

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

**การทดลอง CS01: การจำลองและวิเคราะห์ระบบพลวัตด้วยคอมพิวเตอร์**

**วัตถุประสงค์**

ศึกษาการใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อจำลองและวิเคราะห์ระบบควบคุมของชุดการทดลองมอเตอร์ และกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน

**วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม**

1. เพื่อให้บัณฑิตสามารถเขียนแผนภาพกรอบโดยใช้ Simulink
2. เพื่อให้บัณฑิตสามารถแสดงผลตอบเชิงเวลาของระบบควบคุมโดยใช้ MATLAB/Simulink
3. เพื่อให้บัณฑิตสามารถแสดงทางเดินรากของระบบควบคุมโดยใช้ MATLAB
4. เพื่อให้บัณฑิตสามารถแสดงโพลของระบบควบคุมโดยใช้ MATLAB

**1 บทนำ**

การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ (computer simulation) เป็นขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่ง ในการวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุม โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบทางอุตสาหกรรม ในการวิเคราะห์และออกแบบระบบพลวัต (dynamic system) นั้น เราต้องทราบพฤติกรรมการทำงาน และปัจจัยต่างๆของระบบที่ส่งผลต่อการทำงาน เช่น ผลตอบเชิงเวลาและผลตอบเชิงความถี่ หากมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) ของระบบแล้ว เราสามารถทราบพฤติกรรมของระบบได้โดยการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

อนึ่ง การศึกษาของแบบจำลองของระบบพลวัตสามารถแบ่งได้เป็น 2 เรื่องหลักๆ คือ ความง่ายของการสร้างแบบจำลอง และความแม่นยำของระบบจำลอง ถ้าเราต้องการแบบจำลองที่แม่นยำมาก การสร้างแบบจำลองอาจจะต้องมีความซับซ้อนในทางกลับกัน ถ้าเราสามารถยอมรับแบบจำลองที่ได้จากการประมาณคร่าวๆ แบบจำลองจะมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน ในการทดลองนี้ จะเน้นการสร้างแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นและไม่แปรผันตามเวลา (Linear Time-Invariant) ซึ่งเป็นแบบจำลองอย่างง่ายและความแม่นยำจำกัด

**ระบบเชิงเส้น** หมายถึง ระบบที่ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณและสัญญาณออก เป็นไปตามกฎการทับซ้อน (superposition) นั่นคือ ผลตอบสนองจากสัญญาณเข้าหลายสัญญาณ มีค่าเท่ากับผลรวมของผลตอบจากสัญญาณเข้าแต่ละสัญญาณ

**ระบบไม่แปรผันตามเวลา** หมายถึง ระบบที่ผลตอบสนองจากการประวิงเวลาของสัญญาณเข้า มีค่าเท่ากับการประวิงเวลาของสัญญาณออก จากการกระตุ้นโดยสัญญาณเข้าเดิมที่ไม่มีการประวิงเวลา ระบบเชิงเส้นและไม่แปรผันตามเวลา เป็นระบบเชิงเส้นที่อธิบายพฤติกรรมด้วยสมการอนุพันธ์สามัญเชิงเส้นที่มีสัมประสิทธิ์เป็นค่าคงที่

**ระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น** หมายถึง ระบบที่กฎการทับซ้อน (superposition) ไม่สามารถใช้ได้ นั่นคือ ผลตอบจากสัญญาณเข้าหลายๆ สัญญาณมีค่าไม่เท่ากับผลรวมของผลตอบจากสัญญาณเข้าแต่ละสัญญาณ ตัวอย่างระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น เช่น

$$\begin{aligned}\ddot{x}(t) + \dot{x}(t)^2 + x(t) &= A \sin(\omega t) \\ \ddot{x}(t) + (x(t)^2 - 1)\dot{x}(t) + x(t) &= u_1(t) \\ \ddot{x}(t) + \dot{x}(t) + x(t) + x(t)^3 &= u_2(t)\end{aligned}$$

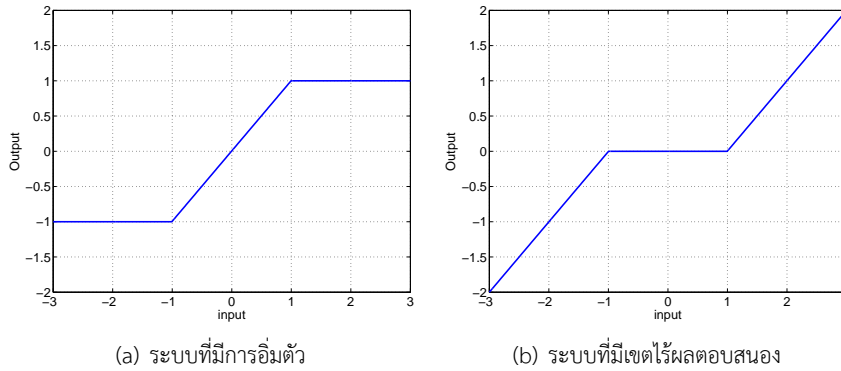


Figure 1: ตัวอย่างลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้น

ระบบพลวัตบางระบบอาจประมาณให้เป็นเชิงเส้นที่จุดทำงานหนึ่ง แต่หากสัญญาณที่เข้าระบบมีขนาดใหญ่เกินไป สัญญาณออกที่ได้อาจเกิดการอิ่มตัว (saturation) ดังรูปที่ 1(a) หรือระบบอาจจะมีเขตไร้ผลตอบสนอง (deadzone) เกิดขึ้น นั่นคือไม่มีสัญญาณออกหากสัญญาณเข้ามีขนาดเล็กเกินไปดังรูปที่ 1(b)

โดยทั่วไป แบบจำลองของระบบพลวัต สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ ดังนั้นการจำลองในโดเมนเวลา คือ การหาผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ที่ใช้แสดงแบบจำลองของระบบนั่นเอง การจำลองระบบพลวัตทำได้ 2 แบบคือ

1. แอนะล็อกคอมพิวเตอร์ (analog computer)

การจำลองโดยใช้แอนะล็อกคอมพิวเตอร์ ทำได้โดยต่อวงจรทางไฟฟ้า ซึ่งมีลักษณะสมบัติเหมือน(หรือคล้าย) กับระบบที่ต้องการจำลอง สัญญาณออกของวงจรคือ ผลตอบสนองของระบบที่ทำการจำลองนั่นเอง องค์ประกอบหลักของแอนะล็อกคอมพิวเตอร์ที่ใช้ได้แก่ ตัวอินทิเกรต (integrator) ตัวขยาย (gain) และตัวรวมสัญญาณ (summer) นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบอื่นๆอีกเช่น ตัวจำกัดค่า (limiter) และรีเลย์ (relay) เป็นต้น ซึ่งใช้ในการจำลองระบบไม่เชิงเส้น ข้อดีของการจำลองด้วยแอนะล็อกคอมพิวเตอร์คือ สามารถให้ผลตอบออกมาได้ทันที ซึ่งทำให้เหมาะสมกับการประยุกต์บางประเภท ทั้งยังสะดวกและรวดเร็วถ้าทำงานที่ไม่ซับซ้อนมาก ส่วนข้อเสียคือ ถ้าต้องการผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำสูงจะทำได้ยากและราคาของอุปกรณ์ที่ใช้จะมีราคาสูงมาก นอกจากนั้นยังมีปัญหาเกี่ยวกับค่าจำกัดของค่าแรงดันเกินพิกัดซึ่งอาจจะต้องทำการย่อขนาดของสัญญาณ (scaling) เพื่อให้วงจรที่ต่อทำงานได้ในช่วงที่ให้ผลลัพธ์ถูกต้อง

2. ดิจิตอลคอมพิวเตอร์ (digital computer)

การจำลองโดยใช้ดิจิตอลคอมพิวเตอร์ ทำได้โดยการคำนวณหาค่าตอบของสมการอนุพันธ์ที่แสดงแบบจำลองของระบบด้วยระเบียบวิธีทางเชิงเลข (numerical method) ข้อดีของวิธีนี้คือ สามารถให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำสูง เหมาะสมกับการจำลองระบบที่ซับซ้อน ไม่มีปัญหาเรื่องการย่อขนาดของสัญญาณ (scaling) และในปัจจุบันดิจิตอลคอมพิวเตอร์มีใช้แพร่หลาย แต่ข้อเสียคือผู้ใช้ควรมีความรู้ทางระเบียบวิธีเชิงเลข (เมื่อจำเป็นต้องเขียนโปรแกรมหรือซอฟต์แวร์เอง) หรือบางครั้งไม่สามารถให้ผลลัพธ์ได้ในเวลาจริง (real time) ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วในการคำนวณของคอมพิวเตอร์

สำหรับการทดลองนี้ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับคำนวณ ได้แก่โปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งมีเครื่องมือช่วยแสดงผลที่ง่ายและชัดเจน ผู้ใช้สามารถโต้ตอบกับโปรแกรมได้สะดวก และยืดหยุ่น การจำลองระบบด้วย MATLAB/Simulink ช่วยลดภาระของการพัฒนาโปรแกรมลงอย่างมาก โดยเฉพาะในเรื่องการเรียนรู้ระเบียบวิธีเชิงเลข และเขียนโปรแกรมเพื่อทำการคำนวณ (เช่น การหาค่าตอบของสมการอนุพันธ์) ทำให้เราสามารถมุ่งความสนใจในเรื่องการวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมได้เต็มที่ นอกจากนี้ MATLAB/Simulink ยังมีส่วนเชื่อมต่อกับผู้ใช้ (user interface) ที่ใช้งานได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว

ในทางปฏิบัติการวิเคราะห์และสังเคราะห์ระบบควบคุมจะประกอบด้วยขั้นตอนหลักๆ คือ

1. ทดลองและเก็บข้อมูลจากระบบจริงเพื่อหาคุณลักษณะและพารามิเตอร์ของระบบ
2. นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

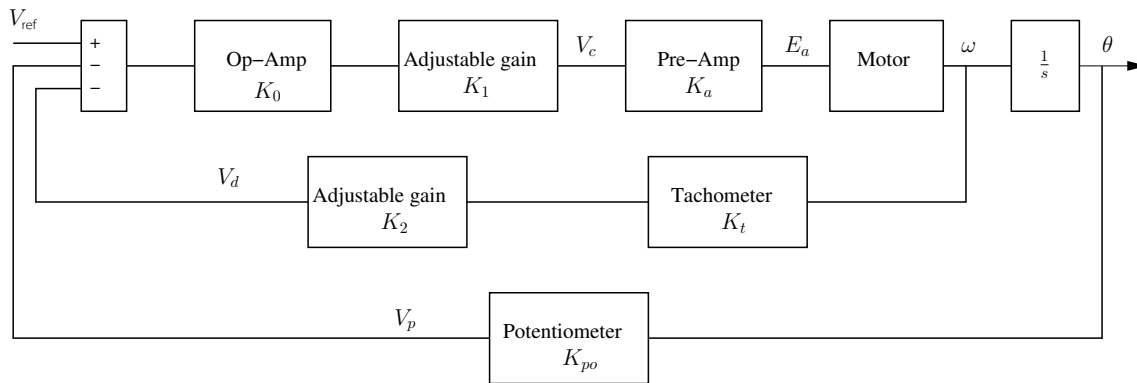


Figure 2: แผนภาพกรอบของชุดการทดลองมอเตอร์

3. จำลองผลตอบสนองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของแบบจำลองว่าใกล้เคียงกับระบบจริงเพียงใด
4. ออกแบบตัวควบคุม และปรับแต่งจนกระทั่งระบบมีสมรรถนะตามต้องการ
5. นำตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบไปควบคุมระบบจริง

ในห้องปฏิบัติการพื้นฐานระบบควบคุมมีอุปกรณ์หลัก ได้แก่ ชุดการทดลองมอเตอร์ และชุดการทดลองกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน ดังนั้นการปฏิบัติครั้งนี้จะเน้นการจำลองระบบทั้งสองด้วยคอมพิวเตอร์ แล้ววิเคราะห์พฤติกรรมของระบบสำหรับนำไปใช้ออกแบบตัวควบคุมต่อไป ชุดการทดลองทั้งสองมีแบบจำลองอย่างง่ายดังนี้

## 2 ชุดการทดลองมอเตอร์

จากแผนภาพกรอบดังรูปที่ 2 แบบจำลองของการควบคุมมอเตอร์นี้มีสัญญาณเข้าเป็นแรงดันอ้างอิง ( $V_{ref}$ ) และมีสัญญาณออกเป็นตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์ ( $\theta$ ) เป้าหมายของการควบคุมระบบนี้ คือ การทำให้ให้แกนโรเตอร์หมุนไปตรงตำแหน่งที่ต้องการ นั่นคือ การตามรอยสัญญาณอ้างอิง (reference tracking) ระบบนี้ใช้การควบคุมแบบมีการป้อนกลับตำแหน่งและ/หรือการป้อนกลับความเร็ว ชุดการทดลองประกอบด้วย อุปกรณ์ต่างๆ และหน้าที่ของอุปกรณ์เป็นดังต่อไปนี้

1. มอเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่เราต้องการควบคุม โดยให้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนไปหยุดในตำแหน่งที่ต้องการ ฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์จากแรงดันอาร์เมเจอร์  $E_a(s)$  ถึงความเร็วเชิงมุม  $\omega(s)$  เป็นดังนี้

$$G(s) = \frac{2.426}{0.00075s^2 + 0.083325s + 0.907463}$$

2. แทคโคมิเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์เป็นแรงดันป้อนกลับความเร็ว ฟังก์ชันถ่ายโอนของแทคโคมิเตอร์เป็นอัตราขยายค่าคงที่ ( $K_t$ ) เท่ากับ 0.1047 V/rpm หรือ 0.9998 V/rad/sec
3. โพลเทนซิโอมิเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์เป็นแรงดันป้อนกลับตำแหน่ง ฟังก์ชันถ่ายโอนของโพลเทนซิโอมิเตอร์เป็นอัตราขยายค่าคงที่ ( $K_p$ ) เท่ากับ 2.3873 V/rad
4. ออปแอมป์ เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปรียบเทียบแรงดันอ้างอิงกับแรงดันป้อนกลับ ถ้าแรงดันป้อนกลับมีค่าไม่เท่ากับแรงดันอ้างอิง แรงดันคลาดเคลื่อนจะมีค่าไม่เป็นศูนย์เพื่อเป็นแรงดันขับมอเตอร์ต่อไป ออปแอมป์มีอัตราขยายค่าคงที่เท่ากับ 1
5. อัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 1 ( $K_1$ ) รับสัญญาณแรงดันจากออปแอมป์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแบ่งแรงดัน มีลักษณะเป็นตัวต้านทานที่ปรับค่าได้ สามารถเลือกอัตราขยายตั้งแต่ 0 ถึง 1 หรือ 0 – 100%
6. อัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 2 ( $K_2$ ) รับสัญญาณแรงดันจากแทคโคมิเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแบ่งแรงดัน มีลักษณะเป็นตัวต้านทานที่ปรับค่าได้ สามารถเลือกอัตราขยายตั้งแต่ 0 ถึง 1 หรือ 0 – 100%

7. ฟรีแอมป์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการขยายสัญญาณควบคุม ตัวฟรีแอมป์มีขั้วสัญญาณออกอยู่ 2 ขั้ว เพื่อแยกสัญญาณที่เป็นบวกและลบออกจากกัน เมื่อมีสัญญาณเข้าเป็นบวก จะได้สัญญาณขยายมีค่าบวกที่ขั้วหนึ่ง ขณะที่เมื่อสัญญาณเข้าเป็นลบจะได้สัญญาณขยายออกมีค่าบวกที่อีกขั้วหนึ่ง ฟรีแอมป์จึงทำหน้าที่ปรับสัญญาณเข้าสู่มอเตอร์ทำให้มอเตอร์หมุนได้ 2 ทิศทาง ดังในรูปที่ 3

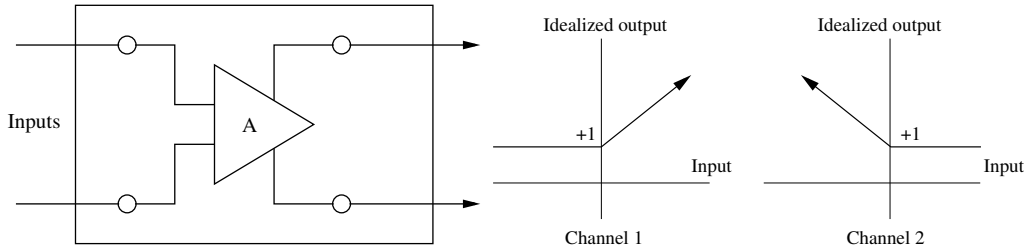


Figure 3: ลักษณะของฟรีแอมป์

นอกจากนี้ ตัวฟรีแอมป์มีลักษณะการอิ่มตัว เนื่องจากแรงดันของแหล่งจ่ายไฟ มีขนาดจำกัด ทั้งนี้อาจมองว่าการอิ่มตัวเป็นประโยชน์ป้องกันไม่ให้แรงดันที่เข้ามอเตอร์มากเกินไป นั่นคือแรงดันอิ่มตัวเท่ากับ  $+13$  หรือ  $-13$  โวลต์ เราสามารถเขียนสัญญาณออกแต่ละช่องให้เป็นฟังก์ชันของแรงดันจากตัวควบคุม ได้ดังนี้

$$\text{ช่องที่ 1} \quad E_a = \begin{cases} 13, & V_c > 0.6 \\ 1 + 20V_c, & 0 \leq V_c \leq 0.6 \\ 1, & V_c < 0 \end{cases} \quad \text{ช่องที่ 2} \quad E_a = \begin{cases} -13, & V_c < -0.6 \\ -1 + 20V_c, & -0.6 \leq V_c \leq 0 \\ -1, & V_c > 0 \end{cases}$$

ฟังก์ชันดังกล่าวสามารถจัดในรูปแบบง่ายเพื่อประโยชน์ในการเขียนภาพกรอบ Simulink ดังนี้

$$E_a = \begin{cases} 13, & V_c > 0.6 \\ 1 + 20V_c, & 0 \leq V_c \leq 0.6 \\ -1 + 20V_c, & -0.6 \leq V_c \leq 0 \\ -13, & V_c < -0.6 \end{cases}$$

ระบบการควบคุมมอเตอร์มีลักษณะสำคัญ คือ มีเขตไร้ผลตอบสนอง ในส่วนการเคลื่อนที่เชิงมุมของตัวมอเตอร์ ซึ่งเกิดจากแรงเสียดทานสถิตย์ ดังนั้นแรงดัน  $E_a$  ที่ป้อนให้กับมอเตอร์ ต้องมีค่าเพียงพอในระดับหนึ่ง เพื่อให้แรงบิดของมอเตอร์เอาชนะแรงเสียดทานสถิตย์ได้ แล้วโรเตอร์จึงจะเริ่มหมุน แรงดันที่ทำให้โรเตอร์เอาชนะแรงเสียดทานของมอเตอร์คือ  $1.5$  โวลต์ ดังนั้นเขตไร้ผลตอบสนองอยู่ในช่วง  $-1.5$  ถึง  $1.5$  โวลต์

แผนภาพกรอบ Simulink ของชุดควบคุมมอเตอร์ที่มีส่วนประกอบที่ไม่เชิงเส้นพร้อมพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 4

อนึ่ง แบบจำลองเชิงเส้นของระบบควบคุมมอเตอร์ เป็นแบบจำลองที่ทำให้เป็นเชิงเส้น นั่นคือละเลยเขตไร้ผลตอบสนองของมอเตอร์ และการอิ่มตัวของฟรีแอมป์ อีกทั้งให้ประมาณฟรีแอมป์ให้เป็นอัตราขยายมีค่าเท่ากับ  $20$

### 3 กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน

แบบจำลองของกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถแสดงได้ดังรูป 5 โดยมีสัญญาณเข้า  $R(s)$  เป็นแรงดันอ้างอิงที่ได้จากการแปลงค่ากำหนด (set point) ของอุณหภูมิที่ต้องการ ส่วนสัญญาณออก  $Y(s)$  เป็นแรงดันที่แปลงมาจากอุณหภูมิที่วัดได้  $T_o$  การควบคุมมีเป้าหมายเพื่อปรับอุณหภูมิ  $T_o$  ให้เป็นตามค่ากำหนด และใช้วิธีควบคุมแบบป้อนกลับ สัญญาณแรงดัน

ชุดการทดลองประกอบด้วย อุปกรณ์ต่างๆ และหน้าที่เป็นดังต่อไปนี้

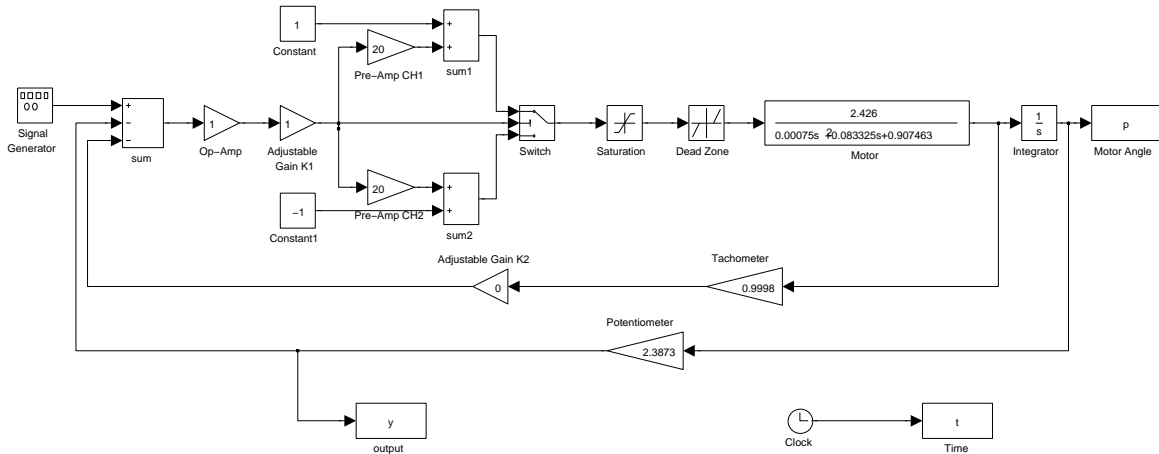


Figure 4: แผนภาพกรอบ Simulink ของชุดการทดลองมอเตอร์

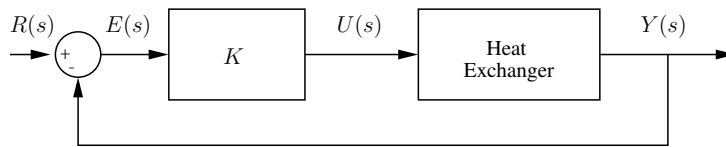


Figure 5: แผนภาพกรอบของกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน

1. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่ควบคุมอุณหภูมิ  $T_o$  ตามค่ากำหนด มีส่วนประกอบย่อยตามรูปที่ 6 ดังนี้
  - (a) บลอร์เออร์ (Blower) เป็นอุปกรณ์มีหน้าที่หมุนเวียนอากาศภายในท่อ
  - (b) ชัตเตอร์ (Shutter) เป็นอุปกรณ์มีหน้าที่ควบคุมปริมาณอากาศที่ไหลเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
  - (c) เทอร์มิสเตอร์ (Thermistor) เป็นตัวตรวจรู้ที่แปลงอุณหภูมิ  $T_o$  เป็นแรงดันโดยมีวงจรวิตสโตนบริดจ์และ วงจรขยายสัญญาณเป็นอุปกรณ์ช่วย
  - (d) ไทริสเตอร์ (Thyristor) เป็นอุปกรณ์ที่แปลงแรงดันควบคุมเป็นกระแสไฟฟ้าเพื่อจ่ายกำลังให้ขดลวดทำความร้อน (Heater)
  - (e) ขดลวดทำความร้อน เป็นอุปกรณ์ทำหน้าที่ให้ความร้อนกับอากาศที่ผ่านเข้ามาในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
2. วงจรขยายสัญญาณเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปรียบเทียบแรงดันอ้างอิงกับแรงดันป้อนกลับ ถ้าแรงดันป้อนกลับมีค่าไม่เท่ากับแรงดันอ้างอิง วงจรขยายสัญญาณจะสร้างแรงดันคลาดเคลื่อนที่มีค่าไม่เป็นศูนย์ เพื่อไปควบคุมกระบวนการต่อไป
3. Proportional Band เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สร้างแรงดันควบคุม โดยรับสัญญาณจากแรงดันคลาดเคลื่อน สามารถปรับค่า %PB ได้ตั้งแต่ 5 ถึง 200% ทั้งนี้อาจมองอุปกรณ์นี้ ในรูปของวงจรขยายสัญญาณปรับค่าได้ นั่นคือ อัตราขยายมีค่าเท่ากับ  $\frac{100\%}{\%PB}$

กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนมีลักษณะสำคัญ คือ การหน่วงเวลา (transportation lag) นั่นคือ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ จะปรากฏที่ปลายท่อหลังจากเวลาช่วงหนึ่ง เทียบกับเวลาที่เริ่มป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับขดลวดทำความร้อน การหน่วงเวลา เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลของอากาศ ผ่านชัตเตอร์ที่ต้นท่อไปยังเทอร์มิสเตอร์ที่อยู่ปลายท่อ กำหนดให้เวลาหน่วงเป็น  $L$  วินาที โดยที่  $L =$  ปริมาตรของท่อ / อัตราการไหลเชิงปริมาตร เวลาหน่วงนี้ส่งผลให้การควบคุมทำได้ยากขึ้น ในชุดการทดลองนี้  $L = 0.15$  วินาที ดังนั้น ฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการ นั่นคือ  $Y(s)/U(s)$  มีค่าเป็น

$$G(s) = \frac{0.67e^{-0.15s}}{0.46s + 1}$$

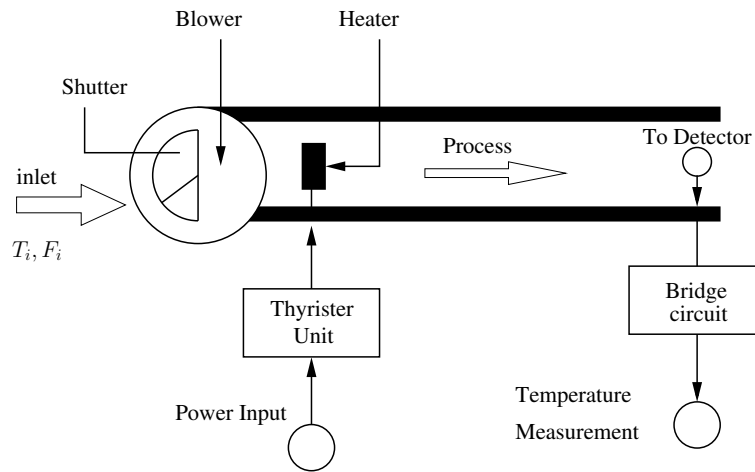


Figure 6: เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

## 4 สิ่งที่ต้องเตรียมมา

(ส่งต้นชั่วโมงของการเรียนแลบ)

1. สร้างแผนภาพกรอบ Simulink ของชุดการทดลองมอเตอร์ ตามแบบจำลองรูปที่ 4 และประมาณระบบให้เป็นเชิงเส้น นั่นคือละเอียดของผลตอบสนองของมอเตอร์ และการอิมิตัวของพรีแอมป์ ให้ประมาณพรีแอมป์เป็นอัตราขยายมีค่าเท่ากับ 20 เมื่อยังไม่มีการป้อนกลับทั้งสัญญาณตำแหน่งและความเร็วเชิงมุม ให้เขียนฟังก์ชันโอนย้ายวงเปิดจากแรงดันอ้างอิง ไปยังตำแหน่งเชิงมุม และระบุขั้ว (poles) ของฟังก์ชันโอนย้าย
2. เมื่อมีการป้อนกลับเพียงสัญญาณตำแหน่ง กำหนดให้ค่าอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 1 ( $K_1$ ) เป็น 100% และให้อัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 2 ( $K_2$ ) เป็น 0% จากนั้นใส่สัญญาณอ้างอิงเป็นสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมขนาด  $2 V_{p-p}$  และมีความถี่ 0.1 Hz จำลองผลตอบสนองทางเวลาของสัญญาณตำแหน่ง และสัญญาณควบคุม บันทึกผลสัญญาณทั้งสอง นอกจากนี้ให้หาทางเดินราก (root loci) ของระบบควบคุมวงปิดเมื่อแปรค่าอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 1 จาก 0 ถึง  $\infty$  พร้อมทั้งระบุตำแหน่งของขั้วระบบวงปิดเมื่ออัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 1 มีค่าเท่ากับ 100%

เขียนชื่อนิสิต ระบุกลุ่มและตอนอย่างชัดเจน ให้บันทึกรูปภาพผลตอบจากการใช้คำสั่ง `plot` ในโปรแกรม MATLAB ระบุชื่อภาพ พร้อมทั้งแกนนอนและแกนตั้ง

## 5 วิธีทดลอง

### การทดลอง 1 การจำลองระบบของชุดการควบคุมมอเตอร์

1. ใช้ MATLAB/Simulink จำลองระบบของชุดการควบคุมมอเตอร์ตามรูปที่ 4
2. ตั้งค่าอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 1 เป็น 100% และอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 2 เป็น 0% จากนั้นใส่สัญญาณเข้าให้เป็นสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมขนาด  $2 V_{p-p}$  และมีความถี่ 0.1 Hz แสดงผลตอบทางเวลาของระบบโดยใช้เวลาในการจำลอง (simulation time) 10 วินาทีโดยตั้งพารามิเตอร์ในการจำลองให้ Max step size และ Initial step size เป็น auto ให้ Relative Tolerance เป็น  $1e-3$  และให้ Absolute Tolerance เป็น auto
3. ทำการทดลองข้อ 2. ซ้ำ โดยให้ Max step size และ Initial step size เป็น 0.1, Relative Tolerance เป็น 1 และให้ Absolute Tolerance เป็น auto
4. ทำการทดลองข้อ 2. ซ้ำ โดยให้ Max step size และ Initial step size เป็น  $1e-4$ , Relative Tolerance เป็น  $1e-4$  และให้ Absolute Tolerance เป็น auto
5. วิเคราะห์ผลตอบที่ได้เมื่อปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆ

## การทดลอง 2 การป้อนกลับแบบ P ของชุดการควบคุมมอเตอร์

1. ประมาณระบบให้เป็นเชิงเส้นโดยละเลย deadzone ของมอเตอร์และการอิ่มตัวของพรีแอมป์ นั่นคือประมาณพรีแอมป์เป็นเพียงอัตราขยายมีค่าเท่ากับ 20 ตั้งค่าอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 1 เป็น 20% กำหนดให้อัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 2 เป็น 0% จากนั้นใส่สัญญาณเข้าให้เป็นสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมขนาด  $2 V_{p-p}$  และมีความถี่ 0.1 Hz แสดงผลตอบทางเวลาของระบบ
2. ทำการทดลองข้อ 1 ซ้ำที่ค่าอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 1 เป็น 50% และ 100%
3. แสดงทางเดินของรากของระบบเมื่อแปรค่าอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 1 จาก 0 ถึง  $\infty$  พร้อมทั้งหาตำแหน่งของขั้วระบบวงปิดเมื่อตั้งค่าอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 1 เป็น 20%, 50% และ 100%
4. วิเคราะห์พฤติกรรมของระบบที่ทำการประมาณให้เป็นเชิงเส้น เมื่อมีการเปลี่ยนค่าอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 1 และอธิบายผลทางกายภาพของระบบจริง

## การทดลอง 3 การป้อนกลับแบบ PD ของชุดการควบคุมมอเตอร์

1. ประมาณระบบให้เป็นเชิงเส้น ตั้งค่าอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 1 เป็น 100% และอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 2 เป็น 10% จากนั้นใส่สัญญาณเข้าให้เป็นสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมขนาด  $2 V_{p-p}$  และมีความถี่ 0.1 Hz แสดงผลตอบทางเวลาของระบบ
2. ทำการทดลองข้อ 1 ซ้ำที่ค่าอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 2 เป็น 20% และ 50%
3. แสดงทางเดินของรากของระบบเมื่อแปรค่าอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 2 จาก 0 ถึง  $\infty$  พร้อมทั้งหาตำแหน่งของขั้วระบบวงปิดเมื่อตั้งค่าอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 2 เป็น 10%, 20% และ 50%
4. วิเคราะห์พฤติกรรมของระบบที่ทำการประมาณให้เป็นเชิงเส้นเมื่อมีการเปลี่ยนค่าอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 2 และอธิบายผลทางกายภาพของระบบจริง

## การทดลอง 4 ผลขององค์ประกอบที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่มีต่อระบบ

1. ใช้ MATLAB/Simulink จำลองระบบของชุดการควบคุมมอเตอร์ตามรูปที่ 4
2. ตั้งค่าอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 1 เป็น 20% และอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 2 เป็น 10% จากนั้นใส่สัญญาณเข้าให้เป็นสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมขนาด  $2 V_{p-p}$  และมีความถี่ 0.1 Hz แสดงผลตอบทางเวลาของระบบ
3. ประมาณระบบให้เป็นเชิงเส้น ตั้งค่าอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 1 เป็น 20% และอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 2 เป็น 10% จากนั้นใส่สัญญาณเข้าให้เป็นสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมขนาด  $2 V_{p-p}$  และมีความถี่ 0.1 Hz แสดงผลตอบทางเวลาของระบบ
4. เปรียบเทียบผลตอบทางเวลาของระบบจริง และระบบที่ประมาณด้วยเชิงเส้น (แสดงผลตอบสนองทางเวลาของสัญญาณตำแหน่ง และสัญญาณควบคุม)

## การทดลอง 5 การจำลองระบบของชุดกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน และวิเคราะห์ผลตอบของระบบในโดเมนเวลาและความถี่

1. ใช้ MATLAB/Simulink จำลองระบบของชุดกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนตามรูป 5
2. ตั้งอัตราขยาย ( $K$ ) วั้ที่ 2 หรือซึ่งก็คือ ค่า %PB วั้ที่ 200% จากนั้นใส่สัญญาณเข้าให้เป็นสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมขนาด  $2 V_{p-p}$  และมีความถี่ 0.1 Hz แสดงผลตอบทางเวลาของระบบ
3. ทำการทดลองข้อ 1 ซ้ำที่ค่า %PB เป็น 100% และ 50%

4. แสดงแผนภาพโอบเตของระบบวงเปิดที่ค่า %PB เป็น 200%, 100% และ 50%
5. วิเคราะห์พฤติกรรมของระบบเมื่อมีการเปลี่ยนค่า %PB และอธิบายผลทางกายภาพของระบบจริง