

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การควบคุมแบบป้อนกลับของแขนกลไฮดรอลิก  
FEEDBACK CONTROL OF HYDAULIC ROBOT



นาย มงคล หงษ์ชัย  
นาย วรเดช ไกรกิจราษฎร์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 50172

วัน,เดือน,ปี..... 1 เม.ย. 2547

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมแบบป้อนกลับของแขนกลไฮดรอลิก  
FEEDBACK CONTROL OF HYDRAULIC ROBOT

โดย

นาย มงคล หงษ์ชัย

นาย วรเดช ไกรกิจราษฎร์



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2545

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
เรื่อง การควบคุมแบบป้อนกลับของแขนกลไฮดรอลิก

FEEDBACK CONTROL OF HYDRAULIC ROBOT

ผู้จัดทำ

1. นายมงคล หงษ์ชัย รหัสประจำตัว 42010591
2. นายวรเดช ไกรกิจราษฎร์ รหัสประจำตัว 42010608



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.อนุชาติ พินิจโสภณ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การควบคุมแบบป้อนกลับของแขนกลไฮดรอลิก

นาย มงคล หงษ์ชัย 42010591

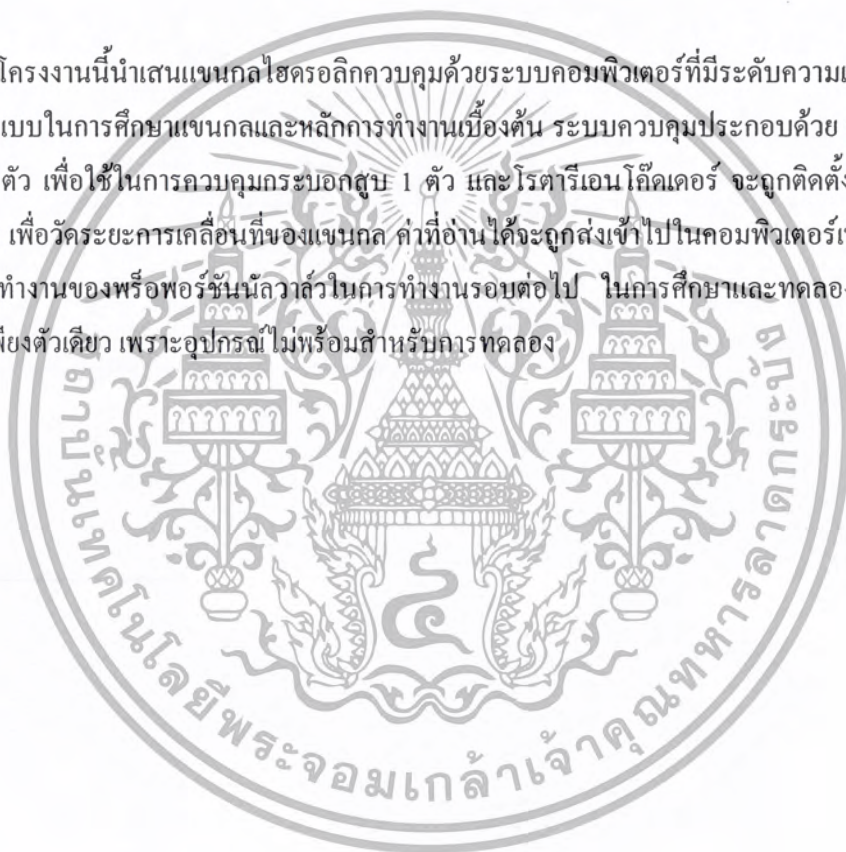
นาย วรเดช ไกรกิจราษฎร์ 42010608

ดร.อนุรัตน์ พิณโสภณ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2545

### บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอแขนกลไฮดรอลิกควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ที่มีระดับความเสรี 2 ชั้น เพื่อเป็นต้นแบบในการศึกษาแขนกลและหลักการงานเบื้องต้น ระบบควบคุมประกอบด้วย พร็อพอร์ชันนัลวาล์ว 1 ตัว เพื่อใช้ในการควบคุมกระบอกสูบ 1 ตัว และโรตารีเอ็นโค้ดเดอร์ จะถูกติดตั้งแต่ละข้อต่อของแขนกล เพื่อวัดระยะการเคลื่อนที่ของแขนกล ค่าที่อ่านได้จะถูกส่งเข้าไปในคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของพร็อพอร์ชันนัลวาล์วในการทำงานรอบต่อไป ในการศึกษาและทดลองใช้กระบอกสูบตัวล่างเพียงตัวเดียว เพราะอุปกรณ์ไม่พร้อมสำหรับการทดลอง



**FEEDBACK CONTROL OF HYDRAULIC ROBOT**

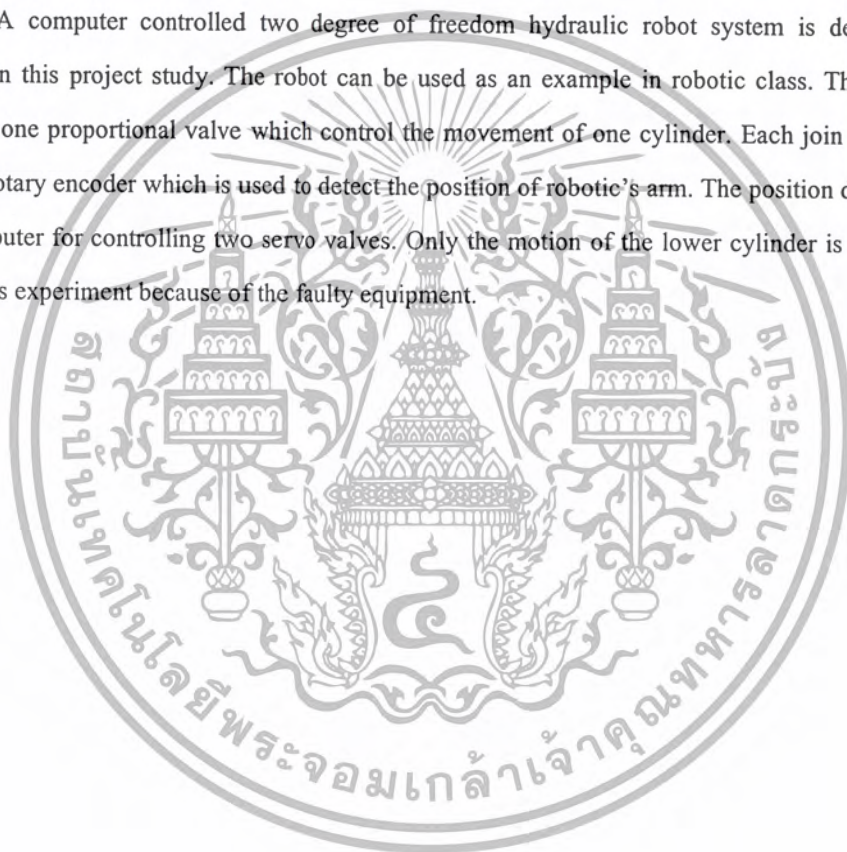
Mr. Mongkol Hongchai 42010591

Mr. Woradet Kraikitrat 42010608

Dr. Unnat Pinsopon Adviser

**Abstract**

A computer controlled two degree of freedom hydraulic robot system is designed and fabricated in this project study. The robot can be used as an example in robotic class. The hydraulic system has one proportional valve which control the movement of one cylinder. Each join of robotis's arm has a rotary encoder which is used to detect the position of robotic's arm. The position data are sent to the computer for controlling two servo valves. Only the motion of the lower cylinder is studied and tested in this experiment because of the faulty equipment.



### กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ได้จัดทำขึ้นเพื่อประกอบการเรียนวิชา Project ซึ่งนับว่าเป็นโอกาสอันดีที่ทำให้นักศึกษาได้นำความรู้ในภาคทฤษฎีมาทำการปฏิบัติการ เป็นการเพิ่มพูนความรู้ และประสบการณ์ให้นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ดร.อุนนติ พินโสภณ อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์และอาจารย์เอกพงษ์ ดันตราภิวัดน์ เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำแนะนำ และคำปรึกษาเกี่ยวกับการทำโครงการนี้

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูข้าพเจ้ามาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมาในทุกๆ ด้าน อันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้



มงคล หงษ์ชัย  
บรรณารักษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

| เรื่อง             | หน้า |
|--------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย    | I    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | II   |
| กิตติกรรมประกาศ    | III  |
| สารบัญ             | IV   |
| สารบัญรูปภาพ       | VII  |

## บทที่ 1 บทนำ

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| 1.1 บทนำ                        | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ      | 2 |
| 1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ | 2 |
| 1.4 ขอบเขตของงาน                | 2 |
| 1.5 วิธีดำเนินงาน               | 2 |

## บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานไฮดรอลิก

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 2.1 ระบบไฮดรอลิก           | 4  |
| 2.2 การใช้งานระบบไฮดรอลิก  | 5  |
| 2.3 น้ำมันไฮดรอลิก         | 5  |
| 2.4 ปัมไฮดรอลิก            | 6  |
| 2.5 ระบายอากาศไฮดรอลิก     | 6  |
| 2.6 ถังพักน้ำมันไฮดรอลิก   | 7  |
| 2.7 พร้อพอร์ชันนัลวาล์ว    | 8  |
| 2.8 เงื่อนไขการซ้อนของสปูล | 8  |
| 2.9 อัตราการไหล            | 10 |
| 2.10 ฮีสเตอร์ซิส           | 12 |
| 2.11 เทรสโพลด์             | 13 |
| 2.12 ข้อดีของระบบไฮดรอลิก  | 13 |

## บทที่ 3 การออกแบบแขนกล

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 3.1 การออกแบบพื้นที่การทำงาน | 15 |
| 3.2 การออกแบบจุดต่อ          | 15 |
| 3.2.1 การหาขนาดของแบริ่ง     | 16 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|  |   |    |
|--|---|----|
| 3.2.2                                    | การหาค่าความปลอดภัยของสลัก  | 18 |
| 3.2.3                                    | การติดตั้งบุช   | 19 |
| 3.3                                      | การออกแบบที่ติดตั้งโรตารีเอนโค้ดเดอร์เข้ากับข้อต่อทั้งสองของแขนกล           | 20 |
| <b>บทที่ 4 อุปกรณ์ในการควบคุมแขนกล</b>   |   |    |
| 4.1                                      | บทนำ  | 22 |
| 4.2                                      | ระบบควบคุมแขนกลไฮดรอลิก   | 23 |
| 4.3                                      | ชุดแขนกล  | 23 |
| 4.4                                      | กระบอกสูบไฮดรอลิก   | 23 |
| 4.5                                      | คอมพิวเตอร์   | 24 |
| 4.6                                      | โรตารีเอนโค้ดเดอร์  | 24 |
| 4.7                                      | การ์ดนับรอบ   | 24 |
| 4.8                                      | แอมพลิไฟเออร์   | 25 |
| 4.9                                      | Data Acquisition Card   | 27 |
| 4.10                                     | เซอร์โววาล์ว  | 29 |
| <b>บทที่ 5 ระบบควบคุมแขนกลไฮดรอลิก</b>   |   |    |
| 5.1                                      | บทนำ  | 30 |
| 5.2                                      | การตรวจจับสัญญาณผิดพลาด   | 31 |
| 5.3                                      | การควบคุมแบบสองตำแหน่ง  | 32 |
| 5.4                                      | การควบคุมเชิงสัดส่วน  | 33 |
| 5.5                                      | การควบคุมแบบอินทิกรัล   | 36 |
| 5.6                                      | การควบคุมแบบอนุพันธ์  | 38 |
| 5.7                                      | การควบคุมเชิงสัดส่วนบวกอินทิกรัล  | 39 |
| 5.8                                      | การควบคุมเชิงสัดส่วนบวกอนุพันธ์   | 41 |
| 5.9                                      | การควบคุมเชิงสัดส่วนบวกอินทิกรัลและอนุพันธ์                                 | 42 |
| 5.10                                     | การเลือกและการปรับแต่งอุปกรณ์ควบคุม   | 43 |
| <b>บทที่ 6 หลักการทำงานและผลการทดลอง</b> |   |    |
| 6.1                                      | วิธีการทดลอง  | 52 |
| 6.1.1                                    | การทดลองเปรียบเทียบค่าความเร็วของแขนกลไฮดรอลิกกับค่าโวลท์อินพุท             | 52 |
| 6.1.2                                    | การทดลองเปรียบเทียบค่าความเร็วของแขนกลที่วัดได้จริงกับค่าความเร็วที่ต้องการ | 55 |
| 6.2                                      | ผลการทดลอง  | 56 |
| 6.3                                      | วิเคราะห์ผลการทดลอง   | 65 |

6.5 สรุปผลการทดลอง

66

6.6 แนวทางการพัฒนา

66



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

| เรื่อง  | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 2.1 อุปกรณ์พื้นฐานในการทำงานของระบบไฮดรอลิก  | 4    |
| รูปที่ 2.2 แสดงการทำงานของกระบอกสูบแบบทำงานสองทาง   | 7    |
| รูปที่ 2.3 โครงสร้างและส่วนประกอบของถังพักน้ำมัน  | 7    |
| รูปที่ 2.4 ก แสดงสปลูซึ่งมีพื้นที่เกินกว่าขอบของพอร์ต(over-lab)                                   | 9    |
| รูปที่ 2.4 ข แสดงสปลูซึ่งมีพื้นที่พอดีกับขอบของพอร์ต(zero or critical lab)                        | 9    |
| รูปที่ 2.4 ค แสดงพื้นที่ของขอบสปลูที่มีค่าน้อยไม่สามารถเปิดพอร์ตได้พอดี(under-lab)                | 9    |
| รูปที่ 2.5 แสดงการเกิด Dead band  | 10   |
| รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์อัตราการไหลกับสัญญาณอินพุท   | 10   |
| รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์อัตราการไหลกับสัญญาณอินพุทเมื่อไม่มี Dead band                     | 10   |
| รูปที่ 2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์อัตราการไหลกับสัญญาณอินพุทเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรอบตำแหน่งศูนย์     | 11   |
| รูปที่ 2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์อัตราการไหลกับสัญญาณอินพุทเมื่อมีการซ้อนของสปลูน้อยกว่าขอบของพอร์ต | 11   |
| รูปที่ 2.10 แสดงสปลูของกระบอกสูบที่ปิดไม่สนิท   | 11   |
| รูปที่ 2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์อัตราการไหลกับสัญญาณอินพุทเมื่อสปลูอยู่ในตำแหน่งต่างๆ             | 12   |
| รูปที่ 2.12 แสดงอัตราการไหลด้านเอาต์พุทแตกต่างกันเพราะฮิสเตอร์ซิส                                 | 12   |
| รูปที่ 2.13 แสดงอัตราการไหลลดลงเพราะทรสไฮลด์  | 13   |
| รูปที่ 3.1 ตำแหน่งการติดตั้งของกระบอกสูบ  | 15   |
| รูปที่ 3.2 แสดงทิศทางของแรงกระทำที่จุดต่อที่ฐาน   | 16   |
| รูปที่ 3.3 แสดงจุดต่อของแบร็งและสลัก  | 17   |
| รูปที่ 3.4 แสดงขนาดของสลัก  | 19   |
| รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะและขนาดของบุช  | 19   |
| รูปที่ 3.6 แสดงขนาดของแขนกล   | 20   |
| รูปที่ 4.1 แสดงภาพประกอบสำเร็จของโครงงาน  | 22   |
| รูปที่ 4.2 แสดงระบบแขนกลไฮดรอลิกส์  | 22   |
| รูปที่ 4.3 แสดงระบบควบคุมแบบย้อนกลับของแขนกลไฮดรอลิก  | 23   |
| รูปที่ 4.4 แสดงรูปร่างของโรตารีเอนโค้ดเดอร์   | 24   |
| รูปที่ 4.5 แสดงวงจรอิเล็กทรอนิกส์อป-แอม   | 25   |
| รูปที่ 4.6 แสดงรูปร่างของเซอร์โวแอมพลิไฟเออร์   | 27   |
| รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะของเซอร์โววาล์ว  | 29   |
| รูปที่ 5.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของอุปกรณ์ควบคุม  | 30   |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| รูปที่ 5.2  | แสดงการตรวจจับสัญญาณผิดพลาด   | 31 |
| รูปที่ 5.3  | แสดงนิวัตร์ลโซน   | 32 |
| รูปที่ 5.4  | แสดงนิวัตร์ลโซนที่มีอิทธิพลต่อการควบคุม   | 33 |
| รูปที่ 5.5  | แสดงระบบควบคุมแบบ P คอนโทรล   | 34 |
| รูปที่ 5.6  | กราฟแสดงความสัมพันธ์สมการของการควบคุมแบบ P                                      | 35 |
| รูปที่ 5.7  | กราฟแสดงความสัมพันธ์สัญญาณเอาต์พุตกับสัญญาณผิดพลาด                              | 36 |
| รูปที่ 5.8  | กราฟแสดงสัญญาณที่ได้จากตัวควบคุมเมื่อกำหนดให้สัญญาณผิดพลาดเป็นสัญญาณระดับ       | 37 |
| รูปที่ 5.9  | แสดงค่าสัญญาณเอาต์พุตที่มีค่าของ $K_p$ แตกต่างกัน                               | 38 |
| รูปที่ 5.10 | ตัวอย่างแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณผิดพลาดกับสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากตัวควบคุม | 39 |
| รูปที่ 5.11 | แสดงลักษณะการทำงานของระบบควบคุมแบบ PI   | 40 |
| รูปที่ 5.12 | แสดงลักษณะการควบคุมแบบ PD   | 41 |
| รูปที่ 5.13 | แสดงการควบคุมแบบ PID  | 43 |
| รูปที่ 5.14 | ผลการตอบสนองของกระบวนการที่ใช้กระบวนการที่ใช้อุปกรณ์ควบคุมแบบต่างๆ              | 44 |
| รูปที่ 5.15 | แสดงการปรับผลการตอบสนองของกระบวนการให้มีอัตราลาดทอนเป็น $1/4$                   | 45 |
| รูปที่ 5.16 | แสดงการปรับผลการตอบสนองของกระบวนการให้มีพื้นที่ (การแกว่ง) ต่ำสุด               | 45 |
| รูปที่ 5.17 | แสดงการปรับอุปกรณ์ควบคุมโดยการหาผลการตอบสนองของกระบวนการเปิด                    | 46 |
| รูปที่ 5.18 | แสดงผลการตอบสนองการปรับอุปกรณ์ควบคุมโดยการหาผลการตอบสนองของกระบวนการเปิด        | 47 |
| รูปที่ 5.19 | แสดงผลการปรับค่า $K_p$ ของอุปกรณ์ควบคุมแบบ P                                    | 50 |
| รูปที่ 5.20 | แสดงผลการปรับค่า $T_i$ ของอุปกรณ์ควบคุมแบบ PI                                   | 50 |
| รูปที่ 5.21 | แสดงผลการปรับค่า $T_d$ ของอุปกรณ์ควบคุมแบบ PID                                  | 51 |
| รูปที่ 6.1  | แสดงระยะของแกนกลที่ใช้ในการคำนวณ  | 53 |
| รูปที่ 6.2  | กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเร็วกับเวลาเมื่อกระบอกสูบชักออก                         | 56 |
| รูปที่ 6.3  | กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเร็วกับเวลาเมื่อกระบอกสูบชักเข้า                        | 56 |
| รูปที่ 6.4  | กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเร็วกับโวลท์อินพุต                                      | 57 |
| รูปที่ 6.5  | กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเร็วกับคาบเวลา เมื่อ $K_p = 1$ และ $K_i = 0$            | 57 |
| รูปที่ 6.6  | กราฟแสดงความสัมพันธ์ $U_{pi}$ กับคาบเวลา เมื่อ $K_p = 1$ และ $K_i = 0$          | 58 |
| รูปที่ 6.7  | กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเร็วกับคาบเวลา เมื่อ $K_p = 0$ และ $K_i = 2$            | 58 |
| รูปที่ 6.8  | กราฟแสดงความสัมพันธ์ $U_{pi}$ กับคาบเวลา เมื่อ $K_p = 0$ และ $K_i = 2$          | 59 |
| รูปที่ 6.9  | กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเร็วกับคาบเวลา เมื่อ $K_p = 0$ และ $K_i = 20$           | 59 |
| รูปที่ 6.10 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ $U_{pi}$ กับคาบเวลา เมื่อ $K_p = 0$ และ $K_i = 20$         | 60 |
| รูปที่ 6.11 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเร็วกับคาบเวลา เมื่อ $K_p = 0$ และ $K_i = 30$           | 60 |
| รูปที่ 6.12 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ $U_{pi}$ กับคาบเวลา เมื่อ $K_p = 0$ และ $K_i = 30$         | 61 |
| รูปที่ 6.13 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเร็วกับคาบเวลา เมื่อ $K_p = 0$ และ $K_i = 40$           | 61 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| รูปที่ 6.14 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ $U_{pi}$ กับคาบเวลา เมื่อ $K_p = 0$ และ $K_i = 40$ | 62 |
| รูปที่ 6.15 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเร็วกับคาบเวลา เมื่อ $K_p = 0$ และ $K_i = 50$   | 62 |
| รูปที่ 6.16 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ $U_{pi}$ กับคาบเวลา เมื่อ $K_p = 0$ และ $K_i = 50$ | 63 |
| รูปที่ 6.17 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเร็วกับคาบเวลา เมื่อ $K_p = 0$ และ $K_i = 60$   | 63 |
| รูปที่ 6.18 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ $U_{pi}$ กับคาบเวลา เมื่อ $K_p = 0$ และ $K_i = 60$ | 64 |
| รูปที่ 6.19 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเร็วกับคาบเวลา เมื่อ $K_p = 0$ และ $K_i = 70$   | 64 |
| รูปที่ 6.20 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ $U_{pi}$ กับคาบเวลา เมื่อ $K_p = 0$ และ $K_i = 70$ | 65 |



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำ

หุ่นยนต์อุตสาหกรรมหรือเครื่องจักรอัตโนมัติ (Automatic Machine) หมายถึง เครื่องจักรกลที่สามารถตั้งโปรแกรมได้หลายๆ ครั้ง รวมทั้งสามารถปฏิบัติการได้หลายๆ หน้าที่ โดยหุ่นยนต์ได้ถูกออกแบบมาเพื่อให้หยิบ จับ เคลื่อนย้ายวัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือ หรือเครื่องใช้พิเศษต่างๆ โดยอาศัยการควบคุมโปรแกรมการเคลื่อนที่ให้ทำงานได้หลายอย่างตามที่ต้องการ

จะเห็นได้ว่าหุ่นยนต์สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงการทำงานได้ หากเราเปลี่ยนแปลงโปรแกรมใหม่ นอกจากนี้การที่หุ่นยนต์สามารถสามารถปฏิบัติงานได้หลายหน้าที่ ก็หมายความว่า มันสามารถทำงานได้มากกว่าหนึ่งงาน ดังนั้น เราจึงอาจกล่าวได้ว่าหุ่นยนต์นั้นสามารถทำงานได้หลายหน้าที่โดยจะมีความสอดคล้องกับความสามารถในการตั้งโปรแกรมได้หลายๆ ครั้งนั่นเอง

การควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์หรือเครื่องจักรกลอัตโนมัติขึ้นอยู่กับ โดยตรงกับการควบคุมการทำงานของระบบขับเคลื่อน ซึ่งระบบขับเคลื่อนส่วนใหญ่แล้วจะขึ้นอยู่กับการออกแบบ เช่น แขนกลของหุ่นยนต์อาจถูกออกแบบมาเพื่อให้เคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งโดยยกวัตถุหนักๆ ดังนั้นหุ่นยนต์ประเภทดังกล่าวจะต้องมีระบบขับเคลื่อนไฮดรอลิก ในขณะที่หุ่นยนต์บางชนิดถูกออกแบบมาให้ทำการเชื่อมในทิศทางที่ต่อเนื่องก็จะมีระบบขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า

#### 1. ระบบขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า (Electric Drive System)

เหตุผลที่มีความนิยมในการใช้ระบบขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้านั้น สาเหตุหนึ่งเนื่องมาจากการทำงานที่ค่อนข้างเงียบและส่วนใหญ่มีขนาดเล็ก และขณะนี้มีการพัฒนามอเตอร์รูปแบบใหม่ๆ ออกมา ทำให้ความก้าวหน้าของหุ่นยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยระบบนี้มีสมรรถนะสูงขึ้น นอกจากนี้ระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ายังมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับระบบอื่น อย่างไรก็ตามมอเตอร์ไฟฟ้าส่วนใหญ่จะใช้กับหุ่นยนต์ขนาดเล็กที่เรียกว่า หุ่นยนต์ฝึกหัด (Training Robot) ซึ่งหุ่นยนต์ดังกล่าวจะทำงานได้อย่างแม่นยำและมักใช้ในอุตสาหกรรมเบาหรือใช้งานในห้องทดลอง

#### 2. ระบบขับเคลื่อนด้วยไฮดรอลิก (Hydraulics Drive System)

หุ่นยนต์ซึ่งขับเคลื่อนด้วยระบบไฮดรอลิกนั้น มักใช้ในการควบคุมหรือการทำงานที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมหนัก หุ่นยนต์เหล่านี้จะถูกออกแบบมาให้ใช้ประโยชน์จากความได้เปรียบทางกลซึ่งสามารถใช้พลังงานของของไหลหรือน้ำมันได้ นอกจากนั้นอุปกรณ์ทำงาน (Actuator) ก็มีทั้งแบบเคลื่อนที่ได้ในแนวเส้นตรงและเชิงมุม จึงเป็นเหตุผลให้ถูกนำมาใช้ในหุ่นยนต์อุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากหุ่นยนต์ดังกล่าวจะต้องอาศัยพลังงานความดันของน้ำมันจึงจำเป็นต้องมีชุดต้นกำลังขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า

#### 3. ระบบขับเคลื่อนด้วยนิวเมติกส์ (Pneumatic Drive System)

หุ่นยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยระบบนิวเมติกส์นั้นค่อนข้างจะได้รับความนิยมมากกว่าหุ่นยนต์ที่ใช้ไฮดรอลิก

ทั้งนี้เนื่องมาจากระบบนิวเมติกส์มีค่าใช้จ่ายของระบบที่ต่ำกว่าระบบไฮดรอลิก ดังนั้นจึงพบว่าหุ่นยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือสงวนสิทธิ์ในบางประการโดยผู้จัดทำขึ้น และผู้จัดทำขอสงวนสิทธิ์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภทนี้ถูกนำมาใช้ในงานหลายประเภท แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการขับเคลื่อนของของไหลในนิวเมติกส์ นั้นใช้ลมอัด แรงที่ได้จึงต่ำกว่าระบบที่ขับเคลื่อนด้วยไฮดรอลิก รวมทั้งลมอัดระบบนิวเมติกส์นั้นสามารถเกิดการยุบตัวได้ (Compressible) ส่งผลให้ค่าความแม่นยำและถูกต้องนั้นน้อยกว่าระบบไฮดรอลิก นอกจากนี้การควบคุมโดยส่วนใหญ่จะอาศัยการทำงานแบบจุดต่อจุด

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. พัฒนาและปรับปรุงแขนกลไฮดรอลิก เพื่อลดปัญหาการสั่นคลอน เพิ่มความมั่นคงของชุดอุปกรณ์ ทำให้การทำงานมีประสิทธิภาพและมีความแม่นยำมากขึ้น
2. สร้างชุดในการควบคุมแขนกล ซึ่งมีดังนี้ Data Acquisition Card และ โปรแกรมที่ใช้ในการสั่งงาน โดยใช้หลักการควบคุมแบบที่เรียกว่า PI (Proportional-Integral Control)

## 1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

ศึกษาการประยุกต์ใช้ระบบไฮดรอลิก และการควบคุมการทำงานของแขนกล ชุดทดลองนี้สามารถใช้เป็นต้นแบบในการศึกษาวิชา นิวเมติกส์ - ไฮดรอลิก และ โรโบติกได้

## 1.4 ขอบเขตของงาน

1. ปรับปรุงจุดต่อของแขนกล
2. ปรับปรุงการติดตั้ง โรตารีเอ็นโคดเดอร์เข้ากับแขนกล
3. สร้างชุดในการควบคุมแขนกล เชื่อมโยงการทำงานกับคอมพิวเตอร์
4. ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าความเร็วกับค่าโวลต์อินพุท
5. ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าความเร็วของแขนกลที่วัดได้จริงกับค่าความเร็วที่ต้องการ

พิจารณา

## 1.5 วิธีการดำเนินงาน

โครงการนี้เริ่มด้วยการปรับปรุงส่วนประกอบต่างๆ ของชุดแขนกล คือ จุดต่อของแขนกล และการติดตั้งโรตารีเอ็นโคดเดอร์เข้ากับแขนกล เพื่อลดปัญหาการสั่นคลอน เพิ่มความมั่นคงของชุดอุปกรณ์ทำให้การทำงานมีประสิทธิภาพและความแม่นยำมากขึ้น ซึ่งจะได้ออกมาถึงทฤษฎีการออกแบบในบทที่ 3 จากนั้นจึงศึกษาอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในโครงการ ซึ่งแบ่งออกเป็นอุปกรณ์ทางไฮดรอลิก เช่น พร็อพอร์ชันวาล์ว, ปัม, วาล์วลดความดัน เป็นต้น โดยจะได้กล่าวถึงในบทที่ 2 และในบทที่ 4 จะได้ออกมาถึงระบบควบคุมแขนกลไฮดรอลิก รวมถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุม เช่น Data Acquisition Card, การ์ดนับรอบ เป็นต้น

จากนั้นจึงเป็นการใช้ โปรแกรมในการควบคุม ซึ่งในโครงการนี้ใช้ Borland C++ ในการสั่งงานต่อไปยังอุปกรณ์ควบคุม โดยในบทที่ 5 จะกล่าวถึงวิธีการควบคุมแบบPID (Proportional-Integral-Derivative Control) และการควบคุมแบบPI (Proportional-Integral Control) ซึ่งเป็นวิธีที่เลือกใช้ในโครงการนี้ ในส่วนของบทที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ชิ้นตอนและผลการทดลองของระบบแขนกลไฮดรอลิก ไม่และแสดงผลที่ได้จากการสั่งงานเทียบการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับคำสั่งเริ่มต้น ซึ่งจะช่วยให้ทราบความเร็วของแกนกลว่ามีเวลาที่ถูกต้องมากน้อยเพียงใด เพื่อใช้ในการ  
พิจารณาปรับแต่งระบบควบคุมต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



6. อุปกรณ์ในระบบท่อทาง ทำหน้าที่เป็นท่อทางการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกในระบบ ประกอบด้วย เป๊ป (Pipe), ข้องอ (Bending), ท่อ (tube), สายน้ำมันไฮดรอลิก (hoses) และข้อต่อชนิดต่าง ๆ (fittings)

## 2.2 การใช้งานระบบไฮดรอลิก

1. ระบบไฮดรอลิกในโรงงานอุตสาหกรรม ในงานอุตสาหกรรมได้มีการนำระบบไฮดรอลิกไปใช้ในเครื่องมือต่าง ๆ เช่น เครื่องฉีดพลาสติก เครื่องฉีดอะลูมิเนียม แท่นอัดขึ้นงาน เครื่องป้อนและเครื่องตัดขึ้นงาน เครื่องประกอบขึ้นรูปขึ้นงาน เครื่องจักรขนาดใหญ่ เครื่องกลึงและเจียรระโน

2. ระบบไฮดรอลิกในอุตสาหกรรมเหล็กกล้า ในปัจจุบันงานอุตสาหกรรมเหล็กกล้าส่วนใหญ่จะต้องมีการใช้งานอุปกรณ์ไฮดรอลิกตัวอย่าง เช่น ใช้กับแท่นเลื่อย แขนโยน ฐานป้อนและส่ง เครื่องปรับขนาดลูกกลิ้ง อุปกรณ์แยกและส่ง อุปกรณ์ควบคุมท่อหล่อเย็น เป็นต้น

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

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

5. ระบบไฮดรอลิกในเรือเดินทะเล เช่น ระบบนำร่องอัตโนมัติ ระบบเครื่องหางเสือเรือทั้งแบบธรรมดาและแบบอัตโนมัติ การควบคุมการปล่อยขบวน การควบคุมระบบระบายน้ำดีที่เรือ เป็นต้น

6. ระบบไฮดรอลิกในงานเฉพาะอย่าง งานที่นำเอาระบบไฮดรอลิกไปใช้นั้น ตัวอย่างเช่น กล้องเทเลสโคป ระบบสื่อสารทางอากาศ ทุ่นเก็บข้อมูลด้านสมุทรศาสตร์ และอุทกนิยศาสตร์ในทะเล เครื่องขุดเจาะน้ำมันในทะเล เครื่องเจาะสำรวจแหล่งแร่ เครื่องมือสำรวจชั้นดิน

## 2.3 น้ำมันไฮดรอลิก

น้ำมันไฮดรอลิกเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งในระบบไฮดรอลิก เพราะถ้าปราศจากน้ำมันไฮดรอลิก ระบบก็ไม่สามารถทำงานได้ น้ำมันไฮดรอลิกมีหน้าที่เป็นตัวกลางในการถ่ายทอดกำลังงานจากจุดหนึ่งไปสู่อีกจุดหนึ่งในระบบเพื่อเปลี่ยนแปลงกำลังงานของไหลให้เป็นกำลังงานกล เป็นตัวหล่อลื่นและลดแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของอุปกรณ์ต่างๆ น้ำมันไฮดรอลิกจะทำหน้าที่เป็นซีลด้วยเพื่อให้มีการรั่วซึมเกิดขึ้นน้อยที่สุดภายในชิ้นส่วนของอุปกรณ์ การไหลเวียนของน้ำมันไฮดรอลิกขณะทำงานจะช่วยถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ต่างๆ อันเนื่องมาจากการสูญเสียกำลังงานในระบบ ถ้าเลือกใช้น้ำมันไฮดรอลิกผิดประเภท ไม่เหมาะสมกับเครื่องจักรตามที่บริษัทผู้ผลิตได้กำหนดไว้ เครื่องจักรก็จะทำงานได้ไม่เต็มที่หรืออาจจะขัดข้องไปทั้งระบบเนื่องจากเครื่องจักรต่างๆ ที่ใช้ระบบไฮดรอลิกมีลักษณะของการใช้แรงไม่เหมือนกันและระยะเบียดของชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่างๆ ภายใต้อุปกรณ์ไม่เท่ากันรวมทั้งอุณหภูมิในการทำงานของเครื่องจักรแต่ละชนิดด้วย ดังนั้น การเลือกใช้น้ำมันไฮดรอลิกแต่ละชนิดจะต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะงานตามที่บริษัทผู้ผลิตได้กำหนดไว้ ถึงแม้ว่าจะจะเลือกใช้น้ำมันไฮดรอลิกได้อย่างถูกต้องแล้วก็ตาม ในขณะที่ใช้งานก็ยัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องดูแลบำรุงรักษาน้ำมันไฮดรอลิกให้อยู่ในสภาพดี คือ สะอาด มีอุณหภูมิพอเหมาะ และเปลี่ยนใหม่เมื่อถึงอายุการใช้งาน รวมทั้งควรตรวจสอบให้มน้ำมันไฮดรอลิกอยู่ในระดับที่พอเพียงสำหรับการใช้งานในระบบอย่างสม่ำเสมอ

## 2.4 ปั๊มไฮดรอลิก

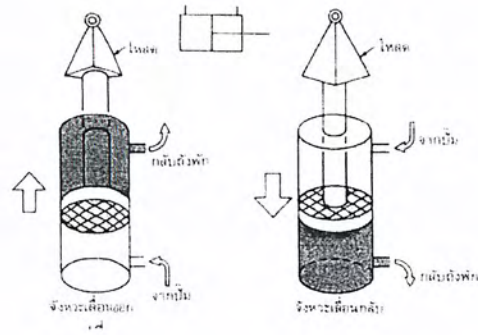
ปั๊มไฮดรอลิกทำหน้าที่เป็นตัวเปลี่ยนพลังงานกลให้เป็นพลังงานของไหลภายใต้ความดัน กล่าวคือ เมื่อป้อนกำลังกลไปที่เพลาชับ (rotating shaft) ของปั๊มให้ทำงาน ปั๊มก็จะเปลี่ยนพลังงานกลนั้นให้เป็นพลังงานจลน์ในของไหล น้ำมันไฮดรอลิกก็จะถูกดูดจากถังพักแล้วส่งออกไปตามท่อทางในระบบเพื่อใช้งานได้ การไหลของน้ำมันจะต้องมีพลังงานศักย์มากเพียงพอที่จะผ่านแรงต้านทานของระบบ แรงต้านทานการไหลในระบบนี้เองที่ทำให้เกิดความดันในระบบไฮดรอลิกขึ้น ซึ่งจะถูกนำไปใช้งาน ณ จุดต่าง ๆ ของระบบ ในโรงงานอุตสาหกรรมกำลังงานกลที่ใช้ขับปั๊มส่วนมากได้จากมอเตอร์ไฟฟ้า แต่ถ้าไม่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมหรือในที่ที่มีกระแสไฟฟ้าก็จะใช้เครื่องยนต์เป็นตัวขับ โดยการแบ่งประเภทของปั๊มจะพิจารณาจากลักษณะโครงสร้าง และหลักการขึ้นพื้นฐานในการทำงาน ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. ปั๊มประเภทดูดเหวี่ยง (non-positive displacement pump) คือปั๊มที่ทำงาน โดยอาศัยแรงเหวี่ยงของใบพัด แรงดันที่เกิดขึ้นภายในตัวปั๊มขึ้นอยู่กับความเร็วของปั๊ม
2. ปั๊มประเภทดูด - อัด (positive displacement pump) เป็นปั๊มที่มีหลักการทำงานในแบบที่เรียกว่าไฮดรอสแตติก (hydrostatic) ได้แก่ ปั๊มแบบฟันเฟือง แบบสกรู แบบเวน และแบบลูกสูบ ปั๊มแบบดูด-อัดนี้ โครงสร้างภายในที่ทำงานมีการซีลแบบกลไก ซึ่งเป็นชนิดโลหะสัมผัสซึ่งกันและกัน กันไม่ให้ท่อทางเข้าและทางออกต่อถึงกันซึ่งช่วยลดปริมาณการรั่วซึมภายในได้จึงเหมาะสำหรับใช้ในความดันสูง ๆ แม้ว่าอัตราความดันภายในระบบไฮดรอลิกจะขึ้นหรือลง ก็ไม่มีผลกระทบต่อการทำงานในทุก ๆ ระยะชักหรือทุกรอบของการหมุนของปั๊ม

## 2.5 กระบอกลูกสูบไฮดรอลิก (Hydraulic cylinder)

กระบอกลูกสูบไฮดรอลิกมีหน้าที่รับน้ำมันไฮดรอลิกที่ส่งมาจากปั๊มและวาล์วควบคุมต่าง ๆ เพื่อเปลี่ยนกำลังงานไฮดรอลิกให้เป็นกำลังงานกล โดยการเปลี่ยนความดันและความเร็วของน้ำมันไฮดรอลิกในท่อทางให้เป็นการเคลื่อนที่ของลูกสูบ เมื่อน้ำมันป้อนเข้าสู่กระบอกลูกสูบทำให้เกิดแรงดันขึ้น โดยอัตราการไหลของน้ำมันจะเป็นตัวกำหนดความเร็วของลูกสูบ กำลังงานกล(แรงม้า) ที่เกิดขึ้นที่กระบอกลูกสูบโดยทั่ว ๆ ไปมี 2 ลักษณะคือแบบทำงานสองทาง (double acting cylinder) และแบบทำงานทางเดียว (single acting cylinder)

1. กระบอกลูกสูบแบบทำงานสองทาง กระบอกลูกสูบแบบมาตรฐานส่วนใหญ่เป็นแบบทำงานได้สองทางตัวกระบอกลูกสูบทำจากท่อเหล็กชุบโครเมียม



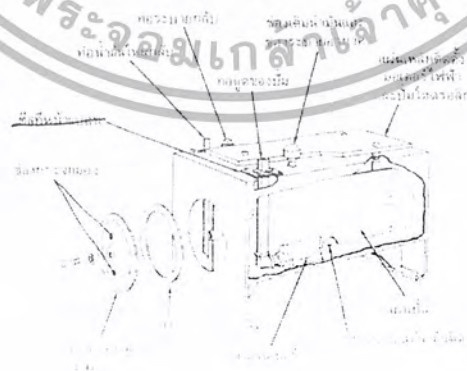
รูปที่ 2.2 แสดงการทำงานของกระบอกสูบแบบทำงาน 2 ทาง

รูปที่ 2.2 เป็นลักษณะการทำงานของกระบอกสูบให้เลื่อนไปอีกด้าน ในขณะที่เดียวกันน้ำมันที่ด้านนี้ก็จะถูกสูบดันกลับสู่ถังพักที่ความดันบรรยากาศหรือความดันต่ำ การทำงานเช่นนี้จะเกิดขึ้นสลับกันทั้ง 2 ด้าน ทำให้ลูกเลื่อนกลับไปกลับมา โดยมีวาล์วควบคุมทิศทางเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนทิศทางการไหลของน้ำมันป้อนให้แก่กระบอกสูบ ส่วนความดันในกระบอกสูบที่เกิดขึ้นจนทำให้ลูกสูบที่เกิดขึ้นจนทำให้ลูกสูบเคลื่อนทำงานได้ จะมีมากขึ้นอยู่กับ โหลตที่กระทำอยู่ที่ปลายก้านสูบ

## 2.6 ถังพักน้ำมันไฮดรอลิก

ถังพักน้ำมัน ไฮดรอลิกมีหน้าที่ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- เป็นที่เก็บและพักน้ำมัน
- เป็นที่ขจัดสิ่งสกปรกต่าง ๆ
- เป็นที่ระบายความร้อนของน้ำมันในระบบ
- เป็นที่ขจัดฟองอากาศ



รูปที่ 2.3 โครงสร้างและส่วนประกอบของถังพักน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 พร้อพอร์ชันนัลวาล์ว (Proportional Valves)

พร้อพอร์ชันนัลวาล์ว คือวาล์วสัดส่วนหรือวาล์วที่แปรผันโดยตรง และจากคำจำกัดความดังกล่าวนี้สามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ว่า วาล์วประเภทนี้ สัญญาเอาท์พุทหรือการเคลื่อนตัวของสปูลภายในตัววาล์วจะเป็นสัดส่วนหรือแปรผันโดยตรงกับสัญญาณอินพุทที่ใช้ในการสั่งงาน ดังนั้นวาล์วประเภทนี้จึงมีความสามารถในการเคลื่อนตัวของสปูลให้ไปอยู่ในตำแหน่งใดก็ได้ภายในตัววาล์ว โดยทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับสัญญาณอินพุทที่ใช้ในการสั่งงาน ซึ่งต่างกับวาล์วแบบเปิดปิด (on/off or switching valve) วาล์วในระบบไฮดรอลิกสัณันั้นจะมีอยู่ 3 กลุ่มใหญ่ ๆ ด้วยกัน คือ วาล์วควบคุมทิศทาง วาล์วควบคุมอัตราการไหล (ความเร็ว) และวาล์วควบคุมความดัน (แรง) พร้อพอร์ชันนัลวาล์วก็สามารถแบ่งประเภทออกได้ในลักษณะทำนองเดียวกัน

### 1. พร้อพอร์ชันนัลวาล์วควบคุมทิศทาง (Proportional Direction Control Valves)

พร้อพอร์ชันนัลวาล์วควบคุมทิศทางจะมีข้อได้เปรียบกว่าวาล์วควบคุมทิศทางแบบเปิด/ปิด ตรงที่สปูลภายในตัววาล์วสามารถค่อยๆ เคลื่อนตัวได้ โดยทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดทิศทางของกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับชุดโซลินอยด์ ดังนั้นการทำงานจึงรวบเรียบกว่าและนอกจากนั้นยังสามารถควบคุมอัตราการไหลได้อีกด้วย แบ่งออกได้ 3 ชนิดคือ แบบทำงานโดยตรงไม่มีสัญญาณย้อนกลับ แบบทำงานโดยตรงมีสัญญาณย้อนกลับ และแบบทำงานโดยอ้อม ( สำหรับอัตราการไหลของน้ำมันจำนวนมาก )

### 2. พร้อพอร์ชันนัลวาล์วควบคุมการไหล (Proportional Flow Control Valves)

วาล์วควบคุมการไหลแบบพร้อพอร์ชันนัล ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิก โดยปรับการเปิด - ปิดวาล์วเป็นสัดส่วนกับแรงของโซลินอยด์ เพื่อให้ความเร็วของอุปกรณ์ทำงาน (Actuator) เพิ่มขึ้นหรือลดลง วาล์วแบบนี้แบ่งออกได้ 2 ชนิด คือ ชนิดไม่มีสัญญาณย้อนกลับและชนิดมีสัญญาณย้อนกลับ

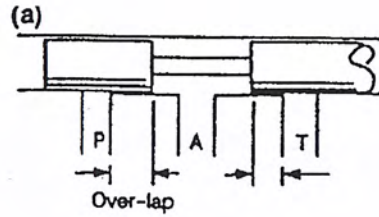
### 3. พร้อพอร์ชันนัลวาล์วควบคุมความดัน (Proportional Pressure Valves)

วาล์วควบคุมความดันมี 2 ชนิด คือ รีลิววาล์ว (Relief Valves) และรีดิวซิงวาล์ว (Reducing Valves) จะมีชิ้นส่วนของระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ควบคุมอย่างเดียว ชุดควบคุมการไหลของไหลอด (Pilot Stage) จะใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กเป็นตัวควบคุม ส่วนชุดวาล์วหลัก (Main Stage) จะต้องใช้ขนาดวาล์วที่ใหญ่เพื่อให้อัตราการไหลของน้ำมันผ่านไปได้ตามต้องการ วาล์วควบคุมความดันจะประกอบด้วยวาล์วที่ทำงานลักษณะต่างๆ กัน เช่นแบบหัวฉีด (Nozzle-Type Relief Valve) แบบพอพเพต (Poppet-Type Relief Valve) ซึ่งมีระบบส่งสัญญาณย้อนกลับได้ (LVDT) และแบบแผ่น (Plate - Type Relief Valve)

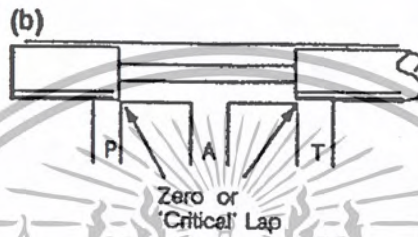
## 2.8 เงื่อนไขการซ้อนของสปูล (Lap Condition)

ไม่ว่าจะเป็นการควบคุมตำแหน่ง ความเร็ว หรือแรง เราสามารถที่จะนำเอาพร้อพอร์ชันนัลหรือเซอร์โววาล์ว แบบควบคุมทิศทางมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมดังกล่าวได้ทั้งหมด ดังนั้นในที่นี้จึงขอให้ความสำคัญกับพร้อพอร์ชันนัลและเซอร์โววาล์วแบบควบคุมทิศทางเป็นกรณีพิเศษ การเคลื่อนตัวของสปูลหลักของวาล์วควบคุมทิศทางจะสร้างการไหลผ่านวาล์ว ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับตำแหน่งของขอบสปูลและขอบของพอร์ต (port) ในตำแหน่งศูนย์ (null position)

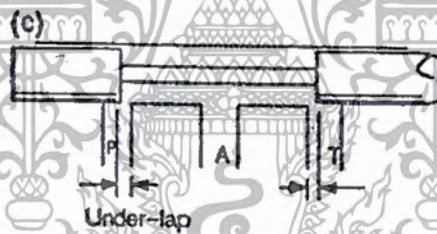
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ก แสดงสลูปลซึ่งมีพื้นที่เกินกว่าขอบของพอร์ต (over-lap)



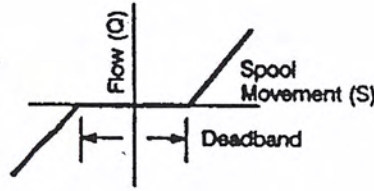
รูปที่ 2.4 ข แสดงสลูปลซึ่งมีพื้นที่พอดีกับขอบของพอร์ต (zero or critical lap)



รูปที่ 2.4 ค. แสดงพื้นที่ขอบของสลูปลที่มีค่าน้อยไม่สามารถปิดพอร์ตได้พอดี (under-lap)

ค่าของพื้นที่ที่เกินหรือน้อยกว่าขอบของพอร์ตโดยทั่วไปจะบอกหรือแสดงอยู่ในเทอมของเปอร์เซ็นต์ของระยะการเคลื่อนที่ของสลูปลหรือเปอร์เซ็นต์ของสัญญาณอินพุท

การพิจารณาคุณสมบัติเงื่อนไขการซ้อนของสลูปล เราจะสมมติให้สลูปลเลื่อนไปทางขวาโดยให้สลูปลมีพื้นที่ขอบเกินกว่าขอบของพอร์ต (รูปที่ 2.5) ดังนั้นในช่วงแรกแม้ว่าสลูปลจะมีการเคลื่อนตัวไปแล้วแต่ก็ยังไม่มีการไหลผ่านวาล์ว (dead band) ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากพื้นที่ของขอบสลูปลที่มีมากกว่าขอบของพอร์ตนั่นเอง แสดงด้วยรูปที่ 2.5

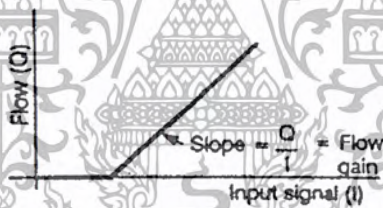


รูปที่ 2.5 แสดงการเกิด Dead band

หลักการที่ขอบของสปูลเลื่อนตัวพ้นจากขอบของพอร์ตแล้ว อัตราการไหล (Q) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะในการเลื่อนตัวของสปูลกับอัตราการไหลอาจจะไม่เป็นเชิงเส้นเสมอไปก็ได้ ซึ่งทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความคม (shape) หรือลักษณะรูปร่างของพอร์ตและสปูล

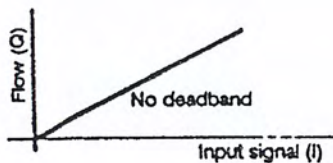
2.9 อัตราการไหล (Flow gain)

เกนการไหล คือ อะไร คำว่าเกน (gain) ก็หมายถึง อัตราการขยายตัว หรืออัตราส่วนระหว่างเอาต์พุตต่ออินพุต เมื่อเอาต์พุตในที่นี้คืออัตราการไหลคือสัญญาณอินพุตหรือกระแสไฟฟ้านั่นเอง



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์อัตราการไหลกับสัญญาณอินพุต

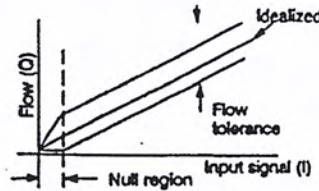
หากสัญญาณอินพุตที่มีค่ามากพอที่จะสร้างการไหลผ่านวาล์ว อัตราการไหลจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสัญญาณอินพุต ณ ที่ความดันแตกต่างตามที่กำหนด ด้วยแสดงด้วยรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์อัตราการไหลกับสัญญาณอินพุตเมื่อไม่มี Dead band

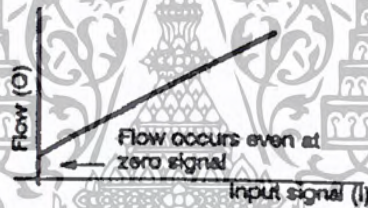
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการซ้อนของสปูลที่เป็นศูนย์ขอบของสปูลจะพอดีกับพอร์ตทำให้ไม่มีค่าเดดแบนด์ (dead band) การไหลผ่านวาล์วจะปรากฏที่ระดับสัญญาณต่ำมาก ๆ ซึ่งทำให้วาล์วสามารถตอบสนองรอบตำแหน่งศูนย์ได้ (null region) ดังรูปที่ 2.7



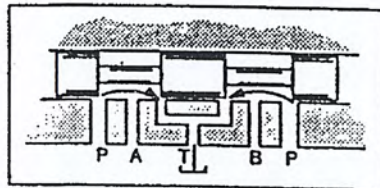
รูปที่ 2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์อัตราการไหลกับสัญญาณอินพุตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรอบตำแหน่งศูนย์

แต่จริง ๆ แล้วเกณฑ์การไหลอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงจากค่าปกติรอบตำแหน่งศูนย์ได้ ทั้งนี้เนื่องมาจากการผลิตและลักษณะพอร์ตรวมทั้งสปูลของตัวเอง รูปที่ 2.8



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์อัตราการไหลกับสัญญาณอินพุตเมื่อการซ้อนของสปูลน้อยกว่าขอบของพอร์ต

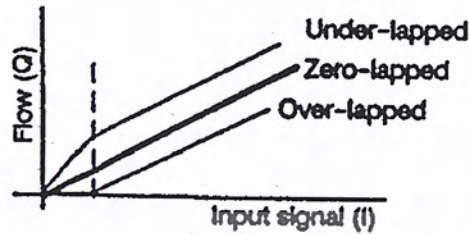
ในกรณีเงื่อนไขการซ้อนของสปูลที่น้อยกว่าขอบของพอร์ต (under-lap) หากเราพิจารณาเพียงพอร์ตเดียวคุณสมบัติของเกณฑ์การไหลสามารถแสดงได้ด้วยรูปที่ 2.9 กล่าวคือ จะมีการไหลปรากฏอยู่แม้จะไม่มีสัญญาณอินพุตก็ตาม ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของสปูลปิดไม่สนิทนั่นเอง ดังแสดงด้วยรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงสปูลของกระบอกสูบที่ปิดไม่สนิท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากสมมติให้ค่าของการซ้อนในแต่ละด้านเท่ากันในตำแหน่งศูนย์ ดังนั้นความดันที่พอร์ต A และพอร์ต B จะมีค่าที่เท่ากัน ทำให้สามารถป้องกันการไหลได้ดังรูปที่ 2.10

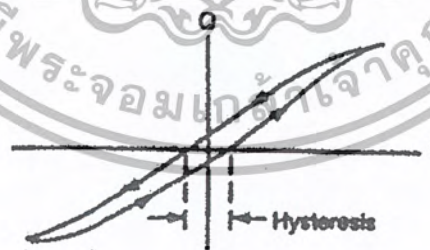


รูปที่ 2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์อัตราการไหลกับสัญญาณอินพุตเมื่อสปลูอยู่ในตำแหน่งต่าง ๆ

เมื่อสปลูมีการเคลื่อนตัวจะทำให้พอร์ตด้านหนึ่งเปิดและอีกด้านหนึ่งปิด การเคลื่อนตัวของสปลูดังกล่าวจะมีค่าเกณฑ์ของการไหลที่แตกต่างกัน โดยทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะการซ้อนของสปลูดังรูปที่ 2.11

## 2.10 ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis)

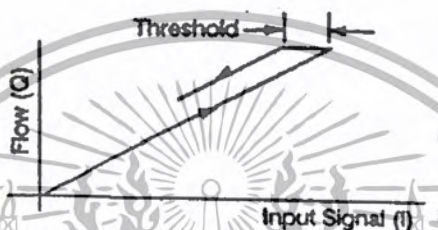
ฮิสเทอรีซิส ถือว่าเป็นความผิดพลาดหรือความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากตัวของอุปกรณ์เอง การให้สัญญาณอินพุตที่แตกต่างกันไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มขึ้นหรือลดลง (แม้ว่าจะเป็นค่าเดียวกัน) จะทำให้อัตราการไหลของวาล์วด้านเอาต์พุตแตกต่างกันดังแสดงด้วยรูปที่ 2.12 ค่าฮิสเทอรีซิสโดยทั่วไปจะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ของพิกัดสูงสุดของสัญญาณอินพุต



รูปที่ 2.12 แสดงอัตราการไหลด้านเอาต์พุตแตกต่างกันเพราะฮิสเทอรีซิส

## 2.11 เทรสโฮลด์ (Threshold)

เทรสโฮลด์จะมีคุณสมบัติคล้ายกับฮิสเตอรีซิส ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าเทรสโฮลด์ ก็คือความผิดพลาดอย่างหนึ่งของวาล์วนั่นเอง กล่าวคือเป็นค่าความแตกต่างของสัญญาณอินพุตที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลให้เป็นการลดลงคงรูป เทรสโฮลด์โดยทั่วไปจะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ของพิกัดสูงสุดของสัญญาณอินพุตดังรูป 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงอัตราการไหลลดลงเพราะเทรสโฮลด์

## 2.12 ข้อดีของระบบไฮดรอลิก

ระบบไฮดรอลิกมีข้อได้เปรียบหลายประการดังนี้

1. ง่ายต่อการควบคุม โดยปกติแล้วการส่งกำลังโดยกลไกจะมีความยุ่งยากเกี่ยวกับ โครงสร้างที่จะควบคุมให้เกิดการเคลื่อนที่ทำงานทั้งแบบหมุนหรือแนวเส้นตรง แต่ระบบไฮดรอลิกทำงานได้ง่ายและดีทั้งในแนวตรงและในแนวหมุนเพียงแต่ใช้กำลังงานจากของไหลไปเปลี่ยนแปลงเป็นกำลังงานกลเพื่อทำงานที่ต้องการแรงผลักดันหรือแรงบิดมากๆ ได้

2. การปรับเปลี่ยนความเร็วของลูกสูบหรือมอเตอร์ไฮดรอลิกกระทำได้ง่าย สามารถปรับเปลี่ยนความเร็วได้ทุกระดับ โดยปรับที่วาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำมัน ส่วนมอเตอร์ไฟฟ้าหรือเครื่องยนต์นั้นควรทำงานที่ความเร็วคงที่มากกว่า

3. แรงคงที่ ระบบไฮดรอลิกสามารถที่จะให้แรงคงที่ได้โดยที่ไม่จำกัดความเร็ว

4. ตั้งขนาดของแรงที่ต้องการใช้งานได้ เพราะปริมาณน้ำมันที่ความดันส่วนเกินจะไหลออกไปทางวาล์วจำกัดความดันหมด

5. การทำงานกลับทิศไปมาได้ กระบอกสูบและมอเตอร์ไฮดรอลิกสามารถทำงานกลับทิศได้ โดยไม่ต้องรอให้หยุด โดยอาศัยวาล์วควบคุมทิศทางการไหล ส่วนปัญหาการโอเวอร์โหลดขณะทำงานกลับทิศจะไม่มี เช่น ก้านสูบเลื่อนออกสุดระยะซัคแล้ว แต่ปั๊มยังคงส่งอัตราการไหลไปในระบบความดันก็จะเพิ่มขึ้นแต่จะถูกจำกัดโดยวาล์วปลดความดัน

6. ควบคุมการทำงานได้เที่ยงตรง แม่นยำ และถูกต้อง เพราะมีวาล์วที่ใช้ควบคุมทั้งความเร็วและความดัน

7. กะทัดรัด กินเนื้อที่ในการติดตั้งและมีน้ำหนักน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดกำลังเดียวกัน เช่น ปั๊มหรือมอเตอร์ไฮดรอลิกขนาด 9 แรงม้า จะมีน้ำหนักเพียง 5 กิโลกรัมเท่านั้น ในขณะที่มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 10 แรงม้า จะมีน้ำหนักที่มากกว่าหลายสิบกิโลกรัม และในบริเวณที่ไม่เหมาะสมก็สามารถที่จะติดตั้งได้เพียงแต่มีที่ว่างให้วางท่อเท่านั้น

8. สามารถหยุดชะงัก เนื่องจากการรับโอเวอร์โหลดนานๆได้ เมื่อโหลดลดลงก็ทำงานต่อไปได้ทันที ไม่มีปัญหาจากการฟิวส์ขาดเหมือนมอเตอร์ไฟฟ้า เมื่อรับโอเวอร์โหลดนานๆ ระบบก็ยังคงทำงานต่อไปได้เพียงแต่ความดันน้ำมันส่วนเกินจะไหลออกทางวาล์วจำกัดความดัน

9. ปลอดภัย ระบบไฮดรอลิกจะมีความปลอดภัยสูง แม้ว่าจะรับภาระโหลดนานๆ ไม่มีปัญหาไฟฟาลัดวงจรเหมือนระบบไฟฟ้า จึงทำให้เป็นที่สนใจและนำไปใช้ในโรงงาน ได้ดีกว่าระบบอื่นๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การออกแบบแขนกล

#### 3.1 การออกแบบพื้นที่การทำงาน (Work Envelopes)

ในโครงการนี้เป็นโครงการที่ทำการพัฒนาระบบการทำงานและระบบควบคุมต่อเนื่องมาจากต้นแบบเดิม ซึ่งส่วนประกอบต่างๆของชุดแขนกลนั้นประกอบไปด้วย

- กระบอบอกสูบที่มีขนาด 420 mm ขนาดชอกเกต (Socket) เท่ากับ 30 mm ความยาวสโตรค (Stroke) 150 mm น้ำหนักกระบอบอกสูบเท่ากับ 6.75 kgs.
- แขนกลท่อนบนมีขนาดเท่ากับ 50x400x30 mm น้ำหนัก 5.90 kgs.
- แขนกลท่อนล่างมีขนาด 50x600x30 mm น้ำหนัก 8.95 kgs.

โดยขนาดของแขนกลดังกล่าวจะเป็นเงื่อนไขที่จะนำมาใช้ในการหาตำแหน่งของการติดตั้งระหว่างแขนกลกับกระบอบอกสูบไฮดรอลิกเพื่อให้ได้พื้นที่ทำงานที่มีค่าสูงสุด ซึ่งในการทดสอบการหาพื้นที่การทำงานพบว่า ตำแหน่งการติดตั้งระหว่างชุดแขนกลและกระบอบอกสูบที่ให้ประโยชน์กับระบบสูงสุด สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 3.1

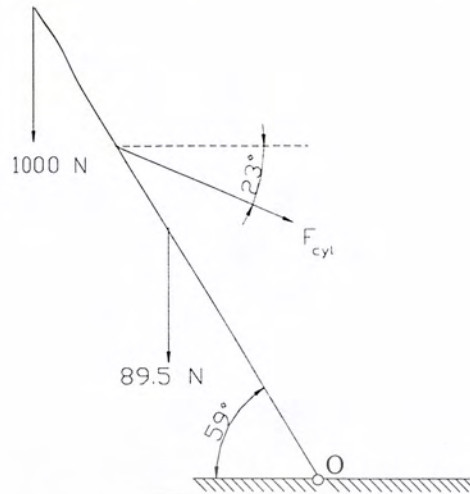


รูปที่ 3.1 ตำแหน่งการติดตั้งของกระบอบอกสูบ

#### 3.2 การออกแบบจุดต่อ

การคำนวณขนาดและชนิดวัสดุที่จุดต่อนั้นจะพิจารณาจากเงื่อนไขที่ว่า จุดต่อบริเวณฐานเป็นจุดต่อที่รับแรงกระทำสูงสุด ดังนั้นจึงทำการคำนวณขนาดและชนิดของวัสดุจากจุดต่อที่ฐานและใช้อ้างอิงนำไปใช้ในจุดอื่นๆต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงทิศทางของแรงกระทำที่จุดต่อที่ฐาน

เงื่อนไขที่ใช้พิจารณา คือ แขนงมวลหนัก 1000 N ไว้ที่ปลายสุดของแขนกลดังรูปที่ 3.2 ทำการหาค่าแรงที่กระทำที่จุดต่อที่ฐานจากการหาค่าโมเมนต์ที่ฐาน โดยการสมดุลแรงในแนวระดับและแนวตั้ง

$$\Sigma M_o = 0 \quad (3.1)$$

เมื่อ  $M_o$  = โมเมนต์ที่กระทำรอบจุด O

จากสมการที่(3.1) ได้แรงที่กระบอกสูบเท่ากับ 651.71 N นำไปหาค่าแรงในแนวระดับและแรงในแนวตั้งจากสมการ (3.2) และ (3.3)

$$\Sigma F_x = 0 \quad (3.2)$$

$$\Sigma F_y = 0 \quad (3.3)$$

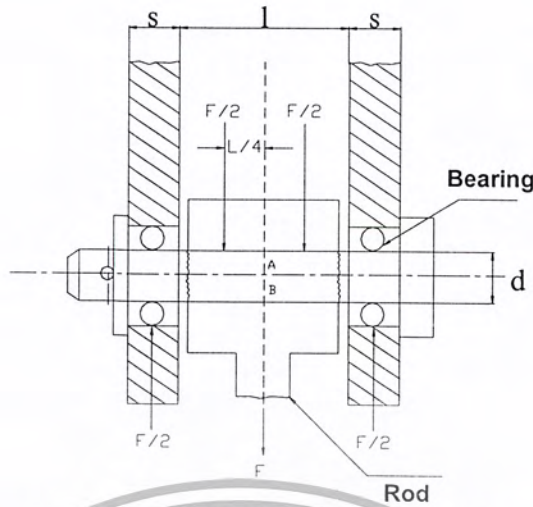
เมื่อ  $F_x$  = แรงในแนวระดับ (N)

$F_y$  = แรงในแนวตั้ง (N)

จากสมการ (3.2) และ(3.3) ค่าของแรงในแนวระดับและแรงในแนวตั้งเท่ากับ 599 N และ 236 N ตามลำดับ ใช้ทฤษฎีพีทาโกรัส หาค่าแรงสุทธิที่กระทำที่ฐานพบว่า มีค่าเท่ากับ 2.1 kN

### 3.2.1 การหาขนาดของแบริ่ง

จุดประสงค์ในการนำแบริ่งมาใช้ ในส่วนที่เป็นจุดต่อระหว่างแขนกลนั้นเพื่อช่วยลดการสั่นคลอนบริเวณจุดต่อให้ลดน้อยลงทำให้แขนกลสามารถเคลื่อนที่ได้ราบเรียบมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 3.3 แสดงจุดต่อของแบริ่งและสลัก

สามารถหาขนาดของแบริ่งได้จากความสัมพันธ์

$$P = XV F_r + Y F_a \quad (3.4)$$

$$P = V F_r \quad (3.5)$$

$$L_{10} = \left( \frac{C}{P} \right)^k \quad (3.6)$$

- เมื่อ
- $P$  = แรงสมมูล (N)
  - $F_r$  = แรงในแนวรัศมี (N)
  - $F_a$  = แรงในแนวแกนหรือแรงรูน (N)
  - $V$  = ตัวประกอบรูนเท่ากับ 1 เพราะแหวนวงในรูน
  - $X$  = ตัวประกอบแรงในแนวรัศมี
  - $Y$  = ตัวประกอบแรงรูน
  - $L_{10}$  = อายุประเมิน (mr)
  - $C$  = แรงพลวัตประเมิน (N)
  - $k$  = 3 สำหรับบอลแบริ่ง

เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่จุดต่อมีขนาดเท่ากับ 26 mm จึงทำการทดลองเลือกบอลแบริ่งขนาดอนุกรมมิติ 02 ขนาดรูสวม 9 mm มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 26 mm ความหนา 8 mm  $c_0 = 0.92$  kN ,  $c = 2.07$  kN มาทำการคำนวณค่าตามสมการ (3.4) และ (3.5) พบว่าเมื่อแรงในแนวแกน ( $F_a$ ) เท่ากับศูนย์ ตัวประกอบแรงในแนวรัศมี ( $V$ ) เท่ากับ 1 ทำให้ค่าแรงสมมูลมีค่าเท่ากับแรงในแนวรัศมี เท่ากับ 2.1 kN (แรงสุทธิที่กระทำที่ฐาน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาสมการที่(3.6) เมื่อกำหนดให้อายุการใช้งานแท้จริง 500 hr รอบการทำงาน 5.6 rpm จะได้ค่าอายุประเมนเท่ากับ 0.0252 mr และสามารถคำนวณค่าแรงพลวัตประเมนเท่ากับ 0.06 kN ซึ่งมีค่าน้อยกว่าแรงพลวัตประเมนของแบริ่งซึ่งเท่ากับ 2.07 kN ดังนั้นบอลแบริ่งที่เลือกมานี้จึงสามารถนำมาใช้งานได้ตามต้องการ

### 3.2.2 การหาค่าความปลอดภัยของสลัก

ตามปกตินั้นรอยต่อด้วยสลักมักใช้ในการต่อคอตเตอร์ (Cotter) กับ ซอกเกต (Socket) ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งในลักษณะเช่นนี้สลักจะอยู่ภายใต้แรงกระทำคือ แรงอัด แรงเฉือน และแรงอัดระหว่างผิวสัมผัส ในการออกแบบหาขนาดของสลักนั้นจะพิจารณาในจุดที่สลักต้องรับแรงกระทำสูงสุดซึ่งเกิดขึ้นที่จุดฐานของแขนกล ดังสมการต่างๆดังต่อไปนี้

$$M = \frac{F}{2} \left( \frac{L}{4} + \frac{S}{2} \right) \quad (3.7)$$

โดย  $M$  = โมเมนต์ดัดสูงสุด

$F$  = แรงสูงสุดที่กระทำที่จุดต่อ (N)

$L$  = ความยาวของสลัก = 30 mm

$S$  = ขนาดของ socket = 10 mm

จากสมการที่ (3.7) พบว่าค่าของ  $M = 13,125 \text{ Nmm}$  นำไปหาค่าของความเค้นจากความสัมพันธ์

$$\sigma_{td} = \sigma_{cd} = \frac{32M}{\pi d^3} \quad (3.8)$$

เมื่อ  $\sigma_{cd}$  = ค่าความเค้นออกแบบ ( $\text{N/mm}^2$ )

$d$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของสลัก 2 ขนาด

เท่ากับ 20 mm และ 9 mm ตามลำดับ

จากความสัมพันธ์ข้างต้นค่าของความเค้นออกแบบของสลักที่ใช้ต่อระหว่างแขนกลมีค่าเท่ากับ  $183.39 \text{ N/mm}^2$  จึงทดลองเลือกชนิดของเหล็กที่จะนำมาทำวัสดุ โดยเลือกคุณสมบัติเหล็ก AISI 1010 ที่มีค่าความเค้นพิสูจน์เท่ากับ  $289.59 \text{ N/mm}^2$  ทำให้ค่า Safety Factor เท่ากับ 1.58

สำหรับสลักที่ใช้ต่อระหว่างแขนกลกับกระบอกสูบ พบว่าค่าความเค้นออกแบบมีค่าเท่ากับ  $16.7 \text{ N/mm}^2$  วัสดุที่ใช้ทำสลักเป็นชนิดเดียวกัน ดังนั้น ค่า Safety Factor มีค่าเท่ากับ 17

ในการหาค่าความเค้นเฉือนพิสูจน์ใช้ทฤษฎีความเค้นเฉือนออกตะฮีดรัล มาทำการพิจารณาตามสมการที่ (3.9)

$$\tau = 0.577 \sigma_y \quad (3.9)$$

เมื่อ  $\tau$  = ค่าความเค้นเฉือน ( $\text{N/mm}^2$ )

$\sigma_y$  = ค่าความเค้นพิสูจน์ ( $\text{N/mm}^2$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าค่าความเค้นเฉือนมีค่าเท่ากับ  $167.09 \text{ N/mm}^2$  สำหรับในส่วนของค่าความเค้นเฉือนออกแบบสามารถหาได้จากสมการที่ (3.10)

$$\tau_d = \frac{16F}{3\pi d^2} \tag{3.10}$$

เมื่อ  $\tau_d =$  ค่าความเค้นเฉือนออกแบบ ( $\text{N/mm}^2$ )

พบว่าค่าความเค้นเฉือนออกแบบของสลักมีค่าเท่ากับ  $44.01 \text{ N/mm}^2$  และ  $8.91 \text{ N/mm}^2$  ตามลำดับ ดังนั้นสามารถหาค่า Safety ได้เท่ากับ 3.8 และ 18.75 ตามลำดับ ดังนั้นสลักที่นำมาใช้บริเวณจุดต่อต่างๆ สามารถรับแรง และนำมาใช้งานได้ตามที่ต้องการ

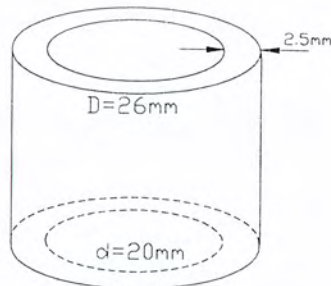


รูปที่ 3.4 แสดงขนาดของสลัก

3.2.3 การติดตั้งบุช

ได้ทำการอัดบุชทองเหลืองระหว่างการต่อกระบอกสูบเข้ากับแขนกล ทั้งหมด 4 จุด โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 26 mm. และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 20 mm. ดังรูปที่ 6 โดยมีวัตถุประสงค์คือ

1. เพื่อลดการเสียดสีระหว่างเหล็ก แขนกล กระบอกสูบ ไฮดรอลิก และสลัก
2. ทำให้แขนกลสามารถเคลื่อนที่ได้ราบเรียบมากขึ้น การตั้งคลอนลดน้อยลง

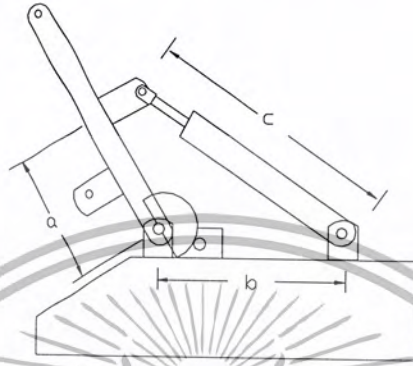


รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะและขนาดของบุช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การออกแบบที่ติดตั้งโรตารีเอ็นโค้ดเดอร์เข้ากับข้อต่อทั้งสองของแขนกล

ในโครงการนี้ออกแบบโดยใช้ โรตารีเอ็นโค้ดเดอร์วัดการเคลื่อนที่ของเฟืองที่ติดอยู่บนแขนกล โดยในการหาอัตราทดของเฟืองจำเป็นต้องทราบความเร็วเชิงมุมสูงสุด ซึ่งเราสามารถพิจารณาได้จากวิธีทางเรขาคณิต



รูปที่ 3.6 แสดงขนาดของแขนกล

จากรูปที่ 3.6 แสดงขนาดของแขนกลส่วนที่จะนำมาใช้ในการคำนวณตามวิธีเรขาคณิตวิเคราะห์เพื่อหาขนาดของการกระจัดเชิงมุม ( $\theta$ ) โดยนำค่าความยาวดังกล่าวมาพิจารณาตามกฎของ Cosine ดังสมการ (3.11)

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \theta \quad (3.11)$$

เมื่อทำการหาค่าอนุพันธ์ของสมการ (3.11) ได้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วเชิงมุม กับ ความเร็วเชิงเส้น และการกระจัดเชิงมุม ดังแสดงสมการที่ (3.12)

$$\dot{\theta} = \frac{c \dot{c}}{ab \sin \theta} = \omega \quad (3.12)$$

เมื่อ  $a = 310 \text{ mm}$

$b = 350 \text{ mm}$

$c =$  ระยะสโตรคของกระบอบสูบ  $= 150 \text{ mm}$

$\dot{c} =$  ความเร็วเชิงเส้น (mm/s)

$\omega =$  ความเร็วเชิงมุม (rad/s)

$\theta =$  ค่ามุมที่เปลี่ยนไปจากการบิดตัวของกระบอบสูบ

$= 0.2182 \text{ rad}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.12) เมื่อแทนค่าตัวแปร พบว่าจะได้ความสัมพันธ์แสดงได้ดังสมการที่ (3.13)

$$\dot{C} = 723.1887 \dot{\theta} \quad (3.13)$$

ทำการแทนค่าความเร็วเชิงเส้นสูงสุด ( $C_{\max}^{\cdot}$ ) ของระบบอกสูบที่ได้จากการวัดในเบื้องต้นซึ่งมีค่าเท่ากับ 93.44 mm/s ลงในสมการ (3.13) ได้ค่าความเร็วเชิงมุมสูงสุด ( $\omega_{\max}$ ) ของแกนกลมีค่าเท่ากับ 0.1292 rad/s หรือ 7.403 °/s เมื่อกำหนดค่า Sampling Time เท่ากับ 0.01 วินาที พบว่าใน 1 Sampling Time แกนกลจะมีการกระจัดเชิงมุมเท่ากับ 0.07403 °

จากนั้นหาจำนวนพัลส์จากมุม 0.07403 ° ดังกล่าว โดยทำการคิดเทียบจากการหมุน 1 รอบของแกนของโรตารีเอนโค้ดเดอร์ (360°) ที่มีความละเอียด 1000 พัลส์/รอบ จะพบว่ามุม 0.07403° ให้สามารถอ่านค่าพัลส์ ได้เท่ากับ 0.20563 พัลส์ แต่ในโครงการต้องการให้ใน 1 วินาที สามารถอ่านค่าพัลส์ได้น้อย 1 พัลส์ ดังนั้นอัตราการทรอประหว่างเฟืองที่ติดบนแกนกลกับเฟืองที่อยู่บนแกนโรตารีเอนโค้ดเดอร์ที่เลือกใช้จึงเท่ากับ 1 ต่อ 6

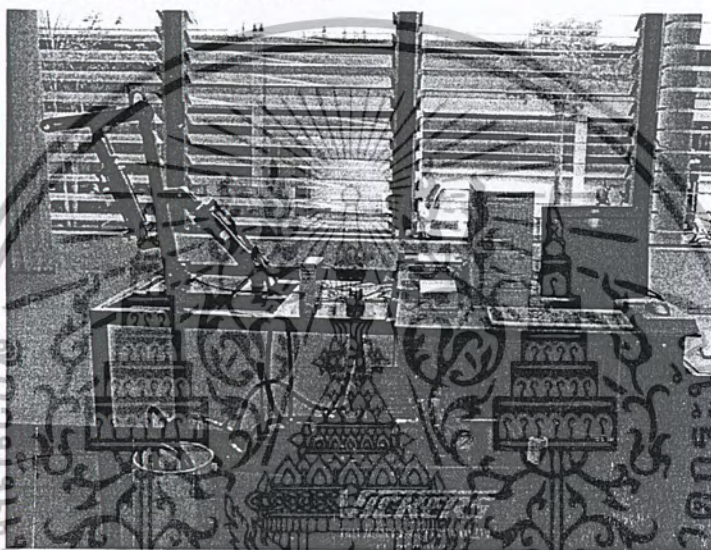


## บทที่ 4

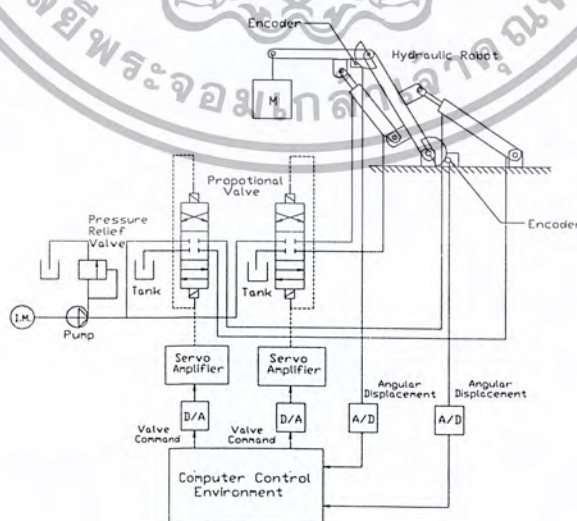
### อุปกรณ์ในการควบคุมแขนกล

#### 4.1 บทนำ

โครงสร้างของแขนกลประกอบด้วยระบบแขนกลที่บังคับการเคลื่อนที่ด้วยระบบอคูบไฮดรอลิกดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 โดยระยะชักของระบบอคูบไฮดรอลิกจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับค่าโวลท์อินพุทที่เฟรื่อฟอร์ชันนั้นแล้วได้รับจากการควบคุมผ่านทางระบบคอมพิวเตอร์ ชุดทดลองแขนกลไฮดรอลิกประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งจะได้แสดงในรายละเอียดต่อไป



รูปที่ 4.1 แสดงภาพประกอบตัวจริงของโครงการงาน

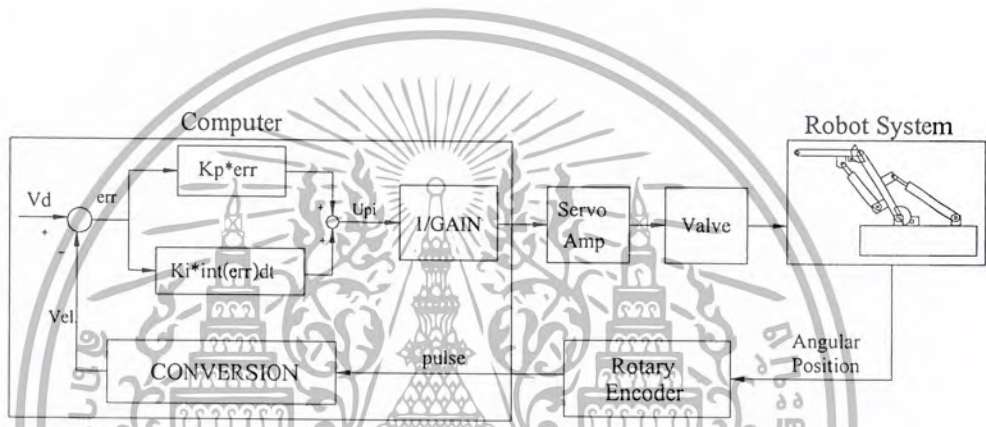


รูปที่ 4.2 แสดงระบบแขนกลไฮดรอลิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2 ระบบควบคุมแขนกลไฮดรอลิก

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.3 ค่าตำแหน่งการเคลื่อนที่เชิงมุมแขนกลที่รับมาจากโรตารีเอนโค้ดเดอร์จะถูกแปลงสัญญาณโดยคาร์ดินัลรอบส่งเข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลโดยใช้โปรแกรมแสดงผลเป็นความเร็วเชิงเส้นของแขนกลในหน่วย mm/s เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าคำสั่งการเคลื่อนที่ ที่เป็นความเร็วสั่งงานมีหน่วยเป็น mm/s เมื่อเกิดค่าความผิดพลาดของความเร็ว ชุดควบคุมจะทำการประมวลผลในสูตรของระบบควบคุมแบบ PI ได้ค่า  $U_p$  ที่มีหน่วยเป็น mm/s นำค่า  $U_p$  ที่ได้หารด้วยค่า Gain ของระบบที่ได้มาจากการทดลองมีหน่วยเป็น (mm/s)/volt ทำให้ได้ค่าโวลท์ ที่ต้องการเพิ่มความเร็วให้กับระบบ ค่าโวลท์ที่ได้จะถูกเปลี่ยนสัญญาณโดย Data Acquisition Card เข้าสู่เซอร์โวแอมพลิไฟเออร์ เพื่อควบคุมการทำงานของพรีออร์ชันนัลวาล์วในรอบการทำงานต่อไป



รูปที่ 4.3 แสดงระบบควบคุมแบบย้อนกลับของแขนกลไฮดรอลิก

#### 4.3 ชุดแขนกล

ชุดแขนกลมีระดับความถี่เท่ากับ 2 ระบบประกอบด้วยแขนกล 2 แขน ถูกควบคุมการเคลื่อนที่โดยกระบอกลูกสูบ 2 ตัว ผ่านทางพรีออร์ชันนัลวาล์ว โดยแขนกลท่อนบนมีขนาดเท่ากับ 50x400x30 mm น้ำหนัก 5.90 kgs. และแขนกลท่อนล่างมีขนาด 50x600x30 mm น้ำหนัก 8.95 kgs.

#### 4.4 กระบอกลูกสูบไฮดรอลิก

กระบอกลูกสูบไฮดรอลิกมีหน้าที่รับน้ำมันไฮดรอลิกที่ส่งมาจากปั๊มและวาล์วควบคุมต่าง ๆ เพื่อเปลี่ยนกำลังงานไฮดรอลิกให้เป็นกำลังงานกล โดยการเปลี่ยนความดันและความเร็วของน้ำมันไฮดรอลิกในท่อทางให้เป็นการเคลื่อนที่ของลูกสูบ ในโครงการนี้กระบอกลูกสูบที่ใช้เป็นแบบทำงาน 2 ทางโดยกระบอกลูกสูบที่ใช้มีขนาด 420 mm ขนาดชอกเกต (Socket) เท่ากับ 30 mm ความยาวสโตรค (Stroke) 150 mm น้ำหนักกระบอกลูกสูบเท่ากับ 6.75 kgs.

#### 4.5 คอมพิวเตอร์

คอมพิวเตอร์ใช้ในการรับและส่งข้อมูลผ่าน Data Acquisition Card และคำนวณค่าส่งไปที่วาล์วเพื่อควบคุมการทำงานของแขนกลไฮดรอลิกในการทำงานรอบต่อไป โดยมี Specification ดังนี้

|           |                                       |
|-----------|---------------------------------------|
| System:   | Microsoft Windows 98 (Second Edition) |
| Computer: | Authentic AMD                         |
|           | AMD — K6(tm) 3D+Process               |
|           | 64.0 MB RAM.                          |

#### 4.6 โรตารีเอนโค้ดเดอร์ (Rotary Encoder)

โรตารีเอนโค้ดเดอร์ เป็นตัวแปรที่ส่งจากการหมุนของแขนกล ซึ่งได้ทำการติดตั้งที่ข้อต่อทั้งสองของแขนกล ใช้ในการวัดตำแหน่งเชิงมุม (Radian) ของแขนกลที่เคลื่อนที่ได้ แล้วส่งข้อมูลย้อนกลับเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อเปลี่ยนจากสัญญาณพัลส์ (Pulse) เป็นความเร็วจริงของแขนกล และเปรียบเทียบกับความเร็วจริงของแขนกลกับความเร็วที่ต้องการพิจารณา เมื่อเกิด error ของความเร็วขึ้น คอมพิวเตอร์จะนำค่า error มาทำการคำนวณเพื่อควบคุมแขนกลให้มีความเร็วเท่ากับความเร็วที่ต้องการพิจารณา โรตารีเอนโค้ดเดอร์ที่ใช้ในการทดลองเป็นของ OMRON รุ่น E6C2 — CWZ3E ซึ่งมีความละเอียดเท่ากับ 1000 พัลส์ (Pulse) /รอบ ซึ่งมีรูปร่างดังนี้



รูปที่ 4.4 แสดงรูปร่างของโรตารีเอนโค้ดเดอร์

#### 4.7 การ์ดนับรอบ

การ์ดนับรอบเป็นการ์ดที่ติดตั้งและทำงานร่วมกับคอมพิวเตอร์ ซึ่งเป็นการที่ใช้นับจำนวนพัลส์ (Pulse) ที่ส่งมาจากโรตารีเอนโค้ดเดอร์ และขณะเดียวกันก็เปลี่ยนสัญญาณจากอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลด้วย แล้วส่งสัญญาณที่ได้ไปยัง Data Acquisition Card ให้คอมพิวเตอร์คำนวณจำนวนพัลส์เป็นความเร็วจริงของแขนกล เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับความเร็วที่ต้องการพิจารณา ซึ่งมีอัตราการขยายเป็น 4 เท่าของความละเอียดของโรตารี

เอนโค้ดเดอร์

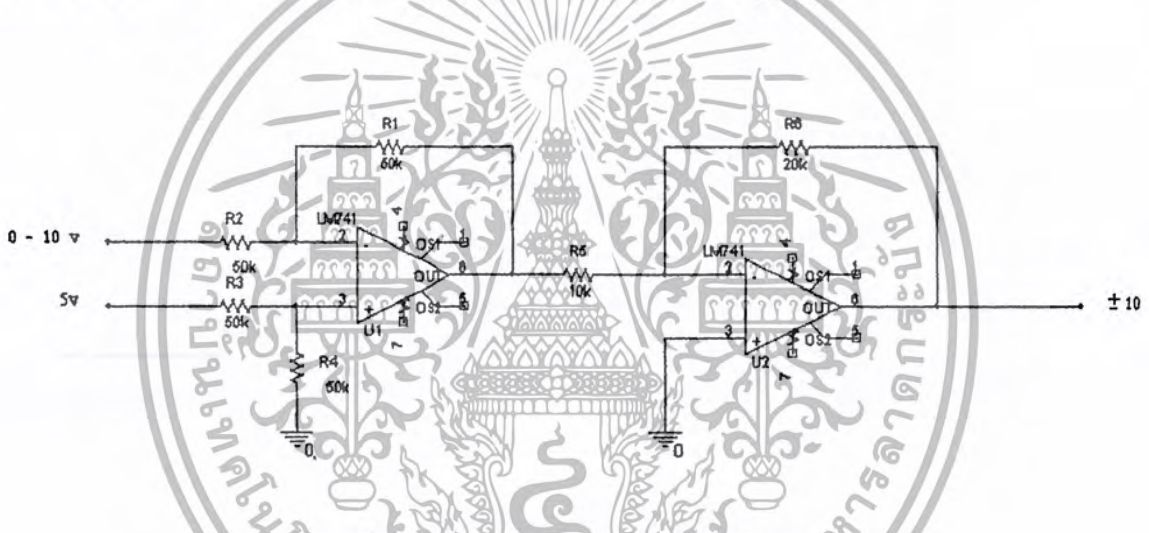
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.8 แอมพลิไฟเออร์ (Amplifier)

เป็นตัวขยายสัญญาณอินพุตจาก Data Acquisition Card ซึ่งให้ค่าสัญญาณอินพุตต่ำ แต่ร็หรือฟอร์ชัน นัลวาล์วมีความต้องการสัญญาณไฟฟ้าที่จะต้องสูงเพียงพอสำหรับการควบคุม หรือกำหนดตำแหน่งของสปูลที่อยู่ภายใน ดังนั้นจึงต้องมีการเพิ่มสัญญาณโดยผ่านค่าสัญญาณอินพุตเข้าไปยังแอมพลิไฟเออร์ซึ่งทำให้ค่าโวลต์-เดจและกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ก่อนที่จะไปขับร็หรือฟอร์ชันนัลวาล์ว ซึ่งในโครงการนี้ประกอบด้วยอิเล็กทรอนิกส์ ออป-แอม (Electronics OP – AMPS) และ เซอร์โวแอมพลิไฟเออร์ (Servo Amplifier)

#### 1. อิเล็กทรอนิกส์ ออป-แอม (Electronics OP – AMPS)

เป็นตัวขยายสัญญาณอินพุตจาก Data Acquisition Card ซึ่งให้ค่าสัญญาณอินพุต 0 ถึง +5 โวลต์ ให้กับเซอร์โวแอมพลิไฟเออร์ที่ต้องการสัญญาณอินพุต -10 โวลต์ถึง +10 โวลต์โดยให้ค่าเกนหรืออัตราส่วนของโวลต์เอาต์พุตและโวลต์อินพุตของอิเล็กทรอนิกส์ออป-แอมเท่ากับ -2 ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ออป-แอม

#### 2. เซอร์โวแอมพลิไฟเออร์ (Servo Amplifier)

เซอร์โวแอมพลิไฟเออร์โดยปกติ สร้างขึ้นเพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ขยายสัญญาณ กล่าวคือสัญญาณอินพุตที่เข้ามาในรูปโวลต์เดจ จะถูกขยายโดยภาคเพาเวอร์ ของเซอร์โวแอมพลิไฟเออร์ ได้สัญญาณเอาต์พุตในรูปโวลต์เดจหรือกระแสตามแต่เอาต์พุตที่ต้องการนำไปใช้ นอกจากนั้นมักใช้เป็นเสมือนการชดเชย หรือใช้เป็นซั่มมิงแอมพลิไฟ ทำหน้าที่เหมือนกับจุดรวมสัญญาณบังคับ และสร้างสัญญาณเออร์เรอร์ ซึ่งจะถูขยายโดยภาคเพาเวอร์เพื่อไปแก่พารามิเตอร์ที่ต้องคอนโทรลให้มีค่าที่ถูกต้อง

เซอร์โวแอมพลิไฟเออร์ที่แท้จริงสามารถให้เอาต์พุตโวลต์เดจหรือกระแสที่มีค่าบวกและลบได้ ดังนั้น มันจะทำงานได้ใน 4 ควอดแรนท์ (Quadrants)

เราสามารถจัดประเภทของเซอร์โวแอมพลิไฟเออร์ออกได้ 3 ประเภทคือ

1. ไลน์ียร์แอมพลิไฟเออร์
2. SCR แอมพลิไฟเออร์
3. สวิทซ์อิงแอมพลิไฟเออร์

เซอร์โวแอมพลิไฟเออร์เป็นอุปกรณ์ระบบบนาลอก ใช้เป็นตัวขยายสัญญาณไปบังคับ Electro Hydraulic Servo valve ซึ่งเซอร์โวแอมพลิไฟเออร์มีความสามารถในการควบคุมตำแหน่ง ความเร็ว และแรง หรือความดัน ในระบบป้อนกลับของPotention-meter, Tachogenerater และ Load-cell (pressure-cell) โดยมี Specification ดังนี้

#### อินพุท (AC power source)

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

#### เอาต์พุท (DC power source)

- (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  $\Omega$

#### สัญญาณเอาต์พุท (Output Signal)

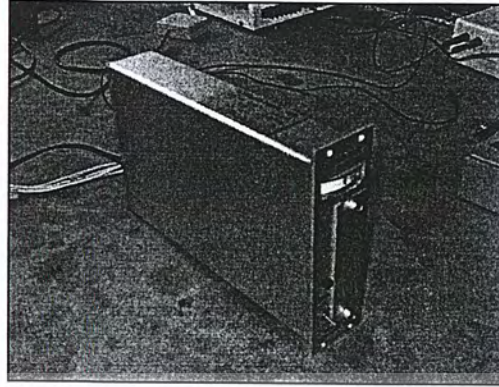
- (1) rated output current and load: 30 mA at 200  $\Omega$ , 0.65  $\mu$  H
- (2) Maximum output current :  $\pm 120\%$  of  $I_r$ . (With shortage circuit protector)
- (3) Maximum driveable frequency at 200 % of  $I_r$ : p-p input : More than 50 Hz for 30 mA, 200  $\Omega$  0.65  $\mu$  H coil
- (4) Frequency response with 200 % of  $I_r$  p-p input 200  $\Omega$  0.65  $\mu$  H coil : -45 phase lag point is more than 700 Hz with the load of fixed to input resistor
- (5) Nulshift with yemperature change : Less than 100V/C ,the rate is converted to input
- (6) Operating temperature range : 0 to 50 $^{\circ}$  C
- (7) Linearity : Less than 0.5 % of  $I_r$ .
- (8) 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงรูปร่างของเซอร์โวแอมพลิไฟเออร์

#### 4.9 Data Acquisition Card

เป็นการ์ดใช้รับค่าที่ส่งมาจากการ์ดนับรอบ และส่งค่าตั้งจากคอมพิวเตอร์ออกไปควบคุมระบบแกนกลไฮดรอลิก ความละเอียดในการแปลงสัญญาณที่ส่งมาจากโรตารีเอ็นโค้ดเดอร์ไปยังคอมพิวเตอร์มีค่าเท่ากับ 16 bit และความละเอียดในการแปลงสัญญาณที่ส่งจากคอมพิวเตอร์ไปยังแกนกลมีค่าเท่ากับ 12 bit รุ่นที่ใช้คือ NuDAQ ACL-8216 16-bit High Resolution โดยมี Specifications ดังนี้

##### Analog Input (A/D)

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| Converter:                     | ADS7805 or equivalent, successive approximation type                                |
| Resolution:                    | 16-bit  |
| Number of channels:            | 16 single-ended or 8 differentials  |
| Input Range:                   | (Programmable)  |
| Bipolar:                       | $\pm 10\text{ V}$ , $\pm 5\text{ V}$ , $\pm 2.5\text{ V}$ , $\pm 1.25\text{ V}$ ,   |
| Conversion Time:               | 8 $\mu\text{sec}$   |
| Sampling Rate:                 | 100 KHz maximum for single channel<br>20KHz maximum for multi-channels multiplexing |
| Over voltage protection:       | Continuous $\pm 35\text{ V}$ maximum  |
| Differential Linearity Error:  | $\pm 2\text{ LSB}$  |
| Accuracy:                      | 0.003 %, $\pm 2\text{ LSB}$   |
| Input Impedance:               | 10 M $\Omega$ /5 pF   |
| AD conversion trigger sources: | Software, Pacer, and External   |
| Data Transfer:                 | Pooling, Interrupt, DMA   |

##### Analog Output (D/A)

Converter: DAC7541 or equivalent, monolithic multiplying

Resolution: 12-bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                            |   |
|----------------------------|---|
| Number of channels:        | 2 double-buffered analog outputs  |
| Output Range:              | Internal reference :(unipolar) 0-5V or 0-10 V<br>External reference: (unipolar) max. +10 V or ~10 V |
| Setting Time:              | 30 $\mu$ sec  |
| Linearity:                 | $\pm 1/2$ bit LSB   |
| Output driving capability: | $\pm 5$ mA max.   |

### Digital I/O (DIO)

Channel: 16TTL compatible inputs and outputs

Input Voltage: Low: Max. 0.8 V

High: Min. +2.0 V

Input Load: Low: +0.5 V@ -0.2 mA max.

High: +2.7 V@+20  $\mu$ A max.

Output Voltage: Low: Max. 0.5 V

High: Min +2.7 V

Driving Capacity: Low: Max. +0.5 V at 8.0mA (Sink)

High: min 2.7 V at 0.4mA (Source)

### Programmable Counter

Device: 8254

A/D pacer: 32-bit timer (two 16-bit counter cascaded together) with a 2 MHz clock base

Counter: One 16-bit counter with an internal 2 MHz clock base or external

Paper output: 0.00046 Hz ~ 100 KHz

### General Specification

I/O Base Address: 16 consecutive address location

Interrupt IRQ: IRQ3, 5,6,7,9,10,11,12,15

DMA Channel: CH1 or CH3

Connector: 37-pin D-type connector

Operating Temperature: 0 ~ 55 $^{\circ}$  C

Storage Temperature: -20 $^{\circ}$  C ~ 80 $^{\circ}$  C

Humidity: 5 ~ 95%, non-condensing

Power Consumption: +5 V@420 mA maximum

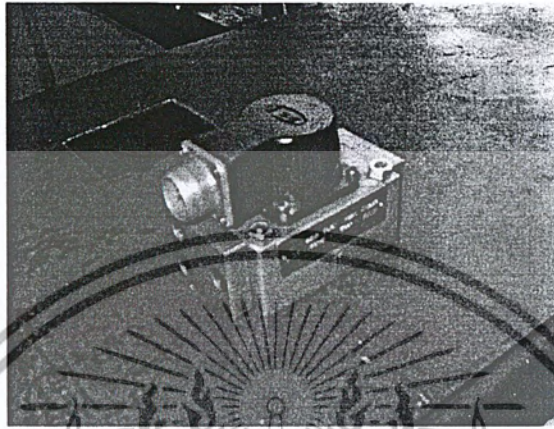
+12 V@240 mA maximum

Dimension: 163 mm (L) X 123 mm (W)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.10 เซอร์โววาล์ว (Servovalve)

เซอร์โววาล์ว คือ วาล์วควบคุมทิศทางที่สามารถควบคุมตำแหน่งของการเคลื่อนที่ของโหลดและอัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกที่มีความเที่ยงตรงมาก จะมีสัญญาณย้อนกลับเพื่อตรวจสอบการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ทำงาน โดยมี Specifications คือ โมเดล 225F อัตราการไหล 7.5 L/s และ รับกระแสได้สูงสุดที่ 30 แอมแปร์



รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะของเซอร์โววาล์ว

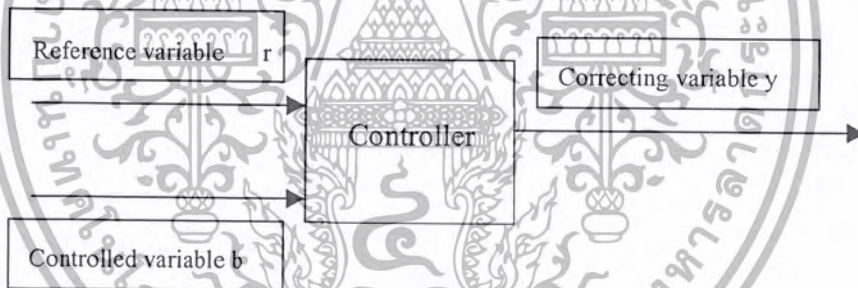


## บทที่ 5

### ระบบควบคุมแขนกลไฮดรอลิก

#### 5.1 บทนำ (INTRODUCTION)

การควบคุมแบบอัตโนมัติ (Automatic control) หรือบางครั้งเราอาจเรียกได้ว่าเป็นการควบคุมแบบวงปิด หรือป้อนกลับ (closed loop or feedback control) ซึ่งระบบการควบคุมดังกล่าวนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมการทำงานของระบบพลศาสตร์ (รวมทั้งระบบไฮดรอลิกส์และนิวแมติกส์) ระบบการควบคุมอัตโนมัติจะทำการเปรียบเทียบสัญญาณที่วัดค่าจากตัวแปรของระบบที่ถูกควบคุมจริง (controlled variable;  $b$ ) ด้วยเซนเซอร์หรือทรานสดิวเซอร์แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ต้องการพิจารณาหรืออ้างอิง (reference variable;  $r$ ) หลังจากนั้นก็จะสร้างสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมทางด้านเอาต์พุต (correcting variable;  $p$  or  $y$ ) ซึ่งจะสามารถลดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น (ความผิดพลาด) ลงไปได้ ให้มีค่าเป็นศูนย์หรือเป็นค่าที่น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ การกระทำของระบบควบคุมอัตโนมัติที่สร้างสัญญาณควบคุมนี้เราจะเรียกว่า กิริยาควบคุม (control action) จากหลักการของการควบคุมดังกล่าวเราสามารถที่จะเขียนให้อยู่ในรูปของบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูป



รูปที่ 5.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของอุปกรณ์ควบคุม

อุปกรณ์ควบคุมจะถูกออกแบบไว้เพื่อให้สร้างสัญญาณควบคุมไปด้วยควบคุมระบบกระบวนการ เมื่อมีสัญญาณผิดพลาด (Error signal) เกิดขึ้นหรือจากกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า หน้าที่ของอุปกรณ์ควบคุมก็คือการพยายามควบคุมตัวแปรของระบบ (system variable) ให้มีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับค่าที่เราต้องการ (desired value) มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ซึ่งอาจแสดงอยู่ในรูปของปัจจัยต่อไปนี้

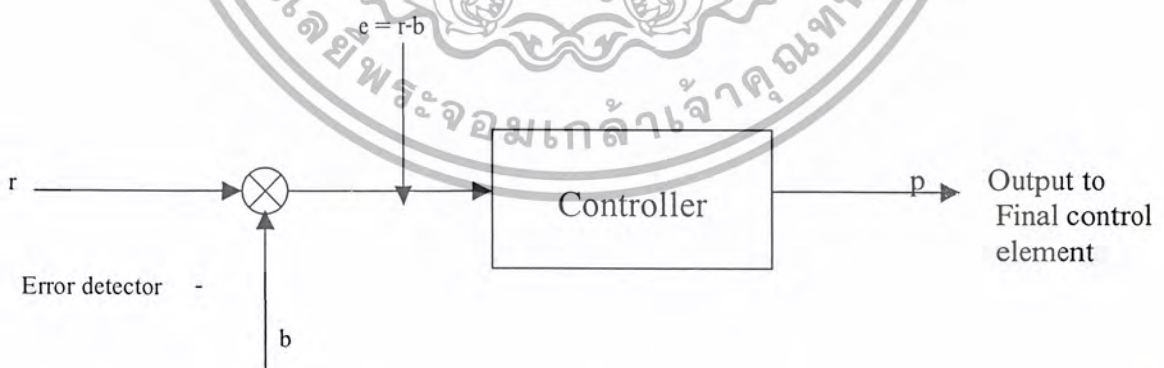
- ลดค่าผิดพลาดให้สถานะอยู่ตัว (Minimize the steady state error)
- ลดเวลาเข้าที่ (Minimize the setting time)
- เพื่อให้การตอบสนองในช่วงต้น (Transient response) มีลักษณะตามที่กำหนด

หากจะกล่าวไปแล้วอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน แต่ถ้าหากเราแบ่งตามลักษณะของสัญญาณที่ได้จากเอาต์พุตของอุปกรณ์ควบคุมก็สามารถที่จะแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ด้วยกันกล่าวคือ อุปกรณ์ควบคุมแบบไม่เป็นพลวัต (non-dynamic controller) กับอุปกรณ์ควบคุมแบบพลวัต (dynamic controller) หรือพูดง่ายๆ ก็คือ อุปกรณ์ที่ให้สัญญาณเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง (หรือทำงานแบบเปิด/ปิด) กับอุปกรณ์ที่ให้สัญญาณต่อเนื่องนั่นเองลักษณะทั่วไปของอุปกรณ์ควบคุมไม่ว่าจะเป็นแบบต่อเนื่องหรือไม่ต่อเนื่องก็ตาม ในที่นี้จะใช้สัญญาณอนาล็อกแสดงตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์ในการควบคุม โดยที่สัญญาณอนาล็อกเหล่านั้นจะอยู่รูปของสัญญาณทางไฟฟ้า และลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมจะเหมือนกับคอมพิวเตอร์แบบอนาล็อก ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากต้องปรับแก้สมการในการควบคุมอยู่ตลอดเวลา ตัวอย่างเช่น สามารถกระทำการบวก ลบ คูณ หาร อินทิเกรต รวมทั้งหาอัตราการเปลี่ยนแปลงหรืออนุพันธ์ได้ด้วย

จริงๆ แล้วในปัจจุบันเครื่องจักรกลอัตโนมัติหรือแม่กระทั่งหุ่นยนต์จะใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ หรือคอมพิวเตอร์ (สัญญาณดิจิทัล) ในการควบคุมเป็นส่วนใหญ่เพราะมีความคล่องตัวที่สูงกว่า

## 5.2 การตรวจจับสัญญาณผิดพลาด (ERROR DETECTIVE)

ก่อนที่จะกล่าวต่อถึงการควบคุมในลักษณะต่าง ๆ นั้นอย่างที่เรารวบรวมกันคืออยู่แล้วว่า อุปกรณ์ควบคุมจะถูกออกแบบไว้เพื่อให้สัญญาณควบคุม ไปคุมระบบกระบวนการเมื่อมีสัญญาณผิดพลาดเกิดขึ้น ถ้ามองแล้วสัญญาณผิดพลาดเราจะตรวจจับได้อย่างไร ค่าความคิดพลาดที่ส่งให้อุปกรณ์ควบคุมก็คือการเอาค่าตัวแปรที่ได้จากการวัดไปลบออกจากค่าเป้าหมายหรือค่าอ้างอิงดังแสดงด้วยรูป 5.2 ต่อไปนี้



รูปที่ 5.2 แสดงการตรวจจับสัญญาณผิดพลาด

เมื่อกำหนดให้  $e$  = ค่าผิดพลาด  
 $b$  = ค่าความเปลี่ยนแปลงที่ได้จากการวัด  
 $r$  = ค่าเป้าหมายที่ต้องการหรือค่าอ้างอิง

ดังนั้น 
$$e = r - b \tag{5.1}$$

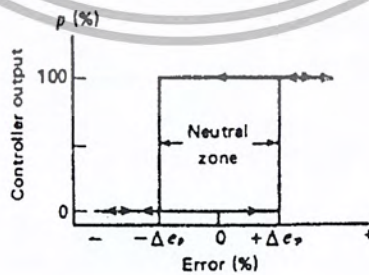
ซึ่งระบบการควบคุมจริงๆ แล้วค่าความผิดพลาดนิยมนำออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ของช่วงหรือย่านการวัด (Percent of span) ดังสมการที่ผ่านมายังเขียนใหม่ได้ว่า

$$e_p = \frac{r - b}{b_{\max} - b_{\min}} \times 100 \tag{5.2}$$

เมื่อ  $e_p$  = ความผิดพลาดในรูปเปอร์เซ็นต์ของช่วงการวัด  
 $b_{\max}$  = ค่าสูงสุดของย่านวัด  
 $b_{\min}$  = ค่าต่ำสุดของย่านวัด

### 5.3 การควบคุมแบบสองตำแหน่ง TWO-POSITION CONTROL

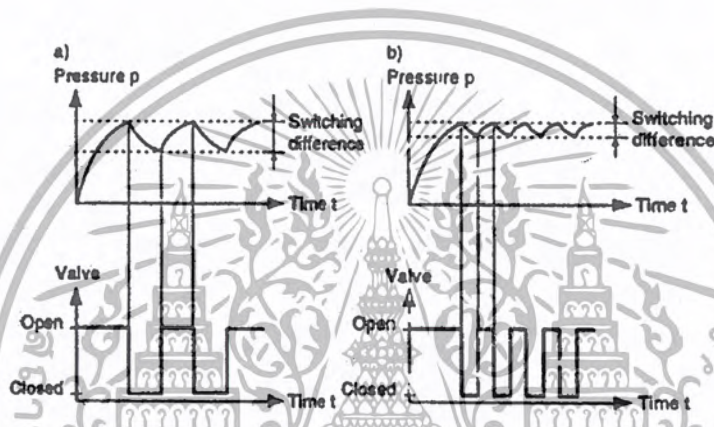
สัญญาณเอาต์พุตของอุปกรณ์ควบคุมชนิดนี้สามารถให้สัญญาณที่แตกต่างกันสองค่า ดังนั้นอุปกรณ์ควบคุมแบบสองตำแหน่งนี้จึงจัดอยู่ในกลุ่มของอุปกรณ์ควบคุมแบบไม่ต่อเนื่องหรือแบบไม่เป็นพลวัต (non-dynamic controller) คำว่าแตกต่างกันสองค่าเป็นอย่างไร เมื่อค่าของการวัดมากกว่าค่าที่ตั้งไว้ อุปกรณ์ควบคุมจะให้สัญญาณทางเอาต์พุตต่ำสุด และเมื่อค่าของการวัดน้อยกว่าค่าที่ตั้งไว้ อุปกรณ์ควบคุมจะให้ค่าสัญญาณเอาต์พุตสูงสุดซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยรูปและสมการต่อไปนี้



รูปที่ 5.3 แสดงนิพจน์ของ

นิวทรัลโซน (neutral zone) หรือโซนกลางรูปที่ 5.3 คืออะไร ในการป้องกันอุปกรณ์ควบคุมแบบสองตำแหน่งจากการตัดต่อ ตอนไปและกลับเพื่อไม่ให้ระบบเกิดการแกว่ง (cycling) ส่วนมากอุปกรณ์ควบคุมชนิดนี้จึงต้องมีความแตกต่างของค่าตอนทำงาน (switching difference หรือ differential gap)

ค่าของความแตกต่างดังกล่าวนี้จะมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของการควบคุม ตัวอย่างเช่น ถ้าเราต้องการอุปกรณ์ควบคุมที่มีการตัดต่อน้อยเราก็ควรเลือกอุปกรณ์ควบคุมที่มีค่าของความแตกต่างในการตัดต่อมา (ดังแสดงในรูป 5.4a) และในทำนองกลับกันหากเราต้องการเปลี่ยนแปลงระหว่างค่าที่ต้องการกับค่าที่เกิดขึ้นจริงมีช่วงแคบๆ ก็ต้องเลือกอุปกรณ์ควบคุมที่มีความแตกต่างระหว่างการตัดต่อน้อยๆ (ดังแสดงในรูปที่ 5.4b)



รูปที่ 5.4 แสดงนิวทรัลโซนที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของการควบคุม

#### 5.4 การควบคุมเชิงสัดส่วน (PROPORTIONAL CONTROL)

การควบคุมเชิงสัดส่วนจะให้สัญญาณทางด้านเอาต์พุตเป็นแบบต่อเนื่อง หรือเป็นการควบคุมแบบพลวัต (Dynamic controller) ชนิดหนึ่งซึ่งสัญญาณจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสัญญาณผิดพลาดที่เกิดขึ้น การควบคุมแบบนี้ส่วนใหญ่จะเรียกสั้นๆว่าแบบ P หากถามว่าสัญญาณทางด้านเอาต์พุตเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสัญญาณผิดพลาดที่เกิดขึ้นอย่างไร ก็ขอแสดงด้วยสมการต่อไปนี้

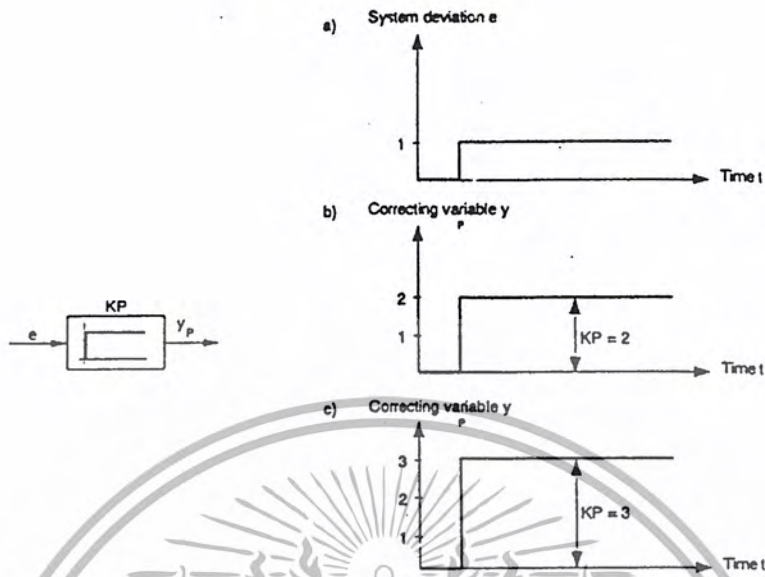
$$p = K_p e_p \quad (5.3)$$

เมื่อ  $p$  = สัญญาณด้านเอาต์พุต

$K_p$  = ค่าอัตราขยาย (เกน) ของตัวควบคุมหรือเกนสัดส่วน

$e_p$  = สัญญาณผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 แสดงระบบควบคุมแบบ P Control

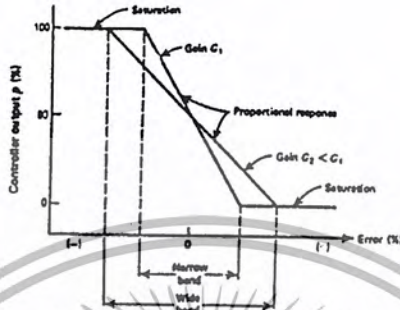
จากสมการที่ ( 5.3 ) เราจะพบว่าสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อค่าเกนของตัวควบคุมเพิ่มสูงขึ้นหรือค่าผิดพลาดมีค่าสูงขึ้น นอกจากนั้นในความเป็นจริงค่าของสัญญาณผิดพลาดอาจเป็นบวกหรือลบได้ดังนั้นสัญญาณค่านเอาต์พุตของตัวควบคุมจึงอาจมีค่าเป็นบวกหรือลบได้เช่นเดียวกัน แล้วถ้าสัญญาณผิดพลาดมีค่าเป็นศูนย์เอาต์พุตของตัวควบคุมจะเป็นอย่างไร จากสมการเมื่อสัญญาณผิดพลาดเป็นศูนย์เอาต์พุตของตัวควบคุมก็จะเป็นศูนย์ด้วยจริงๆแล้วในการควบคุมระบบกระบวนการบางระบบ เราไม่สามารถที่จะทำอย่างนั้นได้ทั้งนี้เนื่องจากอุปกรณ์ควบคุมตัวสุดท้าย (เช่นวาล์ว) ยังคงต้องการสัญญาณในการทำงานอยู่เมื่อเป็นอย่างนี้ในทางปฏิบัติหรือโดยทั่วไปแล้วจะใช้สมการต่อไปนี้

$$p = K_p e_p + p_0 \tag{5.4}$$

เมื่อ  $p_0$  = สัญญาณเอาต์พุตกรณีที่ไม่ได้มีสัญญาณผิดพลาด

เพื่อความชัดเจนยิ่งขึ้นจึงขอยกตัวอย่างดังนี้ หากเรานำตัวควบคุมแบบ P ไปควบคุมการเลื่อนตัวของวาล์ว ก็คือ สัญญาณที่ทำให้วาล์วอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงหรือตรงกับตำแหน่งที่เราต้องการซึ่งที่ตำแหน่งนี้สัญญาณผิดพลาดจะเป็นศูนย์และตรงที่ตำแหน่งนี้เอง จะเรียกว่าการปรับตั้งใหม่ด้วยมือ (manual reset) เพราะฉะนั้นถ้าตำแหน่งเปลี่ยนไปเป็นใดๆ แล้วตัวควบคุมก็จะทำหน้าที่ปรับเพื่อให้ค่า p มีค่าเท่ากับ  $p_0$

ดังที่เราทราบแล้วว่าสัญญาณผิดพลาดอาจจะมีค่าบวกหรือลบก็ได้ ดังนั้นสัญญาณด้านเอาต์พุตของตัวควบคุมจึงอาจเป็นบวกหรือลบได้เช่นเดียวกันโดยลบออกจากค่าของ  $p_0$  และสมการของการควบคุมแบบ P สามารถเขียนความสัมพันธ์ดังกล่าวออกมาเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 5.6

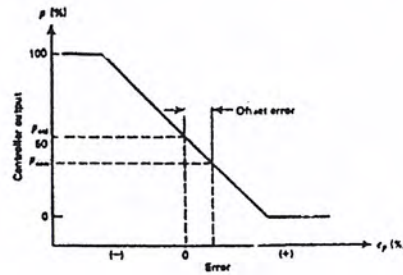


รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์สมการของการควบคุมแบบ P

จากรูปที่ 5.6 ค่า  $p_0$  จะถูกเซตไว้ที่ 50% ของ เอาท์พุทและจะมีอัตราขยาย (gain) ที่ต่างกันอยู่สองค่าด้วยกัน หากเราสังเกตก็จะพบว่า กรณีที่อัตราขยายสูงผลตอบสนองต่อสัญญาณผิดพลาดก็จะสูงตามไปด้วยแต่ช่วงของสัญญาณผิดพลาด (error band) จะแคบลง การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณผิดพลาดที่ใช้ในการปรับสัญญาณเอาท์พุทให้เต็มสเกลหรือพิกัดหรือจุดอิ่มตัว (saturation) จะเรียกว่า แถบเชิงสัดส่วน (proportion band) ซึ่งสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์กับอัตราขยายได้ดังนี้

$$PB = \frac{100}{K_p} \tag{5.5}$$

หากเราพิจารณาให้ลึกลงไปอีกจะพบว่าคุณสมบัติที่สำคัญบางประการของการควบคุมแบบ P จะมีการสร้างสัญญาณผิดพลาดตกค้างถาวร (residual error) ในจุดการทำงานของการทำงานที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดหรือภาระ ซึ่งสัญญาณผิดพลาดดังกล่าวเรียกว่า offset error หรือความผิดพลาดสถานะอยู่ตัว (steady state error) โดยทั้งนี้มันสามารถที่จะทำให้มีค่าที่น้อยลงได้โดยการเพิ่มค่าเกนหรือ แต่มันก็เป็นสาเหตุให้แถบสัดส่วน (PB) มีค่าที่ลดลงตามไปด้วยเช่นกัน (รูปที่ 5.7)



รูปที่ 5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์สัญญาณเอาต์พุตกับสัญญาณผิดพลาด

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าของสัญญาณผิดพลาดจะส่งผลให้สัญญาณเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย และสัญญาณเอาต์พุตที่เปลี่ยนแปลงไปนี้ (ตัวควบคุม) ก็พยายามที่จะทำให้สัญญาณผิดพลาดกลับไปสู่ศูนย์ซึ่งในความเป็นจริงแล้วตัวควบคุมไม่สามารถที่จะทำได้จึงยอมให้มีค่าความผิดพลาดสถวนะอยู่ตัวหรือค่า offset น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้เกิดขึ้นภายใต้โหลดหรือภาระใหม่

ดังนั้นการใช้งานตัวควบคุมแบบ P จึงถูกจำกัดด้วยค่า offset error ความผิดพลาดสถวนะอยู่ตัวแต่ทั้งนี้เราสามารถที่จะปรับแต่งหรือรีเซ็ตจุดในการทำงานได้ โดยอัตราขยายของตัวควบคุมจะต้องมีค่าสูงแบบนี้จึงเหมาะสำหรับระบบที่ยอมให้มีค่าของอัตราขยายที่สูงได้ ข้อดีของการควบคุมแบบนี้ก็คือค่าของสัญญาณควบคุมจะตอบสนองกับค่าสัญญาณผิดพลาดทันทีทันใดจึงจะมีประโยชน์ในกรณีที่เราต้องการการตอบสนองที่รวดเร็ว และในกรณีที่ค่าอัตราขยายมีค่าสูงมากๆ แถบเชิงสัดส่วน (PB) ก็จะมีค่าน้อยมากซึ่งการในลักษณะดังกล่าวนี้จะเหมือนกับการควบคุมแบบสองตำแหน่ง

### 5.5 การควบคุมแบบอินทิกรัล (INTEGRAL CONTROL)

การควบคุมแบบอินทิกรัลหรือเรียกสั้นๆว่า การควบคุมแบบ I การควบคุมแบบนี้อัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณทางออกของตัวควบคุมหรือสัญญาณเอาต์พุตจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับค่าของสัญญาณผิดพลาด ซึ่งแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$\frac{dp}{dt} = K_i e_p \quad (5.6)$$

เมื่อ  $\frac{dp}{dt}$  = อัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเอาต์พุต (%/S)

$K_i$  = ค่าคงที่หรือค่าเกนที่มีความสัมพันธ์กับค่าความผิดพลาด [(%/s)]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในบางกรณีส่วนกลับของ  $K_I$  จะเรียกว่า เวลาในการอินทิกรัล (Integral time) โดยที่  $T_I = 1/K_I$  ซึ่งมีหน่วยเป็นวินาทีหรือนาที และค่าเวลาดังกล่าวนี้อาจนำมาใช้ในการอธิบายการควบคุมแบบอินทิกรัล จากสมการที่ผ่านมามากเราทำการอินทิเกรตก็สามารถที่จะหาค่าของสัญญาณเอาต์พุต ณ ที่เวลาใดๆ ดังแสดงด้วยสมการที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้

$$p(t) = K_I \int_0^t e_p(t) dt \quad (5.7)$$

จากสมการดังกล่าวหากเรากำหนดให้สัญญาณผิดพลาดเป็นสัญญาณระดับ (step change) สัญญาณที่ได้จากตัวควบคุมสามารถแสดงได้ด้วยรูปที่ 5.8

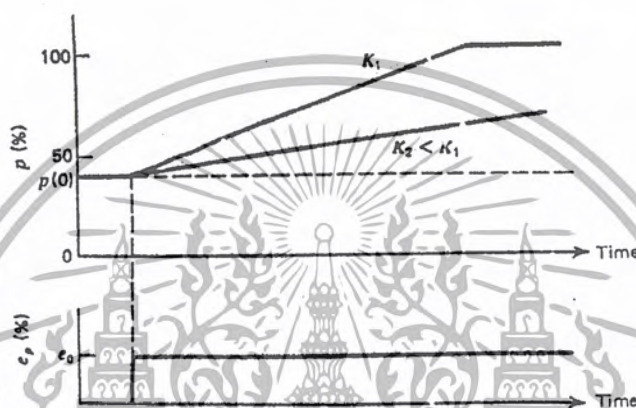


รูปที่ 5.8 กราฟแสดงสัญญาณที่ได้จากตัวควบคุมเมื่อกำหนดให้สัญญาณผิดพลาดเป็นสัญญาณระดับ

จากรูปแบบของการควบคุมแบบอินทิกรัลเราจะเห็นว่าสัญญาณควบคุม หรือสัญญาณเอาต์พุตอาจจะมีค่าค่อนข้างมากก็ได้โดยไม่ลดลงทั้งๆที่สัญญาณควบคุมมีค่าคงที่หรือมีค่าเป็นศูนย์ในภายหลังแล้วก็ตาม ทั้งนี้ก็เพราะว่าสัญญาณควบคุมในกรณีของการควบคุมแบบอินทิกรัลจะอยู่กับค่าในอดีต (past value) ไม่เหมือนกับการควบคุมเชิงสัดส่วนหรือแบบ P ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าปัจจุบันและในทางปฏิบัติโดยทั่วไปแล้วเราจะใช้สมการต่อไปนี้

$$p(t) = K_i \int_0^t e_p(t) dt + p(0) \quad (5.8)$$

เมื่อ  $p(0)$  = สัญญาณเอาต์พุตที่เวลา (t) เท่ากับศูนย์ (0)



รูปที่ 5.9 แสดงสัญญาณเอาต์พุตที่มีค่าของ  $K_i$  แตกต่างกัน

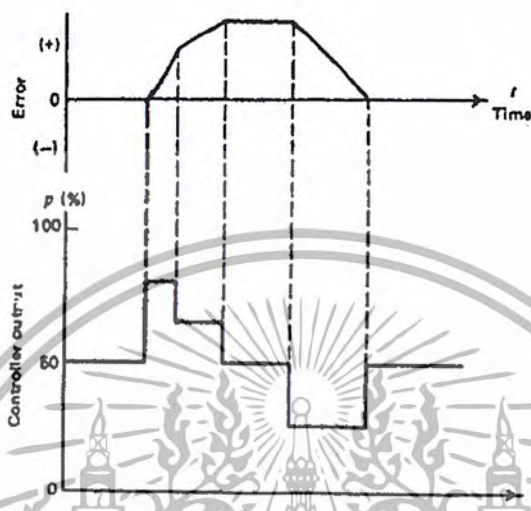
ประโยชน์ของการควบคุมแบบ I นี้ก็เพื่อที่จะลด offset error หรือความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว (steady state error) ที่เกิดขึ้นกับการควบคุมเชิงสัดส่วนหรือแบบ P แต่อย่างไรก็ตามการควบคุมแบบนี้จะทำให้เสถียรภาพของระบบของเราลดลง (ทำให้เกิดการแกว่งได้) ดังนั้นจึงไม่นิยมใช้เดี่ยวๆ ดังจะรวมกับการควบคุมแบบอื่นๆ ดังกล่าวถึงในลำดับต่อไป

## 5.6 การควบคุมแบบอนุพันธ์ (DERIVATIVE CONTROL)

การควบคุมแบบนี้บางครั้งเราอาจเรียกสั้นๆว่า การควบคุมแบบ D ก็ได้ การคำนวณหาค่าสัญญาณที่ถูกควบคุมสัญญาณเอาต์พุตสามารถทำได้ โดยการอนุพันธ์สัญญาณผิดพลาดการควบคุมด้วยวิธีนี้ไม่สามารถใช้ได้ตามลำพังทั้งนี้ก็เนื่องจากหากค่าความผิดพลาดลงที่หรือเป็นศูนย์จะทำให้ไม่มีสัญญาณทางด้านเอาต์พุต

$$p = K_D \frac{de_p}{dt} \quad (5.9)$$

เมื่อ  $K_D =$  เกนหรืออัตราขยายหรือบางครั้งเรียกว่าช่วงเวลาอนุพันธ์ [(%-s)/%]  
 $\frac{de_p}{dt} =$  อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด (%/s)



รูปที่ 5.10 ตัวอย่างแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณผิดพลาดกับสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากตัวควบคุม

ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์นี้จะช่วยให้เราปรับค่าการหน่วง (damping) ในระบบที่จะควบคุมให้มีค่ามากขึ้น นั่นก็คือ จะทำให้ระบบมีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น แต่โดยทั่วไปแล้วตัวควบคุมแบบนี้จะไม่ทำให้ค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวมีค่าเป็นศูนย์ได้ ในขณะที่ชั่วขณะเราจะเห็นว่าสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากตัวควบคุมเป็นสัญญาณที่เกิดจากการหาอนุพันธ์ของสัญญาณผิดพลาด ดังนั้นหากสัญญาณผิดพลาดนี้มีสัญญาณรบกวนมากสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากตัวควบคุมอาจจะเกิดการกระเพื่อม (fluctuate) ค่อนข้างมากด้วยทั้งนี้ก็เนื่องมาจากค่าความชัน (slope) เปลี่ยนแปลงค่อนข้างมากมีผลทำให้ระบบควบคุมของเราไม่เสถียรภาพได้

### 5.7 การควบคุมเชิงสัดส่วนบวกกับอินทิกรัล (PROPORTION INTEGRAL CONTROL)

การควบคุมแบบนี้อาจเรียกสั้นๆว่า การควบคุมแบบ PI ก็ได้ ดังที่เราทราบในข้างต้นแล้วว่า การควบคุมเชิงสัดส่วนนั้นอาจจะให้การตอบสนองที่รวดเร็วได้ก็จริง แต่ไม่ว่าเวลาจะผ่านไปนานแค่ไหนก็ตามก็ยังคงมีความคลาดเคลื่อนอยู่เสมอ (steady state error) หากระบบถูกรบกวนจากภายนอกหรือมีการเปลี่ยนแปลงโหลด ซึ่งปัญหาดังกล่าวนี้จะแก้ไขได้ถ้าเราใช้การควบคุมเชิงสัดส่วนบวกกับอินทิกรัล สมการของการควบคุมแบบนี้ก็คือ การรวมเอาสมการควบคุมเชิงสัดส่วนกับการควบคุมแบบอินทิกรัลเข้าด้วยกันนั่นเอง

$$p = K_p e_p + K_i \int_0^t e_p dt \tag{5.10}$$

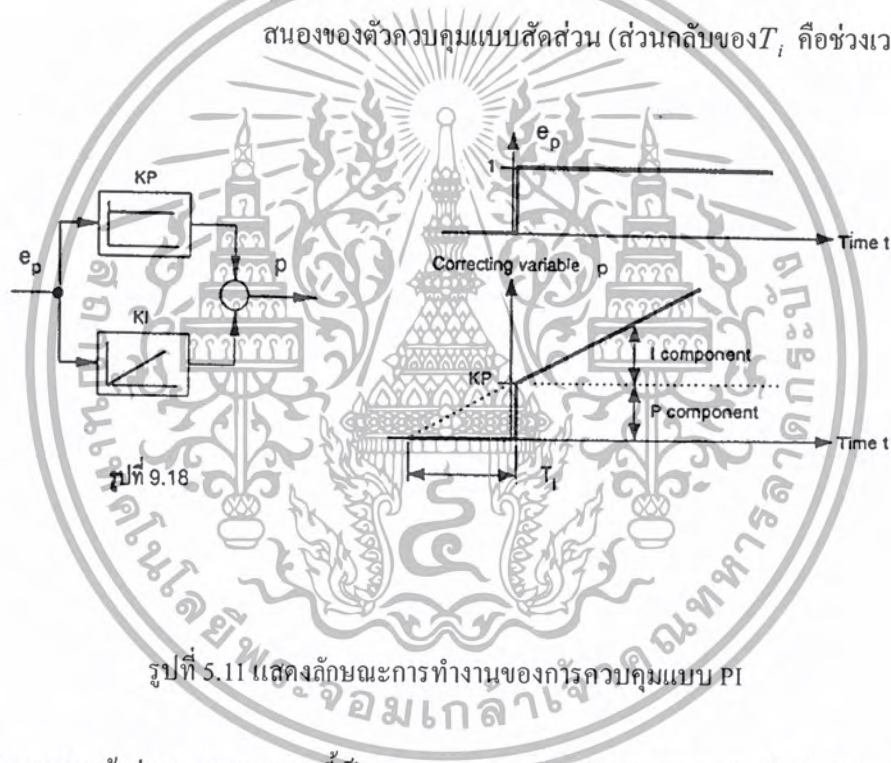
$$p = K_p e_p \left(1 + \frac{1}{TD}\right) \tag{5.11}$$

เมื่อ  $K_p$  = เกนของการควบคุมเชิงสัดส่วน

$K_i$  = เกนของการควบคุมแบบอินทิกรัล

$T_i$  = เวลาที่ใช้ในการอินทิกรัล

$\frac{K_p}{K_i}$  = ระยะเวลาที่ตัวควบคุมแบบอินทิกรัลให้การตอบสนองเท่ากับการตอบสนองของตัวควบคุมแบบสัดส่วน (ส่วนกลับของ  $T_i$ , คือช่วงเวลาอนุพันธ์)



รูปที่ 5.11 แสดงลักษณะการทำงานของตัวควบคุมแบบ PI

ดังที่เราทราบแล้วว่าการควบคุมแบบนี้เป็นการรวมเอาคุณสมบัติของการควบคุมเชิงสัดส่วน (P) และการควบคุมแบบอินทิกรัล (I) เข้าด้วยกันกล่าวคือ การควบคุมเชิงสัดส่วน (P) จะให้การตอบสนองที่เร็วแต่ขาดความแม่นยำ ส่วนการควบคุมแบบอินทิกรัล (I) นั้นจะมีความแม่นยำแต่ช้าและมีแนวโน้มที่จะก่อให้เกิดการแกว่ง ดังนั้นเมื่อรวมการควบคุมทั้งสองแบบเข้าด้วยกันจึงทำให้การตอบสนองต่อสัญญาณผิดพลาดเร็วและแม่นยำแต่แนวโน้มที่จะเกิดการแกว่งของสัญญาณเอาต์พุตสูง

5.8 การควบคุมเชิงสัดส่วนอนุพันธ์ (PROPORTION-DERIVATIVE CONTROL)

การควบคุมแบบนี้อาจเรียกสั้นๆว่าการควบคุมแบบ PD ความสัมพันธ์ของสัญญาณเอาต์พุตหรือสัญญาณที่ถูกควบคุมกับสัญญาณผิดพลาดหรือสัญญาณอินพุตของการควบคุมชนิดนี้นั้นสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการ ได้ดังต่อไปนี้

$$p = K_p e_p + K_D \frac{de_p}{dt} \tag{5.12}$$

$$p = K_p e_p + K_p T_d \frac{de_p}{dt} \tag{5.13}$$

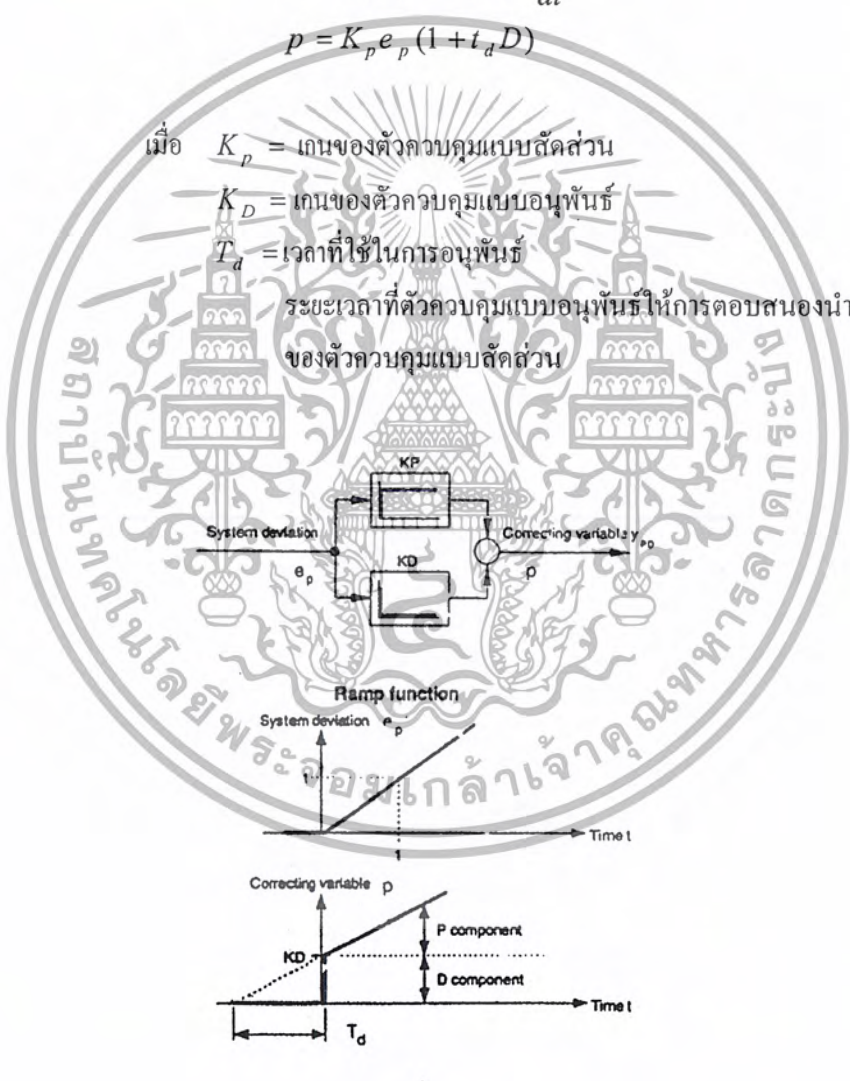
$$p = K_p e_p (1 + t_d D) \tag{5.14}$$

เมื่อ  $K_p$  = เกนของตัวควบคุมแบบสัดส่วน

$K_D$  = เกนของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์

$T_d$  = เวลาที่ใช้ในการอนุพันธ์

ระยะเวลาที่ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ให้การตอบสนองนำการตอบสนองของตัวควบคุมแบบสัดส่วน



รูปที่ 5.12 แสดงลักษณะการควบคุมแบบ PD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเพิ่มส่วนของ D เข้าไปรวมกับ P เป็นตัวควบคุมแบบ PD นั้นจะทำให้การตอบสนองเร็วกว่าการควบคุมแบบ P แต่เพียงอย่างเดียว แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีความผิดพลาดสถานะอยู่ตัว (steady state error) อยู่ดี

**5.9 การควบคุมเชิงสัดส่วนบวกกับอินทิกรัลและอนุพันธ์ (PROPORTION- INTEGRAL-DERIVATIVE CONTROL)**

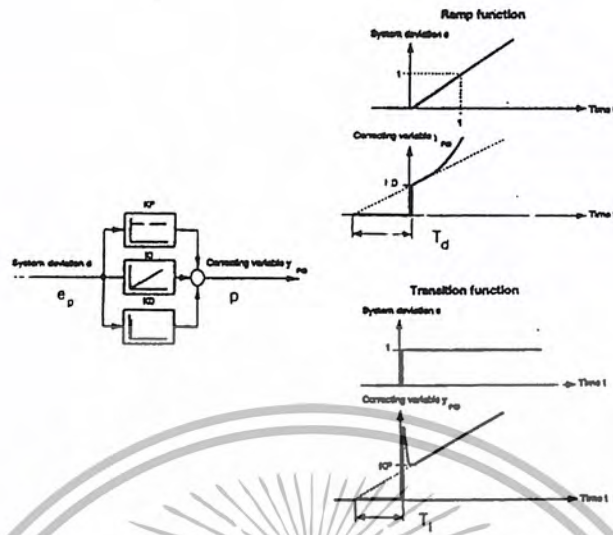
การควบคุมแบบนี้เป็นการรวมเอาคุณสมบัติของการควบคุมแบบ P, I และ D เข้าด้วยกันจึงนิยมเรียกการควบคุมแบบนี้อย่างสั้นๆว่า การควบคุมแบบ PDI ซึ่งเป็นการควบคุมที่นิยมใช้กันมากในทางอุตสาหกรรมเพราะความเร็วและความแม่นยำในการตอบสนองต่อสัญญาณผิดพลาดจะสูง ความสัมพันธ์ของสัญญาณที่ควบคุมหรือสัญญาณเอาต์พุตกับสัญญาณอินพุตหรือสัญญาณผิดพลาดของการควบคุมแบบ PDI นี้สามารถเขียนอยู่รูปของสมการได้ว่า

$$p = K_p e_p + K_i \int_0^t e_p dt + K_D \frac{de_p}{dt} \tag{5.15}$$

$$p = K_p e_p + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e_p dt + K_p T_d \frac{de_p}{dt} \tag{5.16}$$

$$p = K_p e_p \left( 1 + \frac{1}{T_i D} + T_d D \right) \tag{5.17}$$

- เมื่อ  $K_p$  = เกนของตัวควบคุมเชิงสัดส่วน
- $K_D$  = เกนของตัวควบคุมเชิงอนุพันธ์
- $K_i$  = เกนของตัวควบคุมเชิงอินทิกรัล
- $T_i$  = เวลาในการอินทิกรัล
- $T_D$  = เวลาในการอนุพันธ์



รูปที่ 5.13 แสดงการควบคุมแบบ PID

### 5.10 การเลือกและการปรับแต่งอุปกรณ์ควบคุม (SELECTING & TUNING CONTROLLER)

การเลือกและการปรับแต่งอุปกรณ์ควบคุมควรใช้หลักเกณฑ์ในการเลือกและตัดสินใจอย่างไรจึงจะทราบว่าการควบคุมให้ผลการควบคุมที่ดีและเหมาะสมกับกระบวนการมากที่สุด (optimum control) หลักเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจเลือกและปรับแต่งตัวแปรของอุปกรณ์ควบคุมมีอยู่หลายวิธี โดยทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการควบคุมและออกแบบตัวอย่างเช่น ต้องการลดค่าการตอบสนองสูงสุดของระบบควบคุมให้มีค่าน้อยที่สุด ต้องการลดช่วงเวลาเข้าสู่สมดุล หรือเสถียรภาพให้สั้นที่สุด ต้องการลดค่าความคลาดเคลื่อนรวมในการควบคุมให้มีค่าน้อยที่สุด เป็นต้น ซึ่งแน่นอนว่าการใช้หลักเกณฑ์ในการเลือกและตัดสินใจที่แตกต่างกันย่อมจะทำให้ระบบควบคุมได้ผลของการควบคุมที่แตกต่างกันออกไป การเลือกอุปกรณ์ควบคุมเพื่อลดความยุ่งยากในการแก้ปัญหาด้านคณิตศาสตร์และเหมาะสมกับการออกแบบระบบควบคุมสามารถทำได้โดยพิจารณาการตอบสนองของกระบวนการจากผลการควบคุมแบบ P, PI และ PID ดังนี้

การควบคุมแบบ P

- \* ทำให้กระบวนการตอบสนองต่อตัวแปรเข้าเร็วขึ้น
- \* ทำให้ระบบควบคุมมีความคลาดเคลื่อนในการควบคุมเกิดขึ้นเสมอภายหลังการเปลี่ยนแปลงเป้าหมายการควบคุมหรือภาระการควบคุม

การควบคุมแบบ I

- \* ทำให้ระบบควบคุมไม่มีความคลาดเคลื่อนในการควบคุมแต่มีค่าการตอบสนองสูงสุดเกิดขึ้นทำให้ความคลาดเคลื่อนในการควบคุมของกระบวนการในช่วงแรกมากกว่ากระบวนการเดิม

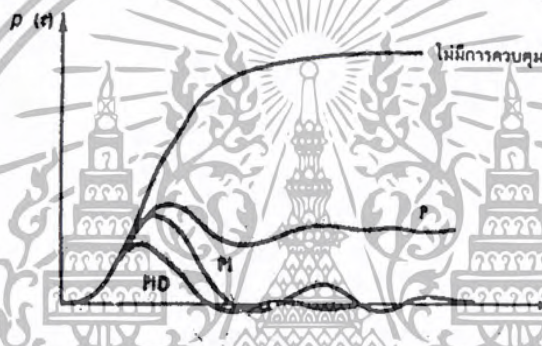
\* ทำให้กระบวนการตอบสนองต่อตัวแปรเข้าภายนอกช้าลง เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเดิมและผลการตอบสนองจะมีการแกว่ง

\* การปรับค่า  $K_p$  เพิ่มขึ้นในการควบคุมแบบ I จะทำให้กระบวนการตอบสนองเร็วขึ้นแต่มีการแกว่งเพิ่มขึ้นทำให้เสถียรภาพของระบบรวมลดลง

#### การควบคุม D

\* การควบคุมแบบนี้จะส่งสัญญาณควบคุมเพื่อปรับสภาพกระบวนการก่อนความคลาดเคลื่อนจริงจะเกิดขึ้นกับกระบวนการทำให้การควบคุมมีผลดีกว่าการควบคุมแบบอื่น

\* การควบคุมแบบนี้จะช่วยเพิ่มเสถียรภาพของกระบวนการให้ดีขึ้น



รูปที่ 5.14 ผลการตอบสนองของกระบวนการที่ใช้กระบวนการที่ใช้อุปกรณ์ควบคุมแบบต่างๆ

รูปที่ 5.14 แสดงคุณสมบัติของอุปกรณ์ควบคุมแบบต่างๆ ที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการโดยอุปกรณ์ควบคุมที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการควบคุมกระบวนการมากที่สุดก็คือ การควบคุมแบบ PID ซึ่งทั้งนี้มันสามารถเปลี่ยนแปลงลักษณะผลการตอบสนองของกระบวนการได้มากที่สุดโดยสามารถปรับตัวแปรได้ 3 ค่าคือ  $K_p$ ,  $T_i$ , และ  $T_d$  แต่ในขณะเดียวกันก็ทำให้การปรับแต่งอุปกรณ์ควบคุมยุ่งยากกว่าการควบคุมแบบอื่น การเลือกชนิดของอุปกรณ์ควบคุมแบบวงปิดหรือป้อนกลับให้การควบคุมกระบวนการ ได้ผลดีและสามารถปรับอุปกรณ์ควบคุมได้ง่าย นั้นเราควรใช้หลักเกณฑ์การพิจารณาดังนี้

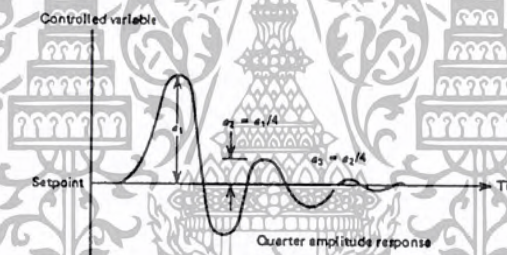
1. เลือกใช้อุปกรณ์ควบคุมแบบ P ถ้าการควบคุมกระบวนการนั้นไม่จำเป็นต้องได้ผลการควบคุมที่แม่นยำนัก โดยปรับค่า  $K_p$  ของอุปกรณ์ควบคุมให้มีความคลาดเคลื่อนในการควบคุมเกิดขึ้นในช่วงที่ยอมรับได้
2. เลือกใช้อุปกรณ์ควบคุมแบบ PI ถ้าเราไม่สามารถที่จะใช้อุปกรณ์ควบคุมแบบ P ได้ทั้งนี้เนื่องจากการควบคุมไม่ต้องการให้มีความคลาดเคลื่อนในการควบคุมเกิดขึ้นเลย
3. เลือกใช้อุปกรณ์ควบคุมแบบ PID ถ้าไม่สามารถที่จะใช้อุปกรณ์ควบคุมแบบ PI ได้ทั้งนี้เนื่องจากการควบคุมแบบ PI นั้นแม้ว่าไม่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการควบคุมได้ก็จริงแต่การตอบสนองของกระบวนการ

จะช้าลง ซึ่งการเพิ่มความเร็วในการตอบสนองของกระบวนการ โดยการปรับค่า  $K_p$  เพิ่มขึ้นจะทำให้ผลการตอบสนองของระบบรวมมีการแกว่งเพิ่มขึ้นและเสถียรภาพลดลง ดังนั้นการใช้อุปกรณ์ควบคุมแบบ PID จะทำให้ผลของการควบคุมไม่มีความคลาดเคลื่อนในการควบคุมเกิดขึ้น เราสามารถปรับ  $K_p$  เพื่อให้กระบวนการตอบสนองเร็วขึ้นโดยเสถียรภาพของระบบยังคงเดิม

### การปรับอุปกรณ์ควบคุม (CONTROLLER TUNING)

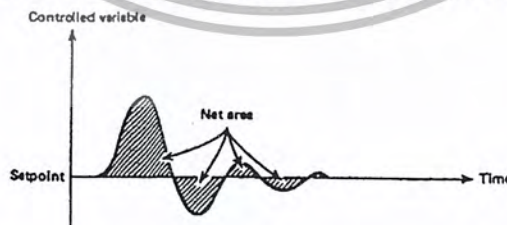
การเลือกค่าตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมกับกระบวนการหรือการปรับอุปกรณ์ควบคุมให้สามารถควบคุมกระบวนการได้ดีและมีประสิทธิภาพโดยทั่วไปนั้นจะมีอยู่ 3 วิธีด้วยกันกล่าวคือ

1. การปรับอุปกรณ์ควบคุม โดยกำหนดกฎเกณฑ์การควบคุมจากผลการตอบสนองของกระบวนการเฉพาะจุด เช่นลดการตอบสนองสูงสุดให้มีค่าน้อยที่สุด ปรับผลการตอบสนองของกระบวนการให้มีอัตราการลดทอนเป็น  $1/4$  (Quarter-decay) ระยะเวลาคู่สมมูลของกระบวนการให้สั้นที่สุด ซึ่งการปรับอุปกรณ์ควบคุมโดยวิธีนี้มักทำให้ได้ค่าตัวแปรควบคุมหลายชุด



รูปที่ 5.15 แสดงการปรับผลการตอบสนองของกระบวนการให้มีอัตราการลดทอนเป็น  $1/4$

2. การปรับอุปกรณ์ควบคุม โดยใช้หลักเกณฑ์การอินทิเกรตค่าเวลาความคลาดเคลื่อนแบบต่าง ๆ การปรับอุปกรณ์ควบคุมด้วยวิธีนี้ต้องใช้การคำนวณค่อนข้างมากทำให้เสียเวลาและมักไม่สามารถใช้กับกระบวนการจริงได้



รูปที่ 5.16 แสดงการปรับผลการตอบสนองของกระบวนการให้มีพื้นที่ (การแกว่ง) ต่ำสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.16 พื้นที่สุทธิของการเบี่ยงเบนเราสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$A = \int |r - b| dt \quad (5.18)$$

เมื่อ  $A$  = พื้นที่ของการเบี่ยงเบน

$b$  = ค่าที่ได้จากการวัด

$r$  = ค่าอ้างอิงหรือค่าที่ต้องการ

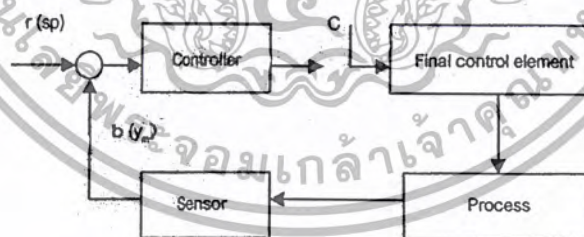
3. การปรับอุปกรณ์ควบคุมโดยใช้สูตรสำเร็จที่ได้จากการทดลองซึ่งสามารถแบ่งออกได้อีก 2 วิธีคือ

3.1 การหาผลการตอบสนองของกระบวนการเปิด (process reaction curve method)

3.2 การหาผลการแกว่งของระบบปิด (closed loop cycling method)

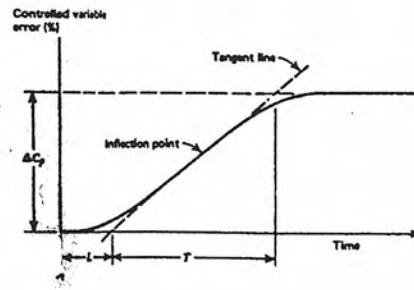
**การปรับอุปกรณ์ควบคุมโดยการหาผลการตอบสนองของกระบวนการเปิด (OPEN LOOP TRANSIENT RESPONSE METHOD)**

ระบบควบคุมกระบวนการดังรูปที่ 5.17 ถ้าเราเปิดวงจรควบคุมออกระหว่างตัวควบคุมกับอุปกรณ์ควบคุมตัวสุดท้ายและทำการป้อนสัญญาณปรับกระบวนการ (C) ให้อุปกรณ์ควบคุมตัวสุดท้ายเป็นสัญญาณระดับ (step function) ขนาดของสัญญาณเท่ากับ  $A$  แล้วสังเกตผลการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์หรืออุปกรณ์ตรวจวัดซึ่งเป็นการตอบสนองของระบบ ( $b$ )



รูปที่ 5.17 แสดงการปรับอุปกรณ์ควบคุมโดยการหาผลการตอบสนองของกระบวนการเปิด

ผลการตอบสนองของกระบวนการจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของกระบวนการเดิม ซึ่งรวมทั้งอุปกรณ์ตรวจวัดและอุปกรณ์ควบคุมตัวสุดท้าย อย่างไรก็ตามการตอบสนองของกระบวนการส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งรูปตัวเอส (s) ดังแสดงด้วยรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 แสดงผลการตอบสนองการปรับอุปกรณ์ควบคุมโดยการหาผลการตอบสนองของกระบวนการเปิด

จากรูปที่ 5.18 เมื่อกำหนดให้

$L$  = เวลาล่าหลัง (lag time ;min)

$T$  = เวลาปฏิกิริยาของกระบวนการ (min)

$\Delta C_p$  = ช่วงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่ถูกควบคุม (%)

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

$R$  = อัตราส่วนลอจ (log ratio)

ดังนั้น

$$N = \frac{\Delta C_p}{T} \tag{5.19}$$

$$R = \frac{NL}{\Delta C_p} \tag{5.20}$$

จี.เอช. โคเฮน (G.H. Cohen) และ จี.เอ. คูน (G.A. Coon) ได้ทำการปรับอุปกรณ์ควบคุมและหาสูตรสำเร็จที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการปรับตัวแปรของอุปกรณ์ควบคุมแบบ P,PI และ PID เพื่อให้กระบวนการมีอัตราการลดทอนเป็นหนึ่งส่วนสี่ (quarter-decay) ลดความคลาดเคลื่อนในการควบคุมให้มีค่าน้อยที่สุด โดยมีค่าต่างๆ ดังนี้

อุปกรณ์ควบคุมแบบ P:

$$K_p = \frac{\Delta p}{NL} \left[ 1 + \frac{1}{3} \frac{NL}{\Delta C_p} \right] \tag{5.21}$$

อุปกรณ์ควบคุมแบบ PI :

$$K_p = \frac{\Delta p}{NL} \left[ 0.9 + \frac{1}{12} R \right] \tag{5.22}$$

$$T_i = l \left[ \frac{30 + 3R}{9 + 20} \right] \tag{5.23}$$

อุปกรณ์ควบคุมแบบ PID :

$$K_p = \frac{\Delta p}{NL} \left( 1.33 + \frac{R}{4} \right) \quad (5.24)$$

$$T_i = L \left[ \frac{32 + 6R}{13 + 8R} \right] \quad (5.25)$$

$$T_d = L \left[ \frac{4}{11 + 2R} \right] \quad (5.26)$$

สูตรการปรับอุปกรณ์ควบคุมของโคเฮนและควิน สามารถใช้ระบบควบคุมที่กระบวนการมีการตอบสนองลักษณะเป็น โคงรูปตัวเอส (s) เท่านั้น ถ้าไม่สามารถประมาณค่าตัวแปรกระบวนการจากเส้นโค้งคือ  $K_p$ ,  $T_i$  และ  $T_d$  ได้อย่างถูกต้อง ค่าตัวแปรที่ใช้ปรับอุปกรณ์ควบคุมจากสูตรของโคเฮนและควิน สามารถใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการปรับอุปกรณ์ควบคุมโดยการลองผิดลองถูกในลำดับต่อไป

การปรับอุปกรณ์ควบคุม โดยใช้สูตรสำเร็จของ โคเฮนและควิน หากเราสังเกตก็จะพบว่า การปรับค่า  $K_p$  ในอุปกรณ์ควบคุมแบบ PI จะมีค่าน้อยกว่าการปรับค่าในอุปกรณ์ควบคุมแบบ P ทั้งนี้เนื่องมาจากว่าผลการควบคุมแบบ I จะทำให้ระบบรวมมีเสถียรภาพลดลงจึงต้องลดค่าของ  $K_p$  เพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบไว้ และการปรับอุปกรณ์ควบคุมแบบ PID เราสามารถเพิ่มค่า  $K_p$  ได้มากกว่าอุปกรณ์ควบคุมแบบ P และ PI ทั้งนี้เนื่องจากผลการควบคุมแบบ D จะช่วยทำให้ระบบรวมมีเสถียรภาพดีขึ้น

#### การปรับอุปกรณ์ควบคุมโดยการหาผลแกว่งของระบบปิด (CLOSED LOOP CYCLING METHOD)

การปรับอุปกรณ์ควบคุมโดยวิธีหาผลการแกว่งของระบบปิดต่างจากวิธีการหาเส้นโค้งแสดงการตอบสนองของกระบวนการทั้งนี้ก็เนื่องมาจากเราไม่จำเป็นต้องเปิดวงจรควบคุมออกทำให้สามารถทดสอบและปรับอุปกรณ์ควบคุมในกระบวนการได้โดยตรง การปรับตัวแปรของอุปกรณ์ควบคุมด้วยวิธีนี้มีขั้นตอนที่สำคัญดังนี้

1. ปรับอุปกรณ์ควบคุมให้ระบบรวมอยู่ในสภาพสมดุล ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรกระบวนการและสัญญาณควบคุม
2. ปรับตัวแปรให้อุปกรณ์ควบคุมเหลือการควบคุมแบบ P อย่างเดียวโดยปรับค่า  $T_i$  ให้มีค่ามากที่สุดและปรับค่า  $T_d$  ให้มีค่าน้อยสุด
3. เปลี่ยนค่าเป้าหมาย (r) การควบคุมและสังเกตผลการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรกระบวนการจากค่าที่ตรวจวัด
4. ปรับอุปกรณ์ควบคุมโดยเพิ่มค่า  $K_p$  จนค่าของตัวแปรกระบวนการแกว่งด้วยความถี่และขนาดคงที่
5. บันทึกค่าอัตราการควบคุมแบบ P ที่ทำให้ระบบมีการแกว่งโดยมีขนาดคงที่ ( $K_C$ ) และคาบเวลาการแกว่งของตัวแปรกระบวนการ ( $T_C$ )

ซีกเกอร์ (Ziegler) และ นิโคลส์ (Nichols) ได้ทดลองหาสูตรการปรับตัวแปรของอุปกรณ์ควบคุมโดยวัดคุณสมบัติของกระบวนการจากผลการแกว่งของระบบปิดได้ดังนี้

อุปกรณ์ควบคุมแบบ P:

$$K_p = 0.5K_C \tag{5.27}$$

อุปกรณ์ควบคุมแบบ PI:

$$K_p = 0.45K_C \tag{5.28}$$

$$T_i = \frac{T_C}{1.2} \tag{5.29}$$

การควบคุมแบบ PID:

$$K_p = 0.6K_C \tag{5.30}$$

$$T_i = \frac{T_C}{2.0} \tag{5.31}$$

$$T_d = \frac{T_C}{8} \tag{5.32}$$

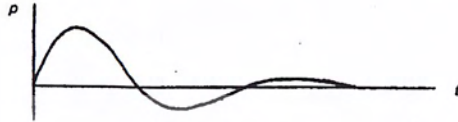
### การปรับอุปกรณ์ควบคุมโดยวิธีการลองผิดลองถูก (TRIAL AND ERROR METHOD)

การปรับอุปกรณ์ควบคุมโดยใช้สูตรสำเร็จจากการทดลองต่าง ๆ นั้นบางครั้งเราไม่สามารถที่จะทำให้การควบคุมกระบวนการได้ผลดีเท่าที่นี้ก็เนื่องมาจากว่ากระบวนการที่ใช้ในการทดลองหาสูตรสำหรับอุปกรณ์ควบคุมมีคุณสมบัติบางอย่างที่ต่างจากกระบวนการจริงที่เราต้องการควบคุม ดังนั้นค่าตัวแปรควบคุมที่ได้จากการใช้จากการใช้สูตรสำเร็จก็สามารถใช้ได้เพียงเป็นค่าเริ่มต้นในการปรับอุปกรณ์ควบคุม โดยไม่ทำให้ระบบรวมสูญเสียเสถียรภาพ การทดลองปรับอุปกรณ์ควบคุมโดยสังเกตผลจากการพิจารณาค่าวัดของตัวแปรกระบวนการมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ปรับอุปกรณ์ควบคุมให้ระบบรวมอยู่ในสภาพสมดุลไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวกระบวนการและสัญญาณควบคุม
2. เปลี่ยนค่าเป้าหมายการควบคุมและสังเกตการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรกระบวนการจากค่าวัด
3. ปรับอัตราการควบคุม  $K_p$  ของอุปกรณ์ควบคุมจนได้ผลการตอบสนองของกระบวนการดีที่สุด
4. ปรับช่วงเวลาการเริ่มต้นอินทิเกรต  $T_i$  ของอุปกรณ์ควบคุมจนได้ผลการตอบสนองของกระบวนการดีที่สุด
5. ปรับค่าคงที่ของเวลาอนุพันธ์  $T_d$  ของอุปกรณ์ควบคุมจนได้ผลการตอบสนองของกระบวนการดีที่สุด



(a) การปรับค่า  $K_p$  ที่เหมาะสม



(b) การปรับค่า  $K_p$  มากเกินไป

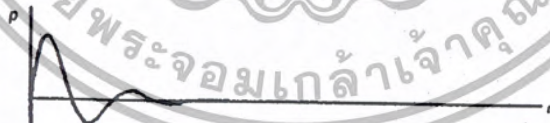


(c) การปรับค่า  $K_p$  น้อยเกินไป

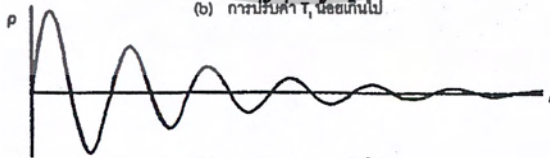
รูปที่ 5.19 แสดงผลการปรับค่า  $K_p$  ของอุปกรณ์ควบคุมแบบ P



(a) การปรับค่า  $T$ , ที่เหมาะสม



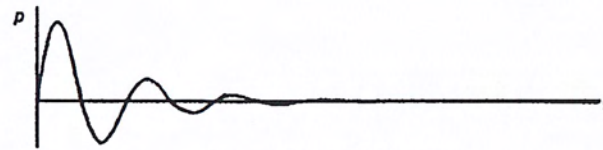
(b) การปรับค่า  $T$ , น้อยเกินไป



(c) การปรับค่า  $T$ , มากเกินไป

รูปที่ 5.20 แสดงผลการปรับค่า  $T$ , ของอุปกรณ์ควบคุมแบบ PI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

รูปที่ 5.21 แสดงผลการปรับค่า  $T_d$  ของอุปกรณ์ควบคุมแบบ PID



## บทที่ 6

### ขั้นตอนและผลการทดลอง

ในเนื้อหาของบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการทำการทดลองรวมทั้งแสดงผลที่ได้จากการทดลองด้วยวิธีการต่างๆ เพื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปทำการวิเคราะห์และทำการสรุปผลต่อไป

#### 6.1 วิธีการทดลอง

วิธีการทดลองในการควบคุมการทำงานของแขนกลไฮดรอลิกควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ

##### 6.1.1 การทดลองเปรียบเทียบค่าความเร็วของแขนกลไฮดรอลิกกับค่าโวลท์อินพุท

เป็นการทดลองเพื่อนำผลการทดลองไปใช้ในการหาค่าเกนของระบบโดยการนำค่าความเร็วเชิงเส้นที่ได้จากการทดลองทั้งหมดมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา เพื่อหาความเร็วเชิงเส้นเฉลี่ยในแต่ละค่าโวลท์อินพุทและนำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์ความเร็วเฉลี่ยทั้งหมดกับค่าโวลท์อินพุทเพื่อนำไปหาเกนของระบบซึ่งขั้นตอนการทดลองเป็นดังต่อไปนี้

1. ทำการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของแขนกลไฮดรอลิกกับค่าโวลท์อินพุทโดยการใส่ค่าอินพุทให้กับระบบ โดยมีค่าตั้งแต่  $-10$  โวลท์ถึง  $+10$  โวลท์
2. หาจำนวนครั้งของการอ่านค่าที่เกิดขึ้นภายใน 1 วินาที จากสมการที่ (6.1) โดยกำหนดค่า Sampling Time ของค่าโวลท์อินพุท  $0 - 4.5$  โวลท์ เท่ากับ  $40$  ms เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการอ่านค่าโรตารีเอ็นโคดเดอร์ เพราะที่ค่าโวลท์อินพุทต่ำ แขนกลไฮดรอลิกจะเคลื่อนที่ได้ช้าและกำหนดให้ค่า Sampling Time ของค่าโวลท์อินพุท  $5 - 10$  โวลท์ เท่ากับ  $10$  ms เพื่อให้โรตารีเอ็นโคดเดอร์อ่านค่าได้สูงขึ้นทันต่อการเคลื่อนที่ของแขนกลที่เร็วขึ้น อันเนื่องมาจากค่าโวลท์อินพุทที่มีค่าสูงขึ้น

$$M = \frac{1 \text{ s}}{t_{\text{sampling}}} \quad (6.1)$$

เมื่อ  $M$  = จำนวนSampling ใน 1 วินาที

$t_{\text{sampling}}$  = เวลาที่ใช้ในการทำงาน 1 รอบ

เมื่อนำค่า Sampling Time ไปแทนค่าในสมการที่ (6.1) จึงสามารถหาจำนวนSampling ใน 1 วินาทีได้

3. ทำการป้อนค่าโวลท์อินพุทโดยเริ่มจาก  $0$  โวลท์และเพิ่มขึ้นทีละ  $0.5$  โวลท์ เมื่อถึง  $5$  โวลท์ จึงค่อยเพิ่มค่าโวลท์อินพุททีละ  $1$  โวลท์จนถึง  $10$  โวลท์ โดยกรณีนี้เป็นการสั่งให้กระบอบอกสูบชักออก สำหรับกรณีกระบอบอกสูบชักเข้าให้ป้อนค่าโวลท์อินพุทเป็นค่าลบ และทำการจับเวลา โดยนำเวลาที่ได้ไปหาจำนวนครั้งของการอ่านค่าที่เกิดของแต่ละค่าโวลท์อินพุทจากสมการ (6.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N = M * t \quad (6.2)$$

เมื่อ  $N =$  จำนวน Sampling ที่เกิดขึ้นทั้งหมดในแต่ละค่าโวลต์อินพุท  
 $t =$  เวลาที่ระบบสุบซัคเข้าหรือซัคออก

ตัวอย่างเช่น เมื่อค่าโวลต์อินพุทของระบบเท่ากับ 10 โวลต์ ที่ Sampling Time เท่ากับ 40 ms จะได้ค่าจำนวน Sampling มีค่าเท่ากับ 25 ครั้งใน 1 วินาที และเมื่อทำการจับเวลาพบว่าเวลาที่ระบบสุบใช้ในการซัคออกสุดมีค่าเท่ากับ 3.5 วินาที ดังนั้น จำนวน Sampling ทั้งหมดในช่วงเวลา 3.5 วินาทีสำหรับค่าโวลต์อินพุท 10 โวลต์ จึงมีค่าเท่ากับ 88 ครั้ง

4. ทำการป้อนค่า Sampling Time, โวลต์อินพุท และจำนวน Sampling ทั้งหมดผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาความเร็วของแขนกลไฮดรอลิกในแต่ละค่าโวลต์อินพุท

การคำนวณหาความเร็วของแขนกลไฮดรอลิก



รูปที่ 6.1 แสดงระยะของแขนกลที่ใช้ในการคำนวณ

พิจารณารูปที่ 6.1 แสดงขนาดของแขนกลส่วนที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ตามวิธีเรขาคณิตวิเคราะห์ เพื่อหาขนาดของการกระจัดเชิงมุม ( $\theta$ ) โดยนำค่าความยาวดังกล่าวมาพิจารณาตามกฎของ Cosine ดังสมการที่ (6.3)

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \theta \quad (6.3)$$

โดย  $a =$  ความยาว 310 mm

$b =$  ความยาว 350 mm

$c =$  ระยะที่ระบบสุบซัคออกหรือซัคเข้าสุด

(เท่ากับ 565 mm และ 413 mm ตามลำดับ )

$\theta =$  มุมที่แขนกลทำกับฐาน ( radian )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาค่าความเร็วของแกนกลไฮดรอลิกเกิดจากการหาค่าอนุพันธ์ของสมการที่ ( 6.3 ) ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นและความเร็วเชิงมุมของแกนกลไฮดรอลิก และมุมที่แกนกลทำกับฐานดังสมการที่ ( 4 )

$$\dot{c} = \frac{ab \sin \theta}{\sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos \theta}} \dot{\theta} \tag{6.4}$$

เมื่อ  $\dot{c}$  = ความเร็วเชิงเส้นของกระบอบสูบไฮดรอลิก ในแต่ละ Samping Time

$\dot{\theta}$  = ความเร็วเชิงมุมของกระบอบสูบไฮดรอลิก ในแต่ละ Samping Time

โดยต่อจากนี้จะเป็นการหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อความเร็วที่เกิดขึ้นในสมการที่ ( 6.4 ) การเคลื่อนที่ของแกนกลไฮดรอลิกทำให้โรตารีเอนโค้ดเดอร์สร้างสัญญาณพัลส์ขึ้นมา ซึ่งอัตราตของเฟืองที่ติดโรตารีเอนโค้ดเดอร์กับเฟืองที่ติดแกนกลไฮดรอลิกมีค่าเท่ากับ 6 ดังนั้นจำนวนพัลส์ที่เกิดขึ้นจริงจากการเคลื่อนที่ของแกนกลหาได้จากสมการที่ ( 6.5 )

$$A = \frac{x}{6} \tag{6.5}$$

เมื่อ  $A$  = จำนวนพัลส์ที่เกิดจากการหมุนของเฟืองที่ติดบนแกนกล ในแต่ละ Samping Time

$x$  = จำนวนพัลส์ที่เกิดจากการหมุนของเฟืองที่ติดบนโรตารีเอนโค้ดเดอร์ ในแต่ละ Samping Time

พิจารณาโรตารีเอนโค้ดเดอร์ที่มีค่าความละเอียดในการทำงานคือ 1000 พัลส์ต่อรอบ เมื่อผ่านการ์ดนับรอบซึ่งมีอัตราขยายเป็น 4 เท่าของโรตารีเอนโค้ดเดอร์ ทำให้ความละเอียดที่เกิดขึ้นเป็น 4000 พัลส์ต่อรอบ จากจำนวนพัลส์ ที่เกิดขึ้นจากการหมุนของเฟืองที่ติดบนแกนกลสามารถคำนวณหามุมที่เปลี่ยนไปในแต่ละ Samping Time ได้จากสมการที่ ( 6.6 ) หรือ ( 6.7 )

$$\Delta \theta = \frac{2\pi A}{6 \times 4000} \tag{6.6}$$

หรือ 
$$\Delta \theta = (2.61799 \times 10^{-4}) A \tag{6.7}$$

เมื่อ  $\Delta \theta$  = มุมที่เปลี่ยนไปในแต่ละ Samping Time

การหามุมที่แกนกลทำกับฐานที่เวลาใด ๆ สามารถหาได้จากสมการที่ ( 6.8 ) คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน  $\theta_{n+1} = (2.61799 \times 10^{-4}) A_n + \theta_n$  เพื่อเอาค่าของมุม  $\theta$  ไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณค่า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ (6.8)

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } n &= 0, 1, 2, \dots, N \\ \theta_{n+1} &= \text{มุมที่แกนกลทำกับฐานที่ Sampling Time ที่ต้องการพิจารณา} \\ \theta_n &= \text{มุมที่แกนกลทำกับฐานก่อน Sampling Time ที่ต้องการพิจารณา} \\ \theta_0 &= 1.347606 \text{ rad เมื่อกระบอกสูบชักออก} \\ &2.052974 \text{ rad เมื่อกระบอกสูบชักเข้า} \end{aligned}$$

ค่าความเร็วเชิงมุมที่เกิดขึ้นบนแกนกลในแต่ละ Sampling Time สามารถหาได้จากสมการที่ (6.9)

$$\dot{\theta} = \frac{\Delta\theta}{t_{\text{sampling}}} \quad (6.9)$$

ดังนั้นเมื่อนำค่า  $a$ ,  $b$ ,  $\theta$  และ  $\dot{\theta}$  จากค่าในสมการต่าง ๆ ข้างต้นแทนลงในสมการที่ (6.4) จะได้ค่าความเร็วเชิงเส้นของกระบอกสูบในแต่ละ Sampling Time นำผลที่ได้ไปพล็อตตามวิธีที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้น จะได้ค่าแกนของระบบตามที่ต้องการ

#### 6.1.2 การทดลองเปรียบเทียบค่าความเร็วของแกนกลที่วัดได้จริงกับค่าความเร็วที่ต้องการพิจารณา

ในโครงการนี้ได้ออกแบบให้ค่าความเร็วที่ต้องการพิจารณามีลักษณะเป็นรูปคลื่น Sine เพื่อให้กระบอกสูบชักเข้าออกได้ เมื่อค่า Sine มีค่าเป็นบวกกระบอกสูบจะชักออก และเมื่อค่า Sine มีค่าเป็นลบกระบอกสูบจะชักเข้า

$$v = a \sin \omega t \quad (6.10)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (6.11)$$

$$T = 2t \quad (6.12)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } v &= \text{ความเร็วเชิงเส้นของแกนกลไฮดรอลิก} \\ a &= \text{แอมพลิจูดความเร็วของแกนกลไฮดรอลิก} \\ \omega &= \text{ความเร็วเชิงมุมของแกนกลไฮดรอลิก} \\ T &= \text{คาบเวลา} \\ t &= \text{ครึ่งคาบเวลา} \end{aligned}$$

ผลจากการทดลองในหัวข้อที่ 6.1.1 ทำให้ได้ค่าแอมพลิจูดความเร็วเท่ากับ 40 mm/s ที่โวลต์อินพุตเท่ากับ 10 โวลต์ เมื่อทำการอินทิเกรตสมการที่ (6.10) จะได้พื้นที่ใต้กราฟ ซึ่งพื้นที่ใต้กราฟคือระยะชักของกระบอกสูบ ซึ่งมีระยะชักสูงสุด 150 mm ทำให้ได้คาบเวลาเท่ากับ 12 วินาที โดยในโครงการนี้ได้ออกแบบให้มีคาบเวลาเท่ากับ 6 วินาที จากสมการที่ (6.11) จะได้ค่าความเร็วเชิงมุมของกระบอกสูบมีค่าเท่ากับ 1.0472 rad/s ดังนั้นได้สมการความเร็วที่ต้องการพิจารณาดังสมการที่ (6.13)

$$v = 40 \sin 1.0472 t$$

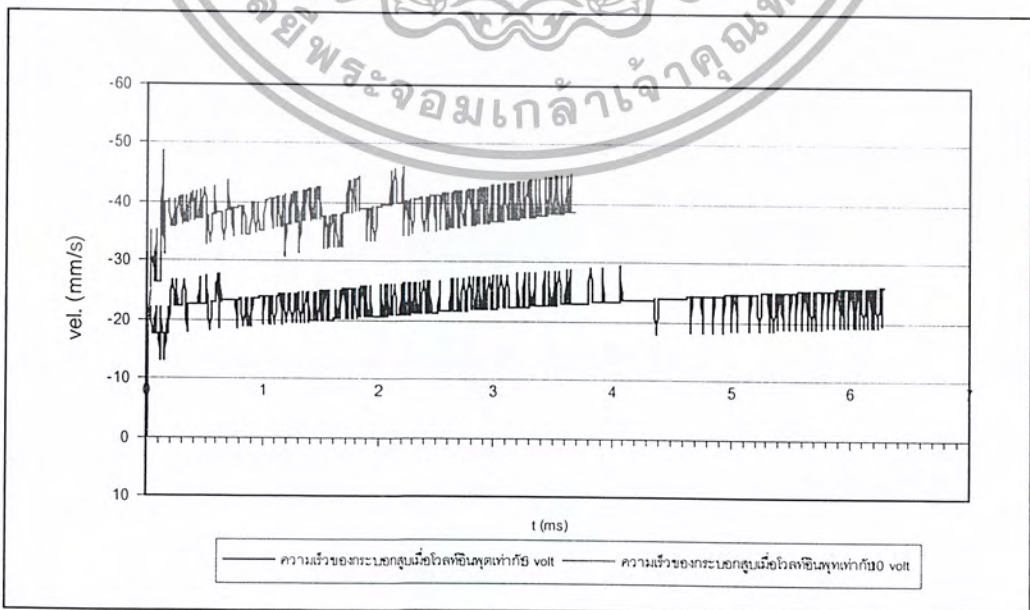
(6.13)

ในการทดลองจะทำการปรับค่า  $K_p$  และ  $K_i$  ในโปรแกรมควบคุมและพิจารณาค่า  $K_p$  และ  $K_i$  ที่ทำให้กราฟความเร็วที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับสมการสมมติฐานที่ตั้งไว้มากที่สุด

### 6.2 ผลการทดลอง

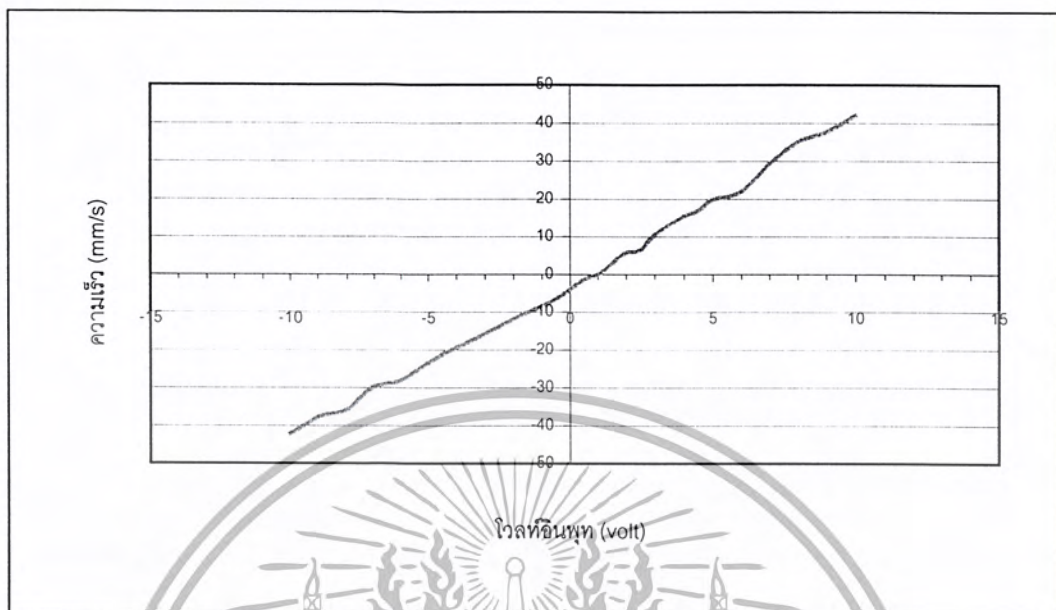


รูปที่ 6.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเร็วกับเวลาเมื่อกระบอกสูบชักออก

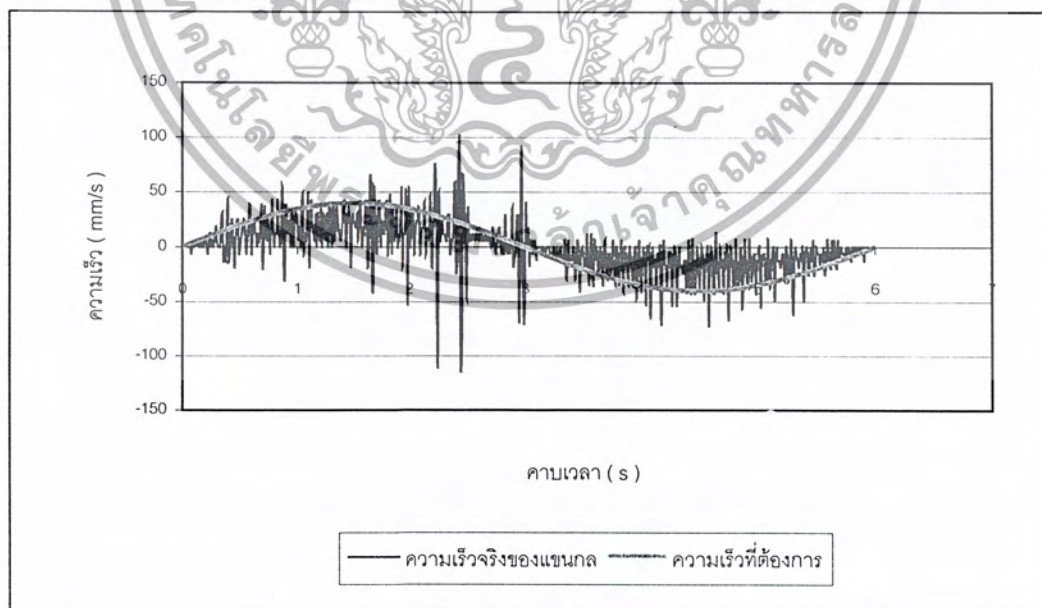


รูปที่ 6.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเร็วกับเวลาเมื่อกระบอกสูบชักเข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ซึ่งห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

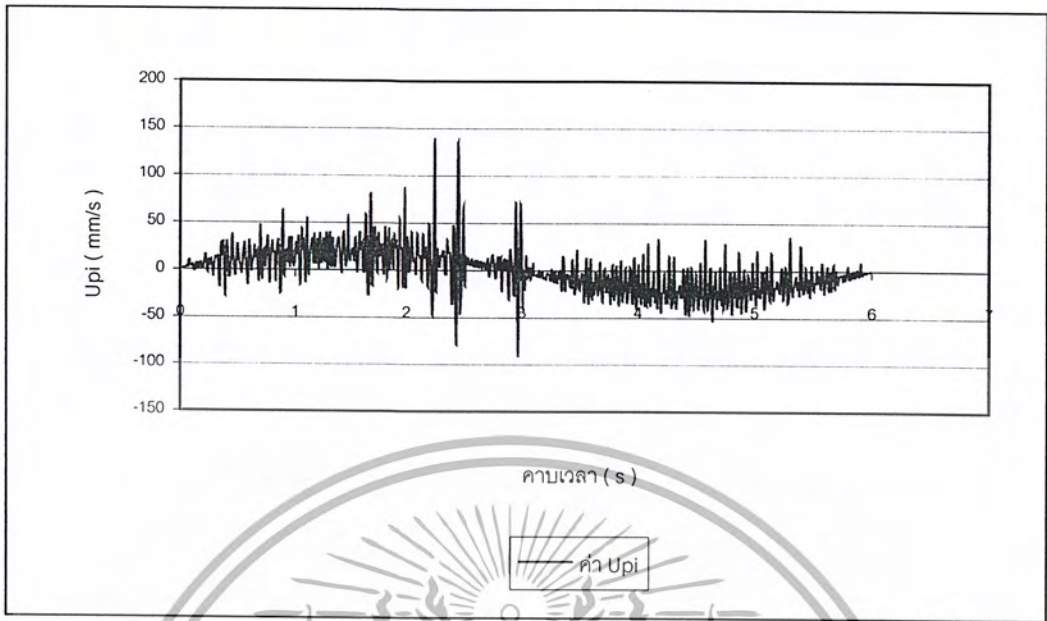


รูปที่ 6.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเร็วกับโวลต์อินพุท

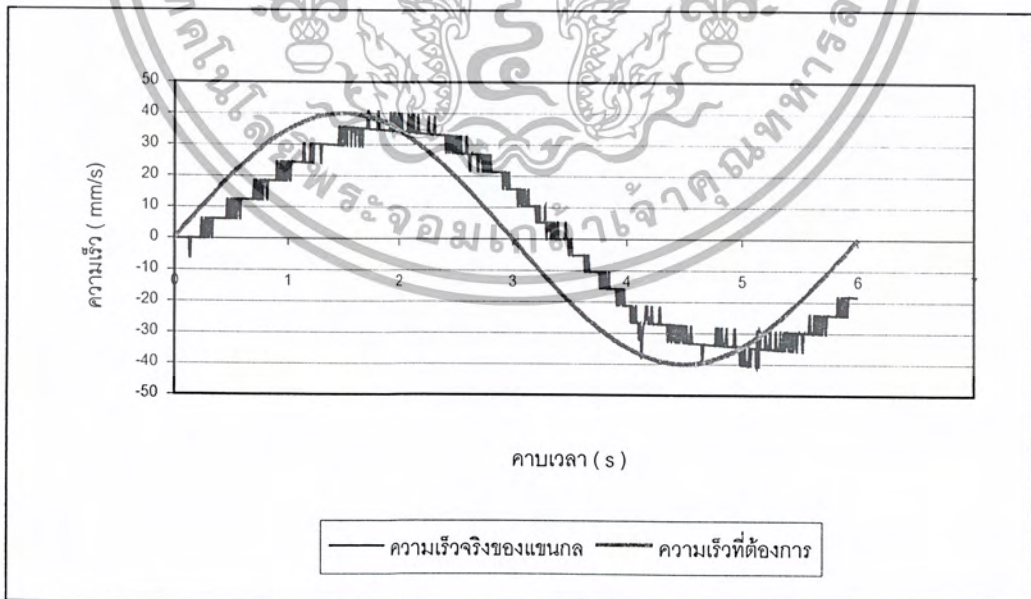


รูปที่ 6.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเร็วกับคาบเวลา เมื่อ  $K_p = 1$  และ  $K_i = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

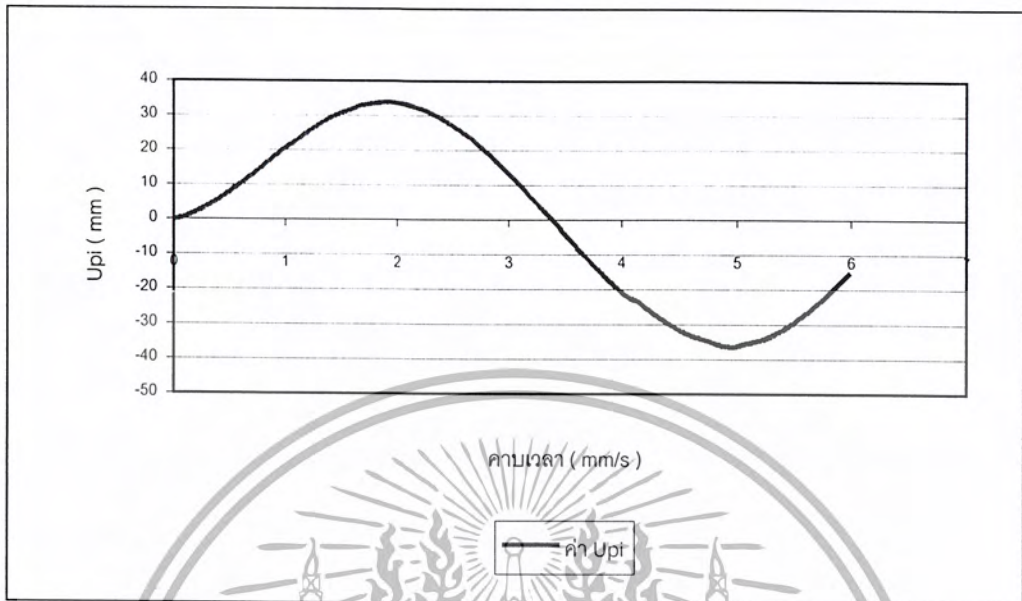


รูปที่ 6.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์  $U_{pi}$  กับคาบเวลา เมื่อ  $K_p = 1$  และ  $K_i = 0$

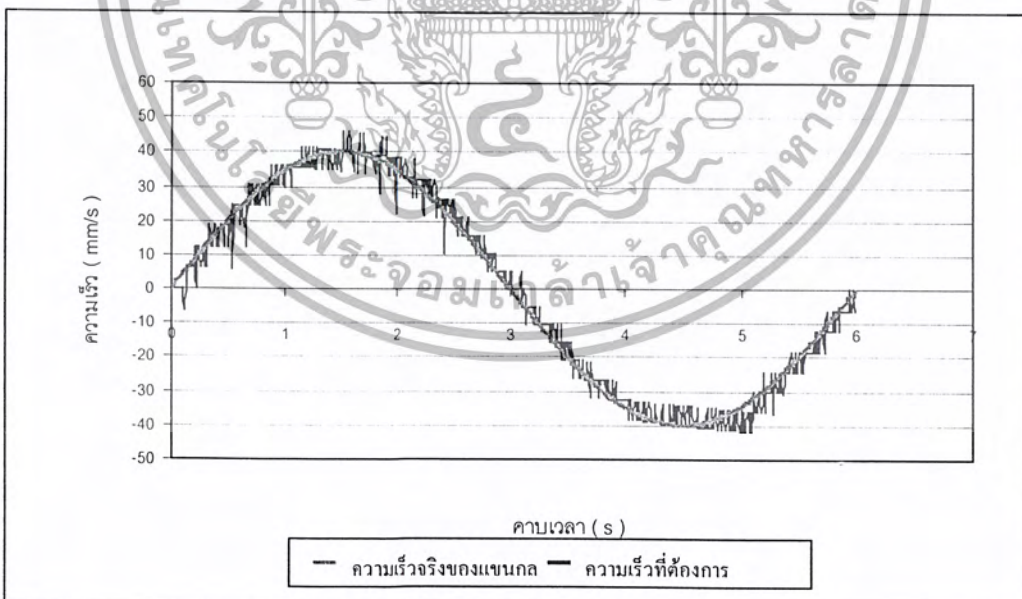


รูปที่ 6.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเร็วกับคาบเวลา เมื่อ  $K_p = 0$  และ  $K_i = 2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

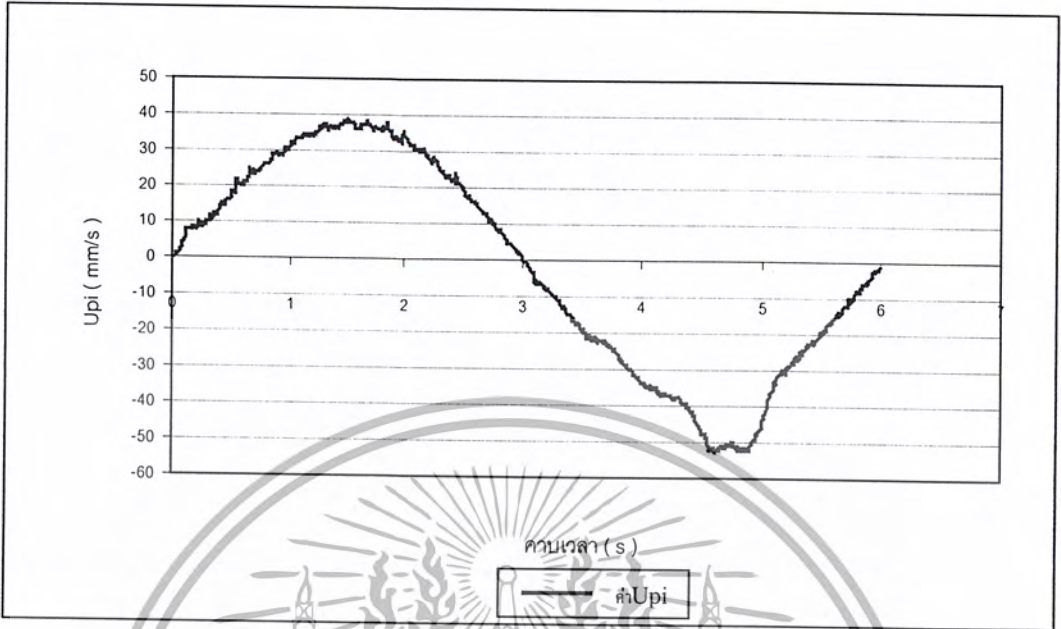


รูปที่ 6.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์  $U_{pt}$  กับคาบเวลา เมื่อ  $K_p = 0$  และ  $K_i = 2$

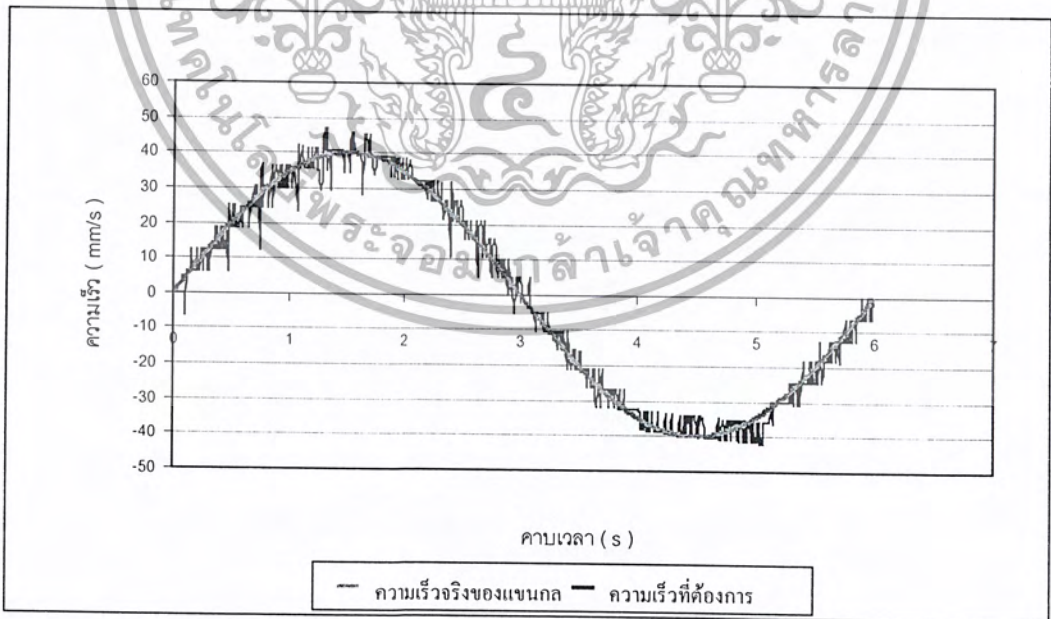


รูปที่ 6.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเร็วกับคาบเวลา เมื่อ  $K_p = 0$  และ  $K_i = 20$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

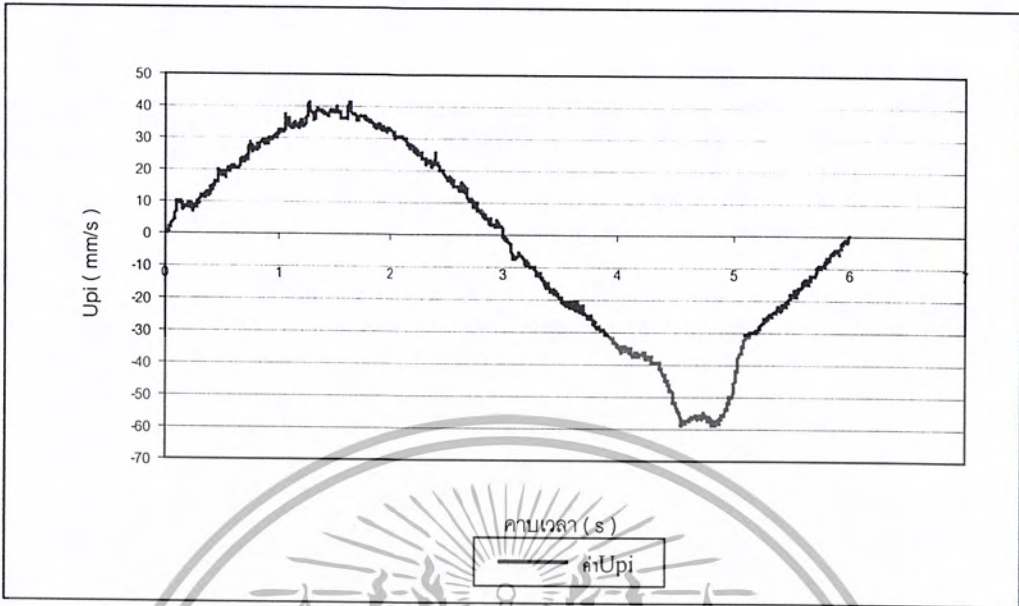


รูปที่ 6.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์  $U_{pi}$  กับคาบเวลา เมื่อ  $K_p = 0$  และ  $K_t = 20$



รูปที่ 6.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเร็วกับคาบเวลา เมื่อ  $K_p = 0$  และ  $K_t = 30$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

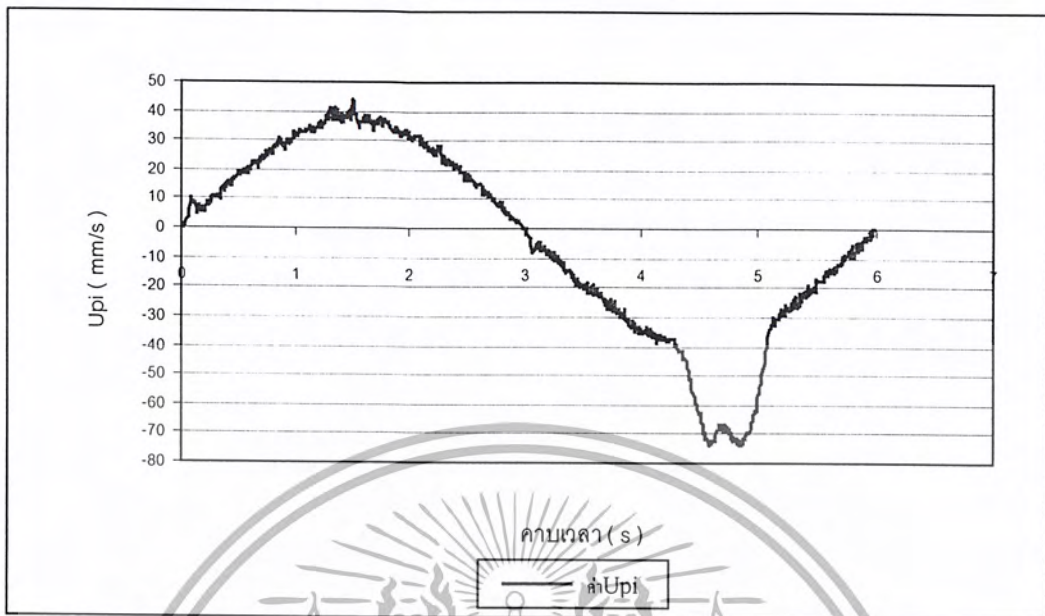


รูปที่ 6.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์  $U_{pi}$  กับคาบเวลา เมื่อ  $K_p = 0$  และ  $K_i = 30$

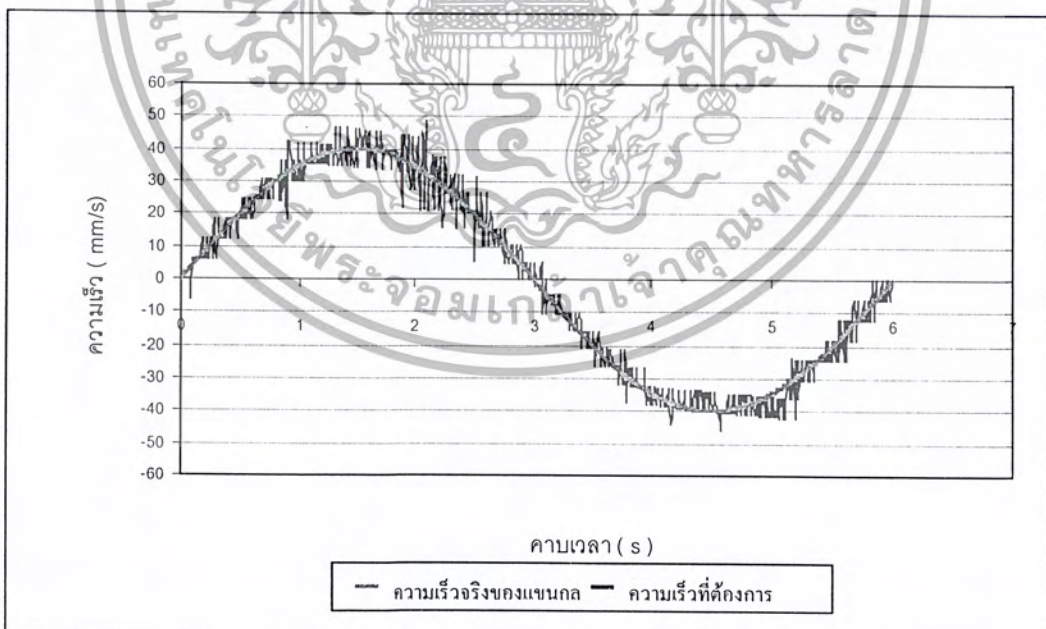


รูปที่ 6.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเร็วกับคาบเวลา เมื่อ  $K_p = 0$  และ  $K_i = 40$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

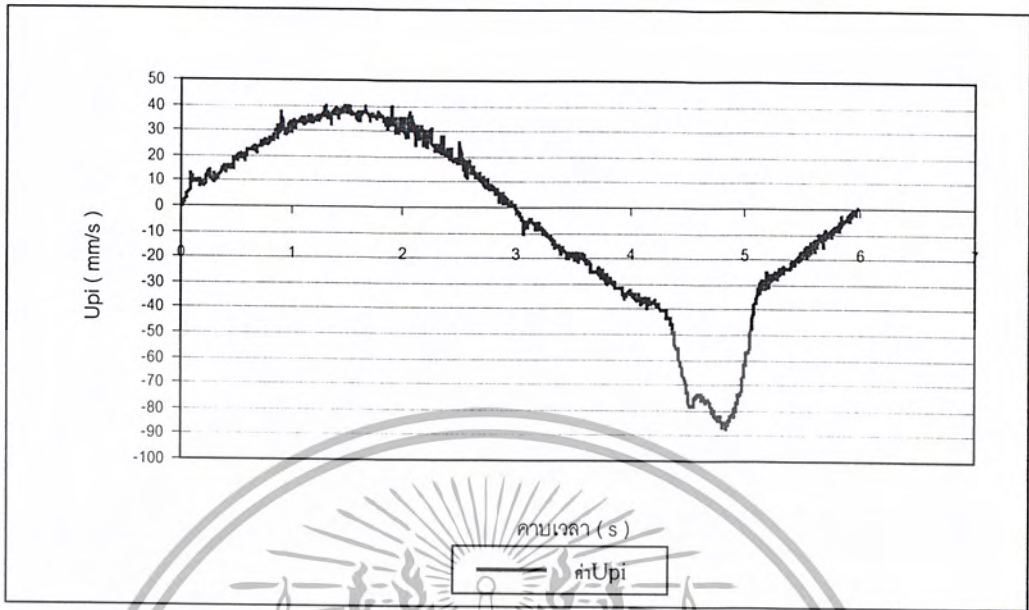


รูปที่ 6.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์  $U_{pi}$  กับคาบเวลา เมื่อ  $K_p = 0$  และ  $K_i = 40$

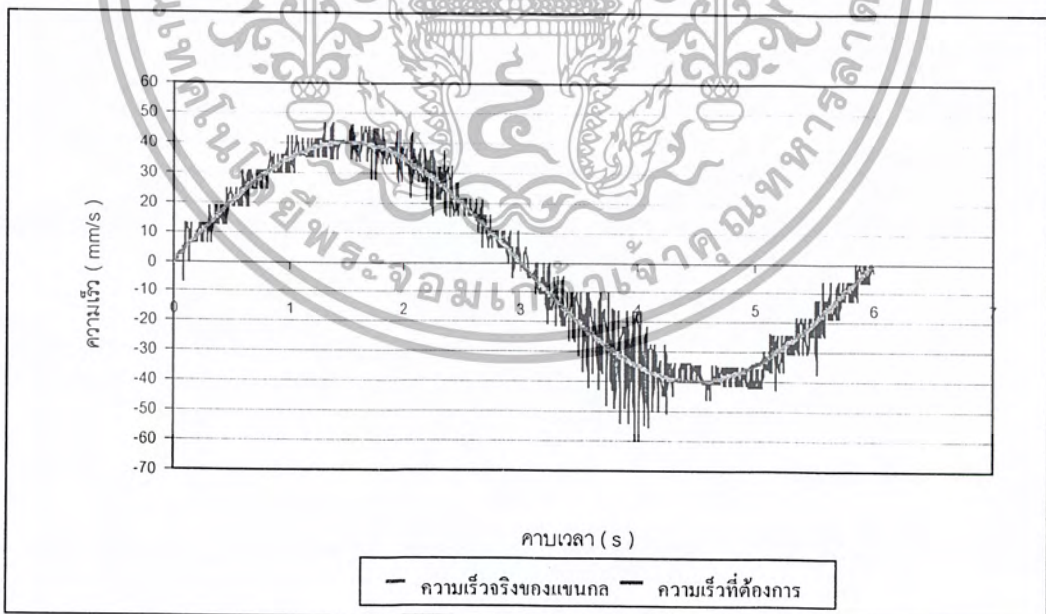


รูปที่ 6.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเร็วกับคาบเวลา เมื่อ  $K_p = 0$  และ  $K_i = 50$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

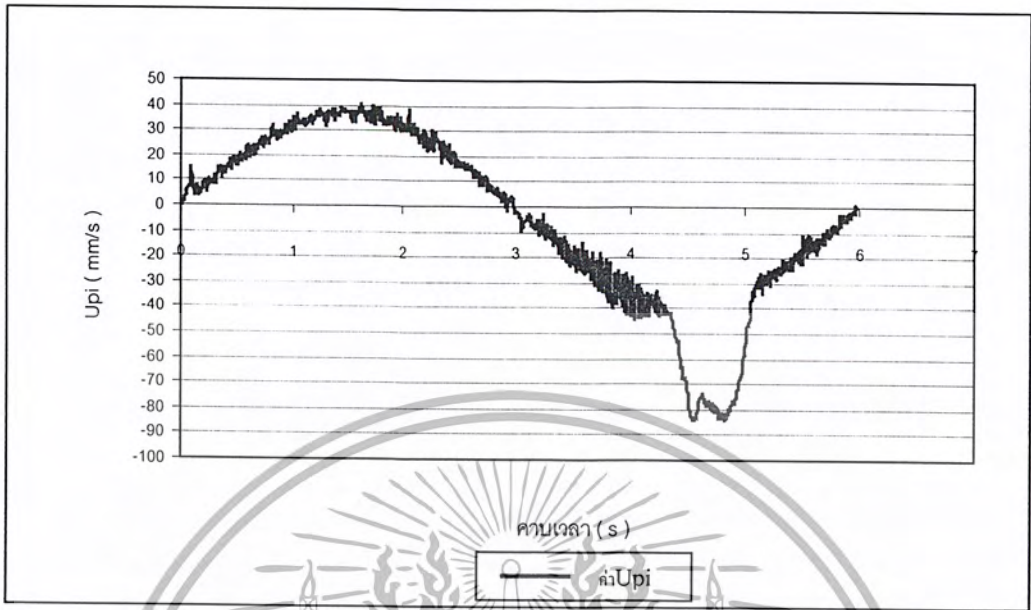


รูปที่ 6.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์  $U_{pi}$  กับคาบเวลา เมื่อ  $K_p = 0$  และ  $K_i = 50$

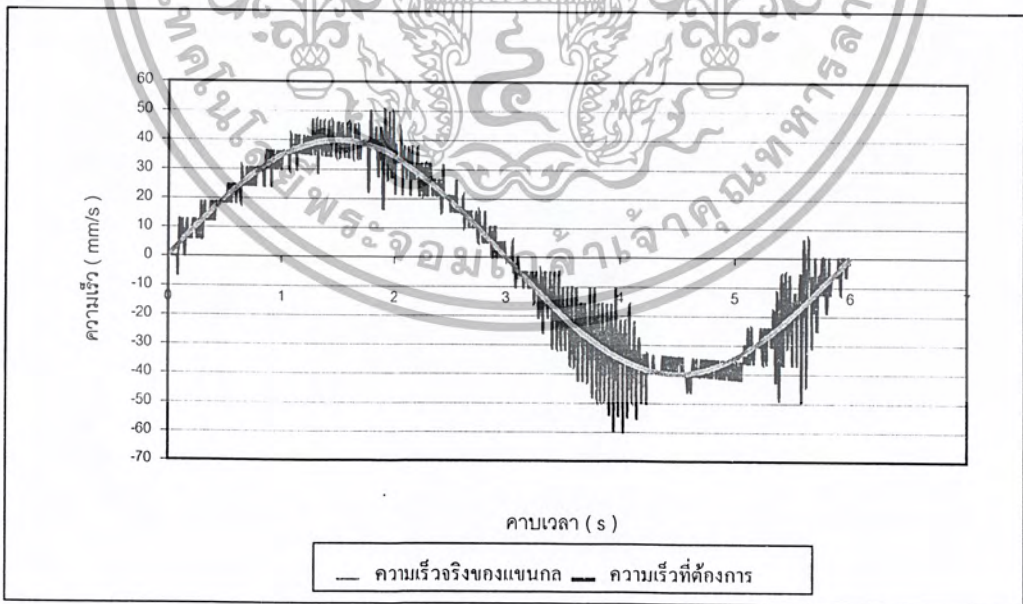


รูปที่ 6.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเร็วกับคาบเวลา เมื่อ  $K_p = 0$  และ  $K_i = 60$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

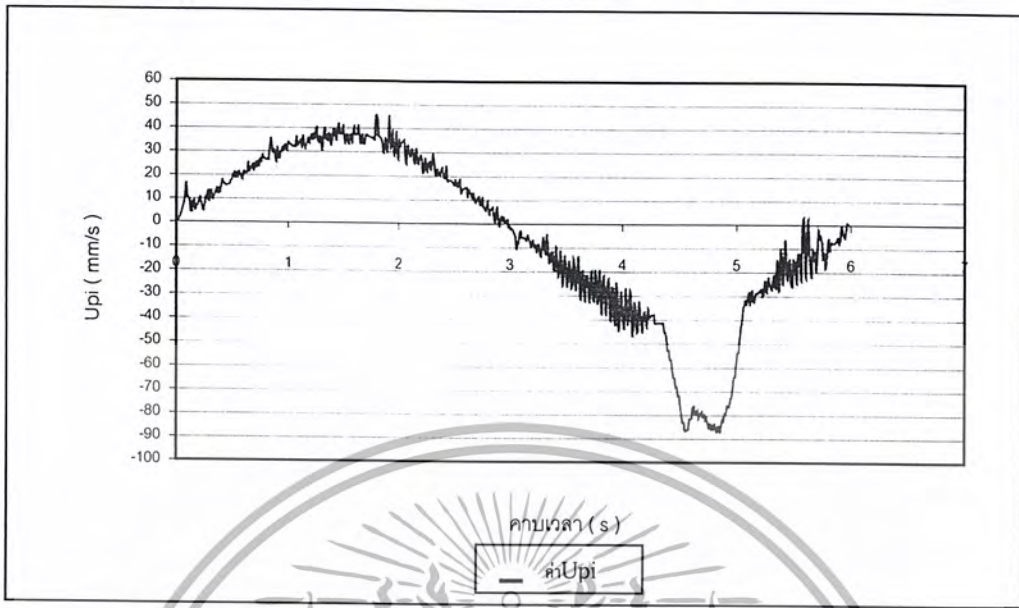


รูปที่ 6.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์  $U_{pi}$  กับคาบเวลา เมื่อ  $K_p = 0$  และ  $K_i = 60$



รูปที่ 6.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเร็วกับคาบเวลา เมื่อ  $K_p = 0$  และ  $K_i = 70$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์  $U_{pi}$  กับคาบเวลา เมื่อ  $K_p = 0$  และ  $K_f = 70$

6.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง

1. จากรูปที่ 6.2 และ 6.3 เมื่อทำการป้อนค่าโวลต์อินพุตมากขึ้นกระบอกสูบจะชักออกหรือชักเข้าได้เร็วขึ้นแสดงว่าความเร็วของแกนกลไฮดรอลิกเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าโวลต์อินพุต ความเร็วของกระบอกสูบตอนชักเข้าจะเร็วกว่าตอนกระบอกสูบชักออก สามารถอธิบายได้จากความสัมพันธ์

$$Q = VA$$

เมื่อ  $Q$  = อัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิก

$V$  = ความเร็วของกระบอกสูบ

$A$  = พื้นที่ของสพูลภายในกระบอกสูบ

เมื่ออัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกคงที่ แต่พื้นที่สพูลด้านที่กระบอกสูบชักเข้ามีค่าน้อยกว่าพื้นที่สพูลด้านที่กระบอกสูบชักออก จึงทำให้ความเร็วของกระบอกสูบขณะชักเข้ามีค่ามากกว่าขณะกระบอกสูบชักออก โดยผลการทดลองที่ได้นั้นมีความสอดคล้องกับคำอธิบายข้างต้น

2. พิจารณารูปที่ 6.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเฉลี่ยที่ได้จากรูปที่ 6.2 และ 6.3 กับค่าโวลต์อินพุต โดยจะนำความสัมพันธ์ที่ได้ไปทำการหาค่าเกนของระบบ โดยค่าเกนของระบบคืออัตราส่วนระหว่างเอาท์พุตต่ออินพุต เมื่อเอาท์พุตคือความเร็วเชิงเส้นของแกนกลไฮดรอลิกต่อสัญญาณอินพุตหรือกระแสไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.6 (หน้า 10) เพื่อนำค่าเกนดังกล่าวไปใช้ในการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยพบว่าความชัน

ของกราฟด้านขวาซึ่งเป็นค่าเกณฑ์ของกระบอกสูบชักออก มีค่าเท่ากับ 40/9 (mm/s)/volt เช่นเดียวกันความชันของกราฟด้านซ้ายเป็นซึ่งค่าเกณฑ์ของกระบอกสูบชักเข้ามีค่าเท่ากับ 40/11 (mm/s)/volt

3. พิจารณารูปที่ 6.5 และ รูปที่ 6.6 แสดงความสัมพันธ์ความเร็วจริงของแขนกลกับคาบเวลา และความเร็วที่ต้องการพิจารณากับคาบเวลา ตามลำดับ เมื่อควบคุมระบบแขนกลไฮดรอลิกด้วยระบบ P Control และให้ค่า  $K_p = 1$  และ  $K_i = 0$  ความเร็วจริงของแขนกลที่ได้ไม่เข้าใกล้กับความเร็วที่ต้องการ ลักษณะกราฟที่ออกมามีลักษณะแกว่ง และเมื่อทำการปรับค่า  $K_p$  ให้มีค่าสูงขึ้น พบว่าการแกว่งมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากสัญญาณความเร็วของกระบอกสูบมีสัญญาณรบกวน (Noise) ที่มีค่ามาก

4. พิจารณารูปที่ 6.7 ถึง รูปที่ 6.20 แสดงความสัมพันธ์ความเร็วจริงของแขนกลกับคาบเวลา และความเร็วที่ต้องการพิจารณากับคาบเวลา เมื่อควบคุมระบบแขนกลไฮดรอลิกด้วยระบบ I Control โดยทำการปรับอุปกรณ์ควบคุมโดยทดลองให้  $K_p = 0, K_i = 2, K_i = 20, K_i = 30, K_i = 40, K_i = 50, K_i = 60$  และ  $K_i = 70$  ตามลำดับ ความเร็วจริงของแขนกลจะเข้าใกล้กับความเร็วที่ต้องการมากขึ้น โดยพบว่าที่ค่า  $K_i = 40$  จะเป็นค่าเกณฑ์ของระบบควบคุมที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากความเร็วจริงของแขนกลและความเร็วที่ต้องการมีค่าใกล้เคียงกันมาก หากปรับค่าเกณฑ์ให้มีความสูงขึ้นไป พิจารณาได้จากรูปที่ 6.15 โดยเมื่อปรับค่า  $K_i$  ที่มีค่าสูงกว่า 40 พบว่า ค่า  $U_{PI}$  ที่ได้จะแกว่งมากขึ้นทำให้แนวโน้มความเสถียรของระบบลดลง

### 6.5 สรุปผลการทดลอง

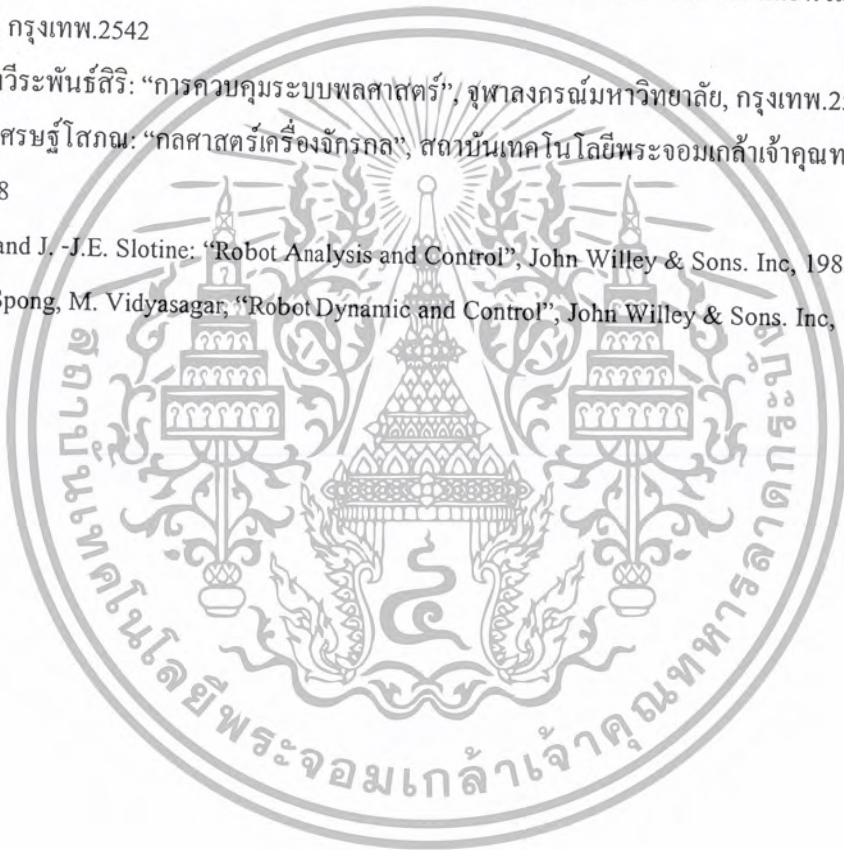
โครงการนี้ได้ทำการจัดทำและประกอบชุดทดลอง และสามารถนำมาใช้ทดลองได้ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ซึ่งได้ทำการทดลองกับกระบอกสูบตัวล่างเพียงตัวเดียว โดยได้นำระบบควบคุมแบบ PI Control มาควบคุมระบบแขนกลไฮดรอลิก การควบคุมแบบ P Control ไม่เหมาะสมกับระบบที่ศึกษา ส่วนการควบคุมแบบ I Control นั้นพบว่า  $K_i = 40$  ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพมากที่สุด

### 6.6 แนวทางการพัฒนา

สำหรับคำแนะนำโครงการนี้จะทำเพิ่มเติมต่อไป เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความสามารถของแขนกลไฮดรอลิก คือ ทำการเขียนโปรแกรมกรองค่าอินพุตให้สัญญาณอินพุตมีความต่อเนื่องและราบเรียบมากขึ้น จึงจะสามารถนำระบบควบคุมแบบ PID มาควบคุมกับทำงานของแขนกลไฮดรอลิกได้ หรือ สร้างมือจับเพื่อเพิ่มความสามารถในการทำงานได้หลากหลายรูปแบบมากขึ้น

## บรรณานุกรม

- [1] ขวัญชัย สันทิพย์สมบุรณ์, ปานเพชร ชินินทรณ์: “ไฮดรอลิกอุตสาหกรรม”, ซีเอ็ดยูเคชั่น, กรุงเทพฯ.2541
- [2] ณรงค์ ดันชีวะวงศ์: “ไฮดรอลิกอุตสาหกรรม”, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, กรุงเทพฯ. 2544
- [3] ดร. โยธิน เปรมปราชญ์รัชต์: “ระบบเซอร์โวแล้วและอิเล็กทรอนิกส์คอนโทรลมอเตอร์”, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.2533
- [4] ดร. วรวิทย์ อึ้งภากรณ์, ชาลญนัดงาน: “การออกแบบเครื่องจักรกลเล่ม 1”, ซีเอ็ดยูเคชั่น, กรุงเทพฯ.2541
- [5] พรจิต ประทุมสุวรรณ: “พื้นฐานหุ่นยนต์และเครื่องจักรกลอัตโนมัติระบบไฮดรอลิกและนิวเมติกส์”, เรือนแก้วการพิมพ์, กรุงเทพฯ.2542
- [6] วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ: “การควบคุมระบบพลศาสตร์”, วุฒาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.2538
- [7] สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ: “กลศาสตร์เครื่องจักรกล”, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.2538
- [8] H. Asada and J. -J.E. Slotine: “Robot Analysis and Control”, John Willey & Sons. Inc, 1985
- [9] Mark W. Spong, M. Vidyasagar, “Robot Dynamic and Control”, John Willey & Sons. Inc, 1980





ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

/*****/
/* Subroutine for encoder counter      */
/*****/

int base_counter=0x280;
void counter_init(void)      /* Initialize counter */

{

    outportb(base_counter+4,0);
    outportb(base_counter+4,4);

}

long int counter_read(void) /* Read no. of counts */
{

    int P0,P1,P2;
    long int pos;
    outportb(base_counter+4,5);
    outportb(base_counter+4,4);
    P0=inportb(base_counter); /* Read Low Byte */
    P1=inportb(base_counter+1);
    P2=inportb(base_counter+2); /* Read High Byte */
    pos=8388607-((long int)(P2)*65536+(long int)P1*256+(long int)P0);
    return(pos);

}

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

/*****/
/* Subroutine for timer, A/D and D/A */
/*****/

int base=0x220;

void timer_set(float msec)

{

    int n1, n2, n1lb, n1hb, n2lb, n2hb;
    n2=20;          n1=(int)(msec*100.0);
    outportb(base+3,0x76); outportb(base+3,0xB6); // Set timer-1 & 2
    n1hb=(int)(n1/256); n1lb=n1-256*n1hb;
    n2hb=(int)(n2/256); n2lb=n2-256*n2hb;
    outportb(base+1,n1lb); outportb(base+1,n1hb); // Load timer 1 no. of counts
    outportb(base+2,n2lb); outportb(base+2,n2hb); // Load timer 2 no. of counts
    outportb(base+11,0x6); // Set pacer trigger and transfer interrupt

}

void timer_wait(void)

{

    int flag;
    do {flag=inportb(base+8) & 32;} // Wait for interrupt
    while(flag!=0);
    outportb(base+8,0); // Clear interrupt

}

void set_adch(int ch) // Set single A/D channel

{

    if(ch<=7)
        outportb(base+10,16+ch);
    else

```

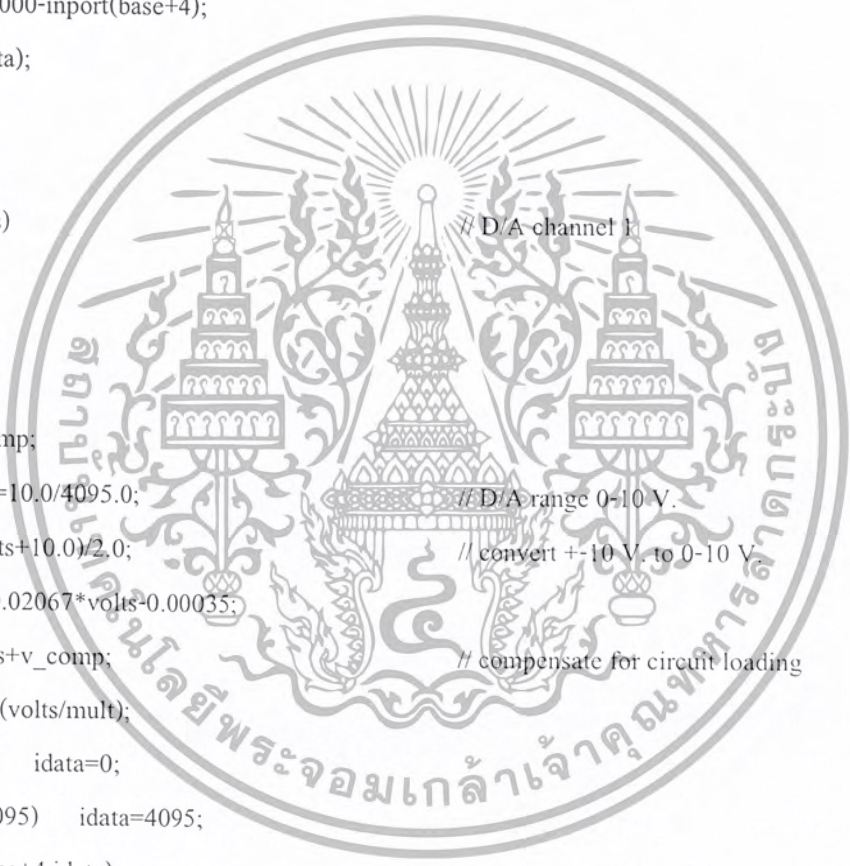


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    outportb(base+10,32+ch);
    outportb(base+9,0); // Set gain 1 (+-10V.)
}
int ad(void)
{
    int idata;
    idata=0x8000-inport(base+4);
    return(idata);
}
void da1(float volts) // D/A channel 1
{
    int idata;
    float v_comp;
    float mult=10.0/4095.0; // D/A range 0-10 V.
    volts=(volts+10.0)/2.0; // convert +-10 V. to 0-10 V.
    v_comp=0.02067*volts-0.00035;
    volts=volts+v_comp; // compensate for circuit loading
    idata=(int)(volts/mult);
    if(idata<0) idata=0;
    if(idata>4095) idata=4095;
    outport(base+4,idata);
}

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

/*****
โปรแกรมคอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงานของแขนกลไฮดรอลิก เพื่อเปรียบเทียบความเร็วของแขนกล
ไฮดรอลิกกับค่าโวลท์อินพุท
*****/

```

```

#include <graphics.h>
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <math.h>
#include <time.h>
#include <dos.h>

```

```

#include "c:\tc\control\io.c"
#include "c:\tc\control\counter.c"

```

```

void main(void)
{

```

```

    long int i=0,old_count = 0,new_count = 0;
    int ch;
    float volts, t_samp;
    char cond;

```

```

//    float mult=20.0/65535.0;

```

```

    long int co[500];
    float vel[500];
    float rad[501];
    float rad_v[500];
    int it_max=500;

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

FILE *fw;

da1(5.0);

clrscr();

// printf("\nEnter Sampling Time [msec]: ");

// scanf("%f",&t_samp);
t_samp=20.0;
timer_set(t_samp);
do
{

printf("Enter D/A volts: ");
scanf("%f",&volts);
//printf("\nEnter A/D Channel: ");
//scanf("%d",&ch);
ch=0;
set_adch(ch);
//i=0;

// do
// {

da1(0.0);
rad[0]=1.884956;
counter_init();
for(i=0;i<it_max;i++)

{

ad();

old_count = new_count;

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



```

fprintf(fw, "\ntime Velocity Co Radian Radian_v");

for(i=0;i<it_max;i++)

{

fprintf(fw, "\n%5.3ft%6.4ft%ld\t%6.4ft%f", (i*0.001*t_samp), vel[i], co[i], rad
[i+1], rad_v[i]);

}

fclose(fw);
printf("\nrad[0]=%f", rad[0]);
printf("\ncount=%ld", new_count);
}
printf("\nContinue? (y/n): ");
scanf("%c", &cond);
}while(cond!='n');
}

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

/\*  
\*\*\*\*\*  
\*/

โปรแกรมควบคุมแขนกลไฮดรอลิก เพื่อเปรียบเทียบความเร็วจริงของแขนกลไฮดรอลิกกับ  
ความเร็วที่ต้องการพิจารณา

/\*  
\*\*\*\*\*  
\*/

```
#include <graphics.h>
```

```
#include <stdio.h>
```

```
#include <conio.h>
```

```
#include <math.h>
```

```
#include <time.h>
```

```
#include <dos.h>
```

```
#include "c:\tc\control\io.c"
```

```
#include "c:\tc\control\counter.c"
```

```
float get_ready(void);
```

```
void main(void)
```

```
{
```

```
int graphdriver, graphmode, errorcode;
```

```
int ch;
```

```
int i,j;
```

```
float volts, t_samp=10, w;
```

```
const float pi=3.141592654;
```

```
char cond;
```

```
long int old_count = 0, new_count = 0;
```

```
long int co[600];
```

```
float vd[600], v[600], rad[601], rad_v[600];
```

```
int it_max=600;
```

```
float Kp, Ki, ui=0, upi[600], err;
```

```
FILE *fw;
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

// float mult=20.0/65535.0;
graphdriver=DETECT;
initgraph(&graphdriver,&graphmode,"c:\\tc\\bgi");

/*****
/* Initialize the data acquisition */
*****/

timer_set(t_samp);
ch=0;
set_adch(ch);

/*****
w=pi/3; /* Velocity command frequency */
for(i=0;i<=600;i++) vd[i]=40.0*sin(w*i*0.001*t_samp); /* Velocity command */
do
{
rad[0]=get_ready(); /* Initialize angular displacement */
da1(-1.0);
cleardevice();
printf("Enter Kp: ");
scanf("%f",&Kp);
printf("Enter Ki: ");
scanf("%f",&Ki);
counter_init(); /* Initialize the encoder counter */
old_count=0;new_count=0;
for(i=0;i<it_max;i++)

ad();

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

old_count=new_count;
new_count=counter_read();      /* Read new count */
co[i]=new_count-old_count;
rad[i+1] = ((float)(co[i])*(2.553802/10000.0))+rad[i];
rad_v[i] = (float)(co[i])*(2.553802/10000.0)/(t_samp/1000);
v[i] = (350.0*310.0*(rad_v[i])*(float)(sin(rad[i+1]))) / (float)(sqrt
(350.0*350.0+310.0*310.0-2.0*350.0*310.0*(float)(cos(rad[i+1]))));
err=vd[i]-v[i];
ui=ui+Ki*err*t_samp*0.001;
upi[i]=ui+Kp*err;
/* Convert upi to D/A volts */
if(upi[i]>=0.0) volts=(upi[i]*9.0/40.0)+1.0;
else      volts=(upi[i]*11.0/40.0)+1.0;
/* Set limits of D/A volts */
if(volts>=10.0)  volts=10.0;
else if(volts<=-10.0) volts=-10.0;
dal(-volts);
timer_wait();
}

/*****
/* Plotting results
*****/

cleardevice();
setcolor(WHITE);
rectangle(0,50,600,450);
for(i=1;i<=7;i++)

{

line(0,i*50+50,10,i*50+50);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

line(590,i*50+50,600,i*50+50);

}

for(i=1;i<=5;i++)

{

line(i*100,50,i*100,60);
line(i*100,440,i*100,450);

}

line(11,250,589,250);
outtextxy(100,460,"Y-scale=10.0[(mm/sec)/div] X-scale=1.0[(sec/div)");
setcolor(RED);
moveto(0,250-(int)(6.25*(v[0])));
for(j=0;j<it_max;j++) hline(j,250-(int)(5.0*(v[j])));
setcolor(GREEN);
moveto(0,250-(int)(6.25*(vd[0])));
for(j=0;j<it_max;j++) hline(j,250-(int)(5.0*(vd[j])));

/*****
printf("Write data? (y/n): ");
scanf(" %c",&cond);
if(cond=='y')

{

if((fw=fopen("c:\\tc\\control\\data.txt","a"))==NULL)

{

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

printf("\nError open file");
exit(1);

}

fprintf(fw, "\nvolt = %f", volts);

for(i=0; i<it_max; i++)
{
    fprintf(fw, "\n%5.3f\t%f\t%f\t%f", (i*0.001*t_samp), v[i], vd[i], upi[i]);
}
fclose(fw);

printf("\nContinue? (y/n): ");
scanf("%c", &cond);
} while(cond != 'n');
}

float get_ready(void)
{
    int i;
    long int oc=0, nc=0;
    float r;

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for(i=0;i<=450;i++)          /* Bring cylinder to fully retraction */

{

    ad();
    dal(10.0);
    timer_wait();

}

r=1.347607;                  /* Initial angular displacement for full retraction */
counter_init();
for(i=0;i<=80;i++)          /* Set initial cylinder location */
{
    ad();
    oc=nc;
    nc=counter_read();
    r=((float)(nc-oc)*(2.553802/10000.0))+r;
    dal(-10.0);
    timer_wait();
}

return(r);

}

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

/*****
โปรแกรมคอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงานแขนกลไฮดรอลิก เพื่อเปรียบเทียบความเร็วของแขนกลไฮดรอลิกกับ
ความเร็วจริงที่ต้องการพิจารณา กรณีให้แขนกลไฮดรอลิกทำงานอย่างต่อเนื่อง
*****/

```

```

#include <graphics.h>
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <math.h>
#include <time.h>
#include <dos.h>

```

```

#include "c:\tc\control\io.c"

```

```

#include "c:\tc\control\counter.c"

```

```

float get_ready(void);

```

```

void main(void)

```

```

{

```

```

    int graphdriver, graphmode, errorcode;

```

```

    int ch;

```

```

    int i,j;

```

```

    float volts, t_samp=10, w;

```

```

    const float pi=3.141592654;

```

```

    char cond;

```

```

    long int old_count = 0, new_count = 0;

```

```

    long int co[600];

```

```

    float vd[600], v[600], rad[601], rad_v[600];

```

```

    int it_max=600;

```

```

    float Kp, Ki, ui=0, upi, err;

```

```

    FILE *fw;

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

// float mult=20.0/65535.0;
graphdriver=DETECT;
initgraph(&graphdriver,&graphmode,"c:\\tc\\bgi");

/*****/

/* Initialize the data acquisition*/
/*****/

timer_set(t_samp);
ch=0;
set_adch(ch);

/*****/

w=pi/3; /* Velocity command frequency */
for(i=0;i<=600;i++) vd[i]=40.0*sin(w*i*0.001*t_samp); /* Velocity command */
do
{
rad[0]=get_ready(); /* Initialize angular displacement */
da1(-1.0);
cleardevice();
printf("Enter Kp: ");
scanf(" %f",&Kp);
printf("Enter Ki: ");
scanf(" %f", &Ki);
counter_init(); /* Initialize the encoder counter */
old_count=0;new_count=0;

for(i=0;i<it_max;i++)

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{

ad();

old_count=new_count;

new_count=counter_read();      /* Read new count */

co[i]=new_count-old_count;

rad[i+1] = ((float)(co[i])*(2.553802/10000.0))+rad[i];

rad_v[i] = (float)(co[i])*(2.553802/10000.0)/(t_samp/1000);

v[i] = (350.0*310.0*(rad_v[i])*(float)(sin(rad[i+1]))) / (float)(sqrt
(350.0*350.0+310.0*310.0-2.0*350.0*310.0*(float)(cos(rad[i+1]))));

err=vd[i]-v[i];

ui=ui+Ki*err*t_samp*0.001;

upi=ui+Kp*err;

/* Convert upi to D/A volts */

if(upi>=0.0) volts=(upi*9.0/40.0)+1.0;

else      volts=(upi*11.0/40.0)+1.0;

/* Set limits of D/A volts */

if(volts>=10.0)  volts=10.0;

else if(volts<=-10.0) volts=-10.0;

da1(-volts);

timer_wait();

}

```

```

/*****

```

```

/* Plotting results

```

```

*/

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
/******
```

```
cleardevice();  
setcolor(WHITE);  
rectangle(0,50,600,450);  
for(i=1;i<=7;i++)  
  
{  
  
    line(0,i*50+50,10,i*50+50);  
    line(590,i*50+50,600,i*50+50);  
  
}  
  
for(i=1;i<=5;i++)  
  
    line(i*100,50,i*100,60);  
    line(i*100,440,i*100,450);  
  
};  
  
line(11,250,589,250);  
outtextxy(100,460,"Y-scale=10.0[(mm/sec)/div] X-scale=1.0[sec/div]");  
setcolor(RED);  
moveto(0,250-(int)(6.25*(v[0])));  
for(j=0;j<it_max;j++) lineto(j,250-(int)(5.0*(v[j])));  
setcolor(GREEN);  
moveto(0,250-(int)(6.25*(vd[0])));  
  
for(j=0;j<it_max;j++) lineto(j,250-(int)(5.0*(vd[j])));
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
/*  
*****  
*/
```

```
printf("Write data? (y/n): ");
```

```
scanf(" %c",&cond);
```

```
if(cond=='y')
```

```
{
```

```
if((fw=fopen("c:\\tc\\control\\data.txt","a"))==NULL)
```

```
{
```

```
printf("\nError open file");
```

```
exit(1);
```

```
fprintf(fw,"nvolt = %f",volts);
```

```
for(i=0;i<it_max;i++)
```

```
fprintf(fw,"n%5.3f\n%f",i*0.001*t_samp,v[i]);
```

```
}
```

```
fclose(fw);
```

```
}
```

```
printf("\nContinue? (y/n): ");
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

scanf(" %c",&cond);

}while(cond!='n');

}

float get_ready(void)

{

int i;
long int oc=0, nc=0;
float r;
for(i=0;i<=450;i++) /* Bring cylinder to fully retraction */
{
ad();
daI(10.0);
timer_wait();
}

r=1.347607; /* Initial angular displacement for full retraction */
counter_init();
for(i=0;i<=80;i++) /* Set initial cylinder location */

{

ad();
oc=nc;
nc=counter_read();

r=((float)(nc-oc)*(2.553802/10000.0))+r;

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
da1(-10.0);  
timer_wait();
```

```
}
```

```
return(r);
```

```
}
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้