

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบและสร้างระบบลอยเหนือราง

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF LEVITATION SYSTEM



มนตรี ชาติพจน์

MONTRI CHATPOJ

ฉพ  
ม/51 7  
2546

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....61199  
วัน,เดือน,ปี..... 17 ก.ค. 2549

b. 115.13632  
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ  
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2548

ISBN 974-15-2021-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# DESIGN AND IMPLEMENTATION OF LEVITATION SYSTEM



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN INFORMATION TECHNOLOGY ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2005

ISBN 974-15-2021-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2005**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้องานวิจัย	การออกแบบและสร้างระบบลอยเหนือราง
นักศึกษา	นายมนตรี ชาติพจน์
รหัสนักศึกษา	46061305
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมงานวิจัย	รศ.ดร.ปิติเขต ผู้รักษา

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เสนอระบบการขนส่งแบบลอยเหนือราง โดยการลอยตัวจะใช้การดูดผลักรของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า เข้ามาช่วย ซึ่งเรียกระบบการลอยตัวนี้ว่า Magnetic Levitation (Maglev) โดยการศึกษาจะค้นคว้าหาตัวควบคุมของระบบ Maglev ให้มีผลตอบสนองที่รวดเร็ว แม่นยำ และนุ่มนวล จากการจำลองผลโดยคอมพิวเตอร์ได้เลือกตัวควบคุมพีไอ (PI) และแบบฟัซซีพีไอ (Fuzzy PI) มาใช้ควบคุม จากการจำลองเปรียบเทียบทดสอบผลตอบสนองที่ได้พบว่าแบบฟัซซีพีไอ มีประสิทธิภาพดีกว่า จึงเลือกตัวควบคุมฟัซซีพีไอจากการออกแบบมาสร้างจริงสำหรับซึ่งผลที่ได้จากการวิจัยสามารถนำมาใช้ในระบบลำเลียงวัสดุ ระบบรถไฟฟ้า และระบบที่ช่วยในการออกตัวยานพาหนะ

<b>Thesis Title</b>	Design and Implementation of Levitation System
<b>Student</b>	Mr. Montri Chatpoj
<b>Student ID.</b>	46061305
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Information Engineering
<b>Year</b>	2005
<b>Thesis Adviser</b>	Assoc.Prof. Dr. Pitikhate Sooraksa

### ABSTRACT

This research presents Levitation System, The levitation utilized by electromagnetic forces herein is called Magnetic Levitation or Maglev. The study aims to search for a controller having qualified properties, which include fast response, high accuracy and soft start-stop operation for the Maglev system. Simulation results are performed to compare the performance between using a PI controller and a fuzzy PI counterpart. The finding indicates that fuzzy PI controller outperforms the conventional one. The experimental results are confirmed the similar findings. Hence the system is then implemented using fuzzy PI version. This work implies further research to many potential applications for transportation systems, electric trains, and the idle speed control system.

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเพราะได้รับช่วยเหลือจากบุคคลต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งได้รับความเมตตาจาก รศ. ดร. ปิติเขต สุริยา ที่กรุณาให้คำชี้แนะและเป็นที่ปรึกษาแก่ผู้วิจัยด้วยดีตลอดมา อีกทั้งยังเอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบคุณคุณอาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ ทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ พร้อมกันนี้ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจมาตลอด

และสุดท้ายที่จะลืมเสียไม่ได้คือ กราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ อันเป็นที่รักยิ่งที่คอยอบรมเลี้ยงดูตั้งแต่เด็กจนสำเร็จในสิ่งที่มุ่งหวังไว้ ฉะนั้นคุณงามความดีใด ๆ ก็ตามที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแด่ทุก ๆ ท่านที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

มนตรี ชาติพจน์

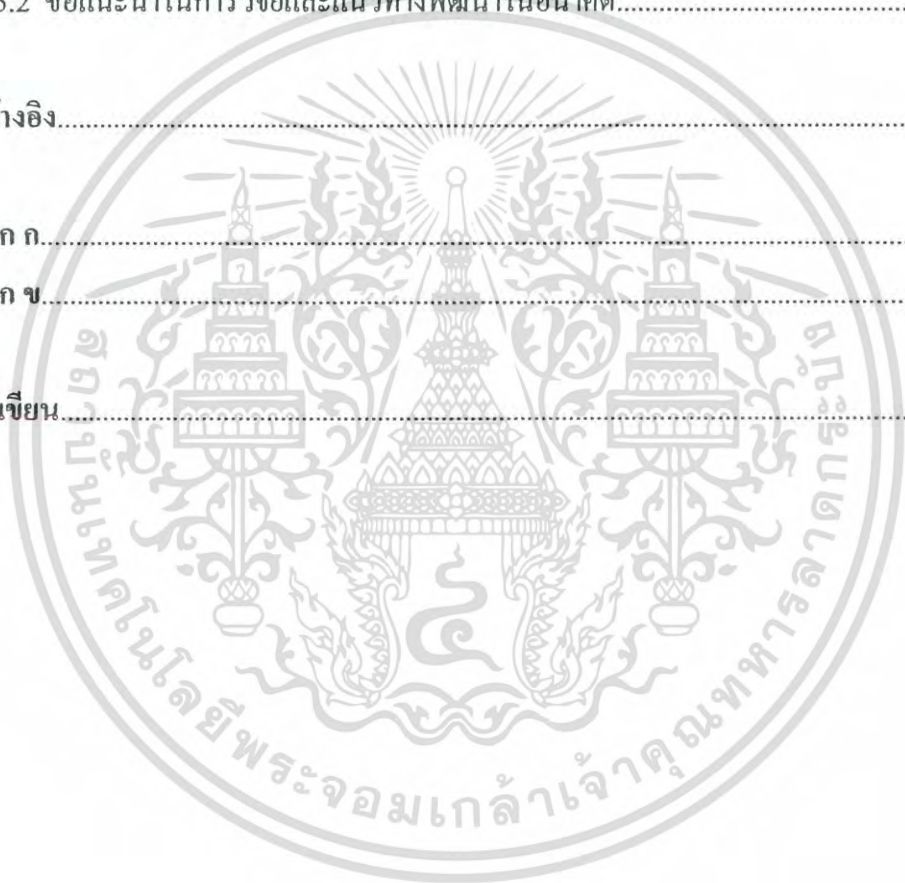
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 สมมุติฐานเบื้องต้น.....	1
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนของงานวิจัย.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b> .....	<b>3</b>
2.1 สมการการเคลื่อนที่เครื่องกลไฟฟ้า.....	3
2.2 การออกแบบตัวควบคุมแบบฟuzzyพีไอ.....	5
2.3 การทำฟuzzyพีเคชัน.....	7
2.4 การกำหนดกฎของฟuzzyพีดี.....	8
2.5 การทำดีฟuzzyพีเคชันของฟuzzyพีไอ.....	9
<b>บทที่ 3 ระบบลดหย่อนौरาง</b> .....	<b>11</b>
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b> .....	<b>15</b>
4.1 บทนำ.....	15
4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	15
4.3 การทำงานของระบบ Maglev.....	16
4.4 จำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์.....	17

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 การทดลองระบบจริง.....	27
4.6 จำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์จากค่าพารามิเตอร์ของระบบจริง.....	35
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>42</b>
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	42
5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยและแนวทางการพัฒนาในอนาคต.....	43
เอกสารอ้างอิง.....	44
ภาคผนวก ก.....	46
ภาคผนวก ข.....	70
ประวัติผู้เขียน.....	76



# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 กฎของตัวควบคุมแบบพีชชีฟีโอ.....	8
4.1 พารามิเตอร์ตัวควบคุมการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์.....	17
4.2 พารามิเตอร์ตัวควบคุมการทดลองระบบจริง.....	27
ก.1 กฎของระบบพีชชีฟีโอในพื้นที่ที่ 1 .....	47
ก.2 กฎของระบบพีชชีฟีโอในพื้นที่ที่ 2 .....	48
ก.3 กฎของระบบพีชชีฟีโอในพื้นที่ที่ 3 .....	50
ก.4 กฎของระบบพีชชีฟีโอในพื้นที่ที่ 4 .....	51
ก.5 กฎของระบบพีชชีฟีโอในพื้นที่ที่ 5 .....	52
ก.6 กฎของระบบพีชชีฟีโอในพื้นที่ที่ 6 .....	54
ก.7 กฎของระบบพีชชีฟีโอในพื้นที่ที่ 7 .....	55
ก.8 กฎของระบบพีชชีฟีโอในพื้นที่ที่ 8 .....	56
ก.9 กฎของระบบพีชชีฟีโอในพื้นที่ที่ 9 .....	57
ก.10 กฎของระบบพีชชีฟีโอในพื้นที่ที่ 10 .....	58
ก.11 กฎของระบบพีชชีฟีโอในพื้นที่ที่ 11 .....	59
ก.12 กฎของระบบพีชชีฟีโอในพื้นที่ที่ 12 .....	60
ก.13 กฎของระบบพีชชีฟีโอในพื้นที่ที่ 13 .....	61
ก.14 กฎของระบบพีชชีฟีโอในพื้นที่ที่ 14 .....	62
ก.15 กฎของระบบพีชชีฟีโอในพื้นที่ที่ 15 .....	63
ก.16 กฎของระบบพีชชีฟีโอในพื้นที่ที่ 16 .....	64
ก.17 กฎของระบบพีชชีฟีโอในพื้นที่ที่ 17 .....	65
ก.18 กฎของระบบพีชชีฟีโอในพื้นที่ที่ 18 .....	66
ก.19 กฎของระบบพีชชีฟีโอในพื้นที่ที่ 19 .....	67
ก.20 กฎของระบบพีชชีฟีโอในพื้นที่ที่ 20 .....	68

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แบบระบบเครื่องกลไฟฟ้า.....	3
2.2 ระบบควบคุมอนาล็อกพีไอแบบดั้งเดิม.....	5
2.3 ระบบควบคุมดิจิทัลพีไอแบบดั้งเดิม.....	6
2.4 ระบบควบคุมแบบพีซีพีไอ.....	6
2.5 ฟังก์ชันสมาชิกของอินพุตของตัวควบคุมพีซีแบบพีไอ.....	7
2.6 ฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุตของตัวควบคุมพีซีแบบพีไอ.....	7
2.7 ผลตอบสนองที่ใช้กำหนดกฎของพีซีพีไอ.....	8
2.8 แสดงพื้นที่ทั้งหมดของพีซีพีไอ.....	9
3.1 ระบบ Maglev.....	13
4.1 บล็อกการทำงานของระบบ Maglev.....	16
4.2 ระบบ Maglev ที่ใช้ทดลองจริง.....	16
4.3 ระยะห่างและแรงดันอินพุตที่จุดอ้างอิงเท่ากับ 0.1 cm.....	17
4.4 แรงยกและกระแสอินพุตที่จุดอ้างอิงเท่ากับ 0.1 cm.....	18
4.5 ระยะห่างและแรงดันอินพุตที่จุดอ้างอิงเท่ากับ 0.4 cm.....	18
4.6 แรงยกและกระแสอินพุตที่จุดอ้างอิงเท่ากับ 0.4 cm.....	19
4.7 ระยะห่างและแรงดันอินพุตที่จุดอ้างอิงเท่ากับ 0.2 cm.....	19
4.8 แรงยกและกระแสอินพุตที่จุดอ้างอิงเท่ากับ 0.2 cm.....	20
4.9 ระยะห่างและแรงดันอินพุตที่เป็นแบบจุดอ้างอิงพลวัต (dynamic setpoints) ที่ 0.1 cm, 0.4 cm และ 0.2 cm.....	21
4.10 แรงยกและกระแสอินพุตที่เป็นแบบจุดอ้างอิงพลวัต ที่ 0.1 cm, 0.4 cm. และ 0.2 cm.....	22
4.11 ระยะห่างและแรงดันอินพุตที่ค่ามวลเท่ากับ 0.25 และ 0.1 kg.....	23
4.12 แรงยกและกระแสอินพุตที่ค่ามวลเท่ากับ 0.1 และ 0.25 kg.....	24
4.13 ระยะห่างและแรงดันอินพุตที่ค่ามวลเท่ากับ 0.25 และ 3 kg.....	25
4.14 แรงยกและกระแสอินพุตที่ค่ามวลเท่ากับ 0.25 และ 3 kg.....	26
4.15 ระยะห่างและแรงดันอินพุตที่จุดอ้างอิงเท่ากับ 0.1 cm.....	27
4.16 ระยะห่างและแรงดันอินพุตที่จุดอ้างอิงเท่ากับ 0.2 cm.....	28
4.17 ระยะห่างและแรงดันอินพุตที่จุดอ้างอิงเท่ากับ 0.4 cm.....	28

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 ระยะห่างและแรงดันอินพุทที่จุดอ้างอิงเท่ากับ 0.1 cm.....	29
4.19 ระยะห่างและแรงดันอินพุทที่จุดอ้างอิงเท่ากับ 0.2 cm.....	29
4.20 ระยะห่างและแรงดันอินพุทที่จุดอ้างอิงเท่ากับ 0.4 cm.....	30
4.21 ระยะห่างและแรงดันอินพุทที่เป็นแบบจุดอ้างอิงพลวัต ที่ 0.1 cm, 0.4 cm และ 0.2 cm.....	31
4.22 ระยะห่างและแรงดันอินพุทที่เป็นแบบจุดอ้างอิงพลวัต ที่ 0.1 cm, 0.4 cm และ 0.2 cm.....	32
4.23 ระยะห่างและแรงดันอินพุทที่ค่าน้ำหนักของระบบลดลงมวลเท่ากับ 0.3 kg.....	33
4.24 ระยะห่างและแรงดันอินพุทที่ค่าน้ำหนักของระบบลดลงมวลเท่ากับ 0.3 kg.....	34
4.25 ระยะห่างและแรงดันอินพุทที่จุดอ้างอิงเท่ากับ 0.1 cm .....	35
4.26 แรงยกและกระแสอินพุทที่จุดอ้างอิงเท่ากับ 0.1cm .....	36
4.27 ระยะห่างและแรงดันอินพุทที่จุดอ้างอิงเท่ากับ 0.4 cm .....	36
4.28 แรงยกและกระแสอินพุทที่จุดอ้างอิงเท่ากับ 0.4cm .....	37
4.29 ระยะห่างและแรงดันอินพุทที่จุดอ้างอิงเท่ากับ 0.2 cm .....	38
4.30 แรงยกและกระแสอินพุทที่จุดอ้างอิงเท่ากับ 0.2cm .....	38
4.31 ระยะห่างและแรงดันอินพุทที่เป็นแบบจุดอ้างอิงพลวัต ที่ 0.1 cm, 0.4 cm และ 0.2 cm .....	39
4.32 แรงยกและกระแสอินพุทที่เป็นแบบจุดอ้างอิงพลวัต ที่ 0.1 cm 0.4 cm และ 0.2 cm .....	40
4.33 ระยะห่างและแรงดันอินพุทที่ค่ามวลเท่ากับ 0.3 และ 0.5 kg.....	40
4.34 แรงยกและกระแสอินพุทที่ค่ามวลเท่ากับ 0.3 และ 0.5 kg.....	34
ก.1 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 1.....	46
ก.2 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 2.....	48
ก.3 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 3.....	49
ก.4 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 4.....	51
ก.5 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 5.....	52
ก.6 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 6.....	53
ก.7 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 7.....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.8 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 8.....	56
ก.9 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 9.....	57
ก.10 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 10.....	58
ก.11 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 11.....	59
ก.12 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 12.....	50
ก.13 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 13.....	61
ก.14 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 14.....	62
ก.15 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 15.....	63
ก.16 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 16.....	64
ก.17 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 17.....	65
ก.18 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 18.....	66
ก.19 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 19.....	67
ก.20 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 20.....	68

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1. ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ระบบลอยเหนือรางมีประโยชน์มากในการเคลื่อนย้ายวัสดุหรือคน เพราะจะทำงานเร็วเท่ากันทุกครั้ง และสามารถขนส่งได้แม้โหลดมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากไม่มีแรงเสียดทานที่ราง เช่น รถไฟฟ้าความเร็วสูง ลิฟต์ขนของ ในระบบขนส่งแบบลอยเหนือรางการลอยตัวจะใช้ การดึงดูดของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีชื่อว่าระบบ Magnetic Levitation (Maglev) โดยการควบคุมจะมีตัวควบคุมที่ทำให้ตัวรถลอยอยู่เหนือรางในระยะที่กำหนดตลอดเวลาแม้ว่ามีโหลดเปลี่ยนแปลงซึ่งจำเป็นต้องมีตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพ จึงจะทำให้ระบบนี้แม่นยำ รวดเร็วและนุ่มนวล

โดยทั่วไปแล้วมีตัวควบคุมอยู่มีหลายแบบ แต่จากการค้นคว้าตัวควบคุมเหล่านั้นกับระบบนี้พบว่า มีผลตอบสนองที่ไม่ดีเท่าที่ควรเมื่อพารามิเตอร์ในระบบมีการเปลี่ยนแปลง และจากการค้นคว้าเปรียบเทียบเพื่อหาประสิทธิภาพ จากตัวควบคุมเดิมตามงานวิจัยอื่น ได้ใช้ตัวควบคุม PI (Proportional-Integral) หรือแบบ PD (Proportional-Derivation) เป็นส่วนใหญ่ โดยที่ตัวควบคุมแบบ PD จะมีการแกว่งของสัญญาณ (overshoot) มาก ส่วนการควบคุมแบบ PI มักให้การตอบสนองไม่รวดเร็วกรณีการเปลี่ยนแปลง จากงานวิจัยที่ผ่านมา [1, 10, 16, 21] ตัวควบคุมฟัซซีฟuzzy logic มีผลตอบสนองได้ครบทุกกรณีตามที่ระบบ Maglev ต้องการ ดังนั้นจึงได้เลือกตัวควบคุมฟัซซีฟuzzy logic มาออกแบบและสร้างระบบ Maglev

### 2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อพัฒนาตัวควบคุมในระบบ Maglev ให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น
- 2) เพื่อเป็นระบบอ้างอิงในการประยุกต์เชิงอุตสาหกรรม เช่น การขนถ่ายวัสดุในสายการผลิต
- 3) เพื่อเป็นแนวทางในการใช้สร้างระบบ Maglev ในระบบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

### 3. สมมุติฐานเบื้องต้น

- 1) ระบบที่ออกแบบจะต้องทำให้มีประสิทธิภาพดีกว่าแบบดั้งเดิมกล่าวคือระบบที่นำเสนอนี้มีผลตอบสนองแม่นยำ รวดเร็วและนุ่มนวล
- 2) การเลือกเซนเซอร์ที่มีความละเอียดสูง มีผลต่อการสร้างฮาร์ดแวร์เพราะเป็นวิธีการแก้ปัญหาสำคัญของระบบประมวลผล

#### 4. ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

- 1) ทฤษฎีการเคลื่อนที่เครื่องกลไฟฟ้า
- 2) ทฤษฎีการออกแบบตัวควบคุมแบบพีดี พีไอและพีซีพีไอ

#### 5. ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ทำการจำลองการทำงานของระบบ Maglev โดยใช้คอมพิวเตอร์
- 2) นำระบบที่ออกแบบทดลองสร้างแบบจำลองจริง
- 3) ทำการทดลองระบบเปรียบเทียบกับระบบต่าง ๆ

#### 6. ขั้นตอนของงานวิจัย

- 1) ค้นคว้าเอกสารและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
- 2) ศึกษาเอกสารและข้อมูลที่รวบรวมได้
- 3) ออกแบบระบบและจำลองการทำงาน โดยใช้คอมพิวเตอร์
- 4) สร้างและทำการทดลองระบบที่ออกแบบ
- 5) นำค่าการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบ สรุปผลและเรียบเรียงวิทยานิพนธ์

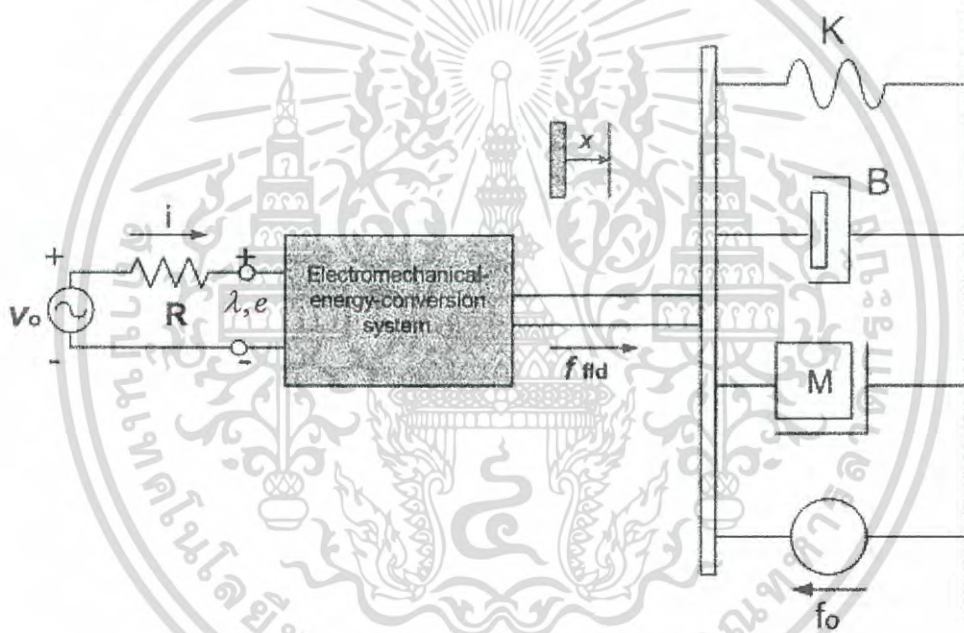


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 สมการการเคลื่อนที่เครื่องกลไฟฟ้า

ความสัมพันธ์ของแรงและทอร์กที่เกิดขึ้นในการเปลี่ยนแปลงพลังงานในเครื่องกลไฟฟ้าเกิดขึ้นจากฟังก์ชันการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าและการเคลื่อนที่ทางกลซึ่งมีความสัมพันธ์ต่อกัน จากรูปตัวอย่างพื้นฐานของระบบเครื่องกลไฟฟ้ารูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบพื้นฐานของระบบ รายละเอียดแบ่งออกได้สามส่วนคือ ระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้า ระบบการเปลี่ยนแปลงพลังงานเครื่องกลไฟฟ้าและระบบเชิงกล [2], [3], [4]



รูปที่ 2.1 แบบระบบเครื่องกลไฟฟ้า

ระบบเครื่องกลไฟฟ้าประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า  $v_0$  และความต้านทาน  $R$  การสูญเสียพลังงานไฟฟ้าในระบบประกอบด้วยสองส่วน คือ ความต้านทานที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า  $R_s$  และความต้านทานของระบบเครื่องกลไฟฟ้าจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานเครื่องกลไฟฟ้า  $R_w$  ซึ่งสามารถนำมารวมกันดังนี้  $R = R_s + R_w$

สมการทางไฟฟ้าสำหรับระบบ ดังนี้

$$v_0 = iR + \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้า flux linkage คือ  $\lambda$  ซึ่ง  $\lambda = L(x)i$  จะได้

$$v_0 = iR + L(x)\frac{di}{dt} + i\frac{dL(x)}{dx}\frac{dx}{dt} \quad (2.2)$$

เทอมที่สอง  $L(di/dt)$  เป็นสมการเทอมแรงดันตัวเหนี่ยวนำ เทอมที่สาม  $i(dL/dx)(dx/dt)$  ตัวคูณ  $(dx/dt)$  เป็นความเร็ว ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานเครื่องกลไฟฟ้าและเป็นส่วนที่เปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกล [13], [14], [15]

ระบบทางกลจากรูปที่ 2.1 ประกอบด้วยสปริง ( $K$  ค่าคงที่ของสปริง) ตัวหน่วง (damper) โดย  $B$  เป็นค่าคงที่ของการหน่วง (damping) มวล ( $M$ ) แรงกระทำจากภายนอก ( $f_0$ ) และระยะ ( $x$ )

สปริง 
$$f_K = -K(x - x_0) \quad (2.3)$$

ตัวหน่วง 
$$f_D = -B\frac{dx}{dt} \quad (2.4)$$

น้ำหนัก 
$$f_M = -M\frac{d^2x}{dt^2} \quad (2.5)$$

$x_0$  เป็นค่าของ  $x$  กับค่าที่สปริงไม่ตึง ค่าสมดุลของแรงแสดงได้ดังนี้

$$f_{fd} + f_K + f_D + f_M - f_0 = f_{fd} - K(x - x_0) - B\frac{dx}{dt} - M\frac{d^2x}{dt^2} - f_0 = 0 \quad (2.6)$$

จากสมการที่ 2.2 และ 2.5 ในระบบดังรูปที่ 1 โดยมีอินพุตคือ  $v_0(t)$  และ  $f_0(t)$  หาได้ดังนี้

$$v_0 = iR + L(x)\frac{di}{dt} + i\frac{dL(x)}{dx} \quad (2.7)$$

$$f_0(t) = -M\frac{d^2x}{dt^2} - B\frac{dx}{dt} - K(x - x_0) + f_{fd}(x, i) \quad (2.8)$$

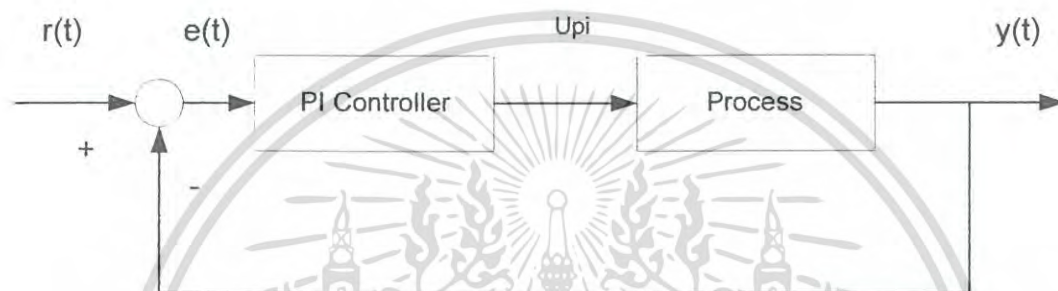
ฟังก์ชัน  $L(x)$  และ  $f_{fd}(x, i)$  เป็นส่วนประกอบที่อยู่ในระบบการเปลี่ยนแปลงพลังงานเครื่องกลไฟฟ้า [17], [19], [20]

## 2.2 การออกแบบตัวควบคุมแบบพีซีพีไอ

โครงสร้างพื้นฐานของตัวควบคุมอนาล็อกพีไอแบบดั้งเดิมดังรูปที่ 2.2 จะเขียนให้อยู่ในรูปของโดเมนความถี่ (frequency domain) [1], [8], [9], [10] โดย

$$u_{pi}(s) = \left(K_p^c + \frac{K_i^c}{s}\right)E(s) \quad (2.9)$$

โดยที่  $K_p^c$  และ  $K_i^c$  เป็นค่าเกน และ  $E(s)$  เป็นค่าสัญญาณผิดพลาด



รูปที่ 2.2 ระบบควบคุมอนาล็อกพีไอแบบดั้งเดิม

จากสมการที่ 3.1 ใช้การแปลงแบบไบบิลิเนียร์ตามฟอร์ม  $s = \frac{2}{T} \left[ \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right]$  เมื่อ  $T > 0$  จะได้เป็นแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete version) ดังนี้

$$u_{pi}(z) = \left( K_p^c - \frac{K_i^c T}{2} + \frac{K_i^c T}{1-z^{-1}} \right) E(z)$$

กำหนดให้  $K_p = K_p^c - \frac{K_i^c}{2}$  และ  $K_d = K_i^c T$  และทำการหาอินเวอร์สซีทรานฟอร์มได้เป็น

$$u_{pi}(nT) - u_{pi}(nT - T) = K_p [e(nT) + e(nT - T)] + K_d e(nT) \quad (2.10)$$

หารสมการที่ 3.2 ด้วย  $T$

$$u_{pi}(nT) = u_{pi}(nT - T) + T \Delta u_{pi}(nT) \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

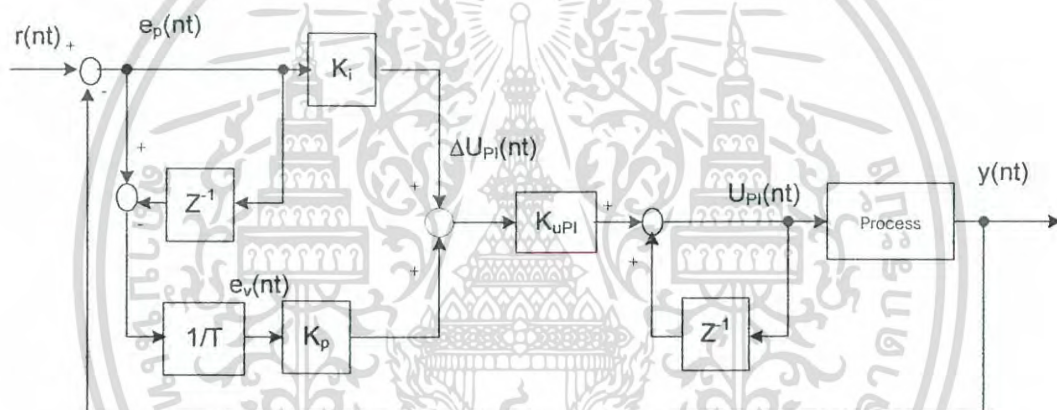
$$\Delta u_{pi}(nT) = K_p e_v(nT) + K_i e_p(nT) \quad (2.12)$$

$$e_v(nT) = \frac{e(n) - e(n-T)}{T} \quad (2.13)$$

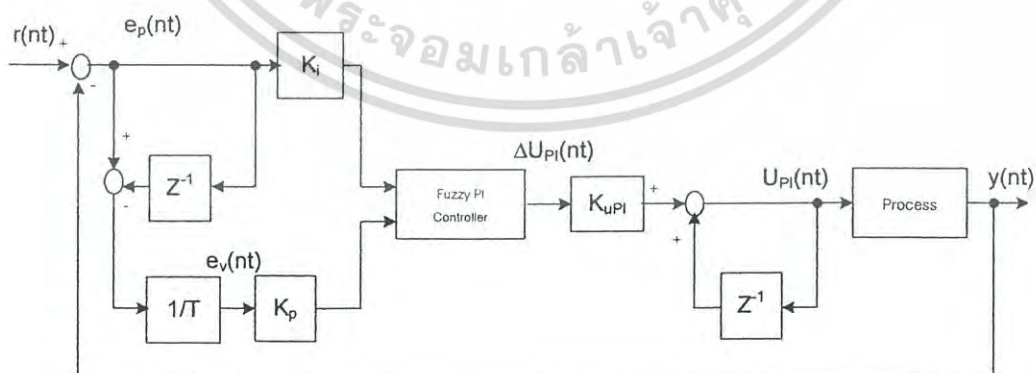
$$e_p(nT) = e(nT) \quad (2.14)$$

แทน  $T\Delta u_{pi}(n)$  ด้วยตัวแปรแทนของตัวควบคุมแบบพีซีพีไอ  $K_{upi}\Delta u_{pi}$  ได้เป็น

$$u_{pi}(n) = u_{pi}(nT - T) + K_{upi}\Delta u_{pi}(nT) \quad (2.15)$$



รูปที่ 2.3 ระบบควบคุมดิจิทัลพีไอแบบดั้งเดิม

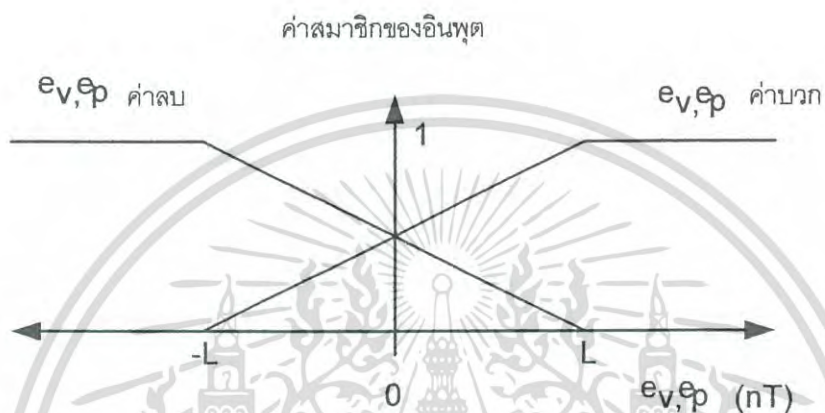


รูปที่ 2.4 ระบบควบคุมแบบพีซีพีไอ

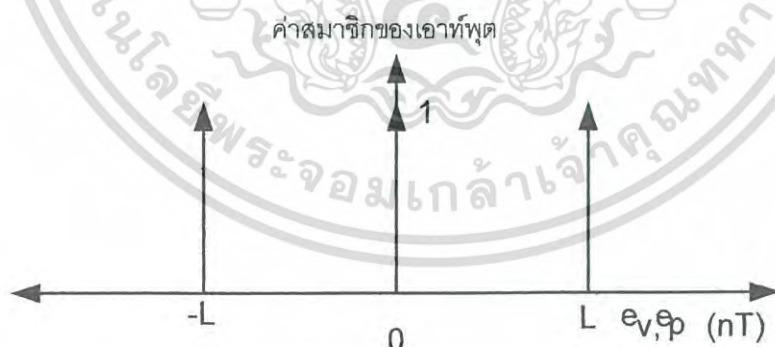
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3 การทำพีชชีพีเคชัน

ตัวควบคุมแบบพีชชีพีไอใช้สองอินพุตประกอบด้วยค่าสัญญาณผิดพลาด ( $e_p(nT)$ ) และค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าสัญญาณผิดพลาด ( $e_v(nT)$ ) จากสมการที่ 2.14 และ 2.1 ตามลำดับ เขียนฟังก์ชันสมาชิกทางอินพุต และฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุต ได้ดังรูปที่ 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ



รูปที่ 2.5 ฟังก์ชันสมาชิกของอินพุตของตัวควบคุมพีชชีแบบพีไอ

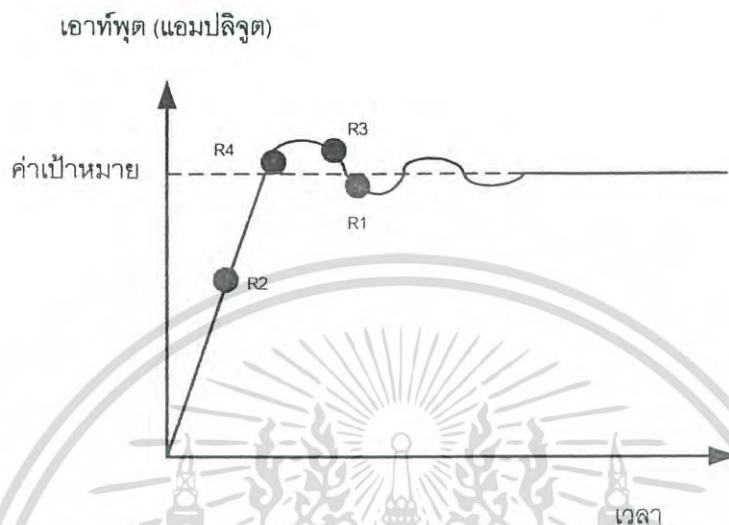


รูปที่ 2.6 ฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุตของตัวควบคุมพีชชีแบบพีไอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 การกำหนดกฎของพีชชีพีไอ

การกำหนดกฎของพีชชีพีไอนั้น จะขึ้นอยู่กับฟังก์ชันสมาชิกของอินพุตในรูปที่ 2.6 โดยจะกำหนดกฎเป็นไปตามตารางที่ 2.1 และจะเลือกเอาท์พุตจากฟังก์ชันสมาชิกของเอาท์พุตในรูปที่ 2.7 และกำหนดกฎจากรูปที่ 2.8 และจะได้กฎของพีชชีพีไอ [11], [12], [16] ดังนี้



รูปที่ 2.7 ผลตอบสนองที่ใช้กำหนดกฎของพีชชีพีไอ

ตารางที่ 2.1 กฎของตัวควบคุมแบบพีชชีพีไอ

กฎที่	$e_p$	$e_v$	เอาท์พุตที่ถูกเลือก
R1	p	p	o.p
R2	p	n	o.z
R3	n	p	o.z
R4	n	n	o.n

จากตารางที่ 2.1  $e_p = r - y$  และ  $e_v = 0 - y$  โดย

$e_p$  คือ ค่าสัญญาณผิดพลาด

$e_v$  คือ ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าสัญญาณผิดพลาด

$r$  คือ ค่าเป้าหมาย

$y$  คือ เอาท์พุต ( $\Delta u_{ipi}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

“ $e_p.p$ ” คือ ค่าตำแหน่งสัญญาณผิดพลาดที่เป็นบวก และ “ $o.p$ ” หมายถึงเอาต์พุตที่เป็นบวก จากกฎในตารางที่ 2.1 จะใช้ “AND” หมายถึง ตรรกศาสตร์ซาดแอน (Zadeh’s logical “AND”) กำหนดโดย  $\mu(A \wedge B) = \min\{\mu_A, \mu_B\}$  จะแบ่งกฎเป็น 4 ข้อดังนี้

R1 : ถ้า  $e_p =$  ค่าผิดพลาดทางบวก และ  $e_v =$  ค่าผิดพลาดทางบวก ดังนั้นเอาต์พุตที่ได้เป็น บวก

R2 : ถ้า  $e_p =$  ค่าผิดพลาดทางบวก และ  $e_v =$  ค่าผิดพลาดทางลบ ดังนั้นเอาต์พุตที่ได้เป็น ศูนย์

R3 : ถ้า  $e_p =$  ค่าผิดพลาดทางลบ และ  $e_v =$  ค่าผิดพลาดทางบวก ดังนั้นเอาต์พุตที่ได้เป็น ศูนย์

R2 : ถ้า  $e_p =$  ค่าผิดพลาดทางลบ และ  $e_v =$  ค่าผิดพลาดทางลบ ดังนั้นเอาต์พุตที่ได้เป็น ลบ

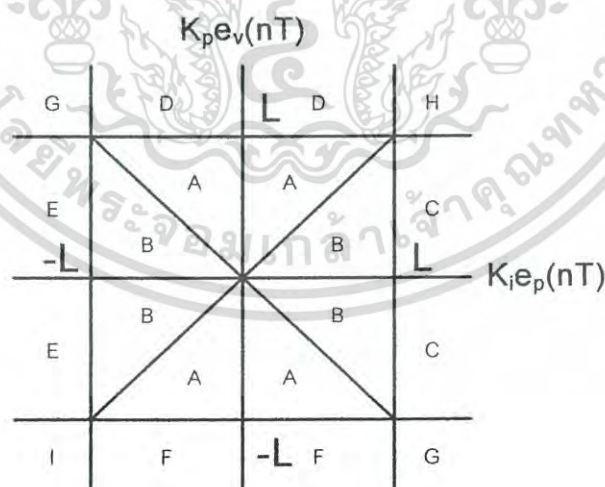
## 2.5 การทำดีฟัซซิฟิเคชันของฟัซซิฟิไอ

ในขั้นตอนของการทำดีฟัซซิฟิเคชัน จะใช้วิธีศูนย์กลางมวล (center of mass) ดังสมการที่ 3.7

$$\Delta u(n) = \frac{\sum MV_{input} \times MV_{output}}{\sum MV_{input}} \quad (3.7)$$

โดยที่  $MV_{input}$  คือ สมาชิกทางอินพุต และ  $MV_{output}$  คือ สมาชิกทางเอาต์พุต [18], [21]

สำหรับตัวควบคุมแบบฟัซซิฟิไอมี 2 อินพุต คือ ค่าสัญญาณผิดพลาด และ ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าสัญญาณผิดพลาด โดยจะแบ่งได้ทั้งหมด 20 พื้นที่ และมีพื้นที่ที่มีสมการเหมือนกัน 9 พื้นที่ จึงสามารถแบ่งได้เป็น 9 พื้นที่ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 แสดงพื้นที่ทั้งหมดของฟัซซิฟิไอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยค่า  $o.p = L$ ,  $o.n = -L$ ,  $o.z = 0$  และสูตรสมการเส้นตรงจากรูปที่ 2.9 จะได้

$$e_p \cdot p = \frac{K_i e_p(nT) + L}{2L}, e_p \cdot n = \frac{-K_i e_p(n) + L}{2L}$$

$$e_v \cdot p = \frac{K_p e_v(n) + L}{2L}, e_v \cdot n = \frac{-K_p e_v(n) + L}{2L}$$

และจะได้ 9 สมการสำหรับ 9 พื้นที่ดังนี้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L[K_i e_p(nT) + K_p e_v(nT)]}{2[2L - K_i |e_p(nT)]} \quad \text{พื้นที่ A}$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L[K_i e_p(nT) + K_p e_v(nT)]}{2[2L - K_i |e_v(nT)]} \quad \text{พื้นที่ B}$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{1}{2}[K_p e_v(nT) + L] \quad \text{พื้นที่ C}$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{1}{2}[K_i e_p(nT) + L] \quad \text{พื้นที่ D}$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{1}{2}[K_p e_v(nT) - L] \quad \text{พื้นที่ E}$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{1}{2}[K_i e_p(nT) - L] \quad \text{พื้นที่ F}$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = 0 \quad \text{พื้นที่ G}$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = L \quad \text{พื้นที่ H}$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = -L \quad \text{พื้นที่ I}$$

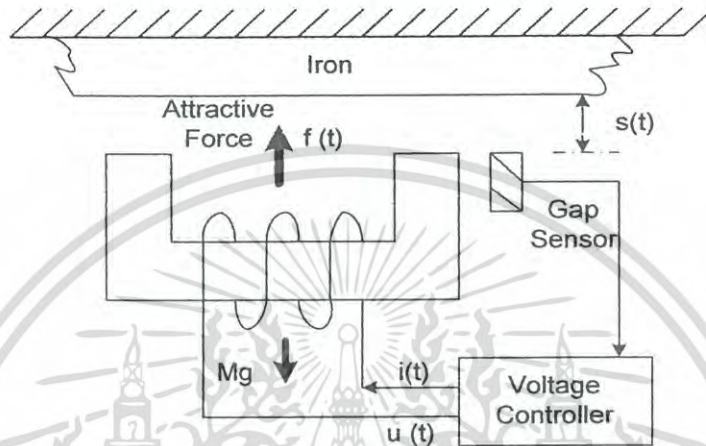
ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องซึ่ง ประกอบด้วยสองส่วนคือ สมการการเคลื่อนที่ เครื่องกลไฟฟ้า และการออกแบบตัวควบคุมแบบพีชซีพีไอ โดยสมการการเคลื่อนที่เครื่องกลไฟฟ้า เป็นที่มาเบื้องต้นของระบบ Maglev ในบทต่อไปจะกล่าวถึงการนำสมการการเคลื่อนที่เครื่องกลไฟฟ้า มาเพื่อหาสมการของระบบ Maglev จริงที่จะนำมาทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### ระบบลอยเหนือร่าง

#### 3. ทฤษฎีระบบลอยเหนือร่าง



รูปที่ 3.1 ระบบลอยเหนือร่าง

ได้สมการของระบบจากรูปดังนี้

$$-\frac{\mu_o N^2 A}{4} \left[ \frac{i(t)}{s(t)} \right]^2 + Mg = Ms''(t) \quad (3.1)$$

$$u(t) = Ri(t) + 2 \frac{\mu_o N^2 A}{4} \frac{d}{dt} \left[ \frac{i(t)}{s(t)} \right] \quad (3.2)$$

จากสมการที่ (3.1) และ (3.2) ประกอบด้วยตัวแปรดังนี้

$\mu_o = 4\pi \times 10^{-7}$  เป็น (Vacuum permeability)  $u(t)$  เป็นแรงดันอินพุต  $i(t)$  เป็นกระแสที่ไหลผ่านขดลวด  $N$  เท่ากับจำนวนรอบของขดลวด  $A$  เป็นพื้นที่ของระยะห่าง  $R$  เป็นความต้านทานของขดลวด  $s(t)$  เป็นระยะห่างของระยะห่าง ดังรูปที่ 3.1 ด้านบนคือส่วนที่อยู่กับที่เป็นเหล็ก ด้านล่างจะเป็นส่วนที่ลอย

จากสมการที่ (3.1) และ (3.2) สามารถหาสมการ  $s(t)$ ,  $i(t)$  และ  $f(t)$  ได้ดังนี้

$$-\frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left[ \frac{i(t)}{s(t)} \right]^2 + Mg = Ms''(t) \quad (3.3)$$

$$u(t) = Ri(t) + 2 \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \frac{d}{dt} \left[ \frac{i(t)}{s(t)} \right] \quad (3.4)$$

ให้  $i(t) = 0$  ใน (3.4) ได้

$$\begin{aligned} u(t) &= 2 \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \frac{d}{dt} \left[ \frac{i(t)}{s(t)} \right] \\ \frac{d}{dt} \left[ \frac{i(t)}{s(t)} \right] &= \frac{4u(t)}{2\mu_0 N^2 A} \\ \left[ \frac{i(t)}{s(t)} \right] &= \left[ \frac{4u(t)}{2\mu_0 N^2 A} \right] t \end{aligned} \quad (3.5)$$

แทนค่า  $\frac{i(t)}{s(t)}$  ใน (3.3)

$$-\frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left[ \left[ \frac{4u(t)}{2\mu_0 N^2 A} \right] t \right]^2 + Mg = Ms''(t)$$

$$s''(t) = \left[ -\frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left[ \left[ \frac{4u(t)}{2\mu_0 N^2 A} \right] t \right]^2 + Mg \right] / M$$

$$s(t) = \left[ \left[ -\frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left[ \left[ \frac{4u(t)}{2\mu_0 N^2 A} \right] t \right]^2 + Mg \right] / M \right] t^2$$

$$\therefore s(t) = \left[ \left[ -\left[ \frac{u^2(t)}{\mu_0 N^2 A} \right] t^2 + Mg \right] / M \right] t^2 \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทน (3.6) ใน (3.5)

$$\left[ \frac{i(t)}{\left[ -\left[ \frac{u^2(t)}{\mu_0 N^2 A} \right] t^2 + Mg \right] / M} \right] t^2 = \left[ \frac{4u(t)}{2\mu_0 N^2 A} \right] t$$

$$i(t) = \left[ \frac{4u(t)}{2\mu_0 N^2 A} \right] t \cdot \left[ -\left[ \frac{u^2(t)}{\mu_0 N^2 A} \right] t^2 + Mg \right] / M t^2$$

$$\therefore i(t) = \left[ \frac{2t^5 u^3(t)}{M\mu_0^2 N^4 A^2} \right] + \left[ \frac{2gt^3 u(t)}{\mu_0 N^2 A} \right] \quad (3.7)$$

จาก (3.4)

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{i(t)}{s(t)} \right] = \left[ \frac{2u(t) - 2Ri(t)}{\mu_0 N^2 A} \right] \quad (3.8)$$

แทนค่า  $i(t)$  จาก (3.7) ใน (3.8)

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{i(t)}{s(t)} \right] = \left[ \frac{2u(t) - 2R \left[ -\left[ \frac{2t^5 u^3(t)}{M\mu_0^2 N^4 A^2} \right] + \left[ \frac{2gt^3 u(t)}{\mu_0 N^2 A} \right] \right]}{\mu_0 N^2 A} \right]$$

$$\left[ \frac{i(t)}{s(t)} \right] = \left[ \frac{2u(t) - 2R \left[ -\left[ \frac{2t^5 u^3(t)}{M\mu_0^2 N^4 A^2} \right] + \left[ \frac{2gt^3 u(t)}{\mu_0 N^2 A} \right] \right]}{\mu_0 N^2 A} \right] t = B(t) \quad (3.9)$$

แทนค่า  $\frac{i(t)}{s(t)}$  จาก (3.9) ใน (3.4)

$$-\frac{\mu_0 N^2 A}{4} [B(t)]^2 + Mg = Ms''(t)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\therefore s(t) = \left[ -\frac{\mu_o N^2 A}{4M} [B(t)]^2 + g \right] t^2 \quad (3.10)$$

สรุปได้สมการดังนี้

$$\left[ \frac{i(t)}{s(t)} \right] = \left[ \frac{2u(t) - 2R \left[ -\frac{2t^5 u^3(t)}{M\mu_o^2 N^4 A^2} + \frac{2gt^3 u(t)}{\mu_o N^2 A} \right]}{\mu_o N^2 A} \right] t$$

$$\therefore s(t) = \left[ -\frac{\mu_o N^2 A}{4M} \left[ \frac{i(t)}{s(t)} \right]^2 + g \right] t^2 \quad (3.11)$$

สมการ  $s(t)$  แสดงถึงฟังก์ชันของระยะห่าง

$$\therefore i(t) = -\frac{2t^5 u^3(t)}{M\mu_o^2 N^4 A^2} + \frac{2gt^3 u(t)}{\mu_o N^2 A} \quad (3.12)$$

สมการ  $i(t)$  แสดงถึงฟังก์ชันของกระแสไฟฟ้า

$$\therefore f(t) = \frac{\mu_o N^2 A}{4} \left[ \frac{i(t)}{s(t)} \right]^2 \quad (3.13)$$

สมการ  $f(t)$  แสดงถึงฟังก์ชันของแรงในการลอยตัว

ในบทนี้ ได้แสดงให้เห็นถึงที่มาของสมการระบบ Maglev โดยในบทต่อไปจะเป็นการนำสมการที่ได้ จำลองการทำงานโดยคอมพิวเตอร์ และส่วนประกอบต่าง ๆ ในระบบ Maglev และผลการทดลองในระบบจริง

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 บทนำ

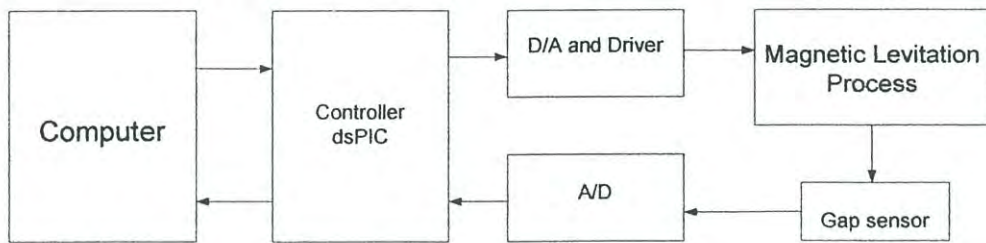
ในขั้นตอนของบทนี้กล่าวถึงส่วนประกอบของระบบจริงที่ใช้ในการทดลองและการทดลองนี้ ประกอบด้วยสามส่วนด้วยกัน คือ การจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้พารามิเตอร์จากการลองผิดลองถูกของผู้ทดลอง การทดลองระบบในจริงโดยใช้พารามิเตอร์จากการลองผิดลองถูกของผู้ทดลองและการทดลองนำค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ใช้ในการทดลองระบบจริงกับมาทดลองจำลองการทำงาน โดยคอมพิวเตอร์ เพื่อเปรียบเทียบว่ามีความใกล้เคียงกับการทดลองกับการทดลองในระบบจริง

#### 4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องคอมพิวเตอร์พร้อมระบบปฏิบัติการ 1 เครื่อง
2. โปรแกรมที่ใช้เขียนจำลองการทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ของ Matlab version 7.0
3. โปรแกรมที่ใช้เขียนบนเครื่องคอมพิวเตอร์ (Compiler) ของ Microsoft รุ่น Microsoft Visual Basic version 6.0
4. โปรแกรมที่ใช้เขียนบอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ (Compiler) ของ Microchip รุ่น MPLAB-C30
5. บอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ของ Microchip รุ่น dsPIC30F6012
6. เครื่องโปรแกรมและDebug โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ของMicrochipรุ่น MPLAB
7. ICD 2
8. สายติดต่อพอร์ตขนานและพอร์ตอนุกรม
9. ชุดจำลองการทำงานของระบบ Maglev

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การทำงานของระบบ Maglev



รูปที่ 4.1 บล็อกการทำงานของระบบ Maglev



รูปที่ 4.2 ระบบ Maglev ที่ใช้ทดลองจริง

จากรูปที่ 4.1 การทำงานเริ่มจากคอมพิวเตอร์จะส่งค่าอินพุต (ระยะห่างที่ต้องการและค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุม) ไปยังบอร์ดควบคุม dsPIC ทำการประมวลผล เอาท์พุทที่ได้จะถูกแปลงสัญญาณจากดิจิทัลเป็นอนาล็อกผ่านชุด Driver เข้าสู่ระบบ Maglev จากนั้นเซ็นเซอร์จะวัดระยะห่างขณะนั้นส่งกลับไปที่บอร์ดควบคุม dsPIC โดยผ่านตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล เพื่อทำการประมวลผลให้ได้ระยะห่างตามที่คอมพิวเตอร์กำหนดมา และบอร์ดควบคุม dsPIC จะส่งค่าที่ได้จากเซ็นเซอร์กลับไปที่คอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

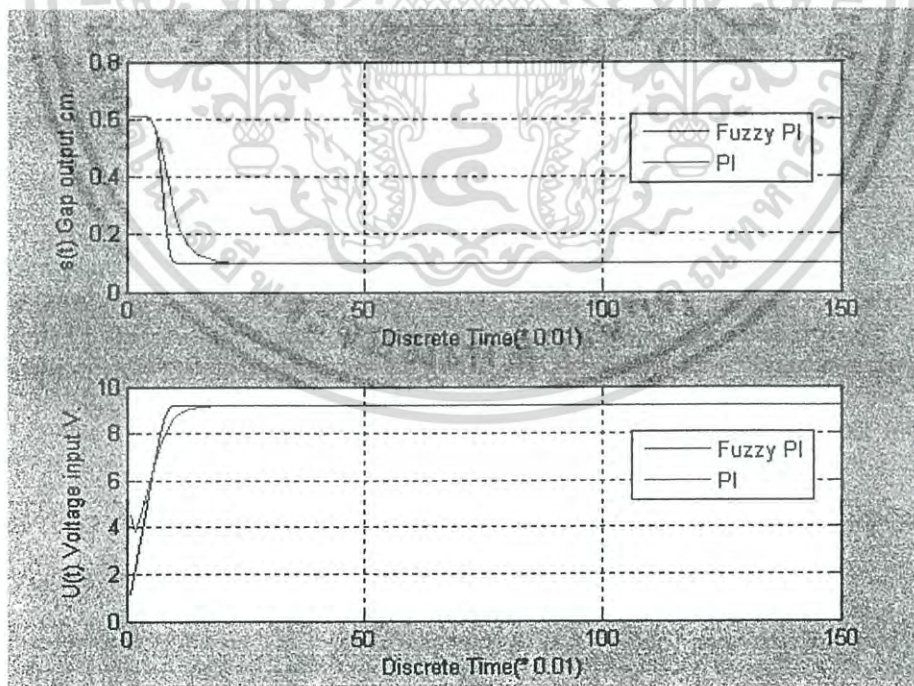
#### 4.4 จำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์

ในการทดลองได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ดังนี้  $g$  มีค่าเท่ากับ 10 N/m  $M$  มีค่าเท่ากับ 0.5 kg  $A$  มีค่าเท่ากับ 0.0004 m<sup>2</sup>  $N$  มีค่าเท่ากับ 1500 รอบ  $\mu$  มีค่าเท่ากับ  $4\pi \times 10^{-7}$   $R$  มีค่าเท่ากับ 500 โอห์มโดยการทดลองได้แบ่งเป็นสามส่วนคือ

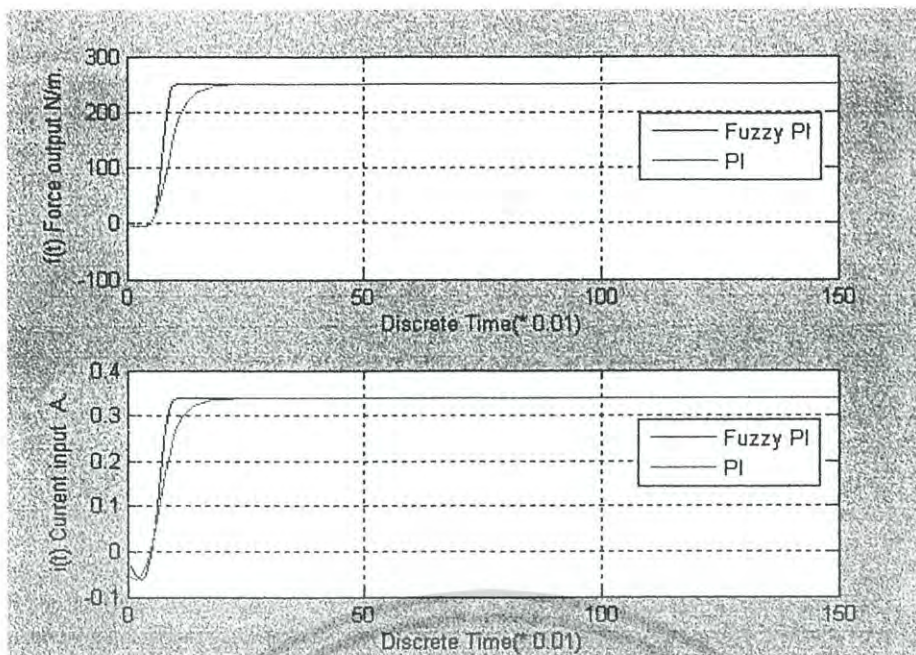
การทดลองที่ 4.4.1 กำหนดค่าจุดอ้างอิงขึ้น สามค่าคือ 0.1, 0.4, 0.2 cm แล้วทำการทดสอบกับตัวควบคุมพีไอแบบดั้งเดิม และตัวควบคุมแบบฟัซซีพีไอทีละค่าโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ จากตารางที่ 4.1 ซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.3 ถึง 4.8

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ตัวควบคุมการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

Parameter	PI	Fuzzy PI
Kp	5	0.03
Ki	5	0.03
L	-	10
Kupi	2	10

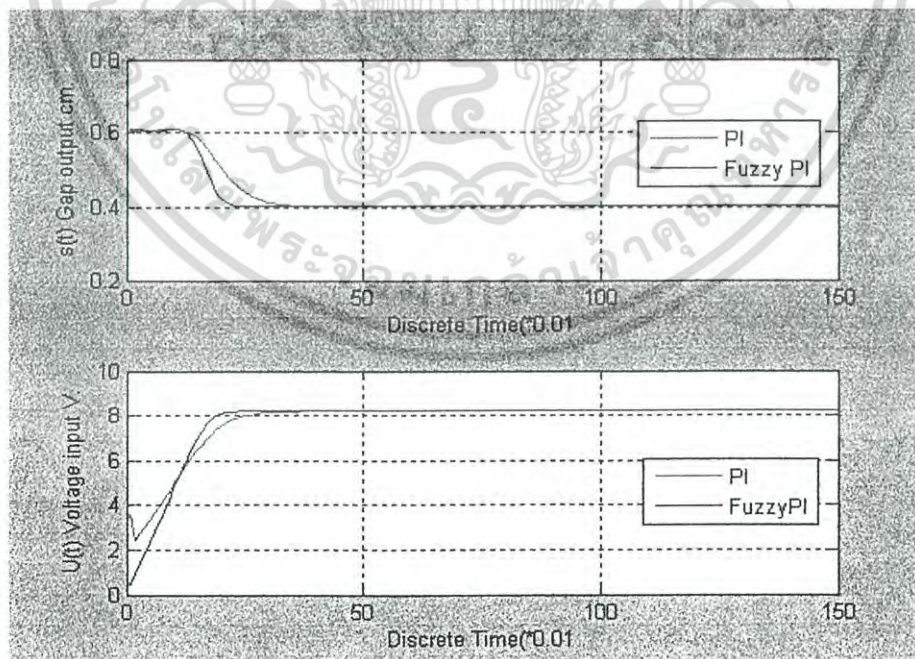


รูปที่ 4.3 ระยะเวลา และแรงดันอินพุตที่จุดอ้างอิงเท่ากับ 0.1 cm



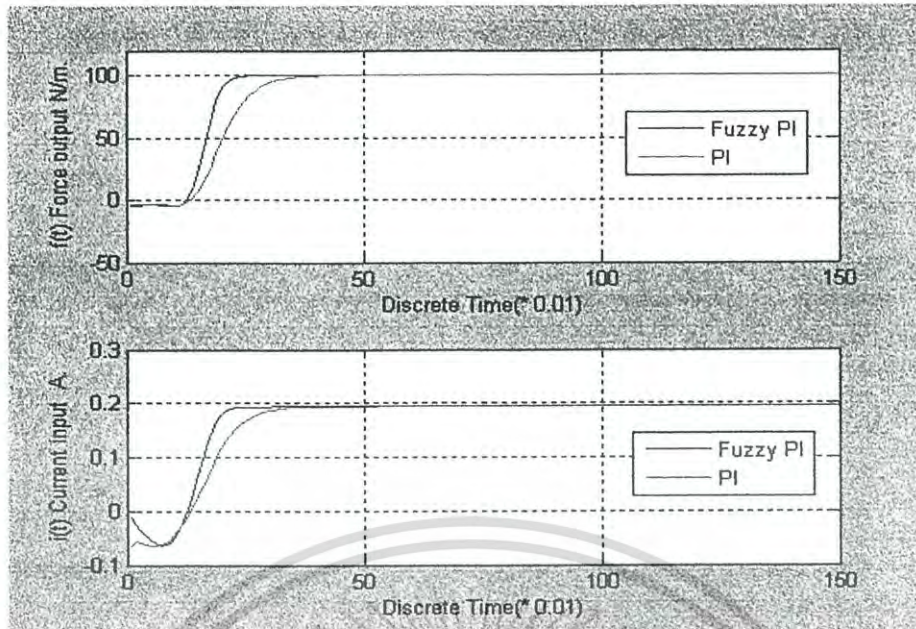
รูปที่ 4.4 แรงยกและกระแสอินพุตที่จุดอ้างอิงเท่ากับ 0.1cm

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบพีซีพีไอเข้าสู่จุดอ้างอิงที่ 0.1 cm ได้รวดเร็วกว่าตัวควบคุมพีไอแบบดั้งเดิมกว่าเล็กน้อยแต่ตัวควบคุมทั้งสองสามารถทำงานได้ถึงจุดอ้างอิงได้อย่างราบรื่นเหมือนกันรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าแรงที่เกิดขึ้นและกระแสที่เข้าสู่ระบบที่เกิดจากตัวควบคุมทั้งสองระบบทำงานได้ราบรื่นเหมือนกัน ผลตอบสนองต่างกันเล็กน้อย



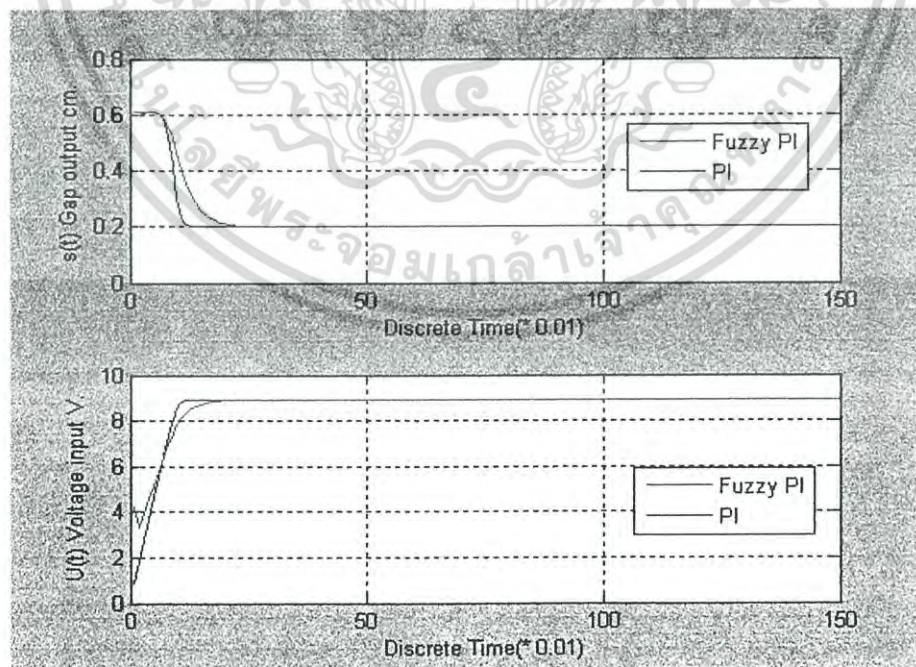
รูปที่ 4.5 ระยะห่างและแรงดันอินพุตจุดอ้างอิงเท่ากับ 0.4 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



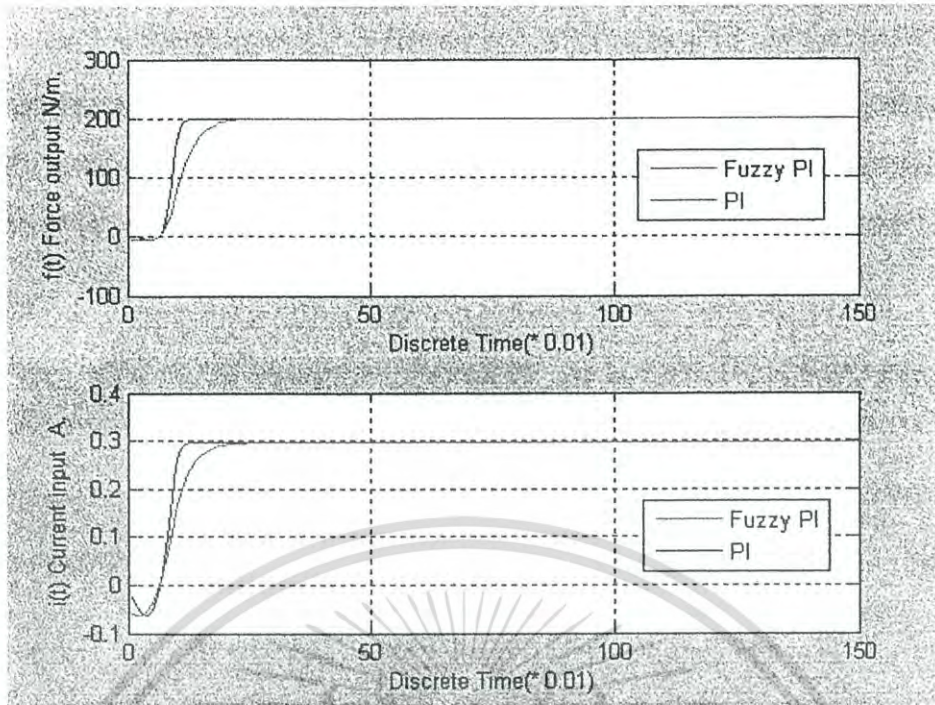
รูปที่ 4.6 แรงยกและกระแสอินพุตที่จุดอ้างอิงเท่ากับ 0.4 cm

จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบฟัซซี่พีไอเข้าสู่จุดอ้างอิงที่ 0.4 cm ได้รวดเร็วกว่าตัวควบคุมพีไอแบบดั้งเดิมกว่าเล็กน้อยแต่ตัวควบคุมทั้งสองสามารถทำงานได้ถึงจุดอ้างอิงได้อย่างราบรื่นเหมือนกันรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าแรงที่เกิดขึ้นและกระแสที่เข้าสู่ระบบที่เกิดจากตัวควบคุมทั้งสองระบบทำงานได้ราบรื่นเหมือนกัน ผลตอบสนองต่างกันเล็กน้อย



รูปที่ 4.7 ระยะห่าง และแรงดันอินพุตที่จุดอ้างอิงเท่ากับ 0.2 cm

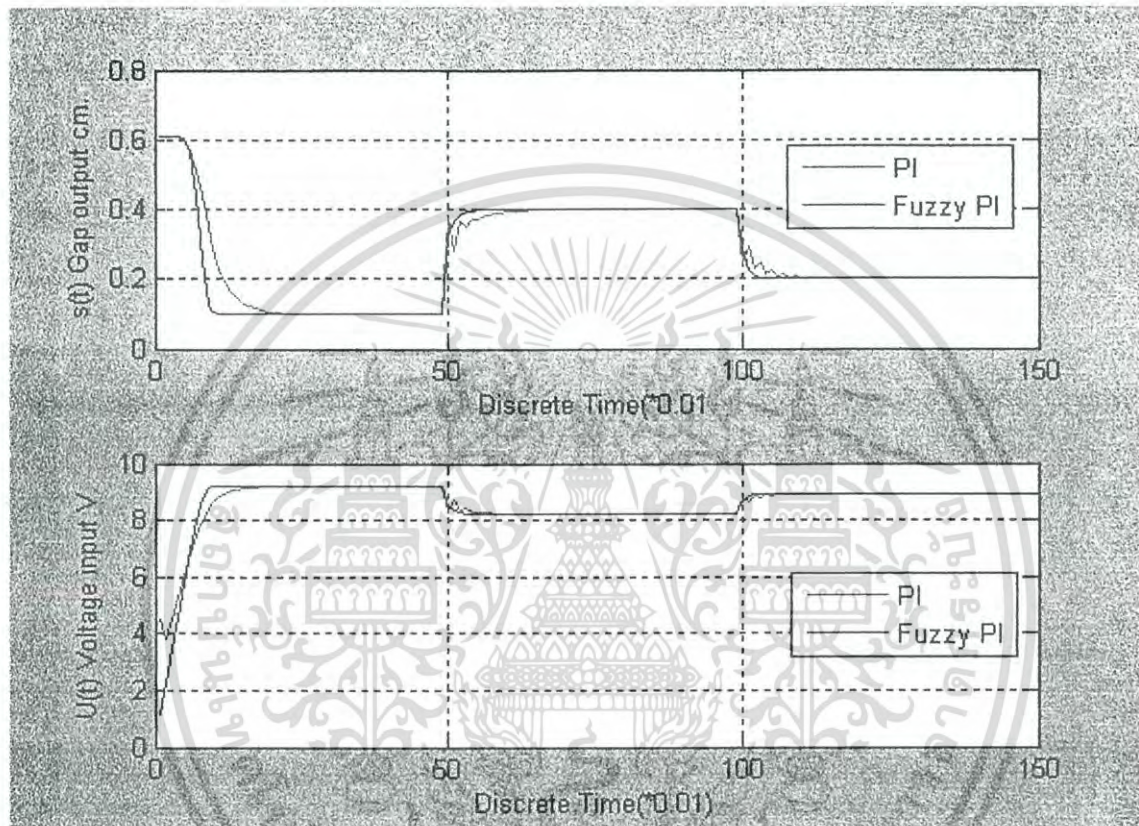
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



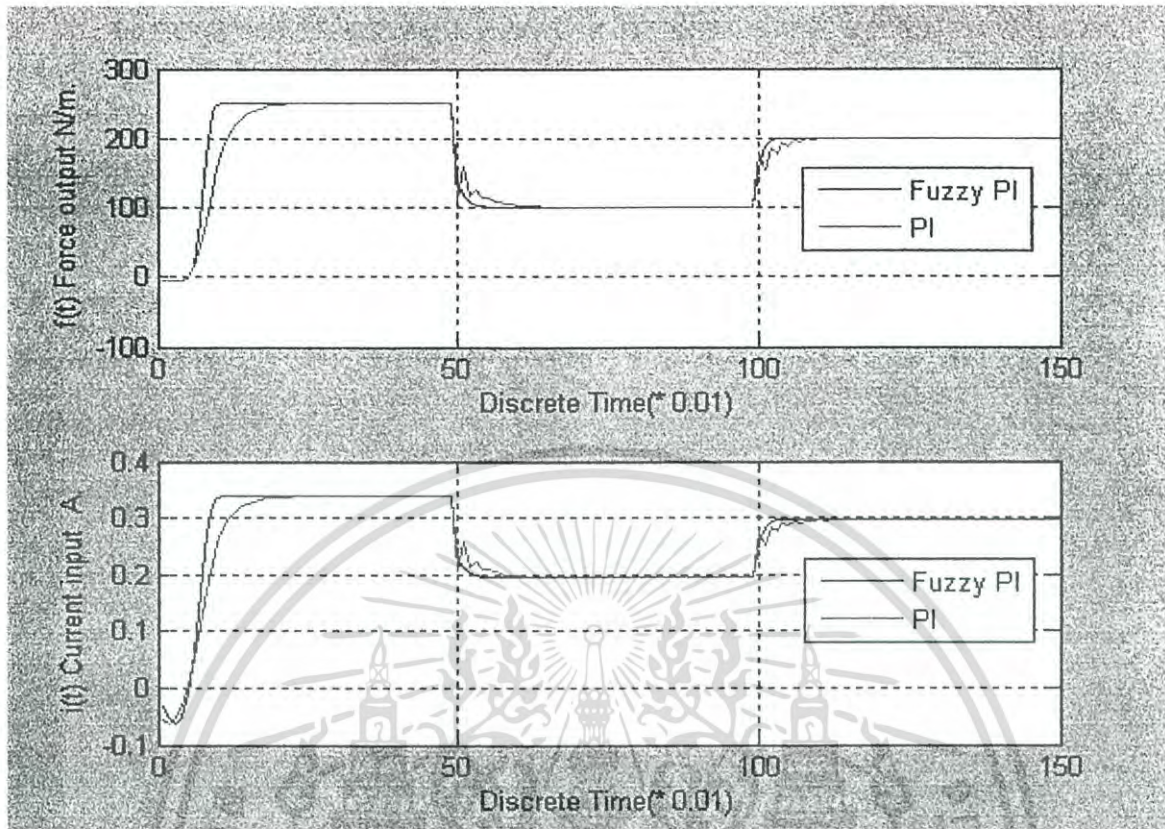
รูปที่ 4.8 แรงยกและกระแสอินพุตที่เท่ากับ 0.2 cm

จากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบฟัซซีพีไอ เข้าสู่จุดอ้างอิงที่ 0.2 cm ได้รวดเร็วกว่าตัวควบคุมพีไอแบบดั้งเดิมกว่าเล็กน้อยแต่ตัวควบคุมทั้งสองสามารถทำงานได้ถึงจุดอ้างอิง ได้อย่างราบรื่นเหมือนกันรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าแรงที่เกิดขึ้นและ กระแสที่เข้าสู่ระบบ ที่เกิดจากตัวควบคุมทั้งสองระบบทำงาน ได้ราบรื่นเหมือนกัน ผลตอบสนองต่างกันเล็กน้อย

การทดลองที่ 4.4.2 ใช้ค่าจุดอ้างอิงเช่นเดียวกับการทดลองที่ 4.4.1 โดยเปลี่ยนค่าจุดอ้างอิง ที่ทุก ๆ 50 การสุ่มค่าซ้ำ (iterations) ทดสอบกับตัวควบคุมพีไอแบบดั้งเดิม และตัวควบคุมแบบฟัซซี่ โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ตัวเดียวกับการทดลองที่ 1 ซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.9 และ 4.10



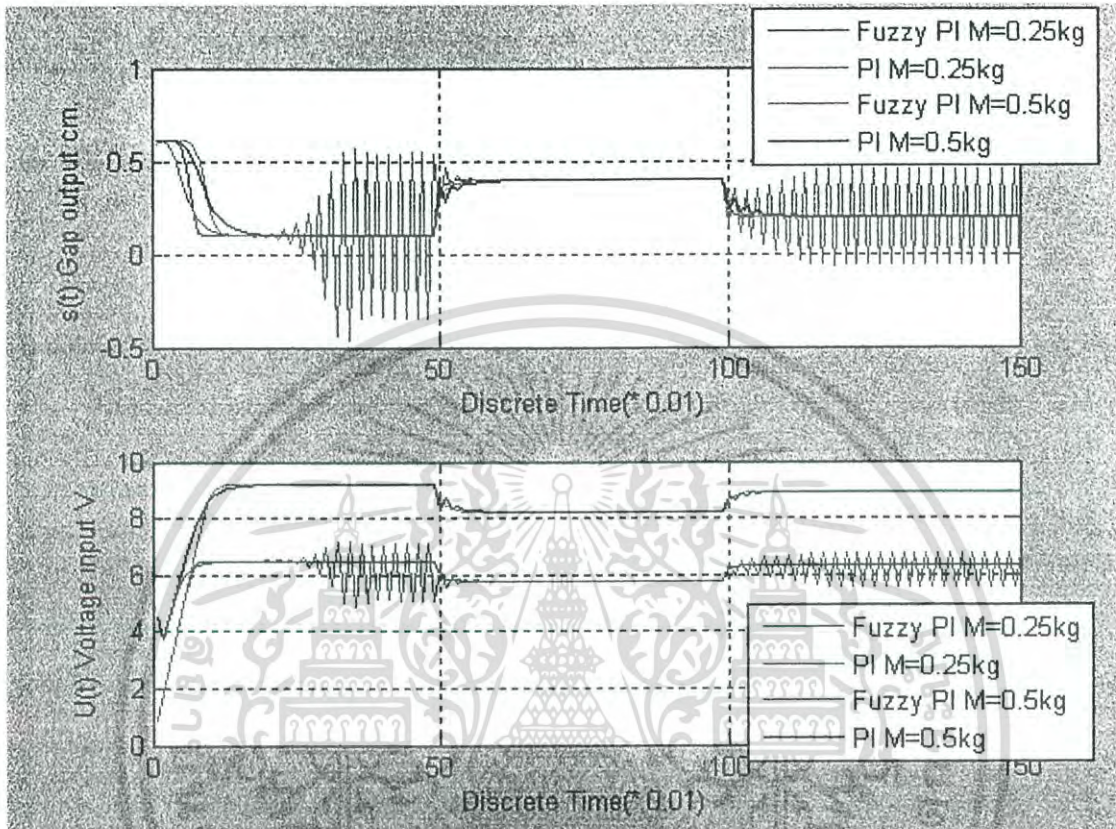
รูปที่ 4.9 ระยะห่าง และ แรงดันอินพุทที่เป็นแบบจุดอ้างอิงพลวัตที่ 0.1 cm 0.4 cm และ 0.2 cm



รูปที่ 4.10 แรงยกและกระแสอินพุตที่เป็นแบบจุดอ้างอิงพลวัตที่ 0.1 cm 0.4 cm และ 0.2 cm

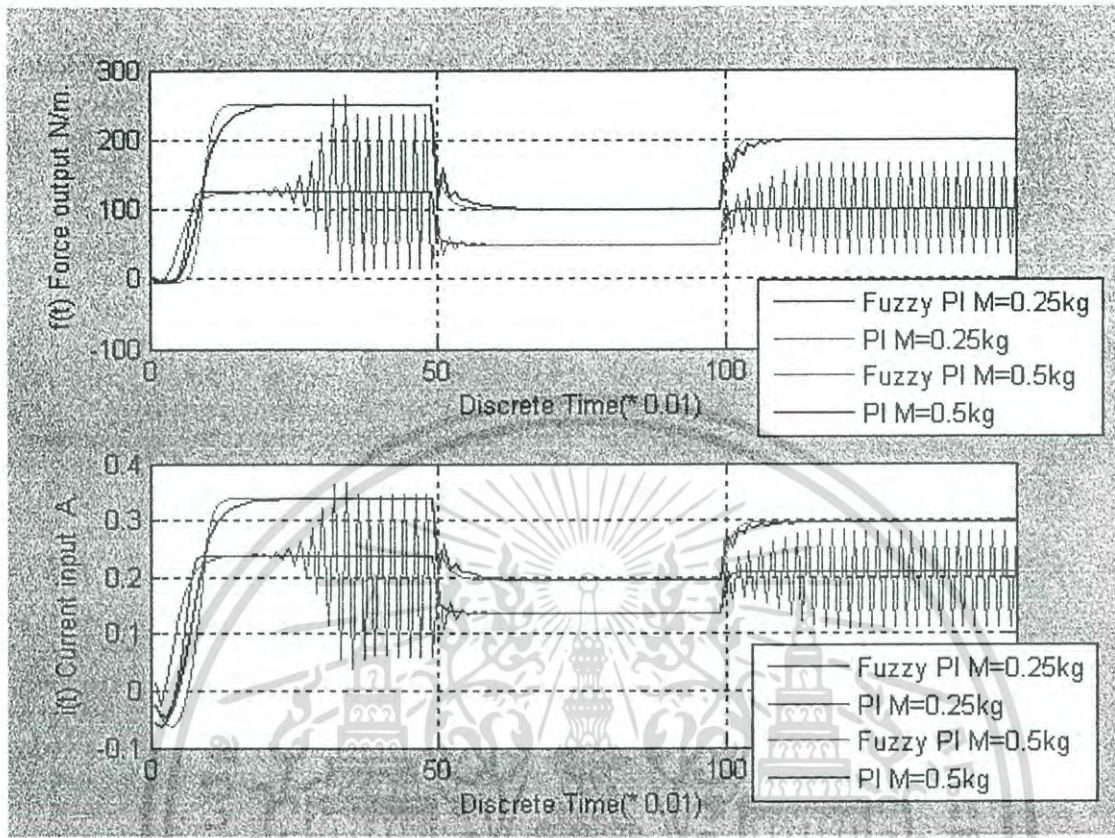
จากรูปที่ 4.9 การทำงานแบบการเปลี่ยนจุดอ้างอิงพลวัตให้เห็นว่าเมื่อเริ่มต้นการทำงานตัวควบคุมทั้งสองระบบสามารถทำงานเข้าถึงจุดอ้างอิงแรกได้ราบรื่น แต่เมื่อมีการเปลี่ยนจุดอ้างอิงจุดต่อมาตัวควบคุมพีไอดั้งเดิมมีการสั่นขณะเข้าจุดอ้างอิงแต่ ตัวควบคุมพีซีซีพีไอยังสามารถเข้าสู่จุดอ้างอิงได้ราบรื่นเหมือนเดิมและเมื่อมีการเปลี่ยนจุดอ้างอิงอีกครั้งตัวควบคุมพีไอดั้งเดิมยังมีการสั่นเช่นเดิมอีกซึ่งต่างจากตัวควบคุมพีซีซีพีไอที่ยังทำงานได้อย่างราบรื่นรูปที่4.10ผลตอบสนอง เช่นเดียวกับรูปที่ 4.9 เช่นกัน

การทดลองที่ 4.4.3 ใช้พารามิเตอร์จากการทดลองที่ 4.4.1 แต่มีการเปลี่ยนแปลงค่าของมวล ( $M$ ) ระบบซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.11 ถึง 4.14



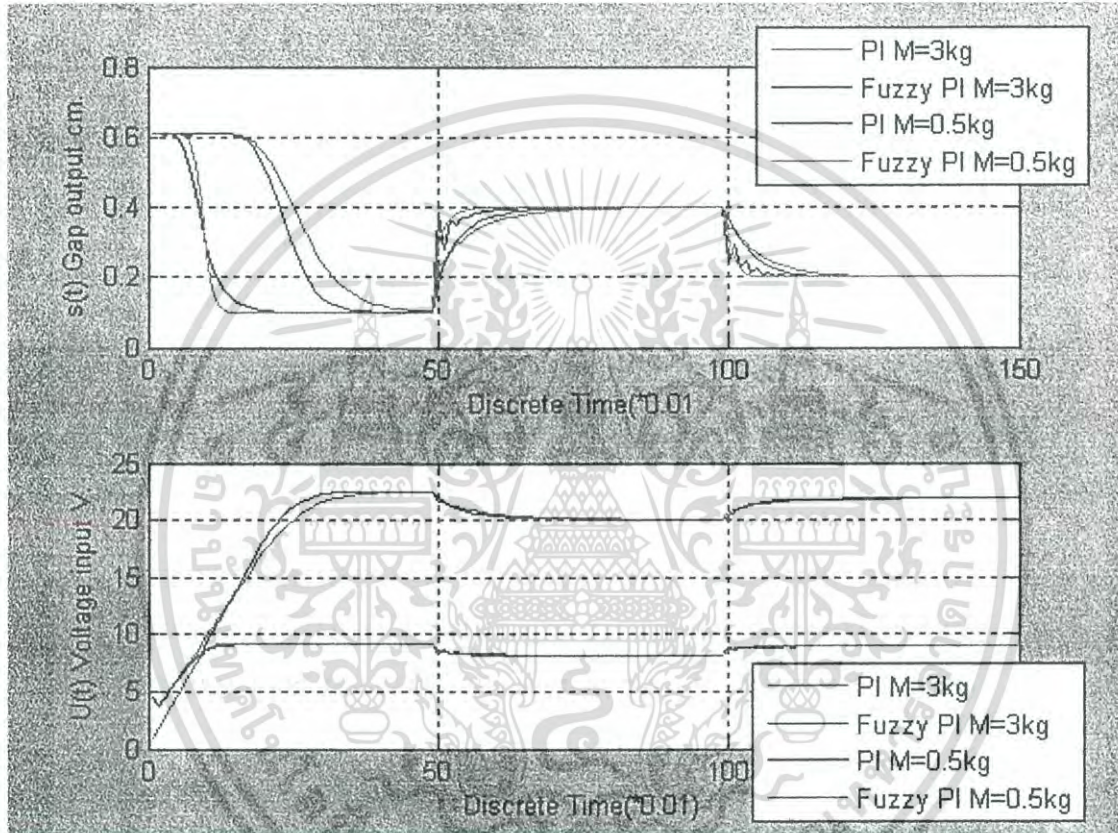
รูปที่ 4.11 ระยะห่างและแรงดันอินพุตที่ค่ามวลเท่ากับ 0.25 และ 0.5 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



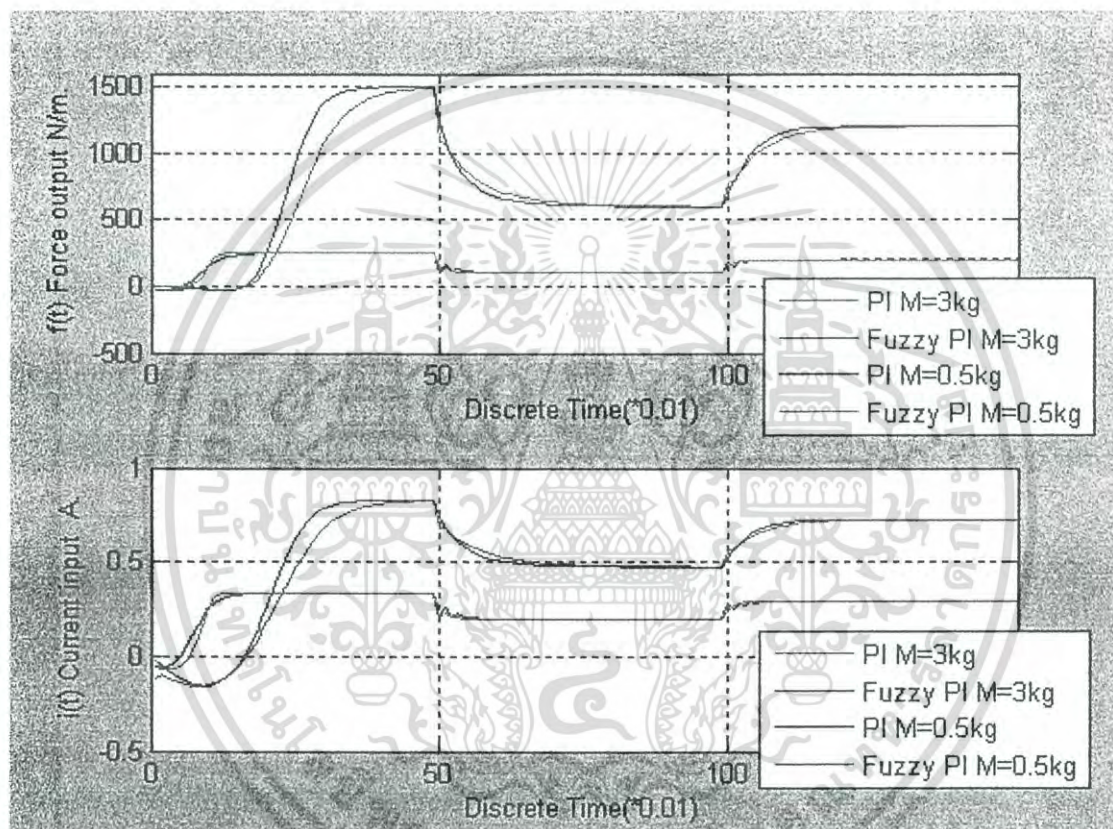
รูปที่ 4.12 แรงยกและกระแสอินพุทที่ค่านวลเท่ากับ 0.25 และ 0.5 kg

จากรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมวลโดยลดมวลลงขณะทำงาน ตัวควบคุมแบบพีไอดั้งเดิมเกิดการแกว่งของเอาต์พุตอย่างมากจนไม่สามารถเข้าจุดอ้างอิงแรกและ จุดอ้างอิงที่สองได้เลยสามารถทำงานเข้าได้ถึงจุดอ้างอิงที่สองเท่านั้น แต่ตัวควบคุมพีซีพีไอสามารถตอบสนองโดยสามารถเข้าถึงจุดอ้างอิงทั้งสามได้อย่างราบรื่น รูปที่ 4.12 ผลตอบสนอง เช่นเดียวกับรูปที่ 4.12 เช่นกัน



รูปที่ 4.13 ระยะห่างและแรงดันอินพุตที่ค่าเท่ากับ 0.5 และ 3 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 แรงยกและกระแสอินพุทที่ค่าเท่ากับ 0.5 และ 3 kg

จากรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมวลโดยลดมวลเพิ่มขึ้นขณะทำงาน ตัวควบคุมแบบฟuzzy ได้ดีเยี่ยมไม่เกิดการแกว่งของเอาต์พุตอย่าง ซึ่งต่างจากการทดลองที่ผ่านมาตัวควบคุมทั้งสองสามารถตอบสนอง โดยสามารถเข้าถึงจุดอ้างอิงทั้งสามได้อย่างราบรื่นแต่เวลาในการเข้าถึงจุดอ้างอิงใช้เวลามากขึ้นตามทั้งสองระบบ รูปที่ 4.12 ผลตอบสนอง เช่นเดียวกับรูปที่ 4.13 เช่นกัน

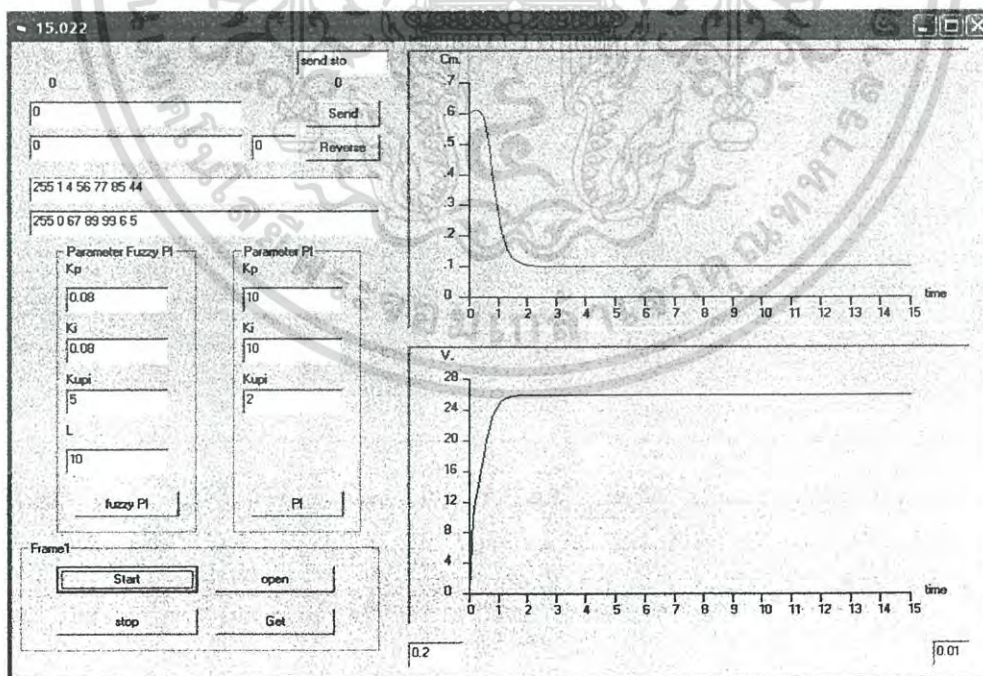
#### 4.5 การทดลองระบบจริง

ในการทดลองได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ดังนี้  $g$  มีค่าเท่ากับ  $10 \text{ N/m}$   $M$  มีค่าเท่ากับ  $0.5 \text{ kg}$  (น้ำหนักรวมตัวถ่วงน้ำหนัก)  $A$  มีค่าเท่ากับ  $0.0001 \text{ m}^2$   $N$  มีค่าเท่ากับ 1000 รอบ  $\mu$  มีค่าเท่ากับ  $4\pi \times 10^{-7}$  โดยการทดลองได้แบ่งเป็นสามส่วนดังนี้

การทดลองที่ 4.5.1 กำหนดค่าจุดอ้างอิงขึ้นสามค่าคือ 0.01, 0.04, 0.02 cm โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 54.2 แล้วทำการทดสอบกับตัวควบคุมพีไอ แบบดั้งเดิมที่ละค่า ซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.15 ถึง 4.17 และตัวควบคุมแบบพีซีซีพีไอที่ละค่าซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.18 ถึง 4.20

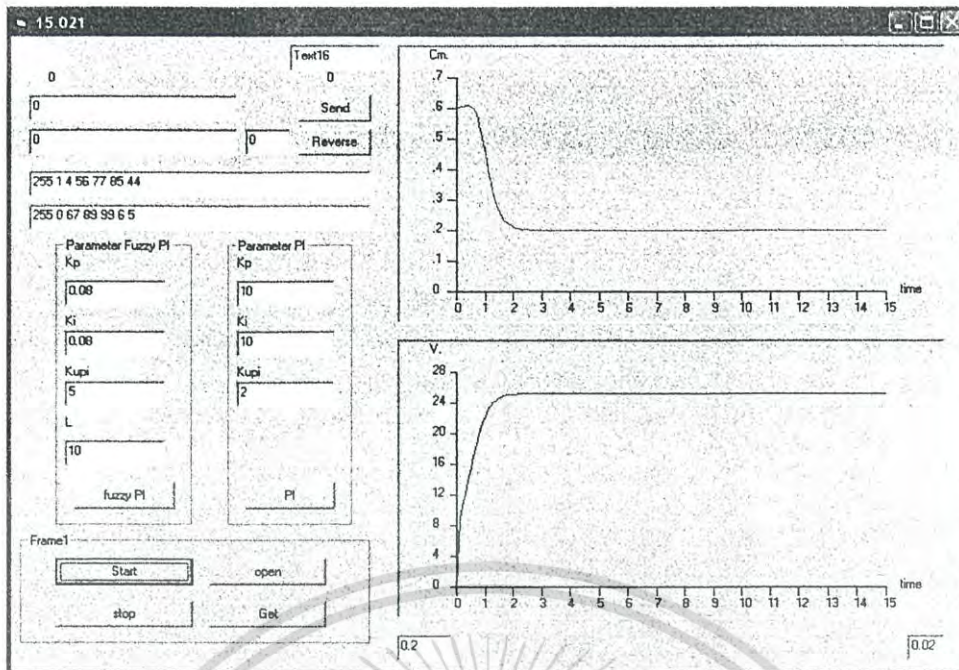
ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ตัวควบคุมการทดลองระบบจริง

Parameter	PI	Fuzzy PI
Kp	10	0.08
Ki	10	0.08
L	-	10
Kupi	2	5

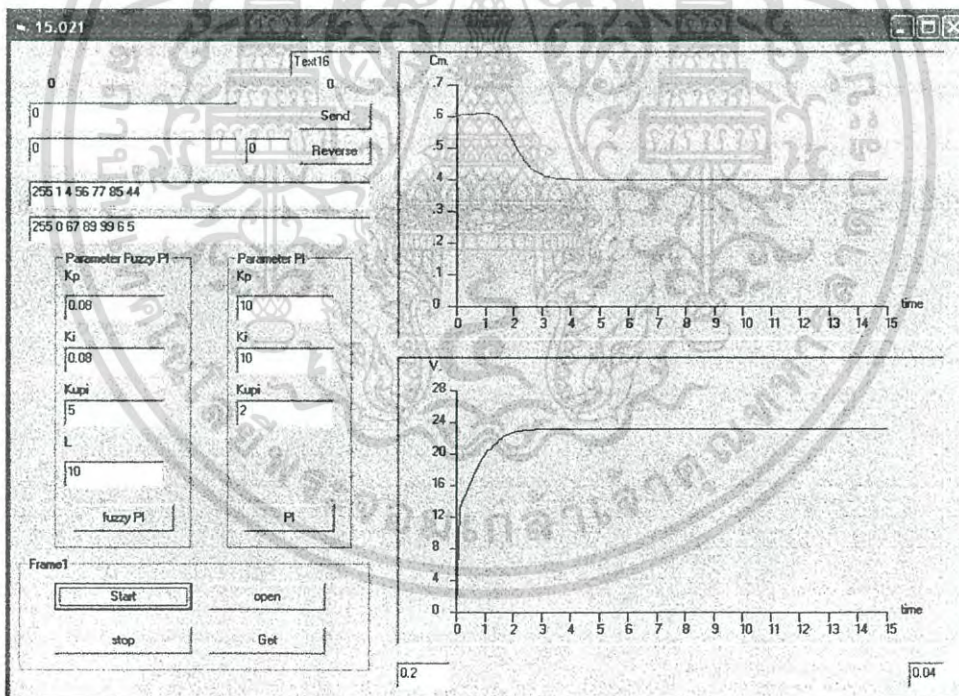


รูปที่ 4.15 ระยะห่างและแรงคืนอินพุทที่จุดอ้างอิงเท่ากับ 0.1 cm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



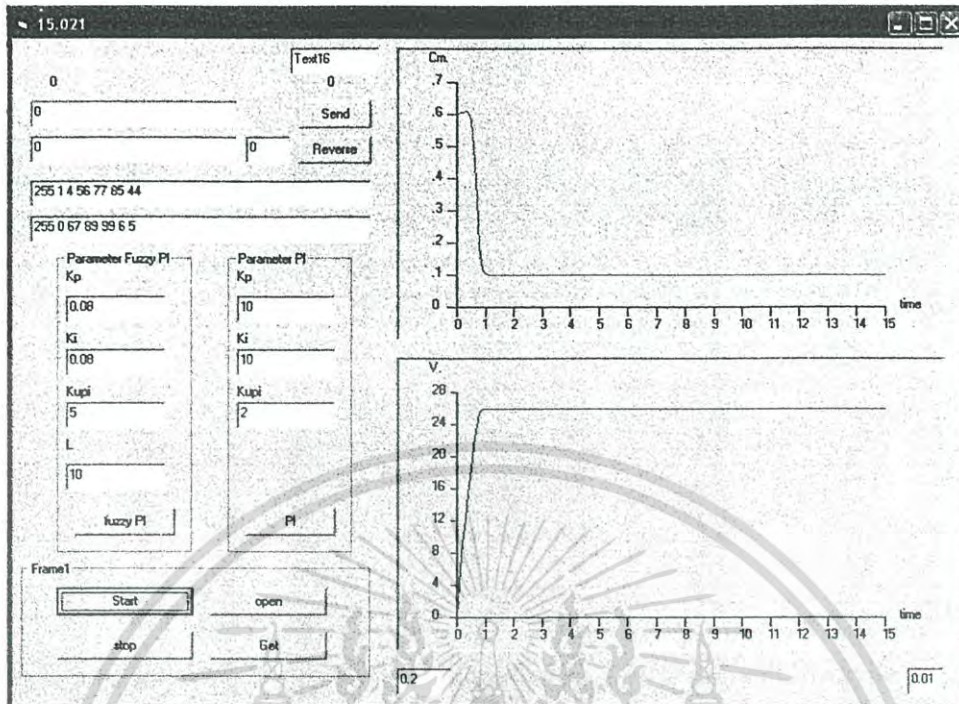
รูปที่ 4.16 ระยะห่างและแรงดันอินพุทที่จุดอ้างอิงเท่ากับ 0.2 cm.



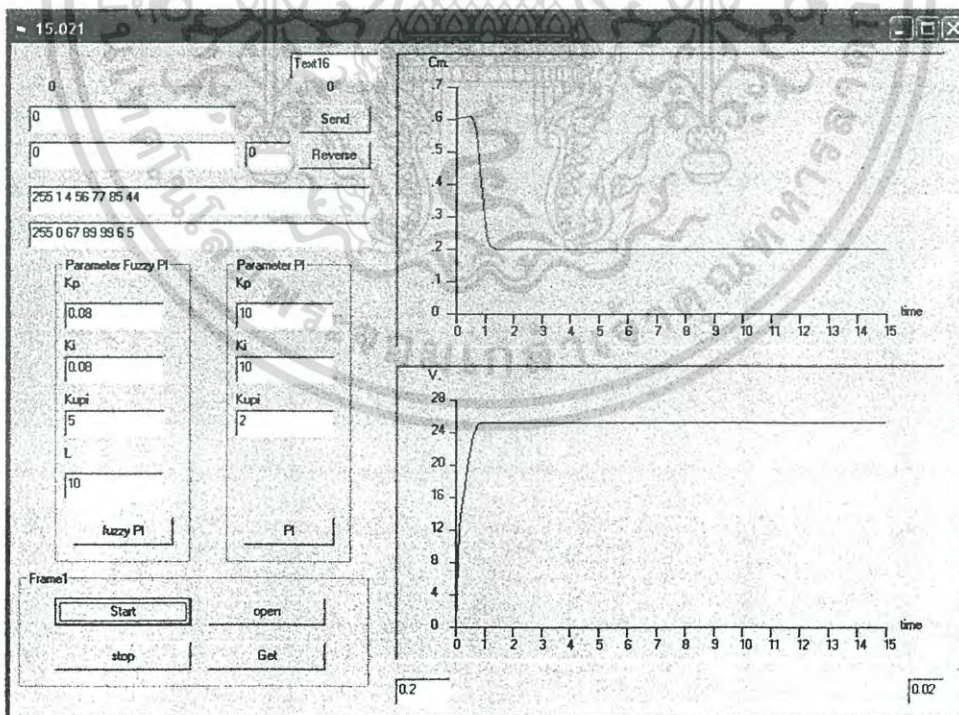
รูปที่ 4.17 ระยะห่างและแรงดันอินพุทที่จุดอ้างอิงเท่ากับ 0.4 cm.

จากรูปที่ 4.15, 4.16 และ 4.17 แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบพีไอดั้งเดิมเข้าสู่จุดอ้างอิงที่ 0.1 cm, 0.2 cm และ 0.4 cm ได้รวดเร็วและราบรื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

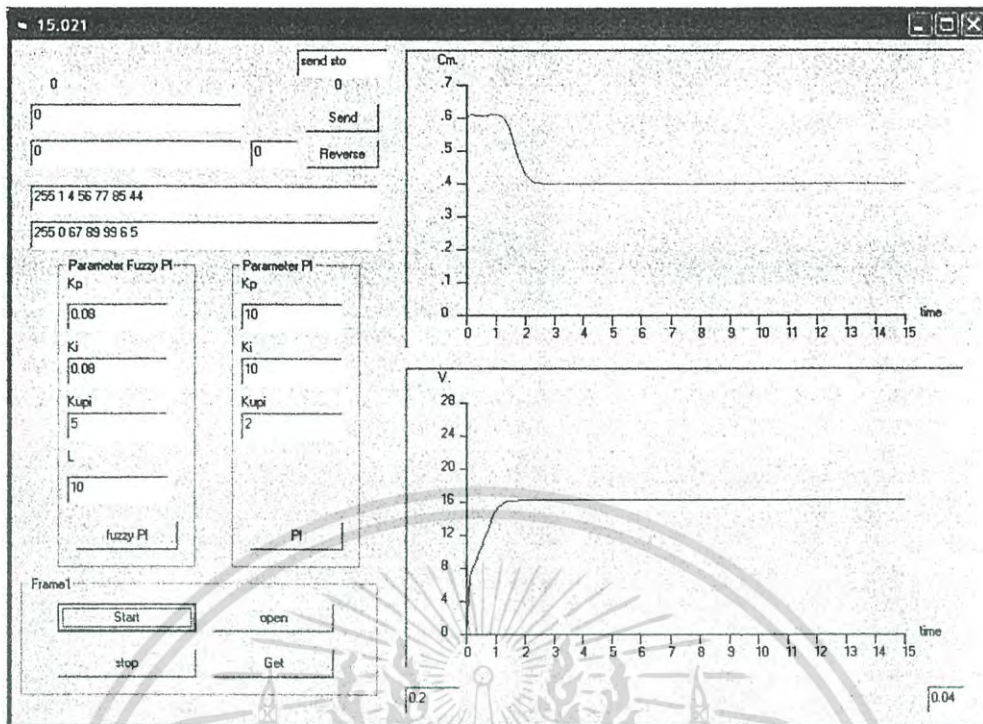


รูปที่ 4.18 ระยะห่างและแรงดันอินพุตที่จุดอ้างอิงเท่ากับ 0.1 cm.



รูปที่ 4.19 ระยะห่างและแรงดันอินพุตที่จุดอ้างอิงเท่ากับ 0.2 cm.

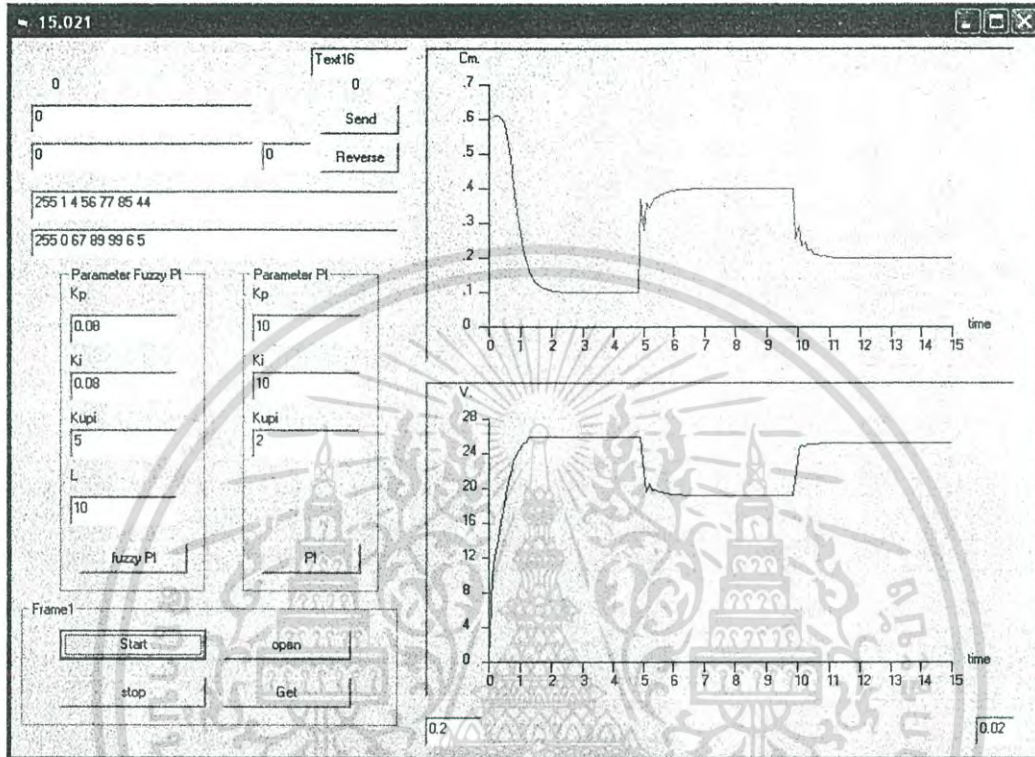
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



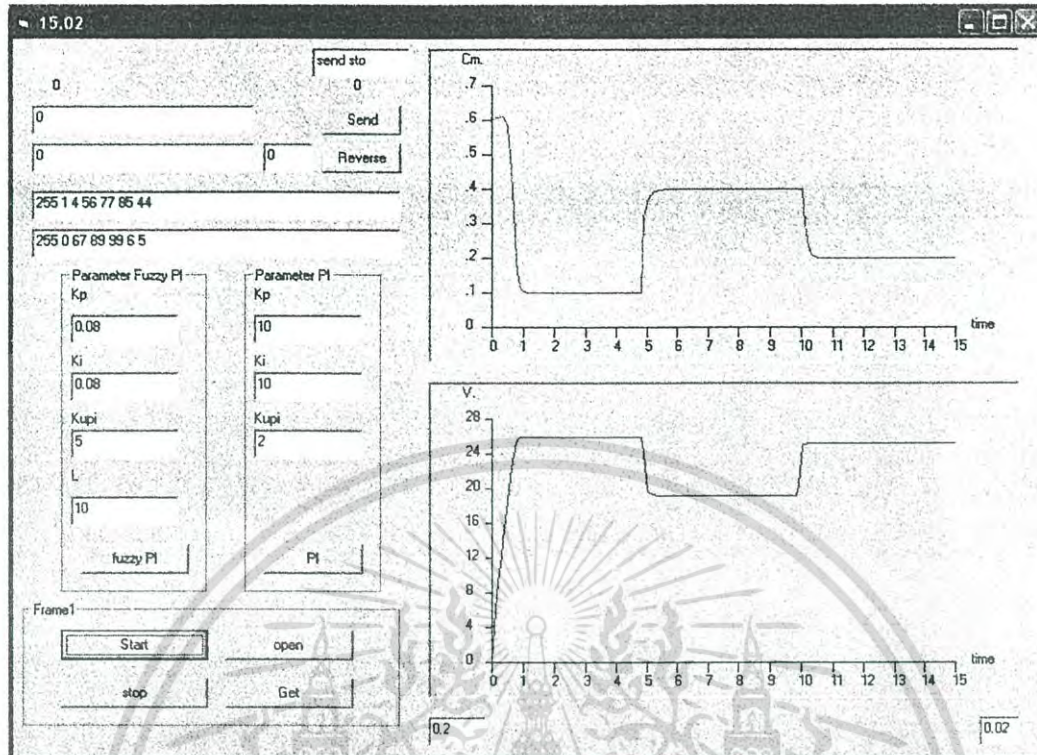
รูปที่ 4.20 ระยะห่างและแรงดันอินพุตที่จุดอ้างอิงเท่ากับ 0.4 cm.

จากรูปที่ 4.18, 4.19 และ 4.20 แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบฟัซซี่พีไอสามารถเข้าสู่จุดอ้างอิงที่ 0.1 cm, 0.2 cm และ 0.4 cm ได้รวดเร็วและราบรื่นเช่นเดียวกับตัวควบคุมพีไอแบบดั้งเดิม และมีผลตอบสนองที่เร็วกว่าเล็กน้อย

การทดลองที่ 4.5.2 โดยเปลี่ยนค่าจุดอ้างอิงขณะทำงานสามค่าคือ 0.1, 0.4, 0.2 cm ตามลำดับ ทดสอบกับตัวควบคุมพีไอแบบดั้งเดิม ซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.21 และตัวควบคุมแบบฟัซซี่พีไอ ซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.22 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 4.2



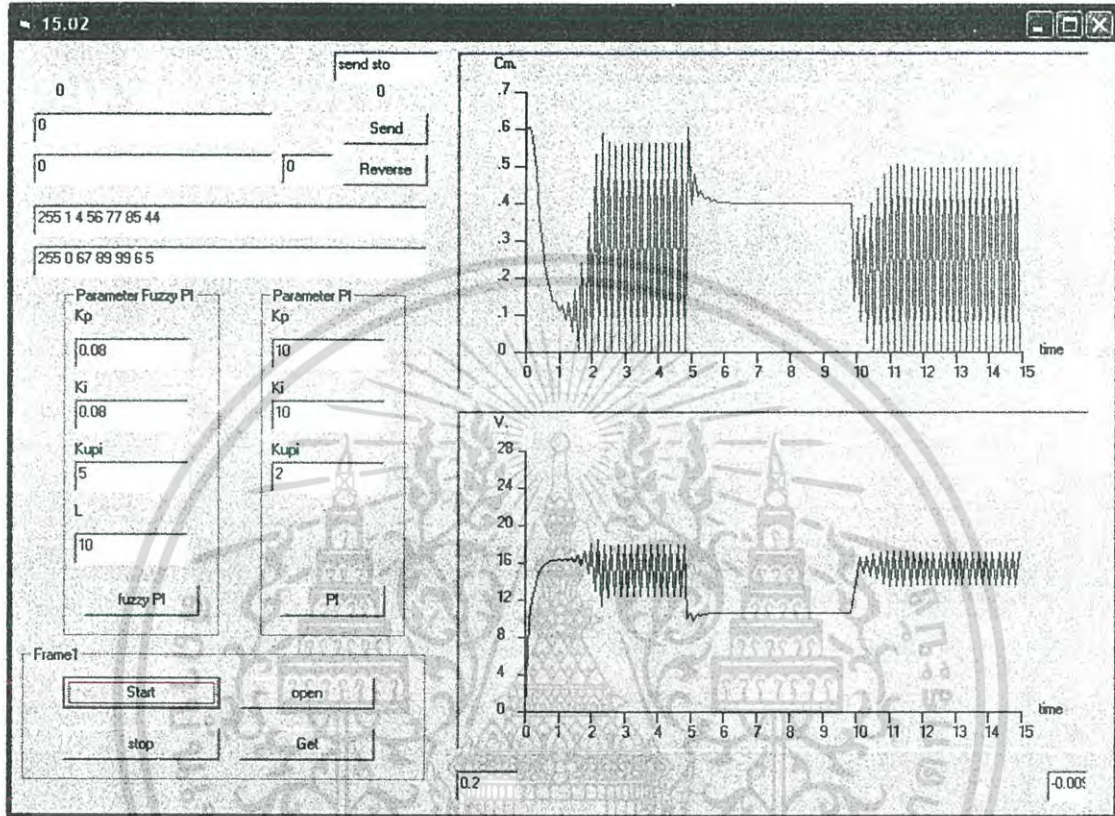
รูปที่ 4.21 ระยะห่างและแรงดันอินพุตที่เป็นแบบจุดอ้างอิงพลวัตที่ 0.1 cm, 0.4 cm และ 0.2 cm



รูปที่ 4.22 ระยะห่าง (gap) และแรงดันอินพุตที่เป็นแบบจุดอ้างอิงพลวัตที่ 0.1 cm, 0.4 cm และ 0.2 cm

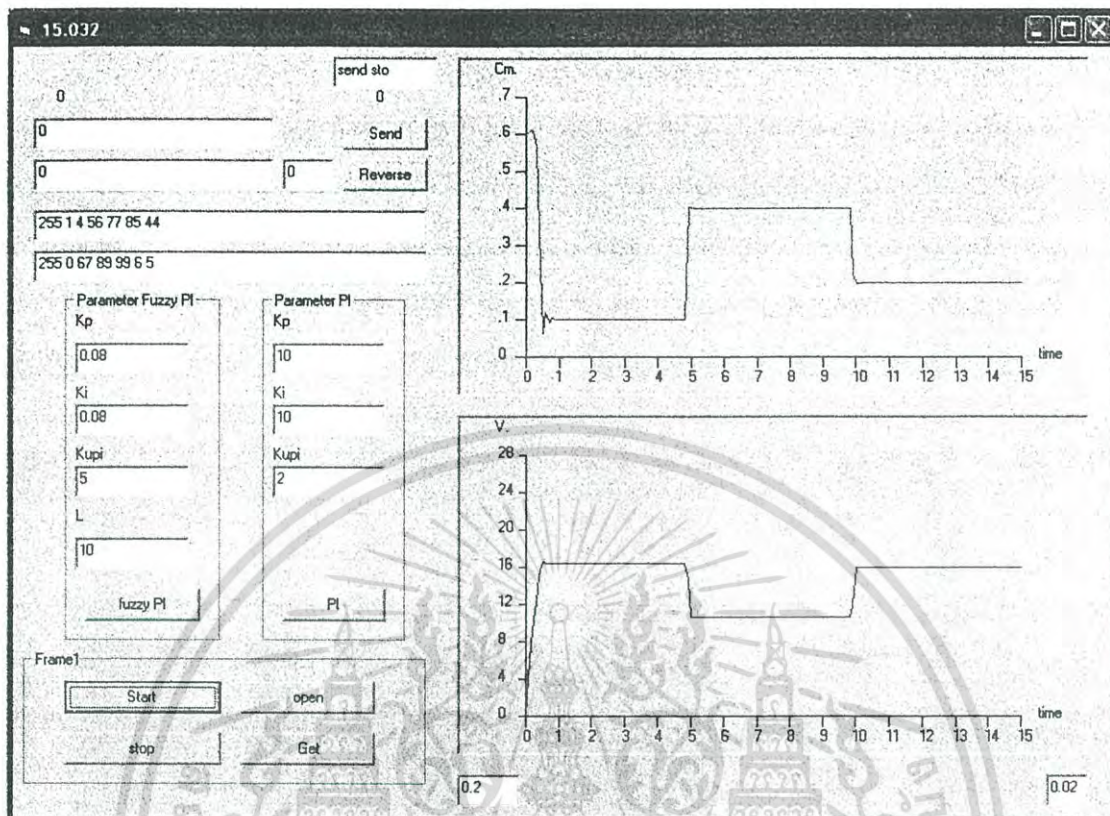
จากรูปที่ 4.21 และ 4.22 การทำงานแบบการเปลี่ยนจุดอ้างอิงพลวัตให้เห็นว่าเมื่อเริ่มต้นการทำงาน ตัวควบคุมทั้งสองระบบสามารถทำงานเข้าถึงจุดอ้างอิงแรกได้ราบรื่น แต่เมื่อมีการเปลี่ยนจุดอ้างอิง จุดต่อมาตัวควบคุมพีไอดั้งเดิมมีการสั่นขณะเข้าจุดอ้างอิงแต่ ตัวควบคุมพีซีพีไอยังสามารถเข้าสู่จุดอ้างอิงได้ราบรื่นเหมือนเดิมและเมื่อมีการเปลี่ยนจุดอ้างอิงอีกครั้งตัวควบคุมพีไอดั้งเดิมยังมีอาการสั่นเช่น เดิมอีก ซึ่งต่างจากตัวควบคุมพีซีพีไอที่ยังทำงาน ได้อย่างราบรื่น

การทดลองที่ 4.5.3 ใช้พารามิเตอร์จากการทดลองที่ 4.4.2 แต่มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของระบบ (มวล) ทดสอบกับตัวควบคุมพีไอแบบดั้งเดิม ซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.23 และตัวควบคุมแบบฟัซซีพีไอ ซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.24 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.23 ระยะเวลาและแรงดันอินพุตที่ค่าน้ำหนักของระบบลดลงมวลเท่ากับ 0.3 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



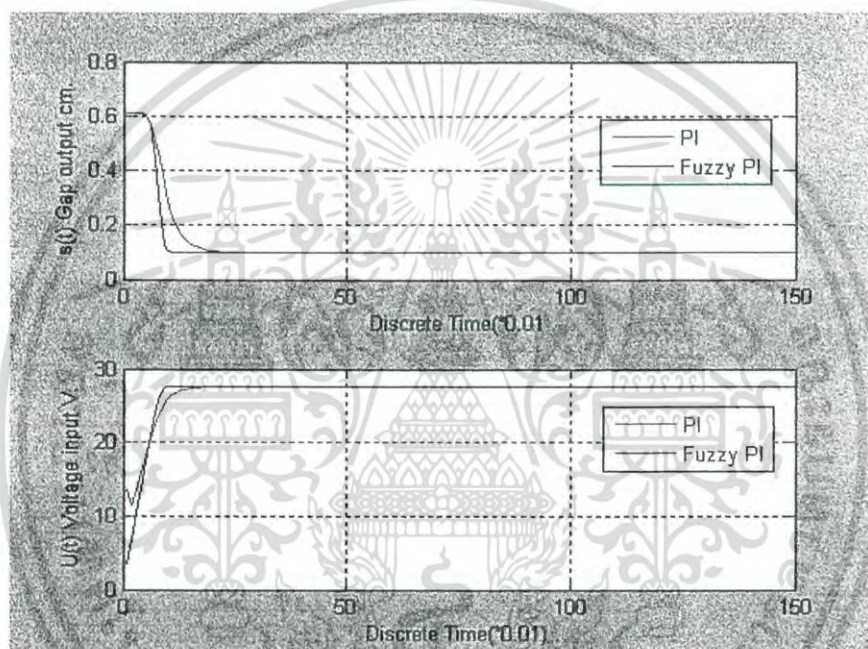
รูปที่ 4.24 ระยะเวลาและแรงคั้นอินพุทที่ค่าน้ำหนักของระบบลดลงมวลเท่ากับ 0.3 kg

จากรูปที่ 4.23 และ 4.24 แสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมวลโดยลดมวลลง ขณะทำงานตัวควบคุมแบบพีไอดั้งเดิมเกิดการแกว่งของเอาต์พุทอย่างมากจนไม่สามารถเข้าจุดอ้างอิงแรกและจุดอ้างอิงที่สามได้เลยสามารถทำงานเข้าได้ถึงจุดอ้างอิงที่สองเท่านั้นแต่ตัวควบคุมพีซีพีไอสามารถตอบสนองโดยสามารถเข้าถึงจุดอ้างอิงทั้งสามได้อย่างราบรื่น

#### 4.6 การทดลองนำค่าพารามิเตอร์ของระบบจริงมาจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์

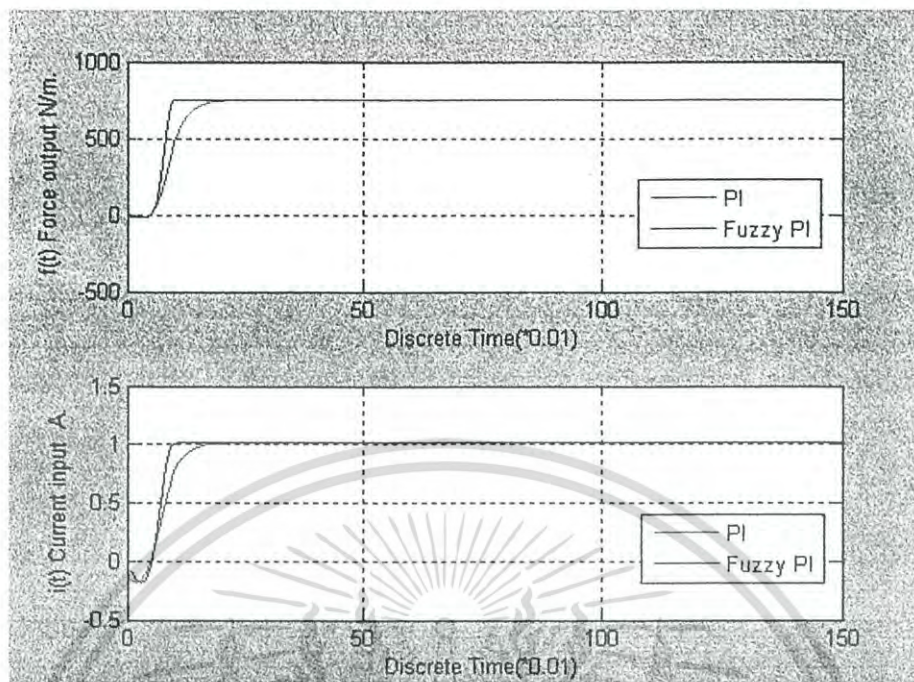
ในการทดลองพารามิเตอร์ของระบบจริง ดังนี้  $g$  มีค่าเท่ากับ 10 N/m  $M$  มีค่าเท่ากับ 0.5 kg (น้ำหนักรวมตัวถ่วงน้ำหนัก)  $A$  มีค่าเท่ากับ 0.0001 m<sup>2</sup>  $N$  มีค่าเท่ากับ 1000 รอบ  $\mu$  มีค่าเท่ากับ  $4\pi \times 10^{-7}$  และใช้ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมการทดลองระบบจริง ดังตารางที่ 4.2 โดยการทดลองได้แบ่งเป็นสามส่วน ดังนี้

การทดลองที่ 4.6.1 กำหนดค่าจุดอ้างอิงขึ้น สามค่าคือ 0.01, 0.04, 0.02 cm โดยใช้ค่า พารามิเตอร์ จากตารางที่ 4.2 แล้วทำการทดสอบกับตัวควบคุมพีไอแบบดั้งเดิมและตัวควบคุมแบบฟัซซีพีไอ ที่ละค่า ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.25 ถึง 4.30

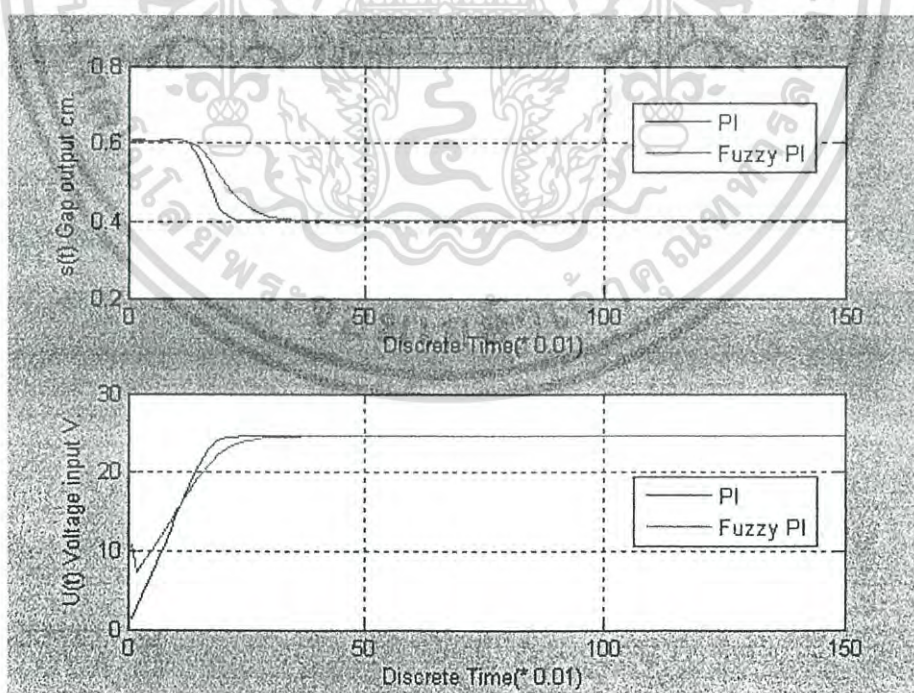


รูปที่ 4.25 ระยะห่าง และแรงดันอินพุตที่จุดอ้างอิงเท่ากับ 0.1 cm

จากรูปที่ 4.25 แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบฟัซซีพีไอเข้าสู่จุดอ้างอิงที่ 0.1 cm ได้รวดเร็วกว่าตัวควบคุมพีไอแบบดั้งเดิมกว่าเล็กน้อย แต่ตัวควบคุมทั้งสองสามารถทำงานได้ถึงจุดอ้างอิงได้อย่างราบรื่นเหมือนกันซึ่งมีผลใกล้เคียงกับการทดลองจริง รูปที่ 4.26 แสดงให้เห็นว่าแรงที่เกิดขึ้นและกระแสที่เข้าสู่ระบบ ที่เกิดจากตัวควบคุมทั้งสองระบบทำงานได้ราบรื่นเหมือนกัน ผลตอบสนองต่างกันเล็กน้อย ซึ่งมีผลใกล้เคียงกับการทดลองจริง

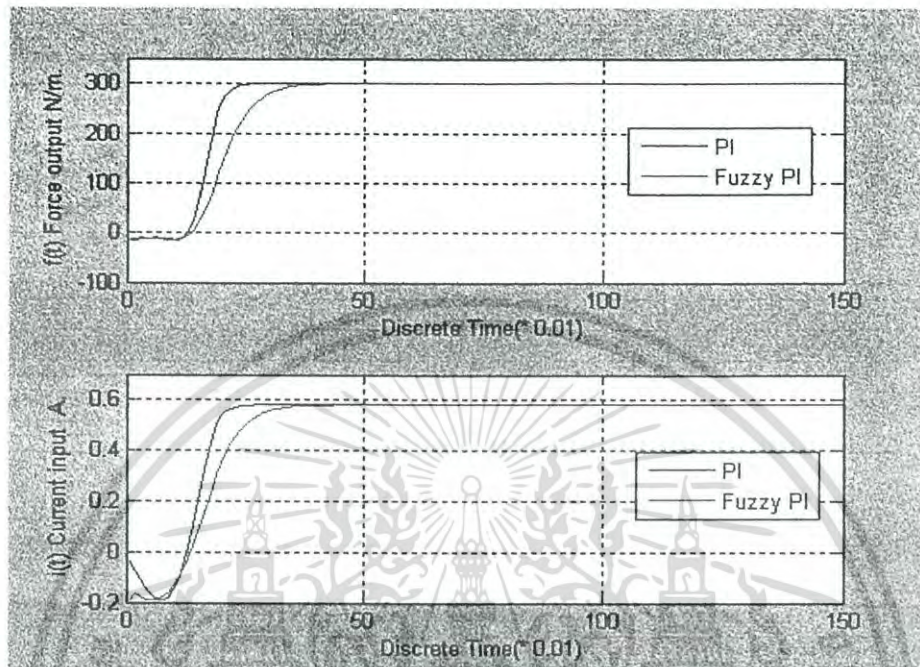


รูปที่ 4.26 แรงยกและกระแสอินพุทที่จุดอ้างอิงเท่ากับ 0.1cm



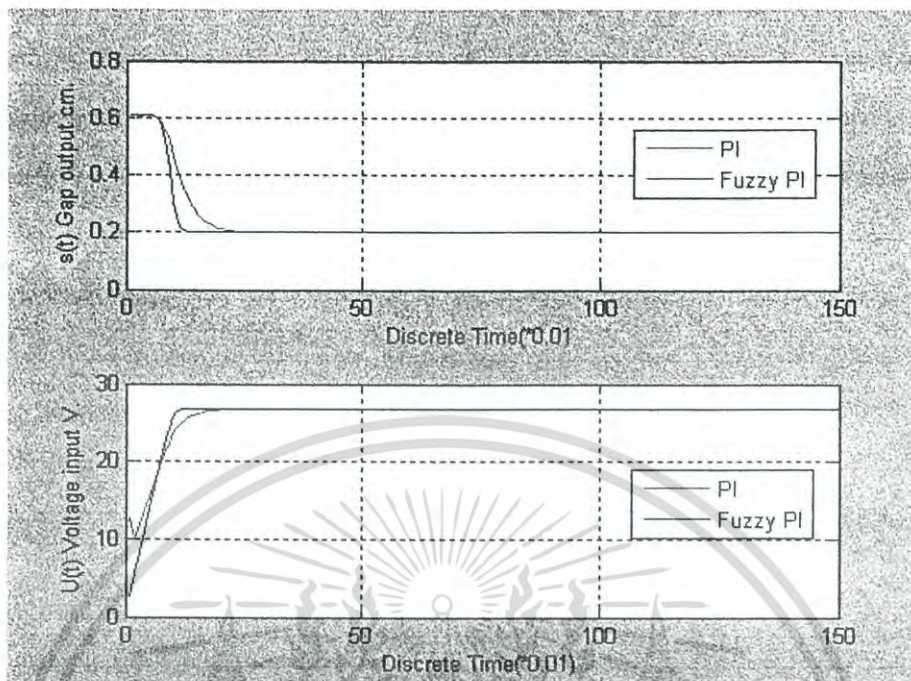
รูปที่ 4.27 ระยะห่างและแรงดันอินพุทที่จุดอ้างอิงเท่ากับ 0.4 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

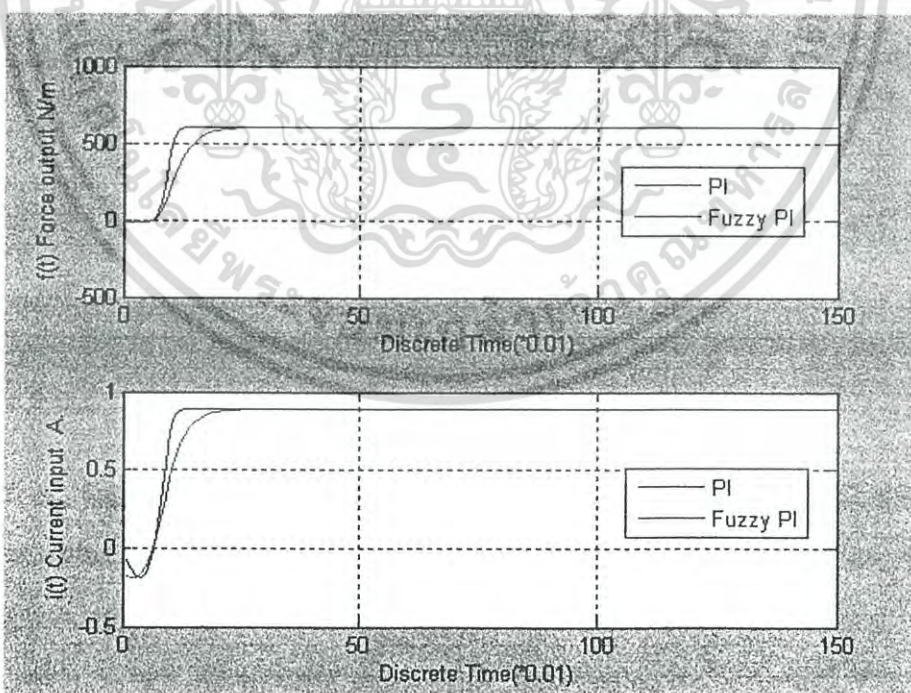


รูปที่ 4.28 แรงยกและกระแสอินพุตที่จุดอ้างอิงเท่ากับ 0.4cm

จากรูปที่ 4.27 แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบฟัซซีพีไอเข้าสู่จุดอ้างอิงที่ 0.4 cm ได้รวดเร็วกว่าตัวควบคุมพีไอแบบดั้งเดิมกว่าเล็กน้อย แต่ตัวควบคุมทั้งสองสามารถทำงานได้ถึงจุดอ้างอิงได้อย่างราบรื่นเหมือนกันซึ่งมีผลใกล้เคียงกับการทดลองจริง รูปที่ 4.28 แสดงให้เห็นว่าแรงที่เกิดขึ้นและกระแสที่เข้าสู่ระบบ ที่เกิดจากตัวควบคุมทั้งสองระบบทำงานได้ราบรื่นเหมือนกัน ผลตอบสนองต่างกันเล็กน้อย ซึ่งมีผลใกล้เคียงกับการทดลองจริง



รูปที่ 4.29 ระยะห่างและแรงดันอินพุตที่จุดอ้างอิงเท่ากับ 0.2 cm

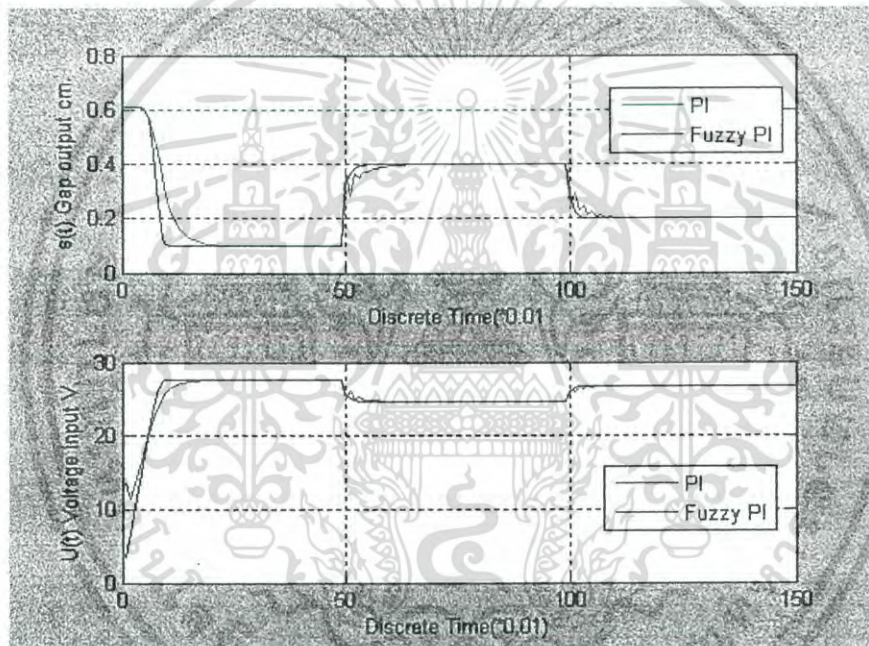


รูปที่ 4.30 แรงยกและกระแสอินพุตที่จุดอ้างอิงเท่ากับ 0.2cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.29 แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบฟัซซีพีไอเข้าสู่จุดอ้างอิงที่ 0.2 cm ได้รวดเร็วกว่าตัวควบคุมพีไอแบบดั้งเดิมกว่าเล็กน้อย แต่ตัวควบคุมทั้งสองสามารถทำงานได้ถึงจุดอ้างอิงได้อย่างราบรื่นเหมือนกันซึ่งมีผลใกล้เคียงกับการทดลองจริง รูปที่ 4.30 แสดงให้เห็นว่าแรงที่เกิดขึ้นและกระแสที่เข้าสู่ระบบ ที่เกิดจากตัวควบคุมทั้งสองระบบทำงานได้ราบรื่นเหมือนกัน ผลตอบสนองต่างกันเล็กน้อย ซึ่งมีผลใกล้เคียงกับการทดลองจริง

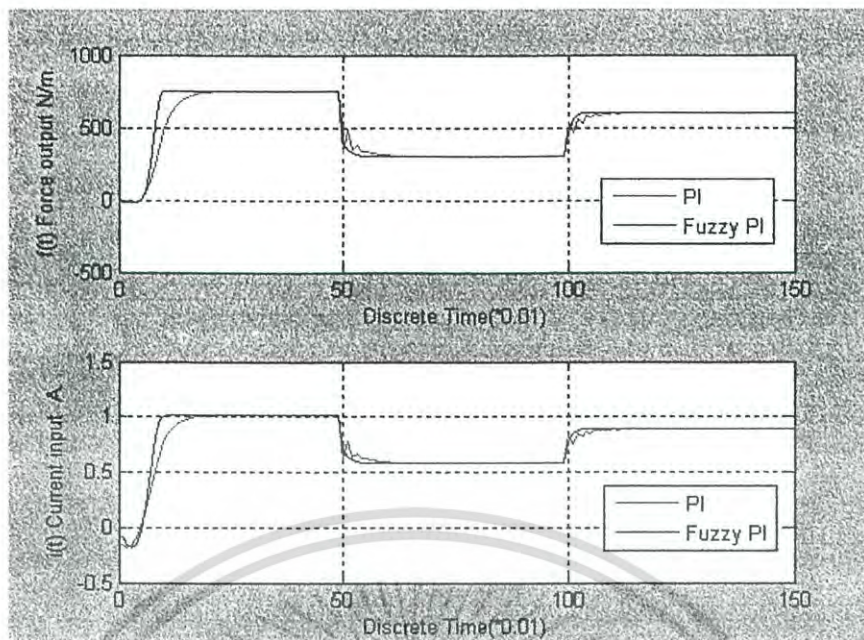
**การทดลองที่ 4.6.2** โดยเปลี่ยนค่าจุดอ้างอิงขณะทำงานสามค่าคือ 0.1, 0.4, 0.2 cm ตามลำดับ ทดสอบกับตัวควบคุมพีไอแบบดั้งเดิมและตัวควบคุมแบบฟัซซีพีไอ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.31 และ 4.32 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 4.2



**รูปที่ 4.31** ระยะห่างและแรงดันอินพุตที่เป็นแบบจุดอ้างอิงพลวัตที่ 0.1 cm, 0.4 cm และ 0.2 cm

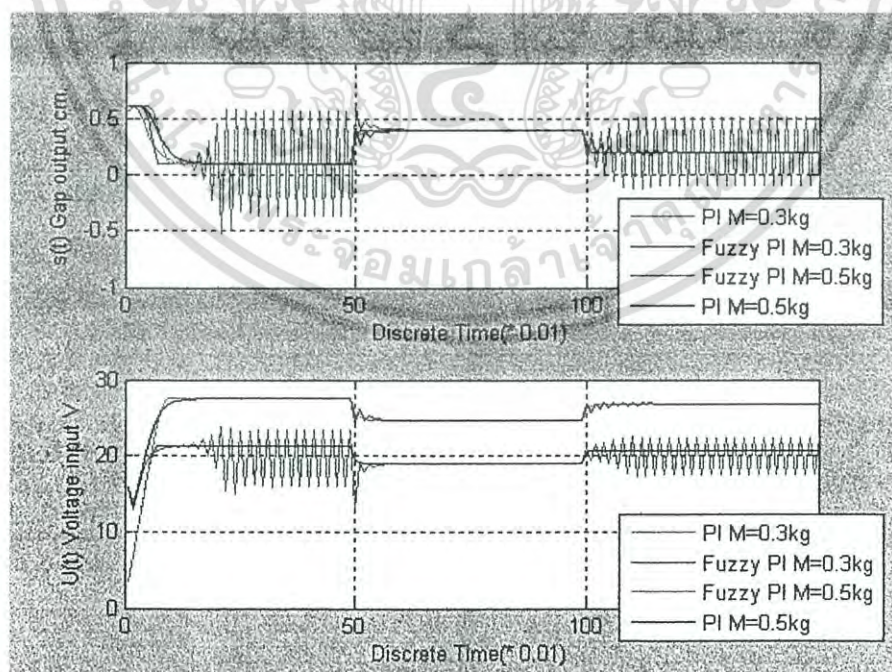
จากรูปที่ 4.31 การทำงานแบบการเปลี่ยนจุดอ้างอิงพลวัตให้เห็นว่าเมื่อเริ่มต้นการทำงานตัวควบคุมทั้งสองระบบสามารถทำงานเข้าถึงจุดอ้างอิงแรกได้ราบรื่น แต่เมื่อมีการเปลี่ยนจุดอ้างอิงจุดต่อมาตัวควบคุมพีไอดั้งเดิมมีการสั่นขณะเข้าสู่จุดอ้างอิงแต่ ตัวควบคุมฟัซซีพีไอยังสามารถเข้าสู่จุดอ้างอิงได้ราบรื่นเหมือนเดิม และเมื่อมีการเปลี่ยนจุดอ้างอิงอีกครั้งตัวควบคุมพีไอดั้งเดิมยังมีอาการสั่นเช่น เดิมอีก ซึ่งต่างจากตัวควบคุมฟัซซีพีไอที่ยังทำงานได้อย่างราบรื่น รูปที่ 4.32 ผลตอบสนอง เช่นเดียวกับรูปที่ 4.31 เช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



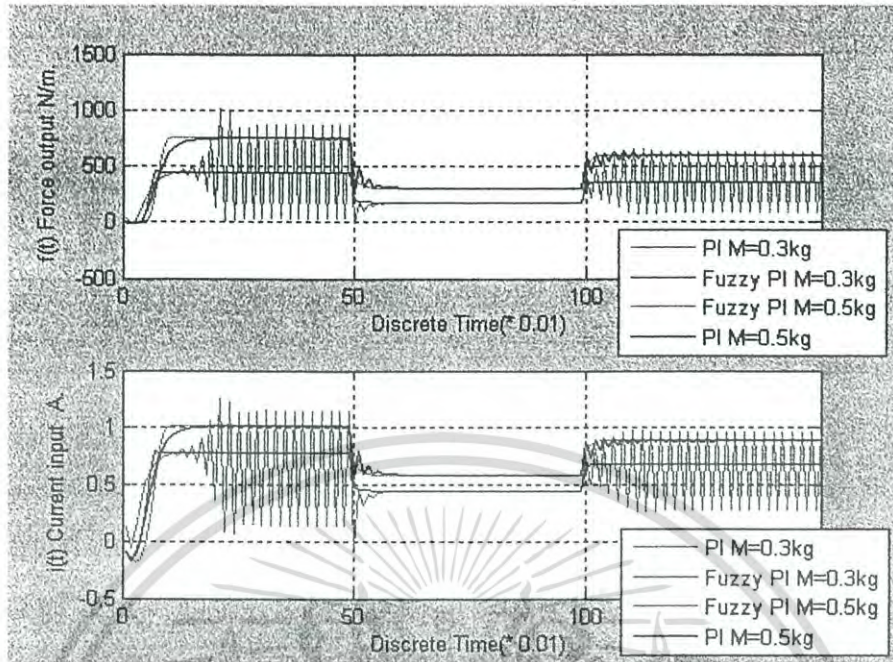
รูปที่ 4.32 แรงยกและกระแสอินพุตที่เป็นแบบจุดอ้างอิงพลวัตที่ 0.1 cm 0.4 cm และ 0.2 cm

การทดลองที่ 4.6.3 ใช้พารามิเตอร์จากการทดลองที่ 4.4.3 ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของระบบ (มวล) ทดสอบกับตัวควบคุมพีไอแบบดั้งเดิมและตัวควบคุมแบบฟัซซี่พีไอได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.33 และ 4.34



รูปที่ 4.33 ระยะห่างและแรงดันอินพุตที่ค่ามวลเท่ากับ 0.3 และ 0.5 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 แรงยกและกระแสอินพุตที่ค่าเท่ากับ 0.3 และ 0.5 kg

จากรูปที่ 4.33 แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมวลโดยลดมวลลงขณะทำงาน ตัวควบคุมแบบพีไอดั้งเดิมเกิดการแกว่งของเอาต์พุตอย่างมากจนไม่สามารถเข้าจุดอ้างอิงแรกและจุดอ้างอิงที่สองได้เลยสามารถทำงานเข้าได้ถึงจุดอ้างอิงที่สองเท่านั้น แต่ตัวควบคุมพีซีพีไอสามารถตอบสนองโดยสามารถเข้าถึงจุดอ้างอิงทั้งสามได้อย่างราบรื่นซึ่งมีผลใกล้เคียงกับการทดลองจริง รูปที่ 4.34 ผลตอบสนอง เช่นเดียวกับรูปที่ 4.33 เช่นกัน

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยสร้างตัวควบคุมระบบแบบลอยเหนือราง(ระบบ Maglev) เป็นการนำตัวควบคุมพีซีซีพีโอมาใช้ควบคุมระบบ Maglev เพื่อต้องการให้ระบบมีผลตอบสนองที่ดีตามวัตถุประสงค์คือ รวดเร็ว นิ่มนวลและทนต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ในระบบ Maglev จากการทดลองได้นำตัวควบคุมพีโอแบบดั้งเดิม และตัวควบคุมพีซีซีพีโอมาทดสอบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์และนำมาทดลองโดยสร้างจริง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

- จากการทดลองได้นำตัวควบคุม PI แบบดั้งเดิมและตัวควบคุมพีซีซีพีโอมาทดลอง โดยเปลี่ยนค่าจุดอ้างอิงที่ละค่า ตัวควบคุมพีโอแบบดั้งเดิมและตัวควบคุมพีซีซีพีโอ พบว่าตัวควบคุมทั้งสองสามารถทำงานถึงเป้าหมายได้ดี ( พารามิเตอร์ที่ใช้ได้มาจากผู้ทดลองทำการทดลองแล้วเลือกค่าที่เหมาะสม )
- จากการทดลองได้นำตัวควบคุมพีโอแบบดั้งเดิมและตัวควบคุมพีซีซีพีโอมาทดลอง โดยการดำเนินงานแบบต่อเนื่องซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงค่าจุดอ้างอิงสามค่า ณ ช่วงเวลาต่างแบบไม่หยุดการทำงาน ผลที่ได้พบว่าตัวควบคุมพีซีซีพีโอสามารถทำงานได้ดี แต่ตัวควบคุม PI แบบดั้งเดิมมีการสั่นขณะเปลี่ยนแปลงค่าจุดอ้างอิงทุกครั้ง
- จากการทดลองต่อมาได้นำตัวควบคุมพีโอแบบดั้งเดิมและตัวควบคุมพีซีซีพีโอมาทดลองทำงานโดยมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักระบบ ทดลองเพิ่มน้ำหนักระบบ Maglev ซึ่งทั้งสองวิธีระบบยังสามารถทำงานได้แต่จะมีผลตอบสนองโดยช้าลง และเมื่อทดลองลดน้ำหนักระบบ Maglev ตัวควบคุมพีซีซีพีโอยังสามารถทำงานได้ แต่ตัวควบคุมพีโอแบบดั้งเดิมมีการสั่นจนไม่สามารถทำงานเข้าสู่จุดอ้างอิงได้
- การทดลองที่กล่าวมาทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีซีซีพีโอ เหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นตัวควบคุมในระบบ Maglev เพราะจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีซีซีพีโอสามารถให้ผลตอบสนองตามที่ต้องการทุกกรณีได้ดี

## 5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยและแนวทางการพัฒนาในอนาคต

- ถ้าต้องการให้ระบบทำงานได้ดีกว่านี้จำเป็นต้องใช้เซนเซอร์วัดระยะที่มีละเอียดมากกว่านี้ ซึ่งจะทำให้ระบบทำงานได้ราบรื่นยิ่งขึ้น ในการทดลองได้ใช้เซนเซอร์ที่มีย่านที่หยาบมาขยายสัญญาณช่วงที่ใช้งาน โดยใช้วงจรขยายสัญญาณเป็นตัวช่วย

- ตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล (A/D) และตัวแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็น อนาล็อก (D/A) ควรมีความเร็วในการแปลงสัญญาณที่เร็วกว่านี้และมีจำนวนบิตข้อมูลดิจิตอลที่มาก การทดลองใช้ A/D ขนาด 12 บิตที่อยู่ภายใน dsPIC ด้านไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวคำนวณถ้าเปลี่ยนเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีความเร็วสูงขึ้นและระบบการคำนวณเป็น 32 บิต ในการทดลองที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC ของ Microchip ระบบการคำนวณเป็น 16 บิต ที่ความเร็วสัญญาณนาฬิกา 100 MHz

- อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองยังไม่ได้เท่าที่ควร จึงทำให้ความแม่นยำในการวัดที่ได้ยังไม่ดีนัก โดยเฉพาะเซนเซอร์วัดระยะซึ่งมีผลต่อการทดลองอย่างมาก

- ข้อจำกัดหลาย ๆ อย่างยังอยู่ที่อุปกรณ์ ซึ่งถ้าใช้อุปกรณ์ในการทดลองที่ดีกว่านี้ (เช่น เซนเซอร์วัดระยะ A/D และ D/A ) จะทำให้ผลการวัดและการควบคุมดีกว่านี้มาก ดังนั้นจึงควรปรับปรุงชุดทดลองที่มีระบบที่มีการวัดที่แม่นยำมากขึ้น อนึ่ง งานวิจัยนี้สนใจเฉพาะการควบคุมการลอยตัวของระบบขนส่งแบบ Maglev การพิจารณาระบบเคลื่อนตัวพร้อมกับระบบลอยตัวในขณะเดียวกันจึงเป็นหัวข้อที่น่าสนใจในการวิจัยในอนาคต

## เอกสารอ้างอิง

- [1] H.A. Malki, D. Misir, D. Feigenspan, and G. Chen, " Fuzzy PID Control of a Flexible-Joint Robot Arm with Uncertainties from Time-Varying Loads " *IEEE Trans. on CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY*, Vol. 5, No. 3, 1997, pp. 371-377.
- [2] J.Y. Hung, " Nonlinear Control of a Magnetic Levitation System," *IECON'91*,1991, pp. 268-273.
- [3] R.K. Galvao, Associate Member, "A Simple Technique for Identifying a Linearized Model for a Didactic Magnetic Levitation System ," *IEEE Trans. on EDUCATIO* ,Vol. 46, No. 1, 2003, pp. 22-25.
- [4] J. M. Watkins and G.E. Piper, "An Undergraduate Course in Active Magnetic Levitation: Bridging the Gap ," *IEEE Trans. on MAGNETICS* , 2003, pp. 313-316.
- [5] R. Jager. " Fuzzy Logic in Control ," *PhD. Thesis of Technische Universiteit Delft*, June 1995, pp. 50-55.
- [6] C.L. Chen, S.N. Wang, C.T. Hsieh, and F.Y Cheng , "Theoretical analysis of crisp-type fuzzy logic controller using various t-norm. sum-gravity inference methods ," *IEEE Trans. On Fuzzy System*, no.6, 1998, pp. 122-136.
- [7] M.M. Gupta and J. Qi. " Design of fuzzy logic controller base on generalized T-operators ," *Fuzzy Sets and System*, No.40, 1991, pp. 473-489.
- [8] J. Franssia and H.N. Koivo. " Fuzzy control of an industrial robot in transporter environment ," *IECON'92*, 1992., pp. 624-629.
- [9] G.J. Klir, *Fuzzy Set and Fuzzy Logic: Theory and Application*. :Prentice Hall,1995, pp. 103-120.
- [10] Y.C. Hsu and G. Chen , " Fuzzy dynamical modeling and control techniques for nonlinear processes with applications to multi-input systems," *In Fuzzy Theory:Systems Technology and Applications*, ad.By C.T. Leondes, New York. :Academic Press, Vol.1, 1999, pp. 47-86 .
- [11] R.D.Thornton, " Magnetic Levitation and Propulsion ," *IEEE Trans., on MAGNETICS*, Vol. MAG-11, No. 4, 1975, pp. 981-994.
- [12] Z.J. Yang, K. Miyazaki, S. Kanae and K. Wada , "Robust Position Control of a Magnetic Levitation System via Dynamic Surface Control Technique ," *IEEE Trans. on INDUSTRIAL ELECTRONICS*, Vol. 51, No. 1, 2004, pp.26-34.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] P.S. Shiakolas, S.R. Van Schenck, D. Piyabongkarn, and I.Franteskou, "Magnetic Levitation Hardware-in-the-Loop and MATLAB-Based Experiments for Reinforcement of Neural Network Control Concepts," *IEEE Trans. on EDUCATION*, Vol. 47, No. 1, 2004, pp. 33-41.
- [14] A.E. Hajjaji and M. Ouladsine, "Modeling and Nonlinear Control of Magnetic Levitation Systems," *IEEE Trans. on INDUSTRIAL ELECTRONICS*, Vol. 48, No. 4, 2001, pp. 831-838.
- [15] K. Davey, "New Electromagnetic Lift Control Method for Magnetic Levitation Systems and Magnetic Bearings," *IEEE Trans. on MAGNETICS*, vol. 40, No.3, 2004, pp.702-706 .
- [16] G. Chen, H. Ying, "Stability analysis of nonlinear fuzzy PI control systems, " Industrial Fuzzy Control and Intelligent Systems," *Tran .on IFIS '93 Third International Conference*, 1993, pp. 128 – 133.
- [17] A.R. Eastham,W.F. Hayes "Maglev systems development status," *IEEE AES Magazine*, 1988, pp. 450-453
- [18] M. Driels, " *Linear control systems Engineering* ," *International Editions*, 1995, pp. 415-424.
- [19] A.E. Fitzgerald and C. Kingsley Jr., "*Electric Machinery*," *Fifth Editions*, 1990, pp. 95-132 .
- [20] J.J. Cathey, " *Electric Machines:Analysis An Design Applying Matlab*," *International Editions*, 2001, pp. 49-102.
- [21] H.A. Malki, L. Huidong ,G. Chen, "New Design and Stability Analysis of FuzzyProportional-Derivative Control Systems," *IEEE Trans. on FUZZY SYSTEMS*. Vol.2, No.4, 1994, pp. 245-254.

## ภาคผนวก ก

# การหาสมการประจำพื้นที่ของระบบควบคุมแบบพีชชีพีไอ

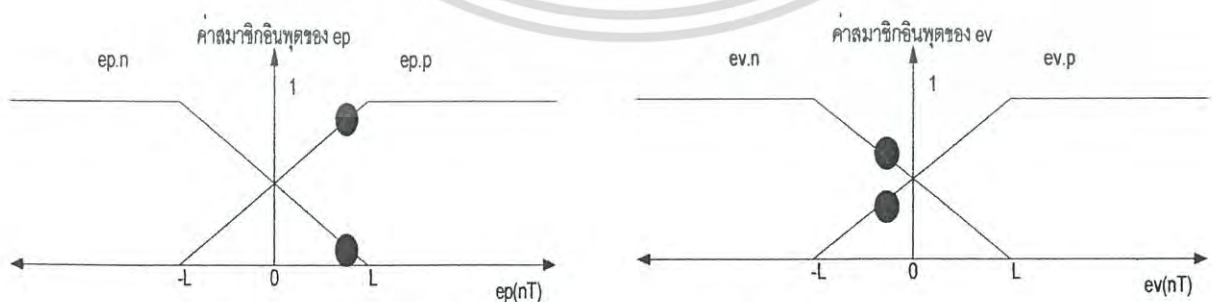
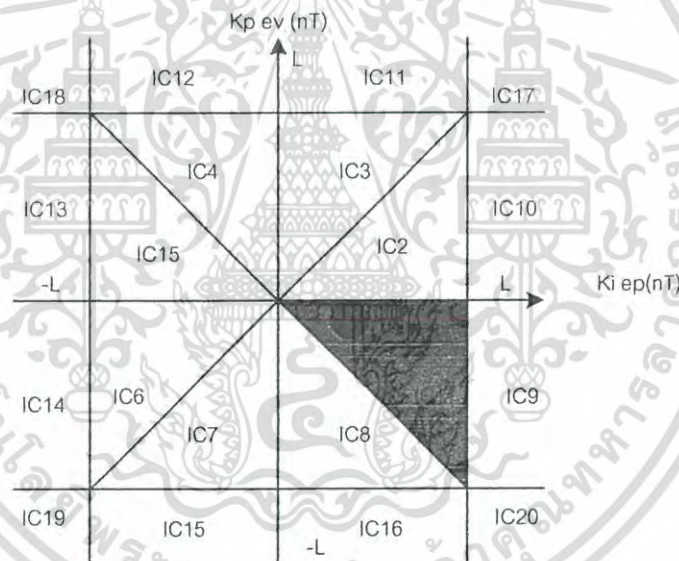
## ในบทที่ 2

การหาสมการประจำพื้นที่ที่ต่าง ๆ โดยที่  $o.n = -L$ ,  $o.z = 0$ ,  $o.p = L$  และได้สมการที่นำไปคำนวณทั้ง 20 พื้นที่ดังต่อไปนี้

$$e_p \cdot p = \frac{k_i e_p(nT) + L}{2L} \qquad e_p \cdot n = \frac{k_i e_p(nT) + L}{2L}$$

$$e_v \cdot p = \frac{k_i e_v(nT) + L}{2L} \qquad e_v \cdot n = \frac{k_i e_v(nT) + L}{2L}$$

## 1. พื้นที่ที่ 1 (IC1)



รูปที่ ก.1 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ ก.1 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 1 ในตารางที่ ก.1 ดังนี้

กฎข้อที่	$e_p$	$e_v$	$\mu(e_p \wedge e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	$p$	$n$	$e_v \cdot p$	$L$
2	$p$	$n$	$e_v \cdot n$	0
3	$n$	$p$	$e_p \cdot n$	0
4	$n$	$p$	$e_p \cdot n$	$-L$

จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{(k_p e_v(nT) + L)L + (-k_i e_p(nT) + L(-L))}{2L} \\ \frac{K_p e_v(nT) + L - k_p e_v(nT) + L - k_i e_p(nT) + L + k_i e_p(nT) + L}{2L}$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L[k_i e_p(nT) + k_p e_v(nT)]}{2(2L - k_i e_p(nT))}$$

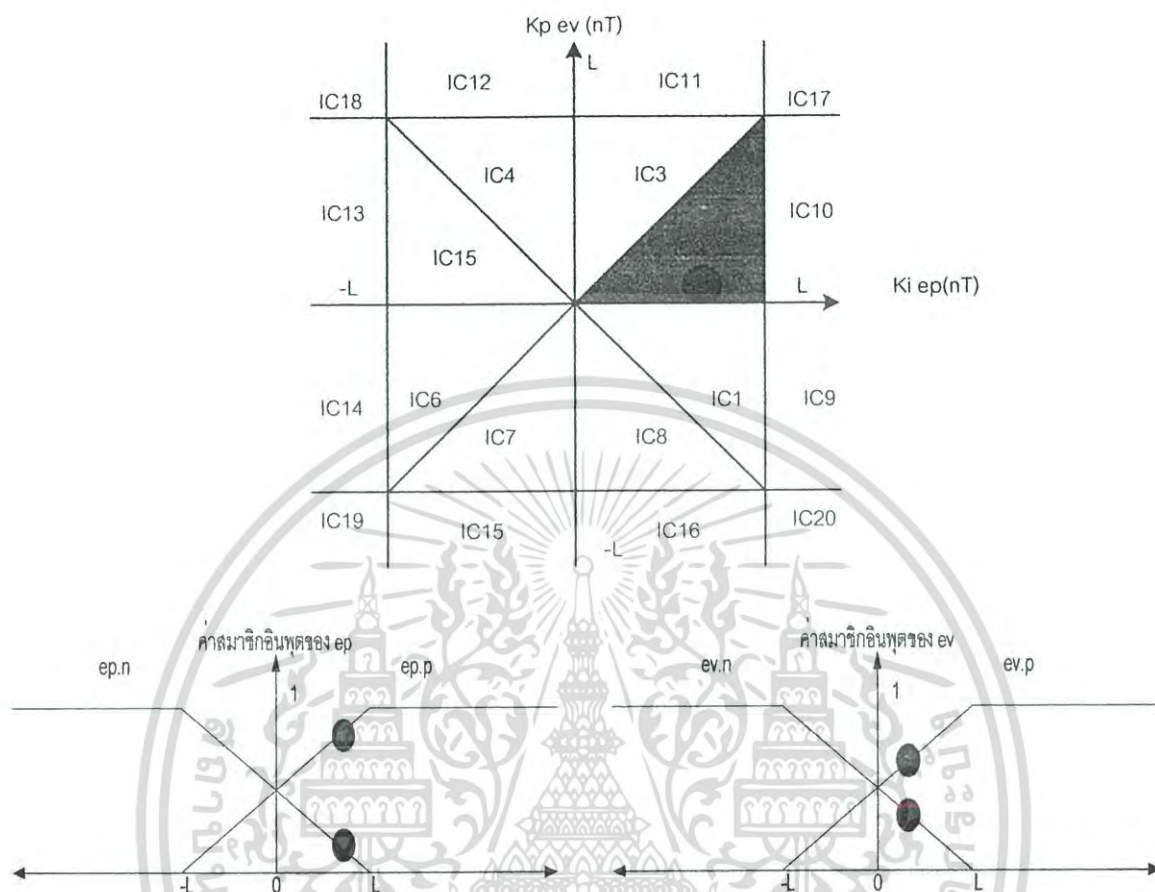
ที่  $e_p \geq 0$  จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L[k_i e_p(nT) + k_p e_v(nT)]}{2(2L - k_i |e_p(nT)|)}$$

(1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. พื้นที่ที่ 2 (IC2)



รูปที่ ก.2 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 2

จากรูปที่ ก.2 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 2 ในตารางที่ ก.2 ดังนี้

กฎข้อที่	$e_p$	$e_v$	$\mu(e_p \wedge e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	$p$	$p$	$e_v.p$	$L$
2	$p$	$n$	$e_v.n$	$0$
3	$n$	$p$	$e_p.n$	$0$
4	$n$	$n$	$e_p.n$	$-L$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{(k_p e_v(nT) + L)(L) + (-k_i e_p(nT) + L)(-L)}{2L}$$

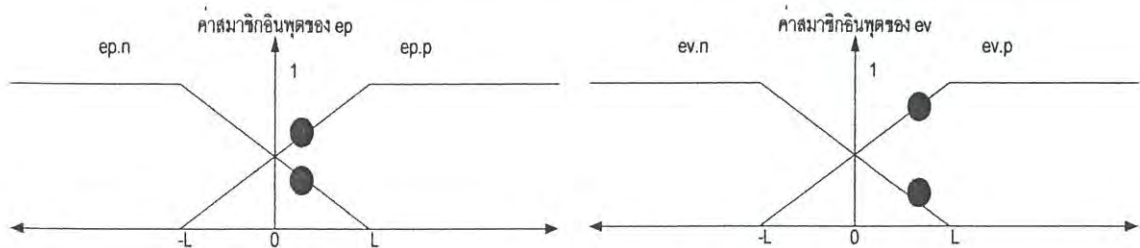
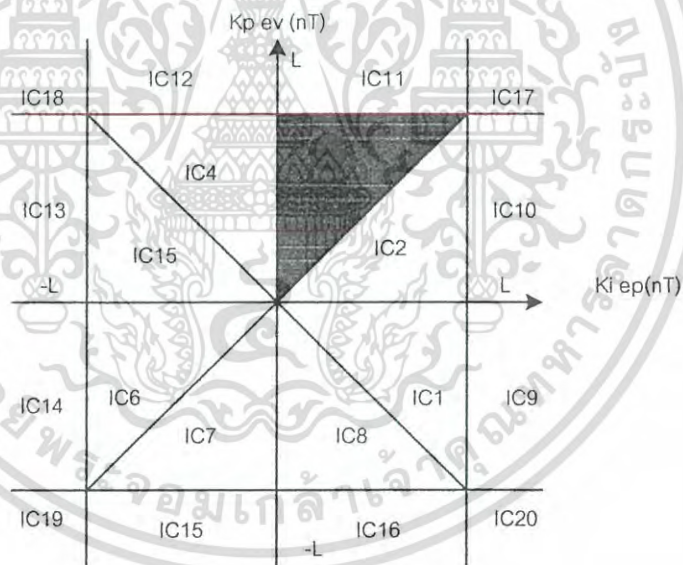
$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{2L}{k_p e_v(nT) + L - k_i e_p(nT) + L - k_i e_p(nT) + L + k_i e_p(nT) + L}$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L[k_i e_p(nT) + k_p e_v(nT)]}{2(2L - k_i e_p(nT))}$$

ที่  $e_p \geq 0$  จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L[k_i e_p(nT) + k_p e_v(nT)]}{2(2L - k_i |e_p(nT)|)} \tag{2}$$

3. พื้นที่ที่ 3 (IC3)



รูปที่ ก.3 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ ก.3 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 3 ในตารางที่ ก.3 ดังนี้

กฎข้อที่	$e_p$	$e_v$	$\mu(e_p \wedge e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	$p$	$p$	$e_v \cdot p$	$L$
2	$p$	$n$	$e_v \cdot n$	$0$
3	$n$	$p$	$e_p \cdot n$	$0$
4	$n$	$n$	$e_p \cdot n$	$-L$

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{(k_p e_p(nT) + L)(L) + (-k_p e_v(nT) + L)(-L)}{-k_p e_v(nT) + L - k_p e_v(nT) + L - k_p e_p(nT) + L + k_p e_p(nT) + L}$$

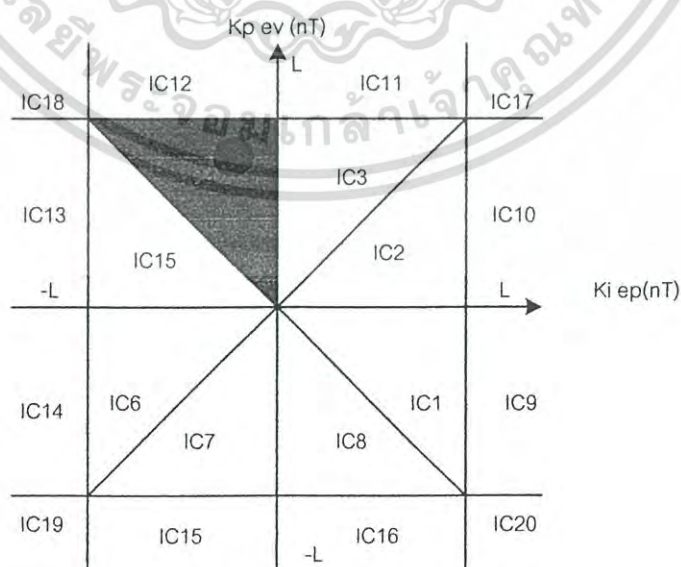
$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L[k_p e_p(nT) + k_p e_v(nT)]}{2(2L - k_p e_v(nT))}$$

ที่  $e_v \geq 0$  จะได้

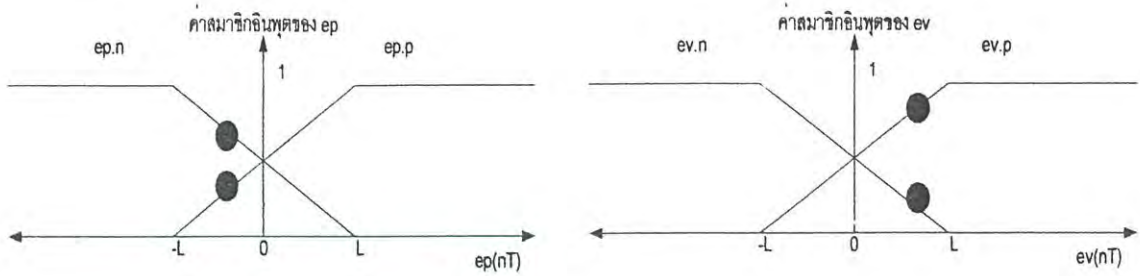
$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L[k_p e_p(nT) + k_p e_v(nT)]}{2(2L - k_p |e_v(nT)|)}$$

(3)

#### 4. พื้นที่ที่ 4 (IC4)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.4 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 4

จากรูปที่ ก.4 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 4 ในตารางที่ ก.4 ดังนี้

กฎข้อที่	$e_p$	$e_v$	$\mu(e_p \wedge e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	$p$	$p$	$e_p \cdot p$	$L$
2	$p$	$n$	$e_v \cdot n$	$0$
3	$n$	$p$	$e_p \cdot n$	$0$
4	$n$	$n$	$e_v \cdot n$	$-L$

จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{(k_p e_p(nT) + L)(L) + (-k_p e_v(nT) + L)(-L)}{-k_p e_v(nT) + L - k_p e_p(nT) + L - k_p e_p(nT) + L + k_p e_p(nT) + L}$$

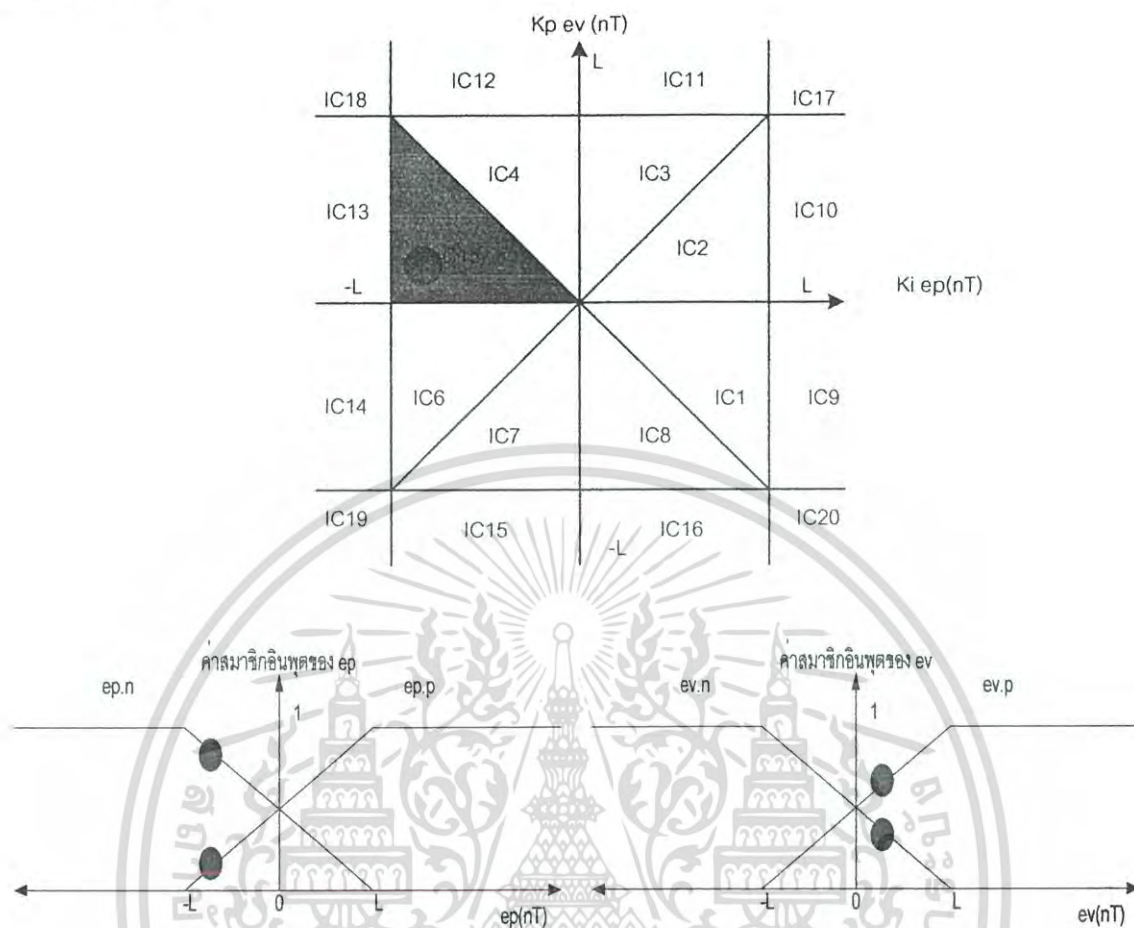
$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L[k_p e_p(nT) + k_p e_v(nT)]}{2(2L - k_p e_v(nT))}$$

ที่  $e_v \geq 0$  จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L[k_p e_p(nT) + k_p e_v(nT)]}{2(2L - k_p |e_v(nT)|)} \quad (4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5. พื้นที่ที่ 5 (IC5)



รูปที่ ๓.๕ แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 5

จากรูปที่ ๓.๕ จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 5 ในตารางที่ ๓.๕ ดังนี้

กฎข้อที่	$e_p$	$e_v$	$\mu(e_p \wedge e_v)$	เอาท์พุทที่ถูกเลือก
1	$p$	$p$	$e_p \cdot p$	$L$
2	$p$	$n$	$e_p \cdot p$	$0$
3	$n$	$p$	$e_p \cdot v$	$0$
4	$n$	$n$	$e_v \cdot n$	$-L$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้

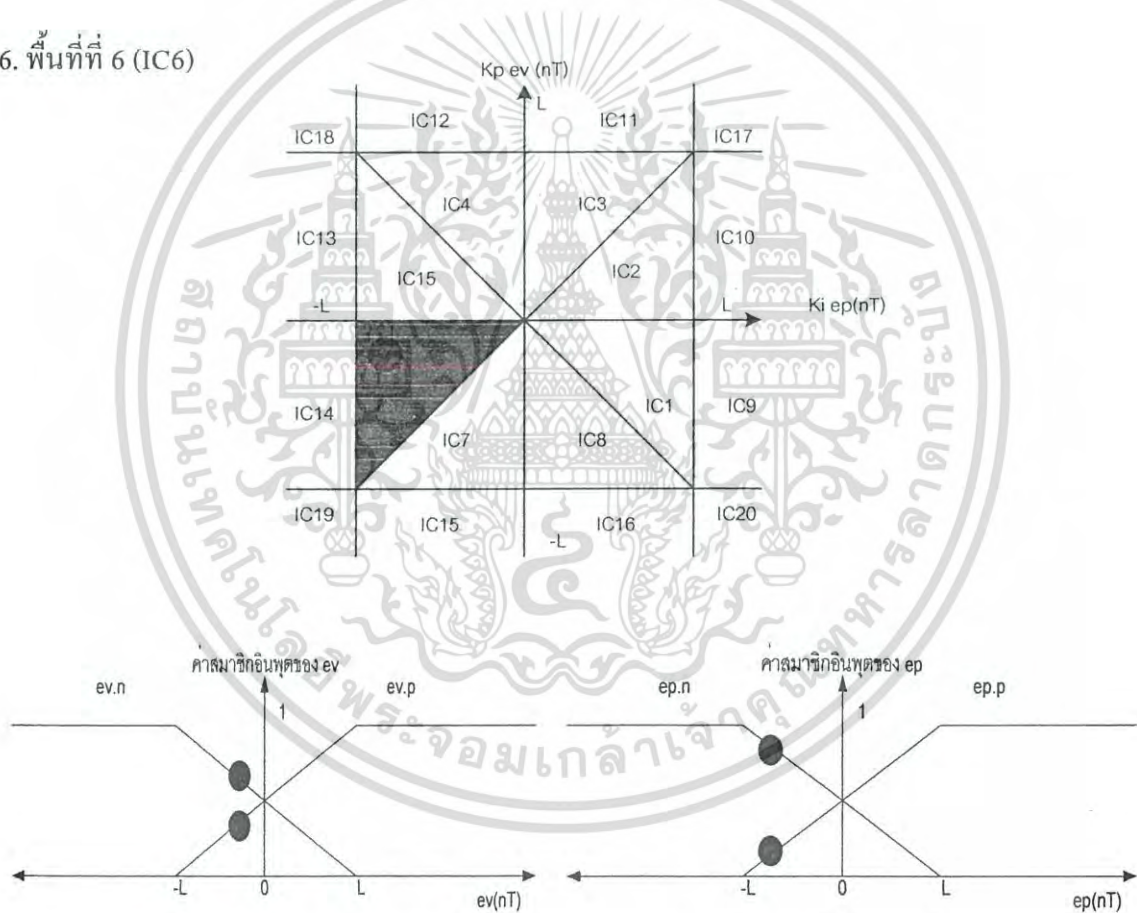
$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{(k_i e_p(nT) + L)(L) + (-k_p e_v(nT) + L)(-L)}{k_p e_v(nT) + L - k_p e_v(nT) + L - k_i e_p(nT) + L + k_i e_p(nT) + L} \cdot \frac{2L}{2L}$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L[k_i e_p(nT) + k_p e_v(nT)]}{2(2L - k_i e_p(nT))}$$

ที่  $e_p \geq 0$  จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L[k_i e_p(nT) + k_p e_v(nT)]}{2(2L - k_i |e_p(nT)|)} \quad (5)$$

6. พื้นที่ที่ 6 (IC6)



รูปที่ 6.6 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ ก.6 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 6 ในตารางที่ ก.6 ดังนี้

กฎข้อที่	$e_p$	$e_v$	$\mu(e_p \wedge e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	$p$	$p$	$e_p \cdot p$	$L$
2	$p$	$n$	$e_p \cdot p$	$0$
3	$n$	$p$	$e_v \cdot p$	$0$
4	$n$	$n$	$e_v \cdot n$	$-L$

จะได้

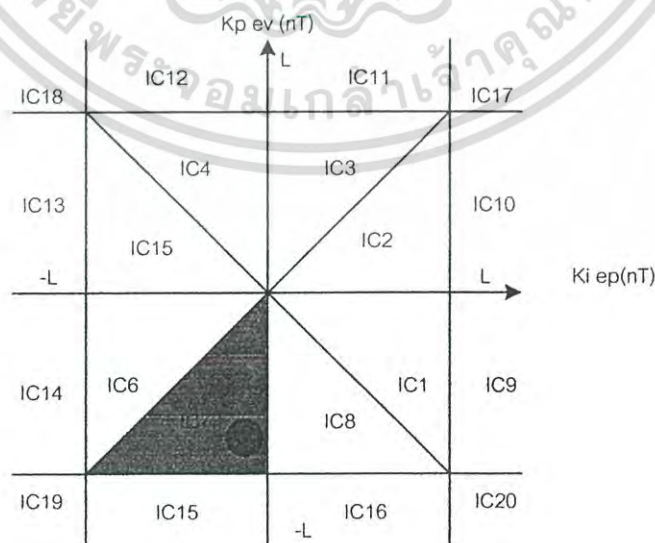
$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{(k_i e_p(nT) + L)(L) + (-k_p e_v(nT) + L)(-L)}{k_p e_v(nT) + L - k_p e_v(nT) + L + k_i e_p(nT) + L + k_i e_p(nT) + L}$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L[k_i e_p(nT) + k_p e_v(nT)]}{2(2L + k_i e_p(nT))}$$

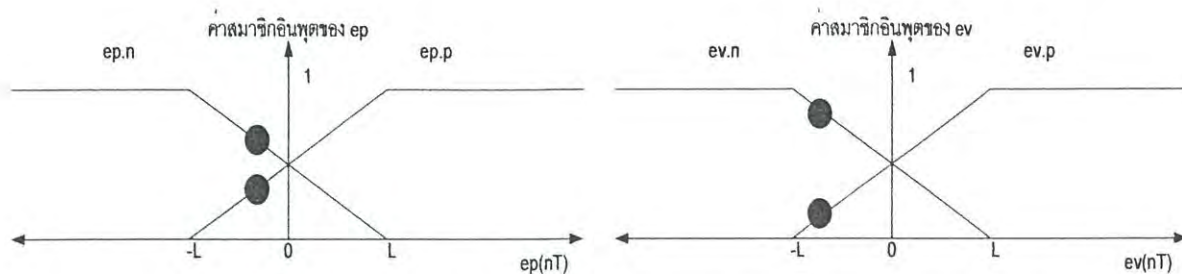
ที่  $e_p \leq 0$  จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L[k_i e_p(nT) + k_p e_v(nT)]}{2(2L - k_i |e_p(nT)|)} \quad (6)$$

7. พื้นที่ที่ 7 (IC7)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.7 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 7

จากรูปที่ ก.7 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 7 ในตารางที่ ก.7 ดังนี้

กฎข้อที่	$e_p$	$e_v$	$\mu(e_p \wedge e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	$p$	$p$	$e_v \cdot p$	$L$
2	$p$	$n$	$e_p \cdot p$	$0$
3	$n$	$p$	$e_p \cdot v$	$0$
4	$n$	$n$	$e_p \cdot n$	$-L$

จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{(k_p e_v(nT) + L)(L) + (-k_i e_p(nT) + L)(-L)}{2L} = \frac{k_p e_v(nT) + L - k_p e_v(nT) + L - k_i e_p(nT) + L + k_i e_p(nT) + L}{2L}$$

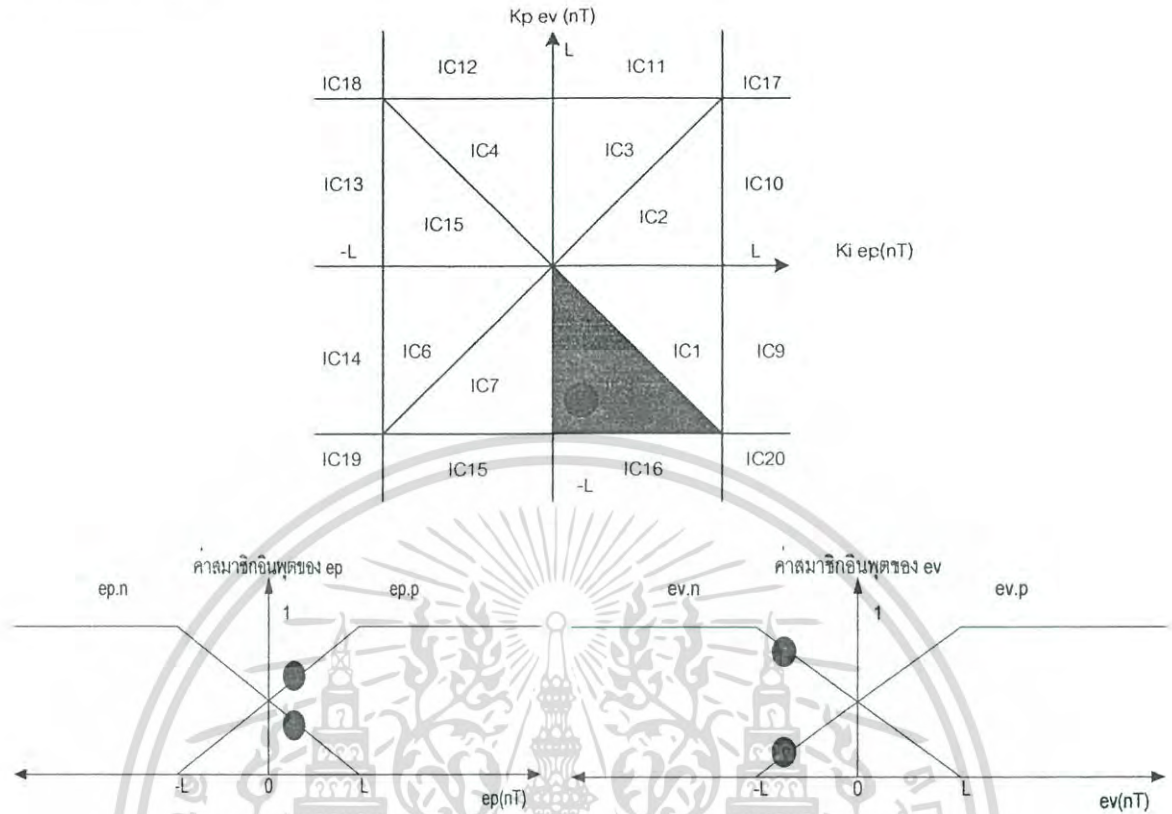
$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L[k_i e_p(nT) + k_p e_v(nT)]}{2(2L + k_p e_v(nT))}$$

ที่  $e_p \leq 0$  จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L[k_i e_p(nT) + k_p e_v(nT)]}{2(2L - k_p |e_v(nT)|)} \quad (7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 8. พื้นที่ที่ 8 (IC8)



รูปที่ 8.8 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 8

จากรูปที่ 8.8 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 8 ในตารางที่ 8.8 ดังนี้

กฎข้อที่	$e_p$	$e_v$	$\mu(e_p \wedge e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	$p$	$p$	$e_v \cdot p$	$L$
2	$p$	$n$	$e_p \cdot p$	$0$
3	$n$	$p$	$e_p \cdot v$	$0$
4	$n$	$n$	$e_p \cdot n$	$-L$

จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{(k_p e_v(nT) + L)(L) + (-k_i e_p(nT) + L)(-L)}{2L}$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{k_p e_v(nT) + L - k_i e_p(nT) + L - k_i e_p(nT) + L + k_i e_p(nT) + L}{2L}$$

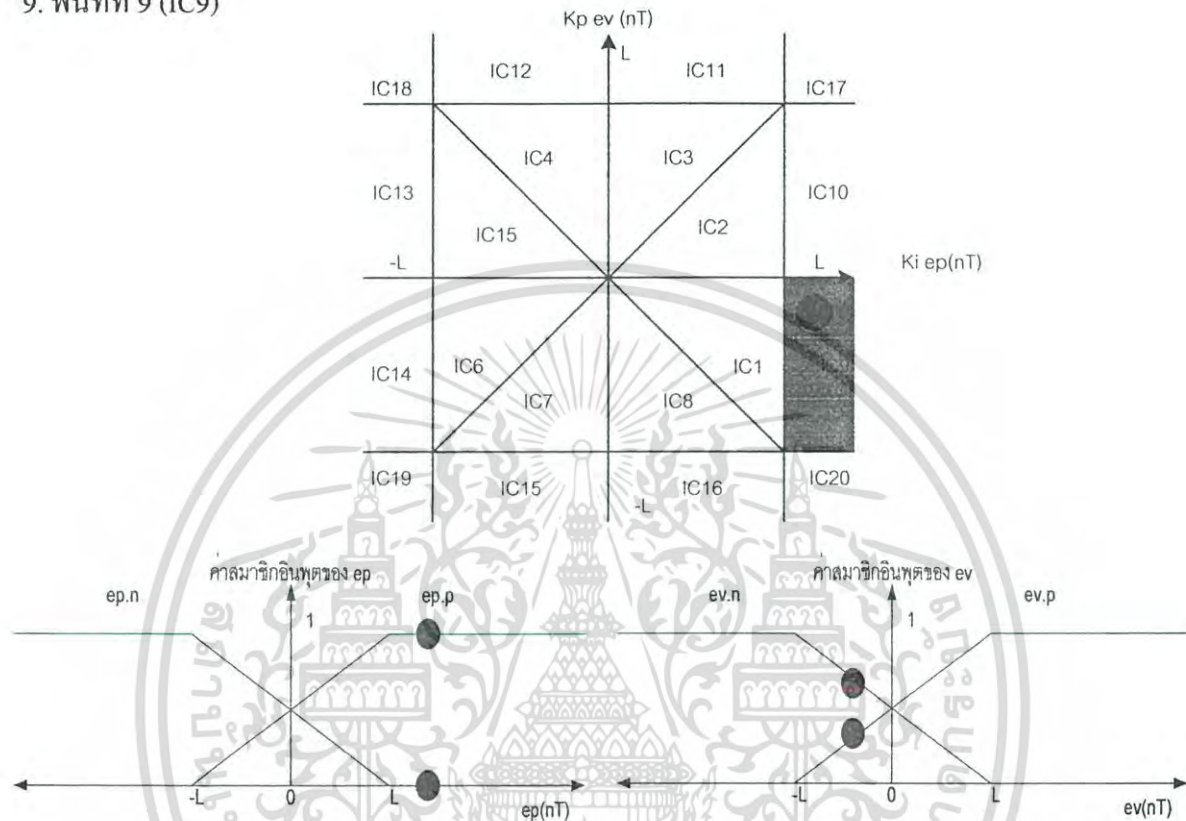
$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L[k_i e_p(nT) + k_p e_v(nT)]}{2(2L + k_p e_v(nT))}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่  $e_p \leq 0$  จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L[k_p e_p(nT) + k_p e_v(nT)]}{2(2L - k_p |e_v(nT)|)} \quad (8)$$

### 9. พื้นที่ที่ 9 (IC9)



รูปที่ 9 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 9

จากรูปที่ 9 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 9 ในตารางที่ 9 ดังนี้

กฎข้อที่	$e_p$	$e_v$	$\mu(e_p \wedge e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	$p$	$p$	$e_v \cdot p$	$L$
2	$p$	$n$	$e_p \cdot p$	$0$
3	$n$	$p$	$0$	$0$
4	$n$	$n$	$0$	$-L$

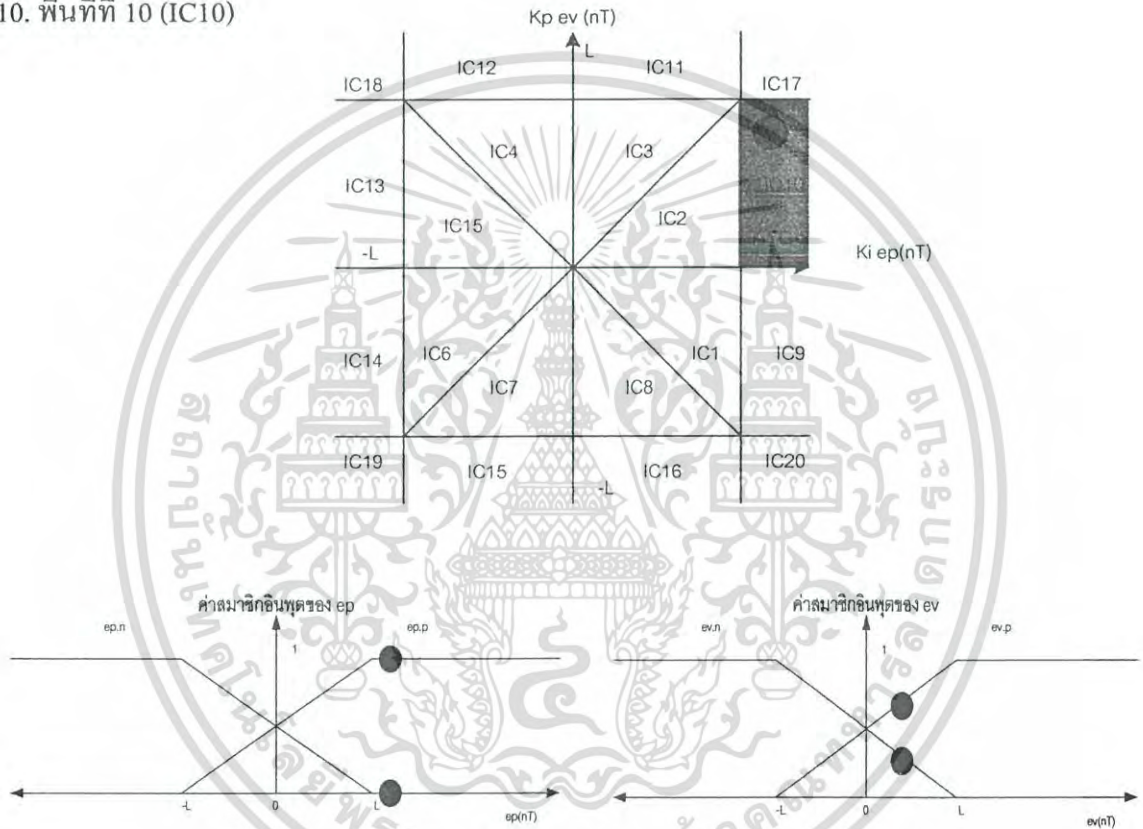
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{(-k_i e_p(nT) + L)(L)}{k_i e_p(nT) + L - k_i e_p(nT) + L} = \frac{2L}{2L}$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = -\frac{k_i e_p(nT) + L}{2} \tag{9}$$

10. พื้นที่ที่ 10 (IC10)



รูปที่ ก.10 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 10

จากรูปที่ ก.10 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 10 ในตารางที่ ก.10 ดังนี้

กฎข้อที่	$e_p$	$e_v$	$\mu(e_p \wedge e_v)$	เอาท์พุทที่ถูกเลือก
1	$p$	$p$	$e_v \cdot p$	0
2	$p$	$n$	$e_v \cdot p$	$L$
3	$n$	$p$	0	$-L$
4	$n$	$n$	0	0

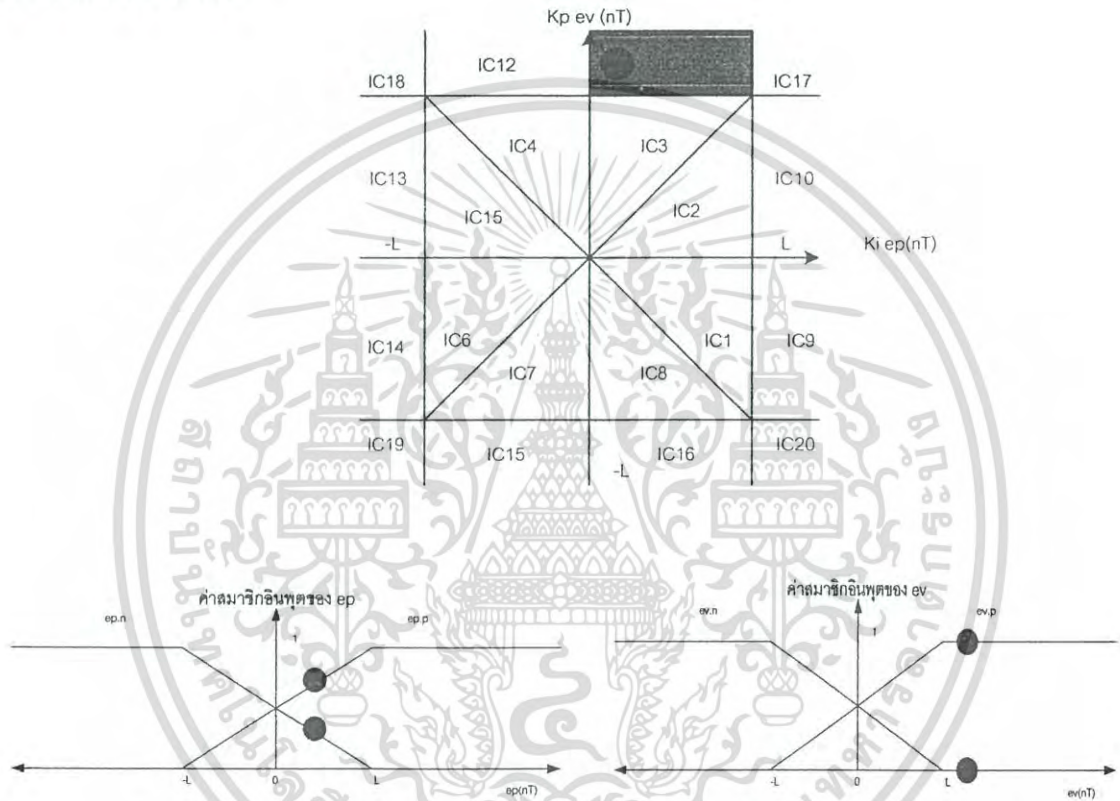
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{(-k_i e_p(nT) + L)(L)}{k_i e_p(nT) + L - k_i e_p(nT) + L} \cdot \frac{2L}{2L}$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = -\frac{k_i e_p(nT) + L}{2} \quad (10)$$

### 11. พื้นที่ที่ 11 (IC11)



รูปที่ ก.11 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 11

จากรูปที่ ก.11 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 11 ในตารางที่ ก.11 ดังนี้

กฎข้อที่	$e_p$	$e_v$	$\mu(e_p \wedge e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	$p$	$p$	$e_v \cdot p$	$L$
2	$p$	$n$	0	0
3	$n$	$p$	$e_v \cdot n$	0
4	$n$	$n$	0	$-L$

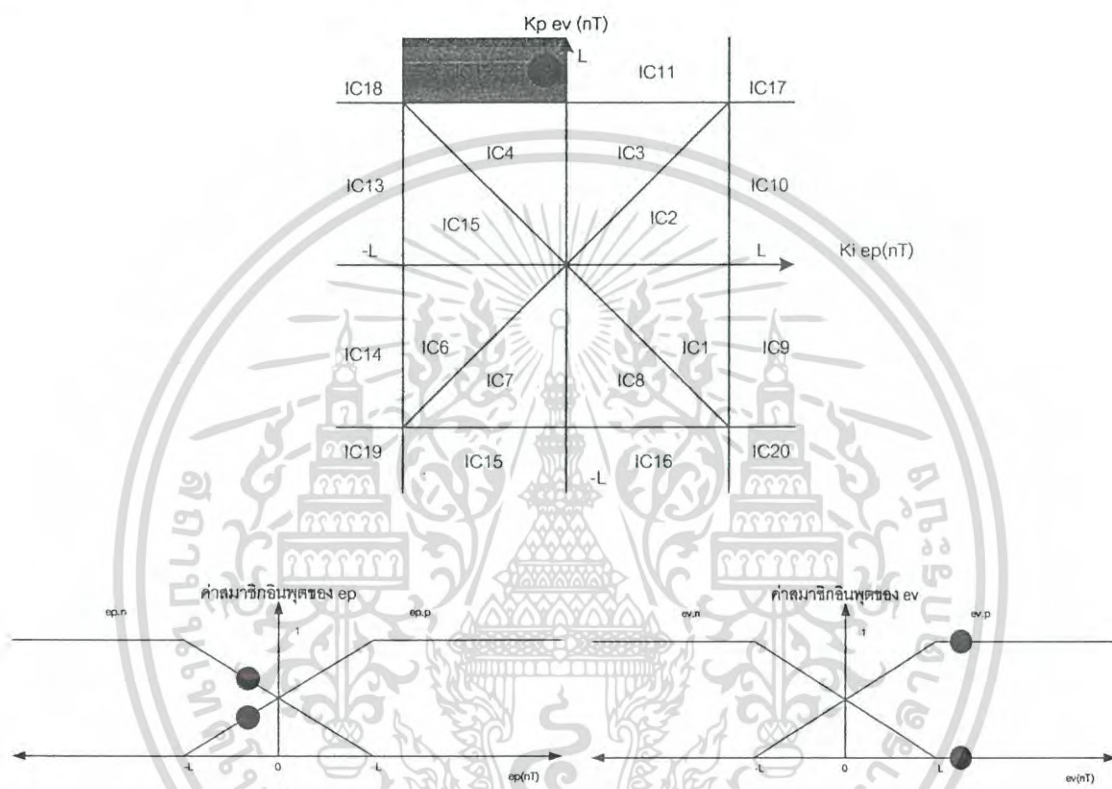
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{(-k_i e_v(nT) + L)(-L)}{k_i e_v(nT) + L - k_i e_v(nT) + L} \cdot \frac{2L}{2L}$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = -\frac{k_i e_p(nT) - L}{2} \quad (11)$$

11. พื้นที่ที่ 11 (IC11)



รูปที่ ก.12 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 12

จากรูปที่ ก.12 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 12 ในตารางที่ ก.12 ดังนี้

กฎข้อที่	$e_p$	$e_v$	$\mu(e_p \wedge e_v)$	เอาท์พุทที่ถูกเลือก
1	$p$	$p$	$e_v.p$	$L$
2	$p$	$n$	0	0
3	$n$	$p$	$e_v.n$	0
4	$n$	$n$	0	$-L$

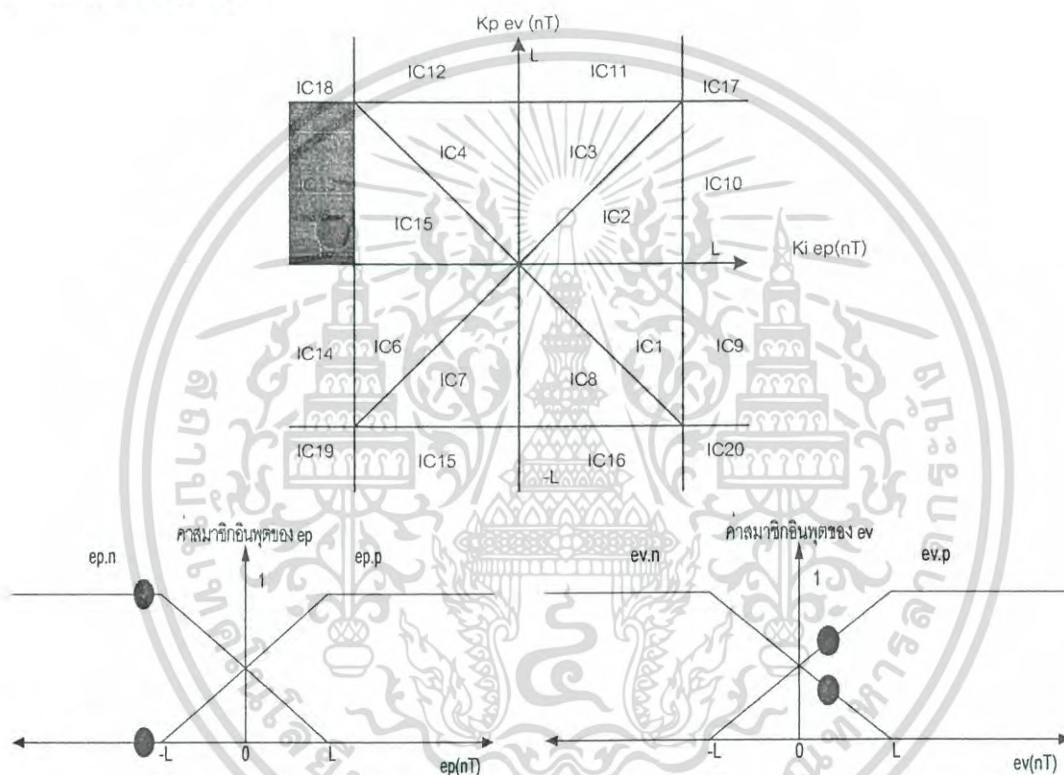
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{(-k_i e_v(nT) + L)(-L)}{k_i e_v(nT) + L - k_i e_v(nT) + L} = \frac{2L}{2L} = 1$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = -\frac{k_i e_p(nT) - L}{2} \tag{12}$$

13. พื้นที่ที่ 13 (IC13)



รูปที่ ก.13 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 13

จากรูปที่ ก.13 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 13 ในตารางที่ ก.13 ดังนี้

กฎข้อที่	$e_p$	$e_v$	$\mu(e_p \wedge e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	$p$	$p$	0	$L$
2	$p$	$n$	0	0
3	$n$	$p$	$e_v.v$	0
4	$n$	$n$	$e_v.n$	$-L$

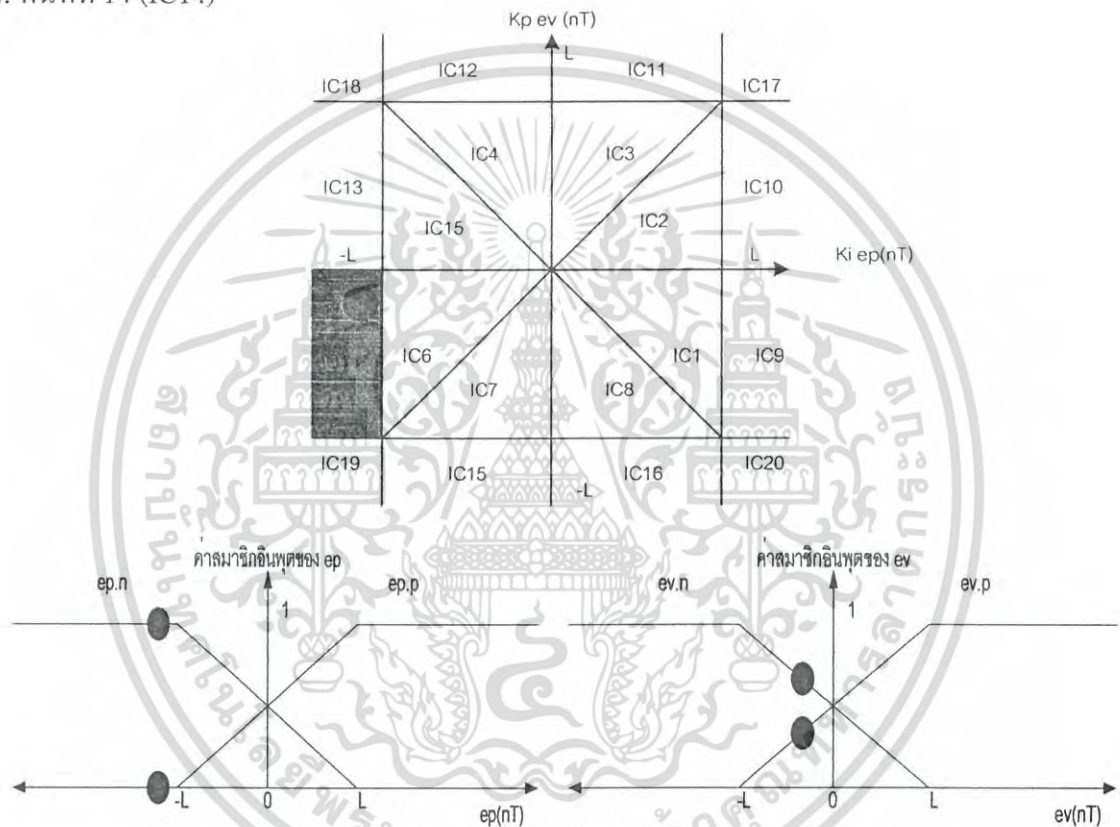
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{(-k_p e_v(nT) + L)(-L)}{2L}$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{k_p e_v(nT) - L}{2} \tag{13}$$

14. พื้นที่ 14 (IC14)



รูปที่ ก.14 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 14

จากรูปที่ ก.14 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 14 ในตารางที่ ก.14 ดังนี้

กฎข้อที่	$e_p$	$e_v$	$\mu(e_p \wedge e_v)$	เอาท์พุทที่ถูกเลือก
1	$p$	$p$	0	$L$
2	$p$	$n$	0	0
3	$n$	$p$	$e_v.v$	0
4	$n$	$n$	$e_v.n$	$-L$

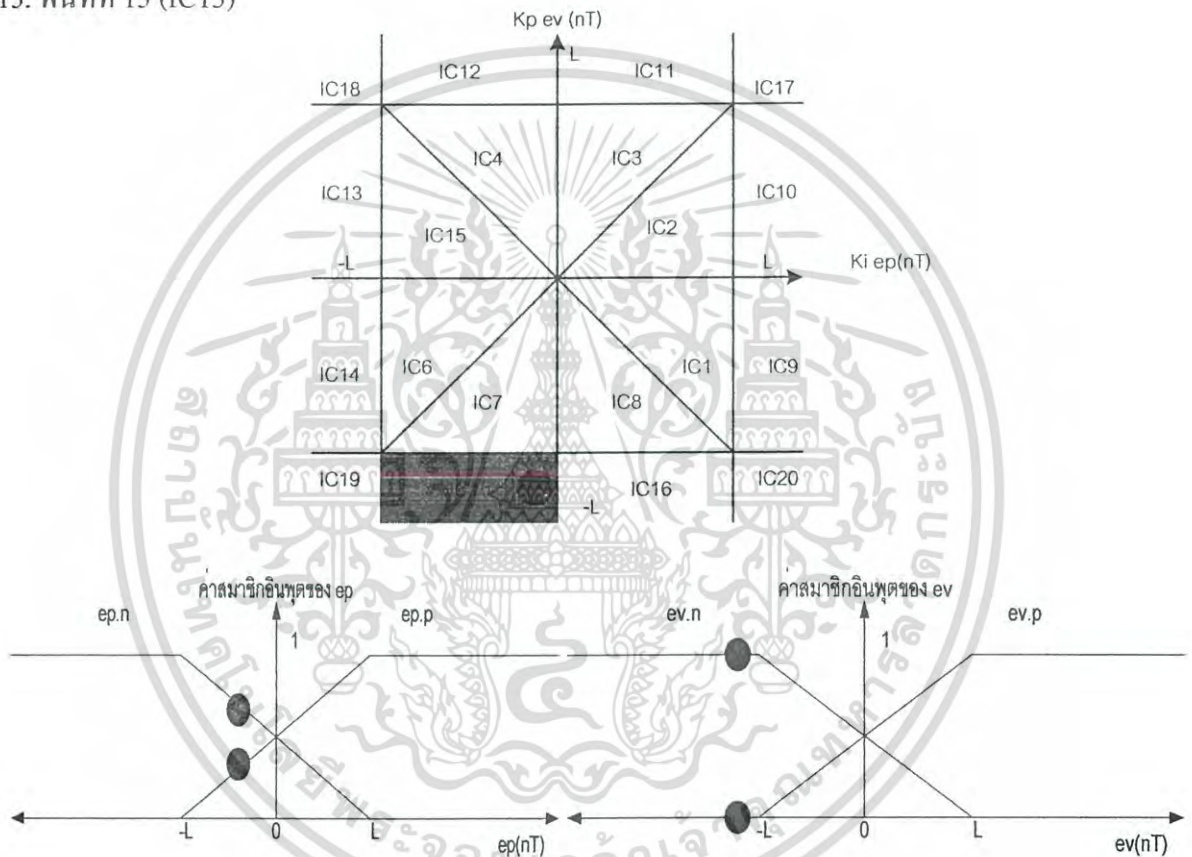
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้

$$\Delta u_{p_i}(nT) = \frac{(-k_p e_v(nT) + L)(-L)}{2L}$$

$$\Delta u_{p_i}(nT) = \frac{k_p e_v(nT) - L}{2} \tag{14}$$

15. พื้นที่ที่ 15 (IC15)



รูปที่ ก.15 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 15

จากรูปที่ ก.15 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 15 ในตารางที่ ก.15 ดังนี้

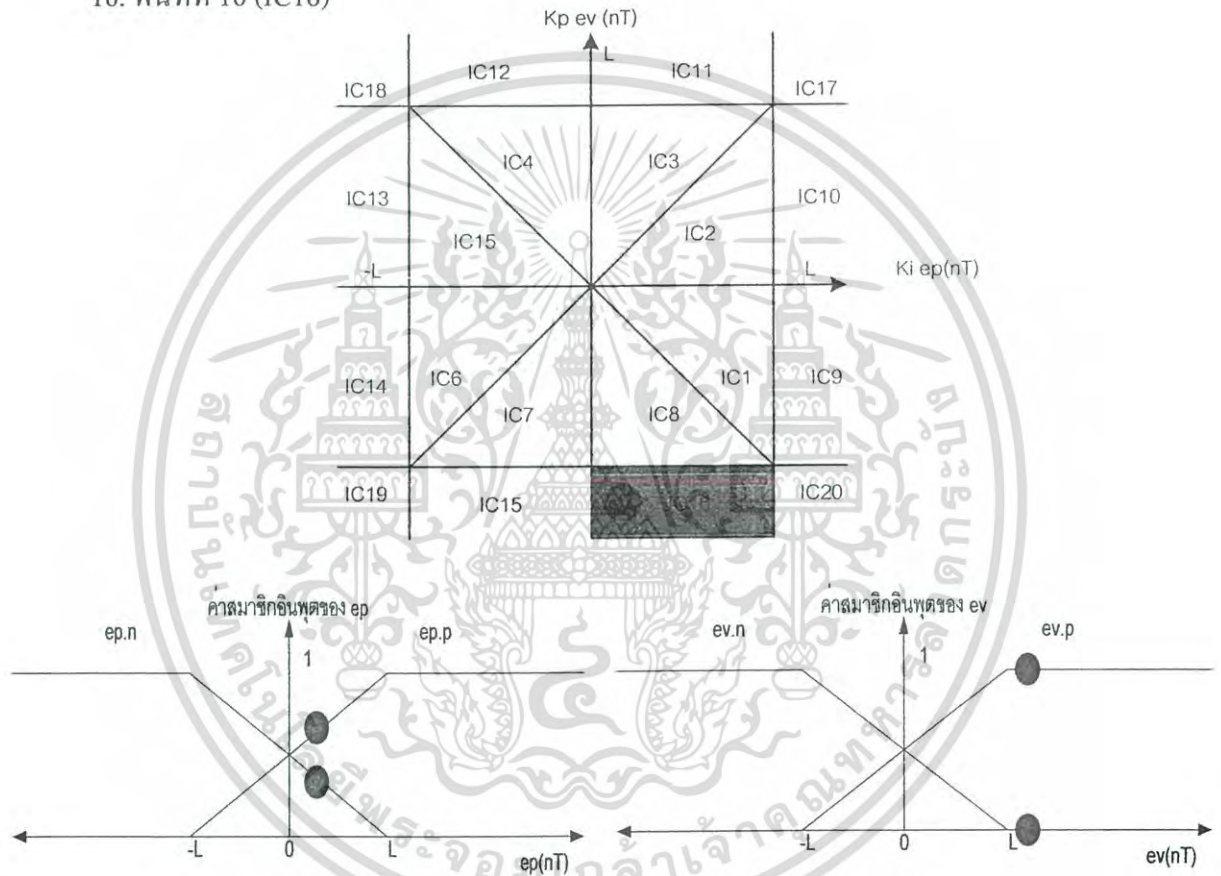
กฎข้อที่	$e_p$	$e_v$	$\mu(e_p \wedge e_v)$	เอาท์พุทที่ถูกเลือก
1	$p$	$p$	0	$L$
2	$p$	$n$	$e_p \cdot p$	0
3	$n$	$p$	0	0
4	$n$	$n$	$e_p \cdot n$	$-L$

จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{(-k_i e_p(nT) + L)(-L)}{2L}$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{k_i e_p(nT) - L}{2} \tag{15}$$

16. พื้นที่ที่ 16 (IC16)



รูปที่ ก.16 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 16

จากรูปที่ ก.16 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 16 ในตารางที่ ก.16 ดังนี้

กฎข้อที่	$e_p$	$e_v$	$\mu(e_p \wedge e_v)$	เอาท์พุทที่ถูกเลือก
1	$p$	$p$	0	$L$
2	$p$	$n$	$e_p \cdot p$	0
3	$n$	$p$	0	0
4	$n$	$n$	$e_p \cdot n$	$-L$

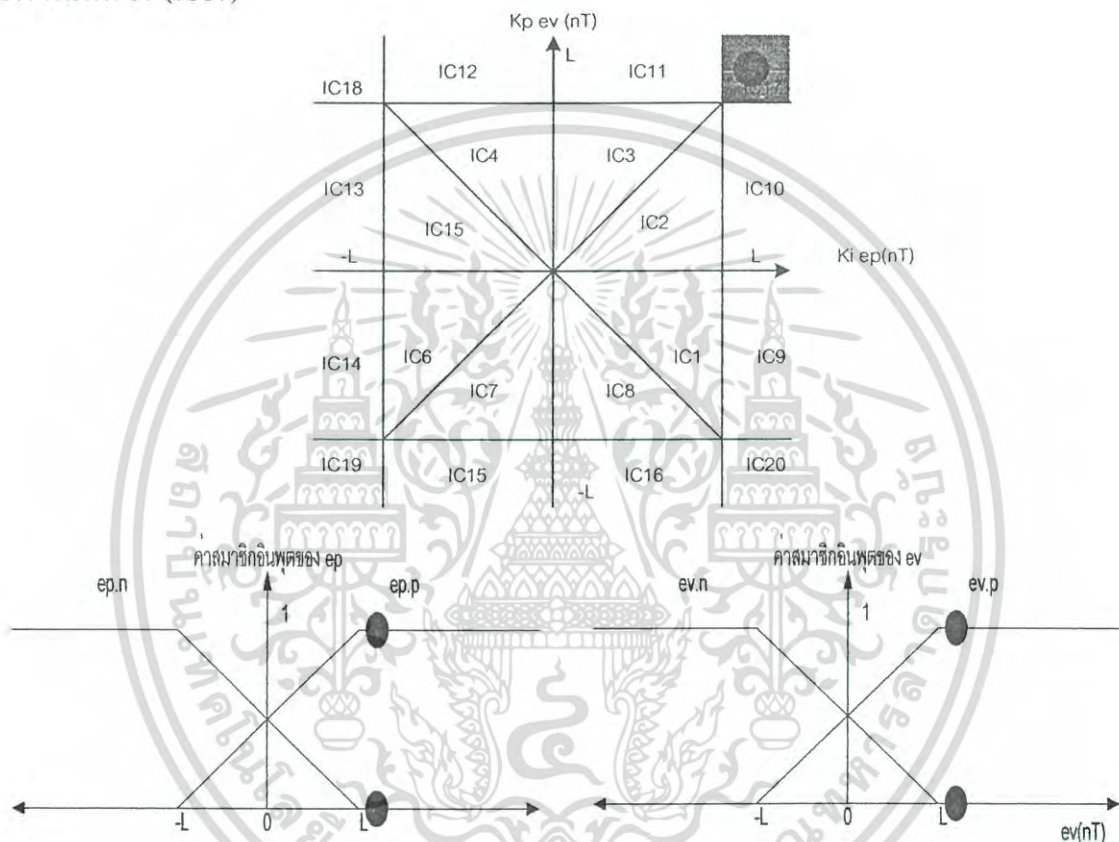
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{(-k_i e_p(nT) + L)(-L)}{k_i e_p(nT) + L - k_i e_p(nT) + L} \cdot \frac{2L}{2L}$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{k_i e_p(nT) - L}{2} \tag{16}$$

17. พื้นที่ที่ 17 (IC17)



รูปที่ ก.17 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 17

จากรูปที่ ก.17 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 17 ในตารางที่ ก.17 ดังนี้

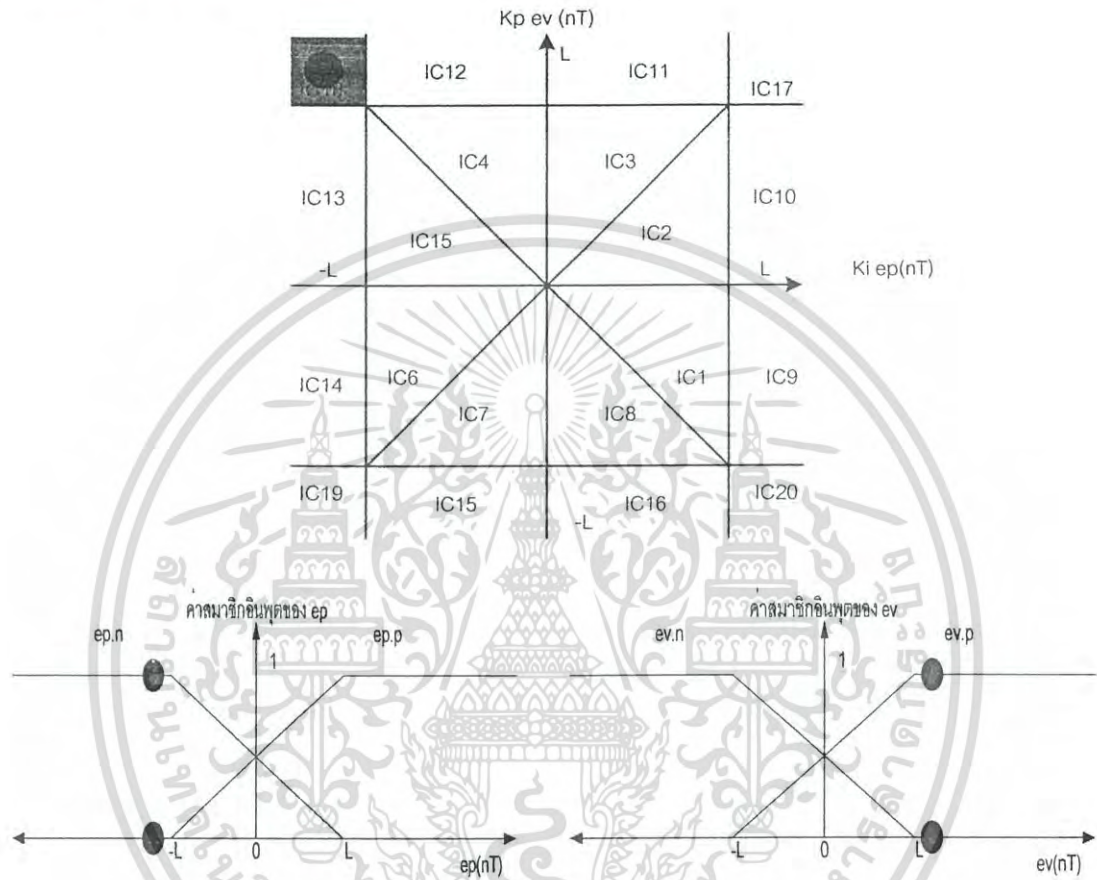
กฎข้อที่	$e_p$	$e_v$	$\mu(e_p \wedge e_v)$	เอาท์พุทที่ถูกเลือก
1	$p$	$p$	1	$L$
2	$p$	$n$	0	0
3	$n$	$p$	0	0
4	$n$	$n$	0	$-L$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้

$$\begin{aligned} \Delta u_{pi}(nT) &= 1 \times L \\ \Delta u_{pi}(nT) &= L \end{aligned} \tag{17}$$

18. พื้นที่ที่ 18 (IC18)



รูปที่ ก.18 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 18

จากรูปที่ ก.18 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 18 ในตารางที่ ก.18 ดังนี้

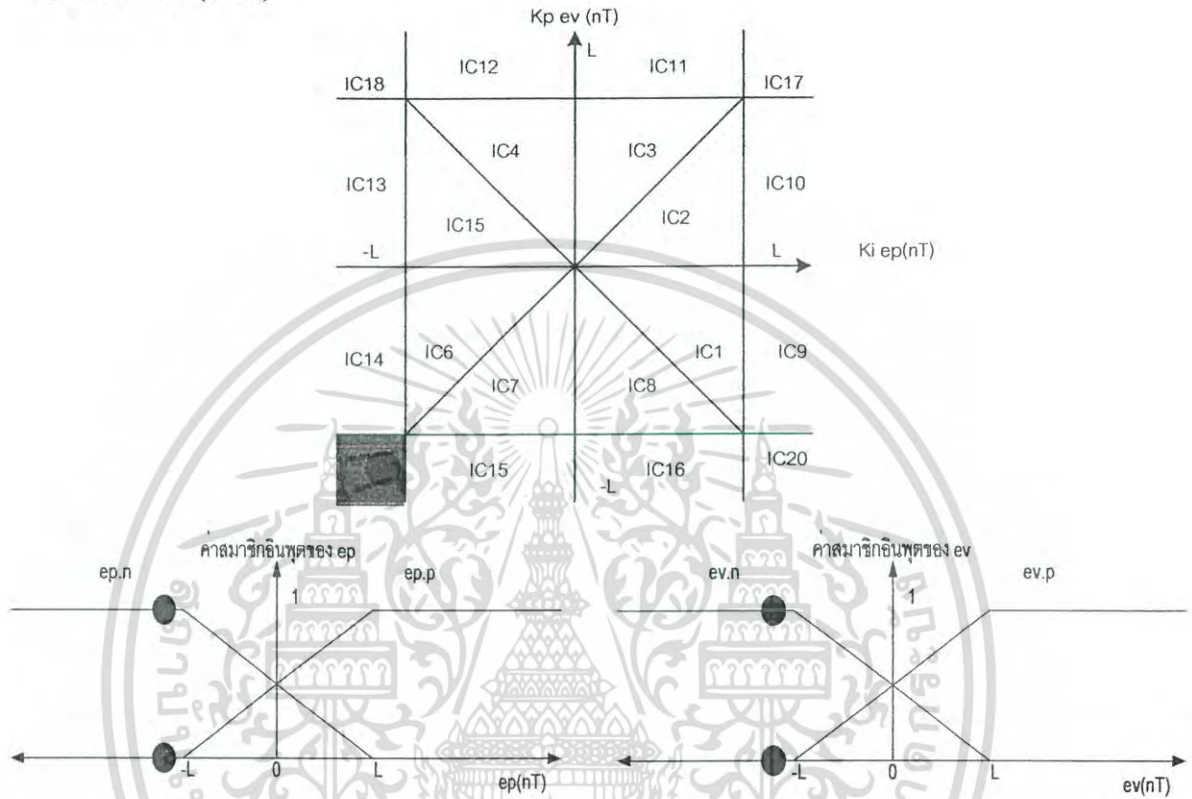
กฎข้อที่	$e_p$	$e_v$	$\mu(e_p \wedge e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	$p$	$p$	0	$L$
2	$p$	$n$	0	0
3	$n$	$p$	1	0
4	$n$	$n$	0	$-L$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้

$$\begin{aligned} \Delta u_{pi}(nT) &= 1 \times 0 \\ \Delta u_{pi}(nT) &= 0 \end{aligned} \tag{18}$$

19. พื้นที่ที่ 19 (IC19)



รูปที่ ก.19 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 19

จากรูปที่ ก.19 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 19 ในตารางที่ ก.19 ดังนี้

กฎข้อที่	$e_p$	$e_v$	$\mu(e_p \wedge e_v)$	เอาท์พุทที่ถูกเลือก
1	$p$	$p$	0	$L$
2	$p$	$n$	0	0
3	$n$	$p$	0	0
4	$n$	$n$	1	$-L$

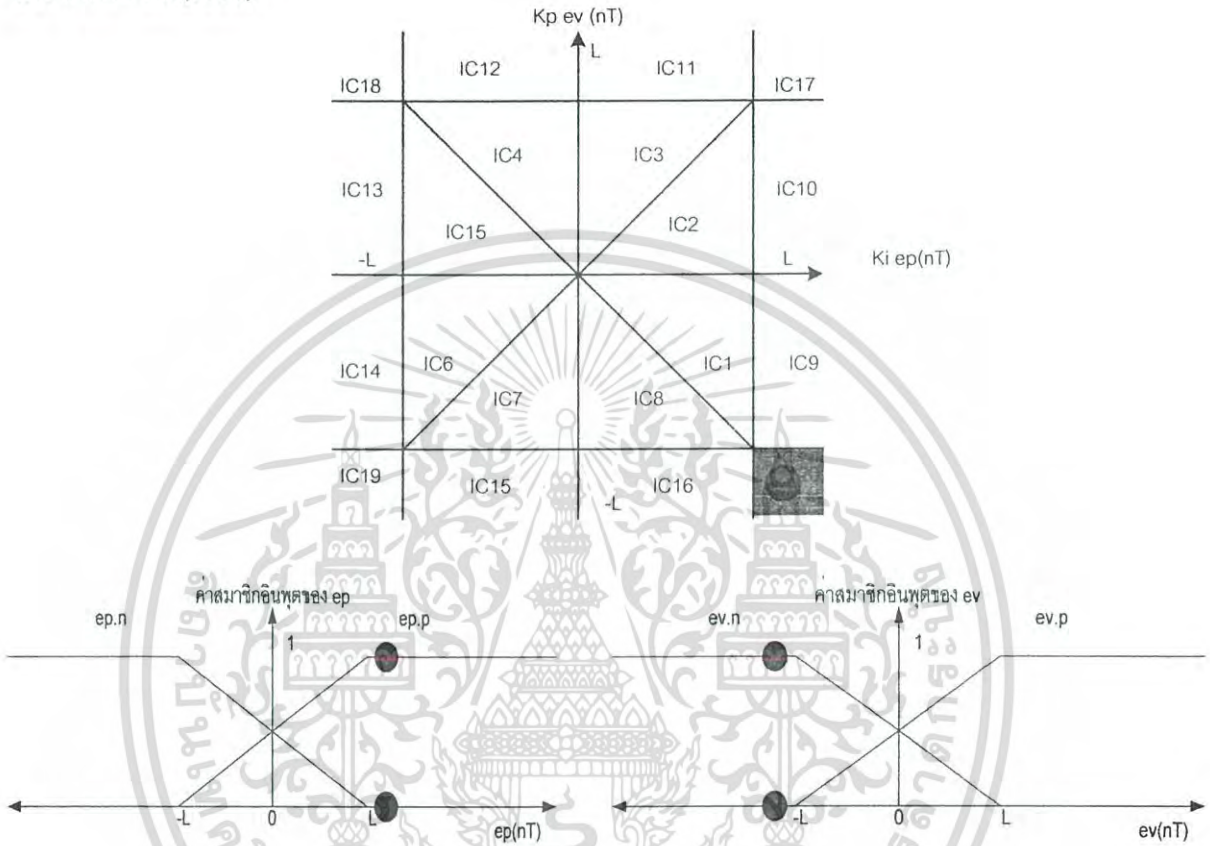
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = 1 \times (-L)$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = -L \tag{19}$$

20. พื้นที่ที่ 20 (IC20)



รูปที่ ก.20 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 20

จากรูปที่ ก.20 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 20 ในตารางที่ ก.20 ดังนี้

กฎข้อที่	$e_p$	$e_v$	$\mu(e_p \wedge e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	$p$	$p$	0	$L$
2	$p$	$n$	1	0
3	$n$	$p$	0	0
4	$n$	$n$	0	$-L$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = 1 \times 0$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = 0$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

## ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] **M.Chatpoj, B.Purahong, T.Thossansin, and P.Sooraksa** “ Floating Robots by Fuzzy Algorithm,” *IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, pp.292-295 ,2004.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Floating Robots by Fuzzy Algorithm

Montri Chatpoj, Boonchana Purahong, Thossaporn Thossansin and Pitikhate Sooraksa  
 Info-Dynamic laboratory, Department of Information Engineering  
 Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,  
 Chalokkrung Rd., Ladkrabang, Bangkok, Thailand 10520

E-mail: montri1980@hotmail.com, yuna001@hotmail.com, thossaporn@thairakthai.or.th and kspitikh@kmitl.ac.th

**Abstract**—This paper is talking about using Fuzzy PI controller in order to help controlling the gap in magnetic levitation system (Maglev). The details of this paper concerns about the model of maglev system which is applied to floating robot; it is also about how to use Fuzzy PI controller for assisting the maglev system in order to make this system more accurate and faster. From the simulation which compared the reactions between Fuzzy PI and the original PI, it showed that Fuzzy PI had faster response without swaying the output values while it was reaching the setpoint values. Therefore, the Fuzzy PI is suitable for using to control the Maglev system in floating robot.

**Keywords**—Maglev System; floating robo; Fuzzy Control PI; PI controller

## I. INTRODUCTION

The Fuzzy Logic Controller is one of the controllers which can make the decision similar to the human's brain. In particular, it can approximate the components of the system without the complex mathematical process, and the conditions are depended on the work type together with the data from the specialist of the specific system. The maglev system is the basic model used to design floating robot; this system assists the floating of the robot that came from the electromagnetic field. In this report, it basically refers to the math model of the Maglev system according to (1),(2) which came from the Maglev model in "Fig 1" we can see that the floatation was generated from the electromagnetic field with was built together with the rail made from metal, and the gap between them must be stable and it must have the ability to maintain its level when it has more tasks.

This reports also shows the simulation of Maglev system that choose the Fuzzy PI as its controller for the reason that the Fuzzy PI will facilitate the Maglev system in order to make the quicker response when compares with the original PI, which is suitable for the floating robot.

## II. MODEL OF MAGLEV SYSTEM

$$-\frac{\mu_o N^2 A}{4} \left[ \frac{i(t)}{h(t)} \right]^2 + Mg = Mh''(t) \quad (1)$$

$$u(t) = Ri(t) + 2 \frac{\mu_o N^2 A}{4} \frac{d}{dt} \left[ \frac{i(t)}{h(t)} \right] \quad (2)$$

From the equation (1) and (2), there are the variables as following;  $\mu_o = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$  is Vacuum permeability,  $u(t)$  is the input voltage,  $i(t)$  is the current flows through the

coil,  $N$  is the round numbers of the coil,  $M$  is the mass of suspended object,  $A$  is the area of a gap,  $R$  is the resistance of the coil,  $h(t)$  is the distance between two gaps. As shown in "Fig 1," on the top is the part that is stuck on the metal rail, and the lower part is that floating one [1] [3] [5] [6].

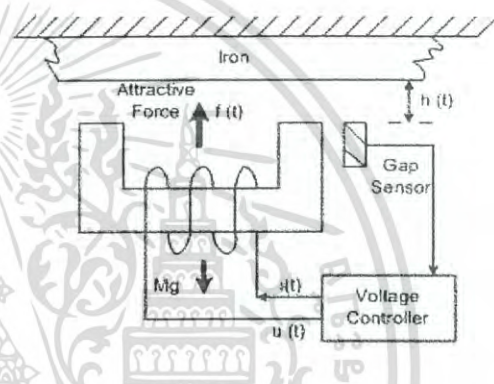


Figure 1. Maglev Model

## III. CONTROLLER SYSTEM

The original PI controller

$$u_{pi}(s) = \left( K_p + \frac{K_i}{s} \right) E(s) \quad (3)$$

Where  $K_p, K_i$  are the gained values and  $E(s)$  is the missed signal value [4]

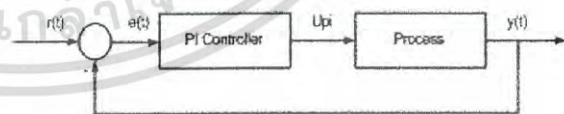


Figure 2. The original PI

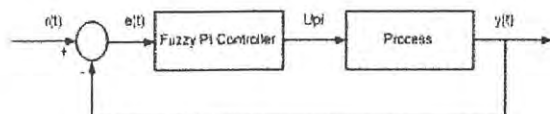


Figure 3. Fuzzy PI controller

Fuzzy PI controller

The Fuzzy PI is two-way input type controller including missed signal value  $ep(nT)$  and the rate changed of the missed signal value  $ev(nT)$  from [2], it acquired the input function member and output function member as shown in "Fig 4 and 5," [7] [8]

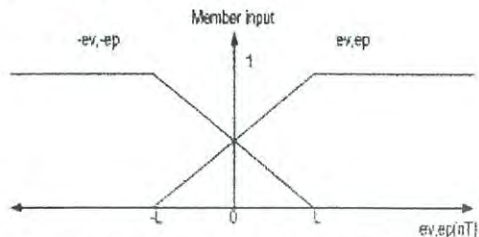


Figure 4. The input function member of Fuzzy PI

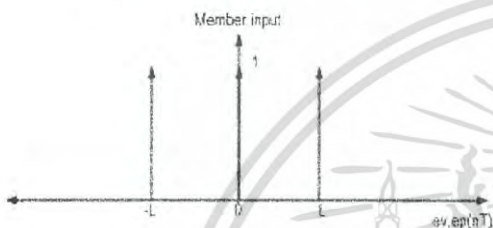


Figure 5. The output function member Fuzzy PI

As the result, Fuzzy PI is acquired as the input that is the missed signal value, and it is separated to 20 areas, and it has 9 areas that have the same equation as shown in "Fig 6,"

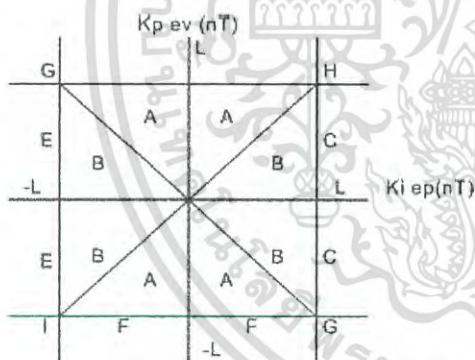


Figure 6. The leveled area of the entire possible missed signal from the Fuzzy PI control.

IV. COMPUTER SIMULATION

In this experiment, the calibrated values from meter were set as following;  $g$  is equal to 10 N/m.,  $M$  is equal to 0.25 kg.  $A$  is equal 0.0004 m<sup>2</sup>,  $N$  is equal to 1200 rounds,  $\mu$  is equal 4 [J] x 10<sup>-7</sup> Hm<sup>-1</sup>. This experiment was divided into two parts. First, we assigned three gap value (setpoint) that were equal 0.001 ,0.005, and 0.002 m, then we performed the experiment on the original PI and Fuzzy PI controllers separately by using the data from meter as shown in table 1 which the acquired results show in "Fig 7," to "Fig 12,".

TABLE I. The controlling meter data

parameter	PI	Fuzzy PI
Kp	1000	0.03
Ki	1000	0.03
L	-	10
Kupi	-	10

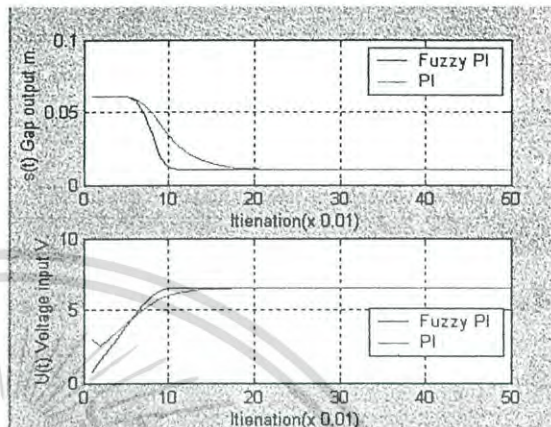


Figure 7. Gap output and Voltage input of setpoint is 0.01m.

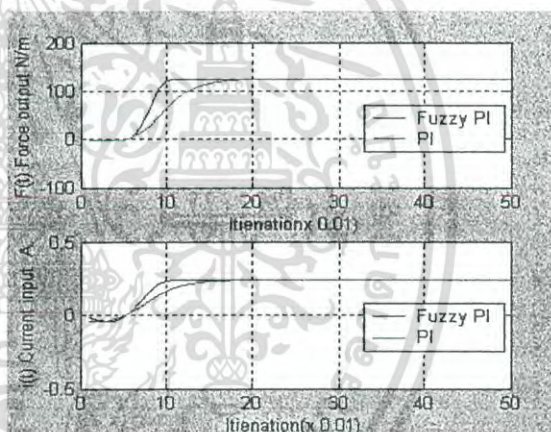


Figure 8. Force output and Current input of setpoint is 0.01m.

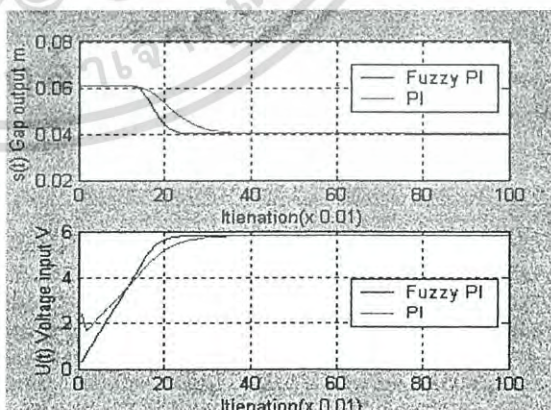


Figure 9. Gap output and Voltage input of setpoint is 0.04m

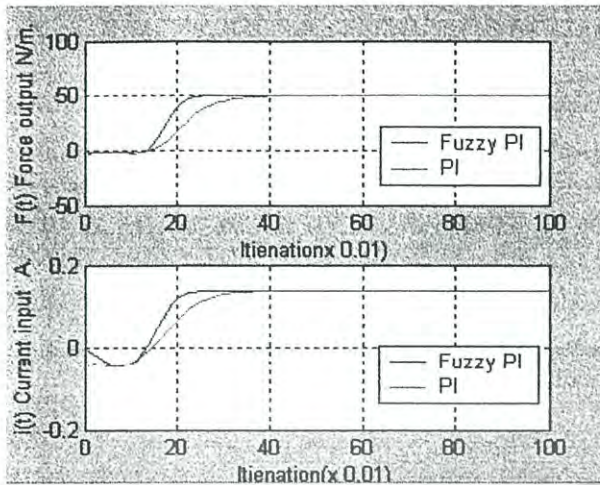


Figure 10. Force output and Current input of setpoint is 0.04m.

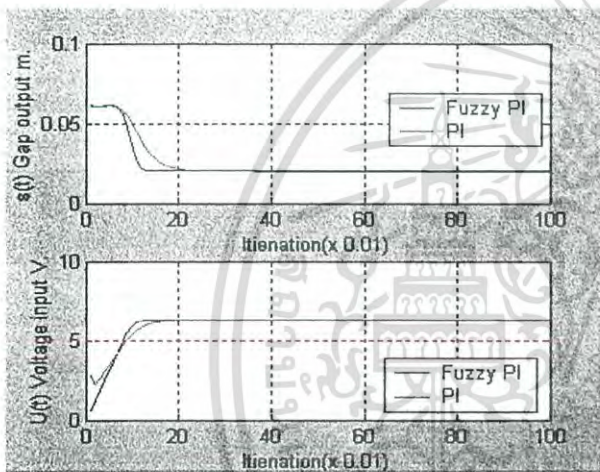


Figure 11. Gap output and Voltage input of setpoint is 0.02m.

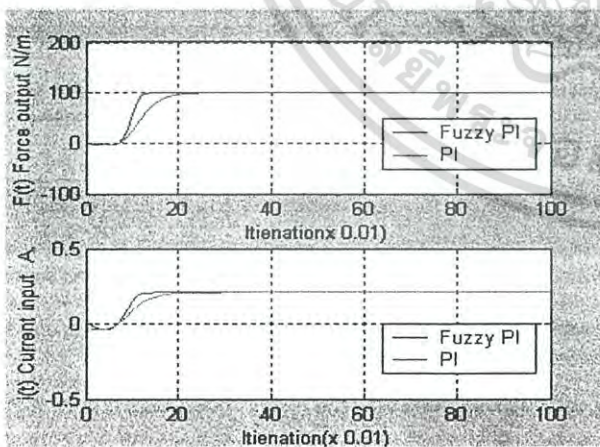


Figure 12. Force output and Current input of setpoint is 0.02m.

In the second experiment, we fixed the gap value (setpoint) as the same as the first experiment, but this time we changed the gap values every 50 iterations with both original PI and Fuzzy PI controllers by using the same meter data as we used in the first experiment.

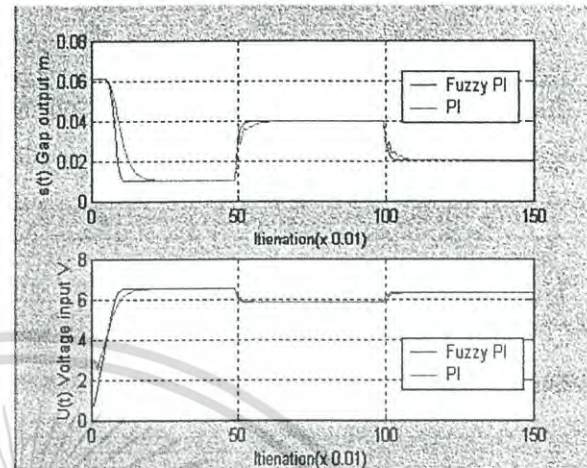


Figure 13. Gap output and Voltage input of dynamic setpoints are 0.01m, 0.04m and 0.02m.

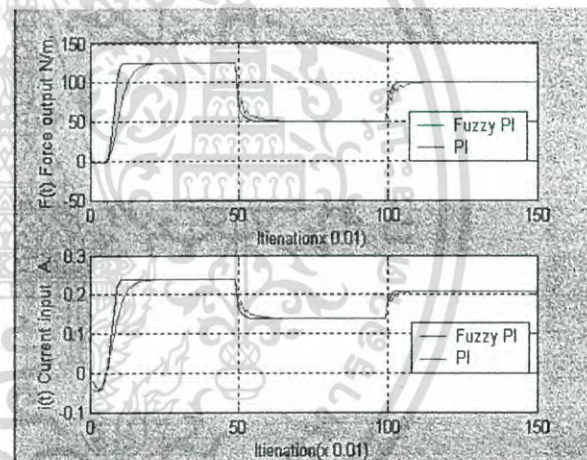


Figure 14. Force output and Current input of dynamic setpoints are 0.01m, 0.04m and 0.02m.

## V. CONCLUSIONS

From the first experiment, it shows the results from the original PI and Fuzzy PI controllers which were used to control the Maglev system. We clearly see that the Fuzzy PI controller had quicker response and better than the original PI. Besides, the second experiment shows us that the original PI had the instability when the system changed the gap value; on the other hand, the Fuzzy PI controller run smoothly and responded well as usual.

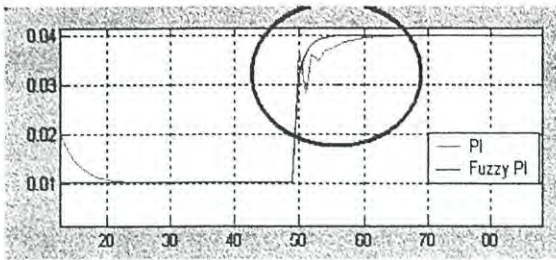


Figure 15. The 0.01m Dynamic setpoint changed to 0.04m.

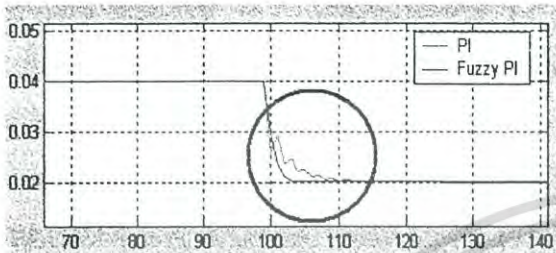


Figure 16. The 0.04m Dynamic setpoint changed to 0.02m.

Therefore, the Fuzzy PI controller works better and is suitable to use in this system.

#### REFERENCES

- [1] Kent Davey, "New Electromagnetic Lift Control Method for Magnetic Levitation Systems and Magnetic Bearings," *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, vol. 40, No. 3, May 2004.
- [2] Guanrong Chen, Hao Ying, "Stability analysis of nonlinear fuzzy PI control systems," *Industrial Fuzzy Control and Intelligent Systems, 1993., IFIS '93., Third International Conference*, pp. 128 - 133, 1-3 December. 1993
- [3] A.R. Eastham, W.F. Hayes "Maglev systems development status," *IEEE AES Magazine*, January 1988.
- [4] Morris Driels, "Linear control systems Engineering", International Editions, 1995, pp 415-424.
- [5] A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley Jr., "Electric Machinery," Fifth Editions, 1990, pp 95-132.
- [6] Jimmie J. Cathey, "Electric Machines: Analysis And Design Applying Matlab," International Editions, 2001, pp. 49-102.
- [7] Heidar A. Malki, Huaidong Li, Guanrong Chen, "New Design and Stability Analysis of Fuzzy Proportional-Derivative Control Systems," *IEEE TRANSACTION ON FUZZY SYSTEMS*, Vol.2, No.4, November 1994, pp. 245-254.
- [8] Heidar A. Malki, Dave Misir, Denny Feigenspan, Guanrong Chen, "Fuzzy PID Control of a Flexible-Joint Robot Arm with Uncertainties from Time-Varying Loads," *IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY*, Vol. 5, No. 3, MAY 1997, pp. 371-377.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายมนตรี ชาติพจน์
วัน เดือน ปีเกิด	24 กุมภาพันธ์ 2523
ที่อยู่	48 ถ.รัฐราษฎร์รังสรรค์ อำเภอตะพานหิน จังหวัดพิจิตร
ประวัติการศึกษา	2541 ประกาศนียบัตรวิชาชีพ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตตาก 2543 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตตาก 2545 อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประสบการณ์การทำงานและงานวิจัย	
ปัจจุบัน	ตำแหน่งผู้ช่วยนักวิจัย ฝ่ายวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และระบบควบคุมศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
พ.ศ.2544	รางวัลอันดับที่3 การแข่งขัน Robocup Thailand Championship 2002.
พ.ศ.2545	รางวัลอันดับที่2 การแข่งขัน The Second International Robot Contest. ที่ National University of Laos August 01, 2003.
พ.ศ.2546	รางวัลอันดับที่3และเทคนิคยอดเยี่ยม การแข่งขัน Robocup Thailand Championship 2003.
พ.ศ.2547	รางวัลอันดับที่2 การแข่งขัน Robocup Thailand Championship 2004.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้