

2102331: การทดลองระบบควบคุมป้อนกลับ
ห้องปฏิบัติการพื้นฐานระบบควบคุม
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลอง CS05: ลักษณะสมบัติของกระบวนการ

วัตถุประสงค์

ศึกษาลักษณะสมบัติของกระบวนการเพื่อกำหนดวัตถุประสงค์ของการควบคุม

1 บทนำ

1.1 การควบคุมกระบวนการ

กระบวนการและการควบคุมอาจประกอบด้วยส่วนประกอบต่างๆ เช่น ระบบทำความร้อนในบ้าน หรืออาจเป็นระบบที่ซับซ้อน เช่น กระบวนการกลั่นน้ำมัน อย่างไรก็ตาม วัตถุประสงค์ของการควบคุมกระบวนการคือ การปรับพลังงาน หรือสัญญาณควบคุม ที่ป้อนให้กับกระบวนการ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ โดยทั่วไป การควบคุมกระบวนการประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วนดังแสดงในรูป 1

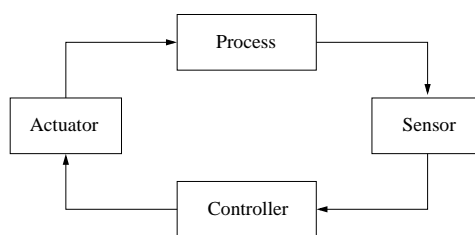


Figure 1: แผนภาพการควบคุมกระบวนการ

1. กระบวนการ (process) หมายถึงระบบกายภาพที่ถูกออกแบบเพื่อควบคุมค่าตัวแปรหนึ่งหรือหลายตัวที่สามารถแสดงหรือทำหน้าที่ของระบบทั้งระบบได้
2. ตัวตรวจรู้ (sensor) ใช้วัดสัญญาณออกของกระบวนการ ในทางปฏิบัติของระบบอุตสาหกรรม ตัวตรวจรู้มักถูกผนวกไว้กับตัวส่งผ่าน (transmitter) เพื่อแปลงสัญญาณออกของกระบวนการให้อยู่ในรูปของสัญญาณไฟฟ้าตามมาตรฐานทางอุตสาหกรรม
3. ตัวควบคุม (controller) มีหน้าที่แปลงข้อมูลที่ได้จากตัวตรวจรู้เป็นสัญญาณควบคุม
4. อุปกรณ์ปรับแก้ (final control element) หรือตัวขับเคลื่อน (actuator) รับสัญญาณควบคุมจากตัวควบคุม แล้วส่งสัญญาณปรับแก้ให้กับกระบวนการ

ตัวอย่างของระบบควบคุมกระบวนการแบบง่ายแสดงในรูป 2

ในตัวอย่างที่พิจารณา กระบวนการคือการทำให้อ่างน้ำร้อนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ ตัวตรวจรู้คือเทอร์โมสแตท ตัวควบคุมคือสวิตช์ของเทอร์โมสแตท อุปกรณ์ปรับแก้คือเครื่องทำความร้อน ระบบมีหน้าที่รักษาอุณหภูมิภายในให้คงที่อยู่ที่ค่าที่ตั้งไว้

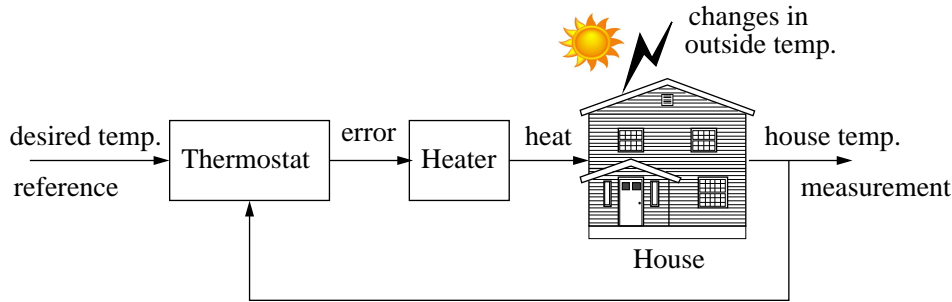


Figure 2: แผนภาพกรอบระบบควบคุมอุณหภูมิ

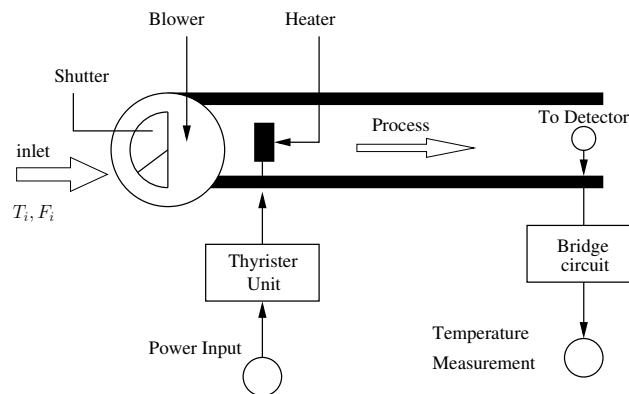


Figure 3: เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

โดยเทอร์โมสแตท กำลังงานถูกจ่ายให้กับกระบวนการเพื่อทำให้ความคลาดเคลื่อน (error) มีค่าเป็นศูนย์ โดยที่ความคลาดเคลื่อนเป็นความแตกต่างระหว่างค่าอุณหภูมิที่วัดได้ (measured value) กับค่าอุณหภูมิที่กำหนด (set point)

โดยทั่วไป การทำงานของระบบควบคุม พิจารณาคุณลักษณะพื้นฐาน ได้แก่ เสถียรภาพ (stability) ผลตอบชั่วคราว (transient response) ความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัว (steady state error) และความไว (sensitivity) ต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบและสิ่งแวดล้อม สิ่งสำคัญอันดับแรกๆ ของระบบควบคุมคือเสถียรภาพ หากระบบขาดเสถียรภาพ ระบบก็ไม่สามารถควบคุมตัวแปรที่ต้องการได้ ส่วนคุณลักษณะอื่นนั้นขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบจะระบุเป็นการเฉพาะสำหรับแต่ละระบบ

1.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

กระบวนการที่ใช้ในการทดลองนี้ ได้แก่ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ดังแสดงในรูป 3 วัตถุประสงค์ของการควบคุมคือรักษาอุณหภูมิออกที่วัดได้ปลายท่อ T_m ไว้ที่ค่าอุณหภูมิที่กำหนด (set point) เมื่อมีการแปรผันของอัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิเข้า T_i ค่ากำหนดนี้ตั้งได้โดยปรับแรงดันอ้างอิงที่แสดงอุณหภูมิออกที่ต้องการ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในรูป 3 ประกอบด้วยโบลเวอร์ (blower) ทำหน้าที่หมุนเวียนอากาศภายในท่อด้วยความเร็วรอบคงที่ ชัตเตอร์ (shutter) ทำหน้าที่ควบคุมปริมาณของอากาศที่ไหลเข้า ผู้ใช้สามารถปรับตำแหน่งของชัตเตอร์ด้วยมือ ตัวขับเคลื่อน (actuator) คือขดลวดทำความร้อนที่ป้อนความร้อนให้อากาศ และควบคุมโดยไทรสเตอร์ (thyristor) ตัวตรวจรู้ (sensor) คือเทอร์มิสเตอร์ (thermistor) ที่วัดอุณหภูมิของอากาศและเปลี่ยนเป็นแรงดันโดยวีตสโตนบริดจ์

เมื่ออัตราการไหลของอากาศคงที่ ผนังท่อที่มีความจุความร้อนที่ละลายได้ จึงไม่ต้องนำมาพิจารณาด้วย ขณะที่ความเร็วของการไหลของอากาศมีรูปแบบเรียบ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิไม่ปรากฏที่ปลายด้านออกของท่อจนกระทั่งเวลาผ่านไป L วินาที โดยที่ L คือเวลาที่อากาศเดินทางผ่านท่อ นั่นคือ

$$L = \frac{\text{ปริมาตรของท่อ}}{\text{อัตราการไหลเชิงปริมาตร}}$$

ปรากฏการณ์เช่นนี้ เรียกว่า การหน่วงเวลา (transportation lag) บางครั้ง L เรียกว่า deadtime หรือ distance/velocity

lag ซึ่งเป็นเหตุให้การควบคุมทำได้ยากขึ้น

การควบคุมแบบป้อนกลับใช้เทอร์มิสเตอร์วัดอุณหภูมิขาออก เทอร์มิสเตอร์คือทรานสดิวเซอร์ที่ความต้านทานเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิที่วัด เทอร์มิสเตอร์ทั่วไปทำด้วยวัสดุสารกึ่งตัวนำและมีจำหน่ายในรูปของ disk rod bead และ chip เมื่อใช้เทอร์มิสเตอร์วัดอุณหภูมิโดยทั่วไปต้องแปลงความต้านทานให้เป็นแรงดันแอนะล็อกที่สมมูลกัน โดยใช้วงจรวีตสโตนบริดจ์ และวงจรขยายสัญญาณ (amplifier) แรงดันที่เป็นสัดส่วนกับอุณหภูมิที่วัดได้จะถูกป้อนให้กับวงจรขยายเชิงบวก (summing amplifier) พร้อมกับแรงดันค่ากำหนด ความแตกต่างของสัญญาณแรงดันทั้งสองถูกส่งต่อไปยังไทรสเตอร์ ซึ่งจ่ายกระแสให้กับขดลวดทำความร้อน

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายนอก T_i เป็นเหตุไปรบกวนการทำงานของกระบวนการ การเปลี่ยนแปลงของ T_i เป็นการเปลี่ยนแปลงภาระงาน ซึ่งมีผลกระทบต่ออุณหภูมิขาออก T_o ระบบควบคุมรับรู้ถึงผลกระทบนี้จากการวัดอุณหภูมิขาออก และการป้อนกลับ ทำให้มีการปรับค่าพลังงานเพื่อรักษา T_o ไว้ที่ค่าอุณหภูมิที่กำหนด ความพยายามในการรักษาค่าอุณหภูมิขาออกนี้ ต้องอาศัยตัวควบคุมซึ่งจะได้กล่าวถึงในตอนต่อไป

1.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองคณิตศาสตร์ของกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนสอดคล้องกับอุณหพลศาสตร์ โดยที่

$$q_i(t) - q_o(t) = C \frac{dT_o}{dt} \quad (1)$$

โดยที่

- $q_i(t)$ = ความร้อนที่ป้อนให้กับท่อ
- $q_o(t)$ = $\frac{T_o - T_i}{R_t}$ = อัตราการไหลของความร้อนตามท่อ (Btu/s)
- R = ความต้านทานเชิงความร้อน (thermal resistance) ($^{\circ}\text{F sec/Btu}$)
- C = ความจุเชิงความร้อน (thermal capacitance) ของอากาศในท่อ (Btu/ $^{\circ}\text{F}$)
- τ = RC = ค่าคงตัวเวลาเชิงความร้อน (thermal time constant)

แทนค่า q_o ใน (1) และจัดเทอมใหม่จะได้สมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่ง

$$\tau \dot{T}_o(t) + T_o(t) = Rq_i(t) + T_i \quad (2)$$

อุณหภูมิอากาศภายนอก T_i ตาม (2) คือภาระงานของกระบวนการ (disturbance) และอาจรวมไว้เป็นส่วนหนึ่งของพารามิเตอร์ของระบบก็ได้ ความร้อนที่ป้อนให้กับท่อ q_i เป็นตัวแปรที่สามารถปรับได้เพื่อควบคุมอุณหภูมิขาออก เนื่องจากเป็นตัวกำหนดปริมาณของพลังงานที่จ่ายไปสู่อากาศ

นอกจากนี้ ผลมาจากการหน่วงเวลา ทำให้เราเขียนได้ว่า อุณหภูมิขาออกที่เราวัดได้ปลายท่อ (T_m) จะสัมพันธ์กับ ค่าอุณหภูมิขาออก T_o ดังนี้

$$T_m(t) = T_o(t - L)$$

ดังนั้น ฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) จาก q_i ไป T_m ของกระบวนการประมาณได้ด้วยระบบอันดับหนึ่งที่มีการหน่วงเวลาดังนี้

$$G(s) = \frac{K e^{-Ls}}{\tau s + 1}$$

ค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวหาได้จากผลตอบสนองทั้งโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ ข้อกำหนดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีดังนี้

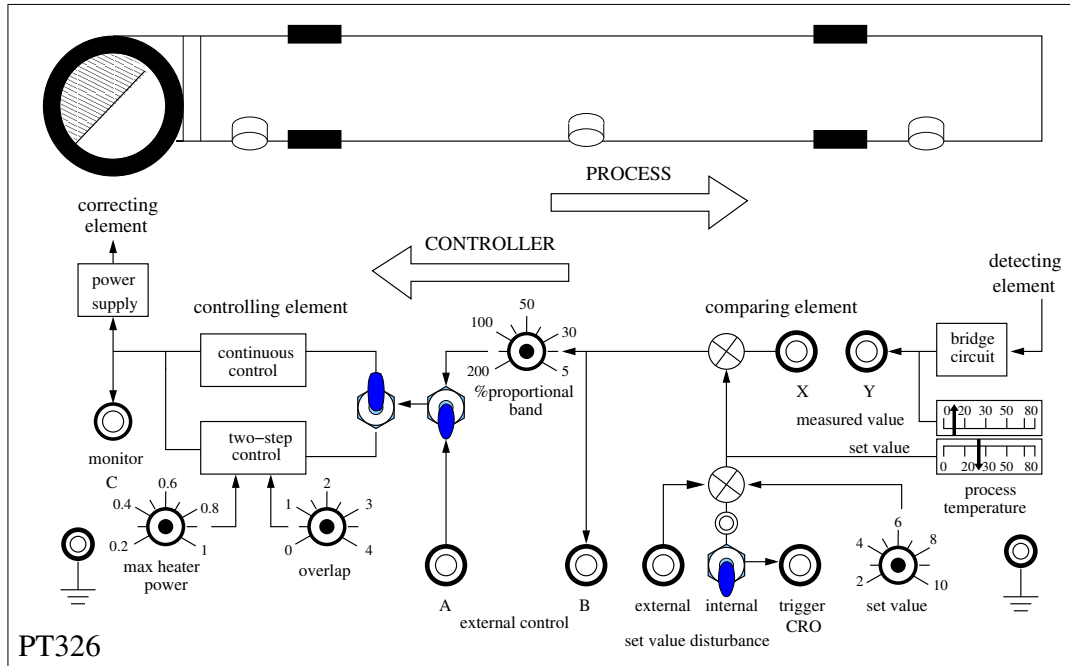


Figure 4: ชุดทดลองกระบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน PT326

พิสัยแรงดันสัญญาณขาเข้า (Input signal voltage range)	0 to -10 V
พิสัยแรงดันสัญญาณขาออก (Output signal voltage range)	0 to +10 V
สเกลค่ากำหนดและค่าที่วัดได้ (Set value and measured value meter scale)	0 to 80 °C
พิสัยการไหลอากาศ (Air flow range)	1 to 10 ft/s
พิสัยกำลังของขดลวดทำความร้อน (Heater power range)	15 to 80 W
พิสัยอุณหภูมิอากาศที่ควบคุมได้ (Controlled air temperature range)	30 to 60 °C
เมื่อชัตเตอร์ (shutter) เปิดอยู่ที่ 40° และตัวตรวจ (detector) อยู่ที่ตำแหน่ง 11 นิ้ว	
การหน่วงเวลา	0.18 s

2 อุปกรณ์การทดลอง

1. PT326 Heat Exchanger ดังรูป 4
2. ออสซิลโลสโคป
3. เครื่องกำเนิดสัญญาณ
4. NI card และ Real-Time Workshop Toolbox in MATLAB

3 การทดลอง

การทดลองที่ 1 และ 2 จะเป็นการหาพารามิเตอร์ของระบบ โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของระบบ ได้แก่ อัตราขยาย (K) ค่าคงตัวเวลา (τ) และการหน่วงเวลา (L) ซึ่งทำได้ทั้งในโดเมนเวลาและความถี่ ในการทดลองจะทำทั้งสองโดเมนเพื่อเป็นการยืนยันผล

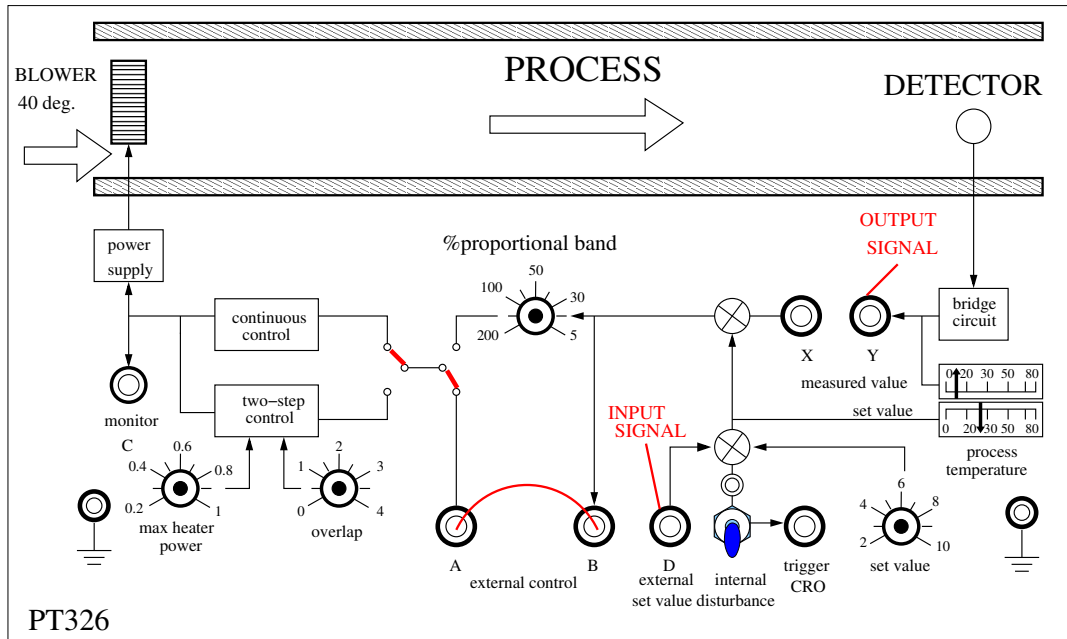


Figure 5: ระบบควบคุมวงเปิดเพื่อศึกษาผลตอบทางเวลา

2. เพื่อแสดงว่าพารามิเตอร์ของระบบเปลี่ยนแปลงได้ เมื่อมีการเปลี่ยน load

การทดลอง 1 ผลตอบในโดเมนเวลา

1. ต่อดวงจรและตั้งสวิตช์ตามรูป 5
2. ปรับค่ากำหนด (Set Value) ไปที่ 40°C ปรับ Blower inlet ไปที่ 40° และตั้งสวิตช์ด้านข้างเครื่อง PT326 ที่ Heater
3. ใส่คลื่นสี่เหลี่ยม 2 V_{p-p} ความถี่ 0.1 Hz ที่ช่องเสียบ D (อาจปรับความถี่ได้ตามความเหมาะสม)
4. ใช้ออสซิลโลสโคปตรวจดูรูปคลื่นสัญญาณออก (ช่องเสียบ Y) และบันทึกทั้งสัญญาณเข้าและสัญญาณออก (ควรบันทึกอย่างน้อย 3 คาบ)
5. ปรับ Blower inlet ไปที่ 60°C ทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง

การทดลอง 2 ผลตอบในโดเมนความถี่

1. ต่อดวงจรและตั้งสวิตช์ตามรูป 6
2. ปรับค่ากำหนด (Set Value) ไปที่ 40°C ปรับ Blower inlet ไปที่ 40°C และตั้งสวิตช์ด้านข้างเครื่อง PT326 ที่ Heater
3. ใส่สัญญาณไซน์ (sine) ขนาด 2 V_{p-p} ที่ช่องเสียบ X ของ PT326
4. บันทึกความสัมพันธ์ของขนาดและเฟสของสัญญาณเข้าและสัญญาณออก โดยที่ความถี่ของสัญญาณไซน์มีค่าเป็น 0.08 0.1 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 1.4 2 Hz (แต่ละความถี่ควรบันทึกอย่างน้อย 3 คาบ)
5. ทดลองปรับความถี่ของสัญญาณเข้า จนกระทั่งการตามหลังเฟสเท่ากับ 180° บันทึกค่าความถี่ และอัตราขยายที่ความถี่นี้

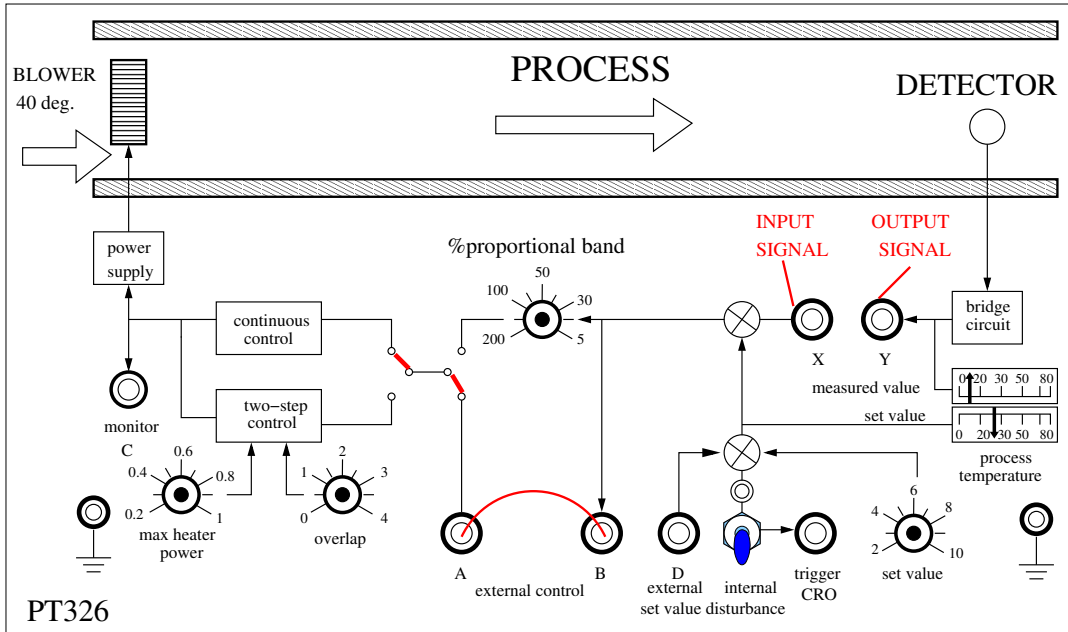


Figure 6: ระบบควบคุมวงเปิดเพื่อศึกษาผลตอบทางความถี่

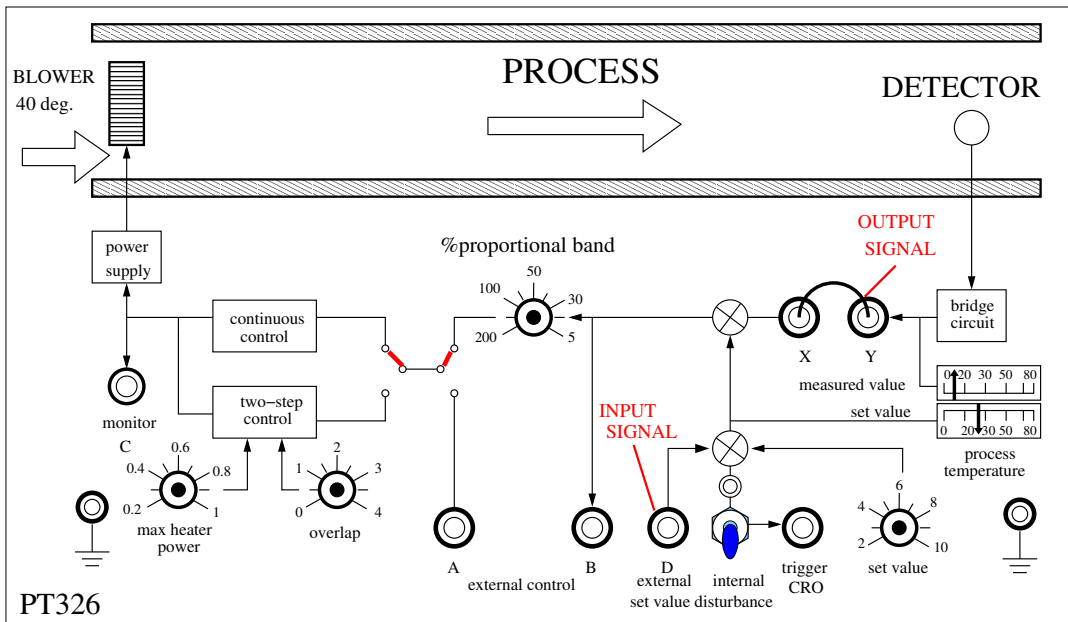


Figure 7: ระบบควบคุมวงปิด

การทดลอง 3 เสถียรภาพของระบบวงปิด

วัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาเสถียรภาพของระบบที่มีการหน่วงเวลา เมื่อปรับค่าอัตราขยายเพิ่มขึ้น ผลตอบสนองจะมีส่วนพุ่งเกิน (percent maximum overshoot, %OS) เพิ่มขึ้น เวลาเข้าที่ (settling time) เร็วขึ้น ค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัวลดลง และเมื่อเพิ่มอัตราขยายจนถึงค่าอัตราขยายวิกฤต (critical gain) ผลตอบจะแกว่งเพิ่มขึ้นจนแกว่งคงที่ อัตราขยายวิกฤตนี้เทียบได้กับส่วนเผื่อขยาย (gain margin) สอดคล้องกับตำแหน่งวงปิดที่แสดงโดยแผนภาพทางเดินราก (root locus)

1. ตั้งสวิทช์และต่อวงจรที่กำหนดให้ตามรูป 7 ปรับค่ากำหนด (Set Value) ไปที่ 40°C ปรับ Blower inlet ไปที่ 40°C
2. ใส่คลื่นสี่เหลี่ยม 2 V_{p-p} ความถี่ 0.1 Hz เข้าที่ช่องเสียบ D ของ PT326
3. ใช้ออสซิลโลสโคปตรวจดูรูปคลื่นสัญญาณออกที่ช่องเสียบ Y
4. ปรับ %PB เพื่อให้ได้ผลตอบต่างกันอย่างน้อยมีนัยสำคัญ 3 ค่า บันทึกค่าสัญญาณควบคุมและสัญญาณออก
5. ปรับ %PB จนกระทั่งผลตอบแกว่งคงที่ (sustained oscillation) อ่านค่า %PB ให้วิเคราะห์ว่าค่าอัตราขยายที่ได้นี้ สัมพันธ์กับค่าส่วนเผื่ออัตราขยาย (phase margin) จากแผนภาพโพลเดของระบบวงเปิด อย่างไร

References

- [1] D.E. Seborg, T.F. Edgar and D.A. Mellichamp, *Process Dynamics and Control*, John Wiley, New York, 1989.
- [2] G. Stephanopoulos, *Chemical Process Control*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1984.