

บทที่ 4

การปรับจูนตัวเองของตัวควบคุม PID โดยใช้ข่ายงานระบบประสาท

ในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างการปรับจูนตัวควบคุม PID ที่อาศัยข่ายงานระบบประสาท หลังจากนั้นจะแสดงประสิทธิภาพของโครงสร้างการปรับจูนตัวควบคุม PID ที่เสนอ โดยพิจารณาผลการจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์กับกระบวนการเชิงเส้นแบบต่างๆ

4.1 โครงสร้างการปรับจูนตัวควบคุม PID ทำนายแบบจำลองโดยใช้ข่ายงานระบบประสาท

โครงสร้างการปรับจูนตัวควบคุม PID ทำนายแบบจำลองโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทที่เสนอในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ อาศัยแนวคิดหลักของตัวควบคุมทำนายแบบจำลอง [9] และแนวคิดของ Tan และ Keyser [39] เพื่อปรับปรุงโครงสร้างของตัวควบคุม PID ในการชดเชยผลของการประวิงเวลาสำหรับกระบวนการที่มีค่าประวิงเวลา โดยใช้ข่ายงานระบบประสาทในการทำนายผลตอบสนองล่วงหน้าของกระบวนการ เพื่อใช้ในการคำนวณหาลำดับของสัญญาณควบคุมที่ทำให้ฟังก์ชันจุดประสงค์ที่พิจารณามีค่าน้อยที่สุด โครงสร้างของตัวควบคุม PID ที่เลือกใช้เป็นตัวควบคุม PID ที่มีสมการอยู่ในรูปของสมการเวลาเต็มหน่วย ดังนี้

$$u(t) = u(t-1) + K_p[e(t) - e(t-1)] + K_i e(t) + K_d[e(t) - 2e(t-1) + e(t-2)] \quad (4.1)$$

โดย $u(t)$ คือ สัญญาณควบคุมที่เวลาปัจจุบัน และ $e(t)$ คือ ความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าปรับตั้งกับผลตอบสนองของกระบวนการที่เวลาปัจจุบัน

จากแนวคิดของ Tan และ Keyser [39] เพื่อปรับปรุงโครงสร้างของตัวควบคุม PID ในการชดเชยผลของการประวิงเวลาสำหรับกระบวนการที่มีค่าประวิงเวลา d แสดงได้ดังสมการ

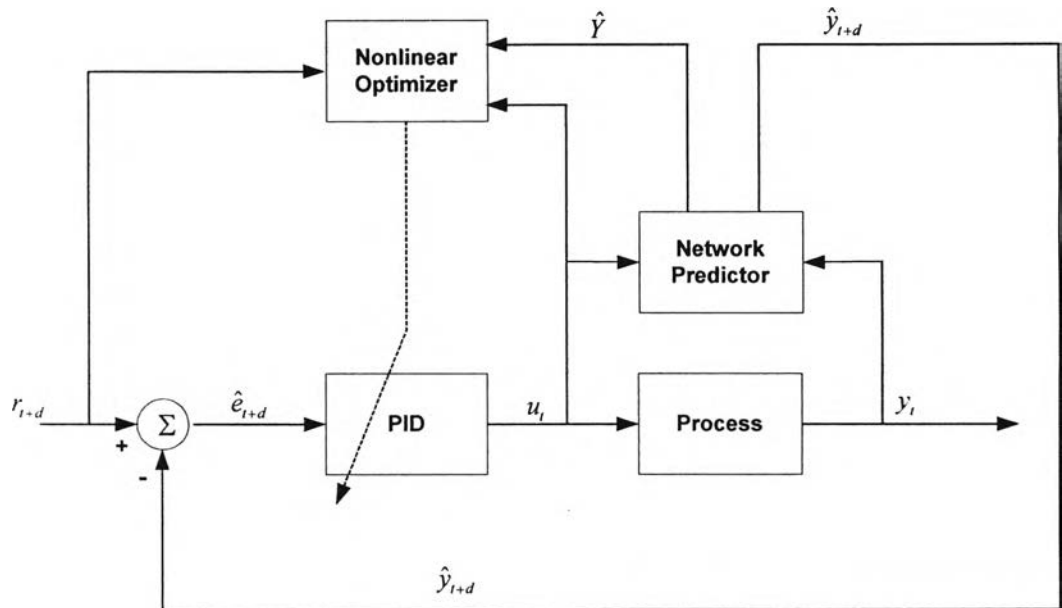
$$y(t) = F[y(t-1), \dots, y(t-n), u(t-d), \dots, u(t-d-m)] \quad (4.2)$$

สมการของตัวควบคุม PID ที่ใช้เพื่อชดเชยผลของการประวิงเวลา เป็นดังนี้

$$u(t) = u(t-1) + K_p[\hat{e}(t+d) - \hat{e}(t+d-1)] + K_i \hat{e}(t+d) + K_d[\hat{e}(t+d) - 2\hat{e}(t+d-1) + \hat{e}(t+d-2)] \quad (4.3)$$

โดย $\hat{e}(t+d-i) = r(t+d-i) - \hat{y}(t+d-i)$, $i=1,2,3$

$r(t+d-i)$ คือ ค่าปรับตั้งหรือสัญญาณอ้างอิงที่เวลา $t+d-i$ และ $\hat{y}(t+d-i)$ ผลตอบสนองของกระบวนการที่ทำนายล่วงหน้าจากข่างานระบบประสาทที่เวลา $t+d-i$ ภายใต้สมมติฐานว่าการหาคุณลักษณะของกระบวนการด้วยข่างานระบบประสาทที่มีความแม่นยำ สามารถแสดงโครงสร้างของการปรับจูนตัวควบคุม PID ที่เสนอดังรูป



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของตัวควบคุม PID ทำนายแบบจำลอง

กำหนดฟังก์ชันจุดประสงค์ J ดังนี้

$$J = \frac{1}{2} \Gamma_e \sum_{j=N_1}^{N_p} [r(t+j) - \hat{y}(t+j)]^2 + \frac{1}{2} \Gamma_u \sum_{j=0}^{N_u-1} [\Delta u(t+j)]^2 \quad (4.4)$$

โดย $\Delta u(t) = u(t) - u(t-1)$

$u(t+j)$ คือ สัญญาณควบคุมที่เวลา $t+j$

$\hat{y}(t+j)$ คือ ผลตอบสนองที่ทำนายได้จากแบบจำลองที่เวลา $t+j$

$r(t+j)$ คือ ค่าปรับตั้งหรือสัญญาณอ้างอิงที่ทราบล่วงหน้าที่เวลา $t+j$ (ถ้าไม่ทราบค่าปรับตั้งล่วงหน้า กำหนดให้เท่ากับค่าปรับตั้งที่เวลาปัจจุบัน)

N_1 คือ เส้นขอบการทำนายค่าสุด (minimum prediction horizon) N_p คือ เส้นขอบการทำนายสูงสุด (maximum prediction horizon) N_u คือ เส้นขอบควบคุม (control horizon) Γ_e คือ การ

ถ่วงน้ำหนักการทำนาย (prediction weighting) และ Γ_u คือ การถ่วงน้ำหนักสัญญาณควบคุม (control weighting)

สามารถเขียนฟังก์ชันจุดประสงค์ J จากสมการที่ (4.4) ให้อยู่ในรูปเวกเตอร์ของความผิดพลาดถ่วงหน้า $E(t)$ และลำดับของสัญญาณควบคุมในอนาคต $\Delta U(t)$ ดังนี้

$$J = \frac{1}{2} \Gamma_e [E^T(t)E(t)] + \frac{1}{2} \Gamma_u [\Delta U^T(t)\Delta U] \quad (4.5)$$

โดย

$$E(t) = [r(t+N_1) - \hat{y}(t+N_1), \dots, r(t+N_2) - \hat{y}(t+N_2)]^T$$

$$\Delta U(t) = [u(t) - u(t-1), \dots, u(t+N_u-1) - u(t+N_u-2)]^T$$

โครงสร้างการปรับจูนตัวควบคุม PID ด้วยวิธีที่เสนอ มีจุดประสงค์เพื่อปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID คือ K_p, K_i, K_d โดยอาศัยการอ็อปติไมซ์ (optimization) ที่ทำให้ฟังก์ชันจุดประสงค์ J มีค่าต่ำที่สุด ดังนี้

$$X_{k+1}(t) = X_k(t) + \lambda_k s_k \quad (4.6)$$

โดย $X(t) = [K_p(t), K_i(t), K_d(t)]^T$ k คือ ธรรมชาติการวนซ้ำ (iteration index) s_k คือ ทิศทางในการหาคำตอบ (search direction) และ λ_k คือ ช่วงก้าว (step length) ซึ่งสามารถคำนวณหา s_k โดยอาศัยการอ็อปติไมซ์ ในที่นี้ใช้วิธี Polak-Ribiere ซึ่งสามารถคำนวณ s_k ได้จาก (ดู [30] เป็นตัวอย่าง)

$$s_{k+1} = -g_{k+1} + \beta_k s_k, \quad \beta_k = \frac{g_{k+1}^T [g_{k+1} - g_k]}{g_k^T g_k}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (4.7)$$

และ $\beta_0 = 0$ คำนวณ λ_k ที่เหมาะสมจากเงื่อนไขของ Armijo

$$J(X_k + \lambda_k s_k) \leq J(X_k) + \mu \lambda_k s_k^T g_k \quad (4.8)$$

โดย $0 < \mu < 1$ ถ้ากำหนดค่า μ ให้มีค่าใกล้ศูนย์ จะทำให้การหาค่า λ_k ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขของ Armijo ง่ายขึ้น โดยพิจารณาค่า λ_k ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขของ Armijo จากลำดับ $1, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \dots, 2^{-i}$ และ g_k หาได้จาก

$$g_k = -\Gamma_e \nabla Z_k \nabla Y_k E_k + \Gamma_u \nabla Z_k \Delta U_k \quad (4.9)$$

คำนวณหา ∇Y_k ได้ดังสมการ

$$\nabla Y_k = \begin{bmatrix} \frac{\partial \hat{y}(t+N_1)}{\partial u(t)} & \frac{\partial \hat{y}(t+N_1+1)}{\partial u(t)} & \dots & \frac{\partial \hat{y}(t+N_p)}{\partial u(t)} \\ 0 & \frac{\partial \hat{y}(t+N_1+1)}{\partial u(t+1)} & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \frac{\partial \hat{y}(t+N_1+i)}{\partial u(t+k)} & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial \hat{y}(t+N_p)}{\partial u(t+N_u-1)} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

โดยคำนวณหาอนุพันธ์ของผลตอบสนองของกระบวนการที่ทำนายได้เทียบกับสัญญาณควบคุมจาก
 ข่ายงานระบบประสาท ดังสมการ

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{y}(t+N_1+i)}{\partial u(t+k)} &= \frac{\partial \hat{y}(t+N_1+i)}{\partial n^q} \sum_{j=1}^{m_{q-1}} \frac{\partial n^q}{\partial x_j^{q-1}} \frac{\partial x_j^{q-1}}{\partial n^{q-1}} \frac{\partial n^{q-1}}{\partial u(t+k)} \\ &= z'(n^q) \sum_{j=1}^{m_{q-1}} w_j^q z'(n_j^{q-1}) \left(w_{j,n+i-k+1}^{q-1} + \sum_{l=1}^n w_{j,l}^{q-1} \frac{\partial \hat{y}(t+N_1+i-l)}{\partial u(t+k)} \right) \end{aligned} \quad (4.11)$$

$i = 0, \dots, N_p - N_1; 0 \leq k \leq i$ ถ้า $i < N_u - N_1$ และ $0 \leq k \leq N_u - 1$ ถ้า $i \geq N_u - N_1$

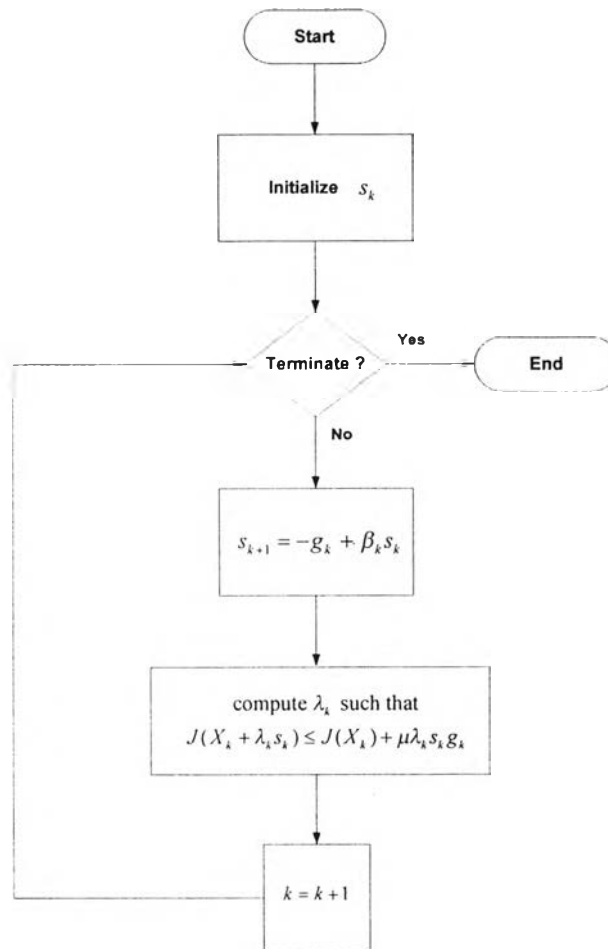
$$\text{โดย} \quad \nabla Z_k = \left[\frac{\partial u(t)}{\partial X_k} \quad \dots \quad \frac{\partial u(t+k)}{\partial X_k} \quad \dots \quad \frac{\partial u(t+N_u-1)}{\partial X_k} \right]$$

$$\frac{\partial u(t+k)}{\partial X_k} = [\hat{e}(t+N_1+k) - \hat{e}(t+N_1+k-1) \quad \hat{e}(t+N_1+k) \quad \hat{e}(t+N_1+k) - 2\hat{e}(t+N_1+k-1) + \hat{e}(t+N_1+k-2)]^T$$

โดย $\hat{e}(t+N_1+k-i) = r(t+N_1+k-i) - \hat{y}(t+N_1+k-i)$, $i = 1, 2, 3$

$$\text{และ} \quad X(t) = [K_p(t), K_i(t), K_d(t)]^T$$

ข่ายงานระบบประสาทที่เลือกใช้มีโครงสร้างของข่ายงานระบบประสาทแบบป้อนไปข้างหน้า (feed forward) เลือกใช้ฟังก์ชันกระตุ้น (activation function) ของปมในชั้นเอาต์พุตเป็นฟังก์ชันเชิงเส้น (linear) ส่วนฟังก์ชันกระตุ้นของปมในชั้นซ่อนภายในเป็นฟังก์ชัน log-sigmoid n เป็นสัญญาณเข้าของปม w เป็นค่าน้ำหนักถ่วงของเครือข่าย z' คืออนุพันธ์ของฟังก์ชัน log-sigmoid



รูปที่ 4.2 วิธีในการอ็อปติไมซ์

หลังจากการอ็อปติไมซ์เสร็จสิ้น จะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID จากการหาค่าเหมาะสมที่สุด ณ แต่ละจุดที่มีการชักตัวอย่าง แต่เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ (constraint) ว่าต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ ดังนั้นหลังจากการอ็อปติไมซ์เสร็จสิ้น จะทำการตรวจสอบว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้สอดคล้องกับเงื่อนไขที่กำหนดหรือไม่ ถ้าสอดคล้องจะมีการปรับจูนตัวควบคุม PID แต่ถ้าไม่สอดคล้องกับเงื่อนไข จะไม่มีการปรับจูนตัวควบคุม PID วิธีนี้เป็นวิธีตรวจสอบอย่างง่ายเพื่อให้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID สอดคล้องกับเงื่อนไขที่กำหนด

4.2 ผลการจำลองระบบด้วยคอมพิวเตอร์กับกระบวนการเชิงเส้นแบบต่างๆ

ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาผลของการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยโครงสร้างการปรับจูนตัวควบคุม PID ทำนายแบบจำลองที่เสนอจากการจำลองระบบด้วยคอมพิวเตอร์ โดยทำการทดลองกับกระบวนการเชิงเส้นต่างๆที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนจากสมการที่ (2.11)

จุดประสงค์ในการทดลอง

1. พิจารณาผลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ปรากฏในฟังก์ชันจุดประสงค์ต่อการควบคุมผลตอบสนองของกระบวนการ โดยทำการทดลองกับกระบวนการที่มีลักษณะพลวัตแบบต่างๆที่พบโดยทั่วไปจากกระบวนการที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนแบบที่ 2, 4 และ 5 และความสามารถในการชดเชยผลของค่าประวิงเวลาสำหรับกระบวนการที่ 1-3 หลังจากนั้นจะนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีการปรับจูนตัวเองที่อาศัยเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์จากบทที่ 2 ตอนที่ 2.3

2. พิจารณาความสามารถในการควบคุมกระบวนการที่มีความไม่แน่นอนในพารามิเตอร์ของกระบวนการ หลังจากนั้นจะนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีการปรับจูนตัวเองที่อาศัยการป้อนกลับด้วยรีเลย์จากบทที่ 2 ตอนที่ 2.3

ขั้นตอนการทดสอบ

แบ่งการทดสอบออกเป็นขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

1. เลือกข่ายงานระบบประสาทที่มีความแม่นยำในการทำนายผลตอบสนองของกระบวนการ โดยการทดลองเปลี่ยนจำนวนปมในชั้นซ่อนภายใน 10, 20 และ 30 ปมตามลำดับ เพื่อพิจารณาขนาดโครงสร้างที่เหมาะสม และมีความแม่นยำในการทำนายผลตอบสนองของกระบวนการ

2. พิจารณาผลของค่าพารามิเตอร์ N_p , N_u , Γ_e , Γ_u ที่ปรากฏในฟังก์ชันจุดประสงค์และนำผลไปเปรียบเทียบกับผลการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนโดยอาศัยการป้อนกลับด้วยรีเลย์จากบทที่ 2 ตอนที่ 2.3 ในการกำหนดค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ N_1 , N_p , N_u , Γ_e , Γ_u จะอาศัยคำแนะนำของ Dumur และ Boucher [13] กำหนด Γ_e เท่ากับ 1 และกำหนด Γ_u เท่ากับ 0 กำหนดค่า N_1 จากความสัมพันธ์ $N_1 h = d$ เมื่อ h คือค่าเวลาการชักตัวอย่าง สำหรับ N_p จะขึ้น

อยู่กับช่วงเวลาขาขึ้นของกระบวนการหรือ T_r กำหนดค่า N_p จากความสัมพันธ์ $N_p h = T_r$ เมื่อ h คือค่าเวลาการซัดตัวอย่าง นอกจากนี้ค่าเวลาการซัดตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองนี้จะกำหนดให้สอดคล้องกับเงื่อนไขที่แนะนำโดย Astrom [6] ดังนี้

$$N_r = \frac{T_r}{h} \approx 4-10 \quad (4.12)$$

โดย h คือ ค่าเวลาการซัดตัวอย่างและ T_r คือช่วงเวลาขาขึ้นของกระบวนการ จากหลักเกณฑ์ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆข้างต้น จะกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นสำหรับกระบวนการต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 4.1 การกำหนดค่าเริ่มต้นของ h , N_i และ N_p สำหรับกระบวนการต่างๆ

	T_r	h	N_i	N_p
1. $G_1(s) = \frac{e^{-s}}{s+1}$	2.21	0.5	3	6
2. $G_2(s) = \frac{e^{-2s}}{s+1}$	2.21	0.5	5	8
3. $G_3(s) = \frac{e^{-3s}}{s+1}$	2.21	0.5	7	10
4. $G_4(s) = \frac{-1.4s+1}{(s+1)^3}$	5.63	1	1	5
5. $G_5(s) = \frac{1}{(s+1)^5}$	5.5	1	1	5

ในการศึกษาผลของพารามิเตอร์ N_p , N_u , Γ_c , Γ_u ที่ปรากฏในฟังก์ชันจุดประสงค์ เพื่อพิจารณาผลของพารามิเตอร์แต่ละตัว จะเปลี่ยนค่าของพารามิเตอร์ที่พิจารณาจากค่าเริ่มต้นอีก 2 ค่า และคงค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นเอาไว้ที่ค่าเริ่มต้นที่กำหนดให้ โดยแบ่งการทดลองเป็นกรณีต่างๆ 9 กรณีเพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์ N_p , N_u , Γ_c , Γ_u ดังนี้

1. การทดลองกรณีที่ 1, 2 และ 3 เพื่อศึกษาผลของ Γ_c
2. การทดลองกรณีที่ 1, 4 และ 5 เพื่อศึกษาผลของ Γ_u
3. การทดลองกรณีที่ 1, 6 และ 7 เพื่อศึกษาผลของ N_p
4. การทดลองกรณีที่ 1, 8 และ 9 เพื่อศึกษาผลของ N_u

หลังจากการปรับจูนเสร็จสิ้น จะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID สำหรับกระบวนการที่พิจารณา จะนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีการปรับจูนตัวเองที่อาศัยเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์จากบทที่ 2 ตอนที่ 2.3

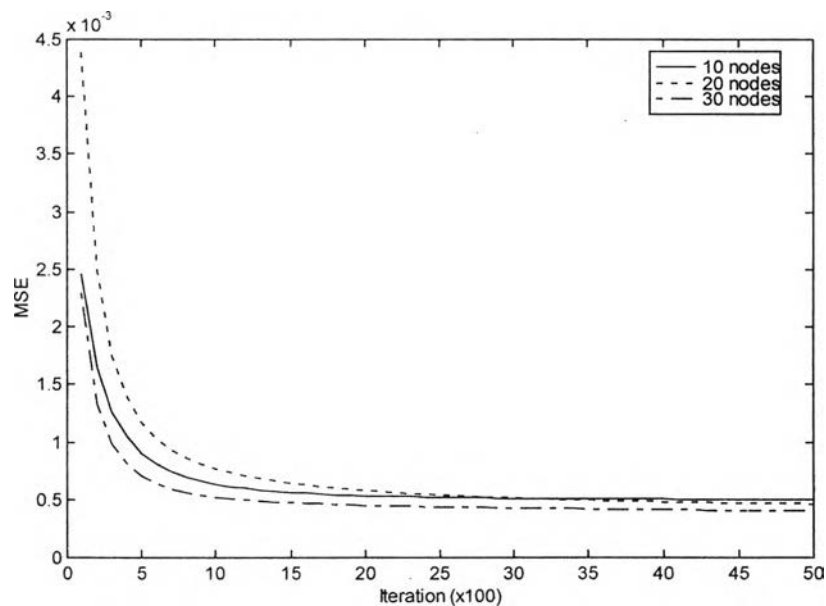
3. ทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการปรับจูนตัวควบคุม PID ที่เสนอเมื่อมีความไม่แน่นอนในพารามิเตอร์ของกระบวนการ โดยกำหนดความไม่แน่นอนในพารามิเตอร์ของกระบวนการจากการเปลี่ยนแปลงอัตราขยายที่สถานะอยู่ตัว (steady state gain) ของกระบวนการที่ 4 และ 5 จากค่าที่สถานะปกติเพิ่มขึ้น และลดลง 10% และกระบวนการที่ 1-3 มีการเพิ่มค่าประวิงเวลาของกระบวนการจากค่าที่สถานะปกติ 10% เนื่องจากในการทดลองมีสมมติฐานว่าทราบค่าประวิงเวลาที่น้อยที่สุดของกระบวนการ ซึ่งกำหนดให้เท่ากับค่าประวิงเวลาที่สถานะปกติ

หลังจากนั้นจะนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีการปรับจูนตัวเองที่อาศัยเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์จากบทที่ 2 ตอนที่ 2.3

4.2.1 กระบวนการเชิงเส้นที่มีฟังก์ชันถ่ายโอน $G(s) = \frac{e^{-s}}{(s+1)}$

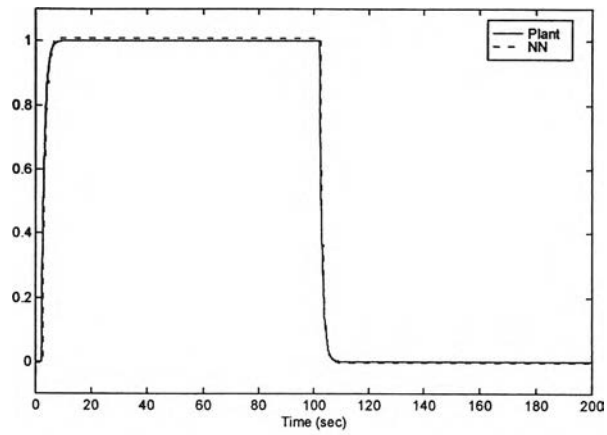
ขั้นตอนการหาคุณลักษณะโดยใช้ข่ายงานระบบประสาท

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

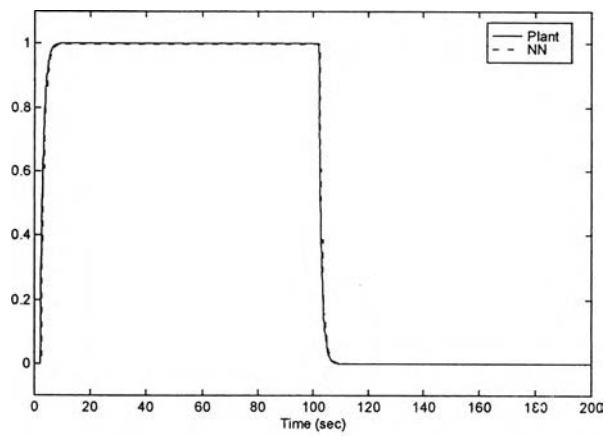


รูปที่ 4.3 ผลการฝึกข่ายงานระบบประสาทที่มีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายในแตกต่างกันสำหรับกระบวนการแบบที่ 1

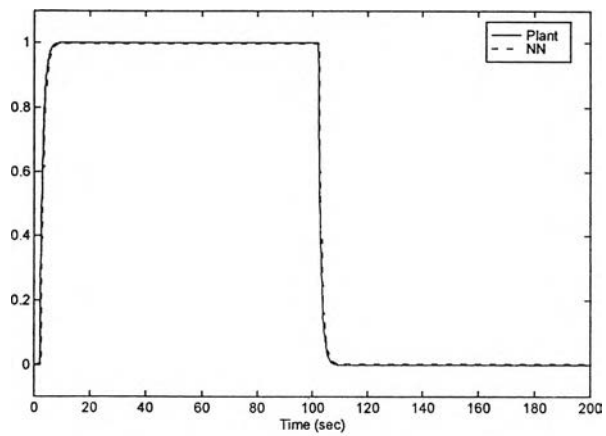
จากรูปข้างต้น พบว่าข่ายงานระบบประสาทที่มีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายในแบบต่างๆมีความสามารถในการหาคุณลักษณะของกระบวนการใกล้เคียงกัน โดยพิจารณาจากค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยหลังจากการฝึกซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน ต่อไปจะพิจารณาประสิทธิภาพในการทำนายผลตอบสนองแบบขั้นของกระบวนการด้วยข่ายงานระบบประสาทที่ได้จากการฝึก ได้ผลดังนี้



(ก) แบบที่ 1 จำนวนปมในชั้นซ่อนภายใน 10 ปม



(ข) แบบที่ 2 จำนวนปมในชั้นซ่อนภายใน 20 ปม



(ค) แบบที่ 3 จำนวนปมในชั้นซ่อนภายใน 30 ปม

รูปที่ 4.4 ผลการทำนายผลตอบสนองแบบขั้นด้วยข่ายงานระบบประสาทที่มีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายในแตกต่างกันสำหรับกระบวนการแบบที่ 1

จากผลการเปรียบเทียบข้างต้น พบว่าความสามารถในการทำนายผลตอบสนองของข่ายงานระบบประสาททั้ง 3 แบบไม่ต่างกันมากนัก จึงเลือกข่ายงานระบบประสาทแบบที่ 1 เนื่องจากมีโครงสร้างเล็กที่สุด ใช้เวลาในการคำนวณน้อย และประสิทธิภาพในการทำนายผลตอบสนองใกล้เคียงกับข่ายงานระบบประสาทอีก 2 แบบที่มีขนาดใหญ่กว่า

ความสามารถในการทำนายผลตอบสนองล่วงหน้าของกระบวนการ

พิจารณาความสามารถในการทำนายผลตอบสนองล่วงหน้าของข่ายงานระบบประสาทจากค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยระหว่างผลตอบสนองของกระบวนการเมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมกับผลตอบสนองที่ได้จากการทำนายด้วยข่ายงานระบบประสาท

ตารางที่ 4.2 ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของผลตอบสนองที่ทำนายได้จากข่ายงานระบบประสาทที่ชั้นต่างๆสำหรับกระบวนการแบบที่ 1

	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	ชั้นที่ 6
MSE($\times 10^{-4}$)	2.23	2.02	3.88	3.67	4.56	4.43

พบว่าเมื่อจำนวนชั้นในการทำนายเพิ่มขึ้น ความสามารถในการทำนายผลตอบสนองจะลดลง พิจารณาจากค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อชั้นการทำนายเพิ่มขึ้น

ผลของพารามิเตอร์ต่างๆในฟังก์ชันจุดประสงค์ต่อผลตอบสนองภายใต้การควบคุม

จากผลการจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์ สามารถทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการปรับจูนตัวควบคุม PID และพิจารณาผลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

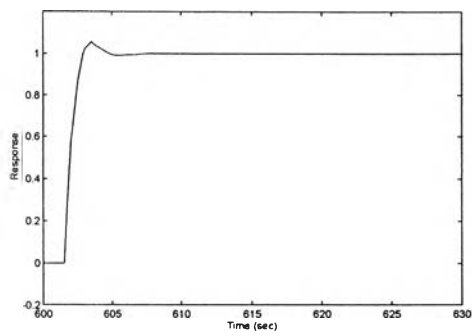
1. การถ่วงน้ำหนักการทำนาย หรือ Γ_e
2. การถ่วงน้ำหนักสัญญาณควบคุม หรือ Γ_u
3. เส้นขอบการทำนายสูงสุด หรือ N_p
4. เส้นขอบควบคุม หรือ N_u

โดยกำหนดเส้นขอบการทำนายต่ำสุดเท่ากับค่าประวิงเวลาของกระบวนการ คือ $N_1 = 3$ และกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวควบคุม PID ในทุกกรณีคือ $K = 0.1, T_i = 0.5, T_d = 0.5$

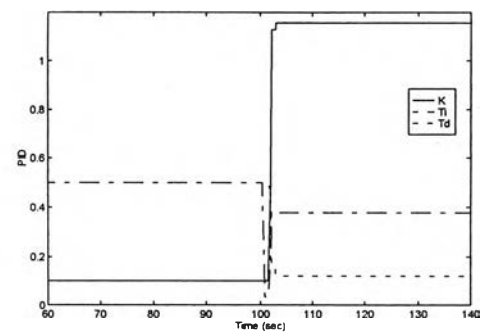
ตารางที่ 4.3 การศึกษาผลของพารามิเตอร์ในฟังก์ชันจุดประสงค์ต่อผลการควบคุมและสรุปค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนได้สำหรับกระบวนการที่ 1

กรณีที่	Γ_e	Γ_u	N_1	N_p	N_u	K	T_i	T_d
1	1	0	3	6	1	1.1568	0.3795	0.1176
2	0.5	0	3	6	1	0.8010	0.2824	0.1330
3	1.5	0	3	6	1	1.4970	0.4439	0.0436
4	1	0.5	3	6	1	0.5502	0.3227	0.2449
5	1	1	3	6	1	0.3502	0.2920	0.3719
6	1	0	3	4	1	1.1251	0.2962	0.1363
7	1	0	3	8	1	0.9936	0.4074	0.0807
8	1	0	3	6	2	1.4665	0.3114	0.0781
9	1	0	3	6	4	1.2649	0.2591	0.1048

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

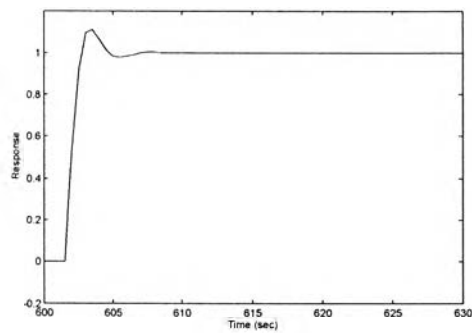


(ก)

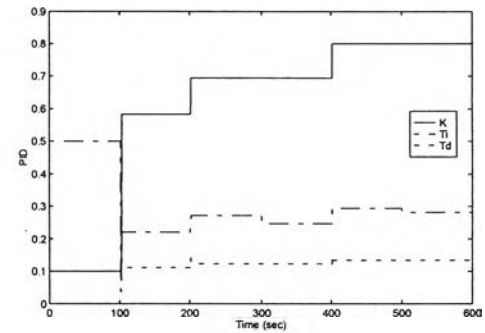


(ข)

รูปที่ 4.5 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 1 ของกระบวนการที่ 1

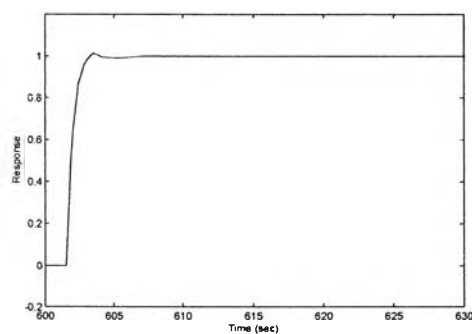


(ก)

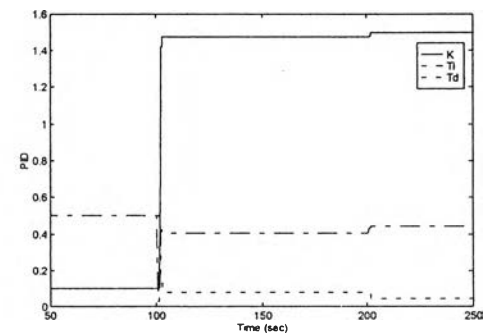


(ข)

รูปที่ 4.6 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 2 ของกระบวนการที่ 1

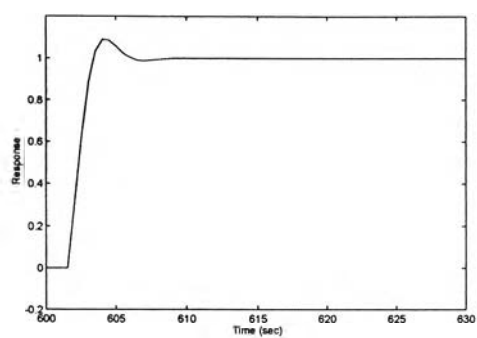


(ก)

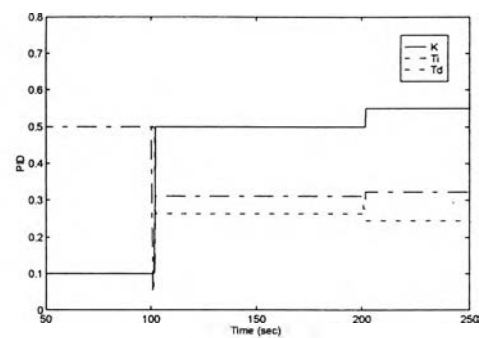


(ข)

รูปที่ 4.7 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 3 ของกระบวนการที่ 1

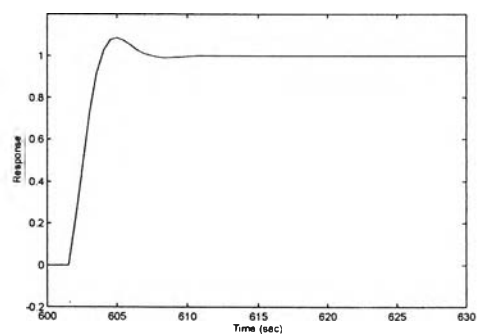


(ก)

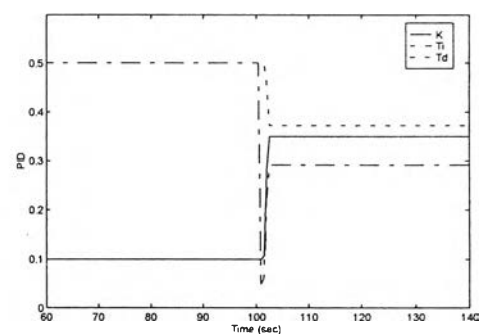


(ข)

รูปที่ 4.8 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 4 ของกระบวนการที่ 1

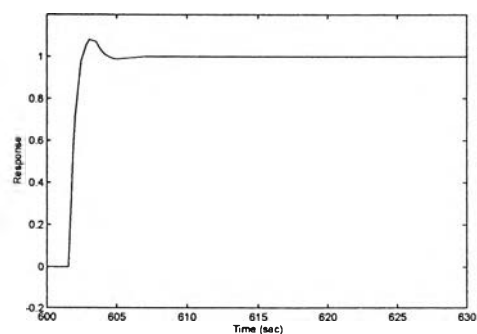


(ก)

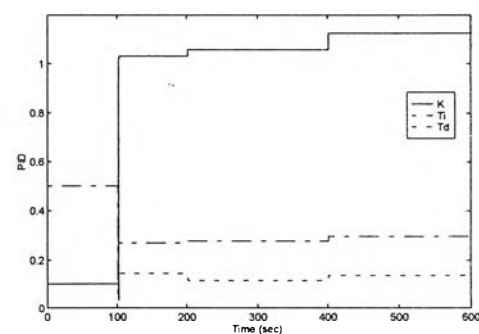


(ข)

รูปที่ 4.9 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 5 ของกระบวนการที่ 1

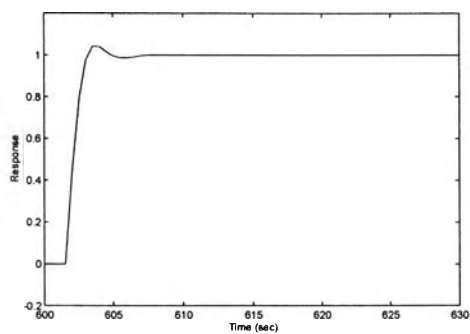


(ก)

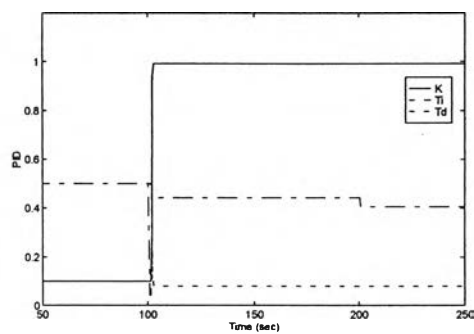


(ข)

รูปที่ 4.10 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 6 ของกระบวนการที่ 1

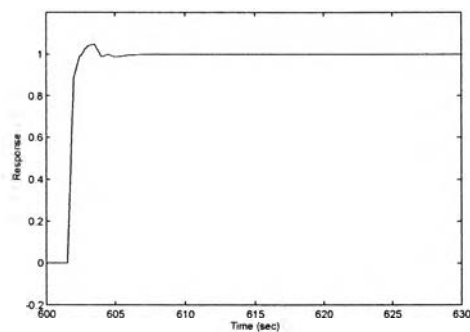


(ก)

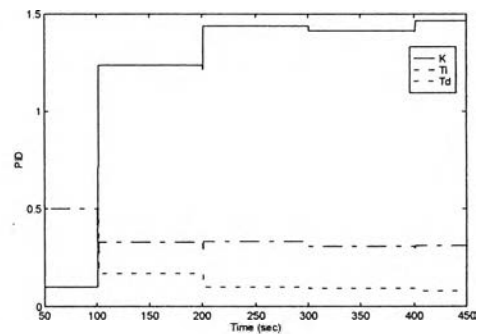


(ข)

รูปที่ 4.11 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 7 ของกระบวนการที่ 1

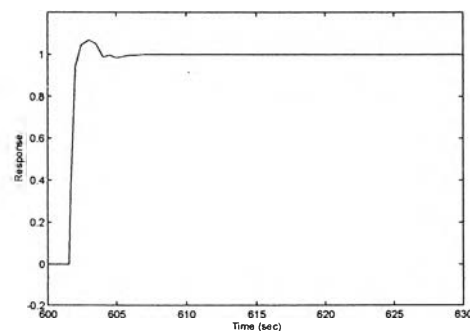


(ก)

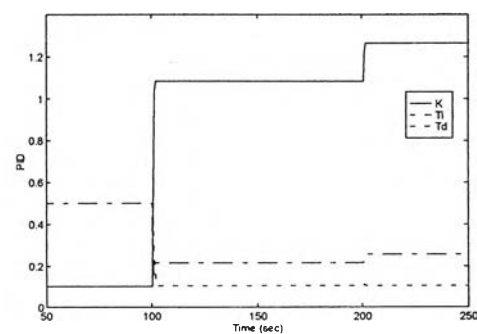


(ข)

รูปที่ 4.12 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 8 ของกระบวนการที่ 1



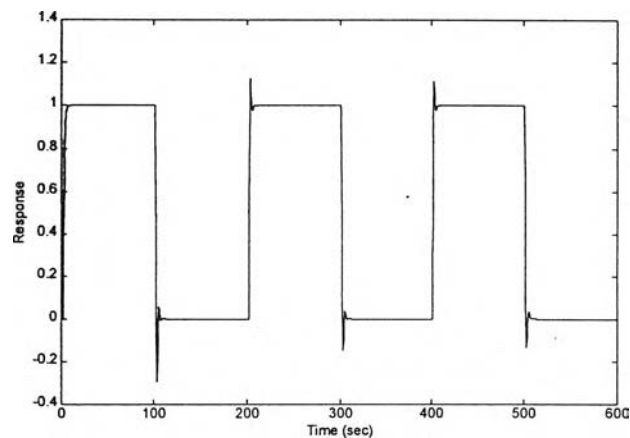
(ก)



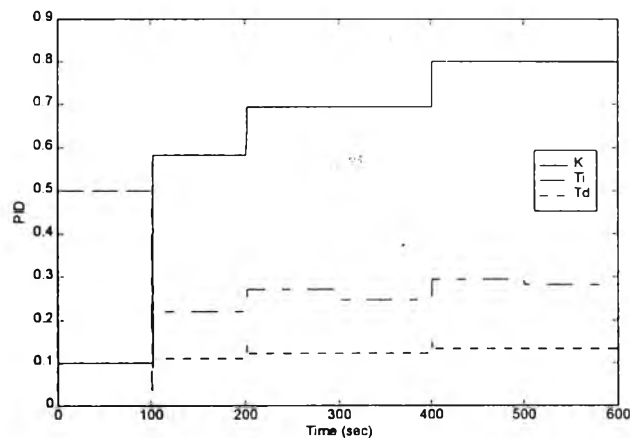
(ข)

รูปที่ 4.13 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 9 ของกระบวนการที่ 1

พิจารณาผลตอบสนองระหว่างที่มีการปรับจูนตัวควบคุม PID จนกระทั่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID คงที่จากการทดลองครั้งที่ 2 ซึ่งใช้เวลาในการปรับจูนมากที่สุด เท่ากับ 500 วินาที ดังรูปที่ 4.14



(ก) ผลตอบสนองระหว่างที่มีการปรับจูน



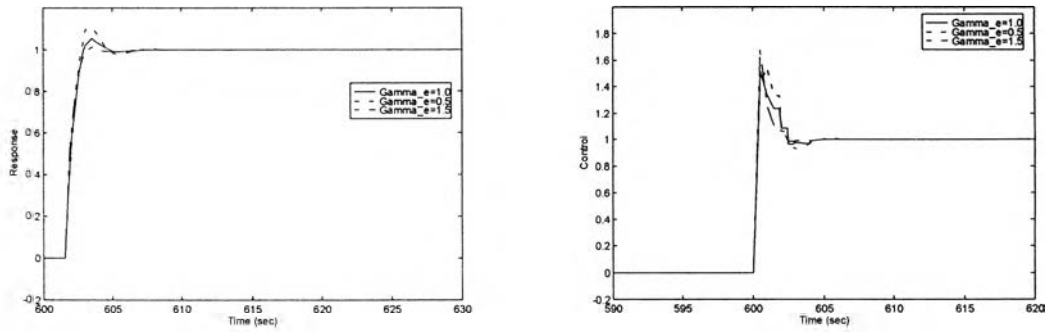
(ข) ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID

รูปที่ 4.14 ผลตอบสนองระหว่างที่มีการปรับจูนตัวควบคุม PID จากการทดลองครั้งที่ 2 ของกระบวนการที่ 1 ที่เวลา 0-600 วินาที

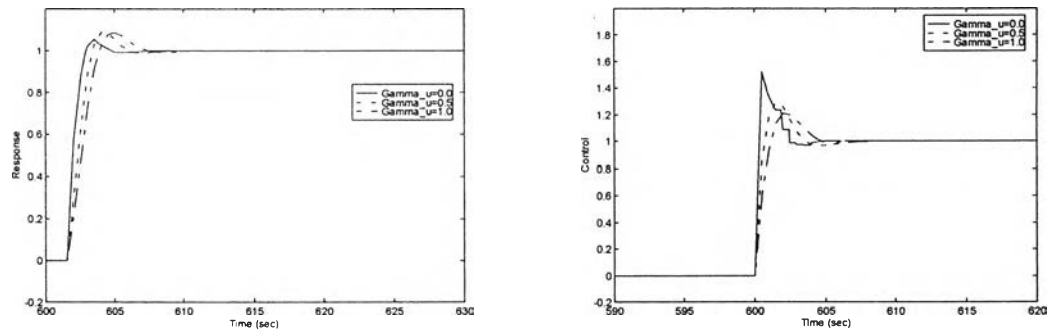
จากรูปที่ 4.14 พบว่าผลตอบสนองถูกควบคุมให้เข้าสู่ค่าปรับตั้งที่กำหนดตลอดช่วงเวลาที่มีการปรับจูนตัวควบคุม PID การปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID เกิดขึ้นที่จุดเปลี่ยนค่าปรับตั้ง เพื่อควบคุมให้ผลตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าปรับตั้ง โดยการปรับจูนในช่วงแรก ๆ อาจทำให้ผลการควบคุมไม่ดี ซึ่งจากรูปที่ 4.14 ผลตอบ

สนองมีค่าพุ่งเกินสูง แต่จะมีการปรับปรุงผลการควบคุมโดยการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID จนกระทั่งได้ค่าคงที่ที่สอดคล้องกับค่า N_p , N_u , Γ_e , Γ_u ที่ทำให้ฟังก์ชันจุดประสงค์ J มีค่าต่ำสุด ลดค่าพุ่งเกินของผลตอบสนอง

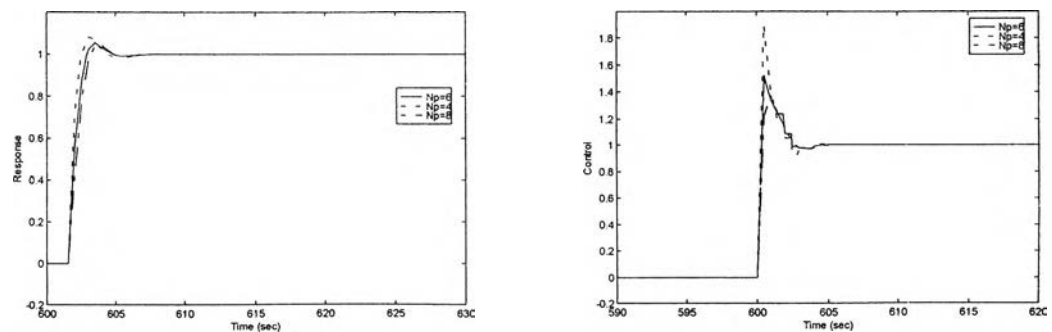
พิจารณาผลการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในฟังก์ชันจุดประสงค์ต่อผลการควบคุม



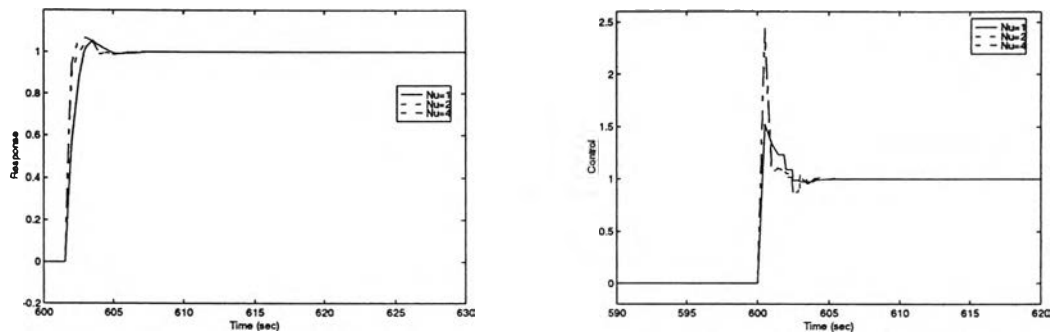
รูปที่ 4.15 ผลการเปลี่ยนแปลง Γ_e ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการที่ 1



รูปที่ 4.16 ผลการเปลี่ยนแปลง Γ_u ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการที่ 1



รูปที่ 4.17 ผลการเปลี่ยนแปลง N_p ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการที่ 1



รูปที่ 4.18 ผลการเปลี่ยนแปลง N_u ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการที่ 1

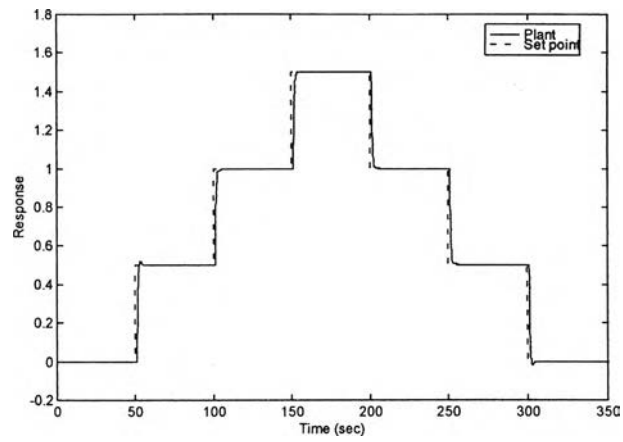
ผลการปรับจูนตัวควบคุม PID และการเปรียบเทียบกับ การปรับจูนตัวควบคุม PID ด้วยวิธีอื่น

จากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

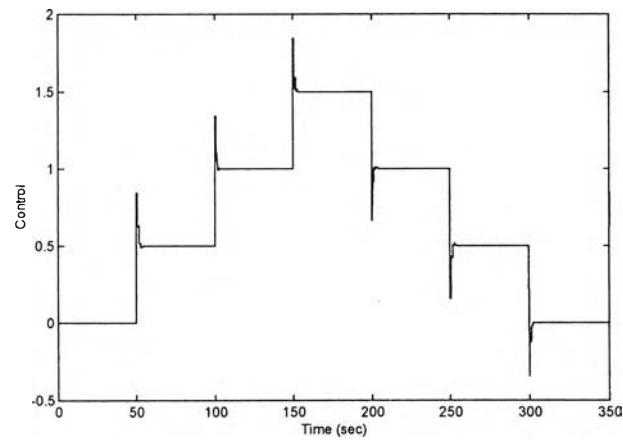
เงื่อนไข

1. การถ่วงน้ำหนักการทำนาย หรือ Γ_v = 1.5
2. การถ่วงน้ำหนักสัญญาณควบคุม หรือ Γ_u = 0
3. เส้นขอบการทำนายสูงสุด หรือ N_p = 6
4. เส้นขอบควบคุม หรือ N_u = 1

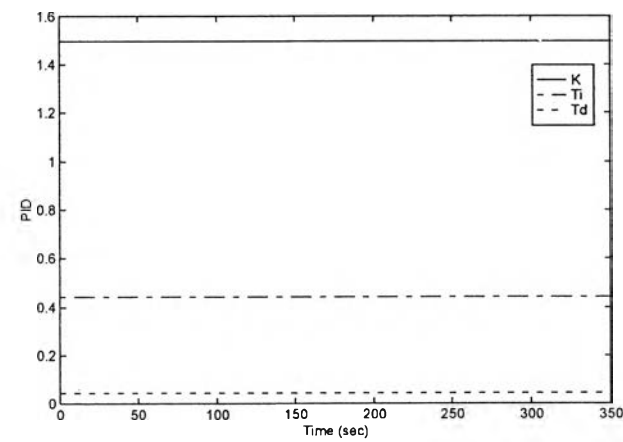
พิจารณาผลการควบคุมตามการเปลี่ยนค่าปรับตั้ง โดยจะทำการควบคุมให้สัญญาณออกมีค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.5 หน่วย เริ่มจาก 0 หน่วยไปจนถึง 1.5 หน่วย แล้วทำการควบคุมลดสัญญาณออกลงจนมีค่าเท่ากับ 0 หน่วยอีกครั้งหนึ่ง ดังรูปที่ 4.19 ซึ่งจะเห็นได้ว่าตัวควบคุมสามารถควบคุมผลตอบสนองให้เปลี่ยนแปลงตามค่าปรับตั้งได้ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ PID เนื่องจากลักษณะพลวัตของกระบวนการภายใต้การควบคุมคงที่ แต่ลักษณะของผลตอบสนองมีความแตกต่างกันเล็กน้อยที่จุดเปลี่ยนค่าปรับตั้ง เนื่องจากผลของความแม่นยำในการทำนายผลตอบสนองของตัวทำนาย เพราะโครงสร้างตัวควบคุม PID ใช้ความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าปรับตั้งและผลตอบสนองที่ทำนายได้จากตัวทำนายในการสร้างสัญญาณควบคุมเพื่อชดเชยผลของการประวิงเวลา



(ก) ผลตอบสนองภายใต้การควบคุม



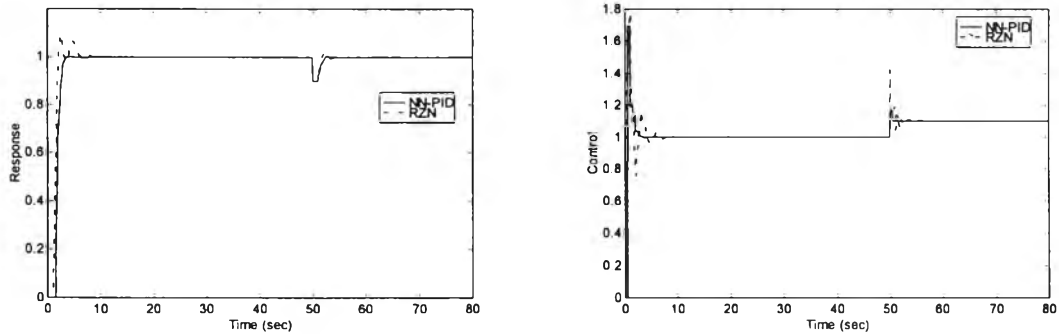
(ข) สัญญาณควบคุม



(ค) ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID

รูปที่ 4.19 การควบคุมตามการเปลี่ยนค่าปรับตั้งแบบขั้นบันไดของกระบวนการที่ 1

พิจารณาผลตอบสนองแบบขั้น และความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวน เมื่อมีสัญญาณภาระขนาดคงที่ 0.1 ณ วินาทีที่ 50



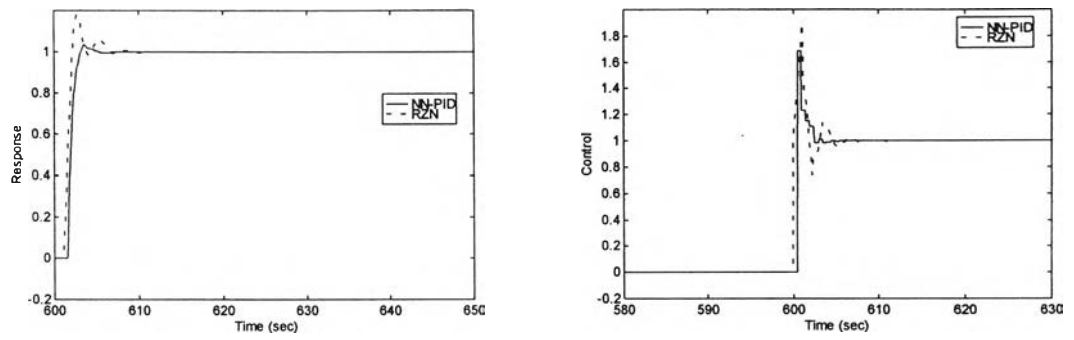
รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบลักษณะผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมจากการควบคุมด้วยตัวควบคุมที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีต่างๆของกระบวนการที่ 1

ประสิทธิภาพต่อความไม่แน่นอนในพารามิเตอร์ของกระบวนการ

ในการทดลองนี้ สมมติว่ามีความไม่แน่นอนของค่าประวิงเวลา เมื่อค่าประวิงเวลาเปลี่ยนจาก 1 วินาที เป็น 1.1 วินาที ณ วินาทีที่ 350

<u>เงื่อนไข</u>	1. การถ่วงน้ำหนักการทำนาย หรือ Γ_c	= 1.5
	2. การถ่วงน้ำหนักสัญญาณควบคุม หรือ Γ_u	= 0
	3. เส้นขอบการทำนายสูงสุด หรือ N_p	= 6
	4. เส้นขอบควบคุม หรือ N_u	= 1

จากการทดลองพบว่าเมื่อมีความไม่แน่นอนของค่าประวิงเวลา เนื่องจากการเปลี่ยนค่าประวิงเวลาจาก 1 เป็น 1.1 วินาที ไม่มีการปรับจูนตัวควบคุม PID เกิดขึ้น นำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบระหว่างผลการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีการปรับจูน โดยอาศัยการป้อนกลับด้วยรีเลย์ในบทที่ 2 และตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีที่เสนอได้ผลการทดลองดังนี้

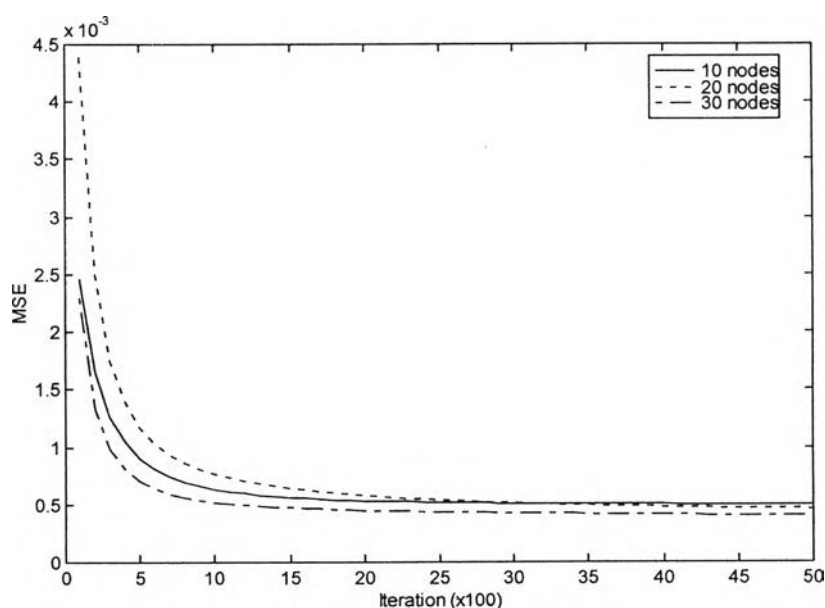


รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบลักษณะผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมจากการควบคุมด้วยตัวควบคุมที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีต่างๆของกระบวนการที่ 1 เมื่อค่าประวิงเวลาเปลี่ยนจาก 1 เป็น 1.1 วินาที

4.2.2 กระบวนการเชิงเส้นที่มีฟังก์ชันถ่ายโอน $G(s) = \frac{e^{-2s}}{(s+1)}$

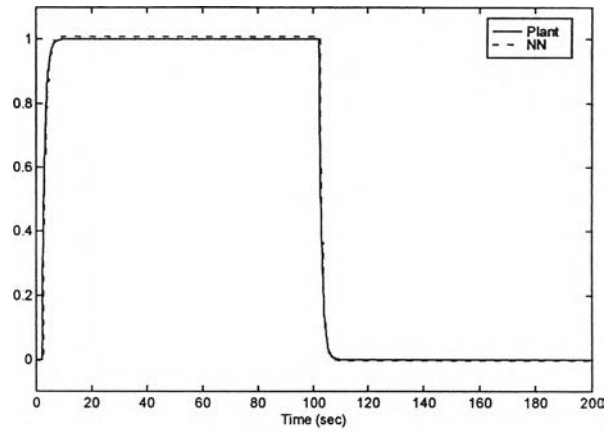
ขั้นตอนการหาคุณลักษณะโดยใช้ข่ายงานระบบประสาท

ในการฝึกข่ายงานระบบประสาทเพื่อประมาณฟังก์ชันซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเข้าและข้อมูลออกของกระบวนการ กำหนดโครงสร้างของข่ายงานระบบประสาทที่ใช้เป็นแบบป้อนไปข้างหน้า โดยฟังก์ชันกระตุ้นที่ใช้เป็นฟังก์ชัน log-sigmoid มี 3 ชั้น ชั้นอินพุตมี 4 ปม ชั้นซ่อนภายในมี 3 แบบคือ 10, 20 และ 30 ปมตามลำดับ ชั้นเอาต์พุตมี 1 ปม ข้อมูลเข้าประกอบด้วย สัญญาณต่างๆ ดังนี้ $y(t-1), y(t-2), u(t-5), u(t-6)$ โดยทำการฝึก 5000 รอบ พิจารณาค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยระหว่างการฝึกของข่ายงานระบบประสาทที่มีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายในแตกต่างกัน ดังนี้

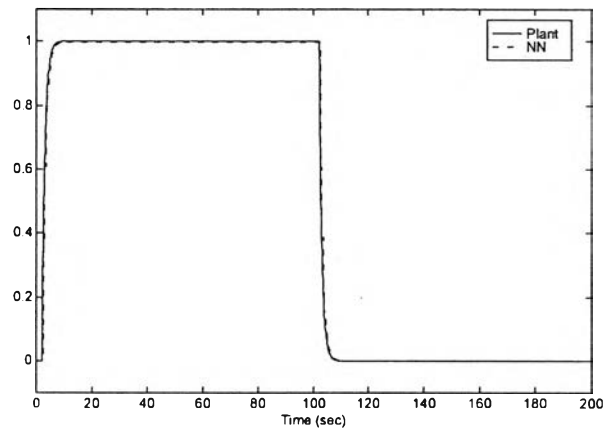


รูปที่ 4.22 ผลการฝึกข่ายงานระบบประสาทที่มีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายในแตกต่างกันสำหรับกระบวนการแบบที่ 2

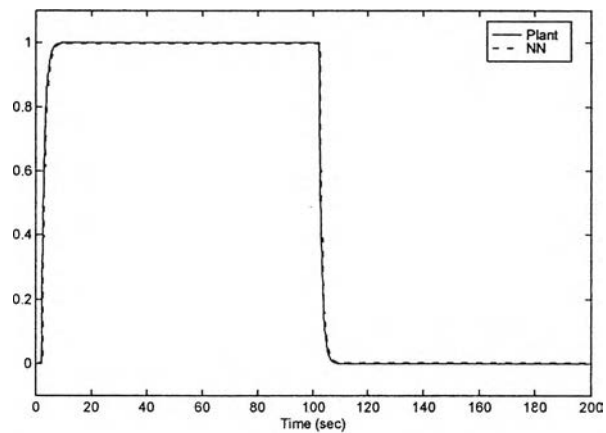
จากรูปข้างต้น พบว่าข่ายงานระบบประสาทที่มีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายในแบบต่างๆ มีความสามารถในการหาคุณลักษณะของกระบวนการใกล้เคียงกัน ต่อไปจะพิจารณาประสิทธิภาพในการทำนายผลตอบสนองแบบขั้นของกระบวนการด้วยข่ายงานระบบประสาทที่ได้จากการฝึก ได้ผลดังนี้



(ก) แบบที่ 1 จำนวนปมในชั้นซ่อนภายใน 10 ปม



(ข) แบบที่ 2 จำนวนปมในชั้นซ่อนภายใน 20 ปม



(ค) แบบที่ 3 จำนวนปมในชั้นซ่อนภายใน 30 ปม

รูปที่ 4.23 ผลการทำนายผลตอบสนองแบบขั้นด้วยข่ายงานระบบประสาทที่มีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายในแตกต่างกันสำหรับกระบวนการแบบที่ 2

จากผลการเปรียบเทียบข้างต้น พบว่าความสามารถในการทำนายผลตอบสนองของข่ายงานระบบประสาททั้ง 3 แบบไม่ต่างกันมากนัก จึงเลือกข่ายงานระบบประสาทแบบที่ 1 เนื่องจากมีโครงสร้างเล็กที่สุด ใช้เวลาในการคำนวณน้อย และประสิทธิภาพในการทำนายผลตอบสนองใกล้เคียงกับข่ายงานระบบประสาทอีก 2 แบบที่มีขนาดใหญ่กว่า

ความสามารถในการทำนายผลตอบสนองล่วงหน้าของกระบวนการ

พิจารณาความสามารถในการทำนายผลตอบสนองล่วงหน้าของข่ายงานระบบประสาทจากค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย ระหว่างผลตอบสนองของกระบวนการเมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมกับผลตอบสนองที่ได้จากการทำนายด้วยข่ายงานระบบประสาท

ตารางที่ 4.4 ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของผลตอบสนองที่ทำนายได้จากข่ายงานระบบประสาทที่ชั้นต่างๆสำหรับกระบวนการแบบที่ 2

	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	ชั้นที่ 6	ชั้นที่ 7	ชั้นที่ 8
MSE($\times 10^5$)	2.23	2.02	3.88	3.67	4.56	4.43	4.81	4.74

พบว่าเมื่อจำนวนชั้นในการทำนายเพิ่มขึ้น ความสามารถในการทำนายผลตอบสนองจะลดลง พิจารณาจากค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อชั้นการทำนายเพิ่มขึ้น

ผลของพารามิเตอร์ต่างๆในฟังก์ชันจุดประสงค์ต่อผลตอบสนองภายใต้การควบคุม

จากผลการจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์ สามารถทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการปรับจูนตัวควบคุม PID และพิจารณาผลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

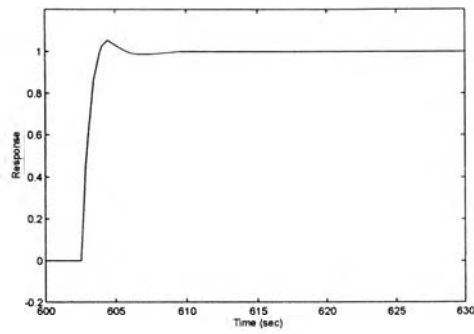
1. การถ่วงน้ำหนักการทำนาย หรือ Γ_e
2. การถ่วงน้ำหนักสัญญาณควบคุม หรือ Γ_u
3. เส้นขอบการทำนายสูงสุด หรือ N_p
4. เส้นขอบควบคุม หรือ N_u

โดยกำหนดเส้นขอบการทำนายต่ำสุดเท่ากับค่าประวิงเวลาของกระบวนการ คือ $N_1 = 5$ และกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวควบคุม PID ในทุกกรณีคือ $K = 0.1, T_i = 0.5, T_d = 0.5$

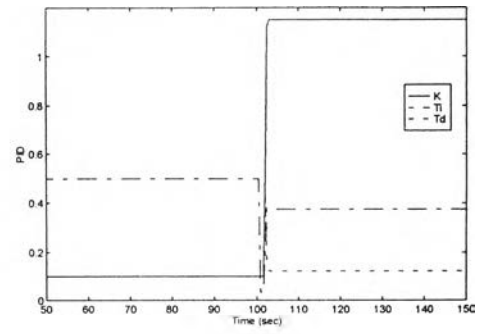
ตารางที่ 4.5 การศึกษาผลของพารามิเตอร์ในฟังก์ชันจุดประสงค์ต่อผลการควบคุมและสรุปค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนได้สำหรับกระบวนการที่ 2

กรณีที่	Γ_e	Γ_u	N_1	N_p	N_u	K	T_i	T_d
1	1	0	5	8	1	1.1508	0.3768	0.1223
2	0.5	0	5	8	1	0.7994	0.2815	0.1353
3	1.5	0	5	8	1	1.4929	0.4485	0.0448
4	1	0.5	5	8	1	0.5472	0.3213	0.2478
5	1	1	5	8	1	0.3485	0.2898	0.3748
6	1	0	5	6	1	1.0984	0.2945	0.1562
7	1	0	5	10	1	0.9863	0.4022	0.0887
8	1	0	5	8	2	1.4665	0.3113	0.0783
9	1	0	5	8	4	1.2844	0.2619	0.1035

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

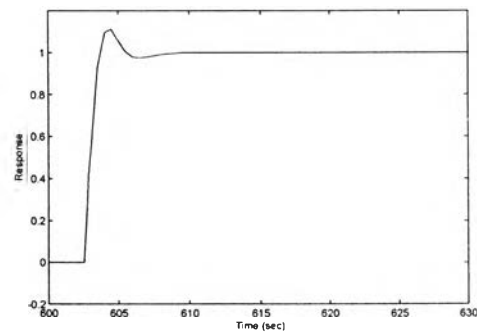


(ก)

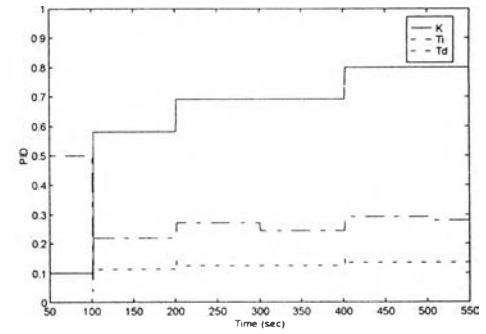


(ข)

รูปที่ 4.24 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 1 ของกระบวนการที่ 2

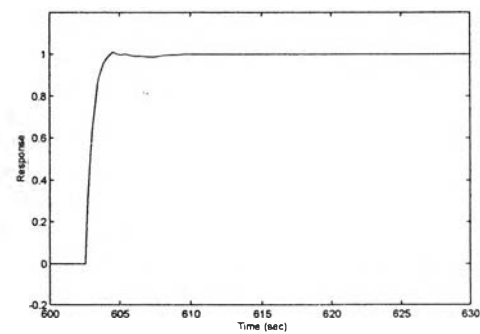


(ก)

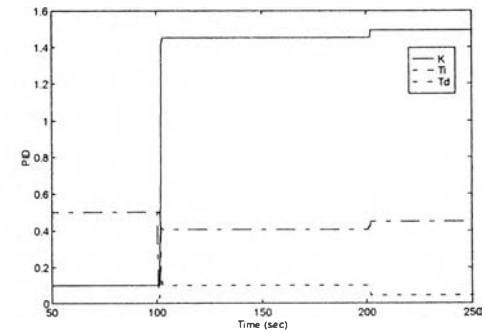


(ข)

รูปที่ 4.25 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 2 ของกระบวนการที่ 2

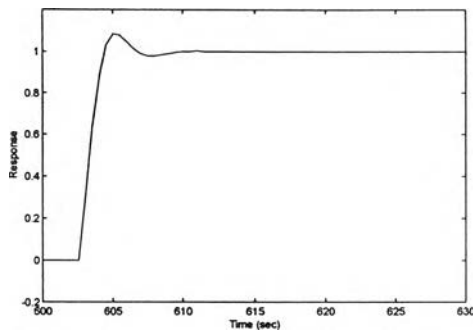


(ก)

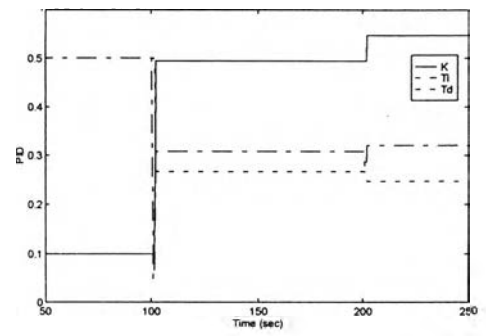


(ข)

รูปที่ 4.26 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 3 ของกระบวนการที่ 2

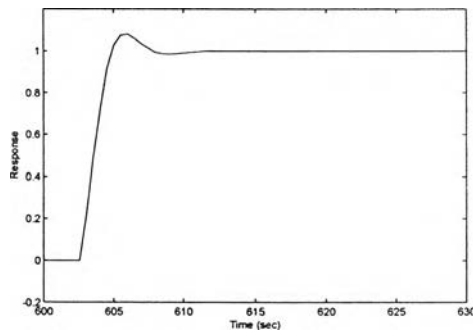


(ก)

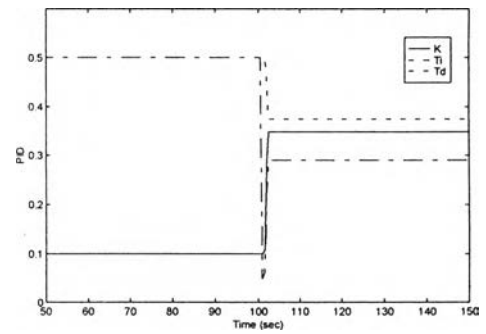


(ข)

รูปที่ 4.27 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 4 ของกระบวนการที่ 2

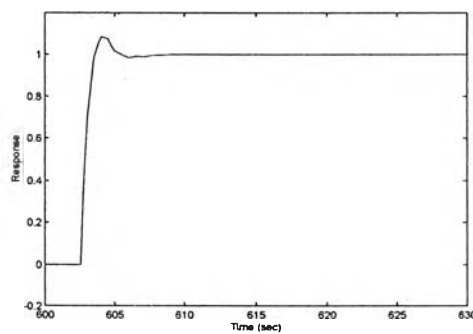


(ก)

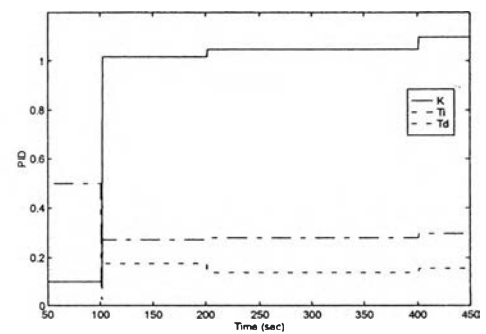


(ข)

รูปที่ 4.28 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 5 ของกระบวนการที่ 2

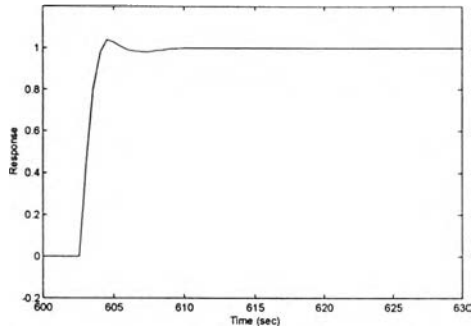


(ก)

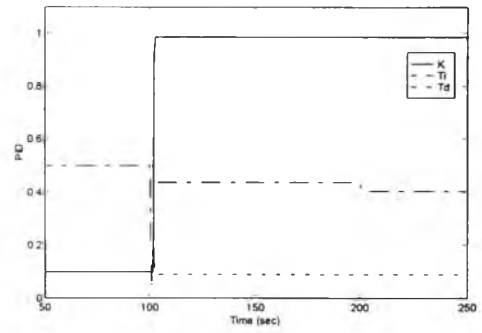


(ข)

รูปที่ 4.29 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 6 ของกระบวนการที่ 2

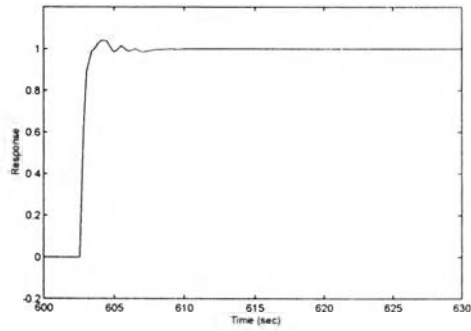


(ก)

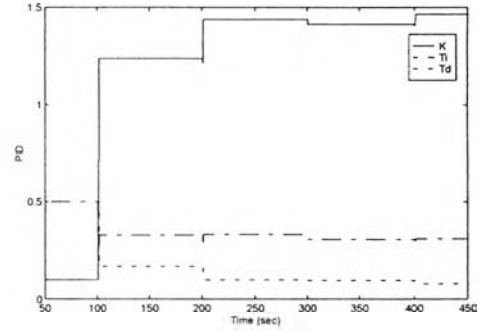


(ข)

รูปที่ 4.30 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 7 ของกระบวนการที่ 2

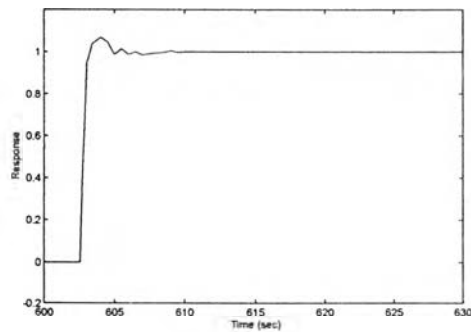


(ก)

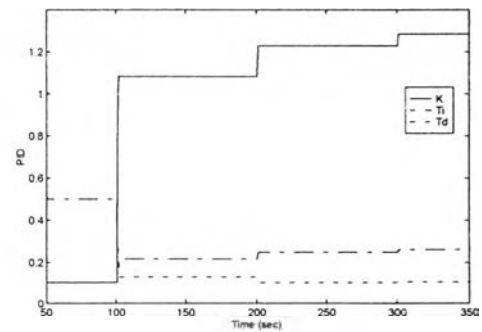


(ข)

รูปที่ 4.31 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 8 ของกระบวนการที่ 2



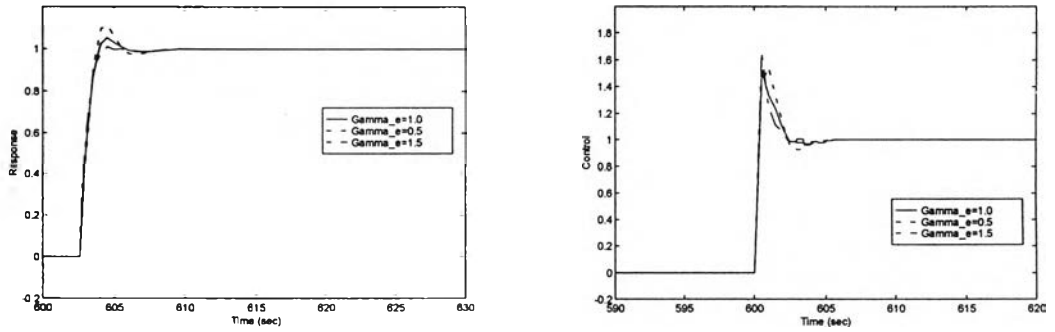
(ก)



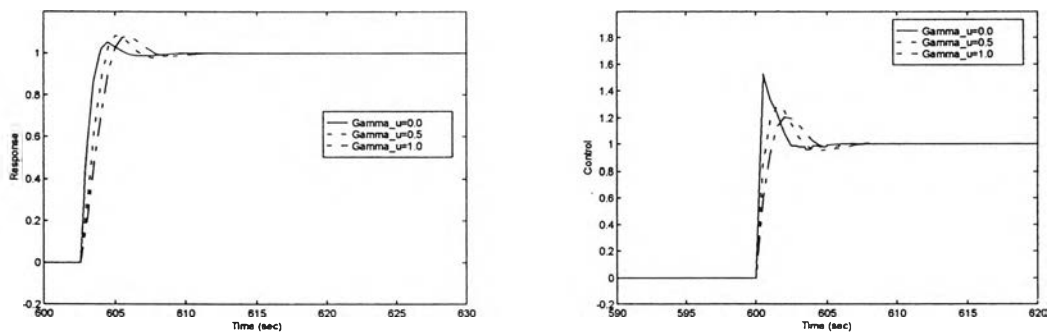
(ข)

รูปที่ 4.32 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 9 ของกระบวนการที่ 2

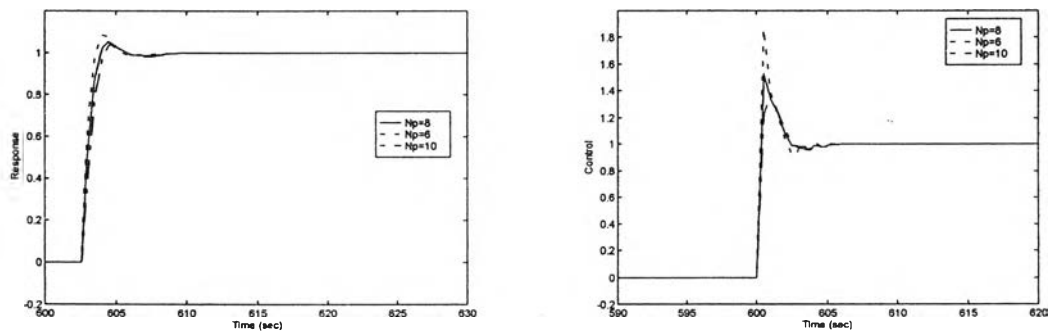
พิจารณาผลการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในฟังก์ชันจุดประสงค์ต่อผลการควบคุม



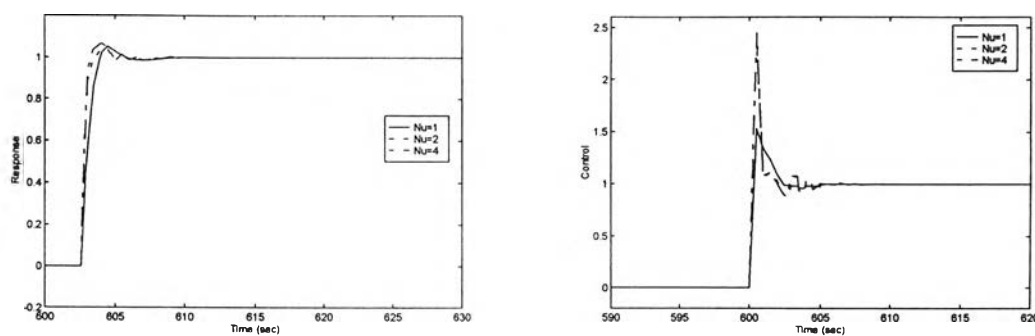
รูปที่ 4.33 ผลการเปลี่ยนแปลง Γ_e ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการที่ 2



รูปที่ 4.34 ผลการเปลี่ยนแปลง Γ_u ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการที่ 2



รูปที่ 4.35 ผลการเปลี่ยนแปลง N_p ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการที่ 2



รูปที่ 4.36 ผลการเปลี่ยนแปลง N_u ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการที่ 2

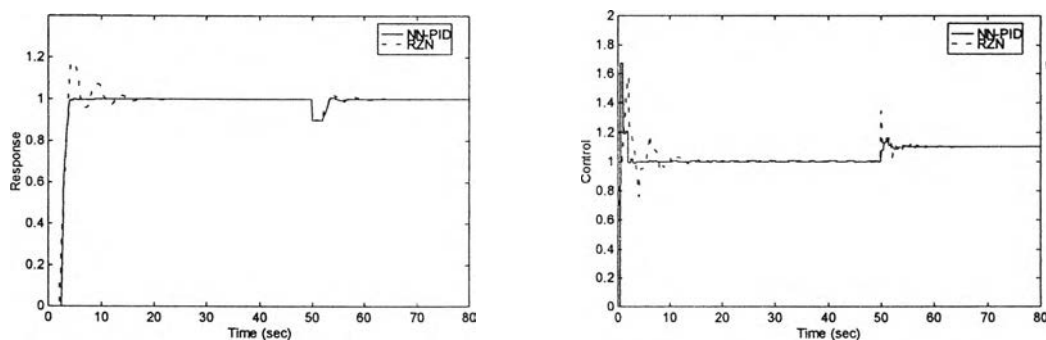
ผลการปรับจูนตัวควบคุม PID และการเปรียบเทียบกับ การปรับจูนตัวควบคุม PID ด้วยวิธีอื่น

จากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

เงื่อนไข

1. การถ่วงน้ำหนักการทำนาย หรือ Γ_c = 1.5
2. การถ่วงน้ำหนักสัญญาณควบคุม หรือ Γ_u = 0
3. เส้นขอบการทำนายสูงสุด หรือ N_p = 8
4. เส้นขอบควบคุม หรือ N_u = 1

พิจารณาผลตอบสนองแบบขั้น และความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวน เมื่อมีสัญญาณการรบกวนคงที่ 0.1 ณ วินาทีที่



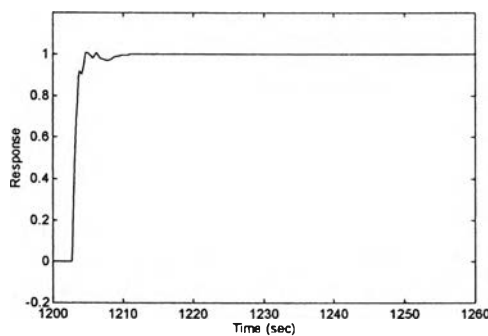
รูปที่ 4.37 เปรียบเทียบลักษณะผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมจากการควบคุมด้วยตัวควบคุมที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีต่างๆของกระบวนการที่ 2

ประสิทธิภาพต่อความไม่แน่นอนในพารามิเตอร์ของกระบวนการ

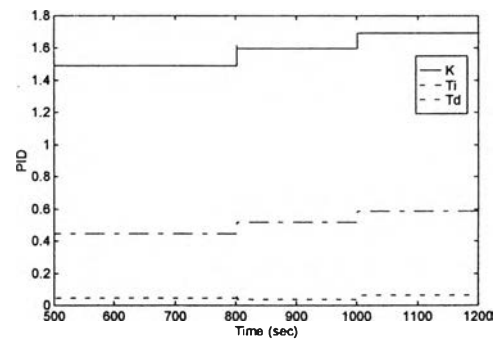
ในการทดลองนี้ สมมติว่ามีความไม่แน่นอนของค่าประวิงเวลา เมื่อค่าประวิงเวลาเปลี่ยนจาก 2 วินาที เป็น 2.2 วินาที ณ วินาทีที่ 350

เงื่อนไข	1. การถ่วงน้ำหนักการทำนาย หรือ Γ_e	= 1.5
	2. การถ่วงน้ำหนักสัญญาณควบคุม หรือ Γ_u	= 0
	3. เส้นขอบการทำนายสูงสุด หรือ N_p	= 8
	4. เส้นขอบควบคุม หรือ N_u	= 1

จากการทดลองพบว่ามี การปรับจูนตัวควบคุม PID เนื่องจากผลของค่าประวิงเวลาที่เปลี่ยนไปดังนี้



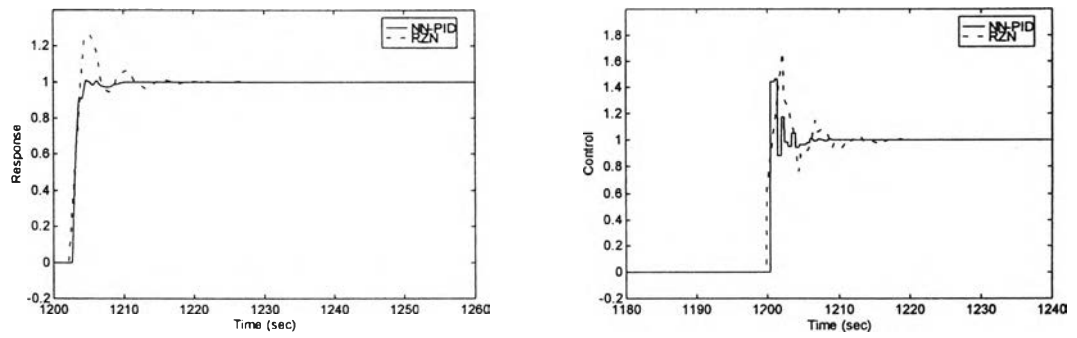
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.38 ผลการควบคุมและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID เมื่อกระบวนการที่ 2 เมื่อค่าประวิงเวลาเปลี่ยนจาก 2 เป็น 2.2 วินาที

รูป (ก) เป็นผลตอบสนองที่ได้จากการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ถูกปรับจูนเมื่อเกิดความไม่แน่นอนของค่าประวิงเวลา รูป (ข) แสดงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID เมื่อมีการปรับจูน นำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบระหว่างผลการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีการปรับจูน โดยอาศัยการป้อนกลับด้วยวิธีเลขในบทที่ 2 และตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีที่เสนอได้ผลการทดลองดังนี้

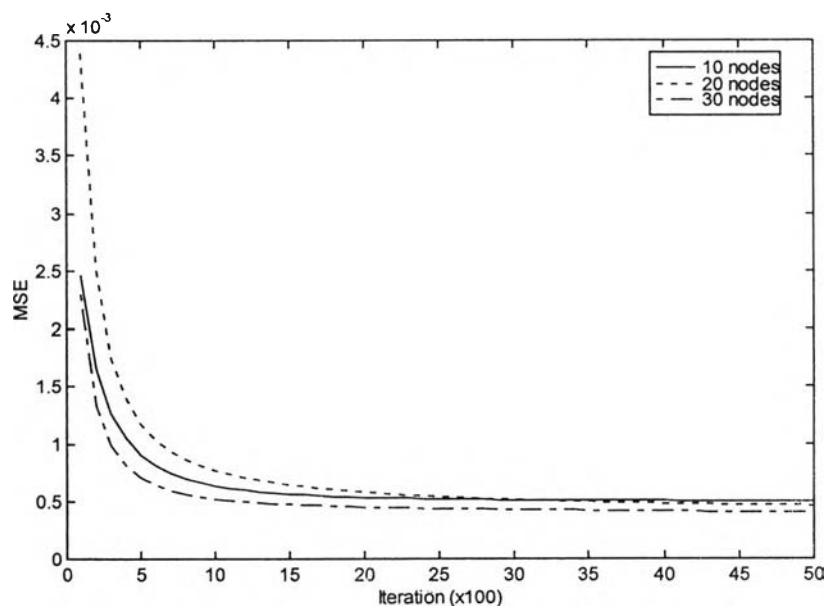


รูปที่ 4.39 เปรียบเทียบลักษณะผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมจากการควบคุมด้วยตัวควบคุมที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีต่างๆของกระบวนการที่ 2 เมื่อค่าประวิงเวลาเปลี่ยนจาก 2 เป็น 2.2 วินาที

4.2.3 กระบวนการเชิงเส้นที่มีฟังก์ชันถ่ายโอน $G(s) = \frac{e^{-3s}}{(s+1)}$

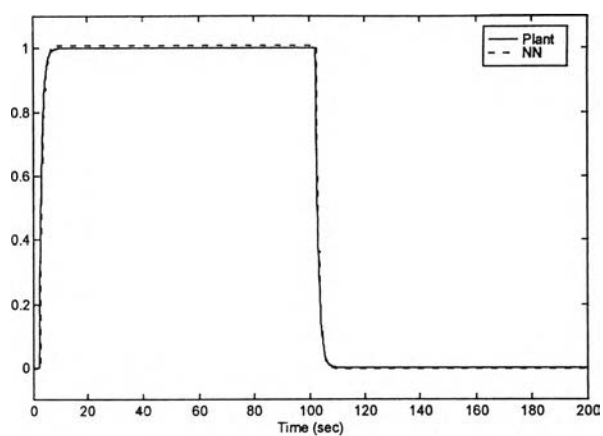
ขั้นตอนการหาคุณลักษณะโดยใช้ข่ายงานระบบประสาท

ในการฝึกข่ายงานระบบประสาทเพื่อประมาณฟังก์ชันซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเข้าและข้อมูลออกของกระบวนการ กำหนดโครงสร้างของข่ายงานระบบประสาทที่ใช้เป็นแบบป้อนไปข้างหน้า โดยฟังก์ชันกระตุ้นที่ใช้เป็นฟังก์ชัน log-sigmoid มี 3 ชั้น ชั้นอินพุตมี 4 ปม ชั้นซ่อนภายในมี 3 แบบคือ 10, 20 และ 30 ปมตามลำดับ ชั้นเอาต์พุตมี 1 ปม ข้อมูลเข้าประกอบด้วยสัญญาณต่างๆ ดังนี้ $y(t-1), y(t-2), u(t-7), u(t-8)$ โดยทำการฝึก 5000 รอบ พิจารณาค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยระหว่างการฝึกของข่ายงานระบบประสาทที่มีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายในแตกต่างกัน ดังนี้

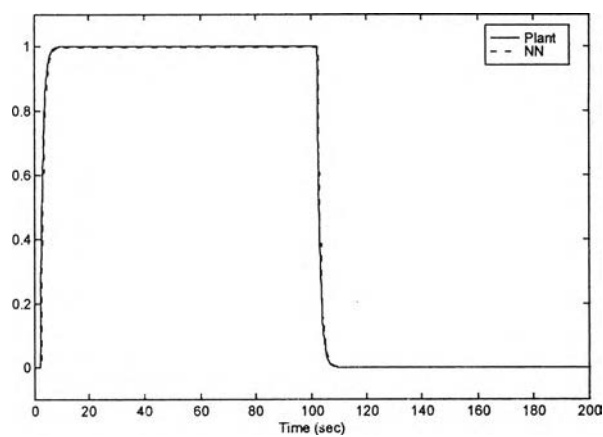


รูปที่ 4.40 ผลการฝึกข่ายงานระบบประสาทที่มีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายในแตกต่างกันสำหรับกระบวนการแบบที่ 3

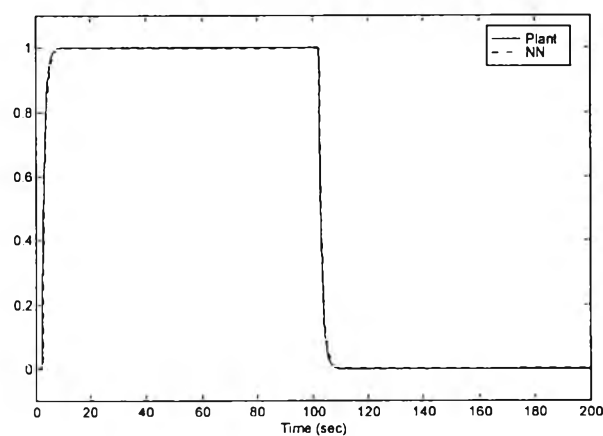
จากรูปข้างต้น พบว่าข่ายงานระบบประสาทที่มีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายในแบบต่างๆ มีความสามารถในการหาคุณลักษณะของกระบวนการใกล้เคียงกัน ต่อไปจะพิจารณาประสิทธิภาพในการทำนายผลตอบสนองแบบขั้นของกระบวนการด้วยข่ายงานระบบประสาทที่ได้จากการฝึก ได้ผลดังนี้



(ก) แบบที่ 1 จำนวนปมในชั้นซ่อนภายใน 10 ปม



(ข) แบบที่ 2 จำนวนปมในชั้นซ่อนภายใน 20 ปม



(ค) แบบที่ 3 จำนวนปมในชั้นซ่อนภายใน 30 ปม

รูปที่ 4.41 ผลการทำนายผลตอบสนองแบบขั้นด้วยข่ายงานระบบประสาทที่มีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายในแตกต่างกันสำหรับกระบวนการแบบที่ 3

จากผลการเปรียบเทียบข้างต้น พบว่าความสามารถในการทำนายผลตอบสนองของข่ายงานระบบประสาททั้ง 3 แบบไม่ต่างกันมากนัก จึงเลือกข่ายงานระบบประสาทแบบที่ 1 เนื่องจากมีโครงสร้างเล็กที่สุด ใช้เวลาในการคำนวณน้อย และประสิทธิภาพในการทำนายผลตอบสนองใกล้เคียงกับข่ายงานระบบประสาทอีก 2 แบบที่มีขนาดใหญ่กว่า

ความสามารถในการทำนายผลตอบสนองล่วงหน้าของกระบวนการ

พิจารณาความสามารถในการทำนายผลตอบสนองล่วงหน้าของข่ายงานระบบประสาทจากค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย ระหว่างผลตอบสนองของกระบวนการเมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมกับผลตอบสนองที่ได้จากการทำนายด้วยข่ายงานระบบประสาท

ตารางที่ 4.6 ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของผลตอบสนองที่ทำนายได้จากข่ายงานระบบประสาทที่ชั้นต่างๆสำหรับกระบวนการแบบที่ 3

	ชั้นที่	ชั้นที่	ชั้นที่	ชั้นที่	ชั้นที่	ชั้นที่	ชั้นที่	ชั้นที่	ชั้นที่	ชั้นที่
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
MSE($\times 10^{-3}$)	2.23	2.02	3.88	3.67	4.56	4.43	4.81	4.74	4.90	4.87

พบว่าเมื่อจำนวนชั้นในการทำนายเพิ่มขึ้น ความสามารถในการทำนายผลตอบสนองจะลดลง พิจารณาจากค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อชั้นการทำนายเพิ่มขึ้น

ผลของพารามิเตอร์ต่างๆในฟังก์ชันจุดประสงค์ต่อผลตอบสนองภายใต้การควบคุม

จากผลการจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์ สามารถทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการปรับจูนตัวควบคุม PID และพิจารณาผลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

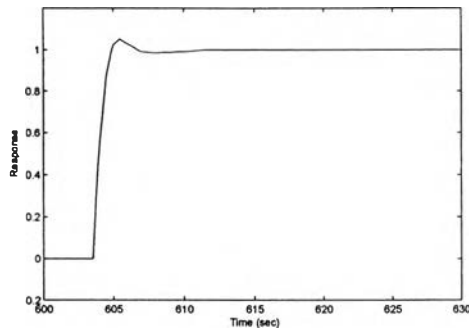
1. การถ่วงน้ำหนักการทำนาย หรือ Γ_e
2. การถ่วงน้ำหนักสัญญาณควบคุม หรือ Γ_u
3. เส้นขอบการทำนายสูงสุด หรือ N_p
4. เส้นขอบควบคุม หรือ N_u

โดยกำหนดเส้นขอบการทำนายต่ำสุดเท่ากับค่าประวิงเวลาของกระบวนการ คือ $N_1 = 7$ และกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวควบคุม PID ในทุกกรณีคือ $K = 0.1, T_i = 0.5, T_d = 0.5$

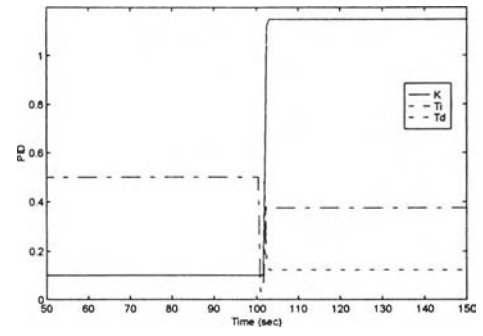
ตารางที่ 4.7 การศึกษาผลของพารามิเตอร์ในฟังก์ชันจุดประสงค์ต่อผลการควบคุมและสรุปค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนได้สำหรับกระบวนการที่ 3

กรณีที่	Γ_e	Γ_u	N_1	N_p	N_u	K	T_i	T_d
1	1	0	7	10	1	1.1503	0.3766	0.1223
2	0.5	0	7	10	1	0.7995	0.2815	0.1354
3	1.5	0	7	10	1	1.4921	0.4482	0.0449
4	1	0.5	7	10	1	0.5470	0.3212	0.2478
5	1	1	7	10	1	0.2875	0.2460	0.4684
6	1	0	7	8	1	1.0982	0.2945	0.1563
7	1	0	7	12	1	0.9857	0.4019	0.0888
8	1	0	7	10	2	1.4662	0.3113	0.0784
9	1	0	7	10	4	1.2840	0.2618	0.1036

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

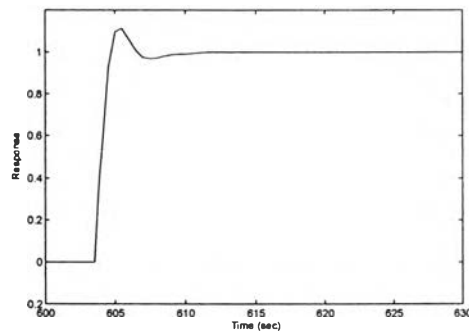


(ก)

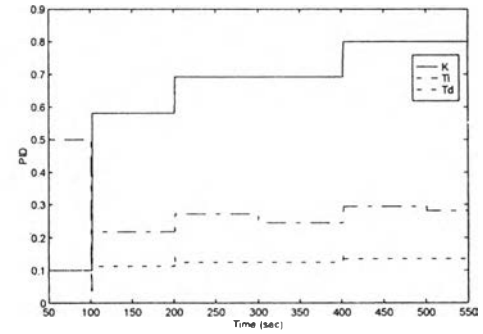


(ข)

รูปที่ 4.42 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 1 ของกระบวนการที่ 3

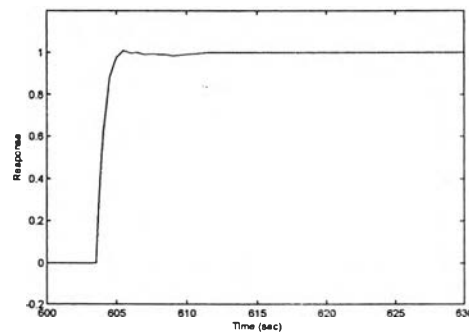


(ก)

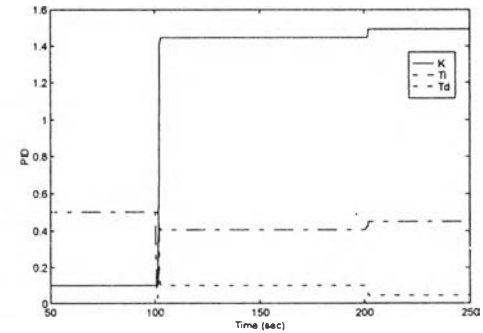


(ข)

รูปที่ 4.43 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 2 ของกระบวนการที่ 3

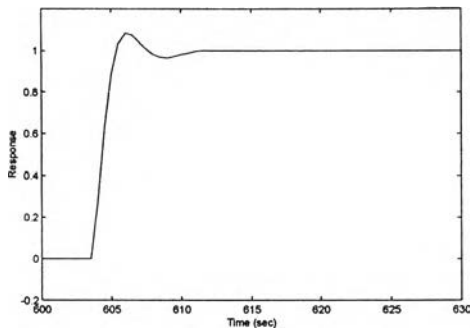


(ก)

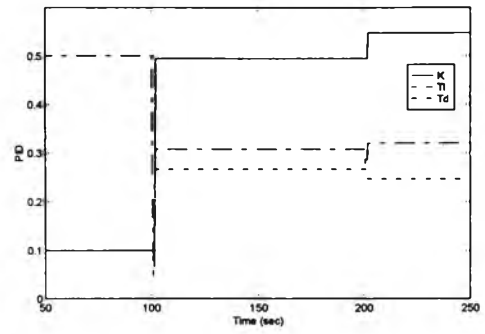


(ข)

รูปที่ 4.44 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 3 ของกระบวนการที่ 3

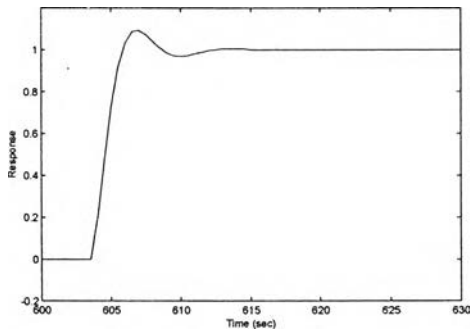


(ก)

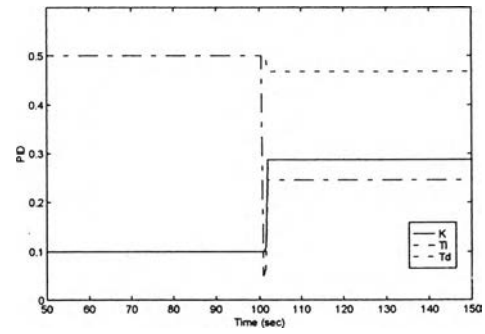


(ข)

รูปที่ 4.45 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 4 ของกระบวนการที่ 3

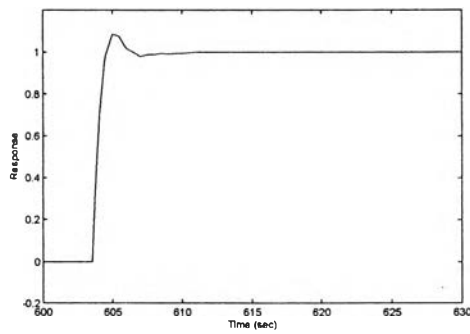


(ก)

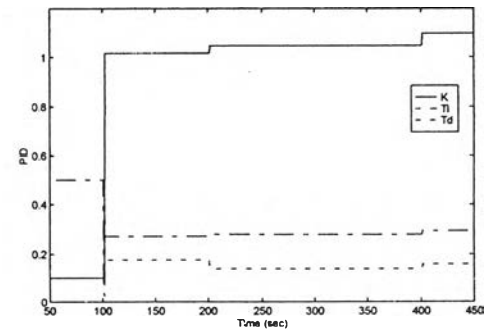


(ข)

รูปที่ 4.46 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 5 ของกระบวนการที่ 3

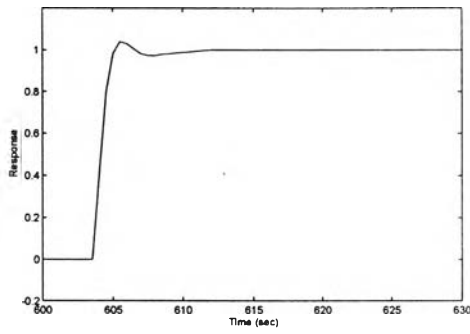


(ก)

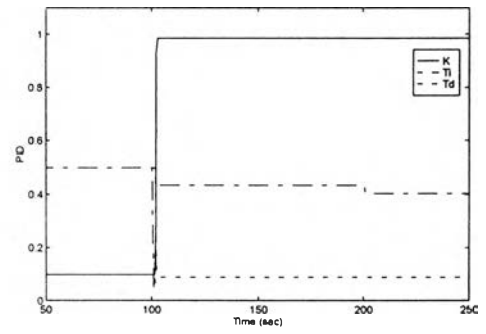


(ข)

รูปที่ 4.47 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 6 ของกระบวนการที่ 3

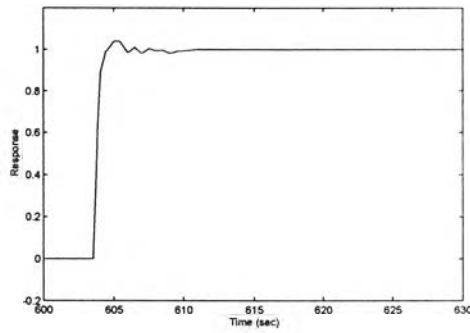


(ก)

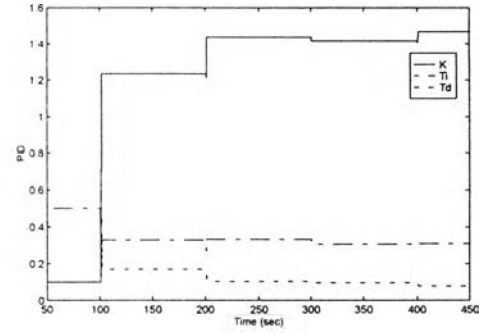


(ข)

รูปที่ 4.48 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 7 ของกระบวนการที่ 3

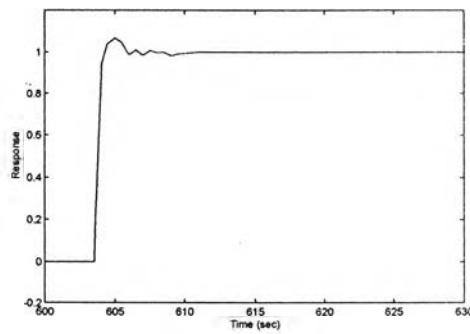


(ก)

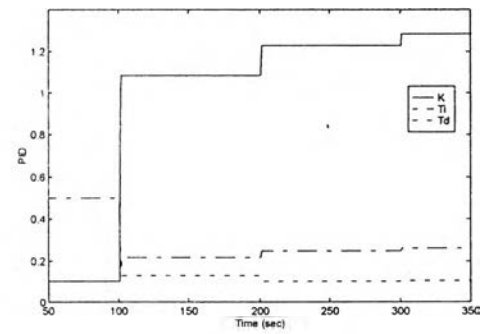


(ข)

รูปที่ 4.49 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 8 ของกระบวนการที่ 3



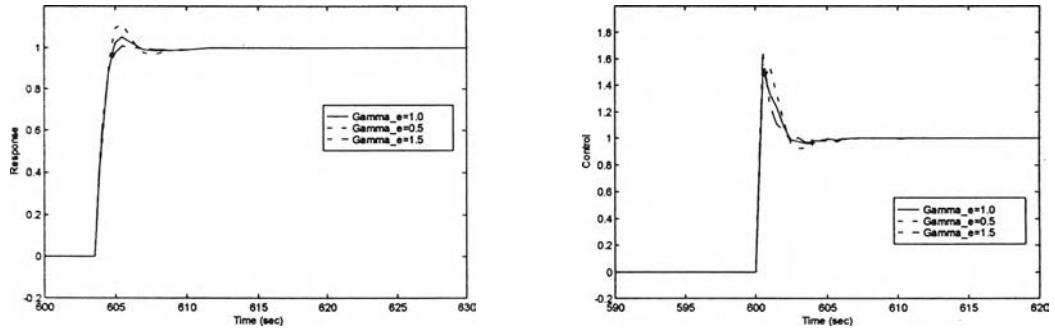
(ก)



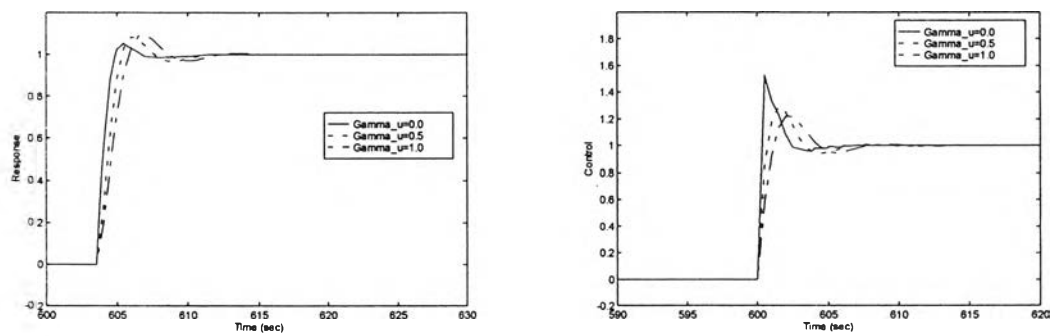
(ข)

รูปที่ 4.50 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 9 ของกระบวนการที่ 3

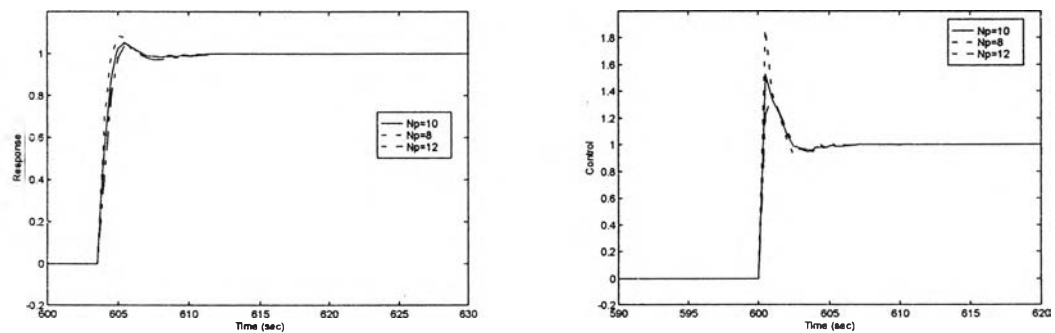
พิจารณาผลการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆในฟังก์ชันจุดประสงค์ต่อผลการควบคุม



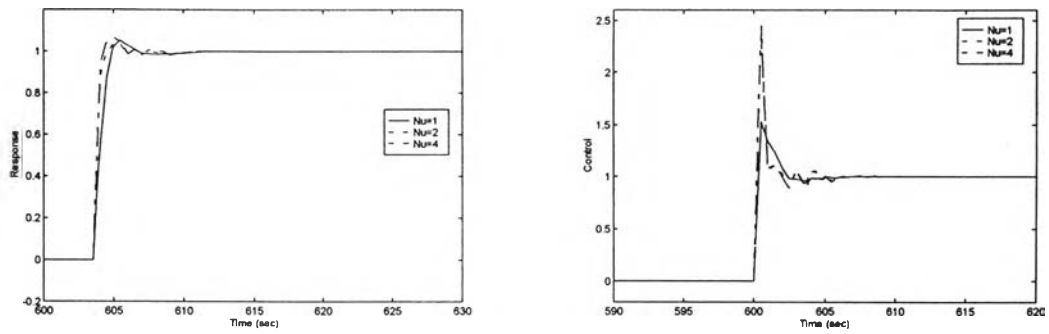
รูปที่ 4.51 ผลการเปลี่ยนแปลง Γ_e ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการที่ 3



รูปที่ 4.52 ผลการเปลี่ยนแปลง Γ_u ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการที่ 3



รูปที่ 4.53 ผลการเปลี่ยนแปลง N_p ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการที่ 3



รูปที่ 4.54 ผลการเปลี่ยนแปลง N_u ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการที่ 3

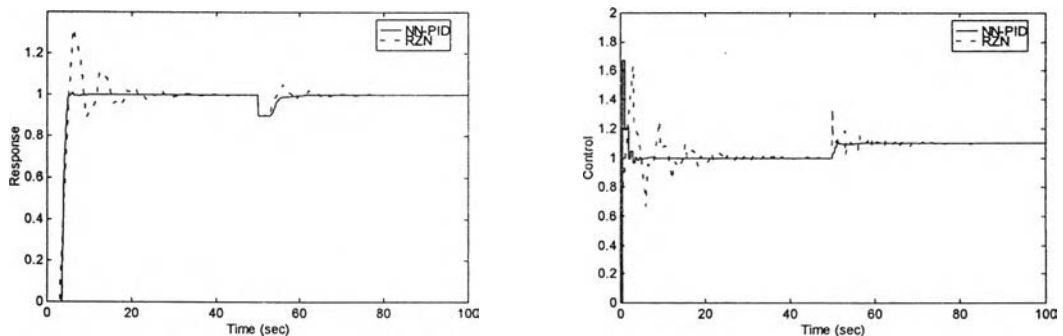
ผลการปรับจูนตัวควบคุม PID และการเปรียบเทียบกับ การปรับจูนตัวควบคุม PID ด้วยวิธีอื่น

จากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

เงื่อนไข

1. การถ่วงน้ำหนักการทำนาย หรือ Γ_c = 1.5
2. การถ่วงน้ำหนักสัญญาณควบคุม หรือ Γ_u = 0
3. เส้นขอบการทำนายสูงสุด หรือ N_p = 8
4. เส้นขอบควบคุม หรือ N_u = 1

พิจารณาผลตอบสนองแบบขั้น และความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวน เมื่อมีสัญญาณรบกวนขนาดคงที่ 0.1 ณ วินาทีที่ 50



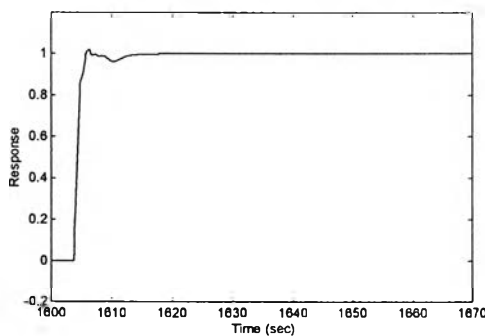
รูปที่ 4.55 เปรียบเทียบลักษณะผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมจากการควบคุมด้วยตัวควบคุมที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีต่างๆของกระบวนการที่ 3

ประสิทธิภาพต่อความไม่แน่นอนในพารามิเตอร์ของกระบวนการ

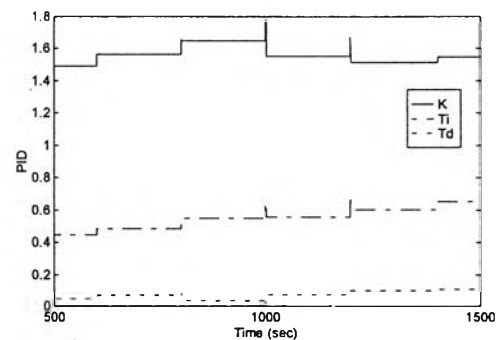
ในการทดลองนี้ สมมติว่ามีความไม่แน่นอนของค่าประวิงเวลา เมื่อค่าประวิงเวลาเปลี่ยนจาก 3 วินาที เป็น 3.3 วินาที ณ วินาทีที่ 350

<u>เงื่อนไข</u>	1. การถ่วงน้ำหนักการทำนาย หรือ Γ_e	= 1.5
	2. การถ่วงน้ำหนักสัญญาณควบคุม หรือ Γ_u	= 0
	3. เส้นขอบการทำนายสูงสุด หรือ N_p	= 8
	4. เส้นขอบควบคุม หรือ N_u	= 1

จากการทดลองพบว่าการปรับจูนตัวควบคุม PID เนื่องจากผลของค่าประวิงเวลาที่เปลี่ยนไปดังนี้



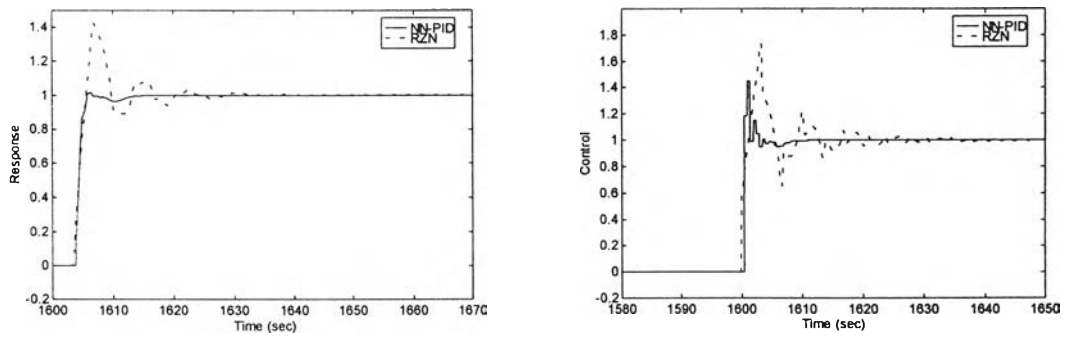
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.56 ผลการควบคุมและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID เมื่อกระบวนการที่ 3 เมื่อค่าประวิงเวลาเปลี่ยนจาก 3 เป็น 3.3 วินาที

รูป (ก) เป็นผลตอบสนองที่ได้จากการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ถูกปรับจูนเมื่อเกิดความไม่แน่นอนของค่าประวิงเวลา รูป (ข) แสดงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID เมื่อมีการปรับจูน นำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบระหว่างผลการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีการปรับจูนโดยอาศัยการป้อนกลับด้วยวิธีในบทที่ 2 และตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีที่เสนอได้ผลการทดลองดังนี้

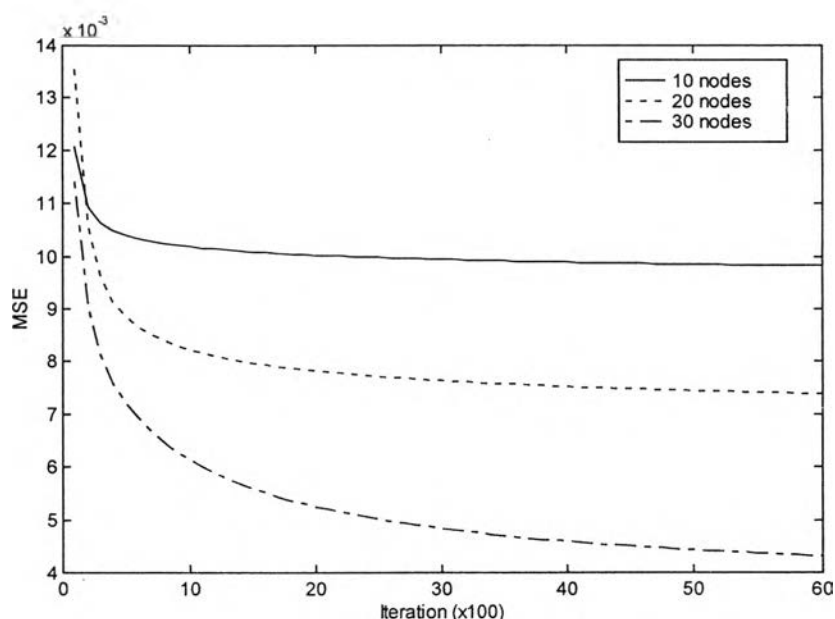


รูปที่ 4.57 เปรียบเทียบลักษณะผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมจากการควบคุมด้วยตัวควบคุมที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีต่างๆของกระบวนการที่ 3 เมื่อค่าประวิงเวลาเปลี่ยนจาก 3 เป็น 3.3 วินาที

4.2.4 กระบวนการเชิงเส้นที่มีฟังก์ชันถ่ายโอน $G(s) = \frac{-1.4s+1}{(s+1)^3}$

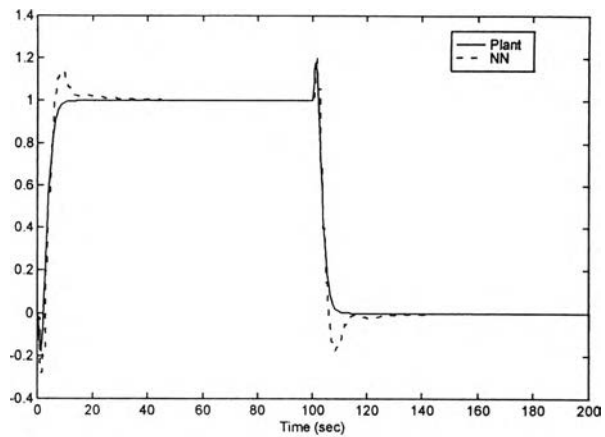
ขั้นตอนการหาคุณลักษณะโดยใช้ข่ายงานระบบประสาท

ในการฝึกข่ายงานระบบประสาทเพื่อประมาณฟังก์ชันซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเข้าและข้อมูลออกของกระบวนการ กำหนดโครงสร้างของข่ายงานระบบประสาทที่ใช้เป็นแบบป้อนไปข้างหน้า โดยฟังก์ชันกระตุ้นที่ใช้เป็นฟังก์ชัน log-sigmoid มี 3 ชั้น ชั้นอินพุตมี 8 ปม ชั้นซ่อนภายในมี 3 แบบคือ 10, 20 และ 30 ปมตามลำดับ ชั้นเอาต์พุตมี 1 ปม ข้อมูลเข้าประกอบด้วยสัญญาณต่างๆ ดังนี้ $y(t-1), \dots, y(t-4), u(t-1), \dots, u(t-4)$ โดยทำการฝึก 5000 รอบ พิจารณาค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยระหว่างการฝึกของข่ายงานระบบประสาทที่มีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายในแตกต่างกัน ดังนี้

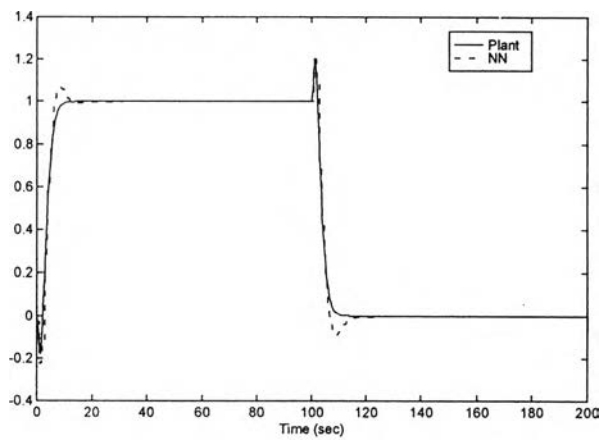


รูปที่ 4.58 ผลการฝึกข่ายงานระบบประสาทที่มีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายในแตกต่างกันสำหรับกระบวนการแบบที่ 4

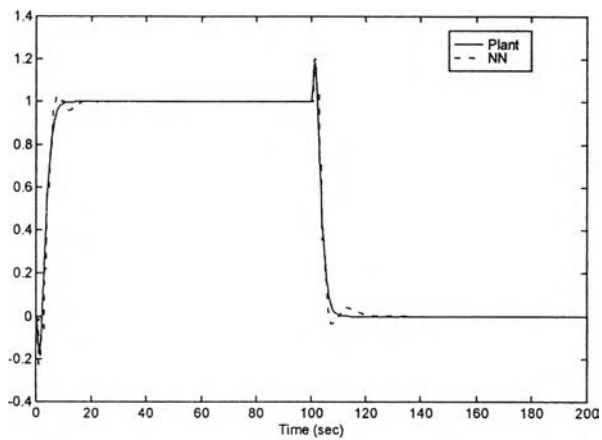
จากรูปข้างต้น พบว่าข่ายงานระบบประสาทที่มีความสามารถในการหาคุณลักษณะของกระบวนการเรียงตามลำดับคือ แบบที่ 3, 2 และ 1 ต่อไปจะพิจารณาประสิทธิภาพในการทำนายผลตอบสนองแบบขั้นของกระบวนการด้วยข่ายงานระบบประสาทที่ได้จากการฝึก ได้ผลดังนี้



(ก) แบบที่ 1 จำนวนปมในชั้นซ่อนภายใน 10 ปม



(ข) แบบที่ 2 จำนวนปมในชั้นซ่อนภายใน 20 ปม



(ค) แบบที่ 3 จำนวนปมในชั้นซ่อนภายใน 30 ปม

รูปที่ 4.59 ผลการทำนายผลตอบสนองแบบขั้นด้วยข่ายงานระบบประสาทที่มีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายในแตกต่างกันสำหรับกระบวนการแบบที่ 4



จากผลการเปรียบเทียบข้างต้น พบว่าความสามารถในการทำนายผลตอบสนองของข่ายงานระบบประสาทแบบที่ 2 และ 3 ให้ผลตอบสนองที่ทำนายใกล้เคียงกับผลตอบสนองจริงของกระบวนการ จึงเลือกข่ายงานระบบประสาทแบบที่ 2 ซึ่งมีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายใน 20 ปม มีขนาดโครงสร้างของข่ายงานระบบประสาทเล็กกว่าแบบที่ 3

ความสามารถในการทำนายผลตอบสนองล่วงหน้าของกระบวนการ

พิจารณาความสามารถในการทำนายผลตอบสนองล่วงหน้าของข่ายงานระบบประสาทจากค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย ระหว่างผลตอบสนองของกระบวนการเมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมกับผลตอบสนองที่ได้จากการทำนายด้วยข่ายงานระบบประสาท

ตารางที่ 4.8 ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของผลตอบสนองที่ทำนายได้จากข่ายงานระบบประสาทที่ชั้นต่างๆของกระบวนการที่ 4

	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	ชั้นที่ 6
MSE($\times 10^{-7}$)	0.99	1.01	1.44	1.88	2.45	3.25

พบว่าเมื่อจำนวนชั้นในการทำนายเพิ่มขึ้น ความสามารถในการทำนายผลตอบสนองจะลดลง เหมือนผลจากการทดลองกับกระบวนการที่ 1-3

ผลของพารามิเตอร์ต่างๆในฟังก์ชันจุดประสงค์ต่อผลตอบสนองภายใต้การควบคุม

จากผลการจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์ สามารถทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการปรับจูนตัวควบคุม PID และพิจารณาผลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

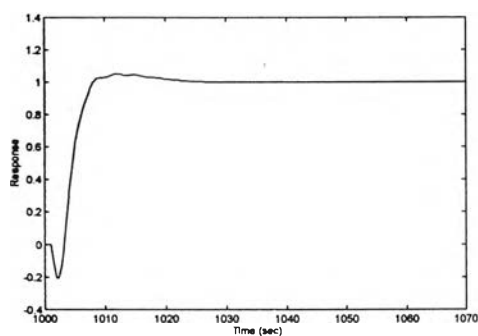
1. การถ่วงน้ำหนักการทำนาย หรือ Γ_e
2. การถ่วงน้ำหนักสัญญาณควบคุม หรือ Γ_u
3. เส้นขอบการทำนายสูงสุด หรือ N_p
4. เส้นขอบควบคุม หรือ N_u

โดยกำหนดเส้นขอบการทำนายต่ำสุดเท่ากับค่าประวิงเวลาของกระบวนการ คือ $N_1 = 1$ และกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวควบคุม PID ในทุกกรณีคือ $K = 0.1, T_i = 1.0, T_d = 1.0$

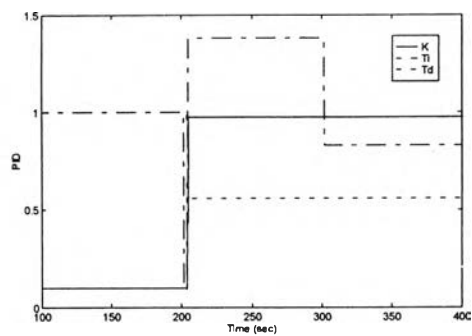
ตารางที่ 4.9 การศึกษาผลของพารามิเตอร์ในฟังก์ชันจุดประสงค์ต่อผลการควบคุมและสรุปค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนได้สำหรับกระบวนการที่ 4

กรณีที่	Γ_e	Γ_u	N_1	N_p	N_u	K	T_i	T_d
1	1	0	1	6	1	0.9742	0.8306	0.5592
2	0.5	0	1	6	1	0.7335	0.6188	0.5727
3	1.5	0	1	6	1	0.9445	0.7895	0.6805
4	1	0.5	1	6	1	0.4565	0.6333	0.7550
5	1	1	1	6	1	0.3721	0.6716	0.8983
6	1	0	1	4	1	1.1612	0.8019	0.5801
7	1	0	1	8	1	0.9162	0.8004	0.5469
8	1	0	1	6	3	0.7863	0.7259	0.5285
9	1	0	1	6	6	1.0242	0.6720	0.3606

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

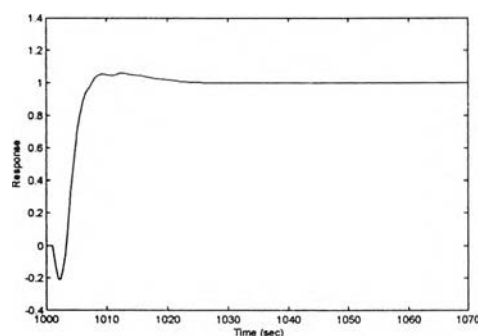


(ก)

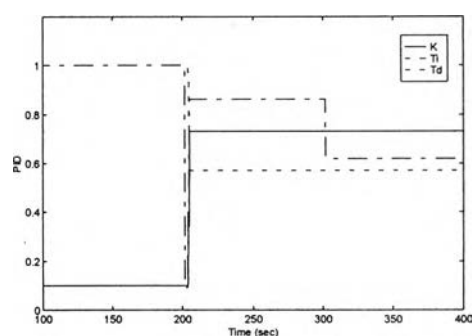


(ข)

รูปที่ 4.60 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 1 ของกระบวนการที่ 4

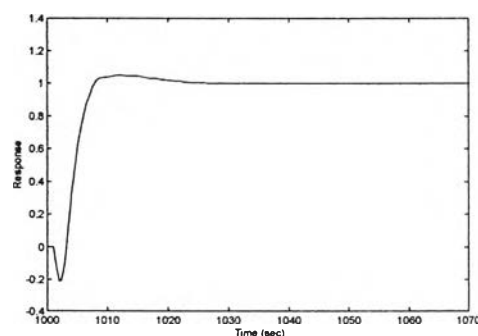


(ก)

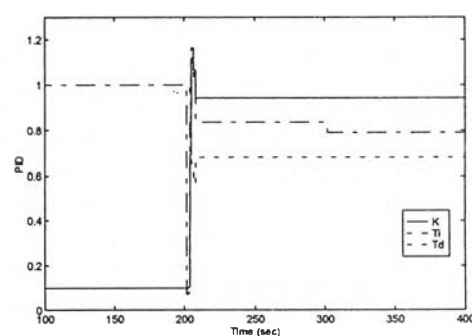


(ข)

รูปที่ 4.61 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 2 ของกระบวนการที่ 4

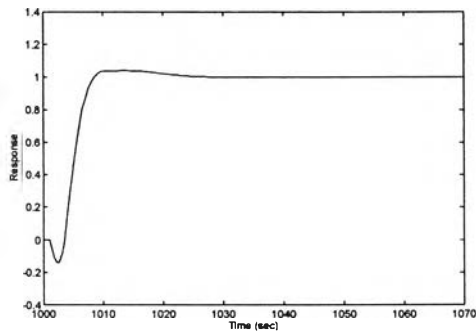


(ก)

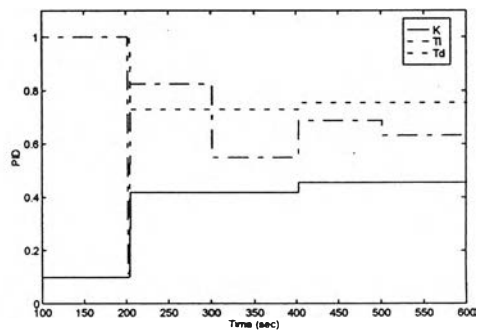


(ข)

รูปที่ 4.62 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 3 ของกระบวนการที่ 4

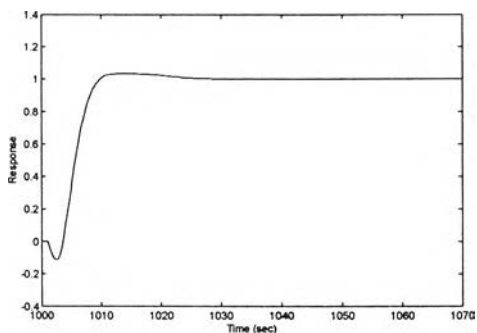


(ก)

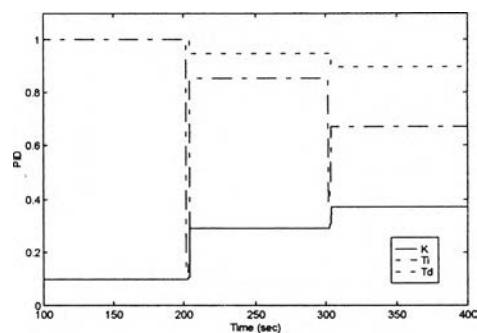


(ข)

รูปที่ 4.63 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 4 ของกระบวนการที่ 4

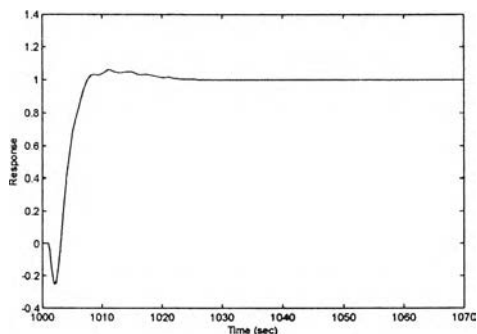


(ก)

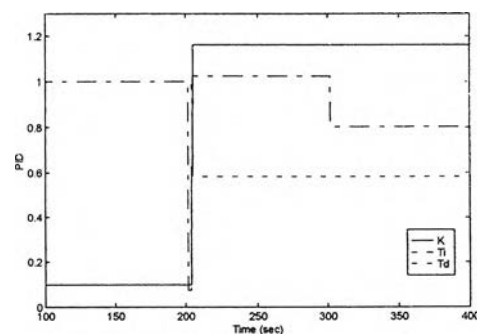


(ข)

รูปที่ 4.64 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 5 ของกระบวนการที่ 4

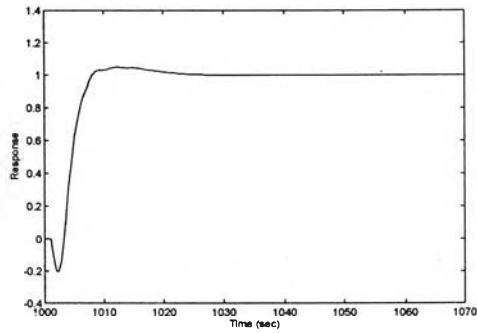


(ก)

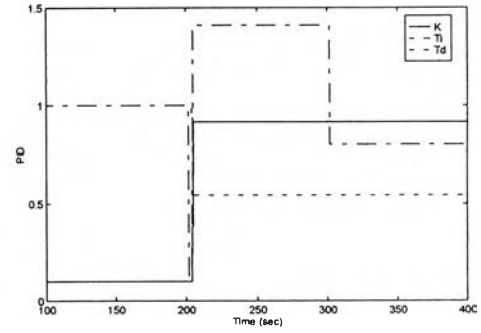


(ข)

รูปที่ 4.65 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 6 ของกระบวนการที่ 4

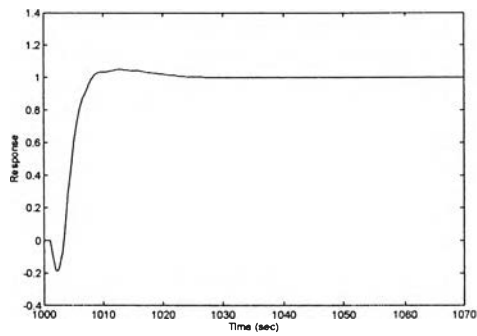


(ก)

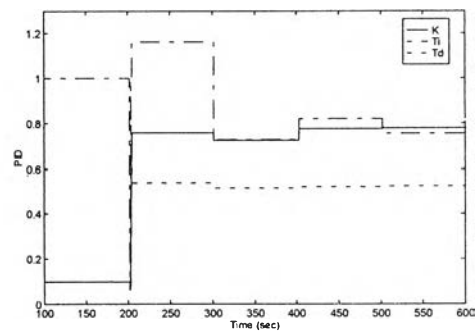


(ข)

รูปที่ 4.66 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 7 ของกระบวนการที่ 4

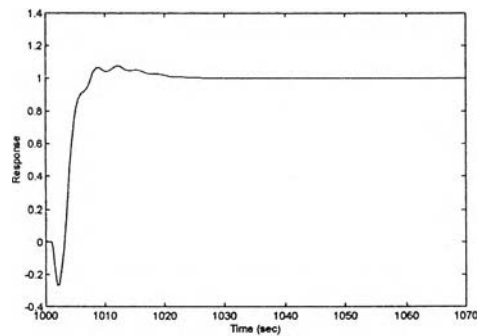


(ก)

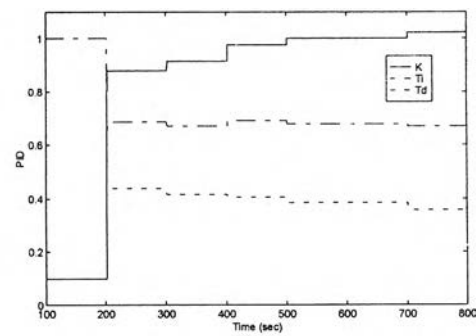


(ข)

รูปที่ 4.67 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 8 ของกระบวนการที่ 4



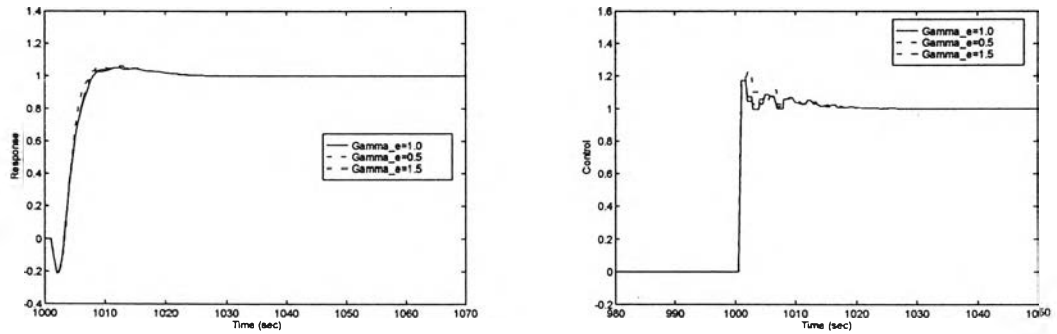
(ก)



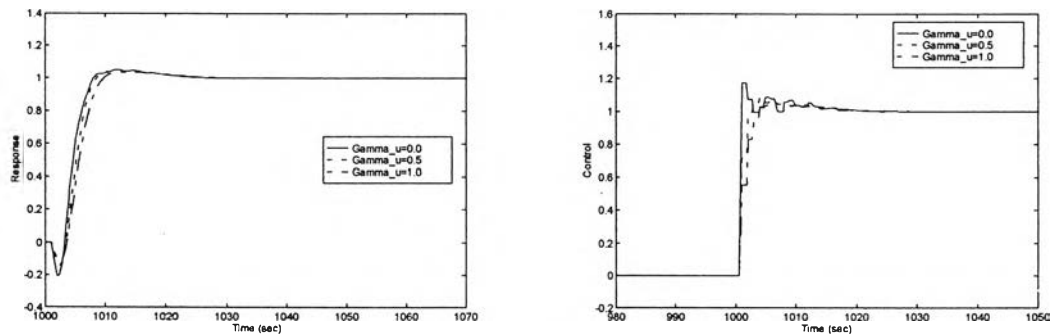
(ข)

รูปที่ 4.68 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 9 ของกระบวนการที่ 4

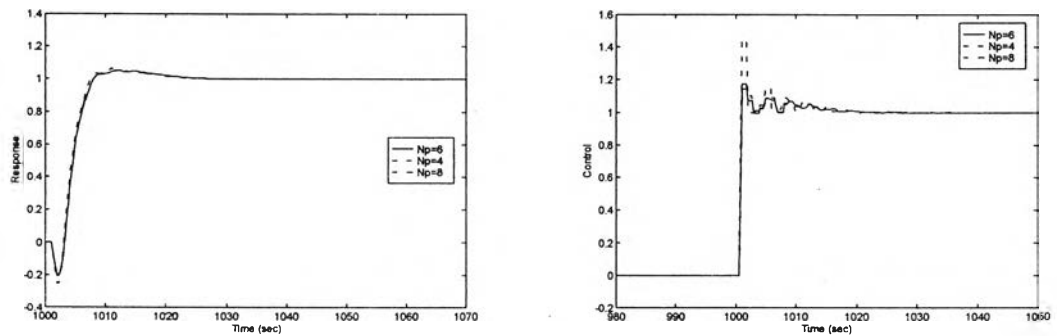
พิจารณาผลการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆในฟังก์ชันจุดประสงค์ต่อผลการควบคุม



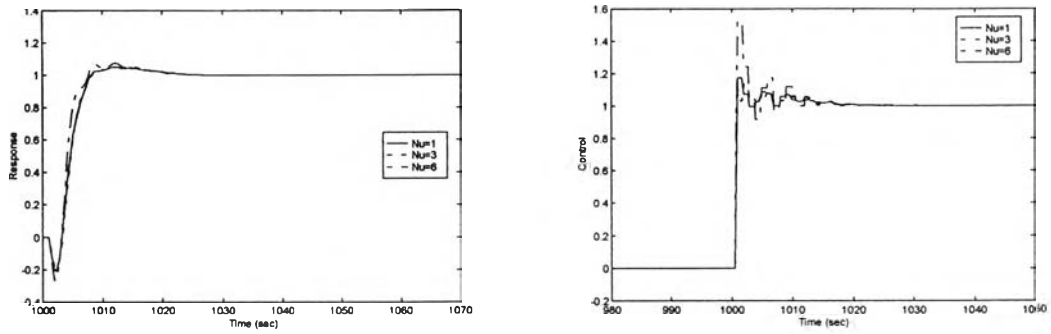
รูปที่ 4.69 ผลการเปลี่ยนแปลง Γ_e ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการที่ 4



รูปที่ 4.70 ผลการเปลี่ยนแปลง Γ_u ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการที่ 4



รูปที่ 4.71 ผลการเปลี่ยนแปลง N_p ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการที่ 4



รูปที่ 4.72 ผลการเปลี่ยนแปลง N_u ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการที่ 4

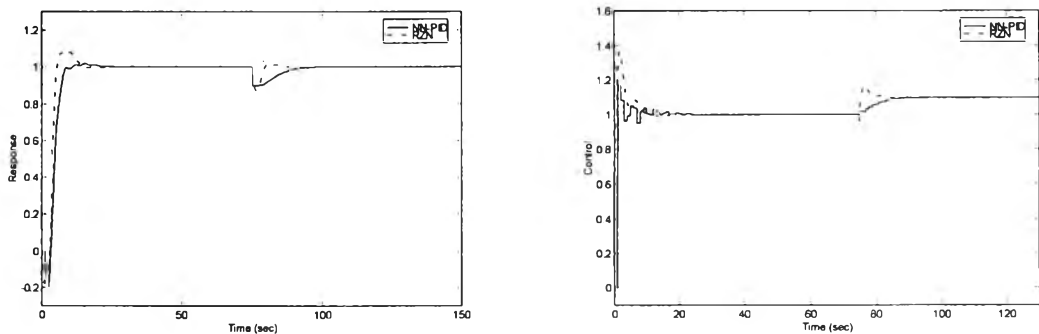
ผลการปรับจูนตัวควบคุม PID และการเปรียบเทียบกับผลการปรับจูนตัวควบคุม PID ด้วยวิธีอื่น

จากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

เงื่อนไข

1. การถ่วงน้ำหนักการทำนาย หรือ $\Gamma_e = 1$
2. การถ่วงน้ำหนักสัญญาณควบคุม หรือ $\Gamma_u = 0$
3. เส้นขอบการทำนายสูงสุด หรือ $N_p = 6$
4. เส้นขอบควบคุม หรือ $N_u = 1$

พิจารณาผลตอบสนองแบบขั้น และความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวน เมื่อมีสัญญาณรบกวนขนาดคงที่ 0.1 ณ วินาทีที่ 75 เปรียบเทียบกับผลการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีการปรับจูนโดยอาศัยการป้อนกลับด้วยวิธีในบทที่ 2



รูปที่ 4.73 เปรียบเทียบลักษณะผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมจากการควบคุมด้วยตัวควบคุมที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีต่างๆของกระบวนการที่ 4

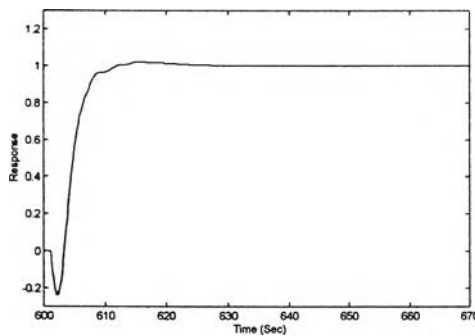
ประสิทธิภาพต่อความไม่แน่นอนในพารามิเตอร์ของกระบวนการ

ในการทดลองนี้ สมมติว่ามีความไม่แน่นอนของค่าอัตราขยายที่สภาวะอยู่ตัว เมื่อค่าอัตราขยายที่สภาวะอยู่ตัวเปลี่ยนจาก 1.0 เป็น 0.9 ณ วินาทีที่ 300

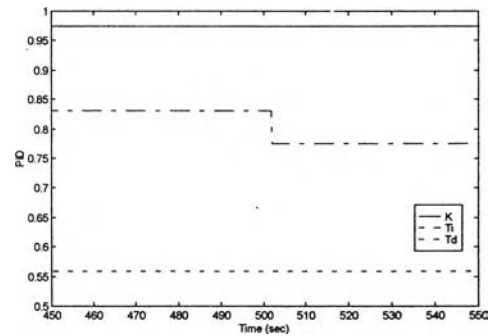
เงื่อนไข

1. การถ่วงน้ำหนักการทำนาย หรือ $\Gamma_e = 1$
2. การถ่วงน้ำหนักสัญญาณควบคุม หรือ $\Gamma_u = 0$
3. เส้นขอบการทำนายสูงสุด หรือ $N_p = 6$
4. เส้นขอบควบคุม หรือ $N_u = 1$

จากการทดลองพบว่าการปรับจูนตัวควบคุม PID เมื่อค่าอัตราขยายที่สภาวะอยู่ตัวเมื่อเปลี่ยนค่าจาก 1 เป็น 0.9 ดังนี้



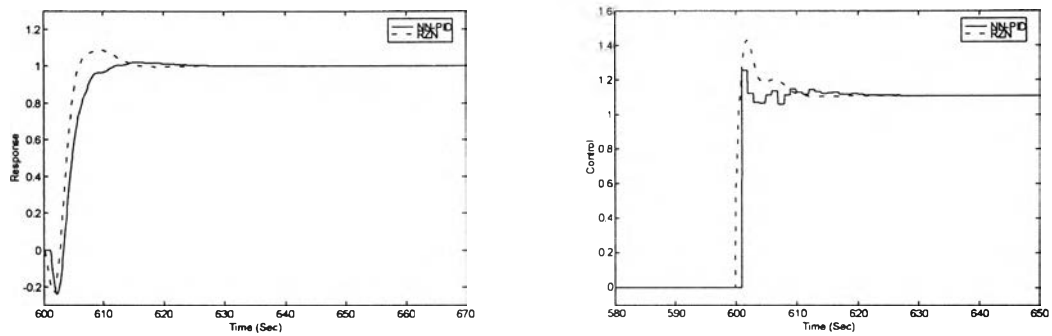
(ก)



(ข)

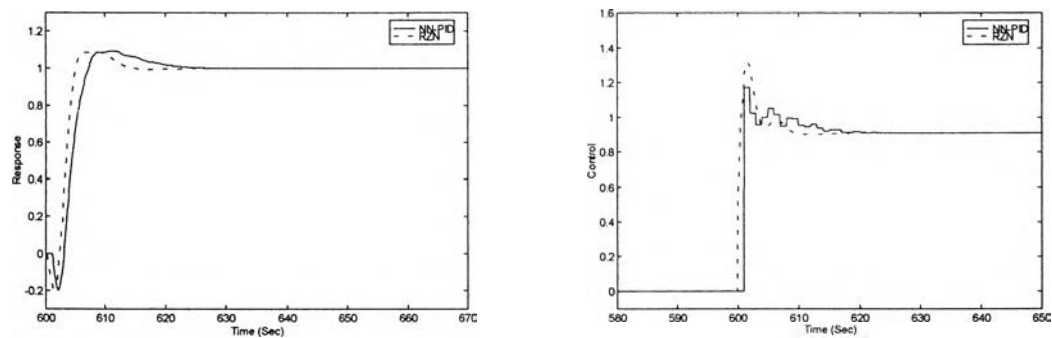
รูปที่ 4.74 ผลการควบคุมและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID เมื่อกระบวนการที่ 4 เมื่ออัตราขยายที่สภาวะอยู่ตัวเปลี่ยนจาก 1.0 เป็น 0.9

รูป (ก) เป็นผลตอบสนองที่ได้จากการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ถูกปรับจูนเมื่อเกิดความไม่แน่นอนของค่าอัตราขยายที่สภาวะอยู่ตัว รูป (ข) แสดงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID เมื่อมีการปรับจูน นำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบระหว่างผลการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีการปรับจูนโดยอาศัยการป้อนกลับด้วยวิธีเลขในบทที่ 2 และตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีที่เสนอได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.75 เปรียบเทียบลักษณะผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมจากการควบคุมด้วยตัวควบคุมที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีต่างๆของกระบวนการที่ 4 เมื่ออัตราขยายที่สภาวะอยู่ตัวเปลี่ยนจาก 1 เป็น 0.9

เมื่อค่าอัตราขยายที่สภาวะอยู่ตัวเปลี่ยนจาก 1.0 เป็น 1.1 ณ วินาทีที่ 300 ไม่มีการปรับจูนตัวควบคุม PID เกิดขึ้น นำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบระหว่างผลการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีการปรับจูน โดยอาศัยการป้อนกลับด้วยวิธีในบทที่ 2 และตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีที่เสนอได้ผลการทดลองดังนี้

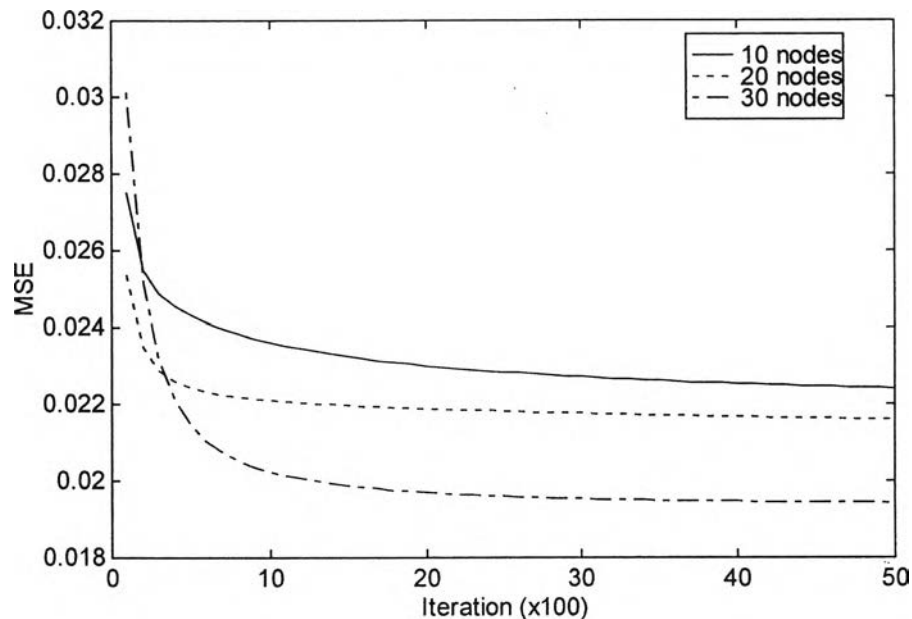


รูปที่ 4.76 เปรียบเทียบลักษณะผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมจากการควบคุมด้วยตัวควบคุมที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีต่างๆของกระบวนการที่ 4 เมื่ออัตราขยายที่สภาวะอยู่ตัวเปลี่ยนจาก 1.0 เป็น 1.1

4.2.5 กระบวนการเชิงเส้นที่มีฟังก์ชันถ่ายโอน $G(s) = \frac{1}{(s+1)^5}$

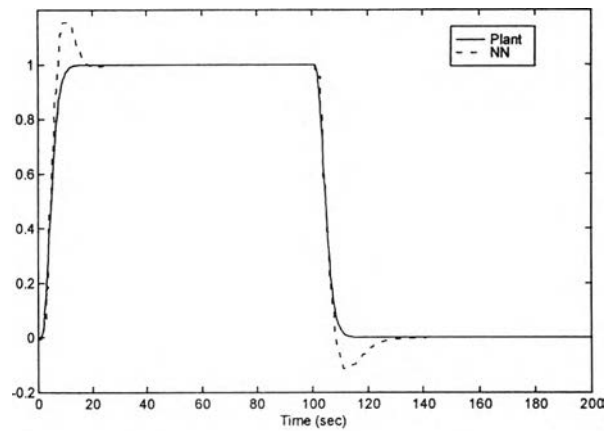
ขั้นตอนการหาคุณลักษณะโดยใช้ข่ายงานระบบประสาท

ในการฝึกข่ายงานระบบประสาทเพื่อประมาณฟังก์ชันซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเข้าและข้อมูลออกของกระบวนการ กำหนดโครงสร้างของข่ายงานระบบประสาทที่ใช้เป็นแบบป้อนไปข้างหน้า โดยฟังก์ชันกระตุ้นที่ใช้เป็นฟังก์ชัน log-sigmoid มี 3 ชั้น ชั้นอินพุตมี 12 ปม ชั้นซ่อนภายในมี 3 แบบคือ 10, 20 และ 30 ปมตามลำดับ ชั้นเอาต์พุตมี 1 ปม ข้อมูลเข้าประกอบด้วยสัญญาณต่างๆ ดังนี้ $y(t-1), \dots, y(t-6), u(t-1), \dots, u(t-6)$ โดยทำการฝึก 5000 รอบ พิจารณาค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (mean square error) ระหว่างการฝึกของข่ายงานระบบประสาทที่มีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายในแตกต่างกัน ดังนี้

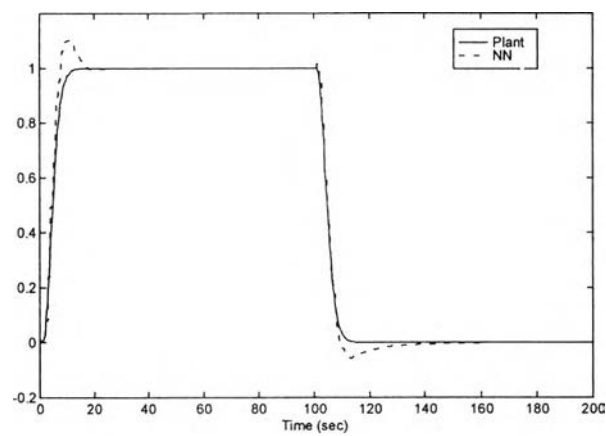


รูปที่ 4.77 ผลการฝึกข่ายงานระบบประสาทที่มีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายในแตกต่างกันสำหรับกระบวนการแบบที่ 5

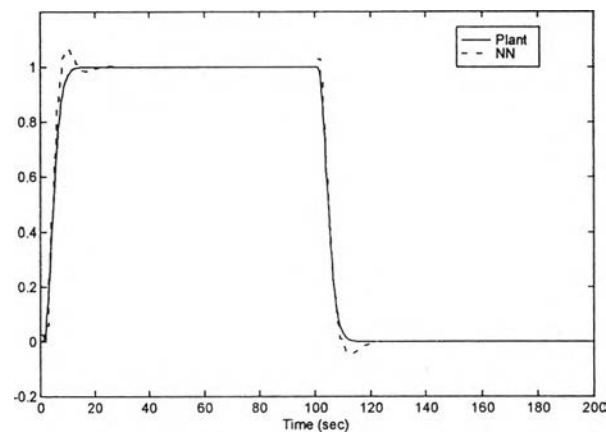
จากรูปข้างต้น พบว่าข่ายงานระบบประสาทที่มีความสามารถในการหาคุณลักษณะของกระบวนการเรียงตามลำดับคือ แบบที่ 3, 2 และ 1 ต่อไปจะพิจารณาประสิทธิภาพในการทำนายผลตอบสนองแบบขั้นของกระบวนการด้วยข่ายงานระบบประสาทที่ได้จากการฝึก ได้ผลดังนี้



(ก) แบบที่ 1 จำนวนปมในชั้นซ่อนภายใน 10 ปม



(ข) แบบที่ 2 จำนวนปมในชั้นซ่อนภายใน 20 ปม



(ค) แบบที่ 3 จำนวนปมในชั้นซ่อนภายใน 30 ปม

รูปที่ 4.78 ผลการทำนายผลตอบสนองแบบขั้นด้วยข่ายงานประสาทที่มีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายในแตกต่างกันสำหรับกระบวนการแบบที่ 5

จากผลการเปรียบเทียบข้างต้น พบว่าความสามารถในการทำนายผลตอบสนองของข่ายงานระบบประสาทแบบที่ 3 ให้ผลตอบสนองที่ทำนายใกล้เคียงกับผลตอบสนองจริงของกระบวนการมากที่สุด จึงเลือกข่ายงานระบบประสาทแบบที่ 3 ซึ่งมีจำนวนปมในชั้นซ่อนภายใน 30 ปม

ความสามารถในการทำนายผลตอบสนองล่วงหน้าของกระบวนการ

พิจารณาความสามารถในการทำนายผลตอบสนองล่วงหน้าของข่ายงานระบบประสาทจากค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย ระหว่างผลตอบสนองของกระบวนการเมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมกับผลตอบสนองที่ได้จากการทำนายด้วยข่ายงานระบบประสาท

ตารางที่ 4.10 ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของผลตอบสนองที่ทำนายได้จากข่ายงานระบบประสาทที่ชั้นต่างๆของกระบวนการที่ 5

	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	ชั้นที่ 6
MSE($\times 10^{-1}$)	1.68	2.51	3.12	3.52	3.92	4.23

พบว่าเมื่อจำนวนชั้นในการทำนายเพิ่มขึ้น ความสามารถในการทำนายผลตอบสนองจะลดลง เหมือนผลจากการทดลองกับกระบวนการที่ 1-4

ผลของพารามิเตอร์ต่างๆในฟังก์ชันจุดประสงค์ต่อผลตอบสนองภายใต้การควบคุม

จากผลการจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์ สามารถทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการปรับจูนตัวควบคุม PID และพิจารณาผลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

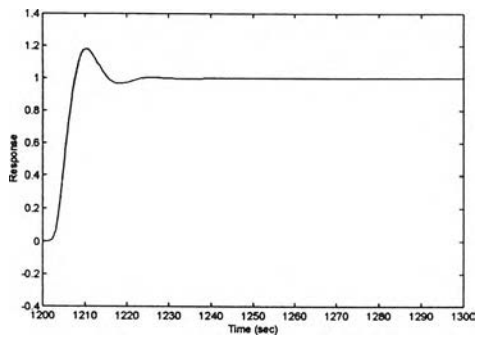
1. การถ่วงน้ำหนักการทำนาย หรือ Γ_e
2. การถ่วงน้ำหนักสัญญาณควบคุม หรือ Γ_u
3. เส้นขอบการทำนายสูงสุด หรือ N_p
4. เส้นขอบควบคุม หรือ N_u

โดยกำหนดเส้นขอบการทำนายต่ำสุดเท่ากับค่าประวิงเวลาของกระบวนการ คือ $N_1 = 1$ และกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวควบคุม PID ในทุกกรณีคือ $K = 0.6, T_i = 2, T_d = 1$

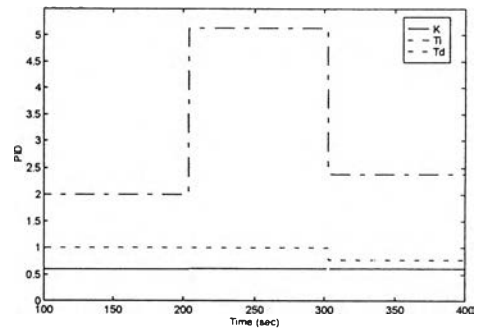
ตารางที่ 4.11 การศึกษาผลของพารามิเตอร์ในฟังก์ชันจุดประสงค์ต่อผลการควบคุมและสรุปค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนได้สำหรับกระบวนการที่ 5

กรณีที่	Γ_e	Γ_u	N_1	N_p	N_u	K	T_i	T_d
1	1	0	1	6	1	0.6135	2.3773	0.7713
2	0.5	0	1	6	1	0.6000	2.0000	1.0000
3	1.5	0	1	6	1	0.8258	4.4590	0.4073
4	1	0.5	1	6	1	0.4025	2.0284	0.2877
5	1	1	1	6	1	0.6465	4.4944	0.0967
6	1	0	1	4	1	0.6000	2.0000	1.0000
7	1	0	1	8	1	0.6673	3.5159	0.4635
8	1	0	1	6	3	1.0181	5.1471	1.2838
9	1	0	1	6	6	0.9654	4.1420	1.3896

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

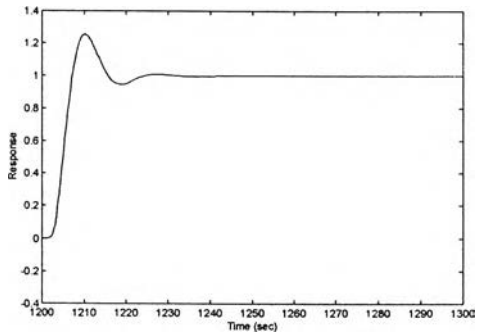


(ก)

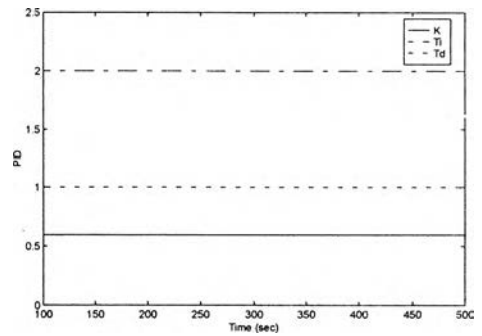


(จ)

รูปที่ 4.79 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 1 ของกระบวนการที่ 5

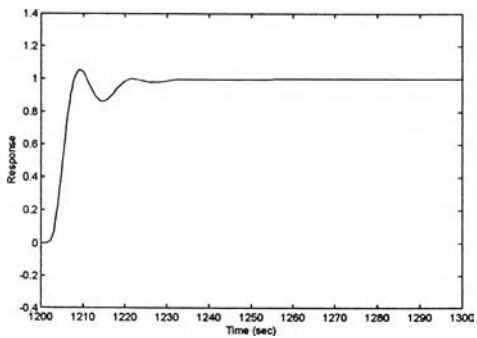


(ก)

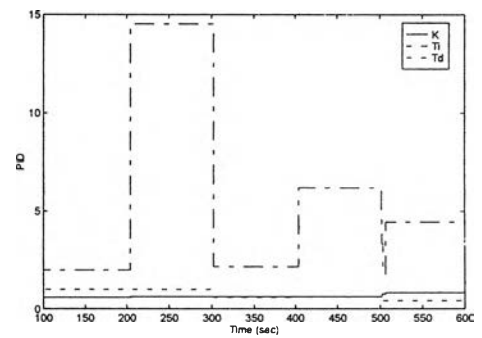


(จ)

รูปที่ 4.80 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 2 ของกระบวนการที่ 5

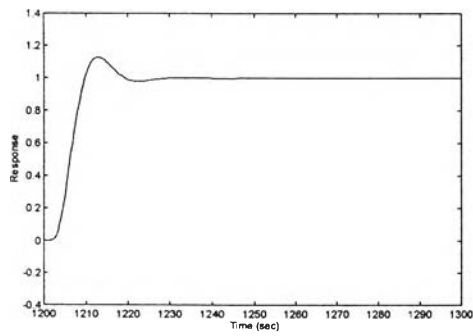


(ก)

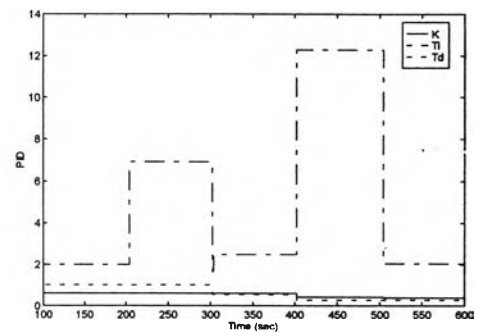


(จ)

รูปที่ 4.81 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 3 ของกระบวนการที่ 5

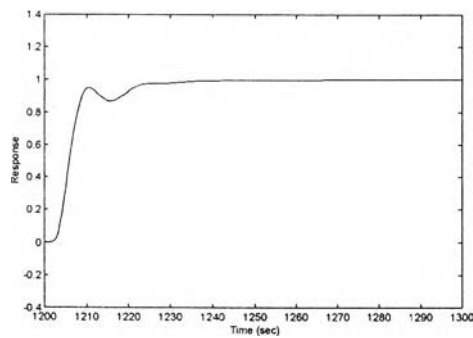


(ก)

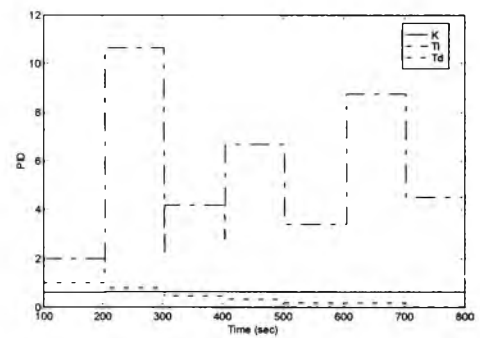


(ข)

รูปที่ 4.82 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 4 ของกระบวนการที่ 5

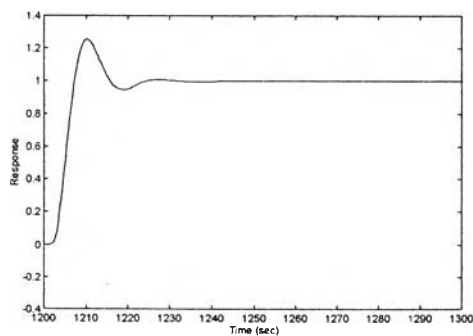


(ก)

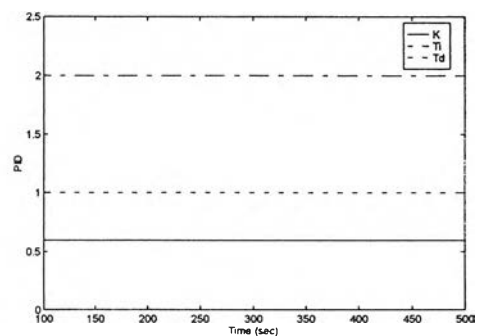


(ข)

รูปที่ 4.83 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 5 ของกระบวนการที่ 5

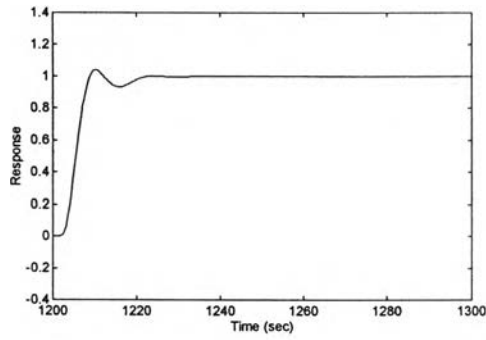


(ก)

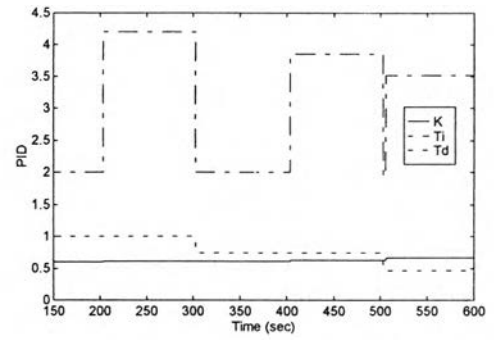


(ข)

รูปที่ 4.84 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 6 ของกระบวนการที่ 5

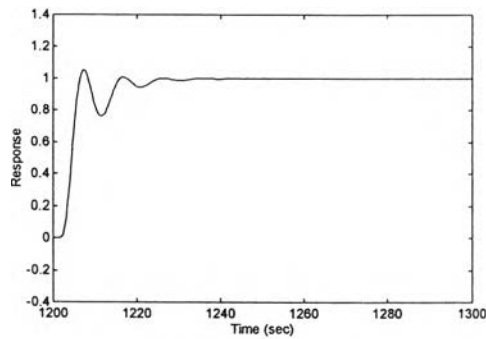


(ก)

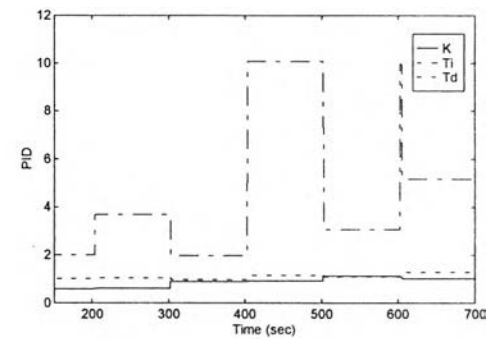


(ข)

รูปที่ 4.85 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 7 ของกระบวนการที่ 5

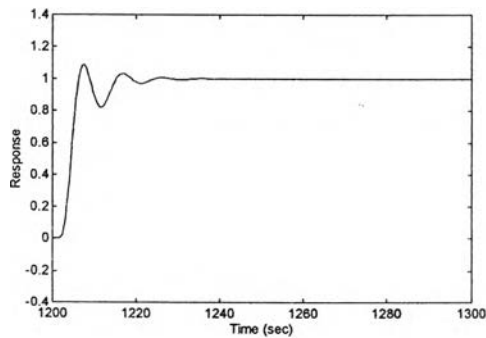


(ก)

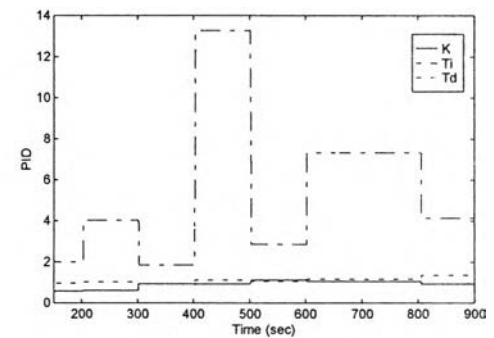


(ข)

รูปที่ 4.86 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 8 ของกระบวนการที่ 5



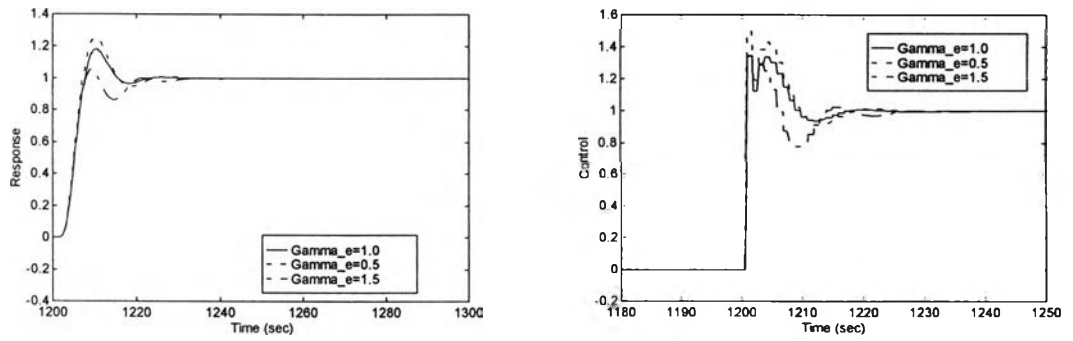
(ก)



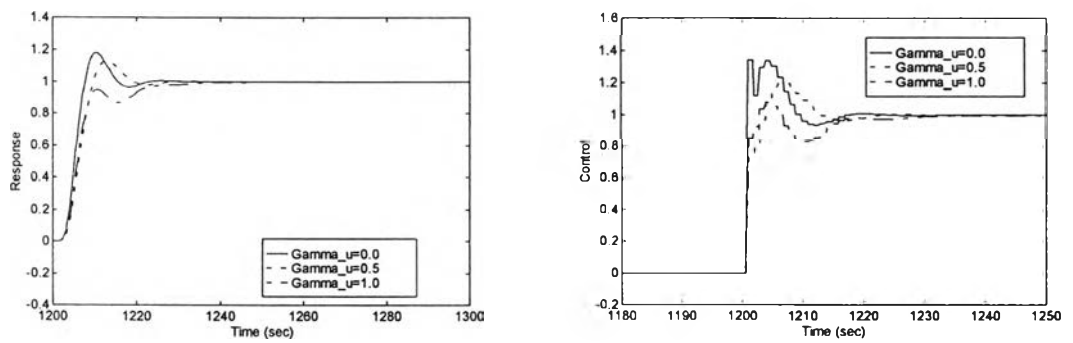
(ข)

รูปที่ 4.87 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 9 ของกระบวนการที่ 5

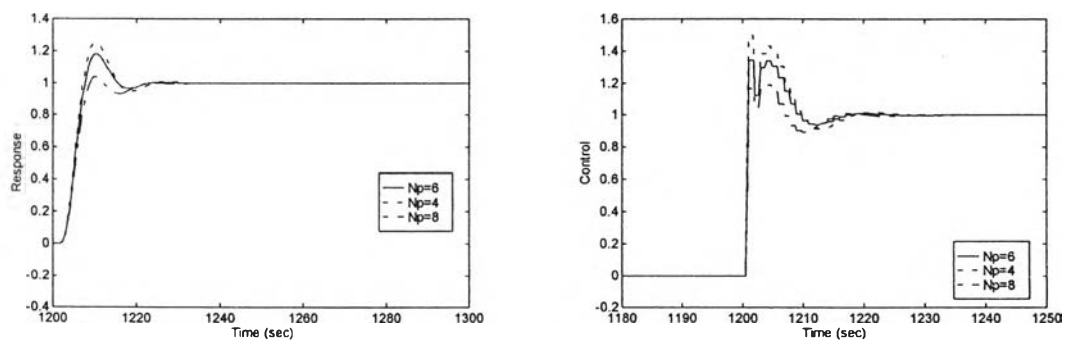
พิจารณาผลการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆในฟังก์ชันจุดประสงค์ต่อผลการควบคุม



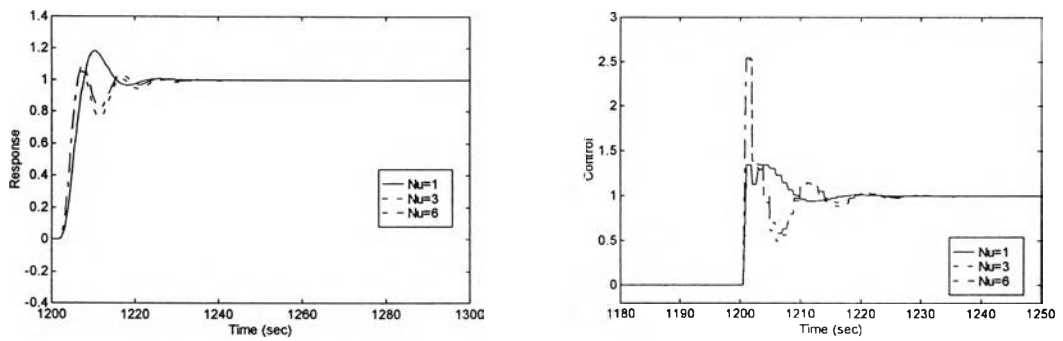
รูปที่ 4.88 ผลการเปลี่ยนแปลง Γ_e ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการที่ 5



รูปที่ 4.89 ผลการเปลี่ยนแปลง Γ_u ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการที่ 5



รูปที่ 4.90 ผลการเปลี่ยนแปลง N_p ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการที่ 5



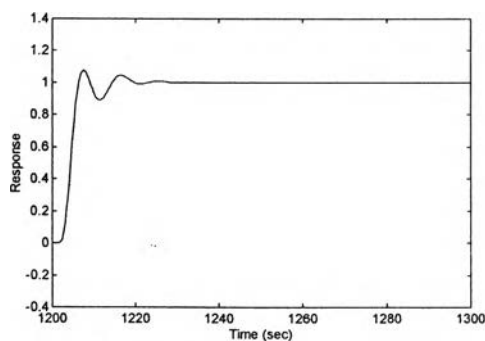
รูปที่ 4.91 ผลการเปลี่ยนแปลง N_u ต่อผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของกระบวนการที่ 5

ผลการปรับจูนตัวควบคุม PID และการเปรียบเทียบกับผลการปรับจูนตัวควบคุม PID ด้วยวิธีอื่น

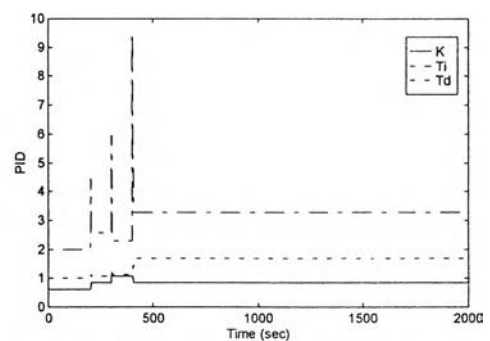
จากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

เงื่อนไข

1. การถ่วงน้ำหนักการทำนาย หรือ Γ_c = 2
2. การถ่วงน้ำหนักสัญญาณควบคุม หรือ Γ_u = 0
3. เส้นขอบการทำนายสูงสุด หรือ N_p = 6
4. เส้นขอบควบคุม หรือ N_u = 6



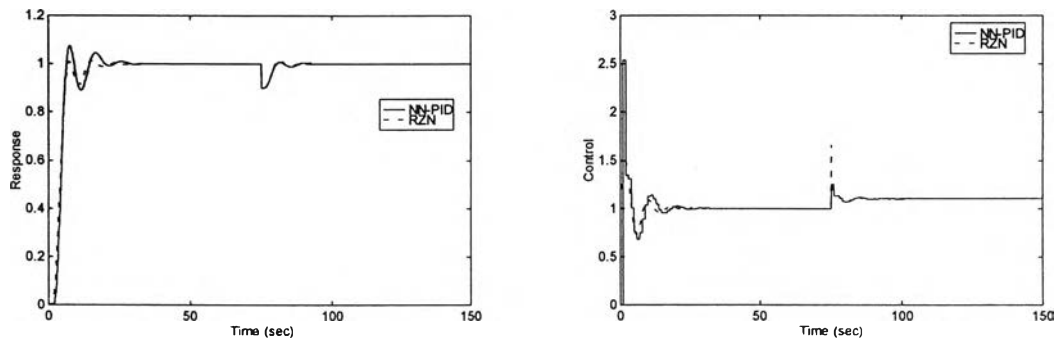
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.92 ผลการควบคุมและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ของกระบวนการที่ 5

จากการทดลองดังรูปที่ 4.92 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID หลังจากการปรับจูน $K = 0.85, T_i = 3.29, T_d = 1.68$ พิจารณาผลตอบสนองแบบขั้น และความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวน เมื่อมีสัญญาณรบกวนขนาดคงที่ 0.1 ณ วินาทีที่ 75 เปรียบเทียบกับผลการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีการปรับจูนโดยอาศัยการป้อนกลับด้วยวิธีเลย์โนบที่ 2



รูปที่ 4.93 เปรียบเทียบลักษณะผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมจากการควบคุมด้วยตัวควบคุมที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีต่างๆของกระบวนการที่ 5

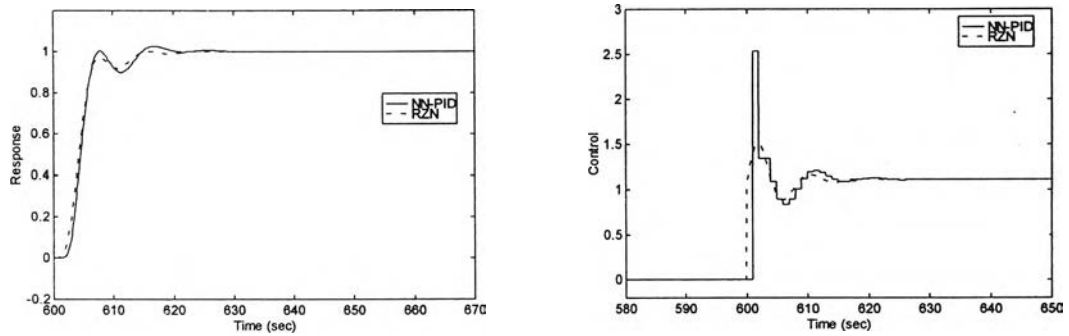
ประสิทธิภาพต่อความไม่แน่นอนในพารามิเตอร์ของกระบวนการ

ในการทดลองนี้ สมมติว่าความไม่แน่นอนของค่าอัตราขยายที่สภาวะอยู่ตัว เมื่อค่าอัตราขยายที่สภาวะอยู่ตัวเปลี่ยนจาก 1.0 เป็น 0.9 ณ วินาทีที่ 300

เงื่อนไข

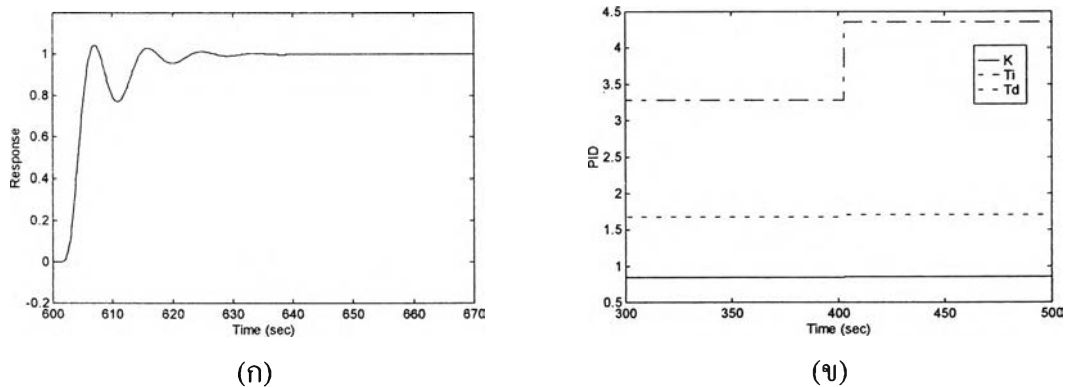
1. การถ่วงน้ำหนักการทำนาย หรือ Γ_v = 2
2. การถ่วงน้ำหนักสัญญาณควบคุม หรือ Γ_u = 0
3. เส้นขอบการทำนายสูงสุด หรือ N_p = 6
4. เส้นขอบควบคุม หรือ N_u = 6

จากการทดลองพบว่าเมื่อมีความไม่แน่นอนของค่าอัตราขยายที่สภาวะอยู่ตัวเมื่อเปลี่ยนค่าจาก 1 เป็น 0.9 ไม่มีการปรับจูนตัวควบคุม PID เกิดขึ้น นำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบบระหว่างผลการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีการปรับจูนโดยอาศัยการป้อนกลับด้วยรีเลย์ในบทที่ 2 และตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีที่เสนอได้ผลการทดลองดังนี้



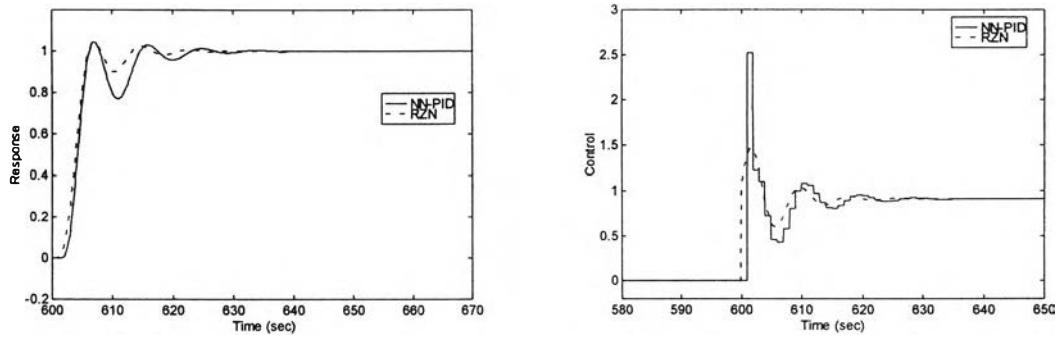
รูปที่ 4.94 เปรียบเทียบลักษณะผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมจากการควบคุมด้วยตัวควบคุมที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีต่างๆของกระบวนการที่ 5 เมื่ออัตราขยายที่สถานะอยู่ตัวเปลี่ยนจาก 1 เป็น 0.9

เมื่อค่าอัตราขยายที่สถานะอยู่ตัวเปลี่ยนจาก 1.0 เป็น 1.1 ณ วินาทีที่ 300 จากการทดลองพบว่าการปรับจูนตัวควบคุม PID ดังนี้



รูปที่ 4.95 ผลการควบคุมและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID เมื่อกระบวนการที่ 5 เมื่ออัตราขยายที่สถานะอยู่ตัวเปลี่ยนจาก 1.0 เป็น 1.1

รูป (ก) เป็นผลตอบสนองที่ได้จากการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ถูกปรับจูนเมื่อเกิดความไม่แน่นอนของค่าอัตราขยายที่สถานะอยู่ตัว รูป (ข) แสดงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID เมื่อมีการปรับจูน นำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบระหว่างผลการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีการปรับจูนโดยอาศัยการป้อนกลับด้วยวิธีเลขในบทยี่ 2 และตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีที่เสนอได้ผลการทดลองดังนี้



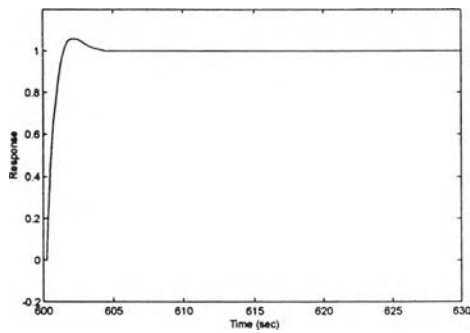
รูปที่ 4.96 เปรียบเทียบลักษณะผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมจากการควบคุมด้วยตัวควบคุมที่ปรับจูนได้ด้วยวิธีต่างๆของกระบวนการที่ 5 เมื่ออัตราขยายที่สภาวะอยู่ตัวเปลี่ยนจาก 1.0 เป็น 1.1

วิเคราะห์ผลการทดลอง

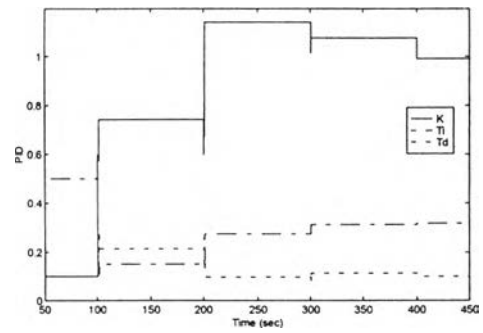
จากผลการทดลอง ทำให้ทราบผลของพารามิเตอร์ต่างๆที่ปรากฏในฟังก์ชันจุดประสงค์ ต่อผลตอบสนองภายใต้การควบคุม คือ การเพิ่มการถ่วงน้ำหนักการทำนาย หรือ Γ_e ทำให้ผลตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลงต่อค่าปรับตั้งรวดเร็วยิ่งขึ้น เพื่อลดความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าปรับตั้งกับผลตอบสนอง ขณะเดียวกันถ้ากำหนดค่ามากเกินไป ผลตอบสนองก็จะมีการแกว่ง และมีค่าพุ่งเกินสูง การเพิ่มการถ่วงน้ำหนักสัญญาณควบคุมหรือ Γ_u ทำให้ขนาดสัญญาณควบคุมลดลง แต่อาจทำให้ผลการควบคุมไม่ดี ผลตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลงช้า ช่วงเวลาเข้าที่ยาวนานขึ้น การเพิ่มค่าเส้นขอบการทำนายสูงสุดหรือ N_p จะเพิ่มความหน่วงให้กับผลตอบสนองของกระบวนการ ลดค่าพุ่งเกินของผลตอบสนอง เพิ่มช่วงเวลาขาขึ้น การเพิ่มเส้นขอบควบคุมหรือ N_u จะช่วยให้ผลตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลงต่อค่าปรับตั้งรวดเร็วยิ่งขึ้นได้ ลดช่วงเวลาขาขึ้นของกระบวนการ

จากผลการควบคุมพบว่าตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีที่เสนอเมื่อเปรียบเทียบกับผลการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนตัวเองโดยเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์เมื่อค่าปรับตั้งเป็นสัญญาณขั้น ในการควบคุมกระบวนการที่มีลักษณะพลวัตแบบต่างๆโดยอาศัยกระบวนการที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนแบบที่ 2, 4 และ 5 พบว่าสำหรับกระบวนการที่ 4 และ 5 ให้ผลการควบคุมที่ใกล้เคียงกัน โดยพิจารณาจากค่าพุ่งเกิน ช่วงเวลาขาขึ้นและช่วงเวลาเข้าที่ของกระบวนการ แต่สำหรับกระบวนการที่ 2 พบว่าการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีที่เสนอให้ผลการควบคุมที่ดีกว่า มีค่าพุ่งเกินและช่วงเวลาเข้าที่เร็วกว่า ในขณะที่ผลการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนตัวเองโดยเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์ให้ผลตอบสนองที่มีการแกว่งสูง และมีช่วงเวลาเข้าที่ยาวนานกว่า

การทดลองควบคุมกระบวนการที่มีค่าประวิงเวลาค่าต่างๆจากกระบวนการแบบที่ 1-3 เพื่อแสดงว่าโครงสร้างตัวควบคุม PID ที่ใช้สามารถชดเชยผลของการประวิงเวลา โดยการทำนายผลตอบสนองล่วงหน้า เพื่อเป็นข้อมูลในการสังเคราะห์สัญญาณควบคุม พบว่าค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนได้สำหรับกระบวนการที่ 1-3 มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆในฟังก์ชันจุดประสงค์เหมือนกัน เพื่อยืนยันความสามารถในการชดเชยผลของการประวิงเวลา จะทำการทดลองควบคุมกระบวนการที่ฟังก์ชันถ่ายโอน $\frac{1}{s+1}$ ซึ่งคล้ายกับกระบวนการที่ 1-3 เพียงแต่ไม่มีค่าประวิงเวลา เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆในฟังก์ชันจุดประสงค์เหมือนกับการทดลองกรณีที่ 1 สำหรับกระบวนการที่ 1-3 ได้ผลการปรับจูนตัวควบคุม PID ดังนี้



(ก)



(จ)

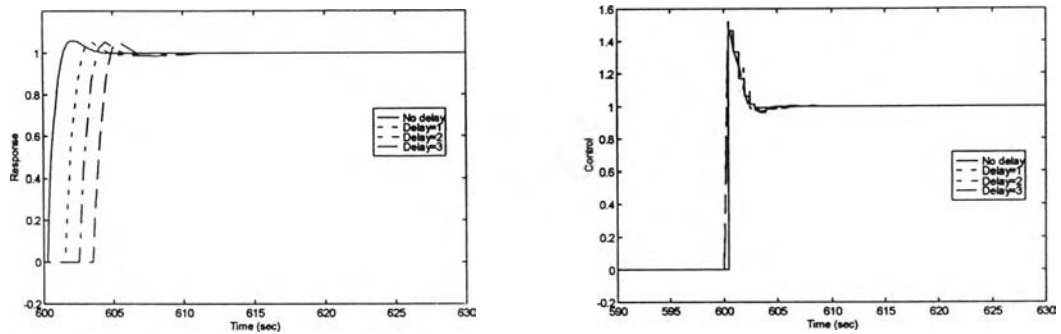
รูปที่ 4.97 ผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในกรณีที่ 1 ของกระบวนการที่ไม่มีค่าประวิงเวลา

จากการทดลองพบว่าค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่ปรับจนได้สำหรับกระบวนการทั้ง 4 คือ กระบวนการที่ไม่มีค่าประวิงเวลา และกระบวนการที่ 1-3 ซึ่งมีค่าประวิงเวลาเป็น 1 วินาที, 2 วินาที และ 3 วินาทีตามลำดับ มีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.12 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่ปรับจนได้สำหรับกระบวนการที่ 1-3 และ $\frac{1}{s+1}$

กระบวนการ	Γ_e	Γ_u	N_1	N_p	N_u	K	T_i	T_d
1. $\frac{1}{s+1}$	1	0	1	6	1	0.9930	0.3188	0.1005
2. $\frac{e^{-s}}{s+1}$	1	0	3	8	1	1.1568	0.3795	0.1176
3. $\frac{e^{-2s}}{s+1}$	1	0	5	10	1	1.1508	0.3768	0.1223
4. $\frac{e^{-3s}}{s+1}$	1	0	7	12	1	1.1503	0.3766	0.1223

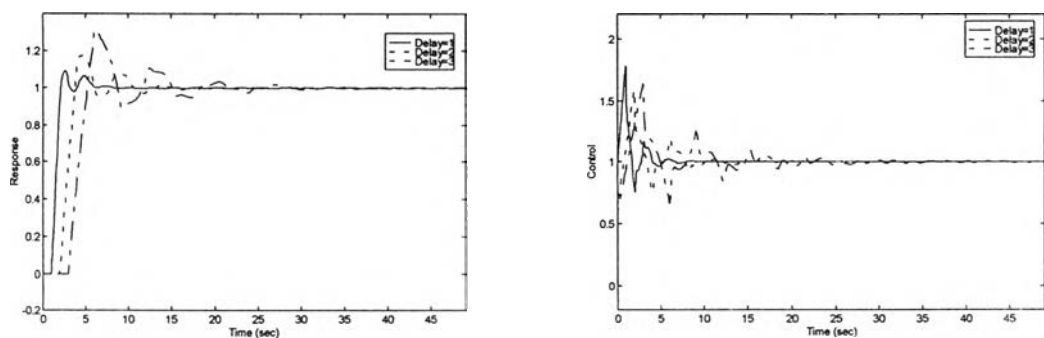
ทำการเปรียบเทียบผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้น เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในฟังก์ชันจุดประสงค์ดังกรณีที่ 1 ในการทดลองกับกระบวนการที่ 1-3 และกระบวนการที่มีฟังก์ชันถ่ายโอน $\frac{1}{s+1}$ ได้ผลดังนี้



รูปที่ 4.98 เปรียบเทียบลักษณะผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมเมื่อกระบวนการมีการเปลี่ยนค่าประวิงเวลาเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีที่เสนอ

จากการเปรียบเทียบพบว่าผลการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีที่เสนอเมื่อค่าปรับตั้งเป็นสัญญาณขั้นของกระบวนการทั้ง 1-3 และ $\frac{1}{s+1}$ มีลักษณะผลตอบสนองใกล้เคียงกัน พิจารณาจากช่วงเวลาขาขึ้นและค่าพุ่งเกินที่ใกล้เคียงกัน เพียงแต่มีการเลื่อนทางเวลาของผลตอบสนองอันเนื่องมาจากค่าประวิงเวลา ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าโครงสร้างตัวควบคุม PID ที่เสนอสามารถชดเชยผลของการประวิงเวลาได้

จากผลการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนตัวเองโดยเทคนิคการป้อนกลับด้วยวิธีเลข เมื่อมีค่าปรับตั้งเป็นสัญญาณขั้นกับกระบวนการที่ 1-3 ซึ่งมีการเพิ่มค่าประวิงเวลาจาก 1 เป็น 2 และ 3 วินาทีตามลำดับ พบว่าเมื่อค่าประวิงเวลาเพิ่มขึ้น ผลตอบสนองมีการแกว่งด้วยแอมพลิจูดที่สูงขึ้น และใช้เวลานานขึ้นกว่าผลตอบสนองจะเข้าสู่ค่าปรับตั้ง



รูปที่ 4.99 เปรียบเทียบลักษณะผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมเมื่อกระบวนการมีการเปลี่ยนค่าประวิงเวลาเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยเทคนิคการป้อนกลับด้วยวิธีเลข

ในการกำจัดผลของสัญญาณรบกวน โดยเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยวิธีที่เสนอเมื่อเปรียบเทียบกับผลการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนตัวเองโดยเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์กับกระบวนการที่ 1-5 พบว่าสามารถควบคุมให้ผลตอบสนองกลับสู่ค่าปรับตั้งได้อย่างรวดเร็วใกล้เคียงกัน

ผลของความไม่แน่นอนในพารามิเตอร์ของกระบวนการต่อผลตอบสนองภายใต้การควบคุม พบว่าตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนได้จากโครงสร้างการปรับจูนที่เสนอ มีความคงทนต่อความไม่แน่นอนในพารามิเตอร์ของกระบวนการที่อยู่ในขอบเขตที่พิจารณา และโครงสร้างการปรับจูนตัวควบคุมที่เสนอมีการปรับจูนตัวควบคุม PID เพื่อปรับปรุงผลการควบคุมสำหรับกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ จากการเปรียบเทียบกับผลการควบคุมโดยพิจารณาจากช่วงเวลาเข้าที่ ค่าพุ่งเกินและช่วงเวลาขาขึ้นเมื่อค่าปรับตั้งเป็นสัญญาณขั้น โดยเปรียบเทียบกับตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์ สำหรับกระบวนการที่มีค่าประวิงเวลา ให้ผลการควบคุมดีกว่า และสำหรับกระบวนการที่ 4 และ 5 ซึ่งไม่มีค่าประวิงเวลา ให้ผลการควบคุมใกล้เคียงกัน

จากหลักเกณฑ์ในการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้ที่ได้จากการทดลองนี้ จะนำไปใช้ในการปรับจูนตัวควบคุม PID เพื่อให้ได้ผลตอบสนองภายใต้การควบคุมที่ดีที่สุดสำหรับการควบคุมกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนต่อไป

4.3 สรุปผลการทดลอง

1. ทราบผลของพารามิเตอร์ต่างๆที่ปรากฏในฟังก์ชันจุดประสงค์ต่อผลตอบสนองของกระบวนการภายใต้การควบคุม โดยอาศัยหลักเกณฑ์เบื้องต้นเกี่ยวกับการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ต่างๆเหล่านี้สำหรับตัวควบคุมทำนายแบบจำลองเป็นพื้นฐาน และจากการทดลองพบว่าผลที่ได้ใกล้เคียงกับหลักเกณฑ์เบื้องต้นดังกล่าว คือ การเพิ่มการถ่วงน้ำหนักการทำนาย หรือ Γ_p ทำให้ผลตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลงต่อค่าปรับตั้งรวดเร็วยิ่งขึ้น เพื่อลดความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าปรับตั้งกับผลตอบสนอง การเพิ่มการถ่วงน้ำหนักสัญญาณควบคุมหรือ Γ_u ทำให้ขนาดสัญญาณควบคุมลดลง ผลตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลงช้า ช่วงเวลาเข้าที่ยาวนานขึ้น การเพิ่มค่าเส้นขอบการทำนายสูงสุดหรือ N_p จะเพิ่มความหน่วงให้กับผลตอบสนองของกระบวนการ ลดค่าพุ่งเกินของผลตอบสนอง เพิ่มช่วงเวลาขาขึ้น การเพิ่มเส้นขอบควบคุมหรือ N_u จะช่วยให้ผลตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลงต่อค่าปรับตั้งรวดเร็วยิ่งขึ้นได้ ลดช่วงเวลาขาขึ้นของกระบวนการ

2. เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการควบคุมกระบวนการที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงเส้นแบบต่างๆ พบว่าตัวควบคุม PID ที่ได้จากโครงสร้างการปรับจูนที่เสนอสามารถควบคุมผลตอบสนองของกระบวนการ ได้ดีกว่าตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์ โดยเฉพาะกระบวนการที่มีค่าประวิงเวลา เนื่องจากโครงสร้างการปรับจูนตัวควบคุม PID ที่เสนอ มีการทำนายผลตอบสนองล่วงหน้า เพื่อเป็นข้อมูลในการสังเคราะห์สัญญาณควบคุม ทำให้สามารถชดเชยผลของการประวิงเวลาได้ ในการกำจัดผลของสัญญาณรบกวน พบว่ามีความสามารถในการกำจัดผลของสัญญาณรบกวนใกล้เคียงกัน

3. ผลของความไม่แน่นอนในพารามิเตอร์ของกระบวนการต่อผลตอบสนองภายใต้การควบคุม พบว่าตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนได้จากโครงสร้างการปรับจูนที่เสนอ มีความคงทนต่อความไม่แน่นอนในพารามิเตอร์ของกระบวนการที่อยู่ในขอบเขตที่พิจารณา และมีการปรับจูนตัวควบคุม PID เพื่อปรับปรุงผลการควบคุมสำหรับกระบวนการที่มีความไม่แน่นอนในพารามิเตอร์ และจากการเปรียบเทียบกับผลตอบสนองภายใต้การควบคุม พบว่ามีประสิทธิภาพดีกว่าตัวควบคุม PID ที่ปรับจูนด้วยเทคนิคการป้อนกลับด้วยรีเลย์ โดยเฉพาะสำหรับกระบวนการที่มีค่าประวิงเวลา