

บทที่ 3

การควบคุมระดับและการออกแบบตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ย

3.1 บทนำ

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 ถึงความสำคัญและความจำเป็นของการควบคุมระดับ เพื่อให้การปฏิบัติการต่าง ๆ ในโรงงานอุตสาหกรรมทางเคมีประสบผลสำเร็จดังต้องการ เนื่องจากการควบคุมระดับแบบเฉลี่ยจัดเป็นการควบคุมที่สำคัญสามารถช่วยลดการรบกวนที่เกิดขึ้นในหน่วยสำคัญของกระบวนการ นอกจากนั้นการออกแบบการควบคุมระดับแบบเฉลี่ยที่ถูกต้องและเหมาะสมยังช่วยลดต้นทุนการผลิตเนื่องจากสามารถเลือกใช้ถังพักที่มีขนาดเล็กกว่า แต่เพียงพอที่จะทำการไหลราบเรียบได้ จึงได้มีผู้ทำการศึกษาและพัฒนาสมการการควบคุมระดับแบบเฉลี่ยขึ้นมาหลายแบบดังได้กล่าวแล้วในบทที่ 2 ในบทนี้จะได้กล่าวถึงข้อมูลเกี่ยวกับการควบคุมระดับในถังพัก การออกแบบสมการของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยและการปรับจูนตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยชนิดต่าง ๆ ที่สนใจศึกษาอย่างละเอียด รวมทั้งผลการทดลอง และข้อดีข้อเสียของตัวควบคุมแต่ละชนิดที่ได้จากผลงานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อเป็นข้อมูลในการศึกษาและทำการวิจัยต่อไป

3.2 ความจำเป็นของถังพักในโรงงาน

ข้อดีของถังพักในโรงงานมีมากมายซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

ก. ถังพักช่วยให้การปฏิบัติการต่าง ๆ ของโรงงานสามารถดำเนินต่อไปได้อย่างต่อเนื่อง ในกรณีที่การไหลเข้ามาในระบบลดลงชั่วคราวหรือไม่มีการไหลเข้ามาในระบบ ยกตัวอย่าง เช่น ในกรณีที่เกิดข้อขัดข้องในการป้อนวัสดุ, การขนส่งผลิตภัณฑ์หรือหน่วยปฏิบัติการบาง หน่วยในกระบวนการผลิตจำเป็นต้องหยุดเพื่อทำการซ่อมแซมหรือบำรุงรักษา ทำให้ไม่สามารถ ส่งวัสดุได้อย่างต่อเนื่อง การมีถังพักจะช่วยแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามถัง พักที่ใช้ในกรณีนี้ควรมีขนาดใหญ่มากพอที่จะเก็บวัสดุให้เพียงพอต่อการใช้งาน

ข. การมีถังพักช่วยทำให้มั่นใจว่ามีของเหลวไหลไปยังปั๊ม (Pump) ตลอดเวลาในขณะที่ ปั๊มกำลังทำงาน ในกรณีที่ไม่มีของเหลวในถังพักการไหลของของเหลวไปยังปั๊มจะถูกรบกวน เนื่องจากปั๊มโดยทั่วไปไม่สามารถทำให้เกิดการไหลได้อย่างอัตโนมัติหลังจากการไหลหยุดลง นอกจากนั้นที่สำคัญคือ ปั๊มจะเกิดความเสียหายขึ้นในกรณีที่ปั๊มยังคงทำงานแต่ไม่มีการไหลเข้ามายังปั๊ม สำหรับหน่วยปฏิบัติการทั่วไปถังพักควรมีเวลาที่ใช้ในถังพัก (Holdup time, τ_H) เท่ากับปริมาตรสูงสุดของถังพักหารด้วยอัตราการไหลปกติ) 5 ถึง 10 นาที เพื่อให้สามารถลดการ เปลี่ยนแปลงการไหลปกติที่เกิดขึ้นได้

ค. ถังพักสามารถนำมาวางไว้ระหว่างแหล่งที่เกิดการรบกวนกับหน่วยปฏิบัติการที่ได้ รับผลกระทบจากการรบกวนได้ง่าย เพื่อที่จะช่วยลดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสายป้อน

และอัตราการไหลในการไหลขาเข้า ทำให้ขนาดของการรบกวนที่เกิดขึ้นกับหน่วยปฏิบัติดังกล่าวมีค่าน้อยลง เหตุผลดังกล่าวเกี่ยวข้องกับตรงกับการควบคุมระดับแบบเฉลี่ยซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป

อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าถึงพักจะมีประโยชน์หลายอย่างดังที่ได้กล่าวมาแล้ว การใช้ถึงพักก็ควรจะกำหนดขนาดเท่าที่จำเป็นเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ถึงพักก็มีข้อเสียเช่นกันซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

ก. การติดตั้งถึงพักจำเป็นต้องเสียค่าใช้จ่าย ทั้งทางด้านราคาของตัวถึงพักเองตลอดจนพื้นที่ต้องใช้ติดตั้ง รวมทั้งต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา

ข. ทำให้ต้องสูญเสียค่าใช้จ่ายของวัตถุดิบที่เก็บไว้ในถึงพัก แทนที่จะนำเงินดังกล่าวไปใช้หมุนเวียนเพื่อให้ได้ผลกำไรมากขึ้น

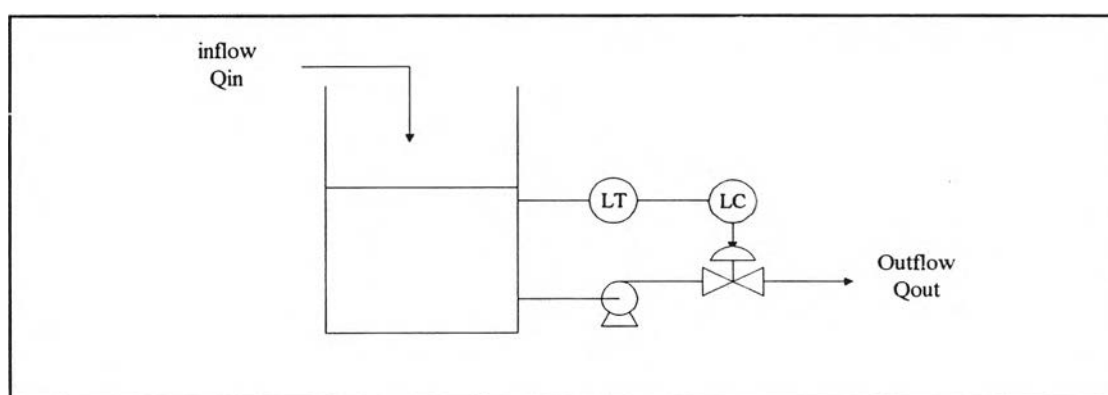
ค. อาจเกิดการเสื่อมคุณภาพของวัตถุดิบที่เก็บไว้ในถึงพักได้

ง. ในการเก็บวัตถุดิบที่ไวไฟหรือมีพิษไว้ในปริมาณมาก จะทำให้ความปลอดภัยภายในโรงงานน้อยลงหรืออาจเกิดอุบัติเหตุได้ง่ายขึ้น

ดังนั้นจากที่กล่าวมาสามารถสรุปได้ว่าการใช้ถึงพักควรกำหนดขนาดถึงพักให้มีค่าน้อยที่สุดเพื่อให้เพียงพอต่อการใช้งานเท่านั้น เพื่อให้กระบวนการผลิตเกิดประสิทธิภาพสูงสุดและเกิดผลเสียน้อยที่สุด

3.3 วัตถุประสงค์ของการควบคุมระดับ

วัตถุประสงค์ของการควบคุมระดับมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบและปรับจูนตัวควบคุม โดยทั่วไประดับของของเหลวจะถูกควบคุมโดยการปรับการไหลขาเข้าและขาออก จากถังซึ่งเป็นที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยชิ้นนี้ ระบบที่นำมาใช้ในศึกษาแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ระบบการควบคุมระดับของเหลวในถังพัก

จากการศึกษาพบว่าวัตถุประสงค์ของการควบคุมระดับที่พบทั่วไปในกระบวนการผลิตทางเคมีสามารถสรุปได้ 2 ประการ ดังนี้

ก. การควบคุมระดับแบบแน่นนอน (Tight level control)

การควบคุมระดับแบบนี้ มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อควบคุมระดับของเหลวในถังให้ได้ค่าที่แน่นอนตามกำหนดไว้ การควบคุมแบบนี้ระดับของของเหลวจัดเป็นปัจจัยที่สำคัญมาก การเปลี่ยนแปลงของการไหลที่ทำการปรับค่าไม่มีความสำคัญมากนัก ตัวอย่างของการควบคุมระดับแบบนี้ ได้แก่ การควบคุมระดับของเหลวในเครื่องปฏิกรณ์ โดยทำการปรับค่าการไหลที่จะส่งต่อไปยังถังพัก

ข. การควบคุมระดับแบบเฉลี่ย (Averaging level control)

การควบคุมระดับแบบนี้แตกต่างจากแบบแรก คือ ระดับของของเหลวในถังพักไม่จำเป็นต้องได้ค่าแน่นอนตามที่กำหนดไว้ โดยระดับสามารถเปลี่ยนแปลงได้ภายในช่วงที่กำหนด

วัตถุประสงค์หลักของการควบคุมระดับแบบนี้ คือ ทำการควบคุมให้อัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกมีค่าน้อยที่สุดหรือทำการปรับค่าการไหลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดความเร็วในการไหลน้อยที่สุด เพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนต่อกระบวนการที่อยู่ถัดมา ตัวอย่างของการควบคุมระดับแบบนี้ ได้แก่ การควบคุมระดับของของเหลวในถังพักก่อนจะส่งไปยังหน่วยที่สำคัญในกระบวนการ (Critical unit) จากที่กล่าวมาสามารถสรุปได้ว่าการควบคุมระดับแบบเฉลี่ยจะพิจารณาถึงข้อสำคัญ 2 ประการ คือ

1. ให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของการไหลขาออกจากถังพัก (Surge tank) ราบเรียบมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้
2. ควบคุมระดับของเหลวภายในถังพักไม่ให้เกิดต่างจากระดับที่ใช้งานในสภาวะปกติมากเกินไป

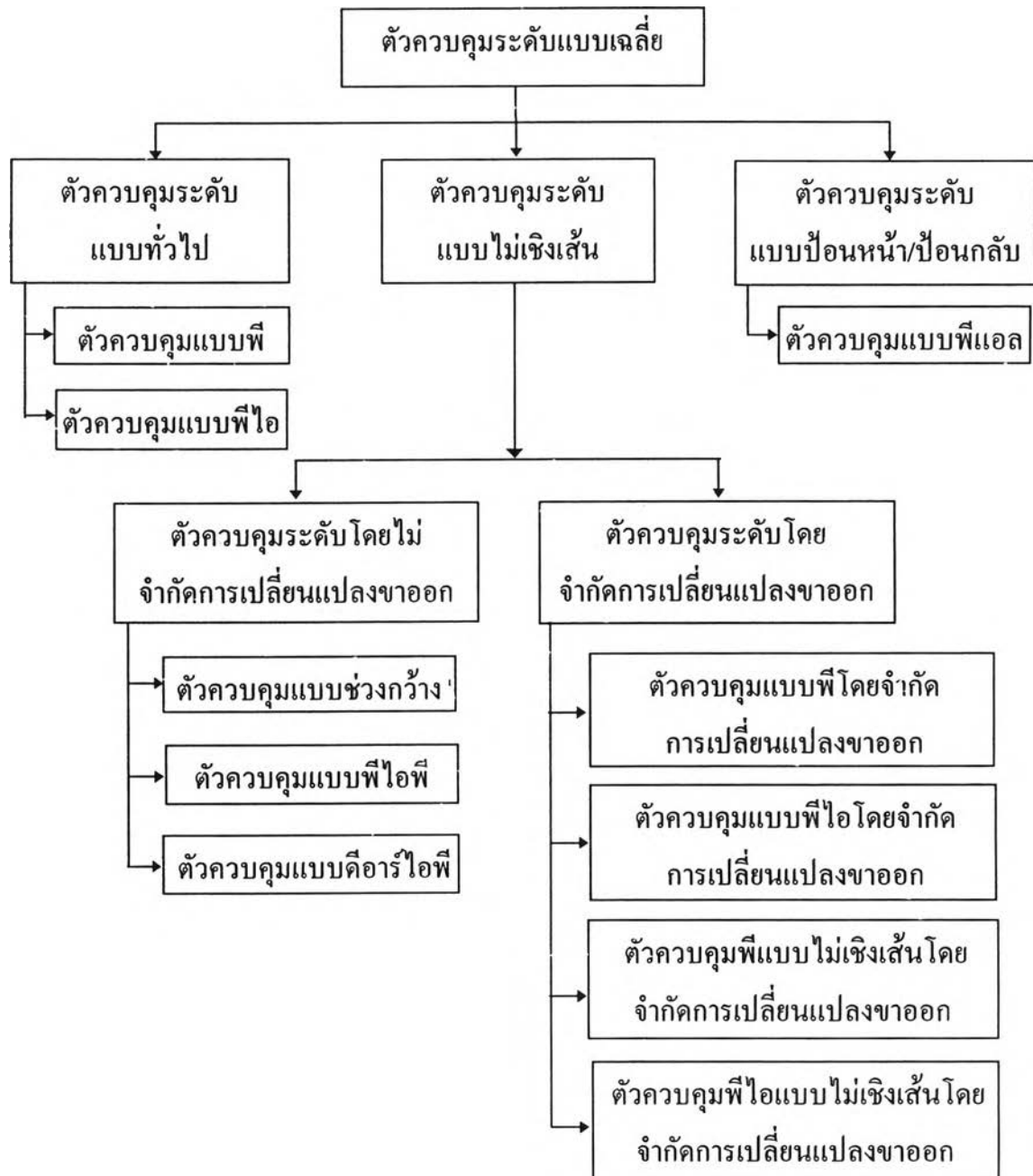
ความแตกต่างระหว่างการควบคุมระดับทั้ง 2 แบบสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.1 ดังนี้

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการควบคุมระดับแบบแน่นอน (Tight level control) และการควบคุมระดับแบบเฉลี่ย (Averaging level control)

ตัวแปร Variable	การควบคุมระดับแบบแน่นอน (Tight level control)	การควบคุมระดับแบบเฉลี่ย (Averaging level control)
ตัวแปรควบคุม : ระดับ	การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมควรมีค่าน้อยที่สุด	สามารถเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรควบคุมได้ภายในช่วงที่กำหนด เช่น 20-80%
ตัวแปรปรับค่า : การไหล	สามารถเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรปรับค่าได้ตามต้องการเพื่อควบคุมให้ได้ค่าระดับที่แน่นอนตามที่กำหนดไว้	การเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับค่าควรให้มีค่าน้อยที่สุด โดยที่ควบคุมให้การเปลี่ยนแปลงของระดับของเหลวอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้

3.4 การออกแบบตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ย

จากผลงานวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมระดับแบบเฉลี่ยที่ผ่านมาสามารถแบ่งตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยที่สนใจศึกษาออกได้เป็น 3 กลุ่มดังแสดงได้ในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนภาพการออกแบบตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ย

โดยสามารถสรุปสมการของตัวควบคุมระดับแบบเฉื่อยชนิดต่าง ๆ ดังกล่าวได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สรุปสมการของตัวควบคุมระดับแบบเฉื่อยชนิดต่าง ๆ

ตัวควบคุมแบบพี	ตัวควบคุมแบบพีไอ
$CO = Bias + K_c e$	$CO = Bias + K_c e + \frac{K_c}{\tau_I} \int_0^t edt$
ตัวควบคุมแบบพีแอล	ตัวควบคุมแบบช่วงกว้าง
$CO1 = K_c e$ $CO2 = e^{-\Delta t/\tau_F} (CO0) + (1 - e^{-\Delta t/\tau_F}) Q_{in0}$ $CO0 = CO2$ $Q_{in0} = Q_{in}$ $CO = Bias + (CO1 + CO2)$	$CO = Bias + K_c e + \frac{K_c}{\tau_I} \int_0^t edt$ $K_c = \frac{dC_p}{de} = (1 + e K \ln 25)(25^{ e K})(K_{c0})$ $\tau_I = \frac{\tau_{I0}}{(1 + e K \ln 25)(25^{ e K})}$
ตัวควบคุมแบบพีไอพี	ตัวควบคุมแบบคิอาร์ไอพี
For $ e \leq e_b$ $CO = Bias + K_c e$ For $ e \geq e_b$ $CO = Bias + K_c e + \frac{K_c}{\tau_I} \int_0^t (e \pm e_b) dt$	For $ e \leq e_b$ $CO = Bias + K_c e + \frac{K_c}{\tau_{I2}} \int_0^t edt$ For $ e \geq e_b$ $CO = Bias + K_c e + \frac{K_c}{\tau_{I1}} \int_0^t edt$ เมื่อ $\tau_{I2} > \tau_{I1}$

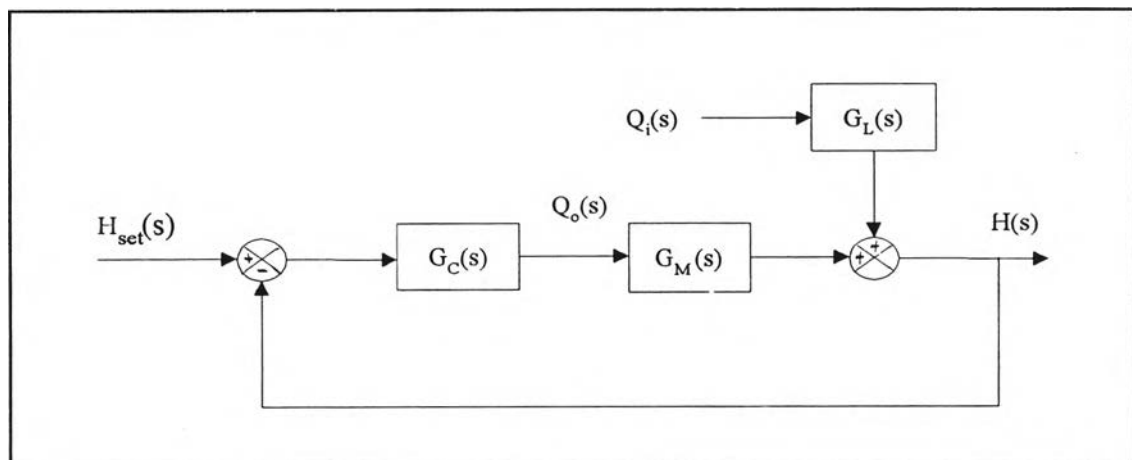
ตัวควบคุมแบบพีโดยจำกัด การเปลี่ยนแปลงขาออก	ตัวควบคุมแบบพีไอโดยจำกัด การเปลี่ยนแปลงขาออก
$CO = Bias + K_c e$ $CO_{new} = CO ;$ $\Delta CO = CO_{new} - CO_{old} ;$ if $\Delta CO \leq CO_{max} (= MRCO \times Ts)$ $CO = CO_{new}$ else if $e < 0$ $CO = CO_{old} + CO_{max}$ else $CO = CO_{old} - CO_{max}$ end end	$CO = Bias + K_c e + \frac{K_c}{\tau_I} \int_0^t edt$ $CO_{new} = CO$ $CO = CO_{new} - CO_{old}$ if $\Delta CO \leq CO_{max} (= MRCO \times Ts)$ $CO = CO_{new}$ else if $e < 0$ $CO = CO_{old} + CO_{max}$ else $CO = CO_{old} - CO_{max}$ end end
ตัวควบคุมพีแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัด การเปลี่ยนแปลงขาออก	ตัวควบคุมพีไอแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัด การเปลี่ยนแปลงขาออก
$CO = Bias + K_c e$ $K_c = \frac{dC_p}{de} = (1 + e K \ln 25)(25^{ e K})(K_{c0})$ $CO_{new} = CO ;$ $\Delta CO = CO_{new} - CO_{old} ;$ if $\Delta CO \leq CO_{max} (= MRCO \times Ts)$ $CO = CO_{new}$ else if $e < 0$ $CO = CO_{old} + CO_{max}$ else $CO = CO_{old} - CO_{max}$ end end	$CO = Bias + K_c e + \frac{K_c}{\tau_I} \int_0^t edt$ $K_c = \frac{dC_p}{de} = (1 + e K \ln 25)(25^{ e K})(K_{c0})$ $\tau_I = \frac{\tau_{I0}}{(1 + e K \ln 25)(25^{ e K})}$ $CO_{new} = CO$ $\Delta CO = CO_{new} - CO_{old}$ if $\Delta CO \leq CO_{max} (= MRCO \times Ts)$ $CO = CO_{new}$ else if $e < 0$ $CO = CO_{old} + CO_{max}$ else $CO = CO_{old} - CO_{max}$ end end

จากแผนภาพการออกแบบตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยดังกล่าว สามารถสรุปข้อมูลและวิธีการปรับจูนตัวควบคุมแต่ละชนิดได้ดังต่อไปนี้

3.5 การควบคุมระดับแบบทั่วไป (Conventional level control)

ไดนามิกของการควบคุมระดับ (Level control dynamics)

ระบบที่นำมาใช้ศึกษาเป็นระบบถังพักที่ไม่มีการควบคุมการไหลขาเข้าและการไหลขาออกสามารถปรับค่าได้โดยใช้ตัวควบคุมระดับ (Level controller) แสดงได้ดังรูป 3.1 ซึ่งสามารถเขียนในรูปบล็อกไดอะแกรม (Block diagram) ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมระดับของเหลวในถังพัก

จากระบบการควบคุมของเหลวในถังพักดังแสดงในรูปที่ 3.1 สามารถอธิบายได้โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$\frac{d(\rho V)}{dt} = \rho Q_i - \rho Q_o$$

กำหนดให้ค่าความหนาแน่น (ρ) คงที่ สามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูปที่ง่ายขึ้นได้

ดังนี้

$$\frac{dH}{dt} = \frac{1}{A} Q_i - \frac{1}{A} Q_o \quad (3-1)$$

โดยการใช้วิธีลาปลาซทรานสฟอร์ม (Laplace transforming) จะได้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน

ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับของเหลว (H) ในถังพักกับอัตราการไหลของของเหลวขาเข้า (Q_i) และอัตราการไหลของของเหลวขาออก (Q_o) ดังนี้

$$sH(s) = \frac{1}{A} Q_i(s) - \frac{1}{A} Q_o(s)$$

$$H(s) = \frac{1}{As} Q_i(s) - \frac{1}{As} Q_o(s) \quad (3-2)$$

จากบล็อกไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 3.3 ได้

$$G_M(s) = \frac{H(s)}{Q_o(s)} = -\frac{1}{As} \quad (3-3)$$

$$G_L(s) = \frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{1}{As} \quad (3-4)$$

สำหรับระบบลูปปิด (Closed loop system) ที่มีตัวควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback controller) ซึ่งมีทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน (Transfer function) คือ $G_c(s)$ ได้

$$H(s) = G_L(s)Q_i(s) + G_M(s)G_c(s)(H(s)_{set} - H(s)) \quad (3-5)$$

ทำการจัดรูปใหม่ได้

$$H(s) = \left[\frac{G_L(s)}{1 + G_c(s)G_M(s)} \right] Q_i(s) + \left[\frac{G_c(s)G_M(s)}{1 + G_c(s)G_M(s)} \right] H(s)_{set} \quad (3-6)$$

$$Q_o(s) = \left[\frac{G_L(s)G_c(s)}{1 + G_c(s)G_M(s)} \right] Q_i(s) + \left[\frac{G_c(s)}{1 + G_c(s)G_M(s)} \right] H(s)_{set} \quad (3-7)$$

จากสมการที่ (3-6) และ (3-7) จะได้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของลููปปิดดังนี้

$$\frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{G_L(s)}{1 + G_c(s)G_M(s)}$$

$$\frac{H(s)}{H_{set}(s)} = \frac{G_c(s)G_L(s)}{1 + G_c(s)G_M(s)}$$

$$\frac{Q_o(s)}{Q_i(s)} = \frac{G_c(s)G_L(s)}{1 + G_c(s)G_M(s)}$$

$$\frac{Q_o(s)}{H_{set}(s)} = \frac{G_c(s)}{1 + G_c(s)G_M(s)}$$

โดยสมการคุณลักษณะ (Characteristic equation) ของลููปปิดในระบบ คือ

$$1 + G_c(s)G_M(s) = 0 \quad (3-8)$$

การควบคุมระดับแบบทั่วไปที่นำมาใช้ในการควบคุมระดับของเหลวแบบเฉลี่ยแบ่ง

ออกเป็น 2 ชนิด คือ

3.5.1 ตัวควบคุมแบบพี (Proportional controller)

ตัวควบคุมแบบพีเป็นตัวควบคุมที่มีค่าตัวควบคุมขาออกเป็นสัดส่วนกับสัญญาณความ

ผิดพลาดสามารถเขียนสมการในรูปโดเมนของเวลาได้ดังนี้

$$CO(t) = \text{Bias} + K_c e(t)$$

$$e(t) = R(t) - B(t)$$

เมื่อ $CO(t) =$ ตัวควบคุมขาออก

$$e(t) = \text{สัญญาณความผิดพลาด}$$

$$R(t) = \text{เซ็ทพอยน์}$$

$$B(t) = \text{ค่าตัวแปรควบคุมที่วัดได้}$$

จากบล็อกไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 3.3 ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของตัวควบคุมแบบพีคือ

$$G_c(s) = K_L \quad (3-9)$$

ได้สมการคุณลักษณะ (Characteristic equation) ของลูปปิดในระบบ คือ

$$1 + K_L \left(\frac{1}{As} \right) = 0 \quad (3-10)$$

จากสมการที่ (3-10) ได้รากของสมการ คือ

$$s = -K_L / As$$

กำหนดให้

$$\tau_H = A / K_L \quad (3-11)$$

ได้

$$s = -1 / \tau_H \quad (3-12)$$

จากสมการคุณลักษณะ (Characteristic equation) ของลูปปิดเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีจะเห็นว่า มีรากของสมการเป็นจำนวนจริงที่มีค่าลบเพียงเทอมเดียว เพราะฉะนั้นระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีจะเสถียรและค่าเกนของตัวควบคุมจะบอกถึงความเร็วในการตอบสนองของระบบ โดยความเร็วในการตอบสนองจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าเกนของตัวควบคุมเพิ่มขึ้น

ข้อดีของตัวควบคุมแบบพี คือ ทำหน้าที่เป็นตัวกรองสัญญาณรบกวนขาเข้า (Input noise filter) และให้การเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกเพิ่มมากขึ้นทีละน้อย

อย่างไรก็ตามพบว่าตัวควบคุมแบบพีมีข้อเสีย คือ เกิดออสซิลเลชันที่สถานะคงตัวเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของการไหลขาเข้าไปเป็นสภาวะการทำงานใหม่

3.5.2 ตัวควบคุมแบบพีไอ (Proportional integral controller)

ตัวควบคุมแบบพีไอสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการ โดเมนของเวลาได้ดังนี้

$$CO(t) = \text{Bias} + K_c \left[e(t) + \tau_I \int_0^t e(t) d(t) \right]$$

จากบล็อกไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 3.3 ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของตัวควบคุมแบบ

พีไอ คือ

$$G_c(s) = K_L \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} \right) \quad (3-13)$$

ได้สมการคุณลักษณะ (Characteristic equation) ของลูปปิดในระบบ คือ

$$1 + K_L \left(\frac{\tau_I s + 1}{\tau_I s} \right) \left(\frac{1}{As} \right) = 0$$

$$\tau_I \tau_H s^2 + \tau_I s + 1 = 0 \quad (3-14)$$

จากสมการที่ (3-12) ได้รากของสมการ คือ

$$s = -\frac{1}{2\tau_H} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{\tau_H^2} - \frac{4}{\tau_I \tau_H}} \quad (3-15)$$

จะได้สัมประสิทธิ์การแดมป์ (Damping coefficient) คือ

$$\xi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\tau_I}{\tau_H}} \quad (3-16)$$

ที่แดมป์พอดี (Critical damping) หรือ $\xi = 1$ ได้

$$\tau_I = 4\tau_H$$

จากสมการที่ (3-16) จะเห็นได้ว่าการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอกับการควบคุมระดับของเหลวส่งผลให้ระบบเกิดแดมป์ขาด (Underdamped) ได้

ข้อดีของตัวควบคุมแบบพีไอ คือ ช่วยลดปัญหาออสซิลเลชัน เนื่องจากระดับของเหลวจะเข้าสู่ค่าเซ็ทพอยท์ (Set point) ที่กำหนด

อย่างไรก็ตามการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอก็มีข้อเสีย คือ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของการไหลขาออกมากกว่าตัวควบคุมแบบพี โดยการไหลขาออกมักจะเกิดโอเวอร์ชูท (Overshoot) ที่สถานะคงตัวใหม่ ถึงแม้ว่าจะทำการปรับจูนโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแดมป์ (Damping coefficient) มากกว่า 1 ซึ่งโอเวอร์ชูทดังกล่าวจะเกิดปัญหาย่างยิ่งในกรณีที่ในระบบใช้ลักษณะเก็บของเหลวที่มีจำนวนมากกว่า 1 วางต่อเนื่องกัน ซึ่งค่าโอเวอร์ชูทดังกล่าวจะเกิดต่อเนื่องกันไปตามลำดับโดยมีค่าแอมพลิจูดมากขึ้นเรื่อย ๆ

เกนของตัวควบคุม (Controller gain)

ค่าเกนของตัวควบคุม K_L ที่ใช้ในสมการมีหน่วยเป็น $m^3 \text{ min}^{-1} m^{-1}$ ตัวควบคุมในระบบจริงมีค่าเกนไร้หน่วย (Dimensionless gain) คือ K_c (psi/psi in pneumatic) K_L เป็นค่าเกนของลูปที่เกิดจากเกนของตัวควบคุม (Controller gain) K_c คูณด้วยค่าเกนของตัวส่งสัญญาณระดับ (Level transmitter gain) K_T และหารด้วยค่าเกนของวาล์วควบคุม (Control valve gain) K_V ดังนี้

$$K_L = \frac{K_c K_T}{K_V} \quad (3-17)$$

โดย $K_T =$ ช่วงกว้างของสัญญาณควบคุม/ ช่วงกว้างของตัวส่งสัญญาณ (Signal range / ΔH)

$K_V =$ ช่วงกว้างของสัญญาณควบคุม/ อัตราการไหลขาออกสูงสุด (Signal range / $Q_{o,max}$)

ซึ่งจะมีค่าคงที่ถ้าวาล์วมีคุณลักษณะของการติดตั้งแบบเชิงเส้น (Linear installed characteristic)

เนื่องจากโดยทั่วไปตัวส่งสัญญาณ (Transmitters), ตัวควบคุม (Controllers) และวาล์ว (Valves) มีช่วงกว้างของสัญญาณเหมือนกัน (เช่น 3-15 psi) เพราะฉะนั้น

$$K_L = \frac{K_c Q_{o,max}}{\Delta H} \quad (3-18)$$

ถ้า τ_V ถูกนิยามว่าเป็นค่าเวลาที่ใช่ (Hold-up time) ในถังได้

$$\tau_V = \frac{(\Delta H)A}{Q_{o,max}} \quad (3-19)$$

จากสมการที่ (3-11), (3-18) และ (3-19) ได้

$$\tau_H = \tau_V / K_c \quad (3-20)$$

ผลที่ได้จากการตอบสนองของระบบควบคุมระดับแบบเฉลี่ยในถังพักสามารถแสดงได้

โดยทำการเลียนแบบดิจิทัล (Digital simulation) โดยใช้ถังพักมาตรฐานซึ่งนิยามดังต่อไปนี้

พื้นที่หน้าตัดของถัง $A = 1$ ลูกบาศก์เมตร

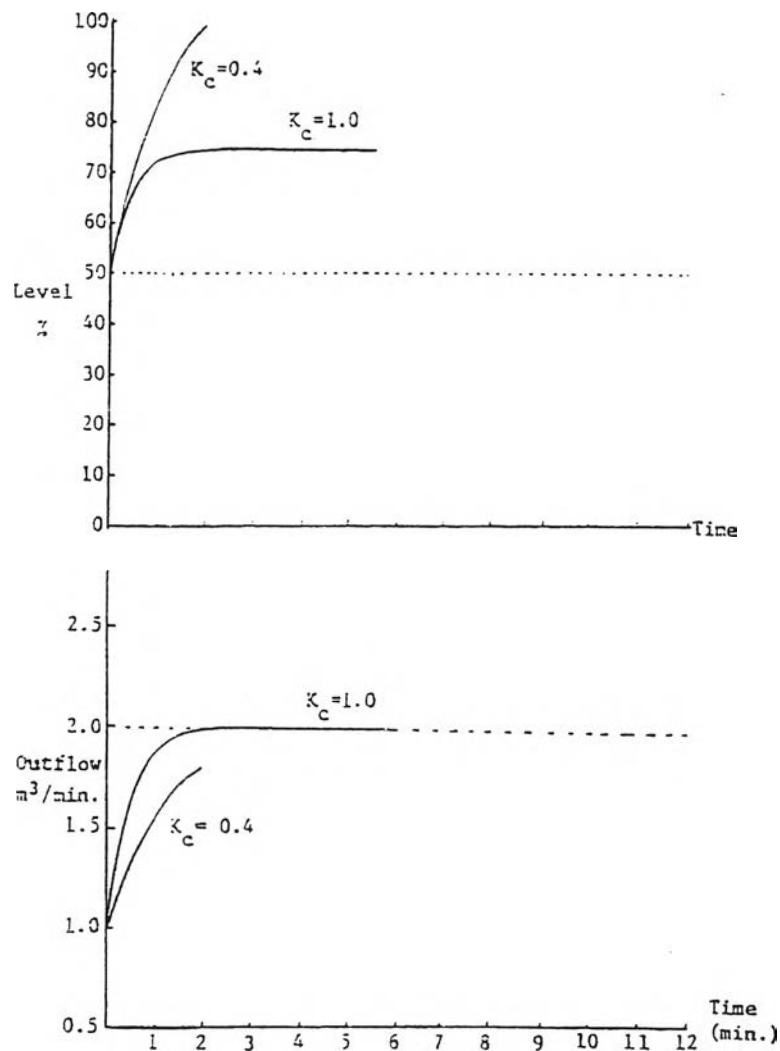
ช่วงกว้างของตัวส่งสัญญาณระดับ $\Delta H = 2$ เมตร

อัตราการไหลขาออกสูงสุด $Q_{o,max} = 4$ ลูกบาศก์เมตร/ นาที

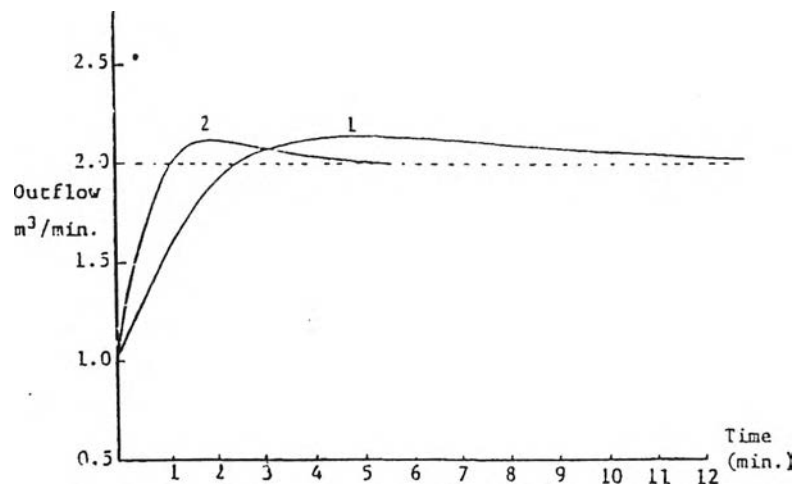
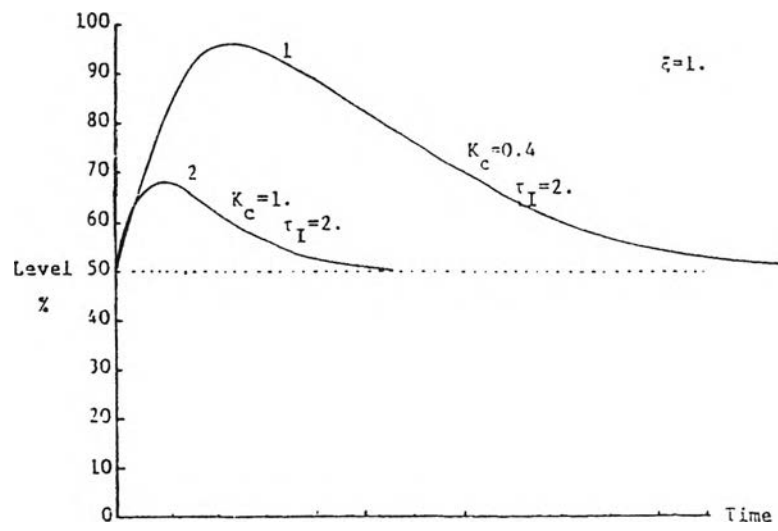
ค่าเริ่มต้นที่สถานะคงตัวของระดับ = 50% full scale

ค่าเริ่มต้นที่สถานะคงตัวของอัตราการไหล = 1 ลูกบาศก์เมตร/ นาที

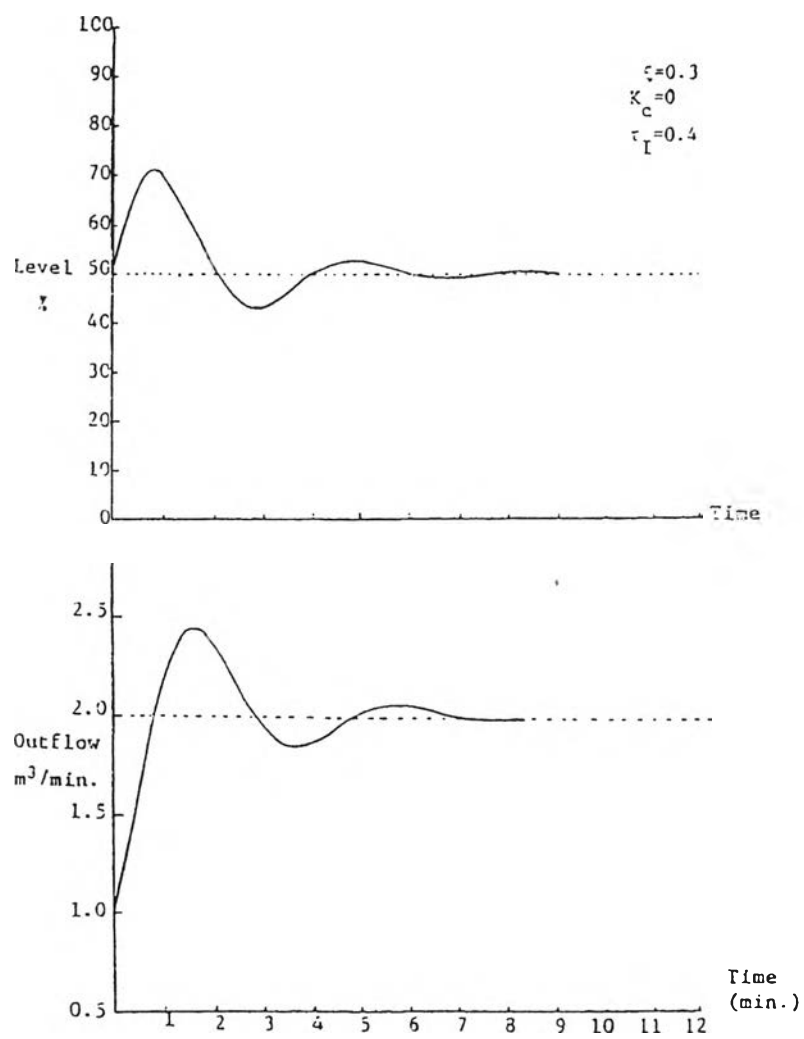
ผลที่ได้จากการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีและพีไอโดยใช้ถังพักมาตรฐานดังกล่าว เมื่อค่าการรบกวนโหลด (Load disturbance) ในการไหลขาเข้าเพิ่มขึ้นขึ้นเท่ากับ 100% สเต็ป แสดงได้ดังรูป 3.4, 3.5 และ 3.6



รูปที่ 3.4 ผลที่ได้จากการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพี



รูปที่ 3.5 ผลที่ได้จากการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอ



รูปที่ 3.6 ผลที่ได้จากการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอเมื่อระบบเป็นแบบแฉวมพ์ขาด

(Underdamped)

จากรูปที่ 3.4 จะเห็นว่าเมื่อทำการปรับจูนตัวควบคุมแบบพีโดยใช้ค่าเกณฑ์ การไหลขาออกจะเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ และระดับของเหลวจะล้นออกจากถังพัก เมื่อใช้ค่าเกณฑ์เท่ากับ 1 การเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกจะเร็วขึ้น โดยระดับของเหลวอยู่ในขอบเขตที่กำหนดไว้ แต่จะเกิดอ็อพเซ็ทของระดับของเหลวที่สภาวะคงตัวเท่ากับ 25% ทำให้ความจุของถังพักลดลง

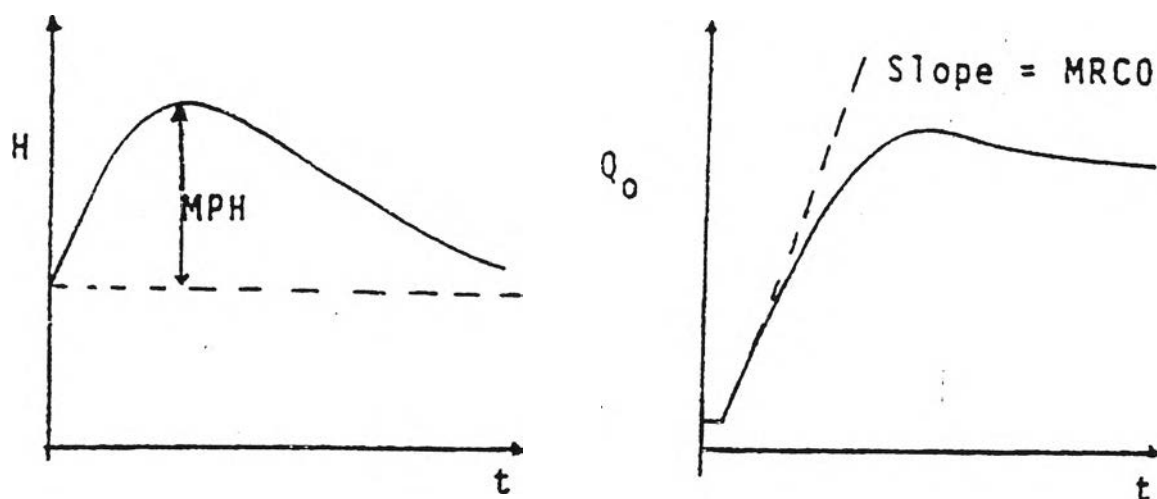
จากรูปที่ 3.5 ตัวควบคุมแบบพีไอถูกปรับจูนเพื่อให้เกิดแดมป์พอดี้ (Critical damping) ($\xi=1$) ระดับของเหลวจะเข้าสู่เซ็ทพอยน์ที่กำหนดโดยใช้เวลาที่เหมาะสมทั้ง 2 กรณี แต่การไหลขาออกจะเกิดโอเวอร์พีคขึ้น เมื่อระบบเป็นแบบแดมป์ขาด (Underdamped) ($\xi < 1$) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 พบว่าการไหลขาออกเกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะขึ้นลง (Fluctuation) มากขึ้น

การปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีและพีไอ

ในที่นี้ขอกล่าวถึงการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีและพีไอสำหรับการควบคุมระดับแบบเฉลี่ยที่เสนอขึ้นโดย Cheung และ Luyben ในปี 1979 ซึ่งได้เสนอแผนภาพการออกแบบ (Design chart) สำหรับการตั้งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีและพีไอในการควบคุมระดับของเหลวแบบเฉลี่ย (Averaging level control) ได้อย่างมีเหตุผลซึ่งการเสนอแผนภาพการปรับจูนดังกล่าวมีวัตถุประสงค์หลัก คือ ทำให้เห็นว่าการปรับจูนตัวควบคุมแบบพีและพีไอสำหรับการควบคุมระดับแบบเฉลี่ยสามารถทำได้ง่าย โดยการระบุค่าระดับของเหลวสูงสุดในถังพักและอัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกสูงสุดที่ต้องการให้เกิดขึ้นในกระบวนการ

การระบุค่าระดับของเหลวสูงสุดและอัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกสูงสุด

เนื่องจากตัวแปรที่สำคัญที่สุดสำหรับการตอบสนองของระบบการควบคุมระดับแบบ
เฉลี่ย คือ ระดับของเหลวสูงสุดหรือค่าพีกระดับสูงสุด (Maximum peak height: MPH) และอัตรา
การเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกสูงสุด (Maximum rate of change in Outlet flow: MRCO) ตัว
แปรทั้งสองดังกล่าวสามารถอธิบายดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ระดับของเหลวสูงสุด (MPH) และอัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกสูงสุด
(MRCO) ที่ได้จากกราฟแสดงผลการตอบสนองของการควบคุมระดับของเหลว
แบบเฉลี่ย

โดยค่าระดับของเหลวสูงสุด (MPH) เป็นตัวบอกระดับความสูงของของเหลวในถัง
 พักต้องอยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดไว้ ส่วนอัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกสูงสุด
 (MRCO) บอกถึงความเร็วของการเปลี่ยนแปลงการไหลที่สามารถเกิดขึ้นได้โดยไม่ส่งผลกระทบ
 ต่อกระบวนการถัดไป เมื่อทราบค่าพารามิเตอร์ของระบบและการรบกวนสูงสุดที่คาดว่าจะ
 เกิดขึ้น สิ่งที่ต้องการทราบถัดมา คือ ค่า MPH และค่า MRCO ขึ้นกับการตั้งค่าพารามิเตอร์ของ
 ตัวควบคุมอย่างไร

ข้อมูลดังกล่าวทราบได้จากทรานสเฟอ์ฟังก์ชันของลูฟปิด โดเมนของลาปลาซทราน
 สเฟอ์ฟังก์ชันสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของโดเมนของเวลา ซึ่งสามารถแก้สมการเพื่อให้
 ทราบถึงการตอบสนองของระบบได้

ตัวควบคุมแบบพี

สำหรับตัวควบคุมแบบพีจากสมการที่ (3-6) และ (3-7) ได้ทรานสเฟอ์ฟังก์ชันของลูฟ
 ปิด คือ

$$\frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{1}{K_L(\tau_H s + 1)} \quad (3-6a)$$

$$\frac{Q_o(s)}{Q_i(s)} = \frac{1}{\tau_H s + 1} \quad (3-7a)$$

สมมุติว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็ปในการไหลขาเข้า Q_i ด้วยขนาด ΔQ_i สมการ
 ที่ (3-6a) และ (3-7a) สามารถเปลี่ยนกลับไปอยู่ในรูปโดเมนของเวลา (Time domain) คือ $H(t)$
 และ $Q_o(t)$ ได้ดังแสดงต่อไปนี้

$$Q_i(s) = \frac{\Delta Q_i}{s}$$

แทนค่า Q_i ลงในสมการที่ (3.6a) และ (3.7a) ได้

$$H(s) = \left(\frac{\Delta Q_i}{s} \right) \frac{1}{K_L(\tau_H s + 1)} \quad (3-6b)$$

$$Q_o(s) = \left(\frac{\Delta Q_i}{s} \right) \frac{1}{(\tau_H s + 1)} \quad (3-7b)$$

เมื่อทำการอินเวอร์สลาปลาซทรานส์ฟอร์มสมการที่ (3-6b) และ (3-7b) ได้

$$H(t) = \frac{\Delta Q_i}{K_L} (1 - e^{-t/\tau_H}) \quad (3-21)$$

$$Q_o(t) = \Delta Q_i (1 - e^{-t/\tau_H}) \quad (3-22)$$

ทำการดิฟเฟอเรนทิเอทสมการที่ (3-22) ได้

$$\left[\frac{dQ_o}{dt} \right]_{t=0} = \frac{\Delta Q_i}{\tau_H} \quad (3-23)$$

จากสมการที่ (3-21) ถึง (3-23) สามารถนิยามถึงการตอบสนองของระบบการควบคุมแบบพีดีได้อย่างสมบูรณ์

จากสมการในรูปโดเมนของเวลาที่สามารถอธิบายการตอบสนองของระบบสามารถนำมาใช้ในการตั้งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม จากการกำหนดค่าระดับของเหลวสูงสุด (MPH) และอัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกสูงสุด (MRCO) สามารถแก้สมการเพื่อทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมได้โดยตรง

สำหรับระบบการควบคุมแบบพีดี ค่าระดับของเหลวสูงสุด (MPH) คือ ค่าอ็อปเซ็ทของระดับของเหลวที่สภาวะคงตัว เมื่อกำหนดให้เวลาในสมการที่ (3.21) เข้าสู่ค่าอนันต์ จะได้ค่าระดับของเหลวที่สภาวะคงตัวดังนี้

$$H_{\text{offset}} = \frac{\Delta Q_i}{K_L} = \text{MPH} \quad (3-21a)$$

แทนสมการที่ (3-18) ลงในสมการที่ (3-21a) ได้

$$\text{MPH} = \frac{\Delta Q_i (\Delta H)}{K_c Q_{o,\text{max}}} \quad (3-21b)$$

หรือ

$$K_c = \frac{\Delta Q_i}{Q_{o,\text{max}}} \left(\frac{\Delta H}{\text{MPH}} \right) \quad (3-21c)$$

จากสมการที่ (3-23) จะได้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลขาออก (MRCO) ดังนี้

$$\left[\frac{dQ_o}{dt} \right]_{t=0} = \frac{\Delta Q_i}{\tau_H} = \text{MRCO} \quad (3-23a)$$

แทนสมการที่ (3-19) และ (3-20) ลงในสมการที่ (3-23a) ได้

$$\text{MRCO} = \frac{\Delta Q_i (K_c Q_{o,\text{max}})}{A \Delta H} \quad (3-23b)$$

$$K_c = \text{MRCO} \frac{A \Delta H}{\Delta Q_i Q_{o,\text{max}}} \quad (3-23c)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (3-21c) และ (3-23c) จะเห็นได้ว่าค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมแบบพีดูถูกกำหนดได้โดยระดับของเหลวสูงสุด (MPH) และอัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกสูงสุด (MRCO) เพียงค่าใดค่าหนึ่ง

จากค่าออฟเซตที่สถานะคงตัว คือ $\Delta Q_i / K_L$ และอัตราการเปลี่ยนแปลงเริ่มต้นของการไหลขาออก คือ $\Delta Q_i / \tau_H = \Delta Q_i (K_L / A)$ ดังนั้น การเพิ่มค่าเกณฑ์จะลดค่าออฟเซต แต่จะเพิ่มอัตราเปลี่ยนแปลงการไหลขาออก

จากตัวอย่างต่อไปนี้จะพิจารณาการปรับจูนตัวควบคุมแบบพีสำหรับถังพักมาตรฐานที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น เมื่อให้ค่าการรบกวนการไหลสูงสุดเท่ากับ 100% ($1 \text{ m}^3/\text{min}$) และให้ค่าอ็อปเซ็ทของระดับของเหลวที่สภาวะคงตัวหรือค่าระดับของเหลวสูงสุด (MPH) เท่ากับ 25% จากสมการที่ (3-21c) สามารถคำนวณค่าเกนของตัวควบคุมได้ดังนี้

$$K_c = \frac{1 \text{ m}^3 / \text{min}}{4 \text{ m}^3 / \text{min}} \times \frac{100\%}{25\%}$$

$$= 1$$

จากสมการที่ (3.23c) ได้

$$\text{MRCO} = 1 \times \frac{1 \text{ m}^3 / \text{min} \times 4 \text{ m}^3 / \text{min}}{2 \text{ m}^3}$$

$$= 2 \text{ m}^3 / \text{min} / \text{min}$$

จากการเปรียบเทียบผลที่ได้ดังกล่าวกับผลที่ได้จากการเลียนแบบพบว่ามีความใกล้เคียงกัน

มาก

ตัวควบคุมแบบพีไอ

สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอจากสมการที่ (3-6) และ (3-7) ได้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน

ของลูปปิด คือ

$$\frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{\tau_I s}{K_L(\tau_I \tau_H s^2 + \tau_I s + 1)} \quad (3-6c)$$

$$\frac{Q_o(s)}{Q_i(s)} = \frac{\tau_I s + 1}{\tau_I \tau_H s^2 + \tau_I s + 1} \quad (3-7c)$$

สมมติว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็ปในการไหลขาเข้า Q_i ด้วยขนาด ΔQ_i สมการ

ที่ (3-6c) และ (3-7c) สามารถเปลี่ยนกลับไปอยู่ในรูปโดเมนของเวลา (Time domain) คือ

$H(t)$ และ $Q_o(t)$ ได้ดังแสดงต่อไปนี้

$$Q_i(s) = \frac{\Delta Q_i}{s}$$

แทนค่า Q_i ลงในสมการที่ (3-6c) และ (3-7c) ได้

$$H(s) = \left(\frac{\Delta Q_i}{s} \right) \frac{\tau_I s}{K_L (\tau_I \tau_H s^2 + \tau_I s + 1)} \quad (3-6d)$$

$$Q_o(s) = \left(\frac{\Delta Q_i}{s} \right) \frac{\tau_I s + 1}{\tau_I \tau_H s^2 + \tau_I s + 1} \quad (3-7d)$$

ทำการอินเวอร์สลาปลาซทรานสฟอร์มสมการที่ (3-6d) และ (3-7d) เมื่อระบบไม่เป็น

แบบแดมป์พอดี (Critical damped); $\alpha^2 \neq 4\beta$ ได้

$$H(t) = \left(\frac{\Delta Q_i}{A} \right) \frac{e^{-r_1 t} - e^{-r_2 t}}{r_2 - r_1} \quad (3-24)$$

$$Q_o(t) = \frac{\Delta Q_i}{\tau_H} \left[\frac{e^{-r_1 t} - e^{-r_2 t}}{r_2 - r_1} + \frac{a}{\beta} + \frac{a}{r_2 - r_1} \left[\frac{e^{-r_2 t}}{r_2} - \frac{e^{-r_1 t}}{r_1} \right] \right] \quad (3-25)$$

ซึ่ง r_1 และ r_2 เป็นรากของสมการ $s^2 + \alpha s + \beta = 0$ และ $\alpha = \frac{1}{\tau_H}$, $\beta = \frac{1}{\tau_H \tau_I}$ และ

$$a = \frac{1}{\tau_I}$$

ถ้า $\alpha^2 = 4\beta$ ได้

$$H(t) = \left(\frac{\Delta Q_i}{A} \right) t e^{\frac{-\alpha t}{2}} \quad (3-26)$$

$$Q_o(t) = \frac{\Delta Q_i}{\tau_H} \left[t e^{\frac{-\alpha t}{2}} + \frac{a}{\beta} \left(1 - \left(1 + \frac{\alpha t}{2} \right) e^{\frac{-\alpha t}{2}} \right) \right] \quad (3-27)$$

จากทั้ง 2 กรณีได้ว่า

$$\left[\frac{dQ_o}{dt} \right]_{t=0} = \frac{\Delta Q_i}{\tau_H}$$

ซึ่งแท้จริงแล้วเป็นผลที่ได้รับจากตัวควบคุมแบบพี เพราะฉะนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงในช่วงเริ่มต้นของการไหลขาออกจะขึ้นอยู่กับค่ากับค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมเท่านั้น

ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไค่อนข้างซับซ้อน ในการคำนวณค่าระดับของเหลวสูงสุดและเวลาที่เกิดพีก สามารถหาได้โดยการดิฟเฟอเรนทิเอทสมการที่ (3-24) หรือ (3-26) และให้เท่ากับศูนย์ ($\frac{dH}{dt} = 0$) จะได้เวลาที่เกิดพีก นำเวลาที่เกิดพีกดังกล่าวแทนกลับลงไปสมการที่ (3-24) หรือ (3-26) จะได้ค่าพีกระดับของเหลว (Peak level: H_{peak})

เมื่อ $\xi < 1$

$$t_{\text{peak}} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{r_2 - r_1} \quad (3-28)$$

$$\Delta H_{\text{peak}} = \left(\frac{\Delta Q_i}{A} \right) \frac{e^{\frac{\alpha t_{\text{peak}}}{2}} \sin\left(t_{\text{peak}} \sqrt{\beta - \frac{\alpha^2}{4}}\right)}{\sqrt{\beta - \frac{\alpha^2}{4}}} \quad (3-29)$$

โดย

$$r_1 = \frac{1}{2\tau_H} \left(-1 + \frac{\sqrt{\xi^2 - 1}}{\xi} \right) \quad (3-30)$$

$$r_2 = \frac{1}{2\tau_H} \left(-1 - \frac{\sqrt{\xi^2 - 1}}{\xi} \right) \quad (3-31)$$

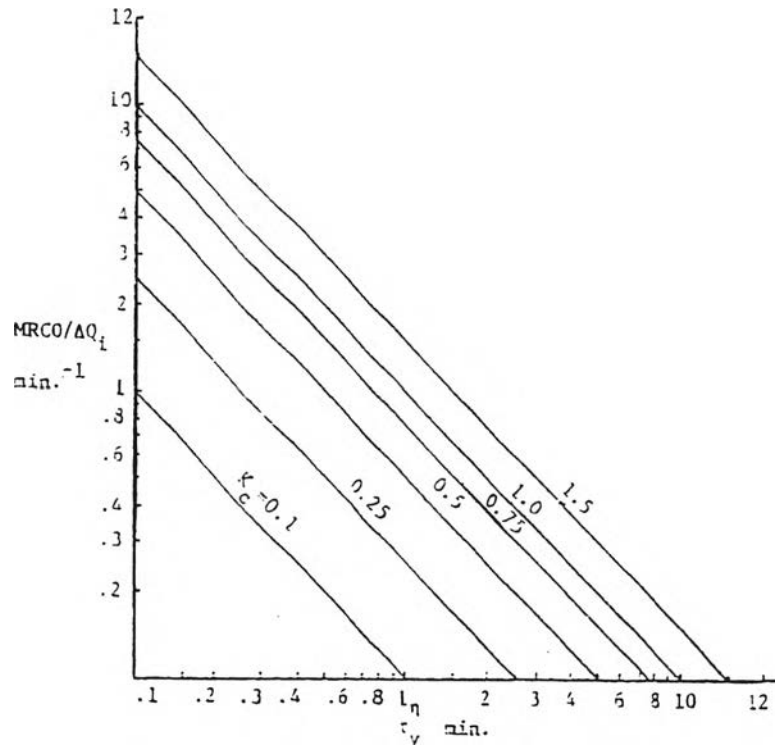
เมื่อ $\xi = 1$

$$t_{\text{peak}} = 2\tau_H \quad (3-32)$$

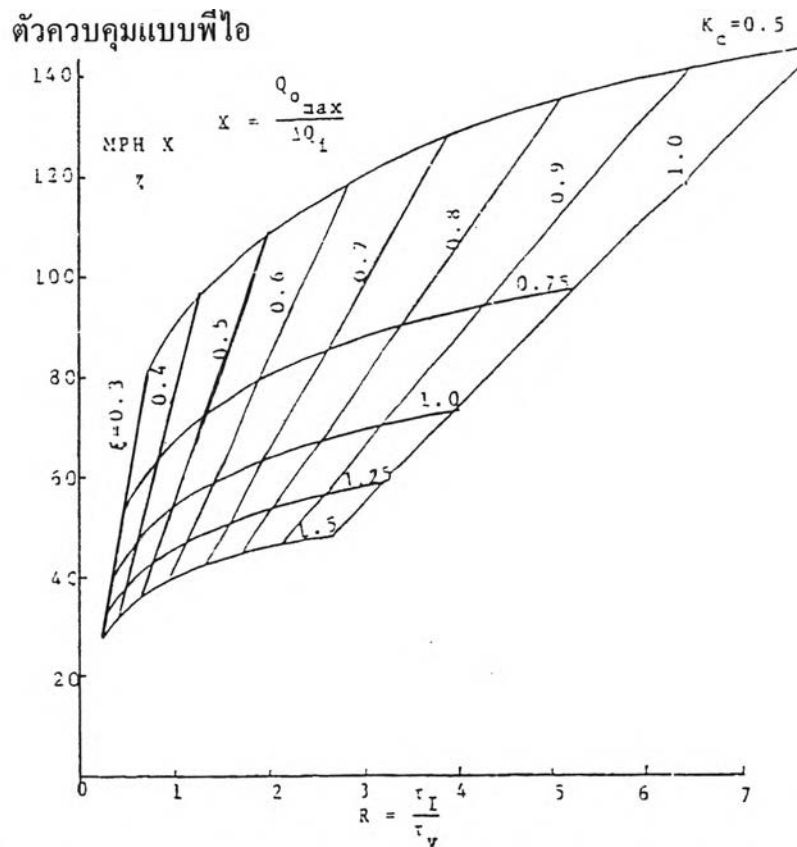
$$\Delta H_{\text{peak}} = 0.736 \left(\frac{\Delta Q_i \tau_v}{K_c A} \right) \quad (3-33)$$

สมการที่ (3-28), (3-29), (3-32), (3-33) และสมการที่ (3-23) สามารถนิยามผลการตอบสนองของระบบการควบคุมแบบพีไอและสามารถนำมาใช้ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอ โดยระบุอัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลสูงสุดและระดับของเหลวสูงสุดที่ต้องการ อย่างไรก็ตามพบว่าการคำนวณทางตัวเลขของสมการดังกล่าวค่อนข้างซับซ้อน ทำให้การปรับจูนยุ่งยากและไม่สะดวกในการใช้งาน เพื่อให้สามารถใช้งานสมการดังกล่าวได้เร็วขึ้น Cheung และ Luyben (1979) จึงได้เสนอแผนภาพการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอขึ้นดังรูปที่ 3.8, 3.9 และ 3.10

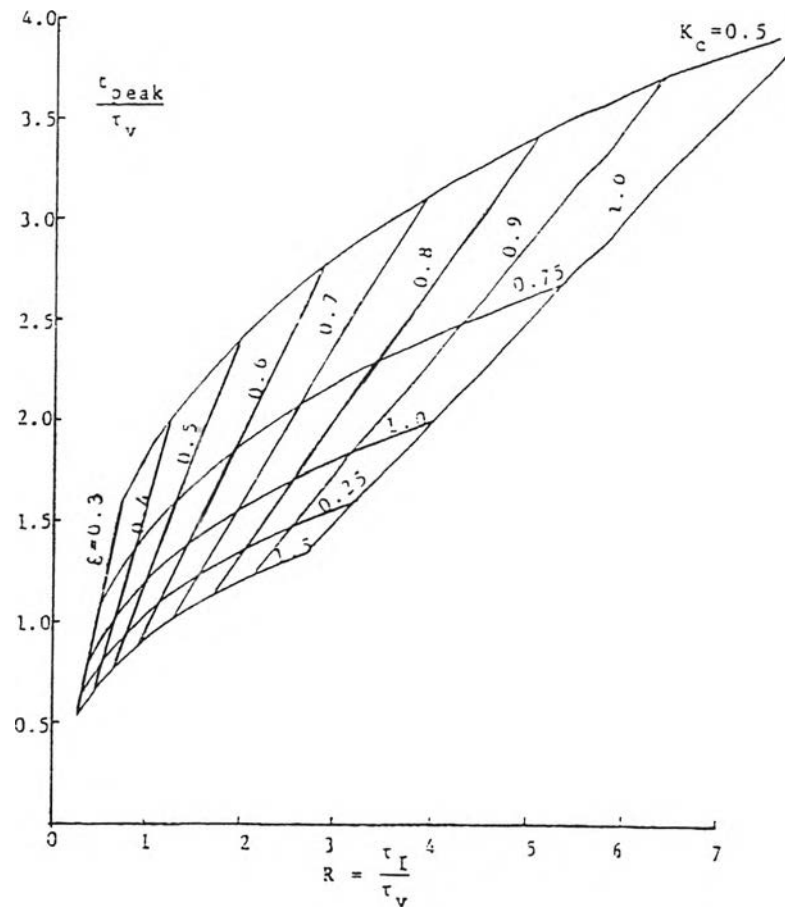
เนื่องจากระบบการควบคุมแบบพีไอมีค่าดีกรีความเป็นอิสระ 2 ตัว เมื่อทราบเวลาที่ใช้ไปในถังพักและขนาดการรบกวนสูงสุด จากแผนภาพการปรับจูนดังกล่าวสามารถนำมาหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับจูนของตัวควบคุม (K_c , τ_i หรือ ξ) เมื่อระบุค่าระดับของเหลวสูงสุด (MPH) และอัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกสูงสุด (MRCO) หรือนำมาหาค่าระดับของเหลวสูงสุด (MPH) และอัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกสูงสุด (MRCO) เมื่อทราบค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับจูนของตัวควบคุม



รูปที่ 3.8 แผนภาพการปรับจูนอัตราการเปลี่ยนแปลงของการไหลขาออกเริ่มต้นของ



รูปที่ 3.9 แผนภาพการปรับจูนค่าพีกระดับของตัวควบคุมแบบพีไอ



รูปที่ 3.10 แผนภาพการปรับจูนค่าเวลาที่เกิดพีคของตัวควบคุมแบบพีไอ

จากแผนภาพการออกแบบดังแสดงในรูปที่ 3.8, 3.9, 3.10 ขั้นตอนการปรับจูนมีดังนี้

1. นิยามค่าการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็ปสูงสุดในการไหลขาเข้า ΔQ_i , อัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของการไหลขาออกที่ต้องการ $\frac{dQ_o}{dt}$ (ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อค่า $t = 0$) และค่าระดับของเหลวสูงสุดที่ต้องการ (Maximum peak height in level)
2. หาค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม K_c จากรูปที่ 3.8
3. อ่านค่าเวลารีเซ็ต (Reset time) τ_I จากรูปที่ 3.9

ส่วนรูปที่ 3.10 สามารถนำมาใช้ในการหาค่าเวลาที่เกิดพีคระดับของของเหลว (Level peak) ขึ้น ในกรณีที่สนใจถึงความเร็วในการตอบสนอง

จากขั้นตอนที่ได้กล่าวมาสามารถแสดงตัวอย่างการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอ เมื่อใช้ระบบถึงพักมาตรฐานที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นดังนี้

กำหนดให้ระบบที่ทำการปรับจูนเป็นดังนี้

พื้นที่หน้าตัดของถัง $A = 1$ ลูกบาศก์เมตร

ช่วงกว้างของตัวส่งสัญญาณระดับ $\Delta H = 2$ เมตร

อัตราการไหลขาออกสูงสุด $Q_{o,max} = 4$ ลูกบาศก์เมตร/นาที

ค่าเริ่มต้นที่สถานะคงตัวของระดับ = 50% full scale

ค่าเริ่มต้นที่สถานะคงตัวของอัตราการไหล = 1 ลูกบาศก์เมตร/นาที

ค่าการรบกวนโหลด (Load disturbance) เท่ากับ 100 % สเต็ป โดยเพิ่มค่าอัตราการไหลขาเข้าจาก 1 ลูกบาศก์เมตร/นาที เป็น 2 ลูกบาศก์เมตร/นาที จะได้ว่า

$$\tau_v = \frac{(\Delta H)A}{Q_{o,max}} = 0.5 \text{ นาที}$$

ถังจะถูกควบคุมเพื่อให้การตอบสนองต่อการเพิ่มขึ้นของการไหลขาเข้าแบบสเต็ป 100% ($1 \text{ m}^3/\text{min}$) มีความคลาดเคลื่อนของระดับสูงสุด 21.5% และอัตราการเปลี่ยนแปลงเริ่มต้นของการไหลขาออกมีค่า $1.5 \text{ m}^3/\text{min}^{-1}\text{min}^{-1}$

ค่าในแกน Y ของรูปที่ 3.8 คือ

$$\frac{\left[\frac{dQ_o}{dt} \right]_{t=0}}{\Delta Q_i} = \frac{1.5}{1} = 1.5$$

ส่วนค่าในแกน X คือ $\tau_v = 0.5$ นาที เพราะฉะนั้นค่าแกนของตัวควบคุมที่อ่านได้ คือ

0.75

การหาค่าเวลารีเซ็ต (Reset time) ของตัวควบคุม τ_I หาได้จากรูปที่ 3.9 โดยค่าในแกน X ของกราฟ คือ

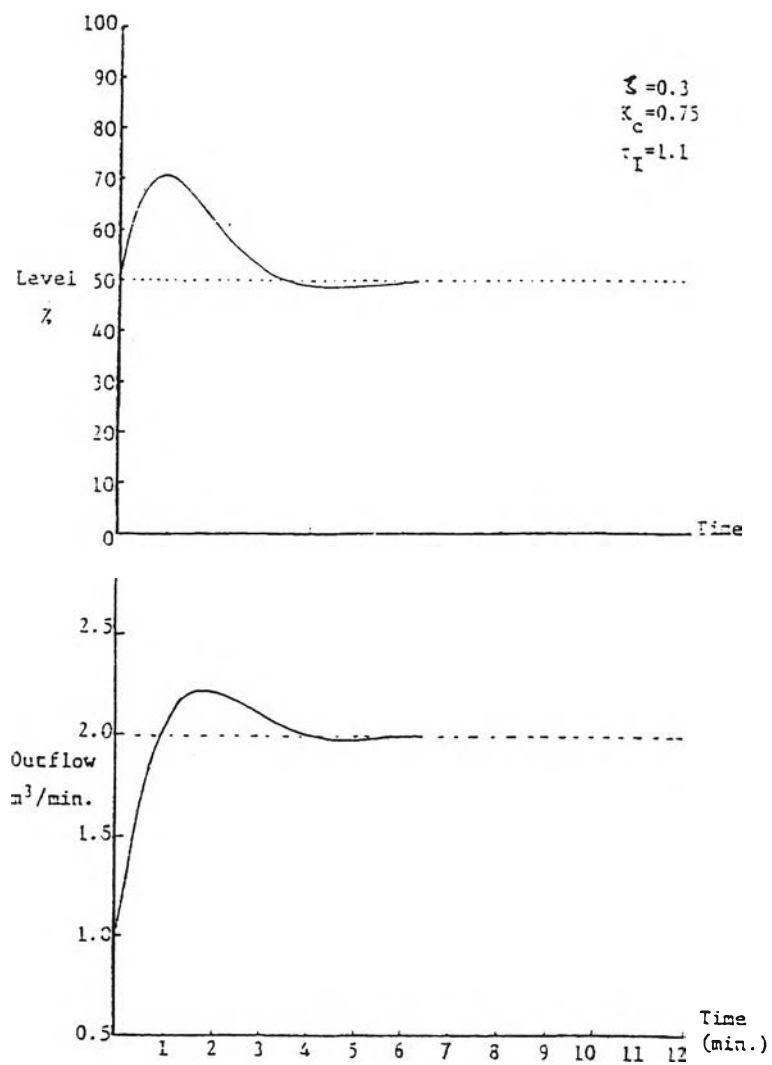
$$\Delta H_{\text{peak}} \frac{Q_{o,\text{max}}}{\Delta Q_i} = (21.5\%) \frac{4 \text{ m}^3 / \text{min}}{1 \text{ m}^3 / \text{min}}$$

จากค่าในแกน X ดังกล่าวและจากค่า $K_c = 0.75$ ค่าในแกน Y จะอ่านได้เท่ากับ $2.6 = \tau_I / \tau_v$ จากค่า $\tau_v = 0.5$ จะได้ค่า $\tau_I = 1.3$ นอกจากนั้นรูปที่ 3.10 ยังสามารถนำมาใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การแคมป์ได้โดย $\xi = 0.7$

จากรูปที่ 3.9 จะได้ค่าเวลาที่เกิดพีก $t_{\text{peak}} = \tau_v(2.08) = 0.5(2.08) = 1.04$ นาที ซึ่งผลการตอบสนองของระดับของเหลวและการไหลขาออกสำหรับระบบที่ทำการเซ็ทค่าตัวควบคุมดังที่ได้กล่าวมาแสดงได้ดังรูปที่ 3.11

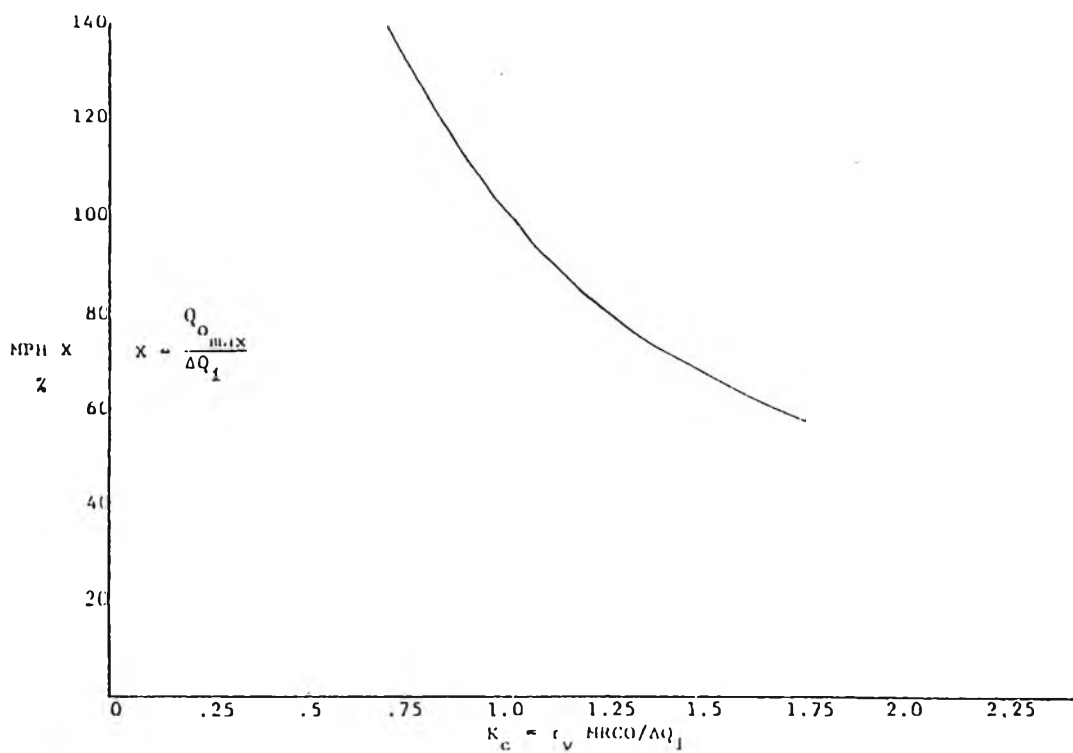
นอกจากแผนภาพการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอแสดงในรูป 3.8, 3.9 และ 3.10 แล้ว (Cheung และ Luyben, 1979) เพื่อให้ผู้ใช้สามารถทำการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ได้สะดวกมากขึ้น Cheung และ Luyben (1980) ได้เสนอการปรับจูนตัวควบคุมแบบพีไอ โดยใช้แผนภาพเพียงภาพเดียว นอกจากนั้นได้ทำการสรุปแผนภาพการปรับจูนค่าพารามิเตอร์

ของตัวควบคุมแบบพีซึ้นด้วย ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.12 และ 3.13

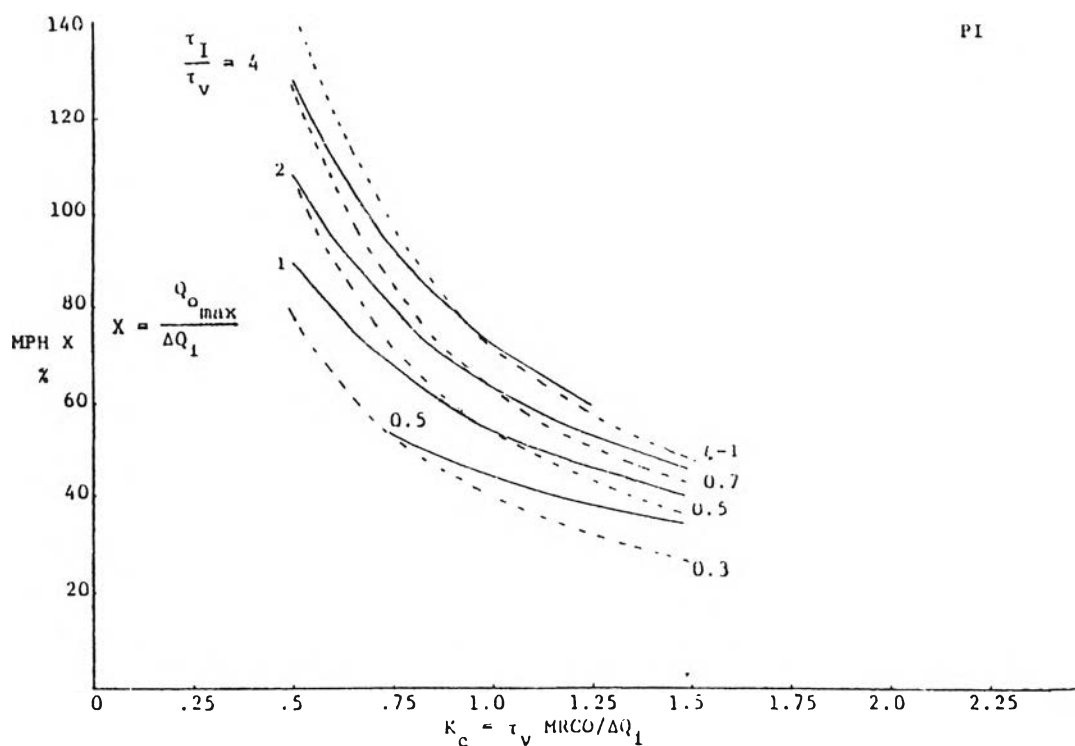


รูปที่ 3.11 ผลการตอบสนองของระดับของเหลวและการไหลขาออกสำหรับตัวอย่างที่

ทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม



รูปที่ 3.12 แผนภาพการปรับจูนตัวควบคุมแบบพี



รูปที่ 3.13 แผนภาพการปรับจูนตัวควบคุมแบบพีไอ

เมื่อ $X = Q_{o,max} / \Delta Q_i$, $K_c = \tau_v (\text{MRCO}) / \Delta Q_i$, $\tau_v = \frac{(\Delta H)A}{Q_{o,max}}$

นอกจากการปรับจูนตัวควบคุมพีและพีไอโดยใช้แผนภาพการปรับจูนดังกล่าวแล้ว Marlin (1995) ได้เสนอการปรับจูนตัวควบคุมแบบพีและพีไอโดยใช้สมการการปรับจูนที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนดังนี้

พิจารณาการควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ตัวควบคุมแบบพี ในกระบวนการที่ไม่สามารถทำการปรับค่าได้เอง (Non-self regulating)

$$\text{จากสมการ} \quad A \frac{dH'}{dt} = Q'_{in} - Q'_{out} \quad (3-34)$$

$$\text{เมื่อ} \quad H' = H - H_s$$

$$Q' = Q - Q_s$$

แทนค่าสมการตัวควบคุมแบบพี

$$Q'_{out} = K_c(H_{sp} - H) = -K_c H' \quad (3-35)$$

ลงในสมการที่ (3-34) เมื่อ $K_c < 0$ ในกรณีของการป้อนกลับในทางลบ (Negative feedback) กำหนดให้ค่าพื้นที่หน้าตัดของถังพักคงที่และ $H_{sp} = H_s$ จากวิธีของลาปลาซทรานสฟอร์ม (Laplace transform) จะได้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันดังนี้

$$\frac{H(s)}{Q_{in}(s)} = \frac{1}{\frac{A}{(-K_c)}s + 1} \quad (3-36)$$

เมื่อเกิดการรบกวนแบบสเต็ปในการไหลขาเข้า $Q_{in} = \Delta Q_i / s$ ได้สมการการปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมแบบพี คือ

$$K_c = \frac{-\Delta Q_{in}}{\Delta H_{max}} \quad (3-37)$$

เมื่อ ΔQ_{in} คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงแบบสตีฟของการไหลขาเข้า

ΔH_{max} คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงระดับสูงสุดที่ยอมรับได้

ทำนองเดียวกันพิจารณาการควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ แทนสม

การของตัวควบคุมแบบพีไอ

$$Q'_{out} = -K_c \left(H' + \frac{1}{\tau_I} \int_0^t H' dt' \right) \quad (3-38)$$

ลงในสมการที่ (3-34) จากวิธีของลาปลาซทรานสฟอร์ม (Laplace transform) จะได้

ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันดังนี้

$$\frac{H(s)}{Q_{in}(s)} = \frac{\left(\frac{\tau_I}{-K_c} \right) s}{\tau^2 s^2 + 2\tau\xi s + 1} \quad (3-39)$$

โดย $\tau = \sqrt{\frac{A\tau_I}{(-K_c)}}$ และ $\xi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\tau_I(-K_c)}{A}}$ (3-40)

ในกรณีที่ $\xi = 1$ เมื่อเกิดการรบกวนแบบสตีฟในการไหลขาเข้า $Q_{in} = \Delta Q_{in} / s$ ทำการอินเวอร์สลาปลาซทรานสฟอร์มจะได้สมการแสดงระดับของเหลวในรูปฟังก์ชันของเวลาดังนี้

$$H' = \left(\frac{\Delta Q t}{A} \right) e^{-t(-K_c)/2A} \quad (3-41)$$

หาเวลาที่ทำให้ระดับของเหลวมีค่าสูงสุดโดยการดิฟเฟอเรนทิเอทสมการที่ (3-41)

แล้วกำหนดให้เท่ากับศูนย์จะได้ค่าเวลาที่ทำให้ระดับของเหลวมีค่าสูงสุด ดังนี้

$$t_{\max} = 2A / K_c \quad (3-42)$$

แทนค่าเวลาที่ทำให้ระดับของเหลวมีค่าสูงสุดจากสมการที่ (3-42) ลงในสมการที่ (3-38)

จะได้สมการการปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมแบบพีไอ คือ

$$\Delta H_{\max} = 0.736 \frac{\Delta Q_{in}}{(-K_c)} \quad (3-43)$$

เมื่อ ΔQ_{in} คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็ปของการไหลขาเข้า

ΔH_{\max} คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงระดับสูงสุดที่ยอมรับได้

เมื่อทราบค่าเกน K_c สามารถปรับจูนค่าเวลารีเซ็ตได้จากสมการที่ (3-40)

$$\tau_I = \frac{4\xi^2 A}{(-K_c)} \quad (3-44)$$

สมการการจูนตัวควบคุมแบบพีและพีไอดังกล่าวสามารถนำมาใช้ได้ทั้งในการปรับจูน

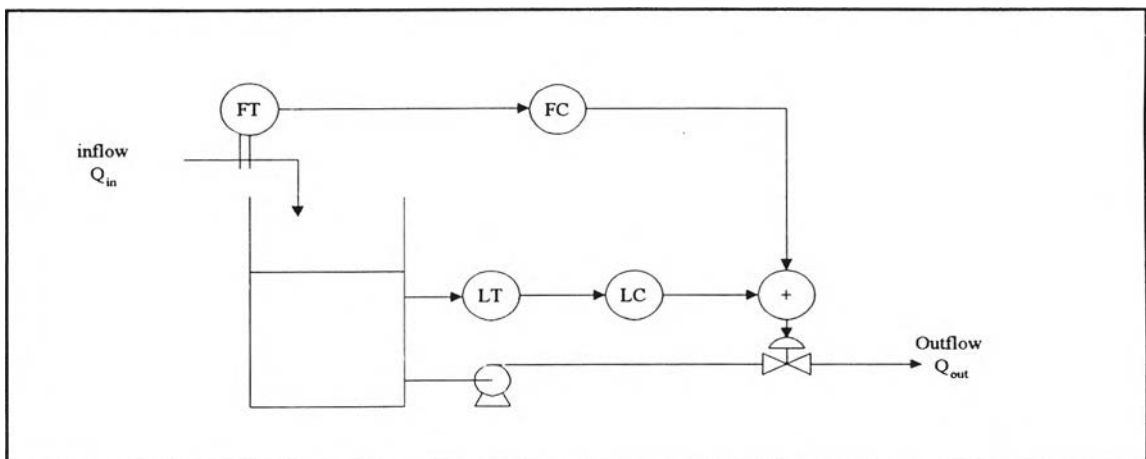
ตัวควบคุมแบบแน่นนอน (Tight level Control) และการปรับจูนตัวควบคุมแบบเฉลี่ย (Averaging level Control)

3.6 การควบคุมระดับแบบป้อนหน้า/ป้อนกลับ (Feedforward/feedback level control)

นอกจากตัวควบคุมระดับแบบป้อนกลับซึ่งได้แก่ ตัวควบคุมแบบพีและพีไอดังได้กล่าวข้างต้นแล้ว ได้มีการนำแผนผังการควบคุมแบบป้อนหน้า/ป้อนกลับ (Feedforward/ feedback scheme) มาใช้ในระบบการควบคุมระดับแบบเฉลี่ย (Luyben และ Buckley, 1977) เรียกตัวควบคุมดังกล่าวว่า ตัวควบคุมแบบพีแอล (Proportional-lag controller)

ตัวควบคุมแบบพีแอล (Proportional-lag controller)

ตัวควบคุมแบบพีแอล (Proportional-lag controller) มีลักษณะเป็นการควบคุมแบบป้อนหน้า/ป้อนกลับ (Feedforward/feedback control) ดังนั้นจึงมีแผนภาพการควบคุมและบล็อกไดอะแกรมแตกต่างจากการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control) ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งแผนภาพการควบคุมและบล็อกไดอะแกรมของการควบคุมระดับของเหลวโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีแอลสามารถแสดงได้ดังนี้

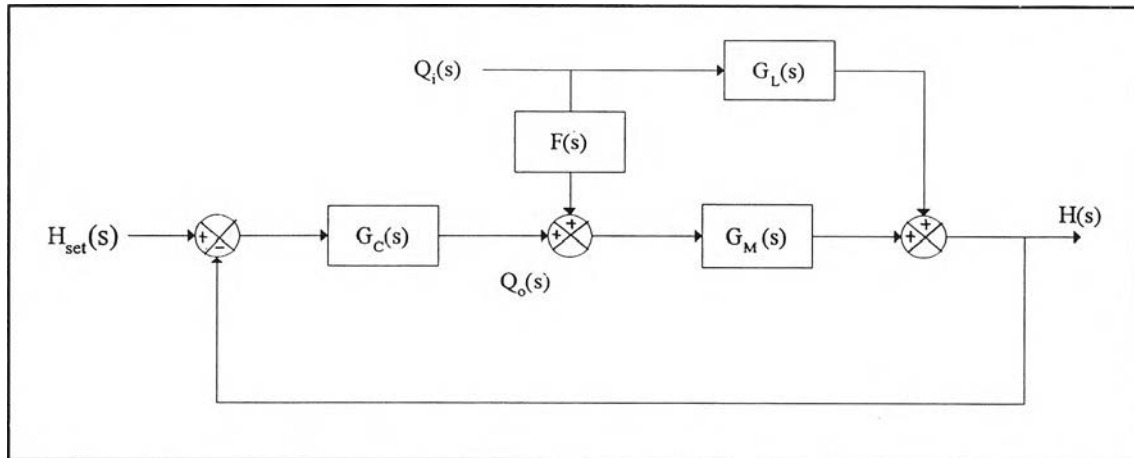


รูปที่ 3.14 แผนภาพการควบคุมระดับของเหลวแบบพีแอลในถังพัก

ไดนามิกของระบบการควบคุมแบบพีแอล

จากบล็อกไดอะแกรมของระบบการควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีแอลสามารถอธิบายโดยใช้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของลูปปิดดังนี้

$$H(s) = \left[\frac{G_L(s) + F(s)G_M(s)}{1 + G_c(s)G_M(s)} \right] Q_i(s) + \left[\frac{G_c(s)G_M(s)}{1 + G_c(s)G_M(s)} \right] H(s)_{set} \quad (3-45)$$



รูปที่ 3.15 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมระดับของเหลวแบบพีแอล

$$Q_o(s) = \left[\frac{F(s) - G_L(s)G_c(s)}{1 + G_c(s)G_M(s)} \right] Q_i(s) + \left[\frac{G_c(s)}{1 + G_c(s)G_M(s)} \right] H(s)_{set} \quad (3-46)$$

จากสมการดังกล่าวจะเห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบป้อนหน้าไม่มีผลกระทบต่อสมการคุณลักษณะ (Characteristic equation) ของลูปปิดในระบบ เสถียรภาพของระบบขึ้นอยู่กับตัวควบคุมแบบป้อนกลับเท่านั้น

ตัวควบคุมแบบป้อนหน้าที่เสนอขึ้นโดย Luyben และ Buckley เป็นตัวควบคุมที่นำค่าเกนมาบวกกับค่าเล็กอันดับหนึ่ง (A gain plus a first-order lag) ยกตัวอย่าง เช่น

$$F(s) = \left(\frac{K_F}{1 + \tau_F s} \right) \quad (3-47)$$

ในกรณีที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีเป็นตัวควบคุมแบบป้อนกลับ ($G_c(s) = K_L$) ได้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราไหลกับระดับของเหลวดังนี้

$$\frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{\tau_F s + 1 - K_F}{K_L(\tau_F s + 1)(\tau_H s + 1)} \quad (3-48)$$

และ

$$\frac{Q_o(s)}{Q_i(s)} = \frac{(K_F \tau_H + \tau_F)s + 1}{(\tau_F s + 1)(\tau_H s + 1)} \quad (3-49)$$

เมื่อ

$$\tau_H = A / K_L$$

$$K_L = \frac{K_c K_T}{K_M}$$

โดย K_T คือ ค่าเกนของตัวส่งสัญญาณระดับ (Level transmitter gain) หน่วย psi/m

K_M คือ ค่าเกนที่เกิดจากการวัดสัญญาณการไหล (Flow measurement gain) หน่วย
psi/m³/min

K_c คือ ค่าเกนไร้หน่วยของตัวควบคุมที่เราต้องทำการกำหนดค่าให้

กำหนดให้สัญญาณการไหลมีคุณลักษณะแบบเชิงเส้น (Linear flow measurement characteristic)

$$K_L = \frac{K_c Q_{o,max}}{\Delta H}$$

เมื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็ปในการไหลขาเข้า ($Q_i(s) = \Delta Q_i / s$) ได้สมการ
แสดงผลการตอบสนองของระดับความสูงของของเหลวและอัตราการไหลขาออกดังนี้

$$H(s) = \left(\frac{\Delta Q_i}{s} \right) \frac{(s+a)}{A(s+\alpha)(s+\beta)} \quad (3-50)$$

เมื่อ

$$a = (1 - K_F) / \tau_F$$

$$\alpha = 1 / \tau_F$$

$$\beta = 1/\tau_H$$

และ

$$Q_o(s) = \Delta Q_i \left(\frac{K_F}{\tau_F} + \frac{1}{\tau_H} \right) \frac{(s+b)}{s(s+\alpha)(s+\beta)} \quad (3-51)$$

เมื่อ

$$b = 1/(K_F\tau_F + \tau_F)$$

เมื่อทำการอินเวอร์สลาปลาซทรานสฟอร์มในสมการที่ (3.50) และ (3.51) จะได้สมการ
ในรูปฟังก์ชันของเวลาดังนี้

$$H(t) = \frac{\Delta Q_i}{A} \left[\frac{a}{\alpha\beta} + \frac{(a-\alpha)}{a(\alpha-\beta)} e^{-\alpha t} + \frac{(a-\beta)}{\beta(\beta-\alpha)} e^{-\beta t} \right] \quad (3-52)$$

และ

$$Q_o(t) = \Delta Q_i \left(\frac{K_F}{\tau_F} + \frac{1}{\tau_H} \right) \left[\frac{b}{\alpha\beta} + \frac{(b-a)}{\alpha(\alpha-\beta)} e^{-\alpha t} + \frac{(b-\beta)}{\beta(\beta-\alpha)} e^{-\beta t} \right] \quad (3-53)$$

เมื่อทำการดิฟเฟอเรนทิเอทสมการที่ (3-52) และกำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์จะได้
สมการแสดงเวลาที่เกิดพิกซ์ขึ้นดังนี้

$$t_{\text{peak}} = \frac{1}{(\alpha-\beta)} \ln \left(\frac{a-\alpha}{a-\beta} \right) \quad (3-54)$$

แทนค่าเวลาที่ได้ลงในสมการแสดงความสูงของระดับของเหลวจะทราบค่าความสูง
ของพีกระดับของเหลวที่เกิดขึ้น

ทำนองเดียวกันเมื่อทำการดิฟเฟอเรนทิเอทสมการที่ (3-53) และกำหนดให้เวลามีค่า
เท่ากับศูนย์จะได้สมการแสดงอัตราการไหลขาออกเริ่มต้นดังนี้

$$\left(\frac{dQ_o}{dt}\right)_{t=0} = \Delta Q_i \left(\frac{K_F}{\tau_F} + \frac{1}{\tau_H}\right) \quad (3-55)$$

ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราการไหลขาออกสูงสุด

ค่าออฟเซ็ทของระดับความสูงของของเหลวที่สภาวะคงตัวสามารถหาได้จากสมการที่

(3-52) โดยกำหนดให้ $t \rightarrow \infty$ จะได้สมการแสดงค่าออฟเซ็ทของระดับของเหลวดังนี้

$$H_{\text{offset}} = \frac{\Delta Q_i}{Q_{o,\text{max}}} \Delta H \left(\frac{1-K_F}{K_c}\right) \quad (3-56)$$

จะเห็นว่าจากสมการที่ (3-52) ถึง (3-55) สามารถอธิบายถึงผลการตอบสนองของระบบได้อย่างสมบูรณ์

จากการสังเกตพบว่าตัวควบคุมแบบพีแอลมีลักษณะสำคัญดังต่อไปนี้

- ถ้าการวัดอัตราการไหลขาเข้าและขาออกมีช่วงกว้างของสัญญาณและลักษณะเหมือนกัน (เช่น มีคุณสมบัติเชิงเส้นทั้งคู่หรือเป็นรากลำกล้องทั้งคู่) ค่าเกนของตัวควบคุมแบบป้อนหน้า K_F ควรมีค่าเท่ากับ 1 ถ้าช่วงกว้างของสัญญาณการไหลขาเข้าและขาออกไม่เหมือนกัน จะต้องทำการปรับค่า K_F เพื่อให้ค่าเกนของลูฟ (ระหว่าง Q_i และ Q_o) มีค่าเท่ากับ 1 เพื่อหลีกเลี่ยงค่าออฟเซ็ทของระดับของเหลวที่เกิดขึ้นดังสมการที่ (3-56) นอกจากนั้นยังพบว่า ถ้า K_F มีค่ามากกว่า 1 และ K_c มีค่าน้อยกว่า 1 มาก ๆ จะทำให้เกิดออฟเซ็ทที่มีค่ามาก ดังนั้นค่าเกนของตัวควบคุมแบบป้อนกลับไม่สามารถลดลงให้มีค่าต่ำมาก ๆ ถึงแม้ว่าจะใช้ตัวควบคุมแบบพีแอล

- จากสมการที่ (3-54) สังเกตได้ว่าค่าคงที่เวลาของตัวควบคุมแบบป้อนหน้า τ_F ไม่

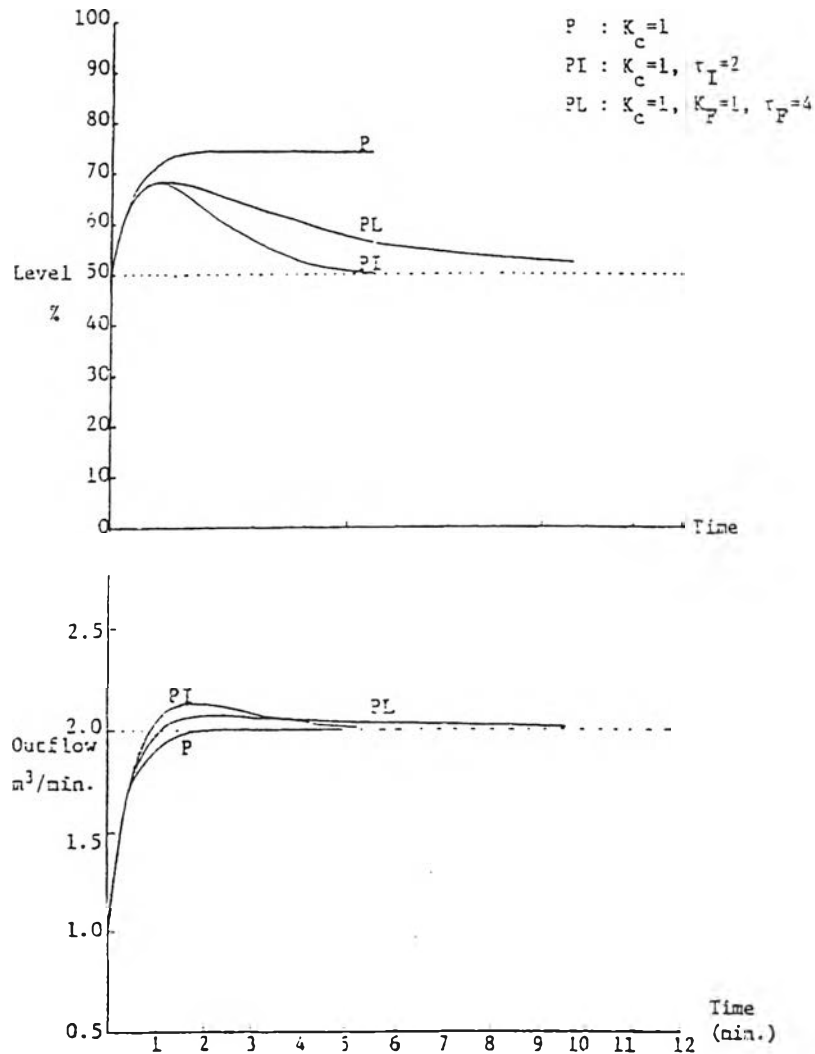
ควรกำหนดให้มีค่าต่ำมาก เพื่อไม่ให้อัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกเริ่มต้นมีค่าเร็วเกินไป ในกรณีที่กำหนดให้ค่า τ_F เท่ากับค่า τ_V (ที่เสนอขึ้นโดย Luyben และ Buckley) และให้ค่าเกน $K_F = K_c = 1$ พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกเริ่มต้นที่เกิดจากตัวควบคุมแบบพีแอลควรจะมีค่าสูงกว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกเริ่มต้นที่เกิดจากตัวควบคุมแบบพีและพีไอถึงสองเท่าในกรณีที่กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้มีค่าเท่ากัน

จากที่กล่าวมาข้างต้นเมื่อทำการเลียนแบบกระบวนการแบบดิจิทัล (Digital simulation) ของตัวควบคุมแบบพีแอลในถังพัก โดยให้พารามิเตอร์ของถังพักที่ใช้มีขนาดเดียวกับที่ตัวอย่าง การควบคุมระดับที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นและตั้งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมให้ $K_F = K_c = 1$ และ $\tau_F = 4$ นาที ผลการตอบสนองที่ได้จากตัวควบคุมแบบพีแอลเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีและพีไอแสดงได้ดังรูปที่ 3.16

จะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีแอลอยู่ระหว่างตัวควบคุมแบบพีและพีไอ โดยระดับของเหลวจะเข้าสู่เซ็ทพอยน์ช้ากว่าตัวควบคุมแบบพีไอ ค่าความชันเริ่มต้นของเส้นโค้งการไหลขาออกควรจะมีมากกว่าเส้นโค้งที่ได้จากตัวควบคุมแบบพีและพีไอ 1/8 เท่า การไหลขาออกจะเกิดโอเวอร์พีค (Overpeak) เพื่อให้ระดับกลับเข้าสู่เซ็ทพอยน์ แต่โอเวอร์พีคและการกลับเข้าสู่สภาวะปกติจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ

รูปที่ 3.17 แสดงผลที่ได้จากการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับจูน พบว่าการลดค่า τ_F จะเร่งการตอบสนอง ระดับจะเข้าสู่สภาวะปกติเร็วขึ้นแต่ส่งผลให้การไหลขาออกเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้นและเกิดโอเวอร์พีคมากขึ้น เมื่อลดค่า K_F ให้เท่ากับ 0.75 พบว่าจะเกิดอ้อพเซ็ท

ของระดับของเหลวจากสภาวะคงตัวเท่ากับ 6.25%



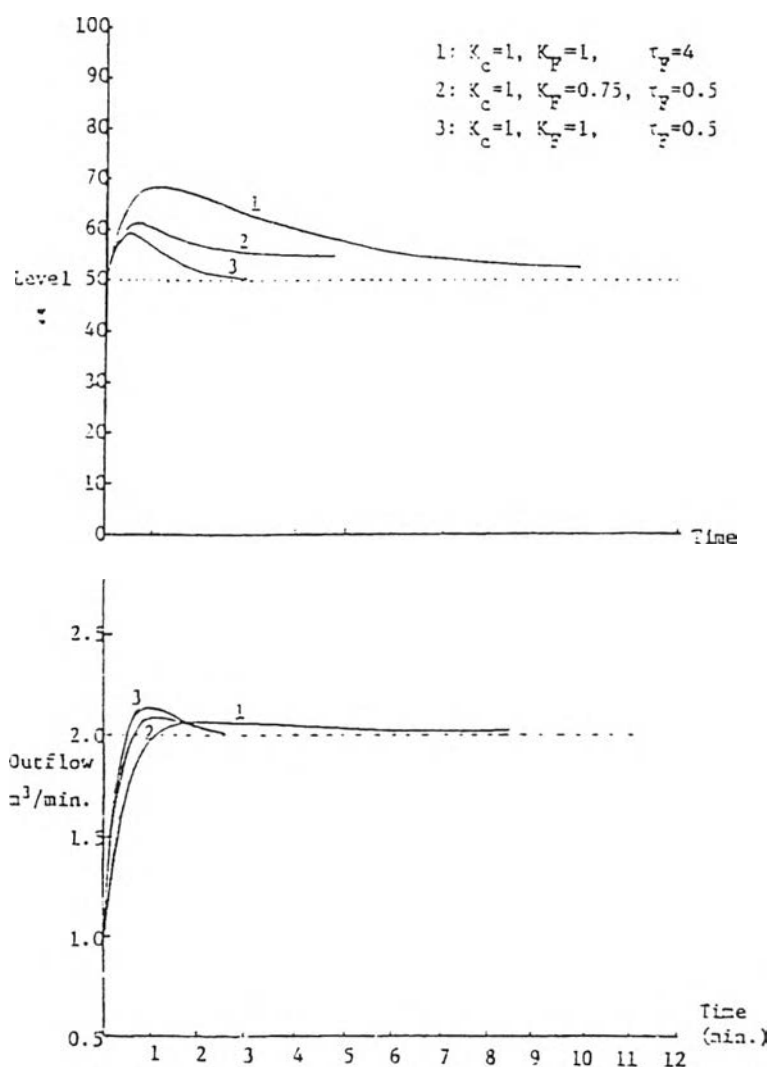
รูปที่ 3.16 เปรียบเทียบผลการตอบสนองที่ได้จากตัวควบคุมแบบพี, พีไอ และพีแอล

การปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีแอล

จากสมการที่ (3-52) ถึง (3-56) ซึ่งอธิบายผลการตอบสนองของระบบ เมื่อทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีแอลทำให้ทราบค่าระดับของเหลวสูงสุดและอัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลขาออก จากแนวคิดดังกล่าว Cheung และ Luyben (1979) จึงได้เสนอแผนผังการปรับจูนตัวควบคุมแบบพีแอลขึ้นเมื่อทำการกำหนดค่าระดับของเหลวสูงสุดและ

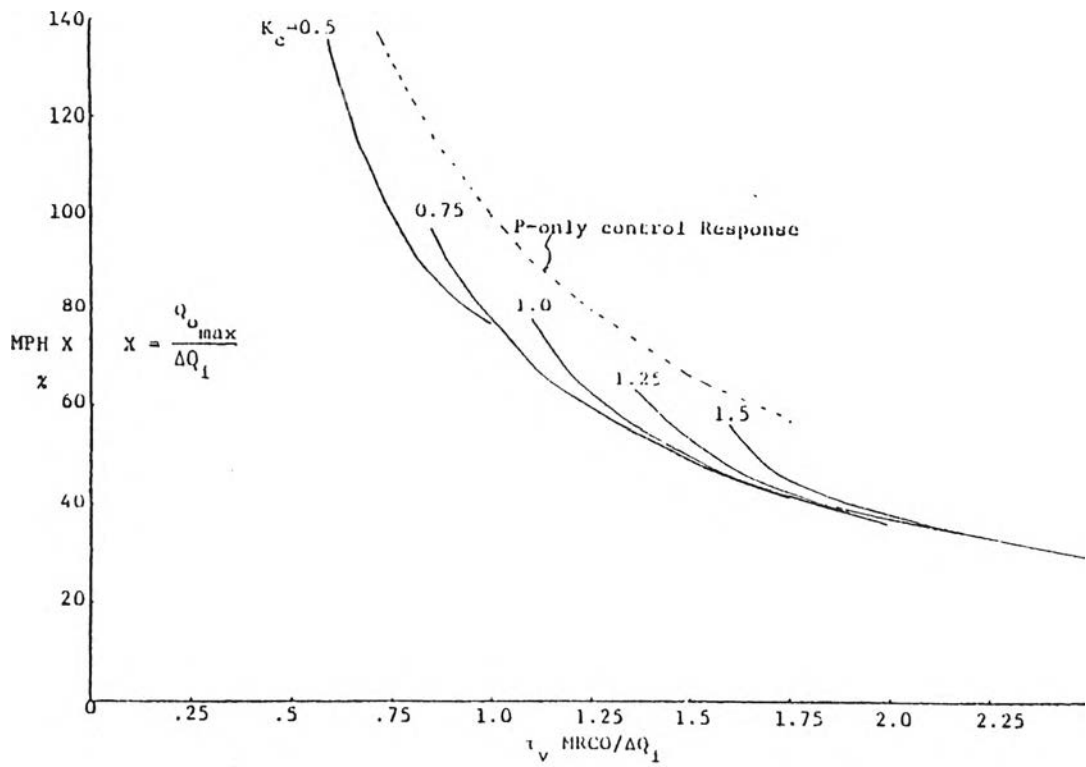
อัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกที่ต้องการขึ้นทำนองเดียวกับแผนภาพการปรับจูนตัวควบคุมแบบพีและพีไอ

โดยแผนภาพการปรับจูนตัวควบคุมแบบพีแอลที่ Cheung และ Luyben (1979) ได้เสนอขึ้นในกรณีที่กำหนดให้ค่า $K_F = 1$ แสดงได้ดังรูปที่ 3.18 และ 3.19

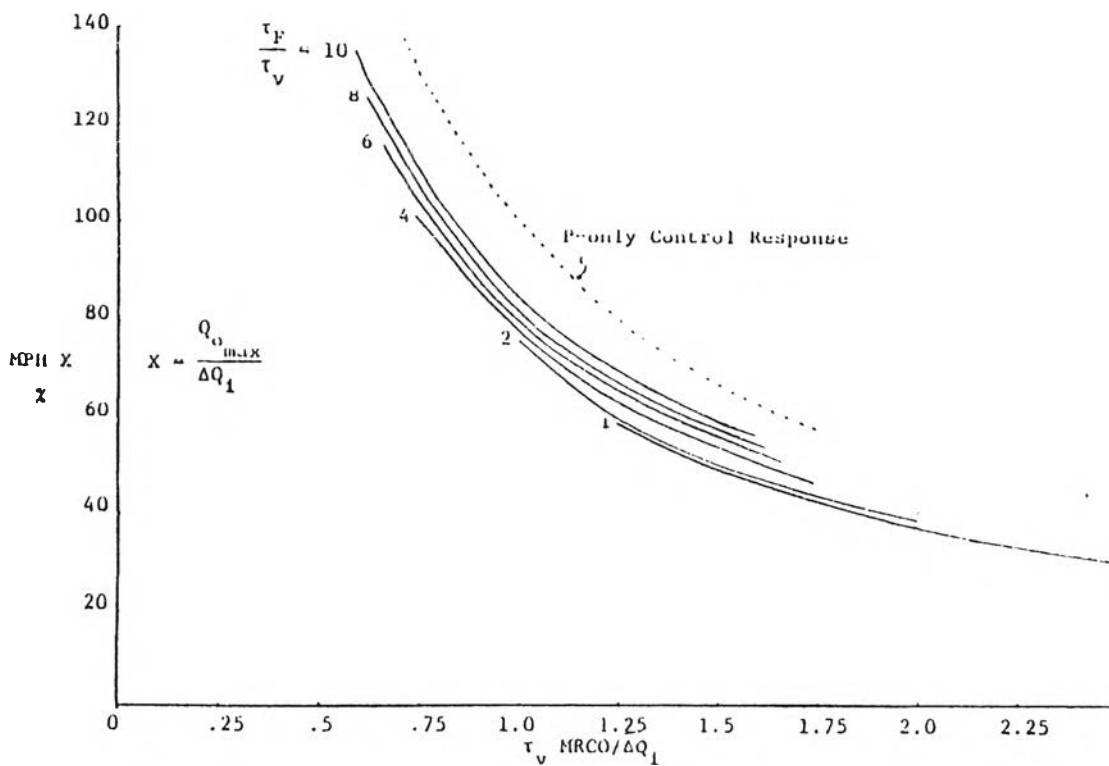


รูปที่ 3.17 การตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีแอลเมื่อทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ของ

ตัวควบคุมต่างกัน



รูปที่ 3.18 แผนภาพการปรับจูนค่าเกณฑ์ควบคุมแบบพีแอล



รูปที่ 3.19 แผนภาพการปรับจูนค่าคงที่เวลาเล็กแบบป้อนหน้า (Feedforward lag

time constant) ของตัวควบคุมแบบพีแอล

ตัวอย่างการใช้แผนภาพการปรับจูนตัวควบคุมแบบพีแอลแสดงได้ดังนี้

กำหนดให้ตัวอย่างระบบการควบคุมระดับแบบเฉลี่ยในถังพักที่ทำการปรับจูนมีค่าเช่นเดียวกับตัวอย่างการตั้งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีและพีไอที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

ให้ค่าระดับของเหลวสูงสุด (MPH) และอัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกสูงสุด (MRCO) ที่ต้องการเท่ากับ 20% และ $2 \text{ m}^3/\text{min}/\text{min}$ ตามลำดับ

ค่าในแกน Y ของรูปที่ 3.18 และ 3.19 คือ

$$\begin{aligned} \text{MPH}(X) &= \text{MPH} \left(\frac{Q_{o,\max}}{\Delta Q_i} \right) \\ &= 20\% (4/1) \\ &= 80\% \end{aligned}$$

ค่าในแกน X ของรูปที่ 3.18 และ 3.19 คือ

$$\begin{aligned} \tau_v (\text{MRCO}/\Delta Q_i) &= 0.5 (2/1) \\ &= 1.0 \end{aligned}$$

จากรูปที่ 3.18 จะได้

$$K_c = 0.8$$

จากรูปที่ 3.19 จะได้

$$\tau_F / \tau_v = 6$$

$$\tau_F = 6 \times 0.5 \text{ นาที} = 3 \text{ นาที}$$

จากแผนภาพการปรับจูนคั้งแสดงในรูปที่ 3.18 และ 3.19 จะเห็นได้ว่าช่วงกว้างของผลการตอบสนองที่สามารถหาค่าได้ค่อนข้างแคบ สำหรับผลการตอบสนองที่มีค่าต่ำกว่าทางด้านซ้ายของเส้นกราฟไม่สามารถทราบคุณสมบัติและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับจูนได้ แต่ผลการตอบสนองที่มีค่าอยู่ทางด้านขวาของเส้นกราฟจะมีคุณสมบัติและทำการปรับจูนเช่นเดียวกับตัวควบคุมแบบพี เพราะฉะนั้นถึงแม้ว่าตัวควบคุมแบบพีแอลได้นำเสนอจำนวนพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับจูนมากขึ้น แต่ผลการตอบสนองที่สามารถหาค่าได้ในเทอมของระดับของเหลวสูงสุดและอัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกที่มากที่สุด (MPH และ MRCO) จะถูกจำกัดลง

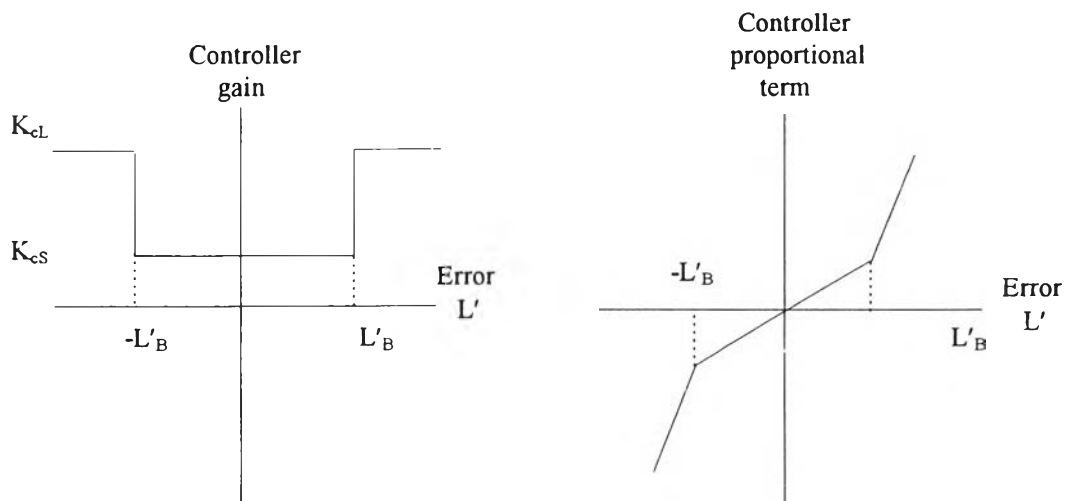
3.7 ตัวควบคุมระดับแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Level Controller)

นอกจากตัวควบคุมที่นิยมนำมาใช้ในการควบคุมระดับ โดยทั่วไปจะเป็นตัวควบคุมแบบเชิงเส้นแล้ว ได้มีการพัฒนาตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้นสำหรับการควบคุมระดับเฉลี่ยขึ้นหลายแบบเพื่อแก้ไขข้อเสียที่เกิดจากตัวควบคุมแบบเชิงเส้น ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

3.7.1 ตัวควบคุมพีไอแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear PI controller)

Shunda และ Fehervari (1976) ได้ออกแบบการควบคุมระดับแบบเฉลี่ยโดยใช้ตัวควบคุมพีไอแบบไม่เชิงเส้นของกระบวนการแบบแคมพ์พอดิ ($\xi = 1$) เมื่อกำหนดให้ค่าเวลาปริเซท $\tau_I = 4\tau_V / K_c$ โดยการตั้งค่าเกณฑ์จะต่ำเมื่อการรบกวนมีค่าน้อยและเพิ่มค่าเกณฑ์ในการรบกวนมีค่ามากดังแสดงในรูปที่ 3.20 ค่าเกณฑ์จะต่ำเมื่อการรบกวนอยู่ในช่วงที่กำหนด เมื่อการรบกวนอยู่นอกช่วงที่กำหนดค่าเกณฑ์จะเพิ่มขึ้นถึง 10 เท่า

ความกว้างของช่วงก่อนที่ตัวควบคุมจะสวิช (Switch) ไปยังค่าเกณฑ์สูงถูกกำหนดโดย
 ขึ้นกับประเภทของการรบกวนในกระบวนการ จากผลการทดสอบพบว่าความกว้างของช่วง
 ระหว่าง 20-30 เปอร์เซ็นต์สามารถใช้ได้เพียงพอสำหรับการรบกวนทั่วไป



รูปที่ 3.20 ภาพแสดงสมการตัวควบคุมพีไอแบบไม่เชิงเส้นสำหรับการควบคุมระดับ

ข้อดีของตัวควบคุมพีไอแบบไม่เชิงเส้น คือ การไหลของของเหลวขาออกจะตอบสนอง
 อย่างช้า ๆ โดยที่ระดับยังคงเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงที่ปลอดภัย เมื่อเกิดการรบกวนที่มีค่ามากขึ้น
 การกระทำแบบไม่เชิงเส้นของเกนและเวลารีเซ็ทจะเร่งการทำงานของตัวควบคุมให้ตอบสนอง
 อย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะเมื่อระบบเข้าใกล้ค่าสูงสุดและต่ำสุดที่กำหนดไว้

การปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอแบบไม่เชิงเส้น

การปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอแบบไม่เชิงเส้นดังกล่าว สามารถอธิบาย
 ได้ดังนี้ (Marlin, 1995) จากรูปที่ 3.20 จะได้ว่า

$$Q'_{out} = -K_c \left(H' + \frac{1}{\tau_I} \int_0^t H' dt' \right) \quad (3-57)$$

โดย $K_c = K_{cS}$ เมื่อ $|H'| < H'_B$

$K_c = K_{cL}$ เมื่อ $|H'| > H'_B$

กำหนดให้ $r_K = \frac{K_{cL}}{K_{cS}}$

การกำหนดค่าอัตราส่วนระหว่างค่าเกน K_{cS} และ K_{cL} โดยทั่วไปมักจะกำหนดให้เท่ากับ 20 จากรูป 3.20 สามารถหาค่าเกน K_{cS} และ K_{cL} ได้ดังนี้

$$\Delta Q_{in} = -K_{cS}H'_B - K_{cL}(\Delta L_{max} - H'_B) = \left(\frac{L'_B}{r_K} + \Delta L_{max} - L'_B \right) (-K_{cL}) \quad (3-58)$$

จากสมการที่ (3.58) จะได้ว่า

$$K_{cL} = \frac{-\Delta Q_{in}}{\frac{H'_B}{r_K} + \Delta L_{max} - H'_B} \quad (3-59)$$

$$K_{cS} = \frac{K_{cL}}{r_K} \quad (3-60)$$

ส่วนค่าเวลารีเซ็ทสามารถหาได้จากสมการที่ (3.40)

$$\text{โดย } \tau_I = \frac{4\xi^2 A}{\left(-\frac{K_{cL}}{r_K} \right)} \quad (3-61)$$

3.7.2 ตัวควบคุมแบบช่วงกว้าง (Wide-range controller)

นอกจากตัวควบคุมพีไอแบบไม่เชิงเส้นแล้ว Shunda และ Fehervari (1976) ยังได้เสนอตัวควบคุมไม่เชิงเส้นขึ้นอีกชนิดหนึ่ง คือ ตัวควบคุมแบบช่วงกว้าง โดยมีวัตถุประสงค์ในการควบคุม คือ ให้ผลการตอบสนองที่ช้าเมื่อการรบกวนมีค่าน้อยและให้ผลการตอบสนองที่เร็วเมื่อการรบกวนมีค่ามาก ซึ่งตัวควบคุมแบบช่วงกว้างของ Shunda และ Fehervari แท้จริงก็

คือ ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีเอาต์พุทของโหมด (Proportional mode) ดังนี้

$$C_p = (25^{|e|K})(K_{c0})e \quad (3-62)$$

เมื่อ $|e|$ คือ ค่าสมบูรณ์ของความผิดพลาด

K_{c0} คือ ค่าเกณฑ์เมื่อความผิดพลาดเป็นศูนย์มีค่าอยู่ในช่วง 0.04-10

K คือ ค่า rangeability factor ซึ่งปรับค่าในเทอมของการเพิ่มขึ้นของความผิดพลาด

ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมหาได้จาก

$$K_c = \frac{dC_p}{de} = (1 + |e|K \ln 25)(25^{|e|K})(K_{c0}) \quad (3-63)$$

ค่าเวลารีเซ็ตจะเปลี่ยนเพื่อให้ค่าสัมประสิทธิ์การแคมพ์คังที่จะได้ว่า

$$\tau_I = \frac{\tau_{I0}}{(1 + |e|K \ln 25)(25^{|e|K})} \quad (3-64)$$

ค่าเกณฑ์และค่าเวลารีเซ็ต (Reset time) ที่มีความผิดพลาดเป็นศูนย์ (K_{c0} และ τ_{I0}) หาได้จากสัมประสิทธิ์การแคมพ์

Shunda และ Fehervari ได้เสนอประโยชน์ของตัวควบคุมแบบช่วงกว้างไว้ดังนี้

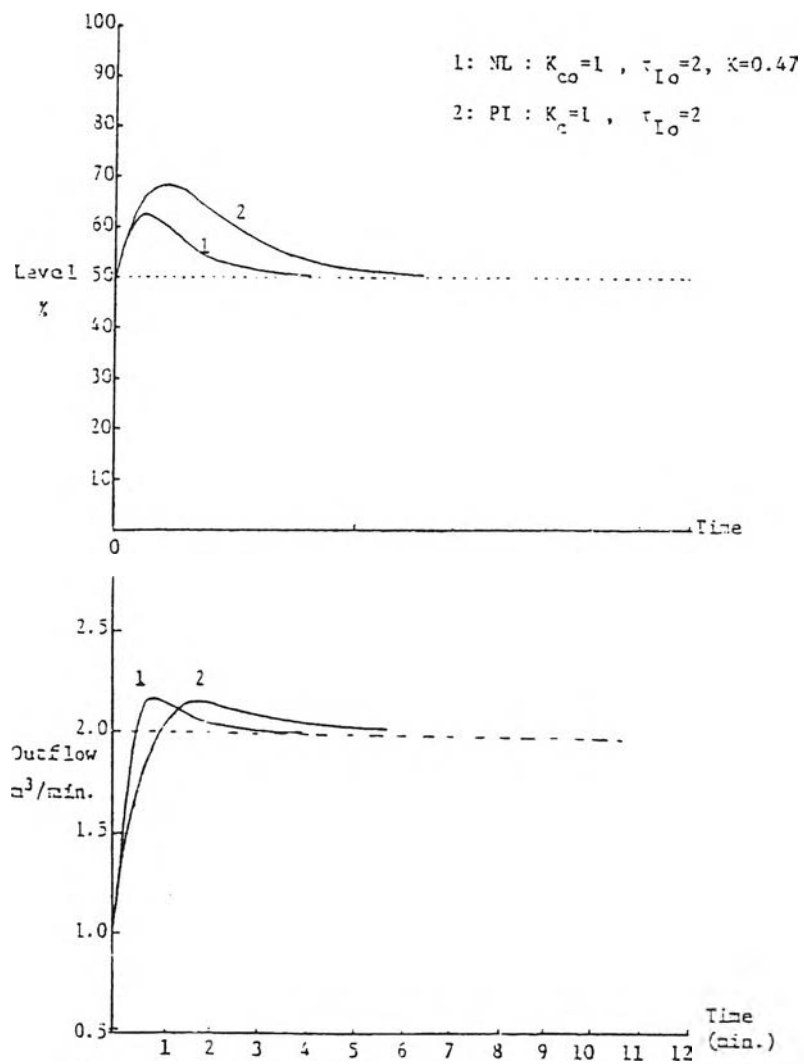
- (i) ค่าเกณฑ์และเวลารีเซ็ตถูกเปลี่ยนโดยที่ระดับของเหลวยังคงอยู่ในขอบเขตที่กำหนดไว้
- (ii) การไหลขาออกเปลี่ยนแปลงแบบต่อเนื่อง (Continuous)
- (iii) มีคุณสมบัติในการกรองสัญญาณรบกวนได้ดี

กล่าวได้ว่าตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear controller) สามารถตอบสนองจุดประสงค์ในการควบคุม คือ จะให้ผลการตอบสนองที่ช้าเมื่อการรบกวนมีค่าน้อยและการตอบ

สนองจะเร็วเมื่อเกิดการรบกวนมากขึ้น

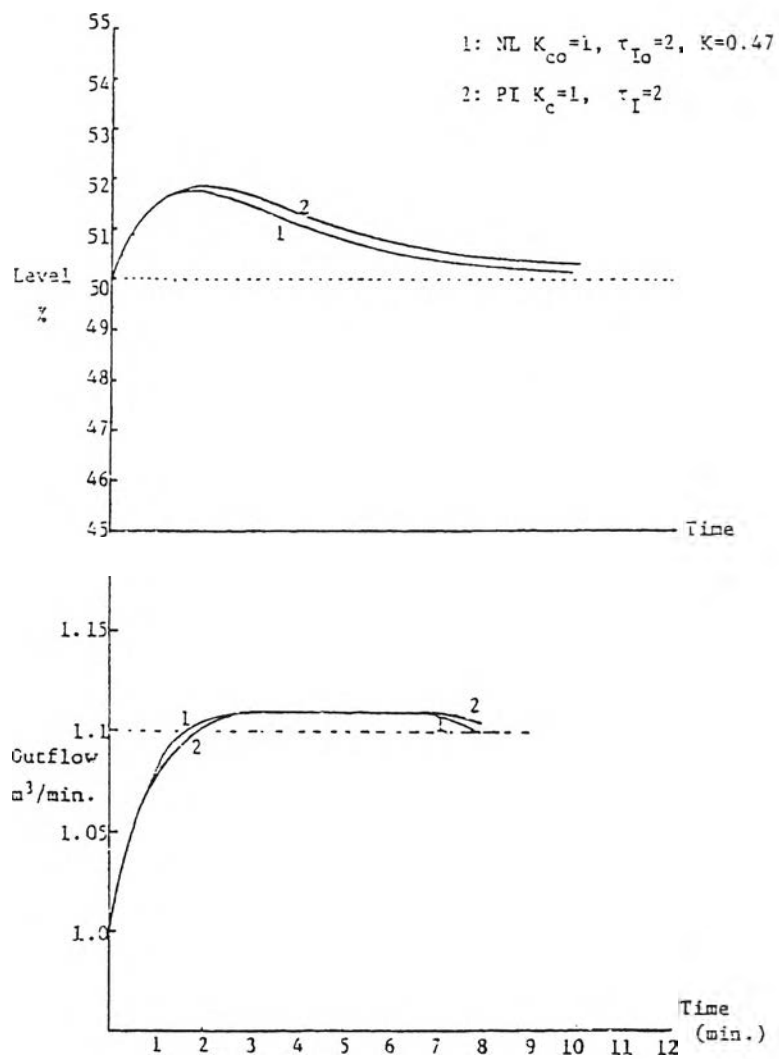
ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบช่วงกว้างถูกแสดงโดยใช้การเลียนแบบดิจิทัล (Digital simulation) ระบบที่ใช้เลียนแบบ (Cheung และ Luyben, 1979) คือ ถังพักที่มีสายการไหลขาเข้าและขาออกอย่างละ 1 สาย การไหลขาออกจะถูกปรับค่าโดยใช้ตัวควบคุมระดับค่าพารามิเตอร์ของระบบเช่นเดียวกับระบบที่ใช้ในตัวอย่างการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีและพีไอที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น โดยกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์การแดมป์เท่ากับ 1

ประโยชน์ของตัวควบคุมแบบช่วงกว้างแสดงได้โดยเปรียบเทียบผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบช่วงกว้างกับผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอ ดังแสดงในรูปที่ 3.21 และ 3.22 โดยทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอให้เป็นค่าเดียวกันกับค่า K_{c0} และค่า τ_{I0} ของตัวควบคุมแบบช่วงกว้าง รูปที่ 3.21 แสดงการตอบสนองเมื่อการไหลขาเข้าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 100% สตีพ เห็นได้ว่าการตอบสนองของตัวควบคุมทั้งสองแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดโดยตัวควบคุมแบบช่วงกว้างจะเร็วกว่าตัวควบคุมแบบพีไอ แต่อย่างไรก็ตามในรูปที่ 3.22 แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมทั้งสองให้ผลการตอบสนองเหมือนกันเมื่อการเปลี่ยนแปลงมีค่าเท่ากับ 10% สตีพ เพราะฉะนั้นสามารถสรุปได้ว่าตัวควบคุมแบบช่วงกว้างจะให้การตอบสนองที่เร็วเมื่อการรบกวนมีค่ามากและให้การตอบสนองที่ช้าเมื่อการรบกวนมีค่าน้อย



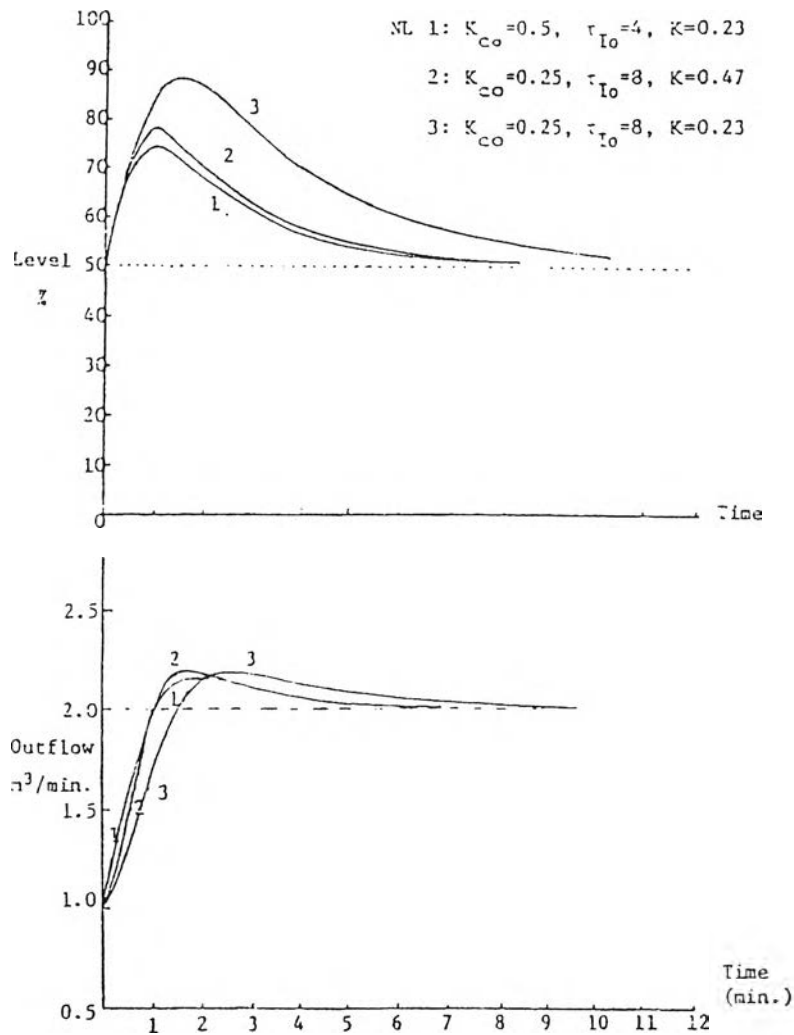
รูปที่ 3.21 ผลเปรียบเทียบผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอและตัวควบคุมแบบ

ช่วงกว้างเมื่อการรบกวนมีค่ามาก ($\Delta Q_i = 1 \text{ m}^3/\text{min}$)



รูปที่ 3.22 ผลเปรียบเทียบผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอและตัวควบคุมแบบ

ช่วงกว้างเมื่อการรบกวนมีค่าน้อย ($\Delta Q_i = 0.1 \text{ m}^3/\text{min}$)



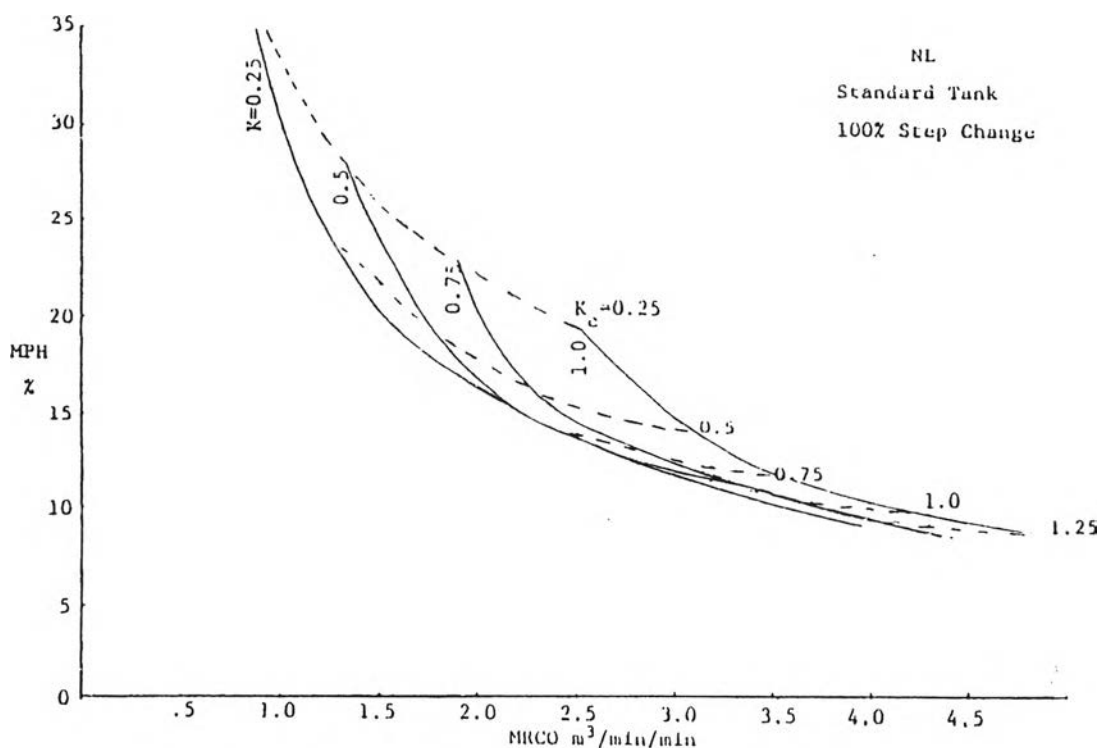
รูปที่ 3.23 ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบช่วงกว้างเมื่อทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ของ

ตัวควบคุมต่างกัน

รูปที่ 3.23 แสดงให้เห็นถึงผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบช่วงกว้างที่เปลี่ยนไปเมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม พบว่าเมื่อทำการลดค่าเกณฑ์ความผิดพลาดเป็นศูนย์ (K_{c0}) สามารถชดเชยได้ด้วยการเพิ่มค่า K ซึ่งประโยชน์ของการใช้ค่าเกณฑ์ความผิดพลาดเป็นศูนย์มีค่าน้อย คือ ทำให้การไหลขาออกราบเรียบขึ้น

การปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบช่วงกว้าง

เนื่องจากความยากในการปรับจูนตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้น โดยการประยุกต์สมการคณิตศาสตร์ และผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบช่วงกว้างมีความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นกับขนาดของการรบกวน ทำให้การสร้างแผนภาพการปรับจูนตัวควบคุมแบบช่วงกว้างทำได้ยากอย่างไรก็ตามจากการสังเกตค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกสูงสุดและค่าระดับของเหลวสูงสุดที่ได้จากการเลียนแบบในแต่ละครั้ง ทำให้สามารถสร้างแผนภาพการปรับจูนค่าตัวควบคุมแบบช่วงกว้างได้ (Cheung และ Luyben, 1980) โดยระบบที่ทำการเลียนแบบกำหนดให้ $\xi = 1$ และให้การเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกเป็นแบบสตีพ 100% ซึ่งผลที่ได้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 แผนภาพการปรับจูนตัวควบคุมแบบช่วงกว้าง

การเปรียบเทียบผลการตอบสนองที่ได้จากตัวควบคุมแบบพี, ตัวควบคุมแบบพีไอ, ตัวควบคุมแบบพีแอล และตัวควบคุมแบบช่วงกว้าง

จากแผนภาพการปรับจูนที่ได้พัฒนาขึ้นสำหรับตัวควบคุมแบบพี, ตัวควบคุมแบบพีไอ, ตัวควบคุมแบบพีแอล (Cheung และ Luyben, 1979) และตัวควบคุมแบบช่วงกว้าง (Cheung และ Luyben, 1980) ดังแสดงในรูปที่ 3.12, 3.13, 3.18, 3.19 และ 3.24 ตามลำดับ Cheung และ Luyben (1980) ได้ทำการเปรียบเทียบตัวควบคุมหลายประเภท โดยเลือกข้อกำหนดที่ต้องการไว้ 5 กลุ่มและทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมตามข้อกำหนดที่เลือกไว้โดยอ่านจากแผนภาพ ซึ่งผลที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.3 ดังนี้

ตารางที่ 3.3 ผลที่ได้จากการตั้งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ทำการเปรียบเทียบ

ข้อกำหนดสมรรถนะ			ชนิดตัวควบคุม								
case	MPH (%)	MRCO (m ³ /min/min)	P	PI			PL (K _F =1)		Wide-range (ξ=1)		
			K _c	K _c	τ _I	ξ	K _c	τ _F	K _∞	τ _{I0}	K
1	30	1.0	(0.83)*	0.50	1.6	0.64	(0.5)*	-	0.36	5.6	0.25
2	20	2.0	(1.25)*	1.00	2.8	>1	0.8	3	0.32	6.2	0.75
3	15	2.5	(1.67)*	1.25	1.6	1	0.8	1.1	0.52	3.9	0.77
4	10	3.5	(2.50)*	1.75	1.2	1	(1.0)*	-	1.32	1.5	0.5
5	20	2.5	1.25	1.25	4.0	>1	1.23	12	0.24	8.3	1.0

หมายเหตุ * คือ ได้ผลตามข้อกำหนดเฉพาะระดับของเหลวสูงสุด

จากผลการเปรียบเทียบเมื่อทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.3 พบว่าค่าระดับของเหลวสูงสุด (MPH) และค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกสูงสุด (MRCO) ที่ได้จากตัวควบคุมแบบพีเป็นไปตามข้อกำหนดสมรรถนะเพียง 1 ใน 5 กลุ่ม การใช้ประโยชน์ของตัวควบคุมชนิดนี้จึงถูกจำกัดลง ส่วนตัวควบคุมแบบพีแอลเมื่อทำการเพิ่มระบบป้อนหน้า พบว่าสามารถให้ค่า MPH และ MRCO ได้ตามข้อกำหนดสมรรถนะ 3 กลุ่ม ใน 5 กลุ่ม มีเฉพาะตัวควบคุมแบบพีไอและตัวควบคุมแบบช่วงกว้างเท่านั้นที่สามารถให้ค่า MPH และ MRCO ได้ตามข้อกำหนดสมรรถนะทั้ง 5 กรณี

แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการตอบสนองที่ได้จากตัวควบคุมแบบพีไอและตัวควบคุมแบบช่วงกว้างในกรณีที่ 1 พบข้อบกพร่องของตัวควบคุมแบบพีไอ เนื่องจากตัวควบคุมแบบพีไอใช้ค่าเกนที่ต่ำเพื่อให้การเปลี่ยนแปลงของการไหลขาออกเป็นไปอย่างช้า ๆ ทำให้การกระทำของรีเซ็ตมาก (Large reset action) เพื่อให้ระดับอยู่ในขอบเขตที่กำหนดส่งผลให้ระบบเป็นแบบแดมป์ขาด (Underdamped) $\xi = 0.64$ ในทางตรงกันข้ามตัวควบคุมแบบช่วงกว้างสามารถที่จะทำการปรับจูนให้ได้ค่าแดมป์พอดี (Critical damping) ยิ่งไปกว่านั้นค่าเกนที่มีความผิดพลาดเป็นศูนย์ (Zero-error gain) ของตัวควบคุมแบบช่วงกว้างจะต่ำกว่าเกนของตัวควบคุมชนิดอื่น ๆ ทุกกรณี ซึ่งทำให้การไหลขาออกราบเรียบได้มากกว่า

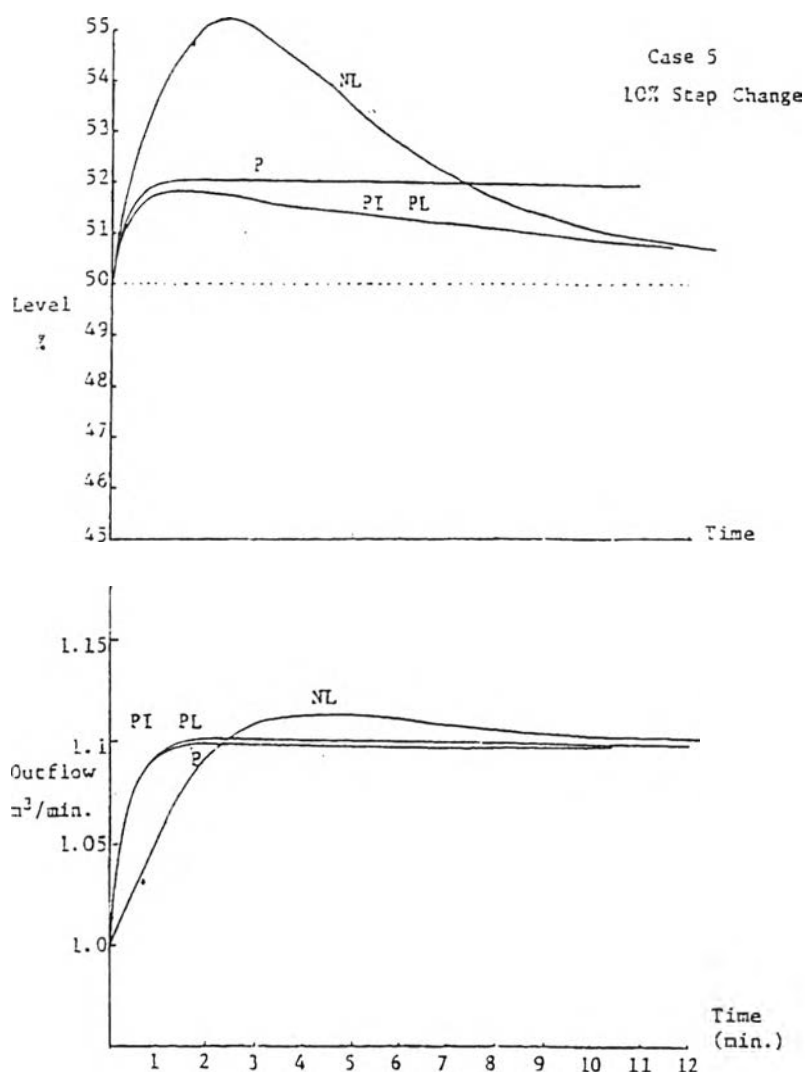
การตอบสนองของตัวควบคุมทั้ง 4 ชนิดจากข้อกำหนดสมรรถนะในกรณีที่ 5 แสดงได้ในรูปที่ 3.25 และ 3.26 รูปที่ 3.25 แสดงให้เห็นถึงผลการตอบสนองเมื่อการไหลขาเข้าเพิ่มขึ้น

10% แบบสเต็ป พบว่าตัวควบคุมแบบช่วงกว้างให้ผลการตอบสนองช้ากว่าตัวควบคุมแบบพี, พีไอ และพีแอล โดยให้จำไว้ว่าการตั้งค่าตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้น จะใช้ในกรณีที่ออกแบบให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบ 100%

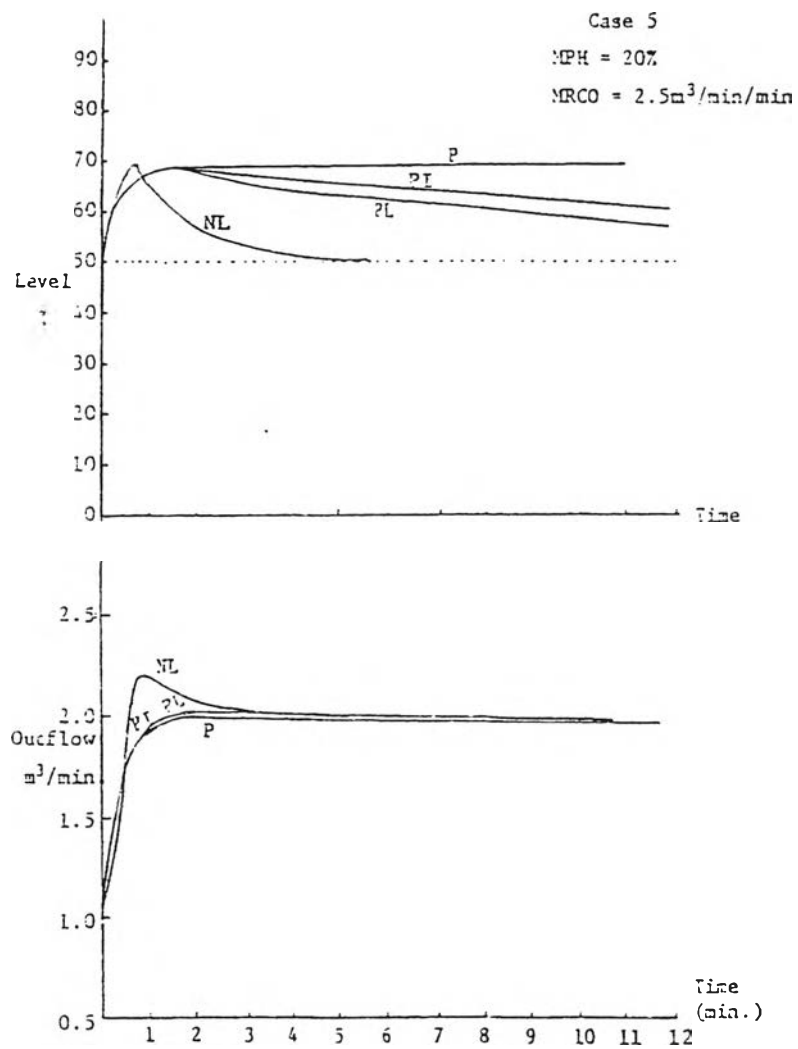
รูปที่ 3.26 แสดงให้เห็นถึงผลการตอบสนองเมื่อการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบ 100% สเต็ป พบว่าตัวควบคุมแบบช่วงกว้างจะกลับสู่ค่าเซตพอยท์ (Set point) อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามการไหลขาออกที่ได้มีลักษณะเป็นโอเวอร์พีค (Overpeak) และแหลม (Sharp) ซึ่งลักษณะดังกล่าวอาจเป็นอุปสรรคที่สำคัญในการประยุกต์ใช้งาน เนื่องจากพฤติกรรมการไหลจะมีค่าสูงกว่าที่ต้องการซึ่งจุดนี้นับเป็นปัญหาหนึ่งในการปรับค่าตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งการทำนายผลการตอบสนองเมื่อการรบกวนมีขนาดใหญ่ทำได้ยาก

การกรองสัญญาณรบกวนการไหล (Flow noise filtering) ของตัวควบคุมแบบช่วงกว้าง คุณสมบัติในการกรองสัญญาณรบกวน (ทำให้การไหลราบเรียบ) ของระบบการควบคุมแบบช่วงกว้างแสดงได้โดยใช้การพลอตแบบโบลด (Bode plot) ดังแสดงในรูปที่ 3.27 สังเกตได้ว่าการกรองสัญญาณรบกวนในกรณีนี้จะขึ้นกับขนาดของสัญญาณรบกวน เนื่องจากคุณสมบัติไม่เชิงเส้น (Nonlinearity) สำหรับสัญญาณรบกวนที่มีค่าอัตราส่วนแอมพลิจูด (Amplitude ratio) ต่ำ ตัวควบคุมแบบช่วงกว้างประมาณได้ว่าเป็นตัวควบคุมแบบพีไอที่มีค่าสอดคล้องกับค่าเกน (K_{c0}) และค่าการแดมป์ $\xi = 1$ เนื่องจากค่าเกนที่มีความผิดพลาดเป็นศูนย์ของตัวควบคุมแบบช่วงกว้างมักจะมีค่าต่ำกว่าค่าเกนของตัวควบคุมชนิดอื่น ๆ ในกรณีคล้ายคลึงกัน ดังนั้นจึงคาดได้

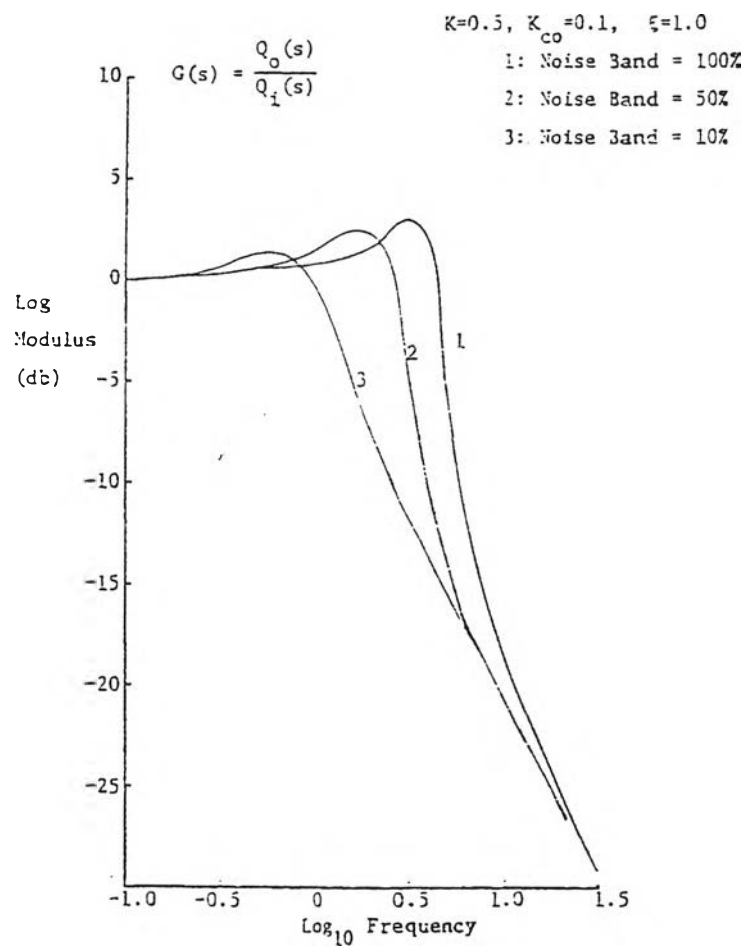
ว่าตัวควบคุมแบบช่วงกว้างควรจะมีการกรองสัญญาณรบกวนที่ความถี่ต่ำและมีขนาดน้อยได้ดี
 อย่างไรก็ตามเมื่อขนาดของสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้นคุณลักษณะในการกรอง (Filtering characteris-
 tic) ของระบบการควบคุมแบบช่วงกว้างจะลดลงอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 3.25 ผลเปรียบเทียบการตอบสนองที่ได้จากตัวควบคุมแบบพี, ตัวควบคุมพีไอ, ตัว
 ควบคุมแบบพีแอลและตัวควบคุมแบบช่วงกว้าง เมื่อการรบกวนมีค่าน้อย (ΔQ
 $= 0.1 \text{ m}^3/\text{min}$)



รูปที่ 3.26 ผลเปรียบเทียบการตอบสนองที่ได้จากตัวควบคุมแบบพี, ตัวควบคุมพีไอ, ตัวควบคุมแบบพีแอลและตัวควบคุมแบบช่วงกว้าง เมื่อการรบกวนมีค่ามาก ($\Delta Q_i = 1.0 \text{ m}^3/\text{min}$)



รูปที่ 3.27 ผลการตอบสนองแบบความถี่ (Frequency response) ของการไหลขาออกต่อ

สัญญาณรบกวนในการไหลขาเข้าเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบช่วงกว้าง

จากที่กล่าวมาสรุปได้ว่าตัวควบคุมไม่เชิงเส้นแบบช่วงกว้างประสบความสำเร็จในการควบคุม คือ ให้การตอบสนองที่เร็วเมื่อการรบกวนมีค่ามากและให้ผลการตอบสนองที่ช้าเมื่อการรบกวนมีค่าน้อย และสามารถใช้งานได้กว้างขวางกว่าตัวควบคุมแบบพี, พีไอและพีแอล อย่างไรก็ตามคุณลักษณะในการกรองสัญญาณรบกวนจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มแอมพลิจูดของสัญญาณรบกวน ซึ่งจะทำให้เกิดอุปสรรคที่สำคัญ คือ การไหลขาออกมีลักษณะโอเวอร์พีค (Overpeaking) และแหลม (Sharp) ความยากอื่น ๆ ในการประยุกต์ใช้งานตัวควบคุมชนิดนี้ คือ การออกแบบและการวิเคราะห์ เนื่องจากไม่สามารถใช้สมการทางคณิตศาสตร์แบบเดิมที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบการควบคุมแบบเชิงเส้นได้ ทำให้ไม่สามารถทำนายพฤติกรรมของตัวควบคุมแบบช่วงกว้างได้อย่างสมบูรณ์และอาจเกิดอันตรายบางอย่างขึ้นเมื่อนำตัวควบคุมแบบช่วงกว้างมาประยุกต์ใช้งาน

เพื่อที่สามารถประสบความสำเร็จในการใช้งานตัวควบคุมระดับแบบไม่เชิงเส้น โดยที่สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาและอันตรายบางอย่างที่อาจเกิดขึ้นได้ Cheung และ Luyben (1980) ได้เสนอตัวควบคุมระดับแบบแบ่งช่วงการควบคุม (Split-range controller) ขึ้น ซึ่งคล้ายคลึงกับการควบคุมแบบอัตโนมัติโดยใช้ตัวควบคุม 2 ตัว ในการใช้งานตัวควบคุมแบบแบ่งช่วงการควบคุม โหมดการควบคุมหรือการตั้งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจะเปลี่ยนไป เมื่อความผิดพลาดสัมบูรณ์ (Absolute error $|e|$) เกินช่วงความผิดพลาดปกติที่กำหนดไว้ (Normal error band e_b) จุดประสงค์ของการควบคุมแบบนี้ คือ ให้การควบคุมที่ช้าเมื่อความผิดพลาดมีค่าน้อย

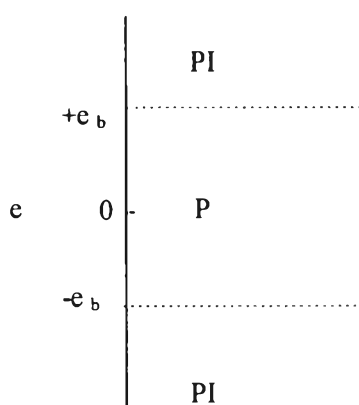
(อยู่ในช่วงความผิดพลาดที่กำหนดไว้) และให้การควบคุมที่เร็วเมื่อความผิดพลาดมีค่ามาก
(อยู่นอกช่วงความผิดพลาดปกติที่กำหนดไว้)

แผนภาพการควบคุมแบบแบ่งช่วงการควบคุม (Split-range control) สร้างขึ้นเพื่อ
ต้องการปรับปรุงแผนผังการควบคุมแบบทั่วไป (Conventional override scheme) โดยการจัดตัว
ควบคุมที่แตกต่างกันในการใช้งานรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งจะได้ทำการอธิบายดังต่อไปนี้

3.7.3 ตัวควบคุมแบบพีไอพี (Proportional integral/proportional controller)

เนื่องจากการควบคุมแบบอัตโนมัติ (Auto-override scheme) ตัวควบคุมสามารถ
เปลี่ยนกลับไปมาได้ ดังนั้นตัวควบคุมแบบพีไอพีจะทำงานในช่วงความผิดพลาดปกติ และตัว
ควบคุมแบบพีไอจะทำงานเมื่อความผิดพลาดอยู่นอกช่วงความผิดพลาดปกติ ดังแสดงในรูป

3.29



รูปที่ 3.28 การทำงานของควบคุมแบบพีไอพี

ประโยชน์ดังกล่าวจะเกิดเมื่อการรบกวนมีค่าน้อย ตัวควบคุมแบบพีไอจะถูกใช้งานและ
สามารถกรองสัญญาณรบกวนได้ดี เมื่อการรบกวนมีค่ามาก โหมดอินทิกรัล (Integral mode)

จะกระทำต่อค่าความผิดพลาด (Error) เพื่อกลับสู่ค่าปกติภายในช่วงอย่างรวดเร็ว ค่าเกินยังคงมีค่าคงที่ตลอดเวลาเพื่อให้การไหลขาออกราบเรียบ สามารถอธิบายการทำงานของตัวควบคุมแบบพีไอพีดีได้โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$\text{สำหรับค่า } |e| \leq e_b$$

$$CO = \text{Bias} + K_c e$$

$$\text{สำหรับค่า } |e| > e_b$$

$$CO = \text{Bias} + K_c e + \frac{K_c}{\tau_I} \int_0^t (e \pm e_b) dt$$

ในกรณีที่ $e > 0$ เครื่องหมายภายในอินทิกรัลจะเป็นลบ และ $e \leq 0$ เครื่องหมายภายในอินทิกรัลจะเป็นบวก เทอมของการอินทิเกรตค่าความผิดพลาดจะถูกตั้งค่าไว้เพื่อให้ค่าความผิดพลาดนอกช่วงเท่านั้นที่ถูกอินทิเกรต ซึ่งจะช่วยให้การเปลี่ยนแปลงขาออกราบเรียบระหว่างช่วงการเปลี่ยนโหมดควบคุม ในระหว่างทำการควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอเพียงอย่างเดียวในส่วนของอินทิกรัลจะไม่มีผลกระทบใด ๆ

ผลที่ได้จากการเลียนแบบดิจิทัลของตัวควบคุมแบบพีไอพีดีโดยใช้ระบบของถังพักมาตรฐานที่ได้กล่าวไว้เมื่อการไหลขาเข้าเปลี่ยนแปลงแบบสเต็ปทั้งทางบวกและลบแสดงได้ดังรูปที่

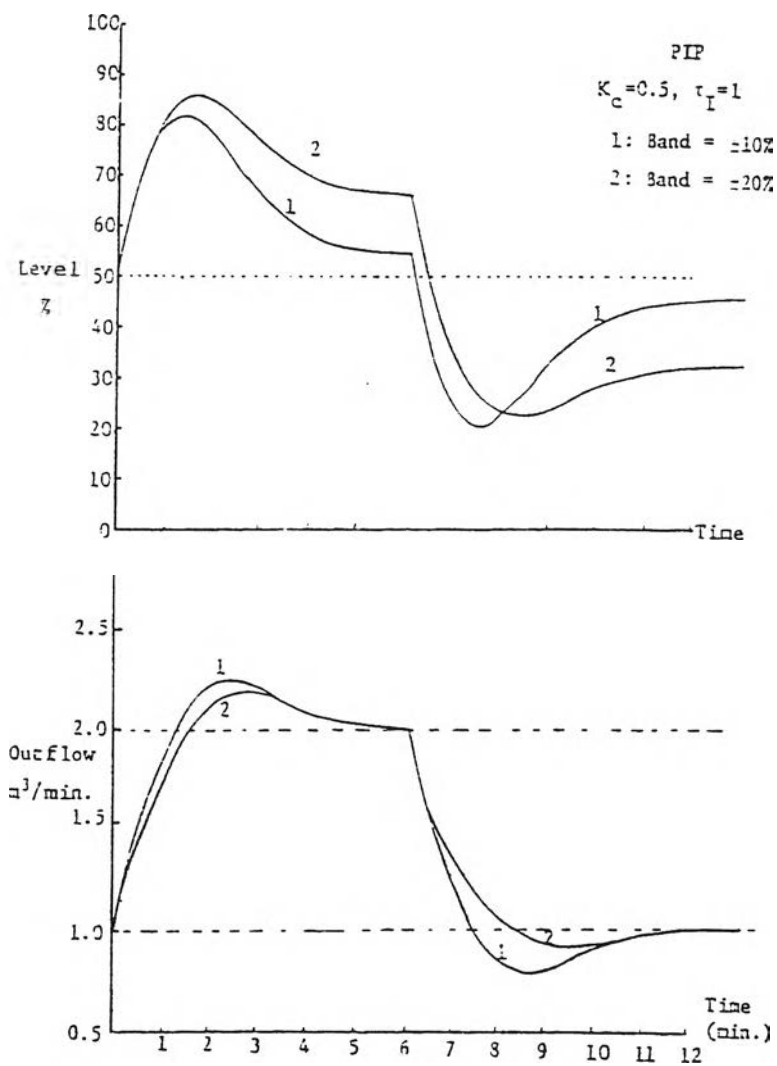
3.29 โดยจากการศึกษาพบว่าผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอพีดีจะคล้ายคลึงกับตัวควบคุมแบบพีไอมาก การไหลขาออกจะเปลี่ยนแปลงอย่างราบเรียบและถึงแม้ว่าการเซ็ทค่าตัวควบคุมแบบพีไอโดยทั่วไปจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การแดมป์เท่ากับ 0.5 แต่ผลการตอบสนองที่ได้จากตัวควบคุมแบบพีไอพีดีดูเหมือนว่าเป็นแบบแดมป์เกิน (Overdamped) อุปสรรคใหญ่ของ

ตัวควบคุมแบบพีไอพี คือ ระดับของเหลวจะกลับไปอยู่ในช่วงความผิดพลาดแต่อาจไม่ใช่ค่า เซ็ทพอยน์ที่ต้องการ

เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอพีสามารถที่จะใช้ค่าเกณฑ์ต่ำเพื่อให้เกิดการกรองสัญญาณที่ดี และสามารถทำการรีเซ็ตได้อย่างรวดเร็วเพื่อรักษาระดับของเหลวให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด ขอบเขตของการควบคุมแบบพีไอพีเปรียบเสมือนกับตัวที่ตรวจสอบการตอบสนองแบบการแกว่ง ขึ้นลง (Oscillate) ที่เกิดจากการควบคุมแบบพีไอ อย่างไรก็ตามช่วงความผิดพลาดปกติไม่ควร กำหนดให้มีขนาดใหญ่เกินไป เนื่องจากมีผลต่อค่าอ็อพเซ็ทของระดับของเหลวที่สถานะคงตัว

การปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอพี

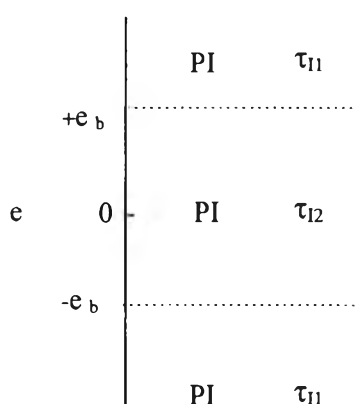
สำหรับการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอพี จากการกำหนดค่าอัตรา การเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกสูงสุด (MRCO) จะทราบค่า K_c ได้ทันที โดยค่าเกณฑ์ดังกล่าว สามารถหาค่าได้จากแผนภาพการปรับจูนตัวควบคุมแบบพีไอ (Cheung และ Luyben, 1979) ดัง แสดงในรูปที่ 3.13 ส่วนการประมาณค่าเริ่มต้นของเวลารีเซ็ต (Reset time) สามารถหาได้จาก แผนภาพการปรับจูนตัวควบคุมแบบพีไอเช่นเดียวกันโดยการกำหนดค่าระดับของเหลวสูงสุด (MPH) ที่ต้องการ การประมาณค่าเวลารีเซ็ตอีกค่าหนึ่งสามารถหาได้จากการใช้ค่าระดับของ เหลวสูงสุด (MPH) ลบด้วยช่วงความผิดพลาด (Error band) ที่กำหนดขึ้น ค่า τ_I ที่ถูกต้องควรอยู่ ระหว่างค่าที่ได้จากการประมาณทั้ง 2 วิธี ซึ่งหาได้จากการลองผิดลองถูก (Trial and error) ความกว้างของช่วงความผิดพลาดจะขึ้นกับระยะอ็อพเซ็ทที่สถานะคงตัวว่ามีความกว้างได้เท่าไร



รูปที่ 3.29 ผลการตอบสนองที่ได้จากตัวควบคุมแบบพีไอพี

3.7.4 ตัวควบคุมแบบคิอาร์ไอพี (Dual range integral/proportional controller)

ตัวควบคุมแบบคิอาร์ไอพีใช้ตัวควบคุมแบบพีไอทั้งในและนอกช่วงความผิดพลาด มีแต่เพียงค่าเวลารีเซ็ตที่ถูกเปลี่ยนเมื่อค่าความผิดพลาดเคลื่อนย้ายจากบริเวณหนึ่งไปยังบริเวณอื่น สามารถสรุปการทำงานของตัวควบคุมแบบคิอาร์ไอพีดังรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 การทำงานของตัวควบคุมแบบคิอาร์ไอพี

จากรูปที่ 3.30 สามารถอธิบายการทำงานของตัวควบคุมแบบคิอาร์ไอพีได้ดังนี้

สำหรับ $|e| < e_b$

$$CO = \text{Bias} + K_c e + \frac{K_c}{\tau_{12}} \int_0^t e dt$$

สำหรับ $|e| > e_b$

$$CO = \text{Bias} + K_c e + \frac{K_c}{\tau_{11}} \int_0^t e dt$$

ค่า τ_{12} ที่มากจะถูกใช้เพื่อให้ค่า $\xi > 1$ อยู่ภายในช่วงและค่า τ_{11} ที่น้อยจะถูกใช้เพื่อให้

ค่า $\xi < 1$ อยู่ในช่วง (Band) จากการปรับค่าความกว้างของช่วงความผิดพลาดปกติและค่าเวลา

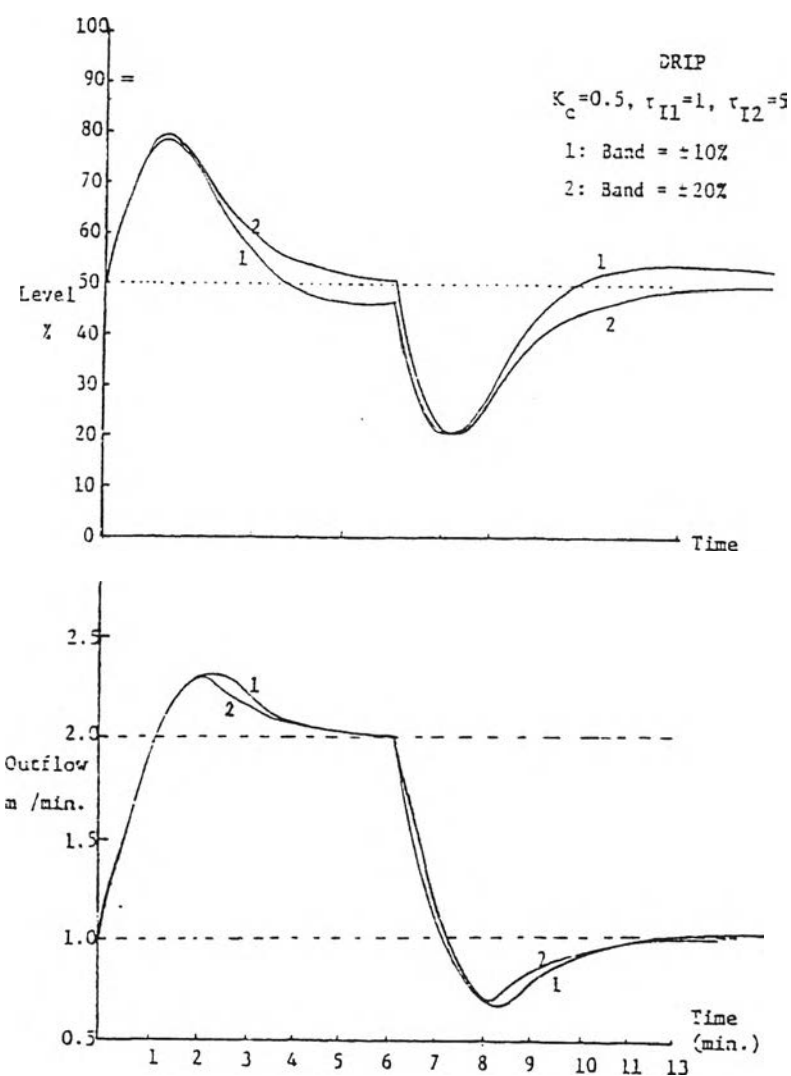
รีเซ็ตทั้งสอง พบว่าเป็นไปได้ที่จะควบคุมให้การตอบสนองของกระบวนการโดยรวม (Overall process) มีค่าใกล้เคียงกับค่าแดมป์พอดี (Critical damping) ได้เสมอ

ผลที่ได้จากการเลียนแบบดิจิทัลของตัวควบคุมแบบดีอาร์ไอพีโดยใช้ระบบของถังพัก มาตรฐานที่ได้กล่าวไว้เมื่อการไหลขาเข้าเปลี่ยนแปลงแบบสตีพทั้งทางบวกและลบแสดงได้ดังรูปที่ 3.31 พบว่าการควบคุมแบบดีอาร์ไอพีประสบความสำเร็จทางด้านของวัตถุประสงค์ที่ให้ เกิดการทำงานอย่างช้า ๆ เมื่อความผิดพลาดมีค่าน้อย และการทำงานเป็นไปอย่างรวดเร็วเมื่อ ความผิดพลาดมีค่ามาก เมื่อทำการเปลี่ยนค่าโหลด (Load change) จะไม่เกิดอ็อปเซ็ทจากผลการตอบสนองที่ได้ เพราะฉะนั้นสามารถใช้งานได้กว้างกว่า ข้อเสียที่เกิดขึ้น คือ การกรองสัญญาณเมื่อความผิดพลาดมีค่าน้อยจะแยกว่า

การปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบดีอาร์ไอพี

ในการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบดีอาร์ไอพี ค่าเกณฑ์ราบได้โดยการ กำหนดค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกสูงสุด (MRCO) เช่นเดียวกับการปรับจูนค่า พารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอ ส่วนค่าเวลารีเซ็ตที่ให้ค่าระดับของเหลวสูงสุด (MPH) เป็นไปตามที่กำหนดและให้ค่า $\xi = 1$ สามารถหาได้จากแผนภาพการปรับจูนตัวควบคุมแบบพี ไอดังแสดงในรูป 3.13 หลังจากนั้นทำการประมาณค่า τ_I (ให้ค่า $\xi < 1$) และ τ_{I2} (ให้ค่า $\xi > 1$) จากค่าเวลารีเซ็ตเมื่อค่า $\xi = 1$ โดยค่า τ_I (ให้ค่า $\xi < 1$) จะมีค่าน้อยกว่าค่าเวลารีเซ็ตเมื่อค่า $\xi = 1$ ส่วนค่า τ_{I2} (ให้ค่า $\xi > 1$) จะมีค่ามากกว่าค่าเวลารีเซ็ตเมื่อค่า $\xi = 1$ ซึ่งค่า τ_I และค่า τ_{I2} ที่ถูกต้องสามารถหาได้จากการลองผิดลองถูก (Trial and error) โดยตัวควบคุมชนิดนี้

สามารถใช้ได้กับช่วงความผิดพลาดที่กว้างกว่า (Wider band) ตัวควบคุมแบบพีไอพี



รูปที่ 3.31 ผลการตอบสนองที่ได้จากตัวควบคุมแบบพีไอพี

นอกจากตัวควบคุมแบบแบ่งช่วงการควบคุมที่ได้เสนอขึ้นโดย Cheung และ Luyben (1980) ได้มีการนำเอาคุณสมบัติการจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก (Limited output change) (Cheung และ Luyben, 1980) มาใช้เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งานตัวควบคุมชนิดต่าง ๆ

หรือช่วยให้สามารถใช้ประโยชน์จากตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้นโดยหลีกเลี่ยงอันตรายที่อาจเกิดขึ้นได้ โดยคุณสมบัติดังกล่าวช่วยจำกัดความไม่แน่นอนในการปรับจูนตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้นและช่วยให้การปรับจูนตัวควบคุมแบบทั่วไปทำได้ง่ายขึ้น

อัตราการเปลี่ยนแปลงของตัวควบคุมขาออกสามารถที่จะจำกัดให้เป็นไปตามค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกสูงสุด (MRCO) ที่ต้องการได้ ข้อจำกัดดังกล่าวสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้กับตัวควบคุมใด ๆ เพื่อให้เกิดความปลอดภัยขึ้น การนำเอาลักษณะการจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกมาประยุกต์ใช้กับตัวควบคุมแบบพีและพีไอ ทำให้การปรับจูนตัวควบคุมดังกล่าวค่อนข้างที่จะแตกต่างกัน ขึ้นกับความซับซ้อนของตัวควบคุม

การกำหนดข้อจำกัด (Constraint action) ประสบความสำเร็จในการใช้งานกับการควบคุมแบบดิจิทัลซึ่งมีลำดับการทำงานเป็นดังนี้ ในแต่ละคาบการเก็บตัวอย่าง (Sampling period) จะได้ว่า

(i) ทำการเก็บค่าเดิมของตัวควบคุมขาออกไว้ (CO_{old})

(ii) ทำการคำนวณการควบคุมเพื่อให้ได้ค่า CO_{new}

(iii) คำนวณการเปลี่ยนแปลง $\Delta CO = CO_{new} - CO_{old}$

(iv) ถ้า ΔCO ไม่เกินค่า $\Delta CO_{max} (= MRCO \times T_s)$ สูงสุดที่ระบุไว้, ค่า $CO = CO_{new}$

(v) ถ้า ΔCO เกินค่า ΔCO_{max} ที่กำหนดไว้ $CO = CO_{old} \pm \Delta CO_{max}$ ซึ่งเครื่องหมาย

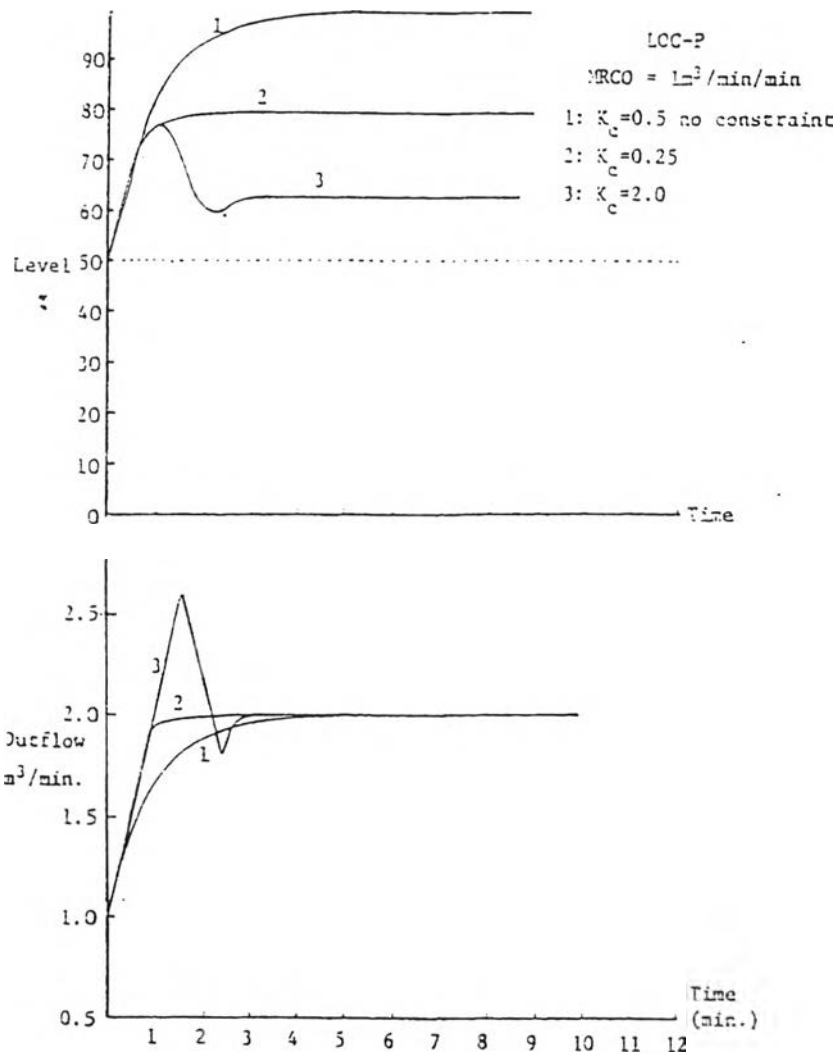
จะขึ้นกับเครื่องหมายของความผิดพลาด

(vi) ปรับค่า $CO_{old} = CO$

การกำจัดการเปลี่ยนแปลงขาออกดังกล่าวสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานกับตัวควบคุมแบบต่าง ๆ ทั้งเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นได้ โดยในที่นี้ขอยกตัวอย่างตัวควบคุมประเภทต่าง ๆ ที่นำการกำจัดการเปลี่ยนแปลงขาออกมาประยุกต์ใช้งานดังต่อไปนี้

3.7.5 ตัวควบคุมแบบพีโดยกำจัดการเปลี่ยนแปลงขาออก (Limited output change of P controller: LOC-P controller)

เป็นการนำตัวควบคุมแบบพีมาทำการกำจัดการเปลี่ยนแปลงขาออกโดยวิธีการที่ได้กล่าวมาข้างต้น ผลที่ได้จากการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีโดยกำจัดการเปลี่ยนแปลงขาออกเมื่อให้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกสูงสุด (MRCO) เท่ากับ $1 \text{ m}^3/\text{min}/\text{min}$ แสดงได้ดังรูป 3.32 จากสถานะปกติเมื่อไม่ได้นำคุณสมบัติการกำจัดการเปลี่ยนแปลงขาออกมาใช้เพื่อให้ได้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกสูงสุดที่กำหนดไว้จะได้ค่าเกินเท่ากับ 0.5 พบว่าค่าเกินดังกล่าวทำให้เกิดอ็อปเซ็ทของระดับของเหลวที่สถานะคงตัวเท่ากับ 50% แต่เมื่อนำคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงขาออกมาใช้พบว่าค่าเกินสามารถเพิ่มขึ้นได้ถึง 0.85 เส้นโค้งของการเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกจะไม่เกินค่าการเปลี่ยนแปลงการไหลขาออกสูงสุดที่กำหนดไว้ ขณะเดียวกันสามารถลดอ็อปเซ็ทของระดับของเหลวได้ถึง 30% อย่างไรก็ตามถ้าค่าเกินเพิ่มขึ้นถึง 2 การไหลขาออกจะเกิดโอเวอร์พีคที่แหลม (Overpeak sharply) และจะเกิดการแกว่ง (Oscillate) ขึ้น



รูปที่ 3.32 ผลการตอบสนองที่ได้จากตัวควบคุมแบบพีโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก

การปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขา

ออก

ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมดังกล่าวสามารถหาได้จากแผนภาพการปรับจูนตัวควบคุมแบบพี
 ดังแสดงในรูปที่ 3.12 หลังจากนั้นทำการปรับจูนค่าเกณฑ์ดังกล่าวอย่างละเอียดอีกครั้งโดยวิธีการ

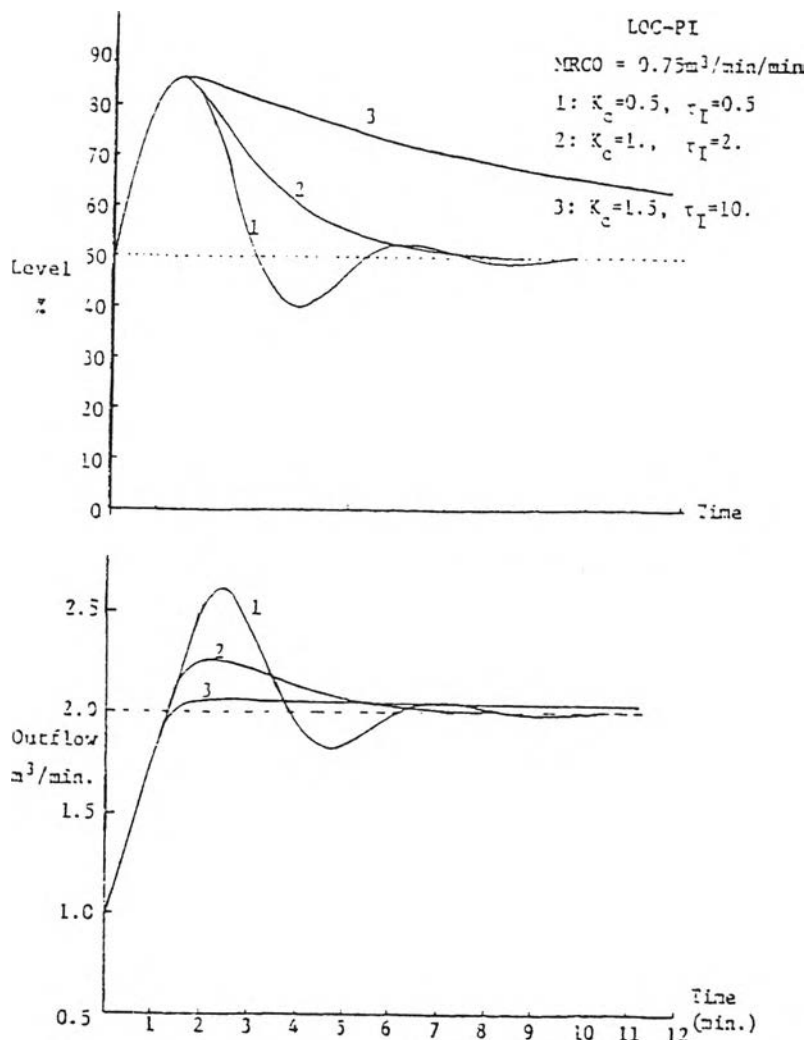
ลองผิดลองถูก อย่างไรก็ตามในการปรับจูนค่าเกนดังกล่าวต้องมั่นใจว่าค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงที่จำกัดไว้เหมาะสม และค่าเกนที่ใช้ไม่ควรมากเกินไปเนื่องจากอาจทำให้ผลการตอบสนองที่ได้เกิดการแกว่ง (Oscillate)

3.7.6 ตัวควบคุมแบบพีไอโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก (Limited output change of PI controller: LOC-PI controller)

ทำนองเดียวกันกับตัวควบคุมแบบพีไอโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก เป็นการนำตัวควบคุมแบบพีไอมาทำการจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกโดยวิธีการที่ได้กล่าวมาข้างต้น พบว่าเมื่อนำคุณสมบัติของการจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกมาใช้กับการควบคุมแบบพีไอจะต้องทำอย่างระมัดระวังเพื่อป้องกันการเกิดรีเซ็ตวายด์อัป (Reset windup) ในการควบคุมแบบดิจิทัล คุณสมบัติการป้องกันการเกิดรีเซ็ตวายด์อัป (Anti reset windup) สามารถเพิ่มได้โดยการคำนวณค่าความผิดพลาดอินทิกรัล (ERINT) ขึ้นมาใหม่ จากข้อจำกัดของตัวควบคุมขาออกที่จุดสิ้นสุดในแต่ละคาบของการเก็บตัวอย่าง เช่น

$$ERINT = CO - Bias - K_c e$$

ผลการตอบสนองที่ได้จากตัวควบคุมแบบพีไอโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกแสดงได้ดังรูปที่ 3.33 จากการศึกษาพฤติกรรมของตัวควบคุมแบบพีไอโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก พบว่าการจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกจะมีประสิทธิภาพในการช่วยลดการแฉก การตอบสนองที่ดีที่สุดจะเกิดเมื่อใช้ค่าเกนที่สูงและเวลารีเซ็ตมาก



รูปที่ 3.33 ผลการตอบสนองที่ได้จากตัวควบคุมแบบพีไอโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก การปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก

ค่าเกณฑ์และเวลารีเซ็ตซึ่งสอดคล้องกับข้อกำหนดของกรณีที่ไม่ได้ทำการจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกสามารถหาได้โดยใช้แผนภาพการปรับจูนตัวควบคุมแบบพีไอดังแสดงใน

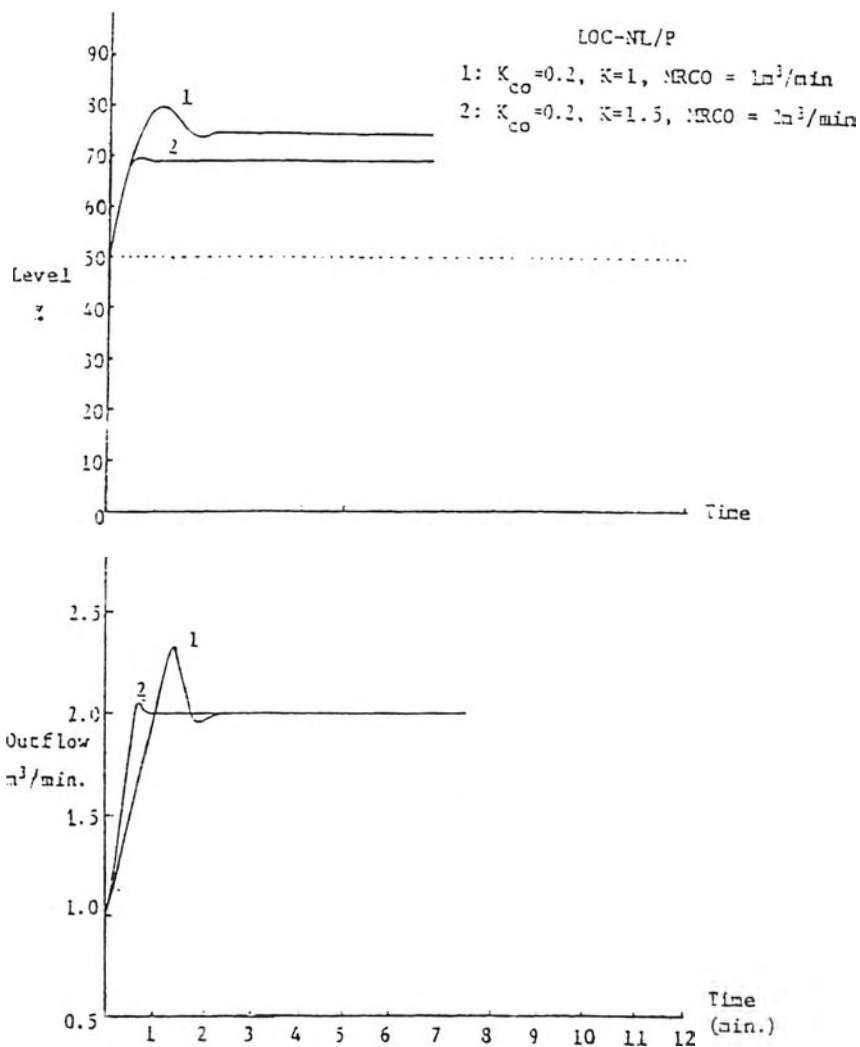
รูป 3.14 หลังจากนั้นทำการปรับจูนค่าที่ได้อย่างละเอียดอีกครั้งโดยทำการเพิ่มค่าเกนและเวลารีเซ็ตที่ได้จกแผนภาพการปรับจูนตัวควบคุมแบบพีโอ ค่าเวลารีเซ็ตที่ใช้ควรให้ค่า $\xi > 1$ ทำการจูนค่าพารามิเตอร์ทั้งสองอย่างละเอียดจนกระทั่งได้ค่าระดับของเหลวสูงสุด (MPH) ตามที่กำหนดไว้

3.7.7 ตัวควบคุมพีแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก (Limited output change of nonlinear-P controller: LOC-NL/P controller)

ตัวควบคุมพีแบบไม่เชิงเส้น (NL/P controller) ในที่นี้คือ ตัวควบคุมแบบช่วงกว้างที่ไม่ใช้การกระทำในส่วนของอินทิกรัลเข้ามาช่วยในการควบคุม ตัวควบคุมพีแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกสามารถที่จะทำการปรับจูนเพื่อให้ค่าเกนที่ความผิดพลาดเป็นศูนย์มีค่าต่ำ เพื่อให้สามารถรองรับสัญญาณรบกวนได้ดี ผลการตอบสนองที่ได้จากตัวควบคุมพีแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกแสดงได้ดังรูปที่ 3.34

การปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก

แฟคเตอร์ของความไม่เชิงเส้น (Nonlinearity factor: K) และค่าเกนที่ความผิดพลาดเป็นศูนย์ (K_{c0}) ซึ่งสอดคล้องกับข้อกำหนดของกรณีที่ไม่ได้ทำการจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกสามารถหาได้โดยใช้แผนภาพการปรับจูนตัวควบคุมแบบช่วงกว้างดังแสดงในรูป 3.24 จากนั้นทำการเพิ่มค่า K_{c0} แล้วทำการปรับจูนค่า K ให้ได้ค่าระดับของเหลวสูงสุดตามที่ต้องการ



รูปที่ 3.34 ผลการตอบสนองที่ได้จากตัวควบคุมพีแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลง

ขาออก

3.7.8 ตัวควบคุมพีไอแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก (Limited

output change of nonlinear PI controller: LOC- NL/PI controller)

เป็นการนำตัวควบคุมแบบช่วงกว้างของ Shunta และ Fehervari มาทำการจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก พบว่าตัวควบคุมดังกล่าวให้ผลการไหลขาออกที่มีลักษณะค่อนข้างแหลม

คม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่ความผิดพลาดเป็นศูนย์ใช้สำหรับกรณีค่าสัมประสิทธิ์การแดมป์เท่ากับ 1 ($\xi = 1$) เมื่อการไหลขาออกถูกจำกัดส่งผลกระทบต่อสัมประสิทธิ์การแดมป์มีค่าน้อยกว่า 1 ผลการตอบสนองที่ได้จากตัวควบคุมพีไอแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกแสดงได้ดังรูปที่ 3.35

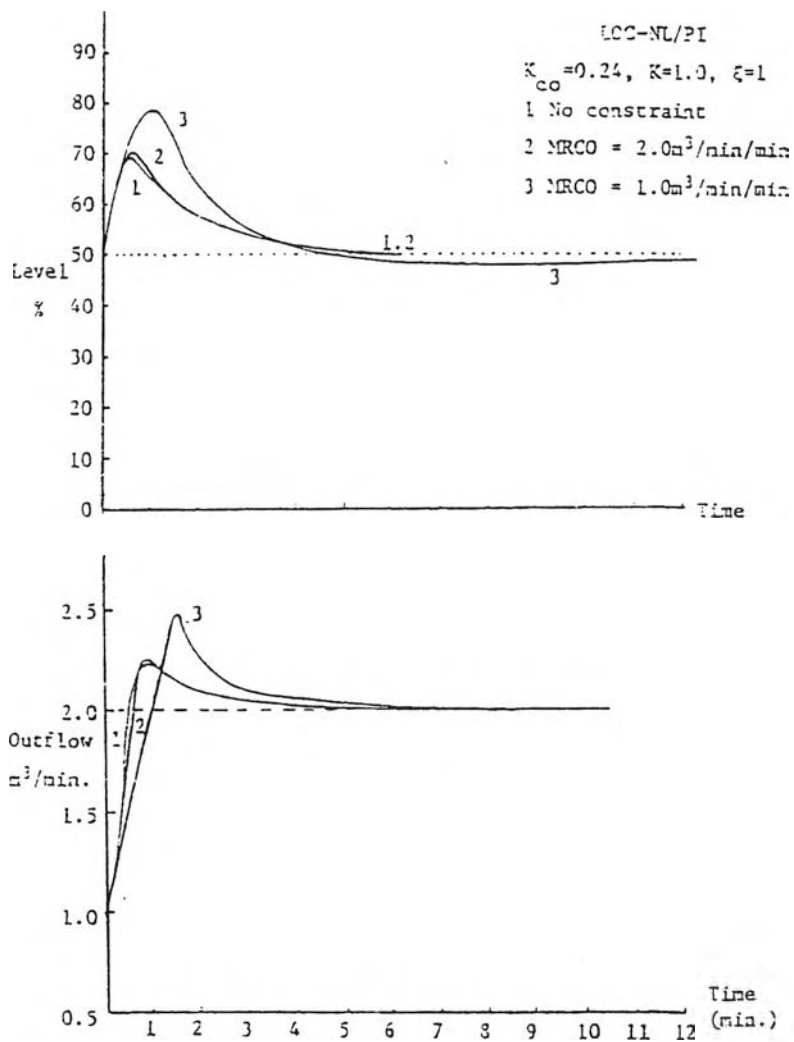
การปรับจูนตัวควบคุมพีไอแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก

ทำนองเดียวกับการปรับจูนตัวควบคุมพีไอแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก แฟคเตอร์ของความไม่เชิงเส้น (Nonlinearity factor: K) และค่าเกณฑ์ความผิดพลาดเป็นศูนย์ (K_{c0}) ซึ่งสอดคล้องกับข้อกำหนดในกรณีที่ไม่ได้ทำการจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกสามารถหาได้โดยใช้แผนภาพการปรับจูนตัวควบคุมแบบช่วงกว้างดังแสดงในรูป 3.24 หลังจากนั้นทำการเลือกค่าเวลารีเซ็ทที่ความผิดพลาดเป็นศูนย์ (τ_{I0}) โดยค่าเวลารีเซ็ทดังกล่าวควรให้ค่า $\xi > 1$ เพื่อหลีกเลี่ยงฟีกการไหลขาออกที่มีลักษณะแหลมคม

จากการนำคุณสมบัติการจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกมาใช้กับตัวควบคุมชนิดต่าง ๆ ข้างต้นสามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่าคุณสมบัติการจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกสามารถช่วยเพิ่มความง่ายในการปรับจูนตัวควบคุม

จากการเปรียบเทียบตัวควบคุมที่กล่าวมาทั้งหมดจะเห็นประโยชน์ข้อหนึ่งของตัวควบคุมแบบแบ่งช่วงการควบคุมและการนำคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงขาออกมาใช้กับตัวควบคุมชนิดต่าง ๆ คือ ความง่ายในการควบคุมให้ได้ตามข้อกำหนดของระดับของเหลวในขณะที่สามารถทำการจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกให้เป็นไปตามต้องการได้ นอกจากนี้ตัวควบคุม

ดังกล่าวยังช่วยเพิ่มคุณสมบัติในการกรองสัญญาณรบกวนในช่วงความถี่พลาตต่ำ



รูปที่ 3.35 ผลการตอบสนองที่ได้จากตัวควบคุมพีไอแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการ

เปลี่ยนแปลงขาออก

การควบคุมแบบแบ่งช่วงควบคุมประสบความสำเร็จในการควบคุม คือ ทำงานช้าเมื่อความผิดพลาดมีค่าน้อยและทำงานเร็วเมื่อความผิดพลาดมีค่ามาก กล่าวได้ว่าตัวควบคุมดังกล่าวสามารถใช้ประโยชน์จากตัวควบคุมแบบพีและพีไอโดยให้การประมาณแบบเชิงเส้นเพื่อเกิดเป็นตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้นขึ้น ผลที่ได้คือ ตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้นที่สามารถทำนายผลการตอบสนองได้ง่าย

ส่วนการนำคุณสมบัติการจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกมาใช้ช่วยให้การไหลขาออกเป็นไปตามค่าการไหลขาออกสูงสุดที่กำหนดไว้ได้มากขึ้น ทำให้ค่าออฟเซตที่สภาวะคงตัวของตัวควบคุมแบบพีลดลงและสามารถหลีกเลี่ยงการตอบสนองแบบแกว่ง (Oscillatory response) ของตัวควบคุมแบบพีไอ นอกจากนี้ยังช่วยให้สามารถปรับจูนตัวควบคุมแบบช่วงกว้างโดยหลีกเลี่ยงโอเวอร์พีคของการไหลขาออกที่แหลม (Sharp outflow overpeak) ได้

จากที่กล่าวมาทั้งหมดไม่ชัดเจนเพียงพอที่จะตัดสินได้ว่าตัวควบคุมชนิดใดดีที่สุด โดยตัวควบคุมแบบพีไอพี, ตัวควบคุมแบบพีโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก และตัวควบคุมพีแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก ให้การกรองสัญญาณรบกวนได้ดีในระดับที่ต่างกัน และให้ออฟเซตของระดับของเหลวที่สภาวะคงตัว ในขณะที่ตัวควบคุมแบบพีไอพี, ตัวควบคุมแบบพีไอโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก และตัวควบคุมพีไอแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก ไม่เกิดออฟเซตของระดับของเหลวที่สภาวะคงตัวแต่ส่งผลให้การไหลขาออกเปลี่ยนแปลงมากขึ้นและเกิดลักษณะโอเวอร์พีค ดูเหมือนว่าตัวควบคุมแบบพีไอพี, ตัวควบคุมแบบพีโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกและตัวควบคุมพีแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัด

การเปลี่ยนแปลงขาออกสามารถนำมาใช้เมื่ออ็อพเช็ทของระดับไม่ใช่ปัจจัยที่สำคัญ ส่วนตัวควบคุมแบบดีอาร์ไอพี, ตัวควบคุมแบบพีไอโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออก และตัวควบคุมพีไอแบบไม่เชิงเส้นโดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขาออกสามารถนำมาใช้งานได้เมื่ออ็อพเช็ทของระดับจัดเป็นปัจจัยที่สำคัญ

จากทฤษฎีการออกแบบและการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยชนิดต่าง ๆ ที่สนใจศึกษาดังได้กล่าวมา งานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยชนิดต่าง ๆ ดังกล่าว จากการเขียนโปรแกรมการควบคุมโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์แมทแลบ (MATLAB) และใช้เกณฑ์ในการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 ดังได้กล่าวรายละเอียดของการทดลองไว้ในบทที่ 4 และบทที่ 5 ต่อไป