

## การชดเชยแรงบิดแบบปรับตัวได้ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ในการตรวจสอบวัตถุในกล่องบรรจุภัณฑ์บนสายพานลำเลียง

เกรียงไกร เจริญสุข นิตศักดิ์ หนูมาน้อย และ จิระพล ศรีเสริฐผล\*

### บทคัดย่อ

กระบวนการลำเลียงด้วยการใช้สายพานได้รับความนิยมทั้งภาคอุตสาหกรรมและภาคการเกษตร เพื่อลำเลียงวัตถุจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่งได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งการทำงานในลักษณะนี้ทำให้ผู้ผลิตไม่สามารถตรวจสอบวัตถุภายในกล่องบรรจุภัณฑ์ขณะลำเลียงได้ จึงจำเป็นต้องหยุดการลำเลียงและชั่งน้ำหนักกล่องบรรจุภัณฑ์เป็นระยะเพื่อตรวจสอบวัตถุภายในกล่องก่อนทำการลำเลียงต่อไป ทำให้เกิดความล่าช้าและสิ้นเปลืองอุปกรณ์ตรวจวัด บทความนี้ได้เสนอการตรวจสอบวัตถุในกล่องบรรจุภัณฑ์บนสายพานลำเลียงอัตโนมัติ โดยการประมาณน้ำหนักของวัตถุบนสายพานลำเลียงจากแรงบิดโพลที่กระทำต่อมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยการใช้การชดเชยแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจากน้ำหนัก เพื่อเป็นเงื่อนไขการตรวจสอบวัตถุในกล่องเปรียบเทียบกับจำนวนกล่องในกระบวนการลำเลียงอัตโนมัติ

**คำสำคัญ :** ระบบลำเลียง, การชดเชยแบบปรับตัวได้, การออกแบบระบบอัตโนมัติ

---

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

\* ผู้ติดต่อ, อีเมล: jiraphon@sut.ac.th รับเมื่อ 11 เมษายน 2559 ตอบรับเมื่อ 30 พฤศจิกายน 2559

## **Adaptive torque compensator of DC motor to inspect objects inside packaging box on belt conveyor**

Kriangkrai Charoensuk, Nitisak Numanoy and Jiraphon Srisertpol<sup>\*</sup>

### **Abstract**

The conveyor systems are popular applications for continuously transporting objects in both industrial and agricultural sectors. For the current system used, the producers cannot inspect the objects inside the packages while being transported. In so doing, the transporting system has to be stopped for package weighing periodically. As a result, this system decreases the speed of transportation and wastes the sensor equipment. This article proposes a new investigation method that estimates the weight of an object being transported on the belt conveyor. When an object is being transported, its weight will affect the load torque of the motor. The load torque variable can be estimated by using observer and adaptive compensator. This variable is used in algorithmic verification which conduces to inspect objects inside the packages on the belt conveyor.

**Keywords:** Conveyor System, Adaptive Compensation, Automation System Design

---

School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

<sup>\*</sup> Corresponding author, E-mail: jiraphon@sut.ac.th Received 11 April 2015, Accepted 30 November 2016

## 1. บทนำ

ระบบสายพานลำเลียงเป็นอุปกรณ์ลำเลียงประเภทหนึ่งที่ได้รับค่านิยมและมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะในส่วนการบรรจุภัณฑ์สินค้าเนื่องจากสามารถขนถ่ายวัสดุจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่ต้องสร้างความเสียหายแก่วัสดุ อีกทั้งสามารถขนถ่ายวัสดุได้อย่างเป็นระบบซึ่งช่วยลดอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นจากการขนถ่ายวัสดุด้วยมนุษย์ ระบบสายพานลำเลียงสามารถขนถ่าย ยารักษาโรค อาหาร อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ผลิตภัณฑ์ ฯลฯ

ภาคอุตสาหกรรมการผลิตในปัจจุบันนิยมใช้ระบบสายพานลำเลียงในการลำเลียงกล่องที่ใส่บรรจุภัณฑ์ ในขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการผลิต ผู้ผลิตมีความจำเป็นในการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ดังกล่าวว่ามีสินค้าบรรจุอยู่จริงก่อนทำการส่งมอบผลิตภัณฑ์ให้กับลูกค้า ซึ่งผลิตภัณฑ์โดยมากมีลักษณะเป็นกล่องบรรจุภัณฑ์จึงส่งผลให้ไม่สามารถตรวจสอบสินค้าได้ด้วยการมอง วิธีการตรวจสอบในปัจจุบันจะทำการหยุดการลำเลียงและชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์เพื่อยืนยันว่ามีสินค้าบรรจุอยู่จริงก่อนที่จะทำการลำเลียงต่อ วิธีการดังกล่าวส่งผลให้ความเร็วในการลำเลียงผลิตภัณฑ์ลดลงเนื่องจากต้องหยุดการลำเลียงเพื่อชั่งน้ำหนักเป็นระยะ อีกทั้งยังเป็นการสิ้นเปลืองอุปกรณ์ตรวจวัดโดยไม่มีจำเป็น

วิธีการตรวจสอบวัตถุภายในกล่องบรรจุภัณฑ์บนสายพานลำเลียงขณะทำงานโดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์ตรวจวัดในเบื้องต้นจำเป็นต้องทราบถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบสายพานลำเลียง ซึ่งมีบทความที่เกี่ยวข้อง อาทิเช่น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบสายพานลำเลียงแบบสถิตและแบบพลวัต [1-3]

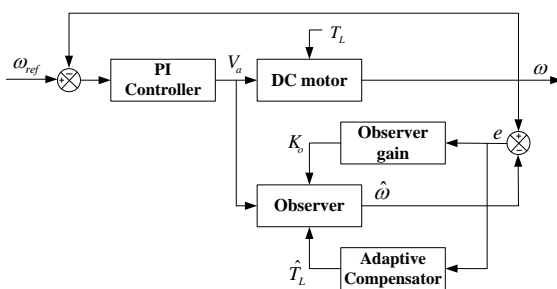
แบบทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบสายพานลำเลียงในกรณีที่พิจารณาความยืดหยุ่นของสายพานแบบไม่เป็นเชิงเส้น [4] ต่อมาได้ศึกษาระบบควบคุมความเร็วของสายพานพบว่ามีความควบคุมหลากหลายประเภทที่สามารถทำการควบคุมความเร็วของสายพานได้ [5-9] ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ตัวควบคุมพีไอซึ่งสามารถควบคุมความเร็วของสายพานได้อย่างแม่นยำ ในลำดับต่อมาได้พิจารณาถึงต้นกำลังของระบบสายพานลำเลียงพบว่า เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยตั้งสมมติฐานว่า น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ขณะทำการลำเลียงจะส่งผลโดยตรงต่อแรงบิดโหลดที่กระทำกับมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งแรงบิดโหลดดังกล่าวสามารถประมาณได้จากการใช้ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ร่วมกับตัวสังเกตระบบ [10-15] ดังนั้นหากสามารถประมาณค่าแรงบิดโหลดได้ ดังกล่าวสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการวัดภายในกล่องบรรจุภัณฑ์ขณะลำเลียงได้เช่นกัน

บทความนี้ได้นำเสนอการระบุวัตถุภายในกล่องบรรจุภัณฑ์ขณะทำการลำเลียง โดยใช้ตัวประมาณแรงบิดโหลดร่วมกับตัวสังเกต (observer) ซึ่งสามารถระบุจำนวนของวัตถุภายในกล่องบรรจุภัณฑ์ขณะลำเลียง โดยไม่ต้องติดตั้งอุปกรณ์ตรวจชั่งน้ำหนักวัตถุเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการลำเลียงและบรรจุภัณฑ์

## 2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ระบบสายพานลำเลียงประกอบไปด้วย สายพาน เอนโค้ดเดอร์ (encoder) โฟโตเซ็นเซอร์ (photosensor) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC motor) และบอร์ดควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ (electronic control board) ใช้รับส่งสัญญาณระหว่างคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ต่างๆ

รูปที่ 1 แสดงแผนภาพหลักการทำงานของระบบการชดเชยเพื่อประมาณค่าแรงบิดแบบปรับตัวได้ โดยมีตัวควบคุมแบบพีไอ (PI controller) ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC motor) ที่ขับเครื่องสายพานให้คงที่ตามกำหนด เมื่อน้ำหนักบนสายพานเปลี่ยนแปลงจะส่งผลให้มอเตอร์มีการขับเคลื่อนเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นฟังก์ชันของแรงดันไฟฟ้า เพื่อรักษาความเร็วรอบ ซึ่งกระแสที่เพิ่มขึ้นนี้มีความสัมพันธ์กับแรงบิดที่เพิ่มขึ้น ในทางปฏิบัติไม่สามารถติดตั้งเซ็นเซอร์วัดแรงบิด กระแสแรงดัน และความเร็วรอบได้ จึงใช้ตัวสังเกต (observer) เข้ามาช่วยในการประมาณค่าต่างๆ เมื่อน้ำหนักบนสายพานเกิดการเปลี่ยนแปลงส่งผลให้ความเร็วรอบระหว่างระบบกับตัวสังเกตเกิดค่าความผิดพลาดขึ้นและได้ใช้ค่าความผิดพลาดนี้ให้การออกแบบตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ (adaptive compensator) ในการชดเชยแรงบิดที่เกิดจากน้ำหนักให้กับตัวสังเกต เพื่อรักษาความเร็วรอบให้คงที่



รูปที่ 1 แผนภาพการทำงานของตัวชดเชยแรงบิด โหลดร่วมกับตัวสังเกตในการควบคุมความเร็วรอบ

### 2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นอุปกรณ์กระตุ้นของสายพานลำเลียง โดยความเร็วของมอเตอร์จะถูกควบคุมโดยแรงดันไฟฟ้าอาร์เมเจอร์  $V_a$  เมื่อพิจารณาวงจรไฟฟ้าของขดลวดอาร์เมเจอร์โดยใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's voltage law) พบว่ามีความสัมพันธ์ดังในสมการที่ (1)

$$V_a - K_b \omega = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a \quad (1)$$

เมื่อพิจารณาสมการทางกลของมอเตอร์พบว่าแรงบิดโหลดจากภายนอกจะส่งผลกระทบต่อความเร็วของมอเตอร์ดังแสดงในสมการที่ (2)

$$I \frac{d\omega}{dt} = -b\omega + K_m i_a - T_L \quad (2)$$

จากสมการที่ (1) และ (2) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการสเตท (state space equation) ได้ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_1 V_a + B_2 T_L \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (3)$$

### 2.2 ตัวสังเกต

ในบทความนี้เราใช้ตัวสังเกตประมาณค่าตัวแปรสเตทของระบบขณะทำงาน ซึ่งตัวแปรสเตทบางตัวนั้นไม่สามารถวัดได้โดยตรง โดยมีหลักการคือนำค่าความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตของระบบจริงกับตัวสังเกตมาประมวลผลผ่านค่าอัตราขยายของตัวสังเกต

และชดเชยให้กับตัวสังเกต ทั้งนี้เพื่อลดค่าความผิดพลาดของระบบจนกระทั่งไม่มีความแตกต่างกัน ส่งผลให้ค่าตัวแปรสเตตที่อ่านได้จากตัวสังเกตมีความถูกต้อง ซึ่งสมการของตัวสังเกตนั้นแสดงในสมการที่ (4) ทั้งนี้ตัวสังเกตจะใช้งานได้ก็ต่อเมื่อระบบมีคุณสมบัติในการสังเกตเท่านั้น [16]

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + B_1V_a + B_2T_L + K_o e \\ \hat{y} &= C\hat{x} \end{aligned} \quad (4)$$

เมื่อ สัญลักษณ์ " $\hat{\phantom{x}}$ " แสดงถึงค่าตัวแปรของตัวสังเกต ในขณะที่  $e$  คือค่าความผิดพลาดระหว่างตัวแปร  $x$  และ  $\hat{x}$  ดังแสดงในสมการที่ (5)

$$e = y - \hat{y} = \omega - \hat{\omega} \quad (5)$$

จากสมการที่ (4) สามารถจัดรูปอยู่ในเทอมของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} x &= \begin{bmatrix} \omega \\ i_a \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} -\frac{b}{I} & \frac{K_m}{I} \\ -\frac{K_b}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix}, K_o = \begin{bmatrix} K_{o1} \\ K_{o2} \end{bmatrix} \\ \hat{x} &= \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ L_a \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{I} \\ 0 \end{bmatrix}, C = [1 \quad 0] \end{aligned}$$

- เมื่อ  $I$  โมเมนต์ความเฉื่อย ( $\text{Kg} \cdot \text{m}^2$ )  
 $K_m$  ค่าคงที่ของแรงบิด ( $\text{N} \cdot \text{m/A}$ )  
 $K_b$  ค่าคงที่ Electromotive Force ( $\text{V} \cdot \text{s/rad}$ )  
 $T_L$  แรงบิดโหลด ( $\text{N} \cdot \text{m}$ )  
 $b$  ค่าความหน่วงทางกล ( $\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s/rad}$ )

- $R_a$  ค่าความต้านทานของอาร์เมเจอร์ ( $\Omega$ )  
 $L_a$  ค่าความเหนี่ยวนำของอาร์เมเจอร์ (H)  
 $i_a$  กระแสไฟฟ้าของอาร์เมเจอร์ (A)  
 $V_a$  ค่าความต่างศักย์ของอาร์เมเจอร์ (V)  
 $\omega$  ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ (rad/s)  
 $K_o$  ค่าอัตราขยายของตัวสังเกต

การออกแบบค่าอัตราขยายของตัวสังเกตจำเป็นต้องออกแบบให้ตัวสังเกตสามารถสังเกตระบบได้รวดเร็วกว่าตัวควบคุม กล่าวคือตัวสังเกตจะต้องสามารถประมาณค่าตัวแปรสเตตได้ก่อนที่ระบบควบคุมจะเข้าสู่สภาวะคงตัว ระบบนี้ได้กำหนดให้อัตราส่วนหน่วงและเวลาที่เข้าสู่สภาวะคงตัวของตัวสังเกตมีค่าเท่ากับ 0.8 และ 0.003 วินาทีตามลำดับ จากสมการที่ (3) และ (4) สามารถเขียนสมการไดนามิกส์ของสัญญาณความผิดพลาดได้คือ

$$\dot{e} = [A - K_o C]e \quad (6)$$

ซึ่งสามารถหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกตได้จากสมการลักษณะเฉพาะของสมการที่ (6) ได้  $|sI - A + K_o C| = 0$  มีค่าเท่ากับ  $K_o = [1567 \ 199]^T$

### 2.3 ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้

ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ใช้ในการประมาณค่าแรงบิดโหลดที่เปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากน้ำหนักของผลิตภัณฑ์บนสายพานได้ จากสมการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในสภาวะที่ระบบได้รับแรงบิดโหลดที่เปลี่ยนแปลงในสมการที่ (1) และ (2) สามารถจัดรูปแบบใหม่ได้ดังนี้

$$b_1 V_a = \ddot{\omega} + a_2 \dot{\omega} + a_1 \omega + \alpha_2 \dot{T}_L + \alpha_1 T_L \quad (7)$$

โดยตัวแปรต่างๆในระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะมีค่าคงที่และสามารถหาค่าได้ ทั้งนี้มีเพียงค่าแรงบิดโหลด  $\hat{T}_L$  เท่านั้นที่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นสามารถเขียนสมการของตัวสังเกตได้ดังนี้

$$b_1 V_a = \dot{\hat{\omega}} + a_2 \hat{\omega} + a_1 \hat{\omega} + \alpha_2 \dot{\hat{T}}_L + \alpha_1 \hat{T}_L \quad (8)$$

เมื่อ 
$$b_1 = \frac{K_t}{L_a I}, a_1 = \left[ \frac{R_a b}{L_a I} + \frac{K_b K_t}{L_a I} \right], a_2 = \left[ \frac{K_{o1}}{K_{o2}} \right]$$
  

$$\alpha_1 = \frac{R_a}{L_a I}, \alpha_2 = \frac{1}{I}$$

หลักการทํางานของตัวชดเชยแบบปรับตัวได้คือ ทําการปรับค่าแรงบิดโหลด  $\hat{T}_L$  เพื่อชดเชยให้กับตัวสังเกตระบบจนกระทั่งค่าความผิดพลาดระหว่างเอาต์พุตของระบบจริงและเอาต์พุตของตัวสังเกตมีทิศทางลดลงเข้าหาค่าศูนย์ โดยใช้วิธี Gradient method ซึ่งได้กำหนดให้ Loss Function มีค่าดังนี้

$$J(\hat{T}_L) = \frac{1}{2} e^2 \quad (9)$$

ผลต่างระหว่างสมการที่ (7) และ (8) จะแสดงให้เห็นถึงค่าความผิดพลาดระหว่างความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวสังเกตได้ดังแสดงในสมการที่ (10)

$$\ddot{e} = -a_2 \dot{e} - a_1 e - \alpha_2 (\dot{T}_L - \dot{\hat{T}}_L) - \alpha_1 (T_L - \hat{T}_L) \quad (10)$$

เมื่อ  $\ddot{e} = \ddot{\omega} - \ddot{\hat{\omega}}$  และ  $\dot{e} = \dot{\omega} - \dot{\hat{\omega}}$  ในขณะทีการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร ( $\hat{T}_L$ ) ในทิศทาง Negative Gradient ของ Loss Function ดังนี้

$$\frac{\partial \hat{T}_L}{\partial t} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \hat{T}_L} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \hat{T}_L} \quad (11)$$

จากกฎการปรับตัวสำหรับการประมาณพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบสำหรับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงที่เรียกว่า MIT Rule ในการออกแบบ จากสมการที่ (11) จะได้ตัวแปรปรับตัวได้คือ

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

เมื่อ  $\gamma$  คืออัตราการปรับตัวและเมื่อตัวแปรปรับตัว  $\hat{T}_L$  มีการเปลี่ยนแปลง จากสมการที่ (8) จะเห็นได้ว่า

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \hat{T}_L} (b_1 V_a) &= \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( \frac{\partial \hat{\omega}}{\partial \hat{T}_L} \right) + a_2 \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial \hat{\omega}}{\partial \hat{T}_L} \right) \\ &+ a_1 \left( \frac{\partial \hat{\omega}}{\partial \hat{T}_L} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

โดยกำหนดให้ Sensitivity Function เท่ากับ

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

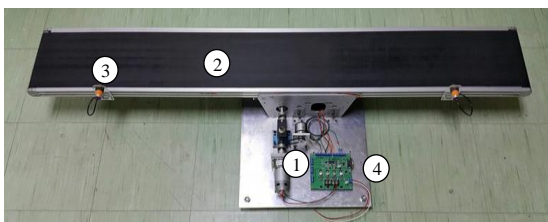
จากนั้นแทนสมการที่ (13) ลงในสมการที่ (12) จะได้สมการการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรปรับค่า ดังนี้

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

### 3. เครื่องมือการทดลองและผลการทดลอง

ในการทดลองได้ทำการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ โดยการเขียนอัลกอริทึมของตัวควบคุมด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink จากนั้นทำการเชื่อมต่อสัญญาณการควบคุมระหว่างคอมพิวเตอร์ด้วยบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่เป็นอุปกรณ์เชื่อมโยงระหว่างคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ทดลองผ่านสาย Serial cable ไปยัง PCI serial card ของคอมพิวเตอร์ ซึ่งบอร์ดจะเชื่อมต่อกับโปรแกรมในส่วนเสริม Real time windows target เป็นบอร์ดที่สามารถควบคุมแบบ Real time ซึ่งมีความสามารถในการรับ - ส่งสัญญาณที่มีลักษณะทั้ง D/A และ A/D สำหรับทดลองจะมี Power amplifier เพื่อป้อนไฟฟ้ากระแสตรงให้แก่บอร์ด ซึ่งจะทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าไปยังมอเตอร์ตามคำสั่งของโปรแกรมควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ และเซนเซอร์วัดความเร็วซึ่งอยู่ในรูป PWM ถูกส่งต่อไปยังบอร์ดเพื่อประมวลผลยังโปรแกรมควบคุมการทำงานต่อไป

ระบบสายพานลำเลียงที่ใช้ในการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 2 ประกอบไปด้วยโฟโต้เซ็นเซอร์ สายพานลำเลียง มอเตอร์/ชุดเอนโค้ดเดอร์ และบอร์ดควบคุม



รูปที่ 2 ชุดระบบสายพานลำเลียง (1.มอเตอร์/ชุดเอนโค้ดเดอร์ 2.สายพาน 3.โฟโต้เซ็นเซอร์ 4.บอร์ดควบคุม)

### 3.1 การสอบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดกับจำนวนผลิตภัณฑ์

ค่าตัวแปรของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถหาได้จากค่าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 24 โวลต์ 100 รอบต่อนาที แบบมีชุดเกียร์ยี่ห้อ ZHENG ที่ได้จากรองาน และการประมาณค่าตัวแปรโดยวิธีระบุเอกลักษณ์จากข้อมูลการทดลองของการตอบสนองของระบบ ค่าตัวแปรที่ได้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1

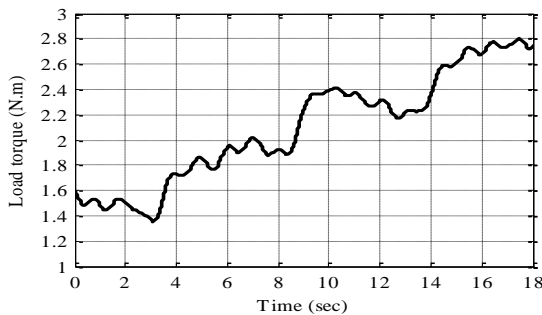
ตารางที่ 1 ตัวแปรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

Parameter	Value	Unit
$R$	5.8	$\Omega$
$L_a$	5.63	mH
$I$	$5.7 \times 10^{-2}$	kg m <sup>2</sup>
$b$	0.069	N m s/rad
$K_b$	1.98	V s/rad
$K_m$	1.98	N m/A

ขณะที่ผลิตภัณฑ์ได้บรรจุในกล่องหรือภาชนะถูกลำเลียงอยู่บนสายพาน จะทำให้เกิดโหลดกระทำต่อการหมุนสายพานลำเลียงของมอเตอร์ ดังนั้นเราจำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์ของค่าแรงบิดโหลด  $T_L$  ที่เกิดขึ้นกับกล่องบรรจุผลิตภัณฑ์นั้นขึ้นอยู่กับน้ำหนักและตำแหน่งของกล่องบรรจุผลิตภัณฑ์บนสายพานลำเลียงเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการเขียนโปรแกรมในการระบุจำนวนผลิตภัณฑ์ที่อยู่บนสายพานขณะลำเลียงได้

การทดลองนี้ ระบบขับเคลื่อนระบบสายพานลำเลียงที่ความเร็วรอบมอเตอร์ที่ 20 รอบต่อนาที ในช่วงเวลาที่ 0 – 4 วินาที ไม่มีกล่องบรรจุผลิตภัณฑ์บนสายพาน จากนั้นในช่วงเวลาที่ 4 – 9 วินาที วางกล่องบรรจุ

ผลิตภัณฑ์จำนวน 1 ชั้นบนสายพาน ถัดมาช่วงเวลา  
9 – 14 วินาที เพิ่มกล่องบรรจุผลิตภัณฑ์ขึ้นที่สองบน  
สายพานลำเลียง และต่อมาในช่วงเวลาที่ 14 – 18 วินาที  
ได้เพิ่มกล่องบรรจุผลิตภัณฑ์ขึ้นที่สามบนสายพาน ซึ่ง  
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีแรงบิดสูงสุด 8 N.m และ  
กล่องบรรจุผลิตภัณฑ์แต่ละกล่องมีน้ำหนัก 4 กิโลกรัม  
โดยใช้สมการที่ (11), (14) และ (15) ในการคำนวณเพื่อ  
ประมาณแรงบิดที่ได้จากตัวชดเชยแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงการประมาณค่าแรงบิด โหลด  $\hat{T}_L(t)$  ที่ได้  
จากตัวชดเชยแรงบิด โหลด

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงค่าประมาณแรงบิด  
โหลดกับจำนวนกล่องบรรจุผลิตภัณฑ์

Description	$\hat{T}_L$ (N.m)	
	Min	Max
ไม่มีกล่องบรรจุผลิตภัณฑ์	0	1.6
กล่องบรรจุผลิตภัณฑ์ 1 ชั้น	1.6	2.1
กล่องบรรจุผลิตภัณฑ์ 2 ชั้น	2.1	2.6
กล่องบรรจุผลิตภัณฑ์ 3 ชั้น	2.6	3.0

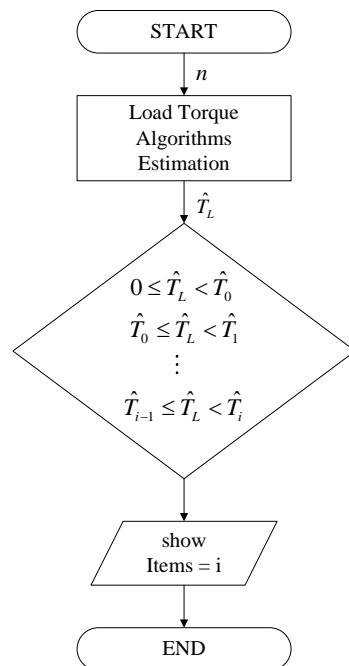
ผลของการทดลองแสดงความสัมพันธ์ของค่าการ  
ประมาณแรงบิด โหลดกับจำนวนกล่องบรรจุผลิตภัณฑ์  
นั้น ซึ่งสามารถกำหนดช่วงขอบเขตของค่าประมาณ  
แรงบิด โหลดที่กระทำกับจำนวนกล่องบรรจุผลิตภัณฑ์  
ได้ดังแสดงในตารางที่ 2

### 3.2 โปรแกรมระบุจำนวนกล่องบรรจุผลิตภัณฑ์

จากหัวข้อที่ผ่านมาได้ทำการระบุขอบเขตของค่าแรง  
บิดรบกวนต่อจำนวนผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีส่วนช่วยในการ  
ออกแบบอัลกอริทึมในการระบุจำนวนผลิตภัณฑ์  
งานวิจัยนี้จะนำค่าขอบบนและขอบล่างของแรงบิด  
รบกวนในแต่ละกรณีมากำหนดเป็นตัวแปรดังนี้

$$\hat{T}_0 = 1.6 \text{ N.m}, \hat{T}_1 = 2.1 \text{ N.m},$$

$$\hat{T}_2 = 2.6 \text{ N.m} \text{ และ } \hat{T}_3 = 3.0 \text{ N.m}$$



รูปที่ 4 แสดงแผนภาพโปรแกรมการระบุจำนวนกล่อง  
บรรจุผลิตภัณฑ์

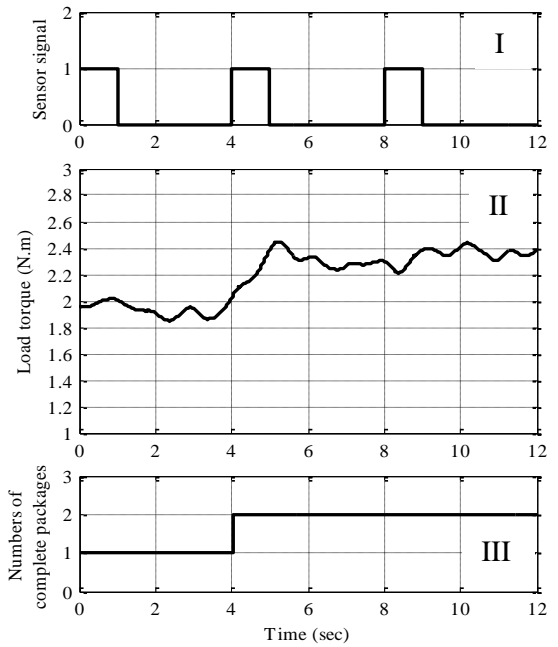


จากรูปที่ 4 เริ่มจากจับเคลื่อนระบบสายพานลำเลียง โดยที่มีผลิตภัณฑ์วางอยู่บนสายพานหรือไม่มีเลยก็ได้ ในลำดับถัดมาตัวชดเชยแบบปรับตัวได้จะทำการหาค่าแรงบิดครบวง เพื่อชดเชยให้กับตัวสังเกต โดยค่าแรงบิดครบวงนี้ถูกส่งต่อมายังตัวเปรียบเทียบจำนวนผลิตภัณฑ์ หลังจากจบกระบวนการเปรียบเทียบแล้ว อัลกอริทึมจะระบุถึงจำนวนผลิตภัณฑ์ที่อยู่บนสายพาน ณ เวลานั้นๆ และจะแสดงผลอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งหยุดการทำงานของระบบสายพานลำเลียง

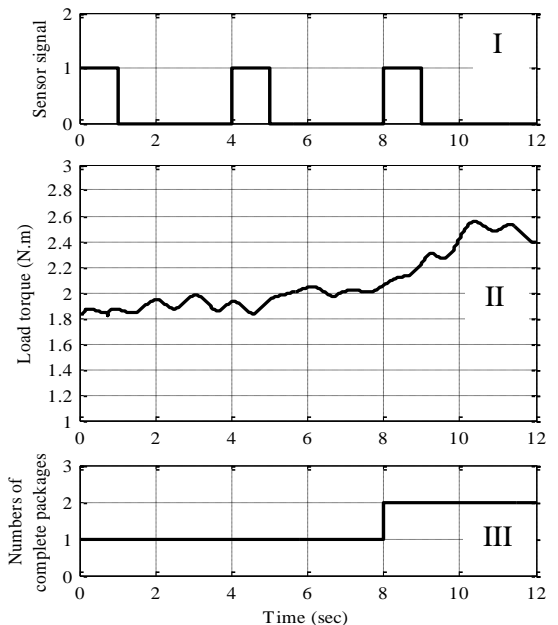
**3.3 ผลการทดลอง**

บทความนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 กรณี ในแต่ละกรณี โดยจะทำการเพิ่มกล่องบรรจุผลิตภัณฑ์ลงบนสายพานลำเลียงทุกๆ 4 วินาที โดยกำหนด A คือกล่องบรรจุผลิตภัณฑ์ที่มีผลิตภัณฑ์บรรจุอยู่ในกล่อง B คือกล่องบรรจุผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีผลิตภัณฑ์บรรจุอยู่ในกล่อง โดยการทดลองจะแสดงผลการทำงานของโปรแกรมในการระบุผลิตภัณฑ์และจำนวนกล่องบรรจุผลิตภัณฑ์จริงบนสายพานลำเลียง

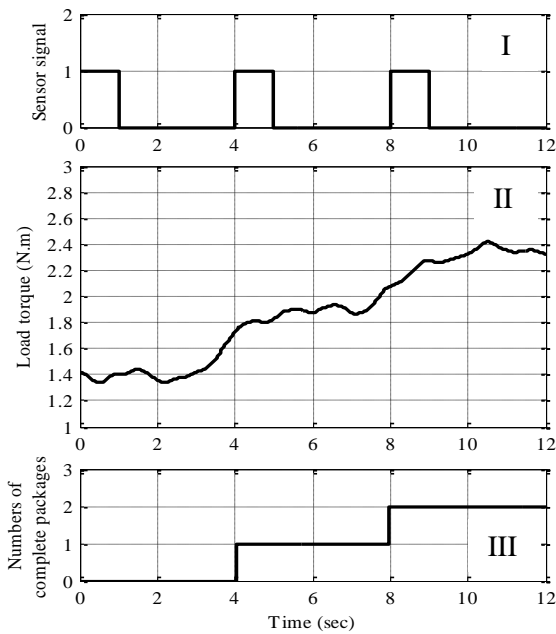
- กรณีที่ 1 (AAB) กล่อง A ถูกวางบนสายพานในช่วงเวลาที่ 0 – 4 วินาที ถัดมากล่อง A กล่องที่สองถูกวางเพิ่มบนสายพานในช่วงเวลาที่ 4 - 8 วินาที และท้ายสุดกล่อง B ถูกวางเพิ่มในช่วงเวลาที่ 8 – 12 วินาที
- กรณีที่ 2 (ABA) กล่องที่ A ถูกวางบนสายพานในช่วงเวลาที่ 0 – 4 วินาที ถัดมากล่อง B ได้วางเพิ่มบนสายพานในช่วงเวลาที่ 4 - 8 วินาที และกล่อง A ถูกวางในช่วงเวลาที่ 8 – 12 วินาที



**รูปที่ 5** แสดงผลการทดลองสำหรับกรณีที่ 1



**รูปที่ 6** แสดงผลการทดลองสำหรับกรณีที่ 2



รูปที่ 7 แสดงผลการทดลองสำหรับกรณีที่ 3

- **กรณีที่ 3 (BAA)** กล่อง B ถูกวางบนสายพานในช่วงเวลาที่ 0 – 4 วินาที ถัดมากล่อง A ถูกวางบนสายพานในช่วงเวลาที่ 4 - 8 วินาที และท้ายสุดกล่อง A ถูกวางเพิ่มในช่วงเวลาที่ 8 – 12 วินาที

กราฟที่ I แสดงผลการทำงานของโฟโต้เซ็นเซอร์ในการตรวจจับกล่องบรรจุภัณฑ์ที่เข้ามาบนสายพานลำเลียง กราฟที่ II แสดงผลการประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำกับมอเตอร์จากตัวชดเชยแรงบิดที่ปรับตัวได้เมื่อมีกล่องบรรจุภัณฑ์อยู่บนสายพานลำเลียง ส่วนกราฟที่ III เป็นการแสดงผลการระบุผลิตภัณฑ์ที่บรรจุอยู่ในกล่องจากโปรแกรมระบุจำนวนกล่องผลิตภัณฑ์ ผลการทดลองในกรณีที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 5 โฟโต้เซ็นเซอร์สามารถตรวจจับกล่องบรรจุภัณฑ์ที่เข้ามาบนสายพาน

ลำเลียงถูกต้อง จำนวน 3 กล่อง ผลการประมาณค่าแรงบิดโหลดอยู่ในช่วงที่กำหนดสัมพันธ์กับจำนวนกล่องบรรจุผลิตภัณฑ์ที่มีผลิตภัณฑ์ภายในกล่อง และโปรแกรมสามารถระบุจำนวนกล่องบรรจุผลิตภัณฑ์ที่มีผลิตภัณฑ์ภายในกล่องได้อย่างถูกต้อง รูปที่ 6 และ 7 แสดงผลการทำงานของโฟโต้เซ็นเซอร์ การประมาณค่าแรงบิดโหลดและ โปรแกรมระบุจำนวนกล่องบรรจุผลิตภัณฑ์ซึ่งทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับกรณีที่ 2 และ 3

#### 4. สรุปผล

วิธีการระบุผลิตภัณฑ์ในกล่องบรรจุผลิตภัณฑ์บนสายพานลำเลียงเป็นไปอย่างยุ่งยากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการบรรจุผลิตภัณฑ์อย่างอัตโนมัติ นั้น น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ในกล่องบรรจุภัณฑ์บนสายพานลำเลียงขณะทำงานจะมีผลกระทบต่อค่าแรงบิดโหลดที่กระทำต่อมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนระบบสายพานลำเลียง ดังนั้นบทความนี้ได้ประมาณค่าแรงบิดโหลดด้วยวิธีการใช้ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ร่วมกับตัวสังเกต เป็นข้อมูลที่ได้นำไปเขียนโปรแกรมระบุจำนวนกล่องบรรจุผลิตภัณฑ์ขณะทำการลำเลียง วิธีการนี้สามารถนำไปใช้ตรวจสอบกล่องบรรจุผลิตภัณฑ์ ร่วมกับควบคุมคุณภาพในระบบอัตโนมัติได้ ดังแสดงในผลการทดลองทั้งสามกรณีข้างต้น แต่จำเป็นต้องเก็บข้อมูลเบื้องต้นในการเขียนโปรแกรม เช่น การทดลองครั้งนี้ในช่วงที่ไม่มีกล่องบรรจุผลิตภัณฑ์อยู่บนสายพานลำเลียงจะมีค่าประมาณแรงบิดโหลดช่วง 1.2 – 1.6 N.m เกิดขึ้นจากน้ำหนักของสายพานลำเลียง กล่องบรรจุผลิตภัณฑ์ที่มีผลิตภัณฑ์บรรจุอยู่ภายในจะทำให้ค่าประมาณแรงบิดโหลดเพิ่มขึ้น 0.4 – 0.7 N.m ต่อ

กล่อง ข้อเสนอแนะควรพิจารณาเลือกมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงมีแรงบิดสูงสุดมากกว่าแรงบิดโหลดที่เกิดขึ้นจากกล่องบรรจุผลิตภัณฑ์สูงสุด 1 เท่า ความถูกต้องของการระบุผลิตภัณฑ์จะขึ้นอยู่กับความแตกต่างน้ำหนักของกล่องบรรจุผลิตภัณฑ์ที่จะสามารถจำแนกความแตกต่างได้ชัดเจน

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และ บริษัท มณีสุรย์ กรุ๊ป จำกัด ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัย

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] O.M.M. Kenneth, K. Zuva and T. Zuva, "Modeling a Nonlinear Conveyor Belt System Integrated on a Closed Loop Channel", Engineering and Innovative Technology 3, 2013, pp. 246-250.
- [2] L. Shengqiang, L. Xiaodong and X. Wilsun, "Modeling DC Motor Drive Systems in Power System Dynamic Studies", Industry Applications 41, 2015, pp. 658-668.
- [3] K. Tseng, J. Chiu, R. Chang and T. Shen, "Modeling and Analysis of Belt Conveyor Using Bond Graph Approach", Proceedings of the IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Beijing, China, 2011, pp. 2717-2722.
- [4] J. Songsiri and D. Banjerdpongchai, "Dynamic Models of Servo-Driven Conveyor System", Proceedings of the 2004 IEEE Region 10 Conference on Analog and Digital Techniques in Electrical Engineering, Bangkok, Thailand, 2004, pp. 538-541.
- [5] S.M. Jagdish and S. Sathishbabu, "A Model Reference PID Control System and Its Application to SISO Process", Engineering Research and Applications 2, 2012, pp. 1543-1550.
- [6] L.B. Ristic and B.I. Jeftenic, "Implementation of Fuzzy Control to Improve Energy Efficiency of Variable Speed Bulk Material Transportation", Industrial Electronics 59, 2012, pp. 2959-2969.
- [7] G. Sujatha and V. Perasiriyana, "Conveyor Control and Sorting Module Controlled by Programmable Logic Controller", Engineering and Technology 4, 2014, pp. 12-18.
- [8] Z. Iwai, I. Mizumoto, L. Liu, S.L. Shah and H. Jiang, "Adaptive Stable PID Controller with Parallel Feedforward Compensator," Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, Singapore, 2006, pp. 1-6.
- [9] Z. Shirong, "Model Predictive Control of Operation Efficiency of Belt Conveyor", Proceedings of the 29<sup>th</sup> Chinese Control Conference, Beijing, China, 2010, pp. 1854-1858.
- [10] L. Faa-Jeng and W. Rong-Jong, "Adaptive Fuzzy-Neural-Network Control for Induction Spindle Motor Drive", IEEE Transactions on Energy Conversion 17, 2002, pp. 507-513

- [11] H.S. Ahn and Y.Q. Chen, “State-dependent Periodic Adaptive Disturbance Compensation”, *Control Theory and Applications* 1, 2007, pp. 1008-1014.
- [12] C. Pewmaikam, J. Srisertpol and C. Khajorntraidet, “Adaptive Fuzzy Logic Compensator for Permanent Magnet Synchronous Motor Torque Control System”, *International Journal Modeling and Optimization* 2, 2012, pp. 141-146.
- [13] C. Khajorntraidet, J. Srisertpol and C. Prattanarak, “Alternative Technique for DC Servo Motor Control using Adaptive Load Torque Compensator”, *Advanced Science Letters* 19, 2013, pp. 2139-2143.
- [14] K. Charoensuk, N. Numanoy and J. Srisertpol, “Verifying Objects Inside Packaging Box on Belt Conveyor by Weight Estimator”, *Proceeding of the 2015 IEEE Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference*, Chongqing, China, 2015, pp. 470-474.
- [15] S.R. Mousavi-Aghdam and M.B.B. Sharifian, “Nonlinear Adaptive Observer for Sensorless Control of Induction Motors” *Proceedings of the 20<sup>th</sup> Iranian Conference on Electrical Engineering*, Tehran, Iran, 2012, pp. 376-379.
- [16] K. Ogata, “*Modern Control Engineering* (5<sup>th</sup> Eds.)”, Person Education, Upper Saxddle River, New Jersey, 2010.