

การประมาณแรงเสียดทานของกระบอกสูบไฮดรอลิกด้วยการใช้
แบบจำลองลูเกอร์
Estimation of Hydraulic Cylinder Friction using LuGre Model



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การประมาณแรงเสียดทานของกระบอกสูบไฮดรอลิคด้วยการใช้
แบบจำลองลูเกอร์

Estimation of Hydraulic Cylinder Friction using LuGre Model



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Estimation of Hydraulic Cylinder Friction using LuGre Model



CHAYAKORN PHASONGWIWAT

PATAWEE CHANKAEW

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEER IN MECHANICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUL'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2560

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การประมาณแรงเสียดทานของกระบอกสูบไฮดรอลิกด้วยการใช้แบบจำลองลูเกอร์

Estimation of Hydraulic Cylinder Friction using LuGre Model

ผู้จัดทำ

- | | | | |
|-------------|----------------|--------------|----------|
| 1. นายชยากร | ประสงศ์วิวัฒน์ | รหัสประจำตัว | 57010261 |
| 2. นายปฐวี | จันทร์แก้ว | รหัสประจำตัว | 57010725 |



(ผศ.ดร.อนันต์ พิณโสภณ)

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประมาณแรงเสียดทานของกระบอกสูบไฮดรอลิกด้วยการใช้แบบจำลองลูเกอร์

นายชยากร ประสงค์วิวัฒน์	57010261
นายปฐวี จันท์แก้ว	57010725
ผศ.ดร.อุนนต์ ภิญโญภน	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2560	

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาต่อจากโครงการของ นายวิโรจน์ ตรีมงคลโชค และ นายศรันธ กุตัน ซึ่งได้ทำการศึกษาระบบควบคุมแรงในกระบอกสูบควบคู่กับการชดเชยแรงเสียดทาน โดยมีการประมาณค่าแรงเสียดทานจากแบบจำลองลูเกอร์โดยค่าแรงเสียดทานจากแบบจำลองนี้ได้มา ความเร็วจากอนุพันธ์เชิงตัวเลขของสัญญาณจากเซนเซอร์วัดระยะทาง ทำให้ค่าความเร็วที่ได้ไม่เสถียร และชดเชยแรงได้ไม่เท่าที่ควร ผู้จัดทำได้เห็นถึงปัญหาในส่วนนี้ จึงทำการศึกษาและพัฒนาโดยการนำ ตัวกรองคาลมานซึ่งเป็นอัลกอริธึมที่ช่วยให้ค่าความเร็วที่ได้มีความแม่นยำมากขึ้น ทำให้สามารถ ประมาณค่าแรงเสียดทานได้แม่นยำมากขึ้น ส่งผลให้การควบคุมแรงในกระบอกสูบมีประสิทธิภาพ สูงขึ้น โดยควบคุมการส่งการผ่านโปรแกรม LabVIEW ในการทดลองได้ทำการทดลองนำแรงเสียดทาน จากแบบจำลองลูเกอร์ที่หาได้ไปใช้ร่วมกับระบบควบคุมพีไอดีในการควบคุมแรง ค่าเฉลี่ยของรากที่สองของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัวมีผลการทดลองเป็น 196.13N, 215.67N และ 233.54N สำหรับแรงแบบ sine wave ที่แรงอ้างอิง 1000N, 2000N และ 3000N ตามลำดับ ในขณะที่ค่าเฉลี่ยของรากที่สองของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัวจากการใช้ตัวกรองคาลมานในการช่วยควบคุมแรงมีผลการทดลองเป็น 101.20N, 133.34N และ 212.83N ค่าเฉลี่ยของรากที่สองของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัวจากการควบคุมแรงมีผลการทดลองเป็น 265.10N, 571.73N และ 868.14N สำหรับแรงแบบ square wave ที่แรงอ้างอิง 1000N, 2000N และ 3000N ตามลำดับ และค่าเฉลี่ยของรากที่สองของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัวจากการใช้ตัวกรองคาลมานในการช่วยควบคุมแรงมีผลการทดลองเป็น 255.17N, 443.34N และ 601.80N ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าการทดลองควบคุมแรงโดยระบบควบคุมพีไอดีควบคู่กับการชดเชยแรงเสียดทานที่ใช้ตัวกรองคาลมานมีประสิทธิภาพในการสั่งการมากกว่าในทุกๆ การทดลอง

Estimation of Hydraulic Cylinder Friction using LuGre Model

Chayakorn Phasongwiwat 57010261

Patawee Chankaew 57010725

Assf. Prof. Dr. Unnat Pinsopon

Year 2017

Abstract

This project is the study and improvement of the existing project which was conducted by Mr. Wirot Treemongkolchok and Mr. Saran Kutan. At that time, They studied the system which was used to control the force within the cylinder and also the friction was compensated. The LuGre model was used to estimate the friction in the cylinder. The friction value was estimated from the velocity which was calculated from the derivative equation of piston's displacement. According to previous study, the calculated value of the velocity was unstable so the compensation of the force was improper. Therefore, the aim of this present study is to apply the Kalman filter algorithm to improve the accuracy of the calculated velocity value and subsequently in the estimation of friction. All devices in this experiment were controlled via package software "LabVIEW". The estimated friction value from LuGre model was used as the input of the PID control system to control the force in cylinder. From the experiment without applying Kalman filter, it was found that the root mean square errors of the controlled force with friction compensation were 196.13N, 215.67N and 233.54N. These results were referenced with the sine wave force of 1000N, 2000N and 3000N respectively. And the results were 265.10N, 571.13N and 868.14N for square wave force of 1000N, 2000N and 3000N. After Kalman filter applied, it was found that the root mean square errors from the experiment were reduced to 101.20N, 133.34N and 212.83N respectively for sine wave force and 255.17N, 443.34N and 601.80N respectively for square wave force. Therefore, it can be concluded that, with the compensation of friction, the PID control system operating with *Kalman filter* have more efficient to control the force in the cylinder in every experiments.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือของ ผศ.ดร.อนุรัตน์ พิณโสภณ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆอันเป็นประโยชน์ในการทำวิจัย อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานอีกด้วย ขอขอบพระคุณ นายวีระพงษ์ จันท์บัว และ นายทศพล แจ่มน้อย ที่คอยให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยและให้คำแนะนำต่างๆทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ท้ายที่สุดนี้ต้องขอกราบขอบพระคุณขอบคุณบิดามารดาและครอบครัว บุคคลสำคัญที่คอยสนับสนุน และให้โอกาสในด้านการศึกษา ขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

นายชยากร

ประสงค์วิวัฒน์

นายปฐวี

จันท์แก้ว

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.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	1
1.4 วิธีการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.2.1 ระบบไฮดรอลิค.....	4
2.2.2 ส่วนประกอบเบื้องต้นและหน้าที่ของอุปกรณ์.....	4
2.2.3 แรงเสียดทานในกระบอกสูบไฮดรอลิค.....	5
2.2.4 แบบจำลองลูเกอร์.....	6
2.2.5 แบบจำลองลูเกอร์ที่สภาวะคงตัว.....	7
2.2.6 Kalman Filter Algorithm.....	7
2.2.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	11
2.2.8 Closed-loop Control.....	18
2.2.9 PID Controller.....	19

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	20
3.1 อุปกรณ์ทำการทดลอง.....	20
3.1.1 แหล่งจ่ายพลังงาน.....	20
3.1.2 ระบายความร้อนทำงานสองก้าน.....	21
3.1.3 วาล์วควบคุมทิศทางและอัตราการไหล.....	21
3.1.4 สายน้ำมันไฮดรอลิค.....	22
3.1.5 เซนเซอร์วัดตำแหน่ง.....	22
3.1.6 เซนเซอร์วัดความดัน.....	23
3.1.7 เซนเซอร์รับแรงและสปริงคอยล์.....	23
3.1.8 แหล่งจ่ายไฟฟ้า.....	24
3.1.9 Data Acquisition Card.....	24
3.1.10 คอมพิวเตอร์.....	25
3.2 วิธีการทดลอง.....	26
3.2.1 การทดลองเพื่อหาค่าตัวแปรในแบบจำลองลูเกอร์.....	28
3.2.2 การทดลองเปรียบเทียบแรงเสียดทานจากแบบจำลองลูเกอร์แบบใช้ตัวกรอง กาลมานและไม่ใช้ตัวกรองกาลมาน.....	29
3.2.3 การทดลองควบคุมแรงโดยใช้ระบบควบคุมพีไอดีควบคู่กับการชดเชยแรง เสียดทานจากแบบจำลองลูเกอร์.....	30
3.2.4 การทดลองควบคุมแรงโดยใช้ระบบควบคุมพีไอดีควบคู่กับการชดเชยแรง เสียดทานจากแบบจำลองลูเกอร์โดยผ่านตัวกรองกาลมาน.....	31
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	32
4.1 การทดลองเพื่อหาค่าตัวแปรในแบบจำลองลูเกอร์.....	32
4.1.1 แรงเสียดทานที่ได้จากโปรแกรม LabVIEW.....	32
4.1.2 ตัวแปรในแบบจำลองแรงเสียดทานลูเกอร์ขณะที่ลูกสูบยืดออก.....	34
4.1.3 ตัวแปรในแบบจำลองแรงเสียดทานลูเกอร์ขณะที่ลูกสูบหดกลับ.....	37

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.2 การทดลองเปรียบเทียบแรงเสียดทานจากแบบจำลองลูเกอร์แบบใช้ตัวกรองคาลมาน และไม่ใช้ตัวกรองคาลมาน.....	39
4.2.1 การควบคุมความเร็วแบบ Sine Wave ในระบบควบคุมพีไอดีโดยไม่ใช้ ตัวกรองคาลมาน.....	39
4.2.2 การควบคุมความเร็วแบบ Sine Wave ในระบบควบคุมพีไอดีโดยใช้ ตัวกรองคาลมานฟิลเตอร์.....	41
4.3 การทดลองควบคุมแรงโดยใช้ระบบควบคุมพีไอดีควบคู่กับการชดเชยแรงเสียดทานจาก แบบจำลองลูเกอร์.....	43
4.3.1 การทดลองควบคุมแรงแบบ sine wave.....	43
4.3.2 การทดลองควบคุมแรงแบบ square wave.....	45
4.4 การทดลองควบคุมแรงโดยใช้ระบบพีไอดีควบคู่กับการชดเชยแรงเสียดทานจาก แบบจำลองลูเกอร์โดยผ่านตัวกรองคาลมาน.....	47
4.4.1 การทดลองควบคุมแรงแบบ sine wave โดยผ่านตัวกรองคาลมาน.....	47
4.4.2 การทดลองควบคุมแรงแบบ square wave โดยผ่านตัวกรองคาลมาน.....	49
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	51
5.1 สรุปผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมแรงในกระบอสูบโดยใช้ระบบ ควบคุมพีไอดีควบคู่กับการชดเชยแรงเสียดทานและการทดลองควบคุมแรงในกระบอ สูบโดยใช้ระบบควบคุมพีไอดีและตัวกรองคาลมานควบคู่กับการชดเชยแรงเสียดทาน..	51
เอกสารอ้างอิง.....	53
ภาคผนวก.....	54
ภาคผนวก ก.....	55

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ค่าความเร็วเฉลี่ยและค่าแรงเสียดทานเฉลี่ยจากการทดลองในขณะที่ลูกสูบยืดออก.....	34
4.2 ค่าแรงเสียดทานที่ได้จากการประมาณค่าด้วยแบบจำลองแรงเสียดทานลูเกอร์ ในขณะที่ลูกสูบยืดออก.....	35
4.3 ค่าความเร็วเฉลี่ยและค่าแรงเสียดทานเฉลี่ยจากการทดลองในขณะที่ลูกสูบหดกลับ.....	37
4.4 ค่าแรงเสียดทานที่ได้จากการประมาณค่าด้วยแบบจำลองแรงเสียดทานลูเกอร์ ในขณะที่ลูกสูบหดกลับ.....	38
5.1 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของรากที่สองของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนจากการควบคุม แรงแบบ sine wave.....	51
5.2 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของรากที่สองของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนจากการควบคุม แรงแบบ square wave.....	52

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบไฮดรอลิค.....	4
2.2 ส่วนที่เกิดแรงเสียดทานภายในกระบอกสูบ.....	5
2.3 ขั้นตอนการทำงานของคาลมานอัลกอริธึม.....	9
2.4 แผนผังสมการคาลมาน.....	10
2.5 การไหลเข้า-ออกภายในบริเวณพื้นที่ปริมาตรควบคุม.....	11
2.6 โครงสร้างระบบควบคุมแบบป้อนกลับ.....	18
2.7 คิวควบคุมแบบพีไอดี.....	19
3.1 แหล่งจ่ายพลังงาน.....	20
3.2 กระบอกสูบสองก้าน.....	21
3.3 วาล์วควบคุมทิศทางและอัตราการไหล.....	21
3.4 สายน้ำมันไฮดรอลิค.....	22
3.5 เซนเซอร์วัดตำแหน่ง.....	22
3.6 เซนเซอร์วัดความดัน.....	23
3.7 เซนเซอร์รับแรงและสปริงคอยล์.....	23
3.8 แหล่งจ่ายไฟฟ้า.....	24
3.9 Data Acquisition Card.....	24
3.10 คอมพิวเตอร์.....	25
3.11 การทดลองควบคุมแรงในอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิค.....	26
3.12 เมทริกซ์และฟังก์ชัน Discrete Kalman Filter.....	27
3.13 Block diagram การหาค่าตัวแปรในแบบจำลองลูเกอร์จากโปรแกรม LabVIEW.....	28
3.14 Block diagram การประมาณค่าแรงเสียดทานจากแบบจำลองลูเกอร์.....	29
3.15 Block diagram การชดเชยแรงเสียดทานโดยใช้ระบบควบคุมพีไอดีควบคู่กับแบบจำลองลูเกอร์.....	30
3.16 Block diagram การชดเชยแรงเสียดทานโดยใช้ระบบควบคุมพีไอดีควบคู่กับแบบจำลองลูเกอร์โดยผ่านตัวกรองคาลมาน.....	31

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 กราฟความเร็วที่รับค่าได้จาก LabVIEW ในแต่ละแรงดันไฟฟ้าในขณะที่กระบอกสูบยืดออก ที่ช่วงเวลา 80-120 ms.....	33
4.2 กราฟแรงเสียดทานที่รับค่าได้จาก LabVIEW ในแต่ละแรงดันไฟฟ้าในขณะที่กระบอกสูบยืดออก ที่ช่วงเวลา 80-120 ms.....	33
4.3 กราฟระหว่างค่าแรงเสียดทานที่ได้จากการทดลองและแรงเสียดทานที่ได้จากแบบจำลองลูเกอร์ ขณะที่ลูกสูบยืดออก.....	34
4.4 กราฟความเร็วที่รับค่าได้จาก LabVIEW ในแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันในขณะที่กระบอกสูบหด กลับที่ช่วงเวลา 80-120 ms.....	36
4.5 กราฟแรงเสียดทานที่รับค่าได้จาก LabVIEW ในแต่ละแรงดันไฟฟ้าในขณะที่กระบอกสูบหด กลับที่ช่วงเวลา 80-120 ms.....	36
4.6 กราฟระหว่างค่าแรงเสียดทานที่ได้จากการทดลองและแรงเสียดทานที่ได้จากแบบจำลองลูเกอร์ ขณะที่ลูกสูบหดกลับ.....	37
4.7 กราฟระยะทางการเคลื่อนที่ที่ได้จากการควบคุมความเร็วแบบ Sine Wave.....	39
4.8 กราฟ Sine Wave ที่ทำการวัดค่าความเร็วที่ได้จากระบบควบคุมพีไอดีเทียบกับ ความเร็วอ้างอิง.....	39
4.9 กราฟแรงเสียดทานจากแบบจำลองลูเกอร์จากระบบควบคุมพีไอดี.....	40
4.10 กราฟระยะทางการเคลื่อนที่ที่ได้จากการควบคุมความเร็วแบบ Sine Wave.....	41
4.11 กราฟ Sine Wave ที่ทำการวัดค่าความเร็วที่ผ่านตัวกรองคาลมานจากระบบควบคุมพีไอดีเทียบ กับความเร็วอ้างอิง.....	41
4.12 กราฟแรงเสียดทานจากแบบจำลองลูเกอร์ที่ผ่านตัวกรองคาลมานจากระบบควบคุมพีไอดี.....	42
4.13 กราฟ Sine Wave ค่าแรงที่วัดได้จากเซนเซอร์เทียบกับแรงอ้างอิงจากการควบคุมแรง ที่ 1000N.....	43
4.14 กราฟ Sine Wave ค่าแรงที่วัดได้จากเซนเซอร์เทียบกับแรงอ้างอิงจากการควบคุมแรง ที่ 2000N.....	44
4.15 กราฟ Sine Wave ค่าแรงที่วัดได้จากเซนเซอร์เทียบกับแรงอ้างอิงจากการควบคุมแรง ที่ 3000N.....	44

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 กราฟ Square Wave ค่าแรงที่วัดได้จากเซนเซอร์เทียบกับแรงอ้างอิงจากการควบคุมแรงที่ 1000N.....	45
4.17 กราฟ Square Wave ค่าแรงที่วัดได้จากเซนเซอร์เทียบกับแรงอ้างอิงจากการควบคุมแรงที่ 2000N.....	45
4.18 กราฟ Square Wave ค่าแรงที่วัดได้จากเซนเซอร์เทียบกับแรงอ้างอิงจากการควบคุมแรงที่ 3000N.	46
4.19 กราฟ Sine Wave ค่าแรงที่วัดได้จากเซนเซอร์โดยผ่านตัวกรองคาลมานเทียบกับแรงอ้างอิงจากการควบคุมแรงที่ 1000N.....	47
4.20 กราฟ Sine Wave ค่าแรงที่วัดได้จากเซนเซอร์โดยผ่านตัวกรองคาลมานเทียบกับแรงอ้างอิงจากการควบคุมแรงที่ 2000N.....	47
4.21 กราฟ Sine Wave ค่าแรงที่วัดได้จากเซนเซอร์โดยผ่านตัวกรองคาลมานเทียบกับแรงอ้างอิงจากการควบคุมแรงที่ 3000N.....	48
4.22 กราฟ Square Wave ค่าแรงที่วัดได้จากเซนเซอร์โดยผ่านตัวกรองคาลมานเทียบกับแรงอ้างอิงจากการควบคุมแรงที่ 1000N.....	49
4.23 กราฟ Square Wave ค่าแรงที่วัดได้จากเซนเซอร์โดยผ่านตัวกรองคาลมานเทียบกับแรงอ้างอิงจากการควบคุมแรงที่ 2000N.....	49
4.24 กราฟ Square Wave ค่าแรงที่วัดได้จากเซนเซอร์โดยผ่านตัวกรองคาลมานเทียบกับแรงอ้างอิงจากการควบคุมแรงที่ 3000N.....	50
1.ก Block Diagram การหาค่าแรงเสียดทานในกระบอกลูกสูบโดยระบบควบคุมพีไอดี.....	55
2.ก Block Diagram การควบคุมแรงโดยระบบควบคุมพีไอดีควบคู่กับการชดเชยแรงเสียดทาน.....	56
3.ก Control Panel ของการควบคุมแรงโดยระบบพีไอดีควบคู่กับการชดเชยแรงเสียดทาน.....	57

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันระบบไฮดรอลิกถือว่าเป็นระบบสำคัญที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบอุตสาหกรรมเนื่องจากข้อดีในหลากหลายด้านของระบบไฮดรอลิก ตัวอย่างเช่น การให้กำลังที่สูงเมื่อเทียบกับน้ำหนัก และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในงานที่หลากหลาย เช่น เครื่องยกสิ่งของ, รถขุดดิน, เครื่องอัดขวดพลาสติก แต่ปัจจุบันระบบยังมีข้อเสียอยู่นั้นคือ การควบคุมแรงให้แม่นยำนั้นทำได้ยากเนื่องจากภายในระบบไฮดรอลิกต้องใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อน ทั้งระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง ซึ่งเหตุผลสำคัญที่ทำให้เกิดความไม่แม่นยำภายในระบบอย่างหนึ่งมาจากแรงเสียดทานภายในกระบอกสูบ คือแรงต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุ ซึ่งที่เห็นได้ชัดเจนคือแรงเสียดทานที่เกิดจากซีลของลูกสูบซึ่งสัมผัสกับกระบอกสูบไฮดรอลิก

ในกระบวนการควบคุมแรงที่ใช้ในระบบไฮดรอลิกมีความสำคัญมาก ในบางอุตสาหกรรมมีการใช้เครื่องจักรที่ต้องใช้ความแม่นยำสูงในการทำงาน เนื่องจากปริญญานิพนธ์ของ นายวิโรจน์ ตรีมงคลโชค และ นาย ศรันธ กุตัน ได้ทำการประมาณค่าแรงเสียดทานจากแบบจำลองลูเกอร์และทำการชดเชยแรงเสียดทานในระบบควบคุมแรง[1] แต่ยังไม่มีความแม่นยำในส่วนของการประมาณค่าแรงเสียดทาน ดังนั้นโครงงานนี้จึงได้ใช้ตัวกรองคาลมานเข้ามาประยุกต์ใช้กับระบบควบคุมชนิดพีไอดีเพื่อที่จะสามารถนำข้อมูลไปใช้ในการประมาณค่าแรงเสียดทานและควบคุมแรงในระบบไฮดรอลิกให้มีความแม่นยำยิ่งขึ้น[1]

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อออกแบบและสร้างระบบควบคุมแรงในระบบไฮดรอลิก โดยใช้ตัวกรองคาลมานในการเพิ่มความแม่นยำในการประมาณค่าแรงเสียดทานจากแบบจำลองลูเกอร์

1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1.3.1 ศึกษาและจัดทำชุดทดลองเพื่อควบคุมแรงไฮดรอลิก โดยใช้อุปกรณ์ภายในห้องทดลอง ประกอบด้วย กระบอกสูบไฮดรอลิกสองก้าน, วาล์วแบบสัดส่วน, เซนเซอร์วัดความดัน, เซนเซอร์วัดตำแหน่ง, โหลดเซลล์ ขดลวดสปริง, DAQ card และคอมพิวเตอร์ควบคุม

- 1.3.2 ใช้ตัวควบคุมพีไอดี และใช้ตัวกรองคาลมานเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการประมาณค่าแรงเสียดทานด้วยสมการลูเกอร์ ในการชดเชยแรงเสียดทานในกระบอกลูกสูบไฮดรอลิก
- 1.3.3 ทำการทดลองโดยการสั่งกระบอกลูกสูบที่แรง 1000N, 2000N และ 3000N

1.4 วิธีการดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับระบบไฮดรอลิกและอุปกรณ์การทำงานต่างๆ
- 1.4.2 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวกับระบบควบคุมวงจรไฮดรอลิกด้วยโปรแกรม LabVIEW และรูปแบบในการหาค่าแรงเสียดทานด้วย LuGre Model
- 1.4.3 เขียนโปรแกรม LabVIEW และทำการทดลอง
- 1.4.4 ปรับปรุงโปรแกรมและแก้ปัญหาจากการทดลอง
- 1.4.5 รวบรวมผลการทดลอง
- 1.4.6 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถควบคุมแรงของกระบอกลูกสูบไฮดรอลิกโดยใช้ตัวกรองคาลมานในการเพิ่มความแม่นยำ
- 1.5.2 สามารถพัฒนาการควบคุมระบบไฮดรอลิกให้ได้ค่าแม่นยำมากขึ้น
- 1.5.3 สามารถนำระบบควบคุมไปประยุกต์ใช้ได้จริง

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นายวิโรจน์ ตรีมงคลโชค และ นายศรันธ กุตัน ได้ทำการออกแบบระบบควบคุมแรงไฮดรอลิกควบคุมกับการชดเชยแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นภายในกระบอกลูกสูบ โดยการใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดีผ่านพรอพอร์ชันนัลวาล์ว และใช้อนุพันธ์เชิงตัวเลขจากสัญญาณของเซนเซอร์วัดระยะทางในการแปลงเป็นความเร็วเพื่อนำไปประมาณค่าแรงเสียดทานจากแบบจำลองลูกสูบ จากผลการทดลองสรุปได้ว่า การชดเชยแรงเสียดทานด้วยแบบจำลองลูกสูบสามารถควบคุมแรงในระบบไฮดรอลิกได้แม่นยำกว่าระบบควบคุมแบบพีไอดีธรรมดา พบว่าการใช้อนุพันธ์เชิงตัวเลขจากสัญญาณของเซนเซอร์วัดระยะทางยังมีสัญญาณรบกวนอยู่มาก ทำให้การประมาณค่าแรงเสียดทานและการควบคุมแรงยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่มาก[1]

Yuvin Chinniah ได้ทำการออกแบบแบบจำลองแรงเสียดทานในชุดอุปกรณ์ทำงานของไฮดรอลิก โดยมีการนำตัวกรองคาลมานเข้ามาช่วยประมาณค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในการจำลองเทียบกับการใช้งานจริง โดยทำการการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ความหน่วงและการเสื่อมเสียคุณสมบัติของน้ำมันไฮดรอลิก พบว่าประมาณค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในแบบจำลองที่ถูกประมาณค่าโดยตัวกรองคาลมานได้ค่าที่ใกล้เคียงกับการใช้งานจริง ซึ่งทำให้เห็นว่าตัวกรองคาลมานสามารถนำมาใช้ในการประมาณค่าได้อย่างแม่นยำ[4]

หนังสือ Restricted Kalman Filtering: Theory, Methods and Application เป็นหนังสือเกี่ยวกับตัวกรองคาลมาน โดยคาลมานเป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อนุกรมของการคำนวณ มีการใส่ค่าตัวแปรไม่ทราบค่าและค่าที่ไม่แม่นยำ ซึ่งจะสามารถผลิตค่าประมาณค่าหนึ่งให้เข้าใกล้ค่าจริงจากการศึกษาพบว่าการใช้ตัวกรองคาลมานสามารถลดสัญญาณรบกวนจากเซนเซอร์วัดต่างๆได้ และประมาณค่าได้อย่างแม่นยำ

เนื่องจากปัญหานี้ทำการใช้เซนเซอร์วัดระยะทางในการอนุพันธ์เชิงตัวเลขเพื่อใช้ประมาณค่าแรงเสียดทานลูกสูบและนำไปควบคุมแรง จึงได้ใช้ตัวกรองคาลมานเพื่อลดสัญญาณรบกวนของเซนเซอร์วัดระยะทางและหวังเพื่อให้ได้รับแรงเสียดทานลูกสูบและการควบคุมแรงที่แม่นยำขึ้น[2]

จากงานวิจัยและหนังสือที่ได้ศึกษาทำให้ทราบว่า การประมาณค่าแรงเสียดทานจากแบบจำลองลูกสูบใช้อนุพันธ์เชิงตัวเลขของสัญญาณจากเซนเซอร์วัดระยะทางเป็นความเร็ว ซึ่งการ

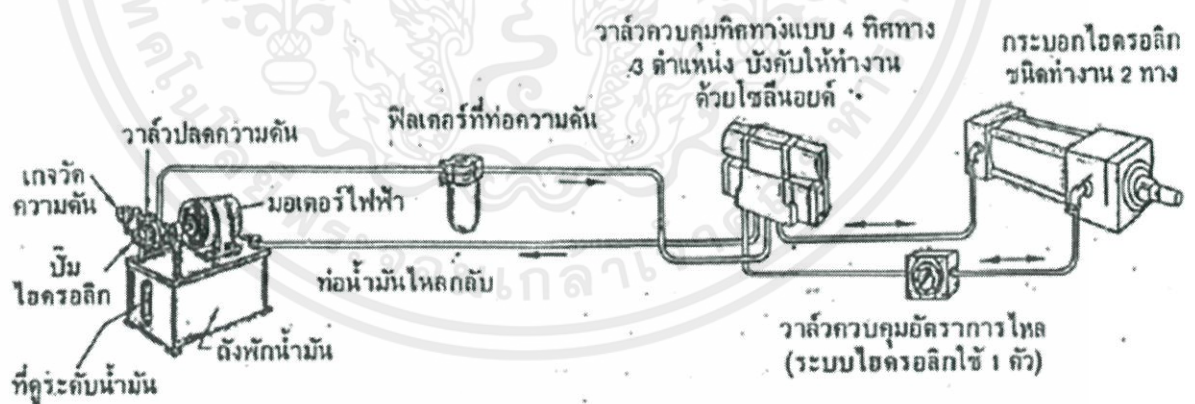
เปลี่ยนแปลงของระยะทางในช่วงเวลาสั้นๆทำให้ค่าความเร็วมีการแกว่งมาก และค่าจากเซนเซอร์มีสัญญาณรบกวนอยู่ ดังนั้นเราจึงใช้ตัวกรองคาลมานซึ่งมีความสามารถในการลดสัญญาณรบกวนจากเซนเซอร์มาช่วยนารประมาณค่าแรงเสียดทานและควบคุมความเร็วให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 ระบบไฮดรอลิก

ระบบไฮดรอลิกเป็นระบบส่งกำลังที่ใช้ของเหลวคือน้ำมันเป็นตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงานภายในระบบ ซึ่งน้ำมันจะเปลี่ยนพลังงานการไหลให้เป็นพลังงานกล โดยผ่านกลไกสำคัญต่างๆ ประกอบไปด้วย ตัวกระทำ, กระจอกสูบและมอเตอร์ไฮดรอลิก ในอุตสาหกรรมนิยมใช้น้ำมันไฮดรอลิกเป็นตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงาน เพราะน้ำมันไฮดรอลิกมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ ไม่สามารถยุบตัวได้ หรือยุบตัวได้น้อย จึงทำให้การส่งถ่ายพลังงานมีประสิทธิภาพมาก ข้อดีของระบบไฮดรอลิกคือสามารถรับแรงได้สูงมากทั้งในแนวเส้นตรงและแนวหมุน และสามารถควบคุมแรงหรือความเร็วในการเคลื่อนที่ได้ง่ายในปัจจุบันได้มีการนำระบบไฮดรอลิกไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆมากมาย เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์, บรรจุกัญญา, วิศวกรรมโยธา และอุตสาหกรรมพลาสติก เป็นต้น

2.2.2 ส่วนประกอบเบื้องต้นและหน้าที่ของอุปกรณ์



รูปที่ 2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบไฮดรอลิก

รูปที่ 2.1 แสดงถึงระบบไฮดรอลิกอย่างง่ายซึ่งในระบบนี้มีอุปกรณ์พื้นฐาน ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ ได้ดังนี้

1. แหล่งจ่ายพลังงาน ทำหน้าที่ส่งถ่ายพลังงานน้ำมันเข้าสู่ระบบ โดยมีมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นตัวขับเคลื่อนให้หมุน เพื่อดูดน้ำมันจากถังพักส่งออกไปสู่ระบบ โดยเรียกส่วนนี้ว่า Power Unit ซึ่งประกอบไปด้วย - ไฮดรอลิกปั๊ม

- มอเตอร์ไฟฟ้า
- ถังพักน้ำมัน
- เกจดันความดัน

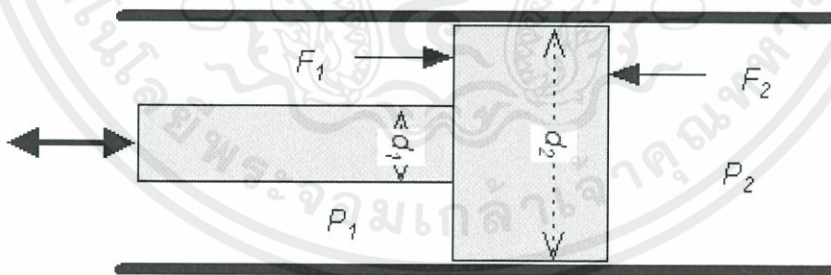
2. ระบบควบคุมการทำงาน ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของกระบอกไฮดรอลิก ประกอบด้วย - วาล์วควบคุมความดัน ทำหน้าที่ควบคุมความดันของระบบไม่ให้สูงเกินไป

- วาล์วควบคุมทิศทาง ทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการไหลของน้ำมันในระบบ

3. ควบคุมปริมาณการไหลของน้ำมัน ทำหน้าที่จำกัดปริมาณการไหลของน้ำมันให้มากหรือน้อย ทำให้สามารถควบคุมความเร็วของอุปกรณ์ทำงานได้

2.2.3 แรงเสียดทานในกระบอกสูบไฮดรอลิก

ภายในกระบอกสูบไฮดรอลิกจะมีแรงเสียดทานเกิดขึ้น โดยแรงเสียดทานส่วนมากจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัส piston seal กับกระบอกสูบ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ส่วนที่เกิดแรงเสียดทานภายในกระบอกสูบ

โดยแรงเสียดทานในกระบอกสูบสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\begin{aligned}\sum F &= ma \\ (P_{he}A_{he} - P_{re}A_{re}) - F_f &= ma \\ F_f &= P_{he}A_{he} - P_{re}A_{re} - ma\end{aligned}\quad (2.1)$$

โดยที่ P_{he} คือ ความดันด้านหัวกระบอกสูบ
 A_{he} คือ พื้นที่หน้าตัดด้านหัวกระบอกสูบ
 P_{re} คือ ความดันด้านท้ายกระบอกสูบ
 A_{re} คือ พื้นที่หน้าตัดด้านท้ายกระบอกสูบ
 F_f คือ แรงเสียดทานในกระบอกสูบ

2.2.4 แบบจำลองลูเกอร์

แบบจำลองลูเกอร์ได้แบบจำลองพื้นฐานมาจากแบบจำลองของดาร์ล จากตัวแปรสถานะ $z = F_f \sigma_0$ เขียนด้วยสมการของดาร์ลได้ว่า

$$\frac{dz}{dt} = \frac{1}{\sigma_0} \frac{dF_f}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{1}{\sigma_0} \frac{dF_f}{dx} v = v - \sigma_0 \frac{|v|}{F_c} z \quad (2.2)$$

จากสมการที่ (2.2) แบบจำลองของลูเกอร์แทนค่าคงที่ F_c ด้วยความเร็วซึ่งเป็นตัวแปรตามของฟังก์ชัน $g(v)$ โดยมีการเพิ่มตัวหน่วง σ_1 ซึ่งสัมพันธ์กับไมโครดิสเพลสเมนต์และค่าความเร็วในเทอมของ $f(v)$ ตัวแปรสถานะ Z เปรียบเสมือนความเครียดในแบบจำลองของดาร์ล

$$\dot{z} = v - \sigma_0 \frac{|v|}{g(v)} z = v - h(v)z \quad (2.3)$$

$$F_f = \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + f(v) \quad (2.4)$$

เมื่อ F_f คือ แรงเสียดทาน
 v คือ ความเร็วระหว่าง 2 ผิวสัมผัส
 z คือ สภาวะแรงเสียดทานภายใน

2.2.5 แบบจำลองลูเกอร์ที่สภาวะคงตัว

แบบจำลอง LuGre ที่สภาวะคงตัว เกิดจากการรวมกันของ coulomb friction, viscous friction และ static friction โดยใช้ฟังก์ชันความเร็วตามสมการที่ (2.5)

$$F_r = F_c + (F_s - F_c)e^{-\left|\frac{v}{v_s}\right|^n} + \sigma_2 v \quad (2.5)$$

- เมื่อ F_r คือ แรงเสียดทาน
 F_c คือ coulomb friction ซึ่งไม่ขึ้นอยู่กับขนาดความเร็ว
 F_s คือ static friction ที่ถูกสังเกตได้ก่อนการสไลด์ของผิวสัมผัส
 v_s คือ stribek velocity ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดของความเร็วของตัวด้านระบบ
 n คือ เลขชี้กำลังที่มีผลต่อ stribek curve
 σ_2 คือ สัมประสิทธิ์ viscous friction
 v คือ ความเร็วระหว่าง 2 พื้นผิวที่สัมผัสกัน

2.2.6 Kalman Filter Algorithm

คาลมานอัลกอริธึม (Kalman Algorithm) คือวิธีการประมาณค่าสภาวะระบบซึ่งพัฒนาจากวิธีการกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square) ซึ่งได้รับความสนใจอย่างมากและเป็นวิธีการที่ให้ผลการคำนวณที่มีประสิทธิภาพและให้ผลการประมาณค่าได้อย่างถูกต้องเนื่องจากมีวิธีการทำงานโดยใช้รูปแบบหนึ่งของการป้อนกลับของสัญญาณ (Feedback Control) และมีขั้นตอนการคำนวณแบบวิธีเรียกซ้ำ (Recursive) นั่นคือ คาลมานอัลกอริธึมนี้สามารถทำนายสภาวะระบบในขณะเวลาใดเวลาหนึ่งหลังจากนั้นจึงนำไปป้อนกลับในรูปของการวัดค่าสัญญาณรบกวน นำเสนอโดย R.E. Kalman ในปี 1960 โดยวิธีการคาลมานนี้มีการนำมาใช้ในงานวิจัยและการประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ

2.2.6.1 คาลมานฟิลเตอร์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Kalman Filter)

ในกระบวนการสุ่มสามารถเขียนแบบจำลองทางพลวัต ได้ดังสมการที่ (2.6)

$$x_{k+1} = \Phi_k x_k + w_k \quad (2.6)$$

และในแบบจำลองการวัดของกระบวนการสามารถกำหนดให้เกิดขึ้นเป็นช่วงเวลาที่ไม่ต่อเนื่องได้ดังนี้

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (2.7)$$

จากสมการที่ (2.6) และ (2.7)

x_k ($n \times 1$) คือ สภาวะระบบ (หรือตัวประมาณค่า) ที่เวลา t_k

Φ_k ($n \times n$) คือ transient matrix ที่เวลา t_k

w_k ($n \times 1$) คือ สัญญาณรบกวนจากระบบ (process noise) ที่เวลา t_k

z_k ($m \times 1$) คือ ผลจากการวัด ที่เวลา t_k

H_k ($m \times n$) คือ connection matrix ระหว่าง z_k กับ x_k ที่เวลา t_k

v_k ($m \times 1$) คือ สัญญาณรบกวนจากการวัด (measurement noise) ที่เวลา t_k

โดยที่ n คือ ขนาดของเวกเตอร์ของสภาวะระบบที่สนใจ และ

m คือ ขนาดของเวกเตอร์ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการวัด

Covariance matrix ของ w_k และ v_k กำหนดโดย

$$\begin{aligned} E[w_k w_i^t] &= Q_k && \text{เมื่อ } k = i \text{ หรือ} \\ E[w_k w_i^t] &= 0 && \text{เมื่อ } k \neq i \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\text{และ} \quad \begin{aligned} E[v_k v_i^t] &= R_k && \text{เมื่อ } k = i \text{ หรือ} \\ E[v_k v_i^t] &= 0 && \text{เมื่อ } k \neq i \end{aligned} \quad (2.9)$$

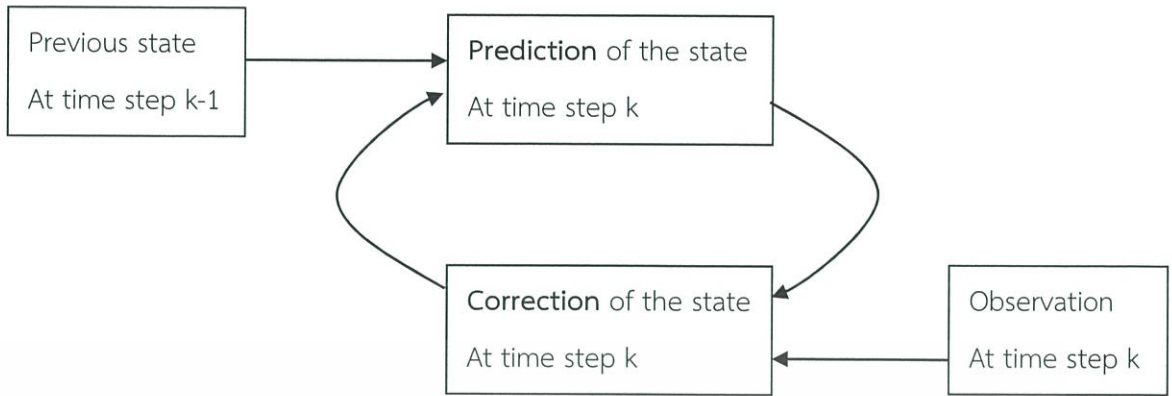
$$E[w_k v_i^t] = 0 \quad \text{สำหรับทุกค่าของ } k \text{ และ } i$$

สำหรับการประมาณค่าด้วยคาลมานอัลกอริธึมเป็นกระบวนการทำนายสภาวะระบบที่มีการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยอาศัยผลจากการวัด คาลมานอัลกอริธึมแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

1. ขั้นตอนการทำนาย (Prediction) หรือขั้นตอนการปรับเวลา (time update)
2. ขั้นตอนการปรับแก้ (Correction) หรือขั้นตอนการปรับการวัด (Measurement update)

ในรูปที่ 2.3 แสดงขั้นตอนการทำงานของคาลมานอัลกอริธึม อธิบายขั้นตอนการทำงานของคาลมานอัลกอริธึมได้ดังนี้ เริ่มต้นจากการทำนายค่าสภาวะระบบที่เวลา k โดยอ้างอิงผลจากสภาวะระบบที่เกิดขึ้นก่อนหน้านั้นที่เวลา $k-1$ จากนั้นเมื่อมีผลจากการวัดเข้ามา ก็เข้าสู่ขั้นตอนการปรับแก้ซึ่งจะตอบสนองต่อการป้อนกลับ นั่นคือ มีการนำผลที่ได้จากการวัดทำการเปรียบเทียบกับผลจากการทำนายในครั้งแรก นำมาผ่านขั้นตอนการปรับแก้ เพื่อนำไปปรับปรุงผลการทำนายในรอบต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการทำงานของคาลมานอัลกอริธึม

จากขั้นตอนการทำงานดังกล่าวสามารถแสดงรูปของสมการทำนายและสมการการปรับแก้ได้

ดังนี้

1. สมการการทำนาย (Prediction equation) ประกอบด้วย

$$\hat{x}_k^- = \Phi_k \hat{x}_{k-1} \quad (2.10)$$

$$P_k^- = \Phi_k P_{k-1} \Phi_k^t + Q_k \quad (2.11)$$

โดยที่ \hat{x}_k^- คือ สถานะระบบก่อนการทำนายที่เวลา

P_k^- คือ error covariance

เครื่องหมาย (-) แสดงถึงสถานะที่เกิดขึ้นก่อนทำการปรับแก้

2. สมการการปรับแก้ (Correction equation) ประกอบด้วย

$$K_k = P_k^- H_k^t (H_k P_k^- H_k^t + R_k)^{-1} \quad (2.12)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H_k \hat{x}_k^-) \quad (2.13)$$

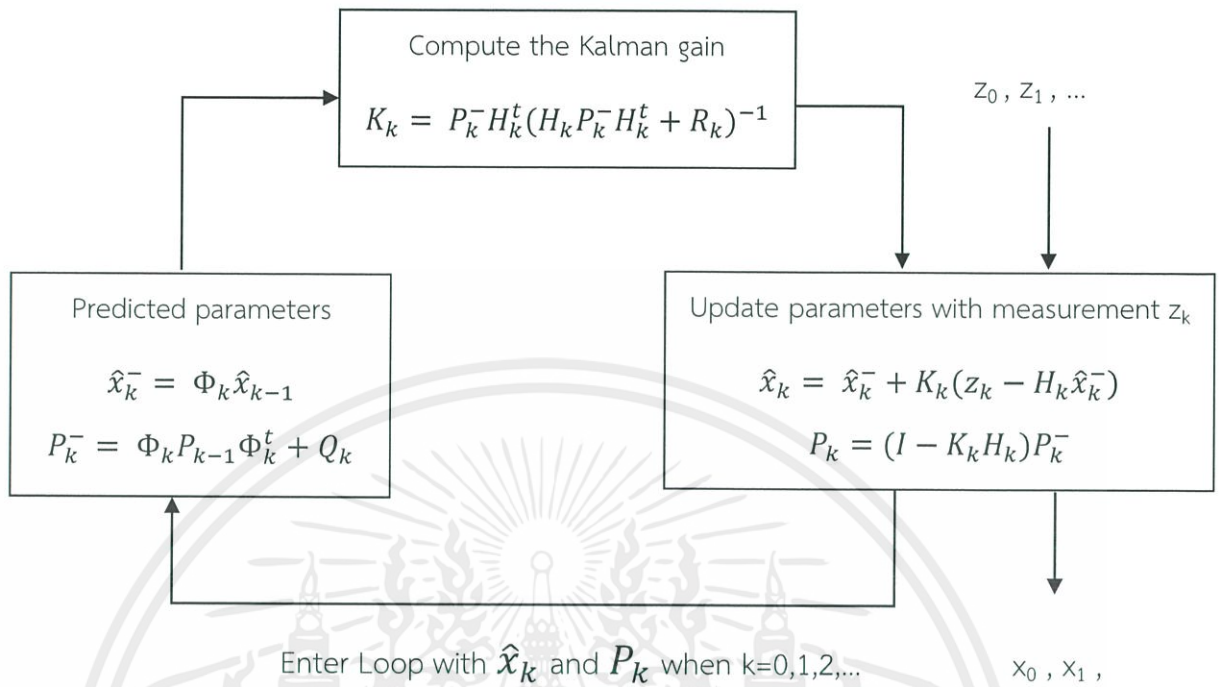
$$P_k = (I - K_k H_k) P_k^- \quad (2.14)$$

โดยที่ z_k คือ ค่าจริงที่ได้จากการวัด

K_k คือ อัตราการขยายคาลมาน (Kalman gain)

\hat{x}_k คือ การปรับค่าหลังจากมีข้อมูลจริงเข้ามา

แผนผังสมการคาลมานแสดงดังรูปที่ 2.4

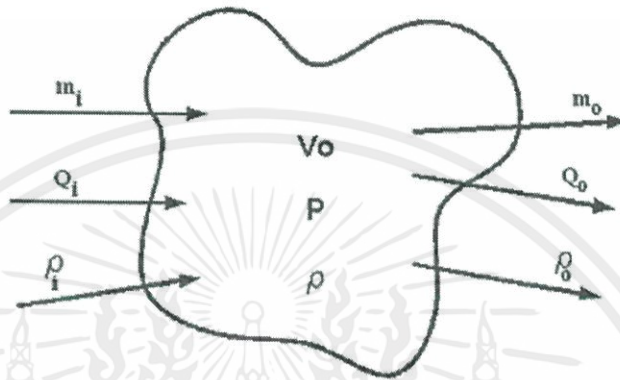


รูปที่ 2.4 แผนผังสมการคาลมาน

รูปที่ 2.4 อธิบายเพิ่มเติมได้ดังนี้ เริ่มต้นที่ขั้นตอนการทำนาย เป็นการเรียนรู้ที่จะทำนายสถานะระบบในครั้งแรก ค่าพารามิเตอร์สำหรับขั้นตอนการทำนายนี้คือ \hat{x}_k^- และ P_k^- ซึ่งก็คือสถานะระบบและค่า error covariance ที่ทำการทำนายในครั้งแรก จากนั้นเข้าสู่ขั้นตอนของการปรับแก้ โดยเริ่มต้นจากการคำนวณหาค่าอัตราขยายคาลมาน K_k ซึ่งเป็นผลมาจากค่า error covariance ที่ได้ทำนายไว้ และเมื่อมีผลจากการวัดหรือสถานะระบบในปัจจุบัน z_k เข้ามา ก็จะทำให้การปรับปรุงสถานะระบบและ error covariance โดยทำการเปรียบเทียบผลจากการวัดกับผลจากการทำนายในครั้งแรกทำการปรับแก้ P_k หลังจากนั้นกระบวนการทั้งหมดนี้จะถูกทำซ้ำโดยสถานะระบบที่ได้ทำการปรับแก้แล้วจะเป็นสถานะระบบอ้างอิงสำหรับการทำนายสถานะระบบในรอบต่อไป

2.2.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การไหลของของไหลในระบบไฮดรอลิกที่เกิดขึ้นโดยเริ่มต้นจากชุดต้นกำลังผ่านวาล์วควบคุม การไหลไปยังอุปกรณ์ทำงานจนกระทั่งไหลกลับถึงเก็บน้ำมันถือว่าเป็นการไหลที่ต่อเนื่อง ซึ่งสามารถพิจารณาได้กับปริมาตรของไหล V_0 ที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.5 กับอัตราไหลเข้า-ออกของมวล m_i กับ m_o โดยใช้กฎการอนุรักษ์มวลของวัตถุจะได้ดังสมการ (2.15)



รูปที่ 2.5 การไหลเข้า-ออกภายในบริเวณพื้นที่ปริมาตรควบคุม

$$\rho_i Q_i - \rho_o Q_o = \frac{d}{dt} (\rho V) \quad (2.15)$$

กำหนดให้ Q_i และ Q_o คือ อัตราการไหลเข้า-ออกของของไหล

ถ้ากำหนดให้ความหนาแน่นของของไหลคงที่จะสามารถเรียบเรียงสมการใหม่ได้เป็น

$$Q_i - Q_o = \frac{dV}{dt} + \frac{V}{\rho} \frac{d\rho}{dt} \quad (2.16)$$

จากสมการบัลคัมดูลัส สามารถวิเคราะห์การอัดตัวของของไหลได้ดังนี้

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{dP}{\beta_e} \quad (2.17)$$

แทนค่าสมการ (2.17) ลงในสมการ (2.16) จะได้

$$Q_i - Q_o = \frac{dV}{dt} + \frac{V}{\beta_e} \frac{dP}{dt} \quad (2.18)$$

จากสมการ (2.18) ประกอบด้วยสองส่วนคือส่วนการเสียรูปของของไหล และส่วนของของไหลอัดตัวได้ ซึ่งทั้งสองส่วนมีผลกระทบกับการทำงานภายใต้ความดันสูง

การไหลผ่านช่องออริฟิสเกิดขึ้นเนื่องจากการไหลผ่านวาล์วควบคุมการไหลเพื่อกำหนดการเคลื่อนที่เข้า-ออกของกระบอกสูบไฮดรอลิก หรือหมุนตามซ้าย-ขวาของมอเตอร์ไฮดรอลิกการควบคุมที่เกิดขึ้นอยู่ภายใต้ความดันสูงและอยู่ในสภาวะการไหลปั่นป่วน ซึ่งสามารถใช้สมการต่อเนื่องของเบอร์นูลลี (Bernoulli's equation) และสมการต่อเนื่อง (Continuity equation) เพื่ออธิบายการไหลในท่อในรูปแบบดังกล่าว ซึ่งแสดงในสมการ (2.19)

$$Q = C_d A_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} (\Delta P)} \quad (2.19)$$

กำหนดให้ Q คืออัตราการไหล, C_d คือสัมประสิทธิ์ทางออก, A_0 คือพื้นที่หน้าตัดของช่องออริฟิส, ΔP คือความดันที่ลดลงเมื่อเทียบกับทางเข้า

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในครั้งนี้ จะพิจารณาถึงแรงที่กดอัดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการหดตัวของคอยล์สปริงที่ติดอยู่กับปลายของก้านสูบไฮดรอลิกเป็นหลัก โดยแรงที่เกิดขึ้นสามารถแยกออกได้เป็น ความดันต่อพื้นที่ที่แตกต่างกันระหว่างห้องก้านสูบกับห้องหัวลูกสูบ โดยใช้สมการ $F = P_{he} A_{he} - P_{re} A_{re}$

จากลักษณะทางกายภาพของระบบกดไฮดรอลิกที่เกิดขึ้น โดยไม่คำนึงถึงความร้อนในระบบการสูญเสียเนื่องจากความหนืดของน้ำมันไฮดรอลิก ช่องอและข้อต่อต่างๆ จะสามารถพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ผ่านสมการอัดตัวของของไหล สมการการไหลผ่านช่องออริฟิส และกฎข้อที่สองของนิวตัน

ในกรณีที่ลูกสูบมีการยืดออก นำสมการ (2.19) มาพิจารณาอัตราการไหลจากต้นกำลังไหลผ่านวาล์วควบคุมการไหลแบบสัดส่วนเข้าไปในกระบอกสูบ ดังสมการ

$$Q_{pahe} = (C_d \sqrt{\frac{2}{\rho}}) A_{pa} \sqrt{P_p - P_{he}} \quad (2.20)$$

เมื่อ Q_{pahe} คืออัตราการไหลผ่านวาล์วควบคุมการไหลแบบสัดส่วนจากช่อง p ไปยังช่อง a ไปยังห้องหัวลูกสูบ, C_d คือสัมประสิทธิ์ทางออก, A_{pa} คือพื้นที่หน้าตัดของช่อง p ไปยังช่อง a , P_p คือค่าความดันของปั๊ม และ P_{he} คือค่าความดันของห้องหัวลูกสูบ

นอกจากนี้ การพิจารณาอัตราการไหลจากกระบอกสูบผ่านวาล์วควบคุมการไหลแบบสัดส่วน ไปยังต้นกำลัง จะเป็นดังสมการ

$$Q_{btre} = (C_d \sqrt{\frac{2}{\rho}}) A_{bt} \sqrt{P_{re} - P_t} \quad (2.21)$$

เมื่อ Q_{btre} คืออัตราการไหลจากห้องก้านลูกสูบผ่านวาล์วควบคุมการไหลแบบสัดส่วนจากช่อง b ไปยังช่อง t ไปยังต้นกำลัง, C_d คือสัมประสิทธิ์ทางออก, A_{bt} คือพื้นที่หน้าตัดของช่อง b ไปยังช่อง t, P_{re} คือค่าความดันของก้านลูกสูบ และ P_t คือค่าความดันของสภาวะแวดล้อม

การพิจารณาการอัดตัวของน้ำมันไฮดรอลิกภายในกระบอกสูบ สามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$Q_{pahe} = A\dot{x} + \frac{(V_{01} + Ax)}{\beta} \dot{P}_{he} \quad (2.22)$$

$$Q_{btre} = A\dot{x} - \frac{(V_{02} + A(L-x))}{\beta} \dot{P}_{re} \quad (2.23)$$

จากสมการ (2.22) และ (2.23) จัดเรียงใหม่ได้เป็น

$$\dot{P}_{he} = \frac{\beta}{V_{01} + Ax} (Q_{pahe} - A\dot{x}) \quad (2.24)$$

$$\dot{P}_{re} = \frac{\beta}{V_{02} + A(L-x)} (-Q_{btre} + A\dot{x}) \quad (2.25)$$

จากการประยุกต์กฎข้อที่สองของนิวตัน จะได้เป็น

$$\ddot{x} = \frac{1}{m} (P_{he} A_{he} - P_{re} A_{re} - F_{ext}) \quad (2.26)$$

จากนั้น กำหนดตัวแปรสถานะในการสร้างสมการสภาวะ ดังแสดงในสมการ

$$x_1 = x \quad (2.27)$$

$$x_2 = \dot{x}_1 \quad (2.28)$$

$$x_3 = P_{he} \quad (2.29)$$

$$x_4 = P_{re} \quad (2.30)$$

กำหนดตัวแปรลงในสมการสภาวะ ดังแสดงในสมการ

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (2.31a)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{m} (P_{he}A_{he} - P_{re}A_{re} - F_{ext}) \quad (2.31b)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{\beta}{V_{01} + A_1x} (Q_{pahe} - A\dot{x}) \quad (2.31c)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{\beta}{V_{02} + A(L-x)} (-Q_{btre} + A\dot{x}) \quad (2.31d)$$

สมการ (2.31a), (2.31b), (2.31c) และ (2.31d) คือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิกในกรณีที่ลูกสูบยืดออก

ในกรณีที่ลูกสูบถอยกลับ นำสมการ (2.19) มาพิจารณาอัตราการไหลจากต้นกำลังไปยังกระบอกสูบ ดังสมการ

$$Q_{pbre} = (C_d \sqrt{\frac{2}{\rho}}) A_{pb} \sqrt{P_p - P_{re}} \quad (2.32)$$

นอกจากนี้ ถ้าพิจารณาอัตราการไหลจากกระบอกสูบไปยังต้นกำลัง จะได้สมการ

$$Q_{athe} = (C_d \sqrt{\frac{2}{\rho}}) A_{at} \sqrt{P_{he} - P_t} \quad (2.33)$$

การพิจารณาการอัดตัวของน้ำมันไฮดรอลิกภายในกระบอกสูบในกรณีที่ลูกสูบถอยกลับ
สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$Q_{athe} = A\dot{x} + \frac{(V_{01}+Ax)}{\beta} P_{he} \quad (2.34)$$

$$Q_{pbre} = A\dot{x} + \frac{(V_{02}+A(L-x))}{\beta} P_{re} \quad (2.35)$$

จากสมการ (2.40) และ (2.41) จัดเรียงใหม่ได้เป็น

$$P_{he} = \frac{\beta}{V_{01}+Ax} (-Q_{athe} + A\dot{x}) \quad (2.36)$$

$$P_{re} = \frac{\beta}{V_{02}+A(L-x)} (Q_{pbre} - A\dot{x}) \quad (2.37)$$

จากการประยุกต์กฎข้อที่สองของนิวตัน จะได้เป็น

$$\ddot{x} = \frac{1}{m} (P_{he}A_{he} - P_{re}A_{re} - F_{ext}) \quad (2.38)$$

จากนั้น กำหนดตัวแปรสถานะในการสร้างสมการสภาวะ ดังแสดงในสมการ

$$x_1 = x \quad (2.39)$$

$$x_2 = \dot{x}_1 \quad (2.40)$$

$$x_3 = P_{he} \quad (2.41)$$

$$x_4 = P_{re} \quad (2.42)$$

กำหนดตัวแปรลงในสมการสถานะ ดังแสดงในสมการ

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (2.43a)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{m} (P_{he}A_{he} - P_{re}A_{re} - F_{ext}) \quad (2.43b)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{\beta}{V_{O1} + A_1 x} (-Q_{athe} + A\dot{x}) \quad (2.43c)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{\beta}{V_{O2} + A(L-x)} (Q_{pbre} - A\dot{x}) \quad (2.43d)$$

สมการ (2.43a), (2.43b), (2.43c) และ (2.43d) คือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์ในกรณีที่ถูกสลับกลับ

แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ผ่านมาเป็นสมการไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้การพิจารณาในการสร้างตัวควบคุมเป็นไปด้วยความยุ่งยาก เพื่อเป็นการลดจำนวนตัวแปรที่ต้องการ สามารถที่จะใช้การทำให้สมการให้อยู่ในรูปแบบเชิงเส้นได้ โดยใช้หลักการของ อนุกรมเทเลอร์ และ ฟังก์ชันในการคำนวณ โดยหลักการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้คือ ซึ่งมีตัวแปรที่จะต้องพิจารณาจากสมการไม่เป็นเชิงเส้นจะสามารถใช้ฟังก์ชันของอนุกรมเทเลอร์ได้คือ พิจารณาฟังก์ชัน $f(x)$ ของตัวแปร x และสมมติให้ \bar{x} คือจุดที่มีค่า $f(x) = 0$ ซึ่งจุด \bar{x} นี้จะถูกเรียกว่า จุดสมดุลของระบบ $\bar{x} = f(x)$ จุดที่อยู่บริเวณรอบๆ นี้จะสามารถอธิบายผ่านสมการอนุกรมเทเลอร์ขยายของจุด \bar{x} จากสมการ (2.50)

$$f(x) = f(\bar{x}) + \left. \frac{df}{dx} \right|_{x=\bar{x}} (x - \bar{x}) + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2f}{dx^2} \right|_{x=\bar{x}} (x - \bar{x})^2 + \dots \quad (2.44)$$

พิจารณาตัวพจน์ที่สูงออกจะได้เป็น

$$f(x) = f(\bar{x}) + \left. \frac{df}{dx} \right|_{x=\bar{x}} (x - \bar{x}) + \text{high order term} \quad (2.45)$$

จัดเรียงสมการ (2.51) ใหม่จะได้เป็น

$$f(x) \approx f(\bar{x}) + a(x - \bar{x}) \quad (2.46)$$

เพราะฉะนั้นเมื่อ $f(x) = 0$ และสมการเชิงเส้นของระบบ $\dot{x} = f(x)$ จะสามารถประมาณสมการเชิงเส้นรอบบริเวณจุดได้เป็น

$$\dot{x} = a(x - \bar{x}) \quad (2.47)$$

เพื่อให้ประมาณค่าสมการให้เป็นเชิงเส้นได้สำเร็จ เมื่อรู้ค่าตัวแปรสถานะอื่นๆ สามารถกำหนดให้เป็น

$$\delta \dot{x} = a \delta x \quad (2.48)$$

จากทฤษฎีข้างต้น จะประมาณสมการเชิงเส้นของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการสภาวะรอบบริเวณจุด $\bar{x}_1(0), \bar{x}_2(0), \bar{x}_3(0)$ และ $\bar{x}_4(0)$

จากนั้นแทนค่าพารามิเตอร์จริงของอุปกรณ์ทั้งหมดจะได้สมการที่เป็นเชิงเส้นในรูปเมทริกซ์ A, B และ C ดังนี้

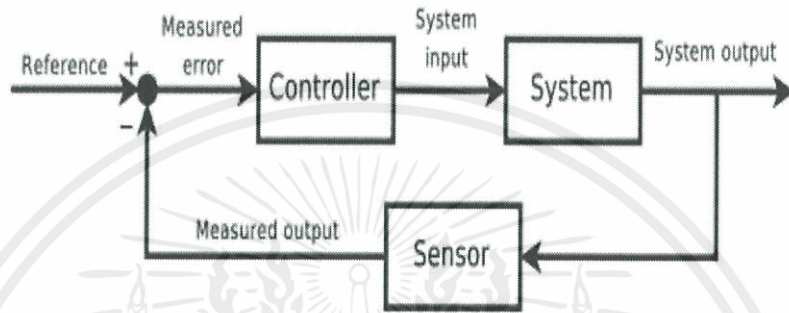
$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -5.43 \times 10^7 A_{pa} \frac{-1.68 \times 10^4}{\sqrt{60 - x_3}} - 1.25 \times 10^{-3} x_2 & -\frac{1.88 \times 10^6}{2.05 \times 10^4 + 1.25 \times 10^{-3} x_1} \\ \frac{6.28 \times 10^4 A_{bt} \sqrt{x_4} + 2.37 \times 10^3}{(2.05 \times 10^4 + 1.25 \times 10^{-3} (0.5 - x_1))^2} & \frac{1.88 \times 10^6}{2.05 \times 10^4 + 1.25 \times 10^{-3} (0.5 - x_1)} \\ 0 & 0 \\ \frac{1.14 \times 10^4}{2.72 \times 10^7 A_{pa}} & -\frac{1.14 \times 10^4}{2.72 \times 10^7 A_{bt}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{5.43 \times 10^7 \sqrt{60 - x_3}}{2.05 \times 10^{-4} + 1.25 \times 10^{-3} x_1} \\ \frac{5.43 \times 10^7 \sqrt{x_4}}{2.05 \times 10^{-4} + 1.25 \times 10^{-3} (0.5 - x_1)} \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

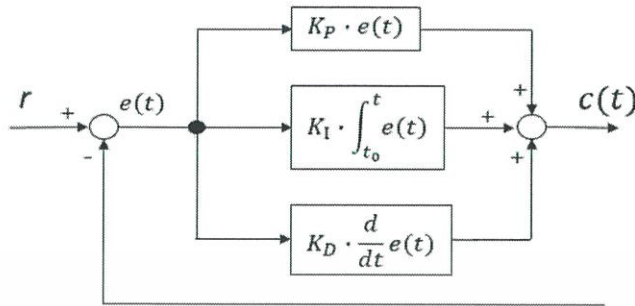
2.2.8 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

เป็นระบบที่นำสัญญาณจาก output ของระบบป้อนกลับมาเปรียบเทียบกับสัญญาณ input ที่ป้อนให้กับระบบ ซึ่งผลต่างระหว่างสัญญาณทั้งสองที่นำมาเปรียบเทียบนั้นจะเป็นค่าผิดพลาด (Error) เพื่อที่จะใช้เป็นสัญญาณป้อนเข้าตัวควบคุม (Controller) ให้ตัวควบคุมนำไปสร้างสัญญาณควบคุมใหม่เพื่อลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบและทำให้ค่า output ของระบบเข้าสู่ค่าที่ต้องการ



รูปที่ 2.6 โครงสร้างระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

2.2.9 PID Controller



รูปที่ 2.7 ตัวควบคุมแบบพีไอดี

ระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์หรือระบบควบคุมแบบพีไอดี เป็นส่วนหนึ่งของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ โดยการควบคุมแบบพีไอดีจะประกอบไปด้วยส่วนการควบคุมที่สำคัญคือ Proportional control action, Integral control action และ Derivative control action ซึ่งทั้งสามส่วนจะนำมารวมกันเป็นสัญญาณขาออกของการควบคุมแบบพีไอดี กำหนดให้ U_{PID} เป็นสัญญาณขาออก สมการสุดท้ายของวิธีพีไอดี คือ

$$U_{PID} = K_P e + K_I \int_0^t e dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.49)$$

โดยที่	K_P	คือ	อัตราขยายสัดส่วน
	K_I	คือ	อัตราขยายปริพันธ์
	K_D	คือ	อัตราขยายอนุพันธ์
	e	คือ	ค่าความคลาดเคลื่อน
	t	คือ	เวลา

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในบทนี้จะแสดงเกี่ยวกับอุปกรณ์และวิธีการทดลองในการประมาณค่าแรงเสียดทานหลังผ่านการกรองสัญญาณด้วยตัวกรองคาลมานในกระบอกสูบไฮดรอลิก ซึ่งรายละเอียดมีดังต่อไปนี้

3.1 อุปกรณ์ทำการทดลอง

ชุดทดลองที่ใช้ในการควบคุมแรงนี้ประกอบด้วยอุปกรณ์ในส่วนของแหล่งจ่ายพลังงาน (Power Unit), ระบบควบคุมการทำงาน (Control Valve), อุปกรณ์ทำงาน (Actuator) และ คอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมระบบการทำงานที่รับข้อมูลมาจากเซนเซอร์ต่างๆ โดยมีอุปกรณ์และหน้าที่ในการทำงานดังนี้

3.1.1 แหล่งจ่ายพลังงาน (Power Units)

ในส่วนของแหล่งจ่ายพลังงานทำหน้าที่ในการเก็บน้ำมันไฮดรอลิก และปล่อยออกสู่ระบบ ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญคือ ถังพักน้ำมันทำหน้าที่ในการเก็บน้ำมันไฮดรอลิก ปั๊มแบบเกียร์ปั๊ม NACHI GP-1B-12-10 เป็นอุปกรณ์สร้างความดันน้ำมันให้สูงขึ้น มอเตอร์ไฟฟ้า synchronous motor ap112m-4 ความเร็วรอบสูงสุด 1435 รอบ/นาที ทำหน้าที่ในการขับให้ปั๊มหมุนทำงาน และชุดกรองน้ำมันไฮดรอลิกดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แหล่งจ่ายพลังงาน

3.1.2 กระบอกลูกสูบทำงานสองก้าน (Hydraulic Cylinder double rod)

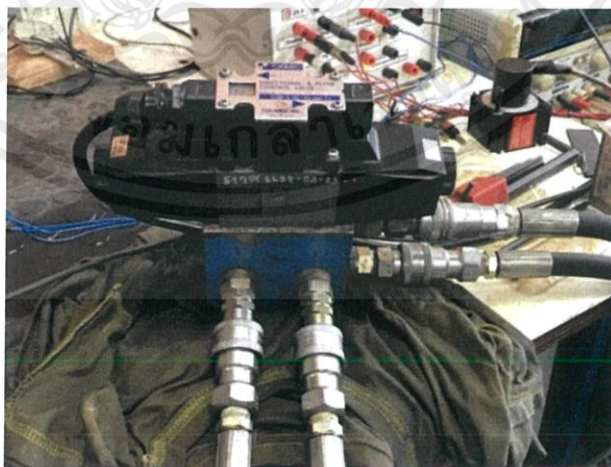
ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานจากพลังงานไฮดรอลิกเป็นพลังงานกล ซึ่งจะส่งถ่ายพลังงานในแนวเชิงเส้น กระบอกลูกสูบที่ใช้มีระยะชัก 50 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายในในกระบอกลูกสูบ 4.0 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางก้านสูบ 2.8 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 กระบอกลูกสูบสองก้าน

3.1.3 วาล์วควบคุมทิศทางและอัตราการไหล (Directional & Flow control valve)

ทำหน้าที่ควบคุมทิศทางและอัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิก เป็นพรอพอร์ชันนัลวาล์วรุ่น COM-3-2C-30-AN-11 โดยมีอัตราการไหลสูงสุด 30 ลิตร/นาที ความดันจำกัดที่พอร์ต P, A และ B เท่ากับ 245 บาร์และที่พอร์ต T เท่ากับ 137 บาร์ อัตราการไหลของวาล์วจะเป็นสัดส่วนแปรผันตรงกับพื้นที่หน้าตัดของช่องวาล์ว ซึ่งแปรผันตามค่าสัญญาณในช่วง ± 10 VDC ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วาล์วควบคุมทิศทางและอัตราการไหล

3.1.4 สายน้ำมันไฮดรอลิก (Hydraulic Hose)

ทำหน้าที่ส่งถ่ายน้ำมันไฮดรอลิกเข้าหรือออกจากระบบ โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 9.5 มิลลิเมตร และภายนอกเท่ากับ 17.1 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 สายน้ำมันไฮดรอลิก

3.1.5 เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (Position transducer)

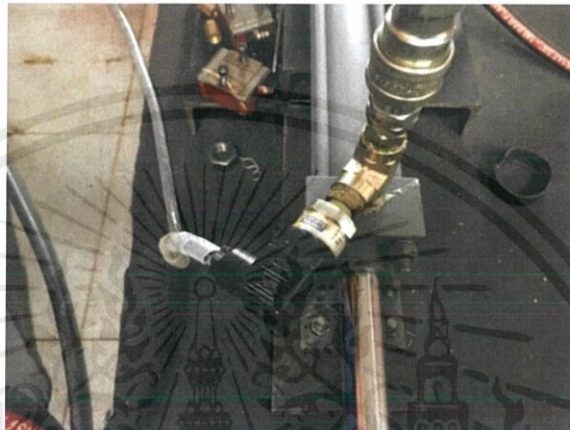
ทำหน้าที่เป็นตัวตรวจจับตำแหน่งของปลายกระบอกลูกสูบ และส่งผลที่ได้เป็นสัญญาณชนิด analog เป็น DC ในช่วง 0-10 V เข้าสู่ DAQ โดยเซนเซอร์ที่ใช้เป็นชนิด Potentiometer รุ่น DLA-750-P60-CR-P มีค่าความต้านทาน 1 กิโลโอห์ม และมีระยะวัดสูงสุดที่ 75 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เซนเซอร์วัดตำแหน่ง

3.1.6 เซนเซอร์วัดความดัน (Pressure transducer)

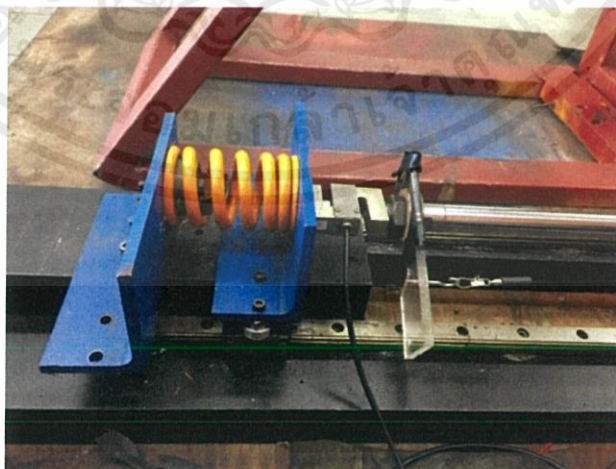
ในชุดทดลองนี้จะใช้เซนเซอร์วัดความดัน 2 ตัวด้วยกัน โดยทำหน้าที่ในการวัดความดันที่ด้านหัวกระบอกลูกสูบ(Head end) และท้ายกระบอกลูกสูบ(Rod end) ยี่ห้อ Wika Model. DIN 175301-803 A มีช่วงความดันใช้งาน 0-600 บาร์ ส่งสัญญาณชนิด analog เข้าสู่ DAQ ในช่วง DC 0-10 V ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เซนเซอร์วัดความดัน

3.1.7 เซนเซอร์รับแรงและสปริงคอยล์ (Force Sensor and Spring Coil)

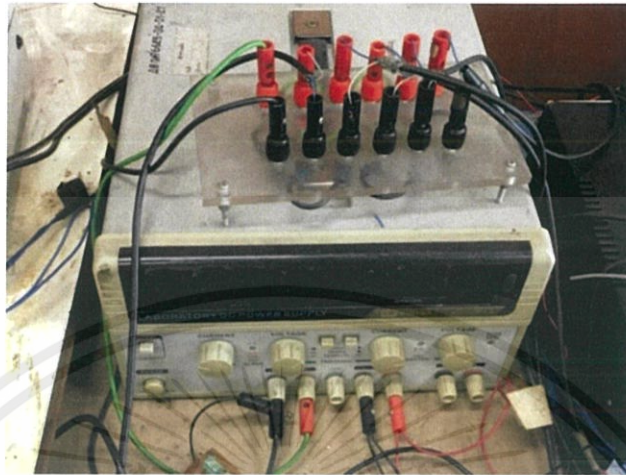
ในชุดทดลองนี้จะใช้เซนเซอร์รับแรงเป็นโหลดเซลล์ในการรับรู้แรงที่เกิดจากการกด และใช้สปริงคอยล์ติดตั้งกับเซนเซอร์รับแรงเป็นอุปกรณ์จำลองแรงกระทำจากภายนอก โดยใช้โหลดเซลล์ยี่ห้อ ZEGA รุ่น KEED-500KG. เป็นโหลดเซลล์ประเภท S beam ทิศทางของแรงเป็นแบบแรงกด และสามารถรับแรงได้สูงสุด 500 กิโลกรัม ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ขดลวดสปริงและเซนเซอร์รับแรง

3.1.8 แหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power Supply)

ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าขนาด 24 โวลต์ ให้กับเซนเซอร์ที่ใช้ในการบันทึกข้อมูล และควบคุมการเปิด-ปิดของวาล์วต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แหล่งจ่ายไฟฟ้า

3.1.9 Data Acquisition Card (DAQ Card)

ทำหน้าที่ในการรับสัญญาณ analog ในช่วง DC $\pm 10V$ จากเซนเซอร์ต่างๆ และแปลงสัญญาณที่ได้เป็นแบบ digital เข้าสู่คอมพิวเตอร์ เพื่อใช้ในการรับข้อมูลและควบคุมวาล์ว ผลิตโดย National Instrument Model. PCI-6221 ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 Data Acquisition Card

3.1.10 คอมพิวเตอร์ (Computer)

ในการทดลอง จะใช้คอมพิวเตอร์ทำหน้าที่ส่งสัญญาณเพื่อสั่งการอุปกรณ์ในระบบและรับข้อมูลที่ได้มาบันทึก, ประมวลผล และทำการปรับปรุงแก้ไขโปรแกรมในการสั่งการ



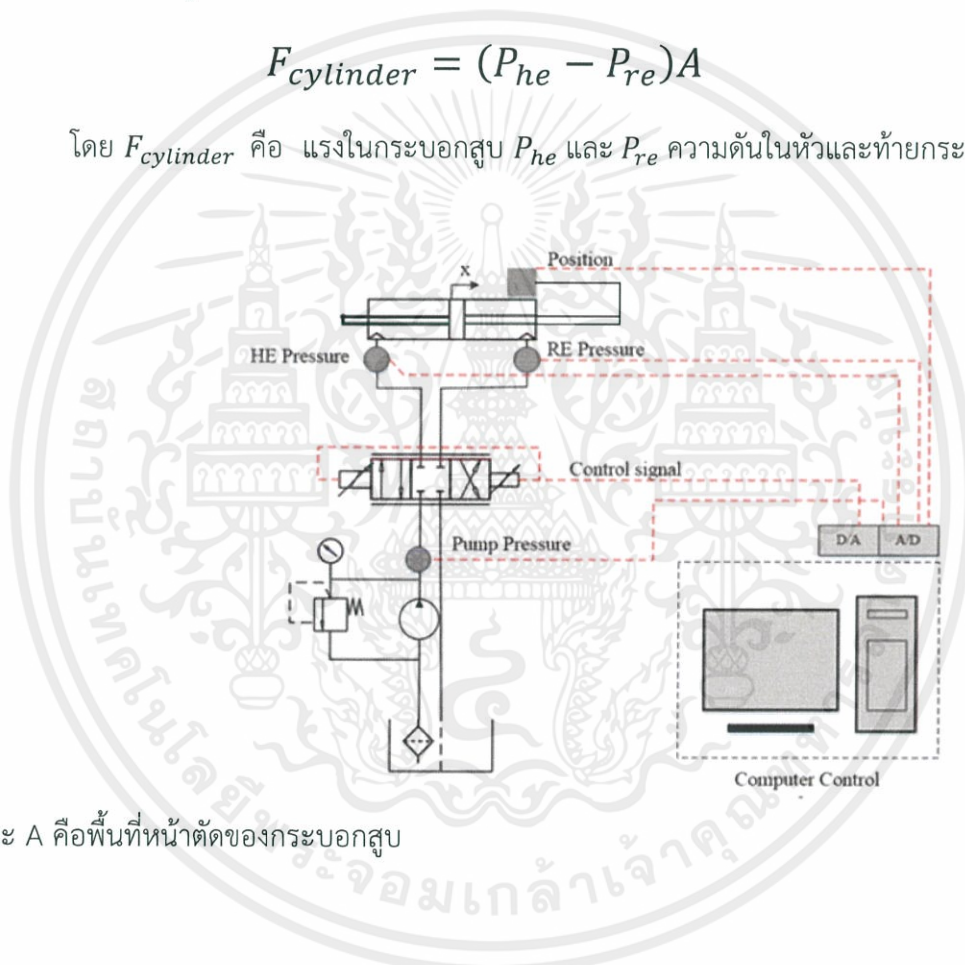
รูปที่ 3.10 คอมพิวเตอร์

3.2 วิธีการทดลอง

ในรูปที่ 3.11 แสดงการทดลองควบคุมแรงของอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้กระบอกลูกสูบแบบสองก้าน การเคลื่อนที่ของกระบอกลูกสูบถูกควบคุมโดยพรอพอร์ชันนัลวาล์ว เช่นเซอร์วัดความดันถูกติดตั้งที่หัวและท้ายของกระบอกลูกสูบ โดยแรงป้อนกลับของกระบอกลูกสูบจะถูกคำนวณโดยความดันภายในกระบอกลูกสูบดังสมการที่ 3.1 และโหลดเซลล์ถูกติดตั้งไว้ที่ปลายชุดทดลอง โดยสัญญาณของแรงที่วัดได้จากโหลดเซลล์จะถูกใช้เป็นแรงอ้างอิง และเซนเซอร์วัดระยะทางจะถูกนำมาคำนวณอนุพันธ์เชิงตัวเลขเพื่อคำนวณเป็นค่าความเร็ว การอัดตัวของสปริงจะนำมาใช้ในการจำลองการรับโหลดของกระบอกลูกสูบ

$$F_{cylinder} = (P_{he} - P_{re})A \quad (3.1)$$

โดย $F_{cylinder}$ คือ แรงในกระบอกลูกสูบ P_{he} และ P_{re} ความดันในหัวและท้ายกระบอกลูกสูบ



และ A คือพื้นที่หน้าตัดของกระบอกลูกสูบ

รูปที่ 3.11 แสดงการทดลองควบคุมแรงในอิเล็กทรอนิกส์

ในการทดลองที่ 3.2.2 และ 3.2.4 จะมีการนำตัวกรองคาบมานำเข้าใช้ในการทดลอง โดยในการทดลองที่ 3.2.2 จะนำตัวกรองคาบมาใช้ในการกรองความเร็วที่ได้จากอนุพันธ์เชิงตัวเลขของสัญญาณจากเซนเซอร์วัดระยะทาง เพื่อให้ความเร็วที่ได้มีความแม่นยำในการนำไปประมาณค่าแรงเสียดทานในแบบจำลองลูเกอร์ต่อไป และในการทดลองที่ 3.2.4 จะนำตัวกรองคาบมาใช้ในการกรองความเร็วที่ได้จากการอนุพันธ์เชิงตัวเลขของสัญญาณวัดระยะทาง แล้วนำ

ความเร็วที่ได้ไปประมาณค่าแรงเสียดทานในแบบจำลองลูเกอร์ เพื่อให้เกิดความแม่นยำในการชดเชยแรงเสียดทานและการควบคุมแรงมากยิ่งขึ้น

โดยจะใช้ฟังก์ชัน Discrete Kalman Filter ในโปรแกรม LabVIEW ในการประมาณค่าความเร็วด้วยการใส่ค่าของเมทริกซ์ต่างๆ

1. เมทริกซ์ A, B และ C จากหัวข้อที่ 2.2.7

โดย เมทริกซ์ A คือ เมทริกซ์สภาวะ

B คือ เมทริกซ์ที่สัมพันธ์ระหว่าง input กับสภาวะ

C คือ เมทริกซ์ที่สัมพันธ์ระหว่าง output กับสภาวะ

2. เมทริกซ์ Q และ R

โดย เมทริกซ์ Q คือ เมทริกซ์แปรปรวนของ process noise vector ค่ามาตรฐานคือ 0.01

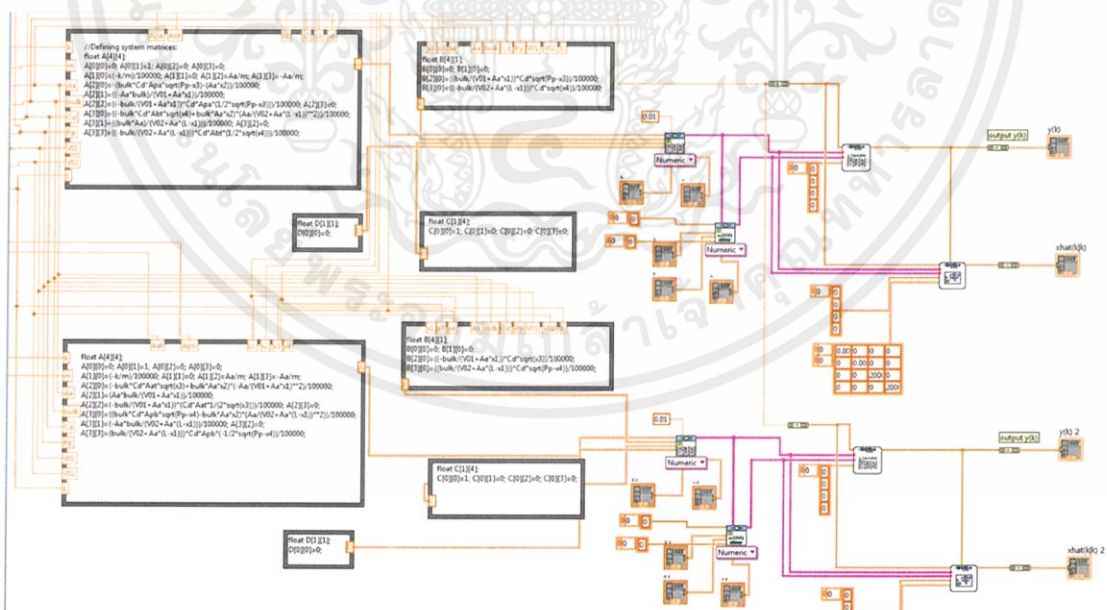
R คือ เมทริกซ์แปรปรวนของ measurement noise vector ค่ามาตรฐานคือ 0.1

3. เมทริกซ์ E{w} และ E{v}

โดย เมทริกซ์ E{w} คือ ค่าเฉลี่ยของ process noise vector โดยในการทดลองจะให้เท่ากับ 0

E{v} คือ ค่าเฉลี่ยของ measurement noise vector โดยจะให้เท่ากับ 0

นอกจากนี้จะต้องต่อสาย input $u(k)$ ซึ่งในโปรแกรมเราจะต่อเข้ากับสัญญาณที่ได้มาจาก DAQ Card และค่าความเร็วที่ผ่านตัวกรองคาลมานจะได้มาจาก output $y(k)$ ของตัวฟังก์ชัน

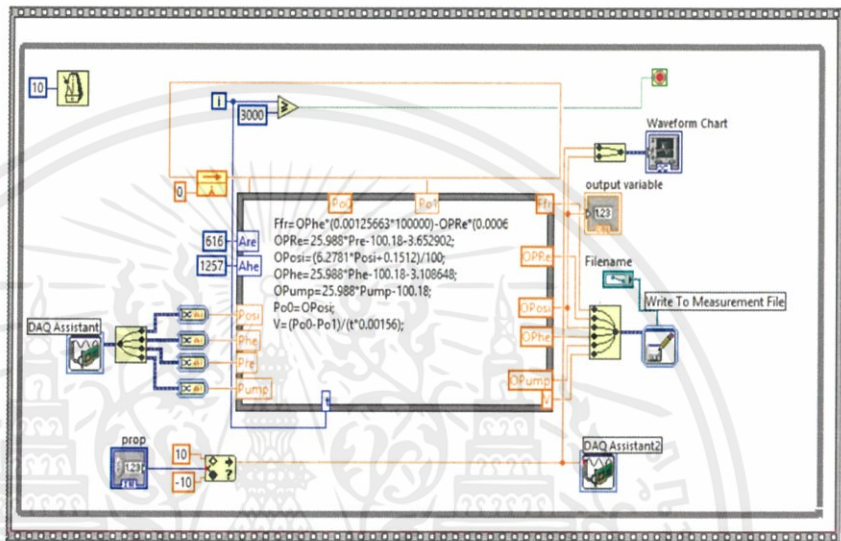


รูปที่ 3.12 เมทริกซ์และฟังก์ชัน Discrete Kalman Filter

3.2.1 การทดลองเพื่อหาค่าตัวแปรในแบบจำลองลูเกอร์

การทดลองนี้มีจุดประสงค์ในการหาค่าตัวแปรต่างๆที่นำไปใช้ในการประมาณค่าแรงเสียดทานในแบบจำลองลูเกอร์ และนำไปใช้ในการชดเชยแรงเสียดทานในระบบควบคุมแรงต่อไป โดยทำการสังเคราะห์บ็อกซ์ให้เคลื่อนที่ด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ต่างกัน โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. ออกแบบโปรแกรม LabVIEW เพื่อใช้สั่งการระบบไฮดรอลิก ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 Block diagram การหาค่าตัวแปรในแบบจำลองลูเกอร์จากโปรแกรม LabVIEW

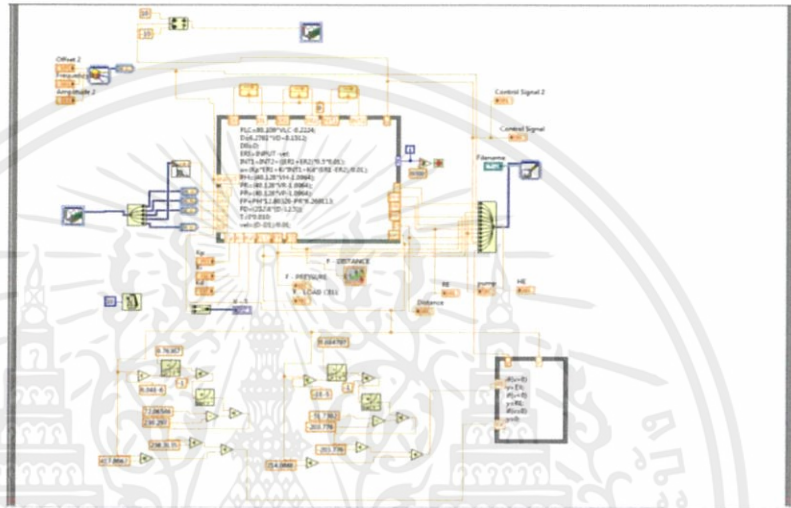
2. ทำการกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าทั้งค่าบวกและลบ เพื่อใช้ในการสั่งการควบคุมทิศทางและอัตราการอัตราการไหล แล้วบันทึกค่าความเร็วจากอนุพันธ์เชิงตัวเลขของสัญญาณจากเซนเซอร์วัดระยะทางที่วัดได้และคำนวณแรงเสียดทานจากสูตร $F_r = P_{he}A_{he} - P_{re}A_{re}$ โดยวัดค่าความดันจากเซนเซอร์ที่หัวและท้ายกระบอสูบ
3. นำค่าความเร็วและแรงเสียดทานที่แรงดันไฟฟ้าต่างๆไปวาดกราฟ เพื่อหาค่าตัวแปรในแบบจำลองลูเกอร์

3.2.2 การทดลองเปรียบเทียบแรงเสียดทานจากแบบจำลองลูเกอร์แบบใช้ตัว

กรองคาลมานและไม่ใช้ตัวกรองคาลมาน

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อดูว่าค่าแรงเสียดทานที่ได้จากแบบจำลองลูเกอร์โดยผ่านตัวกรองคาลมานมีประสิทธิภาพมากกว่าการประมาณค่าแรงเสียดทานจากแบบจำลองลูเกอร์ปกติหรือไม่ โดยมีขั้นตอนในการทดลองดังนี้

1. ออกแบบโปรแกรม LabVIEW โดยนำค่าตัวแปรต่างๆที่ได้ในแบบจำลองลูเกอร์มาใช้เพื่อประมาณค่าแรงเสียดทาน ดังแสดงในรูปที่ 3.14

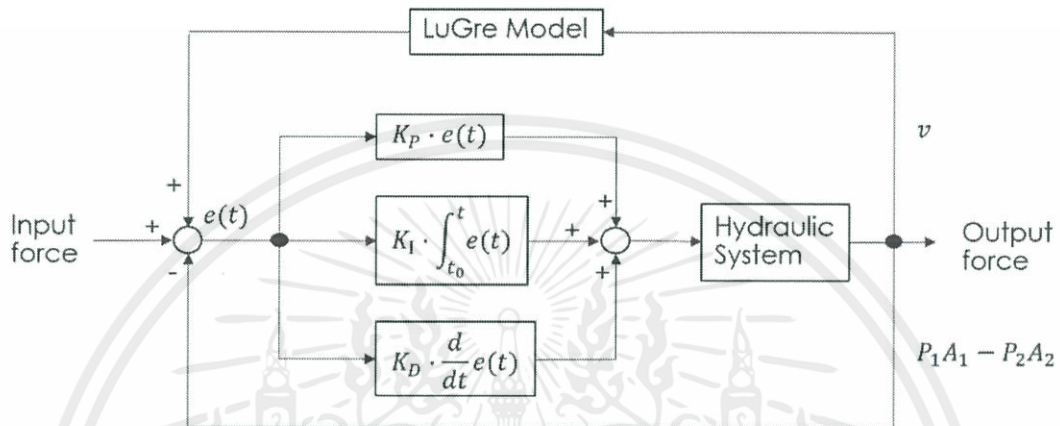


รูปที่ 3.14 Block diagram การประมาณค่าแรงเสียดทานจากแบบจำลองลูเกอร์

2. นำความเร็วที่ได้จากอนุพันธ์เชิงตัวเลขของสัญญาณจากเซนเซอร์วัดระยะทางไปประมาณค่าแรงเสียดทาน
3. นำความเร็วที่ได้จากอนุพันธ์เชิงตัวเลขของสัญญาณจากเซนเซอร์วัดระยะทางไปผ่านตัวกรองคาลมานและประมาณค่าแรงเสียดทานที่ได้
4. บันทึกค่าความเร็วและแรงเสียดทานได้จากทั้ง 2 กรณี และนำมาเปรียบเทียบผล

3.2.3 การทดลองควบคุมแรงโดยใช้ระบบควบคุมพีไอดีควบคู่กับการชดเชยแรงเสียดทานจากแบบจำลองลูเกอร์

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการควบคุมแรง โดยเมื่อเราสั่งการระบบจะชดเชยแรงเสียดทานที่ได้จากการประมาณค่าแบบจำลองลูเกอร์ และป้อนค่ากลับไปเพื่อลดความคลาดเคลื่อนและปรับปรุงการควบคุมแรง ดังแสดงในรูปที่ 3.15 โดยมีขั้นตอนในการทดลองดังนี้

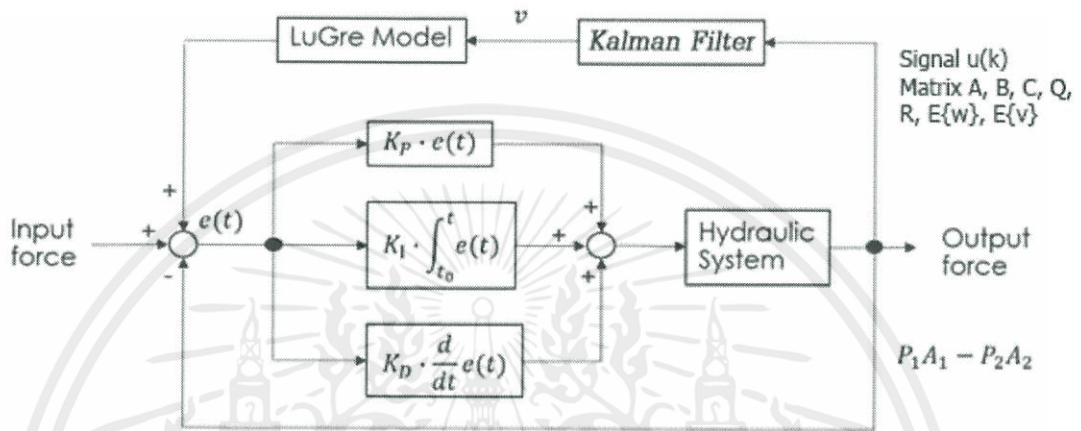


รูปที่ 3.15 Block Diagram การชดเชยแรงเสียดทานโดยใช้ระบบควบคุมพีไอดีควบคู่กับแบบจำลองลูเกอร์

1. ออกแบบโปรแกรม LabVIEW เพื่อสั่งการชุดทดลองไฮดรอลิกโดยใช้ระบบควบคุมพีไอดี
2. ทำการทดลองโดยการควบคุมแรงที่ 1000N, 2000N และ 3000N โดยวัดแรงจากเซนเซอร์รับแรงและนำข้อมูลที่ได้ไปบันทึก
3. นำค่าที่ได้มาวาดกราฟระหว่างแรงอ้างอิงกับแรงที่ทำการควบคุม และเปรียบเทียบผลที่ได้จากทั้ง 3 กรณี

3.2.4 การทดลองควบคุมแรงโดยใช้ระบบควบคุมพีไอดีควบคู่กับการชดเชยแรงเสียดทานจากแบบจำลองลูเกอร์โดยผ่านตัวกรองคาลมาน

การทดลองนี้เป็นการทดลองควบคุมแรง โดยเมื่อสั่งการ ระบบจะชดเชยแรงเสียดทานที่ได้จากการประมาณค่าแบบจำลองลูเกอร์โดยผ่านตัวกรองคาลมาน และมีการป้อนค่ากลับไปเพื่อลดความคลาดเคลื่อนและปรับปรุงการควบคุมแรง ดังแสดงในรูปที่ 3.16 โดยมีขั้นตอนในการทดลองดังนี้



รูปที่ 3.16 Block diagram การชดเชยแรงเสียดทานโดยใช้ระบบควบคุมพีไอดีควบคู่กับแบบจำลองลูเกอร์โดยผ่านตัวกรองคาลมาน

1. ออกแบบโปรแกรม LabVIEW เพื่อสั่งการชุดทดลองไฮดรอลิกโดยใช้ระบบควบคุมพีไอดี
2. ทำการทดลองโดยการควบคุมแรงที่ 1000N, 2000N และ 3000N โดยวัดแรงจากเซนเซอร์รับแรงและนำข้อมูลที่ได้ไปบันทึก
3. นำค่าที่ได้มาวาดกราฟระหว่างแรงอ้างอิงกับแรงที่ทำการควบคุม และทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองที่ 3.2.3 กับ 3.2.4

บทที่ 4

ผลการทดลอง

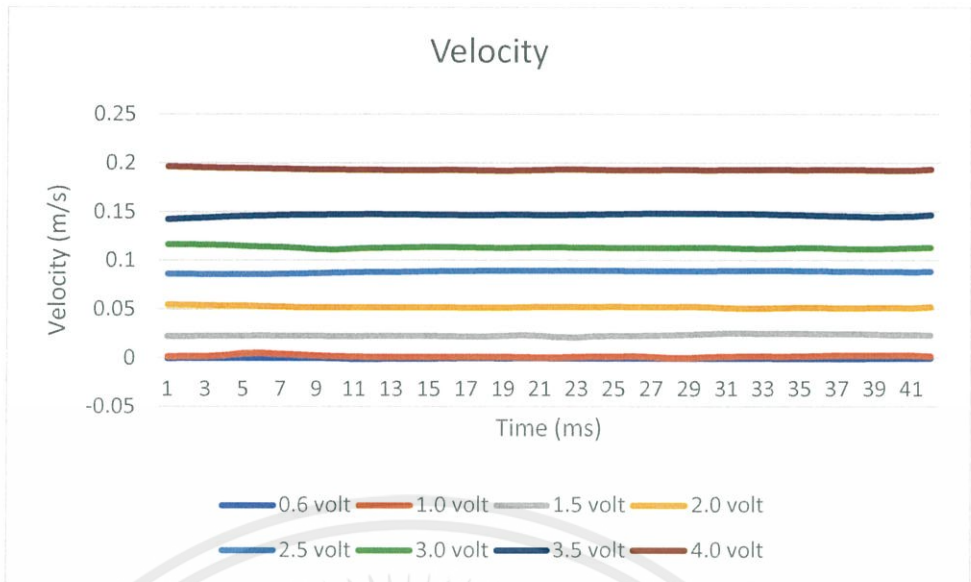
ในบทนี้จะแสดงผลการทดลองหาค่าตัวแปรจากแบบจำลองแรงเสียดทานลูเกอร์, การทดลองเปรียบเทียบแรงเสียดทานจากแบบจำลองลูเกอร์โดยใช้ตัวกรองคาลมานและไม่ใช้, การทดลองควบคุมแรงโดยใช้ระบบควบคุมพีไอดีควบคู่กับการชดเชยแรงเสียดทานจากแบบจำลองลูเกอร์ และการทดลองควบคุมแรงโดยใช้ระบบควบคุมพีไอดีควบคู่กับการชดเชยแรงเสียดทานจากแบบจำลองลูเกอร์ที่ผ่านตัวกรองคาลมาน โดยมีผลการทดลองที่ได้ดังนี้

การทดลองควบคุมแรงของอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิก โดยใช้กระบอบอกสูบแบบสองก้าน การเคลื่อนที่ของกระบอบอกสูบถูกควบคุมโดยพรอพอร์ชันนัลวาล์ว เซนเซอร์วัดความดันถูกติดตั้งที่หัวและท้ายของกระบอบอกสูบ โดยแรงป้อนกลับของกระบอบอกสูบจะถูกคำนวณโดยความดันภายในกระบอบอกสูบ และโหลดเซลล์ถูกติดตั้งไว้ที่ปลายชุดทดลอง โดยสัญญาณของแรงที่วัดได้จากโหลดเซลล์จะถูกใช้เป็นแรงอ้างอิง และเซนเซอร์วัดระยะทางจะถูกนำมาคำนวณอนุพันธ์เชิงตัวเลขเพื่อคำนวณเป็นค่าความเร็วการอัดตัวของสปริงจะนำมาใช้ในการจำลองการรับโหลดของกระบอบอกสูบ

4.1 การทดลองเพื่อหาค่าตัวแปรในแบบจำลองลูเกอร์

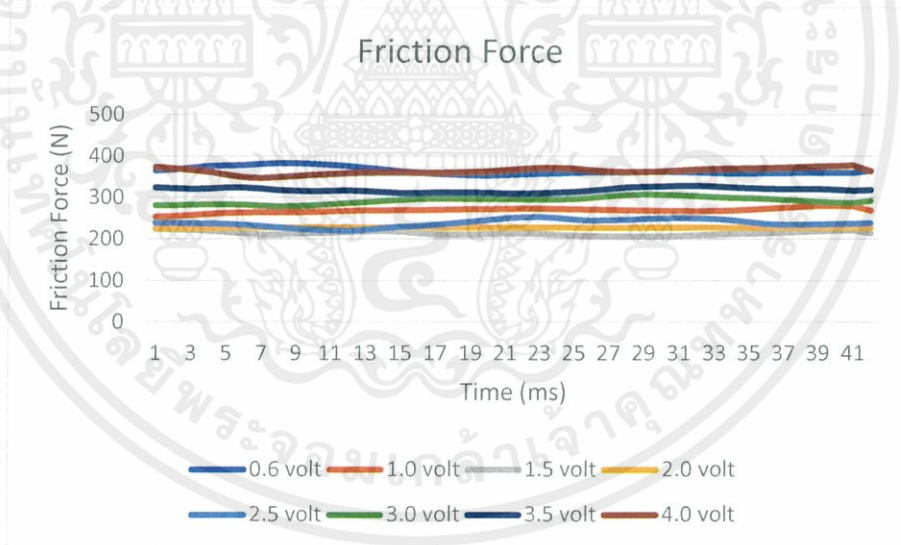
4.1.1 แรงเสียดทานที่ได้จากโปรแกรม LabVIEW

ในการทดลองประมาณค่าแรงเสียดทานและความเร็วจากโปรแกรม LabVIEW การหาค่าแรงเสียดทานใช้กฎข้อที่สองของนิวตันเป็นพื้นฐานในการคำนวณ ซึ่งค่าความดันที่รับโดยเซนเซอร์วัดความดันติดตั้งบริเวณปลายกระบอบอกสูบทั้งด้านหัวและด้านท้าย ค่าความเร็วของกระบอบอกสูบคำนวณจากอนุพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งการเคลื่อนที่ลูกสูบต่อเวลาโดยรับค่าสัญญาณจากเซนเซอร์วัดตำแหน่งการเคลื่อนที่ติดตั้งบริเวณปลายกระบอบอกสูบด้านท้ายและในการทดลองได้จ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ต่างกันให้กับพรอพอร์ชันนัลวาล์ว เพื่อทำให้ลูกสูบเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ต่างกัน และจัดเก็บค่าแรงเสียดทานกับความเร็วของแต่ละแรงดันไฟฟ้ามาเฉลี่ย รวมทั้งประมาณค่าตัวแปรด้วยโปรแกรม Microsoft Excel ดังผลลัพธ์ที่แสดงตารางที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 กราฟความเร็วที่รับค่าได้จาก LabVIEW ในแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันในขณะที่ กระบอกสูบยืดออกที่ช่วงเวลา 80-120 ms

จากรูปที่ 4.1 แสดงค่าความเร็วที่ได้จากการทดลองในโปรแกรม LabVIEW เมื่อกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันโดยไม่มีภาระในการรับแรง จะทำให้ความเร็วของกระบอกสูบมีค่าที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.2 กราฟแรงเสียดทานที่รับค่าได้จาก LabVIEW ในแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันใน ขณะที่กระบอกสูบยืดออกที่ช่วงเวลา 80-120 ms

จากรูปที่ 4.2 แสดงค่าแรงเสียดทานที่ได้จากการทดลองในโปรแกรม LabVIEW เมื่อ กำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันโดยไม่มีภาระในการรับแรง จะทำให้แรงเสียดทานของกระบอกสูบต่างกัน

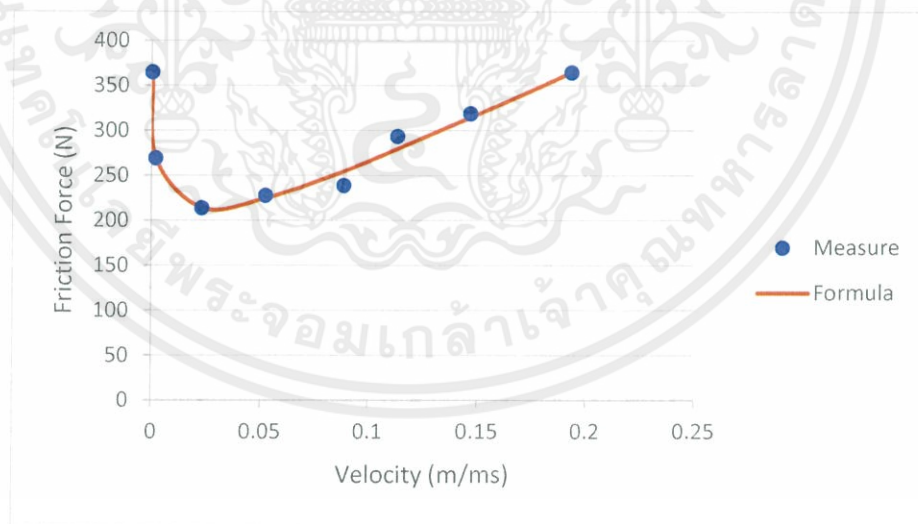
ตารางที่ 4.1 ค่าความเร็วเฉลี่ยและค่าแรงเสียดทานเฉลี่ยจากการทดลองในขณะที่ลูกสูบยืดออก

Velocity (m/ms)	Friction force (N)
0.00037	365.0802
0.001982	269.4891
0.023232	214.1129
0.052256	228.0176
0.088532	239.0108
0.113437	293.5378
0.146647	318.9221
0.193415	364.6968

จากตารางที่ 4.1 แสดงค่าเฉลี่ยของความเร็วและแรงเสียดทานในขณะที่ลูกสูบยืดออก โดยสั่งการที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0.6, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 และ 4.0 โวลต์ตามลำดับ

4.1.2 ตัวแปรในแบบจำลองแรงเสียดทานลูกเกอร์ขณะที่ลูกสูบยืดออก

นำความเร็วเฉลี่ยและแรงเสียดทานเฉลี่ยมาวาดกราฟ และทำการหาค่าตัวแปรในแบบจำลองลูกเกอร์ เพื่อให้กราฟมีความใกล้เคียงกับแรงเสียดทานที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 4.3 กราฟระหว่างค่าแรงเสียดทานที่ได้จากการทดลองและแรงเสียดทานที่ได้จากแบบจำลองลูกเกอร์ขณะที่ลูกสูบยืดออก

จากรูปที่ 4.3 จุดสีฟ้าคือค่าแรงเสียดทานที่วัดได้จากการทดลองที่ความเร็วต่างๆ และเส้นสีน้ำตาลคือค่าแรงเสียดทานซึ่งคำนวณจากสมการของแบบจำลองลูกเกอร์

ตารางที่ 4.2 ค่าแรงเสียดทานจากการประมาณค่าด้วยแบบจำลองแรงเสียดทานลูเกอร์
ในขณะที่ถูกสูบยืดออก

Velocity (m/ms)	Friction force (N)
0.00037	364.0577
0.001982	269.2856
0.023232	215.1287
0.052256	225.0159
0.088532	253.8153
0.113437	286.4826
0.146647	317.4962
0.193415	364.9467

หาค่าตัวแปรจากแบบจำลองแรงเสียดทานลูเกอร์ในขณะที่ถูกสูบยืดออก โดยใช้วิธีการ Non-Linear Regression ในโปรแกรม Microsoft Excel ได้ดังนี้

$$F_C = 72.0658 \text{ N}$$

$$F_S = 238.2970 \text{ N}$$

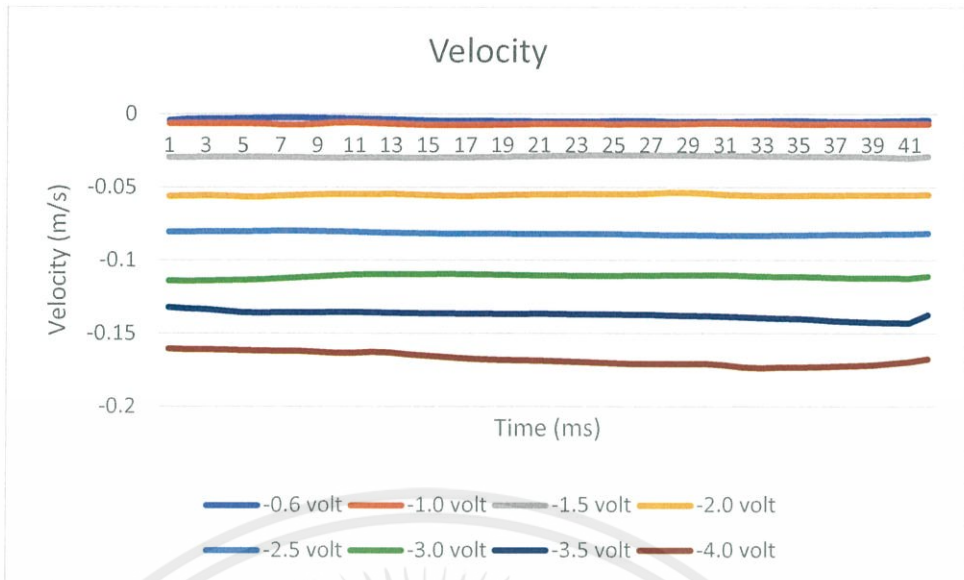
$$v_S = 6.04E-06 \text{ m/s}$$

$$n = 0.7637$$

$$\sigma_2 = 417.8604 \text{ Ns/m}$$

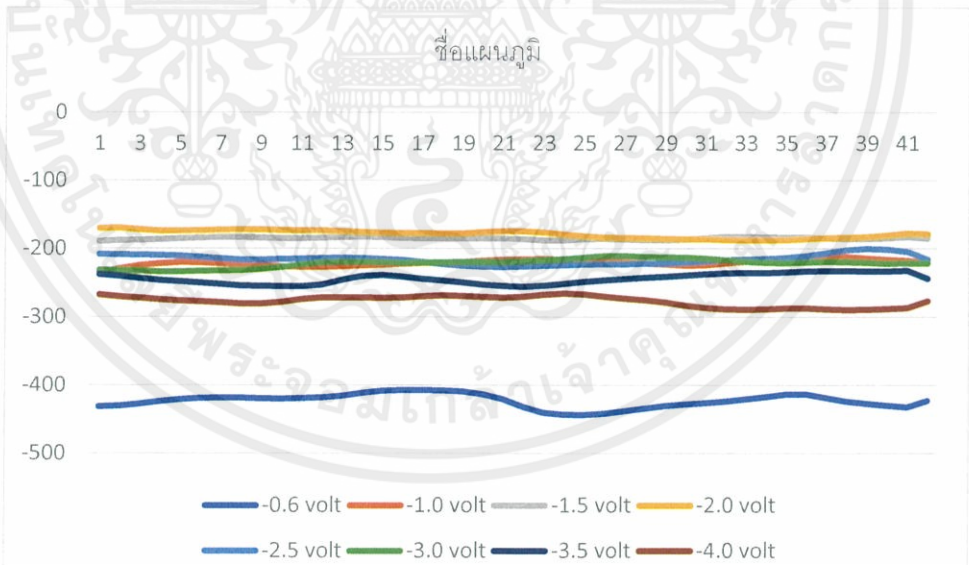
แทนค่าตัวแปรในแบบจำลองแรงเสียดทานลูเกอร์ (2.5) เพื่อใช้ในการประมาณค่าแรงเสียดทานในขณะที่ถูกสูบยืดออกดังสมการที่ (4.5)

$$F_f = 72.0658 + (238.2970 - 72.0658)e^{-\left(\frac{v}{6.04E-06}\right)^{0.7637}} + 417.8604v \quad (4.5)$$



รูปที่ 4.4 กราฟความเร็วที่รับค่าได้จาก LabVIEW ในแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันในขณะที่
กระบอกสูบหดกลับในช่วงเวลา 80-120 ms

จากรูปที่ 4.4 แสดงค่าความเร็วที่ได้จากการทดลองในโปรแกรม LabVIEW เมื่อกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันโดยไม่มีภาระในการรับแรง จะทำให้ความเร็วของกระบอกสูบลีค่าที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.5 กราฟแรงเสียดทานที่รับค่าได้จาก LabVIEW ในแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันใน
ขณะที่กระบอกสูบหดกลับในช่วงเวลา 80-120 ms

รูปที่ 4.5 แสดงค่าแรงเสียดทานที่ได้จากการทดลองในโปรแกรม LabVIEW เมื่อกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันโดยไม่มีภาระในการรับแรง จะทำให้แรงเสียดทานของกระบอกสูบต่างกัน

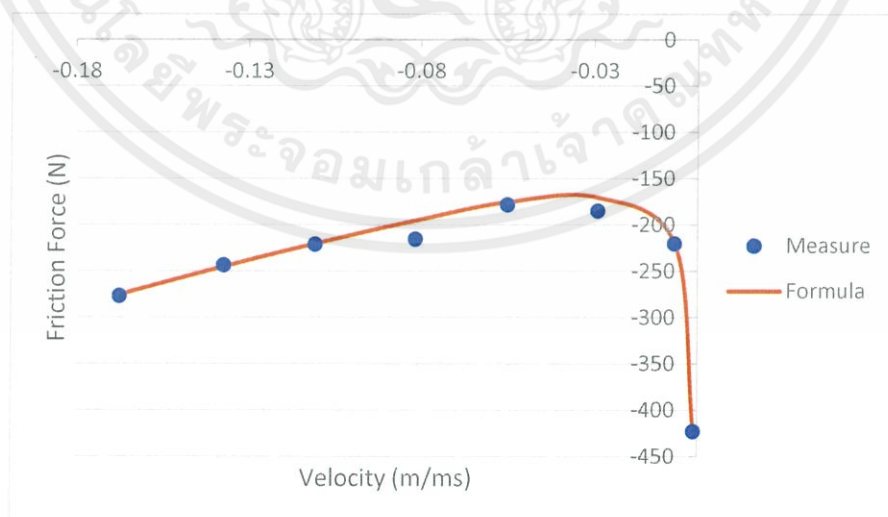
ตารางที่ 4.3 ค่าความเร็วเฉลี่ยและค่าแรงเสียดทานเฉลี่ยจากการทดลองในขณะที่ลูกสูบ
หดรัดกลับ

Velocity (m/cs)	Friction force (N)
-0.00407	-422.7910
-0.00662	-220.222
-0.02893	-184.692
-0.05511	-178.032
-0.08149	-215.186
-0.11089	-220.872
-0.13716	-243.609
-0.16738	-276.77

จากตารางที่ 4.3 แสดงค่าเฉลี่ยของความเร็วและแรงเสียดทานในขณะที่ลูกสูบหดรัดกลับ โดย
สั่งการที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ -0.6, -1.0, -1.5, -2.0, -2.5, -3.0, -3.5 และ -4.0 โวลต์ตามลำดับ

4.1.3 ตัวแปรในแบบจำลองแรงเสียดทานลูเกอร์ขณะที่ลูกสูบหดรัดกลับ

นำความเร็วเฉลี่ยและแรงเสียดทานเฉลี่ยมาวาดกราฟ และทำการหาค่าตัวแปรในแบบจำลองลู
เกอร์เพื่อทำให้กราฟมีความใกล้เคียงกับแรงเสียดทานที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 4.6 กราฟระหว่างค่าแรงเสียดทานที่ได้จากการทดลองและแรงเสียดทานที่ได้จาก
แบบจำลองลูเกอร์ขณะที่ลูกสูบหดรัดกลับ

จากรูปที่ 4.6 จุดสีฟ้าคือค่าแรงเสียดทานที่วัดได้จากการทดลองที่ความเร็วต่างๆ และเส้นสีน้ำเงินคือค่าแรงเสียดทานซึ่งคำนวณจากสมการของแบบจำลองลูเกอร์

ตารางที่ 4.4 ค่าแรงเสียดทานที่ได้จากการประมาณค่าด้วยแบบจำลองแรงเสียดทานลูเกอร์ ในขณะที่ลูกสูบหดกลับ

Velocity (m/cs)	Friction force (N)
-0.00407	-422.9161
-0.00662	-221.4619
-0.02893	-171.2484
-0.05511	-177.1548
-0.08149	-196.1125
-0.11089	-220.9854
-0.13716	-245.3184
-0.16738	-276.7618

หาค่าตัวแปรจากแบบจำลองแรงเสียดทานลูเกอร์ ในขณะที่ลูกสูบยืดออก โดยใช้วิธีการ Non-Linear Regression ในโปรแกรม Microsoft Excel ได้ดังนี้

$$F_C = -203.7760 \text{ N}$$

$$F_S = -51.7302 \text{ N}$$

$$v_S = -1\text{E-}05 \text{ m/s}$$

$$n = 0.6847$$

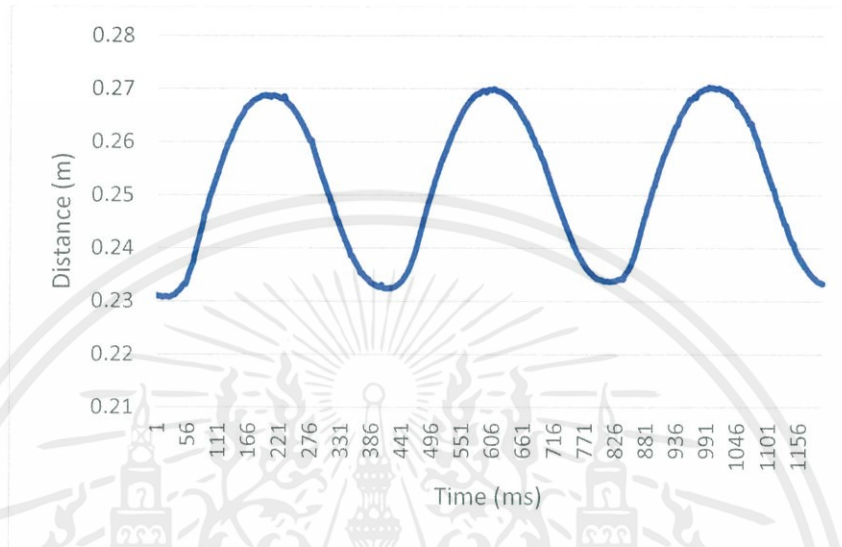
$$\sigma_2 = 214.0666 \text{ Ns/m}$$

แทนค่าตัวแปรในแบบจำลองแรงเสียดทานลูเกอร์ (2.5) เพื่อใช้ในการประมาณค่าแรงเสียดทานในขณะที่ลูกสูบหดกลับดังสมการที่ (4.6)

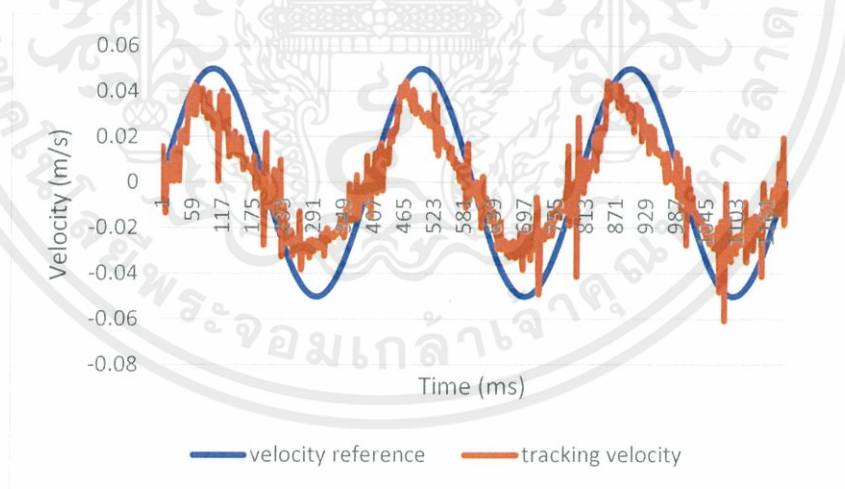
$$F_r = -203.7760 + (-51.7302 + 203.7760)e^{-\left(\frac{v}{-1\text{E-}05}\right)^{0.6847}} + 214.0666v \quad (4.6)$$

4.2 การทดลองเปรียบเทียบแรงเสียดทานจากแบบจำลองลูเกอร์แบบใช้ตัวกรอง คาลมานและไม่ใช้ตัวกรองคาลมาน

4.2.1 การควบคุมความเร็วแบบ Sine Wave ในระบบควบคุมพีไอดีโดยไม่ใช้ ตัวกรองคาลมาน

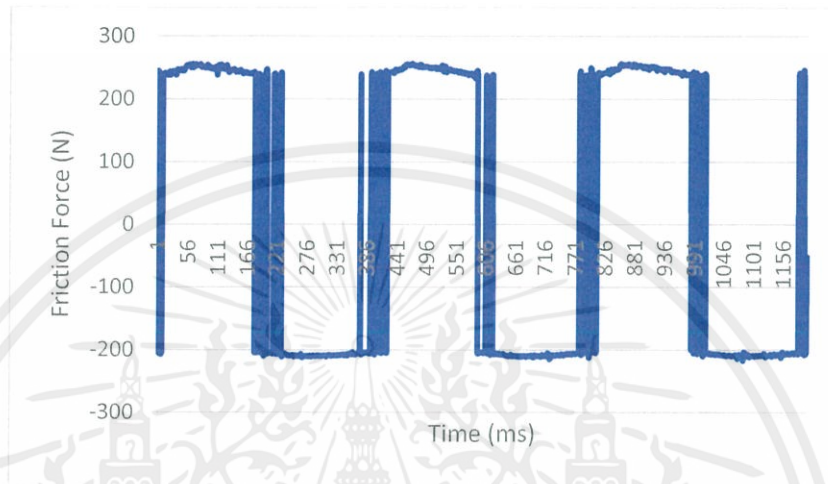


รูปที่ 4.7 กราฟระยะทางการเคลื่อนที่ที่ได้จากการควบคุมความเร็วแบบ Sine Wave



รูปที่ 4.8 กราฟ Sine Wave ที่ทำการวัดค่าความเร็วที่ได้จากระบบควบคุมพีไอดีเทียบกับ
กับความเร็วอ้างอิง

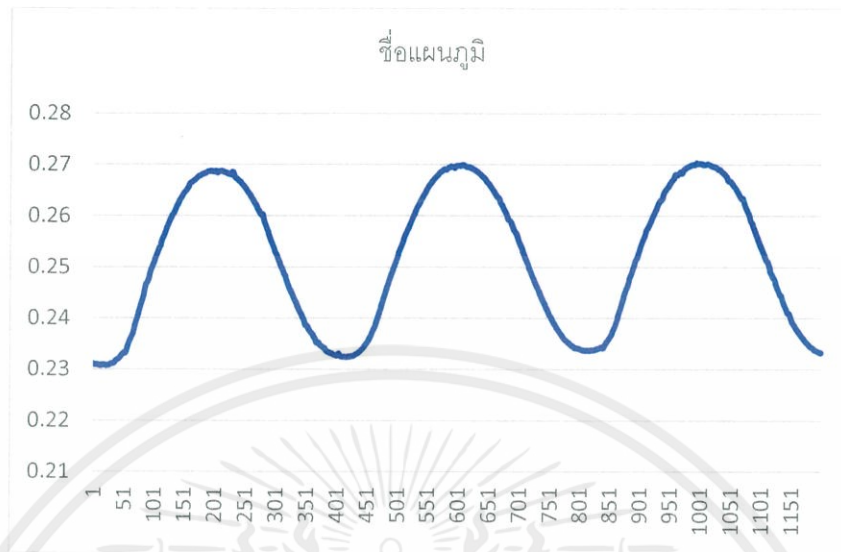
จากรูปที่ 4.7 แสดงถึงระยะทางการเคลื่อนที่ที่ได้จากเซนเซอร์ขณะที่สั่งการควบคุมความเร็วแบบ Sine Wave ที่แอมพลิจูด 5 cm และความถี่ 0.25 Hz และรูปที่ 4.8 แสดงถึงความเร็วที่ได้จากอนุพันธ์เชิงตัวเลขของสัญญาณจากเซนเซอร์วัดระยะทาง โดยใช้ระบบควบคุมพีไอดีที่แอมพลิจูด 5 cm และความถี่ 0.25 Hz ในช่วงเวลา 1200 ms



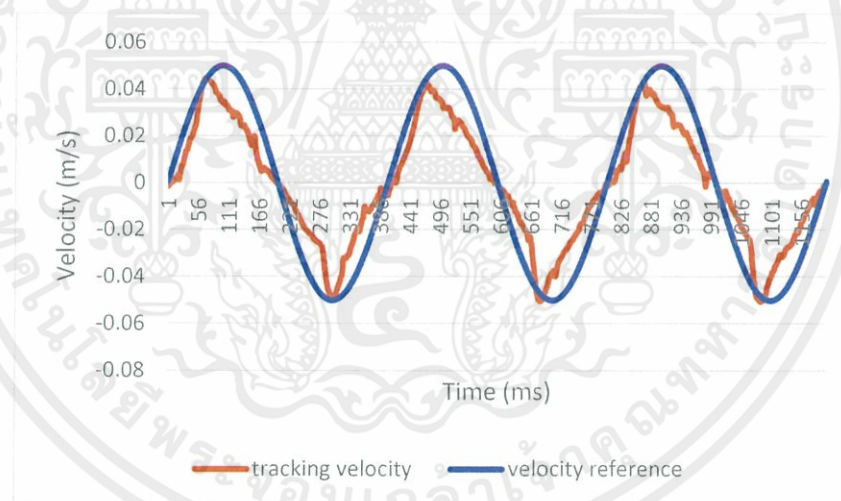
รูปที่ 4.9 กราฟแรงเสียดทานจากแบบจำลองลูกเกอ์จากระบบควบคุมพีไอดี

จากรูปที่ 4.9 แสดงการประมาณค่าแรงเสียดทานลูกเกอ์จากการควบคุมแบบ sine wave ที่ใช้ระบบควบคุมพีไอดี โดยค่าแรงเสียดทานคำนวณจากค่าความเร็วที่ได้จากอนุพันธ์เชิงตัวเลขของสัญญาณจากเซนเซอร์วัดระยะทาง

4.2.2 การควบคุมความเร็วแบบ Sine Wave ในระบบควบคุมพีไอดีโดยใช้ ตัวกรองคาลมาน

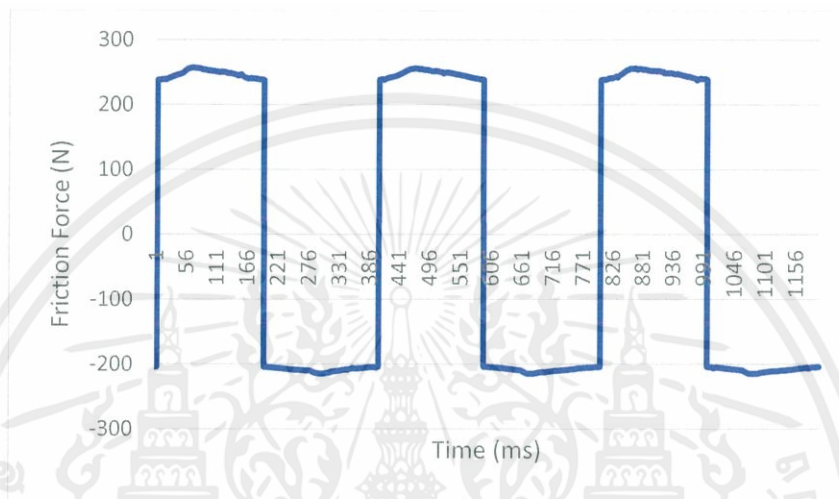


รูปที่ 4.10 กราฟระยะทางการเคลื่อนที่ที่ได้จากการควบคุมความเร็วแบบ Sine Wave



รูปที่ 4.11 กราฟ Sine Wave ที่ทำการวัดค่าความเร็วที่ผ่านตัวกรองคาลมานจากระบบ
ควบคุมพีไอดีเทียบกับความเร็วอ้างอิง

จากรูปที่ 4.10 แสดงถึงระยะทางการเคลื่อนที่ที่ได้จากเซนเซอร์ขณะที่สั่งการควบคุมความเร็วแบบ Sine Wave ที่แอมพลิจูด 5 cm และความถี่ 0.25 Hz และรูปที่ 4.11 แสดงถึงความเร็วที่ได้จากอนุพันธ์เชิงตัวเลขของสัญญาณจากเซนเซอร์วัดระยะทางและผ่านตัวกรองคาลมาน เพื่อลดสัญญาณรบกวน โดยใช้ระบบควบคุมพีไอดีที่แอมพลิจูด 5 cm และความถี่ 0.25 Hz ในช่วงเวลา 1200 ms



รูปที่ 4.12 กราฟแรงเสียดทานจากแบบจำลองลูเกอร์ที่ผ่านตัวกรองคาลมานจากระบบควบคุมพีไอดี

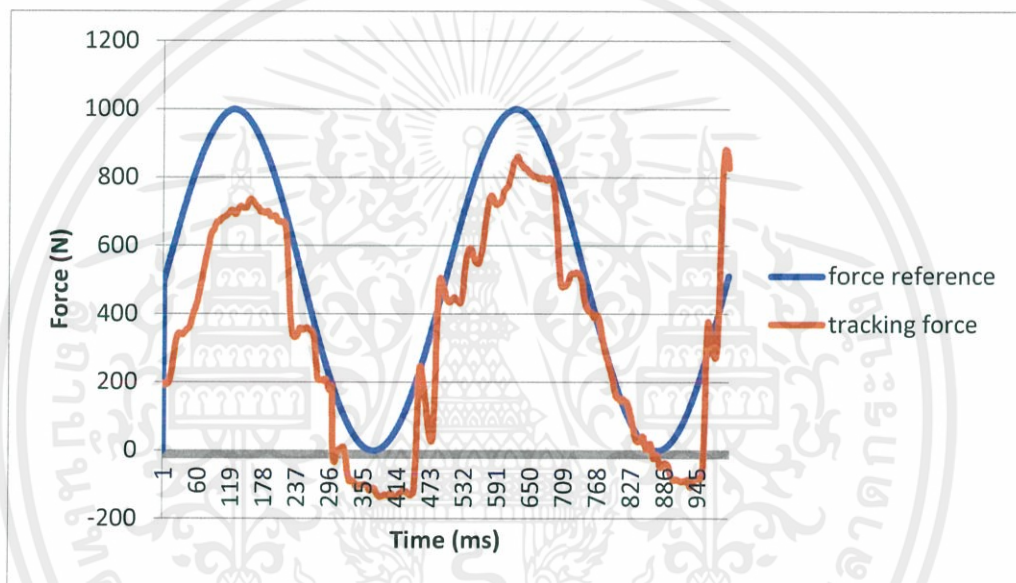
จากรูปที่ 4.12 แสดงการประมาณค่าแรงเสียดทานลูเกอร์จากการควบคุมแบบ sine wave ที่ใช้ระบบควบคุมพีไอดี โดยค่าแรงเสียดทานคำนวณจากค่าความเร็วที่ได้จากอนุพันธ์เชิงตัวเลขของสัญญาณจากเซนเซอร์วัดระยะทางและผ่านตัวกรองคาลมาน

จากการทดลองเปรียบเทียบที่ระยะทางการเคลื่อนที่เดียวกัน พบว่าความเร็วที่ผ่านตัวกรองคาลมานเพื่อลดสัญญาณรบกวนทำให้ได้ค่าความเร็วที่แม่นยำมากกว่า และสามารถนำไปประมาณค่าแรงเสียดทานจากแบบจำลองลูเกอร์ได้แม่นยำกว่า

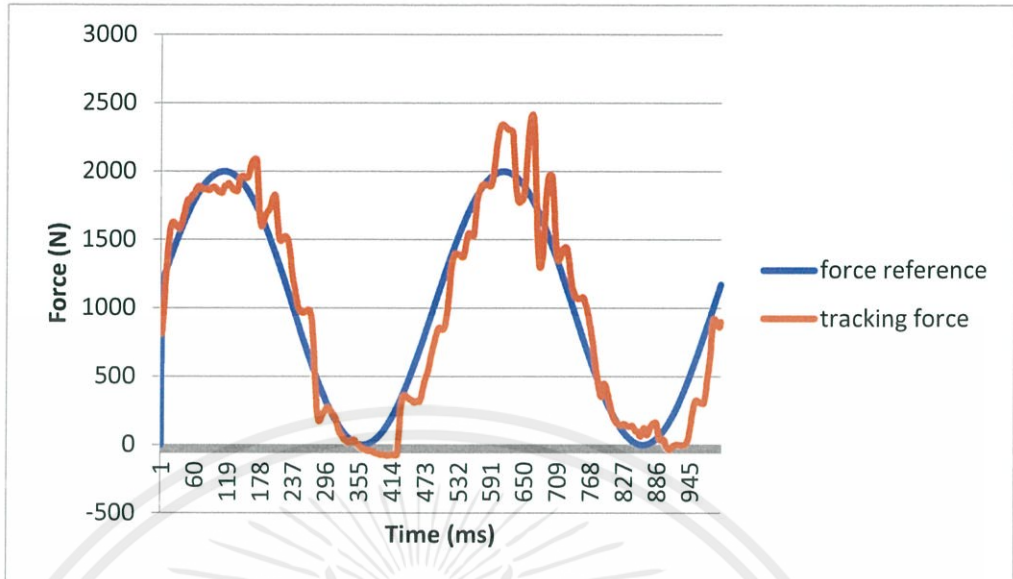
4.3 การทดลองควบคุมแรงโดยใช้ระบบควบคุมพีไอดีควบคู่กับการชดเชยแรงเสียดทานจากแบบจำลองลูเกอร์

ในการทดลองนี้ทำการสั่งควบคุมแรงในระบอบกู่ 2 กรณีสืบกัน โดยการสั่งสัญญาณแบบ sine wave และ square wave ที่ 1000N, 2000N และ 3000N โดยชดเชยแรงเสียดทานด้วยแบบจำลองลูเกอร์ ควบคู่กับระบบควบคุมพีไอดี โดยในผลการทดลอง โดยเส้นสีน้ำเงินเป็นแรงอ้างอิงที่ได้จากโพลดเซลล์ และเส้นสีส้มเป็นแรงที่วัดจากการชดเชยแรงเสียดทานลูเกอร์ โดยมีผลการทดลองดังนี้

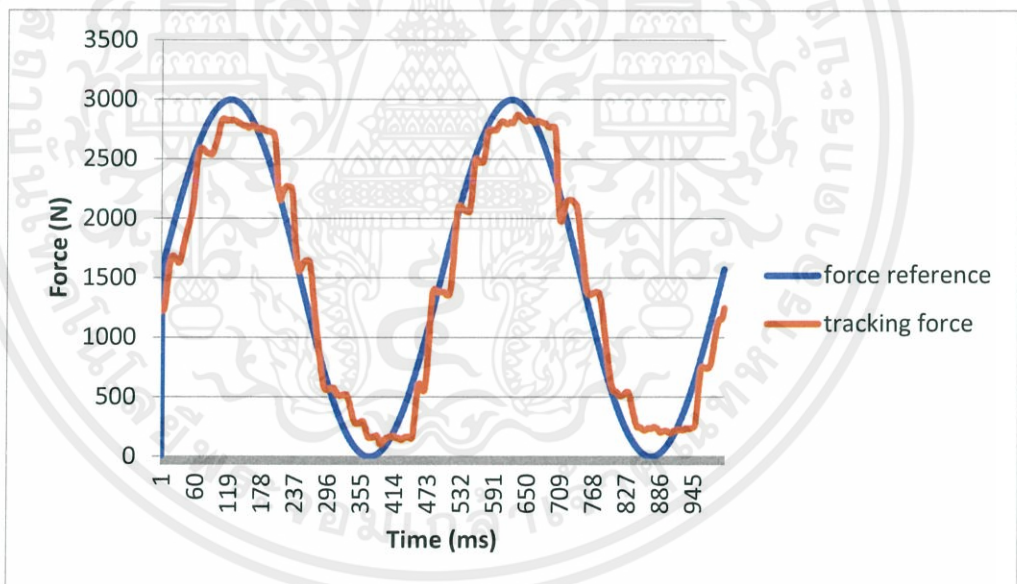
4.3.1 การทดลองควบคุมแรงแบบ sine wave



รูปที่ 4.13 กราฟ sine wave ค่าแรงที่วัดได้จากเซนเซอร์เทียบกับแรงอ้างอิงจากการควบคุมแรงที่ 1000N



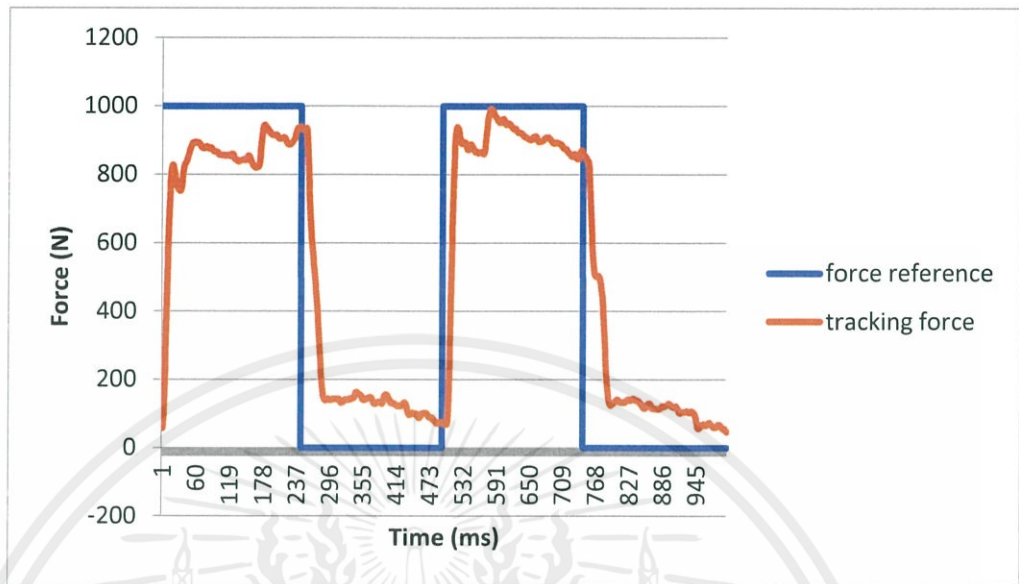
รูปที่ 4.14 กราฟ sine wave ค่าแรงที่วัดได้จากเซนเซอร์เทียบกับแรงอ้างอิงจากการควบคุมแรงที่ 2000N



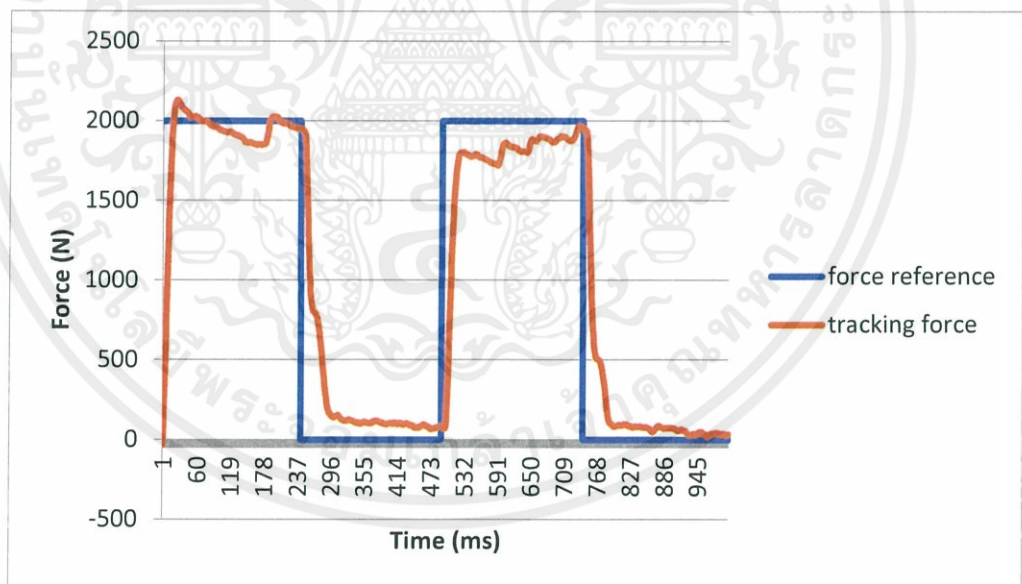
รูปที่ 4.15 กราฟ sine wave ค่าแรงที่วัดได้จากเซนเซอร์เทียบกับแรงอ้างอิงจากการควบคุมแรงที่ 3000N

ผลจากการติดตามแรงแบบ sine wave โดยการสั่งแรงอ้างอิงที่ 1000N, 2000N และ 3000N ผ่านระบบควบคุมพีไอดีและวัดค่าแรงที่ได้จากเซนเซอร์รับแรง มีค่าเฉลี่ยของรากที่สองของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนจากในรูปเท่ากับ 196.13N, 215.67N และ 233.54N ตามลำดับ

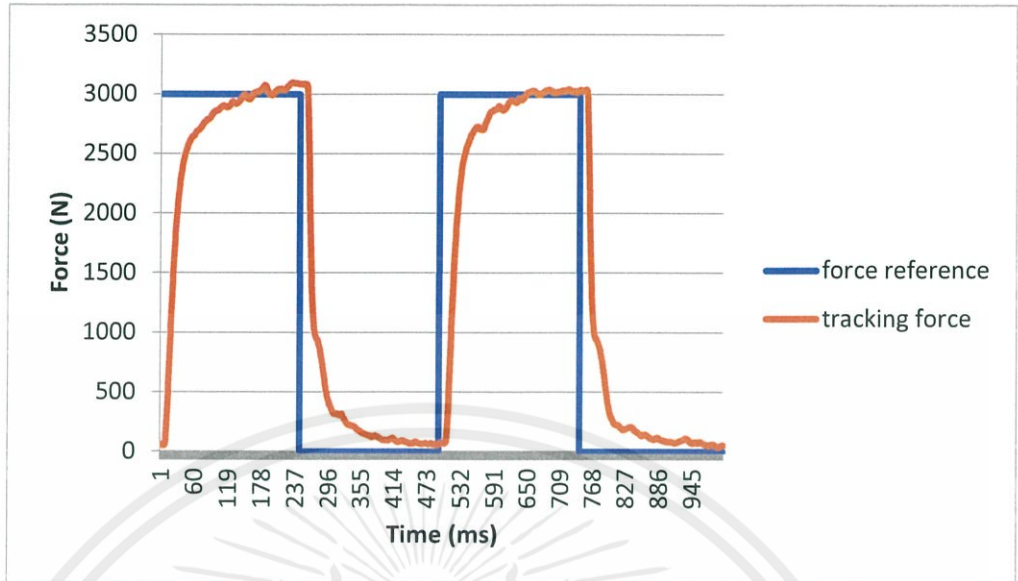
4.3.2 การทดลองควบคุมแรงแบบ square wave



รูปที่ 4.16 กราฟ square wave ค่าแรงที่วัดได้จากเซนเซอร์เทียบกับแรงอ้างอิงจากการควบคุมแรงที่ 1000N



รูปที่ 4.17 กราฟ square wave ค่าแรงที่วัดได้จากเซนเซอร์เทียบกับแรงอ้างอิงจากการควบคุมแรงที่ 2000N



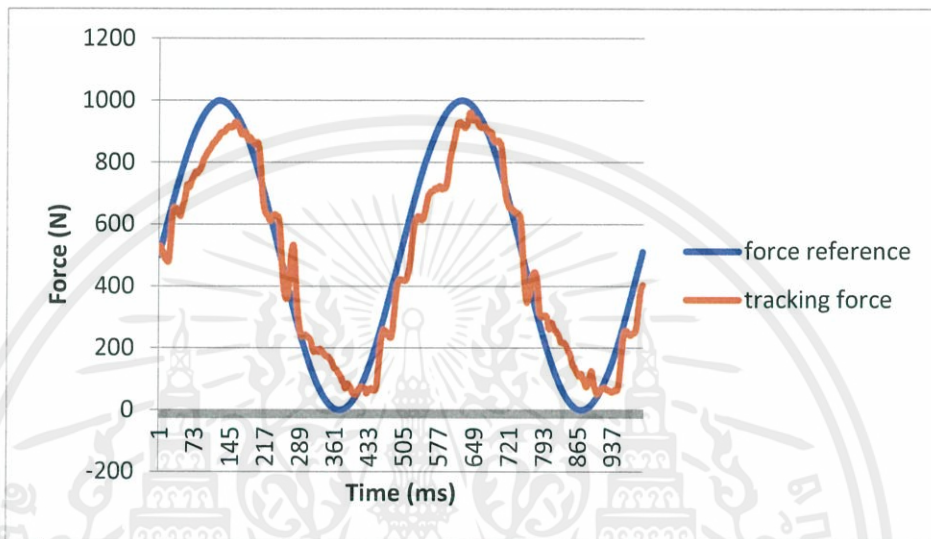
รูปที่ 4.18 กราฟ square wave ค่าแรงที่วัดได้จากเซนเซอร์เทียบกับแรงอ้างอิงจากการควบคุมแรงที่ 3000N

ผลจากการติดตามแรงแบบ square wave โดยการสั่งแรงอ้างอิงที่ 1000N, 2000N และ 3000N ผ่านระบบควบคุมพีไอดีและวัดค่าแรงที่ได้จากเซนเซอร์รับแรง มีค่าเฉลี่ยของรากที่สองของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนจากในรูปเท่ากับ 265.10N, 571.73N และ 868.14N ตามลำดับ

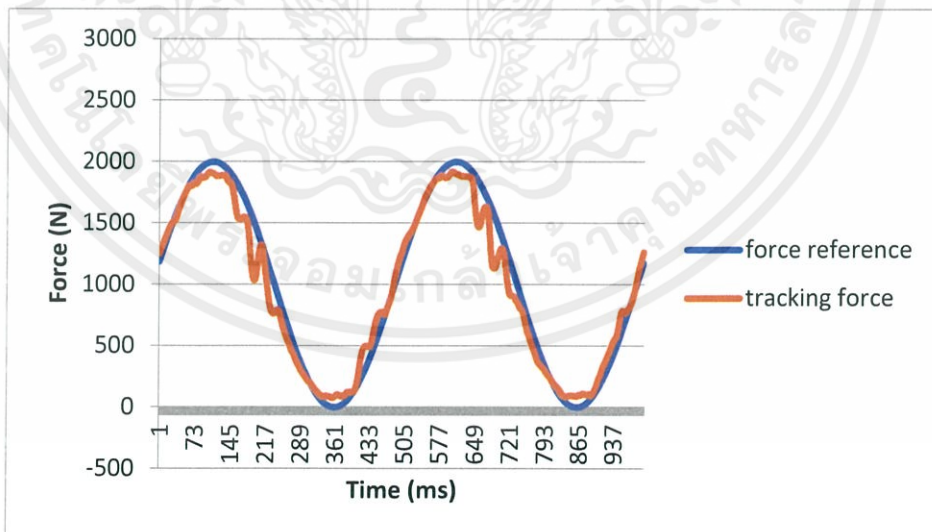
4.4 การทดลองควบคุมแรงโดยใช้ระบบควบคุมพีไอดีควบคู่กับการชดเชยแรงเสียดทานจากแบบจำลองลูเกอร์โดยผ่านตัวกรองคาลมาน

โดยเส้นสีน้ำเงินเป็นแรงอ้างอิงที่ได้จากโพลดเซลล์ และเส้นสีส้มเป็นแรงที่วัดจากการชดเชยแรงเสียดทานลูเกอร์

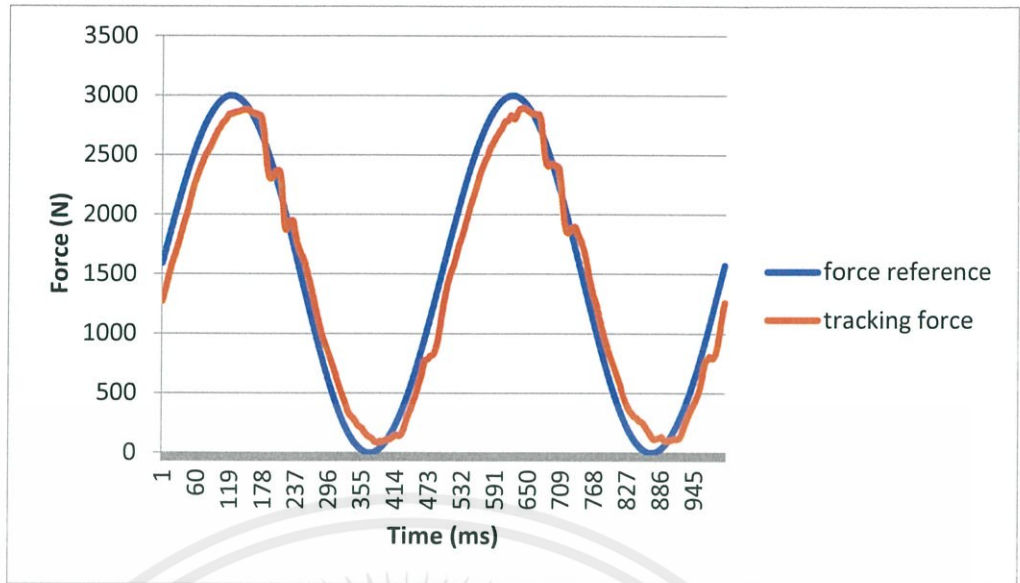
4.4.1 การทดลองควบคุมแรงแบบ sine wave โดยผ่านตัวกรองคาลมาน



รูปที่ 4.19 กราฟ sine wave ค่าแรงที่วัดได้จากเซนเซอร์โดยผ่านตัวกรองคาลมานเทียบกับแรงอ้างอิงจากการควบคุมแรงที่ 1000N



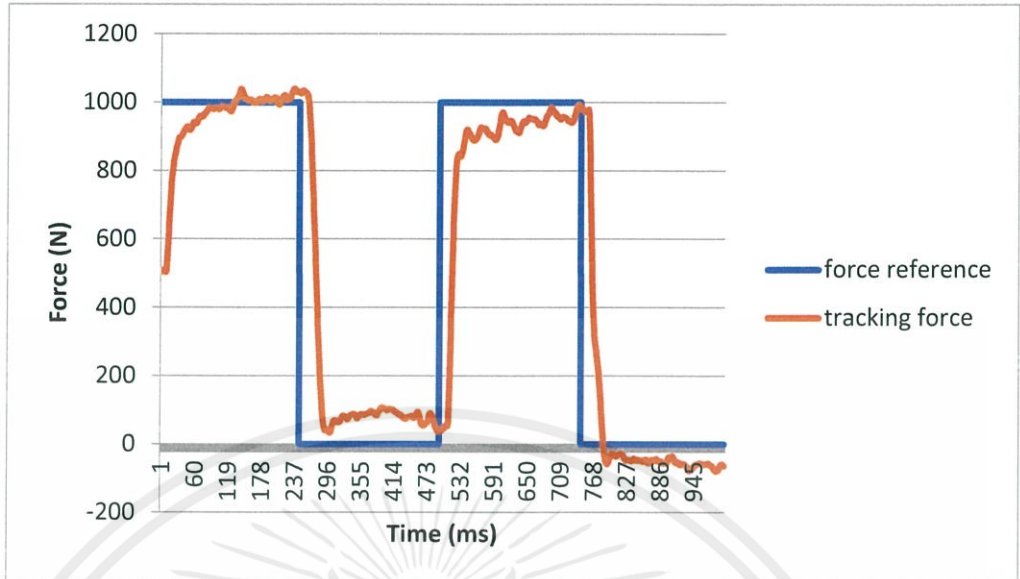
รูปที่ 4.20 กราฟ sine wave ค่าแรงที่วัดได้จากเซนเซอร์โดยผ่านตัวกรองคาลมานเทียบกับแรงอ้างอิงจากการควบคุมแรงที่ 2000N



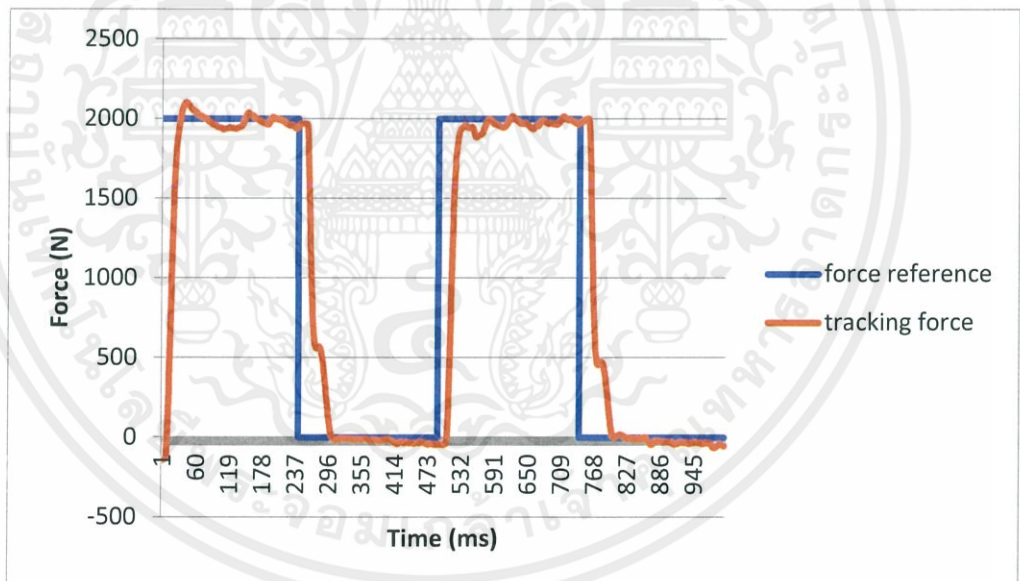
รูปที่ 4.21 กราฟ sine wave ค่าแรงที่วัดได้จากเซนเซอร์โดยผ่านตัวกรองคาลมานเทียบกับแรงอ้างอิงจากการควบคุมแรงที่ 3000N

ผลจากการติดตามแรงแบบ sine wave โดยการสั่งแรงอ้างอิงที่ 1000N, 2000N และ 3000N ผ่านระบบควบคุมพีไอดีและตัวกรองคาลมาน และวัดค่าแรงที่ได้จากเซนเซอร์รับแรง มีค่าเฉลี่ยของรากที่สองของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนจากรูปเท่ากับ 101.20N, 133.34N และ 212.83N ตามลำดับ

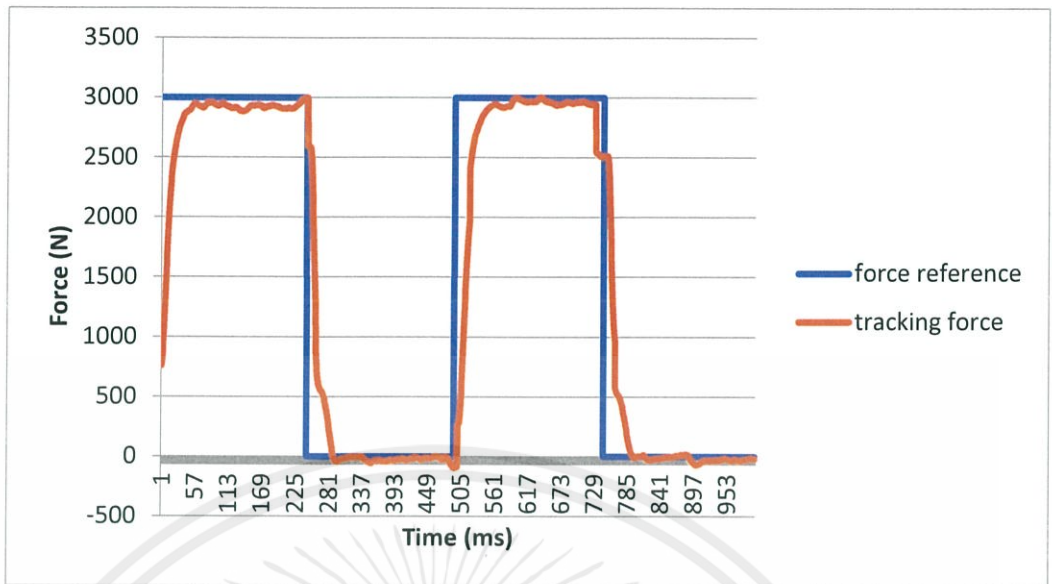
4.4.2 การทดลองควบคุมแรงแบบ square wave โดยผ่านตัวกรองคาบมาน



รูปที่ 4.22 กราฟ square wave ค่าแรงที่วัดได้จากเซนเซอร์โดยผ่านตัวกรองคาบมาน เทียบกับแรงอ้างอิงจากการควบคุมแรงที่ 1000N



รูปที่ 4.23 กราฟ square wave ค่าแรงที่วัดได้จากเซนเซอร์โดยผ่านตัวกรองคาบมาน เทียบกับแรงอ้างอิงจากการควบคุมแรงที่ 2000N



รูปที่ 4.24 กราฟ square wave ค่าแรงที่วัดได้จากเซนเซอร์โดยผ่านตัวกรองคาสมาน เทียบกับแรงอ้างอิงจากการควบคุมแรงที่ 3000N

ผลจากการติดตามแรงแบบ square wave โดยการสั่งแรงอ้างอิงที่ 1000N, 2000N และ 3000N ผ่านระบบควบคุมพีไอดีและตัวกรองคาสมาน และวัดค่าแรงที่ได้จากเซนเซอร์รับแรง มีค่าเฉลี่ยของรากที่สองของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนจากในรูปเท่ากับ 255.17N, 443.34N และ 601.80N ตามลำดับ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างการทดลองควบคุมแรงในกระบอกสูบโดยใช้ระบบควบคุมพีไอดีควบคู่กับการชดเชยแรงเสียดทาน และการทดลองควบคุมแรงในกระบอกสูบโดยใช้ระบบควบคุมพีไอดีและตัวกรองกาลมานควบคู่กับการชดเชยแรงเสียดทาน

ตารางที่ 5.1 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของรากที่สองของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนจากการควบคุมแรงแบบ sine wave

แรง อ้างอิง (N)	ค่าเฉลี่ยของรากที่สองของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนระบบควบคุมพีไอดี (N)	ค่าเฉลี่ยของรากที่สองของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนระบบควบคุมพีไอดีและตัวกรองกาลมาน (N)	ค่าเฉลี่ยของรากที่สองของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนระบบควบคุมพีไอดี (%)	ค่าเฉลี่ยของรากที่สองของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนระบบควบคุมพีไอดีและตัวกรองกาลมาน (%)
1000	196.13	101.20	19.61	10.12
2000	215.67	133.34	10.78	6.67
3000	233.54	212.83	7.78	7.09

จากตารางที่ 5.1 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของรากที่สองของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนระหว่างการทดลองควบคุมแรงในกระบอกสูบโดยใช้ระบบควบคุมพีไอดีควบคู่กับการชดเชยแรงเสียดทาน โดยแบ่งเป็นกรณีที่ใช้ตัวกรองกาลมานและไม่ใช้ตัวกรองกาลมาน และสั่งการในรูปแบบ sine wave ผลจากการทดลองพบว่า การชดเชยแรงเสียดทานโดยผ่านตัวกรองกาลมานมีทำให้ประสิทธิภาพในการควบคุมแรงมากกว่าการชดเชยแรงเสียดทานจากแบบจำลองลูเกอร์ปกติ

ตารางที่ 5.2 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของรากที่สองของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนจากการควบคุมแรงแบบ square wave

แรงอ้างอิง (N)	ค่าเฉลี่ยของรากที่สองของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนระบบควบคุมพีไอดี (N)	ค่าเฉลี่ยของรากที่สองของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนระบบควบคุมพีไอดีและตัวกรองคาลมาน (N)	ค่าเฉลี่ยของรากที่สองของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนระบบควบคุมพีไอดี (%)	ค่าเฉลี่ยของรากที่สองของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนระบบควบคุมพีไอดีและตัวกรองคาลมาน (%)
1000	265.10	255.17	26.51	25.52
2000	571.73	443.34	28.59	22.17
3000	868.14	601.80	28.94	20.06

จากตารางที่ 5.2 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของรากที่สองของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนระหว่างการทดลองควบคุมแรงในกระบอกสูบโดยใช้ระบบควบคุมพีไอดีควบคู่กับการชดเชยแรงเสียดทาน โดยแบ่งเป็นกรณีที่ใช้ตัวกรองคาลมานและไม่ใช้ตัวกรองคาลมาน และสั่งการในรูปแบบ square wave ผลจากการทดลองพบว่า การชดเชยแรงเสียดทานโดยผ่านตัวกรองคาลมานมีทำให้ประสิทธิภาพในการควบคุมแรงมากกว่าการชดเชยแรงเสียดทานจากแบบจำลองลูเกอร์ปกติ

เนื่องจากแบบจำลองลูเกอร์ประมาณค่าแรงเสียดทานจากค่าความเร็วและตัวกรองคาลมานทำให้ค่าค่าความเร็วที่ได้จากอนุพันธ์เชิงตัวเลขของสัญญาณจากเซนเซอร์วัดระยะทางมีความแม่นยำเพิ่มขึ้น เป็นผลให้การประมาณค่าแรงเสียดทานจากแบบจำลองลูเกอร์มีความแม่นยำเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อนำไปสั่งการควบคุมแรงในกระบอกสูบจึงทำให้มีการชดเชยแรงเสียดทานที่แม่นยำมากกว่าการชดเชยแรงเสียดทานจากแบบจำลองลูเกอร์ปกติ

เอกสารอ้างอิง

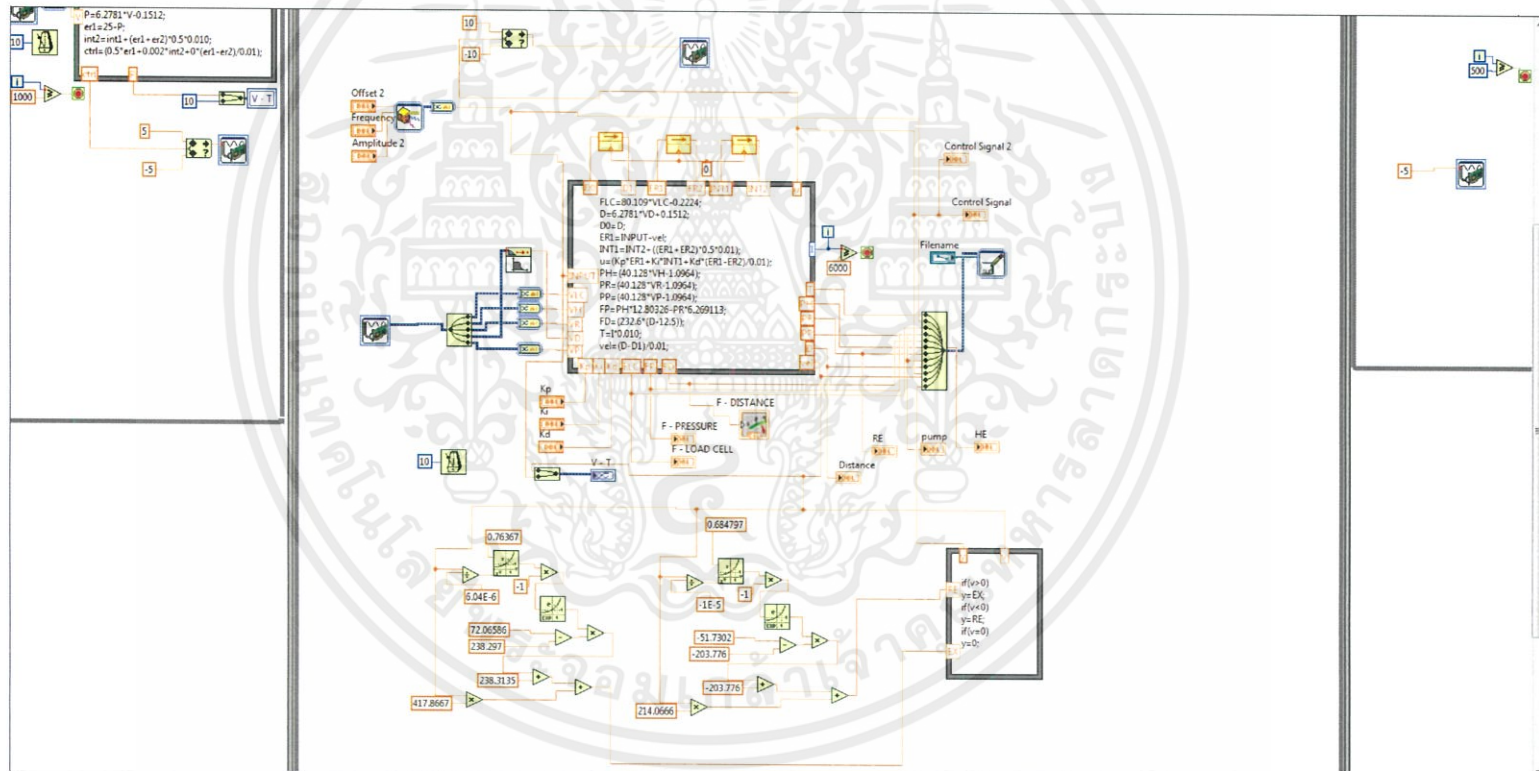
- [1] วิโรจน์ ตรีมงคลโชค และ ศรินทร์ กุตัน. (2559). การควบคุมแรงไฮดรอลิกควบคู่กับการชดเชยแรงเสียดทาน คณะวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
- [2] Adrian Pizzinga. 2012. **Restricted Kalman Filtering: Theory, Methods and Application.** New York : Springer Science+Business Media.
- [3] Hideki YANADA, War Htun KHAING, and Xuan Bo TRAN "Effect of Friction Model on Simulation of Hydraulic Actuator"The 3rd International Conference on Design Engineering and Science, ICDES 2014 Pilsen, Czech Republic, September 1-3, 2014 The Organizing Committee of the ICDES 2014
- [4] Yuvin Adnarain Chinniah. Fault Detection In the Electrohydraulic Actuator Using Extended Kalman Filter. University of Saskatchewan, Mechanical Engineering, Canada, 2004.
- [5] นายชัยวัฒน์ ลือใจ. (2557). การพัฒนาแบบจำลองไหลด้วยระบบมัลติเอเจนต์โดยใช้ตัวกรองคาลมาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [6] นายเกียรติเกรียงไกร ชัยแก้ว, นายฉันทัช อังเกียรติกุล, นางสาวชนกชนม์ อินทเขตต์(2556) รายงานการวิจัยเรื่อง การควบคุมความแรงของกระบอกสูบไฮดรอลิก, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
- [7] นายวัชรพงษ์ อีสสระนุวัฒน์กุล, นายวรศักดิ์ เศรษฐระ(2553). รายงานการวิจัยเรื่องการออกแบบและสร้างการทดลองระบบพอร์ซันนัลไฮดรอลิก, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
- [8] ปจิภรณ์ บุตรแสนลี, ฉัตรมงคล สมรอด, ชัยศิริ ฤทธิเดชา. การออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ไฮดรอลิกส์แบบขนาน คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- [9] โอภาส โกมลวัฒนาพาณิชย์, อุดลย์ พัฒนภักดี, มงคล มงคลวงศ์โรจน์. (2548). การชดเชยและประมาณค่าแรงเสียดทานคูลอมบ์โดยใช้ตัวกรองคาลมานแบบขยาย คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีปทุม
- [10] นางสาวจิตาภา อเนกกิจเจริญ, นายณัฐพร ชิตานนท์, นายณัฐวัตร มั่นคง(2557). รายงานการวิจัยเรื่องการควบคุมความเร็วกระบอกสูบไฮดรอลิก, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง



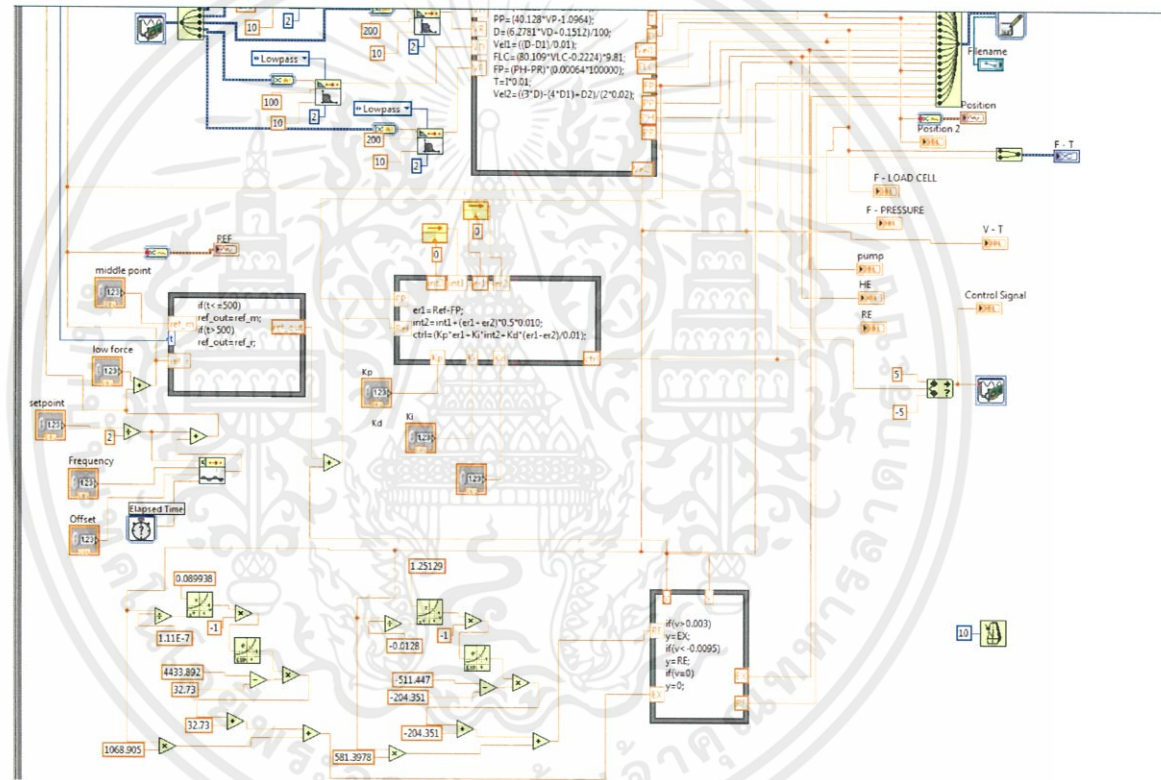
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

รูปที่ 1.ก Block Diagram การหาค่าแรงเสียดทานในกระบอกสูบโดยระบบควบคุมพีเอ็ดดี



รูปที่ 2.n Block Diagram การควบคุมแรงโดยระบบควบคุมพีไอทีควบคุมคู่กับการชดเชยแรงเสียดทาน



รูปที่ 3.ก Control Panel ของการควบคุมแรงโดยระบบพีไอดีควบคู่กับการชดเชยแรงเสียดทาน

