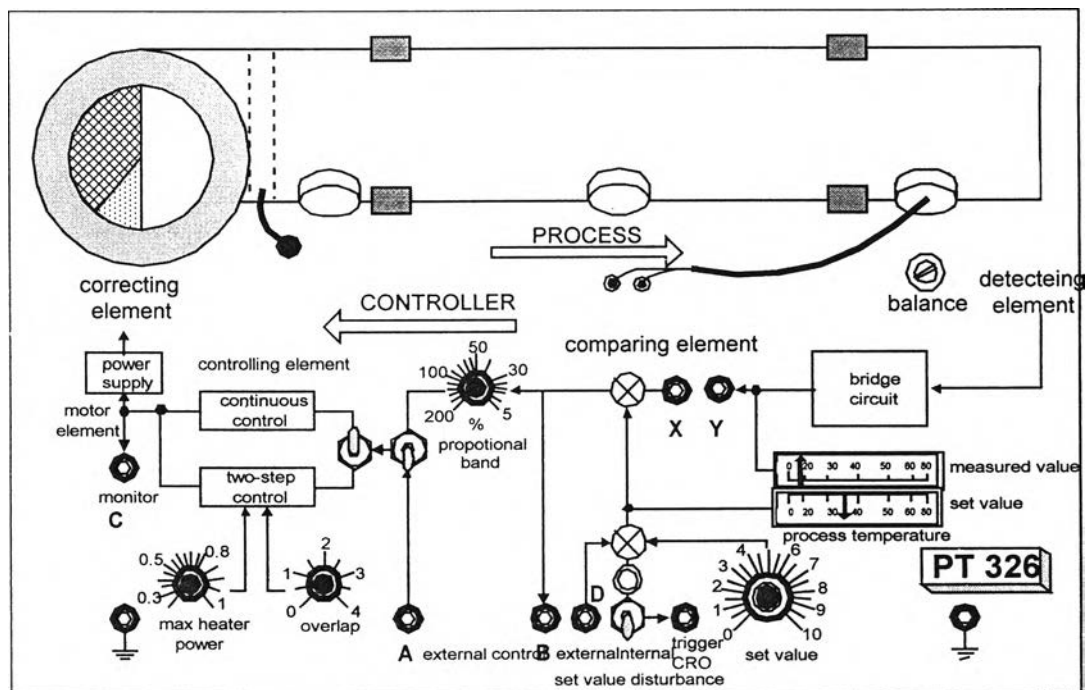


## บทที่ 5 Equation Section 5

### ผลการจำลองและการควบคุมในเวลาจริงกับกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน

ในบทนี้จะกล่าวถึงการนำโครงสร้างการปรับจูนตัวควบคุม PID ที่เสนอมาทดลองกับแบบจำลองของกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการทดลองควบคุมกับกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนในเวลาจริงต่อไป

#### 5.1 ลักษณะของกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 5.1 กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน

กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนดังแสดงในรูปที่ 5.1 ( ดูได้ใน [1] ) เป็นชุดทดลองที่ใช้ในการทดสอบระบบควบคุม โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะรักษาอุณหภูมิขาออกให้มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ตั้งไว้โดยอาศัยการทำงานของพัดลมซึ่งทำหน้าที่ดูดอากาศให้เข้าไปหมุนเวียนในท่ออากาศ สามารถปรับตั้งปริมาณอากาศที่เข้าไปในท่ออากาศโดยผ่านทาง การปรับปุ่มทร็อตทอล (throttle control) กระแสอากาศที่ไหลผ่านท่ออากาศจะไหลผ่านเครื่องทำความร้อนไฟฟ้าซึ่งอยู่ที่ปลายของท่ออากาศ โดยเครื่องทำความร้อนประกอบด้วยไทรสเตอร์เป็นตัวขับเร็ว ภายในท่ออากาศจะมีเทอร์มิสเตอร์เป็นตัววัดอุณหภูมิ

ตารางที่ 5.1 รายละเอียดเบื้องต้นของกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน

ลักษณะโดยทั่วไป	<p>พิสัยแรงดันสัญญาณเข้า</p> <p>พิสัยแรงดันสัญญาณออก</p> <p>โหลดด้านทานต่ำสุดบนช่วงออกใดๆ</p> <p>พิสัยของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน</p>	<p>0 ถึง 10 โวลต์</p> <p>0 ถึง 10 โวลต์</p> <p>5 กิโลโอห์ม</p> <p>0 ถึง 80 องศาเซลเซียส</p>
กระบวนการ	<p>อัตราการไหลของกระแสอากาศ</p> <p>พิสัยกำลังของเครื่องทำความร้อน</p> <p>พิสัยของอุณหภูมิของอากาศที่ควบคุม</p> <p>เวลาหน่วง (delay time)</p>	<p>1 ถึง 10 ฟุต/วินาที</p> <p>15 ถึง 80 วัตต์</p> <p>30 ถึง 60 องศาเซลเซียส</p> <p>0.30 วินาที</p>
ตัวควบคุม	<p>พิสัยการปรับค่าตั้ง</p> <p>พิสัยค่าอุณหภูมิตั้ง</p> <p>พิสัยค่าอุณหภูมิที่วัดได้</p>	<p>0 ถึง 10 โวลต์</p> <p>30 ถึง 60 องศาเซลเซียส</p> <p>30 ถึง 60 องศาเซลเซียส</p>

การเปลี่ยนแปลงของอัตรากระแสไหลอากาศภายในท่อหรือการปรับปุ่มทร็อตทอล (throttle control) จะมีผลต่อพลวัตของระบบ โดยอัตราการไหลอากาศต่ำ อากาศที่ผ่านเข้ามาในท่อจะมีปริมาณน้อยทำให้อัตราความร้อนถ่ายเทไปสู่อากาศมีปริมาณที่มากกว่าอัตราการไหลอากาศสูงๆ ซึ่งปริมาณอากาศในท่อจะมีมากกว่า ด้วยเหตุนี้ที่อัตราการไหลต่ำกว่าจะมีอัตราการขยายของวงเปิดมากกว่าอัตราการไหลอากาศสูง และในอัตราการไหลอากาศต่ำนั้นอุณหภูมิที่วัดได้ที่ปลายท่อจะราบเรียบกว่าที่วัดได้ในอัตราการไหลสูง ที่เป็นเช่นนี้เพราะที่อัตราการไหลสูงพัดลมที่ใช้ดูดอากาศจะต้องมีความเร็วรอบที่สูงทำให้พัดลมเกิดการสั่น ดังนั้นปริมาณอากาศที่ผ่านเข้ามาในท่อจึงไม่สม่ำเสมอ ทำให้การถ่ายเทความร้อนไม่สม่ำเสมอด้วย

การทดสอบจะทำโดยการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งแบบจำลอง  $G_p(s)$  เป็นระบบอันดับหนึ่งและค่าประวิงเวลาดังสมการต่อไปนี้

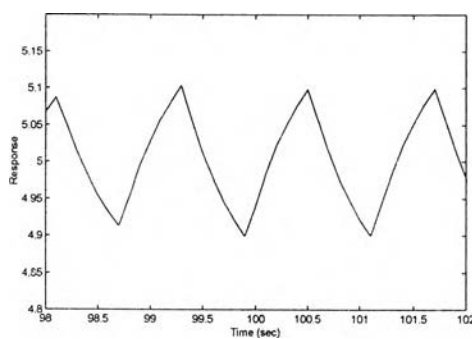
$$G_p(s) = K \frac{e^{-T_d}}{\tau s + 1} \quad (5.1)$$

และพารามิเตอร์ต่างๆ มีค่าดังแสดงในตารางที่ 5.2

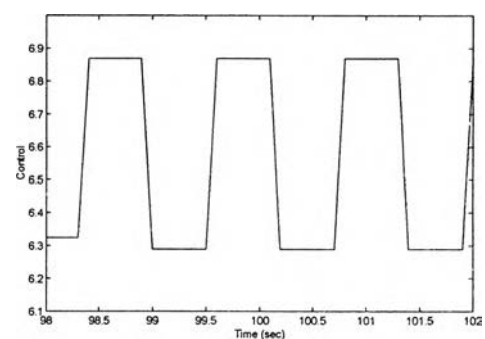
ตารางที่ 5.2 พารามิเตอร์ของแบบจำลอง เมื่อกำหนดค่าเวลาการซัดตัวอย่าง (sampling time) เท่ากับ 0.1 วินาที

พารามิเตอร์	ค่าที่ได้
อัตราขยาย ( $K$ )	0.76
ค่าคงตัวเวลา ( $\tau$ )	0.6
ค่าประวิงเวลา ( $T_d$ )	0.3

การปรับจูนตัวเองของตัวควบคุม PID โดยอาศัยเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์ประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 กำหนดขนาดการแกว่งของผลตอบสนองเท่ากับ 0.1 ขนาดเริ่มต้นของรีเลย์เท่ากับ 0.1 เนื่องจากในการทดลองไม่มีสัญญาณรบกวน จึงไม่ได้ใช้รีเลย์ที่มีฮิสเตอร์รีซิสได้ผลการทดลองดังนี้



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.2 ผลตอบสนองที่มีการแกว่งระหว่างการปรับจูน เพื่อใช้หาข้อมูลที่จุดวิกฤตสำหรับแบบจำลองของกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน

จากรูปข้างต้น รูป (ก) แสดงผลตอบสนองของกระบวนการระหว่างที่มีการใช้เทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์เพื่อใช้ในการหาข้อมูลที่จุดวิกฤต รูป (ข) แสดงสัญญาณควบคุมที่ออกจากรีเลย์ จากข้อมูลจุดวิกฤตของกระบวนการที่ได้จากเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์ ปรับจูนตัวควบคุม PID โดยใช้สูตรการปรับจูน Ziegler-Nichols แบบปรับปรุง ได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ดังนี้

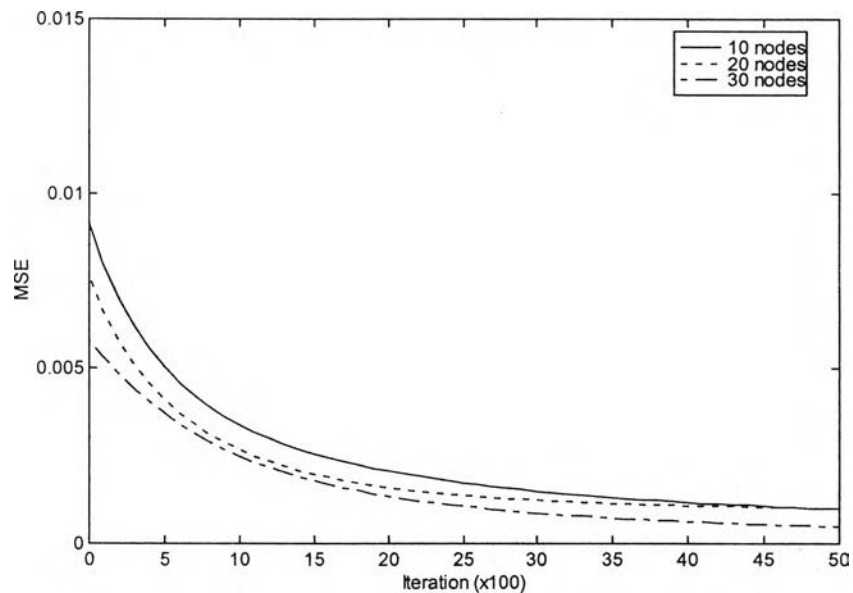
ตารางที่ 5.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยสูตรการปรับจูน Ziegler-Nichols แบบปรับปรุง โดยอาศัยข้อมูลจุดวิกฤตที่ได้จากเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์

$G(s)$	$\hat{k}_u$	$\hat{t}_u$	$\hat{k}_c$	$\hat{T}_i$	$\hat{T}_d$	$\hat{\beta}$
$G_p(s) = K \frac{e^{-T_d}}{\tau s + 1}$	3.71	1.20	2.23	0.60	0.15	0.68

## 5.2 ผลการจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์กับกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน

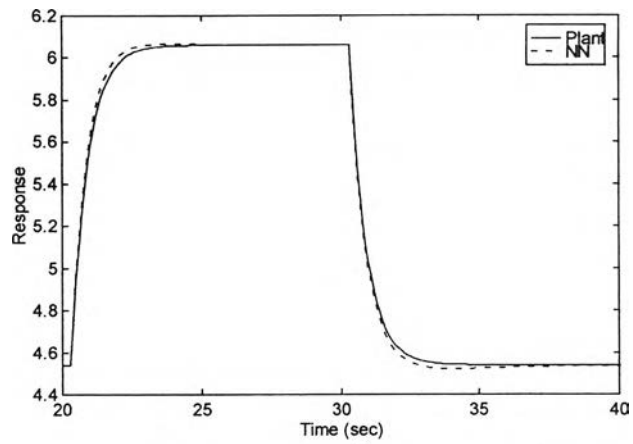
### ขั้นตอนการหาคุณลักษณะโดยใช้ข่ายงานระบบประสาท

ในการฝึกข่ายงานระบบประสาทเพื่อประมาณฟังก์ชันซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเข้าและข้อมูลออกของกระบวนการ กำหนดโครงสร้างของข่ายงานระบบประสาทที่ใช้เป็นแบบป้อนไปข้างหน้า โดยฟังก์ชันกระตุ้นที่ใช้เป็นฟังก์ชัน log-sigmoid มี 3 ชั้น ชั้นอินพุตมี 4 ปม ชั้นซ่อนภายในมี 3 แบบคือ 10, 20 และ 30 ปมตามลำดับ ชั้นเอาต์พุตมี 1 ปม ข้อมูลเข้าประกอบด้วยสัญญาณต่างๆดังนี้  $y(t-1), y(t-2), u(t-4), u(t-5)$  โดยกำหนดค่าเวลาการชักตัวอย่างเท่ากับ 0.1 วินาที ทำการฝึก 5000 รอบ พิจารณาค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (mean square error) ระหว่างการฝึกของข่ายงานระบบประสาทที่มีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายในแตกต่างกัน ดังนี้

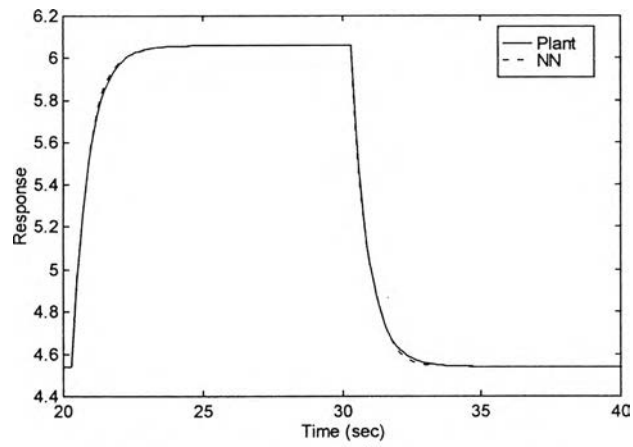


รูปที่ 5.3 ผลการฝึกข่ายงานระบบประสาทที่มีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายในแตกต่างกันสำหรับแบบจำลองของกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน

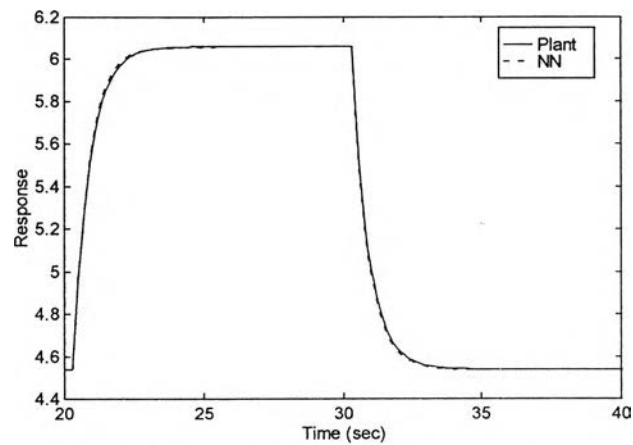
จากรูปข้างต้น พบว่าข่ายงานระบบประสาทที่มีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายในแบบต่างๆมีความสามารถในการหาคุณลักษณะของกระบวนการใกล้เคียงกัน ต่อไปจะพิจารณาประสิทธิภาพในการทำนายผลตอบสนองแบบขั้นของกระบวนการด้วยข่ายงานระบบประสาทที่ได้จากการฝึก ได้ผลดังนี้



(ก) แบบที่ 1 จำนวนปมในชั้นซ่อนภายใน 10 ปม



(ข) แบบที่ 2 จำนวนปมในชั้นซ่อนภายใน 20 ปม



(ค) แบบที่ 3 จำนวนปมในชั้นซ่อนภายใน 30 ปม

รูปที่ 5.4 ผลการทำนายผลตอบสนองแบบขั้นด้วยข่ายงานระบบประสาทที่มีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายในแตกต่างกันสำหรับแบบจำลองของกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน

จากผลการเปรียบเทียบข้างต้น พบว่าความสามารถในการทำนายผลตอบสนองของข่ายงานระบบประสาททั้ง 3 แบบให้ผลตอบสนองที่ทำนายใกล้เคียงกับผลตอบสนองจริงของกระบวนการ จึงเลือกข่ายงานระบบประสาทแบบที่ 1 เนื่องจากมีโครงสร้างเล็กที่สุด ใช้เวลาในการคำนวณน้อย และประสิทธิภาพในการทำนายผลตอบสนองใกล้เคียงกับข่ายงานระบบประสาทอีก 2 แบบที่มีขนาดใหญ่กว่า

### ความสามารถในการทำนายผลตอบสนองล่วงหน้าของกระบวนการ

พิจารณาความสามารถในการทำนายผลตอบสนองล่วงหน้าของข่ายงานระบบประสาทจากค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยระหว่างผลตอบสนองของกระบวนการเมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมกับผลตอบสนองที่ได้จากการทำนายด้วยข่ายงานระบบประสาท

ตารางที่ 5.4 ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของผลตอบสนองที่ทำนายได้จากข่ายงานระบบประสาทที่ชั้นต่างๆ สำหรับแบบจำลองของกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน

	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	ชั้นที่ 6	ชั้นที่ 7	ชั้นที่ 8
MSE( $\times 10^3$ )	2.5	3.6	4.2	5.0	5.6	6.8	7.0	7.4

พบว่าเมื่อจำนวนชั้นในการทำนายเพิ่มขึ้น ความสามารถในการทำนายผลตอบสนองจะลดลง

### ผลของพารามิเตอร์ต่างๆในฟังก์ชันจุดประสงค์ต่อผลตอบสนองภายใต้การควบคุม

จากผลการจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์ สามารถทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการปรับจูนตัวควบคุม PID และพิจารณาผลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

1. การถ่วงน้ำหนักการทำนาย หรือ  $\Gamma_e$
2. การถ่วงน้ำหนักสัญญาณควบคุม หรือ  $\Gamma_u$
3. เส้นขอบการทำนายสูงสุด หรือ  $N_p$
4. เส้นขอบควบคุม หรือ  $N_u$

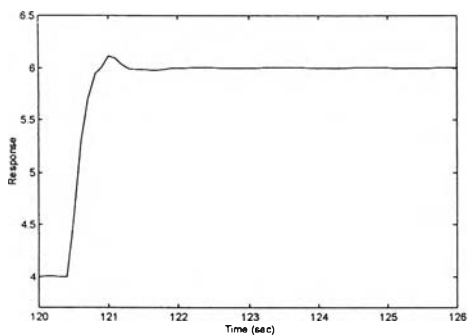
โดยกำหนดเส้นขอบการทำนายค่าสูงสุดเท่ากับค่าประวิงเวลาของกระบวนการ คือ  $N_1 = 1$  และกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวควบคุม PID ในทุกกรณีคือ  $K = 0.2, T_i = 0.05, T_d = 0.05$

**ตารางที่ 5.5** การศึกษาผลของพารามิเตอร์ในฟังก์ชันจุดประสงค์ต่อผลการควบคุมและสรุปค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนได้

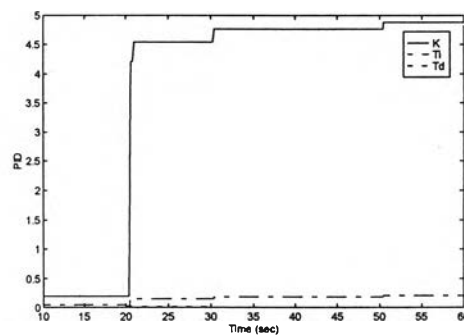
กรณีที่	$\Gamma_e$	$\Gamma_u$	$N_1$	$N_p$	$N_u$	$K$	$T_i$	$T_d$
1	1	0	4	8	1	4.8828	0.1605	0.0013
2	0.5	0	4	8	1	2.8221	0.1138	0.0134
3	1.5	0	4	8	1	5.6297	0.1940	0.0030
4	1	0.1	4	8	1	2.3578	0.1431	0.0288
5	1	0.5	4	8	1	1.1960	0.1520	0.0711
6	1	0	4	6	1	4.8591	0.1305	0.0022
7	1	0	4	10	1	5.0027	0.2441	0.0004
8	1	0	4	8	3	3.6828	0.1507	0.0001
9	1	0	4	8	5	3.7483	0.1040	0.0007

ในการทดลองแต่ละกรณี จะทำการปรับจูนตัวควบคุม PID จนกระทั่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID คงที่ และจะนำตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนได้ไปใช้ในการควบคุมกระบวนการต่อไป ในการแสดงผลการปรับจูนจะประกอบด้วยรูป (ก) จะเป็นผลการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีที่เสนอ สำหรับรูป (ข) แสดงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ระหว่างที่มีการปรับจูนจนกระทั่งได้ค่าคงที่



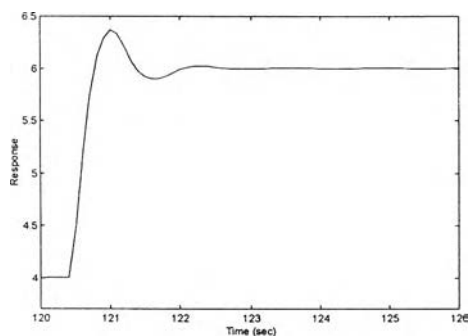


(ก)

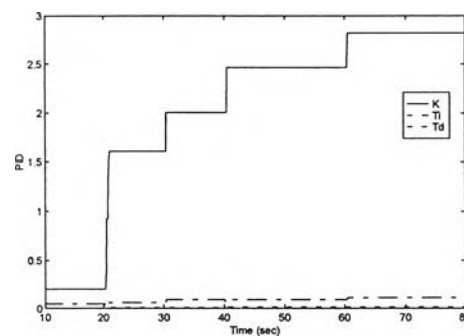


(ข)

รูปที่ 5.5 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 1

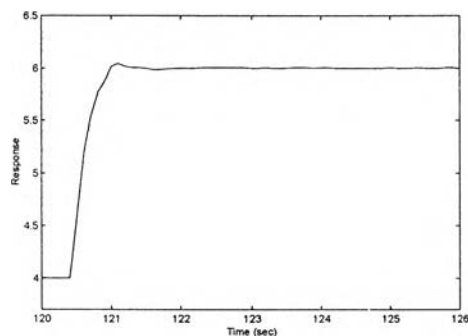


(ก)

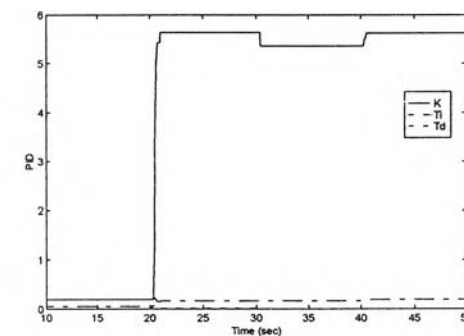


(ข)

รูปที่ 5.6 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 2

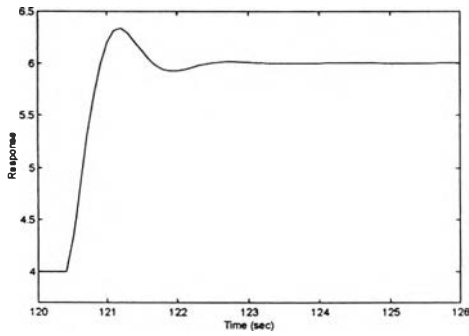


(ก)

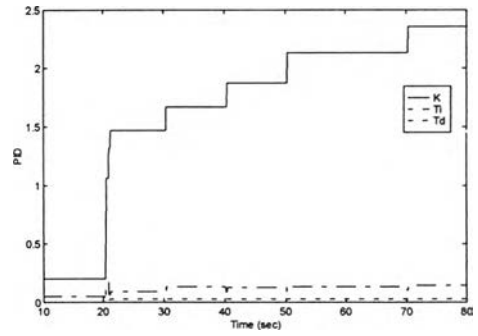


(ข)

รูปที่ 5.7 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 3

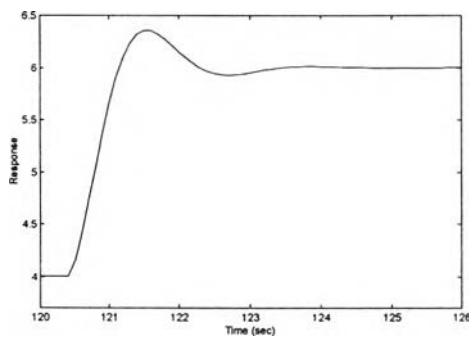


(ก)

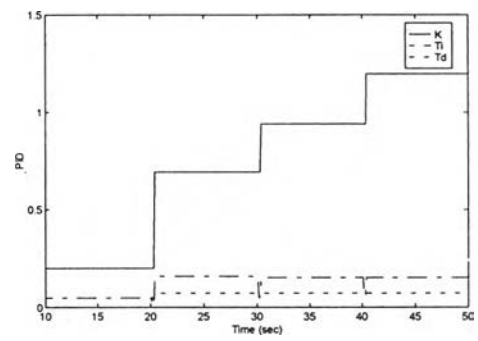


(จ)

รูปที่ 5.8 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 4

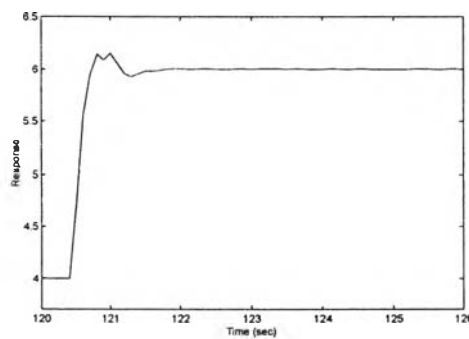


(ก)

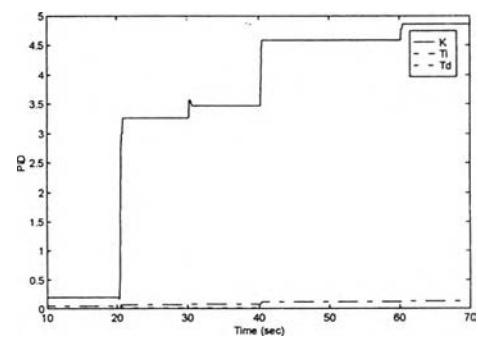


(จ)

รูปที่ 5.9 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 5

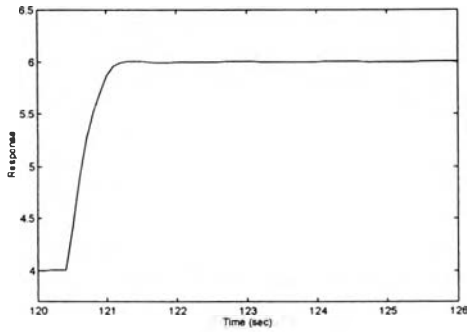


(ก)

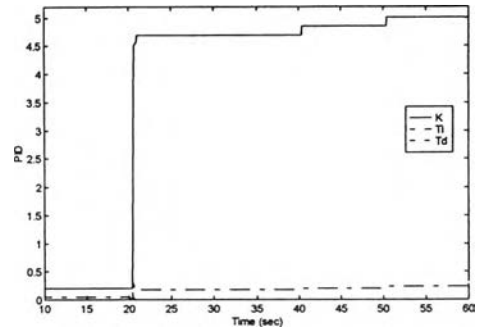


(จ)

รูปที่ 5.10 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 6

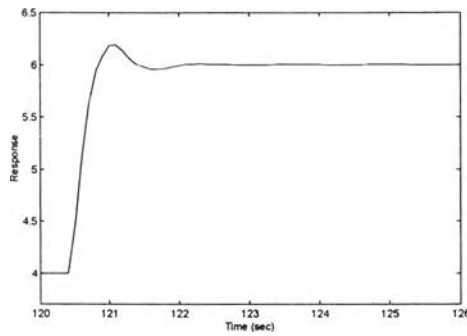


(ก)

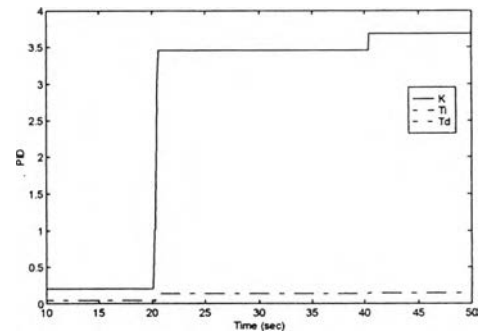


(จ)

รูปที่ 5.11 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 7

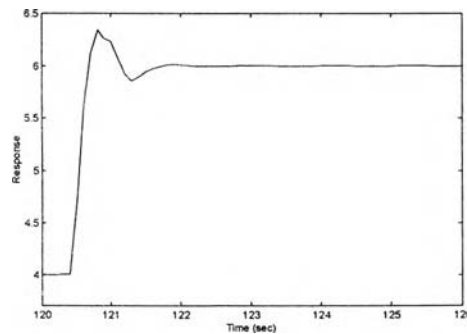


(ก)

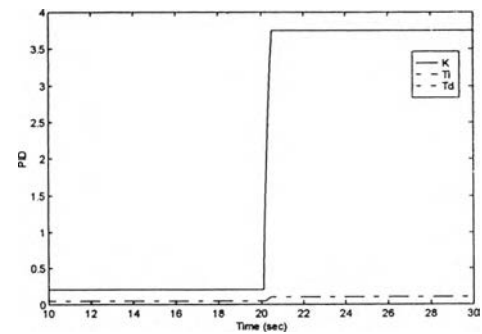


(จ)

รูปที่ 5.12 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 8



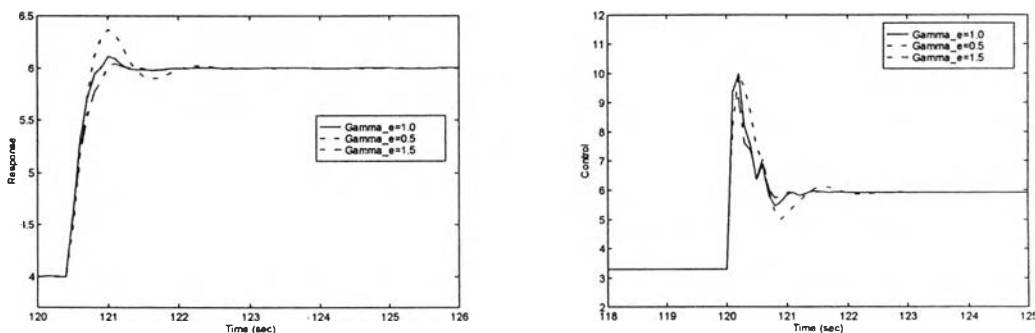
(ก)



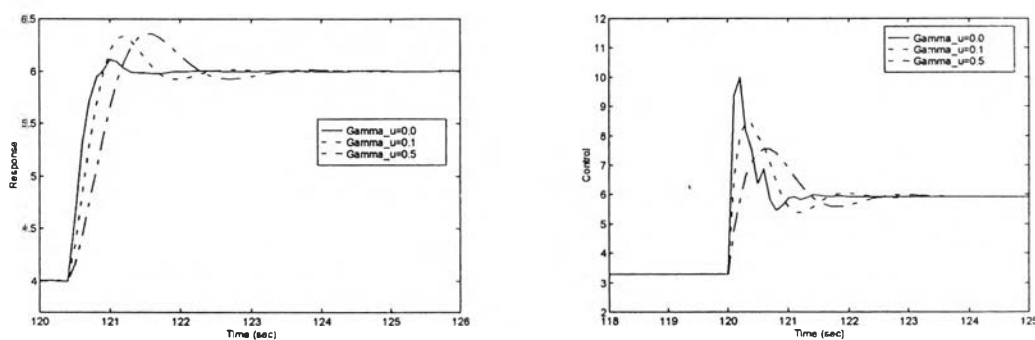
(จ)

รูปที่ 5.13 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 9

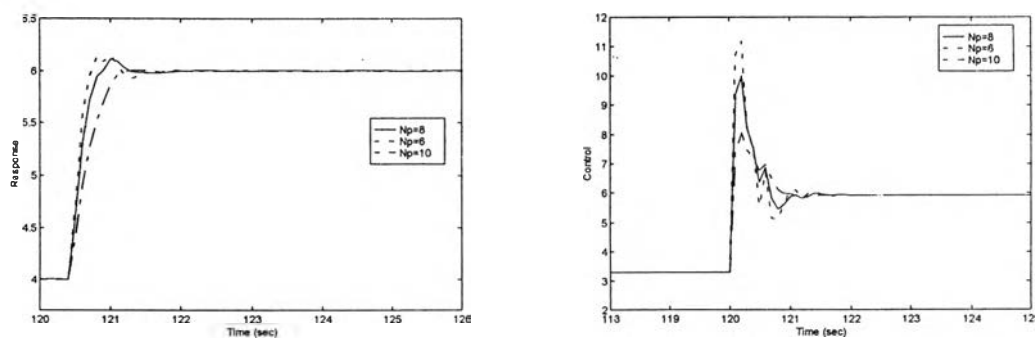
พิจารณาผลการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆในฟังก์ชันจุดประสงค์ต่อผลการควบคุม



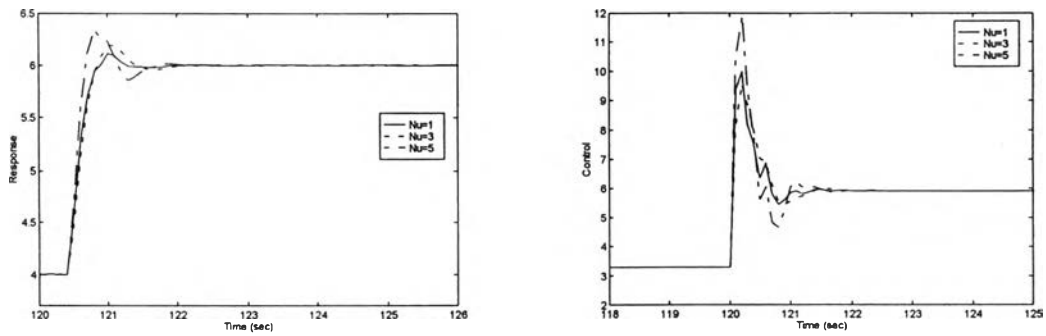
รูปที่ 5.14 ผลการเปลี่ยนแปลง  $\Gamma_e$  ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุม



รูปที่ 5.15 ผลการเปลี่ยนแปลง  $\Gamma_u$  ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุม



รูปที่ 5.16 ผลการเปลี่ยนแปลง  $N_p$  ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุม



รูปที่ 5.17 ผลการเปลี่ยนแปลง  $N_u$  ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุม

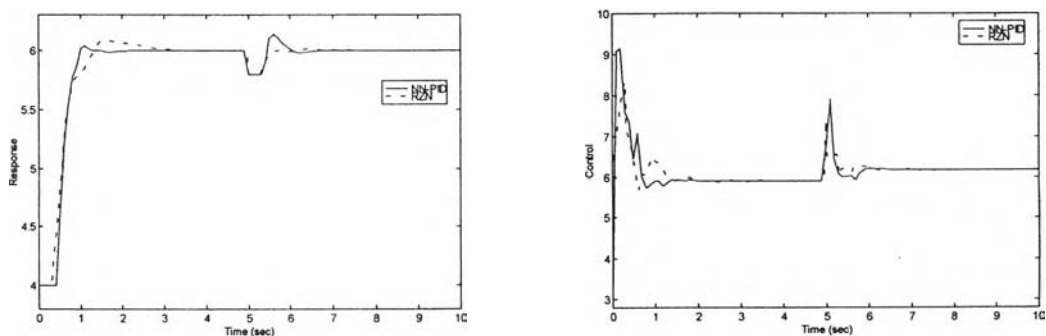
ผลการปรับจูนตัวควบคุม PID และการเปรียบเทียบกับผลการปรับจูนตัวควบคุม PID ด้วยวิธีอื่น

พิจารณาผลตอบสนองแบบขั้น และความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวนเมื่อมีสัญญาณภาระขนาดคงที่ 0.2 ณ วินาทีที่ 15

เงื่อนไข

1. การถ่วงน้ำหนักการทำนาย หรือ  $\Gamma_e$  = 1.5
2. การถ่วงน้ำหนักสัญญาณควบคุม หรือ  $\Gamma_u$  = 0
3. เส้นขอบการทำนายสูงสุด หรือ  $N_p$  = 8
4. เส้นขอบควบคุม หรือ  $N_u$  = 1

นำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบระหว่างผลการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีการปรับจูนโดยอาศัยการป้อนกลับด้วยวิธีเลขในบทที่ 2 และตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีที่เสนอได้ผลการทดลองดังนี้



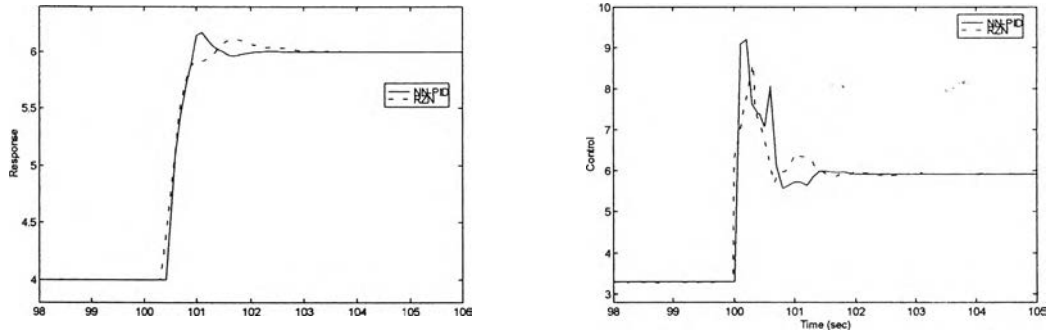
รูปที่ 5.18 เปรียบเทียบลักษณะผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมจากการควบคุมด้วยตัวควบคุมที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีต่างๆ

### ประสิทธิภาพต่อความไม่แน่นอนในพารามิเตอร์ของกระบวนการ

ในการทดลองนี้ สมมติว่าความไม่แน่นอนของค่าประวิงเวลา เมื่อค่าประวิงเวลาเปลี่ยน จาก 0.3 วินาที เป็น 0.33 วินาที ณ วินาทีที่ 75

- เงื่อนไข
1. การถ่วงน้ำหนักการทำนาย หรือ  $\Gamma_e$  = 1.5
  2. การถ่วงน้ำหนักสัญญาณควบคุม หรือ  $\Gamma_u$  = 0
  3. เส้นขอบการทำนายสูงสุด หรือ  $N_p$  = 8
  4. เส้นขอบควบคุม หรือ  $N_u$  = 1

จากการทดลองเมื่อมีความไม่แน่นอนของค่าประวิงเวลา พบว่าไม่มีการปรับจูนตัวควบคุม PID เกิดขึ้น นำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบระหว่างผลการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีการปรับจูน โดยอาศัยการป้อนกลับด้วยวิธีในบทที่ 2 และตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีที่เสนอได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 5.19 เปรียบเทียบลักษณะผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมจากการควบคุมด้วยตัวควบคุมที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีต่างๆ

จากการพิจารณาผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นและการกำจัดผลของสัญญาณเกาะ การควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีที่เสนอ ให้ผลการควบคุมที่มีค่าพุงเกินและช่วงเวลาเข้าที่น้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยสูตรการปรับจูน Ziegler-Nichols แบบปรับปรุง โดยอาศัยข้อมูลจุดวิกฤตจากเทคนิคการป้อนกลับด้วยวิธี แต่จากการเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดผลของสัญญาณรบกวนของตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีที่เสนอกับตัวควบคุม

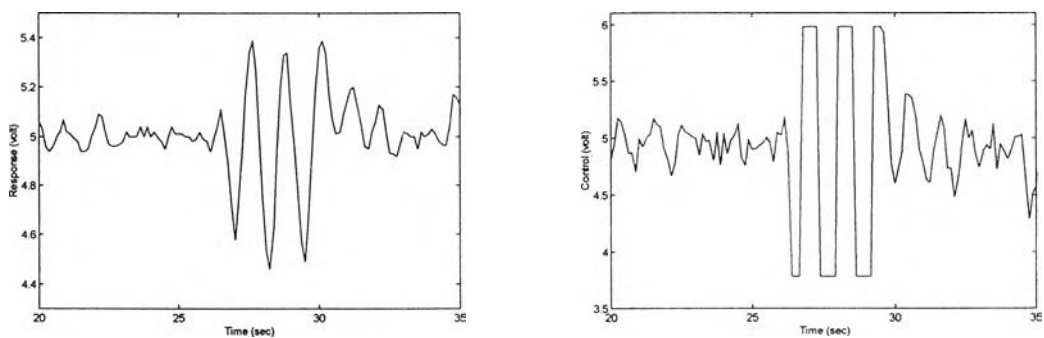
คุม PID ที่ปรับจูนด้วยสูตรการปรับจูน Ziegler-Nichols แบบปรับปรุง พบว่าช่วงเวลาในการปรับเข้าสู่จุดทำงานปกติของผลตอบสนองมากกว่า

เมื่อมีความไม่แน่นอนของค่าประวิงเวลาเกิดขึ้น พบว่าผลการควบคุมจากตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีที่เสนอ สามารถควบคุมให้ผลตอบสนองมีช่วงเวลาเข้าที่และค่าพุ่งเกินที่น้อยกว่าต่อไปจะทำการควบคุมกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนในเวลาจริงต่อไป

### 5.3 การควบคุมกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนในเวลาจริง

#### 5.3.1 การปรับจูนค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุม PID โดยอาศัยเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์

การปรับจูนตัวเองของตัวควบคุม PID โดยอาศัยเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์ประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 กำหนดขนาดการแกว่งของผลตอบสนองเท่ากับ 0.5 โวลต์ ขนาดเริ่มต้นของรีเลย์เท่ากับ 1 เนื่องจากในการทดลองมีสัญญาณรบกวน จึงจำเป็นต้องใช้รีเลย์ที่มีฮิสเตอร์รีซิส โดยกำหนดขนาดของฮิสเตอร์รีซิสประมาณ 2 เท่าของขนาดสูงสุดของสัญญาณรบกวนในระบบซึ่งพบว่าขนาดสูงสุดของสัญญาณรบกวนมีค่าประมาณ 0.03 โวลต์ จึงกำหนดขนาดของฮิสเตอร์รีซิสที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 0.05 ได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 5.20 ผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมระหว่างที่มีการป้อนกลับด้วยรีเลย์ของกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน

จากรูปข้างต้น คำนวณหาค่าอัตราขยายวิกฤตและคาบวิกฤตเป็น

$$\text{แอมพลิจูดของรีเลย์} (d) = 1.1$$

$$\text{แอมพลิจูดของผลตอบสนองที่มีการแกว่ง} (a) = 0.45$$

$$\text{ค่าอัตราขยายวิกฤต} (\hat{k}_u) \hat{k}_u = \frac{4d}{\pi a} = 3.11$$

$$\text{คาบวิกฤต} (\hat{t}_u) = 1.25 \text{ วินาที}$$

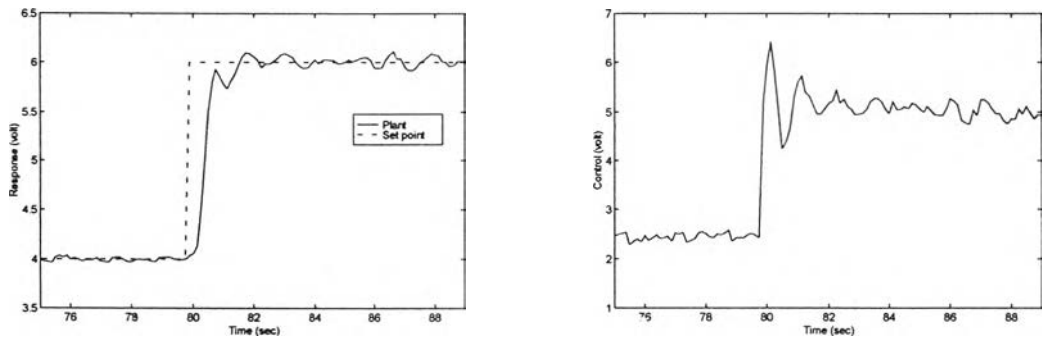
ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนได้มีค่าดังนี้



ตารางที่ 5.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนโดยอาศัยเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์และสูตรการปรับจูน Ziegler-Nichols แบบปรับปรุง สำหรับการควบคุมกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนในเวลาจริง

$G(s)$	$\hat{\beta}$	$\hat{k}_c$	$\hat{T}_i$	$\hat{T}_d$
$G_p(s) = K \frac{e^{-T_d}}{\tau s + 1}$	0.72	1.99	0.63	0.16

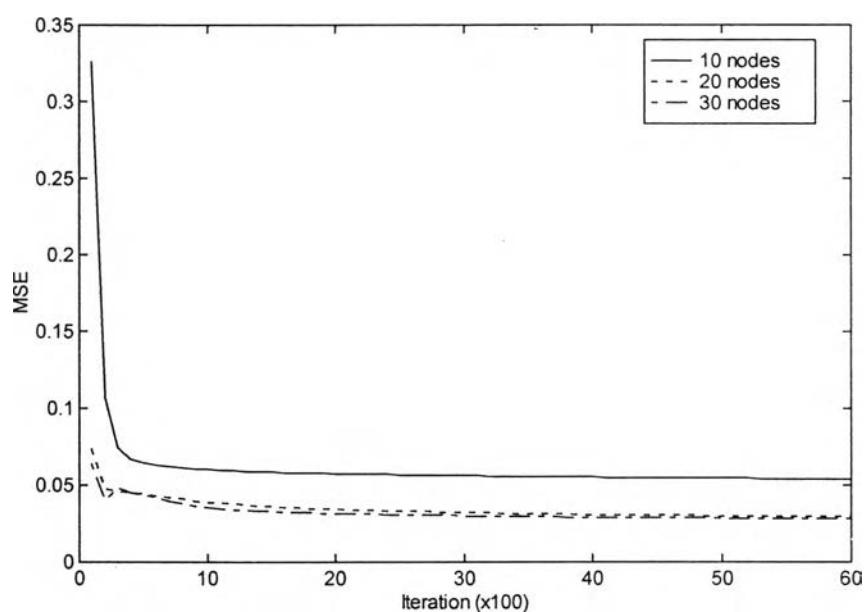
พิจารณาผลตอบสนองระหว่างค่าปรับตั้ง 4 – 6 โวลต์ภายใต้ตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนได้ด้วยสูตรการปรับจูน Ziegler-Nichols แบบปรับปรุง โดยกำหนดอัตราการไหลของอากาศ 5 ฟุต/วินาที



รูปที่ 5.21 ผลการควบคุมกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนตัวเองโดยอาศัยเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์

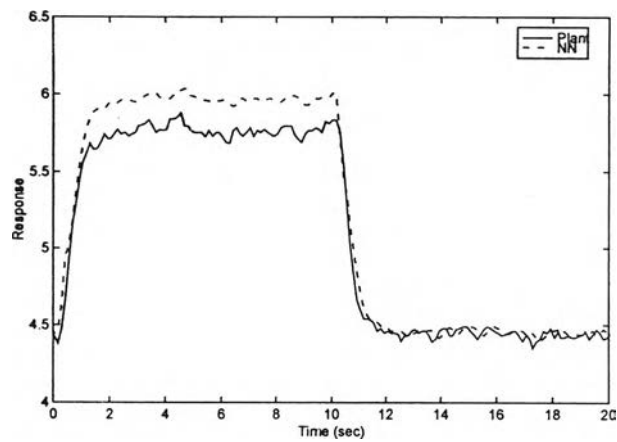
### 5.3.2 การกำหนดโครงสร้างของข่ายงานระบบประสาท

ในการฝึกข่ายงานระบบประสาทเพื่อประมาณฟังก์ชันซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเข้าและข้อมูลออกของกระบวนการ กำหนดโครงสร้างของข่ายงานระบบประสาทที่ใช้เป็นแบบป้อนไปข้างหน้า โดยฟังก์ชันกระตุ้นที่ใช้เป็นฟังก์ชัน log-sigmoid มี 3 ชั้น ชั้นอินพุตมี 4 ปม ชั้นซ่อนภายในมี 3 แบบคือ 10, 20 และ 30 ปมตามลำดับ ชั้นเอาต์พุตมี 1 ปม ข้อมูลเข้าประกอบด้วยสัญญาณต่างๆดังนี้  $y(t-1), y(t-2), u(t-2), u(t-3)$  โดยกำหนดค่าเวลาการชักตัวอย่างเท่ากับ 0.125 วินาที ทำการฝึก 6000 รอบ พิจารณาค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยระหว่างการฝึกของข่ายงานระบบประสาทที่มีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายในแตกต่างกัน ดังนี้

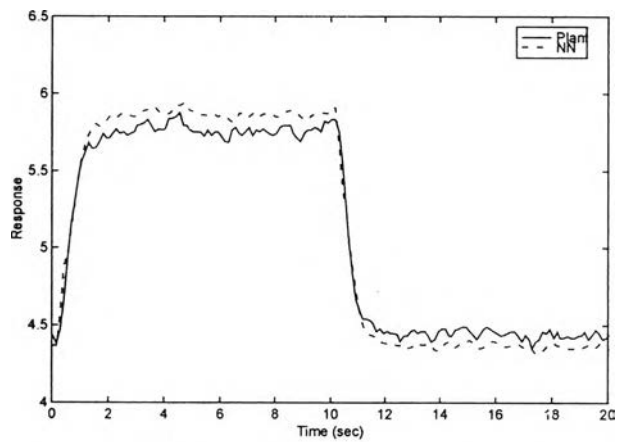


รูปที่ 5.22 ผลการฝึกข่ายงานระบบประสาทที่มีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายในแตกต่างกันสำหรับกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน

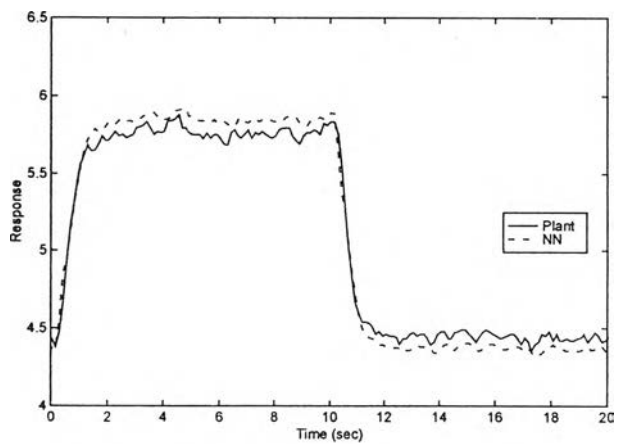
จากรูปข้างต้น พบว่าข่ายงานระบบประสาทที่มีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายในแบบที่ 2 และ 3 มีความสามารถในการหาคูณลักษณะของกระบวนการใกล้เคียงกันและแบบที่ 1 มีความสามารถในการหาคูณลักษณะของกระบวนการด้อยที่สุด ต่อไปจะพิจารณาประสิทธิภาพในการทำนายผลตอบสนองแบบขั้นของกระบวนการด้วยข่ายงานระบบประสาทที่ได้จากการฝึก ได้ผลดังนี้



(ก) แบบที่ 1 จำนวนปมในชั้นซ่อนภายใน 10 ปม



(ข) แบบที่ 2 จำนวนปมในชั้นซ่อนภายใน 20 ปม



(ค) แบบที่ 3 จำนวนปมในชั้นซ่อนภายใน 30 ปม

รูปที่ 5.23 ผลการทำนายผลตอบสนองแบบขั้นด้วยข่ายงานระบบประสาทที่มีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายในแตกต่างกันสำหรับกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน

จากผลการเปรียบเทียบข้างต้น เลือกข่ายงานระบบประสาทแบบที่ 2 เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการทำนายผลตอบสนองดีกว่าแบบที่ 1 และมีโครงสร้างที่เล็กกว่าแบบที่ 3 โดยมีประสิทธิภาพในการทำนายผลตอบสนองใกล้เคียงกับแบบที่ 3

#### ความสามารถในการทำนายผลตอบสนองล่วงหน้าของกระบวนการ

พิจารณาความสามารถในการทำนายผลตอบสนองล่วงหน้าของข่ายงานระบบประสาทจากค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยระหว่างผลตอบสนองของกระบวนการเมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมกับผลตอบสนองที่ได้จากการทำนายด้วยข่ายงานระบบประสาท

ตารางที่ 5.7 ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของผลตอบสนองที่ทำนายได้จากข่ายงานระบบประสาทที่ชั้นต่างๆสำหรับกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน

	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	ชั้นที่ 6	ชั้นที่ 7
MSE	0.051	0.055	0.062	0.065	0.068	0.071	0.075

พบว่าเมื่อจำนวนชั้นในการทำนายเพิ่มขึ้น ความสามารถในการทำนายผลตอบสนองจะลดลง

### 5.3.3 การควบคุมกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนในเวลาจริง

ในการทดลองกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนในเวลาจริง เนื่องจากข้อจำกัดของเวลาที่ใช้ในการคำนวณสำหรับปรับจูนตัวควบคุม PID จำเป็นจะต้องกำหนดค่าเวลาการซีกตัวอย่าง 0.125 วินาที ถ้ากำหนดค่าเวลาการซีกตัวอย่างให้น้อยกว่านี้ จะทำให้โปรแกรมไม่สามารถทำงานได้ กำหนดให้เส้นขอบควบคุม  $N_u$  คงที่เท่ากับ 1

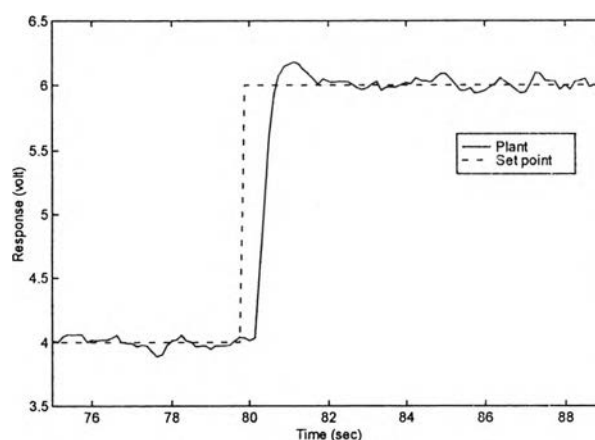
#### การควบคุมกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนในช่วงการทำงานต่างๆ

พิจารณาความสามารถของวิธีการปรับจูนตัวควบคุม PID ที่อาศัยข้อมูลระบบประสาธเป็นตัวประมาณ โดยทำการทดลองควบคุมกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนในเวลาจริงในช่วงการทำงานต่างๆ กำหนดเส้นขอบการทำนายค่าสุด  $N_p$  เป็น 2 ได้ผลการทดลองดังนี้

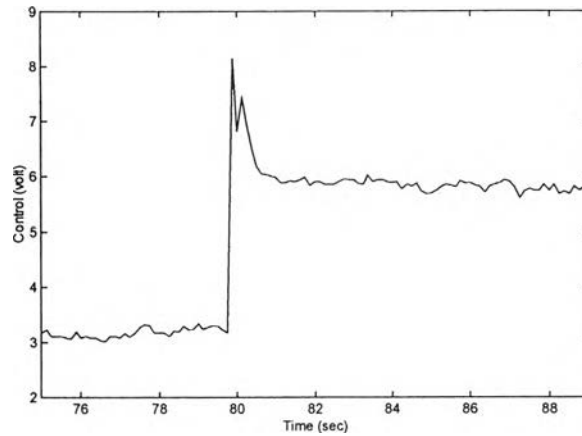
**การทดลองที่ 1** ค่าปรับตั้งเป็นสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมระหว่าง 4-6 โวลต์ที่อัตราการไหลของอากาศ 5 ฟุต/วินาที

#### เงื่อนไข

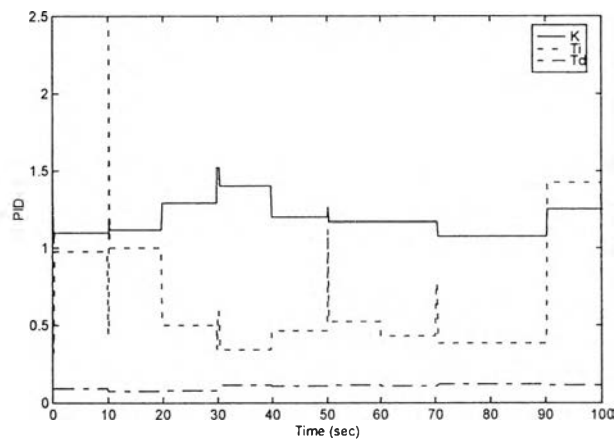
1. การถ่วงน้ำหนักการทำนาย หรือ  $\Gamma_c$  = 1.5
2. การถ่วงน้ำหนักสัญญาณควบคุม หรือ  $\Gamma_u$  = 0
3. เส้นขอบการทำนายสูงสุด หรือ  $N_p$  = 7
4. เส้นขอบควบคุม หรือ  $N_u$  = 1



(ก) ผลตอบสนองของกระบวนการ



(ข) สัญญาณควบคุม

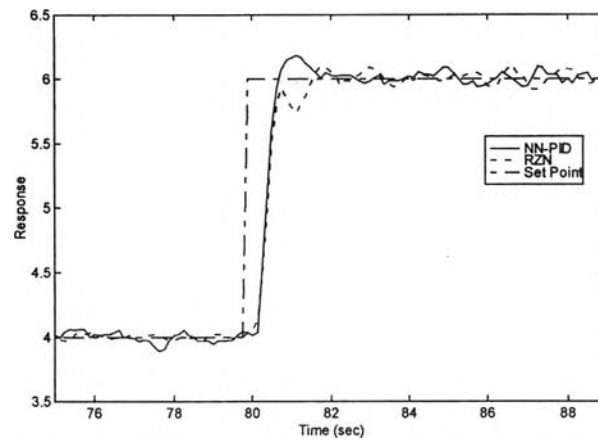


(ค) ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID

### รูปที่ 5.24 ผลการควบคุมและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่ปรับจนได้ (4-6 โวลต์)

ผลทดลองพบว่าค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนค่าปรับตั้ง เพื่อให้ผลตอบสนองของกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเหมาะสมกับจุดทำงานที่เปลี่ยนไป

เปรียบเทียบผลการควบคุมของตัวควบคุม PID ที่ปรับจนด้วยวิธีที่เสนอกับตัวควบคุม PID ที่ได้จากการปรับจนตัวเองโดยอาศัยการป้อนกลับด้วยรีเลย์ดังรูปที่ 5.25 พบว่าลักษณะของผลตอบสนองคล้ายกัน พิจารณาจากค่าพุ่งเกิน ช่วงเวลาขาขึ้นและช่วงเวลาเข้าที่ใกล้เคียงกัน

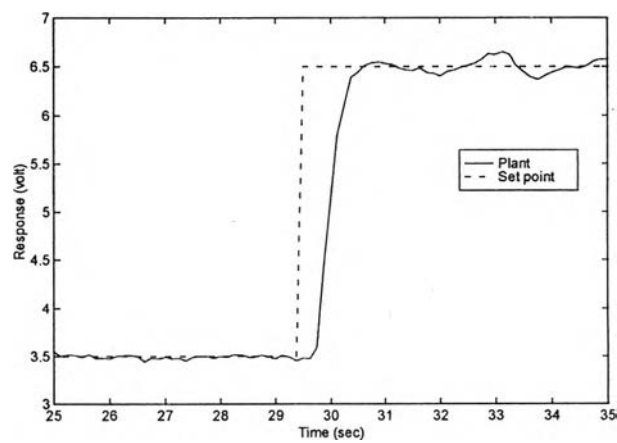


รูปที่ 5.25 เปรียบเทียบผลตอบสนองจากการควบคุมด้วยตัวควบคุมที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีต่างๆ

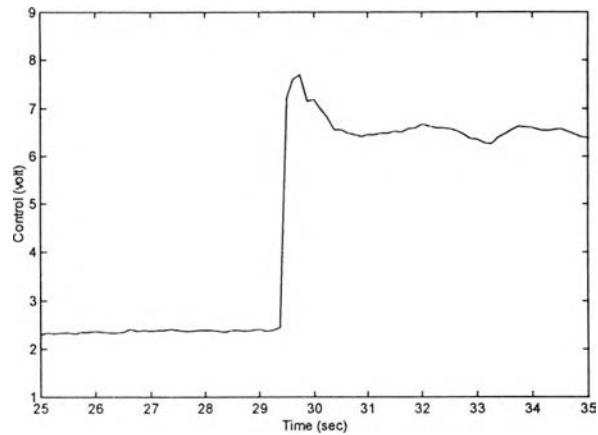
**การทดลองที่ 2** ค่าปรับตั้งเป็นสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมระหว่าง 3.5-6.5 โวลต์ที่อัตราการไหลของอากาศ 5 ฟุต/วินาที

เงื่อนไข

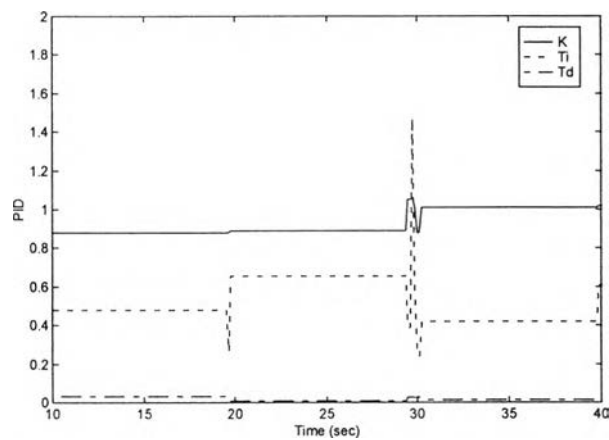
1. การถ่วงน้ำหนักการทำนาย หรือ  $\Gamma_e$  = 3
2. การถ่วงน้ำหนักสัญญาณควบคุม หรือ  $\Gamma_u$  = 0.1
3. เส้นขอบการทำนายสูงสุด หรือ  $N_p$  = 8
4. เส้นขอบควบคุม หรือ  $N_u$  = 1



(ก) ผลตอบสนองของกระบวนการ



(ข) สัญญาณควบคุม

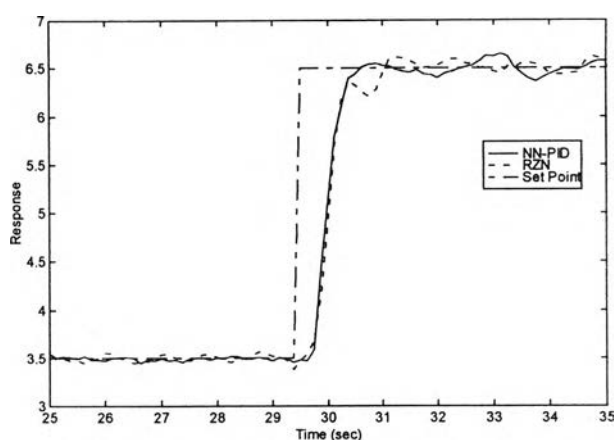


(ค) ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID

รูปที่ 5.26 ผลการควบคุมและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่ปรับจนได้ (3.5-6.5 โวลต์)

ในการควบคุมกระบวนการเมื่อช่วงการทำงานกว้างขึ้น จำเป็นที่จะต้องเพิ่ม  $N_p$  จาก 7 เป็น 8 เพื่อให้ครอบคลุมช่วงที่ผลตอบสนองของกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และการเพิ่ม  $\Gamma_p$  เพื่อลดขนาดของสัญญาณควบคุมที่ใช้ ป้องกันการอึดตัวของตัวขับเร็ว (0-10 โวลต์)





รูปที่ 5.27 เปรียบเทียบผลตอบสนองจากการควบคุมด้วยตัวควบคุมที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีต่างๆ

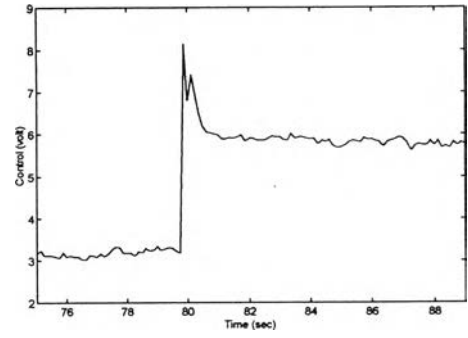
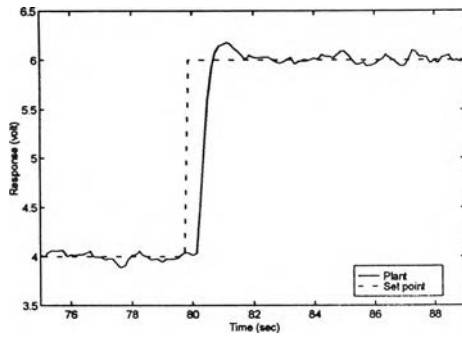
การเปรียบเทียบผลตอบสนองจากการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีที่เสนอ และตัวควบคุม PID ที่ได้จากการปรับจูนตัวเองโดยอาศัยการป้อนกลับด้วยรีเลย์ พบว่าผลตอบสนองของกระบวนการจากการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีทั้งสอง มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วต่อค่าปรับตั้ง ลักษณะของผลตอบสนองคล้ายกัน พิจารณาจากค่าพุ่งเกิน ช่วงเวลาขาขึ้นและช่วงเวลาเข้าที่ใกล้เคียงกัน

#### การควบคุมกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนที่จุดทำงานต่างๆ

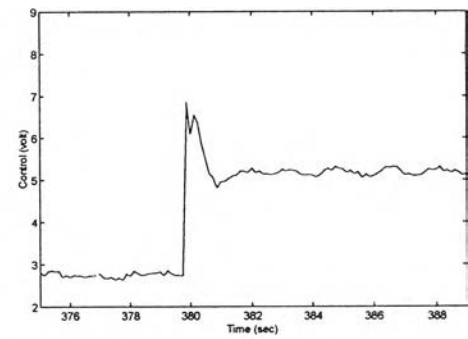
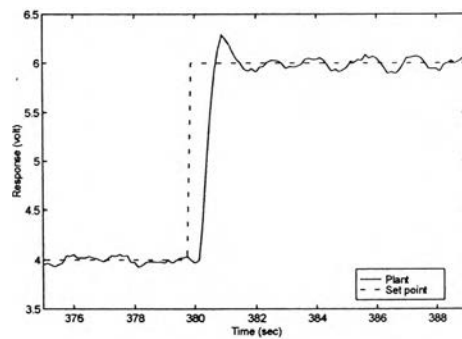
พิจารณาความสามารถของวิธีการปรับจูนตัวควบคุม PID ที่อาศัยข่ายงานระบบประสาทเป็นตัวประมาณ เมื่อมีการเปลี่ยนจุดทำงานจากจุดทำงานปกติที่อัตราการไหลของอากาศ 5 ฟุต/วินาที

<u>เงื่อนไข</u>	1. การถ่วงน้ำหนักการทำงาน หรือ $\Gamma_e$	= 1
	2. การถ่วงน้ำหนักสัญญาณควบคุม หรือ $\Gamma_u$	= 0
	3. เส้นขอบการทำงานสูงสุด หรือ $N_p$	= 7
	4. เส้นขอบควบคุม หรือ $N_u$	= 1

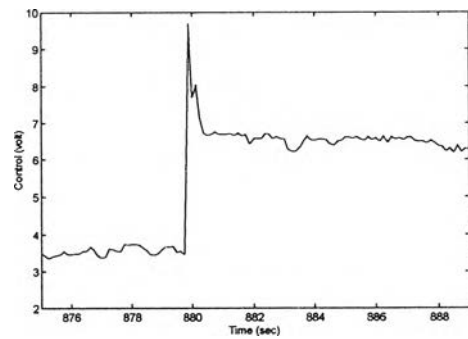
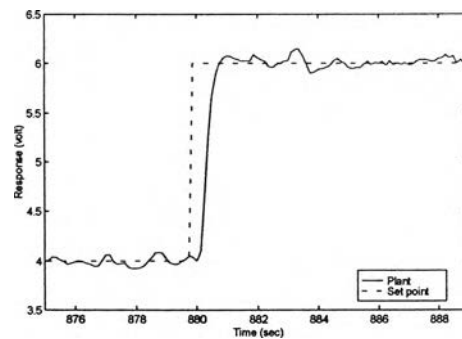
กำหนด ค่าปรับตั้งเป็นสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมระหว่าง 4-6 โวลต์ ที่อัตราการไหลของอากาศ 5 ฟุต/วินาที หลังจากนั้นทุก 4 นาที มีการเปลี่ยนจุดทำงาน โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศจาก 5 ฟุต/วินาที เปลี่ยนเป็น 4 ฟุต/วินาที กลับมาที่ 5 ฟุต/วินาที เปลี่ยนเป็น 6 ฟุต/วินาที และกลับมาที่ 5 ฟุต/วินาที ตามลำดับ



(ก) อัตราการไหลของอากาศ 5 ฟุต/วินาที

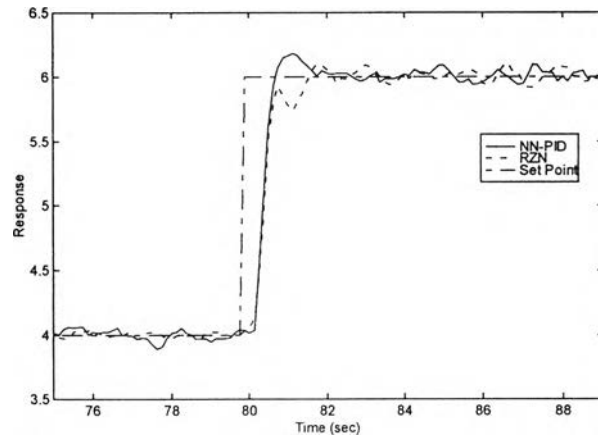


(ข) อัตราการไหลของอากาศ 4 ฟุต/วินาที

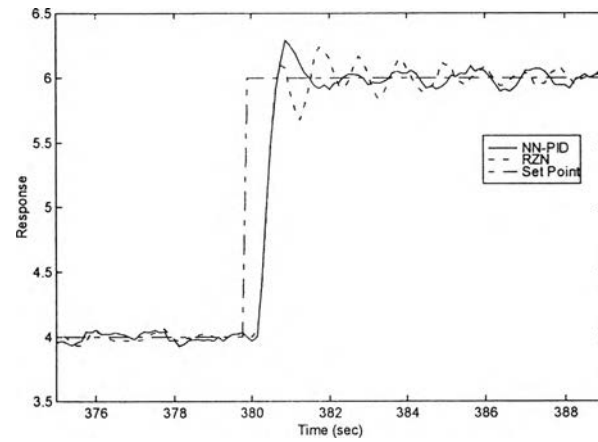


(ค) อัตราการไหลของอากาศ 6 ฟุต/วินาที

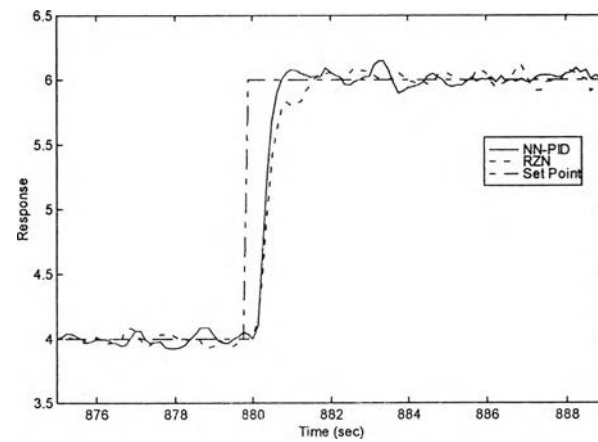
รูปที่ 5.28 ผลการควบคุมและสัญญาณควบคุมที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนที่จุดทำงานต่างๆ



(ก) อัตราการไหลของอากาศ 5 ฟุต/วินาที



(ข) อัตราการไหลของอากาศ 4 ฟุต/วินาที



(ค) อัตราการไหลของอากาศ 6 ฟุต/วินาที

รูปที่ 5.29 เปรียบเทียบผลจากการควบคุมด้วยตัวควบคุมที่ปรับจนได้ด้วยวิธีต่างๆ ที่จุดทำงานต่างๆ

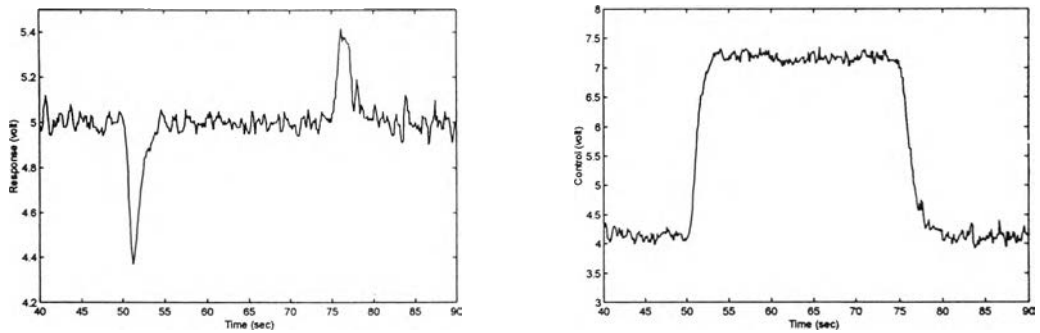
จากผลการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจนได้ด้วยวิธีที่เสนอ สามารถควบคุมให้ ลักษณะผลตอบสนองของกระบวนการที่จุดทำงานต่างๆใกล้เคียงกัน โดยพิจารณาจากช่วงเวลาขาขึ้น, ช่วงเวลาเข้าที่และค่าพุ่งเกินของผลตอบสนองของกระบวนการที่จุดทำงานต่างๆซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน แตกต่างจากผลตอบสนองภายใต้ตัวควบคุม PID ที่ปรับจนโดยอาศัยเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์ โดยเมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศจาก 5 ฟุต/วินาทีเป็น 4 ฟุต/วินาที ผลตอบสนองจะมีการแกว่ง แต่เมื่ออัตราการไหลของอากาศเปลี่ยนจาก 5 ฟุต/วินาทีเป็น 6 ฟุต/วินาที ผลตอบสนองจากการมีการเปลี่ยนแปลงต่อค่าปรับตั้งช้าลง โดยพิจารณาจากช่วงเวลาขาขึ้นและช่วงเวลาเข้าที่ยาวนานกว่าผลตอบสนองของกระบวนการที่ควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจนโดยอาศัยเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์เมื่ออัตราการไหลของอากาศ 5 ฟุต/วินาที

#### การควบคุมกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อมีสัญญาณรบกวน

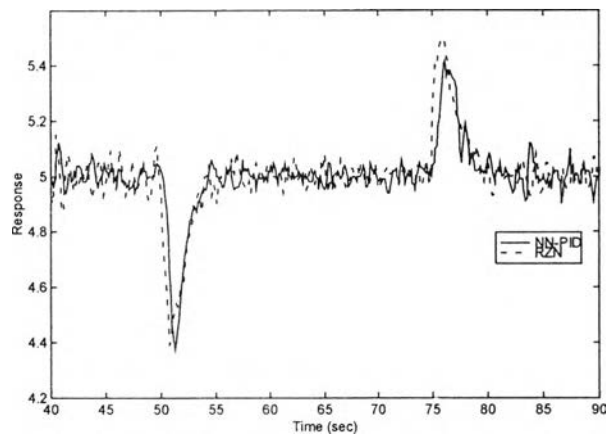
พิจารณาความสามารถของวิธีการปรับจูนตัวควบคุม PID ที่อาศัยข่ายงานระบบประสาทเป็นตัวประมวล โดยทำการทดลองควบคุมกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนในเวลาจริงเมื่อมีสัญญาณรบกวน ได้ผลการทดลองดังนี้

<u>เงื่อนไข</u>	1. การถ่วงน้ำหนักการทำนาย หรือ $\Gamma_e$	= 1.5
	2. การถ่วงน้ำหนักสัญญาณควบคุม หรือ $\Gamma_u$	= 0
	3. เส้นขอบการทำนายสูงสุด หรือ $N_p$	= 7
	4. เส้นขอบควบคุม หรือ $N_u$	= 1

กำหนด จุดทำงานของสภาวะปกติที่ 5 โวลต์ อัตราการไหลของอากาศ 5 ฟุต/วินาที อีก 25 วินาที มีสัญญาณรบกวนเนื่องจากการเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศจาก 5 ฟุต/วินาที เปลี่ยนเป็น 9 ฟุต/วินาที กลับมาที่ 5 ฟุต/วินาที หลังจากวินาทีที่ 50 เปรียบเทียบกับผลตอบสนองจากการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจนโดยอาศัยเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์



รูปที่ 5.30 ผลการควบคุมกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อมีสัญญาณรบกวน



รูปที่ 5.31 เปรียบเทียบผลตอบสนองด้วยตัวควบคุมที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีต่างๆเมื่อมีสัญญาณรบกวน

การเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดผลของสัญญาณรบกวนระหว่างผลการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีที่เสนอกับตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีการป้อนกลับด้วยรีเลย์ ในรูปที่ 5.31 พบว่ามีความสามารถในการกำจัดผลของสัญญาณรบกวนใกล้เคียงกัน ผลตอบสนองกลับสู่ค่าปรับตั้งได้อย่างรวดเร็วใกล้เคียงกัน

## 5.4 สรุปผลการทดลอง

ในการทดลองการปรับจูนตัวเองของตัวควบคุม PID โดยอาศัยข้อมูลจากระบบประสาทจากผลการจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์และผลการทดลองควบคุมกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนในเวลาจริง พบว่าตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีที่เสนอให้ผลการควบคุมที่จุดทำงานปกติใกล้เคียงกับตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์ แต่เมื่อมีการเปลี่ยนจุดทำงานหรือมีความไม่แน่นอนในพารามิเตอร์ ผลการควบคุมด้วยตัวควบคุมที่ปรับจูนด้วยวิธีที่เสนอให้ผลการควบคุมดีกว่าตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์ สำหรับความสามารถในการกำจัดผลของสัญญาณรบกวน ในการจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์พบว่าตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีที่เสนอให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์ แต่ในการทดลองควบคุมกระบวนการจริงพบว่าตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีที่เสนอมีความสามารถในการกำจัดผลของสัญญาณรบกวนใกล้เคียงกับตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์