

แผนกลไฮดรอลิกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์  
COMPUTER CONTROLLED HYDRAULIC ROBOT



โดย

นาย เฉลิม สัมพันธ์ธนรักษ์

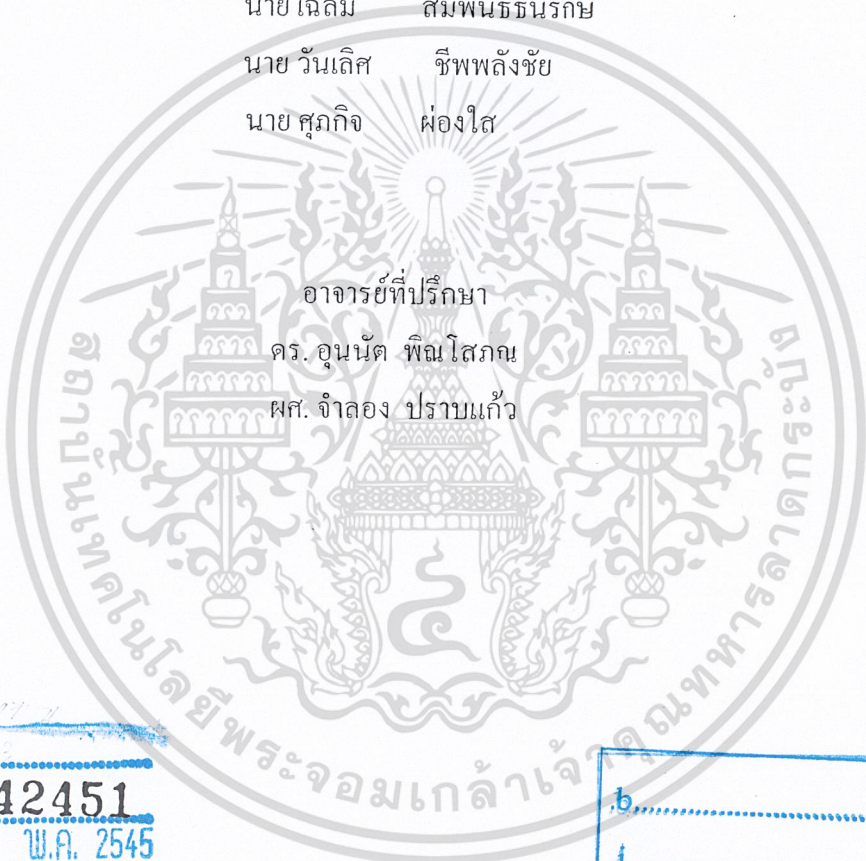
นาย วินเลิศ จีพพลังชัย

นาย ศุภกิจ ผ่องใส

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร. อุन्नิต พิณโสภณ

ผศ. จำลอง ปราบแก้ว



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน **42451**  
วัน, เดือน, ปี **23 พ.ค. 2545**

b.....  
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2543

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

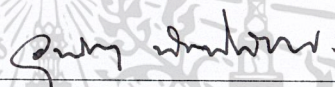
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง แขนกลไฮดรอลิกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์

COMPUTER CONTROLLED HYDRAULIC ROBOT

ผู้จัดทำ

1. นาย เฉลิม สัมพันธ์ธนรักษ์ รหัสประจำตัว 40010150
2. นาย วันเลิศ ชีพพลังชัย รหัสประจำตัว 40010717
3. นาย สุภกิจ ผ่องใส รหัสประจำตัว 40010788



(ดร. อนันต์ พิณโสภณ)

อาจารย์ที่ปรึกษา



(ผศ. จิตอง ปราบแก้ว)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## แผนกลไฮดรอลิกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์

นาย เฉลิม สัมพันธ์ธนรักษ์	40010150
นาย วันเลิศ ชีพพลังชัย	40010717
นาย สุภกิจ ผ่องใส	40010788
ดร. อุन्नัต พิณโสภณ	อาจารย์ที่ปรึกษา
ผศ. จำลอง ปราบแก้ว	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2543	

### บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอระบบควบคุมคอมพิวเตอร์ของแผนกลไฮดรอลิกที่มีระดับความเสถียร 2 ชั้น ระบบควบคุมไฮดรอลิกประกอบด้วยเซอร์โววาล์ว 2 ตัว ซึ่งจะควบคุมกระบอกสูบ 2 กระบอก โรตารีเอ็นโค้ดเดอร์จะถูกติดตั้งที่แต่ละข้อต่อของแผนกลเพื่อใช้ในการวัดตำแหน่งของแผนกล และค่าที่อ่านได้จะถูกส่งเข้าคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณสัญญาณควบคุมเซอร์โววาล์ว ระบบควบคุมแผนกลไฮดรอลิกนี้จะมีประโยชน์ในการใช้เป็นอุปกรณ์ประกอบการเรียนการสอนในวิชาโรโบติกและไฮดรอลิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Computer Controlled Hydraulic Robot

Mr. Chalerm Sampantarak	40010150
Mr. Wanlers cheepplungchai	40010717
Mr. Supakij Pongsai	40010788
Dr. Unnat Pinsopon	Adviser
Assist.Prof. Chamlong Prabkeo	Adviser

### Abstract

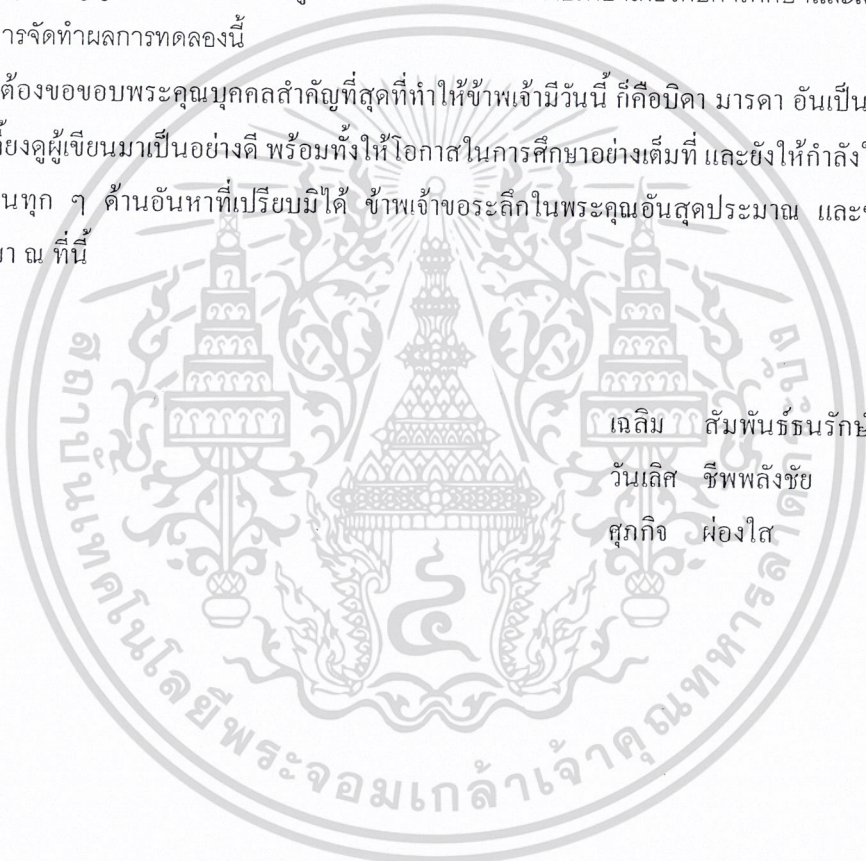
A computer controlled two degree of freedom hydraulic robot system is designed and fabricated in this project study. The Hydraulic system has two servo valves which control the movement of two cylinders. Each joint of robotic's arm has a rotary encoder which it is use to detect position of robotic's arm and send digital signal to computer. The computer sends the control signal, which is calculated based on the sensory data, to the valve amplifier in order to control both servo valves. The robot can be used as a working sample in the study of pneumatic and hydraulic course

### กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้จัดทำขึ้นเพื่อประกอบการเรียนวิชา project ซึ่งนับว่าเป็นโอกาสอันดีที่ทำให้ให้นักศึกษาได้นำความรู้ในภาคทฤษฎี มาทำการปฏิบัติการ เป็นการเพิ่มพูนความรู้ และประสบการณ์ให้แก่นักศึกษา

ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณ ดร. อุณนัต พิณโสภณ และ ผศ. จำลอง ปราบแก้ว ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับการศึกษาและสร้างชิ้นงานตลอดจนการจัดทำผลการทดลองนี้

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือบิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้



เฉลิม สัมพันธ์รักษ์  
วันเลิศ ชิพพลังชัย  
ศุภกิจ ผ่องใส

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 ระบบการขับเคลื่อน	1
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ	3
1.5 วิธีการดำเนินงาน	3
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานไฮดรอลิก	5
2.1 ระบบไฮดรอลิก	5
2.2 การใช้งานระบบไฮดรอลิก	6
2.3 น้ำมันไฮดรอลิก	7
2.4 ปัมป์ไฮดรอลิก	8
2.5 ระบายกลับไฮดรอลิก	9
2.6 วาล์วควบคุมความดัน	11
2.7 ถังพักน้ำมันไฮดรอลิก	13
2.8 เซอร์โววาล์ว	15
บทที่ 3 การออกแบบแขนกล	23
3.1 การออกแบบพื้นที่การทำงาน	23
3.2 การหาแรงและค่าความปลอดภัยของแขนกล	24
บทที่ 4 อุปกรณ์ในการควบคุมแขนกล	28
4.1 โรตารีเอนโค้ดเดอร์	28
4.2 เซอร์โวแอมพลิไฟเออร์	30
4.3 การ์ดอินเทอร์เฟซแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก	31
4.4 การ์ดอินพุต-เอาต์พุต	33
บทที่ 5 การควบคุมเชิงสัดส่วนบวกอินทิกรัลและอนุพันธ์	34

5.2 การปรับปรุงกรณีควบคุม	36
5.2.1 การปรับปรุงกรณีควบคุมโดยการหาผลการตอบสนองของกระบวนการเปิดใดๆ	37
5.2.2 การปรับปรุงกรณีควบคุมโดยการหาผลแกว่งของระบบปิด	39
5.2.3 การปรับปรุงกรณีควบคุมโดยการลองผิดลองถูก	40
บทที่ 6 หลักการทำงานและผลของการทดลอง	43
6.1 หลักการทำงาน	43
6.1.1 การทำงานของระบบ	43
6.1.2 Sampling	44
6.2 ผลการทดลอง	45
6.3 วิจารณ์และสรุปผลการทดลอง	49
บรรณานุกรม	50



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

เรื่อง	หน้า
รูป 1.1 ตัวอย่างแกนกลที่ขับเคลื่อนด้วยไฮดรอลิก	2
รูป 2.1 อุปกรณ์พื้นฐานในการทำงานของระบบไฮดรอลิก	5
รูป 2.2 แสดงน้ำมันไฮดรอลิกช่วยหล่อลื่นและเป็นซีลของชิ้นงานการทำงาน	8
รูป 2.3 แสดงการไหลหมุนเวียนของน้ำมันไฮดรอลิกช่วยในการระบายความร้อนในระบบปั๊มไฮดรอลิก	8
รูป 2.4 แสดงส่วนประกอบของกระบอกสูบแบบทำงาน 2 ทาง	10
รูป 2.5 แสดงการทำงานของกระบอกสูบแบบทำงาน 2 ทาง	10
รูป 2.6 โครงสร้างและส่วนประกอบของถังพักน้ำมัน	13
รูป 2.7 ทิศทางการไหลของน้ำมัน	14
รูป 2.8 มอเตอร์แรงบิด	15
รูป 2.9 การผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ชุดคลาวด์	16
รูป 2.10 การเรียงของอาร์เมเจอร์	16
รูป 2.11 ความดันที่ป้อนให้กับนีโอซีเซลในแต่ละด้าน	16
รูป 2.12 การเคลื่อนของแปลิปเปอร์	17
รูป 2.13 การถอยกลับของแปลิปเปอร์	17
รูป 2.14 แสดงภาพการซ้อนของสปูล	18
รูป 2.15 dead band ของวาล์ว	18
รูป 2.16 สัญญาณอินพุตเป็นสัดส่วน โดยตรงกับอัตราการไหล	18
รูป 2.17 เมื่อการซ้อนเป็นศูนย์ขอบของสปูลจะพอดีกับพอร์ต	19
รูป 2.18 การเปลี่ยนแปลงเกณฑ์ไหลรอบตำแหน่งศูนย์	19
รูป 2.19 การปิดไม่สนิทของสปูล	19
รูป 2.20 การป้องกันการไหลที่ตำแหน่งศูนย์	19
รูป 2.21 ลักษณะการซ้อนของสปูล	19
รูป 2.22 สปูลอยู่ในตำแหน่งศูนย์	20
รูป 2.23 สปูลเลื่อนให้พอร์ต A ต่อถึงกับพอร์ต P และพอร์ต T ถูกปิด	20
รูป 2.24 คุณสมบัติเกินความดัน	20
รูป 2.25 ความแตกต่างของอัตราการไหลของวาล์วด้านเอาต์พุต	21
รูป 2.26 ความผิดพลาดกึ่งหนึ่งของวาล์ว	21
รูป 2.27 ความแตกต่างระหว่างการไหลในเชิงอุดมคติ	21
รูป 2.28 การรวมตัวกันระหว่างวาล์วควบคุมการไหล	22

รูป 3.1 ตำแหน่งการติดตั้งของกระบอกสูบและวาล์วควบคุมทิศทางนั้น ไม่อนุญาตให้นำไป 23 ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 3.2	แสดงแรงที่จุดต่างๆ	25
รูป 3.3	การต่อของ cotter, socket และสลัก	25
รูป 4.1	โรตารีเอน โค้ดเดอร์	28
รูป 4.2	แสดงขนาดของโรตารีเอน โค้ดเดอร์	28
รูป 4.3	สัญญาณเอาต์พุทเมื่อหมุน โรตารีเอน โค้ดเดอร์ตามเข็มนาฬิกา	29
รูป 4.4	สัญญาณเอาต์พุทเมื่อหมุน โรตารีเอน โค้ดเดอร์ทวนเข็มนาฬิกา	29
รูป 4.5	การติดตั้งโรตารีเอน โค้ดเดอร์เข้ากับข้อต่อทั้งสองของแขนกล	29
รูป 4.6	เซอร์โวแอมปริไฟเออร์	31
รูป 4.7	แสดงวงจร Digital to Analog ที่ใช้ในโครงการซึ่งใช้ IC DAC0808 2 ตัว	32
รูป 4.8	แสดงวงจร D/A ที่สร้างขึ้นในโครงการ	32
รูป 4.9	วงจรรวม	32
รูป 4.10	วงจรขยาย มีเกน=2	33
รูป 4.11	การ์ดอินพุทเอาต์พุท	33
รูป 5.1	ผลการตอบสนองของกระบวนการที่ใช้อุปกรณ์ควบคุมแบบต่างๆ	35
รูป 5.2	การปรับผลการตอบสนองของกระบวนการให้มีอัตราการลดทอนเป็น $\frac{1}{4}$	36
รูป 5.3	การปรับผลการตอบสนองของกระบวนการให้มีพื้นที่(การแกว่ง)ต่ำสุด	37
รูป 5.4	ระบบควบคุมกระบวนการ	38
รูป 5.5	ผลตอบสนองของกระบวนการ	38
รูป 5.6	ผลการปรับค่า $K_p$ ของอุปกรณ์ควบคุมแบบ P	41
รูป 5.7	ผลการปรับค่า $T_i$ ของอุปกรณ์ควบคุมแบบ I	42
รูป 5.8	ผลการปรับค่า $T_d$ ของอุปกรณ์ควบคุมแบบ PID	42
รูป 6.1	แสดงภาพประกอบสำเร็จของโครงการ	43
รูป 6.2	Diagram การทำงานของระบบแขนกล	43
รูป 6.3	Diagram การทำงานของการ Sampling	45
รูป 6.4	ผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเร็วกับ โวลต์อินพุต	46
รูป 6.5	ผลการทดลองที่ 2	47
รูป 6.6	ผลการทดลองที่ 3	47
รูป 6.7	ผลการทดลองที่ 3	48
รูป 6.8	ผลการทดลองที่ 4	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มา

หุ่นยนต์อุตสาหกรรมหรือ เครื่องจักรอัตโนมัติ (automatic machine) หมายถึง เครื่องจักรกลที่สามารถตั้งโปรแกรมได้หลาย ๆ ครั้ง รวมทั้งสามารถปฏิบัติงานได้ในหลาย ๆ หน้าที่ โดยหุ่นยนต์ถูกได้รับการออกแบบมาเพื่อให้หยิบ จับ เคลื่อนย้าย วัตถุอุปกรณ์ เครื่องมือหรือ เครื่องใช้พิเศษต่าง ๆ โดยอาศัยการควบคุมโปรแกรมการเคลื่อนที่ของมันให้ทำงานได้หลายอย่างตามต้องการ

จะเห็นได้ว่า มันสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงการทำงาน ได้ถ้าหากเราเปลี่ยนแปลงโปรแกรมใหม่ นอกจากนั้นการที่หุ่นยนต์สามารถปฏิบัติงานได้หลายหน้าที่ ก็หมายความว่า มันสามารถทำงานได้มากกว่าหนึ่งงาน ดังนั้นเราจึงอาจกล่าวได้ว่าหุ่นยนต์นั้นสามารถทำงานได้หลายหน้าที่โดยจะมีความสอดคล้องกับความสามารถในการตั้งโปรแกรมได้หลาย ๆ ครั้งนั่นเอง

### 1.2 ระบบการขับเคลื่อน (Drive System)

การควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์หรือเครื่องจักรกลอัตโนมัติ นั้นเกี่ยวข้องกับควบคุมการทำงานของระบบขับเคลื่อน ซึ่งระบบขับเคลื่อนส่วนใหญ่แล้วจะขึ้นอยู่กับการออกแบบ เช่น แขนกลของหุ่นยนต์อาจถูกออกแบบมาเพื่อให้เคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งโดยยกวัตถุหนัก ๆ ดังนั้น หุ่นยนต์ประเภทดังกล่าวจะมีระบบขับเคลื่อนด้วยไฮดรอลิก ในขณะที่หุ่นยนต์บางชนิดถูกออกแบบมาให้การเชื่อมในทิศทางที่ต่อเนื่องก็จะมีระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า

#### 1.2.1 ระบบขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า (Electric Drive System)

เหตุผลที่มีการนิยมใช้ระบบขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้านั้น สาเหตุหนึ่งก็เนื่องมาจากการทำงานที่ค่อนข้างเงียบและส่วนใหญ่มีขนาดเล็ก และขณะนี้มีการพัฒนามอเตอร์รูปแบบใหม่ๆออกมา ทำให้ความก้าวหน้าของหุ่นยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยระบบนี้มีสมรรถนะเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนั้นระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ายังมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับระบบอื่น อย่างไรก็ตามมอเตอร์ไฟฟ้าส่วนใหญ่จะใช้กับหุ่นยนต์ขนาดเล็กที่เรียกว่า หุ่นยนต์ฝึกหัด (Training Robot) ซึ่งหุ่นยนต์ดังกล่าวจะทำงานได้อย่างแม่นยำและมักใช้ในอุตสาหกรรมเบาหรือใช้งานในห้องทดลอง

#### 1.2.2 ระบบขับเคลื่อนด้วยไฮดรอลิกส์ (Hydraulics drive systems)

หุ่นยนต์ซึ่งใช้พลังงานไฮดรอลิกนั้นมักใช้ในการควบคุมหรือการทำงานที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมหนัก หุ่นยนต์เหล่านี้จะถูกออกแบบมาให้ใช้ประโยชน์จากความสามารถใช้พลังงานของของไหลหรือน้ำมันได้ นอกจากนั้นอุปกรณ์ทำงาน (actuator) ก็มีทั้งแบบที่เคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงและเชิงมุม จึงเป็นเหตุผลให้ถูกนำมาใช้ในหุ่นยนต์อุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากหุ่นยนต์ที่ใช้พลังงานไฮดรอลิกจะต้องอาศัยพลังงานความดันของน้ำมันจึงจำเป็นต้องมีชุดต้นกำลังที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

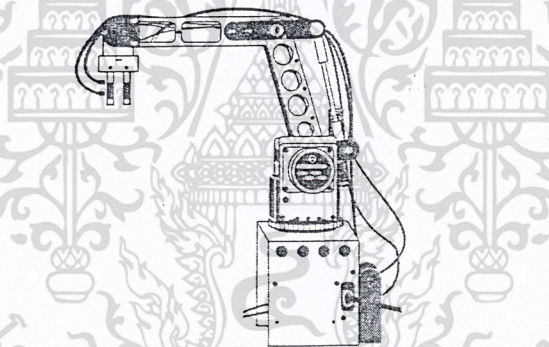
### 1.2.1 ระบบขับเคลื่อนด้วยนิวแมติกส์ (Pneumatic Drive System)

หุ่นยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยระบบนิวแมติกส์นั้นค่อนข้างจะได้รับความนิยมมากกว่าหุ่นยนต์ที่ใช้ไฮดรอลิก ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากระบบนิวแมติกส์มีค่าใช้จ่ายของระบบที่ต่ำกว่าระบบไฮดรอลิก ดังนั้นจึงพบว่า หุ่นยนต์ประเภทนี้ถูกนำไปใช้ในงานหลายประเภท แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากการขับเคลื่อนของของไหลในระบบนิวแมติกส์นั้นใช้ลมอัด แรงที่ได้จึงต่ำกว่าระบบที่ขับเคลื่อนด้วยไฮดรอลิก รวมทั้งลมอัดในระบบนิวแมติกส์สามารถยุบตัวได้ (Compressible) ส่งผลให้ความแม่นยำและความถูกต้องน้อยกว่าระบบไฮดรอลิก นอกจากนี้การควบคุมโดยส่วนใหญ่จะอาศัยการทำงานแบบจุดต่อจุด

### 1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.3.1 ออกแบบและสร้างแขนกลควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อประยุกต์ใช้ในการงานการผลิตแบบอัตโนมัติซึ่งใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรมปัจจุบัน

1.3.2 สร้างชุดในการควบคุมแขนกลซึ่งมีดังนี้ Digital to Analoy Interface Card, Input Output Card รวมถึงโปรแกรมที่ใช้ในการสั่งงานให้แขนกลเคลื่อนที่ได้ตำแหน่งที่ต้องการ โดยใช้หลักในการควบคุมแบบ PID



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างแขนกลที่ขับเคลื่อนด้วยไฮดรอลิก

### 1.4 ข้อดีของระบบไฮดรอลิก

ระบบไฮดรอลิกมีข้อได้เปรียบหลายประการดังนี้

1. ง่ายต่อการควบคุม โดยปกติแล้วการส่งกำลังโดยกลไกจะมีความยุ่งยากเกี่ยวกับโครงสร้างที่จะควบคุมให้เกิดการเคลื่อนที่ทำงานทั้งแบบหมุนหรือในแนวตรง แต่ระบบไฮดรอลิกทำงานได้ง่ายและดีทั้งในแนวตรงและหมุน เพียงแต่ใช้กำลังงานจากของไหลไปเปลี่ยนเป็นกลลังงานกลเพื่อทำงานที่ต้องการแรงผลักดันหรือแรงบิดมาก ๆ ได้
2. การปรับเปลี่ยนความเร็วของลูกสูบหรือมอเตอร์ไฮดรอลิกกระทำได้ง่าย สามารถปรับเปลี่ยนความเร็วได้ทุกระดับ โดยปรับที่วาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำมัน ส่วนมอเตอร์ไฟฟ้าหรือเครื่องยนต์นั้นควรทำงานที่ความเร็วคงที่มากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. แรงงที่ ระบบไฮดรอลิกสามารถจะให้แรงที่คงที่ได้โดยไม่จำกัดความเร็ว และยังให้ประสิทธิภาพสูง ถึงแม้ในระบบจะมีการรั่วไหลแต่ความดันก็ยังคงที่

5. ตั้งขนาดของแรงที่ต้องการใช้งานได้ เพราะปริมาณน้ำมันที่ความดันส่วนเกินจะไหลออกไปทางวาล์วจำกัดความดันหมด

6. การทำงานกลับทิศไปมา กระบอกสูบและมอเตอร์ไฮดรอลิกสามารถทำงานกลับทิศได้ไปมาโดยไม่ต้องรอให้หยุด โดยอาศัยวาล์วควบคุมทิศทางการไหล ส่วนปัญหาการโอเวอร์โหลดขณะทำงานกลับทิศจะไม่มี เช่น ก้านสูบเลื่อนออกจนสุดระยะชักแล้ว แต่ปั๊มยังคงส่งอัตราการไหลไปในระบบ ความดันก็จะเพิ่มขึ้นแต่จะถูกจำกัดโดยวาล์วปลดความดัน

7. ควบคุมการทำงานได้เที่ยงตรง แม่นยำ และถูกต้อง เพราะมีวาล์วที่จะคอยควบคุมทั้งความเร็วและความดัน

8. กระทัดรัด กินเนื้อที่ในการติดตั้งและมีน้ำหนักน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดกำลังเดียวกัน เช่น ปั๊มหรือมอเตอร์ไฮดรอลิกขนาด 9 แรงม้า จะมีน้ำหนักเพียง 5 กิโลกรัมเท่านั้น ในขณะที่มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 10 แรงม้าจะหนักกว่าหลายสิบกิโลกรัม และในบริเวณที่ไม่เหมาะสมก็สามารถติดตั้งได้เพียงแต่ให้มีที่วางท่อเท่านั้น

9. สามารถหยุดชะงัก เนื่องจากรับโอเวอร์โหลดได้นาน เมื่อโหลดลดลงก็ทำงานต่อไปได้โดยทันที ไม่มีปัญหาเนื่องจากพิวส์ขาดเหมือนมอเตอร์ไฟฟ้า เมื่อรับโอเวอร์โหลดนาน ๆ ระบบก็ยังคงทำงานอยู่ต่อไปได้ เพียงแต่ความดันน้ำมันส่วนเกินจะไหลออกไปทางวาล์วจำกัดความดัน

10. ปลอดภัย ระบบไฮดรอลิกจะมีความปลอดภัยสูง แม้ว่าจะรับภาระโหลดนาน ๆ ไม่มีปัญหาเนื่องจากไฟฟ้าช็อตเหมือนระบบไฟฟ้า จึงทำให้เป็นที่สนใจและนำไปใช้ในโรงงานได้ดีกว่าระบบอื่น ๆ

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

โครงการนี้มีประโยชน์ในด้านการรองรับความต้องการของโรงงานอุตสาหกรรม ที่ต้องการระบบที่ทำงานได้อย่างต่อเนื่อง รอบการทำงานคงที่และคุณภาพของผลคงที่ ทำให้อุตสาหกรรมนั้น ๆ สามารถวางแผนการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ อันจะส่งผลให้มีผลกำไรมากขึ้น ส่วนผลพลอยได้ของโครงการนี้ คือสามารถนำมาเป็นอุปกรณ์ในการศึกษาของวิชา Hydraulic และ Robotic เพื่อให้มีความรู้เบื้องต้นในงานด้านควบคุม ซึ่งเป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรมในปัจจุบัน

### 1.6 วิธีการดำเนินงาน

โครงการนี้เริ่มด้วยการออกแบบแกนกลที่ต้องการใช้งานว่าต้องการขนาดและพื้นที่การทำงานของแกนกลอย่างไร ซึ่งจะกล่าวถึงวิธีในการออกแบบในบทที่ 3 จากนั้นจึงศึกษาอุปกรณ์ที่ต้องนำมาใช้ในโครงการ ซึ่งแบ่งออกเป็นอุปกรณ์ทางไฮดรอลิก เช่น เซอร์โววาล์ว, ปั๊ม, วาล์วลดความดัน เป็นต้น และอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุม เช่น การ์ดอินเทอร์เฟซ D/A เป็นต้น โดยจะกล่าวในบทที่ 2 และบทที่ 4 ตามลำดับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นจึงเป็นการใช้โปรแกรมในการควบคุม ซึ่งในโครงการนี้ใช้โปรแกรม C++ ในการสั่งงานต่อไปยังอุปกรณ์ควบคุม โดยในบทที่ 5 จะกล่าวถึงการควบคุมด้วยวิธี PID ซึ่งเป็นวิธีการควบคุมที่ใช้ในโครงการ สำหรับบทที่ 6 เป็นการอธิบายหลักการทำงานของระบบแขนกลและแสดงผลที่ได้จากการสั่งงานเทียบกับคำสั่ง ซึ่งจะรู้ถึงความแน่นอนของตำแหน่งแขนกลว่ามีตำแหน่งถูกต้องหรือไม่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

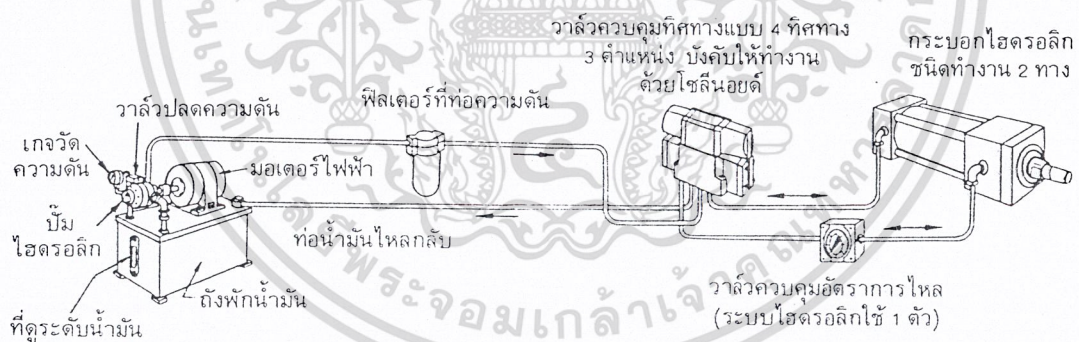
## บทที่ 2

# ทฤษฎีพื้นฐานของไฮดรอลิก

### 2.1 ระบบไฮดรอลิก

คำว่า hydraulic มาจากคำในภาษากรีก 2 คำ คือ hydro หมายถึงน้ำ และ aulis ซึ่งหมายถึงท่อ (pipe) เดิมคำว่า hydraulic จึงหมายถึงเฉพาะการไหลของน้ำในท่อเท่านั้น แต่ปัจจุบันคำนี้หมายถึงการไหลของของเหลวทุกชนิดที่ใช้ในระบบเพื่อเป็นตัวกลางการถ่ายทอดกำลังงานในการเปลี่ยนแปลงกำลังงานของไหลเป็นกำลังงานกล คือ ทำให้กระบอกสูบไฮดรอลิกและมอเตอร์ไฮดรอลิกทำงาน ตัวอย่างงาน เช่น ระบบเบรกในรถยนต์ แม่แรงไฮดรอลิก เครื่องอัด เกียร์อัตโนมัติ เครื่อง กว้าน รถแทรกเตอร์ และเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ระบบไฮดรอลิกจะต้องมีอุปกรณ์พื้นฐานในการทำงานดังนี้

1. อุปกรณ์ต้นกำลังไฮดรอลิก (primary component)
2. อุปกรณ์เก็บและปรับปรุงคุณภาพน้ำมันไฮดรอลิก (storage and treatment component)
3. อุปกรณ์สร้างการไหล (transferring component)
4. อุปกรณ์ควบคุมการทำงาน (controlling component)
5. อุปกรณ์การทำงาน (actuator or working component)
6. อุปกรณ์ในระบบท่อทาง (piping system)



รูปที่ 2.1 อุปกรณ์พื้นฐานในการทำงานของระบบไฮดรอลิก

2.1.1 อุปกรณ์ต้นกำลังไฮดรอลิก ทำหน้าที่เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนปั๊มน้ำมันไฮดรอลิกเพื่อส่งจ่ายให้แก่ระบบไฮดรอลิก ประกอบด้วยเครื่องยนต์หรือมอเตอร์ไฟฟ้า

2.1.2 อุปกรณ์เก็บและปรับปรุงคุณภาพน้ำมันไฮดรอลิก ทำหน้าที่เป็นที่พักของน้ำมันขจัดสิ่งสกปรก ขจัดฟองอากาศ และระบายความร้อนของน้ำมันไฮดรอลิก ประกอบด้วยถังพักน้ำมันไฮดรอลิก ไล์กรองน้ำมันไฮดรอลิก และอุปกรณ์ประกอบอื่น ๆ ที่ใช้กับถังพักน้ำมัน

2.1.3 อุปกรณ์สร้างการไหล ทำหน้าที่สร้างอัตราการไหล ประกอบด้วยปั๊มไฮดรอลิก ชนิดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 อุปกรณ์ควบคุมการทำงาน หมายถึง วาล์วควบคุมชนิดต่าง ๆ ในระบบไฮดรอลิก เช่น วาล์วควบคุมทิศทางการไหลใช้ควบคุมทิศทางเคลื่อนที่ของก้านสูบ วาล์วควบคุมอัตราการไหลใช้จำกัดปริมาณน้ำมันที่เข้าสู่ลูกสูบเพื่อควบคุมความเร็วของก้านสูบ วาล์วควบคุมความดันใช้ควบคุมความดันในระบบ

2.1.5 อุปกรณ์การทำงาน ทำหน้าที่เปลี่ยนกำลังงานของไหลให้เป็นกำลังงานกล เช่น กระบอกลูกสูบไฮดรอลิกหรือมอเตอร์ไฮดรอลิก

2.1.6 อุปกรณ์ในระบบท่อทาง ทำหน้าที่เป็นท่อทางการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกในระบบ ประกอบด้วยเป๊ป (pipe) ท่อ (tube) สายน้ำมันไฮดรอลิก (hoses) ข้องอ (Bending) และข้อต่อชนิดต่าง ๆ (fittings)

## 2.2 การใช้งานระบบไฮดรอลิก

ขอบข่ายงานต่าง ๆ ที่นำเอาระบบไฮดรอลิกไปใช้งานนั้น แบ่งออกได้เป็น 5 ส่วน คือ

1. ระบบไฮดรอลิกในโรงงานอุตสาหกรรม (industrial hydraulics)
2. ระบบไฮดรอลิกในอุตสาหกรรมเหล็กกล้า งานวิศวกรรมโยธา และสถานีกำเนิดไฟฟ้า (hydraulics in steelworks, civil engineering and generating stations)
3. ระบบไฮดรอลิกในยานยนต์อุตสาหกรรม (mobile machinery hydraulics)
4. ระบบไฮดรอลิกในเรือเดินทะเล (hydraulics for marine applications)
5. ระบบไฮดรอลิกในงานเทคนิคเฉพาะอย่าง (hydraulics in special technical applications)

1. ระบบไฮดรอลิกในโรงงานอุตสาหกรรม ในงานอุตสาหกรรมได้มีการนำระบบไฮดรอลิกไปใช้ในเครื่องมือต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น เครื่องฉีดพลาสติก เครื่องฉีดอะลูมิเนียม แทนอัดขึ้นงาน เครื่องปั๊มและตัดขึ้นงาน เครื่องพับและเครื่องตัดขึ้นงาน เครื่องประกอบชิ้นรูปขึ้นงาน เครื่องจักรขนาดใหญ่ เครื่องกลึงและเจียรระโน

2. ระบบไฮดรอลิกในอุตสาหกรรมเหล็กกล้า ในปัจจุบันงานอุตสาหกรรมเหล็กกล้าส่วนใหญ่จะต้องมีการใช้งานอุปกรณ์ไฮดรอลิก ตัวอย่างเช่น ใช้กับแท่นเลื่อน แขนโยน ฐานปั๊มและส่งเครื่องปรับขนาดลูกกลิ้ง อุปกรณ์แยกและส่ง อุปกรณ์ควบคุมท่อหล่อเย็น เป็นต้น

3. ระบบไฮดรอลิกในงานวิศวกรรมโยธา ตัวอย่างงานที่ใช้ระบบนี้ เช่น ระบบปิด-เปิดประตูกันน้ำ เขื่อนกันน้ำ การควบคุมการปิด-เปิดช่องทางเดินเรือ การควบคุมการปิด-เปิดสะพาน

4. ระบบไฮดรอลิกในยานยนต์อุตสาหกรรม ตัวอย่างของการใช้ระบบไฮดรอลิกที่ใช้ในยานยนต์อุตสาหกรรม เช่น รถแทรกเตอร์ รถแทรกเตอร์ ปั่นจั่น รถยก รถขุด เครน รถกวาด รถตัด เครื่องจักรกลการเกษตร รถกระเช้า รถขนย้ายวัสดุ และเครื่องจักรที่ใช้ในงานก่อสร้างอื่น ๆ

5. ระบบไฮดรอลิกในเรือเดินทะเล เช่น ระบบนำร่องอัตโนมัติ ระบบเครื่องหางเสือเรือทั้งแบบธรรมดาและอัตโนมัติ การควบคุมการปล่อยยวน การควบคุมระบบระบายน้ำใต้ท้องเรือ เป็นต้น

6. ระบบไฮดรอลิกในงานเฉพาะอย่าง งานที่นำเอาระบบไฮดรอลิกไปใช้นั้น ตัวอย่างเช่น กล้องเทเลสโคป ระบบสื่อสารทางอากาศ ทู่นเก็บข้อมูลด้านสมุทรศาสตร์และอุตุนิยมศาสตร์ในทะเล เครื่องขุดเจาะน้ำมันในทะเล เครื่องเจาะสำรวจแหล่งแร่ เครื่องมือสำรวจชั้นดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

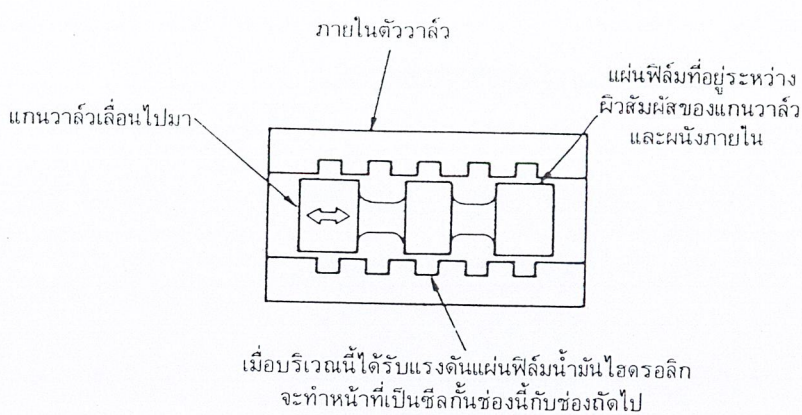
## 2.3 น้ำมันไฮดรอลิก

น้ำมันไฮดรอลิกเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งในระบบไฮดรอลิก เพราะถ้าปราศจากน้ำมันไฮดรอลิก ระบบก็ไม่สามารถทำงานได้ หรือถ้าเลือกใช้น้ำมันไฮดรอลิกผิดประเภท ไม่เหมาะสมกับเครื่องจักรตามที่บริษัทผู้ผลิตได้กำหนดไว้ เครื่องจักรก็จะทำงานได้ไม่เต็มที่ หรืออาจจะขัดข้องไปทั้งระบบ เนื่องจากเครื่องจักรต่าง ๆ ที่ใช้ระบบไฮดรอลิกมีลักษณะของการใช้แรงไม่เหมือนกัน และระยะเบียดของชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในเครื่องจักรไม่เท่ากันรวมทั้งอุณหภูมิในการทำงานของเครื่องจักรแต่ละชนิดด้วย ดังนั้น การเลือกใช้น้ำมันไฮดรอลิกแต่ละชนิดจะต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะงานตามที่บริษัทผู้ผลิตได้กำหนดไว้ ถึงแม้ว่าเราจะเลือกใช้ชนิดของน้ำมันไฮดรอลิกได้อย่างถูกต้องแล้วก็ตาม ในขณะที่ใช้งานก็ยังต้องดูแลบำรุงรักษาน้ำมันไฮดรอลิกให้อยู่ในสภาพดี คือ สะอาด มีอุณหภูมิพอเหมาะ และเปลี่ยนใหม่เมื่อถึงอายุการใช้งาน รวมทั้งควรตรวจสอบให้มึ้น้ำมันไฮดรอลิกอยู่ในระดับที่พอเพียงสำหรับการใช้งานในระบบอย่างสม่ำเสมอ

### 2.3.1 หน้าที่ของน้ำมันไฮดรอลิก (Functions of hydraulic fluids)

หน้าที่หลักของน้ำมันไฮดรอลิกมี 4 ประการคือ

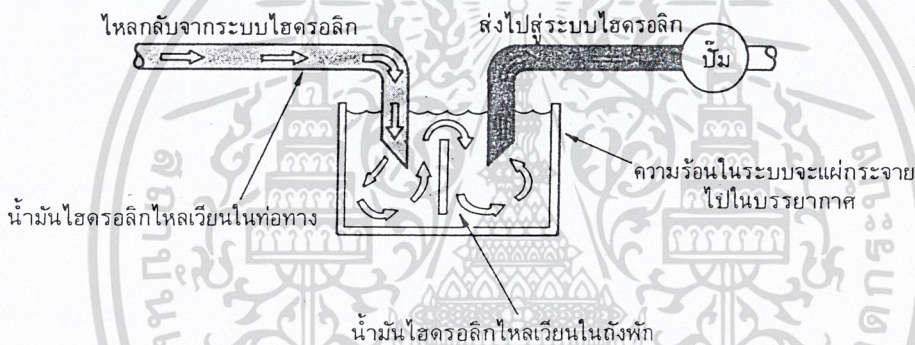
- 1 การส่งผ่านกำลังงาน (power transmission) น้ำมันไฮดรอลิกมีหน้าที่เป็นตัวกลางในการถ่ายทอดกำลังงานจากจุดหนึ่ง ไปสู่อีกจุดหนึ่งในระบบเพื่อเปลี่ยนแปลงกำลังงานของไหลให้เป็นกำลังงานกล ซึ่งถ้าจะให้เป็น ไปอย่างมีประสิทธิภาพแล้ว น้ำมันไฮดรอลิกที่ไหลในท่อทางหรือไหลผ่านวาล์วควบคุมต่าง ๆ จะต้องไหลไปได้อย่างราบรื่น แต่ถ้าเกิดความต้านทานการไหลมาก ๆ ก็จะทำให้กำลังงานสูญเสียไป และน้ำมันไฮดรอลิกจะต้องไม่ขุ่นตัวตามความดันในขณะที่ทำงาน เช่น เมื่อปั๊มทำงานดูดอัดเพื่อส่งน้ำมันไปยังท่อทาง วาล์วเคลื่อนทำงาน และในขณะที่กระบอกสูบหรือมอเตอร์ไฮดรอลิกกำลังทำงานขับโหลด
- 2 การหล่อลื่น (lubrication) น้ำมันไฮดรอลิกจะทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่นและลดแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบ เช่น ชิ้นส่วนของปั๊ม มอเตอร์ไฮดรอลิก ลูกสูบ กระบอกสูบ แกนวาล์ว และส่วนประกอบต่าง ๆ ที่มีการเคลื่อนที่ โดยที่น้ำมันไฮดรอลิกจะมีสภาพเป็นแผ่นฟิล์มบาง ๆ กั้นระหว่างผิวสัมผัสของชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนที่เสียดสีกันทั้งในขณะที่ระบบทำงาน และหยุดนิ่งดังรูปที่ 2.2 ฟิล์มน้ำมันไฮดรอลิกจะช่วยในการหล่อลื่นเพื่อลดการเสียดสีของผิวสัมผัสระหว่างแกนวาล์วกับผนังภายในตัววาล์ว แผ่นฟิล์มดังกล่าวจะต้องมีความหนืดพอเหมาะที่จะแทรกซึมเข้าไปในรูเล็ก ๆ และรอยต่อของชิ้นส่วนภายในอุปกรณ์ และสามารถรับน้ำหนักของวัตถุที่กดทับหรือรับแรงกดอยู่ได้ ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวนี้เรียกว่า ความแข็งแรงของฟิล์ม (film strength) นอกจากนี้ น้ำมันไฮดรอลิกยังควรมีคุณสมบัติในการคืนไหลได้ดีด้วย กล่าวคือ ในขณะที่น้ำมันไฮดรอลิกเป็นฟิล์มยึดติดกับชิ้นส่วนใดก็สามารถจะคืนไหลไปกับชิ้นส่วนนั้น ๆ และช่วยให้เคลื่อนไปได้อย่างคล่องตัวด้วย คุณสมบัติข้อนี้เรียกว่า ความคืน (lubricity)



รูปที่ 2.2 แสดงน้ำมันไฮดรอลิกช่วยหล่อลื่นและเป็นซีลของชิ้นงานการทำงาน

3 การซีล (sealing) น้ำมันไฮดรอลิกจะทำหน้าที่เป็นซีลด้วยเพื่อให้มีการรั่วซึมเกิดขึ้นน้อยที่สุดภายในชิ้นส่วนของอุปกรณ์ในระบบไฮดรอลิกเมื่อมีความดันเกิดขึ้น การซีลนี้จะขึ้นอยู่กับความหนืดของน้ำมันไฮดรอลิกแต่ละชนิด

4 การระบายความร้อน (cooling) การไหลเวียนของน้ำมันไฮดรอลิกในระบบขณะการทำงานจะช่วยถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ต่าง ๆ อันเนื่องมาจากการสูญเสียกำลังงานในระบบความร้อนนี้ก็จะถูกพาไปโดยน้ำมันและไหลลงสู่ถังพัก แล้วแผ่กระจายความร้อนผ่านผนังของถังพัก



รูปที่ 2.3 แสดงการไหลหมุนเวียนของน้ำมันไฮดรอลิกช่วยในการระบายความร้อนในระบบปั๊มไฮดรอลิก

### 2.4 ปั๊มไฮดรอลิก

ปั๊มไฮดรอลิกทำหน้าที่เป็นตัวเปลี่ยนพลังงานกลให้เป็นพลังงานของไหลภายใต้ความดัน กล่าวคือ เมื่อป้อนกำลังกลเข้าไปที่เพลาชับ (rotating shaft) ของปั๊มให้ทำงาน ปั๊มก็จะเปลี่ยนพลังงานกลนั้นให้เป็นพลังงานจลน์ในของไหล น้ำมันไฮดรอลิกก็จะถูกดูดจากถังพักแล้วส่งออกไปตามท่อทางในระบบเพื่อใช้งานได้ การไหลของน้ำมันจะต้องมีพลังงานศักย์มากเพียงพอที่จะผ่านแรงต้านทานของระบบ แรงต้านทานการไหลในระบบนี้เองที่ทำให้เกิดความดันในระบบไฮดรอลิกขึ้น ซึ่งจะถูกนำไปใช้งาน ณ จุดต่าง ๆ ของระบบ ในโรงงานอุตสาหกรรมกำลังงานกลที่ใช้ขับเคลื่อนส่วนมากได้จากมอเตอร์ไฟฟ้า แต่ถ้าไม่ใช่ในโรงงานอุตสาหกรรมหรือในที่ที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าก็จะใช้เครื่องยนต์เป็นตัวขับ

#### 2.4.1 ประเภทของปั๊ม (Pump classification)

การแบ่งประเภทของปั๊มจะพิจารณาจากลักษณะ โครงสร้าง และหลักการขึ้นพื้นฐานในการทำงาน ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. **ปั๊มประเภทดูดเหวี่ยง (non-positive displacement pump)** คือ ปั๊มที่ทำงานโดยอาศัยแรงเหวี่ยงของใบพัด แรงดันที่เกิดขึ้นภายในตัวปั๊มขึ้นอยู่กับความเร็วของปั๊ม

2. **ปั๊มประเภทดูดอัด (positive displacement pump)** เป็นปั๊มที่มีหลักการทำงานในแบบที่เรียกว่า ไฮโดรสแตติก (Hydrostatic) ได้แก่ ปั๊มแบบฟันเฟือง แบบสกรู แบบเวน และแบบลูกสูบ ปั๊มแบบดูดอัดนี้ โครงสร้างภายในที่ทำงานมีการซีลแบบกลไกซึ่งเป็นชนิดโลหะสัมผัสซึ่งกันและกัน กันไม่ให้ช่องทางเข้าและทางออกต่อกันซึ่งช่วยลดปริมาณการรั่วซึมภายในได้ดี จึงเหมาะสำหรับใช้ในความดันสูง ๆ แม้ว่าอัตราการความดันภายในระบบไฮดรอลิกจะขึ้นหรือลงก็ไม่มีผลกระทบต่อการทำงานในทุกๆระยะชักหรือทุกรอบของการหมุนปั๊ม

เมื่อปั๊มประเภทดูดอัดทำงานจะทำให้เกิดสูญญากาศขึ้นภายในท่อดูดของปั๊ม ทำให้ความดันบรรยากาศปกติในถังพักช่วยดันน้ำมันไปสู่อุโมงค์ดูดและไหลเข้าปั๊ม จากนั้นน้ำมันก็จะถูกอัดให้มีความดันสูงจนสามารถส่งออกไปสู่ระบบได้ จะให้ความดันสูงกว่าปั๊มแบบดูดเหวี่ยงและสามารถส่งน้ำมันออกไปได้ไกลกว่าหรือส่งขึ้นที่สูง ๆ กว่าได้และอัตราการสูญเสียกำลังงานก็น้อยกว่า อัตราการไหลที่ส่งออกของปั๊มแบบดูดอัด จะขึ้นอยู่กับปริมาตรความจุของการดูด (capacity of displacement) และความดันที่สามารถกระทำได้ ปกติที่สเป็คของปั๊มแต่ละตัวจะบอกอัตราส่งไว้ว่า ปั๊มตัวนี้สามารถส่งน้ำมันได้เป็นเกลลอนต่อนาทีที่ความเร็วรอบต่อนาที และกำหนดความดันสูงสุดในการทำงานของปั๊มตัวนี้ไว้ด้วย เช่น เกลลอนต่อนาทีที่ความเร็วรอบต่อนาที และกำหนดความดันสูงสุดในการทำงานของปั๊มตัวนี้ไว้ด้วย เช่น ส่งน้ำมันได้ 3 เกลลอนต่อนาทีที่ 1200รอบต่อนาที ความดันสูงสุดในการทำงาน 3000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ปั๊มประเภทดูดอัดยังแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ

1. **แบบปรับค่าอัตราการไหลไม่ได้ (fixed displacement)** เป็นปั๊มประเภทที่ไม่สามารถจะปรับโครงสร้างและส่วนประกอบของกลไกที่สร้างขึ้นในตัวปั๊มเพื่อเปลี่ยนแปลงปริมาตรความจุได้ ได้แก่ ปั๊มแบบเฟืองฟันนอก ปั๊มแบบเฟืองฟันใน และปั๊มแบบสกรู ส่วนปั๊มแบบเวนและปั๊มแบบลูกสูบจะมีทั้งแบบปรับค่าไม่ได้และปรับค่าได้

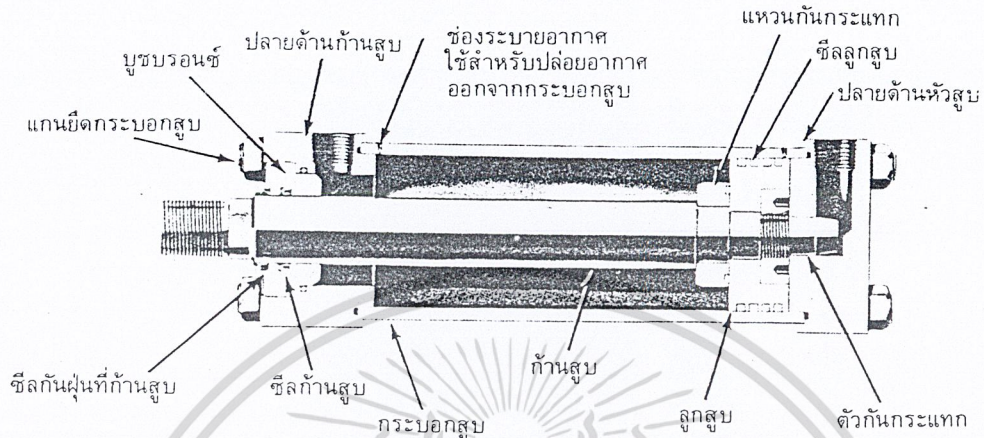
2. **แบบปรับค่าอัตราการไหลได้ (variable displacement)** เป็นปั๊มประเภทที่สามารถจะแก้ไขเพิ่มเติมและปรับส่วนประกอบของกลไกควบคุมที่สร้างขึ้นภายในตัวปั๊ม เพื่อเปลี่ยนแปลงปริมาตรความจุได้ ในกรณีที่ต้องการปรับค่าอัตราการไหลที่ส่งออกจากปั๊ม ปั๊มแบบนี้มีโครงสร้างซับซ้อนกว่าปั๊มแบบปรับค่าไม่ได้ จึงมีราคาแพงกว่าแต่ประสิทธิภาพภายในจะต่ำกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบจากทั้งระบบแล้ว ปั๊มแบบปรับค่าได้กลับมีประสิทธิภาพสูงกว่า ได้แก่ ปั๊มแบบเวนและปั๊มแบบลูกสูบชนิดปรับค่าได้

## 2.5 ระบายลูกสูบไฮดรอลิก (Hydraulic cylinder)

กระบอกสูบไฮดรอลิกมีหน้าที่รับน้ำมันไฮดรอลิกที่ส่งมาจากปั๊มและวาล์วควบคุมต่าง ๆ เพื่อเปลี่ยนกำลังงานไฮดรอลิกให้เป็นกำลังงานกล โดยการเปลี่ยนความดันและความเร็วของน้ำมันไฮดรอลิกในช่องทางให้เป็นเคลื่อนที่ของลูกสูบ เมื่อน้ำมันป้อนเข้าสู่กระบอกสูบทำให้เกิดงานขึ้นโดยอัตราการไหลของน้ำมันจะเป็นตัวกำหนดความเร็วของลูกสูบ กำลังงานกล (แรงม้า) ที่เกิดขึ้นกระบอกสูบโดยทั่ว ๆ ไป

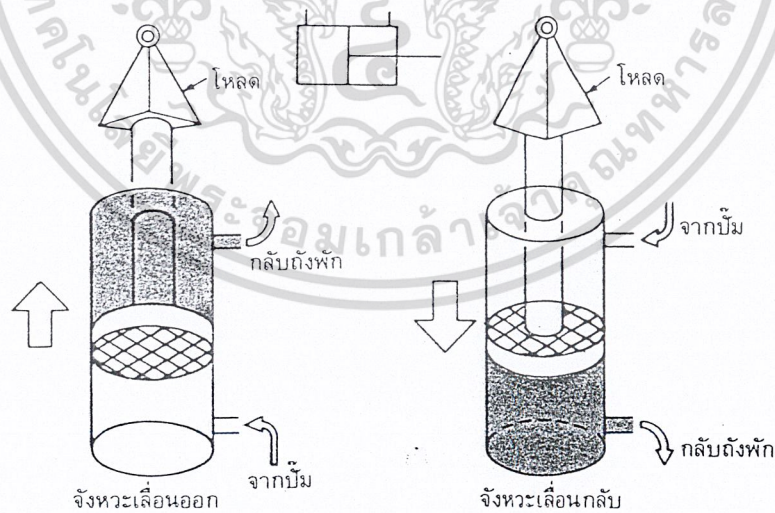
มี 2 ลักษณะคือ แบบทำงานสองทาง (double acting cylinder) และแบบทำงานทางเดียว (single acting cylinder)

2.3.1 กระบอกลูกสูบแบบทำงานสองทาง กระบอกลูกสูบแบบมาตรฐานส่วนใหญ่เป็นแบบทำงานได้สองทาง ตัวกระบอกลูกสูบทำจากท่อเหล็กชุบโครเมียม



รูปที่ 2.4 แสดงส่วนประกอบของกระบอกลูกสูบแบบทำงาน 2 ทาง

กระบอกลูกสูบแบบนี้สามารถทำงานได้ทั้ง 2 ด้าน ตัวกระบอกลูกสูบส่วนมากทำจากเหล็กกล้าแบบไม่มีตะเจ็บ โดยปิดทั้งด้านหัวและท้ายไม่ให้มีการรั่ว และมีซีลป้องกันรั่วที่ก้านสูบอีกชั้นหนึ่ง หรืออาจใช้เบร็งแบบลูกปืน ซึ่งสามารถซีลและรองรับก้านสูบให้เคลื่อนที่ได้ในแนวตรง โดยไม่เกิดแรงกระแทกที่ด้านใดด้านหนึ่ง ส่วนตัวก้านสูบอาจทำจากเหล็กกล้าหรือเหล็กหล่อที่มีความมันวาว ไม่มีรอยขีดข่วนและทนการเสียดสีได้ดี ซึ่งช่วยป้องกันไม่ให้ซีลสึกหรอเร็ว



รูปที่ 2.5 แสดงการทำงานของกระบอกลูกสูบแบบทำงาน 2 ทาง

เป็นลักษณะการทำงานของกระบอกลูกสูบชนิดทำงานสองทางแบบมาตรฐานทั่วไป เมื่อน้ำมันเข้าสู่กระบอกลูกสูบด้านหนึ่งจะดันลูกสูบให้เลื่อนไปอีกด้าน ในขณะที่เดียวกันน้ำมันที่ด้านนี้จะถูกลูกสูบดันกลับสู่ถังพักที่ความดันบรรยากาศหรือความดันต่ำ การทำงานเช่นนี้จะเกิดขึ้นสลับกันทั้ง 2 ด้าน ทำให้ลูกสูบเคลื่อนที่ไปมาได้อย่างต่อเนื่อง การทำงานเช่นนี้จะเกิดขึ้นสลับกันทั้ง 2 ด้าน ทำให้ลูกสูบเคลื่อนที่ไปมาได้อย่างต่อเนื่อง การทำงานเช่นนี้จะเกิดขึ้นสลับกันทั้ง 2 ด้าน ทำให้ลูกสูบเคลื่อนที่ไปมาได้อย่างต่อเนื่อง

สูบเลื่อนกลับไปกลับมา โดยมีวาล์วควบคุมทิศทางเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนทิศทางการไหลของน้ำมันที่ป้อนให้แก่กระบอกสูบ ส่วนความดันในกระบอกสูบที่เกิดขึ้นจนทำให้ลูกสูบเคลื่อนที่ทำงานได้ จะมีมากขึ้นอยู่กับโหลดที่กระทำอยู่ที่ปลายก้านสูบ

## 2.6 วาล์วควบคุมความดัน (Pressure control valve)

การควบคุมกำลังงานของไหลในระบบไฮดรอลิกให้ได้ผลนั้น เราจะต้องควบคุม 3 ส่วนนี้ให้ได้ คือ ทิศทาง ความดัน และอัตราการไหล แต่ละส่วนจะมีวาล์วเพื่อทำหน้าที่ควบคุมซึ่งจะแตกต่างกันโดยสิ้นเชิง เช่น การควบคุมทิศทางเพื่อให้กระบอกสูบเคลื่อนที่ออกและเข้า หรือให้มอเตอร์ไฮดรอลิกหมุนซ้ายหรือขวา การควบคุมความดันที่จะกล่าวถึงในหัวข้อนี้ จุดประสงค์เพื่อควบคุมระดับความดันของน้ำมันในระบบขณะทำงาน โดยใช้วาล์วควบคุมความดันแบบต่าง ๆ และการควบคุมอัตราการไหลเพื่อควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ทำงานของกระบอกสูบและมอเตอร์ไฮดรอลิกโดยใช้วาล์วควบคุมอัตราการไหล ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

เมื่อป้อนทำหน้าที่จ่ายน้ำมัน จะทำให้เกิดอัตราการไหลในอัตราหนึ่งเพื่อป้อนให้แก่กระบอกสูบหรือมอเตอร์ไฮดรอลิก และเมื่อน้ำมันถูกขวางการไหลด้วยอุปกรณ์ส่วนนี้ ความดันในระบบจะเกิดขึ้นเท่าที่โหลดต้องการทำงาน อย่างไรก็ตามถ้าไม่มีการควบคุมความดัน ป้อนอาจจ่ายน้ำมันในปริมาณสูงเกินไปจนเกิดความดันสูงมากเกินความต้องการ ซึ่งทำให้อุปกรณ์ต่าง ๆ เสียหายได้ แต่วาล์วควบคุมความดันในระบบไฮดรอลิกไม่ได้หมายความถึงการป้องกันความดันไม่ให้สูงเกินกำหนดเพียงอย่างเดียว ยังมีจุดประสงค์อื่น ๆ อีกในการควบคุมระดับความดันในระบบ คือ

1. เพื่อควบคุมความดันให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย (safety limiting of pressure) ระบบไฮดรอลิกที่ใช้ปั๊มแบบส่งอัตราการไหลคงที่ควรจะต้องติดตั้งวาล์วปลดความดันไว้ที่ใกล้ ๆ บริเวณท่อทางออกจากปั๊ม เพื่อจำกัดความดันสูงสุดของระบบและของปั๊มในกรณีที่เกิดโอเวอร์โหลด เช่น น้ำมันในท่อทางส่งออกถูกปิดกั้น หรือลูกสูบในกระบอกสูบหยุดนิ่งเมื่อเคลื่อนจนสุดระยะชัก แต่ปั๊มยังทำหน้าที่ส่งน้ำมันให้แก่ระบบตลอดเวลา ความดันในระบบก็จะสูงขึ้นเรื่อย ๆ อย่างรวดเร็ว ถ้าไม่มีวาล์วปลดความดันก็จะทำให้ท่อทางปั๊ม และอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบชำรุดเสียหายได้ ดังนั้นการจำกัดความดันด้วยวาล์วปลดความดันจึงช่วยป้องกันอันตรายได้ทั้งบุคคลและอุปกรณ์ในระบบ ถ้าระบบไฮดรอลิกไม่มีวาล์วปลดความดันทำหน้าที่นี้ ก็เปรียบเสมือนกับระบบไฟฟ้าที่ไม่มีเบรกเกอร์หรือคัตเอาต์นั่นเอง แต่สำหรับระบบไฮดรอลิกที่ใช้ปั๊มแบบปรับค่าปริมาตรหรืออัตราการไหลได้บางชนิด ซึ่งมีอุปกรณ์ชดเชยความดันภายในตัวปั๊ม เมื่อความดันในระบบสูงขึ้น ปั๊มจะปรับตัวเองให้จ่ายน้ำมันออกน้อยลง ไม่ต้องทำงานโอเวอร์โหลดสู้กับความดันในระบบ ก็อาจไม่ต้องใช้วาล์วปลดความดันก็ได้ เพราะอุปกรณ์ชดเชยความดันของปั๊มจะทำหน้าที่แทนได้

2. เพื่อกำหนดระดับการทำงาน (establishing a working level) ในบางระบบขณะทำงาน นอกจากต้องการจำกัดความดันทั้งหมดของวงจรที่จะเป็นอันตรายแล้ว ในบางส่วนของวงจรอาจต้องรักษาระดับความดันเฉพาะส่วนให้พอดีกับชิ้นงานหรือโหลดที่ต้องการทำงาน เช่น บางส่วนต้องการความดันต่ำลง ก็ต้องใช้วาล์วลดความดันประกอบเข้าไปในวงจรด้วย เพื่อทำหน้าที่ลดความดันที่มีอยู่ให้ต่ำลงเท่าที่ต้องการเอาไปใช้งานกับโหลด หรือให้อยู่ในระดับที่ต้องการในเฉพาะส่วนได้ หรือใช้วาล์วลดความดันในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิง ในเพื่อการศึกษาก็เท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นว่าเป็นประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การรักษาระดับความดันในวงจรย่อยให้มีค่าน้อยกว่าวงจรหลัก ไม่ว่าความดันในวงจรหลักจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร นอกจากนี้ยังควบคุมปริมาณแรงที่ได้จากกระบอกสูบ เพื่อป้องกันการเสียหายแก่ชิ้นงานที่เกิดจากการกระแทกขณะดันหรืออัดด้วยแรงที่มากเกินไป

3. เพื่อกำหนดระดับการทำงาน 2 ระดับหรือมากกว่า (establishing two working levels) ในบางระบบต้องการแรงอัดมากในขณะดันหรืออัดชิ้นงาน แต่ต้องการแรงดันน้อยขณะเคลื่อนที่ถูกลับหรือต้องการทำงานตามลำดับความดันในวงจรทำงาน 2 ส่วนหรือมากกว่า เพื่อตั้งให้วงจรสามารถทำงานได้ที่ความดันหลาย ๆ ความดัน ทั้งนี้ก็เพื่อต้องการประหยัดพลังงานสูง ทำให้ประหยัดค่าไฟฟ้าขณะทำงานได้ ก็ต้องใช้วาล์วลดลำดับเพื่อจัดลำดับการไหลของน้ำมันไปยังส่วนต่าง ๆ ของวงจรย่อยตามลำดับความดัน หลังจากการทำงานในวงจรหลักสิ้นสุดลง

4. เพื่อการปรับความดัน 2 ระดับในขณะเดียวกัน (two levels at the same time) สำหรับบางระบบอาจคิดตั้งวาล์วปลดความดันแบบไหลตเพื่อให้เกิดความดันสูงในส่วนหนึ่งของระบบ และคิดตั้งวาล์วปลดความดันเพื่อปรับให้ความดันต่ำในอีกส่วนหนึ่งได้ในเวลาเดียวกัน

5. เพื่อลดโหลดของปั๊ม (pump unloading) เมื่อปั๊มทำงานที่ความดันสูงตลอดเวลา ปั๊มจะต้องทำงานหนักทำให้สิ้นเปลืองกระแสไฟฟ้าที่ให้แก่มอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งเป็นตัวหมุนขับ ดังนั้นในบางระบบหลังจากก้านสูบดันและอัดชิ้นงานแล้วจำเป็นต้องค้างอยู่ในตำแหน่งนั้นก่อนสักระยะหนึ่ง ก็ไม่ต้องให้ปั๊มทำงานที่ความดันสูงตลอดเวลา หรือในกรณีที่ยังไม่มีการทำงานแต่คงให้ปั๊มทำงานอยู่ตลอดเวลา ก็ควรลดโหลดของปั๊มให้ทำงานที่ความดันต่ำลงได้ด้วยการคิดตั้งวาล์วปลดความดันแบบไหลต วาล์วลดวงจรหรือวาล์วลดภาระ หรือวาล์วลดชนิดอื่น ๆ เพื่อให้ปั๊มทำงานเบาลง มอเตอร์ไฟฟ้าก็จะกินกระแสไฟน้อยลง เพราะแรงที่จะให้หมุนขับปั๊มน้อยลง

วาล์วที่ทำหน้าที่เกี่ยวกับการควบคุมความดันในวงจร ไฮดรอลิกมีหลายชนิด ซึ่งมีชื่อเรียกแตกต่างกันไปตามหน้าที่หลักและจุดประสงค์การใช้งาน แต่ลักษณะการทำงานของวาล์วจะคล้ายกันคือ ใช้ความดันของน้ำมันในวงจรมากระทำหรือสั่งงานให้วาล์วทำงาน ซึ่งมีทั้งแบบกระทำภายนอกและกระทำภายใน เมื่อความดันในวงจรถึงระดับที่ปรับตั้งเอาไว้มันก็จะทำหน้าที่ปลดหรือลดหรือจัดลำดับความดันด้วยตัวมันเอง ดังจะกล่าวรายละเอียดของวาล์วควบคุมความดัน ในแต่ละชนิด ดังนี้

วาล์วควบคุมความดันในระบบไฮดรอลิก แบ่งแยกออกเป็นหลายชนิดคือ

1. วาล์วปลดความดัน (relief valve) ได้แก่ วาล์วปลดความดันแบบไคเรกนอกคิง (direct acting relief valve) วาล์วปลดความดันแบบไหลต (pilot operated relief valve) เป็นวาล์วควบคุมความดันที่อยู่ส่วนแรกของวงจรไฮดรอลิก คือ ติดตั้งไว้ที่ท่อทางน้ำมันไหลออกจากปั๊มก่อนเข้าสู่ระบบ มีหน้าที่คอยควบคุมความดันของวงจรทั้งหมด หรือวงจรบางส่วนให้อยู่ที่ระดับความดันเดียวกันทั้งวงจร ใช้เพื่อจุดประสงค์ในการป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ทั้งหมดในวงจร อันเนื่องมาจากความดันสูงเกินไป คือ เมื่อความดันในวงจรเพิ่มขึ้นถึงจุดที่กำหนด (set pressure) หรือปรับตั้งไว้ วาล์วนี้จะเปิดเพื่อระบายน้ำมันที่ทำให้เกิดความดันส่วนเกิน (over pressure) โดยน้ำมันนี้จะดับสปริงของวาล์วให้ยุบตัว เมื่อความดันในระบบสูงขึ้นจนชนะแรงสปริง ตัวลูกบอลหรือป๊อปเป็ตหรือสปูลจะถอยเปิดให้น้ำมันไหลกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

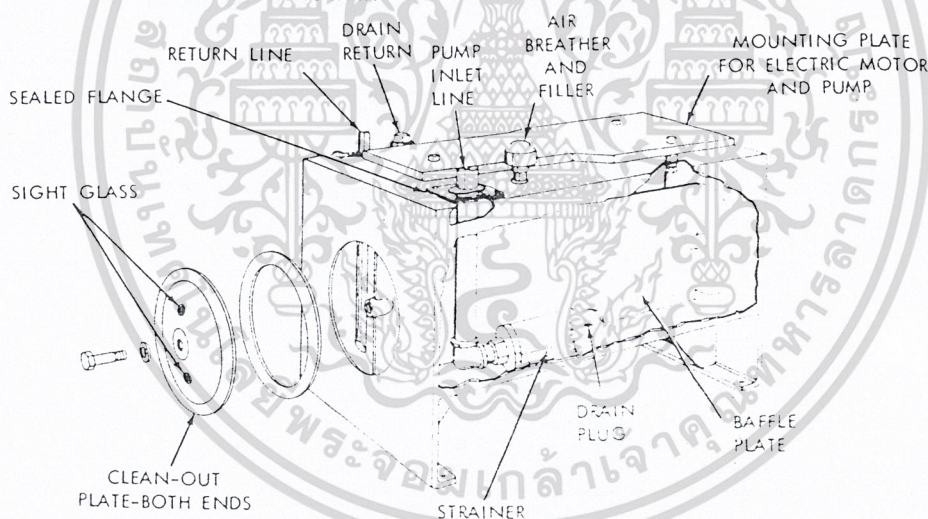
ผู้ตั้งพักได้ ความดันก็จะลดลงและมีค่าคงที่เท่ากับที่ปรับตั้งเอาไว้ วาล์วปลดความดันนี้สามารถแบ่งได้ตามวิธีควบคุมเป็น 2 ประเภทคือ วาล์วปลดความดันแบบไครกแอคติง และวาล์วปลดความดันแบบไฟลอค

2. บายพาสวาล์ว (by-pass valve) ได้แก่ วาล์วลดภาระหรืออันโหลดคั้งวาล์ว (unloading valve) วาล์วจัดลำดับ และวาล์วจัดลำดับแบบมีวาล์วกันกลับ (sequence valve, sequence and check valve) วาล์วกันตกหรือวาล์วคุมถ่วงน้ำหนัก (counter balance valve)
3. เบรกวาล์ว (brake valve)
4. อันโหลดคั้งรีลิววาล์ว (unloading relief valve)
5. วาล์วความดันและวาล์วลดความดันแบบมีวาล์วกันกลับ (pressure reducing valve)
6. สวิตซ์ความดัน (pressure switch)

## 2.7 ถังพักน้ำมันไฮดรอลิก

ถังพักน้ำมันไฮดรอลิกมีหน้าที่ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

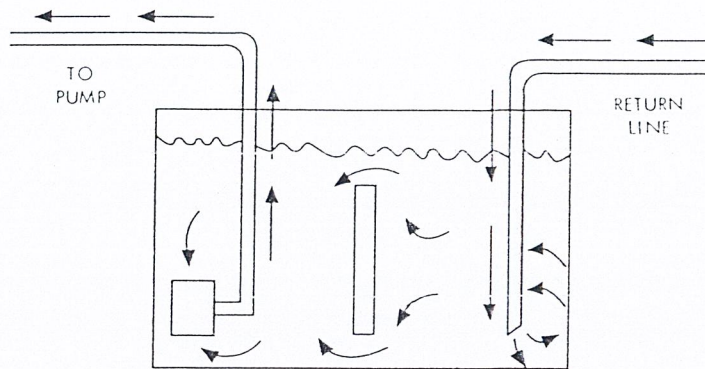
- เป็นที่เก็บและพักน้ำมัน
- เป็นที่จัดหสิ่งสกปรกต่าง ๆ
- เป็นที่ระบายความร้อนของน้ำมันในระบบ
- เป็นที่จัดฟองอากาศ



รูปที่ 2.6 โครงสร้างและส่วนประกอบของถังพักน้ำมัน

การออกแบบขนาดของถังพักน้ำมัน ควรเผื่อขนาดพื้นที่ด้านบนของถังไว้ประมาณ 10 % ของปริมาณน้ำมัน เพื่อให้ฟองอากาศสามารถเดือดลอยขึ้นมาจากน้ำมันได้ ท่อไหลกลับของน้ำมันควรอยู่สูงจากพื้นด้านล่างของถังประมาณ 2 นิ้ว ท่อที่ต่อไปยังปั๊มควรสูงจากด้านล่างของถังไม่น้อยกว่า 1 นิ้ว และแผ่นกั้นภายในถังน้ำมัน (Baffle Plate) ควรมีความสูงประมาณ 70 % ของความสูงของระดับน้ำมัน ขนาดและถังพักน้ำมัน โดยทั่วไป จะมีปริมาตรเป็น 3 เท่า ของอัตราการส่งจ่ายน้ำมันของปั๊มไฮดรอลิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ทิศทางการไหลของน้ำมัน

$$\text{ขนาดถังพักน้ำมัน (gal.)} = 3 \times \text{Pump Flow Rate (gpm.)}$$

แต่ในกรณีที่เป็นขบวนการที่มีการใช้ระบบไฮดรอลิก อาจมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากต้องคำนึงถึงพื้นที่และน้ำหนัก

#### ฟิลเตอร์และสเตรนเนอร์ (Filter and strainer)

ในระบบไฮดรอลิกมีวิธีการติดตั้งหม้อกรองเพื่อกรองน้ำมันอยู่หลายวิธี บางวิธีติดตั้งที่ท่อทางดูดของปั๊ม ซึ่งเรียกว่า สเตรนเนอร์ บางระบบอาจติดตั้งเพิ่มที่ตำแหน่งอื่นๆ อีก เช่น ในค้ำยันท่อใช้งาน และท่อไหลกลับ ซึ่งเรียกหม้อกรองแบบนี้ว่า ฟิลเตอร์

สเตรนเนอร์ จะใช้กรองตะกอนขนาดใหญ่ หรือกรองหยาบส่วน ฟิลเตอร์ จะใช้กรองตะกอนขนาดเล็กๆ หน่วยที่ใช้ในการกรองของสเตรนเนอร์และฟิลเตอร์มี 2 หน่วย คือ เมช (Mesh) และไมครอน

เบอร์เมช หมายถึง จำนวนลวดที่สานเป็นตะแกรงกรองต่อความยาว 1 นิ้ว ไมครอน คือ ขนาดช่องของไส้กรองโดย 1 มีค่าเท่ากับ  $1 \mu\text{m}/1000 \text{ mm}$ .

#### อุปกรณ์หล่อเย็น (Oil Cooler)

การรักษาและควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันที่กำลังใช้งานควรให้อยู่ในระดับที่พอเหมาะ คือระหว่าง  $110-150^{\circ}\text{F}$  หากมีค่าสูงกว่านี้ต้องใช้วิธีการและอุปกรณ์มาช่วยระบายความร้อนดังนี้

##### 1. อุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนแบบใช้พัดลมเป่า (Air-Cooled Heat Exchanger)

อุปกรณ์ชนิดนี้ต้องมีพื้นผิวมากเพียงพอ สำหรับการระบายความร้อน แต่เนื่องจากถ่ายเทความร้อนแบบนี้ระบายความร้อนโดยขึ้นกับอุณหภูมิรอบข้าง ดังนั้นหากอุณหภูมิในที่ตั้งกล่าวเกินกว่า  $210^{\circ}\text{F}$  การระบายความร้อนด้วยวิธีนี้ก็จะได้ผล

##### 2. อุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนแบบใช้น้ำหล่อเย็น (Water - Cooled Heat Exchanger)

การระบายความร้อนด้วยวิธีนี้จะดีกว่าแบบแรก เพราะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายน้อยกว่า และใช้สะดวกกว่า เนื่องจากมีขนาดเล็ก และมีน้ำหนักเบา

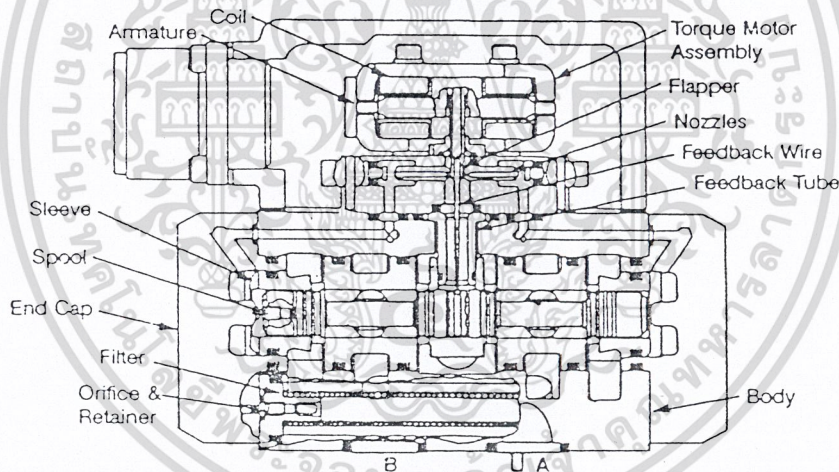
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การติดตั้งถังระบายความร้อน จะไม่ติดตั้งในส่วนที่มีความดันสูง เนื่องจากตัวมันทนความดันได้ไม่เกิน 150-210 psi จึงติดตั้งถังไว้ในส่วนที่มีความดันต่ำของระบบ และส่วนมากจะนิยมติดตั้งไว้ในส่วนของท่อที่ไหลกลับถึงพัก

## 2.8 เซอร์โววาล์ว (Servo Valves)

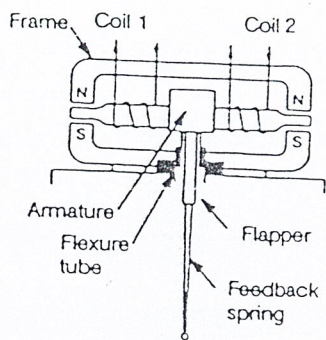
เซอร์โววาล์วก็คือ วาล์วที่มีการป้อนกลับหรือมีการชดเชยภายในตัวของมัน และการที่เซอร์โววาล์วมีการป้อนกลับภายในตัวมันนี้เองจึงทำให้มันต่างจากพรีพอร์ชันนัลวาล์วซึ่งไม่มี จากเหตุผลดังกล่าวทำให้เซอร์โววาล์วมีประสิทธิภาพที่เหนือกว่าพรีพอร์ชันนัลวาล์ว เซอร์โววาล์ว ที่มีใช้อยู่ในงานอุตสาหกรรมโดยส่วนใหญ่จะเป็นแบบควบคุมทิศทาง (directional servo valves)

ถึงแม้ว่าจะมีความแตกต่างกันหลายด้านของเซอร์โววาล์วที่มีใช้กันอยู่โดยทั่วไป แต่สิ่งหนึ่งที่เหมือนกันก็คือการใช้ เฟลป์เปอร์ / นีอซเซิล (flapper/ nozzle) ดังในรูปที่ 2.19 และจากรูปดังกล่าวเราจะเห็นว่าวาล์วแบบนี้จะเป็นแบบ 2 ชั้น หรือ 2 stage (แบบ 3 stage ก็มี) โดยที่มอเตอร์แรงบิด (torque motor) เฟลป์เปอร์และนีอซเซิล จะเป็นส่วนที่ใช้ในการสร้างสัญญาณสั่งงานหรือส่วนของไฟล็ค (pilot stage) สำหรับการเลื่อนตัวของสปูลนั้นจะใช้กันป้อนกลับ (feedback wire) ที่ต่อมาจากเฟลป์เปอร์เป็นตัวสั่งงาน



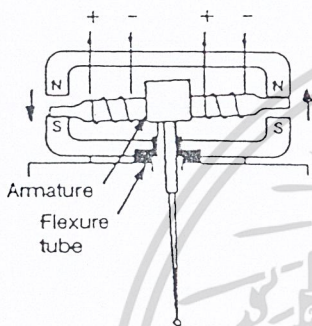
รูปที่ 2.8

มอเตอร์แรงบิด (torque motor) ประกอบด้วยแม่เหล็กการสองชั้นที่ติดตั้งเป็นโครงงออยู่รอบๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.20 ส่วนที่เคลื่อนที่ (armature) และเฟลป์เปอร์ จะถูกประกอบอยู่ระหว่างโครงทั้งสองนี้ โดยท่ออ (flexure tube) จะทำหน้าที่เป็นซีลแยกกระหว่างน้ำมันและส่วนของไฟฟ้า นอกจากนั้นบนแกนแต่ละด้านของส่วนที่เคลื่อนที่หรืออาร์เมเจอร์จะมีขดลวดพันอยู่เพื่อเป็นตัวสร้างสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 2.9

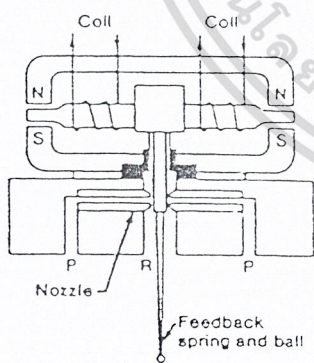
การผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังชุดขดลวดเป็นสาเหตุให้อาร์เมเจอร์กลายเป็นแม่เหล็กโดยที่ปลายด้านหนึ่งจะเป็นขั้วได้และปลายอีกด้านหนึ่งจะเป็นขั้วเหนือ



รูปที่ 2.10

ขณะนี้อาร์เมเจอร์จะมีการเอียงตัวไปในแต่ละด้านของ โครงแม่เหล็ก โดยทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับทิศทางและขนาดของกระแส ที่จะให้หมุนตามเข็มหรือทวนเข็มนาฬิกา ดังรูปที่ 2.10

น๊อชเชิลและแฟลป์เปอร์ (nozzle and flapper) แฟลป์เปอร์จะต่อเข้ากับส่วนกลางของอาร์เมเจอร์โดยมีสปริงย้อนกลับ (feedback spring) ผ่านท่องอ (flexure tube) ลงด้านล่างและที่ปลายของสปริงย้อนกลับนี้จะมีลูกบอลเล็ก ๆ ติดอยู่ ในแต่ละด้านของแฟลป์เปอร์จะมีน๊อชเชิลเป็นตัววัดความดัน ดังแสดงด้วยรูปที่ 2.11

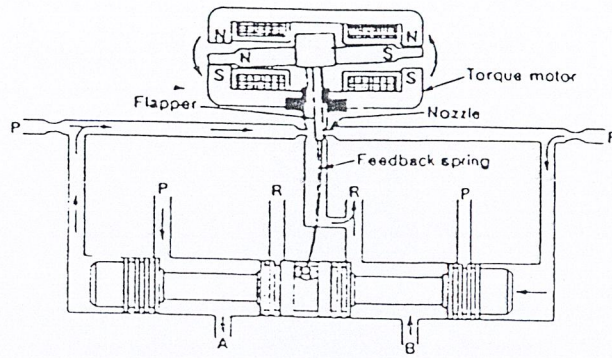


รูปที่ 2.11

ความดันที่ป้อนให้กับน๊อชเชิลในแต่ละด้านมาจากพอร์ต (Port) ของวาล์วผ่านตัวกรอง (filter) และออริฟิซ (orifice) โดยออริฟิซจะจำกัดจำนวนของการไหลที่จะไปยังน๊อชเชิล ส่วนตัวกรองจะป้องกันสิ่งสกปรกเล็ก ๆ ต่าง ๆ ที่เจือปนเข้ามากับน้ำมัน ความดันของน้ำมันในแต่ละด้านของสปูลจะถูกกำหนดโดยน๊อชเชิล และเป็นผลต่อเนื่องมาจากตำแหน่งของแฟลป์เปอร์

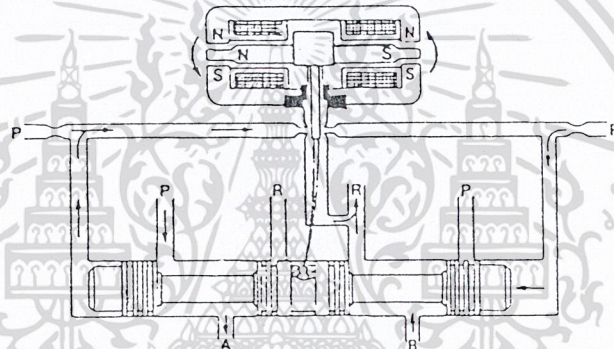
เมื่อสัญญาณที่ป้อนเข้ามาต่อแรงบิดเป็นศูนย์ แฟลป์เปอร์จะอยู่ที่ตำแหน่งกลางระหว่างน๊อชเชิล ทำให้ความดันในแต่ละด้านของสปูลเท่ากัน แต่เมื่อไรก็ตามที่สัญญาณถูกจ่ายเข้าไปยังมอเตอร์แรงบิด แฟลป์เปอร์จะเคลื่อนที่สร้างความเสียชดชาน (ระยะ) ให้มีค่าที่มากในด้านหนึ่งและน้อยในอีกด้านหนึ่ง ทำให้ความดันที่ห้องปลายของสปูลไม่สมดุลกัน ดังแสดงด้วยรูปที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12

ความดันที่ไม่สมดุลดังกล่าวนี้จะเลื่อนสปูลหลักภายในปลอก (sleeve) และสร้างการไหลผ่าน วาล์ว เมื่อสปูลหลักถูกเลื่อนในด้านตรงข้าม แพล็ปเปอร์จะกดยกกลับในตำแหน่งตรงกลางของน็อซเซิล ทั้งสอง เมื่อแพล็ปเปอร์อยู่ที่ตำแหน่งศูนย์กลางความดันที่ห้องปลายของสปูลจะมีค่าที่เท่ากัน ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13

สปูลหลักจะเลื่อนตัวจนกระทั่งแรงของมอเตอร์แรงบิดและแรงของสปริงที่สร้างขึ้นบนแพล็ปเปอร์สมดุล โดยทั้งนี้แรงของมอเตอร์แรงบิดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าของกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวด ระยะการเคลื่อนที่ของสปูลจะถูกกำหนดโดยสัญญาณอินพุตที่ขดลวดนี้ด้วย เช่นเดียวกับทิศทางในการเคลื่อนที่ของสปูลก็จะถูกกำหนดโดยทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดขดลวด

2.8.1 เงื่อนไขการซ้อนของสปูล

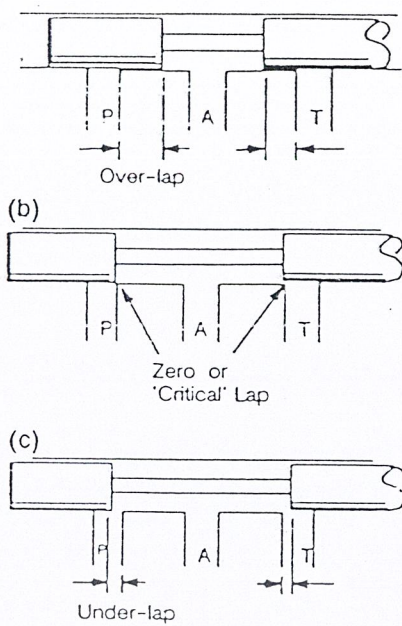
LAP CONDITION

ไม่ว่าจะเป็นการควบคุมตำแหน่ง ความเร็ว หรือแรง เราสามารถที่จะนำเอาพรีออร์ชันนัลหรือเซอร์โววาล์ว แบบควบคุมทิศทางมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมดังกล่าวได้ทั้งหมด ดังนั้นในที่นี้จึงขอให้ความสำคัญกับพรีออร์ชันนัลและเซอร์โววาล์วแบบควบคุมทิศทางเป็นกรณีพิเศษ การเลื่อนตัวของสปูลหลักของวาล์วควบคุมทิศทางจะสร้างการไหลผ่านวาล์วซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับตำแหน่งของขอบสปูลและขอบของพอร์ต (port) ในตำแหน่งศูนย์ (null position)

รูปที่ 2.14 (a) แสดงสปูลซึ่งมีพื้นที่เกิน

กว่าขอบของพอร์ต (over-lap) สำหรับรูปที่ 2.14

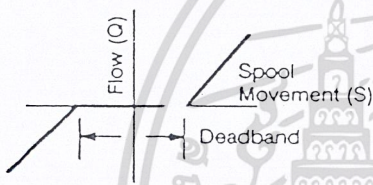
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14

(b) แสดงการซ้อนทับที่เป็นศูนย์หรือพื้นที่ของสปูลจะพอดีกับขอบของพอร์ต (zero or critical lap) และรูปที่ 2.14 (c) แสดงถึงพื้นที่ขอบของสปูลที่มีค่าน้อยไม่สามารถปิดพอร์ตได้พอดี (under-lap)

ค่าของพื้นที่ที่เกินหรือน้อยกว่าขอบของพอร์ตโดยทั่วไปจะบอกหรือแสดงอยู่ในเทอมของเปอร์เซ็นต์ (%) ของระยะการเคลื่อนที่ของสปูล หรือเปอร์เซ็นต์ของสัญญาณอินพุต



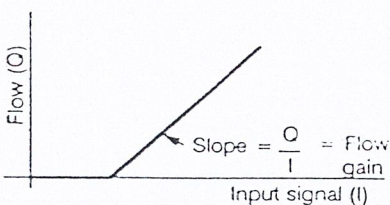
รูปที่ 2.15

การพิจารณาคุนสมบัติเชิงอินพุตของการซ้อนของสปูลเราจะสมมุติให้สปูลเลื่อนไปทางขวาโดยให้สปูลมีพื้นที่ขอบเกินกว่าขอบของพอร์ต (รูปที่ 2.15 a) ดังนั้นในช่วงแรกแม้ว่าสปูลจะมีการเคลื่อนตัวไปแล้วแต่ก็ยังไม่มีการไหลผ่านวาล์ว (dead band) ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากพื้นที่ของขอบสปูลที่มีมากกว่าขอบของพอร์ตนั่นเอง แสดงด้วยรูปที่ 2.15

หลักจากที่ขอบของสปูลเคลื่อนตัวพ้นจากขอบของพอร์ตแล้ว อัตราการไหล (Q) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะในการเคลื่อนตัวของสปูล (S) โดยให้ความดันที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของสปูลกับอัตราการไหลอาจไม่เป็นเชิงเส้นเสมอไปก็ได้ ซึ่งทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับความคม (shape) หรือลักษณะรูปร่างของพอร์ตและสปูล

### 2.8.2 เกนการไหล (Flow gain)

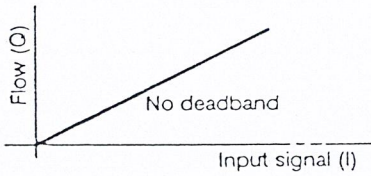
เกนการไหล คือ อะไร คำว่าเกน (gain) ก็หมายถึงว่า อัตราการขยาย หรืออัตราส่วนระหว่างเอาต์พุตต่ออินพุต เมื่อเอาต์พุตในที่นี้คืออัตราการไหล (Q) และอินพุตก็คือกระแสที่ใช้ในการเลื่อนวาล์ว (I) ดังนั้นเกนการไหล ก็คือ อัตราการไหลต่อสัญญาณอินพุตหรือกระแสไฟฟ้านั่นเอง



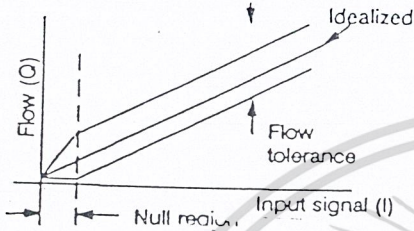
รูปที่ 2.16

หากสัญญาณอินพุตที่มีค่ามากพอที่จะสร้างการไหลผ่านวาล์ว อัตราการไหลจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสัญญาณอินพุต ณ ที่ความดันแตกต่างตามที่กำหนด ด้วยแสดงด้วยรูปที่ 2.16

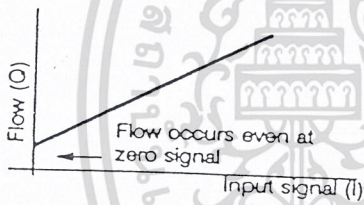
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



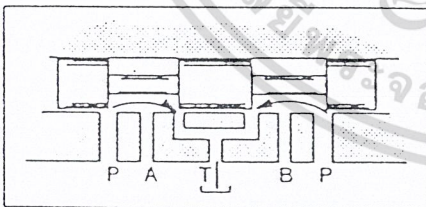
รูปที่ 2.17



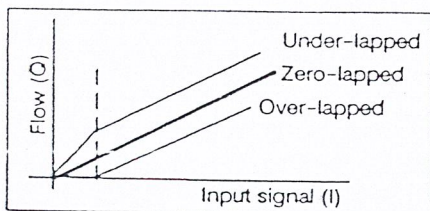
รูปที่ 2.18



รูปที่ 2.19



รูปที่ 2.20



รูปที่ 2.21

สำหรับการซ้อนของสปูลที่เป็นศูนย์ ขอบของสปูลจะพอดีกับพอร์ตทำให้ไม่มีค่าแควมแบนด์ (dead band) การไหลผ่านวาล์วจะปรากฏที่ระดับสัญญาณต่ำมาก ๆ ซึ่งทำให้วาล์วสามารถตอบสนองรอบตำแหน่งศูนย์ได้ (null region) ดังแสดงด้วยรูปที่ 2.17

แต่จริง ๆ แล้วแกนการไหลอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงจากค่าปกติรอบตำแหน่งศูนย์ได้ ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากการผลิตและลักษณะพอร์ตรวม ทั้งสปูลของตัวเอง (รูปที่ 2.18)

ในกรณีเงื่อนไขการซ้อนของสปูลที่น้อยกว่าขอบของพอร์ต (under-lap) หากเราพิจารณาเพียงพอร์ตเดียวคุณสมบัติของแกนการไหลสามารถแสดงได้ด้วยรูปที่ 2.18 กล่าวคือ จะมีการไหลปรากฏอยู่แม้จะไม่มีสัญญาณอินพุตก็ตาม ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของสปูลปิดไม่สนิทนั่นเอง ดังแสดงด้วยรูปที่ 2.19

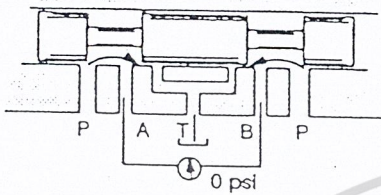
หากสมบัติให้ค่าของการซ้อนในแต่ละด้านเท่ากันในตำแหน่งศูนย์ ดังนั้นความดันที่พอร์ต A และพอร์ต B จะมีค่าที่เท่ากัน ทำให้สามารถป้องกันการไหลได้ดังรูปที่ 2.20

เมื่อสปูลมีการเลื่อนตัวจะทำให้พอร์ตด้านหนึ่งเปิดและอีกด้านหนึ่งจะปิด การเลื่อนตัวของสปูลดังกล่าว จะมีค่าแกนของการไหลที่แตกต่างกัน โดยทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะการซ้อนของสปูลดังแสดงด้วยรูปที่ 2.21

2.8.3 เกนความดัน

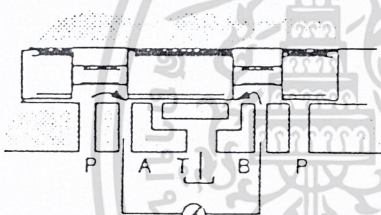
Pressure gain

สิ่งสำคัญอีกสิ่งหนึ่งที่ถูกกำหนดโดยเงื่อนไขการซ้อนของสปูล ก็คือ เกนความดันของวาล์ว ซึ่ง เกนความดันของวาล์ว ก็คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความดันด้านเอาต์พุตต่อสัญญาณกระแสไฟฟ้าอินพุต



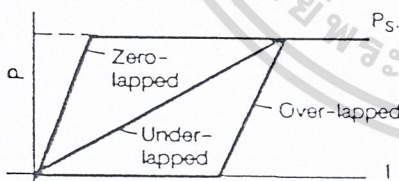
รูปที่ 2.22

สปูลที่อยู่ในตำแหน่งศูนย์ดังแสดงด้วยรูปที่ 2.22 จะมีการรั่วไหลจากพอร์ตความดัน P ทั้งสองไปยังพอร์ต T ซึ่งนี้หมายความว่า ความดันที่พอร์ต A และ B จะมีค่าความดันเกิดขึ้นระหว่าง P และ T สมมติให้เงื่อนไขในทางอุดมคติความดันที่พอร์ต A และ B มีค่าเท่ากัน ดังนั้น เกจวัดความดันแตกต่างจะมีค่าเท่ากับศูนย์



รูปที่ 2.23

ถ้าสปูลถูกเลื่อนทำให้พอร์ต A ต่อถึงกับ P และพอร์ต T ถูกปิด (และในทำนองเดียวกัน หากสปูลถูกเลื่อนไปในด้านตรงข้าม พอร์ต B จะต่อถึงกับ P และพอร์ต T จะถูกปิด) นี้ก็หมายความว่าที่พอร์ต A ความดันจะเพิ่มขึ้น และพอร์ต B ความดันจะตกลง จนกระทั่งความดันมีค่าเท่ากับแหล่งจ่าย ส่วนความดันที่พอร์ต T จะตกลงเป็นศูนย์หรือมีค่าเท่ากับความดันของถังเก็บน้ำมัน

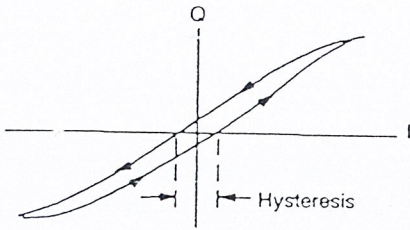


รูปที่ 2.24

สำหรับวาล์วที่มีเงื่อนไขการซ้อนของสปูลเป็นศูนย์ จะใช้ สัญญาณอินพุตเพียงเล็กน้อยคือประมาณ 3 ถึง 4 % ของค่าสูงสุดเท่านั้นที่จะทำให้ความดันมีค่าเท่ากับแหล่งจ่าย ส่วนเงื่อนไขการซ้อนของสปูลแบบอื่น ๆ คุณสมบัติ เกนความดันสามารถแสดงได้ด้วยรูปที่ 2.34

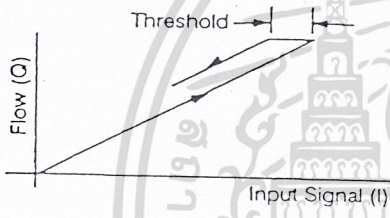
เกนความดันของวาล์วจะเป็นค่าที่สำคัญในระบบการควบคุมความดันแบบวงปิดหรือแบบป้อนกลับ นอกจากนั้นมันยังมีความเกี่ยวข้องกับการกำหนดค่าความแม่นยำสถานะอยู่ตัว (steady state accuracy) ของระบบการควบคุมตำแหน่งอีกด้วย ในการประยุกต์ใช้งานทั่วไปมีความต้องการค่าเกนความดันที่สูง แต่ค่าเดดแบนด์ (dead band) ที่ต่ำ ซึ่งวาล์วที่มีเงื่อนไขการซ้อนของสปูลเป็นศูนย์จะเป็นทางเลือกที่ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



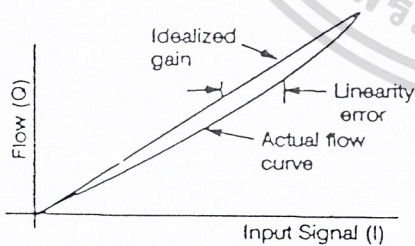
รูปที่ 2.25

ฮิสเทอรีซิส ถือว่าเป็นค่าความผิดพลาด หรือความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากตัวของ อุปกรณ์เอง การให้สัญญาณอินพุตที่แตกต่างกัน ไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มขึ้นหรือลดลง (แม้ว่าจะเป็น ค่าเดียวกัน) จะทำให้อัตราการไหลของวาล์วด้าน เอดส์พุคแตกต่างกันดังแสดงด้วยรูปที่ 2.25 ค่าฮิสต เอรีซิสโดยทั่วไปจะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ของพิกัด สูงสุดของสัญญาณอินพุต



รูปที่ 2.26

เทรชโฮลด์ (Threshold) เทรชโฮลด์จะมี คุณสมบัติคล้ายกับฮิสเทอรีซิส ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า เทรชโฮลด์ ก็คือ ความผิดพลาดอย่างหนึ่งของ วาล์วนั้นเอง กล่าวคือเป็นค่าความแตกต่างของ สัญญาณอินพุตที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไข การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลให้เป็นการลดลงดัง รูป เทรชโฮลด์โดยทั่วไปจะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ ของพิกัดสูงสุดของสัญญาณอินพุต



รูปที่ 2.27

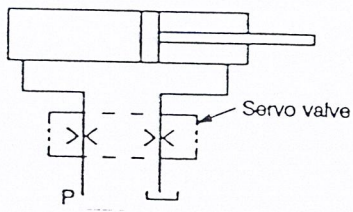
ความเป็นเชิงเส้นและความสมมาตร (Linearity and symmetry) อีกสองคุณสมบัติซึ่งมี ความ สัมพันธ์กับการไหลจริงและการไหลในเชิง อุดมคติ ก็คือ ความเป็นเชิงเส้น และความ สมมาตร ความแตกต่างระหว่างการไหลจริงกับ การไหลในเชิงอุดมคติถือเป็นความผิดพลาดเชิง เส้น (รูปที่ 2.27) ส่วนความผิดพลาดสมมาตร ก็ คือ ความแตกต่างระหว่างเกณฑ์การ ไหลในแต่ละ ด้านของการเคลื่อนตัวของสปูลจากตำแหน่งกลาง

2.8.4 พิกัดการไหล

Flow rating

เซอร์โวหรือพอร์ซันนั้วาล์วประ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำ ไปใช้เพื่อการค้า โดยพื้นฐานก็คือ การรวมตัวกัน ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ระหว่างวาล์วควบคุมการไหลและวาล์วควบคุมทิศทางไว้ในตัวเดียวกัน ซึ่งอัตราการไหลนั้นจะถูกควบคุมโดยการปรับการเลื่อนตัวของสปูลที่เปรียบเสมือนกับเป็นการสร้างออริฟิซ (orifice) ที่สามารถปรับค่าได้สองตัว ดังรูปที่ 2.28

รูปที่ 2.28



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

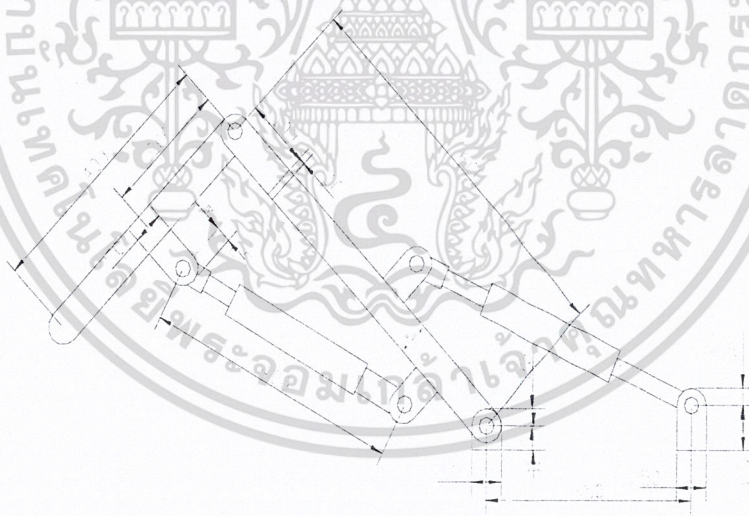
## บทที่ 3

### การออกแบบแขนกล

#### 3.1 การออกแบบพื้นที่การทำงาน ( Work Envelopes)

ขนาดของแขนกลเริ่มพิจารณาจากกระบอสูบที่หาได้ มี Socket ขนาด 30 mm. ทำให้ต้องออกแบบแขนที่มีขนาดความหนาของแขน 30 mm. ส่วนความยาวและความกว้างของแขนกลที่ออกแบบ กำหนดให้มีขนาด 50x400x30 mm. และแขนท่อนล่างมีขนาด 50x600x30 mm. จากนั้นจึงนำกระบอสูบที่หาได้ ซึ่งมีขนาด 420 mm สโตรค 150mm มาจัดวางตำแหน่งการติดตั้งระหว่างแขนกลกับกระบอสูบว่า ตำแหน่งการติดตั้งใดให้พื้นที่มากที่สุด เพื่อให้ใช้ประโยชน์จากระบบมากที่สุด ซึ่งมีหลักการออกแบบหลายวิธีแล้วแต่ตำแหน่งของกระบอสูบ

โดยการขยับการติดตั้งของแต่ละแบบจะเคลื่อนตำแหน่งการติดตั้งกระบอสูบทุก 10 mm. แล้ววาดรูปพิจารณาว่าตำแหน่งการติดตั้งใดให้พื้นที่การทำงานมากที่สุด จึงเอาตำแหน่งการติดตั้งนั้นมาทำการสร้าง ดังรูป 3.1



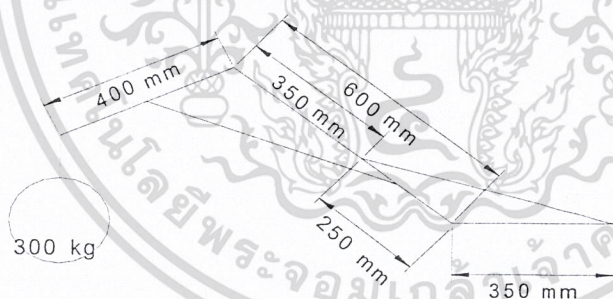
รูปที่ 3.1 ตำแหน่งการติดตั้งของกระบอสูบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การหาแรงและค่าความปลอดภัยของแขนกล

#### 3.2.1 การหาแรงในชิ้นส่วนแขนกล

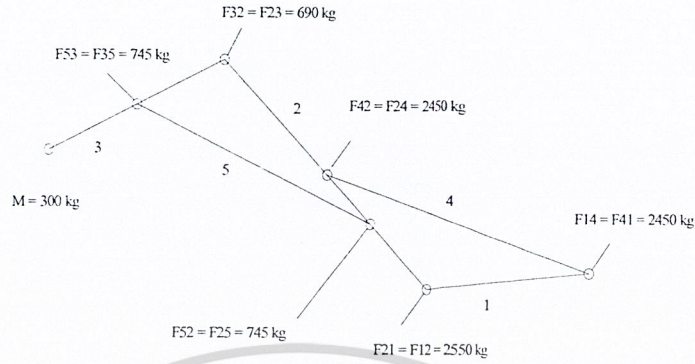
จากวัตถุประสงค์ของโครงการจึงกำหนดให้เคลื่อนที่ด้วยความเร่งต่ำ แรงในเครื่องจักรนั้นเกิดจากแหล่งต่างๆกัน เช่น แรงเนื่องจากน้ำหนักของชิ้นส่วนเครื่องจักร แรงจากส่วนประกอบของชิ้นส่วนต่างๆ แรงจากการรับภาระ และแรงที่เกิดจากการถ่ายเทพลังงาน รวมทั้งแรงเนื่องจากความฝืด แรงเฉื่อย แรงในสปริง แรงกระทบกระแทก และแรงที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ในการออกแบบเครื่องจักรขั้นสุดท้ายจะต้องพิจารณาถึงแรงทั้งหมดที่เกิดขึ้นเหล่านี้ว่าจะไม่ทำให้เกิดการชำรุดเสียหาย ในการวิเคราะห์แรงสถิตซึ่งกระทำบนชิ้นส่วนเครื่องจักรนั้นเราจะถือว่าแรงเฉื่อย(Inertia Forces)ที่เกิดจากความเร่งมีค่าน้อยมาก จนกระทั่งไม่จำเป็นต้องนำมาคำนึงถึงได้ ถ้าหากนำแรงเฉื่อยเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยเรียกการวิเคราะห์นั้นว่าการวิเคราะห์แรงไดนามิก (Dynamic Force) เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วน้ำหนักของชิ้นส่วนเครื่องจักรต่างๆก็มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงสถิตย์(Static Forces) ดังนั้นจึงไม่นำมาคิดในการวิเคราะห์แรงสถิต สำหรับแรงอันเนื่องมาจากความเร่งนั้นเรียกว่า แรงเฉื่อย(Inertia Forces)หรือแรงไดนามิก(Dynamic Force) ในการวิเคราะห์แรงเฉื่อยจะต้องใช้ความรู้เรื่องความเร่ง โดยทั่วไปเครื่องต่อในกลไกจะอยู่ภายใต้แรงทั้งสองแบบคือ แรงสถิตและแรงเฉื่อย ในเครื่องจักรความเร่งสูงแรงเฉื่อยซึ่งเกิดจากความเร่งจะมีค่ามากกว่าแรงสถิตมาก สำหรับเครื่องจักรกลที่มีความเร่งต่ำแรงเฉื่อยจะมีค่าน้อย จนสามารถตัดทิ้งได้ ซึ่งในที่นี้เรากำหนดโหลดสูงสุดให้ระบบคือ 300 kg



รูปที่ 3.1 ตำแหน่งการติดตั้งของกระบอกลูกสูบ

แรงที่เกิดต่อระบบมากที่สุดก็ต่อเมื่อกระบอกลูกสูบทั้ง 2 ยึดติดแล้วจึงคำนวณแรงสถิตย์ด้วยวิธีทาง Machinery

ณ จุดนี้ซึ่ง ได้แรงที่จุดต่างๆดังรูป



จากรูปที่ 3.2

ชั้นที่ 1 คือ แผ่นรอง

ชั้นที่ 2 คือ แขนกล 1

ชั้นที่ 3 คือ แขนกล 2

ชั้นที่ 4 คือ กระบอกสูบ 1

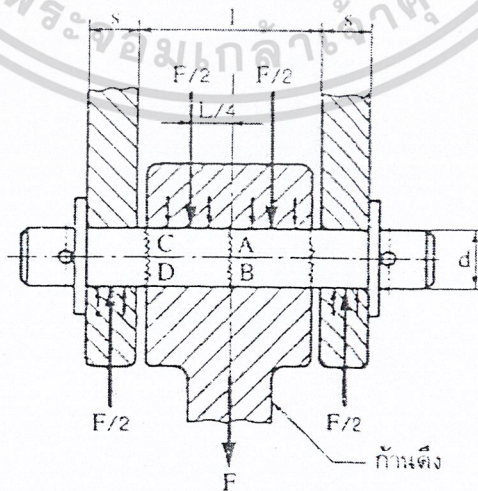
ชั้นที่ 5 คือ กระบอกสูบ 2

จากรูป แรงที่มากที่สุดคือ 2550 kg

### 3.2.2 การคิดค่าความปลอดภัยของสลัก

แรงกระทำกับสลักที่จุดฐานแขนมากที่สุดส่วนแรงที่กระทำกับสลักส่วนอื่นจะไม่คำนึงถึงคำนวณขนาดของสลักที่มีแรงกระทำสูงสุดพอ และใช้ขนาดสลักเดียวกันหมด รอยต่อด้วยสลักมักใช้กับการต่อ cotter กับ socket ดังรูป ซึ่งในกรณีเช่นนี้สลักจะอยู่ภายใต้แรงดัด แรงเฉือนและแรงอัดระหว่างผิวสัมผัส

$l=28 \quad s=18 \quad d=26$



รูปที่ 3.3 การต่อของ cotter , socket และสลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า Moment ที่ทำให้เกิดความเค้นดัดมีค่า

$$M = F/2[l/4+s/2]$$

และค่าความเค้นดัดคือ

$$\sigma = MC/I = 32M/(\pi d^3)$$

แรงเฉือนจะทำให้เกิดความเค้นเฉือน ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\tau = \Delta V/3A = 16F/(3\pi d^2)$$

และความเค้นอัดเกิดจากแรงที่กระทำกับสลักโดยที่ A เป็นพื้นที่ภาพฉายของส่วนที่อัดกันโดย

$$A = dl$$

จะมีค่าความเค้นอัดเท่ากับ

$$\sigma_{cd} = F/A$$

โดยแรงที่ทำกับสลักมากที่สุดคือ แรงที่ทำกับกระบอกสูบอันล่างซึ่งมีแรง 2550 kg หรือ 25015.5N ซึ่งได้จากการคำนวณแรง

$$M = F/2[l/4+s/2]$$

$$= 200124 \text{ N.mm}$$

$$\sigma = MC/I = 32M/(\pi d^3)$$

$$= 115.98 \text{ N.mm}^3$$

ปกติสลักนิยมใช้ชั้นคุณสมบัติ 6.9

ซึ่งมีค่าความเค้นพิสูจน์สูงสุด=540 N/mm<sup>2</sup>

$$\therefore N = 540/115.98$$

$$= 4.65$$

จากกฎค่าความเค้นอัดตะขิตล์ มีค่า

$$\tau = 0.5776\sigma$$

$$= 311.9$$

$$\tau_d = 16F/(3\pi d^2)$$

$$= 62.82 \text{ N/mm}^2$$

$$\therefore N = 311.58/62.82$$

$$= 4.96$$

ค่าความเค้นอัดcd

$$\sigma_{cd} = F/A = F/dl$$

$$= 34.36 \text{ N/mm}^2$$

เลือก ใช้สลักแบบเคลวิสมีหัวตามมาตรฐาน ISO2341

ขนาด d=24 ขนาดหัว=36 ความหนาหัว 6.0 ความยาว 50 ขึ้นไป และขนาดรูเจาะ 6.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การกำหนดขนาดเหล็ก

แรงรวมจะกระทำกับเหล็กท่อนล่างมากกว่า

∴ คำนวณแรงรวมกระทำกับเหล็กท่อนล่างได้

แรงในแนวแกน X รวมกัน = 2959.239.81 = 29029.7N

แรงในแนวแกน Y รวมกัน = 1202.739.81 = 11798.487N

เลือกเหล็กทั่วไปใช้ AISI TYPE 1020 HR ซึ่งมีค่าความต้านแรงดึงครากของวัสดุ คือ

$$\begin{aligned}\sigma_y &= 43 \text{ksi} \\ &= 296.485 \text{ N.mm}\end{aligned}$$

แรงอัด(แกน x)

จากสมการ

กำหนดขนาด  $A=30350$

$$296.485/N = 29029.7/(30350)$$

$N=15.3$

แรงเฉือน (แกน y)

จากสมการ

$$\sigma_y/N = F/A$$

$$\begin{aligned}\sigma_\tau &= 296.485/0.577 \\ &= 171.07 \text{ N.mm}\end{aligned}$$

$$\sigma_\tau/N = F/A$$

$$171.07/N = 11798.48/(30350)$$

$$N = 21.7$$

แสดงว่าขนาดที่เรากำหนดมานั้นใช้ได้ เพราะค่าความต้านแรงดึงครากนั้นมากกว่าค่าความต้านแรงดึงครากที่คำนวณได้ แสดงว่าปลอดภัยใช้งานได้ ซึ่งมีค่าความปลอดภัยของแกนเท่ากับ 15.3 เพราะฉะนั้นเราใช้ขนาดเหล็กที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ  $50 \times 30$

# บทที่ 4

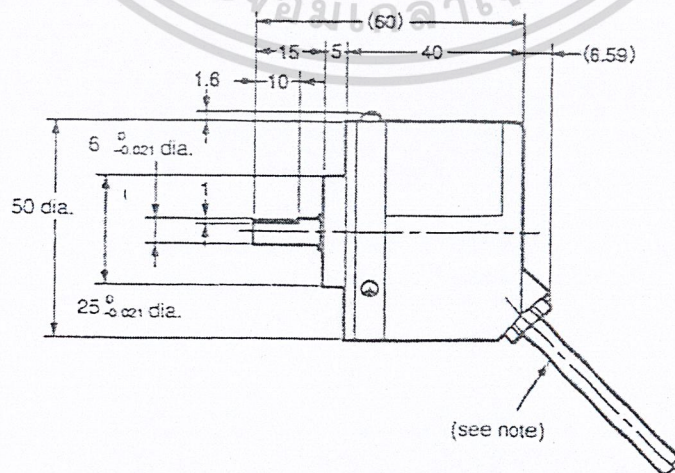
## อุปกรณ์ในการควบคุมแขนกล

### 4.1 โรตารีเอนโค้ดเดอร์ (Rotary Encoder )

เป็นตัวแปลรหัสจากการหมุนของข้อแขนเป็นดิจิทัล ซึ่งเราติดตั้งที่ข้อต่อทั้งสอง ใช้ในการวัดตำแหน่งของแขนกลป้อนเข้าคอมพิวเตอร์ เพื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งที่เราต้องการกับที่เคลื่อนที่ไปจริง เป็น error ของการเคลื่อนที่ จากนั้นคอมพิวเตอร์จะนำค่า error มาทำการคำนวณเพื่อควบคุมวาล์วให้แขนกลอยู่ในตำแหน่งที่เราต้องการ โดยที่ใช้ในที่นี้เป็น rotary encoder รุ่น E6C2-CWZ3E ซึ่งมีรูปร่างและขนาดดังนี้

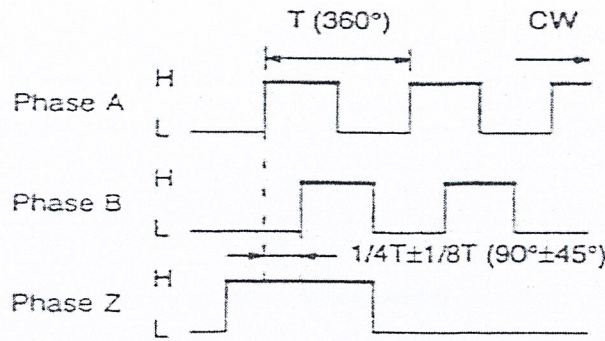


รูปที่ 4.1 โรตารีเอนโค้ดเดอร์

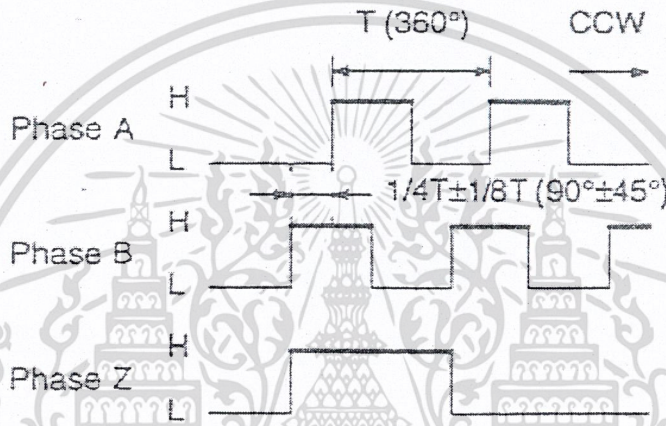


รูปที่ 4.2 แสดงขนาดของโรตารีเอนโค้ดเดอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

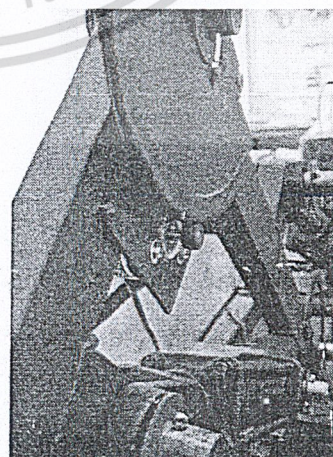


รูปที่ 4.3 สัญญาณเอาต์พุตเมื่อหมุนโรตารีเอนโค้ดเดอร์ตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 4.4 สัญญาณเอาต์พุตเมื่อหมุนโรตารีเอนโค้ดเดอร์ทวนเข็มนาฬิกา

รูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของโรตารีเอนโค้ดเดอร์เมื่อหมุนตามและทวนเข็มนาฬิกาตามลำดับ โดยเมื่อหมุนตามเข็มนาฬิกาสัญญาณเอาต์พุต Phase A จะนำ Phase B อยู่ 90 องศา และเมื่อหมุนทวนเข็มนาฬิกาสัญญาณเอาต์พุต Phase A จะตาม Phase B อยู่ 90 องศา



รูปที่ 4.5 การติดตั้งโรตารีเอนโค้ดเดอร์เข้ากับข้อต่อทั้งสองของแกนกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการค้าเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โรตารีเอ็นโค้ดเดอร์นี้เมื่อหมุนครบ 1 รอบ จะให้สัญญาณ Pulse ออกมา 1000 ลูก ซึ่งในโครงการจะติดตั้งตัวเอ็นโค้ดเดอร์ 2 ตัว ดังรูปเพื่อใช้ในการวัดความเร็วของแขนทั้งสอง โดยจะกล่าวในรายละเอียดในบทที่ 6

#### 4.2 เซอร์โวแอมพลิไฟเออร์ ( Servo Amplifier )

เซอร์โวแอมพลิไฟเออร์โดยปกติ สร้างขึ้นเพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ขยายสัญญาณ กล่าวคือ สัญญาณ input ที่เข้ามาในรูปแบบโวลต์เต็ม จะถูกขยายโดยภาค power ของ servo amplifier ได้สัญญาณ output ในรูปแบบโวลต์เต็มหรือกระแสตามแต่ output ที่ต้องการนำไปใช้ นอกจากนั้นมักใช้เป็นเสมือนการชดเชย หรือใช้เป็นขั้วมิ่งแอมพลิไฟ ทำหน้าที่เหมือนกับจุดรวมของสัญญาณบังคับ และสร้างสัญญาณเออร์เรอร์ ซึ่งจะถูกขยายโดยภาคเฟาเวอร์เพื่อไปแก้พารามิเตอร์ที่ต้องคอนโทรลให้มีค่าที่ถูกต้อง

เซอร์โวแอมพลิไฟเออร์ที่แท้จริงสามารถให้เอาต์พุตโวลต์เต็มหรือกระแสที่มีค่าบวกและลบได้ ดังนั้นมันจะทำงานได้ใน 4 ควอดแดรนต์(quadrants)

เราสามารถจัดประเภทของเซอร์โวแอมพลิไฟเออร์ออกได้เป็น 3 ประเภทคือ

1. ลิเนียร์แอมพลิไฟเออร์
2. SCR แอมพลิไฟเออร์
3. สวิตชิงแอมพลิไฟเออร์

เซอร์โวแอมพลิไฟเออร์เป็นอุปกรณ์ระบบอนาล็อก ใช้เป็นตัวขยายสัญญาณไปบังคับ Electro Hydraulic Servovalve ซึ่งเซอร์โวแอมพลิไฟเออร์มีความสามารถในการควบคุมตำแหน่ง , ความเร็ว และ แรง(ความดัน) ในระบบป้อนกลับของ Potention-meter, Tachogenerator, Load-cell (pressur-cell) โดยมี specification ดังนี้

อินพุท (AC power source)

- (1) Voltage: 100 V, AC
- (2) ความถี่: 50 Hz หรือ 60 Hz
- (3) Power expence: 20 VA

เอาต์พุท (DC power supply)

- (1) Voltage: +15 V and -15 VDC
- (2) Maximum: 30 mA.

สัญญาณอินพุท ( Input Signal)

- (1) Operating input voltage: -10 V ถึง +10 V
- (2) Maximum input voltage: -15 V ถึง +15 V
- (3) Input impedance: 50 K ohm

สัญญาณเอาต์พุท (Output Signal)

- (1) Rated output current and load: 30 mA at 200 ohms, 0.65 $\mu$  H.
- (2) Maximum output current:  $\pm 120\%$  of  $I_r$ . (With shortage circuit protector.)

เอกสารนี้เป็น (3) Maximum driveable frequency at 200% of  $I_r$  p-p input: ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

More than 50 Hz for 30 mA, 200 ohms 0.65  $\mu$ H coil.

(3) Frequency response with 200% of  $I_r$  p-p input for 200 ohm 0.65  $\mu$  H coil:

-45 phase lag point is more than 700 Hz with the load of fixed (solid) resistor.

(4) Nullshift with temperature change: Less than 100 V/ C, the rate is converted to input signal.

(5) Operating temperature range: 0 to 50  $^{\circ}$ C.

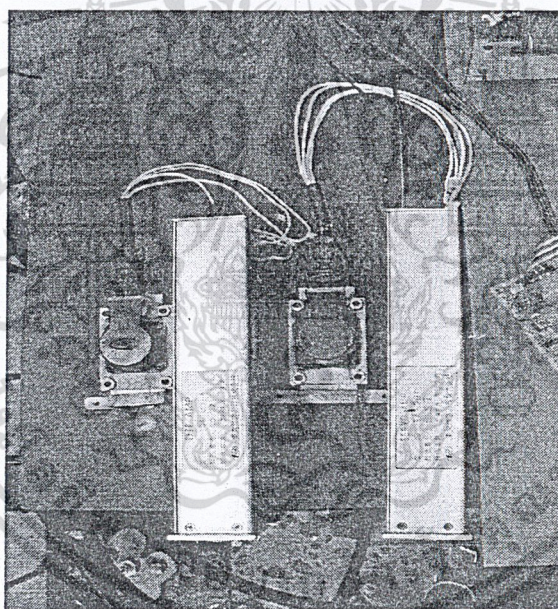
(6) Linearity: Less than 0.5% of  $I_r$ .

(7) Maximum gain: 30 mA( $I_r$ ) / 50 mA (Input signal).

Dither signal.

(1) Output current: 0 to 30% of  $I_r$  p-p.

(2) Frequency: 200 Hz.

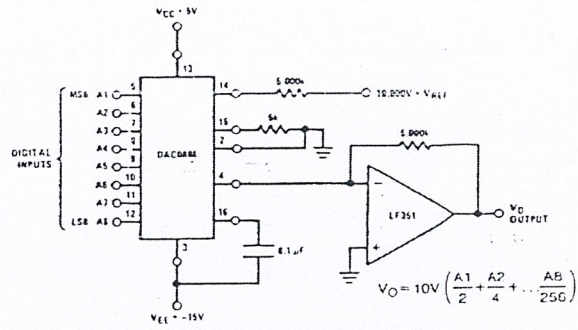


รูปที่ 4.6 เซอร์โวแอมป์รีไฟเออร์

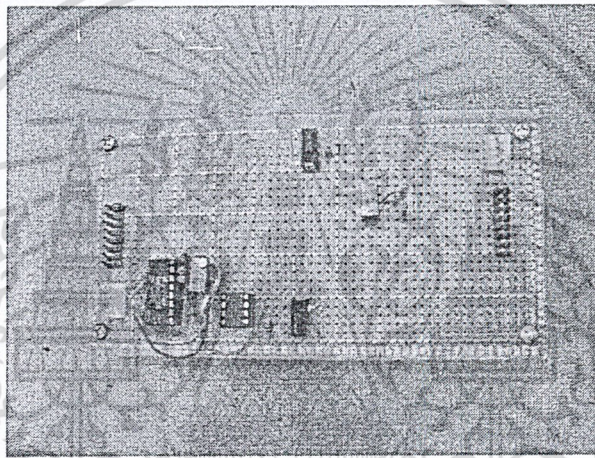
#### 4.3 Digital to Analog Interface Card

เป็นการ์ดใช้ติดต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับระบบแขนกลโดยเมื่อคอมพิวเตอร์คำนวณตำแหน่งได้ ก็จะส่งสัญญาณออกเป็นดิจิทัล แต่อุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมแขนกลทำงานด้วยระบบอนาลอกจึงต้องมีการแปลงสัญญาณ โดยใช้อุปกรณ์ตัวนี้ในการสั่งงาน servo amplifier เนื่องจากตลาดการ์ดสำเร็จรูปไม่มีการ์ด D/A Interface card 2 channel ในตัวการ์ดเดียวซึ่งในโครงการนี้ต้องใช้ เพราะฉะนั้นจึงต้องทำการสร้าง D/A card ขึ้นมาเองโดยมีรูปร่างดังรูปที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

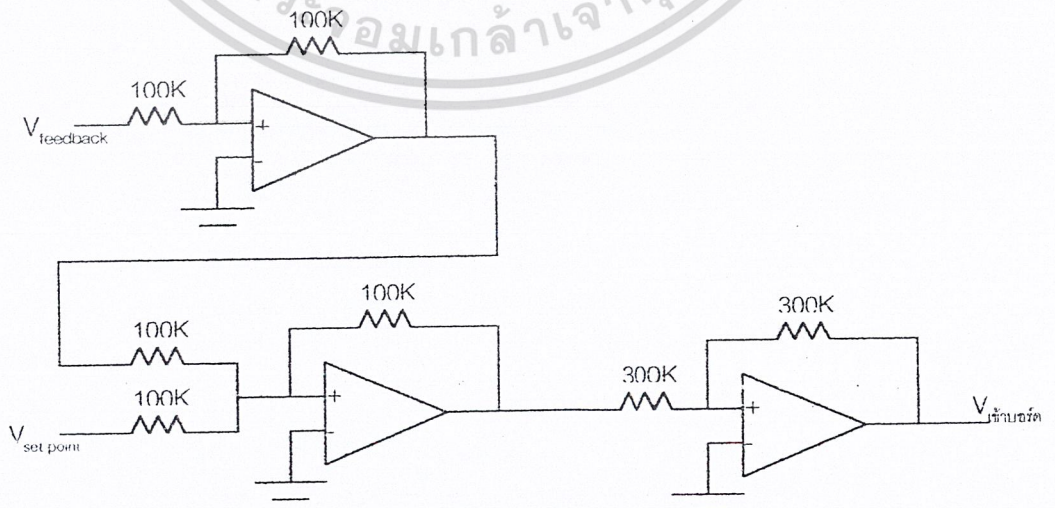


รูปที่ 4.7 แสดงวงจร Digital to Analog ที่ใช้ในโครงการซึ่งใช้ IC DAC0808 2 บิต



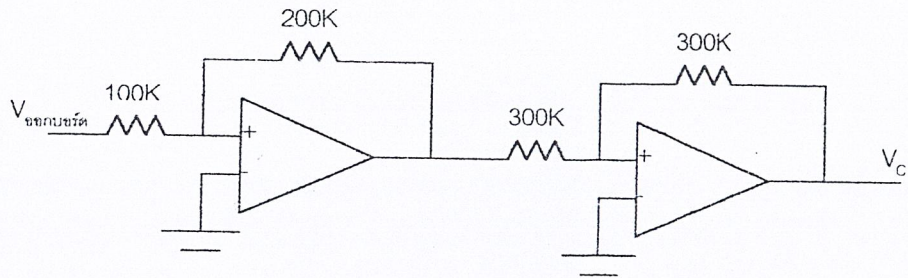
รูปที่ 4.8 แสดงวงจร D/A ที่สร้างขึ้นในโครงการ

เนื่องจากวงจร D/A ที่เลือกมีช่วงเอาต์พุตอยู่ที่ 0-10 V ดังนั้นจึงต้องต่อวงจรเพิ่มเติมเพื่อให้เอาต์พุตมีช่วงเป็น  $\pm 10$  V โดยใช้วงจรรวมและวงจรขยาย ดังรูป



รูปที่ 4.9 วงจรรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



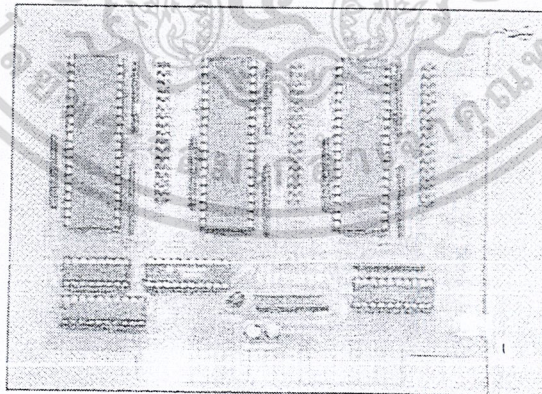
รูปที่ 4.10 วงจรขยาย มีเกน=2

#### 4.4 Input Output Card

ET-PC8255 เป็นการ์ดต่อขยายระบบเครื่อง PC ให้มีส่วนของ input, output port ใช้งานมากขึ้น โดยจะมี port ใช้งานเป็น input หรือ output จำนวน 9 port การทำงานของ ET-PC8255 ประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ ส่วน IC8255 ซึ่งเป็น IC ทำหน้าที่เป็น input, output port และส่วนของวงจร IC DECODE (เลือกตำแหน่งของ port 8255) คือ IC74LS688, 74LS139 และ DIP SW.

การใช้งาน IC 8255 ประกอบด้วย port ใช้งาน 3 port และอีก 1 port ควบคุมก่อนที่จะใช้งาน 8255 จะต้องส่งข้อมูลไปให้ยัง port ควบคุมก่อนว่าจะให้ port ทั้ง 3 port ของ 8255 ที่เหลือนั้นทำหน้าที่อะไร เป็น input หรือ output port เราจะต้องเป็นผู้กำหนด Control Code Port

ET-PC8255



รูปที่ 4.11 การ์ดอินพุตเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### การควบคุมเชิงสัดส่วนอินทิกรัลและอนุพันธ์

## PROPORTIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVE CONTROL

การควบคุมแบบนี้เป็นการรวมเอาคุณสมบัติของการควบคุมแบบ P, I และ D เข้าด้วยกันจึงนิยมเรียกการควบคุมแบบนี้อย่างสั้น ๆ ว่า การควบคุมแบบ PID ซึ่งเป็นการควบคุมที่สมบูรณ์แบบมากที่สุด กล่าวคือความเร็วและความแม่นยำในการตอบสนองต่อสัญญาณผิดพลาดจะสูง ความสัมพันธ์ของสัญญาณที่ควบคุมหรือสัญญาณเอาต์พุตกับสัญญาณอินพุตหรือสัญญาณผิดพลาดของการควบคุมแบบ PID นี้สามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการได้ว่า

$$p = K_p e_p + K_i \int_0^t e_p dt + K_d \frac{de_p}{dt} \quad (5.1)$$

$$p = K_p e_p + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e_p dt + K_p T_d \frac{de_p}{dt} \quad (5.2)$$

$$p = K_p e_p \left( 1 + \frac{1}{T_i D} + T_d D \right) \quad (5.3)$$

โดยที่  $K_p$  = เกนของตัวควบคุมเชิงสัดส่วน

$K_i$  = เกนของตัวควบคุมแบบอินทิกรัล

$K_d$  = เกนของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์

$T_i$  = เวลาในการอินทิกรัล

$T_d$  = เวลาในการอนุพันธ์

### 5.1 การเลือกและการปรับแต่งอุปกรณ์ควบคุม (Selecting & Tuning Controller)

หลักเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจเลือกและปรับแต่งตัวแปรของอุปกรณ์ควบคุมอยู่หลายวิธี โดยทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการควบคุมและออกแบบตัวอย่างเช่น ต้องการลดค่าการตอบสนองสูงสุดของระบบควบคุมให้มีค่าน้อยที่สุด ต้องการลดช่วงเวลาเข้าสู่สมดุลหรือเสถียรภาพให้สั้นที่สุด ต้องการลดค่าความคลาดเคลื่อนรวมในการควบคุมให้มีค่าน้อยที่สุด เป็นต้น ซึ่งแน่นอนว่าการใช้หลักเกณฑ์ในการเลือกและตัดสินใจที่แตกต่างกันย่อมจะทำให้ระบบควบคุมได้ผลของการควบคุมที่แตกต่างกันออกไป การเลือกอุปกรณ์ควบคุมเพื่อลดความยุ่งยากในการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์และเหมาะสม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับการออกแบบระบบควบคุมสามารถทำได้โดยพิจารณาการตอบสนองของกระบวนการจากผลการควบคุมแบบ P, PI และ PID ดังนี้

● การควบคุมแบบ P

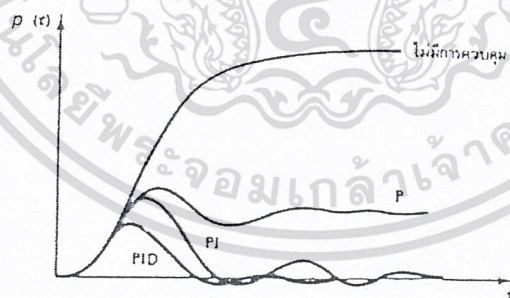
- ทำให้กระบวนการตอบสนองต่อตัวแปรเข้าเร็วขึ้น
- ทำให้ระบบควบคุมรวมมีความคลาดเคลื่อนในการควบคุมเกิดขึ้นเสมอภายหลังการเปลี่ยนแปลง เป้าหมายการควบคุมหรือภาระการควบคุม

● การควบคุมแบบ I

- ทำให้ระบบควบคุมรวมไม่มีความคลาดเคลื่อนในการควบคุมแต่มีค่าการตอบสนองสูงสุดเกิดขึ้น ทำให้ความคลาดเคลื่อนในการควบคุมของกระบวนการในช่วงแรกมากกว่ากระบวนการเดิม
- ทำให้กระบวนการตอบสนองต่อตัวแปรเข้าภายนอกช้าลง เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเดิม และผลการตอบสนองจะมีการแกว่งเกิดขึ้นเสมอ
- การปรับค่า  $K_p$  เพิ่มขึ้นในการควบคุมแบบ I จะทำให้กระบวนการตอบสนองเร็วขึ้นแต่มีการแกว่งเพิ่มขึ้นทำให้เสถียรภาพของระบบรวมลดลง

● การควบคุมแบบ D

- การควบคุมแบบนี้จะส่งสัญญาณควบคุมเพื่อปรับสภาพการก่อนความคลาดเคลื่อนจริงจะเกิดขึ้นกับกระบวนการทำให้การควบคุมมีผลดีกว่าการควบคุมแบบอื่น
- การควบคุมแบบนี้จะช่วยเพิ่มเสถียรภาพของกระบวนการให้ดีขึ้น



รูปที่ 5.1 ผลการตอบสนองของกระบวนการที่ใช้อุปกรณ์ควบคุมแบบต่างๆ

รูปที่ 5.1 แสดงคุณสมบัติของอุปกรณ์ควบคุมแบบต่าง ๆ ที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการ โดยอุปกรณ์ควบคุมที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการควบคุมกระบวนการมากที่สุดก็คือ อุปกรณ์ควบคุมแบบ PID ซึ่งทั้งนี้มันสามารถเปลี่ยนแปลงลักษณะผลการตอบสนองของกระบวนการได้มากที่สุด โดยสามารถปรับตัวแปรได้ 3 ค่าคือ  $K_p$ ,  $T_i$  และ  $T_d$  แต่ในขณะเดียวกันก็ทำให้การปรับแต่งอุปกรณ์ควบคุมเอกจากนี้ดีกว่าการควบคุมแบบอื่น การเลือกชนิดของอุปกรณ์ควบคุมแบบวงปิดหรือป้อนกลับให้ถาวรควบคุมการดำเนินงานว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการได้ผลดีและสามารถปรับอุปกรณ์ควบคุมได้ง่ายนั้นเราควรใช้หลักเกณฑ์การพิจารณาดังต่อไปนี้

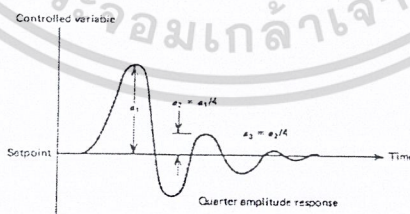
- เลือกใช้อุปกรณ์ควบคุมแบบ P ถ้าการควบคุมกระบวนการนั้นไม่จำเป็นต้องได้ผลการควบคุมที่แม่นยำนัก โดยปรับค่า  $K_p$  ของอุปกรณ์ควบคุมให้มีความคลาดเคลื่อนในการควบคุมเกิดขึ้นในช่วงที่ยอมรับได้
- เลือกใช้อุปกรณ์ควบคุมแบบ PI ถ้าเราไม่สามารถที่จะใช้อุปกรณ์ควบคุมแบบ P ได้ทั้งนี้เนื่องจากจากการควบคุมไม่ต้องการให้มีความคลาดเคลื่อนในการควบคุมเกิดขึ้นเลย
- เลือกใช้อุปกรณ์ควบคุมแบบ PID ถ้าไม่สามารถที่จะใช้อุปกรณ์ควบคุมแบบ PI ได้ ทั้งนี้เนื่องจากว่า การควบคุมแบบ PI นั้นแม้ว่าไม่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการควบคุมได้ก็จริงแต่การตอบสนองของกระบวนการจะช้าลง ซึ่งการเพิ่มความเร็วในการตอบสนองของกระบวนการโดยการปรับค่า  $K_p$  เพิ่มขึ้นจะทำให้ผลการตอบสนองของระบบรวมมีการแกว่งเพิ่มขึ้นและเสถียรภาพลดลง ดังนั้นการใช้อุปกรณ์ควบคุมแบบ PID จะทำให้ผลของการควบคุมไม่มีความคลาดเคลื่อนในการควบคุมเกิดขึ้น เราสามารถปรับค่า  $K_p$  เพื่อให้กระบวนการตอบสนองเร็วขึ้น โดยเสถียรภาพของระบบยังคงเดิม

## 5.2 การปรับอุปกรณ์ควบคุม

### Controller tuning

การเลือกค่าตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมกับกระบวนการหรือการปรับอุปกรณ์ควบคุมให้สามารถควบคุมกระบวนการได้ดีและมีประสิทธิภาพโดยทั่วไปนั้นจะมีอยู่ 4 วิธีด้วยกันกล่าวคือ

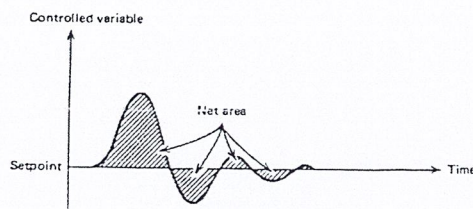
- การปรับอุปกรณ์ควบคุมโดยกำหนดกฎเกณฑ์การควบคุมจากผลการตอบสนองของกระบวนการเฉพาะจุด เช่น ลดการตอบสนองสูงสุดให้มีค่าน้อยที่สุด ปรับผลการตอบสนองของกระบวนการให้มีอัตราการลดทอนเป็น  $1/4$  (quarter – decay) ลดเวลาสู่สมดุลของกระบวนการให้สั้นที่สุด ซึ่งการปรับอุปกรณ์ควบคุมโดยวิธีนี้มักทำให้ได้ค่าตัวแปรควบคุมหลายชุด



รูปที่ 5.2 การปรับผลการตอบสนองของกระบวนการให้มีอัตราการลดทอนเป็น  $1/4$

- การปรับอุปกรณ์ควบคุมโดยใช้หลักเกณฑ์การอินทิเกรตค่าเวลาความคลาดเคลื่อนแบบต่าง ๆ การปรับอุปกรณ์ควบคุมด้วยวิธีนี้ต้องให้การคำนวณค่อนข้างมากทำให้เสียเวลาและมักไม่สามารถใช้กับกระบวนการจริงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### รูปที่ 5.3 การปรับผลการตอบสนองของกระบวนการให้มีพื้นที่(การแกว่ง)ต่ำสุด

จากรูปที่ 5.3 พื้นที่สุทธิ (net area) ของการเบี่ยงเบนเราสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$A = \int |r - b| dt$$

โดยที่  $A$  = พื้นที่ของการเบี่ยงเบน

$b$  = ค่าที่ได้จากการวัด

$r$  = ค่าอ้างอิงหรือค่าที่ต้องการ

- การปรับอุปกรณ์ควบคุม โดยใช้สูตรสำเร็จที่ได้จากการทดลองซึ่งสามารถแบ่งออกได้อีก 2 วิธี คือ

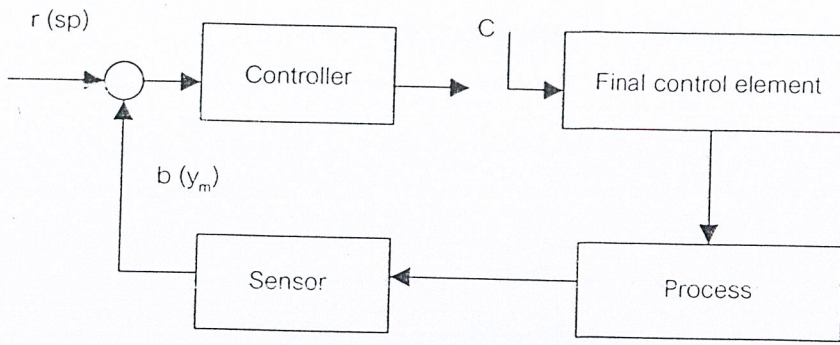
- การหาผลการตอบสนองของกระบวนการเปิด (process reaction curve method)
- การหาผลการแกว่งของระบบปิด (closed loop cycling method)

#### 5.2.1 การปรับอุปกรณ์ควบคุมโดยการหาผลการตอบสนองของกระบวนการเปิด

Open loop transient response method

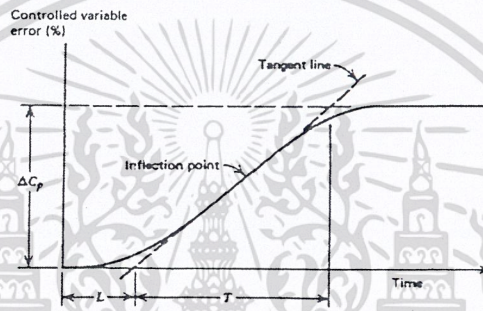
ระบบควบคุมกระบวนการดังรูปที่ 9.27 ถ้าเราเปิดวงจรควบคุมออกระหว่างตัว

ควบคุมกับอุปกรณ์ ควบคุมตัวสุดท้ายและทำการป้อนสัญญาณปรับกระบวนการ (C) ให้อุปกรณ์ควบคุมตัวสุดท้ายเป็นสัญญาณระดับ (step function) ขนาดของสัญญาณเท่ากับ  $A$  แล้วสังเกตผลการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์หรืออุปกรณ์ตรวจวัดซึ่งเป็นการตอบสนองของระบบ ( $b$ )



รูปที่ 5.4

ผลการตอบสนองของกระบวนการจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของกระบวนการเดิม ซึ่งรวมทั้ง อุปกรณ์ตรวจวัดและอุปกรณ์ควบคุมตัวสุดท้าย อย่างไรก็ตามการตอบสนองของกระบวนการส่วนใหญ่ จะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งรูปตัวเอส (S) ดังแสดงด้วยรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5

จากรูปที่ 9.28 เมื่อกำหนดให้

$L$  = เวลาล่าหลัง (lag time ; min)

$T$  = เวลาปฏิกิริยาของกระบวนการ (min)

$\Delta C_p$  = ช่วงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่ถูกควบคุม (%)

$N$  = อัตราปฏิกิริยา (reaction rate ; %/ min)

$R$  = อัตราส่วนลอจ (log ratio)

ดังนั้น

$$N = \frac{\Delta C_p}{T}$$

$$R = \frac{NL}{\Delta C_p}$$

จี.เอช.โคเฮน (G.H. Cohen) และ จี.เอ.คูน (G.A. Coon) ได้ทำการทดลองปรับอุปกรณ์ควบคุม และหาสูตรสำเร็จที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการปรับตัวแปรของอุปกรณ์ควบคุมแบบ P, PI และ PID เพื่อให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการมีอัตราการลดทอนเป็นหนึ่งส่วนสี่ (quarter – decay) ลดความคลาดเคลื่อนในการควบคุมให้ มีค่าน้อยที่สุด โดยมีค่าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

อุปกรณ์ควบคุมแบบ P:

$$K_p = \frac{\Delta p}{NL} \left[ 1 + \frac{1}{3} \frac{NL}{\Delta C_p} \right]$$

อุปกรณ์ควบคุมแบบ PI:

$$K_p = \frac{\Delta p}{NL} \left[ 1 + \frac{1}{3} \frac{NL}{\Delta C_p} \right]$$

$$T_I = L \left[ \frac{30 + 3r}{9 + 20} \right]$$

อุปกรณ์ควบคุมแบบ PID:

$$K_p = \frac{\Delta p}{NL} \left[ 1.33 + \frac{R}{4} \right]$$

$$T_I = L \left[ \frac{32 + 6R}{13 + 8R} \right]$$

$$T_d = L \left[ \frac{4}{11 + 2R} \right]$$

สูตรการปรับอุปกรณ์ควบคุมของ โทเฮนและกุน สามารถใช้กับระบบควบคุมที่กระบวนการมี การตอบสนองลักษณะเป็นเส้นโค้งรูปตัวเอส (S) เท่านั้น ถ้าไม่สามารถประมาณค่าตัวแปรกระบวนการ จากเส้นโค้งคือ  $K_p$ ,  $T_I$  และ  $T_d$  ได้อย่างถูกต้อง ค่าตัวแปรที่ใช้ปรับอุปกรณ์ควบคุมจากสูตรของ โทเฮน และกุน สามารถใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการปรับอุปกรณ์ควบคุมโดยการลองผิดลองถูกในลำดับต่อไป

การปรับอุปกรณ์ควบคุมโดยใช้สูตรสำเร็จของ โทเฮนและกุน หากเราสังเกตก็จะพบว่าค่าการปรับ ค่า  $K_p$  ในอุปกรณ์ควบคุมแบบ PI จะมีค่าน้อยกว่าการปรับค่าในอุปกรณ์ควบคุมแบบ P ทั้งนี้ก็เนื่องมาจาก ว่าผลการควบคุมแบบ I จะทำให้ระบบรวมมีเสถียรภาพลดลงจึงต้องลดค่าของ  $K_p$  เพื่อรักษาเสถียรภาพ ของระบบไว้ และการปรับอุปกรณ์ควบคุมแบบ PID เราสามารถเพิ่มค่า  $K_p$  ได้มากกว่าอุปกรณ์ควบคุม แบบ P และ PI ทั้งนี้เนื่องจากผลการควบคุมแบบ D จะช่วยทำให้ระบบรวมมีเสถียรภาพดีขึ้น

### 5.2.1 การปรับอุปกรณ์ควบคุมโดยการหาผลแกว่งของระบบปิด

#### Closed loop cycling method

การปรับอุปกรณ์ควบคุมโดยวิธีหาผลแกว่งของระบบวงปิดต่างจากวิธีการหา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นโค้งแสดงการตอบสนองของกระบวนการ ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากเราไม่จำเป็นต้องเปิดวงจรถวลุม ออกทำให้สามารถทดสอบและปรับอุปกรณ์ควบคุมในกระบวนการได้โดยตรง การปรับตัวแปรของ อุปกรณ์ควบคุมด้วยวิธีนี้มีขั้นตอนที่สำคัญดังจะกล่าวถึงในลำดับต่อไป

- ปรับอุปกรณ์ควบคุมให้ระบบรวมอยู่ในสภาพสมดุลไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปร กระบวนการและสัญญาณควบคุม
- ปรับตัวแปรให้อุปกรณ์ควบคุมเหลือการควบคุมแบบ P อย่างเดียวโดยปรับค่า  $T_I$  ให้มีค่ามากที่สุดและปรับค่า  $T_D$  ให้มีค่าน้อยสุด
- เปลี่ยนค่าเป้าหมาย ( $r$ ) การควบคุมและสังเกตผลการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรกระบวนการจากค่าที่ตรวจวัด
- ปรับอุปกรณ์ควบคุมโดยเพิ่มค่า  $K_p$  จนค่าของตัวแปรกระบวนการแกว่งด้วยความถี่และขนาดคงที่
- บันทึกค่าอัตราการควบคุมแบบ P ที่ทำให้ระบบมีการแกว่ง โดยมีขนาดคงที่ ( $K_C$ ) และคาบเวลาการแกว่งของตัวแปรกระบวนการ ( $T_C$ )

ซีเกลอร์ (Ziegler) และ นิโกลส์ (Nichols) ได้ทดสอบหาสูตรการปรับตัวแปรของอุปกรณ์ควบคุม โดยวัดคุณสมบัติของกระบวนการจากผลการแกว่งของระบบปิดได้ดังนี้

อุปกรณ์ควบคุมแบบ P:

$$K_p = 0.5K_C$$

อุปกรณ์ควบคุมแบบ PI :

$$K_p = 0.45K_C$$

$$T_I = T_C/1.2$$

การควบคุมแบบ PID:

$$K_p = 0.6K_C$$

$$T_I = T_C/2.0$$

$$T_D = T_C/8$$

### 5.2.2 การปรับอุปกรณ์ควบคุมโดยวิธีการลองผิดลองถูก

#### Trial and error method

การปรับอุปกรณ์ควบคุมโดยใช้สูตรสำเร็จจากการทดลองต่าง ๆ นั้นบางครั้งเรา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่สามารถที่จะทำให้การควบคุมกระบวนการได้ผลดีเท่าที่ควร ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากว่ากระบวนการที่ใช้ในการทดลองหาสูตรสำหรับอุปกรณ์ควบคุมมีคุณสมบัติบางอย่างที่ต่างจากกระบวนการจริงที่เราต้องการควบคุม ดังนั้นค่าตัวแปรควบคุมที่ได้จากการใช้สูตรสำเร็จก็สามารถใช้ได้เพียงเป็นค่าเริ่มต้นในการปรับอุปกรณ์ควบคุมโดยไม่ทำให้ระบบรวมสูญเสียเสถียรภาพ การทดลองปรับอุปกรณ์ควบคุมโดยสังเกตผลจากการพิจารณาค่าวัดของตัวแปรกระบวนการมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

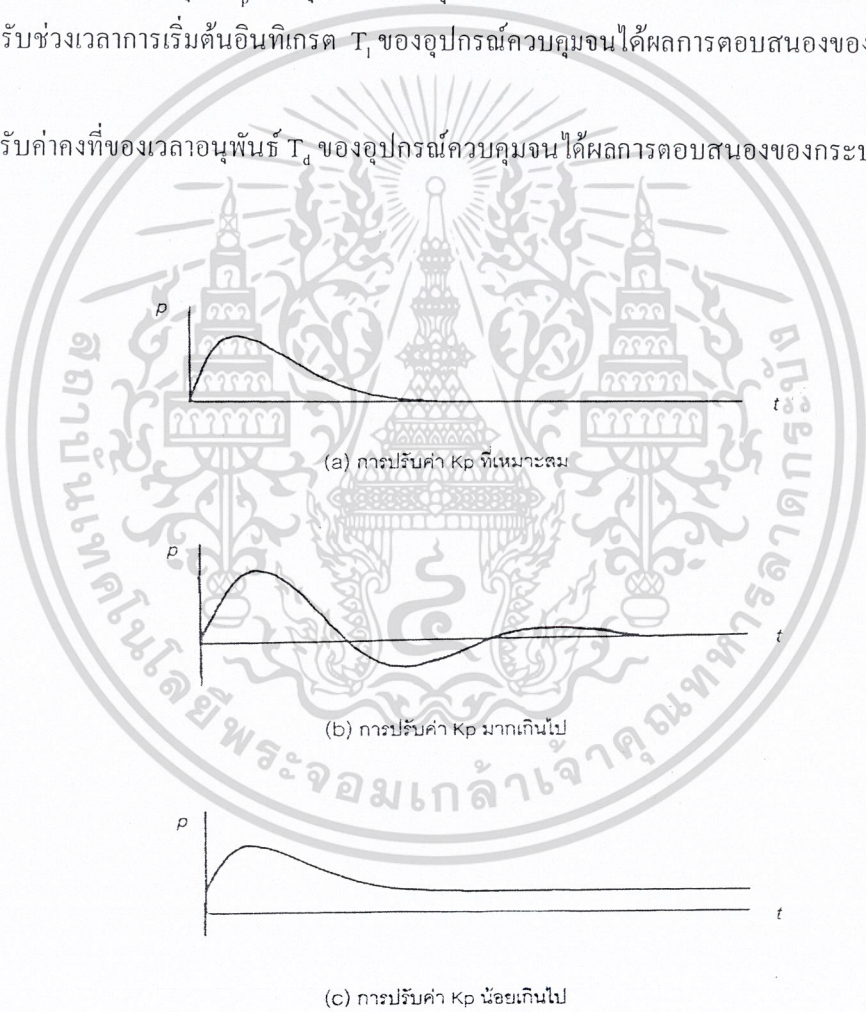
-ปรับอุปกรณ์ควบคุมให้ระบบรวมอยู่ในสภาพสมดุลไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรกระบวนการและสัญญาณควบคุม

-เปลี่ยนค่าเป้าหมายการควบคุมและสังเกตผลการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรกระบวนการจากค่าวัด

-ปรับอัตราการควบคุม  $K_p$  ของอุปกรณ์ควบคุมจนได้ผลการตอบสนองของกระบวนการดีที่สุด

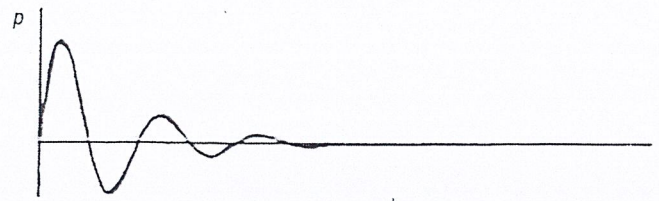
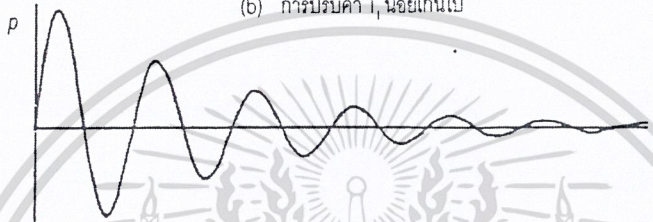
-ปรับช่วงเวลาการเริ่มต้นอินทิเกรต  $T_i$  ของอุปกรณ์ควบคุมจนได้ผลการตอบสนองของกระบวนการดีที่สุด

-ปรับค่าคงที่ของเวลาอนุพันธ์  $T_d$  ของอุปกรณ์ควบคุมจนได้ผลการตอบสนองของกระบวนการดีที่สุด

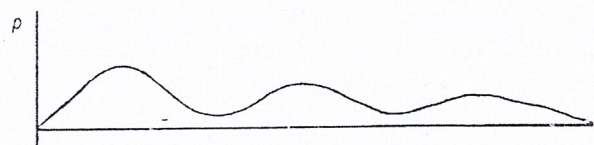


รูปที่ 5.6 ผลการปรับค่า  $K_p$  ของอุปกรณ์ควบคุมแบบ P

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(a) การปรับค่า  $T_i$  ที่เหมาะสม(b) การปรับค่า  $T_i$  น้อยเกินไป(c) การปรับค่า  $T_i$  มากเกินไป

### รูปที่ 5.7 ผลการปรับค่า $T_i$ ของอุปกรณ์ควบคุมแบบ PI

(a) การปรับค่า  $T_d$  ที่เหมาะสม(b) การปรับค่า  $T_d$  มากเกินไป(c) การปรับค่า  $T_d$  น้อยเกินไป

### รูปที่ 5.8 ผลการปรับค่า $T_d$ ของอุปกรณ์ควบคุมแบบ PID

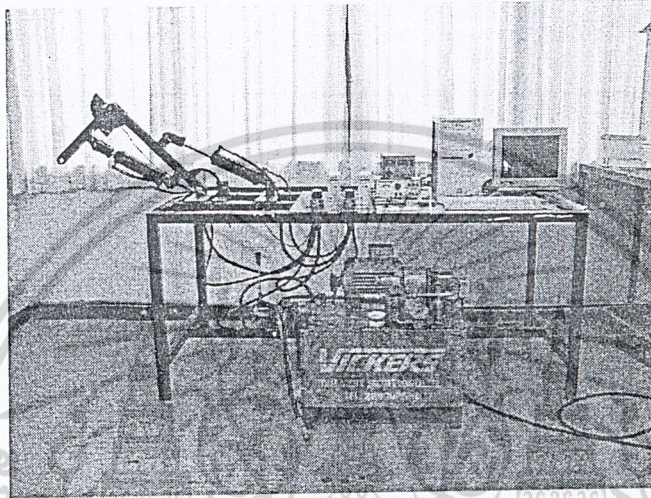
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

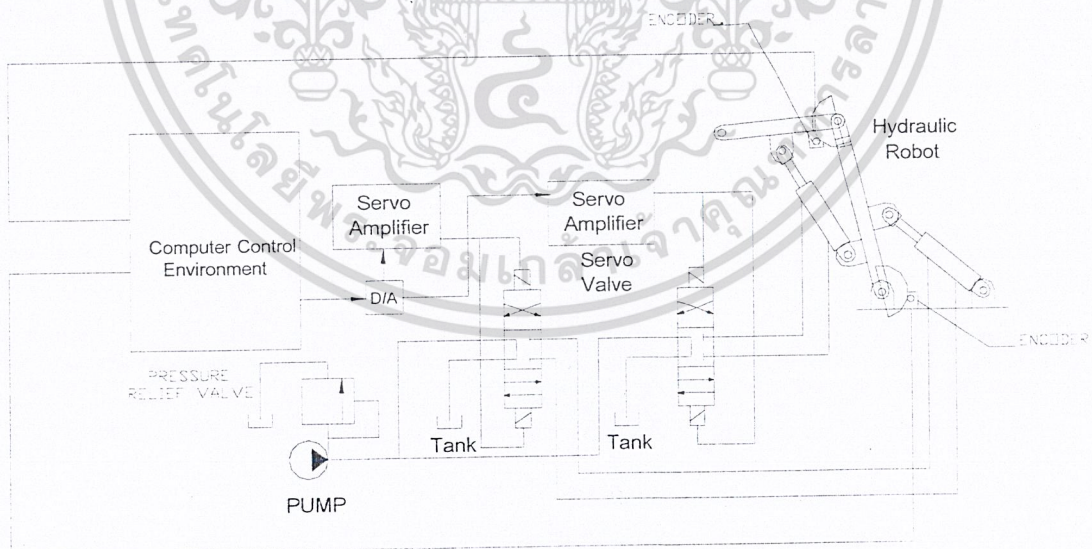
### หลักการทํางานและผลของการทดลอง

#### 6.1 หลักการทํางาน

##### 6.1.1 การทํางานของระบบ



รูปที่ 6.1 แสดงภาพประกอบสำเร็จของโครงการ



รูปที่ 6.2 Diagram การทํางานของระบบแขนกล

เริ่มต้นการทํางานเมื่อเราสั่งงานความเร็วเข้าสู่คอมพิวเตอร์ เอนโค้ดเดอร์ จะวัด pulse ส่งมายังคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลเป็นความเร็ว และเปรียบเทียบความเร็วสั่งงานกับความเร็วที่วัดได้ จะได้ค่า

ความผิดพลาดของความเร็วที่ต้องเพิ่มขึ้นอีกใน Sampling\*<sup>1</sup> นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เริ่มต้นการทำงานเมื่อเราสั่งงานความเร็วเข้าสู่คอมพิวเตอร์ เอนโคเดอร์ จะวัด pulse ส่งมายังคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลเป็นความเร็ว และเปรียบเทียบความเร็วสั่งงานกับความเร็วที่วัดได้ จะได้ค่าความผิดพลาดของความเร็วที่ต้องเพิ่มขึ้นอีกใน Sampling นั้น

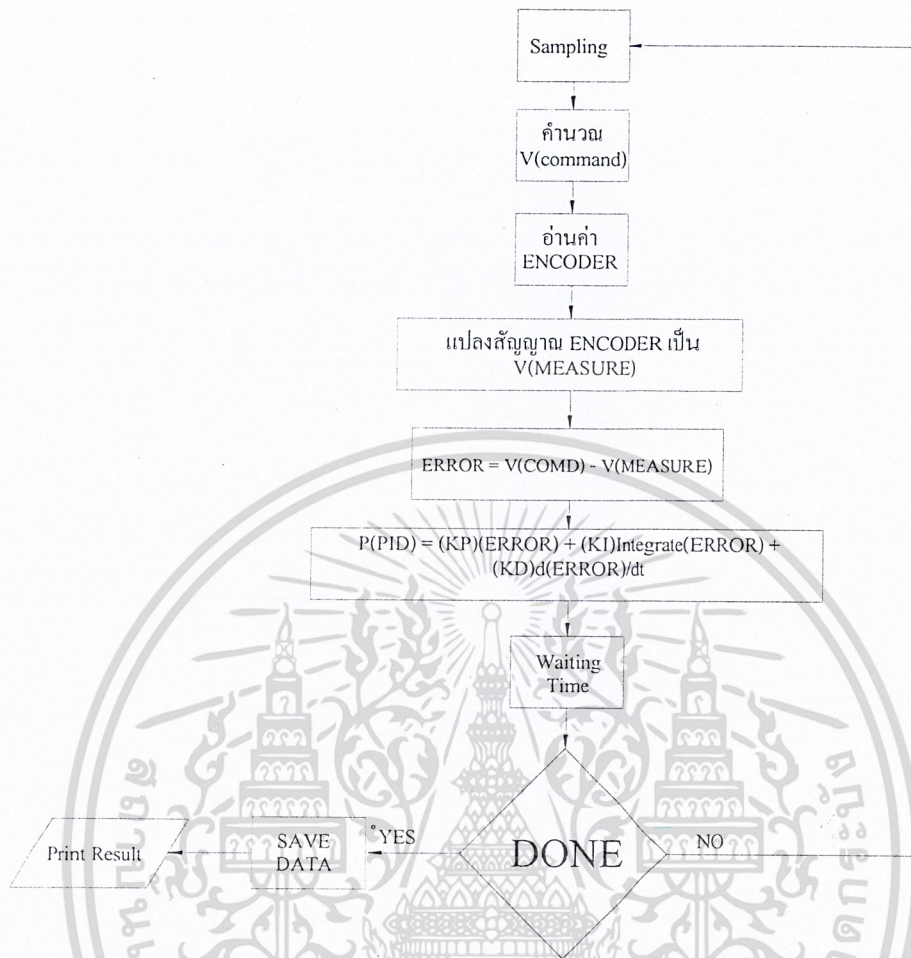
ความผิดพลาดที่ได้ไปประมวลผลในส่วนขอระบบควบคุมแบบ PID ซึ่งจากการประมวลผลจะทำให้ได้ค่า  $U_{PID}$  ซึ่งมีหน่วยความเร็ว เราต้องนำมารหารด้วยค่า Gain ของระบบซึ่งได้มาจากความชันของกราฟคุณลักษณะของระบบ (Characteristic graph) มีหน่วยเป็นความเร็ว / volts เมื่อหารกันจะได้ค่า Volts ที่ต้องการทำให้ได้ความเร็วตรงตามคำสั่ง

คอมพิวเตอร์จะส่งสัญญาณ Volts นั้นไปยัง Digital to Analog Interface Card เพื่อแปลงสัญญาณเป็นไฟ  $\pm 10$  Volts เพื่อนำไปใช้ในการขับ Servo Amplifier และแอม Servo Amplifier จะบังคับ Servo Valve ให้ได้ความเร็วตามต้องการโดยมี pump คอยส่งน้ำมันเข้าสู่ Servo valve ผ่านไปขับกระบอกสูบ และเมื่ออยู่ในตำแหน่งกลางจะมี pressure Relief valve คอยปลดความดันลงถึงน้ำมัน

### 6.1.2 Sampling

Sampling คือรอบการสั่งทำงานของคอมพิวเตอร์ ซึ่งใน 1 Sampling มีขั้นตอนการทำงานดังนี้คือ

1. วัดค่า Encoder ออกมาเข้าคอมพิวเตอร์ เพื่อประมวลผลได้เป็นความเร็ว
2. วัดค่า ความเร็วสั่งงาน (Velocity Command)
3. นำมาลบจากกันได้ค่าความผิดพลาด (Error) ของความเร็ว
4. นำมาประมวลผลในสูตรของระบบควบคุม PID ได้  $U_{PID}$
5. นำค่า  $U_{PID}$  หารด้วย Gain ของระบบซึ่งได้จากการทดลอง ได้ค่า Volt ที่ต้องการในการเพิ่มความเร็ว
6. Volts ที่ได้จะส่งเข้า Digital to Analog Card เพื่อแปลงสัญญาณมาขับ Servo Amplifier
7. เมื่อได้ความเร็วตามต้องการจึงรอ Sampling ต่อไป เพื่อเริ่มต้นการทำงานต่อไป



รูปที่ 6.3 Digram การทำงานของการ Sampling

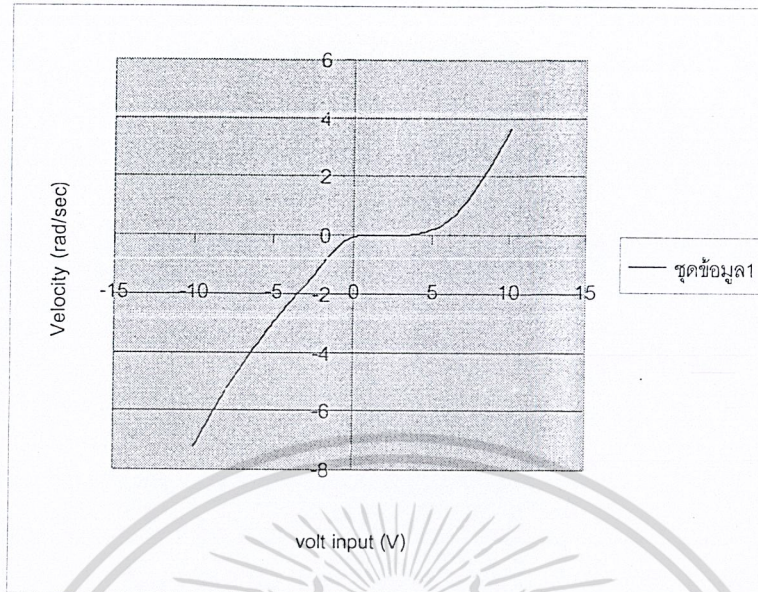
\*หมายเหตุ 1 Sampling คือ ความของการทำงานในคอมพิวเตอร์ซึ่งจะแบ่งตามเวลาในการเคลื่อนที่ ออกเป็นคาบเล็กๆ เรียกว่า Sampling ซึ่งในที่นี้ใช้คาบ 1 Sampling = 50 ms

## 6.1 ผลการทดลอง

จากหลักการทำงาน ระบบจะทำงานได้ต้องได้ค่าแกนของระบบก่อนจึงจะสามารถสั่งงานได้ ซึ่งค่าแกนหาได้จากค่าความชันของกราฟ Velocity กับ Volt input จากการทดลองจึงได้กราฟดังรูปที่ 6.4 และมีความชันของกราฟ = 0.78398 ซึ่งคือค่าแกนของระบบ

### 6.2.1 การทดลองที่ 1 การทดลองเปรียบเทียบค่าความเร็วกับโวลต์อินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.4 ผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเร็วกับโวลต์อินพุต

เริ่มการทดลองป้อนค่าอินพุตเป็นความเร็ว โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะควบคุมความเร็วของแขนกล ซึ่งอินพุตความเร็วนี้กำหนดให้อยู่ในฟังก์ชัน  $\sin$

จากค่าการทดลองในรูป 6.4 ค่า velocity เร็วสุดได้ 7.26091 rad/sec ในโครงงานนี้ออกแบบให้มีแอมพลิจูดความเร็วที่ 3 rad/sec และมีค่าเท่ากับ 1.2566 เพราะฉะนั้น

$$V_{\text{command}} = 3 \sin 1.2566t$$

เมื่อรันโปรแกรมจะมรการให้ใส่ค่า  $K_p$  และ  $K_i$  เพื่อใช้ในการปรับค่าให้ได้ความเร็วที่วัดจาก Rotary encoder เข้าใกล้  $V_{\text{command}}$  โดยการทดลองจะคงค่า  $K_p$  และเปลี่ยนค่า  $K_i$  เพื่อดูความแตกต่างในการปรับค่า ซึ่งได้ผลดังรูป

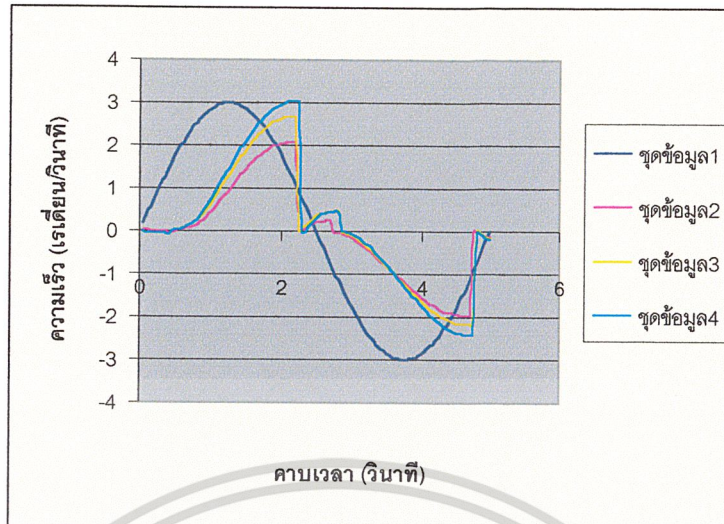
#### 6.2.2 การทดลองที่ 2

ชุดข้อมูลที่ 1 คือ  $V_{\text{command}}$

ชุดข้อมูลที่ 2 คือ ความเร็วที่วัดได้เมื่อ  $K_i=0.5$ ,  $K_p=1$

ชุดข้อมูลที่ 3 คือ ความเร็วที่วัดได้เมื่อ  $K_i=1$ ,  $K_p=1$

ชุดข้อมูลที่ 4 คือ ความเร็วที่วัดได้เมื่อ  $K_i=1.5$ ,  $K_p=1$



รูปที่ 6.5 ผลการทดลองที่ 2

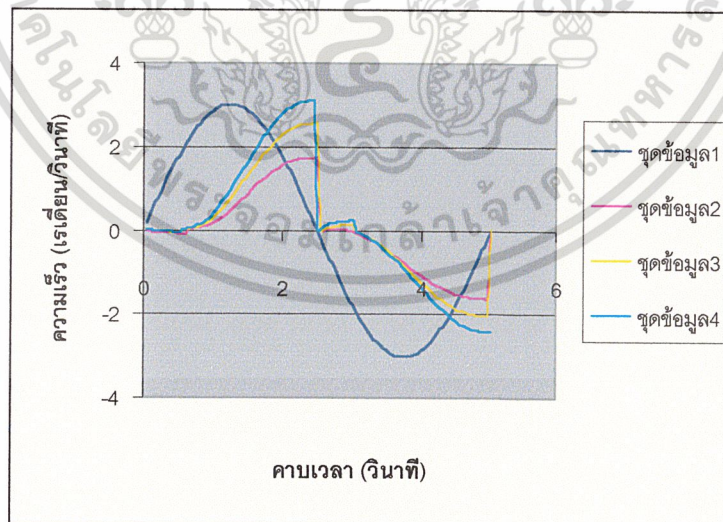
### 6.2.3 การทดลองที่ 3

ชุดข้อมูลที่ 1 คือ  $V_{command}$

ชุดข้อมูลที่ 2 คือ ความเร็วที่วัดได้เมื่อ  $K_i=0.5$ ,  $K_p=1.5$

ชุดข้อมูลที่ 3 คือ ความเร็วที่วัดได้เมื่อ  $K_i=1$ ,  $K_p=1.5$

ชุดข้อมูลที่ 4 คือ ความเร็วที่วัดได้เมื่อ  $K_i=1.5$ ,  $K_p=1.5$



รูปที่ 6.6 ผลการทดลองที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

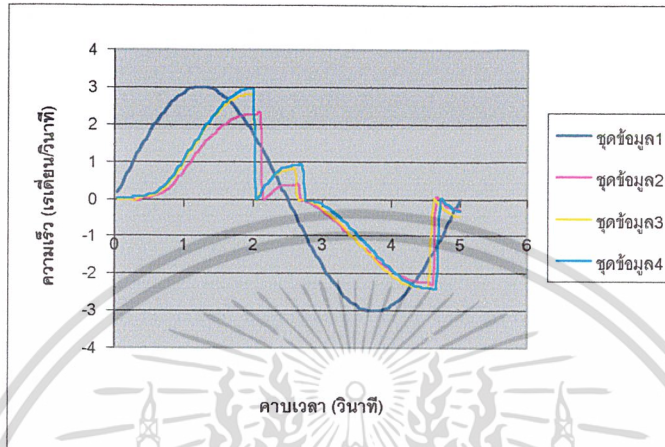
#### 6.2.4 การทดลองที่ 4

ชุดข้อมูลที่ 1 คือ  $V_{command}$

ชุดข้อมูลที่ 2 คือ ความเร็วที่วัดได้เมื่อ  $K_i=0.5$  ,  $K_p=2$

ชุดข้อมูลที่ 3 คือ ความเร็วที่วัดได้เมื่อ  $K_i=1$  ,  $K_p=2$

ชุดข้อมูลที่ 4 คือ ความเร็วที่วัดได้เมื่อ  $K_i=1.5$  ,  $K_p=2$



รูปที่ 6.7 ผลการทดลองที่ 3

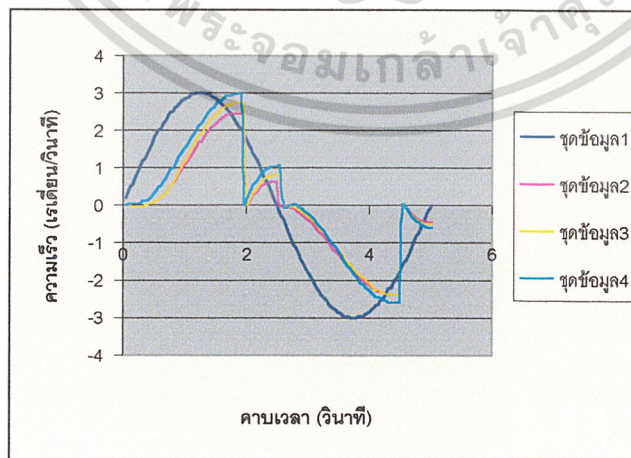
#### 6.2.5 การทดลองที่ 5

ชุดข้อมูลที่ 1 คือ  $V_{command}$

ชุดข้อมูลที่ 2 คือ ความเร็วที่วัดได้เมื่อ  $K_i=0.5$  ,  $K_p=2.5$

ชุดข้อมูลที่ 3 คือ ความเร็วที่วัดได้เมื่อ  $K_i=1$  ,  $K_p=2.5$

ชุดข้อมูลที่ 4 คือ ความเร็วที่วัดได้เมื่อ  $K_i=1.5$  ,  $K_p=2.5$



รูปที่ 6.8 ผลการทดลองที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.3 วิจัยและสรุปผลการทดลอง

จากการทดลองปรับค่า  $K_p$  และ  $K_i$  ได้ผลการปรับคือเมื่อปรับค่า  $K_i$  เพิ่มขึ้นจะได้ผลของความเร็วตรงตามต้องการมากกว่าเมื่อใช้  $K_i$  น้อย ดูได้จากผลการทดลองรูปที่ 6.5 และ รูปที่ 6.8 คือค่า  $K_i$  เท่ากับ 0.5 และ 1.5 มีผลแตกต่างกันที่เมื่อ  $K_i$  มีค่ามากการเข้าใกล้ความเร็วที่ออกแบบจะทำให้เร็วกว่าเมื่อ  $K_i$  มีค่าน้อย เพราะฉะนั้นสรุปได้ว่าการปรับค่า  $K_i$  ควรปรับให้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

และเมื่อพิจารณาการปรับค่า  $K_p$  จากรูปที่ 6.5 และรูปที่ 6.8 คือค่า  $K_p$  เท่ากับ 1 และ 2.5 มีผลแตกต่างกันคือเมื่อค่า  $K_p$  มากยิ่งมีผลทำให้ระบบได้การเคลื่อนที่ไม่เสถียรจะมีการกระชากเปลี่ยนตำแหน่งอย่างรุนแรงและกระทันหัน เมื่อเทียบกับเมื่อค่า  $K_p$  น้อยจะได้การเคลื่อนที่ที่เสถียรมากกว่ามีความราบเรียบกว่า เพราะฉะนั้นสรุปได้ว่าการปรับค่า  $K_p$  ควรปรับให้มีแนวโน้มลดลง

จากผลการทดลองจะเห็นว่าความเร็วที่วัดได้จริงกับความเร็วที่ออกแบบไว้มีค่าแตกต่างกันค่อนข้างมากซึ่งอาจมีสาเหตุมาจาก

การวัดค่า pulse ที่ส่งมาจากโรตารีเอนโคเดอร์ อาจจะส่งมายังเครื่องคอมพิวเตอร์ไม่หมด เนื่องมาจากการสลิประหว่างขอบยางที่ขับเคลื่อนกับตัวเอนโคเดอร์

การปรับค่า  $K_p$  และ  $K_i$  ต้องใช้ความชำนาญและใช้เวลาค่อนข้างมากในการปรับค่า

เนื่องจากผลการทดลองกราฟความเร็ว-โวลต์จะมีค่า dcad band ของเซอร์โวว่าลู่อยู่ที่ 2.426 V ต้องจ่ายไฟถึง 2.426 V เซอร์โวว่าลู่จึงจะเริ่มมีการเคลื่อนตำแหน่ง ซึ่งอาจจะทำให้มีความผิดพลาดของความเร็วได้ แต่ในส่วนความผิดพลาดของ dcad band อาจมีการชดเชยได้ในโปรแกรม

### 6.4 สรุป

โครงการนี้สร้างขึ้นเพื่อรองรับความต้องการของโรงงานอุตสาหกรรมสมัยใหม่ ซึ่งเปลี่ยนแปลงจากการใช้ระบบ manual เป็นระบบ automatic และต้องการความแม่นยำในการควบคุม แต่เนื่องจากการทดลองมีความคลาดเคลื่อนของความเร็วค่อนข้างมาก เนื่องจากขาดประสบการณ์ในการปรับแต่งค่า  $K_p$ ,  $K_i$  และค่า error ของอุปกรณ์ต่างๆ เนื่องจากสัญญาณที่ใช้ควบคุมต้องผ่านอุปกรณ์หลายชั้น ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดความคลาดเคลื่อนของความเร็ว

สำหรับคำแนะนำโครงการนี้ที่จะทำเสริมต่อไป เพื่อเพิ่มความสามารถของแขนกลคือ สร้างมีอจจับเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานให้ทำงานได้หลากหลายขึ้น และอาจเขียนโปรแกรมรอกค่าเอาท์พุทให้มีค่าต่อเนื่องขึ้น ไม่กระโดดขึ้นลงอย่างฉับพลัน ลดความเสียหายของระบบได้

### บรรณานุกรม

- [1] ดร.วริทธิ์ อิงภากรณ์ , ชาญ ถนัดงาน:"การออกแบบเครื่องจักรกลเล่ม 1 " ,ซีเอ็ดยูเคชั่น, กรุงเทพฯ.2541
- [2] สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ:"กลศาสตร์เครื่องจักรกล",โครงการตำราสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,กรุงเทพฯ.2538
- [3] ขวัญชัย สันทิพย์สมบูรณ์,ปานเพชร ชินินทรณ์:"ไฮดรอลิกอุตสาหกรรม" , ซีเอ็ดยูเคชั่น, กรุงเทพฯ.2541
- [4] พรจิต ประทุมสุวรรณ,"แมคคาทรอนิกส์:การควบคุมงานกลด้วยไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์",เรือนแก้วการพิมพ์.2537
- [5] พรจิต ประทุมสุวรรณ,"พื้นฐานหุ่นยนต์และเครื่องจักรกลอัตโนมัติ:ระบบไฮดรอลิกและนิวแมติกส์", เรือนแก้วการพิมพ์.2537
- [6] Kinematics Analysis and Synthesis "JACK T.KIMRELL"
- [7] Modern Control Engineering "Katsuhiko Okata"
- [8] Robert J."Fundamental of Robotics: Analysis and control " ,Prentice-Hall.1990
- [9] Richard S. Figliola , Donald E. Beasley : "Theory and Design for Measurements", John Wiley & sons,Inc.1995.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

int hh,mm,ss,ds;
int th,tm,ts,td;

int i,j,k,ind;
double x[611],ua[611],xr[201];
char cont;
long int stime,etime,total_time;
double volts,in_volts,velocity,sum,w,t,dis_fac,ua_fac,amp,ua_bias;
double ui,ki,ki0,kidt,kidt0,dt,kp,kp0,err,u_pi,xd,dxd,xd_bias;
unsigned int output;

```

```
time T,OldT,ST;
```

```
FILE *fp_xd,*fp_vel,*fp_tim,*fp_volts;
```

```
//-----
```

```
/*funtion*/
```

```
void InitialCount(GroupData& G)
```

```
{
```

```
    G.Phase = G.Count = G.OldA = G.OldB = 0;
```

```
    G.A = G.B = G.Check = G.Time = 0;
```

```
}
```

```
//-----
```

```
int PulseChange(GroupData& G)
```

```
{
```

```
    if(G.OldA != G.A || G.OldB != G.B)
```

```
        return 1;
```

```
    else return 0;
```

```
}
```

```
//-----
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
void PhaseCheck(GroupData& G)
```

```
{
```

```
  if(PulseChange(G))
```

```
  {
```

```
    if(G.OldA == 0 && G.OldB == 0)
```

```
    {
```

```
      if(G.A != 0 && G.B == 0)
```

```
      {
```

```
        if(G.Phase == 2)
```

```
        {
```

```
          G.Time++;
```

```
          if(G.Time >= MAX)
```

```
          {
```

```
            InitialCount(G);
```

```
            G.Count = 0;
```

```
            G.Phase = 1;
```

```
            G.Check = 1;
```

```
            G.Value++;
```

```
          }
```

```
        }
```

```
      else
```

```
      {
```

```
        G.Phase = 1;
```

```
        G.Check = 1;
```

```
        G.Value++;
```

```
      }
```

```
    }
```

```
  else if(G.A == 0 && G.B != 0)
```

```
  {
```

```
    if(G.Phase == 1)
```

```
    {
```

```
      G.Time++;
```

```
      if(G.Time >= MAX)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    {
        InitialCount(G);
        G.Phase = 2;
        G.Check = 1;
        G.Value--;
    }
}
else
{
    G.Phase = 2;
    G.Check = 1;
    G.Value--;
}
}
}
}
}
//-----

```

```

void PulseCount(GroupData& G)
{
    if(PulseChange(G))
    if(G.OldA == 0 && G.OldB == 0)
    {
        if(G.A != 0 || G.B != 0)
            G.Count++;
    }
}
//-----

```

```

void GetData(GroupData& G,int ID)
{
    G.OldA = G.A;
    G.OldB = G.B;

```

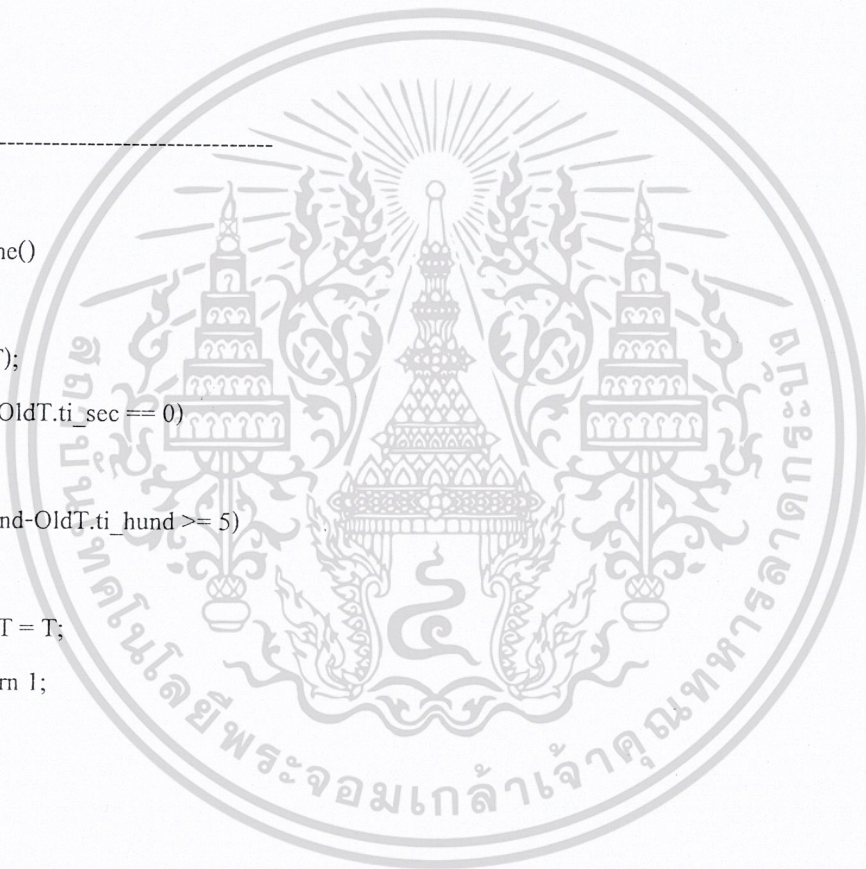
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if(ID == 1)
{
    G.A = inport(PA) & bitsetA1;
    G.B = inport(PA) & bitsetB1;
}
else
{
    G.A = inport(PA) & bitsetA2;
    G.B = inport(PA) & bitsetB2;
}
}
//-----

int CheckTime()
{
    gettime(&T);
    if(T.ti_sec-OldT.ti_sec == 0)
    {
        if(T.ti_hund-OldT.ti_hund >= 5)
        {
            OldT = T;
            return 1;
        }
    }
else
{
    if((T.ti_hund+100-OldT.ti_hund) >= 5)
    {
        OldT = T;
        return 1;
    }
}
return 0;
}

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
//-----
```

```
void CountCheck()
```

```
{
```

```
do
```

```
{
```

```
  GetData(G1,1);
```

```
  GetData(G2,2);
```

```
  PhaseCheck(G1);
```

```
  PhaseCheck(G2);
```

```
  if(G1.Check) PulseCount(G1);
```

```
  if(G2.Check) PulseCount(G2);
```

```
  } while(!CheckTime()); //until time = 0.05 s
```

```
}
```

```
//-----
```

```
void SendData1(int Value)
```

```
{
```

```
  outport(PD,0x80);
```

```
  outport(PB,Value);
```

```
}
```

```
//-----
```

```
void SendData2(int Value)
```

```
{
```

```
  outport(PD,0x80);
```

```
  outport(PC,Value);
```

```
}
```

```
//-----
```

```
void SendData(int Value1,int Value2)
```

```
{
```

```
  outport(PD,0x80);
```

```
  outport(PB,Value1);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\*\*\*\*\*

## โปรแกรมควบคุมการทำงานของแขนกล (ภาษาC++)

\*\*\*\*\*

```
#include<iostream.h>
#include<stdio.h>
#include<conio.h>
#include<math.h>
#include<dos.h>
/*constant*/
const PA = 0x300;
const PB = 0x301;
const PC = 0x302;
const PD = 0x303;

const bitsetA1 = 0x04;
const bitsetB1 = 0x08;
const bitsetA2 = 0x40;
const bitsetB2 = 0x80;

const MAX = 6;
const LENGTH = 100;

struct GroupData
{
    int A,B,OldA,OldB,Phase,Change,Time,Check;
    long int Count;
    int Value;
};

/*global variable*/

GroupData G1,G2;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    outport(PC,Value2);
}
//-----

int main(void)
{
    clrscr();
    outport(PD,0x90);
    G1.Value = 0;
    G2.Value = 0;
    InitialCount(G1);
    InitialCount(G2);

    /* while(1)
    {
    int a;
    cin >> a;
    outport(PB,a);
    }
    int ad;

    // for(ad=0;ad<2;ad++)
    while (ad!=256)
    {

    printf("Enter ad\n");
    scanf(" %d",&ad);
    //SendData1(128);
    outport(PB,ad);
    cout << ad << "\n";
    delay(100);
    }
    */

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{
  outport(PB,a);
  cout << a << "\n";
  delay(200);
} */

outport(PB,141);
dt = 0.05;
ui = 0.0;
ki0 = 50.0;
kidt0 = dt*ki0;
kp0 = 0.0;
w = 1.2566;
amp = 3;
dis_fac = 100/amp;
ua_fac = dis_fac/4;

fp_xd = fopen("xd.txt","w");
fp_vel = fopen("vel.txt","w");
fp_tim = fopen("time.txt","w");
fp_volts = fopen("volts.txt","w");

cout << "Output files are 'xd.txt', 'vel.txt' and 'time.txt'\n\n";

for(j=1;j<=LENGTH;j++)
{
  t = j * dt;
  xr[j] = amp * sin(w*t);
}

cout << "Enter ki -> ";
cin >> ki;

cout << "Enter kp -> ";

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

cin >> kp;
cout << "Enter to Start\n";
getch();

cout << "\nPlease wait ...\n";

kidt = ki*dt;

gettime(&ST);
for(k=1;k<=LENGTH;k++)
{
int Tmp;

    gettime(&OldT);
    xd = xr[k];
    CountCheck();
    Tmp = G1.Count;
    if(G1.Phase == 1)
        Tmp = -Tmp;
    velocity = 0.006169*Tmp;
    err = xd - velocity;
    ui = ui + kidt*err;
    u_pi = ui + kp*err;
    fprintf(fp_xd,"%f\n",xd);
    fprintf(fp_vel,"%f\n",velocity);
    fprintf(fp_tim,"%d %d\n",int(T.ti_sec),int(T.ti_hund));
    volts = u_pi/0.78318;
    // volts = (1.026+4*k*dt);
    // output = floor(255*(volts/10));
    fprintf(fp_volts,"%f\n ",volts);
    output = floor(255*(volts-(-10))/(20));
    // printf("%10f %10f %5d %5d\n",xd,velocity,int(T.ti_sec),int(T.ti_hund));
    outport(PB,output);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
fclose(fp_xd);  
fclose(fp_vel);  
fclose(fp_tim);  
fclose(fp_volts);  
  
outport(PB,141);  
cout << "Complete!!!\n";  
return 0;  
}
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้