

การเพิ่มประสิทธิภาพการทำความสะอาดสายพานเกลียวโดยใช้เทคโนโลยีอัลตราโซนิกส์ ENHANCING THE EFFICIENCY OF SPIRAL CONVEYOR BELT CLEANING USING ULTRASONIC TECHNOLOGY

กรรณกมล แสนสawat¹ เขมฤทัย ถามะพัฒน์^{2*} สุวลักษณ์ อัสวสันติ^{3,4} และ สุวิช ศิริวัฒนโยธิน¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด กรุงเทพมหานคร 10140

²ศูนย์วิจัยวิทยาศาสตร์ประยุกต์และวิศวกรรมศาสตร์เพื่อคำตอบของสังคม ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด กรุงเทพมหานคร 10140

³ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพอาหาร คณะเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ กรุงเทพมหานคร 10240

⁴ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพมหานคร 10900

Kankamon Sansawat¹, Kheamrutai Thamaphat^{2*}, Suvaluk Asavasanti^{3,4} and Suwit siriwattanayotin¹

¹Department of Food Engineering, Faculty of Food Engineering,

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Bangkok 10140

²Applied Science and Engineering for Social Solution Research Center,

Department of Physics, Faculty of Science,

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Bangkok 10140

³Department of Food Biotechnology, Faculty of Biotechnology,

Assumption University, Bangkok 10240

⁴Department of Biotechnology, Faculty of Agro-Industry,

Kasetsart University, Bang Khen, Bangkok 10900

*E-mail: kheamrutai.tha@kmutt.ac.th

Received: 2024-05-31

Revised: 2024-06-17

Accepted: 2024-06-19

บทคัดย่อ

ในอุตสาหกรรมอาหารโดยเฉพาะการแปรรูปผลิตภัณฑ์ไก่สดตัดแต่งและไก่แปรรูปแช่แข็งสหภาพยุโรป (EU) เป็นตลาดส่งออกที่สำคัญ โดยมีมาตรฐานด้านสุขอนามัยและความปลอดภัยอาหารที่เข้มงวด การรักษาความสะอาดและสุขอนามัยของอุปกรณ์การผลิตจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง สายพานลำเลียงแบบเกลียวซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในกระบวนการแปรรูปไก่ มักจะสะสมคราบไขมัน น้ำมัน แป้ง และเศษเนื้อไก่ ซึ่งสามารถเป็นแหล่งเพาะเชื้อจุลินทรีย์ ปัจจุบันการฉีดน้ำแรงดันสูงร่วมกับสารทำความสะอาดเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายแต่มีข้อจำกัดหลายประการ ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอเทคโนโลยีการทำความสะอาดด้วยอัลตราโซนิกส์เพื่อศึกษาผลของชนิดของตัวกลาง อุณหภูมิตัวกลาง และระยะเวลาในการทำความสะอาดต่อประสิทธิภาพการทำความสะอาด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้เทคโนโลยีอัลตราโซนิกส์ที่ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ กำลัง 200 วัตต์ และน้ำรีเวอร์สออสโมซิส (RO) ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส สามารถทำความสะอาดสายพานลำเลียงขนาด 15.75 เมตร ได้อย่างสมบูรณ์ภายใน 4.5 นาที เมื่อนำวิธีการนี้ไปประยุกต์ใช้กับสายพานลำเลียงยาว 350 เมตร เวลาทำความสะอาดจะลดลงจาก 100 นาที เหลือเพียง 50 นาที ซึ่งทำให้สามารถ

เพิ่มกำลังการผลิตได้ประมาณ 63 ตันต่อเดือน และประหยัดค่าน้ำ แสดงให้เห็นว่าเทคโนโลยีการทำความสะอาดด้วยอัลตราโซนิคที่นำเสนอในงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพสูง และสามารถนำไปใช้จริงในอุตสาหกรรมได้

คำสำคัญ: การทำความสะอาด ระบบสายพานเกลียว สายพานลวดตาข่าย อัลตราโซนิคส์

ABSTRACT

In the food industry, particularly in processing fresh-cut and frozen chicken products, the European Union (EU) is a major export market with stringent hygiene and food safety standards. Maintaining the cleanliness and hygiene of production equipment is crucial. Spiral conveyor belts, commonly used in chicken processing, often accumulate grease, oil, starch, and chicken residues, which can harbor microorganisms. Nowadays, high-pressure water jetting combined with cleaning agents is widely used but has several limitations. This study introduces ultrasonic cleaning technology to examine the effects of the cleaning medium type, medium temperature, and cleaning duration on cleaning efficacy. Experimental results show that using ultrasonic technology at a frequency of 40 kHz, power of 200 watts, and RO water at 55 °C can fully clean a 15.75 meter conveyor belt in 4.5 minutes. When applied to a 350 meter conveyor belt, cleaning time is reduced from 100 minutes to 50 minutes, increasing production capacity by approximately 63 tons per month and saving water costs. This demonstrates that ultrasonic cleaning technology is highly efficient and can be practically implemented in industrial settings.

Keyword: Cleaning, Spiral Conveyor Belt, Wire Mesh Belt, Ultrasonic

บทนำ

ในอุตสาหกรรมอาหารโดยเฉพาะอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ไก่สดตัดแต่งและไก่แปรรูปแช่แข็งเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์อาหารของไทยที่มีปริมาณการส่งออกสูง และติดอันดับ 1 ใน 10 ของผลิตภัณฑ์อาหารที่สร้างรายได้ให้แก่ประเทศ (GFPT Public Company Limited, 2022) ซึ่งสหภาพยุโรป (European Union หรือ EU) เป็นตลาดส่งออกที่สำคัญที่สุดของไทย มีกฎระเบียบควบคุมการผลิต การค้า และการนำเข้าเนื้อสัตว์และผลิตภัณฑ์จากสัตว์ที่เข้มงวดเพื่อรับรองว่าสินค้าที่นำเข้ามีคุณภาพและมาตรฐานด้านสุขอนามัย ความปลอดภัยอาหาร และมีสวัสดิภาพสัตว์ในระดับสูง เช่นเดียวกับสินค้าที่ผลิตใน EU (Office of Agricultural Affairs, Royal Thai Embassy, Brussels, 2021) ดังนั้นการรักษามาตรฐานความสะอาด (Cleanliness) และสุขอนามัย (hygiene) ของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการรับรองคุณภาพของผลิตภัณฑ์เนื่องจากหากเกิดการปนเปื้อนแม้เพียงน้อยก็สามารถนำไปสู่ความเสี่ยงอย่างมากด้านสุขภาพของผู้บริโภค และอาจมีผลกระทบต่อภาพลักษณ์ของประเทศและเศรษฐกิจด้านการส่งออก (European Food Safety Authority, 2020; Official Journal of the European Union, 2021)

สายพานลำเลียงแบบเกลียว (Spiral conveyor belt) นับว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมการผลิตไก่สดตัดแต่งและไก่แปรรูปแช่แข็งเนื่องจากถูกใช้อย่างแพร่หลายในการขนส่งผลิตภัณฑ์ผ่านขั้นตอนต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตและบรรจุภัณฑ์ (ShinBen, 2023) สายพานลำเลียงนี้มักจะมีการสะสมของคราบไขมัน น้ำมัน แป้ง และเศษเนื้อไก่ที่ตกค้างจากกระบวนการผลิตซึ่งเป็นแหล่งเพาะเชื้อจุลินทรีย์ต่าง ๆ ส่งผลต่อความปลอดภัยทางด้านอาหาร อย่างไรก็ตามสายพานลำเลียงแบบเกลียวมีโครงสร้างที่ซับซ้อน ดังนั้นการเลือกวิธีการทำความสะอาดสายพานอย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นเรื่องที่ท้าทาย (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2013; Gibson et al., 1999)

โดยวิธีการดังกล่าวต้องเป็นวิธีการที่สามารถกำจัดสิ่งสกปรกและสิ่งปนเปื้อนบนสายพานออกได้หมดแม้ว่าจะเป็นพื้นที่ที่ยากจะเข้าถึง และต้องใช้ระยะเวลาและทรัพยากรต่าง ๆ เช่น น้ำ สารทำความสะอาด และพลังงานให้น้อยที่สุด เป็นวิธีการที่ปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานและสิ่งแวดล้อม ประหยัดค่าใช้จ่าย และสามารถนำไปประยุกต์ใช้จริงในสถานประกอบการได้

ปัจจุบันการใช้น้ำแรงดันสูง (High-pressure water jetting) ร่วมกับสารทำความสะอาดในการล้างสิ่งสกปรกออกจากสายพานเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลาย (Graves, 2007; Westerlund, 1994) อย่างไรก็ตาม การใช้วิธีนี้ในการทำความสะอาดสายพานยังคงประสบปัญหาอยู่หลายประการ เช่น อาจก่อให้เกิดปัญหาการแขวนลอยของละอองน้ำ สิ่งสกปรก หรือแม้กระทั่งเชื้อจุลินทรีย์ในอากาศซึ่งไม่ถูกต้องตามหลักเกณฑ์วิธีการที่ดีในการผลิตอาหาร (Good manufacturing practice หรือ GMP) ไม่สามารถทำความสะอาดสายพานได้อย่างมีประสิทธิภาพภายในระยะเวลาที่กระบวนการผลิตกำหนดไว้ มีการใช้ปริมาณน้ำ และสารทำความสะอาดมากเกินไปซึ่งไม่เพียงแต่เพิ่มค่าใช้จ่ายในการดำเนินการแต่ยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย (Gibson et al., 1999; Marriott & Gravani, 2006) นอกจากนี้ การใช้น้ำแรงดันสูงอาจไม่สามารถเข้าถึงบริเวณที่ยากจะเข้าถึงบนสายพานได้ดีพอทำให้ยังคงมีคราบไขมัน น้ำมัน แป้ง และเศษเนื้อไก่ตกค้างอยู่ส่งผลให้มีความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ต่าง ๆ ดังนั้นจึงยังคงมีความจำเป็นที่จะต้องค้นหาวิธีการทำความสะอาดที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการทำความสะอาดสายพาน นอกจากการใช้น้ำแรงดันสูงแล้ว พบว่ามีการนำวิธีหรือเทคโนโลยีต่าง ๆ เหล่านี้มาประยุกต์ใช้ได้แก่ การใช้เครื่องขูด (Scrapers) การใช้ลูกกลิ้งแบบรีด (Beater roller) การแปรง (Brushing) การทำความสะอาดด้วยไอน้ำ (Steam cleaning) การใช้เทคโนโลยีโอโซน (Ozone technology) การทำความสะอาดโดยใช้แสงเลเซอร์ (Laser cleaning) และการทำความสะอาดด้วยอัลตราโซนิกส (Ultrasonic cleaning) (Brandt, 2007; Tolvanen et al., 2009; Troller, 2012; Wright, 2003) เป็นต้น ท่ามกลางวิธีการต่าง ๆ เหล่านี้ การทำความสะอาดด้วยอัลตราโซนิกสเป็นวิธีที่ใช้คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 กิโลเฮิร์ตซ์ เดินทางผ่านไปยังตัวกลางที่เป็นของเหลวซึ่งสัมผัสอยู่กับพื้นผิววัตถุที่ต้องการทำความสะอาดทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กในของเหลวเป็นจำนวนมากผ่านกระบวนการที่เรียกว่า การเกิดโพรง (Cavitation) เมื่อฟองอากาศที่อยู่ใกล้ ๆ กับพื้นผิวของวัตถุเกิดการยุบตัวลงอย่างรวดเร็ว (Cavitation implosion) จะปลดปล่อยพลังงานสูงออกมายังตัวกลางเกิดเป็นคลื่นกระแทก (Shock wave) ส่งผลให้อนุภาคสิ่งสกปรก คราบไขมัน และสารปนเปื้อนอื่น ๆ ที่เกาะติดบนพื้นผิววัตถุหลุดออกมาได้ (Zhou et al., 2022) ดังนั้นเมื่อนำเทคโนโลยีอัลตราโซนิกสมาประยุกต์ใช้ในการทำความสะอาดสายพานจึงสามารถทำความสะอาดทุกซอกมุมของสายพานได้เป็นอย่างดี และลดการใช้สารทำความสะอาดได้แต่ในขณะเดียวกันวิธีนี้ก็ใช้นำพลังงานสูงและมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบที่สูงกว่าวิธีการแบบดั้งเดิม (Crawford, 1968)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยจึงพยายามออกแบบระบบจำลองการทำความสะอาดสายพานแบบเกลียว (ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมอาหารตัวอย่าง) โดยใช้เทคโนโลยีอัลตราโซนิกสพร้อมทั้งศึกษาผลของชนิดของตัวกลาง อุณหภูมิของตัวกลาง และระยะเวลาในการทำความสะอาดต่อความสามารถในการทำความสะอาด และหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยต่าง ๆ โดยมีวัตถุประสงค์หลัก คือ เพื่อลดระยะเวลาในการทำความสะอาดสายพานที่มีความกว้างเท่ากับ 65 เซนติเมตร และมีความยาวเท่ากับ 350 เมตร จากเดิมที่ต้องใช้ระยะเวลา 100 นาที ในการล้างทำความสะอาดด้วยวิธีการใช้น้ำแรงดันสูงให้ระยะเวลาในการทำความสะอาดลดลงเหลือน้อยกว่าหรือเท่ากับ 80 นาที

วิธีการ

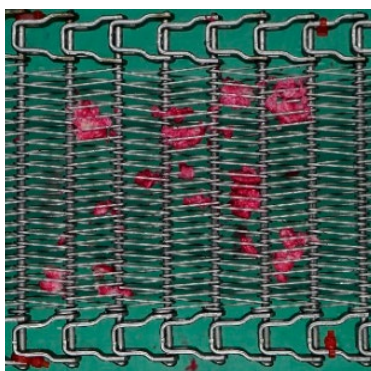
การทดลองในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 4 ตอน ได้แก่ 1) การเตรียมสายพานตัวอย่าง 2) การออกแบบและสร้างระบบจำลองการทำความสะอาดสายพานโดยใช้เทคโนโลยีอัลตราโซนิกส 3) การศึกษาผลของชนิดและอุณหภูมิของตัวกลางต่อความสามารถในการทำความสะอาด และ 4) การหาระยะเวลาที่น้อยที่สุดในการทำความสะอาดสายพานโดยใช้ระบบจำลองที่สร้างขึ้น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การเตรียมสายพานตัวอย่าง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของเทคโนโลยีอัลตราโซนิกส์ในการทำความสะอาดสายพานลำเลียงที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตไก่สดตัดแต่งและไก่แปรรูปแช่แข็ง ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำสายพานลำเลียงชนิดลวดตาข่าย (Wire mesh conveyor belt) ซึ่งทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 ที่ติดตั้งในเครื่องทำความเย็นระบบสายพานเกลียว (Spiral chiller) มาจำลองให้มีเศษไก่ติดอยู่บนสายพานโดยกำหนดให้มีค่าดัชนีเศษอาหารสะสม (Food soil accumulation index หรือ FSAI) ตามสมการที่ (1) อยู่ระหว่างร้อยละ 10-11 ซึ่งมีค่าประมาณ 4 เท่าของดัชนีเศษอาหารสะสมที่เกิดขึ้นจริงจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ไก่ปรุงสุก (Cooked chicken product)

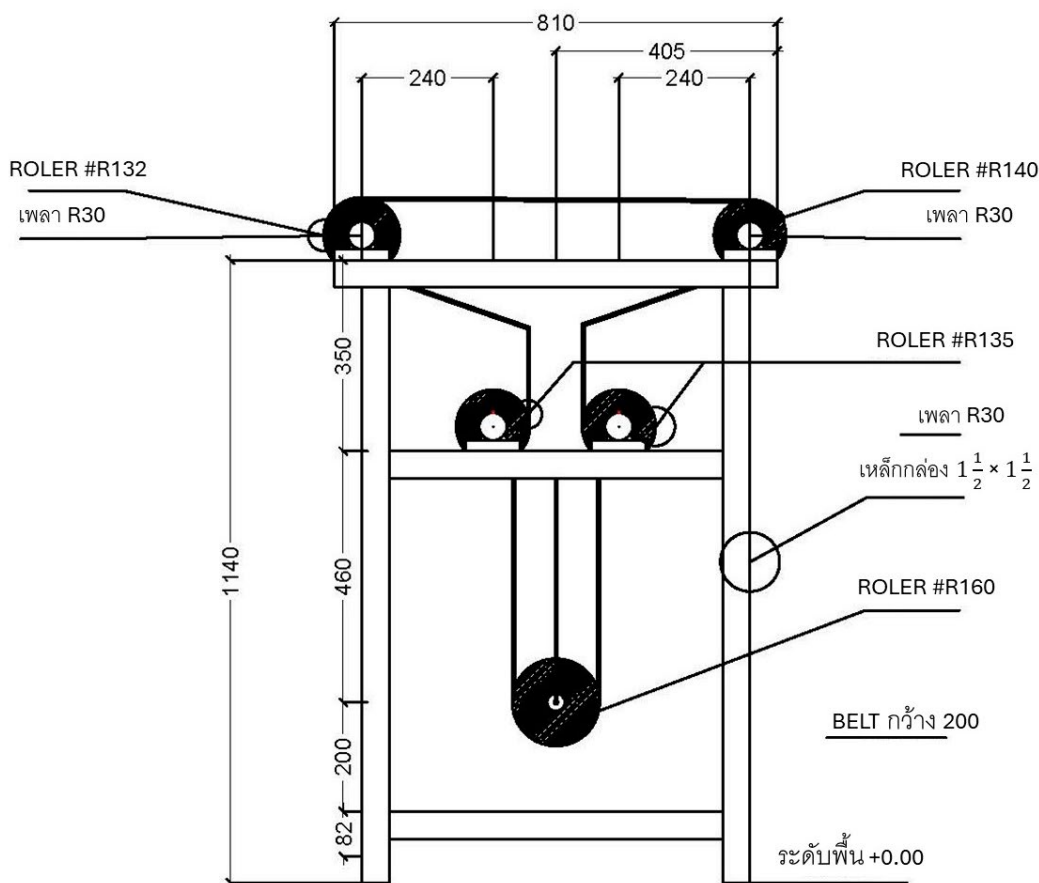
$$\text{FSAI (\%)} = \frac{\text{พื้นที่เศษอาหาร (pixel)}}{\text{พื้นที่ผิวสายพาน (pixel)}} \times 100 \quad (1)$$

ขั้นตอนการจำลองสายพานให้มีค่า FSAI ตามต้องการนั้นทำได้โดยนำเศษไก่ปรุงสุก (ขนาดระหว่าง 0.5 – 4.0 เซนติเมตร) จากกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมอาหารแห่งหนึ่งมาขย้อมสีผสมอาหารให้มีสีแดงแล้วจัดเตรียมให้ติดแน่นอยู่ระหว่างร่องบนพื้นผิวของสายพานโดยใช้วัสดุกดทับด้วยแรง 2.3 นิวตัน หลังจากนั้นทำการถ่ายภาพสายพานจากมุมมองด้านบนภายใต้กล้องควบคุมแสงดังแสดงในภาพที่ 1 โดยใช้กล้องถ่ายภาพชนิดสะท้อนภาพเลนส์เดี่ยวด้วยระบบดิจิทัล (Sony, A7 Mark II) ตั้งค่าการถ่ายภาพให้มีค่ารูรับแสงเท่ากับ f/4.5 ความเร็วชัตเตอร์เท่ากับ 1/200 วินาที ค่า ISO เท่ากับ 160 และค่าความละเอียดภาพเท่ากับ 3,456 × 3,456 พิกเซล นำภาพถ่ายที่ได้ไปหาจำนวนพิกเซลที่พบเศษเนื้อไก่ และจำนวนพิกเซลของพื้นที่สายพานทั้งหมด โดยใช้การประมวลผลภาพ (Image processing) ด้วยโปรแกรม ImageJ แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่า FSAI ดังแสดงในสมการที่ (1) หากค่า FSAI ที่ได้มีค่าต่ำกว่าร้อยละ 10 ก็ต้องเพิ่มปริมาณเศษไก่ในกระบวนการจำลองแต่หากค่า FSAI ที่ได้มีค่าสูงกว่าร้อยละ 11 ก็ต้องลดปริมาณเศษไก่ลงในงานวิจัยนี้จะทำการควบคุมให้สายพานตัวอย่างที่จะนำมาศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการทำความสะอาดด้วยเทคโนโลยีอัลตราโซนิกส์ ต้องมีค่า FSAI อยู่ระหว่าง 10-11



ภาพที่ 1 ตัวอย่างภาพถ่ายสำหรับนำไปประมวลผลภาพด้วยโปรแกรม ImageJ

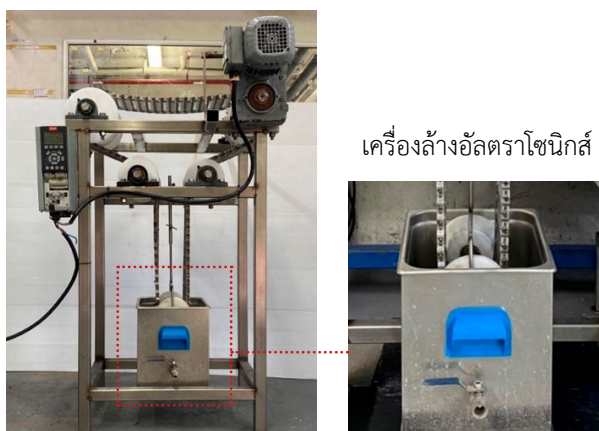
2. การออกแบบและสร้างระบบจำลองการทำความสะอาดสายพานโดยใช้เทคโนโลยีอัลตราโซนิกส์



ภาพที่ 2 แบบร่างระบบควบคุมการเดินสายพาน (หน่วย: มิลลิเมตร)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างระบบขนาดเล็กเพื่อจำลองการทำความสะอาดสายพานในกระบวนการผลิตโดยใช้อัลตราโซนิกส์ ภาพที่ 2 แสดงแบบร่างและมิติของระบบควบคุมการเดินสายพานลำเลียงชนิดลวดตาข่าย โดยกำหนดให้สายพานมีความกว้างเท่ากับ 15 เซนติเมตร และมีความยาวเท่ากับ 15.75 เมตร ถูกควบคุมให้เคลื่อนที่โดยใช้มอเตอร์ที่ทำงานร่วมกับอินเวอร์เตอร์ซึ่งสามารถปรับให้สายพานเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วระหว่าง 0.033 - 1 เมตรต่อวินาที ที่ด้านล่างของระบบจะควบคุมให้สายพานเคลื่อนที่ลงไปอ่างน้ำ (Ultrasonic bath) ของเครื่องล้างอัลตราโซนิกส์ (Ultrasonic cleaner) โดยมีระยะที่ความลึกสูงสุดเท่ากับ 13 เซนติเมตร

เครื่องล้างอัลตราโซนิกส์ที่ใช้ในการทดลอง (GT sonic, GT-1990QTS) มีขนาดอ่างน้ำเท่ากับ 300 x 240 x 150 ลูกบาศก์มิลลิเมตร สามารถกำเนิดคลื่นเสียงที่มีความถี่เท่ากับ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ กำลังของอัลตราโซนิกส์เท่ากับ 200 วัตต์ สามารถควบคุมอุณหภูมิของของเหลวในอ่างให้มีอุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิห้อง (Room temperature) ถึง 80 องศาเซลเซียสได้ ภาพที่ 3 แสดงการติดตั้งเครื่องล้างอัลตราโซนิกส์เข้ากับระบบควบคุมการเดินสายพานที่สร้างขึ้น



ภาพที่ 3 ภาพถ่ายการติดตั้งระบบจำลองการทำความสะอาดสายพานโดยใช้อัลตราโซนิกส์

3. การศึกษาผลของชนิดและอุณหภูมิของตัวกลาง ต่อความสามารถในการทำทำความสะอาด

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำทำความสะอาดพื้นผิวของวัสดุด้วยอัลตราโซนิกส์ ได้แก่ ความถี่และกำลังของคลื่นอัลตราโซนิกส์ ชนิดและอุณหภูมิของตัวกลาง และระยะเวลาในการผ่านอัลตราโซนิกส์ (Intawongsa, 2015; Zhou et al., 2022) ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ความถี่และกำลังของคลื่นอัลตราโซนิกส์มีค่าคงตัว เท่ากับ 40 กิโลเฮิรตซ์ และ 200 วัตต์ ตามลำดับ ดังนั้นการทดลองในตอนนี้จะทำการศึกษาชนิดและอุณหภูมิของตัวกลางที่จะใช้ในกระบวนการทำความสะอาด

เริ่มจากนำสายพานขนาด 13 × 9 ตารางเซนติเมตร มาจำลองการปนเปื้อนเศษไก่ ให้มีค่า FSAI อยู่ระหว่างร้อยละ 10-11 หลังจากนั้นนำไปจุ่มแช่ในตัวกลางที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นระยะเวลา 30 วินาที โดยแบ่งกลุ่มการทดลองออกเป็น 4 กลุ่ม (แต่ละกลุ่มทำการทดลองซ้ำ 4 ครั้ง) ดังนี้

กลุ่มที่ 1: นำไปจุ่มแช่ในน้ำกรองที่ผ่านกระบวนการผลิตด้วยระบบออสโมซิสผันกลับ (Reverse osmosis หรือ น้ำ RO) ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 วินาที

กลุ่มที่ 2: นำไปจุ่มแช่ในน้ำ RO ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 วินาที

กลุ่มที่ 3: นำไปจุ่มแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (2% w/v NaOH) (เป็นสารทำความสะอาดที่มีใช้อยู่แล้วในสถานประกอบการ) ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 วินาที

กลุ่มที่ 4: นำไปจุ่มแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (2% w/v NaOH) ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 วินาที

เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด จะนำสายพานตัวอย่างไปถ่ายภาพและวิเคราะห์จำนวนฟิกลเซลล์ที่พบเศษเนื้อไก่ โดยใช้โปรแกรม ImageJ แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่า FSAI ดังแสดงในสมการที่ (1) หลังจากนั้นจึงนำค่า FSAI ก่อน (FSAI_{before}) และหลังจุ่มแช่ (FSAI_{after}) มาเปรียบเทียบกับ เพื่อหาค่าการลดลงของดัชนีการสะสมเศษอาหารสัมพัทธ์ (Reduction of food soil relative accumulation index หรือ RFSAI) ดังแสดงในสมการที่ (2)

$$\text{RFSAI (\%)} = \frac{\text{FSAI}_{\text{before}} - \text{FSAI}_{\text{after}}}{\text{FSAI}_{\text{before}}} \times 100 \quad (2)$$

หลังจากนั้นจึงนำค่า RFSAI ไปวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab (version 19.0) เพื่อศึกษาผลของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมต่อการทำความสะอาดสายพาน โดยพิจารณาค่า P-value ที่ 0.05 ซึ่งในการพิจารณาแต่ละปัจจัยจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การทวนสอบความเหมาะสม การทวนสอบการออกแบบการทดลอง และการพิจารณาผลของปัจจัยในตาราง ANOVA

4. การหาระยะเวลาที่น้อยที่สุดในการทำความสะอาดสายพานโดยใช้ระบบจำลองที่สร้างขึ้น

จากการทดลองในตอนต้นที่ 3 จะทำให้ทราบชนิดและอุณหภูมิของตัวกลางที่เหมาะสมสำหรับระบบทำความสะอาดสายพานด้วยอัลตราโซนิกส์ โดยใช้ระบบจำลองที่สร้างขึ้นในตอนต้นที่ 2 ดังนั้นในขั้นตอนนี้ จะทำการทดลองเพื่อหาระยะเวลาที่น้อยที่สุดในการทำความสะอาดสายพานจนกระทั่งไม่เหลือเศษโกโก้ติดอยู่บนสายพานเลย (ค่า RFSAI = 100%)

เริ่มจากจำลองการปนเปื้อนเศษโกโก้บนพื้นที่ส่วนหนึ่ง (15×18 ตารางเซนติเมตร) ของสายพานที่มีความยาวเท่ากับ 15.75 เมตร ให้มีค่า FSAI อยู่ระหว่างร้อยละ 10-11 หลังจากนั้นทำการเปิดระบบและควบคุมให้สายพานเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 0.033 เมตรต่อวินาที สายพานบริเวณที่ปนเปื้อนเศษโกโก้จะค่อย ๆ เคลื่อนผ่านไปใต้องาน้ำของเครื่องล้างอัลตราโซนิกส์ และใช้ระยะเวลาเคลื่อนที่ผ่านของเหลวตัวกลางใต้องาน้ำเป็นเวลา 30 วินาทีต่อรอบ ทำการถ่ายภาพบริเวณที่จำลองการปนเปื้อนของเศษโกโก้บนสายพานทุก ๆ รอบหลังผ่านการทำความสะอาด แล้วนำภาพที่ได้ไปวิเคราะห์จำนวนพิกเซลที่พิเศษเนื้อโกโก้โดยใช้โปรแกรม ImageJ เพื่อคำนวณหาค่า FSAI หลังจากนั้นจึงนำค่า FSAI เริ่มต้นก่อนทำความสะอาด (FSAI_{before}) และหลังทำความสะอาดในแต่ละรอบ (FSAI_{after}) มาคำนวณหาค่า RFSAI โดยจะทำการล้างสายพานซ้ำ ๆ จนกว่าจะได้ค่า RFSAI เท่ากับ 100% จึงหยุดระบบ เมื่อรวมระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการเดินระบบเพื่อทำความสะอาดสายพาน ก็จะได้ระยะเวลาที่น้อยที่สุดในการทำความสะอาดสายพานด้วยอัลตราโซนิกส์

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. ผลของชนิดและอุณหภูมิของตัวกลาง ต่อความสามารถในการทำความสะอาด

การทดลองนี้มุ่งเน้นศึกษาผลของชนิดและอุณหภูมิของตัวกลาง ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดการปนเปื้อนของเศษโกโก้ (สิ่งสกปรก) ออกจากสายพานชนิดลวดตาข่าย โดยแบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ 1) สายพานตัวอย่างที่จุ่มแช่ในน้ำ RO ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 วินาที 2) สายพานตัวอย่างที่จุ่มแช่ในน้ำ RO ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 วินาที 3) สายพานตัวอย่างที่จุ่มแช่ในสารละลาย 2 % w/v NaOH ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 วินาที และ 4) สายพานตัวอย่างที่จุ่มแช่ในสารละลาย 2 % w/v NaOH ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 วินาที แต่ละกลุ่มทำการทดลองซ้ำ 4 ครั้ง แล้วนำสายพานหลังผ่านการทำความสะอาดด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ ไปวิเคราะห์และคำนวณหาค่า RFSAI ผลการทดลองพบว่า การทำความสะอาดสายพานโดยใช้วิธีจุ่มแช่ในน้ำ RO ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 วินาที ให้ค่า RFSAI เฉลี่ยร้อยละ 34 การจุ่มแช่ในน้ำ RO ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 วินาที ให้ค่า RFSAI เฉลี่ยร้อยละ 38 การจุ่มแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 วินาที ให้ค่า RFSAI เฉลี่ยร้อยละ 15 และการจุ่มแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 วินาที ให้ค่า RFSAI เฉลี่ยร้อยละ 35 ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลของชนิดและอุณหภูมิของตัวกลาง ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารปนเปื้อนของเศษไก่ออกจากสายพาน โดยค่า RFSAI ที่แสดง เป็นค่าเฉลี่ยจากการทำการทดลองซ้ำ 4 ครั้ง

วิธีการทำความสะอาดสายพาน	ชนิดตัวกลาง	อุณหภูมิตัวกลาง (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลา ในการจุ่มแช่ (วินาที)	ค่า RFSAI เฉลี่ย (ร้อยละ)
จุ่มแช่ในน้ำ RO	น้ำ RO	30	30	34.00 ± 0.02
จุ่มแช่ในน้ำ RO	น้ำ RO	55	30	37.62 ± 0.02
จุ่มแช่ในสารละลาย 2% w/v NaOH	สารละลาย NaOH	30	30	15.10 ± 0.03
จุ่มแช่ในสารละลาย 2% w/v NaOH	สารละลาย NaOH	55	30	35.11 ± 0.03

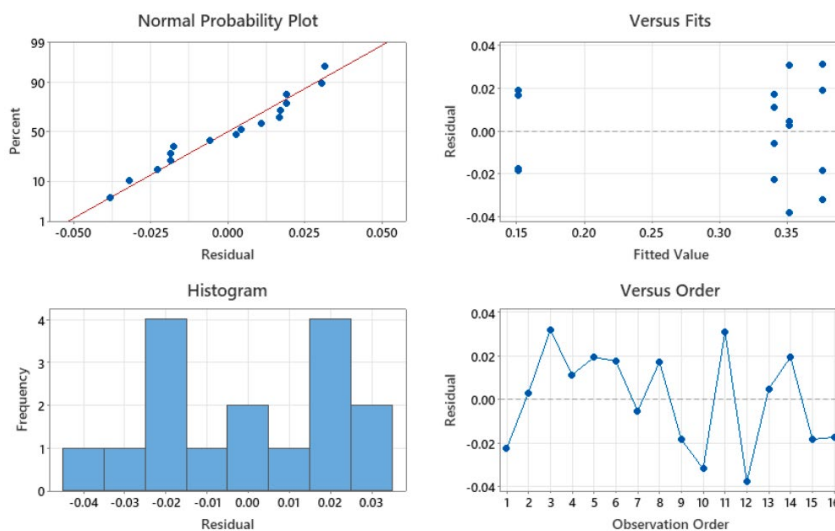
จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าที่อุณหภูมิเท่ากันการใช้น้ำ RO เป็นสารทำความสะอาดสามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนได้ดีกว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เนื่องจากน้ำมีความหนืดน้อยกว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ของเหลวที่มีความหนืดต่ำสามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างและรอยแตกของพื้นผิวได้ดีกว่าของเหลวที่มีความหนืดสูงทำให้สามารถขจัดสิ่งสกปรกที่อยู่ภายในบริเวณที่เข้าถึงยากได้ดีกว่า และของเหลวที่มีความหนืดต่ำจะช่วยให้สิ่งสกปรกถูกพัดพาออกจากพื้นผิวได้ง่ายขึ้นเนื่องจากแรงต้านทานการไหลต่ำทำให้การเคลื่อนที่ของสิ่งสกปรกมีประสิทธิภาพมากกว่า ยิ่งไปกว่านั้น การแทนที่สิ่งสกปรกด้วยของเหลวที่มีความหนืดต่ำจะเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างของเหลวกับสิ่งสกปรกต่ำทำให้สิ่งสกปรกถูกแยกออกจากพื้นผิวได้ง่ายขึ้น และเมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อความสามารถในการทำความสะอาดก็พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะสามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนได้ดีขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของของเหลวที่ใช้เป็นสารทำความสะอาด โดยการเพิ่มอุณหภูมิของของเหลวจะทำให้ความหนืดและแรงดึงดูดของของเหลวลดลงจึงสามารถไหลและกระจายตัวได้ดีกว่า ช่วยเพิ่มการครอบคลุมและการเข้าถึงพื้นผิวที่ต้องการทำความสะอาดได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมิที่สูงขึ้นสามารถลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสิ่งสกปรกและพื้นผิวซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของสิ่งสกปรกที่อุณหภูมิสูงทำให้สิ่งสกปรกสามารถหลุดออกจากพื้นผิวได้ง่ายขึ้น (Halliday et al., 2022; Holm & Anand, 1994; Holmberg et al., 2002; Sumner & Peters, 1992) อย่างไรก็ตามหากพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อความสามารถในการทำความสะอาดโดยใช้น้ำ RO และสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการเพิ่มอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อการทำความสะอาดโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่าการใช้น้ำเป็นสารทำความสะอาดเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีซึ่งเป็นประโยชน์ต่อกระบวนการทำความสะอาดที่ต้องพึ่งพาปฏิกิริยาเคมีของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สามารถขจัดคราบสกปรกที่เป็นไขมันและคราบอินทรีย์ผ่านปฏิกิริยาเคมีที่หลากหลายโดยเฉพาะปฏิกิริยาแซพอนิฟิเคชัน (Saponification) และการละลายโปรตีน (Pornchalermpong & Ratanapong, 2010) และด้วยปฏิกิริยาแซพอนิฟิเคชันนี้เองส่งผลให้การขจัดคราบโปรตีนที่เกิดจากเศษไก่เกิดการจับตัวเป็นเจลและแข็งตัว (ดังแสดงในภาพที่ 4) ยึดเกาะแน่นกับสายพานลวดตาข่ายมากยิ่งขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการกำจัดสารปนเปื้อนของเศษไก่แย่กว่าการใช้น้ำ RO เป็นสารทำความสะอาด



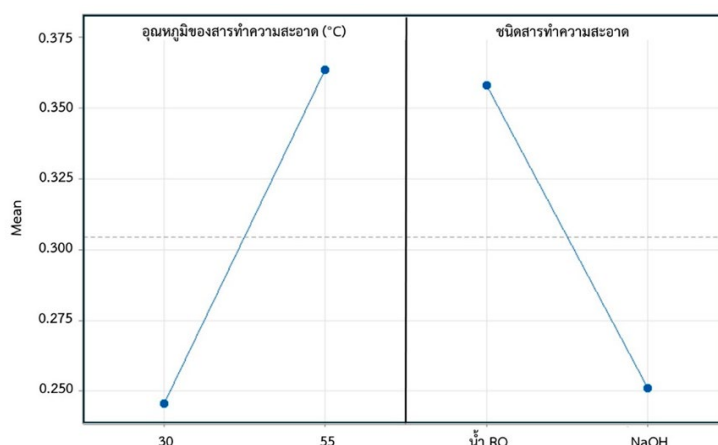
(ก) ใช้น้ำ RO เป็นสารทำความสะอาด
(ข) ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นสารทำความสะอาด

ภาพที่ 4 ภาพถ่ายเปรียบเทียบลักษณะของเศษไก่ที่ถูกกำจัดออกเมื่อน้ำ RO (ก) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ข) เป็นสารทำความสะอาด

เมื่อนำค่า RFSAI ที่ได้จากการทดลองทุก ๆ เงื่อนไขมาวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติด้วยโปรแกรม Minitab ผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 5 พบว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติอย่างสม่ำเสมอ และความแปรผันภายในกลุ่มย่อยมีความคงที่ และเมื่อวิเคราะห์การทวนสอบการออกแบบการทดลองพบว่าทั้งสองปัจจัย คือ ชนิดของสารทำความสะอาด และอุณหภูมิของสารทำความสะอาดมีความสัมพันธ์กันสูงส่งผลต่อความสามารถในการทำความสะดวกสบาย โดยมีความสัมพันธ์การตัดสินใจ (R-squared) เท่ากับร้อยละ 94.56 และเมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบอิทธิพลปฏิสัมพันธ์สองทาง (Two-way ANOVA with interaction effect) พบว่าทั้งสองปัจจัยมีผลต่อความสามารถในการทำความสะดวกสบายอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญขั้นต่ำ 0.000 ซึ่งน้อยกว่าระดับความเสี่ยงที่ยอมรับได้ คือ 0.05 (ช่วงความเชื่อมั่น 95%) ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์ทั้งหมดมีความสอดคล้องกัน โดยอิทธิพลของทั้งสองปัจจัยต่อเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่า RFSAI แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 5 ส่วนเศษเหลือผลตัวแปรตอบสนองของ %RFSAI

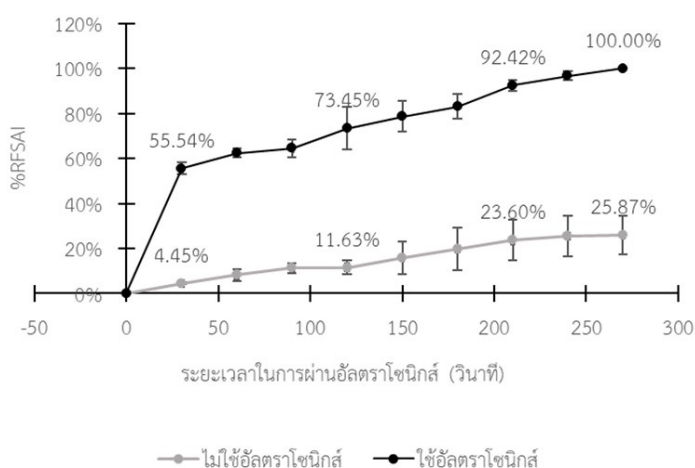


ภาพที่ 6 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่เป็นอิทธิพลหลักต่อค่า RFSAI (กราฟ main effects plot)

จากผลการทดลองทั้งหมดชี้ให้เห็นว่าชนิดและอุณหภูมิของสารทำความสะอาดส่งผลต่อความสามารถในการทำความสะอาดสายพาน โดยจะได้ประสิทธิภาพการทำความสะอาดสูงสุดเมื่อใช้น้ำ RO อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นสารทำความสะอาด ดังนั้นในการทดลองต่อไปที่จะทำการทดลองเพื่อหาระยะเวลาน้อยที่สุดในการทำ ความสะอาดสายพานโดยใช้ระบบจำลองที่สร้างขึ้นจะใช้น้ำ RO ที่มีอุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นตัวกลางในการทำ ความสะอาดด้วยอัลตราโซนิกส์เพื่อให้คลื่นเสียงความถี่สูงสามารถแพร่ผ่านตัวกลางได้ดีทำให้พลังงานสามารถกระจาย ไปทั่วของเหลวและเข้าถึงพื้นผิวที่ต้องการทำความสะอาดได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

2. ระยะเวลาน้อยที่สุดในการทำ ความสะอาดสายพานโดยใช้ระบบจำลองที่สร้างขึ้น

ในตอนนี้จะใช้ระบบจำลองการเคลื่อนที่และการทำความสะอาดสายพานด้วยอัลตราโซนิกส์ที่สร้างขึ้น เพื่อหา ระยะเวลาน้อยที่สุดในการทำ ความสะอาดสายพานจนกระทั่งไม่เหลือเศษไก่ติดอยู่บนสายพานเลย นั่นคือ ได้ค่า RFSAI เท่ากับร้อยละ 100 โดยใช้อัลตราโซนิกส์ที่มีความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ กำลัง 200 วัตต์ และใช้น้ำ RO อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นตัวกลาง เนื่องจากการเคลื่อนที่ของสายพานด้วยอัตราเร็ว 0.033 เมตรต่อวินาที ผ่านน้ำ RO เพียงอย่างเดียวอาจ ส่งผลให้เศษไก่ที่ติดอยู่บนสายพานหลุดออกมาได้ ดังนั้นเพื่อศึกษาอิทธิพลของอัลตราโซนิกส์ในการทำ ความสะอาด จึงทำการทดลองเปรียบเทียบกันระหว่างการให้สายพานเคลื่อนที่ผ่านน้ำ RO อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เพียงอย่างเดียว โดยไม่มีผลของอัลตราโซนิกส์กับการใช้อัลตราโซนิกส์ร่วมด้วย ผลการทดลองจากการทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง (ดังแสดงในภาพที่ 7) พบว่าค่า %RFSAI จะเพิ่มขึ้น เมื่อสายพานบริเวณที่จำลองการปนเปื้อนของเศษไก่เคลื่อนที่ลงไป ในอ่างน้ำเป็นจำนวนรอบที่มากขึ้น (เวลาเพิ่มขึ้น) โดย %RFSAI จะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนเมื่อใช้อัลตราโซนิกส์ ร่วมกับซึ่งเงื่อนไขที่สามารถจัดเศษไก่ที่ติดอยู่บนสายพานออกได้ทั้งหมด (%RFSAI = 100) คือ การใช้อัลตราโซนิกส์ ร่วมกับ โดยให้สายพานเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 0.033 เมตรต่อวินาที เป็นเวลา 270 วินาที หรือ 4.5 นาที ซึ่งดีกว่า การไม่ใช้อัลตราโซนิกส์ถึง 4 เท่า



ภาพที่ 7 ภาพเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของ %RFSAI ระหว่างการให้สายพานเคลื่อนที่ผ่านน้ำ RO อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เพียงอย่างเดียว (ไม่ใช้อัลตราโซนิกส์) กับการใช้อัลตราโซนิกส์ร่วม

สรุป

จากผลการทดลองในงานวิจัยนี้สรุปได้ว่าอัลตราโซนิกส์สามารถทำความสะอาดสายพานลำเลียงชนิดลวดตาข่าย ยาว 15.75 เมตร ที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 0.033 เมตรต่อวินาที ได้ร้อยละ 100 ภายในเวลา 4.5 นาที (ทั้ง ๆ ที่จำลองให้สายพานปนเปื้อนเศษไก่มากกว่าการสะสมจริงที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ไก่ปรุงสุกถึง 4 เท่า) โดยใช้อัลตราโซนิกส์ที่มีความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ กำลัง 200 วัตต์ และใช้น้ำ RO อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นตัวกลาง เมื่อนำไปขยายผลกับขนาดของสายพานจริงในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมอาหารแห่งหนึ่งที่มีความกว้างของสายพานเท่ากับ 65 เซนติเมตร และมีความยาวเท่ากับ 350 เมตร จากเดิมที่ต้องใช้ระยะเวลา 100 นาที ในการล้างทำความสะอาดด้วยวิธีการใช้น้ำแรงดันสูง หากใช้วิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถลดระยะเวลาการล้างลงเหลือเพียง 50 นาที ด้วยการลดระยะเวลาในการทำมาสะอาดสายพานลงไป 50 นาที นี้เอง จะทำให้สถานประกอบการสามารถเพิ่มกำลังการผลิตขึ้นมาได้ประมาณ 63 ตันต่อเดือน คิดเป็นมูลค่าประมาณ 1.8 ล้านบาทต่อเดือน นอกจากนั้นยังช่วยประหยัดค่าน้ำที่เกิดขึ้นจากการฉีดล้างทำความสะอาดสายพานด้วยการใช้น้ำแรงดันสูงได้อีกด้วย แสดงให้เห็นว่าวิธีการทำความสะอาดสายพานด้วยเทคโนโลยีอัลตราโซนิกส์ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูงสามารถกำจัดสิ่งสกปรกและสิ่งปนเปื้อนบนสายพานออกได้หมด ประหยัดระยะเวลา และทรัพยากรในการล้างทำความสะอาด ปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานและสิ่งแวดล้อม และสามารถนำไปประยุกต์ใช้จริงในสถานประกอบการได้จริง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยจาก กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (กองทุนส่งเสริม ววน.) โดยหน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการพัฒนากำลังคน ทุนด้านการพัฒนาสถาบันอุดมศึกษา การวิจัยและการสร้างนวัตกรรม สัญญาเลขที่ B01G640030 ขอขอบคุณ คุณชลธิชา ปิตตาระเต ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการช่วยเหลืองานวิจัยรวมทั้งในการออกแบบ สร้างระบบจำลองความสกปรกและสถานที่สำหรับการทดลอง และศูนย์วิจัยวิทยาศาสตร์ประยุกต์และวิศวกรรมศาสตร์เพื่อคำตอบของสังคม ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สำหรับเครื่องล้างอัลตราโซนิกส์และอุปกรณ์ใช้ในการทดลอง

ขอบคุณทุนการศึกษาระดับปริญญาโท จากภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

เอกสารอ้างอิง

- Brandt, J. (2007). **Ozone-based conveyor cleaning system**. US Patent No. US20070261712.
- Crawford, A.H. (1968). Large scale ultrasonic cleaning. *Ultrasonics*, 6(4), 211–216.
- European Food Safety Authority. (2020). **EFSA strategy 2020: Trusted science for safe food**. Parma, Italy: European Food Safety Authority.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2013). **Poultry development review**. Rome, Italy: FAO.
- GFPT Public Company Limited. (2022). **Annual report 2022**. Bangkok, Thailand: GFPT. (In Thai)
- Gibson, H., Taylor, J.H., Hall, K.E., & Holah, J.T. (1999). Effectiveness of cleaning techniques used in the food industry in terms of the removal of bacterial biofilms. *Applied Microbiology*, 87(1), 41–48.
- Graves, R.E. (2007). **Cleaning and sanitizing food contact surfaces**. Retrieved from https://www.fightbac.org/wp-content/uploads/2022/02/Cleaning_and_Sanitizing_Food-Contact_Surfaces.pdf [2024, 5 May].
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2022). **Fundamentals of physics**. New Jersey, USA: John Wiley & Sons.
- Holm, R.H., & Anand, G. (1994). Liquid cleaning agents and methods. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 71(6), 601–609.
- Holmberg, K., Shah, D.O., & Schwuger, M.J. (2002). **Handbook of applied surface and colloid chemistry: Volume 1-2**. New York, USA: John Wiley & Sons.
- Intawongsa, E. (2015). Effects of ultrasonic wave frequency and time on handsaw blade cleaning efficiency. *Industry Technology Lampang Rajabhat University*, 8(2), 122–132. (In Thai)
- Marriott, N.G., & Gravani, R.B. (2006). **Principles of food sanitation**. New York, USA: Springer.
- Official Journal of the European Union. (2021). **Commission regulation (EU) 2021/382**. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R0382> [2024, 5 May]
- Office of Agricultural Affairs, Royal Thai Embassy, Brussels. (2021). Regulations and conditions for exporting meat and animal products to the European Union market. *European Union Agriculture Newsletter*, 30(1), 1–3. (In Thai)
- Pornchalermpong, P., & Ratanapong, N. (2010). **Saponification**. Retrieved from <https://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1631/> [2022, 22 Nov.] (In Thai)
- ShineBen. (2023). **The impact and importance of conveyor belts in the packaging industry**. Retrieved from <https://shineben.com/packaging-news/the-impact-and-importance-of-conveyor-belts-in-the-packaging-industry> [2024, 5 May].
- Sumner, S.S., & Peters, D.L. (1992). **Principles and practices for food sanitation programs**. Nebraska, USA: University of Nebraska.
- Tolvanen, R., Lunden, J., Horman, A., & Korkeala, H. (2009). Pilot-scale continuous ultrasonic cleaning equipment reduces *Listeria monocytogenes* levels on conveyor belts. *Food Protection*, 72(2), 408–411.
- Troller, J.A. (2012). **Sanitation in food processing**. New York, USA: Academic Press.
- Westerlund, J. (1994). High pressure equipment for food processing, *High Pressure Research*. 12(3), 221–226.

-
- Wright, M.J. (2003). **Design of a conveyor belt washer**. (Master of Engineering). University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- Zhou, W., Sarpong, F., & Zhou, C. (2022). Use of ultrasonic cleaning technology in the whole process of fruit and vegetable processing. **Foods**, **11**(18), 1–21