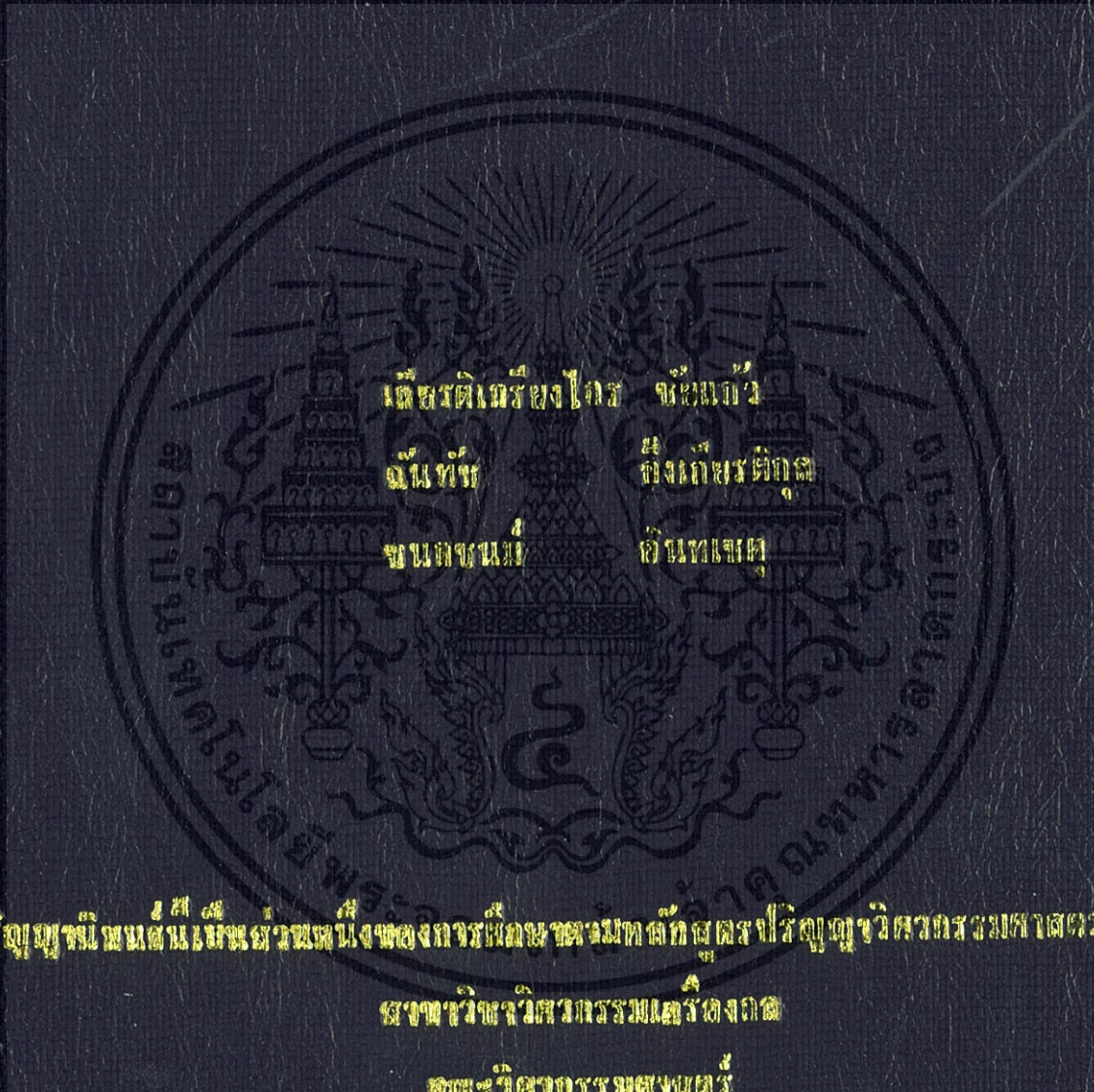


การควบคุมแรงของกระบอกสูบไฮดรอลิก
FORCE CONTROL OF HYDRAULIC CYLINDER



ปรีชญูญานี วัฒนชนเสนาพร หนึ่งในงานของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร

ปีการศึกษา 2556

การควบคุมแรงของกระบอกสูบไฮดรอลิก

FORCE CONTROL OF HYDRAULIC CYLINDER



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FORCE CONTROL OF HYDRAULIC CYLINDER



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2556

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การควบคุมแรงของกระบอกสูบไฮดรอลิก

FORCE CONTROL OF HYDRAULIC CYLINDER

ผู้จัดทำ

- | | | | |
|------------------------|----------------|--------------|----------|
| 1. นายเกียรติเกรียงไกร | ชัยแก้ว | รหัสประจำตัว | 53010140 |
| 2. นายฉันท | อึ้งเกียรติกุล | รหัสประจำตัว | 53010275 |
| 3. นางสาวชนกชนม์ | อินทเขตต์ | รหัสประจำตัว | 53010284 |



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร. อนันต์ พิณโสภณ)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมแรงของกระบอกลูกสูบไฮดรอลิก

นายเกียรติเกรียงไกร	ชัยแก้ว	53010140
นายฉันทัช	อึ้งเกียรติกุล	53010275
นางสาวชนกชนม์	อินทเขตต์	53010284
ผศ.ดร. อุন্নัต พิณโสภณ	อาจารย์ที่ปรึกษา	
ปีการศึกษา 2556		

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นกรนำตัวควบคุมตระกูลพีไอดีมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมระบบไฮดรอลิก มีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมแรงของกระบอกลูกสูบไฮดรอลิกซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับแรงภายนอกอื่นๆ โดยการทำงานอาศัยหลักการแบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิก กล่าวคือจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับพรอพอร์ชันนัลวาล์วผ่านทาง Data Acquisition (DAQ Card) จากนั้นพรอพอร์ชันนัลวาล์วจะเป็นตัวควบคุมอัตราการไหลที่จะเข้าสู่กระบอกลูกสูบไฮดรอลิกเพื่อนำไปใช้ควบคุมแรงของกระบอกลูกสูบไฮดรอลิก ซึ่งอุปกรณ์ทั้งหมด ได้แก่ พรอพอร์ชันนัลวาล์ว เซนเซอร์รับแรง เซนเซอร์วัดระยะทางและเซนเซอร์วัดความดัน จะถูกควบคุมผ่านโปรแกรม Lab view โดยใช้ Data Acquisition (DAQ Card) เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างเครื่องและผู้ใช้งาน ในการทดลองได้จัดให้มีการใช้แรงต้านจากสปริงเป็นภาระของกระบอกลูกสูบแล้วปรับค่าเกนให้เหมาะสมตามเงื่อนไขที่ต้องการ จากผลการทดลองพบว่าที่ค่าเกน $K_p=0.07$, $K_i=0.006$ และ $K_d=0.003$ สามารถทำให้สมรรถนะการควบคุมแรงแบบฟังก์ชันบันไดขนาด 300 กิโลกรัมมีเวลาการลู่เข้าสู่สถานะคงตัว (settling time) ที่ 0.2 วินาที สำหรับสมรรถนะการควบคุมแรงแบบฟังก์ชันไซน์นั้น ในกรณีที่ใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรงจะมีค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัวเท่ากับ 8.51 มีค่าน้อยกว่าในกรณีที่ใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดัน ที่มีค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัวเท่ากับ 21.72 เนื่องจากลักษณะของสัญญาณความดันมีสัญญาณรบกวน

FORCE CONTROL OF HYDRAULIC CYLINDER

Kiadkriangkrai Chaikaew 53010140
Chantat Ungkiattkul 53010275
Chanokchon Inthachet 53010284
Asst.Prof. Ph.Dr. Unnat Pinsopon Advisor
Year 2013

ABSTRACT

In this project, PID type controller is applied to the electrohydraulic control system in order to control the force of the hydraulic cylinder. The voltage command is provided to the proportional valve via Data Acquisition (DAQ Card) and the valve then directs the flow to the cylinder which causes the driving force of the cylinder. The equipment, namely, proportional valve, load cell, potential sensor and pressure sensor, are controlled by Labview programming via the Data Acquisition (DAQ Card) so as to create the connection between the plant and operators. The experiments were done using a spring as the external resistive load. The appropriate controller gains were found to be 0.07, 0.006, and 0.003 for K_p , K_i , and K_d , respectively. A settling time of 0.2 second was achieved for the 300 kg force step tracking. For the sinusoidal force tracking, a root mean square error (rms) of 8.51 was achieved when the load cell feedback is used. A higher value of (rms) error of 21.72 was found when the pressure feedback is used due to the presence of sensor noise.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก ผศ.ดร.อุษณัต พิณโสภณ อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท คณะผู้จัดทำปริญญาโทรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง อีกทั้งขอขอบคุณคณะกรรมการสอบปริญญาโท สำหรับคำแนะนำเพิ่มเติมทำให้ปริญญาโทมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ นายทศพล แจ่มน้อย ที่คอยให้ความช่วยเหลือให้คำแนะนำ ในเรื่องอุปกรณ์เก็บผลการทดลอง และคำแนะนำต่างๆอีกทั้งให้กำลังใจต่อผู้วิจัยอย่างใกล้ชิดทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพยิ่งซึ่งได้เลี้ยงดูพร้อมทั้งให้โอกาสทางการศึกษาอย่างเต็มที่และยังให้กำลังใจอย่างเสมอมาในทุกๆด้านอันหาที่เปรียบไม่ได้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้โอกาสผู้จัดทำปริญญาโทเข้ามารับการศึกษาและทำการทดลองที่ภาควิชาแห่งนี้ คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญาโทฉบับนี้ คณะผู้จัดทำขอขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน ขออำนาจคุณพระศรีรัตนตรัยอานุวยอวยพรความสุขสวัสดิ์ตั้งมีแต่ทุกท่าน

นาย เกียรติเกรียงไกร ชัยแก้ว

นาย ฉันทิช อึ้งเกียรติกุล

นางสาว ชนกชนม์ อินทเขตต์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.4 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.5 วิธีการดำเนินงาน.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 บทนำ.....	3
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.3.1 ระบบไฮดรอลิก.....	4
2.3.2 ระบบไฮดรอลิกในงานอุตสาหกรรม.....	4
2.3.3 ระบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิก.....	6
2.3.4 การควบคุมแบบวงปิด (Closed-loop control)	6
2.3.5 การควบคุมประเภทพีไอดี.....	8
2.3.5.1 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน.....	8
2.3.5.2 ตัวควบคุมแบบปริพันธ์.....	9
2.3.5.3 ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์.....	10
2.3.6 การออกแบบควบคุมประเภทพีไอดีด้วยวิธีการซิงเกิลอร์-นิโคลส์.....	11

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	12
3.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	12
3.1.1 ชุดต้นกำลังไฮดรอลิก.....	12
3.1.2 วาล์วควบคุมทิศทาง	13
3.1.3 ระบายกลับไฮดรอลิก.....	14
3.1.4 การ์ดเชื่อมโยงสัญญาณ.....	14
3.1.5 เซนเซอร์รับแรงและสปริงคอยล์.....	15
3.1.6 เซนเซอร์วัดความดัน.....	15
3.2 วิธีการทดลอง.....	18
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	21
4.1 สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง.....	21
4.1.1 ฟังก์ชันบันได	21
4.1.2 ฟังก์ชันไซน์.....	21
4.1.3 ฟังก์ชันสี่เหลี่ยม.....	22
4.2 สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดัน	22
4.2.1 ฟังก์ชันบันได	22
4.2.2 ฟังก์ชันไซน์.....	23
4.2.3 ฟังก์ชันสี่เหลี่ยม.....	23
บทที่ 5 สรุป และวิจารณ์ผลการทดลอง.....	24
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	24
5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง.....	25
บรรณานุกรม.....	26
ภาคผนวก.....	28

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID).....	10
2.2 การหาค่าเกณฑ์ด้วยวิธีซีเกลอร์ - นิโคลส์.....	11
3.1 ตารางบันทึกผลการทดลอง	20



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรไฮดรอลิก.....	5
2.2 วาล์วควบคุมสัดส่วน.....	6
2.3 การควบคุมแบบวงปิด.....	6
2.4 โครงสร้างของการตอบสนองของระบบ.....	7
2.5 กราฟผลตอบสนองของระบบ.....	7
2.6 ตัวควบคุมแบบพีไอดี.....	8
2.7 ตัวควบคุมแบบพี.....	9
2.8 ตัวควบคุมแบบไอ.....	9
2.9 ตัวควบคุมแบบดี.....	10
3.1 ระบบไฮดรอลิกที่จัดสร้างขึ้น.....	12
3.2 ชุดต้นกำลังไฮดรอลิก.....	13
3.3 วาล์วควบคุมทิศทาง.....	13
3.4 ระบายออกสู่อากาศ.....	14
3.5 การ์ดเชื่อมโยงสัญญาณ.....	14
3.6 โหลดเซลล์และสปริงคอยล์.....	15
3.7 เซนเซอร์วัดความดันทางเข้าพอร์พอร์ชันนัลวาล์ว.....	15
3.8 เซนเซอร์วัดความดันของกระบอกสูบด้าน Head-end.....	16
3.9 เซนเซอร์วัดความดันของกระบอกสูบด้าน Rod-end.....	16
3.10 แผนผังแสดงการทำงานของชุดทดลอง.....	16
3.11 การเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างอุปกรณ์กับ Card Interface.....	17
3.12 Block Diagram สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง.....	18
3.13 Block Diagram สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดัน.....	19
3.14 front panel.....	19
4.1 กราฟฟังก์ชันบันได (Step signal) โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง	21
4.2 กราฟฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง	21
4.3 กราฟฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง	22
4.4 กราฟฟังก์ชันบันได (Step signal) โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดัน	22

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 กราฟฟังก์ชันไซน์ (Sine signal)	23
โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดัน	
4.6 กราฟฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal)	23
โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดัน	
5.1 ฟังก์ชันบันได, ฟังก์ชันไซน์ และฟังก์ชันสี่เหลี่ยมที่ 300 กิโลกรัม.....	24
5.2 สัญญาณรบกวนจากเซนเซอร์วัดความดัน.....	25



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมมีการใช้งานระบบไฮดรอลิก และระบบอิเล็กทรอนิกส์อย่างแพร่หลาย มีการใช้งานทั้งในอุตสาหกรรมหนัก และอุตสาหกรรมทั่วไป เช่น เครื่องฉีดพลาสติก เครื่องฉีดอลูมิเนียม แทนอัดชิ้นงาน เครื่องปั๊ม และเครื่องตัดชิ้นงาน เครื่องประกอบชิ้นรูป หรือในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เช่น ใช้กับเครื่องเลื่อย แขนโยน ฐานปั๊ม และส่ง เครื่องปรับขนาดลูกกลิ้ง อุปกรณ์แยก และส่ง อุปกรณ์ควบคุมท่อหล่อเย็น เป็นต้น ดังนั้นเครื่องจักรที่ทำงานด้วยระบบไฮดรอลิก จึงมีความสำคัญในการทำงานอย่างมากในระบบควบคุม [7, 8] เนื่องจากระบบไฮดรอลิกมีข้อดีหลายประการเช่น ง่ายต่อการควบคุม การปรับเปลี่ยนความเร็วของลูกสูบหรือมอเตอร์ไฮดรอลิกกระทำได้ง่าย แรงกดที่ไม่จำกัดความเร็ว ตั้งขนาดของแรงที่ต้องการใช้งานได้ ทำงานกลับทิศไปมาได้ ควบคุมการทำงานได้เที่ยงตรง และกระทัดรัด สามารถหยุดชะงักเนื่องจากการรั่วไหลดันทันทีได้ และมีความปลอดภัยสูง และส่วนใหญ่ถูกควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ การควบคุมแรงกระทำของกระบอกสูบ สามารถกระทำอย่างง่ายโดยการรักษาระดับความดันของน้ำมันไฮดรอลิกให้สอดคล้องกับแรงที่ต้องการ การควบคุมแรงในลักษณะนี้ จะให้ผลตอบสนองที่ไม่ดี เนื่องจากโดยทั่วไประบบจะทำงานแบบ Open Loop ดังนั้นแรงที่เกิดขึ้นจริงจะไม่มีที่แน่นอน อีกทั้งกรณีที่ขนาดของแรงที่ต้องการมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา การควบคุมขนาดแรงด้วยการปรับระดับความดันของน้ำมันไฮดรอลิก อย่างต่อเนื่องไม่สามารถกระทำได้ง่าย ดังนั้นในงานประยุกต์ที่ต้องการขนาดของแรงที่แม่นยำ และเปลี่ยนแปลงค่าขนาดแรงอย่างต่อเนื่อง จำเป็นจะต้องควบคุมแรงแบบ Close Loop โดยการป้อนกลับแรงที่เกิดขึ้นจริงให้กับตัวควบคุม

การควบคุมแรงมีความสำคัญอย่างมากต่อกระบวนการผลิต เช่นในการอัดเม็ดยาต้องการแรงที่มีความแม่นยำ เนื่องจากรวมทั้งใช้ในการอัดเม็ดผลต่อการละลายของเม็ดยาซึ่งยาแต่ละชนิดต้องใช้ช่วงเวลาในการละลายต่างกัน เพื่อให้ได้ผลในการรักษาที่ดีที่สุด และการอัดขึ้นรูปของโลหะก็อาศัยแรงกดที่ต่างกัน หากใช้แรงในการกดมากเกินไปก็จะทำให้ชิ้นงานเสียหาย และถ้าหากใช้แรงน้อยเกินไปก็จะทำให้ชิ้นงานไม่อยู่ตัว ดังนั้นโครงการนี้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมต่างๆที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน

ดังนั้นผู้จัดทำโครงการจึงมีแนวคิดที่จะสร้างระบบควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อใช้ควบคุมแรงของกระบอกสูบซึ่งจะต้องเป็นระบบควบคุมที่แม่นยำรวดเร็ว และง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบอื่น

โครงการนี้เป็นการศึกษาการควบคุมแรงของระบบอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี และใช้สัญญาณควบคุมจากคอมพิวเตอร์ผ่านบอร์ดเชื่อมโยงสัญญาณไปยังวาล์วควบคุมทิศทาง ในขณะที่สัญญาณควบคุมป้อนกลับวัดได้โดยตรงจากเซนเซอร์วัดแรงที่ติดตั้งที่ปลายก้านสูบไฮดรอลิก โดยอีกด้านหนึ่งของเซนเซอร์ต่อกับสปริง

โดยทำการสร้างชุดทดลองจากหนึ่งกระบอกสูบ โดยใช้แรงด้านสปริงแทนแรงด้านของแรงภายนอก และทดลองควบคุมแรงกดในรูปแบบต่างๆ ที่แรงต่างๆกัน เพื่อศึกษาว่าในระบบควบคุมที่ออกแบบมาจะสามารถควบคุมแรงให้เป็นไปตามที่ต้องการได้หรือไม่ และแม่นยำมากน้อยเพียงใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อออกแบบ และสร้างตัวควบคุมแบบพีไอดีในการควบคุมแรงของกระบอกลูกสูบไฮดรอลิกสำหรับระบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิก

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 ศึกษาและจัดทำชุดทดลองการควบคุมแรงสำหรับกระบอกลูกสูบไฮดรอลิก โดยใช้กระบอกลูกสูบ 1 ตัวทำงานแบบ 2 ทิศทาง ที่มีระยะชัก 500 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของกระบอกลูกสูบ 40 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางก้านสูบ 28 มิลลิเมตร [1, 3]

1.3.2 ใช้แรงดันของสปริงแทนแรงดันของแรงภายนอก โดยแรงที่พิจารณาไม่เกิน 500 กิโลกรัม ใช้โหลดเซลล์ในการตรวจรับรู้แรงที่เกิดจากการกด เช่น เซอร์วัดความดัน (Pressure transducer) ถูกติดตั้งไว้เพื่อวัดความดันของปั๊ม กระบอกลูกสูบด้าน Head-end และกระบอกลูกสูบด้าน Rod-end [2, 3]

1.3.3 ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีควบคุมแรง ด้วยโปรแกรมแลบวิวผ่านคอมพิวเตอร์ ควบคุมแรงในช่วงต่างๆ ณ เวลานั้นๆ แล้วปรับค่าเกนของตัวควบคุม เพื่อให้ระบบควบคุมมีผลตอบสนองใกล้เคียงกับความต้องการมากที่สุด [5, 7, 11]

1.4 วิธีการดำเนินงาน

โครงการนี้เริ่มต้นโดยทำการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบไฮดรอลิก และหลักการแบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิก ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมแบบพีไอดี และชุดควบคุมแรงของกระบอกลูกสูบไฮดรอลิก [3] จากนั้นทำการออกแบบ และสร้างชุดทดลองเพื่อใช้ในการควบคุมแรงของกระบอกลูกสูบไฮดรอลิก โดยทำการทดลองพร้อมเก็บบันทึกผลการทดลองในรูปแบบของกราฟ แล้วผลตอบสนองของระบบ และปรับค่าเกน K_p , K_i และ K_d จนได้ผลตอบสนองของระบบตามที่ต้องการ และสรุปพร้อมวิเคราะห์ผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถควบคุมแรงของกระบอกลูกสูบไฮดรอลิกด้วยระบบควบคุมตระกูลพีไอดีได้
2. สามารถประยุกต์ใช้ชุดควบคุมแรงของกระบอกลูกสูบไฮดรอลิกในการควบคุมแรงที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในการออกแบบ และควบคุมแรงของกระบอกลูกสูบไฮดรอลิกนั้นต้องทำการศึกษาปัจจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งงานวิจัยที่มีผู้ทำมาก่อน เพื่อให้ทราบถึงคุณสมบัติและปัจจัยที่สร้างผลกระทบต่อแรงที่ถูกควบคุม เพื่อเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์และประเมินผล โดยจะกล่าวถึงงานวิจัยที่ทำการควบคุมแรง และตัวควบคุมประเภทพีไอดี (PID)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กัญญ์ เสียงกลกิจ, ทศพล ทะวงษ์เงิน และปวีรศ ตระกรุดคง [1] ทำการออกแบบและเปรียบเทียบระบบควบคุมการทำงาน ของระบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิกแบบพีไอดี คอนโทรลเลอร์กับแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือหรือฟัซซี่ลอจิกในการควบคุมแรงของเครื่องอัดเม็ดยา

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา นักวิจัยได้ทำการเปรียบเทียบการทำงานของระบบควบคุมไฮดรอลิก 2 แบบ คือ พีไอดี และ ฟัซซี่ลอจิก ซึ่งแต่ละระบบมีข้อดีข้อเสียต่างกัน นำมาใช้ในการควบคุมแรงอัดของเครื่องอัดเม็ดยา อาศัยการทำงานแบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิก โดยการทดลองแบ่งเป็น 2 ช่วงในแต่ละระบบช่วงแรกจะเป็นระบบควบคุมพีไอดี ช่วงที่สองจะเป็นระบบฟัซซี่ลอจิก โดยควบคุมการทำงานผ่านโปรแกรมแลบวิว จากผลการทดลองพบว่า ในเครื่องอัดเม็ดยานี้หากมีการเปลี่ยนแปลงแรงอัดบ่อยครั้งจะไม่เหมาะกับระบบควบคุมพีไอดี เพราะต้องทำการปรับค่าเกน K_p , K_i และ K_d ใหม่ทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงอ้างอิง แต่สำหรับระบบฟัซซี่ลอจิกจะสะดวกและมีช่วงการทำงานที่กว้างกว่าในการออกแบบและปรับแต่งตัวควบคุมในแต่ละครั้ง

เนื่องจากการทดสอบแรงของกระบอกลูกสูบครั้งนี้เป็นการทดลองที่ไม่เปลี่ยนรูปแบบของแรงจึงสามารถสมมติฐานได้ว่าสามารถใช้ตัวควบคุมตระกูลพีไอดีในการควบคุมซึ่งทำให้ได้ค่าที่แม่นยำมากกว่า

นัฐชัย ชาญดนตรีกิจ และอรรณสิทธิ จ้อยกลัด[2] ทำการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยตัวควบคุมพีไอดี ผ่านโปรแกรมแลบวิว

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา นักวิจัยได้ทำการควบคุมความเร็วของอุปกรณ์ทำงานคือ มอเตอร์กระแสตรงโดยใช้การควบคุมแบบพีไอดีผ่านทางโปรแกรมแลบวิว จากผลการทดลองพบว่าการใส่ค่าตามที่ได้คำนวณมาจะไม่สามารถทำให้ระบบเสถียรได้จึงจำเป็นต้องมีการปรับแต่งค่าตัวแปรโดยทำการปรับที่ K_p เพื่อลดความผิดพลาดในการตอบสนองที่สภาวะคงตัว แต่การตอบสนองยังคงมีค่าผิดพลาด จึงทำการปรับค่าเกน K_i เพื่อแก้ไขค่าผิดพลาดนั้น ได้ผลคือทำให้ค่าผิดพลาดลดลงจนใกล้เคียงศูนย์ แต่ยังใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวนาน จึงต้องปรับค่าเกน K_d ด้วย

G. P. Liu, S. Daley [16] ได้ทำการปรับจูนเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของระบบควบคุม PID ของระบบไฮดรอลิก การออกแบบตัวควบคุม PID ในระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะง่ายต่อการออกแบบ PID ในระบบเชิงเส้น การปรับจูนที่ดีที่สุดส่วนใหญ่ประกอบด้วย 4 ส่วน คือ การประมาณค่าแบบจำลอง ข้อกำหนดของระบบที่ต้องการ กลไกการปรับค่า และตัวควบคุมแบบพีไอดี เทคนิคข้างต้นสามารถยอมรับได้ และสามารถนำไปใช้ในการควบคุมตำแหน่งของระบบไฮดรอลิกอื่นต่อไปได้

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 ระบบไฮดรอลิก

ระบบไฮดรอลิกมีใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ระบบไฮดรอลิกสามารถควบคุมอุปกรณ์ขนาดเล็ก ขนาดกลาง หรือเครื่องจักรกลอัตโนมัติ ที่มีขนาดปานกลาง ไปจนถึงขนาดใหญ่ หรืองานที่ต้องการกำลังมาก เช่น เครื่องปั๊มขึ้นงาน เครื่องฉีดพลาสติก การประกอบชิ้นส่วนอัตโนมัติ หรือหุ่นยนต์อุตสาหกรรม เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วการทำงานของระบบไฮดรอลิก จะเหมือนกับนิวแมติกส์ คือจะมีการควบคุมทิศทางการทำงาน ส่วนอุปกรณ์และวงจรอื่นๆจะเหมือนกัน แต่จะแตกต่างกันตรงที่ระบบนิวแมติกส์ จะใช้ลมเป็นตัวกลางในการถ่ายส่งพลังงาน โดยปกติจะใช้ความดันที่ 6-8 บาร์ และลมจะถูกปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศ ส่วนระบบไฮดรอลิก จะใช้น้ำมันเป็นตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงาน โดยปกติจะใช้ความดันที่ 30-400 บาร์ แต่น้ำมันจะไหลกลับสู่ถังเก็บน้ำมันเหมือนเดิม ตัวกลางระหว่างลมกับน้ำมันนั้น น้ำมันจะมีการยุบตัวน้อยกว่าระบบลม จึงทำให้ระบบไฮดรอลิกมีการทำงานที่ถูกต้องและแม่นยำกว่าระบบนิวแมติกส์

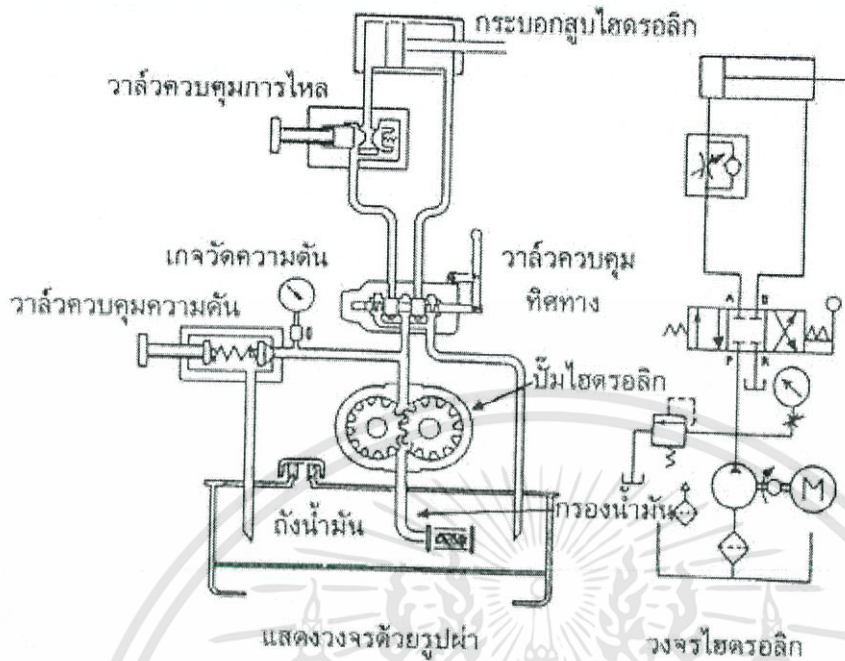
ระบบไฮดรอลิก เป็นระบบที่ใช้อยู่ในเครื่องจักร และเครื่องทุ่นแรงหลายประเภท โดยทั่วไประบบไฮดรอลิกจะใช้กับงานที่ต้องการแรงดึง แรงดัน แรงกด หรือแรงยก ที่ใช้แรงมากๆ ดังนั้นอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบไฮดรอลิกจึงมีความหลากหลาย ใ้การใช้งานแต่ละประเภท ถึงแม้ว่าสัญลักษณ์การทำงานจะเหมือนกันแต่โครงสร้างในการทำงานจะแตกต่างกันไปตามความจำเป็นของงาน เครื่องจักรที่ใช้ระบบไฮดรอลิกสำหรับควบคุมการทำงาน สามารถแบ่งออกได้ดังนี้ คือ

- เครื่องจักรที่อยู่กับที่ จะถูกออกแบบมาให้ประหยัดพลังงาน ดังนั้นจะเลือกอุปกรณ์การทำงานของระบบไฮดรอลิก ที่มีขนาดใหญ่ แต่ใช้แรงดันในระบบต่ำ จึงทำให้ประหยัดพลังงาน
- เครื่องจักรเคลื่อนที่ จะถูกออกแบบให้มีน้ำหนักเบา เพื่อสะดวกในการเคลื่อนที่ ดังนั้นจะเลือกใช้อุปกรณ์การทำงานของระบบไฮดรอลิกที่มีขนาดเล็ก แต่ใช้แรงดันในระบบสูง ทำให้ได้กำลังในการทำงานสูงด้วย

2.3.2 ระบบไฮดรอลิกในงานอุตสาหกรรม

ปัจจุบันระบบไฮดรอลิกถูกนำมาใช้ในระบบอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย ซึ่งหลักการของไฮดรอลิกจะใช้น้ำมัน เป็นตัวกลางในการส่งผ่าน จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง โดยน้ำมันจะเปลี่ยนพลังงานการไหลให้เป็นพลังงานกล เช่น เครื่องปั๊มขึ้นงาน ในระบบของเครื่องปั๊มขึ้นงานจะมีการส่งถ่ายกำลังการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกไปยังอุปกรณ์ ทำให้เครื่องจักรสามารถปั๊มขึ้นงานหรือขึ้นรูปขึ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



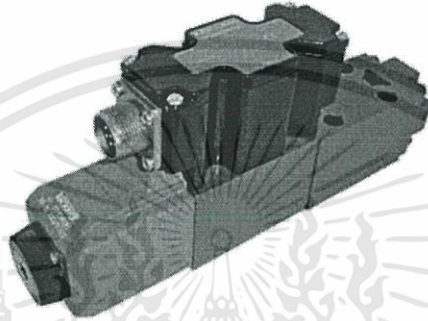
รูปที่ 2.1 วงจรไฮดรอลิก [8]

ระบบไฮดรอลิกดังแสดงในรูปที่ 2.1 สามารถแบ่งออกตามลักษณะการทำงานได้ดังนี้

1. ปั๊มไฮดรอลิก มีหน้าที่ควบคุมการจ่ายน้ำมันและดูดน้ำมันในระบบ
2. ถังพักน้ำมัน มีหน้าที่พักน้ำมันในระบบ ตลอดจนทำความสะอาดน้ำมันและระบายความร้อนน้ำมัน
3. วาล์วควบคุมน้ำมัน หรือ วาล์วนิรภัยมีหน้าที่ควบคุมความดันในระบบ ขณะที่ระบบมีความดันสูงเพิ่มขึ้น วาล์วจะควบคุมให้น้ำมันไหลกลับสู่ถังน้ำมัน
4. ชุดกรองน้ำมัน มีหน้าที่กรองสิ่งสกปรกไม่ให้เข้าไปในระบบ ซึ่งถ้ามีสิ่งสกปรกเข้าไปในระบบ อาจทำให้อุปกรณ์เสียหายได้
5. วาล์วเปิด-ปิด มีหน้าที่เปิด-ปิดการไหลของน้ำมัน
6. โซลินอยด์วาล์ว มีหน้าที่ควบคุมทิศทางการไหลของน้ำมัน
7. อุปกรณ์การทำงาน มีหน้าที่เปลี่ยนพลังงานการไหลให้เป็นพลังงานกล เช่น ลูกสูบ มอเตอร์ เป็นต้น
8. ท่อน้ำมัน มีหน้าที่ส่งผ่านน้ำมันในระบบทั้งหมด

2.3.3 ระบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิก

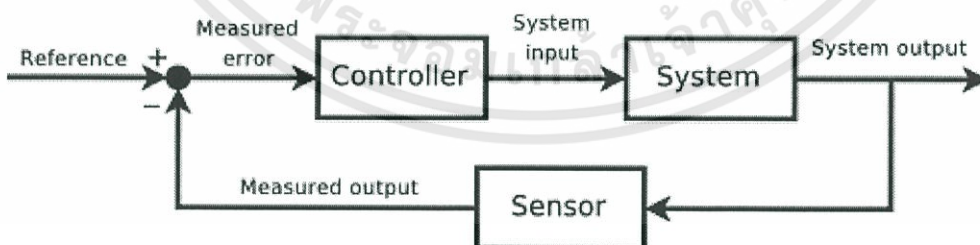
อิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิก คือ การนำค่ากระแส (Input) จ่ายแรงดันไฟฟ้า ไปยังกลไกใดกลไกหนึ่งในที่นี้คือ วาล์วควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Valve) เนื่องจากอุปกรณ์นี้จะสามารถทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเป็นช่วงได้ตั้งแต่ +10v ถึง -10v ซึ่งแรงดันตัวนี้จะนำไปสู่การในการยกขดลวดภายในวาล์ว คล้ายกับการกำหนดอัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกผ่านรูออริฟิส เพื่อแปลงให้เป็นแรงที่ใช้ในการอัดเม็ดยา ซึ่งสามารถควบคุมการไหลได้หลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็น หนึ่งทิศทาง หรือ สองทิศทาง



รูปที่ 2.2 วาล์วควบคุมสัดส่วน [1]

2.3.4 การควบคุมแบบวงปิด (Closed-loop control)

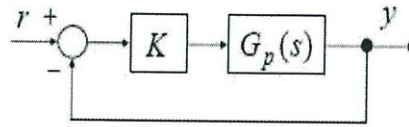
ระบบควบคุมแบบวงปิด (Closed-loop control system) หรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control systems) โดยปกติแล้วระบบควบคุมแบบป้อนกลับก็คือระบบควบคุมแบบวงปิดนั่นเอง ซึ่งค่าสองค่านี้สามารถใช้แทนกันได้ ระบบลักษณะนี้จะมีการทำงานที่พยายามลดความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตและอินพุตอ้างอิง ความแตกต่างนี้ก็คือความผิดพลาดของระบบ (System error) ซึ่งจะถูส่งให้กับตัวควบคุมเพื่อให้ตัวควบคุมสั่งงานในการลดความผิดพลาดนี้ และนำเอาต์พุตไปที่ค่าที่ต้องการ รูปที่ 2.3 แสดงการควบคุมแบบวงปิด



รูปที่ 2.3 การควบคุมแบบวงปิด [7]

ประสิทธิภาพของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ สามารถวิเคราะห์จากผลการตอบสนองของระบบจริง หรือการจำลองการทำงานในคอมพิวเตอร์ โดยการนำฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ มาวิเคราะห์ ซึ่งปัจจุบันมีซอฟต์แวร์ที่สามารถจำลองการทำงานได้ เช่น โปรแกรม Matlab, Scilab

เป็นต้น เพื่อทดสอบว่าตัวควบคุมที่ได้ออกแบบ สามารถควบคุมผลตอบสนองของระบบให้ได้ตามที่ต้องการหรือไม่



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของการตอบสนองของระบบ [9]

ผลการตอบสนองของระบบ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วงคือ

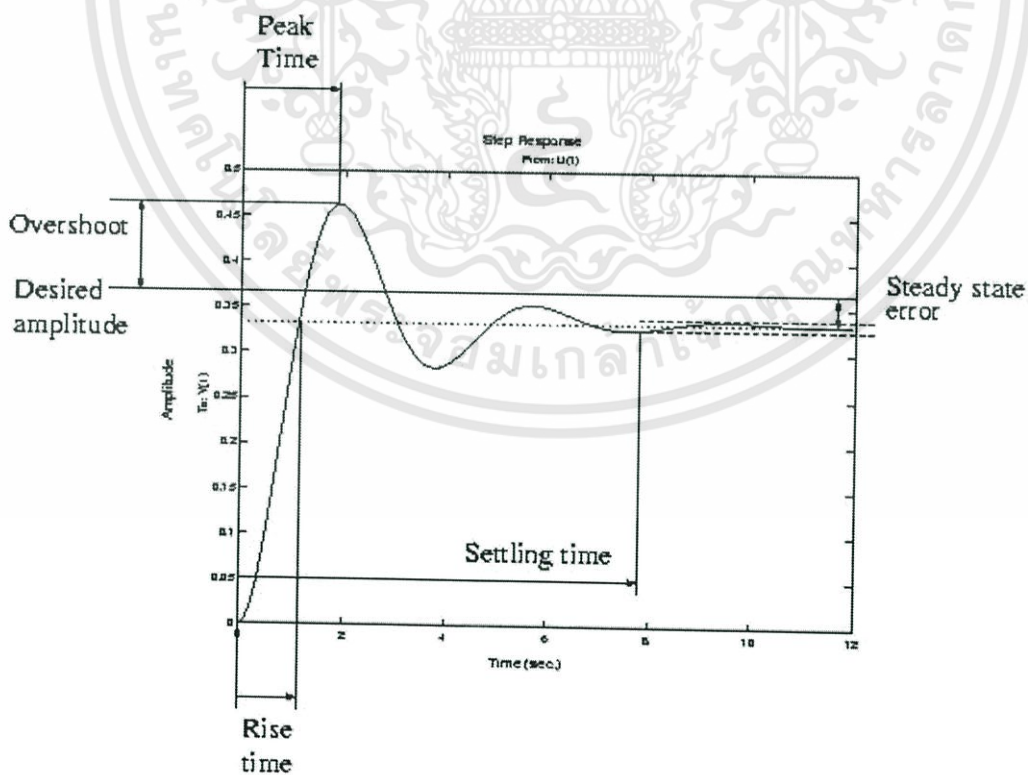
ช่วงการตอบสนองชั่วคราว (Transient Responds) โดยมีผลการตอบสนองดังต่อไปนี้

- เวลาขาขึ้น (Rise time)
- เวลาสูงสุด (Peak time)
- เวลาสู่สมดุลย์ (Settling time)
- ส่วนพุ่งเกิน (Overshoot)

ช่วงการตอบสนองที่สภาวะคงตัว (Steady State Responds)

- ค่าความคลาดเคลื่อน (Error)

ซึ่งค่าของผลการตอบสนองของระบบ ที่กล่าวมาข้างต้น แสดงในรูปที่ 2.5

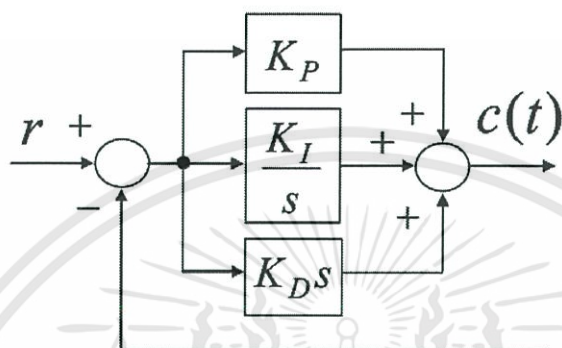


รูปที่ 2.5 กราฟผลตอบสนองของระบบ [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.5 การควบคุมประเภทพีไอดี

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์และอนุพันธ์หรือตัวควบคุมแบบพีไอดี (Proportional-Integral Control: PID Control) แบบแยกการปรับค่าเกน ลักษณะการทำงานก็คือการทำงานร่วมกันของตัวควบคุมแบบสัดส่วน ตัวควบคุมแบบปริพันธ์ และตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ บล็อกไดอะแกรมและฟังก์ชันการทำงานเป็นดังรูปที่ 2.6

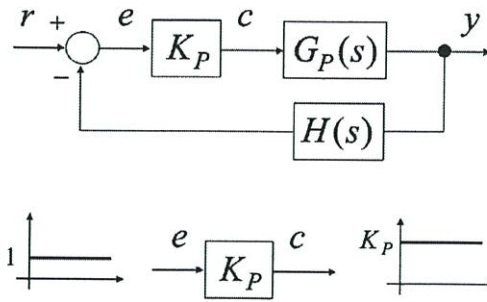


รูปที่ 2.6 ตัวควบคุมแบบพีไอดี [9]

ตัวควบคุมแบบพีไอดีเป็นตัวควบคุมที่พบบ่อยที่สุดในงานอุตสาหกรรมทั่วไปเพราะเป็นควบคุมที่ใช้งานง่าย การปรับค่าเกนอาศัยหลักการที่ไม่ได้ซับซ้อนมากนัก ก็ให้ผลตอบสนองเป็นที่ยอมรับได้ สามารถปรับแต่งการควบคุมได้ง่ายเมื่อต้องการ ระบบควบคุมพีไอดีมีตัวควบคุมย่อย 3 ตัว 1) ตัวควบคุมแบบสัดส่วนหรือตัวควบคุมพี 2) ตัวควบคุมแบบปริพันธ์หรือตัวควบคุมไอ และ 3) ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์หรือตัวควบคุมดี ในการควบคุมระบบทั่วไปมักใช้งานตัวควบคุมร่วมกัน เช่น การควบคุมแบบพีไอ การควบคุมแบบพีดี และการควบคุมแบบพีไอดี รายละเอียดการทำงานของตัวควบคุมแต่ละแบบมีดังนี้

2.3.5.1 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนหรือตัวควบคุมแบบพี ตัวควบคุมแบบนี้จะนำเอาสัญญาณค่าความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตมาเป็นอินพุตของตัวควบคุม แล้วตัวควบคุมจะทำการสร้างสัญญาณเอาต์พุตด้วยการขยายสัญญาณความผิดพลาดดังกล่าวด้วยค่าเกนของตัวควบคุม บล็อกไดอะแกรมและลักษณะของการประมวลผลสัญญาณเป็นดังรูปที่ 2.7

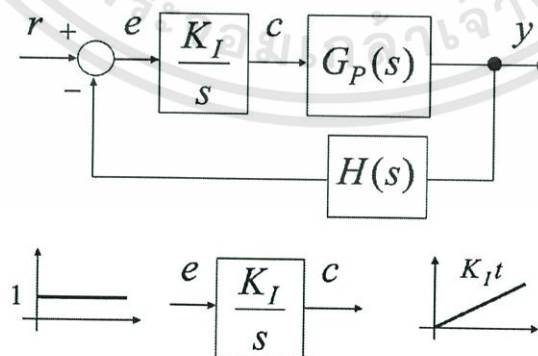


รูปที่ 2.7 ตัวควบคุมแบบพี [9]

จุดเด่นของตัวควบคุมแบบนี้เมื่อนำไปใช้งานคือ การปรับค่าเกนให้สูงขึ้นจะมีผลทำให้ระบบมีผลตอบสนองที่เร็วขึ้น ปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นในการนำไปใช้งานคือ ถ้านำไปใช้กับระบบชนิด 0 (System type 0) ตัวควบคุมแบบนี้จะไม่สามารถจัดค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวได้ แต่ก็สามารถทำให้ค่าความผิดพลาดดังกล่าวมีค่าน้อยลงได้ด้วยการปรับค่าเกนให้สูง ซึ่งในทางปฏิบัติแล้ว การปรับค่าเกนให้สูงมากขนาดไหนเอาต์พุตที่ออกจริงๆ จากตัวควบคุมมักมีค่าจำกัด และการปรับเกนให้สูงสำหรับระบบที่มีอันดับสูง อาจทำให้ได้ผลตอบสนองที่ไม่เป็นที่พึงประสงค์ เช่น การปรับเกนให้สูงขึ้นสำหรับอันดับสอง ผลที่ตามมาคือค่าฟุงเกินก็จะสูงขึ้นตามด้วย ซึ่งอาจจะเป็นอันตรายต่อระบบได้

2.3.5.2 ตัวควบคุมแบบปริพันธ์

ตัวควบคุมแบบปริพันธ์หรือตัวควบคุมแบบไอ ตัวควบคุมแบบนี้จะนำเอาสัญญาณความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตมาเป็นอินพุตของตัวควบคุม แล้วตัวควบคุมจะทำการสร้างสัญญาณเอาต์พุตด้วยการอินทิเกรตสัญญาณความผิดพลาดดังกล่าวแล้วคูณด้วยค่าเกนของตัวควบคุม บล็อกไดอะแกรมและลักษณะของการประมวลผลสัญญาณเป็นดังรูปที่ 2.8



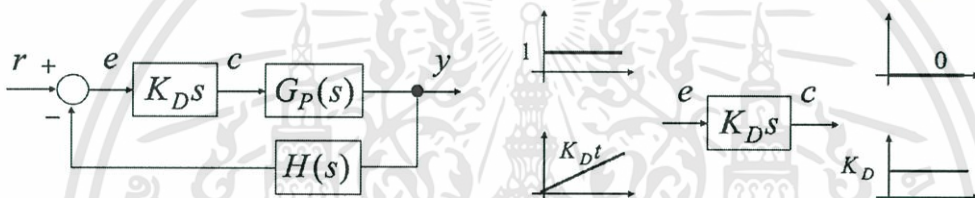
รูปที่ 2.8 ตัวควบคุมแบบไอ [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดเด่นของตัวควบคุมแบบนี้เมื่อนำไปใช้งานก็คือ ตัวควบคุมแบบนี้จะสามารถจัดค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวได้ ข้อด้อยที่อาจจะเกิดขึ้นในการนำไปใช้งานก็คือ ตัวควบคุมแบบนี้ไม่สามารถลดผลของการพุ่งเกินของผลตอบสนองได้และการปรับเกนให้มีค่าสูง อาจจะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ไม่เป็นที่พึงประสงค์เช่นการปรับเกนให้สูงขึ้นอาจจะมีผลทำให้ผลตอบสนองของระบบเกิดการแกว่งตัวได้

2.3.5.3 ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์

ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์หรือตัวควบคุมแบบดี ตัวควบคุมแบบนี้จะนำเอาสัญญาณความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตมาเป็นอินพุตของตัวควบคุม แล้วตัวควบคุมจะทำการสร้างสัญญาณเอาต์พุตด้วยการอนุพันธ์สัญญาณความผิดพลาดดังกล่าว แล้วคูณด้วยค่าเกนของตัวควบคุม บล็อกไดอะแกรมและลักษณะของการประมวลผลสัญญาณเป็นดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ตัวควบคุมแบบดี [9]

จุดเด่นของตัวควบคุมแบบนี้เมื่อนำไปใช้งานก็คือ ตัวควบคุมแบบนี้ใช้สำหรับลดผลของการพุ่งเกินของผลตอบสนองได้ ลดผลตอบสนองที่มีการเปลี่ยนแปลงไปมาได้ แต่ต้องปรับค่าเกนให้เหมาะสมด้วยไม่เช่นนั้น อาจจะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ไม่เป็นที่พึงประสงค์ ปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นในการนำเอาตัวควบคุมนี้ไปใช้งานก็คือ ตัวควบคุมแบบนี้จะไม่สามารถจัดค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวได้และการใช้ตัวควบคุมนี้อาจจะทำให้ได้ผลตอบสนองช้าลงได้

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID)

คุณสมบัติ	ตัวควบคุมแบบ P	ตัวควบคุมแบบ I	ตัวควบคุมแบบ D
ความเร็วในการตอบสนอง	เร็ว	ช้า	เร็วมาก
ความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงที่ (Steady-state-error)	มีเกิดขึ้น	มีค่าเป็นศูนย์	ไม่สามารถควบคุมได้
หมายเหตุ			ไม่สามารถใช้ได้ตามลำพัง

2.3.6 การออกแบบระบบควบคุมประเภทพีไอดีด้วยวิธีการซีเกลอร์-นิโคลส์

วิธีการนี้นำเสนอโดย John G. Ziegler และ Nathaniel B. Nichols ในคริสต์ทศวรรษที่ 1940 โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการป้อนอินพุตแล้วปรับค่าเกน จนกระทั่งผลตอบสนองเกิดการแกว่ง โดยเริ่มต้นให้ค่าเกน k_p เป็นหนึ่ง และค่าเกน k_i และ k_d เป็นศูนย์
2. นำค่าเกนที่ได้ซึ่งก็คือ k_c และคาบเวลาของการแกว่ง (T) มาหาค่าเกนตัวอื่นๆดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การหาค่าเกนด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์

	K_P	K_I	K_D
P-Control	$0.5K_c$		
PI-Control	$0.45K_c$	$0.45K_c/0.83T$	
PID-Control	$0.6K_c$	$0.6K_c/0.5T$	$0.6K_c/0.125T$

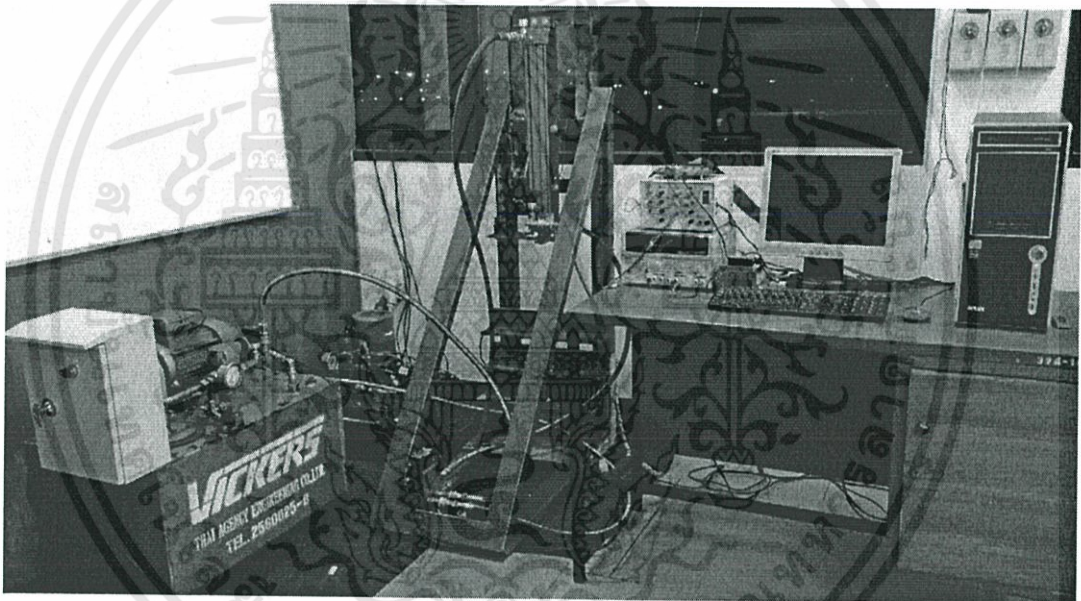
บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

บทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง อุปกรณ์วัดค่าต่างๆที่เกี่ยวข้องในการทดลอง และวิธีการทดลองเพื่อควบคุมแรงในระบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิก ซึ่งรายละเอียดมีดังต่อไปนี้

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

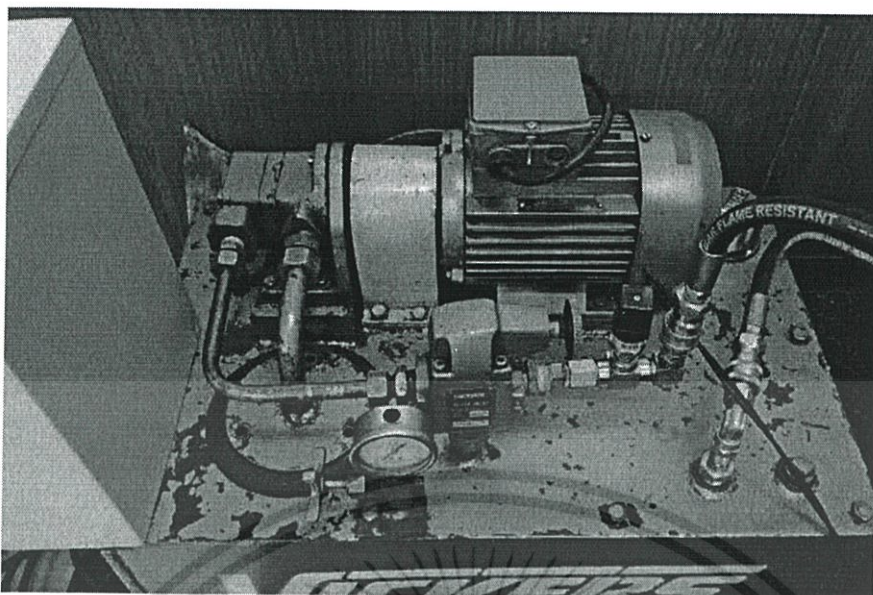
ชุดทดลองที่จัดสร้างขึ้นประกอบด้วยอุปกรณ์ดังต่อไปนี้ ชุดต้นกำลังไฮดรอลิก วาล์วควบคุมทิศทาง ชนิดพรอพอร์ชันนัล กระจบอกสูบไฮดรอลิกทำงาน 2 ทิศทาง คอมพิวเตอร์ควบคุมพร้อมการ์ดเชื่อมต่อสัญญาณ เซนเซอร์วัดความดัน เซนเซอร์รับแรง และสปริงคอยล์ ชุดทดลองแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ระบบไฮดรอลิกที่จัดสร้างขึ้น

3.1.1 ชุดต้นกำลังไฮดรอลิก

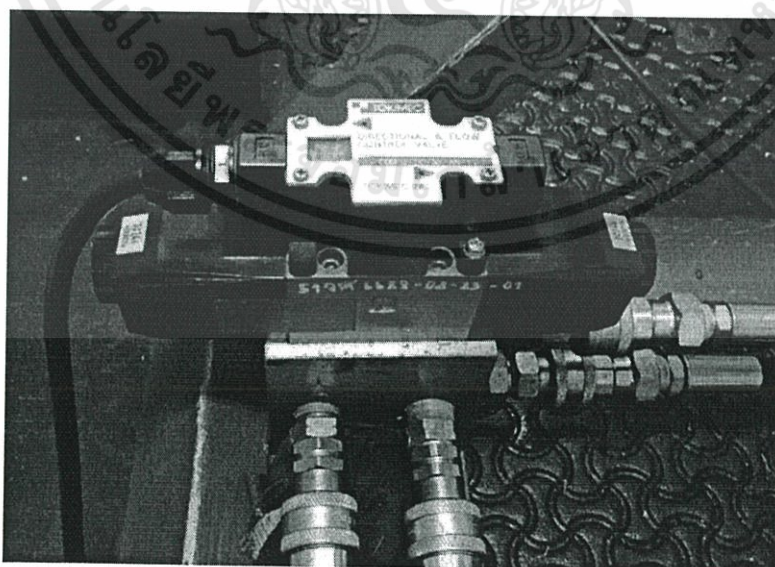
ชุดต้นกำลังไฮดรอลิก ทำหน้าที่กักเก็บน้ำมันไฮดรอลิก และสร้างแรงดันภายในระบบ ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้ ถังพักน้ำมันไฮดรอลิก ปัมป์แบบสกรูบีบ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ วาล์วควบคุมความดัน และชุดกรองน้ำมันไฮดรอลิก ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ชุดต้นกำลังไฮดรอลิก

3.1.2 วาล์วควบคุมทิศทาง

วาล์วควบคุมทิศทาง ชนิดพรอพอร์ชันนัลที่ใช้คือรุ่น COM-3-2C-30-AN-11 ผลิตโดย TOKIMEC ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ควบคุมด้วยไฟฟ้าในรูปแบบความต่างศักย์ไฟฟ้า (-10 ถึง 10 โวลต์) สามารถรับแรงดันตกคร่อมได้สูงสุด 245 บาร์ มีการตอบสนองต่อสัญญาณควบคุมได้อย่างรวดเร็ว (0-100% ใช้เวลาน้อยกว่า 50 ms.) และมีความเป็นเชิงเส้นระหว่างสัญญาณควบคุมและอัตราการไหล ในงานวิจัยนี้ใช้เป็นอุปกรณ์ควบคุมทิศทาง อัตราการไหล และส่งถ่ายน้ำมันเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของก้านสูบ โดยรับสัญญาณควบคุมที่ส่งมาจากการ์ดเชื่อมโยงสัญญาณที่ติดตั้งไว้ในคอมพิวเตอร์

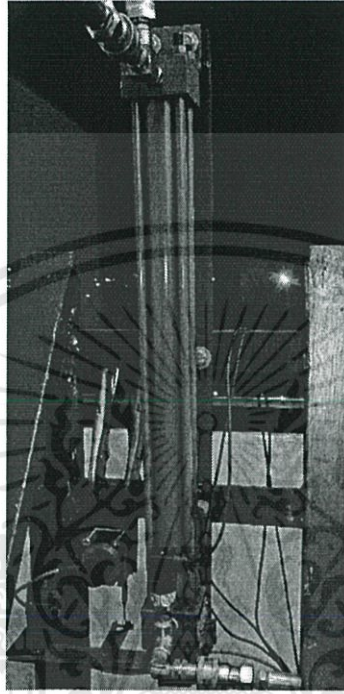


รูปที่ 3.3 วาล์วควบคุมทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 กระบอบอกสูบไฮดรอลิก

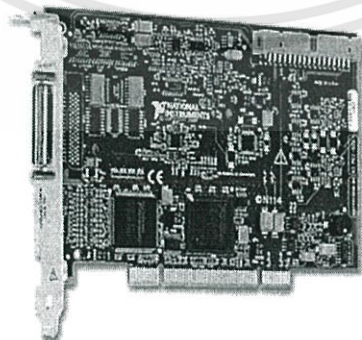
กระบอบอกสูบบแบบแกนเพลลาเดี่ยวเคลื่อนที่ 2 ทาง (เข้า-ออก) ระยะชักสูงสุด 500 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของกระบอบอกสูบ 40 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางก้านสูบ 28 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 กระบอบอกสูบไฮดรอลิก

3.1.4 การ์ดเชื่อมต่อสัญญาณ

การ์ดเชื่อมต่อสัญญาณ (Data Acquisition (DAQ Card) PCI-6221 ของ National Instruments) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 มีความละเอียดในการวัดสัญญาณ 16 bit ความเร็วในการเก็บตัวอย่างสูงสุด 833000 จุด/วินาที ในโครงการนี้ใช้เป็นตัวเชื่อมต่อสัญญาณจากคอมพิวเตอร์ ไปยัง วาล์วควบคุมทิศทาง และจากเซนเซอร์รับแรงกลบมายังคอมพิวเตอร์

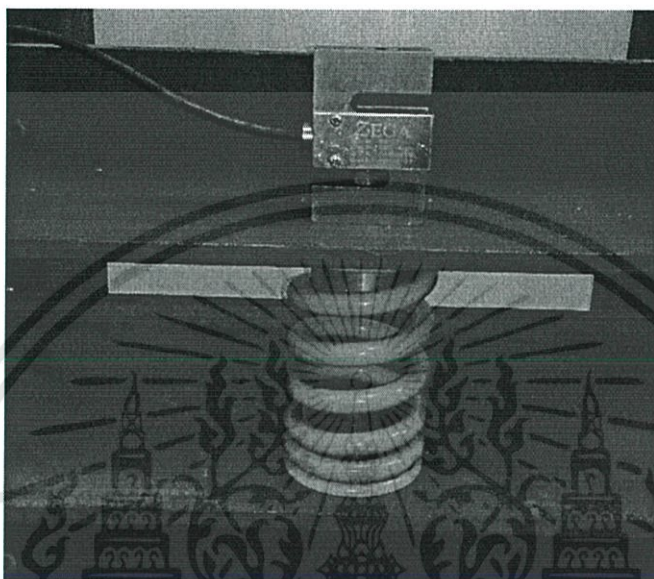


รูปที่ 3.5 การ์ดเชื่อมต่อสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 เซนเซอร์รับแรงและสปริงคอยล์

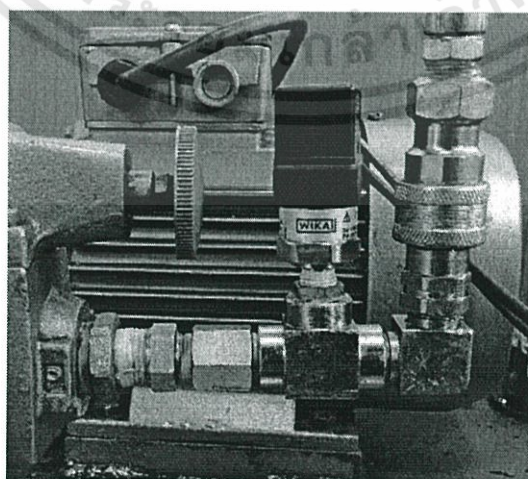
ในโครงการนี้ใช้โหลดเซลล์เป็นเซนเซอร์รับแรงในการตรวจรับรู้อันตรายที่เกิดจากการกด และใช้สปริงคอยล์ติดตั้งติดกับเซนเซอร์รับแรงเป็นอุปกรณ์จำลองแรงกระทำจากภายนอก ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยโหลดเซลล์ที่ใช้คือ ยี่ห้อ ZEGA รุ่น KEED-500KG. เป็นโหลดเซลล์ประเภท S beam ทิศทางของแรงเป็นแบบแรงกด และแรงดึง ไฟจ่ายออก 2mV/V และสามารถรับแรงได้สูงสุด 500 กิโลกรัม



รูปที่ 3.6 โหลดเซลล์และสปริงคอยล์

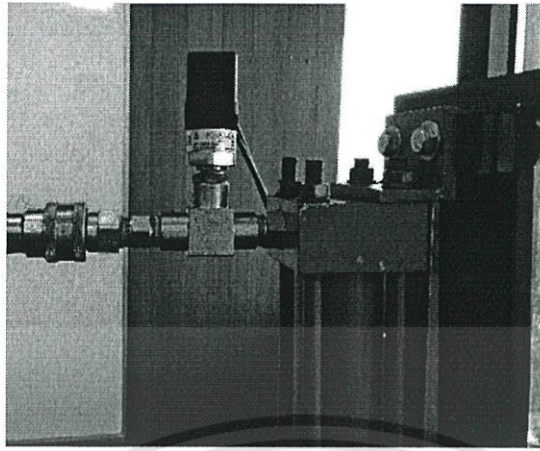
3.1.6 เซนเซอร์วัดความดัน (Pressure transducer)

เซนเซอร์วัดความดัน (Pressure transducer) ถูกติดตั้งไว้เพื่อวัดความดันของปั๊มดังรูปที่ 3.7 ครอบกสูบด้าน Head-end ดังรูปที่ 3.8 และครอบกสูบด้าน Rod-end ดังรูปที่ 3.9 เซนเซอร์วัดความดันที่ใช้คือ ยี่ห้อ WIKA Instrumentation Corporation รุ่น A-10 สามารถวัดได้ที่ช่วง 0-600 บาร์ สัญญาณขาออกเป็นไฟกระแสตรงที่ 0-10 โวลต์

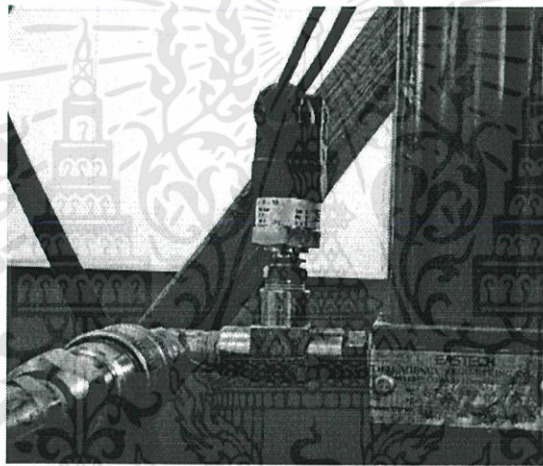


รูปที่ 3.7 เซนเซอร์วัดความดันทางเข้าพรอพอร์ชันนัลวาล์ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

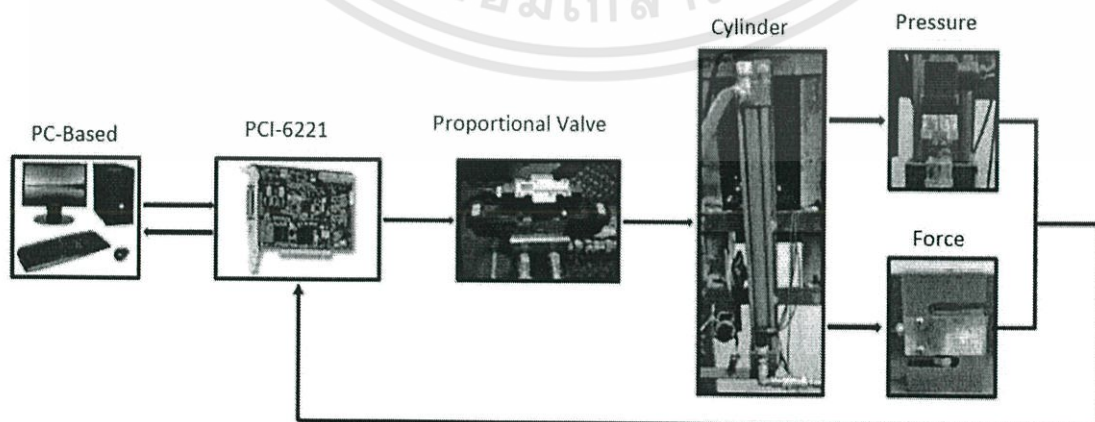


รูปที่ 3.8 เซนเซอร์วัดความดันของกระบอกสูบด้าน Head-end



รูปที่ 3.9 เซนเซอร์วัดความดันของกระบอกสูบด้าน Rod-end

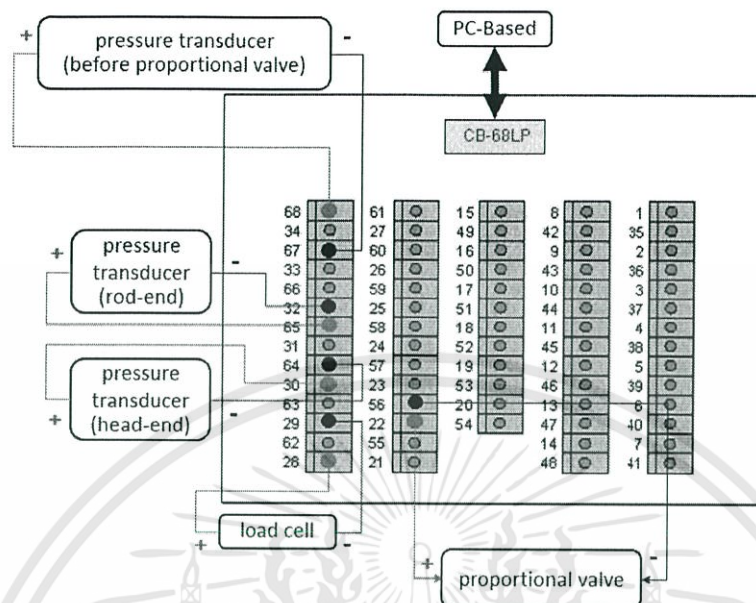
เมื่อต่ออุปกรณ์ทั้งหมดเข้าด้วยกันจะได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แผนผังแสดงการทำงานของชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเชื่อมต่อสายสัญญาณระหว่างอุปกรณ์กับ Card Interface เป็นดังรูปที่ 3.11

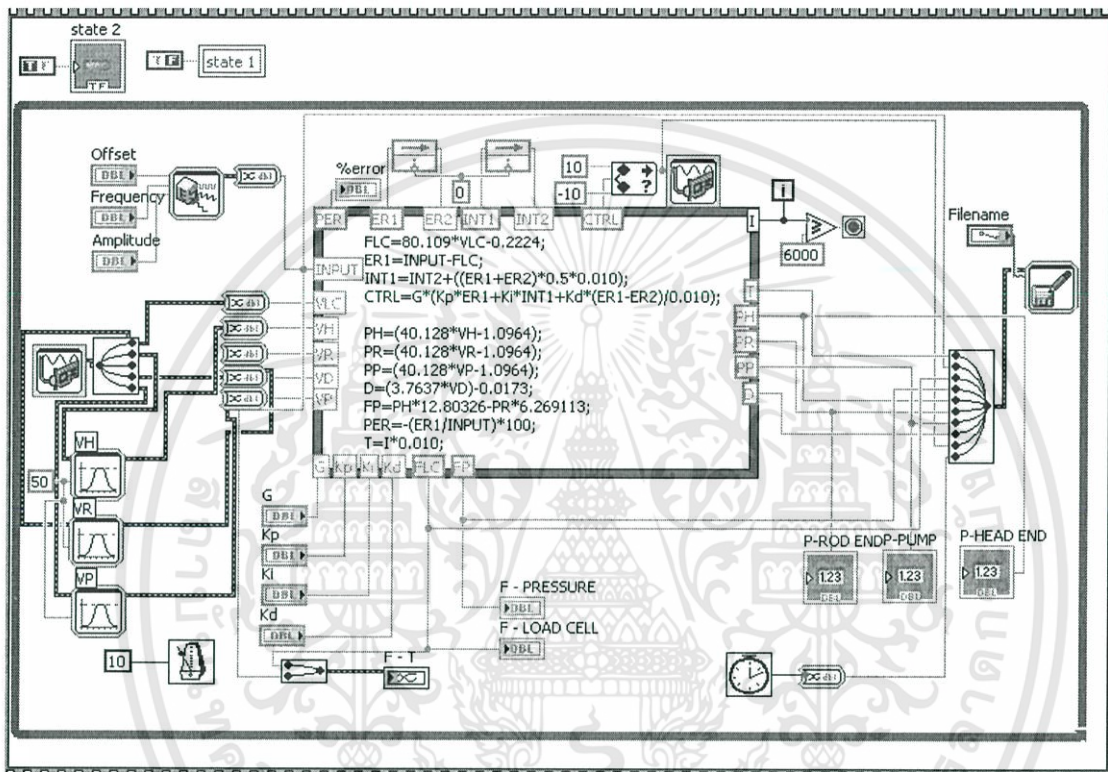


รูปที่ 3.11 การเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างอุปกรณ์กับ Card Interface

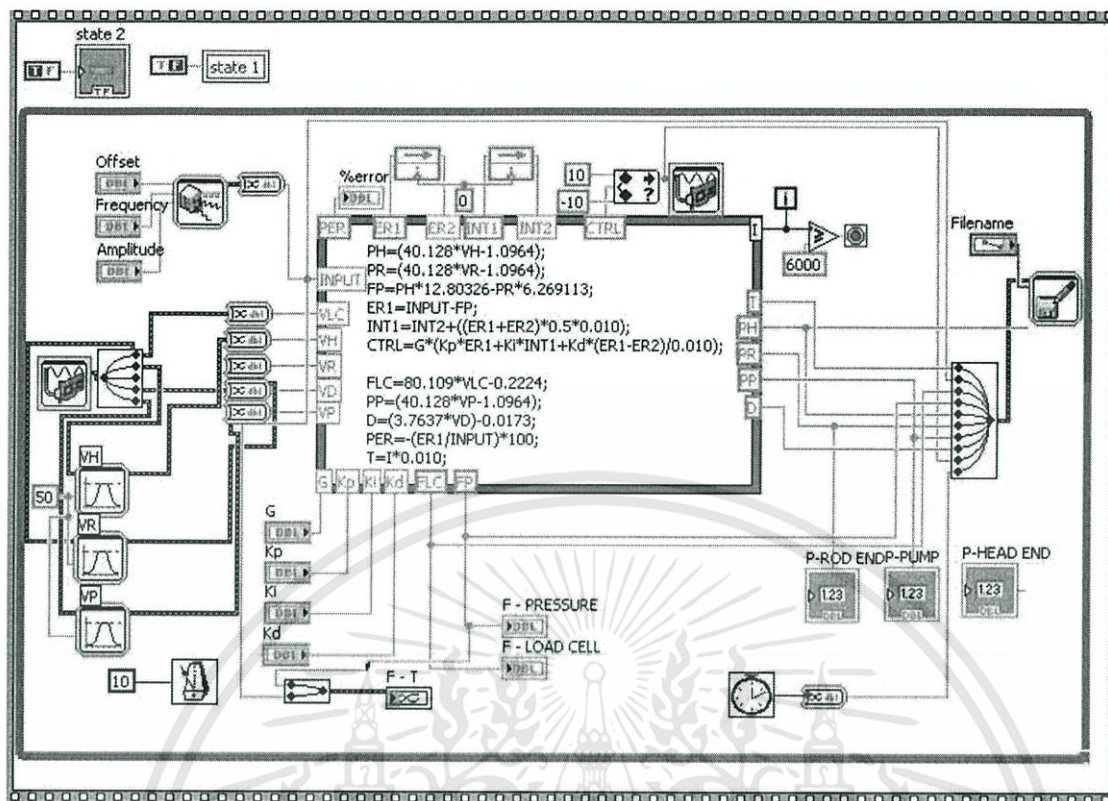
3.2 วิธีการทดลอง

เนื่องจากในโครงการนี้เป็นการควบคุมแรงของกระบอกสูบไฮดรอลิก ซึ่งวัตถุประสงค์หลักของการทดลองนี้ คือ การใช้ตัวควบคุมแบบพีเอ็ดไอเพื่อควบคุมแรงของกระบอกสูบไฮดรอลิก ขั้นตอนการทดลองเป็นดังต่อไปนี้

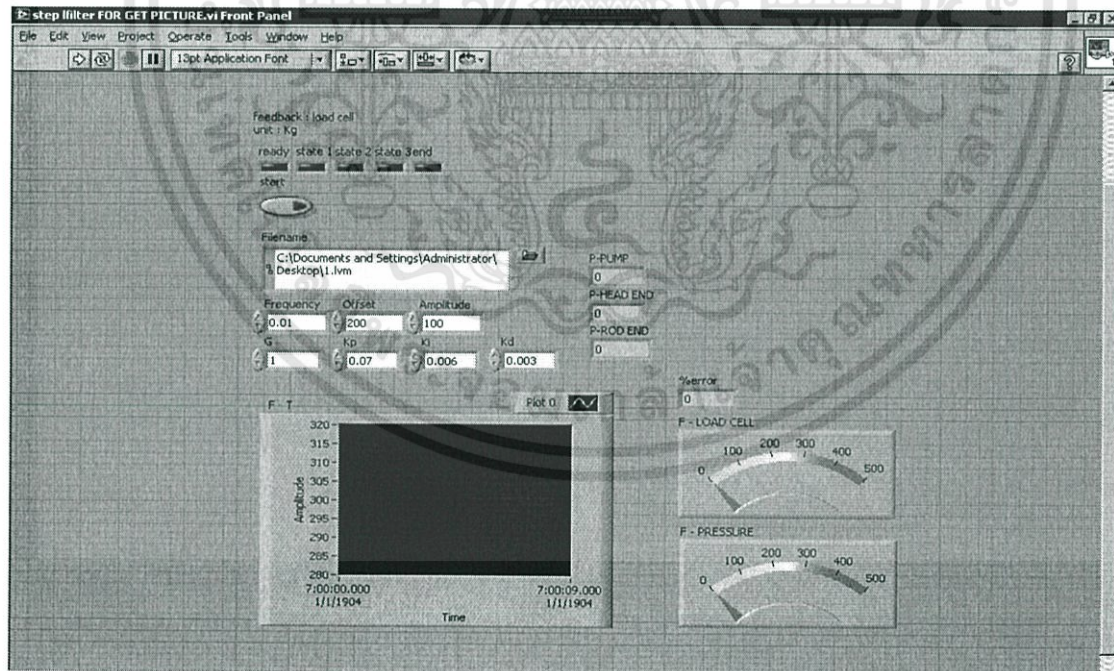
1. ทำการเขียนโปรแกรมแลบวิว และใช้ตัวควบคุมพีเอ็ดไอโดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง และจากเซนเซอร์วัดความดัน ดังแสดงในรูปที่ 3.12 – 3.14



รูปที่ 3.12 Block Diagram สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง



รูปที่ 3.13 Block Diagram สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดัน



รูปที่ 3.14 front panel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทำการปรับค่าเกน K_p , K_i และ K_d ของฟังก์ชันบันไดที่ 300 กิโลกรัม และบันทึกผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 3.1 ตารางบันทึกผลการทดลอง

เวลา(วินาที)	สัญญาณอ้างอิง(กิโลกรัม)	สัญญาณป้อนกลับ(กิโลกรัม)
0.00		
0.01		
0.02		
•		
•		
•		
10.00		

3. วิเคราะห์ผลการทดลองโดยพิจารณาจากสมรรถนะของระบบดังนี้
- เวลาขาขึ้น (Rise time)
 - เวลาสูงสุด (Peak time)
 - เวลาสู่สมดุลย์ (Settling time)
 - ส่วนพุ่งเกิน (Overshoot)
 - ความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัว (Steady State Errors)
4. นำค่าเกนที่ได้จากข้อ 2 ไปใช้กับฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) และฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ที่ความถี่ 0.1 Hz. ระยะเวลาสัญญาณ 300 กิโลกรัม ขนาด 100 กิโลกรัม และบันทึกผลการทดลองตามตารางที่ 3.1
5. วิเคราะห์ผลการทดลองตามสมรรถนะในข้อ 3 แล้วทำการปรับค่าเกนอีกครั้งเพื่อให้ได้สมรรถนะที่ดีที่สุด
6. ทำการทดลอง และบันทึกผลการทดลองอีกครั้งโดยทำการเปลี่ยนจากสัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรงเป็นเซนเซอร์วัดความดัน
7. สรุป และวิจารณ์ผลการทดลอง

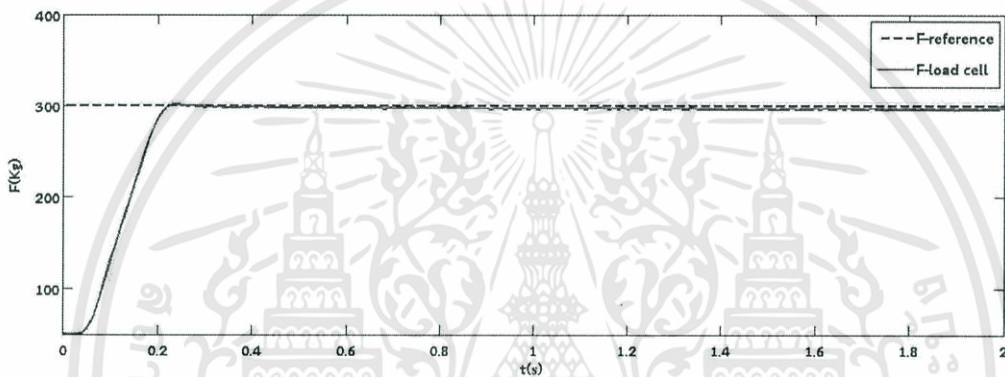
บทที่ 4

ผลการทดลอง

การทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ การควบคุมระบบโดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง และสัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดัน ซึ่งทั้ง 2 กรณีจะใช้ตัวควบคุมเดียวกัน คือ $K_p=0.07$, $K_i=0.006$ และ $K_d=0.003$ ผลตอบสนองของระบบมีดังต่อไปนี้

4.1 สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง

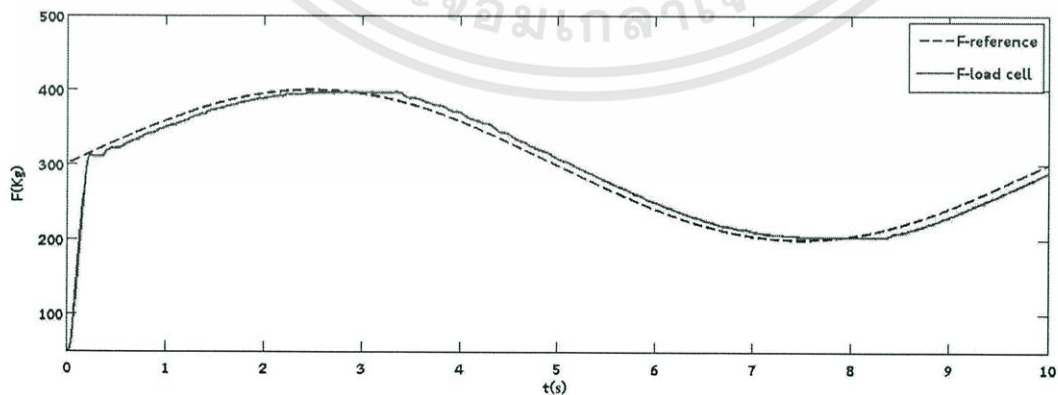
4.1.1 ฟังก์ชันบันได (Step signal)



รูปที่ 4.1 กราฟฟังก์ชันบันได (Step signal) โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง

มีเวลาขาขึ้น 0.19 วินาที, เวลาสู่สมดุลย์ 0.21 วินาที เวลาสูงสุด 0.24 วินาที ที่ส่วนพุ่งเกิน 0.71% และมีค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัว 1.67 ที่ 10 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 4.1

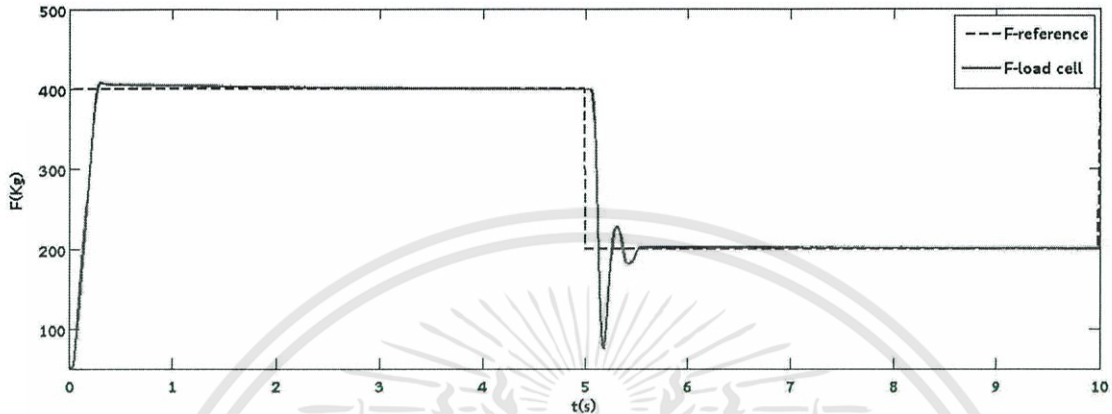
4.1.2 ฟังก์ชันไซน์ (Sine signal)



รูปที่ 4.2 กราฟฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง

มีค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัว 8.51 ที่ 10 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 4.2

4.1.3 ฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal)

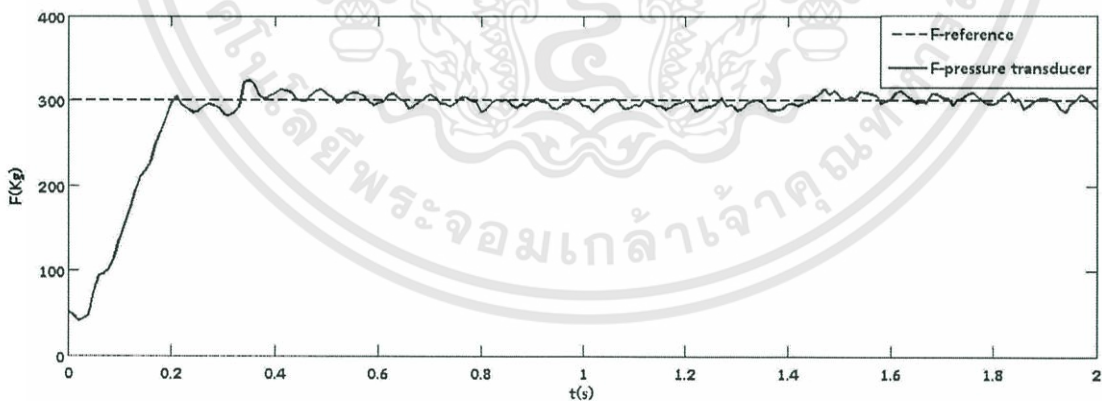


รูปที่ 4.3 ฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง

ตัวควบคุมดังกล่าวยังสามารถทำให้ได้ผลตอบสนองต่อฟังก์ชันสี่เหลี่ยมได้ โดยมี ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัว 30.50 ที่ 10 วินาทีและ 30.50 ดังแสดงในรูปที่ 4.3

4.2 สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดัน

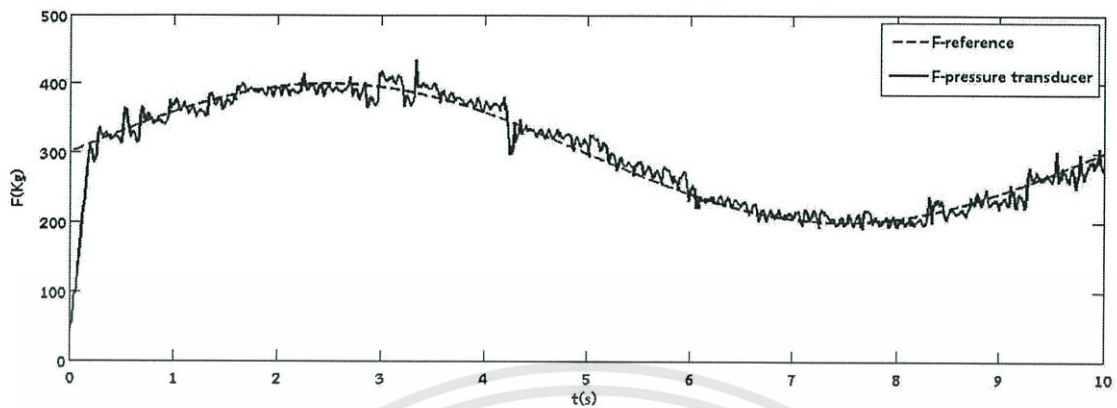
4.2.1 ฟังก์ชันบันได (Step signal)



รูปที่ 4.4 กราฟฟังก์ชันบันได (Step signal) โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดัน

ฟังก์ชันบันได มีเวลาขาขึ้นและเวลาสู่สมดุลย์ 0.21 วินาที มีค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัว 16.9 ที่ 10 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 4.4

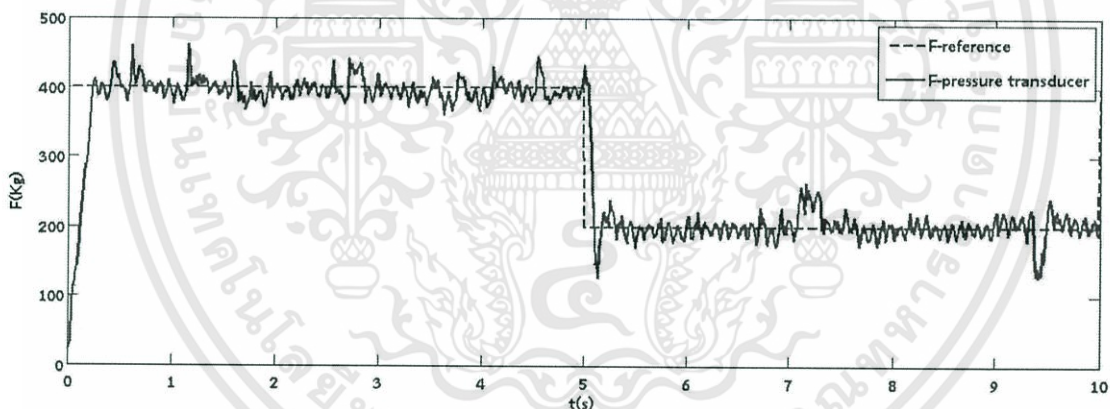
4.2.2 ฟังก์ชันไซน์ (Sine signal)



รูปที่ 4.5 กราฟฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดัน

มีค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัว 21.72 ที่ 10 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 4.5

4.2.3 ฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal)



รูปที่ 4.6 ฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดัน

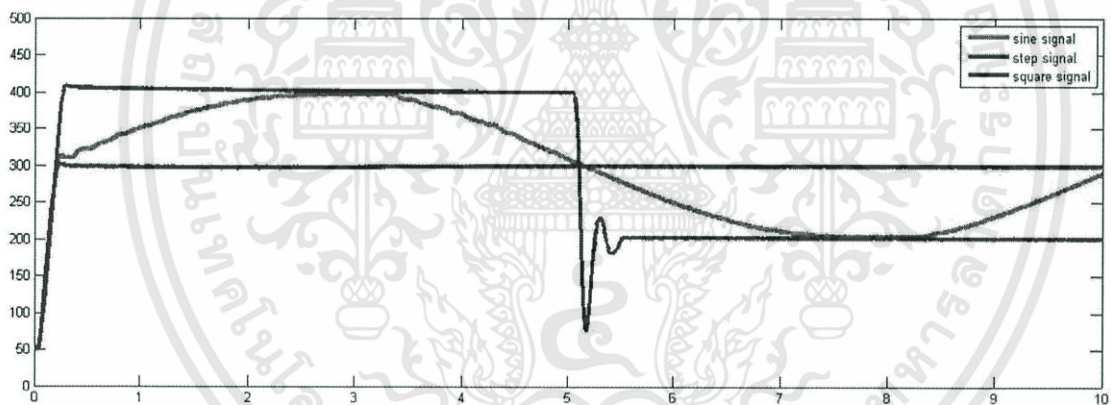
ตัวควบคุมดังกล่าวยังสามารถทำให้ได้ผลตอบสนองต่อสัญญาณสี่เหลี่ยมได้ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัว 32.04 ที่ 10 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 4.6

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

การควบคุมชุดทดลองนี้เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ดีของฟังก์ชันบันได (Step signal) ที่ 300 กิโลกรัม โดยใช้เซนเซอร์รับแรงเป็นสัญญาณป้อนกลับต้องใช้ค่าเกณฑ์ทั้ง 3 ตัวคือ $K_p=0.07$, $K_i=0.006$ และ $K_d=0.003$ ได้ผลดังรูปที่ 4.1 โดยผลตอบสนองของฟังก์ชันบันไดมีเวลาขาขึ้น 0.19 วินาที, เวลาสู่สมดุลย์ 0.21 วินาที เวลาสูงสุด 0.24 วินาที ที่ส่วนพุ่งเกิน 0.71% และมีค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัว 1.677 ที่ 10 วินาที และสามารถนำไปใช้กับฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) และฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ที่ 0.1 Hz. ระยะเยื้องศูนย์ 300 กิโลกรัม ขนาด 100 กิโลกรัมได้ โดยมีค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัว 8.51 และ 30.50 ที่ 10 วินาที ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.1 และหากทำการเปลี่ยนสัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรงเป็นเซนเซอร์วัดความดันก็ยังสามารถควบคุมได้โดยมีค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัว 16.9, 21.72 และ 32.04 ที่ 10 วินาที สำหรับฟังก์ชันบันได, ฟังก์ชันไซน์ และฟังก์ชันสี่เหลี่ยม ตามลำดับ



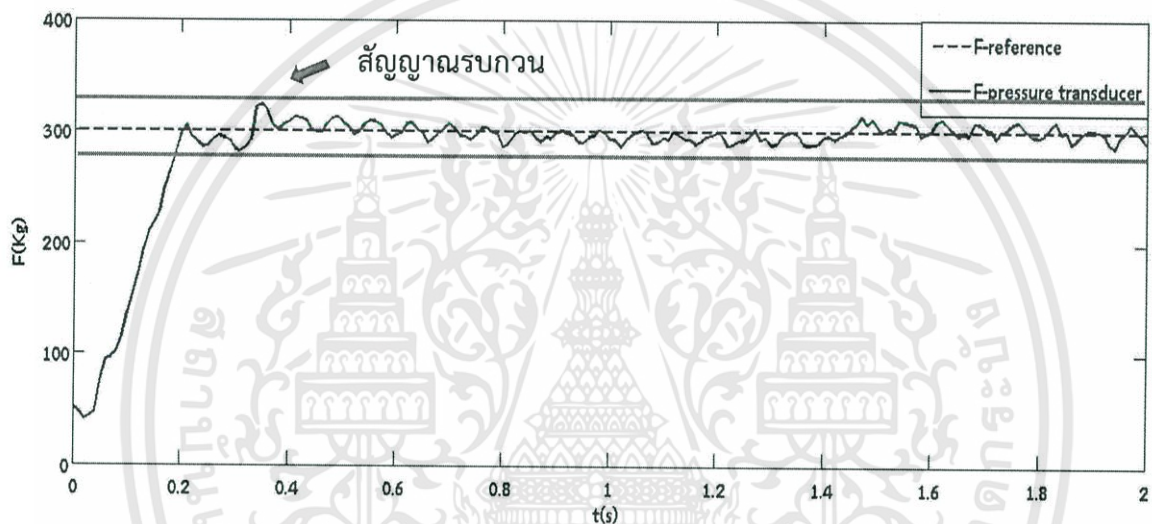
รูปที่ 5.1 ฟังก์ชันบันได, ฟังก์ชันไซน์ และฟังก์ชันสี่เหลี่ยมที่ 300 กิโลกรัม

จากการปรับค่าตัวควบคุมแบบพีไอดีพบว่า การปรับค่าเกณฑ์ K_p สามารถลดความคลาดเคลื่อนในการตอบสนองที่สภาวะคงตัวและลดเวลาขาขึ้นได้ แต่ถ้ามีค่ามากเกินไปจะทำให้มีส่วนพุ่งเกินเกิดขึ้น การปรับค่าเกณฑ์ K_i สามารถลดค่าความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัวจนใกล้เคียงศูนย์ แต่ยังคงทำให้มีส่วนพุ่งเกินเกิดขึ้น การปรับค่าเกณฑ์ K_d สามารถลดส่วนพุ่งเกิน และเวลาสู่สมดุลได้

5.2 วิจัยรณผลการทดลอง

เนื่องจากการทำงานของระบบบางระบบอาจไม่สามารถติดตั้งโหลดเซลได้ การใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดันเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ในการควบคุมแรง จากผลการทดลองพบว่าที่ค่าเกนเดียวกันยังคงสามารถควบคุมแรงได้ แต่ทั้งสองสัญญาณจะแตกต่างกันเพียงค่าความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัว เนื่องจากสัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์วัดความดันมีสัญญาณรบกวนมากกว่าสัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์รับแรงดังแสดงในรูปที่ 5.2

ผลของการปรับค่าเกน K_p , K_i และ K_d ที่ดีที่สุดของฟังก์ชันบันได (Step signal) ไม่สามารถนำไปใช้ได้กับฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) และฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ทำให้ต้องลดสมรรถนะของระบบลงเพื่อให้สามารถควบคุมฟังก์ชันไซน์ และฟังก์ชันสี่เหลี่ยมดังกล่าวได้



รูปที่ 5.2 สัญญาณรบกวนจากเซนเซอร์วัดความดัน

บรรณานุกรม

- [1] กัญย์ เลียงกลกิจ, ทศพล ทะวงษ์เงิน และปวิศ ตะกรุดคง (2550). การออกแบบและเปรียบเทียบระบบควบคุมการทำงานของระบบอิเล็กทรอนิกส์ – ไฮดรอลิกส์แบบพีไอดี คอนโทรลเลอร์กับแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือหรือฟัซซี่ลอจิกในการควบคุมแรงของเครื่องอัดเม็ดยา สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [2] นัฐชัย ชาญดนตรีกิจ และอรณสิทธิ จ้อยกลัด (2550). ชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยตัวควบคุมพีไอดี ผ่านโปรแกรมแลบวิวคณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [3] กฤต กังวานพรศิริ, ศชายุทธ ธนาดำรงศักดิ์ และปวิชญ์ ปรีชาวุฒิเดช (2551). ชุดทดสอบไฮดรอลิก สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [4] ณัฐวุฒิ เตไปวา, อุन्नัต พิณโสภณ, ปิจิราวุช เวียงจันดา, และนเร็น ชัยธานี.(2554). การออกแบบและเปรียบเทียบระบบควบคุมแบบพีไอดีกับแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือในการควบคุมแรงกดของเครื่องอัดเม็ดยาแบบกระบอกสูบไฮดรอลิกส์. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 2519-21 ตุลาคม 2554 จังหวัดกระบี่.
- [5] น.ต.กัปตัน เตียวตระกูล, ทบทวนความรู้: คอนโทรลเลอร์แบบ PID.(2556) วารสารกรมอิเล็กทรอนิกส์ทหารเรือ ปีที่ 15 ฉบับที่ 16 จังหวัดสมุทรปราการ
- [6] รศ.ดร. สุวัฒน์ กุลธนปรีดา(2552), *วิศวกรรมการควบคุมอัตโนมัติ*.กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น)
- [7] Katsuhiko Ogata.(1995). “*System Dynamic*”. Third Edition. PRENTICE HALL.
- [8] เดชฤทธิ์ มณีธรรม และพรพจน์ แพรศิริ.(2552), *คัมภีร์ระบบไฮดรอลิกส์ (HYDRAULIC SYSTEM)*. ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- [9] สุชาติ จันท์จรมานิตย์ วศ.บ., MEng., *Control system ระบบควบคุม Principles of Feedback Control & PID Controller*. ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- [10] Anthony Esposito.(1995). “*Fluid Power with Applications*”. Sixth Edition. PRENTICE HALL.
- [11] Zulfatman, M. F. Rahmat, APPLICATION OF SELF-TUNING FUZZY PID CONTROLLER ON INDUSTRIAL HYDRAULIC ACTUATOR USING SYSTEM IDENTIFICATION APPROACH. International journal on smart sensing and intelligent systems, VOL. 2, NO. 2, JUNE (2009): p. 246-261
- [12] D. Maneetham, N. Afzulpurkar, Modelling, simulation and control of high speed nonlinear hydraulic servo system. World Journal of Modelling and Simulation, VOL. 6, NO. 1, (2010): p. 27-39

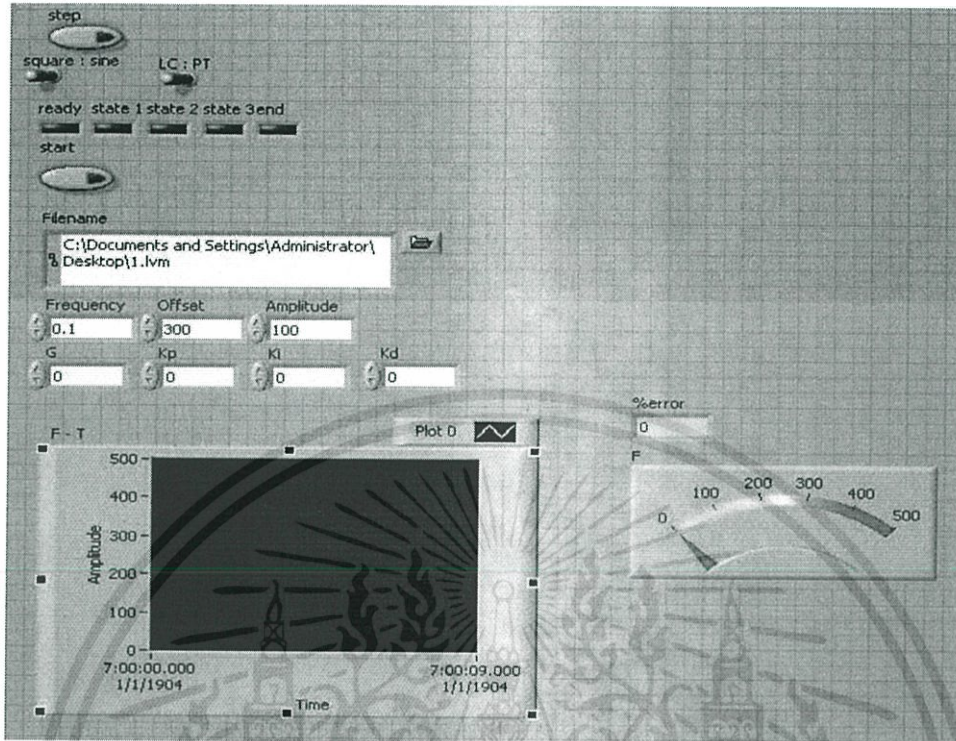
- [13] R. Padma Sree, M. N. Srinivas, M. Chidambaram, "A simple method of tuning PID controllers for stable and unstable FOPTD systems" *Computers and Chemical Engineering* 28 (2004) p.2201–2218
- [14] A. LEVA, C. MAFFEZZONI, R. SCATTOLINI, "Self-tuning PI-PID Regulators for Stable Systems with Varying Delay" *Automatita*, Vol. 311. No. 7, pp. 1171-1183. (1994)
- [15] V. Vijayan, R.C. Panda, "Design of PID controllers in double feedback loops for SISO systems with set-point filters" *ISA Transactions* 51 (2012) p.514–521
- [16] G. P. Liu, S. Daley, "Optimal-tuning nonlinear PID control of hydraulic systems" *Control Engineering Practice* 8 (2000) p.1045-1053
- [17] รัฐพล พงษ์พานิช (2546). "แบบจำลองคณิตศาสตร์ของกระบอกลูกสูบไฮดรอลิก" สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [18] Karam M. Elbayomy, Jiao Zongxia, Zhang Huaqing, "PID Controller Optimization by GA and Its Performances on the Electro-hydraulic Servo Control System" *Chinese Journal of Aeronautics* 21(2008) p.378-384
- [19] Danijel Pavkovic, Sinisa Polak, Davor Zorc, "PID controller auto-tuning based on process step response and damping optimum criterion" *ISA Transactions* 53 (2014) p.85–96
- [20] สุชาติ จันทร์จรมานิตย์ (2555). "ระบบควบคุม Control Systems" สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา suchart@mutl.ac.th



ภาคผนวก ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม



รูปที่ 1 หน้าต่างปรับค่าของโปรแกรม

1. ขั้นตอนการใช้โปรแกรม
 - 1.1 กดปุ่ม step หากต้องการ input เป็น step function
 - 1.2 กดปุ่มเลือก square หรือ sine หากต้องการ input เป็น square function หรือ sine function
 - 1.3 กดปุ่มเลือก LC หากต้องการใช้ feedback จาก load cell และกดปุ่ม PT หากต้องการใช้ feedback จาก pressure transducer
 - 1.4 ตั้งชื่อ และ folder ที่ต้องการบันทึกในช่อง filename
 - 1.5 กำหนดค่า frequency, offset, amplitude, G, kp, ki และ kd
 - 1.6 กดปุ่ม start เพื่อเริ่มการทำงาน

2. การทำงานของโปรแกรม

- สถานะไฟเขียว

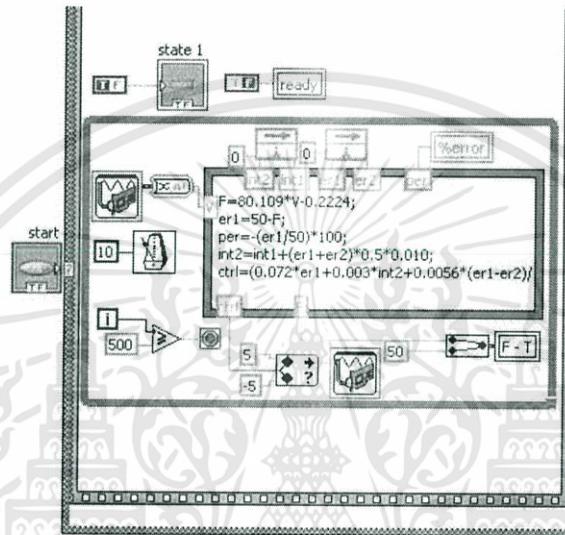
Ready คือ สามารถกดปุ่มstartเพื่อเริ่มการทำงานได้

State 1 คือ ลูกสูบจะเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่ง ศูนย์ตายบน จนกระทั่งได้แรงกดที่ 50kg

State 2 คือ ลูกสูบจะเคลื่อนที่จากตำแหน่ง50kg ไปหา inputที่เราตั้งไว้ เป็นเวลา 60 วินาที

State 3 คือ ลูกสูบจะชักกลับไปที่ตำแหน่งศูนย์ตายบนเหมือนเดิมไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในองค์กรเท่านั้น ไม่ควรนำออกเผยแพร่
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- End คือ จบการทำงาน และสั่งให้ voltage ที่วาล์วเป็นศูนย์ และหลังจากนั้น จะกลับสู่สถานะ ready อีกครั้งเพื่อเริ่มการทำงานในรอบต่อไป
- กราฟ F-T คือกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและเวลา จะมีการพล็อตกราฟทั้งหมด 2 เส้นคือ กราฟของ input และ output เปรียบเทียบกัน
 - gage F แสดงให้เห็นถึงแรงกด ณ ขณะนั้น
 - %error คือ ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่าง output และ input



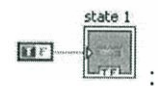
รูปที่ 2 code ที่ใช้ในการทำงานของstate1

จากรูปที่ 2 แสดง code ที่ใช้ในการทำงานของstate1

ใช้ปุ่ม start เพื่อให้ case structure เริ่มทำงาน ภายใน case structure ก็จะมี flat sequence ทั้งหมด 4 ช่องด้วยกัน คือ state1, state 2, state 3 และ state 4



ปุ่มเริ่มทำงาน



เปิดไฟ state 1



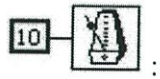
ปิดไฟ ready



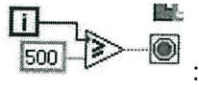
รับสัญญาณแรงดันไฟจากเซนเซอร์รับแรง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้จ่ายสัญญาณแรงดันไฟให้พร็อพอร์ซันน์วาล์ว กรุณาให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รอบ 10 มิลลิวินาทีเพื่อเริ่มการทำงานใหม่อีกครั้ง



ทำ 500 รอบ แล้วให้หยุดการทำงาน



แสดงผลเปรียบเทียบระหว่าง input และ output ในรูปแบบของกราฟ



กำหนดค่า สูงสุด และต่ำสุด



แสดงผลความคลาดเคลื่อนในรูปแบบของตัวเลข

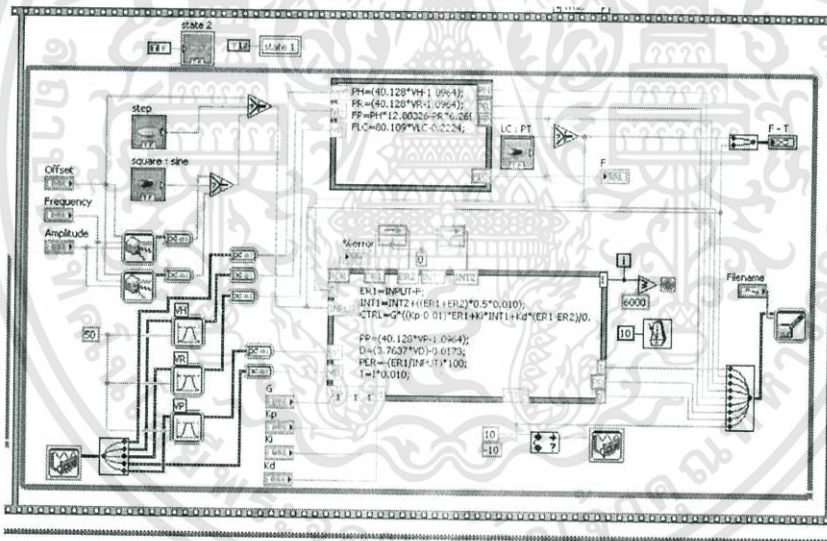


สัญญาณป้อนกลับ

```

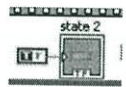
F=40.109*V+0.2224;
er1=50-F;
per=(er1/50)*100;
er2=er1+(er1+er2)*0.5*0.010;
ctrl=(0.072*er1+0.003*er2+0.0056*(er1+er2))
    
```

กล่องข้อความแสดงการคำนวณ



รูปที่ 3 code ที่ใช้ในการทำงานของ state2

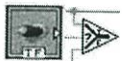
จากรูปที่ 2 แสดงcodeที่ใช้ในการทำงาน state2



: เปิดไฟ state2



: ปิดไฟ state1









: เลือก1ค่าจาก2ค่า

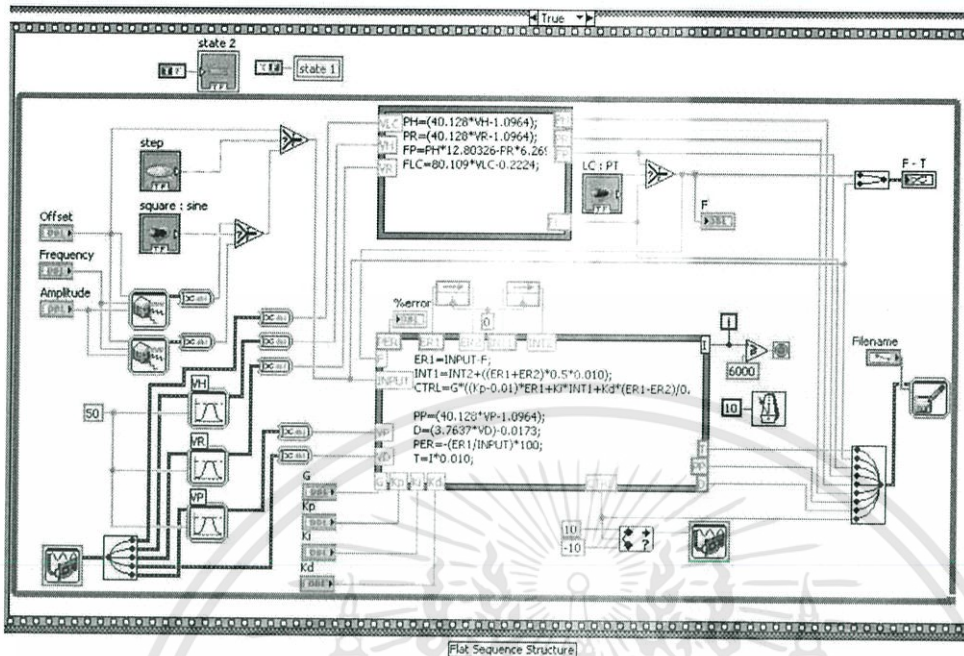


กำเนิดฟังก์ชันไซน์ หรือ ฟังก์ชันสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	:	กรองสัญญาณ
	:	บันทึกผล
	:	รับค่าเข้าในรูปแบบตัวเลข
	:	แสดงผลในรูปแบบตัวเลข
	:	เปลี่ยนชนิดของข้อมูล
	:	เปรียบเทียบมากกว่าหรือเท่ากับ
VH :		สัญญาณแรงดันไฟของเซนเซอร์วัดความดันด้าน head end
PH :		ความดันด้าน head end
VR :		สัญญาณแรงดันไฟของเซนเซอร์วัดความดันด้าน rod end
PR :		ความดันด้าน rod end
FP :		แรงที่คำนวณได้จากความแตกต่างของความดัน
VLC :		สัญญาณแรงดันไฟของเซนเซอร์รับแรง
FLC :		แรงที่วัดได้โดยเซนเซอร์รับแรง
INPUT :		สัญญาณขาเข้า
F :		สัญญาณป้อนกลับ
ER1 :		ค่าความคลาดเคลื่อนครั้งปัจจุบัน
ER2 :		ค่าความคลาดเคลื่อนครั้งก่อนหน้า
INT1 :		ค่าที่ได้จากการอินทิเกรตค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับเวลา ตั้งแต่เริ่มถึงปัจจุบัน
INT2 :		ค่าที่ได้จากการอินทิเกรตค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับเวลา ตั้งแต่เริ่มถึงครั้งก่อนหน้า
CTRL :		สัญญาณควบคุม
G :		คือค่าเกนที่จะปรับ k_p k_i k_d ในอัตราส่วนเท่าๆกัน
K_p :		อัตราขยายสัดส่วน
K_i :		อัตราขยายปริพันธ์
K_d :		อัตราขยายอนุพันธ์
VP :		สัญญาณแรงดันไฟของเซนเซอร์วัดความดันด้านทางออกปั๊ม
PP :		ความดันด้านทางออกปั๊ม
VD :		สัญญาณแรงดันไฟของ เซนเซอร์วัดระยะทาง
D :		ระยะทางที่กระบอกสูบเคลื่อนที่
PER :		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน
I :		รอบที่

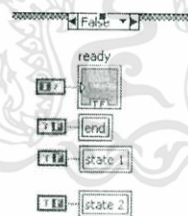
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 code ที่ใช้ในการทำงานของstate3 และ state 4

จากรูปที่ 3 แสดงcodeที่ใช้ในstate 3 และ state 4

ใน state3 จะจ่ายไฟ -5V ให้กับพรอพอร์ชันนัลแล้วเป็นเวลา3วินาที เพื่อให้กล่องสุบซัคกลับส่วนใน state4 จะจ่ายไฟ 0V ให้พรอพอร์ชันนัลแล้วเป็นเวลา1วินาที เพื่อให้กล่องสุบหยุดนิ่ง



รูปที่ 4 code ที่ใช้หลังจากการทำงานเสร็จสิ้น

จากรูปที่ 4 แสดงcode ที่ใช้หลังจากการทำงานเสร็จสิ้น

ไฟทุกดวงจะถูกปิดลงและไฟ ready จะถูกเปิดเพื่อแสดงถึงความพร้อมในการทำงานครั้งต่อไป



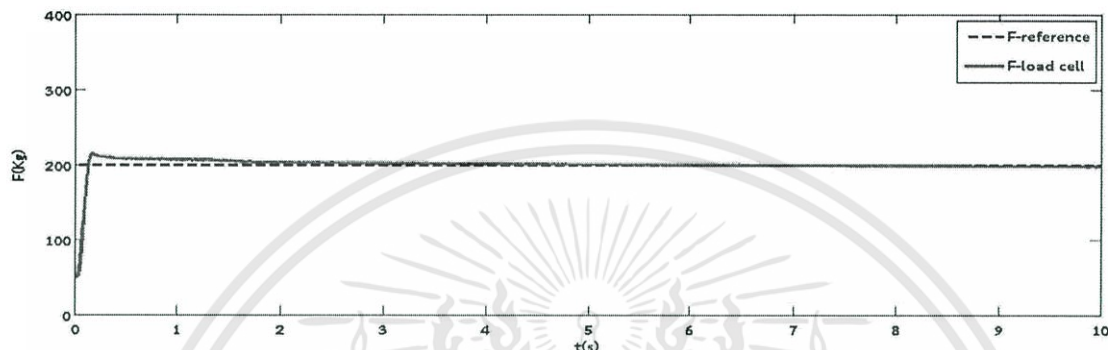
ภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมแรงของกระบอกลูกสูบไฮดรอลิกที่ขนาดของแรงต่างๆกันดังนี้ โดยการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ การควบคุมระบบโดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง และสัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดัน ซึ่งทั้ง 2 กรณีจะใช้ตัวควบคุมเดียวกัน คือ $K_p=0.07$, $K_i=0.006$ และ $K_d=0.003$ ผลตอบสนองของระบบมีดังต่อไปนี้

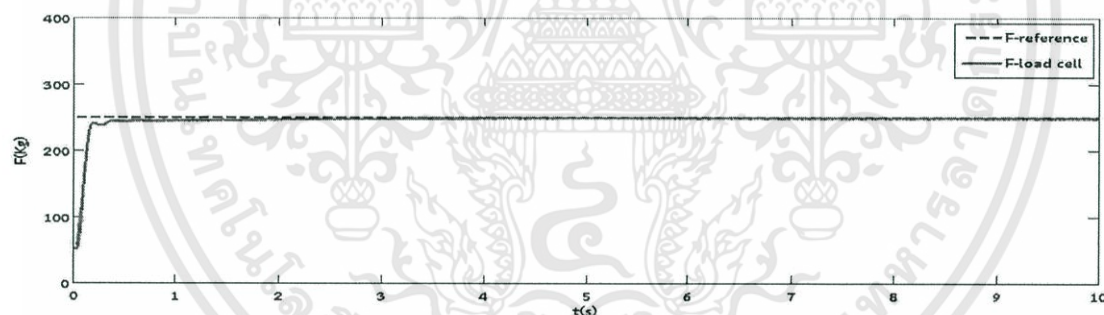
สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง

ฟังก์ชันบันได (Step signal) ที่ 200 กิโลกรัม



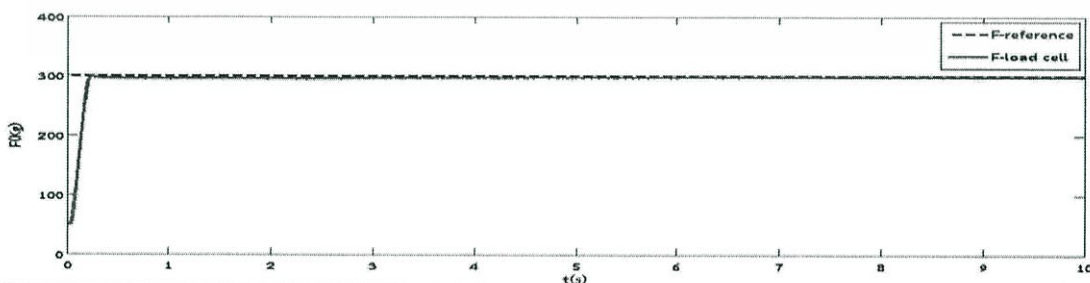
รูปที่ 1 กราฟฟังก์ชันบันได (Step signal) ที่ 200 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง

ฟังก์ชันบันได (Step signal) ที่ 250 กิโลกรัม



รูปที่ 2 กราฟฟังก์ชันบันได (Step signal) ที่ 250 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง

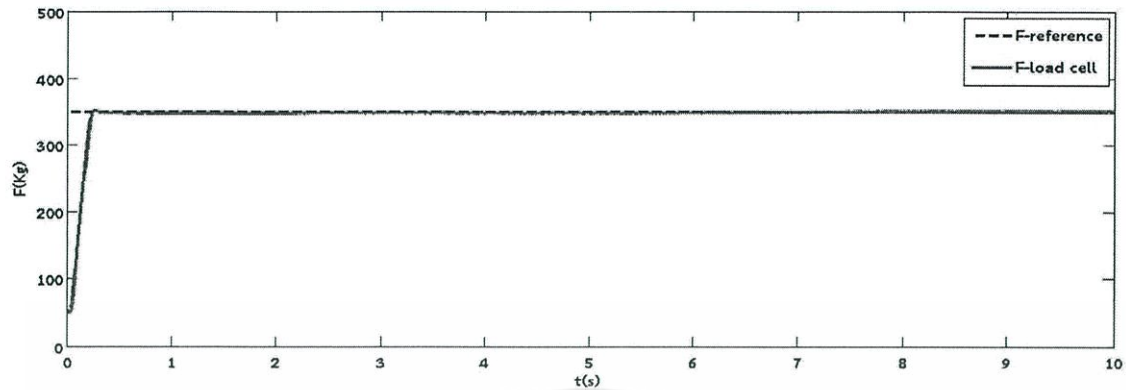
ฟังก์ชันบันได (Step signal) ที่ 300 กิโลกรัม



รูปที่ 3 กราฟฟังก์ชันบันได (Step signal) ที่ 300 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง

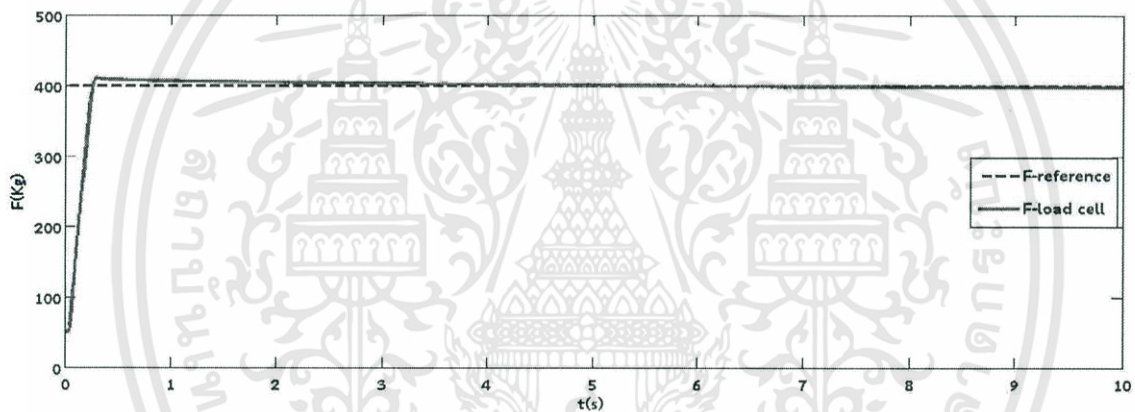
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชันบันได (Step signal) ที่ 350 กิโลกรัม



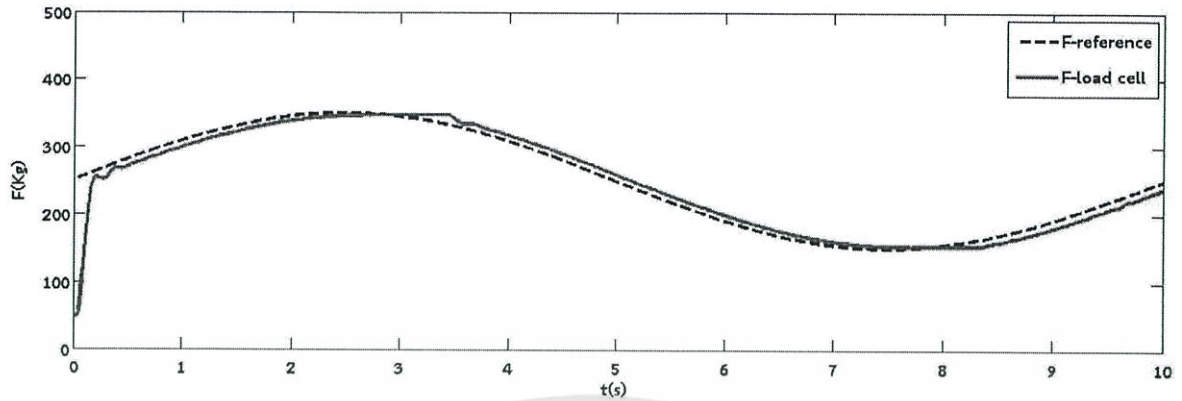
รูปที่ 4 กราฟฟังก์ชันบันได (Step signal) ที่ 350 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง

ฟังก์ชันบันได (Step signal) ที่ 400 กิโลกรัม



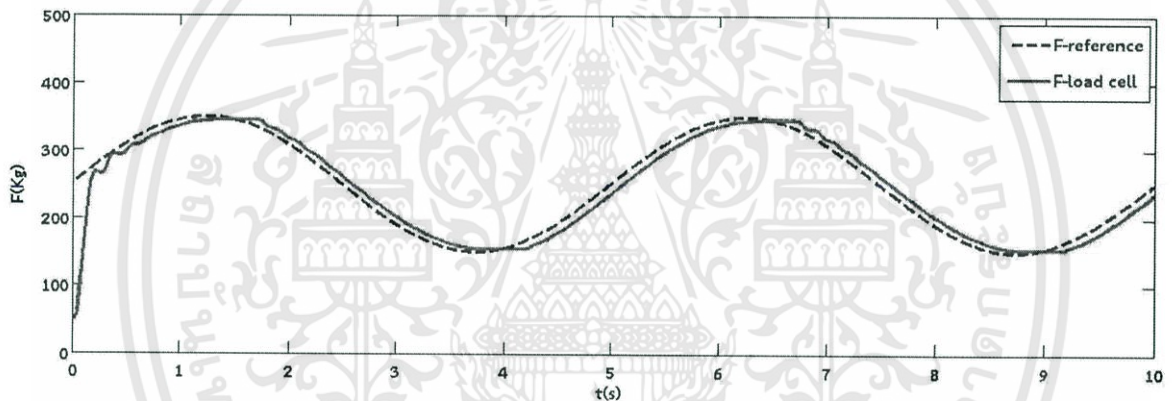
รูปที่ 5 กราฟฟังก์ชันบันได (Step signal) ที่ 400 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง

ฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 250 กิโลกรัม ความถี่ 0.1 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม



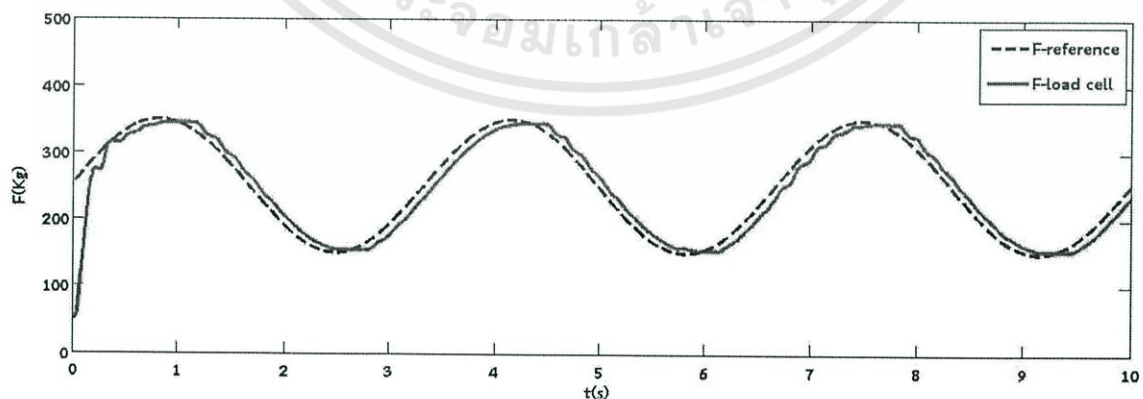
รูปที่ 6 กราฟฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 250 กิโลกรัม ความถี่ 0.1 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง

ฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 250 กิโลกรัม ความถี่ 0.2 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม



รูปที่ 7 กราฟฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 250 กิโลกรัม ความถี่ 0.2 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง

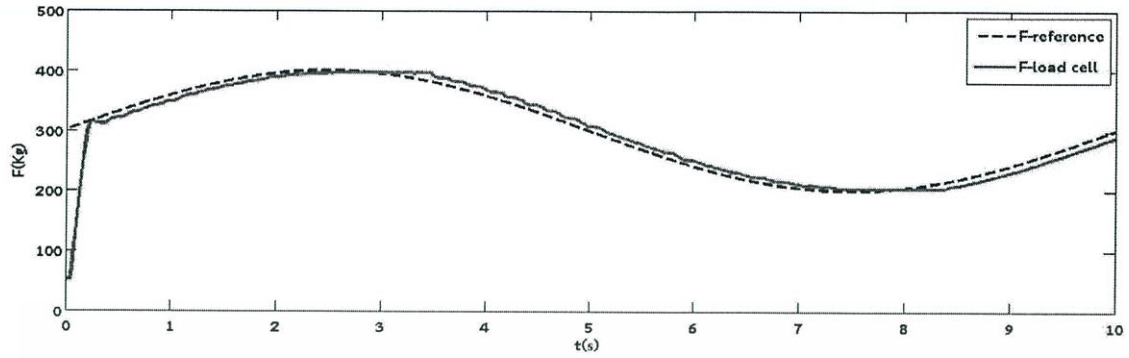
ฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 250 กิโลกรัม ความถี่ 0.3 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม



รูปที่ 8 กราฟฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 250 กิโลกรัม ความถี่ 0.3 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง

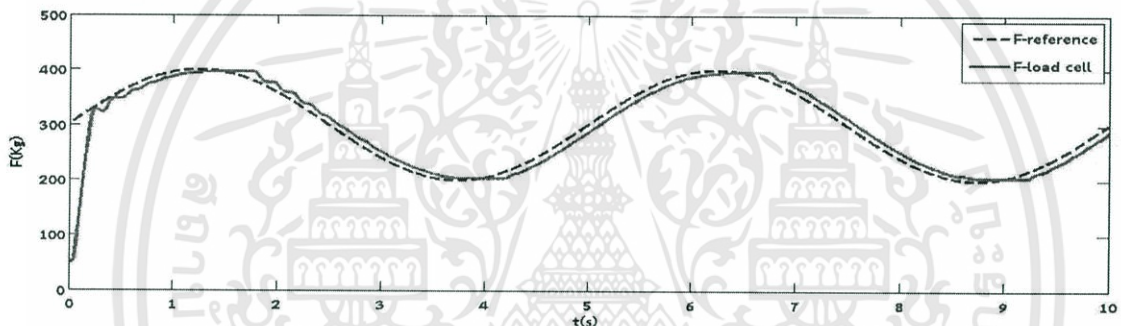
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 300 กิโลกรัม ความถี่ 0.1 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม



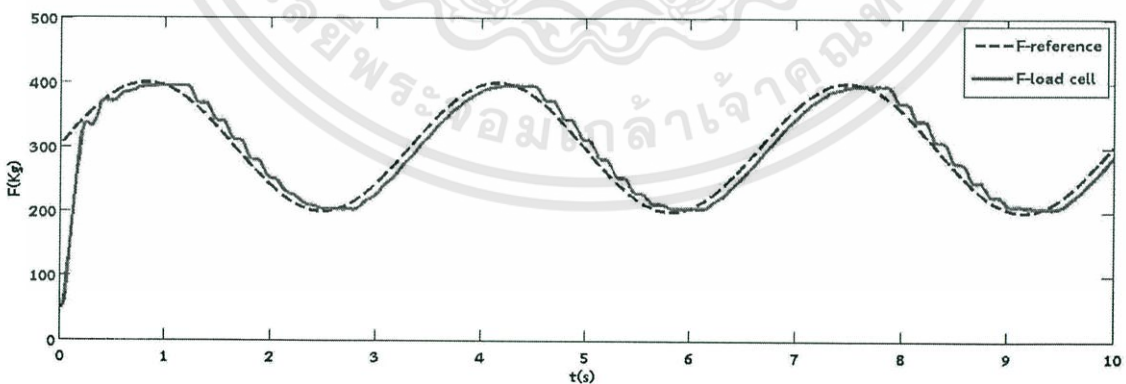
รูปที่ 9 กราฟฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 300 กิโลกรัม ความถี่ 0.1 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง

ฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 300 กิโลกรัม ความถี่ 0.2 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม



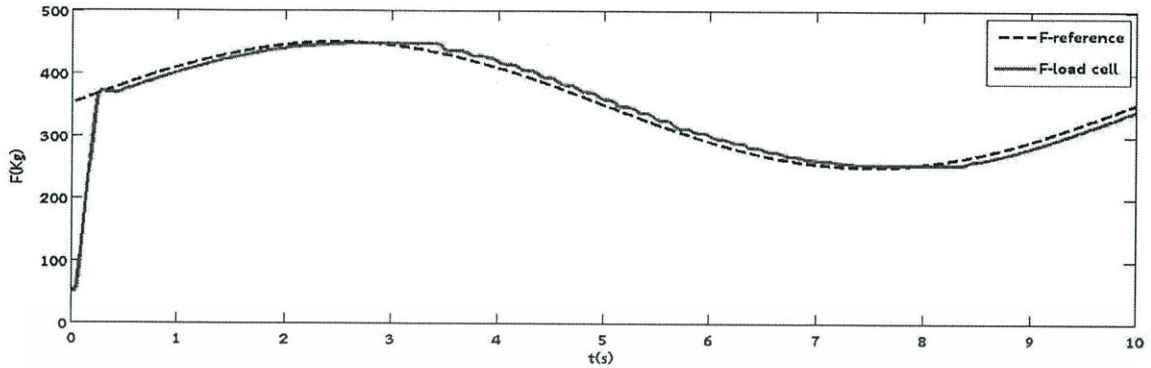
รูปที่ 9 กราฟฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 300 กิโลกรัม ความถี่ 0.2 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง

ฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 300 กิโลกรัม ความถี่ 0.3 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม



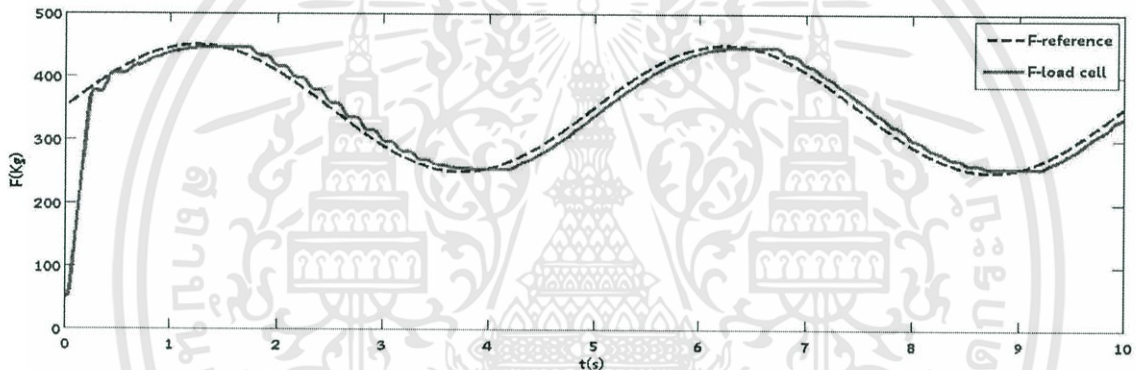
รูปที่ 10 กราฟฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 300 กิโลกรัม ความถี่ 0.3 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง

ฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 350 กิโลกรัม ความถี่ 0.1 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม



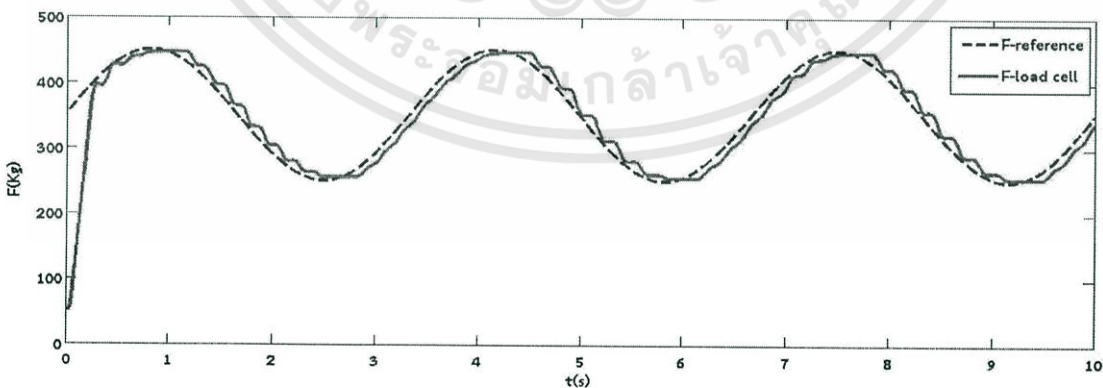
รูปที่ 11 กราฟฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 350 กิโลกรัม ความถี่ 0.1 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง

ฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 350 กิโลกรัม ความถี่ 0.2 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม



รูปที่ 12 กราฟฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 350 กิโลกรัม ความถี่ 0.2 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง

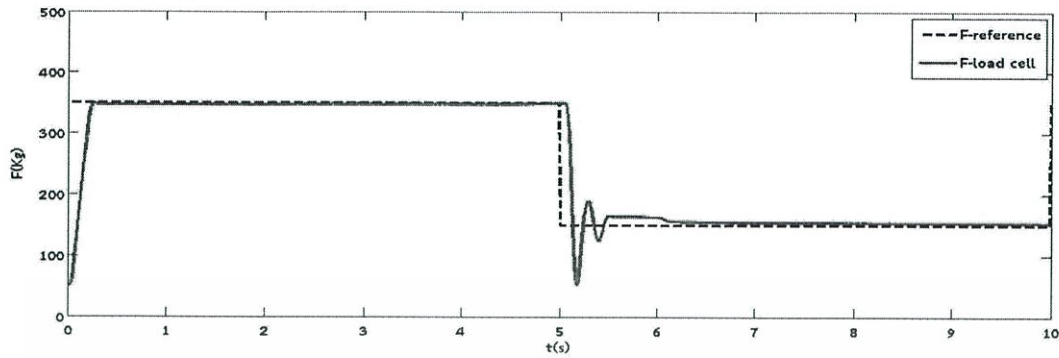
ฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 350 กิโลกรัม ความถี่ 0.3 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม



รูปที่ 13 กราฟฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 350 กิโลกรัม ความถี่ 0.3 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง

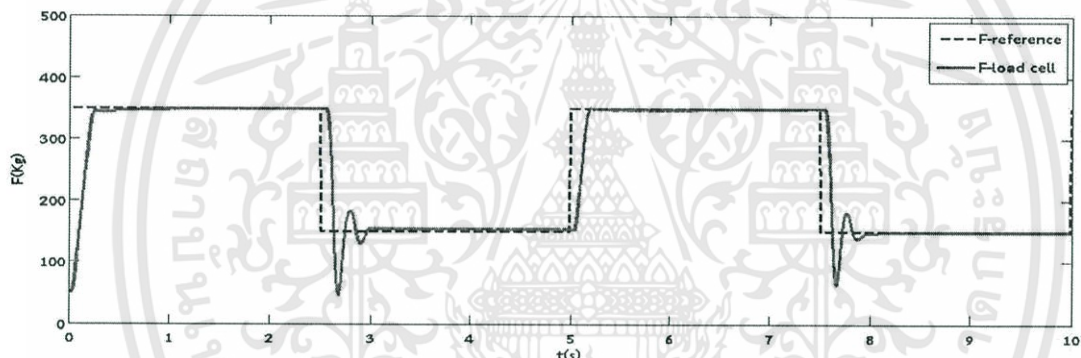
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 250 กิโลกรัม ความถี่ 0.1 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม



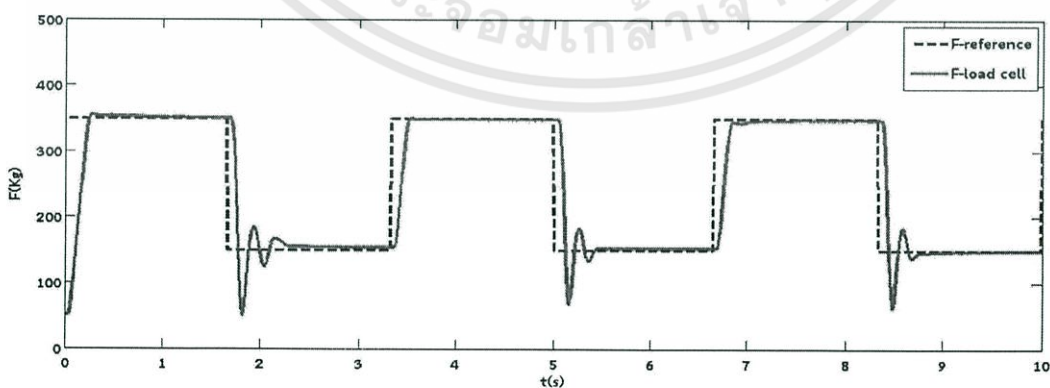
รูปที่ 14 กราฟฟังก์ชันสี่เหลี่ยม ที่ระยะเยื้องศูนย์ 250 กิโลกรัม ความถี่ 0.1 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง

ฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 250 กิโลกรัม ความถี่ 0.2 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม



รูปที่ 15 กราฟฟังก์ชันสี่เหลี่ยม ที่ระยะเยื้องศูนย์ 250 กิโลกรัม ความถี่ 0.2 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง

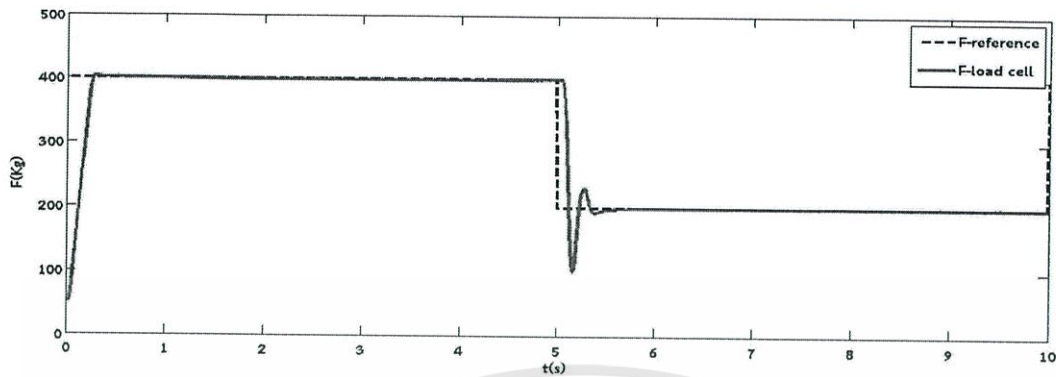
ฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 250 กิโลกรัม ความถี่ 0.3 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม



รูปที่ 16 กราฟฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 250 กิโลกรัม ความถี่ 0.3 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 300 กิโลกรัม ความถี่ 0.1 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม



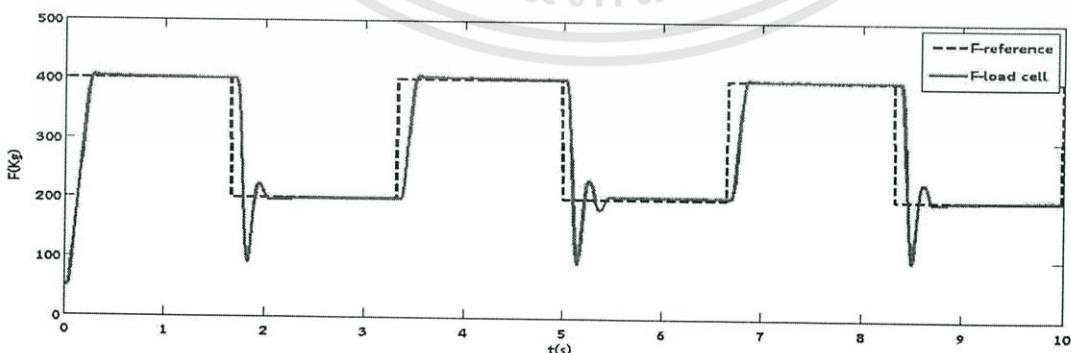
รูปที่ 17 กราฟฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 300 กิโลกรัม ความถี่ 0.1 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง

ฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 300 กิโลกรัม ความถี่ 0.2 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม



รูปที่ 18 กราฟฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 300 กิโลกรัม ความถี่ 0.2 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง

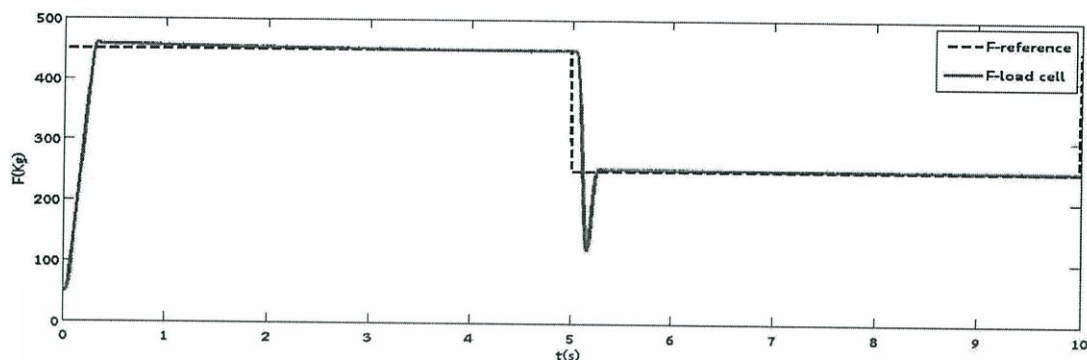
ฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 300 กิโลกรัม ความถี่ 0.3 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม



รูปที่ 19 กราฟฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 300 กิโลกรัม ความถี่ 0.3 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง

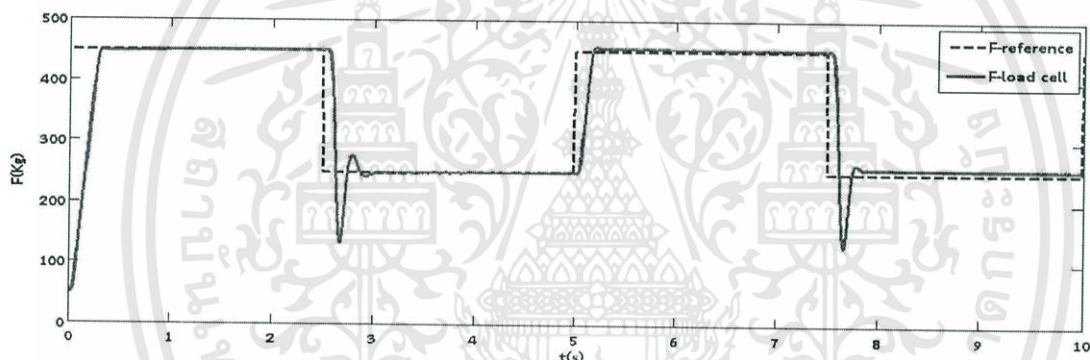
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 350 กิโลกรัม ความถี่ 0.1 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม



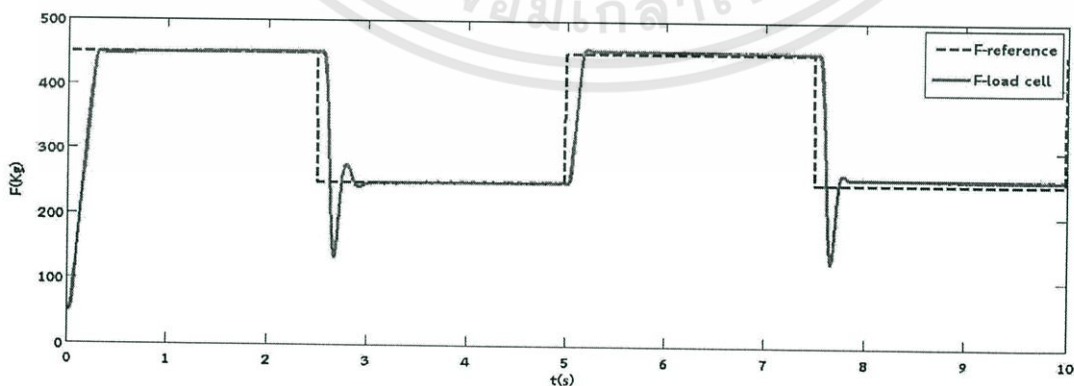
รูปที่ 20 กราฟฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 350 กิโลกรัม ความถี่ 0.1 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง

ฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 350 กิโลกรัม ความถี่ 0.2 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม



รูปที่ 21 กราฟฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 350 กิโลกรัม ความถี่ 0.2 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง

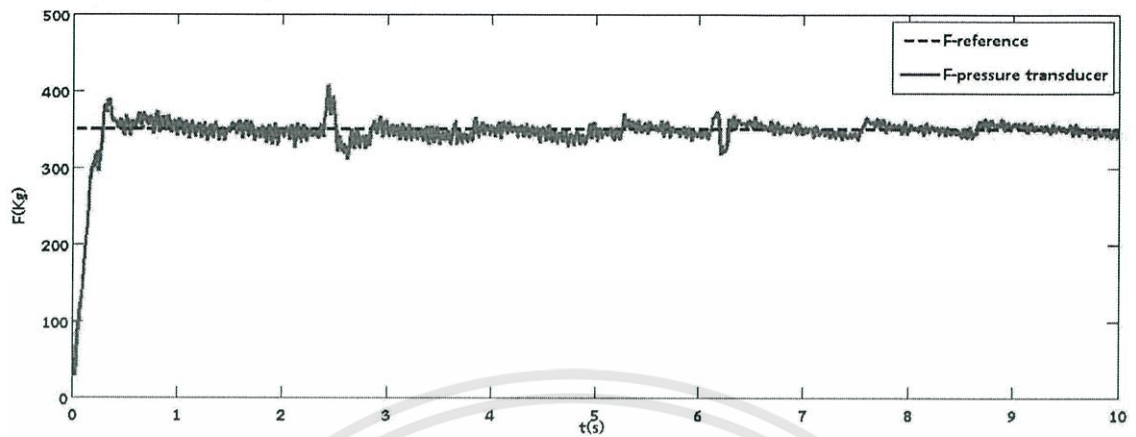
ฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 350 กิโลกรัม ความถี่ 0.3 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม



รูปที่ 22 กราฟฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 350 กิโลกรัม ความถี่ 0.3 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์รับแรง

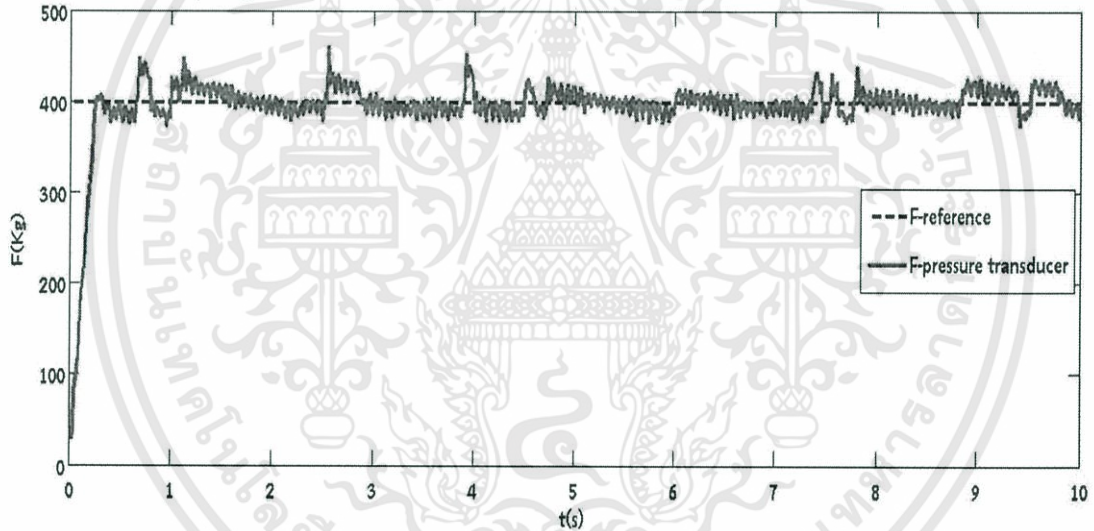
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชันบันได (Step signal) ที่ 350 กิโลกรัม



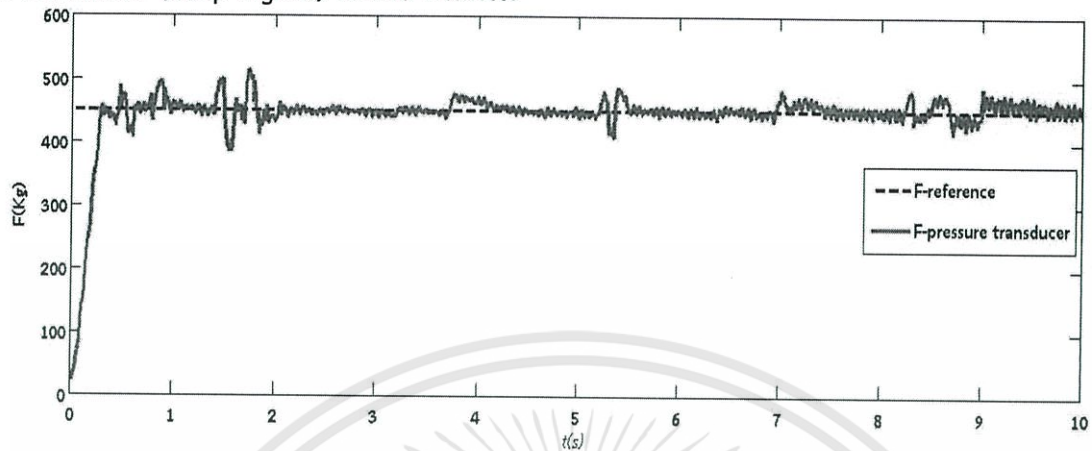
รูปที่ 26 กราฟฟังก์ชันบันได (Step signal) ที่ 350 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดัน

ฟังก์ชันบันได (Step signal) ที่ 400 กิโลกรัม



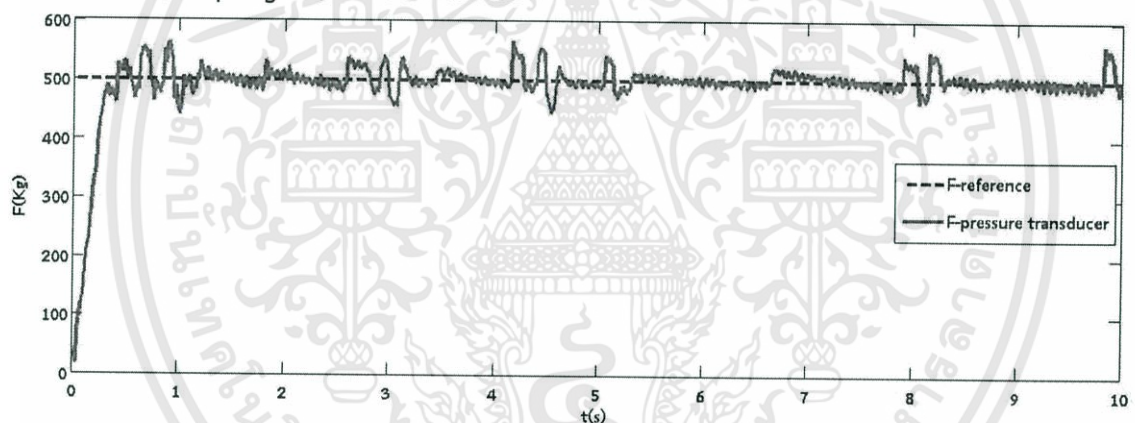
รูปที่ 27 กราฟฟังก์ชันบันได (Step signal) ที่ 400 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดัน

ฟังก์ชันบันได (Step signal) ที่ 450 กิโลกรัม



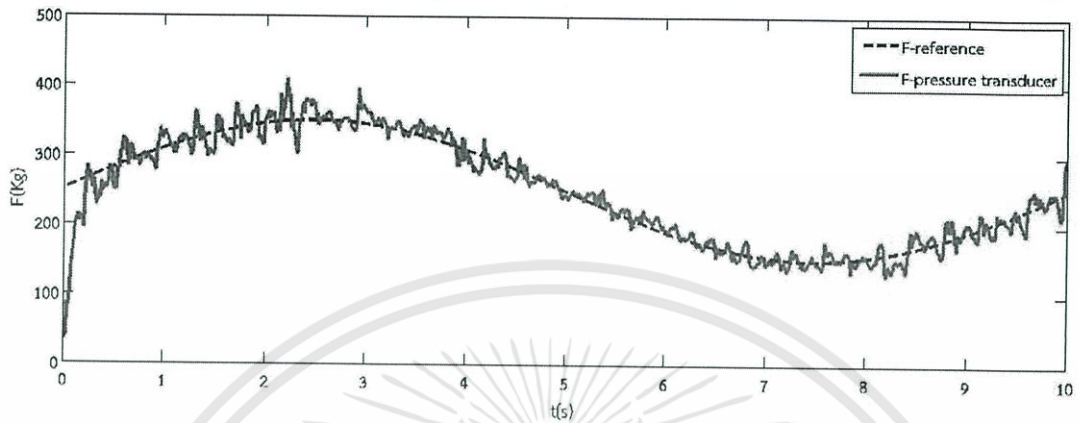
รูปที่ 28 กราฟฟังก์ชันบันได (Step signal) ที่ 450 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดัน

ฟังก์ชันบันได (Step signal) ที่ 500 กิโลกรัม



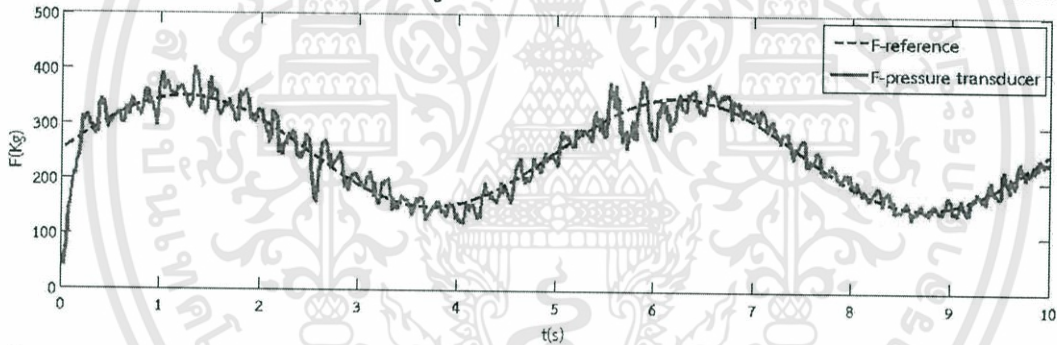
รูปที่ 29 กราฟฟังก์ชันบันได (Step signal) ที่ 500 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดัน

ฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 250 กิโลกรัม ความถี่ 0.1 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม



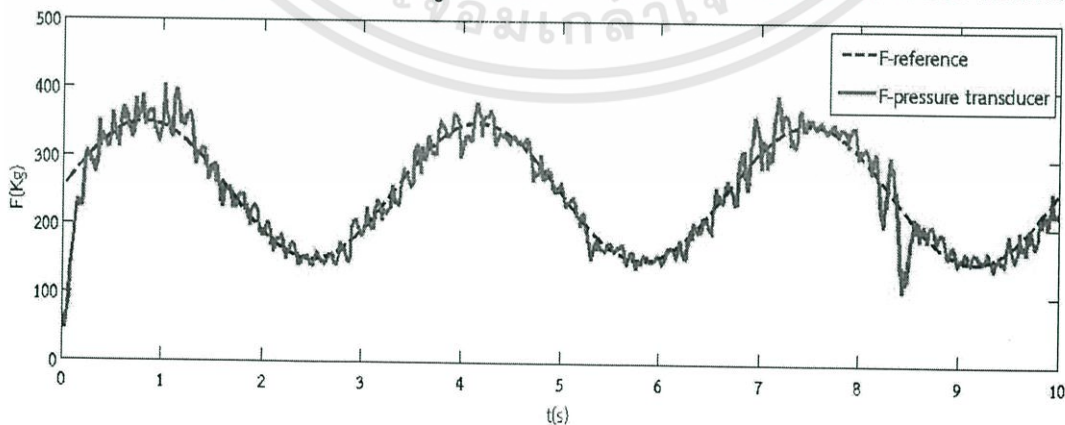
รูปที่ 30 กราฟฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) ที่ 250 กิโลกรัม ความถี่ 0.1 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดัน

ฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 250 กิโลกรัม ความถี่ 0.2 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม



รูปที่ 31 กราฟฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) ที่ 250 กิโลกรัม ความถี่ 0.2 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดัน

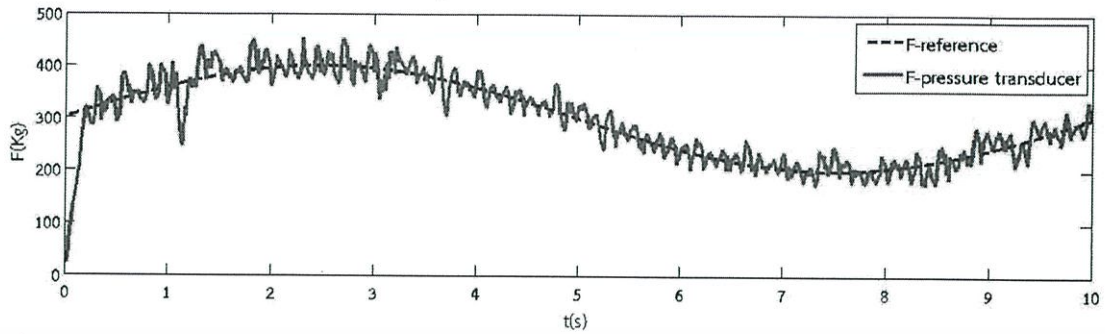
ฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 250 กิโลกรัม ความถี่ 0.3 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม



รูปที่ 32 กราฟฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) ที่ 250 กิโลกรัม ความถี่ 0.3 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดัน

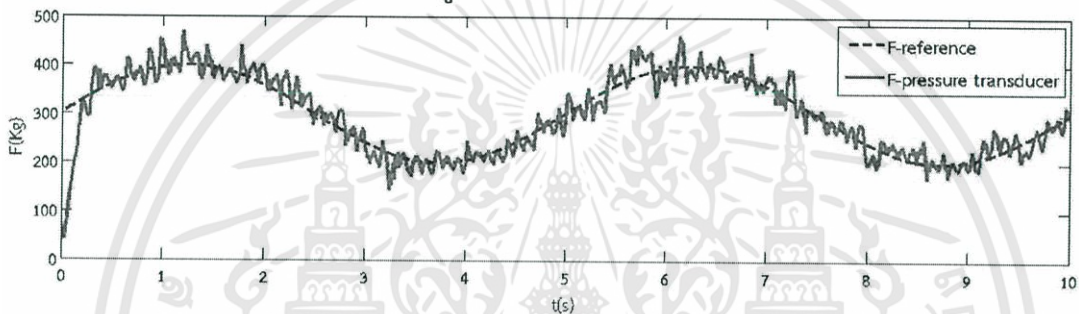
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 300 กิโลกรัม ความถี่ 0.1 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม



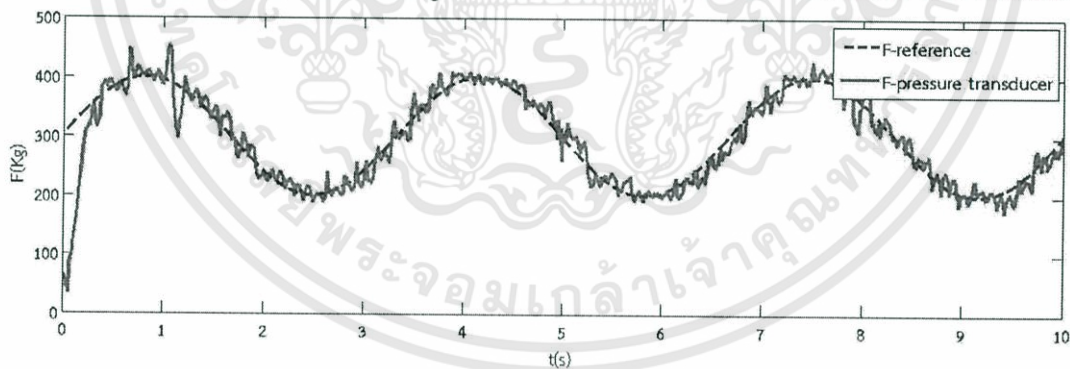
รูปที่ 33 กราฟฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) ที่ 300 กิโลกรัม ความถี่ 0.1 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดัน

ฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 300 กิโลกรัม ความถี่ 0.2 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม



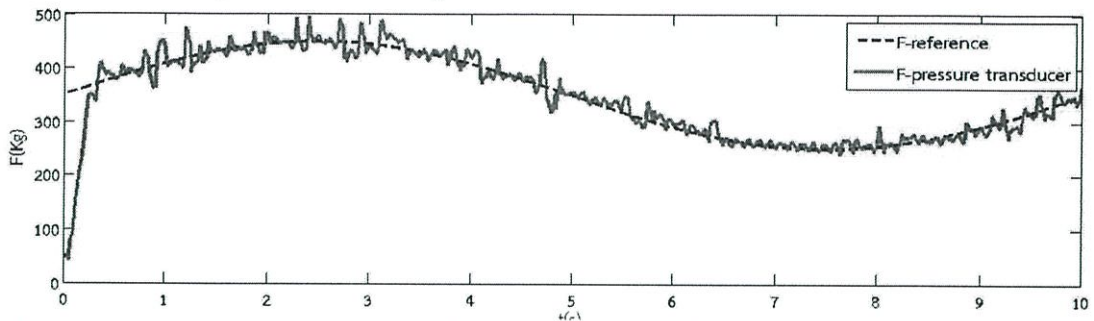
รูปที่ 34 กราฟฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) ที่ 300 กิโลกรัม ความถี่ 0.2 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดัน

ฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 300 กิโลกรัม ความถี่ 0.3 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม



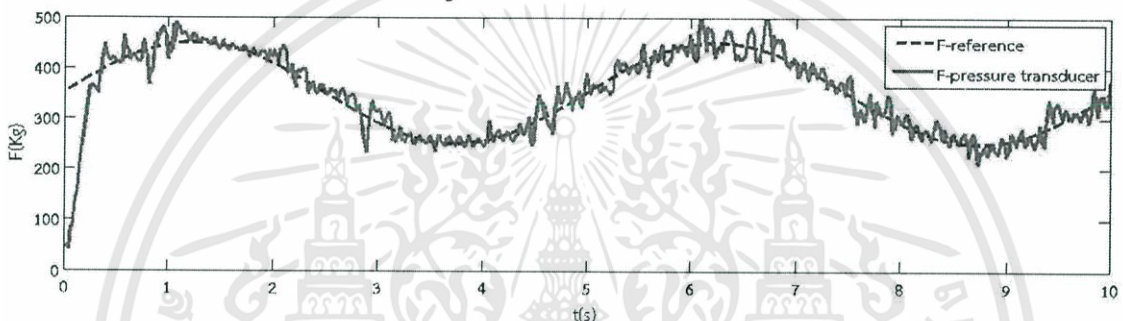
รูปที่ 35 กราฟฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) ที่ 300 กิโลกรัม ความถี่ 0.3 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดัน

ฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 350 กิโลกรัม ความถี่ 0.1 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม



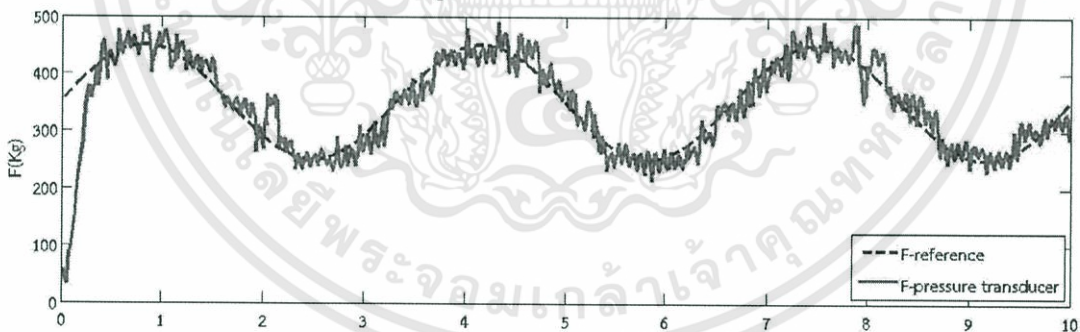
รูปที่ 36 กราฟฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) ที่ 350 กิโลกรัม ความถี่ 0.1 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดัน

ฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 350 กิโลกรัม ความถี่ 0.2 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม



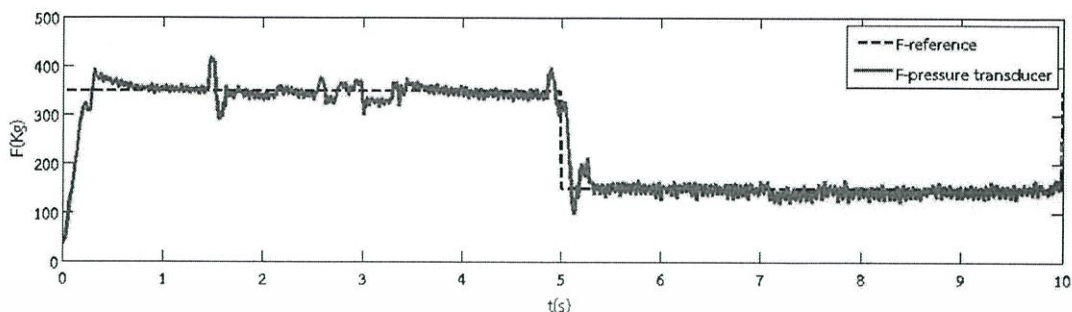
รูปที่ 37 กราฟฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) ที่ 350 กิโลกรัม ความถี่ 0.2 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดัน

ฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 350 กิโลกรัม ความถี่ 0.3 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม



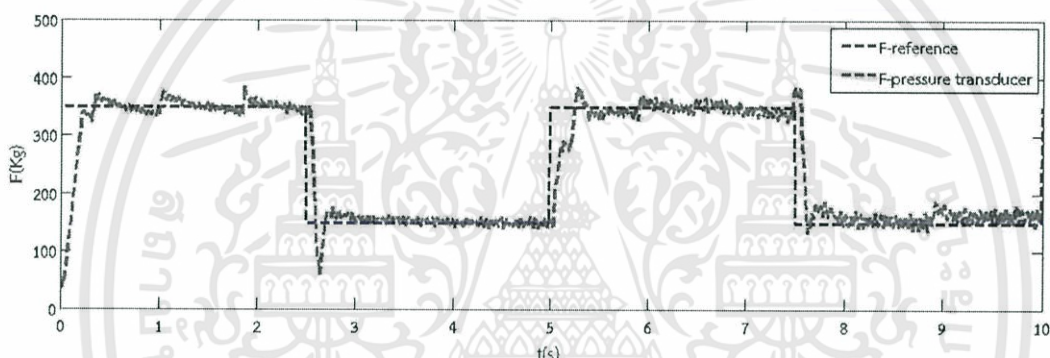
รูปที่ 38 กราฟฟังก์ชันไซน์ (Sine signal) ที่ 350 กิโลกรัม ความถี่ 0.3 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดัน

ฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 250 กิโลกรัม ความถี่ 0.1 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม



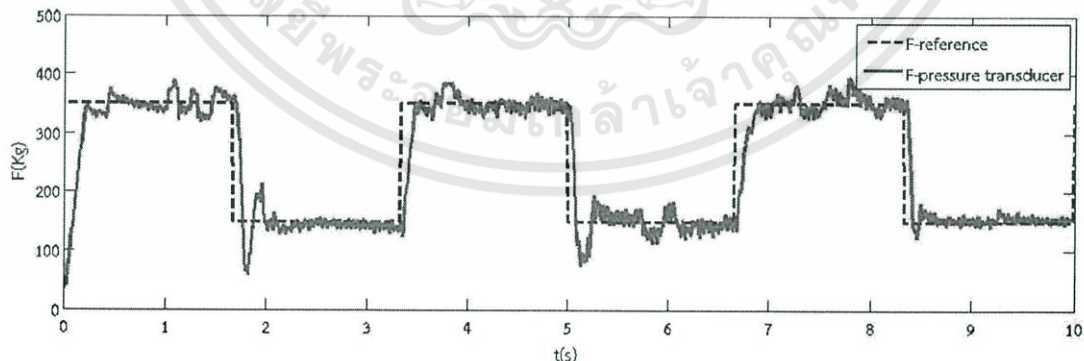
รูปที่ 39 กราฟฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ที่ 250 กิโลกรัม ความถี่ 0.1 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดัน

ฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 250 กิโลกรัม ความถี่ 0.2 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม



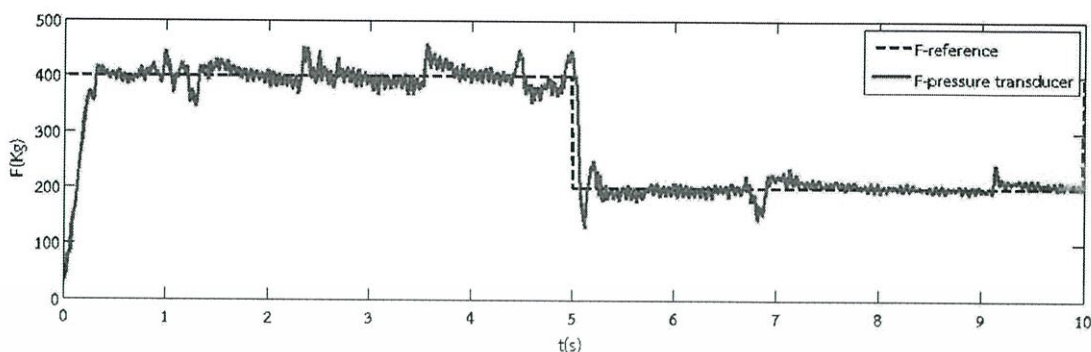
รูปที่ 40 กราฟฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ที่ 250 กิโลกรัม ความถี่ 0.2 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดัน

ฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 250 กิโลกรัม ความถี่ 0.3 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม



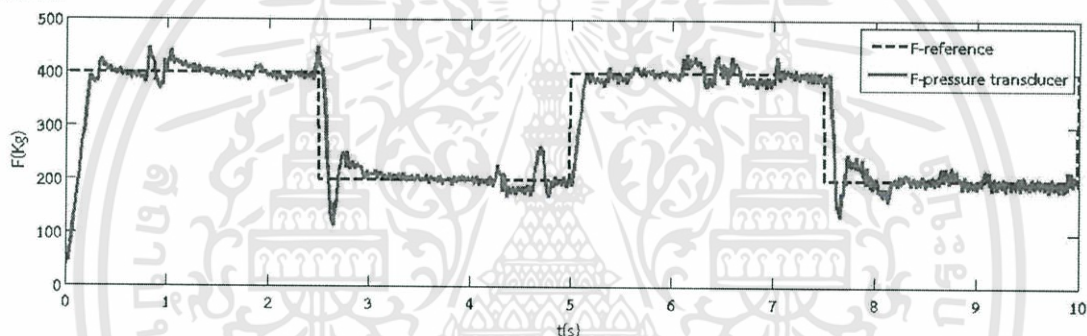
รูปที่ 41 กราฟฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ที่ 250 กิโลกรัม ความถี่ 0.3 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดัน

ฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 300 กิโลกรัม ความถี่ 0.1 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม



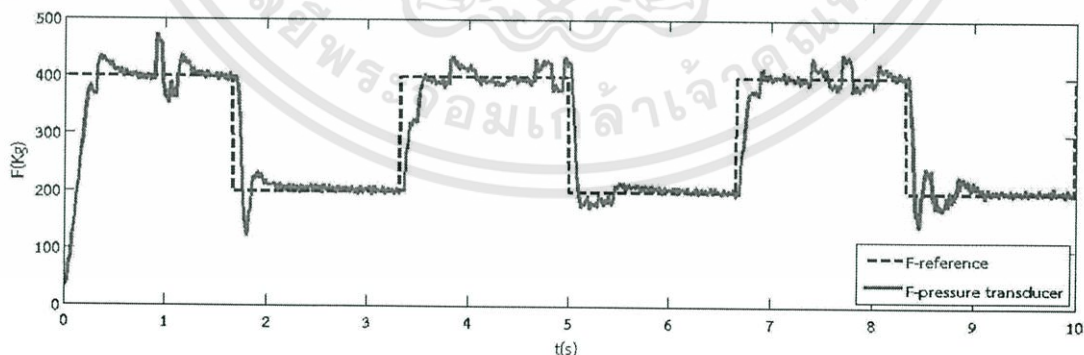
รูปที่ 42 กราฟฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ที่ 300 กิโลกรัม ความถี่ 0.1 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดัน

ฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 300 กิโลกรัม ความถี่ 0.2 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม



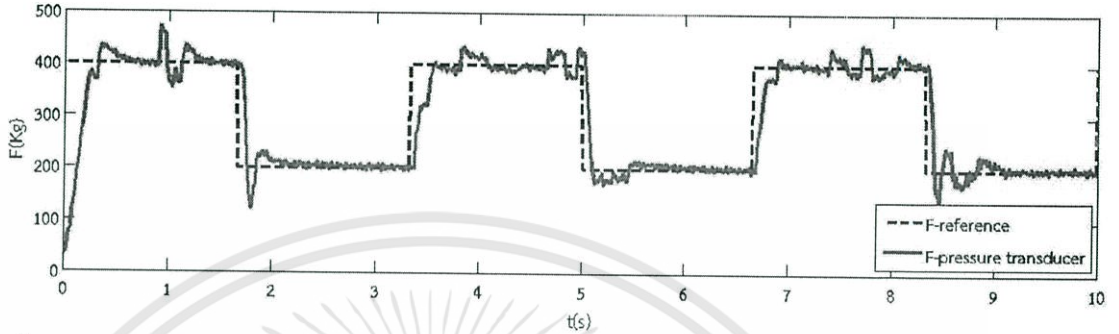
รูปที่ 43 กราฟฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ที่ 300 กิโลกรัม ความถี่ 0.2 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดัน

ฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 300 กิโลกรัม ความถี่ 0.3 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม



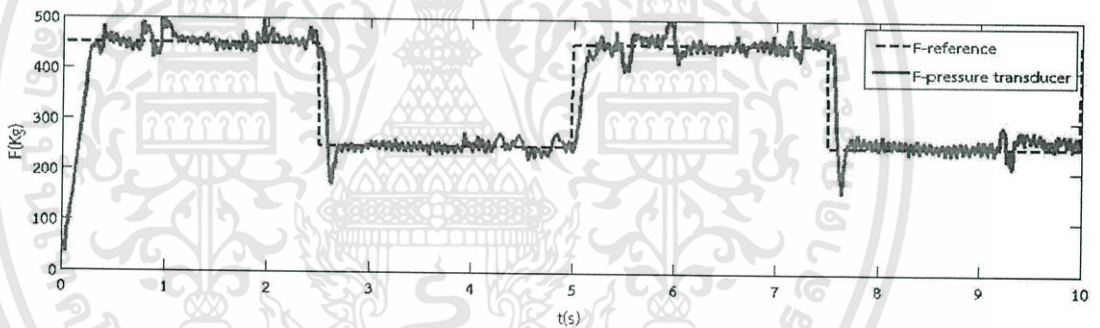
รูปที่ 44 กราฟฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ที่ 300 กิโลกรัม ความถี่ 0.3 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดัน

ฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 350 กิโลกรัม ความถี่ 0.1 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม



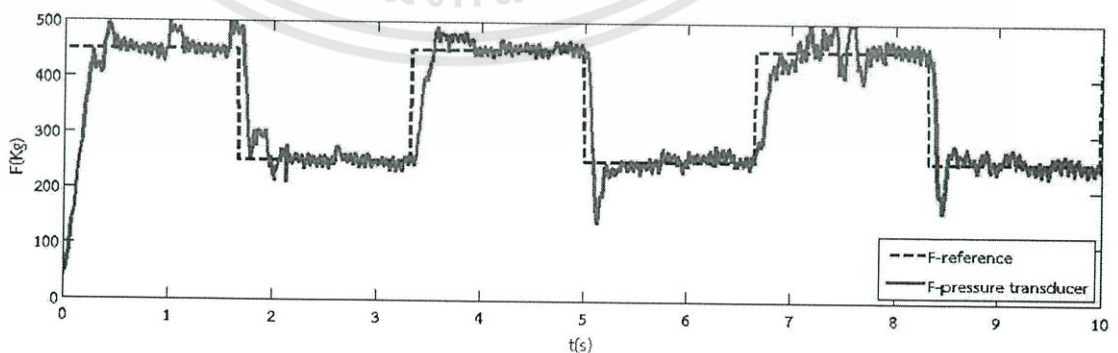
รูปที่ 45 กราฟฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ที่ 350 กิโลกรัม ความถี่ 0.1 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดัน

ฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 350 กิโลกรัม ความถี่ 0.2 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม



รูปที่ 46 กราฟฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ที่ 350 กิโลกรัม ความถี่ 0.2 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดัน

ฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 350 กิโลกรัม ความถี่ 0.3 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม



รูปที่ 47 กราฟฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Square signal) ที่ 350 กิโลกรัม ความถี่ 0.3 Hz. ขนาด 100 กิโลกรัม โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้