



ระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่นสำหรับการควบคุมขั้นสูง

นายกฤษฎชัย พละไชย
นายชนาธิป คำแหง

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล
คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2566
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่นสำหรับการควบคุมขั้นสูง

นายกฤษณ์ พละไชย

นายชนาธิป คำแหง

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองปริญญาโท

ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง ระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่นสำหรับการควบคุมขั้นสูง

โดย นายกฤตยชญ์ พละไชย

นายชนาธิป คำแหง

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์

หัวหน้าภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรวุฒิ ยะนิล)

คณะกรรมการสอบปริญญาโท

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.พรจิต ประทุมสุวรรณ)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศศิธร ชูแก้ว)

ชาริณี ทองเกิด

กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ชาริณี ทองเกิด)

ชื่อ : นายกฤตยชญ์ พลไชย
นายชนาธิป คำแหง
ชื่อปริญญาบัตร : ระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่นสำหรับการควบคุมขั้นสูง
สาขาวิชา : วิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ศศิธร ชูแก้ว
รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย หอวิมานพร
ปีการศึกษา : 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการทดสอบระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่นสำหรับตัวควบคุมขั้นสูง เพื่อทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุม โดยใช้กล้องเว็บแคมในการตรวจจับตำแหน่งบอลลูกบอล และใช้สเตปมอเตอร์ในการสร้างองศาของแผ่นกระดานเพื่อให้ลูกบอลอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ ตัวควบคุมที่ใช้ในการทดสอบประกอบไปด้วย ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิกรัล ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน ตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิกรัล ปรับจูนค่าด้วยตรรกศาสตร์คลุมเครือ และ ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน ปรับจูนค่าด้วยตรรกศาสตร์คลุมเครือ นำเสนอการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และ ใช้โปรแกรมแมตแล็บจำลองผลตอบสนอง การทดลองสรุปได้ว่าทุกตัวควบคุมสามารถสร้างสมรรถนะในการรักษาตำแหน่งของลูกบอลที่ต้องการได้ แต่มีผลตอบสนองที่แตกต่างกัน เช่น การทดลองรักษาตำแหน่งลูกบอลแกนเอกซ์ 15 เซนติเมตร และแกนวาย 15 เซนติเมตร ตัวควบคุมที่มีเวลาได้ขึ้นต่ำสุด คือ ตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือมีค่า 0.253 วินาที ตัวควบคุมที่เวลาสู่จุดสมดุลต่ำที่สุด คือ ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิกรัลแบบปรับค่าอัตโนมัติมีค่าอยู่ที่ 0.940 วินาที และตัวควบคุมที่มีค่าผลตอบสนองเกินน้อยสุด คือ ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิกรัลแบบปรับค่าอัตโนมัติมีค่าอยู่ที่ 0 เปอร์เซ็นต์ จากการทดลองผลตอบสนองของตัวควบคุมจะมีสมรรถนะที่แตกต่างกัน ผู้ที่มีความเกี่ยวข้องกับระบบควบคุมสามารถนำทฤษฎี และผลตอบสนองของตัวควบคุมไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมเครื่องจักรในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการสร้างเสถียรภาพ เพื่อเพิ่มสมรรถนะของอุปกรณ์ และลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นก่อนนำตัวควบคุมไปใช้งาน

(ปริญญาบัตรมีจำนวนทั้งสิ้น 429 หน้า)

คำสำคัญ : ระบบควบคุมบอลบนแผ่น ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิกรัล ตรรกศาสตร์คลุมเครือ ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน



อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตร

Name : Mr.Kittayod Palachai
Mr.Chanatip Komhang
Project Title : Ball on Plate Control System For Advanced Control
Major Field : Teacher Training in Mechatronics Engineering
King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Advisor : Associate Professor Dr.Sasithorn Chookaew
Associate Professor Dr.Suppachai Howimanporn
Academic Year : 2023

Abstract

This work tests a balance ball control system on a plate for advanced controllers. The project has tested the performance of controllers. Project uses a webcam to detect ball's position and a stepping motor to create the board's angle. The ball adjusts to desired position. The controls used in the experiment are proportional, integrals, and derivatives controllers, Sliding Mode Control, fuzzy logic control, proportional integrals derivatives controller tuning with fuzzy logic and Sliding Mode Controller tuning with fuzzy logic. The presentation for the project is constructed with the use of a mathematical model, and it simulates responses using the MATLAB program. The experiment concluded that all controllers could maintain the balancing ball position but there are different responses; for example, in the experiment of maintaining The ball position, the X axis was 15 centimeters, and the Y axis was 15 centimeters. The controller with the lowest rise time was the fuzzy logic control with a value of 0.253 s. The controller with the lowest setting time was the proportional, integral, via proportional integrals derivatives controller tuning with fuzzy logic with a value of 0.940 s. Control with the lower overshoot response is proportional integrals derivatives controller tuning with fuzzy logic at 0 percent. The experiment, the response of the controller has a different performance. Researchers can apply the theory and responses of the controller to the applied machine control industry. Research can increase the machine's performance and reduce the damage that may occur.

(Total 429 pages)

Keywords : Ball on Plate Control System, PID Controller, Fuzzy Controller, Sliding Mode Controller



Advisor

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้นั้น เกิดจากการทุ่มเทแรงกายและแรงใจของคณะผู้จัดทำโครงการ ได้รับคำปรึกษาและความช่วยเหลือจาก รองศาสตราจารย์ ดร.ศศิธร ชูแก้ว และรองศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย หอวิมานพร อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ อาจารย์ และเจ้าหน้าที่ ประจำภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือทุกท่าน ที่ช่วยเหลือทำให้การทำปริญญานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ทางผู้จัดทำกราบขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูง

สุดท้ายนี้ขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยช่วยเหลือเป็นแรงบันดาลใจ เป็นแหล่งเงินทุนคณะผู้จัดทำโครงการหวังว่าปริญญานิพนธ์เล่มนี้ สามารถเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจ และเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

กฤตยชญ์ พลไชย

ชนาธิป คำแหง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ด
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 สมมุติฐาน	3
1.5 ประโยชน์ของการวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น	6
2.2 พีแอลซี	6
2.3 สเตปปีงมอเตอร์	7
2.4 บอร์ดไดรฟ์มอเตอร์	8
2.5 กล้องเว็บแคม	8
2.6 อาดูยโน เมกา 2560	9
2.7 เอนโคดเดอร์แบบแกนหมุน	9
2.8 ทฤษฎีตัวควบคุมระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น	10
2.9 ทฤษฎีการประมวลผลภาพ	11
2.10 ทฤษฎีฟังก์ชันถ่ายโอน	15
2.11 ทฤษฎีกลศาสตร์ลากรังจ์	16
2.12 ทฤษฎีระบบควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์	20
2.13 ทฤษฎีระบบควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ	27
2.14 ทฤษฎีระบบอนุมาน ตรรกศาสตร์คลุมเครือ แบบปรับค่าอัตโนมัติ	31
2.15 ทฤษฎีแบบจำลองปริภูมิสถานะ	32
2.16 ทฤษฎีการควบคุมแผ่นเลื่อน	35

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.17 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	39
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการทำงาน	51
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการทำระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น	53
3.2 การออกแบบและสร้างระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น	56
3.2.1 การเลือกใช้เซ็นเซอร์	56
3.2.2 การเลือกใช้มอเตอร์	63
3.2.3 การออกแบบโครงสร้างระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น	64
3.2.4 การออกแบบวงจรควบคุมระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น	73
3.2.5 การประกอบระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น	76
3.3 การหาสมรรถนะระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น	77
3.3.1 การทดสอบกล่อง	77
3.3.1.1 การทดสอบกล่องเว็บแคมก่อนปรับเทียบ	77
3.3.1.2 การทดสอบกล่องเว็บแคมหลังการปรับเทียบ	81
3.3.2.3 การทดสอบกล่องเว็บแคมที่มีการปรับเทียบ และนิวโรฟิชซี	84
3.3.2.4 ผลการเปรียบเทียบระหว่างกล่องเว็บแคมทั้งสามแบบ	91
3.3.2 การทดสอบการควบคุมมอเตอร์	92
3.3.3 การหาพารามิเตอร์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น	93
3.3.4 การหาค่าเกณฑ์ควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ของระบบด้วยวิธีซีกเกลเลอร์-นิโคลส์	98
3.3.5 ผลการเปรียบเทียบความแม่นยำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	100
3.3.6 การหาสมรรถนะตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ วิธีการแบบจูนเนอร์	102
3.3.7 การหาสมรรถนะตัวควบคุมแผ่นเลื่อน	106
3.3.8 การหาสมรรถนะตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ	109
3.3.9 การหาสมรรถนะตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือในการปรับจูนค่าอัตโนมัติ	112
3.3.10 การหาสมรรถนะตัวควบคุมแผ่นเลื่อน โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือในการปรับจูนค่าอัตโนมัติ	117

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	123
4.1 ผลการออกแบบและสร้างระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น	125
4.1.1 ผลของการสร้างทางกล	125
4.1.2 ผลของการออกแบบและสร้างทางไฟฟ้า	129
4.2 ผลสมรรถนะระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น	130
4.2.1 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิกรัล	130
4.2.1.1 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิกรัล แกนเอกซ์	130
4.2.1.2 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิกรัล แกนวาย	140
4.2.1.3 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิกรัล สองแกน	150
4.2.2 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมแผ่นเลื่อน	157
4.2.2.1 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมแผ่นเลื่อนแกนเอกซ์	157
4.2.2.2 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมแผ่นเลื่อนแกนวาย	167
4.2.2.3 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมแผ่นเลื่อนสองแกน	177
4.2.3 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ	185
4.2.3.1 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือแกนเอกซ์	185
4.2.3.2 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือแกนวาย	195
4.2.3.3 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือสองแกน	205
4.2.4 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิกรัลแบบปรับค่าอัตโนมัติ	212
4.2.4.1 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิกรัลแบบปรับค่าอัตโนมัติแกนเอกซ์	212
4.2.4.2 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิกรัลแบบปรับค่าอัตโนมัติแกนวาย	222
4.2.4.3 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิกรัลแบบปรับค่าอัตโนมัติสองแกน	232
4.2.5 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ	240
4.2.5.1 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับค่าอัตโนมัติแกนเอกซ์	240
4.2.5.2 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับค่าอัตโนมัติแกนวาย	250

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.5.3 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับค่า อัตโนมัติสองแกน	260
4.2.6 ผลการเปรียบเทียบผลตอบสนองของทุกตัวควบคุม	267
4.2.6.1 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนเอกซ์	267
4.2.6.2 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนวาย	272
4.2.6.3 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมสองแกน	277
บทที่ 5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	287
5.1 สรุปผลโครงการ	287
5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข	289
5.3 ข้อเสนอแนะ	290
บรรณานุกรม	291
ภาคผนวก ก	295
ภาพรวมระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น	296
โครงสร้างบอลทรงตัวบนแผ่น	296
ชุดส่งกำลังมอเตอร์	298
ชุดแผ่นกระดานควบคุมสมดุลลูกบอล	305
ภาคผนวก ข	309
โปรแกรมไพทอลส่งตำแหน่งเอกซ์ และวายไปยังอาดูยโน	310
โปรแกรม ESP8266 NodeRED MQTT	312
โปรแกรมทดสอบนิวโรฟิชชิ่งกล้องแกนเอกซ์	315
โปรแกรมทดสอบนิวโรฟิชชิ่งกล้องแกนวาย	318
โปรแกรมอาดูยโนควบคุมแกนเอกซ์ เกลอร์-นิโคลส์	322
โปรแกรมอาดูยโนควบคุมแกนวาย เกลอร์-นิโคลส์	327
โปรแกรมอาดูยโนควบคุมแกนเอกซ์ ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์	332
โปรแกรมอาดูยโนควบคุมแกนวาย ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์	336
โปรแกรมอาดูยโนควบคุมแกนเอกซ์ ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน	341
โปรแกรมอาดูยโนควบคุมแกนวาย ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน	346
โปรแกรมอาดูยโนควบคุมแกนเอกซ์ ตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ	351
โปรแกรมอาดูยโนควบคุมแกนวาย ตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ	365

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
โปรแกรมอาดยโนควบคุมแกนเอกซ์ ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ปรับจูนค่าด้วย ตรรกศาสตร์คลุมเครือ	370
โปรแกรมอาดยโนควบคุมแกนวาย ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ปรับจูนค่าด้วย ตรรกศาสตร์คลุมเครือ	384
โปรแกรมอาดยโนควบคุมแกนเอกซ์ ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน ปรับจูนค่าด้วยตรรกศาสตร์ คลุมเครือ	398
โปรแกรมอาดยโนควบคุมแกนวาย ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน ปรับจูนค่าด้วยตรรกศาสตร์ คลุมเครือ	412
ภาคผนวก ค	427
คู่มือการใช้งานโปรแกรมอาดยโน	428
คู่มือการใช้งานโปรแกรมพีแอลซีอมรอน	428
คู่มือการใช้งานโปรแกรมพีแอลซีซีเมนต์	429
คู่มือการใช้งานโปรแกรมพีแอลซีมิตซูบิชิ	429
ประวัติผู้จัดทำ	431

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 การออกแบบกฎของระบบควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ	29
2-2 ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณหาแบบจำลองปริภูมิสถานะ	32
2-3 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมแผ่นเลื่อน	37
2-4 ผลการเปรียบเทียบตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ และตรรกศาสตร์คลุมเครือ	42
2-5 ผลการเปรียบเทียบตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์	43
2-6 ผลการควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ด้วยเทคนิคตรรกศาสตร์คลุมเครือ	46
2-7 ผลการเปรียบเทียบตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ และตรรกศาสตร์คลุมเครือ	46
2-8 ผลการเปรียบเทียบตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ และตัวควบคุมแผ่นเลื่อน	48
2-9 ผลการเปรียบเทียบตัวควบคุม	49
3-1 ตารางเปรียบเทียบการตัดสินใจการเลือกใช้เซนเซอร์	56
3-2 ตารางเปรียบเทียบข้อมูลจำเพาะกล้อง	58
3-3 ตารางค่าพารามิเตอร์ในการคำนวณระยะการติดตั้งกล้อง	59
3-4 ตารางค่าพารามิเตอร์พื้นที่ในการรับภาพ	60
3-5 ค่าพารามิเตอร์ของลูกบอลและแผ่นกระดาน	62
3-6 ตารางเปรียบเทียบการตัดสินใจการเลือกใช้มอเตอร์	63
3-7 ตารางแสดงข้อมูลจำเพาะโครงสร้าง	66
3-8 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์โครงสร้าง	69
3-9 ตารางแสดงข้อมูลจำเพาะแผ่นกระดาน	70
3-10 ตารางแสดงข้อมูลจำเพาะลูกบอล	71
3-11 รายละเอียดส่วนประกอบชุดส่งกำลังด้วยมอเตอร์	72
3-12 รายละเอียดส่วนประกอบชุดส่งกำลังด้วยมอเตอร์	74
3-13 รายละเอียดเก็บข้อมูลพิกเซลของ มุม A และ มุม B	77
3-14 รายละเอียดเก็บข้อมูลพิกเซลของ มุม C และ มุม D	78
3-15 ตารางเทียบตำแหน่งพิกเซลกับตำแหน่งจริง	78
3-16 ค่าความผิดพลาดของกล้องเว็บแคมก่อนการปรับเทียบ	80
3-17 ค่าความผิดพลาดของกล้องเว็บแคมหลังการปรับเทียบ	83
3-18 ผลการทดลองโดยใช้นิวโรฟซีซีทำนายตำแหน่ง	86
3-19 ช่วงอินพุตข้อมูลพิกเซลเอกซ์	87

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
3-20 ช่วงอินพุตข้อมูลพิกเซลวาย	87
3-21 สมการเส้นตรงของฟังก์ชันสมาชิกอินพุตของแกนเอกซ์	89
3-22 สมการเส้นตรงของฟังก์ชันสมาชิกอินพุตของแกนวาย	89
3-23 ตารางแสดงเอาต์พุตของฟังก์ชันสมาชิก	90
3-24 ค่าความผิดพลาดของกล้องเว็บแคมหลังการปรับเทียบ และนิวโรฟซีซี	90
3-25 ค่าความผิดพลาดของกล้องแต่ละแบบ	91
3-26 ผลการควบคุมสเตปมอเตอร์	93
3-27 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น	94
3-28 ตารางการปรับจูนตามทฤษฎีซีกเกเลอร์-นิโคลส์	98
3-29 ตารางแสดงค่า K_{cr} และค่า P_{cr}	100
3-30 ตารางแสดงค่าสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์จากสูตรการคำนวณซีกเกเลอร์-นิโคลส์	100
3-31 ผลการจำลองการตอบสนองของการควบคุมแบบสัดส่วน	102
3-32 ผลการตอบสนองของการควบคุมแบบสัดส่วน โดยวิธีการจูนค่าพารามิเตอร์	105
3-33 ผลการตอบสนองของการควบคุมแผ่นเลื่อนในแนวแกนเอกซ์	108
3-34 กฎตรรกศาสตร์คลุมเครือที่ใช้ในการควบคุม	110
3-35 ผลการตอบสนองของการควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือในแนวแกนเอกซ์	112
3-36 กฎตรรกศาสตร์คลุมเครือที่ใช้ในการควบคุมตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ โดยใช้ ตรรกศาสตร์คลุมเครือ	114
3-37 ผลการตอบสนองของการควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ โดยใช้ตรรกศาสตร์	116
3-38 กฎตรรกศาสตร์คลุมเครือที่ใช้ในการควบคุมตัวควบคุมแผ่นเลื่อน โดยใช้ตรรกศาสตร์	119
3-39 ผลการตอบสนองของการควบคุมแผ่นเลื่อน โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือในการปรับ	121
4-1 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร	130
4-2 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร	131
4-3 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร	132
4-4 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร	133
4-5 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร	134
4-6 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร	135
4-7 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร	136

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4-118 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร	257
4-119 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ แกนวายตำแหน่ง 27 เซนติเมตร	258
4-120 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร	259
4-121 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 3 เซนติเมตร	261
4-122 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 9 เซนติเมตร	262
4-123 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 15 เซนติเมตร	264
4-124 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 21 เซนติเมตร	265
4-125 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 27 เซนติเมตร	267
4-126 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนเอกซ์ ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร	268
4-127 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนเอกซ์ ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร	269
4-128 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนเอกซ์ ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร	270
4-129 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนเอกซ์ ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร	271
4-130 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนเอกซ์ ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร	272
4-131 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนวาย ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร	273
4-132 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนวาย ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร	274
4-133 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนวาย ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร	275
4-134 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนวาย ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร	276
4-135 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนวาย ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร	277
4-136 ผลเปรียบเทียบทุกตัวควบคุมสองแกน เอกซ์ วาย 3 เซนติเมตร	278
4-137 ผลเปรียบเทียบทุกตัวควบคุมสองแกน เอกซ์ วาย 9 เซนติเมตร	279
4-138 ผลเปรียบเทียบทุกตัวควบคุมสองแกน เอกซ์ วาย 15 เซนติเมตร	281
4-139 ผลเปรียบเทียบทุกตัวควบคุมสองแกน เอกซ์ วาย 21 เซนติเมตร	282
4-140 ผลเปรียบเทียบทุกตัวควบคุมสองแกน เอกซ์ วาย 27 เซนติเมตร	284
5-1 ผลตอบสนองตัวควบคุมที่ทดลองทั้งหมด ตำแหน่งแกนเอกซ์ 15 เซนติเมตร และแกนวาย 15 เซนติเมตร	288

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1-1 ระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น	2
2-1 ระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น	6
2-2 ส่วนประกอบหลักของชุดควบคุมพีแอลซี	7
2-3 สเตปปีงมอเตอร์	7
2-4 บอร์ดไดรฟ์มอเตอร์	8
2-5 กล้องเว็บแคม	8
2-6 อาศัยโน เมกา 2560	9
2-7 เอนโคดเดอร์แบบแกนหมุน	10
2-8 ภาพรวมการทำงานของระบบ	10
2-9 การประมวลผลภาพ	11
2-10 ความหน่วงกล้อง	11
2-11 ภาพเปรียบเทียบอัตราเฟรม	12
2-12 ภาพพารามิเตอร์ในการคำนวณ	12
2-13 ความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตของภาพ	13
2-14 แบบจำลองการแยกสีแบบเอชเอสวี	14
2-15 การแบ่งแยกระดับความเข้มของภาพ	15
2-16 การตรวจจับเหรียญ	15
2-17 บล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์	22
2-18 สัญญาณเอาต์พุตตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ เมื่อค่าความผิดพลาดเป็นฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วย	23
2-19 บล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์	24
2-20 เอาต์พุตตัวควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์ เมื่อสัญญาณผิดพลาดเป็นฟังก์ชันลาดเอียงหนึ่งหน่วย	24
2-21 บล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์	26
2-22 เอาต์พุตจากตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์เมื่อสัญญาณผิดพลาดเป็นฟังก์ชัน	26
2-23 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ	27
2-24 รูปแบบสมาชิกอินพุต	28
2-25 ตัวอย่างของการสร้างฟังก์ชันอินพุตของระบบควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ	28
2-26 รูปแบบการอนุมานของวิธีการอนุมานแบบแมมดานี	29
2-27 โครงสร้างอนุมาน ตรรกศาสตร์คลุมเครือ	32
2-28 การเคลื่อนที่แบบสไลด์ิงโหมด	36

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2-29 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแผ่นเลื่อน	36
2-30 แบบจำลองการเคลื่อนที่บอลบนแผ่น	40
2-31 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมแผ่นกระดานกับมุมมอเตอร์	40
2-32 ผลตอบสนองตำแหน่งลูกบอลเข้าสู่จุดกึ่งกลาง	41
2-33 ภาพการออกแบบระบบบอลและแผ่นกระดาน	41
2-34 การสร้างบล็อกการจำลองในโปรแกรมแมตแล็บ	41
2-35 ขั้นตอนการปรับเทียบกล้อง	42
2-36 การออกแบบ และพัฒนาโดรนแบบสี่ใบพัด	43
2-37 หุ่นยนต์สองล้อทรงตัว	44
2-38 ชุดจำลองโต๊ะบนเรือ	45
2-39 ผลการเปรียบเทียบของตัวควบคุมการตอบสนองของสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์	47
3-1 แผนภูมิภาพแสดงการทำงาน	53
3-2 ความหน่วงกล้อง	58
3-3 ภาพพารามิเตอร์ในการคำนวณ	59
3-4 ขนาดของลูกบอลที่ใช้ในการควบคุม	63
3-5 โครงสร้างภาพรวมการเชื่อมต่อโครงงาน	64
3-6 ภาพระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่นด้วยโปรแกรมซอลิดเวกส์	65
3-7 ภาพรวมระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่นด้วยโปรแกรมซอลิดเวกส์	66
3-8 ภาพระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่นด้วยโปรแกรมซอลิดเวกส์ ด้านหน้า	67
3-9 ภาพระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่นด้วยโปรแกรมซอลิดเวกส์ ด้านข้าง	67
3-10 ภาพระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่นด้วยโปรแกรมซอลิดเวกส์ ด้านบน	68
3-11 ภาพรวมระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่นด้วยโปรแกรมซอลิดเวกส์	68
3-12 โครงสร้างโครงงาน	69
3-13 ภาพโดยรวมระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่นด้วย	70
3-14 ลูกบอล	70
3-15 ชุดส่งกำลังด้วยมอเตอร์	71
3-16 คำานวนชุดส่งกำลังด้วยมอเตอร์	72
3-17 การประกอบชุดส่งกำลังด้วยมอเตอร์	73
3-18 แผนผังการเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้า	74

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-19 ภาพการออกแบบวงจรด้วยโปรแกรมโปรทีอุส	75
3-20 การสร้างวงจรไฟฟ้า	75
3-21 ชุดควบคุมมอเตอร์	75
3-22 ภาพโครงที่ออกแบบ (ซ้าย) โครงสร้างจริง (ขวา)	76
3-23 ภาพโครงงานที่ออกแบบ (ซ้าย) โครงงานจริงสมบูรณ์ (ขวา)	76
3-24 การเก็บข้อมูลมุมภาพ	77
3-25 การเก็บข้อมูลมุมภาพแกนเอกซ์	79
3-26 การเก็บข้อมูลมุมภาพแกนวาย	79
3-27 ขั้นตอนการปรับเทียบกล้อง	82
3-28 การปรับเทียบกล้องตั้งภาพ	82
3-29 การเก็บตำแหน่งพิกเซลเอกซ์ และวาย	84
3-30 วิธีการสอนข้อมูลด้วยนิวโรฟัซซี ข้อมูล 0.5 และ 10.0 ตารางมิลลิเมตร	85
3-31 วิธีการสอนข้อมูลด้วยนิวโรฟัซซี ข้อมูล 0.5 และ 10.0 ตารางมิลลิเมตร	85
3-32 ภาพผลการสอนที่ได้จาก Neuro-Fuzzy Design	86
3-33 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุตของแกนเอกซ์	88
3-34 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุตของแกนวาย	88
3-35 ภาพการทดสอบของสามอเตอร์	92
3-36 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องโครงงาน	93
3-37 โปรแกรมแมตแล็บเพื่อคำนวณสมการฟังก์ชันถ่ายโอน	96
3-38 สมการเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ	96
3-39 การจำลองการทำงานด้วยซิมูลิงค์	97
3-40 ผลตอบสนองของระบบ	97
3-41 ภาพทดสอบซีกเกลอร์-นิโคลส์	99
3-42 คาบเวลาที่ใช้ในการแกว่งตัว	99
3-43 บล็อกการจำลองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์	101
3-44 กราฟจำลองการตอบสนองของการควบคุมแบบสัดส่วน	101
3-45 กราฟเทียบจำลองการตอบสนองของการควบคุมแบบสัดส่วน	102
3-46 บล็อกควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ เพื่อปรับจูนค่าพารามิเตอร์	103
3-47 การจูนค่าพารามิเตอร์	103

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-48 แล็บเครื่องมือสไลด์รจุนค่าพารามิเตอร์	104
3-49 ค่าพารามิเตอร์ผลตอบสนอง	104
3-50 การควบคุมตำแหน่งบอลแกนเอกซ์ ตัวควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์ ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร	105
3-51 การจำลองตัวควบคุมแผ่นเลื่อนโดยโปรแกรมแมตแล็บ	106
3-52 การจำลองผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน	107
3-53 การควบคุมตำแหน่งบอลแกนเอกซ์ ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร	108
3-54 อินพุตค่าความผิดพลาด	109
3-55 อินพุตอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด	109
3-56 เอาต์พุต	110
3-57 พื้นผิวกฎตรรกศาสตร์คลุม	111
3-58 การควบคุมตำแหน่งบอล ตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร	111
3-59 การออกแบบตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือ	112
3-60 สมาชิกอินพุตค่าความผิดพลาด	113
3-61 การออกแบบสมาชิกอินพุตอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด	113
3-62 การออกแบบสมาชิกเอาต์พุต	114
3-63 พื้นผิวกฎตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุม	115
3-64 การควบคุมตำแหน่งบอลแกนเอกซ์ โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือในการปรับ	116
3-65 การออกแบบตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือ	117
3-66 สมาชิกอินพุตค่าความผิดพลาด	117
3-67 การออกแบบสมาชิกอินพุตอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด	118
3-68 การออกแบบสมาชิกเอาต์พุต	118
3-69 พื้นผิวกฎตัวควบคุมแผ่นเลื่อน โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือ	119
3-70 การควบคุมตำแหน่งบอลแกนเอกซ์ ตัวควบคุมแผ่นเลื่อนโดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือ	120
4-1 การออกแบบโครงสร้างโมเดล 3 มิติ ด้วยโปรแกรมซอลิเดวิเกิ้ล	125
4-2 การประกอบโครงสร้างจริง	125
4-3 การทดสอบพื้นที่ในการรับภาพของกล้อง	126
4-4 การประกอบโครงสร้างจริง	126
4-5 ความกว้าง และความสูงพิกเซลของลูกบอล	127
4-6 ขนาดพิกเซลของแผ่นกระดาษ	127

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-7 การออกแบบโครงชุดส่งกำลังด้วยโปรแกรมซอลิเดอวิกส์	128
4-8 ชุดส่งกำลังจริงด้วยโปรแกรมซอลิเดอวิกส์	128
4-9 การเชื่อมต่ออุปกรณ์วงจรไฟฟ้า	129
4-10 ภาพระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น	129
4-11 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิเกรต ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร	130
4-12 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิเกรต ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร	131
4-13 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิเกรต ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร	132
4-14 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิเกรต ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร	133
4-15 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิเกรต ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร	134
4-16 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิเกรต ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร	135
4-17 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิเกรต ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร	136
4-18 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิเกรต ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร	137
4-19 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิเกรต ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร	138
4-20 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิเกรต ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร	139
4-21 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิเกรต แกนวายตำแหน่ง 3 เซนติเมตร	140
4-22 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิเกรต แกนวาย ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร	141
4-23 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิเกรต แกนวายตำแหน่ง 9 เซนติเมตร	142
4-24 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิเกรต แกนวาย ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร	143
4-25 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิเกรต แกนวายตำแหน่ง 15 เซนติเมตร	144
4-26 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิเกรต แกนวาย ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร	145
4-27 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิเกรต แกนวายตำแหน่ง 21 เซนติเมตร	146

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-162 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนเอกซ์ ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร	268
4-163 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนเอกซ์ ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร	269
4-164 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนเอกซ์ ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร	270
4-165 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนเอกซ์ ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร	271
4-166 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนเอกซ์ ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร	272
4-167 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนวาย ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร	273
4-168 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนวาย ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร	274
4-169 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนวาย ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร	275
4-170 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนวาย ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร	276
4-171 ผลเปรียบเทียบทุกตัวควบคุม ตำแหน่ง แกนเอกซ์ 3 เซนติเมตร แกนวาย 3 เซนติเมตร	277
4-172 ผลเปรียบเทียบทุกตัวควบคุม ตำแหน่ง แกนเอกซ์ 9 เซนติเมตร แกนวาย 9 เซนติเมตร	279
4-173 ผลเปรียบเทียบทุกตัวควบคุม ตำแหน่ง แกนเอกซ์ 15 เซนติเมตร แกนวาย 15 เซนติเมตร	280
4-174 ผลเปรียบเทียบทุกตัวควบคุม ตำแหน่ง แกนเอกซ์ 21 เซนติเมตร แกนวาย 21 เซนติเมตร	282
4-175 ผลเปรียบเทียบทุกตัวควบคุม ตำแหน่ง แกนเอกซ์ 27 เซนติเมตร แกนวาย 27 เซนติเมตร	283
5-1 ผลการตอบสนองตัวควบคุมที่ทดลอง ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร	287
ก-1 ภาพรวมระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น	296
ก-2 โครงสร้าง	296
ก-3 ขนาดของโครงสร้าง	297
ก-4 แผ่นอะคริลิก	297
ก-5 ขนาดกล่องแฉับแคม	298
ก-6 ชุดส่งกำลังมอเตอร์	298
ก-7 ฐานยึดมอเตอร์	299
ก-8 แท่นยึดเอนโคดเดอร์	299
ก-9 แท่นยึดมอเตอร์	300
ก-10 อลูมิเนียมโปรไฟล์ขนาด 20 x 20 x 45 เซนติเมตร	300
ก-11 อลูมิเนียมโปรไฟล์ขนาด 20 x 20 x 45 เซนติเมตร	301
ก-12 ฉากยึด	301
ก-13 สเตปปีงมอเตอร์	302
ก-14 เอนโคดเดอร์	302

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ก-15 เฟืองขนาด 20 ฟัน	303
ก-16 เฟืองคู่ขนาด 20 ฟัน และ 30 ฟัน	303
ก-17 เฟืองขนาด 40 ฟัน	304
ก-18 ก้านยก	304
ก-19 ชุดแผ่นกระดานควบคุมสมดุลลูกบอล	305
ก-20 แผ่นอะคริลิคขนาด 300 ตารางมิลลิเมตร	305
ก-21 ฉากยึดก้านยก	306
ก-22 แท่นยึดแผ่นกระดาน	306
ก-23 ข้อต่อแท่นยึดแผ่นกระดาน	307
ก-24 ข้อต่อ	307
ก-25 ลูกปืน	308
ค-1 คิวอาร์โคดคู่มือการใช้งานโปรแกรมอาดยโน	428
ค-2 คิวอาร์โคดคู่มือการใช้งานโปรแกรมพีแอลซีฮอมนอน	428
ค-3 คิวอาร์โคดคู่มือการใช้งานโปรแกรมพีแอลซีซีเมนต์	429
ค-4 คิวอาร์โคดคู่มือการใช้งานโปรแกรมพีแอลซีมิติซูบิชิ ย	429

บทที่ 1

บทนำ

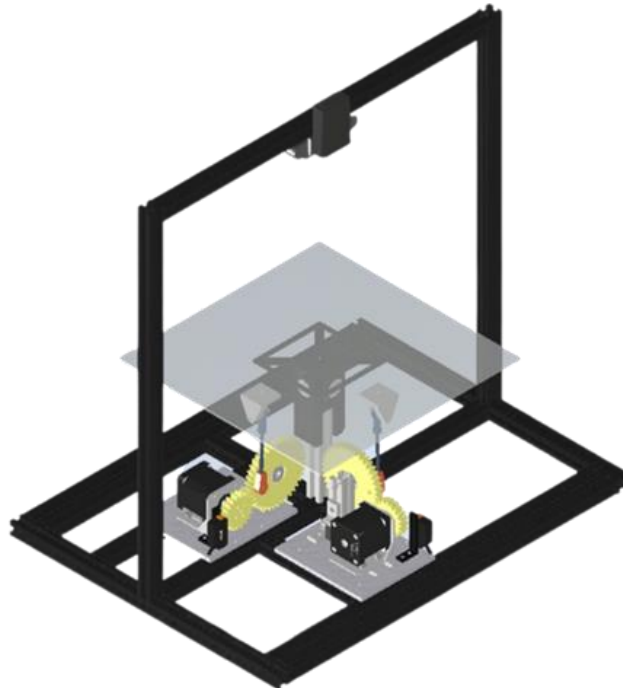
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สิ่งที่มีความจำเป็นต้องได้รับการควบคุมบนโลกใบนี้มีการเสียดีรภาพ และไม่เป็นเชิงเส้นแทบทุกกระบวนการ เช่น อากาศยาน (Moghazy et al., 2022) ยานพาหนะ (Mok et al., 2022) กระบวนการในอุตสาหกรรม (Wu et al., 2021) รวมถึงสิ่งอำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวัน (Aisuwarya and Hardianto, 2021) แต่ปกติการควบคุมแบบดั้งเดิมไม่สามารถที่แก้ไขให้มีเสียดีรภาพที่ดี และเหมาะสมที่สุดได้ การใช้ตัวควบคุมขั้นสูงมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมมีแนวโน้มที่สามารถใช้แก้ปัญหาการเสียดีรภาพได้ (Hu and Zheng, 2020) ในงานอุตสาหกรรมทั้งหลายมีระบบควบคุม และอัลกอริทึมต่าง ๆ ใช้ในการควบคุมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุม ในโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมระบบควบคุมให้ความสำคัญกับระบบควบคุม มีการคิดค้นพัฒนาระบบควบคุม และอัลกอริทึมแบบต่าง ๆ ยกตัวอย่างเช่น ระบบควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ (Proportional Integral Derivative Control : PID Control) ได้มีการประยุกต์ใช้การควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ในกระบวนการควบคุมอุณหภูมิ และความชื้นของโรงงาน เพื่อปรับปรุงความแม่นยำ และความเสียดีรของระบบควบคุมอุณหภูมิ และความชื้น (He and Chen, 2020) ระบบควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ (Fuzzy Logic Control : Fuzzy Control) ได้มีการประยุกต์ใช้ควบคุมอุณหภูมิของเตาเผา โดยใช้การควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือเพื่อนำมาปรับค่าสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ผลการทดลองการควบคุมอุณหภูมิพบว่าประสิทธิภาพดีกว่า การควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ เพียงอย่างเดียว (Al-Amin and Islam, 2021) และระบบควบคุมแผ่นเลื่อน (Sliding Mode Control : SMC Control) ได้มีการประยุกต์ใช้ควบคุมความถี่ และความแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแผ่นเลื่อนให้การควบคุมแรงดันไฟฟ้าได้ดี (Sharma et al., 2020)

เพื่อการทำงานที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น การประมวลผลภาพ (Image Processing) เป็นกระบวนการที่จำเป็นในอุตสาหกรรมปัจจุบัน เนื่องจากช่วยในการเปลี่ยนข้อมูลภาพให้เป็นการข้อมูลที่มีประโยชน์ได้อย่างมากมาย ในภาคอุตสาหกรรมการประมวลผลภาพถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายสำหรับการทำงานต่าง ๆ เช่น การตรวจสอบป้ายทะเบียน (Tenzin et al., 2020) การควบคุมหุ่นยนต์ (Do et al., 2021) หรือการตรวจจับข้อบกพร่อง (Ela-gai and Vasanth, 2021) เพื่อให้การทำงานของเครื่องจักรมีความฉลาดขึ้น การรวมเทคโนโลยีการประมวลผลภาพเข้ากับเครื่องจักรอุตสาหกรรมเป็นองค์ประกอบที่สำคัญเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการควบคุม

ในการทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมมีการทดลองระบบควบคุมแบบต่าง ๆ ยกตัวอย่าง เช่น การทดลองตัวควบคุมลูกตุ้มกลับหัว (Susan, Rahmat and Ishitobi, 2022) การทดลองตัวควบคุมบอลลมในท่อ (Bomfim et al., 2021) การทดลองตัวควบคุมบอลบนคาน (Tajjudin et al., 2022) หรือระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น (Betancourt, Alarcon and Velasquez, 2019) เพราะเป็นระบบที่ไม่มีเสถียรภาพในการควบคุมเหมาะแก่การทดสอบสมรรถนะตัวควบคุม แต่ระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น เป็นการควบคุมที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะตัวควบคุม มีลักษณะการทำงาน คือ การรักษาตำแหน่งของบอลให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการโดยใช้ตัวควบคุมแบบต่าง ๆ อีกทั้งยังมีการนำการประมวลผลภาพมาใช้ในการตรวจจับตำแหน่งของวัตถุเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุม

จากความเป็นมา และความสำคัญผู้วิจัยได้ตระหนักถึงความสำคัญของระบบควบคุมแบบต่าง ๆ และได้พัฒนาระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่นแสดงดังภาพที่ 1-1 เพื่อทดแทนระบบควบคุมที่เกี่ยวข้องกับการสร้างเสถียรภาพของเครื่องจักร โดยผู้วิจัยสร้าง และทดสอบตัวควบคุมได้แก่ ระบบควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ และตัวควบคุมแผ่นเลื่อน เพื่อแสดงสมรรถนะของระบบควบคุมแบบต่าง ๆ โดยนำการประมวลผลภาพมาใช้ในการควบคุม เพื่อให้การควบคุมมีประสิทธิภาพ โดยมีเป้าหมาย คือ แสดงผลสมรรถนะของตัวควบคุม เพื่อลดปัญหาความเสียหาย และอันตรายที่อาจเกิดขึ้นได้กับเครื่องจักรก่อนนำเอาตัวควบคุมแบบต่าง ๆ ไปประยุกต์ใช้จริงในอุตสาหกรรม



ภาพที่ 1-1 ระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อสร้างระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น

1.2.2 เพื่อหาสมรรถนะระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น โดยใช้ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน และตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ขนาดของแผ่นที่ใช้ในการควบคุมลูกบอลขนาด 30 ตารางเซนติเมตร

1.3.2 ขนาดลูกบอลเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร น้ำหนักประมาณ 10 กรัม

1.3.3 ใช้กล้องเว็บแคม (Webcam) ประมวลผลภาพในการตรวจจับตำแหน่งของลูกบอล

1.3.4 ใช้พีแอลซียี่ห้ออมรอน (OMRON) และอาดูยโน (Arduino)

1.3.5 ใช้โปรแกรมแมตแล็บ (MATLAB) ในการเรียนรู้นิวโรฟัซซี (Neuro Fuzzy)

1.3.6 ใช้ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน และตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ ควบคุมสมดุลลูกบอลเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม

1.4 สมมติฐาน

ระบบควบคุมบอลบนแผ่น สามารถควบคุมสมดุลลูกบอลได้ด้วยตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน และตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ

1.5 ประโยชน์ของการวิจัย

1.5.1 ได้ระบบควบคุมบอลบนแผ่น ที่แสดงสมรรถนะของระบบควบคุมรูปแบบต่าง ๆ ที่สามารถนำไปออกแบบระบบการควบคุม เพื่อนำไปประยุกต์ใช้จริงในงานอุตสาหกรรม

1.5.2 ผู้ที่ปฏิบัติงานทางด้านสาขาวิศวกรรมระบบควบคุมสามารถนำสมรรถนะของระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น ไปพัฒนาต่อยอดกระบวนการทำงานให้เกิดประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรม เพื่อให้การควบคุมเครื่องจักรมีประสิทธิภาพมากขึ้น

บทที่ 2

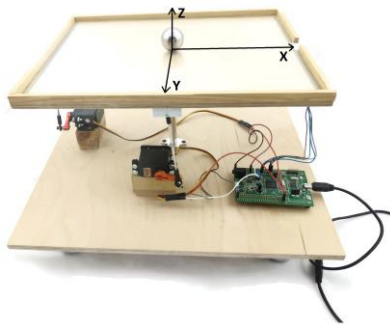
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การจัดทำโครงงานนี้ จำเป็นที่ต้องมีการศึกษาค้นคว้าข้อมูลต่างที่เกี่ยวข้องกับโครงงานเพื่อให้เกิดการความเข้าใจเนื้อหา และผสมผสานความรู้ในส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกันจนที่สามารถนำมาเสนอกระบวนการขั้นตอน และสร้างระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่นได้ เพื่อให้โครงงานสามารถสำเร็จตามวัตถุประสงค์ โดยมีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

- 2.1 ระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น (Ball on Plate Control System)
- 2.2 พีแอลซี (Programmable Logic Controller : PLC)
- 2.3 สเตปปีงมอเตอร์ (Stepping Motor)
- 2.4 บอร์ดไดรฟ์มอเตอร์ (Board Drive)
- 2.5 กล้องเว็บแคม (Webcam)
- 2.6 อาดูยโน เมกา 2560 (Arduino Mega 2560)
- 2.7 เอนโคดเดอร์แบบแกนหมุน (Rotary Encoder)
- 2.8 ทฤษฎีตัวควบคุมระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น
- 2.9 ทฤษฎีการประมวลผลภาพ (Image Processing)
- 2.10 ทฤษฎีฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function)
- 2.11 ทฤษฎีกลศาสตร์ลากรังจ์ (Lagrangian Mechanics)
- 2.12 ทฤษฎีระบบควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ (PID Control : PID Control)
- 2.13 ทฤษฎีระบบควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ (Fuzzy logic Control : Fuzzy Control)
- 2.14 ทฤษฎีระบบอนุมาน ตรรกศาสตร์คลุมเครือ แบบปรับค่าอัตโนมัติ (Adaptive Neuro Fuzzy)
- 2.15 ทฤษฎีแบบจำลองปริภูมิสถานะ (State Space)
- 2.16 ทฤษฎีการควบคุมแผ่นเลื่อน (Sliding Mode Control : SMC Control)
- 2.17 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Related Research)

2.1 ระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น

ระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่นเป็นระบบที่สร้างขึ้นมาเพื่อการทดสอบ และทดลองทางวิศวกรรม ใช้เป็นแบบจำลองในการทดลองการควบคุมที่มีความซับซ้อนของระบบ โดยระบบประกอบด้วยลูกบอล (Ball) ที่วางอยู่บนแผ่น (Plate) โดยมีโครงสร้างเฉพาะเพื่อให้สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของลูกบอลบนแผ่นกระดานได้อย่างแม่นยำ ความสำคัญของการทดสอบระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่นนั้นอยู่ที่สามารถใช้เป็นแบบจำลองในการทำงาน และพัฒนาเทคนิคการควบคุมต่าง ๆ ที่สามารถนำไปใช้กับการควบคุมระบบที่ซับซ้อนมากขึ้น เช่น การควบคุมระบบหุ่นยนต์ การควบคุมระบบเครื่องบิน หรือการควบคุมระบบทางวิศวกรรมต่าง ๆ หลักการทำงานของระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น คือ การควบคุมการเคลื่อนที่ของบอลบนจานโดยใช้ระบบควบคุมที่มีความซับซ้อน โดยระบบนี้ประกอบด้วยเซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่งของบอลบนแผ่นกระดาน และตัวควบคุมที่ประมวลผลข้อมูลจากเซนเซอร์เพื่อสั่งการควบคุมเคลื่อนที่ของบอลบนแผ่นกระดาน การควบคุมเคลื่อนที่ของบอลบนแผ่นกระดาน มีหลายเทคนิคการควบคุม เช่น ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิกรัล ตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ หรือตัวควบคุมแผ่นเลื่อน เทคนิคการควบคุมแต่ละอย่างมีจุดเด่น และจุดด้อยต่างกัน ลักษณะโครงสร้างของระบบบอลทรงตัวบนแผ่นแสดงดังภาพที่ 2-1

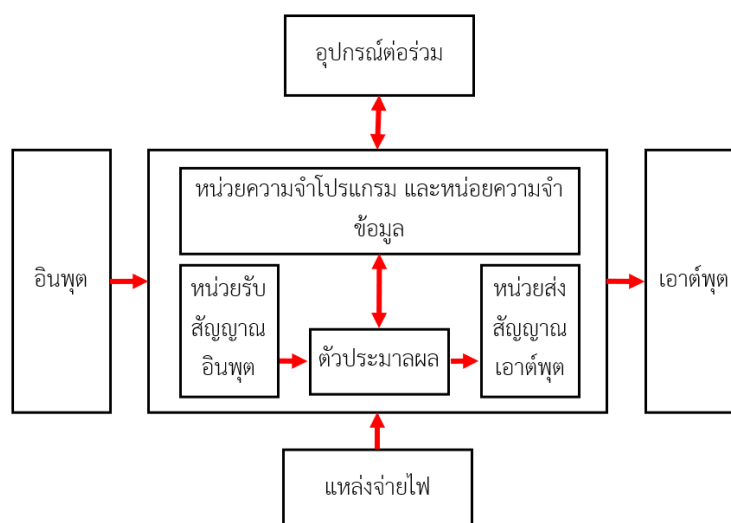


ภาพที่ 2-1 ระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น (<https://www.mdpi.com/1424-220/21/12/3959>)

2.2 พีแอลซี

พีแอลซี คือ เครื่องควบคุมอัตโนมัติที่สามารถเขียนโปรแกรม ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อทดแทนวงจรรีเลย์ (Relay) สามารถใช้งานได้อย่างอนเนกประสงค์ และสามารถเรียนรู้การใช้งานได้ง่ายมีส่วนอินพุต และเอาต์พุตที่สามารถต่อออกไปใช้งานได้ทันที สามารถนำอุปกรณ์ต่าง ๆ ต่อเข้ากับอินพุต ส่วนเอาต์พุตใช้ต่อออกไปควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ หรือเครื่องจักรที่เป็นเป้าหมาย สามารถสร้างวงจร หรือแบบของการควบคุมได้โดยการเขียนโปรแกรมคำสั่งเข้าไปในพีแอลซี นอกจากนี้ยังสามารถใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อื่น ในปัจจุบันนอกจากรีเลย์แล้วการใช้พีแอลซี สำหรับควบคุมเครื่องจักร หรืออุปกรณ์ต่าง ๆ ในโรงงานอุตสาหกรรมมีข้อได้เปรียบกว่า การใช้รีเลย์เนื่องจากการใช้

รีเลย์จำเป็นต้องเดินสายไฟฟ้า (Hard Wired) เมื่อมีความจำเป็นต้องเปลี่ยนกระบวนการผลิต หรือลำดับการทำงานใหม่ จำเป็นต้องเดินสายไฟฟ้าใหม่ เสียเวลา และเสียค่าใช้จ่ายสูง แต่เมื่อเปลี่ยนมาใช้พีแอลซี การเปลี่ยนกระบวนการผลิต หรือลำดับการทำงานใหม่นั้นทำได้โดยการเขียนโปรแกรมใหม่เท่านั้น นอกจากนี้พีแอลซียังใช้ระบบโซลิดสเตต (Solids State) น่าเชื่อถือ และสะดวกกว่าเมื่อต้องการขยายขั้นตอนการทำงานของเครื่องจักร พีแอลซีภายในมีโครงสร้างประกอบไปด้วยส่วนสำคัญต่าง ๆ ที่ทำหน้าที่ควบคุมประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 2-2



ภาพที่ 2-2 ส่วนประกอบหลักของชุดควบคุมพีแอลซี

2.3 สเตปมิงมอเตอร์

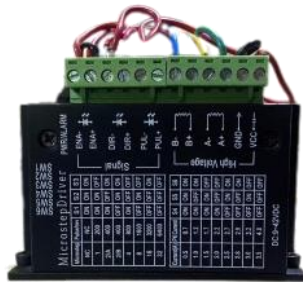
สเตปมิงมอเตอร์เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้สัญญาณพัลส์ (Pulse) ในการขับเคลื่อน โดยมีโครงสร้างภายในประกอบด้วยขั้วแม่เหล็กบนสเตเตอร์ (Stator) ที่ทำมาจากแผ่นเหล็กวงแหวนมีซี่ยื่นออกมาประกอบกันเป็นชั้น ๆ โดยแต่ละซี่ที่ยื่นออกมามีขดลวด (Coil) พันอยู่ สเตปมิงมอเตอร์ไม่สามารถทำงานเองได้ จำเป็นต้องมีวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Circuit) ที่ใช้ในการสร้างสัญญาณ หรือจ่ายพัลส์ไปยังวงจรขับสเตปมิงมอเตอร์ เพื่อให้สเตปมิงมอเตอร์เคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งของพัลส์ได้อย่างแม่นยำ แสดงดังภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 สเตปมิงมอเตอร์

2.4 บอร์ดไทรพ์มอเตอร์

บอร์ดไทรพ์มอเตอร์เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สร้างสัญญาณพัลส์เพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์ โดยหลักการทำงานของบอร์ดไทรพ์มอเตอร์ คือ การส่งสัญญาณพัลส์ไปยังมอเตอร์เพื่อกำหนดตำแหน่ง และความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ บอร์ดไทรพ์มอเตอร์อ่านสัญญาณจากตัวควบคุมเพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ที่ตรงกับการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ สัญญาณพัลส์นี้ส่งไปยังคอยล์ของมอเตอร์เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในมอเตอร์ และกำหนดการหมุนของมอเตอร์ นอกจากนี้บอร์ดไทรพ์มอเตอร์ยังสามารถปรับความเร็ว และแรงดันในการทำงานของสเต็ปมอเตอร์ได้ การเลือกใช้บอร์ดไทรพ์มอเตอร์ที่เหมาะสมช่วยให้ มอเตอร์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่ดีขึ้นแสดงดังภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2-4 บอร์ดไทรพ์มอเตอร์

2.5 กล้องเว็บแคม

กล้องเว็บแคม คือ กล้องดิจิทัลที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ หรือเครือข่าย และใช้สำหรับการสื่อสารผ่านวิดีโอ หรือเพื่อบันทึกภาพ กล้องเว็บแคมมีขนาดเล็ก พกพาสะดวกทำให้ง่ายสำหรับการใช้งานในสถานที่ต่าง ๆ รวมถึงในบ้าน สำนักงาน หรือห้องเรียน สามารถใช้สำหรับการประชุมทางวิดีโอ การถ่ายทอดสด หรือการสื่อสารออนไลน์อื่น ๆ และยังสามารถใช้ถ่ายภาพนิ่ง หรือบันทึกวิดีโอได้อีกด้วยภาพ และวิดีโอที่บันทึกโดยเว็บแคมสามารถดูได้แบบเรียลไทม์บนหน้าจอคอมพิวเตอร์ หรือเก็บไว้ใช้ในภายหลังแสดงกล้องเว็บแคมแสดงดังภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2-5 กล้องเว็บแคม

2.6 อาศัยโน เมกา 2560

เป็นบอร์ดที่ใช้ชิปเอทีเมกา 2560 (ATmega2560) เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์หลัก อาศัยโน เมกา เป็นบอร์ดที่มีการพัฒนามาจากอาศัยโน อูโน (Arduino Uno) มีขารับ และส่งสัญญาณ 54 ขา สามารถใช้ส่งสัญญาณแบบสัญญาณพัลส์ (Pulse Width Modulation : PWM) ได้ 15 ขา มีขารับสัญญาณแอนะล็อก 16 ขา มียูอาร์ที (Universal Asynchronous Receiver and Transmitter : UART) 4 ขา เป็นวิธีการสื่อสารที่ส่งข้อมูลผ่านพอร์ตอนุกรมแบบอะซิงโครนัส (Asynchronous Serial Communication) ทำงานที่ความเร็ว 16 เมกะเฮิรตซ์ สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ด้วยสายยูเอสบี (Universal Serial Bus : USB) เพื่อเริ่มต้นใช้งาน สามารถเขียนโปรแกรมเพื่อใช้ในการควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้แสดงดังภาพที่ 2-6



ภาพที่ 2-6 อาศัยโน เมกา 2560

2.7 เอนโคดเดอร์แบบแกนหมุน

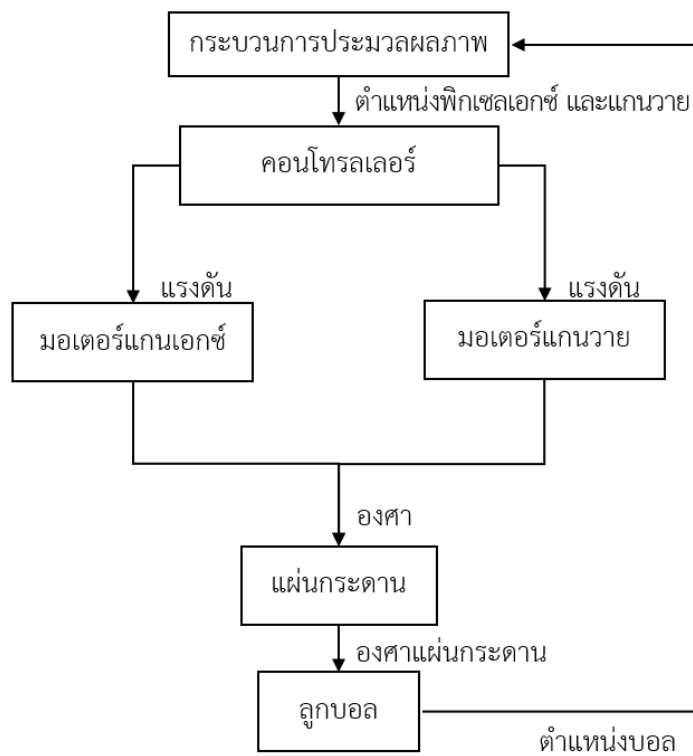
เอนโคดเดอร์แบบแกนหมุน คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด และตรวจนับการหมุนของแกนหมุน โดยมีหลักการทำงาน คือ การหมุนของแผ่นดิสก์ (Disc) ที่มีรู หรือช่องว่างเพื่อให้สามารถตรวจนับการหมุนได้ เอนโคดเดอร์แบบแกนหมุนประกอบด้วยสองส่วนหลัก คือ ส่วนตัวอ่าน และส่วนแผ่นดิสก์ เอนโคดเดอร์แบบแกนหมุนมีเซนเซอร์อินฟราเรด (Infrared Sensor) ที่ใช้ส่ง และรับสัญญาณแสงผ่านแผ่นดิสก์ที่มีรู หรือช่องว่าง เมื่อแผ่นดิสก์หมุนพร้อมกับแกน แสงจากเซนเซอร์อินฟราเรดผ่านรู หรือช่องว่างบนแผ่นดิสก์ ถูกตรวจนับแสง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในสัญญาณอ่านที่ส่งออกจากเซนเซอร์ สามารถแปลงเป็นค่าทางดิจิทัลได้ ค่าทางดิจิทัลแสดงถึงค่าการหมุน หรือตำแหน่งของแกน เอนโคดเดอร์แบบแกนหมุนถูกใช้ในระบบควบคุม และการตรวจวัดที่ต้องการความแม่นยำสูง เช่น ในเครื่องจักรกลอุตสาหกรรม ซีเอ็นซี หุ่นยนต์อุตสาหกรรม รวมถึงการใช้ในอุปกรณ์ต่าง ๆ แสดงเอนโคดเดอร์แบบแกนหมุนแสดงดังภาพที่ 2-7



ภาพที่ 2-7 เอนโคตเตอร์แบบแกนหมุน

2.8 ทฤษฎีตัวควบคุมระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น

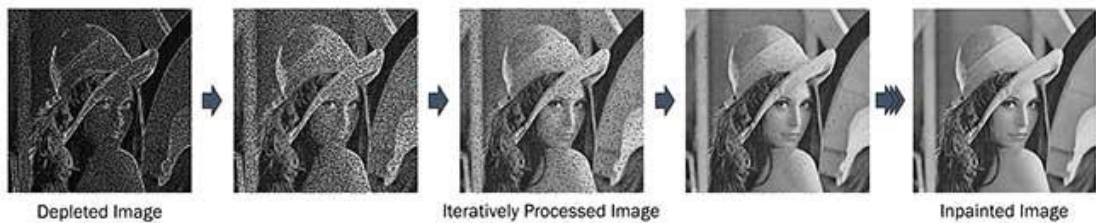
ทฤษฎีตัวควบคุมสำหรับระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น เป็นแนวคิดที่ใช้ในการออกแบบควบคุมเพื่อควบคุมตำแหน่งของลูกบอลบนแผ่นได้อย่างแม่นยำ โดยทั่วไปทฤษฎีตัวควบคุมสำหรับระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่นสามารถใช้หลายวิธีที่แตกต่างกันได้ เช่น ทฤษฎีระบบควบคุมสัดส่วนปริพันธ์ อนุพันธ์ ทฤษฎีการควบคุมแผ่นเลื่อน ทฤษฎีระบบควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ ฯลฯ ระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่นเป็นระบบที่ซับซ้อน และมีความแตกต่างกันไปตามการออกแบบ และตัวบ่งชี้การควบคุมที่ใช้ ดังนั้นทฤษฎีตัวควบคุมที่ใช้ได้รับการปรับแต่ง และการวิเคราะห์เพื่อให้สอดคล้องกับระบบ เพื่อให้ได้ระบบควบคุมเป้าหมายที่มีประสิทธิภาพสูง โดยมีกระบวนการทำงานแสดงดังภาพที่ 2-8



ภาพที่ 2-8 ภาพรวมการทำงานของระบบ

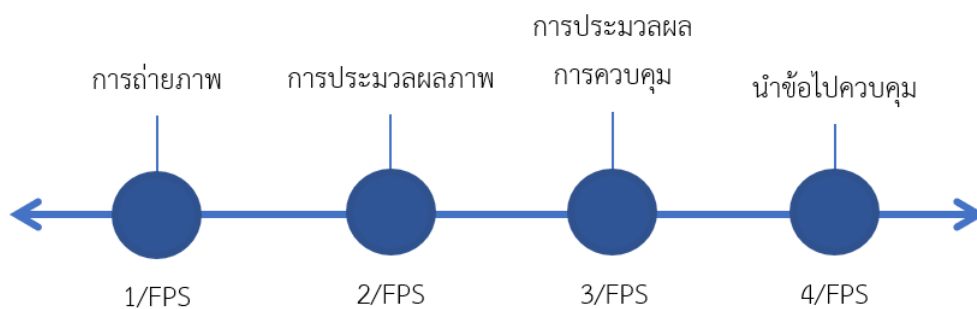
2.9 ทฤษฎีการประมวลผลภาพ

การประมวลผลภาพ เป็นกระบวนการประมวลผลภาพดิจิทัลโดยใช้คอมพิวเตอร์ เพื่อดึงข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับภาพ และสร้างข้อมูลใหม่ที่มีคุณภาพ มาประยุกต์ใช้ เช่น การแก้ไขภาพที่มีปัญหาด้านความคมชัด การตรวจจับวัตถุในภาพ การจำแนกภาพ การสกัดลักษณะเด่นของภาพ และการจัดการกับรูปแบบของภาพดิจิทัลเพื่อค้นหาวัตถุที่สนใจในภาพ คอมพิวเตอร์มีความสามารถในการดึงข้อมูลออกมาจากภาพได้อย่างรวดเร็ว และแม่นยำ ส่งผลให้มีการพัฒนาอุปกรณ์ และโปรแกรมที่สามารถประยุกต์ใช้งานในการประมวลผลภาพได้มากมาย เช่น การนำภาษาไพทอน (Python) มาใช้ในการประมวลผลภาพ มีความสะดวกในการเขียนโปรแกรม มีไลบรารี (Library) ที่มีที่ใช้ในการประมวลผลภาพอย่างมากมาย มีประสิทธิภาพสูงแสดงดังภาพที่ 2-9



ภาพที่ 2-9 การประมวลผลภาพ (<https://shorturl.asia/q6ig0>)

2.9.1 การเลือกใช้กล้องเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อให้ระบบควบคุมทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อใช้ในการติดตาม และส่งข้อมูลเพื่อใช้ในระบบควบคุมการเลือกใช้กล้อง มีปัจจัยในการเลือกดังนี้ ความหน่วง (latency) อัตราเฟรมต่อวินาที (Frame Per Second : FPS) และความละเอียดของกล้อง (Resolution) ความหน่วง เกิดขึ้นจากกระบวนการทั้งหมดที่ใช้ในระบบควบคุม โดยกระบวนการที่เกิดขึ้นในระบบมีดังนี้ 1) ถ่ายภาพ 2) การประมวลผลภาพ 3) การประมวลผลการควบคุม 4) นำข้อมูลไปควบคุม โดยกระบวนการที่เกิดขึ้นทั้งหมดแสดงดังภาพที่ 2-10



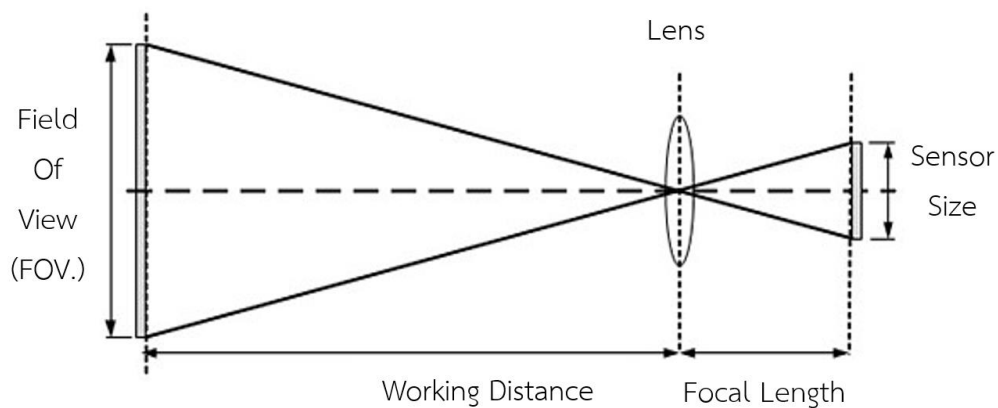
ภาพที่ 2-10 ความหน่วงกล้อง

จากภาพที่ 2-10 แสดงให้เห็นว่า ยิ่งอัตราเฟรมต่อวินาทีมาก ความหน่วงในการทำงานยิ่งต่ำ โดยทั่วไปแล้วอัตราเฟรม 60 เฟรมต่อวินาที ดีกว่า 30 เฟรมต่อวินาที ในแง่ของความราบรื่นของภาพ และการตอบสนอง อัตราเฟรมที่สูงขึ้นทำให้การเคลื่อนไหวลื่นไหล และเหมือนจริงมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเนื้อหาที่มีการเคลื่อนไหว ดังนั้นเลือกใช้กล้องอัตราเฟรม 60 เฟรมต่อวินาทีเพื่อให้ความหน่วงในกระบวนการควบคุมมีน้อย เคลื่อนไหวลื่นไหล และภาพเหมือนจริงแสดงดังภาพที่ 2-11



ภาพที่ 2-11 ภาพเปรียบเทียบอัตราเฟรม (<https://shorturl.asia/Yd4oJ>)

การคำนวณการติดตั้งกล้องเว็บแคม มีผลต่อการออกแบบความสูงของโครงการสามารถคำนวณหาระยะห่างจากวัตถุที่ตรวจจับถึงเลนส์กล้อง (Working Distance) สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของการหาระยะห่างจากวัตถุถึงเลนส์กล้องแสดงดังภาพที่ 2-12



ภาพที่ 2-12 ภาพพารามิเตอร์ในการคำนวณ (<https://www.bing.com/images/blob?bcid=r9ORbl0xcrkFbxtvqXfkJgPtH1Mt34>)

จากภาพที่ 2-12 เป็นการอธิบายความสัมพันธ์ของการหาระยะห่างจากวัตถุถึงเลนส์กล้อง โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้ ขนาดเซนเซอร์ (Sensor Size) ความยาวโฟกัส (Focal length) พื้นที่ในการรับภาพ (Field of View) และระยะทางจากวัตถุถึงเลนส์กล้องแสดงดังสมการที่ (2-1)

$$\frac{\text{ความยาวโฟกัส}}{\text{ระยะทางการทำงาน}} = \frac{\text{ขนาดเซนเซอร์}}{\text{พื้นที่ในการรับภาพ}} \quad (2-1)$$

หาขนาดความยาวโฟกัสแสดงดังสมการที่ (2-2)

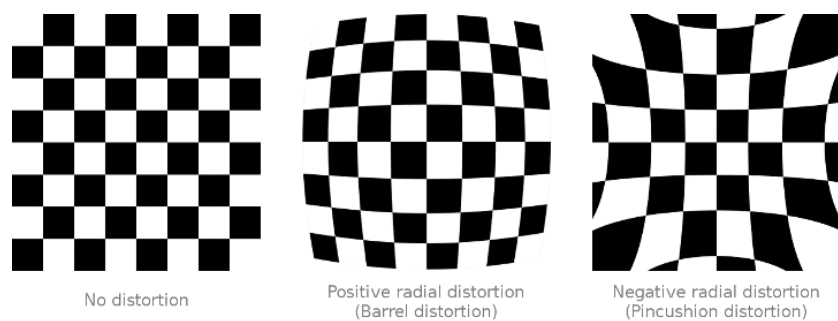
$$\text{ความยาวโฟกัส} = \frac{\text{ขนาดเซนเซอร์} \times \text{ระยะทางการทำงาน}}{\text{พื้นที่ในการรับภาพ}} \quad (2-2)$$

การคำนวณละเอียดของกล้องที่เหมาะสมกับโครงการแสดงดังสมการที่ (2-3)

$$\text{ความละเอียดของกล้อง} = \frac{\text{พื้นที่ในการรับภาพ} \times \text{จำนวนพิกเซลวัตุน้อยสุด}}{\text{ความละเอียดน้อยสุด}} \quad (2-3)$$

2.9.2 การปรับเทียบกล้อง

การปรับเทียบกล้องเป็นกระบวนการที่ใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของกล้องเพื่อปรับแก้ความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตของภาพที่ถ่ายขึ้นมาโดยกล้องแสดงดังภาพที่ 2-13

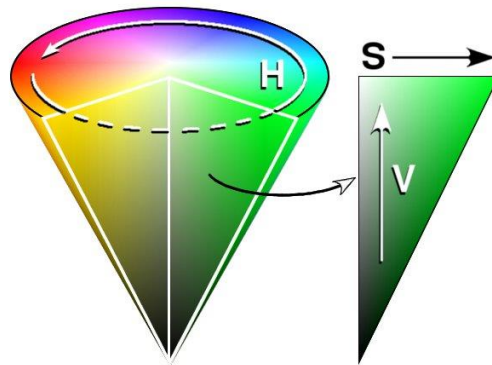


ภาพที่ 2-13 ความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตของภาพ (<https://shorturl.asia/e2dhz>)

เมื่อกล้องถูกปรับเทียบแล้ว สามารถคำนวณ หรือแปลงพิกัดภาพที่ถ่ายเป็นพิกัดในระบบสามมิติได้แม่นยำมากขึ้น การปรับเทียบกล้องนั้นสามารถทำได้โดยใช้เครื่องมือ หรือซอฟต์แวร์ที่เฉพาะเจาะจงสำหรับการปรับเทียบกล้อง โดยกระบวนการเริ่มต้นด้วยการถ่ายภาพ หรือบันทึกวิดีโอของแบบอ้างอิงที่มีลักษณะที่ทราบของวัตถุ แล้วใช้ภาพ หรือวิดีโอนี้ในการวัด และปรับค่าพารามิเตอร์ของกล้อง โดยเทียบกับค่าที่เป็นไปได้ จนกว่าได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำในการแสดงผลของภาพ หรือวิดีโอที่ถูกบันทึกด้วยกล้องนั้น ๆ

2.9.3 การแยกสีแบบเอชเอสวี (HSV Color Separation)

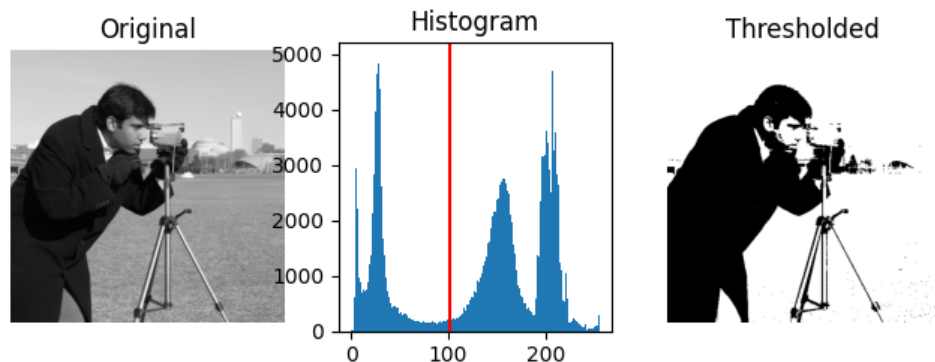
การแยกสีแบบเอชเอสวี คือ การรับรู้สีของมนุษย์ เป็นการรับรู้สีจากแสงที่สะท้อนวัตถุ และแบ่งแยกเป็นสีต่าง ๆ ตามลักษณะของแสงที่สะท้อนกลับมา ค่าสี (Hue) คือ ค่าที่อธิบายสีจากการวัดองค์ประกอบของแสง อยู่ในช่วง 0 ถึง 360 องศา โดยเรียกสีแต่ละสีว่ามีค่าสีอยู่บนวงกลมสี (Color Wheel) มีสีพื้นฐาน คือ แดง (Red) เขียว (Green) และน้ำเงิน (Blue) ความอิ่มตัวของสี (Saturation) คือ ระดับของความบริสุทธิ์ของสี การปรับค่าความอิ่มตัวในกรณีที่ค่าความอิ่มตัวเพิ่มขึ้นทำให้เกิดสีขาว สีจางลง และสีเข้มขึ้นในกรณีที่ค่าความอิ่มตัวลดลง และความเข้มแสง (Value) ใช้อธิบายระดับของความเข้มของแสง ค่าความสว่างสูงแสดงว่ามีแสงมากที่สุด และต่ำสุด แสดงว่ามีควมมืดม่นภาพ แบบจำลองการแยกสีแบบเอชเอสวีแสดงดังภาพที่ 2-14



ภาพที่ 2-14 แบบจำลองการแยกสีแบบเอชเอสวี (<https://shorturl.asia/iZrpw>)

2.9.4 การแบ่งแยกระดับความเข้มของภาพ (Thresholding)

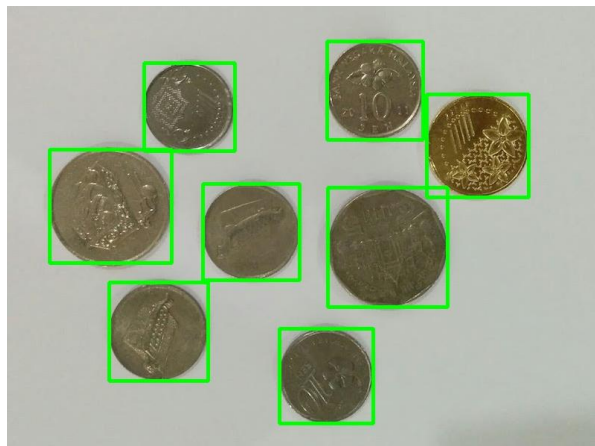
การแบ่งแยกระดับความเข้มของภาพ เป็นเทคนิคการประมวลผลภาพที่ใช้ในการแบ่งแยกพื้นที่ภาพที่มีความเข้มสีต่าง ๆ ออกจากกัน โดยการกำหนดเกณฑ์ หรือค่าเข้มของสี เป็นตัวแปรที่ใช้แบ่งแยกพื้นที่ภาพ เมื่อค่าความเข้มสีของพิกเซลในภาพมากกว่าค่าที่เกณฑ์กำหนด ถูกจัดให้เป็นสีขาว และถ้าน้อยกว่าค่าเกณฑ์ที่กำหนด ถูกจัดให้เป็นสีดำการแบ่งแยกระดับความเข้มของภาพนั้นสามารถนำไปใช้ในการปรับแต่งภาพ เช่น การลดเสียงรบกวน (Noise) การเพิ่มความชัดเจน (Sharpness) การตัดออกพื้นที่ของภาพที่ไม่จำเป็นออก เพื่อให้ได้ภาพที่ชัดเจนแสดงดังภาพที่ 2-15



ภาพที่ 2-15 การแบ่งแยกระดับความเข้มของภาพ (<https://shorturl.asia/Nni17>)

2.9.5 การตีกรอบวัตถุ (Object Framing)

การตีกรอบวัตถุ เป็นกระบวนการที่ใช้เทคโนโลยีการเรียนรู้ของเครื่องมือช่วยวิเคราะห์ภาพในการตรวจสอบ และระบุตำแหน่งของวัตถุต่าง ๆ ในภาพ โดยการตีกรอบวัตถุช่วยให้เครื่องมือสามารถระบุวัตถุที่อยู่ในพื้นที่ใดของภาพ และใช้เป็นพื้นฐานในการทำงานเชิงพื้นที่ (Spatial Analysis) หรือการประมวลผลภาพอื่น ๆ เช่น การติดตามวัตถุ (Object Tracking) หรือการประมวลผลวิดีโอ (Video Processing) แสดงดังภาพที่ 2-16



ภาพที่ 2-16 การตรวจจับเหรียญ (<https://postd.cc/image-processing-101/>)

2.10 ทฤษฎีฟังก์ชันถ่ายโอน

ฟังก์ชันถ่ายโอน เป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบควบคุม โดยมีหน้าที่แปลงสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณเอาต์พุต โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณนำเข้า และสัญญาณส่งออกของระบบ สมการที่ใช้ในการแสดงฟังก์ชันถ่ายโอน คือ สมการลาปลาซ (Laplace Transform) เป็นการแปลงฟังก์ชันเวลาให้กลายเป็นฟังก์ชันของตัวแปรเชิงซ้อน ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นฟังก์ชันของตัวแปรลาปลาซแทนที่เป็นฟังก์ชันของตัวแปรเวลา

สมการลาปลาซที่ใช้ในการแปลงฟังก์ชันเวลา แสดงดังสมการที่ (2-4) โดยที่ s เป็นตัวแปรของลาปลาซ และ $L[f(t)]$ คือ การแปลงลาปลาซของฟังก์ชัน

$$F(s) = L[f(t)] = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad (2-4)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมมีรูปแบบเป็นฟังก์ชันของตัวแปรลาปลาซ ฟังก์ชันถ่ายโอนสามารถเขียนแสดงดังสมการที่ (2-5)

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (2-5)$$

โดยที่ $Y(s)$ เป็นฟังก์ชันลาปลาซของสัญญาณเอาต์พุต และ $X(s)$ เป็นฟังก์ชันลาปลาซของสัญญาณอินพุต ส่วน $G(s)$ เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ

ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นฟังก์ชันที่เชื่อมโยงสัญญาณอินพุต และสัญญาณเอาต์พุตของระบบสัญญาณอินพุต มีผลต่อการออกแบบคอนโทรลเลอร์ หรือระบบควบคุมอัตโนมัติให้มีประสิทธิภาพ

2.11 ทฤษฎีกลศาสตร์ลากร็องจ์

ทฤษฎีกลศาสตร์ลากร็องจ์ เป็นทฤษฎีทางกลศาสตร์ที่ใช้สมการลากร็องจ์ (Lagrangian Equation) ในการอธิบายการเคลื่อนที่ของระบบที่มีแรงกระทำบนโลกให้เป็นเหตุการณ์เชิงคณิตศาสตร์ โดยที่สมการลากร็องจ์เป็นสมการที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของระบบโดยมีความสัมพันธ์ดังนี้ ทฤษฎีกลศาสตร์ลากร็องจ์ (L) เท่ากับ พลังงานจลน์ (T) ลบด้วยพลังงานศักย์ (V) แสดงดังสมการที่ (2-6)

$$L = T - V \quad (2-6)$$

สมการดังกล่าวมีความสัมพันธ์ตามสมการออยเลอร์-ลากร็องจ์ (Euler Lagrange Equation) แสดงดังสมการที่ (2-7)

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} = Q_i \quad (2-7)$$

พิกัดทั่วไป (Generalized Coordinate : Qi) ของระบบ สมการลากรังจ์ในระบบประกอบไปด้วยพลังงานจลน์ของบอล (T_b) พลังงานจลน์ของแผ่น (T_p) แสดงดังสมการที่ (2-8)

$$T_b = \frac{1}{2}m_b(\dot{x}_b^2 + \dot{y}_b^2) + \frac{1}{2}I_b(\omega_x^2 + \omega_y^2) \quad (2-8)$$

ค่าพารามิเตอร์ (Parameter) ของตัวแปรต่าง ๆ มีดังนี้ มวลของลูกบอล (m_b) โมเมนต์ความเฉื่อยของลูกบอล (I_b) ความเร็วในการหมุนรอบแกนเอกซ์ (ω_x) และแกนวาย (ω_y) โดยความเร็วของลูกบอลในแกนเอกซ์ (\dot{x}_b) และแกนวาย (\dot{y}_b) โดยมีความสัมพันธ์แสดงดังสมการที่ (2-9)

$$\dot{x}_b = r_b\omega_y, \dot{y}_b = r_b\omega_x \quad (2-9)$$

ค่าพารามิเตอร์รัศมีของลูกบอล (r_b) เอาไปแทนในสมการ (2-8) แสดงดังสมการที่ (2-10)

$$T_b = \frac{1}{2}(m_b(\dot{x}_b^2 + \dot{y}_b^2) + \frac{I_b}{r_b^2}(\dot{x}_b^2 + \dot{y}_b^2)) = \frac{1}{2}(m_b + \frac{I_b}{r_b^2})(\dot{x}_b^2 + \dot{y}_b^2) \quad (2-10)$$

พลังงานจลน์ของแผ่นพิจารณาที่จุดลูกบอลแสดงดังสมการที่ (2-11) และ (2-12)

$$T_p = \frac{1}{2}(I_p + I_b)(\dot{\alpha}^2 + \dot{\beta}^2) + \frac{1}{2}m_b(x_b\dot{\alpha} + y_b\dot{\beta})^2 \quad (2-11)$$

$$T_p = \frac{1}{2}(I_p + I_b)(\dot{\alpha}^2 + \dot{\beta}^2) + \frac{1}{2}m_b(x_b^2\dot{\alpha}^2 + 2x_b\dot{\alpha}y_b\dot{\beta} + y_b^2\dot{\beta}^2) \quad (2-12)$$

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แสดงดังนี้ความเอียงของแผ่นกระดานแกนเอกซ์ (α) และแกนวาย (β) พลังงานจลน์ของระบบทั้งหมดเท่ากับพลังงานจลน์ของบอลบวกพลังงานจลน์แผ่นแสดงดังสมการที่ (2-13) และ (2-14)

$$T = T_b + T_p \quad (2-13)$$

$$T = \frac{1}{2} \left(m_b + \frac{I_b}{r_b^2} \right) (\dot{x}_b^2 + \dot{y}_b^2) + \frac{1}{2} (I_p + I_b) (\dot{\alpha}^2 + \dot{\beta}^2) + \frac{1}{2} m_b (x_b^2 \dot{\alpha}^2 + 2x_b \dot{\alpha} y_b \dot{\beta} + y_b^2 \dot{\beta}^2) \quad (2-14)$$

พลังงานศักย์ของลูกบอลแสดงดังสมการที่ (2-15)

$$V_b = m_b g h = m_b g (x_b \sin \alpha + y_b \sin \beta) \quad (2-15)$$

สามารถหาสมการของระบบจากสมการลากรังเจียนแสดงดังสมการที่ (2-16)

$$L = T_b + T_p - V_b \quad (2-16)$$

ใช้ลากรังจ์เพื่อหาสมการของระบบแสดงดังสมการที่ (2-17), (2-18), (2-19) และ (2-20)

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} = (I_p + I_b) \dot{\alpha}_x + m_b x_b (x_b \dot{\alpha} + y_b \dot{\beta}), \quad \frac{\partial L}{\partial \alpha} = m_b g \cos \alpha \quad (2-17)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\beta}} = (I_p + I_b) \dot{\beta}_x + m_b y_b (y_b \dot{\beta} + x_b \dot{\alpha}), \quad \frac{\partial L}{\partial \beta} = m_b g \cos \beta \quad (2-18)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_b} = \left(m_b + \frac{I_b}{r_b^2} \right) \dot{x}_b, \quad \frac{\partial L}{\partial x_b} = m_b (x_b \dot{\alpha} + y_b \dot{\beta}) \dot{\alpha} \quad (2-19)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{y}_b} = \left(m_b + \frac{I_b}{r_b^2} \right) \dot{y}_b, \quad \frac{\partial L}{\partial y_b} = m_b (x_b \dot{\alpha} + y_b \dot{\beta}) \dot{\beta} \quad (2-20)$$

สมมติว่าแรงบิดทั่วไปในแนวแกนเอกซ์ และแกนวายเป็นแรงบิดที่เพิ่มขึ้นบนแผ่นกระดาน สามารถเขียนสมการออยเลอร์แสดงดังสมการดังที่ (2-21), (2-22), (2-23) และ (2-24)

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} - \frac{\partial L}{\partial \alpha} &= (I_p + I_b) \ddot{\alpha} + m_b x_b^2 \ddot{\alpha} + 2m_b x_b \dot{x}_b \dot{\alpha} + m_b x_b y_b \ddot{\alpha} + m_b \dot{x}_b y_b \dot{\beta} \\ &\quad + m_b x_b \dot{y}_b \dot{\beta} - m_b g \cos \alpha = \tau_x \end{aligned} \quad (2-21)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\beta}} - \frac{\partial L}{\partial \beta} &= (I_p + I_b) \ddot{\beta} + m_b y_b^2 \ddot{\beta} + 2m_b y_b \dot{y}_b \dot{\beta} + m_b x_b y_b \ddot{\beta} + m_b \dot{y}_b x_b \dot{\alpha} \\ &\quad + m_b y_b \dot{x}_b \dot{\alpha} - m_b g \cos \beta = \tau_y \end{aligned} \quad (2-22)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_b} - \frac{\partial L}{\partial x_b} = \left(m_b + \frac{I_b}{r_b^2}\right) \ddot{x}_b - m_b (x_b \dot{\alpha} + y_b \dot{\beta}) \dot{\alpha} + m_b g \sin \alpha = 0 \quad (2-23)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_b} - \frac{\partial L}{\partial y_b} = \left(m_b + \frac{I_b}{r_b^2}\right) \ddot{y}_b - m_b (y_b \dot{\beta} + x_b \dot{\alpha}) \dot{\alpha} + m_b g \sin \beta = 0 \quad (2-24)$$

แทนสมการนี้ใน (2-7) และจัดเรียงใหม่แสดงดังสมการที่ (2-25), (2-26), (2-27) และ (2-28)

$$\left(m_b + \frac{I_b}{r_b^2}\right) \ddot{x}_b - m_b (x_b \dot{\alpha}^2 + y_b \dot{\alpha} \dot{\beta}) + m_b g \sin \alpha = 0 \quad (2-25)$$

$$\left(m_b + \frac{I_b}{r_b^2}\right) \ddot{y}_b - m_b (y_b \dot{\beta}^2 + x_b \dot{\alpha} \dot{\beta}) + m_b g \sin \beta = 0 \quad (2-26)$$

$$\begin{aligned} \tau_x &= (I_{px} + I_b + m_b x_b^2) \ddot{\alpha} + 2m_b x_b \dot{x}_b \dot{\alpha} + m_b x_b y_b \ddot{\beta} + m_b \dot{y}_b x_b \dot{\beta} \\ &\quad + m_b y_b \dot{x}_b \dot{\beta} + m_b g x_b \cos \alpha \end{aligned} \quad (2-27)$$

$$\begin{aligned} \tau_y &= (I_{py} + I_b + m_b y_b^2) \ddot{\beta} + 2m_b y_b \dot{y}_b \dot{\beta} + m_b x_b y_b \ddot{\alpha} + m_b \dot{y}_b x_b \dot{\alpha} \\ &\quad + m_b y_b \dot{\alpha} + m_b g y_b \cos \beta \end{aligned} \quad (2-28)$$

ค่าพารามิเตอร์ในสมการ มวล (m) รัศมีของบอล (R) ตำแหน่งบอล (x) ความเร็วบอล และความเร่งของบอลในแนวแกนเอกซ์ (\ddot{x}) ตำแหน่งบอล (y) ความเร็วบอล (\dot{y}) และความเร่งของบอลในแนวแกนเวาย (\ddot{y}) มุมเบี่ยงเบนของแผ่นกระดานแนวแกนเอกซ์ (θ_x) ความเร็วเชิงมุมแนวแกนเอกซ์ ($\dot{\theta}_x$) มุมเบี่ยงเบนของแผ่นกระดานแนวแกนเวาย (θ_y) ความเร็วเชิงมุมตามแกนเวาย ($\dot{\theta}_y$)

2.12 ทฤษฎีระบบควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์

ระบบควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ เป็นระบบที่ออกแบบมาเพื่อให้สามารถควบคุม และปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการได้อย่างแม่นยำ มีค่าที่นำไปใช้ในการคำนวณเป็นค่าความผิดพลาดที่หามาจากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการ และค่าที่ต้องการ ตัวควบคุมพยายามลดค่าผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณเอาต์พุตของกระบวนการ การปรับค่าสัญญาณเอาต์พุตของกระบวนการใช้ค่าตัวแปรของสัดส่วน ปริพันธ์ และอนุพันธ์ที่ใช้ปรับเปลี่ยนตามระบบ โดยทฤษฎีการควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ได้ชื่อตามการรวมกันของเทอมของตัวแปรทั้งสามแสดงดังสมการที่ (2-29)

$$MV(t) = P_{out} + I_{out} + D_{out} \quad (2-29)$$

การควบคุมแบบสัดส่วน ใช้ค่าสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุม (Controller Output : $u(t)$) และค่าสัญญาณความผิดพลาดระหว่างระบบกับค่าอ้างอิง (Actuating Error Signal : $e(t)$) โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรแสดงดังสมการที่ (2-30) และ (2-31)

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2-30)$$

$$\frac{u(t)}{e(t)} = K_p \quad (2-31)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของการควบคุมแบบสัดส่วน สามารถได้จากการแปลงลาปลาซของสมการที่ใช้ในการควบคุมได้ดังแสดงดังสมการที่ (2-32)

$$\frac{u(s)}{e(s)} = K_p \quad (2-32)$$

ค่าสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบพี ไม่สามารถกำจัดค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัว (Steady State Error) ได้เนื่องจากการคำนวณสมการแบบสัดส่วน มีจำนวนอนันต์ไม่จำกัด อาจทำให้ค่าสัญญาณเอาต์พุตไม่สามารถจำกัดค่าความผิดพลาดลงได้ในบางกรณี โดยเฉพาะเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย หรือการรบกวนจากโหลด นอกจากนี้การควบคุมแบบสัดส่วนยังมีความแม่นยำน้อยกว่าการควบคุมแบบอื่น ๆ และต้องใช้ในการปรับแต่งค่าสัญญาณอย่างถี่ถ้วนในการใช้งานจริง

การควบคุมปริพันธ์ ได้ความสัมพันธ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมเป็นสัดส่วนกับสัญญาณความผิดพลาดแสดงดังสมการที่ (2-33) และ (2-34)

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t) \quad (2-33)$$

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2-34)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของการควบคุมปริพันธ์แสดงดังสมการที่ (2-35)

$$\frac{u(s)}{e(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (2-35)$$

ค่าสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเมื่อค่าความผิดพลาดมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า และมีค่าคงที่เมื่อค่าความผิดพลาดเป็นศูนย์ การควบคุมแบบสัดส่วนช่วยลดค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวได้บ้าง แต่ข้อเสียของการควบคุมแบบสัดส่วน คือ ไม่สามารถกำจัดค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวได้ หลังจากการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย หรือได้รับสัญญาณรบกวนจากโหลด การควบคุมปริพันธ์ หรือการควบคุมแบบทำใหม่ (Reset Control) เป็นเทคนิคการควบคุมที่ช่วยลดค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวได้ โดยการคำนวณให้สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมเริ่มต้นที่ค่าคงที่เมื่อค่าความผิดพลาดเป็นศูนย์ และเมื่อค่าความผิดพลาดเปลี่ยนแปลงจากศูนย์ ตัวควบคุมคำนวณใหม่ และเริ่มต้นที่ค่าคงที่อีกครั้ง การควบคุมปริพันธ์ช่วยลดค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวได้แม้ว่าค่าความผิดพลาดมีค่าสูงกว่าค่าความผิดพลาดที่สามารถรับได้โดยการควบคุมแบบสัดส่วนเท่านั้น

การควบคุมแบบอนุพันธ์ค่าสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ เป็นสัดส่วนของอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด มีความสัมพันธ์แสดงดังสมการที่ (2-36)

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2-36)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของการควบคุมแบบอนุพันธ์ มีความสัมพันธ์แสดงดังสมการที่ (2-37)

$$\frac{u(s)}{e(s)} = K_d s \quad (2-37)$$

การควบคุมแบบอนุพันธ์ มีส่วนการควบคุมที่ทำให้ค่าพุ่งเกิน (Overshoot) มีขนาดลดลงเนื่องจากการควบคุมแบบนี้พิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์ หรือที่เรียกกันทั่วไปว่าการควบคุมสัดส่วนไอ มีความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตจากตัวควบคุม และสัญญาณค่าความผิดพลาดที่ใช้ขับเคลื่อนแสดงดังสมการที่ (2-38)

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2-38)$$

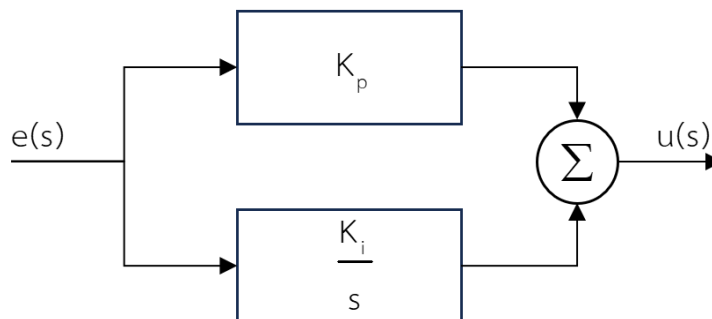
ฟังก์ชันถ่ายโอนของการควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2-39)

$$\frac{u(s)}{e(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (2-39)$$

โดยที่ K_p เป็นอัตราขยายเชิงสัดส่วน และ K_i เป็นอัตราขยายเชิงปริพันธ์ นอกจากนี้ยังอาจแสดงฟังก์ชันถ่ายโอนในอีกรูปแบบหนึ่งได้ดังสมการที่ (2-40)

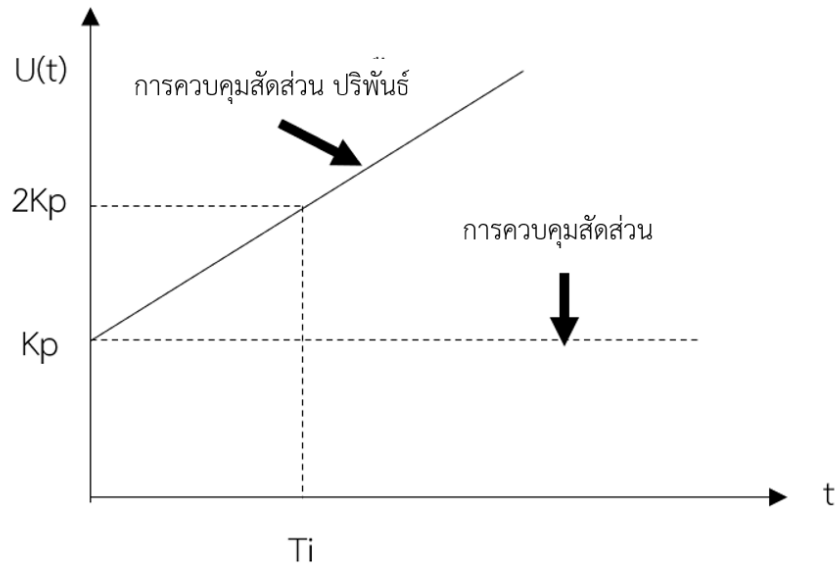
$$\frac{u(s)}{e(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) = \frac{K_p (1 + T_i s)}{T_i s} K \quad (2-40)$$

การปรับค่า K_p ส่งผลต่อการควบคุมทั้งสองส่วน บล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ มีลักษณะดังภาพที่ 2-17



ภาพที่ 2-17 บล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์

ถ้าหากสัญญาณผิดพลาดซับซ้อน เป็นฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วย สัญญาณเอาต์พุตจากตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ มีลักษณะดังแสดงดังภาพที่ 2-18



ภาพที่ 2-18 สัญญาณเอาต์พุตตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ เมื่อค่าความผิดพลาดเป็นฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วย

การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอนุพันธ์ หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า การควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์มีความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตจากตัวควบคุม และสัญญาณผิดพลาดซับซ้อนดังสมการที่ (2-41)

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2-41)$$

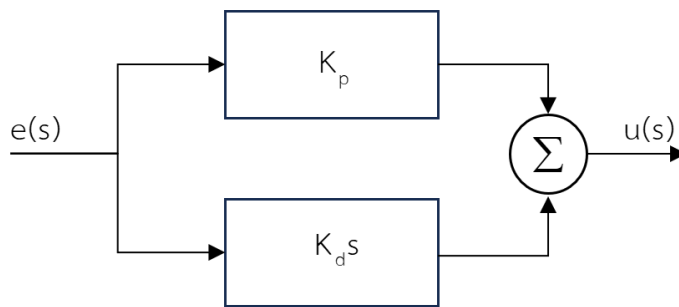
ฟังก์ชันถ่ายโอนของการควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์ มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2-42)

$$\frac{u(s)}{e(s)} = K_p + K_d s \quad (2-42)$$

โดยที่ K_p เป็นอัตราขยายเชิงสัดส่วน และ K_d เป็นอัตราขยายเชิงอนุพันธ์ (Derivative gain) นอกจากนี้ยังสามารถแสดงฟังก์ชันถ่ายโอนในอีกรูปแสดงดังสมการที่ (2-43)

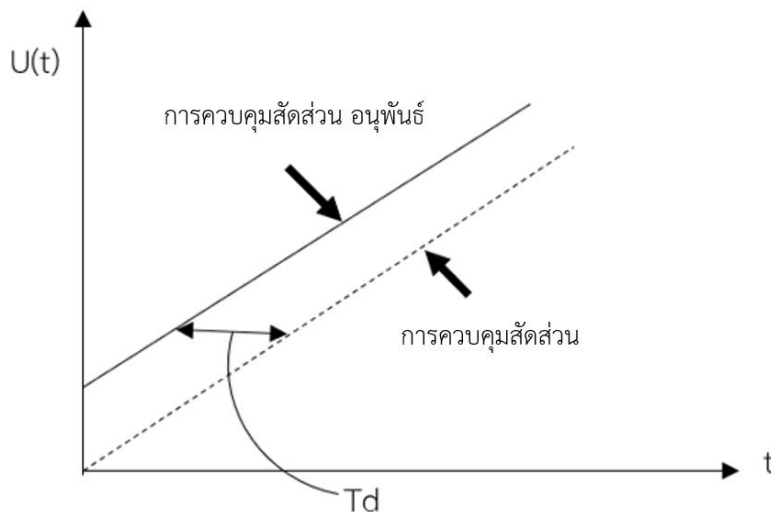
$$\frac{u(s)}{e(s)} = K_p + K_d s = K_p (1 + T_d s) \quad (2-43)$$

โดยที่ T_d เป็นเวลาอนุพันธ์ (Derivative Time) มีค่า $T_d = K_d / K_p$ บล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์ มีลักษณะดังแสดงดังภาพที่ 2-19 หากสัญญาณผิดพลาด เป็นฟังก์ชันลาดเอียงหนึ่งหน่วย สัญญาณเอาต์พุตจากตัวควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์มีลักษณะดังแสดงดังภาพที่ 2-20



ภาพที่ 2-19 บล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์

ผลตอบสนองแสดงให้เห็นว่า สัดส่วน อนุพันธ์ ของตัวควบคุมสามารถทำหน้าที่คาดการณ์ล่วงหน้าถึงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณผิดพลาดขับเคลื่อนได้



ภาพที่ 2-20 เอาต์พุตตัวควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์ เมื่อสัญญาณผิดพลาดเป็นฟังก์ชันลาดเอียงหนึ่งหน่วย

การควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์ ปรับปรุงผลตอบสนองชั่วคราวของระบบ เหมาะสำหรับระบบที่มีการล่าช้าทางเวลาค่อนข้างมาก ทำให้การควบคุมถึงจุดที่ต้องการรวดเร็วขึ้น เนื่องจากมีคุณสมบัติในการคาดการณ์ล่วงหน้าถึงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณผิดพลาดขับเคลื่อน แต่มีข้อเสีย คือ มีความไวต่อสัญญาณรบกวนมาก ไม่ควรใช้กับระบบที่มีสัญญาณรบกวนสูง และยังสามารถทำให้ตัวขับเคลื่อนเกิดการอึดตัวขึ้นได้อีกด้วย

การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์ และอนุพันธ์ หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่าการควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ เป็นการรวมการควบคุมแบบสัดส่วน ปริพันธ์ และแบบอนุพันธ์เข้าด้วยกันมีความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตจากตัวควบคุม และสัญญาณผิดพลาดขับเคลื่อนดังสมการที่ (2-44)

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2-44)$$

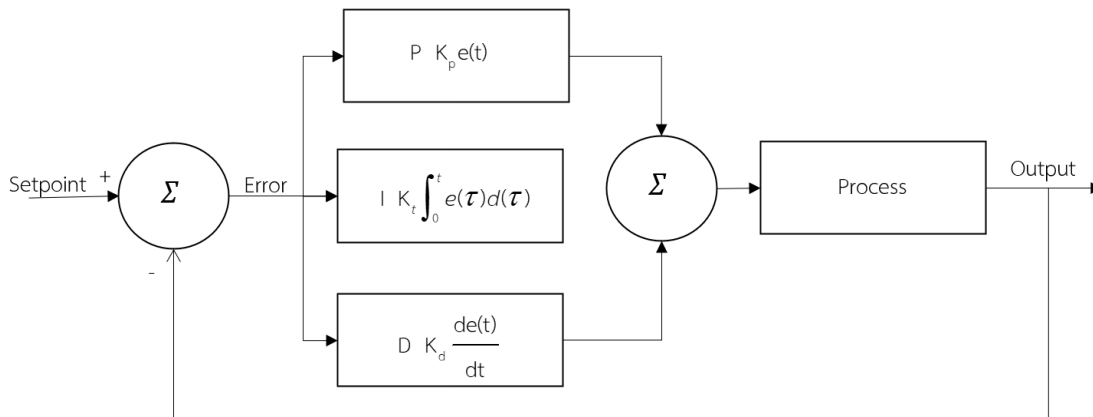
ฟังก์ชันถ่ายโอนของการควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2-45)

$$\frac{u(s)}{e(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \quad (2-45)$$

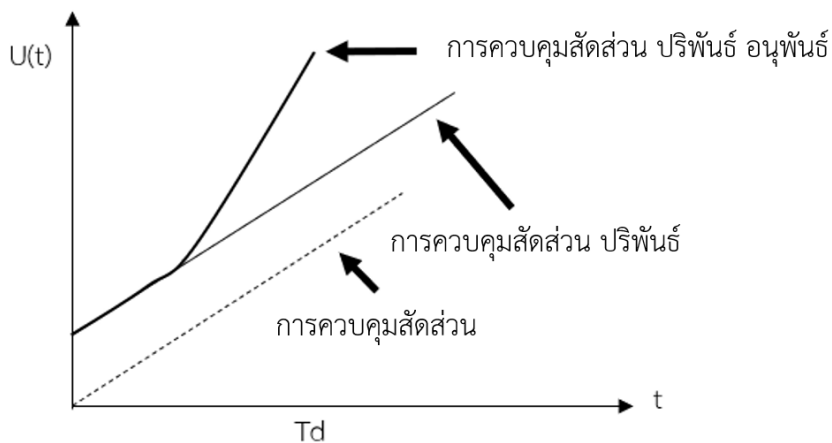
โดยที่ K_p เป็นอัตราขยายเชิงสัดส่วน K_i เป็นอัตราขยายเชิงปริพันธ์ และ K_d เป็นอัตราขยายเชิงอนุพันธ์ การควบคุมแบบสัดส่วน ปริพันธ์ แสดงฟังก์ชันถ่ายโอนในอีกรูปแบบหนึ่งได้ดังสมการที่ (2-46)

$$\frac{u(s)}{e(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2-46)$$

โดยที่ T_i เป็นเวลาเชิงปริพันธ์ และ T_d เป็นเวลาเชิงอนุพันธ์ บล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ มีลักษณะแสดงดังภาพที่ 2-21 และหากสัญญาณผิดพลาดขับเคลื่อนเป็นฟังก์ชันลาดเอียงหนึ่งหน่วย สัญญาณเอาต์พุตจากตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ มีลักษณะแสดงดังภาพที่ 2-22



ภาพที่ 2-21 บล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์



ภาพที่ 2-22 แอต์พุตจากตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์เมื่อสัญญาณผิดพลาดเป็นฟังก์ชันลาดเอียงหนึ่งหน่วย

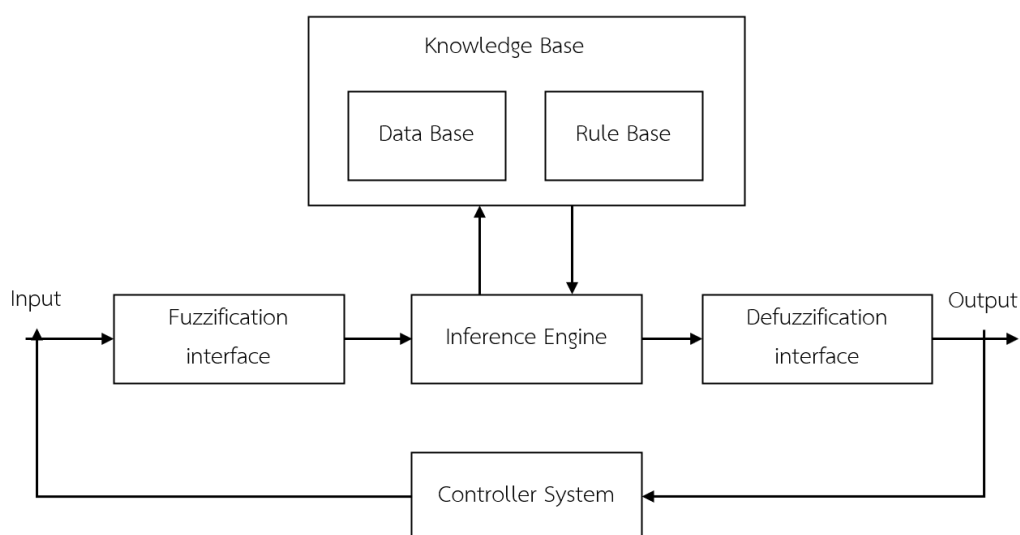
การควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ สัญญาณแอต์พุตจากตัวควบคุมขึ้นอยู่กับผลรวมของการควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ โดยพิจารณาค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากระบบต่อค่าอ้างอิง เมื่อเกิดค่าความผิดพลาดส่วนการควบคุมแบบอนุพันธ์ทำหน้าที่แก้ไขค่าความผิดพลาดโดยพิจารณาความชันของการเปลี่ยนแปลงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในส่วนของการควบคุมแบบสัดส่วน ทำหน้าที่รักษาระดับค่าสัญญาณแอต์พุตของตัวควบคุมจนกระทั่งค่าความผิดพลาดหมดไป จากนั้นการควบคุมปริพันธ์ลดค่าความผิดพลาดที่สถานะคงตัว โดยใช้ผลรวมของค่าความผิดพลาดทำให้ค่าความผิดพลาดลดลงอย่างต่อเนื่องสำหรับระบบที่มีการตอบสนองที่รวดเร็วกว่าการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณแอต์พุต

จากตัวควบคุม ทำให้การควบคุมมีประสิทธิภาพไม่ส่งผลต่อการควบคุม เนื่องจากค่าความผิดพลาดถูกกำจัดในช่วงเวลาอันรวดเร็วด้วยการควบคุมแบบอนุพันธ์

2.13 ทฤษฎีระบบควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ

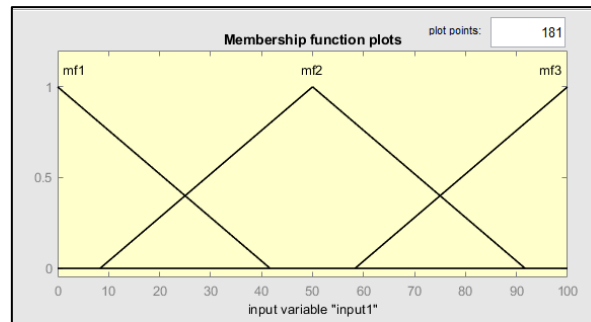
ทฤษฎีระบบควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ เป็นการใช้ตัวแปรแบบไม่ชัดเจนในงานควบคุมแบบต่าง ๆ ระบบที่ต้องการควบคุมส่วนใหญ่มีลักษณะความไม่แน่นอนของระบบ และยากต่อการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เป็นระบบควบคุมแบบพลวัต (Dynamic System) ดังนั้นเพื่อให้การควบคุมที่มีประสิทธิภาพ และมีความแม่นยำจำเป็นต้องใช้การควบคุมที่ตอบสนองต่อระบบที่เป็นพลวัต

ระบบควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ เป็นการระบบควบคุมที่มีการตัดสินใจคล้ายมนุษย์ โดยไม่จำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองคณิตศาสตร์ สามารถประยุกต์ใช้ได้กับระบบควบคุมที่มีคุณลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น ในระบบควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือมีส่วนประกอบอยู่ 3 ขั้นตอนหลัก ๆ แสดงดังภาพที่ 2-23



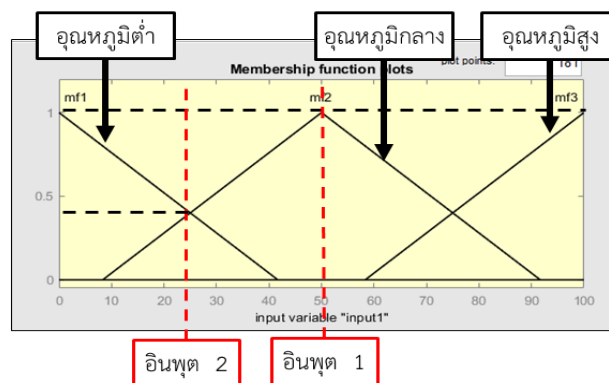
ภาพที่ 2-23 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ (<https://shorturl.asia/QXvMS>)

ฟัซซิฟิเคชัน (Fuzzification) เป็นส่วนที่แปลงอินพุตทั่วไปเป็นอินพุตของระบบควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ โดยถูกกำหนดไว้ในรูปแบบของสมาชิกฟังก์ชัน (Membership Function) โดยแกนเอกซ์ เป็นแกนของค่าในโลกความเป็นจริง และแกนวายเป็นแกนของค่าความเป็นสมาชิกในระบบควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือโดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1 แสดงดังภาพที่ 2-24



ภาพที่ 2-24 รูปแบบสมาชิกอินพุต

จากภาพที่ 2-24 ยกตัวอย่างการใช้งานในระบบทำความร้อน มีลักษณะดังนี้ คือ กำหนดให้อินพุตในโลกความเป็นจริง เป็นอุณหภูมิตั้งแต่ 0 ถึง 100 องศาเซลเซียส ผู้ใช้งานออกแบบสมาชิกโดยแบ่งอินพุตออกเป็น 3 สมาชิก คือ อุณหภูมิต่ำ อุณหภูมิกลาง และอุณหภูมิสูง โดยอุณหภูมิต่ำอยู่ในช่วง 0 ถึง 40 องศาเซลเซียส อุณหภูมิกลางอยู่ในช่วง 10 ถึง 90 องศาเซลเซียส และสูงอยู่ในช่วง 60 ถึง 100 องศาเซลเซียส กำหนดไว้ด้วยฟังก์ชันดังภาพที่ 2-25



ภาพที่ 2-25 ตัวอย่างของการสร้างฟังก์ชันอินพุตของระบบควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ

จากภาพที่ 2-25 เห็นได้ว่าอินพุตถูกแบ่งออกเป็น 3 สมาชิก แต่ละสมาชิกมีช่วงที่แตกต่างกัน เพื่อบอกค่าความเป็นสมาชิก หรือค่าความเชื่อมั่นในสมาชิกนั้น ๆ เช่น จากภาพที่ 2-25 อินพุต 1 เท่ากับ 50 ทำให้ระบบควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือทราบว่า อุณหภูมิอยู่ในระดับกลาง 100 เปอร์เซ็นต์ หรือ W_2 เท่ากับ 1 เพราะมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 แต่สำหรับอินพุต 2 ที่มีอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส ระบบควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือทราบว่า อุณหภูมิอยู่ในระดับต่ำ 40 เปอร์เซ็นต์ หรือ W_2 เท่ากับ 0.4

ขั้นตอนต่อไปในการสร้างระบบควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ คือ การนำค่าความเป็นสมาชิกนั้นมาเป็นตัวกำหนดการทำงานของเอาต์พุต สมมติให้อเอาต์พุตในที่นี้ คือ การทำงานเครื่องทำความร้อน โดย

กำหนดช่วงเท่ากับ 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ และยังคงต้องกำหนดจำนวนสมาชิกของเอาต์พุต เช่นเดียวกันอินพุต กำหนดให้เป็น ต่ำ กลาง สูง โดยเอาต์พุตต้องทำตามเงื่อนไขที่กำหนด แสดงดังตารางที่ 2-1 หรืออาจเรียกได้ว่าเป็นการตีความหมาย (Fuzzy Inference) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ตรวจสอบข้อเท็จจริง และกฎเพื่อให้ในการตีความหมายหาเหตุผล หรือวิเคราะห์อินพุตตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้ หรือเข้าสู่กฎพื้นฐานของ (Fuzzy Rule Base)

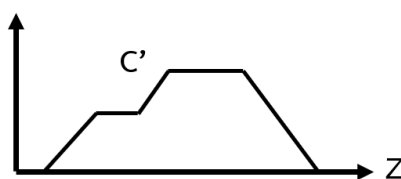
ตารางที่ 2-1 การออกแบบกฎของระบบควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ

อินพุต	เอาต์พุต
สูง	ต่ำ
กลาง	กลาง
ต่ำ	สูง

ในการตั้งกฎ (Rule Base) มีลักษณะในรูปแบบ ถ้า...ดังนั้น (If - Then) เช่น ถ้าอุณหภูมิ หรืออินพุตเท่ากับต่ำ ดังนั้นการทำงานของเครื่องทำความร้อน หรือเอาต์พุตเท่ากับสูง ถ้าอุณหภูมิ หรืออินพุตเท่ากับสูง ดังนั้นการทำงานของเครื่องทำความร้อน หรือเอาต์พุตเท่ากับต่ำ

ขั้นตอนสุดท้าย คือ การแปลงค่าในระบบควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือให้อยู่ในค่าของโลกความเป็นจริง (Defuzzification) สัมพันธ์กับค่าความเป็นสมาชิกของอินพุต กฎเกณฑ์ที่กำหนดฟังก์ชันของเอาต์พุต เพื่อหาค่าเอาต์พุตในโลกความเป็นจริงที่เหมาะสม การแปลงค่าในระบบควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือให้อยู่ในค่าของโลกความเป็นจริง (Defuzzification) แบ่งได้เป็น 3 วิธีการใหญ่ คือ 1) อนุমানแบบแมมดานิ (Mamdani Inference) 2) อนุমানแบบซุกเกโน (Sugeno Inference) และ 3) อนุমানตามแบบที่ซุกาโมโตะ (Tsukamoto's Inference)

อนุমানแบบแมมดานิ เป็นระบบที่ใช้ตัวแปรภาษาทั้งในข้อตั้ง และข้อตาม โดยแยกออกเป็น 3 วิธีการ 1) จุดศูนย์กลางของพื้นที่ (Center of Area) 2) เส้นกลางพื้นที่ (Bisector of Area) และ 3) ค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุด (Mean of Maximum) โดยทั้ง 3 วิธีการของอนุমানแบบแมมดานิ มาจากการหาผลรวม (Integrate) แสดงดังภาพที่ 2-26



ภาพที่ 2-26 รูปแบบการอนุমানของวิธีการอนุমানแบบแมมดานิ

สมการของวิธีการจุดศูนย์กลางของพื้นที่แสดงดังสมการที่ (2-47)

$$z_{COA} = \frac{\int_Z \mu_A(z)zdz}{\int_Z \mu_A(z)dz} \quad (2-47)$$

สมการของวิธีการเส้นกลางพื้นที่แสดงดังสมการที่ (2-48)

$$\int_{\alpha}^{z_{BOA}} \mu_A(z)dz = \int_{z_{BOA}}^{\beta} \mu_A(z)dz \quad (2-48)$$

เมื่อ $\alpha = \min\{z | z \in Z\}$ และ $\beta = \max\{z | z \in Z\}$

สมการของวิธีการค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุดแสดงดังสมการที่ (2-49) และ (2-50)

$$z_{MOM} = \frac{\int_Z z dz}{\int_Z dz} \quad (2-49)$$

$$z' = \left\{ z | \mu_A(z) = \max \mu_A(z) \right\} \quad (2-50)$$

อนุমানแบบซูเกโน เป็นระบบที่อินพุตเป็นฟังก์ชันของเอาต์พุต คือ ค่าเอาต์พุตของระบบเป็นผลรวมจากเอาต์พุตจากกฎแต่ละข้อโดยใช้สมการ (2-51) โดยลักษณะของฟังก์ชันมีตั้งแต่ ฟังก์ชันลำดับศูนย์ (Zero Order) หรือ มากกว่าฟังก์ชันลำดับศูนย์เช่น ฟังก์ชันลำดับหนึ่ง (First Order)

$$z^* = \frac{w_1 z_1 + w_2 z_2 + \dots + w_n z_n}{w_1 + w_2 + \dots + w_n} \quad (2-51)$$

เมื่อค่าความเป็นสมาชิก (w) และผลที่ได้จากการคำนวณของฟังก์ชันเอาต์พุตอนุমানตามแบบที่ซูกาโมโตะ (Z) เป็นระบบที่ส่วนข้อตั้ง และข้อตามเป็นพจน์ภาษาที่คล้ายกับ วิธีการของอนุমানแบบแมมดานิ คือ มีทั้งฟังก์ชันของอินพุต (Membership Function Input) และฟังก์ชันของเอาต์พุต (Membership Function Output) แต่ส่วนของข้อตามถูกแสดงเป็นฟังก์ชันที่มีสมาชิกแบบทางเดียว

เป็นค่าอนุमानเอาต์พุตของแต่ละกฎที่เป็นค่าธรรมดาทั่วไป ใช้สมการลักษณะเดียวกับวิธีการอนุमानแบบซูเกโน แสดงดังสมการที่ (2-52)

$$z^* = \frac{w_1 z_1 + w_2 z_2 + \dots + w_n z_n}{w_1 + w_2 + \dots + w_n} \quad (2-52)$$

เมื่อ ค่าความเป็นสมาชิก คือ W และ ผลที่ได้จากการคำนวณของฟังก์ชันเอาต์พุต คือ Z

2.14 ทฤษฎีระบบอนุमान ตรรกศาสตร์คลุมเครือ แบบปรับค่าอัตโนมัติ

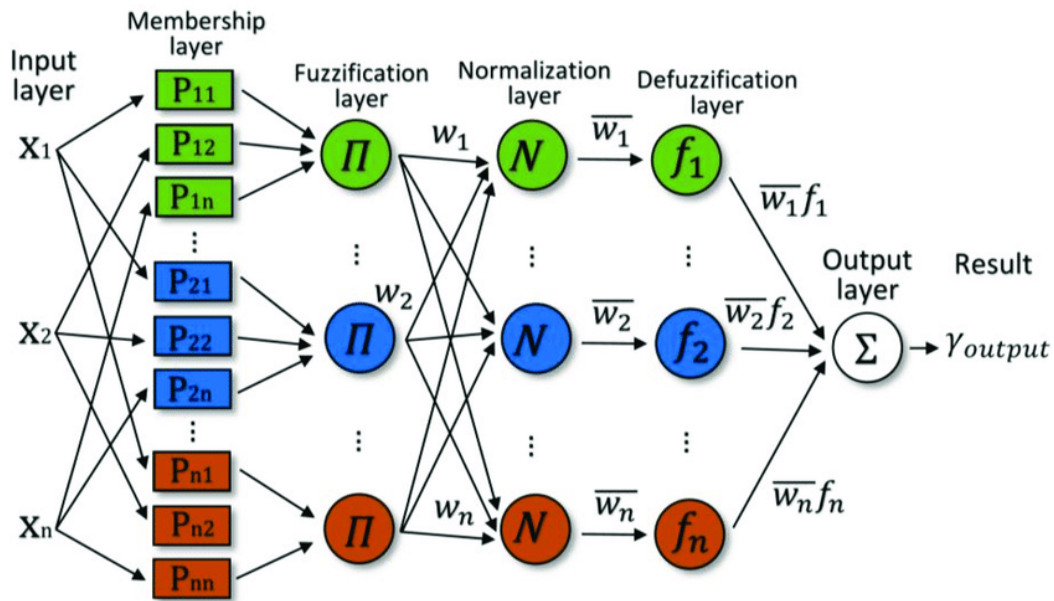
อนุमान ตรรกศาสตร์คลุมเครือ แบบปรับค่าอัตโนมัติ คือ ระบบควบคุมที่ใช้การประมวลผลเชิงโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) ร่วมกับตรรกศาสตร์คลุมเครือในการประมวลผล โดยระบบนี้ใช้โครงข่ายประสาทเทียม เพื่อจำแนก และวิเคราะห์ข้อมูลอินพุต เพื่อสร้างโมเดลที่สามารถใช้ในการควบคุมได้ และใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือเพื่อประมวลผล ตัดสินใจเพื่อส่งสัญญาณควบคุมกลับไปยังระบบ

อนุमान ตรรกศาสตร์คลุมเครือ แบบปรับค่าอัตโนมัติ นั้นมีหลักการทำงานคล้ายกับการเรียนรู้ของมนุษย์ โดยระบบเรียนรู้จากข้อมูลเข้า และข้อมูลที่ส่งออกของระบบ เรียกว่าข้อมูลที่ถูกใช้สำหรับการสอน (Training Data) โดยที่โมเดลของระบบถูกปรับปรุงให้ดียิ่งขึ้นเมื่อมีข้อมูลที่ถูกใช้สำหรับการสอนมากขึ้น ทำให้ระบบมีความสามารถในการปรับปรุงการควบคุมได้มากขึ้นเมื่อมีการเรียนรู้ของระบบ

ข้อดีของอนุमानตรรกศาสตร์คลุมเครือ คือ มีความสามารถในการปรับปรุงการควบคุมได้มากขึ้นเมื่อมีการเรียนรู้ของระบบ และสามารถใช้งานได้กับระบบที่มีความซับซ้อน

ข้อเสียของอนุमानตรรกศาสตร์คลุมเครือ คือ การฝึกอบรมของระบบอาจใช้เวลานาน และต้องใช้งบประมาณสูง เนื่องจากต้องมีการเตรียมข้อมูลที่ถูกใช้สำหรับการฝึก การเลือก และปรับค่าตัวแปรที่ใช้ในการปรับแต่งโมเดลของระบบอย่างมีประสิทธิภาพนอกจากนี้ ระบบยังมีความซับซ้อนในการดูแลรักษา และการปรับปรุง เนื่องจากต้องใช้ความรู้เฉพาะทางในการเข้าใจการทำงานของระบบ

การนำอนุमानตรรกศาสตร์คลุมเครือ ไปใช้ในงานควบคุมสามารถนำมาใช้ในหลายงาน เช่น การควบคุมระบบการผลิต การควบคุมอุณหภูมิในห้องทดลอง การควบคุมเครื่องจักร การควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ และอื่น ๆ โปรแกรมที่ใช้สำหรับการฝึกยกตัวอย่างเช่น แมตแล็บแสดงโครงสร้างอนุमान ตรรกศาสตร์คลุมเครือดังภาพที่ 2-27



ภาพที่ 2-27 โครงสร้างอนุมาน ตรรกศาสตร์คลุมเครือ (<https://shorturl.asia/GnEe5>)

2.15 ทฤษฎีแบบจำลองปริภูมิสถานะ

แบบจำลองปริภูมิสถานะที่ใช้สร้างแบบจำลองของระบบพลศาสตร์ในโดเมนเวลา ประกอบด้วยสมการ 2 สมการ แสดงดังสมการที่ (2-53) และ (2-54)

$$\text{State Equation} = \dot{x} = Ax + Bu \tag{2-53}$$

$$\text{Output Equation} = y = Cx + Du \tag{2-54}$$

ตารางที่ 2-2 ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณแบบจำลองปริภูมิสถานะ

ตัวแปร	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ
y	เอาต์พุต
A	ระบบเมทริกซ์
B	อินพุตเมทริกซ์
C	เอาต์พุตเมทริกซ์
D	เมทริกซ์การส่งข้อมูลโดยตรง

จากตารางที่ 2-2 เป็นค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณหาแบบจำลองปริภูมิสถานะ จากสมการที่ (2-53) เรียกว่า สมการสเตท (State Equation) และสมการที่ (2-54) เรียกว่าสมการเอาต์พุต สามารถแสดงอยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ลำดับที่ 1 จำนวน n แสดงดังสมการที่ (2-55), (2-56) และ (2-57)

$$\frac{dx}{dt} = a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n + b_{11}u_1 + \dots + b_{1r}u_r \quad (2-55)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = a_{21}x_1 + \dots + a_{2n}x_n + b_{21}u_1 + \dots + b_{2r}u_r \quad (2-56)$$

$$\frac{dx_n}{dt} = a_{n1}x_1 + \dots + a_{nn}x_n + b_{n1}u_1 + \dots + b_{nr}u_r \quad (2-57)$$

เมทริกซ์ต่าง ๆ ของสมการสเตท ระบบเมทริกซ์ (System Matrix) แสดงดังสมการที่ (2-58) (2-59), (2-60) และ (2-61)

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & L & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & L & a_{2n} \\ M & & O & M \\ a_{n1} & a_{n2} & L & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (2-58)$$

ระบบเมทริกซ์

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (2-59)$$

เวกเตอร์สถานะ (State Vector)

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & L & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & L & b_{2n} \\ M & & O & M \\ b_{n1} & b_{n2} & L & b_{nn} \end{bmatrix} \quad (2-60)$$

อินพุตเมทริกซ์

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_r \end{bmatrix} \quad (2-61)$$

อินพุตเวกเตอร์

สมการเอาต์พุต แสดงในรูปสมการเชิงเส้น m แสดงดังสมการที่ (2-62), (2-63) และ (2-64)

$$y_1 = c_{11}x_1 + \dots + c_{1n}x_n + d_{11}u_1 + \dots + d_{1r}u_r \quad (2-62)$$

$$y_2 = c_{21}x_1 + \dots + c_{2n}x_n + d_{21}u_1 + \dots + d_{2r}u_r \quad (2-63)$$

$$y_m = c_{m1}x_1 + \dots + c_{mn}x_n + d_{m1}u_1 + \dots + d_{mr}u_r \quad (2-64)$$

เมทริกซ์ต่าง ๆ ของสมการเอาต์พุต แสดงดังสมการที่ (2-65), (2-66) และ (2-67)

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix} \quad (2-65)$$

เอาต์พุตเวกเตอร์

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2n} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ C_{n1} & C_{n2} & \cdots & C_{nn} \end{bmatrix} \quad (2-66)$$

เอาต์พุตเมทริกซ์

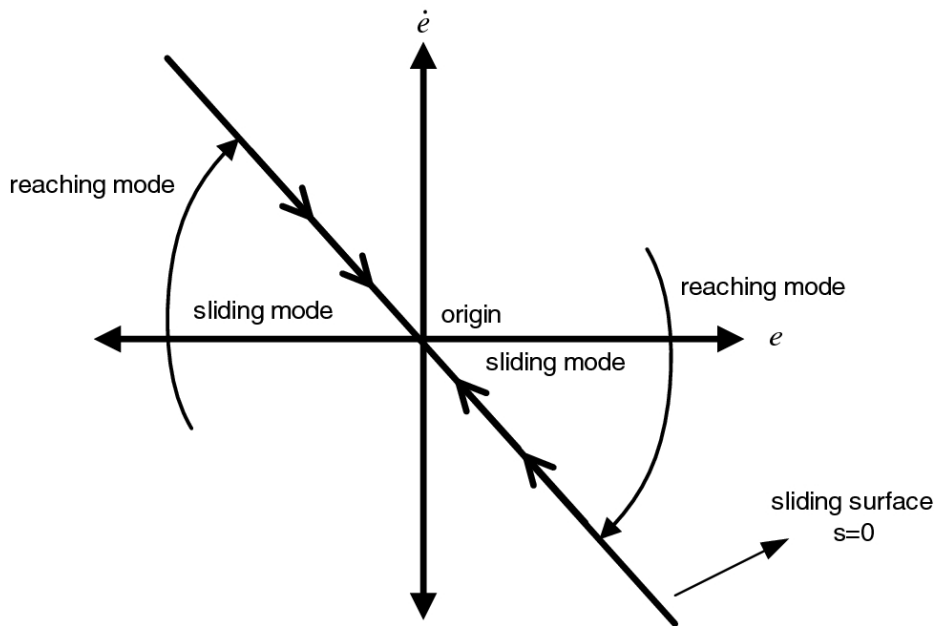
$$D = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & \cdots & D_{1r} \\ D_{21} & D_{22} & \cdots & D_{2r} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ D_{m1} & D_{m2} & \cdots & D_{mr} \end{bmatrix} \quad (2-67)$$

เมทริกซ์การส่งข้อมูลโดยตรง

การสร้างแบบจำลองปริภูมิสถานะนั้นต้องมีการกำหนดตัวแปรปริภูมิสถานะมีหลายวิธี การเลือกตัวแปรนั้นตัวแปรแต่ละตัวต้องเป็นสมการเชิงเส้น และเป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นในระบบ ๆ หนึ่งสามารถเลือกตัวแปรสแตตที่ได้หลายแบบ ทำให้ได้สมการสแตตที่ต่างกัน

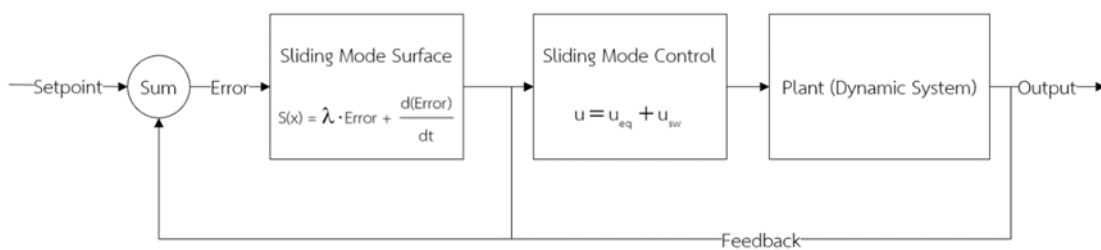
2.16 ทฤษฎีการควบคุมแผ่นเลื่อน

ทฤษฎีการควบคุมแผ่นเลื่อน คือ การควบคุมตัวแปรสถานะของค่าผิดพลาดให้เคลื่อนที่เข้าสู่ระนาบสไลดิง (Sliding Plane) เมื่อตัวแปรสถานะเข้าสู่ระนาบสไลดิง และควบคุมให้เคลื่อนที่อยู่บนระนาบสไลดิงในทิศทางการเข้าสู่ศูนย์แสดงดังภาพที่ 2-28



ภาพที่ 2-28 การเคลื่อนที่แบบสไลดิงโหมด (Tsai et al., 2004)

การควบคุมแผ่นเลื่อน เป็นเทคนิคการควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Control) ที่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการควบคุมระบบที่มีความยืดหยุ่นสูง และมีความซับซ้อน เช่น ระบบหุ่นยนต์ ระบบการเคลื่อนที่ในอุตสาหกรรม ระบบการบิน และระบบการควบคุมการเคลื่อนที่ของยานอวกาศ มีหลักการควบคุมแสดงดังภาพที่ 2-29 และค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมแผ่นเลื่อนแสดงดังตารางที่ 2-3



ภาพที่ 2-29 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแผ่นเลื่อน

ตารางที่ 2-3 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมแผ่นเลื่อน

ค่าพารามิเตอร์	ตัวแปร	หน่วย
ฟังก์ชันพื้นผิวสลับ (Switching Surface)	$s(x)$	-
ค่าความผิดพลาด	error	เซนติเมตร
ค่าความเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด	$d(\text{error})/dt$	เซนติเมตร
ค่าความชันของความผิดพลาด	λ	-
เอาต์พุตของตัวควบคุม	u	-
ฟังก์ชันการสลับ (Switching Function)	u_{sw}	-
ค่าเกน	k	-
ฟังก์ชันซิกนัม (Signum)	sgn	-
ควบคุมสมมูล	u_{eq}	-
ระบบเอาต์พุต	x	-
ตัวแปรที่ไม่ค่าแน่นอนที่มีค่ามากกว่า 0	$f(x)$	-
ตัวแปรที่ไม่ค่าแน่นอนที่มีค่ามากกว่า 0	$g(x)$	-

ที่มา : ัญญา (2556)

จากระบบได้การหาค่า $S(x)$ โดยใช้สมการที่ (2-68)

$$S(x) = \lambda(\text{Error}) + \frac{d(\text{Error})}{dt} \quad (2-68)$$

ค่าความผิดพลาด หาได้จากสมการที่ (2-69)

$$\text{ค่าความผิดพลาด} = \text{ตำแหน่งเป้าหมาย} - \text{สัญญาณป้อนกลับ} \quad (2-69)$$

เอาต์พุตของตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมชุดทดลองแผ่นเลื่อนได้จากสมการที่ (2-70)

$$u = u_{eq} + u_{sw} \quad (2-70)$$

ฟังก์ชันการสลับ ได้จากสมการที่ (2-71)

$$u_{sw} = -k \times \text{sgn}(s(x)) \quad (2-71)$$

โดยฟังก์ชันซิกนัม มีเงื่อนไขสมการดังที่ (2-72)

$$\text{sgn}(s) = \begin{cases} 1f(S(x)) > 0 \\ 0f(S(x)) = 0 \\ -1f(S(x)) < 0 \end{cases} \quad (2-72)$$

เอาต์พุต ของฟังก์ชันซิกนัม เมื่อ ค่า $S > 0$ ให้ฟังก์ชันซิกนัม = 1

ค่าเอาต์พุต ของฟังก์ชันซิกนัม เมื่อ ค่า $S = 0$ ให้ฟังก์ชันซิกนัม = 0

ค่าเอาต์พุต ของฟังก์ชันซิกนัม เมื่อ ค่า $S < 0$ ให้ฟังก์ชันซิกนัม = -1

หลักการออกแบบวิธีเลื่อนเพื่อสร้างเสถียรภาพให้จุดศูนย์ของระบบแสดงดังสมการที่ (2-73) และ (2-74)

$$\dot{x} = x_2 \quad (2-73)$$

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (2-74)$$

การกำหนดฟังก์ชันพื้นผิวสลับ $s(x)$ แสดงดังสมการที่ (2-75)

$$s(x) = \lambda x_1 + x_2 \quad (2-75)$$

เมื่อ $s(x) = 0$ และ $x_2 = -\lambda x_1$ เมื่อนำไปแทนค่าในสมการของระบบได้ $\dot{x}_1 = -\lambda x_1$ บ่งบอกว่าลู่อู่เข้าสู่ศูนย์ และจาก $\dot{x}_2 = -\lambda x_1$ ลู่อู่เข้าสู่ศูนย์ด้วยการหากฎการควบคุมที่ทำให้ $s(x) = 0$ ตลอดเวลา โดยในขั้นตอนนี้แนะนำเสนอวิธีที่รู้จักกันในชื่อวิธีควบคุมสมมูล โดยกำหนดสัญญาณควบคุม $u = u_{eq} + u_{sw}$ ในการหาสัญญาณควบคุม u_{eq} สมมติว่าวิถีการเคลื่อนที่ของระบบอยู่บนพื้นผิวแสดงดังสมการที่ (2-76) และ (2-77)

$$s(x) = s(\dot{x}) = 0 \quad (2-76)$$

$$\dot{s}(x) = \lambda \dot{x}_1 + \dot{x}_2 \quad (2-77)$$

จากเงื่อนไข $s(\dot{x}) = 0$ และแทนเอาต์พุตของตัวควบคุมด้วยควบคุมสมมูล สามารถเขียนใหม่แสดงดังสมการที่ (2-78)

$$0 = \lambda x' + f(x) + g(x)u_{eq} \quad (2-78)$$

ได้สมการสัญญาณควบคุมสมมูลแสดงดังสมการที่ (2-79)

$$u_{eq} = \frac{\lambda x' + f(x)}{g(x)} \quad (2-79)$$

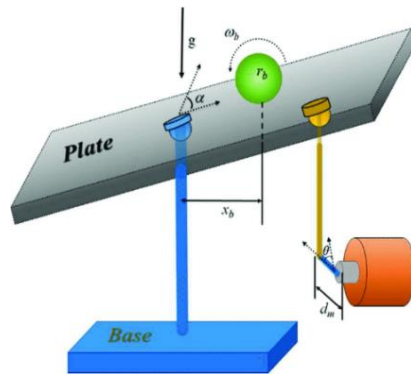
แทนสมการที่ (2-71) และ (2-79) ลงในสมการที่ (2-70) แสดงดังต่อไปนี้

$$u = \frac{\lambda x' + f(x)}{g(x)} + (-k \cdot \text{sgn}(s(x)))$$

2.17 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

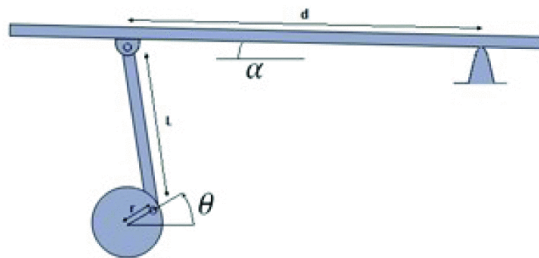
2.17.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น

Elshamy et al.,(2021) ได้นำเสนอการพัฒนาชุดทดลองระบบควบคุมบอลบนแผ่นกระดาน โดยใช้เซอร์โวมอเตอร์ในการสร้างองศาให้แผ่นกระดาน และใช้กล้องเว็บแคมจับตำแหน่งของลูกบอลเพื่อรักษาตำแหน่งที่ต้องการ โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือเป็นตัวควบคุมเสถียรภาพของลูกบอลบนแผ่นกระดาน เพื่อจำลองความสำคัญของอุปกรณ์ที่มีความละเอียดอ่อนในเรื่องของการสร้างเสถียรภาพ โครงการนี้ได้มีการนำเสนอการหาค่าพารามิเตอร์ และการจำลองการคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการควบคุม สามารถนำการจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อมาประยุกต์ใช้กับโครงการได้แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบบอลบนแผ่นกระดานแสดงดังภาพที่ 2-30



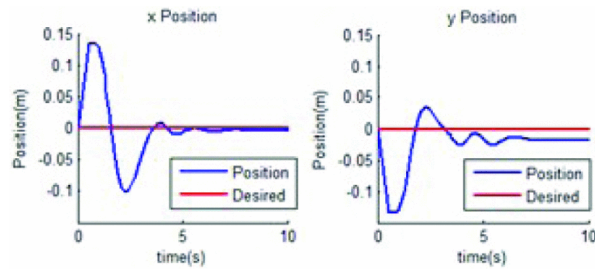
ภาพที่ 2-30 แบบจำลองการเคลื่อนที่ที่บอลบนแผ่น (Elshamy et al., 2021)

Cardeira et al.,(2022) นำเสนอการพัฒนาต้นแบบ (Prototype) สำหรับการควบคุมตำแหน่งและเส้นทางของลูกบอลบนแผ่นโดยใช้กล้องเป็นอุปกรณ์วัดตำแหน่ง และรับภาพของลูกบอลบนแผ่น งานวิจัยนี้ได้้นำเสนอการออกแบบ และสร้างต้นแบบระบบควบคุมบอลบนแผ่นกระดานงานวิจัยนี้ได้ นำเสนอการคำนวณทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ และคานก่อนนำไปควบคุม แสดง สามารถนำวิธีการคำนวณทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ เพื่อไปประยุกต์ใช้ในโครงการแสดงดังภาพที่ 2-31



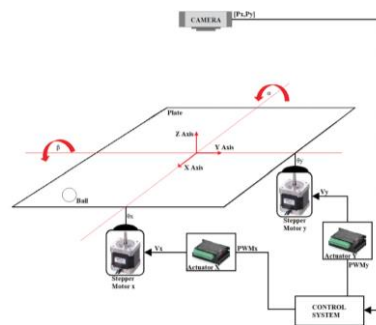
ภาพที่ 2-31 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมแผ่นกระดานกับมุมมอเตอร์ (Cardeira et al., 2022)

ได้นำเสนอกระบวนการในการออกแบบ และสร้างระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น โดยใช้กล้องเป็นเซนเซอร์ในการจับตำแหน่งของบอล และใช้บอร์ดอาดุยโนในการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ เพื่อสร้างองศาให้แผ่นกระดาน ในการออกแบบได้นำเสนอกระบวนการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการการสร้างต้นแบบ เช่น กระบวนการประมวลผลภาพ การจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรมแมตแล็บ การสร้างแบบจำลอง 3 มิติ และใช้ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ สรุปผลได้ว่าตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ สามารถคุมตำแหน่งได้ สามารถนำกระบวนการต่าง ๆ เหล่านี้ไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบ และสร้างระบบควบคุมบอลบนแผ่นกระดานโดยใช้ตัวควบคุมขั้นสูงเพื่อดูพฤติกรรมของตัวควบคุม โดยผลการควบคุมในแนวแกนเอกซ์ และแกนวาย มีค่าความผิดพลาดน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร และในแนวแกนวาย มีค่าความผิดพลาด 15 มิลลิเมตรแสดงดังภาพที่ 2-32



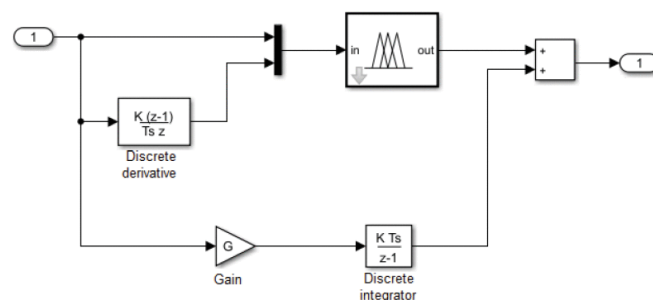
ภาพที่ 2-32 ผลตอบสนองตำแหน่งลูกบอลเข้าสู่จุดกึ่งกลาง (Cardeira et al., 2022)

Betancourt et al., (2019) นำเสนอวิธีการออกแบบระบบควบคุมบอลบนแผ่นกระดาน โดยออกแบบจาก HUMUSOFT มีการออกแบบโดยใช้กล้องเว็บแคมในการจับตำแหน่งของลูกบอล เพื่อส่งไปยังคอนโทรลเลอร์ เพื่อให้คอนโทรลเลอร์ คำนวณ สั่งให้สเตปมอเตอร์สร้างองศาให้แผ่นกระดาน เพื่อใช้รักษาตำแหน่งของลูกบอลให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการแสดงดังภาพที่ 2-33



ภาพที่ 2-33 ภาพการออกแบบระบบบอลและแผ่นกระดาน (Betancourt et al., 2019)

โครงการประยุกต์ใช้ ตรรกศาสตร์คลุมเครือ และสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ เป็นตัวควบคุม ในระบบควบคุมบอลได้นำเสนอกระบวนการในการออกแบบ และสร้างระบบควบคุมบอล และแผ่นกระดาน โดยการคำนวณ สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองการทำงานผ่านโปรแกรมแมตแล็บ ก่อนนำไปควบคุมจริงแสดงดังภาพที่ 2-34



ภาพที่ 2-34 การสร้างบล็อกการจำลองในโปรแกรมแมตแล็บ (Betancourt et al., 2019)

ผลการทดสอบการควบคุมการรักษาเสถียรภาพของลูกบอลแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ และตรรกศาสตร์คลุมเครือมีประสิทธิภาพได้ดี ตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แสดงดังตารางที่ 2-4 และสามารถนำกระบวนการต่าง ๆ เหล่านี้ไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบ และสร้างระบบควบคุม บอลบนแผ่นกระดาน

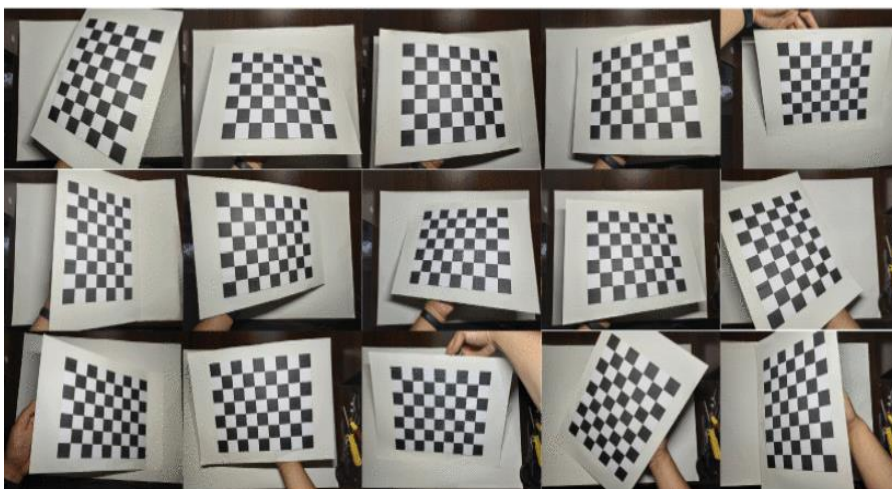
ตารางที่ 2-4 ผลการเปรียบเทียบตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ และตรรกศาสตร์คลุมเครือ

ตัวควบคุม	ค่ารากเฉลี่ยตารางข้อผิดพลาด โดยใช้ลูกบอล		ค่ารากเฉลี่ยตารางข้อผิดพลาด โดยใช้มวลลูกบอลที่มากขึ้น	
	แกนเอกซ์	แกนวาย	แกนเอกซ์	แกนวาย
สัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์	0.055	0.057	0.065	0.082
ตรรกศาสตร์คลุมเครือ	0.051	0.0536	0.062	0.071
ค่าเริ่มต้น สัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์	0.096	0.096	0.125	0.100

(Betancourt et al., 2019)

2.17.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องการประมวลผลภาพ

Zhou et al., (2020) นำเสนอการนำกล้องมาใช้สำหรับคัดแยกผลผลิตทางการเกษตร โดยในงานวิจัยได้นำเสนอการปรับเทียบกล้อง เพื่อแก้ไขความบิดเบี้ยวของกล้องก่อนนำไปใช้งาน แสดงดังภาพที่ 2-35

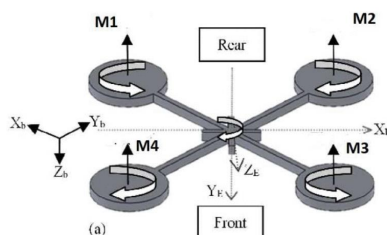


ภาพที่ 2-35 ขั้นตอนการปรับเทียบกล้อง (Zhou et al., 2020)

ผลการทดลองสรุปได้ว่า อัตราความสำเร็จของการกำหนดตำแหน่งเป้าหมายใกล้เคียงกับ 98 เปอร์เซ็นต์ สามารถนำกระบวนการปรับเทียบกล้องมาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกล้องในโครงการได้

2.17.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องทฤษฎีระบบควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์

Moghazy et.,(2022) นำเสนองานวิจัยการพัฒนาโดรนสี่ใบพัด แสดงดังภาพที่ 2-36 ที่สามารถควบคุม สมดุลตัวเองได้ด้วยตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ โดยมีระบบเซนเซอร์ตรวจจับความเอียง และองศาหมุนของโดรน เพื่อให้ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ สามารถปรับค่าการควบคุมให้โดรนสมดุล และคงที่ได้โดยมีผลการทดลองการปรับจูน สัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ได้ผลการทดลอง เวลาที่ระบบใช้ในการเปลี่ยนแปลงจาก 10 เปอร์เซ็นต์ ของค่าเริ่มต้นไปยัง 90 เปอร์เซ็นต์ (Rise Time) อยู่ที่เวลา 0.101 วินาที เวลาที่เข้าสู่สถานะเสถียร (Settling Time) 0.213 วินาที และ ค่าที่สัญญาณเกินค่าเป้าหมาย อยู่ที่ 2.330 เปอร์เซ็นต์ เห็นได้ว่าตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ สามารถสร้างเสถียรภาพให้แก่โดรนแบบสี่ใบพัดได้ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2-5 และสามารถนำมาประยุกต์ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ เพื่อมาใช้ในการรักษาเสถียรของระบบควบคุมบอลบนแผ่นกระดาน



ภาพที่ 2-36 การออกแบบ และพัฒนาโดรนแบบสี่ใบพัด (Moghazy et al., 2022)

ตารางที่ 2-5 ผลการเปรียบเทียบตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์

ตัวควบคุม	สัดส่วน ปริพันธ์	สัดส่วน อนุพันธ์	สัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์	สัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ปรับจูน
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	6.850	0.461	7.740	0.101
เวลาสู่สมดุล (วินาที)	27.000	1.890	28.100	0.213
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	11.800	13.600	7.130	2.330
ความเสถียรของระบบ	เสถียร	เสถียร	เสถียร	เสถียร

(Moghazy et al., 2022)

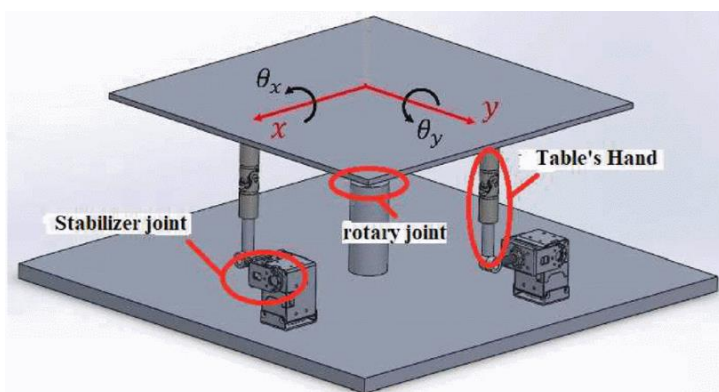
Nikita et al., (2021) ออกแบบ และพัฒนาหุ่นยนต์สองล้อทรงตัวได้ด้วยตนเอง โดยใช้ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ หุ่นยนต์สองล้อที่สร้างขึ้นใช้ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ เพื่อควบคุมความสมดุลของหุ่นยนต์ในแนวตั้ง โดยวัดค่าความเอียงของหุ่นยนต์ และปรับค่าความเอียงให้ใกล้เคียงกับศูนย์ โดยใช้ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ หุ่นยนต์สามารถทรงตัว และควบคุมตัวเองให้อยู่ในสถานะสมดุลได้ โดยระบบควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ สามารถปรับค่าความเอียงให้สมดุลได้อย่างรวดเร็ว ทำให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างประสบความสำเร็จ และคงทนต่อการเสียดสีรูปภาพ แสดงดังภาพที่ 2-37 หุ่นยนต์สามารถทำงานได้ในระหว่าง -173.5 องศาถึง $+173.5$ องศา และได้ผลมุมเอียงของฮาร์ดแวร์ที่ 60 องศา ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ สามารถสร้างเสถียรภาพให้แก่หุ่นยนต์สองล้อได้ จากงานวิจัยสามารถนำการควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ไปประยุกต์ใช้ในระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่นเพื่อทดสอบก่อนนำไปใช้งานจริง



ภาพที่ 2-37 หุ่นยนต์สองล้อทรงตัว (Nikita et al., 2021)

Aditya et al., (2022) นำงานวิจัยนี้ได้นำเสนอโตะะเพื่อการขนส่งทางเรือ จากปัญหาที่เกิดจากความเสียหายจากการไม่รักษาสมดุลเมื่อเผชิญกับคลื่นลูกทะเลลูกใหญ่ หรือสภาพอากาศเลวร้าย จำเป็นต้องใช้ระบบควบคุมที่รักษาเสถียรภาพกับวัตถุบางอย่าง ระบบจำลองโตะะนี้ได้ทำการทดลองการใช้ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ในการติดตั้งระบบควบคุมบนโตะะประจำเรือ โดยวิธีนี้ทำให้ตำแหน่งของโตะะคงที่ด้วยมุมที่กำหนดเป็น 0 องศา ทั้งในแกนเอกซ์ และแกนวาย ระบบสมดุลใช้เซนเซอร์ MPU-6050 และอาดุยโนเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ และเซอร์โวมอเตอร์สองตัวเป็นแอกชูเอเตอร์ในแต่ละแกนที่รักษาตำแหน่งโตะะไว้ที่จุดที่กำหนด จำเป็นต้องมีการออกแบบกลไกเพื่อรองรับการปรับประสิทธิภาพของระบบให้เหมาะสม ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างเสถียร และการตอบสนองของทั้งสองแกนเป็นไปตามที่ต้องการ ค่าการตอบสนองที่ได้รับจาก แกน

เอกซ์ และแกนนวย ค่าที่สัญญาณเกินค่าเป้าหมายแกนเอกซ์ และแกนนวย คือ 20.050 และ 3.850 เปอร์เซ็นต์ ค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวอยู่ที่ 0 เปอร์เซ็นต์ เวลาที่ระบบใช้ในการเปลี่ยนแปลงจาก 10 เปอร์เซ็นต์ ของค่าเริ่มต้นไปยัง 90 เปอร์เซ็นต์ คือ 0.35 และ 0.55 วินาที และเวลาที่เข้าสู่สถานะเสถียร คือ 1.06 และ 0.74 วินาที เห็นได้ว่าตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิกรัล สามารถสร้างเสถียรภาพให้แก่แบบจำลองโต๊ะบนเรือได้ เหมาะแก่การทดสอบเสถียรภาพในระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น ชุดจำลองโต๊ะบนเรือแสดงดังภาพที่ 2-38



ภาพที่ 2-38 ชุดจำลองโต๊ะบนเรือ (Aditya et al., 2022)

2.17.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องทฤษฎีระบบควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ

Pattanapong et al., (2017) นำเสนอการใช้ตัวควบคุมฟิว เป็นตัวควบคุมที่ใช้ค่าความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาด และอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด เพื่อคำนวณ และปรับค่าสัญญาณควบคุมให้เหมาะสมกับการทรงตัวของแผ่นบนระบบยานพาหนะเคลื่อนที่ การปรับแต่งตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ ในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคตรรกศาสตร์คลุมเครือ เป็นเทคนิคในการประมาณค่าสัญญาณควบคุมโดยพิจารณาความสัมพันธ์ทางตรรกะระหว่างความผิดพลาด และอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าผิดพลาด ทำให้สามารถปรับค่าสัญญาณควบคุมให้เหมาะสมกับสภาวะการทรงตัวของแผ่นบนระบบยานพาหนะเคลื่อนที่ ผลการควบคุมของระบบควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือในการปรับอัตโนมัติมีผลเป็นที่น่าพึงพอใจ โดยระบบสามารถควบคุม และรักษาการทรงตัวของแผ่นให้อยู่ในสภาวะสมดุลได้ และสามารถรับมือกับความผิดพลาดในการทรงตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ระบบยานพาหนะเคลื่อนที่ที่สามารถคงทน และควบคุมตัวเองได้อย่างมีประสิทธิภาพในสภาวะการทรงตัวเปลี่ยนแปลง ผลการควบคุมแสดงดังตารางที่ 2-6 เห็นได้ว่าตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือในการปรับสามารถรักษา เสถียรภาพของแผ่นบนระบบยานพาหนะเคลื่อนที่ได้ มีความเหมาะสมที่นำไปทดสอบในระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น เพื่อทดลองผลตอบสนองก่อนนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

ตารางที่ 2-6 ผลการควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ด้วยเทคนิคตรรกศาสตร์คลุมเครือ

อันดับ	ชนิดตัวควบคุม	ค่าเฉลี่ยเวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	ค่าช่วงการเคลื่อนที่ของงาน (องศา)	ค่าความผิดพลาดสถานะคงตัว (องศา)
เส้นทางแรก	สัดส่วน ปริพันธ์	12.500	[-20.000, 20.000]	[-1.500, 1.500]
	ตรรกศาสตร์คลุมเครือปรับสัดส่วน ปริพันธ์	7.7500	[-20.000, 20.000]	[-1.000, 1.000]
เส้นทางที่สอง	สัดส่วน ปริพันธ์	19.500	[-20.000, 20.000]	[-1.500, 1.500]
	ตรรกศาสตร์คลุมเครือปรับสัดส่วน ปริพันธ์	11.500	[-20.000, 20.000]	[-1.000, 1.000]

(Pattanapong et al., 2017)

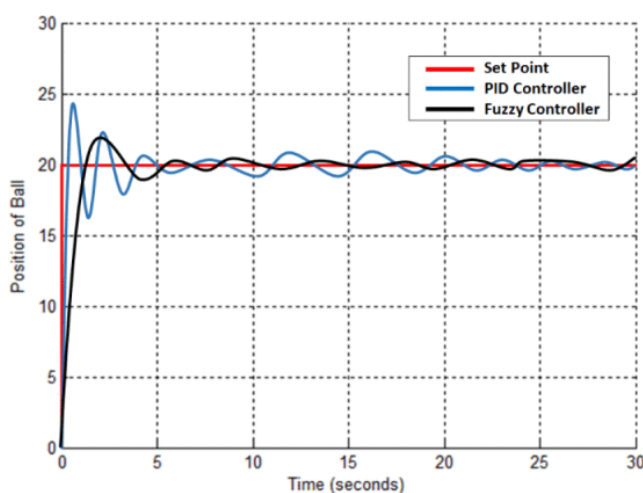
Al-Amin and Saiful Islam.(2021) นำเสนอการควบคุมอุณหภูมิในระบบเตาเผาให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม และปรับจูนค่าเองให้เหมาะสมกับเงื่อนไข โดยใช้ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ที่ปรับอัตโนมัติเพื่อควบคุมอุณหภูมิที่ต้องการโดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือ ปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมให้เหมาะสม ผลลัพธ์ที่ได้จากควบคุมอุณหภูมิ สามารถสร้างอุณหภูมิในเตาเผาได้อย่างแม่นยำ และเสถียร โดยตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ที่ปรับอัตโนมัติ สามารถปรับค่าสัญญาณควบคุมให้เหมาะสมกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ระบบเตาเผาสามารถควบคุมอุณหภูมิในระดับที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ และประหยัดพลังงาน ค่าที่สัญญาณเกินค่าเป้าหมาย 0 เปอร์เซ็นต์ เวลาที่ระบบใช้ในการเปลี่ยนแปลงจาก 10 เปอร์เซ็นต์ ของค่าเริ่มต้นไปยัง 90 เปอร์เซ็นต์ อยู่ที่เวลา 10.27 วินาที และเวลาที่เข้าสู่สถานะเสถียร อยู่ที่เวลา 26.73 วินาที เมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ พบว่ามีเสถียรภาพในการสร้างอุณหภูมิได้ดีกว่า ผลการทดลองตัวควบคุมแสดงดังตารางที่ 2-7

ตารางที่ 2-7 ผลการเปรียบเทียบตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ และตรรกศาสตร์คลุมเครือ

พารามิเตอร์	สัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์	ตรรกศาสตร์คลุมเครือ
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	34.040	-
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	56.370	10.270
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	487.140	26.730

(Al-Amin and Saiful Islam, 2021)

Latif et al., (2019) นำเสนอชุดทดลองที่ใช้อย่างแพร่หลายในการศึกษา เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคควบคุมทั้งแบบดั้งเดิม และขั้นสูง สาเหตุหลักของงานวิจัยนี้ คือ การพัฒนาโมเดลที่มีราคาถูกลง และใช้ง่าย โดยเริ่มต้นจากการพัฒนาโมเดลทางคณิตศาสตร์อย่างละเอียดโดยพิจารณาพารามิเตอร์ของระบบ งานวิจัยนี้ใช้ตัวควบคุมสองตัวสำหรับการปรับความสมดุลของระบบบอล ตัวควบคุมแรก คือ ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ จำลองตัวควบคุมผ่านการจำลองใน แมตแล็บ และตัวควบคุมที่สอง คือ ตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ ตัวควบคุมนี้ใช้เครื่องมือการตัดสินใจแบบมัมดานี ถูกนำมาใช้เนื่องจากความง่ายในการเข้าใจ และความเหมาะสมกับการตัดสินใจคล้ายมนุษย์ ฟังก์ชันสมาชิกสามเหลี่ยมถูกเลือกสำหรับกระบวนการเพราะง่ายในการปรับใช้ ผลการทดลองการตอบสนองของตรรกศาสตร์คลุมเครือ ดีกว่ามากเมื่อเทียบกับตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ เวลาที่ระบบใช้ในการเปลี่ยนแปลงจาก 10 เปอร์เซ็นต์ ของค่าเริ่มต้นไปยัง 90 เปอร์เซ็นต์ และเวลาที่เข้าสู่สถานะเสถียร ของตรรกศาสตร์คลุมเครือ นั้นน้อยกว่า ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ไม่สามารถลดค่าสัญญาณเกินค่าเป้าหมายน้อยกว่า 9 เปอร์เซ็นต์ ตรรกศาสตร์คลุมเครือกำจัดค่าสัญญาณเกินค่าเป้าหมาย แสดงผลการทดลองดังภาพที่ 2-39 ตรรกศาสตร์เหมาะสมแก่การทดสอบสมรรถนะในระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น เพื่อทดลองผลตอบสนองที่เกิดขึ้นก่อนนำไปประยุกต์ใช้งานจริง



ภาพที่ 2-39 ผลการเปรียบเทียบของตัวควบคุมการตอบสนองของสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ และ ตรรกศาสตร์คลุมเครือ (Latif et al., 2019)

2.17.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องของทฤษฎีการควบคุมแผ่นเลื่อน

Howimanporn et al., (2020) นำเสนอการควบคุมการทรงตัวของลูกตุ้มหัวกลับแบบหมุน โดยใช้พีแอลซี ชุดทดลองได้รับการออกแบบ และพัฒนาสำหรับชุดฝึกอบรมพีแอลซี เพื่อยกระดับการเรียนรู้การควบคุมแบบไม่เชิงเส้นสำหรับปัญหาเสถียรภาพ ด้วยการใช้ภาษาสตรัคเจอร์เท็กซ์ (Structure Text : ST) ทำให้พีแอลซีสมัยใหม่สามารถใช้การควบคุมที่มีประสิทธิภาพกับงานที่ซับซ้อนได้ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้พีแอลซียี่ห้อ OMRON รุ่น CPIL-M30DTD ให้คอนโทรลเลอร์ความเร็วสูงและเอาต์พุตพัลส์ความเร็วสูง เพื่อใช้เป็นตัวควบคุมหลักในการควบคุมแบบเรียลไทม์ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของลูกตุ้มหัวกลับแบบหมุน ตัวควบคุมสองตัว ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิเกรต และตัวควบคุมแผ่นเลื่อน ได้รับการออกแบบ และใช้งานในพีแอลซี อัตราขยายที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิเกรต ได้รับการปรับโดยซีเกลอร์-นิโคลส์ (Ziegler Nichols) ในขณะที่ตัวควบคุมแผ่นเลื่อนได้รับการออกแบบตามโมเดลไดนามิกของระบบ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการทรงตัวได้รับการปรับปรุงโดยตัวควบคุมแผ่นเลื่อนถึง 54 เปอร์เซ็นต์ แม้ว่าตัวควบคุม สัดส่วน ปริพันธ์ อินทิเกรต ให้ผลการสั่งที่ต่ำกว่า ข้อเสนอของตัวควบคุม แผ่นเลื่อนคือ การจัดการกับความไม่แน่นอนในระบบที่ไม่เชิงเส้น ในขณะที่ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิเกรต ลดข้อผิดพลาดเข้าสู่ตำแหน่งที่ต้องการ แต่ไม่คำนึงถึงความทนทาน ผลการทดลองจากการศึกษาี้แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแผ่นเลื่อนที่นำเสนอโดยใช้พีแอลซีสามารถทำให้ระบบลูกตุ้มกลับหัวมีความเสถียรด้วยประสิทธิภาพที่แข็งแกร่งยิ่งขึ้น ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2-8

ตารางที่ 2-8 ผลการเปรียบเทียบตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิเกรต และตัวควบคุมแผ่นเลื่อน

ผลตอบสนอง	สัดส่วน ปริพันธ์ อินทิเกรต	แผ่นเลื่อน
ระยะเวลาการทรงตัว (วินาที)	13.700	21.140
ข้อผิดพลาดเชิงบวก (องศา)	1.530	2.990
ข้อผิดพลาดเชิงลบ (องศา)	1.370	2.860

(Howimanporn et al., 2020)

Fatih et al., (2018) นำเสนอการรักษาเสถียรภาพของบอลบนแผ่นโดยใช้ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิเกรต ตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ และตัวควบคุมแผ่นเลื่อน โดยในเซนเซอร์หน้าจอสัมผัส (Touch Screen) ใช้ฮาร์ดแวร์ ยูนิ เป็นคอนโทรลเลอร์ เป็นตัวควบคุม ผลการทดลองตำแหน่งเอาต์พุตของแกนเอกซ์ และแกนวายของลูกบอล ผลลัพธ์ที่ได้รับตามวิธีการควบคุมที่ใช้กับระบบลูกบอล และแผ่นกระดาน แสดงโดยค่าฟังก์ชันเปรียบเทียบในแง่ของ ค่าฟังก์ชันที่มากที่สุดเกิดขึ้นตัวควบคุมแผ่นเลื่อน และค่าฟังก์ชันในตรรกศาสตร์คลุมเครือต่ำที่สุด เวลาที่ระบบใช้ในการ

เปลี่ยนแปลงจาก 10 เปอร์เซ็นต์ ของค่าเริ่มต้นไปยัง 90 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ และตรรกศาสตร์คลุมเครือมีค่าที่ดีกว่าตัวควบคุมแผ่นเลื่อน การควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ มีผลลัพธ์ที่ดีกว่าในเรื่องของเวลาที่เข้าสู่สถานะเสถียร ตรรกศาสตร์คลุมเครือมีผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในแง่ของสภาวะคงตัว โดยมีค่าความผิดพลาดสภาวะคงตัวน้อยกว่าทุกตัวควบคุมที่เปรียบเทียบแสดงผลการเปรียบเทียบตัวควบคุมดังตารางที่ 2-9

ตารางที่ 2-9 ผลการเปรียบเทียบตัวควบคุม

การทดลองที่ 1	สัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์		แผ่นเลื่อน		ตรรกศาสตร์คลุมเครือ	
	แกนเอ็กซ์	แกนวาย	แกนเอ็กซ์	แกนวาย	แกนเอ็กซ์	แกนวาย
เกณฑ์การ ปฏิบัติงาน						
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	0.000	25.000	38.700	0.000	9.500	0.000
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	1.000	0.750	1.000	4.250	0.600	2.500
ระยะเวลาการทรง ตัว (วินาที)	4.300	3.5.000	9.000	10.000	6.250	2.750
ข้อผิดพลาดสถานะ คงตัว (มิลลิเมตร)	±8.000	±4.000	9.500	-8.000	±6.000	±4.500

(Fatih et al., 2018)

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการทำงาน

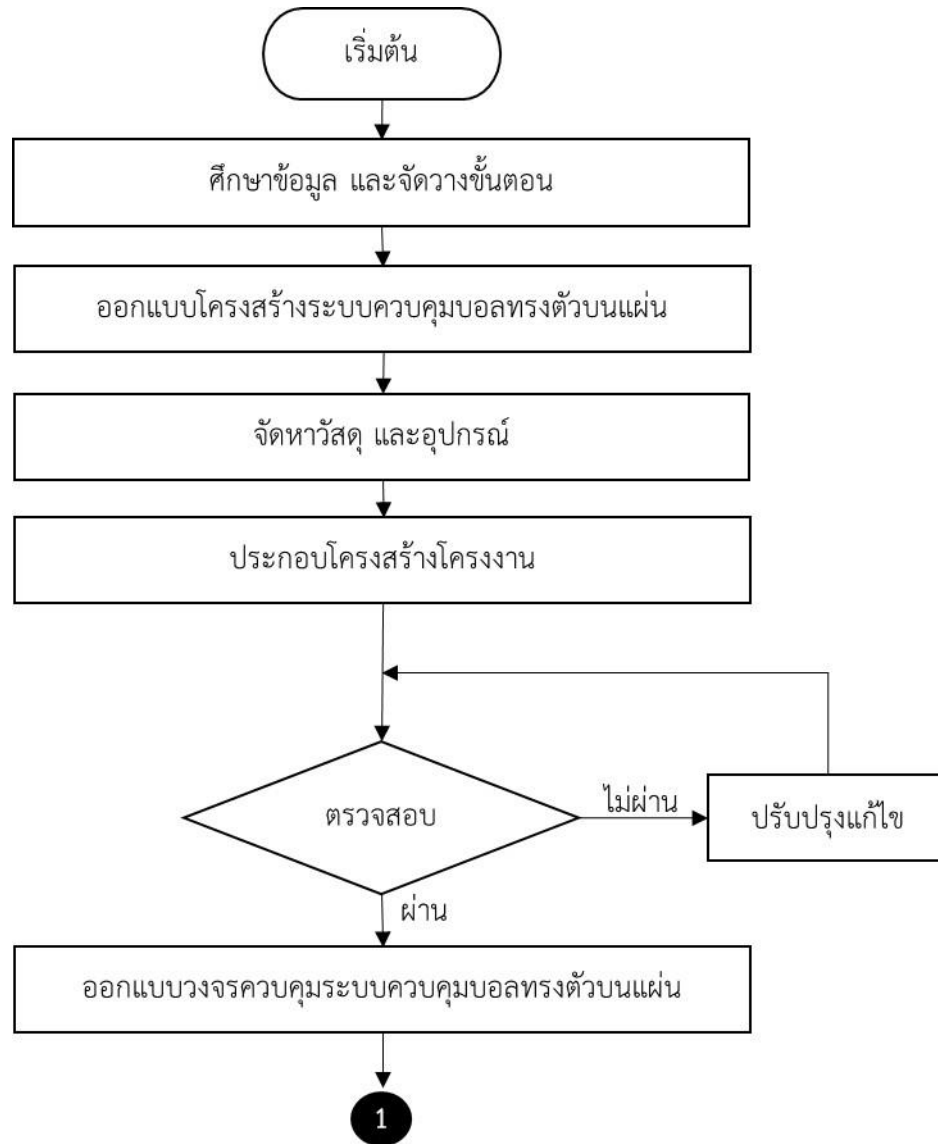
ในการดำเนินการทำงานของโครงการทางผู้จัดทำโครงการระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่นสำหรับตัวควบคุมขั้นสูง ได้ออกแบบ และวางแผนการทำงานสำหรับเป็นแนวทางในการดำเนินงาน และเป็นการตรวจสอบการทำงานเพื่อจัดการกับเวลา ทำให้งานที่ได้ออกมา นั้นสมบูรณ์มากที่สุดเพื่อประสบความสำเร็จตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดโดยมีการแบ่งแผนผังขั้นตอน และวิธีการดำเนินงานเป็นลำดับขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

- 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการทำระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น
- 3.2 การออกแบบและสร้างระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น
 - 3.2.1 การเลือกใช้เซนเซอร์
 - 3.2.2 การเลือกใช้มอเตอร์
 - 3.2.3 การออกแบบโครงสร้างระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น
 - 3.2.4 การออกแบบวงจรควบคุมระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น
 - 3.2.5 การประกอบระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น
- 3.3 การหาสมรรถนะระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น
 - 3.3.1 การทดสอบกล่อง
 - 3.3.1.1 การทดสอบกล่องเว็บแคมก่อนปรับเทียบ
 - 3.3.1.2 การทดสอบกล่องเว็บแคมหลังการปรับเทียบ
 - 3.3.1.3 การทดสอบกล่องเว็บแคมที่การปรับเทียบและนิวโรฟิชซี
 - 3.3.1.4 การเปรียบเทียบระหว่างกล่องเว็บแคมทั้งสามแบบ
 - 3.3.2 การทดสอบควบคุมมอเตอร์
 - 3.3.3 การหาพารามิเตอร์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น
 - 3.3.4 การหาค่าเกณฑ์ควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ของระบบด้วยวิธีซีกเกลอร์-นิโคลส์
 - 3.3.5 ผลการเปรียบเทียบความแม่นยำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
 - 3.3.6 การหาสมรรถนะแบบตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ วิธีการแบบการจูนเนอร์
 - 3.3.7 การหาสมรรถนะตัวควบคุมด้วยตัวควบคุมแผ่นเลื่อน
 - 3.3.8 การหาสมรรถนะตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ

3.3.9 การหาสมรรถนะตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือ
ในการปรับจูนค่าอัตโนมัติ

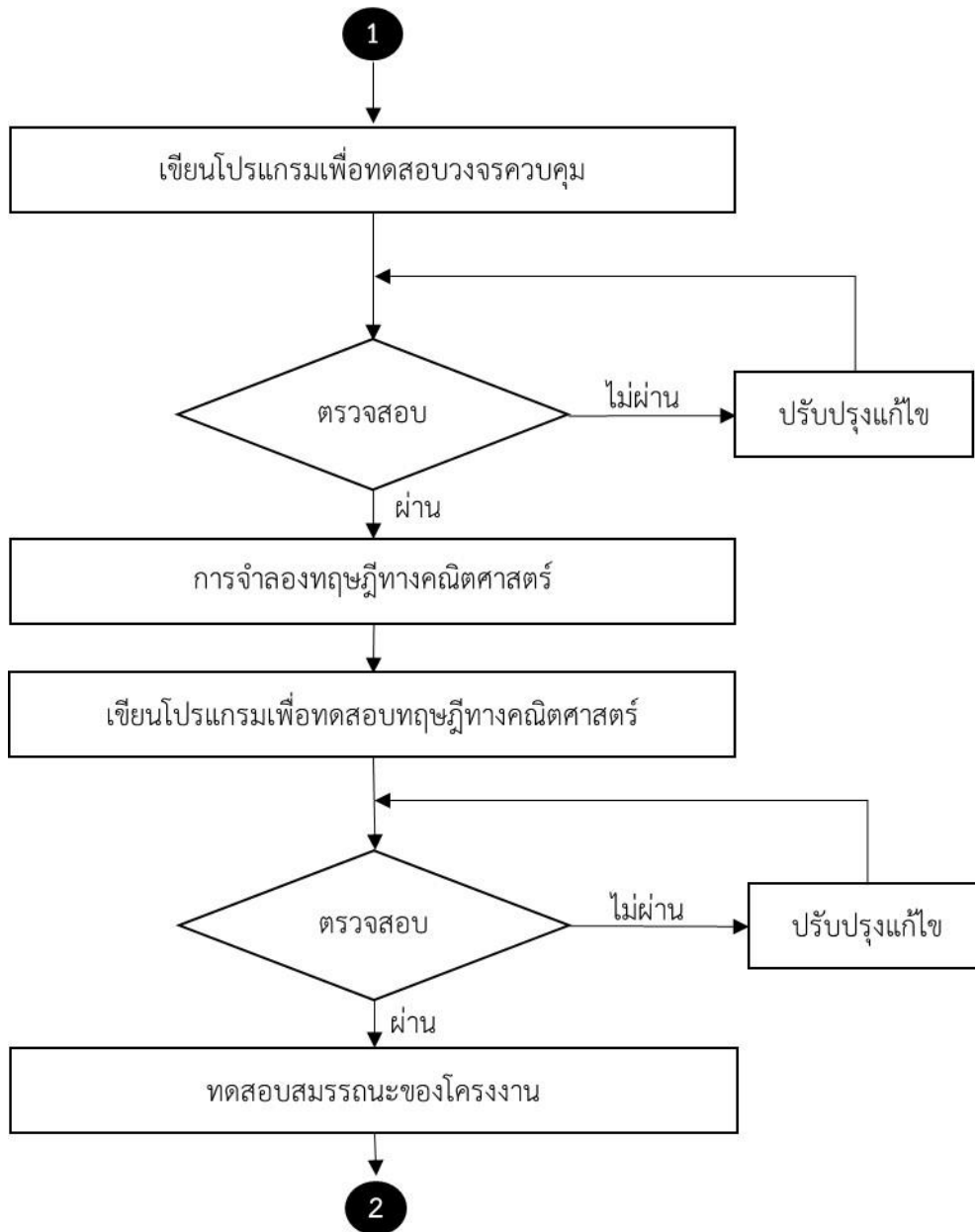
3.3.10 การหาสมรรถนะตัวแปรเปลี่ยน โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือในการปรับจูนค่า
อัตโนมัติ

3.1 ขั้นตอนการดำเนินการทำระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น



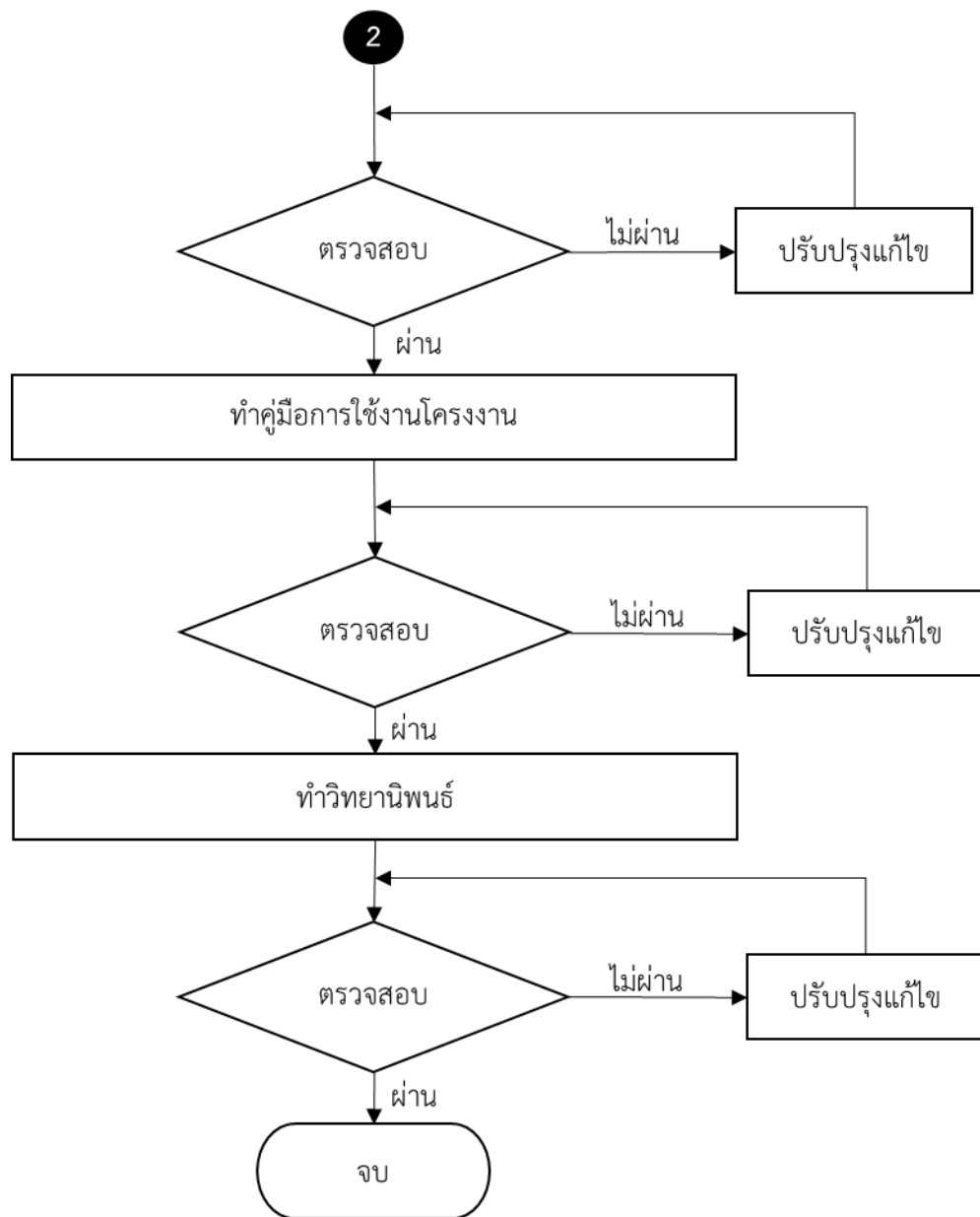
ภาพที่ 3-1 แผนภูมิภาพแสดงการทำงาน

จากภาพที่ 3-1 เป็นขั้นตอนแผนการทำโครงการ โดยเริ่มต้นจากผู้จัดทำโครงการศึกษาข้อมูล และจัดวางขั้นตอนการสร้างระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น แล้วให้ที่ปรึกษาตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล จากนั้นทำการออกแบบตัวโครงสร้างโครงการด้วยโปรแกรมสามมิติ เมื่อออกแบบโครงการเสร็จเรียบร้อย ได้จัดหาวัสดุ และอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการสร้างโครงการ เมื่อจัดซื้ออุปกรณ์ครบแล้วทำการประกอบโครงสร้างโครงการ ตรวจสอบความถูกต้อง จากนั้นออกแบบวงจรระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น และไปสู่อขั้นตอนถัดไป



ภาพที่ 3-1 (ต่อ)

จากภาพเป็นขั้นตอนแผนการทำโครงการที่ต่อจากภาพที่ 3-1 ผู้จัดทำโครงการ เขียนโปรแกรมเพื่อทดสอบวงจรถอบคุม ทดสอบการทำงานของวงจร ถ้าหากสำเร็จให้เข้าสู่ขั้นตอนต่อไป คือ การจำลองทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ เขียนโปรแกรมเพื่อทดสอบทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ ทดลอง ตรวจสอบการทำงานหากไม่มีข้อผิดพลาด ทำการทดสอบสมรรถนะของโครงการงาน และไปสู่ขั้นตอนถัดไป



ภาพที่ 3-1 (ต่อ)

จากภาพเป็นขั้นตอนแผนการทำโครงการที่ต่อจากภาพที่ 3-1 ผู้จัดทำได้ทดสอบ ตรวจสอบ สมรรถนะของโครงการ เมื่อเสร็จแล้วทำคู่มือการใช้งานโครงการ ทำปริญญานิพนธ์ และตรวจสอบ ความถูกต้องก่อนจบการทำโครงการ

3.2 การออกแบบและสร้างระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น

3.2.1 การเลือกใช้เซนเซอร์

การเลือกใช้เซนเซอร์จับตำแหน่งมีบทบาทสำคัญในโครงการนี้เพื่อให้สามารถติดตามและระบุตำแหน่งของลูกบอลได้ตลอดเวลา จำเป็นต้องใช้ข้อมูลตำแหน่งเพื่อควบคุมระบบ และนำลูกบอลไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้ ด้วยเหตุผลนี้การใช้เซนเซอร์ตำแหน่งมีบทบาทสำคัญมากในโครงการนี้ เพื่อให้ระบบควบคุมสามารถติดตาม ควบคุมตำแหน่งของลูกบอลได้อย่างแม่นยำ และมีประสิทธิภาพในการทำงาน จากการค้นหาพบว่าระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่นมีการเลือกใช้เซนเซอร์อยู่สองประเภทคือ ประเภทที่หนึ่งใช้หน้าจอสัมผัสแบบต้านทาน (Wire Touch Screen Panel) และประเภทที่สองใช้กล้อง (Camera) เพื่อมาพิจารณาข้อดี และข้อเสียของเซนเซอร์แต่ละประเภทแสดงดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ตารางเปรียบเทียบการตัดสินใจการเลือกใช้เซนเซอร์

ลำดับ	หัวข้อ	หน้าจอสัมผัสแบบต้านทาน	กล้อง
1	ราคา	-1	+1
2	ความพร้อมในการใช้งาน	-1	+1
3	การออกแบบทางกล	+1	0
4	การตรวจจับที่ผิดพลาด	0	0
5	ความเร็วในการทำงาน	+1	0
6	ความทันสมัย	0	+1

หมายเหตุ ตัวเลือกที่ดีเท่ากับ +1 ตัวเลือกที่พอใช้เท่ากับ 0 และ ตัวเลือกที่ปรับปรุงกับ -1

จากตารางที่ 3-1 เหตุผลในการเลือกเซนเซอร์ให้เหตุผลดังนี้

1) จากขอบเขตของโครงการระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่นมีขอบเขตในการควบคุมขนาด 30 ตารางเซนติเมตร จอสัมผัสที่ใช้ต้องมีขนาดในมุมทแยง 424.260 เซนติเมตร หรือประมาณ 16 นิ้ว ราคาประมาณ 3,000 บาท จอสัมผัสที่ขายทั่วไปมีขนาดไม่ตรงตามขอบเขตของโครงการ และมีราคาสูง ในการสั่งซื้อให้ได้ขนาดตามที่กำหนดต้องสั่งทำพิเศษ ทำให้มีราคาที่สูงขึ้น ในทางกลับกันกล้องเว็บแคม เป็นกล้องที่มีราคาถูกกว่า หาซื้อได้ง่ายสามารถนำมาใช้ในการจับวัตถุได้ตามขอบเขตที่ต้องการ ดังนั้นกล้องมีความเหมาะสมในเรื่องของการใช้งานเมื่อเทียบกับราคา

2) ความพร้อมในการใช้งาน กล้องเว็บแคมมีความพร้อมมากกว่าเนื่องจากกล้องเว็บแคมสามารถหาซื้อได้ทั่วไป ราคาถูก หาซื้อได้ง่าย ความสามารถในการจับตำแหน่งตรงตามขอบเขตในของ

โครงการ ในทางกลับกันจอสัมผัสเป็นสินค้าที่ต้องจัดทำพิเศษเนื่องจากไม่มีขนาดที่ตรงตามความต้องการ และมีราคาสูง

3) การออกแบบทางกล ในการออกแบบทางกลจอสัมผัสมีข้อได้เปรียบมากกว่าเนื่องจากการใช้จอสัมผัสทำให้โครงการมีขนาดที่เล็กกว่า เคลื่อนย้ายได้ง่าย เมื่อเปรียบเทียบกับโครงการที่ใช้กล้อง โครงการที่ใช้กล้องต้องมีการติดตั้งโครงสร้างเพื่อติดกล้อง ทำให้โครงการที่ใช้กล้องในการควบคุมมีขนาดใหญ่กว่า

4) การตรวจจับที่ผิดพลาด สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งสองอุปกรณ์ และเห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อกระดานที่ใช้ในการควบคุมบอลเกิดมูเมอียง เนื่องจากหน้าจอสัมผัส ตรวจจับลูกบอลโดยการวัดปริมาณแรงกด เมื่อเกิดมูเมอียงของแผ่นกระดานแรงกดของลูกบอล เกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้เกิดการตรวจจับที่ผิดพลาดได้ และกรณีที่ใช้กล้องตรวจจับลูกบอลด้วยการประมวลผลภาพโดยใช้พิกเซลของภาพพื้นหลัง เมื่อแผ่นกระดานเอียงพิกเซลเปลี่ยนแปลงทำให้เกิดการตรวจจับที่ผิดพลาดได้เช่นเดียวกัน

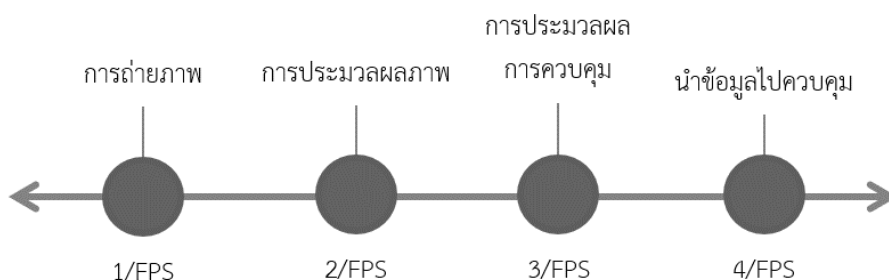
5) ความเร็วในการทำงาน ตัวเลือกจอสัมผัสมีความเร็วในการทำงานสูงกว่า เนื่องจากจอสัมผัสรับข้อมูลปริมาณของแรงกดที่เกิดขึ้น จากนั้นแปลงเป็นตำแหน่งของลูกบอลและถูกส่งต่อไปยังระบบ ในขณะที่กล้องทั่วไปถูกจำกัดอัตราการทำงาน 30 ครั้งต่อวินาที และต้องใช้เวลาในการประมวลผลภาพ ทำให้กล้องเกิดข้อจำกัดที่มากกว่า ดังนั้นจอสัมผัสเป็นทางเลือกที่ดีกว่าในแง่ของความเร็วในการทำงาน

6) ความทันสมัย กล้องมีข้อได้เปรียบมากกว่าเนื่องจากการกล้องเป็นที่นิยมในงานด้านอุตสาหกรรม 4.0 เนื่องจากกล้องมีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูง สามารถทำงานได้หลากหลายรูปแบบ การนำกล้องมาประยุกต์ใช้โครงการเป็นปัจจัยที่ดี เพื่อจำลองการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยใช้กล้องในการควบคุมก่อนนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในอุตสาหกรรม

จากเหตุผลที่ได้กล่าวมาการนำกล้องมาใช้ในโครงการเป็นตัวเลือกที่ดีกว่าเนื่องจากกล้องเป็นสินค้าที่มีราคาไม่สูง สามารถหาซื้อได้ง่าย การใช้งานมีความยืดหยุ่นมากกว่า การใช้กล้องทำให้โครงสร้างมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น แต่แลกมาด้วยความทันสมัยของเนื้อหาของเนื้อหาโครงการ เพราะกล้องเป็นหนึ่งในเทคนิคที่ได้รับความนิยมในการใช้งานด้านกิจการอุตสาหกรรมวงการอุตสาหกรรมได้นำเอาเทคโนโลยีการนำการประมวลผลภาพในรูปแบบต่าง ๆ มาใช้มากขึ้น เนื่องจากนโยบายการสนับสนุนอุตสาหกรรม 4.0 มุ่งเน้นให้ระบบ และอุปกรณ์ทั้งหลายสามารถทำงานได้เองอัตโนมัติ มีการติดตามผล และตัดสินใจด้วยการใช้งานปัญญาประดิษฐ์ ถือเป็นส่วนหนึ่งของการปรับปรุงภาคส่วนที่มีความสำคัญในโรงงานอุตสาหกรรมที่ต้องการจำลองการทำงานด้วยกล้อง

การเลือกใช้กล้องเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อให้ระบบควบคุมทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อใช้ในการติดตาม และส่งข้อมูลเพื่อใช้ในระบบควบคุมการเลือกใช้กล้อง มีปัจจัยในการเลือกดังนี้ ปัจจัยที่หนึ่ง ความหน่วง (Latency) ปัจจัยที่สองอัตราเฟรมต่อวินาที (Frame Per Second : FPS) และปัจจัยที่สาม ความละเอียดของกล้อง (Resolution)

ความหน่วง เกิดขึ้นจากกระบวนการทั้งหมดที่ใช้ในระบบควบคุม โดยกระบวนการที่เกิดขึ้นในระบบมีดังนี้ กระบวนการที่หนึ่งการถ่ายภาพ กระบวนการที่สองการประมวลผลภาพ กระบวนการที่สาม การประมวลผลการควบคุม กระบวนการที่สี่นำข้อมูลไปควบคุม โดยกระบวนการทั้งหมดที่เกิดขึ้นทั้งหมดแสดงดังภาพที่ 3-2



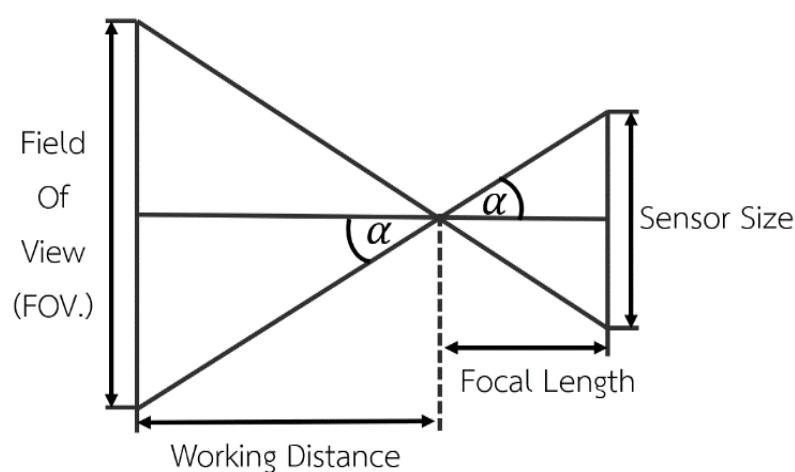
ภาพที่ 3-2 ความหน่วงกลิ้ง

จากภาพที่ 3-2 เห็นได้ว่ายิ่งอัตราเฟรมต่อวินาทียิ่งมาก ความหน่วงในการทำงานยิ่งต่ำ โดยทั่วไปแล้วอัตราเฟรม 60 เฟรมต่อวินาที ดีกว่า 30 เฟรมต่อวินาที ในแง่ของความราบรื่นของภาพ และการตอบสนอง อัตราเฟรมที่สูงขึ้นทำให้การเคลื่อนไหวลื่นไหล การเลือกซื้อกล้อง ได้ทำการค้นหา กล้องระดับกลางที่มีอัตราเฟรม 60 เฟรมต่อวินาที ที่ขายในเว็บออนไลน์โดยนำคุณสมบัติของกล้องแต่ละรุ่นเพื่อหากล้องที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการแสดงดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ตารางเปรียบเทียบข้อมูลจำเพาะกล้อง

ข้อมูลจำเพาะ และรายละเอียด	OKER A881	Logitech C922	Asus Rog Eye S	Logitech Brio Webcam	Avermedia PW315
ความละเอียด (พิกเซล)	1920. x 1080	1080x 720	1920x 1080	2160 x 1440	1920 x 1080
อัตราเฟรม (วินาที)	30 - 60	30 - 60	30 - 60	60 - 90	30 - 60
การเชื่อมต่อ	ยูเอสบี 2.0	ยูเอสบี 2.0	ยูเอสบี 2.0	ยูเอสบี 3.0	ยูเอสบี 2.0
ชนิดเซนเซอร์	CMOS	CMOS	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	CMOS
มุม (องศา)	77	78	ไม่ระบุ	90	95
น้ำหนัก (กรัม)	84	169	118	63	129
ราคา (บาท)	999	2,490	2,790	7,850	3,490

จากตารางที่ 3-2 เห็นได้ว่าข้อมูลสินค้าแต่ละรุ่นมีข้อมูลปรับจูนที่ใกล้เคียงกัน ยกเว้นกล้องรุ่น Avermedia PW315 ที่ให้อัตราเฟรมสูงถึง 90 เฟรมต่อวินาที โดยเงื่อนไขในการเลือกสินค้าพิจารณา สิ่งที่สำคัญอยู่ 2 ประการ คือ 1) ราคาสินค้า และ 2) อัตราเฟรม จากข้อมูลกล้องเว็บแคมกล้องรุ่น Avermedia PW315 ให้ประสิทธิภาพได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราเฟรมแต่มีราคาที่สูง ดังนั้น กล้องเว็บแคมรุ่น OKER A881 มีความเหมาะสมที่สุดในเรื่องของราคา และการให้อัตราเฟรม การคำนวณการติดตั้งกล้องเว็บแคม มีผลต่อการออกแบบความสูงของโครงการสามารถคำนวณหา ระยะห่างจากวัตถุที่ตรวจจับถึงเลนส์กล้อง (Working Distance)



ภาพที่ 3-3 ภาพพารามิเตอร์ในการคำนวณ

จากภาพที่ 3-3 เป็นการอธิบายความสัมพันธ์ของการหาระยะห่างจากวัตถุถึงเลนส์กล้อง โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ พื้นที่ในการรับภาพแนวกว้างคิดจากพื้นที่ของโครงการมีความกว้าง 790 มิลลิเมตร ขนาดเซนเซอร์ (Sensor Size) เท่ากับ 1 ต่อ 2.7 นิ้ว หรือขนาดมุมทแยง 6.670 มิลลิเมตร และองศาการรับภาพของกล้อง (α) มีขนาดที่ 74 องศา แสดงค่าพารามิเตอร์แสดง ดังตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 ตารางค่าพารามิเตอร์ในการคำนวณระยะการติดตั้งกล้อง

ลำดับที่	หัวข้อ	ค่าพารามิเตอร์	หน่วย
1	พื้นที่ในการรับภาพแกนเอกซ์	790.000	มิลลิเมตร
2	ขนาดเซนเซอร์	6.670	มิลลิเมตร
3	องศาการรับภาพของกล้อง	74.000	องศา

หาระยะทางจากหน้าเลนส์กล้องถึงวัตถุแสดงดังสมการที่ (3-1)

$$\text{ระยะห่างจากวัตถุถึงเลนส์กล้อง} = \frac{\text{พื้นที่ในการรับภาพ} \times \text{ความยาวโฟกัส}}{\text{ขนาดเซนเซอร์}} \quad (3-1)$$

หาขนาดความยาวโฟกัสแสดงดังสมการที่ (3-2)

$$\text{ความยาวโฟกัส} = \frac{\text{ขนาดเซนเซอร์}}{(2 \times \tan(37))} = 4.426 \text{ มิลลิเมตร} \quad (3-2)$$

ขนาดความยาวโฟกัสมีขนาด 4.426 มิลลิเมตร นำไปแทนค่าในสมการที่ (3-1) ได้แสดงดังนี้

$$\text{ระยะห่างจากวัตถุถึงเลนส์กล้อง} = \frac{790 \times 4.426}{6.670} = 524.219 \text{ มิลลิเมตร}$$

ดังนั้นการติดตั้งกล้องด้วยความสูง 524 มิลลิเมตร โดยประมาณ เพื่อตรวจสอบพื้นที่กว้างทั้งหมดที่รับภาพขนาด 790 มิลลิเมตร โดยครอบคลุมพื้นที่ในการควบคุมลูกบอลบนแผ่นกระดานที่มีขนาดกว้าง 300 ยาว 300 มิลลิเมตร

ความละเอียดของกล้อง กล้องที่เลือกใช้เป็นรุ่น OKER A881 ปรับความละเอียดกล้องที่ 800 x 600 พิกเซล โดยกล้องที่นำมาใช้มีขนาดพื้นที่ในการรับภาพ วัดจากระนาบแผ่นกระดานอยู่ที่ประมาณ 460 x 350 มิลลิเมตร โดยจับตำแหน่งลูกบอลขนาด 3.5 เซนติเมตร แสดงค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 ตารางค่าพารามิเตอร์พื้นที่ในการรับภาพ

ลำดับ	หัวข้อ	ค่าพารามิเตอร์	หน่วย
1	พื้นที่รับภาพบนกระดานแกนเอกซ์ (Distance Plate X)	460	มิลลิเมตร
2	พื้นที่รับภาพบนกระดานแกนวาย (Distance Plate Y)	350	มิลลิเมตร
3	ความละเอียดกล้องแกนเอกซ์ (Resolution X)	800	พิกเซล
4	ความละเอียดกล้องแกนวาย (Resolution Y)	600	พิกเซล
5	ลูกบอล (Ball)	35	มิลลิเมตร

หาขนาดของพิกเซล หนึ่งพิกเซล (Pixel Size) แสดงดังสมการที่ (3-3)

$$\text{ขนาดของพิกเซล} = \frac{\text{พื้นที่รับภาพบนกระดาน}}{\text{ความละเอียดกล้อง}} \quad (3-3)$$

แทนค่าในสมการ (3-3) แสดงดังนี้

$$\text{ขนาดของพิกเซลแกนเอกซ์} = \frac{460}{800} = 0.575 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$\text{ขนาดของพิกเซลแกนวาย} = \frac{350}{600} = 0.583 \text{ มิลลิเมตร}$$

ดังนั้นขนาดความกว้าง และยาวในหนึ่งพิกเซล มีขนาดความกว้างเท่ากับ 0.575 และความยาวขนาด 0.583 มิลลิเมตร หาขนาดพิกเซลของลูกบอลจากสมการที่ (3-4)

$$\text{ขนาดพิกเซลลูกบอล} = \frac{\text{ขนาดลูกบอล}}{\text{ความกว้างหนึ่งพิกเซล}} \quad (3-4)$$

แทนค่าหาขนาดพิกเซลบอลในแนวแกนเอกซ์ จากสมการที่ (3-4) แสดงได้ดังนี้

$$\text{ขนาดพิกเซลลูกบอลในแนวแกนเอกซ์} = \frac{35.000}{0.575} = 60.870 \text{ พิกเซล}$$

แทนค่าหาขนาดพิกเซลบอลในแนวแกนวาย จากสมการ (3-4) แสดงดังนี้

$$\text{ขนาดพิกเซลลูกบอลในแนวแกนวาย} = \frac{35}{0.583} = 60.030 \text{ พิกเซล}$$

หาขนาดพิกเซลแผ่นกระดานในแนวแกนวาย และแกนเอกซ์จากสมการ (3-5)

$$\text{ขนาดความกว้างพิกเซลแผ่นกระดาน} = \frac{\text{ขนาดของแผ่นกระดาน}}{\text{ความกว้างหนึ่งพิกเซล}} \quad (3-5)$$

จากการหาขนาดพิกเซลแผ่นกระดาษในแกนเอกซ์ และแกนวายโดยการแทนค่าในสมการ (3-5) ได้ดังนี้

$$\text{ขนาดความกว้างพิกเซลแผ่นกระดาษ} = \frac{300}{0.575} = 521.740 \text{ พิกเซล}$$

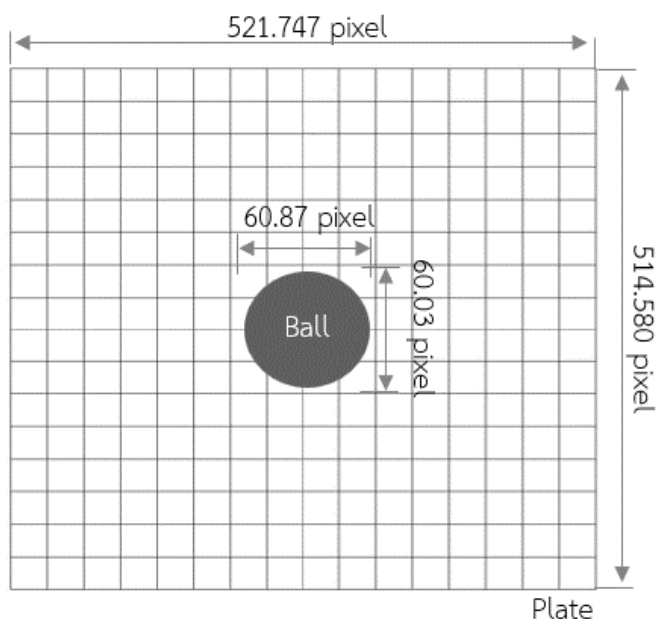
$$\text{ขนาดความยาวพิกเซลแผ่นกระดาษ} = \frac{300}{0.583} = 514.580 \text{ พิกเซล}$$

จากการคำนวณสรุปค่าพารามิเตอร์ของขนาดพิกเซลแผ่นกระดาษในแนวแกนเอกซ์ และแกนวายแสดงดังตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-5 ค่าพารามิเตอร์ของลูกบอล และแผ่นกระดาษ

ลำดับ	หัวข้อ	ค่าพารามิเตอร์	หน่วย
1	ขนาดแผ่นกระดาษแกนวาย	300.000	มิลลิเมตร
2	ขนาดแผ่นกระดาษแกนเอกซ์	300.000	มิลลิเมตร
3	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลูกบอล	35.000	มิลลิเมตร
3	ความกว้างในหนึ่งพิกเซล	0.575	มิลลิเมตร
4	ความสูงในหนึ่งพิกเซล	0.583	มิลลิเมตร
5	ขนาดพิกเซลลูกบอลแกนวาย	60.870	พิกเซล
6	ขนาดพิกเซลลูกบอลแกนเอกซ์	60.030	พิกเซล
7	ขนาดพิกเซลกระดาษแกนวาย	521.747	พิกเซล
8	ขนาดพิกเซลกระดาษแกนเอกซ์	514.580	พิกเซล

จากตารางที่ 3-5 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยเปรียบเทียบขนาดจากหน่วยวัดให้อยู่ในรูปแบบพิกเซลเพื่อหาจำนวนของพิกเซลที่ใช้ในการแสดงผลแสดงดังภาพที่ 3-4



ภาพที่ 3-4 ขนาดของลูกบอลที่ใช้ในการควบคุม

จากภาพที่ 3-4 แสดงให้เห็นว่าลูกบอลที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลูกบอล 35 มิลลิเมตร ใช้พิกเซลประมาณ 60 ตารางพิกเซล และแผ่นกระดานที่ใช้ในการควบคุมขนาด 300 ตารางมิลลิเมตร ใช้พิกเซลประมาณ 52 ตารางพิกเซล กล้องที่ใช้มีความละเอียดสูงสุด 1920 x 1080 พิกเซล และปรับความละเอียดของกล้องเหลือ 800 x 600 พิกเซลเพียงพอต่อความต้องการ

3.2.2 การเลือกใช้มอเตอร์

การเลือกใช้มอเตอร์มีความสำคัญกับโครงการเพราะมอเตอร์เป็นสิ่งที่ทำให้แผ่นกระดานเกิดองศาเพื่อใช้ในการควบคุมตำแหน่งของบอล จากการค้นพบว่าระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่นมีการเลือกใช้มอเตอร์อยู่ 3 ประเภท 1) มอเตอร์กระแสตรง 2) เซอร์โวมอเตอร์ และ 3) สเตปมิงมอเตอร์ เพื่อพิจารณาข้อดี และข้อเสียของมอเตอร์แต่ละประเภทแสดงดังตารางที่ 3-6

ตารางที่ 3-6 ตารางเปรียบเทียบการตัดสินใจการเลือกใช้มอเตอร์

ลำดับ	หัวข้อ	มอเตอร์กระแสตรง	เซอร์โวมอเตอร์	สเตปมิงมอเตอร์
1	ควบคุมตำแหน่งได้โดยตรง	-1	+1	+1
2	ความเร็ว	+1	0	+1
3	ความแม่นยำในการควบคุม	-1	+1	+1
4	งบประมาณ	0	+1	0
5	ความยืดหยุ่นในการใช้งาน	+1	0	+1

หมายเหตุ ตัวเลือกที่ดีเท่ากับ +1 ตัวเลือกที่พอใช้เท่ากับ 0 และ ตัวเลือกที่ปรับปรุงกับ -1

จากตารางที่ 3-6 ให้เหตุผลในการเลือกเซนเซอร์ให้เหตุผลดังนี้

ควบคุมตำแหน่งได้โดยตรง มอเตอร์กระแสตรงไม่สามารถควบคุมตำแหน่งได้โดยตรง เนื่องจากไม่มีระบบควบคุมในตัวที่สามารถควบคุมตำแหน่งได้ มอเตอร์หมุนกระแสตรงหมุนตามกระแสไฟฟ้าที่ได้รับโดยตรง แตกต่างจากเซอร์โวมอเตอร์ และสเตปปีงมอเตอร์

ความเร็วมอเตอร์กระแสตรงมีความเร็วสูง โดยสามารถปรับความเร็วโดยการเพิ่ม หรือลดกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ เซอร์โวมอเตอร์ และสเตปปีงมอเตอร์มีความเร็วที่ใกล้เคียงกันในกรณีต้องการควบคุมตำแหน่งแบบแม่นยำ

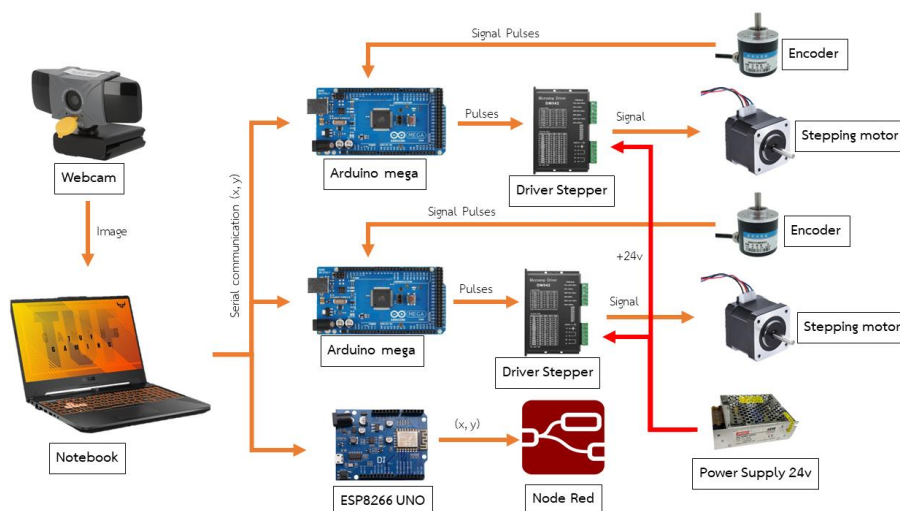
ความแม่นยำในการควบคุม มอเตอร์กระแสตรงไม่มีความแม่นยำในการควบคุมตำแหน่ง เนื่องจากไม่มีระบบระบุตำแหน่งในตัว หมุนตามกระแสไฟฟ้าที่ได้รับโดยตรง เซอร์โวมอเตอร์มีความแม่นยำสูงในการควบคุมตำแหน่ง โดยสามารถควบคุมมุมหมุนได้อย่างแม่นยำตามสัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุม สเตปปีงมอเตอร์เป็นมอเตอร์ที่มีความแม่นยำสูงในการควบคุมตำแหน่ง โดยมีการแบ่งเป็นขั้นของการหมุน ช่วยให้คุณสามารถควบคุมตำแหน่งในระดับที่แม่นยำได้

งบประมาณราคามอเตอร์แต่ละชนิดเมื่อเปรียบเทียบในเว็บออนไลน์ เซอร์โวมอเตอร์ขนาดเล็กมีราคาอยู่ที่ประมาณ 100 ถึง 200 บาท ในขณะที่มอเตอร์กระแสตรงและ สเตปปีงขนาดเล็ก 300 ถึง 400 บาท

ความยืดหยุ่นในการใช้งาน มอเตอร์กระแสตรง และสเตปปีงมอเตอร์สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายกว่า สามารถควบคุมได้หลายรอบ สามารถทดกำลังได้ มีความหลากหลายมากกว่า เซอร์โวมอเตอร์

จากตารางที่ 3-6 การเปรียบเทียบการเลือกใช้มอเตอร์ การเลือกใช้มอเตอร์ในโครงการใช้สเตปปีงมอเตอร์ในการสร้างกำลังทางกลเพื่อใช้ในการรักษาตำแหน่งของโครงการจากการ

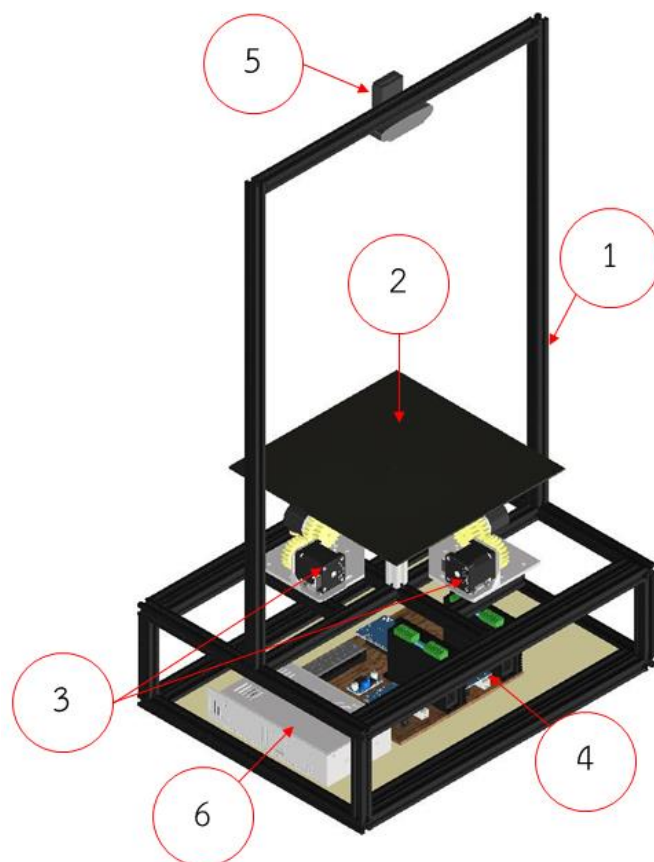
3.2.3 การออกแบบโครงสร้างระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น



ภาพที่ 3-5 โครงสร้างภาพรวมการเชื่อมต่อโครงการ

จากภาพที่ 3-5 เป็นโครงสร้างภาพรวมการเชื่อมต่ออุปกรณ์ระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น เริ่มต้นการทำงานโดยคอมพิวเตอร์พกพาเป็นตัวกลางในการรับและส่งข้อมูล โดยข้อมูลที่ได้อาจเป็นภาพที่ได้จากกล้องเว็บแคมโดยใช้โปรแกรมโฟตอน ในการแปลงภาพที่ได้ด้วยกระบวนการประมวลผลภาพ เพื่อให้ได้ตำแหน่งของลูกบอล หลังจากนั้นคอมพิวเตอร์พกพาส่งตำแหน่งที่ได้ให้อาตุยโน โดยเขียนโปรแกรมรับข้อมูลผ่านการสื่อสารแบบอนุกรม (Serial Communication) โดยมีอาตุยโนรับค่าตำแหน่งลูกบอลอยู่สามตัว ตัวที่หนึ่ง และสองทำการรับค่าตำแหน่งเพื่อตำแหน่งของบอลด้วยทฤษฎีการควบคุมแบบต่าง ๆ ด้วยโปรแกรมอาตุยโนผ่านบอร์ดไดรฟ์มอเตอร์ มีเอนโคเดอร์เป็นเซนเซอร์สำหรับตรวจจับตำแหน่งของมอเตอร์ เพื่อให้ได้ตำแหน่งที่ต้องการ และอาตุยโนตัวที่สามทำการรับค่าตำแหน่งเพื่อแสดงพิกัดตำแหน่งลูกบอลผ่านโหนด-เรด (Node-red)

การออกแบบโครงสร้าง เป็นการออกแบบโครงทางกล และทางไฟฟ้าร่วมกันเพื่อสร้างระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น โดยประกอบไปด้วย 1) โครงสร้าง 2) แผ่นกระดาน 3) ชุดส่งกำลัง 4) ชุดควบคุมมอเตอร์ 5) กล้อง และ 6) แหล่งจ่ายไฟ แสดงดังภาพที่ 3-6 และค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 3-7

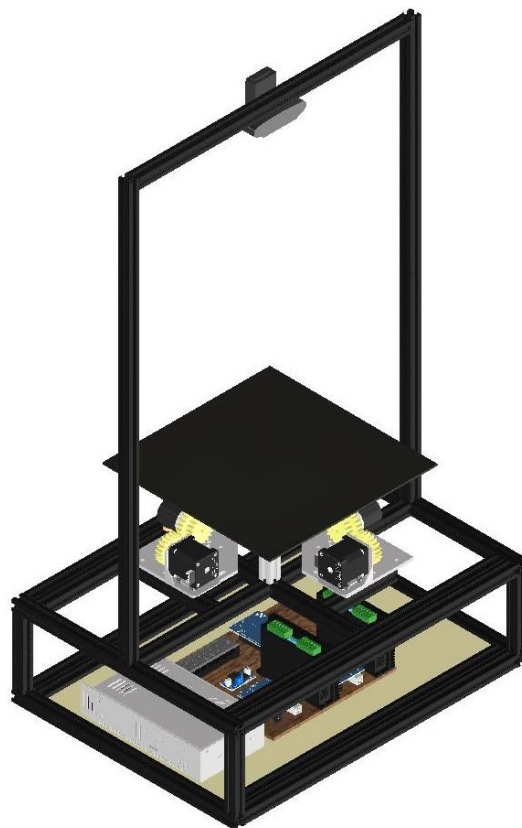


ภาพที่ 3-6 ภาพระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่นด้วยโปรแกรมซอลิเดวิคส์

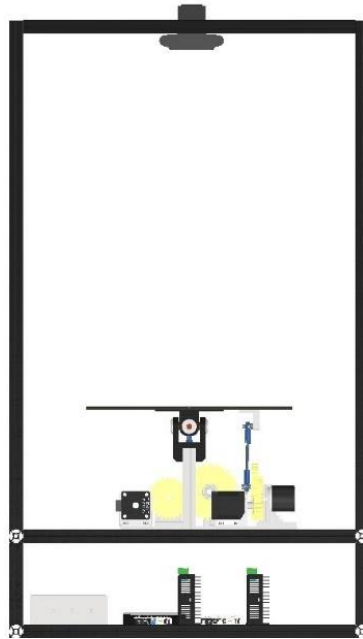
ตารางที่ 3-7 ตารางแสดงข้อมูลจำเพาะโครงสร้าง

ลำดับ	อุปกรณ์	หมายเหตุ
1	โครงสร้าง	ขนาด 400 x 400 x 767 มิลลิเมตร
2	แผ่นกระดาน	ขนาด 300 x 300 มิลลิเมตร
3	ชุดส่งกำลัง	มอเตอร์ 2 ชุดที่ใช้ในการสร้างองศาแผ่นกระดาน
4	ชุดควบคุมมอเตอร์	ชุดควบคุมมอเตอร์ สำหรับควบคุมมอเตอร์ 2 ตัว
5	กล้องเว็บแคม	รุ่น OKER A881 ความละเอียด 1980 x 1080 60FPS
6	แหล่งจ่ายไฟ	24 โวลท์

การออกแบบโครงสร้าง ออกแบบโดยใช้มอเตอร์ในการควบคุมองศา 2 ตัว ที่ควบคุมแผ่นกระดานให้สร้างองศา เพื่อควบคุมลูกบอลบนกระดาน โดยแผ่นกระดานมีขนาดในการควบคุม 300 ตารางมิลลิเมตร โดยมีความสูงจากพื้นที่ตรวจจับ ถึงกล้องเว็บแคมที่ได้จากการคำนวณ ตำแหน่งการติดตั้งกล้องสูงประมาณ 524 มิลลิเมตร และในการออกแบบใช้โปรแกรมซอลิดเวิร์กส์ (SOLIDWORKS) ในการออกแบบ แสดงดังภาพที่ 3-7 ถึง 3-11



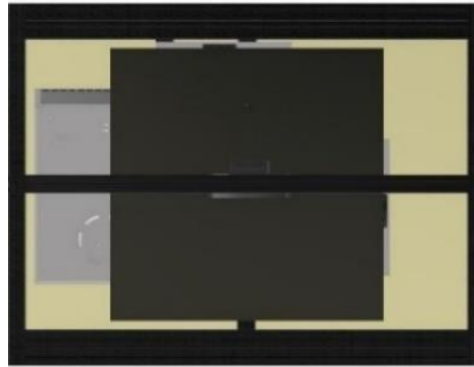
ภาพที่ 3-7 ภาพรวมระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่นด้วยโปรแกรมซอลิดเวิร์กส์



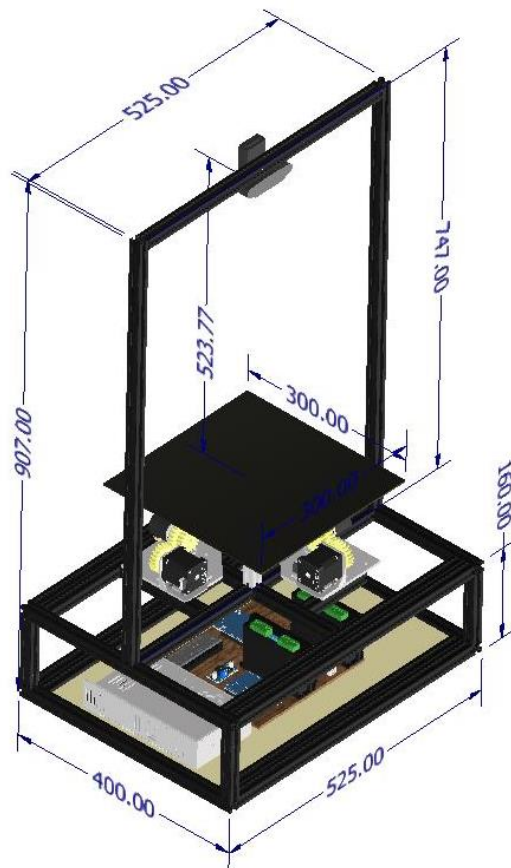
ภาพที่ 3-8 ภาพระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่นด้วยโปรแกรมซอลิดเวิร์กส์ ด้านหน้า



ภาพที่ 3-9 ภาพระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่นด้วยโปรแกรมซอลิดเวิร์กส์ ด้านข้าง



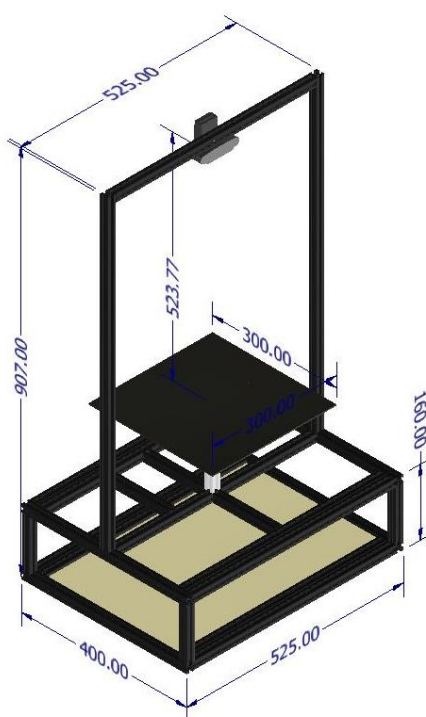
ภาพที่ 3-10 ภาพระบบควบคุมบอลทรวงตัวบนแผ่นด้วยโปรแกรมซอลิดเวิร์กส์ ด้านบน



ภาพที่ 3-11 ภาพรวมระบบควบคุมบอลทรวงตัวบนแผ่นด้วยโปรแกรมซอลิดเวิร์กส์

จากภาพที่ 3-7 ถึง 3-11 เป็นการแสดงโครงสร้าง 3 มิติของระบบควบคุมบอลทรวงตัวบนแผ่น โดยมีการแสดงไอโซเมตริกแสดงดังภาพที่ 3-7 ภาพแสดงด้านหน้าแสดงดังภาพที่ 3-8 ภาพแสดงด้านข้างแสดงดังภาพที่ 3-9 ภาพด้านบนแสดงดังภาพที่ 3-10 และภาพรวมของโครงการแสดงดังภาพที่ 3-11 ต่อมาเป็นการแสดงรายละเอียดแต่ละชิ้นส่วนที่สำคัญของโครงการ โดยมีส่วนประกอบดังนี้

โครงสร้างของระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่นใช้อลูมิเนียมโพรไฟล์ในการสร้างเพื่อความแข็งแรง และสวยงาม โครงสร้างฐานมีความกว้าง 400 มิลลิเมตร ยาว 400 มิลลิเมตร มีพื้นที่ใส่วางจรวดกว้าง 400 มิลลิเมตร ยาว 400 มิลลิเมตร สูง 160 มิลลิเมตร ความสูง 907 มิลลิเมตร โดยระยะห่างจากแผ่นกระดานกับเลนส์กล้องที่ได้จากการคำนวณความสูงของการติดตั้งกล้องอยู่ที่ 524 แสดงดังภาพที่ 3-12 และค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 3-8

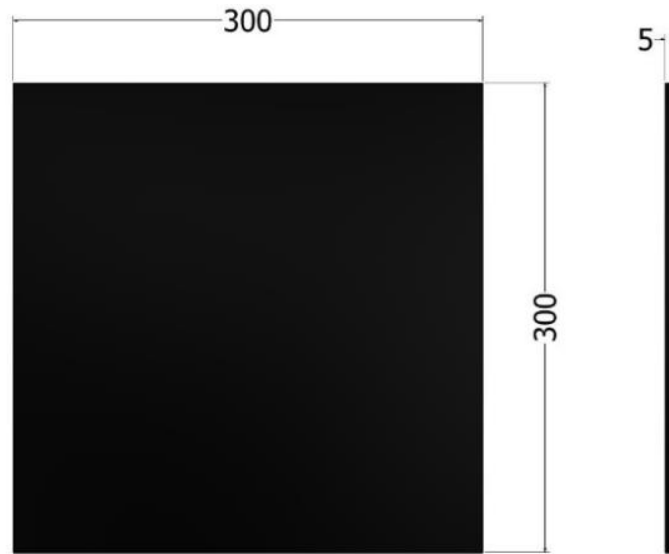


ภาพที่ 3-12 โครงสร้างโครงงาน

ตารางที่ 3-8 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์โครงสร้าง

ข้อมูลจำเพาะ	ประเภท/ปริมาณ	หมายเหตุ
วัสดุ	อลูมิเนียม	ค่าความหนาแน่น 2.7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
ขนาด	400.0 x 400.0 x 767.0	กว้าง x ยาว x สูง หน่วยมิลลิเมตร

แผ่นกระดาน เป็นแผ่นกระดานที่ใช้ในการควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น โดยมีขนาด กว้าง 300 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตรตามขอบเขตของโครงงาน ทำจากวัสดุพอลิแลคติกแอซิดเป็นวัสดุที่ใช้ทดแทนไม้ หรือพลาสติก มีความแข็งแรง ทนทานแสดงดังภาพที่ 3-13 และค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 3-9

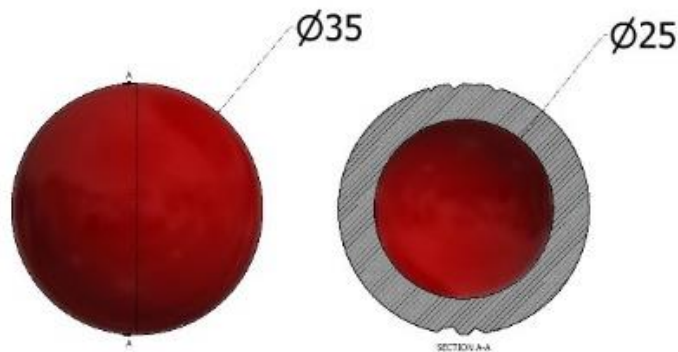


ภาพที่ 3-13 ภาพโดยรวมระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่นด้วย

ตารางที่ 3-9 ตารางแสดงข้อมูลจำเพาะแผ่นกระดาน

ข้อมูลจำเพาะ	ประเภท/ปริมาณ	หมายเหตุ
วัสดุ	พีวีซีโฟม	0.55 ถึง 0.66 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
ขนาด	300.00 x 300.00 x 5.00	กว้าง x ยาว x สูง หน่วยเป็นมิลลิเมตร
น้ำหนัก	160.00	หน่วยกรัม

ลูกบอล เป็นสิ่งให้นำมาควบคุมตำแหน่งให้อยู่บนกระดาน โดยสร้างจากเครื่องปรีน 3 มิติโดยใช้วัสดุพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid : PLA) ออกแบบบอลขนาด 35 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 3-14 และค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 3-10

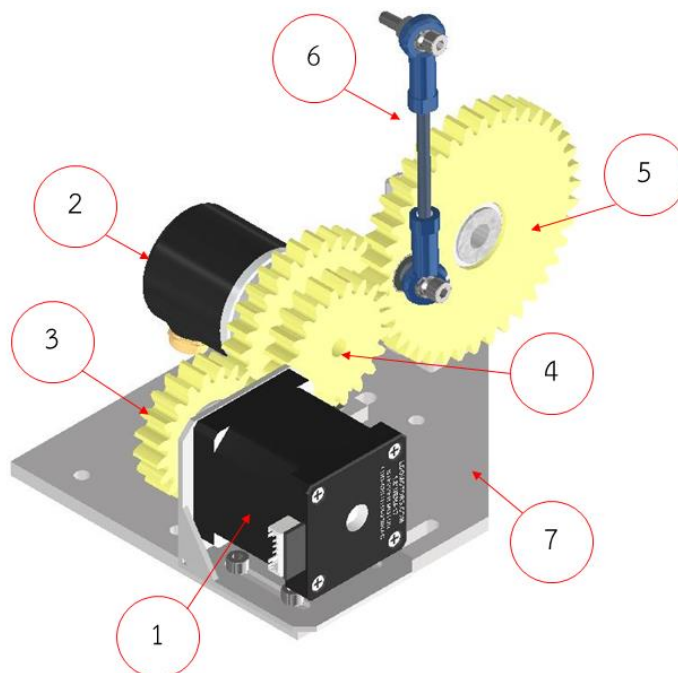


ภาพที่ 3-14 ลูกบอล

ตารางที่ 3-10 ตารางแสดงข้อมูลจำเพาะลูกบอล

ข้อมูลจำเพาะ	ประเภท หรือปริมาณ	หมายเหตุ
วัสดุ	พอลิแลคติกแอซิด	7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
ขนาด	35	หน่วยมิลลิเมตร
น้ำหนัก	10	หน่วยกรัม
สี	แดง	ใช้ในการจับตำแหน่งโดยใช้สีแดง

ชุดส่งกำลัง การกำหนดองศาของแผ่นกระดานใช้มอเตอร์เพื่อส่งกำลังผ่านชุดเกียร์เพื่อหมุนก้านยก และใช้กำลังในการสร้างองศาของแผ่นกระดาน โดยเอนโคดเดอร์ถูกใช้ในการตรวจสอบตำแหน่งของมอเตอร์เพื่อควบคุมการหมุนให้ตรงกับองศาที่ต้องการ เพื่อให้การทำงานของระบบเป็นไปได้อย่างแม่นยำ และมีประสิทธิภาพสูงสุดแสดงชุดส่งกำลังดังภาพที่ 3-15



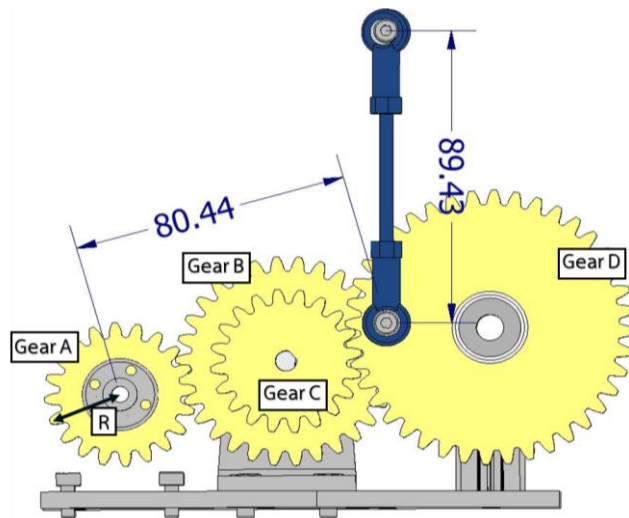
ภาพที่ 3-15 ชุดส่งกำลังด้วยมอเตอร์

จากภาพที่ 3-15 แสดงให้เห็นอุปกรณ์ชุดส่งกำลังเพื่อใช้ในการสร้างองศาให้แผ่นกระดาน โดยมีอุปกรณ์ดังนี้ 1) สเตปปีงมอเตอร์ 2) เอนโคดเดอร์ 3) เฟืองขนาด 20 ฟันเฟือง 4) เฟืองคู่ขนาด 20 และ 30 ฟันเฟือง 5) เฟืองขนาด 40 ฟันเฟือง 6) ก้านยกยาว 95 มิลลิเมตร ค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 3-11

ตารางที่ 3-11 รายละเอียดส่วนประกอบชุดส่งกำลังด้วยมอเตอร์

หมายเลข	ชิ้นส่วนประกอบ	หมายเหตุ
1	สเตปป์มอเตอร์	รุ่น B1142 สเต็ปละ 1.80 ±0.09 องศา แรงบิด 48 นิวตันต่อเซนติเมตร
2	เอนโคเดอร์	รุ่น DC5V-24V RT3806-AB-400N แกน 6 มิลลิเมตร
3	เฟืองขนาด 20 ฟันเฟือง	ฟันเฟืองขนาด 20 มิลลิเมตร จำนวน 20 ฟันเฟือง
4	เฟืองคู่ขนาด 20 ต่อ 30 ฟันเฟือง	ฟันเฟืองคู่ขนาด 20 มิลลิเมตร จำนวน 20 ฟันเฟือง และฟันเฟืองคู่ขนาด 20 มิลลิเมตร จำนวน 30 ฟันเฟือง
5	เฟืองขนาด 40 ฟันเฟือง	ฟันเฟืองขนาด 20 มิลลิเมตร จำนวน 40 ฟันเฟือง
6	ก้านยก	ความยาว 95 มิลลิเมตร
7	ฐานยึด	อลูมิเนียม

การคำนวณกำลังมอเตอร์ มอเตอร์ที่ใช้ในการส่งกำลังประกอบไปด้วยเฟือง 3 ตัวต่อการประกอบชุดส่งกำลังมอเตอร์แสดงดังภาพที่ 3-16



ภาพที่ 3-16 คำนวณ ชุดส่งกำลังด้วยมอเตอร์

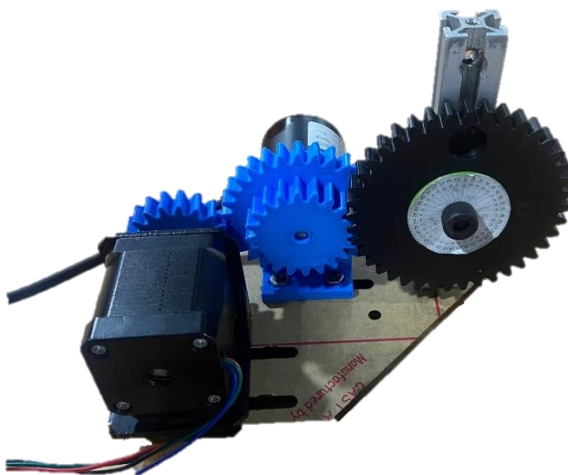
สามารถคำนวณกำลังมอเตอร์แสดงดังสมการที่ (3-6)

$$\text{แรงบิดเฟือง D} = \left(\frac{\text{แรงบิดมอเตอร์}}{\text{รัศมี}} \right) \times \left(\frac{\text{เฟือง B} \times \text{เฟือง D}}{\text{เฟือง A} \times \text{เฟือง C}} \right) \quad (3-6)$$

แทนค่าพารามิเตอร์ในสมการที่ (3-6) แสดงได้ดังนี้

$$\text{แรงบิด } D = \left(\frac{0.048}{2} \right) \times \left(\frac{30 \times 40}{20 \times 20} \right) = \text{แรงบิด } D = 0.072 \text{ นิวตันเมตร}$$

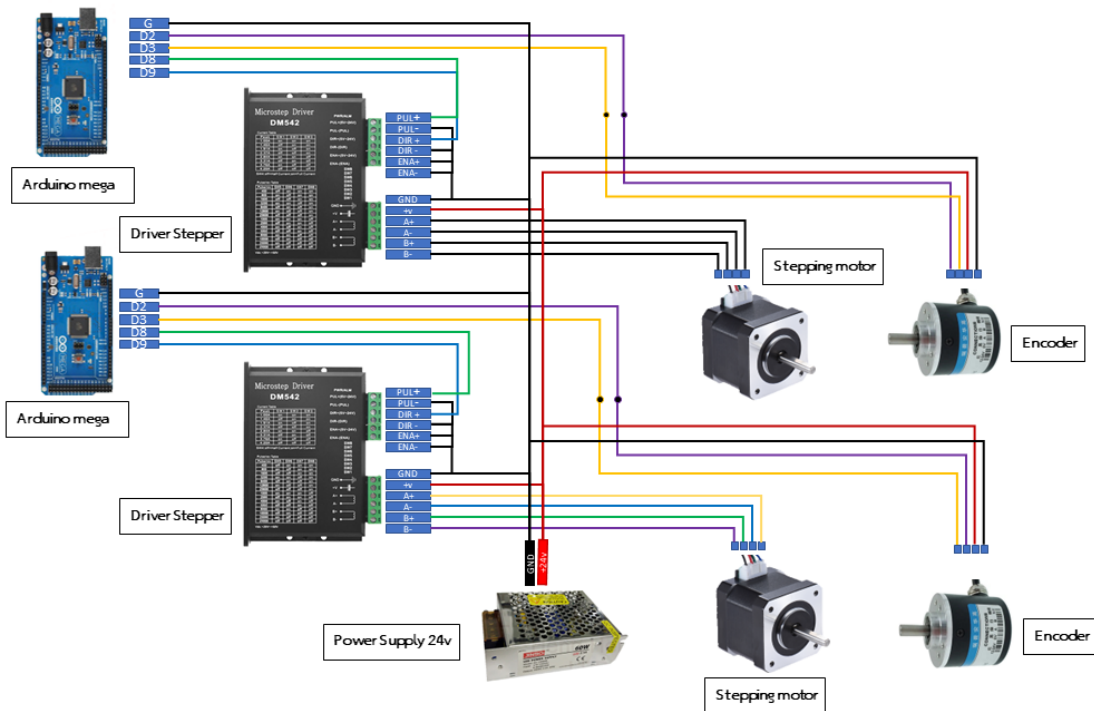
แรงบิดที่เกิดจากชุดส่งกำลังมอเตอร์ มีแรงบิด 0.072 นิวตันเมตร เพียงพอต่อการยกแผ่นกระดาษ ต่อมาประกอบชุดส่งกำลังด้วยมอเตอร์ ในการประกอบชุดส่งกำลังด้วยมอเตอร์ให้เตรียมอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการประกอบได้แก่ สเตปปีงมอเตอร์ เอนโคดเดอร์ ชุดเฟือง ก้านยก และฐานยึด จากนั้นทำการประกอบยึดติดมอเตอร์เข้ากับฐานยึด หลังจากนั้นติดชุดเฟืองเข้ากับเพลลาของมอเตอร์ โดยเฟืองนั้นมีก้านยกยึดติดอยู่ที่ขอบของเฟือง และทำการตรวจสอบการทำงานของมอเตอร์แสดงดังภาพที่ 3-17



ภาพที่ 3-17 การประกอบชุดส่งกำลังด้วยมอเตอร์

3.2.4 การออกแบบวงจรควบคุมระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น

การออกแบบวงจรไฟฟ้าเพื่อสร้างวงจรควบคุมสเตปปีงมอเตอร์ การสร้างวงจรไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่ใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น อาดูยโน บอร์ดไดรฟ์มอเตอร์ เอนโคดเดอร์ และแหล่งจ่ายไฟฟ้า เพื่อสร้างวงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุมอุปกรณ์สเตปปีงมอเตอร์ กระบวนการสร้างวงจรไฟฟ้าเริ่มต้นด้วยการออกแบบและวางแผน เพื่อสร้างแผ่นวงจรพิมพ์ จากนั้นเริ่มต้นสร้างวงจรด้วยการต่ออาดูยโนเข้ากับบอร์ดไดรฟ์มอเตอร์ อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องเข้ากับแผ่นวงจรพิมพ์ และทดสอบมอเตอร์โดยบอร์ดไดรฟ์มอเตอร์ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ที่เชื่อมต่อกับบอร์ด ผ่านโปรแกรมอาดูยโนแสดงภาพการทำงานของวงจรแสดงดังภาพที่ 3-18



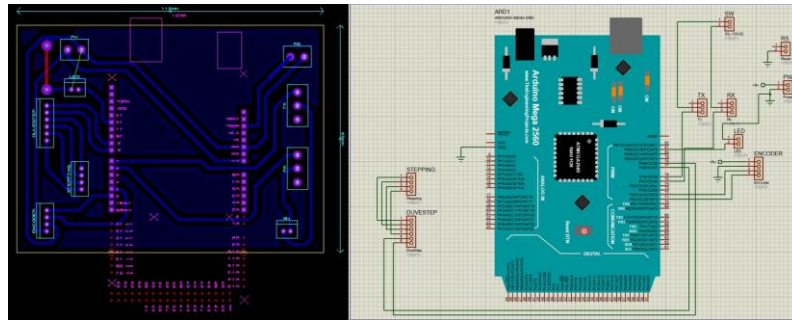
ภาพที่ 3-18 แผนผังการเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้า

การควบคุมมอเตอร์จำเป็นต้องใช้ชุดควบคุมมอเตอร์ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ โดยชุดควบคุมมอเตอร์ประกอบด้วย อาศัยโน บอร์ดไดรฟ์มอเตอร์ และแหล่งจ่ายไฟรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 3-12

ตารางที่ 3-12 รายละเอียดส่วนประกอบชุดส่งกำลังด้วยมอเตอร์

ลำดับ	ชื่ออุปกรณ์	จำนวน	หมายเหตุ
1	อาศัยโน	3	อาศัยโนเมกา 2 ตัว และอาศัยโน ยูโน 1 ตัว
2	บอร์ดไดรฟ์มอเตอร์	2	2 บอร์ด
3	แหล่งจ่ายไฟ	1	โวลท์

จากตารางที่ 3-12 แสดงให้เห็นถึงอุปกรณ์ทางวงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างชุดควบคุม สเตปปีงมอเตอร์โดยการออกแบบวงจรไฟฟ้า ออกแบบด้วยโปรแกรมโปรทีอุส แสดงดังภาพที่ 3-19



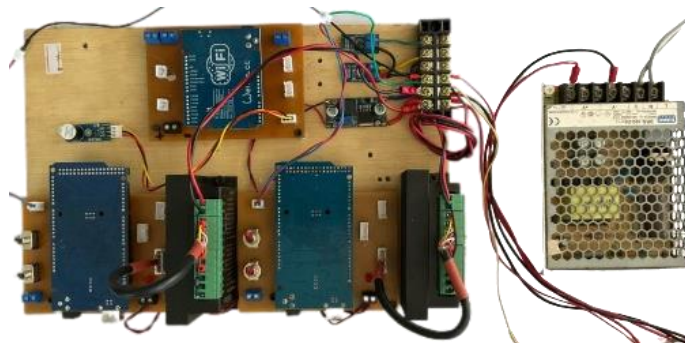
ภาพที่ 3-19 ภาพการออกแบบวงจรด้วยโปรแกรมโปรทีอุส

เมื่อทำการออกแบบเสร็จแล้ว ต่อมาให้ทำการสร้างวงจรไฟฟ้า โดยนำอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างมาติดตั้ง เช่น อาวุธโน ตัวต้านทาน เทอมินอล และสวิตช์ ติดตั้งในวงจรไฟฟ้าแสดงดังภาพที่ 3-20



ภาพที่ 3-20 การสร้างวงจรไฟฟ้า

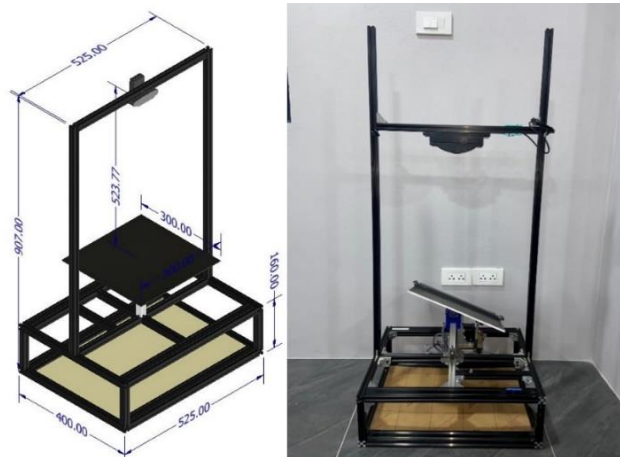
ในการประกอบชุดควบคุมมอเตอร์ เตรียมอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการประกอบได้แก่ อาวุธโน บอร์ดไดรฟ์มอเตอร์ เทอมินอล และแหล่งจ่ายไฟฟ้า จากนั้นเริ่มต้นด้วยการต่ออาวุธโนเข้ากับบอร์ดไดรฟ์มอเตอร์ เพื่อใช้ในการควบคุมสัญญาณไฟฟ้า จากนั้นต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าเข้ากับบอร์ดไดรฟ์มอเตอร์เพื่อให้มอเตอร์สามารถทำงานเมื่อต่อเสร็จสมบูรณ์แล้วดังภาพที่ 3-21



ภาพที่ 3-21 ชุดควบคุมมอเตอร์

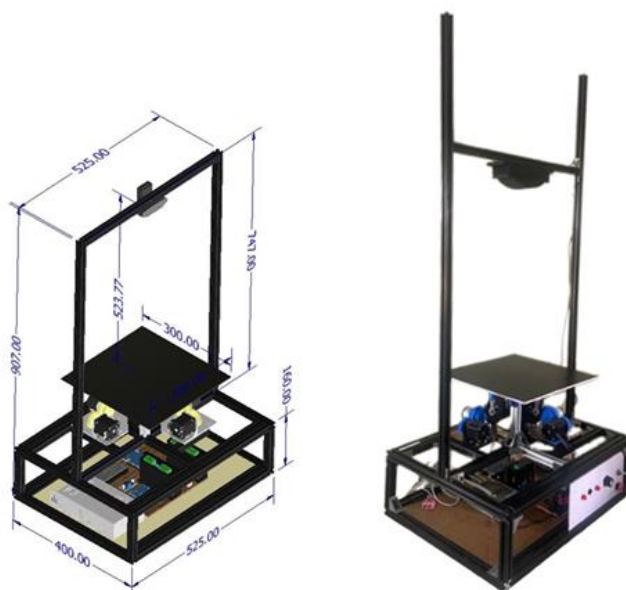
3.2.5 การประกอบระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น

การประกอบโครงสร้างชิ้นส่วนที่ใช้ในการประกอบโครงสร้างประกอบด้วย อลูมิเนียมโปรไฟล์ นอตยัด และฉากยัด โดยการประกอบโครงสร้างตามแบบที่ได้ออกแบบไว้ในโปรแกรมซอลิดเวิร์กส์ โดยมีขนาดของโครงงาน คือ กว้าง 525 มิลลิเมตร เมตร ยาว 400 มิลลิเมตร และสูง 907 มิลลิเมตร โดยประกอบสำเร็จดังภาพที่ 3-22



ภาพที่ 3-22 ภาพโครงที่ออกแบบ (ซ้าย) โครงสร้างจริง (ขวา)

เมื่อประกอบโครงสร้างเสร็จแล้ว ต่อมาให้ติดตั้งวงจรไฟฟ้า และชุดควบคุมสเตปมอเตอร์ เพื่อให้โครงงานประกอบเสร็จสมบูรณ์ แสดงดังภาพที่ 3-23



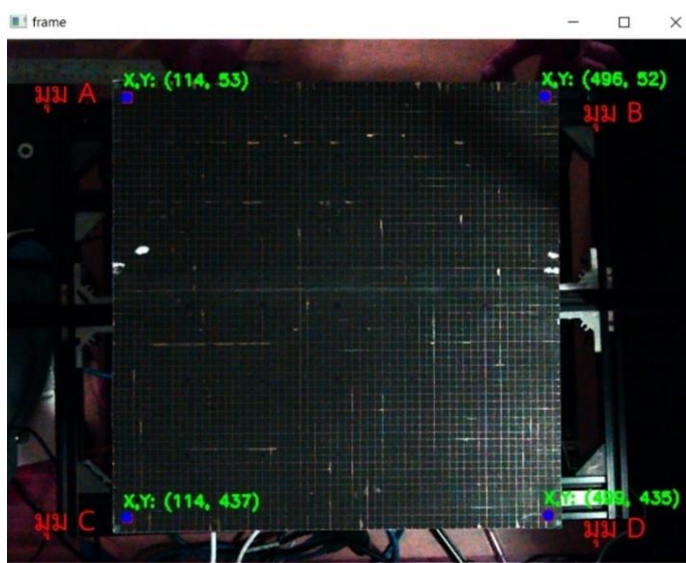
ภาพที่ 3-23 ภาพโครงงานที่ออกแบบ (ซ้าย) โครงงานจริงสมบูรณ์ (ขวา)

3.3 การหาสมรรถนะระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น

3.3.1 การทดสอบกล้อง

3.3.1.1 การทดสอบกล้องเว็บแคมก่อนปรับเทียบ

ขั้นตอนในการเก็บข้อมูล เพื่อใช้ในการหาค่าพิกเซลต่อระยะจริง โดยเก็บค่าพิกเซลของมุม A มุม B มุม C และมุม D แสดงดังภาพที่ 3-24 ผลการเก็บตำแหน่งแสดงดังตารางที่ 3-13 และ ตารางที่ 3-14



ภาพที่ 3-24 การเก็บข้อมูลมุมภาพ

ตารางที่ 3-13 รายละเอียดเก็บข้อมูลพิกเซลของ มุม A และ มุม B

มุม A					มุม B				
ครั้งที่	ระยะจริง		ระยะพิกเซล		ครั้งที่	ระยะจริง		ระยะพิกเซล	
	แกนเอกซ์	แกนวาย	แกนเอกซ์	แกนวาย		แกนเอกซ์	แกนวาย	แกนเอกซ์	แกนวาย
1	1.000	29.000	117.000	52.000	1	29.000	29.000	495.000	52.000
2	1.000	29.000	117.000	52.000	2	29.000	29.000	496.000	53.000
3	1.000	29.000	117.000	52.000	3	29.000	29.000	496.000	53.000
4	1.000	29.000	115.000	52.000	4	29.000	29.000	496.000	53.000
5	1.000	29.000	115.000	52.000	5	29.000	29.000	496.000	53.000
ค่าเฉลี่ย	1.000	29.000	116.200	52.000	ค่าเฉลี่ย	29.000	29.000	495.800	52.800
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			1.095	0.000	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			0.447	0.447

ตารางที่ 3-14 รายละเอียดเก็บข้อมูลพิกเซลของ มุม C และ มุม D

มุม C					มุม D				
ครั้งที่	ระยะจริง		ระยะพิกเซล		ครั้งที่	ระยะจริง		ระยะพิกเซล	
	แกนเอกซ์	แกนวาย	แกนเอกซ์	แกนวาย		แกนเอกซ์	แกนวาย	แกนเอกซ์	แกนวาย
1	1.000	1.000	116.000	436.000	1	29.000	1.000	498.000	435.000
2	1.000	1.000	116.000	437.000	2	29.000	1.000	497.000	435.000
3	1.000	1.000	115.000	437.000	3	29.000	1.000	498.000	435.000
4	1.000	1.000	115.000	437.000	4	29.000	1.000	497.000	435.000
5	1.000	1.000	115.000	437.000	5	29.000	1.000	497.000	435.000
ค่าเฉลี่ย	1.000	1.000	115.400	436.800	ค่าเฉลี่ย	29.000	1.000	497.400	435.000
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			0.548	0.447	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			0.548	0.000

ตารางที่ 3-15 ตารางเทียบตำแหน่งพิกเซลกับตำแหน่งจริง

ข้อมูล	พิกเซลแกนเอกซ์	พิกเซลแกนเอกซ์	พิกเซลแกนวาย	พิกเซลแกนวาย
	ตำแหน่ง 1 เซนติเมตร	ตำแหน่ง 29 เซนติเมตร	ตำแหน่ง 1 เซนติเมตร	ตำแหน่ง 29 เซนติเมตร
ค่าเฉลี่ย	115.800	496.600	435.900	52.400
ตำแหน่งจริง	1.000	29.000	1.000	29.000

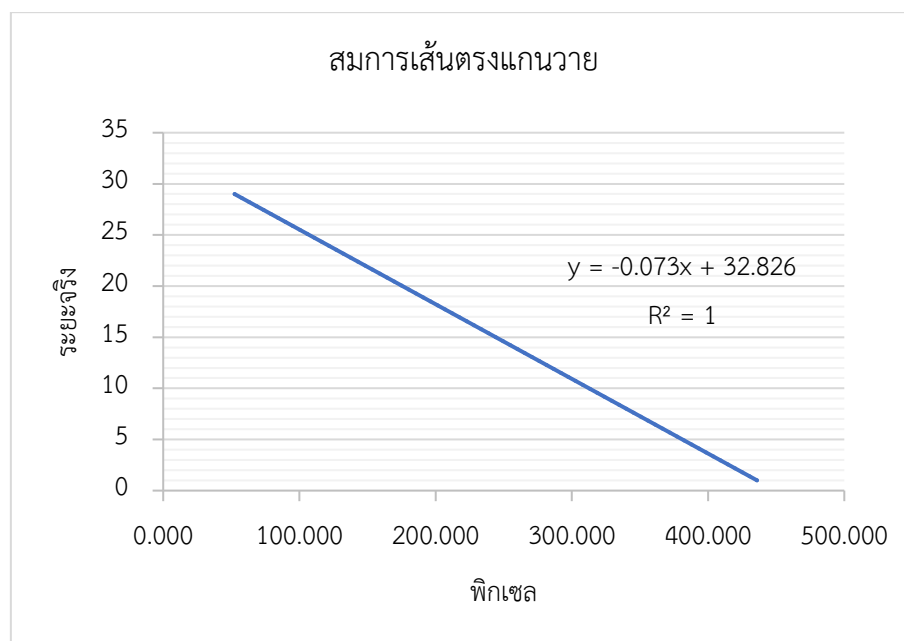
ตารางที่ 3-15 เป็นค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูลพิกเซลจากมุมมอง เพื่อนำมาเฉลี่ยหาพิกเซลต่อขนาดจริงตัวอย่างเช่น ในแกนเอกซ์ 115.8 พิกเซล มีค่าเท่ากับ 1 เซนติเมตร และ 496 พิกเซล มีค่าเท่ากับ 29 เซนติเมตร หรือในแกนวาย 435.9 พิกเซล มีค่าเท่ากับ 1 เซนติเมตร และ 42.4 พิกเซล มีค่าเท่ากับ 29 เซนติเมตร คำนวณจากสมการเส้นตรง โดย y คือ จุดตัดแกนวาย m คือ ความชัน x คือ และตัวแปร c คือ การบอกความลาดชัน แสดงดังสมการที่ (3-7)

$$y = mx + c \quad (3-7)$$

จากสมการที่ (3-7) สามารถแสดงสมการเส้นตรงของความสัมพันธ์พิกเซลต่อระยะจริงของแกนวาย และแกนเอกซ์ สมการแกนวาย แสดงดังภาพที่ 3-25 และ 3-26



ภาพที่ 3-25 การเก็บข้อมูลมุมภาพแกนเอกซ์



ภาพที่ 3-26 การเก็บข้อมูลมุมภาพแกนวาย

ทดสอบความแม่นยำของกล้องเว็บแคม โดยใช้ข้อมูลพิกเซล คำนวณด้วยสมการเส้นตรงแสดงดังสมการที่ (3-7) ยกตัวอย่างเช่นตำแหน่งแกนเอกซ์ เท่ากับ 117 พิกเซล และแกนวาย เท่ากับ 382 ระยะจริงตามลำดับแทนสมการเส้นตรงแกนเอกซ์ ในสมการ โดยที่ค่าแกนเอกซ์ เป็นค่าพิกเซลที่อ่านได้มีค่า 117 พิกเซลคำนวณตำแหน่งจริงแสดงดังต่อไปนี้

$$X = (0.074 \times 171.000) + (-7.3605) = 5.140 \text{ เซนติเมตร}$$

แทนสมการเส้นตรงแกนแกนวายในสมการ โดยที่แกนวายเป็นค่าพิกเซลที่อ่านได้ มีค่า 382 พิกเซล
คำนวณตำแหน่งจริงแสดงดังต่อไปนี้

$$Y = ((-0.073) \times 381.600) + 32.790 = 4.973 \text{ เซนติเมตร}$$

จากการคำนวณค่าแกนเอกซ์ มีค่าเท่ากับ 5.140 เซนติเมตร และค่าแกนวาย มีค่าเท่ากับ
4.973 เซนติเมตร โดยผลการทดลองทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 3-16

ตารางที่ 3-16 ค่าความผิดพลาดของกล้องเว็บแคมก่อนการปรับเทียบ

ลำดับ	พิกเซล		ตำแหน่งอ้างอิง (เซนติเมตร)		ตำแหน่งกล้อง (เซนติเมตร)		ค่าความผิดพลาด (เซนติเมตร)	
	แกน เอกซ์	แกน วาย	แกน เอกซ์	แกน วาย	แกน เอกซ์	แกน วาย	แกน เอกซ์	แกน วาย
1	171.000	381.600	5.000	5.000	5.140	4.973	0.140	0.027
2	238.800	380.800	10.000	5.000	10.096	5.032	0.096	0.032
3	307.200	380.000	15.000	5.000	15.096	5.090	0.096	0.090
4	375.000	380.000	20.000	5.000	20.053	5.090	0.052	0.090
5	442.800	379.400	25.000	5.000	25.009	5.134	0.009	0.134
6	170.600	312.000	5.000	10.000	5.111	10.047	0.111	0.047
7	238.400	312.200	10.000	10.000	10.067	10.033	0.067	0.033
8	306.400	311.600	15.000	10.000	15.038	10.076	0.038	0.076
9	374.800	311.200	20.000	10.000	20.038	10.106	0.038	0.106
10	442.000	310.800	25.000	10.000	24.950	10.135	0.050	0.135
11	170.600	243.800	5.000	15.000	5.111	15.019	0.111	0.019
12	238.400	243.400	10.000	15.000	10.067	15.048	0.067	0.048
13	306.000	243.000	15.000	15.000	15.009	15.077	0.009	0.077

ตารางที่ 3-16 (ต่อ)

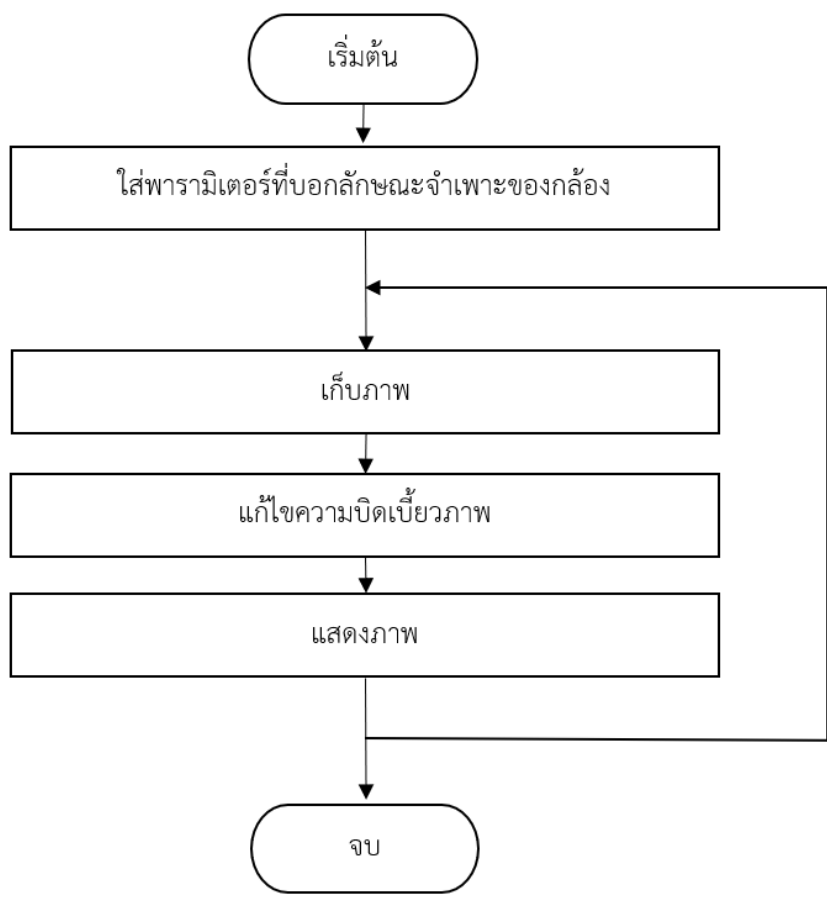
ลำดับ	พิกเซล		ตำแหน่งอ้างอิง (เซนติเมตร)		ตำแหน่งกล้อง (เซนติเมตร)		ค่าความผิดพลาด (เซนติเมตร)	
	แกน เอกซ์	แกน วาย	แกน เอกซ์	แกน วาย	แกน เอกซ์	แกน วาย	แกน เอกซ์	แกน วาย
14	374.800	243.400	20.000	15.000	20.038	15.048	0.038	0.048
15	442.000	243.400	25.000	15.000	24.950	15.048	0.050	0.048
16	171.000	176.000	5.000	20.000	5.140	19.962	0.140	0.038
17	238.600	175.400	10.000	20.000	10.082	20.005	0.082	0.005
18	306.000	175.600	15.000	20.000	15.009	19.991	0.009	0.009
19	374.200	175.400	20.000	20.000	19.994	20.005	0.006	0.005
20	442.000	175.400	25.000	20.000	24.950	20.005	0.050	0.005
21	171.000	108.400	5.000	25.000	5.140	24.890	0.140	0.110
22	239.000	108.000	10.000	25.000	10.111	24.919	0.111	0.081
23	306.200	107.200	15.000	25.000	15.023	24.977	0.023	0.023
24	374.200	107.600	20.000	25.000	19.994	24.948	0.006	0.052
25	441.600	107.600	25.000	25.000	24.921	24.948	0.079	0.052
ค่าเฉลี่ย							0.065	0.056
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน							0.044	0.039

จากตารางที่ 3-16 เป็นผลการจากกล้องที่ไม่ได้ปรับเทียบ โดยการเก็บตำแหน่งทั่วแผ่นกระดาษทั้งหมด 25 ตำแหน่ง โดยเก็บตำแหน่งละ 5 ครั้ง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากล้องเว็บแคมที่ไม่ได้ปรับเทียบมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ย ตำแหน่งแนวแกนเอกซ์ 0.065 เซนติเมตร ค่าเบี่ยงเบนความผิดพลาด 0.044 และค่าความผิดพลาดตำแหน่งแนวแกนวาย 0.056 เซนติเมตร ค่าเบี่ยงเบนความผิดพลาด 0.039

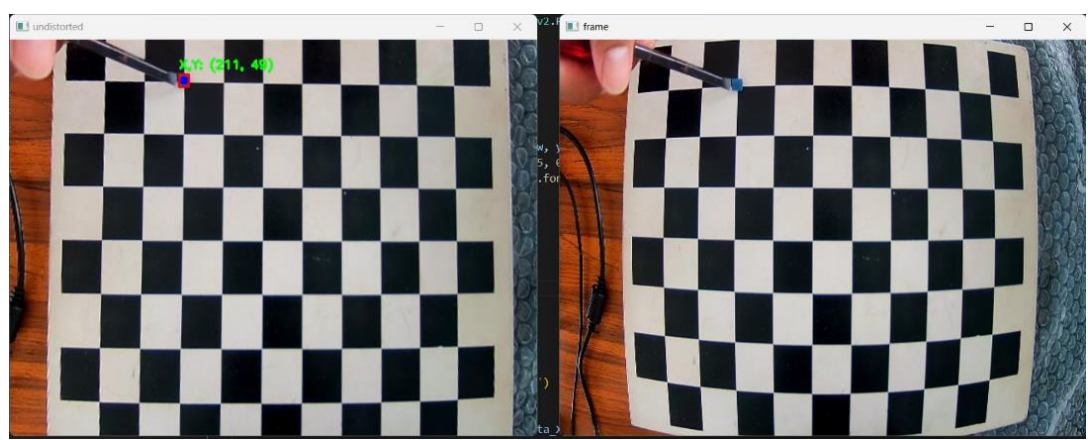
3.3.1.2 การทดสอบกล้องเว็บแคมหลังการปรับเทียบ

การทดสอบกล้องเว็บแคมหลังการปรับเทียบ มีกระบวนการเหมือนกับการทดสอบกล้องเว็บแคมที่ไม่ได้ปรับเทียบ แต่ในหัวข้อนี้กล้องเว็บแคมมีการปรับเทียบเพื่อให้กล้องมีความ

เที่ยงตรงแสดงภาพขั้นตอนการปรับเทียบกล้องแสดงดังภาพที่ 3-27 แสดงการปรับเทียบกล้องดังภาพที่ 3-28 และผลการเก็บตำแหน่งแสดงดังตารางที่ 3-17



ภาพที่ 3-27 ขั้นตอนการปรับเทียบกล้อง



ภาพที่ 3-28 การปรับเทียบกล้องดังภาพ

ตารางที่ 3-17 ค่าความผิดพลาดของกล้องเว็บแคมหลังการปรับเทียบ

ลำดับ	พิกเซล		ตำแหน่งอ้างอิง (เซนติเมตร)		ตำแหน่งกล้อง (เซนติเมตร)		ค่าความผิดพลาด (เซนติเมตร)	
	แกน เอกซ์	แกน วาย	แกน เอกซ์	แกน วาย	แกน เอกซ์	แกน วาย	แกน เอกซ์	แกน วาย
1	170.000	381.800	5.000	5.000	5.067	4.959	0.067	0.041
2	238.600	381.600	10.000	5.000	10.082	4.973	0.082	0.027
3	307.400	380.400	15.000	5.000	15.111	5.061	0.111	0.061
4	375.400	380.600	20.000	5.000	20.082	5.046	0.082	0.046
5	443.400	380.600	25.000	5.000	25.053	5.046	0.053	0.046
6	169.600	312.000	5.000	10.000	5.038	10.047	0.038	0.047
7	238.200	311.800	10.000	10.000	10.052	10.062	0.052	0.062
8	307.000	311.800	15.000	10.000	15.082	10.062	0.082	0.062
9	375.000	311.000	20.000	10.000	20.053	10.120	0.052	0.120
10	442.800	310.800	25.000	10.000	25.009	10.135	0.009	0.135
11	169.800	243.400	5.000	15.000	5.052	15.048	0.052	0.048
12	238.200	244.200	10.000	15.000	10.052	14.990	0.052	0.010
13	307.200	243.800	15.000	15.000	15.096	15.019	0.096	0.019
14	375.000	243.600	20.000	15.000	20.053	15.034	0.052	0.034
15	443.000	242.800	25.000	15.000	25.023	15.092	0.023	0.092
16	169.800	174.600	5.000	20.000	5.052	20.064	0.052	0.064
17	238.600	175.200	10.000	20.000	10.082	20.020	0.082	0.020
18	306.200	175.800	15.000	20.000	15.023	19.976	0.023	0.024
19	374.800	175.200	20.000	20.000	20.038	20.020	0.038	0.020
20	442.000	175.200	25.000	20.000	24.950	20.020	0.050	0.020
21	170.000	106.400	5.000	25.000	5.067	25.035	0.067	0.035

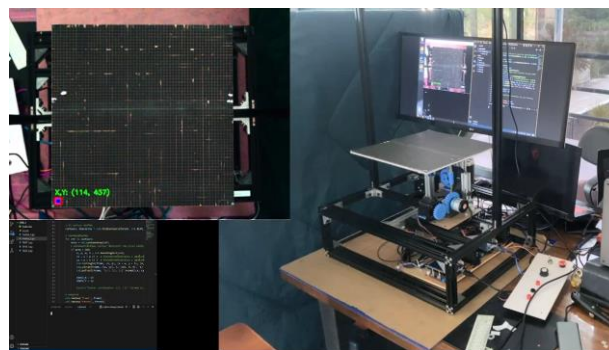
ตารางที่ 3-17 (ต่อ)

ลำดับ	พิกเซล		ตำแหน่งอ้างอิง (เซนติเมตร)		ตำแหน่งกล้อง (เซนติเมตร)		ค่าความผิดพลาด (เซนติเมตร)	
	แกน เอกซ์	แกน วาย	แกน เอกซ์	แกน วาย	แกน เอกซ์	แกน วาย	แกน เอกซ์	แกน วาย
22	238.000	106.600	10.000	25.000	10.038	25.021	0.038	0.021
23	306.400	107.000	15.000	25.000	15.038	24.992	0.038	0.008
24	375.000	106.400	20.000	25.000	20.053	25.035	0.052	0.035
25	443.000	106.600	25.000	25.000	25.023	25.021	0.023	0.021
ค่าเฉลี่ย							0.055	0.045
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน							0.024	0.032

จากตารางที่ 3-17 เป็นผลการจากกล้องที่ปรับเทียบ โดยการเก็บตำแหน่งหัวแผ่นกระดานทั้งหมด 25 ตำแหน่ง เก็บตำแหน่งละ 5 ครั้ง จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากล้องเว็บแคมที่ปรับเทียบมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ย ตำแหน่งแนวแกนเอกซ์ 0.055 เซนติเมตร ค่าเบี่ยงเบนความผิดพลาด 0.024 และค่าความผิดพลาดตำแหน่งแนวแกนวาย 0.045 เซนติเมตร ค่าเบี่ยงเบนความผิดพลาด 0.032

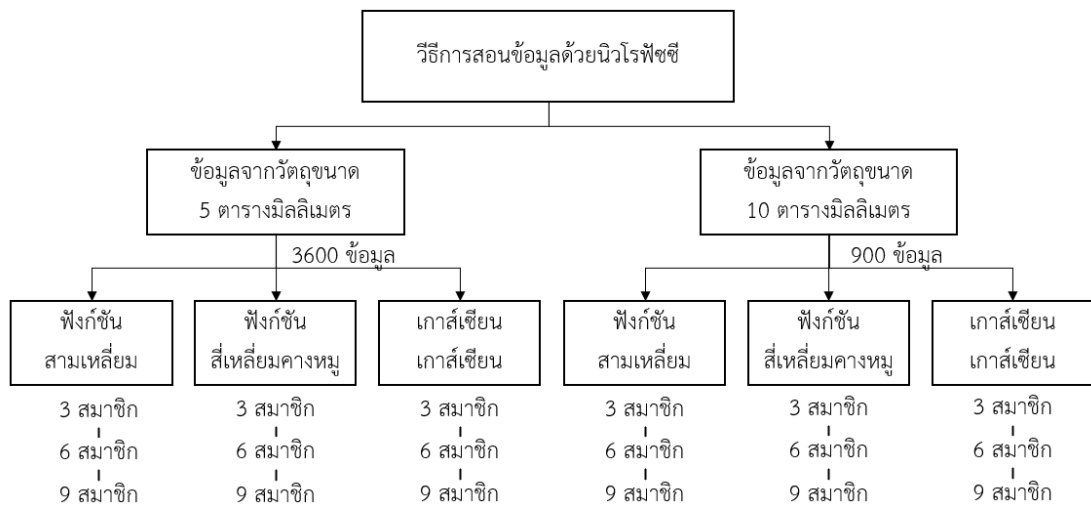
3.3.2.3 การทดสอบกล้องเว็บแคมที่มีการปรับเทียบ และนิวโรฟิชซี

การทดสอบกล้องเว็บแคมหลังการปรับเทียบ และนิวโรฟิชซี เป็นการสร้างความแม่นยำให้กล้องก่อนนำไปใช้จับตำแหน่งด้วยวิธีการปรับเทียบกล้อง และใช้นิวโรฟิชซีเพื่อสร้างความแม่นยำ โดยการนำข้อมูลที่ได้จากการเก็บตำแหน่ง มาทำนายจุดที่อยู่บนแผ่นกระดาน ด้วยวิธีการตีตารางขนาด 0.500 มิลลิเมตรบนแผ่นกระดานขนาด 300 ตารางมิลลิเมตร และทำการสร้างจุดสีแดงเพื่อเก็บตำแหน่งพิกเซลเอกซ์ และวายทั่วทั้งกระดานแสดงดังภาพที่ 3-29

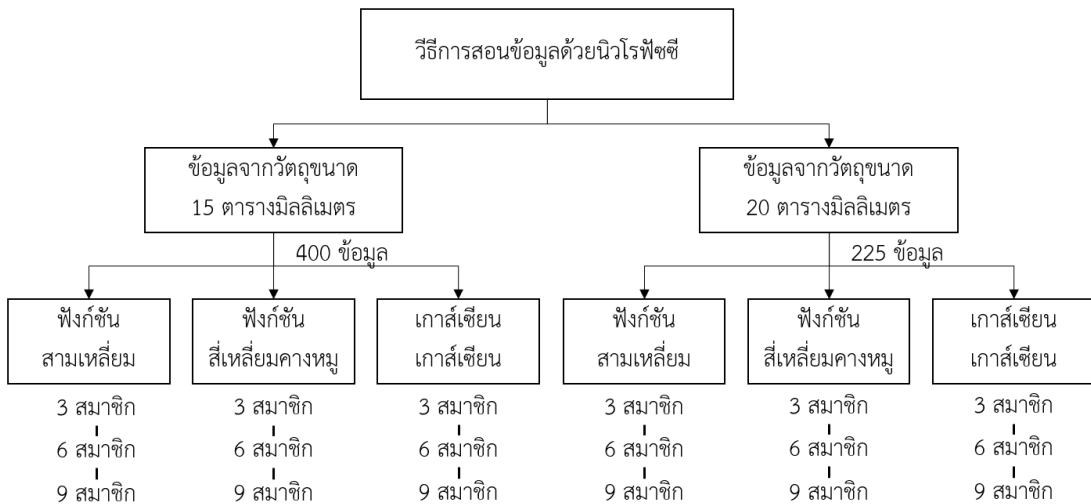


ภาพที่ 3-29 การเก็บตำแหน่งพิกเซลเอกซ์ และวาย

ในกระบวนการเก็บตำแหน่ง มีการเก็บตำแหน่งพิกเซลที่แตกต่างกันเพื่อนำไปใช้ในการสอนด้วยนิวโรฟัซซี คือ เก็บด้วยวิธีการนำวัตถุสีแดงที่มีขนาด 5, 10, 15 และ 20 ตารางมิลลิเมตรตามลำดับ เพื่อนำมาเปรียบเทียบข้อมูลด้วยนิวโรฟัซซี ว่าข้อมูลแบบใดที่มีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด โดยการนำข้อมูลที่ได้ออกไปสอนในแอป Neuro-Fuzzy Design ในโปรแกรมแมตแล็บ แสดงโครงสร้างในการทดลองแสดงดังภาพที่ 3-30 และ ภาพที่ 3-31



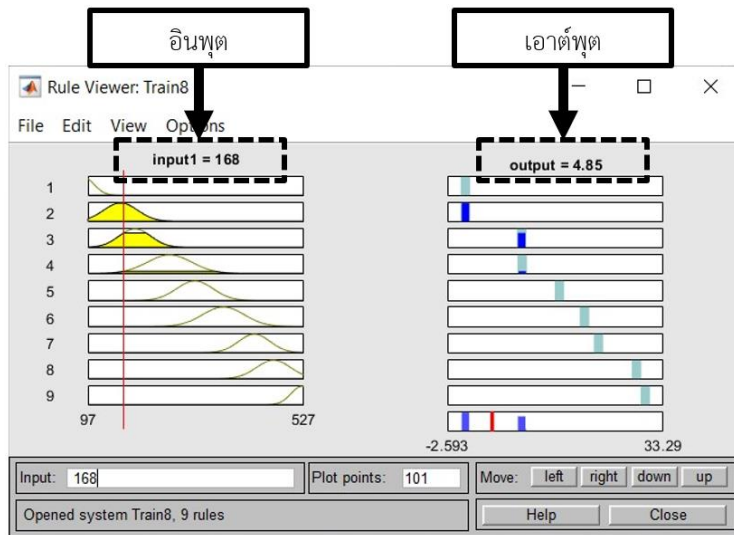
ภาพที่ 3-30 วิธีการสอนข้อมูลด้วยนิวโรฟัซซี ข้อมูล 0.5 และ 10.0 ตารางมิลลิเมตร



ภาพที่ 3-31 วิธีการสอนข้อมูลด้วยนิวโรฟัซซี ข้อมูล 0.5 และ 10.0 ตารางมิลลิเมตร

จากภาพที่ 3-30 และภาพที่ 3-31 เป็นขั้นตอนการนำข้อมูลไปสอนด้วยนิวโรฟัซซี โดยนำข้อมูลโดยนำข้อมูลที่ได้ออกมาจากการเก็บตำแหน่งขนาด 5, 10, 15 และ 20 ตารางมิลลิเมตร ไปสอนด้วย Neuro-Fuzzy Design โดยในการสอนมีทั้งหมด 3 ประเภท 1) สอนข้อมูลทั้งหมดด้วยฟังก์ชัน

สามเหลี่ยม (Triangular Membership Function) 2) ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Membership Function) และ 3) ฟังก์ชันเกาส์เซียน (Gaussian Membership Function) โดยใช้ความเป็นสมาชิกทั้งหมด 3, 6 และ 9 สมาชิก เพื่อนำข้อมูลพิกเซลที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าความผิดพลาดแสดงดังภาพที่ 3-32 และผลการลองแสดงดังตารางที่ 3-18



ภาพที่ 3-32 ภาพผลการสอนที่ได้จาก Neuro-Fuzzy Design

ตารางที่ 3-18 ผลการทดลองโดยใช้นิวโรฟuzzy ทำนายตำแหน่ง

สมาชิก	ค่าความผิดพลาด (มิลลิเมตร)			
	ข้อมูล	ข้อมูล	ข้อมูล	ข้อมูล
	0.500	1.000	1.500	2.000
ฟังก์ชันสามเหลี่ยม 3 สมาชิก	0.476	0.480	0.480	0.538
ฟังก์ชันสามเหลี่ยม 6 สมาชิก	0.475	0.473	0.481	0.500
ฟังก์ชันสามเหลี่ยม 9 สมาชิก	0.463	0.461	0.499	0.512
ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู 3 สมาชิก	0.552	0.560	0.584	0.581
ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู 6 สมาชิก	0.481	0.461	0.461	0.532
ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู 9 สมาชิก	0.482	0.477	0.521	0.511
ฟังก์ชันเกาส์เซียน 3 สมาชิก	0.475	0.480	0.493	0.517
ฟังก์ชันเกาส์เซียน 6 สมาชิก	0.471	0.476	0.493	0.519
ฟังก์ชันเกาส์เซียน 9 สมาชิก	0.466	0.470	0.501	0.554
ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด	ฟังก์ชันสามเหลี่ยม 6 สมาชิก		0.461	

จากตารางที่ 3-18 ผลการทดลองความแม่นยำด้วยนิวโรฟัซซี สรุปผลการทดลองได้ว่า การใช้ นิวโรข้อมูล 1 ตารางมิลลิเมตร โดยใช้ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู 6 สมาชิก และข้อมูล 1.5 ตาราง มิลลิเมตร โดยใช้ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู 6 สมาชิก มีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด มีค่าความผิดพลาด อยู่ที่ 0.461 เซนติเมตร จากข้อมูลได้ประเภทของสมาชิกฟังก์ชันที่เหมาะสมกับการจับตำแหน่งไป ออกแบบในโปรแกรม Neuro Fuzzy Designer ผลที่ได้จากการออกแบบเป็นสมาชิกอินพุตของข้อมูล พิกเซลเอกซ์ และวายแสดงดังตารางที่ 3-19 และตารางที่ 3-20

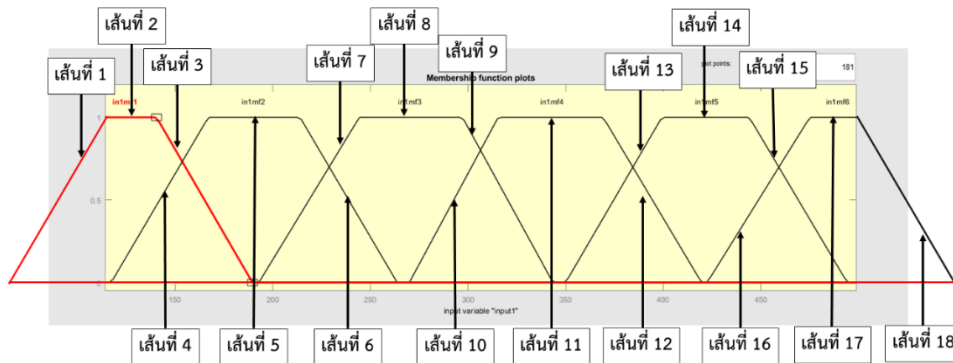
ตารางที่ 3-19 ช่วงอินพุตข้อมูลพิกเซลเอกซ์

สมาชิกของอินพุต	ช่วงของความเป็นสมาชิก
อินพุต 1 สมาชิก 1	[60.100 90.900 140.500 189.600]
อินพุต 1 สมาชิก 2	[117.000 167.000 214.000 264.000]
อินพุต 1 สมาชิก 3	[192.900 244.300 297.100 343.500]
อินพุต 1 สมาชิก 4	[270.000 315.000 369.000 420.000]
อินพุต 1 สมาชิก 5	[349.900 399.200 444.000 494.200]
อินพุต 1 สมาชิก 6	[422.400 475.900 522.100 552.900]

ตารางที่ 3-20 ช่วงอินพุตข้อมูลพิกเซลวาย

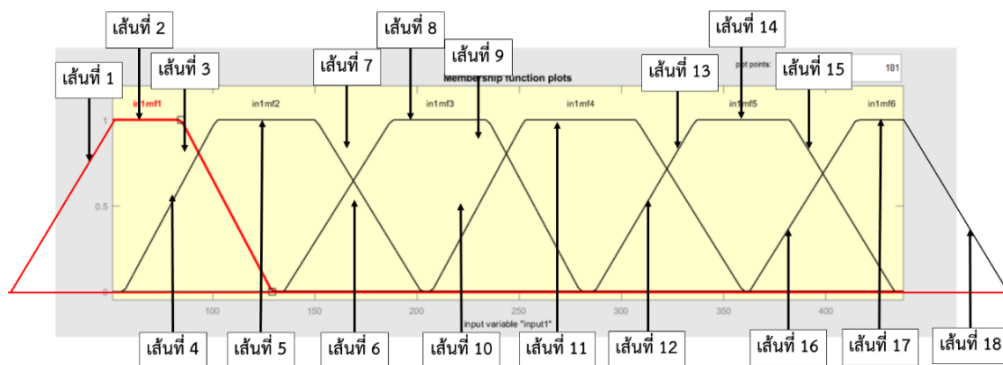
สมาชิกของอินพุต	ช่วงของความเป็นสมาชิก
อินพุต 1 สมาชิก 1	[-3.18.000 27.780 84.630 129.200]
อินพุต 1 สมาชิก 2	[56.700 101.800 150.600 202.100]
อินพุต 1 สมาชิก 3	[56.700 101.800 150.600 202.100]
อินพุต 1 สมาชิก 4	[207.200 252.700 307.300 359.600]
อินพุต 1 สมาชิก 5	[286.900 336.300 382.500 433.600]
อินพุต 1 สมาชิก 6	[362.500 414.800 461.200 492.200]

จากตารางที่ 3-19 และตารางที่ 3-20 เป็นการออกแบบสมาชิกอินพุตโดยรับข้อมูล 2 ข้อมูล คือ ข้อมูลพิกเซลแกนเอกซ์ และข้อมูลพิกเซลแกนวายโดยออกแบบฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู 6 สมาชิก ประกอบไปด้วยเส้นสมาชิกที่ใช้ในการคำนวณสมการเชิงเส้นทั้งหมด 18 เส้นแสดงดังภาพที่ 3-33 และ ภาพที่ 3-34



ภาพที่ 3-33 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุตของแกนเอกซ์

จากภาพที่ 3-33 เป็นฟังก์ชันสมาชิกอินพุตของแกนเอกซ์ ที่ได้จากการออกแบบโดยฟังก์ชันสมาชิกนี้นำชุดข้อมูลพิกเซลมาประมวลผล เพื่อแสดงเอาต์พุตออกมาเป็นตำแหน่งในหน่วยวัด



ภาพที่ 3-34 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุตของแกนวาย

จากภาพที่ 3-34 เป็นฟังก์ชันสมาชิกอินพุตของแกนวาย ที่ได้จากการออกแบบโดยฟังก์ชันสมาชิกนี้นำชุดข้อมูลพิกเซลมาประมวลผล เพื่อแสดงเอาต์พุตออกมาเป็นตำแหน่งในหน่วยวัด เมื่อทำการออกแบบสมาชิกฟังก์ชันเสร็จแล้ว ขั้นตอนต่อมา คือ การนำสมการเส้นตรงในทุก ๆ เส้นตรงที่เกิดขึ้นในภาพที่ 3-34 และภาพที่ 3-35 เพื่อนำมาเป็นเครื่องมือที่ใช้หาค่าความเป็นสมาชิกในทุก ๆ ฟังก์ชันสำหรับอินพุตต่าง ๆ พบว่ามีเส้นตรงทั้งหมด 18 เส้นตรง ทำการหาสมการเส้นตรงของค่าความเป็นสมาชิกฟังก์ชันแต่ละอินพุต โดยใช้สมการเส้นตรงดังสมการที่ (3-8) และแสดงสมการคำนวณดังตารางที่ 3-21 ถึง 3-24

$$y = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}(x) + c \tag{3-8}$$

ตารางที่ 3-21 สมการเส้นตรงของฟังก์ชันสมาชิกอินพุตของแกนเอกซ์

หมายเลข	สมการเส้นตรง	หมายเลข	สมการเส้นตรง
1	$y = 1.000$	10	$y = (0.022x) - 5.932$
2	$y = 1.000$	11	$y = 1.000$
3	$y = (-0.020x) + 3.862$	12	$y = (-0.020x) + 8.340$
4	$y = (0.020x) - 2.353$	13	$y = (0.0203x) - 7.097$
5	$y = 1.000$	14	$y = 1.000$
6	$y = (-0.020x) + 5.295$	15	$y = (-0.020x) + 9.845$
7	$y = (0.020x) - 3.753$	16	$y = (0.0190x) - 8.030$
8	$y = 1.000$	17	$y = 1.000$
9	$y = (-0.022x) + 7.403$	18	$y = (-0.033x) + 17.951$

ตารางที่ 3-22 สมการเส้นตรงของฟังก์ชันสมาชิกอินพุตของแกนวาย

หมายเลข	สมการเส้นตรง	หมายเลข	สมการเส้นตรง
1	$y = 1.000$	10	$y = (0.022x) - 4.578$
2	$y = 1.000$	11	$y = 1.000$
3	$y = (-0.022x) + 2.900$	12	$y = (-0.019x) + 6.885$
4	$y = 1.000$	13	$y = (0.020x) - 5.808$
5	$y = 1.000$	14	$y = 1.000$
6	$y = (-0.019x) + 3.924$	15	$y = (-0.020x) + 8.485$
7	$y = (0.019x) - 2.558$	16	$y = (0.019x) - 6.931$
8	$y = 1.000$	17	$y = 1.000$
9	$y = (-0.022x) + 6.206$	18	$y = (-0.032x) + 15.877$

จากตารางที่ 3-21 และตารางที่ 3-22 เป็นการแสดงสมการเส้นตรงทั้ง 18 เส้นเพื่อในการคำนวณหาเอาต์พุตแสดงผลตอบสนองแสดงดังตารางที่ 3-23 และผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3-24

ตารางที่ 3-23 ตารางแสดงเอาต์พุตของฟังก์ชันสมาชิก

ลำดับ	สมาชิกเอาต์พุต	พารามิเตอร์
1	เอาต์พุต 1 สมาชิก 1	29.000
2	เอาต์พุต 1 สมาชิก 2	23.000
3	เอาต์พุต 1 สมาชิก 3	18.000
4	เอาต์พุต 1 สมาชิก 4	12.000
5	เอาต์พุต 1 สมาชิก 5	6.386
6	เอาต์พุต 1 สมาชิก 6	0.996

ตารางที่ 3-24 ค่าความผิดพลาดของกล่องเว็บแคมหลังการปรับเทียบ และนิวโรฟิชซี

ลำดับ	พิกเซล		ตำแหน่งอ้างอิง (เซนติเมตร)		ตำแหน่งกล่องนิวโร (เซนติเมตร)		ค่าความผิดพลาด (เซนติเมตร)	
	แกน เอกซ์	แกน วาย	แกน เอกซ์	แกน วาย	แกน เอกซ์	แกน วาย	แกน เอกซ์	แกน วาย
1	171.000	381.600	5.000	5.000	5.040	4.950	0.040	0.050
2	238.800	380.800	10.000	5.000	10.100	4.990	0.100	0.010
3	307.200	380.000	15.000	5.000	15.000	5.040	0.000	0.040
4	375.000	380.000	20.000	5.000	20.000	5.040	0.000	0.040
5	442.800	379.400	25.000	5.000	25.000	5.070	0.000	0.070
6	170.600	312.000	5.000	10.000	5.020	9.990	0.020	0.010
7	238.400	312.200	10.000	10.000	10.000	9.970	0.000	0.030
8	306.400	311.600	15.000	10.000	15.000	10.000	0.000	0.000
9	374.800	311.200	20.000	10.000	19.900	10.100	0.100	0.100
10	442.000	310.800	25.000	10.000	24.900	10.100	0.100	0.100
11	170.600	243.800	5.000	15.000	5.020	15.000	0.020	0.000
12	238.400	243.400	10.000	15.000	10.000	15.000	0.000	0.000
13	306.000	243.000	15.000	15.000	14.900	15.100	0.100	0.100
14	374.800	243.400	20.000	15.000	19.900	15.000	0.100	0.000
15	442.000	243.400	25.000	15.000	24.900	15.000	0.100	0.000
16	171.000	176.000	5.000	20.000	5.040	20.000	0.040	0.000

ตารางที่ 3-24 (ต่อ)

ลำดับ	พิกเซล		ตำแหน่งอ้างอิง (เซนติเมตร)		ตำแหน่งกล้อง นิวโร (เซนติเมตร)		ค่าความผิดพลาด (เซนติเมตร)	
	แกน เอกซ์	แกน วาย	แกน เอกซ์	แกน วาย	แกน เอกซ์	แกน วาย	แกน เอกซ์	แกน วาย
17	238.600	175.400	10.000	20.000	10.000	20.000	0.000	0.000
18	306.000	175.600	15.000	20.000	14.900	20.000	0.100	0.000
19	374.200	175.400	20.000	20.000	19.900	20.000	0.100	0.000
20	442.000	175.400	25.000	20.000	24.900	20.000	0.100	0.000
21	171.000	108.400	5.000	25.000	5.040	24.900	0.040	0.100
22	239.000	108.000	10.000	25.000	10.100	24.900	0.100	0.100
23	306.200	107.200	15.000	25.000	15.000	25.000	0.000	0.000
24	374.200	107.600	20.000	25.000	19.900	25.000	0.100	0.000
25	441.600	107.600	25.000	25.000	24.900	25.000	0.100	0.000
ค่าเฉลี่ย							0.054	0.030
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน							0.045	0.040

3.3.2.4 ผลการเปรียบเทียบระหว่างกล้องเว็บแคมทั้งสามแบบ

จากการทดลองความเที่ยงตรงของกล้องทั้งหมด 3 แบบ 1) กล้องที่ไม่ได้ปรับเทียบ 2) กล้องที่ปรับเทียบ และ 3) กล้องที่ได้รับการปรับเทียบ และใช้ นิวโรฟิชซีในการช่วยทำนายตำแหน่งสรุปผลได้ว่ากล้องที่ได้รับการปรับเทียบ และใช้ นิวโรฟิชซีมีค่าความผิดพลาดรวมน้อยที่สุด โดยมีความผิดพลาดรวมสองแกนที่ 0.084 มิลลิเมตร แสดงดังตารางที่ 3-25

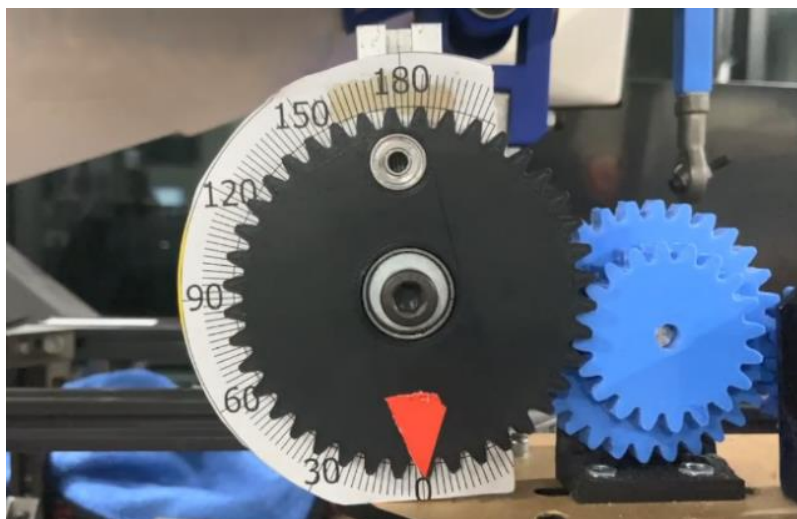
ตารางที่ 3-25 ค่าความผิดพลาดของกล้องแต่ละแบบ

ประเภทกล้อง	ค่าความผิดพลาดในแนวแกน		ค่าความผิดพลาดรวม (มิลลิเมตร)
	แกนเอกซ์	แกนวาย	
กล้องก่อนปรับเทียบ	0.065	0.056	0.121
กล้องหลังปรับเทียบ	0.055	0.045	0.100
กล้องหลังปรับเทียบ และนิวโรฟิชซี	0.054	0.030	0.084

จากตาราง 3-25 สรุปประสิทธิภาพของกล่องแสดงให้เห็นว่า กล่องก่อนการปรับเทียบมีค่าความผิดพลาดในแนวแกนเอกซ์อยู่ที่ 0.065 เซนติเมตร แกนวายมีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ 0.056 เซนติเมตร มีค่าผิดพลาดรวมทั้งสองแนวแกนอยู่ที่ 0.121 เซนติเมตร กล่องหลังการปรับเทียบ มีค่าความผิดพลาดในแนวแกนเอกซ์อยู่ที่ 0.055 เซนติเมตร แกนวายมีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ 0.045 เซนติเมตร มีค่าความผิดพลาดรวมทั้งสองแนวแกนอยู่ที่ 0.100 เซนติเมตร กล่องหลังการปรับเทียบ และนิวโรฟซีมีค่าความผิดพลาดในแนวแกนเอกซ์อยู่ที่ 0.054 เซนติเมตร แกนวายมีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ 0.030 เซนติเมตร มีค่าความผิดพลาดรวมทั้งสองแนวแกนอยู่ที่ 0.084 เซนติเมตร ดังนั้น กล่องที่ปรับเทียบ และนิวโรฟซีมีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด สามารถนำกล่องที่ผ่านการปรับเทียบ และใช้นิวโรฟซีมาใช้งานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจับตำแหน่งของวัตถุ

3.3.2 การทดสอบการควบคุมมอเตอร์

จากการสร้างวงจรควบคุมสเต็ปมอเตอร์ ต่อมาเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของการควบคุมองศาของสเต็ปมอเตอร์ โดยการทดสอบการควบคุมองศาของสเต็ปมอเตอร์ว่ามีความผิดพลาดมากน้อยเพียงใด โดยการทดสอบเขียนโปรแกรมในการควบคุมองศา และทำการทดลองการควบคุมองศาที่กำหนด มีการเก็บองศา 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 องศา แสดงดังภาพ 3-35 โดยเก็บองศาละ 5 ครั้ง ผลการควบคุมแสดงดังตารางที่ 3-26



ภาพที่ 3-35 ภาพการทดสอบองศามอเตอร์

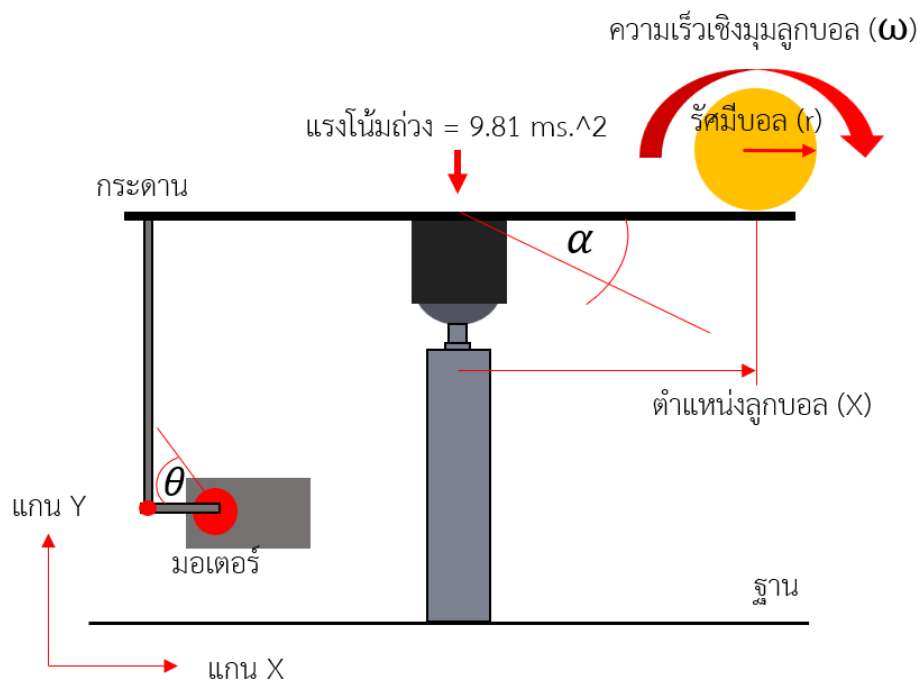
จากการทดลองการควบคุมสเต็ปมอเตอร์ สรุปได้ว่าการควบคุมมอเตอร์ 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 องศา เกิดค่าความผิดพลาด 0.145, 0.209, 0.132, 0.270, 0.782 และ 0.647 องศา ตามลำดับค่าเฉลี่ยความผิดพลาดเฉลี่ยทั้งหมด 0.364 องศา สามารถนำไปใช้ในการควบคุมองศาแผ่นกระดาษได้ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3-26

ตารางที่ 3-26 ผลการควบคุมสเตปิ่งมอเตอร์

องศา	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
30.000	30.303	30.081	30.081	30.081	30.081	0.099	0.145
90.000	90.132	90.132	90.132	90.132	90.132	0.000	0.132
120.000	120.324	120.213	120.213	120.213	120.324	0.061	0.270
180.000	180.486	180.153	180.597	181.152	180.486	0.363	0.647
ค่าเฉลี่ย						0.268	0.299

3.3.3 การหาพารามิเตอร์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น

การจำลองการทำงานของระบบควบคุม เพื่อสังเกตพฤติกรรมระบบควบคุมต่าง ๆ ก่อนนำไปใช้งานจริง ในการจำลองการทำงานของระบบควบคุม ต้องอธิบายการเคลื่อนที่ของโครงสร้างด้วยคณิตศาสตร์เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของระบบ และสิ่งสำคัญในอธิบายการเคลื่อนที่ทางคณิตศาสตร์ คือ ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องโครงการงาน ในหัวข้อนี้แสดงค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องแสดงดังภาพที่ 3-36 และค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 3-27



ภาพที่ 3-36 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องโครงการงาน

ตารางที่ 3-27 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น

ลำดับ	พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	หน่วย
1	มวลของบอล (m)	0.010	กิโลกรัม
2	รัศมีบอล (R)	0.0175	เมตร
3	แขนโยกมอเตอร์ (d)	0.030	เมตร
4	แรงโน้มถ่วงโลก (g)	9.800	เมตรต่อวินาทีกำลังสอง
5	ความยาวแผ่นกระดาน (L)	0.300	เมตร
6	โมเมนต์ความเฉื่อยของบอล (J)	2.042×10^{-6}	เมตรต่อวินาทีกำลังสอง
7	ตำแหน่งบอล (r)	-	เมตร
8	องศาแผ่นกระดาน (α)	-	องศา
9	องศามอเตอร์ (θ)	-	องศา

จากตารางที่ 3-27 เป็นการบอกค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในโครงการ เพื่อนำค่าพารามิเตอร์จำลองการเคลื่อนไหวยของบอลก่อนนำไปควบคุมจริง ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ของลูกบอล จากนั้นแปลงค่าสมการเป็นฟังก์ชันถ่ายโอน เพื่อหาความสัมพันธ์สัญญาณเอาต์พุตต่อสัญญาณอินพุตจากสมการลากร็องจ์

สมการอนุพันธ์อันดับสองของความเร่งของแผ่นกระดาน ($\ddot{\alpha}$) ต่อความสัมพันธ์อันดับสองความเร่งบอลอธิบายด้วยสมการลากร็องจ์แสดงดังสมการที่ (3-9)

$$\left(m_b + \frac{I_b}{r_b^2} \right) \ddot{x} + m_b g \sin \alpha - m x \ddot{\alpha} = 0 \quad (3-9)$$

ก่อนการเริ่มต้นการควบคุมลูกบอลบนกระดานกำหนดให้มุมของกระดานมีค่าเป็น ทำให้ไม่เกิดความเร่งของแผ่นกระดานจัดเรียงสมการใหม่แสดงดังสมการที่ (3-10)

$$\left(m_b + \frac{I_b}{r_b^2} \right) \ddot{x} = -m g \alpha \quad (3-10)$$

สมการความสัมพันธ์ของแผ่นกระดานต่อองศาเพียงแสดงดังสมการที่ (3-11)

$$\alpha = \frac{d}{L}\theta \quad (3-11)$$

นำสมการที่ (3-11) แทนในสมการที่ (3-10) แสดงดังต่อไปนี้

$$\left(m_b + \frac{I_b}{r_b^2}\right)\ddot{x} = -mg\frac{d}{L}\theta$$

แปลงเป็นสมการฟังก์ชันถ่ายโอนแสดงดังสมการที่ (3-12)

$$\left(m_b + \frac{I_b}{r_b^2}\right)X(s)s^2 = -mg\frac{d}{L}\theta(s) \quad (3-12)$$

จัดรูปแบบสมการเพื่อให้สมการฟังก์ชันถ่ายโอน ความสัมพันธ์ของสัญญาณเอาต์พุตต่อสัญญาณอินพุตแสดงดังสมการที่ (3-13)

$$F(s) = \frac{X(s)}{\theta(s)} = -\frac{mgd}{L\left(\frac{J}{R^2} + m\right)s^2} \quad (3-13)$$

แทนค่าพารามิเตอร์ในสมการที่ (3-13) แสดงดังต่อไปนี้

$$\frac{X(s)}{\theta(s)} = -\frac{0.100 \times (-9.810) \times 0.030}{0.300 \times \left(\frac{2.04 \times 10^{-6}}{0.0175^2} + 0.100\right)s^2}$$

$$\frac{X(s)}{\theta(s)} = -\frac{0.588}{s^2}$$

จากการแทนค่าได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอน เพื่อนำไปใช้ในการจำลองระบบควบคุมก่อนนำไปใช้งานจริง โดยนำไปจำลองด้วยโปรแกรมแมตแล็บเพื่อจำลองการทำงานแสดงดังภาพที่ 3-37

```

1  m = 0.01;           %มวลบอล (กิโลกรัม)
2  R = 0.0175;        %รัศมีบอล (เมตร)
3  g = -9.8;          %แรงโน้มถ่วง (เมตรต่อวินาที^2)
4  L = 0.3;           %ความยาวคาน (เมตร)
5  d = 0.03;          %รัศมีเกียร์มอเตอร์ (เมตร)
6  J = 2.04166667E-6; %โมเมนต์ความเฉื่อย (กิโลกรัมเมตร^2)
7  s = tf('s');      %แปลงสมการเป็น Tranfunction
8  P_ball = -m*g*d/L/(J/R^2+m)/s^2; %คำนวณสมการ
9  P_ball; %แสดงสมการ
10

```

ภาพที่ 3-37 โปรแกรมแมตแล็บเพื่อคำนวณสมการฟังก์ชันถ่ายโอน

จากภาพที่ 3-37 เป็นตัวอย่างการคำนวณสมการฟังก์ชันถ่ายโอน ด้วยโปรแกรมแมตแล็บ โดยการกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ประกอบด้วย มวลของบอล รัศมีบอล แรงโน้มถ่วง ความยาวแผ่นกระดาน รัศมีเกียร์มอเตอร์ และโมเมนต์ความเฉื่อยของบอล หลังจากนั้นแปลงสมการเป็นฟังก์ชันถ่ายโอน ด้วยสมการความสัมพันธ์ของสัญญาณเอาต์พุตต่อสัญญาณอินพุตของระบบ หลังจากนั้นกดเริ่มทำงาน เพื่อแสดงสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบออกมาแสดงดังภาพที่ 3-38

```

>> P_ball

P_ball =

    0.588
-----
    s^2

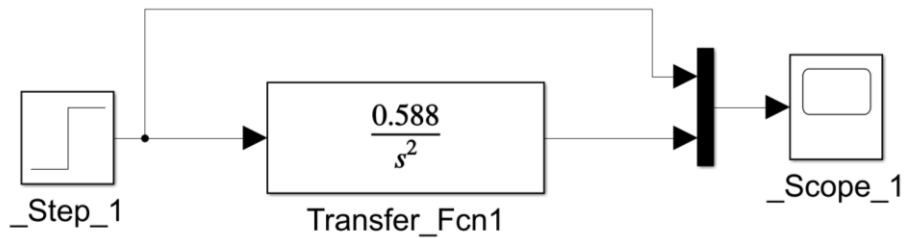
Continuous-time transfer function.

fx >>

```

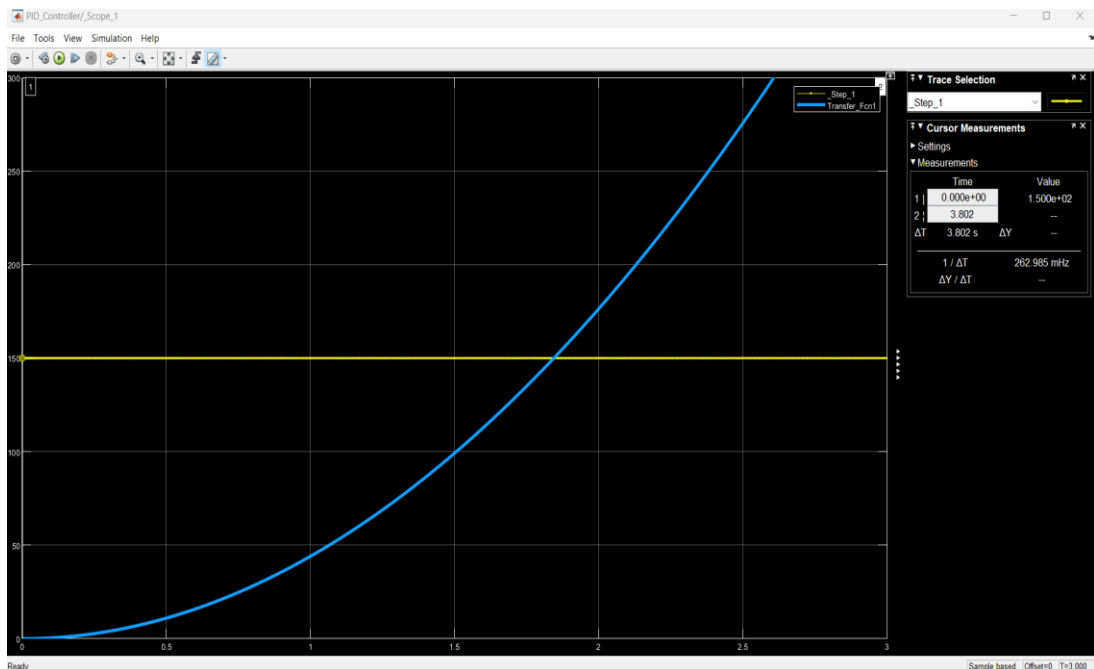
ภาพที่ 3-38 สมการเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ

จากภาพที่ 3-38 เป็นสมการฟังก์ชันถ่ายโอน ของระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น โดยเป็นความสัมพันธ์ของสัญญาณเอาต์พุตต่อสัญญาณอินพุตของระบบ หลังจากนั้นนำค่าสมการฟังก์ชันถ่ายโอนไปเขียนบล็อกในการจำลองการทำงานด้วยซิมูลิงค์ (Simulink) แสดงดังภาพที่ 3-39



ภาพที่ 3-39 การจำลองการทำงานด้วยซิมูลิงค์

จากภาพที่ 3-39 เป็นการแสดงการต่อบล็อกเพื่อจำลองผลตอบสนองของระบบควบคุม โดยประกอบไปด้วย บล็อกทางด้านซ้ายมือ คือ บล็อกแหล่งจ่ายสัญญาณ (Step Block) เพื่อกำหนดตำแหน่งอ้างอิงที่ต้องการให้ลูกบอลเคลื่อนที่เข้า บล็อกกลาง คือ บล็อกฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function Block) เพื่อนำสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเข้ามาจำลอง และบล็อกทางด้านขวามือ คือ บล็อกวัดสัญญาณ (Scope Block) เพื่อใช้ในการดูผลตอบสนอง โดยผลตอบสนองแสดงดังภาพที่ 3-40



ภาพที่ 3-40 ผลตอบสนองของระบบ

จากภาพที่ 3-40 เป็นการแสดงผลตอบสนองระบบ โดยเส้นสีเหลือง คือ ตำแหน่งอ้างอิงที่ต้องการให้ลูกบอลเคลื่อนที่เข้า และเส้นสีน้ำเงิน คือ ตำแหน่งบอล จากผลการจำลองสังเกตได้ว่าตำแหน่งลูกบอลเคลื่อนที่ช้ากว่าตำแหน่งอ้างอิง เนื่องจากระบบนี้ยังไม่มีตัวควบคุม ดังนั้นเพื่อให้ระบบสามารถควบคุม

ตำแหน่งลูกบอลได้จำเป็นต้องใส่ตัวควบคุมให้แก่ระบบ เช่น ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ตัวควบคุมควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ หรือควบคุมแผ่นเลื่อน

3.3.4 การหาค่าเกณฑ์ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ของระบบด้วยวิธีซีกเกลอร์-นิโคลส์

ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ เป็นตัวควบคุมที่มีการปรับค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญอยู่ 3 ตัวได้แก่ สัดส่วน (K_p) ปริพันธ์ (K_i) และอนุพันธ์ (K_d) ในการปรับจูนด้วยมือนั้นยากในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ดังนั้นในหัวข้อนี้แนะนำเสนอการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการซีกเกลอร์-นิโคลส์ ด้วยวิธีการวัฏจักรสุดท้าย (Ultimate Cycle Method) การทดลองด้วยวิธีนี้ ระบบต้องเป็นระบบควบคุมวงปิด (Closed Loop Control) จากนั้นค่อย ๆ เพิ่มค่าสัดส่วนขึ้น จนระบบเกิดการแกว่งตัว (Oscillate) หรือเกิดเสถียรภาพแบบขอบ จากนั้นทำการบันทึกค่าสัดส่วน ให้มีค่าเท่ากับ K_{cr} และหาเวลาในการแกว่งตัวของสัญญาณให้มีค่าเท่ากับ P_{cr} เพื่อนำไปปรับจูนตามทฤษฎีซีกเกลอร์-นิโคลส์แสดงดังตารางที่ 3-28

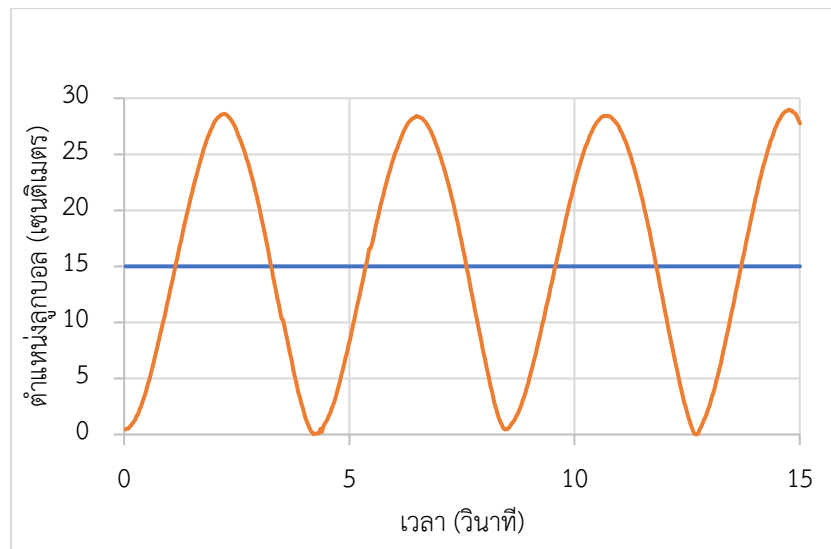
ตารางที่ 3-28 ตารางการปรับจูนตามทฤษฎีซีกเกลอร์-นิโคลส์

ชนิดตัวควบคุม	สัดส่วน	ปริพันธ์	อนุพันธ์
สัดส่วน	0.5 (K_{cr})	-	-
สัดส่วน ปริพันธ์	0.45 (K_{cr})	1.2 (K_{cr}/P_{cr})	-
สัดส่วน ปริพันธ์ และอนุพันธ์	0.6 (K_{cr})	2 / P_{cr}	$P_{cr}/8$

จากตารางที่ 3-28 เป็นวิธีการจูนแบบซีกเกลอร์-นิโคลส์ ด้วยการปรับค่าเกณฑ์ตัวควบคุมด้วยวิธีนี้ ทำให้ผลตอบสนองของระบบมีการแกว่งลดลงด้วยอัตราหนึ่งในสี่ของสัญญาณ หมายความว่าสัญญาณค่าโอเวอร์ชูตที่สองมีขนาดเล็กกว่าค่าโอเวอร์ชูต 25 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังสมการที่ (3-14)

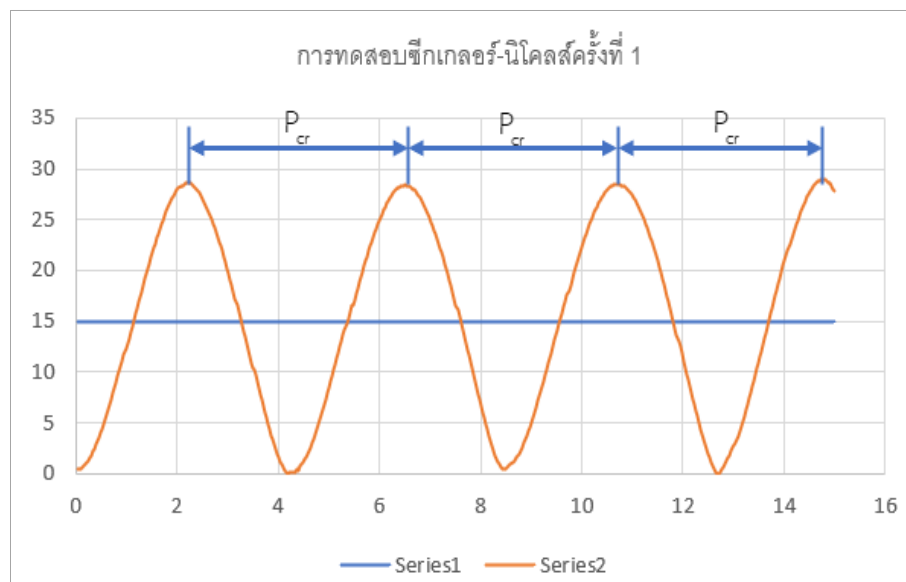
$$\text{ผลตอบสนองเกินครั้งที่ 2} = \left(\frac{1}{4} \right) \text{ผลตอบสนองเกินครั้งที่ 1} \quad (3-14)$$

ทดสอบควบคุมระบบ ลำดับที่หนึ่งปรับจูนหาค่าสัดส่วนจนกว่าระบบเกิดการแกว่งตัว หรือเกิดเสถียรภาพแบบขอบโดยค่าสัดส่วนที่ทดลองแล้วเกิดการแกว่งตัวค่าสัดส่วนเท่ากับ 4.75 แสดงดังภาพที่ 3-41



ภาพที่ 3-41 ภาพทดสอบซีกเกลอร์-นิโคลส์

ภาพที่ 3-41 เป็นสัญญาณผลตอบสนองของระบบ เส้นสีส้ม คือ ตำแหน่งลูกบอล เส้นสีน้ำเงิน คือ ตำแหน่งเป้าหมาย จากรูปให้ค่าพารามิเตอร์มาสองค่า 1) ค่า K_{cr} เท่ากับค่าสัดส่วน และ 2) ค่า P_{cr} เท่ากับคาบเวลาที่ใช้ในการแกว่งตัวแสดงดังภาพที่ 3-42



ภาพที่ 3-42 คาบเวลาที่ใช้ในการแกว่งตัว

ทำการทดลองและเก็บผลโดยการวัดค่า K_{cr} และค่า P_{cr} ทั้งหมด 5 ครั้งแล้วทำการบันทึกผลแสดงดังตารางที่ 3-29

ตารางที่ 3-29 ตารางแสดงค่า K_{cr} และค่า P_{cr}

ครั้งที่	ค่าพารามิเตอร์	
	K_{cr}	P_{cr}
1	4.750	4.177
2	4.750	3.981
3	4.750	3.991
4	4.750	4.167
5	4.750	5.213
ค่าเฉลี่ย		4.306
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.100

ค่า K_{cr} เท่ากับ 4.75 และค่า P_{cr} เท่ากับ 4.306 วินาที ค่าที่ได้นำไปคำนวณในตารางสูตรการคำนวณซีกเกลอร์-นิโคลส์แสดงดังตารางที่ 3-29

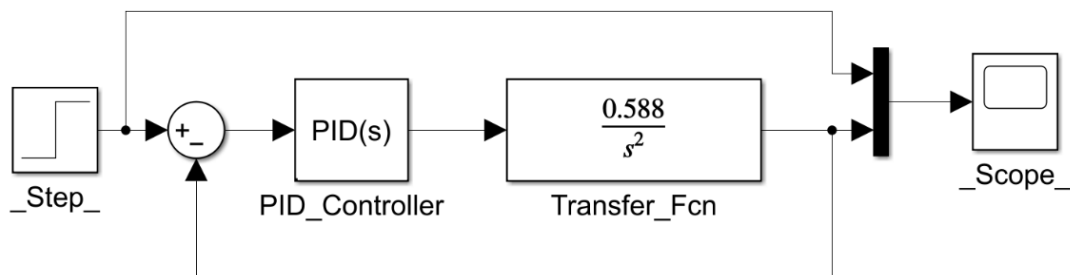
ตารางที่ 3-30 ตารางแสดงค่าสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์จากสูตรการคำนวณซีกเกลอร์-นิโคลส์

ชนิดตัวควบคุม	สัดส่วน	ปริพันธ์	อนุพันธ์
สัดส่วน	2.375	-	-
สัดส่วน ปริพันธ์	2.138	1.323	-
สัดส่วน ปริพันธ์ และอนุพันธ์	2.850	0.464	0.538

จากตารางที่ 3-30 เป็นค่าสัดส่วน ปริพันธ์ และอนุพันธ์จากสูตรการคำนวณซีกเกลอร์-นิโคลส์วิธีนี้ทำให้ผลตอบสนองของระบบมีการแกว่งลดลงด้วยอัตราหนึ่งในสี่ของสัญญาณ

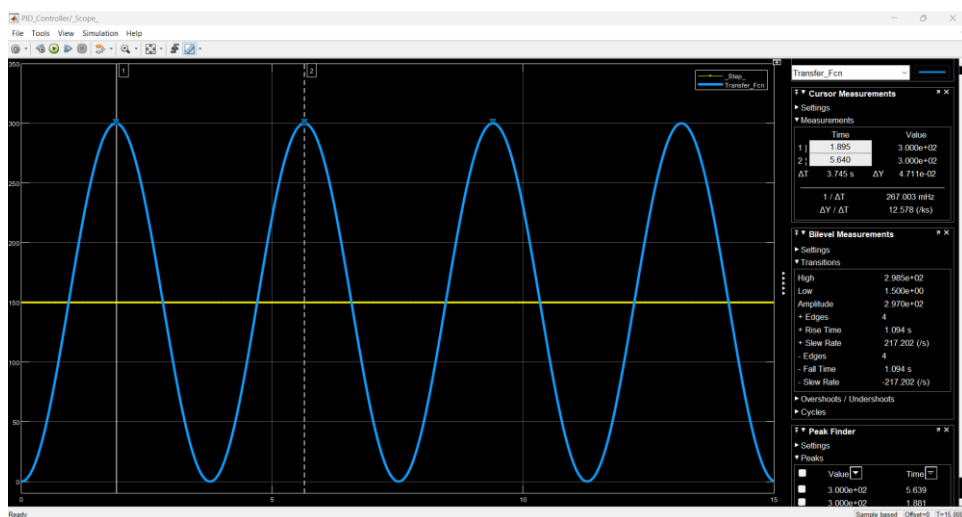
3.3.5 ผลการเปรียบเทียบความแม่นยำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การเปรียบเทียบความแม่นยำจำเป็นต้องมีผลการจำลองสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเปรียบเทียบกับผลตอบสนองจริง การเปรียบเทียบในครั้งนี้นำเอาผลตอบสนองจากการจำลองฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบโดยใช้ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ เพื่อเปรียบเทียบผลตอบสนองกับผลการควบคุมจริง แสดงการจำลองระบบควบคุมดังภาพที่ 3-43



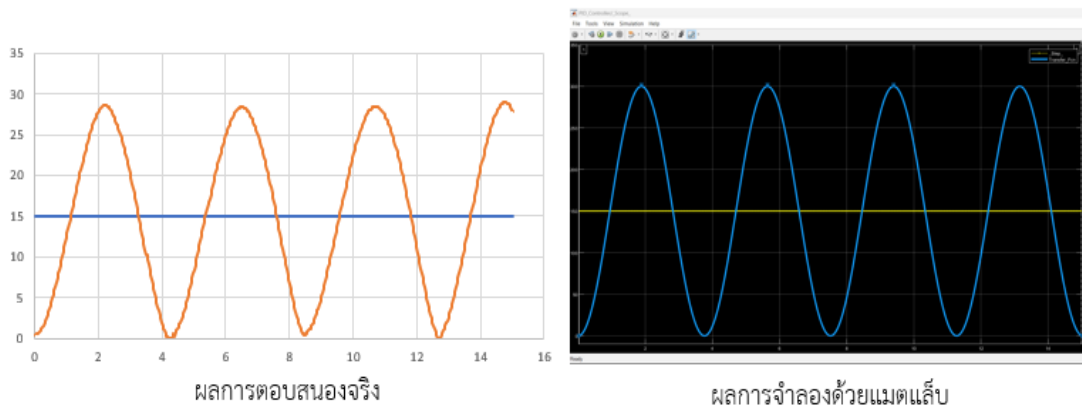
ภาพที่ 3-43 บล็อกการจำลองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์

จากภาพที่ 3-43 เป็นการแสดงการต่อบล็อกเพื่อจำลองผลตอบสนองของระบบควบคุมโดยประกอบไปด้วย บล็อกทางด้านซ้ายมือ คือ บล็อกสัญญาณ (Step Block) เพื่อกำหนดตำแหน่งอ้างอิงที่ต้องการให้ลูกบอลเคลื่อนที่เข้า บล็อกถัดมาเป็นบล็อกตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์เพื่อปรับจูนค่าพารามิเตอร์ สัดส่วน ปริพันธ์ และ อนุพันธ์ บล็อกถัดมา คือ บล็อกฟังก์ชันถ่ายโอน เพื่อนำสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเข้ามาจำลอง และบล็อกสุดท้ายทางด้านขวามือ คือ บล็อกวัดสัญญาณ เพื่อใช้ในการดูผลตอบสนอง โดยผลตอบสนองของการควบคุมแบบสัดส่วน โดยปรับจูนค่าสัดส่วนเท่ากับ 4.75 แสดงดังภาพที่ 3-44



ภาพที่ 3-44 กราฟจำลองการตอบสนองของการควบคุมแบบสัดส่วน

จากภาพที่ 3-44 เป็นภาพการแสดงผลตอบสนองของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบโดยใช้ค่าสัดส่วนเท่ากับ 4.75 เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณจริงของระบบ ว่ามีผลตอบสนองใกล้เคียงจากการทดลองด้วยซิกเกิลอร์-นิโคลส์ หรือไม่ ภาพการเทียบเทียบผลตอบสนองจริงกับผลตอบสนองจริงแสดงดังภาพที่ 3-45



ภาพที่ 3-45 กราฟเทียบจำลองการตอบสนองของการควบคุมแบบสัดส่วน

จากภาพที่ 3-45 เป็นภาพการแสดงผลตอบสนองจริงเปรียบเทียบกับผลการจำลอง เห็นได้ว่ากราฟมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน ผลตอบสนองการควบคุมผลจำลองจริง และผลการจำลอง แสดงดังตารางที่ 3-31

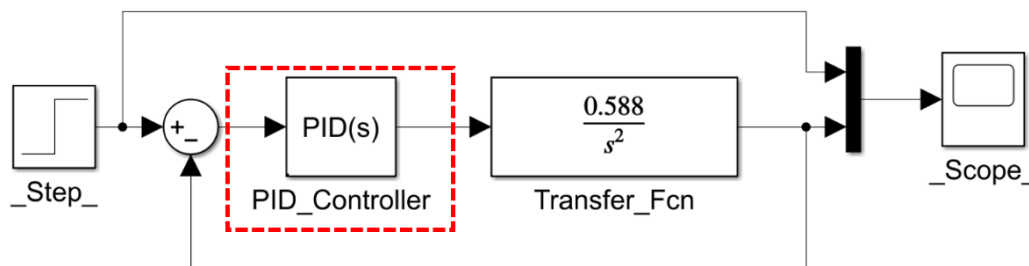
ตารางที่ 3-31 ผลการจำลองการตอบสนองของการควบคุมแบบสัดส่วน

ข้อมูล	ผลการตอบสนองจริง	ผลการจำลอง	หน่วย
เวลาไต่ขึ้น	0.804	0.610	วินาที
เวลาตอบสนองสูงสุด	2.227	1.878	วินาที
ผลตอบสนองเกิน	93.236	100	เปอร์เซ็นต์

จากตารางที่ 3-31 เป็นการเปรียบเทียบกราฟระหว่างผลการทดลองจริงเทียบกับผลการจำลอง โดยสรุปผลได้ว่ามีผลตอบสนองที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความผิดพลาดจากผลการทดลองจริงดังนี้ เวลาไต่ขึ้นมีค่าความผิดพลาด 0.194 วินาที เวลาตอบสนองสูงสุดมีค่าความผิดพลาด 0.349 วินาที และผลตอบสนองเกินมีค่าความผิดพลาด 6.764 เปอร์เซ็นต์

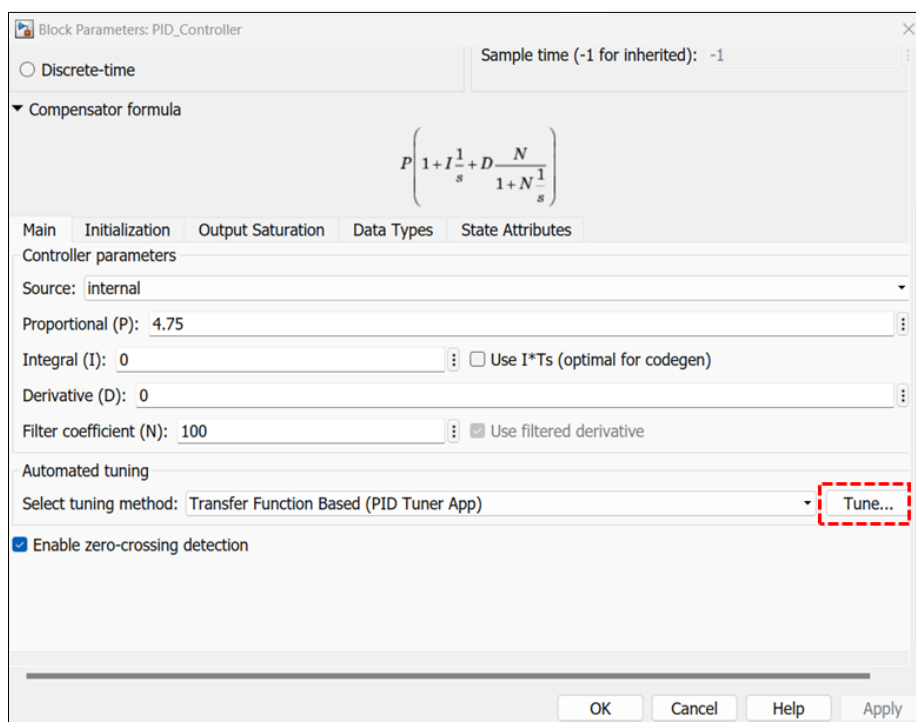
3.3.6 การหาสมรรถนะตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ วิธีการแบบจูนเนอร์

การทดสอบสมรรถนะตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ โดยการจูนค่าพารามิเตอร์สัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ และดูผลตอบสนองสามารถทำได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมแมตแล็บโดยการเขียนบล็อกจำลองตัวควบคุม และกดเริ่มทำงาน ดับเบิลคลิกบล็อกควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ เพื่อปรับจูนค่าพารามิเตอร์แสดงดังภาพที่ 3-46



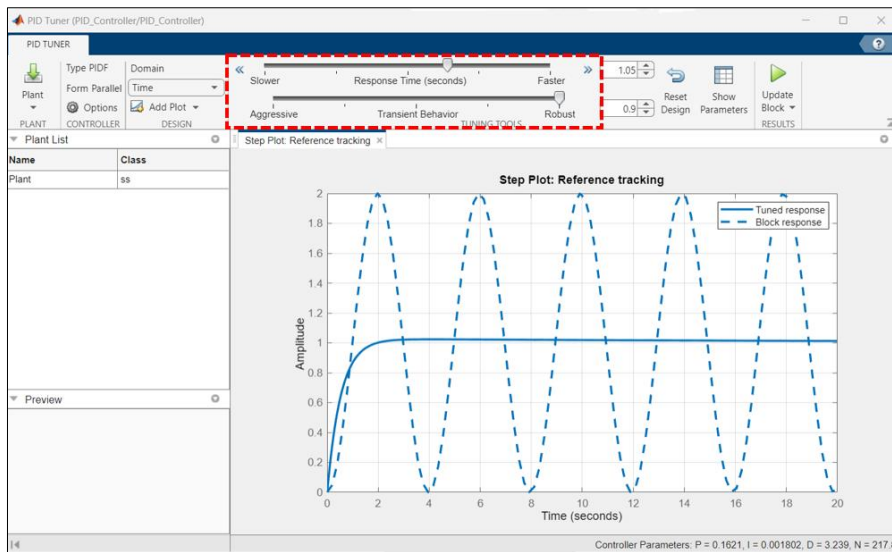
ภาพที่ 3-46 บล็อกควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ เพื่อปรับจูนค่าพารามิเตอร์

เมื่อดับเบิลคลิกบล็อกควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ สามารถปรับจูนได้ด้วยตนเอง และสามารถปรับจูนค่าพารามิเตอร์แบบอัตโนมัติ การปรับจูนแบบอัตโนมัติสามารถทำได้โดยการเข้าไปที่ การจูนแสดงดังภาพที่ 3-47



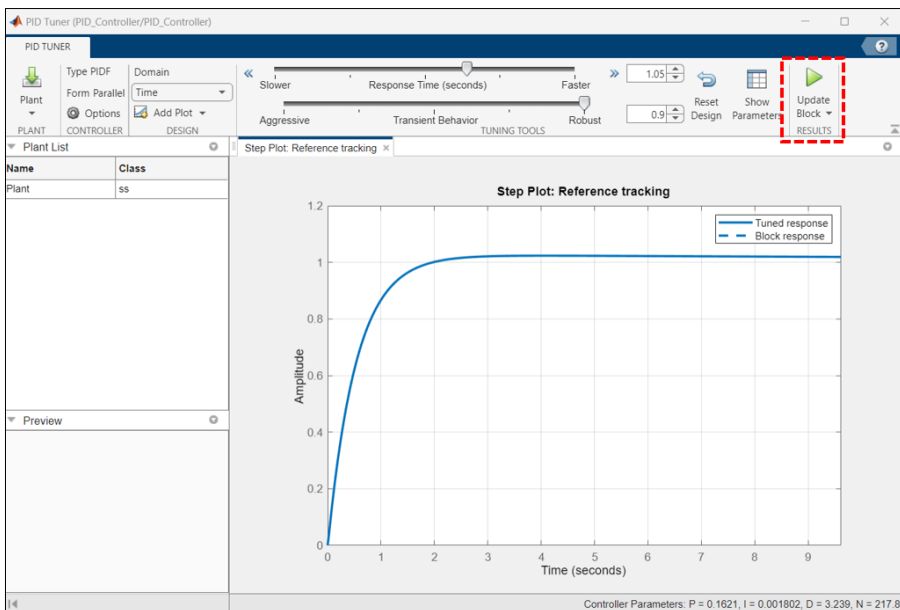
ภาพที่ 3-47 การจูนค่าพารามิเตอร์

โดยวิธีการจูนสามารถปรับจูนค่าพารามิเตอร์ได้ตามต้องการ จากแถบเครื่องมือสไลด์ด้านบนแสดง ดังภาพที่ 3-48



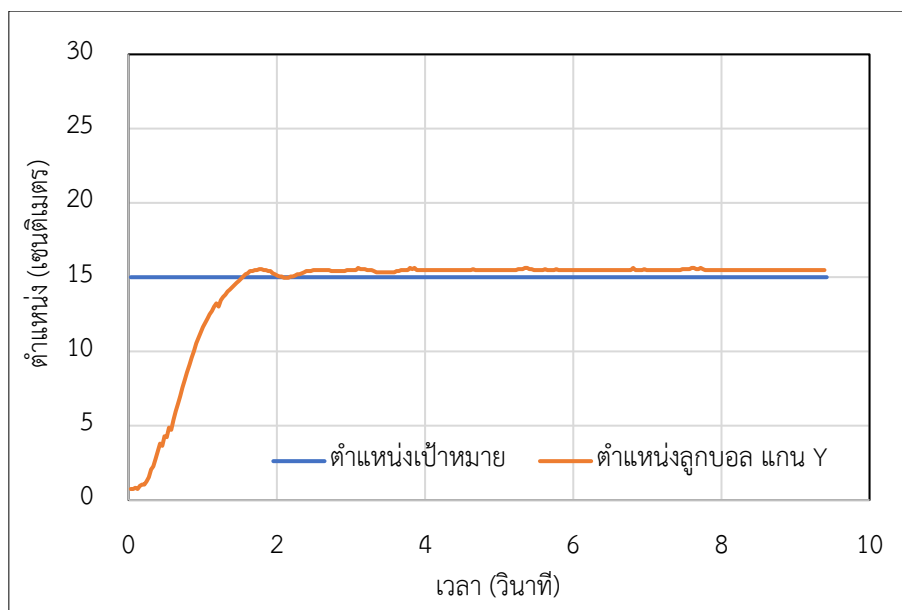
ภาพที่ 3-48 แถบเครื่องมือสไลด์รจูนค่าพารามิเตอร์

เมื่อปรับจูนได้ผลตอบสนองตามที่ต้องการ สามารถกดอัปเดตค่าพารามิเตอร์เพื่อจำลองผลตอบสนองก่อนนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์แสดงดังภาพที่ 3-49



ภาพที่ 3-49 ค่าพารามิเตอร์ผลตอบสนอง

เมื่อปรับจูนค่าพารามิเตอร์ได้ผลตอบสนองตามต้องการแล้ว สามารถนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปใช้ในโครงการแสดงดังภาพที่ 3-50 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 3-32



ภาพที่ 3-50 การควบคุมตำแหน่งบอลแกนเอกซ์ ตัวควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์ ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

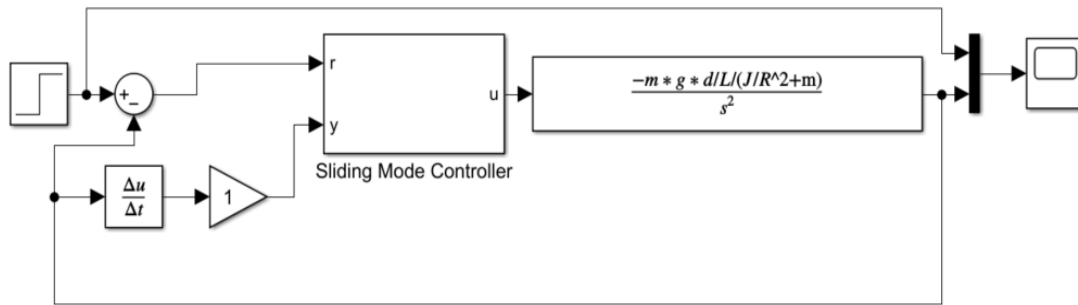
ตารางที่ 3-32 ผลการตอบสนองของการควบคุมแบบสัดส่วน โดยวิธีการจูนค่าพารามิเตอร์

ผลตอบสนอง	แกนเอกซ์	หน่วย
เวลาไต่ขึ้น	0.756	วินาที
เวลาชั่วคราว	0.925	วินาที
เวลาสู่จุดสมดุล	0.934	วินาที
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล	13.539	เซนติเมตร
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล	14.788	เซนติเมตร
ผลตอบสนองเกิน	0.000	เปอร์เซ็นต์
สภาวะความหน่วงน้อย	2.841	เซนติเมตร
สัญญาณสูงสุด	14.788	เซนติเมตร
เวลาตอบสนองสูงสุด	1.398	วินาที

จากตาราง 3-32 ผลการตอบสนองการควบคุมแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุม เวลาไต่ขึ้น 0.756 วินาที เวลาชั่วคราว 0.925 วินาที เวลาสู่จุดสมดุล 0.934 วินาที สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล 13.539 วินาที สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล 14.788 วินาที ผลตอบสนองเกิน 0 เปอร์เซ็นต์สภาวะความหน่วงน้อย 2.841 วินาที สัญญาณสูงสุด 14.788 วินาที และเวลาตอบสนองสูงสุด 1.398 วินาที

3.3.7 การหาสมรรถนะตัวควบคุมแผ่นเลื่อน

การหาสมรรถนะตัวควบคุมแผ่นเลื่อนสามารถจำลองการผลตอบสนองได้จากการจำลองโดยโปรแกรมแมตแล็บแสดงดังภาพที่ 3-51



ภาพที่ 3-51 การจำลองตัวควบคุมแผ่นเลื่อนโดยโปรแกรมแมตแล็บ

โดยที่เอาต์พุตของตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมชุดทดลองแผ่นเลื่อนหาได้จากสมการที่ (3-15)

$$u = u_{eq} + u_{sw} \quad (3-15)$$

โดยที่ฟังก์ชันการสลับของระบบออกแบบจากการนำค่าเกิน คูณกับฟังก์ชันซิกนัมแสดงดังสมการที่ (3-16)

$$u_{sw} = (-k) \operatorname{sgn}(S(x)) \quad (3-16)$$

โดยฟังก์ชันซิกนัมมีเงื่อนไขสมการดังที่ (3-17)

$$\operatorname{sgn}(s) = \begin{cases} 1f(S(x)) > 0 \\ 0f(S(x)) = 0 \\ -1f(S(x)) < 0 \end{cases} \quad (3-17)$$

จากระบบหาค่า $S(x)$ เท่ากับแลมบ์ดา (λ) เป็นค่าเกิน คูณกับค่าความผิดพลาดของตำแหน่งลูกบอล บวกกับอัตราความผิดพลาดของตำแหน่งลูกบอลโดยแสดงดังสมการที่ (3-18)

$$S(x) = (\lambda)Error + \frac{d(Error)}{dt} \quad (3-18)$$

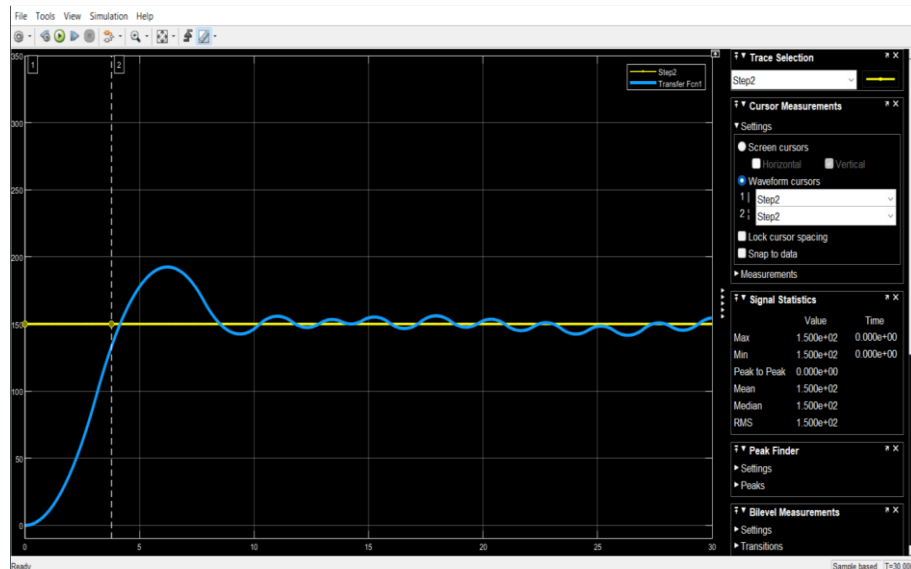
ได้สมการสัญญาณควบคุม จากสมการสมดุลแรงของระบบแสดงดังสมการที่ (3-19)

$$u_{eq} = \frac{\lambda x' + f(x)}{g(x)} \quad (3-19)$$

แทนสมการที่ (3-16) และ (3-19) ลงในสมการที่ (3-15) แสดงดังต่อไปนี้

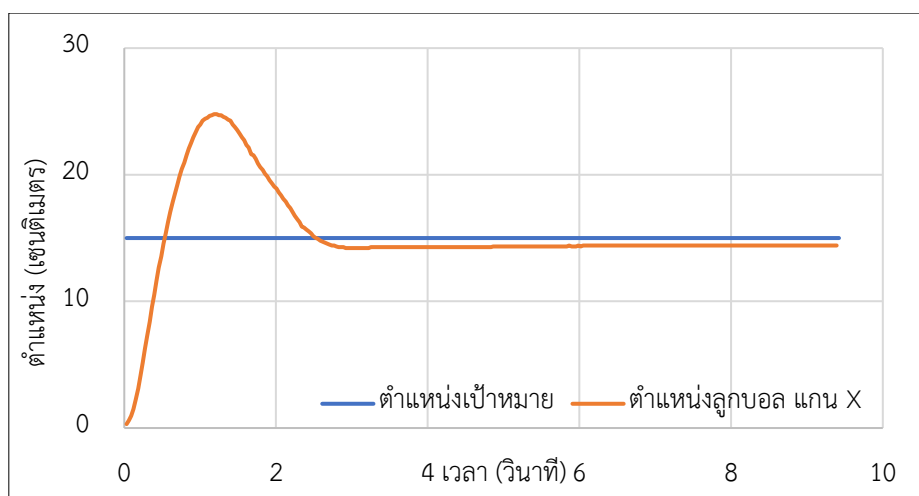
$$u = \frac{\lambda x' + f(x)}{g(x)} + ((-k)sgn(s(x)))$$

ปรับจูนค่าพารามิเตอร์ให้ได้ผลตอบสนองตามที่ต้องการ เพื่อจำลองผลตอบสนองก่อนนำค่าพารามิเตอร์ไปใช้แสดงดังภาพที่ 3-52



ภาพที่ 3-52 การจำลองผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน

ทดสอบสมรรถนะตัวควบคุมแผ่นเลื่อน และเก็บผลการตอบสนองเพื่อหาค่า ผลตอบสนองเกิน เวลาตอบสนองสูงสุด เวลาไต่ เวลาสู่จุดสมดุล และค่าสถานะคงตัว การเข้าตำแหน่งในแนวแกนเอกซ์ แสดงดังภาพที่ 3-53



ภาพที่ 3-53 การควบคุมตำแหน่งบอลแกนเอกซ์ ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

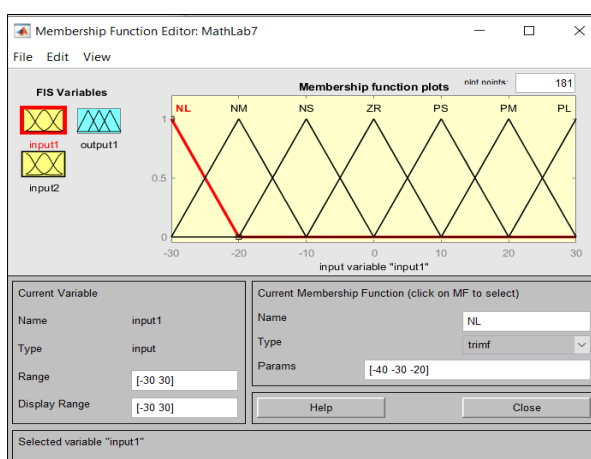
จากภาพที่ 3-53 ผลการตอบสนองการควบคุมแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุม เวลาไต่ขึ้น 0.363 วินาที เวลาชั่วคราว 2.309 วินาที เวลาสู่จุดสมดุล 2.308 วินาที สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล 13.539 วินาที สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล 24.784 วินาที ผลตอบสนองเกิน 65.229 เปอร์เซ็นต์ สภาวะความหวนวน้อย 0 วินาที สัญญาณสูงสุด 24.784 วินาที และเวลาตอบสนองสูงสุด 1.216 วินาทีแสดงดังตารางที่ 3-33

ตารางที่ 3-33 ผลการตอบสนองของการควบคุมแผ่นเลื่อนในแนวแกนเอกซ์

ผลตอบสนอง	แกนเอกซ์	หน่วย
เวลาไต่ขึ้น	0.363	วินาที
เวลาชั่วคราว	2.309	วินาที
เวลาสู่จุดสมดุล	2.308	วินาที
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล	13.539	เซนติเมตร
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล	24.784	เซนติเมตร
ผลตอบสนองเกิน	65.229	เปอร์เซ็นต์
สภาวะความหวนวน้อย	0.000	เซนติเมตร
สัญญาณสูงสุด	24.784	เซนติเมตร
เวลาตอบสนองสูงสุด	1.216	วินาที

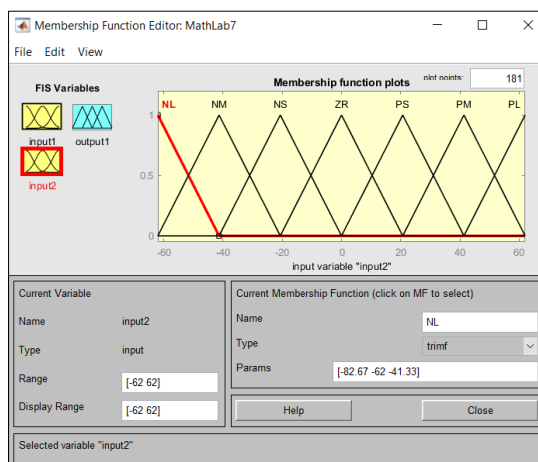
3.3.8 การหาสมรรถนะตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ

ในการออกแบบตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ โดยใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสามเหลี่ยมโดยมีการรับอินพุต 2 ค่า คือ 1) ค่าความผิดพลาด 2) อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด มีค่าความเป็นสมาชิกตั้งแต่ -30 ถึง 30 มีสมาชิก 7 สมาชิกประกอบด้วย ลบมาก (Negative Big : NB) ลบกลาง (Negative Medium : NM) ลบน้อย (Negative Small : NS) ศูนย์ (Zero : ZR) บวกมาก (Positive Small : PS) บวกกลาง (Positive Medium: PM) และ บวกมาก (Positive Big: PB) ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสามเหลี่ยม การออกแบบสมาชิกอินพุตค่าความผิดพลาดแสดงดังภาพที่ 3-54



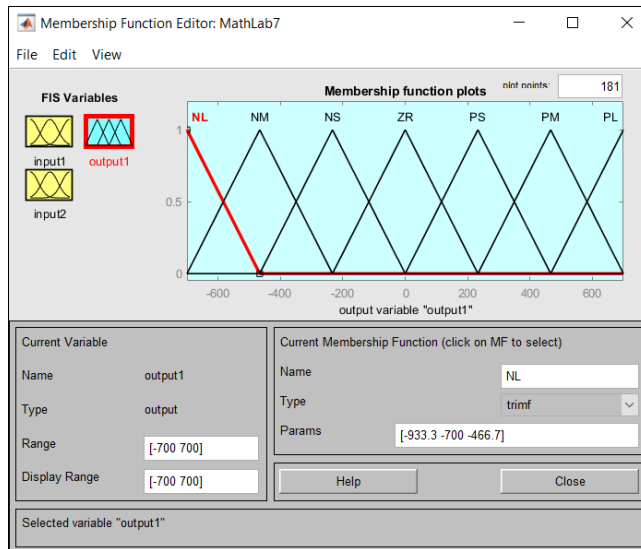
ภาพที่ 3-54 อินพุตค่าความผิดพลาด

อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด มีค่าความเป็นสมาชิกตั้งแต่ -60 ถึง 60 มีสมาชิก 7 สมาชิกประกอบด้วย NB NM NS ZR PS PM และ PB ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสามเหลี่ยม การออกแบบสมาชิกอินพุตอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดแสดงดังภาพที่ 3-55



ภาพที่ 3-55 อินพุตอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด

ค่าเอาต์พุต มีค่าความเป็นสมาชิกตั้งแต่ -700 ถึง 700 มีสมาชิก 7 สมาชิกประกอบด้วย NB NM NS ZR PS PM และ PB ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสามเหลี่ยมการออกแบบสมาชิกเอาต์พุตแสดงดังภาพที่ 3-56



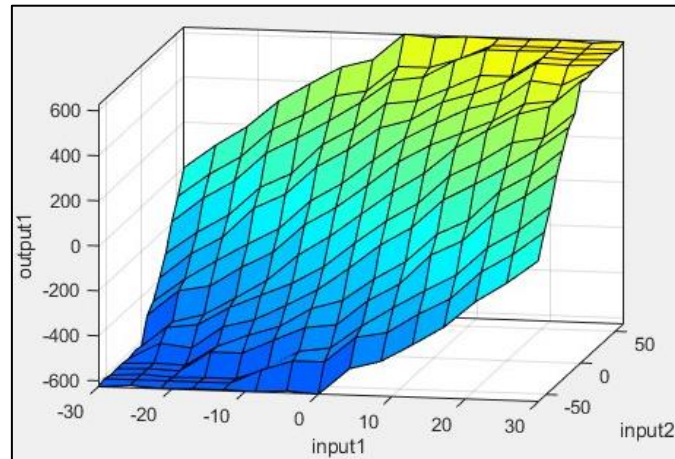
ภาพที่ 3-56 เอาต์พุต

แสดงกฎตรรกศาสตร์คลุมเครือที่ใช้ในการควบคุม ประกอบไปด้วยอินพุตสองค่า คือ ค่าความผิดพลาด และอัตราความผิดพลาด เอาต์พุต คือ องศาของมอเตอร์แสดงดังตารางที่ 3-34

ตารางที่ 3-34 กฎตรรกศาสตร์คลุมเครือที่ใช้ในการควบคุม

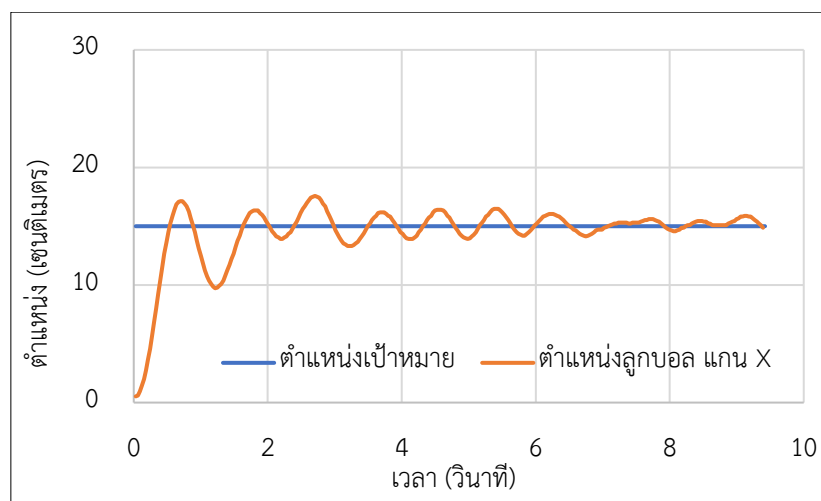
e.dot/e	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZR
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZR	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZR	PS	PM
ZR	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZR	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZR	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZR	PS	PM	PB	PB	PB	PB

จากตารางที่ 3-34 เป็นการออกกฎตรรกศาสตร์คลุมเครือที่ใช้ในการควบคุม เป็นความสัมพันธ์ของข้อมูลอินพุตทั้งสองข้อมูลได้แก่ 1) ค่าความผิดพลาด และ 2) อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด มีผลสัญญาณเอาต์พุต คือ การสร้างองศาของมอเตอร์ พื้นผิวกฎตรรกศาสตร์คลุมเครือแสดงดังภาพที่ 3-57



ภาพที่ 3-57 พื้นผิวกฎตรรกศาสตร์คลุมเครือ

การทดสอบสมรรถนะตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ และเก็บผลการตอบสนองเพื่อหาเวลาไต่ขึ้น เวลาชั่วคราว เวลาสู่จุดสมดุล สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล ผลตอบสนองเกิน สภาวะความหน่วงน้อย สัญญาณสูงสุด และเวลาตอบสนองสูงสุดการเข้าตำแหน่งในแนวแกนเอกซ์ กราฟตอบสนองตัวควบคุมแสดงดังภาพที่ 3-58 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 3-35



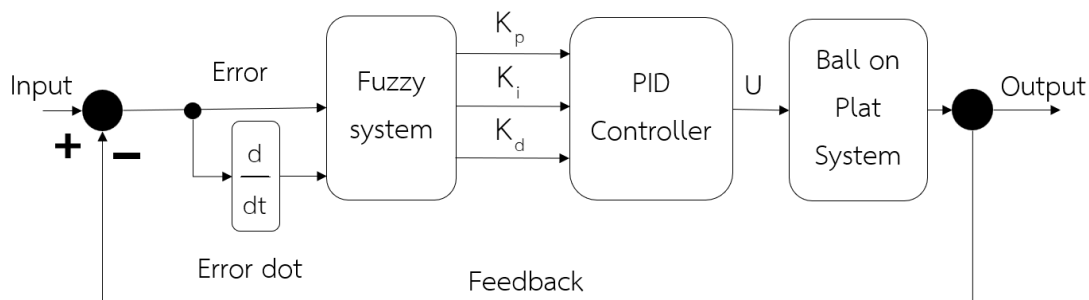
ภาพที่ 3-58 การควบคุมตำแหน่งบอล ตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

ตารางที่ 3-35 ผลการตอบสนองของการควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือในแนวแกนเอกซ์

ผลตอบสนอง	แกนเอกซ์	หน่วย
เวลาไต่ขึ้น	0.357	วินาที
เวลาชั่วคราว	-	วินาที
เวลาสู่จุดสมดุล	3.335	วินาที
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล	9.717	เซนติเมตร
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล	17.581	เซนติเมตร
ผลตอบสนองเกิน	17.209	เปอร์เซ็นต์
สภาวะความหน่วงน้อย	0.000	เปอร์เซ็นต์
สัญญาณสูงสุด	17.581	เซนติเมตร
เวลาตอบสนองสูงสุด	2.736	วินาที

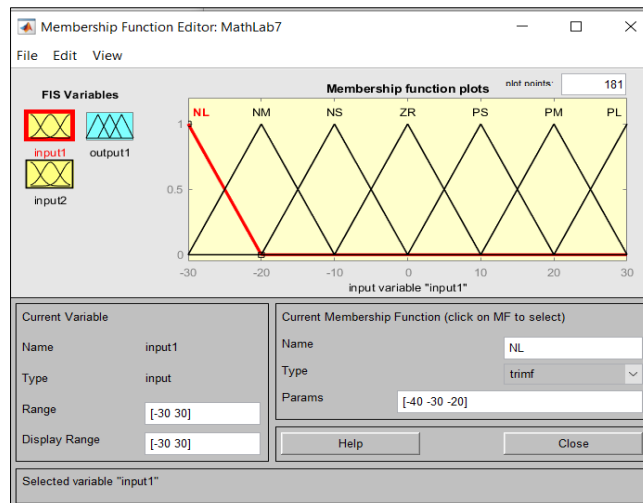
3.3.9 การหาสมรรถนะตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือในการปรับจูนค่าอัตโนมัติ

ในการออกแบบตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือในการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการควบคุม การออกแบบตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือแสดงดังภาพที่ 3-59



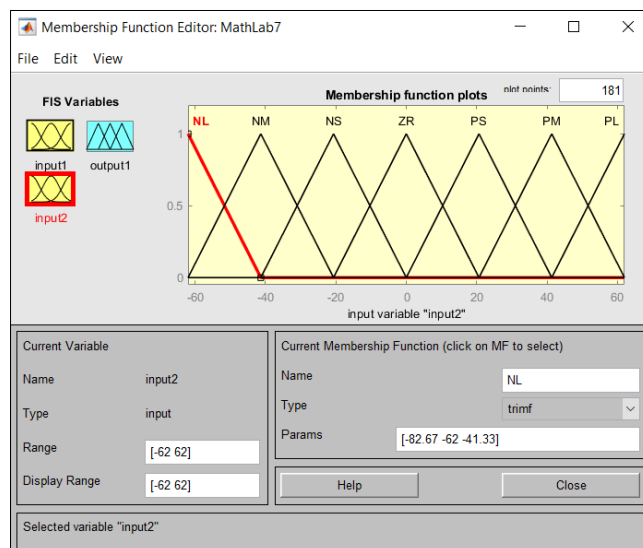
ภาพที่ 3-59 การออกแบบตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือ

ในการออกแบบตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือปรับจูนค่าอัตโนมัติ ใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสามเหลี่ยมรับอินพุต 2 ค่า คือ 1) ค่าความผิดพลาด 2) ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความผิดพลาด โดยค่าความผิดพลาดมีค่าความเป็นสมาชิกตั้งแต่ -30 ถึง 30 มีสมาชิก 7 สมาชิกประกอบด้วย NB NM NS ZR PS PM และ PB ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสามเหลี่ยม การออกแบบสมาชิกอินพุตค่าความผิดพลาดแสดงดังภาพที่ 3-60



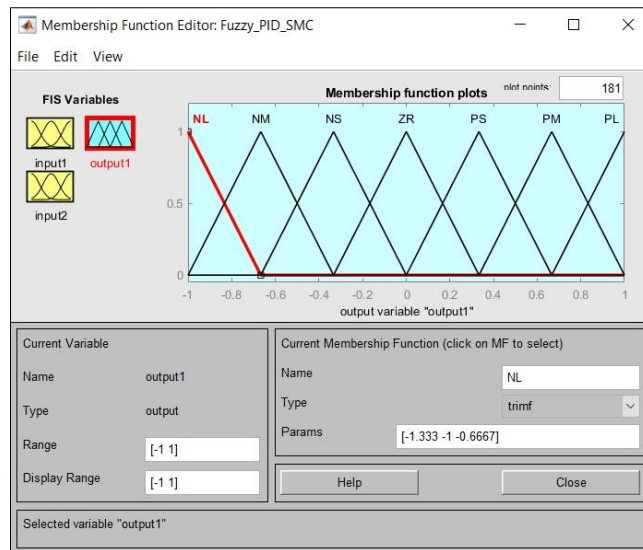
ภาพที่ 3-60 สมาชิกอินพุตค่าความผิดพลาด

และอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด มีค่าความเป็นสมาชิกตั้งแต่ -60 ถึง 60 มีสมาชิก 7 สมาชิกประกอบด้วย NB NM NS ZR PS PM และ PB ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสามเหลี่ยม การออกแบบสมาชิกอินพุตอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดแสดงดังภาพที่ 3-61



ภาพที่ 3-61 การออกแบบสมาชิกอินพุตอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด

ค่าเอาต์พุต มีค่าความเป็นสมาชิกตั้งแต่ -1 ถึง 1 มีสมาชิก 7 สมาชิกประกอบด้วย NB NM NS ZR PS PM และ PB การออกแบบสมาชิกฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสามเหลี่ยมแสดงดังภาพที่ 3-62



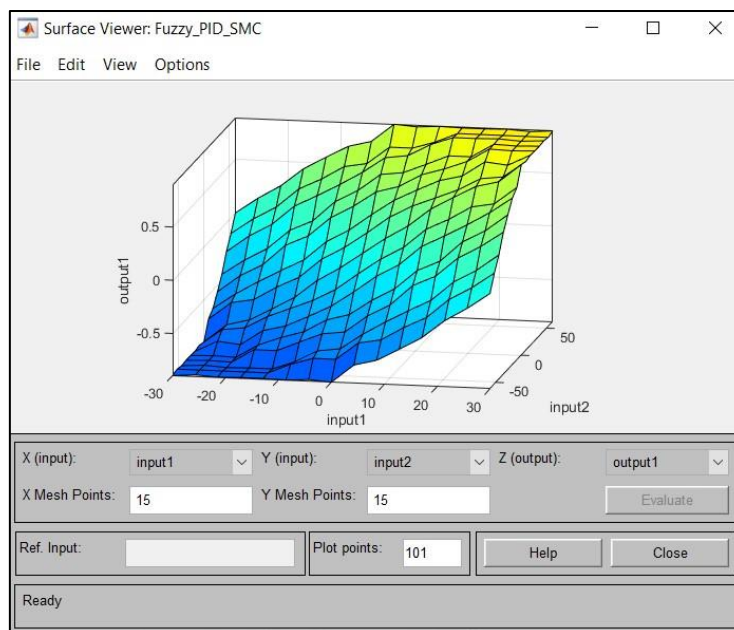
ภาพที่ 3-62 การออกแบบสมาชิกเอาต์พุต

แสดงกฎตรรกศาสตร์คลุมเครือที่ใช้ในการควบคุม ประกอบไปด้วยอินพุตสองค่า คือ ค่าความผิดพลาด และอัตราการความผิดพลาด เอาต์พุต คือ องศาของมอเตอร์แสดงดังตารางที่ 3-36

ตารางที่ 3-36 กฎตรรกศาสตร์คลุมเครือที่ใช้ในการควบคุมตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือ

e.dot/e	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZR
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZR	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZR	PS	PM
ZR	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZR	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZR	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZR	PS	PM	PB	PB	PB	PB

จากตารางที่ 3-36 เป็นการออกกฎตรรกศาสตร์คลุมเครือที่ใช้ในการควบคุม เป็นความสัมพันธ์ของข้อมูลอินพุตทั้งสองข้อมูลได้แก่ 1) ค่าความผิดพลาด และ 2) อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด มีสัญญาณเอาต์พุต คือ ค่าคงที่ในการปรับจูน พื้นผิวกฎตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือแสดงดังภาพที่ 3-63



ภาพที่ 3-63 พื้นผิวกฎตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุม

โดยค่าเอาต์พุตที่ได้จากกฎมีค่าความเป็นสมาชิกตั้งแต่ -1 ถึง 1 เพื่อใช้ในการปรับจูนค่าสัดส่วน อนุพันธ์ การปรับจูนค่าสัดส่วนแสดงดังสมการที่ (3-20)

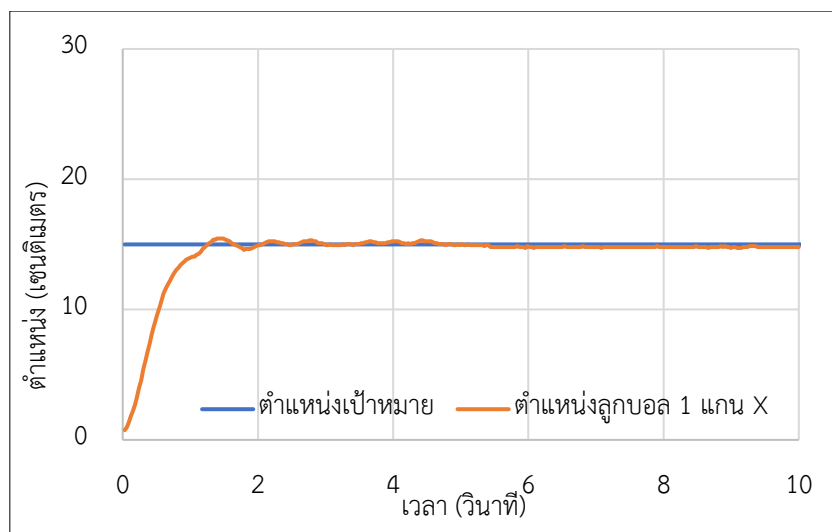
$$K_p = (14 \times \text{output}) + 4 \quad (3-20)$$

และการปรับจูนค่าอนุพันธ์แสดงดังสมการที่ (3-21)

$$K_d = (-6 \times \text{output}) + 10 \quad (3-21)$$

การปรับจูนค่าสัดส่วน อนุพันธ์ที่แสดงดังสมการที่ (3-20) และ (3-21) เป็นการปรับค่าสัดส่วน อนุพันธ์ที่ได้จากทดลองจูนค่าสัดส่วน อนุพันธ์ที่มีประสิทธิภาพในการสร้างเสถียรภาพของลูกบอลจาก ตัวควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์ที่ได้นำเสนอไว้ก่อนหน้านี้ โดยค่าสัดส่วนมีค่าอยู่ในช่วง 4 ถึง 18 และค่า อนุพันธ์มีค่าอยู่ในช่วง 10 ถึง 4 ขึ้นอยู่กับค่าอินพุตที่นำมาคำนวณในระบบ

การทดสอบสมรรถนะตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือในการ ปรับจูนค่าอัตโนมัติ และเก็บผลการตอบสนองเพื่อหาค่า ผลตอบสนองเกิน เวลาตอบสนองสูงสุด เวลา ใต้ เวลาสู่จุดสมดุล และค่าสถานะคงตัว การเข้าตำแหน่งในแนวแกนเอกซ์ แสดงดังภาพที่ 3-64 และ ผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 3-37



ภาพที่ 3-64 การควบคุมตำแหน่งบอลแกนเอกซ์ โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือในการปรับ
จูนอัตโนมัติตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

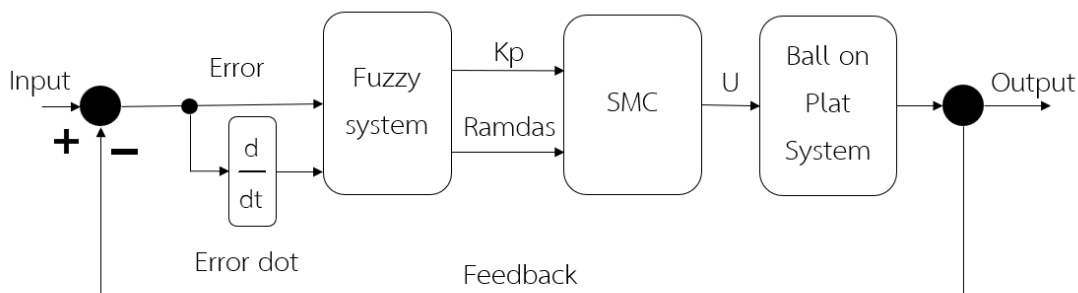
ตารางที่ 3-37 ผลการตอบสนองของการควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ โดยใช้ตรรกศาสตร์
คลุมเครือในการปรับจูนค่าอัตโนมัติในแนวแกนเอกซ์

ผลตอบสนอง	แกนเอกซ์	หน่วย
เวลาไต่ขึ้น	0.773	วินาที
เวลาชั่วคราว	0.915	วินาที
เวลาสู่จุดสมดุล	0.904	วินาที
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล	13.539	เซนติเมตร
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล	15.450	เซนติเมตร
ผลตอบสนองเกิน	2.999	เปอร์เซ็นต์
สถานะความหน่วงน้อย	0.000	เซนติเมตร
สัญญาณสูงสุด	15.450	เซนติเมตร
เวลาตอบสนองสูงสุด	1.429	วินาที

จากตาราง 3-37 ผลการตอบสนองการควบคุมแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุม เวลาไต่ขึ้น 0.773 วินาที เวลาชั่วคราว 0.915 วินาที เวลาสู่จุดสมดุล 0.904 วินาที สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล 13.539 วินาที สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล 15.450 วินาที ผลตอบสนองเกิน 2.999 เปอร์เซ็นต์ สถานะความหน่วงน้อย 0 วินาที สัญญาณสูงสุด 15.450 วินาที และเวลาตอบสนองสูงสุด 1.429 วินาที

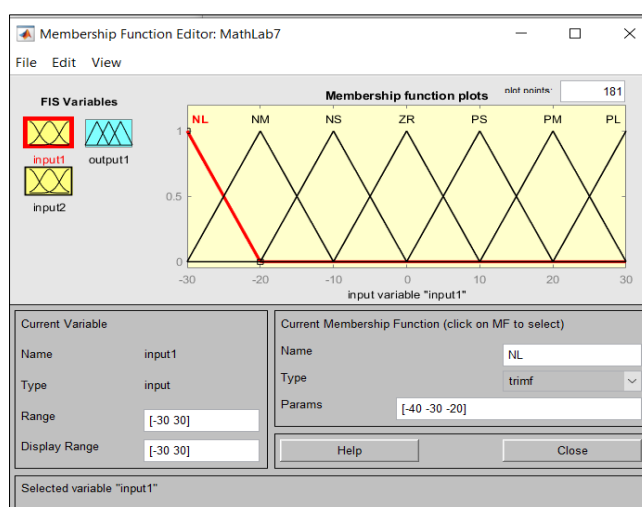
3.3.10 การหาสมรรถนะตัวควบคุมแผ่นเลื่อน โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือในการปรับจูนค่าอัตโนมัติ

ในการออกแบบตัวควบคุมแผ่นเลื่อน โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือในการปรับจูนค่าอัตโนมัติ โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือในการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ สัดส่วน และ แลมบ์ดา แสดงดังภาพที่ 3-65



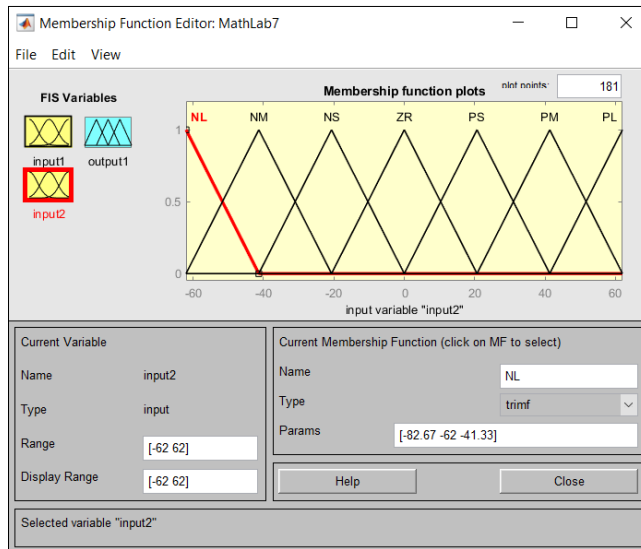
ภาพที่ 3-65 การออกแบบตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือ

ในการออกแบบตัวควบคุมแผ่นเลื่อน โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือในการปรับจูนค่าอัตโนมัติ ใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสามเหลี่ยมรับอินพุต 2 ค่า 1) ค่าความผิดพลาด 2) ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความผิดพลาด โดยค่าความผิดพลาดมีค่าความเป็นสมาชิกตั้งแต่ -30 ถึง 30 มีสมาชิก 7 สมาชิกประกอบด้วย NB NM NS ZR PS PM และ PB ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสามเหลี่ยม การออกแบบสมาชิกอินพุตค่าความผิดพลาดแสดงดังภาพที่ 3-66



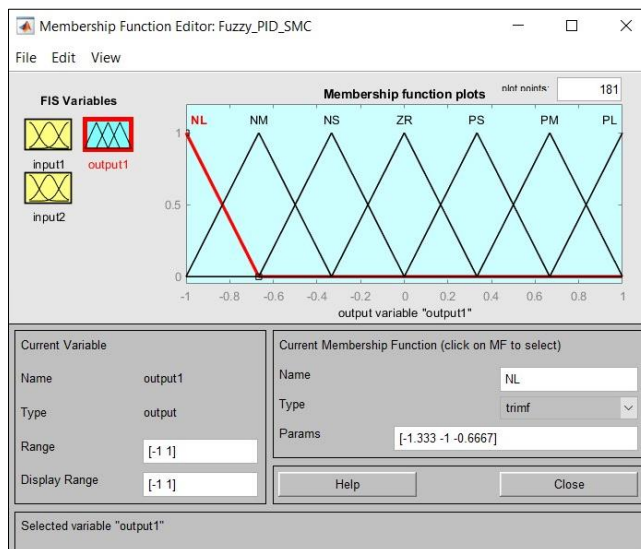
ภาพที่ 3-66 สมาชิกอินพุตค่าความผิดพลาด

และอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด มีค่าความเป็นสมาชิกตั้งแต่ -60 ถึง 60 มีสมาชิก 7 สมาชิกประกอบด้วย NB NM NS ZR PS PM และ PB ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสามเหลี่ยม การออกแบบสมาชิกอินพุตอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดแสดงดังภาพที่ 3-67



ภาพที่ 3-67 การออกแบบสมาชิกอินพุตอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด

ค่าเอาต์พุต มีค่าความเป็นสมาชิกตั้งแต่ -1 ถึง 1 มีสมาชิก 7 สมาชิกประกอบด้วย NB NM NS ZR PS PM และ PB การออกแบบสมาชิกฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสามเหลี่ยมแสดงดังภาพที่ 3-68



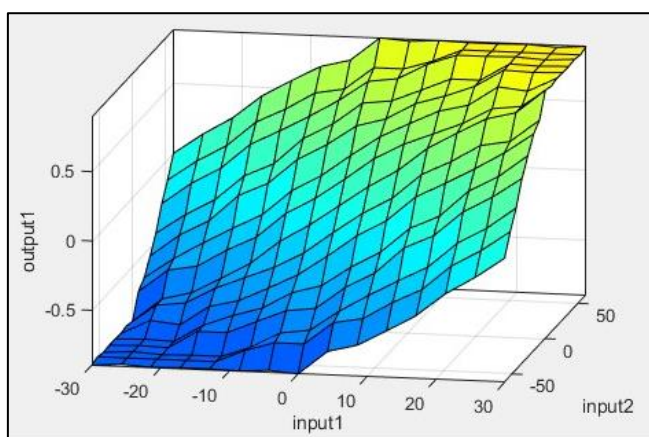
ภาพที่ 3-68 การออกแบบสมาชิกเอาต์พุต

แสดงกฎตรรกศาสตร์คลุมเครือที่ใช้ในการควบคุม ประกอบไปด้วยอินพุต 2 ค่า 1) ค่าความผิดพลาด และ 2) อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด มีสัญญาณเอาต์พุต คือ ค่าคงที่ในการปรับจูน กฎตรรกศาสตร์คลุมเครือที่ใช้ในการควบคุมตัวควบคุมแผ่นเลื่อน โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือแสดงดังตารางที่ 3-38

ตารางที่ 3-38 กฎตรรกศาสตร์คลุมเครือที่ใช้ในการควบคุมตัวควบคุมแผ่นเลื่อน โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือ

e.dot/e	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZR
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZR	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZR	PS	PM
ZR	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZR	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZR	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZR	PS	PM	PB	PB	PB	PB

จากตารางที่ 3-36 เป็นการออกกฎตรรกศาสตร์คลุมเครือที่ใช้ในการควบคุม เป็นความสัมพันธ์ของข้อมูลอินพุตทั้ง 2 ข้อมูลได้แก่ 1) ค่าความผิดพลาด และ 2) อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด มีสัญญาณเอาต์พุต คือ ค่าคงที่ในการปรับจูน พื้นผิวกฎตัวควบคุมแผ่นเลื่อน โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือแสดงดังภาพที่ 3-69



ภาพที่ 3-69 พื้นผิวกฎตัวควบคุมแผ่นเลื่อน โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือ

โดยค่าเอาต์พุตที่ได้จากกฎมีค่าความเป็นสมาชิกตั้งแต่ -1 ถึง 1 เพื่อใช้ในการปรับจูนค่าสัดส่วน และค่าแลมบ์ดา การปรับจูนค่าสัดส่วนแสดงดังสมการที่ (3-22)

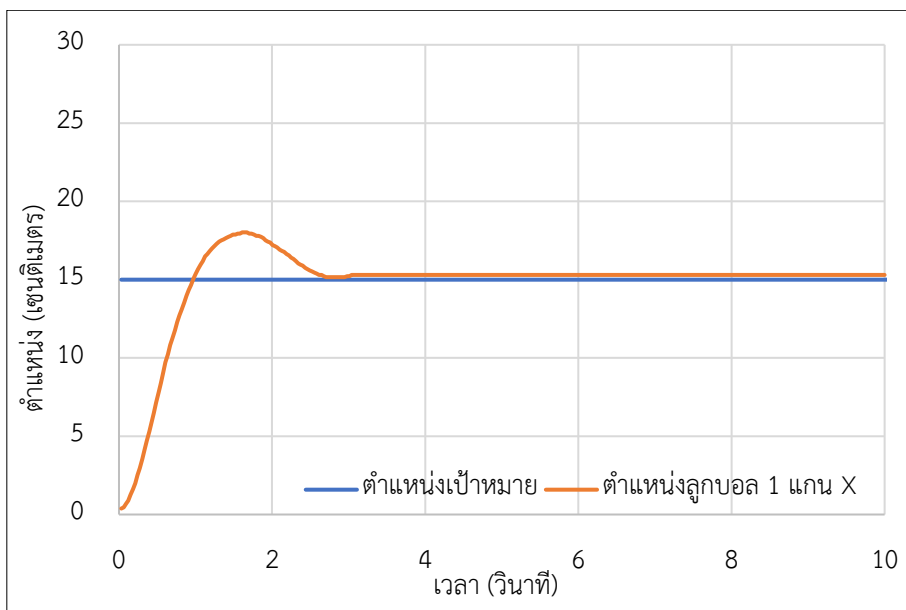
$$K_p = 1.3 \times (\text{output}) + 0.7 \quad (3-22)$$

และการปรับจูนแลมบ์ดาแสดงดังสมการที่ (3-23)

$$\lambda = (-0.2 \times \text{output}) + 0.98 \quad (3-23)$$

การปรับจูนค่าสัดส่วน และค่าแลมบ์ดาที่แสดงดังสมการที่ (3-22) และ (3-23) เป็นการปรับค่าสัดส่วน และค่าแลมบ์ดาที่ได้จากทดลองจูนค่าสัดส่วน และค่าแลมบ์ดาที่มีประสิทธิภาพในการสร้างเสถียรภาพของลูกบอลจากตัวควบคุมแผ่นเลื่อนที่ได้นำเสนอไว้ก่อนหน้านี้ โดยค่าสัดส่วนอยู่ในช่วง 2 ถึง 3 และค่าแลมบ์ดาอยู่ในช่วง 0.98 ถึง 0.96 ขึ้นอยู่กับค่าอินพุตที่นำมาคำนวณในระบบ

การทดสอบสมรรถนะตัวควบคุมแผ่นเลื่อน โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือในการปรับจูนค่าอัตโนมัติ และเก็บผลการตอบสนองเพื่อหาค่า ผลตอบสนองเกิน เวลาตอบสนองสูงสุด เวลาไต่ เวลาสู่จุดสมดุล และค่าสถานะคงตัว การเข้าตำแหน่งในแนวแกนเอกซ์แสดงดังภาพที่ 3-70 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 3-39



ภาพที่ 3-70 การควบคุมตำแหน่งบอลแกนเอกซ์ ตัวควบคุมแผ่นเลื่อนโดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือ ในการปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

ตารางที่ 3-39 ผลการตอบสนองของการควบคุมแผ่นดินเลื่อน โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือในการปรับ
 จูนค่าอัตโนมัติในแนวแกนเอกซ์

ผลตอบสนอง	แกนเอกซ์	หน่วย
เวลาไต่ขึ้น	0.677	วินาที
เวลาชั่วคราว	2.266	วินาที
เวลาสู่จุดสมดุล	2.260	วินาที
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล	13.539	เซนติเมตร
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล	18.022	เซนติเมตร
ผลตอบสนองเกิน	20.149	เปอร์เซ็นต์
สภาวะความหน่วงน้อย	0.000	เซนติเมตร
สัญญาณสูงสุด	18.022	เซนติเมตร
เวลาตอบสนองสูงสุด	1.641	วินาที

จากตาราง 3-39 ผลการตอบสนองการควบคุมแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุม เวลาไต่ขึ้น 0.677 วินาที เวลาชั่วคราว 2.266 วินาที เวลาสู่จุดสมดุล 2.260 วินาที สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล 13.539 วินาที สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล 18.022 วินาที ผลตอบสนองเกิน 20.149 เปอร์เซ็นต์ สภาวะความหน่วงน้อย 0 วินาที สัญญาณสูงสุด 18.022 วินาที และเวลาตอบสนองสูงสุด 1.641 วินาที

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

ในการดำเนินงานของโครงการระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น ผู้จัดทำโครงการเสนอ ผลการดำเนินงานโดยมีการประเมินผล ตามหัวข้อต่อไปนี้

4.1 ผลการสร้างระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น

4.1.1 ผลของการสร้างทางกล

4.1.2 ผลของการสร้างทางไฟฟ้า

4.2 ผลสมรรถนะระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น

4.2.1 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์

4.2.1.1 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์แกนเอกซ์

4.2.1.2 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์แกนวาย

4.2.1.3 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์สองแกน

4.2.2 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมแผ่นเลื่อน

4.2.2.1 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมแผ่นเลื่อนแกนเอกซ์

4.2.2.2 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมแผ่นเลื่อนแกนวาย

4.2.2.3 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมแผ่นเลื่อนสองแกน

4.2.3 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ

4.2.3.1 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือแกนเอกซ์

4.2.3.2 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือแกนวาย

4.2.3.3 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือแกนสองแกน

4.2.4 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์แบบปรับค่าอัตโนมัติ

4.2.3.1 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์แบบปรับค่าอัตโนมัติ แกนเอกซ์

4.2.3.2 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์แบบปรับค่าอัตโนมัติ แกนวาย

4.2.3.3 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์แบบปรับค่าอัตโนมัติ สองแกน

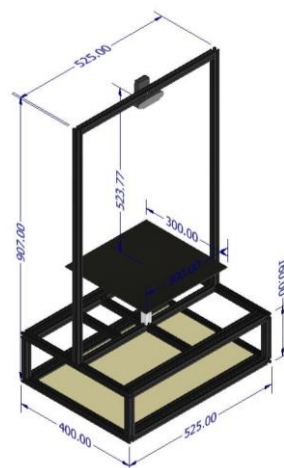
- 4.2.5 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับค่าอัตโนมัติ
 - 4.2.5.1 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับค่าอัตโนมัติแกนเอกซ์
 - 4.2.5.2 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับค่าอัตโนมัติแกนวาย
 - 4.2.5.3 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับค่าอัตโนมัติสองแกน
- 4.2.6 ผลการเปรียบเทียบการเข้าสู่ตำแหน่งของทุกตัวควบคุม
 - 4.2.6.1 ผลการเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนเอ็กซ์
 - 4.2.6.2 ผลการเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนวาย
 - 4.2.6.3 ผลการเปรียบเทียบตัวควบคุมสองแกน

4.1 ผลการออกแบบและสร้างระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น

ผลการสร้างระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น จากกระบวนการในการสร้างระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น เพื่อในการทดสอบสมรรถนะตัวควบคุมแบ่งเป็น 2 หัวข้อ คือ 1) ผลของสร้างทางกล และผลของการสร้างทางไฟฟ้า

4.1.1 ผลของการสร้างทางกล

4.1.1.1 ผลของการสร้างโครงสร้าง ขั้นตอนการสร้างระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่นมี ปัจจัยที่สำคัญในการออกแบบโครงสร้าง คือ การเลือกใช้เซนเซอร์ จากการเลือกใช้เซนเซอร์ใช้กล้อง ในการตรวจจับตำแหน่งของลูกบอล ทำให้โครงสร้างมีความสูงเท่ากับระยะการทำงานของกล้อง จาก การคำนวณระยะการทำงานของกล้องต้องใช้ระยะทำงาน 524 มิลลิเมตร แสดงการออกแบบ โครงสร้างโมเดล สามมิติ ด้วยโปรแกรมซอลิเดอวิคส์แสดงดังภาพที่ 4-1 และการประกอบโครงสร้าง จริงแสดงดังภาพที่ 4-2



ภาพที่ 4-1 การออกแบบโครงสร้างโมเดล 3 มิติ ด้วยโปรแกรมซอลิเดอวิคส์



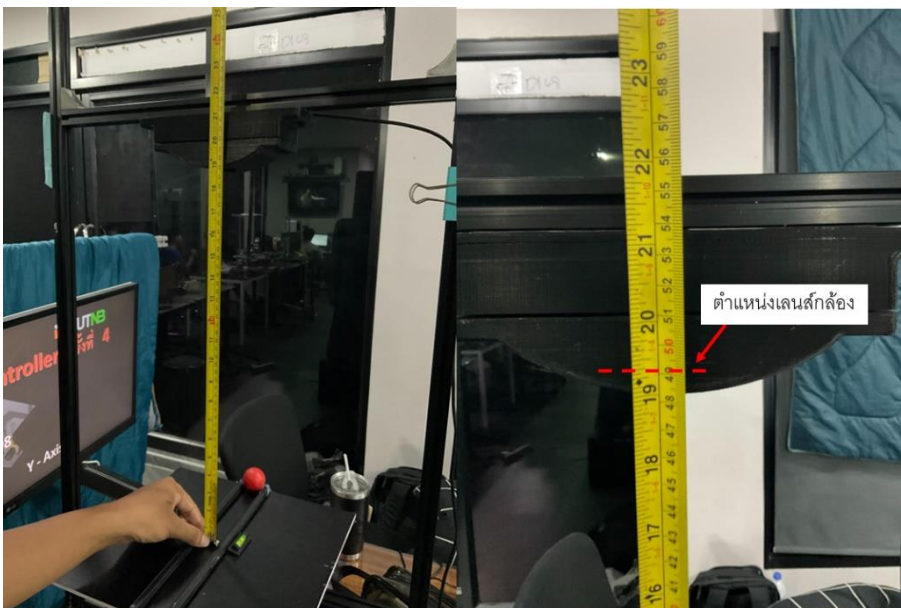
ภาพที่ 4-2 การประกอบโครงสร้างจริง

ติดตั้งกล้องให้มีพื้นที่ในการรับภาพ 790 มิลลิเมตร เพื่อใช้ในการคำนวณระยะความสูงจากเลนส์กล้องถึงพื้นที่ในการตรวจจับแสดงดังภาพที่ 4-3



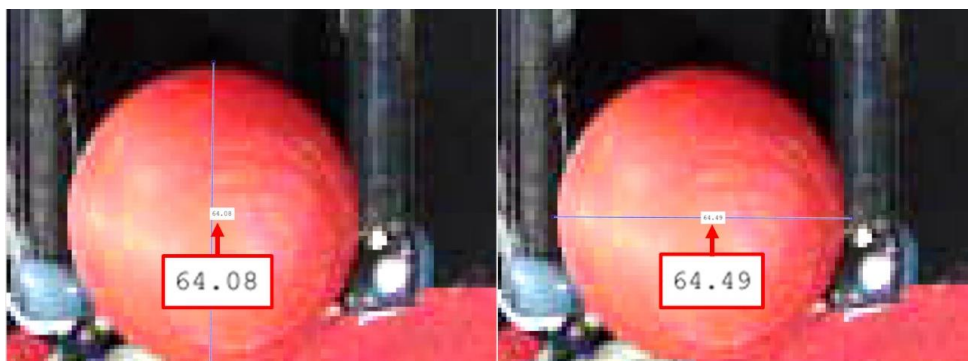
ภาพที่ได้จากกล้องเว็บแคม ภาพการวัดจริง
ภาพที่ 4-3 การทดสอบพื้นที่ในการรับภาพของกล้อง

เมื่อทดสอบพื้นที่ในการรับภาพของกล้องแล้ว จากการคำนวณความสูงจากระยะเลนส์กล้องถึงพื้นที่ในการตรวจจับ ค่าที่ได้จากการคำนวณระยะทาง 524 มิลลิเมตร ทำการวัดระยะความสูงจริงจากเลนส์กล้องถึงพื้นที่ในการรับภาพ มีระยะทางประมาณ 490 มิลลิเมตร มีค่าความผิดพลาดจากการคำนวณ 34 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 4-4



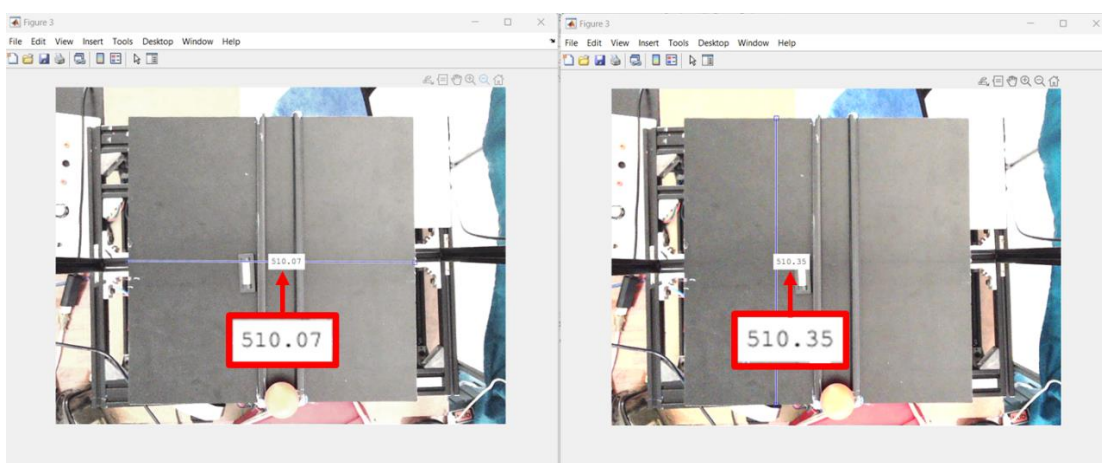
ภาพที่ 4-4 การประกอบโครงสร้างจริง

จากการคำนวณความกว้าง และความสูงพิกเซลของลูกบอลความกว้างมีขนาด 60.87 และความสูงมีขนาด 60.03 พิกเซล เมื่อทำการวัดพิกเซลของลูกบอลจริงมีความขนาดกว้างที่ 64.49 พิกเซล มีความสูงอยู่ที่ 64.08 พิกเซล มีค่าความผิดพลาดความกว้างอยู่ที่ 3.62 พิกเซล และค่าความผิดพลาดความสูงอยู่ที่ 4.05 พิกเซล มีขนาดใกล้เคียงกับการคำนวณแสดงดังภาพที่ 4-5



ภาพที่ 4-5 ความกว้าง และความสูงพิกเซลของลูกบอล

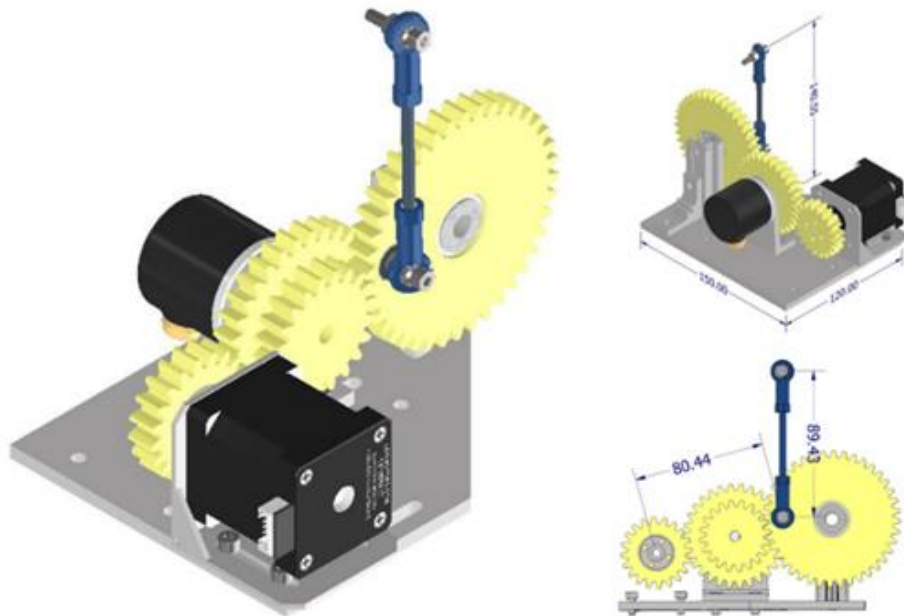
หาขนาดพิกเซลของแผ่นกระดาษที่ใช้ในแกนเอกซ์ และแกนวายมีขนาดจากการคำนวณอยู่ที่ 521.74 พิกเซล และ 514.58 ตามลำดับ เมื่อทำการวัดจริงมีขนาดพิกเซลที่ใช้ในแกนเอกซ์อยู่ที่ 510.07 และขนาดในแกนเอกซ์อยู่ที่ 510.35 มีขนาดใกล้เคียงจากการคำนวณโดยมีค่าความผิดพลาดในแนวแกนเอกซ์อยู่ที่ 11.67 พิกเซล และมีค่าความผิดพลาดในแนวแกนวายอยู่ที่ 4.51 พิกเซล โดยการวัดพิกเซลแสดงดังภาพที่ 4-6



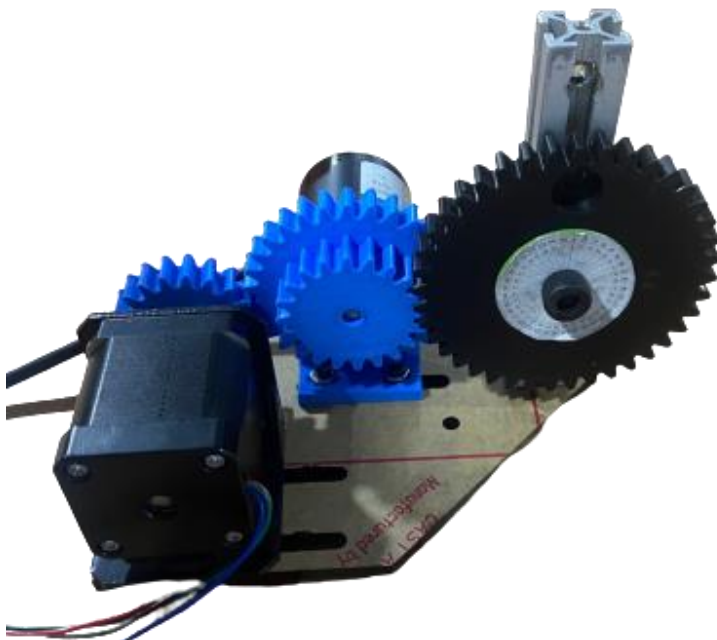
ภาพที่ 4-6 ขนาดพิกเซลของแผ่นกระดาษ

สรุปผลการติดตั้งกล่องเพื่อใช้ในการจับตำแหน่ง จากการคำนวณระยะทางจากเลนส์กล่องถึงพื้นที่ในการตรวจจับ ระยะที่ใช้ในการติดตั้งมีระยะทาง 490 มิลลิเมตร

ผลการสร้างชุดส่งกำลังมอเตอร์ เพื่อใช้ในการสร้างองศาของแผ่นกระดาน ออกแบบชุดส่งกำลังด้วยโปรแกรมซอลิเดอวิคส์แสดงดังภาพที่ 4-7 และการประกอบชุดส่งกำลังจริงแสดงดังภาพที่ 4-8



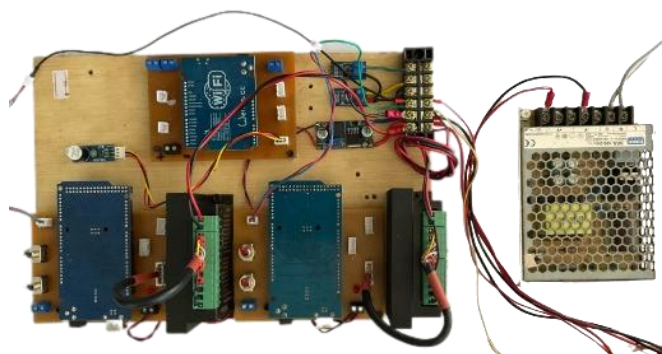
ภาพที่ 4-7 การออกแบบโครงชุดส่งกำลังด้วยโปรแกรมซอลิเดอวิคส์



ภาพที่ 4-8 ชุดส่งกำลังจริงด้วยโปรแกรมซอลิเดอวิคส์

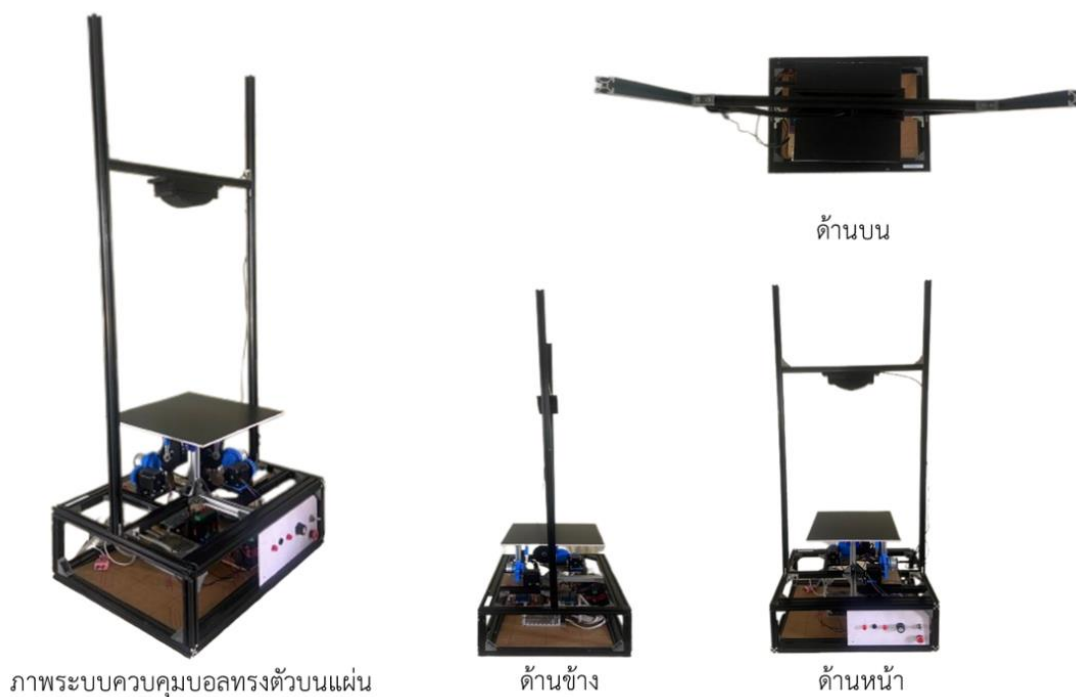
4.1.2 ผลของการออกแบบและสร้างทางไฟฟ้า

การออกแบบวงจรไฟฟ้าเพื่อสร้างวงจรควบคุมสเตปมอเตอร์ การสร้างวงจรไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่ใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น อาศัยโน บอร์ดไดรฟ์มอเตอร์ เอนโคตเตอร์ และแหล่งจ่ายไฟฟ้าเพื่อสร้างวงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุมอุปกรณ์สเตปมอเตอร์ ผลการเชื่อมต่ออุปกรณ์แสดงดังภาพที่ 4-9



ภาพที่ 4-9 การเชื่อมต่ออุปกรณ์วงจรไฟฟ้า

เมื่อทำออกแบบโครงสร้างทางกล และทางไฟฟ้าสำเร็จแล้ว นำทั้งสองส่วนมาประกอบเข้าด้วยกันเพื่อให้ระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่นสมบูรณ์แสดงดังภาพที่ 4-10



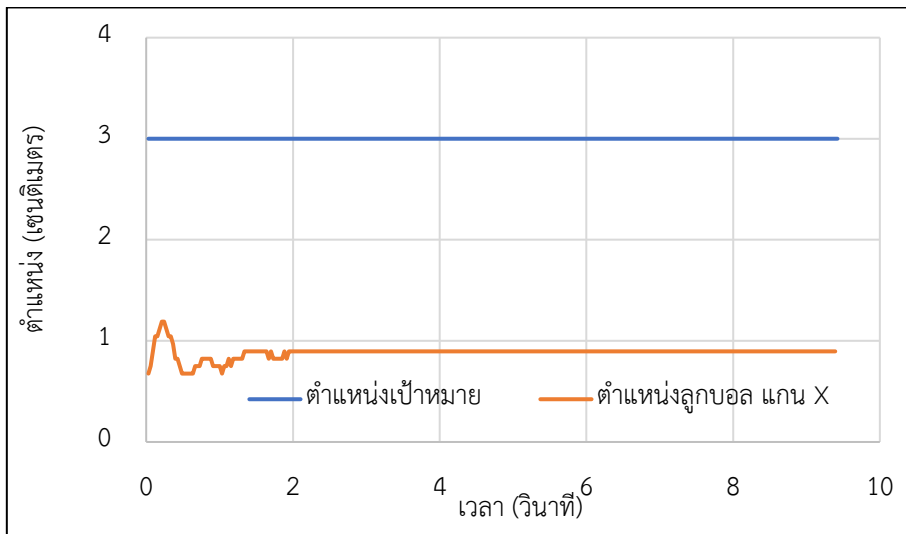
ภาพที่ 4-10 ภาพระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น

4.2 ผลสมรรถนะระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น

4.2.1 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์

4.2.1.1 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนเอกซ์

4.2.1.1.1 ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนเอกซ์แสดงดังภาพที่ 4-11 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-1

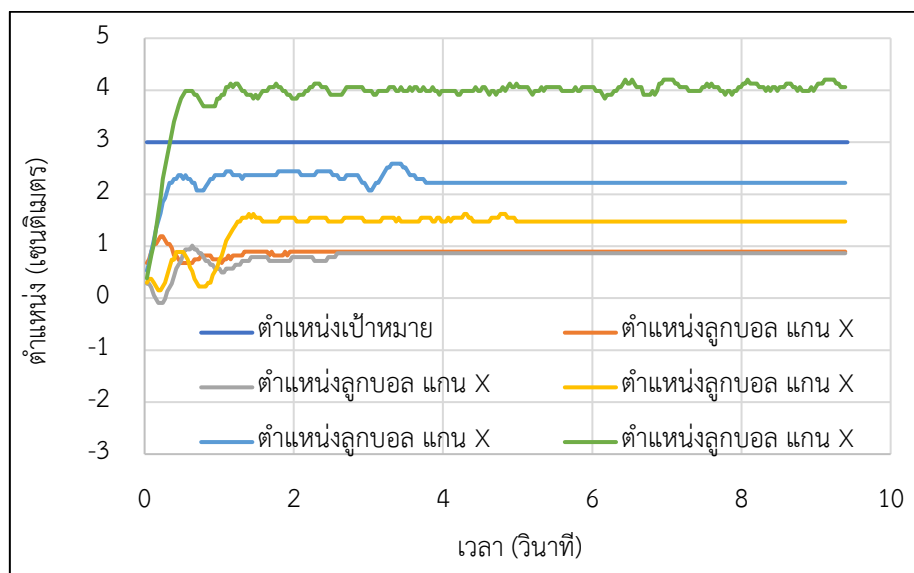


ภาพที่ 4-11 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-1 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	-
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	-
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	-
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	-
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	-
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	1.191
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	0.243

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-12 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-2

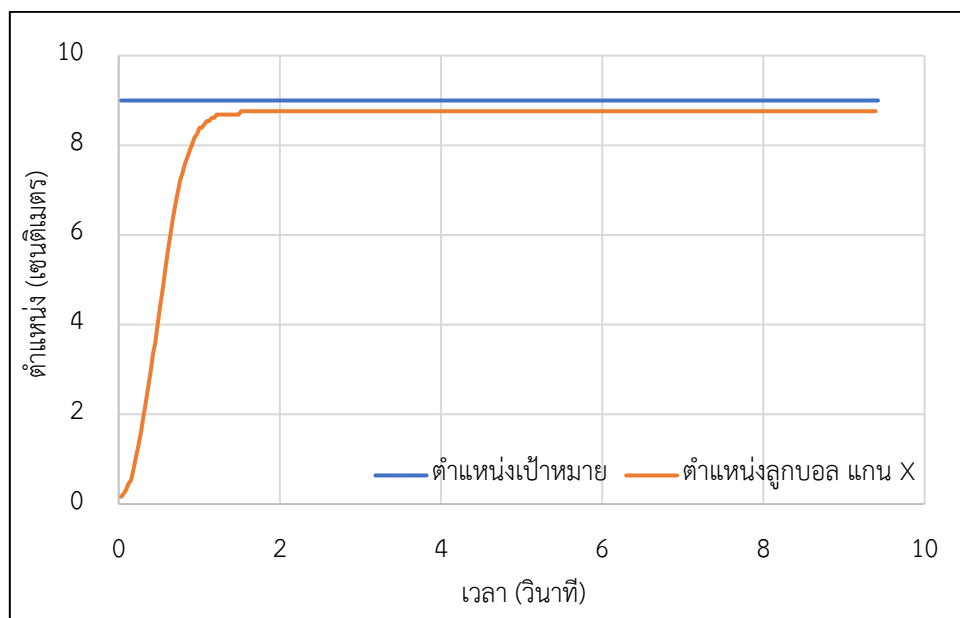


ภาพที่ 4-12 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-2 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	-	-	-	-	0.280	-	0.280
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-	-	-	-	-	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	-	-	-	-	-	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	-	-	-	-	2.734	-	2.734
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	-	-	-	-	4.204	-	4.204
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	-	-	-	-	40.143	-	40.143
สภาวะหวนน้อย (เซนติเมตร)	-	3.040	-	-	-	-	3.040
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	1.191	1.011	1.621	2.587	4.204	1.314	2.123
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	0.243	0.669	1.429	3.343	6.474	2.553	2.432

4.2.1.1.2 ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แวนแกนเอกซ์ แสดงดังภาพที่ 4-13 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-3

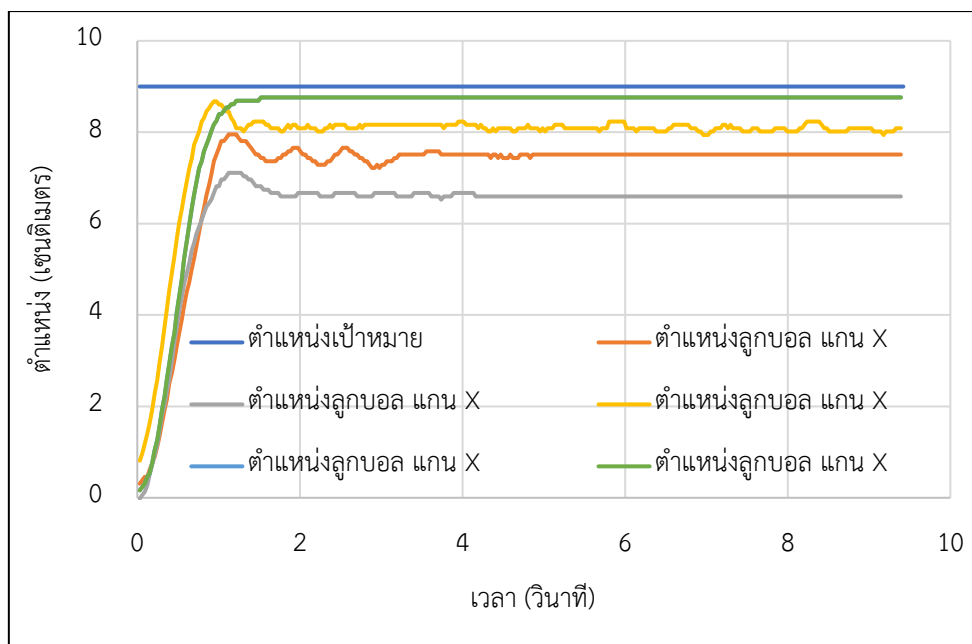


ภาพที่ 4-13 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-3 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.729
เวลาชั่วคราว (วินาที)	0.961
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	0.958
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	8.173
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	8.761
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	-
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	-
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	8.761
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.550

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-14 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-4

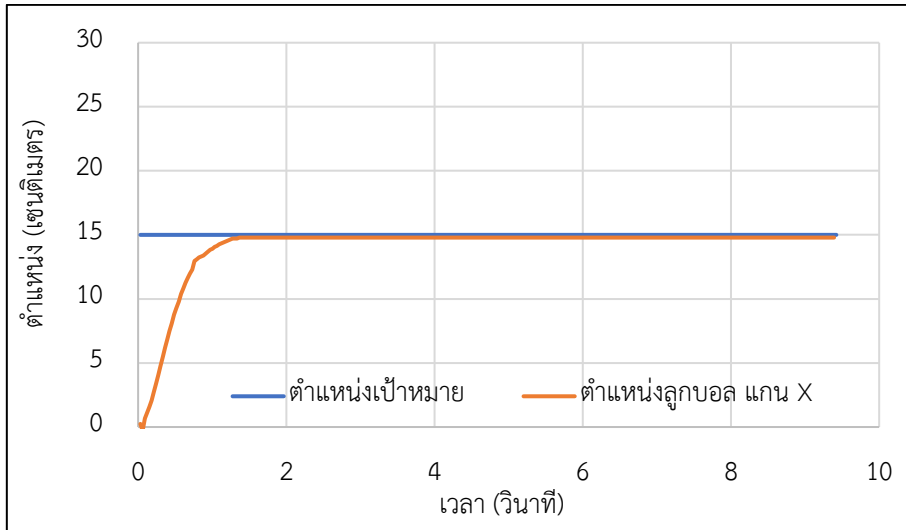


ภาพที่ 4-14 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-4 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	-	-	0.723	0.729	0.729	0.004	0.727
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-	-	0.961	0.961	0.000	0.961
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	-	-	0.958	0.958	0.000	0.958
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	-	-	7.942	8.173	8.173	0.134	8.096
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	-	-	8.677	8.761	8.761	0.049	8.733
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สภาวะหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	1.013	0.000	0.000	0.000	0.453	0.203
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	7.953	7.112	8.677	8.761	8.761	0.723	8.253
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.155	1.155	0.973	1.550	1.550	0.261	1.277

4.2.1.1.3 ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แนวแกนเอกซ์แสดงดังภาพที่ 4-15 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-5

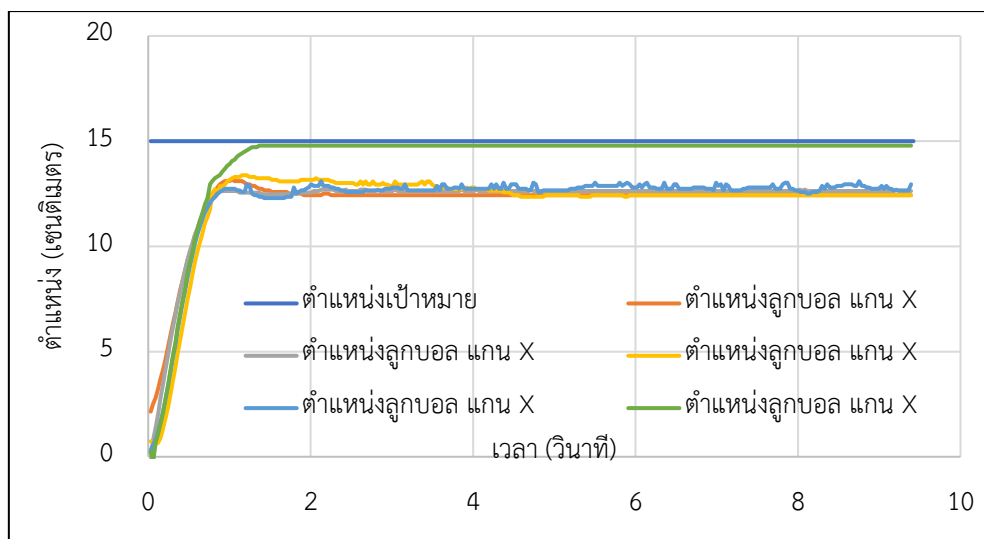


ภาพที่ 4-15 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-5 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.756
เวลาชั่วคราว (วินาที)	0.925
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	0.934
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	13.539
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	14.788
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	-
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	2.841
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	14.788
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.398

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้ง แสดงดังภาพที่ 4-16 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-6

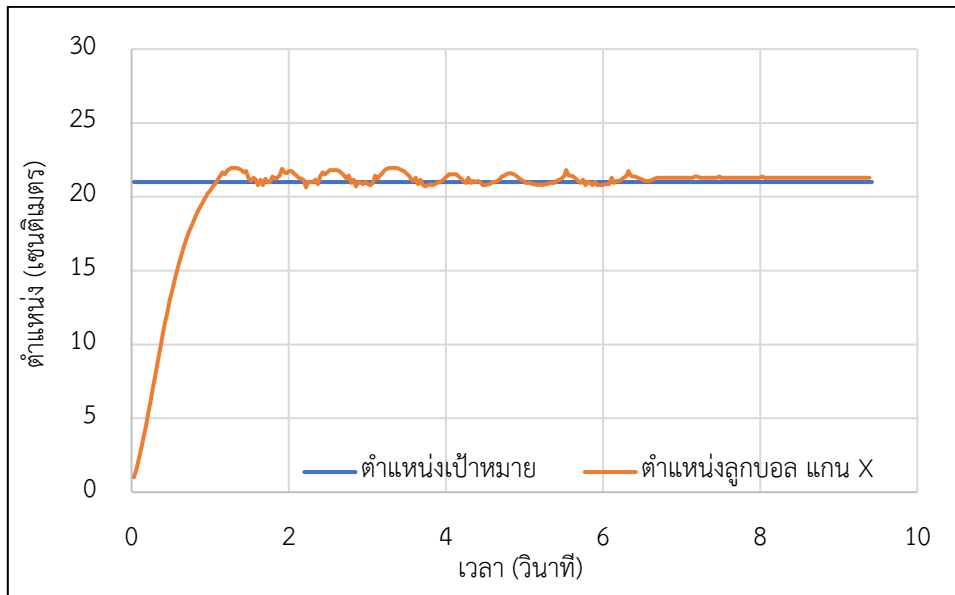


ภาพที่ 4-16 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ความคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-6 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาได้ขึ้น (วินาที)	-	-	-	-	0.756	-	0.756
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-	-	-	0.925	-	0.925
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	-	-	-	0.934	-	0.934
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	-	-	-	-	13.539	-	13.539
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	-	-	-	-	14.788	-	14.788
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	5.018	0.000	0.000	2.841	2.286	1.572
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	13.171	12.698	13.381	13.381	14.788	0.781	13.484
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.064	2.158	1.185	1.185	1.398	0.441	1.398

4.2.1.1.4 ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แนวแกนเอกซ์ แสดงดังภาพที่ 4-17 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-7

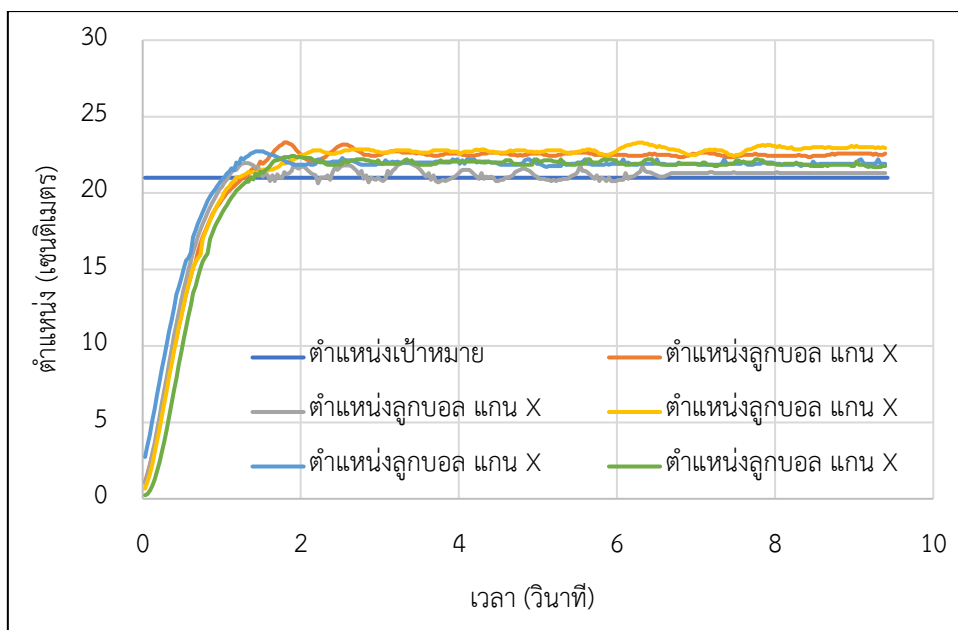


ภาพที่ 4-17 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-7 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร

สมรรถนะระบบ	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.752
เวลาชั่วคราว (วินาที)	0.869
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	0.863
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	19.127
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	21.974
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	4.637
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	21.974
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.307

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้ง แสดงดังภาพที่ 4-18 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-8

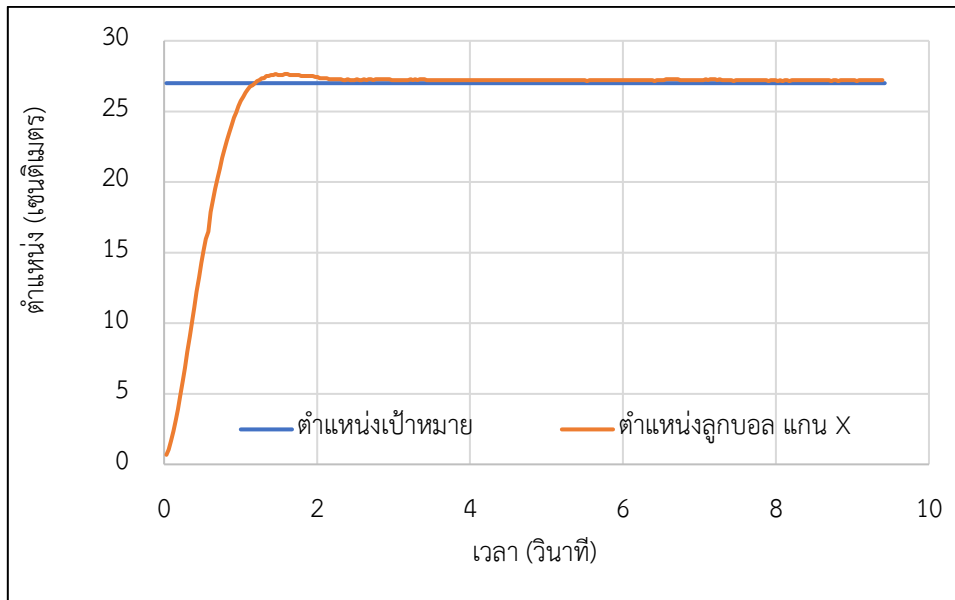


ภาพที่ 4-18 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-8 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.864	0.752	0.818	0.791	0.791	0.041	0.803
เวลาชั่วคราว (วินาที)	0.999	0.869	0.974	0.848	0.848	0.073	0.908
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	0.992	0.863	0.972	0.832	0.832	0.078	0.898
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	18.981	19.127	18.908	19.127	19.127	0.103	19.054
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	22.923	21.974	22.996	22.339	22.339	0.434	22.514
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	9.156	4.637	9.503	6.375	6.375	2.065	7.209
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	22.923	21.974	22.996	22.339	22.339	0.434	22.514
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.824	1.307	6.292	1.459	1.459	2.146	2.468

4.2.1.1.5 ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมสัดส่วน
ปริพันธ์ อนุพันธ์ แนวแกนเอกซ์แสดงดังภาพที่ 4-19 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-9

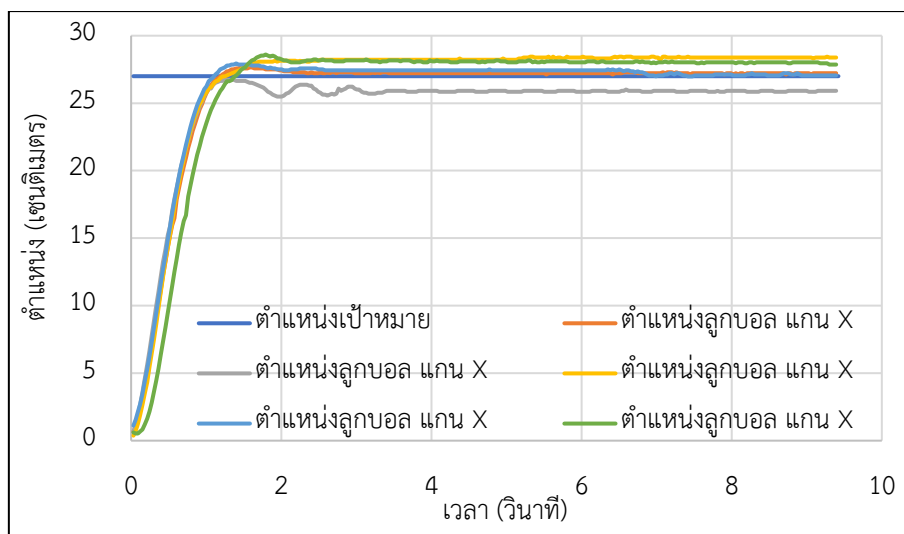


ภาพที่ 4-19 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-9 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

สมรรถนะระบบ	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.729
เวลาชั่วคราว (วินาที)	0.884
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	0.879
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	24.343
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	27.945
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	3.499
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	-
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	27.945
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	0.243

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ย
ของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร ทั้ง 5
ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-20 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-10



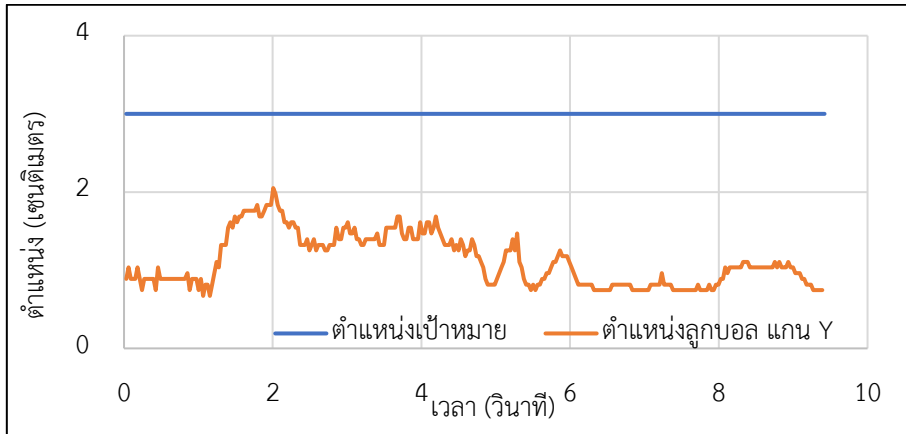
ภาพที่ 4-20 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-10 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.763	0.759	0.715	0.729	0.782	0.027	0.750
เวลาชั่วคราว (วินาที)	0.931	0.913	0.901	0.884	1.085	0.081	0.943
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	0.929	0.911	0.900	0.879	1.081	0.081	0.940
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	24.564	24.311	24.479	24.343	24.49 0	0.107	24.437
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	27.651	26.736	28.448	27.945	28.60 6	0.744	27.877
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	2.410	0.000	5.364	3.499	5.949	2.392	3.445
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	27.651	26.736	28.448	27.945	28.60 6	0.744	27.877
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.489	1.277	5.349	1.429	1.824	1.731	2.274

4.2.1.2 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนวาย

4.2.1.2.1 ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนวาย แสดงดังภาพที่ 4-21 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-11

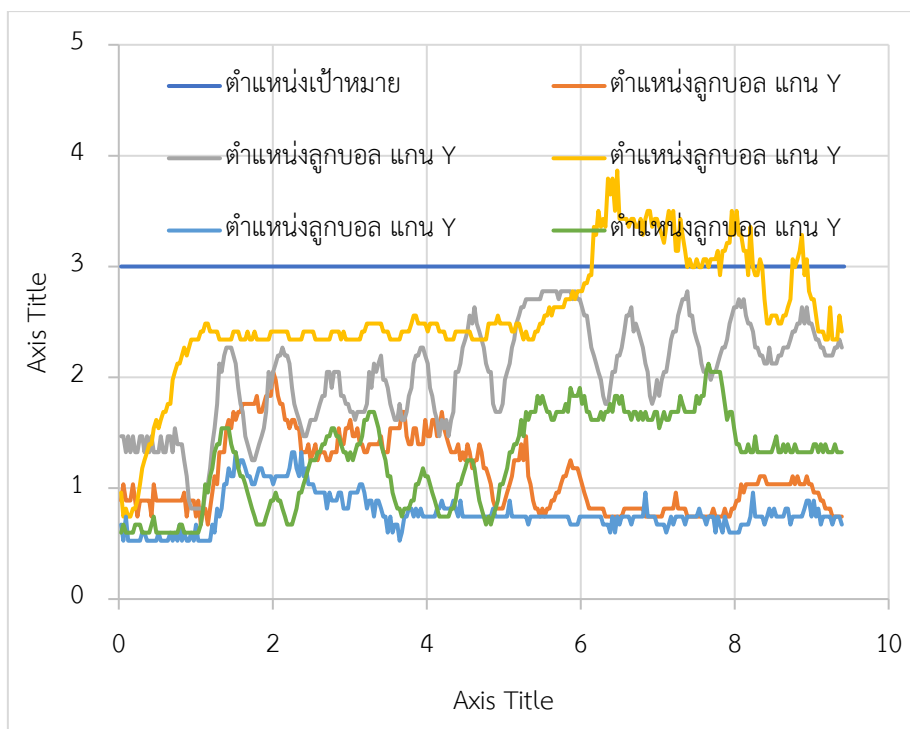


ภาพที่ 4-21 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนวายตำแหน่ง 3 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-11 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนวายตำแหน่ง 3 เซนติเมตร

สมรรถนะระบบ	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	-
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	-
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	-
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	-
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	-
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	2.051
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	2.036

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-22 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-12

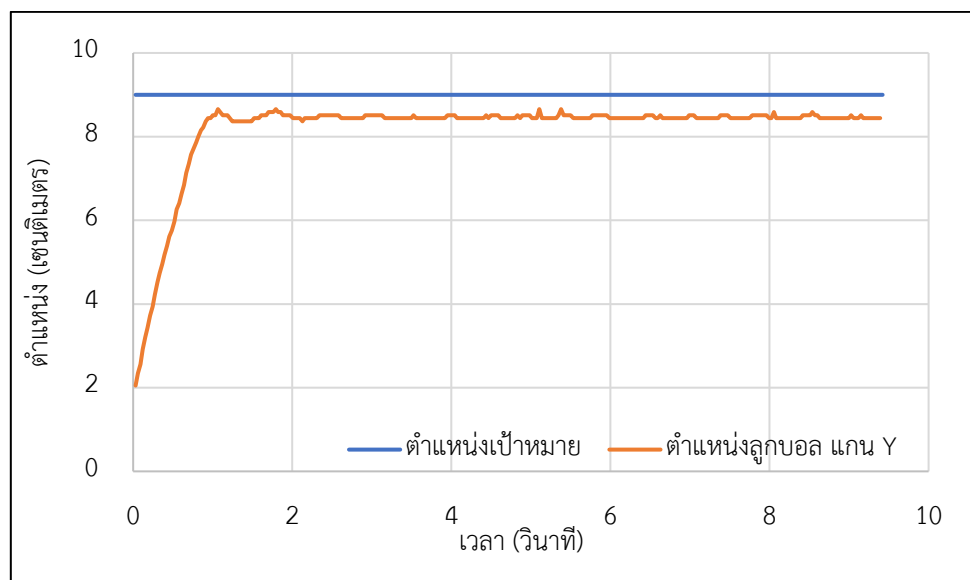


ภาพที่ 4-22 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนวายตำแหน่ง 3 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-12 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนวายตำแหน่ง 3 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาได้ขึ้น (วินาที)	-	5.287	5.804	-	-	0.365	5.545
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-	-	-	-	-	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	-	-	-	-	-	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	-	1.760	2.341	-	-	0.411	2.051
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	-	2.777	3.866	-	-	0.770	3.321
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	0.000	0.000	28.860	0.000	0.000	12.907	5.772
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	2.051	2.777	3.866	1.325	2.123	0.954	2.428
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	2.036	5.532	6.504	1.550	7.690	2.734	4.663

4.2.1.2.1 ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แนวแกนวาย แสดงดังภาพที่ 4-23 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-13

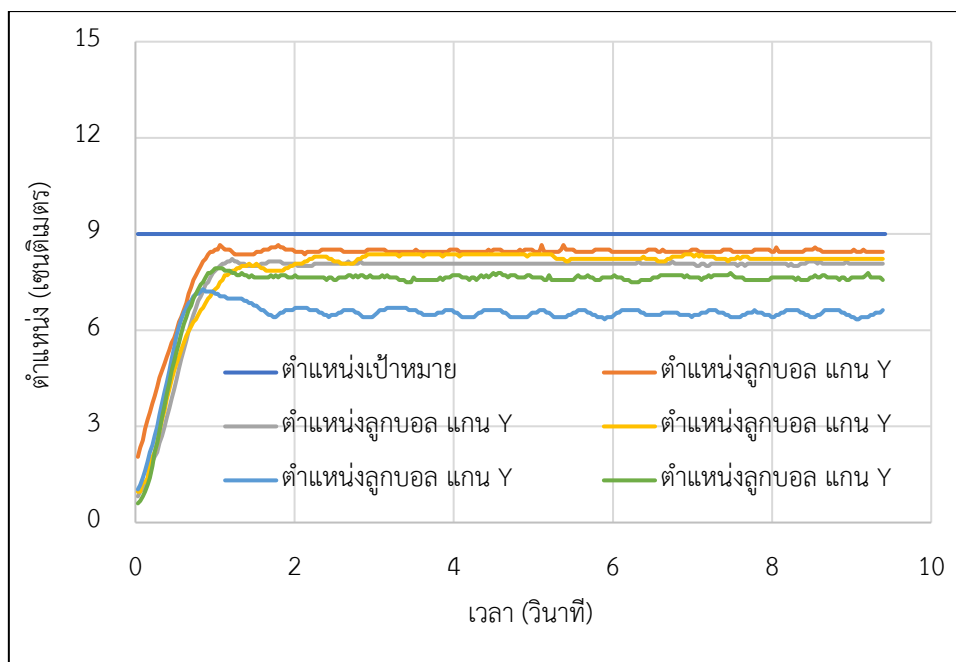


ภาพที่ 4-23 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนวายตำแหน่ง 9 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-13 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร

สมรรถนะระบบ	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.841
เวลาชั่วคราว (วินาที)	0.928
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	0.871
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	8.149
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	8.657
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	0.000
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	8.657
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.094

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-24 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-14

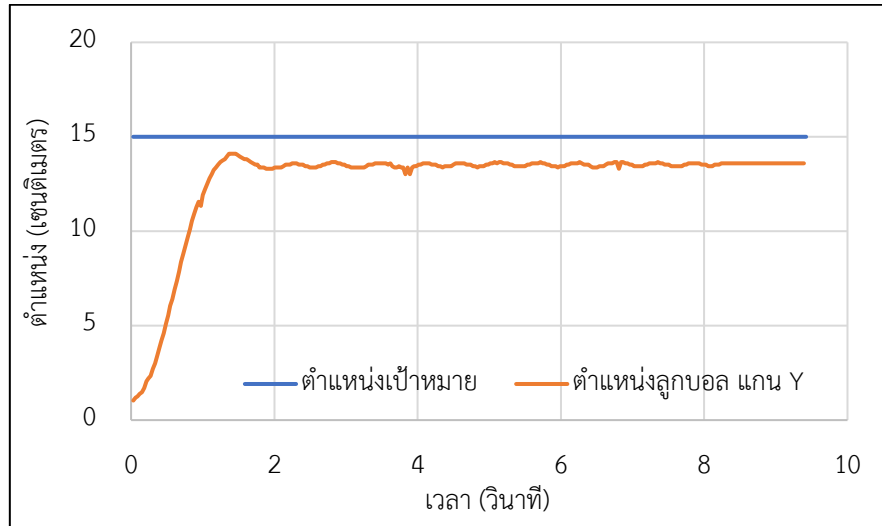


ภาพที่ 4-24 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนวายตำแหน่ง 9 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-14 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาได้ขึ้น (วินาที)	-	5.287	5.804	-	-	0.365	5.545
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-	-	-	-	-	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	-	-	-	-	-	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	-	1.760	2.341	-	-	0.411	2.051
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	-	2.777	3.866	-	-	0.770	3.321
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	0.000	0.000	28.860	0.000	0.000	12.907	5.772
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	2.051	2.777	3.866	1.325	2.123	0.954	2.428
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	2.036	5.532	6.504	1.550	7.690	2.734	4.663

4.2.1.2.3 ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แนวแกนวาย แสดงดังภาพที่ 4-25 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-15

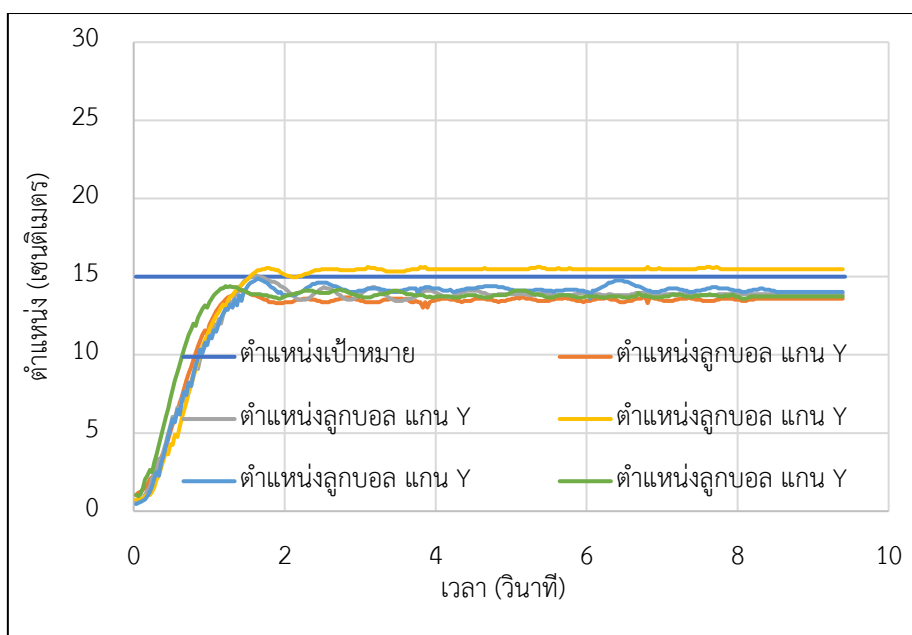


ภาพที่ 4-25 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนวายตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-15 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

สมรรถนะระบบ	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	1.055
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	8.167
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	13.013
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	14.102
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	0.000
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	14.102
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.398

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-26 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-16

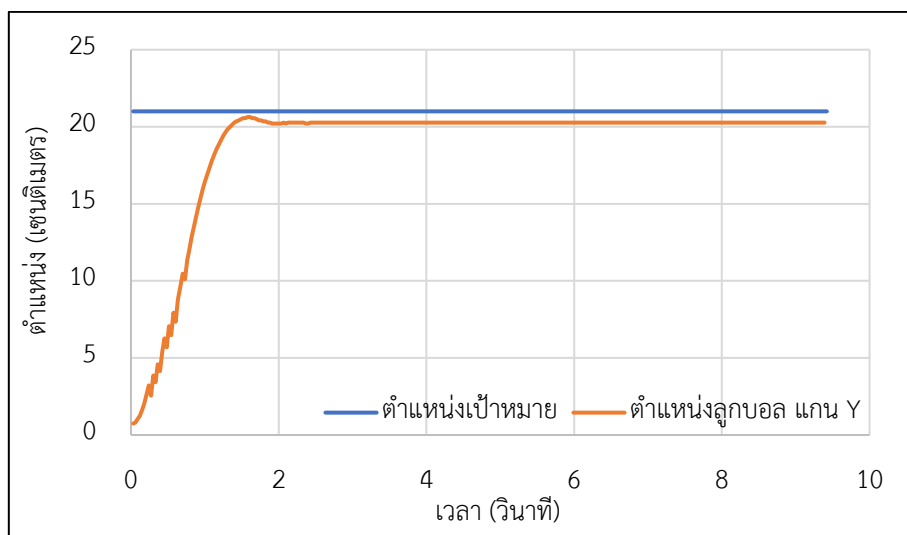


ภาพที่ 4-26 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนวายตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-16 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนวายตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	1.055	1.119	0.984	1.103	0.897	0.092	1.032
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	3.663	1.294	1.464	1.063	1.206	1.871
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	8.167	3.608	1.284	1.462	1.051	3.005	3.114
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	13.013	13.449	13.667	13.159	13.594	0.281	13.376
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	14.102	15.046	15.627	14.901	14.393	0.593	14.814
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	0.000	0.308	4.180	0.000	0.000	1.840	0.898
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	14.102	15.046	15.627	14.901	14.393	0.593	14.814
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.398	1.641	3.131	1.672	1.246	0.755	1.818

4.2.1.2.4 ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แนวแกนวาย แสดงดังภาพที่ 4-27 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-17

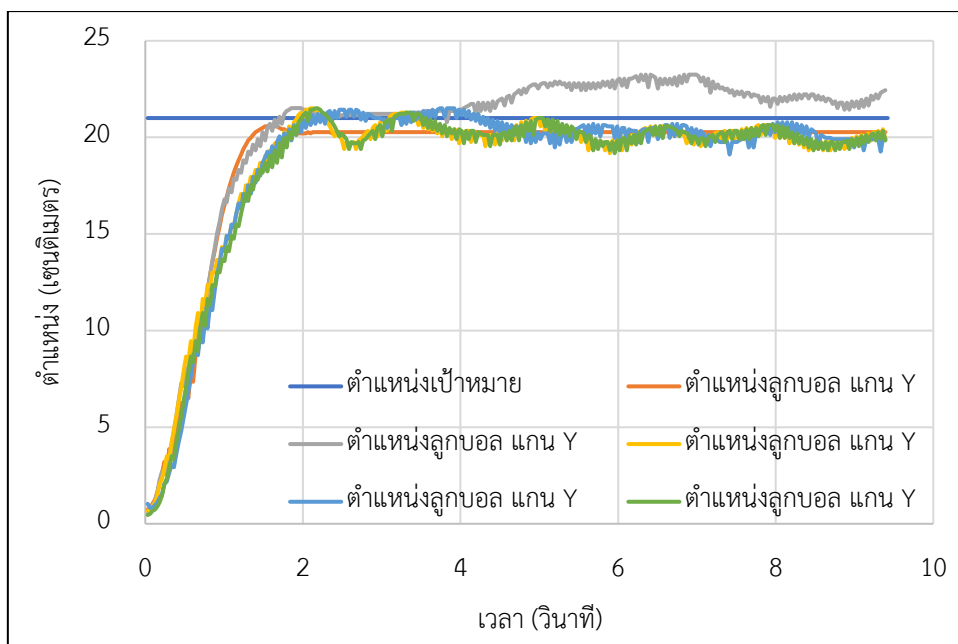


ภาพที่ 4-27 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนวายตำแหน่ง 21 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-17 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร

สมรรถนะระบบ	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	1.009
เวลาชั่วคราว (วินาที)	1.231
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	1.224
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	19.112
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	20.636
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	0.000
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	20.636
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.611

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-28 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-18

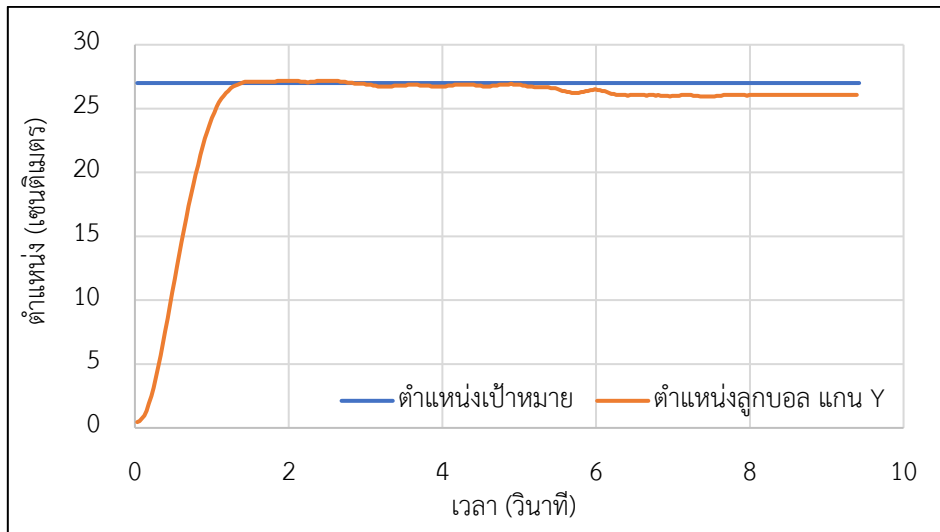


ภาพที่ 4-28 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนวายตำแหน่ง 21 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-18 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนวายตำแหน่ง 21 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	1.009	1.114	1.327	1.259	1.327	0.141	1.207
เวลาชั่วคราว (วินาที)	1.231	7.116	1.650	1.677	1.710	2.489	2.677
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	1.224	7.113	1.648	1.674	1.709	2.489	2.674
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	19.112	19.112	18.458	18.821	18.458	0.327	18.792
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	20.636	23.250	21.508	21.508	21.508	0.954	21.682
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	0.000	10.714	2.417	2.417	2.417	4.116	3.593
สภาวะหวนวน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	20.636	23.250	21.508	21.508	21.508	0.954	21.682
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.611	6.322	2.128	3.769	2.188	1.922	3.204

4.2.1.2.5 ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แนวแกนวาย แสดงดังภาพที่ 4-29 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-19

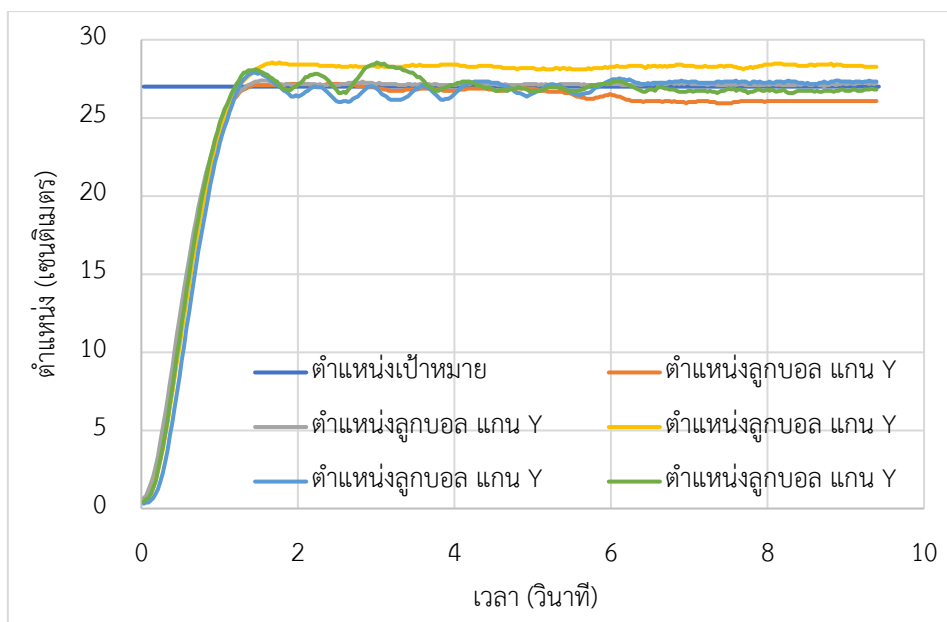


ภาพที่ 4-29 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนวายตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-19 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนวายตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง	หน่วย
เวลาไต่ขึ้น	0.783	วินาที
เวลาชั่วคราว	1.039	วินาที
เวลาสู่จุดสมดุล	1.036	วินาที
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล	24.702	เซนติเมตร
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล	27.170	เซนติเมตร
ผลตอบสนองเกิน	0.631	เปอร์เซ็นต์
สภาวะความหวนน้อย	0.000	เซนติเมตร
สัญญาณสูงสุด	27.170	เซนติเมตร
เวลาตอบสนองสูงสุด	1.884	วินาที

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-30 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-20



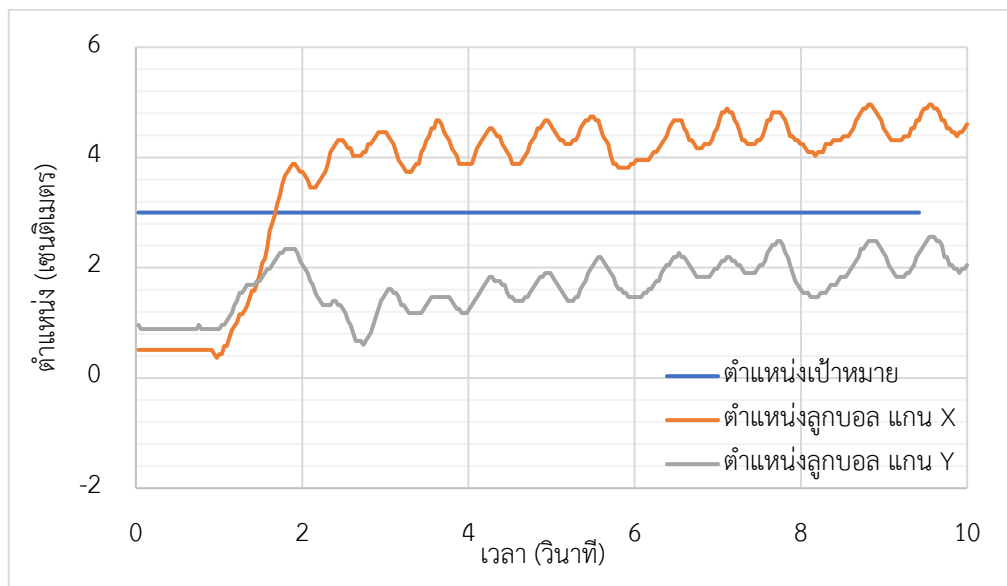
ภาพที่ 4-30 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แกนวายตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-20 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ แกนวายอนุพันธ์ ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

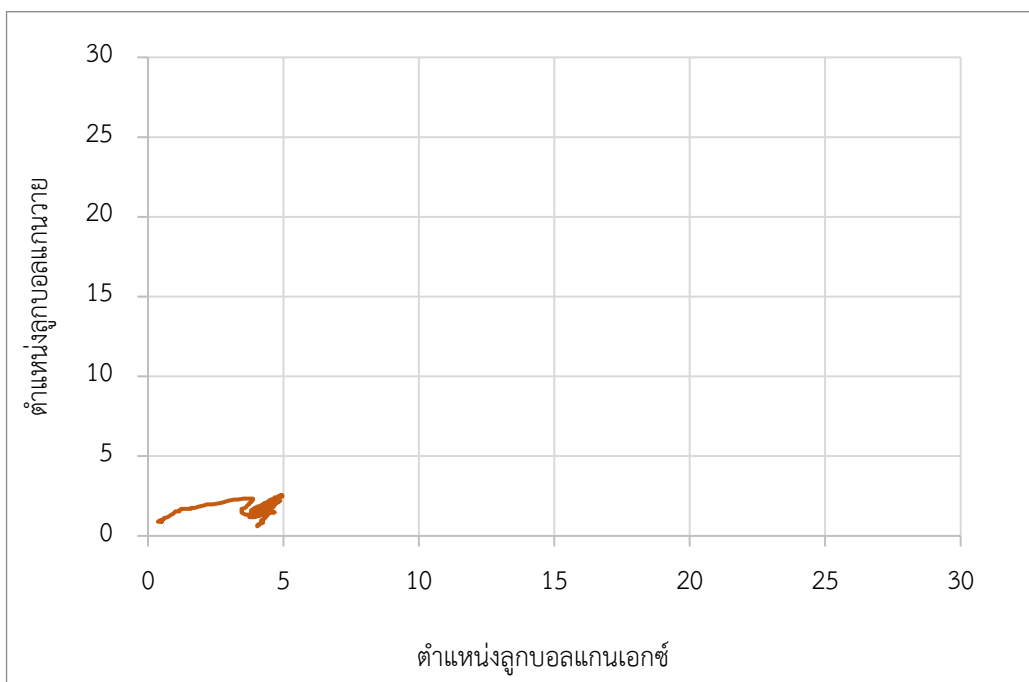
ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.783	0.813	0.783	0.762	0.759	0.021	0.780
เวลาชั่วคราว (วินาที)	1.039	1.030	1.041	1.089	1.015	0.028	1.043
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	1.036	1.026	1.039	1.086	1.012	0.028	1.040
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	24.702	24.412	24.775	24.412	24.702	0.175	24.600
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	27.170	27.388	28.550	27.896	28.550	0.640	27.911
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	0.631	1.438	5.740	3.320	5.740	2.370	3.374
สภาวะหวนน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	27.170	27.388	28.550	27.896	28.550	0.640	27.911
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.884	1.550	1.702	1.459	3.039	0.642	1.927

4.2.1.3 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ สองแกน

4.2.1.3.1 ตำแหน่งแกนเอกซ์ 3 เซนติเมตร แกนวาย 3 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์สองแกนแสดงดังภาพที่ 4-31 มุมมองด้านบนแสดงดังภาพที่ 4-32 และผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-21



ภาพที่ 4-31 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ระยะแกนเอกซ์ 3 เซนติเมตร และแกนวาย 3 เซนติเมตร

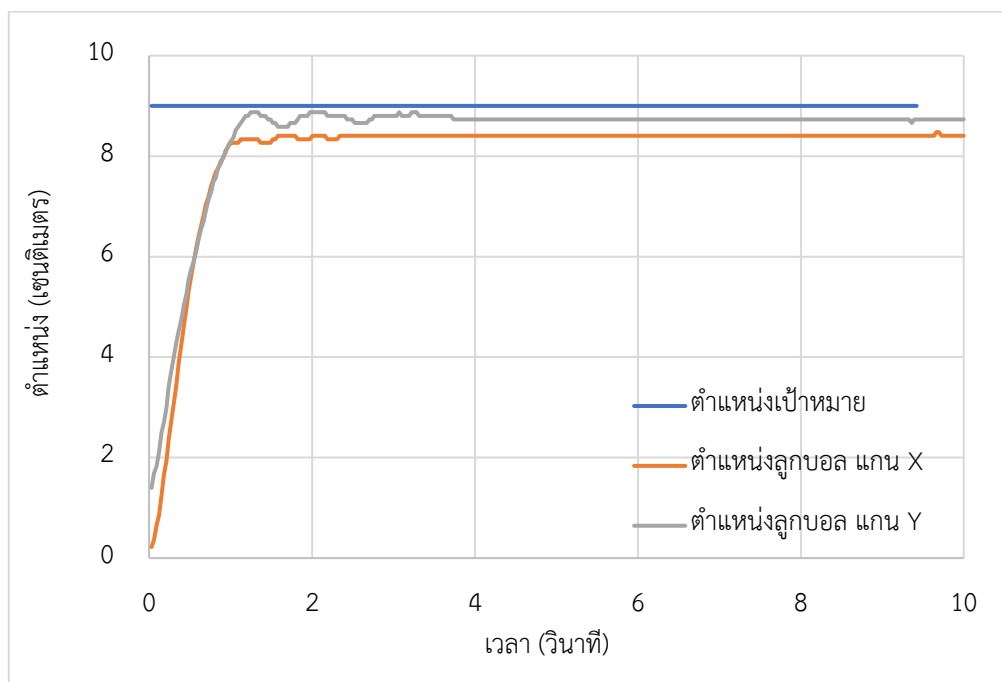


ภาพที่ 4-32 ผลตอบสนองมุมมองด้านบนตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ระยะ 3 เซนติเมตร

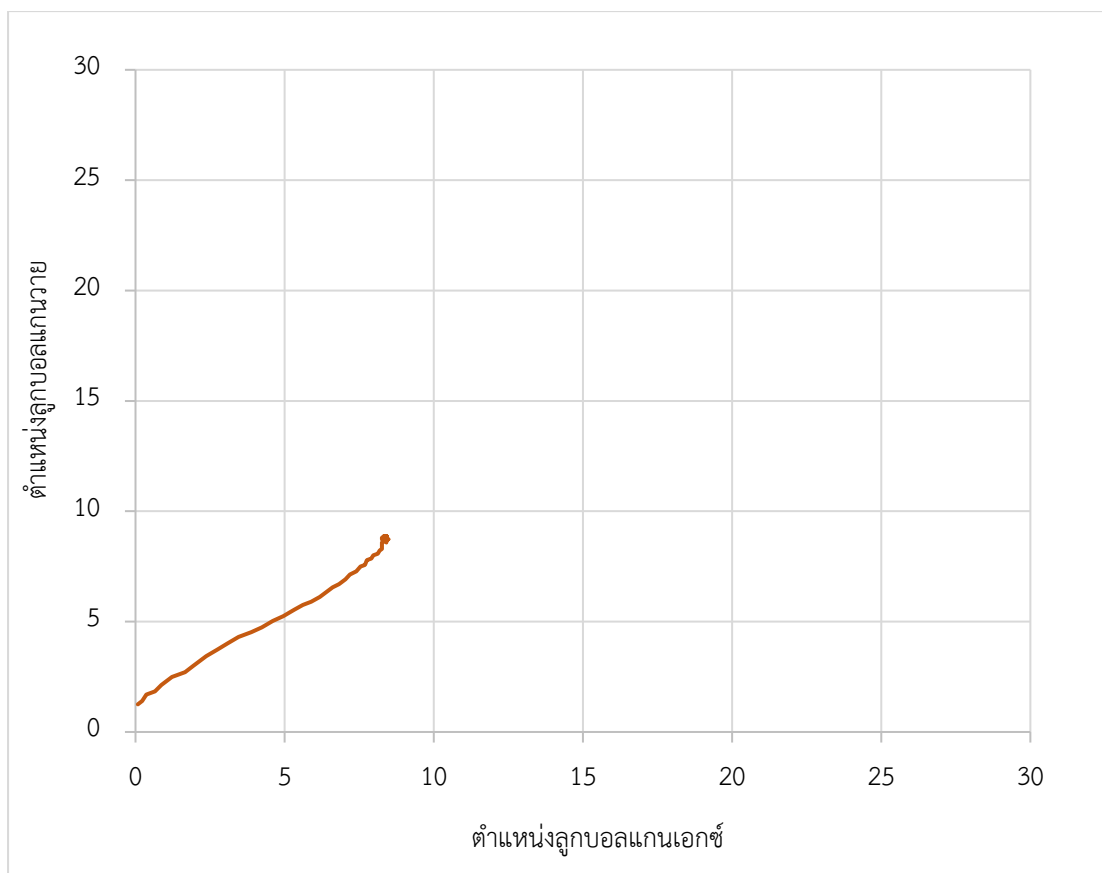
ตารางที่ 4-21 ผลตอบสนองสองแกนตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ระยะ 3 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง	
	แกนเอกซ์	แกนวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	1.619	-
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	2.806	-
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	4.960	-
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	65.317	0.000
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	4.960	2.559
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	8.845	9.544

4.2.1.3.2 ตำแหน่งแกนเอกซ์ 9 เซนติเมตร แกนวาย 9 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์สองแกนแสดงดังภาพที่ 4-33 มุมมองด้านบนแสดงดังภาพที่ 4-34 และผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-22



ภาพที่ 4-33 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ระยะแกนเอกซ์ 9 เซนติเมตร และแกนวาย 9 เซนติเมตร

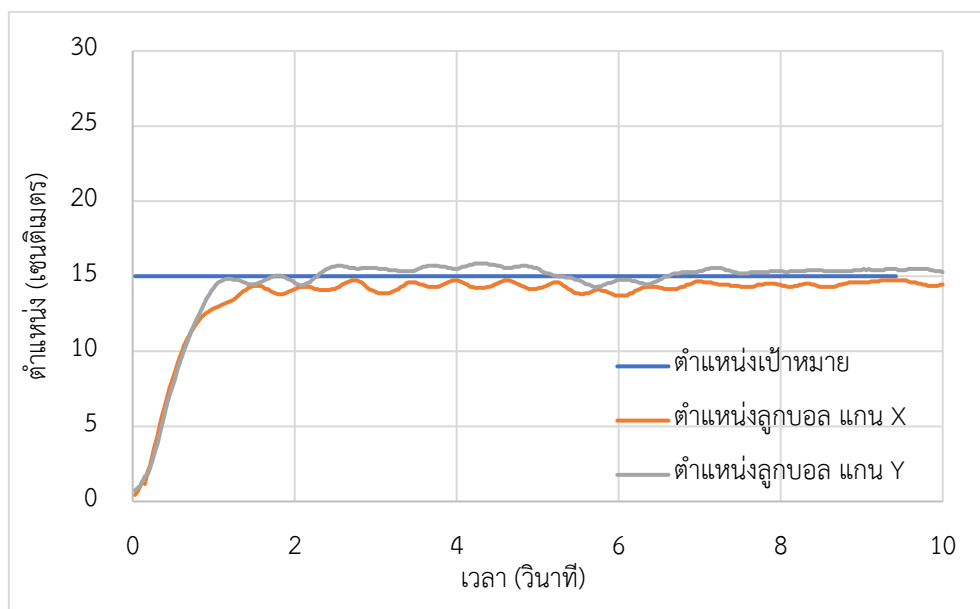


ภาพที่ 4-34 ผลตอบสนองมุมมองด้านบนตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ระยะ 9 เซนติเมตร และแกนวาย 9 เซนติเมตร

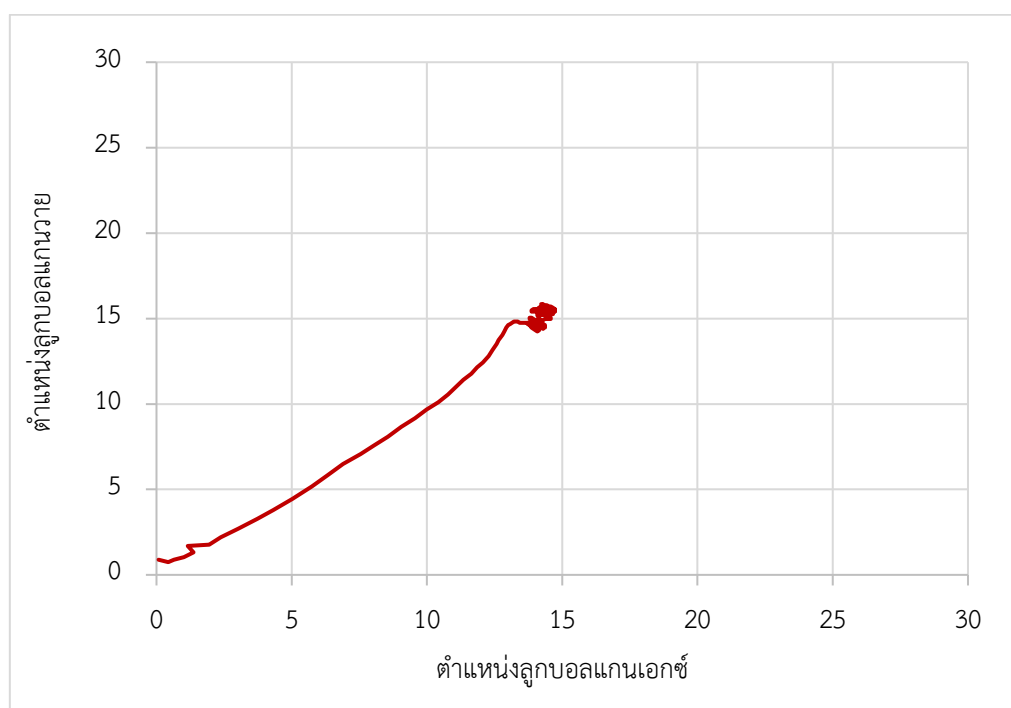
ตารางที่ 4-22 ผลตอบสนองสองแกนตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ระยะ 9 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง	
	แกนเอกซ์	แกนวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.814	0.947
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	8.478	8.875
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	0.000	0.000
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	8.478	8.875
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	9.696	1.277

4.2.1.3.3 ตำแหน่งแกนเอกซ์ 15 เซนติเมตร แกนวาย 15 เซนติเมตร กราฟ
 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์สองแกนแสดงดังภาพที่ 4-35 มุมมองด้านบนแสดงดัง
 ภาพที่ 4-36 และผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-23



ภาพที่ 4-35 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ระยะแกนเอกซ์ 15 เซนติเมตร
 และแกนวาย 15 เซนติเมตร

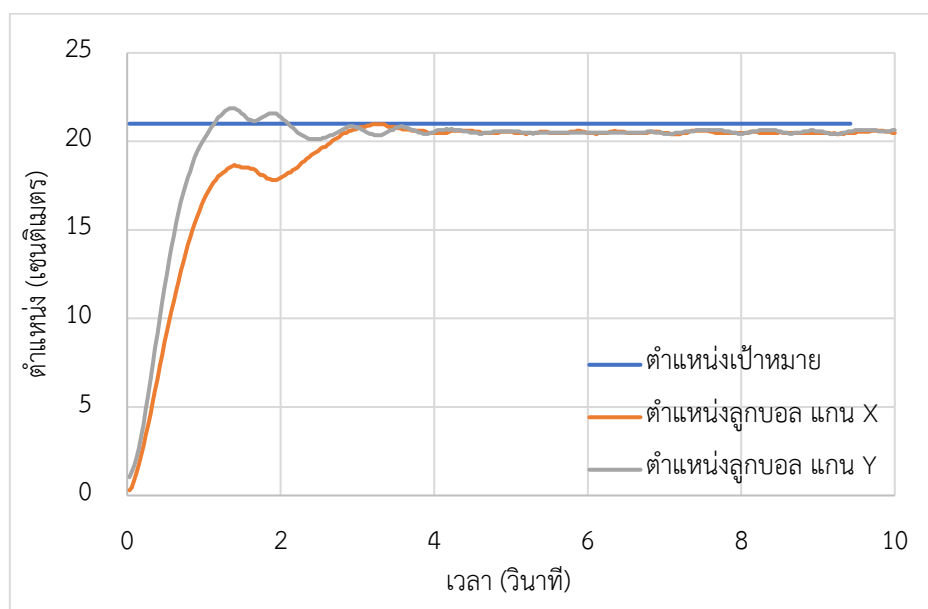


ภาพที่ 4-36 ผลตอบสนองมุมมองด้านบนตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ระยะ 15 เซนติเมตร

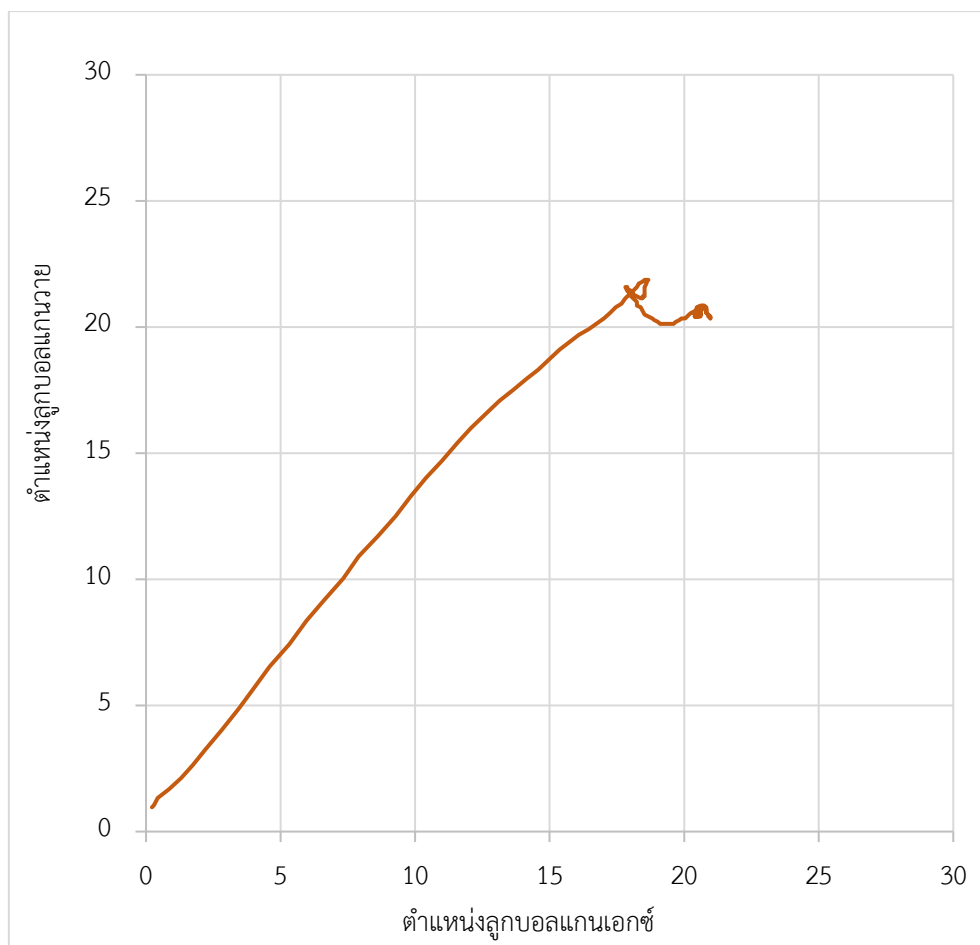
ตารางที่ 4-23 ผลตอบสนองสองแกนตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ระยะ 15 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง	
	แกนเอกซ์	แกนวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	1.095	0.7738
เวลาชั่วคราว (วินาที)	1.293	0.9496
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	1.291	0.9404
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	13.576	13.5216
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	14.724	15.8448
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	0.000	5.632
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	14.724	15.8448
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	2.736	4.2552

4.2.1.3.4 ตำแหน่งแกนเอกซ์ 21 เซนติเมตร แกนวาย 21 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์สองแกนแสดงดังภาพที่ 4-37 มุมมองด้านบนแสดงดังภาพที่ 4-38 และผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-24



ภาพที่ 4-37 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ระยะแกนเอกซ์ 21 เซนติเมตร และแกนวาย 21 เซนติเมตร

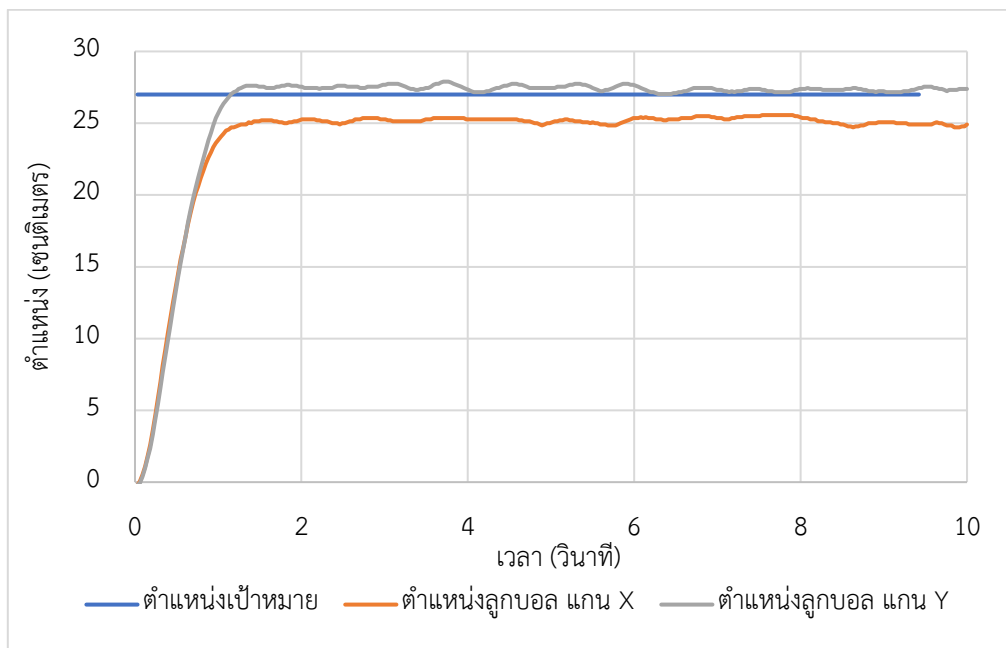


ภาพที่ 4-38 ผลตอบสนองมุมมองด้านบนตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ระยะ 21

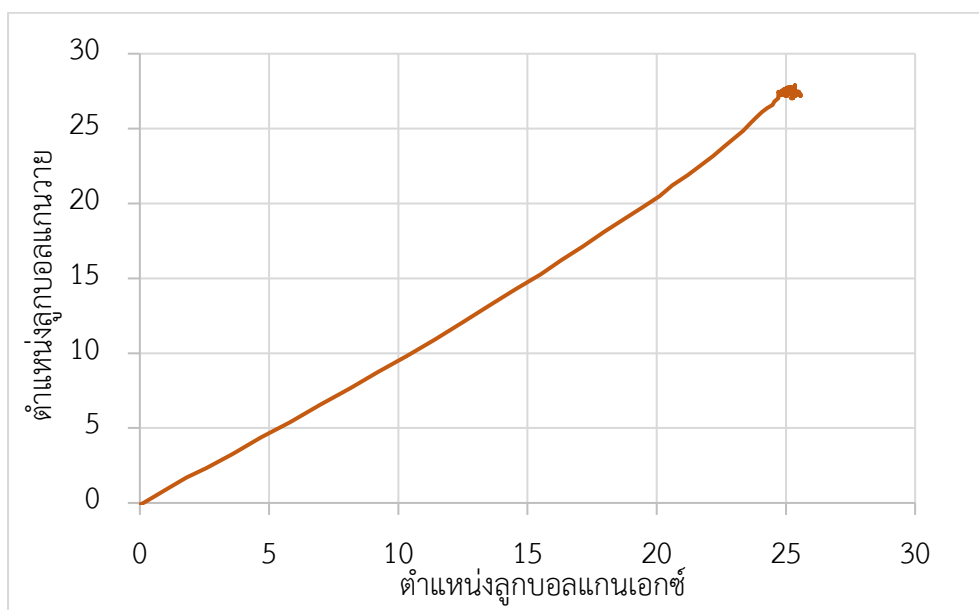
ตารางที่ 4-24 ผลตอบสนองสองแกนตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ระยะ 21 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง	
	แกนเอกซ์	แกนวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	2.138	0.744
เวลาชั่วคราว (วินาที)	2.347	0.902
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	2.343	0.894
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	19.032	19.112
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	20.971	21.871
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	0.000	4.146
สภาวะความหวนวงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	20.971	21.871
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	3.222	1.368

4.2.1.3.4 ตำแหน่งแกนเอกซ์ 27 เซนติเมตร แกนวาย 27 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์สองแกนแสดงดังภาพที่ 4-39 มุมมองด้านบนแสดงดังภาพที่ 4-40 และผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-25



ภาพที่ 4-39 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ระยะแกนเอกซ์ 27 เซนติเมตร และแกนวาย 27 เซนติเมตร



ภาพที่ 4-40 ผลตอบสนองมุมมองด้านบนตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ระยะ 27

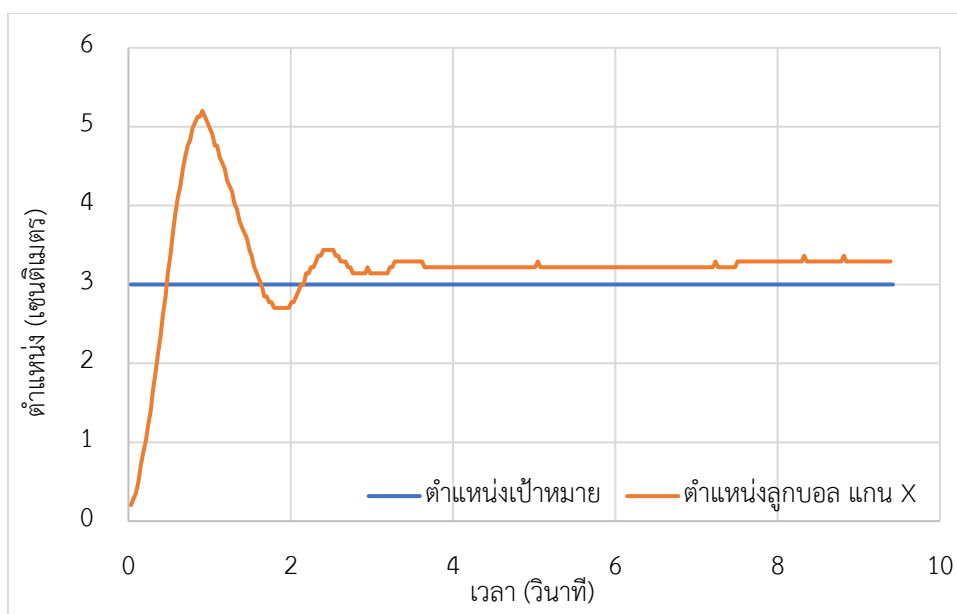
ตารางที่ 4-25 ผลตอบสนองสองแกนตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ระยะ 27 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่า	
	แกนเอกซ์	แกนวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	2.138	0.744
เวลาชั่วคราว (วินาที)	2.347	0.902
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	2.343	0.894
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	19.032	19.112
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	20.971	21.871
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	0.000	4.146
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	20.971	21.871
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	3.222	1.368

4.2.2 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมแผ่นเลื่อน

4.2.2.1 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมแผ่นเลื่อนแกนเอกซ์

4.2.2.1.1 ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมแผ่นเลื่อนแนวแกนเอกซ์ แสดงดังภาพที่ 4-41 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-26

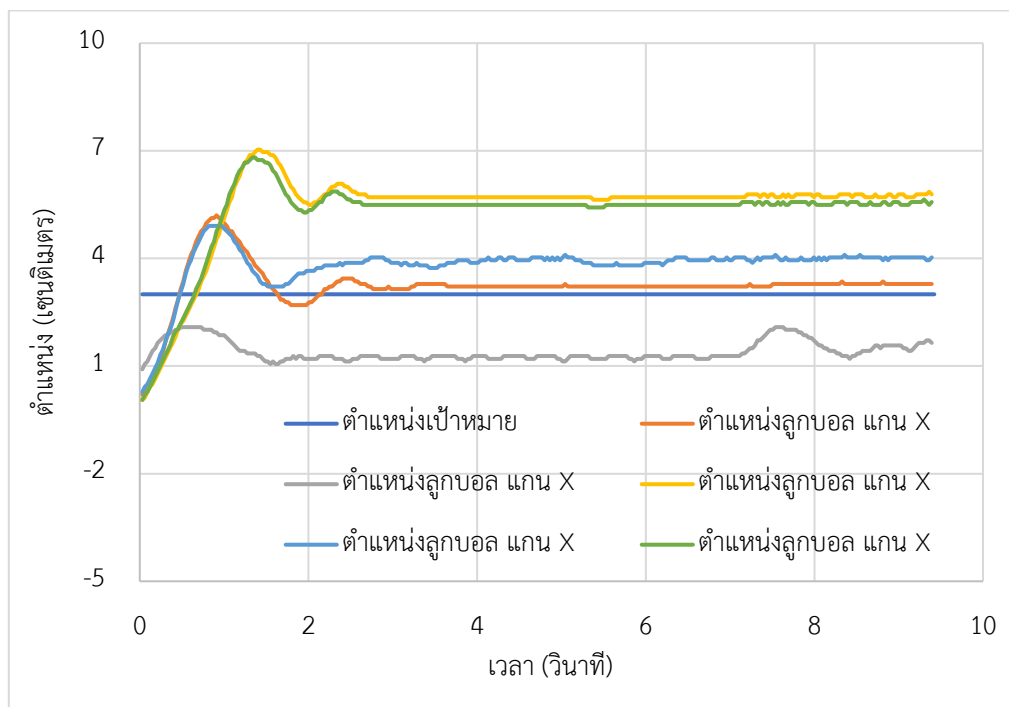


ภาพที่ 4-41 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนเอกซ์ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-26 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนเอกซ์ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.365
เวลาชั่วคราว (วินาที)	8.870
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	8.871
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	2.702
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	5.201
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	73.360
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.590
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	5.201
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	0.942

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-42 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-27

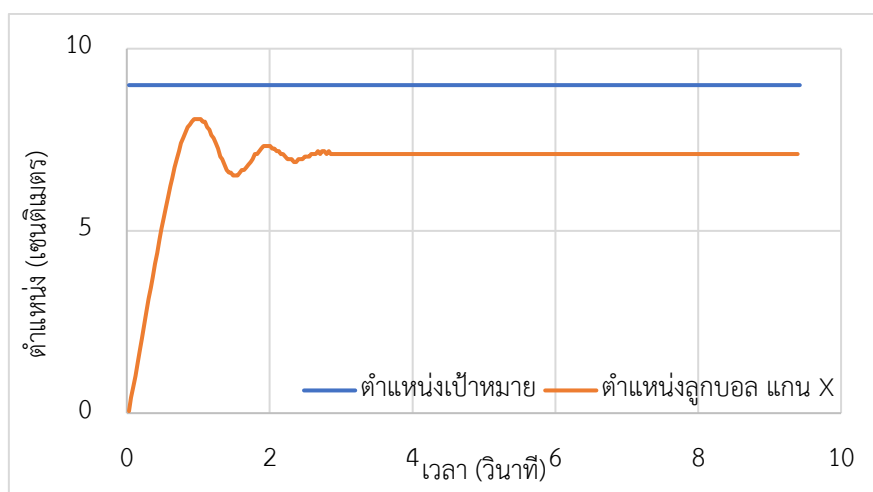


ภาพที่ 4-42 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนเอกซ์ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-27 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนเอกซ์ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.365	-	0.511	0.405	0.496	0.071	0.444
เวลาชั่วคราว (วินาที)	8.870	-	-	-	-	-	8.870
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	8.871	-	-	-	-	-	8.871
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุด สมดุล (เซนติเมตร)	2.702	-	2.844	2.849	2.775	0.069	2.792
สัญญาณสูงสุดก่อนจุด สมดุล (เซนติเมตร)	5.201	-	7.033	4.907	6.818	1.091	5.990
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	73.360	0.000	134.44 0	63.560	127.26 0	54.569	79.724
สภาวะหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.590	0.000	0.000	0.000	3.040	1.319	0.726
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	5.201	2.085	7.033	4.907	6.818	1.985	5.209
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	0.942	0.517	1.429	0.851	1.368	0.379	1.021

4.2.2.1.2 ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมแผ่นเลื่อน
แนวแกนเอกซ์ แสดงดังภาพที่ 4-43 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-28

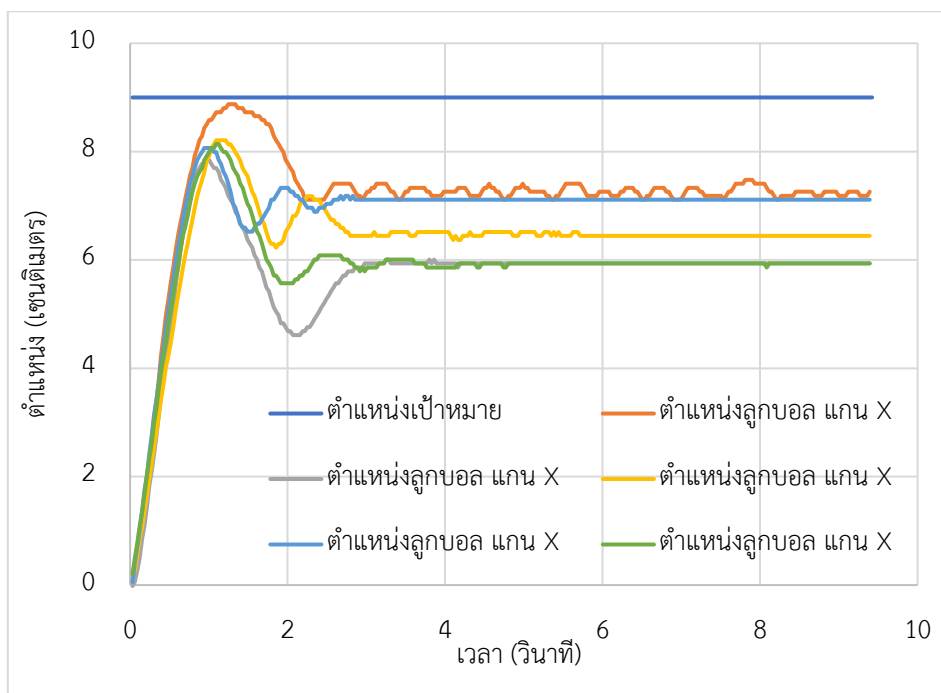


ภาพที่ 4-43 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนเอกซ์ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-28 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนเอกซ์ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	-
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	-
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	-
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	-
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	1.0133
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	8.0673
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	0.9726

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-44 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-29

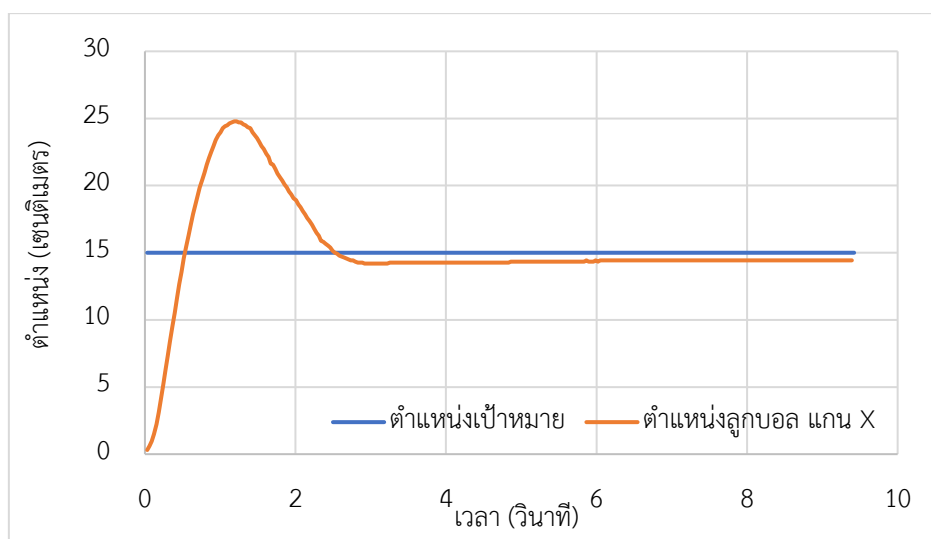


ภาพที่ 4-44 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนเอกซ์ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-29 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนเอกซ์ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาได้ขึ้น (วินาที)	0.740	-	0.922	-	0.975	0.123	0.879
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-	-	-	-	-	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	-	-	-	-	-	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	7.112	-	6.225	-	5.568	0.775	6.302
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	8.876	-	8.209	-	8.141	0.406	8.409
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สภาวะหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	1.013	1.013	0.000	1.013	0.197	0.506	0.647
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	8.876	7.847	8.209	8.067	8.141	0.387	8.228
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.277	1.003	1.125	0.973	1.125	0.120	1.100

4.2.2.1.3 ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมแผ่นเลื่อน
แนวแกนเอกซ์ แสดงดังภาพที่ 4-45 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-30

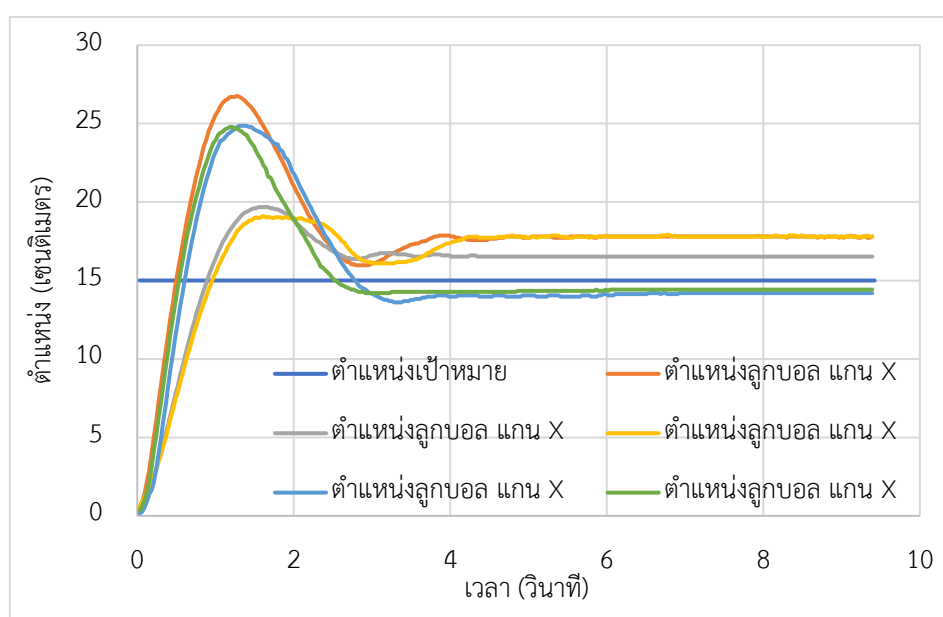


ภาพที่ 4-45 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนเอกซ์ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-30 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนเอกซ์ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.3628
เวลาชั่วคราว (วินาที)	2.3094
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	2.3078
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	13.5388
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	24.7843
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	65.2287
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	-
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	24.7843
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.2158

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-46 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-31

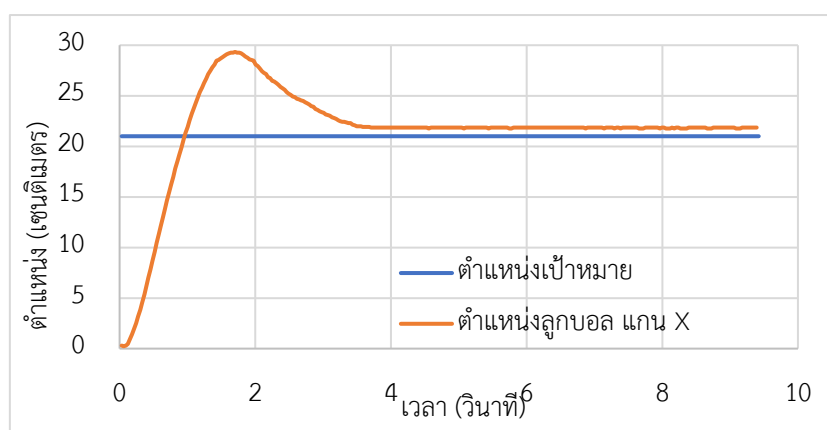


ภาพที่ 4-46 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนเอกซ์ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-31 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนเอกซ์ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.358	0.651	0.725	0.389	0.363	0.177	0.497
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-	-	2.597	2.309	0.204	2.453
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	-	-	2.597	2.308	0.204	2.452
สัญญาณต่ำสุดก่อน จุดสมดุล (เซนติเมตร)	13.612	13.947	13.528	13.612	13.539	0.172	13.64 8
สัญญาณสูงสุดก่อน จุดสมดุล (เซนติเมตร)	26.769	19.680	19.114	24.858	24.784	3.426	23.04 1
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	78.459	31.202	27.425	65.719	65.229	22.841	53.60 7
สภาวะหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	26.769	19.680	19.114	24.858	24.784	3.426	23.04 1
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.307	1.581	1.641	1.337	1.216	0.184	1.416

4.2.2.1.4 ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของของตัวควบคุมแผ่นเลื่อนแนวแกนเอกซ์ แสดงดังภาพที่ 4-47 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-32

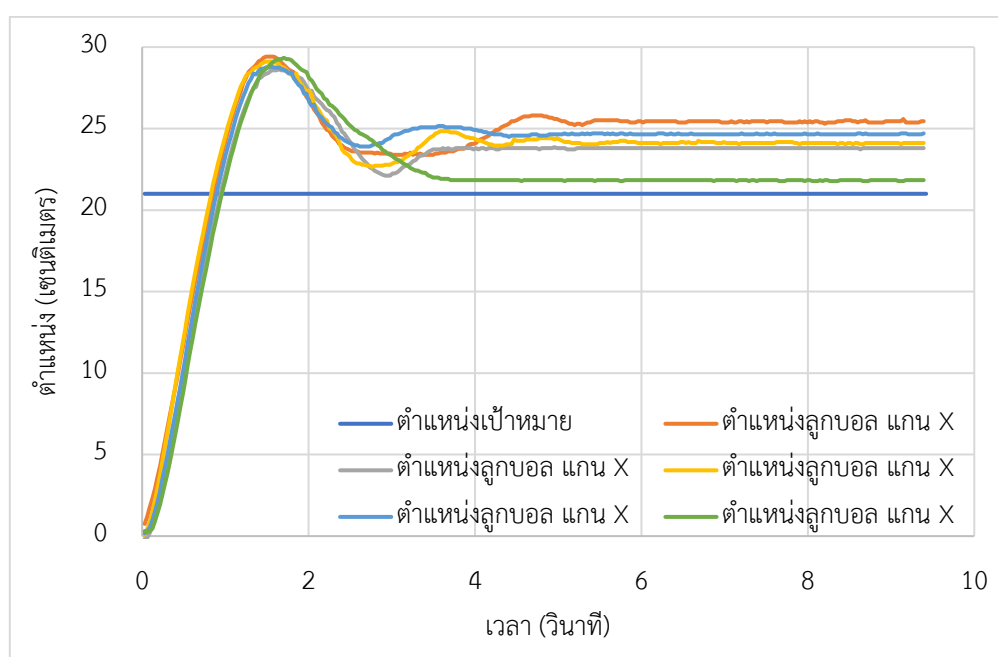


ภาพที่ 4-47 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนเอกซ์ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-32 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนเอกซ์ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.646
เวลาชั่วคราว (วินาที)	3.107
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	3.098
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	19.198
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	29.341
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	39.721
สภาวะความหวน่งน้อย (เซนติเมตร)	-
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	29.341
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.733

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-48 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-33

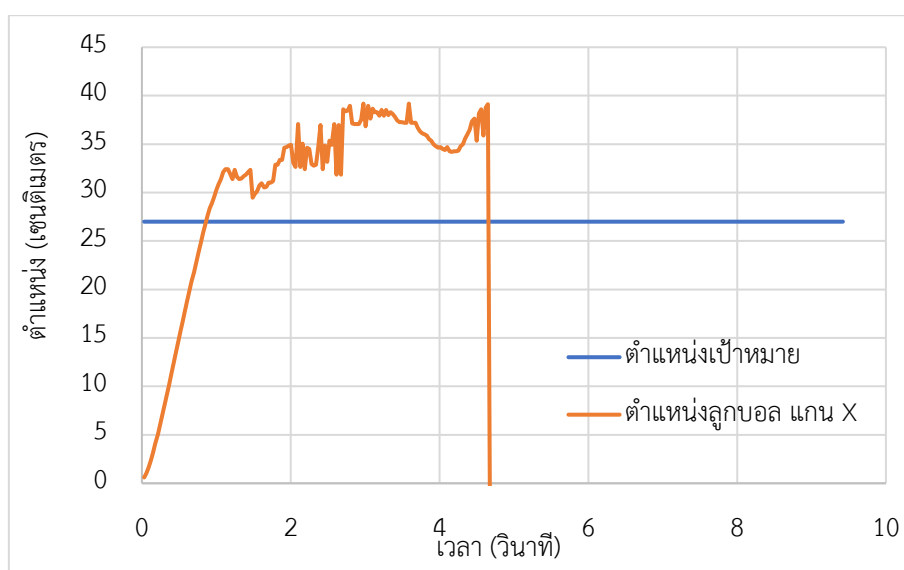


ภาพที่ 4-48 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนเอกซ์ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-33 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนเอกซ์ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.653	0.655	0.596	0.622	0.646	0.025	0.634
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-	-	-	3.107	-	3.107
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	-	-	-	3.098	-	3.098
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	19.566	19.607	19.334	19.272	19.198	0.181	19.395
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	29.415	28.647	29.110	28.827	29.341	0.329	29.068
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	40.071	36.416	38.618	37.271	39.721	1.565	38.419
สภาวะห้วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	1.134	0.000	0.000	0.000	0.507	0.227
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	29.415	28.647	29.110	28.827	29.341	0.329	29.068
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.520	1.672	1.520	1.581	1.733	0.095	1.605

4.2.2.1.5 ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของของตัวควบคุมแผ่นเลื่อนแนวแกนเอกซ์ แสดงดังภาพที่ 4-49 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-34

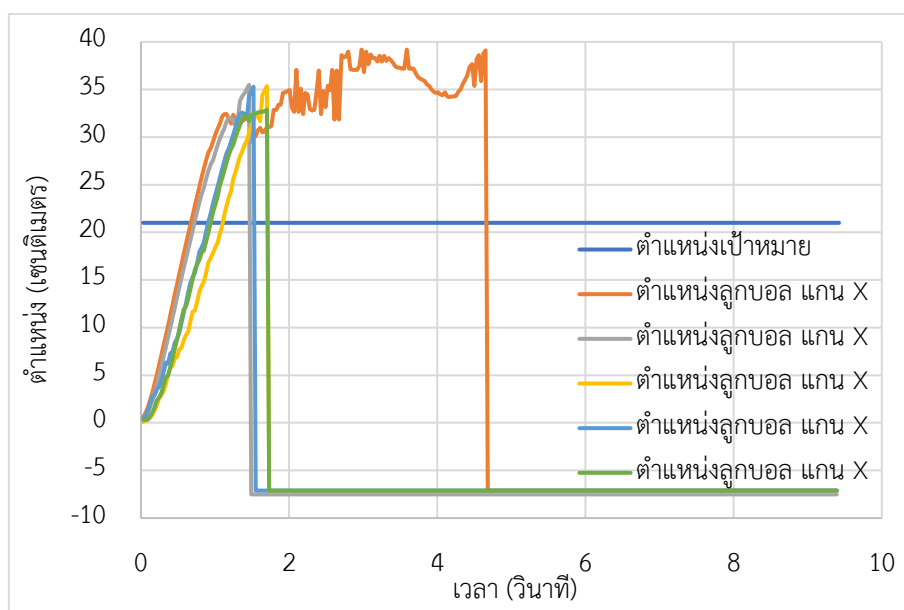


ภาพที่ 4-49 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-34 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนเอกซ์ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.5016
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	-7.1147
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	39.1903
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	86.6205
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	33.8795
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	39.1903
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	3.009

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-50 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-35



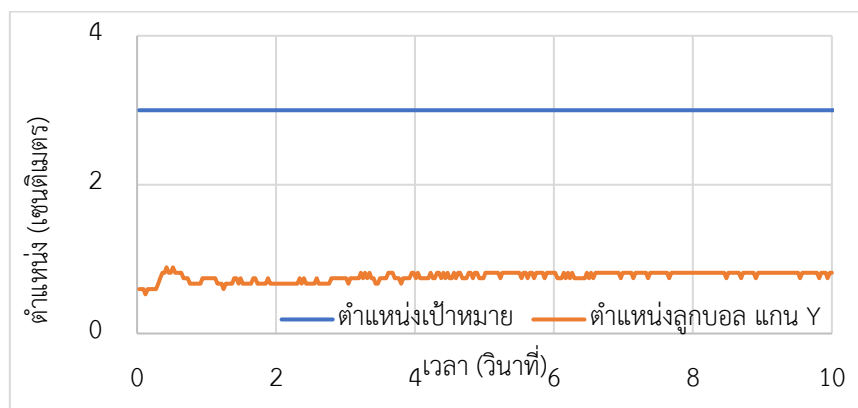
ภาพที่ 4-50 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนเอกซ์ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-35 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนเอกซ์ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.502	0.519	0.810	0.721	0.675	0.133	0.645
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-	-	-	-	-	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	-	-	-	-	-	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	-7.115	-7.515	-7.199	-7.115	-7.115	0.173	-7.212
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	39.190	35.483	35.357	35.295	32.869	2.264	35.639
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	86.621	68.966	68.368	68.071	56.521	10.782	69.709
สภาวะหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	33.880	35.784	34.282	33.880	33.880	0.825	34.341
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	39.190	35.483	35.357	35.295	32.869	2.264	35.639
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	3.009	1.489	1.733	1.550	1.733	0.628	1.903

4.2.2.2 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมแผ่นเลื่อนแกนวาย

4.2.2.2.1 ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมแผ่นเลื่อน
แนวแกนวาย แสดงดังภาพที่ 4-51 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-36

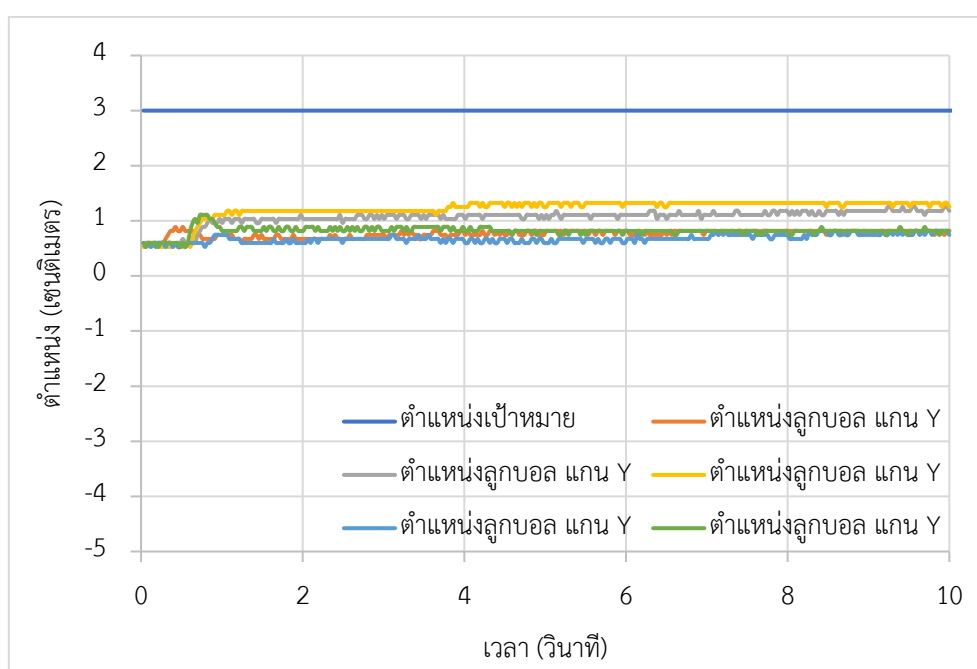


ภาพที่ 4-51 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนวาย ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-36 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนวายตำแหน่ง 3 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	-
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	-
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	-
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	0
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	0.889
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	0.456

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-52 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-37

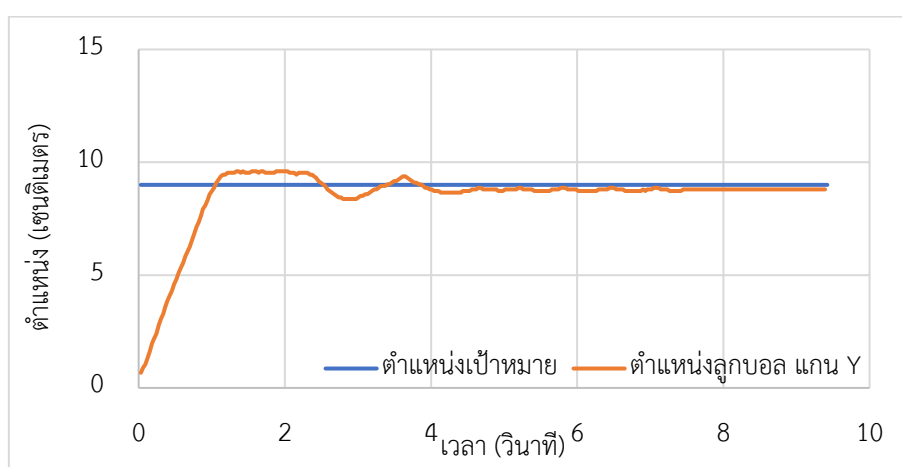


ภาพที่ 4-52 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนวายตำแหน่ง 3 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-37 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนวายตำแหน่ง 3 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	-	-	-	-	-	-	-
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-	-	-	-	-	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	-	-	-	-	-	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	-	-	-	-	-	-	-
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	-	-	-	-	-	-	-
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สภาวะหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	0.889	1.252	1.325	0.817	1.107	0.221	1.078
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	0.456	9.270	3.891	7.143	0.760	3.881	4.304

4.2.2.2.2 ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนวาย แสดงดังภาพที่ 4-53 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-38

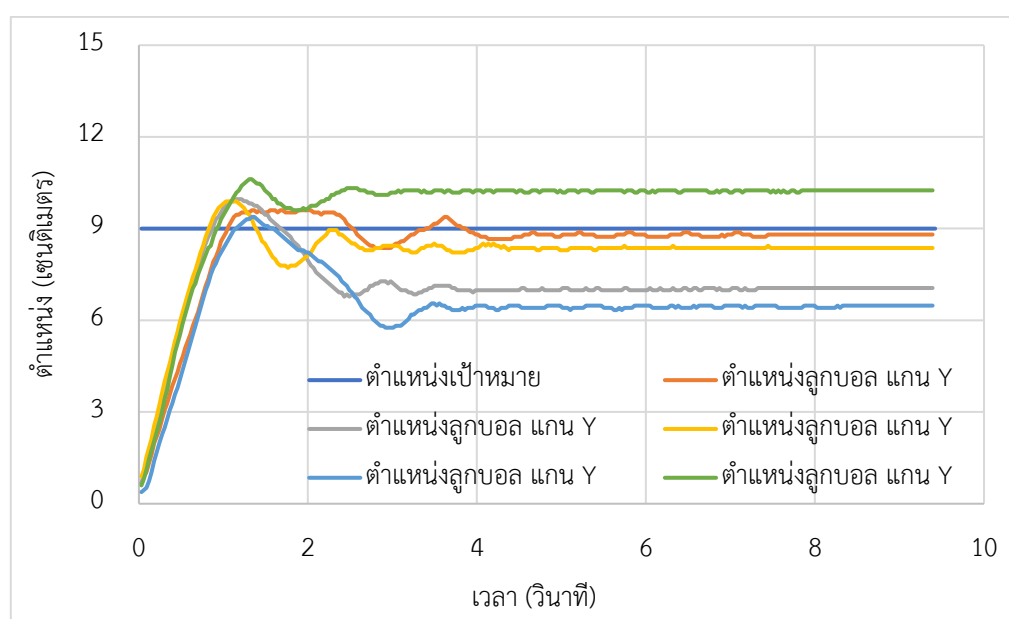


ภาพที่ 4-53 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนวาย ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-38 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนวายตำแหน่ง 9 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.852
เวลาชั่วคราว (วินาที)	0.954
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	0.946
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	8.294
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	9.601
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	6.680
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	9.601
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.368

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งลูกบอล ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-54 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-39

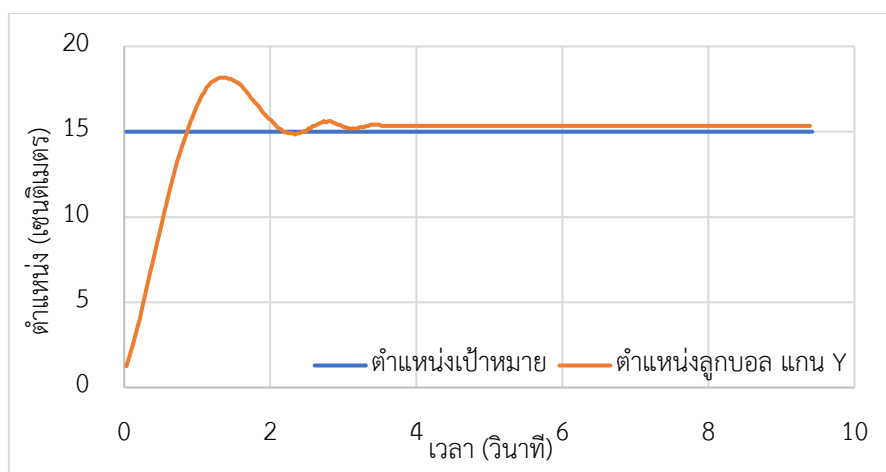


ภาพที่ 4-54 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนวายตำแหน่ง 9 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-39 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนวายตำแหน่ง 9 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.852	0.685	0.685	0.809	0.714	0.077	0.749
เวลาชั่วคราว (วินาที)	0.954	-	2.041	-	-	0.769	1.497
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	0.946	-	2.016	-	-	0.757	1.481
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	8.294	6.770	7.714	5.753	8.149	1.066	7.336
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	9.601	9.964	9.892	9.383	10.618	0.468	9.892
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	6.680	10.713	9.907	4.260	17.973	5.197	9.907
สภาวะหวนน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	9.601	9.964	9.892	9.383	10.618	0.468	9.892
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.368	1.185	1.064	1.368	1.337	0.135	1.264

4.2.2.2.3 ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนวาย แสดงดังภาพที่ 4-55 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-40

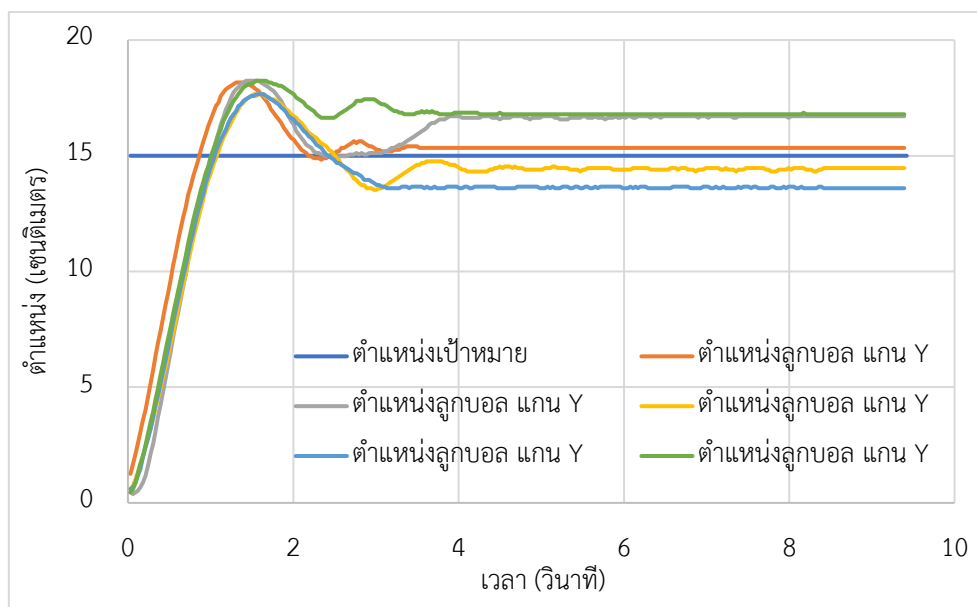


ภาพที่ 4-55 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-40 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนวายตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.698
เวลาชั่วคราว (วินาที)	1.888
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	1.869
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	13.667
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	18.168
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	21.12
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	18.168
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.337

ผลการตอบสนอง 5 ครั้งจากการทดลองตำแหน่ง 15 เซนติเมตร แสดงดังภาพที่ 4-56 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-41

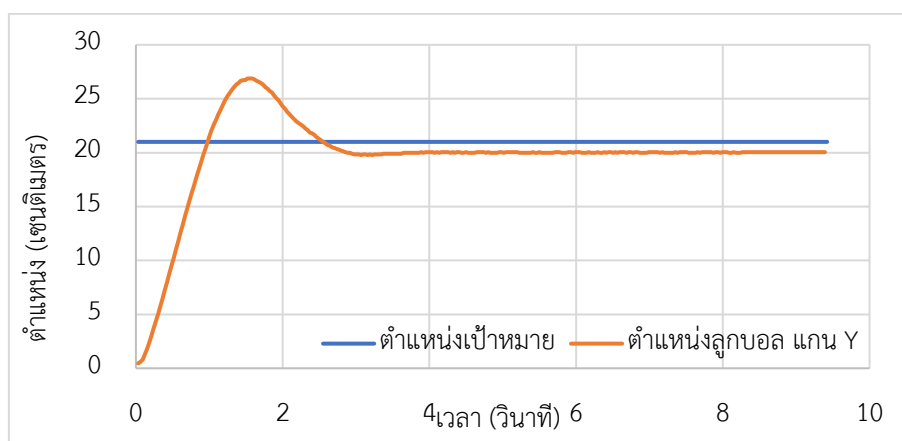


ภาพที่ 4-56 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนวายตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-41 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนวายตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.698	0.670	0.799	0.767	0.741	0.052	0.735
เวลาชั่วคราว (วินาที)	1.888	-	3.052	2.062	-	0.628	2.334
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	1.869	-	2.097	2.051	-	0.121	2.006
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	13.667	13.594	13.522	13.594	13.522	0.061	13.580
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	18.168	18.241	17.660	17.660	32.688	6.605	20.883
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	21.120	21.604	17.732	17.732	17.920	1.963	19.222
สภาวะหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	18.168	18.241	17.660	17.660	32.688	6.605	20.883
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.337	1.459	1.550	1.581	10.030	3.824	3.191

4.2.2.2.4 ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของของตัวควบคุมแผ่นเลื่อนแนวแกนวาย แสดงดังภาพที่ 4-57 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-42

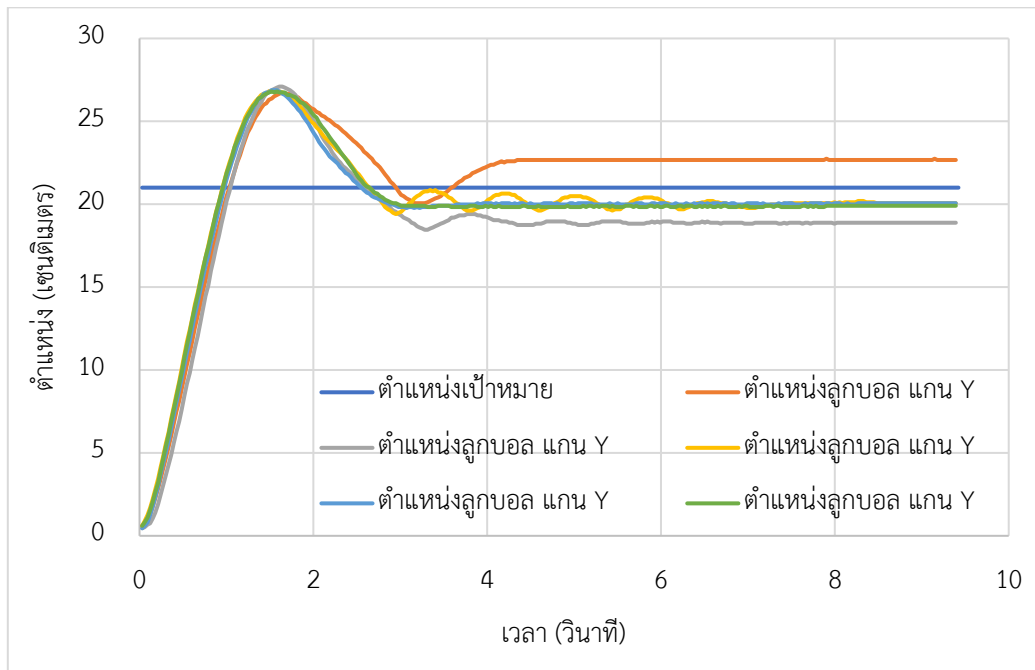


ภาพที่ 4-57 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-42 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนวายตำแหน่ง 21 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.709
เวลาชั่วคราว (วินาที)	2.195
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	2.189
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	18.967
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	26.880
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	28.000
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	26.880
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.550

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-58 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-43

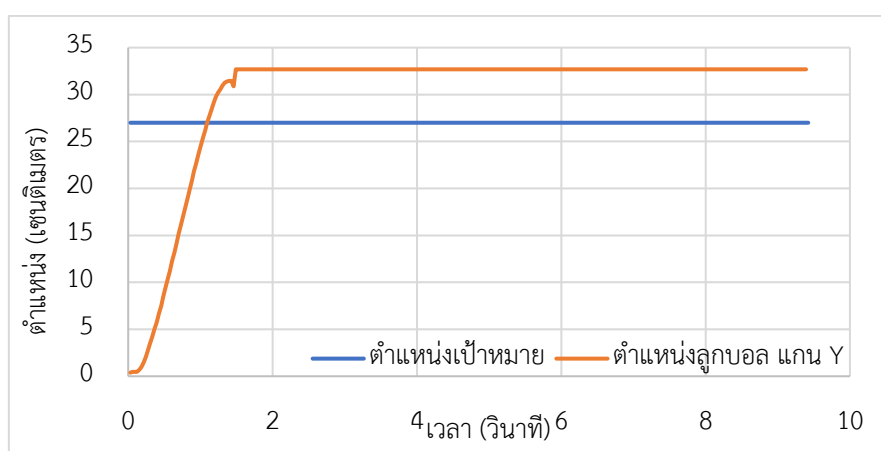


ภาพที่ 4-58 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนวายตำแหน่ง 21 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-43 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนวายตำแหน่ง 21 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาได้ขึ้น (วินาที)	0.751	0.723	0.708	0.709	0.700	0.020	0.718
เวลาชั่วคราว (วินาที)	2.641	-	2.354	2.195	2.359	0.185	2.387
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	2.630	-	2.341	2.189	2.351	0.184	2.378
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	19.257	18.458	19.402	18.967	19.475	0.414	19.112
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	26.735	27.098	26.807	26.880	26.807	0.140	26.865
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	27.309	29.037	27.654	28.000	27.654	0.665	27.931
สภาวะหวนน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	26.735	27.098	26.807	26.880	26.807	0.140	26.865
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.672	1.641	1.520	1.550	1.550	0.066	1.587

4.2.2.2.5 ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของของตัวควบคุมแผ่นเลื่อนแนวแกนวาย แสดงดังภาพที่ 4-59 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-44

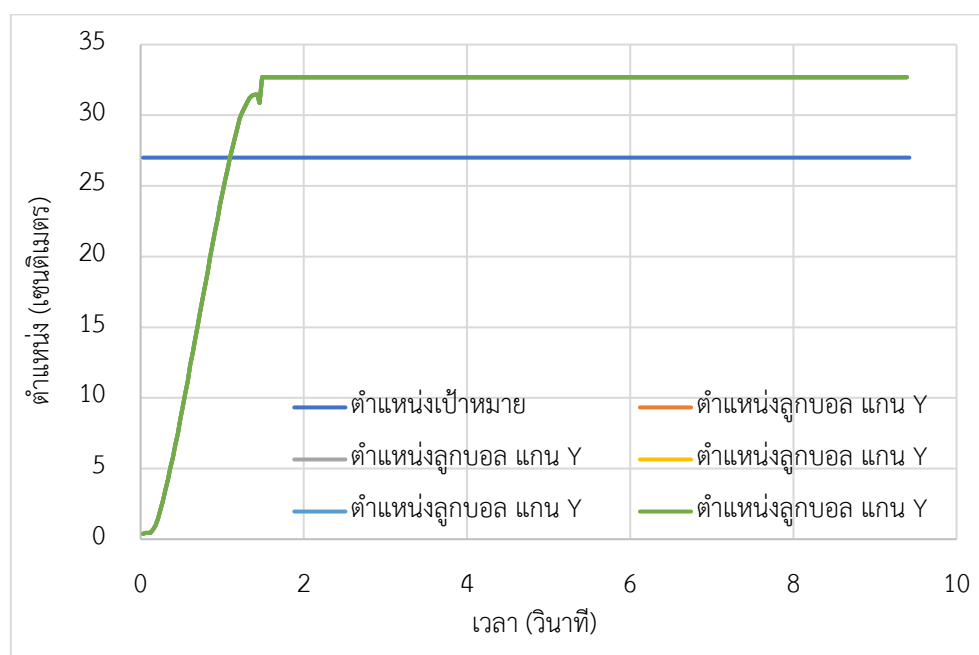


ภาพที่ 4-59 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนวาย ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-44 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนวายตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.723
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	24.484
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	32.688
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	21.067
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	32.688
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.520

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-60 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-45



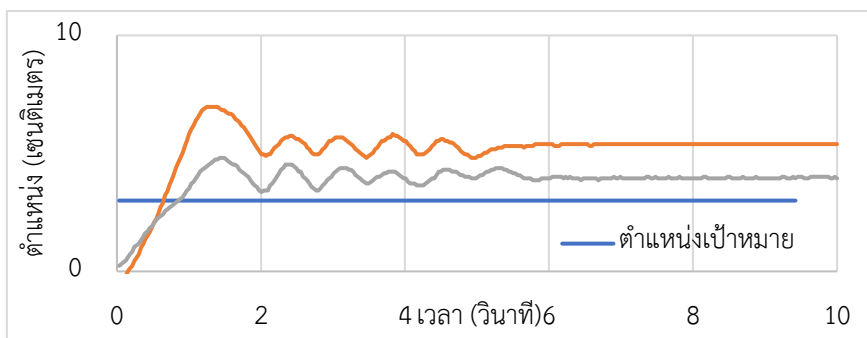
ภาพที่ 4-60 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนวายตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-45 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แกนวายตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

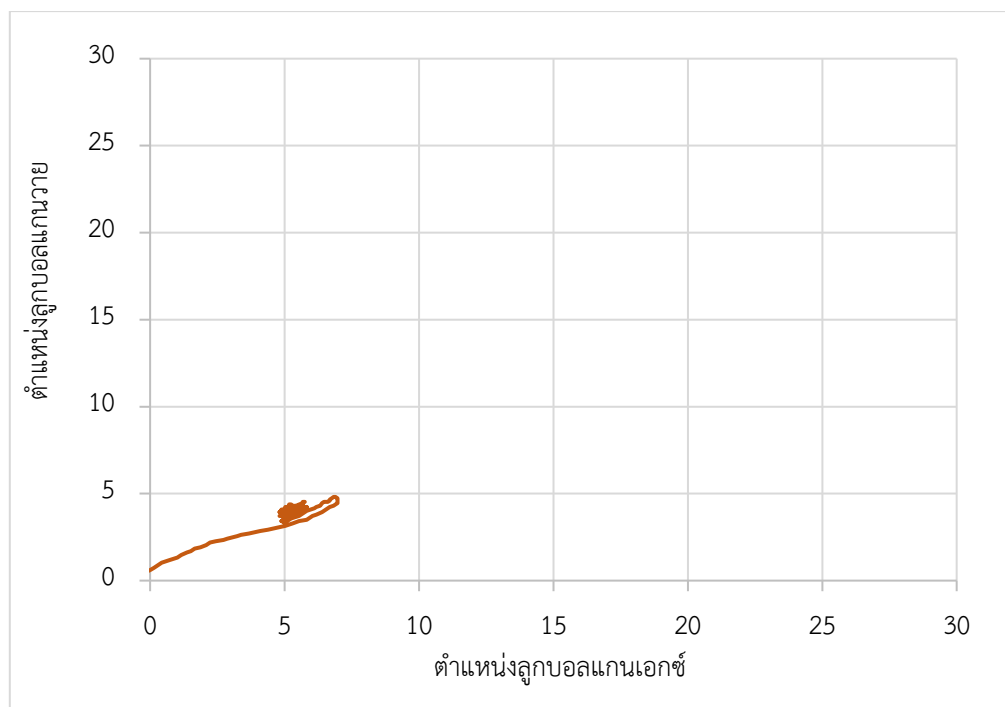
ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาได้ขึ้น (วินาที)	0.723	0.723	0.723	0.723	0.723	0.000	0.723
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-	-	-	-	-	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	-	-	-	-	-	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	24.484	24.484	24.484	24.484	24.484	0.000	24.484
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	32.688	32.688	32.688	32.688	32.688	0.000	32.688
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	21.067	21.067	21.067	21.067	21.067	0.000	21.067
สภาวะหวนน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	32.688	32.688	32.688	32.688	32.688	0.000	32.688
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.520	1.520	1.520	1.520	1.520	0.000	1.520

4.2.2.3 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมแผ่นเลื่อนสองแกน

4.2.2.3.1 ตำแหน่งแกนเอกซ์ 3 เซนติเมตร แกนวาย 3 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อนสองแกนแสดงดังภาพที่ 4-61 มุมมองด้านบนแสดงดังภาพที่ 4-62 และผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-46



ภาพที่ 4-61 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน ระยะแกนเอกซ์ 3 เซนติเมตร และแกนวาย 3 เซนติเมตร

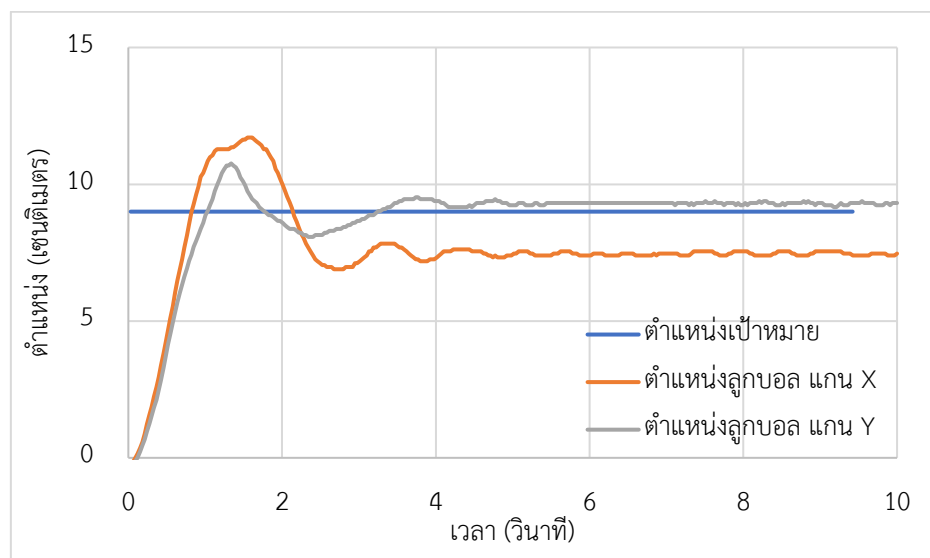


ภาพที่ 4-62 ผลตอบสนองมุมมองด้านบนตัวควบคุมแผ่นเลื่อน ระยะแกนเอกซ์ 3 เซนติเมตร และ แกนวาย 3 เซนติเมตร

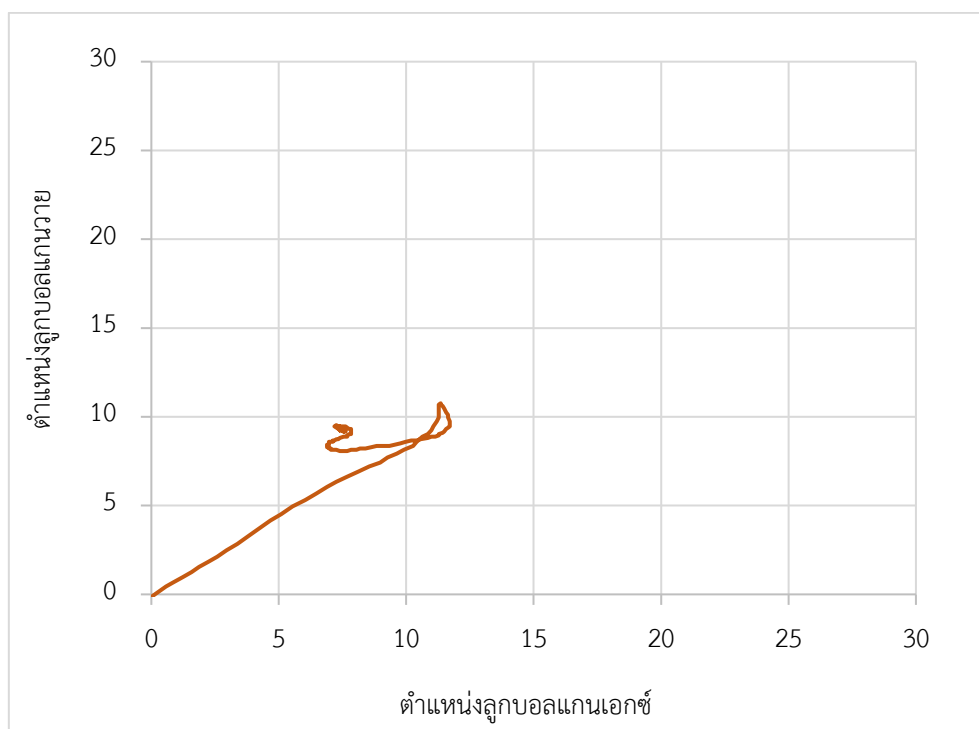
ตารางที่ 4-46 ผลตอบสนองสองแกนตัวควบคุมแผ่นเลื่อน ระยะ 3 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง	
	แกนเอกซ์	แกนวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.380	0.670
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	2.734	2.704
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	6.970	4.810
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	132.330	60.320
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	18.970	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	6.970	4.810
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.277	1.459

4.2.2.3.2 ตำแหน่งแกนเอกซ์ 9 เซนติเมตร แกนวาย 9 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อนสองแกนวาย แสดงดังภาพที่ 4-63 มุมมองด้านบนแสดงดังภาพที่ 4-64 และผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-47



ภาพที่ 4-63 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน ระยะแกนเอกซ์ 9 เซนติเมตร และแกนวาย 9 เซนติเมตร

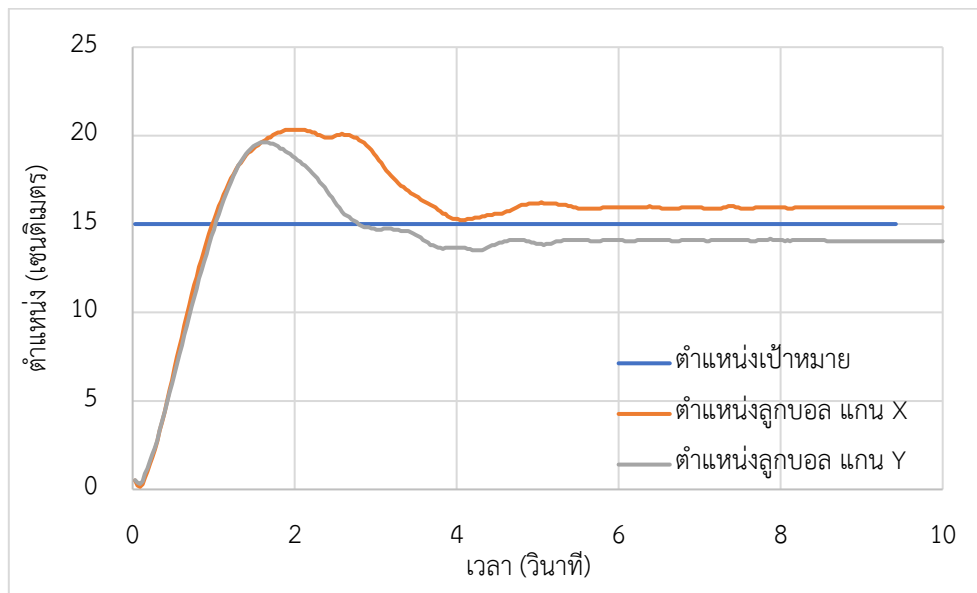


ภาพที่ 4-64 ผลตอบสนองมุมมองด้านบนตัวควบคุมแผ่นเลื่อน ระยะแกนเอกซ์ 9 เซนติเมตร และแกนวาย 9 เซนติเมตร

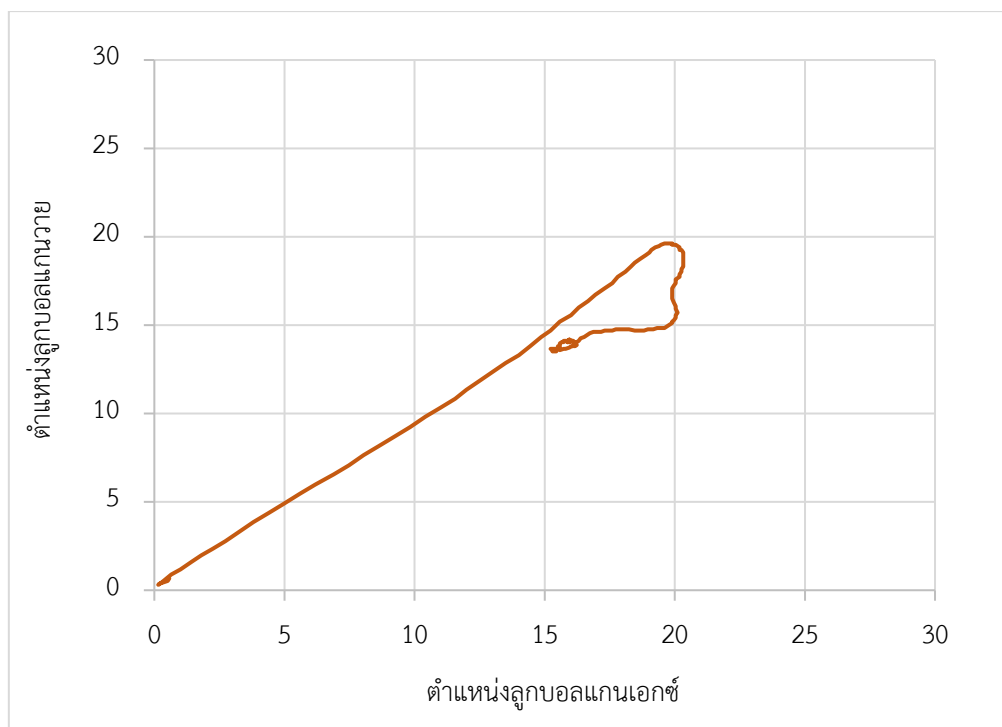
ตารางที่ 4-47 ผลตอบสนองสองแกนตัวควบคุมแผ่นเลื่อน ระยะ 9 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง	
	แกนเอกซ์	แกนวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.543	0.668
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	1.586
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	2.472
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	6.898	8.077
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	11.709	10.763
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	30.097	19.587
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	6.323	3.027
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	11.709	10.763
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.611	1.398

4.2.2.3.3 ตำแหน่งแกนเอกซ์ 15 เซนติเมตร แกนวาย 15 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อนสองแกนแสดงดังภาพที่ 4-65 มุมมองด้านบนแสดงดังภาพที่ 4-66 และผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-48



ภาพที่ 4-65 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน ระยะแกนเอกซ์ 15 เซนติเมตร และแกนวาย 15 เซนติเมตร

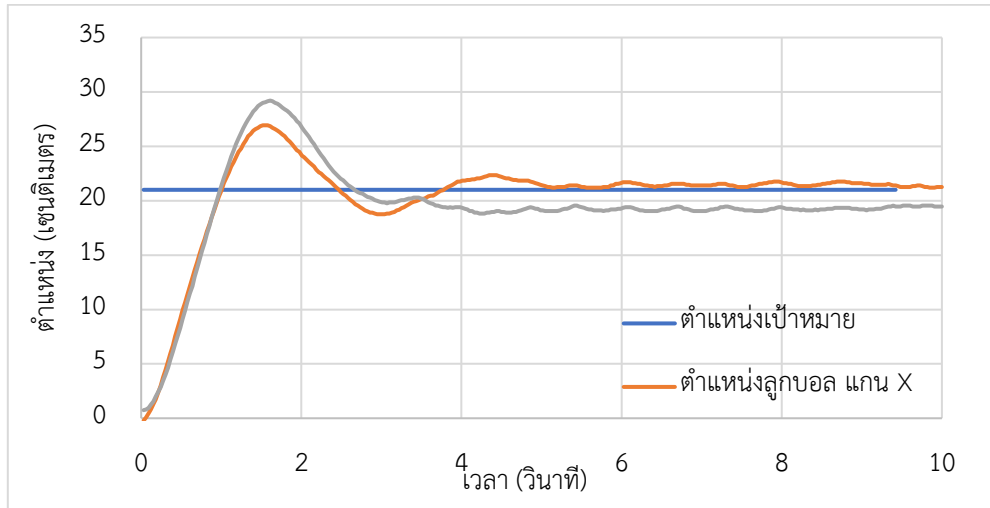


ภาพที่ 4-66 ผลตอบสนองมุมมองด้านบนตัวควบคุมแผ่นเลื่อน ระยะแกนเอกซ์ 15 เซนติเมตร และ แกนวาย 15 เซนติเมตร

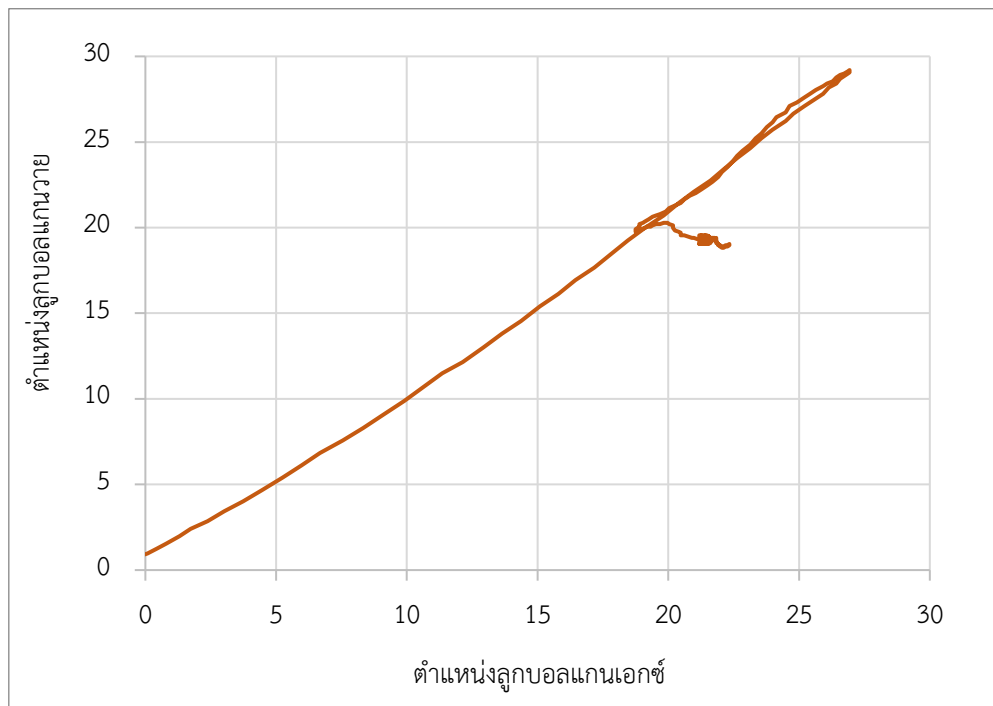
ตารางที่ 4-48 ผลตอบสนองสองแกนตัวควบคุมแผ่นเลื่อน ระยะ 15 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง	
	แกนเอกซ์	แกนวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.664	0.719
เวลาชั่วคราว (วินาที)	3.563	4.350
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	3.560	2.492
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	13.504	13.522
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	20.325	19.620
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	35.498	30.800
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	20.325	19.620
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.915	1.611

4.2.2.3.4 ตำแหน่งแกนเอกซ์ 21 เซนติเมตร แกนวาย 21 เซนติเมตร กราฟ
 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อนสองแกนแสดงดังภาพที่ 4-67 มุมมองด้านบนแสดงดังภาพที่ 4-68
 และผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-49



ภาพที่ 4-67 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน ระยะแกนเอกซ์ 21 เซนติเมตร และแกนวาย 21 เซนติเมตร

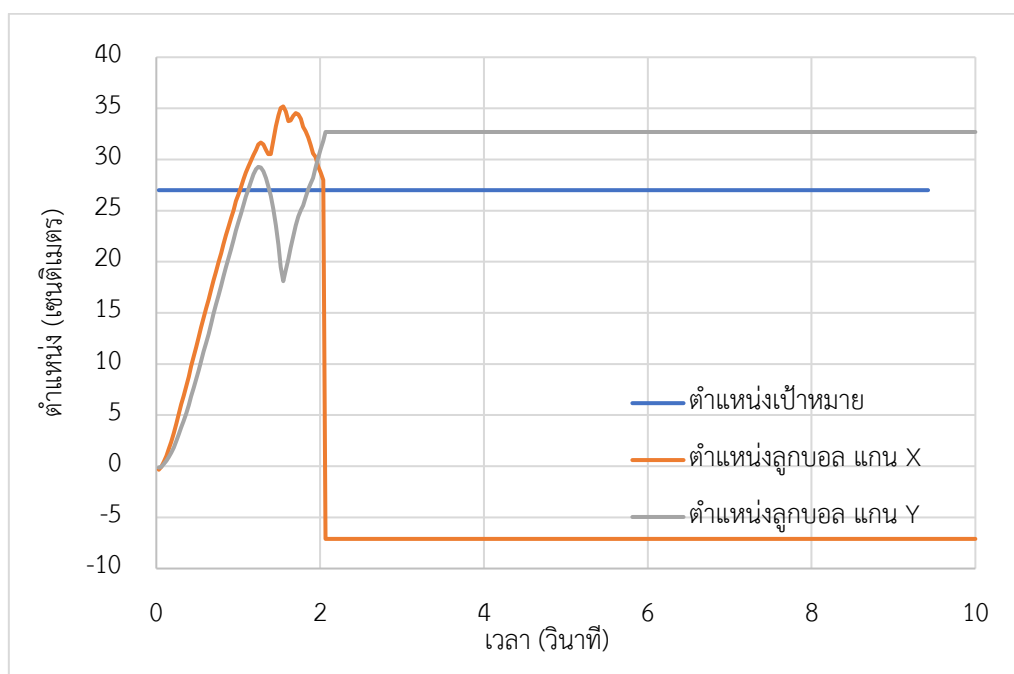


ภาพที่ 4-68 ผลตอบสนองมุมมองด้านบนตัวควบคุมแผ่นเลื่อน ระยะแกนเอกซ์ 21 เซนติเมตร และแกนวาย 21 เซนติเมตร

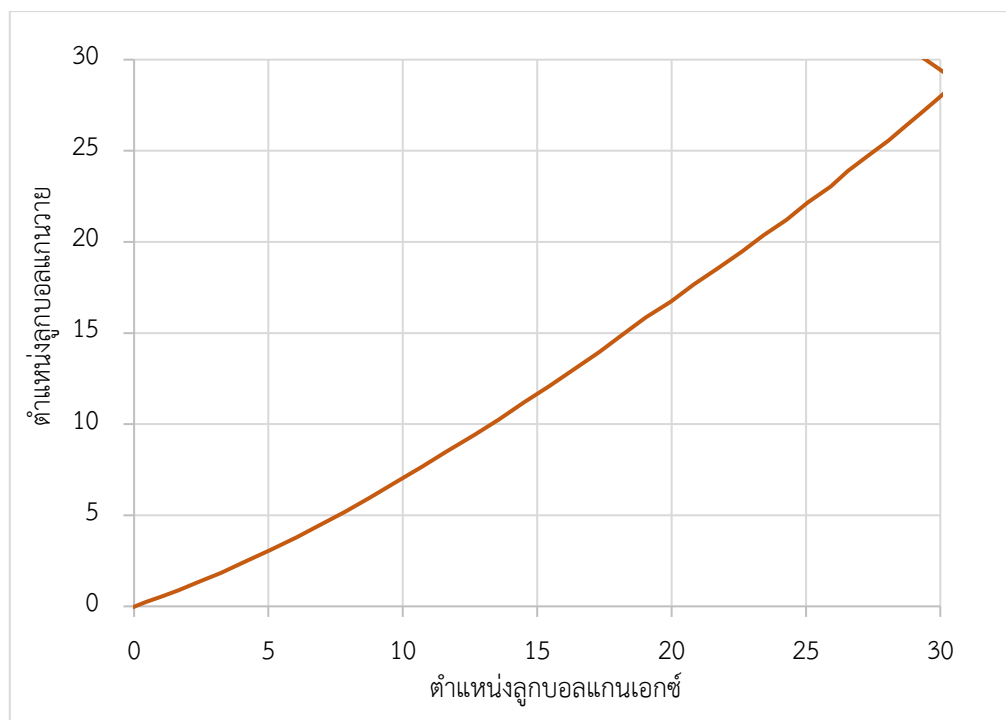
ตารางที่ 4-49 ผลตอบสนองสองแกนตัวควบคุมแผ่นเลื่อน ระยะ 21 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง	
	แกนเอกซ์	แกนวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.702	0.707
เวลาชั่วคราว (วินาที)	3.151	4.684
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	3.166	4.622
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	18.745	18.821
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	26.930	29.203
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	28.240	39.063
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	1.684	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	26.930	29.203
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.550	1.611

4.2.2.3.5 ตำแหน่งแกนเอกซ์ 27 เซนติเมตร แกนวาย 27 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อนสองแกนแสดงดังภาพที่ 4-69 มุมมองด้านบนแสดงดังภาพที่ 4-70 และผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-50



ภาพที่ 4-69 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน ระยะแกนเอกซ์ 27 เซนติเมตร และแกนวาย 27 เซนติเมตร



ภาพที่ 4-70 ผลตอบสนองมุมมองด้านบนตัวควบคุมแผ่นเลื่อน ระยะแกนเอกซ์ 27 เซนติเมตร และ แกนวาย 27 เซนติเมตร

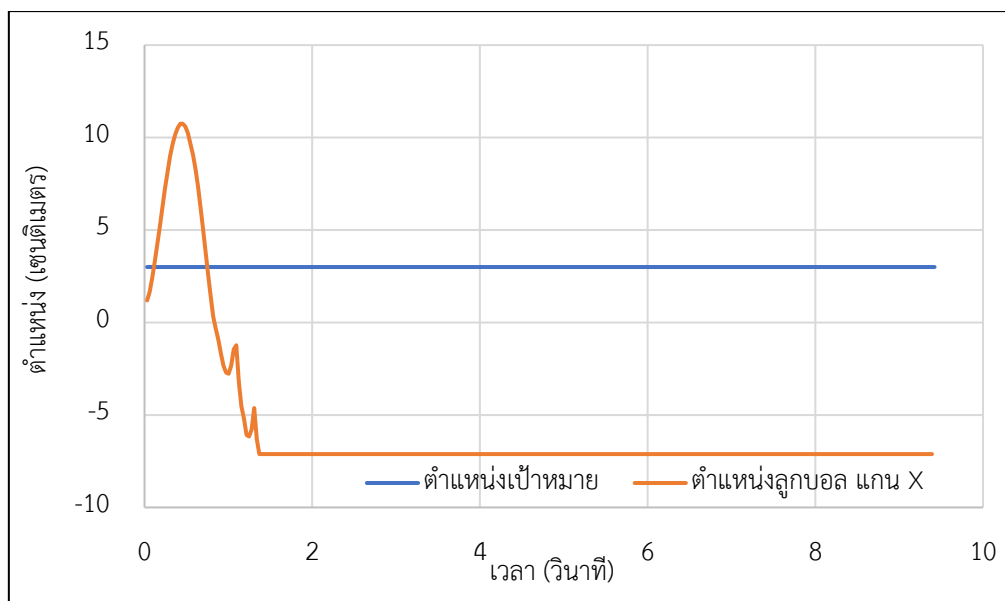
ตารางที่ 4-50 ผลตอบสนองสองแกนตัวควบคุมแผ่นเลื่อน ระยะ 21 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง	
	แกนเอกซ์	แกนวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.702	0.707
เวลาชั่วคราว (วินาที)	3.151	4.684
เวลาสูงสุดสมดุล (วินาที)	3.166	4.622
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	18.745	18.821
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	26.930	29.203
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	28.240	39.063
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	1.684	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	26.930	29.203
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.550	1.611

4.2.3 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ

4.2.3.1 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือแกนเอกซ์

4.2.3.1.1 ตำแหน่งแกนเอกซ์ 3 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ แนวแกนเอกซ์ แสดงดังภาพที่ 4-71 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-51

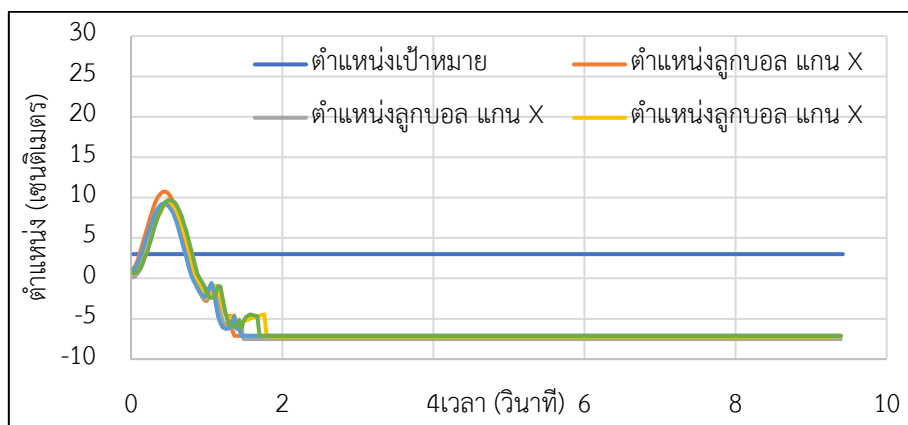


ภาพที่ 4-71 ผลตอบสนองตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-51 ผลตอบสนองตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.103
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	-7.115
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	10.746
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	258.193
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	237.157
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	10.746
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	0.456

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-72 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-52

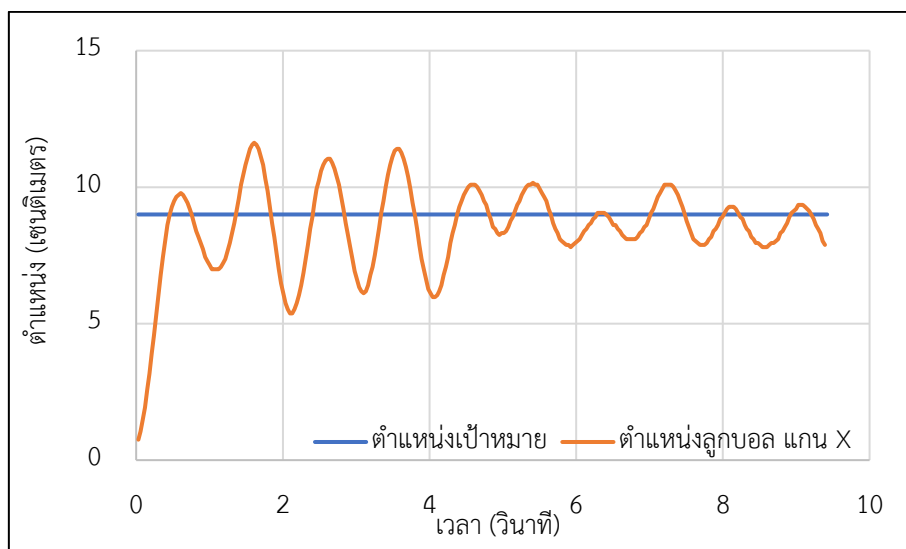


ภาพที่ 4-72 รวมผลตอบสนองตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-52 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาได้ขึ้น (วินาที)	0.103	0.127	0.178	0.123	0.187	0.037	0.144
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-	-	-	-	-	-
เวลาสูงสุดสมดุล (วินาที)	-	-	-	-	-	-	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	-7.115	-7.515	-7.199	-7.115	-7.115	0.173	-7.212
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	10.746	9.611	9.265	9.276	9.717	0.606	9.723
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	258.19	220.36	208.82	209.19	223.89	20.199	224.093
สภาวะหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	237.15	250.49	239.97	237.15	237.15	5.778	240.387
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	10.746	9.611	9.265	9.276	9.717	0.606	9.723
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	0.456	0.517	0.517	0.456	0.547	0.041	0.498

4.2.3.1.2 ตำแหน่งแกนเอกซ์ 9 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุม ทรรกศาสตร์คัลคุมเครือแวนแกนเอกซ์ แสดงดังภาพที่ 4-73 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-53

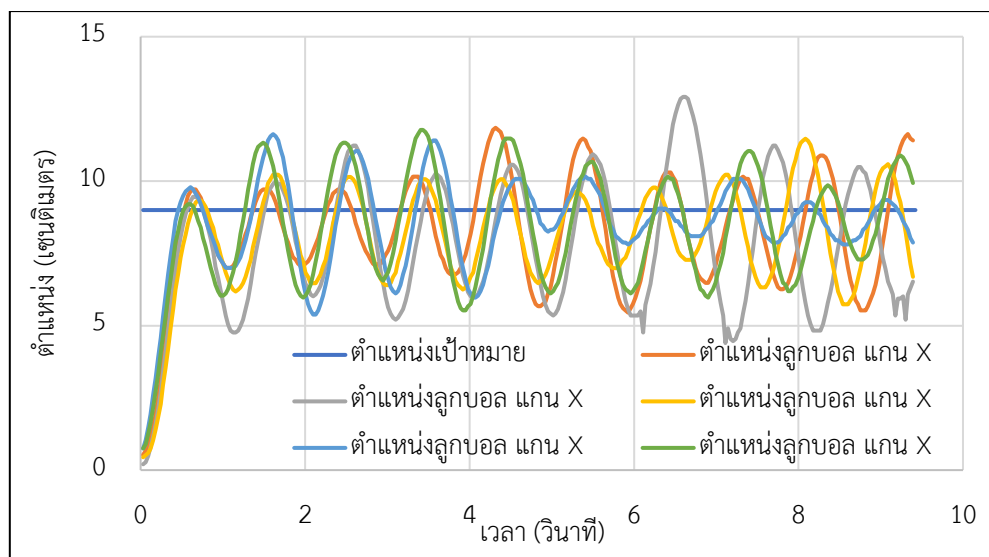


ภาพที่ 4-73 ผลตอบสนองตัวควบคุมทรรกศาสตร์คัลคุมเครือ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-53 ผลตอบสนองตัวควบคุมทรรกศาสตร์คัลคุมเครือ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.353
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	5.380
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	11.628
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	29.198
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	-
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	11.628
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.641

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-74 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-54

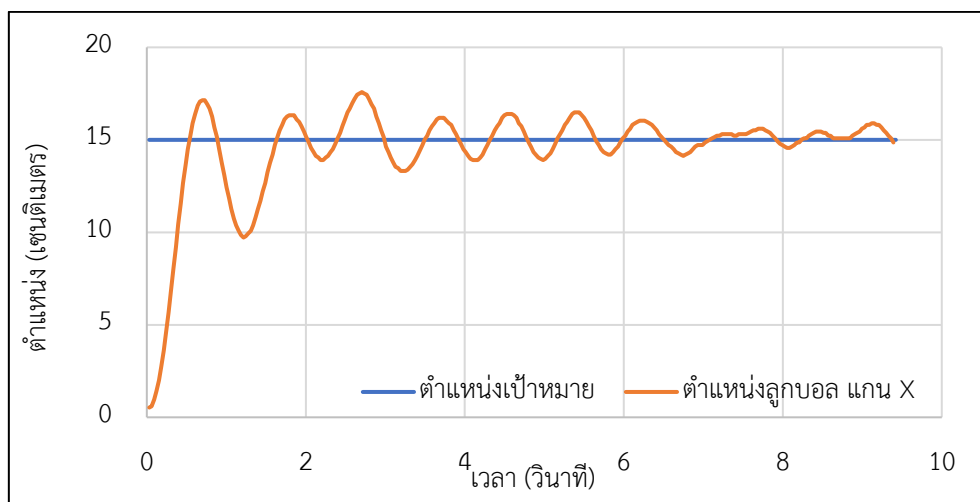


ภาพที่ 4-74 รวมผลตอบสนองตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-54 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.379	0.358	0.404	0.353	0.383	0.020	0.375
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-	-	-	-	-	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	-	-	-	-	-	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	5.454	4.392	5.737	5.380	5.527	0.524	5.298
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	11.848	12.918	11.470	11.628	11.775	0.572	11.928
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	31.648	43.537	27.441	29.198	30.831	6.360	32.531
สภาวะหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	11.848	12.918	11.470	11.628	11.775	0.572	11.928
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	4.346	6.626	8.115	1.641	3.435	2.567	4.833

4.2.3.1.2 ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุม
 ทรรกศาสตร์คลุมเครือแนวแกนเอกซ์ แสดงดังภาพที่ 4-75 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-55

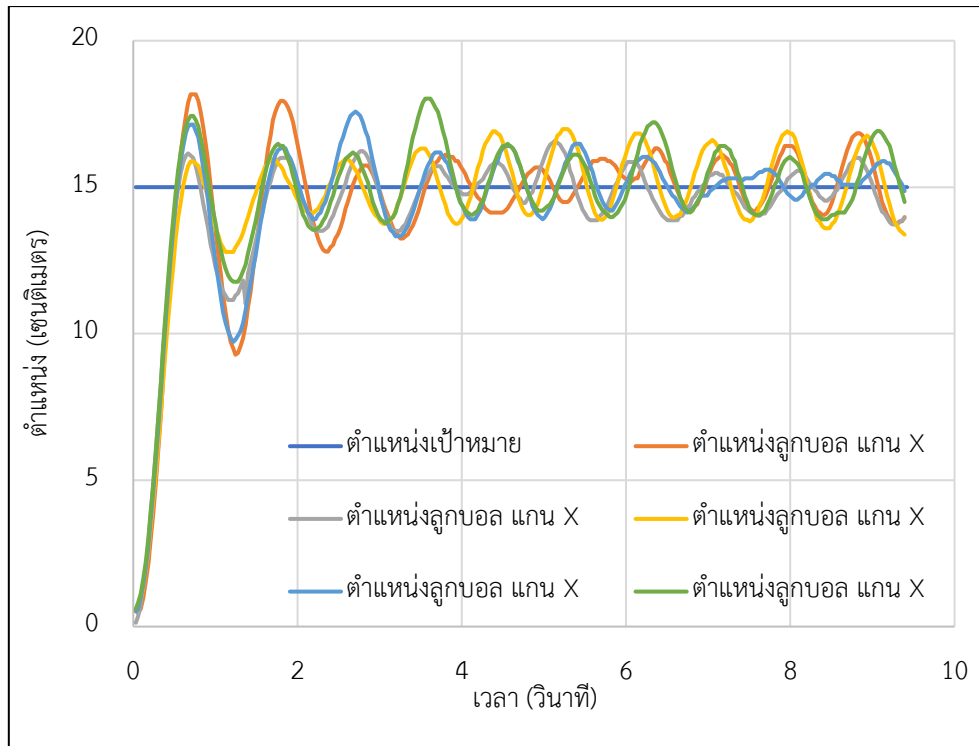


ภาพที่ 4-75 ผลตอบสนองตัวควบคุมทรรกศาสตร์คลุมเครือ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-55 ผลตอบสนองตัวควบคุมทรรกศาสตร์คลุมเครือ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.357
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	3.335
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	9.717
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	17.581
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	17.209
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	17.581
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	2.736

ผลการตอบสนอง 5 ครั้งจากการทดลองตำแหน่ง 15 เซนติเมตร แสดงดังภาพที่ 4-76 และผล
 การตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-56

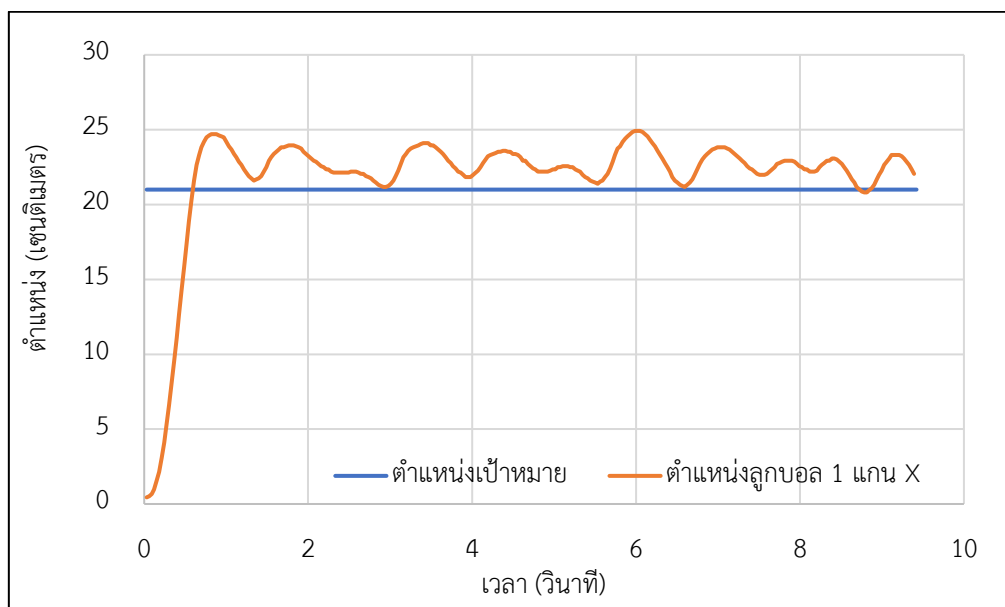


ภาพที่ 4-76 รวมผลตอบสนองตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-56 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.341	0.357	0.397	0.357	0.357	0.021	0.362
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	9.825	9.517	-	-	0.218	9.671
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	9.826	9.502	3.335	-	3.657	7.554
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	9.276	11.007	12.793	9.717	11.775	1.449	10.913
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	18.390	16.593	16.982	17.581	18.022	0.735	17.514
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	22.599	10.622	13.215	17.209	20.149	4.899	16.759
สภาวะความหน่วงน้อย	0.000	0.118	0.000	0.000	0.000	0.053	0.024
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	18.390	16.593	16.982	17.581	18.022	0.735	17.514
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	9.878	5.167	5.258	2.736	3.587	2.761	5.325

4.2.3.1.3 ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุม
ตรรกศาสตร์คลุมเครือแนวแกนเอกซ์ แสดงดังภาพที่ 4-77 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-57

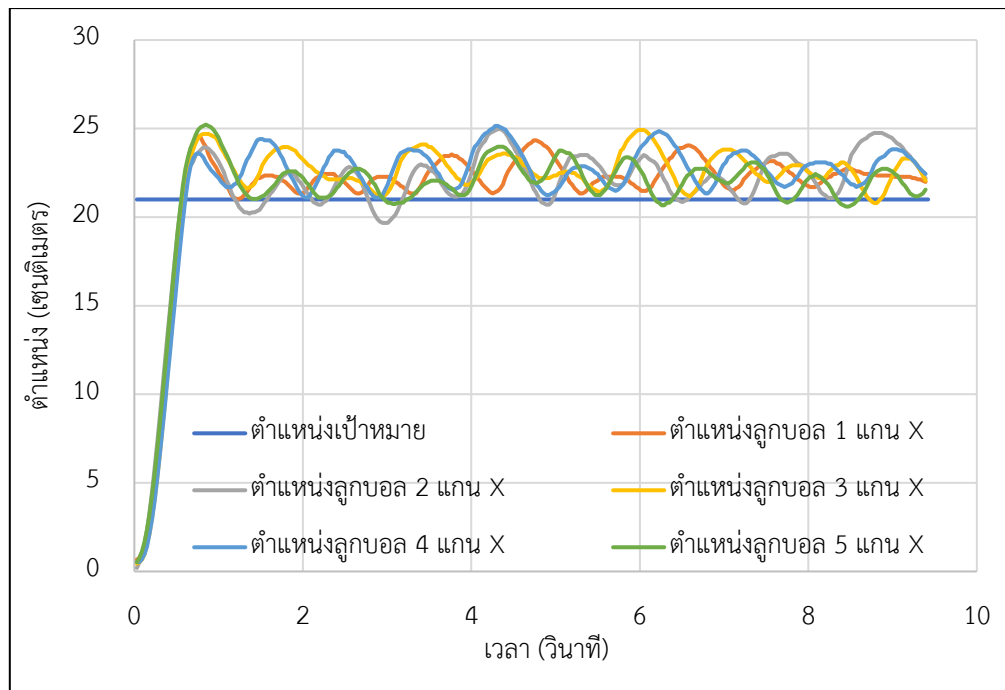


ภาพที่ 4-77 ผลตอบสนองตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-57 ผลตอบสนองตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.367
เวลาชั่วคราว (วินาที)	9.303
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	9.297
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	20.290
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	24.920
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	18.668
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	24.920
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	6.018

ผลการตอบสนอง 5 ครั้งจากการทดลองตำแหน่ง 21 เซนติเมตร แสดงดังภาพที่ 4-78 และผล
การตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-58

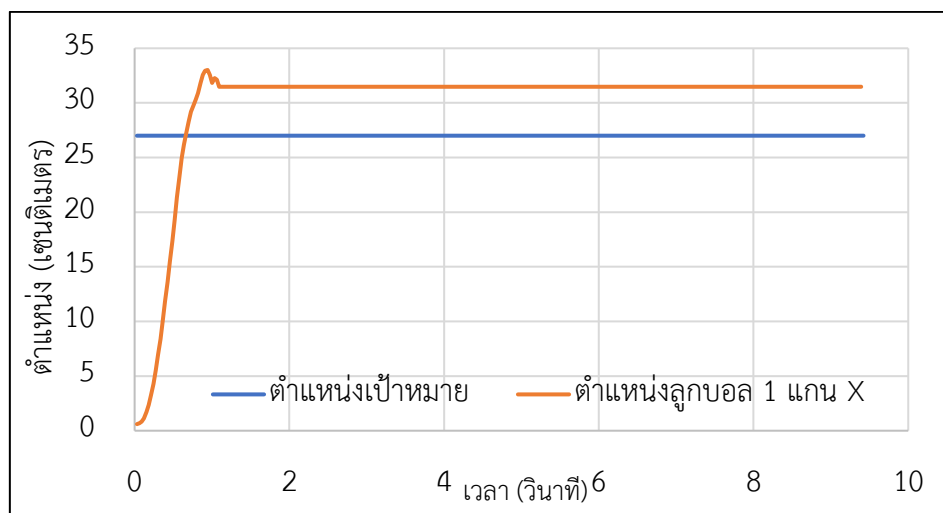


ภาพที่ 4-78 รวมผลตอบสนองตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-58 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.370	0.366	0.367	0.378	0.370	0.005	0.370
เวลาชั่วคราว (วินาที)	7.657	9.294	9.303	-	7.424	1.019	8.420
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	7.643	9.293	9.297	-	5.977	1.588	8.052
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	20.080	19.239	20.290	19.786	19.198	0.490	19.719
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	24.564	24.972	24.920	25.152	25.225	0.258	24.967
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	16.971	18.916	18.668	19.771	20.121	1.227	18.889
สภาวะหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	24.564	24.972	24.920	25.152	25.225	0.258	24.967
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	0.790	4.346	6.018	4.316	0.881	2.327	3.270

4.2.3.1.4 ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุม ทรรกศาสตร์คลุมเครือแนวแกนเอกซ์ แสดงดังภาพที่ 4-79 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-59

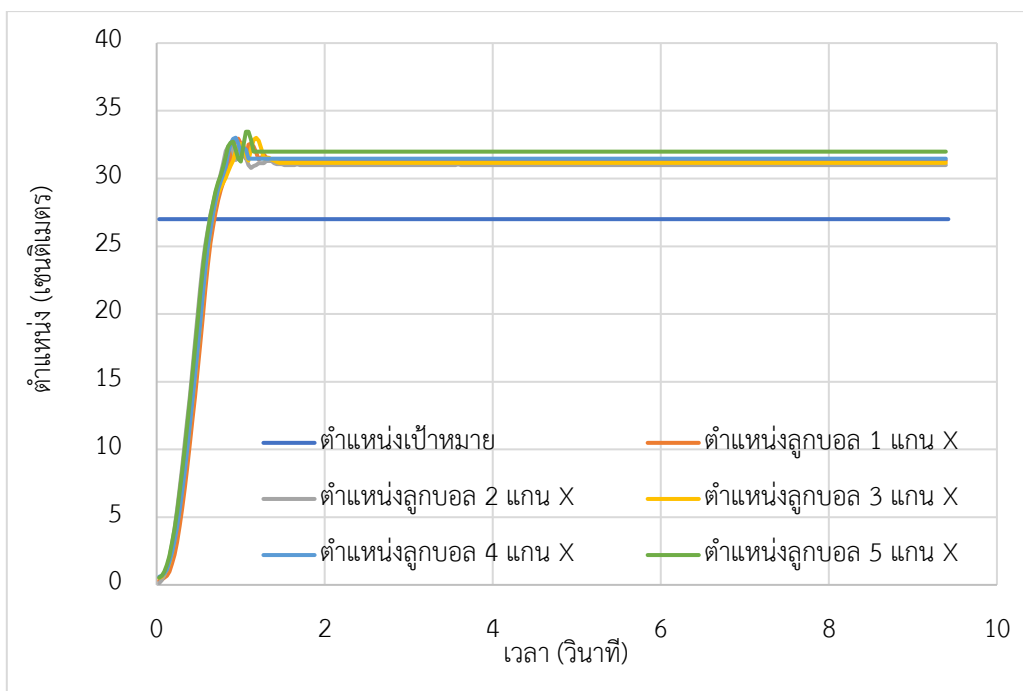


ภาพที่ 4-79 ผลตอบสนองตัวควบคุมทรรกศาสตร์คลุมเครือ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-59 ผลตอบสนองตัวควบคุมทรรกศาสตร์คลุมเครือ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.403
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	24.931
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	33.016
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	22.283
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	33.016
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	0.973

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-80 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-60



ภาพที่ 4-80 รวมผลตอบสนองตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

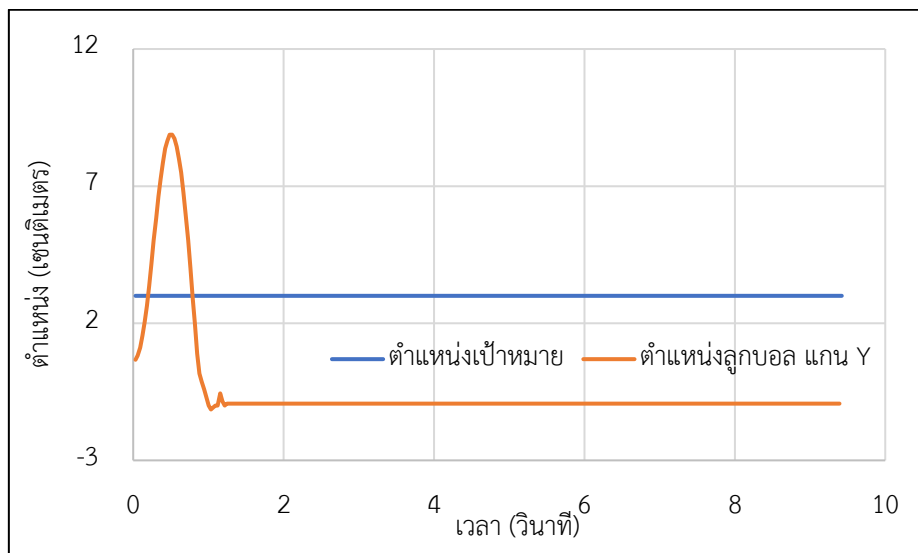
ตารางที่ 4-60 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ แกนเอกซ์ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.393	0.387	0.406	0.403	0.397	0.008	0.397
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-	-	-	-	-	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	-	-	-	-	-	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	25.225	25.11 9	24.773	24.93 1	24.858	0.187	24.981
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	32.943	32.54 3	33.005	33.01 6	33.457	0.325	32.993
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	22.010	20.52 9	22.242	22.28 3	23.916	1.202	22.196
สภาวะหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.066	0.000	0.000	0.000	0.029	0.013
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	32.943	32.54 3	33.005	33.01 6	33.457	0.325	32.993
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.003	0.912	1.216	0.973	1.094	0.119	1.039

4.2.3.2 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือแกนวาย

4.2.3.2.1 ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุม

ตรรกศาสตร์คลุมเครือ แกนวาย แสดงดังภาพที่ 4-81 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-61

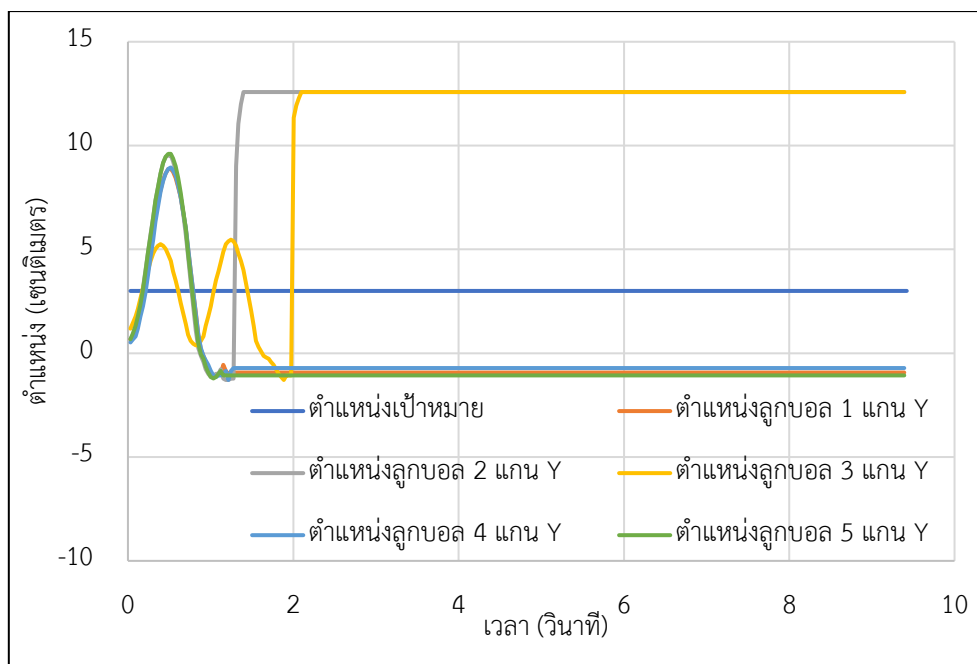


ภาพที่ 4-81 ผลตอบสนองตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ แกนวายตำแหน่ง 3 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-61 ผลตอบสนองตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ แกนวายตำแหน่ง 3 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.185
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	-1.144
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	8.875
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	195.800
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	38.120
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	8.875
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	0.517

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-82 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-62

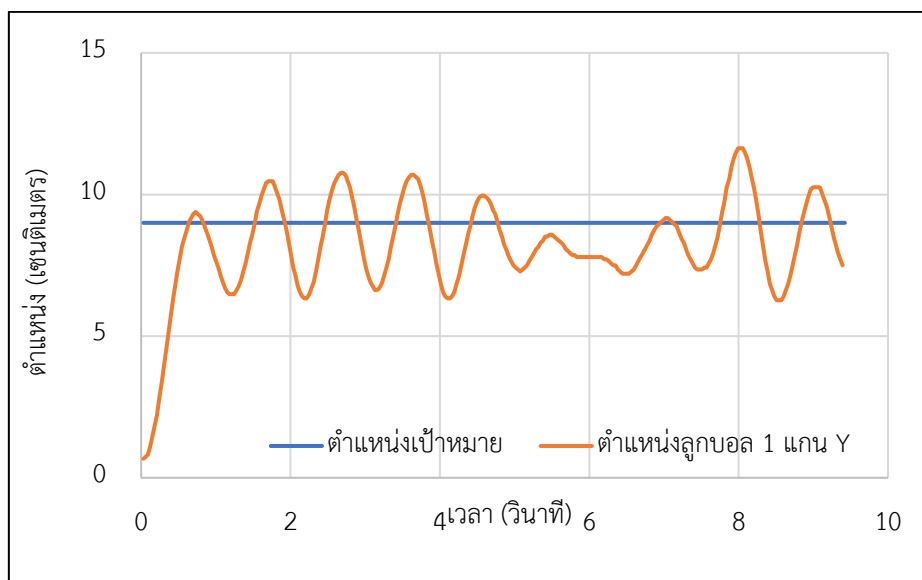


ภาพที่ 4-82 รวมผลตอบสนองตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-62 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ แกนวายตำแหน่ง 3 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.185	0.164	0.156	0.202	0.167	0.019	0.175
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-	-	-	-	-	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	-	-	-	-	-	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	-1.144	-1.289	-1.289	-1.289	-1.216	0.065	-1.245
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	8.875	12.578	12.578	8.948	9.601	1.903	10.516
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	195.84 0	319.26 0	319.26 0	198.26 0	220.04 0	63.444	250.53 2
สภาวะหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	38.120	42.960	42.960	42.960	40.540	2.165	41.508
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	8.875	12.578	12.578	8.948	9.601	1.903	10.516
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	0.517	1.429	2.128	0.547	0.517	0.729	1.027

4.2.3.2.2 ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมตรรกศาสตร์
 กลุ่มเครื่องแนวแกนวาย แสดงดังภาพที่ 4-83 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-63

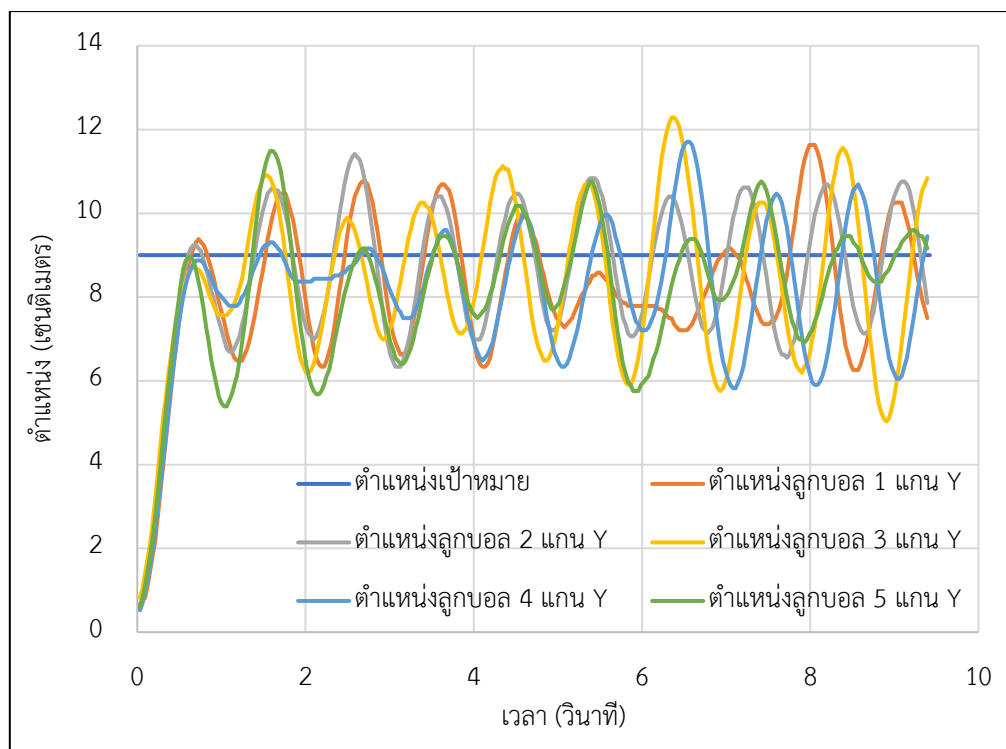


ภาพที่ 4-83 ผลตอบสนองตัวควบคุมตรรกศาสตร์กลุ่มเครื่อง แกนวายตำแหน่ง 9 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-63 ผลตอบสนองตัวควบคุมตรรกศาสตร์กลุ่มเครื่อง แกนวายตำแหน่ง 9 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.444
เวลาชั่วคราว (วินาที)	9.774
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	9.767
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	6.262
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	11.634
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	29.267
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	11.634
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	8.024

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-84 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-64

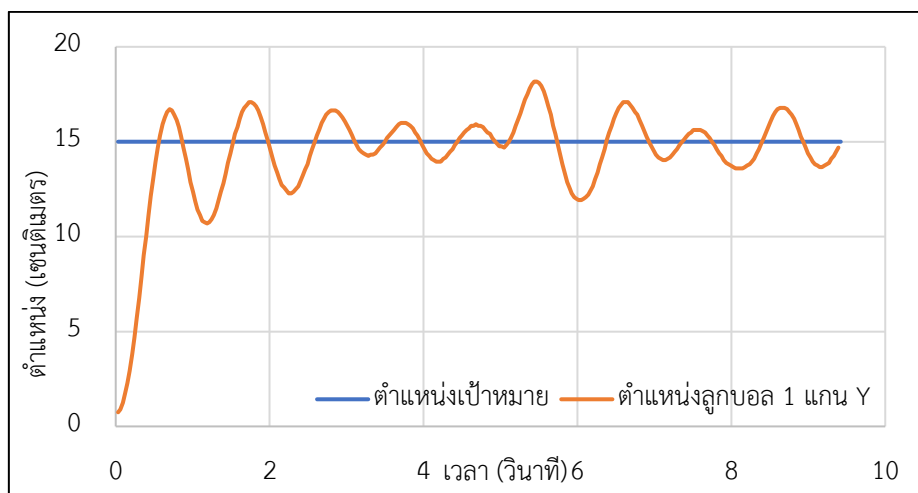


ภาพที่ 4-84 รวมผลตอบสนองตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ แกนวายตำแหน่ง 9 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-64 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ แกนวายตำแหน่ง 9 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.444	0.434	0.488	0.475	0.434	0.025	0.455
เวลาชั่วคราว (วินาที)	9.774	-	-	-	-	-	9.774
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	9.767	-	-	-	10.010	0.172	9.888
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	6.262	6.334	5.027	5.826	5.390	0.561	5.768
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	11.634	11.416	12.287	11.707	11.489	0.344	11.707
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	29.267	26.847	36.527	30.073	27.653	3.826	30.073
สภาวะหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	11.634	11.416	12.287	11.707	11.489	0.344	11.707
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	8.024	2.614	6.383	6.565	1.611	2.769	5.039

4.2.3.2.3 ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุม ทรรกศาสตร์คลุมเครือแนวแกนวาย แสดงดังภาพที่ 4-85 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-65

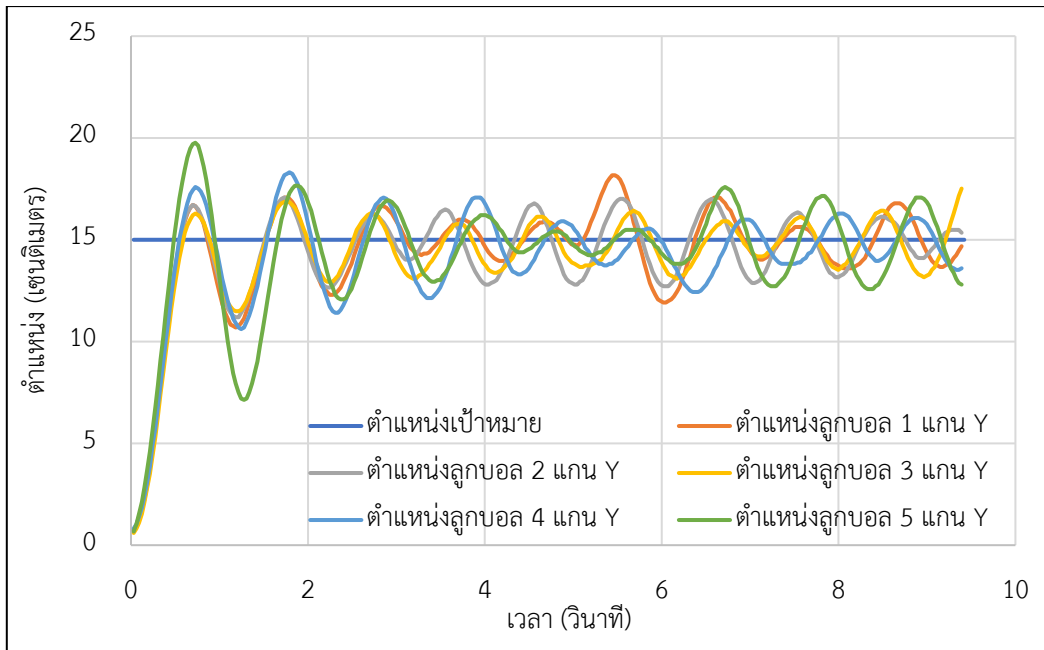


ภาพที่ 4-85 ผลตอบสนองตัวควบคุมทรรกศาสตร์คลุมเครือ แกนวายตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-65 ผลตอบสนองตัวควบคุมทรรกศาสตร์คลุมเครือ แกนวายตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.395
เวลาชั่วคราว (วินาที)	8.811
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	8.799
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	10.690
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	18.168
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	21.120
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	18.168
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	5.471

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-86 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-66

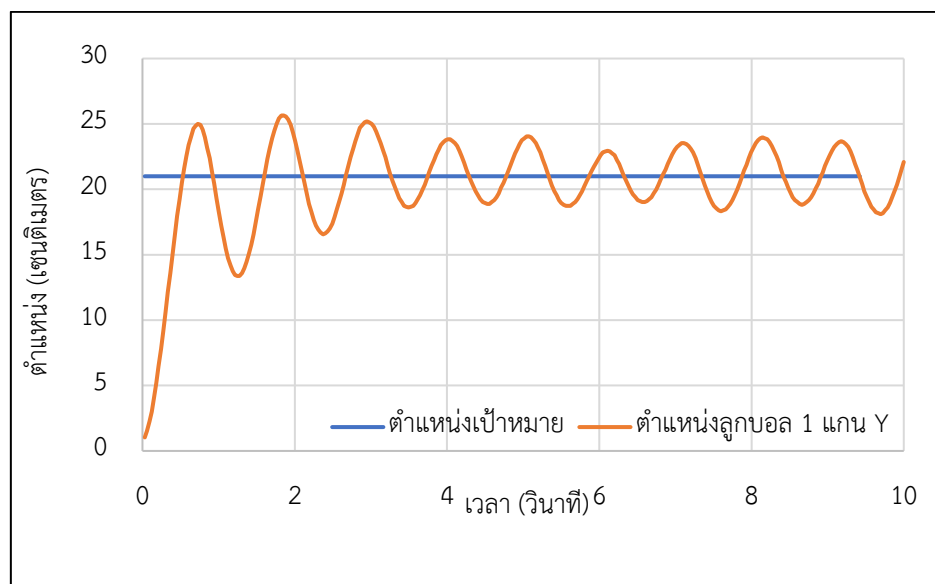


ภาพที่ 4-86 รวมผลตอบสนองตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ แกนวายตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-66 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ แกนวายตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.395	0.397	0.403	0.397	0.357	0.018	0.390
เวลาชั่วคราว (วินาที)	8.811	8.131	-	9.408	9.669	0.684	9.005
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	8.799	8.122	-	6.624	9.662	1.284	8.302
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	10.690	11.198	11.489	10.618	7.133	1.766	10.226
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	18.168	17.079	18.168	18.313	19.765	0.958	18.299
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	21.120	13.860	21.120	22.088	31.768	6.388	21.991
สภาวะหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	18.168	17.079	18.168	18.313	19.765	0.958	18.299
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	5.471	1.763	9.513	1.824	0.760	3.630	3.866

4.2.3.2.4 ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุม ทรรกศาสตร์คลุมเครือแนวแกนวาย แสดงดังภาพที่ 4-87 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-67

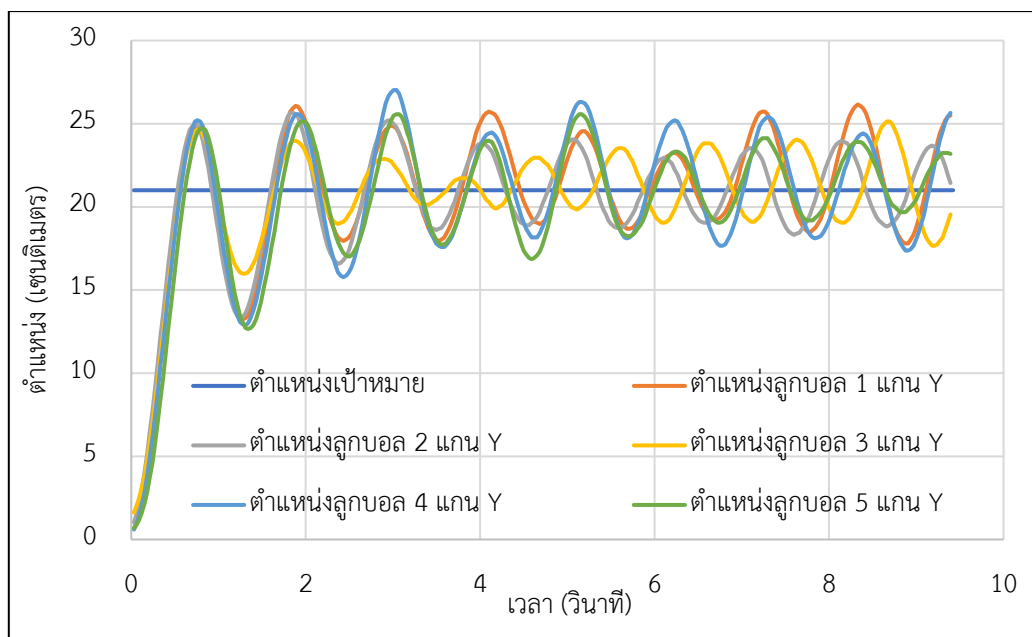


ภาพที่ 4-87 ผลตอบสนองตัวควบคุมทรรกศาสตร์คลุมเครือ แกนวายตำแหน่ง 21 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-67 ผลตอบสนองตัวควบคุมทรรกศาสตร์คลุมเครือ แกนวายตำแหน่ง 21 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.394
เวลาชั่วคราว (วินาที)	9.848
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	9.842
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	13.376
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	25.646
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	22.123
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	25.646
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.854

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-88 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-68

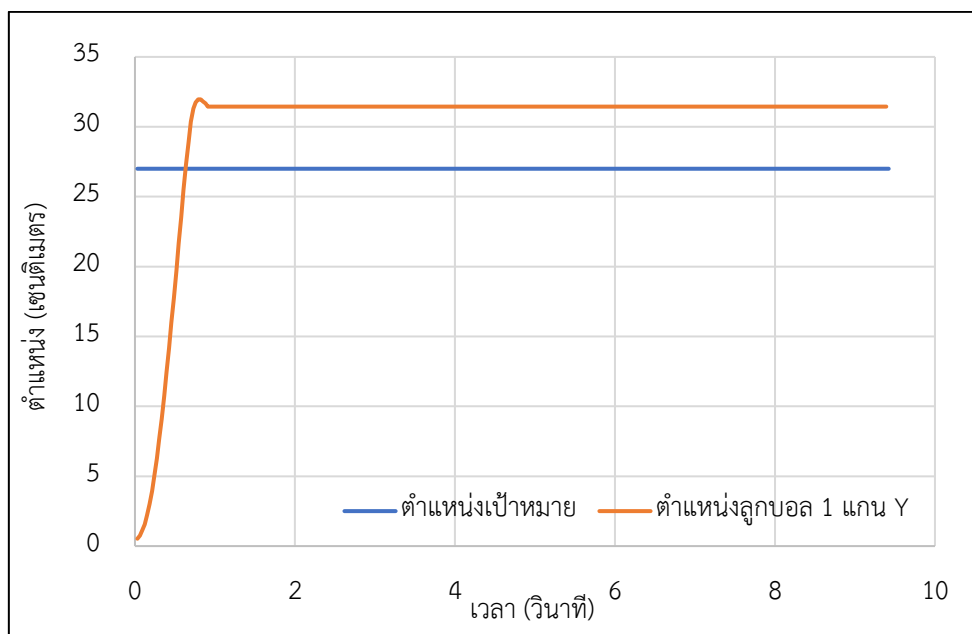


ภาพที่ 4-88 รวมผลตอบสนองตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ แกนวายตำแหน่ง 21 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-68 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ แกนวายตำแหน่ง 21 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.387	0.394	0.444	0.390	0.414	0.024	0.406
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	9.848	9.955	-	9.451	0.265	9.751
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	9.842	9.947	-	9.438	0.268	9.742
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	13.231	13.376	15.990	12.868	12.650	1.354	13.623
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	26.154	25.646	25.138	27.025	25.573	0.722	25.907
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	24.543	22.123	19.703	28.691	21.777	3.436	23.367
สภาวะหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	26.154	25.646	25.138	27.025	25.573	0.722	25.907
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	8.358	1.854	8.693	3.039	3.070	3.255	5.003

4.2.3.2.4 ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุม
 ทรรกศาสตร์คลุมเครือแนวแกนวาย แสดงดังภาพที่ 4-89 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-69

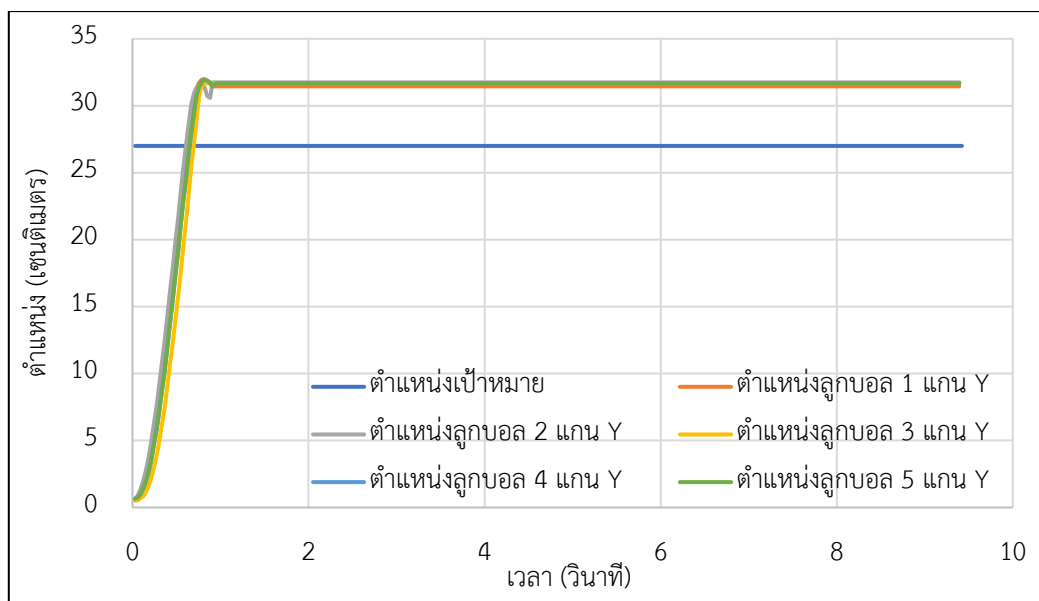


ภาพที่ 4-89 ผลตอบสนองตัวควบคุมทรรกศาสตร์คลุมเครือ แกนวายตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-69 ผลตอบสนองตัวควบคุมทรรกศาสตร์คลุมเครือ แกนวายตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.418
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	25.501
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	31.962
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	18.378
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	31.962
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	0.821

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ย
 ของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร ทั้ง 5
 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-90 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-70



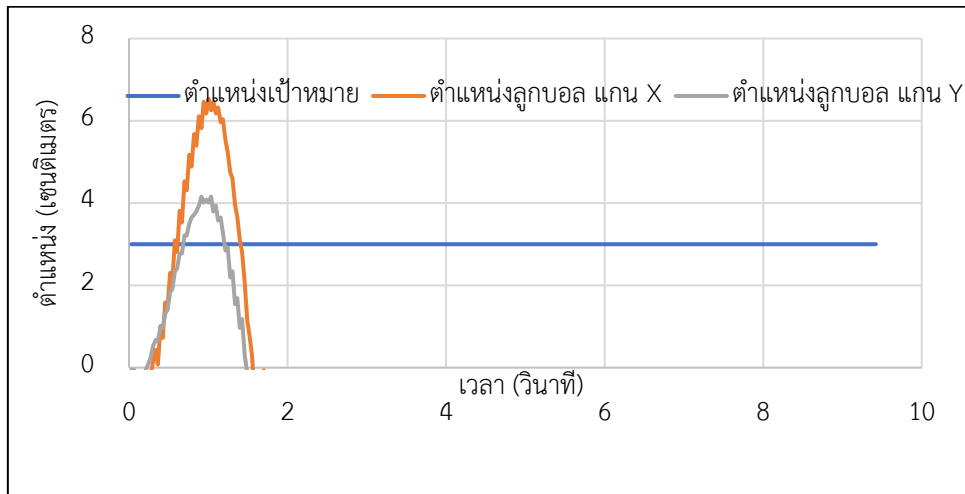
ภาพที่ 4-90 รวมผลตอบสนองตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ แกนวายตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-70 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ แกนวายตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

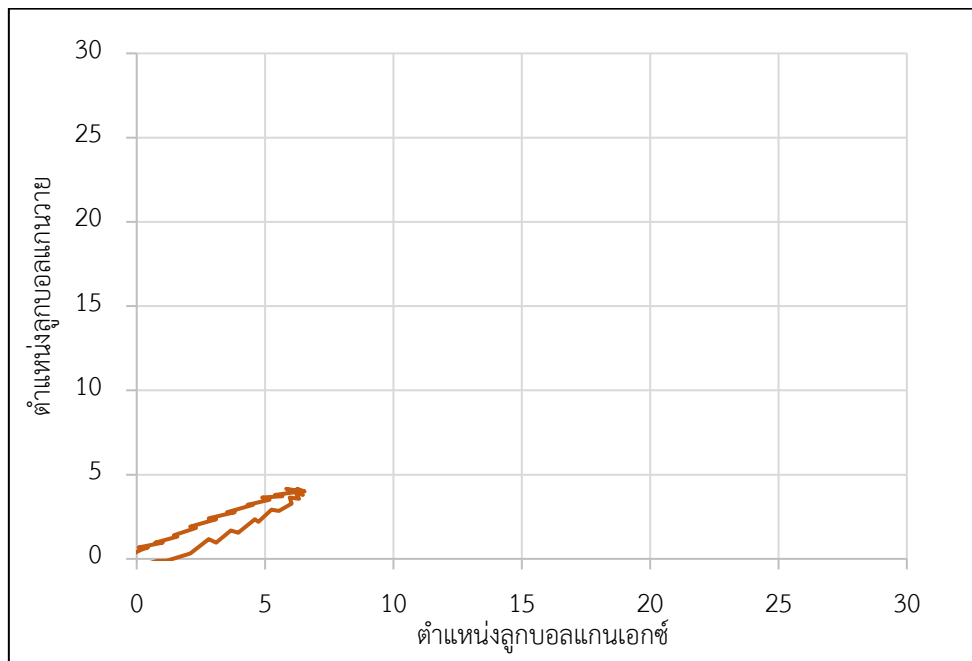
ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.418	0.409	0.419	0.419	0.419	0.004	0.417
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-	-	-	-	-	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	-	-	-	-	-	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	25.501	25.283	25.355	24.557	24.557	0.457	25.050
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	31.962	31.744	31.672	31.962	31.962	0.142	31.860
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	18.378	17.571	17.302	18.378	18.378	0.524	18.001
สภาวะหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	31.962	31.744	31.672	31.962	31.962	0.142	31.860
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	0.821	0.942	0.821	0.851	0.851	0.050	0.857

4.2.3.3 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือสองแกน

4.2.3.3.1 ตำแหน่งแกนเอกซ์ 3 เซนติเมตร แกนวาย 3 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือสองแกนแสดงดังภาพที่ 4-91 มุมมองด้านบนแสดงดังภาพที่ 4-92 และผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-71



ภาพที่ 4-91 ผลตอบสนองตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ ระยะแกนเอกซ์ 3 เซนติเมตร และแกนวาย 3 เซนติเมตร

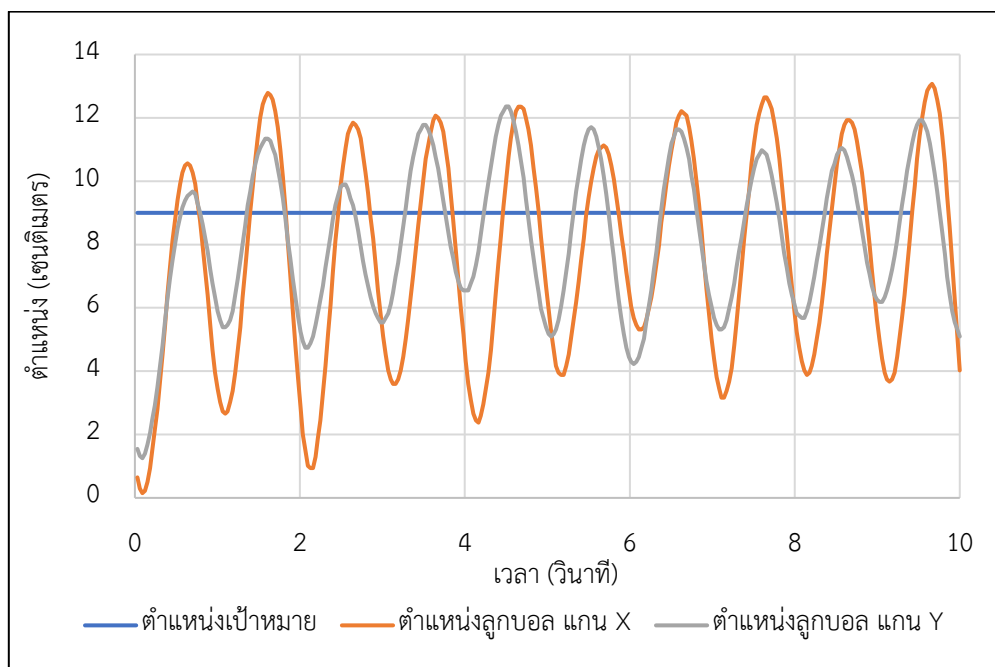


ภาพที่ 4-92 ผลตอบสนองมุมมองด้านบนตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ ระยะแกนเอกซ์ 3 เซนติเมตร และแกนวาย 3 เซนติเมตร

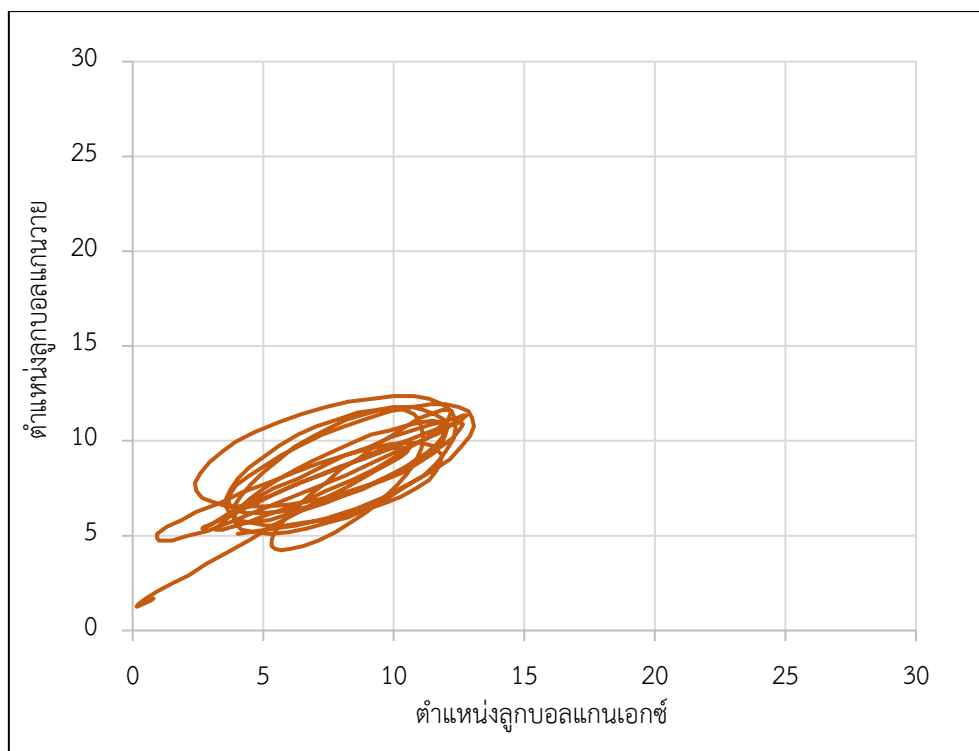
ตารางที่ 4-71 ผลตอบสนองสองแกนตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุม ระยะแกนเอกซ์ 3 เซนติเมตร และแกนวาย 3 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง	
	แกนเอกซ์	แกนวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	-9.587	-9.553
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	0	-1.216
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	6.0365	3.430
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	101.2167	14.340
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	11.79	40.540
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	6.0365	3.430
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	0	0.000

4.2.3.3.2 ตำแหน่งแกนเอกซ์ 9 เซนติเมตร แกนวาย 9 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครื่องสองแกนแสดงดังภาพที่ 4-93 มุมมองด้านบนแสดงดังภาพที่ 4-94 และผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-72



ภาพที่ 4-93 ผลตอบสนองตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุม ระยะแกนเอกซ์ 9 เซนติเมตร และแกนวาย

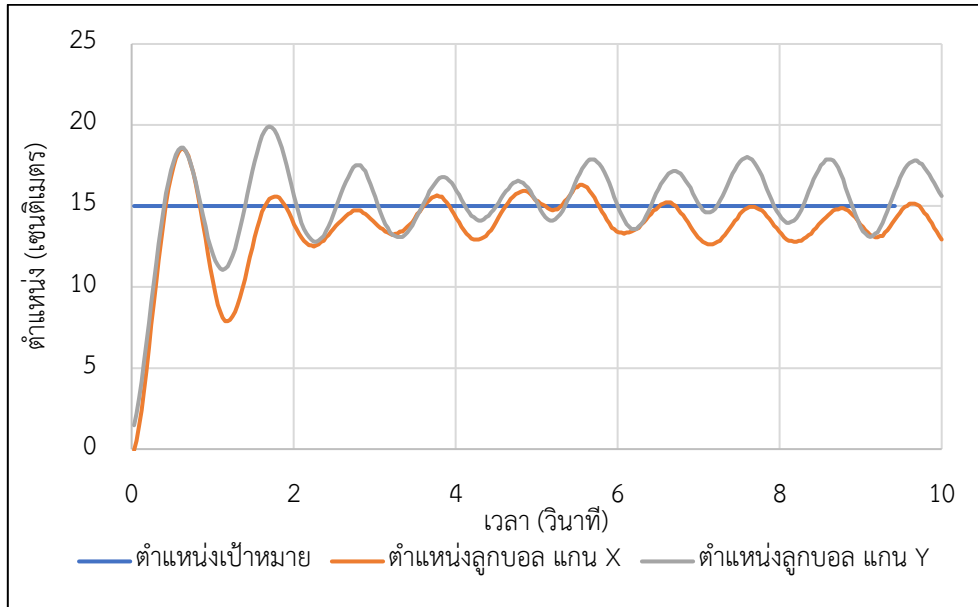


ภาพที่ 4-94 ผลตอบสนองมุมมองด้านบนตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุม ระยะแกนเอกซ์ 9 เซนติเมตร และแกนวาย 9 เซนติเมตร

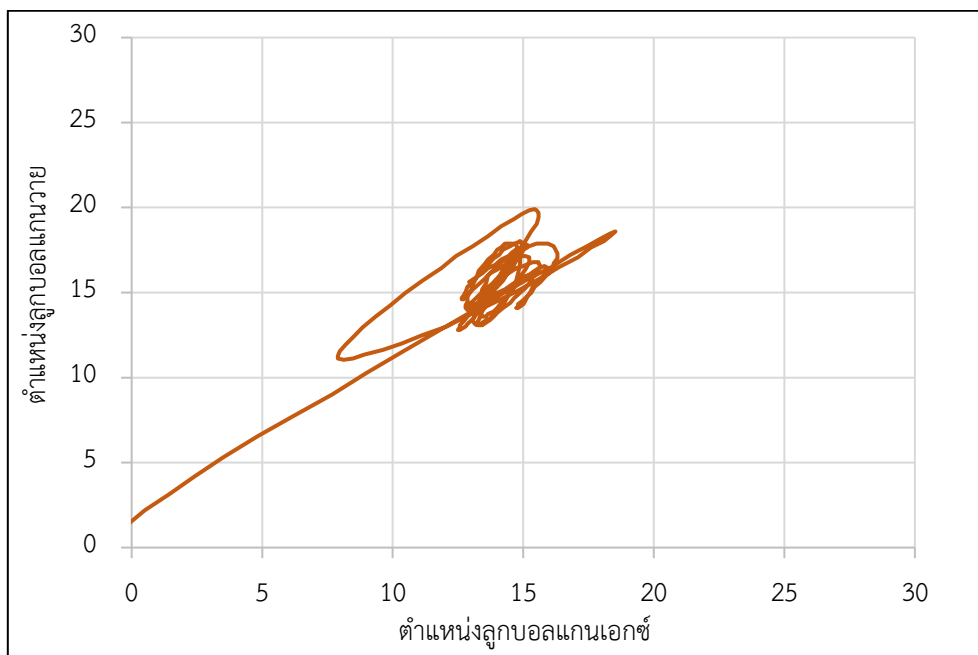
ตารางที่ 4-72 ผลตอบสนองสองแกนตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุม ระยะแกนเอกซ์ 9 เซนติเมตร และแกนวาย 9 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง	
	แกนเอกซ์	แกนวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.276	0.492
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	0.939	4.229
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	13.073	12.360
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	45.254	37.333
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	13.073	12.360
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	9.696	4.529

4.2.3.3.1 ตำแหน่งแกนเอกซ์ 15 เซนติเมตร แกนวาย 15 เซนติเมตร กราฟ
 ผลตอบสนองตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือสองแกนแสดงดังภาพที่ 4-95 มุมมองด้านบนแสดงดัง
 ภาพที่ 4-96 และผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-73



ภาพที่ 4-95 ผลตอบสนองตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ ระยะแกนเอกซ์ 15 เซนติเมตร และ
 แกนวาย 15 เซนติเมตร

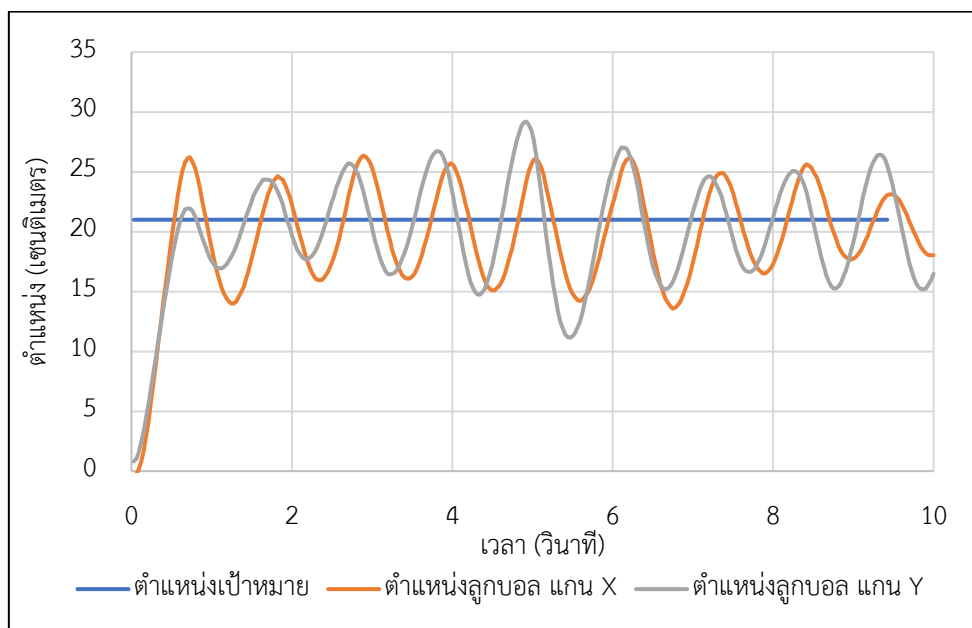


ภาพที่ 4-96 ผลตอบสนองมุมมองด้านบนตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ ระยะแกนเอกซ์ 15
 เซนติเมตร และแกนวาย 15 เซนติเมตร

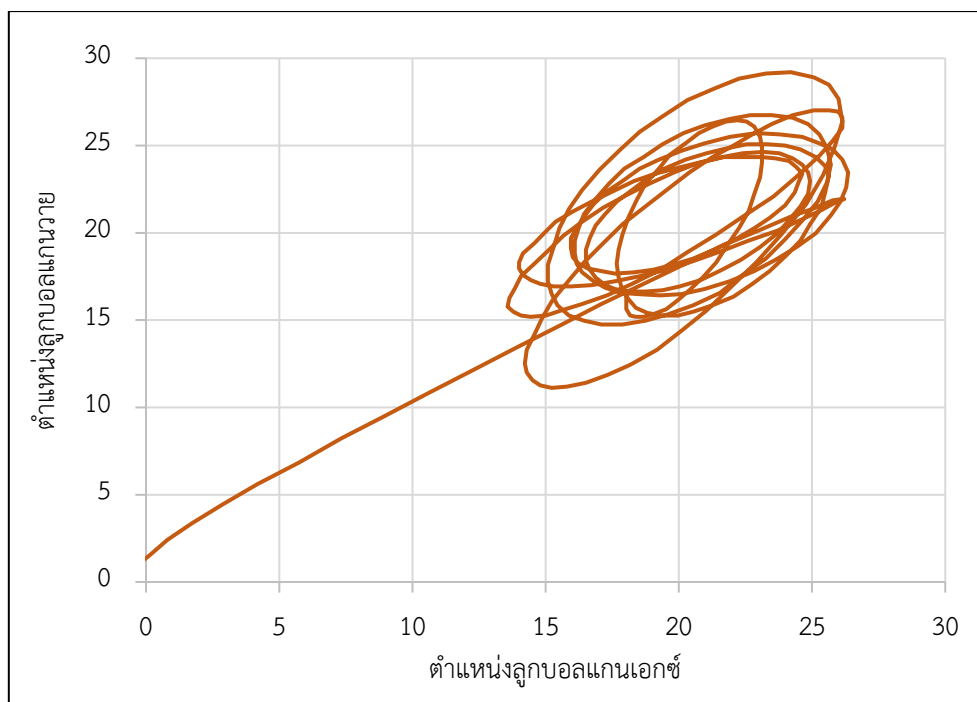
ตารางที่ 4-73 ผลตอบสนองสองแกนตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุม ระยะแกนเอกซ์ 15 เซนติเมตร และแกนวาย 15 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง	
	แกนเอกซ์	แกนวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.288	0.326
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	9.941
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	9.929
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	7.903	11.053
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	18.530	19.910
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	23.531	32.74
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	3.315	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	18.530	19.910
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	0.638	1.733

4.2.3.3.3 ตำแหน่งแกนเอกซ์ 21 เซนติเมตร แกนวาย 21 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครื่องสองแกนแสดงดังภาพที่ 4-97 มุมมองด้านบนแสดงดังภาพที่ 4-98 และผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-74



ภาพที่ 4-97 ผลตอบสนองตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุม ระยะแกนเอกซ์ 21 เซนติเมตร และระยะแกนวาย 21 เซนติเมตร

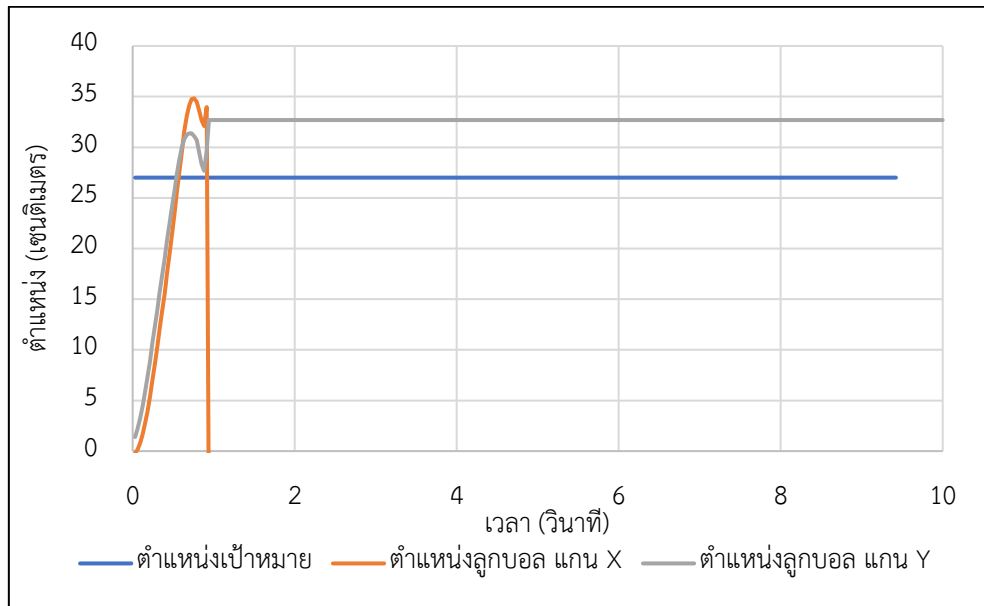


ภาพที่ 4-98 ผลตอบสนองมุมมองด้านบนตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุม ระยะแกนเอกซ์ 21 เซนติเมตร และแกนเวาย 21 เซนติเมตร

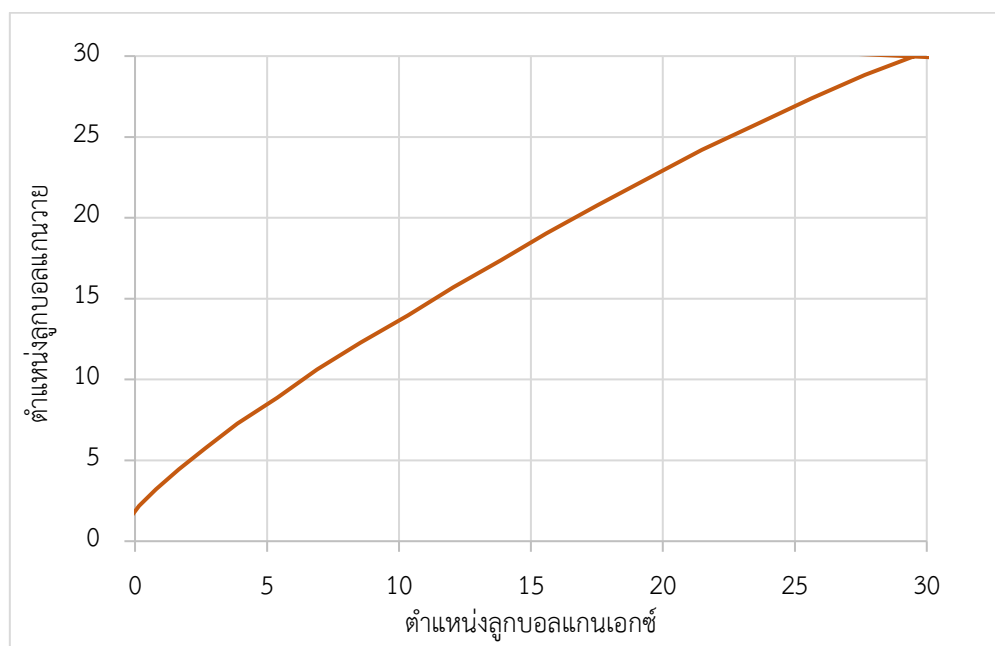
ตารางที่ 4-74 ผลตอบสนองตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุม ระยะแกนเอกซ์ 21 เซนติเมตร และแกนเวาย 21 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง	
	แกนเอกซ์	แกนเวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.329	0.426
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	13.576	11.126
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	26.356	29.203
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	25.504	39.063
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	1.684	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	26.356	29.203
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	2.918	4.954

4.2.3.3.4 ตำแหน่งแกนเอกซ์ 27 เซนติเมตร แกนวาย 27 เซนติเมตร กราฟ
 ผลตอบสนองตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือสองแกนแสดงดังภาพที่ 4-99 มุมมองด้านบนแสดงดัง
 ภาพที่ 4-100 และผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-75



ภาพที่ 4-99 ผลตอบสนองตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ ระยะแกนเอกซ์ 27 เซนติเมตร และแกน
 ยาย 27 เซนติเมตร



ภาพที่ 4-100 ผลตอบสนองมุมมองด้านบนตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ ระยะแกนเอกซ์
 27 เซนติเมตร และแกนวาย 27 เซนติเมตร

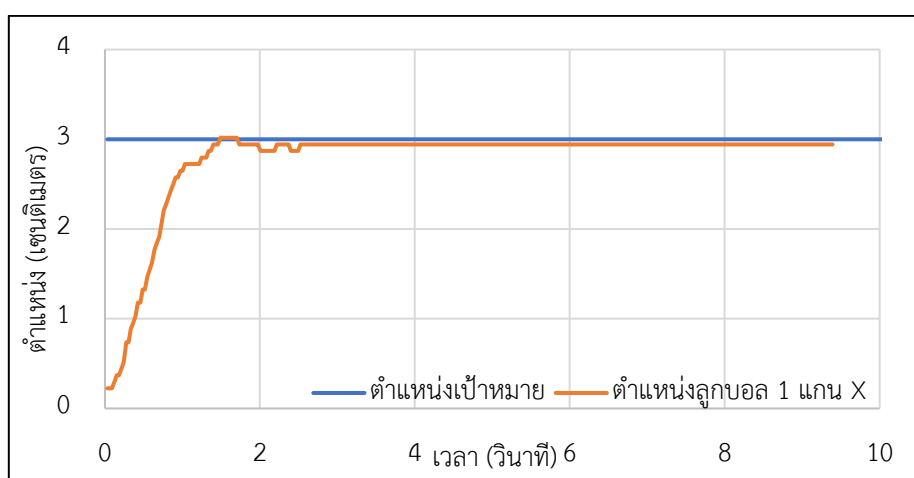
ตารางที่ 4-75 ผลตอบสนองตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุม ระยะแกนเอกซ์ 27 เซนติเมตร และ แกนวาย 27 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง	
	แกนเอกซ์	แกนวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.375	0.413
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	-7.103	25.791
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	34.828	32.688
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	28.994	21.067
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	26.307	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	34.828	32.688
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	0.790	0.973

4.2.4 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์แบบปรับค่าอัตโนมัติ

4.2.4.1 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์แบบปรับค่าอัตโนมัติแกนเอกซ์

4.2.4.1.1 ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แบบปรับค่าอัตโนมัติแนวแกนเอกซ์ แสดงดังภาพที่ 4-101 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-76

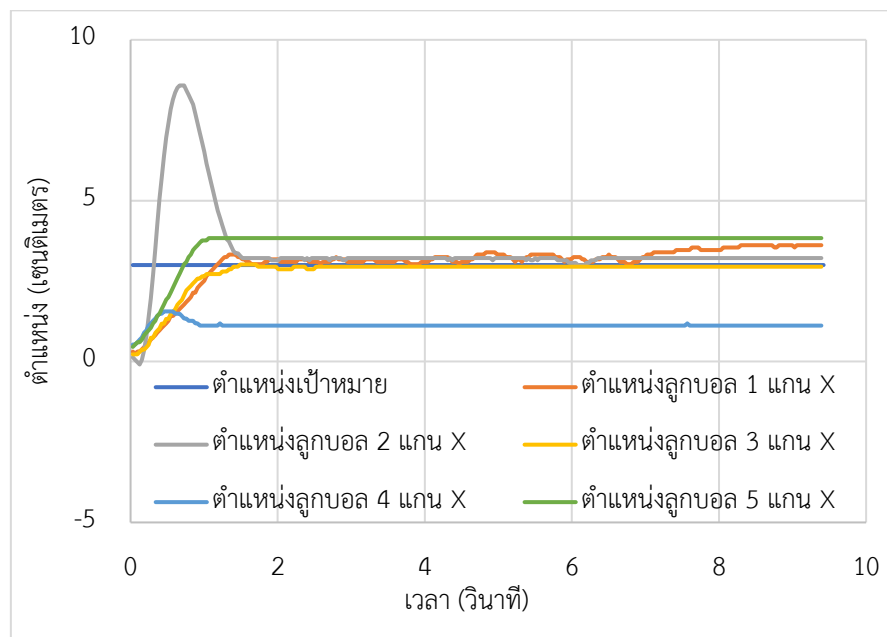


ภาพที่ 4-101 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แบบปรับค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-76 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง แกนเอกซ์ 3 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.901
เวลาชั่วคราว (วินาที)	1.064
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	1.054
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	2.723
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	3.017
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	0.573
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	-
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	3.017
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.520

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-102 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-77

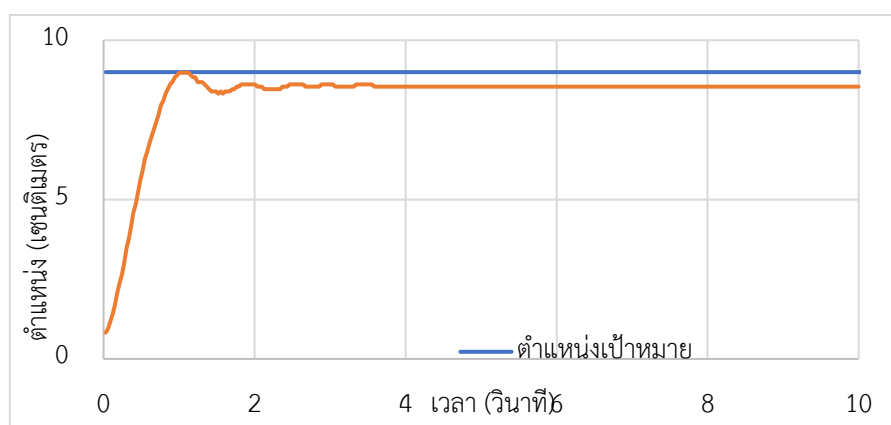


ภาพที่ 4-102 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-77 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	1.050	0.127	0.901	-	0.662	0.405	0.685
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	1.403	1.064	-	-	0.240	1.233
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	1.516	1.054	-	-	0.326	1.285
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุด สมดุล (เซนติเมตร)	2.734	2.702	2.723	-	2.734	0.015	2.723
สัญญาณสูงสุดก่อนจุด สมดุล (เซนติเมตร)	3.616	8.582	3.017	-	3.837	2.569	4.763
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	20.543	186.060	0.573	0.000	27.893	78.688	47.014
สภาวะหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	3.040	0.000	0.000	0.000	1.360	0.608
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	3.616	8.582	3.017	1.558	3.837	2.647	4.122
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	8.328	0.699	1.520	0.486	1.094	3.323	2.425

4.2.4.1.2 ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมสัดส่วน
ปริพันธ์ อนุพันธ์ แบบปรับค่าอัตโนมัติแนวแกนเอกซ์ แสดงดังภาพที่ 4-103 และผลการตอบสนองแสดง
ดังตารางที่ 4-78

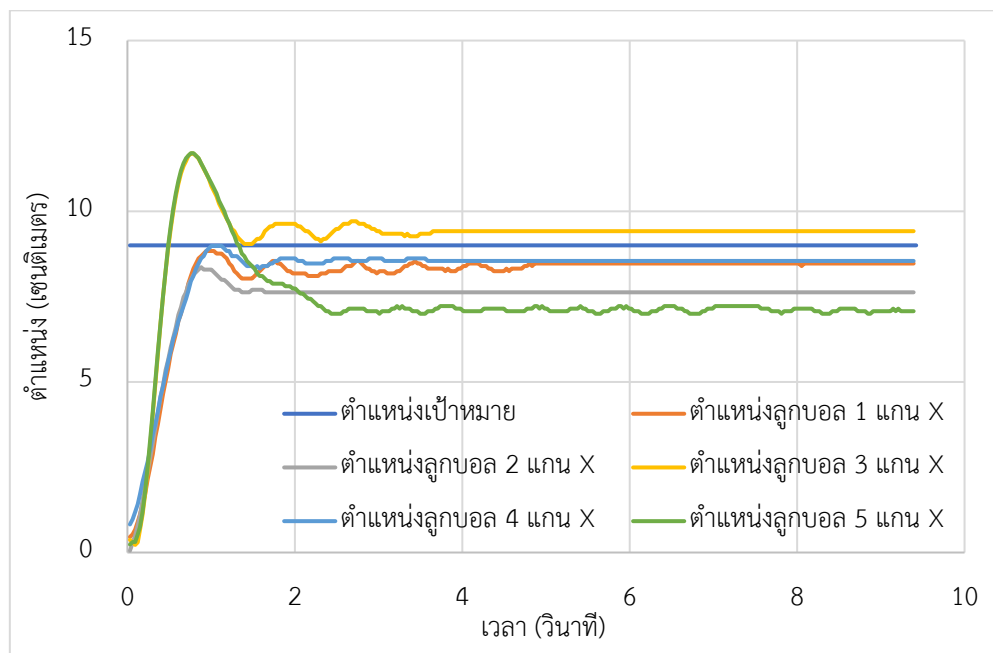


ภาพที่ 4-103 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-78 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง แกนเอกซ์ 9 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.744
เวลาชั่วคราว (วินาที)	0.830
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	0.821
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	8.320
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	8.982
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	-
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	-
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	8.982
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.033

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-104 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-79

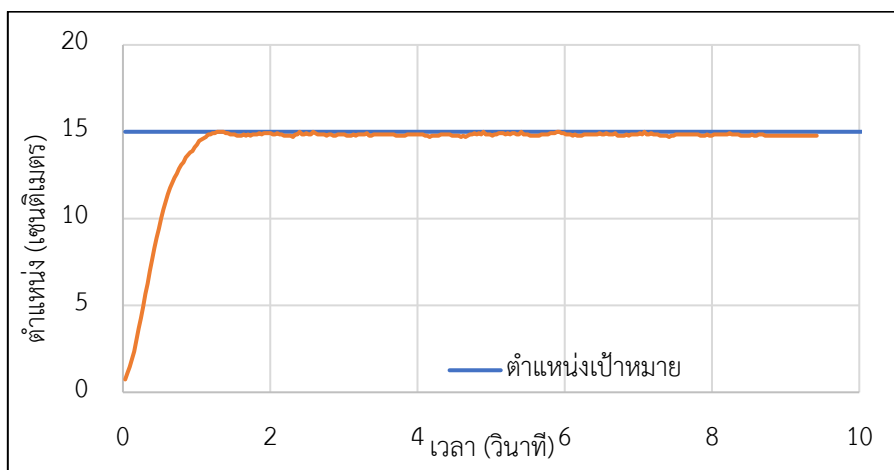


ภาพที่ 4-104 รวมผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-79 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.638	0.649	0.282	0.744	0.288	0.219	0.520
เวลาชั่วคราว (วินาที)	2.329	-	1.195	0.830	-	0.782	1.451
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	2.310	-	1.191	0.821	-	0.775	1.441
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	8.026	7.626	8.236	8.320	6.997	0.543	7.841
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	8.835	8.361	11.690	8.982	11.701	1.643	9.914
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	0.000	0.000	29.891	0.000	30.014	16.406	11.981
สภาวะหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	1.013	0.000	0.000	0.000	0.453	0.203
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	8.835	8.361	11.690	8.982	11.701	1.643	9.914
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	0.973	0.912	0.790	1.033	0.790	0.109	0.900

4.2.4.1.3 ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แบบปรับค่าอัตโนมัติแนวแกนเอกซ์ แสดงดังภาพที่ 4-105 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-80

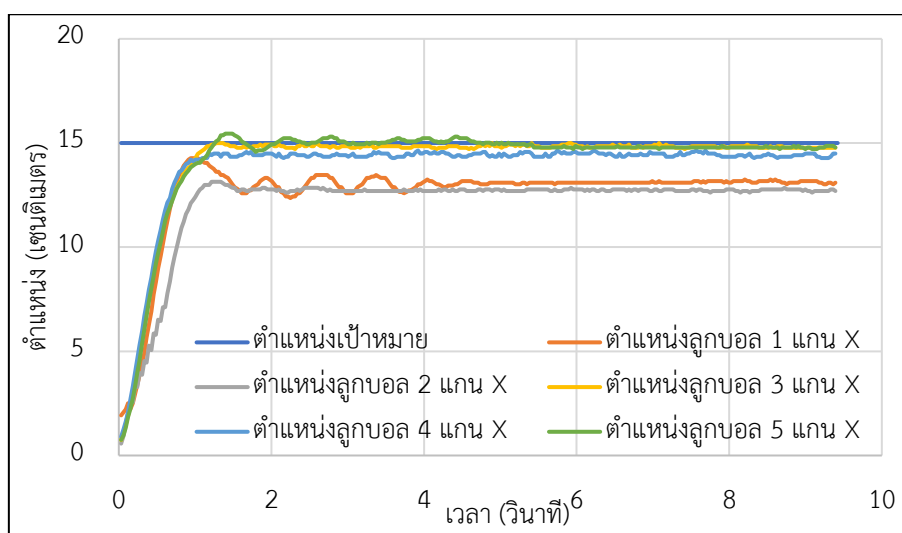


ภาพที่ 4-105 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-80 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง แกนเอกซ์ 15 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.755
เวลาชั่วคราว (วินาที)	0.885
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	0.879
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	13.528
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	14.998
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	-
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	-
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	14.998
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.307

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-106 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-81

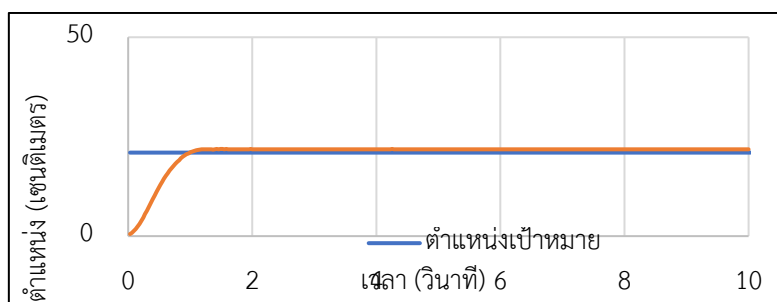


ภาพที่ 4-106 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-81 ผลตอบสนอง 5 ครั้ง ตัวควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง
15 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.795	-	0.755	0.698	0.773	0.041	0.755
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-	0.885	0.815	0.915	0.051	0.872
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	-	0.879	0.809	0.904	0.049	0.864
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	12.363	-	13.528	13.61 2	13.53 9	0.600	13.26 0
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	14.274	-	14.998	14.64 1	15.45 0	0.502	14.84 1
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	0.000	0.000	0.000	0.000	2.999	1.341	0.600
สภาวะหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	14.274	13.139	14.998	14.64 1	15.45 0	0.877	14.50 0
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	0.973	1.246	1.307	3.951	1.429	1.225	1.781

4.2.4.1.4 ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมสัดส่วน
ปริพันธ์ อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติแนวแกนเอกซ์ แสดงดังภาพที่ 4-107 และผลการตอบสนอง
แสดงดังตารางที่ 4-82

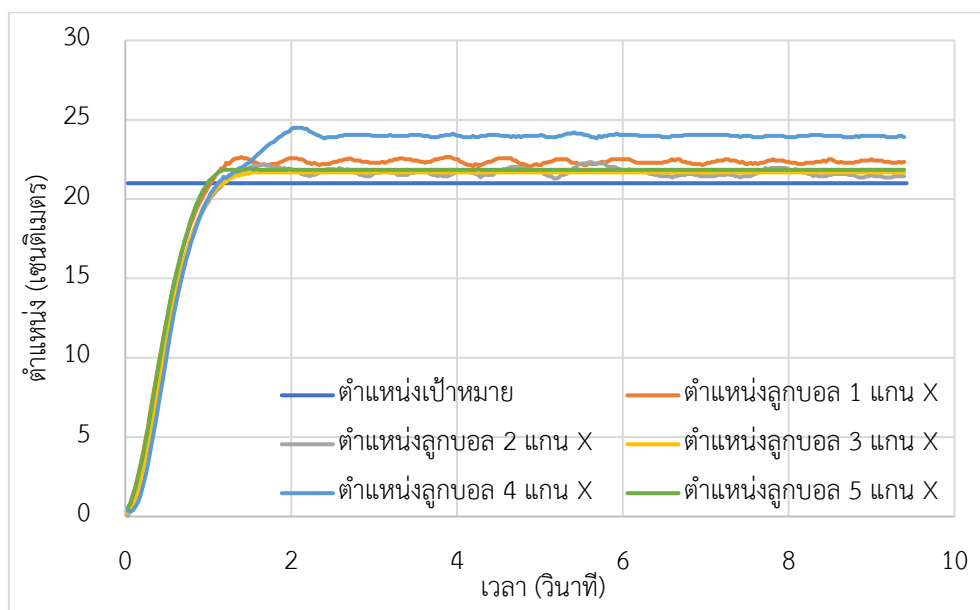


ภาพที่ 4-107 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติตำแหน่ง
21 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-82 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ
แกนเอกซ์ ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.669
เวลาชั่วคราว (วินาที)	0.838
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	0.836
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	19.125
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	21.918
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	4.371
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	-
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	21.918
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.459

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-108 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-83

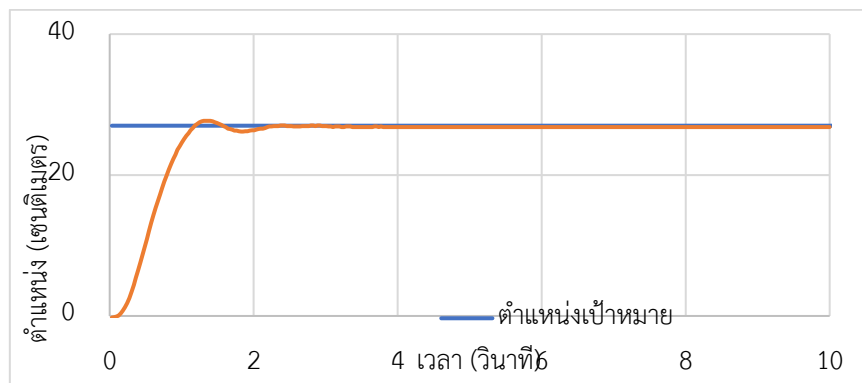


ภาพที่ 4-108 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-83 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาได้ขึ้น (วินาที)	0.693	0.738	0.721	0.681	0.669	0.029	0.700
เวลาชั่วคราว (วินาที)	0.858	0.932	0.926	-	0.838	0.047	0.888
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	0.856	0.932	0.925	-	0.836	0.049	0.887
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	19.272	19.019	19.114	19.051	19.125	0.097	19.116
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	22.653	22.326	21.760	24.490	21.918	1.098	22.629
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	7.871	6.316	3.618	16.621	4.371	5.226	7.759
สภาวะหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.434	0.000	0.000	0.000	0.194	0.087
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	22.653	22.326	21.760	24.490	21.918	1.098	22.629
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.429	5.623	7.355	2.067	1.459	2.732	3.587

4.2.4.5 ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์ แบบปรับค่าอัตโนมัติแนวแกนเอกซ์ แสดงดังภาพที่ 4-109 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-84

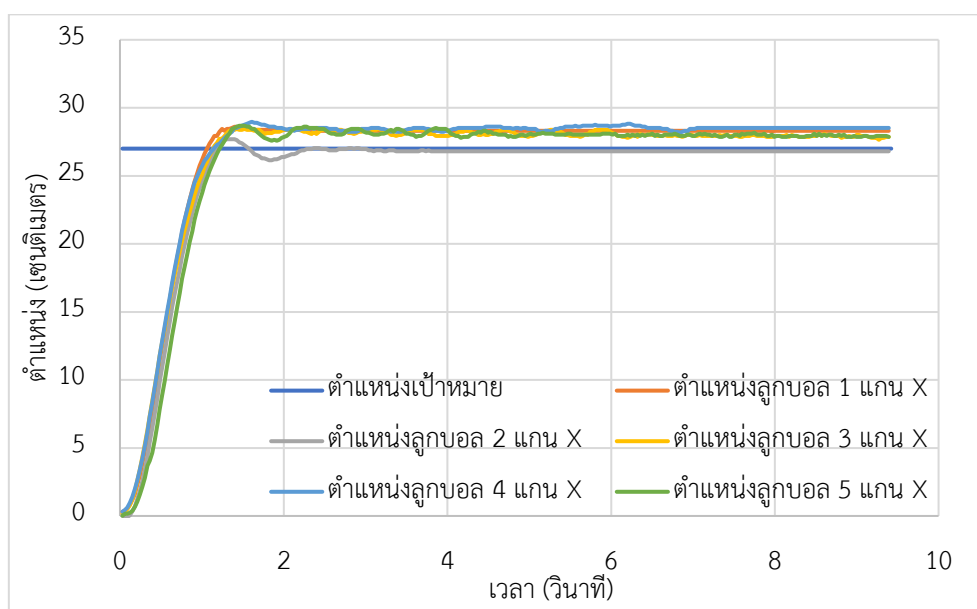


ภาพที่ 4-109 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-84 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ
แกนเอกซ์ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.707
เวลาชั่วคราว (วินาที)	1.014
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	1.015
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	24.605
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	27.692
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	2.562
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.882
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	27.692
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.337

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-110 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-85



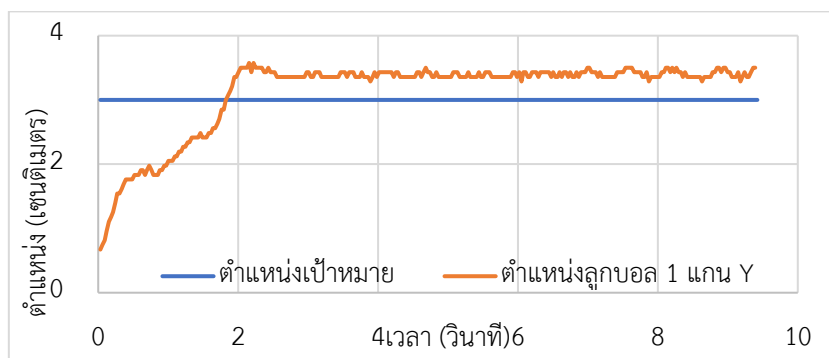
ภาพที่ 4-110 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ
ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-85 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.667	0.707	0.732	0.685	0.732	0.029	0.704
เวลาชั่วคราว (วินาที)	0.930	1.014	0.980	0.934	1.062	0.056	0.984
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	0.929	1.015	0.979	0.932	1.062	0.056	0.983
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	24.564	24.605	24.700	24.490	24.343	0.134	24.540
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	28.606	27.692	28.448	28.974	28.680	0.480	28.480
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	5.949	2.562	5.364	7.310	6.222	1.778	5.481
สภาวะหวนนอย (เซนติเมตร)	0.000	0.882	0.000	0.000	0.000	0.395	0.176
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	28.606	27.692	28.448	28.974	28.680	0.480	28.480
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.429	1.337	1.459	1.641	1.489	0.111	1.471

4.2.4.2 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์แบบปรับค่าอัตโนมัติแกนวาย

4.2.4.2.1 ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แบบปรับค่าอัตโนมัติแกนวาย แสดงดังภาพที่ 4-111 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-86

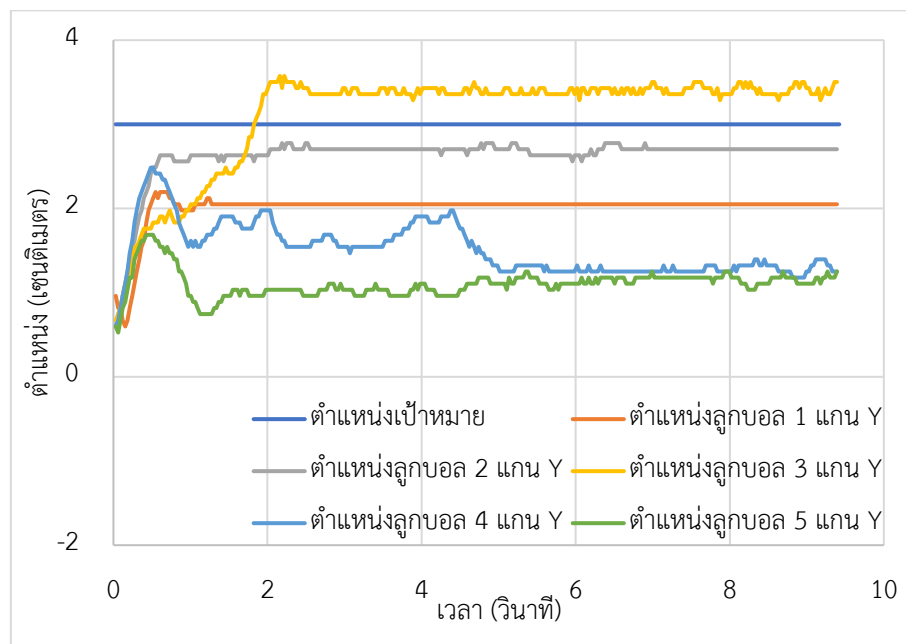


ภาพที่ 4-111 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-86 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง แกนวาย 3 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	1.731
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	2.704
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	3.575
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	19.180
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	3.575
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	2.188

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-112 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-87

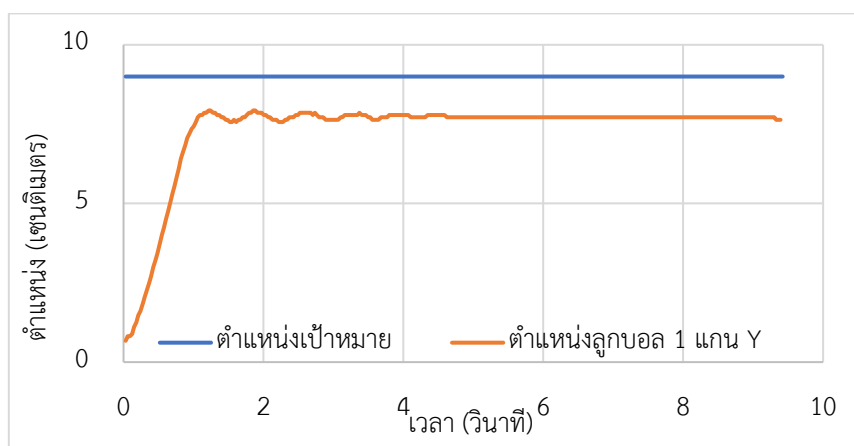


ภาพที่ 4-112 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-87 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	-	2.035	1.731	-	-	0.215	1.883
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-	-	-	-	-	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	9.572	-	-	-	-	9.572
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	-	2.559	2.704	-	-	0.103	2.632
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	-	2.777	3.575	-	-	0.565	3.176
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	0.000	0.000	19.180	0.000	0.000	8.578	3.836
สภาวะหวนงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	2.196	2.777	3.575	2.486	1.688	0.703	2.544
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	0.578	2.219	2.188	0.517	0.456	0.925	1.191

ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์ แบบปรับค่าอัตโนมัติแนวแกนวาย แสดงดังภาพที่ 4-113 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-88

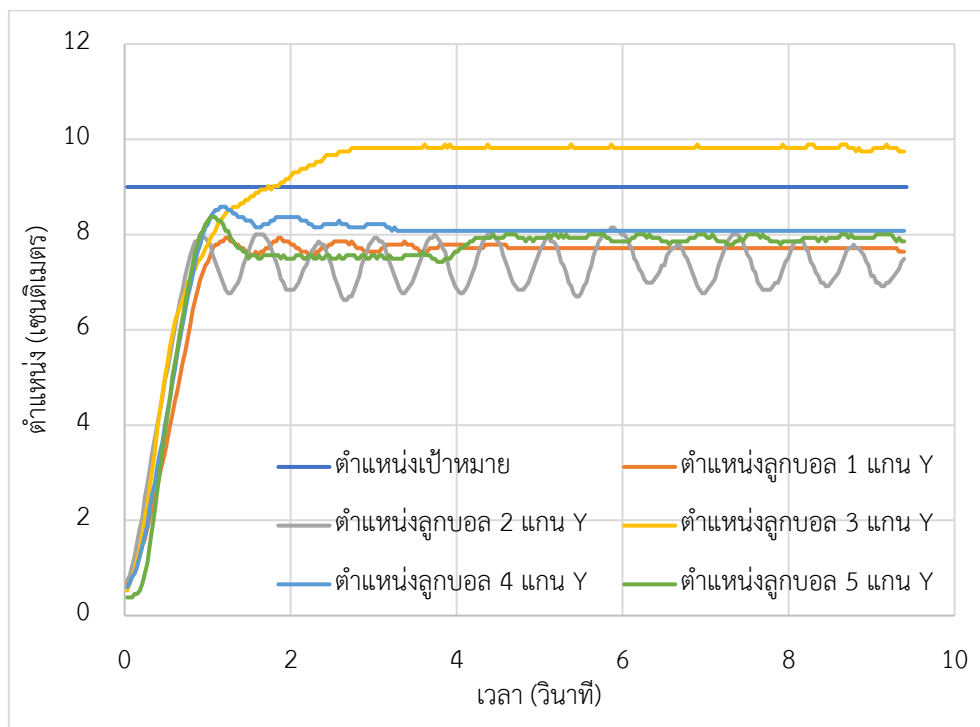


ภาพที่ 4-113 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-8 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง แกนวาย 9 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.744
เวลาชั่วคราว (วินาที)	0.830
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	0.821
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	8.320
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	8.982
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	-
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	-
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	8.982
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.033

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-114 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-89

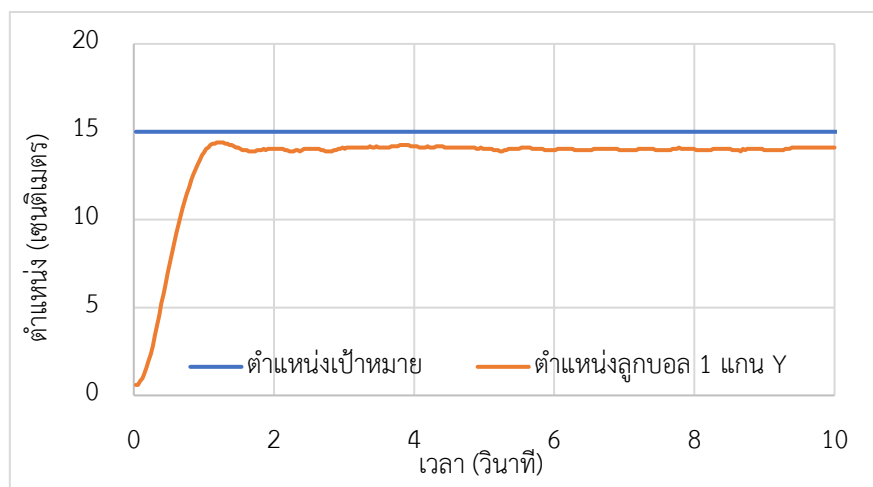


ภาพที่ 4-114 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-89 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	-	5.773	0.991	0.839	0.703	2.467	2.076
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-	-	-	-	-	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	-	1.130	-	-	-	1.130
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	-	6.770	8.222	8.077	7.423	0.666	7.623
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	-	8.149	9.892	8.585	8.367	0.783	8.748
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	0.000	0.000	9.907	0.000	0.000	4.430	1.981
สภาวะหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	7.931	8.149	9.892	8.585	8.367	0.770	8.585
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.246	5.897	3.647	1.185	1.064	2.131	2.608

4.2.4.3 ระยะ 15 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แบบปรับค่าอัตโนมัติแนวแกนวาย แสดงดังภาพที่ 4-115 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-90

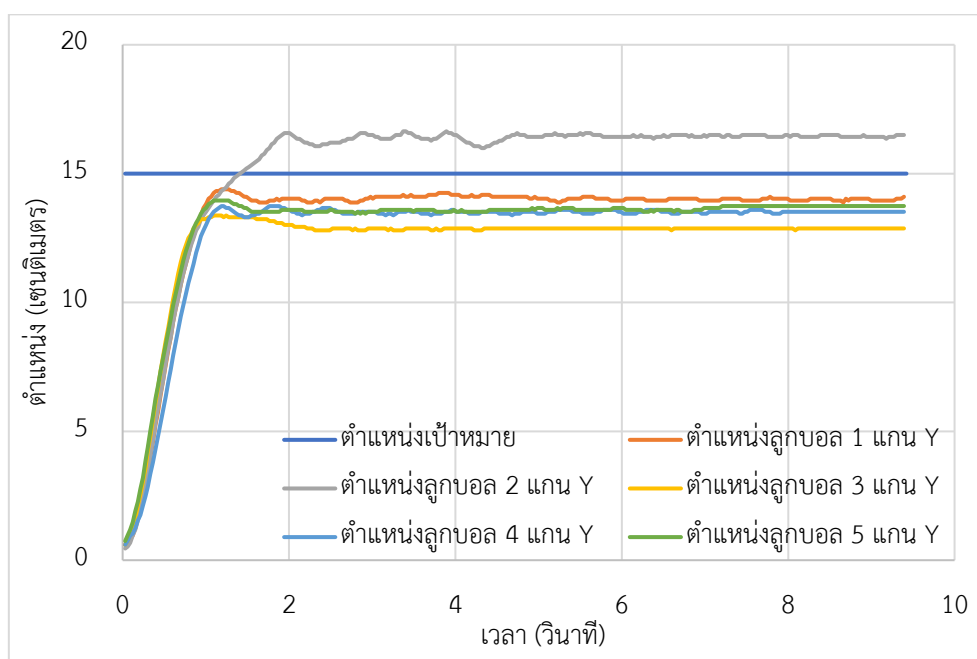


ภาพที่ 4-115 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-90 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง แกนวาย 15 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.782
เวลาชั่วคราว (วินาที)	0.991
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	0.986
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	13.667
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	14.393
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	0.000
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	14.393
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.216

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-116 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-91

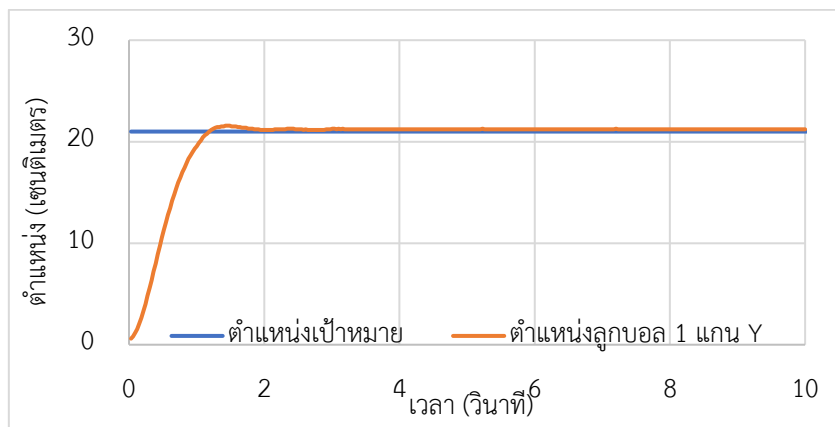


ภาพที่ 4-116 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-91 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.782	0.820	-	0.912	0.829	0.055	0.836
เวลาชั่วคราว (วินาที)	0.991	-	-4	-	6.885	4.168	3.938
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	0.986	5.683	-	7.954	2.970	3.054	4.398
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	13.667	13.522	-	13.304	13.449	0.151	13.485
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	14.393	16.643	-	13.739	13.957	1.335	14.683
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	0.000	10.956	0.000	0.000	0.000	4.900	2.191
สภาวะหวนน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	14.393	16.643	13.376	13.739	13.957	1.295	14.422
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.216	3.404	1.125	1.216	1.125	1.000	1.617

4.2.4.4.3 ระยะ 21 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แบบปรับค่าอัตโนมัติแนวแกนวาย แสดงดังภาพที่ 4-117 และผลการตอบสนอง แสดงดังตารางที่ 4-92

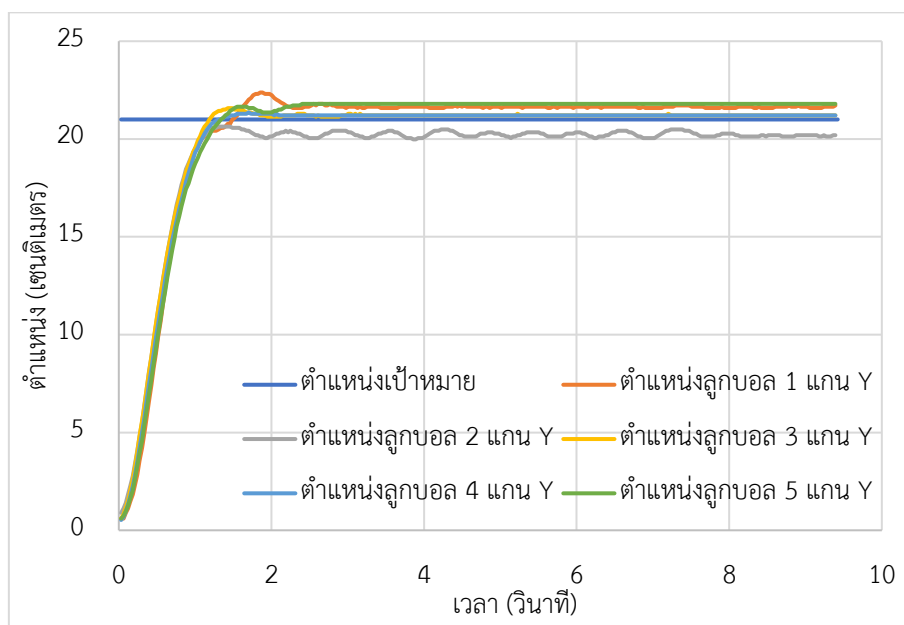


ภาพที่ 4-117 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-92 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง แกนวาย 21 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.781
เวลาชั่วคราว (วินาที)	0.971
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	0.966
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	18.967
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	21.580
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	2.763
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	21.580
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.459

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-118 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-93

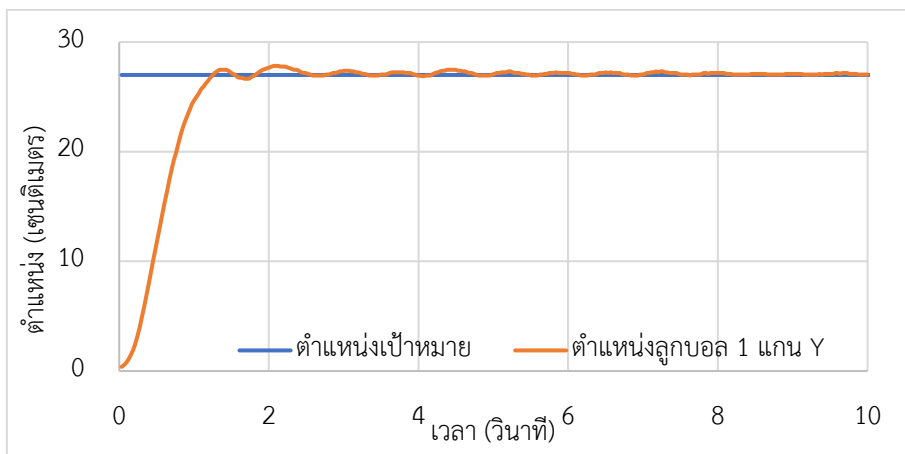


ภาพที่ 4-118 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-93 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.745	0.787	0.781	0.795	0.834	0.032	0.788
เวลาชั่วคราว (วินาที)	0.978	0.964	0.971	1.001	1.055	0.037	0.994
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	0.973	0.958	0.966	0.997	1.049	0.037	0.989
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	19.184	19.039	18.967	18.967	19.039	0.089	19.039
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	22.379	20.636	21.580	21.362	21.798	0.636	21.551
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	6.566	0.000	2.763	1.726	3.800	2.451	2.971
สภาวะห้วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	22.379	20.636	21.580	21.362	21.798	0.636	21.551
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.884	1.337	1.459	1.733	2.432	0.429	1.769

4.2.4.4.5 ระยะ 27 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แบบปรับค่าอัตโนมัติแนวแกนวาย แสดงดังภาพที่ 4-119 และผลการตอบสนอง แสดงดังตารางที่ 4-94

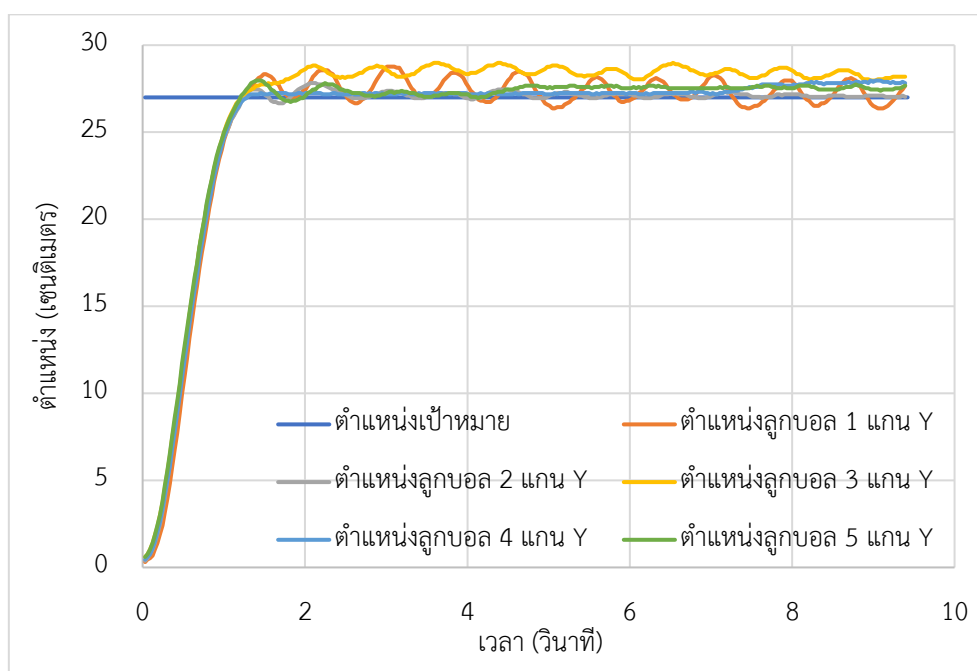


ภาพที่ 4-119 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-94 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง แกนวาย 27 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.749
เวลาชั่วคราว (วินาที)	1.003
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	1.001
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	24.339
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	27.824
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	3.051
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	27.824
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	2.097

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-120 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-95



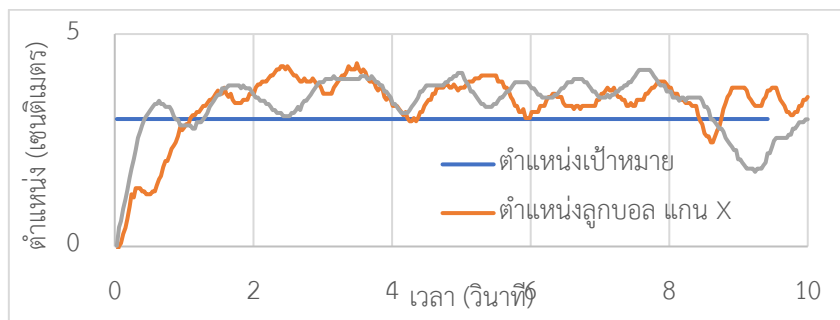
ภาพที่ 4-120 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์ แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-95 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน อนุพันธ์ แบบปรับค่าอัตโนมัติ ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

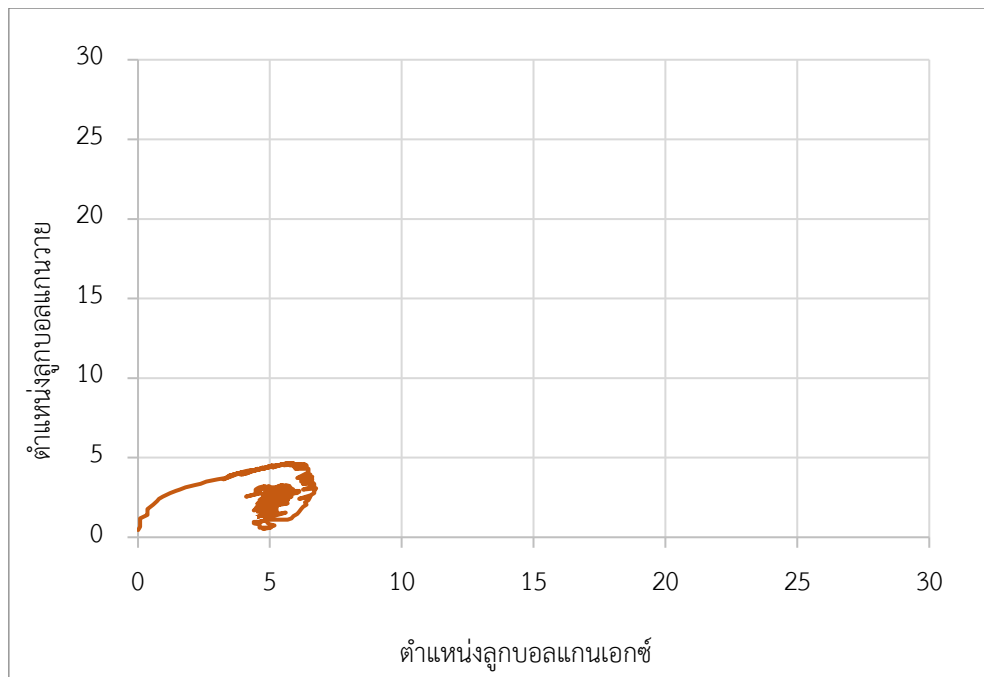
ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาชั่วคราว (วินาที)	0.734	0.749	0.758	0.763	0.757	0.011	0.752
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	1.021	1.003	0.990	1.012	0.988	0.014	1.003
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	1.020	1.001	0.988	1.009	0.985	0.015	1.001
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	24.557	24.339	24.557	24.702	24.557	0.130	24.542
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	28.768	27.824	28.985	28.042	27.969	0.522	28.317
สภาวะหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	6.547	3.051	7.353	3.858	3.589	1.933	4.880
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	28.768	27.824	28.985	28.042	27.969	0.522	28.317
เวลาชั่วคราว (วินาที)	3.039	2.097	3.617	9.665	1.429	3.294	3.969

4.2.4.3 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์แบบปรับค่าอัตโนมัติสองแกน

4.2.4 3.1 ระยะแกนเอกซ์ 3 เซนติเมตร แกนวาย 3 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์แบบปรับค่าอัตโนมัติ สองแกนแสดงดังภาพที่ 4-121 มุมมองด้านบนแสดงดังภาพที่ 4-122 และผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-96



ภาพที่ 4-121 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์แบบปรับค่าอัตโนมัติ ระยะแกนนอน 3 เซนติเมตร และแกนวาย 3 เซนติเมตร

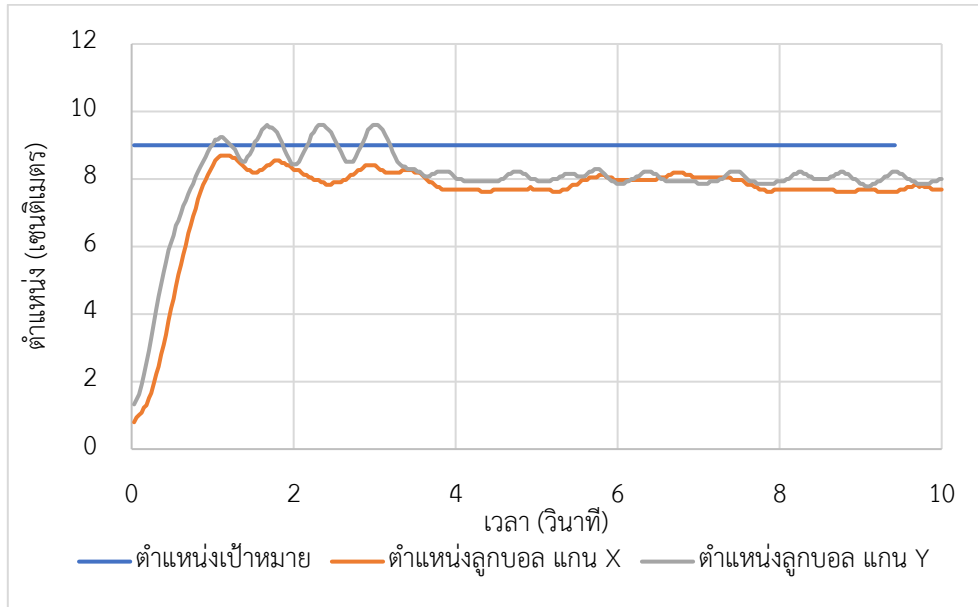


ภาพที่ 4-122 ผลตอบสนองมุมมองด้านบนตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์แบบปรับค่าอัตโนมัติ สองแกน ระยะ 3 เซนติเมตร และแกนวาย 3 เซนติเมตร

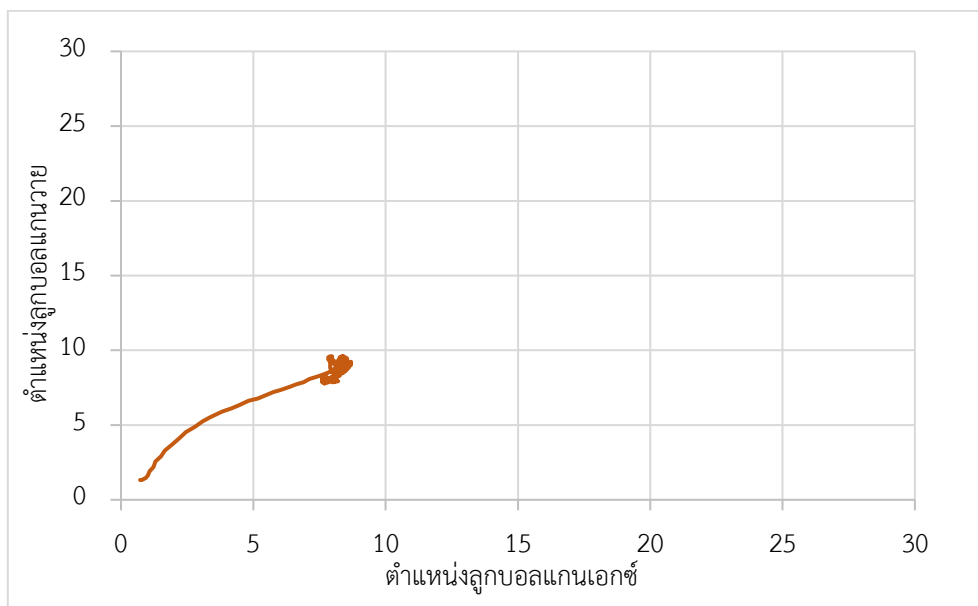
ตารางที่ 4-96 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์แบบปรับค่าอัตโนมัติสองแกน ระยะ 3 เซนติเมตร และแกนวาย 3 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง	
	แกนเอกซ์	แกนวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.4309	0.462
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	2.734	0.817
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	6.396	4.737
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	113.183	57.900
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	2.217	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	6.396	4.737
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	3.161	9.118

4.2.4.3.2 ระยะแกนเอกซ์ 9 เซนติเมตร แกนวาย 9 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์แบบปรับค่าอัตโนมัติ สองแกนแสดงดังภาพที่ 4-123 มุมมองด้านบนแสดงดังภาพที่ 4-124 และผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-97



ภาพที่ 4-123 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์แบบปรับค่าอัตโนมัติ ระยะแกนนอน 9 เซนติเมตร และแกนวาย 9 เซนติเมตร

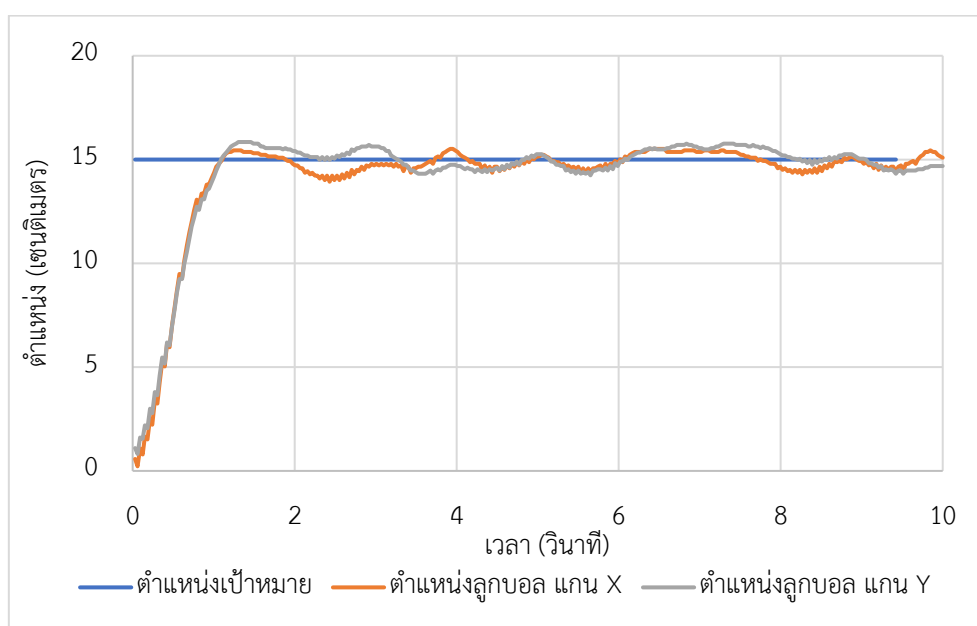


ภาพที่ 4-124 ผลตอบสนองมุมมองด้านบนตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์แบบปรับค่าอัตโนมัติสองแกน ระยะ 9 เซนติเมตร และแกนโยย 9 เซนติเมตร

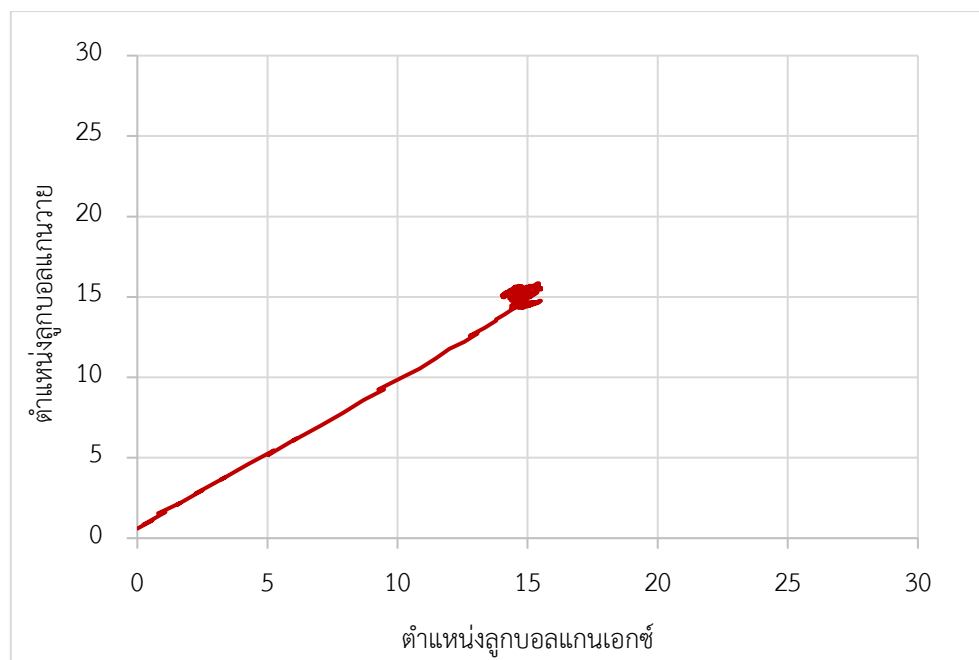
ตารางที่ 4-97 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์แบบปรับค่าอัตโนมัติสองแกน
ระยะ 9 เซนติเมตร และแกนวาย 9 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง	
	แกนเอกซ์	แกนวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.886	0.795
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	7.616	7.786
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	8.693	9.601
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	0.000	6.680
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	8.693	9.601
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.125	1.702

4.2.4.3.3 ระยะแกนเอกซ์ 15 เซนติเมตร แกนวาย 15 เซนติเมตร กราฟ
ผลตอบสนองของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์แบบปรับค่าอัตโนมัติ สองแกนแสดงดังภาพที่
4-125 มุมมองด้านบนแสดงดังภาพที่ 4-126 และผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-98



ภาพที่ 4-125 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์แบบปรับค่าอัตโนมัติ ระยะแกน
นอน 15 เซนติเมตร และแกนวาย 15 เซนติเมตร

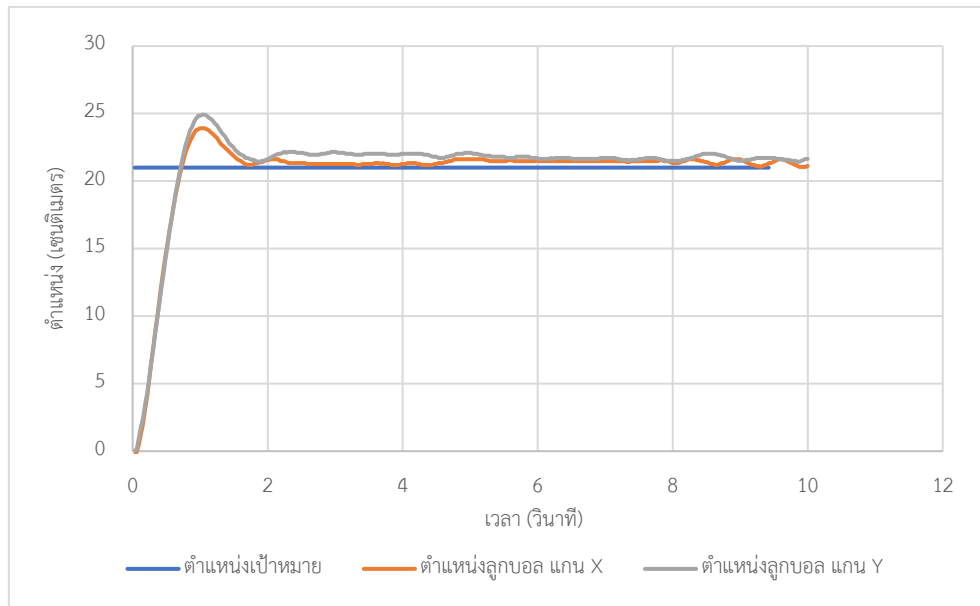


ภาพที่ 4-126 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์แบบปรับค่าอัตโนมัติ ระยะแกน
นอน 15 เซนติเมตร และแกนวาย 15 เซนติเมตร

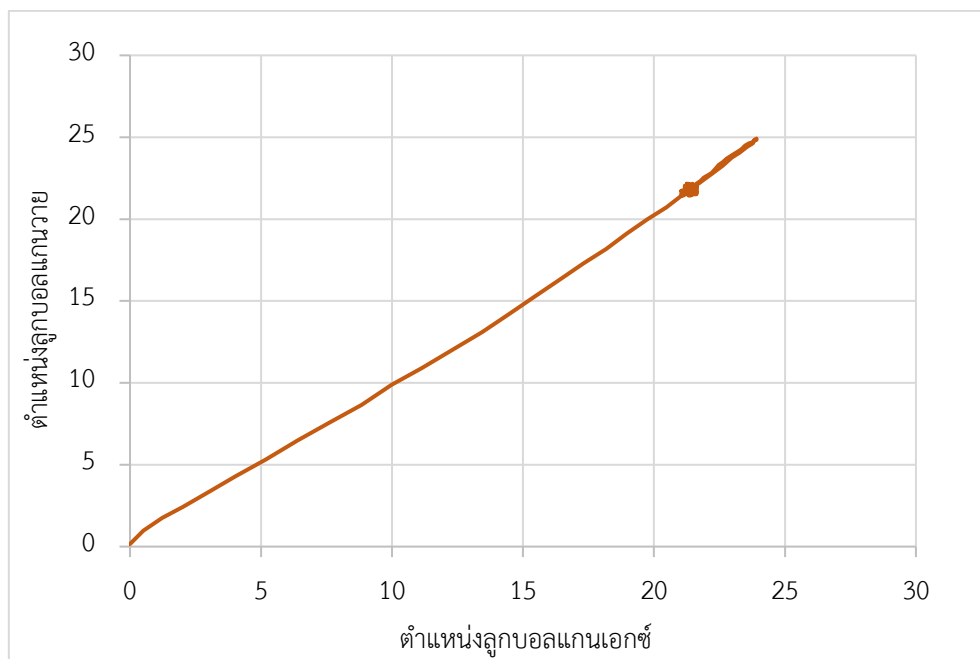
ตารางที่ 4-98 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์แบบปรับค่าอัตโนมัติสองแกน
ระยะ 15 เซนติเมตร และแกนวาย 15 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง	
	แกนเอกซ์	แกนวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.886	0.795
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	7.616	7.786
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	8.693	9.601
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	0.000	6.680
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	8.693	9.601
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.125	1.702

4.2.4.3.4 ระยะแกนเอกซ์ 21 เซนติเมตร แกนวาย 21 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์แบบปรับค่าอัตโนมัติ สองแกนแสดงดังภาพที่ 4-127 มุมมองด้านบนแสดงดังภาพที่ 4-128 และผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-99



ภาพที่ 4-127 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์แบบปรับค่าอัตโนมัติ ระยะแกนนอน 21 เซนติเมตร และแกนวาย 21 เซนติเมตร



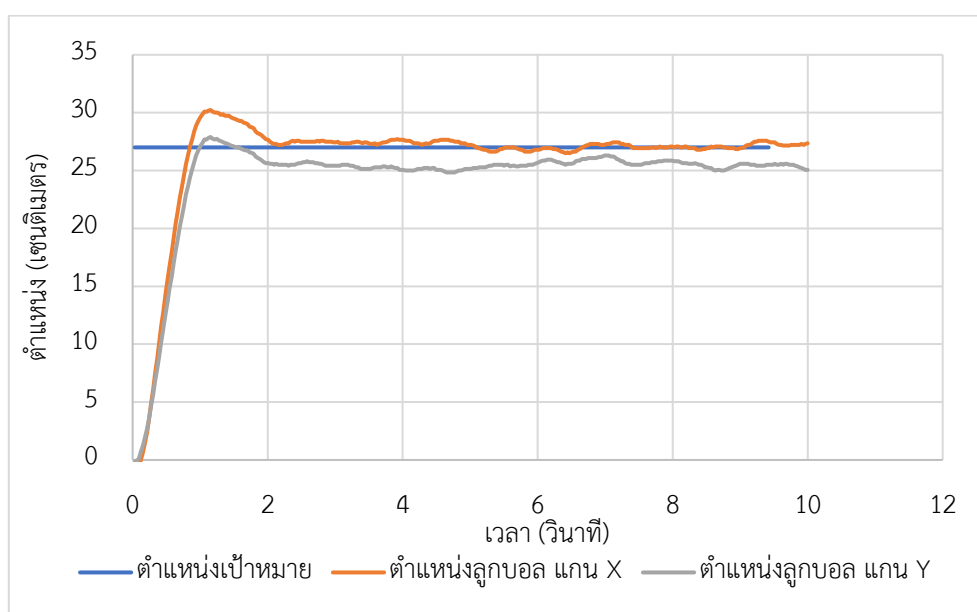
ภาพที่ 4-128 ผลตอบสนองมุมมองด้านบนตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์แบบปรับค่าอัตโนมัติ สองแกน ระยะ 15 เซนติเมตร และแกนวาย 15 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-99 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์แบบปรับค่าอัตโนมัติสองแกน
ระยะ 15 เซนติเมตร และแกนวาย 15 เซนติเมตร

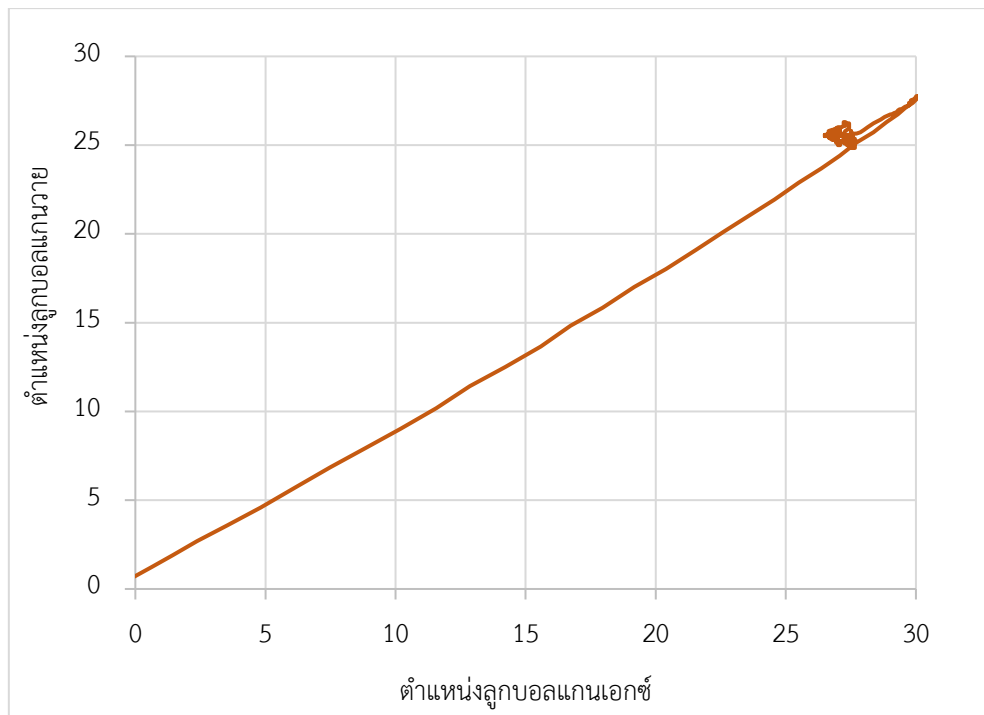
ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง	
	แกนเอกซ์	แกนวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.481	0.494
เวลาชั่วคราว (วินาที)	1.283	1.420
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	1.290	1.421
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	18.961	19.112
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	23.915	24.920
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	13.880	18.666
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	2.368	0.606
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	23.915	24.920
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.033	1.064

4.2.4.3.5 ระยะแกนเอกซ์ 27 เซนติเมตร แกนวาย 27 เซนติเมตร

กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์แบบปรับค่าอัตโนมัติ สองแกนแสดง
ดังภาพที่ 4-129 มุมมองด้านบนแสดงดังภาพที่ 4-130 และผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-100



ภาพที่ 4-129 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์แบบปรับค่าอัตโนมัติ ระยะแกน
นอน 27 เซนติเมตร และแกนวาย 27 เซนติเมตร



ภาพที่ 4-130 ผลตอบสนองมุมมองด้านบนตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์แบบปรับค่าอัตโนมัติ สองแกน ระยะ 27 เซนติเมตร และแกนวาย 27 เซนติเมตร

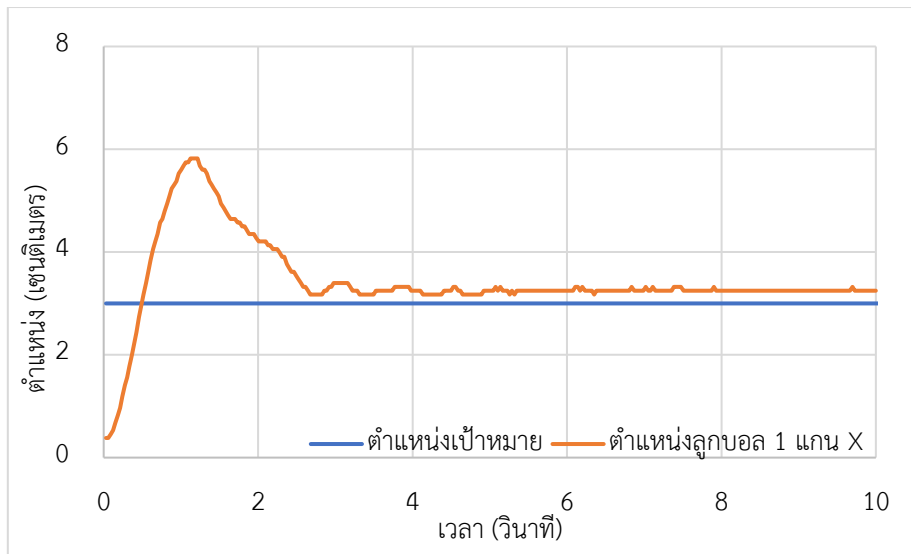
ตารางที่ 4-100 ผลตอบสนองตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์แบบปรับค่าอัตโนมัติสองแกน ระยะ 15 เซนติเมตร และแกนวาย 27 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง	
	แกนเอกซ์	แกนวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.530	0.634
เวลาชั่วคราว (วินาที)	1.394	0.876
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	1.465	0.877
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	24.561	24.412
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	30.233	27.896
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	11.974	3.320
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	1.842	0.471
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	30.233	27.896
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.185	1.185

4.2.5 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ

4.2.5.1 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติแกนเอกซ์

4.2.5.1.1 ระยะ 3 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ แนวแกนเอกซ์แสดงดังภาพที่ 4-131 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-101

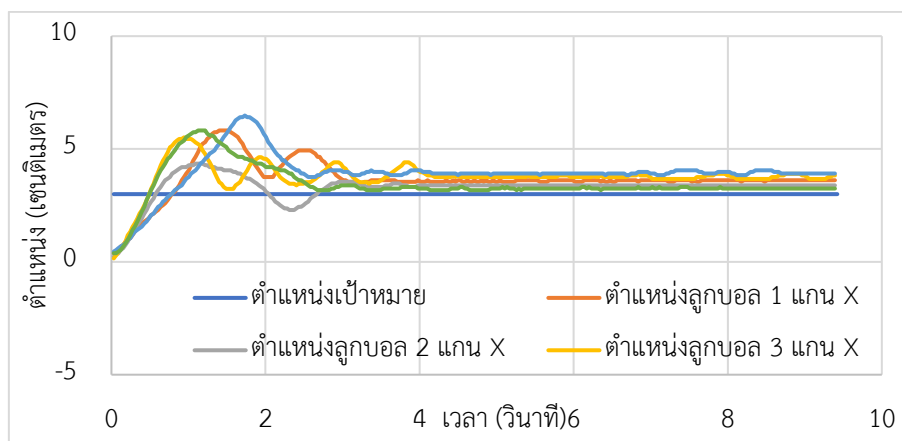


ภาพที่ 4-131 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 3 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-101 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 3 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.452
เวลาชั่วคราว (วินาที)	9.743
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	9.735
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	2.734
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	5.821
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	94.043
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	-
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	5.821
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.155

ผลการตอบสนอง 5 ครั้งจากการทดลองตำแหน่ง 3 เซนติเมตร แสดงดังภาพที่ 4-132 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-102

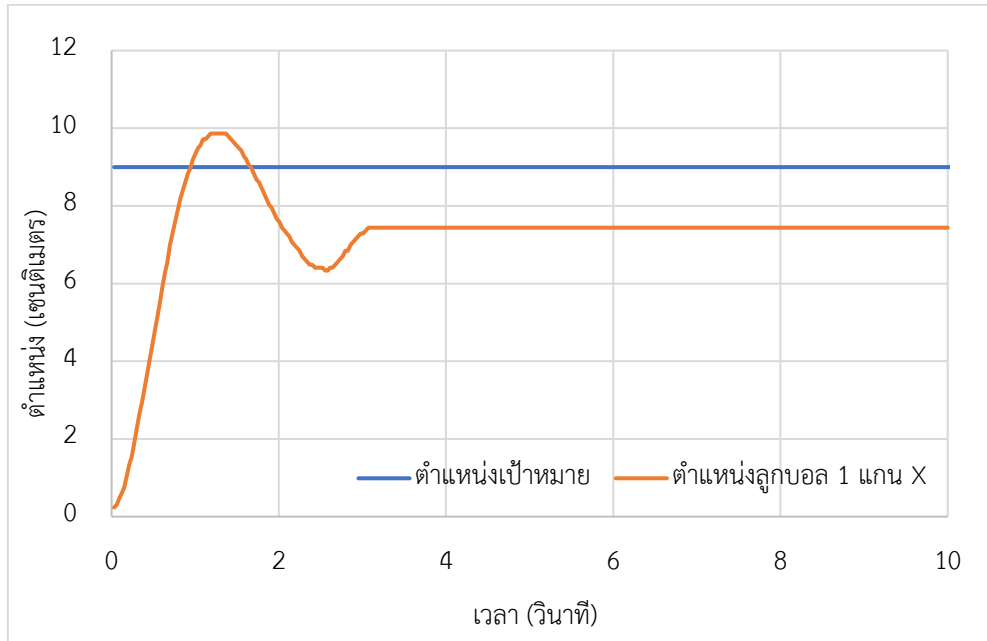


ภาพที่ 4-132 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 3 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-102 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 3 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.722	0.525	0.392	0.685	0.452	0.144	0.555
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-	-	-	9.743	-	9.743
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	-	-	-	9.735	-	9.735
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	2.734	2.293	2.723	2.734	2.734	0.196	2.644
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	5.821	4.351	5.516	6.483	5.821	0.782	5.599
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	94.043	45.043	83.873	116.093	94.043	26.053	86.619
สภาวะหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	5.821	4.351	5.516	6.483	5.821	0.782	5.599
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.429	1.125	0.973	1.763	1.155	0.312	1.289

4.2.5.1.2 ระยะ 9 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมแผ่นเลื่อนแบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ แนวแกนเอกซ์แสดงดังภาพที่ 4-133 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-103

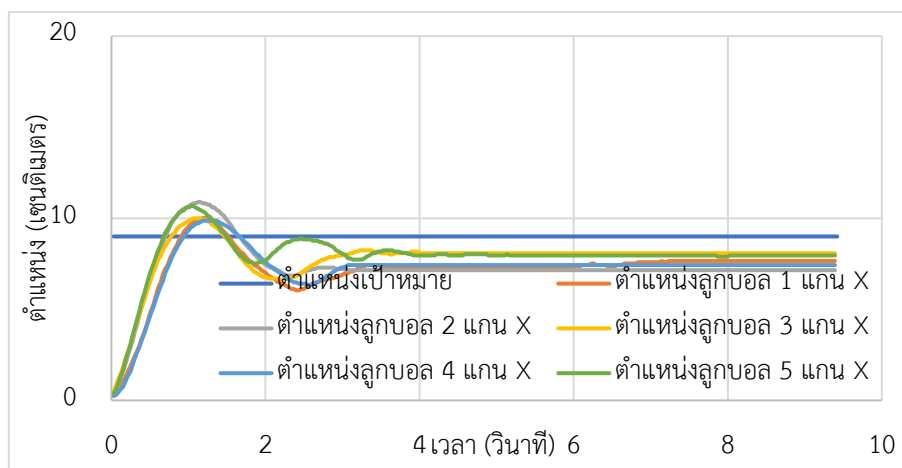


ภาพที่ 4-133 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ แกนเอกซ์ ระยะ 9 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-103 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ แกนเอกซ์ ระยะ 9 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.646
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	6.336
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	9.864
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	9.598
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	-
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	9.864
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.216

ผลการตอบสนอง 5 ครั้งจากการทดลองตำแหน่ง 9 เซนติเมตร แสดงดังภาพที่ 4-134 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-104

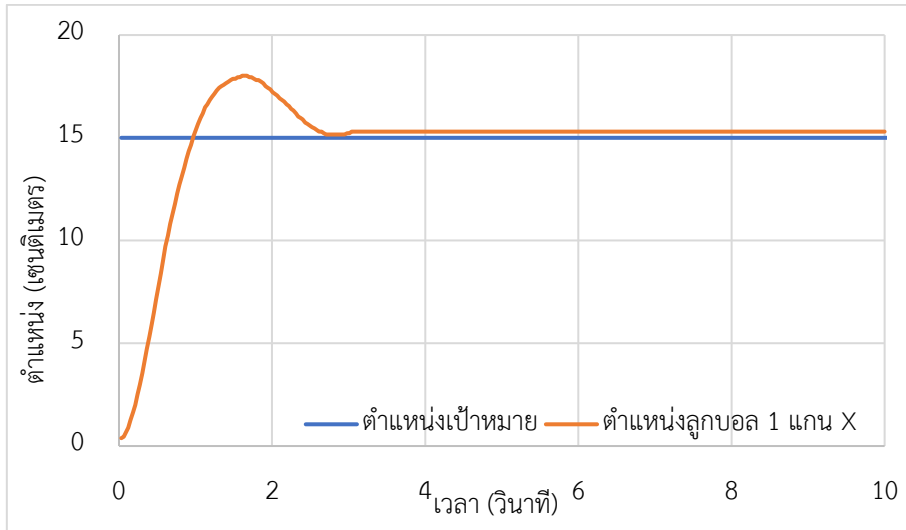


ภาพที่ 4-134 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ แกนเอกซ์ ระยะ 9 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-104 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 9 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.666	0.529	0.587	0.646	0.510	0.069	0.587
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-	-	-	-	-	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	-	-	-	-	-	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	6.042	6.850	6.619	6.336	7.512	0.559	6.672
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	10.011	10.893	10.000	9.864	10.672	0.462	10.288
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	11.231	21.031	11.108	9.598	18.581	5.132	14.310
สภาวะหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	10.011	10.893	10.000	9.864	10.672	0.462	10.288
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.429	1.125	0.973	1.763	1.155	0.312	1.289

4.2.5.1.3 ระยะ 15 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ แนวแกนเอกซ์แสดงดังภาพที่ 4-135 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-105

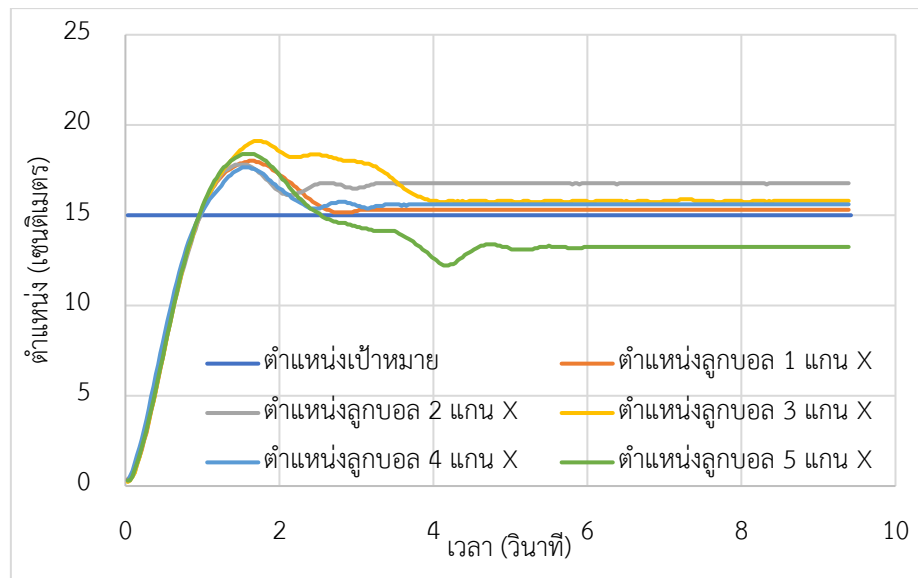


ภาพที่ 4-135 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 15 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-105 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 15 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.677
เวลาชั่วคราว (วินาที)	2.266
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	2.260
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	13.539
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	18.022
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	20.149
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	-
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	18.022
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.641

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-136 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-106

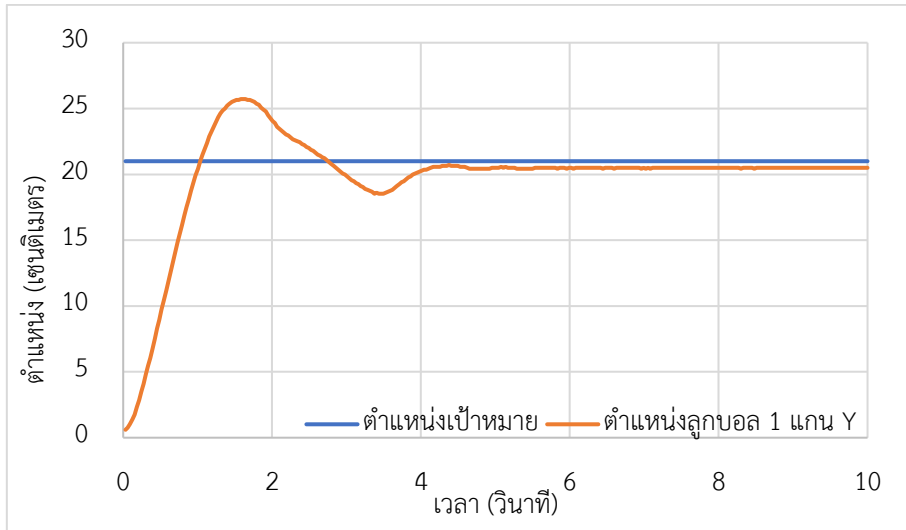


ภาพที่ 4-136 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 15 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-106 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 15 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น	0.677	0.680	0.670	0.680	0.674	0.004	0.676
เวลาชั่วคราว	2.266	-	3.645	2.040	-	0.869	2.651
เวลาสู่จุดสมดุล	2.260	-	3.641	2.028	-	0.872	2.643
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล	13.539	13.906	13.601	13.539	12.216	0.658	13.360
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล	18.022	17.802	19.114	17.655	18.390	0.583	18.196
ผลตอบสนองเกิน	20.149	18.679	27.425	17.699	22.599	3.885	21.310
สภาวะความหน่วงน้อย	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด	18.022	17.802	19.114	17.655	18.390	0.583	18.196
เวลาตอบสนองสูงสุด	1.641	1.459	1.702	1.550	1.550	0.094	1.581

4.2.5.1.4 ระยะ 21 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ แนวแกนเอกซ์แสดงดังภาพที่ 4-137 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-107

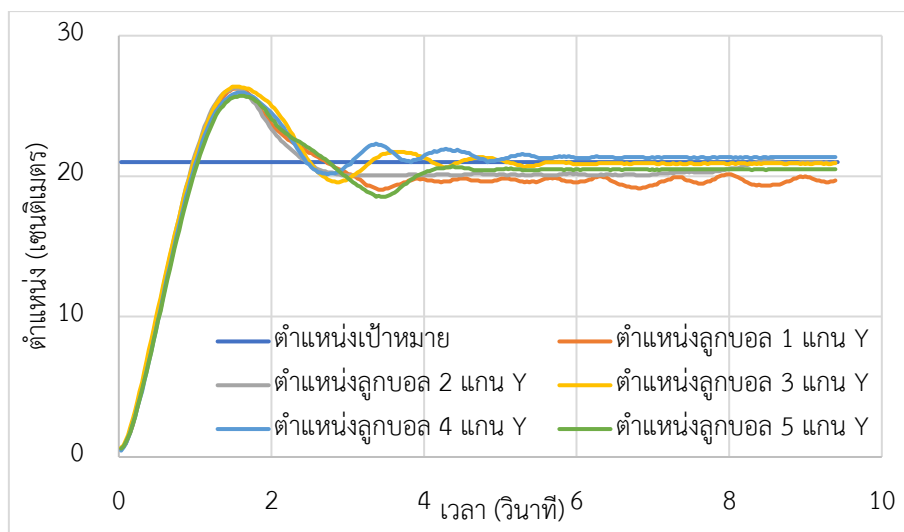


ภาพที่ 4-137 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 21 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-107 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 21 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.750
เวลาชั่วคราว (วินาที)	3.675
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	3.664
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	18.531
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	25.718
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	22.469
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	-
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	25.718
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.611

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-138 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-108

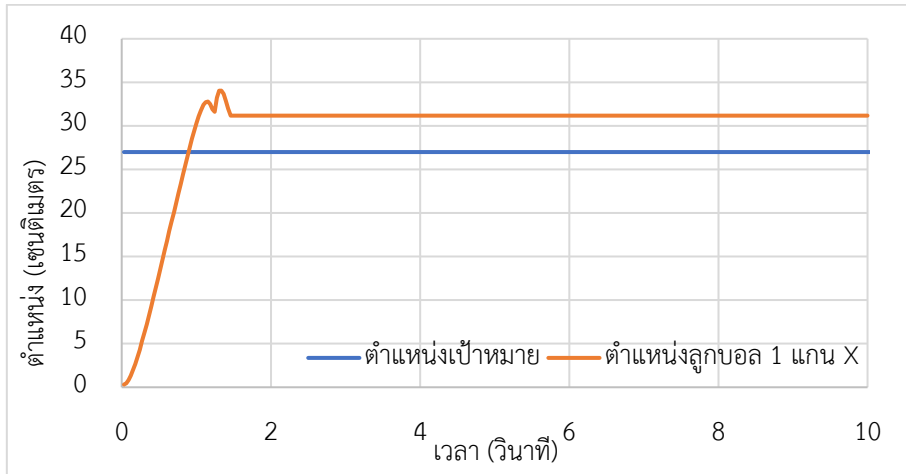


ภาพที่ 4-138 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 21 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-108 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 21 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.720	0.702	0.721	0.731	0.750	0.017	0.725
เวลาชั่วคราว (วินาที)	2.155	2.074	2.298	2.235	3.675	0.669	2.487
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	2.144	2.068	2.290	2.230	3.664	0.668	2.479
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	19.039	19.184	19.112	19.112	18.531	0.265	18.996
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	26.227	26.299	26.372	25.936	25.718	0.275	26.110
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	24.889	25.234	25.580	23.506	22.469	1.307	24.335
สภาวะหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	26.227	26.299	26.372	25.936	25.718	0.275	26.110
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.520	1.520	1.520	1.581	1.611	0.043	1.550

4.2.5.1.5 ระยะ 27 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมแผ่นเลื่อนแบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ แนวแกนเอกซ์แสดงดังภาพที่ 4-139 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-109

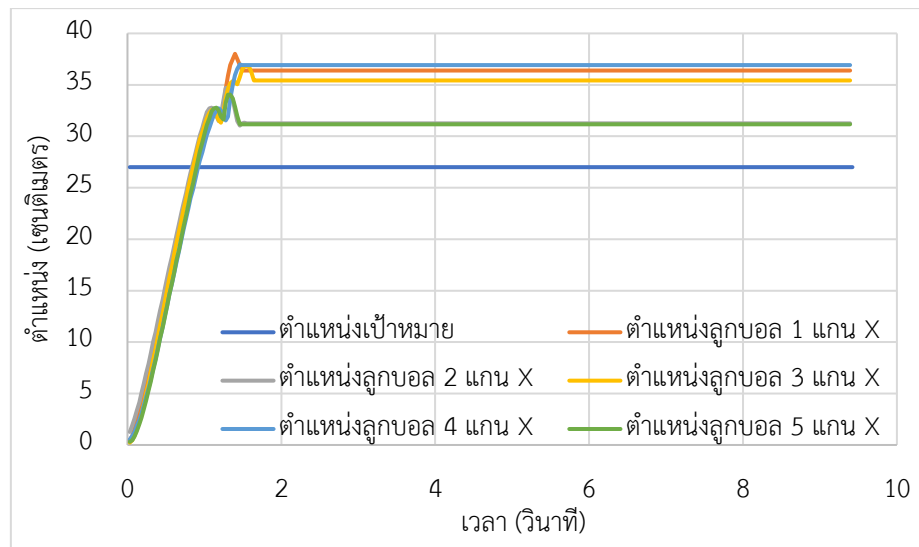


ภาพที่ 4-139 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 27 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-109 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 27 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.6336
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	-7.1147
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	34.0453
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	26.0937
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	26.3507
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	34.0453
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.3373

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-140 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-110



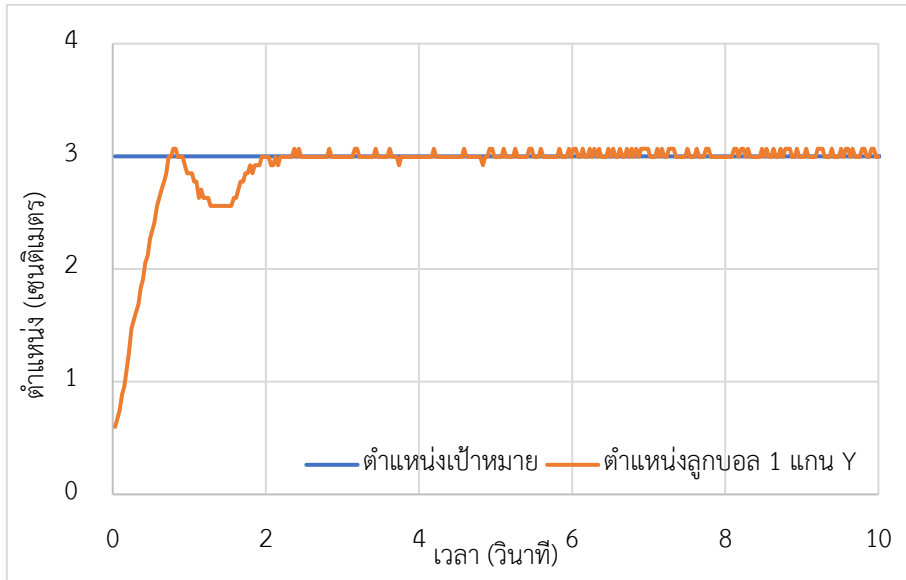
ภาพที่ 4-140 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 27 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-110 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 27 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.632	0.658	0.602	0.668	0.634	0.026	0.639
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-	-	-	-	-	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	-	-	-	-	-	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	25.078	24.490	24.994	24.858	-7.115	14.299	18.461
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	38.014	34.707	36.827	36.985	34.045	1.669	36.116
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	40.794	28.544	36.397	36.983	26.094	6.180	33.762
สภาวะหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	26.351	11.784	5.270
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	38.014	34.707	36.827	36.985	34.045	1.669	36.116
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.429	1.307	1.550	1.489	1.337	0.102	1.422

4.2.5.2 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับค่าอัตโนมัติแกนวาย

4.2.5.2.1 ระยะ 3 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับค่าอัตโนมัติ แนวแกนวายแสดงดังภาพที่ 4-141 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-111

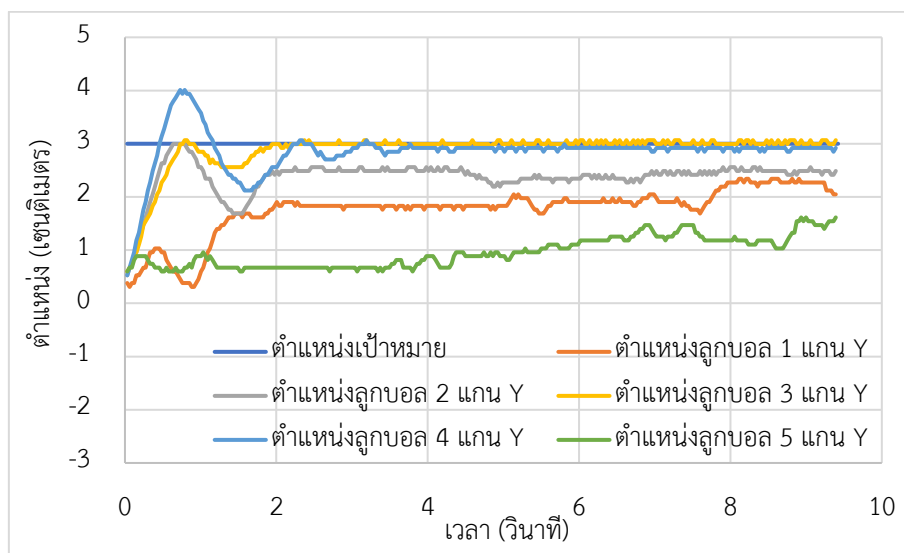


ภาพที่ 4-141 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับค่าอัตโนมัติ แนวแกนวาย ระยะ 3 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-111 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับค่าอัตโนมัติ แนวแกนวาย ระยะ 3 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.637
เวลาชั่วคราว (วินาที)	1.692
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	1.670
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	2.559
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	3.067
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	2.240
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	3.067
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	0.821

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-142 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-112

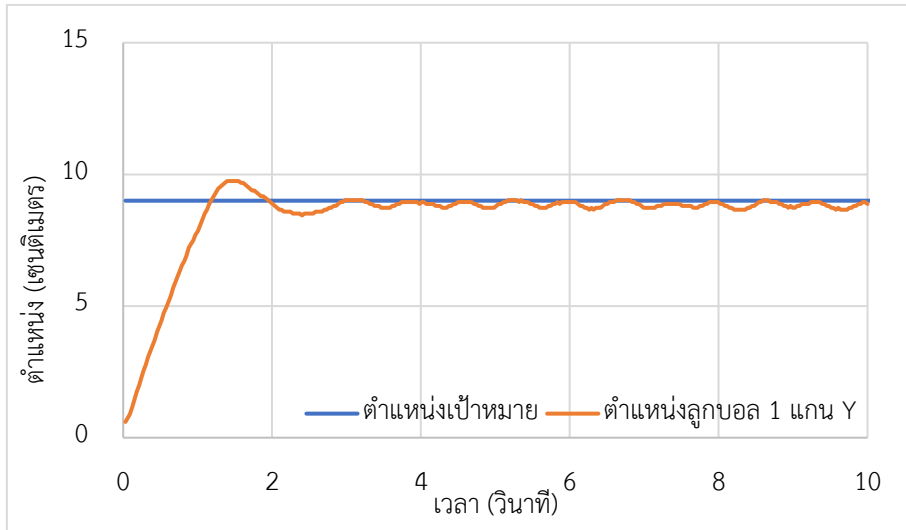


ภาพที่ 4-142 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 3 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-112 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 3 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาได้ขึ้น	-	0.531	0.637	0.409	-	0.114	0.526
เวลาชั่วคราว	-	-	1.692	2.814	-	0.793	2.253
เวลาสู่จุดสมดุล	-	-	1.670	2.095	-	0.301	1.883
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล	-	1.688	2.559	2.123	-	0.436	2.123
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล	-	2.995	3.067	4.011	-	0.567	3.358
ผลตอบสนองเกิน	0.000	0.000	2.240	33.700	0.000	14.852	7.188
สภาวะความหน่วงน้อย	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด	2.341	2.995	3.067	4.011	1.760	0.846	2.835
เวลาตอบสนองสูงสุด	8.146	0.669	0.821	0.760	9.453	4.433	3.970

4.2.5.2.2 ระยะ 9 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ แนวแกนวายแสดงดังภาพที่ 4-143 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-113

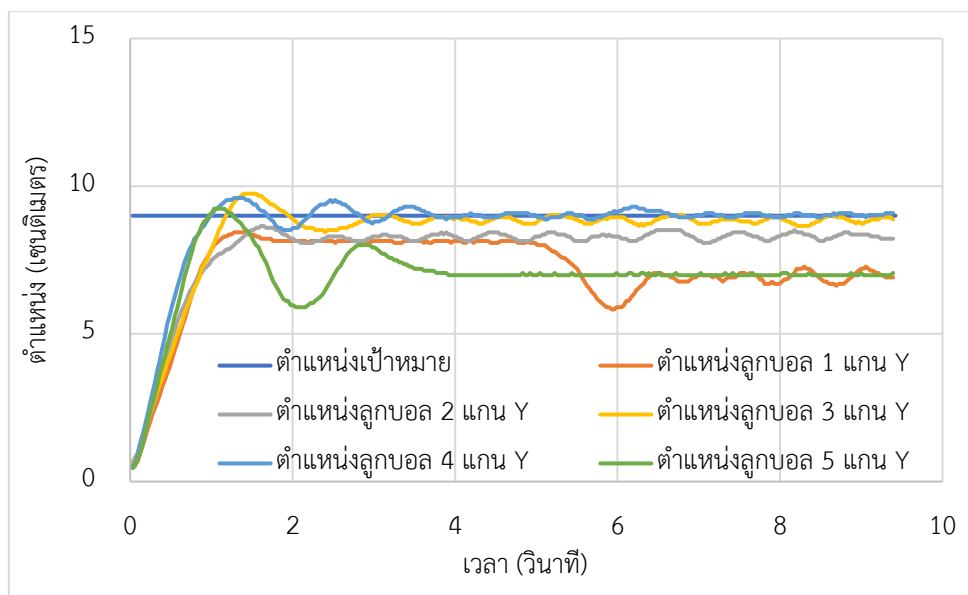


ภาพที่ 4-143 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 9 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-113 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 9 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.944
เวลาชั่วคราว (วินาที)	1.074
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	1.067
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	8.294
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	9.746
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	8.293
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	9.746
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.429

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-144 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-114

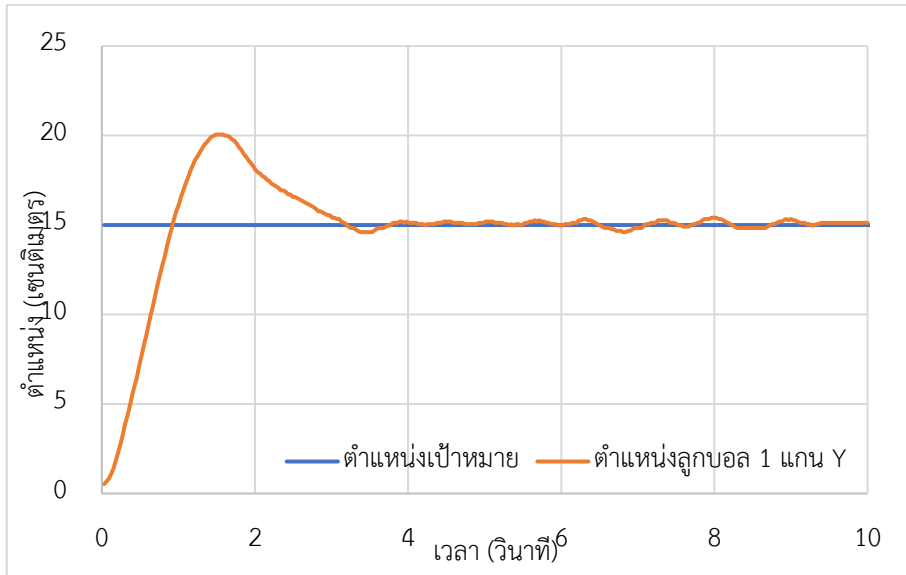


ภาพที่ 4-144 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 9 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-114 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 9 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.959	1.239	0.944	0.681	0.681	0.232	0.901
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	8.573	1.074	0.810	-	4.407	3.486
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	7.183	1.067	0.804	-	3.609	3.018
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	5.826	8.077	8.294	8.222	5.899	1.282	7.263
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	8.440	8.657	9.746	9.601	9.238	0.573	9.137
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	0.000	0.000	8.293	6.680	2.647	3.818	3.524
สภาวะหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	8.440	8.657	9.746	9.601	9.238	0.573	9.137
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.307	1.641	1.429	1.307	1.064	0.210	1.350

4.2.5.2.3 ระยะ 15 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ แนวแกนวายแสดงดังภาพที่ 4-145 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-115

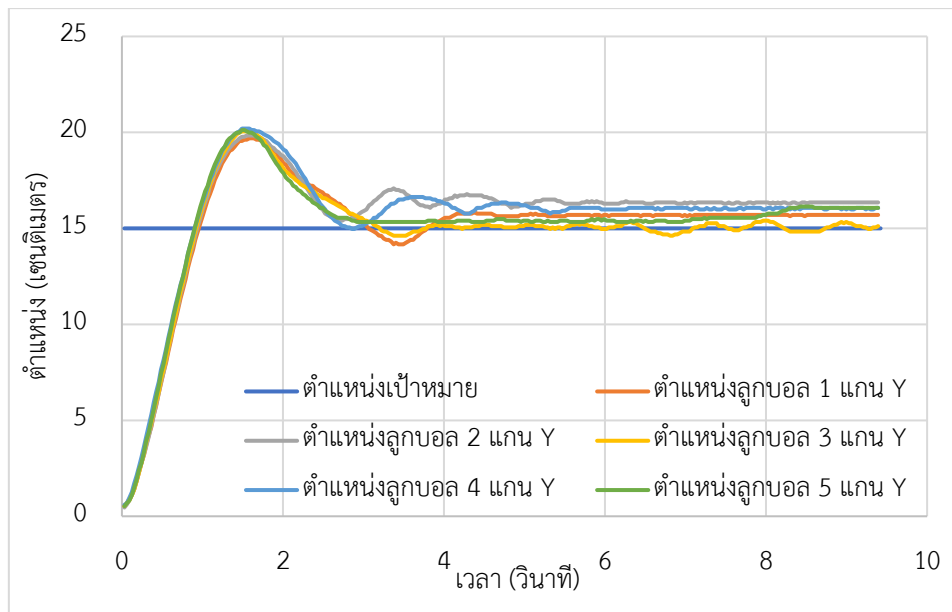


ภาพที่ 4-145 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 15 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-115 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 15 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.676
เวลาชั่วคราว (วินาที)	2.602
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	2.583
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	13.812
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	20.056
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	33.704
สภาวะความหวนวน้อย (เซนติเมตร)	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	20.056
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.520

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-146 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-116

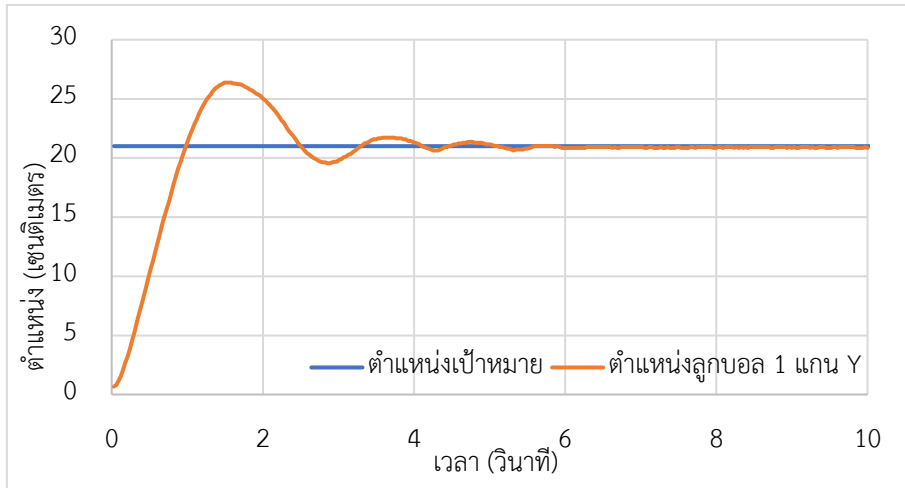


ภาพที่ 4-146 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 15 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-116 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 15 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น	0.696	0.682	0.676	0.673	0.658	0.014	0.677
เวลาชั่วคราว	2.663	5.425	2.602	3.939	2.380	1.286	3.402
เวลาสู่จุดสมดุล	2.644	4.650	2.583	3.890	2.370	0.994	3.227
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล	13.885	13.667	13.812	13.667	13.667	0.103	13.739
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล	19.693	19.838	20.056	20.201	20.128	0.212	19.983
ผลตอบสนองเกิน	31.284	32.252	33.704	34.672	34.188	1.411	33.220
สภาวะความหน่วงน้อย	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด	19.693	19.838	20.056	20.201	20.128	0.212	19.983
เวลาตอบสนองสูงสุด	1.611	1.581	1.520	1.520	1.520	0.043	1.550

4.2.5.2.4 ระยะ 21 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ แนวแกนวายแสดงดังภาพที่ 4-147 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-117

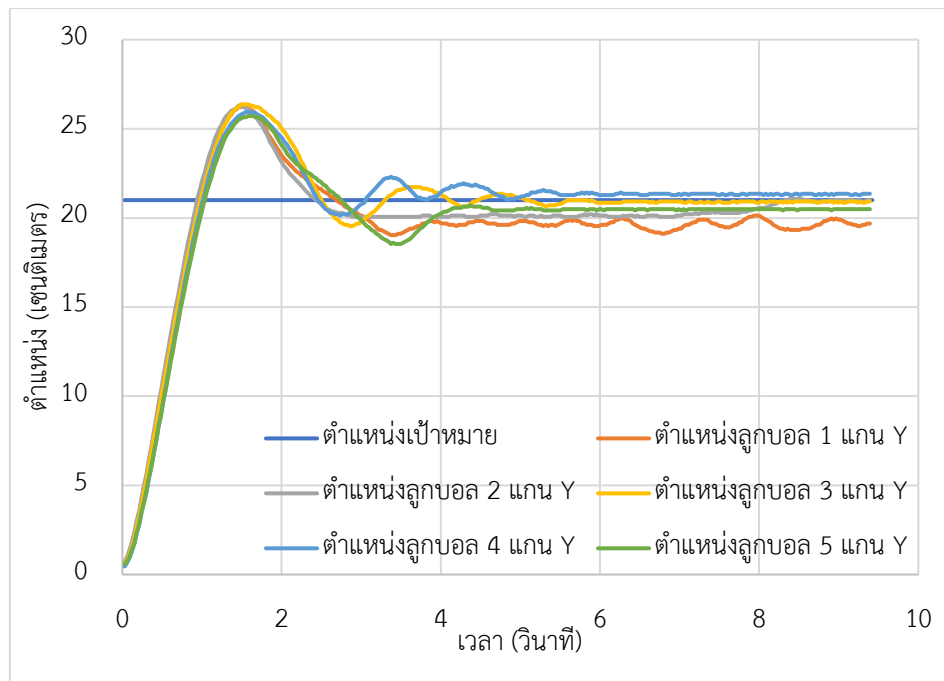


ภาพที่ 4-147 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ แกนวาย ระยะ 21 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-117 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ แกนวาย ระยะ 21 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.721
เวลาชั่วคราว (วินาที)	2.298
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	2.290
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	19.112
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	26.372
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	25.580
สภาวะความหวนวน้อย (เซนติเมตร)	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	26.372
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.520

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-148 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-118

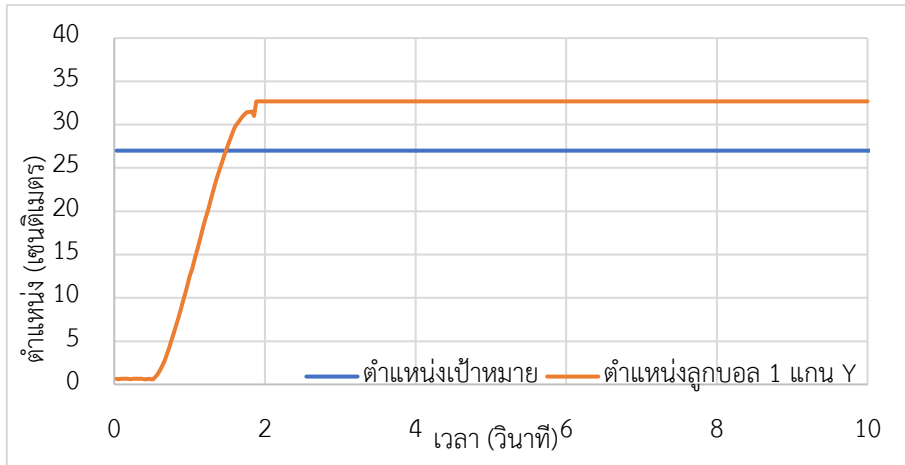


ภาพที่ 4-148 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 21 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-118 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 21 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น	0.720	0.702	0.721	0.731	0.750	0.017	0.725
เวลาชั่วคราว	2.126	2.045	2.298	2.235	3.675	0.677	2.476
เวลาสู่จุดสมดุล	2.113	2.037	2.290	2.230	3.664	0.676	2.467
สัญญาณต่ำสุดก่อน จุดสมดุล	19.039	19.184	19.112	19.112	18.531	0.265	18.996
สัญญาณสูงสุดก่อน จุดสมดุล	26.227	26.299	26.372	25.936	25.718	0.275	26.110
ผลตอบสนองเกิน	24.889	25.234	25.580	23.506	22.469	1.307	24.335
สภาวะความหน่วงน้อย	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด	26.227	26.299	26.372	25.936	25.718	0.275	26.110
เวลาตอบสนองสูงสุด	1.489	1.489	1.520	1.581	1.611	0.055	1.538

4.2.5.2.5 ระยะ 27 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ แนวแกนวายแสดงดังภาพที่ 4-149 และผลการตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-119

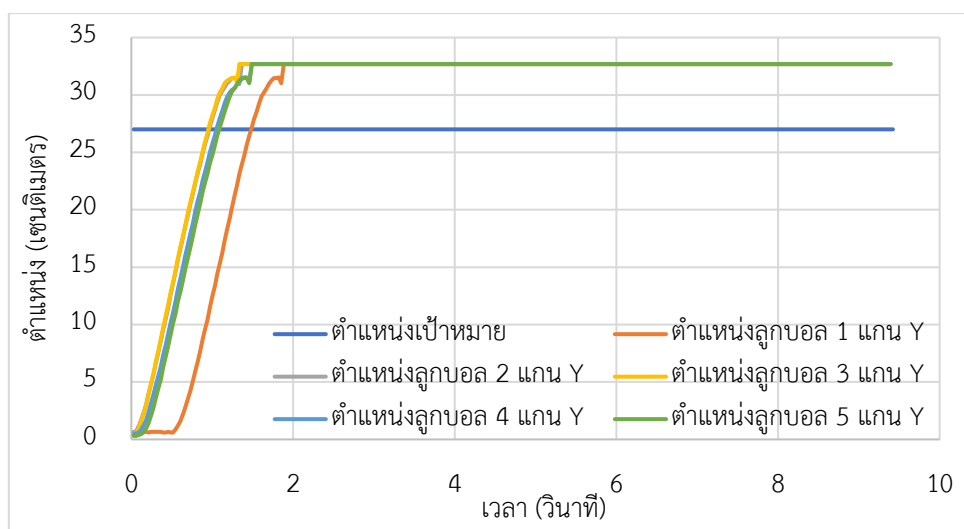


ภาพที่ 4-149 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ แกนวาย ระยะ 27 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-119 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ แกนวาย ระยะ 27 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.715
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	24.775
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	32.688
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	21.067
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	32.688
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.915

ทำการทดสอบ และเก็บผลการตอบสนอง 5 ครั้งเพื่อหาสมรรถนะของตัวควบคุม โดยหาค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ จากการทดลองรักษาตำแหน่งของลูกบอล ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร ทั้ง 5 ครั้งแสดงดังภาพที่ 4-150 และผลการตอบสนองการทดลอง 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4-120



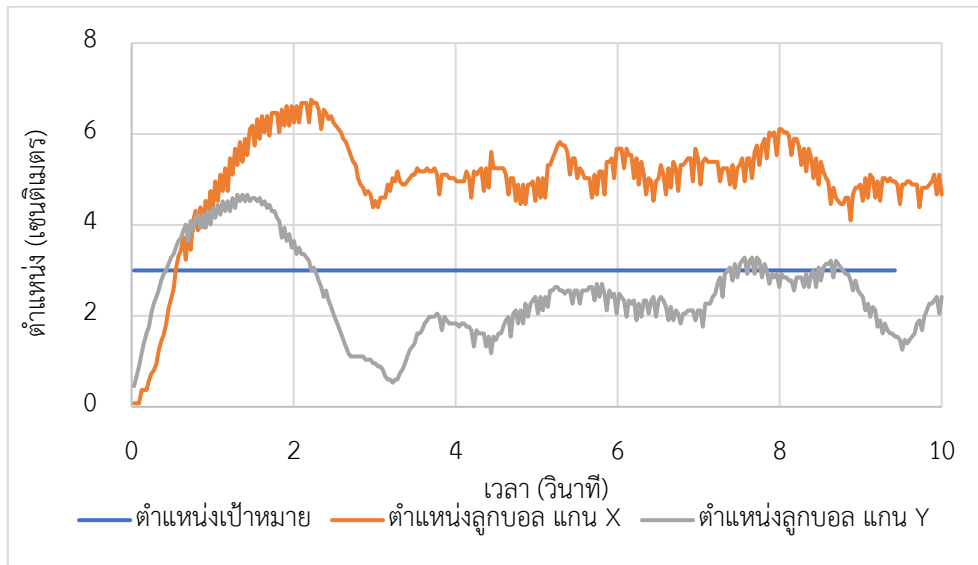
ภาพที่ 4-150 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ แกนวาย ระยะ 27 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-120 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ แกนวาย ระยะ 27 เซนติเมตร

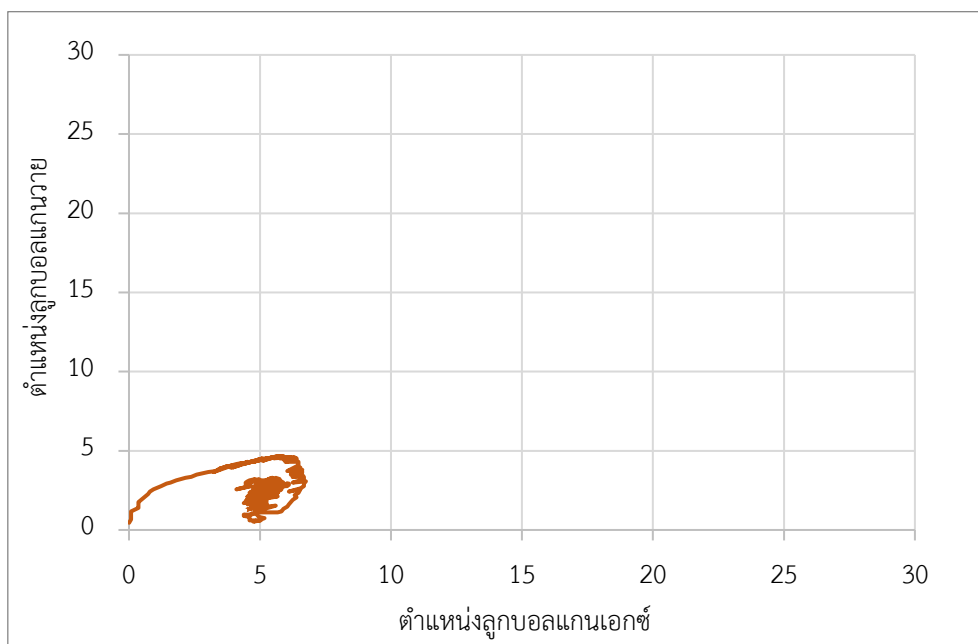
ผลตอบสนอง	ครั้งที่					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.720	0.702	0.721	0.731	0.750	0.017	0.725
เวลาชั่วคราว (วินาที)	2.126	2.045	2.298	2.235	3.675	0.677	2.476
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	2.113	2.037	2.290	2.230	3.664	0.676	2.467
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	19.039	19.184	19.112	19.112	18.531	0.265	18.996
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	26.227	26.299	26.372	25.936	25.718	0.275	26.110
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	24.889	25.234	25.580	23.506	22.469	1.307	24.335
สภาวะหวนวน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	26.227	26.299	26.372	25.936	25.718	0.275	26.110
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.489	1.489	1.520	1.581	1.611	0.055	1.538

4.2.5.3 ผลสมรรถนะของตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับค่าอัตโนมัติสองแกน

4.2.5.3.1 ระยะแกนเอกซ์ 3 เซนติเมตร แกนวาย 3 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ สองแกนแสดงดังภาพที่ 4-151 มุมมองด้านบนแสดงดังภาพที่ 4-152 และผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-121



ภาพที่ 4-151 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะแกนเอกซ์ 3 เซนติเมตร และแกนวาย 3 เซนติเมตร

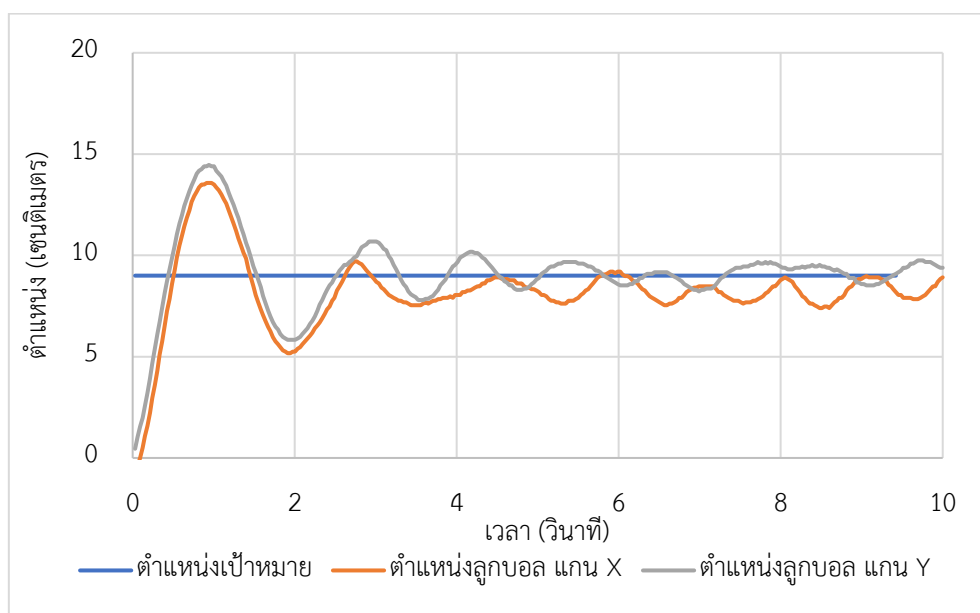


ภาพที่ 4-152 ผลตอบสนองมุมมองด้านบนตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 3 เซนติเมตร และแกนวาย 3 เซนติเมตร

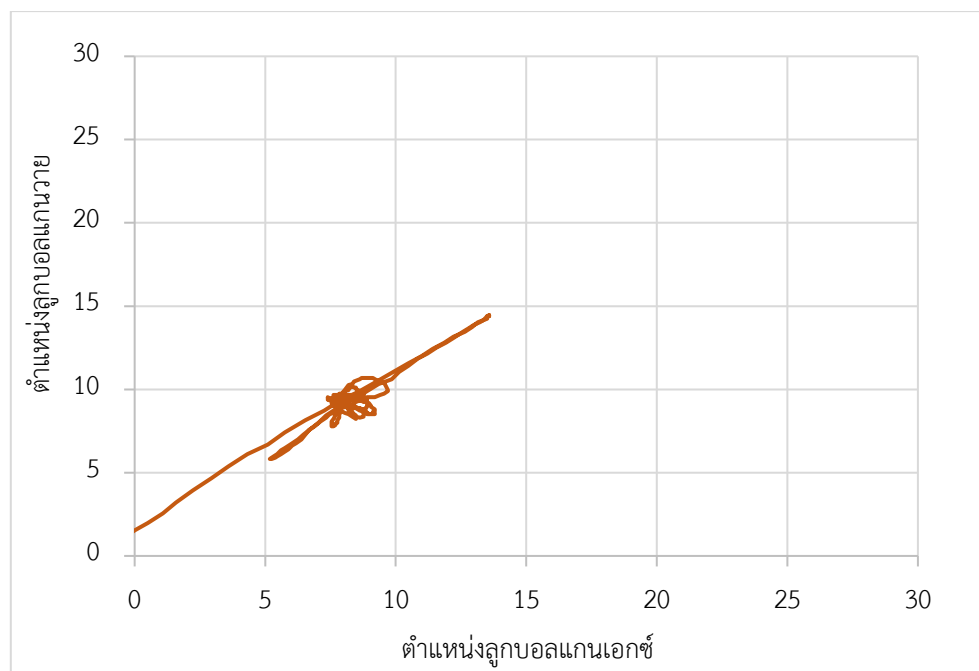
ตารางที่ 4-121 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ สองแกน ระยะ
3 เซนติเมตร และแกนวาย 3 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง	
	แกนเอกซ์	แกนวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.4309	0.462
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	2.734	0.817
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	6.396	4.737
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	113.183	57.900
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	2.217	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	6.396	4.737
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	3.161	9.118

4.2.5.3.2 ระยะแกนเอกซ์ 9 เซนติเมตร แกนวาย 9 เซนติเมตร กราฟ
ผลตอบสนองของตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ สองแกนแสดงดังภาพที่ 4-153
มุมมองด้านบนแสดงดังภาพที่ 4-154 และผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-122



ภาพที่ 4-153 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 9 เซนติเมตร
และแกนวาย 9 เซนติเมตร

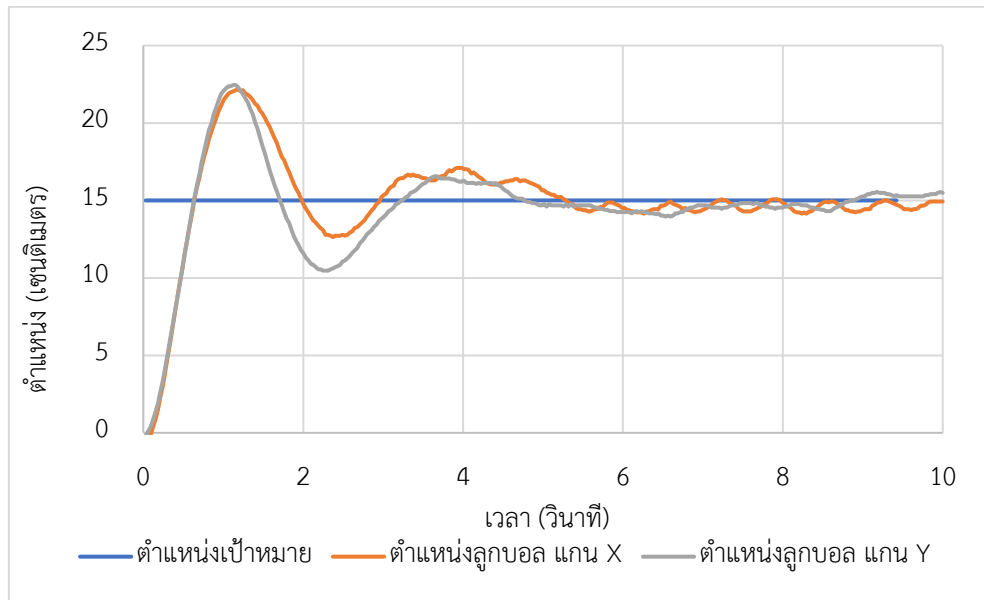


ภาพที่ 4-154 ผลตอบสนองมุมมองด้านบนตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 9 เซนติเมตร และแกนวาย 9 เซนติเมตร

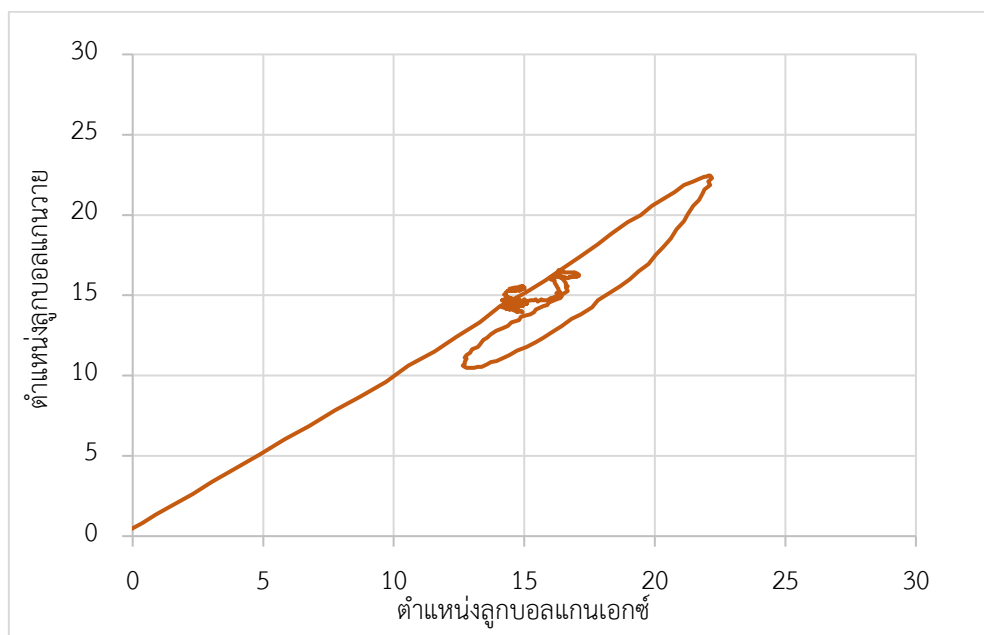
ตารางที่ 4-122 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 9 เซนติเมตร และแกนวาย 9 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง	
	แกนเอกซ์	แกนวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.324	0.339
เวลาชั่วคราว (วินาที)	9.798	4.345
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	9.829	4.345
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	5.175	5.826
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	13.576	14.465
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	50.839	60.727
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	11.110	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	13.576	14.465
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	0.942	0.973

4.2.5.3.2 ระยะแกนเอกซ์ 15 เซนติเมตร แกนวาย 15 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ สองแกนแสดงดังภาพที่ 4-155 มุมมองด้านบนแสดงดังภาพที่ 4-156 และผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-123



ภาพที่ 4-155 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 15 เซนติเมตร และแกนวาย 15 เซนติเมตร

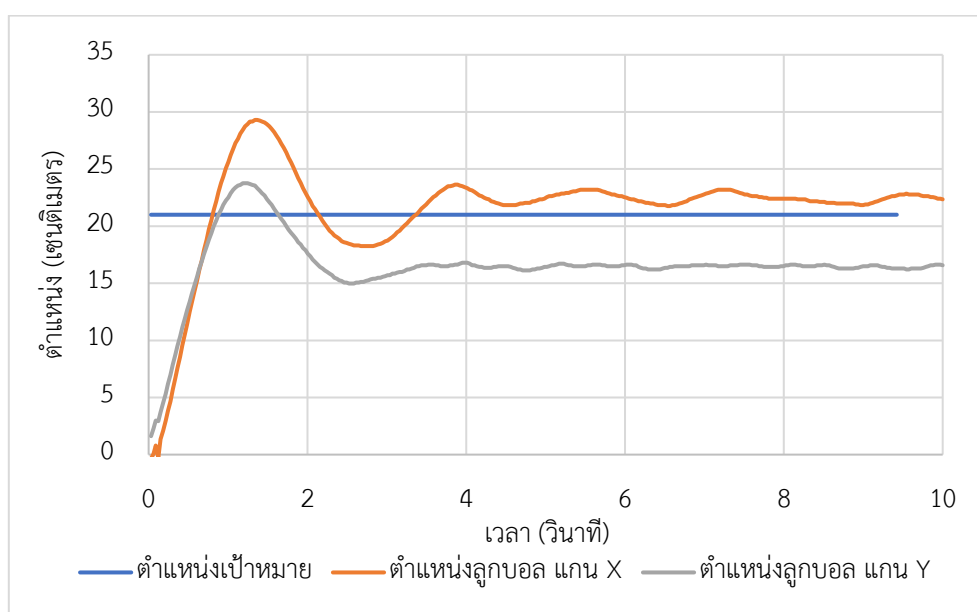


ภาพที่ 4-156 ผลตอบสนองมุมมองด้านบนตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 15 เซนติเมตร และแกนวาย 15 เซนติเมตร

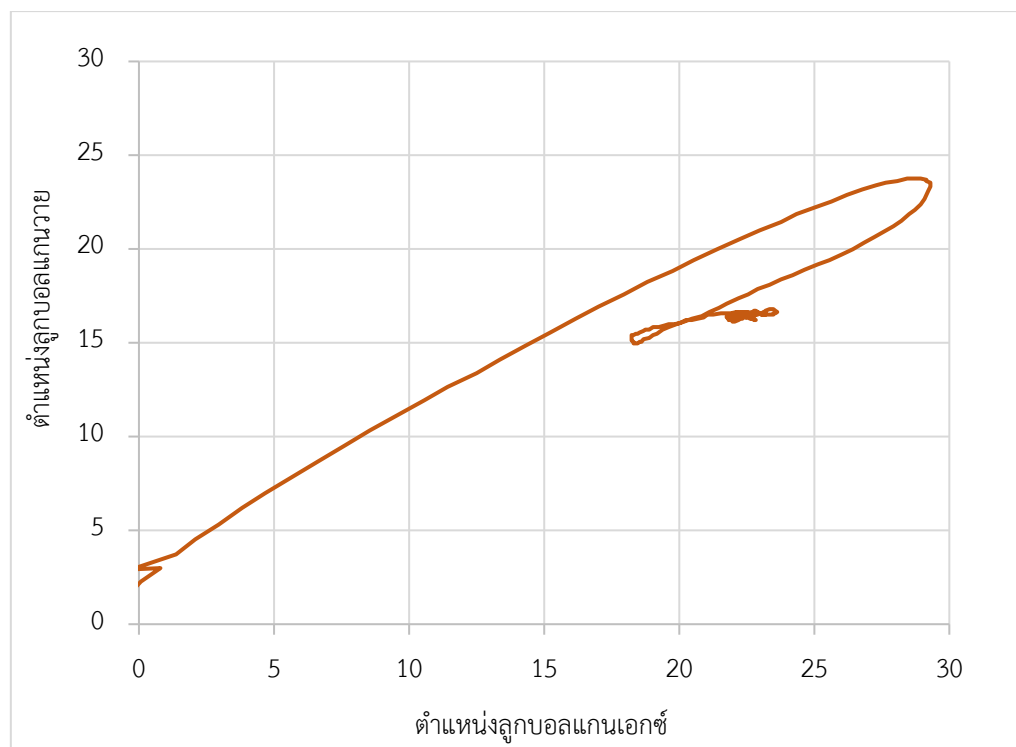
ตารางที่ 4-123 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 15 เซนติเมตร และแกนวาย 15 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง	
	แกนเอกซ์	แกนวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.404	0.422
เวลาชั่วคราว (วินาที)	4.211	3.717
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	4.233	3.723
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	12.642	10.472
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	22.192	22.451
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	47.943	49.676
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	5.709	1.816
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	22.192	22.451
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.216	1.155

4.2.5.3.4 ระยะแกนเอกซ์ 21 เซนติเมตร แกนวาย 21 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ สองแกนแสดงดังภาพที่ 4-157 มุมมองด้านบนแสดงดังภาพที่ 4-158 และผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-124



ภาพที่ 4-157 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 21 เซนติเมตร และแกนวาย 21 เซนติเมตร

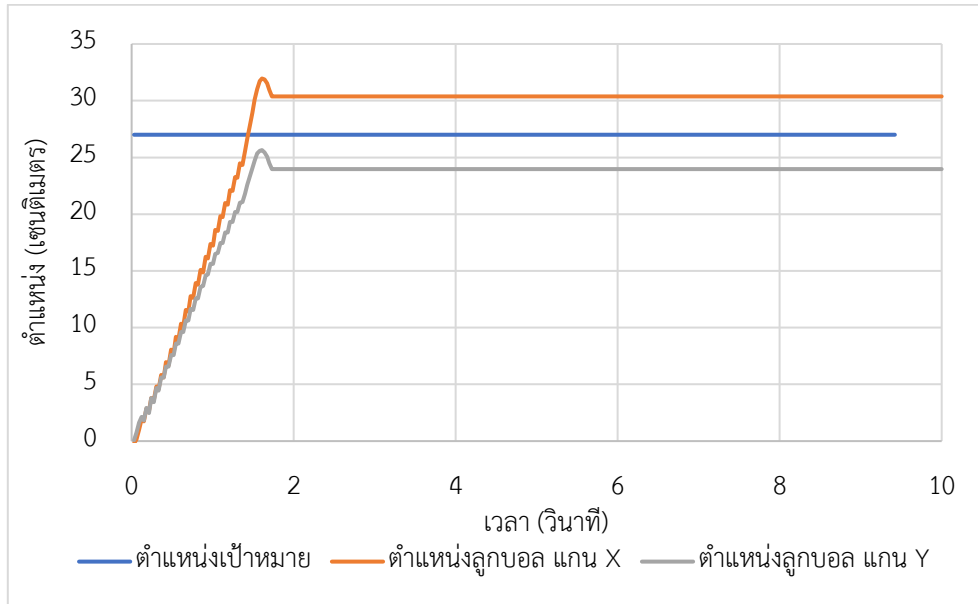


ภาพที่ 4-158 ผลตอบสนองมุมมองด้านบนตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 21 เซนติเมตร และแกนวาย 21 เซนติเมตร

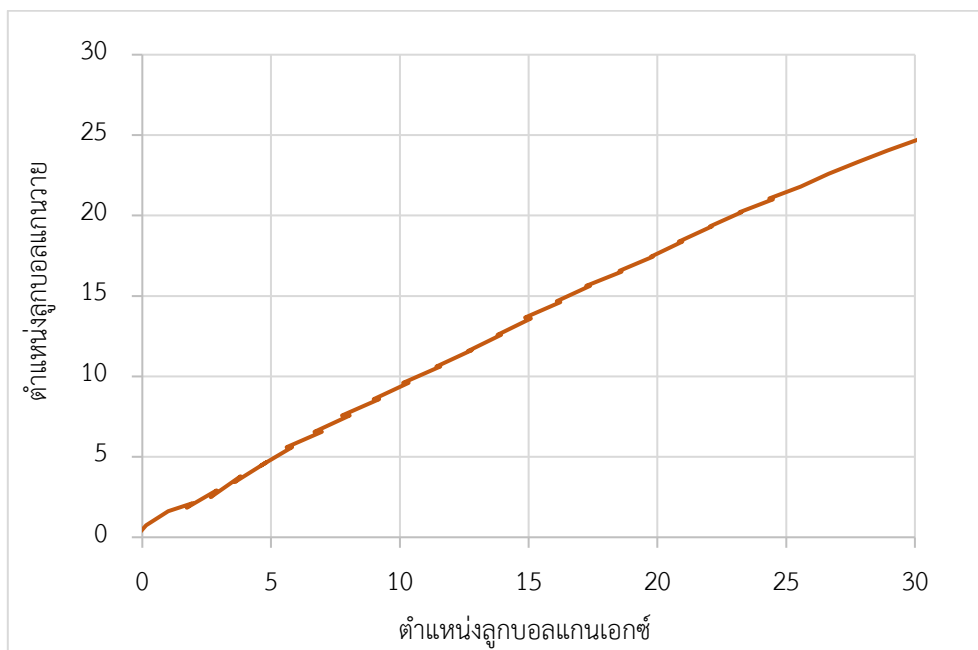
ตารางที่ 4-124 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 21 เซนติเมตร และแกนวาย 21 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง	
	แกนเอกซ์	แกนวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.549	0.711
เวลาชั่วคราว (วินาที)	7.360	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	7.396	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	18.243	14.974
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	29.300	23.758
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	39.522	13.134
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	4.078	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	29.300	23.758
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.368	1.216

4.2.5.3.5 ระยะแกนเอกซ์ 27 เซนติเมตร แกนวาย 27 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ สองแกนแสดงดังภาพที่ 4-159 มุมมองด้านบนแสดงดังภาพที่ 4-160 และผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-125



ภาพที่ 4-159 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 27 เซนติเมตร และแกนวาย 27 เซนติเมตร



ภาพที่ 4-160 ผลตอบสนองมุมมองด้านบนตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 27 เซนติเมตร และแกนวาย 27 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-125 ผลตอบสนองตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับจูนค่าอัตโนมัติ ระยะ 27 เซนติเมตร และแกนวาย 27 เซนติเมตร

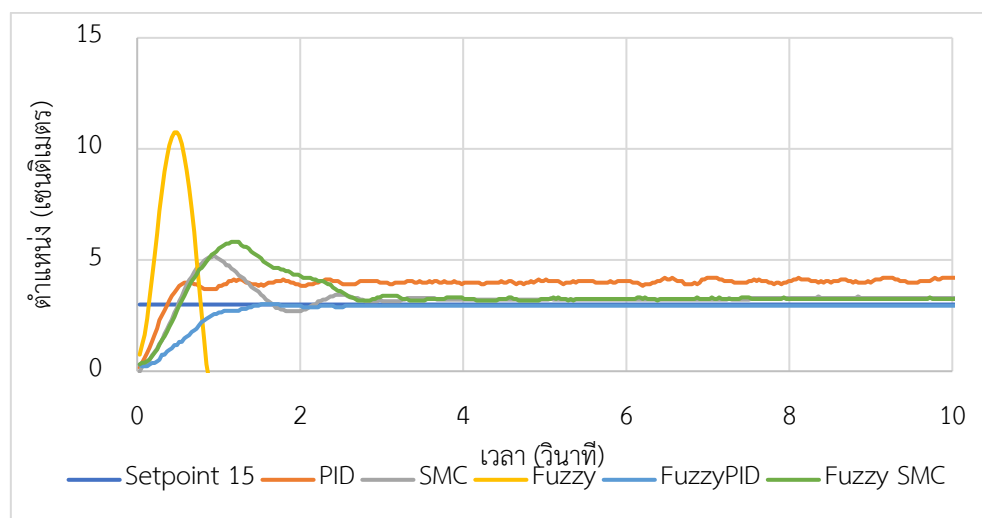
ผลตอบสนอง	ค่าผลตอบสนอง	
	แกนเอกซ์	แกนวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	1.155	1.325
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	24.346	23.976
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	31.956	25.646
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	18.357	0.000
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	2.108	0.471
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	31.956	25.646
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.641	1.641

4.2.6 ผลการเปรียบเทียบผลตอบสนองของทุกตัวควบคุม

4.2.6.1 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนเอกซ์

4.2.6.1.1 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนเอกซ์ ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร

กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมตัวควบคุมทั้งหมดแสดงดังภาพที่ 4-161 และตารางผลตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-126

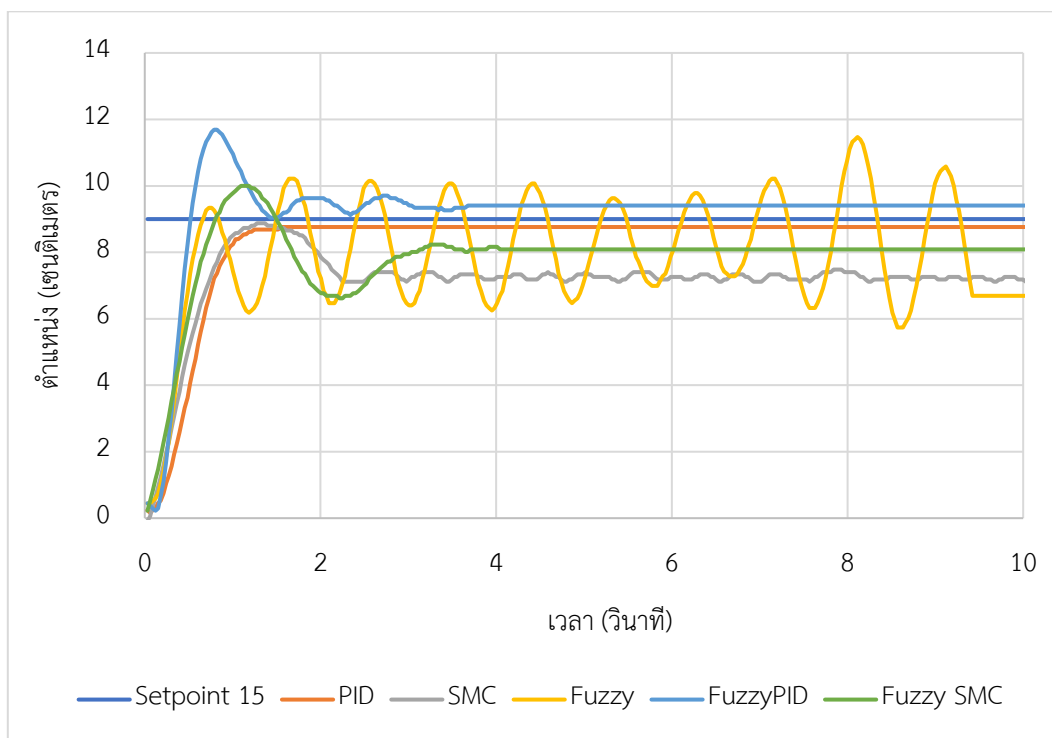


ภาพที่ 4-161 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนเอกซ์ ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-126 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนเอกซ์ ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	PID	SMC	FLC	F-PID	F- SMC
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.280	0.365	0.103	0.901	0.452
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	8.870	-	1.064	9.743
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	8.871	-	1.054	9.735
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	2.734	2.702	-7.115	2.723	2.734
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	4.204	5.201	10.746	3.017	5.821
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	40.143	73.360	258.193	0.573	94.043
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.590	237.157	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	4.204	5.201	10.746	3.017	5.821
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	6.474	0.942	0.456	1.520	1.155

4.2.6.1.2 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนเอกซ์ ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมตัวควบคุมทั้งหมดแสดงดังภาพที่ 4-162 และตารางผลตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-127



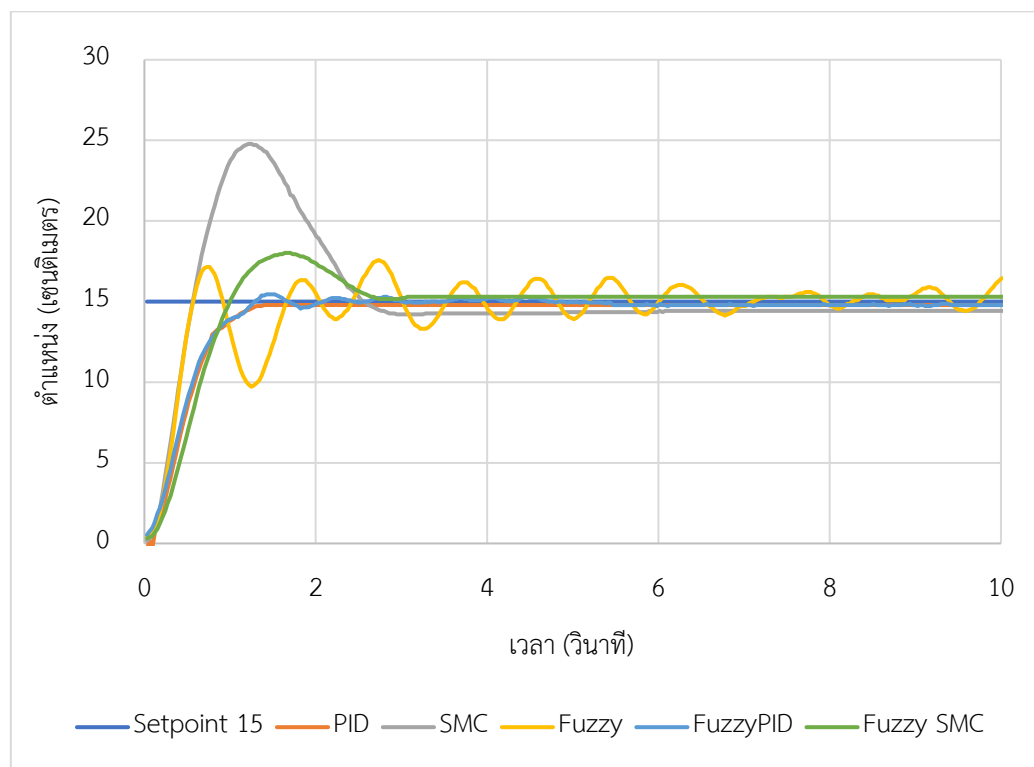
ภาพที่ 4-162 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนเอกซ์ ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-127 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนเอกซ์ ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	PID	SMC	FLC	F-PID	F- SMC
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.756	0.363	0.357	0.773	0.677
เวลาชั่วคราว (วินาที)	0.925	2.309	-	0.915	2.266
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	0.934	2.308	3.335	0.904	2.260
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	13.539	13.539	9.717	13.539	13.539
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	14.788	24.784	17.581	15.450	18.022
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	0.000	65.229	17.209	2.999	20.149
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	2.841	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	14.788	24.784	17.581	15.450	18.022
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.398	1.216	2.736	1.429	1.641

4.2.6.1.2 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนเอกซ์ ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมตัวควบคุมทั้งหมดแสดงดังภาพที่ 4-163 และตารางผลตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-128



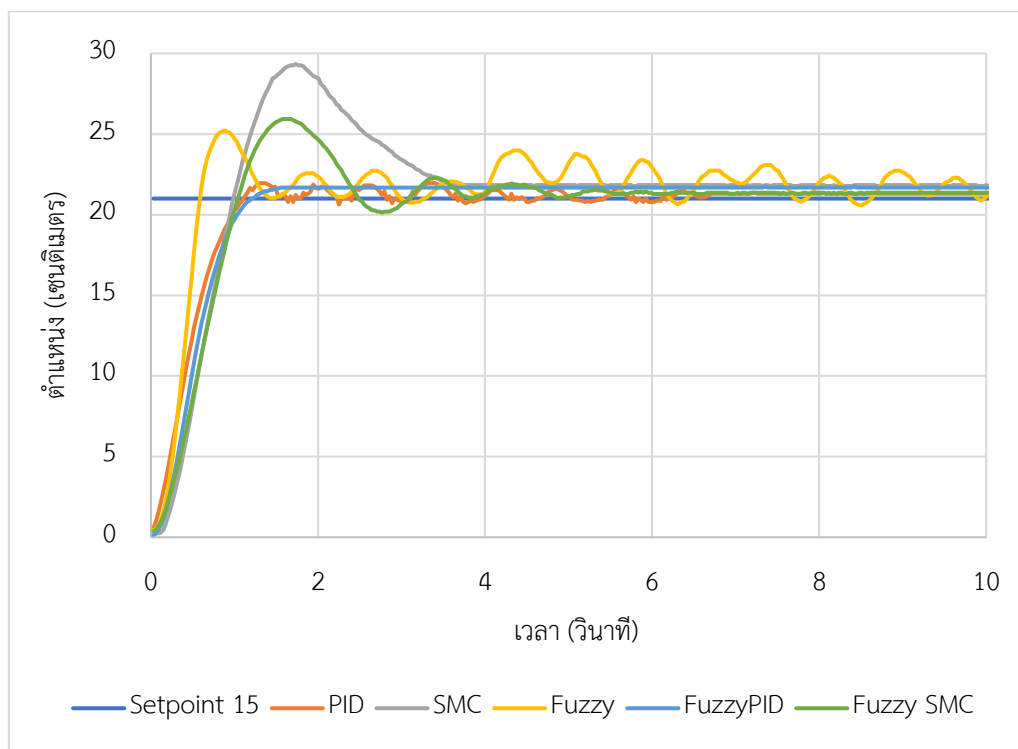
ภาพที่ 4-163 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนเอกซ์ ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-128 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนเอกซ์ ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	PID	SMC	FLC	F-PID	F- SMC
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.756	0.363	0.357	0.773	0.677
เวลาชั่วคราว (วินาที)	0.925	2.309	-	0.915	2.266
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	0.934	2.308	3.335	0.904	2.260
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	13.539	13.539	9.717	13.539	13.539
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	14.788	24.784	17.581	15.450	18.022
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	0.000	65.229	17.209	2.999	20.149
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	2.841	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	14.788	24.784	17.581	15.450	18.022
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.398	1.216	2.736	1.429	1.641

4.2.6.1.3 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนเอกซ์ ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร

กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมตัวควบคุมทั้งหมดแสดงดังภาพที่ 4-164 และตารางผลตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-129

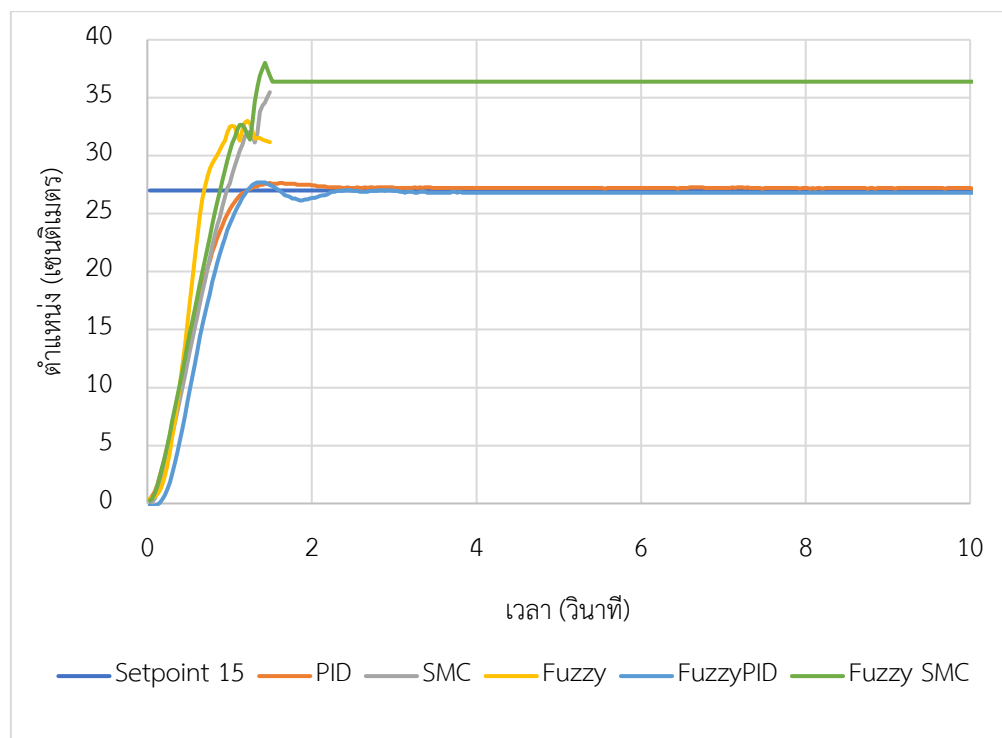


ภาพที่ 4-164 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนเอกซ์ ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-129 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนเอกซ์ ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	PID	SMC	FLC	F-PID	F- SMC
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.752	0.646	0.370	0.721	0.731
เวลาชั่วคราว (วินาที)	0.869	3.107	7.424	0.926	2.235
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	0.863	3.098	5.977	0.925	2.230
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	19.127	19.198	19.198	19.114	19.112
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	21.974	29.341	25.225	21.760	25.936
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	4.637	39.721	20.121	3.618	23.506
สถานะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	21.974	29.341	25.225	21.760	25.936
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.307	1.733	0.881	7.355	1.581

4.2.6.1.5 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนเอกซ์ ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมตัวควบคุมทั้งหมดแสดงดังภาพที่ 4-165 และตารางผลตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-130



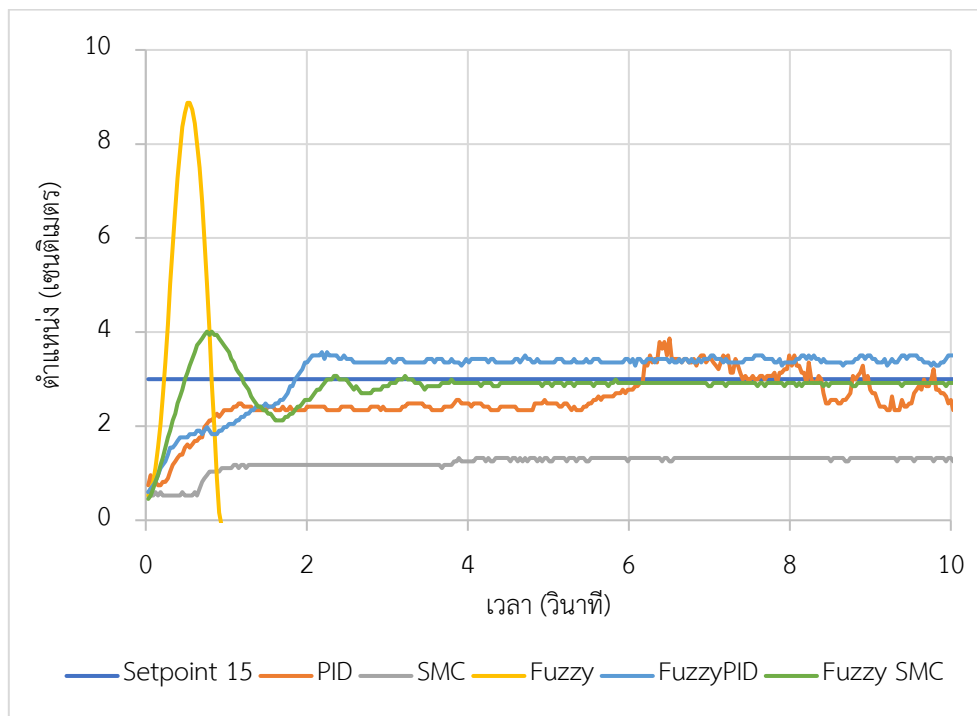
ภาพที่ 4-165 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนเอกซ์ ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-130 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนเอกซ์ ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	PID	SMC	FLC	F-PID	F- SMC
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.763	0.810	0.393	0.707	0.632
เวลาชั่วคราว (วินาที)	0.931	-	-	1.014	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	0.929	-	-	1.015	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	24.564	-7.199	25.225	24.605	25.078
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	27.651	35.357	32.943	27.692	38.014
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	2.410	68.368	22.010	2.562	40.794
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	34.282	0.000	0.882	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	27.651	35.357	32.943	27.692	38.014
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.489	1.733	1.003	1.337	1.429

4.2.6.2 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนวาย

4.2.6.2.1 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนวาย ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมตัวควบคุมทั้งหมดแสดงดังภาพที่ 4-166 และตารางผลตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-131

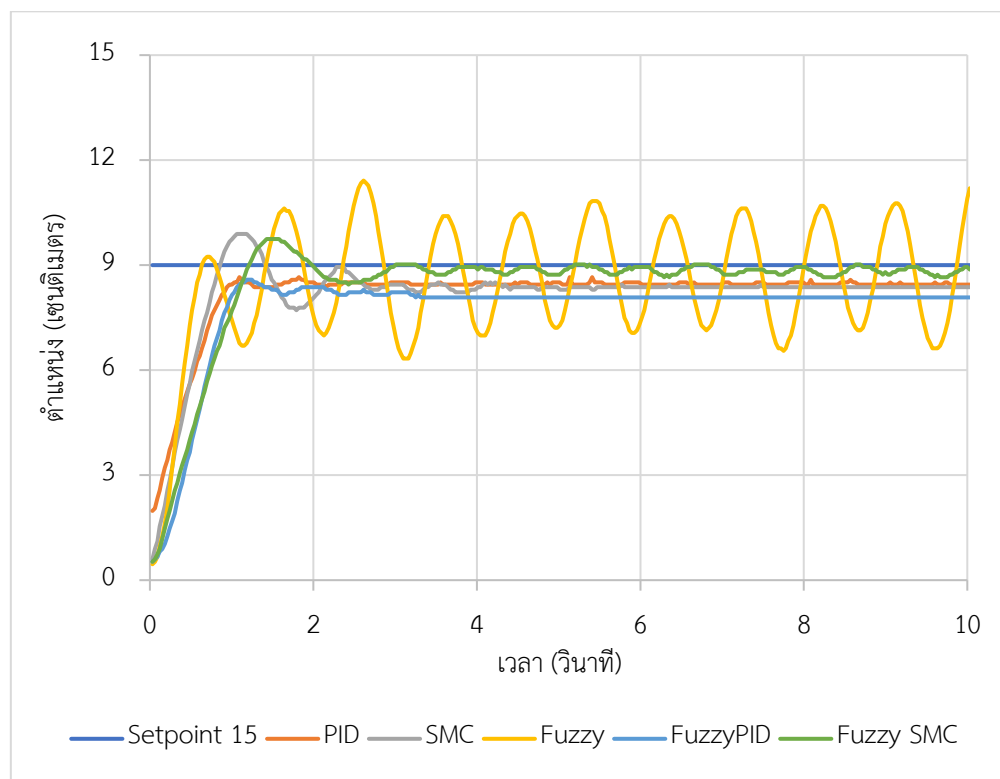


ภาพที่ 4-166 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนวาย ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-131 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนวาย ตำแหน่ง 3 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	PID	SMC	FLC	F-PID	F-SMC
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	5.804	-	0.185	1.731	0.409
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-	-	-	2.814
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	-	-	-	2.095
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	2.341	-	-1.144	2.704	2.123
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	3.866	-	8.875	3.575	4.011
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	28.860	0.000	195.840	19.180	33.700
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	38.120	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	3.866	1.325	8.875	3.575	4.011
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	6.504	3.891	0.517	2.188	0.760

4.2.6.2.2 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนวาย ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมตัวควบคุมทั้งหมดแสดงดังภาพที่ 4-167 และตารางผลตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-132

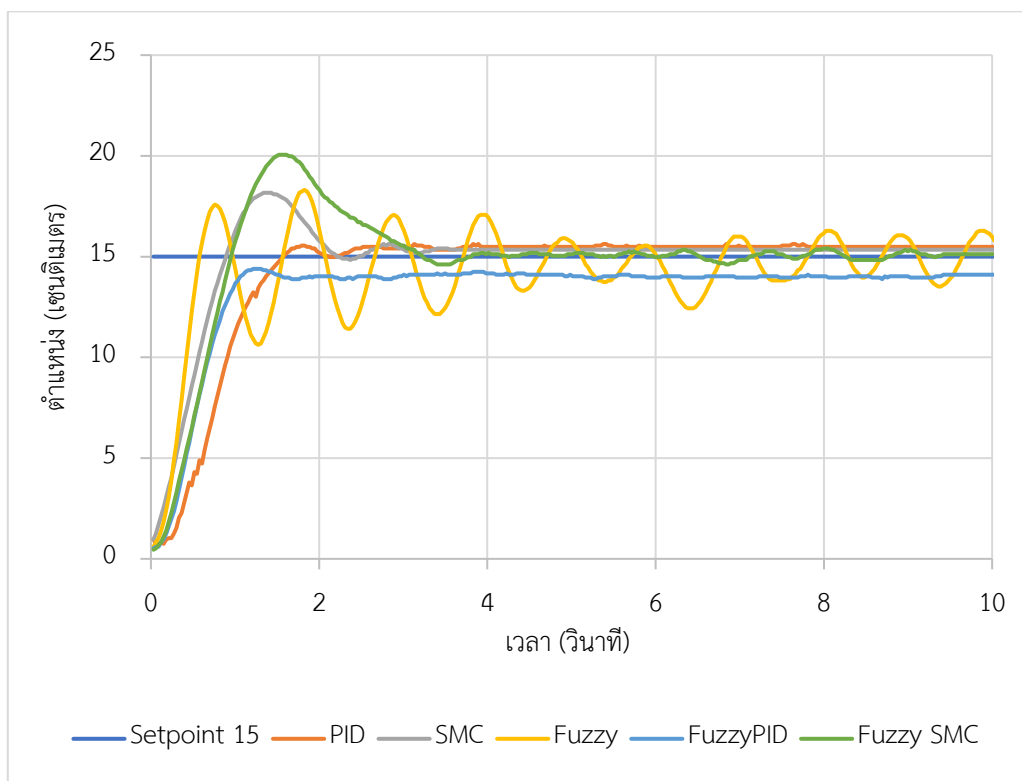


ภาพที่ 4-167 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนวาย ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-132 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนวาย ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	PID	SMC	FLC	F-PID	F-SMC
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.841	0.685	0.434	0.839	0.944
เวลาชั่วคราว (วินาที)	0.928	2.041	-	-	1.074
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	0.871	2.016	-	-	1.067
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	8.149	7.714	6.334	8.077	8.294
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	8.657	9.892	11.416	8.585	9.746
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	0.000	9.907	26.847	0.000	8.293
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	8.657	9.892	11.416	8.585	9.746
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.094	1.064	2.614	1.185	1.429

4.2.6.2.1 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนวาย ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมตัวควบคุมทั้งหมดแสดงดังภาพที่ 4-168 และตารางผลตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-133

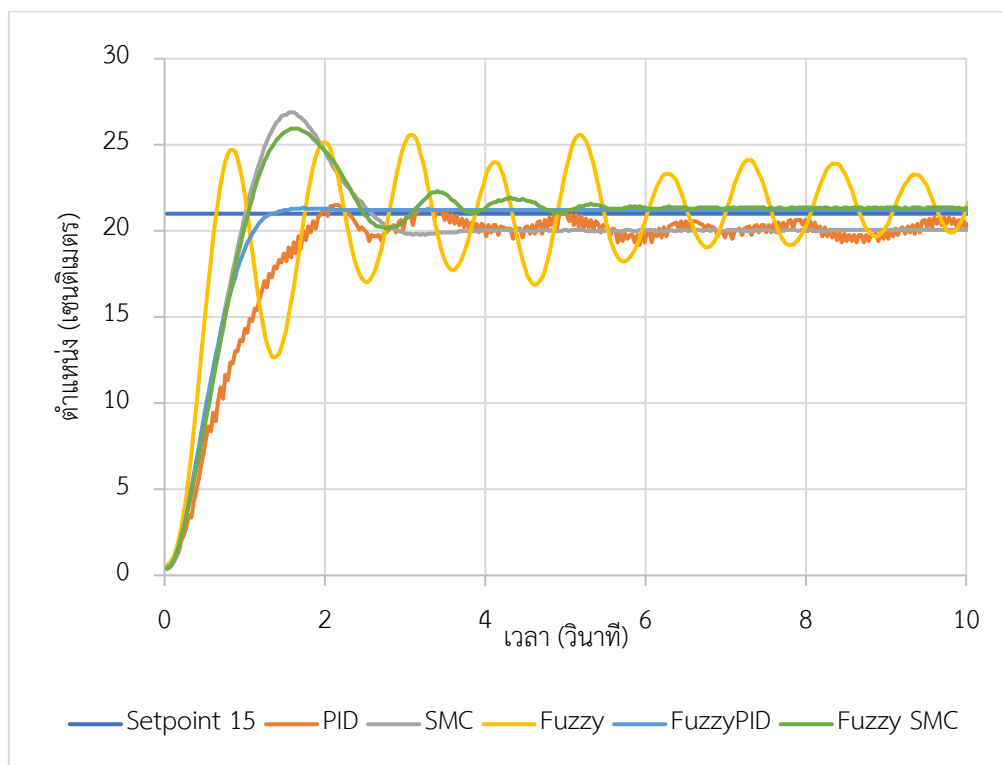


ภาพที่ 4-168 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนวาย ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-133 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกววย ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	PID	SMC	FLC	F-PID	F-SMC
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.984	0.698	0.397	0.782	0.676
เวลาชั่วคราว (วินาที)	1.294	1.888	9.408	0.991	2.602
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	1.284	1.869	6.624	0.986	2.583
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	13.667	13.667	10.618	13.667	13.812
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	15.627	18.168	18.313	14.393	20.056
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	4.180	21.120	22.088	0.000	33.704
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	15.627	18.168	18.313	14.393	20.056
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	3.131	1.337	1.824	1.216	1.520

4.2.6.2.4 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกววย ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมตัวควบคุมทั้งหมดแสดงดังภาพที่ 4-169 และตารางผลตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-134



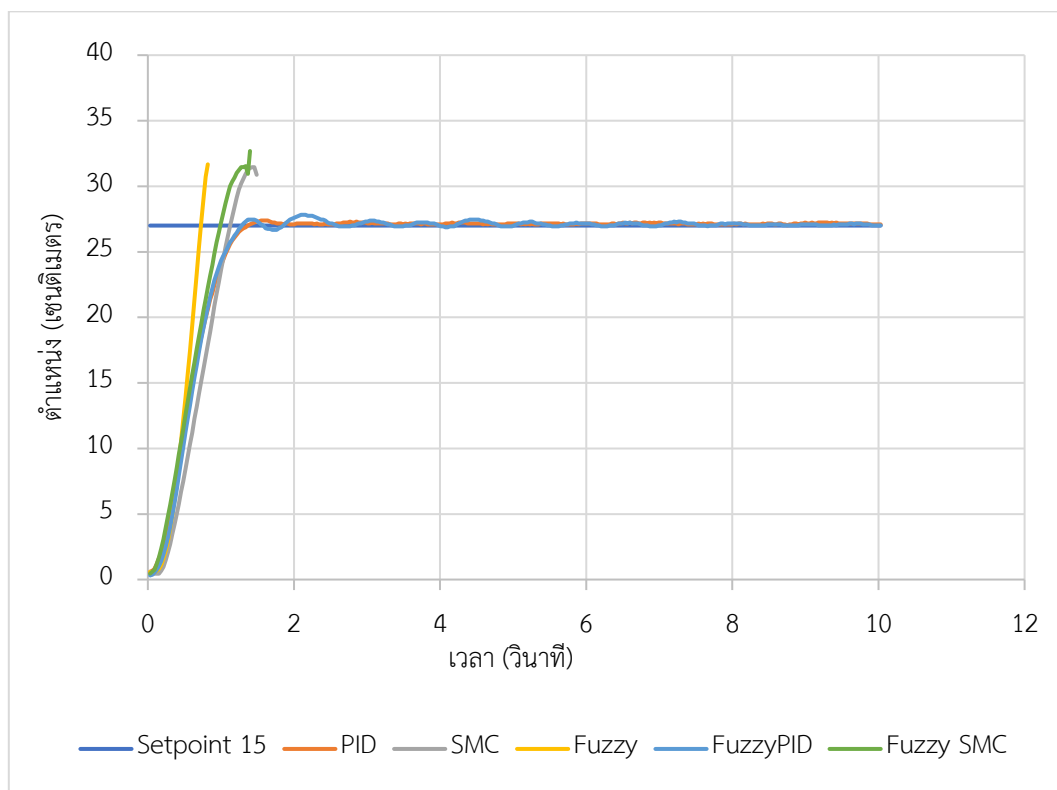
ภาพที่ 4-169 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกววย ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-134 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนวาย ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	PID	SMC	FLC	F-PID	F-SMC
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	1.327	0.709	0.414	0.795	0.731
เวลาชั่วคราว (วินาที)	1.650	2.195	9.451	1.001	2.235
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	1.648	2.189	9.438	0.997	2.230
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	18.458	18.967	12.650	18.967	19.112
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	21.508	26.880	25.573	21.362	25.936
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	2.417	28.000	21.777	1.726	23.506
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	21.508	26.880	25.573	21.362	25.936
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	2.128	1.550	3.070	1.733	1.581

4.2.6.2.5 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนวาย ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมตัวควบคุมทั้งหมดแสดงดังภาพที่ 4-170 และตารางผลตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-135



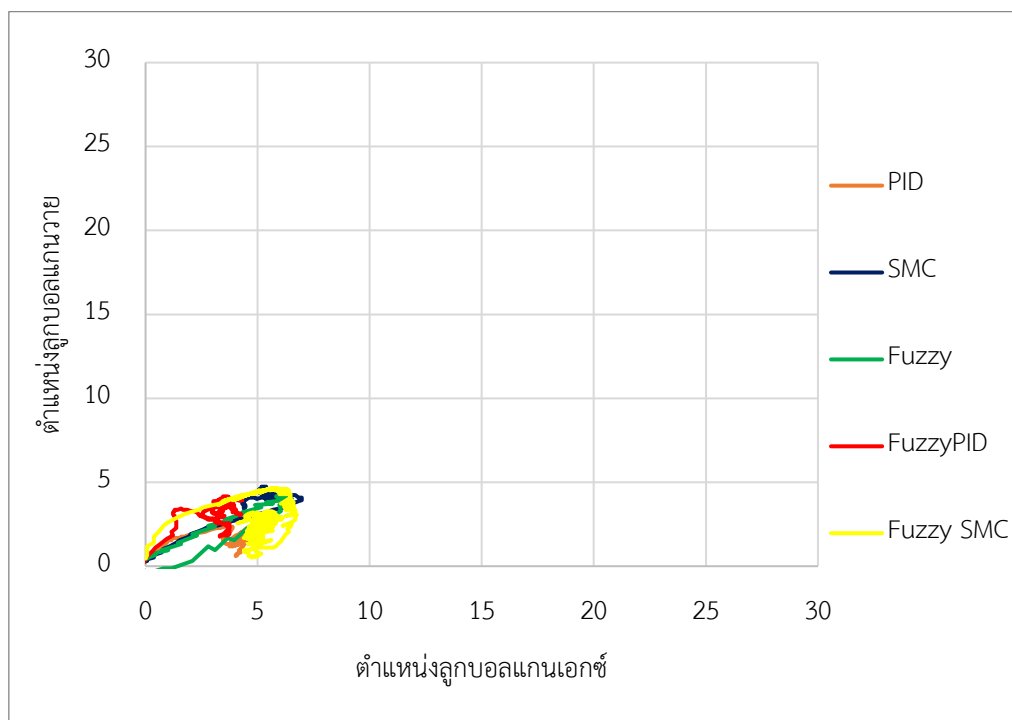
ภาพที่ 4-170 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนวาย ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-135 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนวาย ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	PID	SMC	FLC	F-PID	F-SMC
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.813	0.723	0.419	0.749	0.695
เวลาชั่วคราว (วินาที)	1.030	-	-	1.003	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	1.026	-	-	1.001	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	24.412	24.484	25.355	24.339	24.847
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	27.388	32.688	31.672	27.824	32.688
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	1.438	21.067	17.302	3.051	21.067
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	27.388	32.688	31.672	27.824	32.688
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.550	1.520	0.821	2.097	1.398

4.2.6.3 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมสองแกน

4.2.6.3.1 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนเอกซ์ 3 เซนติเมตร แกนวาย 3 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมตัวควบคุมทั้งหมดแสดงดังภาพที่ 4-171 และตารางผลตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-136



ภาพที่ 4-171 ผลเปรียบเทียบทุกตัวควบคุม ตำแหน่ง แกนเอกซ์ 3 เซนติเมตร แกนวาย 3 เซนติเมตร

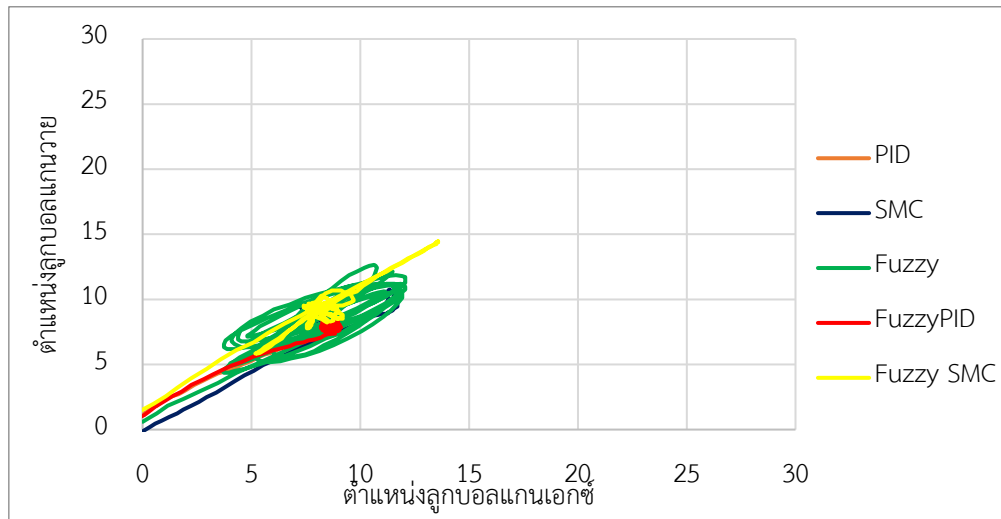
ตารางที่ 4-136 ผลเปรียบเทียบทุกตัวควบคุม ตำแหน่ง แกนเอกซ์ 3 เซนติเมตร แกนวาย 3 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์		ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน		ตัวควบคุมตรรกศาสตร์ คลุมเครือ	
	แกนเอกซ์	แกนวาย	แกนเอกซ์	แกนวาย	แกนเอกซ์	แกนวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	1.261	-	0.325	0.519	9.894	9.855
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-	-	-	-	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	-	-	-	-	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	2.734	-	2.806	2.704	3.944	1.216
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	5.462	-	6.970	4.737	6.539	4.156
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	82.070	0.000	132.330	57.900	117.970	38.540
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	4.610	0.000	9.397	0.000	131.457	40.540
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	5.462	2.632	6.970	4.737	6.539	4.156
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	7.720	4.225	1.033	9.878	0.000	0.000

ตารางที่ 4-136 (ต่อ)

ผลตอบสนอง	ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ปรับจูนค่าด้วย ตรรกศาสตร์คลุมเครือ		ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน ปรับ จูนค่าด้วยตรรกศาสตร์ คลุมเครือ	
	แกนเอกซ์	แกนวาย	แกนเอกซ์	แกนวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.804	0.314	0.410	0.324
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	9.800	-	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	9.801	-	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	2.447	1.760	3.021	0.526
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	4.313	4.156	6.755	4.664
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	43.777	38.540	125.150	55.480
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	7.003	1.820	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	4.313	4.156	6.755	4.664
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	3.526	7.599	2.249	1.307

4.2.6.3.2 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนเอกซ์ 9 เซนติเมตร แกนวาย 9 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมตัวควบคุมทั้งหมดแสดงดังภาพที่ 4-172 และตารางผลตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-137



ภาพที่ 4-172 ผลเปรียบเทียบทุกตัวควบคุม ตำแหน่ง แกนเอกซ์ 9 เซนติเมตร แกนวาย 9 เซนติเมตร

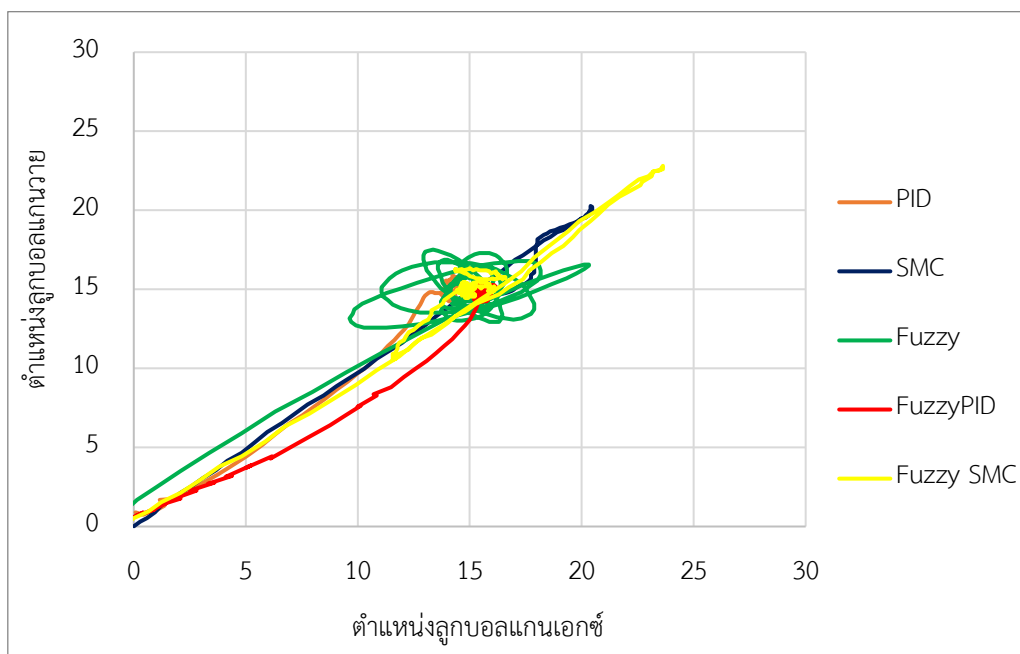
ตารางที่ 4-137 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุม ตำแหน่ง 9 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์		ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน		ตัวควบคุมตรรกศาสตร์ คลุมเครือ	
	แกนเอกซ์	แกนวาย	แกนเอกซ์	แกนวาย	แกนเอกซ์	แกนวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.814	0.947	0.543	0.668	0.266	0.356
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	-	-	1.586	-	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	-	-	2.472	-	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	0.000	0.000	6.898	8.077	3.667	4.374
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	8.478	8.875	11.709	10.763	12.068	12.650
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	0.000	0.000	30.097	19.587	34.086	40.560
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	6.323	3.027	0.000	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	8.478	8.875	11.709	10.763	12.068	12.650
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	9.696	1.277	1.611	1.398	2.492	7.477

ตารางที่ 4-137 (ต่อ)

ผลตอบสนอง	ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ปรับจูนค่าด้วย ตรรกศาสตร์คลุมเครือ		ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน ปรับ จูนค่าด้วยตรรกศาสตร์ คลุมเครือ	
	แกนเอกซ์	แกนวาย	แกนเอกซ์	แกนวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.545	0.946	0.324	4.345
เวลาชั่วคราว (วินาที)	0.745	9.877	9.798	4.345
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	0.750	9.858	9.829	5.826
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	8.191	7.351	5.175	14.465
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	9.124	8.440	13.576	60.727
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	1.377	0.000	50.839	0.000
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	5.526	0.000	11.110	14.465
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	9.124	8.440	13.576	0.973
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	7.781	7.021	0.942	0.000

4.2.6.3.3 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนเอกซ์ 15 เซนติเมตร แกนวาย 15 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมตัวควบคุมทั้งหมดแสดงดังภาพที่ 4-173 และตารางผลตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-138



ภาพที่ 4-173 ผลเปรียบเทียบทุกตัวควบคุม ตำแหน่ง แกนเอกซ์ 15 เซนติเมตร แกนวาย 15 เซนติเมตร

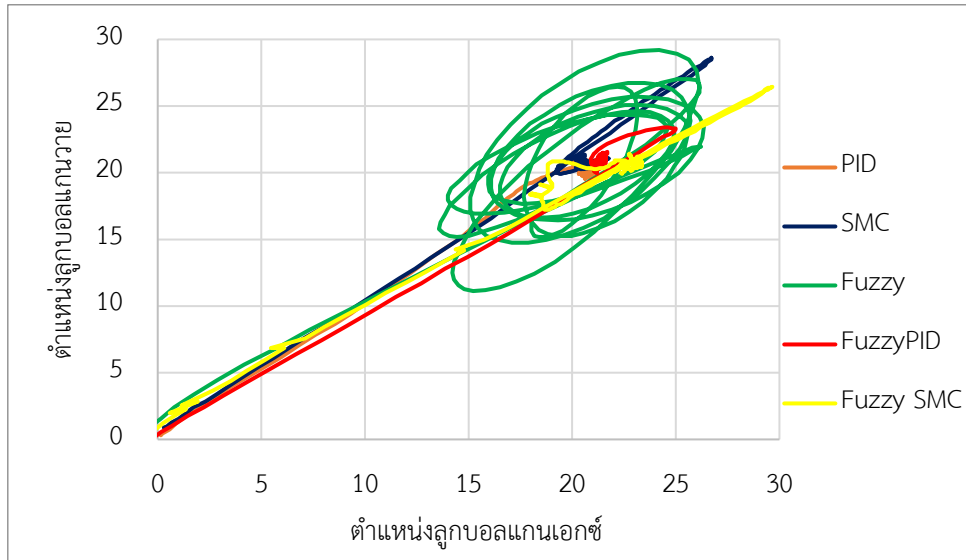
ตารางที่ 4-138 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุม ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ตัวควบคุมสกัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์		ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน		ตัวควบคุมตรรกศาสตร์ คลุมเครือ	
	แกนเอกซ์	แกนวาย	แกนเอกซ์	แกนวาย	แกนเอกซ์	แกนวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	1.095	0.774	0.649	0.666	0.253	0.327
เวลาชั่วคราว (วินาที)	1.293	0.950	2.988	2.543	9.697	10.000
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	1.291	0.940	2.988	2.543	9.715	10.000
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	13.576	13.522	13.504	13.812	9.627	12.578
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	14.724	15.845	20.468	20.273	20.325	17.515
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	0.000	5.632	36.455	35.156	35.498	16.764
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	5.709	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	14.724	15.845	20.468	20.273	20.325	17.515
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	2.736	4.255	1.702	1.641	0.669	3.587

ตารางที่ 4-138 (ต่อ)

ผลตอบสนอง	ตัวควบคุมสกัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ปรับจูนค่าด้วย ตรรกศาสตร์คลุมเครือ		ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน ปรับ จูนค่าด้วยตรรกศาสตร์ คลุมเครือ	
	แกนเอกซ์	แกนวาย	แกนเอกซ์	แกนวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.747	0.934	0.377	0.425
เวลาชั่วคราว (วินาที)	1.001	1.192	3.470	2.738
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	1.003	1.190	3.498	2.743
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	13.504	13.812	11.565	10.545
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	16.160	15.409	23.628	22.814
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	7.735	2.728	57.517	52.096
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	1.879	0.000	5.230	2.300
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	16.160	15.409	23.628	22.814
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.854	1.550	1.094	1.155

4.2.6.3.4 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนเอกซ์ 21 เซนติเมตร แกนวาย 21 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมตัวควบคุมทั้งหมดแสดงดังภาพที่ 4-174 และตารางผลตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-139



ภาพที่ 4-174 ผลเปรียบเทียบทุกตัวควบคุม ตำแหน่ง แกนเอกซ์ 21 เซนติเมตร แกนวาย 21 เซนติเมตร

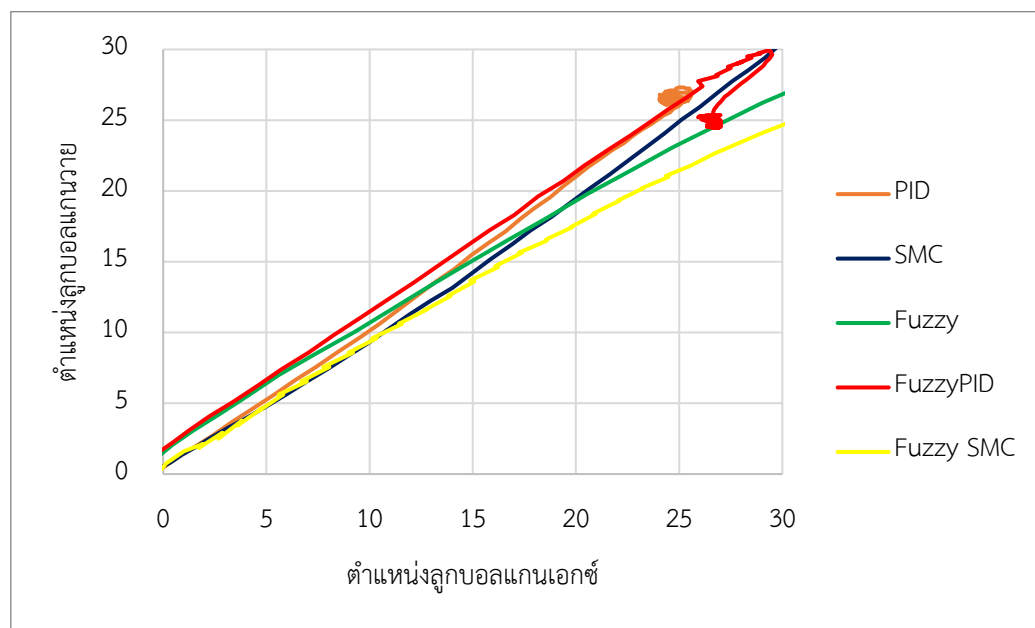
ตารางที่ 4-139 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุม ตำแหน่ง 21 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์		ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน		ตัวควบคุมตรรกศาสตร์ คลุมเครือ	
	แกนเอกซ์	แกนวาย	แกนเอกซ์	แกนวาย	แกนเอกซ์	แกนวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	1.090	0.842	0.717	0.724	0.329	0.426
เวลาชั่วคราว (วินาที)	1.313	1.049	2.164	2.381	-	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	1.309	1.044	2.161	2.371	-	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	19.032	19.039	19.248	19.547	13.576	11.126
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	21.186	20.927	26.715	28.622	26.356	29.203
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	0.887	0.000	27.214	36.297	25.504	39.063
สภาวะความหวังน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	1.684	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	21.186	20.927	26.715	28.622	26.356	29.203
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	5.927	4.711	1.520	1.581	2.918	4.954

ตารางที่ 4-139 (ต่อ)

ผลตอบสนอง	ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ปรับจูนค่าด้วย ตรรกศาสตร์คลุมเครือ		ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน ปรับ จูนค่าด้วยตรรกศาสตร์ คลุมเครือ	
	แกนเอกซ์	แกนวาย	แกนเอกซ์	แกนวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.461	0.526	0.602	0.776
เวลาชั่วคราว (วินาที)	1.256	1.229	7.710	3.714
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	1.260	1.232	7.852	3.711
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	19.679	19.039	17.955	17.224
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	24.992	23.395	29.659	26.444
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	19.008	11.406	41.232	25.926
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	2.368	0.606	2.368	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	24.992	23.395	29.659	26.444
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.003	1.094	1.520	1.520

4.2.6.3.5 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุมแกนเอกซ์ 27 เซนติเมตร แกนวาย 27 เซนติเมตร กราฟผลตอบสนองของตัวควบคุมตัวควบคุมทั้งหมดแสดงดังภาพที่ 4-175 และตารางผลตอบสนองแสดงดังตารางที่ 4-140



ภาพที่ 4-175 ผลเปรียบเทียบทุกตัวควบคุม ตำแหน่ง แกนเอกซ์ 27 เซนติเมตร แกนวาย 27 เซนติเมตร

ตารางที่ 4-140 ผลเปรียบเทียบตัวควบคุม ตำแหน่ง 27 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์		ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน		ตัวควบคุมตรรกศาสตร์ คลุมเครือ	
	แกนเอกซ์	แกนวาย	แกนเอกซ์	แกนวาย	แกนเอกซ์	แกนวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.874	0.788	0.686	0.701	0.360	0.429
เวลาชั่วคราว (วินาที)	-	1.000	-	-	-	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	-	1.000	-	-	-	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	24.058	24.339	0.000	0.000	-7.103	24.702
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	25.638	27.316	31.597	31.454	37.844	32.688
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	0.000	1.169	17.027	16.496	40.163	21.067
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	1.842	0.202	2.906	0.471	26.307	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	25.638	27.316	31.597	31.454	37.844	32.688
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.398	1.520	1.246	1.216	0.973	1.003

ตารางที่ 4-140 (ต่อ)

ผลตอบสนอง	ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ปรับจูนค่าด้วย ตรรกศาสตร์คลุมเครือ		ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน ปรับ จูนค่าด้วยตรรกศาสตร์ คลุมเครือ	
	แกนเอกซ์	แกนวาย	แกนเอกซ์	แกนวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.559	0.573	1.155	1.325
เวลาชั่วคราว (วินาที)	0.751	1.275	-	-
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	0.754	1.264	-	-
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	24.489	24.484	24.346	23.976
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	29.515	29.929	31.956	25.646
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	9.315	10.849	18.357	0.000
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	2.906	0.000	2.108	0.471
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	29.515	29.929	31.956	25.646
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.277	1.185	1.641	1.641

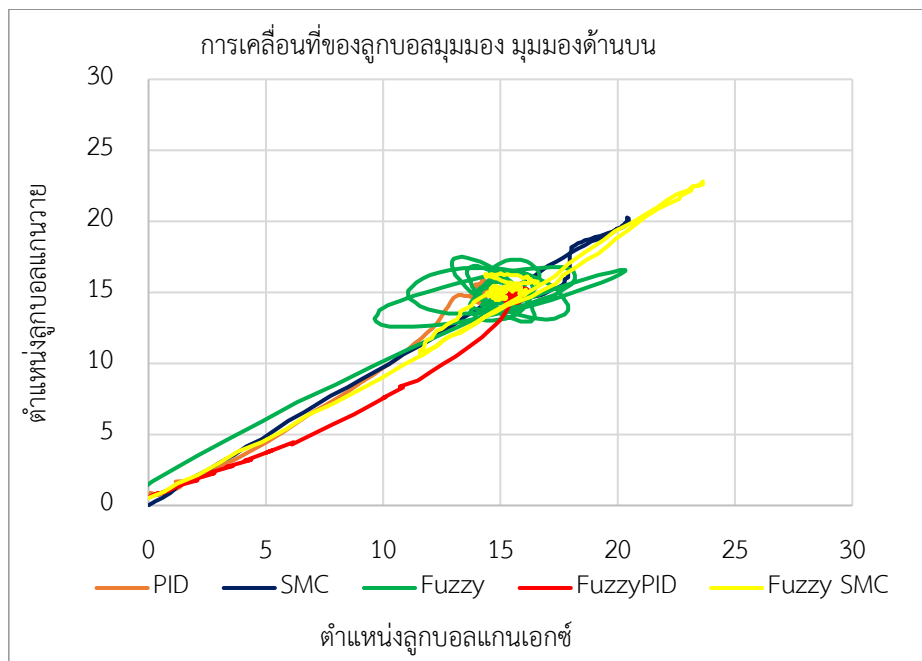
จากการทดลองควบคุมตำแหน่งของลูกบอล สรุปได้ว่าตัวควบคุม ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน ตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ปรับจูนค่าด้วยตรรกศาสตร์คลุมเครือและตัวควบคุมแผ่นเลื่อน ปรับจูนค่าด้วยตรรกศาสตร์คลุมเครือ อัตโนมติ สามารถรักษาตำแหน่งของลูกบอลให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการได้ แต่มีผลตอบสนองที่แตกต่าง กัน สามารถนำผลการตอบสนองของตัวควบคุมไปประยุกต์ใช้กับเครื่องจักรที่เกี่ยวข้องกับการสร้าง เสถียรภาพได้

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลโครงการ

โครงการนี้เป็นการสร้างระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่นด้วยตัวควบคุมขั้นสูง โดยทำการทดลองเพื่อหาผลตอบสนองของตัวควบคุมแต่ละชนิด เนื่องจากชุดทดลองเป็นระบบที่มีการเสียเสถียรภาพได้ง่าย เหมาะสมแก่การทดสอบตัวควบคุมแบบต่างๆ ในการสั่งการทำงานของชุดทดลอง กำหนดตำแหน่งที่ต้องการจากระบบสั่งการให้มอเตอร์สร้างองศาเพื่อไปควบคุมตำแหน่งของลูกบอล โดยใช้ตัวควบคุมแบบต่าง ๆ ได้แก่ ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิกรัล ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน ตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิกรัลแบบปรับค่าอัตโนมัติ และตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับค่าอัตโนมัติ เพื่อดูสมรรถนะของตัวควบคุมโดยวัดสมรรถนะจาก เวลาไต่ขึ้นจาก 10 ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ เวลาชั่วคราว เวลาสู่จุดสมดุล สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล ผลตอบสนองเกิน สภาวะความหน่วงน้อย สัญญาณสูงสุด และเวลาตอบสนองสูงสุด ยกตัวอย่างการทดลอง จากการทดสอบการควบคุมตำแหน่งลูกบอล 15 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุมแบบต่าง ๆ แสดงดังตารางภาพที่ 5-1



ภาพที่ 5-1 ผลการตอบสนองตัวควบคุมที่ทดลอง ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร

สรุปได้ว่าทุกตัวควบคุมสามารถรักษาตำแหน่งของลูกบอลได้ แต่ตัวควบคุมแต่ละแบบมีผลตอบสนองที่แตกต่างกันออกไป เช่น เวลาไต่ขึ้นตัวควบคุมที่มีค่าต่ำที่สุด คือ ตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือมีค่า 0.253 วินาที ตัวควบคุมที่มีค่าเวลาไต่ขึ้นสูงสุด คือ ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์มีค่า 1.095 วินาที ผลของเวลาชั่วคราวตัวควบคุมที่มีค่าต่ำสุด คือ ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์แบบปรับค่าอัตโนมัติมีค่าอยู่ที่ 0.950 วินาที ตัวควบคุมที่มีเวลาชั่วคราวสูงสุด คือ ตรรกศาสตร์คลุมเครือมีค่าเวลาชั่วคราวอยู่ที่ 10 วินาที ผลของเวลาสู่จุดสมดุลตัวควบคุมที่ต่ำที่สุด คือ ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ มีค่าอยู่ที่ 0.940 วินาที ตัวควบคุมที่มีเวลาสู่จุดสมดุลมากที่สุด คือ ตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ มีค่าเวลาสู่จุดสมดุล คือ 10 วินาที ผลการทดลองผลตอบสนองเกิน ตัวควบคุมที่มีค่าน้อยสุด คือ ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์แบบปรับค่าอัตโนมัติมีค่าอยู่ที่ 0 เซนติเมตร ตัวควบคุมที่มีผลตอบสนองเกินมากที่สุด คือ ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับค่าอัตโนมัติมีค่าอยู่ที่ 57.517 เปอร์เซ็นต์ ตัวควบคุมที่มีสัญญาณสูงสุดน้อยที่สุด คือ ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ มีค่าอยู่ที่ 14.724 เซนติเมตร ผลสัญญาณสูงสุดตัวควบคุมที่มีค่าสูงสุด คือ ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน แบบปรับค่าอัตโนมัติมีค่าอยู่ที่ 23.628 เซนติเมตร และผลการควบคุมเวลาตอบสนองสูงสุดตัวควบคุมที่มีค่าน้อยสุด คือ ตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือมีค่าอยู่ที่ 0.669 โดยตัวควบคุมที่มีค่าเวลาตอบสนองสูงสุดใช้เวลานานที่สุด คือ ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์มีค่าเวลาอยู่ที่ 4.255 วินาที แสดงผลการทดลองดังตารางที่ 5-1

ตารางที่ 5-1 ผลตอบสนองตัวควบคุมทั้งหมด ตำแหน่งแกนเอกซ์ 15 เซนติเมตร และแกนวาย 15 เซนติเมตร

ผลตอบสนอง	ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์		ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน		ตัวควบคุมตรรกศาสตร์ คลุมเครือ	
	แกนเอกซ์	แกนวาย	แกนเอกซ์	แกนวาย	แกนเอกซ์	แกนวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	1.095	0.774	0.649	0.666	0.253	0.327
เวลาชั่วคราว (วินาที)	1.293	0.950	2.988	2.543	9.697	10.000
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	1.291	0.940	2.988	2.543	9.715	10.000
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	13.576	13.522	13.504	13.812	9.627	12.578
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	14.724	15.845	20.468	20.273	20.325	17.515
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	0.000	5.632	36.455	35.156	35.498	16.764
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	0.000	0.000	0.000	0.000	5.709	0.000
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	14.724	15.845	20.468	20.273	20.325	17.515
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	2.736	4.255	1.702	1.641	0.669	3.587

ตารางที่ 5-1 (ต่อ)

ผลตอบสนอง	ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ปรับจูนค่าด้วย ตรรกศาสตร์คลุมเครือ		ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน ปรับ จูนค่าด้วยตรรกศาสตร์ คลุมเครือ	
	แกนเอกซ์	แกนวาย	แกนเอกซ์	แกนวาย
เวลาไต่ขึ้น (วินาที)	0.747	0.934	0.377	0.425
เวลาชั่วคราว (วินาที)	1.001	1.192	3.470	2.738
เวลาสู่จุดสมดุล (วินาที)	1.003	1.190	3.498	2.743
สัญญาณต่ำสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	13.504	13.812	11.565	10.545
สัญญาณสูงสุดก่อนจุดสมดุล (เซนติเมตร)	16.160	15.409	23.628	22.814
ผลตอบสนองเกิน (เปอร์เซ็นต์)	7.735	2.728	57.517	52.096
สภาวะความหน่วงน้อย (เซนติเมตร)	1.879	0.000	5.230	2.300
สัญญาณสูงสุด (เซนติเมตร)	16.160	15.409	23.628	22.814
เวลาตอบสนองสูงสุด (วินาที)	1.854	1.550	1.094	1.155

จากตารางที่ 5-1 สังเกตได้ว่าผลตอบสนองตัวควบคุมในแนวแกนเอกซ์ และแกนวายของทุกตัวควบคุมที่นำมาทดลองนั้น ผลตอบสนองในการควบคุมไม่เหมือนกัน เนื่องจากในการทดลอง ผู้ทดลองไม่สามารถควบคุมปัจจัยที่มีผลกระทบต่อควบคุมได้ทั้งหมด เช่น การเกิดลมรบกวน ความเรียบของกระดานทดสอบ ความผิดพลาดจากกล้องเนื่องจากแสงรบกวน และอื่น ๆ แต่ทุกผลการทดลองตัวควบคุมที่ทดลองนั้นมีแนวโน้มผลตอบสนองในแนวแกนเอกซ์ และแกนวายที่ใกล้เคียงกันเสมอ

สุดท้ายผลการทดลองที่นำเสนอไปทั้งหมดนั้น สามารถมีการปรับเปลี่ยน หรือเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพได้ขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความชำนาญของผู้ใช้ อุปกรณ์ที่นำไปควบคุม สภาพแวดล้อมสิ่งรบกวน หรือสิ่งอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ผลการทดสอบตัวควบคุมทั้งหมดที่นำเสนอไปนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้ตัวควบคุมกับอุปกรณ์ที่มีความเกี่ยวข้องกับการสร้างเสถียรภาพ เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ตัวควบคุม การจำลองทฤษฎีและผลตอบสนองของตัวควบคุม เพื่อลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นก่อนก่อนนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในอุตสาหกรรม

5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

5.2.1 การจับตำแหน่งด้วยกล้อง บางครั้งไม่สามารถจับได้เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงของแสง แนวทางในการแก้ไขควรทำการทดลองในพื้นที่ ที่สามารถกำหนดความเข้มของแสงได้เอง หรือสร้างแหล่งกำเนิดแสงเอง ทดลองในสภาวะแวดล้อมปิด

5.2.2 การทดสอบมีแรงลมจากภายนอกกระทบทำให้ผลการทดลองในบางครั้งเกิดความคลาดเคลื่อนได้ แนวทางในการแก้ไข ทำการทดลองสมรรถนะตัวควบคุมในสภาวะแวดล้อมปิด

5.2.3 การควบคุมแผ่นเลื่อนสามารถปรับจูนค่าพารามิเตอร์ได้หลากหลายวิธี เพื่อเพิ่มสมรรถนะของตัวควบคุมแผ่นเลื่อนจำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีในการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ในการควบคุมที่มีประสิทธิภาพ ยกตัวอย่างทฤษฎีในการปรับค่าพารามิเตอร์ เช่น ทฤษฎีการปรับจูนค่าแบบฟิเอสโอ (Particle Swarm Optimization : PSO)

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ควรสร้างแหล่งกำเนิดแสงขึ้นมาเอง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับด้วยกล้อง

5.3.2 ควรทดลองสมรรถนะตัวควบคุมในสภาวะปิด เพื่อให้ผลการทดลองมีประสิทธิภาพ

5.3.3 ควรศึกษาทฤษฎีในการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ในตัวควบคุมแบบต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ

บรรณานุกรม

- Aditya, H. N., Mardiyati, R., Kamelia, L., and Rohandy, F. (2022). "Two-Axis Balancing System for Ship-Table Based on The Proportional Integral Derivative Controller (PID) Methods." In 2022 16th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA) (pp. 1-4).
- Aisuwarya, R., and Hardianto, I. T. (2021). "A slow Cooker Design based on Fuzzy Logic Control Temperature System." In 2021 4th International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI) (pp. 440-445).
- Al-Amin, M., and Islam, M. S. (2021). "Design of an intelligent temperature controller of furnace system using the fuzzy self-tuning PID controller." In 2021 International Conference on Electronics, Communications and Information Technology (ICECIT) (pp. 1-4).
- Betancourt, F. I. R., Alarcon, S. M. B., & Velasquez, L. F. A. (2019). "Fuzzy and PID controllers applied to ball and plate system." In 2019 IEEE 4th Colombian Conference on Automatic Control (CCAC) (pp. 1-6).
- Bomfim, M. H. S., Lima II, E. J., Monteiro, N. S., and Dias, A. L. A. (2021). "A novel hybrid (PID+ MRAC) adaptive controller for an air levitation system." IEEE Latin America Transactions, 19(8), 1400-1409
- Cardeira, C., Rodrigues, E., and Melicio, R. (2022). "Prototype for Position and Trajectory Control of a Ball on Plate using Image Sensor." In 2022 International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD) (pp. 1-6).
- Do, T. V., et al. (2021). "Design of Delta Robot Using Image Processing for Product Sorting Process." In 2021 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE) (pp. 210-214).
- Elanangai, V., and Vasanth, K. (2022). "An Efficient Technique for Identifying Defects in Stainless Steel (SS) Plate using Image Processing." In 2022 8th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS) (Vol. 1, pp. 1448-1452).

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Elshamy, M. R., et al. (2021). "Stabilization enhancement of the ball on the plate system (BOPS) based on Takagi-Sugeno (TS) fuzzy modeling." In 2021 International Conference on Electronic Engineering (ICEEM) (pp. 1-8).
- He, Y., Wang, H., and Chen, D. (2020). "The application of fuzzy PID control in the process temperature and humidity control of cigarette factory." In 2020 IEEE 9th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC) (Vol. 9, pp. 1091-1096). IEEE.
- Howimanporn, S., Chookaew, S., and Silawatchananai, C. (2020). "Comparison between PID and Sliding Mode Controllers for Rotary Inverted Pendulum Using PLC." In 2020 4th International Conference on Automation, Control and Robots (ICACR) (pp. 122-126).
- Hu, S., and Zheng, P. (2022). "Research on Cascade PID Advanced Control of Natural Gas Recondenser Based on PLC." In 2022 IEEE 10th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC) (Vol. 10, pp. 1440-1444).
- Latif, S., Muhammad, E., and Naeem, U. (2019). "Implementation of ball and beam system using classical and advanced control techniques." In 2019 International Conference on Applied and Engineering Mathematics (ICAEM) (pp. 74-79).
- Li, J., and Wang, Y. (2021). "Design and development of programmable controller based on Embedded Technology." In 2021 5th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI) (pp. 1563-1566).
- Moghazy, A. E., et al. (2022). "Self Balancing Quad-Copter Using PID Controller." In 2022 18th International Computer Engineering Conference (ICENCO) (Vol. 1, pp. 92-96).
- Nikita, T., and Prajwal, K. T. (2021). "PID controller based two wheeled self balancing robot." In 2021 5th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI) (pp. 1-4).

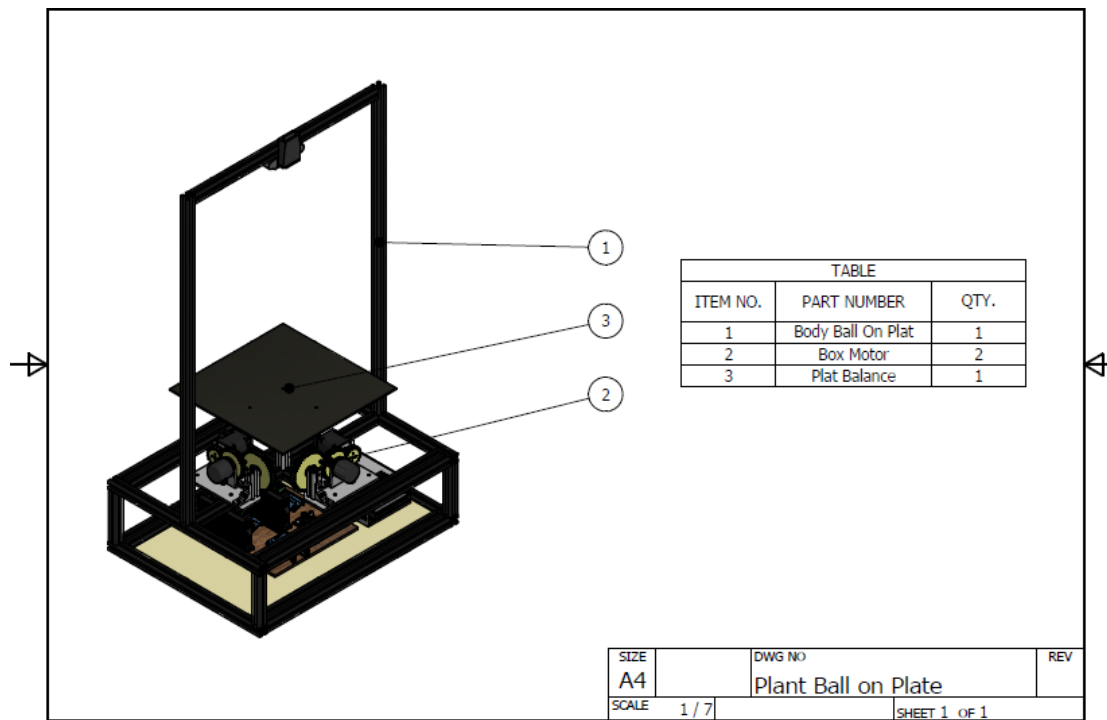
บรรณานุกรม (ต่อ)

- Pattanapong, Y., and Deelertpaiboon, C. (2017). "Fuzzy-tuned PI controller for plate balancing on a mobile vehicle system." In 2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA) (pp. 1952-1957).
- Sharma, P., et al. (2020). "Efficacy of sliding mode controller (SMC) over DC-DC full bridge isolated converter (FBIC)." In 2020 2nd International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA) (pp. 631-636).
- Susanto, E., Rahmat, B., and Ishitobi, M. (2022). "Stabilization of Rotary Inverted Pendulum using Proportional Derivative and Fuzzy Controls." In 2022 9th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE) (pp. 34-37).
- Tajjudin, M., et al. (2022). "Design of Fuzzy PID with Second-order Model Reference for Ball and Beam System." In 2022 IEEE 13th Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC) (pp. 137-140).
- Tenzin, S., et al. (2020). "Smart check-in check-out system for vehicles using automatic number plate recognition." In 2020 11th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT) (pp. 1-6).
- Wu, L., et al (2021). "A thermal drift compensation method for precision sensors considering historical temperature state." IEEE Transactions on Industrial Electronics, 68(12), 12821-12829.A.

ภาคผนวก ก

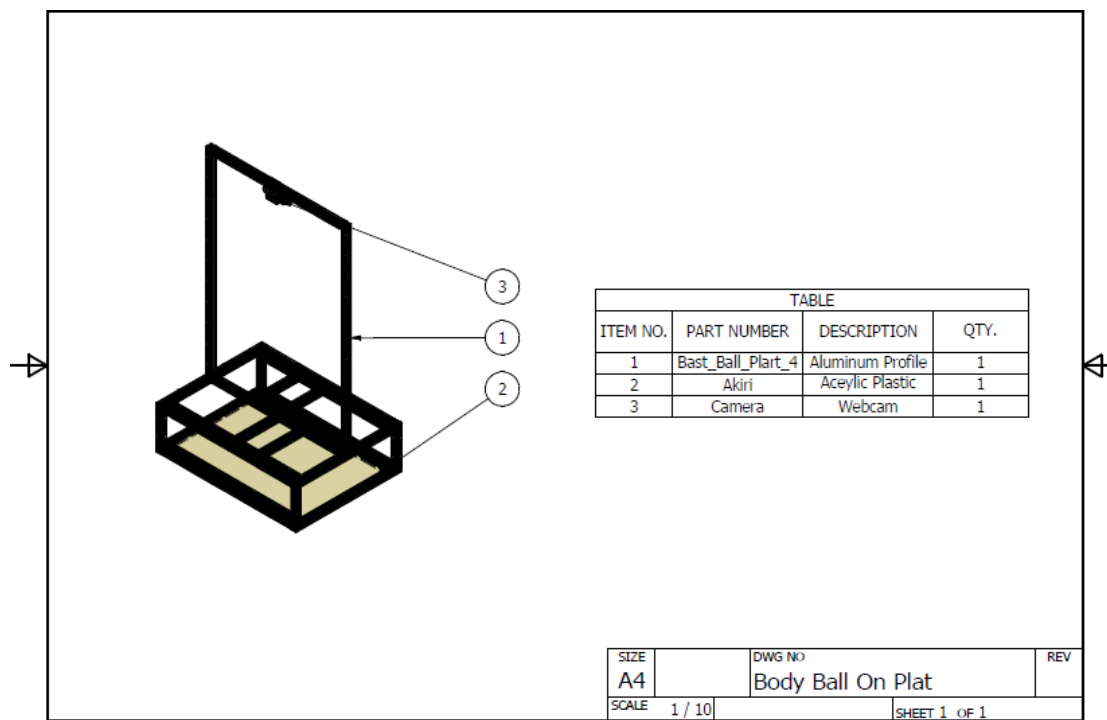
การออกแบบโครงสร้างของโครงการ

ภาพรวมระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น

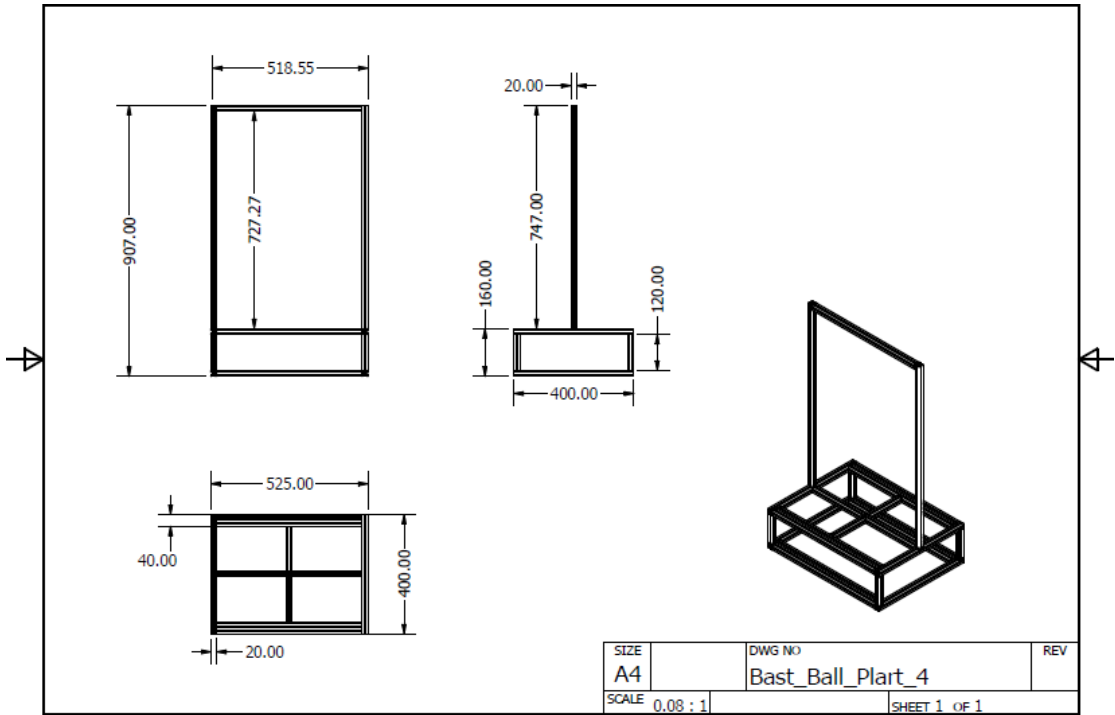


ภาพที่ ก-1 ภาพรวมระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น

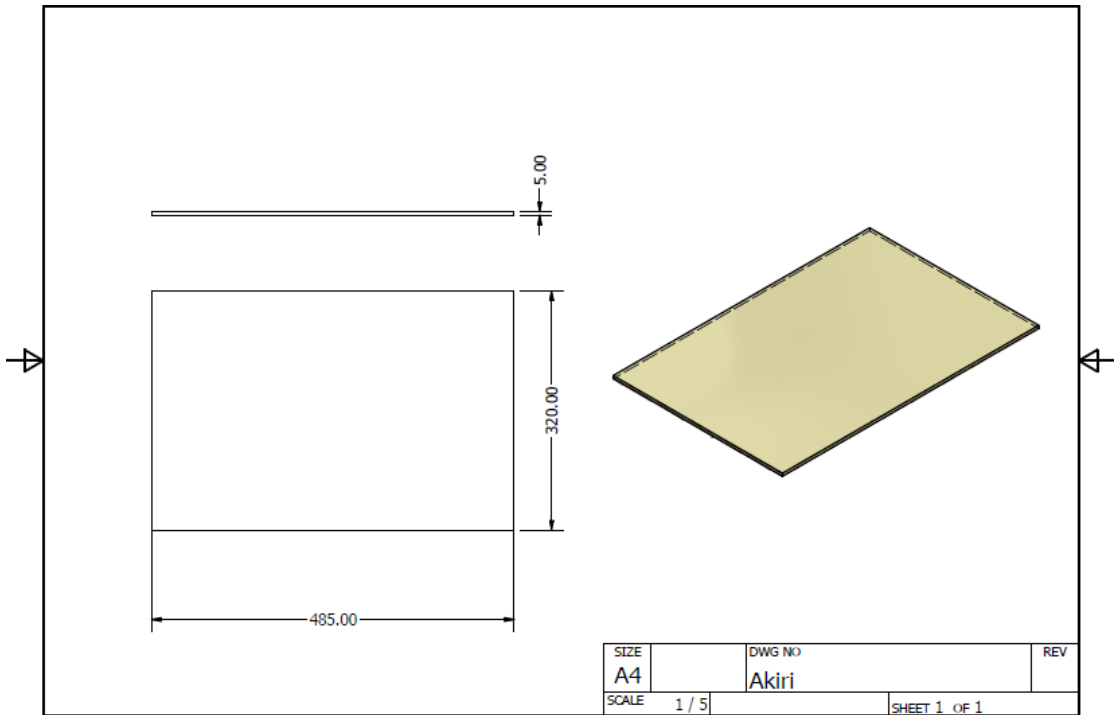
โครงสร้างบอลทรงตัวบนแผ่น



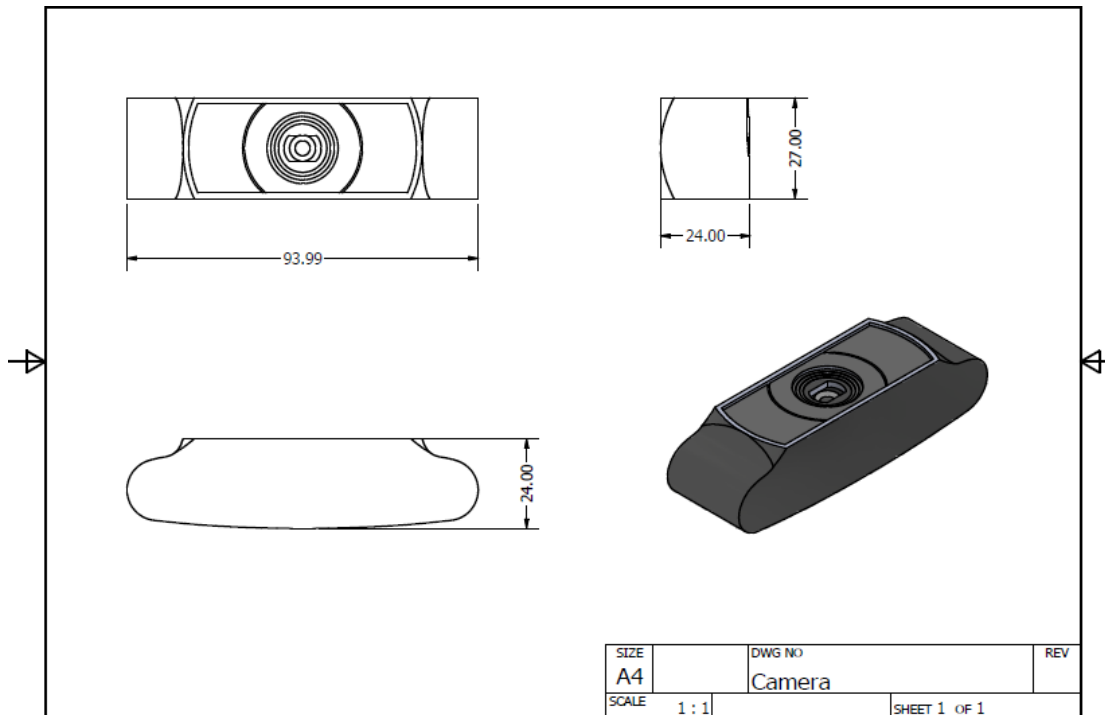
ภาพที่ ก-2 โครงสร้าง



ภาพที่ ก-3 ขนาดของโครงสร้าง

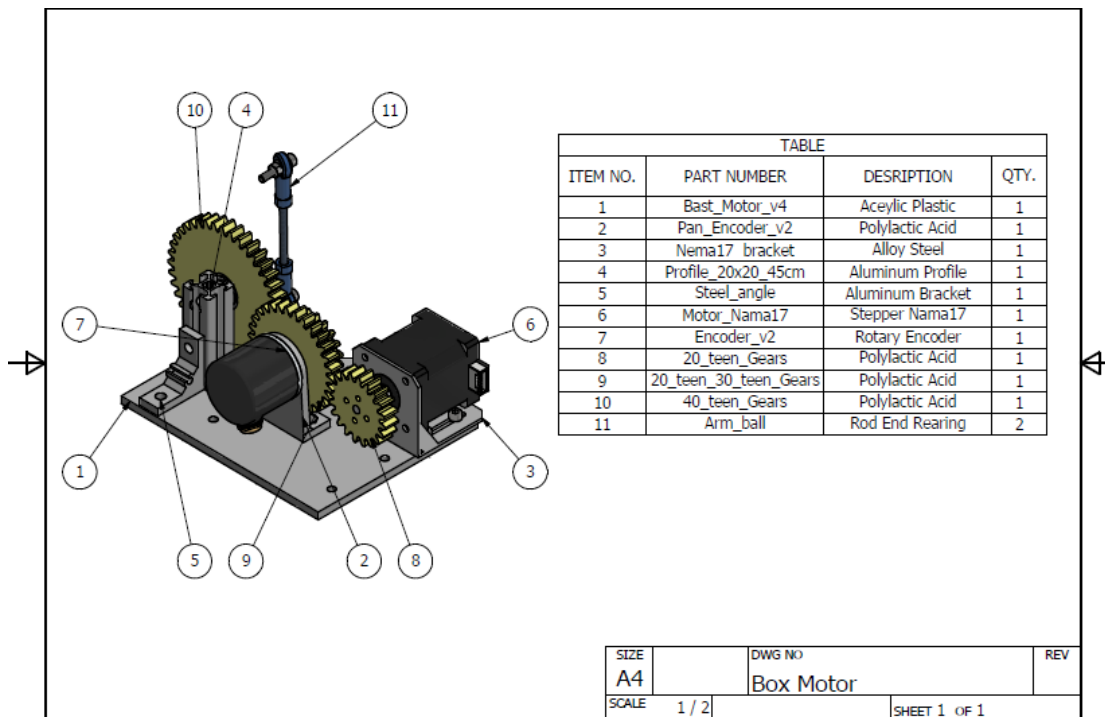


ภาพที่ ก-4 แผ่นอะคริลิก

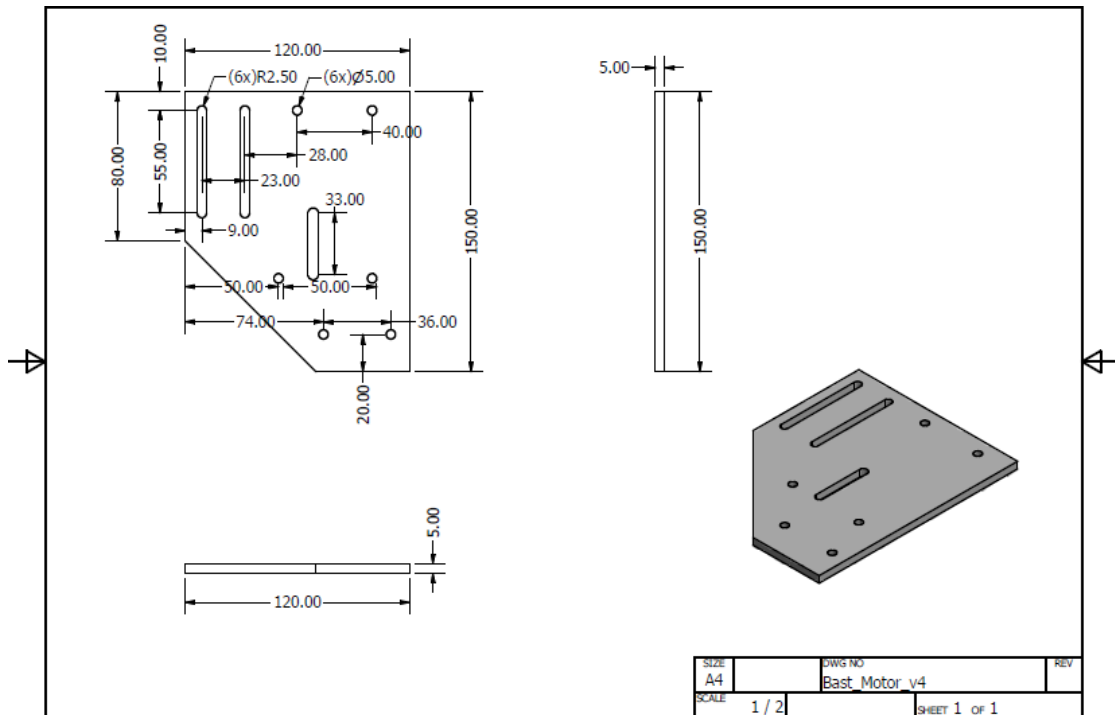


ภาพที่ ก-5 ขนาดกล้องเว็บแคม

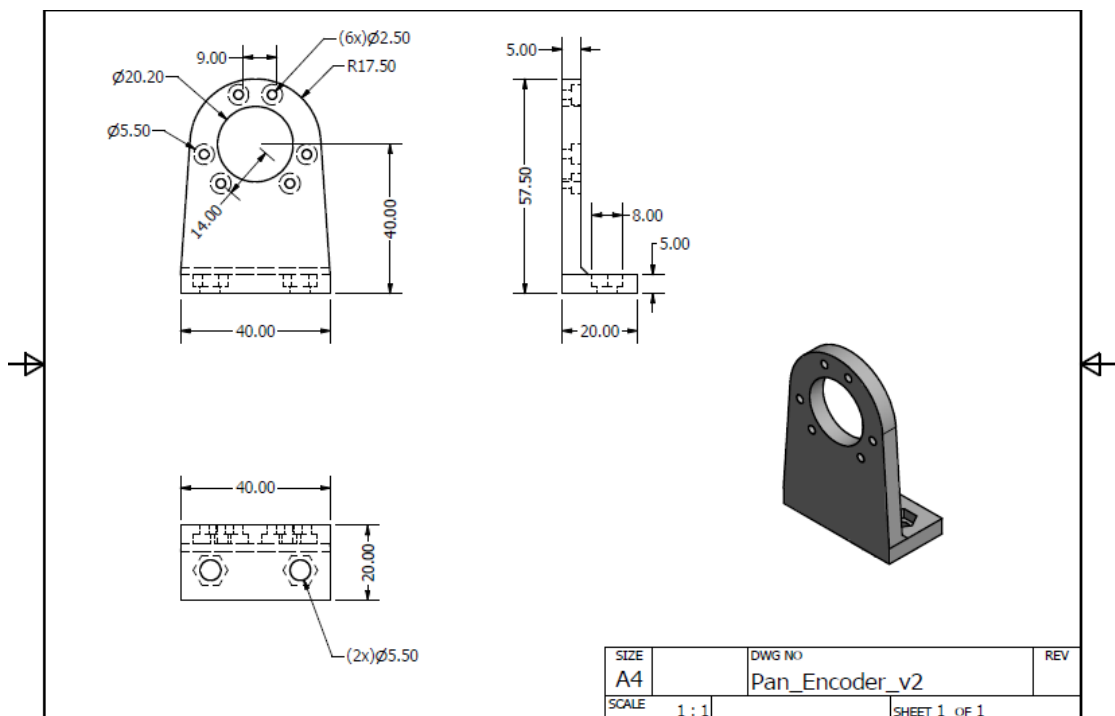
ชุดส่งกำลังมอเตอร์



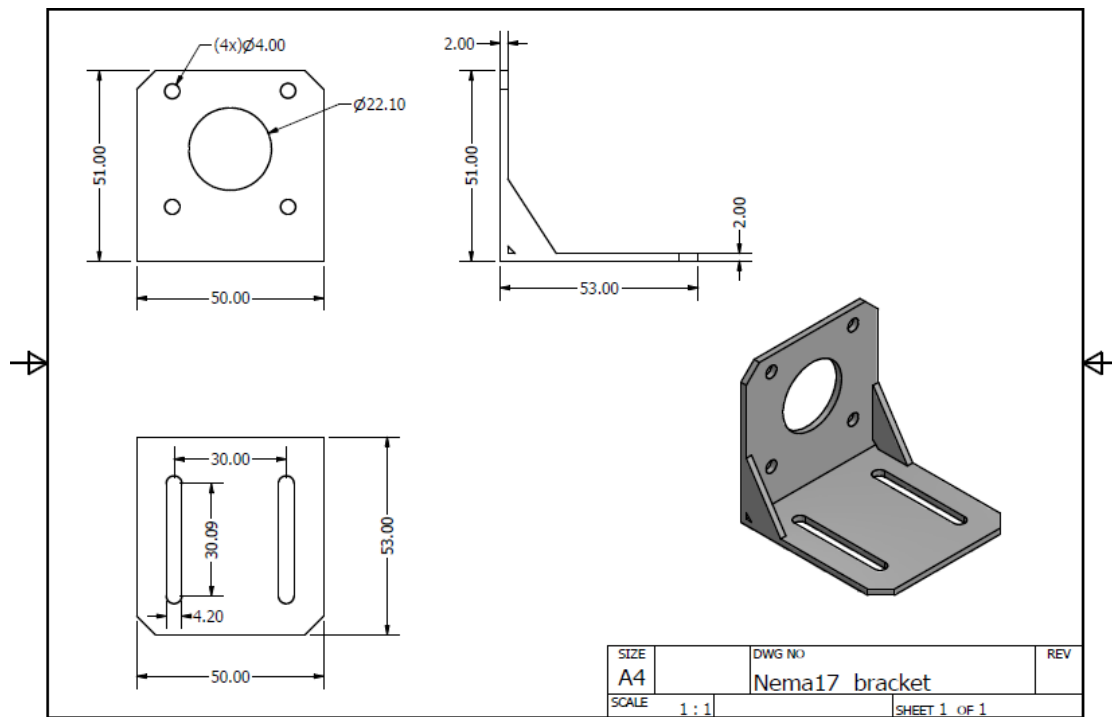
ภาพที่ ก-6 ชุดส่งกำลังมอเตอร์



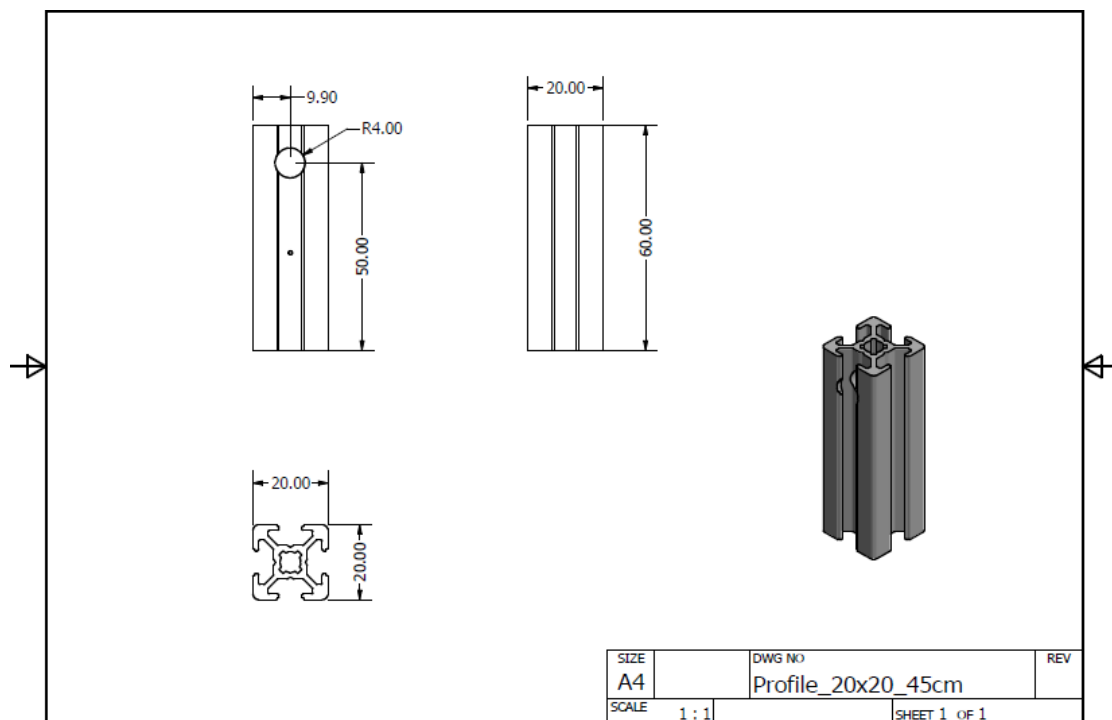
ภาพที่ ก-7 ฐานยึดมอเตอร์



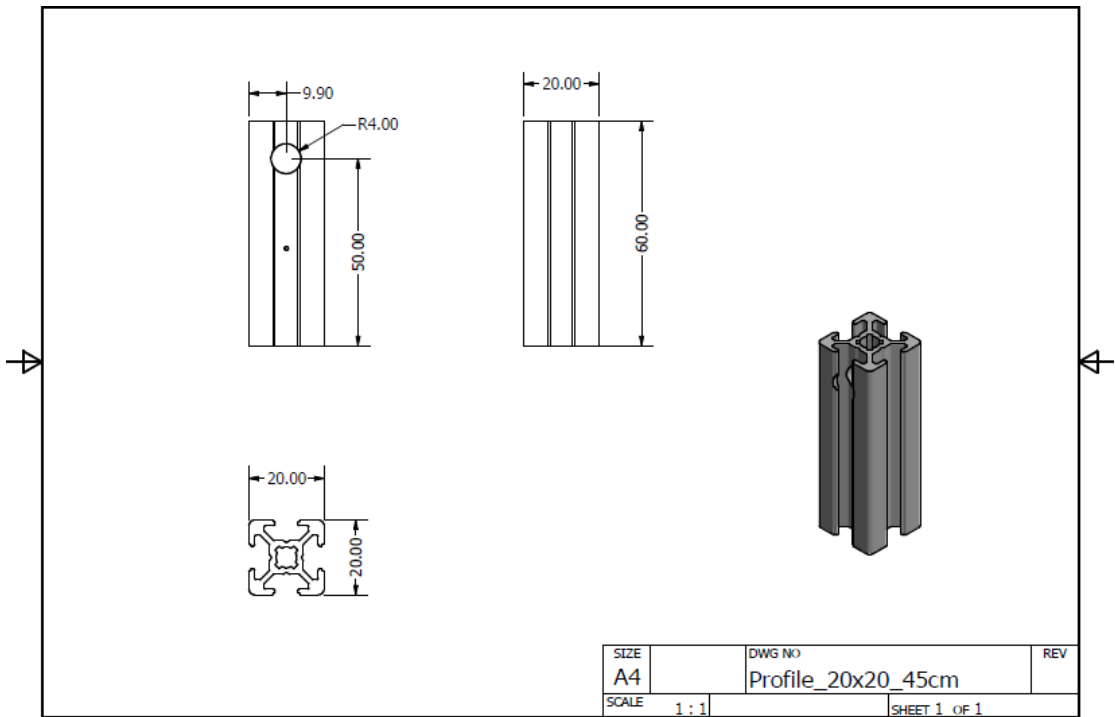
ภาพที่ ก-8 แท่นยึดเอนโคเดอร์



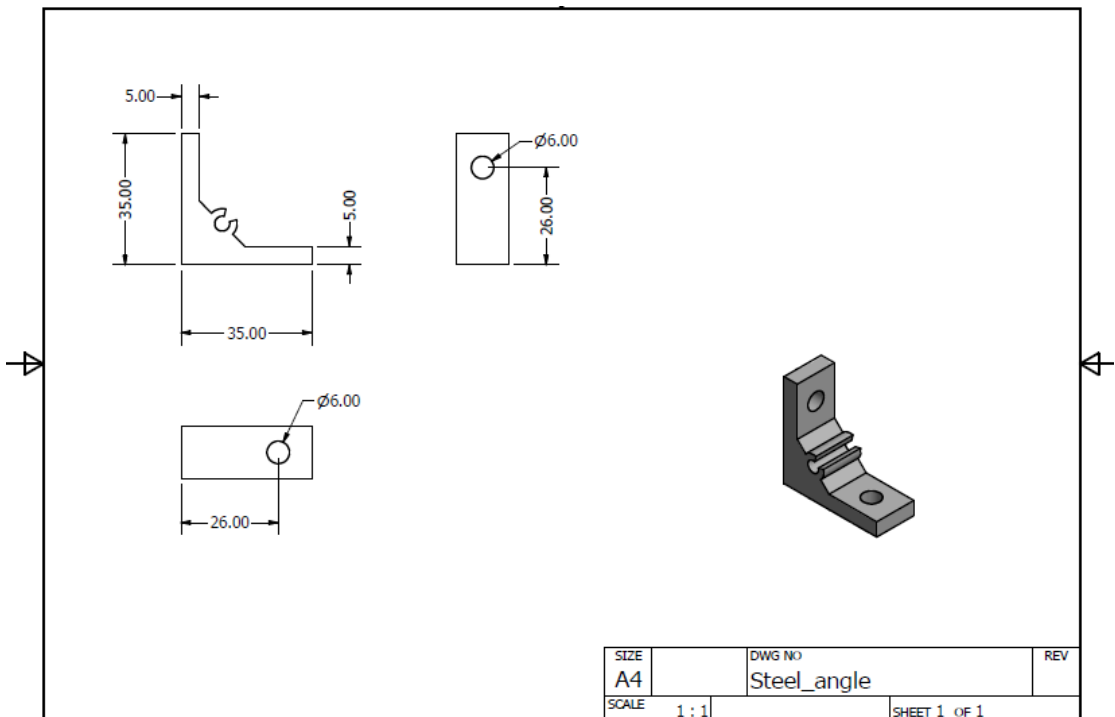
ภาพที่ ก-9 แท่นยึดมอเตอร์



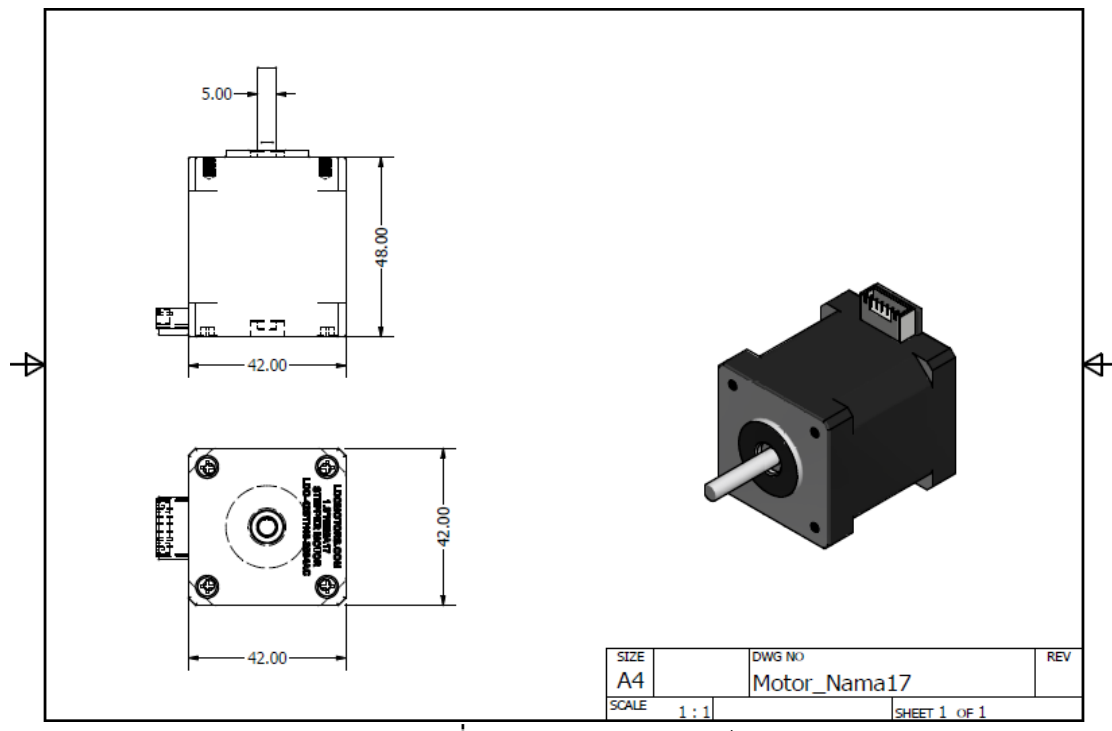
ภาพที่ ก-10 อลูมิเนียมโปรไฟล์ขนาด 20 x 20 x 45 เซนติเมตร



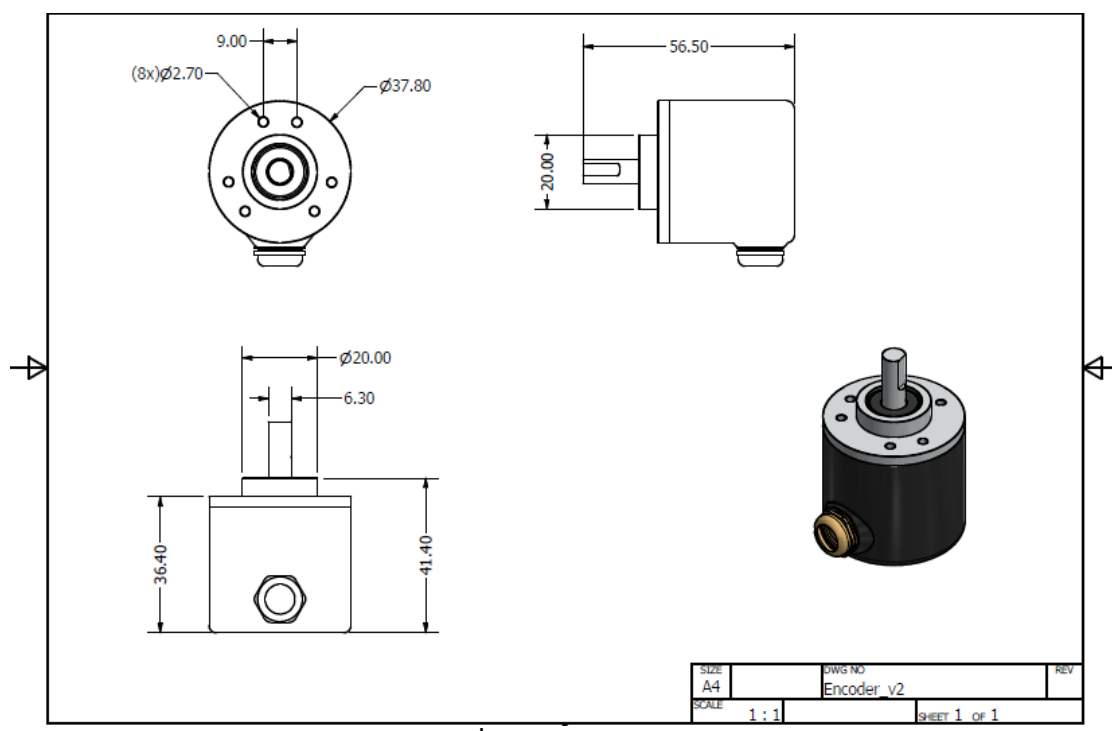
ภาพที่ ก-11 อลูมิเนียมโปรไฟล์ขนาด 20 x 20 x 45 เซนติเมตร



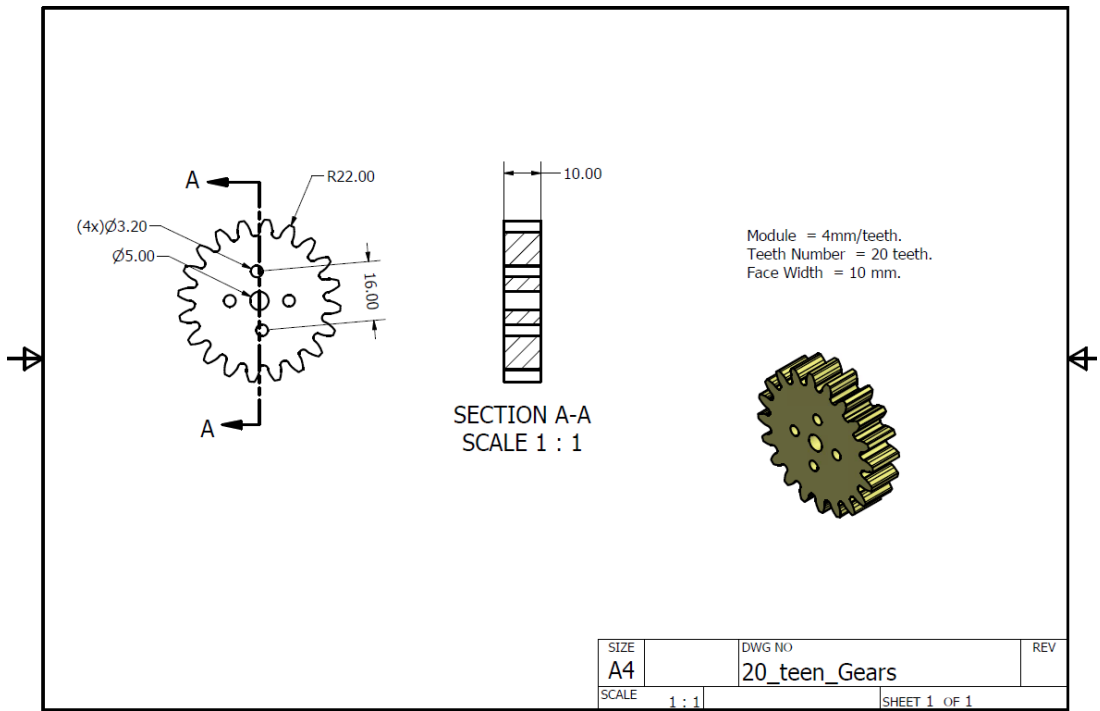
ภาพที่ ก-12 ฉากยึด



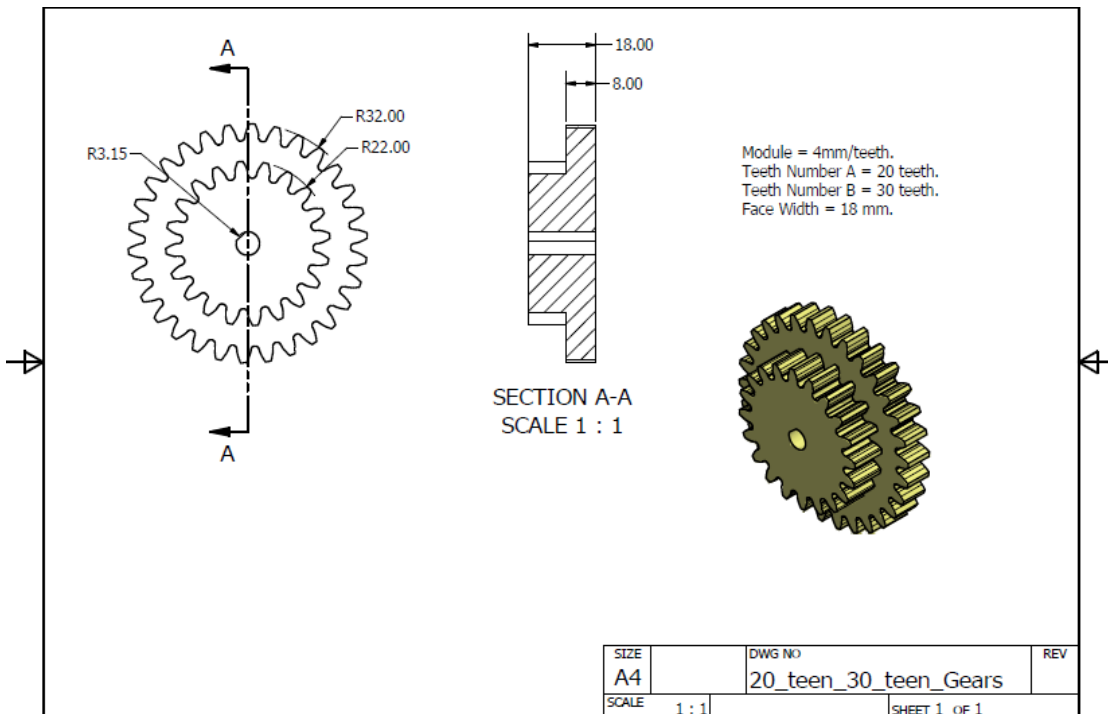
ภาพที่ ก-13 สเตปมิงมอเตอร์



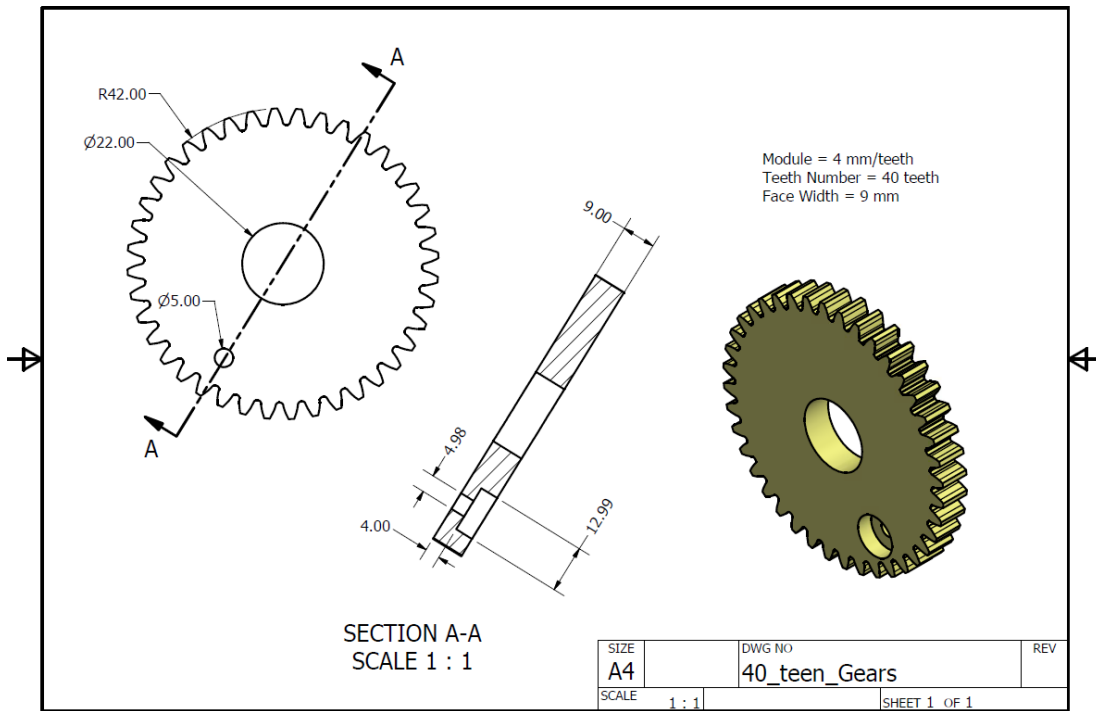
ภาพที่ ก-14 เอนโคเดเดอร์



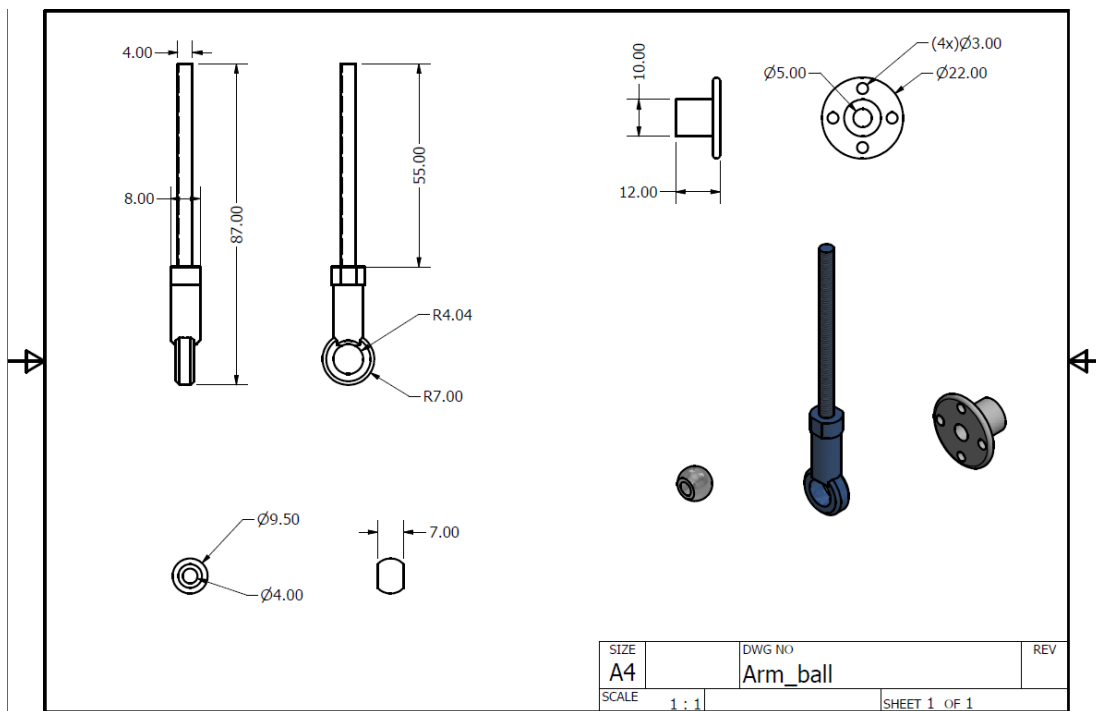
ภาพที่ ก-15 เฟืองขนาด 20 ฟัน



ภาพที่ ก-16 เฟืองคู่ขนาด 20 ฟัน และ 30 ฟัน

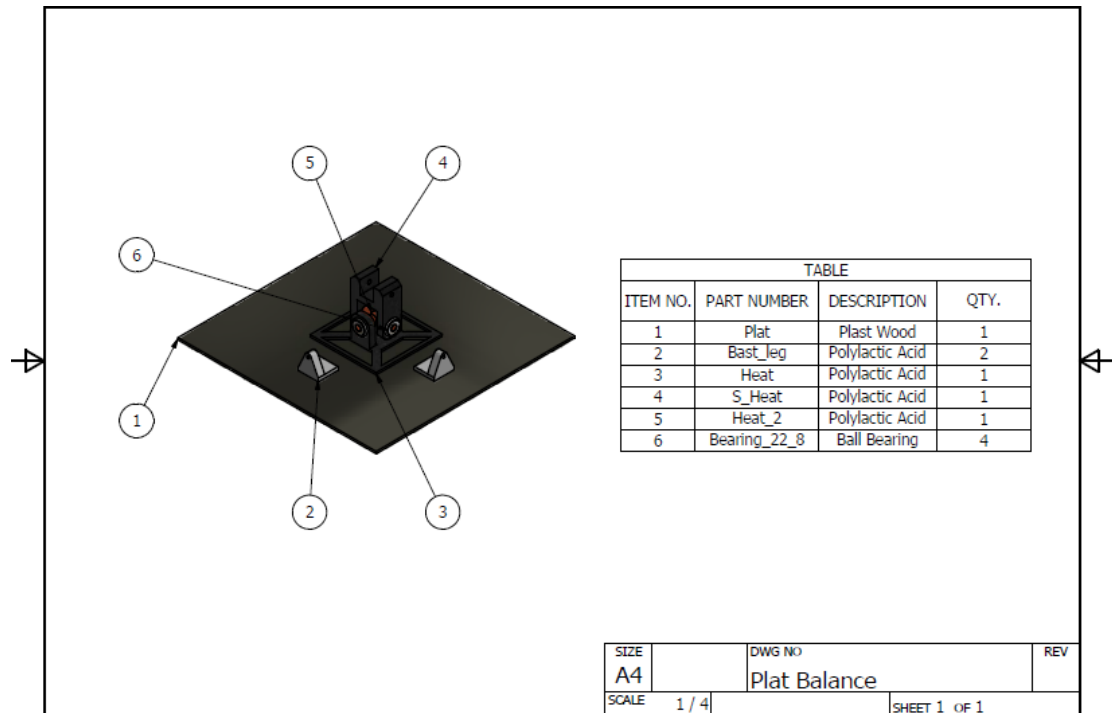


ภาพที่ ก-17 เฟืองขนาด 40 ฟัน

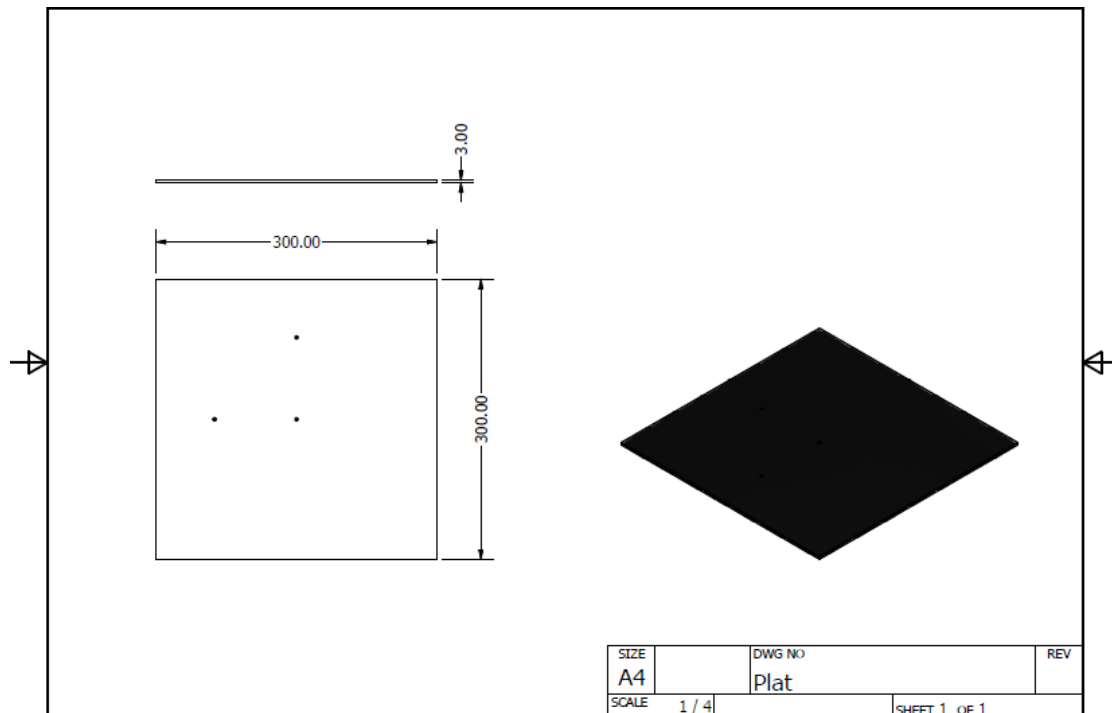


ภาพที่ ก-18 ก้านยก

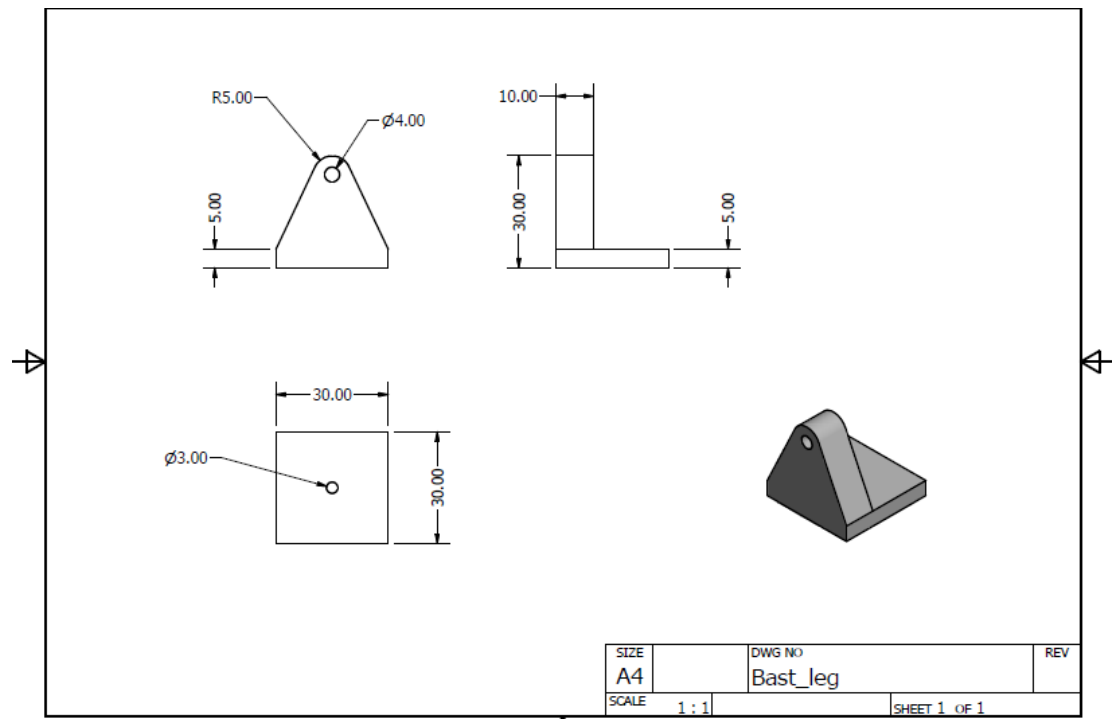
ชุดแผ่นกระดานควบคุมสมดุลลูกบอล



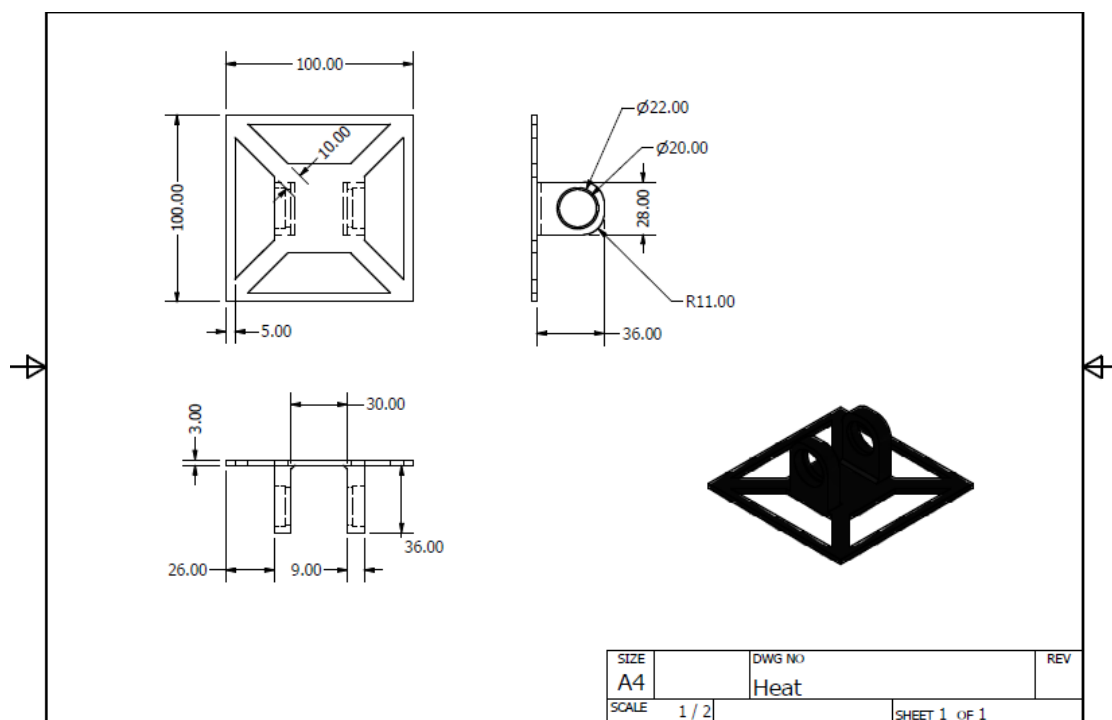
ภาพที่ ก-19 ชุดแผ่นกระดานควบคุมสมดุลลูกบอล



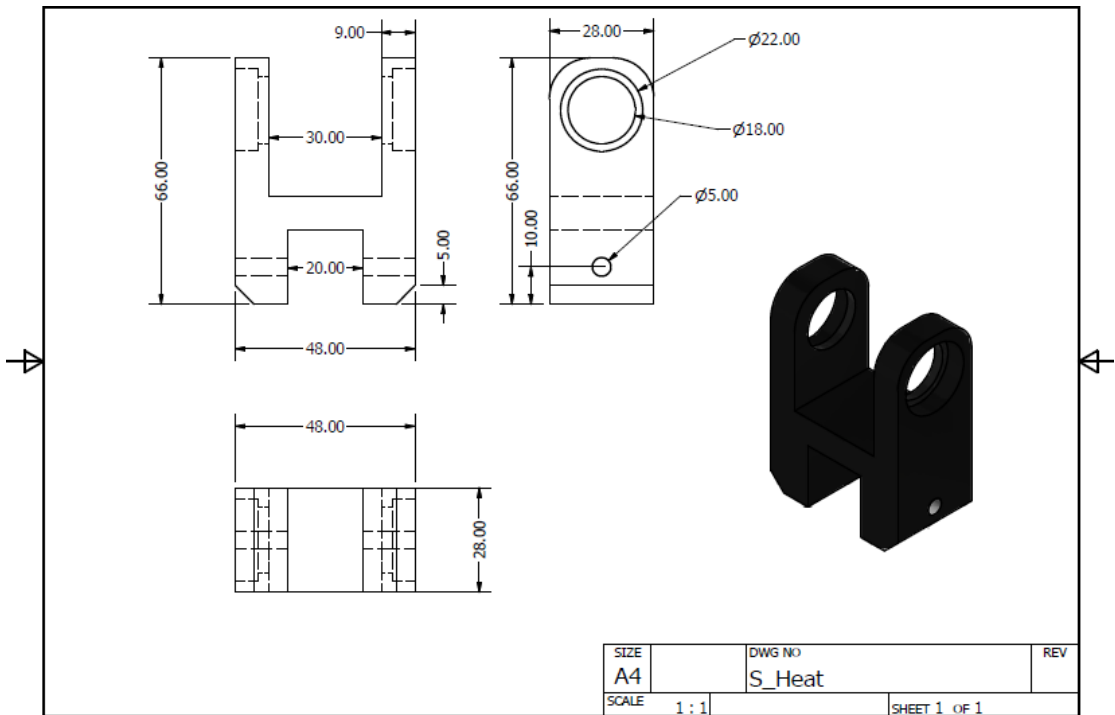
ภาพที่ ก-20 แผ่นอะคริลิกขนาด 300 ตารางมิลลิเมตร



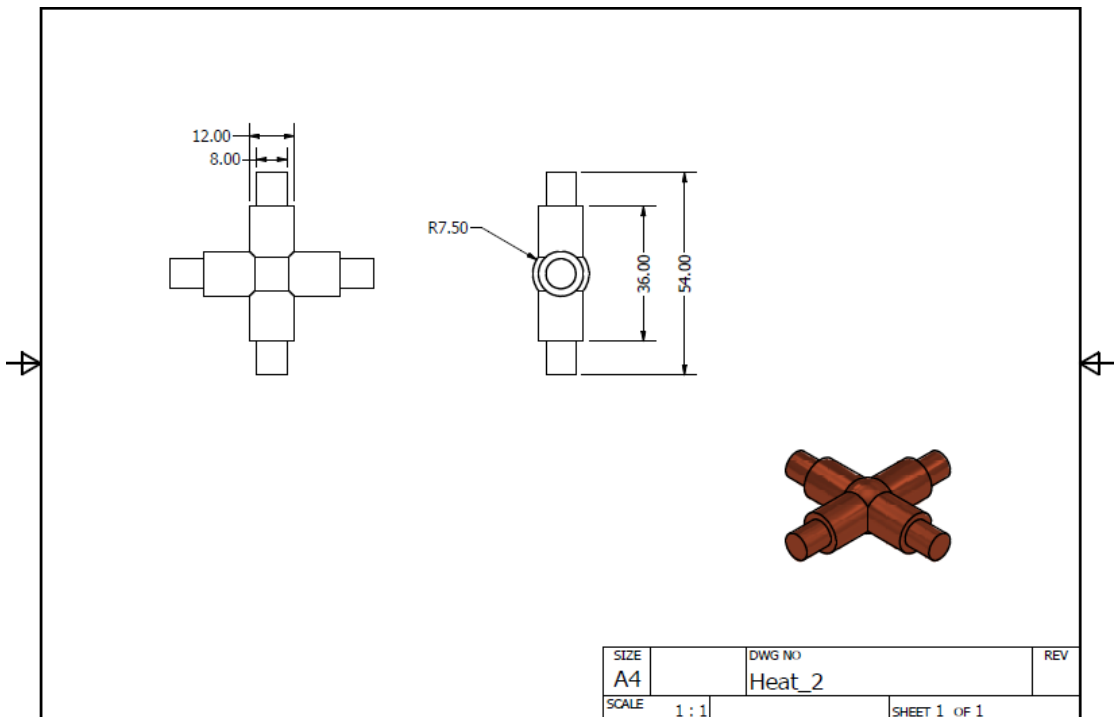
ภาพที่ ก-21 ฉากยึดก้านยก



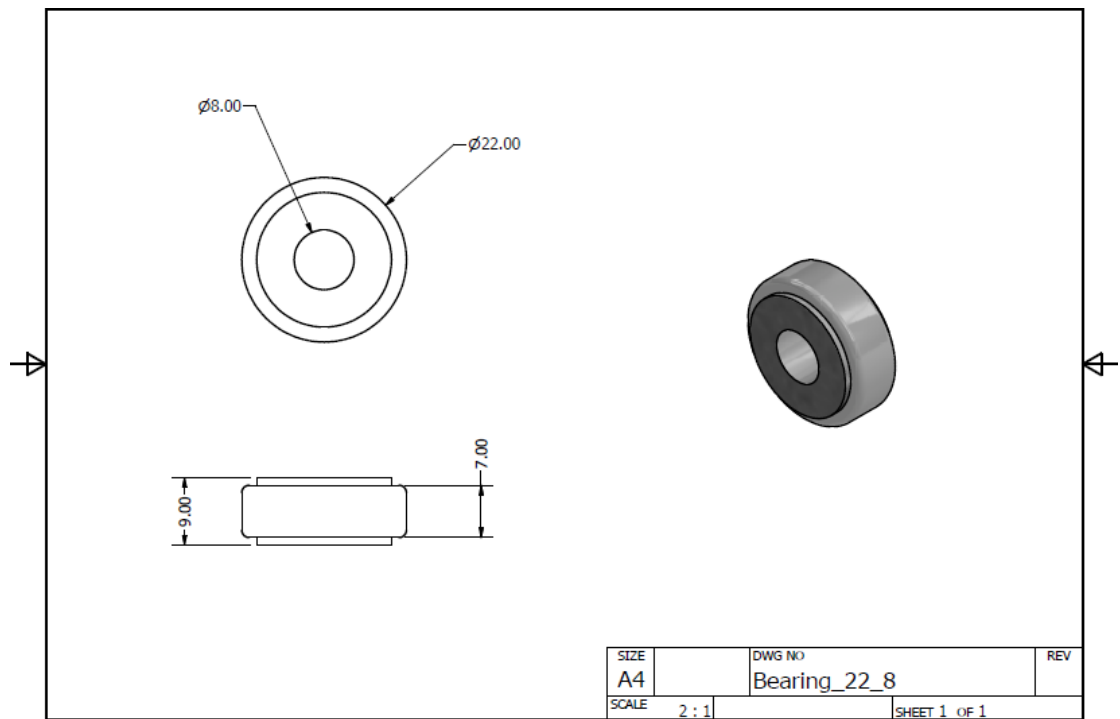
ภาพที่ ก-22 แท่นยึดแผ่นกระดาน



ภาพที่ ก-23 ข้อต่อแท่นยึดแผ่นกระดาน



ภาพที่ ก-24 ข้อต่อ



SIZE		DWG NO	REV
A4		Bearing_22_8	
SCALE	2 : 1	SHEET 1 OF 1	

ภาพที่ ก-25 ลูกปืน

ภาคผนวก ข

โปรแกรมทั้งหมดของโครงการ

โปรแกรมทั้งหมด

1) โปรแกรมไพทอนส่งตำแหน่งเอกซ์ และวายไปยังอาดูยโน

```

import serial
import time
import cv2
import numpy
import numpy as np
x_pos = 0
y_pos = 0
# establish serial connection
ser = serial.Serial('COM22', 115200, timeout=1)
mer = serial.Serial('COM21', 115200, timeout=1)
wer = serial.Serial('COM15', 115200, timeout=1)
# เปิดเว็บแคม
cap = cv2.VideoCapture(1)
while True:
    # จับภาพจากเว็บแคม
    ret, frame = cap.read()
    # แปลงภาพให้เป็น HSV
    hsv = cv2.cvtColor(frame, cv2.COLOR_BGR2HSV)
    # ช่วงสี HSV
    lower = np.array([149, 66, 235]) #[0, 100, 100]
    upper = np.array([162, 255, 255]) #[10, 255, 255]
    # สร้าง mask ของสีที่ต้องการจับ
    mask = cv2.inRange(hsv, lower, upper)
    # ทำ Gaussian blur เพื่อลด noise
    #blur = cv2.GaussianBlur(mask, [15, 15], 0)
    # Dillation ขยายภาพ
    #kernel = np.ones((15, 15), np.uint8)
    #dilation = cv2.dilate(mask, kernel, iterations=1)
    #erosion = cv2.erode(dilation, kernel, iterations=1)

```

```

# ทำ threshold ด้วย Otsu's algorithm เพื่อแยกวัตถุกับพื้นหลัง
ret, thresh = cv2.threshold(mask, 0, 255, cv2.THRESH_BINARY + cv2.THRESH_OTSU)
# หา contour ของวัตถุ
contours, hierarchy = cv2.findContours(thresh, cv2.RETR_TREE,
cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
# วาดกรอบสี่รอบวัตถุ
for cnt in contours:
    area = cv2.contourArea(cnt)
    # ตรวจสอบว่าพื้นที่ของ contour มีค่ามากกว่า 100 pixel หรือไม่ ถ้าใช่ก็เข้าเงื่อนไข
    if area > 500:
        x, y, w, h = cv2.boundingRect(cnt)
        cx = x + w // 2 # คำนวณหาจุดกึ่งกลางแกน x ของสี่เหลี่ยม
        cy = y + h // 2 # คำนวณหาจุดกึ่งกลางแกน y ของสี่เหลี่ยม
        cv2.rectangle(frame, (x, y), (x + w, y + h), (0, 0, 255), 2)
        cv2.circle(frame, (cx, cy), 5, (255, 0, 0), -1) # วาดวงกลมที่จุดกึ่งกลาง
        cv2.putText(frame, 'X,Y: {}'.format(cx, cy), (x, y - 7),
cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.5, (0, 255, 0), 2)
        print("{} {}".format(cx, cy))
        # read X and Y position values
        x_pos = cx
        y_pos = cy
# convert values to bytes and send to Arduino
#ser.write(bytes([str(x_pos), str(y_pos)]))
ser.write(bytes(str(x_pos) + ',' + str(y_pos) + '\n', 'utf-8'))
ser.flush()
ser.reset_input_buffer()
mer.write(bytes(str(x_pos) + ',' + str(y_pos) + '\n', 'utf-8'))
mer.flush()
mer.reset_input_buffer()
wer.write(bytes(str(x_pos) + ',' + str(y_pos) + '\n', 'utf-8'))
wer.flush()

```

```

wer.reset_input_buffer()
cv2.imshow('frame', frame)
#cv2.imshow('thresh', thresh)
#time.sleep(0.001)
if cv2.waitKey(1) & 0xFF == ord('q'):
    break
# ปิดเว็บแคม
cap.release()
cv2.destroyAllWindows()

```

2) โปรแกรม ESP8266 NodeRED MQTT

```

#include <ESP8266WiFi.h>
#include <PubSubClient.h>
int X_Value = 0;
int Y_Value = 0;
// Update these with values suitable for your network.
const char* ssid = "MSI_12";
const char* password = "00000012";
const char* mqtt_server = "broker.hivemq.com";
WiFiClient espClient;
PubSubClient client(espClient);
unsigned long lastMsg = 0;
#define MSG_BUFFER_SIZE   (50)
char msg[MSG_BUFFER_SIZE];
int value = 309;
void setup_wifi() {
    delay(10);
    // We start by connecting to a WiFi network
    Serial.println();
    Serial.print("Connecting to ");
    Serial.println(ssid);

```

```

WiFi.mode(WIFI_STA);
WiFi.begin(ssid, password);
while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
  delay(500);
  Serial.print(".");
}
randomSeed(micros());
Serial.println("");
Serial.println("WiFi connected");
Serial.println("IP address: ");
Serial.println(WiFi.localIP());
}

void callback(char* topic, byte* payload, unsigned int length) {
  Serial.print("Message arrived [");
  Serial.print(topic);
  Serial.print("] ");
  for (int i = 0; i < length; i++) {
    Serial.print((char)payload[i]);
  }
  Serial.println();
  // Switch on the LED if an 1 was received as first character
  if ((char)payload[0] == '1') {
    digitalWrite(BUILTIN_LED, LOW); // Turn the LED on (Note that LOW is the voltage
level
    // but actually the LED is on; this is because
    // it is active low on the ESP-01)
  } else {
    digitalWrite(BUILTIN_LED, HIGH); // Turn the LED off by making the voltage HIGH
  }
}

void reconnect() {

```

```
// Loop until we're reconnected
while (!client.connected()) {
  Serial.print("Attempting MQTT connection...");
  // Create a random client ID
  String clientId = "ESP8266Client-";
  clientId += String(random(0xffff), HEX);
  // Attempt to connect
  if (client.connect(clientId.c_str())) {
    Serial.println("connected");
    // Once connected, publish an announcement...
    client.publish("outTopic", "hello world");
    // ... and resubscribe
    client.subscribe("inTopic");
  } else {
    Serial.print("failed, rc=");
    Serial.print(client.state());
    Serial.println(" try again in 5 seconds");
    // Wait 5 seconds before retrying
    delay(5000);
  }
}

void setup() {
  pinMode(BUILTIN_LED, OUTPUT); // Initialize the BUILTIN_LED pin as an output
  Serial.begin(115200);
  setup_wifi();
  client.setServer(mqtt_server, 1883);
  client.setCallback(callback);
}

void loop() {
  Python_Read();
}
```



```

if (!client.connected()) {
    reconnect();
}
client.loop();
unsigned long now = millis();
if (now - lastMsg > 2000) {
    lastMsg = now;
    snprintf(msg, MSG_BUFFER_SIZE, "%ld,%ld", X_Value, Y_Value);
    Serial.print("Publish message: ");
    Serial.println(msg);
    client.publish("GOLF", msg);
}
}

void Python_Read() {
    if (Serial.available() >= 0) {
        int x_pos = Serial.parseInt();
        int y_pos = Serial.parseInt();
        X_Value = x_pos;
        Y_Value = y_pos;
    }
}

```

3) โปรแกรมทดสอบนิเวศวิทยาชีกล้องแกนเอกซ์

```

float input = 0;
float A = 0;
float B = 0;
float mf0[] = {60.1, 90.9, 140.5, 189.6};
float mf1[] = {117.2, 167, 213.9, 263.7};
float mf2[] = {192.9, 244.3, 297.1, 343.5};
float mf3[] = {269.9, 315.4, 369.2, 419.5};
float mf4[] = {349.9, 399.2, 444, 494.2};

```

```

float mf5[] = {422.4, 475, 522.1, 552.9};
float minr[6];
float Rule[6];
float output[] = {0.9982, 6.574, 12, 18, 23.44, 29};
void setup() {
  Serial.begin(9600);
}
void loop() {
  input = 427;
  minr[0] = 0;minr[1] = 0;minr[2] = 0;minr[3] = 0;minr[4] = 0;minr[5] = 0;
  Rule[0] = 0;Rule[1] = 0;Rule[2] = 0;Rule[3] = 0;Rule[4] = 0;Rule[5] = 0;
  if(input > mf0[0] && input < mf0[3]){
    Rule[0] = 0.9982;
    if(input < mf0[2]){minr[0] = 1;}
    else if(input > mf0[2] && input < mf0[3]){
      minr[0] = (-0.0204*input) + 3.8615;
    }
    else{minr[0] = 0;}
  }
  if(input > mf1[0] && input < mf1[3]){
    Rule[1] = 6.574;
    if(input>mf1[0]&&input<mf1[1]){
      minr[1] = (0.0201*input) - 2.3534;
    }else if(input > mf1[1] && input < mf1[2]){
      minr[1] = 1;
    }else if(input > mf1[2]&&input < mf1[3]){
      minr[1] = (-0.0201*input) + 5.2952;
    }
  }
  if(input > mf2[0] && input < mf2[3]){
    Rule[2] = 12;

```

```

if(input>mf2[0]&&input<mf2[1]){
    minr[2] = (0.0195*input) - 3.7529;
}else if(input > mf2[1] && input < mf2[2]){
    minr[2] = 1;
}else if(input > mf2[2]&&input < mf2[3]){
    minr[2] = (-0.0216*input) + 7.403;
}
}
if(input > mf3[0] && input < mf3[3]){
    Rule[3] = 18;
if(input>mf3[0]&&input<mf3[1]){
    minr[3] = (0.022*input) - 5.9319;
}else if(input > mf3[1] && input < mf3[2]){
    minr[3] = 1;
}else if(input > mf3[2]&&input < mf3[3]){
    minr[3] = (-0.0199*input) + 8.34;
}
}
if(input > mf4[0] && input < mf4[3]){
    Rule[4] = 23.44;
if(input>mf4[0]&&input<mf4[1]){
    minr[4] = (0.0203*input) - 7.0974;
}else if(input > mf4[1] && input < mf4[2]){
    minr[4] = 1;
}else if(input > mf4[2]&&input < mf4[3]){
    minr[4] = (-0.0199*input) + 9.8446;
}
}
if(input > mf5[0] && input < mf5[3]){
    Rule[5] = 29;
if(input>mf5[0]&&input<mf5[1]){

```

```

    minr[5] = (0.019*input) - 8.0304;
}else if(input > mf5[1] && input < mf5[2]){
    minr[5] = 1;
}else if(input > mf5[2]&&input < mf5[3]){
    minr[5] = (-0.0325*input) + 17.951;
}
}
Serial.print("# minr[0] : ");
Serial.print(minr[0],3);
Serial.print("# minr[1] : ");
Serial.print(minr[1],3);
Serial.print("# minr[2] : ");
Serial.print(minr[2],3);
Serial.print("# minr[3] : ");
Serial.print(minr[3],3);
Serial.print("# minr[5] : ");
Serial.print(minr[5],3);
A =
(Rule[0]*minr[0])+(Rule[1]*minr[1])+(Rule[2]*minr[2])+(Rule[3]*minr[3])+(Rule[4]*minr[4]
)+(Rule[5]*minr[5]);
B = minr[0]+minr[1]+minr[2]+minr[3]+minr[4]+minr[5];
Serial.print(" A/B = ");
Serial.print(A/B,3);
Serial.println();
}

```

4) โปรแกรมทดสอบนิเวศชีกล้องแกนวาย

```

float input = 0;
float A = 0;
float B = 0;
float mf0[] = {-3.18, 27.78, 84.63, 129.2};

```

```

float mf1[] = {56.7, 101.8, 150.6, 202.1};
float mf2[] = {134.8, 187.5, 234.8, 279.9};
float mf3[] = {207.2, 252.7, 307.3, 359.6};
float mf4[] = {286.9, 336.3, 382.5, 433.6};
float mf5[] = {362.5, 414.8, 461.2, 492.2};
float minr[6];
float Rule[6];
float output[] = {29, 23, 18, 12, 6.386, 0.9957};
void setup() {
  Serial.begin(9600);
}
void loop() {
  intput = 241;
  minr[0] = 0;minr[1] = 0;minr[2] = 0;minr[3] = 0;minr[4] = 0;minr[5] = 0;
  Rule[0] = 0;Rule[1] = 0;Rule[2] = 0;Rule[3] = 0;Rule[4] = 0;Rule[5] = 0;
  if(intput > mf0[0] && intput < mf0[3]){
    Rule[0] = output[0];
    if(intput < mf0[2]){minr[0] = 1;}
    else if(intput > mf0[2] && intput < mf0[3]){
      minr[0] = (-0.0224*intput) + 2.8988;
    }
    else{minr[0] = 0;}
  }
  if(intput > mf1[0] && intput < mf1[3]){
    Rule[1] = output[1];
    if(intput>mf1[0]&&intput<mf1[1]){
      minr[1] = (0.0222*intput) - 1.2572;
    }else if(intput > mf1[1] && intput < mf1[2]){
      minr[1] = 1;
    }else if(intput > mf1[2]&&intput < mf1[3]){
      minr[1] = (-0.0194*intput) + 3.9243;
    }
  }
}

```

```
    }  
  }  
  if(input > mf2[0] && input < mf2[3]){  
    Rule[2] = output[2];  
    if(input>mf2[0]&&input<mf2[1]){  
      minr[2] = (0.019*input) - 2.5579;  
    }else if(input > mf2[1] && input < mf2[2]){  
      minr[2] = 1;  
    }else if(input > mf2[2]&&input < mf2[3]){  
      minr[2] = (-0.0222*input) + 6.2062;  
    }  
  }  
  if(input > mf3[0] && input < mf3[3]){  
    Rule[3] = output[3];  
    if(input>mf3[0]&&input<mf3[1]){  
      minr[3] = (0.0222*input) - 4.5778;  
    }else if(input > mf3[1] && input < mf3[2]){  
      minr[3] = 1;  
    }else if(input > mf3[2]&&input < mf3[3]){  
      minr[3] = (-0.0192*input) + 6.8846;  
    }  
  }  
  if(input > mf4[0] && input < mf4[3]){  
    Rule[4] = output[4];  
    if(input>mf4[0]&&input<mf4[1]){  
      minr[4] = (0.0202*input) - 5.8077;  
    }else if(input > mf4[1] && input < mf4[2]){  
      minr[4] = 1;  
    }else if(input > mf4[2]&&input < mf4[3]){  
      minr[4] = (-0.0196*input) + 8.4853;  
    }  
  }
```

```

}
if(input > mf5[0] && input < mf5[3]){
    Rule[5] = output[5];
    if(input>mf5[0]&&input<mf5[1]){
        minr[5] = (0.0191*input) - 6.9312;
    }else if(input > mf5[1] && input < mf5[2]){
        minr[5] = 1;
    }else if(input > mf5[2]&&input < mf5[3]){
        minr[5] = (-0.0323*input) + 15.877;
    }
}
}
Serial.print("# minr[0] : ");
Serial.print(minr[0],3);
Serial.print("# minr[1] : ");
Serial.print(minr[1],3);
Serial.print("# minr[2] : ");
Serial.print(minr[2],3);
Serial.print("# minr[3] : ");
Serial.print(minr[3],3);
Serial.print("# minr[5] : ");
Serial.print(minr[5],3);

A =
(Rule[0]*minr[0])+(Rule[1]*minr[1])+(Rule[2]*minr[2])+(Rule[3]*minr[3])+(Rule[4]*minr[4]
)+(Rule[5]*minr[5]);
B = minr[0]+minr[1]+minr[2]+minr[3]+minr[4]+minr[5];
Serial.print(" A/B = ");
Serial.print(A/B,3);
Serial.println();
}

```

5) โปรแกรมควบคุมมอเตอร์แบบ PID

```

#include <AccelStepper.h>
#include <Encoder.h>

double eSetpoint, Input, Output;
double error,proportional,integral,derivative,previous_error;
double dt = 0.1;
double Kp=4.75, Ki=0, Kd=0;
#define dirPin_X 9
#define stepPin_X 8
int X_Value = 0;
int Y_Value = 0;
int X_Newro = 0;
int Y_Newro = 0;
float Errors = 0;
float Angle = 0;
float PoBall = 0;
int ESmer = 6;
int Buzzer = 12;

const long SERIAL_REFRESH_TIME = 100;
long refresh_time;

Encoder myEnc(2, 3);
AccelStepper stepper1(AccelStepper::DRIVER, stepPin_X, dirPin_X);
void setup () {
  Serial.begin(115200);
  eSetpoint = 15;
  stepper1.setMaxSpeed(6000.0);
  stepper1.setAcceleration(12000.0);
  pinMode(ESmer,INPUT_PULLUP);
  pinMode(Buzzer,OUTPUT);
  digitalWrite(Buzzer,HIGH);

```



```

}
long oldPosition = -999;
void loop () {
  Python_Read();
  int Esme = digitalRead(ESmer);
  if(Esme){
    digitalWrite(Buzzer,HIGH);
    if (millis() > refresh_time) {
      Input = PoBall;
      error = eSetpoint - Input;
      proportional = error;
      integral = (integral + error)*dt;
      derivative = (error-previous_error)/dt;
      Output = (Kp*proportional)+(Ki*integral)+(Kd*derivative);
      previous_error = error;
      refresh_time = millis() + SERIAL_REFRESH_TIME;
    }
    Angle = Output*-1;
  }
  else{
    digitalWrite(Buzzer,LOW);
    Angle = 0;
  }
  long newPos = myEnc.read();
  //long Encod = newPos*0.1125;
  long Encod = newPos*1.125;
  Errors = Encod - Angle;
  stepper1.move(Errors);
  stepper1.run();
}
void Python_Read(){

```

```

if (Serial.available() >= 2) {
    int x_pos = Serial.parseInt();
    int y_pos = Serial.parseInt();
    X_Newro = x_pos;
    Y_Newro = y_pos;
}
Neuro_Fuzzy();
}
void Neuro_Fuzzy(){
    float input = X_Newro;
    float A = 0;
    float B = 0;
    float mf0[] = {60.1, 90.9, 140.5, 189.6};
    float mf1[] = {117.2, 167, 213.9, 263.7};
    float mf2[] = {192.9, 244.3, 297.1, 343.5};
    float mf3[] = {269.9, 315.4, 369.2, 419.5};
    float mf4[] = {349.9, 399.2, 444, 494.2};
    float mf5[] = {422.4, 475, 522.1, 552.9};

    float minr[6];
    float Rule[6];
    float output[] = {0.9982, 6.574, 12, 18, 23.44 , 29};
    minr[0] = 0;minr[1] = 0;minr[2] = 0;minr[3] = 0;minr[4] = 0;minr[5] = 0;
    Rule[0] = 0;Rule[1] = 0;Rule[2] = 0;Rule[3] = 0;Rule[4] = 0;Rule[5] = 0;
    if(input > mf0[0] && input < mf0[3]){
        Rule[0] = 0.9982;
        if(input < mf0[2]){minr[0] = 1;}
        else if(input > mf0[2] && input < mf0[3]){
            minr[0] = (-0.0204*input) + 3.8615;
        }
        else{minr[0] = 0;}
    }

```

```
}  
if(input > mf1[0] && input < mf1[3]){  
    Rule[1] = 6.574;  
    if(input>mf1[0]&&input<mf1[1]){  
        minr[1] = (0.0201*input) - 2.3534;  
    }else if(input > mf1[1] && input < mf1[2]){  
        minr[1] = 1;  
    }else if(input > mf1[2]&&input < mf1[3]){  
        minr[1] = (-0.0201*input) + 5.2952;  
    }  
}  
if(input > mf2[0] && input < mf2[3]){  
    Rule[2] = 12;  
    if(input>mf2[0]&&input<mf2[1]){  
        minr[2] = (0.0195*input) - 3.7529;  
    }else if(input > mf2[1] && input < mf2[2]){  
        minr[2] = 1;  
    }else if(input > mf2[2]&&input < mf2[3]){  
        minr[2] = (-0.0216*input) + 7.403;  
    }  
}  
if(input > mf3[0] && input < mf3[3]){  
    Rule[3] = 18;  
    if(input>mf3[0]&&input<mf3[1]){  
        minr[3] = (0.022*input) - 5.9319;  
    }else if(input > mf3[1] && input < mf3[2]){  
        minr[3] = 1;  
    }else if(input > mf3[2]&&input < mf3[3]){  
        minr[3] = (-0.0199*input) + 8.34;  
    }  
}
```

```

if(input > mf4[0] && input < mf4[3]){
    Rule[4] = 23.44;
    if(input>mf4[0]&&input<mf4[1]){
        minr[4] = (0.0203*input) - 7.0974;
    }else if(input > mf4[1] && input < mf4[2]){
        minr[4] = 1;
    }else if(input > mf4[2]&&input < mf4[3]){
        minr[4] = (-0.0199*input) + 9.8446;
    }
}
if(input > mf5[0] && input < mf5[3]){
    Rule[5] = 29;
    if(input>mf5[0]&&input<mf5[1]){
        minr[5] = (0.019*input) - 8.0304;
    }else if(input > mf5[1] && input < mf5[2]){
        minr[5] = 1;
    }else if(input > mf5[2]&&input < mf5[3]){
        minr[5] = (-0.0325*input) + 17.951;
    }
}
A =
(Rule[0]*minr[0])+(Rule[1]*minr[1])+(Rule[2]*minr[2])+(Rule[3]*minr[3])+(Rule[4]*minr[4]
)+(Rule[5]*minr[5]);
B = minr[0]+minr[1]+minr[2]+minr[3]+minr[4]+minr[5];

X_Value = A/B;
PoBall = X_Value;
}

```

6) โปรแกรมอาศัยโนควบคุมแกนวาย เกลอร์-นิโคลส์

```

#include <AccelStepper.h>
#include <Encoder.h>
double eSetpoint, Input, Output;
double error,proportional,integral,derivative,previous_error;
double dt = 0.1;
double Kp=4.75, Ki=0, Kd=0;
#define dirPin_X 9
#define stepPin_X 8
int X_Value = 0;
int Y_Value = 0;
int X_Newro = 0;
int Y_Newro = 0;
float Errors = 0;
float Angle = 0;
float PoBall = 0;
int ESmer = 6;
int Buzzer = 12;
const long SERIAL_REFRESH_TIME = 100;
long refresh_time;
Encoder myEnc(2, 3);
AccelStepper stepper1(AccelStepper::DRIVER, stepPin_X, dirPin_X);
void setup () {
  Serial.begin(115200);
  eSetpoint = 15;
  stepper1.setMaxSpeed(6000.0);
  stepper1.setAcceleration(12000.0);
  pinMode(ESmer,INPUT_PULLUP);
  pinMode(Buzzer,OUTPUT);
  digitalWrite(Buzzer,HIGH);
}

```

```
long oldPosition = -999;
void loop () {
  Python_Read();
  int Esme = digitalRead(ESmer);
  if(Esme){
    digitalWrite(Buzzer,HIGH);
    if (millis() > refresh_time) {
      Input = PoBall;
      error = eSetpoint - Input;
      proportional = error;
      integral = (integral + error)*dt;
      derivative = (error-previous_error)/dt;
      Output = (Kp*proportional)+(Ki*integral)+(Kd*derivative);
      previous_error = error;
      refresh_time = millis() + SERIAL_REFRESH_TIME;
    }
    Angle = Output;
  }
  else{
    digitalWrite(Buzzer,LOW);
    Angle = 0;
  }

  long newPos = myEnc.read();
  //long Encod = newPos*0.1125;
  long Encod = newPos*1.125;

  Errors = Encod - Angle;
  stepper1.move(Errors);
  stepper1.run();
```

```

}
void Python_Read(){
    if (Serial.available() >= 2) {
        int x_pos = Serial.parseInt();
        int y_pos = Serial.parseInt();
        X_Newro = x_pos;
        Y_Newro = y_pos;
    }
    Neuro_Fuzzy();
}
void Neuro_Fuzzy(){
    float intput = Y_Newro;

    float A = 0;
    float B = 0;

    float mf0[] = {-3.18, 27.78, 84.63, 129.2};
    float mf1[] = {56.7, 101.8, 150.6, 202.1};
    float mf2[] = {134.8, 187.5, 234.8, 279.9};
    float mf3[] = {207.2, 252.7, 307.3, 359.6};
    float mf4[] = {286.9, 336.3, 382.5, 433.6};
    float mf5[] = {362.5, 414.8, 461.2, 492.2};
    float minr[6];
    float Rule[6];
    float output[] = {29, 23, 18, 12, 6.386, 0.9957};
    minr[0] = 0;minr[1] = 0;minr[2] = 0;minr[3] = 0;minr[4] = 0;minr[5] = 0;
    Rule[0] = 0;Rule[1] = 0;Rule[2] = 0;Rule[3] = 0;Rule[4] = 0;Rule[5] = 0;
    if(intput > mf0[0] && intput < mf0[3]){
        Rule[0] = output[0];
        if(intput < mf0[2]){minr[0] = 1;}
        else if(intput > mf0[2] && intput < mf0[3]){

```

```
    minr[0] = (-0.0224*input) + 2.8988;
  }
  else{minr[0] = 0;}
}
if(input > mf1[0] && input < mf1[3]){
  Rule[1] = output[1];
  if(input>mf1[0]&&input<mf1[1]){
    minr[1] = (0.0222*input) - 1.2572;
  }else if(input > mf1[1] && input < mf1[2]){
    minr[1] = 1;
  }else if(input > mf1[2]&&input < mf1[3]){
    minr[1] = (-0.0194*input) + 3.9243;
  }
}
if(input > mf2[0] && input < mf2[3]){
  Rule[2] = output[2];
  if(input>mf2[0]&&input<mf2[1]){
    minr[2] = (0.019*input) - 2.5579;
  }else if(input > mf2[1] && input < mf2[2]){
    minr[2] = 1;
  }else if(input > mf2[2]&&input < mf2[3]){
    minr[2] = (-0.0222*input) + 6.2062;
  }
}
if(input > mf3[0] && input < mf3[3]){
  Rule[3] = output[3];
  if(input>mf3[0]&&input<mf3[1]){
    minr[3] = (0.0222*input) - 4.5778;
  }else if(input > mf3[1] && input < mf3[2]){
    minr[3] = 1;
  }else if(input > mf3[2]&&input < mf3[3]){
```



```

        minr[3] = (-0.0192*input) + 6.8846;
    }
}
if(input > mf4[0] && input < mf4[3]){
    Rule[4] = output[4];
    if(input>mf4[0]&&input<mf4[1]){
        minr[4] = (0.0202*input) - 5.8077;
    }else if(input > mf4[1] && input < mf4[2]){
        minr[4] = 1;
    }else if(input > mf4[2]&&input < mf4[3]){
        minr[4] = (-0.0196*input) + 8.4853;
    }
}
if(input > mf5[0] && input < mf5[3]){
    Rule[5] = output[5];
    if(input>mf5[0]&&input<mf5[1]){
        minr[5] = (0.0191*input) - 6.9312;
    }else if(input > mf5[1] && input < mf5[2]){
        minr[5] = 1;
    }else if(input > mf5[2]&&input < mf5[3]){
        minr[5] = (-0.0323*input) + 15.877;
    }
}
}
A =
(Rule[0]*minr[0])+(Rule[1]*minr[1])+(Rule[2]*minr[2])+(Rule[3]*minr[3])+(Rule[4]*minr[4]
)+(Rule[5]*minr[5]);
B = minr[0]+minr[1]+minr[2]+minr[3]+minr[4]+minr[5];
Y_Value = A/B;
PoBall = Y_Value;
}

```

7) โปรแกรมอาศัยไมโครควบคุมแกนเอกซ์ ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์

```

#include <PID_v1_bc.h>
#include <AccelStepper.h>
#include <Encoder.h>
double Setpoint, Input, Output;
double Kp=10, Ki=0, Kd=7;
#define dirPin_X 9
#define stepPin_X 8
int X_Value = 0;
int Y_Value = 0;
int X_Newro = 0;
int Y_Newro = 0;

float Errors = 0;
float Angle = 0;
float PoBall = 0;
int ESmer = 6;
int Buzzer = 12;
Encoder myEnc(2, 3);
AccelStepper stepper1(AccelStepper::DRIVER, stepPin_X, dirPin_X);
PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);
void setup () {
  Serial.begin(115200);
  Setpoint = 3;
  stepper1.setMaxSpeed(6000.0);
  stepper1.setAcceleration(12000.0);
  pinMode(ESmer,INPUT_PULLUP);
  pinMode(Buzzer,OUTPUT);
  digitalWrite(Buzzer,HIGH);

```

```
myPID.SetMode(AUTOMATIC);
myPID.SetOutputLimits(-900, 900);
myPID.Compute();
}
long oldPosition = -999;
void loop () {
  Python_Read();
  int Esme = digitalRead(ESmer);
  if(Esme){
    digitalWrite(Buzzer,HIGH);
    Input = PoBall;
    myPID.Compute();
    Angle = Output*-1;
  }
  else{
    digitalWrite(Buzzer,LOW);
    Angle = 0;
  }
  long newPos = myEnc.read();
  //long Encod = newPos*0.1125;
  long Encod = newPos*1.125;
  Errors = Encod - Angle;
  stepper1.move(Errors);
  stepper1.run();
}
void Python_Read(){
  if (Serial.available() >= 2) {
    int x_pos = Serial.parseInt();
    int y_pos = Serial.parseInt();
    X_Newro = x_pos;
    Y_Newro = y_pos;
  }
}
```

```

}
Neuro_Fuzzy();
}
void Neuro_Fuzzy(){
float input = X_Newro;
float A = 0;
float B = 0;
float mf0[] = {60.1, 90.9, 140.5, 189.6};
float mf1[] = {117.2, 167, 213.9, 263.7};
float mf2[] = {192.9, 244.3, 297.1, 343.5};
float mf3[] = {269.9, 315.4, 369.2, 419.5};
float mf4[] = {349.9, 399.2, 444, 494.2};
float mf5[] = {422.4, 475, 522.1, 552.9};

float minr[6];
float Rule[6];
float output[] = {0.9982, 6.574, 12, 18, 23.44 , 29};
minr[0] = 0;minr[1] = 0;minr[2] = 0;minr[3] = 0;minr[4] = 0;minr[5] = 0;
Rule[0] = 0;Rule[1] = 0;Rule[2] = 0;Rule[3] = 0;Rule[4] = 0;Rule[5] = 0;
if(input > mf0[0] && input < mf0[3]){
    Rule[0] = 0.9982;
    if(input < mf0[2]){minr[0] = 1;}
    else if(input > mf0[2] && input < mf0[3]){
        minr[0] = (-0.0204*input) + 3.8615;
    }
    else{minr[0] = 0;}
}
if(input > mf1[0] && input < mf1[3]){
    Rule[1] = 6.574;
    if(input>mf1[0]&&input<mf1[1]){
        minr[1] = (0.0201*input) - 2.3534;
    }
}
}

```

```

}else if(input > mf1[1] && input < mf1[2]){
    minr[1] = 1;
}else if(input > mf1[2]&&input < mf1[3]){
    minr[1] = (-0.0201*input) + 5.2952;
}
}
if(input > mf2[0] && input < mf2[3]){
    Rule[2] = 12;
    if(input>mf2[0]&&input<mf2[1]){
        minr[2] = (0.0195*input) - 3.7529;
    }else if(input > mf2[1] && input < mf2[2]){
        minr[2] = 1;
    }else if(input > mf2[2]&&input < mf2[3]){
        minr[2] = (-0.0216*input) + 7.403;
    }
}
if(input > mf3[0] && input < mf3[3]){
    Rule[3] = 18;
    if(input>mf3[0]&&input<mf3[1]){
        minr[3] = (0.022*input) - 5.9319;
    }else if(input > mf3[1] && input < mf3[2]){
        minr[3] = 1;
    }else if(input > mf3[2]&&input < mf3[3]){
        minr[3] = (-0.0199*input) + 8.34;
    }
}
if(input > mf4[0] && input < mf4[3]){
    Rule[4] = 23.44;
    if(input>mf4[0]&&input<mf4[1]){
        minr[4] = (0.0203*input) - 7.0974;
    }else if(input > mf4[1] && input < mf4[2]){

```

```

    minr[4] = 1;
} else if(input > mf4[2] && input < mf4[3]){
    minr[4] = (-0.0199*input) + 9.8446;
}
}
if(input > mf5[0] && input < mf5[3]){
    Rule[5] = 29;
    if(input > mf5[0] && input < mf5[1]){
        minr[5] = (0.019*input) - 8.0304;
    } else if(input > mf5[1] && input < mf5[2]){
        minr[5] = 1;
    } else if(input > mf5[2] && input < mf5[3]){
        minr[5] = (-0.0325*input) + 17.951;
    }
}
}
A =
(Rule[0]*minr[0])+(Rule[1]*minr[1])+(Rule[2]*minr[2])+(Rule[3]*minr[3])+(Rule[4]*minr[4]
)+(Rule[5]*minr[5]);
B = minr[0]+minr[1]+minr[2]+minr[3]+minr[4]+minr[5];
X_Value = A/B;
PoBall = X_Value;
}

```

8) โปรแกรมควบคุมในควบคุมแกนวาย ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์

```

#include <PID_v1_bc.h>
#include <AccelStepper.h>
#include <Encoder.h>
double Setpoint, Input, Output;
double Kp=10, Ki=0, Kd=7;
#define dirPin_X 9
#define stepPin_X 8

```

```
int X_Value = 0;
int Y_Value = 0;
int X_Newro = 0;
int Y_Newro = 0;
float Errors = 0;
float Angle = 0;
float PoBall = 0;
int ESmer = 6;
int Buzzer = 12;
Encoder myEnc(2, 3);
AccelStepper stepper1(AccelStepper::DRIVER, stepPin_X, dirPin_X);
PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);
void setup () {
  Serial.begin(115200);
  Setpoint = 27;
  stepper1.setMaxSpeed(6000.0);
  stepper1.setAcceleration(12000.0);
  pinMode(ESmer,INPUT_PULLUP);
  pinMode(Buzzer,OUTPUT);
  digitalWrite(Buzzer,HIGH);
  myPID.SetMode(AUTOMATIC);
  myPID.SetOutputLimits(-900, 900);
  myPID.Compute();
}
long oldPosition = -999;
void loop () {
  Python_Read();
  int Esme = digitalRead(ESmer);
  if(Esme){
    digitalWrite(Buzzer,HIGH);
    Input = PoBall;
```

```
    myPID.Compute();
    Angle = Output;
}
else{
    digitalWrite(Buzzer,LOW);
    Angle = 0;
}
long newPos = myEnc.read();
//long Encod = newPos*0.1125;
long Encod = newPos*1.125;
Errors = Encod - Angle;
stepper1.move(Errors);
stepper1.run();
}
void Python_Read(){
    if (Serial.available() >= 2) {
        int x_pos = Serial.parseInt();
        int y_pos = Serial.parseInt();
        X_Newro = x_pos;
        Y_Newro = y_pos;
    }
    Neuro_Fuzzy();
}
void Neuro_Fuzzy(){
    float input = Y_Newro;
    float A = 0;
    float B = 0;
    float mf0[] = {-3.18, 27.78, 84.63, 129.2};
    float mf1[] = {56.7, 101.8, 150.6, 202.1};
    float mf2[] = {134.8, 187.5, 234.8, 279.9};
    float mf3[] = {207.2, 252.7, 307.3, 359.6};
```



```

float mf4[] = {286.9, 336.3, 382.5, 433.6};
float mf5[] = {362.5, 414.8, 461.2, 492.2};
float minr[6];
float Rule[6];
float output[] = {29, 23, 18, 12, 6.386, 0.9957};
minr[0] = 0;minr[1] = 0;minr[2] = 0;minr[3] = 0;minr[4] = 0;minr[5] = 0;
Rule[0] = 0;Rule[1] = 0;Rule[2] = 0;Rule[3] = 0;Rule[4] = 0;Rule[5] = 0;

if(input > mf0[0] && input < mf0[3]){
    Rule[0] = output[0];
    if(input < mf0[2]){minr[0] = 1;}
    else if(input > mf0[2] && input < mf0[3]){
        minr[0] = (-0.0224*input) + 2.8988;
    }
    else{minr[0] = 0;}
}

if(input > mf1[0] && input < mf1[3]){
    Rule[1] = output[1];
    if(input>mf1[0]&&input<mf1[1]){
        minr[1] = (0.0222*input) - 1.2572;
    }else if(input > mf1[1] && input < mf1[2]){
        minr[1] = 1;
    }else if(input > mf1[2]&&input < mf1[3]){
        minr[1] = (-0.0194*input) + 3.9243;
    }
}

if(input > mf2[0] && input < mf2[3]){
    Rule[2] = output[2];
    if(input>mf2[0]&&input<mf2[1]){
        minr[2] = (0.019*input) - 2.5579;
    }else if(input > mf2[1] && input < mf2[2]){

```

```

    minr[2] = 1;
} else if(input > mf2[2] && input < mf2[3]){
    minr[2] = (-0.0222*input) + 6.2062;
}
}
if(input > mf3[0] && input < mf3[3]){
    Rule[3] = output[3];
    if(input > mf3[0] && input < mf3[1]){
        minr[3] = (0.0222*input) - 4.5778;
    } else if(input > mf3[1] && input < mf3[2]){
        minr[3] = 1;
    } else if(input > mf3[2] && input < mf3[3]){
        minr[3] = (-0.0192*input) + 6.8846;
    }
}
if(input > mf4[0] && input < mf4[3]){
    Rule[4] = output[4];
    if(input > mf4[0] && input < mf4[1]){
        minr[4] = (0.0202*input) - 5.8077;
    } else if(input > mf4[1] && input < mf4[2]){
        minr[4] = 1;
    } else if(input > mf4[2] && input < mf4[3]){
        minr[4] = (-0.0196*input) + 8.4853;
    }
}
if(input > mf5[0] && input < mf5[3]){
    Rule[5] = output[5];
    if(input > mf5[0] && input < mf5[1]){
        minr[5] = (0.0191*input) - 6.9312;
    } else if(input > mf5[1] && input < mf5[2]){
        minr[5] = 1;
    }
}

```

```

}else if(input > mf5[2]&&input < mf5[3]){
    minr[5] = (-0.0323*input) + 15.877;
}
}
A =
(Rule[0]*minr[0])+(Rule[1]*minr[1])+(Rule[2]*minr[2])+(Rule[3]*minr[3])+(Rule[4]*minr[4]
)+(Rule[5]*minr[5]);
B = minr[0]+minr[1]+minr[2]+minr[3]+minr[4]+minr[5];
Y_Value = A/B;
PoBall = Y_Value;
}

```

9) โปรแกรมควบคุมความเร็วแกนเอกซ์ ตัวควบคุมผ่านเลื่อน

```

#include <AccelStepper.h>
#include <Encoder.h>
#define dirPin_X 9
#define stepPin_X 8
int FX = 0.5; int GX = 4.325;
const long SERIAL_REFRESH_TIME = 100;
long refresh_time;
double SetpointX = 30;
double Kd = 0.7;
double lambda = 0.98;
double prevErrorX = 0;
double prevSignX = 0;
double outputX = 0;
double PoBall = 0;
double deltaSignX = 0;
double PrePoBall = 0;
double PreErrorX = 0;

```

```

int ESmer = 6;
int Buzzer = 5;
int X_Value = 0;
int Y_Value = 0;
int X_Newro = 0;
int Y_Newro = 0;
long AnglePos = 0;
Encoder myEnc(2, 3);
AccelStepper stepper1(AccelStepper::DRIVER, stepPin_X, dirPin_X);
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  stepper1.setMaxSpeed(6000.0);
  stepper1.setAcceleration(12000.0);
  pinMode(ESmer,INPUT_PULLUP);
  pinMode(Buzzer,OUTPUT);
  digitalWrite(Buzzer,HIGH);
}
long oldPosition = -999;
void loop() {
  Python_Read();
  int Esme = digitalRead(ESmer);
  if(Esme){
    if (millis() > refresh_time) {
      double deltaError = (PoBall-PrePoBall)/0.1;
      double ErrorX = SetpointX - PoBall;
      double ErrorX_dot = ErrorX - PreErrorX;
      double Suface = lambda*ErrorX+ErrorX_dot;
      double signX = (Suface > 0) ? 1 : ((Suface < 0) ? -1 : 0);
      double Swith = Kd*Suface;
      double Eq = -((lambda*deltaError+FX)/GX);
      double Uout = Swith+Eq;
    }
  }
}

```

```

    AnglePos = Uout*-1;
    PrePoBall = PoBall;
    PreErrorX = ErrorX;
    refresh_time = millis() + SERIAL_REFRESH_TIME;
  }
}
else{
  AnglePos = 0;
}
long newPos = myEnc.read();
long Encod = newPos*1.125;
double ErrorPos = Encod - AnglePos;
stepper1.move(ErrorPos);
stepper1.run();
}
void Python_Read(){
  if (Serial.available() >= 2) {
    int x_pos = Serial.parseInt();
    int y_pos = Serial.parseInt();
    X_Newro = x_pos;
    Y_Newro = y_pos;
  }
  Neuro_Fuzzy();
}
void Neuro_Fuzzy(){
  float input = X_Newro;
  float A = 0;
  float B = 0;
  float mf0[] = {60.1, 90.9, 140.5, 189.6};
  float mf1[] = {117.2, 167, 213.9, 263.7};
  float mf2[] = {192.9, 244.3, 297.1, 343.5};

```

```

float mf3[] = {269.9, 315.4, 369.2, 419.5};
float mf4[] = {349.9, 399.2, 444, 494.2};
float mf5[] = {422.4, 475, 522.1, 552.9};
float minr[6];
float Rule[6];
float output[] = {0.9982, 6.574, 12, 18, 23.44, 29};
minr[0] = 0;minr[1] = 0;minr[2] = 0;minr[3] = 0;minr[4] = 0;minr[5] = 0;
Rule[0] = 0;Rule[1] = 0;Rule[2] = 0;Rule[3] = 0;Rule[4] = 0;Rule[5] = 0;
if(input > mf0[0] && input < mf0[3]){
    Rule[0] = 0.9982;
    if(input < mf0[2]){minr[0] = 1;}
    else if(input > mf0[2] && input < mf0[3]){
        minr[0] = (-0.0204*input) + 3.8615;
    }
    else{minr[0] = 0;}
}
if(input > mf1[0] && input < mf1[3]){
    Rule[1] = 6.574;
    if(input>mf1[0]&&input<mf1[1]){
        minr[1] = (0.0201*input) - 2.3534;
    }else if(input > mf1[1] && input < mf1[2]){
        minr[1] = 1;
    }else if(input > mf1[2]&&input < mf1[3]){
        minr[1] = (-0.0201*input) + 5.2952;
    }
}
if(input > mf2[0] && input < mf2[3]){
    Rule[2] = 12;
    if(input>mf2[0]&&input<mf2[1]){
        minr[2] = (0.0195*input) - 3.7529;
    }
}

```

```

}else if(input > mf2[1] && input < mf2[2]){
    minr[2] = 1;
}else if(input > mf2[2]&&input < mf2[3]){
    minr[2] = (-0.0216*input) + 7.403;
}
}
if(input > mf3[0] && input < mf3[3]){
    Rule[3] = 18;
    if(input>mf3[0]&&input<mf3[1]){
        minr[3] = (0.022*input) - 5.9319;
    }else if(input > mf3[1] && input < mf3[2]){
        minr[3] = 1;
    }else if(input > mf3[2]&&input < mf3[3]){
        minr[3] = (-0.0199*input) + 8.34;
    }
}
if(input > mf4[0] && input < mf4[3]){
    Rule[4] = 23.44;
    if(input>mf4[0]&&input<mf4[1]){
        minr[4] = (0.0203*input) - 7.0974;
    }else if(input > mf4[1] && input < mf4[2]){
        minr[4] = 1;
    }else if(input > mf4[2]&&input < mf4[3]){
        minr[4] = (-0.0199*input) + 9.8446;
    }
}
if(input > mf5[0] && input < mf5[3]){
    Rule[5] = 29;
    if(input>mf5[0]&&input<mf5[1]){
        minr[5] = (0.019*input) - 8.0304;
    }else if(input > mf5[1] && input < mf5[2]){

```

```

    minr[5] = 1;
} else if (input > mf5[2] && input < mf5[3]) {
    minr[5] = (-0.0325 * input) + 17.951;
}
}
A =
(Rule[0] * minr[0]) + (Rule[1] * minr[1]) + (Rule[2] * minr[2]) + (Rule[3] * minr[3]) + (Rule[4] * minr[4])
+ (Rule[5] * minr[5]);
B = minr[0] + minr[1] + minr[2] + minr[3] + minr[4] + minr[5];
X_Value = A / B;
PoBall = X_Value;
}

```

10) โปรแกรมอาศัยโนควบคุมแกนวาย ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน

```

#include <AccelStepper.h>
#include <Encoder.h>
#define dirPin_X 9
#define stepPin_X 8
int FX = 0.5; int GX = 4.325;
const long SERIAL_REFRESH_TIME = 100;
long refresh_time;
double SetpointX = 270;
double Kd = 0.7;
double lambda = 0.98;
double prevErrorX = 0;
double prevSignX = 0;
double outputX = 0;
double PoBall = 0;
double deltaSignX = 0;
double PrePoBall = 0;
double PreErrorX = 0;

```



```

int ESmer = 6;
int Buzzer = 5;
int X_Value = 0;
int Y_Value = 0;
int X_Newro = 0;
int Y_Newro = 0;
long AnglePos = 0;
Encoder myEnc(2, 3);
AccelStepper stepper1(AccelStepper::DRIVER, stepPin_X, dirPin_X);
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  stepper1.setMaxSpeed(6000.0);
  stepper1.setAcceleration(12000.0);
  pinMode(ESmer,INPUT_PULLUP);
  pinMode(Buzzer,OUTPUT);
  digitalWrite(Buzzer,HIGH);
}
long oldPosition = -999;
void loop() {
  Python_Read();
  int Esme = digitalRead(ESmer);
  if(Esme){
    if (millis() > refresh_time) {
      double deltaError = (PoBall-PrePoBall)/0.1;
      double ErrorX = SetpointX - PoBall;
      double ErrorX_dot = ErrorX - PreErrorX;
      double Suface = lambda*ErrorX+ErrorX_dot;
      double signX = (Suface > 0) ? 1 : ((Suface < 0) ? -1 : 0);
      double Swith = Kd*Suface;
      double Eq = -((lambda*deltaError+FX)/GX);
      double Uout = Swith+Eq;
    }
  }
}

```

```
    AnglePos = Uout;
    PrePoBall = PoBall;
    PreErrorX = ErrorX;
    refresh_time = millis() + SERIAL_REFRESH_TIME;
  }
}
else{
  AnglePos = 0;
}
long newPos = myEnc.read();
long Encod = newPos*1.125;
double ErrorPos = Encod - AnglePos;
stepper1.move(ErrorPos);
stepper1.run();
}
void Python_Read(){
  if (Serial.available() >= 2) {
    int x_pos = Serial.parseInt();
    int y_pos = Serial.parseInt();
    X_Newro = x_pos;
    Y_Newro = y_pos;
  }
  Neuro_Fuzzy();
}
void Neuro_Fuzzy(){
  float input = Y_Newro;
  float A = 0;
  float B = 0;
  float mf0[] = {-3.18, 27.78, 84.63, 129.2};
  float mf1[] = {56.7, 101.8, 150.6, 202.1};
  float mf2[] = {134.8, 187.5, 234.8, 279.9};
```

```

float mf3[] = {207.2, 252.7, 307.3, 359.6};
float mf4[] = {286.9, 336.3, 382.5, 433.6};
float mf5[] = {362.5, 414.8, 461.2, 492.2};
float minr[6];
float Rule[6];
float output[] = {29, 23, 18, 12, 6.386, 0.9957};
minr[0] = 0;minr[1] = 0;minr[2] = 0;minr[3] = 0;minr[4] = 0;minr[5] = 0;
Rule[0] = 0;Rule[1] = 0;Rule[2] = 0;Rule[3] = 0;Rule[4] = 0;Rule[5] = 0;
if(input > mf0[0] && input < mf0[3]){
    Rule[0] = output[0];
    if(input < mf0[2]){minr[0] = 1;}
    else if(input > mf0[2] && input < mf0[3]){
        minr[0] = (-0.0224*input) + 2.8988;
    }
    else{minr[0] = 0;}
}
if(input > mf1[0] && input < mf1[3]){
    Rule[1] = output[1];
    if(input>mf1[0]&&input<mf1[1]){
        minr[1] = (0.0222*input) - 1.2572;
    }else if(input > mf1[1] && input < mf1[2]){
        minr[1] = 1;
    }else if(input > mf1[2]&&input < mf1[3]){
        minr[1] = (-0.0194*input) + 3.9243;
    }
}
if(input > mf2[0] && input < mf2[3]){
    Rule[2] = output[2];
    if(input>mf2[0]&&input<mf2[1]){
        minr[2] = (0.019*input) - 2.5579;
    }else if(input > mf2[1] && input < mf2[2]){

```

```

    minr[2] = 1;
}else if(input > mf2[2]&&input < mf2[3]){
    minr[2] = (-0.0222*input) + 6.2062;
}
}
if(input > mf3[0] && input < mf3[3]){
    Rule[3] = output[3];
if(input>mf3[0]&&input<mf3[1]){
    minr[3] = (0.0222*input) - 4.5778;
}else if(input > mf3[1] && input < mf3[2]){
    minr[3] = 1;
}else if(input > mf3[2]&&input < mf3[3]){
    minr[3] = (-0.0192*input) + 6.8846;
}
}
if(input > mf4[0] && input < mf4[3]){
    Rule[4] = output[4];
if(input>mf4[0]&&input<mf4[1]){
    minr[4] = (0.0202*input) - 5.8077;
}else if(input > mf4[1] && input < mf4[2]){
    minr[4] = 1;
}else if(input > mf4[2]&&input < mf4[3]){
    minr[4] = (-0.0196*input) + 8.4853;
}
}
if(input > mf5[0] && input < mf5[3]){
    Rule[5] = output[5];
if(input>mf5[0]&&input<mf5[1]){
    minr[5] = (0.0191*input) - 6.9312;
}else if(input > mf5[1] && input < mf5[2]){
    minr[5] = 1;
}
}

```

```

}else if(input > mf5[2]&&input < mf5[3]){
    minr[5] = (-0.0323*input) + 15.877;
}
}
A =
(Rule[0]*minr[0])+(Rule[1]*minr[1])+(Rule[2]*minr[2])+(Rule[3]*minr[3])+(Rule[4]*minr[4]
)+(Rule[5]*minr[5]);
B = minr[0]+minr[1]+minr[2]+minr[3]+minr[4]+minr[5];
Y_Value = A/B;
PoBall = Y_Value;
}

```

11) โปรแกรมอาศัยโน้ตควบคุมแกนเอกซ์ ตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ

```

#include <Encoder.h>
#include <AccelStepper.h>
#include <Fuzzy.h>
// Fuzzy
Fuzzy *fuzzy = new Fuzzy();
// FuzzyInput
FuzzySet *erNL = new FuzzySet(-40, -30, -30, -20);
FuzzySet *erNM = new FuzzySet(-30, -20, -20, -10);
FuzzySet *erNS = new FuzzySet(-20, -10, -10, 0);
FuzzySet *erZR = new FuzzySet(-10, 0, 0, 10);
FuzzySet *erPS = new FuzzySet(0, 10, 10, 20);
FuzzySet *erPM = new FuzzySet(10, 20, 20, 30);
FuzzySet *erPL = new FuzzySet(20, 30, 30, 40);
FuzzySet *edNL = new FuzzySet(-82.67, -62, -62, -41.33);
FuzzySet *edNM = new FuzzySet(-62, -41.33, -41.33, -20.67);
FuzzySet *edNS = new FuzzySet(-41.33, -20.67, -20.67, 0);
FuzzySet *edZR = new FuzzySet(-20.67, 0, 0, 20.67);
FuzzySet *edPS = new FuzzySet(0, 20.67, 20.67, 41.33);

```

```

FuzzySet *edPM = new FuzzySet(20.67, 41.33, 41.33, 62);
FuzzySet *edPL = new FuzzySet(41.33, 62, 62, 82.67);
// FuzzyOutput
//FuzzySet *opNL = new FuzzySet(-1.333, -1, -1, -0.6667);
//FuzzySet *opNM = new FuzzySet(-1, -0.6667, -0.6667, -0.3333);
//FuzzySet *opNS = new FuzzySet(-0.6667, -0.3333, -0.3333, 0);
//FuzzySet *opZR = new FuzzySet(-0.3333, 0, 0, 0.3333);
//FuzzySet *opPS = new FuzzySet(0, 0.3333, 0.3333, 0.6667);
//FuzzySet *opPM = new FuzzySet(0.3333, 0.667, 0.667, 1);
//FuzzySet *opPL = new FuzzySet(0.6667, 1, 1, 1.333);
FuzzySet *opNL = new FuzzySet(-933.3 , -700, -700, -466.7);
FuzzySet *opNM = new FuzzySet(-700, -466.7, -466.7, -233.3);
FuzzySet *opNS = new FuzzySet(-466.7, -233.3, -233.3, 0);
FuzzySet *opZR = new FuzzySet(-233.3, 0, 0, 233.3);
FuzzySet *opPS = new FuzzySet(0, 233.3, 233.3, 466.7);
FuzzySet *opPM = new FuzzySet(233.3, 466.7, 466.7, 700);
FuzzySet *opPL = new FuzzySet(466.7, 700, 700, 933.3);
float previous_input1;
const long SERIAL_REFRESH_TIME = 100;
long refresh_time;
double eSetpoint, Input, Output;
#define dirPin_X 9
#define stepPin_X 8
int X_Value = 0;
int Y_Value = 0;
int X_Newro = 0;
int Y_Newro = 0;

float Errors = 0;
float Angle = 0;

```

```
float PoBall = 0;
int ESmer = 6;
int Buzzer = 5;
Encoder myEnc(2, 3);
AccelStepper stepper1(AccelStepper::DRIVER, stepPin_X, dirPin_X);
void setup () {
  Serial.begin(115200);
  // FuzzyInput
  FuzzyInput *errorSim = new FuzzyInput(1);
  errorSim->addFuzzySet(erNL);
  errorSim->addFuzzySet(erNM);
  errorSim->addFuzzySet(erNS);
  errorSim->addFuzzySet(erZR);
  errorSim->addFuzzySet(erPS);
  errorSim->addFuzzySet(erPM);
  errorSim->addFuzzySet(erPL);
  fuzzy->addFuzzyInput(errorSim);
  // FuzzyInput
  FuzzyInput *errorDot = new FuzzyInput(2);

  errorDot->addFuzzySet(edNL);
  errorDot->addFuzzySet(edNM);
  errorDot->addFuzzySet(edNS);
  errorDot->addFuzzySet(edZR);
  errorDot->addFuzzySet(edPS);
  errorDot->addFuzzySet(edPM);
  errorDot->addFuzzySet(edPL);
  fuzzy->addFuzzyInput(errorDot);
  // FuzzyOutput
  FuzzyOutput *outputFS = new FuzzyOutput(1);
  outputFS->addFuzzySet(opNL);
```

```
outputFS->addFuzzySet(opNM);
outputFS->addFuzzySet(opNS);
outputFS->addFuzzySet(opZR);
outputFS->addFuzzySet(opPS);
outputFS->addFuzzySet(opPM);
outputFS->addFuzzySet(opPL);
fuzzy->addFuzzyOutput(outputFS);
FuzzyRuleConsequent *theopNL = new FuzzyRuleConsequent();
theopNL->addOutput(opNL);
FuzzyRuleConsequent *theopNM = new FuzzyRuleConsequent();
theopNM->addOutput(opNM);
FuzzyRuleConsequent *theopNS = new FuzzyRuleConsequent();
theopNS->addOutput(opNS);
FuzzyRuleConsequent *theopZR = new FuzzyRuleConsequent();
theopZR->addOutput(opZR);
FuzzyRuleConsequent *theopPS = new FuzzyRuleConsequent();
theopPS->addOutput(opPS);
FuzzyRuleConsequent *theopPM = new FuzzyRuleConsequent();
theopPM->addOutput(opPM);
FuzzyRuleConsequent *theopPL = new FuzzyRuleConsequent();
theopPL->addOutput(opPL);
FuzzyRuleAntecedent *iferNL_and_edNL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNL_and_edNL->joinWithAND(erNL, edNL);
FuzzyRule *fuzzyRule01 = new FuzzyRule(1,iferNL_and_edNL,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule01);
FuzzyRuleAntecedent *iferNL_and_edNM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNL_and_edNM->joinWithAND(erNL, edNM);
FuzzyRule *fuzzyRule02 = new FuzzyRule(2,iferNL_and_edNM,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule02);
FuzzyRuleAntecedent *iferNL_and_edNS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNL_and_edNS->joinWithAND(erNL, edNS);
```



```
FuzzyRule *fuzzyRule03 = new FuzzyRule(3,iferNL_and_edNS,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule03);
FuzzyRuleAntecedent *iferNL_and_edZR= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNL_and_edZR->joinWithAND(erNL, edZR);
FuzzyRule *fuzzyRule04 = new FuzzyRule(4,iferNL_and_edZR,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule04);
FuzzyRuleAntecedent *iferNL_and_edPS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNL_and_edPS->joinWithAND(erNL, edPS);
FuzzyRule *fuzzyRule05 = new FuzzyRule(5,iferNL_and_edPS,theopNM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule05);
FuzzyRuleAntecedent *iferNL_and_edPM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNL_and_edPM->joinWithAND(erNL, edPM);
FuzzyRule *fuzzyRule06 = new FuzzyRule(6,iferNL_and_edPM,theopNS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule06);
FuzzyRuleAntecedent *iferNL_and_edPL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNL_and_edPL->joinWithAND(erNL, edPL);
FuzzyRule *fuzzyRule07 = new FuzzyRule(7,iferNL_and_edPL,theopZR);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule07);
FuzzyRuleAntecedent *iferNM_and_edNL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNM_and_edNL->joinWithAND(erNM, edNL);
FuzzyRule *fuzzyRule08 = new FuzzyRule(8,iferNM_and_edNL,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule08);
FuzzyRuleAntecedent *iferNM_and_edNM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNM_and_edNM->joinWithAND(erNM, edNM);
FuzzyRule *fuzzyRule09 = new FuzzyRule(9,iferNM_and_edNM,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule09);
FuzzyRuleAntecedent *iferNM_and_edNS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNM_and_edNS->joinWithAND(erNM, edNS);
FuzzyRule *fuzzyRule10 = new FuzzyRule(10,iferNM_and_edNS,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule10);
FuzzyRuleAntecedent *iferNM_and_edZR= new FuzzyRuleAntecedent();
```

```
iferNM_and_edZR->joinWithAND(erNM, edZR);
FuzzyRule *fuzzyRule11 = new FuzzyRule(11,iferNM_and_edZR,theopNM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule11);
FuzzyRuleAntecedent *iferNM_and_edPS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNM_and_edPS->joinWithAND(erNM, edPS);
FuzzyRule *fuzzyRule12 = new FuzzyRule(12,iferNM_and_edPS,theopNS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule12);
FuzzyRuleAntecedent *iferNM_and_edPM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNM_and_edPM->joinWithAND(erNM, edPM);
FuzzyRule *fuzzyRule13 = new FuzzyRule(13,iferNM_and_edPM,theopZR);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule13);
FuzzyRuleAntecedent *iferNM_and_edPL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNM_and_edPL->joinWithAND(erNM, edPL);
FuzzyRule *fuzzyRule14 = new FuzzyRule(14,iferNM_and_edPL,theopPS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule14);
FuzzyRuleAntecedent *ifeNS_and_edNL= new FuzzyRuleAntecedent();
ifeNS_and_edNL->joinWithAND(erNS, edNL);
FuzzyRule *fuzzyRule15 = new FuzzyRule(15,ifeNS_and_edNL,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule15);
FuzzyRuleAntecedent *iferNS_and_edNM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNS_and_edNM->joinWithAND(erNS, edNM);
FuzzyRule *fuzzyRule16 = new FuzzyRule(16,iferNS_and_edNM,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule16);
FuzzyRuleAntecedent *iferNS_and_edNS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNS_and_edNS->joinWithAND(erNS, edNS);
FuzzyRule *fuzzyRule17 = new FuzzyRule(17,iferNS_and_edNS,theopNM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule17);
FuzzyRuleAntecedent *iferNS_and_edZR= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNS_and_edZR->joinWithAND(erNS, edZR);
FuzzyRule *fuzzyRule18 = new FuzzyRule(18,iferNS_and_edZR,theopNS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule18);
```

```
FuzzyRuleAntecedent *iferNS_and_edPS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNS_and_edPS->joinWithAND(erNS, edPS);
FuzzyRule *fuzzyRule19 = new FuzzyRule(19,iferNS_and_edPS,theopZR);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule19);
FuzzyRuleAntecedent *iferNS_and_edPM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNS_and_edPM->joinWithAND(erNS, edPM);
FuzzyRule *fuzzyRule20 = new FuzzyRule(20,iferNS_and_edPM,theopPS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule20);
FuzzyRuleAntecedent *iferNS_and_edPL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNS_and_edPL->joinWithAND(erNS, edPL);
FuzzyRule *fuzzyRule21 = new FuzzyRule(21,iferNS_and_edPL,theopPM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule21);
FuzzyRuleAntecedent *iferZR_and_edNL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferZR_and_edNL->joinWithAND(erZR, edNL);
FuzzyRule *fuzzyRule22 = new FuzzyRule(22,iferZR_and_edNL,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule22);
FuzzyRuleAntecedent *iferZR_and_edNM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferZR_and_edNM->joinWithAND(erZR, edNM);
FuzzyRule *fuzzyRule23 = new FuzzyRule(23,iferZR_and_edNM,theopNM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule23);
FuzzyRuleAntecedent *iferZR_and_edNS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferZR_and_edNS->joinWithAND(erZR, edNS);
FuzzyRule *fuzzyRule24 = new FuzzyRule(24,iferZR_and_edNS,theopNS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule24);
FuzzyRuleAntecedent *iferZR_and_edZR= new FuzzyRuleAntecedent();
iferZR_and_edZR->joinWithAND(erZR, edZR);
FuzzyRule *fuzzyRule25 = new FuzzyRule(25,iferZR_and_edZR,theopZR);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule25);
FuzzyRuleAntecedent *iferZR_and_edPS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferZR_and_edPS->joinWithAND(erZR, edPS);
FuzzyRule *fuzzyRule26 = new FuzzyRule(26,iferZR_and_edPS,theopPS);
```

```
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule26);
FuzzyRuleAntecedent *iferZR_and_edPM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferZR_and_edPM->joinWithAND(erZR, edPM);
FuzzyRule *fuzzyRule27 = new FuzzyRule(27,iferZR_and_edPM,theopPM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule27);
FuzzyRuleAntecedent *iferZR_and_edPL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferZR_and_edPL->joinWithAND(erZR, edPL);
FuzzyRule *fuzzyRule28 = new FuzzyRule(28,iferZR_and_edPL,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule28);
FuzzyRuleAntecedent *iferPS_and_edNL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPS_and_edNL->joinWithAND(erPS, edNL);
FuzzyRule *fuzzyRule29 = new FuzzyRule(29,iferPS_and_edNL,theopNM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule29);
FuzzyRuleAntecedent *iferPS_and_edNM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPS_and_edNM->joinWithAND(erPS, edNM);
FuzzyRule *fuzzyRule30 = new FuzzyRule(30,iferPS_and_edNM,theopNS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule30);
FuzzyRuleAntecedent *iferPS_and_edNS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPS_and_edNS->joinWithAND(erPS, edNS);
FuzzyRule *fuzzyRule31 = new FuzzyRule(31,iferPS_and_edNS,theopZR);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule31);
FuzzyRuleAntecedent *iferPS_and_edZR= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPS_and_edZR->joinWithAND(erPS, edZR);
FuzzyRule *fuzzyRule32 = new FuzzyRule(32,iferPS_and_edZR,theopPS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule32);
FuzzyRuleAntecedent *iferPS_and_edPS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPS_and_edPS->joinWithAND(erPS, edPS);
FuzzyRule *fuzzyRule33 = new FuzzyRule(33,iferPS_and_edPS,theopPM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule33);
FuzzyRuleAntecedent *iferPS_and_edPM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPS_and_edPM->joinWithAND(erPS, edPM);
```

```

FuzzyRule *fuzzyRule34 = new FuzzyRule(34,iferPS_and_edPM,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule34);
FuzzyRuleAntecedent *iferPS_and_edPL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPS_and_edPL->joinWithAND(erPS, edPL);
FuzzyRule *fuzzyRule35 = new FuzzyRule(35,iferPS_and_edPL,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule35);
FuzzyRuleAntecedent *iferPM_and_edNL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPM_and_edNL->joinWithAND(erPM, edNL);
FuzzyRule *fuzzyRule36 = new FuzzyRule(36,iferPM_and_edNL,theopNS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule36);
FuzzyRuleAntecedent *iferPM_and_edNM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPM_and_edNM->joinWithAND(erPM, edNM);
FuzzyRule *fuzzyRule37 = new FuzzyRule(37,iferPM_and_edNM,theopZR);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule37);
FuzzyRuleAntecedent *iferPM_and_edNS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPM_and_edNS->joinWithAND(erPM, edNS);
FuzzyRule *fuzzyRule38 = new FuzzyRule(38,iferPM_and_edNS,theopPS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule38);
FuzzyRuleAntecedent *iferPM_and_edZR= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPM_and_edZR->joinWithAND(erPM, edZR);
FuzzyRule *fuzzyRule39 = new FuzzyRule(39,iferPM_and_edZR,theopPM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule39);
FuzzyRuleAntecedent *iferPM_and_edPS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPM_and_edPS->joinWithAND(erPM, edPS);
FuzzyRule *fuzzyRule40 = new FuzzyRule(40,iferPM_and_edPS,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule40);
FuzzyRuleAntecedent *iferPM_and_edPM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPM_and_edPM->joinWithAND(erPM, edPM);
FuzzyRule *fuzzyRule41 = new FuzzyRule(41,iferPM_and_edPM,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule41);
FuzzyRuleAntecedent *iferPM_and_edPL= new FuzzyRuleAntecedent();

```

```
iferPM_and_edPL->joinWithAND(erPL, edPL);
FuzzyRule *fuzzyRule42 = new FuzzyRule(42,iferPM_and_edPL,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule42);
FuzzyRuleAntecedent *iferPL_and_edNL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPL_and_edNL->joinWithAND(erPL, edNL);
FuzzyRule *fuzzyRule43 = new FuzzyRule(43,iferPL_and_edNL,theopZR);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule43);
FuzzyRuleAntecedent *iferPL_and_edNM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPL_and_edNM->joinWithAND(erPL, edNM);
FuzzyRule *fuzzyRule44 = new FuzzyRule(44,iferPL_and_edNM,theopPS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule44);
FuzzyRuleAntecedent *iferPL_and_edNS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPL_and_edNS->joinWithAND(erPL, edNS);
FuzzyRule *fuzzyRule45 = new FuzzyRule(45,iferPL_and_edNS,theopPM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule45);
FuzzyRuleAntecedent *iferPL_and_edZR= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPL_and_edZR->joinWithAND(erPL, edZR);
FuzzyRule *fuzzyRule46 = new FuzzyRule(46,iferPL_and_edZR,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule46);
FuzzyRuleAntecedent *iferPL_and_edPS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPL_and_edPS->joinWithAND(erPL, edPS);
FuzzyRule *fuzzyRule47 = new FuzzyRule(47,iferPL_and_edPS,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule47);
FuzzyRuleAntecedent *iferPL_and_edPM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPL_and_edPM->joinWithAND(erPL, edPM);
FuzzyRule *fuzzyRule48 = new FuzzyRule(48,iferPL_and_edPM,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule48);
FuzzyRuleAntecedent *iferPL_and_edPL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPL_and_edPL->joinWithAND(erPL, edPL);
FuzzyRule *fuzzyRule49 = new FuzzyRule(49,iferPL_and_edPL,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule49);
```

```

stepper1.setMaxSpeed(6000.0);
stepper1.setAcceleration(12000.0);
pinMode(ESmer,INPUT_PULLUP);
pinMode(12,OUTPUT);
digitalWrite(12,HIGH);
eSetpoint = 3;
}
long oldPosition = -999;
void loop () {
  Python_Read();
  int Esme = digitalRead(ESmer);
  if(Esme){
    if (millis() > refresh_time)
    {
      float input1 = eSetpoint-PoBall;
      float input2 = (input1-previous_input1)/0.1;

      fuzzy->setInput(1, input1);
      fuzzy->setInput(2, input2);
      fuzzy->fuzzify();
      float output = fuzzy->defuzzify(1);
      Output = output;
      refresh_time = millis() + SERIAL_REFRESH_TIME;
      previous_input1 = input1;
    }

    Input = PoBall;
    Angle = Output*-1;
  }
  else{
    Angle = 0;
  }
}

```

```

}
long newPos = myEnc.read();
//long Encod = newPos*0.1125;
long Encod = newPos*1.125;
Errors = Encod - Angle;
stepper1.move(Errors);
stepper1.run();
}
void Python_Read(){
  if (Serial.available() >= 2) {
    int x_pos = Serial.parseInt();
    int y_pos = Serial.parseInt();
    X_Newro = x_pos;
    Y_Newro = y_pos;
  }
  Neuro_Fuzzy();
}
void Neuro_Fuzzy(){
  float input = X_Newro;
  float A = 0;
  float B = 0;
  float mf0[] = {60.1, 90.9, 140.5, 189.6};
  float mf1[] = {117.2, 167, 213.9, 263.7};
  float mf2[] = {192.9, 244.3, 297.1, 343.5};
  float mf3[] = {269.9, 315.4, 369.2, 419.5};
  float mf4[] = {349.9, 399.2, 444, 494.2};
  float mf5[] = {422.4, 475, 522.1, 552.9};
  float minr[6];
  float Rule[6];
  float output[] = {0.9982, 6.574, 12, 18, 23.44 , 29};
  minr[0] = 0;minr[1] = 0;minr[2] = 0;minr[3] = 0;minr[4] = 0;minr[5] = 0;

```



```

Rule[0] = 0;Rule[1] = 0;Rule[2] = 0;Rule[3] = 0;Rule[4] = 0;Rule[5] = 0;
if(input > mf0[0] && input < mf0[3]){
    Rule[0] = 0.9982;
    if(input < mf0[2]){minr[0] = 1;}
    else if(input > mf0[2] && input < mf0[3]){
        minr[0] = (-0.0204*input) + 3.8615;
    }
    else{minr[0] = 0;}
}
if(input > mf1[0] && input < mf1[3]){
    Rule[1] = 6.574;
    if(input>mf1[0]&&input<mf1[1]){
        minr[1] = (0.0201*input) - 2.3534;
    }else if(input > mf1[1] && input < mf1[2]){
        minr[1] = 1;
    }else if(input > mf1[2]&&input < mf1[3]){
        minr[1] = (-0.0201*input) + 5.2952;
    }
}
if(input > mf2[0] && input < mf2[3]){
    Rule[2] = 12;
    if(input>mf2[0]&&input<mf2[1]){
        minr[2] = (0.0195*input) - 3.7529;
    }else if(input > mf2[1] && input < mf2[2]){
        minr[2] = 1;
    }else if(input > mf2[2]&&input < mf2[3]){
        minr[2] = (-0.0216*input) + 7.403;
    }
}
if(input > mf3[0] && input < mf3[3]){
    Rule[3] = 18;

```

```

if(input>mf3[0]&&input<mf3[1]){
    minr[3] = (0.022*input) - 5.9319;
}else if(input > mf3[1] && input < mf3[2]){
    minr[3] = 1;
}else if(input > mf3[2]&&input < mf3[3]){
    minr[3] = (-0.0199*input) + 8.34;
}
}
if(input > mf4[0] && input < mf4[3]){
    Rule[4] = 23.44;
if(input>mf4[0]&&input<mf4[1]){
    minr[4] = (0.0203*input) - 7.0974;
}else if(input > mf4[1] && input < mf4[2]){
    minr[4] = 1;
}else if(input > mf4[2]&&input < mf4[3]){
    minr[4] = (-0.0199*input) + 9.8446;
}
}
if(input > mf5[0] && input < mf5[3]){
    Rule[5] = 29;
if(input>mf5[0]&&input<mf5[1]){
    minr[5] = (0.019*input) - 8.0304;
}else if(input > mf5[1] && input < mf5[2]){
    minr[5] = 1;
}else if(input > mf5[2]&&input < mf5[3]){
    minr[5] = (-0.0325*input) + 17.951;
}
}
A =
(Rule[0]*minr[0])+(Rule[1]*minr[1])+(Rule[2]*minr[2])+(Rule[3]*minr[3])+(Rule[4]*minr[4]
)+(Rule[5]*minr[5]);

```

```

    B = minr[0]+minr[1]+minr[2]+minr[3]+minr[4]+minr[5];
    X_Value = A/B;
    PoBall = X_Value;
}

```

12) โปรแกรมอาศัยโน้ตควบคุมแกนวาย ตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ

```

#include <AccelStepper.h>
#include <Encoder.h>
double eSetpoint, Input, Output;
double error,proportional,integral,derivative,previous_error;
double dt = 0.1;
double Kp=4.75, Ki=0, Kd=0;
#define dirPin_X 9
#define stepPin_X 8
int X_Value = 0;
int Y_Value = 0;
int X_Newro = 0;
int Y_Newro = 0;
float Errors = 0;
float Angle = 0;
float PoBall = 0;
int ESmer = 6;
int Buzzer = 12;
const long SERIAL_REFRESH_TIME = 100;
long refresh_time;
Encoder myEnc(2, 3);
AccelStepper stepper1(AccelStepper::DRIVER, stepPin_X, dirPin_X);
void setup () {
    Serial.begin(115200);
    eSetpoint = 15;
    stepper1.setMaxSpeed(6000.0);
}

```

```

stepper1.setAcceleration(12000.0);
pinMode(ESmer,INPUT_PULLUP);
pinMode(Buzzer,OUTPUT);
digitalWrite(Buzzer,HIGH);
}
long oldPosition = -999;
void loop () {
  Python_Read();
  int Esme = digitalRead(ESmer);
  if(Esme){
    digitalWrite(Buzzer,HIGH);
    if (millis() > refresh_time) {
      Input = PoBall;
      error = eSetpoint - Input;
      proportional = error;
      integral = (integral + error)*dt;
      derivative = (error-previous_error)/dt;
      Output = (Kp*proportional)+(Ki*integral)+(Kd*derivative);
      previous_error = error;
      refresh_time = millis() + SERIAL_REFRESH_TIME;
    }
    Angle = Output*-1;
  }
  else{
    digitalWrite(Buzzer,LOW);
    Angle = 0;
  }
  long newPos = myEnc.read();
  //long Encod = newPos*0.1125;
  long Encod = newPos*1.125;
  Errors = Encod - Angle;
}

```

```

stepper1.move(Errors);
stepper1.run();
}
void Python_Read(){
  if (Serial.available() >= 2) {
    int x_pos = Serial.parseInt();
    int y_pos = Serial.parseInt();
    X_Newro = x_pos;
    Y_Newro = y_pos;
  }
  Neuro_Fuzzy();
}
void Neuro_Fuzzy(){
  float intput = Y_Newro;
  float A = 0;
  float B = 0;
  float mf0[] = {-3.18, 27.78, 84.63, 129.2};
  float mf1[] = {56.7, 101.8, 150.6, 202.1};
  float mf2[] = {134.8, 187.5, 234.8, 279.9};
  float mf3[] = {207.2, 252.7, 307.3, 359.6};
  float mf4[] = {286.9, 336.3, 382.5, 433.6};
  float mf5[] = {362.5, 414.8, 461.2, 492.2};
  float minr[6];
  float Rule[6];
  float output[] = {29, 23, 18, 12, 6.386, 0.9957};
  minr[0] = 0;minr[1] = 0;minr[2] = 0;minr[3] = 0;minr[4] = 0;minr[5] = 0;
  Rule[0] = 0;Rule[1] = 0;Rule[2] = 0;Rule[3] = 0;Rule[4] = 0;Rule[5] = 0;
  if(intput > mf0[0] && intput < mf0[3]){
    Rule[0] = output[0];
    if(intput < mf0[2]){minr[0] = 1;}
    else if(intput > mf0[2] && intput < mf0[3]){

```

```
    minr[0] = (-0.0224*input) + 2.8988;
}
else{minr[0] = 0;}

}
if(input > mf1[0] && input < mf1[3]){
    Rule[1] = output[1];
    if(input>mf1[0]&&input<mf1[1]){
        minr[1] = (0.0222*input) - 1.2572;
    }else if(input > mf1[1] && input < mf1[2]){
        minr[1] = 1;
    }else if(input > mf1[2]&&input < mf1[3]){
        minr[1] = (-0.0194*input) + 3.9243;
    }
}
if(input > mf2[0] && input < mf2[3]){
    Rule[2] = output[2];
    if(input>mf2[0]&&input<mf2[1]){
        minr[2] = (0.019*input) - 2.5579;
    }else if(input > mf2[1] && input < mf2[2]){
        minr[2] = 1;
    }else if(input > mf2[2]&&input < mf2[3]){
        minr[2] = (-0.0222*input) + 6.2062;
    }
}
if(input > mf3[0] && input < mf3[3]){
    Rule[3] = output[3];
    if(input>mf3[0]&&input<mf3[1]){
        minr[3] = (0.0222*input) - 4.5778;
    }else if(input > mf3[1] && input < mf3[2]){
        minr[3] = 1;
    }
}
```

```

}else if(input > mf3[2]&&input < mf3[3]){
    minr[3] = (-0.0192*input) + 6.8846;
}
}
if(input > mf4[0] && input < mf4[3]){
    Rule[4] = output[4];
    if(input>mf4[0]&&input<mf4[1]){
        minr[4] = (0.0202*input) - 5.8077;
    }else if(input > mf4[1] && input < mf4[2]){
        minr[4] = 1;
    }else if(input > mf4[2]&&input < mf4[3]){
        minr[4] = (-0.0196*input) + 8.4853;
    }
}
if(input > mf5[0] && input < mf5[3]){
    Rule[5] = output[5];
    if(input>mf5[0]&&input<mf5[1]){
        minr[5] = (0.0191*input) - 6.9312;
    }else if(input > mf5[1] && input < mf5[2]){
        minr[5] = 1;
    }else if(input > mf5[2]&&input < mf5[3]){
        minr[5] = (-0.0323*input) + 15.877;
    }
}
}
A =
(Rule[0]*minr[0])+(Rule[1]*minr[1])+(Rule[2]*minr[2])+(Rule[3]*minr[3])+(Rule[4]*minr[4]
)+(Rule[5]*minr[5]);
B = minr[0]+minr[1]+minr[2]+minr[3]+minr[4]+minr[5];

Y_Value = A/B;
PoBall = Y_Value;

```

}

13) โปรแกรมอาศัยโนควบคุมแกนเอกซ์ ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ปรับจูนค่าด้วย ตรรกศาสตร์คลุมเครือ

```

#include <Encoder.h>
#include <AccelStepper.h>
#include <PID_v1_bc.h>
#include <Fuzzy.h>

// Fuzzy
Fuzzy *fuzzy = new Fuzzy();

// FuzzyInput
FuzzySet *erNL = new FuzzySet(-40, -30, -30, -20);
FuzzySet *erNM = new FuzzySet(-30, -20, -20, -10);
FuzzySet *erNS = new FuzzySet(-20, -10, -10, 0);
FuzzySet *erZR = new FuzzySet(-10, 0, 0, 10);
FuzzySet *erPS = new FuzzySet(0, 10, 10, 20);
FuzzySet *erPM = new FuzzySet(10, 20, 20, 30);
FuzzySet *erPL = new FuzzySet(20, 30, 30, 40);
FuzzySet *edNL = new FuzzySet(-20, -15, -15, -10);
FuzzySet *edNM = new FuzzySet(-15, -10, -10, -5);
FuzzySet *edNS = new FuzzySet(-10, -5, -5, 0);
FuzzySet *edZR = new FuzzySet(-5, 0, 0, 5);
FuzzySet *edPS = new FuzzySet(0, 5, 5, 10);
FuzzySet *edPM = new FuzzySet(5, 10, 10, 10);
FuzzySet *edPL = new FuzzySet(10, 15, 15, 20);

// FuzzyOutput
//FuzzySet *opNL = new FuzzySet(-1.333, -1, -1, -0.6667);
//FuzzySet *opNM = new FuzzySet(-1, -0.6667, -0.6667, -0.3333);
//FuzzySet *opNS = new FuzzySet(-0.6667, -0.3333, -0.3333, 0);

```



```
//FuzzySet *opZR = new FuzzySet(-0.3333, 0, 0, 0.3333);
//FuzzySet *opPS = new FuzzySet(0, 0.3333, 0.3333, 0.6667);
//FuzzySet *opPM = new FuzzySet(0.3333, 0.667, 0.667, 1);
//FuzzySet *opPL = new FuzzySet(0.6667, 1, 1, 1.333);
FuzzySet *opNL = new FuzzySet(-133.3, -100, -100, -66.67);
FuzzySet *opNM = new FuzzySet(-100, -66.67, -66.67, -33.33);
FuzzySet *opNS = new FuzzySet(-66.67, -33.33, -33.33, 0);
FuzzySet *opZR = new FuzzySet(-33.33, 0, 0, 33.33);
FuzzySet *opPS = new FuzzySet(0, 33.33, 33.33, 66.67);
FuzzySet *opPM = new FuzzySet(33.33, 66.67, 66.67, 100);
FuzzySet *opPL = new FuzzySet(66.67, 100, 100, 133.3);
float Fs_p = 0;
float Fs_d = 0;
int previous_input1;
const long SERIAL_REFRESH_TIME = 10;
long refresh_time;
double Setpoint, Input, Output;
double Kp=10, Ki=0, Kd=7;
#define dirPin_X 9
#define stepPin_X 8
int X_Value = 0;
int Y_Value = 0;
int X_Newro = 0;
int Y_Newro = 0;
float Errors = 0;
float Angle = 0;
float PoBall = 0;
int ESmer = 7;
int Buzzer = 5;
Encoder myEnc(2, 3);
AccelStepper stepper1(AccelStepper::DRIVER, stepPin_X, dirPin_X);
```

```
PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);
```

```
void setup () {
```

```
    Serial.begin(115200);
```

```
    // FuzzyInput
```

```
    FuzzyInput *errorSim = new FuzzyInput(1);
```

```
    errorSim->addFuzzySet(erNL);
```

```
    errorSim->addFuzzySet(erNM);
```

```
    errorSim->addFuzzySet(erNS);
```

```
    errorSim->addFuzzySet(erZR);
```

```
    errorSim->addFuzzySet(erPS);
```

```
    errorSim->addFuzzySet(erPM);
```

```
    errorSim->addFuzzySet(erPL);
```

```
    fuzzy->addFuzzyInput(errorSim);
```

```
    // FuzzyInput
```

```
    FuzzyInput *errorDot = new FuzzyInput(2);
```

```
    errorDot->addFuzzySet(edNL);
```

```
    errorDot->addFuzzySet(edNM);
```

```
    errorDot->addFuzzySet(edNS);
```

```
    errorDot->addFuzzySet(edZR);
```

```
    errorDot->addFuzzySet(edPS);
```

```
    errorDot->addFuzzySet(edPM);
```

```
    errorDot->addFuzzySet(edPL);
```

```
    fuzzy->addFuzzyInput(errorDot);
```

```
    // FuzzyOutput
```

```
    FuzzyOutput *outputFS = new FuzzyOutput(1);
```

```
    outputFS->addFuzzySet(opNL);
```

```
    outputFS->addFuzzySet(opNM);
```

```
    outputFS->addFuzzySet(opNS);
```

```
    outputFS->addFuzzySet(opZR);
```

```
    outputFS->addFuzzySet(opPS);
```

```

outputFS->addFuzzySet(opPM);
outputFS->addFuzzySet(opPL);
fuzzy->addFuzzyOutput(outputFS);
FuzzyRuleConsequent *theopNL = new FuzzyRuleConsequent();
theopNL->addOutput(opNL);
FuzzyRuleConsequent *theopNM = new FuzzyRuleConsequent();
theopNM->addOutput(opNM);
FuzzyRuleConsequent *theopNS = new FuzzyRuleConsequent();
theopNS->addOutput(opNS);
FuzzyRuleConsequent *theopZR = new FuzzyRuleConsequent();
theopZR->addOutput(opZR);
FuzzyRuleConsequent *theopPS = new FuzzyRuleConsequent();
theopPS->addOutput(opPS);
FuzzyRuleConsequent *theopPM = new FuzzyRuleConsequent();
theopPM->addOutput(opPM);
FuzzyRuleConsequent *theopPL = new FuzzyRuleConsequent();
theopPL->addOutput(opPL);
FuzzyRuleAntecedent *iferPL_and_edNL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPL_and_edNL->joinWithAND(erPL, edNL);
FuzzyRule *fuzzyRule01 = new FuzzyRule(1,iferPL_and_edNL,theopZR);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule01);
FuzzyRuleAntecedent *iferPL_and_edNM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPL_and_edNM->joinWithAND(erPL, edNM);
FuzzyRule *fuzzyRule02 = new FuzzyRule(2,iferPL_and_edNM,theopPS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule02);
FuzzyRuleAntecedent *iferPL_and_edNS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPL_and_edNS->joinWithAND(erPL, edNS);
FuzzyRule *fuzzyRule03 = new FuzzyRule(3,iferPL_and_edNS,theopPM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule03);
FuzzyRuleAntecedent *iferPL_and_edZR= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPL_and_edZR->joinWithAND(erPL, edZR);

```

```
FuzzyRule *fuzzyRule04 = new FuzzyRule(4,iferPL_and_edZR,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule04);
FuzzyRuleAntecedent *iferPL_and_edPS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPL_and_edPS->joinWithAND(erPL, edPS);
FuzzyRule *fuzzyRule05 = new FuzzyRule(5,iferPL_and_edPS,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule05);
FuzzyRuleAntecedent *iferPL_and_edPM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPL_and_edPM->joinWithAND(erPL, edPM);
FuzzyRule *fuzzyRule06 = new FuzzyRule(6,iferPL_and_edPM,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule06);
FuzzyRuleAntecedent *iferPL_and_edPL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPL_and_edPL->joinWithAND(erPL, edPL);
FuzzyRule *fuzzyRule07 = new FuzzyRule(7,iferPL_and_edPL,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule07);
FuzzyRuleAntecedent *iferPM_and_edNL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPM_and_edNL->joinWithAND(erPM, edNL);
FuzzyRule *fuzzyRule08 = new FuzzyRule(8,iferPM_and_edNL,theopNS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule08);
FuzzyRuleAntecedent *iferPM_and_edNM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPM_and_edNM->joinWithAND(erPM, edNM);
FuzzyRule *fuzzyRule09 = new FuzzyRule(9,iferPM_and_edNM,theopZR);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule09);
FuzzyRuleAntecedent *iferPM_and_edNS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPM_and_edNS->joinWithAND(erPM, edNS);
FuzzyRule *fuzzyRule10 = new FuzzyRule(10,iferPM_and_edNS,theopPS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule10);
FuzzyRuleAntecedent *iferPM_and_edZR= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPM_and_edZR->joinWithAND(erPM, edZR);
FuzzyRule *fuzzyRule11 = new FuzzyRule(11,iferPM_and_edZR,theopPM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule11);
FuzzyRuleAntecedent *iferPM_and_edPS= new FuzzyRuleAntecedent();
```

```

iferPM_and_edPS->joinWithAND(erPM, edPS);
FuzzyRule *fuzzyRule12 = new FuzzyRule(12,iferPM_and_edPS,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule12);
FuzzyRuleAntecedent *iferPM_and_edPM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPM_and_edPM->joinWithAND(erPM, edPM);
FuzzyRule *fuzzyRule13 = new FuzzyRule(13,iferPM_and_edPM,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule13);
FuzzyRuleAntecedent *iferPM_and_edPL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPM_and_edPL->joinWithAND(erPM, edPL);
FuzzyRule *fuzzyRule14 = new FuzzyRule(14,iferPM_and_edPL,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule14);
FuzzyRuleAntecedent *iferPS_and_edNL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPS_and_edNL->joinWithAND(erPS, edNL);
FuzzyRule *fuzzyRule15 = new FuzzyRule(15,iferPS_and_edNL,theopNM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule15);
FuzzyRuleAntecedent *iferPS_and_edNM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPS_and_edNM->joinWithAND(erPS, edNM);
FuzzyRule *fuzzyRule16 = new FuzzyRule(16,iferPS_and_edNM,theopNS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule16);
FuzzyRuleAntecedent *iferPS_and_edNS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPS_and_edNS->joinWithAND(erPS, edNS);
FuzzyRule *fuzzyRule17 = new FuzzyRule(17,iferPS_and_edNS,theopZR);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule17);
FuzzyRuleAntecedent *iferPS_and_edZR= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPS_and_edNS->joinWithAND(erPS, edZR);
FuzzyRule *fuzzyRule18 = new FuzzyRule(18,iferPS_and_edZR,theopPS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule18);
FuzzyRuleAntecedent *iferPS_and_edPS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPS_and_edPS->joinWithAND(erPS, edPS);
FuzzyRule *fuzzyRule19 = new FuzzyRule(19,iferPS_and_edPS,theopPM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule19);

```

```
FuzzyRuleAntecedent *iferPS_and_edPM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPS_and_edPM->joinWithAND(erPS, edPM);
FuzzyRule *fuzzyRule20 = new FuzzyRule(20,iferPS_and_edPM,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule20);
FuzzyRuleAntecedent *iferPS_and_edPL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPS_and_edPL->joinWithAND(erPS, edPL);
FuzzyRule *fuzzyRule21 = new FuzzyRule(21,iferPS_and_edPL,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule21);
FuzzyRuleAntecedent *iferZR_and_edNL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferZR_and_edNL->joinWithAND(erZR, edNL);
FuzzyRule *fuzzyRule22 = new FuzzyRule(22,iferZR_and_edNL,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule22);
FuzzyRuleAntecedent *iferZR_and_edNM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferZR_and_edNM->joinWithAND(erZR, edNM);
FuzzyRule *fuzzyRule23 = new FuzzyRule(23,iferZR_and_edNM,theopNM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule23);
FuzzyRuleAntecedent *iferZR_and_edNS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferZR_and_edNS->joinWithAND(erZR, edNS);
FuzzyRule *fuzzyRule24 = new FuzzyRule(24,iferZR_and_edNS,theopNS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule24);
FuzzyRuleAntecedent *iferZR_and_edZR= new FuzzyRuleAntecedent();
iferZR_and_edZR->joinWithAND(erZR, edZR);
FuzzyRule *fuzzyRule25 = new FuzzyRule(25,iferZR_and_edZR,theopZR);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule25);
FuzzyRuleAntecedent *iferZR_and_edPS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferZR_and_edPS->joinWithAND(erZR, edPS);
FuzzyRule *fuzzyRule26 = new FuzzyRule(26,iferZR_and_edPS,theopPS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule26);
FuzzyRuleAntecedent *iferZR_and_edPM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferZR_and_edPM->joinWithAND(erZR, edPM);
FuzzyRule *fuzzyRule27 = new FuzzyRule(27,iferZR_and_edPM,theopPM);
```

```
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule27);
FuzzyRuleAntecedent *iferZR_and_edPL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferZR_and_edPL->joinWithAND(erZR, edPL);
FuzzyRule *fuzzyRule28 = new FuzzyRule(28,iferZR_and_edPL,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule28);
FuzzyRuleAntecedent *iferNS_and_edNL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNS_and_edNL->joinWithAND(erNS, edNL);
FuzzyRule *fuzzyRule29 = new FuzzyRule(29,iferNS_and_edNL,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule29);
FuzzyRuleAntecedent *iferNS_and_edNM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNS_and_edNM->joinWithAND(erNS, edNM);
FuzzyRule *fuzzyRule30 = new FuzzyRule(30,iferNS_and_edNM,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule30);
FuzzyRuleAntecedent *iferNS_and_edNS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNS_and_edNS->joinWithAND(erNS, edNS);
FuzzyRule *fuzzyRule31 = new FuzzyRule(31,iferNS_and_edNS,theopNM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule31);
FuzzyRuleAntecedent *iferNS_and_edZR= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNS_and_edZR->joinWithAND(erNS, edZR);
FuzzyRule *fuzzyRule32 = new FuzzyRule(32,iferNS_and_edZR,theopNS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule32);
FuzzyRuleAntecedent *iferNS_and_edPS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNS_and_edPS->joinWithAND(erNS, edPS);
FuzzyRule *fuzzyRule33 = new FuzzyRule(33,iferNS_and_edPS,theopZR);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule33);
FuzzyRuleAntecedent *iferNS_and_edPM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNS_and_edPM->joinWithAND(erNS, edPM);
FuzzyRule *fuzzyRule34 = new FuzzyRule(34,iferNS_and_edPM,theopPS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule34);
FuzzyRuleAntecedent *iferNS_and_edPL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNS_and_edPL->joinWithAND(erNS, edPL);
```

```
FuzzyRule *fuzzyRule35 = new FuzzyRule(35,iferNS_and_edPL,theopPM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule35);
FuzzyRuleAntecedent *iferNM_and_edNL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNM_and_edNL->joinWithAND(erNM, edNL);
FuzzyRule *fuzzyRule36 = new FuzzyRule(36,iferNM_and_edNL,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule36);
FuzzyRuleAntecedent *iferNM_and_edNM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNM_and_edNM->joinWithAND(erNM, edNM);
FuzzyRule *fuzzyRule37 = new FuzzyRule(37,iferNM_and_edNM,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule37);
FuzzyRuleAntecedent *iferNM_and_edNS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNM_and_edNS->joinWithAND(erNM, edNS);
FuzzyRule *fuzzyRule38 = new FuzzyRule(38,iferNM_and_edNS,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule38);
FuzzyRuleAntecedent *iferNM_and_edZR= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNM_and_edZR->joinWithAND(erNM, edZR);
FuzzyRule *fuzzyRule39 = new FuzzyRule(39,iferNM_and_edZR,theopNM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule39);
FuzzyRuleAntecedent *iferNM_and_edPS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNM_and_edPS->joinWithAND(erNM, edPS);
FuzzyRule *fuzzyRule40 = new FuzzyRule(40,iferNM_and_edPS,theopNS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule40);
FuzzyRuleAntecedent *iferNM_and_edPM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNM_and_edPM->joinWithAND(erNM, edPM);
FuzzyRule *fuzzyRule41 = new FuzzyRule(41,iferNM_and_edPM,theopZR);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule41);
FuzzyRuleAntecedent *iferNM_and_edPL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNM_and_edPL->joinWithAND(erNM, edPL);
FuzzyRule *fuzzyRule42 = new FuzzyRule(42,iferNM_and_edPL,theopPS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule42);
FuzzyRuleAntecedent *iferNL_and_edNL= new FuzzyRuleAntecedent();
```



```

iferNL_and_edNL->joinWithAND(erNL, edNL);
FuzzyRule *fuzzyRule43 = new FuzzyRule(43,iferNL_and_edNL,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule43);
FuzzyRuleAntecedent *iferNL_and_edNM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNL_and_edNM->joinWithAND(erNL, edNM);
FuzzyRule *fuzzyRule44 = new FuzzyRule(44,iferNL_and_edNM,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule44);
FuzzyRuleAntecedent *iferNL_and_edNS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNL_and_edNS->joinWithAND(erNL, edNS);
FuzzyRule *fuzzyRule45 = new FuzzyRule(45,iferNL_and_edNS,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule45);
FuzzyRuleAntecedent *iferNL_and_edZR= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNL_and_edZR->joinWithAND(erNL, edZR);
FuzzyRule *fuzzyRule46 = new FuzzyRule(46,iferNL_and_edZR,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule46);
FuzzyRuleAntecedent *iferNL_and_edPS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNL_and_edPS->joinWithAND(erNL, edPS);
FuzzyRule *fuzzyRule47 = new FuzzyRule(47,iferNL_and_edPS,theopNM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule47);
FuzzyRuleAntecedent *iferNL_and_edPM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNL_and_edPM->joinWithAND(erNL, edPM);
FuzzyRule *fuzzyRule48 = new FuzzyRule(48,iferNL_and_edPM,theopNM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule48);
FuzzyRuleAntecedent *iferNL_and_edPL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNL_and_edPL->joinWithAND(erNL, edPL);
FuzzyRule *fuzzyRule49 = new FuzzyRule(49,iferNL_and_edPL,theopZR);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule49);
stepper1.setMaxSpeed(6000.0);
stepper1.setAcceleration(12000.0);
pinMode(ESmer,INPUT_PULLUP);
pinMode(Buzzer,OUTPUT);

```

```
digitalWrite(Buzzer,HIGH);
//turn the PID on
Setpoint = 3;
myPID.SetMode(AUTOMATIC);
myPID.SetOutputLimits(-900, 900);
myPID.Compute();
}
long oldPosition = -999;
void loop () {
  Python_Read();
  int Esme = digitalRead(ESmer);
  if(Esme){
    if(PoBall>15){ digitalWrite(Buzzer,LOW);}
    else{digitalWrite(Buzzer,HIGH);}
    if (millis() > refresh_time) {
      int input1 = Setpoint - PoBall;
      int input2 = (input1 - previous_input1)/0.01;
      previous_input1 = input1;
      fuzzy->setInput(1, input1);
      fuzzy->setInput(2, input2);
      fuzzy->fuzzify();
      float output = fuzzy->defuzzify(1);
      output = abs(output/100);
      Fs_p = (14*output)+4;
      Fs_d = (-6*output)+10;
      Kp=Fs_p,
      Kd=Fs_d;
      refresh_time = millis() + SERIAL_REFRESH_TIME;
    }
    Input = PoBall;
    myPID.Compute();
```

```

    Angle = Output*-1;
}
else{
    Angle = 0;
}
long newPos = myEnc.read();
//long Encod = newPos*0.1125;
long Encod = newPos*1.125;
Errors = Encod - Angle;
stepper1.move(Errors);
stepper1.run();
}
void Python_Read(){
    if (Serial.available() >= 2) {
        int x_pos = Serial.parseInt();
        int y_pos = Serial.parseInt();
        X_Newro = x_pos;
        Y_Newro = y_pos;
    }
    Neuro_Fuzzy();
}
void Neuro_Fuzzy(){
    float input = X_Newro;
    float A = 0;
    float B = 0;

    float mf0[] = {60.1, 90.9, 140.5, 189.6};
    float mf1[] = {117.2, 167, 213.9, 263.7};
    float mf2[] = {192.9, 244.3, 297.1, 343.5};
    float mf3[] = {269.9, 315.4, 369.2, 419.5};
    float mf4[] = {349.9, 399.2, 444, 494.2};

```

```

float mf5[] = {422.4, 475, 522.1, 552.9};
float minr[6];
float Rule[6];
float output[] = {0.9982, 6.574, 12, 18, 23.44, 29};
minr[0] = 0;minr[1] = 0;minr[2] = 0;minr[3] = 0;minr[4] = 0;minr[5] = 0;
Rule[0] = 0;Rule[1] = 0;Rule[2] = 0;Rule[3] = 0;Rule[4] = 0;Rule[5] = 0;
if(input > mf0[0] && input < mf0[3]){
    Rule[0] = 0.9982;
    if(input < mf0[2]){minr[0] = 1;}
    else if(input > mf0[2] && input < mf0[3]){
        minr[0] = (-0.0204*input) + 3.8615;
    }
    else{minr[0] = 0;}
}
if(input > mf1[0] && input < mf1[3]){
    Rule[1] = 6.574;
    if(input>mf1[0]&&input<mf1[1]){
        minr[1] = (0.0201*input) - 2.3534;
    }else if(input > mf1[1] && input < mf1[2]){
        minr[1] = 1;
    }else if(input > mf1[2]&&input < mf1[3]){
        minr[1] = (-0.0201*input) + 5.2952;
    }
}
if(input > mf2[0] && input < mf2[3]){
    Rule[2] = 12;
    if(input>mf2[0]&&input<mf2[1]){
        minr[2] = (0.0195*input) - 3.7529;
    }else if(input > mf2[1] && input < mf2[2]){
        minr[2] = 1;
    }else if(input > mf2[2]&&input < mf2[3]){

```

```

    minr[2] = (-0.0216*input) + 7.403;
  }
}
if(input > mf3[0] && input < mf3[3]){
  Rule[3] = 18;
  if(input>mf3[0]&&input<mf3[1]){
    minr[3] = (0.022*input) - 5.9319;
  }else if(input > mf3[1] && input < mf3[2]){
    minr[3] = 1;
  }else if(input > mf3[2]&&input < mf3[3]){
    minr[3] = (-0.0199*input) + 8.34;
  }
}
if(input > mf4[0] && input < mf4[3]){
  Rule[4] = 23.44;
  if(input>mf4[0]&&input<mf4[1]){
    minr[4] = (0.0203*input) - 7.0974;
  }else if(input > mf4[1] && input < mf4[2]){
    minr[4] = 1;
  }else if(input > mf4[2]&&input < mf4[3]){
    minr[4] = (-0.0199*input) + 9.8446;
  }
}
if(input > mf5[0] && input < mf5[3]){
  Rule[5] = 29;
  if(input>mf5[0]&&input<mf5[1]){
    minr[5] = (0.019*input) - 8.0304;
  }else if(input > mf5[1] && input < mf5[2]){
    minr[5] = 1;
  }else if(input > mf5[2]&&input < mf5[3]){
    minr[5] = (-0.0325*input) + 17.951;
  }
}

```

```

    }
}
A =
(Rule[0]*minr[0])+(Rule[1]*minr[1])+(Rule[2]*minr[2])+(Rule[3]*minr[3])+(Rule[4]*minr[4]
)+(Rule[5]*minr[5]);
B = minr[0]+minr[1]+minr[2]+minr[3]+minr[4]+minr[5];
X_Value = A/B;
PoBall = X_Value;
}

```

14) โปรแกรมอาศัยโนควบคุมแกนวาย ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ ปรับจูนค่าด้วย ตรรกศาสตร์คลุมเครือ

```

#include <Encoder.h>
#include <AccelStepper.h>
#include <PID_v1_bc.h>
#include <Fuzzy.h>

// Fuzzy
Fuzzy *fuzzy = new Fuzzy();
// FuzzyInput
FuzzySet *erNL = new FuzzySet(-40, -30, -30, -20);
FuzzySet *erNM = new FuzzySet(-30, -20, -20, -10);
FuzzySet *erNS = new FuzzySet(-20, -10, -10, 0);
FuzzySet *erZR = new FuzzySet(-10, 0, 0, 10);
FuzzySet *erPS = new FuzzySet(0, 10, 10, 20);
FuzzySet *erPM = new FuzzySet(10, 20, 20, 30);
FuzzySet *erPL = new FuzzySet(20, 30, 30, 40);
FuzzySet *edNL = new FuzzySet(-20, -15, -15, -10);
FuzzySet *edNM = new FuzzySet(-15, -10, -10, -5);
FuzzySet *edNS = new FuzzySet(-10, -5, -5, 0);
FuzzySet *edZR = new FuzzySet(-5, 0, 0, 5);

```

```

FuzzySet *edPS = new FuzzySet(0, 5, 5, 10);
FuzzySet *edPM = new FuzzySet(5, 10, 10, 10);
FuzzySet *edPL = new FuzzySet(10, 15, 15, 20);
// FuzzyOutput
//FuzzySet *opNL = new FuzzySet(-1.333, -1, -1, -0.6667);
//FuzzySet *opNM = new FuzzySet(-1, -0.6667, -0.6667, -0.3333);
//FuzzySet *opNS = new FuzzySet(-0.6667, -0.3333, -0.3333, 0);
//FuzzySet *opZR = new FuzzySet(-0.3333, 0, 0, 0.3333);
//FuzzySet *opPS = new FuzzySet(0, 0.3333, 0.3333, 0.6667);
//FuzzySet *opPM = new FuzzySet(0.3333, 0.667, 0.667, 1);
//FuzzySet *opPL = new FuzzySet(0.6667, 1, 1, 1.333);

FuzzySet *opNL = new FuzzySet(-133.3, -100, -100, -66.67);
FuzzySet *opNM = new FuzzySet(-100, -66.67, -66.67, -33.33);
FuzzySet *opNS = new FuzzySet(-66.67, -33.33, -33.33, 0);
FuzzySet *opZR = new FuzzySet(-33.33, 0, 0, 33.33);
FuzzySet *opPS = new FuzzySet(0, 33.33, 33.33, 66.67);
FuzzySet *opPM = new FuzzySet(33.33, 66.67, 66.67, 100);
FuzzySet *opPL = new FuzzySet(66.67, 100, 100, 133.3);
float Fs_p = 0;
float Fs_d = 0;
int previous_input1;
const long SERIAL_REFRESH_TIME = 10;
long refresh_time;
double Setpoint, Input, Output;
double Kp=10, Ki=0, Kd=7;
#define dirPin_X 9
#define stepPin_X 8
int X_Value = 0;
int Y_Value = 0;
int X_Newro = 0;

```

```
int Y_Newro = 0;
float Errors = 0;
float Angle = 0;
float PoBall = 0;
int ESmer = 7;
int Buzzer = 5;
Encoder myEnc(2, 3);
AccelStepper stepper1(AccelStepper::DRIVER, stepPin_X, dirPin_X);
PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);
void setup () {
  Serial.begin(115200);
  // FuzzyInput
  FuzzyInput *errorSim = new FuzzyInput(1);
  errorSim->addFuzzySet(erNL);
  errorSim->addFuzzySet(erNM);
  errorSim->addFuzzySet(erNS);
  errorSim->addFuzzySet(erZR);
  errorSim->addFuzzySet(erPS);
  errorSim->addFuzzySet(erPM);
  errorSim->addFuzzySet(erPL);
  fuzzy->addFuzzyInput(errorSim);
  // FuzzyInput
  FuzzyInput *errorDot = new FuzzyInput(2);
  errorDot->addFuzzySet(edNL);
  errorDot->addFuzzySet(edNM);
  errorDot->addFuzzySet(edNS);
  errorDot->addFuzzySet(edZR);
  errorDot->addFuzzySet(edPS);
  errorDot->addFuzzySet(edPM);
  errorDot->addFuzzySet(edPL);
  fuzzy->addFuzzyInput(errorDot);
```



```

// FuzzyOutput
FuzzyOutput *outputFS = new FuzzyOutput(1);
outputFS->addFuzzySet(opNL);
outputFS->addFuzzySet(opNM);
outputFS->addFuzzySet(opNS);
outputFS->addFuzzySet(opZR);
outputFS->addFuzzySet(opPS);
outputFS->addFuzzySet(opPM);
outputFS->addFuzzySet(opPL);
fuzzy->addFuzzyOutput(outputFS);
FuzzyRuleConsequent *theopNL = new FuzzyRuleConsequent();
theopNL->addOutput(opNL);
FuzzyRuleConsequent *theopNM = new FuzzyRuleConsequent();
theopNM->addOutput(opNM);
FuzzyRuleConsequent *theopNS = new FuzzyRuleConsequent();
theopNS->addOutput(opNS);
FuzzyRuleConsequent *theopZR = new FuzzyRuleConsequent();
theopZR->addOutput(opZR);
FuzzyRuleConsequent *theopPS = new FuzzyRuleConsequent();
theopPS->addOutput(opPS);
FuzzyRuleConsequent *theopPM = new FuzzyRuleConsequent();
theopPM->addOutput(opPM);
FuzzyRuleConsequent *theopPL = new FuzzyRuleConsequent();
theopPL->addOutput(opPL);
FuzzyRuleAntecedent *iferPL_and_edNL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPL_and_edNL->joinWithAND(erPL, edNL);
FuzzyRule *fuzzyRule01 = new FuzzyRule(1,iferPL_and_edNL,theopZR);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule01);
FuzzyRuleAntecedent *iferPL_and_edNM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPL_and_edNM->joinWithAND(erPL, edNM);
FuzzyRule *fuzzyRule02 = new FuzzyRule(2,iferPL_and_edNM,theopPS);

```

```
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule02);
FuzzyRuleAntecedent *iferPL_and_edNS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPL_and_edNS->joinWithAND(erPL, edNS);
FuzzyRule *fuzzyRule03 = new FuzzyRule(3,iferPL_and_edNS,theopPM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule03);
FuzzyRuleAntecedent *iferPL_and_edZR= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPL_and_edZR->joinWithAND(erPL, edZR);
FuzzyRule *fuzzyRule04 = new FuzzyRule(4,iferPL_and_edZR,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule04);
FuzzyRuleAntecedent *iferPL_and_edPS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPL_and_edPS->joinWithAND(erPL, edPS);
FuzzyRule *fuzzyRule05 = new FuzzyRule(5,iferPL_and_edPS,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule05);
FuzzyRuleAntecedent *iferPL_and_edPM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPL_and_edPM->joinWithAND(erPL, edPM);
FuzzyRule *fuzzyRule06 = new FuzzyRule(6,iferPL_and_edPM,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule06);
FuzzyRuleAntecedent *iferPL_and_edPL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPL_and_edPL->joinWithAND(erPL, edPL);
FuzzyRule *fuzzyRule07 = new FuzzyRule(7,iferPL_and_edPL,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule07);
FuzzyRuleAntecedent *iferPM_and_edNL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPM_and_edNL->joinWithAND(erPM, edNL);
FuzzyRule *fuzzyRule08 = new FuzzyRule(8,iferPM_and_edNL,theopNS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule08);
FuzzyRuleAntecedent *iferPM_and_edNM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPM_and_edNM->joinWithAND(erPM, edNM);
FuzzyRule *fuzzyRule09 = new FuzzyRule(9,iferPM_and_edNM,theopZR);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule09);
FuzzyRuleAntecedent *iferPM_and_edNS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPM_and_edNS->joinWithAND(erPM, edNS);
```

```

FuzzyRule *fuzzyRule10 = new FuzzyRule(10,iferPM_and_edNS,theopPS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule10);
FuzzyRuleAntecedent *iferPM_and_edZR= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPM_and_edZR->joinWithAND(erPM, edZR);
FuzzyRule *fuzzyRule11 = new FuzzyRule(11,iferPM_and_edZR,theopPM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule11);
FuzzyRuleAntecedent *iferPM_and_edPS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPM_and_edPS->joinWithAND(erPM, edPS);
FuzzyRule *fuzzyRule12 = new FuzzyRule(12,iferPM_and_edPS,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule12);
FuzzyRuleAntecedent *iferPM_and_edPM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPM_and_edPM->joinWithAND(erPM, edPM);
FuzzyRule *fuzzyRule13 = new FuzzyRule(13,iferPM_and_edPM,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule13);
FuzzyRuleAntecedent *iferPM_and_edPL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPM_and_edPL->joinWithAND(erPM, edPL);
FuzzyRule *fuzzyRule14 = new FuzzyRule(14,iferPM_and_edPL,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule14);
FuzzyRuleAntecedent *iferPS_and_edNL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPS_and_edNL->joinWithAND(erPS, edNL);
FuzzyRule *fuzzyRule15 = new FuzzyRule(15,iferPS_and_edNL,theopNM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule15);
FuzzyRuleAntecedent *iferPS_and_edNM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPS_and_edNM->joinWithAND(erPS, edNM);
FuzzyRule *fuzzyRule16 = new FuzzyRule(16,iferPS_and_edNM,theopNS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule16);
FuzzyRuleAntecedent *iferPS_and_edNS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPS_and_edNS->joinWithAND(erPS, edNS);
FuzzyRule *fuzzyRule17 = new FuzzyRule(17,iferPS_and_edNS,theopZR);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule17);
FuzzyRuleAntecedent *iferPS_and_edZR= new FuzzyRuleAntecedent();

```

```
iferPS_and_edNS->joinWithAND(erPS, edZR);
FuzzyRule *fuzzyRule18 = new FuzzyRule(18,iferPS_and_edZR,theopPS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule18);
FuzzyRuleAntecedent *iferPS_and_edPS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPS_and_edPS->joinWithAND(erPS, edPS);
FuzzyRule *fuzzyRule19 = new FuzzyRule(19,iferPS_and_edPS,theopPM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule19);
FuzzyRuleAntecedent *iferPS_and_edPM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPS_and_edPM->joinWithAND(erPS, edPM);
FuzzyRule *fuzzyRule20 = new FuzzyRule(20,iferPS_and_edPM,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule20);
FuzzyRuleAntecedent *iferPS_and_edPL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPS_and_edPL->joinWithAND(erPS, edPL);
FuzzyRule *fuzzyRule21 = new FuzzyRule(21,iferPS_and_edPL,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule21);
FuzzyRuleAntecedent *iferZR_and_edNL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferZR_and_edNL->joinWithAND(erZR, edNL);
FuzzyRule *fuzzyRule22 = new FuzzyRule(22,iferZR_and_edNL,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule22);
FuzzyRuleAntecedent *iferZR_and_edNM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferZR_and_edNM->joinWithAND(erZR, edNM);
FuzzyRule *fuzzyRule23 = new FuzzyRule(23,iferZR_and_edNM,theopNM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule23);
FuzzyRuleAntecedent *iferZR_and_edNS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferZR_and_edNS->joinWithAND(erZR, edNS);
FuzzyRule *fuzzyRule24 = new FuzzyRule(24,iferZR_and_edNS,theopNS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule24);
FuzzyRuleAntecedent *iferZR_and_edZR= new FuzzyRuleAntecedent();
iferZR_and_edZR->joinWithAND(erZR, edZR);
FuzzyRule *fuzzyRule25 = new FuzzyRule(25,iferZR_and_edZR,theopZR);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule25);
```

```
FuzzyRuleAntecedent *iferZR_and_edPS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferZR_and_edPS->joinWithAND(erZR, edPS);
FuzzyRule *fuzzyRule26 = new FuzzyRule(26,iferZR_and_edPS,theopPS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule26);
FuzzyRuleAntecedent *iferZR_and_edPM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferZR_and_edPM->joinWithAND(erZR, edPM);
FuzzyRule *fuzzyRule27 = new FuzzyRule(27,iferZR_and_edPM,theopPM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule27);
FuzzyRuleAntecedent *iferZR_and_edPL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferZR_and_edPL->joinWithAND(erZR, edPL);
FuzzyRule *fuzzyRule28 = new FuzzyRule(28,iferZR_and_edPL,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule28);
FuzzyRuleAntecedent *iferNS_and_edNL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNS_and_edNL->joinWithAND(erNS, edNL);
FuzzyRule *fuzzyRule29 = new FuzzyRule(29,iferNS_and_edNL,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule29);
FuzzyRuleAntecedent *iferNS_and_edNM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNS_and_edNM->joinWithAND(erNS, edNM);
FuzzyRule *fuzzyRule30 = new FuzzyRule(30,iferNS_and_edNM,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule30);
FuzzyRuleAntecedent *iferNS_and_edNS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNS_and_edNS->joinWithAND(erNS, edNS);
FuzzyRule *fuzzyRule31 = new FuzzyRule(31,iferNS_and_edNS,theopNM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule31);
FuzzyRuleAntecedent *iferNS_and_edZR= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNS_and_edZR->joinWithAND(erNS, edZR);
FuzzyRule *fuzzyRule32 = new FuzzyRule(32,iferNS_and_edZR,theopNS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule32);
FuzzyRuleAntecedent *iferNS_and_edPS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNS_and_edPS->joinWithAND(erNS, edPS);
FuzzyRule *fuzzyRule33 = new FuzzyRule(33,iferNS_and_edPS,theopZR);
```

```
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule33);
FuzzyRuleAntecedent *iferNS_and_edPM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNS_and_edPM->joinWithAND(erNS, edPM);
FuzzyRule *fuzzyRule34 = new FuzzyRule(34,iferNS_and_edPM,theopPS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule34);
FuzzyRuleAntecedent *iferNS_and_edPL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNS_and_edPL->joinWithAND(erNS, edPL);
FuzzyRule *fuzzyRule35 = new FuzzyRule(35,iferNS_and_edPL,theopPM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule35);
FuzzyRuleAntecedent *iferNM_and_edNL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNM_and_edNL->joinWithAND(erNM, edNL);
FuzzyRule *fuzzyRule36 = new FuzzyRule(36,iferNM_and_edNL,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule36);
FuzzyRuleAntecedent *iferNM_and_edNM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNM_and_edNM->joinWithAND(erNM, edNM);
FuzzyRule *fuzzyRule37 = new FuzzyRule(37,iferNM_and_edNM,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule37);
FuzzyRuleAntecedent *iferNM_and_edNS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNM_and_edNS->joinWithAND(erNM, edNS);
FuzzyRule *fuzzyRule38 = new FuzzyRule(38,iferNM_and_edNS,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule38);
FuzzyRuleAntecedent *iferNM_and_edZR= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNM_and_edZR->joinWithAND(erNM, edZR);
FuzzyRule *fuzzyRule39 = new FuzzyRule(39,iferNM_and_edZR,theopNM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule39);
FuzzyRuleAntecedent *iferNM_and_edPS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNM_and_edPS->joinWithAND(erNM, edPS);
FuzzyRule *fuzzyRule40 = new FuzzyRule(40,iferNM_and_edPS,theopNS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule40);
FuzzyRuleAntecedent *iferNM_and_edPM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNM_and_edPM->joinWithAND(erNM, edPM);
```

```
FuzzyRule *fuzzyRule41 = new FuzzyRule(41,iferNM_and_edPM,theopZR);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule41);
FuzzyRuleAntecedent *iferNM_and_edPL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNM_and_edPL->joinWithAND(erNM, edPL);
FuzzyRule *fuzzyRule42 = new FuzzyRule(42,iferNM_and_edPL,theopPS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule42);
FuzzyRuleAntecedent *iferNL_and_edNL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNL_and_edNL->joinWithAND(erNL, edNL);
FuzzyRule *fuzzyRule43 = new FuzzyRule(43,iferNL_and_edNL,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule43);
FuzzyRuleAntecedent *iferNL_and_edNM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNL_and_edNM->joinWithAND(erNL, edNM);
FuzzyRule *fuzzyRule44 = new FuzzyRule(44,iferNL_and_edNM,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule44);
FuzzyRuleAntecedent *iferNL_and_edNS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNL_and_edNS->joinWithAND(erNL, edNS);
FuzzyRule *fuzzyRule45 = new FuzzyRule(45,iferNL_and_edNS,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule45);
FuzzyRuleAntecedent *iferNL_and_edZR= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNL_and_edZR->joinWithAND(erNL, edZR);
FuzzyRule *fuzzyRule46 = new FuzzyRule(46,iferNL_and_edZR,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule46);
FuzzyRuleAntecedent *iferNL_and_edPS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNL_and_edPS->joinWithAND(erNL, edPS);
FuzzyRule *fuzzyRule47 = new FuzzyRule(47,iferNL_and_edPS,theopNM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule47);
FuzzyRuleAntecedent *iferNL_and_edPM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNL_and_edPM->joinWithAND(erNL, edPM);
FuzzyRule *fuzzyRule48 = new FuzzyRule(48,iferNL_and_edPM,theopNM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule48);
FuzzyRuleAntecedent *iferNL_and_edPL= new FuzzyRuleAntecedent();
```

```

iferNL_and_edPL->joinWithAND(erNL, edPL);
FuzzyRule *fuzzyRule49 = new FuzzyRule(49,iferNL_and_edPL,theopZR);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule49);
stepper1.setMaxSpeed(6000.0);
stepper1.setAcceleration(12000.0);
pinMode(ESmer,INPUT_PULLUP);
pinMode(Buzzer,OUTPUT);
digitalWrite(Buzzer,HIGH);
//turn the PID on
Setpoint = 27;
myPID.SetMode(AUTOMATIC);
myPID.SetOutputLimits(-900, 900);
myPID.Compute();
}
long oldPosition = -999;
void loop () {
  Python_Read();
  int Esme = digitalRead(ESmer);
  if(Esme){
    if(PoBall>15){ digitalWrite(Buzzer,LOW);}
    else{digitalWrite(Buzzer,HIGH);}
    if (millis() > refresh_time) {
      int input1 = Setpoint - PoBall;
      int input2 = (input1 - previous_input1)/0.01;
      previous_input1 = input1;
//    Serial.print("\t Error : ");
//    Serial.print(input1);
//    Serial.print(", Error dot : ");
//    Serial.print(input2);
      fuzzy->setInput(1, input1);
      fuzzy->setInput(2, input2);

```



```

    fuzzy->fuzzify();
    float output = fuzzy->defuzzify(1);
    output = abs(output/100);
    Fs_p = (14*output)+4;
    Fs_d = (-6*output)+10;
    Kp=Fs_p,
    Kd=Fs_d;
    refresh_time = millis() + SERIAL_REFRESH_TIME;
}
Input = PoBall;
myPID.Compute();
Angle = Output;
}
else{
    Angle = 0;
}
long newPos = myEnc.read();
//long Encod = newPos*0.1125;
long Encod = newPos*1.125;
Errors = Encod - Angle;
stepper1.move(Errors);
stepper1.run();
}
void Python_Read(){
    if (Serial.available() >= 2) {
        int x_pos = Serial.parseInt();
        int y_pos = Serial.parseInt();
        X_Newro = x_pos;
        Y_Newro = y_pos;
    }
    Neuro_Fuzzy();

```

```

}
void Neuro_Fuzzy(){
    float input = Y_Newro;
    float A = 0;
    float B = 0;
    float mf0[] = {-3.18, 27.78, 84.63, 129.2};
    float mf1[] = {56.7, 101.8, 150.6, 202.1};
    float mf2[] = {134.8, 187.5, 234.8, 279.9};
    float mf3[] = {207.2, 252.7, 307.3, 359.6};
    float mf4[] = {286.9, 336.3, 382.5, 433.6};
    float mf5[] = {362.5, 414.8, 461.2, 492.2};
    float minr[6];
    float Rule[6];
    float output[] = {29, 23, 18, 12, 6.386, 0.9957};
    minr[0] = 0;minr[1] = 0;minr[2] = 0;minr[3] = 0;minr[4] = 0;minr[5] = 0;
    Rule[0] = 0;Rule[1] = 0;Rule[2] = 0;Rule[3] = 0;Rule[4] = 0;Rule[5] = 0;
    if(input > mf0[0] && input < mf0[3]){
        Rule[0] = output[0];
        if(input < mf0[2]){minr[0] = 1;}
        else if(input > mf0[2] && input < mf0[3]){
            minr[0] = (-0.0224*input) + 2.8988;
        }
        else{minr[0] = 0;}
    }
    if(input > mf1[0] && input < mf1[3]){
        Rule[1] = output[1];
        if(input>mf1[0]&&input<mf1[1]){
            minr[1] = (0.0222*input) - 1.2572;
        }else if(input > mf1[1] && input < mf1[2]){
            minr[1] = 1;
        }else if(input > mf1[2]&&input < mf1[3]){

```

```

    minr[1] = (-0.0194*input) + 3.9243;
  }
}
if(input > mf2[0] && input < mf2[3]){
  Rule[2] = output[2];
  if(input>mf2[0]&&input<mf2[1]){
    minr[2] = (0.019*input) - 2.5579;
  }else if(input > mf2[1] && input < mf2[2]){
    minr[2] = 1;
  }else if(input > mf2[2]&&input < mf2[3]){
    minr[2] = (-0.0222*input) + 6.2062;
  }
}
if(input > mf3[0] && input < mf3[3]){
  Rule[3] = output[3];
  if(input>mf3[0]&&input<mf3[1]){
    minr[3] = (0.0222*input) - 4.5778;
  }else if(input > mf3[1] && input < mf3[2]){
    minr[3] = 1;
  }else if(input > mf3[2]&&input < mf3[3]){
    minr[3] = (-0.0192*input) + 6.8846;
  }
}
if(input > mf4[0] && input < mf4[3]){
  Rule[4] = output[4];
  if(input>mf4[0]&&input<mf4[1]){
    minr[4] = (0.0202*input) - 5.8077;
  }else if(input > mf4[1] && input < mf4[2]){
    minr[4] = 1;
  }else if(input > mf4[2]&&input < mf4[3]){
    minr[4] = (-0.0196*input) + 8.4853;
  }
}

```

```

    }
}
if(input > mf5[0] && input < mf5[3]){
    Rule[5] = output[5];
    if(input>mf5[0]&&input<mf5[1]){
        minr[5] = (0.0191*input) - 6.9312;
    }else if(input > mf5[1] && input < mf5[2]){
        minr[5] = 1;
    }else if(input > mf5[2]&&input < mf5[3]){
        minr[5] = (-0.0323*input) + 15.877;
    }
}
A =
(Rule[0]*minr[0])+(Rule[1]*minr[1])+(Rule[2]*minr[2])+(Rule[3]*minr[3])+(Rule[4]*minr[4]
)+(Rule[5]*minr[5]);
B = minr[0]+minr[1]+minr[2]+minr[3]+minr[4]+minr[5];
Y_Value = A/B;
PoBall = Y_Value;
}

```

15) โปรแกรมควบคุมมอเตอร์ควบคุมแกนเอกซ์ ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน ปรับจูนค่าด้วยตรรกศาสตร์

กลุ่มเครื่อง

```

#include <AccelStepper.h>
#include <Encoder.h>
#define dirPin_X 9
#define stepPin_X 8
#include <Fuzzy.h>

// Fuzzy
Fuzzy *fuzzy = new Fuzzy();
// FuzzyInput

```

```

FuzzySet *erNL = new FuzzySet(-40, -30, -30, -20);
FuzzySet *erNM = new FuzzySet(-30, -20, -20, -10);
FuzzySet *erNS = new FuzzySet(-20, -10, -10, 0);
FuzzySet *erZR = new FuzzySet(-10, 0, 0, 10);
FuzzySet *erPS = new FuzzySet(0, 10, 10, 20);
FuzzySet *erPM = new FuzzySet(10, 20, 20, 30);
FuzzySet *erPL = new FuzzySet(20, 30, 30, 40);
FuzzySet *edNL = new FuzzySet(-20, -15, -15, -10);
FuzzySet *edNM = new FuzzySet(-15, -10, -10, -5);
FuzzySet *edNS = new FuzzySet(-10, -5, -5, 0);
FuzzySet *edZR = new FuzzySet(-5, 0, 0, 5);
FuzzySet *edPS = new FuzzySet(0, 5, 5, 10);
FuzzySet *edPM = new FuzzySet(5, 10, 10, 10);
FuzzySet *edPL = new FuzzySet(10, 15, 15, 20);
// FuzzyOutput
FuzzySet *opNL = new FuzzySet(-1.333, -1, -1, -0.6667);
FuzzySet *opNM = new FuzzySet(-1, -0.6667, -0.6667, -0.3333);
FuzzySet *opNS = new FuzzySet(-0.6667, -0.3333, -0.3333, 0);
FuzzySet *opZR = new FuzzySet(-0.3333, 0, 0, 0.3333);
FuzzySet *opPS = new FuzzySet(0, 0.3333, 0.3333, 0.6667);
FuzzySet *opPM = new FuzzySet(0.3333, 0.667, 0.667, 1);
FuzzySet *opPL = new FuzzySet(0.6667, 1, 1, 1.333);

int previous_input1;
int FX = 0.5; int GX = 4.325;
const long SERIAL_REFRESH_TIME = 100;
long refresh_time;
double SetpointX = 150;
double Kd = 0.7;
double lambda = 0.98;
double prevErrorX = 0;

```

```
double prevSignX = 0;
double outputX = 0;
double PoBall = 0;
double deltaSignX = 0;
double PrePoBall = 0;
double PreErrorX = 0;
int ESmer = 7;
int Buzzer = 5;
int X_Value = 0;
int Y_Value = 0;
int X_Newro = 0;
int Y_Newro = 0;
long AnglePos = 0;
Encoder myEnc(2, 3);
AccelStepper stepper1(AccelStepper::DRIVER, stepPin_X, dirPin_X);
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  stepper1.setMaxSpeed(6000.0);
  stepper1.setAcceleration(12000.0);
  pinMode(ESmer,INPUT_PULLUP);
  pinMode(Buzzer,OUTPUT);
  digitalWrite(Buzzer,HIGH);
  // FuzzyInput
  FuzzyInput *errorSim = new FuzzyInput(1);
  errorSim->addFuzzySet(erNL);
  errorSim->addFuzzySet(erNM);
  errorSim->addFuzzySet(erNS);
  errorSim->addFuzzySet(erZR);
  errorSim->addFuzzySet(erPS);
  errorSim->addFuzzySet(erPM);
  errorSim->addFuzzySet(erPL);
```

```
fuzzy->addFuzzyInput(errorSim);
// FuzzyInput
FuzzyInput *errorDot = new FuzzyInput(2);
errorDot->addFuzzySet(edNL);
errorDot->addFuzzySet(edNM);
errorDot->addFuzzySet(edNS);
errorDot->addFuzzySet(edZR);
errorDot->addFuzzySet(edPS);
errorDot->addFuzzySet(edPM);
errorDot->addFuzzySet(edPL);
fuzzy->addFuzzyInput(errorDot);
// FuzzyOutput
FuzzyOutput *outputFS = new FuzzyOutput(1);
outputFS->addFuzzySet(opNL);
outputFS->addFuzzySet(opNM);
outputFS->addFuzzySet(opNS);
outputFS->addFuzzySet(opZR);
outputFS->addFuzzySet(opPS);
outputFS->addFuzzySet(opPM);
outputFS->addFuzzySet(opPL);
fuzzy->addFuzzyOutput(outputFS);
FuzzyRuleConsequent *theopNL = new FuzzyRuleConsequent();
theopNL->addOutput(opNL);
FuzzyRuleConsequent *theopNM = new FuzzyRuleConsequent();
theopNM->addOutput(opNM);
FuzzyRuleConsequent *theopNS = new FuzzyRuleConsequent();
theopNS->addOutput(opNS);
FuzzyRuleConsequent *theopZR = new FuzzyRuleConsequent();
theopZR->addOutput(opZR);
FuzzyRuleConsequent *theopPS = new FuzzyRuleConsequent();
theopPS->addOutput(opPS);
```

```
FuzzyRuleConsequent *theopPM = new FuzzyRuleConsequent();
theopPM->addOutput(opPM);
FuzzyRuleConsequent *theopPL = new FuzzyRuleConsequent();
theopPL->addOutput(opPL);
FuzzyRuleAntecedent *iferPL_and_edNL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPL_and_edNL->joinWithAND(erPL, edNL);
FuzzyRule *fuzzyRule01 = new FuzzyRule(1,iferPL_and_edNL,theopZR);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule01);
FuzzyRuleAntecedent *iferPL_and_edNM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPL_and_edNM->joinWithAND(erPL, edNM);
FuzzyRule *fuzzyRule02 = new FuzzyRule(2,iferPL_and_edNM,theopPS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule02);
FuzzyRuleAntecedent *iferPL_and_edNS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPL_and_edNS->joinWithAND(erPL, edNS);
FuzzyRule *fuzzyRule03 = new FuzzyRule(3,iferPL_and_edNS,theopPM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule03);
FuzzyRuleAntecedent *iferPL_and_edZR= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPL_and_edZR->joinWithAND(erPL, edZR);
FuzzyRule *fuzzyRule04 = new FuzzyRule(4,iferPL_and_edZR,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule04);
FuzzyRuleAntecedent *iferPL_and_edPS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPL_and_edPS->joinWithAND(erPL, edPS);
FuzzyRule *fuzzyRule05 = new FuzzyRule(5,iferPL_and_edPS,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule05);
FuzzyRuleAntecedent *iferPL_and_edPM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPL_and_edPM->joinWithAND(erPL, edPM);
FuzzyRule *fuzzyRule06 = new FuzzyRule(6,iferPL_and_edPM,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule06);
FuzzyRuleAntecedent *iferPL_and_edPL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPL_and_edPL->joinWithAND(erPL, edPL);
FuzzyRule *fuzzyRule07 = new FuzzyRule(7,iferPL_and_edPL,theopPL);
```



```
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule07);
FuzzyRuleAntecedent *iferPM_and_edNL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPM_and_edNL->joinWithAND(erPM, edNL);
FuzzyRule *fuzzyRule08 = new FuzzyRule(8,iferPM_and_edNL,theopNS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule08);
FuzzyRuleAntecedent *iferPM_and_edNM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPM_and_edNM->joinWithAND(erPM, edNM);
FuzzyRule *fuzzyRule09 = new FuzzyRule(9,iferPM_and_edNM,theopZR);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule09);
FuzzyRuleAntecedent *iferPM_and_edNS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPM_and_edNS->joinWithAND(erPM, edNS);
FuzzyRule *fuzzyRule10 = new FuzzyRule(10,iferPM_and_edNS,theopPS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule10);
FuzzyRuleAntecedent *iferPM_and_edZR= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPM_and_edZR->joinWithAND(erPM, edZR);
FuzzyRule *fuzzyRule11 = new FuzzyRule(11,iferPM_and_edZR,theopPM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule11);
FuzzyRuleAntecedent *iferPM_and_edPS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPM_and_edPS->joinWithAND(erPM, edPS);
FuzzyRule *fuzzyRule12 = new FuzzyRule(12,iferPM_and_edPS,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule12);
FuzzyRuleAntecedent *iferPM_and_edPM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPM_and_edPM->joinWithAND(erPM, edPM);
FuzzyRule *fuzzyRule13 = new FuzzyRule(13,iferPM_and_edPM,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule13);
FuzzyRuleAntecedent *iferPM_and_edPL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPM_and_edPL->joinWithAND(erPM, edPL);
FuzzyRule *fuzzyRule14 = new FuzzyRule(14,iferPM_and_edPL,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule14);
FuzzyRuleAntecedent *iferPS_and_edNL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPS_and_edNL->joinWithAND(erPS, edNL);
```

```
FuzzyRule *fuzzyRule15 = new FuzzyRule(15,iferPS_and_edNL,theopNM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule15);
FuzzyRuleAntecedent *iferPS_and_edNM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPS_and_edNM->joinWithAND(erPS, edNM);
FuzzyRule *fuzzyRule16 = new FuzzyRule(16,iferPS_and_edNM,theopNS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule16);
FuzzyRuleAntecedent *iferPS_and_edNS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPS_and_edNS->joinWithAND(erPS, edNS);
FuzzyRule *fuzzyRule17 = new FuzzyRule(17,iferPS_and_edNS,theopZR);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule17);
FuzzyRuleAntecedent *iferPS_and_edZR= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPS_and_edNS->joinWithAND(erPS, edZR);
FuzzyRule *fuzzyRule18 = new FuzzyRule(18,iferPS_and_edZR,theopPS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule18);
FuzzyRuleAntecedent *iferPS_and_edPS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPS_and_edPS->joinWithAND(erPS, edPS);
FuzzyRule *fuzzyRule19 = new FuzzyRule(19,iferPS_and_edPS,theopPM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule19);
FuzzyRuleAntecedent *iferPS_and_edPM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPS_and_edPM->joinWithAND(erPS, edPM);
FuzzyRule *fuzzyRule20 = new FuzzyRule(20,iferPS_and_edPM,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule20);
FuzzyRuleAntecedent *iferPS_and_edPL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPS_and_edPL->joinWithAND(erPS, edPL);
FuzzyRule *fuzzyRule21 = new FuzzyRule(21,iferPS_and_edPL,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule21);
FuzzyRuleAntecedent *iferZR_and_edNL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferZR_and_edNL->joinWithAND(erZR, edNL);
FuzzyRule *fuzzyRule22 = new FuzzyRule(22,iferZR_and_edNL,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule22);
FuzzyRuleAntecedent *iferZR_and_edNM= new FuzzyRuleAntecedent();
```

```
iferZR_and_edNM->joinWithAND(erZR, edNM);
FuzzyRule *fuzzyRule23 = new FuzzyRule(23,iferZR_and_edNM,theopNM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule23);
FuzzyRuleAntecedent *iferZR_and_edNS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferZR_and_edNS->joinWithAND(erZR, edNS);
FuzzyRule *fuzzyRule24 = new FuzzyRule(24,iferZR_and_edNS,theopNS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule24);
FuzzyRuleAntecedent *iferZR_and_edZR= new FuzzyRuleAntecedent();
iferZR_and_edZR->joinWithAND(erZR, edZR);
FuzzyRule *fuzzyRule25 = new FuzzyRule(25,iferZR_and_edZR,theopZR);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule25);
FuzzyRuleAntecedent *iferZR_and_edPS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferZR_and_edPS->joinWithAND(erZR, edPS);
FuzzyRule *fuzzyRule26 = new FuzzyRule(26,iferZR_and_edPS,theopPS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule26);
FuzzyRuleAntecedent *iferZR_and_edPM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferZR_and_edPM->joinWithAND(erZR, edPM);
FuzzyRule *fuzzyRule27 = new FuzzyRule(27,iferZR_and_edPM,theopPM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule27);
FuzzyRuleAntecedent *iferZR_and_edPL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferZR_and_edPL->joinWithAND(erZR, edPL);
FuzzyRule *fuzzyRule28 = new FuzzyRule(28,iferZR_and_edPL,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule28);
FuzzyRuleAntecedent *iferNS_and_edNL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNS_and_edNL->joinWithAND(erNS, edNL);
FuzzyRule *fuzzyRule29 = new FuzzyRule(29,iferNS_and_edNL,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule29);
FuzzyRuleAntecedent *iferNS_and_edNM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNS_and_edNM->joinWithAND(erNS, edNM);
FuzzyRule *fuzzyRule30 = new FuzzyRule(30,iferNS_and_edNM,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule30);
```

```
FuzzyRuleAntecedent *iferNS_and_edNS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNS_and_edNS->joinWithAND(erNS, edNS);
FuzzyRule *fuzzyRule31 = new FuzzyRule(31,iferNS_and_edNS,theopNM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule31);
FuzzyRuleAntecedent *iferNS_and_edZR= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNS_and_edZR->joinWithAND(erNS, edZR);
FuzzyRule *fuzzyRule32 = new FuzzyRule(32,iferNS_and_edZR,theopNS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule32);
FuzzyRuleAntecedent *iferNS_and_edPS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNS_and_edPS->joinWithAND(erNS, edPS);
FuzzyRule *fuzzyRule33 = new FuzzyRule(33,iferNS_and_edPS,theopZR);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule33);
FuzzyRuleAntecedent *iferNS_and_edPM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNS_and_edPM->joinWithAND(erNS, edPM);
FuzzyRule *fuzzyRule34 = new FuzzyRule(34,iferNS_and_edPM,theopPS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule34);
FuzzyRuleAntecedent *iferNS_and_edPL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNS_and_edPL->joinWithAND(erNS, edPL);
FuzzyRule *fuzzyRule35 = new FuzzyRule(35,iferNS_and_edPL,theopPM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule35);
FuzzyRuleAntecedent *iferNM_and_edNL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNM_and_edNL->joinWithAND(erNM, edNL);
FuzzyRule *fuzzyRule36 = new FuzzyRule(36,iferNM_and_edNL,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule36);
FuzzyRuleAntecedent *iferNM_and_edNM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNM_and_edNM->joinWithAND(erNM, edNM);
FuzzyRule *fuzzyRule37 = new FuzzyRule(37,iferNM_and_edNM,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule37);
FuzzyRuleAntecedent *iferNM_and_edNS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNM_and_edNS->joinWithAND(erNM, edNS);
FuzzyRule *fuzzyRule38 = new FuzzyRule(38,iferNM_and_edNS,theopNL);
```

```
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule38);
FuzzyRuleAntecedent *iferNM_and_edZR= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNM_and_edZR->joinWithAND(erNM, edZR);
FuzzyRule *fuzzyRule39 = new FuzzyRule(39,iferNM_and_edZR,theopNM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule39);
FuzzyRuleAntecedent *iferNM_and_edPS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNM_and_edPS->joinWithAND(erNM, edPS);
FuzzyRule *fuzzyRule40 = new FuzzyRule(40,iferNM_and_edPS,theopNS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule40);
FuzzyRuleAntecedent *iferNM_and_edPM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNM_and_edPM->joinWithAND(erNM, edPM);
FuzzyRule *fuzzyRule41 = new FuzzyRule(41,iferNM_and_edPM,theopZR);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule41);
FuzzyRuleAntecedent *iferNM_and_edPL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNM_and_edPL->joinWithAND(erNM, edPL);
FuzzyRule *fuzzyRule42 = new FuzzyRule(42,iferNM_and_edPL,theopPS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule42);
FuzzyRuleAntecedent *iferNL_and_edNL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNL_and_edNL->joinWithAND(erNL, edNL);
FuzzyRule *fuzzyRule43 = new FuzzyRule(43,iferNL_and_edNL,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule43);
FuzzyRuleAntecedent *iferNL_and_edNM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNL_and_edNM->joinWithAND(erNL, edNM);
FuzzyRule *fuzzyRule44 = new FuzzyRule(44,iferNL_and_edNM,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule44);
FuzzyRuleAntecedent *iferNL_and_edNS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNL_and_edNS->joinWithAND(erNL, edNS);
FuzzyRule *fuzzyRule45 = new FuzzyRule(45,iferNL_and_edNS,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule45);
FuzzyRuleAntecedent *iferNL_and_edZR= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNL_and_edZR->joinWithAND(erNL, edZR);
```

```

FuzzyRule *fuzzyRule46 = new FuzzyRule(46,iferNL_and_edZR,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule46);
FuzzyRuleAntecedent *iferNL_and_edPS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNL_and_edPS->joinWithAND(erNL, edPS);
FuzzyRule *fuzzyRule47 = new FuzzyRule(47,iferNL_and_edPS,theopNM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule47);
FuzzyRuleAntecedent *iferNL_and_edPM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNL_and_edPM->joinWithAND(erNL, edPM);
FuzzyRule *fuzzyRule48 = new FuzzyRule(48,iferNL_and_edPM,theopNM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule48);
FuzzyRuleAntecedent *iferNL_and_edPL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNL_and_edPL->joinWithAND(erNL, edPL);
FuzzyRule *fuzzyRule49 = new FuzzyRule(49,iferNL_and_edPL,theopZR);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule49);
}
long oldPosition = -999;
void loop() {
  Python_Read();
  int Esme = digitalRead(ESmer);
  if(Esme){
    if (millis() > refresh_time) {
      int input1 = SetpointX - PoBall;
      int input2 = (input1 - previous_input1)/0.1;
      previous_input1 = input1;
      fuzzy->setInput(1, input1);
      fuzzy->setInput(2, input2);
      fuzzy->fuzzify();
      float output = fuzzy->defuzzify(1);
      output = abs(output);
      Kd = 1.3*(output)+0.7;
      lambda = (-0.2*output)+0.98;
    }
  }
}

```

```

    double deltaError = (PoBall-PrePoBall)/0.1;
    double ErrorX = SetpointX - PoBall;
    double ErrorX_dot = ErrorX - PreErrorX;
    double Suface = lambda*ErrorX+ErrorX_dot;
    double signX = (Suface > 0) ? 1 : ((Suface < 0) ? -1 : 0);
    double Swith = Kd*Suface;
    double Eq = -((lambda*deltaError+FX)/GX);
    double Uout = Swith+Eq;
    AnglePos = Uout*-1;
    PrePoBall = PoBall;
    PreErrorX = ErrorX;
    refresh_time = millis() + SERIAL_REFRESH_TIME;
}
}
else{
    AnglePos = 0;
}
long newPos = myEnc.read();
long Encod = newPos*1.125;
double ErrorPos = Encod - AnglePos;
stepper1.move(ErrorPos);
stepper1.run();
}
void Python_Read(){
    if (Serial.available() >= 2) {
        int x_pos = Serial.parseInt();
        int y_pos = Serial.parseInt();
        X_Newro = x_pos;
        Y_Newro = y_pos;
    }
    Neuro_Fuzzy();
}

```

```

}
void Neuro_Fuzzy(){
    float input = X_Newro;
    float A = 0;
    float B = 0;
    float mf0[] = {60.1, 90.9, 140.5, 189.6};
    float mf1[] = {117.2, 167, 213.9, 263.7};
    float mf2[] = {192.9, 244.3, 297.1, 343.5};
    float mf3[] = {269.9, 315.4, 369.2, 419.5};
    float mf4[] = {349.9, 399.2, 444, 494.2};
    float mf5[] = {422.4, 475, 522.1, 552.9};
    float minr[6];
    float Rule[6];
    float output[] = {0.9982, 6.574, 12, 18, 23.44 , 29};
    minr[0] = 0;minr[1] = 0;minr[2] = 0;minr[3] = 0;minr[4] = 0;minr[5] = 0;
    Rule[0] = 0;Rule[1] = 0;Rule[2] = 0;Rule[3] = 0;Rule[4] = 0;Rule[5] = 0;

    if(input > mf0[0] && input < mf0[3]){
        Rule[0] = 0.9982;
        if(input < mf0[2]){minr[0] = 1;}
        else if(input > mf0[2] && input < mf0[3]){
            minr[0] = (-0.0204*input) + 3.8615;
        }
        else{minr[0] = 0;}
    }

    if(input > mf1[0] && input < mf1[3]){
        Rule[1] = 6.574;
        if(input>mf1[0]&&input<mf1[1]){
            minr[1] = (0.0201*input) - 2.3534;
        }else if(input > mf1[1] && input < mf1[2]){
            minr[1] = 1;
        }
    }

```



```

}else if(input > mf1[2]&&input < mf1[3]){
    minr[1] = (-0.0201*input) + 5.2952;
}
}
if(input > mf2[0] && input < mf2[3]){
    Rule[2] = 12;
    if(input>mf2[0]&&input<mf2[1]){
        minr[2] = (0.0195*input) - 3.7529;
    }else if(input > mf2[1] && input < mf2[2]){
        minr[2] = 1;
    }else if(input > mf2[2]&&input < mf2[3]){
        minr[2] = (-0.0216*input) + 7.403;
    }
}
if(input > mf3[0] && input < mf3[3]){
    Rule[3] = 18;
    if(input>mf3[0]&&input<mf3[1]){
        minr[3] = (0.022*input) - 5.9319;
    }else if(input > mf3[1] && input < mf3[2]){
        minr[3] = 1;
    }else if(input > mf3[2]&&input < mf3[3]){
        minr[3] = (-0.0199*input) + 8.34;
    }
}
if(input > mf4[0] && input < mf4[3]){
    Rule[4] = 23.44;
    if(input>mf4[0]&&input<mf4[1]){
        minr[4] = (0.0203*input) - 7.0974;
    }else if(input > mf4[1] && input < mf4[2]){
        minr[4] = 1;
    }else if(input > mf4[2]&&input < mf4[3]){

```

```

    minr[4] = (-0.0199*input) + 9.8446;
}
}
if(input > mf5[0] && input < mf5[3]){
    Rule[5] = 29;
    if(input>mf5[0]&&input<mf5[1]){
        minr[5] = (0.019*input) - 8.0304;
    }else if(input > mf5[1] && input < mf5[2]){
        minr[5] = 1;
    }else if(input > mf5[2]&&input < mf5[3]){
        minr[5] = (-0.0325*input) + 17.951;
    }
}
}
A =
(Rule[0]*minr[0])+(Rule[1]*minr[1])+(Rule[2]*minr[2])+(Rule[3]*minr[3])+(Rule[4]*minr[4]
)+(Rule[5]*minr[5]);
B = minr[0]+minr[1]+minr[2]+minr[3]+minr[4]+minr[5];
X_Value = A/B;
PoBall = X_Value;
}

```

16) โปรแกรมอาศัยโนควบคุมแกนวาย ตัวควบคุมแผ่นเลื่อน ปรับจูนค่าด้วยตรรกศาสตร์

คลุมเครือ

```

#include <AccelStepper.h>
#include <Encoder.h>
#define dirPin_X 9
#define stepPin_X 8
#include <Fuzzy.h>
// Fuzzy
Fuzzy *fuzzy = new Fuzzy();
// FuzzyInput

```

```

FuzzySet *erNL = new FuzzySet(-40, -30, -30, -20);
FuzzySet *erNM = new FuzzySet(-30, -20, -20, -10);
FuzzySet *erNS = new FuzzySet(-20, -10, -10, 0);
FuzzySet *erZR = new FuzzySet(-10, 0, 0, 10);
FuzzySet *erPS = new FuzzySet(0, 10, 10, 20);
FuzzySet *erPM = new FuzzySet(10, 20, 20, 30);
FuzzySet *erPL = new FuzzySet(20, 30, 30, 40);
FuzzySet *edNL = new FuzzySet(-20, -15, -15, -10);
FuzzySet *edNM = new FuzzySet(-15, -10, -10, -5);
FuzzySet *edNS = new FuzzySet(-10, -5, -5, 0);
FuzzySet *edZR = new FuzzySet(-5, 0, 0, 5);
FuzzySet *edPS = new FuzzySet(0, 5, 5, 10);
FuzzySet *edPM = new FuzzySet(5, 10, 10, 10);
FuzzySet *edPL = new FuzzySet(10, 15, 15, 20);
// FuzzyOutput
FuzzySet *opNL = new FuzzySet(-1.333, -1, -1, -0.6667);
FuzzySet *opNM = new FuzzySet(-1, -0.6667, -0.6667, -0.3333);
FuzzySet *opNS = new FuzzySet(-0.6667, -0.3333, -0.3333, 0);
FuzzySet *opZR = new FuzzySet(-0.3333, 0, 0, 0.3333);
FuzzySet *opPS = new FuzzySet(0, 0.3333, 0.3333, 0.6667);
FuzzySet *opPM = new FuzzySet(0.3333, 0.667, 0.667, 1);
FuzzySet *opPL = new FuzzySet(0.6667, 1, 1, 1.333);
int previous_input1;
int FX = 0.5; int GX = 4.325;
const long SERIAL_REFRESH_TIME = 100;
long refresh_time;
double SetpointX = 270;
double Kd = 0.7;
double lambda = 0.98;
double prevErrorX = 0;
double prevSignX = 0;

```

```
double outputX = 0;
double PoBall = 0;
double deltaSignX = 0;
double PrePoBall = 0;
double PreErrorX = 0;
int ESmer = 7;
int Buzzer = 5;
int X_Value = 0;
int Y_Value = 0;
int X_Newro = 0;
int Y_Newro = 0;
long AnglePos = 0;
Encoder myEnc(2, 3);
AccelStepper stepper1(AccelStepper::DRIVER, stepPin_X, dirPin_X);
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  stepper1.setMaxSpeed(6000.0);
  stepper1.setAcceleration(12000.0);
  pinMode(ESmer,INPUT_PULLUP);
  pinMode(Buzzer,OUTPUT);
  digitalWrite(Buzzer,HIGH);
  // FuzzyInput
  FuzzyInput *errorSim = new FuzzyInput(1);
  errorSim->addFuzzySet(erNL);
  errorSim->addFuzzySet(erNM);
  errorSim->addFuzzySet(erNS);
  errorSim->addFuzzySet(erZR);
  errorSim->addFuzzySet(erPS);
  errorSim->addFuzzySet(erPM);
  errorSim->addFuzzySet(erPL);
  fuzzy->addFuzzyInput(errorSim);
```

```
// FuzzyInput
FuzzyInput *errorDot = new FuzzyInput(2);
errorDot->addFuzzySet(edNL);
errorDot->addFuzzySet(edNM);
errorDot->addFuzzySet(edNS);
errorDot->addFuzzySet(edZR);
errorDot->addFuzzySet(edPS);
errorDot->addFuzzySet(edPM);
errorDot->addFuzzySet(edPL);
fuzzy->addFuzzyInput(errorDot);

// FuzzyOutput
FuzzyOutput *outputFS = new FuzzyOutput(1);
outputFS->addFuzzySet(opNL);
outputFS->addFuzzySet(opNM);
outputFS->addFuzzySet(opNS);
outputFS->addFuzzySet(opZR);
outputFS->addFuzzySet(opPS);
outputFS->addFuzzySet(opPM);
outputFS->addFuzzySet(opPL);
fuzzy->addFuzzyOutput(outputFS);

FuzzyRuleConsequent *theopNL = new FuzzyRuleConsequent();
theopNL->addOutput(opNL);

FuzzyRuleConsequent *theopNM = new FuzzyRuleConsequent();
theopNM->addOutput(opNM);

FuzzyRuleConsequent *theopNS = new FuzzyRuleConsequent();
theopNS->addOutput(opNS);

FuzzyRuleConsequent *theopZR = new FuzzyRuleConsequent();
theopZR->addOutput(opZR);

FuzzyRuleConsequent *theopPS = new FuzzyRuleConsequent();
theopPS->addOutput(opPS);

FuzzyRuleConsequent *theopPM = new FuzzyRuleConsequent();
```

```
theopPM->addOutput(opPM);
FuzzyRuleConsequent *theopPL = new FuzzyRuleConsequent();
theopPL->addOutput(opPL);
FuzzyRuleAntecedent *iferPL_and_edNL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPL_and_edNL->joinWithAND(erPL, edNL);
FuzzyRule *fuzzyRule01 = new FuzzyRule(1,iferPL_and_edNL,theopZR);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule01);
FuzzyRuleAntecedent *iferPL_and_edNM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPL_and_edNM->joinWithAND(erPL, edNM);
FuzzyRule *fuzzyRule02 = new FuzzyRule(2,iferPL_and_edNM,theopPS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule02);
FuzzyRuleAntecedent *iferPL_and_edNS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPL_and_edNS->joinWithAND(erPL, edNS);
FuzzyRule *fuzzyRule03 = new FuzzyRule(3,iferPL_and_edNS,theopPM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule03);
FuzzyRuleAntecedent *iferPL_and_edZR= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPL_and_edZR->joinWithAND(erPL, edZR);
FuzzyRule *fuzzyRule04 = new FuzzyRule(4,iferPL_and_edZR,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule04);
FuzzyRuleAntecedent *iferPL_and_edPS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPL_and_edPS->joinWithAND(erPL, edPS);
FuzzyRule *fuzzyRule05 = new FuzzyRule(5,iferPL_and_edPS,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule05);
FuzzyRuleAntecedent *iferPL_and_edPM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPL_and_edPM->joinWithAND(erPL, edPM);
FuzzyRule *fuzzyRule06 = new FuzzyRule(6,iferPL_and_edPM,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule06);
FuzzyRuleAntecedent *iferPL_and_edPL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPL_and_edPL->joinWithAND(erPL, edPL);
FuzzyRule *fuzzyRule07 = new FuzzyRule(7,iferPL_and_edPL,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule07);
```

```
FuzzyRuleAntecedent *iferPM_and_edNL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPM_and_edNL->joinWithAND(erPM, edNL);
FuzzyRule *fuzzyRule08 = new FuzzyRule(8,iferPM_and_edNL,theopNS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule08);

FuzzyRuleAntecedent *iferPM_and_edNM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPM_and_edNM->joinWithAND(erPM, edNM);
FuzzyRule *fuzzyRule09 = new FuzzyRule(9,iferPM_and_edNM,theopZR);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule09);
FuzzyRuleAntecedent *iferPM_and_edNS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPM_and_edNS->joinWithAND(erPM, edNS);
FuzzyRule *fuzzyRule10 = new FuzzyRule(10,iferPM_and_edNS,theopPS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule10);
FuzzyRuleAntecedent *iferPM_and_edZR= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPM_and_edZR->joinWithAND(erPM, edZR);
FuzzyRule *fuzzyRule11 = new FuzzyRule(11,iferPM_and_edZR,theopPM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule11);
FuzzyRuleAntecedent *iferPM_and_edPS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPM_and_edPS->joinWithAND(erPM, edPS);
FuzzyRule *fuzzyRule12 = new FuzzyRule(12,iferPM_and_edPS,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule12);
FuzzyRuleAntecedent *iferPM_and_edPM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPM_and_edPM->joinWithAND(erPM, edPM);
FuzzyRule *fuzzyRule13 = new FuzzyRule(13,iferPM_and_edPM,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule13);
FuzzyRuleAntecedent *iferPM_and_edPL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPM_and_edPL->joinWithAND(erPM, edPL);
FuzzyRule *fuzzyRule14 = new FuzzyRule(14,iferPM_and_edPL,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule14);
FuzzyRuleAntecedent *iferPS_and_edNL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPS_and_edNL->joinWithAND(erPS, edNL);
```

```
FuzzyRule *fuzzyRule15 = new FuzzyRule(15,iferPS_and_edNL,theopNM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule15);
FuzzyRuleAntecedent *iferPS_and_edNM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPS_and_edNM->joinWithAND(erPS, edNM);
FuzzyRule *fuzzyRule16 = new FuzzyRule(16,iferPS_and_edNM,theopNS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule16);
FuzzyRuleAntecedent *iferPS_and_edNS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPS_and_edNS->joinWithAND(erPS, edNS);
FuzzyRule *fuzzyRule17 = new FuzzyRule(17,iferPS_and_edNS,theopZR);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule17);
FuzzyRuleAntecedent *iferPS_and_edZR= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPS_and_edNS->joinWithAND(erPS, edZR);
FuzzyRule *fuzzyRule18 = new FuzzyRule(18,iferPS_and_edZR,theopPS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule18);
FuzzyRuleAntecedent *iferPS_and_edPS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPS_and_edPS->joinWithAND(erPS, edPS);
FuzzyRule *fuzzyRule19 = new FuzzyRule(19,iferPS_and_edPS,theopPM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule19);
FuzzyRuleAntecedent *iferPS_and_edPM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPS_and_edPM->joinWithAND(erPS, edPM);
FuzzyRule *fuzzyRule20 = new FuzzyRule(20,iferPS_and_edPM,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule20);
FuzzyRuleAntecedent *iferPS_and_edPL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferPS_and_edPL->joinWithAND(erPS, edPL);
FuzzyRule *fuzzyRule21 = new FuzzyRule(21,iferPS_and_edPL,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule21);
FuzzyRuleAntecedent *iferZR_and_edNL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferZR_and_edNL->joinWithAND(erZR, edNL);
FuzzyRule *fuzzyRule22 = new FuzzyRule(22,iferZR_and_edNL,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule22);
FuzzyRuleAntecedent *iferZR_and_edNM= new FuzzyRuleAntecedent();
```



```

iferZR_and_edNM->joinWithAND(erZR, edNM);
FuzzyRule *fuzzyRule23 = new FuzzyRule(23,iferZR_and_edNM,theopNM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule23);
FuzzyRuleAntecedent *iferZR_and_edNS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferZR_and_edNS->joinWithAND(erZR, edNS);
FuzzyRule *fuzzyRule24 = new FuzzyRule(24,iferZR_and_edNS,theopNS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule24);
FuzzyRuleAntecedent *iferZR_and_edZR= new FuzzyRuleAntecedent();
iferZR_and_edZR->joinWithAND(erZR, edZR);
FuzzyRule *fuzzyRule25 = new FuzzyRule(25,iferZR_and_edZR,theopZR);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule25);
FuzzyRuleAntecedent *iferZR_and_edPS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferZR_and_edPS->joinWithAND(erZR, edPS);
FuzzyRule *fuzzyRule26 = new FuzzyRule(26,iferZR_and_edPS,theopPS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule26);
FuzzyRuleAntecedent *iferZR_and_edPM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferZR_and_edPM->joinWithAND(erZR, edPM);
FuzzyRule *fuzzyRule27 = new FuzzyRule(27,iferZR_and_edPM,theopPM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule27);
FuzzyRuleAntecedent *iferZR_and_edPL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferZR_and_edPL->joinWithAND(erZR, edPL);
FuzzyRule *fuzzyRule28 = new FuzzyRule(28,iferZR_and_edPL,theopPL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule28);
FuzzyRuleAntecedent *iferNS_and_edNL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNS_and_edNL->joinWithAND(erNS, edNL);
FuzzyRule *fuzzyRule29 = new FuzzyRule(29,iferNS_and_edNL,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule29);
FuzzyRuleAntecedent *iferNS_and_edNM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNS_and_edNM->joinWithAND(erNS, edNM);
FuzzyRule *fuzzyRule30 = new FuzzyRule(30,iferNS_and_edNM,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule30);

```

```
FuzzyRuleAntecedent *iferNS_and_edNS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNS_and_edNS->joinWithAND(erNS, edNS);
FuzzyRule *fuzzyRule31 = new FuzzyRule(31,iferNS_and_edNS,theopNM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule31);
FuzzyRuleAntecedent *iferNS_and_edZR= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNS_and_edZR->joinWithAND(erNS, edZR);
FuzzyRule *fuzzyRule32 = new FuzzyRule(32,iferNS_and_edZR,theopNS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule32);
FuzzyRuleAntecedent *iferNS_and_edPS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNS_and_edPS->joinWithAND(erNS, edPS);
FuzzyRule *fuzzyRule33 = new FuzzyRule(33,iferNS_and_edPS,theopZR);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule33);
FuzzyRuleAntecedent *iferNS_and_edPM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNS_and_edPM->joinWithAND(erNS, edPM);
FuzzyRule *fuzzyRule34 = new FuzzyRule(34,iferNS_and_edPM,theopPS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule34);
FuzzyRuleAntecedent *iferNS_and_edPL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNS_and_edPL->joinWithAND(erNS, edPL);
FuzzyRule *fuzzyRule35 = new FuzzyRule(35,iferNS_and_edPL,theopPM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule35);
FuzzyRuleAntecedent *iferNM_and_edNL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNM_and_edNL->joinWithAND(erNM, edNL);
FuzzyRule *fuzzyRule36 = new FuzzyRule(36,iferNM_and_edNL,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule36);
FuzzyRuleAntecedent *iferNM_and_edNM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNM_and_edNM->joinWithAND(erNM, edNM);
FuzzyRule *fuzzyRule37 = new FuzzyRule(37,iferNM_and_edNM,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule37);
FuzzyRuleAntecedent *iferNM_and_edNS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNM_and_edNS->joinWithAND(erNM, edNS);
FuzzyRule *fuzzyRule38 = new FuzzyRule(38,iferNM_and_edNS,theopNL);
```

```

fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule38);
FuzzyRuleAntecedent *iferNM_and_edZR= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNM_and_edZR->joinWithAND(erNM, edZR);
FuzzyRule *fuzzyRule39 = new FuzzyRule(39,iferNM_and_edZR,theopNM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule39);
FuzzyRuleAntecedent *iferNM_and_edPS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNM_and_edPS->joinWithAND(erNM, edPS);
FuzzyRule *fuzzyRule40 = new FuzzyRule(40,iferNM_and_edPS,theopNS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule40);
FuzzyRuleAntecedent *iferNM_and_edPM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNM_and_edPM->joinWithAND(erNM, edPM);
FuzzyRule *fuzzyRule41 = new FuzzyRule(41,iferNM_and_edPM,theopZR);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule41);
FuzzyRuleAntecedent *iferNM_and_edPL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNM_and_edPL->joinWithAND(erNM, edPL);
FuzzyRule *fuzzyRule42 = new FuzzyRule(42,iferNM_and_edPL,theopPS);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule42);
FuzzyRuleAntecedent *iferNL_and_edNL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNL_and_edNL->joinWithAND(erNL, edNL);
FuzzyRule *fuzzyRule43 = new FuzzyRule(43,iferNL_and_edNL,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule43);
FuzzyRuleAntecedent *iferNL_and_edNM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNL_and_edNM->joinWithAND(erNL, edNM);
FuzzyRule *fuzzyRule44 = new FuzzyRule(44,iferNL_and_edNM,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule44);

FuzzyRuleAntecedent *iferNL_and_edNS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNL_and_edNS->joinWithAND(erNL, edNS);
FuzzyRule *fuzzyRule45 = new FuzzyRule(45,iferNL_and_edNS,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule45);
FuzzyRuleAntecedent *iferNL_and_edZR= new FuzzyRuleAntecedent();

```

```

iferNL_and_edZR->joinWithAND(erNL, edZR);
FuzzyRule *fuzzyRule46 = new FuzzyRule(46,iferNL_and_edZR,theopNL);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule46);
FuzzyRuleAntecedent *iferNL_and_edPS= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNL_and_edPS->joinWithAND(erNL, edPS);
FuzzyRule *fuzzyRule47 = new FuzzyRule(47,iferNL_and_edPS,theopNM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule47);
FuzzyRuleAntecedent *iferNL_and_edPM= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNL_and_edPM->joinWithAND(erNL, edPM);
FuzzyRule *fuzzyRule48 = new FuzzyRule(48,iferNL_and_edPM,theopNM);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule48);
FuzzyRuleAntecedent *iferNL_and_edPL= new FuzzyRuleAntecedent();
iferNL_and_edPL->joinWithAND(erNL, edPL);
FuzzyRule *fuzzyRule49 = new FuzzyRule(49,iferNL_and_edPL,theopZR);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule49);
}
long oldPosition = -999;
void loop() {
  Python_Read();
  int Esme = digitalRead(ESmer);
  if(Esme){
    if (millis() > refresh_time) {
      int input1 = SetpointX - PoBall;
      int input2 = (input1 - previous_input1)/0.1;
      previous_input1 = input1;
      fuzzy->setInput(1, input1);
      fuzzy->setInput(2, input2);
      fuzzy->fuzzify();
      float output = fuzzy->defuzzify(1);
      output = abs(output);
      Kd = 1.3*(output)+0.7;
    }
  }
}

```

```

    lambda = (-0.2*output)+0.98;
    double deltaError = (PoBall-PrePoBall)/0.1;
    double ErrorX = SetpointX - PoBall;
    double ErrorX_dot = ErrorX - PreErrorX;
    double Surface = lambda*ErrorX+ErrorX_dot;
    double signX = (Surface > 0) ? 1 : ((Surface < 0) ? -1 : 0);
    double Swith = Kd*Surface;
    double Eq = -((lambda*deltaError+FX)/GX);
    double Uout = Swith+Eq;
    AnglePos = Uout;

    PrePoBall = PoBall;
    PreErrorX = ErrorX;

    refresh_time = millis() + SERIAL_REFRESH_TIME;
}
}
else{
    AnglePos = 0;
}
long newPos = myEnc.read();
long Encod = newPos*1.125;
double ErrorPos = Encod - AnglePos;
stepper1.move(ErrorPos);
stepper1.run();
}
void Python_Read(){
    if (Serial.available() >= 2) {
        int x_pos = Serial.parseInt();
        int y_pos = Serial.parseInt();
        X_Newro = x_pos;

```

```

    Y_Newro = y_pos;
}
Neuro_Fuzzy();
}
void Neuro_Fuzzy(){
    float intput = Y_Newro;
    float A = 0;
    float B = 0;

    float mf0[] = {-3.18, 27.78, 84.63, 129.2};
    float mf1[] = {56.7, 101.8, 150.6, 202.1};
    float mf2[] = {134.8, 187.5, 234.8, 279.9};
    float mf3[] = {207.2, 252.7, 307.3, 359.6};
    float mf4[] = {286.9, 336.3, 382.5, 433.6};
    float mf5[] = {362.5, 414.8, 461.2, 492.2};
    float minr[6];
    float Rule[6];
    float output[] = {29, 23, 18, 12, 6.386, 0.9957};
    minr[0] = 0;minr[1] = 0;minr[2] = 0;minr[3] = 0;minr[4] = 0;minr[5] = 0;
    Rule[0] = 0;Rule[1] = 0;Rule[2] = 0;Rule[3] = 0;Rule[4] = 0;Rule[5] = 0;
    if(intput > mf0[0] && intput < mf0[3]){
        Rule[0] = output[0];
        if(intput < mf0[2]){minr[0] = 1;}
        else if(intput > mf0[2] && intput < mf0[3]){
            minr[0] = (-0.0224*intput) + 2.8988;
        }
        else{minr[0] = 0;}
    }
    if(intput > mf1[0] && intput < mf1[3]){
        Rule[1] = output[1];
        if(intput>mf1[0]&&intput<mf1[1]){

```

```

    minr[1] = (0.0222*input) - 1.2572;
}else if(input > mf1[1] && input < mf1[2]){
    minr[1] = 1;
}else if(input > mf1[2]&&input < mf1[3]){
    minr[1] = (-0.0194*input) + 3.9243;
}
}
if(input > mf2[0] && input < mf2[3]){
    Rule[2] = output[2];
    if(input>mf2[0]&&input<mf2[1]){
        minr[2] = (0.019*input) - 2.5579;
    }else if(input > mf2[1] && input < mf2[2]){
        minr[2] = 1;
    }else if(input > mf2[2]&&input < mf2[3]){
        minr[2] = (-0.0222*input) + 6.2062;
    }
}
if(input > mf3[0] && input < mf3[3]){
    Rule[3] = output[3];
    if(input>mf3[0]&&input<mf3[1]){
        minr[3] = (0.0222*input) - 4.5778;
    }else if(input > mf3[1] && input < mf3[2]){
        minr[3] = 1;
    }else if(input > mf3[2]&&input < mf3[3]){
        minr[3] = (-0.0192*input) + 6.8846;
    }
}
if(input > mf4[0] && input < mf4[3]){
    Rule[4] = output[4];
    if(input>mf4[0]&&input<mf4[1]){
        minr[4] = (0.0202*input) - 5.8077;
    }
}

```

```

}else if(input > mf4[1] && input < mf4[2]){
    minr[4] = 1;
}else if(input > mf4[2]&&input < mf4[3]){
    minr[4] = (-0.0196*input) + 8.4853;
}
}
if(input > mf5[0] && input < mf5[3]){
    Rule[5] = output[5];
    if(input>mf5[0]&&input<mf5[1]){
        minr[5] = (0.0191*input) - 6.9312;
    }else if(input > mf5[1] && input < mf5[2]){
        minr[5] = 1;
    }else if(input > mf5[2]&&input < mf5[3]){
        minr[5] = (-0.0323*input) + 15.877;
    }
}
}
A =
(Rule[0]*minr[0])+(Rule[1]*minr[1])+(Rule[2]*minr[2])+(Rule[3]*minr[3])+(Rule[4]*minr[4]
)+(Rule[5]*minr[5]);
B = minr[0]+minr[1]+minr[2]+minr[3]+minr[4]+minr[5];
Y_Value = A/B;
PoBall = Y_Value;
}

```


ภาคผนวก ค

คู่มือการใช้งานของโครงการ

จากการทดลองระบบควบคุมบอลทรงตัวบนแผ่น มีการใช้โปรแกรมต่าง ๆ มากมายเพื่อใช้ในการควบคุม และสร้างเสถียรภาพในการรักษาตำแหน่งของลูกบอล โดยคู่มือการติดตั้ง และใช้งานโปรแกรมต่าง ๆ

คู่มือการใช้งานโปรแกรมอาดูโยโน แสดงดังภาพที่ ค-1



ภาพที่ ค-1 คิวอาร์โค้ดคู่มือการใช้งานโปรแกรมอาดูโยโน (<https://qrco.de/be7Bcu>)

คู่มือการใช้งานโปรแกรมพีแอลซีอมรอน แสดงดังภาพที่ ค-2



ภาพที่ ค-2 คิวอาร์โค้ดคู่มือการใช้งานโปรแกรมพีแอลซีอมรอน (<https://qrco.de/be7Be0>)

คู่มือการใช้งานโปรแกรมพีแอลซีซีเมนต์แสดงดั่งภาพที่ ค-3



ภาพที่ ค-3 คิวอาร์โค้ดคู่มือการใช้งานโปรแกรมพีแอลซีซีเมนต์(<https://qrco.de/be7BhS>)

คู่มือการใช้งานโปรแกรมพีแอลซีมิติซูบิชิแสดงดั่งภาพที่ ค-4



ภาพที่ ค-4 คิวอาร์โค้ดคู่มือการใช้งานโปรแกรมพีแอลซีมิติซูบิชิ (<https://qrco.de/be7Bf1>)

ประวัติผู้จัดทำ

- ชื่อ : นายกฤตยชญ์ พลไชย
- ชื่อปริญญาบัตร : ระบบควบคุมบอลลองตัวบนแผ่นสำหรับการควบคุมขั้นสูง
- สาขาวิชา : วิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์
- ประวัติ
- ประวัติการศึกษา : - การศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขา แมคคาทรอนิกส์
วิทยาลัยเทคโนโลยีภาคตะวันออก (อีเทค) สำเร็จการศึกษา
ปีการศึกษา 2562
- การศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ ภาควิชา
ครุศาสตร์เครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- สถานที่ติดต่อ : 10/1 หมู่ 13 ตำบล ไตรตรังษ์ อำเภอ เมือง จังหวัด กำแพงเพชร
รหัสไปรษณีย์ 62000
- เบอร์ติดต่อ : 096-9088190
- ชื่อ : ชนาธิป คำแหง
- ชื่อปริญญาบัตร : ระบบควบคุมบอลลองตัวบนแผ่นสำหรับการควบคุมขั้นสูง
- สาขาวิชา : วิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์
- ประวัติ
- ประวัติการศึกษา : - การศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขา แมคคาทรอนิกส์
และหุ่นยนต์ วิทยาลัยเทคนิคพิจิตร สำเร็จการศึกษาปีการศึกษา 2562
- การศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ ภาควิชา
ครุศาสตร์เครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- สถานที่ติดต่อ : 24 ม.4 ตำบล ทาเยียม อำเภอ สากเหล็ก จังหวัดพิจิตร
รหัสไปรษณีย์ 66160
- เบอร์ติดต่อ : 092-646524