

บทที่ 2

ทฤษฎีสำคัญ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหา และทฤษฎีสำคัญที่เกี่ยวข้องกับโครงการปริญญาโทในครั้งนี้ ทางผู้จัดทำได้ศึกษา และนำมา รวบรวมไว้เพื่อเป็นประโยชน์ในการศึกษาของผู้ที่มีความสนใจในโครงการ ปริญญาโทฉบับนี้ ดังนี้

- 2.1 หม้อแปลง
- 2.2 สายไฟฟ้า
- 2.3 เซอร์คิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำ
- 2.4 วงจรสายป้อนมอเตอร์
- 2.5 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ
- 2.6 อินเวอร์เตอร์
- 2.7 ระบบไฮดรอลิก
- 2.8 โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์
- 2.9 เซ็นเซอร์วัดอัตราการไหล
- 2.10 การควบคุมแบบพอร์พอร์ตชันนัล
- 2.11 การคำนวณค่าเสด (Head) ในระบบ และการประยุกต์ใช้กับโครงการปริญญาโท
- 2.12 การหาปริมาณทรายจากค่าเสดในโครงการปริญญาโท
- 2.13 การคำนวณค่าความดันไฮดรอลิกในกระบอกสูบกันหราม (Ram)

2.1 หม้อแปลง (Transformer)

หม้อแปลงที่ใช้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า เรียกว่า หม้อแปลงจำหน่าย (Distribution Transformers) ซึ่งจะแปลง แรงดันไฟฟ้าจากระบบแรงดันปานกลาง ไปเป็นระบบแรงดันต่ำ โดยทั่วไปหม้อแปลงชนิดนี้จะมีพิกัดถึง 2000 กิโลโวลต์-แอมป์ แต่ในบางกรณีอาจมีพิกัดสูงถึง 3150 กิโลโวลต์-แอมป์

2.1.1 ชนิดของหม้อแปลง หม้อแปลงตามปกติเรียกชื่อตามวัสดุที่ใช้เป็นแบบฉนวน และระบายความร้อน หม้อแปลงจำหน่ายที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน มี 2 แบบ คือ

- หม้อแปลงแบบที่ใช้ของเหลว
- หม้อแปลงแห้ง

2.1.1.1 หม้อแปลงแบบที่ใช้ของเหลว (Liquid – immersed Transformers) ของเหลวที่นิยมใช้เป็น ฉนวน และตัวระบายความร้อน คือ น้ำมันหม้อแปลง และของเหลวที่ติดไฟยาก

- หม้อแปลงน้ำมัน (Oil - type Transformers) เป็นหม้อแปลงที่ใช้ น้ำมัน หม้อแปลงเป็นฉนวน และเป็นตัวระบายความร้อนด้วย หม้อแปลงน้ำมันนิยมใช้กันมากกับงานภายนอกอาคาร เนื่องจากมีราคาถูก แต่ถ้านำมาใช้ภายในอาคารจะต้องมีการสร้างห้องพิเศษซึ่งสามารถป้องกันไฟได้ เนื่องจากน้ำมันสามารถติดไฟได้ โดยมีจุดติดไฟที่ 165 องศาเซลเซียส

- หม้อแปลงแบบใช้ของเหลวติดไฟยาก (Less- Flammable Liquid - insulated Transformers) เป็นหม้อแปลงชนิดที่ใช้ของเหลวติดไฟยากเป็นฉนวน และระบายความร้อน โดยทั่วไปนิยมใช้สารซิลิโคน ซึ่งมีจุดติดไฟที่ 343 องศาเซลเซียส ไม่เป็นพิษ และไม่มีสารเป็นอันตรายต่อคน และสิ่งแวดล้อม หม้อแปลงแบบใช้ของเหลวติดไฟยากอนุญาตให้ติดตั้งภายในอาคารได้

2.1.1.2 หม้อแปลงแห้ง (Dry - type Transformers) หม้อแปลงแห้งเป็นหม้อแปลงที่ใช้ฉนวนเป็นของแข็ง โดยทั่วไปนิยมใช้สารเรซินอัดระหว่างขดลวดของหม้อแปลงจึงเรียกว่า หม้อแปลงหล่อเรซิน (Cast Resin Transformers) สารเรซินมีจุดติดไฟที่ 350 องศาเซลเซียส มีความแข็งแรงทนทาน หม้อแปลงประเภทนี้ นิยมติดตั้งภายในอาคาร

ในปัจจุบัน หม้อแปลงที่นิยมใช้กันมาก คือ หม้อแปลงน้ำมัน และหม้อแปลงหล่อเรซิน หม้อแปลงน้ำมันเป็นหม้อแปลงมีการใช้กันมากที่สุด เนื่องจากใช้งานได้ดี และมีราคาถูก เหมาะสำหรับการติดตั้งนอกอาคาร ปัจจุบันได้มีการทำหม้อแปลงที่มีตัวถังปิดผนึกขึ้น หม้อแปลงแบบนี้ไม่มีถังพัก และไม่ต้องมีซิลิกาเจล (Silica Gel) จึงสามารถป้องกันความชื้นได้อย่างสมบูรณ์ หม้อแปลงแบบนี้จึงไม่ต้องการบำรุงรักษา และกำลังได้รับความนิยมมากขึ้น

หม้อแปลงปิดผนึกมีปัญหาที่ต้องแก้ คือ การขยายตัวของน้ำมันขณะจ่ายโหลด หรือเกิดการลัดวงจร ดังนั้นจึงมีหม้อแปลงปิดผนึกอย่างน้อย 2 แบบ ที่จะแก้ปัญหานี้ คือ

- หม้อแปลงปิดผนึกแบบใช้ก๊าซในโตรเจน หม้อแปลงแบบนี้จะอัดก๊าซในโตรเจนเข้าเหนือน้ำมันเพื่อให้มีที่ว่างสำหรับการขยายตัวของน้ำมัน

- หม้อแปลงปิดผนึกแบบผนังเป็นลอนคลื่น ขณะเดียวกันตัวถังสามารถยืดหยุ่นได้ เพื่อรองรับการขยายตัวของน้ำมัน



ภาพที่ 2.1 ส่วนประกอบหม้อแปลงหล่อเรซิน

การป้องกันความร้อน หม้อแปลงหล่อเรซิน จะต้องมีระบบป้องกันความร้อนเกินสำหรับขดลวด ระบบป้องกันความร้อนประกอบด้วย ตัวรับสัญญาณ และรีเลย์ความร้อน ตัวรับสัญญาณ (Sensor) ตัวรับสัญญาณ ทำด้วย พีทีซี (Positive Temperature Coefficient: PTC) ซึ่งมันจะเปลี่ยนค่าความต้านทานตามอุณหภูมิตัวรับ สัญญาณจะติดตั้งใกล้ขดลวดแรงดันต่ำ ที่จุดที่จะเกิดความร้อนสูงสุดตัวรับสัญญาณอาจมี 2 หรือ 3 ตัวต่อเฟส โดยแต่ละตัวมีหน้าที่ดังนี้

ตัวรับสัญญาณตัวที่หนึ่ง	สำหรับ	พัดลม (Fan)
ตัวรับสัญญาณตัวที่สอง	สำหรับ	เตือน (Alarm)
ตัวรับสัญญาณตัวที่สาม	สำหรับ	ตัดวงจร (Trip)
ตัวรับสัญญาณจะต่ออนุกรมกันแล้วต่อเข้ากับวงจรควบคุมของรีเลย์ความร้อน		

รีเลย์ความร้อน (Temperature Relay) รีเลย์ความร้อนจะรับสัญญาณจากตัวรับสัญญาณ เมื่อ อุณหภูมิของหม้อแปลงมีค่าสูงกว่าที่ปรับตั้งไว้ มันจะสั่งให้รีเลย์ทำงาน ซึ่งจะทำให้พัดลมทำงาน เกิดการเตือน หรือตัดวงจร

อุณหภูมิที่ปรับตั้งของตัวรับสัญญาณ มีดังนี้

พัลลมทำงาน	อุณหภูมิ	90 – 110	องศาเซลเซียส
เตือน	อุณหภูมิ	130 – 140	องศาเซลเซียส
ตัดวงจร	อุณหภูมิ	150	องศาเซลเซียส

เครื่องหล่อหุ้ม เนื่องจากส่วนที่เป็น เรซิน ของหม้อแปลงหล่อเรซิน จะแตกต้องไม่ได้เพราะจะทำให้เกิดไฟดูดซึ่งเป็นผลจากแรงดันเหนียวๆ ดังนั้นหม้อแปลงชนิดนี้จึงสมควรติดตั้งไว้ในเครื่องหล่อหุ้ม

สำหรับเครื่องหล่อหุ้มที่ใช้กับอาคารชุดนั้น มีมาตรฐานกำหนดไว้ว่า ต้องมีค่าระดับการป้องกันอย่างน้อย IP21 (หมายถึง ของแข็งที่มีขนาดตั้งแต่ 12 มิลลิเมตร ขึ้นไป ไม่สามารถเข้าได้ และมีการป้องกันน้ำหยดในแนวดิ่ง) และหากต้องการความปลอดภัยมากขึ้นสามารถใช้ IP สูงขึ้นเป็น IP31 (หมายถึง ของแข็งขนาดตั้งแต่ 2.5 มิลลิเมตร ขึ้นไปไม่สามารถเข้าได้ และมีการป้องกันน้ำหยดในแนวดิ่ง)

สำหรับเครื่องหล่อหุ้มที่ใช้ภายนอกอาคารนั้น ต้องมีค่าป้องกันอย่างน้อย IP33 (หมายถึง ของแข็งที่มีขนาดตั้งแต่ 2.5 มิลลิเมตร ขึ้นไป ไม่สามารถเข้าได้ และมีการป้องกันน้ำฝน)

2.2 สายไฟฟ้า (Wire and Cable)

สายไฟฟ้ามีหน้าที่สำหรับนำพลังงานไฟฟ้า จากแหล่งจ่ายไฟไปยังบริเวณที่ไฟฟ้าต่างๆ ในปัจจุบันได้มีผู้ผลิตสายไฟฟ้าขึ้นมามากมายหลายชนิด ตามความต้องการสำหรับการติดตั้งรูปแบบต่างๆ ดังนั้นการเลือกใช้สายไฟฟ้าเพื่อให้มีความเหมาะสมปลอดภัย ประหยัด และเชื่อถือได้ จะต้องพิจารณาถึงปัจจัยหลายประการด้วยกัน ได้แก่ ความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่ติดตั้ง ความสามารถในการนำกระแสของตัวนำ ขนาดแรงดันตกที่เกิดขึ้น ความสามารถในการทนต่อความร้อนที่เกิดขึ้นทั้งในขณะใช้งานปกติ และขณะเกิดการลัดวงจร ในส่วนของสายไฟฟ้าจะกล่าวถึง 3 ส่วนหลักๆ คือ

2.2.1 ส่วนประกอบสายไฟฟ้า สายไฟฟ้า ประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วนคือ ตัวนำ (Conductor) และฉนวน (Insulator)

2.2.1.1 ตัวนำ ตัวนำของสายไฟฟ้าทำมาจากโลหะที่มีความนำไฟฟ้าสูง อาจเป็นตัวนำเดี่ยว หรือตัวนำตีเกลียว ที่นิยมได้แก่ทองแดง และอะลูมิเนียม ซึ่งมีข้อดี-ข้อเสีย ดังนี้

- ทองแดง มีความนำไฟฟ้าสูงมาก แข็งแรง เหนียว ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี ข้อเสียคือน้ำหนักมาก ราคาแพง จึงไม่เหมาะกับงานแรงดันสูง แต่เหมาะกับงานทั่วไปโดยเฉพาะงานในอาคาร

- อะลูมิเนียม มีความนำไฟฟ้ารองจากทองแดง แต่เมื่อเทียบประสิทธิภาพกระแสเท่ากันแล้ว อะลูมิเนียมจะเบาและราคาถูกกว่า จึงเหมาะกับงานนอกอาคารและแรงดันสูง อะลูมิเนียมถ้าทิ้งไว้ในอากาศ จะเกิดออกไซด์เป็นฉนวนฟิล์มบางๆ ป้องกันการสึกกร่อน แต่ทำให้การเชื่อมต่อทำได้ยาก

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของทองแดง และอะลูมิเนียม

คุณสมบัติ	ทองแดง	อะลูมิเนียม
ความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ (ทองแดง = 100)	100	61
สภาพความต้านทานไฟฟ้าที่ 20 องศาเซลเซียส ($\Omega m \times 10^{-8}$)	1.724	2.803
สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (ต่อ องศาเซลเซียส $\times 10^{-6}$)	17	23
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	1083	659
ความนำความร้อน (W/cm องศาเซลเซียส)	3.8	2.4
ความหนาแน่นที่ (20 องศาเซลเซียส)	8.89	2.7

2.2.1.2 ฉนวน ทำหน้าที่ห่อหุ้มตัวนำ เพื่อป้องกันการสัมผัสโดยตรง ระหว่างตัวนำ หรือตัวนำ กับ ส่วนที่ต่อลงดิน ในระหว่างที่ตัวนำนำกระแสไฟฟ้า จะเกิดพลังงานสูญเสีย ในรูปความร้อน ซึ่งจะถ่ายเทไปยังเนื้อ ฉนวน ความสามารถในการทนต่อความร้อน ของฉนวน จะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการทนความร้อนของ สายไฟฟ้านั้นเอง การเลือกใช้ชนิดของฉนวน จะขึ้นกับอุณหภูมิใช้งาน แรงดันของระบบ และสภาพแวดล้อมใน การติดตั้ง วัสดุที่นิยมใช้เป็น ฉนวนมากที่สุดขณะนี้คือ โพลีไวนิล คลอไรด์ (Polyvinyl Chloride:PVC) และ ครอสลิงค์ โพลีไทลีน (Cross Linked Polyethylene:XLPE)

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของฉนวน พีวีซี และ เอ็กซ์แอลพีอี

คุณสมบัติ	พีวีซี	เอ็กซ์แอลพีอี
พิกัดอุณหภูมิสูงสุดขณะใช้ (องศาเซลเซียส)	70	90
พิกัดอุณหภูมิสูงสุดขณะลัดวงจร (องศาเซลเซียส)	120	250
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	6	2.4
ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	1.4	0.92
ความนำความร้อน (W/cm องศาเซลเซียส)	3.5	8
ความทนทานต่อแรงดึง (กิโลกรัม/ตารางมิลลิเมตร)	2.5	3

จะเห็นว่าฉนวน เอ็กซ์แอลพีอี มีความแข็งแรง ทนต่อความร้อน และถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าฉนวน พีวีซี ในปัจจุบันจึงมีการ ใช้ฉนวน เอ็กซ์แอลพีอี เพิ่มมากขึ้น

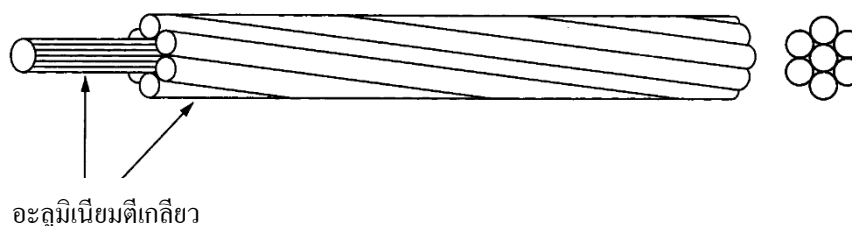
2.2.2 ประเภทของสายไฟฟ้า

- สายไฟฟ้าแรงดันสูง
- สายไฟฟ้าแรงดันต่ำ

2.2.2.1 สายไฟฟ้าแรงดันสูง เป็นตัวนำดีเกลียวมีขนาดใหญ่ ในลักษณะตัวนำดีเกลียว สายไฟฟ้า แรงดันสูงสามารถ แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ สายเปลือย และสายหุ้มฉนวน

- สายเปลือย สายชนิดนี้ใช้กับแรงดันต่ำจะไม่ปลอดภัย จึงนิยมใช้กับแรงดันสูงและ มักทำ จากสายอะลูมิเนียมเพราะน้ำหนักเบาและราคาถูก แต่สายอะลูมิเนียมล้วนสามารถรับแรงดึงได้ต่ำ จึงได้พัฒนาให้ สามารถรับแรงดึงให้สูงขึ้น โดยเสริมแกนเหล็กหรือวัสดุอื่น สายเปลือยที่นิยมใช้ปัจจุบันได้แก่

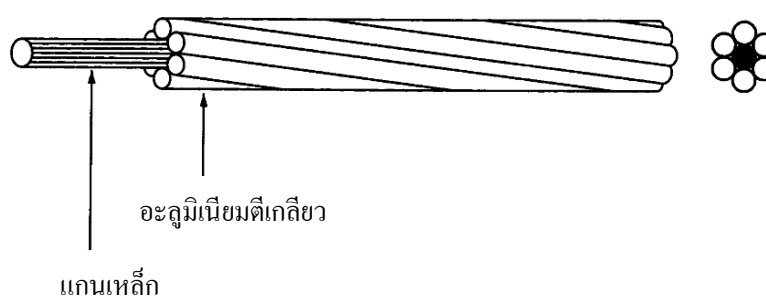
ก. สายอะลูมิเนียมตีเกลียวเปลือย (All Aluminum Conductor: AAC) เป็นตัวนำอะลูมิเนียมล้วนตีเกลียวเป็นชั้นๆ รับแรงดึงได้ต่ำ จึงไม่สามารถหึงสายให้มีระยะห่างมากๆ ได้ ปกติความยาวช่วงเสาต้องไม่เกิน 50 เมตร ยกเว้นสายที่มีขนาด 95 ตารางมิลลิเมตร ขึ้นไปสามารถมีระยะช่วงเสามากถึง 100 เมตร มาตรฐานสำหรับสายไฟฟ้าอะลูมิเนียมตีเกลียวเปลือย คือ มอก. 85-2522 ลักษณะของสายชนิดนี้จะแสดงใน ภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 สายอะลูมิเนียมตีเกลียวเปลือย

ข. สายอะลูมิเนียมผสม (All Aluminum Alloy Conductor: AAAC) สายชนิดนี้มีส่วนผสมของอะลูมิเนียม แมกนีเซียม และซิลิกอน ซึ่งมีความเหนียว และรับแรงดึงได้สูงกว่าสายอะลูมิเนียมล้วน จึงสามารถหึงสายได้ห่างมากขึ้น นิยมใช้บริเวณชายทะเล เพราะสามารถทนการกัดกร่อนของไอเกลือได้ดี

ค. สายอะลูมิเนียมแกนเหล็ก (Aluminum Conductor Steel Reinforced: ACSR) เป็นสายอะลูมิเนียมตีเกลียว และมีสายเหล็กอยู่ตรงกลาง เพื่อให้สามารถรับแรงดึงได้สูงขึ้น ทำให้ขยายระยะห่างช่วงเสาได้มากขึ้น แต่จะไม่ใช้สายชนิดนี้บริเวณชายทะเล เพราะจะเกิดการกัดกร่อนจากไอเกลือ ทำให้อายุการใช้งานสั้นลง มาตรฐานสำหรับสายไฟฟ้าอะลูมิเนียมแกนเหล็ก คือ มอก. 86-2522 ลักษณะของสายชนิดนี้จะแสดงอยู่ใน ภาพที่ 2.3

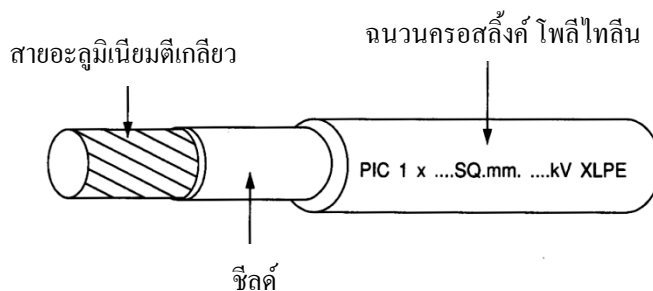


ภาพที่ 2.3 สายอะลูมิเนียมแกนเหล็ก

สายเปลือยทั้ง 3 ชนิด มีใช้ทั่วไปในระบบส่งของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค สำหรับสายเอชซี นั้นยังมิใช่ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวงด้วย แต่ในปัจจุบัน ทางกรมไฟฟ้าฯ ได้มีนโยบายที่จะเลิกใช้สายชนิดนี้แล้ว เนื่องจากการลัดวงจรจากสัตว์ และกิ่งไม้บ่อยครั้ง และได้หันมาใช้สายหุ้มฉนวนประเภท พีไอซี และ เอสเอซี ที่จะกล่าวถึงต่อไป

- สายหุ้มฉนวน ในการเดินสายแรงสูงผ่านที่อยู่อาศัย เพื่อความปลอดภัยต้องใช้สายไฟฟ้าแรงดันสูงที่มีฉนวนหุ้ม และการใช้สายไฟฟ้าหุ้มฉนวนยังช่วยลดการเกิดลัดวงจรจากสัตว์ หรือกิ่งไม้แตะถูกสายไฟฟ้าอีกด้วย ซึ่งทำให้มีความเชื่อถือสูงขึ้น สายไฟฟ้าแรงดันสูงที่นิยมใช้มีดังนี้

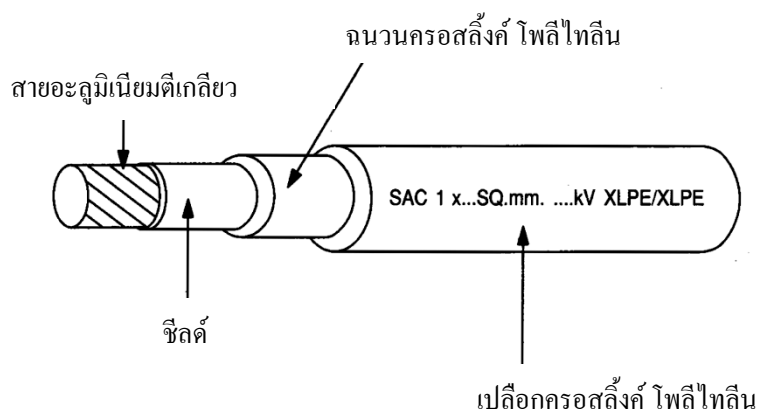
ก. สายชนิดฉนวนบางส่วน (Partial Insulated Cable: PIC) โครงสร้างของสาย พิไอซี นี้ประกอบด้วย ตัวนำอะลูมิเนียมตีเกลียว หุ้มด้วยฉนวนครอสลิงค์ โพลีไทลีน หรือโพลีไทลีน แล้วแต่ความเหมาะสม 1 ชั้น ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 สายพิไอซี

ถึงแม้ว่าสายชนิดนี้มีฉนวนเอ็กซ์แอลพีอี หุ้ม แต่ก็ไม่สามารถแตะต้องสายโดยตรงได้ เพราะฉนวนบางมาก ซึ่งจะช่วยลดการเกิดลัดวงจร ของสายเปลี่ยนเท่านั้น การไฟฟ้าฯ ได้นำสายชนิดนี้ใช้เดินในอากาศผ่านลูกถ้วยบนเสาไฟฟ้าแทนสายเปลือย

ข. สายเอสเอซี (Space Aerial Cable: SAC) โครงสร้างประกอบด้วย ตัวนำอะลูมิเนียมตีเกลียวหุ้มด้วยฉนวน เอ็กซ์แอลพีอี เช่นเดียวกับสาย พิไอซี แต่จะมีเปลือกที่ทำจาก เอ็กซ์แอลพีอี หุ้มฉนวนอีกชั้นหนึ่ง ทำให้มีความทนทานมากกว่าสาย พิไอซี สาย เอสเอซี มีลักษณะดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 สายเอสเอซี

ถึงแม้จะมีเปลือกหุ้ม อีกชั้นหนึ่ง แต่ก็ไม่ควรสัมผัสสายโดยตรง เพราะจะเป็นอันตรายได้ ในการใช้งานสายชนิดนี้ การไฟฟ้าฯ ใช้เป็นวงจรเสริมสำหรับวงจรที่ใช้สาย พิไอซี โดยในการเดินสายจะต้องใช้สเปซอร์ (Spacer) เป็นตัวรองรับ และเพื่อจำกัดระยะห่างระหว่างสาย แม้ว่าจะสามารถวางไว้ใกล้กันได้มากกว่าสาย พิไอซี แต่ต้อง

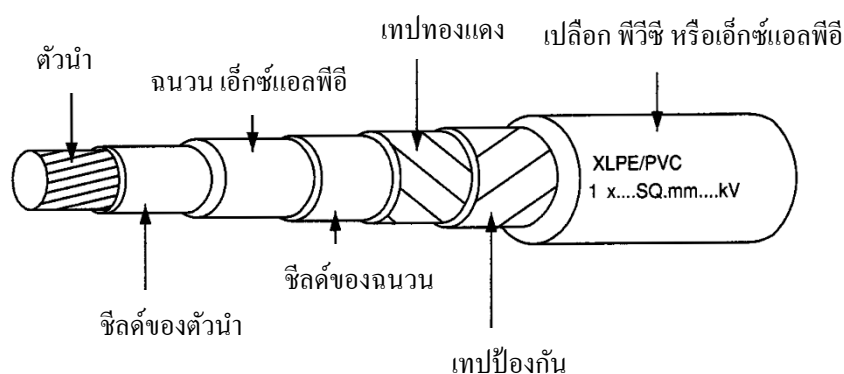
ไม่เกินค่าจำกัดค่าหนึ่ง และต้องใช้สายสลิงเป็นตัวรับน้ำหนัก และช่วยดึงสายไว้ สายสลิงนี้จะต่อลงดินทำหน้าที่เป็นสายล่อฟ้าอีกด้วย



ภาพที่ 2.6 สเปเซอร์

ค. สายพีเอซี (Preassembly Aerial Cable: PAC) สายชนิดนี้จัดเป็นสายฉนวนสมบูรณ์มีโครงสร้างคล้ายสายเอ็กซ์แอลพีอี และสามารถวางใกล้กันได้ จึงใช้สายชนิดนี้ในบริเวณที่มี ระยะห่างจากตัวอาคารจำกัด หรือผ่านบริเวณที่มีคนอาศัยอยู่ สายชนิดนี้ยังสามารถวางพาดไปกับมุมตึกได้ เนื่องจากมีความแข็งแรงมาก

ง. สายครอสลิงค์ โพลีไทลีนสายชนิดนี้จัดเป็นสายฉนวนสมบูรณ์มีโครงสร้าง และส่วนประกอบดังภาพที่ 2.7 สายชนิดนี้สามารถเดินลอย ในอากาศหรือฝังดินก็ได้ แต่นิยมฝังใต้ดิน เนื่องจากมีความแข็งแรง ทนทานสามารถทนต่อความชื้นได้ดี



ภาพที่ 2.7 สายครอสลิงค์ โพลีไทลีน

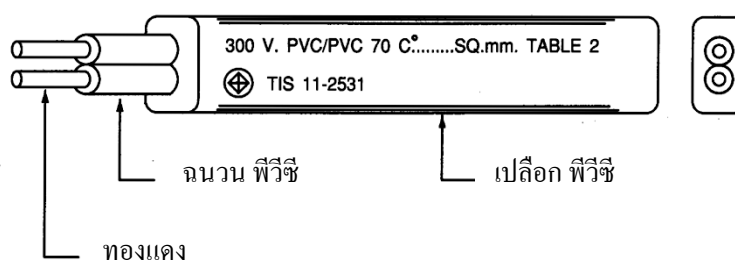
2.2.2.2 สายไฟฟ้าแรงดันต่ำ เป็นสายไฟฟ้าที่ใช้กับแรงดันไม่เกิน 750 โวลต์ มีลักษณะเป็นสายหุ้มฉนวน โดยที่ตัวนำทำด้วยทองแดงหรืออะลูมิเนียม โดยทั่วไปเป็นสายทองแดง สายขนาดเล็กจะเป็นตัวนำเดี่ยว แต่

สายขนาดใหญ่เป็นตัวยึดเกลียว วัสดุฉนวนที่ใช้กับสายแรงดันต่ำ ได้แก่ โพลีไวนิล คลอไรด์ และครอสลิงค์ โพลีไธลีน แบ่งได้ 3 ชนิดหลักๆ คือ

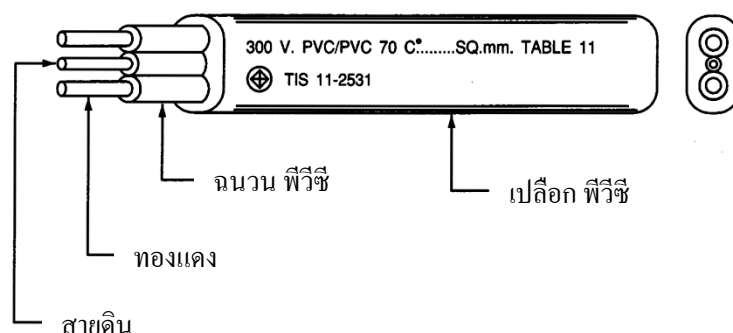
- สายไฟฟ้าอะลูมิเนียมหุ้มด้วยฉนวนพีวีซี สายไฟฟ้าชนิดนี้ จะมีตัวยึดเป็นอะลูมิเนียม และหุ้มด้วยฉนวนพีวีซี โดยอาจจะเป็น พีวีซี ธรรมดา หรือ เป็นแบบพีวีซีทนความร้อน (Heat Resisting PVC) สามารถใช้ได้กับแรงดันไม่เกิน 750 โวลต์ สายไฟฟ้าชนิดนี้จะเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 293-2526 สายชนิดนี้สามารถใช้งานได้ในระบบแรงดันต่ำ เดินภายนอกอาคารเป็นสายประธาน หรือสายป้อน โดยจะใช้เดินในอากาศเหนือพื้นดินทางการไฟฟ้านครหลวง และการไฟฟ้าภูมิภาค ใช้สายชนิดนี้เป็นสายประธานแรงดันต่ำ เดินมาจากหม้อแปลงจำหน่าย พาดบนลูกถ้วยตามเสาไฟฟ้า หรือชายคาบ้าน หรือตึกแถว เพื่อจ่ายไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ สายชนิดนี้มีราคาถูก และรับแรงดึงได้พอควร

- สายไฟฟ้าทองแดงหุ้มด้วยฉนวนพีวีซี เนื่องจากทองแดง มีคุณสมบัติข้อดีที่เหนือกว่าอะลูมิเนียมหลายประการด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นโลหะที่มีความนำไฟฟ้าสูงกว่า การตัดต่อก็ทำได้ง่ายกว่า จึงนิยมใช้สายชนิดนี้กันมาก สายไฟฟ้าทองแดงหุ้มด้วยฉนวน พีวีซี มีมากมายหลายชนิด แต่ละชนิดก็เหมาะกับงานแต่ละแบบ ทำให้สามารถใช้สายไฟฟ้าชนิดนี้กับงานได้กว้างขวางมากตั้งแต่ เป็นสายเชื่อมต่อวงจรเล็กๆ จนกระทั่งเป็นสายประธาน หรือสายป้อน สายไฟฟ้าแรงดันต่ำ ได้แก่

ก. สายไฟฟ้าแรงดันต่ำ - สายชนิด วี เอ เอฟ (VAF) สายไฟตาม มอก.11-2531 ที่ตามท้องตลาดเรียกว่าสายชนิด วี เอ เอฟ หรือ สายไฟฟ้าตารางที่ 2 และตารางที่ 11 เป็นสายชนิด ทนแรงดัน 300 โวลต์ มีทั้งชนิดที่เป็น สายเดี่ยว สายคู่ และที่มีสายดินอยู่ด้วย ถ้าเป็นสายเดี่ยว จะเป็นสายกลม และถ้าเป็นชนิด 2 แกน หรือ 3 แกน แต่สายไฟฟ้าตารางที่ 11 จะมีสายดินเพิ่มขึ้นไปอีก 1 แกน สายชนิดนี้เป็นสายแบน ตัวยึดนอกจาก จะมีฉนวนหุ้ม แล้วยังมีเปลือกหุ้มอีกชั้นหนึ่ง สายคู่จะนิยมนำด้วยเข็มขัดรัดสาย ใช้ในบ้านอยู่อาศัยทั่วไปสายชนิดนี้ห้ามใช้ในวงจร 3 เฟส ที่มีแรงดัน 380 โวลต์



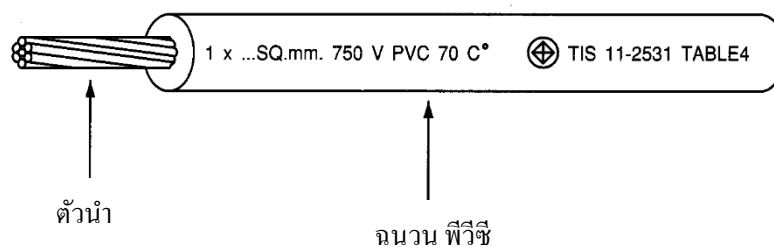
ภาพที่ 2.8 สายไฟฟ้าตารางที่ 2



ภาพที่ 2.9 สายไฟฟ้าตารางที่ 11

แรงดันใช้งาน	300 โวลต์
อุณหภูมิใช้งาน	70 องศาเซลเซียส
สถานที่ใช้งาน	สถานที่แห้ง และสถานที่เปียก
ลักษณะการติดตั้ง	- เดินเกาะผนัง - เดินซ่อนในผนัง - ห้ามเดินในช่องสาย ยกเว้น ร่องเดินสาย - ห้ามร้อยท่อฝังดิน หรือฝังดินโดยตรง

ข. สายไฟฟ้าแรงดันต่ำ - สายชนิด ทีเอชดับเบิลยู (THW) สายไฟฟ้าตาม มอก.11-2531 ที่ในท้องตลาดนิยมเรียกว่า ทีเอชดับเบิลยู เป็นสายไฟฟ้าชนิดทนแรงดัน 750 โวลต์ เป็นสายเดี่ยว นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะใน โรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากใช้ในวงจรไฟฟ้า 3 เฟส ได้ ปกติจะเดิน ร้อยใน ท่อร้อยสาย ชื่อ ทีเอชดับเบิลยู เป็นชื่อตามมาตรฐานอเมริกัน ซึ่งเป็นสายชนิดทนแรงดัน 600 โวลต์ อุณหภูมิใช้งานที่ 75 องศาเซลเซียส แต่ในประเทศไทยนิยม เรียกสายที่ผลิตตาม มอก. 11 -2531 ว่า สายทีเอชดับเบิลยู เนื่องจากมีโครงสร้างคล้ายกัน และรู้กันทั่วไปในท้องตลาด

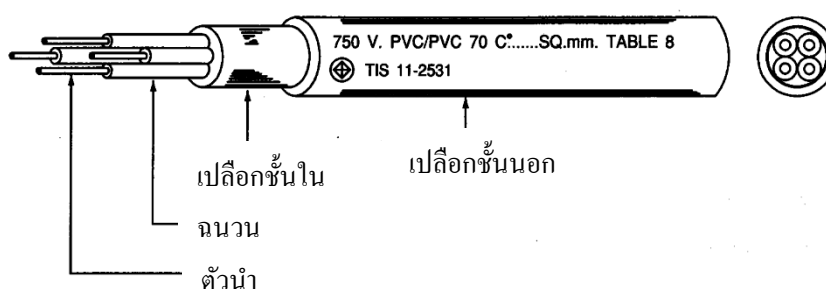


ภาพที่ 2.10 สาย ทีเอชดับเบิลยู

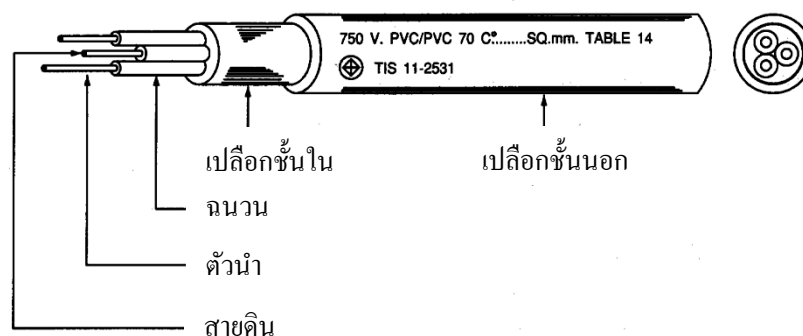
แรงดันใช้งาน	750 โวลต์
อุณหภูมิใช้งาน	70 องศาเซลเซียส
สถานที่ใช้งาน	สถานที่แห้ง และสถานที่เปียก
ลักษณะการติดตั้ง	- เดินลอย ต้องยึดด้วยวัสดุฉนวน - เดินในช่องเดินสาย ในสถานที่แห้ง - เดินในท่อร้อยสาย ผึงดินแต่ต้องไม่ให้น้ำเข้าท่อ และป้องกันไม่ให้สายมีโอกาสแฉ่น้ำ - ห้ามผึงดินโดยตรง

ค. สายไฟฟ้าแรงดันต่ำ - สายชนิด เอ็นวายวาย (NYY) สายไฟฟ้าตาม มอก.11-2531 ตามท้องตลาดนิยมเรียกว่าสายชนิด เอ็นวายวาย มีทั้งชนิดแกนเดี่ยว และหลายแกน สายหลายแกน ก็จะเป็นสายชนิดกลมเช่นกัน สายชนิดนี้ทนแรงดันที่ 750 โวลต์ นิยมใช้อย่างกว้างขวางเช่นกันเนื่องจากว่ามี ความทนต่อสภาพแวดล้อม เพราะมีเปลือกหุ้มอีกชั้นหนึ่ง บางทีเรียกว่าเป็นสายฉนวน 3 ชั้น ความจริงแล้ว สายชนิดนี้มีฉนวนชั้นเดียว อีกสองชั้นที่เหลือเป็นเปลือก เปลือกชั้นในทำหน้าที่เป็นแบบ ให้สายแต่ละแกนที่ติดเกลียวเข้าด้วยกันมีลักษณะกลม แล้วจึงมีเปลือกนอกหุ้ม อีกชั้นหนึ่ง ทำหน้าที่ป้องกันความเสียหายทางกายภาพ ชนิดของสาย เอ็นวายวายแบ่งตามลักษณะของสายโดยแบ่งออกได้ดังนี้

- เอ็นวายวาย ชนิดสายเดี่ยว สายชนิดนี้เป็นสายที่มีเปลือกเพียงชั้นเดียว ทำหน้าที่ป้องกัน ความเสียหายทางกายภาพ ไม่ต้องมีเปลือกชั้นใน
- เอ็นวายวาย ชนิด 2 แกน 3 แกน และ 4 แกน ซึ่งแล้วแต่ความต้องการของการใช้งาน สายชนิดนี้จะมีเปลือกสองชั้นดังกล่าวมาแล้วข้างต้น
- เอ็นวายวาย ชนิด NYY - GRD ถือเป็นสายชนิด 2 แกน 3 แกน และ 4 แกน ที่มีสายดิน รวมอยู่ด้วยอีกหนึ่งเส้น จึงเหมาะที่จะใช้ต่อเข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องต่อลงดิน



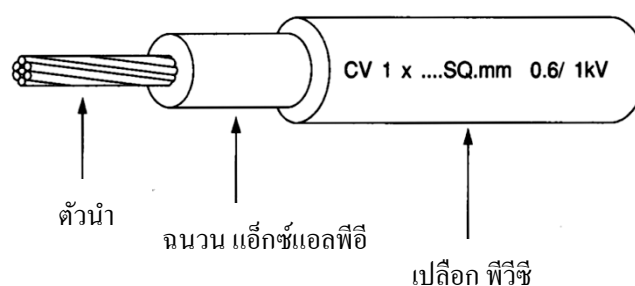
ภาพที่ 2.11 สาย เอ็นวายวาย ชนิดหลายแกน



ภาพที่ 2.12 สายเอ็นวาวาย ชนิดมีสายดิน

แรงดันใช้งาน	750 โวลต์
อุณหภูมิใช้งาน	70 องศาเซลเซียส
สถานที่ใช้งาน	สถานที่แห้ง และสถานที่เปียก
ลักษณะการติดตั้ง	- ใช้งานได้ทั่วไป - เดินในท่อร้อยสายฝังดิน - ฝังดินโดยตรง

- สายไฟฟ้าทองแดงหุ้มฉนวนเอ็กซ์แอลพีอี เนื่องจากคุณสมบัติของฉนวนเอ็กซ์แอลพีอี ที่สามารถทนต่อความร้อนได้สูง มีความแข็งแรง ทนต่อแรงทางกล และการกัดกร่อนทางเคมีได้ดี ในปัจจุบันจึงมีการใช้สายไฟฟ้าที่หุ้มฉนวนเอ็กซ์แอลพีอี มากขึ้น โดยสายชนิดนี้ มีชื่อ เรียกว่า สายซีวี (CV) หรือซีวีวี (CVV) ซึ่งไม่อยู่ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม แต่จะใช้ตามมาตรฐานอื่น เช่น IEC 502 โดยทั่วไปสายชนิดนี้จะสามารถใช้งานได้เหมือนกับสาย เอ็นวาวาย จึงนิยมใช้เป็นสายป้อนหรือสายประธาน



ภาพที่ 2.13 สายซีวี หรือ ซีวีวี

แรงดันใช้งาน	0.6/1 กิโลโวลต์
อุณหภูมิใช้งาน	90 องศาเซลเซียส
สถานที่ใช้งาน	สถานที่แห้ง และสถานที่เปียก
ลักษณะการติดตั้ง	- ใช้งานได้ทั่วไป - ผึงดินโดยตรง

2.2.3 การเลือกสายไฟฟ้าที่เหมาะสมในการพิจารณาเลือกสายไฟฟ้าที่เหมาะสมนั้น มีหลายข้อด้วยกันที่ต้องพิจารณา ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพความเชื่อถือได้ และความปลอดภัยในการใช้งาน ข้อกำหนดที่ต้องพิจารณาในการเลือกสายไฟฟ้า ได้แก่

2.2.3.1 พิกัดแรงดัน (Voltage Rating) สายไฟฟ้าที่จะใช้ต้องสามารถทนต่อแรงดันใช้งานได้ตาม มอก. 11-2531 ได้กำหนดแรงดันใช้งานเอาไว้ 2 ระดับ คือ 300 โวลต์ และ 750 โวลต์ ดังนั้นในการเลือกชนิดของสายไฟฟ้า จึงต้องคำนึงถึงพิกัดแรงดันให้เหมาะสมด้วย

2.2.3.2 พิกัดกระแส (Current Rating) คือ ความสามารถของสายไฟฟ้า ในการที่จะนำกระแสไฟฟ้าปริมาณหนึ่งอย่างต่อเนื่องในขณะที่ใช้งานโดยไม่ให้อุณหภูมิสุดท้ายมีค่าเกินอุณหภูมิที่กำหนดเอาไว้ พิกัดกระแสของสายไฟฟ้าหุ้มฉนวนจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ขนาดสายไฟฟ้า สายไฟฟ้าที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาดใหญ่ ก็จะมีค่าพิกัดกระแสสูงกว่าสายไฟฟ้าที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาดเล็ก

- ชนิดของฉนวนที่หุ้มสายไฟฟ้า การที่สายไฟฟ้ามีฉนวนที่มีคุณภาพดี ย่อมที่จะทำให้อายุการใช้งานมีค่าพิกัดกระแสสูงขึ้น

- อุณหภูมิโดยรอบ เนื่องจากค่าความต้านทานของตัวนำจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นถ้าอุณหภูมิบริเวณรอบๆ ของสายไฟฟ้าที่ใช้มีค่าสูงขึ้น ก็จะส่งผลให้ค่าพิกัดของกระแสลดลงจากค่าปกติ

- ลักษณะการติดตั้ง เนื่องจากการติดตั้งสายไฟฟ้า สามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น เดินลอย เดินในท่อร้อยสาย หรือฝังใต้ดิน การติดตั้งแต่ละแบบก็จะมีค่าพิกัดกระแสที่ต่างกัน ถ้าสายไฟฟ้าติดตั้งในบริเวณที่มีอากาศถ่ายเทสะดวก ก็จะมีค่าพิกัดกระแสสูงกว่ากรณีติดตั้งในบริเวณที่อากาศถ่ายเทไม่สะดวก

กรณีสายไฟฟ้า ที่เดินในท่อร้อยสาย จะมีความสามารถในการนำกระแสได้น้อยกว่าการเดินในอากาศ โดยทั่วไปพิสัยการทนกระแสที่แสดงใน ตารางสาย จะใช้กับจำนวนสายในท่อไม่เกิน 3 เส้นเท่านั้น ถ้ามากกว่านี้ความสามารถในการทนกระแสก็ยิ่งลดลง ซึ่งเป็นไปตาม ค่าตัวคูณลดพิสัยกระแส (Derating Factor) ในตารางที่ 2.3 ในการนับจำนวนสายไฟในท่อร้อยสายมีหลักเกณฑ์ดังนี้

การนับจำนวนสายไฟฟ้าในท่อร้อยสาย

- กรณีที่เป็นสายเคเบิลหลายแกน ให้ถือว่าจำนวนแกนคือจำนวนเส้น เช่น สายซีวี 3 x 150 ตารางมิลลิเมตร ให้นับเป็นสาย 3 เส้น เป็นต้น
- ไม่ต้องนับสายนิวทรัลในระบบ 3 เฟส ที่มีการออกแบบไว้เป็น โหลดสมดุล แม้บางครั้งอาจมีกระแสไหล ในสายนิวทรัล อันเกิดจากการใช้งานโหลดในแต่ละเฟสไม่เท่ากัน
- ต้องนับสายนิวทรัลด้วย ในกรณีโหลดส่วนใหญ่ (มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์) เป็นโหลดชนิดคายประจุ เช่น หลอดฟลูออเรสเซนต์ คอมพิวเตอร์ และอุปกรณ์อื่นที่ทำให้เกิดกระแสฮาร์โมนิกในสายนิวทรัล
- ไม่ต้องนับตัวนำสำหรับต่อลงดิน

ตารางที่ 2.3 ตัวคูณลดค่าพิสัยกระแส (Derating Factor)

จำนวนสาย (เส้น)	ตัวคูณ
4-6	0.82
7-9	0.72
10-20	0.56
21-30	0.48
31-40	0.44
เกิน 40	0.38

2.2.3.3 สายควบ (Multiple Conductors) สายควบคือการใช้สายตั้งแต่ 2 เส้นขึ้นไปเพื่อร่วมกันจ่ายโหลดในวงจรเดียวกัน โดยเฉพาะในวงจรที่มีการใช้ไฟฟ้าปริมาณมาก ซึ่งพิสัยกระแสของสายเส้นเดียวอาจไม่พอที่จะรองรับกระแสทั้งหมดในวงจรได้ จึงต้องใช้สายหลายเส้นต่อขนานกัน โดยปลายทั้ง 2 ด้าน ของเฟสเดียวกันต้องต่อเข้าด้วยกัน ข้อกำหนดในการใช้สายควบมีดังนี้คือ

- ใช้กับตัวนำที่มีขนาดตั้งแต่ 50 ตารางมิลลิเมตร ขึ้นไป
- ต้องเป็นสายชนิดเดียวกันเช่น สายที่เอสดับเบิ้ลยู เหมือนกันทุกเส้น
- ต้องมีความยาวเท่ากัน
- ต้องมีลักษณะการเดินสายเหมือนกัน เช่น เดินในอากาศเหมือนกัน หรือเดินในท่อโลหะเหมือนกัน เป็นต้น สายควบมักใช้ในกรณีที่ เป็นสายเมน เช่น เดินจากหม้อแปลงไฟฟ้ามายังตู้สวิตช์บอร์ด

การใช้สายควบจะช่วยลดสภาวะสกินเอฟเฟกต์ (Skin Effect) ภายในสายและทำให้ความต้านทานโดยรวมของสายลดลง สำหรับระบบไฟฟ้าแรงสูงการใช้สายควบมักจะมีอุปกรณ์คั่นสายติดตั้งเป็นระยะเพื่อป้องกันสายพันกัน จำนวนสายควบอาจใช้ 2, 3 หรือ 4 เส้น ก็ได้

2.3 เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำ (Low Voltage Circuit Breakers)

เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker: CB) เป็นบริภัณฑ์ไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ สำหรับเปิดปิด วงจรไฟฟ้าแรงดันต่ำ ในภาวะปกติ และจะเปิดวงจรโดยอัตโนมัติ เมื่อเกิดภาวะผิดปกติขึ้นอันเนื่องมาจากการใช้ กำลังเกิน หรือการลัดวงจรหลังจากทำการการแก้ไขสิ่งผิดปกติบกพร่องเรียบร้อยแล้ว ก็สามารถ สับไฟเข้าให้ใช้ งานต่อไปได้อีก

มาตรฐานเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่สำคัญคือ IEC 60947-2 “Part 2 Circuit Breaker”

IEC 60898 “Circuit Breakers for Over current Protection for Household and Similar Installations”

ในส่วนของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำ มีเนื้อหาแบ่งเป็นหลักๆ ได้ 3 ส่วน ดังนี้

2.3.1 พิกัดที่สำคัญ ตามมาตรฐาน IEC 60947-2 มีดังต่อไปนี้

- พิกัดกระแสที่ต่อเนื่อง พิกัดกระแสต่อเนื่องของเซอร์กิตเบรกเกอร์ คือ ค่าอาร์เอ็มเอส (RMS) ที่ เซอร์กิตเบรกเกอร์สามารถทนได้โดยอุณหภูมิไม่เกินค่าที่กำหนดให้ของอุณหภูมิโดยรอบบริษัทผู้ผลิตส่วนมาก จะทำ เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีขนาดโครงเป็นช่วงกว้างๆ แล้วปรับตั้งกระแสพิกัดในระหว่างช่วงให้ละเอียดขึ้น ดังนั้นจึงเกิดมีคำว่า แอมแปร์เฟรม (AF) และแอมแปร์ทริป (AT) ขึ้น

ก. แอมแปร์เฟรม (AF) คือ ขนาดพิกัดกระแสสูงสุดที่สามารถใช้ได้กับของเซอร์กิตเบรกเกอร์

ข. แอมแปร์ทริป (AT) คือ ขนาดพิกัดกระแสที่ปรับตั้งให้ เซอร์กิตเบรกเกอร์ใช้งาน

เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวหนึ่งขนาด 80 AT/100AF หมายความว่า เซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวนี้มี ขนาดโครง 100 แอมป์ กระแสที่ขนาดโครงนี้อาจปรับตั้งได้ตั้งแต่ 10 แอมป์ ถึง 100 แอมป์ แต่สำหรับ เซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวนี้ ปรับตั้งที่โรงงานให้สามารถใช้งานที่กระแสต่อเนื่องได้ 80 แอมป์

- พิกัดการตัดกระแสวงจร พิกัดการตัดกระแสวงจร (Interrupting Capacity: IC, Breaking Capacity) คือ กระแสลัดวงจรสูงสุดที่ เซอร์กิตเบรกเกอร์สามารถตัดได้โดยที่ตัว เซอร์กิตเบรกเกอร์ไม่ได้รับความเสียหาย

ค่า IC ของ เซอร์กิตเบรกเกอร์ได้จากการทดสอบ และขึ้นกับตัวแปรหลายตัว เช่น แรงดัน ตัวประกอบกำลัง เป็นต้น ดังนั้น เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่สามารถใช้ได้กับหลายแรงดัน จะต้องมีค่า IC ที่แต่ละแรงดัน ค่า IC ของ เซอร์กิตเบรกเกอร์เป็นพิกัดที่สำคัญมากอย่างหนึ่ง ในการเลือก เซอร์กิตเบรกเกอร์เพื่อใช้สำหรับงาน หนึ่งงานใดนั้นจะต้องให้มี IC เท่ากับ หรือมากกว่ากระแสลัดวงจรสูงสุดที่จุดติดตั้ง

ค่า AF ขนาดมาตรฐาน และ AT บริษัทผู้ผลิตต่างๆ จะผลิตเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มี AF ตามมาตรฐาน ที่กำหนดมาตรฐาน IEC ได้กำหนด AF ไว้ดังนี้คือ 63, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150 (3200), 4000, 5000, 6300 แอมป์ บริษัทบางแห่งอาจจะไม่ผลิตค่า AF บางค่าได้

ค่า AT ที่บริษัทต่างๆจะผลิตออกมานั้นมีหลายค่า แล้วแต่ความต้องการของบริษัทนั้นๆ เช่น บริษัทผลิตเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ AF = 250 แอมป์ อาจจัด AT ไว้ดังนี้ คือ 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250 แอมป์ และที่ AF = 1600 แอมป์ มี AT ค่าต่างๆ คือ 800, 1000, 1250, 1600 แอมป์

2.3.2 ประเภทของเซอร์กิตเบรกเกอร์

เซอร์กิตเบรกเกอร์อาจแบ่งตามลักษณะภายนอก และการใช้งานได้เป็น 2 ชนิด คือ

- โมลด์เคสเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Molded Case Circuit Breaker: MCCB)
- เซอร์กิตเบรกเกอร์อากาศ (Air Circuit Breaker: ACB)

2.3.2.1 เอ็มซีซีบี (MCCB) เป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่บริษัทตรวจจับ และบริษัทตัดต่ออยู่ภายในฉนวน ซึ่งทำด้วยสารประเภทพลาสติกแข็ง เอ็มซีซีบี มีตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ ใช้สำหรับป้องกันระบบไฟฟ้าตั้งแต่วงจรย่อย สายป้อนถึงสายประธาน และบริเวณที่ไฟฟ้าด้วย

โครงกรอบของ เอ็มซีซีบี ส่วนมากทำด้วย โพลีเอสเตอร์พลาสติก (Polyester Plastic) วัสดุชนิดนี้จะทำหน้าที่ในการป้องกันการอาร์ค ความร้อน และแก๊สได้ เป็นฉนวน และเป็นที่ยึดระหว่างขั้วไฟฟ้ามีความแข็งแรง ทางกล ดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิด เอ็มซีซีบี

เอ็มซีซีบี ที่มีใช้กันอยู่ในขณะนี้ อาจแบ่งตามการใช้งานได้เป็น

- เอ็มซีซีบี ขนาดเล็ก (Miniature Circuit Breaker: MCB) มีใช้สำหรับติดตั้งบนแผงจ่ายไฟ (Panel board) หรือแผงจ่ายไฟของที่อยู่อาศัย เพื่อป้องกันระบบไฟฟ้าของบ้าน สำนักงาน หรือกลุ่มอุตสาหกรรม และมาตรฐานที่ใช้ส่วนมากสำหรับ เอ็มซีบี จะเป็นมาตรฐาน IEC 60898 คุณสมบัติของ เอ็มซีบี มีดังนี้

- ก. มีทั้ง 1, 2 หรือ 3 ขั้ว
- ข. มี AF คือ 50 AF หรือ 63 AF
- ค. มี IC ตั้งแต่ 3 กิโลแอมป์ ถึง 10 กิโลแอมป์

เอ็มซีบี ที่มีการป้องกันการลัดวงจรลงดิน เรียกว่า เซอร์กิตเบรกเกอร์กระแสเหลือ (Residual Current Circuit Breaker: RCCB) มีความไว 10 มิลลิแอมป์, 30 มิลลิแอมป์ สำหรับป้องกันไฟดูด

- เอ็มซีบี ขนาดมาตรฐาน (Standard CB) เอ็มซีบี ชนิดนี้มีขนาดตั้งแต่ 100 AF ถึง 2500 AF และมี IC ให้เลือกอยู่หลายระดับเป็น เอ็มซีบี ที่มี IC ไม่สูงมากนัก เช่น 18, 25 กิโลแอมป์, และ 30 กิโลแอมป์ เหมาะสำหรับงานระบบไฟฟ้าขนาดเล็ก

- เอ็มซีบี แบบ IC สูง (High Interrupting Capacity Circuit Breaker) เป็น เอ็มซีบี ที่มี IC สูงกว่า ขนาดมาตรฐาน มีขนาดของ IC หลายระดับได้แก่ 25 กิโลแอมป์, 35 กิโลแอมป์, 50 กิโลแอมป์, 65 กิโลแอมป์ และ 100 กิโลแอมป์ เอ็มซีบี แบบนี้ใช้ในที่ซึ่งมีกระแสลัดวงจรสูงเกินกว่าที่จะใช้ เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบมาตรฐานได้

- เอ็มซีบี แบบจำกัดกระแสลัดวงจร (Current Limiting Circuit Breaker: CLCB) เป็น เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มี IC สูงมาก คือ 100 กิโลแอมป์ ถึง 200 กิโลแอมป์ ที่ 400/415 โวลต์ การที่มี IC สูงเนื่องจาก มันสามารถตัดกระแสลัดวงจรได้เร็วมาก คือ ภายในเวลา 0.005 วินาที การที่เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบจำกัดกระแส สามารถลดกระแสยอด และพลังงานผ่านได้นั้น ทำให้เราสามารถใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาดเล็กที่มี IC ต่ำใน วงจรไฟฟ้าซึ่งมีกระแสลัดวงจรสูงกว่า IC ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ได้โดยมีเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบจำกัดกระแส อยู่ต้นทาง การทำงานประสานกันระหว่าง เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบจำกัดกระแส กับเซอร์กิตเบรกเกอร์ใน ลักษณะนี้ที่เรียกว่าการป้องกันแบบทำงานสำรอง (Back Up Protection)

2.3.2.2 เซอร์กิตเบรกเกอร์อากาศ (Air Circuit Breaker: ACB) เป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์ แรงดันต่ำอีก ชนิดหนึ่ง สามารถดับอาร์คไฟฟ้าในอากาศจึงเรียกว่า Air Circuit Breaker (ความจริง เอ็มซีบี ก็ดับอาร์คใน อากาศเช่นเดียวกัน แต่เมื่อพูดถึง เอ็มซีบี จะหมายถึงเซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาดใหญ่) เอ็มซีบี เป็น เซอร์กิตเบรกเกอร์ ขนาดใหญ่ มีพิทกระแสต่อเนื่องสูง คืออาจมีตั้งแต่ 600 แอมป์ ถึง 6300 แอมป์ เป็นแบบเปิดโล่ง (Open Frame) กล่าวคือ มีบริกซ์ และกลไกอยู่เป็นจำนวนมาก และติดตั้งอย่างเปิดโล่งเห็นได้ชัดเจน ดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 เซอร์กิตเบรกเกอร์ ชนิด เอชีบี

เอชีบี สามารถแบ่งตามชนิดตามการติดตั้งได้ 2 ชนิด คือ

- แบบติดตั้งอยู่กับที่ (Fixed Type) ตัวโครงของ เอชีบี จะติดตั้งให้ติดอยู่กับแผงวงจรหลัก โดยยึดติดด้วยสกรูอย่างแข็งแรง เวลาถอดออกเพื่อซ่อมบำรุง ต้องดับไฟฟ้า และใช้เวลามาก

- แบบดึงออกได้ (Draw out Type) ตัวโครงของ เอชีบี จะติดตั้งบน โครงล้อเลื่อนที่สามารถเลื่อนไปตามรางที่เตรียมไว้ ส่วนสัมผัสของ เอชีบี กับ วงจรไฟฟ้าหลักจะต้องเป็นแบบพิเศษ เพื่อให้การสัมผัสที่แน่นหนา ซึ่งจะสามารถทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้สะดวก การซ่อมบำรุง เอชีบี ชนิดนี้สามารถทำได้สะดวก รวดเร็ว และสามารถลดเวลาดับไฟฟ้าได้

ข้อเปรียบเทียบระหว่าง เอ็มซีซีบี กับ เอชีบี

ก. เอชีบี เป็นแบบเปิด สามารถเพิ่มเติมบริภัณฑ์ช่วยต่างๆ เข้าไปได้อย่างสะดวก แต่ชิ้นส่วนของ เอ็มซีซีบี ทั้งหมดอยู่ภายในโมลพลาสติก และปรับตั้งจากโรงงาน การเพิ่มเติมบริภัณฑ์ภายหลังทำไม่ได้

ข. เอ็มซีซีบี ไม่จำเป็นต้องมีการบำรุงรักษา เนื่องจากความชื้น ฝุ่น และวัสดุแปลกปลอม เข้าถึงชิ้นส่วนได้ยาก แต่ เอชีบี ต้องมีการบำรุงรักษาเป็นประจำ

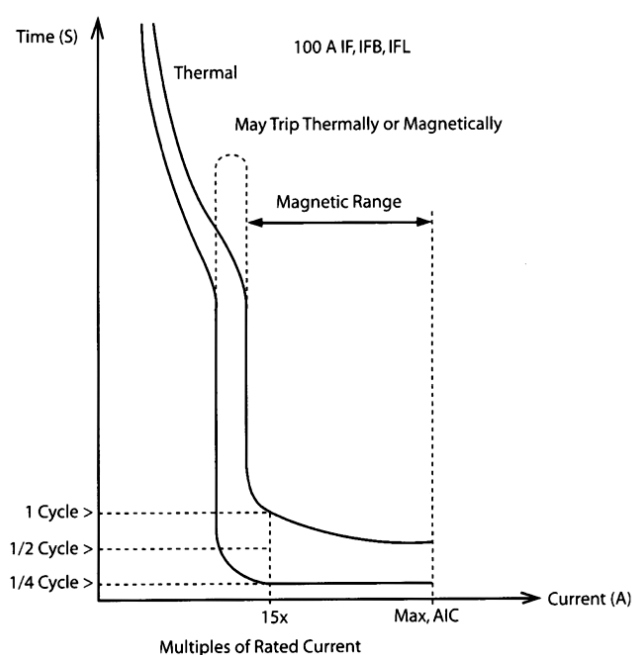
ค. เอชีบี ถูกออกแบบให้แข็งแรง ทนการลัดวงจรได้สูงมี Short Time Rating (I_{cw}) คือ สามารถทนกระแสลัดวงจรได้นานถึง 1 วินาที แต่ เอ็มซีซีบี ทนกระแสลัดวงจรได้นาน 0.01-0.02 วินาที เท่านั้น

2.3.3 หน่วยการตัด คือส่วนของเซอร์กิตเบรกเกอร์ซึ่งจะตัดวงจรออก เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้า มี 2 แบบด้วยกัน ดังนี้

2.3.3.1 แบบอาศัยอุณหภูมิ และสนามแม่เหล็ก เมื่อ โอเวอร์โวลต์ มีค่าน้อย (ประมาณ 125 เปอร์เซ็นต์) จะใช้วัสดุที่เป็นโลหะเป็นตัวตัด แต่ถ้า โอเวอร์โวลต์ มีค่ามาก (ประมาณ 10 เท่าของกระแสพิสัย) จะใช้สนามแม่เหล็กเป็นตัวตัด หน่วยการตัดแบบอาศัยอุณหภูมิ และสนามแม่เหล็ก มีเส้นโค้งความสัมพันธ์ กระแส และเวลา เป็น 2 ส่วน คือ

- การหน่วงเวลา (Long Time Delay)
- การตัดแบบฉับพลัน (Instantaneous Trip)

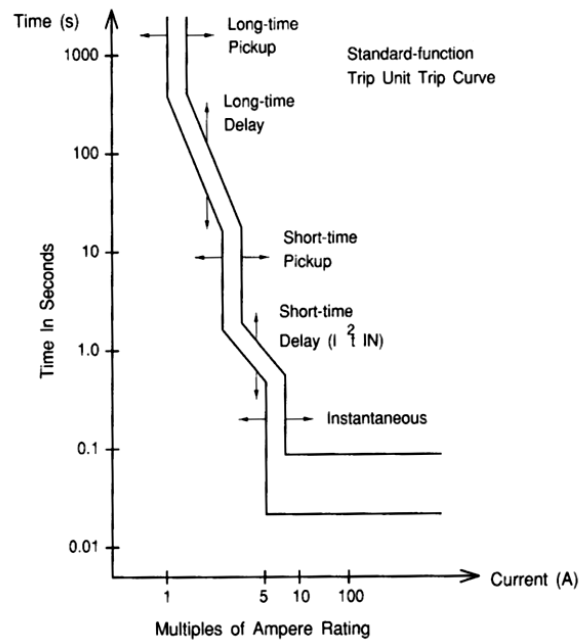
เซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาดเล็กส่วนมากจะปรับตั้งการหน่วงเวลา ไม่ได้ (แต่ขนาดใหญ่ๆ มักจะปรับตั้งได้) สำหรับค่าการตัดแบบฉับพลัน นั้นปรับค่าได้ตั้งแต่ 5 ถึง 10 เท่า ของค่ากระแสพิสัย ดังภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และเวลาของ การตัดแบบอาศัยอุณหภูมิ และสนามแม่เหล็ก

2.3.3.2 การตัดแบบโซลิดสเตต (Solid state trip) หน่วยการตัดแบบนี้จะใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์เข้ามาช่วยโดยจะใช้หม้อแปลงกระแส และวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อเปรียบเทียบค่ากระแสในวงจรกับค่าที่ตั้งไว้เมื่อกระแสในวงจรมีค่าสูงกว่าค่าที่ตั้งไว้ก็จะเกิดการตัดวงจรขึ้น หน่วยการตัดแบบนี้จะให้ความแม่นยำ และความเชื่อถือได้สูงกว่าหน่วยตัดแบบอื่นๆ มาก ดังภาพที่ 2.17

ข้อดีบางอย่างของหน่วยการตัดแบบนี้ คือ สามารถเลือกใช้งานได้หลากหลายรูปแบบกว่า เช่น Long Time Trip, Short Time Trip, Ground Fault Trip และ Instantaneous Trip



ภาพที่ 2.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และเวลาของ Solid State Trip

2.4 วงจรสายป้อนมอเตอร์

การออกแบบวงจรสายป้อน ที่จ่ายไฟให้กับมอเตอร์หลายตัว หรือมอเตอร์ร่วมกับโหลดชนิดอื่น เช่น ไฟฟ้าแสงสว่าง โหลดเต้ารับ จะต้องคำนึงถึงเรื่องต่อไปนี้

2.4.1 ขนาดพิกัดสายป้อน และการป้องกันสายป้อน การหาขนาดสายป้อน และขนาดบริภัณฑ์ป้องกันสายป้อนวงจรมอเตอร์ อาจแบ่งเป็น 2 กรณี คือ มอเตอร์หลายตัว และมอเตอร์ร่วมกับโหลดอื่นๆ

- กรณีมอเตอร์หลายตัว

$$I_F \geq 1.25I_{n,MAX} + \sum I_R \quad (2.1)$$

$$CB_F \leq CB_{MAX} + \sum I_R \quad (2.2)$$

- กรณีมอเตอร์กับโหลดอื่นๆ

ก. โหลดอื่นเป็นชนิดต่อเนื่อง

$$I_F \geq 1.25I_{n,MAX} + \sum I_R + 1.25I_{L1} \quad (2.3)$$

$$CB_F \leq CB_{MAX} + \sum I_R + 1.25I_{L1} \quad (2.4)$$

ข. โหลดอื่นเป็นชนิดไม่ต่อเนื่อง

$$I_F \geq 1.25I_{n,MAX} + \sum I_R + I_{L2} \quad (2.5)$$

$$CB_F \leq CB_{MAX} + \sum I_R + I_{L2} \quad (2.6)$$

โดยที่	I_F	หมายถึง พิกัดของกระแสสายป้อน (แอมป์)
	$I_{n,MAX}$	หมายถึง พิกัดกระแสมอเตอร์ตัวโตที่สุด (แอมป์)
	$\sum I_R$	หมายถึง ผลรวมพิกัดกระแสมอเตอร์ที่เหลือ (แอมป์)
	I_{L1}	หมายถึง พิกัดกระแสโหลดต่อเนื่อง (แอมป์)
	I_{L2}	หมายถึง พิกัดกระแสโหลดไม่ต่อเนื่อง (แอมป์)
	CB_F	หมายถึง ขนาดบริภัณฑ์ป้องกัน (แอมป์)
	CB_{MAX}	หมายถึง พิกัดบริภัณฑ์ป้องกันตัวโตที่สุด (แอมป์)

2.4.2 สายนิวทรัล และสายดินมอเตอร์หลายตัวส่วนใหญ่รับไฟฟ้าจากตู้ควบคุมมอเตอร์ ดังนั้นตู้ควบคุมมอเตอร์ จะมีคอนแทกเตอร์ติดตั้งอยู่มากมาย แรงดันของวงจรควบคุมของคอนแทกเตอร์เหล่านี้ จะเป็น 220 – 230 โวลต์ ดังนั้นสายป้อนที่จ่ายไฟให้ตู้ควบคุมมอเตอร์ จึงต้องมีสายนิวทรัลด้วย ขนาดสายนิวทรัลที่ต้องการนั้นเล็ก เนื่องจากกระแสที่ใช้มีค่าน้อยมาก แต่ต้องไม่เล็กกว่าสายดิน โดยทั่วไปจะใช้สายนิวทรัลเท่ากับ ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ ของสายเฟส

สำหรับสายดินนั้นให้ใช้ตามตารางสายดินของเครื่องบริภัณฑ์ไฟฟ้า ซึ่งคิดตามขนาดของพิกัดของ เซอร์กิตเบรกเกอร์ของสายป้อน

2.4.3 แรงดันตกในการหาขนาดของสายป้อน นอกจากจะคำนึงถึงพิกัดกระแสแล้ว ยังจะต้องคำนึงถึงแรงดันตกด้วย โดยที่แรงดันตกที่ยอมรับได้นั้นจะมีค่าต่างกันไป เนื่องจากสภาพการใช้งาน และการจัดเรียงโหลดมอเตอร์

สำหรับแรงดันตกที่ยอมรับได้นั้น จะต้องไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ โดยจากแหล่งจ่ายไฟไปถึง ศูนย์กลางควบคุมมอเตอร์ (Motor Control Center) จะมีแรงดันตกได้ไม่เกิน 3 เปอร์เซ็นต์ ส่วนจากศูนย์กลางควบคุมมอเตอร์ไปจนถึงตัวมอเตอร์ จะมีแรงดันตกไม่เกิน 2 เปอร์เซ็นต์

2.5 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternative Current Motor)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ หมายถึง มอเตอร์ที่ใช้กับระบบไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล ส่วนที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าคือขดลวดในสเตเตอร์ และส่วนที่ทำหน้าที่ให้พลังงานกล คือ ตัวหมุนหรือโรเตอร์ ซึ่งเมื่อขดลวดในสเตเตอร์ได้รับพลังงานไฟฟ้าก็จะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาในตัวที่อยู่กับที่หรือสเตเตอร์ ซึ่งสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนี้จะมีการเคลื่อนที่หรือหมุนไปรอบๆ สเตเตอร์ เนื่องจากการต่างเฟสของกระแสไฟฟ้าในขดลวดและการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า ในขณะที่สนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ไปสนามแม่เหล็กจากขั้วเหนือก็จะพุ่งเข้าหาขั้วใต้ ซึ่งจะไปตัดกับตัวนำที่เป็นวงจรปิดหรือขดลวดกรงกระรอกของตัวหมุนหรือโรเตอร์ ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าขึ้นในขดลวด

ของโรเตอร์ซึ่งสนามแม่เหล็กของโรเตอร์นี้จะเคลื่อนที่ตามทิศทางเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์ก็จะทำให้โรเตอร์ของมอเตอร์เกิดจะพลังงานกลสามารถนำไปใช้ประโยชน์ที่ต้องการหมุนได้



ภาพที่ 2.18 มอเตอร์กระแสสลับ

2.5.1 ชนิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบ่งออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ มอเตอร์อะซิงโครนัส (Asynchronous) และมอเตอร์ซิงโครนัส (Synchronous) ซึ่งที่กล่าวจะเป็นมอเตอร์อะซิงโครนัสที่เรียกว่า มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ ซึ่งจะมีขนาดตั้งแต่เล็ก ๆ ไปจนถึงขนาดหลายร้อยแรงม้า มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำมีทั้งที่เป็นมอเตอร์ชนิด 1 เฟส และชนิดที่เป็นมอเตอร์ 3 เฟส มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำนั่นส่วนมากแล้วจะหมุนด้วยความเร็วคงที่แต่ก็มีบางชนิดที่สามารถเปลี่ยนแปลงความเร็วได้ เช่น มอเตอร์ชนิดขดลวดพัน (Would Rotor Motor) หรือมอเตอร์สลีปรिंग (Slip Ring Motor) ซึ่งจะเป็นมอเตอร์ชนิด 3 เฟส

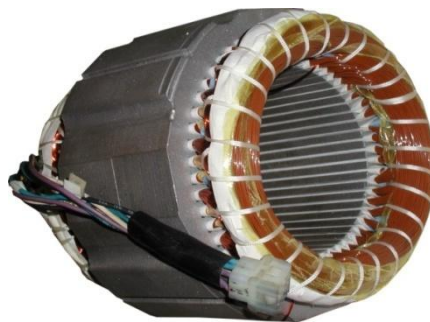
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิดเหนี่ยวนำเป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล ในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกลนี้ โรเตอร์ไม่ได้รับพลังงานไฟฟ้าโดยตรง แต่จะได้จากการเหนี่ยวนำ ดังนั้นจึงเรียกว่ามอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

- มอเตอร์ชนิดกรงกระรอก (Squirrel Cage) ซึ่งมีทั้งที่เป็นมอเตอร์ 1 เฟสและชนิดที่เป็น 3 เฟส
- มอเตอร์ชนิดขดลวดพัน (Would Rotor Motor) หรือมอเตอร์สลีปรिंग (Slip Ring Motor) ซึ่งจะเป็นมอเตอร์ชนิด 3 เฟส

โดยทั่วไปมอเตอร์ทุกประเภทจะมีส่วนประกอบหลัก หรือส่วนประกอบเบื้องต้นคล้ายกัน คือ สเตเตอร์หรือตัวที่อยู่กับที่และโรเตอร์หรือตัวหมุนแต่ละแตกต่างกันในเรื่องของรายละเอียดของส่วนประกอบปลีกย่อยอื่นๆ

2.5.2 ส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

2.5.2.1 สเตเตอร์ หรือตัวอยู่กับที่ (Stator) จะเป็นส่วนที่อยู่กับที่ซึ่งจะประกอบด้วยโครงของมอเตอร์แกนเหล็กสเตเตอร์ และขดลวด



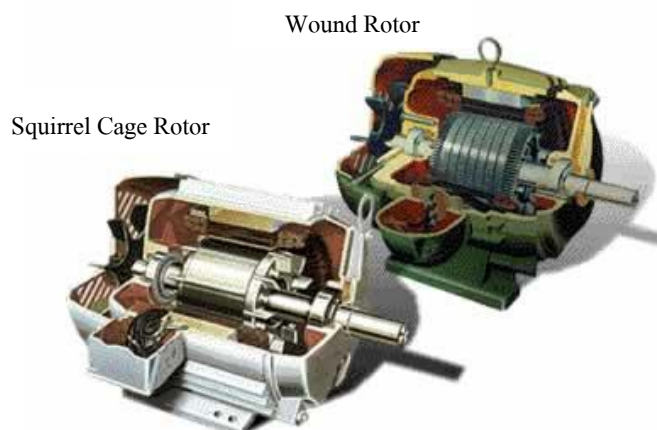
ภาพที่ 2.19 โครงมอเตอร์

- โครงมอเตอร์ (Frame or Yoke) จะทำด้วยเหล็กหล่อทรงกระบอกกลวง ส่วนด้านล่างจะเป็นขาตั้ง มีกล่องสำหรับต่อสายไฟอยู่ด้านบนหรือด้านข้าง ดังแสดงในภาพที่ 2.19 โครงจะทำหน้าที่ยึดแกนเหล็ก สเตเตอร์ให้แน่นอยู่กับที่ผิวด้านนอกของโครงมอเตอร์จะออกแบบให้มีลักษณะเป็นกรีบ เพื่อช่วยในการระบายความร้อนในกรณีที่เป็นมอเตอร์ขนาดเล็ก ๆ โครงจะทำด้วยเหล็กหล่อ แต่ถ้าเป็นมอเตอร์ขนาดใหญ่ โครงจะทำด้วยเหล็กหล่อเหนียว ซึ่งจะทำให้มอเตอร์มีขนาดเล็กกะทัดรัดมากขึ้น แต่ถ้าใช้เหล็กหล่อก็จะให้มีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก

- แกนเหล็กสเตเตอร์ (Stator Core) ทำด้วยแผ่นเหล็กบาง ๆ มีลักษณะกลม เจาะตรงกลางและเจาะร่องภายในโดยรอบ แผ่นเหล็กชนิดนี้เรียกว่า ลามิเนต (Laminate) ซึ่งจะถูกเคลือบด้วย ซิลิกอน เหล็ก แต่ละแผ่นจะมีความหนาประมาณ 0.025 นิ้ว หลังจากนั้นจึงนำไปอัดเข้าด้วยกันจนมีความหนาที่เหมาะสม เรียกว่า แกนเหล็กสเตเตอร์

- ขดลวด (Stator Winding) จะมีลักษณะเป็นเส้นลวดทองแดงเคลือบฉนวนที่เรียกว่า อินาเมล (Enamel) พันอยู่ในร่องของแกนเหล็กสเตเตอร์ตามรูปแบบต่าง ๆ ของการพันมอเตอร์

2.5.2.2 โรเตอร์หรือตัวหมุน (Rotor) มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำจะมีโรเตอร์ 2 ชนิด คือ โรเตอร์แบบกรงกระรอกและโรเตอร์แบบขดลวดพันหรือแบบวาวนด์ ซึ่งจะมีส่วนประกอบดังนี้คือ แกนเหล็ก โรเตอร์ขดลวด ใบพัด และเพลลา



ภาพที่ 2.20 โรเตอร์ (Rotor)

- โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel cage rotor) จะประกอบด้วยแผ่นเหล็กบางๆ ที่เรียกว่าแผ่นเหล็กลามิเนต ซึ่งจะเป็นแผ่นเหล็กชนิดเดียวกันกับสเตเตอร์ มีลักษณะเป็นแผ่นกลม ๆ เชะร่องผิวภายนอกเป็นร่องโดยรอบ ตรงกลางจะเจาะรูสำหรับสวมเพลลา และจะเจาะรูรอบ ๆ รูตรงกลางที่สวมเพลลาทั้งนี้เพื่อช่วยให้ในการระบายความร้อน และยังทำให้โรเตอร์มีน้ำหนักเบาลง เมื่อนำแผ่นเหล็กไปสวมเข้ากับแกนเพลลาแล้วจะได้เป็นแกนเหล็กโรเตอร์หลังจากนั้นก็จะใช้แท่งตัวทองแดงหรือแท่งอะลูมิเนียมหล่ออัดเข้าไปในร่องของแกนเหล็กสเตเตอร์เข้าไปวางทั้งสองด้านด้วยวงแหวนตัวนำทั้งนี้เพื่อให้ขดลวดครบวงจรไฟฟ้า หรืออาจนำแกนเหล็กสเตเตอร์เข้าไปในแบบพิมพ์แล้วฉีดอะลูมิเนียมเหลวเข้าไปในร่อง ก็จะได้อะลูมิเนียมอัดแน่นอยู่ในร่องจนเต็มและจะได้ขดลวดตัวนำแบบกรงกระรอกฝังอยู่ในแกนเหล็ก ขดลวดในโรเตอร์นั้นจะเป็นลักษณะของตัวนำที่เป็นแท่งซึ่งอาจใช้ ทองแดง หรืออะลูมิเนียมประกอบเข้าด้วยกันเป็นลักษณะคล้ายกรงกระรอก

- โรเตอร์แบบขดลวดพันหรือแบบวาวด์ (Wound Rotor) โรเตอร์ชนิดนี้จะมีส่วนประกอบคล้าย ๆ กับโรเตอร์แบบกรงกระรอก คือ มีแกนเหล็กที่เป็นแผ่นลามิเนตอัดเข้าด้วยกันแล้วสวมเข้ากับเพลลา แต่ จะแตกต่างกันตรงที่ขดลวด จะเป็นเส้นลวดชนิดที่หุ้มด้วยน้ำยาฉนวนอินามเมลพันลงไปในร่องสลิตของโรเตอร์จำนวน 3 ชุด ซึ่งจะมีลักษณะเหมือนกับที่พันบนสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟสแล้วต่อวงจรขดลวดเป็นแบบสตาร์ โดยนำปลายทั้ง 3 ที่เหลือต่อเข้ากับวงแหวนตัวนำ ทั้งนี้เพื่อให้สามารถต่อวงจรของขดลวดของโรเตอร์เข้ากับตัวต้านทานที่ปรับค่าได้ที่อยู่ภายนอกตัวมอเตอร์เพื่อการปรับค่าความต้านทานของโรเตอร์ ซึ่งจะสามารถควบคุมความเร็วของโรเตอร์ได้

2.5.2.3 ฝาครอบ (End Plate) ส่วนมากจะทำด้วยเหล็กหล่อ เจาะรูตรงกลางและคว้านเป็นรูปกลมใหญ่เพื่ออัดแบร็งหรือตลับลูกปืนรองรับแกนเพลลาของโรเตอร์

2.5.2.4 ฝาครอบใบพัด (Fan End Plate) จะมีลักษณะเป็นแผ่นเหล็กเหนียวขึ้นรูปให้มีขนาดสวม ฝาครอบได้พอดี มีรูเจาะเพื่อระบายอากาศ และยึดติดกับฝาครอบด้านที่มีใบพัด ส่วนใหญ่จะมีในมอเตอร์ 3 เฟส และมอเตอร์ 1 เฟสขนาดใหญ่

2.5.2.5 ใบพัด (Fan) จะทำด้วยเหล็กหล่อ มีลักษณะเท่ากันทุกครีบท่ากันทุกครีบท่า จะสวมยึดอยู่บนเพลาด้านตรงข้ามกับเพลางาน ใบพัดนี้จะช่วยในการระบายอากาศและความร้อนได้มากทีเดียวใบพัดนี้ ส่วนใหญ่จะมีในมอเตอร์ 3 เฟสและมอเตอร์ 1 เฟสขนาดย่อยถึงขนาดใหญ่ เช่นเดียวกับฝาครอบใบพัด

2.5.2.6 สลักเกลียว (Bolt) จะทำด้วยเหล็กเหนียวจะมีลักษณะเป็นเกลียวตลอด ถ้าเป็นมอเตอร์ 3 เฟส จะประกอบด้วยสลักเกลียว 8 ตัว ทำหน้าที่ยึดฝาครอบให้ติดกับโครง ถ้าเป็นมอเตอร์ 1 เฟสขนาดเล็ก เช่น มอเตอร์สปลิตเฟสจะเป็นสลักเกลียวยาวตลอดความยาวของตัวมอเตอร์ ทำเกลียวเฉพาะด้านปลาย และมีน็อตขันยึดไว้ ดังนั้นจึงมีเพียง 4 ตัว

2.6 อินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ (Inverter) หรือเรียกว่า เอซีไดรฟ์ (AC drives) ก็คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับควบคุม ความเร็วรอบ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหรือเอชึมอเตอร์ (ซึ่งบางครั้งก็ถูกเรียกว่า "อะซิงโครนัส หรือมอเตอร์แบบ กรงกระรอก") ความเร็วรอบสามารถควบคุมได้เนื่องจากความเร็วรอบของอินดักชันมอเตอร์ หรือมอเตอร์ เหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับสมการความเร็วรอบหรือสมการความเร็วซิงโครนัสดังต่อไปนี้

$$N_s = \frac{(120 \times f)}{P} \quad (2.7)$$

โดยที่	N_s	หมายถึง	ความเร็วซิงโครนัส (รอบ/นาที)
	f	หมายถึง	ความถี่กระแสไฟฟ้า (เฮิรตซ์)
	P	หมายถึง	จำนวนขั้วแม่เหล็ก

จากสมการความเร็วซิงโครนัสจะเห็นว่าความเร็วรอบของมอเตอร์สามารถปรับเปลี่ยนได้ 2 เส้นทางคือ

ก. เปลี่ยนจำนวนขั้วแม่เหล็ก

ข. เปลี่ยนแปลงความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้า

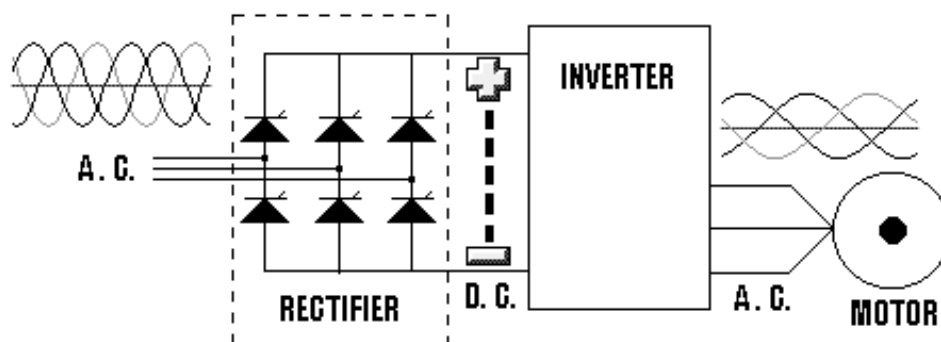
ดังนั้นหากความถี่กระแสไฟฟ้ามีค่าคงที่คือ 50 เฮิรตซ์ หรือ 60 เฮิรตซ์ในบางประเทศ เช่น อเมริกา ความเร็ว รอบของมอเตอร์ แต่ละตัวก็จะมีความเร็วรอบที่แตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับจำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์แต่ละตัว ซึ่งสามารถสรุปได้ตามตารางดังนี้

ตารางที่ 2.4 ความเร็วรอบของมอเตอร์

จำนวนขั้ว	2	4	6	8	10	15
จำนวนรอบที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์ (รอบต่อนาที)	3000	1500	1000	750	600	500
จำนวนรอบที่ความถี่ 60 เฮิรตซ์ (รอบต่อนาที)	3600	1800	1200	900	720	600

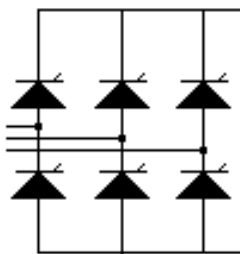
จากตารางสรุปความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของมอเตอร์ที่มีจำนวนขั้วแม่เหล็กที่แตกต่างกันจะเห็นว่าวิธีการควบคุมความเร็วรอบด้วยการเปลี่ยนจำนวนขั้วแม่เหล็กนั้น ความเร็วจะเปลี่ยนแปลงไปครั้งละมาก ๆ เช่น เปลี่ยนจาก 3000 รอบต่อนาที ไปเป็น 1500 รอบต่อนาที หรือจาก 1500 รอบต่อนาที ไปเป็น 3000 รอบต่อนาที (กรณีเปลี่ยนจากการต่อแบบ 2 ขั้วแม่เหล็กไปเป็นการต่อแบบ 4 ขั้วแม่เหล็ก หรือจาก 4 ขั้วแม่เหล็กลดลงมาเหลือ 2 ขั้วแม่เหล็ก) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในลักษณะนี้ความเร็วรอบที่เปลี่ยนแปลงจะไม่ละเอียด, ทำให้เฉพาะในกรณีที่ไม่มีโหลด และที่สำคัญคือต้องใช้มอเตอร์ที่ออกแบบพิเศษที่สามารถเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้วแม่เหล็กได้เท่านั้น ทำให้ไม่เหมาะสมกับความต้องการของงานในหลาย ๆ ประเภทที่ต้องการควบคุมความเร็วรอบในขณะมีโหลดเพื่อให้ความเร็วเหมาะสมกับความเร็วของกระบวนการผลิต ดังนั้นในกระบวนการผลิตทั่วไปจึงนิยมใช้อินเวอร์เตอร์ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์มากกว่าเนื่องจากสามารถควบคุมให้มอเตอร์ด้วยความเร็วคงที่ ปรับความเร็วรอบไปที่ความเร็วต่าง ๆ ได้อย่างรวดเร็วและมีความเที่ยงตรงมากกว่า

2.6.1 การทำงานของอินเวอร์เตอร์ จากรูปบล็อกไดอะแกรมพื้นฐานอย่างง่าย ๆ ของอินเวอร์เตอร์จะประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ ๆ และมีการทำงานดังนี้



ภาพที่ 2.21 การทำงานของอินเวอร์เตอร์

2.6.2 วงจรเรียงกระแสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ วงจรประกอบด้วย เพาเวอร์ไคโอด 4 ตัว กรณีที่อินพุตเป็นแบบเฟสเดียว หรือมี



ภาพที่ 2.22 วงจรเรียงกระแส

เพาเวอร์ไคโอด 6 ตัว กรณีที่อินพุตเป็นแบบ 3 เฟส ดังรูป (สำหรับอินเวอร์เตอร์บางประเภทจะใช้เอสซีอาร์ ทำหน้าที่เป็นวงจรเรกติไฟเออร์ซึ่งทำให้สามารถควบคุมระดับแรงดันในวงจรดีซี ลิงค์ได้)

2.6.3 ดีซี ลิงค์ (DC link) หรือ วงจรเชื่อมโยงทางกระแส คือวงจรเชื่อมโยงระหว่างวงจรเรียงกระแส และวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะประกอบด้วยแคปซิเตอร์ที่มีขนาดใหญ่ พักดแรงดัน ไฟฟ้า 400 โวลต์แหล่งจ่ายไฟตรง หรือ 800 โวลต์แหล่งจ่ายไฟตรง โดยขึ้นอยู่กับแรงดันอินพุตว่าเป็นแบบเฟสเดียวหรือ 3 เฟส ทำหน้าที่กรองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงเรกติไฟเออร์ให้เรียบยิ่งขึ้น และทำหน้าที่เก็บประจุไฟฟ้า ขณะที่มอเตอร์ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในช่วงสั้นเนื่องจากการเบรคหรือมีการลดความเร็วรอบลงอย่างรวดเร็ว สำหรับกรณีที่ใช้งานกับโหลดที่มีแรงเฉื่อยมาก ๆ และต้องการหยุดอย่างรวดเร็ว จะเกิดแรงดันสูงย้อนกลับมาตกคร่อมแคปซิเตอร์ และทำให้แคปซิเตอร์เสียหาย ได้ ดังนั้นในทางปฏิบัติจะมีวงจรชอปเปอร์โดยต่อค่าความต้านอนุกรมกับทรานซิสเตอร์ และต่อขานานกับแคปซิเตอร์ไว้ โดยทรานซิสเตอร์จะทำให้ที่เป็นสวิตช์ตัดต่อควบคุมให้กระแสไหลผ่านค่าความต้านทานเพื่อลดพลังงานที่เกิดขึ้น

2.6.4 วงจรอินเวอร์เตอร์ คือส่วนที่ทำหน้าที่แปลงผันจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (ที่ผ่านการกรองจากวงจรดีซีลิงค์) เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ วงจรจะประกอบด้วยเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์กำลัง 6 ชุด (ปัจจุบันส่วนใหญ่จะใช้ ไอจีบีที) ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดต่อกระแสไฟฟ้าเพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยอาศัยเทคนิคที่นิยมใช้กันทั่วไปคือ การมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse width modulation: PWM)

2.6.5 วงจรควบคุม จะทำหน้าที่รับข้อมูลจากผู้ใช้เช่น รับข้อมูลความเร็วรอบที่ต้องการเข้าไปทำการประมวลผล และส่งนำเอาต์พุตออกไปควบคุมการทำงานของทรานซิสเตอร์เพื่อจ่ายแรงดัน และความถี่ให้ได้ ความเร็วรอบและแรงบิดตาม ที่ผู้ใช้งานต้องการ ทำไมจึงต้องแปลงผันจาก ดีซีเป็น เอซี และแปลงผันกลับจากดีซีเป็นเอซีอีกครั้ง เนื่องจากการแปลงจากเอซีไปเป็นเอซี โดยตรงเลยนั้น ความถี่ทางด้านเอาต์พุต จะได้สูงสุดไม่เกินความถี่ ทางด้านอินพุต ทำให้ไม่สามารถควบคุมความเร็วมอเตอร์ให้มีความเร็วมากกว่าความเร็วที่บอกไว้บนแผ่นป้ายของมอเตอร์แต่การเปลี่ยนจาก เอซี ไปเป็น ดีซี และแปลงกลับมาเป็น เอซี อีกครั้งจะทำให้อินเวอร์เตอร์สามารถสร้างความถี่ที่สูงกว่าความถี่ทางด้านอินพุต

2.7 ระบบไฮดรอลิก (Hydraulic System)

ระบบการทำงานที่ใช้ของไหลเป็นตัวการส่งถ่ายกำลังทำให้เกิดการเคลื่อนที่และแรงกระทำเกิดขึ้น ปัจจุบันระบบไฮดรอลิกได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากกับการทำงานของเครื่องมือเครื่องจักรในปัจจุบัน เนื่องจากระบบไฮดรอลิกมีข้อดีหลายประการ เช่น สามารถส่งถ่ายกำลังได้แรงจำนวนมากโดยใช้อุปกรณ์ขนาดเล็ก สามารถควบคุมการทำงานได้อย่างนิ่มนวลและแน่นอน เป็นระบบที่สามารถหล่อลื่นอุปกรณ์ได้ด้วยตัวเองทำให้เกิดการสึกหรอน้อยมาก หลักการทางฟิสิกส์ของระบบไฮดรอลิก จะเกี่ยวข้องกับเรื่องความเร็ว ความดัน เวลา และอุณหภูมิ ซึ่งสามารถวัดได้

2.7.1 กฎของนิวตัน เป็นกฎสากลที่ใช้ได้กับการเคลื่อนที่ของวัตถุหลายชนิดทั้งบนโลกและนอกโลก กฎการเคลื่อนที่ทั้งสามของนิวตันจะแสดงถึงธรรมชาติของสภาพการเคลื่อนที่ และการเปลี่ยนแปลงสภาพการเคลื่อนที่ของวัตถุต่างๆ

กฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 1 วัตถุจะคงสภาพอยู่นิ่งหรือสภาพการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ในแนวตรง นอกจากจะมีแรงลัพธ์ที่ไม่เท่ากับศูนย์มากระทำ

กฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 เมื่อมีแรงลัพธ์ซึ่งมีค่าไม่เป็นศูนย์มากระทำต่อวัตถุนั้น วัตถุจะมีความเร่งในทิศทางเดียวกับแรงลัพธ์ที่มากระทำ และขนาดของความเร่งนี้จะแปรผันตรงกับขนาดของแรงลัพธ์ และแปรผกผันกับมวลของวัตถุ

กฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 3 ทุกแรงกิริยา ย่อมมีแรงปฏิกิริยาซึ่งมีขนาดเท่ากัน และทิศทางตรงข้ามกันเสมอ

2.7.2 กฎความดัน ไฮดรอลิกเป็นวิทยาศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับแรงและการส่งถ่ายกำลัง โดยใช้มวลของไหล ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่แสดงให้เห็นถึงแมคคานิกส์ของไหลเกิดขึ้นจากการกระทำสถิตศาสตร์ของไหล (Hydrostatics) และกลศาสตร์ของไหล (Hydrodynamic)

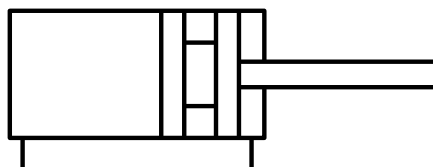
$$P_s = h \cdot p \cdot g \quad (2.8)$$

โดยที่	P_s	หมายถึง	ความดันของของไหล (บาร์)
	h	หมายถึง	ความสูงของของไหล (เมตร)
	p	หมายถึง	ความหนาแน่นของของไหล (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
	g	หมายถึง	แรงดึงดูดของโลก (เมตร/วินาที ²)

2.7.3 สัญลักษณ์อุปกรณ์ของระบบไฮดรอลิก เป็นสิ่งสำคัญอย่างมากในระบบไฮดรอลิก เนื่องจากสัญลักษณ์จะช่วยให้อ่านและทำความเข้าใจวงจรไฮดรอลิกได้ง่ายขึ้น และทำให้การออกแบบการทำงานของวงจรระบบไฮดรอลิกได้อย่างถูกต้อง รวมถึงใช้ตรวจสอบ และบำรุงรักษาระบบไฮดรอลิกได้อย่างรวดเร็ว และประหยัดเวลามากขึ้นอุปกรณ์ในระบบไฮดรอลิกมีจำนวนค่อนข้างมาก และอุปกรณ์ส่วนใหญ่ของระบบไฮดรอลิกมีทำงานค่อนข้างซับซ้อน ดังนั้นจึงทำให้สัญลักษณ์อุปกรณ์ไฮดรอลิกจึงมีความสำคัญมากขึ้นตามมา ในที่นี้

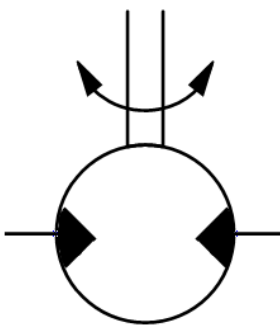
ขอก้าวถึงสัญลักษณ์อุปกรณ์ที่สำคัญๆ เช่น อุปกรณ์ทำงาน อุปกรณ์ควบคุม อุปกรณ์ดันกำลัง อุปกรณ์ท่อ และ ข้อต่อวิธีการบังคับให้อุปกรณ์ทำงาน และอุปกรณ์อื่นๆ ที่ช่วยในการทำงานของระบบไฮดรอลิก เป็นต้น

2.7.3.1 สัญลักษณ์กระบอกสูบไฮดรอลิก กระบอกสูบจะทำงานในลักษณะการเคลื่อนที่เชิงเส้นตรง (Linear motion) สัญลักษณ์ของกระบอกสูบจะมีส่วนประกอบของกระบอกสูบคือ กระบอกสูบ ลูกสูบ และ ก้านสูบ จากรูปที่ 2.23 สัญลักษณ์กระบอกสูบไฮดรอลิกจะประกอบด้วย กระบอกสูบแบบทำงานทางเดียวอาจใช้ แทน อุปกรณ์ทำงานแบบไดอะแฟรม หรือเชิงเส้นอื่นๆ ได้กระบอกสูบแบบทำงานสองทางมีก้านสูบเดี่ยว กระบอกสูบแบบทำงานสองทางมีสองก้านสูบ กระบอกสูบแบบมีชุดกันกระแทกอยู่ภายใน กระบอกสูบมีชุดกันกระแทกปรับค่าได้ กระบอกสูบแบบทำงานสองทางก้านสูบขนาดใหญ่ เป็นต้น



ภาพที่ 2.23 ตัวอย่างสัญลักษณ์กระบอกสูบไฮดรอลิก

2.7.3.2 สัญลักษณ์มอเตอร์ไฮดรอลิก มอเตอร์ไฮดรอลิกเป็นอุปกรณ์ทำงานในระบบไฮดรอลิกแบบหนึ่งที่มีนิยมนำมาใช้กัน โครงสร้างโดยทั่วไปก็คล้ายคลึงกับปั๊มไฮดรอลิกแตกต่างกันที่การทำงานคือ ปั๊มไฮดรอลิกจะเปลี่ยนพลังงานจลน์ในน้ำมันที่ได้รับจากวาล์วหรือปั๊มในระบบให้ เป็นพลังงานกลด้วยการหมุน สัญลักษณ์ของมอเตอร์ไฮดรอลิกจะคล้ายๆ กับปั๊มคือ มีลักษณะเป็นวงกลม มีลูกศรที่บ่งชี้ทิศทางการไหลของน้ำมัน เนื่องจากสัญลักษณ์ของมอเตอร์ไฮดรอลิกคล้ายคลึงกับปั๊มไฮดรอลิกมากนี้เอง ทำให้บางคนเข้าใจผิดได้โดยง่าย ดังนั้นจึงต้องสังเกตความแตกต่างให้ดีคือ ทิศทางการไหลของน้ำมันที่เข้ามอเตอร์ไฮดรอลิก จะเปลี่ยนพลังงานจลน์ของน้ำมันให้เป็นแรงบิดจากการเคลื่อนที่แบบหมุน จุดที่สำคัญที่แสดงให้เห็นทิศทางไหลของน้ำมันก็คือ ลูกศรที่บ่งชี้ ซึ่งหัวลูกศรที่บ่งชี้ในสัญลักษณ์ของมอเตอร์ไฮดรอลิกนั้นจะมีทิศทางแตกต่างกับปั๊มไฮดรอลิก จากรูปสัญลักษณ์มอเตอร์ไฮดรอลิกจะประกอบด้วย มอเตอร์แบบมีทิศทางไหลทางเดียวที่มีลูกศรที่บ่งชี้ 1 ตัว และมีทิศทางไหลได้สองทางที่มีลูกศรที่บ่งชี้ 2 ตัว มอเตอร์ไฮดรอลิกแบบปรับค่าอัตราการไหลได้ จะเพิ่มเส้นลูกศรพาดผ่านสัญลักษณ์มอเตอร์ไฮดรอลิก มอเตอร์ไฮดรอลิกแบบปรับค่าอัตราการไหลไม่ได้



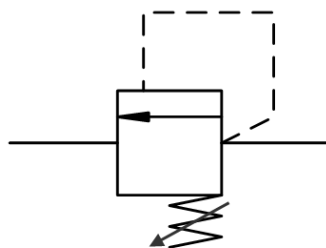
ภาพที่ 2.24 ตัวอย่างสัญลักษณ์มอเตอร์ไฮดรอลิก

2.7.3.3 อุปกรณ์ควบคุมการไหล อุปกรณ์ควบคุมการไหลแบบง่ายๆ ชนิดที่นิยมใช้กันมากคือแบบประตู (Gate) การควบคุมอัตราการไหลของวาล์วแบบนี้ควบคุมได้ไม่แน่นอนเท่าที่ควรดังนั้นหากต้องการควบคุมอัตราการไหลของน้ำมันที่ผ่านวาล์วได้อย่างแม่นยำจึงจำเป็นต้องใช้วาล์วควบคุมอัตราการไหลแบบปรับอัตราการไหลได้ จากรูปที่ 2.25 สัญลักษณ์อุปกรณ์ควบคุมการไหลประกอบด้วยอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลปรับช่องคอคอดไม่ได้ อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลที่ปรับช่องคอคอดได้มีวาล์วก้นกลับแต่ไม่มีการขีดเซอ อุปกรณ์ควบคุมการไหล อุปกรณ์ควบคุมการไหลทางเดียวอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลแบบช่องคอคอดได้มีวาล์วก้นกลับ และมีชุดขีดเซออุณหภูมิและความดัน เป็นต้น



ภาพที่ 2.25 ตัวอย่างสัญลักษณ์อุปกรณ์ควบคุมการไหล

2.7.3.4 อุปกรณ์ควบคุมความดัน อุปกรณ์ควบคุมความดันลักษณะนี้จะแทนสัญลักษณ์ด้วยรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส เป็นอุปกรณ์ที่ให้น้ำมันไหลผ่านหรือปิดกั้นเอาไว้ ลักษณะของอุปกรณ์ควบคุมความดันมีอุปกรณ์ควบคุมความดันชนิดระบายความดัน อุปกรณ์ควบคุมความดันชนิดจัดอันดับการไหล และอุปกรณ์ควบคุมความดันชนิดลดโหลด หรือปลดความดัน



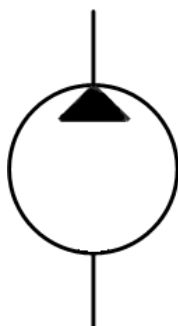
ภาพที่ 2.26 ตัวอย่างสัญลักษณ์อุปกรณ์ควบคุมความดัน

- อุปกรณ์ควบคุมทิศทาง อุปกรณ์ควบคุมทิศทางมีสัญลักษณ์ของวาล์วแบบทำงานหลายตำแหน่ง จะแทนด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสหลายรูป ทั้งนี้อาจจะมีสี่เหลี่ยมตั้งแต่ 2 รูปขึ้นไป ซึ่งสี่เหลี่ยมแต่ละรูปจะหมายถึง ตำแหน่งของวาล์ว และภายในตำแหน่งจะมีทิศทางการไหลผ่านของน้ำมัน จะแสดงด้วยเส้นลูกศรภายในสี่เหลี่ยม จากรูปที่ 2.27 สัญลักษณ์อุปกรณ์ควบคุมทิศทางประกอบด้วย อุปกรณ์ควบคุมทิศทางการไหล 2 ตำแหน่ง 3 ทิศทาง อุปกรณ์ควบคุมทิศทางการไหล 2 ตำแหน่ง 4 ทิศทางในตำแหน่งปกติ อุปกรณ์ควบคุมทิศทางการไหล แบบ 3 ตำแหน่ง 4 รู 4 ทิศทาง ตำแหน่งกลางปิดหมด อุปกรณ์ควบคุมทิศทางการไหลแบบ 3 ตำแหน่ง 4 รู 4 ทิศทาง ตำแหน่งกลางไหลถึงกันทั้งหมด เป็นต้น



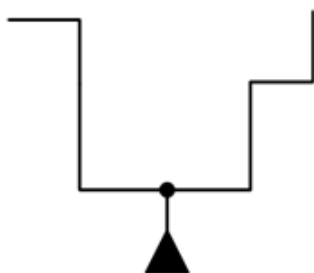
ภาพที่ 2.27 ตัวอย่างสัญลักษณ์วาล์วเปลี่ยนทิศทางการไหล

- ปั๊มไฮดรอลิก เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำมันในระบบไฮดรอลิก ให้มี อัตราการไหลเพิ่มขึ้นหรือลดลง โดยได้รับกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้าผ่านเพลาขับมาหมุนปั๊ม จากรูปที่ 2.28 สัญลักษณ์ปั๊มจะประกอบด้วย ปั๊มแบบอัตราการไหลคงที่มีทิศทางการไหลทางเดียว ปั๊มแบบอัตราการไหลคงที่มี ทิศทางการไหล สองทาง ปั๊มแบบปรับอัตราการไหลได้ ปั๊มแบบปรับอัตราการไหลได้แบบค่อนข้างสมบูรณ์ ปั๊มแบบทิศทางการไหลสองทางปรับอัตราการไหลได้ ปั๊มแบบสมบูรณ์ที่มีทิศทางการไหลสองทาง ปรับอัตราการ ไหลได้ และเพลาขับปั๊มหมุนได้สองทาง เป็นต้น



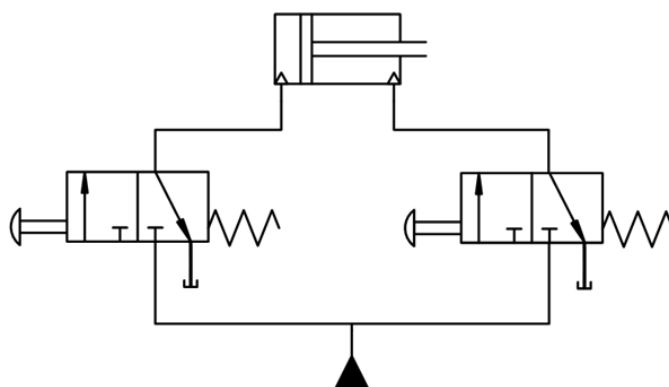
ภาพที่ 2.28 ตัวอย่างสัญลักษณ์ปั๊มไฮดรอลิก

- อุปกรณ์ท่อและข้อต่อ มีหน้าที่เพื่อให้น้ำมันสามารถไหลผ่านเข้าไปยังอุปกรณ์ต่างๆ มีผลทำให้ระบบไฮดรอลิกสามารถทำงานได้ตามความต้องการ จากรูปที่ 2.29 สัญลักษณ์อุปกรณ์ท่อและข้อต่อจะประกอบด้วย ท่อใช้งาน ท่อควบคุม ท่อระบายน้ำมัน จุดต่อร่วม ท่อไฮดรอลิกแบบหักงอได้ ท่อใช้งานต่อกัน ท่อใช้งานคร่อมกัน ทิศทางการไหลของน้ำมันไหลทางเดียวเท่านั้น ทิศทางการไหลของน้ำมันไหลได้ทั้งสองทาง ท่ออยู่ต่ำกว่าระดับของน้ำมันในถัง ปลายท่ออยู่เหนือกว่าระดับของน้ำมันในถัง ปลายท่อถูกอุด และจุดต่อระบายร่วม เป็นต้น



ภาพที่ 2.29 ตัวอย่างสัญลักษณ์อุปกรณ์ท่อและข้อต่อ

- สัญลักษณ์วิธีการบังคับให้อุปกรณ์ทำงาน วิธีการเปลี่ยนตำแหน่งการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมทิศทางนั้น มีการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ มีอยู่หลายวิธีด้วยกัน คือการควบคุมแบบธรรมดาด้วยแรงจากคน การควบคุมแบบทางกล การควบคุมด้วยไฟฟ้าและการควบคุมด้วยลม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความต้องการของการนำไปใช้งานที่แตกต่างกันออกไป จากรูปสัญลักษณ์วิธีการบังคับให้อุปกรณ์ทำงาน จะประกอบด้วย การบังคับแบบรองซี่ดให้ค้างตำแหน่ง การบังคับให้วาล์วทำงานแบบธรรมดาด้วยแรงคน การบังคับแบบลูกกลิ้ง การบังคับโดยใช้ความดันท่อควบคุม การบังคับแบบปุ่มกด การบังคับแบบคันโยกมือ การบังคับแบบคันเหยียบ การบังคับแบบเคี้ยว การบังคับแบบโซลินอยด์ การบังคับแบบใช้เซอร์โวและการบังคับแบบรวม



ภาพที่ 2.30 ตัวอย่างสัญลักษณ์วิธีการบังคับให้อุปกรณ์ทำงาน

- อุปกรณ์ที่ช่วยในการทำงานของระบบไฮดรอลิก ยังมีอยู่อีกมากมายหลายอย่าง เช่น ถังพักน้ำมัน ถังสะสมความดัน เกจวัดความดัน กรองน้ำมัน เป็นต้น สัญลักษณ์อุปกรณ์อื่นๆ ที่ช่วยในการทำงานของ

ระบบไฮดรอลิกจะประกอบด้วย สัญลักษณ์เส้นกรอบอุปกรณ์ สัญลักษณ์ถังพักน้ำมันแบบเปิดและแบบปิด สัญลักษณ์เกจวัดความดัน สัญลักษณ์เกจวัดอุณหภูมิ สัญลักษณ์อุปกรณ์วัดอัตราการไหล สัญลักษณ์มอเตอร์ไฟฟ้า สัญลักษณ์ถังสะสมความดัน สัญลักษณ์กรองน้ำมัน สัญลักษณ์ตัวเพิ่มความร้อน สัญลักษณ์ระบายความร้อน และ สวิตช์ความดัน เป็นต้น



ภาพที่ 2.31 ตัวอย่างอุปกรณ์ที่ช่วยในการทำงานของระบบไฮดรอลิก

2.8 โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (Programmable Logic Controller)

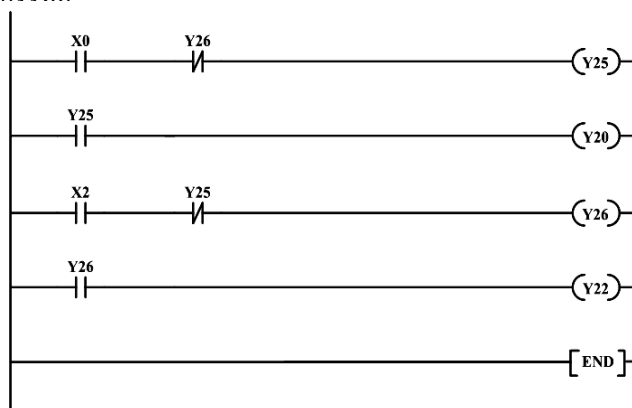
เป็นอุปกรณ์ที่ถูกคิดค้นขึ้นมาเพื่อควบคุมเครื่องจักร หรือ ระบบต่างๆ แทนวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบเก่า ๆ ซึ่งแบบเก่าจะมีข้อเสียคือ การเดินสายและการปรับแก้โครงสร้างการทำงานจะทำได้ยากมาก ดังนั้นปัจจุบันพีแอลซี จึงเข้ามาทดแทนวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เพราะใช้งานได้ง่ายกว่า สามารถต่อเข้ากับอุปกรณ์ อินพุต/เอาต์พุต ได้โดยตรง หลังจากนั้นเพียงแค่เขียนโปรแกรมก็สามารถใช้งานได้ทันที ถ้าต้องการเปลี่ยนเงื่อนไข สามารถทำได้โดยเปลี่ยนแปลงโปรแกรมเท่านั้น ระบบการผลิตในปัจจุบันมักประกอบไปด้วยสายงานการทำงานที่ต่อเนื่อง เครื่องควบคุมพีแอลซียังสามารถต่อกันได้หลายๆตัวเข้ากันด้วยเน็ตเวิร์ค เพื่อควบคุมการทำงานของระบบให้มีความเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น จะเห็นว่าการใช้งานพีแอลซีมีความยืดหยุ่นมากกว่าการใช้งานวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบเก่า

ดังนั้นปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ จึงเปลี่ยนมาใช้พีแอลซี ซึ่งเป็นเครื่องควบคุมที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมเนื่องจากความยืดหยุ่นและความเสถียร เรียกได้ว่าเครื่องจักรทุกชนิดจะต้องมีพีแอลซี ติดตั้งมาด้วยเพื่อควบคุมเครื่องจักรเสมอ



ภาพที่ 2.32 แสดงโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (Programmable Logic Controller: PLC)

ภาษาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมควบคุม โดยในโครงการนี้เลือกใช้ภาษาแลดเดอร์ไลอะแกรม (Ladder diagram) เนื่องจากรูปแบบคล้ายวงจรทางไฟฟ้าซึ่งง่ายต่อการทำความเข้าใจทั้งยังมีส่วนคล้ายกับวงจรควบคุมทางลอจิก การทำงานของภาษาลาเดอร์ จะไม่เหมือนกับโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ทั่วไป โดยจะทำงานจากบนลงล่างตามบรรทัด



ภาพที่ 2.33 แสดงภาษาแลดเดอร์ไลอะแกรมที่คล้ายกับวงจรควบคุมทางไฟฟ้า

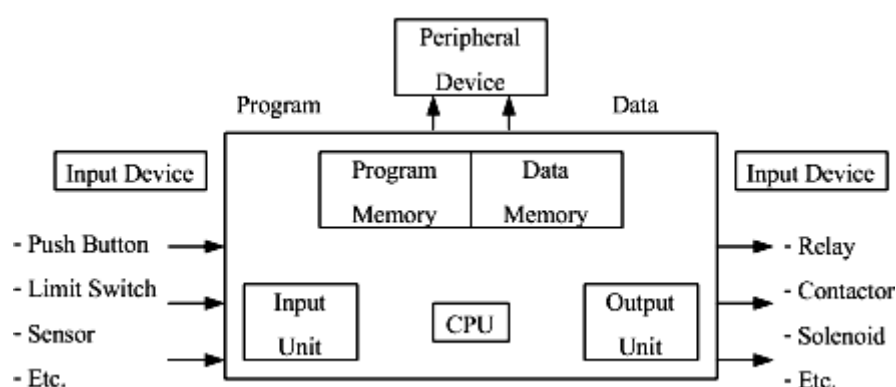
ในการควบคุมโดยใช้ชุดควบคุมแบบโปรแกรมหรือพีแอลซี ไม่จำเป็นต้องใช้ปุ่มกดเซ็นเซอร์รีเลย์ และนิวแมติกส์แล้ว เดินสายต่อเรียงเข้าด้วยกันเป็นวงจรเพื่อให้ได้ผลทางดิจิทัลและลำดับขั้นตอนการทำงานที่ต้องการ เพียงแต่นำสัญญาณจากปุ่มกดและเซ็นเซอร์ทั้งหลายต่อตรงเข้ากับหน่วยรับสัญญาณ และนำคอนแทคเตอร์คอยล์ขั้วแล้วและอุปกรณ์สำหรับการขับเคลื่อนหรือให้พลังงานมาต่อเข้ากับหน่วยส่งสัญญาณของพีแอลซีได้โดยตรงสัญญาณที่เข้าสู่หน่วยรับและออกจากหน่วยส่งสัญญาณของพีแอลซีเป็นสัญญาณไฟฟ้า สำหรับระบบนิวแมติกส์จำเป็นต้องมีการปรับเปลี่ยนลักษณะของสัญญาณจากลมเป็นไฟฟ้า หรือจากไฟฟ้าเป็นลม เพื่อให้ทำงานร่วมกับพีแอลซีได้ ส่วนลำดับขั้นตอนหรือฟังก์ชันการทำงานของระบบนั้น พีแอลซีจะเป็นผู้รับหน้าที่ไปดำเนินการในรูปของโปรแกรมซอฟต์แวร์ ตัวโปรแกรมจะถูกป้อนเข้าสู่ตัวควบคุมได้โดยอาศัยตัวป้อนโปรแกรม โปรแกรมที่ป้อนเข้ามานี้จะถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำของตัวควบคุม ซึ่งเหมือนโบบันทึกลงหน้าที่และขั้นตอนการทำงานของตัวควบคุม ตัวโปรแกรมประกอบด้วยฟังก์ชันทางดิจิทัล เช่น สัญญาณในรูปแบบ และ หรือ ของสัญญาณจากหน่วยรับสัญญาณ และสัญญาณช่วยอื่น ๆ ที่ตัวควบคุมสร้างขึ้นในระหว่างการทำงาน สถานะของสัญญาณต่าง ๆ และดิจิทัลที่ได้กำหนดไว้ในโปรแกรมจะเป็นตัวกำหนดว่าเอาต์พุตตัวใดควรทำงานเมื่อไร และทำงานนานแค่ไหน ในกรณีที่ต้องการแก้ไขเปลี่ยนแปลงลำดับขั้นตอนการทำงานของระบบ สามารถทำได้โดยง่ายเพียงแค่แก้ไขโปรแกรม และป้อนเข้า ตัวควบคุมเพื่อให้รับรู้หน้าที่ และขั้นตอนการทำงานใหม่เท่านั้น โดยไม่จำเป็นต้องมีการแก้ไขวงจร และเดินสายต่อวงจรใหม่

ในการเลือกขนาดและรุ่นของพีแอลซีนั้น สิ่งแรกคือ การนับจำนวนอุปกรณ์อินพุต และเอาต์พุตที่จะต่อเข้าพีแอลซีก่อน จึงสามารถกำหนดขนาดของพีแอลซีที่ใช้ได้ ซึ่งจำนวนอินพุตที่ต้องการจะไม่เท่ากับจำนวนอุปกรณ์

อินพุตเสมอไป นับจำนวนอินพุตเอาต์พุตจากรูปวงจรรีเลย์ซีเควินซ์ การเลือกแบบแหล่งจ่ายไฟ, แรงดันไฟอินพุต, เอาต์พุตแหล่ง จ่ายไฟพีแอลซี ในปัจจุบันสามารถใช้ไฟได้ตั้งแต่ 100 ถึง 240 โวลต์ จึงไม่มีปัญหาเรื่อง แหล่งจ่ายไฟพีแอลซีบางชนิดนั้นใช้แหล่งจ่ายไฟตรง 24 โวลต์ได้ และยังสามารถใช้การสำรองไฟจากแบตเตอรี่ ได้ด้วย แรงดันไฟอินพุตปกติแรงดันไฟด้านอินพุตจะใช้ไฟตรง 24 โวลต์ จะจ่ายออกมาจากตัวพีแอลซี แต่มี พีแอลซี ชนิดที่รับแรงดันไฟสลับ 100 โวลต์หรือ 220 โวลต์ได้ ใช้ในกรณีที่สายอินพุตยาว และมีสัญญาณ ครอบคลุมมาก แรงดันไฟเอาต์พุตที่เป็นหน้าสัมผัสจะมีใช้มากที่สุด เนื่องจากสามารถขับโหลดได้ทั้งไฟฟ้า กระแสสลับ และ ไฟฟ้ากระแสตรง เอาต์พุตที่เป็นทรานซิสเตอร์หรือไทรแอก เหมาะสำหรับ โหลดที่มีการเปิดปิด บ่อย จะต้องศึกษาว่าพีแอลซี ของแต่ละบริษัท และแต่ละรุ่นมีแบบให้เลือกกี่แบบ ศึกษาข้อกำหนดของพีแอลซี ให้ละเอียดก่อนการเลือกชนิดของหน่วยความจำ

ระบบควบคุมแบบโปรแกรมได้โดยทั่วไปประกอบด้วยชุดควบคุมแบบโปรแกรมได้มีเซ็นเซอร์ต่อเข้ากับ หน่วยรับสัญญาณ และอุปกรณ์สำหรับขับเคลื่อนหรือการทำงานต่อเข้ากับหน่วยส่งสัญญาณ สำหรับชุดควบคุม ประกอบด้วยส่วนสำคัญ คือ หน่วยประมวลผลกลาง พร้อมโปรเซสเซอร์ (Processor)

หน่วยความจำ (Program module) และแหล่งจ่ายไฟ สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านเซ็นเซอร์จะเข้าสู่ หน่วยรับสัญญาณขณะเดียวกันหน่วยประมวลผลพร้อม โปรเซสเซอร์ก็ทำงานตามโปรแกรมที่บันทึกไว้ใน หน่วยความจำโดยตรวจจับสัญญาณเข้า จากเซ็นเซอร์ว่ามีสถานะเป็น “0” หรือเป็น “1” กล่าวคือมีแรงดันไฟฟ้า เคลื่อนผ่านเซ็นเซอร์นั้นเข้าตัวควบคุมหรือไม่ เมื่อโปรเซสเซอร์รับรู้สถานะของสัญญาณจากเซ็นเซอร์แล้วก็ พิจารณาตามโปรแกรม และคำสั่งการไปยังหน่วยสัญญาณว่าจะอนุญาตหรือไม่อนุญาตให้แรงดันไฟฟ้าเคลื่อนเข้า สู่อุปกรณ์สำหรับการขับเคลื่อน กล่าวคือให้หน่วยส่งสัญญาณแต่ละตัวมีสถานะเป็น “0” หรือ “1”



ภาพที่ 2.34 แสดงองค์ประกอบของพีแอลซี

หน่วยความจำหมายถึงสถานที่เก็บรักษาข้อมูล และข้อมูลที่เก็บอยู่ นั้นสามารถนำออกมาใช้ในเวลาที่ ต้องการ เช่น โปรแกรมสำหรับควบคุมกระบวนการ โปรเซสเซอร์จะเรียกดูเมื่อมีคำสั่งให้ชุดควบคุมแบบ โปรแกรมได้เริ่มปฏิบัติงาน หน่วยความจำที่ใช้กันอยู่แบ่งแยกประเภทได้ออกตามขนาดความจุ โครงสร้าง และ

คุณสมบัติในการเก็บรักษารวมทั้งการแก้ไขข้อมูลในหน่วยความจำนั้นขนาดความจุของหน่วยความจำคือ จำนวนข้อมูลที่สามารถเก็บรักษาไว้ในหน่วยความจำได้ส่วนใหญ่แล้วจะมีหน่วยเป็นกิโลไบต์ (Kilo-byte) หน่วยความจำของพีแอลซีประกอบด้วย หน่วยความจำแรม (RAM) และ รอม (ROM) หน่วยความจำชนิดแรมทำหน้าที่เก็บโปรแกรมของผู้ใช้และข้อมูลสำหรับการปฏิบัติงานของพีแอลซี ส่วนรอมทำหน้าที่เก็บโปรแกรมของผู้ผลิตและข้อมูลสำหรับการปฏิบัติงานของพีแอลซี สามารถแบ่งออกได้ดังต่อไปนี้

2.8.1 สเตติกแรม (Static RAM: Static random access memory) เป็นหน่วยความจำชนิดที่สามารถเปลี่ยนแปลงข้อมูลได้โดยตรง กล่าวคือข้อมูลใหม่ที่ถูกใส่เข้ามา จะเข้ามาแทนที่ข้อมูลเก่าโดยที่ข้อมูลเก่าจะสูญหายไป หน่วยความจำชนิดนี้จะเก็บรักษาข้อมูลไว้ได้ก็ต่อเมื่อมีไฟเลี้ยงวงจรตลอดเวลา ถ้าขาดไฟเลี้ยงวงจรข้อมูลทั้งหมดที่เก็บรักษาจะหายไปหมดสิ้น

2.8.2 ไดนามิกแรม (Dynamic RAM: Dynamic random access memory) มีคุณสมบัติเช่นเดียวกับสเตติกแรมทุกอย่าง แต่แตกต่างกันที่ไดนามิกแรมต้องมีการจ่ายไฟเลี้ยงในลักษณะการเติมประจุเป็นรอบ โดยปกติใช้ความถี่ประมาณเฮิรตซ์หรือมากกว่า ข้อดีของไดนามิกแรม คือมีขนาดเล็กกว่าเก็บข้อมูลได้มากกว่าและราคาถูกกว่าด้วย

2.8.3 รอม (ROM: Read only memory) เป็น หน่วยความจำชนิดที่ผู้ผลิตเป็นผู้ใส่ข้อมูลเข้าไปในหน่วยความจำ จะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงแก้ไขได้อีกต่อไป และสัดส่วนของข้อมูลก็จะไม่สูญหายไปเมื่อไม่มีไฟเลี้ยงวงจร

2.8.4 พรอม (PROM: Program read only memory) เป็นหน่วยความจำชนิดที่ข้อมูลทั้งหมด ที่เก็บรักษาสามารถลบทิ้งไปได้ ข้อมูลก็จะไม่สูญหายไปเมื่อไม่มีไฟเลี้ยงวงจร

2.8.5 อีพรอม (EPROM: Erasable program read only memory) เป็นความจำที่ผู้ใช้ใส่ข้อมูลเข้าไปในหน่วยความจำเอง แต่กระทำได้เพียงครั้งเดียว และไม่สามารถเปลี่ยนแปลงแก้ไขข้อมูลได้อีกต่อไป ข้อมูลก็จะไม่สูญหายไปเมื่อไม่มีไฟเลี้ยงวงจร

2.8.6 อีอีพรอม (EEPROM: Electrical erasable program read only memory) เป็นหน่วย ความจำชนิดที่ข้อมูลทั้งหมดที่เก็บรักษาสามารถลบทิ้งได้ด้วยไฟฟ้า และสามารถทำการใส่ข้อมูลเข้าไปได้อีก ข้อมูลก็จะไม่สูญหายเมื่อไม่มีไฟเลี้ยงวงจร

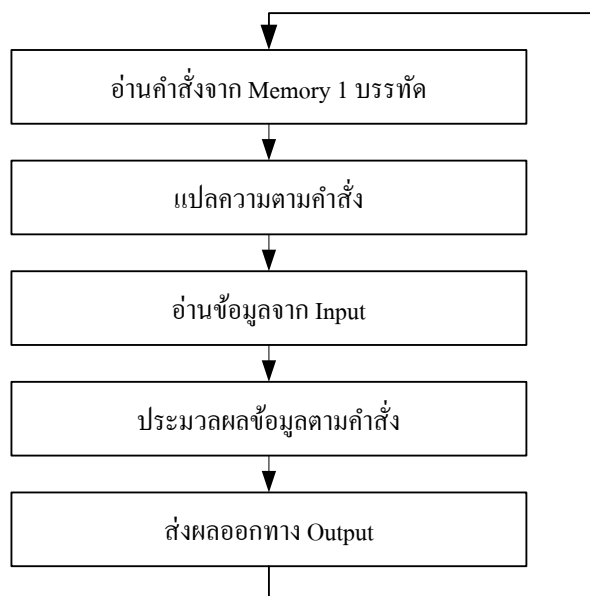
2.8.7 หน่วยความจำโปรแกรม (Program memory unit) คือส่วนที่รักษาโปรแกรมโดยที่โปรแกรมประกอบขึ้นด้วยหลาย ๆ คำสั่งที่ถูกเขียนขึ้นและเรียบเรียงกันอย่างมีหลักการ โปรแกรมนี้จะเป็นตัวกำหนดลำดับขั้นตอนการทำงานว่าให้เป็นไปในลักษณะใด โดยทั่วไปแล้วหน่วยความจำโปรแกรมภายใน (Internal program memory) จะเป็นแบบแรม ในกรณีที่ไฟฟาดับโปรแกรมที่เก็บอยู่ในหน่วยความจำ โปรแกรมภายในจะสูญหายไปหมด เพื่อป้องกันไม่ให้โปรแกรมสูญหายไปจึงจำเป็นต้องมีแบตเตอรี่จ่ายไฟสำรอง เป็นตัวจ่ายไฟเลี้ยงวงจร

แทนอย่างสม่ำเสมอ ให้กับหน่วยความจำโปรแกรมภายในเมื่อไฟฟ้าดับด้วย หรือถ้าต้องการรักษาโปรแกรมไว้โดยไม่ใช้อิพროม โดยทั่วไปจะทำเป็นโมดูลให้สามารถเสียบต่อและถอดออกจากตัวพีแอลซี ได้โดยง่าย

2.8.8 หน่วยรับสัญญาณ (Input) เป็นส่วนที่รับสัญญาณจากภายนอก เช่น เซ็นเซอร์หรือคิมิด์สวิตช์ และนำเข้าสู่ระบบภายในซีพียู โดยแปลงสัญญาณอินพุตต่าง ๆ เหล่านี้ที่อาจอยู่ในรูปของไฟกระแสสลับไฟกระแสตรง หรือสัญญาณแบบอนาล็อกให้เป็นสัญญาณที่เหมาะสมกับระบบภายในของพีแอลซี สัญญาณเหล่านี้จะต้องมีความเหมาะสมถูกต้อง ไม่เช่นนั้นแล้วจะก่อให้เกิดความเสียหายกับพีแอลซีได้ และสัญญาณเหล่านี้เองจะถูกนำไปประมวลผลตามที่โปรแกรมกำหนดไว้

2.8.9 ส่วนของหน่วยส่งสัญญาณ (Output) จะทำหน้าที่รับค่าสถานะที่ได้จากการประมวลผลของซีพียู แล้วนำค่าเหล่านี้ไปควบคุมอุปกรณ์ทำงาน เช่น รีเลย์ โซลินอยด์ เป็นต้น นอกจากนั้นแล้วยังทำหน้าที่แยกสัญญาณของหน่วยประมวลผลกลาง ออกจากอุปกรณ์เอาต์พุต โดยปกติเอาต์พุตนี้จะมีความสามารถขับโหลดด้วยกระแสไฟฟ้า ประมาณ 1-3 แอมแปร์ แต่ถ้าโหลดต้องการกระแสไฟฟ้ามากกว่านี้จะต้องต่อเข้ากับอุปกรณ์ขับอื่นเพื่อขยายให้รับกระแสไฟฟ้ามากขึ้น เช่น รีเลย์ หรือแมกเนติกส์คอนแทกเตอร์ (Magnetics Contactor)

2.8.10 หน่วยประมวลผลกลาง (Central Processor Unit) หมายถึง ส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของพีซี โดยทั่วไปแล้วมักจะใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ชนิด 8 บิต เป็นตัวประมวลผลปกติเป็นหน้าที่ของซีพียู คือ รับข้อมูลอินพุตเข้ามาทำการประมวลผล แล้วส่งผลที่ได้ออกไปยังเอาต์พุต จากนั้นก็จะวนกลับไปรับข้อมูลอินพุตเข้ามาอีกแล้วทำซ้ำ ๆ ในลักษณะเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ เรียกกันว่า การสแกนการทำงานของซีพียู จะอยู่ภายใต้การควบคุมของโปรแกรมที่ผู้ใช้ป้อนเข้าไป นอกจากนี้ซีพียู ยังทำหน้าที่รับส่งข้อมูลกับอุปกรณ์ติดต่อ (Peripheral device) ตรวจสอบเช็คตัวเอง และหน่วยความจำ ตรวจสอบเช็คแหล่งจ่ายไฟ เป็นต้น



ภาพที่ 2.35 แผนภูมิแสดงการทำงานของซีพียู

2.9 เซ็นเซอร์วัดอัตราการไหล (Flow Sensor)

การเคลื่อนที่ของการไหล จำแนกออกได้เป็น 3 ประเภทได้แก่

- อัตราปริมาตรไหล (Volumetric Flow Rate)
- อัตรามวลไหล (Mass Flow Rate)
- อัตราเร็วของของไหล (Fluid Velocity)

โดยปกติการวัดการไหลของของเหลวจะเป็นตัวแปรที่ถูกควบคุมอย่างแพร่หลายพบว่าการวัดของเหลวจะมีความเกี่ยวข้องกับตัวแปรหลายตัวเช่น ผลของความดัน แรง การส่งถ่ายความร้อน พื้นที่การไหล เป็นต้น

2.9.1 การวัดการไหลของของแข็ง (solid Flow Measurement) การวัดการไหลของของแข็งที่ใช้ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของอนุภาคขนาดเล็กๆ เช่น วัสดุที่ถูกบด หรือแข็งที่ถูกลำเลียงโดยระบบสายพานลำเลียงหรือวัสดุแบบบดค้อนๆ เช่น ของแข็งที่ถูกพักไว้ในถังเก็บของเหลว (liquid host) ในการรวมตัวกันของวัสดุลักษณะดังกล่าวนี้จะเรียกว่า “สเลอรี” (slurry) ซึ่งสามารถลำเลียงหรือขนส่งได้โดยการดูดผ่านท่อในลักษณะที่คล้ายกับของเหลวเราจึงพิจารณาได้ว่าระบบดังกล่าวเป็นของไหลได้

2.9.2 การไหลของของเหลว (Liquid Flow) การวัดอัตราการไหลของของเหลวมีความเกี่ยวข้องกับงานหลายๆอย่างในกระบวนการทางอุตสาหกรรม เช่น ในโรงกลั่นน้ำมัน โรงงานผลิตเบียร์ เป็นต้น

หน่วยที่ใช้อธิบายการวัดการไหลมีอยู่หลายหน่วย ขึ้นอยู่กับว่าเราจะกำหนดรายละเอียดของกระบวนการอย่างไร วิธีทั่วไปที่สามารถใช้อธิบาย ได้แก่

2.9.2.1 ปริมาตรอัตราการไหล (volume flow rate) แสดงเป็นปริมาตรการไหลผ่านจุดอ้างอิงต่อหน่วยเวลา ตัวอย่างของหน่วยนี้คือ แกลลอน/นาทีก, ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง

2.9.2.2 ความเร็วของการไหล (flow velocity) แสดงเป็นระยะทางที่ของไหลเคลื่อนที่ในท่อต่อหน่วยเวลา ตัวอย่างของหน่วยเป็น เมตร/นาทีก, ฟุต/นาทีก ซึ่งค่านี้จะสัมพันธ์กับปริมาตรอัตราการไหลนั้นคือ

$$v = \frac{Q}{A} \quad (2.9)$$

โดยที่	v	หมายถึง	ความเร็วของการไหล (เมตร/นาทีก)
	Q	หมายถึง	ปริมาตรอัตราการไหล (ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง)
	A	หมายถึง	พื้นที่หน้าตัดของตัวนำการไหล (ตารางเมตร)

2.9.2.3 มวลการไหลหรือน้ำหนักอัตราการไหล (mass or weight flow rate) เป็นการแสดงอัตราการไหลของมวลหรือน้ำหนักต่อหน่วยเวลา ตัวอย่างของหน่วยนี้คือ กิโลกรัม/ชั่วโมง, ปอนด์/ชั่วโมง ซึ่งค่านี้จะสัมพันธ์กับปริมาตรอัตราการไหล นั้นคือ

$$F = \rho \cdot Q \quad (2.10)$$

โดยที่	F	หมายถึง	มวลหรือน้ำหนักอัตราการไหล (กิโลกรัม/ชั่วโมง)
	ρ	หมายถึง	ความหนาแน่นมวล (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
	Q	หมายถึง	ปริมาตรอัตราการไหล (ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง)

2.9.3 ประเภทของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของของไหล สามารถแยกออกเป็น 7 ชนิด คือ

2.9.3.1 อุปกรณ์ตรวจวัดการไหล แบบกระบอกสูบโรตารี (Rotary piston meter) หลักการทำงาน เมื่อของเหลวไหลเข้าไปยังพื้นที่ว่าง หรือห้องสูบภายในตัวอุปกรณ์ตรวจวัดการไหลแบบกระบอกสูบโรตารี จนเต็ม ลูกสูบซึ่งอยู่ภายในก็จะเคลื่อนที่ปิดช่องทางไม่ให้ของเหลวไหลเข้าไปภายในห้องสูบได้อีก จนกระทั่ง ลูกสูบภายในเกิดการหมุนเคลื่อนที่ไปอีกด้านเพื่อเปิดช่องทางออกให้ของเหลวภายในห้องสูบไหลผ่านออกไป จนหมด จากนั้นลูกสูบจึงเคลื่อนที่ไปเปิดทางเข้าให้ของเหลวชุดใหม่สามารถไหลเข้ามาภายในห้องสูบได้อีก ลักษณะการทำงานเช่นนี้จะทำให้ทราบถึงปริมาตรของเหลวที่เกิดการไหลผ่านตัวอุปกรณ์ตรวจวัดการไหลในแต่ละรอบ โดยในแต่ละรอบของเหลวมีปริมาตรเท่ากับขนาดของห้องสูบภายในอุปกรณ์ตรวจวัดการไหล สำหรับ จำนวน การหมุนของลูกสูบจะถูกส่งผ่านทางคลัทช์แบบสนามแม่เหล็ก (Magnetic Clutch) เพื่อสร้างเป็นสัญญาณพัลส์ โดยจำนวนของพัลส์จะใช้ในการบอกค่าปริมาตรของของเหลว ส่วนความถี่ของพัลส์ใช้ในการบอกค่าอัตราการไหลของของเหลว



ภาพที่ 2.36 ตัวอย่างอุปกรณ์ตรวจวัดการไหลแบบกระบอกสูบโรตารีในอุตสาหกรรม

ข้อมูลด้านเทคนิค

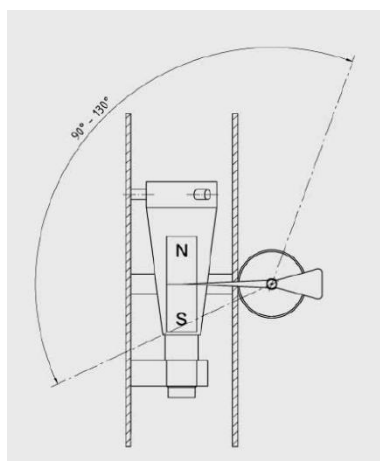
ขนาดของอุปกรณ์ตรวจวัด	DN 15, 25, 50 และ 80
ย่านความดันที่ใช้งาน	PN 4 ถึง 63
ย่านการวัดอัตราการไหล	0.2 ถึง 1,000 l/min
ความแม่นยำ	< 0.3%
ความหนืด	สามารถใช้งานได้ถึง 350,000 mPa.S
อุณหภูมิของของเหลว	สามารถใช้งานได้ถึง 300 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของอุปกรณ์ตรวจวัดการไหลแบบกระบอกสูบโรตารี

ข้อดี	ข้อเสีย
- สามารถใช้กับของเหลวทั่วไปหรือของเหลวที่มีความหนืดสูง (350,000 mPa.S) - ใช้กับของเหลวที่มีการกัดกร่อนได้ (Aggressive media) - ใช้กับงานที่ต้องเคลื่อนย้ายจุดทำงานได้เพราะไม่ต้องต่อกระแสไฟฟ้า - ติดตั้งไม่ต้องการระยะหน้า – หลังของท่อ - ใช้งานได้กับของเหลวที่มีอุณหภูมิสูง (300 องศาเซลเซียส) ได้ - ใช้กับของเหลวที่มีชิ้นวัสดุเจือปนเล็กน้อยได้ - มีความทนทานสูง	- เกิดการสูญเสียแรงดันในระบบ (Pressure loss) ขณะใช้งาน - มีชิ้นส่วนเคลื่อนที่ทางกล - ราคาแพงเมื่อเลือกใช้นาฬิกาดังกล่าว - จำกัดย่านการวัด - โคนกัดกร่อนจากของเหลวที่มีคุณสมบัติเป็นกรดรุนแรงได้

2.9.3.2 อุปกรณ์ตรวจวัดการไหล แบบโรตารี (Rota meter / Variable area flow meter)

หลักการทำงาน อุปกรณ์ตรวจวัดการไหลแบบโรตารีนี้ตัวอุปกรณ์ตรวจวัดจะติดตั้งในแนวตั้งโดยแรงดันของของไหลผ่านจะดันให้ลูกกลอยทรงกรวยภายในโรตารียกตัวขึ้น ระดับของลูกกลอยที่ยกตัวสูงขึ้นแสดงถึงค่าอัตราการไหลของของไหล ตัวอุปกรณ์ตรวจวัดการไหลแบบโรตารีข้างบนภายในตัวลูกกลอยจะมีแม่เหล็กเป็นส่วนประกอบ และมีแท่งเหล็กติดตั้งอยู่ภายนอกตัวท่อโรตารี ซึ่งแท่งเหล็กก็จะเกิดการเหนี่ยวนำกับตัวลูกกลอย ส่งผลทำให้เกิดแรง ไปขับเคลื่อนเข็มที่ใช้สำหรับแสดงค่าอัตราการไหลต่อไป



ภาพที่ 2.37 โครงสร้างการทำงานของอุปกรณ์ตรวจวัดการไหลแบบโรตารี



ภาพที่ 2.38 ตัวอย่างของอุปกรณ์ตรวจวัดการไหลแบบโรตารีในอุตสาหกรรม

ข้อมูลทางเทคนิค

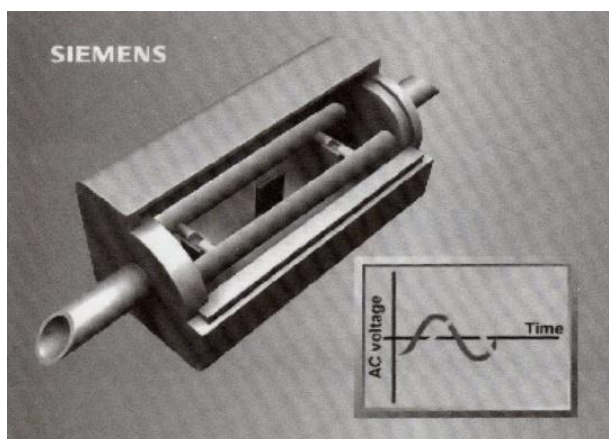
ย่านการวัดอัตราการไหล	100 m ³ /h สำหรับของเหลว 630 m ³ /h สำหรับก๊าซ
อุณหภูมิของของไหล	สามารถใช้งานได้ถึง 300 องศาเซลเซียส
ย่านความดันที่ใช้งาน	สามารถใช้งานได้ถึง PN40

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของอุปกรณ์ตรวจวัดการไหลแบบโรตารี

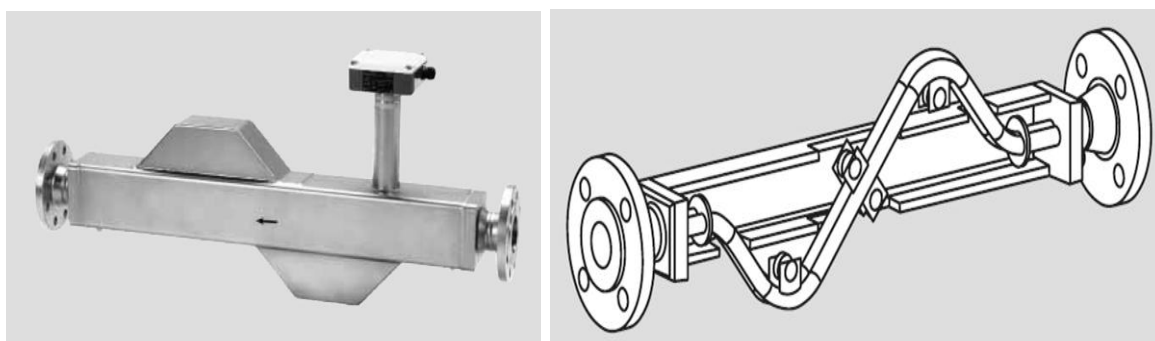
ข้อดี	ข้อเสีย
- ราคาถูก มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน - ไม่ต้องการแหล่งพลังงานหรือกระแสไฟฟ้าภายนอก - ใช้ได้กับทั้งของเหลวและก๊าซ - ไม่ต้องการติดตั้งและบำรุงรักษา - สามารถต่อเพิ่มสัญญาณเอาต์พุตเพื่อใช้กับ พีแอลซี หรือ คอนโทรลเลอร์ ได้	- ต้องติดตั้งแนวตั้งเท่านั้น - มีการสูญเสียแรงดันในระบบขณะใช้งาน - ถ้าของเหลวมีวัสดุเจือปนอาจทำให้ตัวอุปกรณ์ตรวจวัดเสียหายได้ - ความแม่นยำจะขึ้นกับความดัน, อุณหภูมิ และ ความหนาแน่นของของไหลที่ไหลผ่าน - อ่อนไหวต่อแรงกระแทก หรือ การสั่นสะเทือน - โดนกักร้อนจากของเหลว เช่น กรด ได้

2.9.3.3 อุปกรณ์ตรวจวัดการไหล แบบคอรียอลิส ชนิดท่อขนาน (Coriolis parallel tube) หลักการทำงาน อุปกรณ์ตรวจวัดแบบคอรียอลิส ชนิดท่อขนานนี้จะใช้หลักการของคอรียอลิส โดยของไหลทั้งสองจะถูกทำให้สั่นที่ความถี่ก้ำกัร (Resonant frequency) ด้วยพลังงานจากขดแม่เหล็กไฟฟ้าภายในตัวมิเตอร์ สำหรับสาเหตุที่ต้องใช้ท่อภายในเป็นท่อแบบขนานสองท่อเพราะต้องการให้เกิดสมมูลขณะสั่น และเมื่อมีการไหลเกิดขึ้นจะเกิดความแตกต่างของเฟส (Phase shift) โดยค่าต่างเฟสที่เกิดขึ้นจะเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับอัตราการไหลของมวลที่ไหลผ่านท่อ อุปกรณ์ตรวจวัดการไหลชนิดนี้จะมีหัววัดอุณหภูมิติดตั้งอยู่ภายในท่อเพื่อใช้ชดเชยค่าอุณหภูมิของ

ของไหล อุปกรณ์ตรวจวัดการไหลชนิดนี้ได้รับความนิยมในการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถทำการตรวจวัดการไหลได้ทั้งของเหลว และก๊าซ อีกทั้งยังสามารถทำการตรวจวัดค่าตัวแปรได้หลายค่า เช่น อัตราการไหล (Flow rate) อัตราการไหลของมวล (Mass Flow Rate) ปริมาตรการไหล (Volume totalize) ปริมาณการไหล (Mass totalize) อุณหภูมิ (Temperature) ความหนาแน่น (Density) ของของไหล เป็นต้น



ภาพที่ 2.39 โครงสร้างการทำงานของอุปกรณ์ตรวจวัดการไหลคอริโอลิส ชนิดท่อขนาน



ภาพที่ 2.40 ตัวอย่างมิเตอร์คอริโอลิส ชนิดท่อขนานในอุตสาหกรรม

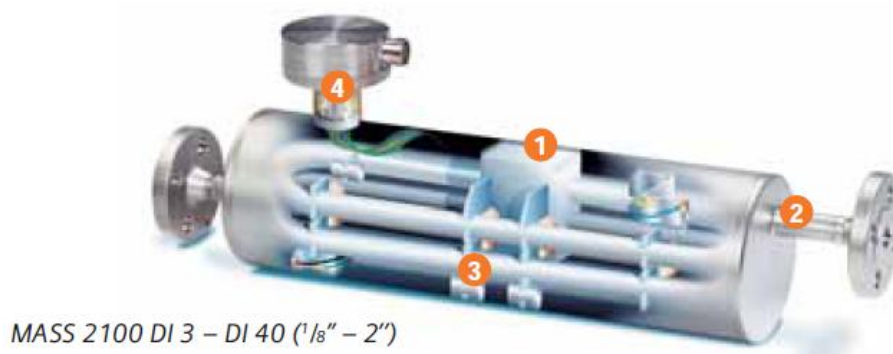
ข้อมูลทางเทคนิค

ขนาดของอุปกรณ์ตรวจวัด	DN50, 65, 80 และ 150/2", 2.5", 3", 4" และ 6"
ช่วงการวัด	0 – 510,000 kg/h / 0-1,124,000 lbs/h
ความดันปกติ	ถึง PN 100 /1450 psi
อุณหภูมิปกติ	- 40 องศาเซลเซียส ถึง 180 องศาเซลเซียส
วัสดุของท่อตรวจวัด	AISI31 6L หรือ Hastelloy C4
ความแม่นยำ	0.15% ของอัตราการไหลของมวล

ตารางที่ 2.7 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของอุปกรณ์ตรวจวัดการไหลคอริโอลิส ชนิดท่อขนาน

ข้อดี	ข้อเสีย
- สามารถวัดได้ทั้งก๊าซและของเหลว - สามารถใช้งานได้โดยเป็นอิสระโดยตรง ไม่ขึ้นกับตัวแปรทางกายภาพของของไหล คือ อุณหภูมิ, ความดัน, ความหนาแน่น, ความหนืด, ความนำไฟฟ้า และลักษณะการไหล - เมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ตรวจวัดการไหลที่ใช้หลักการแบบอื่น อุปกรณ์ตรวจวัดการไหลคอริโอลิสจะให้ความแม่นยำ และมีข้อจำกัดอัตราส่วน (Turn down) ที่ดีกว่า - สามารถวัดการไหลได้หลายตัวแปรและมีความแม่นยำสูงเช่นอัตราการไหลของมวล, อุณหภูมิ และความหนาแน่น ของของไหล เป็นต้น	- ความแม่นยำลดลงเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ตรวจวัดการไหลคอริโอลิส ชนิดท่อเดี่ยว เพราะต้องแบ่งของของไหลให้ไหลเป็นสองท่อภายในตัวอุปกรณ์ - ท่อภายในตัวอุปกรณ์ตรวจวัดการไหลของท่อสองท่อไม่เหมาะกับงานประเภทอุตสาหกรรมยา และอาหารเนื่องจากอาจมีการตกค้างของของไหลภายในท่อได้ - ราคาค่อนข้างราคาแพงเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ตรวจวัดการไหลชนิดอื่น

2.9.3.4 อุปกรณ์ตรวจวัดการไหล คอริโอลิส ชนิดท่อเดี่ยว (Coriolis single pipe) หลักการทำงาน อุปกรณ์ตรวจวัดการไหลแบบคอริโอลิส ชนิดท่อเดี่ยวจะใช้หลักการทำงานเช่นเดียวกับมิเตอร์คอริโอลิส ชนิดท่อนาน นั่นก็คือ การใช้หลักของแรงคอริโอลิสที่เกิดขึ้น แต่ภายในตัวอุปกรณ์ตรวจวัดการไหลจะมีท่อซึ่งขดตัวเป็นแบบ Omega loop เพียงท่อเดี่ยว ทั้งนี้เพื่อทำให้เกิดสมดุลขณะสั่นด้วยความถี่สั่นพ้องจากพลังงานของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ลักษณะการทำงานเช่นนี้จะทำให้มีข้อเปรียบในแง่ของความแม่นยำมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ตรวจวัดการไหลคอริโอลิส ชนิดท่อนาน โดยทั่วไปอุปกรณ์ตรวจวัดการไหลคอริโอลิส ชนิดท่อเดี่ยวนิยมนำไปประยุกต์ใช้ใน งานผสมยา และในงานผสมสารเคมีที่ต้องการความแม่นยำสูง เป็นต้น



ภาพที่ 2.41 ลักษณะภายในของอุปกรณ์ตรวจวัดการไหล คอริโอลิส ชนิดท่อเดี่ยว



ภาพที่ 2.42 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการไหลคอรืออลิส ชนิดท่อเดี่ยวในอุตสาหกรรม

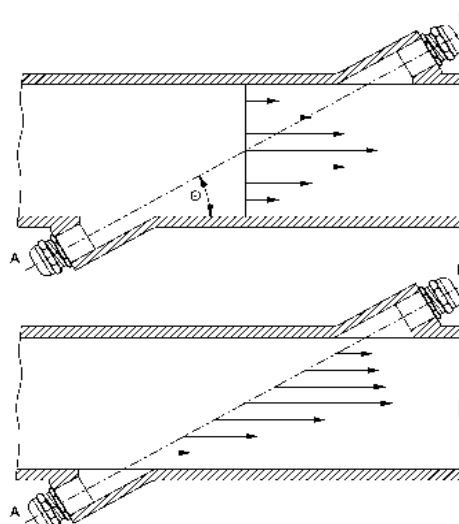
ข้อมูลทางเทคนิค

ขนาดของอุปกรณ์ตรวจวัด	DI 1.5, 3, 6, 15, 25 และ 40 mm 1/16", 1/8", 1/4", 1/2", 1" และ 2"
ย่านการวัด	0-52,000 kg/h / 0-114,600 lbs/h
ความดันปกติ	ถึง PN410 / 5.945 psi
อุณหภูมิปกติ	- 40 องศาเซลเซียส ถึง 180 องศาเซลเซียส
วัสดุของท่อตรวจวัด	AISI31 6L หรือ Hestelloy C4
ความแม่นยำ	0.10% ของอัตราการไหลแบบมวล

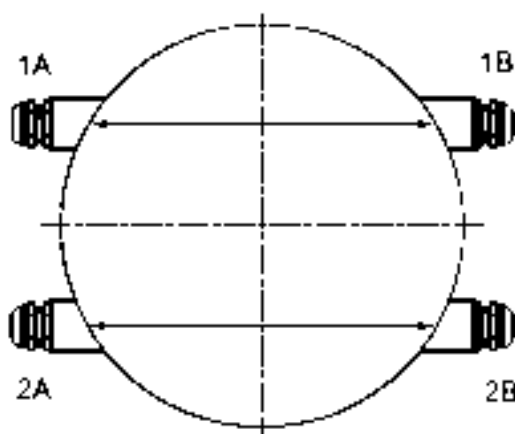
ตารางที่ 2.8 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของอุปกรณ์ตรวจวัดการไหลแบบคอรืออลิส ชนิดท่อเดี่ยว

ข้อดี	ข้อเสีย
- สามารถทำการตรวจวัดได้ทั้งของเหลวและก๊าซ - สามารถใช้งานได้โดยเป็นอิสระโดยตรง ไม่ขึ้นกับตัวแปรทางกายภาพของของไหล คือ อุณหภูมิ, ความดัน, ความหนาแน่น, ความหนืด, ความนำไฟฟ้า และลักษณะการไหล (Flow profile) - เมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ตรวจวัดการไหลที่ใช้หลักการแบบอื่น อุปกรณ์ตรวจวัดการไหลคอรืออลิสจะให้ความแม่นยำ และมีข้อจำกัดอัตราส่วน (Turn down) ที่ดีกว่า - สามารถวัดการไหลได้หลายตัวแปรและมีความแม่นยำสูงเช่น อัตราการไหล	- ความแม่นยำจะลดลงเมื่อของไหลมีคุณลักษณะเป็นของผสม 2 สถานะเช่น ก๊าซผสมของเหลว - ราคาค่อนข้างราคาแพงเมื่อเทียบกับมิเตอร์ชนิดอื่น

2.9.3.5 อุปกรณ์ตรวจวัดการไหล อัลตราโซนิก ชนิดจับช่วงเวลา (Ultrasonic flow meter: Transit time) หลักการทำงาน อุปกรณ์ตรวจวัดการไหลอัลตราโซนิก ชนิดจับช่วงเวลานี้จะใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกที่ย่านความถี่ประมาณ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ เพื่อตรวจวัดจับหาความเร็วและทิศทางการไหลของของไหล โดยระยะเวลาในการเดินทางไป - กลับของคลื่นอัลตราโซนิกจากหัววัดหนึ่งไปยังอีกหัววัดหนึ่งจะขึ้นอยู่กับทิศทางและอัตราการไหลของของไหลภายในท่อ ดังนั้นจึงสามารถคำนวณย้อนกลับเพื่อทราบอัตราการไหลได้



ภาพที่ 2.43 ลักษณะภายในของอุปกรณ์ตรวจวัดการไหลอัลตราโซนิก ชนิดจับช่วงเวลา



ภาพที่ 2.44 ลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ตรวจวัดการไหลอัลตราโซนิก ชนิดจับช่วงเวลา



ภาพที่ 2.45 ตัวอย่างของอุปกรณ์ตรวจวัดการไหลอัลตราโซนิกแบบจับช่วงเวลา

ข้อมูลทางเทคนิค

ขนาดของอุปกรณ์ตรวจวัด	DN25, 50, 80, 100 (1", 2", 3", 4")
อุณหภูมิของของไหล	- 20 องศาเซลเซียส ถึง 180 องศาเซลเซียส
ความแม่นยำ	0.5% ของการวัด

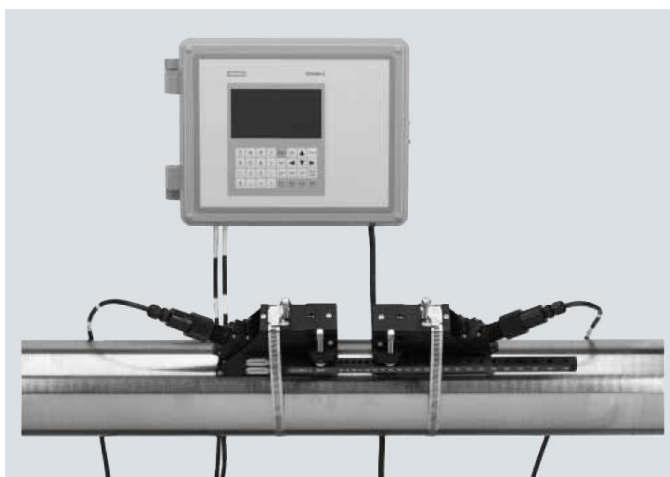
ตารางที่ 2.9 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของอุปกรณ์ตรวจวัดการไหลอัลตราโซนิก ชนิดจับช่วงเวลา

ข้อดี	ข้อเสีย
- ไม่สูญเสียแรงดันในท่อ ไม่มีส่วนเคลื่อนไหวกวทางกล - ใช้กับของไหลที่อุณหภูมิสูงได้ถึง 180 องศาเซลเซียส - สามารถใช้กับท่อของเหลวที่ไม่ใช่ตัวนำไฟฟ้า (Non-conductive) - สามารถใช้กับท่อที่มีขนาดเล็กและมีอัตราการไหลต่ำได้	- ไม่เหมาะกับของไหลที่มี 2 ลักษณะเช่น ของเหลว ผสมเศษ ของแข็ง หรือมีฟองอากาศ - ไม่เหมาะกับการวัดก๊าซ และไอน้ำ - ไม่เหมาะกับของเหลวที่มีความหนืดสูง (ขึ้นอยู่กับขนาดของท่อ)

2.9.3.6 อุปกรณ์ตรวจวัดการไหล อัลตราโซนิก ชนิดหัววัดแนบติดกับผนังท่อ (Ultrasonic flow meter: Clamp – on) หลักการทำงาน อุปกรณ์ตรวจวัดการไหลอัลตราโซนิก ชนิดหัววัดแนบติดกับผนังท่อนั้น ใช้หลักการเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกแต่จะเพิ่มความสามารถในการตรวจวัดโดยหลักการของดอปเปลอร์ (Doppler) และวิธีการรับ-ส่งสัญญาณแบบคลื่นกว้าง (Wide Beam) ทำให้ได้ความแม่นยำที่มากกว่าอุปกรณ์ตรวจวัดการไหลอัลตราโซนิกทั่วไป และเนื่องจากหัวอัลตราโซนิกเป็นแบบที่สามารถติดตั้งแนบติดกับผนังท่อ จึงทำให้ง่ายต่อการติดตั้ง และสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก



ภาพที่ 2.46 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการไหลอัลตราโซนิก ชนิดหัววัดแนบติดกับผนังท่อ



ภาพที่ 2.47 การติดตั้งใช้งานอุปกรณ์ตรวจวัดการไหลอัลตราโซนิกแบบแนบติดกับผนังท่อ

ข้อมูลทางเทคนิค

ย่านการวัด	0.01 ถึง 25 m/s
ความละเอียด	0.025 cm/s
การทำซ้ำ	0.15% ของค่าวัดในช่วง ± 0.01 m/s
ความแม่นยำ	อัตราการไหลแบบปริมาตร ± 1 ถึง 3% ± 1.0 cm/s ของค่าวัดขึ้นกับการใช้งาน
ความเร็วการไหล	$\pm 0.5\%$, ± 1.0 cm/s ของค่าการวัด
ความสามารถย่านการวัด	1/2500
อัตราส่วน Turn down ratio	1/100

ตารางที่ 2.10 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของอุปกรณ์ตรวจวัดการไหลอัลตราโซนิก ชนิดแนบติดกับผนังท่อ

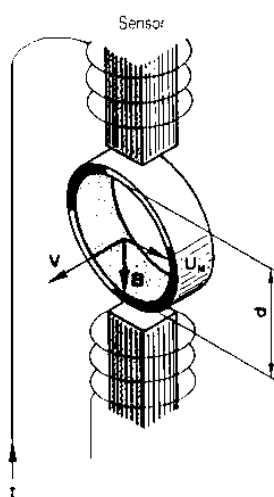
ข้อดี	ข้อเสีย
- ประหยัดค่าใช้จ่ายและแรงงานในการติดตั้ง - สามารถวัดได้โดยไม่ขึ้นกับค่าความนำไฟฟ้าและแรงดันของของไหล - ติดตั้งได้โดยไม่ต้องทำการตัดท่อ - ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาคต่ำ	- ไม่สามารถวัดของไหลที่มีอัตราการไหลต่ำหรือแรงดันต่ำได้ - ราคาค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับมิเตอร์ทั่วไป

2.9.3.7 อุปกรณ์ตรวจวัดการไหล: แบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic inductive flow meter)

หลักการทำงาน อุปกรณ์ตรวจวัดการไหลแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะใช้หลักการตามกฎสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของฟาราเดย์ (Faraday's law) จากภาพที่ 2.48 ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์กันทางสมการคณิตศาสตร์ดังนี้

$$U_M = B \cdot v \cdot d \cdot k \quad (2.11)$$

โดยที่	U_M	หมายถึง	ค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากการไหลผ่านของของเหลวที่นำกระแสระหว่างขั้วอิเล็กโทรดสองขั้ว (โวลต์)
	B	หมายถึง	ค่าความหนาแน่นแม่เหล็กไฟฟ้า (เวเบอร์ต่อตารางเมตร)
	v	หมายถึง	อัตราการไหลของของเหลว (เมตร/นาที)
	d	หมายถึง	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านในของท่อ (เมตร)
	k	หมายถึง	ค่าคงที่ของตัวอุปกรณ์ ตรวจวัด (ไม่มีหน่วย)



ภาพที่ 2.48 ทฤษฎีสานแม่เหล็กไฟฟ้าของฟาราเดย์

ขดลวดของอุปกรณ์ตรวจวัดการไหลแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะผลิตสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานไฟฟ้าภายนอกที่ป้อนให้ เมื่อของเหลวที่นำกระแสได้ไหลผ่านขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองสัมผัสภายในท่อก็จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า U_M โดยมีอัตราส่วนสัมพันธ์กันโดยตรงกับอัตราการไหลของของเหลว



ภาพที่ 2.49 ตัวอย่างของอุปกรณ์ตรวจวัดการไหลแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในอุตสาหกรรม

ข้อมูลทางเทคนิค

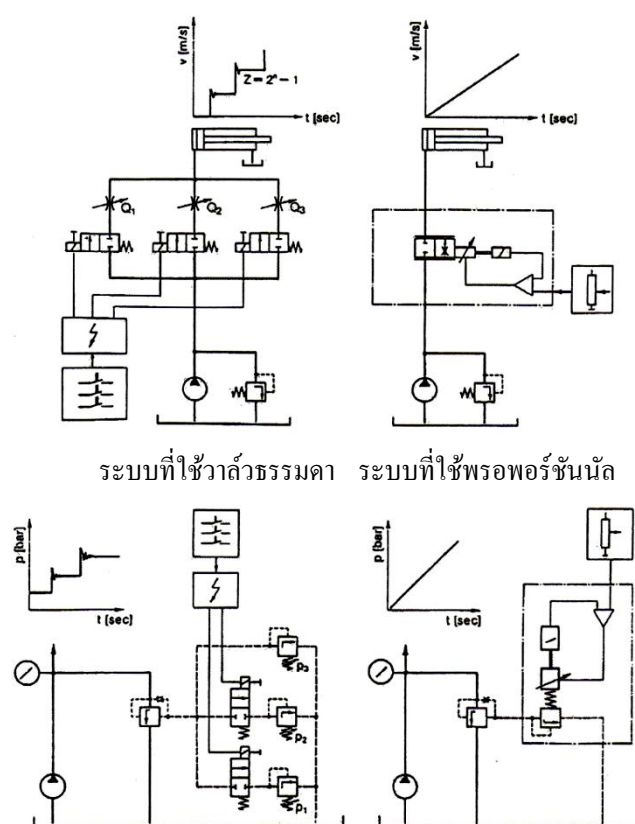
ขนาดของอุปกรณ์ตรวจวัด	DN 2 – DN 2000 / 2 mm – 80"
ความดันใช้งานปกติ	PN 10 – PN40 / 145 – 580 psi
ช่วงการวัด	0 – 5 l/h ถึง 0 – 100,000 m ³ /h 0 – 1.32 US gpm ถึง 0 – 500,000 US gpm
ความแม่นยำ	0.5 %
อุณหภูมิสูงสุดของของไหล	สูงถึง 180 องศาเซลเซียส (ขึ้นอยู่กับวัสดุ Coating)

ตารางที่ 2.11 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของอุปกรณ์ตรวจวัดการไหลแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ข้อดี	ข้อเสีย
- ทนทาน อายุการใช้งานยาวนาน - ราคาประหยัด - ไม่มีการสูญเสียแรงดันในระบบเมื่อของเหลวไหลผ่าน	- สามารถใช้ได้กับของเหลวที่มีค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity) เท่านั้น

2.10 การควบคุมแบบพรอพอร์ชันนัล (Proportional Control System)

เนื่องจากในปัจจุบันความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยี เครื่องจักรกล และอุปกรณ์การทำงานได้เพิ่มประสิทธิภาพขึ้นอย่างมากมาย แม้แต่ในด้านการควบคุมเองก็ตาม ได้มีการคิดสร้างอุปกรณ์ที่จะนำมาใช้ควบคุมให้มีความสามารถตามวัตถุประสงค์ของเครื่องจักร ในเรื่องของระบบไฮดรอลิกได้เกิดอุปกรณ์ขึ้นใหม่ขึ้นมาเพื่อใช้ควบคุมการทำงานของกระบอกสูบหรือมอเตอร์ไฮดรอลิกให้ทำงานได้อย่างนุ่มนวลและเที่ยงตรงตลอดเวลา หรือเอาไว้ใช้เพื่อลดความเสียหายของการทำงานที่มีอุปกรณ์ที่จะต้องมีการกระแทกกันอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นอุปกรณ์ในระบบไฮดรอลิกจึงเกิดคำว่า ระบบควบคุมแบบพรอพอร์ชันนัล (Proportional Control System)



ภาพที่ 2.50 ตัวอย่างการใช้พรอพอร์ชันนัลแทนวาล์วธรรมดาในระบบไฮดรอลิก

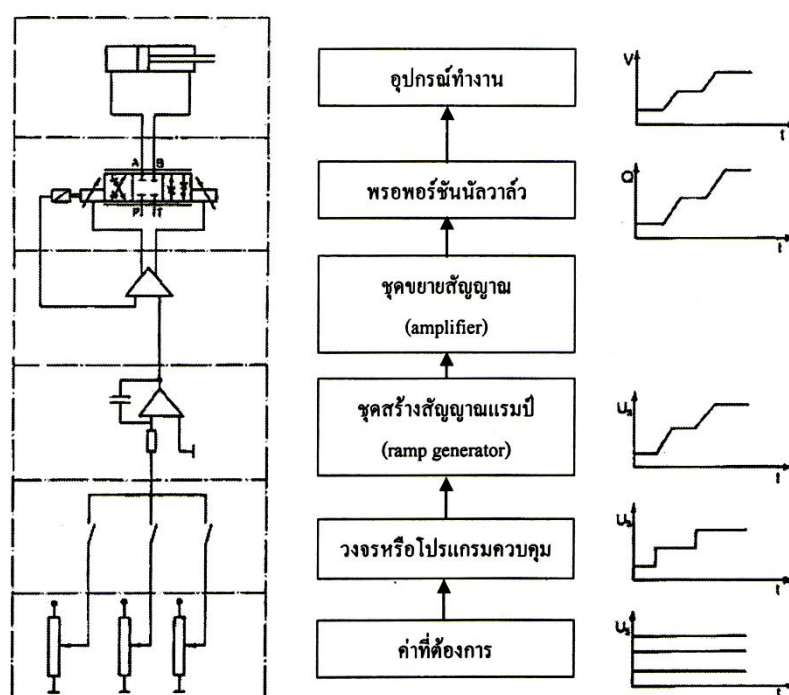
ข้อได้เปรียบของระบบพรอพอร์ชันนัลไฮดรอลิกเมื่อเปรียบเทียบกับระบบไฮดรอลิกที่ใช้วาล์วเปิด/ปิดธรรมดาทั่วไป สามารถสรุปได้ดังตารางดังต่อไปนี้

- | | | |
|---------------------|---|--|
| ความสามารถในการปรับ | : | สามารถปรับอัตราการไหล และความดันโดยผ่านทางสัญญาณไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง |
| | : | ปรับอัตราการไหลและความดันในขณะที่ทำงานอัตโนมัติ |

ผลต่ออุปกรณ์ขับเคลื่อน : มีความเป็นอัตโนมัติ, ต่อเนื่องและมีความละเอียดในการปรับ แรงหรือแรงบิด ความเร็ว, ความเร่ง, และตำแหน่งหรือมุมของการหมุน

อัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน : สิ้นเปลืองพลังงานน้อยลงในการควบคุมและอัตราการไหลวงจรไฮดรอลิก
: วาล์วแบบพรอพอร์ชันนัลสามารถทำหน้าที่แทนวาล์วต่างๆ ได้เช่น วาล์วควบคุมทิศทางและวาล์วควบคุมการไหล ทำให้วงจรไม่ซับซ้อน

สำหรับระบบพรอพอร์ชันนัลไฮดรอลิก จะประกอบไปด้วยส่วนที่สำคัญดังแสดงในภาพที่ 2.51 โดยในส่วนของการควบคุมจะใช้แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งในงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มักรวมอยู่ในชุดเดียวกัน

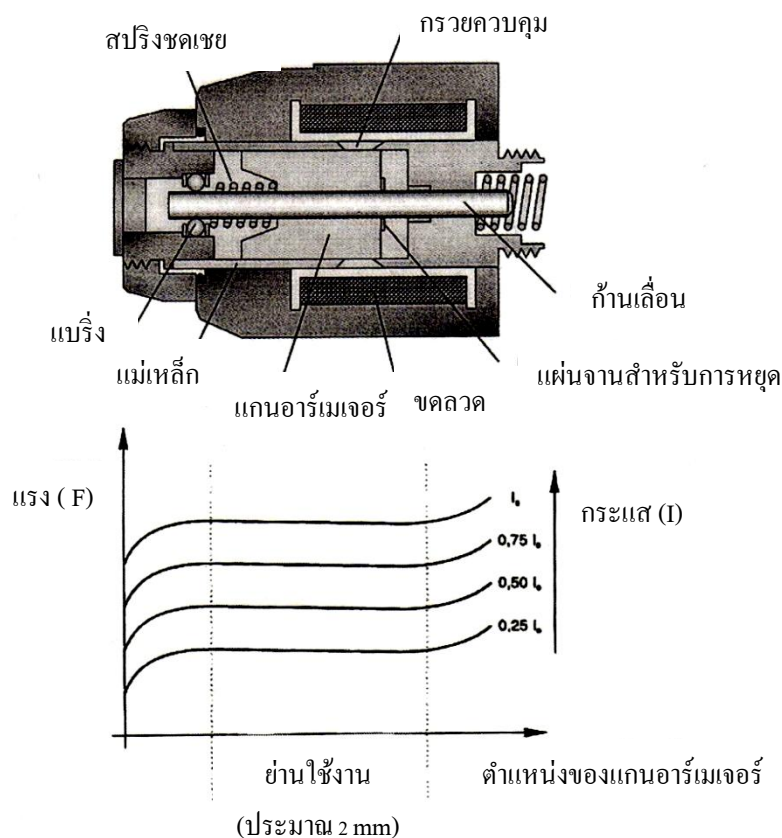


ภาพที่ 2.51 ส่วนประกอบหลักของระบบพรอพอร์ชันนัลไฮดรอลิก

2.10.1 พรอพอร์ชันนัลวาล์ว จากส่วนประกอบหลักของระบบพรอพอร์ชันนัลไฮดรอลิกใน ภาพที่ 2.51 ในอันดับแรกเราจะมาทำความรู้จักกับพรอพอร์ชันนัลวาล์วก่อน (proportion ความหมายในภาษาไทย คือ สัดส่วน)

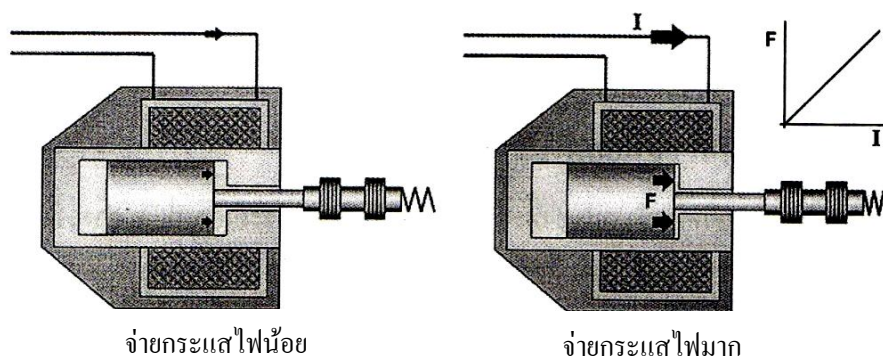
2.10.1.1 พรอพอร์ชันนัลโซลินอยด์ โครงสร้างและหลักการทำงานของพรอพอร์ชันนัลโซลินอยด์ จะมีส่วนที่แตกต่างออกไปจากวาล์วเปิด/ปิดทั่วไปคือมีกรวยควบคุม (control cone) ที่สร้างจากวัสดุที่เป็นแม่เหล็กไม่ได้ (non-magnetsable material) โดยกรวยดังกล่าวจะมีผลต่อการจัดเรียงเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากโครงสร้างที่เพิ่มเข้ามานี้เองทำให้แรงที่ได้เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของระดับกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามา

พฤติกรรมดังกล่าวจึงเป็นที่มาของคำว่าพรอพอร์ชันนัลโซลินอยด์จะมีความทำงานเป็นแบบต่อเนื่อง (analog) ซึ่งต่างจากโซลินอยด์ทั่วไปที่เป็นการทำงานแบบเปิด/ปิด



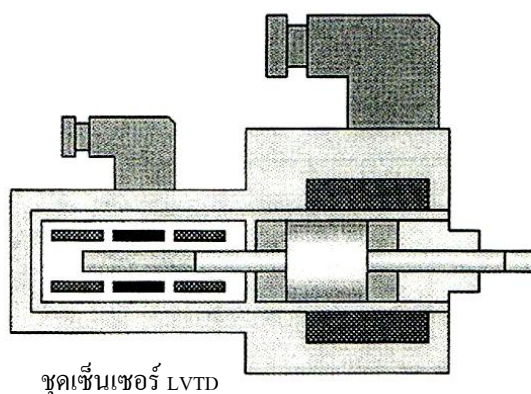
ภาพที่ 2.52 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของพรอพอร์ชันนัลโซลินอยด์

จากที่ได้กล่าวมาแล้ว แรงที่ได้พรอพอร์ชันนัลโซลินอยด์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสที่ป้อนเข้าไปในชุดขดลวด เพื่อให้เห็นภาพในกรณีที่น่ามาใช้ร่วมกับวาล์ว (กลายเป็นพรอพอร์ชันนัลวาล์ว) ดูตัวอย่างจาก ภาพที่ 2.53



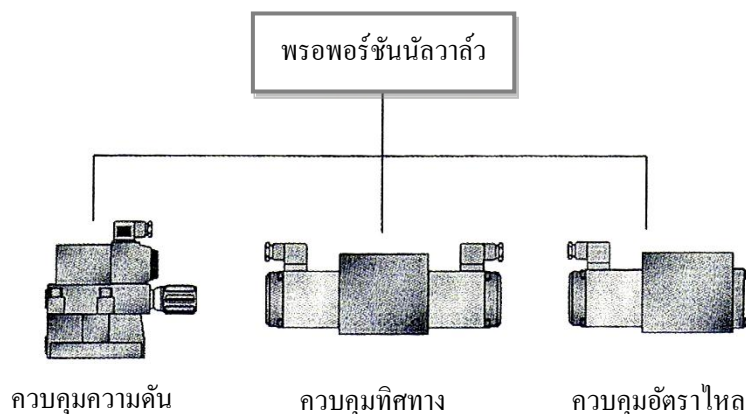
ภาพที่ 2.53 ตัวอย่างการนำเอาพรอพอร์ชันนัลโซลินอยด์มาใช้ร่วมกับวาล์ว

จากภาพที่ 2.53 จะเห็นว่าเมื่อจ่ายกระแสไฟค่าน้อยๆ ให้กับโซลินอยด์แรงที่เกิดขึ้นจะน้อย ส่งผลให้ระยะในการเคลื่อนที่น้อยตามไปด้วย และในทำนองเดียวกันหากเพิ่มปริมาณการจ่ายกระแสให้กับชุดโซลินอยด์แรงที่เกิดขึ้นก็จะเพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะการเคลื่อนที่มากขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน เนื่องจากผลที่เกิดจากการทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็ก แรงเสียดทาน รวมทั้งแรงจากการไหลของน้ำมัน ส่วนแล้วแต่มีผลต่อการทำงานของพรอพอร์ชันนัลวาล์วทั้งสิ้น นั่นก็จะมีผลทำให้ตำแหน่งของการเคลื่อนที่ของแกนอาร์เมเจอร์ (Armature) ไม่ถูกต้องมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงและไม่สอดคล้องกับค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไป ดังนั้นสำหรับงานบางประเภทที่ต้องการความแม่นยำสูงจึงจำเป็นต้องใช้เซ็นเซอร์ในการตรวจจับการเคลื่อนตัวของแกนอาร์เมเจอร์ หรือสปลูของวาล์ว ซึ่งเราอาจเรียกพรอพอร์ชันนัลโซลินอยด์ดังที่กล่าวนี้ว่าเป็นแบบควบคุมช่วงชัก (Stroke Controlled)



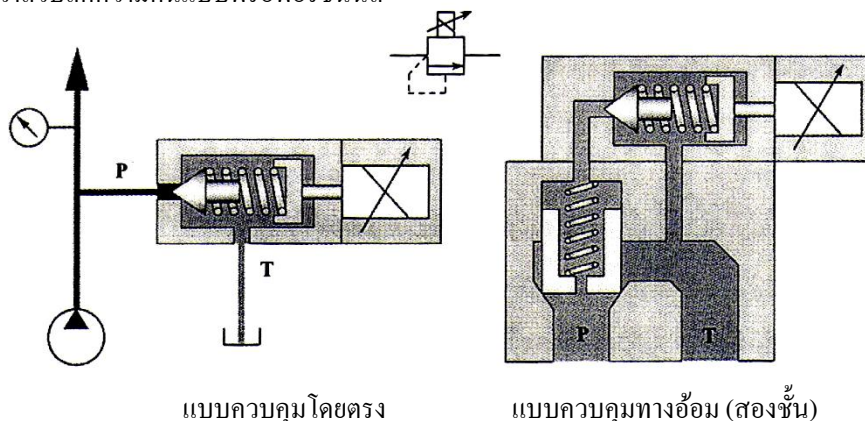
ภาพที่ 2.54 การใช้เซ็นเซอร์ควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของพรอพอร์ชันนัลโซลินอยด์

2.10.1.2 ประเภทของพรอพอร์ชันนัลวาล์ว ดังที่ทราบเป็นการดื้ออยู่แล้วว่า วาล์วในระบบไฮดรอลิกโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มด้วยกัน ซึ่งนั่นหมายถึงว่าพรอพอร์ชันนัลวาล์วก็สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มด้วยเช่นกัน คือ วาล์วควบคุมความดัน ควบคุมทิศทางและวาล์วควบคุมอัตราการไหล



ภาพที่ 2.55 ประเภทของพรอพอร์ชันนัลวาล์ว

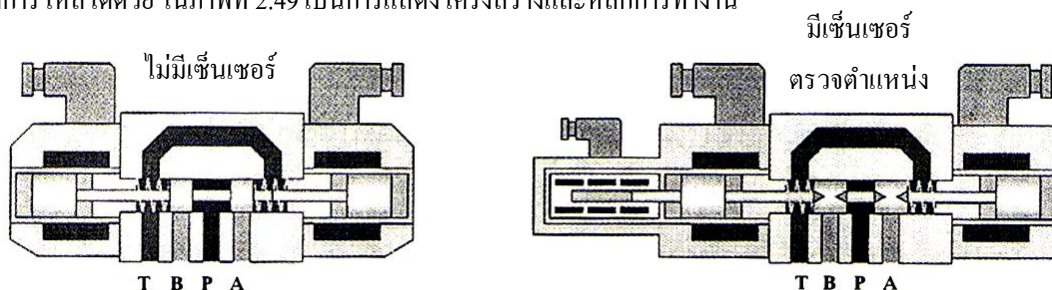
- พรอพอร์ชันนัลวาล์วควบคุมความดัน เราสามารถปรับค่าความดันของน้ำมันไฮดรอลิกได้ โดยผ่านสัญญาณทางไฟฟ้าที่ป้อนให้กับพรอพอร์ชันนัลควบคุมความดัน ในภาพที่ 2.56 เป็นการแสดงตัวอย่าง หลักการของวาล์วปลดความดันแบบพรอพอร์ชันนัล



ภาพที่ 2.56 วาล์วปลดความดันแบบพรอพอร์ชันนัล

หากมีพื้นฐานความรู้ในเรื่องของวาล์วควบคุมความดันอย่างเพียงพอ ดังนั้นสำหรับ พรอพอร์ชันนัลวาล์วควบคุมความดันคงไม่มีปัญหาอะไร เนื่องจากการเปลี่ยนจากการใช้มือปรับมาใช้ สัญญาณทางไฟฟ้าปรับการทำงานแทนนั่นเอง จากภาพที่ 2.56 ความดันที่ช่อง P จะกระทำกับหน้ากรวยควบคุม ซึ่งผ่านน้ำมันมาจากช่องนำ (pilot) ของลิ้นควบคุม โดยพรอพอร์ชันนัลโซลินอยด์จะออกแรงต้านในทิศทางตรงข้ามซึ่งการปรับขนาดของแรงต้าน จะขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าโซลินอยด์ กล่าวคือ กรวยน้ำมัน จะยังคงปิดช่องน้ำมัน T อยู่ตลอดจนกว่าแรงที่เกิดจากโซลินอยด์มีค่าน้อยกว่าแรงที่เกิดจากความดันน้ำมัน น้ำมัน จึงจะถูกระบายออกที่ช่อง T ได้

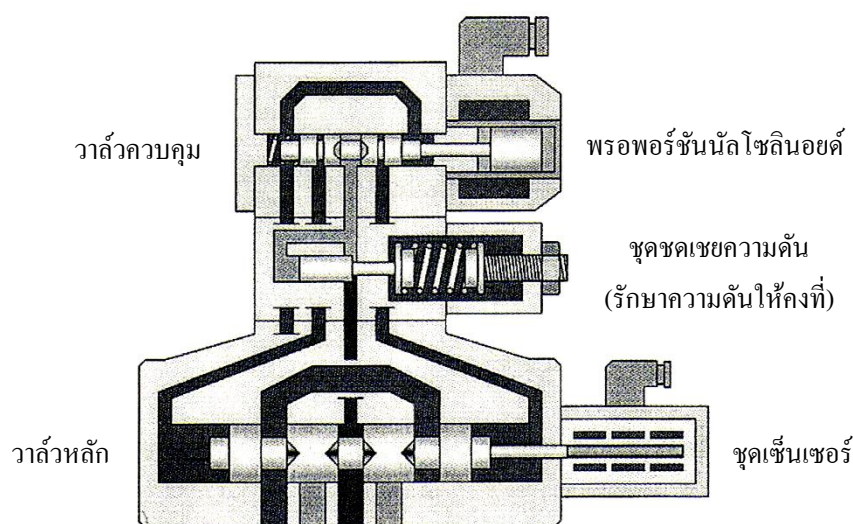
- พรอพอร์ชันนัลวาล์วควบคุมทิศทาง สำหรับพรอพอร์ชันนัลวาล์วควบคุมทิศทาง มีลักษณะ ของการออกแบบคล้ายคลึงกับวาล์ว 4/3 ทัวไป (ตำแหน่งกลางปกติปิด) แต่จะมีลักษณะพิเศษตรงที่สามารถปรับ อัตราการไหลได้ด้วย ในภาพที่ 2.49 เป็นการแสดงโครงสร้างและหลักการทำงาน



ภาพที่ 2.57 พรอพอร์ชันนัลวาล์ว ควบคุมทิศทางชนิดควบคุมโดยตรง

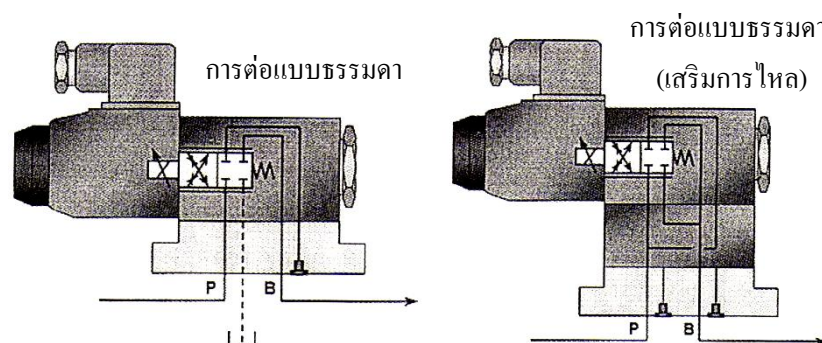
จากภาพที่ 2.57 หากสัญญาณไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ วาล์วจะอยู่ตรงกลางด้วยแรงของสปริงทั้งสองด้าน แต่หากเราค่อยๆ จ่ายสัญญาณไฟเข้าไปยังสัญญาณไฟโซลินอยด์ด้านขวามือก็จะทำให้ลิ้นวาล์วค่อยๆ

เลื่อนไปทางซ้ายมือ น้ำมันจากช่อง P จะต่อกับช่อง B และ A จะต่อกับ T และหากเราค่อยๆ จ่ายสัญญาณไฟฟ้าเข้าไปยังโซลินอยด์ด้านซ้ายมือก็จะทำให้ลิ้นวาล์วค่อยๆ เลื่อนไปทางขวามือ น้ำมันจากช่อง P จะต่อกับ A และ B จะต่อกับ T ดังที่ได้อธิบายมา เราจะได้เห็นว่า พรอพอร์ชันนัลวาล์วแบบ นี้ นอกจากควบคุมทิศทางน้ำมันได้แล้วยังสามารถควบคุมการไหลของน้ำมันได้อีกด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณและทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปยังโซลินอยด์ ในการควบคุมที่ต้องการความละเอียดและความแม่นยำสูงสุด โซลินอยด์จะต้องมีเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนที่ติดตั้งร่วมอยู่ด้วยดังที่เคยได้กล่าวถึงไว้ในตอนต้น นอกจากนั้นหากเป็นระบบไฮดรอลิกขนาดใหญ่เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานทางไฟฟ้า การทำงานของวาล์วต้องเป็นชนิดที่ส่งงานทางอ้อมซึ่งการตรวจจับตำแหน่งอาจจะอยู่ที่วาล์วหลักหรืออาจใช้เซ็นเซอร์สองชุดก็ได้เช่นกัน ภาพที่ 2.58 เป็นอีกตัวหนึ่งของพรอพอร์ชันนัลวาล์วควบคุมทิศทาง

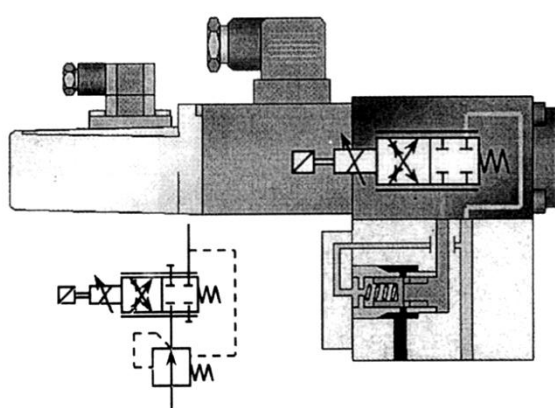


ภาพที่ 2.58 พรอพอร์ชันนัลวาล์วควบคุมทิศทางชนิดส่งงานทางอ้อมและมีเซ็นเซอร์ตรวจจับตำแหน่ง

- พรอพอร์ชันนัลวาล์วควบคุมการไหล ในปัจจุบันวาล์วกลุ่มนี้ไม่ค่อยได้รับความนิยมมากนัก เนื่องจากว่าพรอพอร์ชันนัลวาล์วควบคุมทิศทางก็สามารถควบคุมการไหล ได้ภายในตัวของมันเอง อย่างไรก็ตาม สำหรับพรอพอร์ชันนัลวาล์วควบคุมการไหล อัตราการไหลจะขึ้นอยู่กับ การเปิดของลิ้นบ่าควบคุม (ซึ่งถูกกำหนดมาจากสัญญาณไฟฟ้าควบคุม) และความดันตกคร่อม (Pressure drop) ที่ตัววาล์ว ดังนั้นเพื่อให้เกิดความแน่ใจว่า อัตราการไหลจะขึ้นอยู่กับสัญญาณควบคุมเพียงอย่างเดียว จึงจำเป็นต้องรักษาความดันตกคร่อมให้มีค่าคงที่ไว้ ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น เพิ่มส่วนสร้างระดับความสมดุลของความดัน (Hydrostats) รวมไว้ในตัววาล์ว



ภาพที่ 2.59 พรอพอร์ชันนัลวาล์วควบคุมการไหล

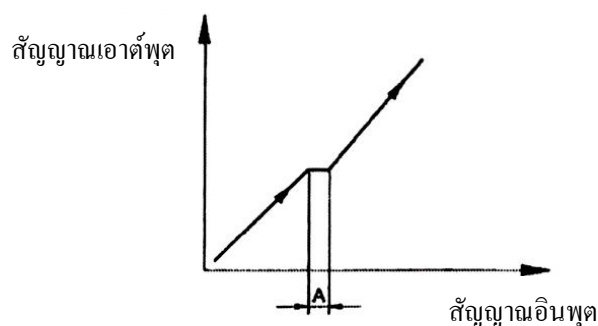


ภาพที่ 2.60 พรอพอร์ชันนัลวาล์วควบคุมการไหลแบบมีชุดรักษาระดับความดัน

2.10.1.3 คุณสมบัติของพรอพอร์ชันนัลวาล์ว มีความเป็นไปได้เล็กน้อยมากที่ความสัมผัสระหว่างตัวแปรอินพุตซึ่งในที่นี้คือกระแสไฟฟ้าและตัวแปรเอาต์พุต ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปแบบของแรงดันหรืออัตราไหลจะเกิดเป็นกราฟเชิงเส้น ทั้งนี้เนื่องมาจากสาเหตุหลายประการด้วยกัน เช่น ความเสียดทานของสปูล รูปร่างของบ่า ลูกสูบสปูล การเหลื่อมของบ่าลูกสูบสปูล (Overlap) แรงต้านทานจากสปริง และผลจากการสร้างอำนาจแม่เหล็ก

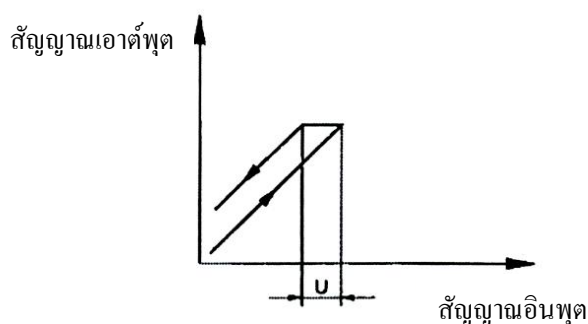
- พฤติกรรมของพรอพอร์ชันนัลวาล์ว การเบี่ยงเบนจากพฤติกรรมในอุดมคติของพรอพอร์ชันนัลวาล์วไม่ว่าจะเกิดขึ้นจากเหตุผลก็ตามจะทำให้เกิดพฤติกรรมต่างๆขึ้นกับพรอพอร์ชันนัลวาล์วดังนี้

ก. ความเร็วในการตอบสนอง (Response Sensitivity) ในกรณีเมื่อมีกระแสไฟฟ้า (สัญญาณอินพุต) ไหลผ่านโซลินอยด์ แกนอาร์เมเจอร์จะเคลื่อนที่ (สัญญาณเอาต์พุต) และทันทีที่แกนกระแสไฟฟ้าคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทำให้แกนอาร์เมเจอร์หยุดการเคลื่อนที่ หากต้องการให้แกนอาร์เมเจอร์เริ่มมีการเคลื่อนที่ต่อไปในทิศทางเดิม ก็จะต้องมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย การเพิ่มค่า ในการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้เรียกว่า “ความเร็วในการตอบสนอง”



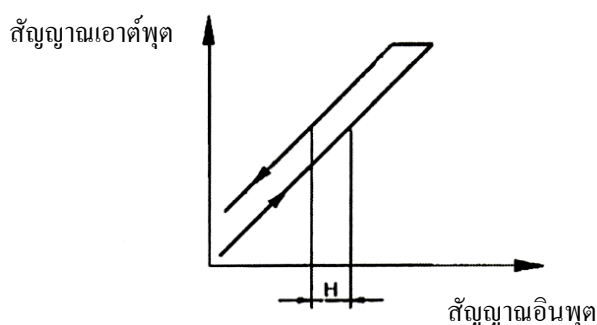
ภาพที่ 2.61 กราฟแสดงความเร็วในการตอบสนอง

ข. ช่วงของการผันกลับ (Inversion Range) พฤติกรรมดังกล่าวมีลักษณะเช่นเดียวกับกรณีของความไวในการตอบสนอง แต่จะต่างกันตรงที่เป็นการให้แก่อาร์เมเจอร์เคลื่อนที่กลับในทิศทางตรงข้ามไฟฟ้าลงจากตอนแรก ซึ่งช่วงระยะความแตกต่างที่เกิดขึ้นของเส้นกราฟนี้ เรียกว่า “ช่วงของการผันกลับ”



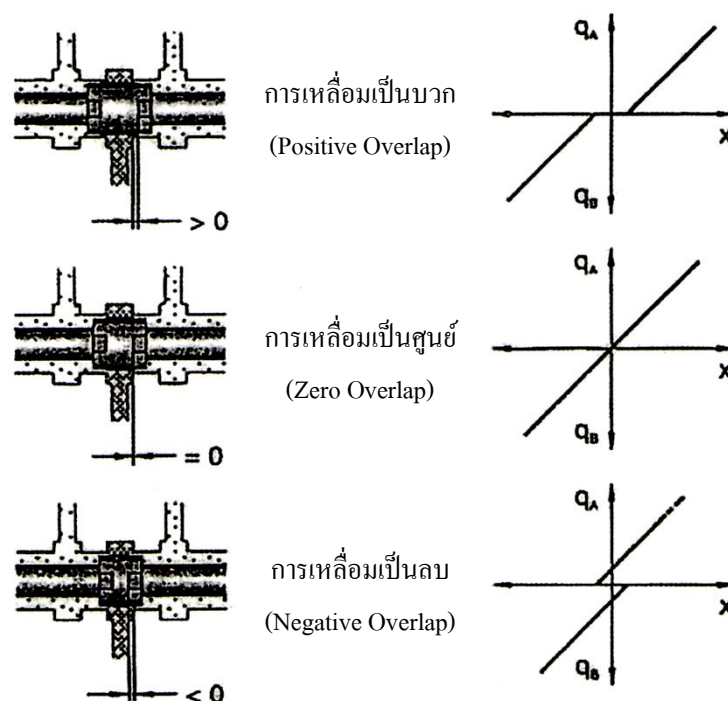
ภาพที่ 2.62 กราฟแสดงช่วงของการผันกลับ

ค. ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ในกรณีที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับพรอพอร์ชันนัลวาล์วตลอดย่านที่ถูกกำหนดไว้ทั้งตอนที่เพิ่มขึ้นและลดลงแม้ว่าสัญญาณกระแสไฟฟ้าอินพุตเป็นค่าเดียวกันก็ตาม แต่สัญญาณเอาต์พุตจะมีค่าที่แตกต่างกันและช่วงระยะความแตกต่างที่มากที่สุดนี้เรียกว่า “ฮิสเทอรีซิส”



ภาพที่ 2.63 กราฟแสดงฮิสเทอรีซิส

ง. การเหลื่อมของลิ้นวาล์ว (Overlap) การเหลื่อมกันของลิ้นวาล์ว หรือสปลูกับช่องทางของน้ำมันที่ตัวเรือนวาล์วจะมีผลต่ออัตราการไหลต่อสัญญาณไฟฟ้าที่ใช้ควบคุม และในลำดับต่อไปนี้ขอกล่าวถึงการเหลื่อมที่เกิดขึ้นในพรอพอร์ชันนัลวาล์วควบคุมทิศทาง

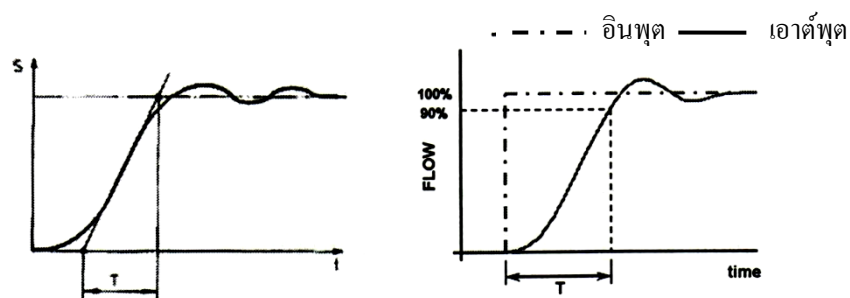


ภาพที่ 2.64 การเหลื่อมและอัตราการไหล / สัญญาณไฟฟ้า

ในรูปจะพบการเหลื่อมมีสามรูปแบบด้วยกันคือการเหลื่อมเป็นบวก (positive) หมายถึงความยาวของสไปลจะมีค่ามากกว่าช่องทางของน้ำมัน ดังนั้นในสภาพปกติน้ำมันจึงไม่สามารถรั่วไหลออกไปที่ช่องน้ำมันได้ แต่ตอนสั่งงานจะต้องมีสัญญาณช่วงหนึ่งที่ใช้ให้สไปลเลื่อนพื้นระยะดังกล่าว ซึ่งช่วงนี้อาจเรียกว่า “dead band” โครงสร้างของวาล์วโดยส่วนใหญ่จะมีการเหลื่อมเป็นแบบบวกนี้ ส่วนวาล์วที่มีการเหลื่อมเป็น (negative) ไม่ค่อยพบเห็นเนื่องจากในสภาพปกติจะมีน้ำมันรั่วไหลออกที่ช่องน้ำมันซึ่งอาจจะส่งผลต่ออุปกรณ์ทำงานที่ต่อร่วมอยู่ได้ และสำหรับการเหลื่อมที่เป็นศูนย์ จริงๆ แล้วการเหลื่อมแบบนี้เป็นสิ่งที่ต้องการแต่ในทางปฏิบัติเป็นสิ่งที่เป็นไปได้ยากและราคาแพง(มีการใช้เซอร์โววาล์ว)

- คุณสมบัติทางพลวัตหรือไดนามิก ในหัวข้อที่ผ่านมาเป็นการกล่าวถึงค่าตัวแปรคุณสมบัติของพรอพอร์ชันนัลวาล์วในสภาวะคงตัว (Steady state) ในการควบคุมนอกจากจะพิจารณาค่าดังกล่าวแล้ว คุณสมบัติขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงหรือคุณสมบัติทางไดนามิกก็มีความสำคัญไม่ยิ่งหย่อนไปกว่ากัน โดยทั่วไปความเร็วในการสั่งงานของพรอพอร์ชันนัลวาล์วสามารถพิจารณาได้จาก 2 ค่าคือ เวลาในการตอบสนอง (Response time) และการตอบสนองความถี่ (Frequency Response)

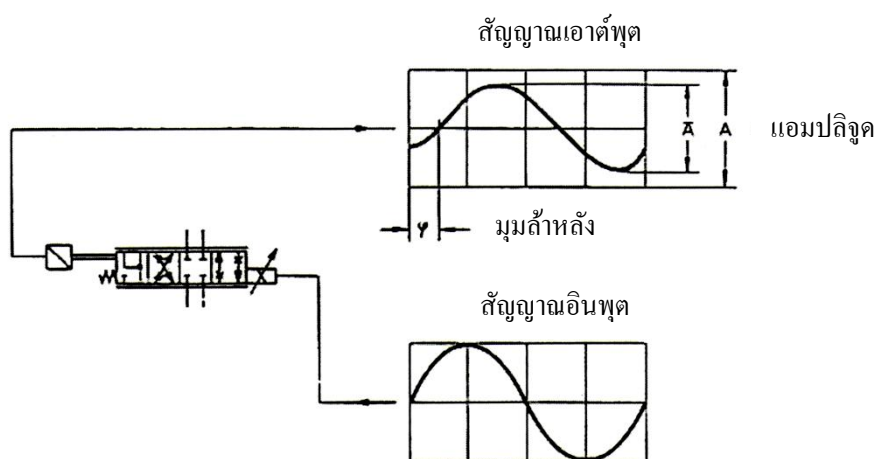
เวลาในการตอบสนอง (Response time) ทันทีที่ป้อนสัญญาณไปยังอินพุตไปยัง โซลินอยด์ จะทำให้สปีดมีการเคลื่อนตัว และเมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ไปตั้งแต่สปีดเริ่มเคลื่อนตัว (น้ำมันเริ่มไหล) จนกระทั่งสิ้นสุด ปลายตำแหน่งของการทำงาน (น้ำมันไหลลงที่สูงสุด) เวลาดังกล่าวนี้ก็คือ เวลาการตอบสนอง นั่นเอง



ภาพที่ 2.65 เวลาในการตอบสนองการเลื่อนวาล์ว

เวลาในการตอบสนองการเลื่อนวาล์วแบบพอร์ชันนัลจะมีค่าอยู่ระหว่าง 10 ถึง 100 มิลลิวินาที โดยทั้งนี้จะมีค่าเวลาในการตอบสนองที่แตกต่างกันออกไป โดยเฉพาะในกรณีของการป้อนสัญญาณที่เป็นบวกและเป็นลบ

การตอบสนองความถี่ (Frequency Response) ในการวัดการตอบสนองความถี่ สามารถทำได้โดยการป้อนสัญญาณควบคุมอินพุตแบบรูปคลื่นไซน์ แล้วใช้ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) จับสัญญาณเทียบกับสัญญาณเอาต์พุตซึ่งได้จากการเคลื่อนตัวของสปีด



ภาพที่ 2.66 การตอบสนองความถี่ของพอร์ชันนัลวาล์ว

การตอบสนองความถี่ในวาล์วจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ 2 ตัวแปรที่สำคัญ คือ การตอบสนองแอมพลิจูด (Amplitude response) และการตอบสนองเฟส (Phase Response)

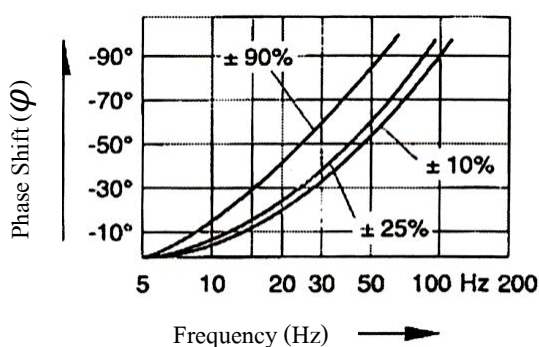
การตอบสนองแอมพลิจูด กรณีที่ความถี่ของสัญญาณควบคุมต่ำ แอมพลิจูดในการแกว่งตัวของสปูลจะมีค่าใกล้เคียงกับของสัญญาณควบคุม แต่ในกรณีที่เพิ่มความถี่ของสัญญาณควบคุมมากขึ้น มีผลทำให้ สปูลของวาล์วไม่สามารถเคลื่อนที่ติดตามการเปลี่ยนแปลงได้ทันส่งผลให้ค่าแอมพลิจูดมีขนาดน้อยลง การตอบสนองแอมพลิจูดที่ความถี่ใดๆ โดยปกติมีหน่วยเป็น dB ซึ่งได้จาก

$$dB = 20 \times \log \frac{A_o}{A} \quad (2.12)$$

โดยที่ A_o หมายถึง แอมพลิจูดเอาต์พุต ในที่นี้คือการเคลื่อนตัวของสปูล (dB)

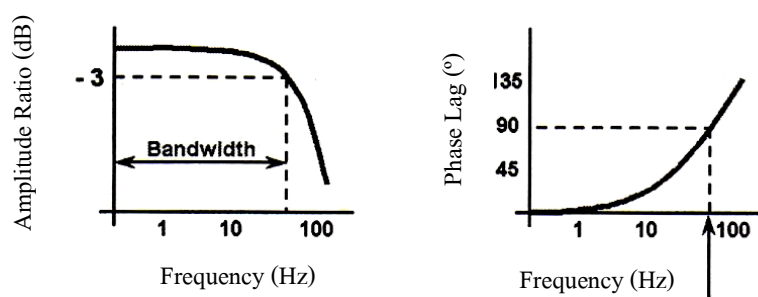
A หมายถึง แอมพลิจูดอินพุต ในที่นี้คือสัญญาณควบคุมโซลินอยด์ (dB)

การตอบสนองเฟส ในความเป็นจริงแล้วสัญญาณเอาต์พุตหรือในที่นี้คือการเคลื่อนตัวของสปูลไม่สามารถตามสัญญาณอินพุตสั่งงานได้ทันทำให้เกิดการล้าหลังดังกล่าวโดยทั่วไปจะถูกกำหนดเป็นองศาแสดงในภาพที่ 2.67



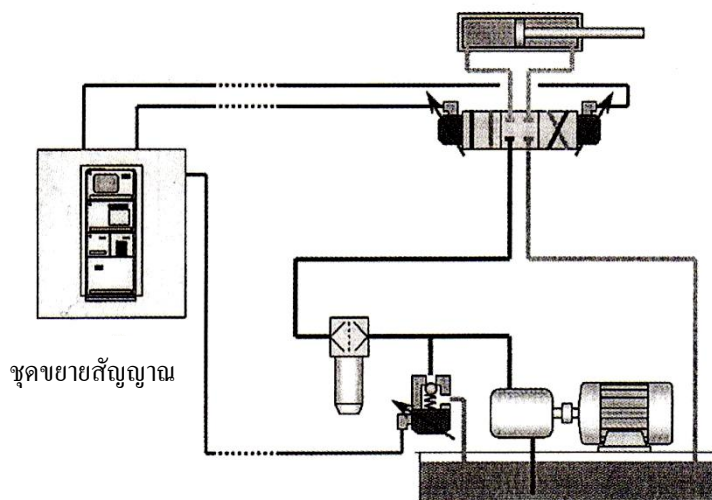
ภาพที่ 2.67 กราฟแสดงความตอบสนอง

ความถี่วิกฤติ (Critical Frequency) ความถี่วิกฤติ หมายถึง ความถี่ที่มีการตอบสนองแอมพลิจูดตกลงเป็น 70.7% หรือ -3dB โดยส่วนใหญ่ค่าความถี่ของพอร์พอร์ชันนัลวาล์วจะมีค่าอยู่ระหว่าง 5 ถึง 100 Hz



ภาพที่ 2.68 ความถี่วิกฤติที่จำกัดการทำงาน

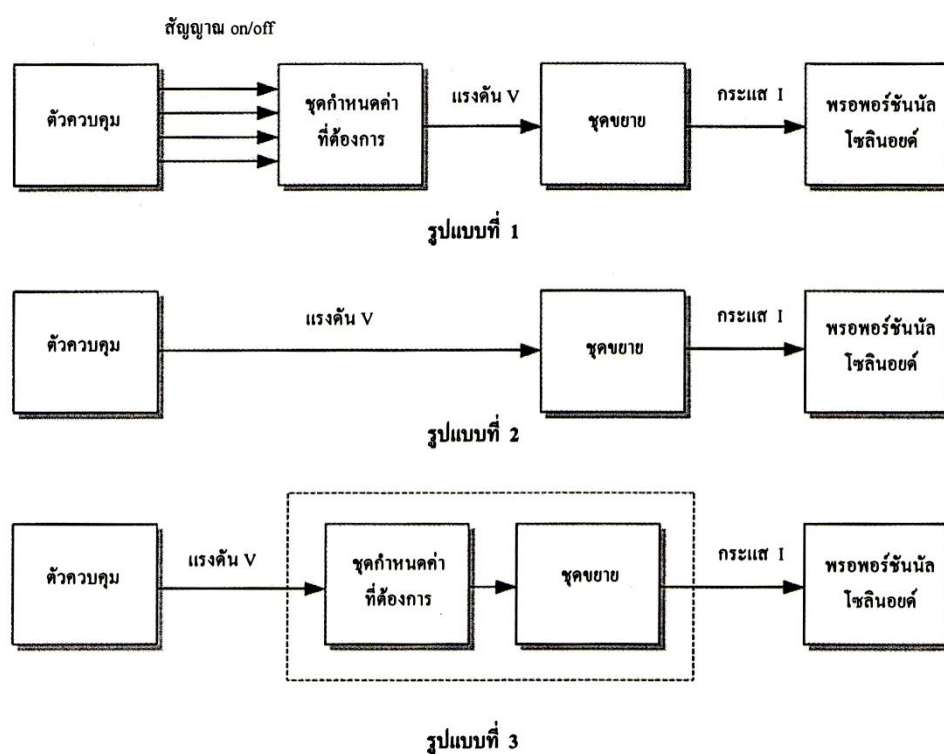
2.10.2 ชุดขยายสัญญาณ ดังที่ได้ทราบมาตั้งแต่ตอนต้นแล้วว่า โครงสร้างของระบบพอร์พอร์ชันนัลไฮดรอลิกจำเป็นต้องมีองค์ประกอบที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งคือ ชุดขยายสัญญาณให้กับวาล์ว (Valve Amplifier) ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวจะทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมการทำงานของพอร์พอร์ชันนัลวาล์วชนิดต่างๆ ให้ทำงานได้ตามความต้องการ



ภาพที่ 2.69 ชุดขยายสัญญาณให้พอร์พอร์ชันนัลวาล์ว

โดยทั่วไปสัญญาณควบคุมสำหรับพอร์พอร์ชันนัลวาล์วนั้นเกิดจากการทำงานวงจรอิเล็กทรอนิกส์หรือในที่นี้ก็คือ ชุดขยายสัญญาณให้กับขยายสัญญาณให้กับวาล์วนั้นเอง ซึ่งขยายสัญญาณดังกล่าวจะทำหน้าที่หลักอยู่ 2 ประการ คือ กำหนดค่าปรับตั้งที่ต้องการ (Set-Point Value Specification) และขยายสัญญาณเพื่อไปควบคุมพอร์พอร์ชันนัลวาล์วให้ทำงาน

2.10.2.1 รูปแบบของชุดขยายสัญญาณ สำหรับชุดขยายสัญญาณให้กับวาล์ว โดยทั่วไปมีอยู่ 2 ประเภทคือ ประเภทที่ประกอบรวมอยู่กับวาล์ว (Built in Integrated Electronics) และประเภทที่แยกออกจากตัววาล์วเป็นลักษณะ โมดูลหรือการ์ด (Card) อย่างไร ก็ตามเมื่อนำมาควบคุมร่วมกันเป็นระบบพอร์พอร์ชันนัลไฮดรอลิกจะมีรูปแบบสัญญาณดังนี้



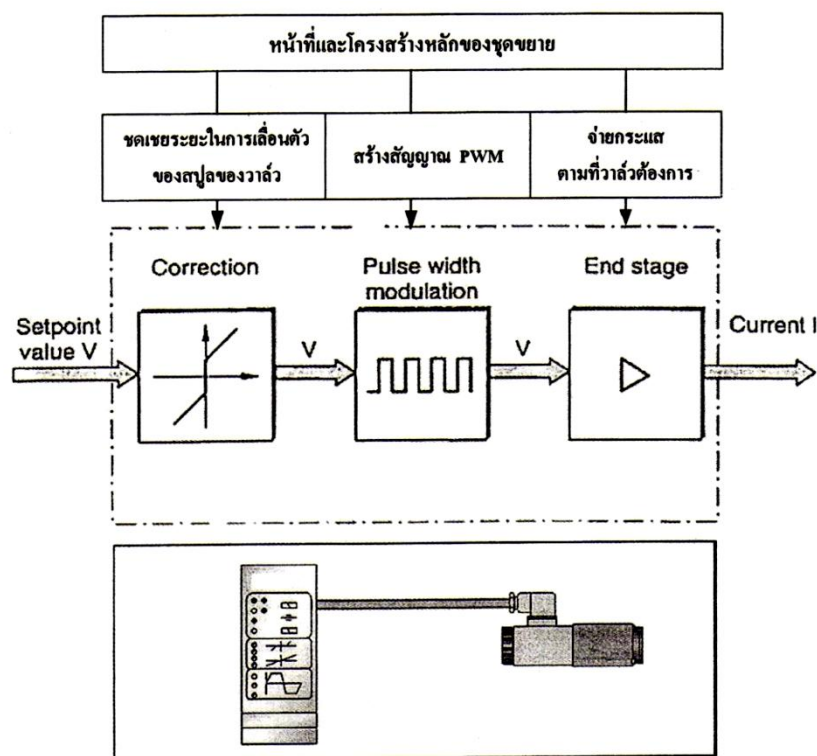
ภาพที่ 2.70 รูปแบบของการส่งสัญญาณในการควบคุมพรีฟรอนซ์อินเวอร์เตอร์

สำหรับรูปแบบที่ 1 ของภาพที่ 2.70 นั้น ตัวควบคุม (Controller) จะให้สัญญาณแบบเปิด/ปิด เท่านั้น เช่น พีแอลซี, ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งในกรณีนี้กำหนดค่าที่ต้องการ (Set - Point) กับชุดขยายสัญญาณให้กับวาล์ว จะแยกออกจากกัน ส่วนรูปแบบที่ 2 ตัวควบคุมจะให้สัญญาณอนาล็อกที่มีการปรับตั้งค่าที่ต้องการมาแล้วซึ่งในกรณีดังกล่าวนี้จะมีเฉพาะตัวขยายสัญญาณให้กับวาล์วเท่านั้น และในรูปแบบที่ 3 เป็นรูปแบบผสมและนิยมใช้กันมาก เนื่องมาจากตัวควบคุมระบุค่าสัญญาณ โดยเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่มาให้ ดังนั้นจึงมีการรวมเอาชุดกำหนดค่าที่ต้องการและชุดขยายสัญญาณมาไว้เป็นชุดเดียวกัน

2.10.2.2 หน้าทีและโครงสร้างของชุดขยาย หน้าทีและโครงสร้างหลักของชุดขยายสัญญาณให้กับวาล์วที่ไม่มีการควบคุมตำแหน่งของสปูล โดยทั่วไปมี 3 ส่วนคือ

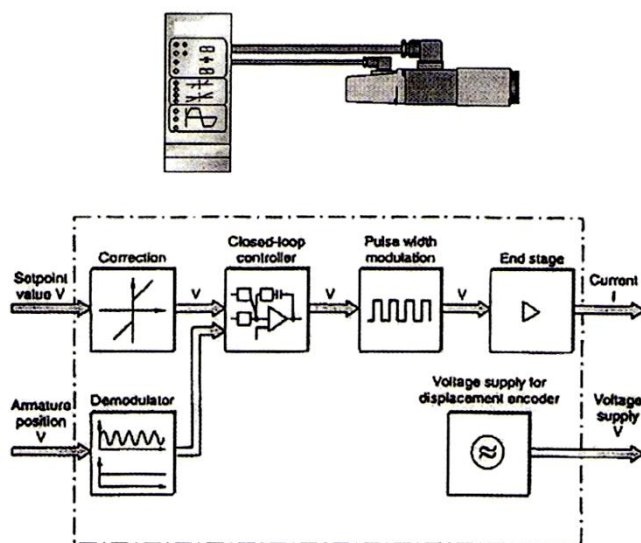
- ส่วนที่สร้างการชดเชยระยะในการเคลื่อนตัวของสปูล
- ส่วนที่ใช้ในการแปลงสัญญาณ พัลส์เบรดยูเอ็ม (Pulse Width Modulation: PWM)
- ส่วนที่ใช้จ่ายกระแสไฟฟ้าตามที่วาล์วต้องการ ซึ่งโดยปกติจะมีค่า 0 - 800 มิลลิแอมป์,

0 - 1600 มิลลิแอมป์ หรือ 0 - 2400 มิลลิแอมป์



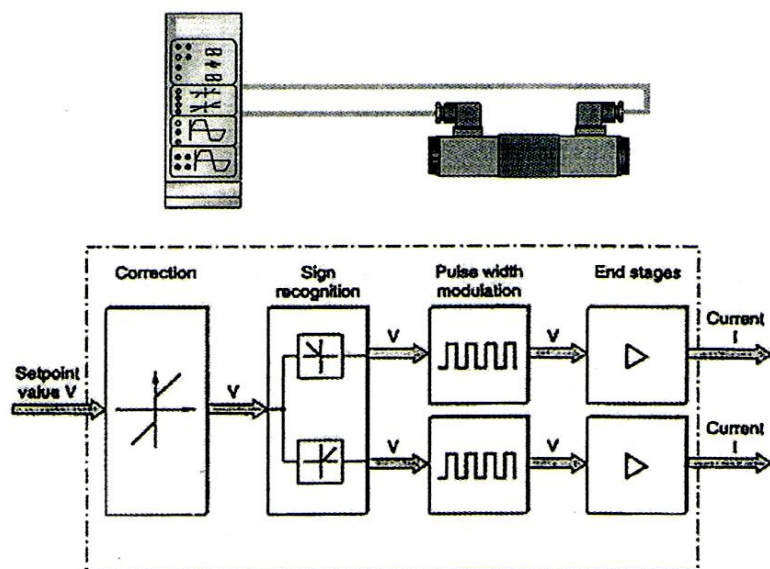
ภาพที่ 2.71 โครงสร้างหลักของชุดควบคุมขยายสัญญาณให้กับวาล์วที่ไม่มี การควบคุมตำแหน่งของสปีด

ในกรณีที่พรอพอร์ชันนัลวาล์วเป็นชนิดที่มี การควบคุมตำแหน่งของสปีดซึ่งจะมีเซ็นเซอร์ และ การควบคุมแบบวงจรรปิด (Closed Loop Control) ประกอบรวมอยู่ในชุดขยายนั้น จำเป็นที่จะต้องมีฟังก์ชันเพิ่มเติมอื่นๆ เข้ามาด้วยดังนี้ คือแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับเซ็นเซอร์วัดตำแหน่งของสปีด และ ตัวแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Demodulator) ที่ได้จากเซ็นเซอร์ รวมทั้งตัวควบคุมแบบวงจรรอบปิดซึ่งทำหน้าที่เปรียบเทียบค่าที่กำหนดไว้ กับตำแหน่งของสปีดให้เป็นไปตามที่ต้องการ



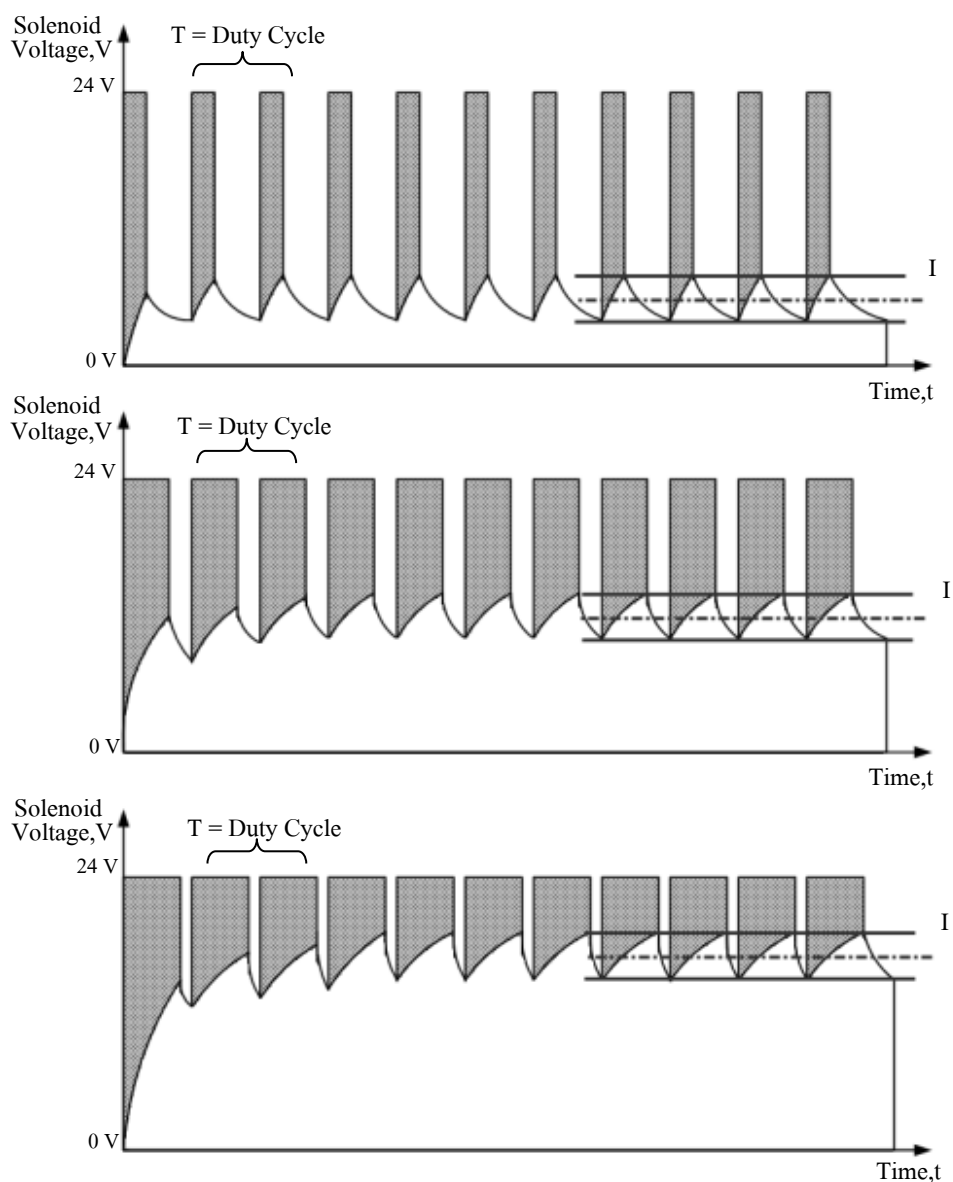
ภาพที่ 2.72 โครงสร้างหลักของชุดชุดขยายสัญญาณให้กับวาล์วที่มีการควบคุมตำแหน่งของสปีด

สำหรับพอร์ชัณณวลว้ชณคมีโชนลนอยค้สองข้างน้ันจ้เป็นค้องใช้ช้ชคชยแบบ 2 ช้องส้ญญาน โดยที่ช้ชคชยค้ก้ลว้จะม้การะบุนสถานะของส้ญญานควบคุม (sign recognition) เพื่อนำไป ก้าหนดการจ้ายกระแสไฟฟ้าเข้าป้ยังโชนลนอยค้ด้นใดด้นหน้ึงให้ท้างานตามค้ค้องการ



ภาพที่ 2.73 ช้ชคชยส้ญญานให้ก้บว้ลว้แบบ 2 ช้องส้ญญาน

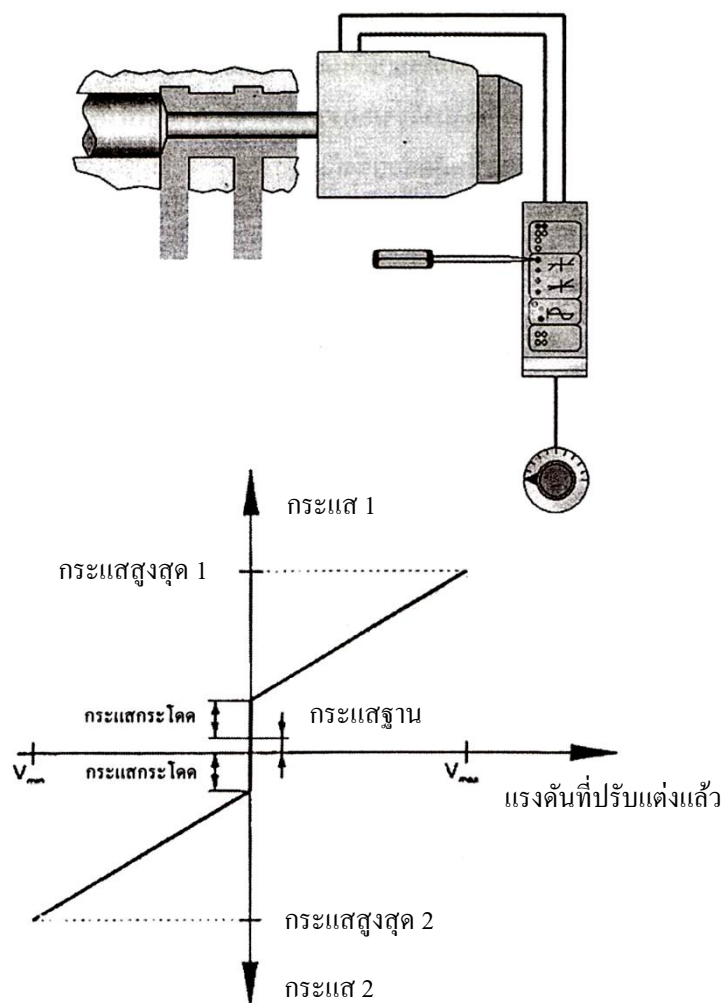
การมอดูเลตควมกว้างพัลส์ (Pulse width modulation) หรือการผสมส้ญญานส้เหล้ยมที่ปรับ ควมกว้างได้ในภาพที่ 2.74 หากส้งเกตค้จะพบว้ที่ช่วงปลายส้ญญานพัลส์กระทำบโชนลนอยค้เนืองจาก ค้าควมเหน้ยว่นาในขคลวด กระแสไฟฟ้าจ้ิงไม่สามารถเปล้ยนแปลงได้เร้วเท่าก้บแรงค้้นไฟฟ้าการเปล้ยนแปลง ข้้นลงของกระแสไฟฟ้าจ้ิงมีค้าใกล้เคียงก้บค้าจ้างานจ้ริง นอกจากน้ันค้ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโชนลนอยค้และ แรงค้้นไฟฟ้าด้นอินพุตของช้ชคชยส้ญญานจะป้็นส้คส่วนข้้งก้ันและก้ัน



ภาพที่ 2.74 การมอดูเลตความกว้างพัลส์

จากวงจรพีคดับเบิลยูเอ็มนี้เองที่ทำให้เกิด ความถี่ที่ทำให้เกิดการสั่นตัว (Dither Frequency) ซึ่งความถี่ดังกล่าวนี้จะทำให้สปูล มีการสั่นตัวตลอดเวลาทั้งนี้เพื่อลดแรงเสียดทานสถิต (Static friction) ส่งผลให้ความเร็วในการตอบสนองดีขึ้น รวมทั้งเป็นการลดช่วงเวลาของการผันกลับและฮิสเตอร์ซิสของวาล์วลง โดยทั่วไป ความถี่นี้จะใช้อยู่ที่ประมาณ 50-100 Hz และแอมพลิจูดสูงสุด ประมาณ 30% ของกระแสปกติ

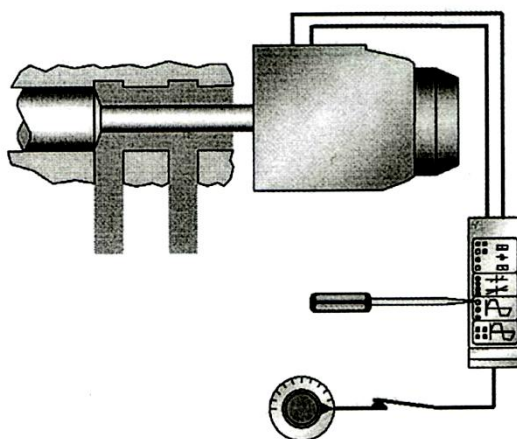
2.10.2.3 การปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ชุดขยายสัญญาณ ในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของชุดขยายสัญญาณสามารถทำได้ถึงแม้ว่า เราจะนำไปใช้กับการขับวาล์วต่างขนาดกัน นอกจากนั้นยังสามารถชดเชยปัญหาอันเนื่องมาจากภาระระยะการเคลื่อนของสปูลได้อีกด้วย



ภาพที่ 2.75 การปรับค่าพารามิเตอร์ของชุดขยายสัญญาณ

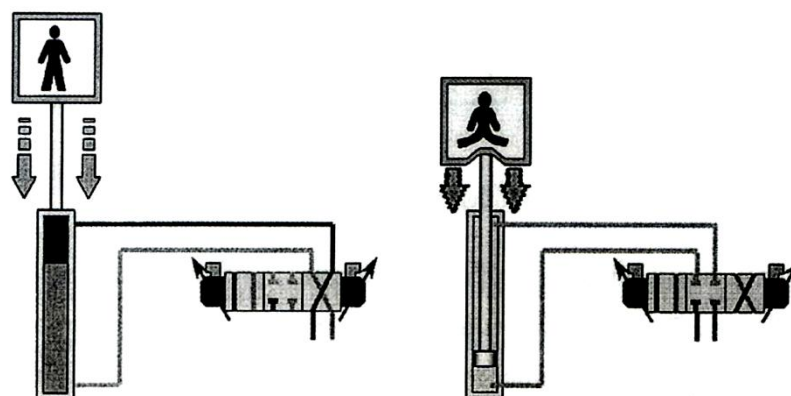
ในภาพที่ 2.75 ค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ตัวแปร ที่ควรทราบได้แก่ กระแสฐาน (Basic Current) เนื่องจากในกระบวนการผลิตตัวใด ๆ ก็ตามพบว่าตำแหน่งสปูลตัวจะไม่วางตรงกลางพอดีเมื่อยังไม่ได้รับการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังที่โซลินอยด์ทั้งสองด้านดังนั้นจึงต้องมีการปรับชดเชยระยะดังกล่าวด้วยค่ากระแสฐาน โดยจะปรับได้ที่ Offset setting กระแสสูงสุด (Maximum Current) โดยทั่วไปการปรับตั้งค่ากระแสสูงสุดจะหมายถึงการปรับตั้งค่ากระแสไฟฟ้าตามที่กล่าวความต้องการสูงสุด เช่น 800 มิลลิแอมป์ หรือ 1600 มิลลิแอมป์ โดยจะปรับตั้งค่าที่ Amplifier Factor กระแสกระโดด (Jump Current) เป็นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ปรับเพื่อชดเชยผลจากการเคลื่อนที่ของสปูล ซึ่งค่ากระแสดังกล่าวโดยส่วนใหญ่จะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 1-20 เปอร์เซ็นต์ ของกระแสปกติ หรือกระแสสูงสุดที่ต้องการสามารถปรับตั้งค่าได้ที่ Signal Characterizer

2.10.3 ชุดสร้างสัญญาณรampe จากภาพที่ 2.51 ในตอนต้นซึ่งเป็นการแสดงส่วนประกอบหลักของระบบ พรอพอร์ชันนัลไฮดรอลิก ในหัวข้อที่ผ่านมาได้กล่าวถึงพรอพอร์ชันนัลวาล์วชุดขยายสัญญาณ และในลำดับต่อไปนี้จะเป็นการกล่าวถึงชุดสร้างสัญญาณรampe หรือ ramp generator ซึ่งโดยทั่วไปในปัจจุบันชุดดังกล่าวจะรวมอยู่กับชุดขยายเสียงเป็นส่วนใหญ่

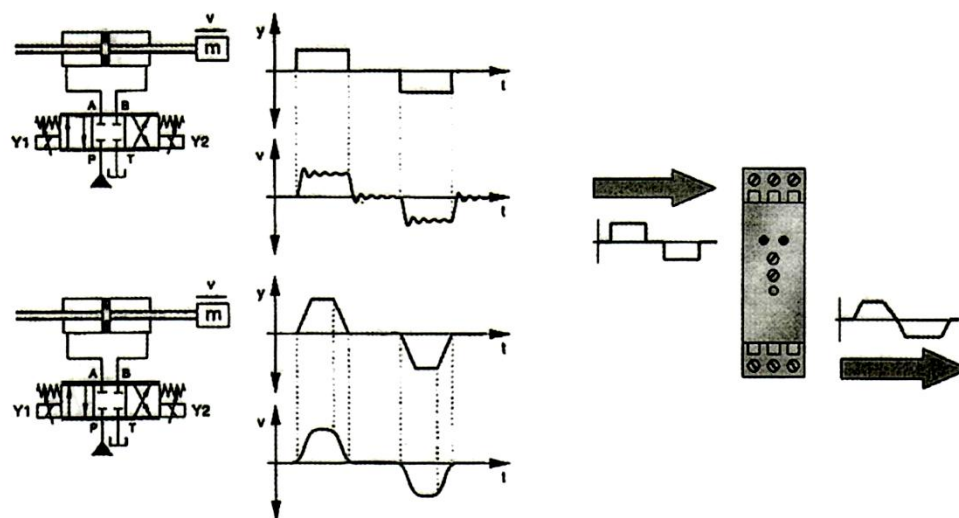


ภาพที่ 2.76 ชุดขยายสัญญาณที่มีการรวมเอาชุดสร้างสัญญาณรampe เข้าไว้ด้วยกัน

มีความเป็นไปได้ที่จะปรับตั้งค่าการปิด/เปิดวาล์วและความเร็วที่แตกต่างกันโดยปรับตั้งการควบคุม ในพรอพอร์ชันนัลวาล์วควบคุมทิศทางให้มีสถานะ “ปิดวาล์ว” กับ “เปิดวาล์ว” แต่การกระทำดังกล่าวจะทำให้ความดันเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดเป็นผลทำให้เกิดการกระตุกของความเร็ว และเกิดการสั่นขึ้นที่กระบอกสูบ เพื่อให้การเคลื่อนที่ที่ความราบเรียบขึ้นจึงได้มีการปรับความชันของสัญญาณ และสัญญาณดังกล่าวนี้เกิดจากชุดสร้างสัญญาณรampeนั่นเอง



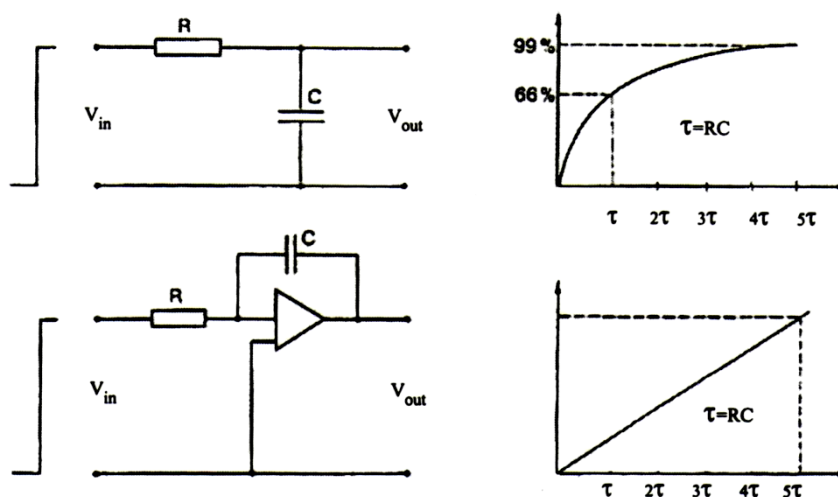
ภาพที่ 2.77 การเปิดปิดวาล์วแบบทันทีทันใดทำให้เกิดการกระตุกอันเนื่องมาจากความดัน



ภาพที่ 2.78 การแก้ปัญหาระบบและสันด้วยการปรับตั้งค่าแรมป์ หรือความชัน

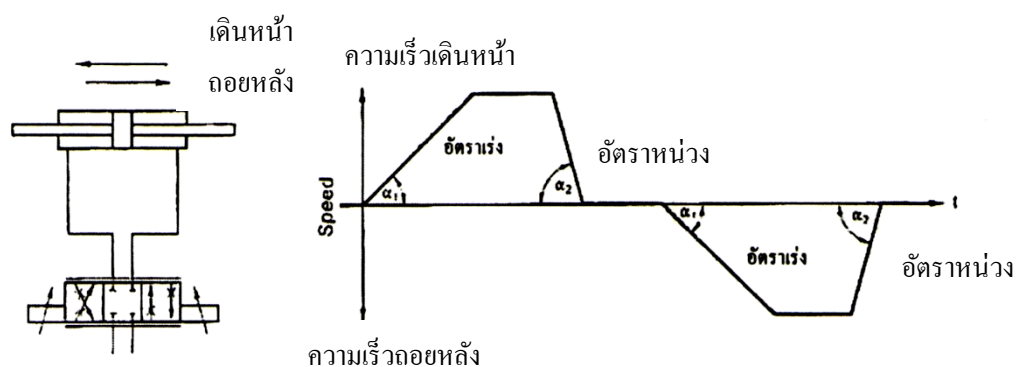
หลักการทํางานพื้นฐานของตัวสร้างสัญญาณแรมป์คือ การใช้วงจรอาร์ซี ที่อาศัยการเก็บประจุ (Capacitor) ดังแสดงในภาพที่ 2.79 หรือหากต้องการการความเป็นเชิงเส้นมากขึ้นก็นำมาใช้ร่วมกับออปแอมป์ (Op-Amp) และวงจรดังกล่าว อาจเรียกอีกอย่างหนึ่งได้ว่าวงจรอินทิเกรต (Integral Circuit)

อย่างไรก็ตามจากวงจรทั้งสองจะเห็นว่าค่าความชันของระดับแรงดันจะขึ้นอยู่กับค่าอาร์ซี ดังนั้นก็หมายความว่าหากเราต้องการเพิ่มหรือลดความชันของสัญญาณก็ให้ปรับค่าความต้านทาน หรือค่าการเก็บประจุ

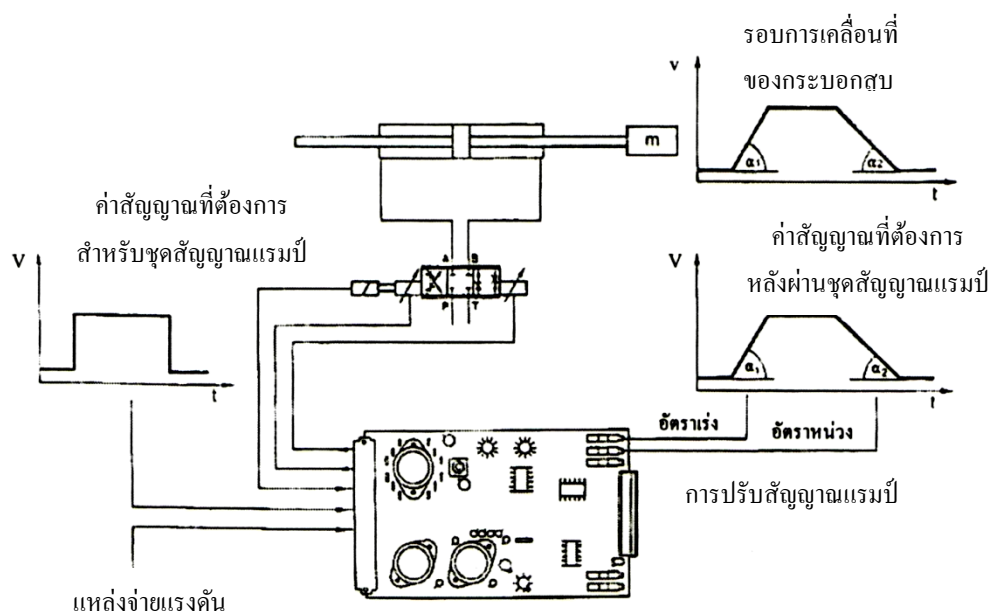


ภาพที่ 2.79 หลักการของตัวสร้างสัญญาณแรมป์

ในทางปฏิบัติหรือการนำสัญญาณแรมป์มาใช้งานในที่นี้เราคงไม่ได้ให้ความสนใจในเรื่องของเวลา แต่จะสนใจในเรื่องของระดับความชัน (α) เป็นหลักเพราะมีผลต่ออัตราเร่งในการเปิด/ปิดตัวของพรอพอร์ชันนัล วาล์วและจะส่งผลต่อเนื่องไปยังกระบอบอกสูบหรืออุปกรณ์ทำงาน



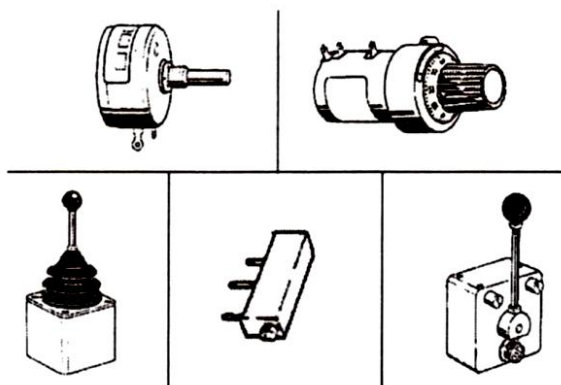
ภาพที่ 2.80 การปรับค่าความชันซึ่งมีผลต่ออัตราเร่ง (acceleration) และอัตราหน่วง (deceleration)



ภาพที่ 2.81 ตัวอย่างการปรับระดับความชันของสัญญาณแรมป์ที่ชุดควบคุม

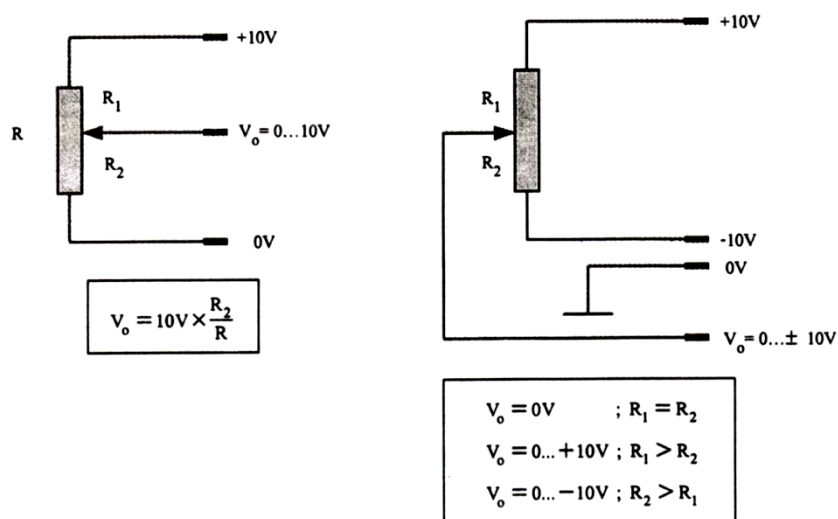
2.10.4 ชุดกำหนดค่าสัญญาณที่ต้องการ จากส่วนประกอบหลักของระบบพรอพอร์ชันนัลไฮดรอลิกในภาพที่ 2.51 ซึ่งเคยถึงไว้ในตอนต้น ในลำดับต่อไปเราจะมาศึกษาถึงรายละเอียดของชุดกำหนดค่าสัญญาณที่ต้องการ (Set Point or Desired-Value) สำหรับเป็นตัวจ่ายสัญญาณอินพุตให้กับชุดควบคุมพรอพอร์ชันนัลวาล์ว

ชุดสร้างสัญญาณแรมปรับสัญญาณแล้วส่งต่อไปยังชุดขยายโดยทั่วไปอุปกรณ์นำมาใช้ในการปรับค่าระดับแรงดันไฟฟ้าเพื่อป้อนให้กับชุดควบคุมพอร์ชอนัลวาล์วมักใช้เป็น โปเทนชิโอมิเตอร์ (Potentiometer) หรือตัวต้านทาน R ที่สามารถปรับค่าได้



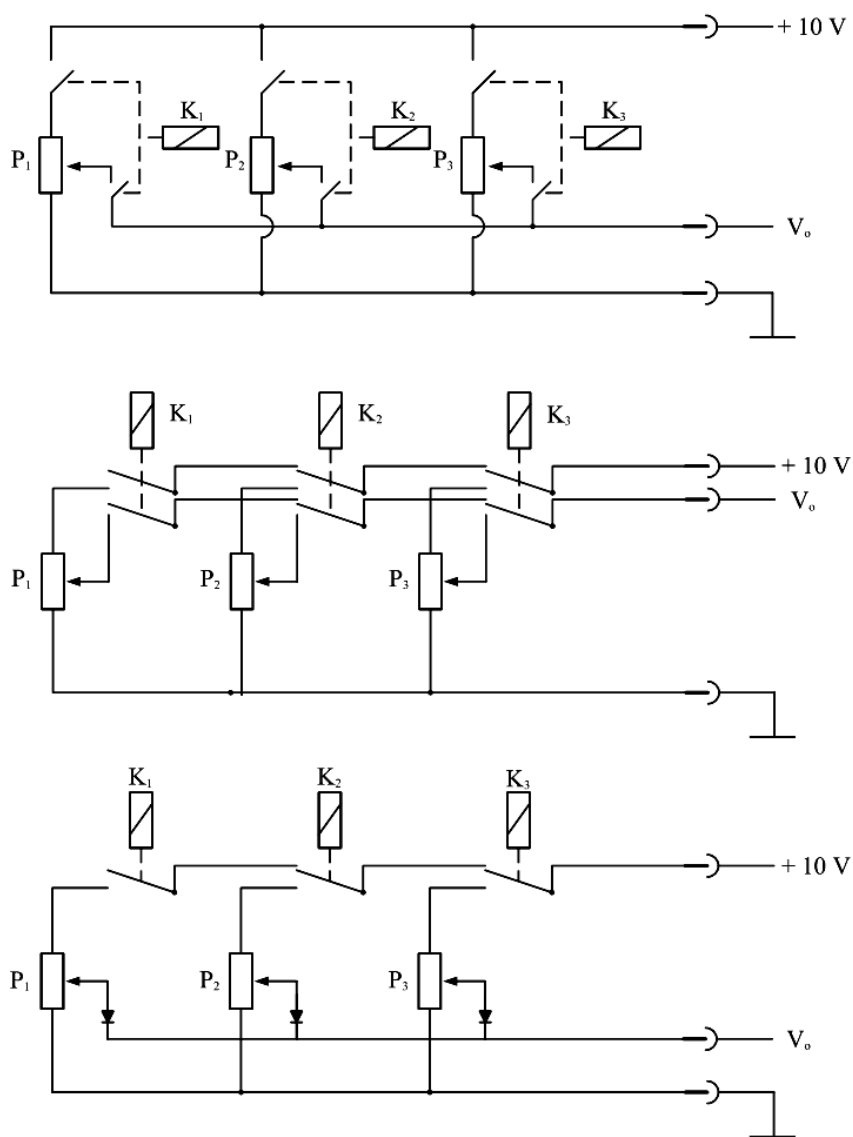
ภาพที่ 2.82 ตัวอย่างโพเทนชิโอมิเตอร์ในรูปแบบต่างๆ

การนำเอาโพเทนชิโอมิเตอร์มาใช้งานจะใช้หลักการวงจรแบ่งแรงดัน (Voltage divider) ดังแสดงด้วยภาพที่ 2.83

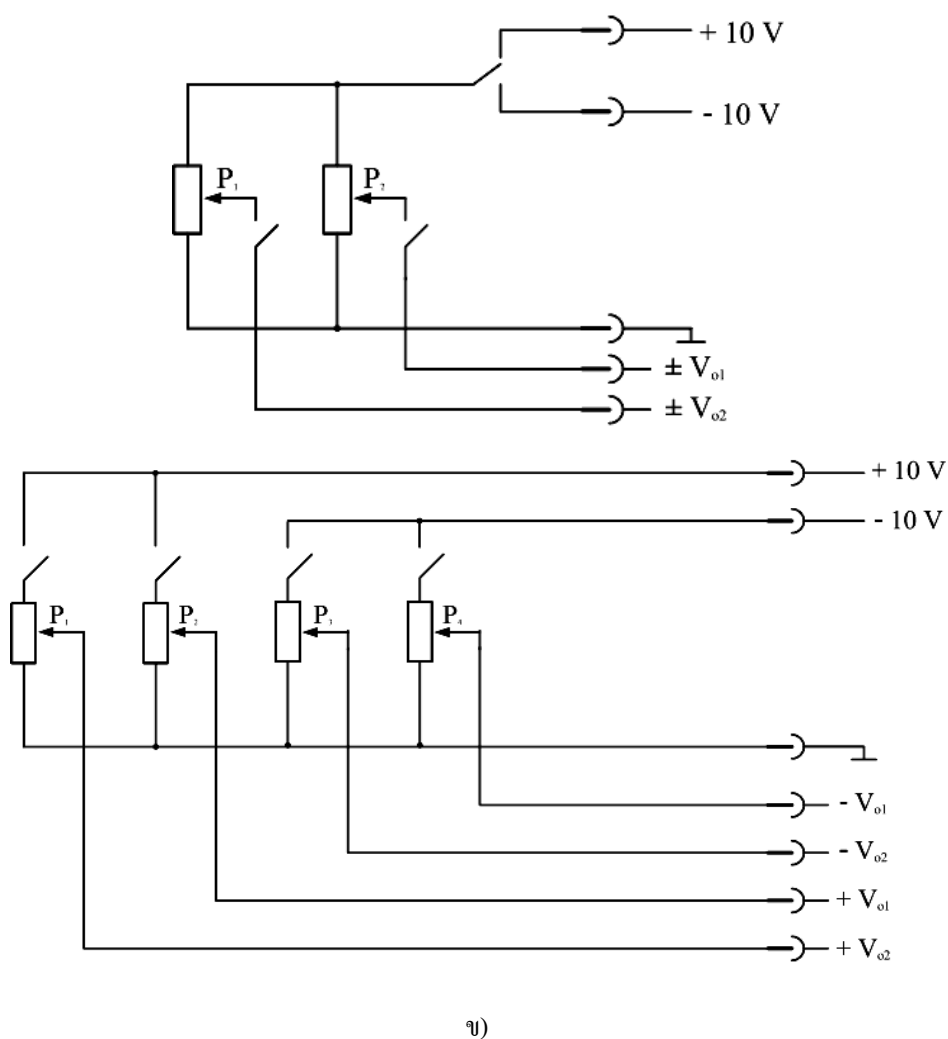


ภาพที่ 2.83 หลักการนำโพเทนชิโอมิเตอร์มาใช้งาน

สำหรับการนำเอาโพเทนชิโอมิเตอร์หลายๆชุดมาเป็นตัวจ่ายสัญญาณให้กับชุดสร้างสัญญาณแรมป์สามารถใช้รีเลย์หรือ พีแอลซีมาเป็นตัวควบคุมในการตัดต่อเพื่อให้เกิดสัญญาณที่มีค่าหลายๆ ระดับได้ดังแสดงด้วยภาพที่ 2.85



ก)

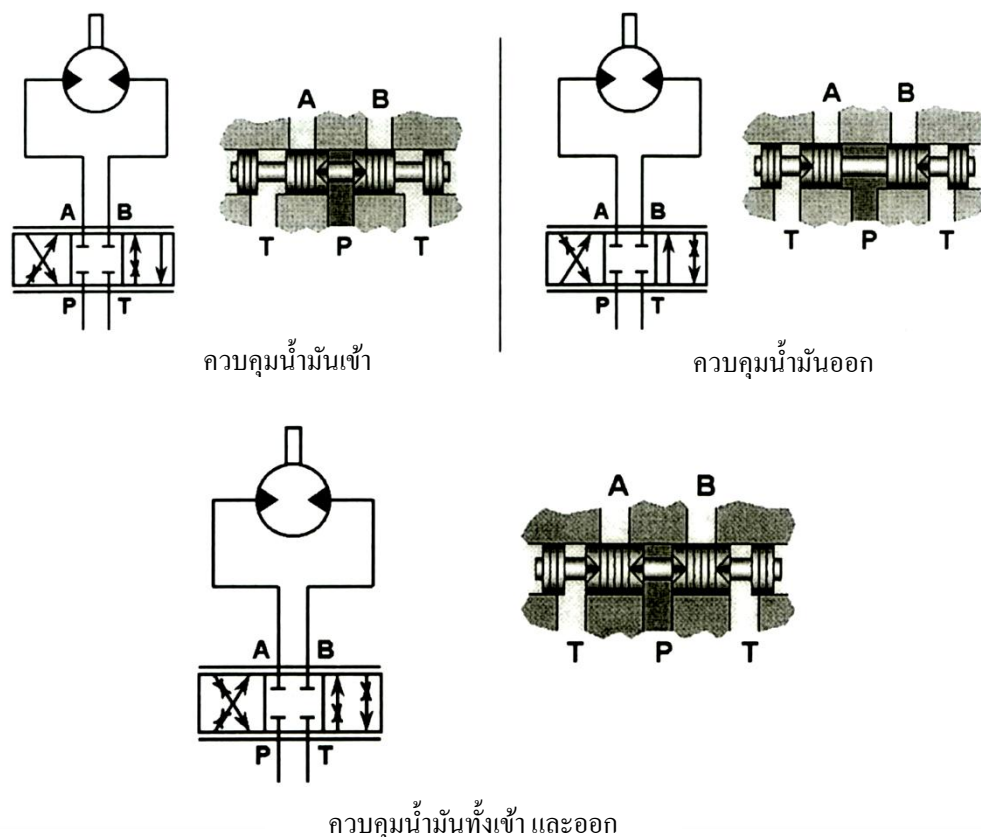


ภาพที่ 2.84 การใช้เล็หรือ พีแอลซี ควบคุมโพเทนชิโอมิเตอร์เพื่อสร้างสัญญาณให้มีค่าหลายระดับ

ก) V_0 สำหรับต่อเข้ากับชุดสร้างสัญญาณแรมป์ที่ต้องการจากระดับแรงดัน 0-10 โวลต์

ข) V_0 สำหรับต่อเข้ากับชุดสร้างสัญญาณแรมป์ที่ต้องการระดับแรงดัน ± 10 โวลต์

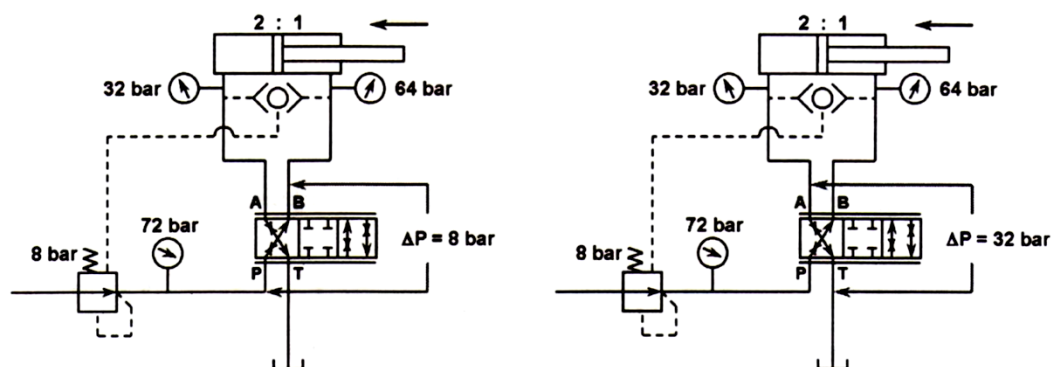
2.10.5 เทคนิคการใช้พรอพอร์ชันนัลวาล์ว เทคนิคการควบคุมความเร็วของอุปกรณ์ทำงานแบบควบคุมน้ำมันเข้า (Meter-in) และควบคุม (Meter-out) สำหรับพรอพอร์ชันนัลวาล์วในปัจจุบัน สามารถเลือกวิธีการควบคุมน้ำมันดังกล่าวได้ด้วยการเลือกรูปแบบโครงสร้างของสปีดที่อยู่ภายใน ดังแสดงในภาพที่ 2.85 (สังเกตร่องบากตรงที่ สปีดจะต่างกัน)



ภาพที่ 2.85 รูปแบบสลับของพรอพอร์ชันนัลวาล์วที่สามารถควบคุมน้ำมันเข้าหรือออกได้

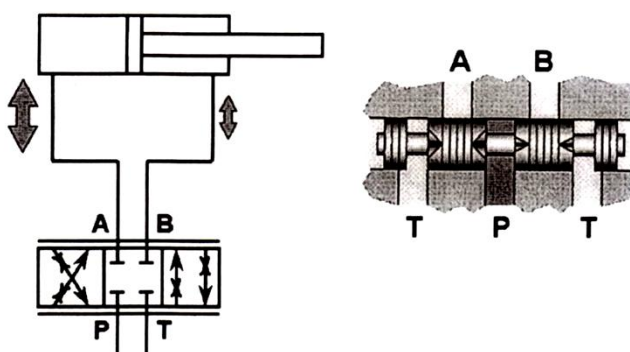
สำหรับการควบคุมความเร็วของอุปกรณ์ทำงานไม่ว่าจะเป็นมอเตอร์ไฮดรอลิกหรือกระบอกสูบ จะต้องรักษาความดันที่ตกคร่อมวาล์วให้คงที่ทั้งนี้เนื่องจากความเร็วจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหล และอัตราการไหลจะขึ้นอยู่กับความดันที่ตกคร่อมวาล์วดังที่กล่าวไว้ตั้งแต่ตอนต้น การรักษาความดันอาจใช้วาล์วลดความดันมาต่อรวมก็ได้

การใช้พรอพอร์ชันนัลวาล์วเพื่อสามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฮดรอลิกหรือกระบอกสูบที่มีก้านสูบสองด้าน คงไม่เกิดปัญหาอะไรเพราะพื้นที่ที่มีผลต่อความดันจะเท่ากันส่งผลให้ความดันที่ตกคร่อมวาล์วมีค่าเท่ากันทั้งตอนที่เคลื่อนที่ไปด้านหน้าและถอยกลับ แต่หากเป็นกระบอกสูบที่มีพื้นที่ลูกสูบไม่เท่ากัน เช่น พื้นที่หลังต่อด้านก้านสูบมีค่าเป็น 2:1 จะส่งผลต่อความดันที่ตกคร่อมวาล์ว ดังแสดงในภาพที่ 2.86

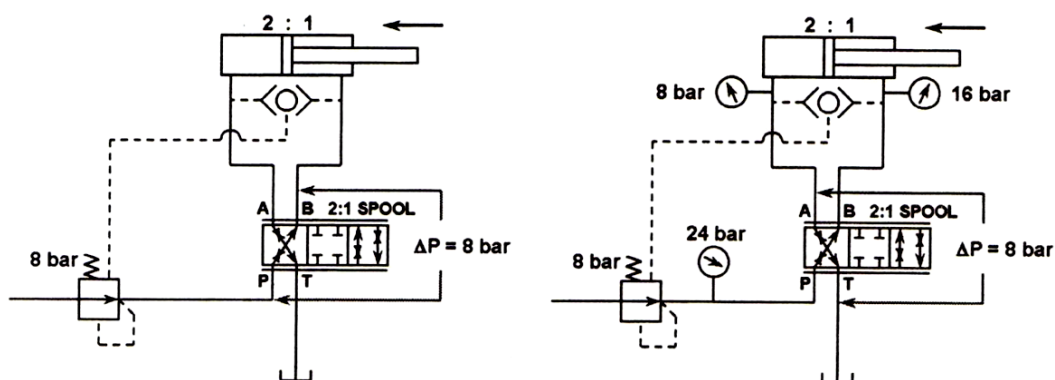


ภาพที่ 2.86 ตัวอย่างความดันตกคร่อมวาล์วเมื่อพื้นที่ของลูกสูบต่างกันเป็น 2:1

ในภาพที่ 2.86 เมื่อความดันที่ตกคร่อมวาล์วมีค่าไม่เท่ากันแน่นอนว่าอัตราการไหลที่เกิดขึ้นย่อมต่างกันส่งผลถึงความเร็วของกระบอกสูบและนั่นก็หมายความว่าเร็วจะเปลี่ยนไปจากที่ควรจะเป็น กล่าวคือความเร็วตอนเคลื่อนที่ออกและเข้าจะไม่เท่ากัน โดยที่การเคลื่อนที่เข้าจะเร็วกว่าการเคลื่อนที่ออก ซึ่งหลักการควบคุมความเร็วโดยทั่วไปเราจะให้ความดันตกคร่อมวาล์วคงที่ไว้ที่ค่าหนึ่งเพื่อให้อัตราการไหลขึ้นอยู่กับสัญญาณคำสั่งเพียงอย่างเดียว แก้โดยใช้สปูลที่มีพื้นที่ 2 : 1 (ให้สังเกตขนาดของร่องบาก) แก้ปัญหาดังแสดงด้วยภาพที่ 2.87



ภาพที่ 2.87 สปูลของวาล์วที่มีพื้นที่ 2:1



ภาพที่ 2.88 ตัวอย่างความดันตกคร่อมวาล์ว เมื่อพื้นที่ของสปูลมีค่าเป็น 2:1

2.11 การคำนวณค่าเสดในระบบ และการประยุกต์ใช้กับโครงการประิณญาณพนธ์

ในระบบการส่งถ่ายของไหล ค่าเสดมีความสำคัญมาก เนื่องจากเสดเกี่ยวข้องกับแรงที่เกิดขึ้น จุดต่างๆในระบบส่งถ่ายของไหล ถ้ามีการคำนวณค่าเสดผิดพลาด จะทำให้การส่งถ่ายของไหลไม่มีประสิทธิภาพ หรืออาจทำให้อุปกรณ์ในระบบส่งถ่ายของไหลเสียหายได้ ในปริญญานิพนธ์นี้จะใช้การปรับค่าความเร็วรอบมอเตอร์ในปั้มดูด เพื่อรักษาค่าเสดในระบบให้เหมาะสม

2.11.1 เสด (Head) หมายถึง พลังงานในรูปความสูงของเหลว มีความหมายเกี่ยวข้องโดยตรงกับ ความดันของของเหลว ค่าเสดและค่าความดันสามารถเปลี่ยนกลับไปกลับมาได้ ความดัน หมายถึง แรงต่อหน่วยพื้นที่ที่กระทำ ณ จุดจุดใด คำว่า แรง อาจเป็นน้ำหนักของของเหลว หรืออื่นๆที่กดทับอยู่บนจุดจุดนั้น การบอกค่าความดันยังแบ่งเป็นหลายแบบ ขึ้นอยู่กับการตั้งบรรทัดฐานในการหาความดัน ดังนั้นหน่วยของเสดจึงเป็น ฟุตของเหลว เมตรของเหลว หรืออื่นๆ การจะเปลี่ยนความดันของของเหลวไปเป็นค่าของเสด สามารถคำนวณโดยใช้สูตร

$$\text{เสด (ฟุตของเหลว)} = \frac{2.31 \times \text{ความดัน} \left(\frac{\text{ปอนด์}}{\text{ตารางนิ้ว}} \right)}{\text{ความถ่วงจำเพาะของเหลว}} \quad (2.13)$$

จะสังเกตได้ว่า สำหรับน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 62 องศาฟาเรนไฮท์ ซึ่งเป็นสถานะที่มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1 ความสูงของน้ำที่สถานะนี้ 2.31 ฟุต จะทำให้เกิดความดัน 1 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว คำจำกัดความเกี่ยวกับเสดแบบต่างๆมีดังนี้

2.11.1.1 เสดความดัน หมายถึง เสดซึ่งเกิดจากความดันภายในระบบ ในที่นี้จะหมายถึงความดันที่กระทำอยู่เหนือผิวของของเหลว สามารถแปลงเป็นค่าเสดได้โดยใช้สมการ 2.13

2.11.1.2 เสดสแตติก หมายถึง เสดซึ่งเกิดจากความสูงของคอลัมน์น้ำที่กระทำต่อปั้ม

- เสดสแตติกด้านเข้า มีค่าเท่ากับความสูงจากแนวศูนย์กลางของปั้มไปยังผิวหน้าของของเหลวทางด้านเข้าของปั้ม อาจมีค่าเป็นบวกหรือลบก็ได้ ถ้าผิวหน้าของของเหลวสูงกว่าแนวศูนย์กลางของปั้ม จะมีค่าบวก สำหรับที่ผิวหน้าของของเหลวต่ำกว่าแนวศูนย์กลางของปั้มจะมีค่าลบ สำหรับค่าเสดที่เป็นลบนี้ มักใช้คำว่า “ลิฟท์” แทน เช่น ถ้าในระบบผิวหน้าของของเหลวทางด้านเข้าอยู่ต่ำกว่าแนวศูนย์กลางของปั้ม 5 ฟุต จะเรียกเสดสแตติกด้านเข้า 5 ฟุตว่ามีค่า สแตติกลิฟท์ 5 ฟุต

- เสดสแตติกด้านออก มีค่าเท่ากับความสูงจากแนวศูนย์กลางของปั้มไปยังผิวหน้าของของเหลวด้านเข้าและด้านออก

- เสดสแตติกรวม คือ ผลบวกของเสดสแตติกด้านเข้าและด้านออก

2.11.1.3 เสดความเร็ว เนื่องจากสสารทุกชนิดขณะเคลื่อนที่จะมีพลังงานจลน์อยู่ในตัวมัน และเนื่องจากพลังงานสามารถเปลี่ยนกลับไปกลับมาได้ ดังนั้นพลังงานจลน์ของของเหลวที่กำลังเคลื่อนที่ในระบบปั๊ม จึงต้องนำมาคิดเป็นเสครูปหนึ่ง เรียกว่า เสดความเร็ว ซึ่งจะคำนวณได้จากสูตร

$$\text{เสดความเร็ว} = \frac{v^2}{2g} \quad (2.14)$$

โดยที่ v หมายถึง ความเร็ว (เมตร/วินาที)
 g หมายถึง ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก(เมตร/วินาที²)

2.11.1.4 เสดสูญเสีย คือ พลังงานของของเหลวที่สูญเสียไปในขณะที่ของเหลวไหลไปในท่อ ประกอบด้วย

- เสดเสียดทาน การที่ของเหลวไหลไปในท่อพลังงานส่วนหนึ่งจะสูญเสียไป ในการเอาชนะความเสียดทานจากผิวท่อซึ่งเป็นตัวต้านทานการไหลของของเหลว ความเสียดทานต่อการไหลที่มีต่อของเหลวนี้ สามารถเปรียบได้กับความต้านทานต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าในขดลวดตัวนำ

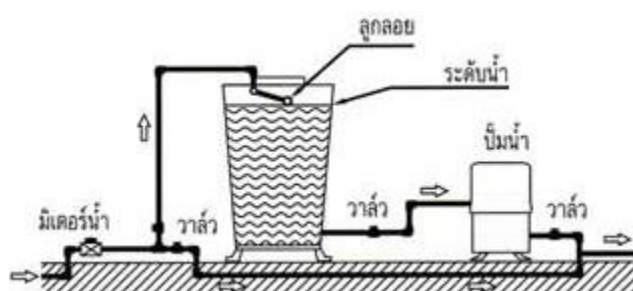
- เสดสูญเสียอื่นๆ ได้แก่ เสดสูญเสียเนื่องจากการเปลี่ยนทิศทางการไหล การเพิ่มหรือลดความเร็วทันทีทันใดและอื่นๆ

การคำนวณว่า ปั๊มที่จะนำมาใช้ในระบบต้องมีเสดอย่างน้อยที่สุดเท่าใด จะต้องหาค่าการเคลื่อนย้ายของเหลวจากด้านเข้าไปยังด้านออก ด้วยอัตราไหลขนาดต่างๆเสดของเหลวจะเพิ่มขึ้นเท่าใด อาจจะแบ่งพิจารณาโดย เสดรวมด้านเข้าเท่ากับเสดความดันด้านเข้าบวกเสดเสดเด็คด้านเข้าบวกเสดความเร็วด้านเข้าลบเสดสูญเสียด้านเข้า, เสดรวมด้านออกเท่ากับเสดความดันด้านออกบวกเสดเสดเด็คด้านออกบวกเสดความเร็วด้านออกบวกเสดสูญเสียด้านออก และ เสดของปั๊มที่ต้องการเท่ากับเสดรวมด้านออกลบเสดรวมด้านเข้า

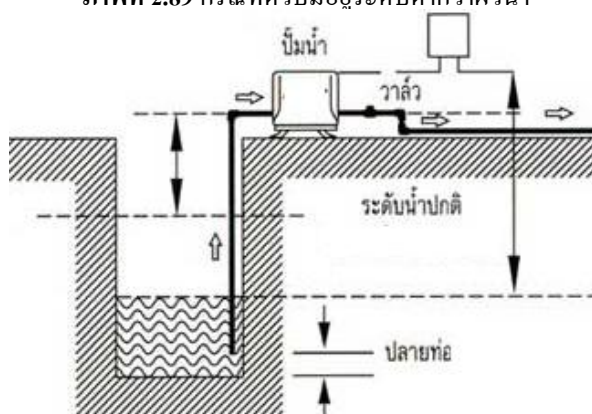
ในการเลือกปั๊ม นอกจากจะพิจารณาว่า ปั๊มสามารถทำเสดที่อัตราไหลตามที่ออกแบบได้หรือไม่แล้ว ยังมีองค์ประกอบที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกว่าปั๊มนั้นสามารถใช้งานได้โดยไม่เกิดความเสียหายรวดเร็วเนื่องจาก “การสำลัก” ทางด้านดูดของปั๊ม องค์ประกอบนั้นคือ เนทโพสิทีฟชัคชั่นเสด (Net-Positive Section Head: NPSH) หมายถึง ปริมาณในตัวของของเหลวที่แนวศูนย์กลางของปั๊ม แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ เนทโพสิทีฟชัคชั่นเสดที่มีอยู่ในระบบ เป็นลักษณะสมบัติของระบบ บ่งบอกถึงปริมาณพลังงานที่สูงกว่าพลังงานจากความดันไอของของเหลว การที่ถือความดันไอของของเหลวเป็นบรรทัดฐาน เพราะไม่ต้องการให้การดูดของปั๊มทางด้านดูดทำให้เกิดความดันต่ำกว่าความดันไอของของเหลว ซึ่งจะทำให้ของเหลวนั้นกลายเป็นไอ และเกิดเป็นฟองของไอบนไปกับของเหลว ทั้งนี้เพราะถ้าของเหลวที่ถูกดูดกลายเป็นไอ และเป็นฟองปนไปกับของเหลวเข้าสู่ใบพัด ฟองของไอล่านี้จะแตกเนื่องจากความดันที่เพิ่มขึ้น การแตกของฟองเหล่านี้จะก่อให้เกิดปัญหาการสั่นของปั๊ม และการสึกกร่อนเป็นรูของใบพัดอย่างรวดเร็ว เรียกการเกิดนี้ว่า การเกิดควาเวชัน (Cavitation) และ เนทโพสิทีฟชัคชั่นเสดที่ต้องการของตัวปั๊ม หมายถึง พลังงานที่ต้องการในการเอาชนะความต้านทานทางด้านเข้าของปั๊มไปยังใบพัด และทำให้ของเหลวไหลเข้าสู่ใบพัดมีความเร็วเพียงพอค่าเนทโพสิทีฟชัคชั่นเสดที่ต้องการของปั๊มขึ้นอยู่กับลักษณะการออกแบบของตัวปั๊ม และยังขึ้นกับอัตราการไหลของของเหลวด้วย จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าเนทโพสิทีฟชัคชั่นเสดที่มีในระบบจะต้องสูงกว่า

ค่าเนตโพลีทิฟซัคชั่นเฮดที่ต้องการของปั๊มที่จะนำมาใช้เสมอ อย่างไรก็ตาม ถ้าหากปั๊มที่มีอยู่มีค่าเนตโพลีทิฟซัคชั่นเฮดที่มีอยู่ในระบบต่ำกว่าค่า เนตโพลีทิฟซัคชั่นเฮดที่ต้องการ ยังสามารถดัดแปลงระบบให้ใช้ปั๊มตัวนี้ได้ โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดท่อหรือตำแหน่งของตัวปั๊มใหม่เพื่อให้ค่าเนตโพลีทิฟซัคชั่นเฮดที่มีอยู่ในระบบสูงกว่าค่าเนตโพลีทิฟซัคชั่นเฮดที่ต้องการของปั๊ม

2.11.2 การประยุกต์ใช้งานในโครงการงานปรัญญาพนธ์ ค่าเสดมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากจะเกี่ยวข้องกับเรื่องแรงที่เกิดขึ้นในระบบ ขนาดของปั๊ม ความเร็วรอบในการขับปั๊ม ตำแหน่งการวางอุปกรณ์ และผลที่อาจจะสร้างความเสียหายให้กับปั๊มได้ ลักษณะของการเกิดจะพิจารณาจากตำแหน่งของปั๊มเทียบกับระดับผิวน้ำทางด้านท่อดูด แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ตัวปั๊มอยู่ระดับต่ำกว่าผิวน้ำ และกรณีที่ตัวปั๊มอยู่สูงกว่าระดับผิวน้ำ



ภาพที่ 2.89 กรณีที่ตัวปั๊มอยู่ระดับต่ำกว่าผิวน้ำ



ภาพที่ 2.90 กรณีที่ตัวปั๊มอยู่ระดับสูงกว่าผิวน้ำ



ภาพที่ 2.91 ตำแหน่งการติดตั้งปั๊มดูดทรายบนเรือ

จากภาพที่ 2.91 ตำแหน่งการติดตั้งปั๊มดูดทรายบนเรือ จะพบว่าตัวปั๊มดูดทรายถูกติดตั้งอยู่บนแขนบลูม ในการทำงาน ผู้ควบคุมเรือจะหย่อนแขนบลูมลงในน้ำเพื่อให้ปลายท่อดูดอยู่ในตำแหน่งเหนือหน้าดิน ซึ่งตรงกับกรณีที่ตัวปั๊มอยู่ต่ำกว่าระดับผิวน้ำ การคำนวณค่าเสดคำนวณได้จากสูตรต่อไปนี้

$$\text{เสดสูญเสียตรง} = \frac{kv^2}{2g} \quad (2.15)$$

$$\text{เสดสูญเสียหลัก} = \frac{f_{s,d} l_{s,d} v_{s,d}^2}{D_{s,d} 2g} \quad (2.16)$$

โดยที่	k	หมายถึง	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานข้องอ (ไม่มีหน่วย)
	v	หมายถึง	ความเร็วการไหล (เมตร/วินาที)
	g	หมายถึง	ค่าแรงโน้มถ่วง (เมตร/วินาที ²)
	$f_{s,d}$	หมายถึง	ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านทานของวัสดุ (ไม่มีหน่วย)
	$l_{s,d}$	หมายถึง	ความยาวท่อ (เมตร)
	$D_{s,d}$	หมายถึง	เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ (เมตร)

จากตำแหน่งการติดตั้งปั๊มดูดทรายบนเรือ กำหนดให้ใช้ปั๊มดูดทรายแบบมาตรฐานใบพัดปั๊มดูดทรายมีขนาด 30 นิ้ว ด้านท่อดูดเป็นท่อเหล็ก ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทาน 0.0275 เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 นิ้ว ยาว 7 เมตร ที่หัวกัด $k = 0.5$ ข้อต่อ 45 องศา ขนาด 12 นิ้ว $k = 0.16$ ส่วนด้านท่อส่งเป็นท่อเซซีพีอี ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทาน 0.017 เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นิ้ว ยาว 400 เมตร ข้อต่อ 45 องศา ขนาด 10 นิ้ว $k = 0.17$ ข้อต่อ 90 องศา ขนาด 10 นิ้ว $k = 0.6$ จำนวน 3 ตัว ระยะจากปั๊มไปยังฝัมน้ำ 14.15 เมตร ระยะจากปั๊มไปยังโรงงาน 26.15 เมตร กำหนดอัตราไหล 0.25

พิจารณาด้านท่อดูด

$$\begin{aligned} \text{เสถียรเชิงตรง} &= \frac{kv^2}{2g} \text{ จาก } v = \frac{Q}{A} = \frac{0.25}{\frac{\pi(0.305)^2}{4}} = 3.421 \text{ เมตร/วินาที} \\ &= \frac{(0.5+0.16)(3.421^2)}{2(9.81)} = 0.393 \text{ เมตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{เสถียรเชิงหลัก} &= \frac{f_l v_s^2}{D_s 2g} \\ &= \frac{0.0275 \times 7 \times 3.421^2}{0.305 \times 2 \times 9.81} = 0.376 \text{ เมตร} \end{aligned}$$

$$\text{เสถียรแตก} = 14.15 \text{ เมตร}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \text{เสถียรทางด้านดูด} = 14.15 - 0.376 - 0.393 = 13.380 \text{ เมตร}$$

พิจารณาด้านท่อส่ง

$$\begin{aligned} \text{เสถียรเชิงตรง} &= \frac{kv^2}{2g} \text{ จาก } v = \frac{Q}{A} = \frac{0.25}{\frac{\pi(0.255)^2}{4}} = 4.865 \text{ เมตร/วินาที} \\ &= \frac{(3 \times 0.17)(4.865^2)}{2(9.81)} = 0.615 \text{ เมตร (ข้อต่อ 45 องศา)} \end{aligned}$$

$$= \frac{(0.6)(4.865^2)}{2(9.81)} = 0.723 \text{ เมตร (ข้อต่อ 90 องศา)}$$

$$\text{เสถียรเชิงหลัก} = \frac{f_d v_d^2}{D_d 2g} = \frac{0.017 \times 400 \times 4.865^2}{0.255 \times 2 \times 9.81} = 32.168 \text{ เมตร}$$

$$\text{เสถียรแตก} = 26.15 \text{ เมตร}$$

$$\text{เสถียรภาพ} = \frac{v^2}{2g} = \frac{4.865^2}{2 \times 9.81} = 1.206 \text{ เมตร}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \text{เสถียรภาพทางด้านส่ง} = 32.168 + 26.15 + 1.206 + 0.615 + 0.723 = 61.332 \text{ เมตร}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \text{เสถียรภาพของระบบ} = \text{เสถียรภาพทางส่ง} - \text{เสถียรภาพทางดูด} = 61.332 - 13.380 = 47.959 \text{ เมตร}$$

2.12 การหาปริมาณทรายจากค่าเสถียรภาพในโครงการงานปรัญญาพนธ์

ทำให้สามารถหาปริมาณของของไหลปลายทาง ความเร็วรอบของมอเตอร์ต้นกำลัง ซึ่งจะทำให้ทราบผลผลิตที่ทำงานได้ โดยอาศัยกราฟในภาคผนวก ก

จากภาคผนวก ก พิจารณากราฟของปั๊มขนาด 30 นิ้ว จากกราฟในแกนตั้ง แสดงถึงค่าเสถียรภาพที่เกิดขึ้นของระบบเมื่อระบบทำงาน แกนนอนแสดงถึงอัตราไหล ซึ่งสามารถนำค่าอัตราไหลคำนวณหาปริมาณทรายปลายทางได้ ถ้ากำหนดอัตราไหล 300 ลิตรต่อวินาที การทำงานที่อัตราส่วนน้ำต่อทราย 30 เปอร์เซนต์ จะหาปริมาณทรายในหน่วยลิตรต่อชั่วโมงคือ $300 \times (30/100) \times (3.6) = 324$ ตันต่อชั่วโมง ในทางกลับกัน ถ้าผู้ประกอบการต้องการทราย 350 ตันต่อชั่วโมง ขณะการทำงานที่อัตราส่วนน้ำต่อทราย 30 เปอร์เซนต์ ก็จะสามารถหาอัตราการไหลในหน่วยลิตรต่อวินาทีได้เช่นกัน

จากตัวอย่างการหาค่าเสถียรภาพ ทำให้สามารถทราบความเร็วรอบมอเตอร์จากกราฟได้ ซึ่งเสถียรภาพที่คำนวณได้คือ 47.959 เมตร หรือประมาณ 48 เมตร ถ้าต้องการปริมาณทรายที่ 324 ตันต่อชั่วโมง โดยทำงานที่อัตราส่วนน้ำต่อทราย 30 เปอร์เซนต์ จะเท่ากับอัตราไหล 300 ลิตรต่อวินาที เมื่อเปรียบเทียบกราฟจากแกนตั้งและแกนนอน เส้นกราฟจะตัดกันที่ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที สรุปคือ ถ้าให้ปั๊ม 30 นิ้ว ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที เสถียรภาพ จะได้ทราย 324 ตันต่อชั่วโมง

2.13 การคำนวณค่าความดันไฮดรอลิกในกระบอกสูบกันหราม (Ram)

การคำนวณความดันน้ำมันในกระบอกไฮดรอลิกเพื่อถ่วงดุลกับค่าสูญญากาศในท่อดูด มีความจำเป็นอย่างมากในระบบควบคุมสูญญากาศในปั๊มดูดทราย เนื่องจากการทำงานขณะปั๊มดูดทรายเริ่มดูด ค่าสูญญากาศที่เกิดขึ้นในท่อดูดจะเพิ่มขึ้นเป็นลำดับ ในทฤษฎีของการคำนวณนี้ จะยกตัวอย่างค่าตัวแปรการเกิดสูญญากาศที่เหมาะสมคือ 50 เปอร์เซนต์ ถึง 70 เปอร์เซนต์ ให้เป็นอัตราที่เหมาะสมที่สุดในการดูดทราย ซึ่งในการใช้งานจริงนั้น จะต้องทำการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซนต์นี้เป็นค่าสูญญากาศที่เกิดขึ้นจริงต่อไป

การออกแบบระบบควบคุมสูญญากาศในปั๊มดูดทรายจะใช้หลักการปรับความดันในกระบอกสูบไฮดรอลิกด้วยพรอพอร์ชันนัลวาล์ว ซึ่งก้านสูบจะติดกับประตุน้ำที่ปลายท่อกันหราม โดยใช้ความดันในทิศทางตรงกันข้ามต้านกัน จากภาพที่ 2.92 ความดันสูญญากาศที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางเดียวกับความดันได้น้ำที่เกิดขึ้น ค่าความดันทั้งสองนี้เป็นค่าความดันที่เกิดขึ้นจริงในการทำงาน เมื่อท่อดูดเกิดการติดขัด เนื่องจากส่วนผสมทรายในน้ำเพิ่มขึ้น ค่าความดันสูญญากาศจะเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนค่าความดันได้น้ำ จะเกิดเนื่องจากแรงดันน้ำรอบข้าง ซึ่งแปรเปลี่ยนไปตามความลึกที่ทำการดูด จึงต้องติดตั้งกระบอกไฮดรอลิก และควบคุมความดันน้ำมันในกระบอกสูบให้อยู่ในค่าที่เหมาะสมเพื่อดันความดันตรงด้านตรงข้าม ยกตัวอย่าง ที่ความลึก 20 เมตร ค่าสูญญากาศที่เหมาะสมคือ 50 ถึง 70 เปอร์เซนต์ ซึ่งจะทำให้ได้เปอร์เซนต์ของแข็งที่ 27 ถึง 33 เปอร์เซนต์ ค่าความดันได้น้ำและความดันสูญญากาศที่คำนวณได้สูงสุดคือ 5 บาร์ จะต้องจ่ายน้ำมันไฮดรอลิกเข้าไปที่กระบอกสูบเพื่อดันแรงดังกล่าวที่

ความดัน 5.1 บาร์ ถ้าระบบดูดทรายอยู่ในค่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งระหว่าง 27 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ความดันของน้ำมันไฮดรอลิกจะมากกว่าความดันได้น้ำและความดันสุญญากาศ ประตูน้ำจะปิด น้ำจะไม่มีการเสริมเข้าท่อดูด แต่เมื่อเกิดการหกรام เปอร์เซ็นต์ของแข็งจะเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าสุญญากาศเพิ่มขึ้น ผลรวมความดันจากที่คำนวณได้จะเปลี่ยนไป เช่นเปลี่ยนไปเป็น 5.5 บาร์ ซึ่งมากกว่าความดันของน้ำมันไฮดรอลิกในระบบดูด

เมื่อเป็นเช่นนี้ประตูน้ำจะเปิด ทำให้น้ำเสริมเข้าท่อดูดของปั๊มดูดทรายได้ เมื่อน้ำเข้ามาเสริมทำให้การไหลราบรื่น ค่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งจะลดลงไปด้วย ทำให้ความดันไฮดรอลิกมากพอที่จะปิดประตูน้ำอีกครั้ง จึงสามารถรักษาสภาพการไหลให้ราบรื่นได้

สมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าแรงดันสุญญากาศคือ

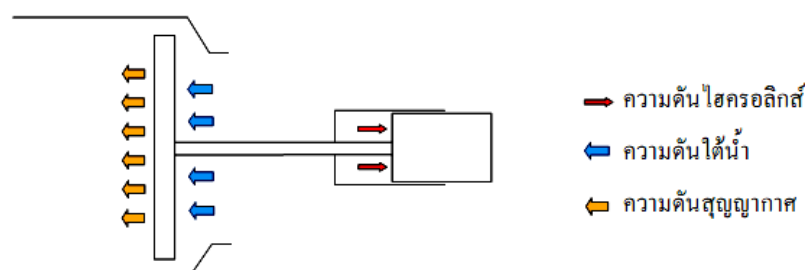
$$D = \frac{1.11 \times \sqrt{F}}{\Delta P} \quad (2.17)$$

โดยที่	D	หมายถึง เส้นผ่านศูนย์กลางของวาล์วเปิดปิดน้ำ (เซนติเมตร)
	F	หมายถึง แรงดันสุญญากาศ (กิโลกรัม)
	ΔP	หมายถึง ค่าสุญญากาศที่เกิดขึ้นในท่อดูด (เปอร์เซ็นต์)

สมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความดันได้น้ำคือ

$$P = \frac{1000 \times h}{10000} \quad (2.18)$$

โดยที่	h	หมายถึง ความลึกจากผิวหน้า (เมตร)
	P	หมายถึง ความดันได้น้ำในท่อขนาดต่างๆ (บาร์)



ภาพที่ 2.92 แสดงลักษณะความดันที่เกิดขึ้น

จากขนาดของท่อกันหกรามเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวาล์วเปิดปิด น้ำ 10 เซนติเมตรที่ความลึกจากผิวหน้า 20 เมตร ค่าสุญญากาศที่เกิดขึ้นในท่อดูด 50 เปอร์เซ็นต์ จงหาความดัน ไฮดรอลิกในระบบดูดที่เหมาะสม

$$\text{จากสูตร} \quad D = \frac{1.11 \times \sqrt{F}}{\Delta P} \quad \text{ย้ายข้างหา F จะได้}$$

$$F = \left(\frac{D \times \Delta P}{1.11} \right)^2$$

$$F = \left(\frac{10 \times 0.5}{1.11} \right)^2$$

$$F = 20 \text{ กิโลกรัม}$$

$$\text{จาก} \quad A = A_{\text{นอก}} - A_{\text{ใน}}$$

$$A = 78.539 - 3.141 = 75.398 \text{ ตารางเซนติเมตร}$$

ความดันได้น้ำที่ท่อ 6 นิ้ว

$$P = \frac{1000 \times h}{10000}$$

$$P = \frac{1000 \times 20}{10000}$$

$$P = 2 \text{ บาร์}$$

$$\text{จาก} \quad F = P \times A$$

$$F = 2 \times 75.398 = 150 \text{ กิโลกรัม}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad F_{\text{ไฮดรอลิก}} = F_{\text{สูญญากาศ}} + F_{\text{ได้น้ำ}}$$

$$F_{\text{ไฮดรอลิก}} = 20 + 150 = 170 \text{ กิโลกรัม}$$

$$\text{จาก} \quad P = \frac{F}{A}$$

$$P = \frac{170}{9.42} = 18 \text{ บาร์}$$

ดังนั้น ความดันไฮดรอลิกในกระบอกสูบที่เหมาะสมคือ 18 บาร์