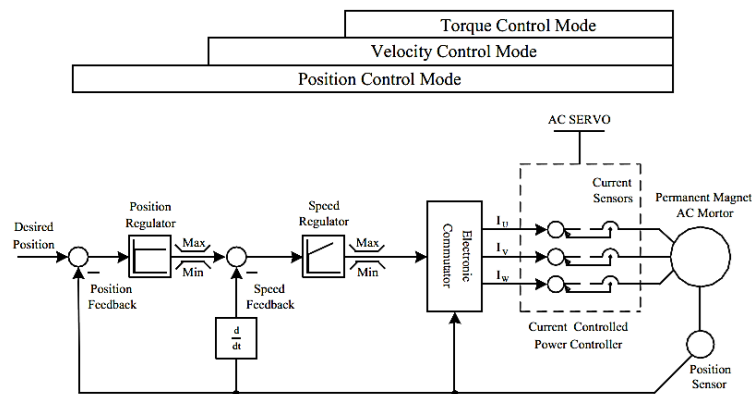


ชุดควบคุม AC Servo Motor ซึ่งจะเป็นตัวจ่ายไฟและรับสัญญาณป้อนกลับจากตัวเซ็นเซอร์ (Encoder Feedback) ถ้ามีเฉพาะ AC Servo Motor และ ชุดควบคุม AC Servo Motor สามารถควบคุมได้แค่ความเร็วและแรงบิด เท่านั้นคล้ายๆกับการใช้ อินเวอร์เตอร์แต่แตกต่างกันที่จะควบคุมรอบได้เที่ยงตรงแม่นยำและมีแรงบิดคงที่ตลอดช่วงความเร็วของมอเตอร์

ระบบ Servo Motor คือ การควบคุมเครื่องจักรกลให้ทำงานตอบสนองด้านไดนามิกส์เช่น ความเร็ว อัตราเร่ง แรงบิด และตำแหน่ง ให้ได้ดีที่สุดและใช้เวลาให้น้อย

### 2.1.1 โครงสร้างระบบควบคุม Servo Motor

ระบบควบคุม Servo Motor จะเป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับประกอบด้วย 3 โหมดการควบคุม คือ โหมดการควบคุมแรงบิดซึ่งอยู่วงรอบหรือลูบในสุด โหมดการควบคุมอัตราเร่ง และ โหมดการควบคุมตำแหน่ง ซึ่งอยู่ลูบด้านนอกสุดโดยมีอุปกรณ์ที่สำคัญดังนี้



ภาพที่ 2-2 ระบบควบคุม Servo Motor

### 2.1.2 ประเภทของ Servo Motor

Servo Motor จะมี 2 ชนิดคือ DC Servo Motor และ AC Servo Motor โดย DC Servo Motor จะมีการควบคุมที่กระแสวิ่ง และใช้ในงานได้ที่มีความถี่สูงได้มีประสิทธิภาพดังนั้น ทำให้ AC Servo Motor ถูกนำมาใช้งานมากขึ้น โดยเฉพาะเครื่องจักรรุ่นใหม่จะมีระบบควบคุมที่ใช้ AC Servo Motor

### 2.1.3 Servo Motor ชนิดที่มีแปรงถ่าน (Brush Type = Mit Bursten)

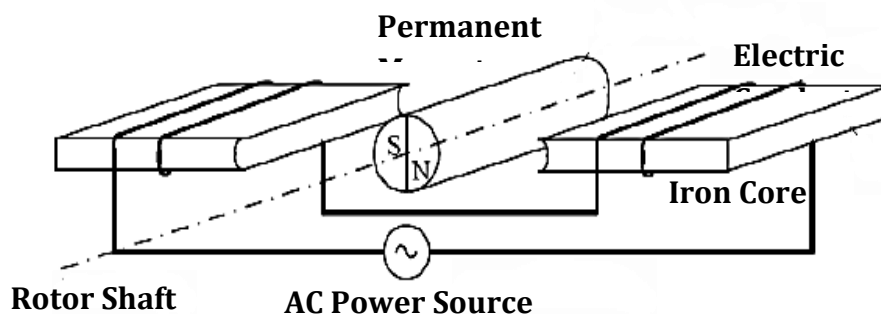
Servo Motor ชนิดนี้ที่สเตรเตอร์จะเป็นแม่เหล็กถาวร ส่วนโรเตอร์ยังใช้แปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์เรียงกระแสเข้าสู่ขดลวดอาร์เมเจอร์เหมือนกับติชชีมอเตอร์ทั่วไป

### 2.1.4 Servo Motor ชนิดที่ไม่มีแปรงถ่าน (Brush Type)

Servo Motor ในกลุ่มนี้ประกอบด้วย DC Servo (DC Brushless Servo) โรเตอร์ทำด้วยแม่เหล็กถาวร AC Servo Motor ซึ่งมีทั้งแบบซิงโครนัส Servo Motor และอะซิงโครนัส Servo Motor การนำอินดัคชั่นมอเตอร์มาใช้ทำเป็นระบบขับเคลื่อน Servo Motor

### 2.1.5 โครงสร้างของ Servo Motor

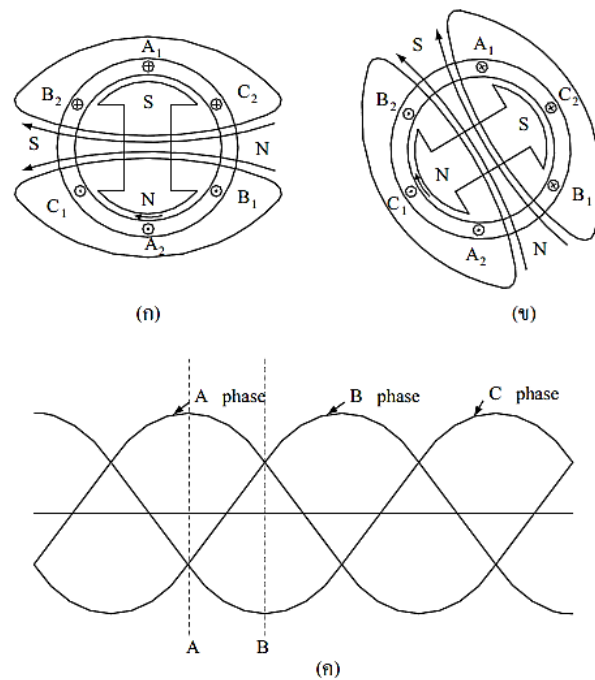
ระบบควบคุม Servo Motor โดยทั่วไปต้องใช้งานในระบบลูปปิด (Close Loop) เท่านั้นไม่สามารถเลือกให้เป็น ลูปเปิด (Open Loop) เหมือนกับระบบ AC Drive Servo Motor ไม่สามารถควบคุมการทำงานได้ หากไม่มีสัญญาณจาก Encoder ป้อนกลับไปยังชุดขับเคลื่อน AC Servo Motor ระบบจำเป็นต้องใช้ Encoder ส่วนเกี่ยวข้องในระบบควบคุมเหมือนกับเป็นของคู่กัน ระหว่าง AC Servo Motor และ Encoder ทำให้บริษัทผู้ผลิตออกแบบโครงสร้าง AC Servo Motor และ Encoder รวมด้วยกันจึงทำให้มีลักษณะโครงสร้างที่ใช้งานได้ง่ายโดยรวมของ AC Servo Motor พบเห็นในเชิงพาณิชย์จะมีลักษณะรูปแบบเป็นแพคเกจประกอบด้วย AC Servo Motor และ Encoder ติดอยู่ที่ส่วนท้าย AC Servo Motor และ โครงสร้าง AC Servo Motor ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ สเตเตอร์และโรเตอร์ ซึ่งคล้ายกับมอเตอร์ 3 เฟส ทั่วไป โดยสเตเตอร์จะประกอบด้วยขดลวด 3 ชุดที่สมดุลกันขดลวดภายในจะต่อเป็นแบบสตาร์ หรือเดลต้าและมีสายต่อมาที่ขั้วต่อสายด้านนอก 3 เส้น ส่วนโรเตอร์ทำด้วยแม่เหล็กถาวร ไม่มีขดลวดพัน ไม่มีคอมมิวเตเตอร์และไม่มีแปรงถ่าน



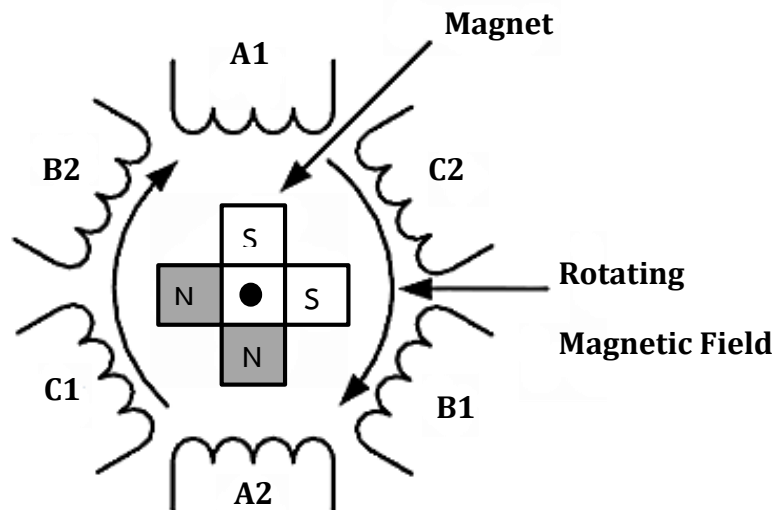
ภาพที่ 2-3 ภาพส่วนประกอบของ AC Servo Motor

### 2.1.6 นิยามของความเร็วและตำแหน่งการวัดตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้า

โดยทั่วไปกำหนดในรูปแบบของทางกล และไฟฟ้าตำแหน่งในทางกลมีความสัมพันธ์กับการหมุนของโรเตอร์ซึ่งมีค่า 360 องศา ทางกลตำแหน่งทางไฟฟ้าของโรเตอร์ มีความสัมพันธ์กับการหมุนของสนามแม่เหล็กจากใน ภาพที่ 2-4 โรเตอร์ต้องเคลื่อนที่ไป 180 องศาทางกลจึงจะได้รูปร่างแม่เหล็กเหมือนกันเมื่อครั้งที่โรเตอร์เริ่มหมุนและตำแหน่งไฟฟ้าของโรเตอร์ มีความสัมพันธ์กับจำนวนคู่ของโพลแม่เหล็กบนโรเตอร์



ภาพที่ 2-4 การจ่ายไฟและทิศทางการเกิดสนามแม่เหล็ก



ภาพที่ 2-5 โครงสร้าง AC Servo Motor ที่มี 4 โพลหรือโพลมี 2 คู่

### 2.1.7 ข้อแตกต่างระหว่าง Servo Motor กับมอเตอร์ชนิดอื่นๆ

Servo Motor ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อ ประยุกต์ใช้กับงานที่มีการควบคุมตำแหน่งเป็นหลัก ซึ่งต้องการคุณสมบัติการตอบสนองด้านไดนามิกส์สูง (High Dynamics Response) ต้องการความละเอียดและความแม่นยำสูงในการควบคุมสูงในทางปฏิบัติให้ได้ ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวจึงได้พยายามออกแบบให้โรเตอร์มีเส้นผ่านศูนย์กลางและรัศมีเล็กๆ รวมถึงการทำให้โรเตอร์เป็นแม่เหล็ก

ถาวร เพื่อเป็นการลดแรงเฉื่อยของโรเตอร์ (Rotor Moment of Inertia) และ ชดเชยแรงบิดหรือ ทอร์กที่หายไปเนื่องจากโรเตอร์มีขนาดเล็กลงด้วยการเพิ่มความยาวของโรเตอร์ ดังนั้นรูปร่าง โครงสร้างทางกายภาพของ Servo Motor ที่พบเห็นทั่วไปจึงมีลักษณะบาง และ มีความยาว มากกว่ามอเตอร์ที่ใช้งานทั่วไป นอกจากนี้ยังมีแรงบิดสูงกว่ามอเตอร์

## 2.2 สเตรนเกจ (Strain Gauge)

อุปกรณ์ที่ใช้วัดความเครียดหรือสเตรนเกจ คือ อุปกรณ์ที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง ทั้งในห้องปฏิบัติการและใช้เป็นเครื่องมือวัดหลายๆแบบ ค่าความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering- Strain:  $\epsilon$ ) สำหรับวัสดุที่อยู่ภายใต้ภาระแบบธรรมดา นิยามว่า คือ อัตราความ เปลี่ยนแปลงความยาวของวัสดุต่อหน่วยความยาวเดิม ดังนั้นในบางกรณีอาจเรียกว่าความเครียด ต่อหน่วย (Unit Strain) สำหรับความเครียดตามแนวแกน สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\epsilon_\alpha = \frac{dL}{L} \approx \frac{L_2 - L_1}{L_1} = \frac{\Delta L}{L_1} \quad (2-1)$$

เมื่อ

$\epsilon_\alpha$  คือ ความเครียดตามแนวแกน ไม่มีหน่วย

$L_1$  คือ ความยาวตามแนวแกน มีหน่วยเป็น เมตร (m)

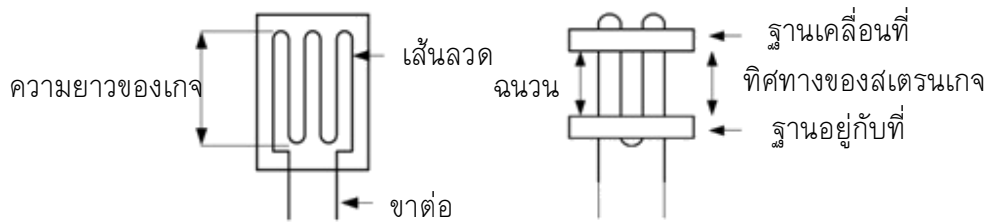
$L_2$  คือ ความยาวตามแนวแกนที่เปลี่ยนไป มีหน่วยเป็น เมตร (m)

จากนิยามตามสมการที่ (2-1) จะเห็นว่าความเครียดนั้นจะเป็นปริมาณที่ไม่มีมิติ แต่อย่างไรก็ตามสำหรับวิศวกรรม ส่วนใหญ่จะให้ความสนใจกับวัสดุที่มีการยืดตัวไม่มากหรือ อยู่ในช่วงขีดจำกัดของความยืดหยุ่น (Elastic Limit) ซึ่งจะทำให้ค่าความเครียดที่เป็นตัวเลขมีค่าน้อยมาก ดังนั้นในบางกรณีจึงนิยมที่จะคูณค่าตัวเลขที่ได้นั้นด้วย  $10^6$  แล้วเลขค่าที่ได้ว่า ไมโครสเตรน (Micro-Strain)

### 2.2.1 การวัดความเครียด

การวัดความเครียดนั้นวัดได้แบบทางตรงและทางอ้อม การวัดทางตรง คือค่าที่อ่านได้ จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน สำหรับเตรนเกจที่วัดความเครียดโดยตรง คือ ค่าที่อ่านได้ ค่าที่อ่านได้จากสเตรนเกจจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามในช่วงก่อน ค.ศ. 1930 ยังไม่มีอุปกรณ์ที่สามารถวัดความเครียดได้โดยตรง แต่จะเป็นการอ่านค่าระยะการยืดตัวที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน อุปกรณ์นี้เรียกว่า Extensometer ซึ่งในปัจจุบันนี้ก็ยังพบเห็นกันอยู่โดยระยะยืดที่วัดได้จะนำไปหาค่าความเครียดโดยใช้สมการที่ (2-1)

อุปกรณ์วัดความเครียดโดยตรงนั้นมีหลายแบบ เช่น แบบที่ใช้หลักการทางไฟฟ้า ซึ่งโดยปกติจะใช้หลักการของความต้านทาน (Resistive), การประจุ (Capacitive), การเหนี่ยวนำ (Inductive) หรือ โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric) สำหรับเตรนเกจที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางที่สุดจะเป็นแบบความต้านทาน คือ วัดการเปลี่ยนไปของความต้านทานไฟฟ้า



ภาพที่ 2-6 ส่วนประกอบของสเตรนเกจ

### 2.2.2 หลักการวัดค่าความต้านทานของสเตรนเกจที่เป็นโลหะ

ทฤษฎีและหลักการของการวัดค่าความต้านทานของสเตรนเกจ จากหลักการ คือ เมื่อลวดถูกแรงมากระทำหรือถูกดึงจะทำให้ความยาวเพิ่มขึ้นหน้าตัดเล็กลง ยังผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนไป และลวดนั้นติดอยู่กับชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานเปลี่ยนขนาดไปลวดก็จะเปลี่ยนแปลงขนาดตามไปด้วย ดังนั้นการวัดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าของเส้นลวดก็จะเป็นสัดส่วนกับความเครียดที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน

ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางกลของวัสดุนั้น สามารถหาได้จากสมการที่ (2-2) โดยกำหนดให้ลวดตัวนำมีความยาวเริ่มต้น  $L$  พื้นที่หน้าตัด  $CD^2$  เส้นลวดไม่จำเป็นต้องมีหน้าตัดวงกลม โดยค่า  $D$  จะเป็นมิติความยาวของหน้าตัด และค่า  $D$  จะเป็นค่าคงที่ ในกรณีวงกลม  $D$  จะเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางและ  $C = \pi/4$  ส่วนในกรณีที่พื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสค่า  $D$  จะเป็นด้านใดด้านหนึ่งและ  $C = 1$  เมื่อลวดอยู่ใต้แรงดึง ความยาวจะเพิ่มขึ้น ส่วนพื้นที่หน้าตัดจะเล็ก

$$R = \frac{\rho L}{A} = \frac{\rho L}{CD^2} \quad (2-2)$$

เมื่อ

$CD^2$  คือ พื้นที่หน้าตัด ( $m^2$ )

$R$  คือ ความต้านทานไฟฟ้าของโลหะใดๆ มีหน่วยเป็น โอห์ม ( $\Omega$ )

$\rho$  คือ ความต้านทานจำเพาะของวัสดุ มีหน่วยเป็น โอห์ม-เมตร ( $\Omega m$ )

$L$  คือ ความยาวของตัวนำ มีหน่วยเป็น เมตร ( $m$ )

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัด มีหน่วยเป็น ตารางเมตร ( $m^2$ )

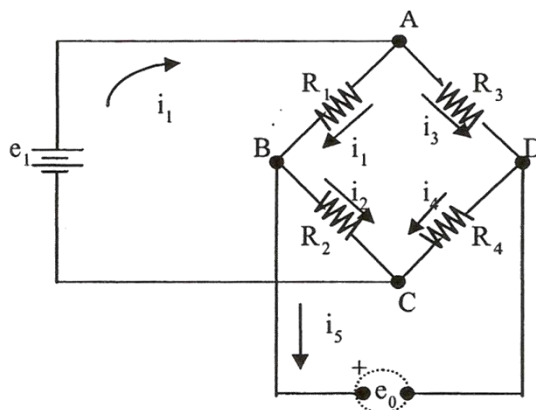
### 2.2.3 วงจรไฟฟ้าที่ใช้ปรับสภาพสัญญาณที่ใช้กับสเตรนเกจ

วงจรไฟฟ้าที่ใช้กับสเตรนเกจ ต้องเป็นวงจรไฟฟ้าที่มีความไวสูง เนื่องจากสเตรนเกจมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างต่ำ สำหรับวงจรไฟฟ้าที่ใช้กับสเตรนเกจจะมีด้วยกันหลายวงจร

#### 2.2.3.1 วงจรวิสโตนบริดจ์ (The Wheatstone Bridge Circuit)

จากภาพที่ 2-7 หากวงจรไฟฟ้าง่ายๆ ดังกล่าวมีค่าสมดุล คือ ในวงจรไฟฟ้าไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมิเตอร์ หรือ  $i_5 = 0$  สำหรับในกรณีนี้จะได้ว่า  $i_1 = i_2$  และ  $i_3 = i_4$  แต่ความ

ต่างศักย์ที่ตกคร่อมมิเตอร์ก็ต้องเป็นศูนย์เช่นกัน ดังนั้น  $i_1 R_1 = i_3 R_3$  และ  $i_2 R_2 = i_4 R_4$  จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจะได้

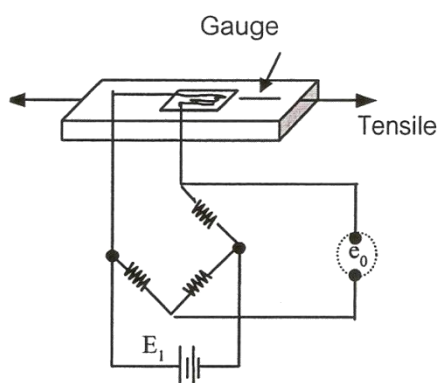


ภาพที่ 2-7 วงจรไฟฟ้าสำหรับสเตรนเกจแบบวิสโตนบริดจ์

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad \text{หรือ} \quad \frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4} \quad (2-3)$$

จากหลักการจะสามารถ วัดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานแต่ละตัวได้ แต่จะเป็นการใช้การตรวจจับสนามไฟฟ้าแทนที่จะตรวจจับสนามความต้านทานวงจรสำหรับสเตรนเกจดังกล่าวเรียกว่าโวลต์เตจเซ็นซิทีฟวิสโตนบริดจ์ (Voltage-Sensitive Wheatstone Bridge)

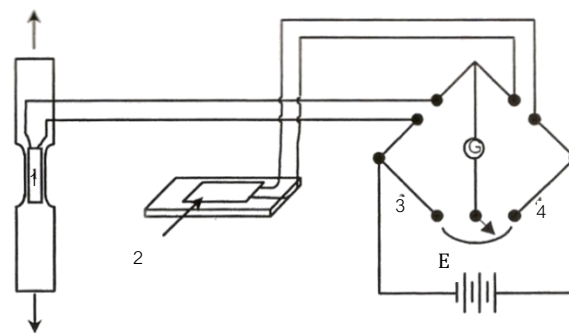
ในทางปฏิบัติจะใช้ค่าความต้านทานตัวใดตัวหนึ่งในวงจรวิสโตนบริดจ์ เป็นตัววัดค่าความเครียดดังแสดงได้ดังสมการที่ 2-3 โดยขั้นแรกจะต้องทำให้วงจรวิสโตนบริดจ์สมดุล เพื่อให้การระกับการตรวจวัด การตรวจวัดจะเกิดค่าความเครียดขึ้นและสเตรนเกจที่ติดอยู่ก็จะเกิดค่าความเครียดในปริมาณที่เท่ากัน และเมื่อความต้านทานของสเตรนเกจเปลี่ยนไปก็จะสามารถจับค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าได้



ภาพที่ 2-8 การใช้ความต้านทานตัวหนึ่งในวงจรบริดจ์ เป็นตัวตรวจวัดค่าความเครียด

### 2.2.4 การป้องกันผลกระทบของอุณหภูมิ

หากพิจารณาถึงค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหล ในขดลวดความต้านทานก็จะเกิดความร้อนขึ้นซึ่งอาจทำให้สภาพทางไฟฟ้าของขดลวดเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านสเตรนเกจระยะหนึ่งอาจทำให้ความต้านทานของขดลวดเปลี่ยนแปลงไป ถึงแม้ว่าค่าความเครียดของขดลวดจะไม่เปลี่ยนแปลง จะเรียกผลกระทบนี้ว่าผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิ การป้องกันผลกระทบนี้สามารถทำได้โดยใช้สเตรนเกจประเภทเดียวกันติดบนชิ้นวัสดุแบบเดียวกับชิ้นงาน แต่จะต้องไม่มีการให้ภาระใดๆ กับชิ้นงาน ดังแสดงได้ดังภาพที่ 2-9



ภาพที่ 2-9 การต่อวงจรเพื่อป้องกันผลกระทบจากอุณหภูมิจากการใช้งานสเตรนเกจ

ดังนั้น เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดจะทำให้ทั้งตัวตรวจวัดและตัวติดบนชิ้นงานของวงจรวิลสันบริดจ์ และตัวตรวจวัดที่ติดไว้ภายนอก โดยไม่มีการเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเท่ากัน หากพิจารณาจากวงจรวิลสันบริดจ์พื้นฐานที่อยู่ในสภาพสมดุลจะได้

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (2-4)$$

หากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด จะทำให้ความต้านทานของตัวตรวจวัดที่ 1 และ 2 เปลี่ยนแปลงไป  $\Delta R$  ซึ่งจะได้

$$\frac{R_1 + \Delta R}{R_2 + \Delta R} = \frac{R_3}{R_4} \quad (2-5)$$

ถ้าหากว่าก่อนอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ซึ่งทำให้ความต้านทานเปลี่ยนไปนั้น เราให้วงจรบริดจ์อยู่ในสภาพสมดุล จากนั้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านอุณหภูมิของตัววัดทั้งสองตัวก็จะเปลี่ยนไปแต่วงจรบริดจ์ก็ยังจะสมดุลอยู่ จนกว่าจะมีความเครียดเกิดขึ้นบนตัวตรวจวัดที่ 1 ดังนั้นการติดแบบนี้ก็จะสามารถป้องกันผลกระทบจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปได้ ส่วนตัวตรวจวัดที่ติดโดยไม่มีการใดๆ มักเรียกกันว่า ดัมมี่เกจ (Dummy Gage)

## 2.3 ระบบไฮดรอลิกส์ (Hydraulic System)

**Hydraulics** เป็นคำที่เกิดมาจากการผสมกันของภาษากรีก ระหว่างคำว่า **Hydro** ซึ่งมีความหมายว่า น้ำ (Water) และคำว่า **Aulis** ซึ่งมีความหมายว่า ท่อ (Pipe) ในอดีตระบบไฮดรอลิกส์ จึงหมายถึง ระบบการทำงานที่ใช้ของไหลเป็นตัวการส่งถ่ายกำลังทำให้เกิดการเคลื่อนที่ และแรงกระทำเกิดขึ้น ปัจจุบันระบบไฮดรอลิกส์ ได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากในการทำงานอุตสาหกรรมของเครื่องมือ เครื่องจักร เนื่องจากระบบไฮดรอลิกนั้นมีข้อดีอยู่หลายประการ เช่น สามารถส่งถ่ายกำลังได้แรงจำนวนมาก โดยใช้อุปกรณ์ขนาดเล็ก สามารถควบคุมการทำงานได้อย่างนิ่มนวลและแม่นยำ เป็นระบบที่สามารถหล่อลื่นอุปกรณ์ได้ด้วยตัวเอง ทำให้เกิดการสึกหรอน้อยลง หลักการทางฟิสิกส์ของระบบไฮดรอลิกส์ จะเกี่ยวข้องกับเรื่องความเร็ว ความดัน เวลา และอุณหภูมิ

**2.3.1 กฎของนิวตัน (Newton's Laws)** เป็นกฎสากลที่ใช้ได้กับการเคลื่อนที่ของวัตถุหลายชนิด ทั้งบนโลกและนอกโลก กฎการเคลื่อนที่ทั้งสามกฎของนิวตันจะแสดงถึงหลักการธรรมชาติของสภาพการเคลื่อนที่และการเปลี่ยนแปลงสภาพการเคลื่อนที่ของวัตถุต่างๆ

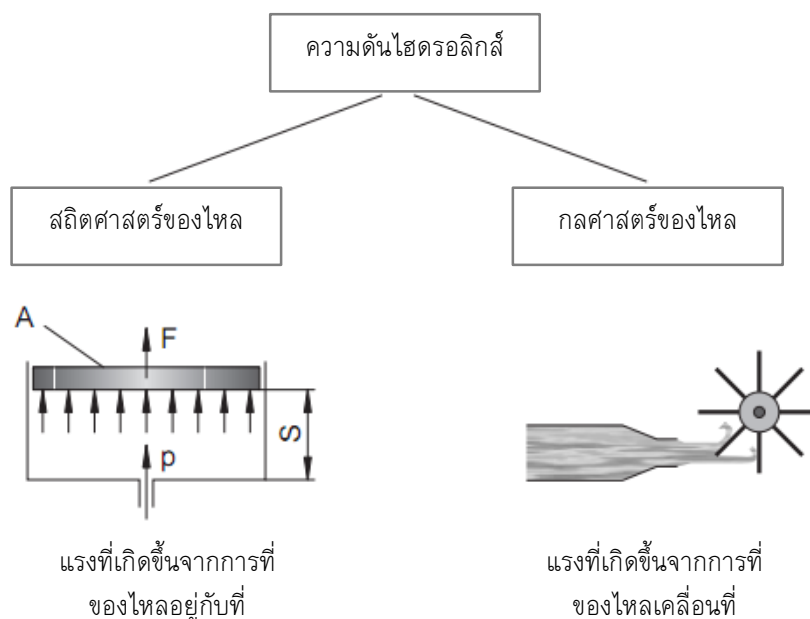
**2.3.1.1** วัตถุจะคงสภาพอยู่นิ่งหรือสภาพการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ในแนวตรง นอกจากจะมีแรงลัพธ์ที่ไม่เท่ากับศูนย์มากระทำ

**2.3.1.2** เมื่อมีแรงลัพธ์ซึ่งมีค่าไม่เป็นศูนย์มากระทำต่อวัตถุนั้น วัตถุจะมีความเร่งในทิศทางเดียวกับแรงลัพธ์ที่มากระทำ และขนาดของความเร่งนี้จะแปรผันตรงกับขนาดของแรงลัพธ์ และแปรผกผันกับมวลของวัตถุ

**2.3.1.3** ทุกแรงกิริยา (Action) ย่อมมีแรงปฏิกิริยา (Reaction) ขนาดเท่ากันกระทำในทิศตรงกันข้ามเสมอ

**2.3.2** กฎความดันไฮดรอลิกส์ เป็นหลักการทางวิทยาศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับแรงและการส่งถ่ายกำลัง โดยใช้มวลของไหล ซึ่งเป็นความลัมพันธ์ที่แสดงให้เห็นถึงแมคคานิกส์ (Mechanic) ของไหลเกิดขึ้นจากการกระทำสถิตศาสตร์ของไหล (Hydrostatics) และกลศาสตร์ของไหล (Hydrodynamic)





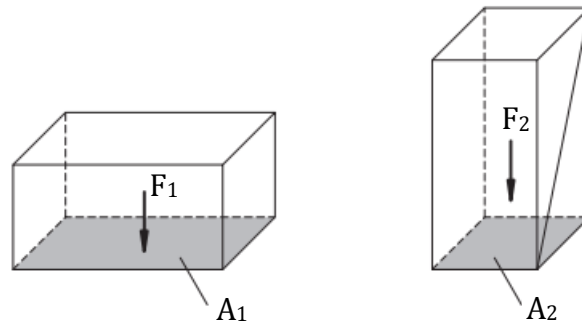
**ภาพที่ 2-10** การเกิดความดันในระบบไฮดรอลิกส์

ความดันทางสถิตศาสตร์ของไหล (Hydrostatic Pressure) ความดันทางสถิตศาสตร์ของไหล เป็นความดันที่เกิดขึ้นจากระดับความสูงที่คงที่ของของเหลว อันเนื่องจากน้ำหนัก จากมวล (Mass) ของของเหลว

$$P_s = h \times p \times g \quad (2-6)$$

โดยที่  $P_s$  หมายถึง ความดันทางสถิตศาสตร์ของไหล (ปาสคาล)  
 $h$  หมายถึง ความสูงของของไหล (เมตร)  
 $p$  หมายถึง ความหนาแน่นของของไหล (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)  
 $g$  หมายถึง แรงดึงดูดของโลก (เมตรต่อวินาที<sup>2</sup>)

ในข้อกำหนดของระบบมาตรฐานสากล (SI International System) ความดันทางสถิตศาสตร์ของไหล ( $P_s$ ) สามารถกำหนดหน่วยได้ทั้ง ปาสคาล (Pascal) และบาร์ (bar) ระดับความสูงของเหลว ( $h$ ) กำหนดหน่วยเป็นเมตร ความหนาแน่นของของเหลว ( $p$ ) เป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและอัตราเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก ( $g$ ) เป็นเมตรต่อวินาทีกำลังสอง ทุกๆวัตถุจะถูกกระทำให้เกิดความดัน  $p$  ที่ฐานของวัตถุ ค่าของความดันนี้ขึ้นอยู่กับแรง  $F$  ที่เกิดจากน้ำหนักของวัตถุและขนาดพื้นที่  $A$  ที่แรงจากน้ำหนักกระทำ



**ภาพที่ 2-11** ค่าของความดันที่เกิดขึ้นจากแรงมากระทำต่อวัตถุ

จากภาพที่ 2-11 แสดงให้เห็นวัตถุ 2 ชิ้น ที่มีพื้นที่แตกต่างกัน ( $A_1$  และ  $A_2$ ) วัตถุทั้งสองมีมวลที่เท่ากันและแรงเนื่องจากน้ำหนัก ( $F$ ) กระทำที่พื้นของวัตถุเหมือนกัน อย่างไรก็ตามวัตถุทั้งสองจะมีความดันแตกต่างกันเนื่องจากมีขนาดพื้นที่ฐานของวัตถุแตกต่างกัน ถ้าวัตถุทั้งสองมีแรงกดเนื่องจากน้ำหนักเท่ากัน ความดันที่สูงกว่าจะเกิดขึ้นในกรณีที่มีขนาดพื้นที่ฐานเล็กกว่ากรณีที่มีฐานใหญ่ ความดันนี้แสดงโดยสมการ 2-7

$$P = \frac{F}{A} \quad (2-7)$$

โดยที่  $P$  หมายถึง ความดัน (ปาสคาล)

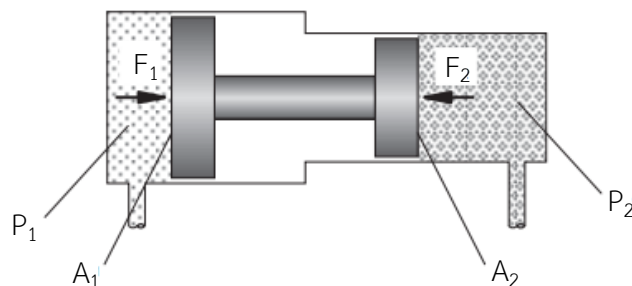
$F$  หมายถึง แรง (นิวตัน)

$A$  หมายถึง พื้นที่ (ตารางเมตร)

1 ปาสคาล เท่ากับ 1 นิวตันต่อตารางเมตร

1 บาร์ เท่ากับ 100,000 นิวตันต่อตารางเมตร หรือเท่ากับ  $10^2$  ปาสคาล

การส่งถ่ายความดัน (Pressure transfer)



**ภาพที่ 2-12** การส่งถ่ายความดัน

ความดันทางสถิติศาสตร์ของไหล  $P_1$  ทำให้เกิดแรง  $F_1$  กระทำบนพื้นที่  $A_1$  ซึ่งเป็นการส่งถ่ายความดันผ่านทางก้านสูบไปยังลูกสูบเล็ก ดังนั้น แรง  $F_1$  จะกระทำบนพื้นที่  $A_2$  และทำให้เกิดความดันทางสถิติศาสตร์ของไหล  $P_2$  โดยเหตุที่พื้นที่ลูกสูบ  $A_2$  เล็กกว่าพื้นที่ลูกสูบ  $A_1$  ดังนั้นความดัน  $P_2$  จะมากกว่าความดัน  $P_1$  จากสมการที่ 2-6

จากสมการสามารที่จะกำหนดสมการสำหรับแรง  $F_1$  และ  $F_2$  ได้ดังนี้

$$F_1 = P_1 A_1 \quad \text{และ} \quad F_2 = P_2 A_2$$

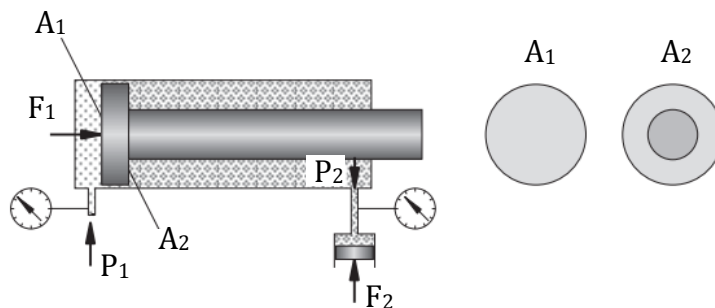
เนื่องจากแรงสองแรงเท่ากัน ( $F_1 = F_2$ ) สามารถจะสมมูลสมการดังนี้

$$P_1 A_1 = P_2 A_2 \quad (2-8)$$

สำหรับการคำนวณหาค่า  $P_1$ ,  $A_1$  และ  $A_2$  สามารถหาได้จากสมการ 2-8 ตัวอย่างเช่น การหา  $P_2$  และ  $A_2$  สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$P_2 = \frac{P_1 \times g \times A_1}{A_2} \quad \text{และ} \quad A_2 = \frac{P_1 \times g \times A_1}{P_2} \quad (2-9)$$

ในกรณีของกระบอกสูบทำงานสองทาง (Double – acting Cylinder) เมื่อการไหลจากพื้นที่ก้านสูบถูกปิดกั้นทางไหล อาจจะทำให้เกิดความดันสูงมากเกินไป



ภาพที่ 2-13 การส่งถ่ายความดันโดยกระบอกสูบทำงานสองทาง

**2.3.3 ของไหลไฮดรอลิกส์ (Hydraulic fluid)** ของเหลว (Liquid) ทุกชนิดสามารถใช้ส่งถ่ายพลังงานความดัน (Pressure Energy) ได้ แต่อย่างไรก็ตามในการใช้งานจะต้องคำนึงถึงคุณลักษณะของของไหลด้วย เบอร์ (Number) ของของไหลที่เหมาะสมจำเป็นจะต้องมีการพิจารณาอย่างเช่นในของไหลไฮดรอลิกส์ น้ำจะเป็นสาเหตุให้เกิดปัญหาการผุกร่อน, จุดเดือด (Boiling Point), จุดเยือกแข็ง (Freezing Point) และความหนืดต่ำ (Low Viscosity) ของไหลไฮดรอลิกที่มีพื้นฐานมาจากน้ำมันแร่ (Mineral Oil) หรือเรียกว่า น้ำมันไฮดรอลิกส์ (Hydraulic oil) มีคุณสมบัติตรงกับความต้องการใช้งานตามปกติมากที่สุด (เช่นสำหรับ เครื่องมือกล)ของไหลไฮดรอลิกส์ ชนิดนี้มีการใช้งานอย่างกว้างขวางมาก ของไหลไฮดรอลิกส์ที่มีคุณสมบัติไวไฟต่ำ (Low Inflammability) เป็นที่ต้องการสำหรับระบบไฮดรอลิกส์ที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดอัคคีภัยสูง ในการประยุกต์ใช้งานเหล่านี้ อาจมีอันตรายจากของไหลไฮดรอลิกส์ที่มีพื้นฐานมาจากน้ำมันแร่ 12 Oil) จะทำให้เกิดอัคคีภัยเนื่องจากชิ้นส่วนโลหะที่มีความร้อนสูง ดังนั้นจะต้องทำการผสมน้ำมันกับน้ำหรือน้ำมันสังเคราะห์ ตามมาตรฐานของน้ำมัน

#### 2.3.3.1 งานสำหรับของของไหลไฮดรอลิกส์ (Tasks for Hydraulic Fluids)

ของไหลที่ใช้ในงานไฮดรอลิกส์จะต้องมีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการใช้งานที่แตกต่างกันไปได้แก่

##### 2.3.3.1.1 การส่งถ่ายความดัน (Pressure Transfer)

##### 2.3.3.1.2 การหล่อลื่นชิ้นส่วนเคลื่อนที่ของอุปกรณ์

2.3.3.1.3 การระบายความร้อน หลีกเลี่ยงการทำให้เกิดความร้อนเนื่องจาก การเปลี่ยนรูปพลังงาน (การสูญเสียความดัน)

2.3.3.1.4 การป้องกันการแกว่งของสัญญาณ (Cushioning of Oscillations) ที่มีสาเหตุจากความดันกระตุก (Pressure Jerks)

2.3.3.1.5 ป้องกันการผุกร่อน

2.3.3.1.6 ส่งสัญญาณ (Signal Transmission)

2.3.3.2 ชนิดของของไหลไฮดรอลิกส์ (Type of Hydraulic Fluid) ของของไหล ใน ไฮดรอลิกส์สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ น้ำมันไฮดรอลิกส์ และของของไหลไฮดรอลิกส์ ที่คุณสมบัติไวไฟต่ำ (Hydraulic Fluid with Low Inflammability) ซึ่งมีหลากหลายชนิดตาม ความแตกต่างของคุณลักษณะ โดยลักษณะเหล่านี้พิจารณาตามคุณสมบัติพื้นฐานของของเหลว และ ปริมาณของสิ่งที่เพิ่มหรือผสมเข้าไป

2.3.3.2.1 น้ำมันไฮดรอลิกส์ น้ำมันไฮดรอลิกส์ตามมาตรฐาน DIN 51524 และ DIN 51525 สามารถที่จะแบ่งตามคุณลักษณะและส่วนประกอบเป็น 3 อย่าง

ก) น้ำมันไฮดรอลิกส์ HL

ข) น้ำมันไฮดรอลิกส์ HLP

ค) น้ำมันไฮดรอลิกส์ HV

การเรียกชื่อน้ำมันเหล่านี้ อักษร H หมายถึง น้ำมันไฮดรอลิกส์ และเพิ่มอักษรตาม คุณสมบัติของของไหล (L, LP และ V) ส่วนรหัสตัวเลขเพิ่มเติมตามรหัสของความหนืดที่ได้นิยามไว้ ในมาตรฐาน DIN 51517 (ระดับความหนืดของ ISO)

ตารางที่ 2-1 น้ำมันสำหรับระบบไฮดรอลิกส์

| น้ำมันไฮดรอลิกส์สำหรับระบบไฮดรอลิกส์ |                                                |                                                                          |
|--------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| ชื่อ                                 | ลักษณะพิเศษ                                    | ของเขตการประยุกต์ใช้งาน                                                  |
| HL                                   | เพิ่มการป้องกันการผุกร่อน และ ยึดอายุการใช้งาน | ระบบที่ต้องการทำงานที่อุณหภูมิสูงๆ หรือการ ผุกร่อนเนื่องจากน้ำ           |
| HLP                                  | เพิ่มการป้องกันการสึกหรอ                       | เหมือนกับน้ำมัน HL, สำหรับใช้ในระบบที่เกิด ความเปลี่ยนแปลงแรงเสียดทานสูง |
| HV                                   | ปรับปรุงลักษณะความหนืดอุณหภูมิ                 | เหมือนกับน้ำมัน HLP, ใช้งานที่อุณหภูมิแวดล้อม ต่ำและเปลี่ยนแปลงมาก       |

ตารางที่ 2-2 ตัวอย่างน้ำมันสำหรับระบบไฮดรอลิกส์

| น้ำมันไฮดรอลิกส์ HLP 68 |                                                                                                                                                                                                 |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| HLP 68                  | <p>H : น้ำมันไฮดรอลิกส์</p> <p>L : เพิ่มการป้องกันการสึกกร่อนและยืดอายุการใช้งาน</p> <p>P : เพิ่มเพื่อจะลด/เพิ่ม ความสามารถในการแบกภาระ</p> <p>68 : รหัสความหนืดตามนิยามในมาตรฐาน DIN 51517</p> |

2.3.3.2.2 ของไหลไฮดรอลิกส์ไวไฟต่ำ ของไหลไฮดรอลิกส์ไวไฟต่ำ สามารถ แบ่งออกเป็นของไหลไฮดรอลิกส์สังเคราะห์ที่ผสมน้ำ (Hydrous) กับไม่ผสมน้ำ (Anhydrous) ซึ่ง ของไหลไฮดรอลิกส์สังเคราะห์โดยคุณสมบัติทางเคมีเมื่อกลายเป็นไอ จะไม่ลุกติดไฟได้ง่าย

ตารางที่ 2-3 ลักษณะทั่วไปของของไหลไฮดรอลิกส์ไวไฟต่ำ (HF Liquids) ซึ่งมีการอธิบายไว้ในมาตรฐาน VDMA 24317 และ 24320

| ของไหลไฮดรอลิกส์ไวไฟต่ำ (Hydraulic fluid with low flammability) |       |                                       |         |
|-----------------------------------------------------------------|-------|---------------------------------------|---------|
| HFA                                                             | 24320 | น้ำผสมน้ำมัน                          | 80 - 98 |
| HFB                                                             | 24317 | น้ำมันผสมน้ำ                          | 40      |
| HFC                                                             | 24317 | สารละลายน้ำ เช่น Water - glycol       | 35 - 55 |
| HFD                                                             | 24317 | ของเหลวไม่ผสมน้ำ เช่น Phosphate ether | 0 - 0.1 |

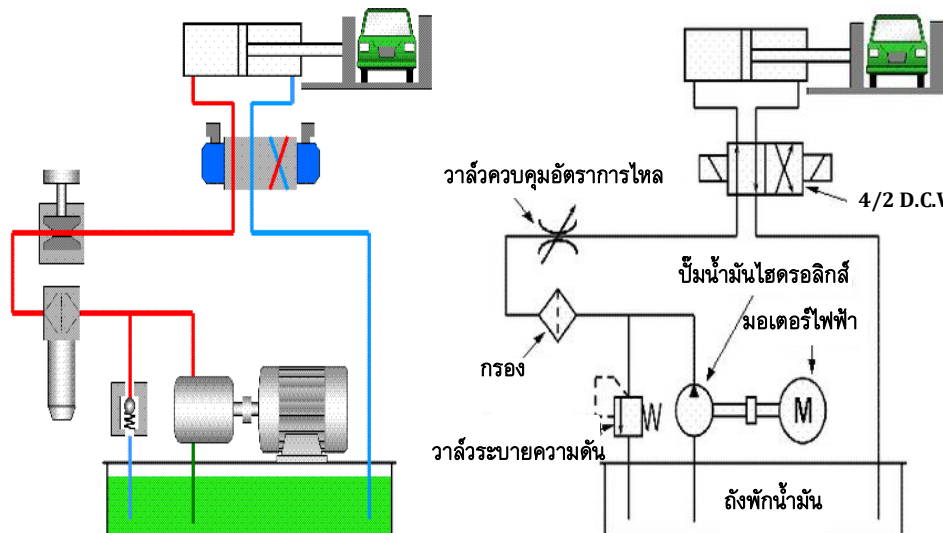
ความเร็วเคลื่อนที่กลับจะสูงกว่าถึงแม้อัตราไหลจะเท่ากัน เนื่องจากพื้นที่เล็กกว่าด้านที่ทำให้เคลื่อนที่ออก สามารถพิสูจน์ได้จากสมการต่อไปนี้

$$V = \frac{Q}{A} \quad (2-10)$$

โดยที่

- V หมายถึง ความเร็วการไหล (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)
- Q หมายถึง อัตราการไหล (เมตรต่อวินาที)
- A หมายถึง พื้นที่หน้าตัด (ตารางเมตร)

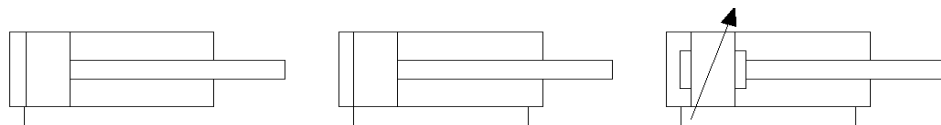
### 2.3.4 โครงสร้างของระบบไฮดรอลิกส์



ภาพที่ 2-14 โครงสร้างของระบบไฮดรอลิกส์

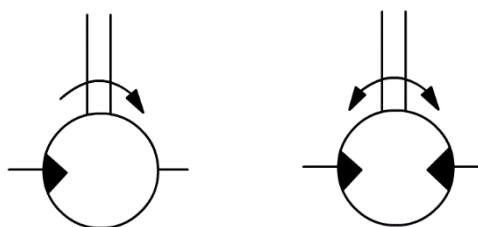
2.3.4 สัญลักษณ์อุปกรณ์ของระบบไฮดรอลิกส์ เป็นสิ่งสำคัญอย่างมากในระบบไฮดรอลิกส์ เนื่องจากสัญลักษณ์จะช่วยให้ทำความเข้าใจในวงจรไฮดรอลิกส์ได้ง่าย และยังช่วยทำให้การออกแบบการทำงานของวงจรระบบไฮดรอลิกส์ได้อย่างถูกต้อง รวมถึงการตรวจสอบวงจรและบำรุงรักษาระบบ ไฮดรอลิกส์ได้อย่างรวดเร็ว และสามารถประหยัดเวลามากขึ้น อุปกรณ์ในระบบไฮดรอลิกส์มีจำนวนค่อนข้างมากและอุปกรณ์ส่วนใหญ่ของระบบไฮดรอลิกส์ มีการทำงานค่อนข้างซับซ้อน ดังนั้น จึงทำให้สัญลักษณ์อุปกรณ์ไฮดรอลิกส์ มีความสำคัญมากขึ้นตามมา ในที่นี้จึงขอกล่าวถึงสัญลักษณ์และอุปกรณ์ที่สำคัญๆ เช่น อุปกรณ์ทำงาน อุปกรณ์ควบคุมอุปกรณ์ต้นกำลัง อุปกรณ์ท่อ และข้อต่อ วิธีการบังคับให้อุปกรณ์ทำงาน และอุปกรณ์อื่นๆ ที่ช่วยในการทำงานของระบบไฮดรอลิกส์

2.3.5 สัญลักษณ์กระบอกสูบไฮดรอลิกส์ ซึ่งจะมีลักษณะของทำงานการเคลื่อนที่เชิงเส้นตรง สัญลักษณ์ของกระบอกสูบจะมีส่วนประกอบของกระบอกสูบ คือ กระบอกสูบ ลูกสูบ และก้านสูบ จากภาพที่ 2-15 สัญลักษณ์กระบอกสูบไฮดรอลิกส์จะประกอบด้วย กระบอกสูบแบบทำงานทางเดียวอาจใช้แทนอุปกรณ์ทำงานแบบเชิงเส้นอื่นๆ ได้ เช่น กระบอกสูบแบบทำงานสองทาง มีก้านสูบเดียว กระบอกสูบแบบทำงานสองทางมีสองก้านสูบ กระบอกสูบแบบมีชุดกันกระแทกอยู่ภายในกระบอกสูบ มีชุดกันกระแทกปรับค่าได้ กระบอกสูบแบบทำงานสองทางก้านสูบขนาดใหญ่



ภาพที่ 2-15 สัญลักษณ์กระบอกสูบไฮดรอลิก

**2.3.6 สัญลักษณ์ของมอเตอร์ไฮดรอลิก (Hydraulic Motor)** เป็นอุปกรณ์ทำงานแบบหนึ่งในระบบไฮดรอลิก ที่นิยมนำมาใช้กัน โครงสร้างโดยทั่วไปก็คล้ายคลึงกับปั๊มไฮดรอลิก แตกต่างกันที่การทำงาน คือ ปั๊มไฮดรอลิกจะเปลี่ยนพลังงานจลน์ในน้ำมันที่ได้รับจากวาล์ว หรือปั๊มในระบบให้เป็นพลังงานกลด้วยการหมุน สัญลักษณ์ของมอเตอร์ไฮดรอลิกจะคล้ายๆ กับปั๊ม คือ มีลักษณะเป็นวงกลมมีลูกศรที่บ่งชี้ทิศทางไหลของน้ำมัน เนื่องจากสัญลักษณ์ของมอเตอร์ไฮดรอลิกคล้ายคลึงกับปั๊มไฮดรอลิกมากทำให้บางคนเข้าใจผิดได้โดยง่าย ดังนั้นจึงต้องสังเกตความแตกต่าง คือ ทิศทางการไหลของน้ำมันที่เข้ามอเตอร์ไฮดรอลิกจะเปลี่ยนพลังงานจลน์ของน้ำมันให้เป็นแรงบิดจากการเคลื่อนที่แบบหมุน จุดที่สำคัญที่แสดงให้เห็นทิศทางไหล ของน้ำมันก็คือ ลูกศรที่บ่งชี้ ซึ่งหัวลูกศรที่บ่งชี้ในสัญลักษณ์ของมอเตอร์ไฮดรอลิก นั้นจะมีทิศทางแตกต่างกับปั๊มไฮดรอลิก จากภาพที่ 2-16 สัญลักษณ์มอเตอร์ไฮดรอลิก จะประกอบด้วยมอเตอร์แบบมีทิศทาง การไหลทางเดียวที่มีลูกศรที่ 1 ตัว และมีทิศทางไหลได้สองทางที่มีลูกศรที่ 2 ตัว มอเตอร์ไฮดรอลิกแบบปรับค่าอัตราการไหลได้ จะเพิ่มเส้นลูกศรพาดผ่านสัญลักษณ์มอเตอร์ไฮดรอลิกแบบปรับค่าอัตราการไหลไม่ได้



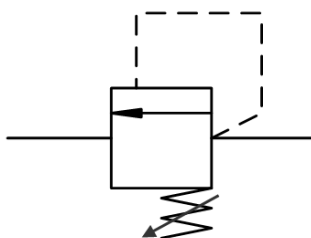
ภาพที่ 2-16 สัญลักษณ์มอเตอร์ไฮดรอลิก

**2.3.7 อุปกรณ์ควบคุมการไหลชนิดที่นิยมใช้กันมาก** คือ แบบประตู (Gate) ซึ่งการควบคุมอัตราการไหลของวาล์วแบบนี้ควบคุมได้ไม่แน่นอนเท่าที่ควร ดังนั้นหากต้องการควบคุม อัตราการไหลของน้ำมันที่ผ่านวาล์วได้อย่างแม่นยำ จำเป็นต้องใช้วาล์วควบคุมอัตราการไหลแบบปรับอัตราการไหลได้ แสดงในภาพที่ 2-17 สัญลักษณ์อุปกรณ์ควบคุมการไหลประกอบด้วยอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลปรับช่องคอคอดไม่ได้ อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลที่ปรับช่องคอคอดได้มีวาล์วกันกลับ (Check Valve) แต่ไม่มีการขัดเซย์ อุปกรณ์ควบคุมการไหล อุปกรณ์ควบคุมการไหลทางเดียว อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลแบบช่องคอคอดได้มีวาล์วกันกลับ และมีชุดขัดเซย์อุณหภูมิและความดัน



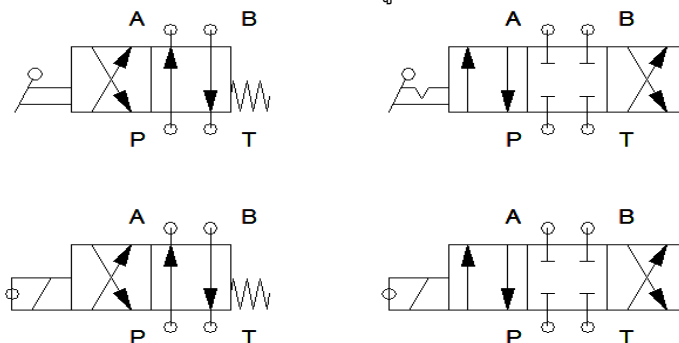
ภาพที่ 2-17 สัญลักษณ์อุปกรณ์ควบคุมการไหล

2.3.8 อุปกรณ์ควบคุมความดัน ลักษณะนี้จะแทนสัญลักษณ์ควบคุมความดันด้วยรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเป็นอุปกรณ์ที่ให้น้ำมันไหลผ่าน หรือ ปิดกั้นเอาไว้ลักษณะของอุปกรณ์ควบคุมความดัน มีอุปกรณ์ควบคุมความดันชนิดระบายความดัน อุปกรณ์ควบคุมความดันชนิดจัดอันดับการไหล และอุปกรณ์ควบคุมความดันชนิดลดโหลด หรือปลดความดัน



ภาพที่ 2-18 สัญลักษณ์อุปกรณ์ควบคุมความดัน

2.3.9 อุปกรณ์ควบคุมทิศทางมีสัญลักษณ์ของวาล์วแบบทำงานหลายตำแหน่ง จะเป็นรูปสี่เหลี่ยมหลายรูปทั้งนี้อาจจะมีสี่เหลี่ยมตั้งแต่ 2 รูปขึ้นไป ซึ่งสี่เหลี่ยมแต่ละรูปจะ หมายถึงตำแหน่งของวาล์ว และภายในตำแหน่งจะมีทิศทางการไหลผ่านของน้ำมัน จะแสดงด้วยเส้นลูกศรภายในสี่เหลี่ยม จากภาพที่ 2-19 สัญลักษณ์อุปกรณ์ควบคุมทิศทางประกอบด้วยอุปกรณ์ควบคุมทิศทางการไหล 2 ตำแหน่ง 3 ทิศทาง อุปกรณ์ควบคุมทิศทางการไหล 2 ตำแหน่ง 4 ทิศทาง ในตำแหน่งปกติอุปกรณ์ควบคุมทิศทางการไหลแบบ 3 ตำแหน่ง 4 รู 4 ทิศทางตำแหน่งกลางปิด อุปกรณ์ควบคุมทิศทาง การไหลแบบ 3 ตำแหน่ง 4 รู 4 ทิศทางตำแหน่งกลางไหลถึงกันทั้งหมด



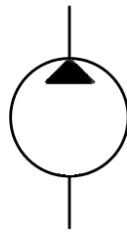
ภาพที่ 2-19 สัญลักษณ์วาล์วเปลี่ยนทิศทางการไหล



### 2.3.10 ปัมไฮดรอลิกส์

เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนอัตราการไหลน้ำมัน

ในระบบไฮดรอลิกส์ให้อัตราการไหลเพิ่มขึ้นหรือลดลง โดยได้รับกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้าผ่านเพลาลำดับมาหมุนปั๊ม จากภาพที่ 2-20 สัญลักษณ์ปั๊มจะประกอบด้วย ปั๊มแบบอัตราการไหลคงที่มีทิศทางการไหลทางเดียว ปั๊มแบบอัตราการไหลคงที่มีทิศทางการไหลสองทาง ปั๊มแบบปรับอัตราการไหลได้ ปั๊มแบบปรับอัตราการไหลได้แบบค่อนข้างสมบูรณ์ ปั๊มแบบทิศทางการไหลสองทางสามารถปรับอัตราการไหลปั๊มแบบสมบูรณ์ที่มีทิศทางการไหลสองทาง ปรับอัตราการไหลได้ และเพลาลำดับปั๊มหมุนได้สองทาง



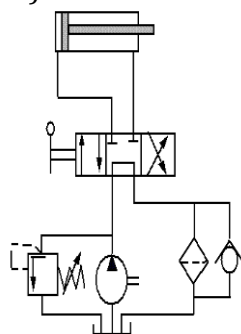
ภาพที่ 2-20 สัญลักษณ์ปั๊มไฮดรอลิกส์

### 2.3.11 อุปกรณ์ท่อและข้อต่อ

มีหน้าที่เพื่อให้ให้น้ำมันสามารถไหลผ่านเข้าไปยังอุปกรณ์ต่างๆ มีผลทำให้ระบบไฮดรอลิกส์ สามารถทำงานได้ตามความต้องการ สัญลักษณ์อุปกรณ์ท่อและข้อต่อจะประกอบด้วยท่อใช้งาน ท่อควบคุม ท่อระบายน้ำมัน จุดต่อร่วมท่อไฮดรอลิก แบบหักงอได้ ท่อใช้งานต่อกัน ท่อใช้งานคร่อมกันทิศทางการไหลของน้ำมันไหลทางเดียวเท่านั้นทิศทางการไหลของน้ำมันไหลได้ทั้งสองทางท่ออยู่ต่ำกว่าระดับของน้ำมันในถัง ซึ่งปลายท่อจะอยู่เหนือกว่าระดับของน้ำมันในถังปลายท่อถูกอุด และจุดต่อระบายร่วม

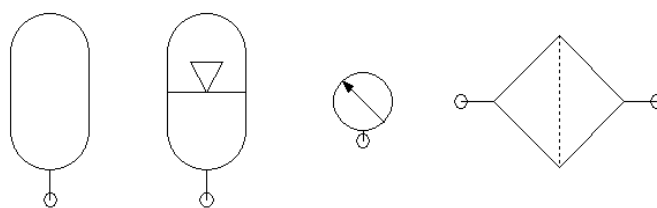
### 2.3.12 สัญลักษณ์และวิธีการบังคับให้อุปกรณ์ทำงานและวิธีการเปลี่ยนตำแหน่ง

การทำงานของอุปกรณ์ควบคุมทิศทางการไหลนั้น มีการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งมีอยู่หลายวิธี คือการควบคุมแบบธรรมดาที่ควบคุมด้วยแรงจากคน การควบคุมแบบทางกล การควบคุม ด้วยระบบไฟฟ้า และการควบคุมด้วยน้ำมัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความต้องการของการนำไปใช้งานที่แตกต่างกันออกไป สัญลักษณ์วิธีการบังคับให้อุปกรณ์ทำงานจะประกอบด้วย การบังคับ แบบร่องยึดให้ค้างตำแหน่ง การบังคับให้วาล์วทำงานแบบธรรมดาด้วยแรงคน การบังคับ แบบลูกกลิ้งการบังคับ โดยใช้ความดัน ท่อควบคุมการบังคับแบบปุ่มกด การบังคับแบบคันโยกมือการบังคับแบบคันเหยียบ การบังคับแบบเดียวการบังคับแบบโซลินอยด์ (Solenoid) และการบังคับแบบร่วม



ภาพที่ 2-21 สัญลักษณ์วิธีการบังคับให้อุปกรณ์ทำงาน

**2.3.13** อุปกรณ์ที่ช่วยในการทำงานของระบบไฮดรอลิก ยังมีอยู่อีกมากมายหลายอย่าง เช่น ถังพักน้ำมัน ถังสะสมความดัน เกจวัดความดัน (Pressure Gauge) กรองน้ำมัน เป็นต้น สัญลักษณ์ อุปกรณ์อื่นๆ ที่ช่วยในการทำงานของระบบไฮดรอลิกก็จะประกอบด้วย สัญลักษณ์ เส้นกรอบอุปกรณ์ สัญลักษณ์ถังพักน้ำมันแบบเปิดและแบบปิด สัญลักษณ์เกจวัดความดัน สัญลักษณ์ เกจวัดอุณหภูมิ สัญลักษณ์อุปกรณ์วัดอัตราการไหล สัญลักษณ์มอเตอร์ไฟฟ้า สัญลักษณ์ถังสะสมความดัน (Accumulator) สัญลักษณ์กรองน้ำมัน สัญลักษณ์ตัวเพิ่มความร้อน สัญลักษณ์ระบายความร้อน และสวิตช์ความดัน (Pressure Switch) เป็นต้น



**ภาพที่ 2-22** อุปกรณ์ที่ช่วยในการทำงานของระบบไฮดรอลิก

## 2.4 การ์ด ดีเอคิว (Data Acquisition : DAQ)

การ์ดอินเตอร์เฟซ (Card Interface) เป็นแบบปลั๊กอิน (Plug-In) เสียบเข้าไปในช่อง การขนถ่ายข้อมูลจากอุปกรณ์หนึ่งไปยังอุปกรณ์หนึ่งของระบบคอมพิวเตอร์ (Computer Bus) ภายในเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะทำได้ความเร็วในการส่งถ่ายข้อมูลสูงขึ้น โดยการนี้ทำหน้าที่ เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์กับสัญญาณวัดที่ส่งมาจาก Signal Conditioning Module แต่ละการ์ด ที่ติดตั้งในคอมพิวเตอร์ จะมีที่อยู่ (Addressed) ของตัวมันเองโดยระบุที่อยู่ในตำแหน่ง Input / Output Memory Map

การ์ดดีเอคิวทำหน้าที่ประมวลผล และแปลความหมายหรือเปลี่ยนสัญญาณในลักษณะอนาล็อก (Analog) ให้มาอยู่ในรูปของสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal) เพื่อประโยชน์ในการตีความหมาย และใช้ในการควบคุมหน้าที่ของบอร์ดการ์ดดีเอคิว (Data Acquisition Board) ซึ่งอาจจะเป็น การอ่านสัญญาณอนาล็อก (A/D Conversion) การสร้างสัญญาณอนาล็อก (D/A Conversion) เขียนและอ่านสัญญาณเพื่อเชื่อมต่อกับตัวแปลงสัญญาณโดยข้อกำหนด (Specification) ของการ์ดอินเตอร์เฟซจะถูกระบุไว้อยู่บนการ์ดดีเอคิว ข้อกำหนดเบื้องต้น ของฮาร์ดแวร์การ์ดดีเอคิวที่สำคัญๆมีดังนี้

### 2.4.1 จำนวนช่องสัญญาณอินพุต

อนาล็อกอินพุต (Analog Input) ของการ์ดดีเอคิว มักจะได้รับการระบุไว้ทั้ง 2 กรณี ดังนี้

- **Single-Ended** โดยอินพุตของการ์ดตีเอคิที่เป็น **Single-Ended** นั้นจะอ้างอิงกับกราวด์จุดเดียวกันทั้งหมดและอินพุตแบบนี้จะใช้ในกรณีสัญญาณอินพุตมีระดับสูงมากกว่า 1 โวลต์ และใช้สายวัดสั้นๆ ไม่เกิน 15 ฟุต

- **Differential Input** แต่ละอินพุตจะมีกราวด์ของตัวเอง ซึ่งถือเป็นข้อดีเพราะเป็นการลดสัญญาณรบกวน **Common-Mode** ได้

#### 2.4.2 อัตราการสุ่มวัด (Sampling Rate)

เป็นพารามิเตอร์ที่จะกำหนดว่าการ์ดตีเอคิจะสามารถวัดสัญญาณอินพุตได้ละเอียดมากเท่าใดโดยปกติการ์ดตีเอคิแบบปลั๊กอินจะมีอัตราการสุ่ม 30,000 ถึง 250,000 ครั้งต่อวินาที เนื่องจากการสุ่มวัดด้วยความถี่สูงๆ จะทำให้สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุตได้ในทันทีทันใด (ทฤษฎีของ **Nyquist** จะต้องทำการสุ่มอ่านค่าความถี่เสียงด้วยความถี่อย่างน้อย 1.5 เท่าของความถี่สัญญาณอินพุต) ในทางกลับกันหากยังคงใช้อัตราการสุ่มวัดที่ไม่เหมาะสมแล้วการตีความสัญญาณอินพุตก็จะผิดเพี้ยนไป โดยปกติแล้วการ์ดตีเอคิจะต้องทำการวัดสัญญาณอินพุตหลายช่องสัญญาณพร้อมกัน การ์ดตีเอคิจึงจำเป็นต้องมีวงจรมัลติเพล็กซ์ เพื่อเลือกสัญญาณเข้ามาวิเคราะห์ทีละช่องสัญญาณ

#### 2.4.3 ระดับการแยกแยะสัญญาณ

เกิดจากการแปลงสัญญาณ จากสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลของการ์ดตีเอคิ ซึ่งจะใช้จำนวนบิตในการแทนค่าของสัญญาณอนาล็อกในแต่ละช่วงเวลา เช่น การแทนด้วยรหัสเพียง 3 บิต นั้นให้ค่าความแยกแยะเพียง 8 ระดับ หากต้องการเพิ่มค่าความแยกแยะเพื่อป้องกันข้อมูลของสัญญาณที่วัดได้ขาดหายไป ก็จะต้องเพิ่มการแทนบิตสูงขึ้น เช่น การแทนบิตด้วยรหัส 8 บิต จะสามารถแทนระดับสัญญาณอินพุตได้สูงถึง 255 ระดับ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มความแม่นยำให้กับการวัดอย่างมากเลยทีเดียว

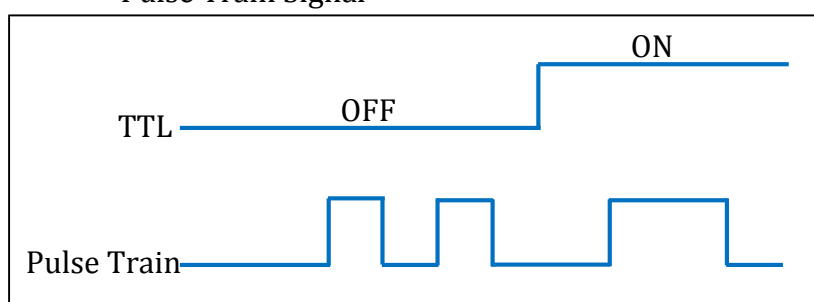
#### 2.4.4 การแบ่งประเภทสัญญาณ

สามารถแยกประเภทของสัญญาณได้ตามลักษณะของมันได้เป็น 2 แบบใหญ่ คือ แบบสัญญาณดิจิทัล และแบบสัญญาณอนาล็อก (**Analog Signal**) สำหรับปริมาณที่เกิดขึ้นตามปรากฏการณ์ธรรมชาติต่างๆ จะเป็นสัญญาณประเภทอนาล็อกแทบทั้งสิ้น ส่วนสัญญาณดิจิทัลนั้นโดยมากแล้วจะเป็นสัญญาณที่มนุษย์สร้างขึ้น และมักใช้ประโยชน์ในงานควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ โดยปกติแล้วเมื่อสัญญาณผ่านออกจากตัวแปลงสัญญาณ (**Signal Conditioner**) จะมีลักษณะเป็นสัญญาณไฟฟ้าแต่ยังคงเป็นสัญญาณอนาล็อกอยู่ การที่จะนำปริมาณนั้นเข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า **A/D (Analog to Digital Converter: ADC)** เมื่อสัญญาณเข้าสู่ **A/D** จะได้รับการเปลี่ยนลักษณะให้เป็นสัญญาณดิจิทัล จากนั้นจึงสามารถให้คอมพิวเตอร์จะสามารถดึงข้อมูลของสัญญาณนั้นออกมาได้ ข้อมูลที่สำคัญที่บรรจุอยู่ในสัญญาณนั้น เช่น รูปร่าง ปริมาณ ความถี่ เป็นต้น ถ้าแบ่งประเภทของสัญญาณแล้ว

สัญญาณทุกแบบเป็นอนาล็อกแทบทั้งสิ้นและมักเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา อย่างไรก็ตามในการพิจารณาเรื่องการวัดสัญญาณจะแบ่งสัญญาณออกย่อยจาก ดิจิตอล และ อนาล็อก ออกเป็นทั้งหมด 5 ประเภทคือ

#### 2.4.4.1 สัญญาณดิจิตอล แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

- ON-OFF Signal หรือ TTL (Transistor to Transistor Logic)
- Pulse Train Signal



ภาพที่ 2-23 สัญญาณดิจิตอล 2 ชนิด

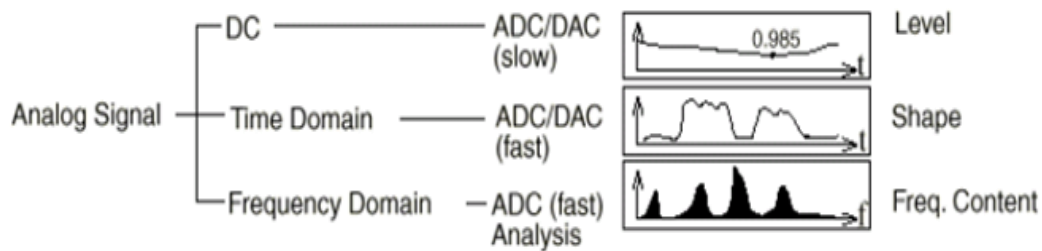
สำหรับ ON-OFF Signal มักจะเป็นสัญญาณที่มีข้อมูลที่เป็นสภาวะ (State) ว่าขณะนี้สัญญาณเกิดขึ้น (ON) หรือไม่มีสัญญาณ (OFF) อุปกรณ์ที่ใช้วัดจึงเป็นอุปกรณ์ประเภท digital State Detector เช่น หลอดไฟ หรือ ไดโอดเปล่งแสง ก็สามารถบอกสภาวะขณะนั้นได้ ส่วน Pulse Train Signal จะเป็นสัญญาณที่ประกอบด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาวะออกอย่างต่อเนื่อง ข้อมูลที่สำคัญที่สัญญาณนี้มีคือ จำนวนการเปลี่ยนแปลงสภาวะหรือระยะเวลาระหว่างการเปลี่ยนแปลงสภาวะสำหรับตัวอย่างของสัญญาณในลักษณะนี้ก็ เช่น การสะท้อนของแสงจากแผ่นโลหะที่ติดอยู่บนเพลา เพื่อใช้ในการวัดความเร็วรอบ หรือสำหรับในงานด้านการควบคุมสัญญาณในลักษณะนี้จะใช้ในการควบคุมสเตปป์มอเตอร์ (Stepping Motor)

#### 2.4.4.2 สัญญาณอนาล็อก สามารถแบ่งแยกย่อยออกเป็น 3 ชนิดคือ

- สัญญาณไฟตรง (DC Signal) สัญญาณที่เปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ
- สัญญาณไฟสลับ (AC Signal) สัญญาณที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเทียบกับ

กับเวลา (Time Domain)

- Frequency Domain Signal สัญญาณที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วแต่เป็นการพิจารณาว่าสัญญาณนั้น มีความถี่ใดบ้างที่บรรจุอยู่



ภาพที่ 2-24 สัญญาณอนาล็อกทั้ง 3 ชนิด

#### 2.4.4.3 สัญญาณไฟตรง สัญญาณนี้จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างช้าๆ เทียบต่อเวลา

คุณลักษณะที่สำคัญของสัญญาณไฟตรง ก็คือปริมาณหรือขนาดของสัญญาณที่ได้ขณะนั้น เนื่องจากสัญญาณไฟตรง เปลี่ยนแปลงไปอย่างช้าๆ ความแม่นยำในการวัดจึงสำคัญมากกว่าอัตราการเก็บข้อมูล ลักษณะของสัญญาณไฟตรง นี้มักได้จากอุปกรณ์การวัดทางกลชิ้นพื้นฐาน เช่น อุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหลในท่อปกติ เป็นต้น ลักษณะของระบบ ดีเอคิว ควรจะมีลักษณะดังต่อไปนี้

- **Accuracy/Resolution** คือมีความแม่นยำและละเอียด
- **Low Bandwidth** คือมีอัตราการเก็บข้อมูลที่ต่ำ

#### 2.4.4.4 สัญญาณไฟสลับ ลักษณะของสัญญาณไฟสลับ ที่สำคัญก็คือจะส่งผ่าน

ขนาดของสัญญาณ และการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณเทียบต่อเวลา ในการวัดปริมาณและแสดงผลของสัญญาณในลักษณะนี้มักเรียกสัญญาณนี้ว่าอยู่ในรูปของ รูปคลื่น (Waveform) ในการวัดสัญญาณไฟสลับ ใน **Time Domain** จำเป็นจะต้องวัดข้อมูลต่อเนื่องกัน เพื่อจะหาขนาดของสัญญาณในแต่ละเวลา การวัดจะต้องกระทำบ่อยครั้งเพื่อให้เพียงพอต่อการนำข้อมูลนี้ไปแปลความหมายได้อย่างถูกต้อง แต่ต้องไม่มากเกินไปเพราะไม่มีทรัพยากรในคอมพิวเตอร์เพียงพอที่จะบรรจุข้อมูลเหล่านี้ตลอดเวลา ลักษณะของการดีเอคิว ที่เหมาะสมกับงานประเภทนี้ควรเป็นดังนี้

- **High Bandwidth** เพื่อสามารถสุ่มเก็บตัวอย่างข้อมูลได้ในอัตราที่สูง
- **Accurate Sample Clock** เพื่อสามารถสุ่มเก็บตัวอย่างได้ในเวลาที่แม่นยำ

ที่แม่นยำ

- **Triggering** เพื่อที่จะได้เริ่มเก็บข้อมูลในเวลาที่แม่นยำ

#### 2.4.4.5 Frequency Domain Signals

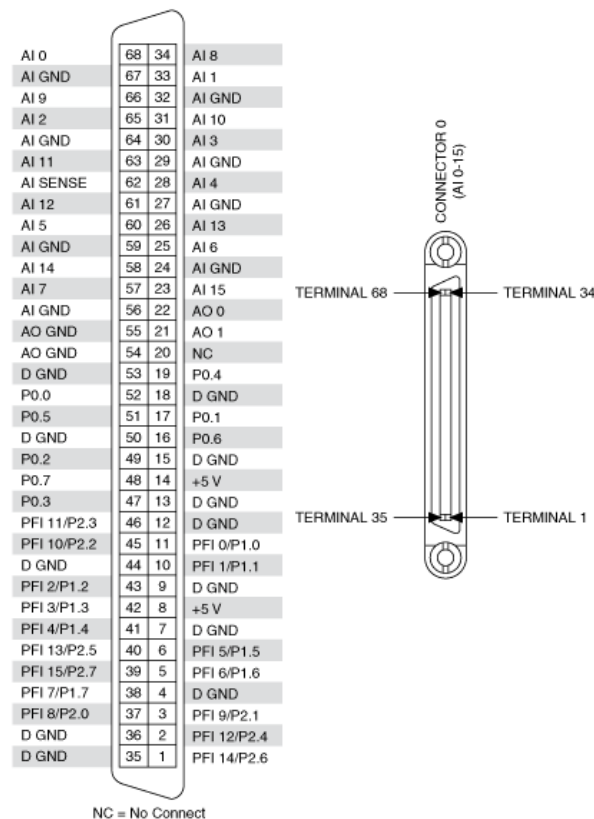
ในความจริงแล้วสัญญาณอนาล็อกทุกรูปแบบจะอยู่ใน **Time Domain** ทั้งสิ้น เพียงแต่ว่าข้อมูลที่สำคัญที่อยู่ในข้อมูลนั้นคืออะไร สำหรับสัญญาณประเภทนี้นั้นมีความแตกต่างจาก

สัญญาณไฟสลับ ตรงที่ต้องการทราบว่าเป็นสัญญาณที่วัดโดยรวมนั้นมีสัญญาณที่มีความถี่เท่าใดบ้าง บรรจุอยู่ด้วย และแต่ละความถี่มีปริมาณเท่าใด แต่ในสัญญาณไฟสลับ ปกติทั่วไปจะให้ความสำคัญกับรูปทรงของสัญญาณมากกว่าความถี่ที่บรรจุอยู่ ดังนั้นอุปกรณ์ที่ใช้วัดสัญญาณประเภทนี้จึงคล้ายกับสัญญาณไฟสลับ แต่ต้องเพิ่มฟังก์ชันที่เข้าไปมีส่วนร่วมในการเปลี่ยนสัญญาณที่วัดออกมาจาก Time Domain ให้อยู่ใน Frequency Domain ซึ่งจะใช้วิธีการของการแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบดีเอคิว นี้มีดังนี้

- High Bandwidths สุ่มตัวอย่างด้วยอัตราสูง
- Accurate Sample Clock สามารถสุ่มตัวอย่างเป็นช่วงๆด้วยความแม่นยำ
- Triggering เริ่มสุ่มตัวอย่างด้วยเวลาที่แม่นยำ
- Analysis Function เปลี่ยนข้อมูลใน Time Domain ให้อยู่ใน Frequency Domain



ภาพที่ 2-25 การ์ด DAQ รุ่น PCI-6221 (68 pin)



ภาพที่ 2-26 ขาต่อใช้งานของ การ์ด DAQ รุ่น PCI-6221 (68 pin)

#### 2.4.4.6 การเชื่อมต่อด้วยพีซีไอ (Peripheral Component Interconnect : PCI)

พีซีไอคือกระบวนการอ่านค่าสัญญาณ ทางไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ แล้วนำมาเก็บไว้บนคอมพิวเตอร์เพื่อการวัด การวิเคราะห์ จัดเก็บ หรือแสดงผลด้วยซอฟต์แวร์ สัญญาณทางไฟฟ้ามีสองประเภทคือ สัญญาณอนาล็อก และสัญญาณดิจิทัล

- สัญญาณแบบอนาล็อก จะคงอยู่ในรูปแบบของแรงดันไฟฟ้า (Voltage) หรือกระแสไฟฟ้า (Current) แบบต่อเนื่อง ถ้าสัญญาณนั้นมีการเปลี่ยนแปลงระดับไปมาอย่างรวดเร็ว จะเรียกว่า สัญญาณแบบไฟสลับ (Alternating Current: AC) และสัญญาณที่มีระดับคงที่หรือเปลี่ยนแปลงช้าลงจะเรียกว่า สัญญาณแบบไฟตรง (Direct Current: DC)

- สัญญาณแบบดิจิทัล คือสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าอยู่สองระดับ คือระดับต่ำ 0 โวลต์ กับระดับสูงโดยสัญญาณดิจิทัลแบบลอจิก TTL/CMOS จะใช้แรงดันระดับสูงเป็นแบบ 5 โวลต์ และมีลอจิกแบบอื่นๆ ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอีก เช่น 12 โวลต์, 24 โวลต์ และ 60 โวลต์ เป็นต้น

**2.4.4.7** หน้าทีของพีซีไอ อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์พีซีไอ แบบพื้นฐานจะสามารถทำงานได้หลายหน้าที่พร้อมกันโดยมีหน้าที่หลักสี่อย่าง คือ

- อนาล็อกอินพุต (Analog Input) สำหรับสัญญาณอนาล็อก ซึ่ง พีซีไอ จะรับได้หลายช่องสัญญาณพร้อมกัน ตั้งแต่ไม่กี่ช่องจนถึงหลายร้อยช่อง ซึ่งใช้ในการวัดค่าสัญญาณแรงดันจากเซนเซอร์ต่างๆ เป็นต้น ปกติจะวัดได้ตั้งแต่ -10 โวลต์ จนถึง +10 โวลต์ แต่ก็มีรุ่นพิเศษที่สามารถวัดได้มากกว่านั้น
- อนาล็อกเอาต์พุต (Analog Output) สำหรับสร้างสัญญาณอนาล็อก ทั้งแบบกระแสตรง (DC) และกระแสสลับ (AC) ที่เป็นรูปคลื่น (Waveform)
- ดิจิตอลไอโอ (Digital I/O) ใช้ทำหน้าที่ในการรับหรือสร้างสัญญาณดิจิตอล หรือทำงานร่วมกับอุปกรณ์ภายนอกอย่างเช่น สวิตช์ หรือ รีเลย์ เป็นต้น
- เคาน์เตอร์ ไอโอ (Counter I/O) ทำหน้าที่สำหรับใช้วัดสัญญาณจากเอ็นโค้ดเดอร์ หรือสร้างสัญญาณพัลส์ (Pulse)

## 2.5 การควบคุมด้วยพีไอดี (PID Control)

ระบบควบคุม (Control System) คือการจัดองค์ประกอบส่วนต่างๆ ให้มีการทำงานที่สัมพันธ์เพื่อบังคับหรือปรับปรุงให้ระบบทำงานตามที่ต้องการพลานต์ (Plant) คือ สิ่งที่ต้องจะควบคุมอาจเป็นเครื่องมือหรือ เครื่องจักรหรือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำงาน ดิสเตอร์บิลานต์ (Disturbance) คือ สัญญาณรบกวนที่เราเข้ามาภายในระบบ ทำให้ค่าเอาต์พุตของระบบเปลี่ยนไป การควบคุมป้อนกลับ (Feedback) คือการพยายามลดค่าแตกต่างระหว่างเอาต์พุตกับค่าอ้างอิงหรือ อินพุต ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control System) คือระบบที่ควบคุมที่รักษาค่าเอาต์พุตให้ใกล้เคียงกับ ค่าอินพุต โดยมีการเปรียบเทียบสัญญาณทั้งสองนี้ ผลจากการเปรียบเทียบจะเป็นค่าผิดพลาด (Error) ซึ่งเป็นสัญญาณที่ใช้ป้อนเข้าสู่ตัวควบคุม (Controller) เซอร์โวแมคคาทรอนิกส์ (Servomechanisms) คือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ โดยที่เอาต์พุตอยู่ในรูปของตำแหน่ง (Position) ความเร็ว (Velocity) หรือ อัตราเร่ง (Acceleration) ลักษณะการควบคุมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะใหญ่ๆ คือ

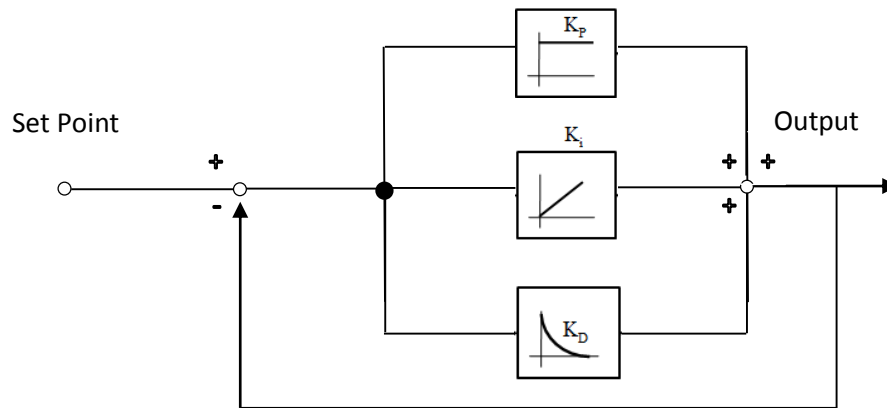
- ระบบควบคุมแบบปิด (Open-Loop Control System)
- ระบบควบคุมแบบเปิด (Closed-Loop Control System)

แต่ที่ในโครงงานนี้ใช้ระบบควบคุมแบบปิด

ระบบควบคุมแบบปิด คือ เมื่อระบบควบคุมเปิดไม่สามารถให้ความแม่นยำในการควบคุมได้ ดังนั้นจึงมีการพิจารณาที่จะนำสัญญาณเอาต์พุต ซึ่งมีผลโดยตรงกับระบบควบคุม มาใช้งานโดยการนำสัญญาณเอาต์พุตจากระบบป้อนกลับมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับระบบ ซึ่งมีผลต่างระหว่างสัญญาณทั้งสองที่นำมาเปรียบเทียบนั่น จะเป็นสัญญาณค่าผิดพลาดเพื่อที่จะใช้เป็น



สัญญาณป้อนกลับเข้าตัวควบคุมให้ตัวควบคุมนำไปสร้างสัญญาณควบคุมใหม่ เพื่อลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบและทำให้เอาต์พุต ของระบบเข้าสู่ค่าที่เราต้องการ



ภาพที่ 2-27 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบปิด พีไอดี

2.5.1 ตัวควบคุมพีไอดี (PID Controller) ประกอบด้วยภาคต่างๆ ดังนี้

2.5.1.1 ตัวควบคุมแบบ พี (Proportional-action controller : P Controller)

หรือที่เรียกว่า การควบคุมแบบสัดส่วน เป็นการควบคุมซึ่งมีการปฏิบัติการแก้ไขความผิดพลาดโดยให้สัญญาณที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความผิดพลาด เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$m = K_p e \quad (2-11)$$

Take Laplace สมการที่ 2-11 แล้วได้ตั้งสมการที่ 2-12

$$M(s) = K_p E(s) \quad (2-12)$$

โดยที่  $m$  คือ ปริมาณที่เปลี่ยนแปลงที่ใช้แก้ไขความผิดพลาด (Manipulating Variable)

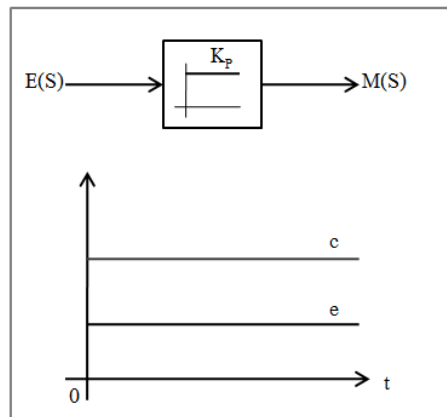
$e$  คือ ค่าความผิดพลาด (Error)

$K_p$  คือ อัตราการขยายของตัวควบคุมแบบอัตราส่วน (Proportional Gain)

$E(s)$  คือ ค่าความผิดพลาดที่เปลี่ยนแปลง (Actuating Error)

$M(s)$  คือ เอาต์พุต (Output)

จากสมการสามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้



ภาพที่ 2-28 ไดอะแกรมเวลาของขั้นตอนการตอบสนอง (กระทำตามสัดส่วน)

คุณลักษณะที่สำคัญของการควบคุมแบบสัดส่วน คือ จะมีผลตอบสนองต่อสัญญาณอินพุต (Actuating Error;  $e$ ) แบบทันทีขนาดของเอาต์พุต (Manipulating Variable;  $m$ ) นอกจากจะขึ้นอยู่กับขนาดของสัญญาณอินพุต แล้วยังขึ้นกับอัตราการขยายของตัวควบคุมแบบอัตราส่วน (Proportional Gain;  $K_p$ )

จะเห็นว่าค่าของสัญญาณเอาต์พุตจะคงอยู่ได้ก็ต่อเมื่อมีสัญญาณอินพุต หรือค่าความผิดพลาดปรากฏอยู่ในสภาวะสม่ำเสมอเท่านั้น (Steady-State Error) ซึ่งเท่ากับ  $e_{ss} = \frac{m_{ss}}{K_p}$

(Steady-State;ss) การควบคุมแบบสัดส่วนต้องการค่าความผิดพลาดเพื่อกำเนิดสัญญาณเอาต์พุตสำหรับกระบวนการ (Process or Plant) ดังนั้นจึงกล่าวว่า การควบคุมแบบสัดส่วนไม่สามารถกำจัดค่าความผิดพลาดของระบบ ที่ถูกใช้ให้ควบคุมให้หมดได้แต่เนื่องจากการควบคุมแบบสัดส่วนตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบฉับพลัน จึงทำให้มีความไวในการควบคุมระบบซึ่งถือได้ว่าเป็นคุณสมบัติเด่นของการควบคุม แบบสัดส่วน

2.5.1.2 การควบคุมแบบ ดี (Derivative Controller : D Controller) หรือที่เรียกว่า การควบคุมแบบอนุพันธ์ เป็นการควบคุมซึ่งมีการปฏิบัติการเพื่อแก้ไขความผิดพลาด โดยให้สัญญาณที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับการอนุพันธ์ของค่าความผิดพลาด (Time Integral of the Error) เขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$m = K_d \left( \frac{de}{dt} \right) \quad (2-13)$$

Take Laplace สมการที่ 2-13 แล้วได้ดังสมการที่ 2-14

$$M(s) = K_d S[E(s)] \quad (2-14)$$

โดยที่  $m$  คือ ปริมาณที่เปลี่ยนแปลงที่ใช้แก้ไขความผิดพลาด

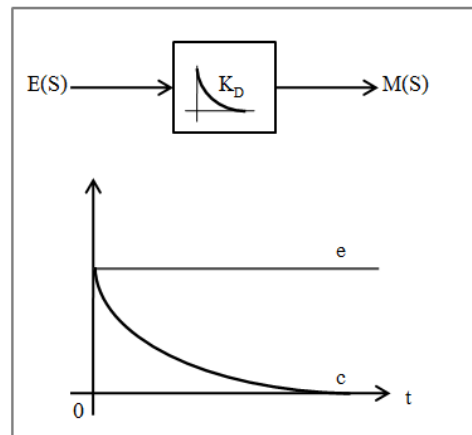
$e$  คือ ค่าความผิดพลาด

$K_d$  คือ อัตราการขยายของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์

$E(s)$  คือ ค่าความผิดพลาดที่เปลี่ยนแปลง

$M(s)$  คือ เอาต์พุต

จากสมการสามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้



ภาพที่ 2-29 ไดอะแกรมเวลาของขั้นตอนการตอบสนอง (การกระทำอนุพันธ์)

จากสมการ 2-13 จะเห็นว่าการแก้ไขค่าผิดพลาดเป็นอัตราของการเปลี่ยนแปลงความผิดพลาด ดังนั้นการควบคุมแบบอนุพันธ์จะให้สัญญาณเอาต์พุต (Manipulating Variable :  $m$ ) ที่เกิดจากการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุตเท่านั้น และจะไม่มีผลต่อสัญญาณอินพุตหรือค่าความผิดพลาดที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรืออยู่ในสภาวะคงที่

การควบคุมแบบอนุพันธ์ทำให้ระบบ สามารถที่จะแก้ไขความผิดพลาดก่อนที่ค่าความผิดพลาดจะมีมากขึ้นแต่จะไม่รับรู้การมีอยู่ของค่าความผิดพลาดที่อยู่ในสภาวะคงที่ ดังนั้นการควบคุมแบบอนุพันธ์เพียงอย่างเดียว จึงไม่เหมาะที่จะใช้ในการควบคุมระบบการชดเชยข้อด้อยดังกล่าวทำได้โดยใช้การควบคุมแบบอนุพันธ์ร่วมกับการควบคุมแบบสัดส่วน และการควบคุมแบบปริพันธ์ เพื่อทำให้คุณสมบัติโดยรวมของการควบคุมดีขึ้น

2.5.1.3 ตัวควบคุมแบบ ไอ (Integral-Action Controller : I Controller) หรือที่เรียกว่า การควบคุมแบบปริพันธ์ เป็นการควบคุมซึ่งมีการปฏิบัติการเพื่อแก้ไขความผิดพลาด โดยให้สัญญาณที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับการอินทิกรัล ของค่าความผิดพลาด (Time Integral Of The Error) เขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$m = K_i (\int e dt) \quad (2-15)$$

Take Laplace สมการที่ 2-15 แล้วได้ดังสมการที่ 2-16

$$M(s) = \frac{K_i [E(s)]}{s} \quad (2-16)$$

โดยที่  $m$  คือ ปริมาณที่เปลี่ยนแปลงที่ใช้แก้ไขความผิดพลาด

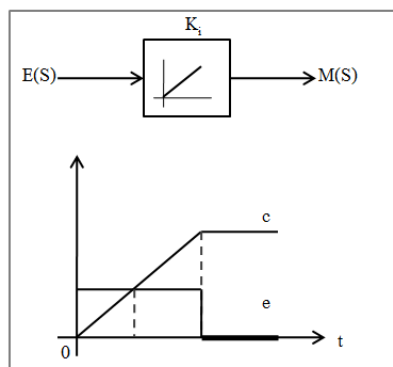
$e$  คือ ค่าความผิดพลาด

$K_i$  คือ อัตราการขยายของตัวควบคุมแบบปริพันธ์

$E(s)$  คือ ค่าความผิดพลาดที่เปลี่ยนแปลง

$M(s)$  คือ เอาต์พุต

จากสมการสามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้



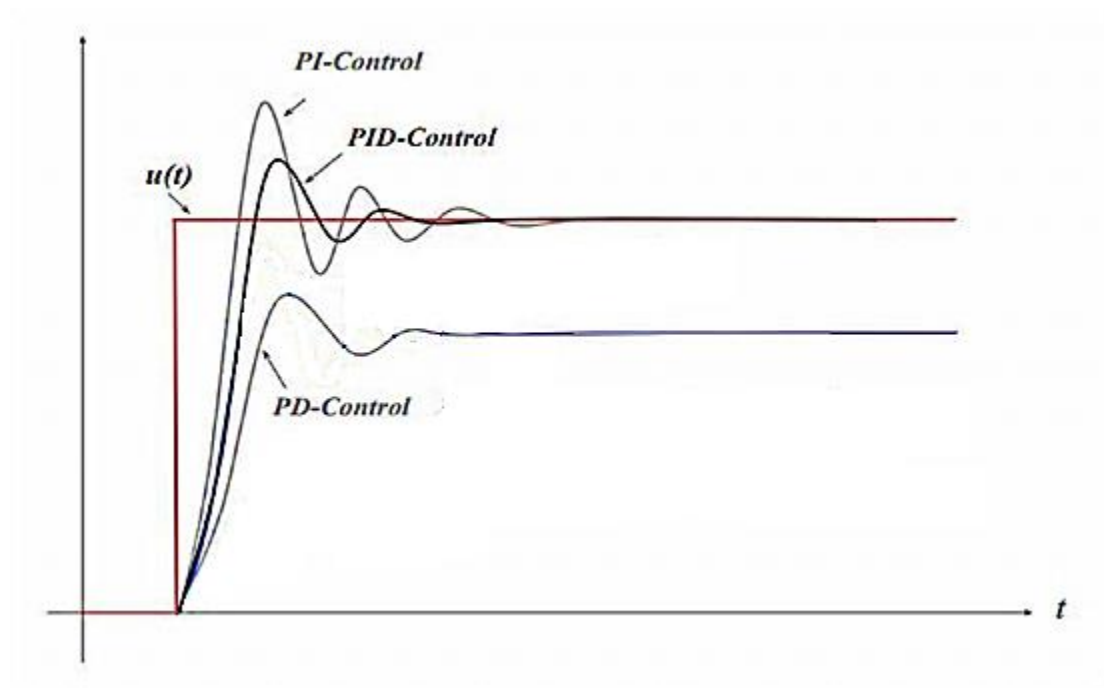
**ภาพที่ 2-30** ไดอะแกรมเวลาของขั้นตอนการตอบสนอง (ตัวกระทำปริพันธ์)

จากสมการ 2-15 จะเห็นว่าสัญญาณเอ้าพุต (Manipulating Variable:  $m$ ) เป็นค่าสะสมของสัญญาณอินพุต ตราบใดที่ยังมีสัญญาณอินพุตหรือค่าความผิดพลาดปรากฏอยู่ ค่าของสัญญาณ เอ้าพุตจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ค่าของสัญญาณเอ้าพุตจะหยุดเปลี่ยนแปลงและรักษาค่าให้คงที่ไว้เมื่อค่าความผิดพลาดเท่ากับศูนย์ (Error ;  $e = 0$ ) ความเร็วการเพิ่มขึ้นของสัญญาณเอ้าพุต นอกจากจะขึ้นอยู่กับขนาดของค่าความผิดพลาดแล้วยังขึ้นกับการควบคุมแบบปริพันธ์

คุณลักษณะสำคัญของการควบคุมแบบปริพันธ์หรือ **Integral reset time ;  $T_i$**

จะเห็นได้จากการอนุพันธ์สมการ B ซึ่งจะได้  $\left(\frac{dm}{dt}\right) = K_i(e)$  แสดงให้เห็นว่า อัตราการแก้ไขความผิดพลาด เป็นสัดส่วนกับค่าความผิดพลาด ดังนั้นตัวควบคุมแบบปริพันธ์จึงสามารถทำการแก้ไขความผิดพลาดของระบบจนกระทั่งไม่มีความผิดพลาดเหลืออยู่ แต่ในขณะเดียวกันก็ทำให้การตอบสนองของระบบช้าลง เมื่อเทียบกับการควบคุมแบบสัดส่วนแล้ว จะเห็นว่าการควบคุมแบบปริพันธ์มีคุณสมบัติของการหน่วงเวลาร่วมอยู่

เปรียบเทียบผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบต่างๆ



ภาพที่ 2-31 ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบต่างๆ

ตารางที่ 2-4 ผลกระทบของค่าเกนในตัวควบคุมแบบ พีไอดี ต่อการตอบสนองของระบบ

| ค่าเกนที่<br>ของตัว<br>ควบคุม | ช่วงเวลาดำเนิน<br>(Rise Time : $t_r$ ) | โอเวอร์ชูตสูงสุด<br>(Maximum<br>Overshoot :<br>$M_p$ ) | เวลาเข้าสู่<br>Set point<br>(Setting Time<br>: $t_s$ ) | ค่าความผิดพลาด<br>ณ สถานะอยู่ตัว<br>(Steady state<br>error: $e_{ss}$ ) |
|-------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| $K_p$                         | ช่วยลดเวลา $t_r$                       | ถ้าปรับมาก $M_p$<br>จะเพิ่มขึ้น                        | เปลี่ยนแปลง<br>น้อยมาก                                 | ช่วยลด $e_{ss}$ ลง                                                     |
| $K_i$                         | ช่วยลดเวลา $t_r$                       | ถ้าปรับมาก $M_p$<br>จะเพิ่มขึ้น                        | ถ้าปรับมากทำให้<br>$t_s$ เพิ่มขึ้น                     | ช่วยกำจัด $e_{ss}$<br>จนหมดไป                                          |
| $K_d$                         | เปลี่ยนแปลง<br>น้อยมาก                 | ช่วยลด $M_p$                                           | ลดลง                                                   | เปลี่ยนแปลง<br>น้อยมาก                                                 |

จากตารางที่ 2-4 จะเห็นได้ว่าค่าเกนที่  $K_p$  จะทำให้ช่วงเวลาดำเนิน (Rise time) ลดลง และลดค่าความผิดพลาด ณ สถานะคงตัว แต่ไม่สามารถกำจัดค่าความผิดพลาด ณ สถานะคงตัวให้หมดได้ ค่าเกน  $K_i$  จะมีหน้าที่หลักในการลดค่าความผิดพลาด ณ สถานะคงตัวให้หมดไป แต่การเพิ่มค่าเกน  $K_i$  มากเกินไปจะทำให้ผลการตอบสนองชั่วคราวของระบบเสียไปได้ ส่วนค่าเกน  $K_d$  มีหน้าที่หลักในการลดโอเวอร์ชูตสูงสุดลง และ ทำให้ผลการตอบสนองชั่วคราวของระบบดีขึ้น

## 2.6 Encoder

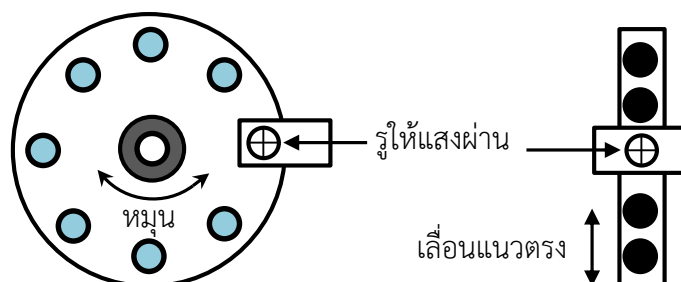
ในกรณีที่ต้องการวัดระยะทางยาวๆมักนิยมใช้ตัวตรวจจับ (Sensor) ตำแหน่งแบบดิจิตอล โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าเป็นระบบการวิเคราะห์แบบดิจิตอล เนื่องจากตัวตรวจจับชนิดนี้จะไม่ถูกจำกัดช่วงของการวัดด้วยกลไก แต่ความสามารถในการวัดจะขึ้นอยู่กับซอฟต์แวร์ที่ใช้เป็นหลัก

ตัวตรวจจับตำแหน่งแบบดิจิตอลใน ที่นี้จะกล่าวถึง Encoder ตรวจรู้ตำแหน่ง (Position Encoder) ซึ่งสามารถแบ่งตามโครงสร้างการเคลื่อนที่ออกได้เป็นสองแบบด้วยกันคือ Encoder ตำแหน่งแบบหมุน (Rotation Position Encoder) และ Encoder ตำแหน่งแบบเคลื่อนที่แนวเส้นตรง (Linear Position Encoder)

ถ้าจำแนกตัวตรวจรู้แบบ Encoder ออกตามลักษณะของสัญญาณเอาต์พุต จะได้เป็น 2 แบบหลัก ๆ คือ Incremental Encoder และ Absolute Encoder

### 2.6.1 Encoder แบบเพิ่มค่า (Incremental Encoder)

Encoder แบบเพิ่มค่า ประกอบด้วยแผ่นกลมหรือแผ่นบรรทัดแนวตรง ที่เคลื่อนที่ตามกลไกที่ต้องการวัดระยะทาง ในกรณีของออปติคัล Encoder (Optical Encoder) จะมีการเจาะรูเพื่อให้แสงผ่านไปเป็นระยะๆ เพื่อบอกตำแหน่งของแผ่นหมุน โดยจะให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นสัญญาณพัลส์ออกมาทุกครั้งที่มีการหมุนแกน Encoder ทำให้สามารถทราบมุมที่หมุนหรือระยะทางเคลื่อนที่ไปได้ โดยเอาต์พุตปกติจะมีแค่เพียงบิตเดียวหรือสองบิตเพื่อให้บอกทิศทางได้

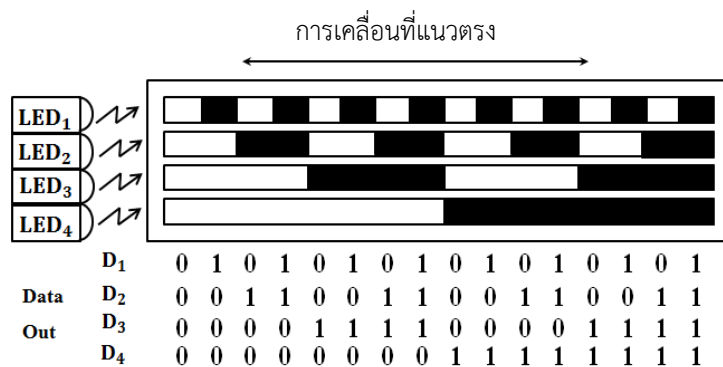


ภาพที่ 2-32 Encoder แบบเพิ่มค่าด้านซ้ายแบบหมุน ด้านขวาแบบเคลื่อนที่เชิงเส้น

Encoder แบบนี้มีข้อเสียตรงที่ข้อมูลของการเคลื่อนที่จะหายไปหมดเมื่อ แหล่งจ่ายไฟฟ้าดับหรือมีการแยกสายสัญญาณออกแม้เพียงชั่วขณะเดียวหรือเมื่อมีการรบกวนของสัญญาณเกิดขึ้น ทำให้ต้องมีการปรับเทียบกับจุดอ้างอิงอยู่ตลอดเวลาเพื่อความถูกต้อง นอกจากนี้ข้อมูลที่จะนำไปใช้ยังมักจำเป็นที่จะต้องผ่านวงจรนับ (Counter) เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงขนานที่ใช้ในระบบคอมพิวเตอร์

### 2.6.2 Absolute Encoder

Encoder แบบลัมบูร์ดจะให้เอาต์พุตในรูปแบบที่เป็นรหัส ที่ตรงกับตำแหน่งที่กลไกเคลื่อนที่ไป หลักการทำงานโดยรวมจะเหมือนกับ Encoder แบบเพิ่มค่า แต่ในตัว Encoder แบบลัมบูร์ด จะมีหัวอ่านหลายชุดเท่ากับจำนวนบิตเอาต์พุต การเจาะรูบนแผ่นแต่ละชุดก็จะมีระยะห่างเป็นทวีคูณทำให้สามารถทราบตำแหน่งของ การหมุนโดยทันที

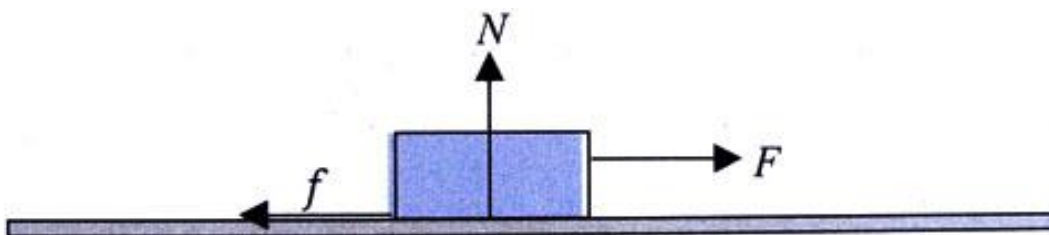


ภาพที่ 2-33 Absolute Encoder แบบเลื่อนแนวตรงขนาด 4 บิต

ตัวอย่างในภาพที่ 2-33 จะเป็น Encoder แบบเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง ขนาด 4 บิตข้อมูล ซึ่งจะมีหัวอ่านข้อมูล 4 หัวด้วยกัน คือ D1,D2,D3 และ D4 ทำให้สามารถอ่านข้อมูลได้ทั้งสิ้น 16 ระดับ ขึ้นตั้งแต่ 0000, 0001 .. ไปเรื่อย ๆ จนถึง 1111 Encoder แบบนี้จะมีข้อดีตรงที่ข้อมูลยังคงถูกต้อง ถึงแม้สัญญาณจะหายไปชั่วขณะ เนื่องจากข้อมูลที่ได้จะหมายถึงตำแหน่งของการเคลื่อนที่นั้น ๆ กล่าวคือ สามารถบอกได้ทันทีว่าการเคลื่อนที่ถึงไหนแล้วโดยดูจากข้อมูลดิจิทัลที่ได้ ต่างจาก Encoder แบบเพิ่มค่า ซึ่งจะต้องทราบวก่อนหน้าว่าการเคลื่อนที่อยู่ที่ตำแหน่งใดแล้วบวกเพิ่มค่าตำแหน่งขึ้นไปจากเดิม จึงจะทราบว่าเคลื่อนที่ถึงไหนแล้ว เมื่อเป็นเช่นนี้ทำให้ Encoder ชนิดนี้บอกถึงทิศทางการเคลื่อนที่ของกลไกได้ทันที เพราะข้อมูลเอาต์พุตที่ได้จะมีการเพิ่มหรือลดตามทิศทางการเคลื่อนที่โดยตรงอย่างไรก็ตาม เนื่องจากความซับซ้อนของอุปกรณ์ ทำให้ Encoder แบบนี้มีราคาแพงกว่าแบบเพิ่มค่ามาก สำหรับ Encoder แบบสมบูรณ์แล้ว การเรียงรูปแบบของข้อมูลหรือการเข้ารหัสดังภาพที่ 2-33 จะเป็นการเข้ารหัสแบบเลขฐานสองตามธรรมชาติ(Natural Binary Code) ปกติ แต่ในทางปฏิบัติยังมีการเข้ารหัสอีกหลายแบบ เช่น แบบเลขฐานสิบเข้ารหัสเลขฐานสอง(Binary Code Decimal : BCD) และรหัสเกรย์ (Gray Code) ดังนั้นการใช้งานต้องทราบถึงชนิดของการเข้ารหัสด้วย

## 2.7 แรงเสียดทาน (Frictional Force)

จากการทดลองโดยการดึงหรือลากวัตถุบนพื้นผิวต่างๆ ดังภาพ 2-34



ภาพที่ 2-34 การออกแรงดึงแผ่นไม้

จากการทดลองตอนแรกสรุปได้ว่าเมื่อแผ่นไม้อยู่นิ่งขนาดของแรงเสียดทานจะมีค่าเท่ากับขนาดของแรงดึงแผ่นไม้แต่มีทิศตรงกันข้าม เพราะแรงลัพธ์ที่กระทำต่อแผ่นไม้เป็นศูนย์ ซึ่งเป็นไปตามกฎการเคลื่อนที่ข้อ 1 ของนิวตัน และขนาดของแรงเสียดทานเพิ่มตามขนาดของแรงดึงที่เพิ่มขึ้นจนมีค่ามากในที่สุดเรียกแรงเสียดทานนี้ว่า แรงเสียดทานสถิต (Static friction) หลังจากเริ่มเคลื่อนที่แล้ว ปกติจะใช้แรงที่น้อยลงในการทำให้แผ่นไม้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงตัว การที่แผ่นไม้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงตัวบนพื้นราบแสดงว่า แรงลัพธ์ในแนวราบมีค่าเป็นศูนย์ตามกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน แสดงว่าแรงเสียดทานขณะนั้นมีค่าเท่ากับแรงที่ดึงแต่มีทิศตรงกันข้าม แรงเสียดทานขณะที่ไม่มีการเคลื่อนที่จะเรียกว่า แรงเสียดทานจลน์ (kinetic friction) จากการทดลองจะพบว่าแรงเสียดทานจลน์เป็นปฏิภาคกับแรงที่พื้นกระทำต่อวัตถุในแนวตั้งฉากกับพื้น (ซึ่งมีขนาดเท่ากับแรงกดพื้นในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัส อาจจะนับว่าเป็นแรงกดสำหรับผิว) เมื่ออยู่บนพื้นราบแรงนี้จะมีขนาดเท่ากับน้ำหนักของวัตถุ ความเป็นปฏิภาคนี้อาจเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานและแรงกดระหว่างผิวในแนวตั้งฉากกับผิวได้ว่า

$$f_k = \mu_k N \quad (2-17)$$

ในเมื่อ  $f_k$  เป็นแรงเสียดทานจลน์  $N$  เป็นแรงกดระหว่างผิว ในแนวตั้งฉากกับผิวหรือแรงที่ผิวกระทำกับวัตถุในแนวตั้งฉากซึ่งมีค่าเท่ากัน  $\mu_k$  เป็นค่าคงตัวของการเป็นปฏิภาคเรียกว่า สัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ (Coefficient of kinetic friction) จากการทดลองพบว่า  $\mu_k$  ขึ้นกับชนิดของผิวสัมผัสแต่ละคู่

ค่าของแรงที่มากที่สุดที่เริ่มทำให้วัตถุเคลื่อนที่ได้เรียกว่า แรงเสียดทานสถิตสูงสุด ให้เป็น  $f_s$  และจะสัมพันธ์กับแรงที่กระทำต่อวัตถุ ในแนวตั้งฉากกับผิว  $N$  ในทำนองเดียวกันกับสมการ(3.17)

$$f_s = \mu_s N \quad (2-18)$$

เมื่อ  $f_s$  เป็นแรงเสียดทานสถิต  $\mu_s$  เป็นค่าคงตัวของการแปรผันที่เรียกว่า สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (coefficient of static friction)

$\mu$  เป็นอักษรกรีกเรียกว่า มิว  $\mu_k$  และ  $\mu_s$  ในสมการ (2-17) และ (2-18) จึงอ่านว่ามิวเค และมิวเอสตามลำดับ

สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต  $\mu_s$  และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์  $\mu_k$  ที่หาได้จากการทดลองมีค่าขึ้นอยู่กับชนิดของผิวสัมผัสดังตาราง 2-6 ซึ่งพบว่า สำหรับผิวสัมผัสคู่หนึ่ง สัมประสิทธิ์เสียดทานสถิต  $\mu_s$  มีค่ามากกว่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์  $\mu_k$  เสมอ



**ตารางที่ 2-5** สัมประสิทธิ์เสียดทานสถิต  $\mu_s$  มีค่ามากกว่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์  $\mu_k$

| ผิวสัมผัส               | $\mu_s$ | $\mu_k$ |
|-------------------------|---------|---------|
| ไม้กับไม้               | 0.70    | 0.40    |
| เหล็กกล้ากับเหล็กกล้า   | 0.74    | 0.57    |
| อะลูมิเนียมกับเหล็กกล้า | 0.61    | 0.47    |
| ทองแดงกับเหล็กกล้า      | 0.53    | 0.36    |
| ทองเหลืองกับเหล็กกล้า   | 0.51    | 0.44    |
| แก้วกับแก้ว             | 0.94    | 0.40    |
| ทองแดงกับแก้ว           | 0.68    | 0.53    |
| ยางกับคอนกรีตแห้ง       | 1.0     | 0.80    |
| ยางกับคอนกรีตเปียก      | 0.30    | 0.25    |
| ล้อยางกับถนนแห้ง        | 0.90    | 0.65    |
| ล้อยางกับถนนเปียก       | 0.70    | 0.55    |

การลดแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส สามารถทำได้โดยการใช้น้ำมันหรือสารหล่อลื่นแทรก  
ระหว่างผิวสัมผัส เช่น การหล่อลื่นในเครื่องยนต์กลไกต่างๆ สำหรับการเคลื่อนที่แบบหมุนตลับลูกปืน  
มีบทบาทสำคัญในการลดแรงเสียดทาน โดยการใส่ลูกปืนกลมเล็กๆ ระหว่างผิวนอกและผิวในใน  
ตลับลูกปืน ทำให้ตลับลูกปืนชั้นนอกเคลื่อนที่ได้คล่องโดยชั้นในไม่ได้เคลื่อนที่นั่นคือการลดแรง  
เสียดทานในการหมุน ในทางอุตสาหกรรมได้มีการผลิตตลับลูกปืน เพื่อใช้ในงานต่างๆ เช่น  
การเคลื่อนย้ายสิ่งของ ล้อรถเลื่อน รถยนต์ ฯลฯ หรือแม้แต่พัดลมไฟฟ้า ก็มีตลับลูกปืนติดอยู่ เพื่อ  
ลดแรงเสียดทานเนื่องจากการหมุนของใบพัด