

### การจำลองเชิงเลขของระบบควบคุม

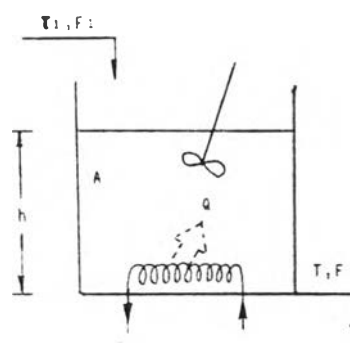
การจำลองเชิงเลขของระบบควบคุมมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาและทดสอบการใช้ตัวควบคุมแบบจูนปรับตัวเองกับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์อย่างช้า ๆ ตามเวลาหรือมีสิ่งรบกวนที่เกิดขึ้นภายในระบบ โดยใช้อัลกอริทึมของการควบคุมแบบจูนปรับตัวเองจากบทที่ 2 ที่ได้กล่าวมาแล้ว การจำลองนี้จะประกอบด้วย การจำลองกระบวนการและการจำลองตัวควบคุมชนิดต่าง ๆ โดยอาศัยรูปแบบทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการและตัวควบคุม และแสดงผลการจำลองของการควบคุมกระบวนการทั้งในรูปค่าของตัวแปรและกราฟิก สามารถนำข้อมูลมาศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมของการควบคุมเพื่อนำไปใช้ควบคุมในห้องทดลอง

#### จุดประสงค์ของการจำลอง

ในบทนี้เป็นการศึกษาจำลองเชิงเลขของระบบควบคุมโดยใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ขนาด 16 บิต เพื่อทดสอบตัวควบคุมชนิดต่าง ๆ ในการควบคุมระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์อย่างช้า ๆ หรือมีสิ่งรบกวนที่เกิดขึ้น และเก็บข้อมูลของการจำลองเพื่อนำมาศึกษาและพิจารณาการควบคุมก่อนที่จะนำตัวควบคุมแบบต่าง ๆ ไปใช้ควบคุมกระบวนการในห้องทดลอง การจำลองได้เลือกการควบคุมอนุกรมวิธานมาใช้ในการทดสอบเนื่องจากเป็นการควบคุมที่พบเห็นบ่อย มีรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่ง่าย สามารถประยุกต์ใช้กับการควบคุมแบบจูนปรับตัวเองได้โดยง่ายไม่เกิดปัญหาเรื่องเวลาในการคำนวณ นอกจากนี้ได้จำลองตัวควบคุมชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ตัวควบคุมแบบ PID และ ตัวควบคุมแบบจูนปรับตัวเอง เพื่อใช้ควบคุมกระบวนการที่จำลองขึ้นตามจุดประสงค์ดังกล่าวข้างต้น แต่ก่อนที่จะพิจารณาลักษณะต่าง ๆ การควบคุมในการจำลองเชิงเลขจะขอกกล่าวถึงการจำลองกระบวนการและการจำลองตัวควบคุมเสียก่อน

#### การจำลองกระบวนการ

การควบคุมอนุกรมวิธานสามารถจำลองโดยอาศัยรูปแบบทางคณิตศาสตร์โดยโปรแกรมลงในไมโครคอมพิวเตอร์ ซึ่งใช้รูปแบบของระบบควบคุมอนุกรมวิธานตาม [22] มีลักษณะดังนี้



รูปที่ 3.1 ลักษณะ Stirred tank

กระบวนการที่จะใช้ในการจำลองเป็นกระบวนการควบคุมอุณหภูมิแบบระบบ Stirred tank แสดงไว้ในรูปที่ 3.1 ประกอบด้วยถังน้ำที่มีทางน้ำไหลเข้าและทางน้ำไหลออก โดยที่น้ำภายในถังจะถูกทำให้ร้อนโดยขดลวดความร้อนที่ติดตั้ง

ในระบบ Stirred tank [22] สามารถหาแบบทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้คือ เมื่อพิจารณาจากมวลสารและพลังงานในกระบวนการจะได้

$$A \frac{dh}{dt} = F_1 - F \quad (3.1)$$

$$Ah \frac{dT}{dt} = F_1(T_1 - T) + KQ \quad (3.2)$$

โดยที่	$h$	= ความสูงของระดับน้ำในถัง
	$A$	= พื้นที่หน้าตัดของถัง
	$T$	= อุณหภูมิของน้ำภายในถัง
	$F$	= อัตราการไหลออกของน้ำ
	$T_1$	= อุณหภูมิของน้ำเข้า
	$F_1$	= อัตราการไหลเข้าของน้ำ
	$K$	= สัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อน
	$Q$	= ปริมาณความร้อนขาเข้าที่ให้แก่ น้ำในถัง

จากสมการ (3.1), (3.2) จะสามารถควบคุมได้ทั้งระดับความสูงของน้ำและอุณหภูมิของน้ำในถัง โดยมี

Output variables	:	$h, T$
Input variables disturbance	:	$T_1, F_1$
Manipulated variables	:	$Q, F$

ซึ่งเมื่อนิยามจากสมการ (3.1) และ (3.2) จะพบว่า การเปลี่ยนแปลง  $F_1$  จะมีผลต่อการควบคุมทั้งความสูง  $h$  และอุณหภูมิ  $T$  ส่วนการเปลี่ยนแปลง  $T_1$  จะมีผลต่ออุณหภูมิ  $T$  เท่านั้น กรณี เมื่อ  $F_1$  ลดลง อุณหภูมิ  $T$  จะมีค่าสูงขึ้น และความสูง  $h$  จะมีค่าลดลง ส่วนกรณีที่  $T_1$  ลดลงก็จะทำให้อุณหภูมิ  $T$  มีค่าลดลง

จาก [22] จะพบว่าผลตอบของการควบคุมระดับความสูง  $h$  จะตอบสนองเร็วกว่าการควบคุมอุณหภูมิ  $T$  มาก ในการจำลองกระบวนการจะถือว่าเมื่อควบคุมในรูปการควบคุมระดับความสูงแล้ว ผลตอบของ  $F$  เนื่องจาก  $F_1$  ที่เปลี่ยนแปลงจะสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้อย่างรวดเร็ว เมื่อเปรียบเทียบกับ การควบคุมอุณหภูมิ  $T$  ดังนั้นในการจำลองจะกระทำเฉพาะรูปการควบคุมอุณหภูมิเท่านั้น โดยจากสมการ (3.2) คือ

$$Ah \frac{dT}{dt} = F_1(T_1 - T) + KQ$$

จะได้ว่า

$$\frac{dT}{dt} + \frac{F_1 T}{Ah} = \frac{F_1 T_1}{Ah} + \frac{KQ}{Ah}$$

$$(s + a) T(s) = a T_1(s) + KQ(s) \quad (3.3)$$

$$T(s) = \frac{a}{s + a} T_1(s) + \frac{K_1}{s + a} Q(s) \quad (3.4)$$

โดยที่

$$a = F_1/Ah$$

$$K_1 = K/Ah$$

จากสมการ (3.2) ที่ได้สามารถหาค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่เวลาใด ๆ ได้โดยการแก้สมการ Differential equation ในการจำลองกระบวนการได้ใช้วิธี Runge Kutta 4 ในการหาค่าตัวแปรของอุณหภูมิทุก ๆ คาบของการสุ่มในการจำลอง โดยสามารถเปลี่ยนค่าตัวแปร  $F_1, T_1$  และ  $Q$  ได้

### การจำลองตัวควบคุม

ตัวควบคุมที่ใช้ในการจำลองจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ตัวควบคุมแบบธรรมดาซึ่งใช้ตัวควบคุมแบบ PID กับตัวการควบคุมแบบจูนปรับตัวเองซึ่งสามารถจำลองได้ดังนี้

1. ตัวควบคุมแบบ PID โดยปกติจะหาค่า PID จากพารามิเตอร์ของระบบซึ่งมีวิธีที่นิยม 2 วิธี คือ การหา Reaction curve ของกระบวนการ เพื่อหาค่า Time constant , Response rate และ Dead time กับวิธี Ultimate sensitivity method ซึ่งใช้หาค่าอัตราขยาย (Gain) และคาบของระบบ (Natural Time,  $T_o$ ) ในการจำลองการควบคุมแบบ PID จะใช้วิธีนี้หาค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการและจูนค่าตามวิธีของ Ziegler & Nichols [22,23] คือ

$$K_p = 0.6 \text{ Gain}$$

$$T_i = 2/T_o$$

$$T_D = T_o/8$$

สำหรับผลตอบของตัวควบคุม  $u(t)$  หาได้โดยอาศัยรูปแบบของ Digital PID controller ใน [2] คือ

$$u(kh) = u(kh-h) + K_p [1 - z^{-1} + \frac{hz^{-1}}{T_i} + \frac{T_D(1 - 2z^{-1} + z^{-2})}{h(1 + \gamma z^{-1})}] e(kh)$$

โดยที่

- $h$  - คาบของการสุ่ม
- $u(kh), e(kh)$  - กิริยาควบคุมและความคลาดเคลื่อนที่การสุ่มเท่ากับ  $kh$
- $\gamma$  - มีค่าเท่ากับ  $- \text{EXP}(-hN/T_D)$
- $N$  - ขนาดของฟิลเตอร์ของตัวกรองความถี่ (filter) ของ Derivative Part

2. ตัวควบคุมแบบจูนปรับตัวเอง การควบคุมแบบจูนปรับตัวเองสามารถประยุกต์ใช้ได้กับวิธีการควบคุมชนิดต่าง ๆ ได้ง่าย เช่น การควบคุมแบบเล็งเลิศ (Optimal control) หรือ การควบคุมแบบกำหนดโพล (Pole placement method) เป็นต้น สามารถประยุกต์ใช้ได้ดังนี้

2.1 ตัวควบคุมแบบจูนปรับตัวเองชนิดเล็งเลิศ อัลกอริทึมที่ใช้ในการจำลองจะใช้การควบคุมแบบ Minimum variance control และ Generalized minimum



variance ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทก่อน โดยใช้สมการ (2.5) และ (2.8) และเลือก  $P(z^{-1})$ ,  $Q(z^{-1})$  ให้มีค่าตามลักษณะของการควบคุม

2.2 ตัวควบคุมแบบจูนปรับตัวเองชนิดกำหนดโพล อัลกอริทึมของการควบคุมแบบจูนปรับตัวเองที่ใช้วิธีการกำหนดโพลที่สะดวกที่สุดได้แก่ อัลกอริทึมแบบ Explicit โดยการบอกเอกลักษณ์ของพารามิเตอร์ของระบบก่อนที่จะหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม จากรูปแบบของการควบคุม [13] กำหนดให้

$$R(z^{-1}) u(t) = T(z^{-1}) u_c(t) - S(z^{-1}) y(t) \quad (3.5)$$

โดยที่  $R(z^{-1}), T(z^{-1}), S(z^{-1})$  - เป็นโพลีโนเมียลที่สอดคล้องกับสมการ

$u_c(t)$  - ค่าที่ตั้งไว้ที่เวลาใด ๆ

$u(t), y(t)$  - อินพุตและเอาต์พุตที่เวลาใด ๆ

จากสมการ (2.2) จะได้

$$\frac{z^{-k}TB}{AR + z^{-k}BS} = \frac{z^{-k}B_m}{A_m} \quad (3.6)$$

โดยที่  $A_m, B_m$  - Closed-loop pole and zero polynomial [2, 13]

ในกรณีที่ขั้วของระบบอยู่ในขอบเขตแห่งเสถียรภาพ (Stability Region) ทั้งหมดวิธีที่ง่ายในการกำหนดโพลได้แก่ การกำจัดขั้วโรทุกตัวของระบบ (All zeros cancellation) [13] ดังนั้นจะได้ว่า

$$\frac{z^{-k}T}{AR_1 + z^{-k}S} = \frac{z^{-k}B A_o}{A_m A_o}$$

โดยที่  $R = BR_1$

$A_o$  - Desired observer polynomial [2, 13]

หรือ  $AR_1 + z^{-k}S = A_m A_o \quad (3.7)$

ดังนั้นเมื่อหาค่าพารามิเตอร์ของ  $A(z^{-1})$  และ  $B(z^{-1})$  แทนในสมการ (3.7) ก็จะได้ค่าพารามิเตอร์  $R_1(z^{-1})$  และ  $S(z^{-1})$  ตามลำดับ ซึ่งแทนค่าในสมการ ฎของการควบคุม (3.5) ก็จะได้ผลตอบของตัวควบคุม  $u(t)$

ส่วนการควบคุมด้วยอัลกอริทึมแบบ Implicit สามารถทำได้ดังนี้

จากสมการ (3.7)  $AR_1 + z^{-k}S = A_m A_o$

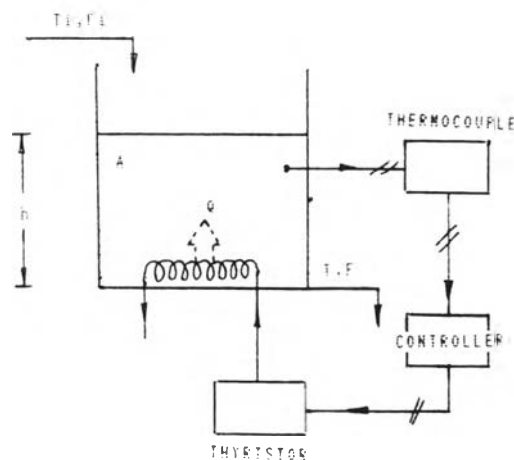
$$\begin{aligned} A_m A_o y &= AR_1 y + z^{-k} S y \\ &= z^{-k} (R u + S y) \end{aligned} \quad (3.8)$$

ทำนองเดียวกันจากสมการ (3.8) สามารถหาเอกลักษณ์ของพารามิเตอร์  $R(z^{-1})$ ,  $S(z^{-1})$  ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ของตัวควบคุม เมื่อแทนกลับในสมการ (3.5) ก็จะได้ผลตอบของตัวควบคุมเช่นกัน

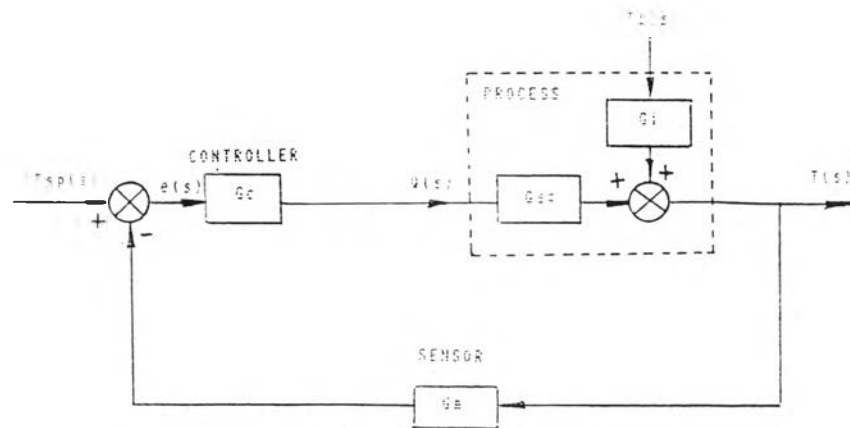
2.3 ตัวควบคุมแบบจูนปรับตัวเองชนิด PID นอกจากการควบคุมที่กล่าวมาแล้ว การควบคุมแบบจูนปรับตัวเองสามารถประยุกต์ใช้กับการควบคุมแบบอื่น ๆ ได้ ในการจำลองได้ประยุกต์การควบคุมแบบจูนปรับตัวเองเข้ากับตัวควบคุมแบบ PID จูนค่าตามวิธีของ Ziegler & Nichols ใช้อัลกอริทึมแบบ Explicit หาเอกลักษณ์ของพารามิเตอร์ของระบบ แล้วแก้สมการโดยใช้วิธี Newton Raphson method เพื่อหาค่าอัตราขยาย (Gain) และคาบของระบบ (Natural time,  $T_o$ ) สำหรับใช้ในการจูนค่า PID

จะเห็นว่าเราสามารถใช้ในการควบคุมแบบจูนปรับตัวเองประยุกต์เข้ากับการควบคุมได้อย่างง่าย ๆ โดยอาศัยการบอกเอกลักษณ์และกฎการควบคุม แต่อย่างไรก็ตามจะต้องคำนึงถึงรูปแบบของระบบและเงื่อนไขในการควบคุม เพื่อให้การควบคุมมีเสถียรภาพและสามารถควบคุมกระบวนการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### ผลของการจำลองเชิงเลข



รูปที่ 3.2 ระบบควบคุมอุณหภูมิที่จำลอง

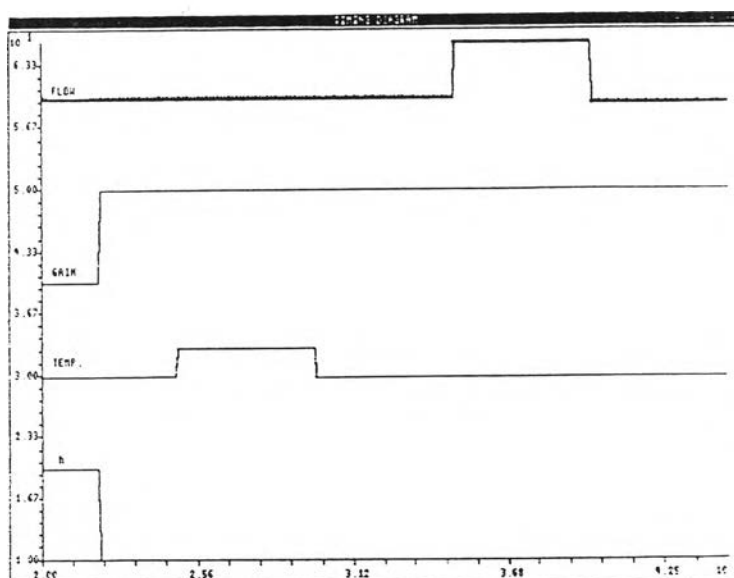


รูปที่ 3.3 Block diagram ของระบบที่ใช้จำลอง

เมื่อรวมการจำลองกระบวนการและการจำลองตัวควบคุมเข้าด้วยกันก็จะได้ระบบควบคุมอุณหภูมิตั้งเป็นระบบเชิงเส้นแบบหนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุตซึ่งมีตัวควบคุมต่ออนุกรมอยู่ มีลักษณะการควบคุมแสดงไว้ในรูปที่ 3.2 และมี Block diagram ดังรูปที่ 3.3 โดยที่สมมติให้การควบคุมจะวัดค่าของอุณหภูมิผ่านอุปกรณ์การวัดซึ่งได้แก่ เทอร์โมคัลเปิลแล้วใช้ตัวส่งสัญญาณ (Transmitter) ส่งค่าที่วัดได้ให้แก่ตัวควบคุมซึ่งทำหน้าที่ควบคุมปริมาณของกระแสที่ไหลผ่านหลอดนำความร้อน โดยเงื่อนไขของจำลองจะกำหนดให้มีน้ำไหลเข้าและไหลออกภายในกระบวนการเป็นสื่อบรรเทาที่เกิดขึ้นตลอดเวลา และสามารถเปลี่ยนค่าของอุณหภูมิของน้ำที่ไหลเข้าและอัตราการไหลได้โดยตรง ส่วนการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์จะทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงระดับความสูงของน้ำ และเพื่อความสะดวกในการจำลองเชิงเลขจึงจะทดสอบเฉพาะระบบที่เป็น Deterministic system โดยจะไม่พิจารณา Noise ที่อาจเกิดขึ้นได้ในกระบวนการ

การจำลองได้กำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการมีค่าดังรูปที่ 3.2 โดยที่  $F_1 = 3 \text{ ft}^3/\text{min}$ ,  $A = 3 \text{ ft}^2$ ,  $h = 2 \text{ ft}$  คาบของการสุมเท่ากับ 6 วินาที และมีค่าที่ตั้งไว้เท่ากับ  $100^\circ$  จะเห็นว่า  $F_1, T_1$  เป็นสื่อบรรเทาที่เข้ามาภายในกระบวนการ ซึ่งสามารถทำให้ผลตอบอุณหภูมิ T เกิดการเปลี่ยนแปลงได้ ดังนั้นการใช้ตัวควบคุมจะต้องเลือกตัวควบคุมที่สามารถรักษาผลตอบของกระบวนการให้มีค่าเท่ากับค่าที่ตั้งไว้ ในขณะที่มีสื่อบรรเทาเหล่านี้เกิดขึ้น ตัวควบคุมที่ใช้ได้ดีและนิยมใช้กันปัจจุบัน ได้แก่ตัวควบคุมแบบ PID และการจำลองเชิงเลขจะใช้การควบคุมแบบ PID กับ การควบคุมแบบจูนปรับตัวเอง เพื่อควบคุมกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์และมีสื่อบรรเทาเกิดขึ้น และเปรียบเทียบผลตอบระหว่างการควบคุมทั้งสองแบบ

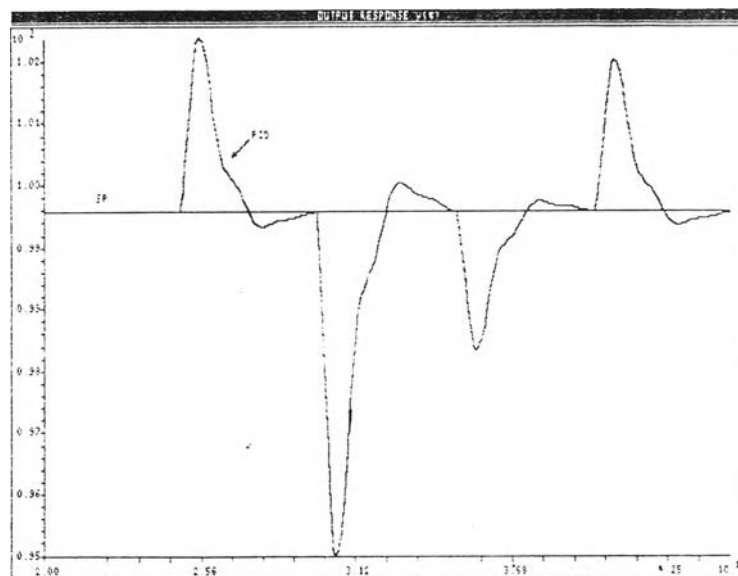
1. ตัวควบคุมแบบ PID ในการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PID จะต้องจูนค่าโดยอาศัยพารามิเตอร์ของกระบวนการก่อน ซึ่งหลังจากที่ได้ทดสอบระบบแบบวงเปิดและวงปิดแล้ว จะได้ว่า Delay time เนื่องจากการวัดมีค่าเท่ากับ 30 วินาที ส่วนอัตราขยายของกระบวนการที่ทำให้ระบบแกว่งมีค่าเท่ากับ 6.6 และแกว่งด้วยคาบที่ยาวเท่ากับ 117 วินาที เพราะฉะนั้นค่า PID ที่จูนตามวิธีของ Ziegler & Nichols จะมีค่า  $PB = 25\%$  ,  $T_i = 0.017 \text{ sec}^{-1}$  ,  $T_D = 14.6325 \text{ sec}$  เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว กระบวนการที่จำลองจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่าง ๆ ตามรูปที่ 3.4 โดยกำหนดให้  $T_i$  เพิ่มขึ้นและลดจากเดิม 10% ที่การสุ่มนาฬิกาที่ 25 และ 30 ทำนองเดียวกันให้  $F_s$  เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดจากเดิม 10% นาฬิกาที่ 35 และ 40 ซึ่งผลตอบของกระบวนการที่ควบคุมด้วย PID ได้แสดงในรูปที่ 3.5 จะเห็นว่าถึงแม้กระบวนการจะมีสิ่งรบกวนเกิดขึ้นตามรูปที่ 3.4 ก็ตาม แต่ตัวควบคุมแบบ PID ก็ยังสามารถรักษาผลตอบของกระบวนการให้มีความใกล้เคียงกับค่าที่ตั้งไว้ได้



รูปที่ 3.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่าง ๆ

( หมายเหตุ แกนนอนเป็นแกนเวลามีหน่วยเป็นจำนวนครั้งของการสุ่มซึ่งมีคาบของการสุ่มเท่ากับ 6 วินาที )





รูปที่ 3.5 ผลตอบของกระบวนการควบคุมด้วย PID

( หมายเหตุ แกนนอน เป็นแกนเวลามีหน่วยเป็นจำนวนครั้งของการสุ่มซึ่งมีคาบของการสุ่มเท่ากับ 6 วินาที และแกนตั้งเป็นค่าของอุณหภูมิมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส )

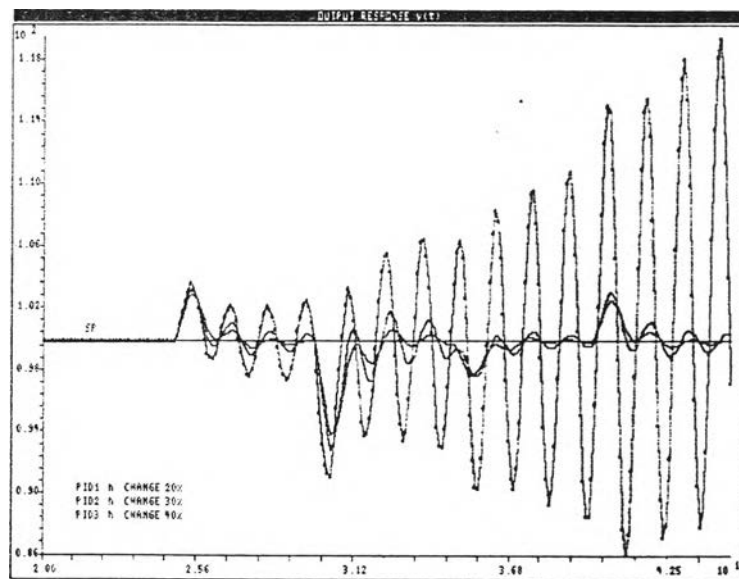
ผลตอบในรูปที่ 3.5 แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบ PID นี้สามารถใช้ได้ดีถึงแม้จะมีสิ่งรบกวนเกิดขึ้นภายในระบบ แต่ถ้ากระบวนการเกิดมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์เกิดขึ้น เช่น การเปลี่ยนแปลงอัตราขยาย หรือ การเปลี่ยนค่าของ Time Constant เป็นต้น ค่าของ PID ที่จูนไว้เดิมจำเป็นต้องเปลี่ยนไปด้วย ซึ่งปกติจะต้องปรับค่า PID นี้ใหม่เพื่อให้เหมาะสมกับพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงในกระบวนการ ผลที่ตามมาคือ จะต้องเสียเวลามากเพื่อที่จะปรับค่า PID ทำให้ผลตอบของระบบในระหว่างการปรับนั้นเลวลง สำหรับการจำลองกระบวนการจะไม่เปลี่ยนค่า PID นี้ใหม่ แต่จะคงค่าเดิมไว้เพื่อดูพฤติกรรมของผลตอบของระบบว่าเป็นอย่างไร

จากสมการ (3.2) จะพบว่า  $F_1$ ,  $h$  และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะมีผลต่อค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการ ดังนั้นในการจำลองจะเปลี่ยนค่า  $F_1$ ,  $h$  และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน เพื่อให้ค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการเปลี่ยนไป โดยจะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 กรณีใหญ่ ๆ คือ

1. กรณีที่อัตราขยายของกระบวนการเปลี่ยนโดยการเปลี่ยนค่า  $h$  หรือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยมี  $F_1, T_1$  เป็นสิ่งรบกวน

2. กรณีที่คาบของระบบ (Time constant) มีค่าน้อยกว่า Delay time ในระบบ ทำได้โดยการปรับ  $F_1$  และ  $h$  โดยมี  $F_1, T_1$  เป็นสิ่งรบกวน

ในกรณีที่ 1 การจำลองจะควบคุมกระบวนการด้วยตัวควบคุมแบบ PID ซึ่งมีค่า PID จะจูนค่าเหมือนในตอนต้นเมื่อผลตอบเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว คือมีค่าที่ตั้งไว้เท่ากับ  $100^\circ$  กำหนดให้ที่เวลาของการล่มหน้าที่ที่ 22 มีการเปลี่ยนแปลงความสูง  $h$  ลดลง 20%, 30%, 40% ตามลำดับ โดยมี  $F_1$  และ  $T_1$  เป็นสิ่งรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบตามรูปที่ 3.4 ผลตอบของกระบวนการและตัวควบคุมแสดงในรูปที่ 3.6

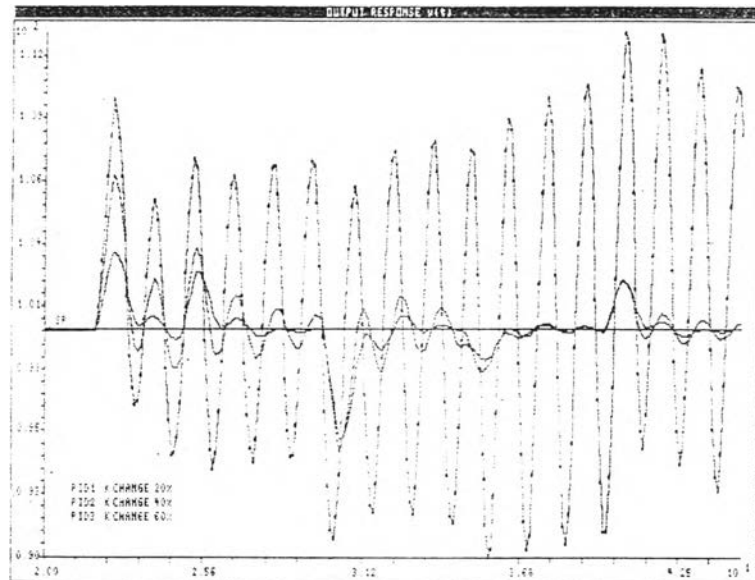


รูปที่ 3.6 ผลตอบของการควบคุมด้วย PID เมื่อลดความสูง 20%, 30%, 40%

( หมายเหตุ แกนนอนเป็นแกนเวลามีหน่วยเป็นจำนวนครั้งของการล่มซึ่งมีคาบของการล่มเท่ากับ 6 วินาที และแกนตั้งเป็นค่าของอุณหภูมิมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส )

เมื่อระดับความสูง  $h$  ลดลงมากขึ้นผลตอบของอุณหภูมิ  $T$  ที่ควบคุมด้วย PID ก็จะไม่เลวลงตามลำดับ จนกระทั่งตัวควบคุมแบบ PID ไม่สามารถควบคุมต่อไปได้ ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากการลดความสูง  $h$  จะเป็นการเพิ่มอัตราขยายของระบบเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการที่เปลี่ยนไปทำให้อัตราขยายของระบบทั้งหมดสูงขึ้นจนกระทั่งตัวควบคุมแบบ PID เดิมไม่สามารถควบคุมได้ และในทำนองเดียวกันการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยตรง จะทำให้อัตราขยายของกระบวนการเปลี่ยนแปลง การจำลองจะเพิ่มอัตราขยาย 20% , 40% และ 60% ตามลำดับ

โดยที่มี  $F_1$  และ  $T_1$  ตามรูปที่ 3.4 เป็นสิ่งรบกวน ก็จะได้ผลตอบตามรูปที่ 3.7

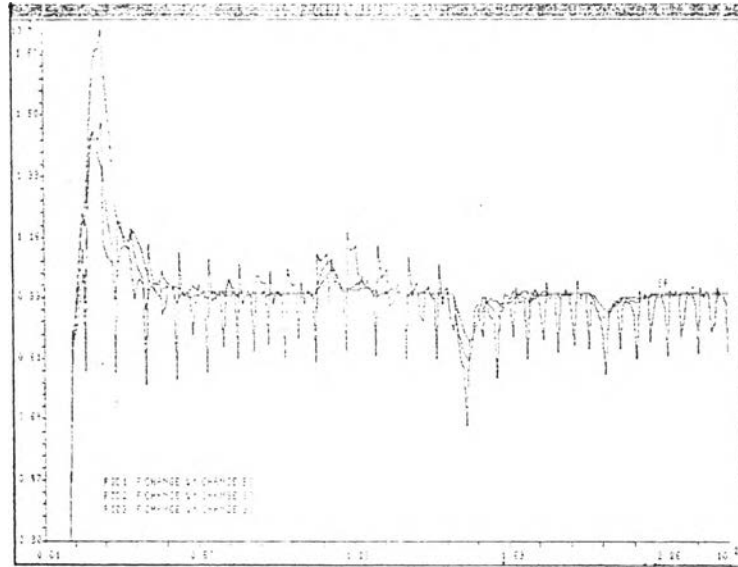


รูปที่ 3.7 ผลตอบของกระบวนการควบคุมด้วย PID เมื่ออัตราขยายเพิ่ม 20%, 40%, 60%

( หมายเหตุ แยกนอนเป็นแกนเวลามีหน่วยเป็นจำนวนครั้งของการสุ่มซึ่งมีคาบของการสุ่มเท่ากับ 6 วินาที และแกนตั้งเป็นค่าของอุณหภูมิมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส )

ผลตอบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะเหมือนกับการเปลี่ยนแปลงระดับความสูงคือ เมื่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสูงขึ้น ระบบจะมีผลตอบที่เลวลงกว่าเดิม จนกระทั่งไม่สามารถควบคุมได้ด้วยตัวควบคุมแบบ PID

กรณีที่ 2 จะเป็นการลดค่า Time constant ให้มีค่าน้อยกว่า Delay time โดยการเปลี่ยนแปลง  $F_1$  ให้มีค่าเพิ่มขึ้น และลดความสูง  $h$  ลง ซึ่งในการจำลองจะจูนค่าของ PID ใหม่ทุกครั้งที่เปลี่ยนแปลงค่า Time constant เพื่อสังเกตว่าเมื่อใดที่ PID ไม่สามารถควบคุมกระบวนการได้ (หมายเหตุ การเพิ่มหรือลดค่าของ  $F_1$  และ  $h$  อาจจะไม่เป็นจริงในการควบคุมแต่ก็ใช้เพื่อการทดสอบเท่านั้น) โดยเปลี่ยนแปลง  $F_1$  เป็น 2 เท่าและค่อย ๆ ลดระดับความสูง  $h$  ลง 50%, 80% และ 90% ตามลำดับ จะได้ผลตอบตามรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ผลตอบของกระบวนการควบคุมด้วย PID เมื่ออัตราไหลเพิ่ม 2 เท่า และความสูงลดลง 50%, 80%, 90%

( หมายเหตุ แกนนอนเป็นแกนเวลามีหน่วยเป็นจำนวนครั้งของการลุ่มซึ่งมีคาบของการลุ่มเท่ากับ 6 วินาที และแกนตั้งเป็นค่าของอุณหภูมิมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส )

จะเห็นว่าผลตอบของการควบคุมแบบ PID จะเลวลงเมื่อค่า Time constant มีค่าลดลงและเมื่อค่า Time constant มีค่าน้อยกว่า Delay time ตัวควบคุมแบบ PID ไม่สามารถจะควบคุมกระบวนการได้ ซึ่งเนื่องจากตัวควบคุมแบบ PID จะใช้ได้กับระบบที่มี Delay time น้อยกว่าค่า Time constant

2. ตัวควบคุมแบบจูนปรับตัวเอง จากผลการจำลองการควบคุมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์เกิดขึ้นแล้ว การจูนค่า PID แบบที่ใช้กันจะไม่สามารถควบคุมระบบได้และโดยปกติการเปลี่ยนแปลงมักเกิดขึ้นได้เสมอ ๆ การที่ต้องจูนค่า PID ใหม่ หรืออาจจะถึงกลับต้องเริ่มต้นกระบวนการใหม่ ย่อมทำให้เสียเวลาและสิ้นเปลือง การควบคุมระบบดังกล่าวจึงจำเป็นต้องอาศัยการควบคุมแบบจูนปรับตัวเองเพื่อให้การควบคุมเป็นไปอย่างต่อเนื่อง และมีสมรรถนะที่ดี ในการจำลองจะใช้ตัวควบคุม 3 ชนิด คือ

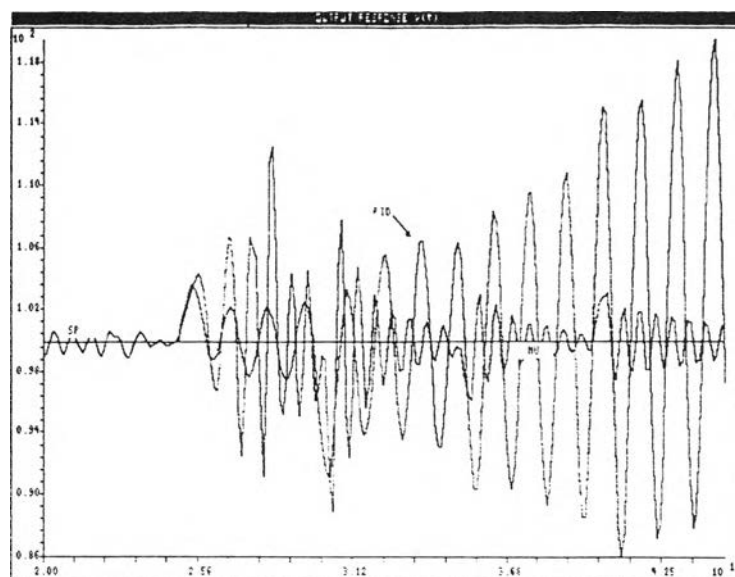
2.1 ตัวควบคุมแบบจูนปรับตัวเองโดยใช้วิธีแบบ Optimal control โดยใช้การควบคุมแบบ Minimum variance control และ Generalized minimum variance control โดยกำหนดให้  $P(z^{-1})$  มีโพลอยู่ที่จุด 0.1 จำนวน 2 ตัว และ  $\lambda = 0.01$  โดยแทน  $Q'(z^{-1})$  ด้วยอัลกอริทึมแบบ PI ดังในภาคผนวก ก

2.2 ตัวควบคุมแบบจูนปรับตัวเองโดยใช้วิธี Pole placement method ซึ่งใช้อัลกอริทึมทั้งแบบ Explicit และ Implicit โดยกำหนดให้  $w = 0.055$  rad/sec. และ  $\zeta = 0.707$

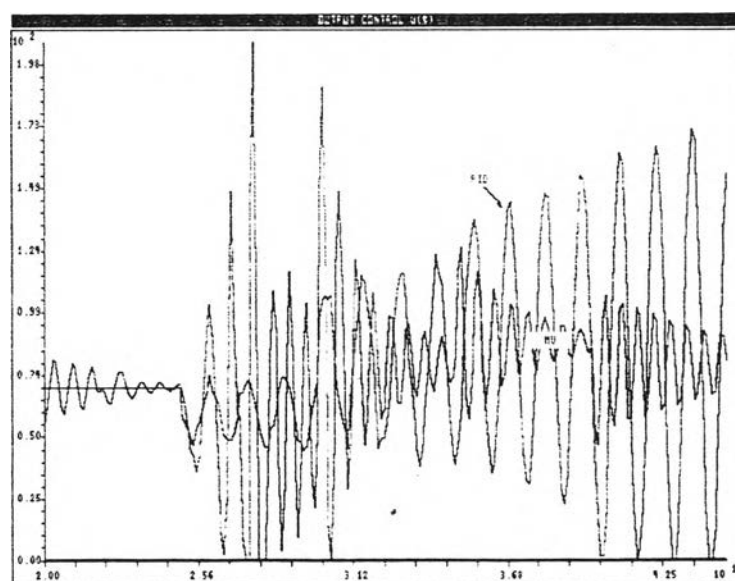
2.3 ตัวควบคุมแบบจูนปรับตัวเองโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PID จูนตามวิธีของ Ziegler & Nichols ตามที่กล่าวข้างต้น

การจำลองการควบคุมกระบวนการด้วยตัวควบคุมแบบจูนปรับตัวเองจะแบ่งเป็น 2 กรณี และใช้เงื่อนไขในการควบคุมเหมือนกับการควบคุมด้วย PID ข้างต้น ซึ่งสามารถดูผลตอบได้ในภาคผนวก ข สำหรับรูปที่ 3.9 - 3.18 แสดงเฉพาะการควบคุมที่เปลี่ยนแปลงระดับความสูงเท่านั้นโดยเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมแบบ PID กับการควบคุมแบบจูนปรับตัวเองซึ่งจะนำไปใช้เป็นข้อมูลในการทดลอง

จากผลตอบจะเห็นว่าเมื่อกระบวนการไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าของพารามิเตอร์ ตัวควบคุมแบบ PID จะสามารถควบคุมผลตอบของกระบวนการได้เป็นอย่างดี แต่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์และมีสิ่งรบกวนเกิดขึ้น ตัวควบคุมแบบ PID จะไม่สามารถควบคุมกระบวนการได้เลย ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการควบคุมแบบจูนปรับตัวเองแล้ว ตัวควบคุมแบบจูนปรับตัวเองจะสามารถควบคุมกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถควบคุมระบบที่ตัวควบคุมแบบ PID ควบคุมไม่ได้ สำหรับการเปรียบเทียบระหว่างวิธีการควบคุมแบบจูนปรับตัวเองนั้นจะเห็นว่า ผลตอบจะมีลักษณะเป็นไปตามคุณสมบัติของวิธีการควบคุมที่ใช้ [2] แต่อย่างไรก็ตาม ผลตอบของการจำลองจะไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากลักษณะการควบคุมไม่ซับซ้อน ที่น่าพิจารณาคือ ระบบลักษณะอย่างไรที่สามารถใช้การควบคุมแบบจูนปรับตัวเองได้ เนื่องจากการควบคุมแบบจูนปรับตัวเองจะควบคุมสำเร็จได้ขึ้นกับรูปแบบของระบบและขั้นตอนการควบคุม จึงไม่สามารถบอกแบบเจาะจงได้ว่าวิธีไหนดีที่สุด เพราะว่าเงื่อนไขส่วนใหญ่ขึ้นกับลักษณะของระบบ

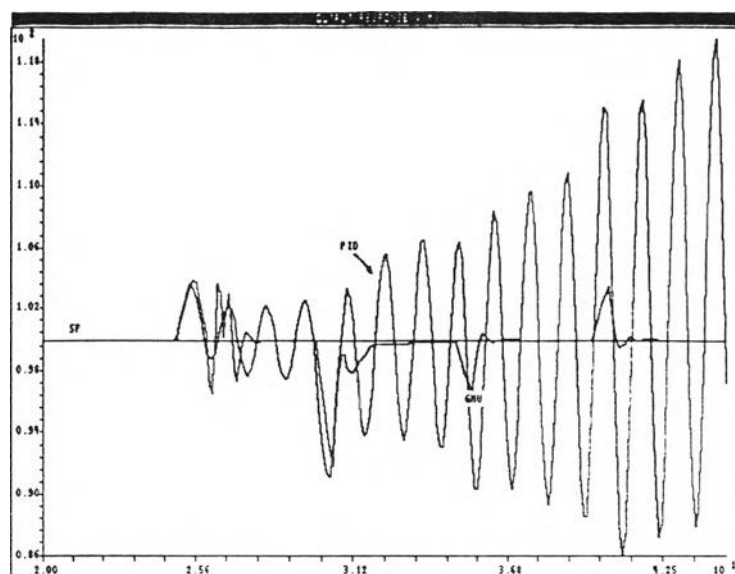


รูปที่ 3.9 แสดงผลตอบของกระบวนการโดยการควบคุมแบบ MV เปรียบเทียบกับการควบคุมแบบ PID เมื่อความสูงลดลง 40%

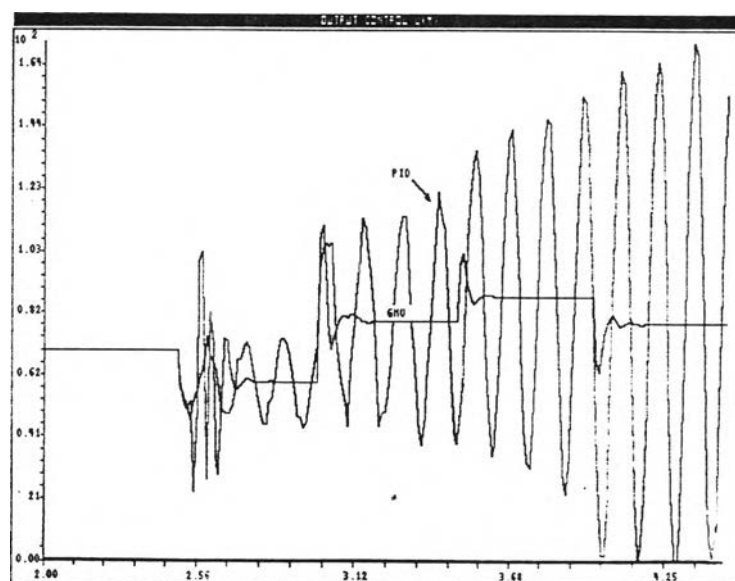


รูปที่ 3.10 แสดงผลตอบของตัวควบคุมโดยการควบคุมแบบ MV เปรียบเทียบกับการควบคุมแบบ PID เมื่อความสูงลดลง 40%

( หมายเหตุ    แกนนอนเป็นแกนเวลามีหน่วยเป็นจำนวนครั้งของการสุมซึ่งมีคาบของการสุมเท่ากับ 6 วินาที และแกนตั้งรูปบนเป็นค่าของอุณหภูมิมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส )

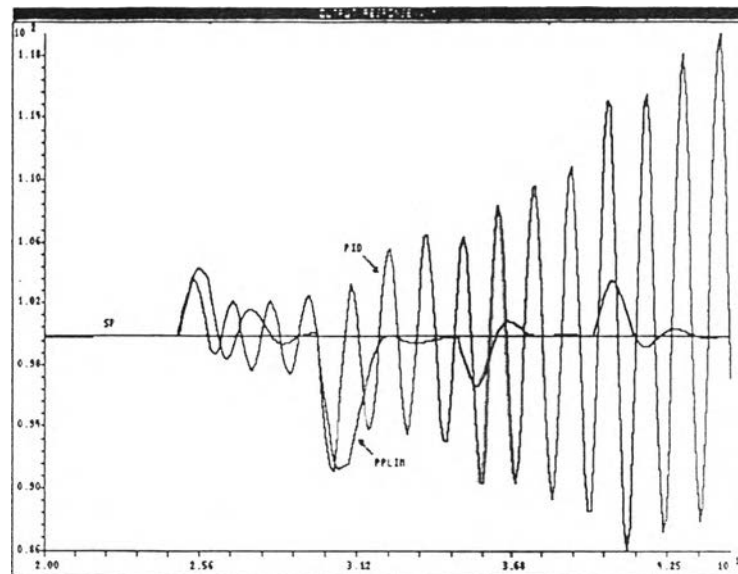


รูปที่ 3.11 แสดงผลตอบของกระบวนการโดยการควบคุมแบบ GMV เปรียบเทียบกับการควบคุมแบบ PID เมื่อความสูงลดลง 40%

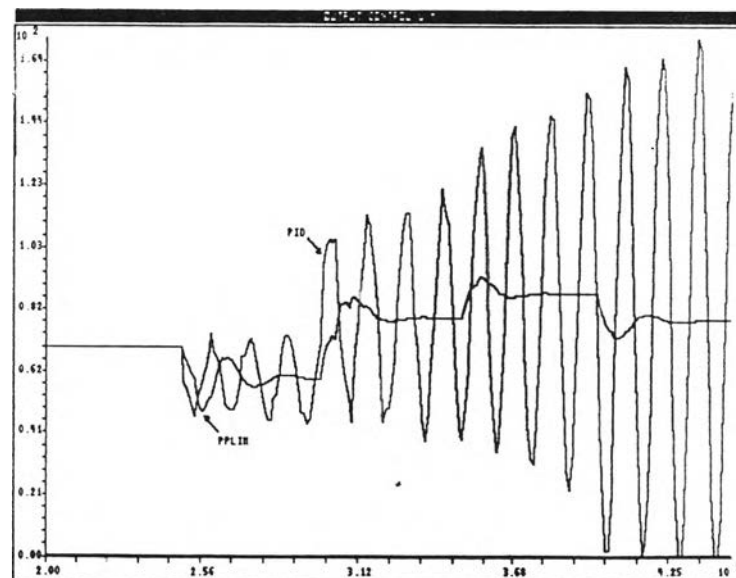


รูปที่ 3.12 แสดงผลตอบของตัวควบคุมโดยการควบคุมแบบ GMV เปรียบเทียบกับการควบคุมแบบ PID เมื่อความสูงลดลง 40%

( หมายเหตุ แกนนอนเป็นแกนเวลามีหน่วยเป็นจำนวนครั้งของการสุ่มซึ่งมีคาบของการสุ่มเท่ากับ 6 วินาที และแกนตั้งรูปบนเป็นค่าของอุณหภูมิมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส )



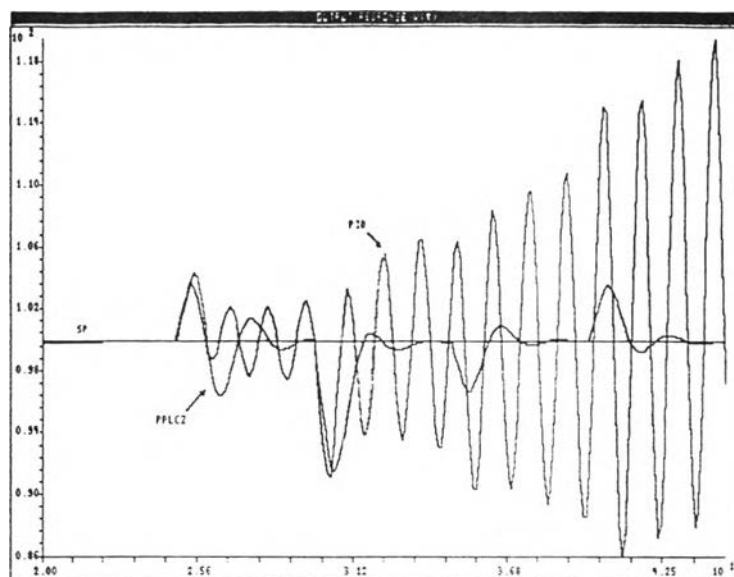
รูปที่ 3.13 แสดงผลตอบของกระบวนการโดยการควบคุมแบบ PPL (Implicit) เปรียบเทียบกับการควบคุมแบบ PID เมื่อความสูงลดลง 40%



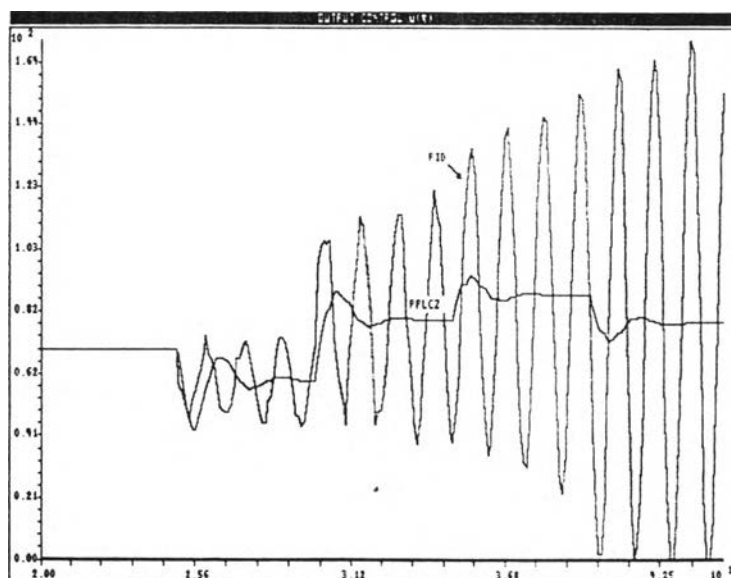
รูปที่ 3.14 แสดงผลตอบของตัวควบคุมโดยการควบคุมแบบ PPL (Implicit) เปรียบเทียบกับการควบคุมแบบ PID เมื่อความสูงลดลง 40%

( หมายเหตุ แกนนอนเป็นแกนเวลามีหน่วยเป็นจำนวนครั้งของการสุ่มซึ่งมีคาบของการสุ่มเท่ากับ 6 วินาที และแกนตั้งรูปบนเป็นค่าของอุณหภูมิมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส )



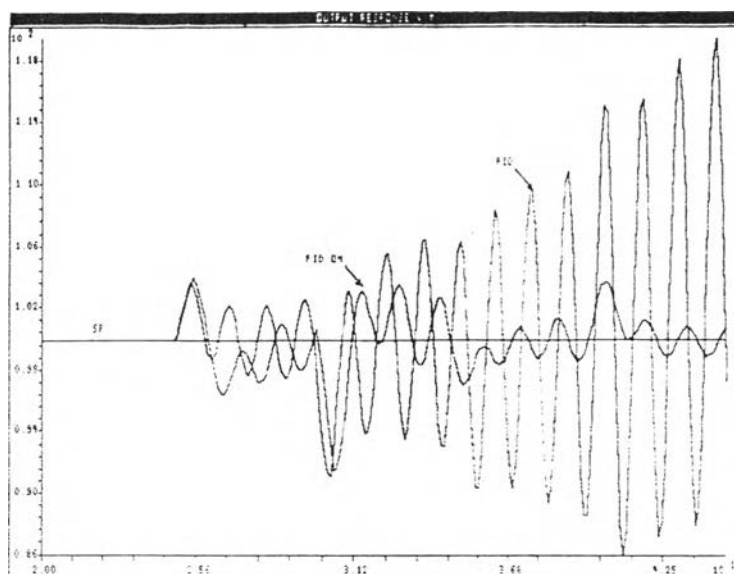


รูปที่ 3.15 แสดงผลตอบของกระบวนการโดยการควบคุมแบบ PPL (Explicit) เปรียบเทียบกับการควบคุมแบบ PID เมื่อความสูงลดลง 40%

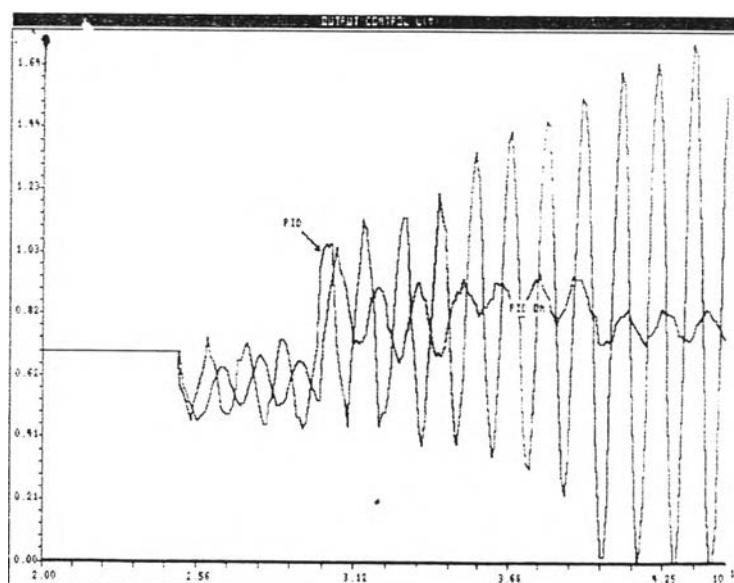


รูปที่ 3.16 แสดงผลตอบของตัวควบคุมโดยการควบคุมแบบ PPL (Explicit) เปรียบเทียบกับการควบคุมแบบ PID เมื่อความสูงลดลง 40%

( หมายเหตุ แกนนอนเป็นแกนเวลามีหน่วยเป็นจำนวนครั้งของการสุ่มซึ่งมีคาบของการสุ่มเท่ากับ 6 วินาที และแกนตั้งรูปบนเป็นค่าของอุณหภูมิมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส )



รูปที่ 3.17 แสดงผลตอบของกระบวนการโดยการควบคุมแบบ PID (on-line) เปรียบเทียบกับการควบคุมแบบ PID เมื่อความสูงลดลง 40%



รูปที่ 3.18 แสดงผลตอบของตัวควบคุมโดยการควบคุมแบบ PID (on-line) เปรียบเทียบกับการควบคุมแบบ PID เมื่อความสูงลดลง 40%

( หมายเหตุ แกนนอนเป็นแกนเวลามีหน่วยเป็นจำนวนครั้งของการสุมซึ่งมีคาบของการสุมเท่ากับ 6 วินาที และแกนตั้งรูปบนเป็นค่าของอุณหภูมิมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส )

### สรุป

ในการจำลองเชิงเลขที่ได้กล่าวมานี้เป็นการจำลองระบบควบคุมแบบเชิงเส้นประกอบด้วยการจำลองกระบวนการและการจำลองตัวควบคุม เพื่อที่จะศึกษาและทดสอบการควบคุมแบบจูนปรับตัวเองชนิดต่าง ๆ รวมทั้งเปรียบเทียบผลตอบกับการควบคุมแบบ PID ที่ใช้กัน ซึ่งจากการจำลองจะเห็นได้ชัดว่าตัวควบคุมที่ประยุกต์ใช้การควบคุมแบบจูนปรับตัวเองสามารถใช้กับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ หรือระบบที่มี Delay time นานมาก ๆ ได้เป็นอย่างดี เมื่อเปรียบเทียบกับการควบคุมด้วย PID ซึ่งไม่สามารถควบคุมกระบวนการดังกล่าวได้เลย นอกจากนี้การควบคุมแบบจูนปรับตัวเองยังสามารถประยุกต์เข้ากับตัวควบคุมได้หลายชนิด จึงเป็นวิธีที่น่าสนใจวิธีหนึ่งที่สามารถจะนำไปใช้ในงานควบคุมได้