

การประมาณปริมาตรในภาชนะกวนด้วยการชดเชยแรงบิดของเครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็ก Volume Estimation in Stir Container Using Load Torque Compensator of Magnetic Stirrer Machine

ชัชวาล เข็มเงิน^{1*}, นิตศักดิ์ หนูมาน้อย¹, จริญญาศักดิ์ พวกขุนทด¹ และ จิระพล ศรีเสริฐผล¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
*ติดต่อ: E-mail: kemngoen@gmail.com เบอร์โทรศัพท์: 085-535-7576

บทคัดย่อ

เครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็กเป็นเครื่องที่ใช้ผสมสารละลายตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปเป็นที่นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย ซึ่งในบางอุตสาหกรรมขณะกวนของเหลวเพื่อผสมสารนั้นมีความจำเป็นต้องกวนตลอดเวลาระหว่างนำสารที่ผสมไปใช้งาน ปัญหาของเครื่องกวนสารที่สำคัญคือการลดลงของปริมาตรของของเหลวในภาชนะซึ่งส่งผลกระทบต่อกระบวนการนำสารนั้นไปใช้ไปใช้งานต่อไป ดังนั้นปริมาตรของของเหลวในภาชนะที่มีการกวนสารผสมจึงจำเป็นต้องมีการตรวจวัด แต่การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดในภาชนะจะทำให้ประสิทธิภาพของการกวนสารผสมลดลงและเสียค่าใช้จ่าย ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการประมาณปริมาตรของของเหลวในภาชนะผ่านการเปลี่ยนแปลงของภาระกรรมที่ใช้ในเครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็กโดยไม่ต้องติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดเพิ่ม เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็ก

คำหลัก: เครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็ก, ภาระกรรม, การประมาณค่า

Abstract

The magnetic stirrer machine is a mixture of two or more chemical substances. It is widely used in the industry and the mixtures of some industries that have stirred constantly throughout the process before it is used. Sometimes the problem of stirrer is the reducing of liquid in the container and requires the monitored. On the other hand, measuring devices installed in a container gets decreased performance of stirring the mixture which incurs additional cost. Consequently, this research purposes estimation the volume of liquid in the container through the variable of load torque while the magnetic stirrer machine without installs additional measuring devices. For this reason, it also increases the performance of the magnetic stirrer machine..

Keywords: Magnetic Stirrer Machine, Load Torque, Estimation

1. บทนำ

ปัจจุบันได้มีการพัฒนากระบวนการผลิตอย่างรวดเร็วทั้งในภาคการศึกษาและโรงงานอุตสาหกรรม จึงทำให้มีความต้องการนำเครื่องมือมาใช้งานเพิ่มขึ้น เพื่อการผลิตที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพโดยเฉพาะโรงงานอุตสาหกรรม เครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็กเป็นเครื่องมือชนิดหนึ่งที่ใช้ผสมสารละลายตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป ซึ่งในบางอุตสาหกรรมจึงมีความจำเป็นต้องใช้เครื่องกวนสารใน

กระบวนการต่างๆ อาทิ การเตรียมสารละลาย การผสมสารละลายในสารบางตัวที่ผสมยากและใช้เวลาในการผสมนานหรือสารที่เป็นอันตรายกับผู้ปฏิบัติงาน [3] เป็นต้น ขณะกวนของเหลวหรือสารผสมอยู่นั้นอาจจะต้องกวนสารตลอดเวลาระหว่างกระบวนการเพื่อนำสารที่ผสมนำไปใช้งาน ปัญหาที่ในกระบวนการนั้นบางครั้งปริมาตรของของเหลวในภาชนะนั้นมีการเปลี่ยนแปลงอาจจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการนำสารไปใช้งานต่อ อีกทั้งผู้ปฏิบัติการอาจมี

DRC-18

สังเกตเครื่องกวนอยู่ตลอดเวลาจะทำให้กระบวนการนั้นเกิดความเสียหาย ดังนั้นการวัดปริมาณของของเหลวในภาชนะกวนจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง แต่การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดในภาชนะกวนจะทำให้ประสิทธิภาพของการกวนสารลดลงและเสียค่าใช้จ่าย

เครื่องกวนแบบแท่งแม่เหล็ก [1, 2] นอกจากจะช่วยเตรียมสารละลาย ผสมสารละลาย และไม่เกิดอันตรายกับผู้ปฏิบัติการ แล้วยังสามารถประมาณปริมาณของเหลวในภาชนะโดยไม่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดในภาชนะในภาชนะ [4, 5, 6] จากการประมาณปริมาณของเหลวที่เปลี่ยนแปลงซึ่งมีความสัมพันธ์กับภาระกรรมที่เปลี่ยนแปลง ในภาชนะบรรจุของเหลว การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวของไหลจากภาระกรรมจะทำให้แรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเข้ามาบรรเทาการทำงานของตัวควบคุม ซึ่งระบบควบคุมโดยทั่วไปของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงใช้หลักการเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์เพื่อให้ได้แรงบิดและความเร็วรอบตามต้องการในภาวะที่มีแรงบิดเปลี่ยนแปลง โดยระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีการนำตัวสังเกตมาใช้ในการประมาณค่าตัวแปรสแตตเพื่อนำไปใช้ในการควบคุมระบบเช่น วิธีการของ Full-state feedback Control [10] ผลของค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจะทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นกับการประมาณค่าตัวแปรสแตตโดยใช้ตัวสังเกต ดังนั้นประสิทธิภาพของการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงลดลง ในทางปฏิบัติค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงนี้ไม่สามารถวัดได้โดยตรงแต่สามารถประมาณค่าได้

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการประมาณปริมาณของเหลวในภาชนะจากการเปลี่ยนแปลงของภาระกรรมที่เกิดขึ้นในภาชนะบรรจุผ่านการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์เพื่อรักษาความเร็วรอบให้คงที่ตลอดการทำงาน โดยไม่ต้องติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดเพิ่ม ซึ่งรายละเอียดจะอธิบายในส่วนต่อไป

2. สมการควบคุมและตัวสังเกตอันดับเต็มของ

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะมีหลักการการทำงานโดยเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล โดยวิธีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดในสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะทำให้เกิดแรงทางกลเกิดขึ้น โดยการควบคุมด้วยวิธี Armature Control ใช้การปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับวงจรร

อาร์เมเจอร์ (Armature Circuit) เพื่อการควบคุมความเร็วรอบโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับวงจรรสนาม (Field Circuit) คงที่จึงสามารถพิจารณาเฉพาะวงจรรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเนื่องจากกระแสที่ให้กับวงจรรสนามมีค่าคงที่ที่สนามแม่เหล็กของมอเตอร์คงที่ตามไปด้วย การควบคุมจะทำได้โดยการปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ให้กับวงจรรอาร์เมเจอร์ พิจารณาสมการของแรงบิด

$$I \frac{d\omega}{dt} = -c\omega + K_t i - T_L \quad (1)$$

สมการของวงจรรไฟฟ้า

$$V_a - K_b \omega = L_a \frac{di}{dt} + R_a i \quad (2)$$

สมการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในรูปแบบของ State Space Form

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= Ax + BV_a + HT \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (3)$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจากสมการ (1) และ (2) จัดให้อยู่ในรูปของรูป State Space Form

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega \\ i_a \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{c}{I} & \frac{K_t}{I} \\ -\frac{K_b}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ i_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix} V_a + \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix} T_L \\ y &= [1 \ 0] \begin{bmatrix} \omega \\ i_a \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

และตัวสังเกตอันดับเต็มของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังสมการที่ 5

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{x}}{dt} &= A\hat{x} + BV_a + H\hat{T} + Le \\ y &= C\hat{x} \end{aligned} \quad (5)$$

เมื่อ $e = y - c\hat{x} = \omega - \hat{\omega}$

โดยกำหนดให้ค่าที่มีสัญลักษณ์ " \wedge " คือค่าตัวแปรของตัวสังเกตที่ได้มาจากการประมาณค่าจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และค่า e คือค่าความผิดพลาดของความเร็ว

DRC-18

รอบที่เกิดขึ้นระหว่างมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกับตัว
สังเกตุ

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{c}{I} & \frac{K_t}{I} \\ -\frac{K_b}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix} V_a + \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix} \hat{T}_L + \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \end{bmatrix} e \quad (6)$$

$$y = [1 \ 0] \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix}$$

เมื่อ

- I โมเมนต์ความเฉื่อย ($\text{Kg} \cdot \text{m}^2$)
- K_t ค่าคงที่ของแรงบิด ($\text{N} \cdot \text{m/A}$)
- K_b ค่าคงที่ Electromotive Force ($\text{V} \cdot \text{s/rad}$)
- T_L แรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ($\text{N} \cdot \text{m}$)
- c ค่าความหน่วงทางกล ($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s/rad}$)
- i_a กระแสไฟฟ้าของอาร์เมเจอร์(A)
- ω ความเร็วรอบ (rad/s)
- V_a ค่าความต่างศักย์ของอาร์เมเจอร์ (V)
- R ค่าความต้านทานของอาร์เมเจอร์ (Ω)
- L_a ค่าความเหนี่ยวนำของอาร์เมเจอร์ (H)
- L_1, L_2 ค่าอัตราขยายของตัวสังเกตุการณ์

3. การประมาณแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงโดยตัวชดเชย แบบปรับค่าได้

การใช้ตัวชดเชยแบบปรับค่าได้โดยวิธี Gradient Method [10] ในการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจากสมการมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง(1)และ(2) เมื่อระบบได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง [4, 5, 6] สามารถจัดรูปได้ดังนี้

$$\frac{K_t}{L_a I} V_a = \frac{d^2 \omega}{dt^2} + \left(\frac{R}{L_a} + \frac{c}{I}\right) \frac{d\omega}{dt} + \left(\frac{Rc}{L_a I} + \frac{K_b K_t}{L_a I}\right) \omega + \frac{1}{I} \frac{dT_L}{dt} + \frac{R_a}{L_a I} T_L \quad (7)$$

จากสมการที่ (7) สามารถหาค่าตัวแปรได้และกำหนดให้ตัวแปรที่มีค่าคงที่ที่มีเพียงค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง (\hat{T}_L) เพียงตัวเดียว ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในการประมาณค่าตัว

แปรสแตต ดังนั้นจากสมการของตัวสังเกตุ จะได้ดังสมการที่ (8)

$$\frac{K_t}{L_a I} V_a = \frac{d^2 \hat{\omega}}{dt^2} + \left(\frac{R}{L_a} + \frac{c}{I}\right) \frac{d\hat{\omega}}{dt} + \left(\frac{Rc}{L_a I} + \frac{K_b K_t}{L_a I}\right) \hat{\omega} + \frac{1}{I} \frac{d\hat{T}_L}{dt} + \frac{R_a}{L_a I} \hat{T}_L \quad (8)$$

เมื่อ

$$b = \frac{K_t}{L_a I}, \quad \alpha_1 = \frac{1}{I}, \quad a_1 = \left(\frac{R_a}{L_a} + \frac{c}{I}\right), \quad \alpha_2 = \frac{R_a}{L_a I},$$

$$a_2 = \left(\frac{R_a c}{L_a I} + \frac{K_b K_t}{L_a I}\right)$$

จัดรูปสมการ (7) กับ (8) ใหม่

$$bV_a = \frac{d^2 \omega}{dt^2} + a_1 \frac{d\omega}{dt} + a_2 \omega + \alpha_1 \frac{dT_L}{dt} + \alpha_2 T_L \quad (9)$$

$$bV_a = \frac{d^2 \hat{\omega}}{dt^2} + a_1 \frac{d\hat{\omega}}{dt} + a_2 \hat{\omega} + \alpha_1 \frac{d\hat{T}_L}{dt} + \alpha_2 \hat{T}_L \quad (10)$$

ดังนั้นหลักการการทำงานของตัวชดเชยแบบปรับค่าได้คือการปรับค่าตัวแปร (\hat{T}_L) ให้ความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตทั้งสองหมดไป ทำได้โดยให้ Loss Function (J) ที่มีค่า

$$J(\hat{T}_L) = \frac{1}{2} e^2$$

จากสมการที่ (9) เท่ากับ สมการ (10)

$$\frac{d^2 e}{dt^2} = -a_1 \frac{de}{dt} - a_2 e - \alpha_1 \left(\frac{dT_L}{dt} - \frac{d\hat{T}_L}{dt}\right) - \alpha_2 (T_L - \hat{T}_L) \quad (11)$$

เมื่อ $e = \omega - \hat{\omega}$

การปรับค่าตัวแปร (\hat{T}_L) ในทิศทาง Negative Gradient of Loss Function คือ

$$\frac{\partial \hat{T}_L}{\partial t} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \hat{T}_L} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \hat{T}_L} \quad (12)$$

จาก MIT Rule จะได้ตัวแปรปรับค่า คือ

$$\frac{\partial e}{\partial \hat{T}_L} = -\frac{\partial \hat{\omega}}{\partial \hat{T}_L} \quad (13)$$

DRC-18

เมื่อ γ อัตราการปรับตัวเมื่อตัวแปรปรับตัวมีการเปลี่ยนแปลงโดยกำหนดให้ Sensitivity Function เท่ากับ

$$v = \frac{\partial \hat{\omega}}{\partial \hat{T}_L} \quad (14)$$

เมื่อตัวแปรปรับตัวมีการเปลี่ยนแปลงการเปลี่ยนแปลงของสมการที่ (10) ต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรปรับตัว คือ

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + a_1 \frac{\partial v}{\partial t} + a_2 v = -\alpha_1 \quad (15)$$

4. ผลการทดสอบการทำงานของระบบ

การทดสอบการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในกรณีที่ระบบมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วมอเตอร์แบบขั้นบันได จะพิจารณาระบบที่มีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์แบบปิดโดยระบบจะมีตัวควบคุมแบบ พีไอ พร้อมทั้งสังเกตกระแสขณะความเร็วของมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงได้จากการประให้ตัวสังเกตด้วยวิธี Gradient Method สำหรับค่าตัวแปรที่ได้จากการทดสอบระบบและการทดลองนั้นได้จากการระบุเอกลักษณ์ของระบบ

$$I = 1.6 \times 10^{-6} \text{ Kg} \cdot \text{m}^2, \quad La = 2.95 \text{ mH},$$

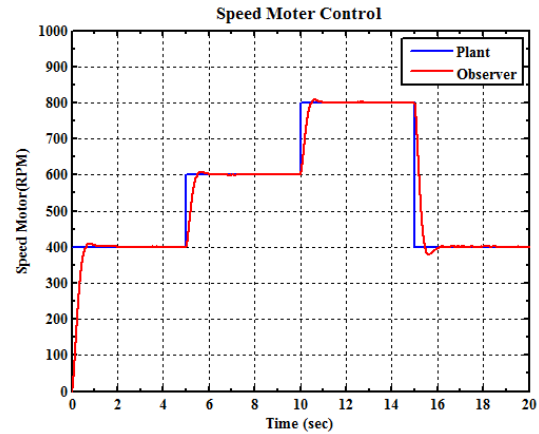
$$R = 4.95 \Omega \quad Kt = 0.0371 \text{ N} \cdot \text{m/A},$$

$$Kb = 0.0373 \text{ V} \cdot \text{s/rad}$$

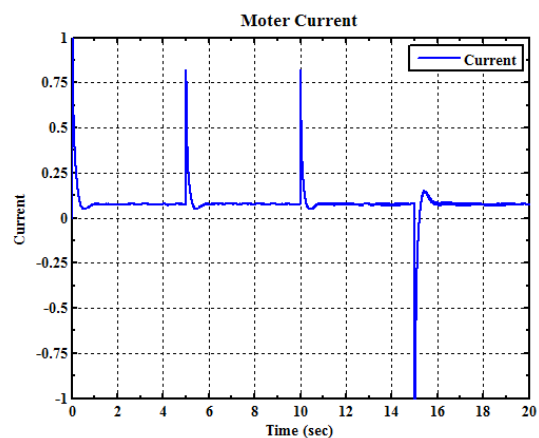
$$c = 4.865 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s/rad}$$

จากรูปที่ 1 ทดสอบระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นลักษณะขั้นบันได โดยจะเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบที่ 400 600 และ 800 รอบต่อ นาที ตามลำดับ

จากการทดสอบระบบควบคุมด้วยการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบแบบขั้นบันได จากรูปที่ 2 จะเห็นว่าช่วงเวลา ที่ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์เปลี่ยนแปลงความเร็ว จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าถูกดึงเพื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ และกระแสไฟฟ้าขณะตั้งสูงมากเมื่อเทียบกับกระแสไฟฟ้าที่กำลังขับมอเตอร์ในช่วงความเร็วรอบคงที่



รูปที่ 1 ทดสอบระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์แบบขั้นบันได

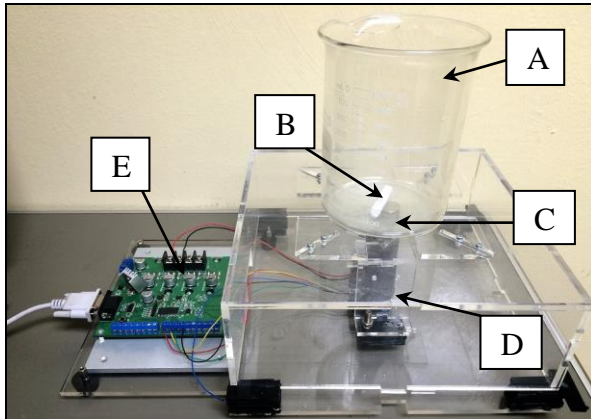


รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของกระแสขณะทดสอบระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์

5. ผลการทดลอง

การทดลองจะใช้การหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการติดตั้งแม่เหล็กแม่เหล็กถาวร เพื่อใช้กวนสารละลายในภาชนะบรรจุที่มีระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบปิด ด้วยการเปลี่ยนแปลงภาระกรรมในภาชนะซึ่งมีความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปของมอเตอร์ด้วยความเร็วของมอเตอร์ที่ปฏิบัติการโดยมีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเร็วรอบที่มอเตอร์ การกรรมที่เปลี่ยนแปลงไปในภาชนะซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับปริมาตรของของเหลวในภาชนะโดยพื้นที่หน้าตัดของภาชนะคงที่ การควบคุมการทำงานของมอเตอร์ในเครื่องกวนสารนั้นเพื่อความเหมาะสมของสารแต่ละชนิด หากของเหลวในภาชนะเกิดการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลให้แรงบิดของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงไป โดยตัวควบคุมจะทำหน้าที่ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้คงที่ด้วยการปรับกระแสไฟฟ้าเพื่อรักษาความเร็วรอบ แสดงดังรูปที่ 3

DRC-18



รูปที่ 3 เครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็ก

A - Beaker, B – Magnetic Bar,
C – Magnetic, D – DC Motor และ E – Control Board

โดยพื้นที่หน้าตัดของภาชนะคงที่(105mm) และความหนืดคงที่(1mPa.s) ณ อุณหภูมิที่อุณหภูมิห้องโดยปริมาตรของของเหลวจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 0 -1000 ml ขณะทำการทดลองกวนของเหลวอยู่นั้นเมื่อปริมาตรของเหลวมีการเปลี่ยนแปลง ระบบควบคุมจะรักษาความเร็วให้คงที่ที่ 600 รอบต่อนาที ซึ่งการทดลองจะใช้เครื่องกวนแบบแท่งแม่เหล็ก โดยมีแม่เหล็กถาวรติดกับมอเตอร์ขนาด 12 โวลต์ พร้อมมีแท่งแม่เหล็กอยู่ในภาชนะสำหรับกวนของเหลวโดยแม่เหล็กถาวรกับแท่งแม่เหล็กกวนจะอยู่อย่างอิสระต่อกัน การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ คือ Board ควบคุมผ่านโปรแกรม Simulink ของ MATLAB ซึ่งการทดลองจะแบบการทดลองเป็น 2 ส่วน คือ การทดลองการเปลี่ยนแปลงภาระโหลดของของเหลวในภาชนะโดยไม่ขึ้นกับเวลา และการทดลองการเปลี่ยนแปลงภาระโหลดของของเหลวในภาชนะที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร

ส่วนที่ 1 การทดลองเปลี่ยนแปลงภาระโหลดในภาชนะกวนที่ไม่ขึ้นกับเวลา ด้วยระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ 600 รอบต่อนาที จากรูปที่ 4 จะเห็นว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของของเหลวกับกระแสไฟฟ้า และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของของเหลวกับภาระโหลดจะมีลักษณะเชิงเส้น และได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของของเหลวกับกระแสไฟฟ้า

$$\nabla = 7878.5 \hat{i}_a + 765.9$$

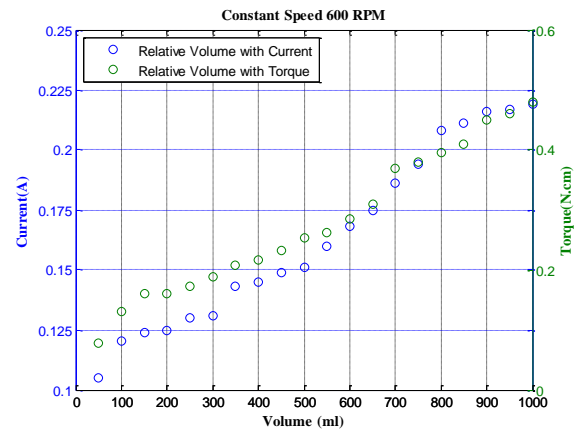
เมื่อ ∇ คือ ปริมาตรของของเหลว

และสมการความสัมพันธ์ระหว่างภาระโหลดกับกระแสไฟฟ้า

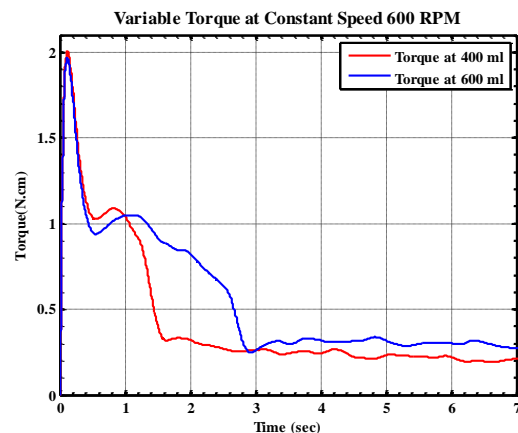
$$\hat{T}_L = 3.2238 \hat{i}_a - 0.2481$$

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ภาระโหลดของของเหลว(น้ำ) แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และภาระโหลด

Volume (ml)	Volt (V)	Current (A)	Torque (N.cm)
200	2.87	0.125	0.160
400	2.93	0.145	0.216
600	3.03	0.168	0.285
800	3.19	0.208	0.396
1000	3.28	0.219	0.480

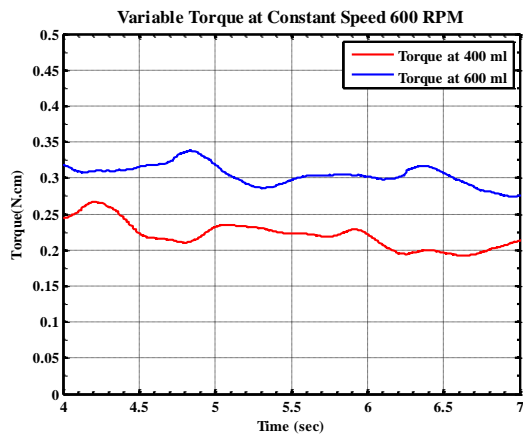


รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของของเหลวกับกระแสไฟฟ้าและภาระโหลด

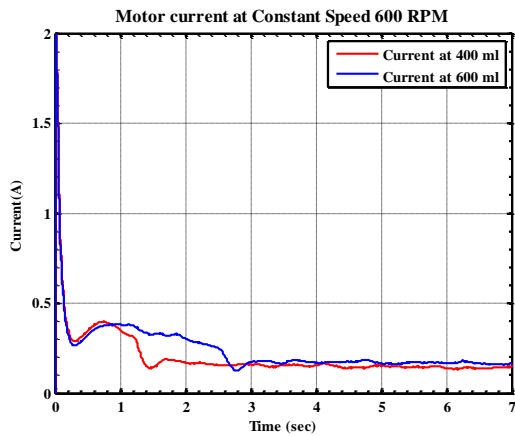


รูปที่ 5 กราฟเปรียบเทียบการตอบสนองระหว่างภาระโหลดที่ปริมาตร 400 กับ 600 มิลลิลิตร

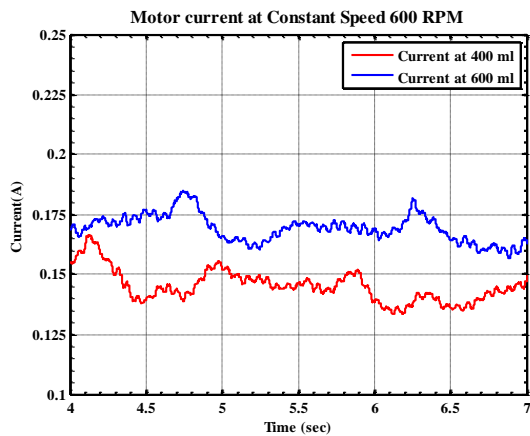
DRC-18



รูปที่ 6 กราฟเปรียบเทียบระหว่างภาระโหลดที่ปริมาตร 400 กับ 600 มิลลิลิตร ขณะระบบเข้าสู่สมดุล



รูปที่ 7 กราฟเปรียบเทียบการตอบสนองระหว่างกระแสที่ ปริมาตร 400 กับ 600 มิลลิลิตร

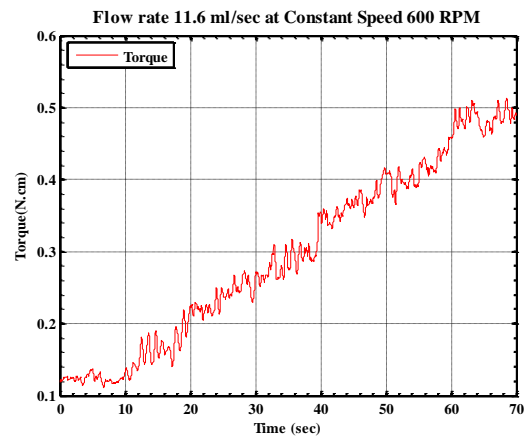


รูปที่ 8 กราฟเปรียบเทียบการตอบสนองระหว่างกระแสที่ ปริมาตร 400 กับ 600 มิลลิลิตร ขณะระบบเข้าสู่สมดุล

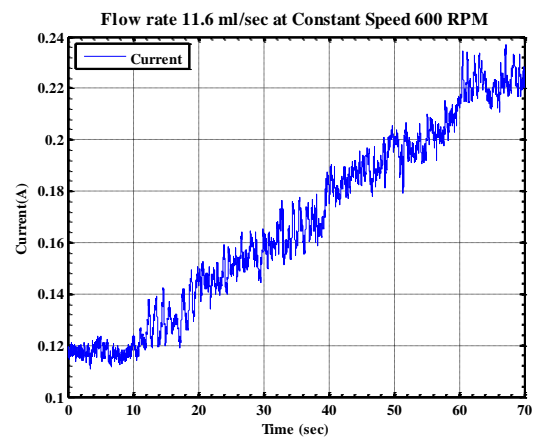
จากรูปที่ 5 และ 7 กราฟเปรียบเทียบระหว่างภาระ โหลดและกระแสระหว่างปริมาตรที่ 400 กับ 600 มิลลิลิตร เมื่อระบบควบคุมเริ่มทำงานสั่งมอเตอร์ให้มีความเร็วรอบ เท่ากับ 600 รอบต่อนาที จะเห็นว่าภาระโหลดทั้งสองค่า

ขึ้นสูงเป็นผลมาจากการตั้งกระแสเพื่อเอาชนะ inertia ของของเหลวเมื่อกับเทียบกับภาระโหลดที่ระบบเข้าสู่สมดุล เข้า ช่วงที่ระบบเข้าสู่สมดุลจะเห็นว่าภาระโหลดที่มากกว่า จะเข้าสู่สมดุลได้ช้ากว่า และเมื่อระบบเข้าสู่สมดุล จากรูป ที่ 6 และ 8 จะเห็นว่าภาระโหลดที่มากกว่าจะมีแรงบิด มากกว่าอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งในทางปฏิบัติเราจะพิจารณาที่ สภาวะสมดุลหรือ operating speed เท่านั้น

ส่วนที่ 2 การทดลองเปลี่ยนแปลงภาระโหลดในภาวะ กวนที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ด้วยระบบควบคุม ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ 600 รอบต่อ นาที และอัตราการเปลี่ยนแปลงภาระโหลดเท่ากับ 11.6 มิลลิลิตรต่อวินาที



รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่ภาระโหลดใน ภาวะกวนที่อัตราการไหล 11.6 ml/sec



รูปที่ 10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ภาระโหลด ในภาวะกวนที่อัตราการไหล 11.6 ml/sec

การทดลองในส่วนที่ 2 โดยการเพิ่มภาระโหลดใน ภาวะกวนที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร เมื่อเปรียบเทียบ

DRC-18

แรงบิดกับกระแสไฟฟ้าจากรูปที่ 9 และรูปที่ 10 เมื่อภาระโหลดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องที่ความเร็วรอบคงที่ จะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าและแรงบิดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยลักษณะของกราฟมีการเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณมีการเปลี่ยนแปลง

6. สรุป

ผลการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของของเหลวในภาชนะจะมีผลกระทบต่อค่าแรงบิดโหลด และกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นวิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้เพื่อประมาณค่าของแรงบิดโหลดที่เปลี่ยนแปลงร่วมกับตัวสังเกต ซึ่งข้อมูลที่ได้จะสามารถประมาณปริมาตรโดยมีความสัมพันธ์กับระดับน้ำภายในภาชนะ รวมถึงการแจ้งเตือนในกรณีที่ของเหลวเปลี่ยนแปลงปริมาตรไม่อยู่ในช่วงการทำงาน และสามารถควบคุมปริมาตรที่ภายในภาชนะได้ตามต้องการ

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และบริษัท มณีสุรีย์ กรุ๊ป จำกัด ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Yavuz Ege, Osman Kalender, and Sedat Nazlibilek (2010). Electromagnetic Stirrer Operating in Double Axis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, No. 7, July 2010.
- [2] Osman Kalender and Yavuz Ege (2007). A PIC Microcontroller Based Electromagnetic Stirrer. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 43, No. 9, September 2007.
- [3] Wang Jianwen, Hu Weiqing, Jia Lifeng and Qin Yukun (2011). Effects of Water-Lime Ratio and Stirring Speed of Lime Dry Hydration Productions Properties. *International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring*, China
- [4] Srisertpol, J. and Khajorntraidat, C. (2009). Estimation of DC Motor Variable Torque Using Adaptive Compensation, *Proceedings of 21st the*

Chinese Control and Decision Conference (CCDC2009), Guilin, China.

- [5] Khajorntraidat, C. and Srisertpol, J. (2010). Simulation Studies of Position Control Systems for Estimation of DC Motor Load Torque, *Proceedings of the 9th WSEAS international Conference on Signal Processing, Robotics and Automation*, University of Cambridge, UK.
- [6] Khajorntraidat, C. and Srisertpol, J. (2010). Torque Control for DC Servo Motor Using Adaptive Load Torque Compensation, *Proceedings of ICOSSE'10*, Iwate Prefectural University, Iwate, Japan.
- [7] A. Sevinc. A Full Adaptive Observer for DC Servo Motors, *Turk J Engin*, Vol. 11, No.2 2003.
- [8] M. BRANESH PILLAI, G.V.A.G. ASANKA PERERA, M.K.C.D. CHINTHAKA AND A.M. HARSHAS. ABEYKOON. Analysis of A DC Motor Based Velocity Controller Using Disturbance Observer, *J.Sci.Res.* 5(1): 1-7, 2014, Indian
- [9] Ogata, K (2010). *Modern Control Engineering*, 5th edition, ISBN: 10: 0-13-713337-5, Pearson, New Jersey.
- [10] Karl J. Åström and Björn Wittenmark (1995). *Adaptive Control*, 2nd edition, Addison Wesley, USA.