บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีความสำคัญต่อระบบไฟฟ้าและมีราคาต้นทุนที่สูงมาก เนื่องจากความเสียหายใดๆที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง นอกจากจะทำให้งานด้านบริการทางด้านไฟฟ้าหยุดชะงักลงและยังส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์อื่นๆในระบบอีกด้วย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะมีการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) โดยที่นำผลการตรวจวัดทางน้ำมันและผลการตรวจวัดทางไฟฟ้า มาวิเคราะห์หาความผิดปกติที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวก ปลอดภัยและประหยัดต้นทุนในการบำรุงรักษา สามารถทำนายความผิดปกติหรือความเสียหายที่จะเกิดขึ้นล่วงหน้าได้ เพื่อจะได้ทำการแก้ไขปัญหาที่จะเกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังได้ทันท่วงที โดยที่ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องตามลำดับดังนี้

2.1 น้ำมันหม้อแปลง[1]

น้ำมันหม้อแปลงมีหน้าที่หลักคือเป็นฉนวนและระบายความร้อนจากภายในหม้อแปลงออกสู่บรรยากาศภายนอก โดยฉนวนน้ำมันที่ดีจะต้องมีค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์สูงตามมาตรฐาน จะต้องมีค่าคุณสมบัติอื่นๆ ตามมาตรฐาน IEC 296 หรือ BS 148/1978 หรือ ASTWD 3487 น้ำมันที่ดีนอกจากระบายความร้อนได้ดีและมีสภาพเป็นฉนวนแล้ว ต้องไม่รวมตัวกับความชื้นได้ง่าย ไม่ทำปฏิกิริยากับอุปกรณ์ที่แช่อยู่ จะต้องไม่เป็นกรด ด่าง กำมะถัน มีความหนืดต่ำและตกตะกอนยาก

2.1.1 องค์ประกอบของน้ำมันหม้อแปลง ส่วนประกอบส่วนใหญ่ในน้ำมันหม้อแปลงซึ่งจะมีธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนธาตุทั้งสองนี้ รวมตัวกันอยู่ในรูปของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมีปริมาณมากกว่า 75% ขึ้นไป ส่วนกำมะถัน ไนโตรเจน ออกซิเจน และธาตุอื่นๆ จะอยู่ในรูปของสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ละลายอยู่ในน้ำมันดิบ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงนั้นมีขนาดโมเลกุลตั้งแต่เล็กสุดคือมีเทน ซึ่งมีอะตอมของคาร์บอนเพียง 1 ตัวไปจนถึงขนาดโมเลกุลที่ใหญ่ โดยมีอะตอมของคาร์บอนถึง 80 ตัว สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภทใหญ่ๆ ตามลักษณะโครงสร้างของโมเลกุลดังนี้

- Normal Paraffins หรือที่เรียกกันทางศัพท์เคมีว่า N – Alkanes ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทนี้ มีโครงสร้างเป็นอะตอมคาร์บอนเรียงต่อกันเป็นเส้นยาว แต่ละตัวของคาร์บอนก็มีอะตอมไฮโดรเจนจับอยู่จนอิ่มตัว ขนาดโมเลกุลของสารประเภทนี้ในน้ำมันดิบมีตั้งแต่โมเลกุลที่ประกอบด้วย 1 อะตอมของคาร์บอนไปจนถึงราว 42 อะตอม มีสูตรทางเคมีดังนี้ C_nH_{2n-2} มี n เป็นจำนวนอะตอมของคาร์บอนในโมเลกุล

- ISO Paraffins หรือที่เรียกกันทางศัพท์เคมีว่า ISO - Alkanes มีลักษณะของโครงสร้างเป็นอะตอมของคาร์บอนเรียงต่อกัน และมีอะตอมของคาร์บอนแยกออกด้านข้างด้วย แต่ละตัวของคาร์บอนก็มีอะตอมของไฮโดรเจนจับอยู่จนอิ่มตัว ดังนั้นจึงมีสูตรทางเคมีเหมือนกับพวก Normal Paraffins คือ C_nH_{2n-2} พวก Paraffins ทั้งสองประเภทนี้มีอยู่มากในน้ำมันเชื้อเพลิงใส (Distillates)

- Naphthenes หรือที่เรียกกันทางศัพท์เคมีว่า Cyclo – Alkanes มีลักษณะของโครงสร้างโดยประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนต่อเรียงตัวกันเป็นวง อาจจะเป็นวงละ 5 ตัว 6 ตัว หรือ 7 ตัว ซึ่งมีสูตรทางเคมีเป็น $C_n H_{2n-2} 2R_n$ โดยที่ n เป็นจำนวนอะตอมของคาร์บอน และมี R_n เป็นจำนวนของวงคาร์บอนที่มีอยู่ในโมเลกุล

- Aromatics หรือที่เรียกกันทางศัพท์เคมีว่า Arenes เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างประกอบด้วย Benzenes Ring

- Mixed Naphtheno – Aromatics เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทที่มีทั้ง Naphthenic Ring และ Aromatic Rings อยู่ในโมเลกุลเดียวกัน

2.1.2 การเกิดก๊าซเจือปนในน้ำมันหม้อแปลง เกิดจากน้ำมันหม้อแปลงได้รับพลังงานที่มากพอ จนสูญเสียพันธะทางเคมีของโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ซึ่งพลังงานนั้นอาจเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลงเช่น ดิสชาร์จ อาร์ก และ ความร้อนสูง โดยความผิดปกติเหล่านี้เกิดจากน้ำมันหม้อแปลงสัมผัสกับออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิด ออกซิเดชั่น ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดหยดน้ำและตะกอน และยังก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีกัดกร่อนฉนวนและโลหะ จนทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพ และเปลี่ยนจากสภาพความเป็นฉนวนเป็นสภาพนำไฟฟ้า

- เกิดความร้อนสูงภายในกระดาษฉนวน จากการวิเคราะห์ในเบื้องต้นแสดงให้เห็นถึงการเสื่อมสภาพของกระดาษฉนวนที่อุณหภูมิประมาณ 140 °C จะเกิดการสะสมของก๊าซภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังดังนี้

- คาร์บอนมอนน็อกไซด์ CO)
- คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)
- น้ำ (H_2O)

- กระดาษฉนวนได้รับความร้อนจนเกิดความเสียหายที่อุณหภูมิสูงกว่า 250 °C (สำหรับหม้อแปลงประเภทซีลด์) โดยการเกิดก๊าซคาร์บอนมอนน็อกไซด์ (CO) สูงกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) (หรือในบางครั้งอาจจะสูงกว่า 4 เท่าโดยเทียบกับค่ามาตรฐาน)

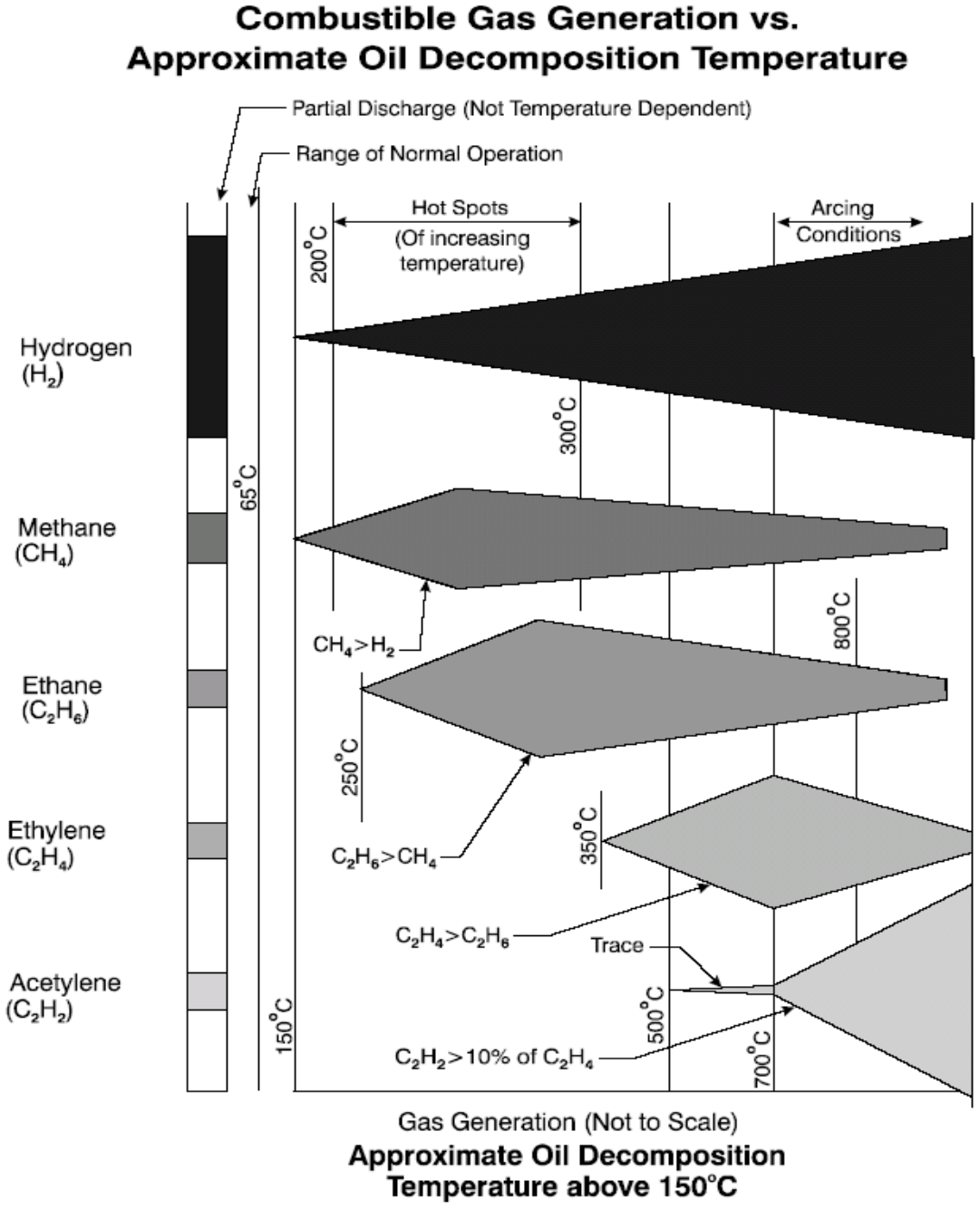
- ฉนวนน้ำมันหม้อแปลงได้รับความร้อนสูงจะทำให้เกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนดังนี้

- เอทิลีน (C_2H_4)
- อีเทน (C_2H_6)
- มีเทน (CH_4)
- อะเซทิลีน (C_2H_2)

ดังนั้น ก๊าซที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยทั่วไปมีอยู่ 7 ก๊าซ ได้แก่ ไฮโดรเจน (H_2), คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), คาร์บอนมอนน็อกไซด์ (CO), มีเทน (CH_4), อีเทน (C_2H_6), เอทิลีน (C_2H_4), อะเซทิลีน (C_2H_2) โดยที่ก๊าซแต่ละชนิดเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการเกิดก๊าซจะไม่เท่ากัน จะมีเพียงก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซอะเซทิลีนมีอัตราเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ส่วนก๊าซที่เหลือจะเพิ่มตามอุณหภูมิไปจนถึงจุดหนึ่งแล้วจะลดลงมาแม้อุณหภูมิสูงขึ้นก็ตาม ส่วนก๊าซไฮโดรเจนจะเกิดขึ้นตั้งแต่อุณหภูมิไม่สูงมากนัก

- น้ำมันหม้อแปลงที่มีการใช้งานเกินกำลัง จะได้รับความเครียดทางไฟฟ้าสูงมาก จะทำให้เกิดดิจชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) ทำให้มีก๊าซไฮโดรเจนสูงและมีก๊าซไฮโดรคาร์บอนต่ำ ถ้ามีก๊าซไฮโดรเจนสูงและ มีก๊าซไฮโดรคาร์บอนสูง ยกเว้น ก๊าซอะเซทิลีน แสดงว่าเกิดความร้อนสูง (Overheat) ที่จุดนั้นถ้าเกิดความร้อนสูงที่ฉนวนกระดาษก็จะพบก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงด้วย ถ้ามีก๊าซเช่นเดียวกับกรณีที่เกิด ความร้อนสูง (Overheat) และพบก๊าซอะเซทิลีน แสดงว่าเกิดการอาร์ค (Arcing) ส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซคาร์บอนมอนน็อกไซด์เกิดขึ้นจากการใช้งานปกติ จากฉนวนประเภท เซลลูโลสเสื่อมสภาพ เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นที่ลวดตัวนำขณะจ่ายโหลด

แผนภูมิของก๊าซต้องการแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ชนิดของก๊าซ และปริมาณของก๊าซที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและก๊าซที่เกิดขึ้น

2.2 การตรวจวัดทางน้ำมัน

2.2.1 การวิเคราะห์ก๊าซที่เจือปนในน้ำมัน (Dissolved Gas Analysis)[2][3] เป็นวิธีการตรวจหาก๊าซต่างๆที่เจือปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง เป็นการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในทุกๆ6 เดือน เพื่อเฝ้าติดตามการทำงานทางกลและทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งเป็นวิธีการที่มีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการวินิจฉัยความผิดปกติและปัญหาที่เกิดจากการใช้งานกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง และตัวเปลี่ยนแท็ปหรืออุปกรณ์ชนิดฉนวนน้ำมันถูกใช้งานภายใต้สภาวะความร้อน และความเครียดทางสนามไฟฟ้าสูงๆ อาจจะมีโอกาสทำให้เกิดความผิดปกติขึ้นได้ความผิดปกติอาจจำแนกได้ 3 ประเภทด้วยกันคือ

- การเกิดดิสชาร์จบางส่วน
- การเกิดความร้อนสูง
- การเกิดอาร์ก

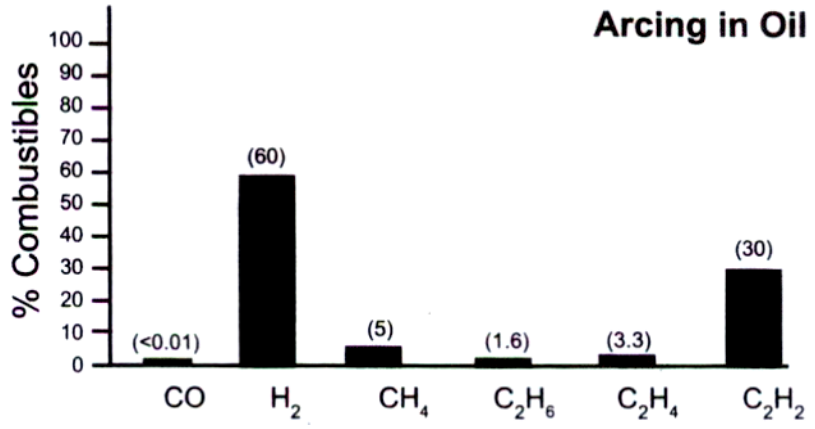
ความผิดปกติที่เกิดขึ้นเหล่านี้เป็นสาเหตุทำให้น้ำมันเกิดเบรกดาวน์ ผลของการเบรกดาวน์ทำให้เกิดการก๊าซต่างๆ ขึ้นซึ่งสามารถทำการตรวจวัดเพื่อหาชนิดและความรุนแรงของความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้ การวิเคราะห์น้ำมันหม้อแปลงจากการเกิดก๊าซเจือปนในน้ำมัน ทำให้เราสามารถตรวจวัดความผิดปกติที่เริ่มเกิดได้ ก่อนที่จะเกิดความเสียหายกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ซึ่งนำไปสู่การเกิดไฟดับและความสูญเสียอีกหลายอย่างตามมา

ในการตรวจวัดปริมาณก๊าซที่เจือปนในน้ำมันหม้อแปลง โดยใช้เครื่องมือที่มีชื่อว่า MYRKOS Transformer Fault Gas Analyzer ซึ่งเครื่องมือชนิดนี้ถูกออกแบบมาให้มีความถูกต้องแม่นยำสำหรับการตรวจวัดก๊าซทั้ง 7 ชนิดซึ่งเกิดจากความผิดปกติภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ชนิดฉนวนน้ำมันได้แก่ ไฮโดรเจน (H_2), คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), คาร์บอนมอนน็อกไซด์ (CO), มีเทน (CH_4), อีเทน (C_2H_6), เอทิลีน (C_2H_4), อะเซทิลีน (C_2H_2) ก๊าซที่เกิดขึ้นในน้ำมันหม้อแปลงและเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปสามารถแสดงได้ตามตารางที่ 2.1 และภาพที่ 2.2, 2.3, 2.4, 2.5

ตารางที่ 2.1 แสดงชนิดการเกิดฟอลท์

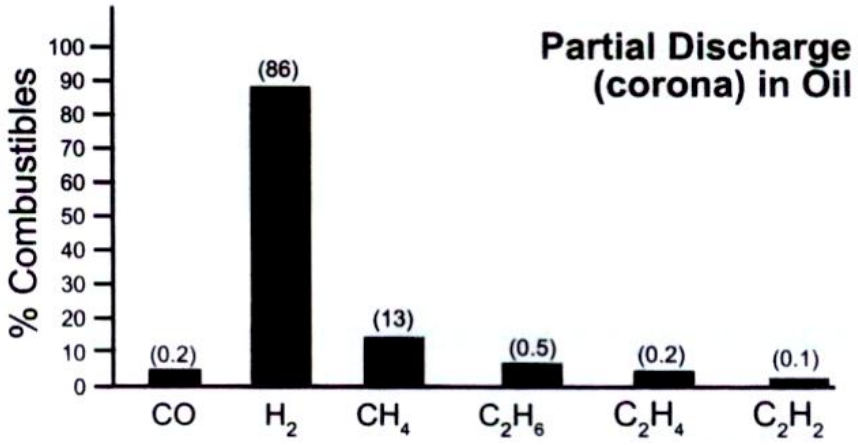
ก๊าซที่ตรวจสอบพบ	ความหมาย
ก๊าซ N_2 +5% หรือน้อยกว่า O_2	การใช้งานปกติของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังชนิด SealType
ก๊าซ N_2มากกว่า 5% ของก๊าซ O_2	ตรวจรอยรั่วของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังชนิด SealType
ก๊าซ N_2 , CO_2, CO หรือทั้งหมด	หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังใช้งานโหลดเกิน เกิดความร้อนในการทำงาน สาเหตุเนื่องจากเกิดการอาร์กในกระดาษฉนวนให้ตรวจสอบเงื่อนไขการใช้งาน
ก๊าซ N_2 และ H_2	เกิดดิสชาร์จบางส่วน, เกิดสนิม
ก๊าซ N_2, H_2, CO_2 และ CO	เกิดดิสชาร์จบางส่วนขึ้นภายในกระดาษฉนวนหรือเกิดจากการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเกินโหลด
ก๊าซ N_2, H_2, CH_4 และเกิดปริมาณก๊าซ C_2H_6 และ C_2H_4 เล็กน้อย	สปาร์คหรือเกิดฟอลท์ สาเหตุเนื่องจากการเกิดอาร์กภายในน้ำมันหม้อแปลง
ก๊าซ N_2 ร่วมกับ H_2 ปริมาณสูงและมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น C_2H_2 เล็กน้อย	เกิดอาร์กสาเหตุเนื่องจากการเสื่อมสภาพของน้ำมันอย่างรวดเร็ว
ก๊าซ N_2 ร่วมกับ H_2 ปริมาณสูง, CH_4 และ C_2H_4 ในปริมาณสูงและมี C_2H_2 เล็กน้อย	เกิดอาร์กในน้ำมันที่อุณหภูมิสูงภายในบริเวณแคบๆ ตัวอย่างเช่น เกิดลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด
มีปริมาณก๊าซเหมือนข้างบน แต่มี CO_2 และ CO เกิดร่วมอยู่ด้วย	เกิดอาร์กในน้ำมันที่อุณหภูมิสูงภายในบริเวณแคบๆ ของกระดาษฉนวน

Key Gas: อะซิทิลีน (C_2H_2) มีก๊าซชนิดอื่นในปริมาณเล็กน้อย



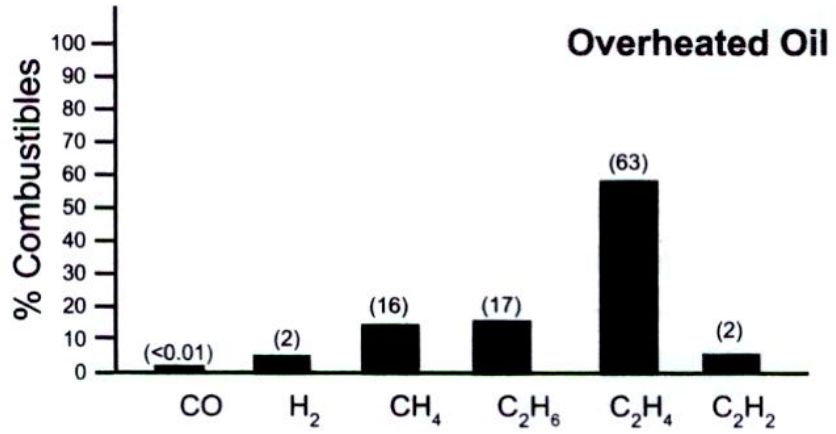
ภาพที่ 2.2 แสดงอาร์กในน้ำมันหม้อแปลง

Key Gas: ไฮโดรเจน (H_2) เกิดในปริมาณที่สูงมาก



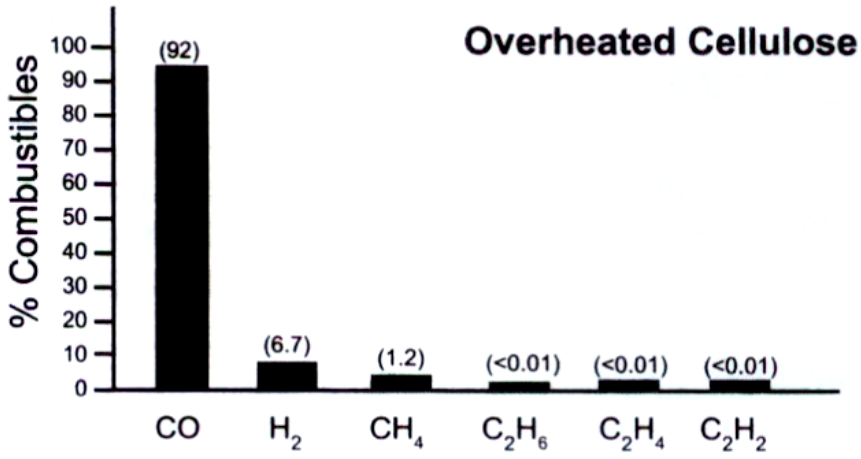
ภาพที่ 2.3 แสดงดิสชาร์จบางส่วน (โคโรน่า) ในน้ำมันหม้อแปลง

Key Gas: เอทิลีน (C_2H_4) เกิดจากการเสื่อมสภาพของน้ำมันหม้อแปลงเนื่องจากเกิดความร้อนสูง



ภาพที่ 2.4 แสดงความร้อนสูงในน้ำมันหม้อแปลง

Key Gas: คาร์บอนมอนน็อกไซด์ (CO)



ภาพที่ 2.5 แสดงความร้อนสูงในกระดาษฉนวนของหม้อแปลง

การวินิจฉัยหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังโดยใช้ค่าของก๊าซที่เจือปนอยู่ในน้ำมัน คู่มือใช้ในการจำแนกความเสี่ยงที่อาจเป็นไปได้โดยใช้ DGA เพื่อวิเคราะห์ปัญหาที่อาจจะเกิดกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังตามมาตรฐาน IEEE C-57-104-2008 ซึ่งจะดูจากค่าก๊าซแต่ละชนิดและก๊าซที่เจือปนในน้ำมันทั้งหมดเพื่อใช้ในการประเมินหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังโดยจะมีอยู่สี่เงื่อนไข

Status	Dissolved key gas concentration limits [µL/L (ppm)[a]]							
	Hydrogen (H_2)	Methane (CH_4)	Acetylene (C_2H_2)	Ethylene (C_2H_4)	Ethane (C_2H_6)	Carbon monoxide (CO)	Carbon dioxide (CO_2)	TDCG[b]
Condition 1	100	120	1	50	65	350	2 500	720
Condition 2	101–700	121–400	2–9	51–100	66–100	351–570	2 500–4 000	721–1920
Condition 3	701–1800	401–1000	10–35	101–200	101–150	571–1400	4 001–10 000	1921–4630
Condition 4	>1800	>1000	>35	>200	>150	>1400	>10 000	>4630

ภาพที่ 2.6 แสดงมาตราฐานการทดสอบก๊าซที่เจือปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

เงื่อนไขที่ 1 ก๊าซทั้งหมดที่เจือปนอยู่ในน้ำมัน (TDCG) ต่ำกว่าระดับนี้บ่งชี้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังอยู่ในสภาพที่ดี

เงื่อนไขที่ 2 ก๊าซทั้งหมดที่เจือปนอยู่ในน้ำมัน (TDCG) ในช่วงนี้แสดงถึงการเจือปนของก๊าซมากกว่าปกติ ควรจะมีการตรวจสอบเพิ่มเติมและควรนำค่า DGA ไปคำนวณก๊าซที่เกิดขึ้นต่อวัน

เงื่อนไขที่ 3 ก๊าซทั้งหมดที่เจือปนอยู่ในน้ำมัน (TDCG) ในช่วงนี้แสดงถึงระดับสูงของการสลายตัวของเซลลูโลสหรือน้ำมัน ควรนำค่า DGA ไปคำนวณและประเมินก๊าซที่ถูกผลิตขึ้นต่อวัน

เงื่อนไขที่ 4 ก๊าซทั้งหมดที่เจือปนอยู่ในน้ำมัน (TDCG) ในช่วงนี้ซึ่งแสดงถึงระดับของการสลายตัวของเซลลูโลสหรือน้ำมันมากเกินไป ควรที่จะเข้าบำรุงรักษาทันที

2.2.2 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ (Dielectric Breakdown Voltage Test) โดยวิธีการสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านน้ำมัน เป็นการวัดค่าความสามารถของน้ำมันในการคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้ากระแสสลับ โดยไม่เกิดความเสียหายตามมาตรฐาน ASTM D877, D1816 หรือ IEC156 ค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ จะบอกให้ทราบถึงสิ่งที่เจือปนอยู่ในน้ำมัน ในรูปของสิ่งสกปรกต่างๆ เช่น เศษเส้นใยของฉนวนแข็ง, เศษตัวนำ, น้ำ, ฝุ่นละออง หรือความสกปรกต่างๆ น้ำมันที่มีความสกปรกปนอยู่มากจะมีค่าความคงทนต่อแรงดันเบกดาวน์ต่ำ น้ำมันที่สะอาดหรือผ่านการกรองมาใหม่ๆ จะมีค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์สูง จะทำการทดสอบทุก 6 เดือนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่มีความสำคัญมาก และจะทำการทดสอบทุก 1 ปี สำหรับหม้อแปลงปกติ ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM D877-87 หรือ D1816, IEC156 กำหนดว่าไม่ควรต่ำกว่า 26 kV จึงจะถือว่าพอใช้งานต่อไปได้อย่างปลอดภัย

ค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ขั้นต่ำของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังตามข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM D877 – 87 สามารถแบ่งสภาพของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังได้ดังนี้

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์

มาตรฐานการทดสอบ	ระดับแรงดันไฟฟ้า	สภาพดี
ASTM D877	<= 69 kV	>30
	69 – 288 kV	>30
	> 345 kV	>30

2.2.3 การตรวจวัดปริมาณความชื้น (Water Content Test) เป็นการตรวจวัดปริมาณความชื้นภายในน้ำมันหม้อแปลงจะทำการตรวจวัดโดยวิธี Coulometric Karl Fisher Titration ด้วย Electricity Titration ซึ่งเป็นการเติม อิเล็กโตรไลด์เข้าไปใน Titration Cell แล้วทำการวัดความชื้นจากการเกิดขึ้นของ Free Iodine ที่ใช้ในการไตรเตรทด้วยเครื่อง Mitsubishi Portable Karl Fisher Moisture Meter Model CA-21 ตามมาตรฐาน ASTM D1533

Karl Fisher Coulometer มีพื้นฐานมาจากสมการมาตรฐานของปฏิกิริยา Karl Fisher ดังนี้คือ

$$ROH+SO_2+RN \longrightarrow (RNH).SO_3R$$

$$(RNH).SO_3+2RN+I+H_2O \longrightarrow (RNH).SO_4+2(RNH)I$$

เซลล์สำหรับการไตเตรทประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นขั้วไฟฟ้าบวก (anode) และขั้วไฟฟ้าลบ (cathode) ซึ่งทั้งสองส่วนจะถูกแยกออกจากกันด้วยไดอะเฟรม (diaphragm) ทางด้านขั้วไฟฟ้าบวก (anode) จะมี anolyte ซึ่งประกอบด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (sulfurdioxide) อิไมดาโซล(imidazole) และไอโอได (iodide) โดยจะใช้เมทานอลหรือเอททานอลเป็นตัวทำละลาย ส่วนขั้วไฟฟ้าลบ(cathode) จะมี catholyte ซึ่งประกอบด้วยเกลือแอมโมเนียปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าบวก (anode reaction)

I_2 จะเกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าบวก โดยประจุลบจาก $2I^-$ จะปล่อยอิเล็กตรอนที่ขั้วไฟฟ้าบวกและเกิด I_2 ซึ่ง I_2 ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับน้ำในสารละลายตัวอย่าง โดยอัตราการทำปฏิกิริยาระหว่าง $[H_2O]:[I_2]$ คือ 1:1

ปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าลบ (cathode reaction) H_2จะถูกผลิตขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าลบ โดย H^+ จะถูกรีดิวส์ไปเป็นH_2 โดยจะต้องมีการเติมเกลือแอมโมเนียลงไปใน catholyte เพื่อเป็นตัวเหนี่ยวนำให้ผลิต H_2

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าการตรวจวัดปริมาณความชื้น

มาตราฐานการทดสอบ	ระดับแรงดันไฟฟ้า	สภาพดี
ASTM D1553	<=69Kv	<=35
	69-288Kv	<=25
	>345Kv	<=20

2.2.4 การทดสอบค่าความสูญเสียของฉนวนน้ำมัน (Dissipation Factor Test) เป็นการวัดความสูญเสียทางฉนวนของน้ำมันภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับ การทดสอบนี้จะวัดที่อุณหภูมิ 25°C ซึ่งอาจมีการละลายหรือปนเปื้อนของสารต่างๆ ในน้ำมัน เช่น ปริมาณทองแดง, กรด, เปอร์ออกไซด์ ปกติทดสอบทุก 1 ปี ค่า tanที่ 25°C ไม่ควรเกิน 0.5 % (มาตรฐาน ASTM D924)

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าการทดสอบค่าความสูญเสียของฉนวนน้ำมันที่ 25ºC

สภาพของน้ำมันหม้อแปลง	% ค่าความสูญเสียของฉนวนน้ำมัน
ดี	< 0.5%
น่าสงสัย	0.5-2.0%
อันตราย	> 2.0%

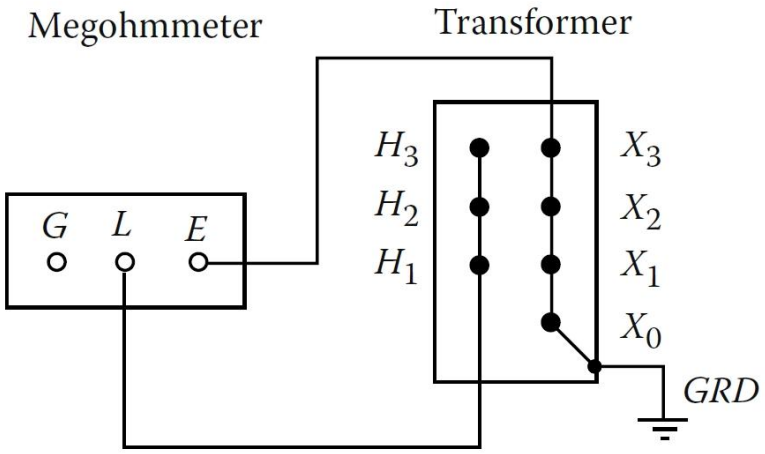
2.3 การตรวจวัดทางไฟฟ้า

2.3.1 การวัดค่าความต้านทานของฉนวน (Insulation Resistance Measurement) เป็นการทดสอบหาค่าความต้านทานของฉนวนภายใต้ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งค่าความต้านทานของฉนวนบ่งบอกถึงสภาพความเป็นฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยทำการลัดวงจรของขดลวดในแต่ละชุดของหม้อแปลงเข้าด้วยกัน เพื่อที่จะให้แรงดันทดสอบมีค่าเท่ากันในแต่ละเฟส ถ้าขดลวดทดสอบมีพิกัดแรงดันตั้งแต่ 3,300 V ขึ้นไปให้ทดสอบด้วยแรงดัน 2,500 V_{dc} และถ้าพิกัดแรงดันน้อยกว่า

3,300V ลงมาให้ทดสอบด้วยแรงดัน 1,000 V_{dc} จากนั้นทดสอบตั้งแต่ 1 นาที 10 นาที แล้วคำนวณค่าโพลาไรเซชั่น อินเด็กซ์ (PI) หรือค่าอัตราส่วนความต้านทานฉนวนที่นาทีที่ 10 ต่อนาทีที่ 1 ตามมาตรฐาน IEEE C57.125-1999

ตารางที่ 2.5 แสดงค่าอัตราส่วนความต้านทานฉนวนที่นาทีที่ 10 ต่อนาทีที่ 1

สภาพของฉนวน	ค่าอัตราส่วนความต้านทานฉนวนที่นาทีที่ 10 ต่อนาทีที่ 1
ดี	> 2.0
น่าสงสัย	1.25 – 1.1
อัตราย	< 1.1

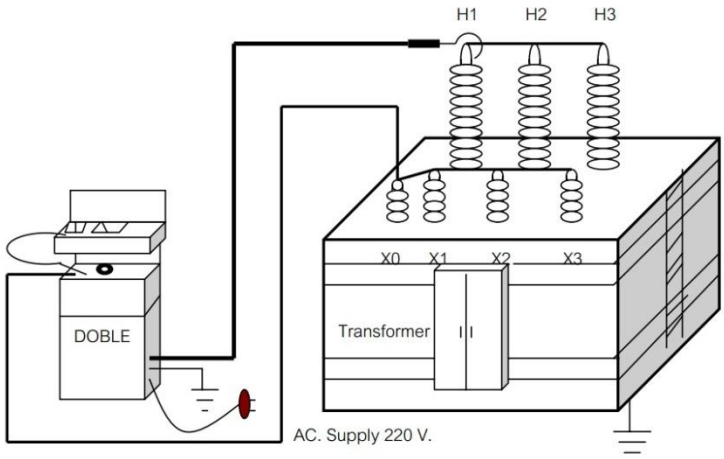


ภาพที่ 2.7 แสดงวงจรวัดค่าความต้านทานฉนวน

2.3.2 การวัดค่าความสูญเสียทางฉนวน (Dielectric Loss Measurement) เป็นการวัดค่าความสูญเสียของฉนวน ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับ โดยถ้าค่า PI มีค่าระหว่าง 1.1 – 1.15 ให้ทดสอบค่าความสูญเสียและ %PF ที่แรงดัน 2.5 kV ที่พิกัดแรงดัน 3 – 5 kV ทดสอบที่แรงดัน 5 kV ที่พิกัดแรงดัน 5 – 10 kV และทดสอบที่แรงดันมากกว่า 10 kV ที่พิกัดมากกว่า 10 kV ตามมาตรฐาน NETA MTS-05

ตารางที่ 2.6 แสดงค่าความสูญเสียทางฉนวน (%PF)

ชนิด	สภาพดี (%PF)	น่าสงสัย (%PF)	อัตราย (%PF)
หม้อแปลงกำลัง	< 0.5	0.5 – 1.0	> 1.0
หม้อแปลงจำหน่าย	< 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
หม้อแปลงฉนวนอากาศ	< 2.0	2.0 – 5.0	> 5.0

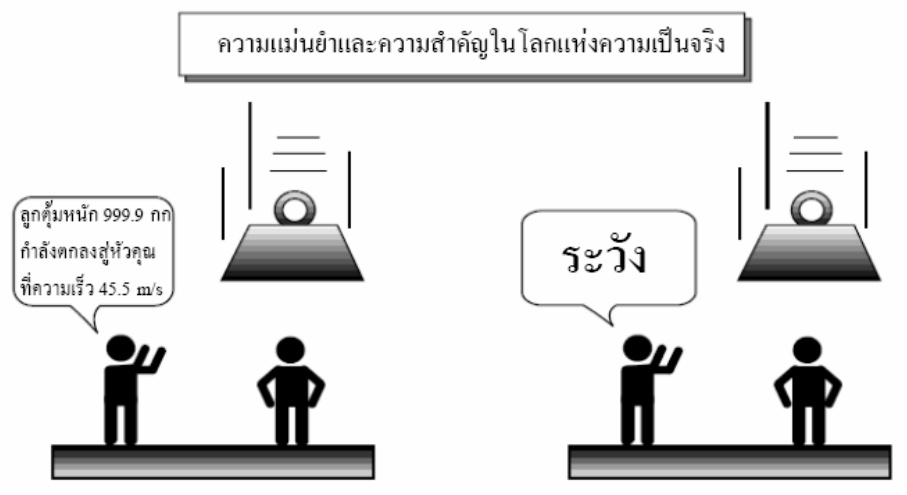


ภาพที่ 2.8 แสดงวงจรวัดค่าความสูญเสียทางฉนวน (%PF)

2.3.3 การวัดค่าอัตราส่วนของขดลวด (Ratio Test) เป็นการวัดอัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลงเปรียบเทียบกับค่าที่กำหนด ว่ามีค่าถูกต้องและมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในพิกัดมาตรฐานหรือไม่ โดยที่ค่าความคลาดเคลื่อนอัตราส่วนของขดลวดที่ทดสอบได้ควรมีค่าไม่เกิน ±2% ที่ Full winding และ ±5% ที่ Tapped winding เมื่อเทียบกับค่าอัตราส่วนจาก Nameplate ตามมาตรฐาน (ANSI C57.12.90-1973)

2.4 ทฤษฎีของฟัซซี่ลอจิก[5]

ฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic) คือตรรกะแบบคลุมเครือ โดยเป็นคณิตศาสตร์แขนงใหม่ ที่มีส่วนสำคัญต่อเทคโนโลยีสารสนเทศเป็นอย่างมาก ฟัซซี่ลอจิกได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในส่วนด้านต่างๆที่ต้องใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการประมวลผล ช่วยในการสนับสนุนการตัดสินใจ การพยากรณ์ การคาดการเหตุการณ์ การลดความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นจากมนุษย์หรือ แม้แต่ในงานด้านวิศวกรรม ฟัซซี่ลอจิกเป็นระบบด้านคอมพิวเตอร์ที่ทำงานโดยอาศัยฟัซซี่เซตที่คิดค้นโดย Dr.Lotfi Zadeh ในปี ค.ศ. 1965 ซึ่งเป็นผลงานวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาเอก ฟัซซี่ลอจิกเป็นตรรกะที่อยู่บนพื้นฐานความเป็นจริง ที่ว่าทุกสิ่งบนโลกแห่งความเป็นจริง ไม่ใช่มีเฉพาะสิ่งมีความแน่นอนเท่านั้น ฟัซซี่ลอจิกสามารถให้ผลลัพธ์กับเรา โดยผลลัพธ์นั้นมีความยืดหยุ่นสูงใกล้เคียงกับความรู้สึกนึกคิดในการตัดสินใจของมนุษย์คือ “ความเหมือนจริง” แต่มีหลายสิ่งหลายเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างไม่เที่ยงและไม่แน่นอน อาจเป็นสิ่งที่คลุมเครือไม่ใช่ชัดเจน ยกตัวอย่าง เช่น เซตของน้ำหนักที่ไม่แน่นอนอาจแบ่งเป็น คนที่มีรูปร่างอ้วน คนที่มีรูปร่างผอม คนที่มีรูปร่างดี จะเห็นได้ว่าในแต่ละช่วงน้ำหนักของแต่ละคนไม่สามารถระบุได้แน่ชัดว่า คนไหนจะมีรูปร่างเป็นอย่างไรได้ชัดเจน ซึ่งคนนี้มีรูปร่างอ้วนอาจถูกตีความว่า มีน้ำหนักระหว่าง 60 – 70 แต่บางคนอาจตีอีกความว่ามีน้ำหนักในช่วงระหว่าง 80 – 90 ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นตัวอย่างของความไม่แน่นอน เป็นลักษณะทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นทั่วไป เซตของเหตุการณ์ที่ไม่แน่นอน เช่นนี้ถูกเรียกว่า ฟัซซี่เซต (Fuzzy Set)



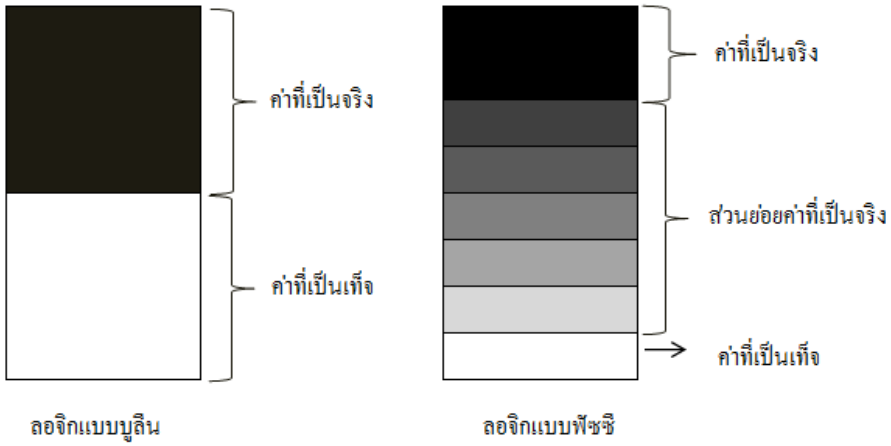
ภาพที่ 2.9 แสดงแนวคิดเกี่ยวกับฟัซซี่ลอจิก

ฟัซซี่จะสร้างวิธีทางคณิตศาสตร์ที่แสดงถึงความคลุมเครือความไม่แน่นอนของระบบ ซึ่งมีการเกี่ยวข้องกับความคิดความรู้สึกของมนุษย์ เมื่อพิจารณาส่วนประกอบต่างๆในความไม่แน่นอน เพื่อกำหนดเงื่อนไขในการตัดสินใจ (Decision Making) โดยมีการอาศัยเซตของความไม่เป็นสมาชิก (Set Membership) ตามภาพที่ 2.9 และภาพที่ 2.10 ความไม่แน่นอน (Uncertainty)

ภาพที่ 2.10 แสดงความไม่แน่นอน (Uncertainty)

2.4.1 โครงสร้าง จากการคิดค้นฟัซซี่ลอจิกโดย Dr. Lotfi Zadeh เกี่ยวกับความไม่แน่นอน ได้มีการขยายแนวคิดเพื่อนำไปพัฒนาและประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆอย่างมากมาย ซึ่งมีนักวิจัยได้คิดค้นทฤษฎีเสริมร่วมกับแนวคิดเดิม จนทำให้ฟัซซี่ลอจิกโดดเด่นในวงการคอมพิวเตอร์ โดยมีแนวคิดพื้นฐาน ในส่วนของฟัซซี่ลอจิกประกอบไปด้วย เซตแบบดั้งเดิม (Classical Set), ฟัซซี่เซต (Fuzzy Set), ฟัซซี่ฟังก์ชั่นความเป็นสมาชิก (Fuzzy Set Membership Function), ตัวแปรภาษา (Linguistic Variable), กฎฟัซซี่ (Fuzzy Rules)

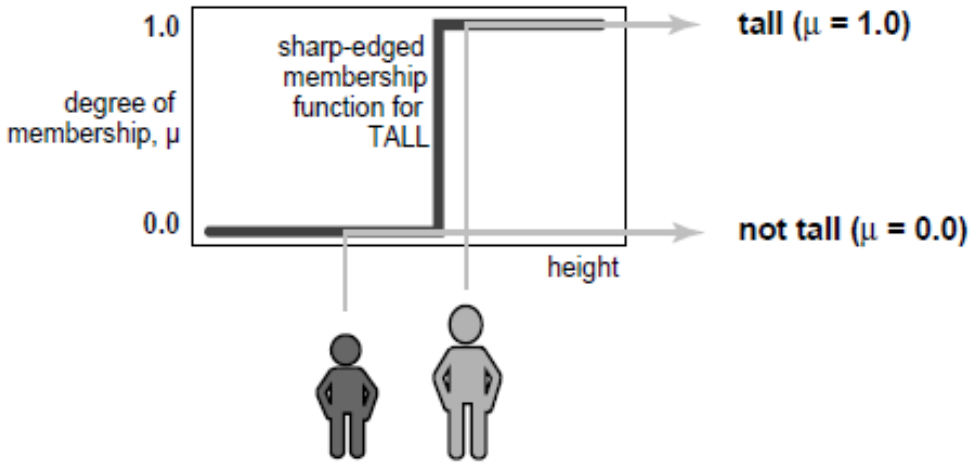
2.4.2 หลักการ ตรรกะแบบคลุมเครือ (Fuzzy Logic) เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการตัดสินใจภายใต้ความไม่แน่นอนของข้อมูลโดยยอมให้มีความยืดหยุ่นได้ซึ่งใช้หลักเหตุผลที่ความคล้ายการเลียนแบบวิธีการคิดที่ซับซ้อนในส่วนของมนุษย์ ฟัซซี่ลอจิกมีลักษณะที่พิเศษกว่า ตรรกะแบบบูลีน (Boolean Logic) เป็นแนวคิดที่มีการต่อขยายในส่วนของความจริง โดยค่าความจริงจะอยู่ในช่วงระหว่างค่าจริงกับเท็จเช่น ค่า “0” “0.234” “1” แต่ในส่วนของตรรกศาสตร์แบบบูลีน จะมีค่าเป็นจริงกับเท็จเท่านั้นที่ซึ่งอาจจะมีค่าเป็น “1” กับ “0” โดยความที่เป็นฟัซซี่มีชื่อเรียกว่า มัลติวาลานซ์ (Multivalance) โดยมีค่าความเป็นสมาชิกมากกว่าสองค่าและเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ลอจิกแบบบูลีนจะมีความเป็นสมาชิกเพียงสองค่าเท่านั้นหรืออากเรียกว่า ไบวาลานซ์ (Bivalance) โดยจะเห็นความแตกต่างที่ชัดเจนจาก ภาพที่ 2.11



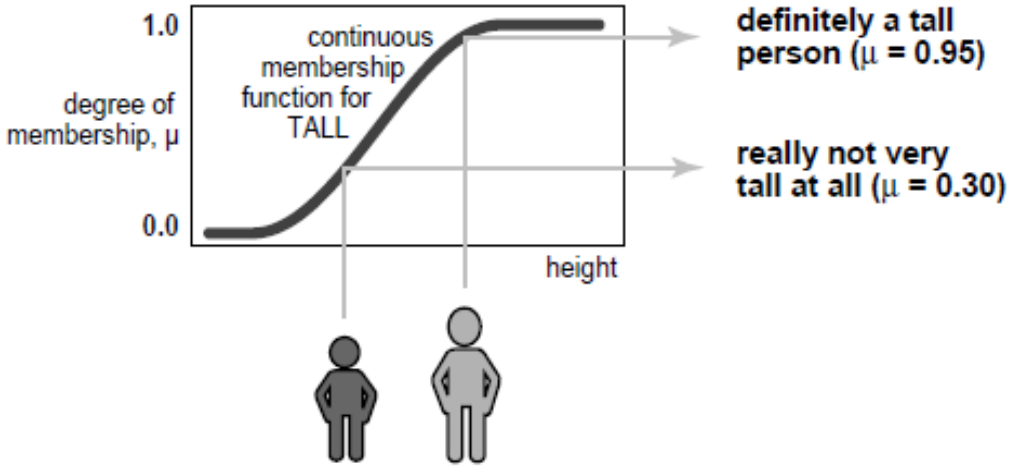
ภาพที่ 2.11 แสดงความแตกต่างระหว่างตรรกะแบบบูลีนกับตรรกะแบบฟัซซี่

ซึ่งแนวคิดพื้นของระบบฟัซซี่ลอจิกมีด้วยกันดังนี้

เซตแบบดั้งเดิม (Classical Set) และฟัซซี่เซต (Fuzzy Set) ในความแตกต่างเซตแบบดั้งเดิมจะเป็นเซตที่มีค่าความเป็นสมาชิก {0,1} เท่านั้น ซึ่งเป็นขอบเขตที่ตัดขาดจากกันแบบทันทีทันใด ตามแนวคิดของเลขฐานสองและในส่วนของฟัซซี่เซตจะมีขอบเขตที่ราบเรียบ โดยฟัซซี่เซตจะมีค่าที่ความเป็นสมาชิกอยู่ในช่วงระหว่าง {0-1} โดยมีความยืดหยุ่นในการหาผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงความเป็นจริงที่สุดใ นที่นี้จะยกตัวอย่างความสูงของสองคนในภาพที่ 2.12 จะแสดงให้เห็นว่าความสูงของคนที่หนึ่งไม่ได้เป็นสมาชิกของเซตแบบดั้งเดิม ส่วนความสูงของคนที่สองได้เป็นสมาชิกของเซตแบบดั้งเดิมและในภาพที่ 2.13 จะแสดงให้เห็นว่าความสูงของทั้งสองคนเป็นสมาชิกในฟัซซี่เซต จากที่ความแตกต่างข้างต้นแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ฟัซซี่เซตมีความยืดหยุ่นสูงในการหาผลลัพธ์เมื่อเทียบกับเซตดั้งเดิม



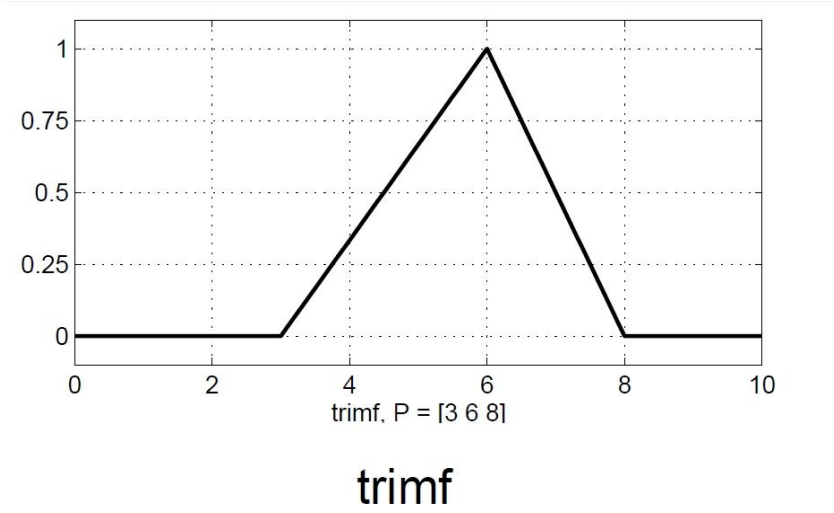
ภาพที่ 2.12 แสดงความเป็นสมาชิกของเซตแบบดั้งเดิม



ภาพที่ 2.13 แสดงความเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซต

ฟัซซี่เซตฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Fuzzy Set Membership Function) เป็นฟังก์ชันที่มีการกำหนดระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรที่ต้องการใช้งาน โดยเริ่มจากการแทนที่กับตัวแทนที่มีความไม่ชัดเจน ไม่แน่นอน และคลุมเครือ จึงสำคัญต่อคุณสมบัติหรือการดำเนินการของฟัซซี่ เพราะรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกมีความสำคัญ ต่อกระบวนการคิดและแก้ไขปัญหาโดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจะไม่สมมาตรกันหรือสมมาตรกันทุกประการก็ได้ ชนิดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ใช้งานทั่วไปมีดังนี้

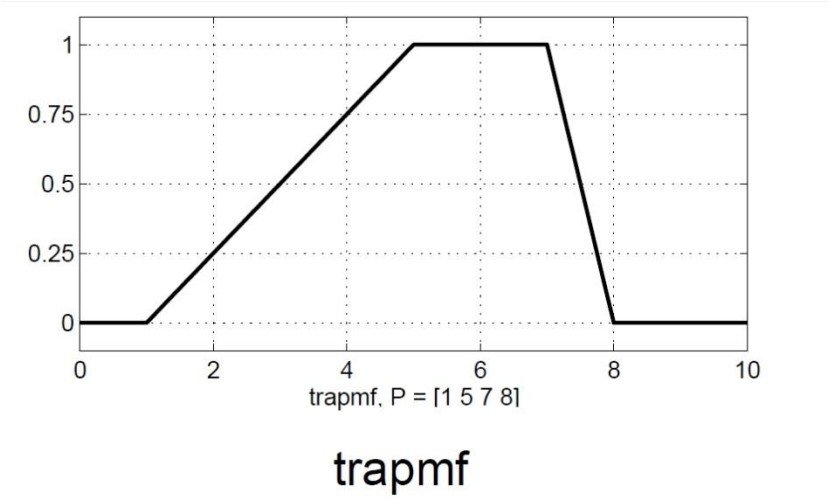
ฟังก์ชันสามเหลี่ยม (Triangular Membership Function) ฟังก์ชันสามเหลี่ยมมีทั้งหมด 3 พารามิเตอร์คือ {*a*, *b*, *c*}



ภาพที่ 2.14 แสดงฟังก์ชันสามเหลี่ยม (Triangular Membership Function)

$$rimf\,(x{:}a,b,c)=\begin{cases} 0 & x<a \\ (x-a)/(b-a) & a\le x<b \\ (c-x)/(c-b) & b\le x\le c \\ 0 & x>c \end{cases} \tag{2.1}$$

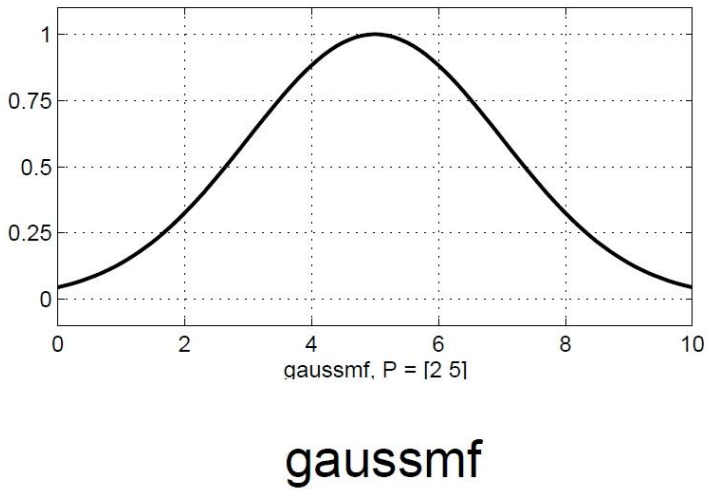
ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Membership Function) ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมูมีทั้งหมด 4 พารามิเตอร์คือ {*a*, *b*, *c*, *d*}



ภาพที่ 2.15 แสดงฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Membership Function)

$$trapmf\,(x:a,b,c,d) = \begin{cases} 0 & x < a \\ (x-a)/(b-a) & a \le x < b \\ 1 & b \le x < c \\ (d-x)/(d-c) & c \le x < d \\ 0 & x \ge d \end{cases} \tag{2.1}$$

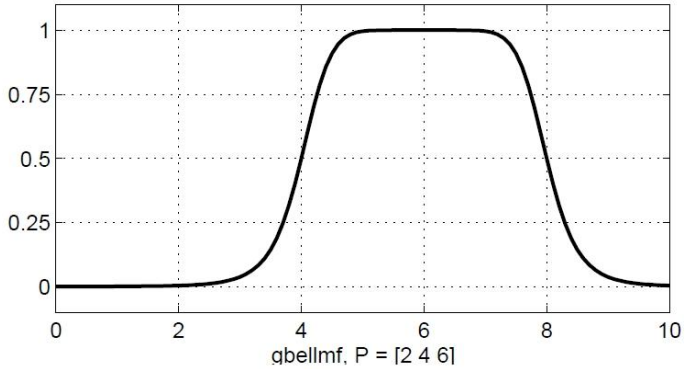
ฟังก์ชันเกาส์เซียน (Gaussian Membership Function) ฟังก์ชันเกาส์เซียนมีทั้งหมด 2 พารามิเตอร์คือ $\{m, \sigma\}$ ซึ่ง m หมายถึงค่าเฉลี่ยและ σ หมายถึง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน



ภาพที่ 2.16 แสดงฟังก์ชันเกาส์เซียน (Gaussian Membership Function)

$$guassian(x:m,\sigma) = \exp\left(-\frac{\left(x-m\right)^2}{2\sigma^2}\right) \tag{2.3}$$

ฟังก์ชันระฆังคว่ำ (Bell-shaped Membership Function) ซึ่งฟังก์ชันรูประฆังคว่ำมีค่าพารามิเตอร์ทั้งหมด 3 ค่าคือ $\{a, b, c\}$

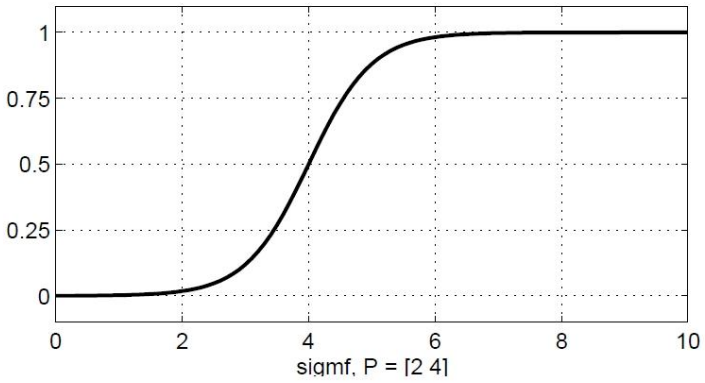


gbellmf

ภาพที่ 2.17 แสดงฟังก์ชันระฆังคว่ำ (Bell - shaped Membership Function)

$$gbellmf\,(x:a,b,c) = \frac{1}{1+\left|\frac{x-c}{a}\right|^{2b}} \tag{2.4}$$

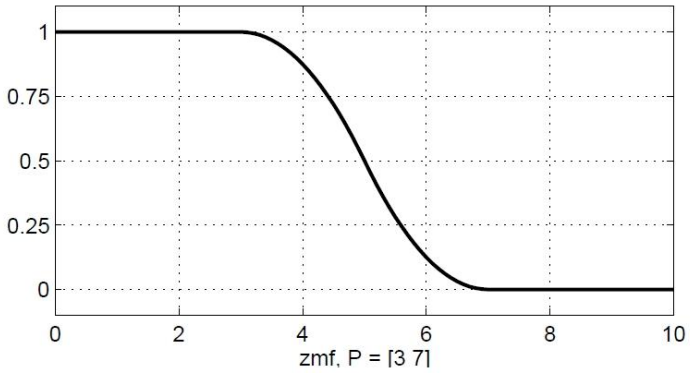
ฟังก์ชันตัวเอส (Smooth Membership Function) ฟังก์ชันรูปตัวเอสมีพารามิเตอร์ทั้งหมด 2 ค่าคือ $\{a, b\}$



ภาพที่ 2.18 แสดงฟังก์ชันตัวเอส (Smooth Membership Function)

$$smf\,(x:a,b)=\begin{cases}0 & x<a\\ 2\left(\dfrac{x-b}{b-a}\right)^2 & a\le x<\dfrac{a+b}{2}\\ 1-2\left(\dfrac{x-b}{b-a}\right)^2 & \dfrac{a+b}{2}\le x<b\\ 1 & x\ge b\end{cases} \tag{2.5}$$

ฟังก์ชันตัวแซด (Z-Membership Function) ฟังก์ชันรูปตัวเอสมีพารามิเตอร์ทั้งหมด 2 ค่า คือ $\{a, b\}$



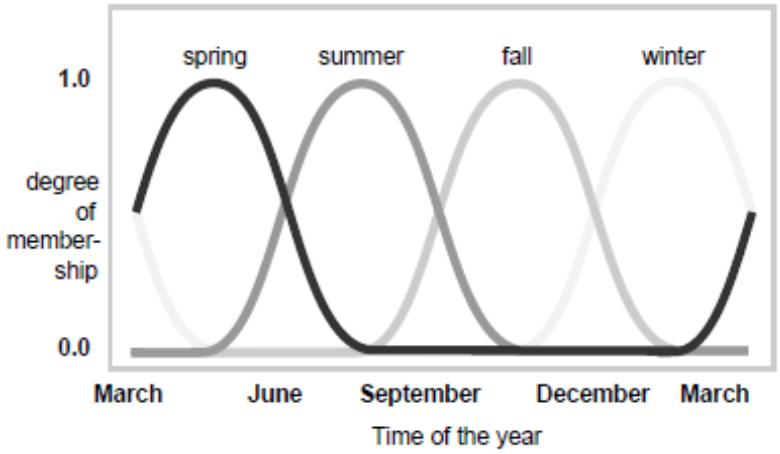
zmf

ภาพที่ 2.19 แสดงฟังก์ชันตัวแซด (Z-Membership Function)

$$Z(x:a,b)=\begin{cases}1 & x\le a\\ 1-2\left(\dfrac{x-a}{b-a}\right)^2 & a\le x\le \dfrac{a+b}{2}\\ 2\left(b-\dfrac{x}{b-a}\right)^2 & \dfrac{a+b}{2}\le x\le b\\ 0 & x\ge b\end{cases} \tag{2.6}$$

การเลือกฟังก์ชันของความเป็นสมาชิกจะต้องเลือกตามความเหมาะสม ครอบคลุมข้อมูลที่จะรับเข้ามา โดยข้อมูลสามารถที่จะทับซ้อนกันเพื่อให้การดำเนินงานราบเรียบ ซึ่งมีความเป็นสมาชิกหลายค่าได้ และฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเปลี่ยนแปลงแก้ไขให้เหมาะตามความต้องการ

ตัวแปรเชิงภาษา (Linguistic Variable) เซตแบบฟัซซี่สามารถประยุกต์ใช้ในการอธิบายค่าของตัวแปรซึ่งเป็นแนวคิดที่สำคัญมากในตรรกะแบบฟัซซี่ ตัวแปรภาษาช่วยกำหนดค่าของสิ่งที่จะอธิบายทั้งในรูปคุณภาพโดยใช้พจน์ภาษา (Linguistic Term) และในรูปปริมาณโดยใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Function) ซึ่งแสดงความหมายของเซตแบบฟัซซี่พจน์ภาษาใช้สำหรับการแสดงแนวคิดและองค์ความรู้ในการสื่อสารของมนุษย์ ส่วนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกมีประโยชน์ในการจัดการกับอินพุตที่เป็นข้อมูลเชิงตัวเลขจากภาพที่ 2.20

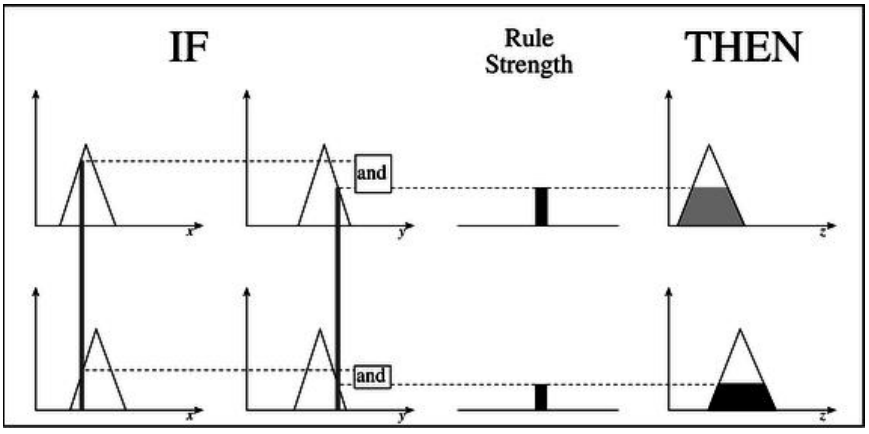


ภาพที่ 2.20 แสดงฤดูกาลในแต่ละเดือนซึ่งแสดงในเชิงตัวเลข

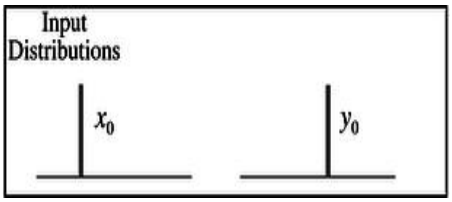
กฎฟัซซี่ (Fuzzy Rules) มีจำนวนมาก แต่ที่นิยมในการประยุกต์ใช้งานมากที่สุดคือกฎฟัซซี่แบบถ้า-แล้ว (fuzzy if-then rule) เช่น

$$if\ x\ is\ x_0\ then\ y\ is\ y_0$$

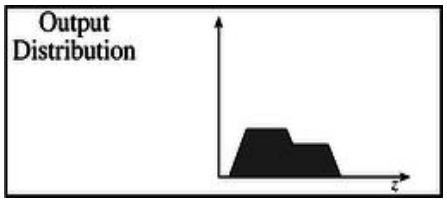
ค่าภาษาที่กำหนดโดยชุดฟัซซี่ในช่วงที่ x_0 และ y_0 มี x และ y ตามลำดับ โดย x_0 มีค่าเป็น x ข้อสรุปคือ y_0 จะมีค่าเป็น y ดังภาพที่ 2.21



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 2.21 แสดงกฎฟัซซี่

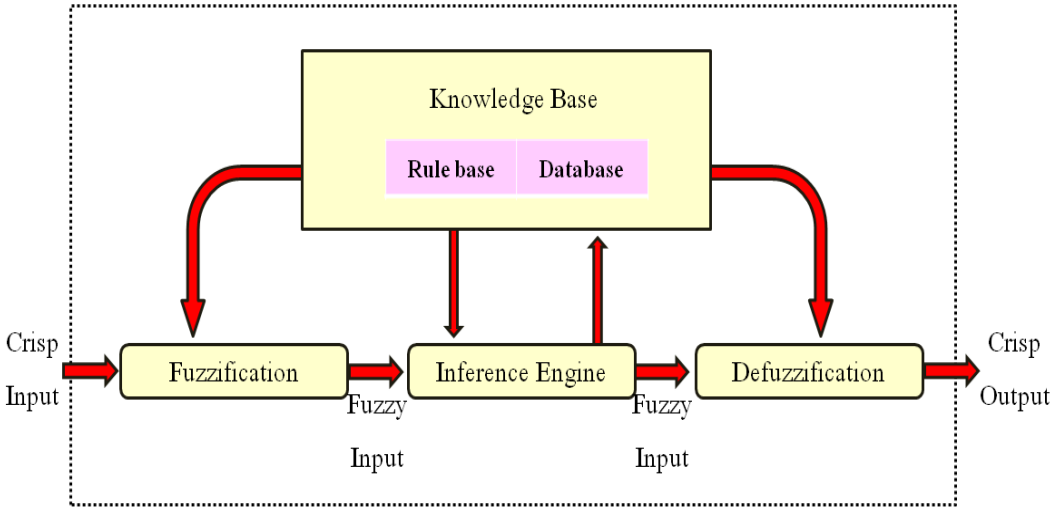
โดยที่

(ก) คือหลักการประเมินกฎ

(ข) คือแสดงส่วนประกอบของอินพุต

(ค) คือแสดงผลลัพธ์ของเอาต์พุต

2.4.3 การทำงานของระบบฟัซซี่ โดยมีโครงสร้างพื้นฐานของการประมวลผลแบบฟัซซี่ ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 4 ส่วนดังภาพที่ 2.22



ภาพที่ 2.22 แสดงการทำงานของระบบฟัซซี่

- อินพุตแบบตัวแปรฟัซซี่ (Fuzzification) เป็นส่วนที่แปลงอินพุตทั่วไปเปลี่ยนเป็นอินพุตแบบตัวแปรฟัซซี่ หรือในรูปแบบฟัซซี่เซตหรือเรียกว่าเป็นตัวแปรภาษา (Linguistic Variable)

- ฐานความรู้ (Knowledge Base) เป็นส่วนที่จัดเก็บรวบรวมข้อมูลในการควบคุม ประกอบ 2 ส่วนคือ ฐานกฎ (Rule base) และฐานข้อมูล (Data base)

- ฐานกฎ (Rule base) ส่วนของการกำหนดวิธีการควบคุม ซึ่งได้จากผู้เชี่ยวชาญในรูปแบบของชุดข้อมูลแบบกฎของภาษา (Linguistic Rule)

- ฐานข้อมูล (Data base) เป็นการจัดเตรียมส่วนที่จำเป็น เพื่อที่จะใช้ในการกำหนดกฎการควบคุมและการจัดการข้อมูลของตรรกศาสตร์ฟัซซี่

- การอนุมานหรือการตีความ (Inference Engine) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ตรวจสอบข้อเท็จจริงและกฎเพื่อใช้ในการตีความหาเหตุผล เหมือนกลไกสำหรับควบคุมการใช้ความรู้ในการแก้ไขปัญหา รวมทั้งการกำหนดวิธีการของการตีความเพื่อหาคำตอบ

- ส่วนที่แปลงเอาต์พุตให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม (Defuzzification) เป็นการแปลงข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบฟัซซี่ ให้เป็นค่าที่สรุปผลหรือค่าการควบคุมระบบ

2.4.4 การประมวลผลของระบบฟัซซี่ลอจิก มีขั้นตอนการประมวลผลแบบฟัซซี่ลอจิกอยู่ 5 ขั้นตอนหลัก

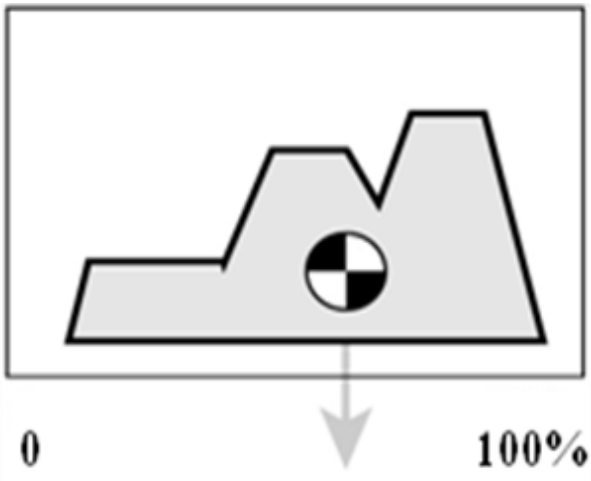
- เป็นการแปลงข้อมูลอินพุตแบบทวินัยเปลี่ยนเป็นข้อมูลอินพุตแบบตัวแปรฟัซซี โดยจะสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิก โดยไม่จำเป็นต้องมีลักษณะเดียวกัน ขึ้นกับคุณลักษณะของแต่ละข้อมูลอินพุต (Input) และความสำคัญต่อข้อมูลเอาต์พุต (Output) ที่น่าสนใจโดยฟังก์ชันจะมีลักษณะเป็นการกำหนดภาษาสามัญ เพื่อให้เป็นฟัซซี่อินพุต

- เป็นการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลอินพุตทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลเอาต์พุตที่อาศัยหลักการของการหาเหตุและผล อาจจะสร้างการเก็บข้อมูล การคาดการณ์จากการตัดสินใจของมนุษย์ หรือค่าจากการทดลอง โดยเขียนเป็นกฎการควบคุมระบบซึ่งจะมีลักษณะอยู่ในรูปแบบถ้า (If), แล้ว (Then), และ (And), หรือ (Or) ซึ่งเป็นภาษาสามัญ นำกฎทั้งหมดมาประมวลผลรวมกันเพื่อการหาตัดสินใจที่เหมาะสม

- เป็นการหาฟัซซี่เอาต์พุต โดยการนำกฎการควบคุม ที่สร้างขึ้นในขั้นตอนที่ 2 มาประมวลผลกับฟัซซี่อินพุต โดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์เพื่อนำค่าที่ได้ประมวลผลด้วยวิธีการทำเป็นค่าคลุมเครือ (Fuzzification) วิธีการที่นิยมใช้ในการตีความหาเหตุผลเลือกใช้ Max-Min Method และ Max-Dot Method

- การรวมค่าฟัซซี่เอาต์พุตจากกฎทุกข้อ (Aggregation) เป็นการรวมค่าจากข้อตามของกฎทุกข้อเพื่อเป็นฟัซซี่เซตของระบบทั้งหมดด้วยวิธี Fuzzy OR

- การทำค่าฟัซซี่เป็นค่าปกติ (Defuzzification) เป็นการทำค่าฟัซซี่เอาต์พุตที่รวมจากกฎทุกข้อเป็นค่าปกติที่ใช้ในงานจริง เช่น งานในระบบควบคุม เป็นต้น ด้วยวิธีการหาจุดศูนย์ถ่วง (Central Of Gravity: COG) เป็นวิธีการหาค่าเฉลี่ยของผลที่ได้จากการตีความจากการอนุมาน ค่าที่ได้จะคำนวณจุดศูนย์ถ่วงโดยรวมจะหาได้จากในภาพที่ 2.23

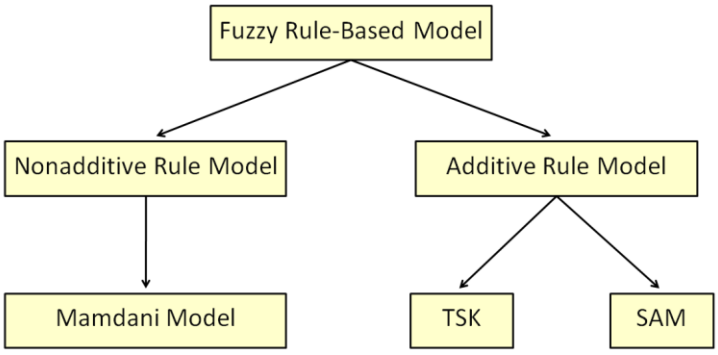


ภาพที่ 2.23 แสดงค่าจุดศูนย์ถ่วง

2.4.5 รูปแบบพื้นฐานในระบบกฎฟัซซี่ ซึ่งระบบจะมีการประมาณค่าฟังก์ชัน(Function Approximation) ระบบกฎฟัซซี่ที่ใช้มี 3 ชนิดใหญ่ๆ ได้แก่

- รูปแบบ Mamdani
- รูปแบบ Takagi Sugeno Kang (TSK)
- รูปแบบ Standard

Additive Model (SAM) รูปแบบ Mamdani รวมผลการอนุมาน (Inference) ของกฎโดยวิธีซ้อนทับ (Superimposition) จากกฎหลายๆข้อซึ่งไม่เป็นแบบบวกกันเรียกระบบแบบนี้ว่าเป็น Nonadditive Rule Model แต่สำหรับ TSK และ SAM มีการอนุนามแบบรวมค่าน้ำหนัก (Weighted Sum) จากที่หลายๆกฎ เพื่อรวมเป็นข้อสรุปสุดท้าย จึงเรียกระบบแบบนี้ว่า Additive Rule Model การจัดกลุ่มของระบบกฎฟัซซี่แสดงในภาพที่ 2.24



ภาพที่ 2.24 แสดงรูปแบบพื้นฐานของระบบกฎฟัซซี่

ในโครงงานศึกษาและประเมินอายุของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดฉนวนน้ำมันนี้ จะใช้รูปแบบพื้นฐานของระบบกฎฟัซซี่แบบ Mamdani ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

2.4.6 ระบบกฎฟัซซี่ของแมมดานิ (Mamdani) ระบบกฎฟัซซี่แบบ Mamdani เป็นระบบที่มีความนิยมใช้มากที่สุดระบบหนึ่ง ในทางปฏิบัติเป็นระบบที่ใช้ตัวแปรภาษาทั้งในข้อตั้งและข้อตามเพื่อจัดเทียบฟังก์ชันจากเป็น

กฎที่ 1: $IF(x_1 isA_{11})AND...AND(x_n isA_{1n})THENyisC_1$

กฎที่ 2: $IF(x_1 isA_{21})AND...AND(x_n isA_{2n})THENyisC_2$

กฎที่ L: $IF(x_1 isA_{n1})AND...AND(x_n isA_{nn})THENyisC_n$

เมื่อ x_j, j = 1, …, n, เป็นตัวประกอบที่ j ของตัวแปรอินพุต **x**, y เป็นตัวแปรเอาต์พุต A_{ij} เป็นพจน์ภาษาของข้อตั้ง (Consequence Linguistic Term) หรือเป็นฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อตั้ง (Antecedent Membership Function) ในกฎที่ i, i = 1, …, L, C_i เป็นพจน์ภาษาของข้อตามหรือฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อตาม (Consequent Membership Function) ของกฎที่ i

กำหนดให้ A_i^S เป็นฟัซซี่เซตใหม่สำหรับกฎข้อที่ i, i = 1,…,L

$$A_i^s = A_{i1} \cap A_{i2} \cap ... \cap A_{in} \tag{2.7}$$

แสดงในรูปฟังก์ชันความเป็นสมาชิกได้เป็น

$$\mu_{A_i^s}(x) = \min(\mu_{A_{i1}}(x_1), \mu_{A_{i2}}(x_2), ..., \mu_{A_{in}}(x_n)) \tag{2.8}$$

ถ้าหากมีอินพุทเข้ามาในรูป

$$(x_1 = x_1'), (x_2 = x_2'), ..., (x_n = x_n') \tag{2.9}$$

จะได้ค่าฟัซซี่ในส่วนของข้อตั้งเป็น

$$\alpha_i = \min(\mu_{A_{i1}}(x_1), \mu_{A_{i2}}(x_2), ..., \mu_{A_{in}}(x_n)) \tag{2.10}$$

ค่าเอาต์พุตของกฎแต่ละข้อของระบบฟัซซี่แบบ Mamdani ที่เป็นค่าฟัซซี่สามารถหาได้จากสมการ

$$\mu_c(y) = \alpha_i \wedge \mu_c(y) \tag{2.11}$$

ค่าเอาต์พุตของระบบ เป็นผลรวมจากเอาต์พุตจากกฎแต่ละข้อโดยใช้สมการ

$$\mu_c(y) = \max(\mu_{c_i}(y), \mu_{c_2}(y), ..., \mu_{c_i}(y_n)) \tag{2.12}$$

ฟัซซี่เอาต์พุตสามารถแปลงเป็นค่าปกติได้โดยวิธี Defuzzification แบบเฉลี่ยน้ำหนัก

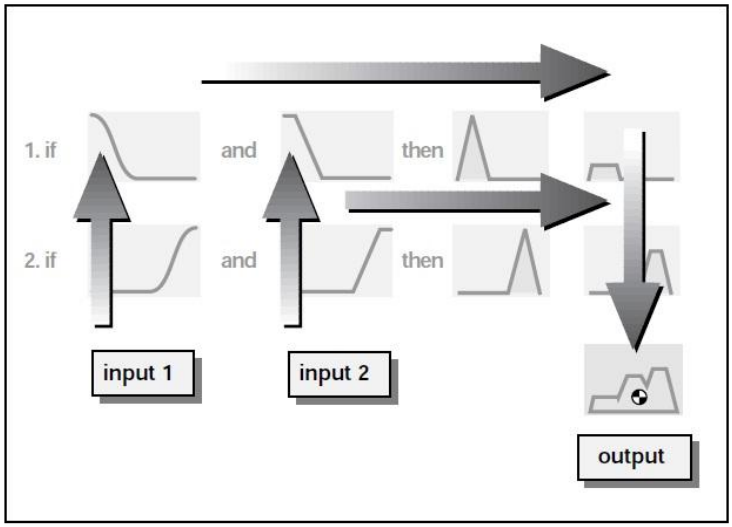
$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^{n} \mu_C(y_i) \times y_i}{\sum_{i=1}^{n} \mu_C(y_i)} \tag{2.13}$$

เมื่อ y^* เป็นค่า Centriod ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกผลลัพธ์

2.4.7 การตีความแบบ Mamdani กำหนดให้ ระบบฟัซซี่แบบ Mamdani มี 2 อินพุต x_1 และ x_2 (Antecedent) และ 1 เอาต์พุต y (Consequent) ซึ่งมีกฎฟัซซี่เป็น

$$IF\ x_1\ is\ A_{k1}\ AND\ x_2\ is\ A_{k2}\ THEN\ y\ is\ B_k$$ สำหรับ k = 1 , 2 ,…,n

ผลรวมเอาต์พุตหาได้โดยการใช้วิธีการจัดองค์ประกอบแบบค่าสูงสุด-ต่ำสุด ตามภาพที่ 2.25



ภาพที่ 2.25 แสดงการตีความแบบ Mamdani

2.4.8 การหาผลลัพธ์ในรูปแบบ Mamdani การหาผลสรุปฟัซซี่ในรูปแบบ Mamdani เป็นการใช้ตัวดำเนินการค่าต่ำสุด (Minimum Operator) สำหรับการเชื่อมประโยคแบบ “And”และ

ใช้ตัวดำเนินการค่าสูงสุด (Maximum Operator) สำหรับการเชื่อมประโยคแบบ “Or” ระดับค่าฟัซซี่ของกฎแต่ละข้อในส่วนข้อตั้งหาได้โดยการคำนวณจากสมการ

$$\alpha_1 = A_1(x_0) \wedge B_1(y_0) \tag{2.14}$$

$$\alpha_2 = A_2(x_0) \wedge B_2(y_0) \tag{2.15}$$

เอาต์พุตของกฎแต่ละข้อ สามารถคำนวณได้จาก

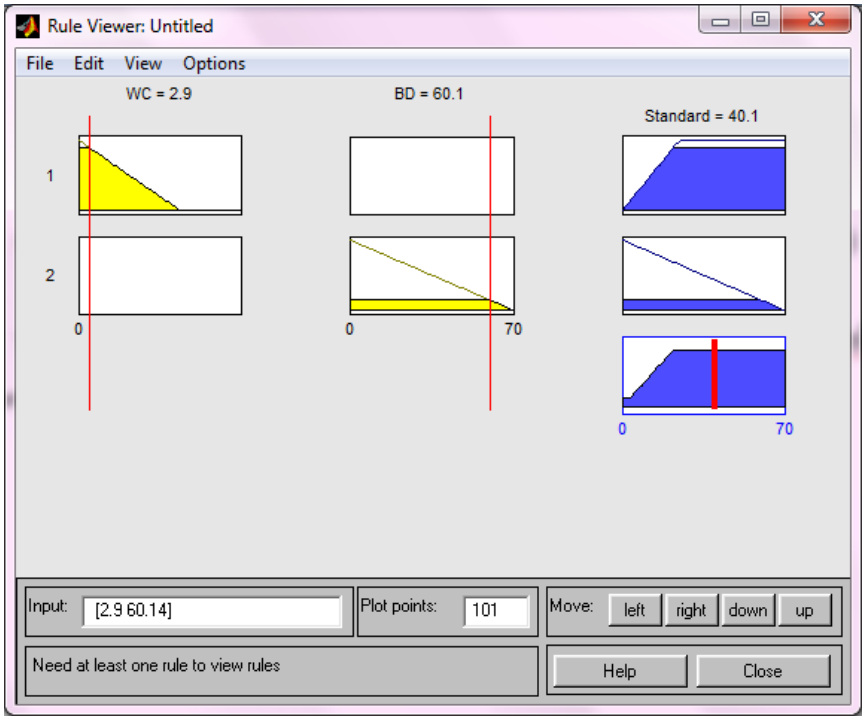
$$C_1''(W) = (\alpha_1 \wedge C_1(W)) \tag{2.16}$$

$$C_2''(W) = (\alpha_2 \wedge C_2(W)) \tag{2.17}$$

ผลรวมของเอาต์พุตฟัซซี่ทั้งหมดหาได้จากการยูเนียนผลลัพธ์จากแต่ละกฎ

$$C(W) = C_1''(W) \vee C_2''(W) = (\alpha_1 \wedge C_1(W)) \vee (\alpha_2 \wedge C_2(W)) \tag{2.18}$$

สุดท้ายหากต้องการผลเอาต์พุตที่เป็นค่าทั่วไป สามารถหาโดยวิธีการแปลงค่าฟัซซี่เป็นค่าทั่วไป (Defuzzification Method) จาก ภาพที่ 2.26



ภาพที่ 2.26 แสดงวิธีการแปลงค่าฟัซซี่เป็นค่าทั่วไป

2.4.9 การประยุกต์ใช้งานฟัซซี่ลอจิก เป็นลอจิกชนิดแบบคลุมเครือที่ทำงานอยู่บพื้นฐานด้านคอมพิวเตอร์ สามารถตอบสนองต่อสิ่งที่ไม่ชัดเจน ซึ่งมีความสามารถในการจัดการเกี่ยวกับข้อมูลข้างต้นเพื่อให้ผลลพ์กับเรา โดยผลลัพธ์นั้นมีความยืดหยุ่นสูงใกล้เคียงกับความรู้สึกนึกคิดในการตัดสินใจของมนุษย์ ยิ่งไปกว่านั้นฟัซซี่ลอจิกสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดในด้านต่างๆทั้งการควบคุมแม้กระทั้งนำไปช่วยในการด้านงานวิจัยจะเห็นได้จากตัวอย่างต่อไปนี้

- งานการประมาณค่าฟังก์ชันหรือการประมาณความสัมพันธ์ที่ไม่ชัดเจน
- การประยุกต์ใช้ระบบฟัซซี่ควบคุมกระบวนการทางเคมี
- งานด้านการแพทย์ ช่วยวิเคราะห์การแพร่กระจายของเชื้อไวรัส วิเคราะห์สุขภาพผู้ป่วย
- งานด้านการทหาร ช่วยวิเคราะห์สร้างและพัฒนายุทโธปกรณ์ให้มีสมรรถภาพดีขึ้น
- งานด้านธุรกิจ ช่วยวิเคราะห์ต่อความเสี่ยงในการลงทุนในตลาดใหม่
- งานด้านอุตสาหกรรมใช้ควบคุมเครื่องจักรเพื่อลดความผิดพลาดในการทำงา
- ใช้เป็นตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกสำหรับการควบคุมการทำงานของหุ้นยนต์
- พัฒนาการควบคุมความเร็วมอเตอร์โดยใช้ฟัซซี่ลอจิก
- งานด้านการศึกษา ช่วยวิเคราะห์ผลการเรียนของนักศึกษา
- งานด้านวิศกรรม ช่วยประเมินสภาพของอุปกรณ์

2.4.10 สรุปหลักการเบื้องต้น ฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic) ได้ช่วยอธิบายความสัมพันธ์ที่เกิดปรากฏการต่างๆโดยอาศัยฟังก์ชันฟัซซี่เซต (Fuzzy Set) เข้ามีช่วยวิเคราะห์อินพุต เอาต์พุต ที่มีความหลากหลายของโครงงานศึกษาและประเมินอายุของหม้อแปลงชนิดน้ำมัน ซึ่งใช้หลักเหตุผลที่คล้ายการเลียนแบบวิธีความคิดที่ซับซ้อนของมนุษย์ ฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic) มีลักษณะพิเศษกว่าตรรกะแบบบูลีน (Boolean Logic) ในส่วนของความจริง โดยค่าความจริงจะอยู่ในช่วงระหว่างค่าจริงกับเท็จ ซึ่งแนวคิดพื้นฐานของฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic) ประกอบไปด้วย เซตแบบดั้งเดิม (Classical Set), ฟัซซี่เซต (Fuzzy Set), ฟัซซี่ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Fuzzy Set Membership Function), ตัวแปรภาษา (Linguistic Variable), กฎฟัซซี่ (Fuzzy Rules) เมื่อนำค่าที่ต้องการใช้ฟัซซี่ลอจิกช่วยในการวิเคราะห์จะต้องเปลี่ยนค่าอินพุต – เอาต์พุตทั่วไปเป็นค่าตัวแปรฟัซซี่ (Fuzzification) และนำค่ามาดำเนินการด้วย รูปแบบ Mamdani เป็นการใช้ตัวดำเนินการค่าต่ำสุด (Minimum Operator) สำหรับการเชื่อมประโยคแบบ “And” และใช้ตัวดำเนินการค่าสูงสุด (Maximum Operator) สำหรับการเชื่อมประโยคแบบ “Or” ภายใต้กฎ IF – THEN จากนั้นแปลงเอาต์พุตให้อยู่ในช่วงของดีฟัซซี่ (Defuzzification) โดยอาศัยวิธีการหาจุดศูนย์ถ่วง (Central Of

Gravity: COG) ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าเฉลี่ยของผลที่ได้มาจากการตีความเสร็จสมบูรณ์เรียบร้อย แล้วมาหาข้อสรุปสุดท้ายโดยเป็นวิธีที่นิยมใช้กันในปัจจุบันโดยถูกยอมรับอย่างแพร่หลาย