

**2102331: การทดลองระบบควบคุมป้อนกลับ**  
**ห้องปฏิบัติการพื้นฐานระบบควบคุม**  
**ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย**

**การทดลอง CS02: การออกแบบเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของระบบควบคุม**

### วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ในการออกแบบตัวควบคุม เพื่อปรับปรุงสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุม ให้สามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

## 1 บทนำ

โดยทั่วไป การทำงานของระบบควบคุมควรพิจารณาลักษณะสมบัติต่างๆ ดังนี้คือ

1. เสถียรภาพ (Stability)
2. ผลตอบสนองชั่วคราว (Transient response)
3. ความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัว (Steady state error)

สิ่งสำคัญอันดับแรกของระบบควบคุมก็คือเสถียรภาพ เพราะถ้าระบบไม่มีเสถียรภาพเราก็ไม่สามารถควบคุมระบบได้ สำหรับลักษณะผลตอบสนองนั้น เรามักต้องการให้ได้ผลตอบสนองที่เร็ว นั่นคือ ช่วงเวลาขึ้น (Rise time) ช่วงเวลาเข้าที่ (Settling time) ส่วนพุ่งเกิน (Overshoot) ที่ยอมรับได้ ส่วนความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัวนั้นต้องมีค่าเป็นศูนย์ หรือต่ำที่สุดเท่าที่สามารถทำได้ ลักษณะอื่นๆ นอกเหนือจากนี้จะระบุเฉพาะในแต่ละระบบ

ในระบบควบคุมที่พลานต์ (Plant) ได้ถูกกำหนดแล้ว เราไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ภายในเพื่อปรับปรุงระบบเพื่อให้ทำงานได้ตามต้องการ ดังนั้นในขั้นแรก ผู้ออกแบบอาจปรับค่าอัตราขยายของวงรอบการควบคุม ในเชิงปฏิบัติมักพบว่า การปรับอัตราขยายอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะทำให้ระบบมีลักษณะตามต้องการได้ เช่นถ้าเราเพิ่มอัตราขยายจะทำให้ความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัวลดลง แต่ก็อาจมีผลทำให้ผลตอบสนองเลวลง การแก้ไขในกรณีเช่นนี้ทำได้โดยออกแบบตัวควบคุม (Controller) เสริมเข้าไปในระบบ โดยสมรรถนะของตัวควบคุมที่ใช้นั้นขึ้นอยู่กับประกอบหลัก 2 ส่วน ดังนี้

1. การตามรอยสัญญาณอ้างอิง (Reference tracking) หมายถึงการที่ผลตอบของระบบสามารถติดตามสัญญาณเข้าอ้างอิง (Reference input) ได้ เช่น การที่โรเตอร์ของมอเตอร์สามารถหมุนไปตรงตำแหน่งที่ต้องการหรือการที่อุณหภูมิขาออกของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าตรงกับค่ากำหนดที่ตั้งไว้ การตามรอยสัญญาณอ้างอิงแบ่งการพิจารณาเป็น 2 ช่วง ดังนี้
  - (a) ผลตอบสนองของระบบ พิจารณาผลตอบ ณ เวลาเริ่มต้นที่สัญญาณอ้างอิงมีการเปลี่ยนแปลง จนกระทั่งผลตอบสนองเข้าสู่สถานะอยู่ตัวและส่วนพุ่งเกินที่เกิดขึ้นจากการปรับตัวเข้าสู่สถานะอยู่ตัวของระบบ
  - (b) ผลตอบอยู่ตัวของระบบ พิจารณาความคลาดเคลื่อนที่สถานะอยู่ตัวของระบบ
2. การกำจัดสัญญาณรบกวน (Disturbance rejection) หมายถึง การที่ระบบสามารถแก้ไขผลกระทบที่เกิดจากสิ่งรบกวนภายนอกได้ เช่น เมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำและส่งผลให้ตำแหน่งของโรเตอร์ผิดไปจากที่กำหนดไว้ ดังแผนภาพกรอบ Simulink ในรูปที่ 1 ตัวควบคุมมีหน้าที่ทำให้แกนโรเตอร์ของมอเตอร์ หมุนกลับมายังตำแหน่งที่ต้องการได้ หรือเมื่อปรับ Blower Inlet ทำให้ปริมาณอากาศที่ไหลเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเปลี่ยนไป ดังแผนภาพกรอบ Simulink ในรูปที่ 2 ตัวควบคุมมีหน้าที่ทำให้อุณหภูมิขาออกกลับสู่ค่าที่ต้องการได้

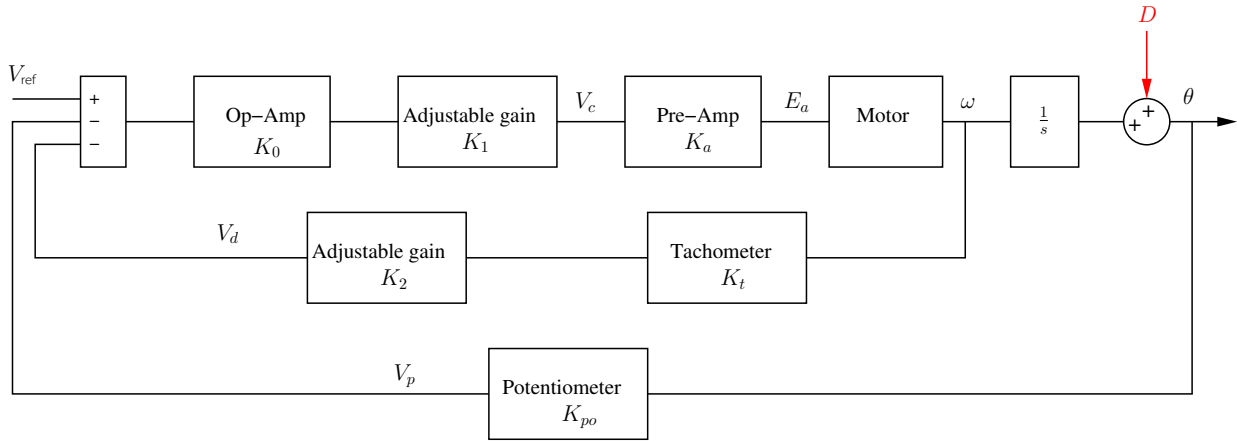


Figure 1: แผนภาพกรอบของชุดการทดลองมอเตอร์ที่มีการรบกวนจากภายนอก

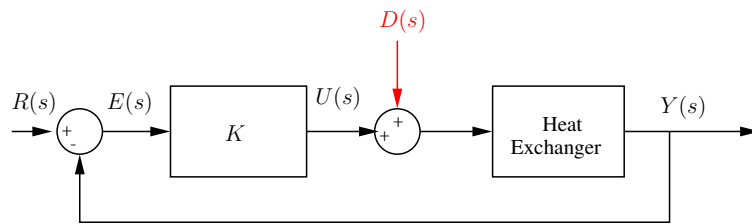


Figure 2: แผนภาพกรอบของกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการรบกวนจากภายนอก

ดังนั้น ตัวควบคุมที่ดีสามารถรักษาเสถียรภาพและสมรรถนะที่พึงประสงค์ไว้ได้ ส่วนจะเน้นส่วนใดนั้นขึ้นกับระบบที่ควบคุม และการนำไปใช้งาน

จากการทดลองที่ผ่านมา เราได้จำลองและวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบพลวัต 2 ระบบ ได้แก่ ชุดการทดลองมอเตอร์ และกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน ในการทดลองนี้ เราจะพิจารณาการออกแบบตัวควบคุมของระบบทั้งสอง ดังต่อไปนี้

1. ชุดการทดลองมอเตอร์ ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับตำแหน่งและความเร็ว โดยนำแรงดันคลาดเคลื่อนที่เป็นผลต่างระหว่างแรงดันอ้างอิงกับกับแรงดันตำแหน่งเชิงมุมของมอเตอร์ รวมกับแรงดันที่ได้จากการป้อนกลับความเร็วของมอเตอร์ ไปผ่านตัวควบคุมเพื่อสร้างเป็นสัญญาณควบคุมต่อไป ทั้งนี้การป้อนกลับตำแหน่งและความเร็วเปรียบเสมือนกับการใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนและอนุพันธ์ (Proportional and Derivative, PD) นั่นเอง
2. กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน ใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน อินทิกรัล และอนุพันธ์ (Proportional-Integral-Derivative, PID) โดยนำเอาแรงดันคลาดเคลื่อนที่ได้จากผลต่างระหว่างแรงดันอ้างอิงกับแรงดันป้อนกลับ ไปผ่านตัวควบคุมเพื่อสร้างสัญญาณควบคุมต่อไป

## 2 คุณสมบัติของตัวควบคุมแบบ PID

ตัวควบคุมในระบบควบคุมมีหลายชนิด แต่ที่ใช้ในระบบควบคุมกระบวนการส่วนใหญ่ เป็นตัวควบคุมแบบ PID ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยที่  $R(s)$  คือสัญญาณอ้างอิง  $Y(s)$  คือสัญญาณออกที่วัดได้  $E(s)$  คือ สัญญาณคลาดเคลื่อน

$$E(s) = R(s) - Y(s)$$

และ  $U(s)$  คือ สัญญาณควบคุมที่ออกจากตัวควบคุม อนึ่ง ตัวควบคุม PID อาศัยเทคนิคการควบคุมพื้นฐาน 3 แบบ ได้แก่ แบบสัดส่วน (Proportional หรือ P) แบบอินทิกรัล (Integral หรือ I) และแบบอนุพันธ์ (Derivative หรือ D) ผู้ออกแบบ

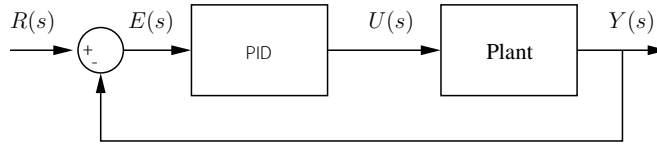


Figure 3: ตัวควบคุม PID ที่ต่อเข้าในระบบแบบอนุกรม

มักใช้ตัวควบคุมแบบ PI หรือ PID เพื่อทำให้วงควบคุมทำงานตามที่ต้องการ รายละเอียดของการควบคุมพื้นฐานแต่ละแบบมีดังนี้

1. **Proportional Action (P)** เป็นเทคนิคที่ง่ายที่สุด หลักการก็คือสัญญาณควบคุมจากตัวควบคุมป้อนเข้ากระบวนการ มีค่าเป็นสัดส่วนกับความผิดพลาด (error = setpoint-output) ที่เกิดขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง Proportional Action ทำหน้าที่เป็นอัตราขยาย (Gain) เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  $K_p$

การควบคุมเชิงสัดส่วนนี้สามารถควบคุมระบบได้ระดับหนึ่ง เหมาะสมกับกระบวนการที่ต้องการผลตอบสนองรวดเร็ว ในขณะเดียวกันยอมให้เกิดความคลาดเคลื่อนขนาดคงที่ค่าหนึ่ง ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงานหรือพารามิเตอร์บางตัวในระบบ ก็อาจทำให้เกิดปัญหาขึ้นได้ เช่น ความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัว (steady state error) หรือที่เรียกว่า "ออฟเซต" ตัวควบคุมแบบ P ไม่สามารถแก้ไขให้หมดไปได้ แต่สามารถลดผลได้โดยเพิ่มอัตราขยายของตัวควบคุมเพื่อเพิ่มขนาดของสัญญาณควบคุม ทำให้ความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยลง อย่างไรก็ตาม หากเพิ่มอัตราขยายของตัวควบคุมมากเกินไปก็อาจจะทำให้ผลตอบแกว่งได้ เนื่องจากระบบจะไวต่อการเปลี่ยนแปลง

2. **Integral Action (I)** สัญญาณควบคุมของตัวควบคุมแบบ PI สามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$U(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) E(s) = \left( K_p + \frac{K_i}{s} \right) E(s)$$

เมื่อ  $T_i$  คือ Integral time (วินาที) วิธีนี้จะสามารถแก้ความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัวได้ เนื่องจากเสมือนเพิ่มขั้วที่จุดกำเนิดให้กับระบบวงเปิด แต่ก็จะทำให้ระบบมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ลดลง โดยทั่วไปแล้วระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบ PI จะมีช่วงเวลาการแกว่งนานกว่าช่วงเวลาที่ใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน 50% หรือ

$$T_{PI} = 1.5T_p$$

เมื่อ  $T_p$  คือ ช่วงเวลาในการแกว่งของระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบ PI และ  $T_p$  คือ ช่วงเวลาในการแกว่งของระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบ P

อย่างไรก็ตาม สำหรับระบบที่มีค่าคงตัวเวลา (time constant) น้อย (เช่น ระบบควบคุมอัตราการไหล) ปัญหานี้จะไม่มีผลมากนัก แต่สำหรับระบบที่มีค่าคงตัวเวลามาก ปัญหานี้จะใหญ่มากและอาจทำให้ระบบเข้าสู่จุดวิกฤติที่ไม่สามารถยอมรับได้ (เช่น ระบบควบคุมระดับ)

3. **Derivative Action (D)** การควบคุมแบบสัดส่วนและอินทิกรัลต่างก็มีข้อจำกัด และอาจทำให้เกิดปัญหาต่อการควบคุมกระบวนการเนื่องจากการแกว่งมาก อย่างไรก็ตาม ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้ด้วยการเพิ่มตัวอนุพันธ์ สัญญาณควบคุมของตัวควบคุมแบบ PID สามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$U(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) E(s) = \left( K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s \right) E(s)$$

ในทฤษฎีระบบควบคุม Derivative action ทำหน้าที่เสมือนกับการเพิ่มศูนย์ (zero) หนึ่งตัวให้กับระบบ ทำให้ระบบมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม การเพิ่ม  $K_D$  มากเกินไปอาจจะทำให้ระบบมีผลตอบที่ช้า

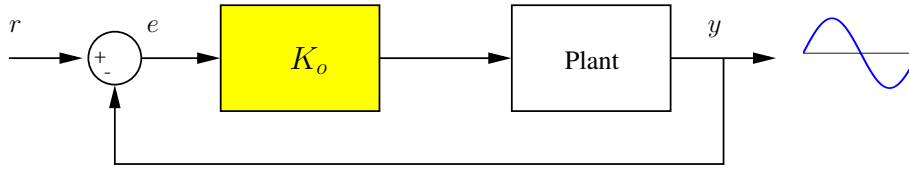


Figure 4: การหาค่าอัตราขยายที่ทำให้ระบบเริ่มแกว่ง

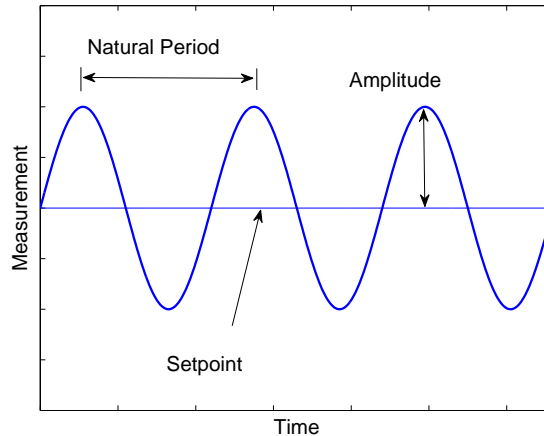


Figure 5: การแกว่งด้วยค่าแอมพลิจูดคงที่สำหรับวิธีวงปิด

### 3 การปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

ในการปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุม (Controller Parameter Tuning) เริ่มจากการหาลักษณะของวงรอบการควบคุมเดิม เทคนิคต่างๆในการหาลักษณะของกระบวนการมีความสำคัญมาก นำไปสู่การตั้งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ตัวควบคุม PID เป็นแบบที่นิยมใช้ ในปัจจุบันแบ่งการปรับแต่งตัวควบคุมเป็น 2 วิธีคือ วิธีวงปิด (closed-loop method/ultimate sensitivity method) และวิธีวงเปิด (open-loop method) ในการทดลองนี้ เราจะเน้นวิธีวงปิดเป็นหลัก

วิธีวงปิด เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เพราะว่ามีกระบวนการวัดค่าพารามิเตอร์จากผลตอบสนองทางเวลาเพียงค่าเดียว วิธีนี้เริ่มจากการปรับอัตราขยายวงรอบ  $K_o$  ดังรูปที่ 4 จนทำให้ผลตอบสนองเริ่มแกว่งด้วยแอมพลิจูดคงที่และมีคาบเวลาคงที่ดังในรูป 5 หลังจากนั้นให้อ่านหรือคำนวณคาบเวลาทางธรรมชาติ (natural period,  $T_0$ ) ของการแกว่ง ตัวอย่างของการวัดวิธีนี้แสดงในรูป 5 เวลาจากยอดถึงยอดวัดได้ 2.2 วินาที ดังนั้น  $T_0$  มีค่าเท่ากับ 2.2 วินาที

#### จุดประสงค์ในการปรับจูนตัวควบคุม

หลังจากการวัดคาบเวลาทางธรรมชาติแล้ว การปรับจูนตัวควบคุม (controller tuning) ก็สามารถทำได้ด้วยวิธี Ziegler-Nichols หรือ Shinskey หรือวิธีอื่นๆ วัดจุดประสงค์ก็เพื่อจะหาตัวควบคุมที่ทำให้ผลรวมของความคลาดเคลื่อนในช่วงเวลาทำงานมีค่าต่ำสุด ในทางปฏิบัติการปรับจูนที่เหมาะสมวิธีหนึ่งคือ การปรับจูนให้ได้ผลตอบที่มีลักษณะการหน่วงแอมพลิจูดหนึ่งในสี่ (quarter amplitude damping, QAD) รูปที่ 6(a) แสดงลักษณะสมบัติของ QAD สัดส่วนของส่วนพุ่งเกินที่สอง  $B$  ต่อส่วนพุ่งเกินที่หนึ่ง  $A$  เป็น 1 : 4 หรือ ผลตอบลักษณะนี้เกี่ยวข้องโดยตรงกับผลตอบที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำสุด

ในบางกระบวนการไม่อาจยอมรับการแกว่งของสัญญาณได้ เพราะอาจทำให้อุปกรณ์ชำรุดเสียหาย ดังนั้น จึงต้องเลือกการปรับจูนตัวควบคุมให้ได้ผลตอบในลักษณะอื่น เช่น ผลตอบสนองแบบหน่วงวิกฤต (critically damped) ดังแสดงในรูปที่ 6(b) ถ้าหากเพิ่มอัตราขยายแก่ตัวควบคุมอีกเพียงเล็กน้อย ผลตอบก็จะแกว่งรอบๆค่าอ้างอิงหลายครั้ง ตัวควบคุมที่ให้ผลตอบแบบหน่วงวิกฤต จะให้ค่าคลาดเคลื่อนมีขนาดใหญ่มากกว่าตัวควบคุมที่ให้ผลตอบแบบ QAD แต่ยอมรับได้มากขึ้น และตรงกับความต้องการ อย่างไรก็ตาม หากเพิ่มค่าอัตราขยายของตัวควบคุมให้สูงขึ้นอีก ระบบก็จะเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง ผลตอบลักษณะนี้เรียกว่าหน่วงขาด (underdamped) และจะมีความคลาดเคลื่อน (วัดเทียบกับค่าอ้างอิง) เล็กน้อย ดังรูปที่ 6(c)

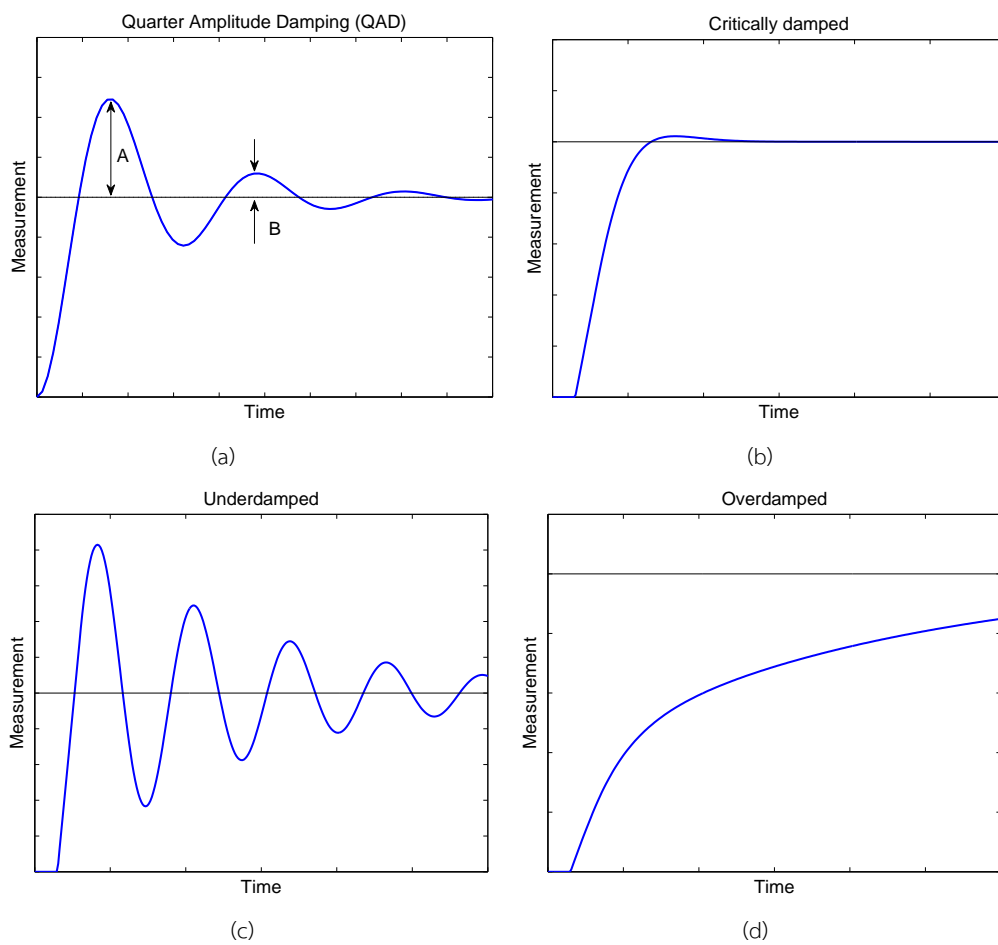


Figure 6: ผลของการปรับอัตราขยายที่มีต่อผลตอบเชิงเวลาในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว

ในทางกลับกันหากลดอัตราขยายของตัวควบคุมลง การรบกวนจะส่งผลต่อผลตอบทำให้การแกว่งลดลงดังรูปที่ 6(d) แต่ทำให้ความคลาดเคลื่อนมากขึ้น ผลตอบในลักษณะนี้เรียกว่าหน่วงเกิน (overdamped)

#### 4 แนวทางและวิธีการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

ตัวควบคุม PID สามารถเขียนได้ในรูปต่อไปนี้

$$C(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

โดยที่  $K_p$  คือค่าอัตราขยายสัดส่วน (proportional gain)  $T_i$  คือเวลารีเซต (reset time) มีหน่วยเป็นวินาที และ  $T_d$  คืออัตราอนุพันธ์ (derivative rate) มีหน่วยเป็นวินาที ลักษณะสมบัติและการปรับจูนตัวควบคุมแบบ P, PI, และ PID มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### Proportional-only mode (P control)

ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (P control) จะได้จากการกำหนดค่า  $T_i = \infty$  และ  $T_d = 0$  และเลือกค่า  $K_p$  ที่เหมาะสม ตัวควบคุมแบบนี้เหมาะในการใช้งานกับกระบวนการที่ต้องการผลตอบที่รวดเร็ว ในขณะที่เดียวกันก็ยอมให้เกิดความคลาดเคลื่อนขนาดคงที่ค่าหนึ่ง ตัวควบคุมแบบสัดส่วนจะมีพารามิเตอร์ที่ต้องปรับจูนเพียงตัวเดียว

##### Proportional-plus-integral mode (PI control)

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนและอินทิกรัล (หรือ PI) จะได้จากการกำหนดค่า  $T_d = 0$  และเลือกค่า  $K_p$  และ  $T_i$  ที่เหมาะสม มีข้อได้เปรียบกว่าตัวควบคุมเชิงสัดส่วนอย่างเดียวคือให้ผลตอบที่เร็วและให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่สถานะอยู่ตัวเป็นศูนย์ วิธีการปรับจูนพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PI จะยุ่งยากขึ้นเนื่องจากมีพารามิเตอร์ที่ต้องเลือกจำนวน 2 ตัว

##### Proportional, integral and derivative mode (PID)

ตัวควบคุมแบบ PID จะใช้กับกระบวนการที่มีการตอบสนองช้า และมีคาบเวลาที่ค่อนข้างนาน เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้กับกระบวนการควบคุมอุณหภูมิ เมื่อค่าอุณหภูมิที่วัดได้เริ่มเปลี่ยนแปลง heat rate อาจต้องเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว Derivative action จะลดคาบเวลาของผลตอบให้สั้นลงเมื่อเกิดการรบกวน (upset) อย่างไรก็ตาม ตัวควบคุมแบบ PID ไม่สามารถใช้กับระบบที่มีสัญญาณรบกวนการวัดหรือการเปลี่ยนแปลงแบบฉับพลัน

วิธีการเลือกพารามิเตอร์ของตัวควบคุม P, PI และ PID เป็นดังนี้

ตัวควบคุม	ค่าอัตราขยายของ Ziegler-Nichols	ตัวควบคุม	ค่าอัตราขยายของ Shinsky
P	$K_p = 0.5K_0$	P	$K_p = 0.5K_0$
PI	$K_p = 0.45K_0$ $T_i = T_0/1.2$	PI	$K_p = 0.5K_0$ $T_i = 0.43T_0$
PID	$K_p = 0.6K_0$ $T_i = 0.5T_0$ $T_d = T_0/8$	PID	$K_p = 0.25K_0$ $T_i = 0.5T_0$ $T_d = 0.12T_0$

โดยที่  $K_0$  คือค่าอัตราขยายที่ใช้ตั้งที่ทำให้เกิดการแกว่งแบบแอมพลิจูดคงที่ดังรูป 4 และ  $T_0$  คือคาบของการแกว่งของผลตอบสนองเมื่อใช้อัตราขยาย  $K_0$  หากไม่ต้องการผลตอบแบบ QAD การเพิ่ม %PB (หรือลดอัตราขยายของตัวควบคุม) จะทำให้ผลตอบเป็นแบบหน่วงวิกฤต (critically damped) และหากยังคงเพิ่มค่า %PB ต่อเนื่องไป จะทำให้ผลตอบเป็นแบบหน่วงเกิน (overdamped) ในทางกลับกัน การลด %PB จะทำให้ผลตอบเป็นแบบหน่วงขาด (underdamped)

## 5 สิ่งที่ต้องเตรียมมา

1. จากการทดลอง CS01 พิจารณาแบบจำลองของระบบควบคุม 2 ระบบ ดังต่อไปนี้
  - (a) แบบจำลองของชุดการควบคุมมอเตอร์ที่มีการประมาณเป็นเชิงเส้นเมื่อตั้งค่าของอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 1 เป็น 100% และ ค่าของอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 2 เป็น 0%
  - (b) แบบจำลองของชุดกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อตั้งค่าของ %PB เป็น 100%กำหนดสิ่งที่ควรปรับปรุงของผลตอบเชิงเวลา พร้อมทั้งระบุสมรรถนะที่ต้องการ เวลาอยู่ตัว (settling time) ส่วนพุ่งเกิน (overshoot) และความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว (steady state error) พร้อมทั้งอธิบายเหตุผล
2. ปรับค่าของอัตราขยายทั้งสองตัวในข้อ a) เพื่อให้ระบบมีสมรรถนะตามที่ได้ระบุไว้
3. ปรับแต่งตัวควบคุม PID เพื่อให้ระบบในข้อ b) มีสมรรถนะตามที่ได้ระบุไว้

## 6 วิธีทดลอง

### การทดลอง 1 การป้อนกลับความเร็วเชิงมุมและตำแหน่งเชิงมุมในชุดการควบคุมมอเตอร์

1. ใช้ MATLAB/Simulink จำลองระบบที่ประมาณเป็นเชิงเส้นของชุดการควบคุมมอเตอร์ตามการทดลอง CS01
2. ใส่สัญญาณเข้าเป็นสัญญาณขั้นหนึ่งหน่วยจากนั้นปรับค่าของอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 1 และ 2 จนกระทั่งผลตอบสนองทางเวลามีเวลาอยู่ตัวน้อยกว่า 0.12 วินาที, ไม่มีส่วนพุ่งเกิน และไม่มี ความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว พล็อตผลตอบเชิงเวลาพร้อมทั้งระบุค่าของอัตราขยายทั้ง 2 ตัว (อัตราขยายไม่ควรเกิน 100%)
3. คงค่าอัตราขยายทั้ง 2 ตัวไว้ ใส่สัญญาณเข้าเป็นสัญญาณขั้นหนึ่งหน่วยและใส่สัญญาณรบกวนเป็นสัญญาณขั้นโดยให้ Final value เป็น 0.1 และ Step time เป็น 5 วินาที ตามรูปที่ 1 พล็อตผลตอบเชิงเวลา
4. ใช้ MATLAB/Simulink จำลองระบบที่มีองค์ประกอบไม่เชิงเส้นของชุดการควบคุมมอเตอร์โดยตั้งค่าของอัตราขยายทั้ง 2 ตัวตามที่หามาได้ในข้อ 2 พล็อตผลตอบเชิงเวลา และใส่สัญญาณรบกวนตามข้อ 3 รวมทั้งพล็อตผลตอบเชิงเวลา
5. เปรียบเทียบผลตอบของระบบที่ประมาณเป็นเชิงเส้นกับระบบที่มีองค์ประกอบไม่เชิงเส้น

### การทดลอง 2 การหาพารามิเตอร์ในการปรับจูนตัวควบคุม PID ในกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน

1. ใช้ MATLAB/Simulink จำลองระบบของชุดกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนตามรูป 4
2. ใส่สัญญาณเข้าให้เป็นสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมขนาด  $2 V_{p-p}$  และมีความถี่ 0.1 Hz จากนั้นปรับค่าอัตราขยาย  $K_0$  จนกระทั่งผลตอบของระบบเริ่มมีการแกว่งคงที่ บันทึกค่า  $K_0$  นี้ และคาบธรรมชาติ (natural period,  $T_0$ ) พล็อตผลตอบเชิงเวลา

### การทดลอง 3 การควบคุมแบบ P ในกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน

1. นำพารามิเตอร์ที่ได้จากตอนที่ 2 มาปรับจูนตัวควบคุมแบบ P ด้วยวิธี Ziegler-Nichols และ Shinskey
2. ใส่สัญญาณเข้าให้เป็นสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมขนาด  $2 V_{p-p}$  และมีความถี่ 0.1 Hz พล็อตผลตอบทางเวลาและแรงดันควบคุมของทั้ง 2 วิธี

3. คงค่าอัตราพารามิเตอร์ของตัวควบคุมไว้ตามข้อ 2. ใส่สัญญาณเข้าอ้างอิงเป็นสัญญาณขั้นหนึ่งหน่วยและใส่สัญญาณรบกวนเป็นสัญญาณขั้นตามรูปที่ 2 โดยให้ Final value เป็น 1 และ Step time เป็น 5 วินาที พล็อตผลตอบเชิงเวลา
4. วิเคราะห์ผลที่เกิดจากตัวควบคุมแบบ P

#### การทดลอง 4 การควบคุมแบบ PI ในกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน

1. นำพารามิเตอร์ที่ได้จากตอนที่ 2 มาปรับจูนตัวควบคุมแบบ PI ด้วยวิธี Ziegler-Nichols และ Shinskey
2. ใส่สัญญาณเข้าให้เป็นสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมขนาด  $2 V_{p-p}$  และมีความถี่ 0.1 Hz พล็อตผลตอบทางเวลาและแรงดันควบคุมของทั้ง 2 วิธี
3. คงค่าอัตราพารามิเตอร์ของตัวควบคุมไว้ตามข้อ 2 ใส่สัญญาณเข้าอ้างอิงเป็นสัญญาณขั้นหนึ่งหน่วยและใส่สัญญาณรบกวนเป็นสัญญาณขั้นตามรูปที่ 2 โดยให้ Final value เป็น 1 และ Step time เป็น 5 วินาที และพล็อตผลตอบเชิงเวลา
4. วิเคราะห์ผลที่เกิดจากตัวควบคุมแบบ PI

#### การทดลอง 5 การควบคุมแบบ PID ในกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน

1. นำพารามิเตอร์ที่ได้จากตอนที่ 2 มาปรับจูนตัวควบคุมแบบ PID ด้วยวิธีของ Ziegler-Nichols และ Shinskey
2. ใส่สัญญาณเข้าให้เป็นสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมขนาด  $2 V_{p-p}$  และมีความถี่ 0.1 Hz พล็อตผลตอบ ทางเวลาและแรงดันควบคุมของทั้ง 2 วิธี
3. ถ้าผลตอบทางเวลาที่ได้ยังไม่เป็น QAD ปรับค่า  $K_p$ ,  $T_i$  และ  $T_d$  ใหม่จนกระทั่งได้ผลตอบเป็น QAD จึงพล็อตผลตอบทางเวลา และระบุค่า  $K_p$ ,  $T_i$  และ  $T_d$  ที่ใช้
4. คงค่าอัตราพารามิเตอร์ของตัวควบคุมไว้ตามข้อ 3 ใส่สัญญาณเข้าอ้างอิงเป็นสัญญาณขั้นหนึ่งหน่วยและใส่สัญญาณรบกวนเป็นสัญญาณขั้นตามรูป 2 โดยให้ Final value เป็น 1 และ Step time เป็น 5 วินาที พล็อตผลตอบเชิงเวลา
5. วิเคราะห์ผลที่เกิดจากตัวควบคุมแบบ PID และเปรียบเทียบค่า  $K_p$ ,  $T_i$  และ  $T_d$  ที่ปรับจูนเองกับค่า  $K_p$ ,  $T_i$  และ  $T_d$  ที่ได้จากการปรับด้วยวิธี Ziegler-Nichols และ Shinskey