บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีความสำคัญต่อระบบไฟฟ้าและมีราคาต้นทุนสูงมาก ความเสียหายใดๆที่เกิดขึ้น นอกจากจะทำให้งานด้านบริการทางด้านไฟฟ้าหยุดชะงักลงแล้วยังส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์อื่นๆ ในระบบอีกด้วย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะมีการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) โดยที่นำผลการตรวจวัดทางน้ำมันและผล การตรวจวัดทางไฟฟ้า เพื่อนำผลมาวิเคราะห์หาความผิดปก ติที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้ าซึ่งเป็นวิธีที่สะดวก ปลอดภัย และประหยัดต้ นทุนในการบำรุงรักษา สามารถทำนายความผิดปกติหรือความเสียหายที่จะเกิดขึ้นล่วงหน้าได้ เพื่อจะได้ทำการแก้ไขปัญหาที่จะเกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้าได้ทันท่วงที โดยที่ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องตามลำดับดังนี้

2.1 น้ำมันหม้อแปลง

น้ำมันหม้อแปลงมีหน้าที่หลักคือ เป็นฉนวน และระบายความร้อนจากภายในหม้อแปลงออกสู่บรรยากาศภายนอก น้ำมันที่มีการเป็นฉนวนที่ดีจะต้องมีค่า Breakdown voltage สูง ตามมาตรฐานจะต้องมีค่าคุณสมบัติอื่นๆตามมาตรฐาน IEC 296 หรือ BS 148/1978 หรือ ASTWD 3487 น้ำมันที่ดีนอกจากระบายความร้อนได้ดีมีสภาพเป็นฉนวนแล้ว ต้องไม่รวมตัวกับความชื้นได้ง่ายไม่ทำปฏิกิริยากับอุปกรณ์ที่แช่อยู่ จะต้องไม่เป็นกรด ด่าง กำมะถัน มีความหนืดต่ำ และตกตะกอนยาก

2.1.1 องค์ประกอบของน้ำมันหม้อแปลง ส่วนประกอบส่วนใหญ่ในน้ำมันหม้อแปลง จะเป็นธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจน ธาตุทั้งสองนี้รวมตัวกันอยู่ในรูปของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมีปริมาณมากกว่า 75% ขึ้นไป ส่วนกำมะถัน ไนโตรเจน ออกซิเจน และธาตุอื่นๆ จะอยู่ในรูปสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ละลายอยู่ในน้ำมันดิบ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงนั้นมีขนาดโมเลกุลตั้งแต่เล็กสุดคือ มีเทน (Methane) ซึ่งมีอะตอมของคาร์บอนเพียง 1 ตัว ไป

จนถึงขนาดโมเลกุลที่ใหญ่มีอะตอมของคาร์บอนถึง 80 ตัว สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภทใหญ่ ๆ ตามลักษณะโครงสร้างของโมเลกุลคือ

- Normal Paraffins หรือที่เรียกกันทางศัพท์เคมีว่า N–Alkanes สารไฮโดรคาร์บอนประเภทนี้มีโครงสร้างเป็นอะตอมของคาร์บอนเรียงต่อกันเ ป็นเส้นยาวแต่ละตัวของคาร์บอนก็ มีอะตอม ไฮโดรเจนจับอยู่จนอิ่มตัวขนาดโมเลกุลของสารประเภทนี้ในนำ มันดิบมีตั้งแต่ตัวที่ ประกอบด้วย 1 อะตอม ของคาร์บอนไปจนถึงราว 42 อะตอม มีสูตรทางเคมีดังนี้ $C_n H_{2n-2}$ โดย nเป็นจำนวนอะตอมของคาร์บอนในโมเลกุล

- ISO Paraffins หรือที่เรียกกันทางศัพท์เคมีว่า ISO - Alkanes มีลักษณะโครงสร้างเป็นอะตอมของคาร์บอนเรียงต่อกันแยกสาขาออกด้านข้างด้วย แต่ละตัวของคาร์บอนก็มีอะตอมของไฮโดรเจนจับอยู่จนอิ่มตัว ดังนั้น จึงมีสูตรทางเคมีเหมือนกับพวก Normal Paraffins คือ $C_n H_{2n-2}$ พวก Paraffins ทั้งสองประเภทนี้มีอยู่มากในน้ำมันเชื้อเพลิงใส (Distillates)

- Naphthenes หรือที่เรียกกันทางศัพท์เคมีว่า Cyclo - Alkanes ลักษณะโครงสร้างประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนต่อเรียงตัวกันเป็นวงอาจจะเป็นวงละ 5 ตัว 6 ตัว หรือ 7 ตัวก็มีดังตัวอย่างข้างล่าง มีสูตรทางเคมีเป็น $C_n H_{2n-2} 2R_n$ โดยที่ n เป็นจำนวนอะตอมของคาร์บอน และ R_n เป็นจำนวนของวงคาร์บอนที่มีอยู่ในโมเลกุล

- Aromatics หรือที่เรียกกันทางศัพท์เคมีว่า Arenes เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างประกอบด้วย Benzenes Ring

- Mixed Naphtheno - Aromatics เป็นไฮโดรคาร์บอนประเภทที่มีทั้ง Naphthenic Ring และ Aromatic Rings อยู่ในโมเลกุลเดียวกัน

2.1.2 ก๊าซที่เกิดจากความผิดปกติในน้ำมันหม้อแปลง (Fault Gas)

สาเหตุของการเกิดความผิดปกติของก๊าซถูกแบ่งออก 3 ประเภท

2.2.1.1 โคโรน่าหรือการดิสชาร์จบางส่วน

2.2.1.2 ความร้อน

2.2.1.3 การอาร์คซิ่ง

อาการผิดปกติทั้ง 3 ประเภทนี้ก่อให้เกิดการสูญเสียภายในหม้อแปลงซึ่งอาการที่รุนแรงที่สุดคือการเกิดอาร์คซิ่ง (Arcing) ความร้อนและโคโรน่าตามลำดับ ซึ่งแก๊สที่เกิดขึ้นเนื่องจากสภาวะผิดปกติจะประกอบไปด้วยแก๊ส 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. ไฮโดรคาร์บอนและไฮโดรเจน (Hydrocarbons and Hydrogen)

ตารางที่ 2.1 สารประกอบไฮโดรคาร์บอนและไฮโดรเจน

Methane	CH_4
Ethane	C_2H_6
Ethylene	C_2H_4
Acetylene	C_2H_2
Hydrogen	H_2

2. คาร์บอนออกไซด์ (Carbon Oxides)

ตารางที่ 2.2 สารประกอบคาร์บอนออกไซด์

Carbon monoxide	CO
Carbon dioxide	CO_2

3. ก๊าซที่เกิดขึ้นตามปกติ (Non-fault Gases)

ตารางที่ 2.3 สารประกอบก๊าซที่เกิดขึ้นตามปกติ

Nitrogen	N_2
Oxygen	O_2

ก๊าซเหล่านี้ถูกสะสมในน้ำมันและพื้นที่ว่างของหม้อแปลงโดยก๊าซที่สะสมจะทำให้เกิดอาการผิดปกติที่ต่างกันสามารถดูความสัมพันธ์ได้จากตารางที่ 2.1

2.2 การวิเคราะห์ก๊าซละลายในน้ำมัน (Dissolved Gas Analysis)

พื้นฐานวิเคราะห์ก๊าซละลายในน้ำ (Dissolved Gas Analysis) ใช้กลุ่มตัวอย่างน้ำมันที่นำมาจากหม้อแปลงไฟฟ้า โดยการเก็บตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงมีอัตราส่วนหนึ่งต่อล้านส่วน (ppm) ของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งหมด ต้องทำโดย วิธีสูญญากาศเพื่อป้องกันไม่ให้ ก๊าซในน้ำมันหม้อแปลงสูญเสียไป ซึ่งก๊าซเหล่านี้จะถูกแยกออกจากตัวอย่างน้ำมันที่เก็บ โดยก๊าซที่ถูกแยกออกจากน้ำมันหม้อแปลง จะนำมาวิเคราะห์พิจารณาถึงสภาพของหม้อแปลงได้

การวิเคราะห์หาก๊าซที่เจือปนอยู่ใน น้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้านั้นมีคุณสมบัติพิเศษคือ เป็นทั้งฉนวนและตัวระบายอุณหภูมิความร้อนให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อมีสิ่งผิดปกติเกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้า จากการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าหรือความผิดพลาดที่มีผลกระทบกับหม้อแปลงไ ฟฟ้าโดยตรง จำเป็นต้องมีการทดสอบ วิเคราะห์ก๊าซละลายในน้ำ (Dissolved Gas Analysis) เพื่อดูค่าก๊าซที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ก๊าซ จะบ่งบอกถึงความผิดปกติที่เกิดขึ้นจากการใช้งาน ว่าเกิดสิ่งผิดปกติอะไรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า เช่น เกิดการลัดวงจรของขดลวด การใช้โหลดเกินพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า ส่ วนใหญ่วิเคราะห์ก๊าซละลายในน้ำ (Dissolved Gas Analysis) จะอยู่ในมาตราฐาน ASTM และ IEC

ในการตรวจวัดปริมาณก๊าซที่เจือปนในน้ำมันหม้อแปลง ด้วยเครื่อง MYRKOS Transformer Fault Gas Analyzer ดังแสดงในภาพที่ 2.1 ซึ่งเครื่องมือชนิดนี้ถูกออกแบบมาให้มีความถูกต้องแม่นยำสำหรับการตรวจสอบหาก๊าซทั้ง 7 ชนิดซึ่งเกิดจากความผิดปกติภายในหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดฉนวนด้วยน้ำมันได้แก่ ไฮโดรเจน (H_2), คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), คาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO), มีเทน(CH_4), อีเทน(C_2H_6), เอทิลีน(C_2H_4), อะเซทิลีน(C_2H_2)

ภาพที่ 2.1 MYRKOS Transformer Fault Gas Analyzer ตรวจสอบหาก๊าซ

การวินิจฉัยหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้ค่าของก๊าซที่ลายอยู่ในน้ำมัน คู่มือใช้ในการจำแนกความเสี่ยงที่อาจเป็นไปได้โดยใช้ DGA เพื่อวิเคราะห์ปัญหาที่อาจจะเกิดกับหม้อแปลงไฟฟ้า ตามมาตรฐาน IEEE C-57-104-1991 ซึ่งจะดูจากค่าก๊าซแต่ละชนิดและ ก๊าซที่เผาไหม้ทั้งหมดเพื่อ ใช้ในการประเมินหม้อแปลงไฟฟ้าโดยจะมีอยู่สี่เงื่อน

ตารางที่ 2.4 แสดงขีดจำกัดของก๊าซที่ละลายอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงส่วนในล้านส่วน (ppm)

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

เงื่อนไขที่ 1 ก๊าซที่เผาไหม้ทั้งหมดที่ละลายอยู่ในน้ำมัน (TDCG) ต่ำกว่าระดับนี้บ่งชี้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในสภาพที่ดี

เงื่อนไขที่ 2 ก๊าซที่เผาไหม้ทั้งหมดที่ละลายอยู่ในน้ำมัน (TDCG) ในช่วงนี้แสดงถึงการเผาไหม้สูงกว่าปกติควรจะมีการตรวจสอบเพิ่มเติมและควรนำค่า DGA ไปคำนวณและประเมินก๊าซที่ถูกผลิตขึ้นต่อวัน

เงื่อนไขที่ 3 ก๊าซที่เผาไหม้ทั้งหมดที่ละลายอยู่ในน้ำมัน (TDCG) ในช่วงนี้แสดงถึงระดับสูงของการสลายตัวของเซลลูโลสฉนวนหรือน้ำมันควรนำค่า DGA ไปคำนวณและประเมินก๊าซที่ถูกผลิตขึ้นต่อวัน

เงื่อนไขที่ 4 ก๊าซที่เผาไหม้ทั้งหมดที่ละลายอยู่ในน้ำมัน (TDCG) ในช่วงนี้แสดงถึงระดับของการสลายตัวของเซลลูโลสฉนวนหรือน้ำมันมากเกินไปควรที่จะเข้าบำรุงรักษาทันที

2.2.1 ผลที่เกิดจากการวิเคราะห์

การเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษที่เกิดจาก CO, CO_2 และไอน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าการสลายตัวของน้ำมัน

ตารางที่ 2.5 การละลายของก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง

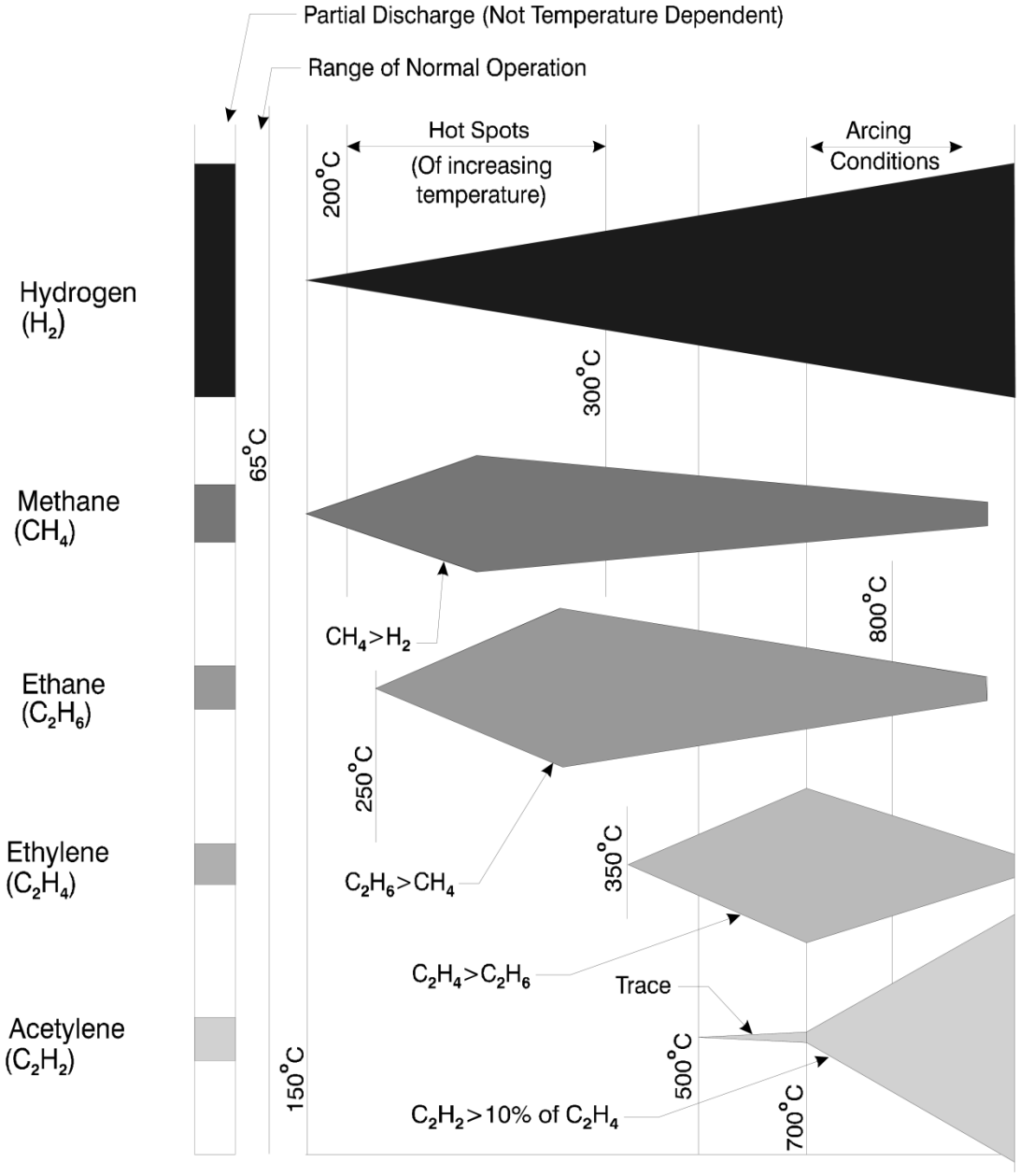
Hydrogen	7.0% by volume
Nitrogen	8.6% by volume
Carbon monoxide	9.0% by volume
Oxygen	16.0% by volume
Methane	30.0% by volume
Carbon dioxide	120.0% by volume
Ethane	280.0% by volume
Ethylene	280.0% by volume
Acetylene	400.0% by volume

หมายเหตุ : สมดุลคงที่ 760 มม. ปรอทและ 25 °C

2.2.2 การเกิดก๊าซที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ

ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 150 °C ถึง 500 °C จะทำให้น้ำมันมีการสลายตัวและทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ก๊าซมีเทน(CH_4) และเกิดก๊าซอีเทน(C_2H_6) เป็นจำนวนมาก ส่วนก๊าซเอทิลีน(C_2H_4) จะมีการเกิดขึ้นอีกจำนวนหนึ่ง เมื่ออุณหภูมิของน้ำมันสูงขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัวจะพบว่าก๊าซไฮโดรเจน(H_2) มากพอที่จะทำให้พบว่าก๊าซอีเทน(C_2H_6) มีค่ามากกว่าก๊าซมีเทน(CH_4) และก๊าซเอทีลิน(C_2H_4) มีค่ามากกว่าก๊าซอีเทน (C_2H_6) ขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นก๊าซไฮโดรเจน(H_2) ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ในขณะอุณหภูมิสูงขึ้นก็จะเกิดก๊าซเอทีลิน(C_2H_4) และก๊าซอะเซทิลีน(C_2H_2) แต่จะมีค่าขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับการเกิดก๊าซอื่น ซึ่งก๊าซอะเซทีลีนจะสามารถพบได้ชัดเจนขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงตั้งแต่ 700 °C ขึ้นไป

แผนภูมิของก๊าซ จากแผนภูมิของก๊าซต้องการแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ชนิดของก๊าซ และปริมาณของก๊าซที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 2.2 การเกิดก๊าซที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ

กระดาษฉนวนของหม้อแปลง ไฟฟ้า ส่วนใหญ่ใช้กระดาษชุบน้ำมัน และกระดาษอัดแรง เนื่องจากขีดจำกัดของฉนวนประเภทนี้จะใช้กับอุณหภูมิได้ถึง 105 c° และเนื่องจากกระดาษสามารถดูดซึมความชื้นได้ง่ายจากบรรยากาศ ฉะนั้น ฉนวนประเภทนี้ จะต้องปลอดจากความชื้นในขณะใช้งาน น้ำมันหม้อแปลงทำหน้าที่เป็นฉนวนและระบายความร้อนโดยวนเวียนผ่านแกนเห ล็กและขดลวด อุณหภูมิใช้งานอยู่ในช่วง - 40 ถึง +50 c° ออกซิเดชั่น อาจเกิดขึ้นในน้ำมันได้ ถ้าหากน้ำมันสัมผัสกับออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะเป็นผลให้เกิดหยดน้ำ กรด และตะกอน ก่ อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีกัดกร่อนฉนวนกระดาษและโลหะ ส่วนตะกอนที่เกิดขึ้นจะทำให้การระบายความร้อนของขดลวดลดลง อุณหภูมิของน้ำมันจะสูงขึ้นจนแตกตัวออกเป็นไฮโดรเจน และก๊าซไฮโดรคาร์บอน ซึ่งนำไปสู่การระเบิดของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ ซึ่งปัญหาต่างๆที่ได้กล่าวมาแล้วเราสามารถป้องกันและแก้ปัญหาได้โดยการตรวจวัดค่าความเป็นฉนวนข องน้ำมันเป็นระยะๆ และอาจต้องกรองน้ำมันเพื่อขจัดสิ่งเจือปนทั้งหลายที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีตามเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว หรือต้องมีการสับเปลี่ยนสารดูดความชื้น (Silica-gel) ตามวาระอย่างน้อย ปีละ 1 ครั้ง

เกิดความร้อนสูงภายในกระดาษฉนวน เมื่อกระดาษฉนวนมีควา มร้อนเกิดขึ้นมาก จากการวิเคราะห์ในเบื้องต้นแสดงให้เห็นถึงการเสื่อมสภาพของกระดาษฉนวนที่อุณหภูมิประมาณ 140 องศาเซลเซียส จะเกิดการสะสมก๊าซภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนี้

คาร์บอนมอนน็อกไซด์ (CO)

คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)

น้ำ (H_2O)

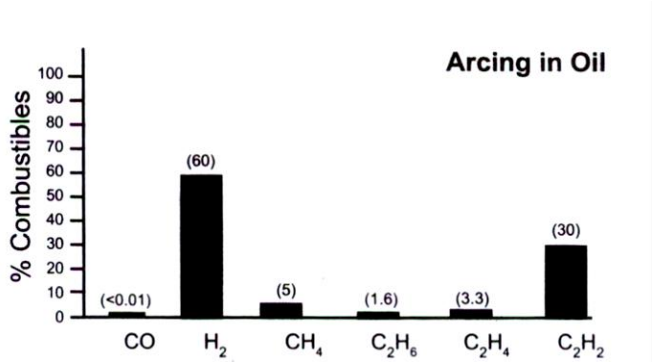
เกิดความเสียหายกับกระดาษฉนวน เมื่อกระดาษฉนวนได้รับความร้อน จนเกิดความเสียหาย เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 250 องศาเซลเซียส (สำหรับหม้อแปลงประเภทซีลด์) จะเกิดก๊าซคาร์บอนมอนน็อกไซด์ (CO) สูงกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) (หรือในบางครั้งอาจจะสูงกว่า 4 เท่า)

- Fault Gas ก๊าซที่เกิดขึ้นในน้ำมันหม้อแปลงและเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไป สามารถแสดงได้ดังในตารางที่ 2.6 และรูปภาพที่ 2.3-2.6

ตารางที่ 2.6 แสดงชนิดการเกิดฟอลท์

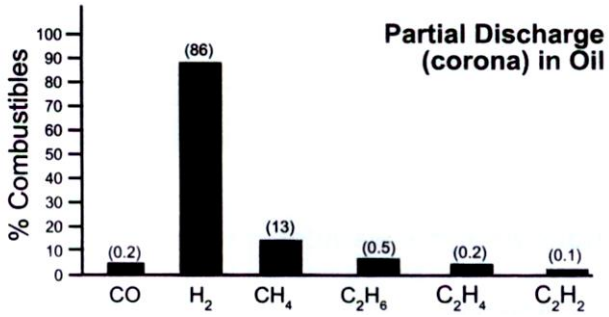
ก๊าซที่ตรวจสอบพบ	ความหมาย
ก๊าซ N_2 +5% หรือน้อยกว่า O_2	การใช้งานปกติของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด seal type
ก๊าซ N_2 มากกว่า 5% ของก๊าซ O_2	ตรวจรอยรั่วของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด seal type
ก๊าซ N_2 , CO_2 , CO หรือทั้งหมด	หม้อแปลงไฟฟ้าใช้งานโหลดเกินหรือเกิดความร้อนในการทำงาน สาเหตุเนื่องจากเกิดเบรกดาวน์ในกระดาษฉนวน ให้ตรวจสอบเงื่อนไขการใช้งาน
ก๊าซ N_2 และ H_2	เกิดดิสชาร์จบางส่วน, เกิดแยกน้ำเป็นออกซิเจนหรือเกิดสนิม
ก๊าซ N_2, H_2, CO_2 และ CO	เกิดดิสชาร์จบางส่วนขึ้นภายในกระดาษฉนวนหรือเกิดจากการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าเกินโหลด
ก๊าซ N_2, H_2, CH_4 และเกิดปริมาณก๊าซ C_2H_6 และ C_2H_4 เล็กน้อย	สปาร์คหรือเกิดฟอลท์ประเภท เนื่องจากการเกิดเบรกดาวน์ภายในน้ำมันหม้อแปลง
ก๊าซ N_2 ร่วมกับ H_2 ปริมาณสูงและมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น C_2H_2 เล็กน้อย	เกิดอาร์กชนิดที่มีพลังงานสูงมาก สาเหตุเนื่องจากการเสื่อมสภาพของน้ำมันอย่างรวดเร็ว
ก๊าซ N_2 ร่วมกับ H_2 ปริมาณสูง, CH_4และ 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



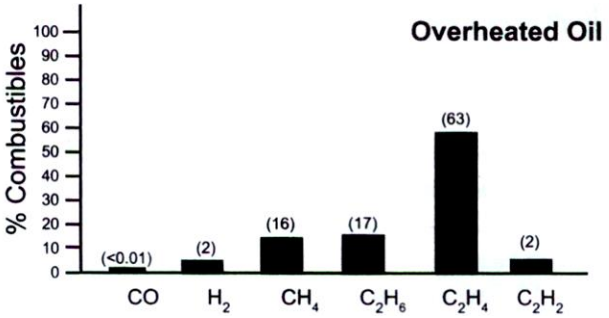
ภาพที่ 2.3 แสดงอาร์กในน้ำมันหม้อแปลง

Key gas : ไฮโดรเจน(H_2) เกิดในปริมาณที่สูงมาก



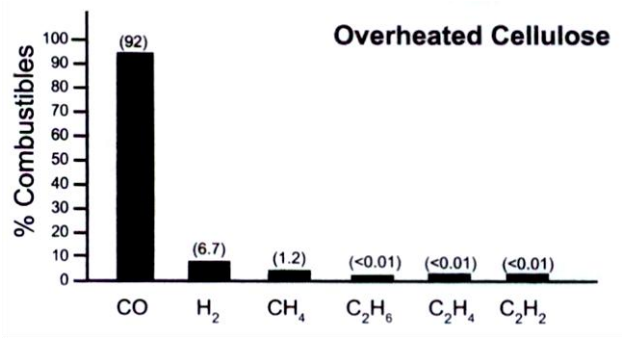
ภาพที่ 2.4 แสดงเบรกดาวน์บางส่วน (โคโรน่า) ในน้ำมันหม้อแปลง

Key gas : เอทิลีน(C_2H_4) เกิดจากการเสื่อมสภาพของน้ำมันหม้อแปลงเนื่องจากเกิดความร้อนสูงมาก



ภาพที่ 2.5 แสดงความร้อนสูงในน้ำมันหม้อแปลง

Key gas : คาร์บอนมอนน็อกไซด์(CO)



ภาพที่ 2.6 แสดงความร้อนสูงในกระดาษฉนวนของหม้อแปลง

2.3 สารประกอบ Furan

โดยจะถูกสร้างขึ้นมาจากเซลลูโลสในการเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษที่เกิดจากความร้อนที่และเกิดการออกซิเดชันและความเครียดทางไฟฟ้า ความเข้มข้น Furans ที่วัดโดยโครมาโต ของเหลวประสิทธิภาพสูง (HPLC) หรือก๊าซ chromatography - Mass Spectrometry (GC / MS) อยู่บนพื้นฐานตามมาตรฐานASTM D 5837

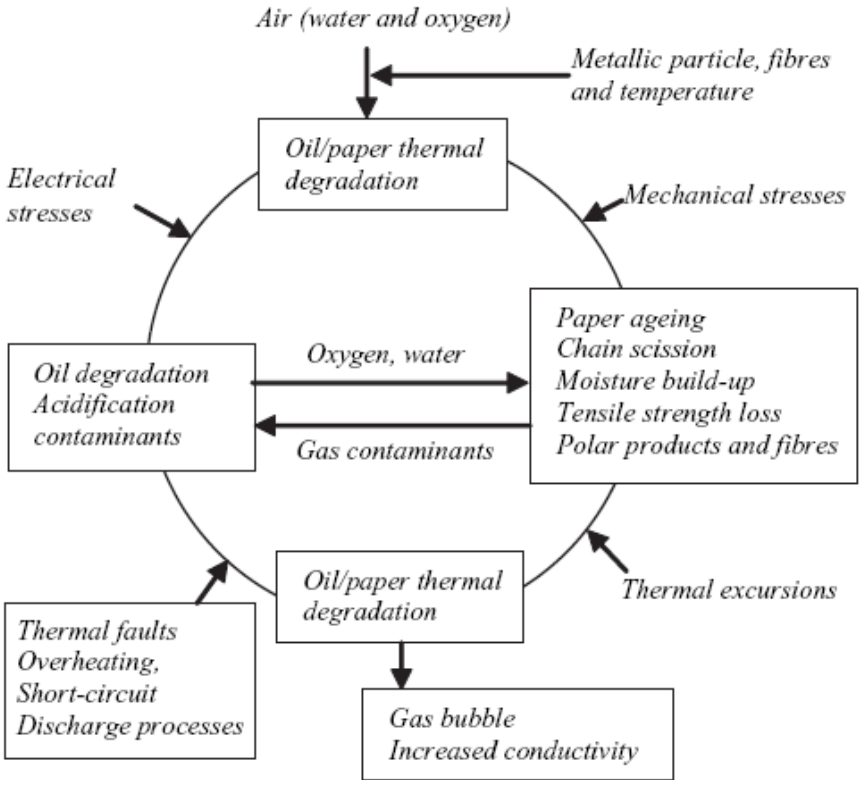
ตารางที่ 2.7 แสดงค่าการเสื่อมสภาพของฉนวนที่เป็นของแข็ง

Furan Analysis	Voltage Class	Acceptable value (ppb)
ASTM D5873	> 115 kV	< 1000 for open type < 100 for sealed type

การทดลองวิเคราะห์การเสื่อมสภาพฉนวนที่เป็นของแข็งที่แช่อยู่ในน้ำมัน (cellulosic) น้ำมันจะถูกส่งเข้าไปในระบบ GC/MS ดังภาพที่ 2.7 แทนระบบ HPLC ซึ่งจะช่วยให้การวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบ Furanic ทั้ง 5 มีประสิทธิภาพแม่นยำจากกระดาษคราฟท์

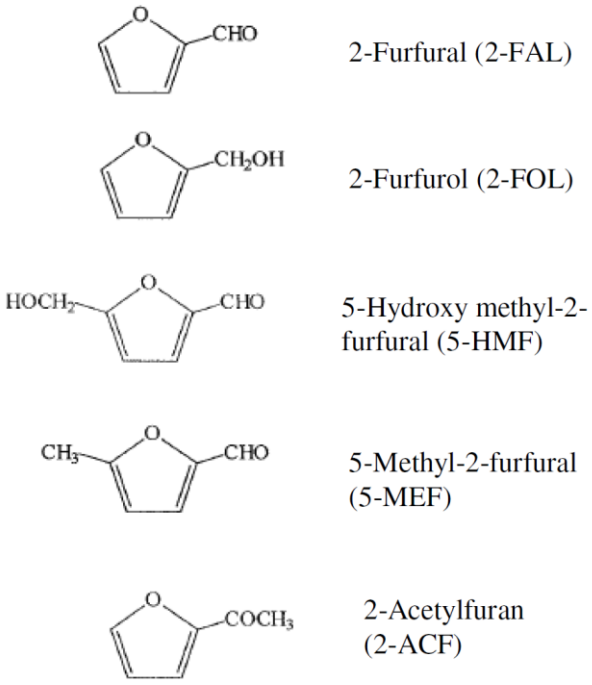
ภาพที่ 2.7 GC / MS ที่ใช้สำหรับการวัดสาร furanic (TACS)

ฉนวนกระดาษที่แช่อยู่ในน้ำมันหม้อแปลง มีส่วนประกอบเป็นเซลลูโลส 90%, และลิกนิน 6-7% ที่เหลือจากนั้นจะเป็น hemicelluloses (pentosans) การย่อยสลายของกระดาษฉนวนขึ้นอยู่กับระดับของความเครียดทางกล อุณหภูมิ ความชื้นและออกซิเจน ซึ่งปัจจัยการเสื่อมสภาพของกระดาษฉนวนดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพและการเสื่อมสภาพของน้ำมันและฉนวนกระดาษในหม้อแปลง

2.3.1 สารประกอบ Furanic จะสามารถทราบถึงอนุพันธ์สารประกอบ Furanic ที่เกิดจากการย่อยสลายหรือการเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษ
ภายในหม้อแปลง



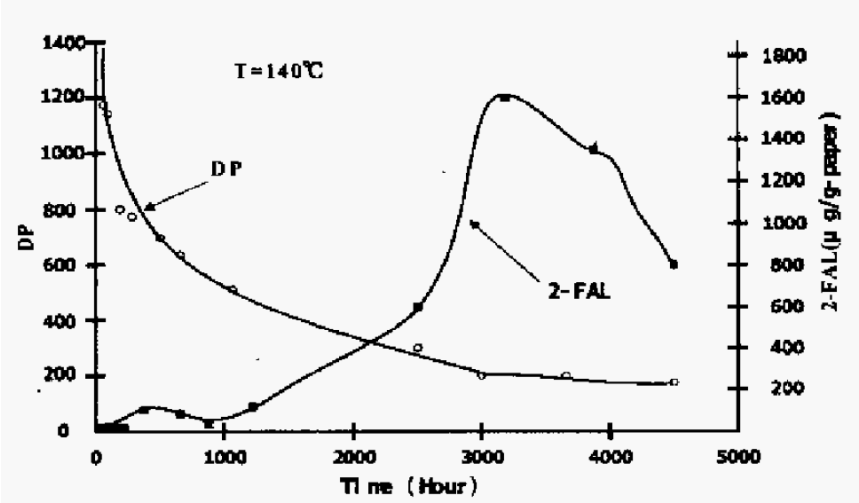
ภาพที่ 2.9 สารประกอบ Furan ที่ตรวจพบในฉนวนกระดาษที่เกิดจาการเสื่อมสภาพ

- **2-Furfural (2-FAL)** การย่อยสลายของเซลลูโลสในกระดาษโดยความร้อน ซึ่งนำไปสู่การประเมินสภาพของหม้อแปลงได้
- **2-Furfurol (2-FOL)** ความชื้นภายหม้อแปลงสูง
- **5-Hydroxy methyl-2-furfural (5-HMF)** การเกิดออกซิเดชั่น
- **5-Methyl-2-furfural (5-MEF)** ความร้อนรุนแรงภายในหม้อแปลง
- **2-Acetyfuran (2-ACE)** การเกิดอาร์คหรือความร้อนเนื่องจากฟ้าผ่า

2.3.2 การวิเคราะห์ 2-Furfural การเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษ ที่เกิดจากความร้อนที่ และเกิดการออกซิเดชันและความเครียดทางไฟฟ้า โดยกระบวนการย่อยสลายของฉนวนกระดาษอาจมีน้ำหรือออกซิเจนเป็นตัวการก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษ ซึ่งปัจจัยที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษภายในหม้อแปลงไฟฟ้าคือ

- ฉนวนกระดาษเปราะบางแยกออกจากขดลวดภายในหม้อแปลงไฟฟ้า
- น้ำเป็นตัวการย่อยสลายและลดความต้านทานฉนวนกระดาษ
- การเกิดความผิดพลาดของตัวนำภายในหม้อแปลงทำให้เกิดความร้อนของฉนวนกระดาษสูง

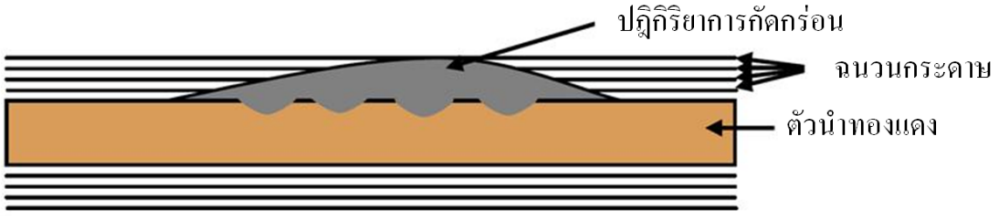
Degree Of Polymerization (DP) เป็นตัวบ่งชี้สภาพของฉนวนกระดาษภายในหม้อแปลงไฟฟ้า แต่เนื่องจากปริมาณการเกิดริ้วรอยในหม้อแปลงไม่สม่ำเสมอกัน บางครั้งฉนวนกระดาษมีการย่อยสลายตัวเร็วแตกต่างกันไป ซึ่งโดยทั่วไปฉนวนกระดาษมีเซลลูโลสประมาณ 90% ลิกนิน 34% และเฮมิเซลลูโลส 6-7% Celluloses ที่เสื่อมสภาพและย่อยสลายลงในน้ำมัน จะสามารถระบุอัตราการย่อยสลายที่ละลายในน้ำมัน ให้ตัวชี้วัดทางเคมีโดยตรงของริ้วรอยกระดาษ



ภาพที่ 2.10 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลง DP ที่เพิ่มขึ้นในระดับความเข้มข้นของ 2-Furfural ในน้ำมันที่อุณหภูมิ 140 ° C

2.4 การกัดกร่อน (CORROSIVE SULFUR)

การป้องกันการเกิดการกัดกร่อนในหม้อแปลงถือเป็นประโยชน์ต่อการใช้งานหม้อแปลง อย่างยิ่งในอนาคต กระบวนการกัดกร่อนในหม้อแปลงจะนำไปสู่ความเสียหายต่อหม้อแปลง ซึ่งกระบวนการกัดกร่อนจะเกิดปฏิกิริยากับโลหะทองแดง ซึ่งจะทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวของทองแดง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของทองแดงยังไปลดคุณภาพของทองแดงในขดลวด ซึ่งจะก่อให้เกิดความร้อนที่เพิ่มขึ้นและเกิดการสูญเสียภายในหม้อแปลง รวมถึงลดประสิทธิภาพของหม้อแปลงและจะทำให้ลดอายุการใช้งานของหม้อแปลง



ภาพที่ 2.11 กระบวนการกัดกร่อนบนพื้นผิวของทองแดง

แสดงให้เห็นถึงปฏิกิริยาการกัดกร่อนของทองแดง และจะทำให้ความเป็นตัวนำของทองแดงลดลง จากนั้นปฏิกิริยาการกัดกร่อนก็จะแทรกซึมเข้าสู่ฉนวนกระดาษไปยังเนื้อของทองแดง การกัดกร่อนบนพื้นผิวทองแดงจะทำให้เกิดการสะสมตัวของคาร์บอน

2.4.1 มาตรฐานการทดลอง CORROSIVE SULFUR การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1275 มีการพัฒนาขึ้นเพื่อให้มีการทดสอบที่แม่นยำโดยมีสองวิธี

- วิธีแรกเป็นวิธี A ซึ่งเป็นวิธีการเดิมจะทำการทดสอบอุณหภูมิที่ 140 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 19 ชั่วโมงในสภาพแวดล้อมที่ปิดสนิท

- วิธีที่สองเป็นวิธีการ B ซึ่งมีความละเอียดและแม่นยำมากขึ้น ซึ่งวิธีการ B จะทำการทดสอบอุณหภูมิที่สูงกว่าที่ 150 องศาเซลเซียสเป็นเวลาถึง 48 ชั่วโมงหรือใช้เวลาสองวัน ซึ่งวิธีการ B มีความไวต่อ Corrosive sulfer ทำให้วิธีการ B ได้รับความรับรองจาก S.D. Myers ว่าเป็นวิธีมาตรฐานในปี 2006

ตารางที่ 2.8 แสดงผลความเสียหายในการทดสอบ CORROSIVE SULFUR

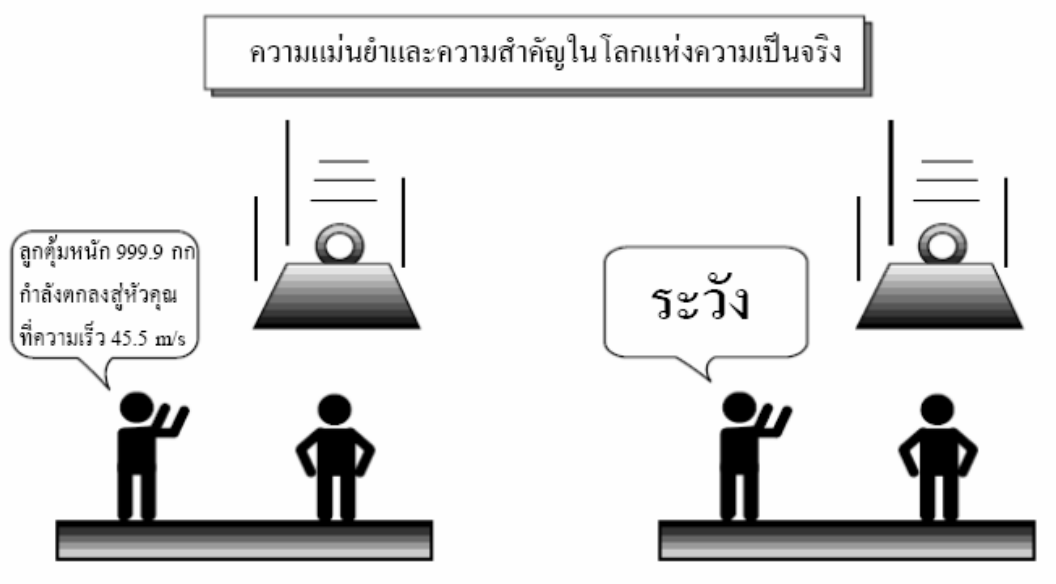
ประเภท	**ระดับความเสียหาย**	**ลักษณะ**
ไม่เกิดสนิม	1a	สีส้มอ่อน
	1b	สีส้มเข้ม
	2a	สีแดงออกม่วง
	2b	ม่วง
	2c	สีส้มและดำ
	2d	สีเงิน
	2e	สีทอง
มีแนวโน้มว่าจะเกิด	3a	สีส้มออกแดง
	3b	สีแดงออกม่วงและเขียว
เกิดสนิม	4a	สีดำ สีเทาเข้ม หรือสีน้ำตาลเข้ม
	4b	สีดำด้าน
	4c	มันเงาหรือดำเงา

ภาพที่ 2.12 แถบทองแดงมาตรฐานที่ใช้ในการประเมินการทดสอบ CORROSIVE SULFUR

2.5 ทฤษฎีของฟัซซี่ลอจิก

ฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic) คือตรรกะแบบคลุมเครือ เป็นคณิตศาสตร์แขนงใหม่ที่ มีความสำคัญต่อเทคโนโลยีสารสนเทศเป็นอย่างมาก ฟัซซี่ลอจิกได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ ที่ต้องใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการประมวลผล ช่วยในการสนับสนุนการตัดสินใจการพยากรณ์ การคาดการเหตุการณ์ การลดความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นจากมนุษย์หรือแม้แต่ในงานด้านวิศวกรรม ฟัซซี่ลอจิกเป็นระบบด้านคอมพิวเตอร์ที่ทำงานโดยอาศัยฟัซซี่ เซตที่คิดค้นโดย Dr. Lotfi Zadeh ในปี ค.ศ. 1965 ซึ่งเป็นผลงานวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาเอก ฟัซซี่ลอจิกเป็นตรรกะที่ อยู่บนพื้นฐานความเป็นจริงที่ว่าทุกสิ่งบนโลกแห่งความเป็นจริงไม่ใช่มี เฉพาะสิ่งมีความแน่นอนเท่านั้น ฟัซซี่ลอจิกสามารถให้ผลลัพธ์กับเราโดยผลลัพธ์นั้นมีความยืดหยุ่นสูงใกล้เคียงกับความรู้สึกนึกคิดในการตัดสินใจของมนุษย์ คือ “ความเหมือนจริง” แต่มีหลายสิ่งหลายเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างไม่เที่ยงและไม่แน่นอน อาจเป็นสิ่งที่คลุมเครือไม่ใช่ชัดเจน ยกตัวอย่าง เช่น เซตของน้ำหนักที่ไม่แน่นอน อาจแบ่งเป็น คนที่มีรูปร่างอ้วน คน

ที่มีรูปร่างผอม คนที่มีรูปร่างดี จะเห็นได้ว่าในแต่ละช่วงน้ำหนักของแต่ละคนไม่สามารถระบุได้แน่ชัดว่า คนไหนจะมีรูปร่างเป็นอย่างไร ได้ชัดเจนซึ่งคนนี้มีรูปร่างอ้วนอาจถูกตีความว่า มีน้ำหนักระหว่าง 60 – 70 แต่บางคนอาจตีอีกความว่ามีน้ำหนักระหว่าง 80 – 90 ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นตัวอย่างของความไม่แน่นอนเป็นลักษณะทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นทั่วไปเซตของเหตุการณ์ที่ไม่แน่นอน เช่นนี้ถูกเรียกว่า ฟัซซี่เซต (Fuzzy Set)



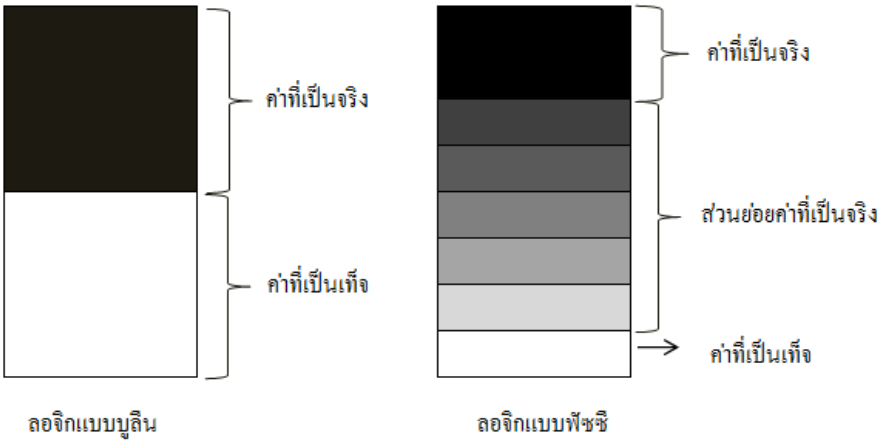
ภาพที่ 2.13 แสดงแนวคิดเกี่ยวกับฟัซซี่ลอจิก

ฟัซซี่จะสร้างวิธีทางคณิตศาสตร์ที่แสดงถึงความคลุมเครือ ความไม่แน่นอนของระบบที่เกี่ยวข้องกับความคิดความรู้สึกของมนุษย์ เมื่อพิจารณาส่วนประกอบต่าง ๆ ในความไม่แน่นอนเพื่อกำหนดเงื่อนไขในการตัดสินใจ (Decision making) โดยอาศัยเซตของความไม่เป็นสมาชิก (Set membership) ตามภาพที่ 2.13 และภาพที่ 2.14 ความไม่แน่นอน (uncertainty)

ภาพที่ 2.14 แสดงความไม่แน่นอน (uncertainty)

2.5.1 โครงสร้าง จากการคิดค้นฟัซซี่ลอจิกโดย Dr. Lotfi Zadeh เกี่ยวกับความไม่แน่นอนได้มีการขยายแนวคิดเพื่อนำไปพัฒนาและประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ มากมายจนนับไม่ถ้วนซึ่งมีนักวิจัยได้คิดค้นทฤษฎีเสริมร่วมกับแนวคิดเดิมจนทำให้ฟัซซี่ ลอจิกโดดเด่นในวงการคอมพิวเตอร์ โดยมีแนวคิดพื้นฐานของฟัซซี่ลอจิกประกอบไปด้วย เซตแบบดั้งเดิม (Classical Set), ฟัซซี่เซต (Fuzzy Set), ฟัซซี่เซตฟังก์ชั่นความเป็นสมาชิก (Fuzzy Set Membership Function), ตัวแปรภาษา (Linguistic Variable), กฎฟัซซี่ (Fuzzy Rules)

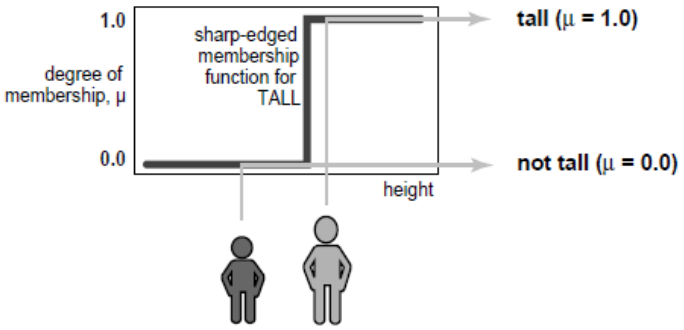
2.5.2 หลักการ ตรรกะแบบคลุมเครือ (Fuzzy Logic) เป็นเครื่องมือที่ช่ว ยในการตัดสินใจภายใต้ความไม่แน่นอนของข้อมูลโดยยอมให้มีความยืดหยุ่นได้ ซึ่งใช้หลักเหตุผลที่คล้ายการเลียนแบบวิธีการคิดที่ซับซ้อนของมนุษย์ ฟัซซี่ลอจิกมีลักษณะที่พิเศษกว่า ตรรกะแบบบูลีน (Boolean Logic) เป็นแนวคิดที่มีการต่อขยายในส่วนของความจริง โดยค่าความจริงจะอยู่ในช่วงระหว่างค่าจริงกับเท็จเช่น ค่า “0” “0.234” “1” แต่ในส่วนของตรรกศาสตร์แบบบูลีน จะมีค่าเป็นจริงกับเท็จเท่านั้นซึ่งจะมีค่าเป็น “1” กับ “0” โดยความเป็นฟัซซี่มีชื่อเรียกว่า มัลติวาลานซ์ (Multivalance) โดยมีค่าความเป็นสมาชิกมากกว่าสองค่าและเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ลอจิกแบบบูลีนจะมีความเป็นสมาชิกเพียงสองค่าเท่านั้นหรืออากเรี ยกว่า ไบวาลานซ์ (Bivalance) โดยจะเห็นความแตกต่างที่ชัดเจนจาก ภาพที่ 2.15



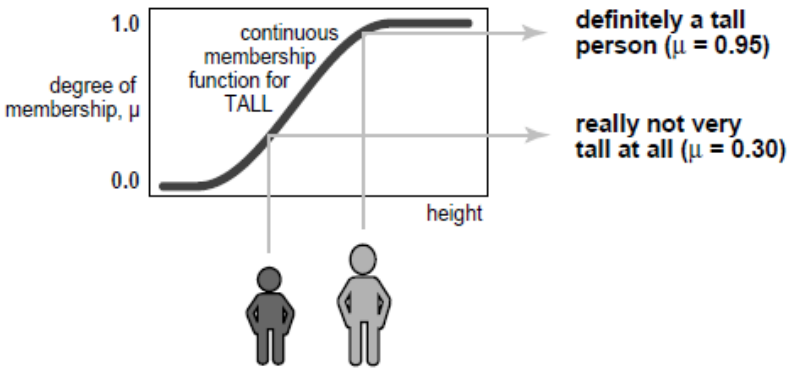
ภาพที่ 2.15 แสดงความแตกต่างระหว่างตรรกะแบบบูลีนกับตรรกะแบบฟัซซี่

ซึ่งแนวคิดพื้นของระบบฟัซซี่ลอจิกมีด้วยกันดังนี้

- เซตแบบดั้งเดิม (Classical Set) และ ฟัซซี่เซต (Fuzzy Set) ในความแตกต่างเซตแบบดั้งเดิมจะเป็นเซตที่มีค่าความเป็นสมาชิก {0,1} เท่านั้น ซึ่งเป็นขอบเขตที่ตัดขาดจากกันแบบทันทีทันใดตามแนวคิดของเลขฐานสองและในส่วนของ ฟัซซี่ เซตจะมีขอบเขตที่ราบเรียบโดย ฟัซซี่เซตจะมีค่าความเป็นสมาชิกอยู่ในช่วงระหว่าง {0-1} โดยมีความยืดยุ่นในการหาผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงความเป็นจริงที่สุดในที่นี้จะยกตัวอย่างความสูงของสองคนใน ภาพที่ 2.16 จะแสดงให้เห็นว่าความสูงของคนที่หนึ่งไม่ได้เป็นสมาชิกของเซตแบบดั้งเดิม ส่วนความสูงของคนที่สองได้เป็นสมาชิกของเซตแบบดั้งเดิมแ ละใน ภาพที่ 2.17 จะแสดงให้เห็นว่าความสู งของทั้งสองคนเป็นสมาชิกใน ฟัซซี่เซต จากความแตกต่างข้างต้นแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ฟัซซี่เซตมีความยืด ยุ่นสูงในการหาผลลัพธ์เมื่อเทียบกับเซตดั้งเดิม



ภาพที่ 2.16 แสดงความเป็นสมาชิกของเซตแบบดั้งเดิม

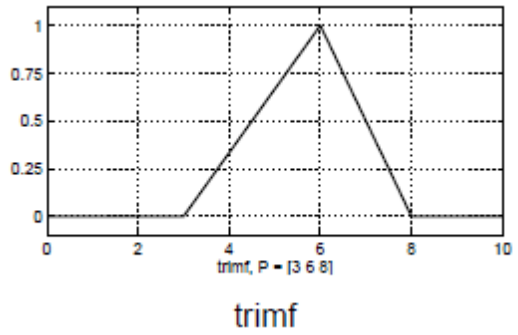


ภาพที่ 2.17 แสดงความเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซต

- ฟัซซี่เซตฟังก์ชั่นความเป็นสมาชิก (Fuzzy Set Membership Function) เป็นฟังก์ชันที่มีการกำหนดระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรที่ ต้องการใช้งานโดยเริ่มจากการแทนที่กับตัวแทนที่มีความไม่ชัดเจน ไม่แน่นอน และคลุมเครือ ดังนั้นส่วนที่สำคัญต่อคุณสมบัติหรือการดำเนินการของฟัซซี่ เพราะรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกมีความสำคัญต่อกระบวนการคิดและแก้ไขปัญหาโดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิก จะไม่สมมาตรกันหรือสมมาตรกันทุกประการก็ได้ ชนิดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ใช้งานทั่วไปมีดังนี้

ฟังก์ชันสามเหลี่ยม (Triangular Membership Function)

ฟังก์ชันสามเหลี่ยมมีทั้งหมด 3 พารามิเตอร์คือ $\{a, b, c\}$

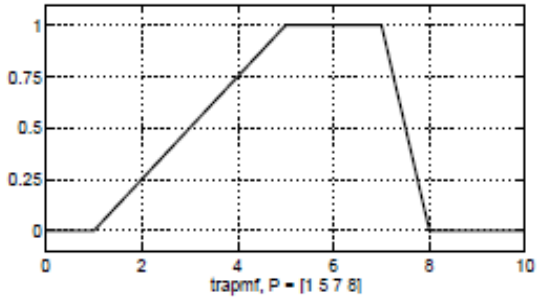


$$rimf\,(x{:}a,b,c)=\begin{cases}0 & x<a\\ (x-a)/(b-a) & a\le x<b\\ (c-x)/(c-b) & b\le x\le c\\ 0 & x>c\end{cases}$$

ภาพที่ 2.18 แสดงฟังก์ชันสามเหลี่ยม (Triangular Membership Function)

ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Membership Function)

ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมูมีทั้งหมด 4 พารามิเตอร์คือ $\{a, b, c, d\}$



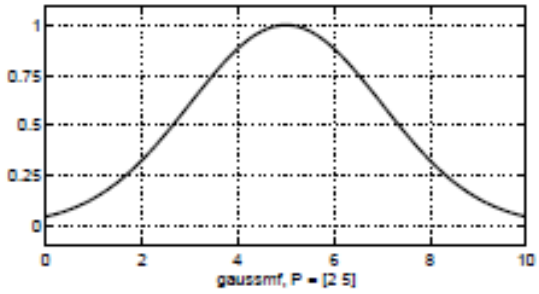
trapmf

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

ภาพที่ 2.19 แสดงฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Membership Function)

ฟังก์ชันเกาส์เซียน (Gaussian Membership Function)

ฟังก์ชันเกาส์เซียนมีทั้งหมด 2 พารามิเตอร์คือ $\{m, \sigma\}$ ซึ่ง m หมายถึงค่าเฉลี่ย และ σ หมายถึง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน



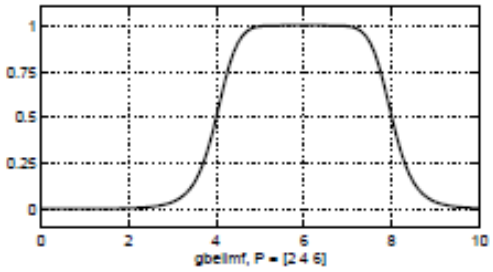
gaussmf

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

ภาพที่ 2.20 แสดงฟังก์ชันเกาส์เซียน (Gaussian Membership Function)

ฟังก์ชันระฆังคว่ำ (Bell-shaped Membership Function)

ฟังก์ชันรูประฆังคว่ำมีพารามิเตอร์ทั้งหมด 3 ค่าคือ $\{a, b, c\}$



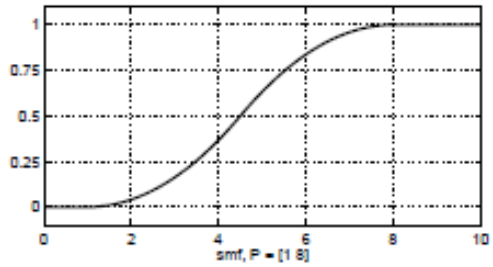
gbellmf

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

ภาพที่ 2.21 แสดงฟังก์ชันระฆังคว่ำ (Bell-shaped Membership Function)

ฟังก์ชันตัวเอส (Smooth Membership Function)

ฟังก์ชันรูปตัวเอสมีพารามิเตอร์ทั้งหมด 2 ค่าคือ $\{a, b\}$



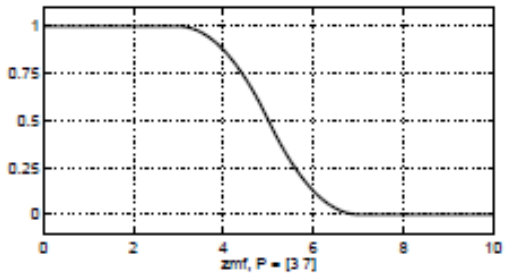
smf

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

ภาพที่ 2.22 แสดงฟังก์ชันตัวเอส (Smooth Membership Function)

ฟังก์ชันตัวแซด (Z-Membership Function)

ฟังก์ชันรูปตัวเอสมีพารามิเตอร์ทั้งหมด 2 ค่าคือ $\{a, b\}$



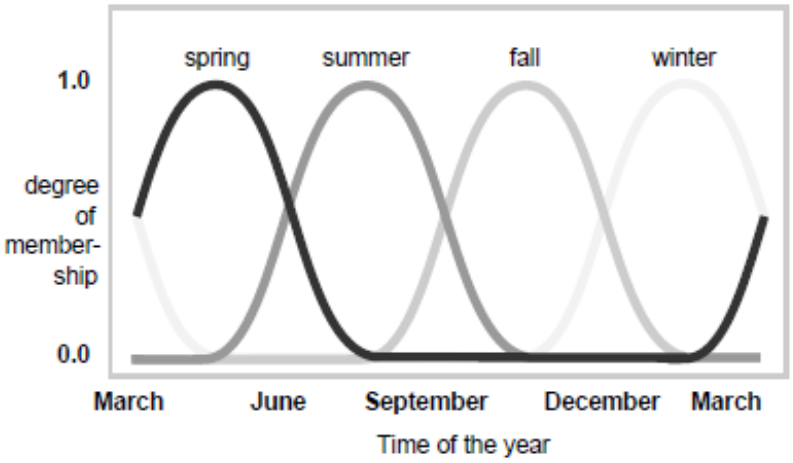
zmf

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

ภาพที่ 2.23 แสดงฟังก์ชันตัวแซด (Z-Membership Function)

การเลือกฟังก์ชันของความเป็นสมาชิกจะต้องเลือกตามความเหมาะสม ครอบคลุมของข้อมูลที่จะรับเข้ามาโดยสามารถที่ทับซ้อนกันเพื่อให้การดำเนินงานราบเรียบ ซึ่งมีความเป็นสมาชิกหลายค่าได้ และฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเปลี่ยนแปลงแก้ไขให้เหมาะตามความต้องการ

- ตัวแปรเชิงภาษา (Linguistic Variable) เซตแบบฟัซซี่ สามารถประยุกต์ใช้ในการอธิบายค่าของตัวแปรซึ่งเป็นแนวคิดที่สำคัญมากในตรรกะแบบฟัซซี่ ตัวแปรภาษาช่วยกำหนดค่าของสิ่ งที่จะอธิบายทั้งในรูปคุณภาพโดยใช้พจน์ภาษา (Linguistic Term) และในรูปปริมาณโดยใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Function) ซึ่งแสดงความของของเซตแบบฟัซซี่ พจน์ภาษาใช้สำหรับการแสดงแนวคิดและองค์ความรู้ในการสื่อสารของมนุษย์ ส่วนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกมีประโ ยชน์ในการจัดการกับอินพุตที่เป็นข้อมูลเชิงตัวเลขจาก ภาพที่ 2.24

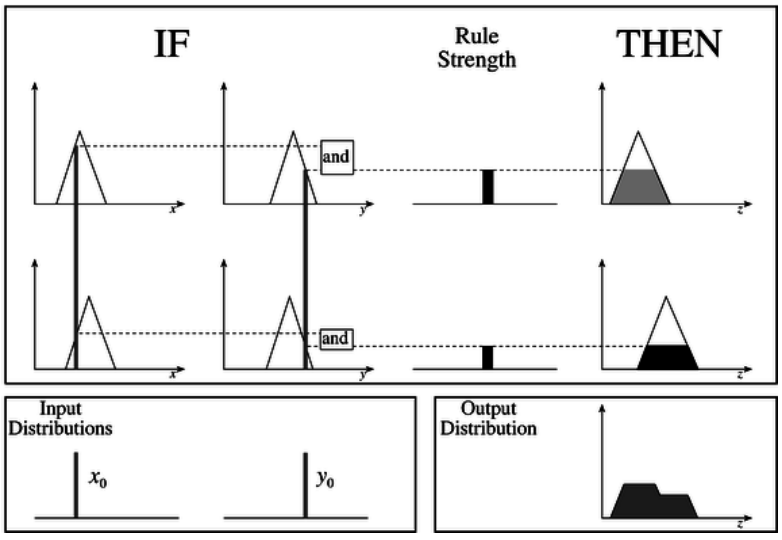


ภาพที่ 2.24 แสดงฤดูกาลในแต่ละเดือนซึ่งแสดงในเชิงตัวเลข

- กฎฟัซซี่ (Fuzzy Rules) มีจำนวนมากแต่ที่นิยมและการประยุกต์ใช้งานมากที่สุดคือ กฎฟัซซี่แบบ ถ้า-แล้ว (fuzzy if-then rule) เช่น

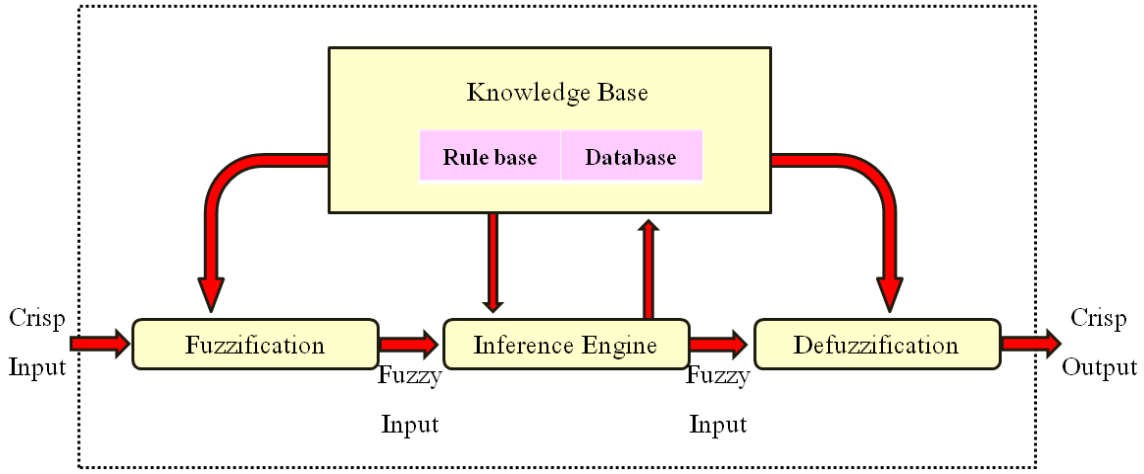
$$\textbf{if } x \textbf{ is } x_0 \textbf{ then } y \textbf{ is } y_0$$

ค่าภาษาที่กำหนดโดยชุดฟัซซี่ ในช่วงที่ x_0 และ y_0 มี x และ y ตามลำดับ โดย x_0 มีค่าเป็น x ข้อสรุปคือ y_0 จะมีค่าเป็น y ดัง ภาพที่ 2.25



ภาพที่ 2.25 แสดงกฎฟัซซี่

2.5.3 การทำงานของระบบฟัซซี่ โครงสร้างพื้นฐานของการประมวลผลแบบฟัซซี่ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 4 ส่วนดัง ภาพที่ 2.26



ภาพที่ 2.26 แสดงการทำงานของระบบฟัซซี่

- อินพุตแบบตัวแปรฟัซซี่ (Fuzzification) เป็นส่วนที่แปลงอินพุตทั่วไปเปลี่ยนเป็นอินพุตแบบตัวแปรฟัซซีหรือในรูปแบบฟัซซีเซตหรือเรียกว่าเป็นตัวแปรภาษา (Linguistic Variable)

- ฐานความรู้ (Knowledge Base) เป็นส่วนที่จัดเก็บรวบรวมข้อมูลในการควบคุมประกอบ 2 ส่วนคือ ฐานกฎ (Rule base) และฐานข้อมูล (Database)

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

- ฐานข้อมูล (Database) เป็นการจัดเตรียมส่วนที่จำเป็นเพื่อที่จะใช้ในการกำหนดกฎการควบคุม และการจัดการข้อมูลของตรรกศาสตร์ฟัซซี่

- การอนุมานหรือการตีความ (Inference Engine) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ตรวจสอบข้อเท็จจริงและกฎเพื่อใช้ในการตีความหาเหตุผล เหมือนกลไกสำหรับควบคุมการใช้ความรู้ในการแก้ไขปัญหา รวมทั้งการกำหนดวิธีการของการตีความเพื่อหาคำตอบ

- ส่วนที่แปลงเอาต์พุตให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม (Defuzzification) เป็นการทำการแปลงข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบฟัซซี่ให้เป็นค่าที่สรุปผลหรือค่าการควบคุมระบบ

2.5.4 การประมวลผลของระบบฟัซซี่ ลอจิก มีขั้นตอนการประมวลผลแบบฟัซซี่ ลอจิกอยู่ 5 ขั้นตอนหลัก

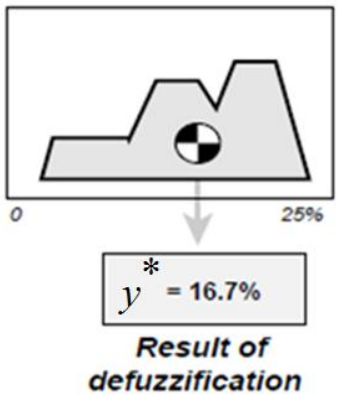
- เป็นการแปลงการอินพุตแบบทวินัยเปลี่ยนเป็นการอินพุตแบบตัวแปรฟัซซี่ โดยจะสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิก โดยไม่จำเป็นต้องมีลักษณะเดียวกัน ขึ้นกับคุณลักษณะของแต่ละการอินพุต (Input) และความสำคัญต่อการเอาต์พุต (Output) ที่น่าสนใจโดยฟังก์ชันจะมีลักษณะเป็นการกำหนดภาษาสามัญ เพื่อให้เป็นฟัซซี่อินพุต

- เป็นการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างการอินพุตทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับเอาต์พุตที่อาศัยหลักการของการหาเหตุและผล อาจจะสร้างการเก็บข้อมูล การคาดการณ์จากการตัดสินใจของมนุษย์ หรือค่าจากการทดลอง โดยเขียนเป็นกฎการควบคุมระบบ ซึ่งจะมีลักษณะอยู่ในรูปแบบ ถ้า (If), แล้ว (Then), และ (And), หรือ (Or) ซึ่งเป็นภาษาสามัญ นำกฎทั้งหมดมาประมวลผลรวมกัน เพื่อการหาตัดสินใจที่เหมาะสม

- เป็นการหาฟัซซี่เอาต์พุตโดยการนำกฎการควบคุมที่สร้างขึ้นใน ขั้นตอนที่ 2 มาประมวลผลกับ ฟัซซี่อินพุต โดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ เพื่อนำค่าที่ได้ประมวลผล ด้วยวิธีการทำเป็นค่าคลุมเครือ (Fuzzification) วิธีการที่นิยมใช้ในการตีความหาเหตุผลเลือกใช้ Max-Min Method และ Max-Dot Method

- การรวมค่าฟัซซี่เอาต์พุตจากกฎทุกข้อ (Aggregation) เป็นการรวมค่าจากข้อตามของกฎทุกข้อเพื่อเป็นฟัซซี่เซตของระบบทั้งหมดด้วยวิธี Fuzzy OR

- การทำค่าฟัซซี่เป็นค่าปกติ (Defuzzification) เป็นการทำค่าฟัซซี่เอาต์พุตที่รวมจากกฎทุก ข้อเป็น ค่าปกติที่ใช้ในงานจริง เช่น งานในระบบควบคุม เป็นต้น ด้วยวิธีการหา จุดศูนย์ถ่วง (Central of Gravity: COG) เป็นวิธีการหาค่าเฉลี่ยของผลที่ได้จากกา รตีความหาเหตุที่ นิยมใช้ในปัจจุบัน ค่าที่ได้จะคำนวณจุดศูนย์ถ่วงโดยรวมจะหาได้จากใน ภาพที่ 2.27

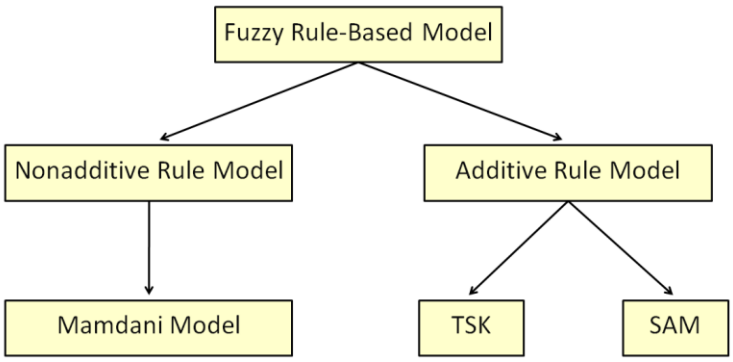


ภาพที่ 2.27 แสดงค่าจุดศูนย์ถ่วง

2.5.5 รูปแบบพื้นฐานของระบบกฎฟัซซี่ การประมาณค่าฟังก์ชัน (Function Approximation) ระบบกฎฟัซซี่ที่ใช้มี 3 ชนิดใหญ่ๆ ได้แก่

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

Additive Model (SAM) รูปแบบ Mamdani รวมผลการอนุมาน (Inference) ของกฎ โดยวิธีการซ้อนทับ (Superimposition) จากกฎหลายๆ ข้อ ซึ่งไม่เป็นแบบบวกกัน จึงเรียกระบบแบบนี้ว่าเป็น Nonadditive Rule Model แต่สำหรับ TSK และ SAM มีการอนุนามแบบรวมค่าน้ำหนัก (Weighted sum) จากหลาย ๆ กฎ เพื่อรวมเป็นข้อสรุปสุดท้าย จึงเรียกระบบแบบนี้ว่า Additive Rule Model การจัดกลุ่มของระบบกฎฟัซซี่แสดงใน ภาพที่ 2.28



ภาพที่ 2.28 แสดงรูปแบบพื้นฐานของระบบกฎฟัซซี่

ในโครงงานศึกษาและประเมินอายุของหม้อแปลงชนิดน้ำมันนี้ จะใช้รูปแบบพื้นฐานของระบบ กฎฟัซซี่แบบ Mamdani ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

2.5.6 ระบบกฎฟัซซี่ของแมมดานิ (Mamdani) ระบบกฎฟัซซี่แบบ Mamdani เป็นระบบที่มีความนิยมใช้มากที่สุดระบบหนึ่งในทางปฏิบัติเป็นระบบที่ใช้ตัวแปรภาษาทั้งในข้อตั้งและข้อตาม เพื่อจัดเทียบฟังก์ชันจากเป็น

$$\text{กฎที่ 1 : } IF(x_1 isA_{11}) AND ... AND (x_n isA_{1n}) THEN y isC_1$$

$$\text{กฎที่ 2 : } IF(x_1 isA_{21}) AND ... AND (x_n isA_{2n}) THEN y isC_2$$

$$\text{กฎที่ L : } IF(x_1 isA_{n1}) AND ... AND (x_n isA_{nn}) THEN y isC_n$$

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 เป็นพจน์ภาษาของข้อตามหรือ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อตาม (consequent membership function) ของกฎที่ i

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

$$A_i^s = A_{i1} \bigcap A_{i2} \bigcap ... \bigcap A_{in}$$

แสดงในรูปฟังก์ชันความเป็นสมาชิกได้เป็น

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

ถ้าหากมีอินพุทเข้ามาในรูป

$$(x_1 = x_1'), (x_2 = x_2'), ..., (x_n = x_n')$$

จะได้ค่าฟัซซี่ในส่วนของข้อตั้งเป็น

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

ค่าเอาต์พุตของกฎแต่ละข้อของระบบฟัซซี่แบบ Mamdani ที่เป็นค่าฟัซซี่สามารถหาได้จากสมการ

$$\mu_c(y) = \alpha_i \wedge \mu_c(y)$$

ค่าเอาต์พุตของระบบเป็นผลรวมจากเอาต์พุตจากกฎแต่ละข้อโดยใช้สมการ

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

ฟัซซี่เอาต์พุตสามารถแปลงเป็นค่าปกติได้โดยวิธี Defuzzification แบบเฉลี่ยน้ำหนัก

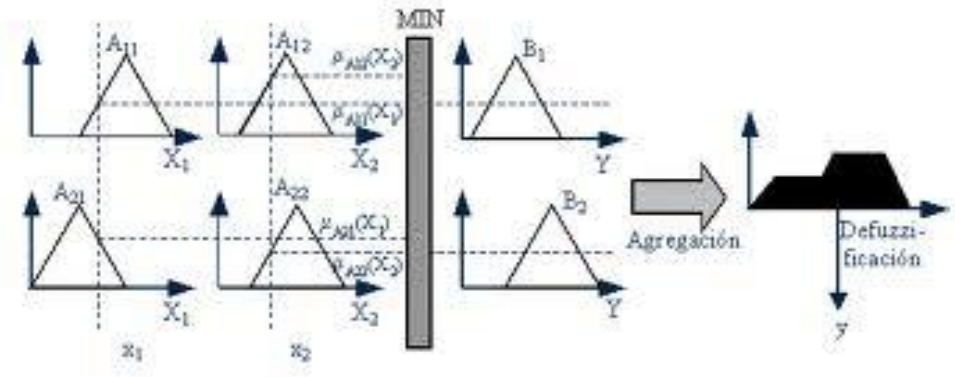
$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^{n} \mu_c(y_i) \times y_i}{\sum_{i=1}^{n} \mu_c(y_i)}$$

เมื่อ y^* เป็นค่า Centriod ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกผลลัพธ์

2.5.7 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

ผลรวมเอาต์พุตหาได้ โดยการใช้วิธีการจัดองค์ประกอบแบบค่าสูงสุด-ต่ำสุด (max-min Composition) ตามภาพที่ 2.25



ภาพที่ 2.29 แสดงการตีความแบบ Mamdani

2.5.8 การหาผลลัพธ์ในรูปแบบ Mamdani การหาผลสรุปฟัซซี่ ในรูปแบบ Mamdani เป็นการใช้ตัวดำเนินการค่าต่ำสุด (minimum Operator) สำหรับการเชื่อมประโยคแบบ “and” และใช้ตัวดำเนินการค่าสูงสุด (maximum Operator) สำหรับการเชื่อมประโยคแบบ “or” ระดับค่าฟัซซี่ของกฎแต่ละข้อในส่วนข้อตั้ง หาได้โดยการคำนวณจากสมการ

$$\alpha_1 = A_1(x_0) \wedge B_1(y_0)$$

$$\alpha_2 = A_2(x_0) \wedge B_2(y_0)$$

เอาต์พุตของกฎแต่ละข้อ สามารถคำนวณได้จาก

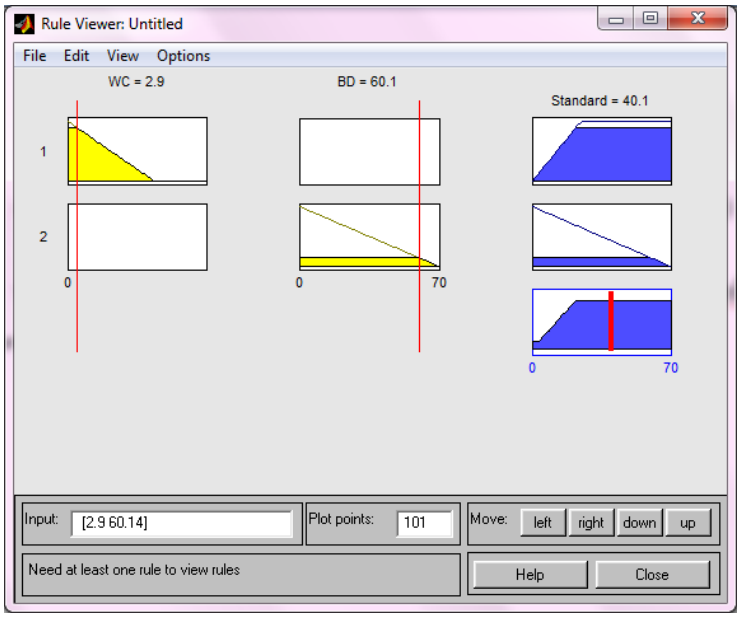
$$C_1''(W) = (\alpha_1 \wedge C_1(W))$$

$$C_2''(W) = (\alpha_2 \wedge C_2(W))$$

ผลรวมของเอาต์พุตฟัซซี่ทั้งหมดหาได้จากการยูเนียนผลลัพธ์จากแต่ละกฎ

$$C(W) = C_1''(W) \vee C_2''(W) = (\alpha_1 \wedge C_1(W)) \vee (\alpha_2 \wedge C_2(W))$$

สุดท้าย หากต้องการผลเอาต์พุตที่เป็นค่าทั่วไป สามารถหาโดยวิธีการแปลงค่าฟัซซี่เป็นค่าทั่วไป (Defuzzification Method) จาก ภาพที่ 2.30



ภาพที่ 2.30 แสดงวิธีการแปลงค่าฟัซซี่เป็นค่าทั่วไป

2.5.9 การประยุกต์ใช้งานฟัซซี่ ลอจิก ลอจิกแบบคลุมเครือที่ทำงานอยู่บนพื้นฐานด้านคอมพิวเตอร์ สามารถตอบสนองต่อสิ่งที่ ไม่ชัดเจนไม่แน่นอนซึ่งมีความสามารถในการจัดการเกี่ยวกับข้อมูลข้างต้น เพื่อให้ผลลัพธ์กับเราโดยผลลัพธ์นั้นมีความยืดหยุ่นสูงใกล้เคียงกับความรู้สึกนึกคิดในการตัดสินใจของมนุษย์ยิ่งไปก ว่านั้นฟัซซี่ลอจิกสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดในด้านต่างๆ ทั้งด้านการควบคุมแม้กระทั่งนำไปช่วยในงานด้านงานวิจัยจะเห็นได้จากตัวอย่างต่อไปนี้

- งานการประมาณค่าฟังก์ชันหรือการประมาณความสัมพันธ์ที่ไม่ชัดเจน (มี inputs และ outputs แต่ไม่ทราบว่า inputs กับ outputs มีความสัมพันธ์กันอย่างไร)
- งานทำนาย ช่วยในการพยากรณ์อากาศ พยากรณ์หุ้น
- การประยุกต์ใช้ระบบฟัซซี่ควบคุมกระบวนการทางเคมีโดยวิธีพยากรณ์ แบบจำลอง (Model Predictive Control)
- งานด้านการแพทย์ ช่วยวิเคราะห์การแพร่กระจายของเชื้อไวรัส วิเคราะห์สุขภาพของผู้ป่วย
- งานด้านการทหาร ช่วยวิเคราะห์สร้างและพัฒนายุทโธปกรณ์ให้มีสมรรถภาพดีขึ้นโดยใช้งบประมาณน้อยลงหรือเท่าเดิม
- งานด้านธุรกิจ ช่วยวิเคราะห์ต่อความเสี่ยงในการลงทุนในตลาดใหม่
- งานด้านอุตสาหกรรม ใช้เป็นส่วนควบคุมเครื่องจักรเพื่อลดความผิดพลาดในการทำงาน

- ใช้เป็นตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกสำหรับการควบคุมการทำงานของหุ้นยนต์
- พัฒนาการควบคุมความเร็วมอเตอร์โดยใช้ฟัซซี่ ลอจิก เพื่อประยุกต์ใช้กับระบบการเสริมกำลังของเครื่องจักรกลให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

2.5.10 สรุปหลักการเบื้องต้น ฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic) ได้ช่วยอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดปรากฏการต่างๆโดยอาศัยฟังก์ชันฟัซซี่ เซต (Fuzzy Set) เข้ามีช่วยวิเคราะห์อินพุต -เอาต์พุตที่มีความหลากหลายของโครงงานศึกษาและประเมินอายุของหม้อแปลงชนิดน้ำมันซึ่งใช้หลักเหตุผลที่คล้ายการเลียนแบบวิธีความคิดที่ซับซ้อนของมนุษย์ ฟัซซี่ ลอจิก (Fuzzy Logic) มีลักษณะที่พิเศษกว่าตรรกะแบบบูลีน (Boolean Logic) ในส่วนของความจริงโดยค่าความจริงจะอยู่ ในช่วงระหว่างค่าจริงกับเท็จซึ่งแนวคิดพื้นฐานของฟัซซี่ ลอจิก (Fuzzy Logic) ประกอบไปด้วย เซตแบบดั้งเดิม (Classical Set), ฟัซซี่เซต (Fuzzy Set) , ฟัซซี่เซตฟังก์ชั่นความเป็นสมาชิก (Fuzzy Set Membership Function), ตัวแปรภาษา (Linguistic Variable), กฎฟัซซี่ (Fuzzy Rules) เมื่อนำค่าที่ต้องการใช้ฟัซซี่ ลอจิกช่วยในการวิเคราะห์จะต้องเปลี่ยนค่าอินพุต- เอาต์พุตทั่วไปเป็นค่า ตัวแปรฟัซซี่ (Fuzzification) และนำค่ามาดำเนินการด้วย รูปแบบ Mamdani เป็นการใช้ตัวดำเนินการค่าต่ำสุด (minimum Operator) สำหรับการเชื่อมประโยคแบบ “and” และใช้ตัวดำเนินการค่าสูงสุด (maximum Operator) สำหรับการเชื่อมประโยคแบบ “or” ภายใต้กฎ IF – THEN จากนั้นแปลงเอาต์พุตให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม (Defuzzification) โดยอาศัยวิธีการหาจุดศูนย์ถ่วง (Central of Gravity: COG) ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าเฉลี่ยของ ผลที่ได้มาจากการตีความเสร็จสมบูรณ์เรียบร้อยแล้วมาหาข้อสรุปสุดท้ายโดยเป็นวิธีที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน