

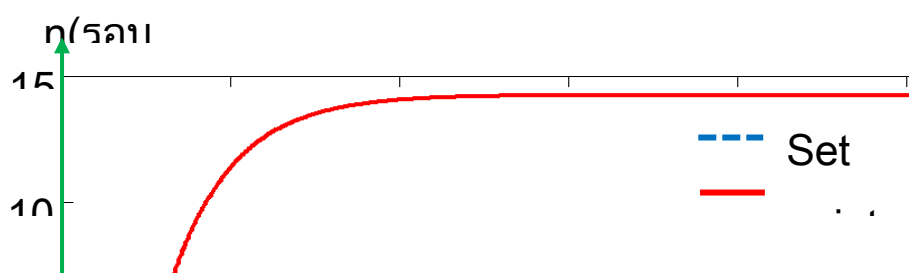
บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

ในการดำเนินงานของโครงการการสร้างและควบคุมระบบ แพนดูลัมผกผัน ได้แบ่งการทดลองเป็น 6 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการ Simulation แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแพนดูลัมผกผัน ส่วนที่สองเป็นการรักษาสมดุลของแท่งแพนดูลัม โดยใช้มือในการจับแท่งแพนดูลัม ตั้งขึ้นที่จุดสมดุลบน ที่มุม 180 องศา หรือ (-180 องศา) เพื่อกำหนดให้เป็น Set Point ในการเลี้ยงแท่งแพนดูลัม โดยใช้ตัวควบคุมแบบ พีไอดี และฟัซซี่ลอจิก ส่วนที่สามเป็นการควบคุมตำแหน่งของตัวรถเพื่อใช้ในการ แกว่งแท่งแพนดูลัม โดยใช้ตัวควบคุมแบบ พีไอดี การแกว่งแท่งแพนดูลัม ขึ้นจากจุดสมดุลล่างที่ มุม 0 องศา ถึง จุดสมดุลบนที่มุม 180 องศา หรือ ที่มุม 0 องศา ถึงจุดสมดุลบนที่มุม(-180 องศา) เพื่อกำหนดให้เป็น Set Point ในการรักษาสมดุลของแท่งแพนดูลัม ส่วนที่สี่เป็นการนำส่วนที่สองกับส่วนที่สามรวมเข้าด้วยกัน ในการรักษาสมดุลของแท่งแพนดูลัม เพื่อให้แท่งแพนดูลัม ตั้งขึ้นด้วยตัวระบบเอง ส่วนที่ห้าเป็นการรบกวนระบบโดยใช้มือผลักที่แท่งแพนดูลัมและที่ตัวรถ ส่วนสุดท้ายเป็นการรักษาสมดุลของแท่งแพนดูลัม โดยใช้ตัวควบคุมพีไอดีร่วมกับฟัซซี่ลอจิก

4.1 ผลการ Simulation ในโปรแกรม Simulink MATLAB

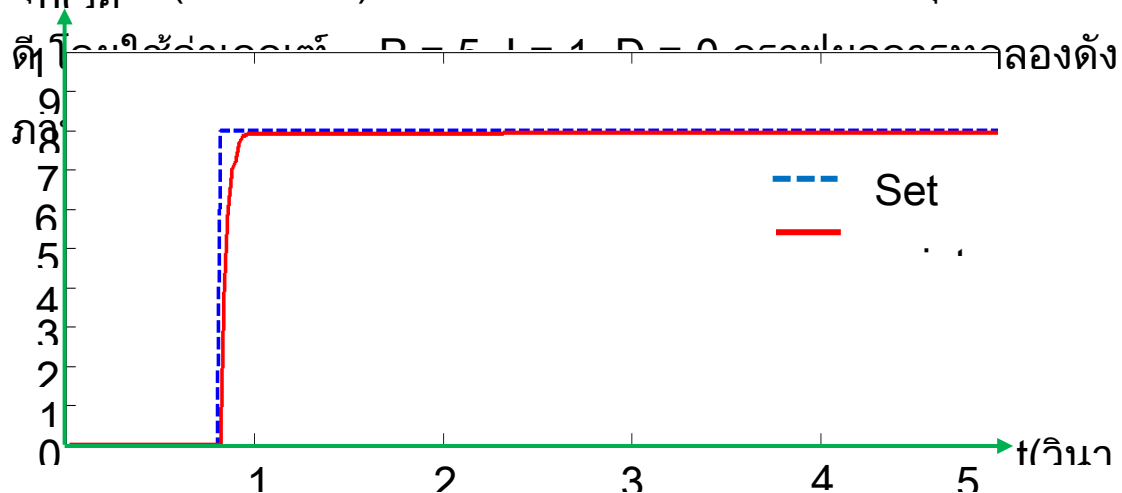
ผลการ Simulation แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current Motor : DC



Motor) แบบลูปเปิด(Open Loop) ผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับผลจากการทดลอง Open Loop ของมอเตอร์ระบบจริง

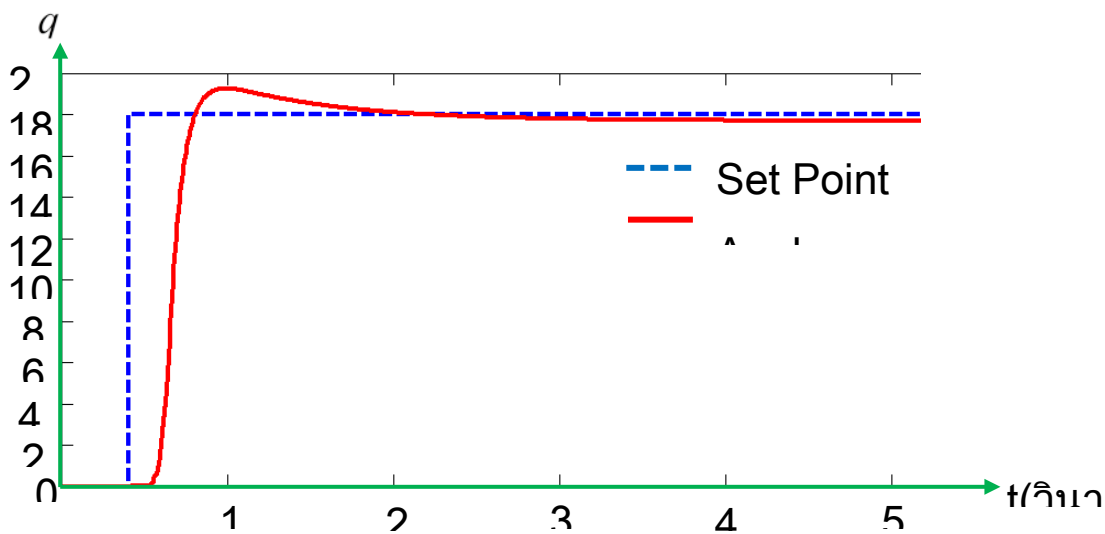
ภาพที่ 4-1 ผลการ Simulation แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
Open Loop

ผลการ Simulation แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบลูปปิด(Close Loop) กำหนดจุดอ้างอิง(Set Point) ที่ 8 รอบต่อนาที โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี



ภาพที่ 4-2 ผลการ Simulation แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
Close Loop

ผลการ Simulation แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแพนดูลัมผกผัน กำหนดให้ Set Point ที่มุม 180 องศาโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยใช้ค่าเกณฑ์ของการควบคุมในการรักษาสมดุลของแท่งแพนดูลัม ที่ $P = 10$, $I = 30$, $D = 0.5$ กราฟผลการทดลองดังภาพที่ 4-3



ภาพที่ 4-3 ผลการ Simulation แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ
ระบบแพนดูลัมผกผัน

Close Loop

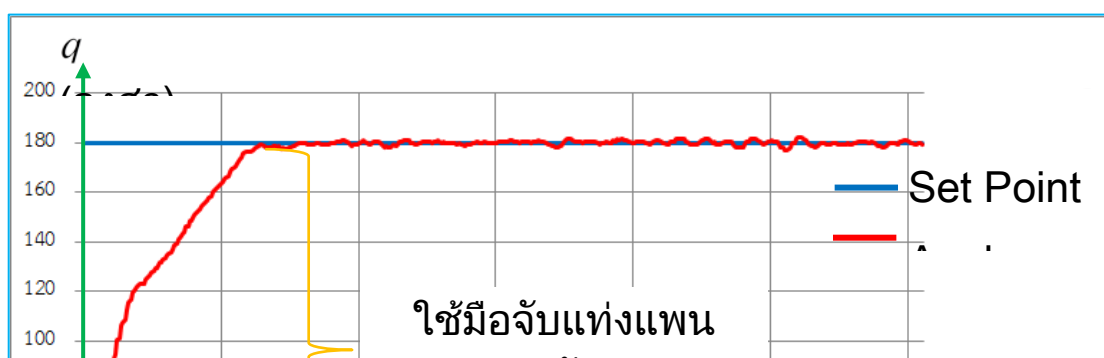
4.2 การทดลองรักษาสมดุลของแท่งแพนดูลัม โดยใช้มือตั้ง
แท่งแพนดูลัม ที่จุดสมดุลบนที่มุม 180 องศาหรือ (-180 องศา)
โดยใช้ตัวควบคุมแบบ พีไอดี และฟัซซี่ลอจิก

4.2.1 ควบคุมด้วยพีไอดี

ในการทดลองรักษาสมดุลแท่งแพนดูลัม โดยทำ
การทดลองเป็นจำนวน 10 ครั้งติดต่อกัน โดยใช้มือในการตั้งแท่ง
แพนดูลัม ที่มุม 180 องศา ผลการทดลองดังตารางที่ 4-1 ผลการ
ทดลองครั้งที่ดีที่สุดของการควบคุมด้วยพีไอดี สามารถรักษาสมดุล
ของแท่งแพนดูลัม ได้เป็นเวลา 139 วินาที แล้วตัวรถก็วิ่งไปชน
ขอบรางทำให้แท่งแพนดูลัมล้ม กราฟผลการทดลองดังภาพที่ 4-4

ตารางที่ 4-1 ผลที่ได้จากการทดลองควบคุมด้วยพีไอดีเวลาที่
แท่งแพนดูลัมสามารถ
รักษาสมดุลอยู่ได้

การทดลองครั้งที่	เวลาที่แท่งแพนดูลัมสามารถรักษาสมดุลอยู่ได้ วินาที : (Second)
1	139
2	5
3	13
4	51
5	8
6	117
7	7
8	33
9	9
10	50



ภาพที่ 4-4 ผลตอบสนองการควบคุมแท่งแพนดูลัม ด้วยพีไอดี

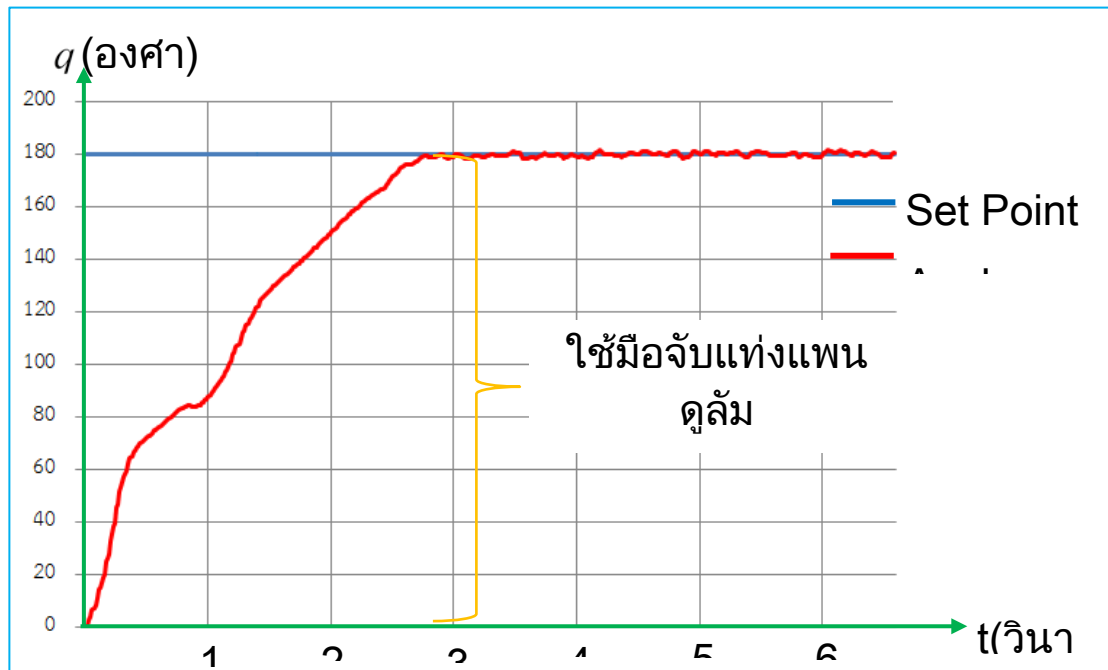
4.2.2 ควบคุมด้วยฟuzzyลอจิก

4.2.2.1 ควบคุมด้วยฟuzzyลอจิกแบบ 3 สมาชิก

ในการทดลองควบคุมแท่งแพนดูลัม โดยใช้ตัวควบคุมฟuzzyแบบ 3 สมาชิก ในการรักษาสมดุลของแท่งแพนดูลัม โดยทำการทดลองเป็นจำนวน 10 ครั้งติดต่อกันโดยใช้มือตั้ง แท่งแพนดูลัม ที่มุม 180 องศา ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-2 ผลการทดลองครั้งที่ดีที่สุดของการควบคุมด้วยฟuzzy สามารถรักษาสมดุลของแท่งแพนดูลัม ได้เป็นเวลา 8 วินาที แล้วตัวรถก็วิ่งไปชนขอบรางทำให้แท่งแพนดูลัมล้ม กราฟผลการทดลองดังภาพที่ 4-5

ตารางที่ 4-2 ผลที่ได้จากการทดลองควบคุมด้วยฟิซซีลอจิก
แบบ 3 สมาชิก เวลาที่แบ่ง
แพนดูลัมสามารถรักษาสมดุลอยู่ได้

การทดลอง ครั้งที่	เวลาที่แบ่งแพนดูลัมสามารถรักษาสมดุลอยู่ได้ วินาที : (Second)
1	8
2	4
3	3
4	3
5	8
6	5
7	7
8	5
9	5
10	4



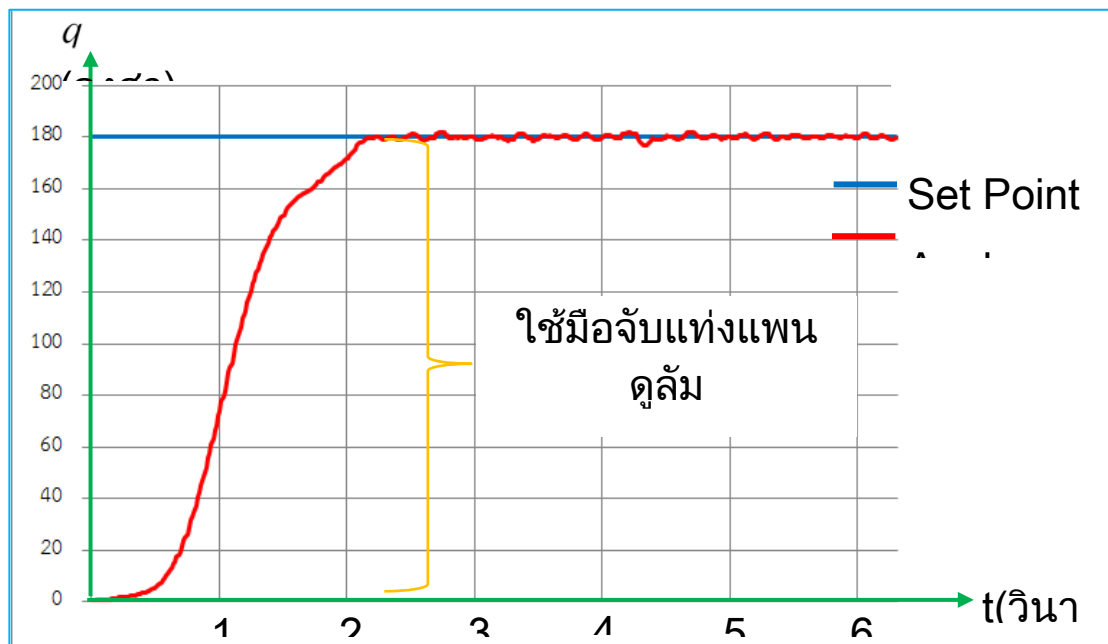
ภาพที่ 4-5 ผลตอบสนองการควบคุมแท่งแพนดูลัมด้วยฟuzzyลอจิก
แบบ 3 สมาชิก

4.2.2.2 ควบคุมด้วยฟuzzyลอจิกแบบ 5 สมาชิก

ในการทดลองควบคุมแท่งแพนดูลัม ใช้ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกแบบ 5 สมาชิก ในการรักษาสมดุลของแท่งแพนดูลัม โดยทำการทดลองเป็นจำนวน 10 ครั้งติดต่อกัน โดยใช้มือตั้งแท่งแพนดูลัม ที่มุม 180 องศา ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-3 ผลการทดลองครั้งที่ดีที่สุด สามารถรักษาสมดุลของแท่งแพนดูลัม ได้เป็นเวลา 13 วินาที แล้วตัวรถก็วิ่งไปชนขอบรางทำให้ แท่งแพนดูลัมล้ม กราฟผลการทดลองดังภาพที่ 4-6

ตารางที่ 4-3 ผลที่ได้จากการทดลองควบคุมด้วยฟิซซีลอจิก
แบบ 5 สมาชิก เวลาที่
แท่งแพนดูลัม สามารถรักษาสมดุลอยู่ได้

การทดลอง ครั้งที่	เวลาที่แท่งแพนดูลัมสามารถรักษาสมดุลอยู่ได้ วินาที : (Second)
1	10
2	12
3	9
4	8
5	5
6	12
7	10
8	13
9	9
10	8



ภาพที่ 4-6 ผลตอบสนองการควบคุมแท่งแพนดูลัม ด้วยพีชชี
ลอจิกแบบ 5 สมาชิก

เปรียบเทียบผลการทดลองรักษาสมดุลของแท่งแพนดูลัม โดยใช้

มือตั้งแท่งแพนดูลัม ที่มุม 180 องศา

จากผลการทดลอง ตัวควบคุมแบบ พีไอดี และพีชชีลอจิก สามารถรักษาสมดุลของแท่งแพนดูลัมได้ แต่มีระยะทางในการเลี้ยวจำกัดจึงทำให้ตัวรถวิ่งไปชนกับขอบราง ทำให้แท่งแพนดูลัม ล้ม ตัวควบคุมแบบพีไอดีสามารถรักษาสมดุลของแท่งแพนดูลัม ได้นานกว่าตัวควบคุมแบบพีชชีพีดี และเมื่อเข้าสู่ Set Point แล้วตัวควบคุมแบบพีไอดีจะมีความนิ่งกว่าตัวควบคุมแบบพีชชีพีดี เพราะ ตัวควบคุมแบบ พีไอดีสามารถกำจัด ค่าความผิดพลาด

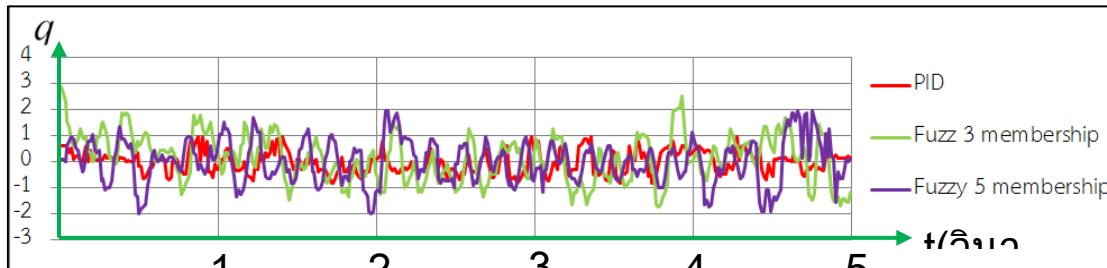
(Error) ที่เกิดขึ้นได้จากการปรับค่าอินทิกรัล (Integral : I) แต่เมื่อทำการทดลองควบคุมแบบใช้ตัวควบคุมพีไอดี แบบพีดี ผลที่ได้ก็มีลักษณะเหมือนกับการใช้ตัวควบคุมแบบพีซีพีดี คือสามารถเลี้ยงแท่งแพนดูลัม ให้ตั้งอยู่ได้ในเวลาที่เท่ากับการใช้ตัวควบคุมด้วยพีซีพีดี ผลการทดลองครั้งที่ดีที่สุดของตัวควบคุมพีไอดีกับพีซีลอลจิก ดังตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง เวลาที่แท่งแพนดูลัมสามารถรักษาสมดุลอยู่ได้

ชนิดของตัวควบคุม	เวลาที่แท่งแพนดูลัม สามารถรักษาสมดุลอยู่ได้นานที่สุดของตัวควบคุมแต่ละชนิด วินาที : (Second)
พีไอดี	139
พีซีลอลจิกแบบ 3 สมาชิก	8
พีซีลอลจิกแบบ 5 สมาชิก	13

กราฟเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของตัวควบคุมแบบพีไอดี พีซีลอลจิกแบบ 3 สมาชิกและ พีซีลอลจิกแบบ 5 สมาชิก ใน

การรักษาสมดุลของแท่งแพนดูลัม โดยใช้มือตั้งแท่งแพนดูลัมที่มุม 180 องศา



ภาพที่ 4-7 กราฟค่าความผิดพลาดของตัวควบคุมแบบพีไอดี ฟัซซี่ลอจิกแบบ 3 สมาชิกและ

ฟัซซี่ลอจิกแบบ 5 สมาชิก ในการควบคุมแท่งแพนดูลัม

จากภาพที่ 4-7 กราฟผลการทดลองค่าความผิดพลาด โดยค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยคิดเมื่อระบบเข้าสู่ Set Point ไป 5 วินาที

โดยค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด ได้คิดจากเวลาระบบเข้าสู่ Set Point ไป 5 วินาที

$$\%Error = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Setpoint - Feedback(i)}{Setpoint}}{n} \times 100$$

ค่า Feedback Angle ที่บันทึกได้จากโปรแกรมแลบวิวที่ใช้ในการควบคุมระบบแพนดูลัมผกผัน ในเวลา 1 วินาที จะบันทึกค่าได้ประมาณ 75 ค่า นำ 75 คูณ 5 เท่ากับ 375 ค่า โดยค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดทั้ง 375 ค่า ที่คิดออกมารวมกัน ด้วยวิธี Integral Square Error (ISE) ของตัวควบคุมแบบพีไอดีมีค่าเท่ากับ

72.166 ตัวควบคุมพีชชีลอจิกแบบ 3 สมาชิกมีค่าเท่ากับ 154.86
 ตัวควบคุมพีชชีลอจิกแบบ 5 สมาชิกมีค่าเท่ากับ 139.07 นำ 375
 มาหารทั้งสามค่าจะได้เป็นเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยดังตาราง
 ที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย

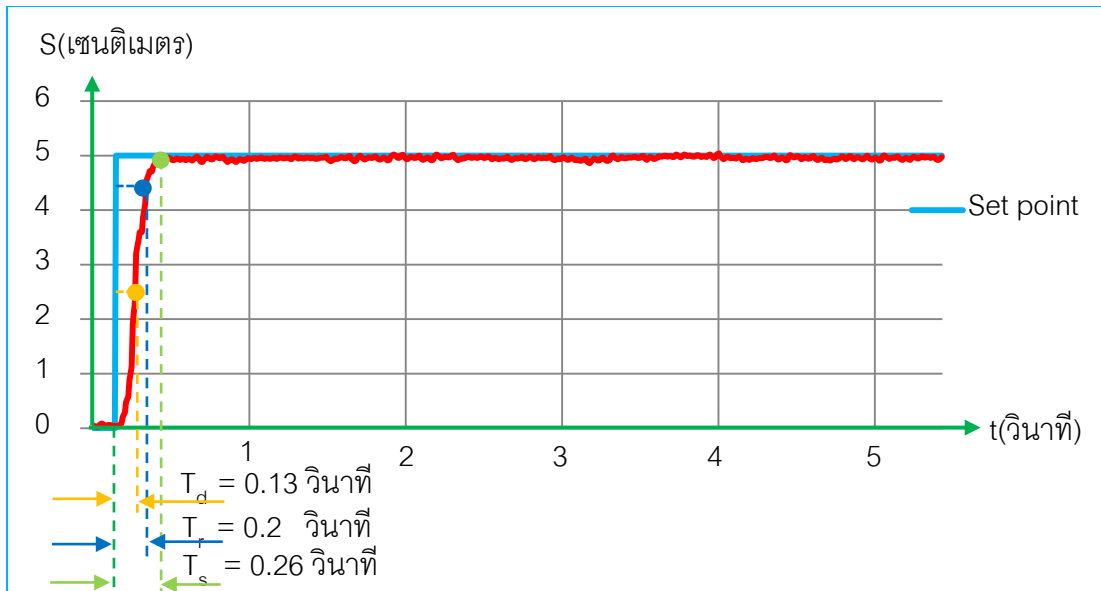
ชนิดของตัว ควบคุม	เปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย เมื่อเข้าสู่ Set Point ไป 5 วินาที
พีไอดี	0.192 เปอร์เซ็นต์
พีชชีลอจิกแบบ 3 สมาชิก	0.412 เปอร์เซ็นต์
พีชชีลอจิกแบบ 5 สมาชิก	0.370 เปอร์เซ็นต์

จากตารางที่ 4-5 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเมื่อ
 ระบบเข้าสู่ Set Point ไป 5 วินาทีโดยตัวควบคุมด้วยพีไอดีจะมีค่า
 ความผิดพลาดน้อยที่สุด เพราะ ตัวควบคุมพีไอดีสามารถกำจัดค่า
 ความผิดพลาด ที่เกิดขึ้นได้จากการปรับค่า อินทิกรัล (Integral : I
) รองลงมาก็จะเป็นตัวควบคุม พีชชีลอจิกแบบ 5 สมาชิกและแบบ
 3 สมาชิก เป็นตัวควบคุมแบบพีชชีพีดี

**4.3 การทดลองควบคุมการแกว่งแท่งแพนดูลัม โดยใช้ตัว
 ควบคุมแบบพีไอดี**

4.3.1 การทดลองควบคุมตำแหน่งของตัวรถ เพื่อการ
 แกว่งแท่งแพนดูลัม โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี การทดลองได้ทำ
 การทดลองเป็นจำนวน 10 ครั้ง โดยสั่งจากจุดเริ่มต้น ไปที่ระยะ 5
 เซนติเมตร (cm) และจากจุดเริ่มต้นไปที่ระยะทาง (-5) เซนติเมตร

โดยใช้ค่าเกน (Gain) ของการควบคุมตัวรถ ที่ $P = 1.3$, $I = 0$, $D = 0.001$ ผลการทดลองดังตารางที่ 4-6, 4-7



ภาพที่ 4-8 กราฟที่ได้จากแลบวิวโดยการปรับค่าระยะที่ 0 - 5 โดยใช้พีไอดี

โดย Delay Time : T_d หาได้จากระยะเวลาการตอบสนองที่อยู่ใน ช่วง 50 เปอร์เซ็นต์ ของ การตอบสนอง

Rise Time : T_r หาได้จากระยะเวลาของการตอบสนองที่อยู่ใน ช่วง 10 เปอร์เซ็นต์ ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ก่อนที่จะเข้าสู่ตำแหน่งที่ตั้ง

Setting Time : T_s หาได้จากเวลาที่ระบบเข้าสู่ตำแหน่งที่ตั้งไป จะมีค่าผิดพลาด ± 2 เปอร์เซ็นต์

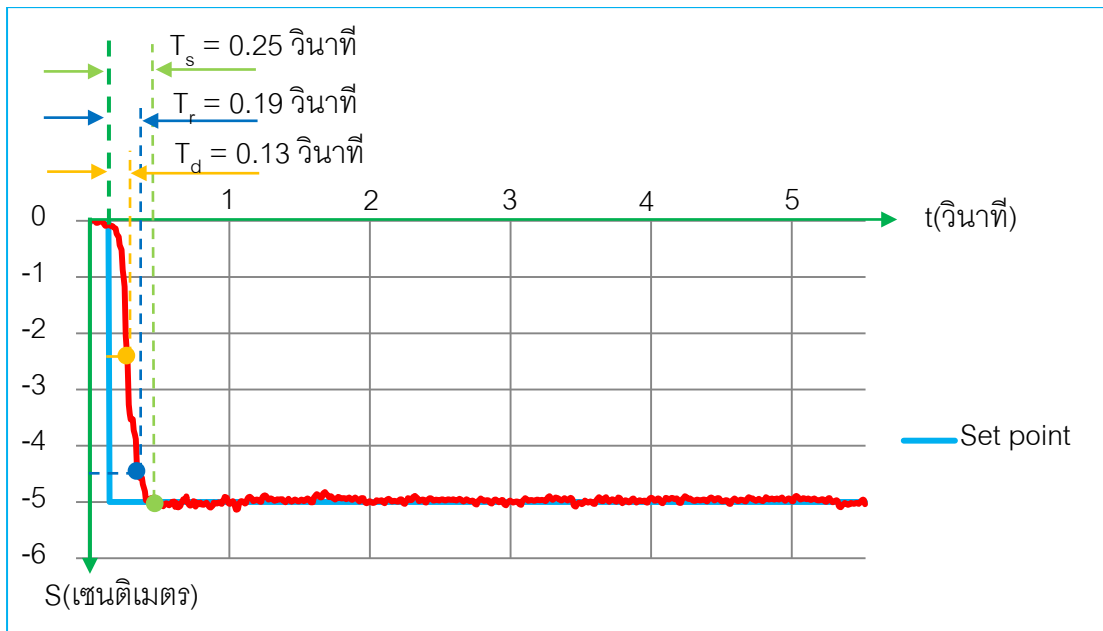
% Overshoot : %OS หาได้จากค่าที่พุ่งเกินจากตำแหน่งที่สั่ง

% Error หาได้จากค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างตำแหน่งที่สั่งและตำแหน่งที่ตอบสนอง

ตารางที่ 4-6 ผลที่ได้จากการทดลองควบคุมตำแหน่งของตัวรถด้วยพีไอดี

การทดลองครั้งที่	ตำแหน่งที่ต้องการ	ผลที่ได้	ค่าความผิดพลาด
1	5 cm	4.96 cm	0.04
2	5 cm	4.92 cm	0.08
3	5 cm	4.95 cm	0.05
4	5 cm	4.87 cm	0.13
5	5 cm	4.9 cm	0.01
6	5 cm	4.89 cm	0.11
7	5 cm	4.96 cm	0.04
8	5 cm	4.86 cm	0.14

9	5 cm	4.86 cm	0.14
10	5 cm	4.87 cm	0.13
เฉลี่ย	5 cm	4.9 cm	ค่าความผิดพลาด 2%



ภาพที่ 4-9 กราฟที่ได้จากการปรับค่าระยะที่ 0 – (-5) โดยใช้พีไอดี

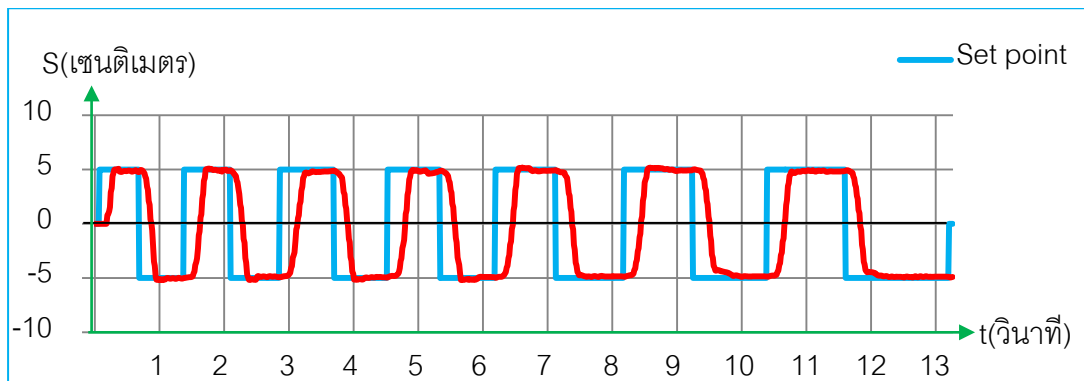
ตารางที่ 4-7 ผลที่ได้จากการทดลองควบคุมตำแหน่งของตัวรถด้วยพีไอดี

การทดลอง ครั้งที่	ตำแหน่งที่ ต้องการ	ผลที่ได้	ค่าความผิดพลาด
----------------------	-----------------------	----------	----------------

1	-5 cm	-4.97 cm	-0.03
2	-5 cm	-4.99 cm	-0.01
3	-5 cm	-5.01 cm	-0.01
4	-5 cm	-4.98 cm	-0.02
5	-5 cm	-4.95 cm	-0.05
6	-5 cm	-4.87 cm	-0.13
7	-5 cm	-4.94 cm	-0.06
8	-5 cm	-4.88 cm	-0.12
9	-5 cm	-4.93 cm	-0.07
10	-5 cm	-4.96 cm	-0.04
เฉลี่ย	-5 cm	-4.94 cm	ค่าความผิดพลาด 1.2%

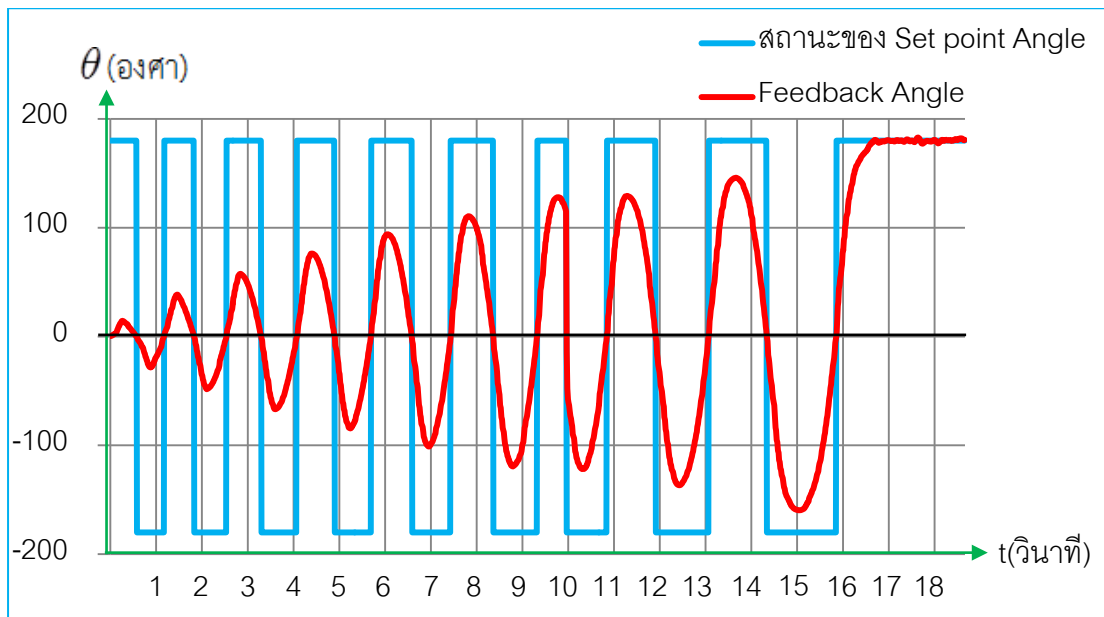
4.3.2 การทดลองแกว่งแท่งแพนดูลัม โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี

การทดลองได้ทำการปรับตำแหน่งของ Set Point ในแนวแกน X ไว้ที่ระยะทาง 5 เซนติเมตรและ -5 เซนติเมตร โดยใช้เอ็นโค้ดเดอร์ตัวที่ 1 เป็นตัวกำหนดทิศทางในการเปลี่ยนค่า Set Point ระหว่าง 5 เซนติเมตร เป็น -5 เซนติเมตร เมื่อเอ็นโค้ดเดอร์ตัวที่ 1 ที่ติดอยู่กับ แท่งแพนดูลัมหมุนทวนเข็มนาฬิกา ค่ามุมที่ได้ก็จะมีค่าเป็นลบ โปรแกรมก็จะกำหนด Set Point ในแนวแกน X ที่ตำแหน่ง X เท่ากับ 5 เซนติเมตร และเมื่อ แท่งแพนดูลัม แกว่งตามเข็มนาฬิกา ค่ามุมที่ได้ก็จะมีค่าเป็นบวก โปรแกรมก็จะกำหนด Set Point ในแนวแกน X ที่ตำแหน่ง X เท่ากับ -5 เซนติเมตร สลับกันไปมาดังภาพที่ 4-10 จนแท่งแพนดูลัม เคลื่อนที่ไปอยู่ในตำแหน่งระหว่าง 170 องศา ถึง 180 องศา เมื่อแท่งแพนดูลัม แกว่งขึ้นในทิศทางตามเข็มนาฬิกา หรือ อยู่ในตำแหน่งระหว่าง (-170 องศา ถึง -180 องศา) เมื่อแท่งแพนดูลัม แกว่งขึ้นในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา เมื่อ แท่งแพนดูลัมแกว่งอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ดังกล่าวระบบก็จะเริ่มทำการเลี้ยงแท่งแพนดูลัม



ภาพที่ 4-10 กราฟที่ได้จากการปรับค่าระยะที่ 5 กับ (-5) โดยใช้
พีไอดี

การทดลอง แท่งแพนดูลัม จะแกว่งไปมา ตามเข็ม และทวนเข็มนาฬิกา สลับกัน เหมือนกับลูกตุ้มนาฬิกา โดยการแกว่งแต่ละด้านจะมีมุมอยู่ในช่วง 0 ถึง 180 องศา หรือ 0 ถึง (-180 องศา) โดยแท่งแพนดูลัม แกว่งตามเข็มนาฬิกา Set Point ก็จะถูกกำหนดให้เป็น 180 องศา และถ้าแท่งแพนดูลัม แกว่งทวนเข็มนาฬิกา Set Point ก็จะถูกกำหนดให้เป็น (-180) องศา โดยสีแดงจะแสดงเป็น Feedback Angle จาก เอ็นโค้ดเดอร์ตัวที่ 1 ในการวัดค่า มุมของแท่งแพนดูลัม ส่วนเส้นสีฟ้าแสดงสถานะของ Set Point ที่จะเป็นตัวกำหนด Set Point ให้อยู่ที่มุม 180 องศา หรือ (-180 องศา) ในการเลี้ยงแท่งแพนดูลัม ดังภาพที่ 4-11



ภาพที่ 4-11 กราฟผลตอบสนองการแกว่งของแท่งแพนดูลัม โดยใช้พีไอดี

จากภาพที่ 4-11 เป็นผลการทดลองแกว่งแท่งแพนดูลัม เพื่อให้ แท่งแพนดูลัม ตั้งขึ้นที่มุม 180 หรือ -180 องศา ด้วยตัวระบบเอง แทนการใช้มือจับตั้งขึ้น เพื่อกำหนดให้เป็น Set Point ในการเลี้ยงแท่งแพนดูลัม โดยใช้ตัวควบคุมด้วยพีไอดี ผลจากการทดลอง ระบบสามารถแกว่งให้ แท่งแพนดูลัมตั้งขึ้นด้วยตัวระบบเองได้

4.4 การทดลองรักษาสมดุลของแท่งแพนดูลัม โดยให้แท่งแพนดูลัมแกว่งตั้งขึ้นที่มุม 180 องศา หรือ (-180 องศา) ด้วยตัวระบบเองโดยใช้ตัวควบคุมแบบ พีไอดี และพีซซีลอจิก โดยใช้ค่าเกน (Gain) ของการควบคุมตัวรถในการแกว่งแท่งแพนดูลัม ที่ $P = 1.3, I = 0, D = 0.001$

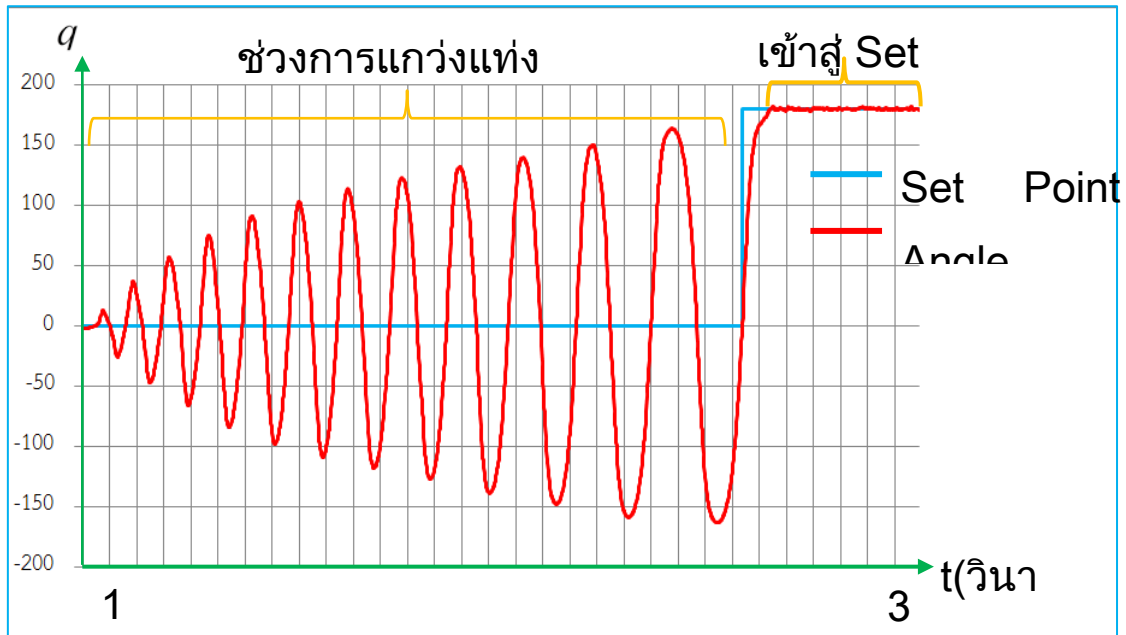
4.4.1 ควบคุมด้วยพีไอดี

การทดลองรักษาสมดุลของแท่งแพนดูลัม โดยให้แท่งแพนดูลัม ตั้งขึ้นด้วยตัวระบบเอง ทำการทดลองเป็นจำนวน 10 ครั้งติดต่อกัน ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-8 ผลการทดลองครั้งที่ดีที่สุดของการควบคุมด้วยพีไอดี สามารถรักษาสมดุลของแท่งแพนดูลัม ได้เป็นเวลา 52 วินาที แล้วตัวรถก็วิ่งไปชนขอบรางทำให้แท่งแพนดูลัม ล้ม กราฟผลการทดลองดังภาพที่ 4-12 และ ภาพที่ 4-13

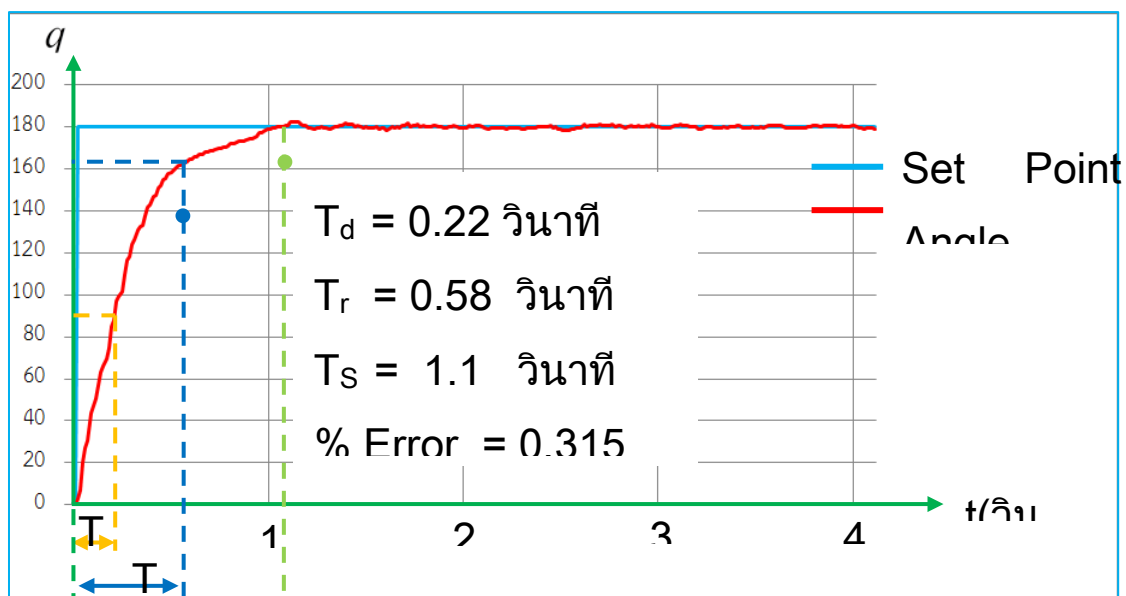
ตารางที่ 4-8 ผลที่ได้จากการทดลองควบคุมด้วยพีไอดี เวลาที่แท่งแพนดูลัมสามารถรักษาสมดุลอยู่ได้

การทดลองครั้งที่	เวลาที่แท่งแพนดูลัมสามารถรักษาสมดุลอยู่ได้ วินาที : (Second)
1	52
2	2
3	3
4	2
5	2
6	19
7	6
8	5
9	2

10	51
----	----



ภาพที่ 4-12 กราฟผลตอบสนองการรักษาสมดุลของแท่ง
แพนดูลัม โดยใช้พีไอดี



ภาพที่ 4-13 กราฟผลตอบสนองการรักษาสมดุลของแท่ง
แพนดูลัม เมื่อเข้าสู่ Set Point
ที่ 180 องศา โดยใช้พีไอดี

โดยค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด ได้คิดจากเวลาระบบเข้าสู่ Set Point ไป 3 วินาที

$$\%Error = \frac{Setpoint - Feedback}{Setpoint} \times 100$$

ค่า Feedback Angle ที่บันทึกได้จากโปรแกรม
แลบวิวที่ใช้ในการควบคุมระบบแพนดูลัมผกผัน ในเวลา 1 วินาที
จะบันทึกค่าได้ประมาณ 75 ค่า นำ 75 คูณ 3 เท่ากับ 225 ค่า โดย
ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดทั้ง 225 ค่า ที่คิดออกมารวมกันของตัว
ควบคุมพีไอดี มีค่าเท่ากับ 71.061 นำ 225 มาหารได้เป็นเปอร์เซ็นต์
ความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 0.315 เปอร์เซ็นต์

4.4.2 ควบคุมด้วยฟuzzyลอจิก

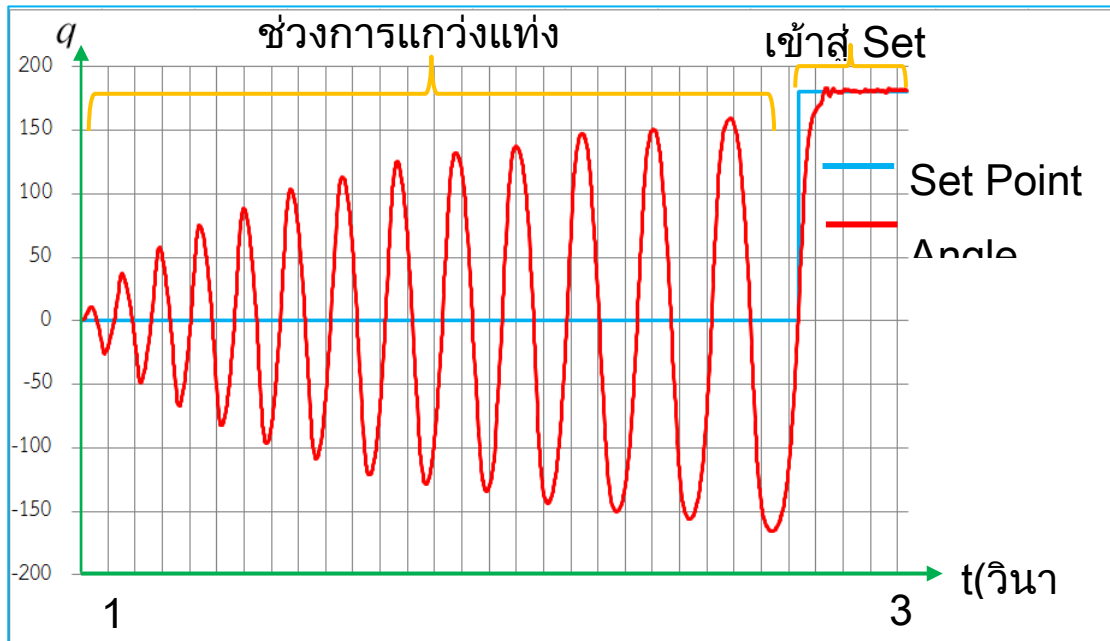
4.4.2.1 ควบคุมด้วยฟัซซี่ลอจิกแบบ 3 สมาชิก

การทดลองรักษาสมดุลของแท่งแพนดูลัม โดยให้แท่งแพนดูลัม ตั้งขึ้นด้วยตัวระบบเอง ใช้ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกแบบ 3 สมาชิก โดยทำการทดลองเป็นจำนวน 10 ครั้ง ติดต่อกัน ผลการทดลองดังตารางที่ 4-9 ผลการทดลองครั้งที่ดีที่สุด สามารถรักษาสมดุลของ แท่งแพนดูลัม ได้เป็นเวลา 9 วินาที แล้วตัวรถก็วิ่งไปชนขอบรางทำให้แท่งแพนดูลัมล้ม กราฟผลการทดลองดังภาพที่ 4-14 และภาพที่ 4-15

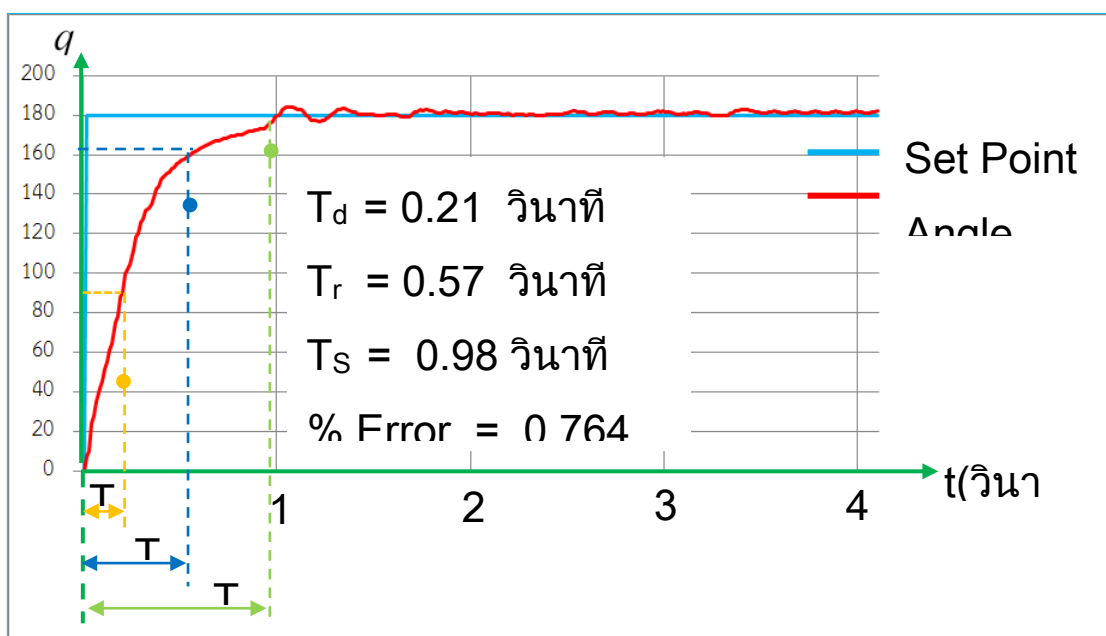
ตารางที่ 4-9 ผลที่ได้จากการทดลองควบคุมด้วยฟัซซี่ลอจิกแบบ 3 สมาชิก เวลาที่แท่ง

แพนดูลัมสามารถรักษาสมดุลอยู่ได้

การทดลอง ครั้งที่	เวลาที่แท่งแพนดูลัม สามารถรักษาสมดุลอยู่ได้ วินาที : (Second)
1	9
2	2
3	1
4	3
5	2
6	2
7	2
8	2
9	8
10	2



ภาพที่ 4-14 กราฟผลตอบสนองการรักษาสมดุลของแท่ง
แพนดูลัม โดยใช้ ฟิชชีลอจิก
แบบ 3 สมาชิก



ภาพที่ 4-15 กราฟผลตอบสนองการรักษาสมดุลของแท่ง
แพนดูลัม เมื่อเข้าสู่ Set Point

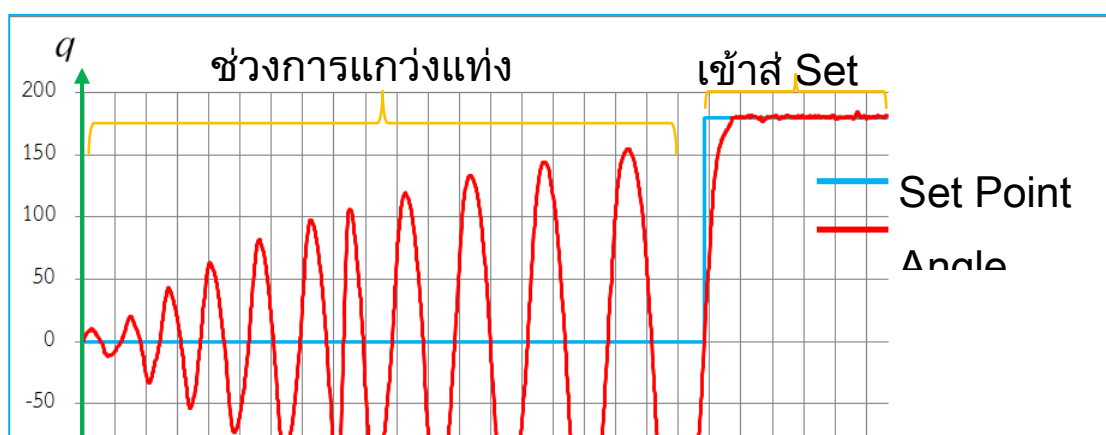
180 องศา โดยใช้ ฟิชชีลอจิกแบบ 3 สมาชิก

4.4.2.2 ควบคุมด้วยฟิชชีลอจิกแบบ 5 สมาชิก

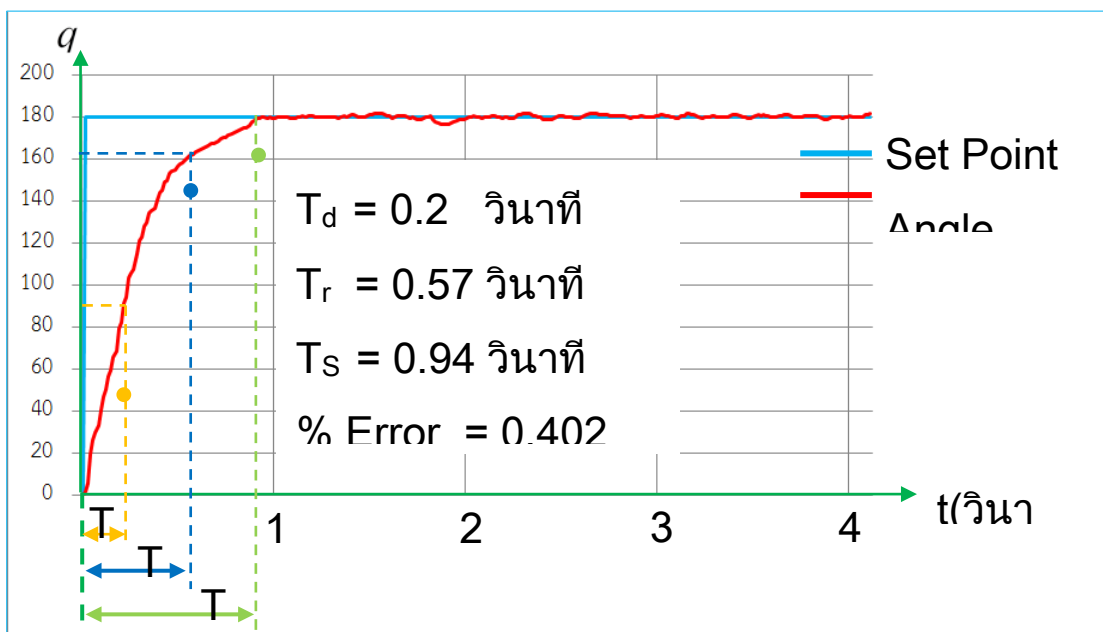
การทดลองรักษาสมดุลของแท่งแพนดูลัม
โดยให้แท่งแพนดูลัม ตั้งขึ้นด้วยตัวระบบเอง ใช้ตัวควบคุมฟิชชี
ลอจิกแบบ 5 สมาชิก โดยทำการทดลองเป็นจำนวน 10 ครั้ง
ติดต่อกัน ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-10 ผลการทดลองครั้ง
ที่ดีที่สุด สามารถรักษาสมดุลของแท่งแพนดูลัม ได้เป็นเวลา 12
วินาที แล้วตัวรถก็วิ่งไปชนขอบรางทำให้แท่งแพนดูลัมล้ม กราฟ
ผลการทดลองดังภาพที่ 4-16 และ ภาพที่ 4-17

ตารางที่ 4-10 ผลที่ได้จากการทดลองควบคุมด้วยพีชชี
 ลอจิกแบบ 5 สมาชิก เวลาที่แบ่ง
 แพนดูลัมสามารถรักษาสมดุลอยู่ได้

การทดลอง ครั้งที่	เวลาที่แบ่งแพนดูลัม สามารถรักษาสมดุลอยู่ได้ วินาที : (Second)
1	2
2	9
3	10
4	3
5	4
6	3
7	2
8	12
9	7
10	3



ภาพที่ 4-16 กราฟผลตอบสนองการรักษาสมดุลของแท่งแพน
ดูลัม โดยใช้ ฟิชชีลอจิกแบบ 5 สมาชิก



ภาพที่ 4-17 กราฟผลตอบสนองการรักษาสมดุลของแท่ง
แพนดูลัม เมื่อเข้าสู่ Set Point

180 องศา โดยใช้ ฟิชชีลอจิกแบบ 5 สมาชิก

เปรียบเทียบผลการทดลองการรักษาสมดุลของแท่งแพนดูลัม โดย
ให้แท่งแพนดูลัม ตั้งขึ้นที่มุม 180 องศา หรือ (-180 องศา) ด้วยตัว
ระบบเอง

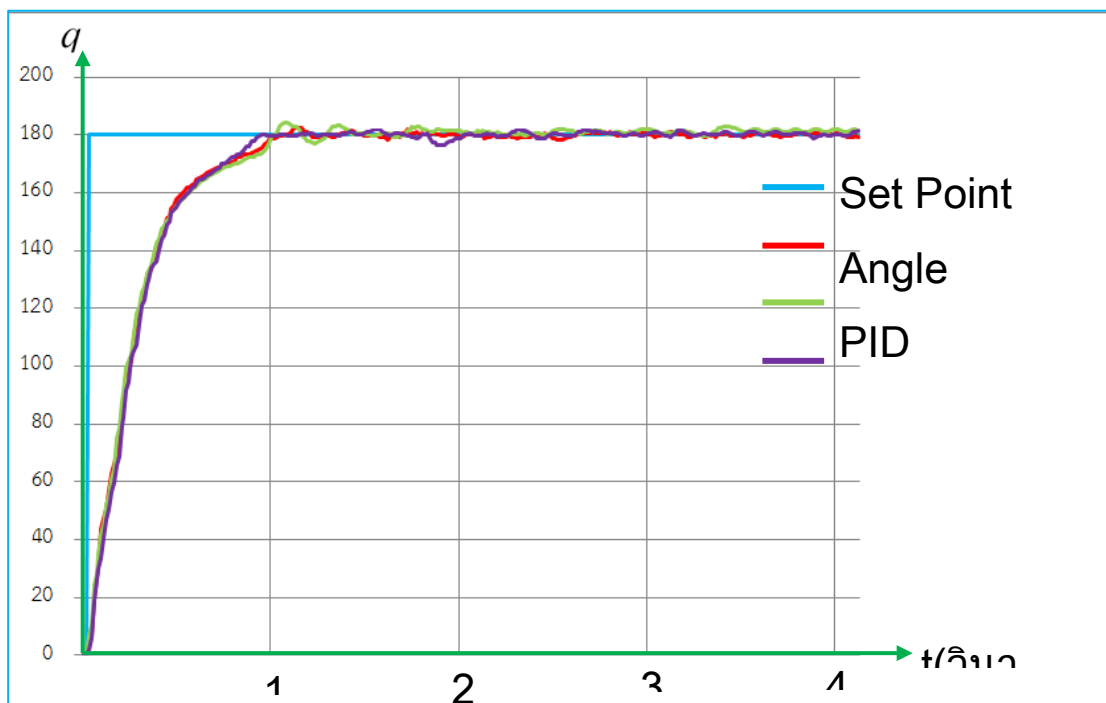
ตารางที่ 4-11 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง เวลาที่แท่ง
แพนดูลัมสามารถรักษาสมดุลอยู่ได้

ชนิดของตัว ควบคุม	เวลาที่แท่งแพนดูลัมสามารถรักษาสมดุลอยู่ ได้นานที่สุดของตัวควบคุมแต่ละชนิด วินาที : (Second)
พีไอดี	52
ฟิชชีลอจิกแบบ 3 สมาชิก	9
ฟิชชีลอจิกแบบ 5 สมาชิก	12

จากผลการทดลอง แท่งแพนดูลัม สามารถตั้งขึ้นด้วยตัว
ระบบเองได้ โดยตัวควบคุมแบบ พีไอดี และฟิชชีลอจิก สามารถ
ควบคุมให้แท่งแพนดูลัม รักษาสมดุลอยู่ได้ แต่มีระยะทางในการ

เลี้ยงจำกัดจึงทำให้ตัวร่วงไปชนกับขอบราง ทำให้แท่งแพนดูลัม ล้ม ตัวควบคุมแบบ พีโอดีสามารถรักษาสมดุล แท่งแพนดูลัม ได้นานกว่าตัวควบคุมแบบพีซีพีดี และเมื่อเข้าสู่ Set Point แล้วตัวควบคุม

แบบพีโอดีจะมีความนิ่งกว่าตัวควบคุมแบบพีซีพีดี เพราะ ตัวควบคุมแบบ พีโอดีสามารถกำจัด ค่าความผิดพลาด ที่เกิดขึ้นได้จากการปรับค่า อินทิกรัล (Integral : I)



ภาพที่ 4-18 เปรียบเทียบกราฟผลตอบสนองการรักษาสมดุลของแท่งแพนดูลัม เมื่อเข้า

สู่ Set Point 180 องศา โดยใช้ พีโอดี พีซีพีดี

ลอจิกแบบ 3 สมาชิก และ

ฟัซซีลอจิกแบบ 5สมาชิก

ตารางที่ 4-12 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของระบบ

โหมดการควบคุม	ช่วงเวลาการตอบสนองของระบบ				
	T _d : วินาที	T _r : วินาที	T _s : วินาที	% Error	%Overshoot
พีไอดี	0.22	0.58	1.1	0.315 เปอร์เซ็นต์	0
ฟัซซีลอจิกแบบ 3 สมาชิก	0.21	0.57	0.98	0.764 เปอร์เซ็นต์	0
ฟัซซีลอจิกแบบ 5 สมาชิก	0.2	0.57	0.94	0.402 เปอร์เซ็นต์	0

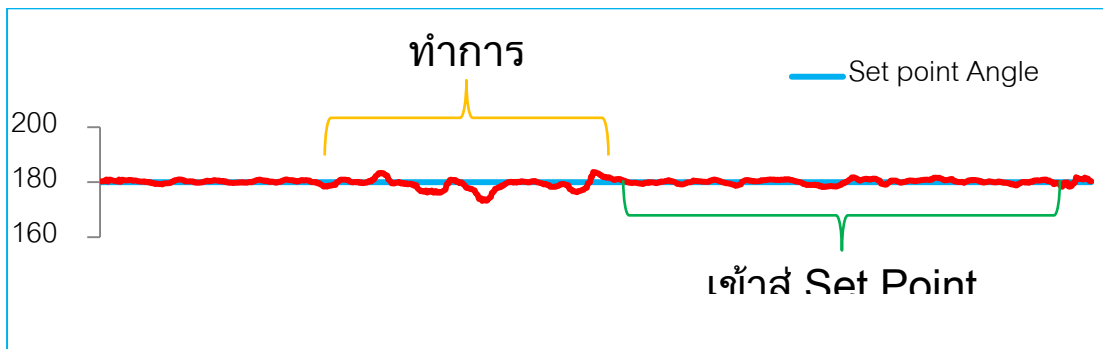
จากผลการทดลองในตารางที่ 4-12 ตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกจะเข้าสู่ Set Point เร็วกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี เพราะขึ้นอยู่กับ การออกแบบกฎฟัซซีของผู้ควบคุมให้เข้าสู่ Set Point เร็วหรือช้า

4.5 การทดลองรบกวนระบบ โดยใช้มือตั้งแท่งแพนดูลัม ที่มุม 180 องศาหรือ (-180 องศา) โดยใช้ตัวควบคุมแบบ พีไอดี และฟัซซีลอจิก

4.5.1 รบกวนระบบ โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี

ในการทดลองรบกวนระบบ โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีค่าเกณฑ์ของ

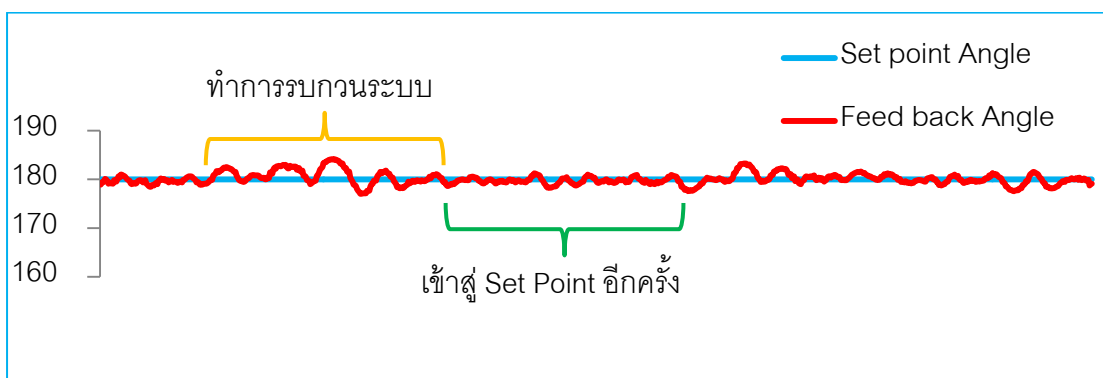
การควบคุมในการรักษาสมดุลของแท่งแพนดูลัม ที่ $P = 10$, $I = 0.004$, $D = 0.001$ กราฟผลการทดลองดังภาพที่ 4-19



ภาพที่ 4-19 ระบบระบบ ควบคุมด้วยพีไอดี

4.5.2 ระบบระบบ โดยใช้ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกแบบ 3 สมาชิก

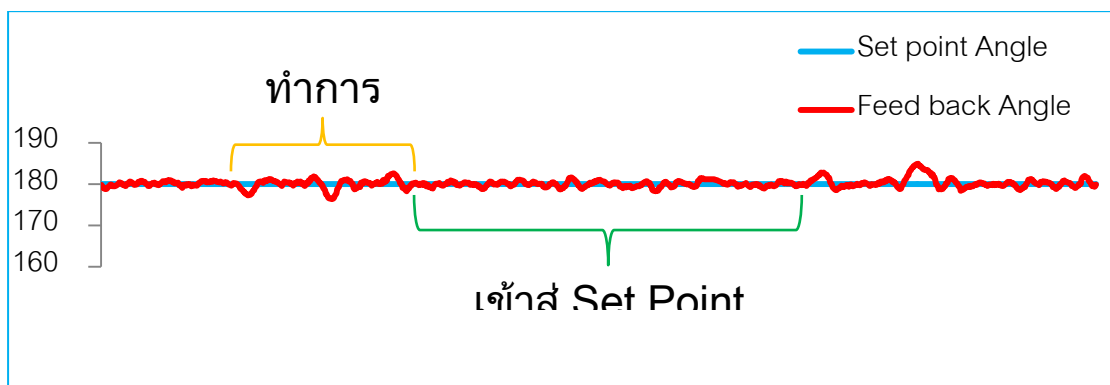
ในการทดลองระบบระบบ โดยใช้ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกแบบ 3 สมาชิกควบคุมในการรักษาสมดุลของแท่งแพนดูลัม กราฟผลการทดลองดังภาพที่ 4-20



ภาพที่ 4-20 ระบบควบคุมด้วยฟuzzyลอจิกแบบ 3 สมาชิก

4.5.3 ระบบควบคุม โดยใช้ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกแบบ 5 สมาชิก

ในการทดลองระบบควบคุม โดยใช้ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกแบบ 5 สมาชิกควบคุมในการรักษาสมดุลของแท่งแพนดูลัม กราฟผลการทดลองดังภาพที่ 4-21



ภาพที่ 4-21 ระบบควบคุมด้วยฟuzzyลอจิกแบบ 5 สมาชิก

ผลการทดลอง เมื่อทำการระบบควบคุมโดยใช้มีระบบที่แท่งแพนดูลัม และที่ตัวรถ ระบบก็จะพยายามรักษาสมดุลของแท่งแพนดูลัม ไม่ให้ล้มโดยกลับเข้าสู่ Set Point ที่ 180 องศาเหมือนเดิม แต่บางครั้งตัวรถก็พยายามวิ่งเพื่อรักษาสมดุลของแท่งแพนดูลัม แต่ก็วิ่งไปชนขอบรางก่อนจึงทำให้แท่งแพนดูลัม ล้ม โดยตัวควบคุมแบบฟuzzyลอจิกและฟuzzy สามารถรักษาสมดุลของแท่งแพนดูลัม ให้อยู่ที่มุม 180 องศา ได้เหมือนเดิมเมื่อทำการระบบ

4.6 การทดลองรักษาสมดุของแท่งแพนดูลัม ใช้ตัวควบคุมพีไอดีร่วมกับฟิชชิลอจิก โดยใช้พีไอดีเป็นตัวควบคุมในการรักษาสมดุของแท่งแพนดูลัม และใช้ตัวควบคุมฟิชชิลควบคุมตัวรถไม่ให้วิ่งไปชนขอบรางเมื่อเลี้ยงแท่งแพนดูลัม โดยให้แท่งแพนดูลัมตั้งขึ้นด้วยตัวระบบเอง ใช้ค่าเกณฑ์ของการควบคุม ในการรักษาสมดุของแท่งแพนดูลัม ที่ $P = 10$, $I = 0.004$, $D = 0.001$ และใช้ฟิชชิลอจิกแบบ 3 สมาชิกในการควบคุมตัวรถ ทำการทดลองเป็นจำนวน 10 ครั้งติดต่อกัน ผลการทดลองดังตารางที่ 4-13 ผลการทดลองครั้งที่ดีที่สุด สามารถรักษาสมดุของแท่งแพนดูลัม ได้เป็นเวลา 85 วินาที แล้วตัวรถก็วิ่งไปชนขอบรางทำให้แท่งแพนดูลัมล้ม

ตารางที่ 4-13 ผลที่ได้จากการทดลองควบคุมด้วยพีไอดีร่วมกับฟิชชิลอจิก เวลาที่แท่งแพนดูลัม สามารถรักษาสมดุอยู่ได้

การทดลองครั้งที่	เวลาที่แท่งแพนดูลัม สามารถรักษาสมดุอยู่ได้ วินาที : (Second)
1	19
2	32
3	29
4	26

5	72
6	85
7	39
8	32
9	47
10	52