

การควบคุมการทำงานของเครื่องกวนสารด้วยระบบควบคุมวงลูปปิด

The Operation Controlling of Agitator using Closed Loop Control System

ปาริมา ผุยแสงพันธ์¹ และชัยยงค์ เสริมผล^{1*}

Parima Phuisaengpan¹ and Chaiyong Soemphol^{1*}

¹สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

¹Department of Electrical and Computer Engineering,
Faculty of Engineering, Mahasarakham University

Received: September 1, 2022

Revised: October 12, 2022

Accepted: October 19, 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อ ออกแบบ สร้าง และทดสอบประสิทธิภาพเครื่องกวนสารด้วยระบบควบคุมวงลูปปิด โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมหลัก และสามารถวัดค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ด้วยโมดูลวัดการใช้พลังงาน (PZEM-004T) ระบบควบคุมเครื่องกวนสารที่สร้างขึ้นสามารถทำการประเมินค่าความหนืด จากสูตรสมการพื้นฐานของเครื่องวัดความหนืดแบบหมุน และสามารถแสดงผลความหนืดได้แบบเรียลไทม์ การทำงานของเครื่องจะอาศัยหลักการทำงานของมอเตอร์ภายใต้สภาวะคงตัว เมื่อมีมอเตอร์หมุนจะทำให้เกิดทอร์กหน่วงที่กระทำต่อพื้นผิวใบพัด อันเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของของเหลวภายในเครื่องกวนสาร และทอร์กหน่วงที่เกิดขึ้นนั้นแปรผันกับความหนืดของสารที่ทำการผสม ผลการทดลองพบว่า ระบบควบคุมแบบวงลูปปิดหรือระบบป้อนกลับสามารถทำให้ความเร็วรอบในการผสมคงที่อย่างสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาในการผสม และจากการทดสอบประสิทธิภาพการกวนสารตัวอย่างพบว่า เมื่อผสมแชมพูในปริมาตร 10 ลิตร เครื่องกวนสารที่สร้างขึ้นจะใช้ระยะเวลาในกระบวนการผลิตอยู่ในช่วง 45 -55 นาที เมื่อเทียบกับการใช้เครื่องผสมสารตามท้องตลาดในปริมาตรเท่ากัน จะใช้เวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที นอกจากนี้การประเมินความหนืดของตัวอย่างผลิตภัณฑ์พบว่า การประเมินความหนืดของแชมพูที่ผสมจะมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 2.94% และมีความคลาดเคลื่อนสูงสุด 3.15 % เมื่อเทียบกับเครื่องวัดความหนืดมาตรฐานแบบบรูคฟิลด์ ซึ่งมีค่าที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้

คำสำคัญ: การประเมินค่าความหนืด เครื่องกวนสาร ระบบควบคุมแบบวงลูปปิด ทอร์กของมอเตอร์ การผสมสาร

Abstract

This research was conducted to design, build, and test the efficiency of an agitator using a closed-loop control system. The microcontroller was used as the main control, and it can measure the electrical energy used with the AC Digital Power Energy Meter Module--PZEM-004T. The system of control of the stirrer was studied, and the viscosity was assessed using the basic formula of the rotary viscometer. The constructed agitator can display viscosity in real time. The operation of the machine was based on the principle of motor operation under steady state. When the motor was rotated, a damping torque occurred on the impeller surface, and the resulting torque was proportional to the viscosity of the mixture. The results showed that a closed-loop or feedback control system can keep the mixing speed constant throughout the mixing period. The test of the stirring efficiency of the sample found that when mixed with shampoo in a volume of 10 liters, the constructed machine takes in the production process in the range of 45 to 55 minutes. Compared to using the same volume of commercial mixers, it takes 1 hour and 30 minutes. In addition, the viscosity assessment of the product samples revealed that the viscosity assessment of the shampoo mix had an average percentage tolerance of 0.75% and a maximum tolerance of 3.15% compared to a Brookfield standard viscometer, which had values that were within acceptable standards.

Keywords: viscosity estimation, agitator, closed-loop control system, motor torque, substances mixing



บทนำ

การผสมสารหรือของเหลวที่แตกต่างกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป ถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญอย่างหนึ่งในกระบวนการผลิตต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นในด้านเภสัชกรรม อาหาร กระบวนการผลิตพอลิเมอร์ เทคโนโลยีชีวภาพ และรวมถึงในภาคอุตสาหกรรม เป็นต้น จึงถือได้ว่าการใช้ประโยชน์จากการผสมกันของสารอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม การผสมที่ไม่ได้มาตรฐานส่งผลให้เกิดปัญหาขึ้นภายหลัง เช่น การผสมของสารที่ทำให้เป็นเนื้อเดียวกันไม่เพียงพอใช้ระยะเวลาในการผสมนาน ทำให้เกิดคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ต่ำลง สินค้าไม่ได้มาตรฐาน (Gubanov & Cortelezzi, 2010) ส่งผลให้เกิดการส่งของที่ล่าช้าซึ่งอาจทำให้ยอดขายลดลงได้ นอกจากนี้ตลาดการแข่งขันในปัจจุบันต้องการลดต้นทุนกระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นปัญหาในการออกแบบเครื่องกวนสารที่สามารถผสมสารให้เป็นเนื้อเดียวกันได้ในเวลาน้อยที่สุดโดยใช้พลังงานน้อยที่สุดจึงเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงอย่างยิ่งในกระบวนการผลิต

เครื่องกวนสารในปัจจุบันแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ได้แก่ เครื่องกวนสารแบบใบพัด และเครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็ก จากการศึกษาพบว่า เครื่องกวนสารแบบใบพัดเป็นเครื่องกวนที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายด้วยลักษณะการทำงานที่เรียบง่าย โดยควบคุมความเร็วในการหมุนด้วยมอเตอร์ ซึ่งตัวมอเตอร์จะเชื่อมต่อโดยตรงกับใบพัดกวนสาร โดยที่มอเตอร์จะส่งผ่านพลังกำลังการหมุนไปที่ใบพัดกวนสารต่อ เพื่อให้เกิดกระบวนการการผสมของสารได้อย่างเหมาะสม (Kemngoen, 2015)

นอกจากนี้จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องกวนสารพบว่า สิ่งสำคัญที่ควรพิจารณาในการกวนสารก็คือ ระยะเวลาและความเป็นเนื้อเดียวกันของสาร เมื่อเริ่มทำการกวนสารผสม จะทำให้แรงต้านจากแรงเฉือนระหว่างใบพัดกวนสารกับสารผสมมากกว่าแรงที่ถูกส่งมาจากมอเตอร์ ส่งผลทำให้ความเร็วและประสิทธิภาพของเครื่องกวนสารลดลงไปด้วย ทำให้เกิดความสูญเสียในคุณภาพของเนื้อสารที่ไม่ได้มาตรฐาน การควบคุมประสิทธิภาพในการ

หมุนของมอเตอร์จึงเป็นสิ่งสำคัญ และสิ่งสำคัญอีกอย่างหนึ่งของการผสมก็คือ ความหนืด ซึ่งถือเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของของเหลวที่ภาคอุตสาหกรรมอาหาร และภาคอุตสาหกรรมน้ำมันใช้ความหนืดเป็นตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ วัตถุดิบด้านอาหาร น้ำมันหล่อลื่น เป็นต้น ซึ่งจะพบว่าเครื่องที่มีใช้ทั่วไปในปัจจุบันจะสามารถกวนสามารถได้อย่างเดียวไม่สามารถวัดค่าความหนืดของสารที่กวนได้โดยตรง จำเป็นต้องวัดค่าความหนืดของสารเข้ามารวมด้วย และจากการศึกษาพบว่า ในปัจจุบันเครื่องมือวัดความหนืดส่วนใหญ่มีราคาสูงและสามารถวัดความหนืดที่สถานะคงตัวได้เท่านั้น

หลักการประเมินค่าความหนืดของเครื่องวัดความหนืดแบบหมุนนั้น สามารถทำได้โดยอาศัยหลักการของมอเตอร์ภายใต้สภาวะคงตัว โดยพบว่า ทอร์กหมุนที่กระทำต่อพื้นผิวใบพัดอันเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของของเหลวจากการทำงานของเครื่องกวนสาร ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความหนืด จะมีค่าเท่ากับทอร์กมอเตอร์ ดังนั้นความหนืดจึงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับทอร์กที่เกิดขึ้นจากมอเตอร์ (Cullen et al., 2000; Kraftmakher, 2010; Rodroeng, 2011)

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดข้างต้น นำไปสู่หลักการออกแบบและการสร้างเครื่องกวนสารที่มีระบบควบคุมแบบวงลูปปิด ที่สามารถรักษาความเร็วรอบในการผสมได้อย่างเหมาะสมกับสารที่นำมาผสมระหว่างกวนและสามารถประเมินค่าความหนืดของสารจากการนำหลักการการทำงานของเครื่องวัดค่าความหนืดมาปรับใช้ เพื่อนำไปสู่การหาค่าความหนืดของของเหลวด้วยการประมาณค่าตลอดระยะเวลาที่เครื่องทำงาน โดยไม่ต้องใช้เครื่องมือเฉพาะทางในการวัดความหนืด

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. ศึกษาการควบคุมการทำงานของเครื่องกวนสารและระบบควบคุมแบบวงลูปปิด
2. ออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมของเครื่องกวนสารด้วยระบบควบคุมแบบวงลูปปิด
3. ทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องกวนสารแบบที่พัฒนาขึ้น

4. เปรียบเทียบค่าความหนืดจากการประมาณค่าเทียบกับค่าที่วัดจากเครื่องวัดความหนืดในห้องปฏิบัติการ

แนวคิดทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การควบคุมการทำงานของเครื่องกวนสารแบบวงลูปปิด และการประเมินความหนืด ดังต่อไปนี้

เครื่องกวนสาร

เครื่องกวนสารเป็นเครื่องมือชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในภาคการศึกษา อุตสาหกรรม และทางการแพทย์ เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วเครื่องกวนสารจะกวนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) หรือมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Motor) เป็นอุปกรณ์ต้นกำลังของการกวนสาร การผสมสารแต่ละชนิดมีความหนืดและลักษณะไม่เหมือนกัน ดังนั้นการเลือกใช้เครื่องกวนสารจึงขึ้นอยู่กับลักษณะของสารที่ทำการผสม โดยเครื่องกวนสารสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ เครื่องกวนสารแบบใบพัดหรือแบบใบกวน (stirrer machine) และเครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็ก (magnetic stirrer machine)

1. เครื่องกวนสารแบบใบพัดหรือใบกวน (stirrer machine)

เป็นเครื่องกวนที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ด้วยลักษณะการกวนโดยใช้ใบกวนทำการกวนสารผสมซึ่งใบกวนจะเชื่อมต่อกับมอเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ต้นกำลังโดยผ่านก้านใบกวน ใบพัดหรือใบกวนของเครื่องกวนประเภทนี้นิยมใช้สแตนเลส (Stainless Steel) เพราะวัสดุชนิดนี้ สามารถป้องกันสนิมจากการทำปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนกับธาตุโลหะ และสามารถป้องกันการกัดกร่อนจากสารผสมได้อีกทั้งใบพัดหรือใบกวนมีหลากหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานทำให้เครื่องกวนสารแบบใบพัดหรือใบกวนสามารถกวนสารผสมหรือของเหลวที่มีความหนืดสูงหรือต่ำได้ขึ้นอยู่กับกำลังของมอเตอร์และชนิดของเครื่องกวนสารโดยสามารถแบ่งลักษณะการใช้งาน

2. เครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็ก (magnetic stirrer machine)

เป็นเครื่องกวนสารที่นิยมใช้งานด้านวิทยาศาสตร์

และทางการแพทย์เป็นส่วนใหญ่ มีลักษณะการกวาน คือ ใช้แท่งแม่เหล็กหรือแท่งกวาน (magnetic bar) ทำหน้าที่กวานหรือผสมสาร โดยใช้มอเตอร์เป็นอุปกรณ์ต้นกำลังในการกวานสารซึ่งแท่งกวานสารกับมอเตอร์มีได้เชื่อมต่อกันโดยตรง แต่จะใช้หลักการการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กระหว่างแท่งกวานกับแม่เหล็กถาวรที่ยึดติดกับก้านเพลลาของมอเตอร์ เนื่องจากแท่งกวานสารไม่เชื่อมต่อกับมอเตอร์โดยตรงจึงทำให้ไม่มีสารตกค้างจากสารอื่น เช่น น้ำยาหล่อลื่นที่มอเตอร์ เป็นต้น แท่งกวานสารสามารถทำความสะอาดได้ง่ายกว่าใบกวานของเครื่องกวานแบบใบพัดหรือใบกวาน จึงทำให้เครื่องกวานสารแบบแท่งแม่เหล็กเหมาะกับการใช้ผสมสารเคมีในงานทดลองทั้งในส่วนทางการแพทย์ วิทยาศาสตร์ และกระบวนการอื่น ๆ เครื่องกวานสารแบบแท่งแม่เหล็กไม่เหมาะกับการกวานสารผสมที่มีความหนืดสูงขณะความเร็วกวานสูง เนื่องจากจะทำให้แรงต้านจากแรงเฉือนระหว่างแท่งกวานสารกับสารผสมมากกว่าแรงจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กจะส่งผลทำให้แท่งกวานไม่สามารถกวานสารได้ (Kemngoen, 2015)

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีข้อดีคือ ไม่มีการแปรงถ่าน ทำให้การสูญเสียเนื่องจากความเสียดสีมีค่าน้อย มีตัวประกอบกำลังสูง การเริ่มเดินเครื่องทำได้ไม่ยาก ราคาถูก มีประสิทธิภาพสูง และมีความเร็วรอบค่อนข้างคงที่ แต่มีข้อเสียในการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ทำได้ยาก ซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนาชุดอุปกรณ์ควบคุมที่เรียกว่า อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ซึ่งใช้ในการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบของมอเตอร์ และมีความนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย มอเตอร์เหนี่ยวนำหรืออีกชื่อหนึ่งเรียกว่า มอเตอร์กระแสสลับ เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล โดยที่พลังงานไฟฟ้าไม่ได้เข้าสู่ที่โรเตอร์โดยตรง แต่ได้จากการเหนี่ยวนำแทน (Bangsaphan Industrial and Community Education College, 2022)

ระบบควบคุม

ระบบควบคุม คือ ส่วนประกอบหลายๆส่วนต่อเชื่อมกันขึ้นเป็นระบบที่จะให้การตอบสนองตามต้องการพื้นฐานของการวิเคราะห์ระบบจะมีพื้นฐานจากทฤษฎีระบบเชิงเส้น ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ของอินพุตและ

เอาต์พุตหรือการตอบสนอง ในส่วนอินพุตและเอาต์พุตของระบบมักแทนด้วยสัญญาณ โดยสัญญาณอินพุตจะเป็นส่วนสำคัญของผลลัพธ์หรือเอาต์พุต ระบบควบคุมสามารถแบ่งออกเป็น ระบบควบคุมแบบวงเปิด (open loop control system) และระบบควบคุมแบบวงปิด (closed loop control system)

1. ระบบควบคุมแบบวงเปิดหรือระบบควบคุมแบบไม่ป้อนกลับ (open loop control system or no feedback control system) เป็นระบบควบคุมส่วนใหญ่จะต้องอาศัยการคาดคะเน และการตัดสินใจในการกำหนดอินพุต ตัวอย่างเช่น การควบคุมอัตราการไหลของน้ำประปาในครัวเรือน การควบคุมมอเตอร์ของพัดลมเพื่อระบายอากาศที่มีการติดตั้งอุปกรณ์เปิด-ปิดเท่านั้น เป็นต้น (Jaikang, 2016) ข้อดีของระบบควบคุมนี้คือไม่มีความซับซ้อน ควบคุมง่าย แต่อย่างไรก็ตามระบบควบคุมแบบวงเปิดนี้จะไม่สามารถแก้ไขข้อผิดพลาดใด ๆ หากมีการรบกวนจากภายนอกและไม่สามารถมีส่วนร่วมในการเรียนรู้เครื่อง เนื่องจากไม่มีการส่งข้อมูลป้อนกลับไปเพื่อพิจารณาว่า ผลลัพธ์ที่ได้บรรลุเป้าหมายที่ต้องการตามคำสั่งของอินพุตแล้วหรือไม่

2. ระบบควบคุมแบบวงปิดหรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (closed loop control system or feedback control system) ระบบควบคุมแบบป้อนกลับจะแตกต่างจากระบบควบคุมแบบเปิด ก็คือ มีการนำเอาผลที่ได้จากการตอบสนองของระบบมาป้อนกลับเพื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุตอ้างอิง ซึ่งจะได้ผลต่างความคลาดเคลื่อน (error) ระหว่างสัญญาณอินพุตอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตเพื่อนำมาสร้างสัญญาณกระตุ้นระบบเพื่อแก้ไขให้ผลต่างความคลาดเคลื่อนลดน้อยลง ซึ่งผู้ควบคุมสามารถกำหนดเอาต์พุตให้กับระบบควบคุมแบบป้อนกลับได้ ซึ่งมีหลักการดังนี้ นำผลต่างความคลาดเคลื่อนระหว่างสัญญาณอินพุตกับสัญญาณเอาต์พุตมาประมวลผลผ่านระบบควบคุม (controller) เพื่อกระตุ้นสัญญาณ (actuator) ในระบบ (system) ให้ตอบสนองตามที่ต้องการ ซึ่งระบบควบคุมแบบปิดเป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบันและมีประสิทธิภาพในการควบคุมการตอบสนองมากกว่าระบบควบคุมแบบเปิด (Saengwirapansiri, 2005) ตัวอย่างระบบที่มีการใช้งานระบบควบคุมแบบปิด เช่น ระบบควบคุมอุณหภูมิ (Ogata,

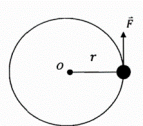
2000) การควบคุมความชื้นในดินสำหรับโรงเรือนเมล่อน Chaoumead & Phangkeio, 2018) และการควบคุมการเติมออกซิเจนในน้ำ (Soemphol et al., 2020) เป็นต้น

การหาทอร์กจากมอเตอร์

ทอร์กหรือแรงบิด คือ แรงที่กระทำต่อวัตถุ ส่งผลให้วัตถุหมุนบิดไปตามทิศทางที่โดนกระทำ (Calibration Laboratory, 2022) โดยอ้างอิงจากหลักการของโมเมนต์เมื่อออกแรงกระทำต่อวัตถุและแนวแรงไม่ผ่านจุดศูนย์กลางมวลหรือแกนหมุน ผลที่เกิดขึ้นจะมีการหมุนเกิดขึ้นซึ่งเรียกว่าเกิดโมเมนต์ของแรงรอบจุดหมุนนั้น เรียกว่า ทอร์ก (τ) โดยทอร์กเป็นปริมาณเวกเตอร์ มีขนาดเท่ากับแรงคูณระยะทางที่ลากจากจุดหมุนมาตั้งฉากกับแนวแรงและทิศทางของทอร์กมีทิศตั้งฉากกับระนาบการหมุน

วิธีที่สามารถหาค่าทอร์กจากมอเตอร์นั้นมี 2 วิธี วิธีที่หนึ่ง ใช้เครื่องวัดทอร์กโดยอาศัยหลักการของเซ็นเซอร์ตำแหน่งเชิงมุมและการวัดมุมเฟสระหว่างสิ่งนั้นออกมาเป็นค่าแรงบิด และวิธีที่สอง คำนวณหาค่าทอร์กจากค่า RPM หรือความเร็วรอบต่อนาทีที่วัดได้ และค่ากำลังทางไฟฟ้า

ในการศึกษาเรื่องการหมุนของวัตถุเมื่อมีทอร์กที่ไม่เป็นศูนย์มากระทำ ผลที่เกิดขึ้นวัตถุจะหมุนในลักษณะการเปลี่ยนสภาพการหมุนที่มีความเร่งเชิงมุมตามทิศของทอร์ก ลักษณะเดียวกันกับการขึ้นน็อตและคลายน็อต โดยในงานวิจัยนี้จะใช้หลักการในการหาทอร์กที่เกิดขึ้นจากการหมุนแบบง่าย ๆ เช่น เมื่อมีมวล m ติดอยู่กับปลายแท่งวัตถุเล็ก ๆ เบา ยาว r โดยปลายอีกข้างหนึ่งตรึงอยู่กับจุด 0 บนพื้น ซึ่งปราศจากแรงเสียดทาน เมื่อมีแรง F มากระทำต่อมวล m ในทิศตั้งฉากกับแท่งวัตถุเล็ก ๆ ตลอดเวลาโดยแนวแรง F สัมผัสกับแนววงกลมหรือตั้งฉากกับรัศมี r ดังภาพ 1 (Rajamangala University of Technology, 2022)



ภาพ 1 แสดงแรงกระทำต่อวัตถุทำให้เกิดทอร์ก

การคำนวณความหนืดของเครื่องวัดความหนืดแบบหมุน

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงการสร้างเครื่องวัดความหนืดแบบหมุนแบบง่าย และอธิบายหลักการทำงานของเครื่องวัดความหนืดแบบหมุนเพื่อนำมาประมาณค่าความหนืดจากเครื่องวัด โดยเครื่องวัดค่าความหนืดแบบหมุนนี้ประกอบด้วยชุดเพอร์ลินทรงกระบอกรัศมี r_1 มีความยาว l ยึดติดกับเพลลาของมอเตอร์ และจุ่มอยู่ในภาชนะซึ่งบรรจุของเหลวที่ต้องการหาค่าความหนืด โดยภาชนะนี้ทำจากแก้วและมีรัศมี r_2 ($r_1 < r_2$) เมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสตรงให้กับมอเตอร์ จะทำให้แท่งชุดเพอร์ลินหมุนด้วยอัตราเร็วเชิงมุมคงที่ ภายใต้สภาวะคงตัว ทอร์กหน่วง τ_r ที่กระทำต่อพื้นผิวของชุดเพอร์ลินเนื่องจากการเคลื่อนที่ของของเหลว ซึ่งเป็นสัดส่วนกับความหนืดของของเหลวจะมีค่าเท่ากับทอร์กที่เกิดขึ้นโดยมอเตอร์ (τ_{motor}) ซึ่ง τ_{motor} นี้แปรผันโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าในขดลวดโรเตอร์ โดยค่าความหนืดสามารถประมาณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\tau_r = 4\pi\eta\omega r_1^2 \left(\frac{1}{1 - \frac{r_1^2}{r_2^2}} \right) = \tau_{motor} \quad (1)$$

เมื่อ τ_r = ทอร์กหน่วง (N-m)

τ_{motor} = ทอร์กของมอเตอร์ (N.m)

r_1 = รัศมีของแท่งวัตถุทรงกระบอก (m)

r_2 = รัศมีของภาชนะที่บรรจุของเหลว (m)

l = ความยาวของแท่งวัตถุทรงกระบอกที่จุ่มอยู่ในของเหลว (m)

ω = ความเร็วเชิงมุมของแท่งวัตถุทรงกระบอก (rad/s)

η = ค่าความหนืดของสาร (cP)

จากสมการข้างต้นสรุปได้ว่า ความหนืดของของเหลวมีความสัมพันธ์กับทอร์กหน่วงที่เกิดจากของเหลวโดยทอร์กหน่วงมีความสัมพันธ์กับทอร์กของมอเตอร์ และทอร์กของมอเตอร์จะมีความสัมพันธ์กับกระแสที่ไหลในขดลวดของมอเตอร์ ผู้วิจัยจึงได้ทำการสร้างเครื่องมือวัดค่า

ความหนืดแบบหมุนอย่างง่ายและราคาถูกโดยการวัดค่ากระแสที่ไหลในขดลวดโรเตอร์เพื่อนำไปสู่การหาค่าความหนืดของสารที่นำมาหมุนให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Kraftmakher, 2010; Rodroeng, 2011)

ในงานวิจัยนี้จะใช้การควบคุมแบบระบบปิด หรือเรียกอีกชื่อว่า การควบคุมแบบป้อนกลับ เพื่อให้มีการตอบสนองของเอาต์พุต สามารถรักษาความเร็วรอบที่เหมาะสมของเครื่องหมุนให้ทำงานได้กับสารหลากหลายชนิด รวมทั้งสามารถรองรับภาระโหลดที่หลากหลาย โดยใช้ระบบควบคุมนี้มาควบคุมการทำงานของมอเตอร์ จากนั้นจะอาศัยหลักการของเซนเซอร์เหนี่ยวนำในการหาค่าทอร์กออกมา แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าความหนืด ณ เวลานั้น ๆ เทียบเคียงกับหลักการการทำงานของเครื่องวัดความหนืดแบบหมุน ซึ่งจะช่วยให้ทราบค่าความหนืดที่แปรผันได้

กรอบแนวคิดการวิจัย

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อ ออกแบบ สร้าง และทดสอบประสิทธิภาพเครื่องกลวงสารด้วยระบบควบคุมวงลูปปิด โดยมีขอบเขตงานวิจัย ดังนี้

- 1) ควบคุมความเร็วของเครื่องกลวงสาร
- 2) สามารถผสมได้ปริมาณสูงสุด 30 ลิตร
- 3) สามารถประมาณค่าความหนืดได้ จากการตรวจวัดแรงบิดที่ใช้ให้เกิดการหมุน
- 4) เป็นระบบกึ่งอัตโนมัติ สามารถตั้งค่าการใช้งานหรือสร้างโปรไฟล์การผสมขึ้นมาเองได้
- 5) ของเหลวที่นำมาทำงานวิจัย คือ ส่วนประกอบของสารที่ใช้ในการผลิตแชมพู

สมมติฐานการวิจัย

เครื่องกลวงสารที่สร้างขึ้นสามารถควบคุมความเร็วรอบในการหมุนได้ด้วยระบบควบคุมแบบปิดและสามารถประเมินความหนืดของสารได้ จากการนำหลักการการทำงานของเครื่องวัดค่าความหนืดแบบหมุนอย่างง่ายมาปรับใช้

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การออกแบบโครงสร้างเครื่องกลวงสาร

การออกแบบเครื่องกลวงสารในที่นี้จำเป็นต้องคำนึงถึง การกำหนดโครงสร้างทางกลของเครื่องและระบบสั่งงานต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น การกำหนดค่าทางกลของเพลลาใบกวนที่ทำการกลวงสารผสมซึ่งใบกวนจะเชื่อมต่อกับมอเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ต้นกำลังโดยผ่านก้านใบกวน เส้นผ่านศูนย์กลาง ความสูงของเพลลา ตลอดจนรูปร่างและตำแหน่งของใบพัด เป็นต้น และอีกสิ่งหนึ่ง คือ การปรับระดับความเร็วให้ได้หลายระดับ เพื่อที่จะควบคุมระดับความเร็วของเครื่องกลวงให้ได้ตามความต้องการและเหมาะสมกับลักษณะของเนื้อสารที่จะนำไปผสมกันให้เกิดเป็นสารใหม่นั้น ๆ รวมไปถึงจนถึงความเสถียรในการผสม เพื่อที่จะไม่ต้องกังวลถึงเรื่องเนื้อที่ไม่เท่ากัน น้ำหนักมือที่ลงมือไม่ทัน ความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และการลดระยะเวลาในการผสม

เครื่องกลวงสารมีขนาดความกว้าง 650 มิลลิเมตร ความยาว 600 มิลลิเมตร และสูง 876 มิลลิเมตร ขนาดใบพัดกลวงสารมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 310 มิลลิเมตร หนา 20 มิลลิเมตร ซึ่งใบพัดสามารถสามารถถอดออกจากตัวเครื่องได้ โดยมีมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ขนาด 220/380 V. เป็นต้นกำลัง และมีตู้ควบคุมการทำงานอยู่ทางด้านข้างของตัวเครื่อง นอกจากนี้จะมีถังกวนรูปทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 41 มิลลิเมตร และสูง 51 มิลลิเมตร สามารถผสมสารได้ในปริมาณ 30-50 ลิตร ดังแสดงในภาพ 2

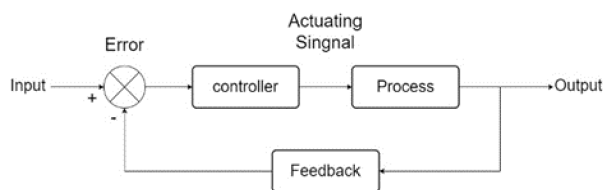


ภาพ 2 โครงสร้างของเครื่องกลวงสาร

2. การออกแบบระบบควบคุม

การออกแบบขั้นตอนการทำงานของเครื่องกวสารควบคุมผ่านบอร์ดรุ่น Arduino Mega 2560 โดยชุดคำสั่งการทำงานของเครื่องกวสาร ใช้โปรแกรม

Arduino เขียนโค้ดชุดคำสั่งลงในไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยออกแบบเป็นระบบควบคุมแบบปิดเพื่อให้มีการส่งค่าเอาต์พุตกลับมา ดังแสดงในภาพ 3



ภาพ 3 ระบบควบคุมแบบเครื่องกวสารแบบวงลูปปิด

ภาพ 4 แสดงส่วนประกอบของระบบควบคุมของระบบทั้งหมด โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

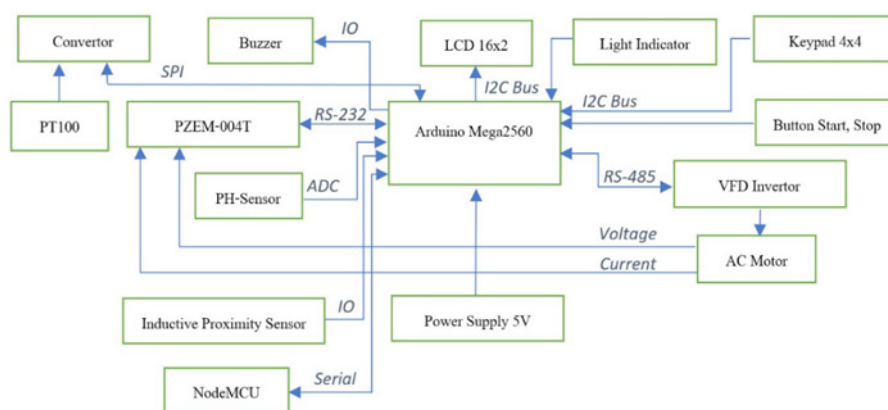
เซนเซอร์ตัวเหนี่ยวนำ (inductive proximity sensor) ถูกใช้สำหรับการวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ ซึ่งระบบจะรับค่าความเร็วรอบในช่วงเวลาที่ทำการผสมสาร และตรวจสอบว่าค่าที่ได้สอดคล้องกับค่าความเร็วรอบที่

กำหนดไว้หรือไม่ จากนั้นระบบพยายามเพิ่มหรือลดพลังงานที่ใช้ เพื่อให้เครื่องกวสารกลับมาหมุนด้วยความเร็วรอบที่ต้องการ

เพาเวอร์ซัพพลาย (Power supply) 12 V 3A จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้อุปกรณ์ต่าง ๆ ได้แก่ LM2596 ซึ่งเป็นวงจรลดแรงดันไฟฟ้า (stepdown) ทำหน้าที่ในการลดแรงดันไฟลงเพื่อให้ได้ค่าตามที่ต้องการ โดยเครื่องที่ทำการจัดสร้างขึ้นมีอุปกรณ์ที่ใช้แรงดันไฟฟ้า 5 V ได้แก่ เซ็นเซอร์วัดค่า PH (PH sensor) ไอซีที่ใช้สำหรับขยายขาคิจิทัล (PCF8574 module) โมดูลวัดการใช้พลังงาน (PZEM-004t AC Digital Power Energy Meter Module) บอร์ด Arduino Mega 2560 จอ LCD 2 บรรทัด 16 ตัวอักษร โมดูลแปลงพอร์ต Uart เป็น TTL RS RS485 (Module RS485) ส่วนอุปกรณ์ที่ใช้แรงดันไฟฟ้า 12 V คือ เซ็นเซอร์ตัวเหนี่ยวนำ (inductive proximity sensor)

ไอซีที่ใช้ขยายพอร์ตขาคิจิทัล (PCF8574 module) เป็นตัวชิป (Chip) ที่ทำหน้าที่แปลงการสื่อสารแบบ I2C ให้เป็นรูปแบบ Parallel ข้อดีคือช่วยลดจำนวนขาในการสื่อสาร

โมดูลแปลงพอร์ต Uart เป็น TTL RS RS485 Module RS485 จะเป็นการแปลงสัญญาณที่สื่อสารผ่าน RS323 ให้อยู่ในรูปแบบ RS485



ภาพ 4 ไดอะแกรมของระบบควบคุมเครื่องกวสาร

โมดูลวัดการใช้พลังงาน (PZEM-004t AC Digital Power Energy Meter Module) ใช้ในการวัดค่าทางไฟฟ้าต่าง ๆ

เซ็นเซอร์ PT100 ใช้ในการวัดอุณหภูมิ

เซ็นเซอร์วัดค่า PH (PH Sensor) ใช้ในการวัดค่าความเป็นกรดต่างของสาร

การเลือกขนาดกำลังของมอเตอร์

ต้องคำนึงถึงการออกแรงบิดของมอเตอร์ว่ามีความสามารถออกแรงบิดได้เพียงพอกับที่เราต้องการหรือไม่ เพราะถ้าแรงบิดไม่เพียงพอ มอเตอร์ก็จะมีออกแรงขับโหลดทางกลให้หมุนได้ด้วยความเร็วที่ต้องการได้ และอีกปัจจัยหนึ่งที่ควรคำนึงถึง คือ ขนาดกำลังของมอเตอร์ ซึ่งจะต้องมีกำลังที่มากพอที่จะสามารถออกแรงบิดส่วนเกินนั้นได้ ซึ่งมันจะสัมพันธ์กับความเร็วรอบของมอเตอร์ที่เลือกใช้งาน (Hongnapa, 2003)

การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์

มอเตอร์ที่ใช้เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส มีแรงดัน 220/380 V โดยสามารถทำการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ผ่านตัวอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ควบคุมอินเวอร์เตอร์ จะต้องสื่อสารกันผ่านทาง RS 485 ซึ่งเป็นโปรโตคอล (Protocol) ที่ใช้สื่อสารชนิดหนึ่งที่มีชื่อว่า โมดบัส (Modbus) โดยการใช้อินเวอร์เตอร์ในการเริ่มเดินมอเตอร์ สามารถปรับความเร็ว หรือ อัตราส่วน $V: f$ ได้ตามต้องการ ความเร็วของมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอ และสามารถปรับเพิ่ม-ลดแรงบิดได้ ซึ่งอินเวอร์เตอร์ที่นิยมใช้งานจะเป็นแบบ PWM--Pulse Width Modulation (โดยในทางทฤษฎีแล้วความถี่จะแปรผันตรงกับความเร็วเชิงโคโรนัสของมอเตอร์ เมื่อมีความถี่มาก ความเร็วเชิงโคโรนัสก็จะมากตาม ในทางตรงข้ามหากมีความถี่ที่ลดลง ความเร็วเชิงโคโรนัสก็จะลดลงด้วย)

นอกจากนี้ตัวเครื่องยังสามารถส่งข้อมูลไปบันทึกในแอปพลิเคชัน Google Sheet เพื่อบันทึกค่าการวัดได้ตลอดเวลา โดยการสร้างไฟล์เอกสาร Google Sheet ไว้สำหรับจัดเก็บข้อมูล ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตัวบอร์ด Arduino Mega 2560 ควบคุมการทำงานของเครื่อง แต่ไม่สามารถเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต (internet)

ได้โดยตรง จะต้องใช้โหนดเอเอ็มซียู ESP8266 (Node MCU ESP8266) เชื่อมต่อ

โดยระหว่างโหนดเอเอ็มซียู ESP8266 (NodeMCU ESP8266) กับบอร์ด Arduino Mega สื่อสารกันผ่าน Serial ตัวโหนดเอเอ็มซียู ESP8266 (NodeMCU ESP8266) จะคอยรับข้อมูลจากบอร์ด Arduino mega 2560 ยกตัวอย่างเช่น แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า เป็นต้น

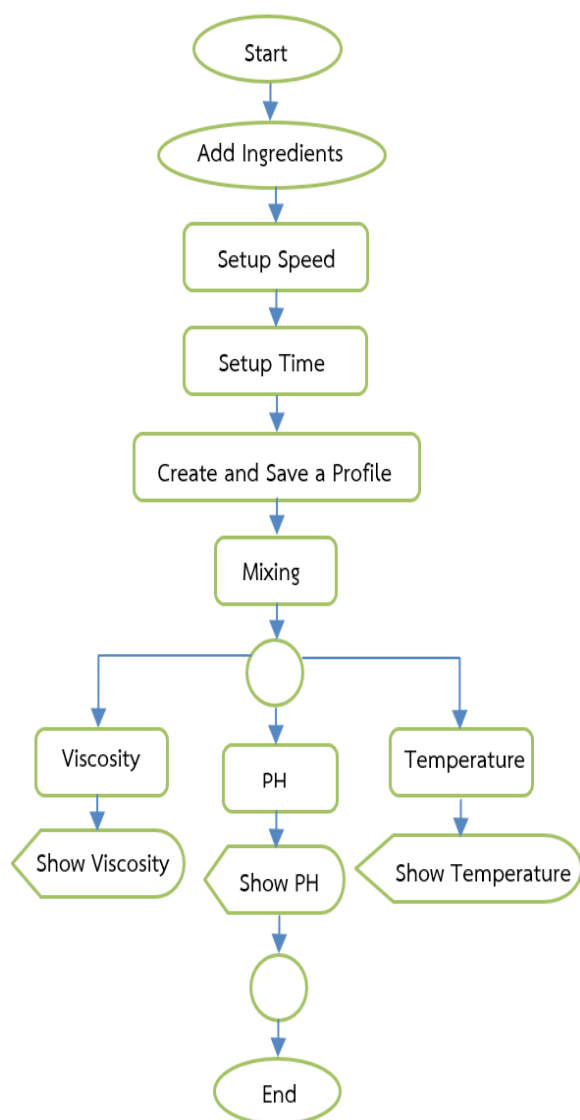
ส่วนตัวโหนดเอเอ็มซียู ESP8266 (Node MCU Esp8266) จะทำหน้าที่ส่งข้อมูลนี้ไปให้ไฟล์เอกสาร Google Sheet แต่แอปพลิเคชัน Google Sheet นั้นไม่สามารถเอาข้อมูลไปลงในไฟล์เอกสาร Google Sheet ได้โดยตรง ซึ่งต้องเขียน Script file หรือโค้ด (Code) ควบคุมการทำงานขึ้นมา โดยในไฟล์เอกสาร google sheet จะมีหน้าต่างสำหรับใส่โค้ด (Code) หรือภาษาทางคอมพิวเตอร์ (computer code) ดังแสดงในภาพ 4-5 ที่แสดงการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทั้งหมดของระบบควบคุม

ขั้นตอนการทำงานของเครื่องกวนสาร มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. นำถังเข้าไปวางไว้ใต้เครื่องกวนสารและทำการขันสกรูยึดใบพัด
2. ใส่สารที่ต้องการผสมลงไปถังตามจำนวนที่ต้องการ (ไม่เกิน 30 ลิตร) โดยใส่ให้ท่วมใบพัดทุกครั้ง
3. เสียบปลั๊กไฟ เปิดกล่องคอนโทรล ดึงเบรกเกอร์ขึ้น ON
4. ตั้งค่าการใช้งานโดยทั่วไป เช่น ความเร็วรอบและระยะเวลาในการผสม เป็นต้น
5. หลังจากได้ยินเสียงเตือนหมดเวลา สามารถทำการวัดอุณหภูมิ และค่า PH เพิ่มเติมได้ โดยทำการนำหัวโพรบเซนเซอร์จุ่มลงไปถังสาร จากนั้นระบบจะแสดงค่าต่าง ๆ ที่หน้าจอแอลซีดี
6. หากต้องการจบการทำงานของเครื่องให้กดปุ่มตกลง (enter) เพื่อจบการทำงาน และทำการดึงเบรกเกอร์ลง และถอดปลั๊กไฟ



ภาพ 5 ระบบควบคุมของเครื่องกวนสาร



ภาพ 6 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องกวนสาร

3. หลักการประเมินความหนืด

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดข้างต้น นำไปสู่หลักการออกแบบและการสร้างเครื่องกวนสารที่สามารถประเมินค่าความหนืดของสาร จากการนำหลักการทำงานของเครื่องวัดค่าความหนืดมาปรับใช้ โดยทำการเก็บข้อมูลการทดลองในแต่ละครั้ง อันได้ความเร็วรอบต่อนาทีที่วัดได้ และค่ากำลังทางไฟฟ้า เพื่อคำนวณหาค่าทอร์ก หลังจากนั้นอาศัยสมการข้างต้นในการคำนวณหาค่าความหนืดออกมา

การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกวนสาร ผู้วิจัยได้ออกแบบการทดลอง ดังนี้

1. การทดลองเพื่อหาความเร็วรอบที่เหมาะสมของใบพัด ซึ่งทางผู้วิจัยได้ทำการออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้ผสมสาร 2 ประเภท ได้แก่ สารเกิดฟอง สารไม่เกิดฟอง ซึ่งใช้ระบบควบคุมแบบวงลูปปิด โดยมีเงื่อนไขที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

- ทดลองกับใบพัดที่ทำการออกแบบ
- ปริมาตรในการทดลองครั้งละ 10 ลิตร
- ทดลองซ้ำเพื่อหาค่าเฉลี่ยที่เหมาะสมทั้งหมด 5 ครั้ง โดยเก็บค่าความเร็วในการผสม ระยะเวลา กระแสไฟฟ้าที่ใช้ และค่าความหนืด
- หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและระยะเวลา

2. การทดลองเพื่อหาค่าความหนืดจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความหนืดด้วยระบบควบคุมแบบวงลูปปิดเพื่อหาความแม่นยำของสมการ โดยมีเงื่อนไขที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

- ทดลองกับใบพัดที่ทำการออกแบบ
- ปริมาตรในการทดลองครั้งละ 10 ลิตร
- ทดลองซ้ำเพื่อหาค่าเฉลี่ยที่เหมาะสมทั้งหมด 5 ครั้ง โดยเก็บค่าความเร็วในการผสม ระยะเวลา กำลังไฟฟ้าที่ใช้ และค่าความหนืด
- หาค่าความคลาดเคลื่อนในการคำนวณหาความหนืดจากค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ยอมรับได้จากเครื่องวัดความหนืดแบบหมุน

3. ทดสอบหาสมรรถนะของเครื่องจักร เพื่อหาระยะเวลาในกระบวนการผลิต และลักษณะทางกายภาพของผลผลิต โดยจะทำการทดลองผลิต ผลิตภัณฑ์แชมพูสระผม ครั้งละ 10 ลิตร จำนวน 5 ครั้ง โดยเปรียบเทียบกันระหว่างอัตราการผลิตโดยเครื่องจักรที่ควบคุมด้วยระบบควบคุมแบบลูปปิดและเครื่องจักรที่มีระบบควบคุมแบบเปิดหรือควบคุมผ่านตัวอินเวอร์เตอร์แบบปกติ

ผลการวิจัย

จากการศึกษาพบว่า ความเร็วรอบที่เหมาะสมในการผสมแชมพูอยู่ที่ 135 รอบ/นาที ปริมาณ 10 ลิตร ในระยะเวลา 55 นาที เนื่องจากหากใช้ความเร็วรอบที่ต่ำกว่า 135 รอบ/นาที จะไม่สามารถทำการละลายน้ำกับหัวเชื้อแชมพูให้ละลายได้หมด ในขั้นตอนแรกของการกระบวนการผสมได้ ซึ่งเนื้อสารที่ได้อาจจะไม่พร้อมสำหรับการเติมสารผสมในขั้นตอนต่อไป จนกว่าจะครบจบกระบวนการผลิตแชมพู

จากกราฟที่แสดงในภาพ 7 พบว่า ในช่วงเวลา 15–35 นาทีความเร็วรอบที่มีการแกว่งสูง ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงเวลาดังกล่าว จะมีการเติมส่วนผสมของการผลิตแชมพู อันได้แก่ หัวเชื้อแชมพู (N70) ผงซักล้าง ผงฟอง น้ำหอม สี และสารกันบูด ซึ่งหลังจากขั้นตอนการเติมสารละลายเข้าไปได้ พบว่า ณ ช่วงขณะหนึ่ง จะทำให้เกิดสภาวะความหนืดที่เพิ่มขึ้นฉับพลัน ทำให้ระบบควบคุมเครื่องกวนสารแบบปิด ทำงานมากขึ้นเนื่องจากความเร็วที่วัดได้นั้นต่ำลง โดยการไปสั่งการมอเตอร์ให้ปล่อยกระแสไฟฟ้าและแรงดัน ทำให้กำลังมอเตอร์เพิ่มเพื่อเร่งความเร็วรอบของมอเตอร์กลับมาทำงานที่ความเร็วคงที่ตามที่ได้ตั้งค่า จะสังเกตได้ว่าตลอดระยะเวลาที่มีการแกว่งของความเร็วรอบในการผสมเสมอเนื่องมาจากเนื้อสารยังไม่มีสถานะความหนืดคงที่ แต่จะสังเกตได้ว่าเมื่อใกล้จบกระบวนการผสมสารรวมเป็นเนื้อเดียวกันแล้วการแกว่งของความเร็วรอบในการผสมก็จะน้อยลงไปเรื่อย ๆ ในที่สุด

จากการทดลองพบว่า เครื่องกวนสารที่ได้สร้างขึ้นสามารถทำงานได้ตามขั้นตอน ภายใต้สภาวะการทำงานที่เหมาะสมในระบบควบคุมแบบปิด สามารถผสมสารทดสอบได้ดีในส่วนของการขึ้นของสารเคมีทดสอบอันได้แก่ แชมพู โดยมีความหนืดอยู่ที่ 100–130 cP ที่ความเร็วรอบ 135 รอบต่อวินาที เป็นต้นไป ซึ่งหากต้องการผสมสารที่มีความหนืดมากขึ้นกว่านี้จะต้องมีการเพิ่มความเร็วรอบในการผสม

ในส่วนของการใช้ไฟฟ้าของเครื่องที่สร้างขึ้นได้ทำการวัดโดยใช้โมดูลวัดการใช้พลังงาน (PZEM-004T) โดยสามารถวัดค่าได้ตลอดระยะเวลาในช่วงที่ทำการผสมสาร โดยอัตราการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยของเครื่องกวนสารขณะทำการทดสอบทั้ง 5 ครั้งแสดงในตาราง 1

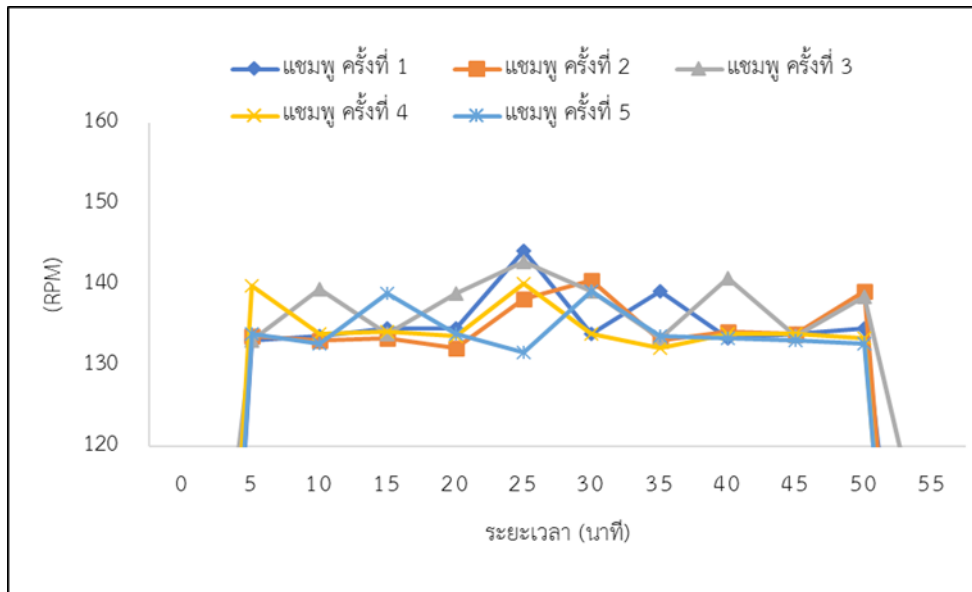
จากตาราง 1 แสดงให้เห็นว่า เครื่องกวนสารมีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าขณะทำการทดสอบในการผสมแชมพูพบว่า การทดสอบครั้งที่ 1 มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่ำสุดที่ 24.91 วัตต์ และครั้งที่ 2 ใช้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่

29.52 วัตต์ โดยกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยรวมมีค่า 26.16 วัตต์ ซึ่งเป็นปริมาณการใช้กำลังไฟฟ้าที่ต่ำมาก เมื่อเทียบกับเครื่องกวนสารที่ใช้ตามท้องตลาด

การประมาณค่าความหนืดจากสูตรสมการพื้นฐานของเครื่องวัดความหนืดแบบหมุนที่ได้มีการนำมาปรับใช้กับเครื่องกวนสารที่ได้ทำการออกแบบและสร้างขึ้น โดยอาศัยหลักการของมอเตอร์ภายใต้สภาวะคงตัว ทอร์กหน่วง (τ) ที่กระทำต่อพื้นผิวของใบพัดเนื่องจากการเคลื่อนที่ของของเหลว เป็นสัดส่วนกับความหนืดของของเหลวจะมีค่าเท่ากับทอร์กที่เกิดขึ้นโดยมอเตอร์ (τ_{motor}) ซึ่งความหนืดของของเหลวจะมีความสัมพันธ์กับทอร์กที่เกิดขึ้น โดยมอเตอร์ (τ_{motor}) ดังสมการข้างต้นที่ได้กล่าวมา โดยค่าที่ได้แสดงในตาราง 2

จากตาราง 2 แสดงค่าความหนืดของสารตัวอย่างจากการวัดด้วยเครื่องวัดมาตรฐานเปรียบเทียบกับค่าจากการประมาณค่าความหนืดโดยใช้สมการ พบว่า แชมพูที่จากผสมมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 2.94% และค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ 3.15% ซึ่งถือว่าเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่น้อยมาก แสดงให้เห็นว่าเครื่องมือที่สร้างขึ้นมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือเมื่อเทียบเคียงการวัดค่าความหนืดที่วัดด้วยเครื่องวัดความหนืดแบบบรุคฟิลด์

จากการทดลองพบว่า เครื่องกวนสารที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้จะสามารถตั้งความเร็วแล้วจะหมุนตามความเร็วที่ตั้งค่าไว้ได้ตลอดเวลาที่เครื่องทำงาน ซึ่งสามารถทำให้ความเร็วรอบในการผสมคงที่อย่างสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาในการผสม ทำให้สามารถผสมสารได้ดี มีคุณภาพ ในระยะเวลาอันรวดเร็วโดยระยะเวลาในการกระบวนการผลิตของตัวผลิตภัณฑ์ที่ทดสอบ อยู่ในช่วง 45–55 นาที สามารถลดระยะเวลาในการผสมได้ถึง 38.88% เมื่อเทียบกับการใช้เครื่องผสมสารที่มีขายตามท้องตลาดโดยทั่วไปในปริมาณ 10 ลิตร ต่อ ครั้ง ด้วยระยะเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที จึงส่งผลให้ช่วยประหยัดพลังงานการใช้ไฟฟ้ามากขึ้นและเพิ่มความยืดหยุ่นในการใช้งานได้มากขึ้น นอกจากนี้เครื่องดังกล่าวยังสามารถนำหลักการหาความหนืดจากสมการของเครื่องวัดความหนืดแบบหมุนอย่างง่ายมาปรับใช้กับเครื่องกวนสารธรรมดาที่นำเสนอได้ โดยค่าความหนืดที่ได้จากประมาณค่าความหนืดของสารที่ทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดจากเครื่องมือวัดความหนืดมาตรฐาน



ภาพ 7 ความเร็วรอบในการผลิตแอมพูด้วยระบบควบคุมแบบวงลูปปิด

ตาราง 1

อัตราการใช้ไฟฟ้าของเครื่องกวนสารขณะทำการทดสอบ

การทดลอง	กระแสไฟฟ้าที่ใช้เฉลี่ย มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (Ampere)	แรงดันไฟฟ้าที่ใช้เฉลี่ย มีหน่วยเป็นโวลต์ (Voltage)	ค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้เฉลี่ย มีหน่วยเป็นวัตต์ (Watt)
1	0.26	197.15	24.91
2	0.29	210.14	29.52
3	0.27	198.78	26.44
4	0.23	201.54	23.01
5	0.27	201.93	26.91
ค่าเฉลี่ย	0.26	201.91	26.16

ตาราง 2

ค่าความหนืดของสารตัวอย่างจากการวัดด้วยเครื่องวัดมาตรฐานและค่าจากการประมาณค่าความหนืดโดยใช้สมการ

การทดลอง	ค่าความหนืดจากเครื่องวัดความหนืดมาตรฐาน (cP)	ค่าความหนืดที่ได้จากการทดลอง (cP)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (cP)
1	120.23	118.93	1.08%
2	112.90	109.96	2.60%
3	113.70	115.32	1.42%
4	117.32	119.34	1.72%
5	120.60	116.80	3.15%
ค่าเฉลี่ย	116.95	116.07	2.94%

ข้อเสนอแนะ

จากการทำโครงการวิจัยทำให้ผู้จัดทำพบว่า เครื่อง กวนสารที่สร้างขึ้นสามารถทำงานได้ดี แต่อย่างไรก็ตาม การทดสอบนี้เป็นตัวอย่างการผลิตของผลิตภัณฑ์เพียงชนิดเดียวเท่านั้น หากต้องการจะทำการผลิตผลิตภัณฑ์ประเภทเดียวกัน แต่มีส่วนผสมที่ต่างจากการทดสอบนี้ ควรที่จะทำการทดสอบการผลิตจริงอีกครั้ง เพื่อให้ได้ความเร็วรอบที่เหมาะสมในการผสมครั้งต่อไป

นอกจากนี้ในส่วนของการประมาณความหนืด จากการนำสมการคำนวณหาความหนืดอย่างง่ายมาเปรียบเทียบกับเครื่องกวนสาร ซึ่งมีปัจจัยสำคัญ 3 ปัจจัย อันได้แก่ รูปร่างใบพัด ความเร็วรอบในการหมุน และความหนืด ที่ต้องสัมพันธ์กัน ดังนั้น หากต้องการประมาณค่าความหนืด จากสมการหาความหนืดที่มีความหนืดมากกว่า 1,000 cP ได้อย่างแม่นยำ ควรมีการออกแบบโครงสร้างของรูปร่างใบพัดผสมและปรับปรุงสมการดังกล่าวนี้ต่อไป และสุดท้าย

ออกแบบหัวกวนหลายขนาดเพื่อความสะดวกในการวัดหาความหนืดได้ในหลาย ๆ ย่าน ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ทางผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณโครงการสร้างขีดความสามารถในการทำนวัตกรรมของภาคอุตสาหกรรม เพื่อยกระดับความสามารถการแข่งขันของประเทศโดยการพัฒนากำลังคนระดับสูง จากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (TITE) ที่สนับสนุนทุนด้านการศึกษา งานวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณ บริษัทออล อินฟอร์เมชั่น เทคโนโลยีส์ จำกัด ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และอำนวยความสะดวกในส่วนของการสถานที่ทำงานวิจัย

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ สาขาวิชาวิศวกรรมชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้คำแนะนำ และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวัดค่าความหนืด



References

- Bangsaphan Industrial and Community Education College. (2022). *Three-phase induction motor*. Retrieved from http://www.bspc.ac.th/files/2106081010324194_21081716163950.pdf
- Chaoumead, A., & Phangkeio, D. (2018). Soil moisture control system for melon cultivation in Greenhouse. *RMUTSV Research Journal*, 11(2), 269-278. (in Thai)
- Cullen, P. J., Duffy, A. P., Donnell, C. P., & Callaghan, D. J. (2000). Process viscometry for the food industry. *Trends in Food Science Science and Technology*, 11(9), 451 – 457. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(01\)00034-6](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(01)00034-6)
- Calibration Laboratory Co., Ltd. (2022). *How to maintain the Torque Gauge and how to calibrate it?*. Retrieved from <https://www.cal-laboratory.com/บทความ/การดูแลรักษา-เครื่องมือวัดแรงบิด-Torque-Gauge-และการสอบเทียบอย่างไร/> (in Thai)
- Gubanov, O., & Cortelezzi, L. (2010). Towards the design of an optimal mixer. *Journal of Fluid Mechanics*, 651, 27-53. <https://doi.org/10.1017/S0022112009993806>
- Jaikang, W. (2016). *Control system*. Retrieved from http://www.intech.crru.ac.th/research_ind/doc/52_dissemin_ตำรา%20ผศ%20วิภพ.pdf (in Thai)

- Hongnapa, S. (2003). Direct current motor. *Industrial Technology Review*, 9(110), 104-108.
Retrieved from https://www.tinamics.com/download/tinamics_com/dc_motor_selection.pdf
(in Thai)
- Kemngoen, C. (2015). *Volume Estimation in stir container using load torque compensator of magnetic stirrer machine*. Retrieved from <http://sutir.sut.ac.th:8080/jspui/handle/123456789/7504> (in Thai)
- Kraftmakher, Y. (2010). Rotational viscometers – a subject for student project. *Physics Education*, 45(6), 622-628. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/45/6/007>
- Ogata, K. (2000). *Modern control engineering* (4th ed.). New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- Rodroeng, K. (2011). *Construction a simple and low cost rotational viscometter*. Retrieved from https://doi.nrct.go.th/ListDoi/listDetail?Resolve_DOI= (in Thai)
- Rajamangala University of Technology. (2022). *Torque motors*. Retrieved from <http://www.rmutphysics.com/CHARUD/Virtualexperiment/Virtual1/ericksontutor/tutor/2210/torque/indexthai.htm>. (in Thai)
- Saengwirapansiri, W. (2005). *Control of dynamic systems* (2nd ed.). Bangkok: Chulalongkorn University Printing House. (in Thai)
- Soemphol, C., Sangkhaho, J., & Sriyoha, P. (2020). The Development of Solar Aerator Controlled by Wireless Signal. *EAU Heritage Journal Science and Technology*, 14(2), 173–189. (in Thai)

