

บทที่ 4

วิธีการทดลองและผลการทดลอง

4.1 คำนำ

ในการออกแบบระบบควบคุมไม่ว่าจะเป็นแบบป้อนกลับ ป้อนหน้า หรือ แบบโมเดลภายใน มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องแสดงผลการคำนวณด้านวิศวกรรมได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งโปรแกรมที่มีการแสดงผลทางด้านกราฟฟิก เป็นโปรแกรมที่สามารถแก้ปัญหาเมทริกซ์ และ เซกเตอร์ได้ มีความยืดหยุ่นในการใช้งาน โปรแกรมที่กล่าวนี้ได้แก่โปรแกรม MatLab และยังมีโปรแกรมอีกชุดหนึ่งคือโปรแกรม Simulink ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการทำเลียนแบบในแบบจำลองต่างๆ นั่นคือมีความเหมาะสมในการนำมาใช้ในการออกแบบ และวิเคราะห์ระบบควบคุมในลักษณะต่างๆ กันได้ และนอกจากนี้ ยังมีข้อดีประการหนึ่ง คือสามารถที่จะใช้ร่วมกับโปรแกรมอื่นๆ ได้เช่น โปรแกรมภาษาซี ภาษาฟอร์แทรน เป็นต้น ซึ่งในรายละเอียดของโปรแกรมนี้อาจจะขอกล่าวไว้ในภาคผนวกต่อไป

การควบคุมแบบป้อนกลับที่จับตัวควบคุมโดยวิธีการของ Ziegler-Nicoles ; Z-N และการควบคุมแบบโมเดลภายใน (IMC) จะมีสมรรถนะการควบคุมที่ต่างกัน โดยการควบคุมแบบป้อนกลับ จะมีพื้นฐานมาจากกระบวนการจริง (G_p) ส่วนการควบคุมแบบ IMC จะมีพื้นฐานมาจากความถูกต้องของโมเดล (G_m) ดังนั้นการควบคุมนี้จะได้ผลดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับค่าประมินค่าโมเดล ซึ่งการนำผลการควบคุมของทั้งสองวิธีมาเปรียบเทียบกัน จะทำให้ทราบสมรรถนะ และข้อจำกัดของการควบคุมทั้งสองแบบได้เป็นอย่างดี

4.2 วิธีการทดลอง

ในการวิจัยนี้จะมี 2 ตัวอย่างการทดลอง ซึ่งในแต่ละตัวอย่างการทดลองจะแบ่งเป็น 4 การทดลอง ดังนี้

4.2.1 ศึกษาการควบคุมแบบพีไอดีทั่วไป (Conventional PID)

4.2.2 ศึกษาการควบคุมแบบพีไอดีที่มีดีคัปเปิลเลอร์ (PID with Decouplers)

4.2.3 ศึกษาการควบคุมแบบโมเดลภายในที่ไม่มีดีคัปเปิลเลอร์ (IMC without Decouplers)

4.2.4 ศึกษาการควบคุมแบบโมเดลภายในที่มีดีคัปเปิลเลอร์ (IMC with Decouplers, MIMC)

และแต่ละการทดลองยังได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์ และการเปลี่ยนแปลงโหลด

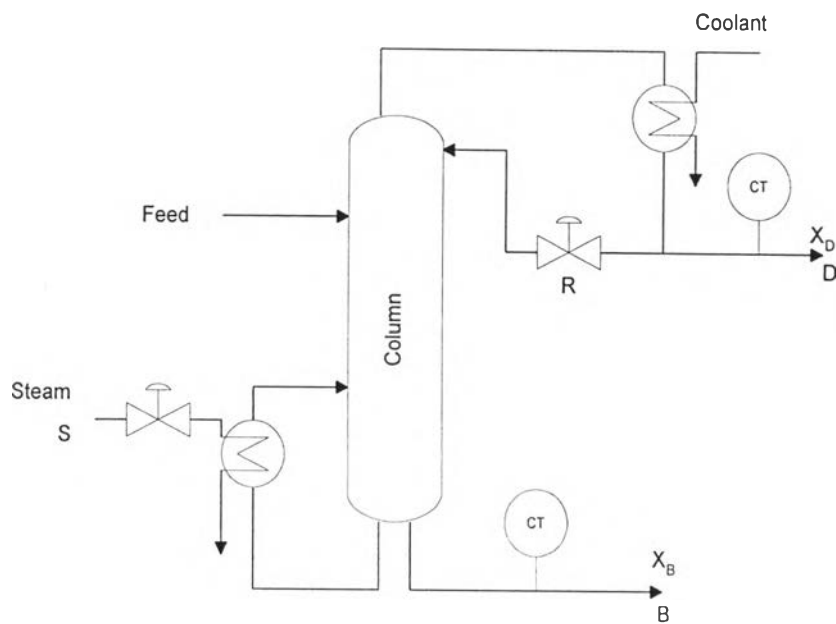
ตัวอย่างการทดลองที่ 1

เป็นตัวอย่างการทดลองของ Wood และ Berry (1973) ซึ่งได้ออกแบบจำลองหอกลับ

สำหรับการควบคุมที่มีหลายตัวแปร (Multivariable Control) ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งมีทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน

ดังนี้

$$\begin{bmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12.8e^{-2s}}{16.7s+1} & \frac{-18.9e^{-3s}}{21s+1} \\ \frac{6.6e^{-7s}}{10.9s+1} & \frac{-19.4e^{-3s}}{14.4s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{3.8e^{-8s}}{14.9s+1} \\ \frac{4.9e^{-3s}}{13.2s+1} \end{bmatrix} L(s) \quad (4-1)$$



รูปที่ 4.1 หอกลิ้นสำหรับการควบคุมที่มีหลายตัวแปร

โดยที่ระบบเป็นการควบคุมแบบลูฟหมู่ ซึ่งประกอบด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ (PI) สองตัว ปัญหานี้ได้ถูกวิเคราะห์โดย McAVOY (1987) โดยการใช้วิธีการของ Ziegler - Nichols ที่ได้มีการ จูนแบบลูฟหมู่ และเขาสามารถหาค่า K_c และ τ_c ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่า K_c และ τ_c ที่ได้จากการทดลองของ McAVOY

Controller Paring	Tuning Method	K_c	τ_c (min)
Y_1-u_1	Conventional	0.945	3.26
Y_2-u_2	Conventional	-0.196	9.00
Y_1-u_1	With decouplers	0.647	10.20
Y_2-u_2	With decouplers	-0.134	10.20

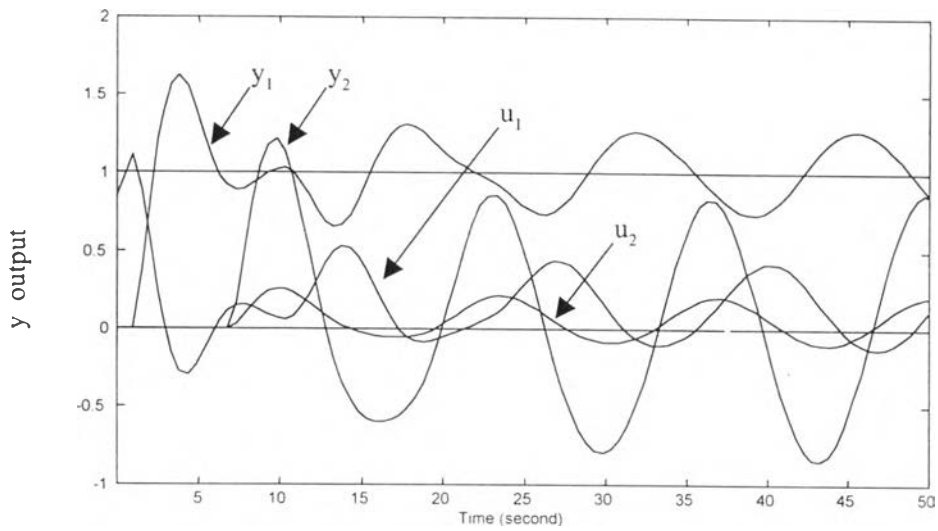
4.2.1 การควบคุมแบบพีไอดีทั่วไป (Conventional PID)

โดยการสร้างแบบจำลองนั้น จะเริ่มต้นจากการเรียกโปรแกรมช่วยวิเคราะห์และออกแบบตัวควบคุม MatLab และเรียกใช้โปรแกรมช่วย Simulink ซึ่งจะมีห้องสมุดของบล็อกไดอะแกรมต่างๆ ที่สามารถนำมาใช้สร้างแบบจำลองของการศึกษาวิจัย โดยการนำบล็อกไดอะแกรมที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทั้งหมดออกมาจากห้องสมุด โดยวางตำแหน่งบล็อกไดอะแกรม ให้เป็นไปตามตรรกของการควบคุม จากนั้นจึงลากเส้นเชื่อมโยงระหว่างบล็อกต่างๆ เข้าด้วยกัน ให้เป็นไปตามแบบจำลองที่ต้องการ

ซึ่งจากการควบคุมแบบกรณีนี้ 4.2.1 นี้สามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูป 4.2 โดยจะนำค่า K_c และ τ_c จากตารางที่ 4.1 ซึ่งได้มีการหาค่าโดย McAVOY ไว้แล้ว มาใช้ในการทดลองไม่ว่าจะเป็นการควบคุมแบบพีไอดีทั่วไป (Conventional PID) หรือการควบคุมแบบพีไอดีที่มีดีคัปเปิลเลอร์ (PID with Decouplers) ต่อไป

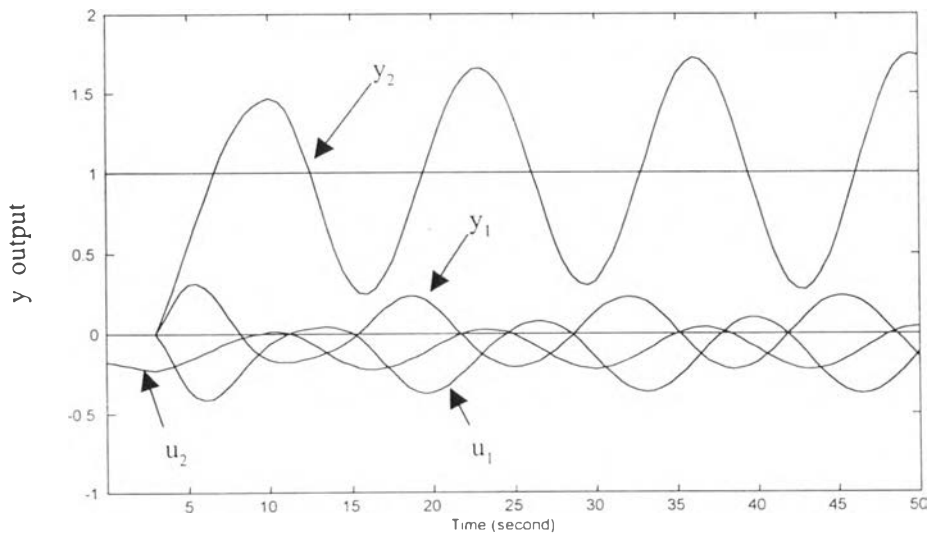
ผลการทดลอง

ก. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเซตพอยท์ ที่ $y_1 = 1, y_2 = 0$



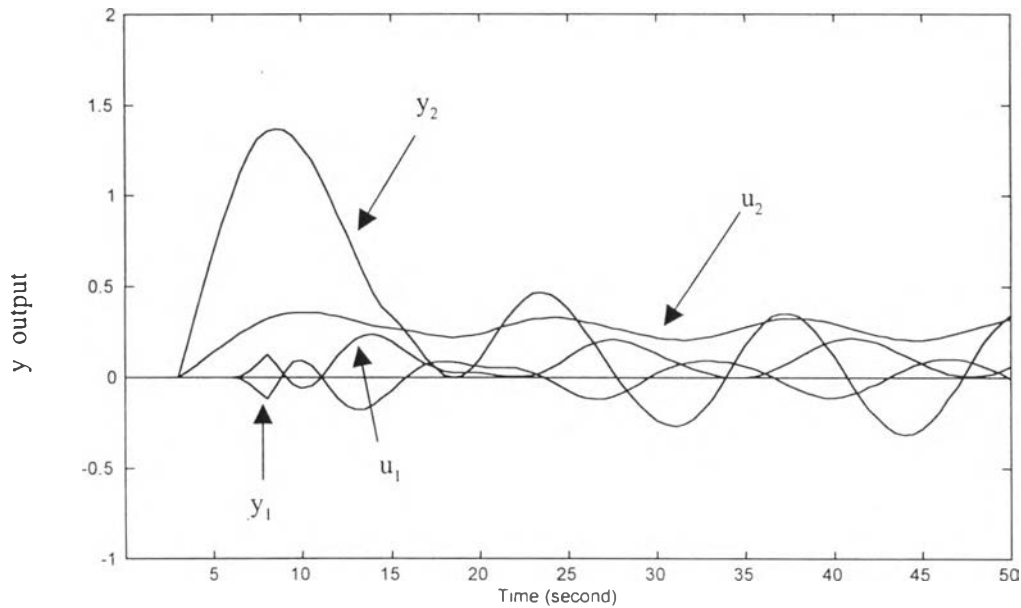
รูปที่ 4.3 การตอบสนองการควบคุมแบบพีไอดีทั่วไป ที่ $y_1 = 1, y_2 = 0$

ข. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเซตพอยท์ ที่ $y_1 = 0, y_2 = 1$



รูปที่ 4.4 การตอบสนองการควบคุมแบบพีไอดีทั่วไป ที่ $y_1 = 0, y_2 = 1$

ค. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด



รูปที่ 4.5 การตอบสนองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด

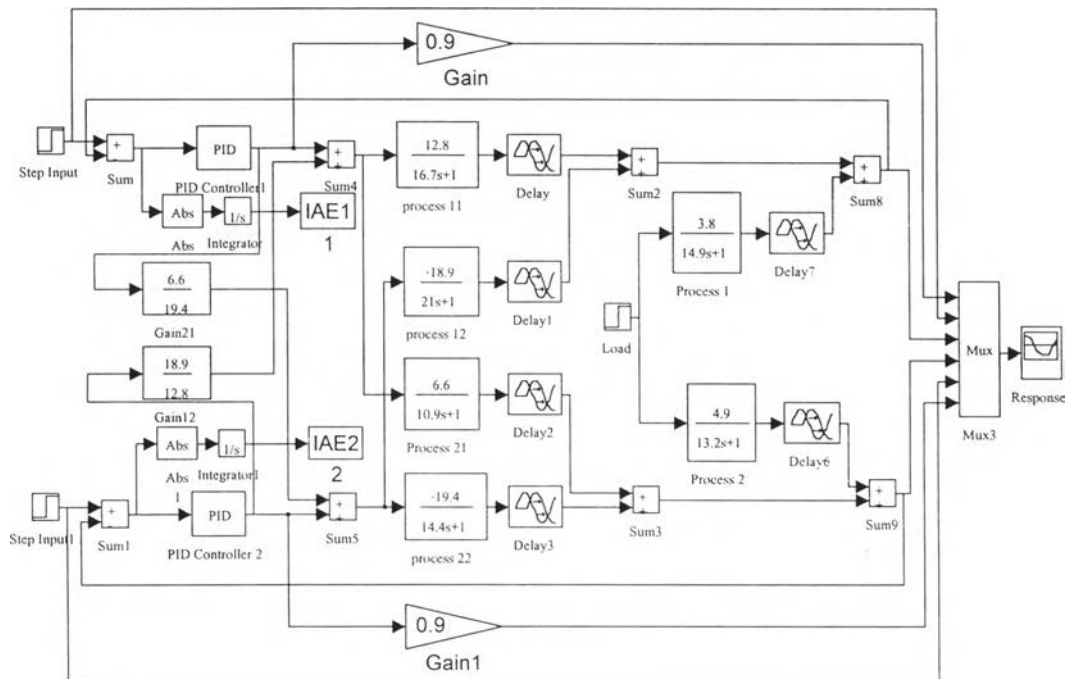
จากผลการตอบสนองทั้ง 3 กรณี สามารถวิเคราะห์ผลการทดลองโดยพิจารณาจากค่า IAE ที่น้อยกว่า และค่า u หรือค่าการควบคุมของตัวแปรปรับซึ่งจะหมายถึงการเปิด-ปิดของวาล์วไปพร้อม ๆ กัน

ตารางที่ 4.2 ค่า IAE เมื่อมีการเปลี่ยนเซ็ทพอยท์และโหลด สำหรับการควบคุมแบบพีไอดีทั่วไป

ความผิดพลาด	เมื่อมีการเปลี่ยนเซ็ทพอยท์		เมื่อมีการเปลี่ยน โหลด
	$y_1 = 1, y_2 = 0$	$y_1 = 0, y_2 = 1$	
IAE1	9.933	6.709	2.957
IAE2	23.283	23.737	17.861

4.2.2 การควบคุมแบบพีไอดีที่มีดีคัปเลอร์ (PID with Decouplers)

สามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้



รูปที่ 4.6 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแบบพีไอดีที่มีดีคัปเลอร์

จากการออกแบบการควบคุมได้แบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 3 กรณีศึกษาดังนี้

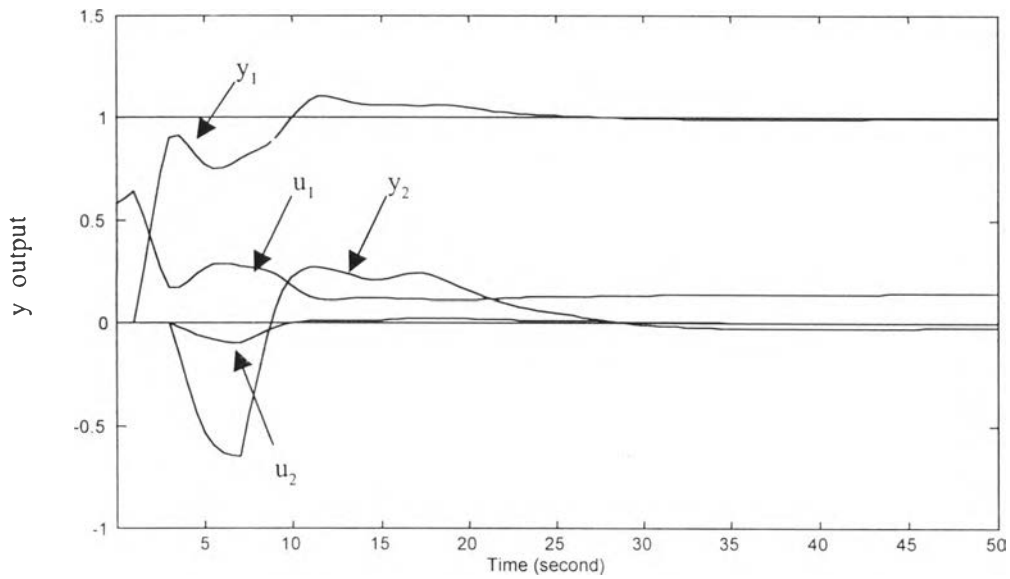
ก. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์ ที่ $y_1 = 1, y_2 = 0$

ข. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์ ที่ $y_1 = 0, y_2 = 1$

ค. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด

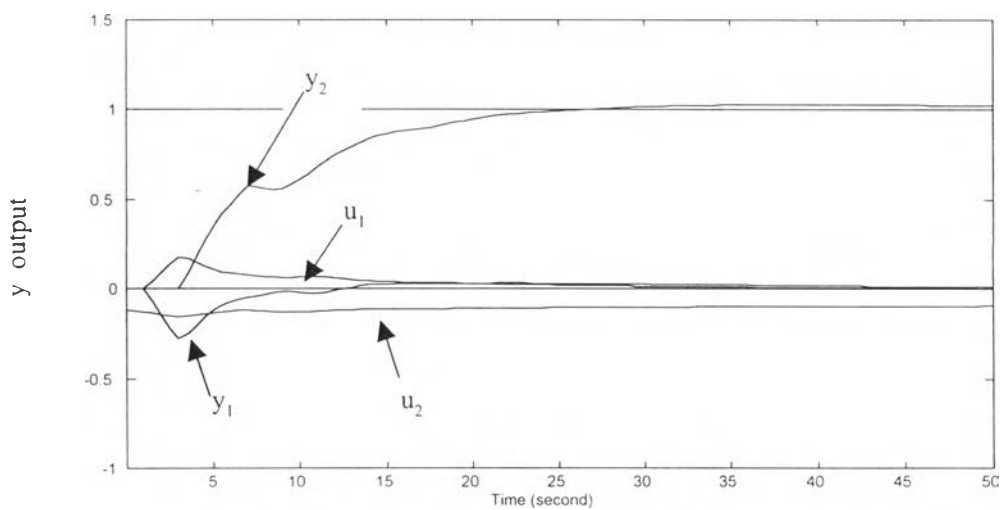
ผลการทดลอง

ก. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์ ที่ $y_1 = 1, y_2 = 0$



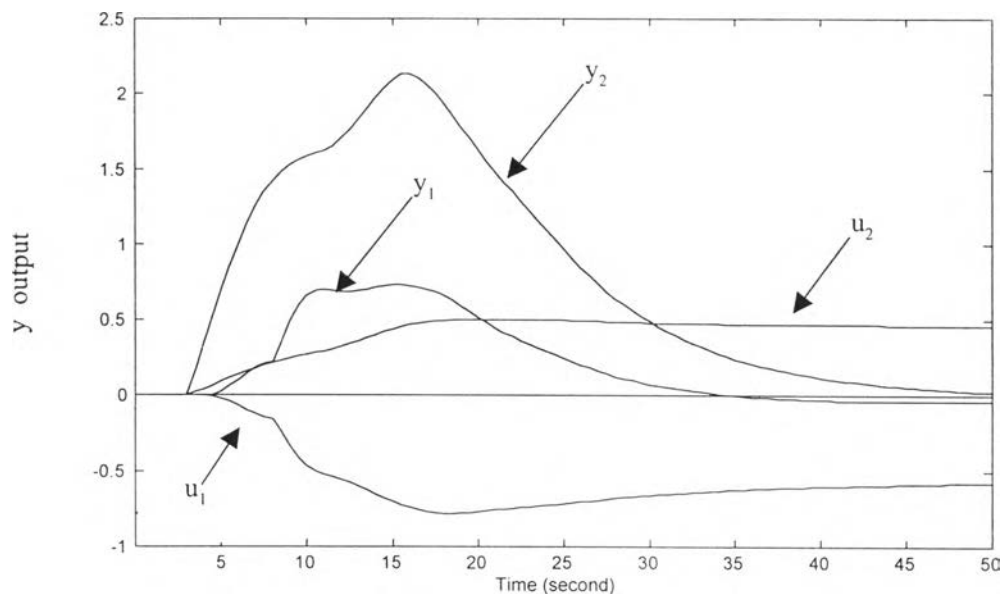
รูปที่ 4.7 การตอบสนองการควบคุมพีไอดีที่มีคัพเปลอร์ ที่ $y_1 = 1, y_2 = 0$

ข. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์ ที่ $y_1 = 0, y_2 = 1$



รูปที่ 4.8 การตอบสนองการควบคุมพีไอดีที่มีคัพเปลอร์ ที่ $y_1 = 0, y_2 = 1$

ค. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด



รูปที่ 4.9 การตอบสนองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด

วิเคราะห์ผลการทดลองจากทั้ง 3 กรณี โดยพิจารณาจากค่า IAE ซึ่งแสดงได้ในตาราง 4.3

ดังนี้

ตารางที่ 4.3 ค่า IAE เมื่อมีการเปลี่ยนเซ็ทพอยท์และโหลด สำหรับการควบคุมแบบพีไอดี

ที่มีคัพเพลอร์

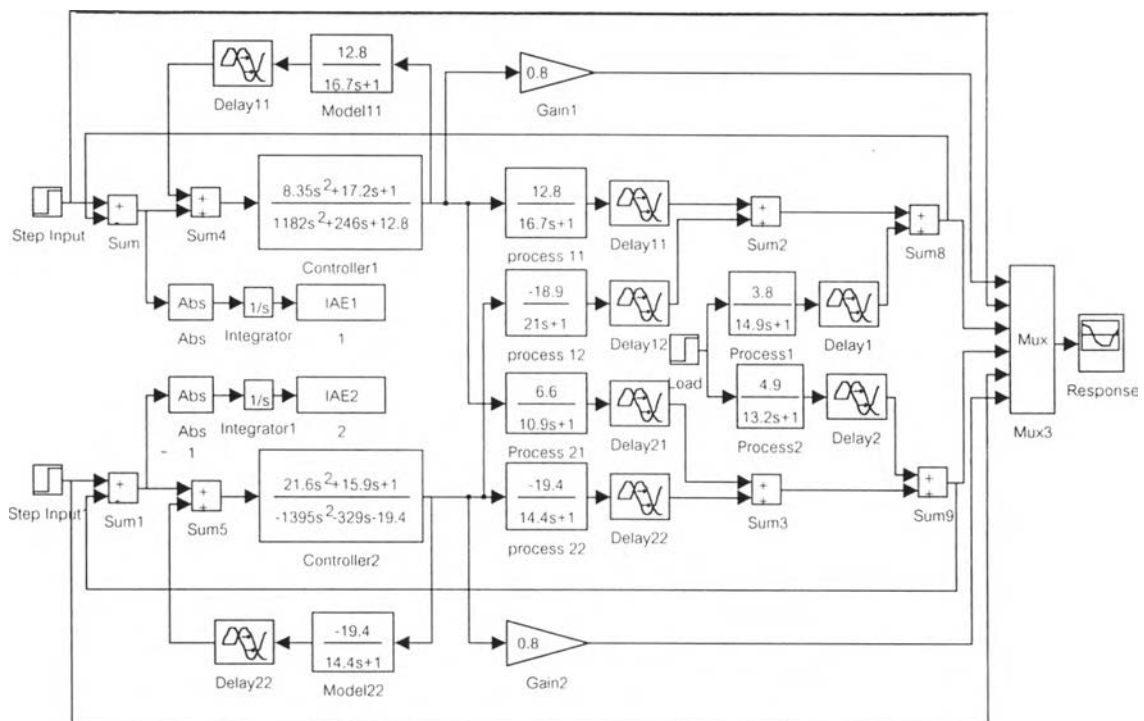
ความผิดพลาด	เมื่อมีการเปลี่ยนเซ็ทพอยท์		เมื่อมีการเปลี่ยนโหลด
	$Y_1 = 1, y_2 = 0$	$y_1 = 0, y_2 = 1$	
IAE1	4.095	1.798	11.398
IAE2	5.829	9.392	39.025

4.2.3 การควบคุมแบบโมเดลภายในที่ไม่มีดีคัปเปลอร์ (IMC without Decouplers)

จะแบ่งกรณีศึกษาเป็น 2 การทดลอง ดังนี้

การทดลองที่ 1 การควบคุมแบบ โมเดลภายในที่รวมเดดไทม์

สำหรับกระบวนการที่มีทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันอันดับหนึ่งที่มีเดดไทม์ สามารถใช้การประมาณค่าโดยวิธีการของ Padé Approximation ทำให้มีทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการมีรูปแบบตามสมการที่ 3-6 ซึ่งเมื่อพิจารณาในแง่ของ IMC แล้วจะได้ G_+ และ G_- ตามสมการที่ 3-7 และ 3-8 และจะได้ G_c^* ตามสมการที่ 3-9 สามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้



รูปที่ 4-10 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัปเปลอร์

สำหรับค่า τ_{f1} และ τ_{f2} ที่นำมาใช้ในการทดลองนี้อาศัยจากกราฟรูปที่ 2.1 (ในที่นี้ $\tau_f = \tau_c$)

โดยที่

$$\text{Dead Time Fraction} = \frac{\theta}{\theta + \tau} \quad (4-2)$$

$$\text{แกน } y = \frac{\tau_c}{\theta + \tau} \quad (4-3)$$

$$\text{หรือใช้สมการ } y = -0.47833x + 0.57 \quad (4-4)$$

ซึ่งจะได้ $\tau_{f1} = 9.61$ และ $\tau_{f2} = 8.48$ และจะนำไปใช้ในการทดลองต่อไป เมื่อกำหนดหาค่า G_c^*

ตามสมการที่ 3-9 จะได้

$$G_{c1}^* = \frac{(1 + 0.5s)(16.7s + 1)}{12.8(9.61s + 1)^2}$$

$$G_{c1}^* = \frac{8.35s^2 + 17.22s + 1}{1182s^2 + 246s + 12.8} \quad (4-5)$$

$$\text{และ } G_{c2}^* = \frac{(1 + 1.5s)(14.4s + 1)}{-19.4(8.48s + 1)^2}$$

$$G_{c2}^* = \frac{21.6s^2 + 15.9s + 1}{-1395s^2 + 329s - 19.4} \quad (4-6)$$

ในการทดลองที่ 1 นี้จะได้แบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 3 กรณีศึกษาดังนี้

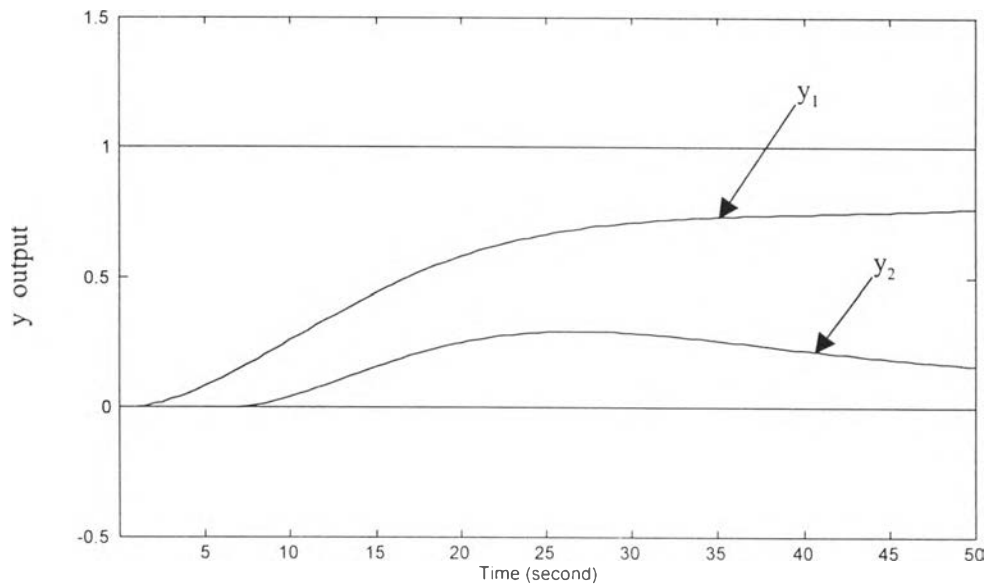
ก. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์ ที่ $y_1 = 1, y_2 = 0$

ข. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์ ที่ $y_1 = 0, y_2 = 1$

ค. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด

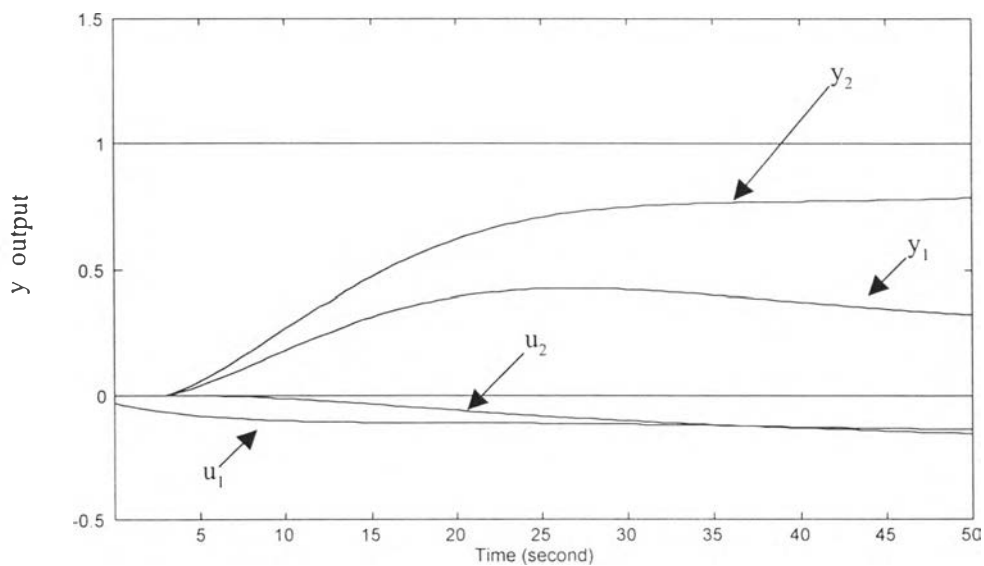
ผลการทดลองที่ 1

ก. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์ ที่ $y_1 = 1, y_2 = 0$



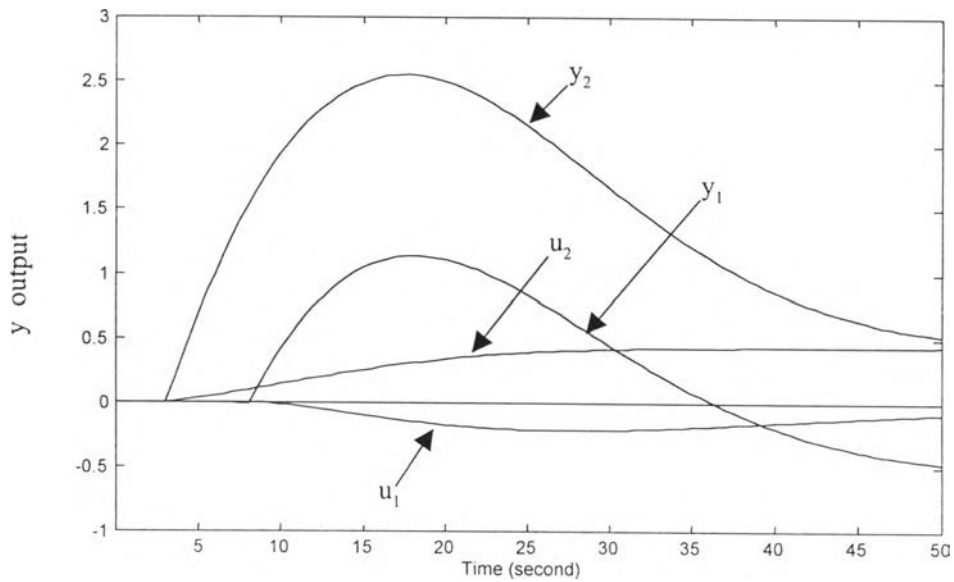
รูปที่ 4.11 การควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัฟเฟิลเลอร์ ที่รวมเดดไทม์ ที่ $y_1 = 1, y_2 = 0$

ข. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์ ที่ $y_1 = 0, y_2 = 1$



รูปที่ 4.12 การควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัฟเฟิลเลอร์ ที่รวมเดดไทม์ ที่ $y_1 = 0, y_2 = 1$

ค. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด



รูปที่ 4.13 การตอบสนองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด

จากทั้ง 3 กรณี แสดงผลการตอบสนองที่ยังไม่ได้จูน ซึ่งค่า IAE ที่ได้จะเป็นไปตามตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่า IAE สำหรับการควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัทเพลอร์ ของการทดลองที่ 1

ความผิดพลาด	เมื่อมีการเปลี่ยนเซ็ทพอยท์		เมื่อมีการเปลี่ยนโหลด
	$y_1 = 1, y_2 = 0$	$y_1 = 0, y_2 = 1$	
IAE1	23.251	15.190	23.449
IAE2	8.836	22.141	71.785

การทดลองที่ 2 การควบคุมแบบ โมเดลภายในที่ไม่รวมเดดไทม์

สำหรับกระบวนการที่มีทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันอันดับหนึ่งที่มีเดดไทม์ สามารถใช้การประมาณค่าโดยวิธีการของ Pade' Approximation เช่นเดียวกันแต่ \tilde{G}_+ และ \tilde{G}_- มีค่าต่างจากการควบคุมแบบโมเดลภายในที่รวมเดดไทม์ ดังนี้

$$\tilde{G}_+ = e^{-\theta s} = \frac{1 - \frac{\theta}{2}s}{1 + \frac{\theta}{2}s} \quad (4-7)$$

$$\text{ส่วน } \tilde{G}_- = \frac{k}{\tau s + 1} \quad (4-8)$$

$$\text{ดังนั้น } G_c^* = \frac{1}{\tilde{G}_-} \cdot \frac{1}{\tau_f s + 1} \quad (4-9)$$

$$G_c^* = \frac{(\tau s + 1)}{k} \cdot \frac{1}{\tau_f s + 1} \quad (4-10)$$

สำหรับค่า τ_{f1} และ τ_{f2} ยังใช้ค่าเดิมอยู่คือ $\tau_{f1} = 9.61$ และ $\tau_{f2} = 8.41$

เมื่อคำนวณหาค่า G_c^* ตามสมการที่ 4-10 จะได้

$$G_{c1}^* = \frac{(16.7s + 1)}{12.8} \cdot \frac{1}{(9.61s + 1)}$$

$$G_{c1}^* = \frac{16.7s + 1}{123s + 12.8} \quad (4-11)$$

และ

$$G_{c2}^* = \frac{(14.4s + 1)}{-19.4} \cdot \frac{1}{(8.48s + 1)}$$

$$G_{c2}^* = \frac{14.4s + 1}{-164.5s - 19.4} \quad (4-12)$$

ในการทดลองที่ 2 นี้จะได้แบ่งกรณีศึกษาย่อย เป็น 3 กรณีศึกษาดังนี้

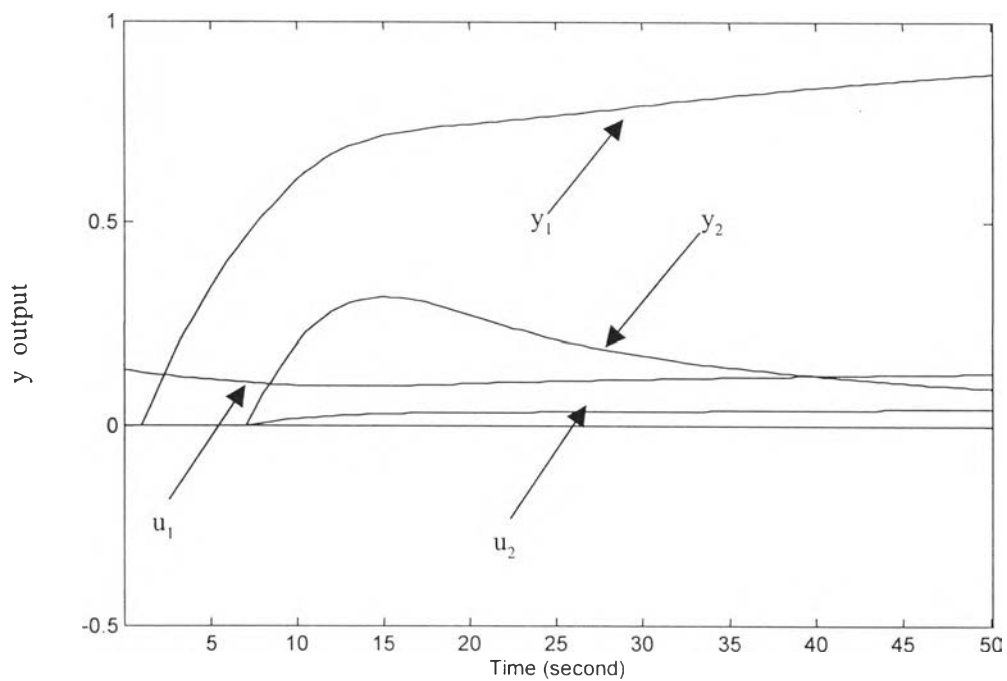
ก. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์ ที่ $y_1 = 1, y_2 = 0$

ข. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์ ที่ $y_1 = 0, y_2 = 1$

ค. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโพลด

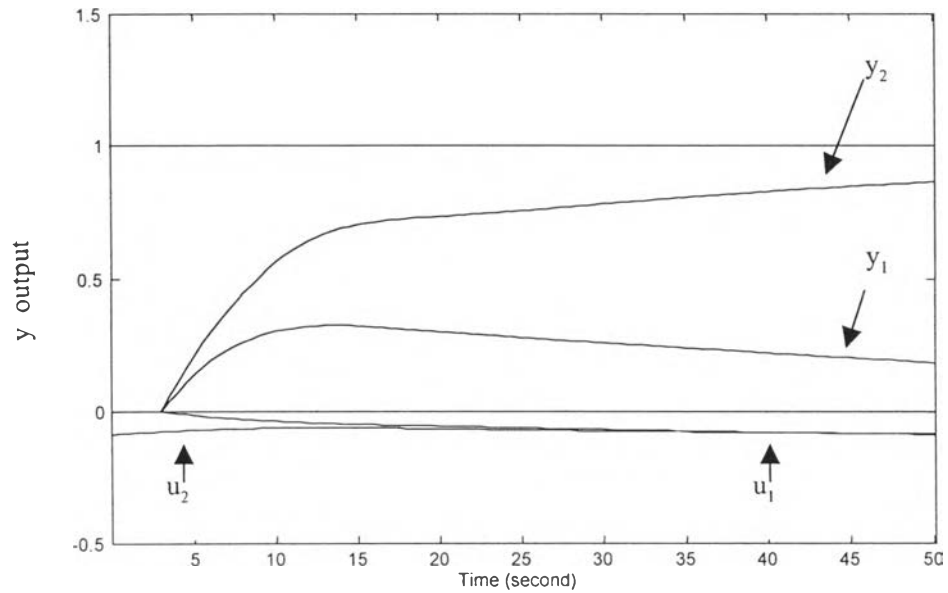
ผลการทดลองที่ 2

ก. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์ ที่ $y_1 = 1, y_2 = 0$



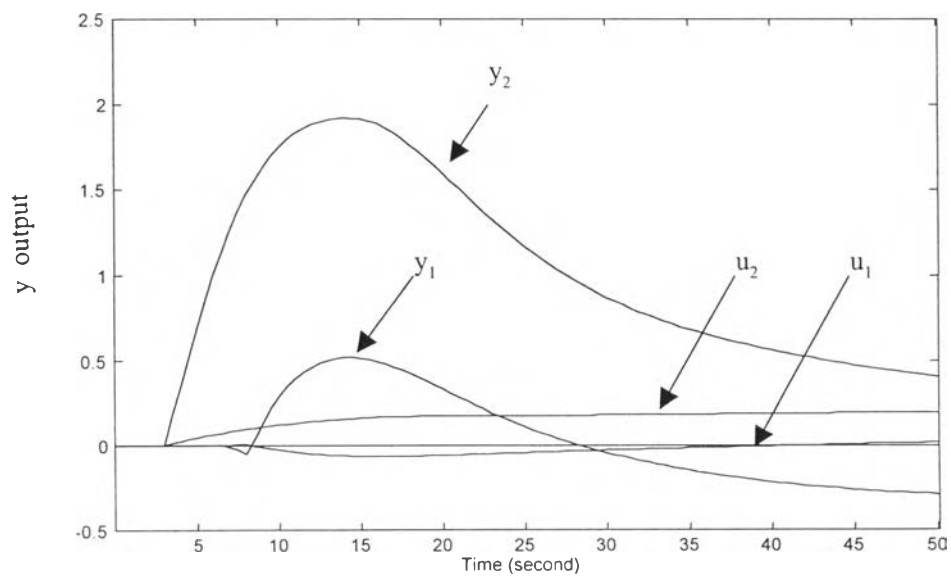
รูปที่ 4.14 การควบคุม IMC ที่ไม่มีดีคัพเพลอร์ไม่รวมเดดไทม์ ที่ $y_1 = 1, y_2 = 0$

ข. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์ ที่ $y_1 = 0, y_2 = 1$



รูปที่ 4.15 การควบคุม IMC ที่ไม่มีดีคิฟเฟอเรนเชียลรวมเดดไทม์ ที่ $y_1 = 0, y_2 = 1$

ค. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด



รูปที่ 4.16 การตอบสนองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด

จากทั้ง 3 กรณี แสดงผลการตอบสนองที่ยังไม่ได้จูนตัวควบคุม ซึ่งค่า IAE ที่ได้จะเป็นไป

ตามตาราง 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่า IAE สำหรับการควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเพลอร์ ของการทดลองที่ 2

ความผิดพลาด	เมื่อมีการเปลี่ยนเซ็ทพอยท์		เมื่อมีการเปลี่ยน โหลด
	$y_1 = 1, y_2 = 0$	$y_1 = 0, y_2 = 1$	
IAE1	15.446	11.779	10.084
IAE2	7.913	16.863	49.255

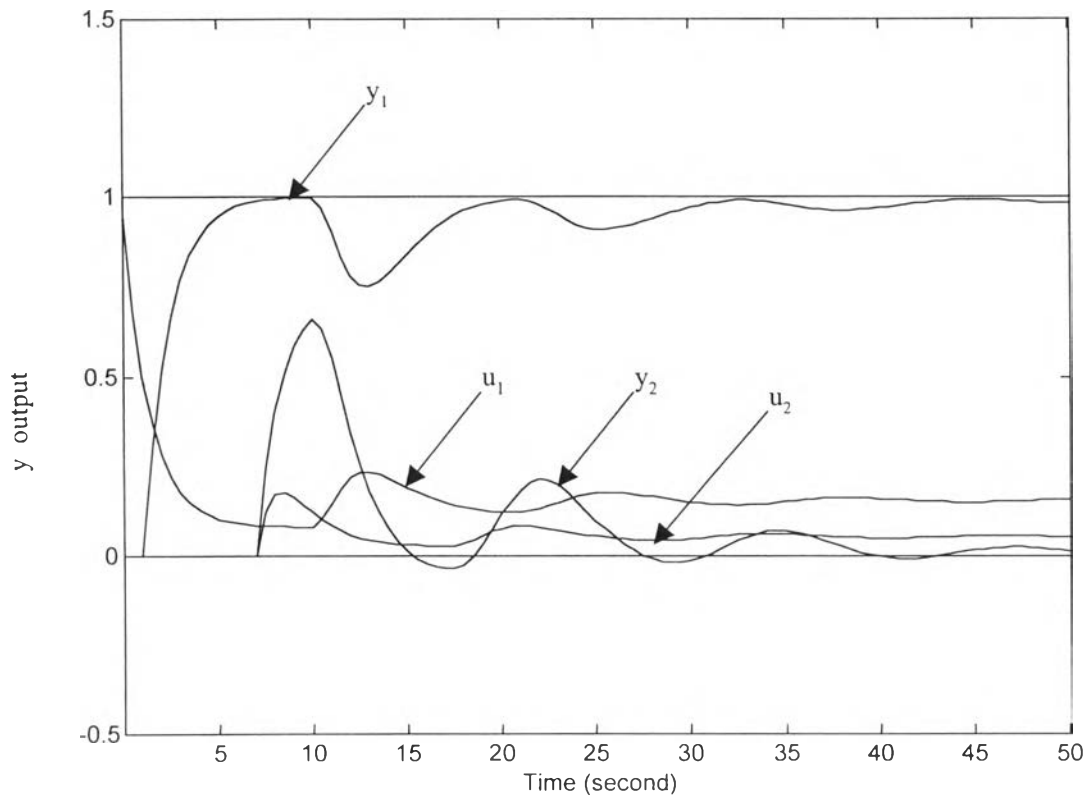
เมื่อเปรียบเทียบตารางที่ 4.4 กับตารางที่ 4.5 จะเห็นว่า การควบคุมแบบโมเดลภายในที่ไม่มีดีคัพเพลอร์แบบไม่รวมเดดไทม์ จะให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่าแบบรวมเดดไทม์ โดยพิจารณาจากค่า IAE ไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนเซ็ทพอยท์หรือการเปลี่ยนโหลดตลอดจนการควบคุมของวาล์ว

ดังนั้นเราจะนำวิธีการออกแบบ IMC ที่ไม่รวมเดดไทม์ไปทำการจูนหาตัวควบคุมต่อโดยการลดค่า τ_c ลง โดยการลดลงของค่า τ_c ของทั้งสองค่านั้น (τ_{c1} และ τ_{c2}) จะให้ลดลงไปพร้อม ๆ กัน ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่า IAE เมื่อมีการจูนตัวควบคุมสำหรับการควบคุมแบบ IMC ที่ไม่รวมเดดไทม์

ค่า τ_f	IAE					
	$y_1 = 1, y_2 = 0$		$y_1 = 0, y_2 = 1$		เปลี่ยนโหลด	
	IAE1	IAE2	IAE1	IAE2	IAE1	IAE2
ยังไม่ได้ลดค่า τ_f	15.446	7.913	11.779	16.863	10.084	49.255
ลดลง 4 เท่า	6.257	4.917	5.491	9.400	3.100	25.796
ลดลง 5 เท่า	5.441	4.593	4.820	8.727	2.682	23.914
ลดลง 6 เท่า	4.882	4.473	4.349	8.260	2.440	22.631
ลดลง 7 เท่า	4.481	4.491	3.997	7.925	2.287	21.696
ลดลง 8 เท่า	4.182	4.533	3.726	7.677	2.180	20.987
ลดลง 10 เท่า	3.766	4.621	3.348	7.338	2.037	19.986
ลดลง 12 เท่า	3.496	4.715	3.095	7.135	1.941	19.317

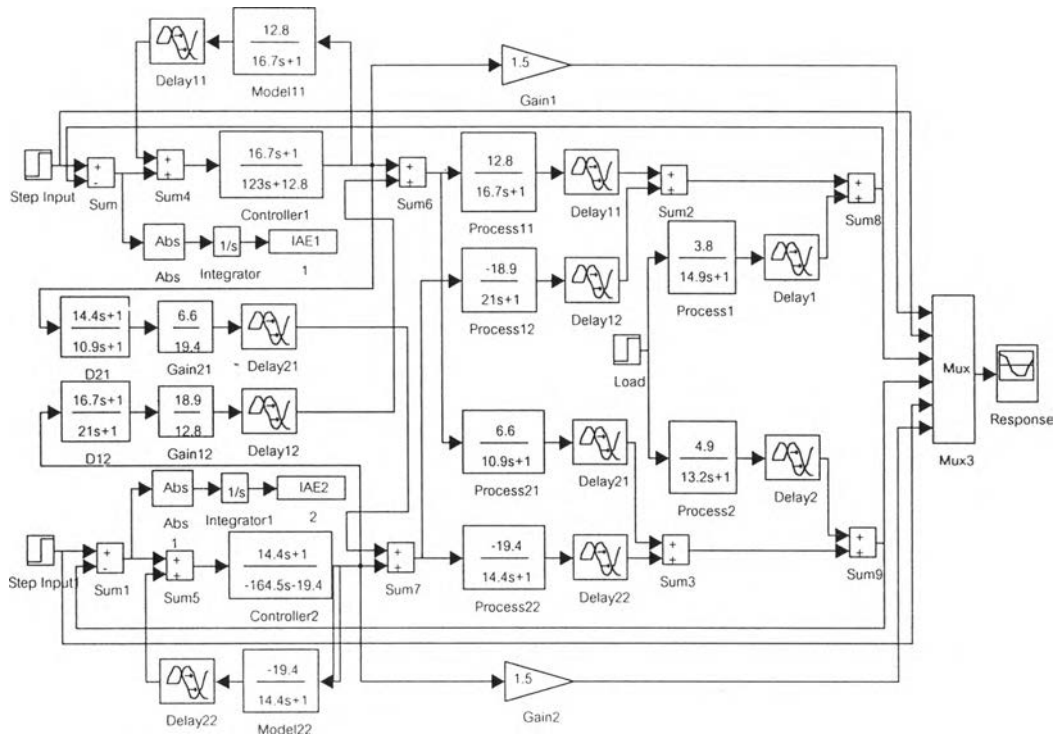
จากผลการจูนตัวควบคุมโดยการลดค่า τ_f ลงนั้น จะเห็นว่าค่า τ_f ที่เหมาะสมที่สุดคือ เมื่อลดลง 7 เท่า ($\tau_{f1} = 9.61/7 = 1.373$ และ $\tau_{f2} = 8.48/7 = 1.21$) โดยการพิจารณาจากค่า IAE และจากกราฟการตอบสนองตลอดจนการควบคุมของวาล์ว (Control Action) ดังรูปที่ 4.17 นั่นคือ เมื่อให้ค่า τ_f ลดลงไปมากกว่า 7 เท่า จะทำให้ค่า IAE2 ของการปรับเปลี่ยนเซ็ทพอยท์ ณ $y_1 = 1, y_2 = 0$ เริ่มที่จะเพิ่มขึ้นตามลำดับ ขณะที่ค่า IAE อื่น ๆ ลดลง



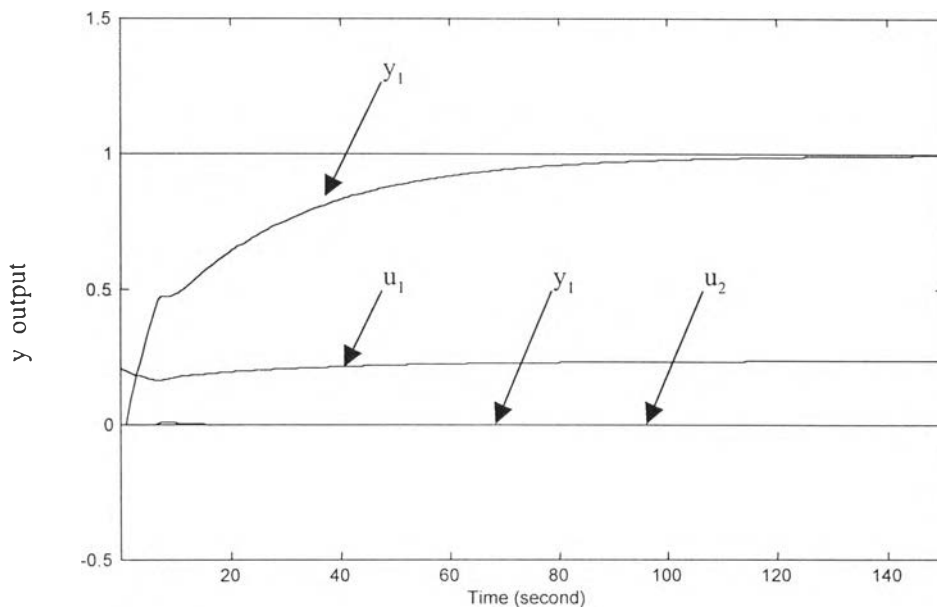
รูปที่ 4.17 การตอบสนองหลังการจูนตัวควบคุม เมื่อ $\tau_{f1} = 1.373$ และ $\tau_{f2} = 1.21$

4.2.4 การศึกษาการควบคุมแบบโมเดลภายในที่มีดีคัปเปลอร์ (IMC with Decouplers)

จากการพิสูจน์แล้วว่า การออกแบบตัวควบคุม IMC แบบไม่รวมเดคไทม์นั้นจะให้ผลที่ดีกว่าแบบที่มีเดคไทม์ ดังนั้นในการวิจัยจะใช้วิธีการออกแบบนี้มาใช้หาตัวควบคุมร่วมกับกรณีศึกษา นี้ ซึ่งในกรณีศึกษานี้จะเป็นการนำเอาดีคัปเปลอร์ มาสร้างเป็นแบบจำลองที่เป็น MIMC และเขียนบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 4.18 โดยที่ค่า τ_{f1} และ τ_{f2} ยังคงเป็นค่าเดิมคือ 9.61 และ 8.48 ตามลำดับ และผลการตอบสนองแสดงได้ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.18 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแบบ IMC ที่มีดีคัพเปลอร์



รูปที่ 4.19 การตอบสนองการควบคุมแบบ IMC ที่มีดีคัพเปลอร์ ที่ $y_1 = 1$ และ $y_2 = 0$

จากผลการตอบสนองของการควบคุม IMC ที่มีดีคัพเพลอร์ ไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนเซตพอยท์ ที่ $y_1 = 1, y_2 = 0$ และ $y_1 = 0, y_2 = 1$ หรือการเปลี่ยนแปลงโหลด จะพบว่า ได้ผลไม่เป็นที่น่าพอใจ เมื่อพิจารณา จากค่า IAE และกราฟการตอบสนอง ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่า IAE สำหรับการควบคุมแบบ IMC ที่มีดีคัพเพลอร์

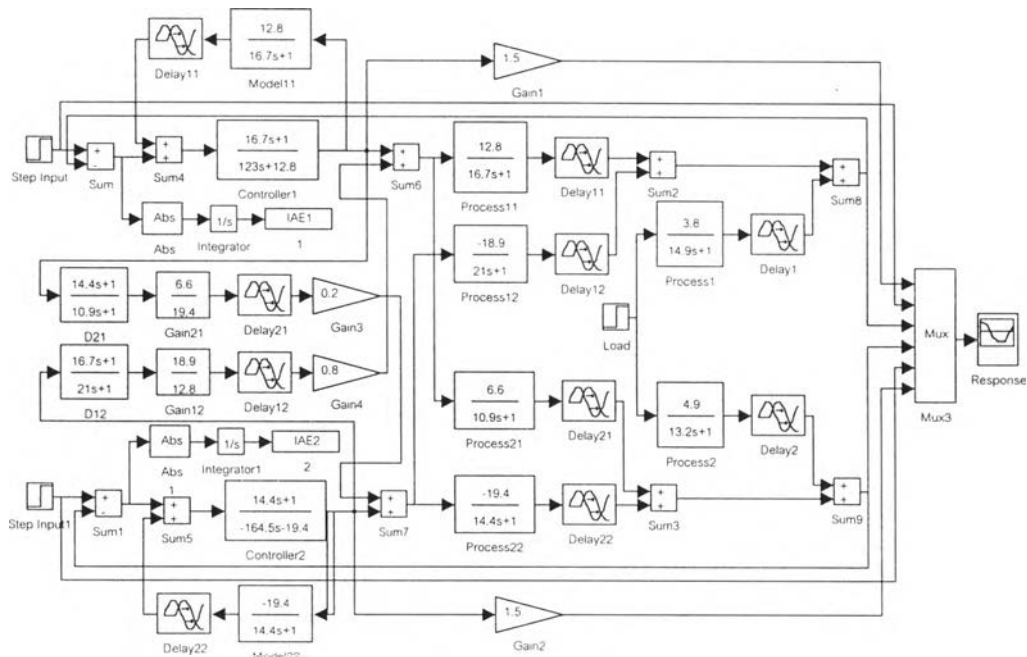
ความผิด พลาด	เมื่อมีการเปลี่ยนเซตพอยท์				เมื่อมีการ เปลี่ยนโหลด
	$y_1 = 1, y_2 = 0$	$y_1 = 0, y_2 = 1$	$y_1 = 2, y_2 = 1$	$y_1 = 1, y_2 = 2$	
IAE1	17.886	0.059	42.343	21.166	49.493
IAE2	0.061	19.322	22.900	45.793	77.822

และเมื่อเปรียบเทียบกับตารางที่ 4.5 ซึ่งแสดงค่า IAE สำหรับการควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเพลอร์ พบว่ายังได้ผลที่แย่กว่า ดังนั้นจากผลการทดลองดังกล่าวจึงมีแนวคิดที่จะทำการทดลอง โดยการนำดีคัพเพลอร์แบบครึ่งหนึ่ง (Partial Decouplers) มาใช้แทนดีคัพเพลอร์ แบบธรรมดา นั่นคือโดยการเลือกใช้ D_{21} หรือ D_{12} อย่างใดอย่างหนึ่งแทน ซึ่งจะให้ผลการตอบสนองที่ดีขึ้นทั้งคู่ สังเกตได้จากตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่า IAE สำหรับการควบคุมแบบ IMC โดยใช้ Partial Decoupling, D_{12}

ความผิด พลาด	เมื่อมีการเปลี่ยนเซตพอยท์				เมื่อมีการ เปลี่ยนโหลด
	$y_1 = 1, y_2 = 0$	$y_1 = 0, y_2 = 1$	$y_1 = 2, y_2 = 1$	$y_1 = 1, y_2 = 2$	
IAE1	17.915	20.435	22.000	18.637	11.495
IAE2	0.071	11.482	11.431	22.889	52.080

จากผลการตอบสนองที่คิดว่าเช่น กรณีการเปลี่ยนเซ็ทพอยท์ ที่ $y_1=2, y_2=1$ หรือ $y_1=1, y_2=2$ จะมีแนวคิดต่อไปว่า แทนที่จะใช้ดีคัปเปลอร์ตัวใดตัวหนึ่งตัดทิ้งไปนั้น นำที่จะคิดเป็นแบบนำหนัก (Weighted Decouplers) ระหว่าง D_{21} และ D_{12} หรือเป็นการคิดแบบสัดส่วน (fraction) คือจะให้ D_{21} คูณกับ f_1 และ D_{12} คูณกับ f_2 โดยที่ $f_1 + f_2$ เท่ากับผลรวมซึ่งอาจเป็น 2 หรือ 1 หรือ 0.5 ก็ได้ ซึ่งจะต้องทำการทดลองต่อไปว่าผลรวมใดที่เหมาะสมที่สุดในการควบคุม



รูปที่ 20 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแบบ IMC โดยใช้ดีคัปเปลอร์แบบนำหนัก

สำหรับการทดลอง ได้แบ่งกรณีศึกษาย่อย เป็น 3 กรณีศึกษาดังนี้

- ก. ผลรวมของ f_1 และ f_2 เท่ากับ 2
- ข. ผลรวมของ f_1 และ f_2 เท่ากับ 1
- ค. ผลรวมของ f_1 และ f_2 เท่ากับ 0.5

โดยในแต่ละกรณีได้ศึกษาทั้งการเปลี่ยนเซตพอยท์และการเปลี่ยนโหนด ซึ่งผลการทดลอง และค่า IAE แสดงไว้ในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่า IAE ของการควบคุมแบบ IMC ที่ใช้คิฟเฟิลอร์แบบน้ำหนัก โดยแยกตามกรณี

ผลรวม		ผลรวมเท่ากับ 2						ผลรวมเท่ากับ 1						ผลรวมเท่ากับ 0.5					
f_1		2	1.5	1.1	0.9	0.5	0	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
f_2		0	0.5	0.9	1.1	1.5	2	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
เปลี่ยนเซ็ทพอยท์ $y_1=1, y_2=0$	IAE 1	12.31	5.99	5.35	4.29	3.92	5.52	4.78	4.670	0.34	3.80	3.816	2.40	4.71	4.56	4.37	4.15	3.87	3.56
	IAE2	9.28	4.01	1.48	1.00	3.47	8.04	0.17	0.976	1.99	2.97	3.114	4.64	2.18	2.68	3.10	3.59	3.97	4.36
	SUM	21.59	10.00	6.83	5.29	7.39	13.56	4.95	5.646	6.33	6.77	6.930	7.04	6.89	7.24	7.47	7.64	9.84	7.92
เปลี่ยนเซ็ทพอยท์ $y_1=2, y_2=1$	IAE1	6.04	3.63	0.89	0.89	3.61	5.66	4.58	3.97	3.12	2.09	1.02	0.20	4.50	4.13	3.71	3.25	2.76	2.27
	IAE2	9.48	6.31	7.54	9.16	10.16	14.57	4.36	5.55	6.74	7.70	8.24	8.21	6.33	6.89	7.39	7.82	8.17	8.40
	SUM	15.52	9.94	8.43	10.05	13.77	20.23	8.94	9.52	9.86	9.77	9.26	8.41	10.83	11.02	11.10	11.07	10.93	10.67
เปลี่ยนโหลด	IAE1	8.82	0.91	2.47	3.46	3.57	4.10	0.63	0.47	0.55	0.74	0.99	1.24	0.62	0.52	0.47	0.46	0.50	0.56
	IAE2	8.20	4.61	6.24	5.50	5.71	5.98	3.14	3.55	3.84	3.98	3.94	3.75	3.44	3.57	3.67	3.73	3.76	3.74
	SUM	17.02	5.52	8.71	8.96	9.28	10.08	3.77	4.02	4.39	4.72	4.93	4.99	4.06	4.09	4.14	4.19	4.26	4.30

จากตารางที่ 4.9 สรุปได้ดังนี้

เมื่อมีการเปลี่ยนเซตพอยท์ที่ $y_1=1$, $y_2=0$ แล้วจะพบว่ากรณีผลรวมเท่ากับ 1 จะให้ค่าผลรวมของ IAE ต่ำกว่ากรณีผลรวมเท่ากับ 2 และผลรวมเท่ากับ 0.5 ซึ่งไม่เฉพาะแต่เพียงการเปลี่ยนเซตพอยท์ที่ $y_1=1$, $y_2=0$ เท่านั้น ยังได้ผลเช่นเดียวกับการเปลี่ยนเซตพอยท์ที่ $y_1=0$, $y_2=1$ ด้วย และนอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงโหนด ก็ยังได้ค่าผลรวมของ IAE ที่ต่ำกว่ากรณีผลรวมเท่ากับ 2 และผลรวมเท่ากับ 0.5 อีกด้วย และโดยทั่วไปแล้วกระบวนการในโรงงานอุตสาหกรรมมักจะมีการเปลี่ยนแปลงโหนดหรือมีสิ่งรบกวนต่อกระบวนการมากกว่าที่จะมีการเปลี่ยนแปลงเซตพอยท์ ดังนั้น เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงโหนดที่ได้จากการทดลองตามตารางที่ 4.9 แล้วจะพบว่าค่าผลรวมของ IAE จะมีค่าน้อยกว่าผลรวมของ IAE เมื่อมีการเปลี่ยนเซตพอยท์ ไม่ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงเซตพอยท์ ที่ $y_1=1$, $y_2=0$ หรือ $y_1=0$, $y_2=1$ ก็ตาม โดยที่การเปลี่ยนแปลงโหนดที่จะให้ผลการตอบสนองที่ดีที่สุดเมื่อมีการออกแบบให้ $f_1=1$ และ $f_2=0$ นั้นหมายความว่า การออกแบบตัวควบคุมแบบโมเดลภายในที่มีดีคัพเพลอร์แบบบางส่วนจะให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่า

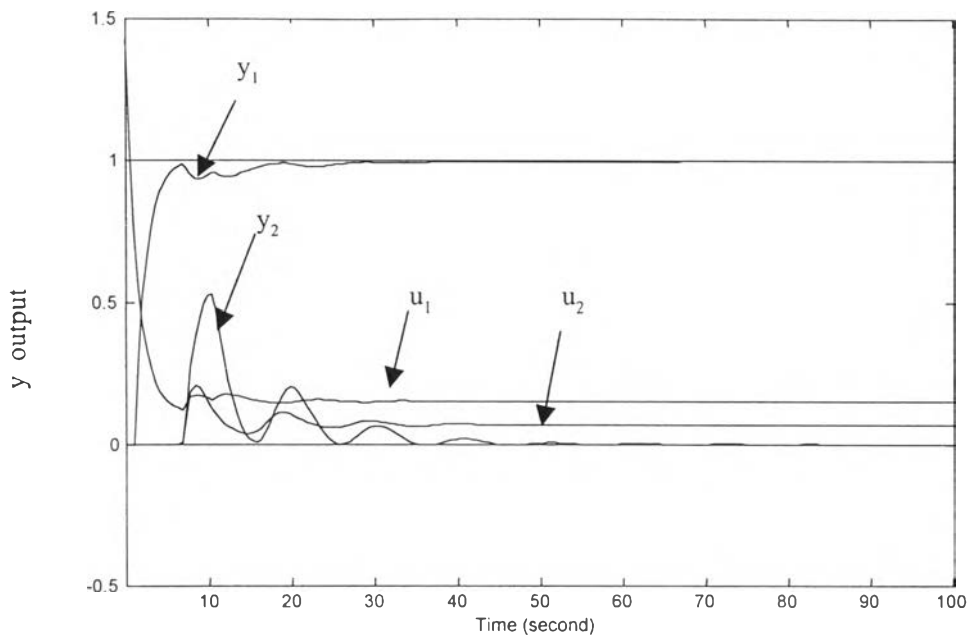
ทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาตารางที่ 4.17 สำหรับตัวอย่างการทดลองที่ 2 ก็จะให้ผลการตอบสนองเช่นเดียวกันกับตัวอย่างการทดลองที่ 1 คือ ผลรวมของ IAE เมื่อมีการเปลี่ยนโหนด กรณีผลรวมเท่ากับ 1 จะมีค่าน้อยกว่ากรณีผลรวมเท่ากับ 2 และผลรวมเท่ากับ 0.5 โดยที่ $f_1=1$ และ $f_2=0$ เป็นคู่ที่ดีที่สุด นั่นคือการออกแบบตัวควบคุมแบบโมเดลภายในที่มีดีคัพเพลอร์แบบบางส่วน จะให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่าเช่นกัน.

ตารางที่ 4.10 ค่า IAE เมื่อจูนตัวควบคุมสำหรับการควบคุมแบบ IMC ที่ใช้คัพเพเลอร์แบบนำหน้า

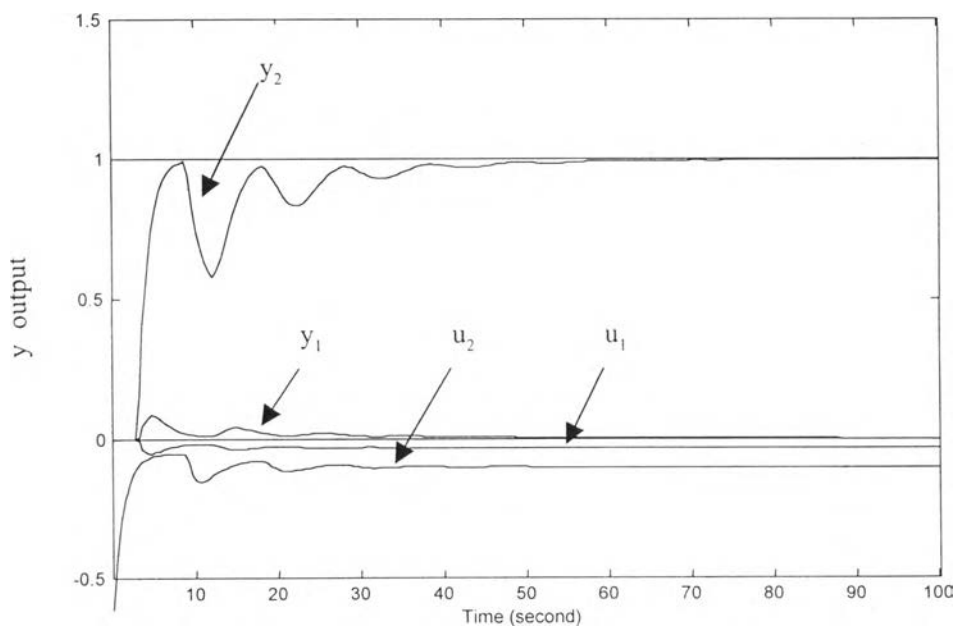
(โดยเลือกใช้ $f_1 = 0.2$ และ $f_2 = 0.8$)

ค่า τ_f	IAE					
	$y_1 = 1, y_2 = 0$		$y_1 = 0, y_2 = 1$		เปลี่ยนโหลด	
	IAE1	IAE2	IAE1	IAE2	IAE1	IAE2
ยังไม่ได้ลดค่า τ_f	13.79	10.19	4.41	22.33	32.66	70.47
ลดลง 5 เท่า	3.83	4.23	1.25	9.23	8.78	29.07
ลดลง 6 เท่า	3.41	3.97	1.11	8.68	7.83	27.33
ลดลง 7 เท่า	3.11	3.82	1.01	8.28	7.15	26.08
ลดลง 8 เท่า	2.89	3.76	0.93	7.99	6.64	25.14
ลดลง 12 เท่า	2.37	3.75	0.76	7.30	5.47	22.96
ลดลง 20 เท่า	1.95	3.72	0.63	6.82	4.54	21.21

จากการจูนตัวควบคุมโดยการเปลี่ยน τ_f ลง 7 เท่า ($\tau_{f1} = 1.373$, $\tau_{f2} = 1.21$) จะได้ผลการตอบสนองที่ค่อนข้างดี โดยพิจารณาจากค่า IAE แต่ถ้ามีการจูนโดยลดค่า τ_f ลงไปอีกอาจจะทำให้วาล์ว ทำงานหนักได้ สังเกตจากค่าการควบคุมของวาล์ว แม้ว่าค่า IAE จะมีค่าต่ำก็ดี พิจารณาได้จาก รูปที่ 4.21 และ รูปที่ 4.22



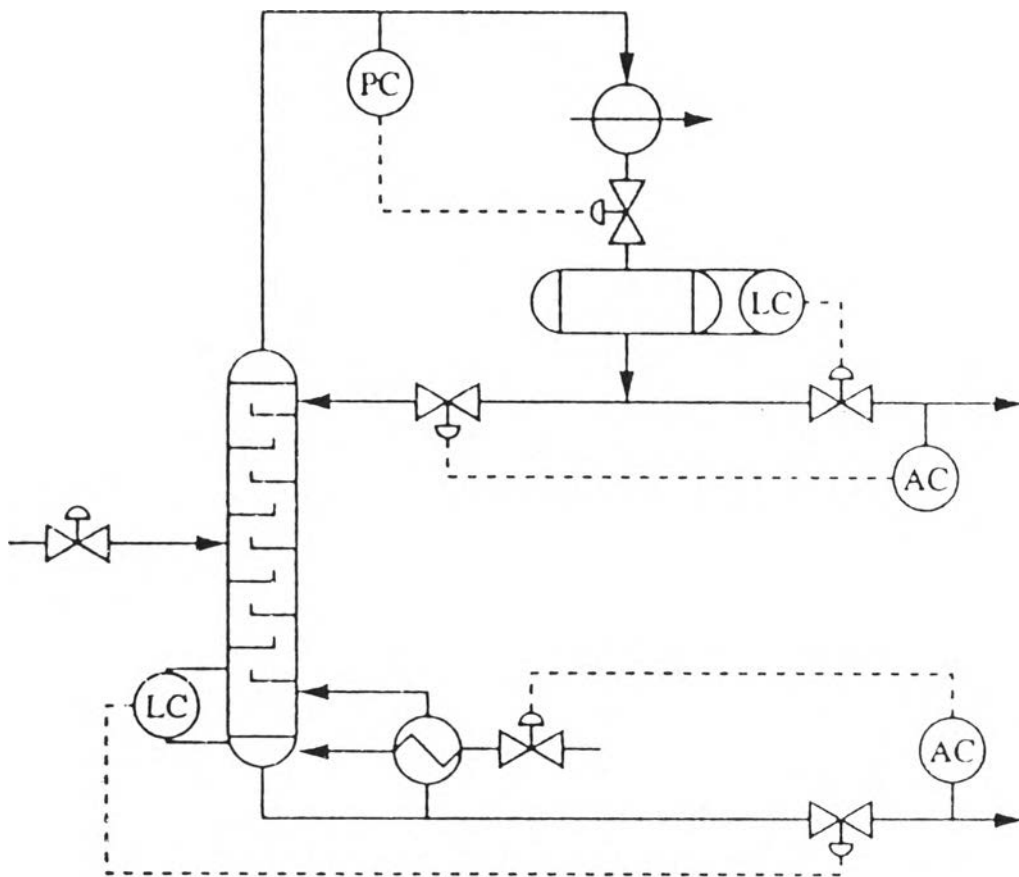
รูปที่ 4.21 การจูนตัวควบคุมแบบ IMC ที่ใช้ดีคัพเพลเตอร์แบบนำหน้า ที่ $y_1=1, y_2=0$
(โดยเลือกใช้ $f_1=0.2$ และ $f_2=0.8$)



รูปที่ 4.22 การจูนตัวควบคุมแบบ IMC ที่ใช้ดีคัพเพลเตอร์แบบนำหน้า ที่ $y_1=0, y_2=1$
(โดยเลือกใช้ $f_1=0.2$ และ $f_2=0.8$)

ตัวอย่างการทดลองที่ 2

เป็นตัวอย่างการทดลองของ McAVOY และ Weischedel (1981) โดย ตัวแปรปรับได้แก่ อัตราการไหลรีฟลักซ์ (Reflux flow rate, F_R) และอัตราการไหลรีบอยเลอร์ (Reboiler flow rate, F_V) และม็อดส์ประกอบสายป้อน (X_F) เป็นโหลด หรือสิ่งรบกวน (Disturbance) สำหรับตัวแปรควบคุม ได้แก่ องค์ประกอบยอดหอ (Distillated Composition, X_D) และองค์ประกอบก้นหอ (Bottom Composition, X_B)



รูปที่ 4.23 หอกลิ้นสำหรับการควบคุม

ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการนี้คือ

$$\begin{bmatrix} X_D \\ X_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{0.0747 e^{-3s}}{12s+1} & \frac{-0.0667 e^{-2s}}{15s+1} \\ \frac{0.1173 e^{-3.3s}}{11.75s+1} & \frac{-0.1253 e^{-2s}}{10.2s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_R \\ F_V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{0.70 e^{-5s}}{14.4s+1} \\ \frac{1.3e^{-3s}}{12s+1} \end{bmatrix} X_F \quad (4-13)$$

สำหรับค่า K_C และ τ_I ต่าง ๆ ที่จูนแล้วโดย McAVOY แสดงไว้ในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้รับการจูนแล้ว

K_{CD}	10.4
τ_{ID}	9.0
K_{CB}	-6.8
τ_{IB}	6.1
การเปลี่ยนแปลงโหลด	-0.04
IAE_{XD}	0.17
IAE_{XB}	0.35
การเปลี่ยนเซ็ทพอยท์	0.005
IAE_{XD}	0.35
IAE_{XB}	0.34

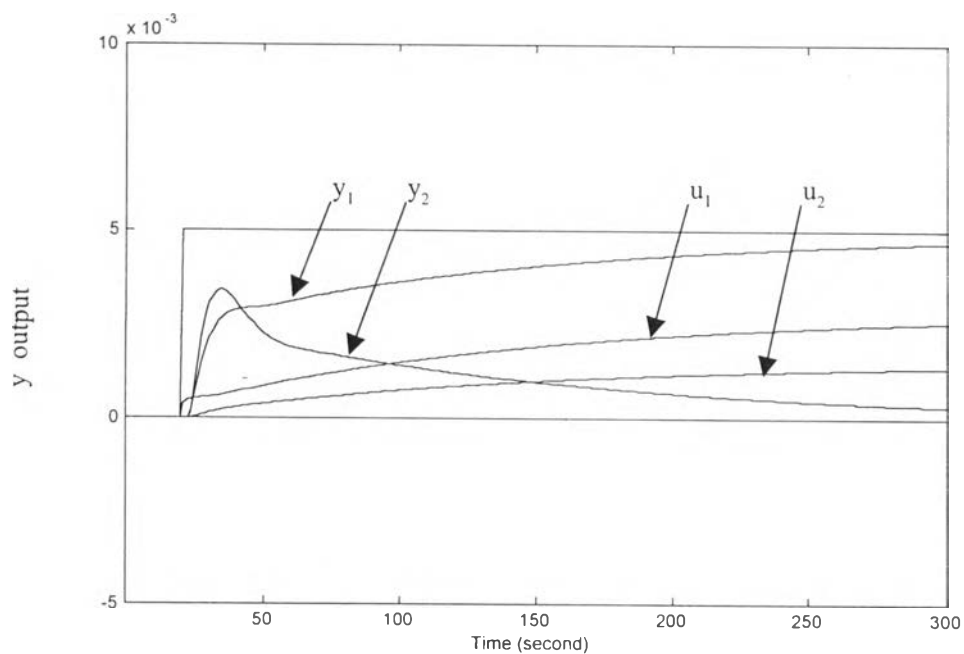
4.2.5 การควบคุมแบบพีไอดีทั่วไป (Conventional PID)

โดยจะนำเอาค่าต่าง ๆ ในตาราง 4.11 ซึ่งได้จูนไว้แล้วมาใช้ในการทดลองไม่ว่าจะเป็นการควบคุมแบบทั่วไป หรือ การควบคุมพีไอดี ที่มีคิฟเฟิลอร์ และได้แบ่งกรณีศึกษาย่อยเป็น 3 กรณี ดังนี้

- ก. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์ ที่ $y_1 = 0.005, y_2 = 0$
- ข. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์ ที่ $y_1 = 0, y_2 = 0.005$
- ค. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโพลด์ที่ -0.04

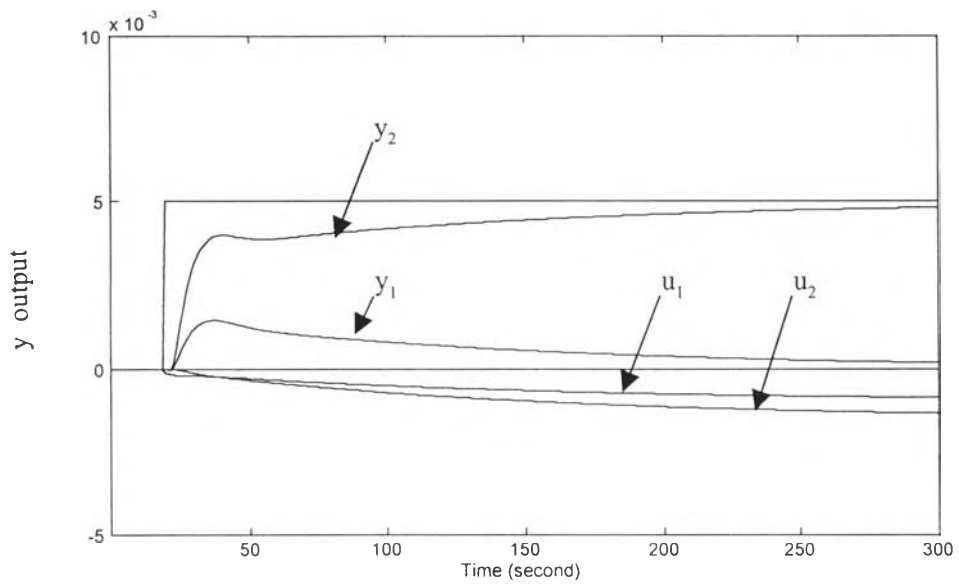
ผลการทดลอง

- ก. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์ ที่ $y_1 = 0.005, y_2 = 0$



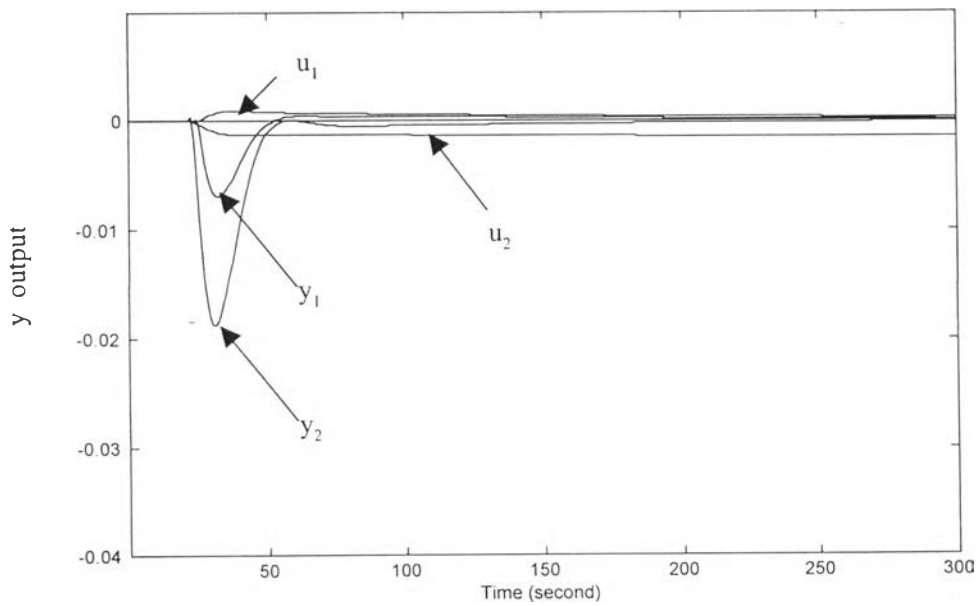
รูปที่ 4.24 การควบคุมแบบพีไอดีทั่วไป ที่ $y_1 = 0.005, y_2 = 0$

ข. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์ ที่ $y_1 = 0, y_2 = 0.005$



รูปที่ 4.25 การควบคุมแบบฟีดแบ็คทั่วไป ที่ $y_1 = 0, y_2 = 0.005$

ค. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด ที่ -0.04



รูปที่ 4.26 การตอบสนองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด

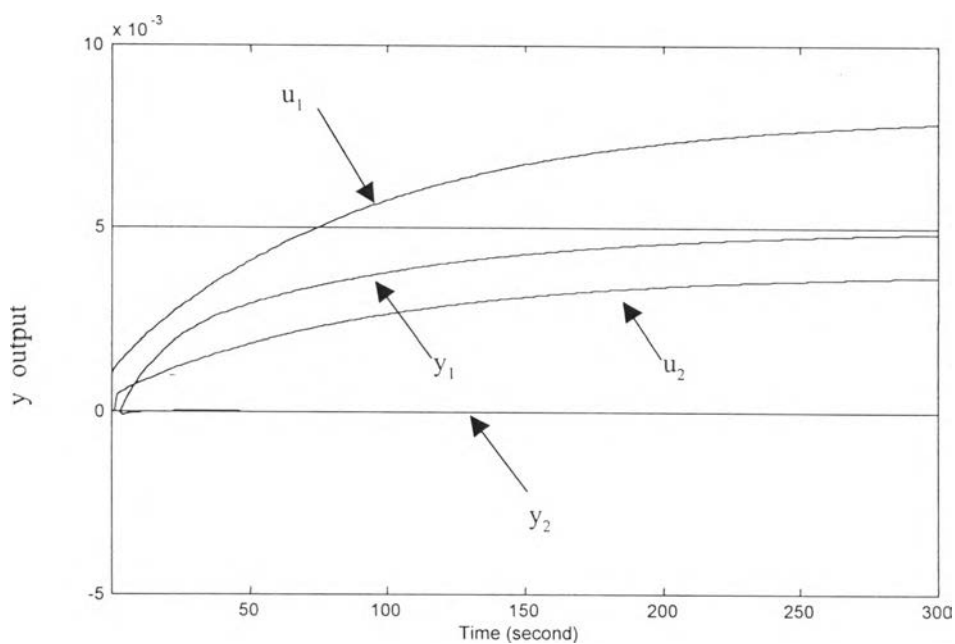
ตารางที่ 4.12 ค่า IAE เมื่อเปลี่ยนเซ็ทพอยท์และเปลี่ยน โหลดสำหรับการควบคุมแบบพีไอดีทั่วไป

ความคิดพลาด	เมื่อมีการเปลี่ยนเซ็ทพอยท์		เมื่อมีการ เปลี่ยน โหลด
	$y_1 = 0.005, y_2 = 0$	$y_1 = 0, y_2 = 0.005$	
IAE1	0.35	0.18	0.17
IAE2	0.34	0.22	0.35

4.2.6 การควบคุมแบบพีไอดีที่มีดีคัปเปลอร์ (PID with Decouplers)

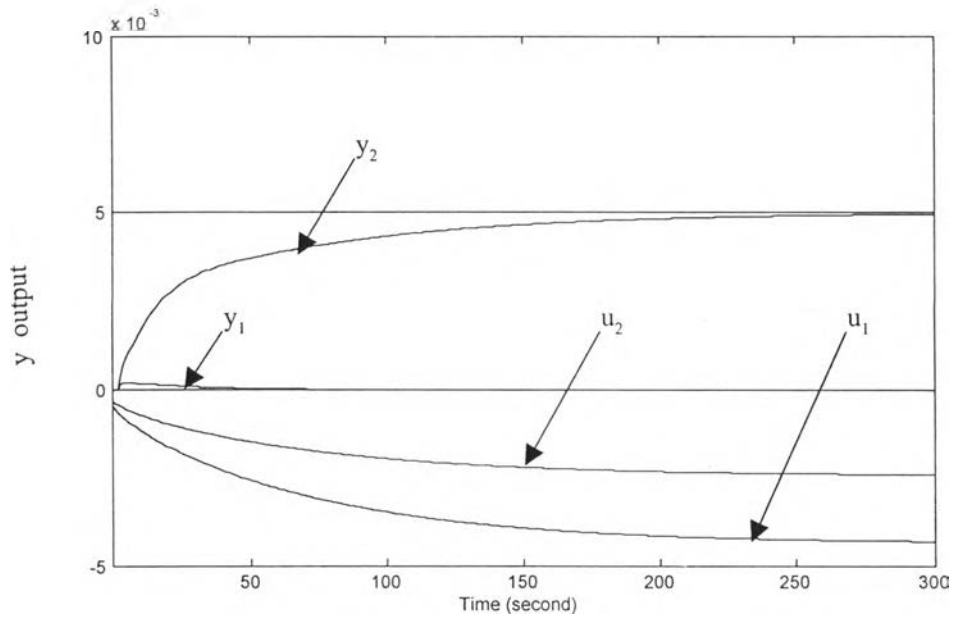
ผลการทดลอง

ก. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์ ที่ $y_1 = 0.005, y_2 = 0$



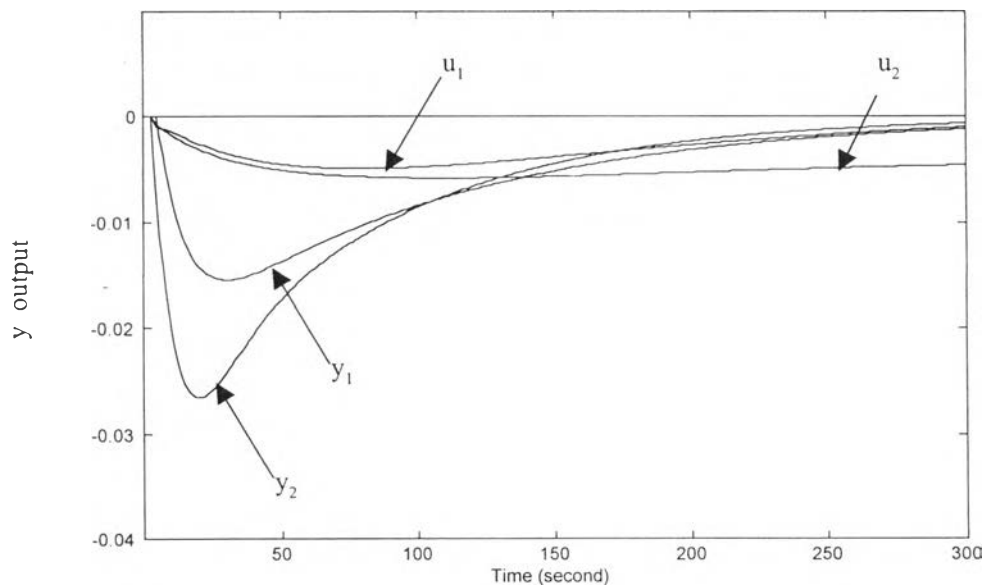
รูปที่ 4.27 การควบคุมแบบพีไอดีที่มีดีคัปเปลอร์ ที่ $y_1 = 0.005, y_2 = 0$

ข. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์ ที่ $y_1 = 0, y_2 = 0.005$



รูปที่ 4.28 การตอบสนองการควบคุมแบบพีไอดีที่มีคัทเพลลอร์ ที่ $y_1 = 0, y_2 = 0.005$

ค. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด ที่ -0.04



รูปที่ 4.29 การตอบสนองการควบคุมแบบพีไอดีที่มีคัทเพลลอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด

ตารางที่ 4.13 ค่า IAE สำหรับการควบคุมแบบพีไอดีที่มีดีคัพเพลอร์

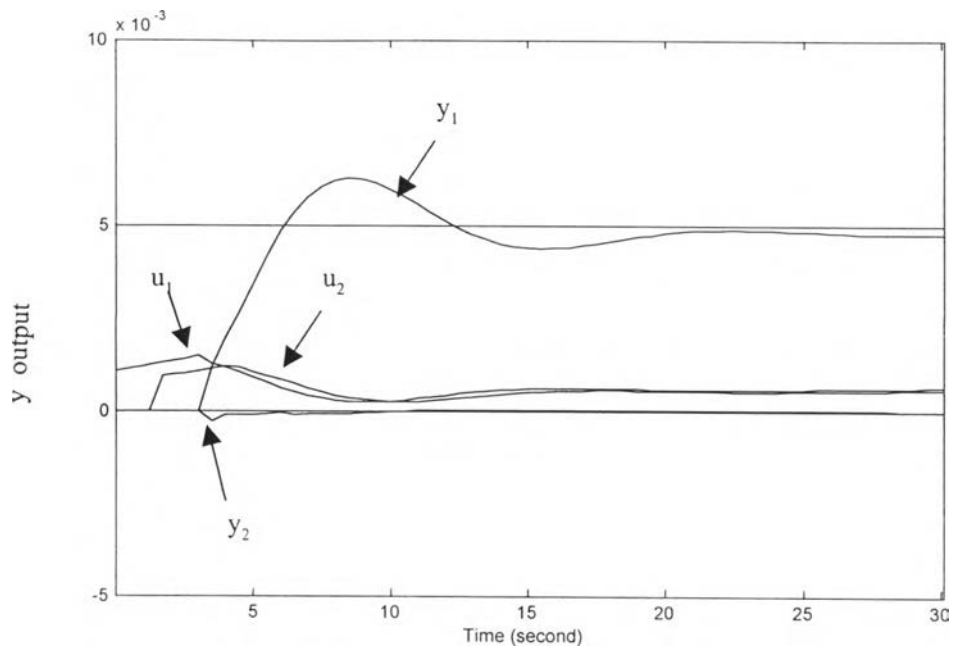
ความผิดพลาด	เมื่อมีการเปลี่ยนเซ็ทพอยท์		เมื่อมีการเปลี่ยนโหลด (-0.04)
	$y_1 = 0.005, y_2 = 0$	$y_1 = 0, y_2 = 0.005$	
IAE1	0.34	0.008	1.86
IAE2	0.001	0.21	2.22

จากนั้นจะทำการจูนตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีดีคัพเพลอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนเซ็ทพอยท์ที่ $y_1 = 0.005, y_2 = 0$ โดยการใช้วิธีไซเคิลแบบต่อเนื่อง และใช้ตาราง 3.1 แสดงค่าการคำนวณตัวควบคุม โดยวิธีการของ ซีเกลอร์-นิโคลส์ จะได้ค่าใหม่ ตามตารางที่ 4.14

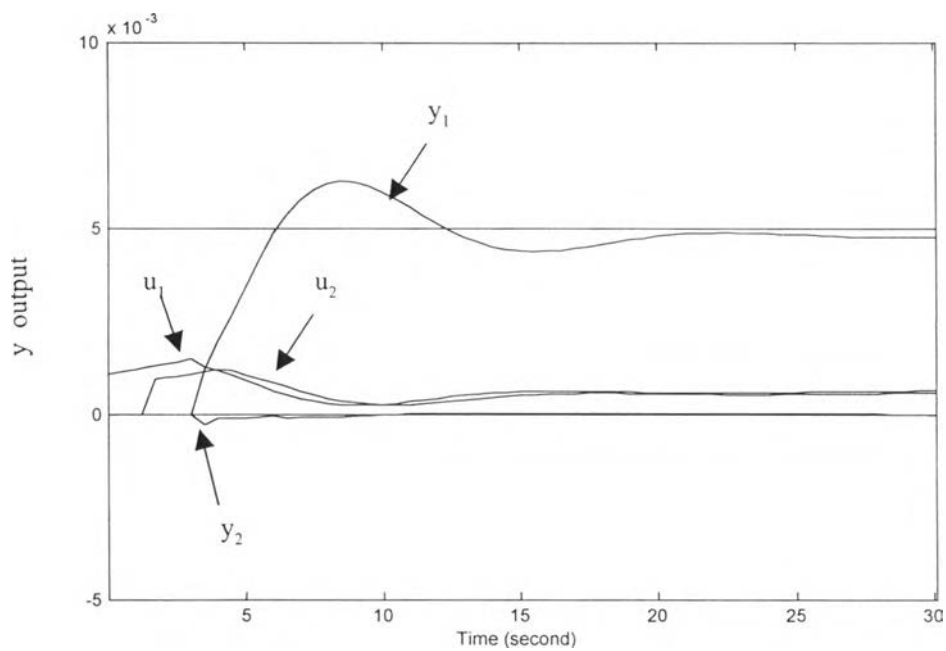
ตารางที่ 4.14 ค่า K_C และ τ_I หลังจากรุ่นตัวควบคุม แบบพีไอดีที่มีดีคัพเพลอร์

K_{CD}	10.8
τ_{ID}	8
K_{CB}	-37.12
τ_{IB}	4.81
IAE_{xD}	0.03
IAE_{xB}	0.0007

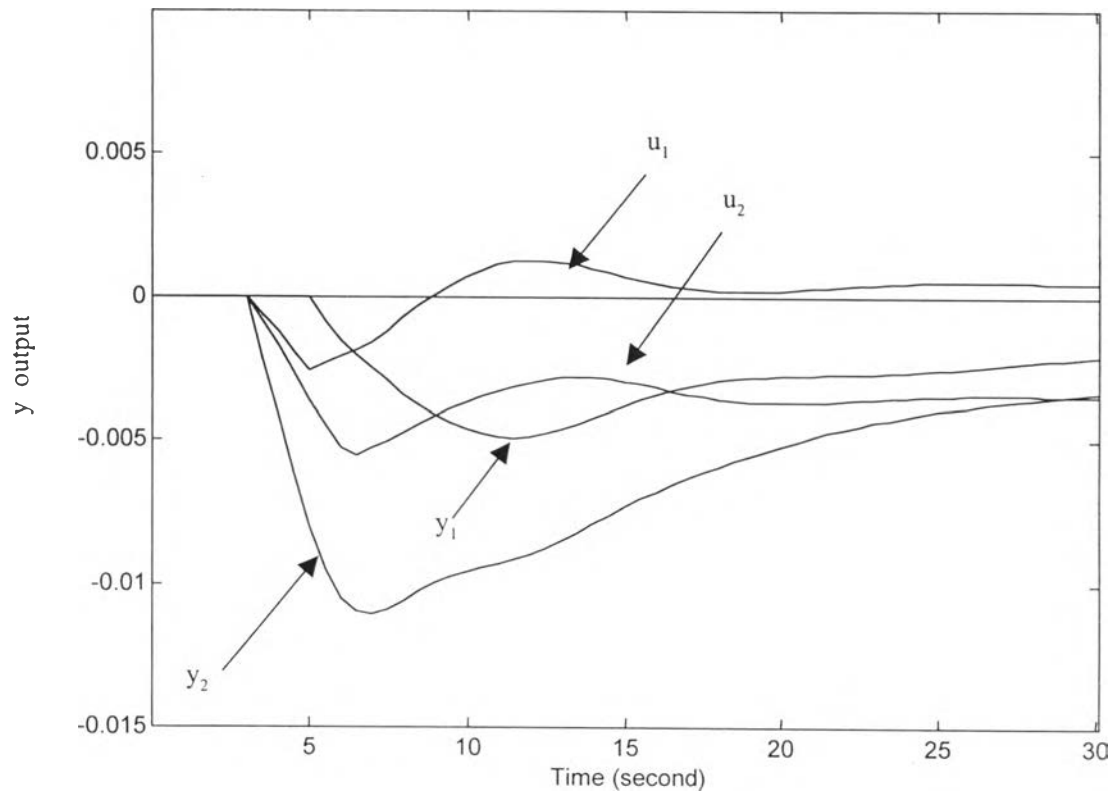
ซึ่งผลการตอบสนองแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.30 การตอบสนองการควบคุมแบบพีไอดีที่มีคัพเพลอร์หลังการจูน ที่ $y_1 = 0.005$, $y_2 = 0$



รูปที่ 4.31 การตอบสนองการควบคุมแบบพีไอดีที่มีคัพเพลอร์หลังการจูน ที่ $y_1 = 0$, $y_2 = 0.005$



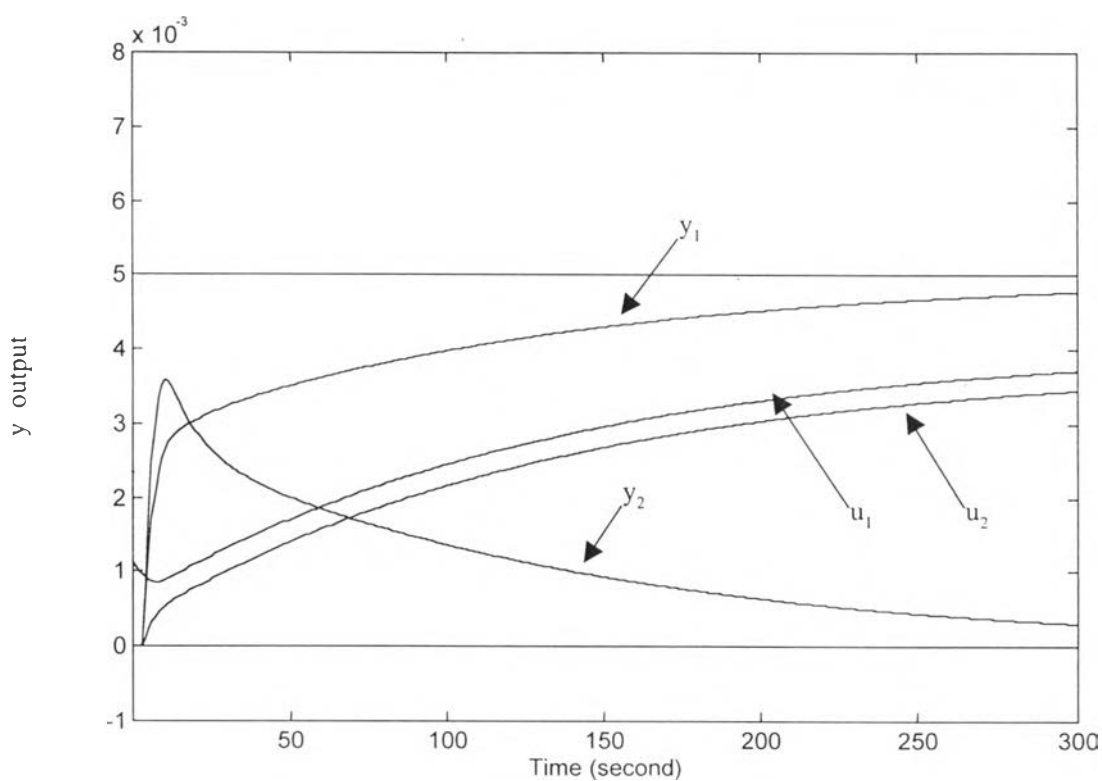
รูปที่ 4.32 การตอบสนองการควบคุมแบบพีไอดีที่มีดีคัพเพลอร์หลังการจูน เมื่อเปลี่ยนโหลด (-0.04)

ตารางที่ 4.14 ค่า IAE สำหรับการควบคุมแบบพีไอดีที่มีดีคัพเพลอร์หลังการจูน

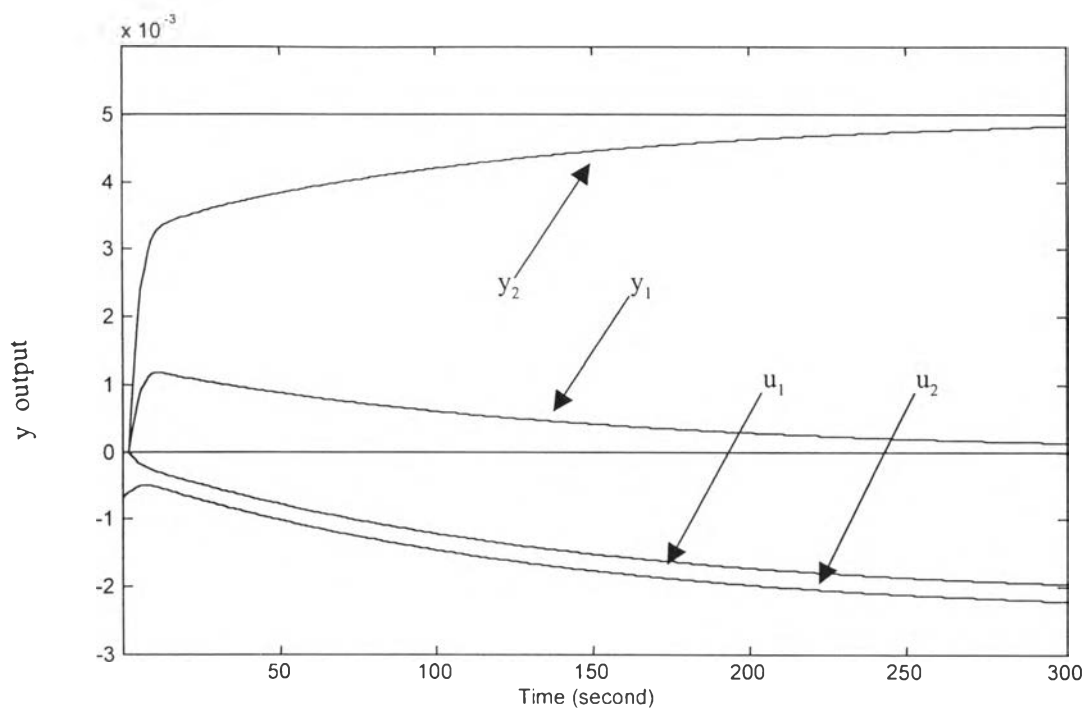
ความผิดพลาด	เมื่อมีการเปลี่ยนเซ็ทพอยท์		เมื่อมีการเปลี่ยนโหลด (-0.04)
	$y_1 = 0.005, y_2 = 0$	$y_1 = 0, y_2 = 0.005$	
IAE1	0.04	0.006	0.08
IAE2	0.0007	0.05	0.17

4.2.7 การควบคุมแบบโมเดลภายในที่ไม่มีดีคัปเปลอร์ (IMC without Decouplers)

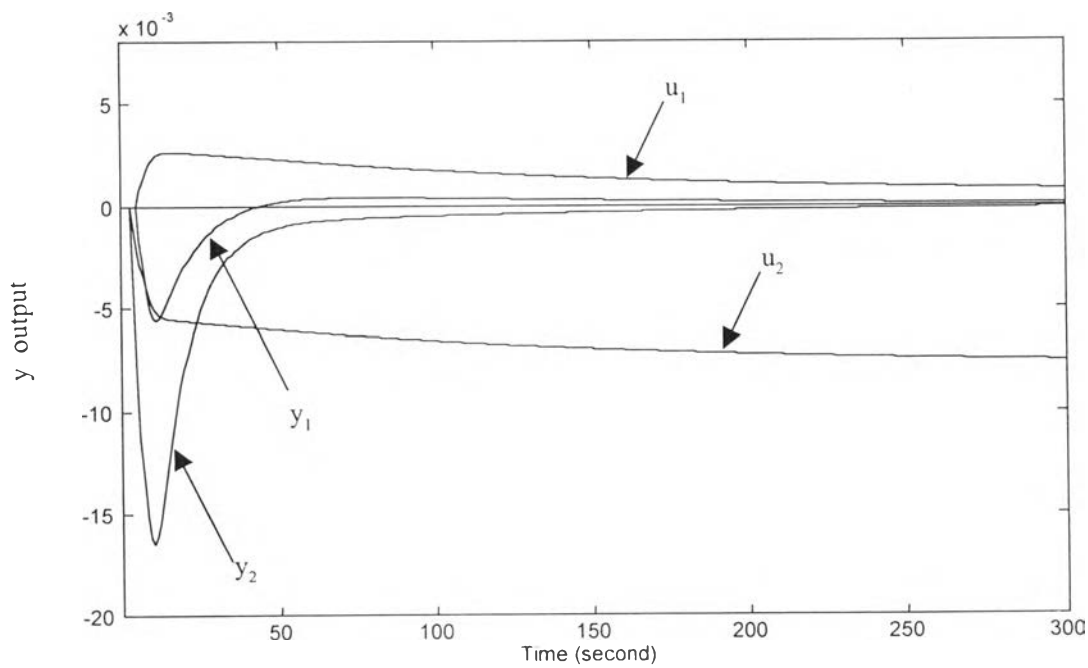
ทั้งนี้จะใช้การออกแบบตัวควบคุมที่ไม่รวมเดคไทม์ สำหรับการหาค่า G_c^* มาใช้ในการทดลองนี้ โดยที่ค่า τ_{f1} และ τ_{f2} อาศัยจากกราฟรูปที่ 2.1 ซึ่งจากการคำนวณแล้วจะได้ $\tau_{f1} = 7.1$ และ $\tau_{f2} = 6$ และจะใช้ค่า τ_f ทั้งสองนี้สำหรับการทดลองอื่นต่อไป ผลการทดลองการตอบสนองของตัวควบคุมแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 4.33 การควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัปเปลอร์ ที่ $y_1 = 0.005$, $y_2 = 0$



รูปที่ 4.34 การควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเพลอร์ ที่ $y_1 = 0.$, $y_2 = 0.005$



รูปที่ 4.35 การควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเพลอร์ เมื่อเปลี่ยนโหลด (-0.04)

ตารางที่ 4.15 ค่า IAE สำหรับการควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเพลอร์

ความผิดพลาด	เมื่อมีการเปลี่ยนเซ็ทพอยท์		เมื่อมีการเปลี่ยนโหลด (-0.04)
	$y_1 = 0.005, y_2 = 0$	$y_1 = 0, y_2 = 0.005$	
IAE1	0.28	0.15	0.14
IAE2	0.34	0.22	0.38

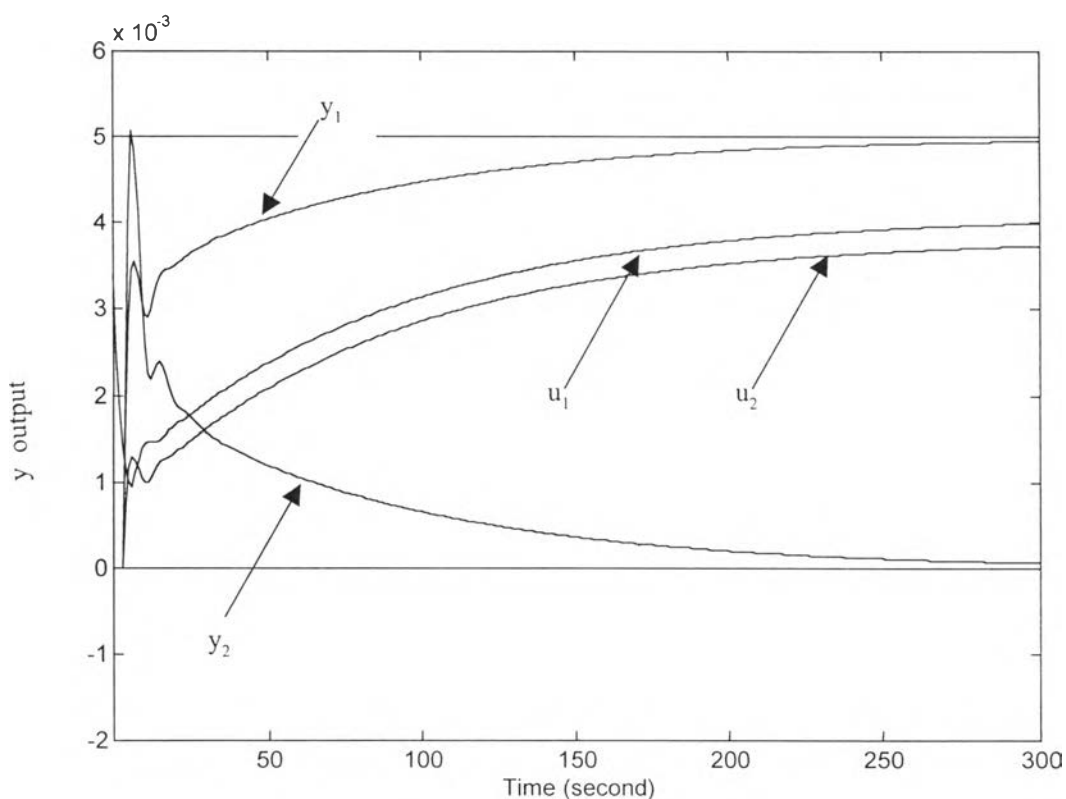
จากนั้นจะทำการจูนตัวควบคุมโดยการลดค่า τ_f ลงและได้ค่า IAE ตามตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ค่า IAE เมื่อจูนตัวควบคุมสำหรับการควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเพลอร์

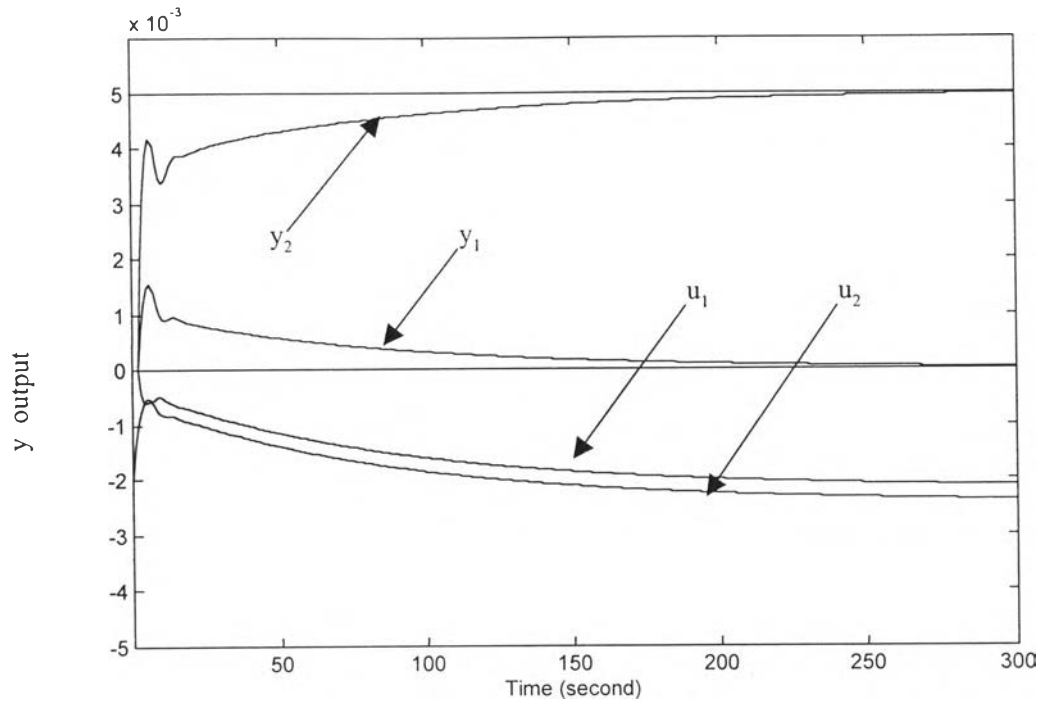
ค่า τ_f	IAE					
	$y_1 = 0.005, y_2 = 0$		$y_1 = 0, y_2 = 0.005$		เปลี่ยนโหลด	
	IAE1	IAE2	IAE1	IAE2	IAE1	IAE2
ยังไม่ได้ลดค่า τ_f	0.28	0.34	0.15	0.22	0.14	0.38
ลดลง 2 เท่า	0.19	0.23	0.10	0.15	0.08	0.24
ลดลง 3 เท่า	0.16	0.18	0.08	0.12	0.06	0.19
ลดลง 4 เท่า	0.14	0.16	0.07	0.10	0.05	0.17
ลดลง 5 เท่า	0.13	0.15	0.07	0.09	0.04	0.15

จากผลการจูนตัวควบคุมพบว่า ถ้ามีการลดค่า τ_f ลงไปมากกว่า 3 เท่า อาจจะทำให้การควบคุมของวาล์วทำงานหนัก สังเกตจากกราฟ การตอบสนองของตัวแปรปรับ แม้ว่าค่า IAE ยังคงลดลงก็ตาม

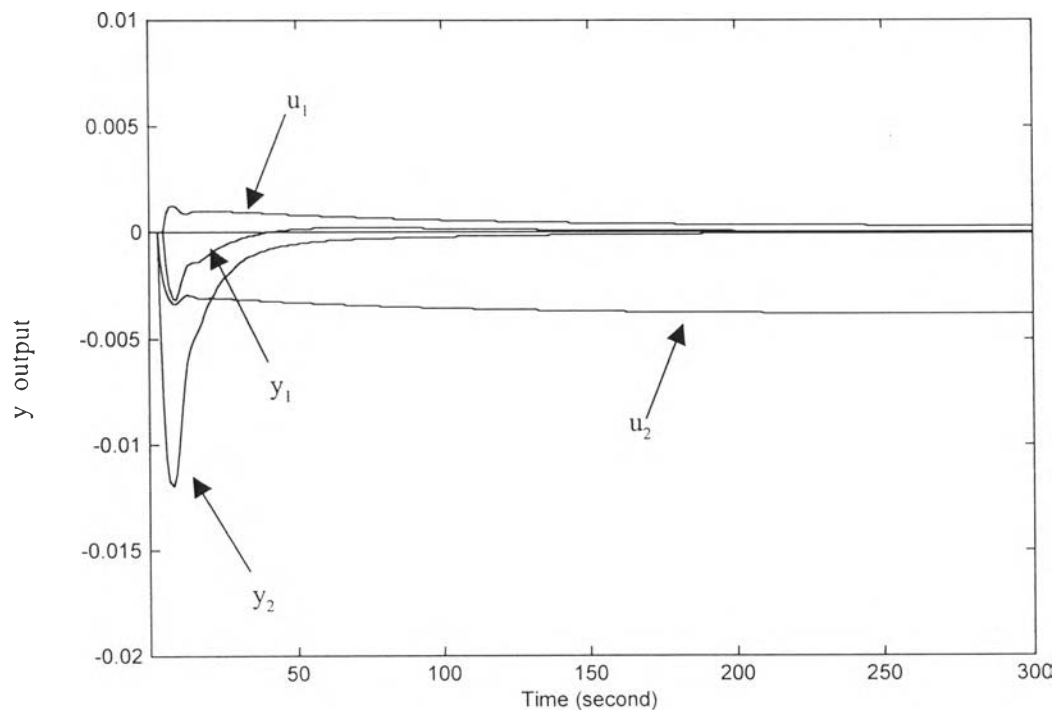
ดังนั้นค่า τ_f ที่ได้จากการจูนแล้วโดยการควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีคิฟเฟิลอร์คือ $\tau_{f1} = 2.37$ และ $\tau_{f2} = 2.00$ ซึ่งจะได้ค่า IAE สอดคล้องตามตารางที่ 4.16 เมื่อแยกตามการเปลี่ยนเซ็ทพอยท์ และการเปลี่ยนโหลด



รูปที่ 4.36 การควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีคิฟเฟิลอร์หลังการจูน ที่ $y_1 = 0.005$, $y_2 = 0$



รูปที่ 4.37 การควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเพลอร์หลังการจูน ที่ $y_1 = 0, y_2 = 0.005$



รูปที่ 4.38 การควบคุมแบบ IMC ที่ไม่มีดีคัพเพลอร์หลังการจูน เมื่อเปลี่ยนโหลด

4.2.8 การควบคุมแบบโมเดลภายในที่มีดีคัปเปิลเลอร์ (IMC with Decouplers)

โดยการใช้ค่า τ_{f_1} และ τ_{f_2} ที่ยังไม่มีการจูนมาใช้ในการทดลองนั้นคือ $\tau_{f_1} = 7.1$ และ $\tau_{f_2} = 6$ และจากตัวอย่างการทดลองที่ผ่านมาแสดงให้เห็นแล้วว่าการใช้ดีคัปเปิลเลอร์แบบธรรมดาจะ
ได้ผลไม่เป็นที่น่าพอใจจึงได้เสนอแนวทางในการออกแบบใหม่โดยใช้ดีคัปเปิลเลอร์แบบน้ำหนัก
(Weighting Decouplers) จากนั้นจะเลือกคู่ที่เหมาะสมที่สุด เพื่อนำไปจูนต่อไป โดยได้แบ่งกรณี
ศึกษาเป็น 3 กรณี เช่นกัน คือ

- ก. ผลรวมของ f_1 และ f_2 เท่ากับ 2
- ข. ผลรวมของ f_1 และ f_2 เท่ากับ 1
- ค. ผลรวมของ f_1 และ f_2 เท่ากับ 0.5

ผลการทดลองและค่า IAE แสดงไว้ในตารางที่ 4.17

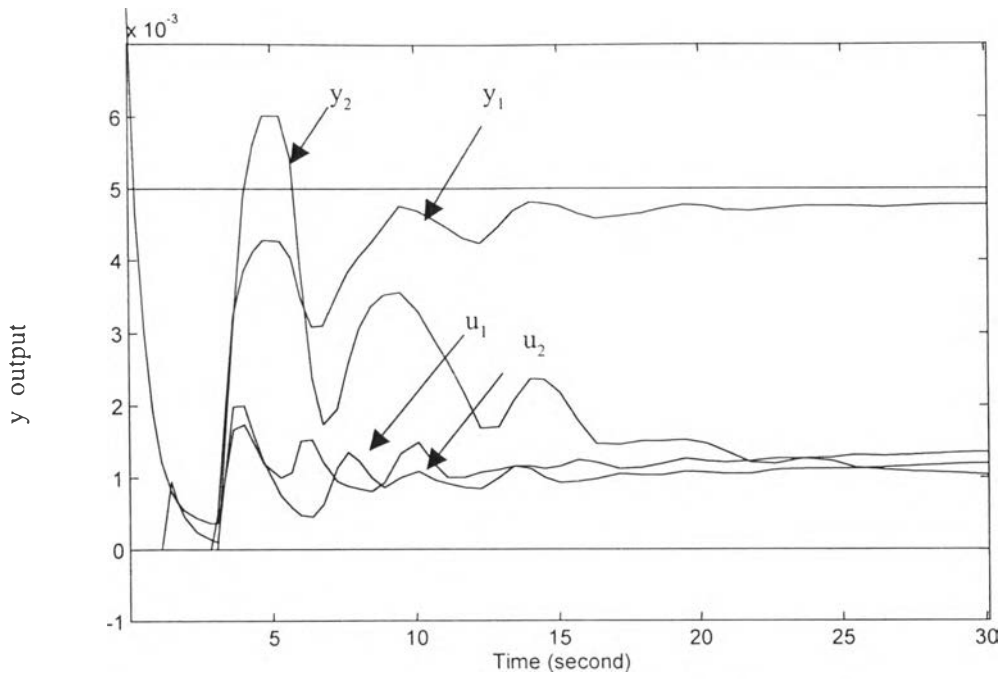
ตารางที่ 4.17 ค่า IAE ของการควบคุม IMC ที่ใช้คัตออฟเฟลอร์แบบน้ำหนัก

ผลรวม		ผลรวมเท่ากับ 2					ผลรวมเท่ากับ 1						ผลรวมเท่ากับ 0.5						
f_1		2	1.5	1.1	0.9	0.5	0	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
f_2		0	0.5	0.9	1.1	1.5	2	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
เปลี่ยนเซ็ทพอยท์ $y_1=0.005, y_2=0$	IAE1	0.08	0.09	0.07	0.05	0.05	0.09	0.064	0.060	0.053	0.044	0.033	0.024	0.06	0.061	0.054	0.05	0.042	0.046
	IAE2	0.08	0.06	0.02	0.02	0.08	0.11	0.002	0.014	0.031	0.047	0.062	0.073	0.03	0.032	0.044	0.05	0.065	0.064
	SUM	0.16	0.15	0.09	0.07	0.13	0.20	0.066	0.074	0.084	0.091	0.095	0.097	0.09	0.093	0.098	0.10	0.107	0.110
เปลี่ยนเซ็ทพอยท์ $y_1=0, y_2=0.005$	IAE1	0.04	0.03	0.01	0.01	0.03	0.05	0.028	0.025	0.019	0.014	0.007	0.004	0.02	0.021	0.024	0.02	0.021	0.022
	IAE2	0.05	0.03	0.04	0.05	0.08	0.07	0.015	0.023	0.031	0.039	0.046	0.05	0.03	0.032	0.035	0.04	0.041	0.047
	SUM	0.09	0.06	0.05	0.06	0.11	0.12	0.043	0.048	0.050	0.053	0.053	0.054	0.05	0.053	0.059	0.06	0.062	0.069
เปลี่ยนโหลด (-0.04)	IAE1	0.02	0.08	0.14	0.17	0.20	0.18	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.03	0.02	0.04	0.04	0.05	0.05
	IAE2	0.12	0.20	0.25	0.27	0.24	0.18	0.09	0.10	0.11	0.11	0.11	0.11	0.09	0.11	0.11	0.12	0.13	0.14
	SUM	0.14	0.28	0.39	0.44	0.44	0.36	0.11	0.13	0.15	0.16	0.17	0.18	0.12	0.13	0.15	0.16	0.18	0.19

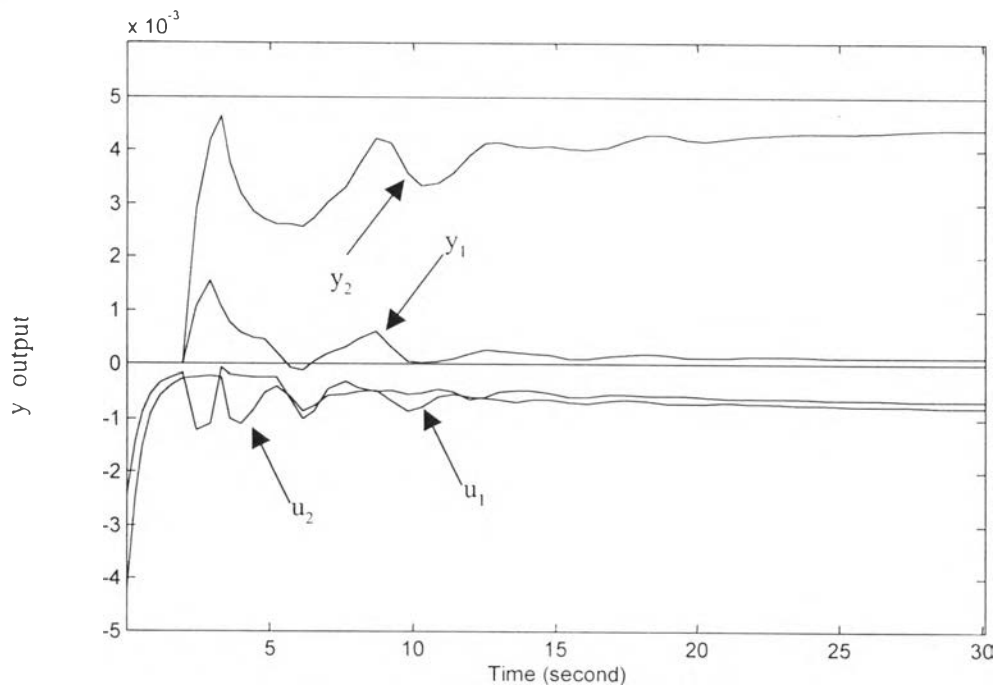
เมื่อพิจารณาจากทั้ง 3 กรณี โดยการเปรียบเทียบระหว่างผลรวมเท่ากับ 1 และผลรวมเท่ากับ 0.5 กับ ผลรวมเท่ากับ 2 จะเห็นว่าค่า IAE ที่ได้ค่อนข้างต่ำกว่า ผลรวมเท่ากับ 2 และเมื่อทำการเลือกคู่ที่เหมาะสมที่สุดของ ผลรวมเท่ากับ 1 จะได้ $f_1 = 0.2$ และ $f_2 = 0.8$ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับคู่ที่เหมาะสมที่สุดของ ผลรวมเท่ากับ 0.5 (คือ $f_1 = 0.1$ และ $f_2 = 0.4$) พบว่าค่า IAE ของ ผลรวมเท่ากับ 1 จะดีกว่า ผลรวมเท่ากับ 0.5 ดังนั้นจึงเลือกใช้ $f_1 = 0.2$ และ $f_2 = 0.8$ ของ ผลรวมเท่ากับ 1 เพื่อนำไปค้นหาตัวควบคุมซึ่งจะได้ค่า IAE ตามตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 ค่า IAE เมื่อจูนตัวควบคุมสำหรับการควบคุมแบบ IMC ที่ใช้คิฟเพลอร์แบบน้ำหนัก (โดยเลือกใช้ $f_1 = 0.2$ และ $f_2 = 0.8$)

ค่า τ_f	IAE					
	$y_1 = 0.005, y_2 = 0$		$y_1 = 0, y_2 = 0.005$		เปลี่ยนโหลด	
	IAE1	IAE2	IAE1	IAE2	IAE1	IAE2
ยังไม่ได้ลดค่า τ_f	0.11	0.34	0.04	0.23	0.27	0.46
ลดลง 3 เท่า	0.05	0.14	0.02	0.10	0.14	0.23
ลดลง 5 เท่า	0.04	0.12	0.01	0.08	0.11	0.18
ลดลง 7 เท่า	0.03	0.10	0.009	0.07	0.10	0.16
ลดลง 12 เท่า	0.02	0.05	0.006	0.04	0.07	0.13



รูปที่ 4.39 การจูนตัวควบคุมแบบ IMC ที่ใช้ดีคัฟเฟลอร์แบบนำหน้า ที่ $y_1=0.005$, $y_2=0$
(โดยเลือกใช้ $f_1 = 0.2$, $f_2 = 0.8$)



รูปที่ 4.40 การจูนตัวควบคุมแบบ IMC ที่ใช้ดีคัฟเฟลอร์แบบนำหน้า ที่ $y_1=0$, $y_2=0.005$