

การปรับปรุงตัวเองของตัวควบคุมพีไอดีโดยใช้ข่ายงานระบบประสาท



นายวรณัยพันธุ์ สุขสมมโน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-334-969-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# AUTO-TUNING OF PID CONTROLLERS USING NEURAL NETWORK

Mr. Warunpun Suksommano

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 1999

ISBN 974-334-969-3

วรรณย์พันธุ์ สุขสมมโน : การปรับจูนตัวเองของตัวควบคุมพีไอดีโดยอาศัยข่ายงานระบบประสาท.  
(Auto-Tuning of PID Controllers Using Neural Network) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. วัชรพงษ์ ใจวิฑูร  
กิจ, 137 หน้า. ISBN 974-334-969-3.

งานวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้ข่ายงานระบบประสาทในการปรับปรุงวิธีการ  
ปรับจูนตัวควบคุม PID โดยศึกษากับกระบวนการเชิงเส้นแบบต่างๆ และทดลองกับกระบวนการแลกเปลี่ยน  
เปลี่ยนความร้อนด้วยคอมพิวเตอร์และการควบคุมในเวลาจริง โดยนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับ  
ตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีแบบเดิมที่อาศัยเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์และสูตรการปรับจูน Ziegler-  
Nichols แบบปรับปรุง

ในการทดลองกับแบบจำลองคอมพิวเตอร์ของกระบวนการเชิงเส้นแบบต่างๆ พบว่าตัวควบคุม  
PID ที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีที่เสนอ ให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีเดิม ทั้งใน  
สภาวะปกติ และสภาวะที่มีความไม่แน่นอนของกระบวนการเกิดขึ้น โดยพิจารณาจากช่วงเวลาขาขึ้นสั้น  
กว่า และค่าพุ่งเกินที่น้อยกว่า

ในการทดลองควบคุมกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยคอมพิวเตอร์และการควบคุมในเวลา  
จริง พบว่าผลการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีทั้งสองใกล้เคียงกัน แต่ในสภาวะที่มีการ  
เปลี่ยนจุดทำงานของกระบวนการ พบว่าตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีที่เสนอ ให้ผลการควบคุมที่ดี  
กว่า มีช่วงเวลาขาขึ้นสั้นกว่า และลักษณะของผลตอบสนองที่ได้ใกล้เคียงกับผลการควบคุมที่สภาวะปกติ  
อีกทั้งตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนได้มีความสามารถในการกำจัดผลของสัญญาณรบกวนได้ดี

ภาควิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า  
ปีการศึกษา ..... 2542

รายชื่อผู้จัดทำ ..... วัชรพงษ์ ใจวิฑูร  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... วัชรพงษ์ ใจวิฑูร  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การปรับปรุงตัวเองของตัวควบคุมพีไอดีโดยใช้ข่ายงานระบบประสาท

โดย

นาย วรณัณฑ์ สุขสมมโน


ภาควิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

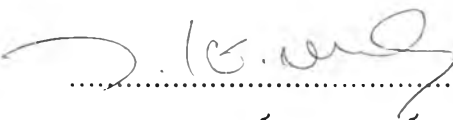
อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัชรพงษ์ โขวิฑูรกิจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. วราภรณ์ เชาว์วิศิษฐ)

วัชรพงษ์ โขวิฑูรกิจ  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วัชรพงษ์ โขวิฑูรกิจ)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. สุชิน อรุณสวัสดิ์วงศ์)

# # 3971597721 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: PID / NEURAL NETWORK / AUTO-TUNING / RELAY-FEEDBACK

WARUNPUN SUKSOMMANO : AUTO-TUNING OF PID CONTROLLER USING NEURAL NETWORK. THESIS ADVISOR : ASIST. PROF. WATCHARAPONG KHOVIDHUNGJ, Ph.D., 137 pp. ISBN 974-334-969-3.

This thesis deals with the application of neural networks to the auto-tuning of PID controllers. Simulations were performed on various linear plants. Real-time control was also implemented on a heat exchanger process. The experimental results were then compared to the PID tuning method using a relay feedback and the RZN formula.

Computer simulation results on linear system show that the proposed method gives better responses, in terms of shorter rise time and smaller overshoot, in the nominal case and when there are uncertainties in the plant parameters.

Hardware experimental results on the heat exchanger process show that the proposed method and the RZN give comparable performance. But when the set point changes, the proposed method gives good responses that do not differ much from the nominal case. The disturbance rejection ability is also satisfactory.

ภาควิชา .....  
สาขาวิชา .....  
ปีการศึกษา ..... 2542

ลายมือชื่อนิติต .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยอาจารย์ทุกท่านในสาขาระบบควบคุมที่ได้  
ประสิทธิ์ประสาทความรู้พื้นฐานในวิชาทางระบบควบคุม อันเป็นพื้นฐานในการศึกษาและทำงาน  
วิทยานิพนธ์นี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วัชรพงษ์ โขวิฑูรกิจ อาจารย์ที่ปรึกษา  
ซึ่งได้สละเวลาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ อันเป็นประโยชน์ในการวิจัย ผู้วิจัยจึงใคร่ขอกราบ  
ขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

อนึ่งเบื้องหลังที่สำคัญที่ทำให้งานวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ คือ บิดา มารดา และญาติ  
พี่น้อง ที่คอยให้กำลังใจ ตลอดจนผองเพื่อน พี่ น้อง ในสาขาระบบควบคุมที่ร่วมทุกข์สุข ช่วยคิดแก้  
ปัญหา และเป็นแรงใจในการทำวิทยานิพนธ์นี้ และสุดท้ายนี้ขอขอบคุณ โครงการศิษย์ก้นกุฏิที่  
สนับสนุนทางการเงินเป็นเวลา 2 ปี

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญภาพ	ฉ
<b>1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ประวัติความเป็นมาของตัวควบคุม PID แบบปรับจูนตัวเอง .....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิทยานิพนธ์.....	4
1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงาน.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	5
1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	5
<b>2 การปรับจูนตัวเองของตัวควบคุม PID โดยอาศัยเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์</b>	<b>6</b>
2.1 สูตรการปรับจูนตัวควบคุม PID แบบต่างๆ .....	6
2.1.1 สูตรการปรับจูน Ziegler-Nichols.....	6
2.1.2 สูตรการปรับจูน Ziegler-Nichols แบบปรับปรุง.....	7
2.2 การวิเคราะห์การปรับจูนตัวเองของตัวควบคุม PID โดยใช้เทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์ .....	8
2.3 การปรับจูนตัวเองของตัวควบคุม PID โดยอาศัยเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์.....	11
2.4 สรุปผล .....	20
<b>3 ตัวควบคุมทำนายแบบจำลองโดยอาศัยข่ายงานระบบประสาท</b>	<b>21</b>
3.1 ตัวควบคุมทำนายแบบจำลอง .....	23
3.2 ข่ายงานระบบประสาท.....	25
3.3 โครงสร้างของตัวทำนายด้วยข่ายงานระบบประสาท .....	26
3.3.1 ตัวทำนายแบบเวียนเกิด (recursive predictor).....	27

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.2	ตัวทำนายแบบ ไม่เวียนเกิด (non-recursive predictor).....	27
<b>4</b>	<b>การปรับจูนตัวเองของตัวควบคุม PID โดยใช้ข่ายงานระบบประสาท</b>	<b>29</b>
4.1	โครงสร้างการปรับจูนตัวควบคุม PID ทำนายแบบจำลองโดยใช้ ข่ายงานระบบประสาท .....	29
4.2	ผลการจำลองระบบด้วยคอมพิวเตอร์กับกระบวนการเชิงเส้นแบบต่างๆ .....	34
4.2.1	กระบวนการเชิงเส้นที่มีฟังก์ชันถ่ายโอน $G(s) = \frac{e^{-s}}{(s+1)}$ .....	37
4.2.2	กระบวนการเชิงเส้นที่มีฟังก์ชันถ่ายโอน $G(s) = \frac{e^{-2s}}{(s+1)}$ .....	50
4.2.3	กระบวนการเชิงเส้นที่มีฟังก์ชันถ่ายโอน $G(s) = \frac{e^{-3s}}{(s+1)}$ .....	61
4.2.4	กระบวนการเชิงเส้นที่มีฟังก์ชันถ่ายโอน $G(s) = \frac{-1.4s+1}{(s+1)^3}$ .....	72
4.2.5	กระบวนการเชิงเส้นที่มีฟังก์ชันถ่ายโอน $G(s) = \frac{1}{(s+1)^5}$ .....	83
4.3	สรุปผลการทดลอง .....	99
<b>5</b>	<b>ผลการจำลองและการควบคุมในเวลาจริงกับกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน</b>	<b>100</b>
5.1	ลักษณะของกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน .....	100
5.2	ผลการจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์กับกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน.....	104
5.3	การควบคุมกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนในเวลาจริง .....	115
5.3.1	การปรับจูนค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุม PID โดยอาศัยเทคนิคการป้อนกลับ ด้วยรีเลย์ .....	115
5.3.2	การกำหนดโครงสร้างของข่ายงานระบบประสาท .....	117
5.3.3	การควบคุมกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนในเวลาจริง.....	120
5.4	สรุปผลการทดลอง .....	129
<b>6</b>	<b>สรุปผลและข้อเสนอแนะ</b>	<b>130</b>
	รายการอ้างอิง	132
	ประวัติผู้เขียน	137



## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ผลการปรับจูนตัวเองของตัวควบคุม PID โดยอาศัยเทคนิคการป้อนกลับ ด้วยรีเลย์และสูตรการปรับจูน Ziegler-Nichols แบบปรับปรุง.....	17
ตารางที่ 2.2 ผลการปรับจูนตัวควบคุม PID โดยสูตรการปรับจูน Ziegler-Nichols แบบ ปรับปรุง เมื่อทราบข้อมูลอัตราขยายวิกฤตและคาบวิกฤตที่ถูกต้องของ กระบวนการ .....	17
ตารางที่ 2.3 ความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่จุดวิกฤตจากการใช้เทคนิคการป้อนกลับ ด้วยรีเลย์.....	18
ตารางที่ 4.1 การกำหนดค่าเริ่มต้นของ $h$ , $N_1$ และ $N_p$ สำหรับกระบวนการต่างๆ .....	35
ตารางที่ 4.2 ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของผลตอบสนองที่ทำนายได้จากข่ายงานระบบ ประสาทที่ชั้นต่างๆสำหรับกระบวนการแบบที่ 1 .....	39
ตารางที่ 4.3 การศึกษาผลของพารามิเตอร์ในฟังก์ชันจุดประสงค์ต่อผลการควบคุมและ สรุปค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนได้สำหรับกระบวนการที่ 1 .....	40
ตารางที่ 4.4 ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของผลตอบสนองที่ทำนายได้จากข่ายงานระบบ ประสาทที่ชั้นต่างๆสำหรับกระบวนการแบบที่ 2 .....	52
ตารางที่ 4.5 การศึกษาผลของพารามิเตอร์ในฟังก์ชันจุดประสงค์ต่อผลการควบคุมและ สรุปค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนได้สำหรับกระบวนการที่ 2 .....	53
ตารางที่ 4.6 ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของผลตอบสนองที่ทำนายได้จากข่ายงานระบบ ประสาทที่ชั้นต่างๆสำหรับกระบวนการแบบที่ 3 .....	63
ตารางที่ 4.7 การศึกษาผลของพารามิเตอร์ในฟังก์ชันจุดประสงค์ต่อผลการควบคุมและ สรุปค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนได้สำหรับกระบวนการที่ 3 .....	64
ตารางที่ 4.8 ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของผลตอบสนองที่ทำนายได้จากข่ายงานระบบ ประสาทที่ชั้นต่างๆของกระบวนการที่ 4 .....	74
ตารางที่ 4.9 การศึกษาผลของพารามิเตอร์ในฟังก์ชันจุดประสงค์ต่อผลการควบคุมและ สรุปค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนได้สำหรับกระบวนการที่ 4 .....	75
ตารางที่ 4.10 ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของผลตอบสนองที่ทำนายได้จากข่ายงานระบบ ประสาทที่ชั้นต่างๆของกระบวนการที่ 5 .....	85

## สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.11 การศึกษาผลของพารามิเตอร์ในฟังก์ชันจุดประสงค์ต่อผลการควบคุมและ สรูปค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนได้สำหรับกระบวนการที่ 5 .....	86
ตารางที่ 4.12 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนได้สำหรับกระบวนการที่ 1-3 และ $\frac{1}{s+1}$ .....	96
ตารางที่ 5.1 รายละเอียดเบื้องต้นของกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน .....	101
ตารางที่ 5.2 พารามิเตอร์ของแบบจำลอง เมื่อกำหนดค่าเวลาการชักตัวอย่าง (sampling time) เท่ากับ 0.1 วินาที .....	102
ตารางที่ 5.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยสูตรการปรับจูน Ziegler-Nichols แบบปรับปรุง โดยอาศัยข้อมูลจุดวิกฤตที่ได้จากเทคนิคการ ป้อนกลับด้วยรีเลย์ .....	103
ตารางที่ 5.4 ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของผลตอบสนองที่ทำนายได้จากข่ายงานระบบ ประสาทที่ขึ้นต่างๆสำหรับแบบจำลองของกระบวนการแลกเปลี่ยนความ ร้อน .....	106
ตารางที่ 5.5 การศึกษาผลของพารามิเตอร์ในฟังก์ชันจุดประสงค์ต่อผลการควบคุมและ สรูปค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนได้ .....	107
ตารางที่ 5.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนโดยอาศัยเทคนิคการป้อน กลับด้วย รีเลย์และสูตรการปรับจูน Ziegler-Nichols แบบปรับปรุง สำหรับ การควบคุมกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนในเวลาจริง .....	116
ตารางที่ 5.7 ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของผลตอบสนองที่ทำนายได้จากข่ายงานระบบ ประสาทที่ขึ้นต่างๆสำหรับกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน .....	119

## สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	ผลตอบสนองของระบบวงเปิดเมื่อมีสัญญาณเข้าเป็นฟังก์ชันขั้นบันไดหนึ่งหน่วย.....	7
รูปที่ 2.2	แสดงการปรับจูนตัวเองของตัวควบคุม PID โดยอาศัยเทคนิคการป้อนกลับ ด้วยรีเลย์.....	8
รูปที่ 2.3	แสดงการหาจุดวิกฤตโดยประมาณรีเลย์ด้วยฟังก์ชันพหุนาม .....	9
รูปที่ 2.4	ลักษณะของรีเลย์ที่มีฮิสเตอร์ริซิส .....	10
รูปที่ 2.5	ลักษณะการแกว่งของผลตอบสนองที่ไม่สมมาตร.....	13
รูปที่ 2.6	ผลตอบสนองที่มีการแกว่งระหว่างการปรับจูนของกระบวนการที่ 1 .....	14
รูปที่ 2.7	ผลตอบสนองที่มีการแกว่งระหว่างการปรับจูนของกระบวนการที่ 2.....	14
รูปที่ 2.8	ผลตอบสนองที่มีการแกว่งระหว่างการปรับจูนของกระบวนการที่ 3 .....	15
รูปที่ 2.9	ผลตอบสนองที่มีการแกว่งระหว่างการปรับจูนของกระบวนการที่ 4.....	15
รูปที่ 2.10	ผลตอบสนองที่มีการแกว่งระหว่างการปรับจูนของกระบวนการที่ 5.....	16
รูปที่ 2.11	ผลการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนโดยอาศัยข้อมูลจุดวิกฤตที่แท้จริง และ ข้อมูลจุดวิกฤตที่ได้จากเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์.....	19
รูปที่ 2.12	ผลของค่าประวิงเวลาต่อผลการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธี การปรับจูนตัวเอง โดยอาศัยการป้อนกลับด้วยรีเลย์ .....	20
รูปที่ 3.1	โครงสร้างตัวควบคุมทำนายแบบจำลอง.....	23
รูปที่ 3.2	แนวคิดของตัวควบคุมทำนายแบบจำลอง.....	24
รูปที่ 3.3	ข่ายงานระบบประสาทแบบหลายชั้นซึ่งมีสองชั้นซ่อนภายใน .....	25
รูปที่ 3.4	แผนผังภาพของข่ายงานระบบประสาทแบบหลายชั้นซึ่งมีสองชั้นซ่อนภายใน.....	25
รูปที่ 4.1	โครงสร้างของตัวควบคุม PID ทำนายแบบจำลอง.....	30
รูปที่ 4.2	วิธีในการอ็อปติไมซ์ .....	33
รูปที่ 4.3	ผลการฝึกข่ายงานระบบประสาทที่มีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายในแตกต่างกัน สำหรับกระบวนการแบบที่ 1 .....	37
รูปที่ 4.4	ผลการทำนายผลตอบสนองแบบขั้นด้วยข่ายงานระบบประสาทที่มีจำนวนปมใน ชั้นซ่อนภายในแตกต่างกันสำหรับกระบวนการแบบที่ 1 .....	38
รูปที่ 4.5	ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 1 ของกระบวนการ การที่ 1 .....	41

## สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.6 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 2 ของกระบวนการ การที่ 1 .....	41
รูปที่ 4.7 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 3 ของกระบวนการ การที่ 1 .....	41
รูปที่ 4.8 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 4 ของกระบวนการ การที่ 1 .....	42
รูปที่ 4.9 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 5 ของกระบวนการ การที่ 1 .....	42
รูปที่ 4.10 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 6 ของกระบวนการ การที่ 1 .....	42
รูปที่ 4.11 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 7 ของกระบวนการ การที่ 1 .....	43
รูปที่ 4.12 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 8 ของกระบวนการ การที่ 1 .....	43
รูปที่ 4.13 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 9 ของกระบวนการ การที่ 1 .....	43
รูปที่ 4.14 ผลตอบสนองระหว่างที่มีการปรับจูนตัวควบคุม PID จากการทดลองกรณีที่ 2 ของกระบวนการการที่ 1 ที่เวลา 0-600 วินาที .....	44
รูปที่ 4.15 ผลการเปลี่ยนแปลง $\Gamma_c$ ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการ การที่ 1 .....	45
รูปที่ 4.16 ผลการเปลี่ยนแปลง $\Gamma_u$ ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการ การที่ 1 .....	45
รูปที่ 4.17 ผลการเปลี่ยนแปลง $N_p$ ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการ การที่ 1 .....	45
รูปที่ 4.18 ผลการเปลี่ยนแปลง $N_u$ ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการ การที่ 1 .....	46
รูปที่ 4.19 การควบคุมตามการเปลี่ยนค่าปรับตั้งแบบขั้นบันไดของกระบวนการการที่ 1 .....	47

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบลักษณะผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมจากการควบคุมด้วยตัวควบคุมที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีต่างๆของกระบวนการที่ 1 .....	48
รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบลักษณะผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมจากการควบคุมด้วยตัวควบคุมที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีต่างๆของกระบวนการที่ 1 เมื่อค่าประวิงเวลาเปลี่ยนจาก 1 เป็น 1.1 วินาที.....	49
รูปที่ 4.22 ผลการฝึกข่ายงานระบบประสาทที่มีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายในแตกต่างกันสำหรับกระบวนการแบบที่ 2.....	50
รูปที่ 4.23 ผลการทำนายผลตอบสนองแบบขั้นด้วยข่ายงานระบบประสาทที่มีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายในแตกต่างกันสำหรับกระบวนการแบบที่ 2.....	51
รูปที่ 4.24 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 1 ของกระบวนการที่ 2.....	54
รูปที่ 4.25 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 2 ของกระบวนการที่ 2.....	54
รูปที่ 4.26 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 3 ของกระบวนการที่ 2.....	54
รูปที่ 4.27 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 4 ของกระบวนการที่ 2.....	55
รูปที่ 4.28 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 5 ของกระบวนการที่ 2.....	55
รูปที่ 4.29 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 6 ของกระบวนการที่ 2.....	55
รูปที่ 4.30 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 7 ของกระบวนการที่ 2.....	56
รูปที่ 4.31 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 8 ของกระบวนการที่ 2.....	56
รูปที่ 4.32 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 9 ของกระบวนการที่ 2.....	56

## สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.33 ผลการเปลี่ยนแปลง $\Gamma_c$ ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการ ที่ 2 .....	57
รูปที่ 4.34 ผลการเปลี่ยนแปลง $\Gamma_u$ ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการ ที่ 2 .....	57
รูปที่ 4.35 ผลการเปลี่ยนแปลง $N_p$ ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการ ที่ 2 .....	57
รูปที่ 4.36 ผลการเปลี่ยนแปลง $N_u$ ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการ ที่ 2 .....	58
รูปที่ 4.37 เปรียบเทียบลักษณะผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมจากการควบคุมด้วยตัว ควบคุมที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีต่างๆของกระบวนการที่ 2 .....	58
รูปที่ 4.38 ผลการควบคุมและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID เมื่อกระบวนการที่ 2 เมื่อ ค่าประวิงเวลาเปลี่ยนจาก 2 เป็น 2.2 วินาที .....	59
รูปที่ 4.39 เปรียบเทียบลักษณะผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมจากการควบคุมด้วยตัว ควบคุมที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีต่างๆของกระบวนการที่ 2 เมื่อค่าประวิงเวลา เปลี่ยนจาก 2 เป็น 2.2 วินาที.....	60
รูปที่ 4.40 ผลการฝึกข่ายงานระบบประสาทที่มีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายในแตกต่างกัน สำหรับกระบวนการแบบที่ 3.....	61
รูปที่ 4.41 ผลการทำนายผลตอบสนองแบบขั้นด้วยข่ายงานระบบประสาทที่มีจำนวนปม ในชั้นซ่อนภายในแตกต่างกันสำหรับกระบวนการแบบที่ 3.....	62
รูปที่ 4.42 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 1 ของกระบวนการ ที่ 3 .....	65
รูปที่ 4.43 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 2 ของกระบวนการ ที่ 3 .....	65
รูปที่ 4.44 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 3 ของกระบวนการ ที่ 3 .....	65
รูปที่ 4.45 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 4 ของกระบวนการ ที่ 3 .....	66

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.46 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 5 ของกระบวนการที่ 3 .....	66
รูปที่ 4.47 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 6 ของกระบวนการที่ 3 .....	66
รูปที่ 4.48 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 7 ของกระบวนการที่ 3 .....	67
รูปที่ 4.49 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 8 ของกระบวนการที่ 3 .....	67
รูปที่ 4.50 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 9 ของกระบวนการที่ 3 .....	67
รูปที่ 4.51 ผลการเปลี่ยนแปลง $\Gamma_c$ ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการที่ 3 .....	68
รูปที่ 4.52 ผลการเปลี่ยนแปลง $\Gamma_u$ ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการที่ 3 .....	68
รูปที่ 4.53 ผลการเปลี่ยนแปลง $N_p$ ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการที่ 3 .....	68
รูปที่ 4.54 ผลการเปลี่ยนแปลง $N_u$ ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการที่ 3 .....	69
รูปที่ 4.55 เปรียบเทียบลักษณะผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมจากการควบคุมด้วยตัวควบคุมที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีต่างๆของกระบวนการที่ 3 .....	69
รูปที่ 4.56 ผลการควบคุมและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID เมื่อกระบวนการที่ 3 เมื่อค่าประวิงเวลาเปลี่ยนจาก 3 เป็น 3.3 วินาที .....	70
รูปที่ 4.57 เปรียบเทียบลักษณะผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมจากการควบคุมด้วยตัวควบคุมที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีต่างๆของกระบวนการที่ 3 เมื่อค่าประวิงเวลาเปลี่ยนจาก 3 เป็น 3.3 วินาที .....	71
รูปที่ 4.58 ผลการฝึกช่วยงานระบบประสาทที่มีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายในแตกต่างกันสำหรับกระบวนการแบบที่ 4 .....	72

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.59 ผลการทำนายผลตอบสนองแบบขั้นด้วยข่ายงานระบบประสาทที่มีจำนวนปม ในชั้นซ่อนภายในแตกต่างกันสำหรับกระบวนการแบบที่ 4.....	73
รูปที่ 4.60 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 1 ของกระบวนการ การที่ 4.....	76
รูปที่ 4.61 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 2 ของกระบวนการ การที่ 4.....	76
รูปที่ 4.62 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 3 ของกระบวนการ การที่ 4.....	76
รูปที่ 4.63 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 4 ของกระบวนการ การที่ 4.....	77
รูปที่ 4.64 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 5 ของกระบวนการ การที่ 4.....	77
รูปที่ 4.65 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 6 ของกระบวนการ การที่ 4.....	77
รูปที่ 4.66 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 7 ของกระบวนการ การที่ 4.....	78
รูปที่ 4.67 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 8 ของกระบวนการ การที่ 4.....	78
รูปที่ 4.68 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 9 ของกระบวนการ การที่ 4.....	78
รูปที่ 4.69 ผลการเปลี่ยนแปลง $\Gamma_c$ ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการ ที่ 4.....	79
รูปที่ 4.70 ผลการเปลี่ยนแปลง $\Gamma_u$ ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการ ที่ 4.....	79
รูปที่ 4.71 ผลการเปลี่ยนแปลง $N_p$ ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการ การที่ 4.....	79



## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.72 ผลการเปลี่ยนแปลง $N_u$ ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการที่ 4.....	80
รูปที่ 4.73 เปรียบเทียบลักษณะผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมจากการควบคุมด้วยตัวควบคุมที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีต่างๆของกระบวนการที่ 4.....	80
รูปที่ 4.74 ผลการควบคุมและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID เมื่อกระบวนการที่ 4 เมื่ออัตราขยายที่สถานะอยู่ตัวเปลี่ยนจาก 1.0 เป็น 0.9.....	81
รูปที่ 4.75 เปรียบเทียบลักษณะผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมจากการควบคุมด้วยตัวควบคุมที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีต่างๆของกระบวนการที่ 4 เมื่ออัตราขยายที่สถานะอยู่ตัวเปลี่ยนจาก 1 เป็น 0.9.....	82
รูปที่ 4.76 เปรียบเทียบลักษณะผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมจากการควบคุมด้วยตัวควบคุมที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีต่างๆของกระบวนการที่ 4 เมื่ออัตราขยายที่สถานะอยู่ตัวเปลี่ยนจาก 1.0 เป็น 1.1.....	82
รูปที่ 4.77 ผลการฝึกข่ายงานระบบประสาทที่มีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายในแตกต่างกันสำหรับกระบวนการแบบที่ 5.....	83
รูปที่ 4.78 ผลการทำนายผลตอบสนองแบบขั้นด้วยข่ายงานระบบประสาทที่มีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายในแตกต่างกันสำหรับกระบวนการแบบที่ 5.....	84
รูปที่ 4.79 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 1 ของกระบวนการที่ 5.....	87
รูปที่ 4.80 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 2 ของกระบวนการที่ 5.....	87
รูปที่ 4.81 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 3 ของกระบวนการที่ 5.....	87
รูปที่ 4.82 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 4 ของกระบวนการที่ 5.....	88
รูปที่ 4.83 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 5 ของกระบวนการที่ 5.....	88

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.84 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 6 ของกระบวนการ การที่ 5 .....	88
รูปที่ 4.85 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 7 ของกระบวนการ การที่ 5 .....	89
รูปที่ 4.86 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 8 ของกระบวนการ การที่ 5 .....	89
รูปที่ 4.87 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 9 ของกระบวนการ การที่ 5 .....	89
รูปที่ 4.88 ผลการเปลี่ยนแปลง $\Gamma_c$ ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการ ที่ 5 .....	90
รูปที่ 4.89 ผลการเปลี่ยนแปลง $\Gamma_u$ ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการ ที่ 5 .....	90
รูปที่ 4.90 ผลการเปลี่ยนแปลง $N_p$ ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการ การที่ 5 .....	90
รูปที่ 4.91 ผลการเปลี่ยนแปลง $N_u$ ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการ การที่ 5 .....	91
รูปที่ 4.92 ผลการควบคุมและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ของกระบวนการที่ 5 .....	91
รูปที่ 4.93 เปรียบเทียบลักษณะผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมจากการควบคุมด้วยตัว ควบคุมที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีต่างๆของกระบวนการที่ 5 .....	92
รูปที่ 4.94 เปรียบเทียบลักษณะผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมจากการควบคุมด้วยตัว ควบคุมที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีต่างๆของกระบวนการที่ 5 เมื่ออัตราขยายที่ สภาวะอยู่ตัวเปลี่ยนจาก 1 เป็น 0.9.....	93
รูปที่ 4.95 ผลการควบคุมและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID เมื่อกระบวนการที่ 5 เมื่อ อัตราขยายที่สภาวะอยู่ตัวเปลี่ยนจาก 1.0 เป็น 1.1.....	93
รูปที่ 4.96 เปรียบเทียบลักษณะผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมจากการควบคุมด้วยตัว ควบคุมที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีต่างๆของกระบวนการที่ 5 เมื่ออัตราขยายที่ สภาวะอยู่ตัวเปลี่ยนจาก 1.0 เป็น 1.1.....	94

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.97 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 1 ของกระบวนการที่ไม่มีค่าประวิงเวลา .....	96
รูปที่ 4.98 เปรียบเทียบลักษณะผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมเมื่อกระบวนการมีการเปลี่ยนค่าประวิงเวลาเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีที่เสนอ .....	97
รูปที่ 4.99 เปรียบเทียบลักษณะผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมเมื่อกระบวนการมีการเปลี่ยนค่าประวิงเวลาเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์ .....	97
รูปที่ 5.1 กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน .....	100
รูปที่ 5.2 ผลตอบสนองที่มีการแกว่งระหว่างการปรับจูน เพื่อใช้หาข้อมูลที่จุดวิกฤตสำหรับแบบจำลองของกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน .....	102
รูปที่ 5.3 ผลการฝึกข่ายงานระบบประสาทที่มีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายในแตกต่างกันสำหรับแบบจำลองของกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน .....	104
รูปที่ 5.4 ผลการทำนายผลตอบสนองแบบขั้นด้วยข่ายงานระบบประสาทที่มีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายในแตกต่างกันสำหรับแบบจำลองของกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน .....	105
รูปที่ 5.5 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 1 .....	108
รูปที่ 5.6 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 2 .....	108
รูปที่ 5.7 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 3 .....	108
รูปที่ 5.8 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 4 .....	109
รูปที่ 5.9 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 5 .....	109
รูปที่ 5.10 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 6 .....	109
รูปที่ 5.11 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 7 .....	110
รูปที่ 5.12 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 8 .....	110
รูปที่ 5.13 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 9 .....	110
รูปที่ 5.14 ผลการเปลี่ยนแปลง $\Gamma_c$ ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุม .....	111
รูปที่ 5.15 ผลการเปลี่ยนแปลง $\Gamma_u$ ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุม .....	111
รูปที่ 5.16 ผลการเปลี่ยนแปลง $N_p$ ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุม .....	111

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.17 ผลการเปลี่ยนแปลง $N_v$ ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุม .....	112
รูปที่ 5.18 เปรียบเทียบลักษณะผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมจากการควบคุมด้วยตัว ควบคุมที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีต่างๆ .....	112
รูปที่ 5.19 เปรียบเทียบลักษณะผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมจากการควบคุมด้วยตัว ควบคุมที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีต่างๆ .....	113
รูปที่ 5.20 ผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมระหว่างที่มีการป้อนกลับด้วยรีเลย์ของ กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน .....	115
รูปที่ 5.21 ผลการควบคุมกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูน ตัวเองโดยอาศัยเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์.....	116
รูปที่ 5.22 ผลการฝึกใช้งานระบบประสาทที่มีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายในแตกต่างกัน สำหรับกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน .....	117
รูปที่ 5.23 ผลการทำนายผลตอบสนองแบบขั้นด้วยข่ายงานระบบประสาทที่มีจำนวนปม ในชั้นซ่อนภายในแตกต่างกันสำหรับกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน .....	118
รูปที่ 5.24 ผลการควบคุมและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนได้ (4-6 โวลต์).....	121
รูปที่ 5.25 เปรียบเทียบผลตอบสนองจากการควบคุมด้วยตัวควบคุมที่ปรับจูนได้ด้วยวิธี ต่างๆ .....	122
รูปที่ 5.26 ผลการควบคุมและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนได้ (3.5-6.5 โวลต์).....	123
รูปที่ 5.27 เปรียบเทียบผลตอบสนองจากการควบคุมด้วยตัวควบคุมที่ปรับจูนได้ด้วยวิธี ต่างๆ .....	124
รูปที่ 5.28 ผลการควบคุมและสัญญาณควบคุมที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการแลกเปลี่ยน ความร้อนที่จุดทำงานต่างๆ.....	125
รูปที่ 5.29 เปรียบเทียบผลจากการควบคุมด้วยตัวควบคุมที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีต่างๆที่จุด ทำงานต่างๆ .....	126
รูปที่ 5.30 ผลการควบคุมกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อมีสัญญาณรบกวน .....	128
รูปที่ 5.31 เปรียบเทียบผลตอบสนองด้วยตัวควบคุมที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีต่างๆเมื่อมี สัญญาณรบกวน.....	128