บทความวิจัย

การกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับเครื่องจักรบดแยกทองแดงออกจากฉนวนหุ้มสายไฟฟ้าใช้แล้ว

ทวี วงศ์ณรัตน์ ณภัทร อินทนนท์ และ ชาญชัย เหลาหา*
สาขาวิชาเทคโนโลยีระบบการผลิตอัตโนมัติ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 06 1929 2599 อีเมล: chanchai.la@rmuti.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2026.11.002
รับเมื่อ 25 ตุลาคม 2568 แก้ไขเมื่อ 1 เมษายน 2569 ตอบรับเมื่อ 25 มิถุนายน 2569 เผยแพร่ออนไลน์ 6 พฤศจิกายน 2569
© 2026 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องบดแยกทองแดงออกจากฉนวนสายไฟฟ้าใช้แล้ว 3 ขนาด (0.75 1.5 และ 2.5 ตารางมิลลิเมตร) น้ำหนักขนาดละ 1 กิโลกรัม จำนวนขนาดละ 13 ครั้ง เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการคัดแยกด้วยแรงงานคนที่มีประสบการณ์ 2 ปี การออกแบบการทดลองใช้แผนแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Design; CCD) โดยกำหนดให้ความถี่พัดลมเป่าลมและการสั่นสะเทือนเป็นปัจจัยต้นและปริมาณทองแดงที่คัดแยกได้เป็นตัวแปรตอบสนอง ผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดให้ค่าฟังก์ชันความพึงพอใจสูงสุด (Maximum Desirability Function) เท่ากับ 1 อย่างสมบูรณ์ในทุกขนาดสายไฟ ซึ่งมีความสอดคล้องกับหลักพลศาสตร์ตามมวลของวัสดุ โดยสายไฟขนาด 0.75 ตารางมิลลิเมตร มีสภาวะที่เหมาะสมคือ ความถี่พัดลม 46 เฮิรตซ์ และการสั่นสะเทือน 37 เฮิรตซ์ สายไฟขนาด 1.5 ตารางมิลลิเมตร คือ ความถี่พัดลม 45 เฮิรตซ์ และการสั่นสะเทือน 39 เฮิรตซ์ และสายไฟขนาด 2.5 ตารางมิลลิเมตร คือ ความถี่พัดลม 45 เฮิรตซ์ และการสั่นสะเทือน 40 เฮิรตซ์ การตั้งค่าสภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวสามารถลดความแปรปรวนในกระบวนการ ส่งผลให้เครื่องจักรมีเสถียรภาพและประสิทธิภาพการคัดแยกสูงเทียบเท่าแรงงานคนที่มีความชำนาญ ซึ่งช่วยลดต้นทุนและยกระดับมาตรฐานการจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์ของวิสาหกิจชุมชนได้อย่างเป็นรูปธรรม

คำสำคัญ: การออกแบบการทดลอง การแยกทองแดง การรีไซเคิลสายไฟฟ้า การหาสภาวะที่เหมาะสม ระเบียบวิธีพื้นผิวตอบสนอง

การอ้างอิงบทความ: ทวี วงศ์ณรัตน์, ณภัทร อินทนนท์ และ ชาญชัย เหลาหา, "การกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับเครื่องจักรบดแยกทองแดงออกจากฉนวนหุ้มสายไฟฟ้าใช้แล้ว," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 37, ฉบับที่ 1, หน้า 1–25, ม.ค.–มี.ค. 2570. เลขที่บทความ 271-018380, doi: 10.14416/j.kmutnb.2026.11.002.

Research Article

Optimization of Factors Levels for Copper Separation from Insulated of Used Electrical Wires by the Granulator

Tawee Wongnarat, Naphatara Intanon and Chanchai Laoha*

Department of Automated Manufacturing System Technology, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 06 1929 2599, E-mail: chanchai.la@rmuti.ac.th
DOI: 10.14416/j.kmutnb.2026.11.002
Received 25 October 2025; Revised 1 April 2026; Accepted 25 June 2026; Published online: 6 September 2026
© 2026 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research aimed to determine the optimal operating conditions of a machine for separating copper from discarded electrical wire insulation for three wire sizes (0.75, 1.5 and 2.5 mm²). The experiment utilized 1 kg of wire for each size with 13 experimental runs per size, and the results were compared with the separation efficiency of manual labor with two years of experience. A Central Composite Design (CCD) was employed, with fan frequency and vibration frequency defined as the independent factors and the amount of recovered copper as the response variable. The results indicated that the optimization achieved a maximum desirability function value of 1.00 for all wire sizes, demonstrating consistency with particle dynamics principles based on material mass. Specifically, the optimal settings for the 0.75 mm² wire were a fan frequency of 46 Hz and a vibration frequency of 37 Hz; for the 1.5 mm² wire, a fan frequency of 45 Hz and a vibration frequency of 39 Hz; and for the 2.5 mm² wire, a fan frequency of 45 Hz and a vibration frequency of 40 Hz. Implementing these optimal conditions minimized process variation, resulting in enhanced machine stability and a separation efficiency comparable to that of skilled manual labor. Consequently, operating costs can be reduced, and electronic waste management standards for community enterprises can be substantially improved.

Keywords: Desing of Experimental, Copper Separation, Electrical Wire Recycling, Optimization of Conditions, Response Surface Methodology

Please cite this article as: T. Wongnarat, N. Intanon, and C. Laoha, "Optimization of factors levels for copper separation from insulated of used electrical wires by the granulator," *The Journal of KMUTNB*, vol. 37, no. 1, pp. 1–25, Jan.–Mar. 2027 (in Thai), Art. no. 271-018380, doi: 10.14416/j.kmutnb.2026.11.002.

1. บทนำ

ปริมาณขยะอิเล็กทรอนิกส์ 50 ล้านตัน (Ton) ในปี 2562 และอาจเพิ่มขึ้นเป็น 120 ล้านตัน ในปี 2593 [1] สายไฟใช้แล้วเป็นหนึ่งในขยะอิเล็กทรอนิกส์ ชาวบ้านคัดแยกทองแดง (Copper) จากฉนวนหุ้ม (Insulated) สายไฟใช้แล้วได้เพื่อนำไปขายให้ร้านรับซื้อของเก่าในพื้นที่ ซึ่งจะส่งต่อไปยังโรงหลอม การคัดแยกสายไฟใช้แล้วโดยการเผาอาจเกิดฝุ่นละออง ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อสุขภาพของประชาชนในพื้นที่ และระบบนิเวศทั้งในระยะสั้นและระยะยาว การหายใจระหว่างการเผาสายไฟใช้แล้ว ก่อให้เกิดโอกาสเสี่ยงสูงทั้งสารที่ก่อให้เกิดมะเร็ง ได้แก่ สารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs) โครเมียม และแคดเมียม และสารที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็งได้แก่ สารหนู โครเมียม และทองแดง [2]

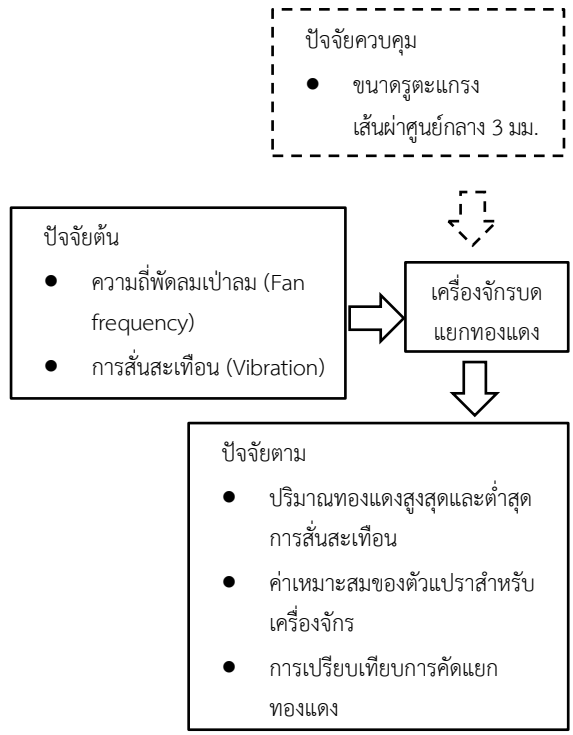
ปัจจุบันการแยกทองแดงจากสายไฟใช้แล้วเผชิญข้อจำกัดด้านกรรมวิธีแม้งานวิจัยของ Meshcheryakov และคณะ [3] จะใช้เทคนิคไอน้ำละลายฉนวนหุ้ม หรือการศึกษาของ Kumar และคณะ [4] ที่ใช้แรงกระแทกในสภาวะเปียกเพื่อแยกทองแดงออกจากพลาสติกโพลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) แต่วิธีเหล่านี้ล้วนสร้างความเสียหายต่อฉนวนจนสูญเสียมูลค่าทางเศรษฐกิจ ซึ่งปัจจุบันสามารถนำไปขายให้กับร้านรับซื้อของเก่าได้ การเปลี่ยนผ่านสู่เทคนิคเชิงกล (Mechanical Separation) จึงเป็นทางออกที่ยั่งยืนและมีประสิทธิภาพมากกว่า [5] ดังนั้นเครื่องจักรบดแยกทองแดง (Granulator) กลายเป็นเทคโนโลยีที่วิสาหกิจชุมชนเลือกใช้แต่พบว่าปัญหาสำคัญคือความซับซ้อนของการตั้งค่าพารามิเตอร์การเดินเครื่อง (Operation) ที่ส่งผลโดยตรงต่อผลผลิต (Output) ต้องพึ่งพาสัญชาตญาณของผู้ปฏิบัติงาน

กลไกหลักของเครื่องจักรอาศัยการลดขนาดและการแยกทางกายภาพ [6] ซึ่งแฝงด้วยความซับซ้อนของตัวแปรอิสระโดยเฉพาะความเร็วลมและการสั่นสะเทือน ดังที่ Kaas และคณะ [7] ทบทวนหลักการเครื่องแยกอากาศแบบซิกแซกที่ใช้ในการคัดแยกวัสดุตามน้ำหนักโดยใช้แรงลมเป่าผ่านวัสดุ (Zigzag Air Classifier) แม้หลักการพลศาสตร์ของลมจะสามารถแยกทองแดงที่หนักกว่าให้ตกลงมาและเป่าพลาสติกออกไปได้ แต่หากขาดการประเมินระดับอัตราการไหลของลมที่เหมาะสมตามหลักสถิติ ทองแดงชิ้นเล็กจะถูกเป่าสูญเสียไปอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ นอกจากความเร็วลมแล้วกระบวนการคัดกรอง (Screening) ตามที่ Wedrychowicz [8] เสนอชี้ให้เห็นว่าขนาดรูตะแกรงมีผลต่อการแยกโลหะ การบูรณาการปัจจัยเหล่านี้เข้าด้วยกันจำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือทางสถิติขั้นสูง สอดคล้องกับแนวทางของ Shanmugam และคณะ [9] ที่ยืนยันความสำเร็จของการใช้แผนการทดลองในการประเมินเครื่องแยกแบบสั่นโดยพิจารณาปัจจัยนำเข้าคือ ความชื้น ความเอียง และความถี่ โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และกราฟพาเรโต (Pareto Graph) เพื่อระบุนัยสำคัญของการสั่น ในทางตรงข้ามแม้ Arslan และ Arslan [10] จะนำเสนอการแยกทองแดงด้วยมอซลีย์ เทเบิล (Mozley Table) ที่อาศัยแรงโน้มถ่วงแต่การควบคุมการสั่นสะเทือนให้คงที่ทำให้งานวิจัยดังกล่าวละเลยการหาจุดที่เหมาะสมของพารามิเตอร์จึงมีความสำคัญมากกว่าการปรับตั้งค่าแบบลองผิดลองถูก ดังนั้นการนำเทคนิคการออกแบบการทดลอง (Design of Experiments; DOE) มาใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อวิเคราะห์ตัวแปรความเร็วลมและการสั่นสะเทือนไปพร้อมกัน จึงเป็นการอุดช่องโหว่ของการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมา

งานวิจัยส่วนใหญ่มักมุ่งเน้นไปที่กระบวนการทาง

เคมี [3]–[5] หรือการแยกขนาดอนุภาคทั่วไป [6]–[10] และที่ผ่านมาได้มีการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองในกระบวนการการแยกฉนวนหุ้มออกจากทองแดง [9] การออกแบบการทดลองถือเป็นแนวทางเชิงสถิติที่มุ่งเน้นการระบุและวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อผลผลิต เมื่อสามารถระบุปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการผลิตได้แล้ว และนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความเสถียรของกระบวนการผลิต เครื่องจักรบดแยกทองแดงจากฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า ซึ่งเป็นเทคโนโลยีเชิงกลที่พึ่งพากลศาสตร์ของไหล (Air Flow) และพลศาสตร์ (Vibration) ร่วมกันนั้น ยังไม่มีการศึกษาที่อธิบายถึงอิทธิพลร่วม (Interaction Effects) ของปัจจัยทั้งสองนี้อย่างเป็นระบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อขนาดของสายไฟเปลี่ยนไป นอกจากนี้องค์ความรู้เดิมยังขาดการอธิบายกลไกทางพลศาสตร์ (Dynamics) ระหว่างความเร็วลมและการสั่นสะเทือนในการคัดแยกวัสดุที่มีความหนาแน่นต่างกัน ยิ่งไปกว่านั้นยังไม่มีการศึกษาใดที่เปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงปริมาณระหว่างเครื่องจักรที่ถูกปรับตั้งค่าอย่างเหมาะสมด้วยหลักการทางสถิติเพื่อทำให้เครื่องจักรมีความยืดหยุ่นสูง ควบคุมได้ง่ายกับการใช้แรงงานคนที่มีความชำนาญ เหมาะสมกับทักษะของผู้ปฏิบัติงานในระดับวิสาหกิจชุมชน

จากปัญหาดังกล่าวทำให้เกิดช่องว่างการวิจัย งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดค่าของปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับเครื่องจักร โดยกำหนด 2 ตัวแปรต้น 1 ตัวแปรควบคุม และ 1 ตัวแปรตาม ดังรูปที่ 1 โดยประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) พร้อมทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพการคัดแยกที่สภาวะ



รูปที่ 1 กรอบการวิจัย

เหมาะสมกับกระบวนการคัดแยกโดยใช้แรงงานคน เพื่อเป็นแนวทางในการยกระดับประสิทธิภาพและมาตรฐานการทำงานของอุตสาหกรรมรีไซเคิล (Recycle) ต่อไป

หากไม่ดำเนินการดังกล่าวจะทำให้เครื่องทำงานไม่เต็มประสิทธิภาพทำให้ต้นทุนสูง ไม่เกิดเรื่องจูงใจให้กับร้านรับซื้อของเก่า และชุมชนหรือวิสาหกิจชุมชนในพื้นที่ในการประยุกต์ใช้เครื่องจักร ส่งผลกระทบต่อการคัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ด้วยการเผาเหมือนเดิม ทำให้มีผลต่อสิ่งแวดล้อมเกิดฝุ่น PM2.5 [11], [12] และลดรายได้ของประชาชนที่นำทองแดงไปขายกับตลาดรีไซเคิล (Recyclables Market) แม้ปัจจุบันสัดส่วนยังไม่สูงนัก ซึ่งสามารถสร้างรายได้ให้กับชุมชนในวงกว้างได้อย่างเป็นรูปธรรมในรูปแบบธนาคารขยะ หากได้รับคัดแยกอย่างเหมาะสม [13]

2. วิธีการทดลอง

2.1 วัสดุทดลอง

สายไฟที่ใช้แล้วในการทดลองมี 3 ขนาด คือ ขนาด 0.75 1.5 และ 2.5 ตารางเมตร รายละเอียดดังรูปที่ 2 ทั้ง 3 ขนาด เป็นสายไฟ ชนิด THW (Thermoplastic Heat and Water–Resistant Wire) แต่ละขนาดมีน้ำหนักในการทดลองแต่ละครั้ง ๆ ละ 1 กิโลกรัม สายไฟใช้แล้วประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ ทองแดง และพลาสติก ซึ่งทองแดงและพลาสติกมีความหนาแน่นต่างกัน ดังนั้นวิธีการแยกโลหะออกจากพลาสติกจึงสามารถทำได้โดยอาศัยแรงโน้มถ่วง หรือความถ่วงจำเพาะเป็นหลักการสำคัญในการแยกดังกล่าว



สายไฟใช้แล้วขนาด 1.5 ตร.มม. (ขนาดความโตนอก 2.49 มม.) | สายไฟใช้แล้วขนาด 2.5 ตร.มม. (ขนาดความโตนอก 3.28 มม.) | สายไฟใช้แล้วขนาด 0.75 ตร.มม. (ขนาดความโตนอก 9.28 มม.)

รูปที่ 2 ขนาดความโตนอกของสายไฟใช้แล้วแต่ละขนาด

2.2 เครื่องมือการวิจัย

เครื่องจักรบดแยกทองแดงออกจากฉนวนหุ้มสายไฟฟ้าใช้แล้ว กำลังการผลิต 20–40 กิโลกรัมต่อชั่วโมง กำลังไฟฟ้าทั้งหมด 4.2 กิโลวัตต์ แรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ 1 เฟส 50 เฮิรตซ์ โดยมีขั้นตอนดังนี้ เครื่องจักรจะตัด และบดสายไฟใช้แล้วเพื่อคัดแยกทองแดงออกจากฉนวนหุ้ม จากนั้นชิ้นทองแดงตกลงไปที่ตะแกรงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีน้ำหนักมากกว่าและจะมีฉนวนหุ้มปะปนมาบางส่วน แต่จะถูกแยกด้วยตะแกรงที่มีการสั่นสะเทือนอีกครั้งเพื่อคัดแยกทองแดง ส่วนฉนวนหุ้มทองแดงจะถูกลมเป่าให้เข้าไปในช่องรองรับในรอบแรก บางส่วนจะตกลงไปยังตะแกรง และจะถูกคัดแยกรอบที่สองอีกครั้ง การตัดและบดสายไฟใช้แล้วโดยตัวใบมีดประกอบด้วย 2 ใบหลัก ใบมีดอันแรกติดตั้งไว้อยู่กับที่ ส่วนอีกใบติดตั้งบนโรเตอร์ ผลผลิตที่ผ่านเครื่องจักรบดแยกทองแดงออกจากฉนวนหุ้มสายไฟฟ้าใช้แล้ว ดังแสดงในรูปที่ 3 นอกจากนี้การทดลองนี้ยังมีการคัดแยกด้วยแรงงานคน โดยที่ใช้เครื่องมือคือมีดคัตเตอร์ (Cutter Knife) ขนาด 9.5 x 2.5 x 1.2 เซนติเมตร ผลผลิตที่ได้ดังรูปที่ 4 ในการทดลองนี้ ปริมาณลมที่ใช้ในการคัดแยกถูกควบคุมผ่านการปรับปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วยการควบคุมความถี่ผ่านอินเวอร์เตอร์ (Variable Frequency Drive) ที่จ่ายให้กับมอเตอร์พัดลมเป่าลมแทนความเร็วลมที่ปัจจัยในงานวิจัยที่ผ่านมา [3]–[5] ก่อนหน้านี้ โดยมีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz) ซึ่งแปรผันตรงกับปริมาณลมที่เกิดขึ้น

การทดลองนี้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรหลายตัวที่มีต่อตัวแปรตาม (Central Composite Design; CCD) เพื่อศึกษาผลของตัวแปรอิสระ 2 ปัจจัย ได้แก่ ความถี่พัดลมเป่าลม (A) ความถี่การสั่นสะเทือน (B) ต่อค่าการตอบสนอง คือ น้ำหนักของทองแดง (กิโลกรัม : กก.) [14]–[15]



รูปที่ 3 ปริมาณทองแดงของขนาดสายไฟใช้แล้ว 0.75 มิลลิเมตร โดยเครื่องจักร



รูปที่ 4 ปริมาณทองแดงของขนาดสายไฟใช้แล้ว 0.75 มิลลิเมตร โดยแรงงานคน

ในการพิจารณาเลือกปัจจัยควบคุมสำหรับกระบวนการบดแยก คณะผู้วิจัยได้อ้างอิงหลักการทำงานทางกลศาสตร์ของเครื่องจักรที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ รวมทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [9] ซึ่งระบุว่าความเร็วลมและการสั่นสะเทือนเป็นกลไกสำคัญในการแยกชั้นวัสดุตามความแตกต่างของความหนาแน่น

2.3 การรวบรวมข้อมูล

2.3.1 การคัดแยกด้วยแรงงานคน

โดยใช้แรงงานคนที่มีความชำนาญปานกลาง ซึ่งมีประสบการณ์ในการปอกสายไฟมาแล้ว 2 ปี ทำการปอกสายไฟ เพื่อแยกทองแดงออกจากฉนวนหุ้ม การปอกสายไฟ จำนวน 13 ครั้ง ๆ ละ 1 กิโลกรัม ต่อ 1 ขนาดสายไฟใช้แล้ว จากนั้นชั่งน้ำหนักทองแดงที่ถูกคัดแยกแล้ว

2.3.2 การคัดแยกด้วยเครื่องจักร

การกำหนดช่วงการสั่นสะเทือนที่ 25–45 เฮิรตซ์ ว่ามาจากการทดลองนำร่อง (Preliminary Experiment) ร่วมกับข้อจำกัดทางวิศวกรรมของเครื่องจักร หากความถี่ต่ำกว่า 25 เฮิรตซ์ จะไม่เกิดการแยกชั้นของวัสดุ และหากสูงกว่า 45 เฮิรตซ์ จะทำให้วัสดุกระดอนปะปนกันจนไม่สามารถคัดแยกได้ ซึ่งคำอธิบายนี้ช่วยสนับสนุนความน่าเชื่อถือของการกำหนดช่วงขอบเขตของปัจจัยก่อนเข้าสู่กระบวนการออกแบบการทดลองด้วยวิธี CCD โดยมีระดับของปัจจัยดังตารางที่ 1

2.3.3 ลำดับการทดลอง (Randomized Run Order)

การทดลองทั้ง 13 เงื่อนไขได้ดำเนินการโดยใช้การสุ่มลำดับการทดลอง เพื่อหลีกเลี่ยงอคติ (Bias) ที่อาจเกิดจากตัวแปรแทรกซ้อนซึ่งไม่สามารถควบคุมได้ ดังตารางที่ 2–4

ตารางที่ 1 ระดับปัจจัย

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย		
	(-1)	0	+1
ความถี่พัดลมเป่าลม (เฮิรตซ์)	25	35	45
การสั่นสะเทือน (เฮิรตซ์)	25	35	45

ตารางที่ 2 การออกแบบลำดับการทดลองสายไฟขนาด 0.75 ตารางมิลลิเมตร

ข้อมูลชุดที่	ลำดับการทดลอง	ความถี่พัดลมเป่าลม (เฮิรตซ์)	การสั่นสะเทือน (เฮิรตซ์)	ปริมาณทองแดง (กก.)
4	1	47	42	0.51
10	2	44	39	0.46
6	3	48.2426	39	0.43
13	4	44	39	0.47
3	5	41	42	0.58
9	6	44	39	0.48
8	7	44	43.2426	0.48
1	8	41	36	0.5
2	9	47	36	0.41
11	10	44	39	0.45
7	11	44	34.7574	0.45
5	12	39.7574	39	0.6
12	13	44	39	0.47

ตารางที่ 3 การออกแบบลำดับการทดลองสายไฟขนาด 1.5 ตารางมิลลิเมตร

ข้อมูลชุดที่	ลำดับการทดลอง	ความถี่พัดลมเป่าลม (เฮิรตซ์)	การสั่นสะเทือน (เฮิรตซ์)	ปริมาณทองแดง (กก.)
10	1	45	38	0.45
11	2	45	38	0.45
1	3	43	35	0.43
3	4	43	41	0.47
5	5	42.1716	38	0.46
13	6	45	38	0.47
4	7	47	41	0.48
6	8	47.8284	38	0.42
2	9	47	35	0.31
12	10	45	38	0.46
9	11	45	38	0.47
7	12	45	33.7574	0.13
8	13	45	42.2426	0.5

ตารางที่ 4 การออกแบบลำดับการทดลองสายไฟขนาด 2.5 ตารางมิลลิเมตร

ข้อมูลชุดที่	ลำดับการทดลอง	ความถี่พัดลมเป่าลม (เฮิรตซ์)	การสั่นสะเทือน (เฮิรตซ์)	ปริมาณทองแดง (กก.)
9	1	45	38	0.48
4	2	47	41	0.5
6	3	47.8284	38	0.45
13	4	45	38	0.49
2	5	47	35	0.51
8	6	45	42.2426	0.53
7	7	45	33.7574	0.5
10	8	45	38	0.51
12	9	45	38	0.47
11	10	45	38	0.48

ตารางที่ 4 การออกแบบลำดับการทดลองสายไฟขนาด 2.5 ตารางมิลลิเมตร (ต่อ)

ข้อมูลชุดที่	ลำดับการทดลอง	ความถี่พัดลมเป่าลม (เฮิรตซ์)	การสั่นสะเทือน (เฮิรตซ์)	ปริมาณทองแดง (กก.)
3	11	43	41	0.53
1	12	43	35	0.45
5	13	42.1716	38	0.43

2.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

2.4.1 การวิเคราะห์สถิติเชิงพรรณนา

1) ค่าเฉลี่ย

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \quad (1)$$

2) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1}} \sum_{i=1}^{n} \left(x_i - \bar{x}\right)^2 \quad (2)$$

2.4.2 การวิเคราะห์สถิติเชิงอนุมาน

สมการเชิงพหุนาม (Quadratic Model) เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าและผลลัพธ์ ใช้ ANOVA เพื่อตรวจสอบความมีนัยสำคัญของแต่ละปัจจัย สร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface) เพื่อดูแนวโน้ม

1) แบบจำลองพหุนามกำลังสอง (Second-order Polynomial Model)

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^{\,2} + \sum_{i<j}^{k} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3)$$

2) การวิเคราะห์ ANOVA สำหรับโมเดล CCD

2.1) Sum of Squares Total (SST)

$$SST = \sum_{i=1}^{n} \left(Y_i - \bar{Y} \right)^2 \quad (4)$$

2.2) Sum of Squares Regression (SSR)

$$SSR = \sum_{i=1}^{n} \left(\hat{Y}_i - \bar{Y} \right)^2 \quad (5)$$

2.3) Sum of Squares Error (SSE)

$$SSE = \sum_{i=1}^{n} \left(Y_i - \hat{Y}_i \right)^2 \quad (6)$$

3) ค่าความแปรปรวนเฉลี่ย (Mean Squares) ค่า *F* และ ค่า *p*

3.1) ค่าความแปรปรวนเฉลี่ย (Mean Square)

$$MS = \frac{ss}{df} \quad (7)$$

3.2) ค่าสถิติ *F*

$$F = \frac{MS}{MS_{error}} \quad (8)$$

3.3) ค่า *p*

$$p = 1 - F_{CDF} \left(F; df_1 = df, = df_{error} \right) \quad (9)$$

ข้อมูลผลการทดลองจะถูกนำมาวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนองและวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งนี้ ผู้วิจัยจะทำการตรวจสอบข้อตกลงเบื้องต้นทางสถิติ (Statistical Assumptions) ของข้อมูล หากพบว่าความคลาดเคลื่อนไม่มีการแจกแจงแบบปกติจะดำเนินการแปลงรูปข้อมูล (Data Transformation) ด้วยเทคนิค Box–Cox ก่อนการวิเคราะห์ ANOVA ต่อไป

2.4.3 สมมติฐานทางสถิติสำหรับการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัย (DOE/ANOVA)

1) การทดสอบอิทธิพลหลักของความถี่พัดลมเป่าลม (Main Effect of Fan Frequency)

H0 : ความถี่พัดลมเป่าลม ไม่มีอิทธิพลต่อปริมาณทองแดงที่แยกได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

H1 : ความถี่พัดลมเป่าลม มีอิทธิพลต่อปริมาณทองแดงที่แยกได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

2) การทดสอบอิทธิพลหลักของการสั่นสะเทือน (Main Effect of Vibration)

H0 : การสั่นสะเทือน ไม่มีอิทธิพลต่อปริมาณทองแดงที่แยกได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

H1 : การสั่นสะเทือน มีอิทธิพลต่อปริมาณทองแดงที่แยกได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

3) การทดสอบอิทธิพลร่วม (Interaction Effects)

H0 : ไม่มีอิทธิพลร่วมระหว่างความถี่พัดลมเป่าลมลมและการสั่นสะเทือน ต่อปริมาณทองแดงที่แยกได้

H1 : มีอิทธิพลร่วมระหว่างความถี่พัดลมเป่าลมและการสั่นสะเทือน ต่อปริมาณทองแดงที่แยกได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

3. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

การทดลองนี้กำหนดปัจจัย 2 ปัจจัย คือ ความถี่พัดลมเป่าลมและการสั่นสะเทือนในการคัดบดแยกทองแดงออกจากฉนวนหุ้มสายไฟฟ้าใช้แล้วได้

3.1 อิทธิพลร่วมของทั้งสองปัจจัยสำหรับเครื่องจักร

การทดลองปัจจัยนำเข้าของเครื่องจักรบดคัดแยกทองแดงออกจากฉนวนหุ้มสายไฟใช้แล้ว สามารถออกแบบ

การทดลองให้ครอบคลุมช่วงค่าที่ใช้งานได้จริง โดยไม่ต้องทดลองในค่าที่เกินขีดจำกัดของเครื่องจักร [16] ปัจจัยสมการกำลังสอง (Quadratic) ปัจจัยหลักคือ ความถี่พัดลมเป่าลม (A : speed) และการสั่นสะเทือน (B : vibration) ตามสมการที่ (3) ที่จะอธิบายปัจจัยทั้งสองส่งผลต่อปริมาณทองแดงที่ถูกบดแยกของจากฉนวนหุ้มสายไฟใช้แล้วอย่างไร และการเก็บรวบรวมข้อมูลจากการทดลองจะแสดงความแปรปรวน โดยการคำนวณสมการกำลังสองตามสมการที่ (4)–(6) การประเมินความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อยืนยันความสอดคล้องกับผลการทดลองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ตามสมการที่ (7) ค่าสถิติ F ตามสมการที่ (8) และและค่าสถิติ P ตามสมการที่ (9)

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ขนาดสายไฟใช้แล้ว 0.75 ตารางมิลลิเมตร

แหล่งที่มาของความแปรปรวน	ผลรวมกำลังสอง (SS)	องศาอิสระ (df)	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (MS)	ค่า F	ค่า P
Model	0.0314	5	0.0063	11.29	0.0030
ความถี่พัดลมเป่าลม (A-speed)	0.0200	1	0.0200	36.03	0.0005
การสั่นสะเทือน (B-vibration)	0.0062	1	0.0062	11.12	0.0125
AB	0.0001	1	0.0001	0.1798	0.6843
A^2	0.0051	1	0.0051	9.12	0.0194
B^2	0.0000	1	0.0000	0.0500	0.8294
ค่าความคลาดเคลื่อน (Residual)	0.0039	7	0.0006		

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ขนาดสายไฟใช้แล้ว 0.75 ตารางมิลลิเมตร (ต่อ)

แหล่งที่มาของความแปรปรวน	ผลรวมกำลังสอง (SS)	องศาอิสระ (df)	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (MS)	ค่า F	ค่า P
ความไม่สอดคล้องของตัวแบบ (Lack of Fit)	0.0034	3	0.0011	8.65	0.0319
ความคลาดเคลื่อนบริสุทธิ์ (Pure error)	0.0005	4	0.0001		
ผลรวมกำลังสองทั้งหมดของข้อมูล	0.0353	12			

R^2 = 0.8897, Adjusted R^2 = 0.8109, Predicted R^2= 0.2974

แม้ว่าจำนวนการทดลองจะอ้างอิงตามแผนการทดลองซึ่งประกอบด้วย 13 รัน (n = 13) แต่ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าค่าสถิติของแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือในระดับสูง โดยมีค่า *p*-value ของ Model เท่ากับ น้อยกว่าค่า *p*-value (*p*-value < 0.05) ดังตารางที่ 5–8 จึงสามารถยืนยันได้ว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการพยากรณ์ผลลัพธ์ ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าอิทธิพลของตัวแปรหลักคือ ความถี่พัดลมเป่าลม (A-speed) การสั่นสะเทือน (B-vibration) มีความชัดเจนทางสถิติ และสามารถอธิบายความแปรปรวนของระบบได้อย่างมีนัยสำคัญ แม้จะอยู่ภายใต้ข้อจำกัดของจำนวนหน่วยทดลองก็ตาม

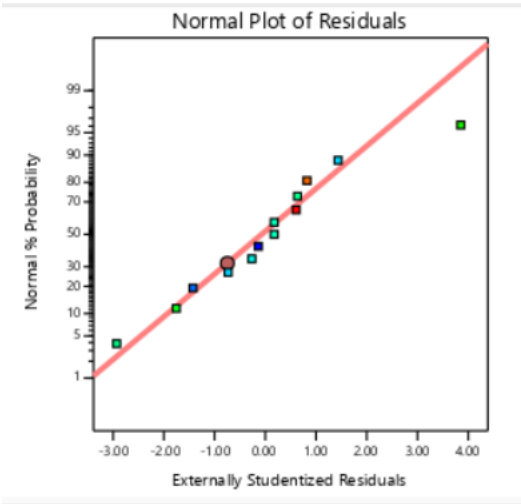
จากตารางที่ 5 กรณีสายไฟขนาด 0.75 ตารางมิลลิเมตร พบว่าการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำลองสมการกำลังสองมีความเหมาะสมอย่างยิ่งในการอธิบายความสัมพันธ์ของการทดลอง เนื่องจากค่า *p*-value ของ

ตัวแบบมีค่าเท่ากับ *p*-value = 0.0030 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ *p*-value = 0.05 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปใช้ทำนายผลปริมาณทองแดงได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ตัวแปร A^2 มีอิทธิพลต่อปริมาณทองแดงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 และไม่มีอิทธิพลร่วมของปัจจัยทั้งสอง เนื่องจากค่า *p*-value เท่ากับ 0.6843 มีค่าสูงกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 มาก จึงสรุปได้ว่าไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ผลวิเคราะห์ชี้ว่าเมื่อความถี่พัดลมเป่าลมเพิ่มขึ้น 1 เฮิรตซ์ ปริมาณทองแดงเฉลี่ยลดลง 0.05 กิโลกรัม ขณะที่เพิ่มการสั่นสะเทือน 1 เฮิรตซ์ ทำให้ลดลง 0.028 กิโลกรัม ดังแสดงในสมการที่ (10) ทั้งนี้เมื่อความถี่พัดลมเป่าลมถึงระดับหนึ่งปริมาณทองแดงจะเริ่มเพิ่มขึ้นสูงสุด

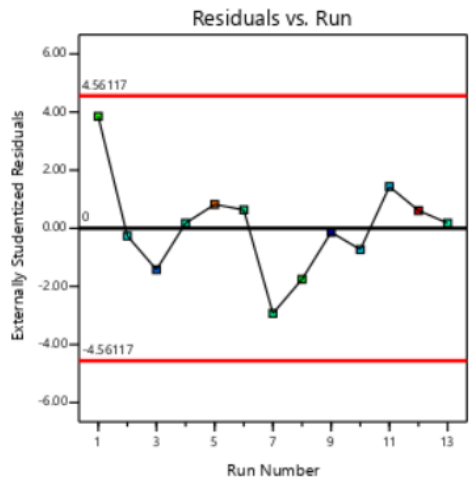
ค่าความไม่สอดคล้องของตัวแบบ (Lack–of– fit) มี *p*-value = 0.064 (*p*-value > 0.05) สะท้อนว่าแบบจำลองสอดคล้องกับข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญ แต่ค่า R^2 เท่ากับร้อยละ 88.9 และ Adjusted R^2 เท่ากับร้อยละ 81 บ่งชี้ว่าความแปรปรวนของข้อมูลได้สูง โดยมีเพียงร้อยละ 11.1 ที่เป็นความคลาดเคลื่อน อีกทั้งความใกล้เคียงกันของค่า R^2 ทั้งสองยังยืนยันว่าไม่เกิดปัญหาความซับซ้อนเกินจริง (Overfitting) ในรูปที่ 5 ข้อมูลเกาะกลุ่มตามเส้นทแยงมุมในกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Probability Plot) ยืนยันการแจกแจงแบบปกติ (Normality) การกระจายตัวในรูปที่ 6 พบว่าไม่มีค่าใดเกินเส้นขอบเขตที่กำหนด (±4.56117) บ่งชี้ว่าไม่มีค่าผิดปกติรุนแรงในชุดข้อมูลนี้

สมการสำหรับสายไฟขนาด 0.75 มิลลิเมตร คือ

$$Y = 0.466 - 0.05A - 0.027B + 0.005AB + 0.027A^2 + 0.002B^2 \quad (10)$$

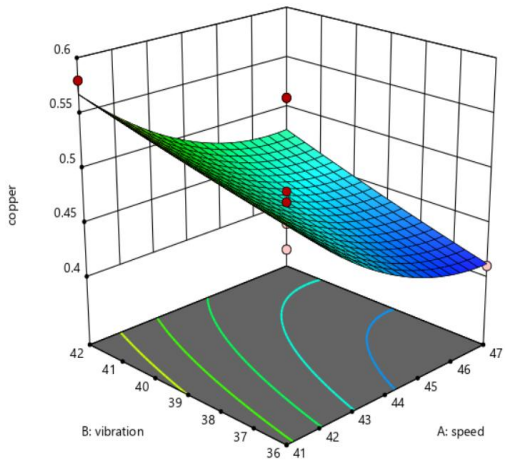


รูปที่ 5 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อน (Normal Plot of Residuals) ขนาดสายไฟใช้แล้ว 0.75 ตารางมิลลิเมตร



รูปที่ 6 การกระจายตัวของค่าคลาดเคลื่อน (Externally Studentized Residuals) ขนาดสายไฟใช้แล้ว 0.75 ตารางมิลลิเมตร

รูปที่ 7 คือ การวิเคราะห์กราฟพื้นผิว 3 มิติ (3D Surface) แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่พัดลมเป่าลมและการสั่นสะเทือนต่อประสิทธิภาพการ



รูปที่ 7 3D Surface ของ Response : copper ขนาดสายไฟใช้แล้ว 0.75 ตารางมิลลิเมตร

แยกทองแดง กราฟพื้นผิว 3 มิติ แสดงรูปแบบโค้งที่ซับซ้อน โดยมีค่าการตอบสนองสูงสุดอยู่ในบริเวณที่ความถี่พัดลมเป่าลมประมาณ 40–41 เฮิรตซ์ และการสั่นสะเทือน ประมาณ 42–43 เฮิรตซ์ ซึ่งให้ประสิทธิภาพการแยกทองแดงประมาณ 0.55–0.57

สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณทองแดงที่ถูกบดแยกได้จากสายไฟใช้แล้วขนาด 1.5 ตารางมิลลิเมตร พบว่าข้อมูลเริ่มต้นมีการกระจายตัวของความคลาดเคลื่อนที่ไม่เป็นไปตามข้อตกลงเบื้องต้นทางสถิติ (Assumption of Variance) ดังนั้นเพื่อให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ จึงได้ทำการแปลงข้อมูลตัวแปรตอบสนองด้วยวิธียกกำลัง (Transformation) โดยค่าพารามิเตอร์แลมบ์ด้า (Lambda) เท่ากับ 3 ($\lambda = 3$) ข้อเสนอแนะของการวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อน (Box-Cox Plot) ซึ่งการแปลงข้อมูลดังกล่าวช่วยปรับปรุงให้แบบจำลองมีความสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองมากยิ่งขึ้น และลดความคลาดเคลื่อนในการทำนายผลลัพธ์

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ขนาดสายไฟใช้แล้ว 1.5 ตารางมิลลิเมตร

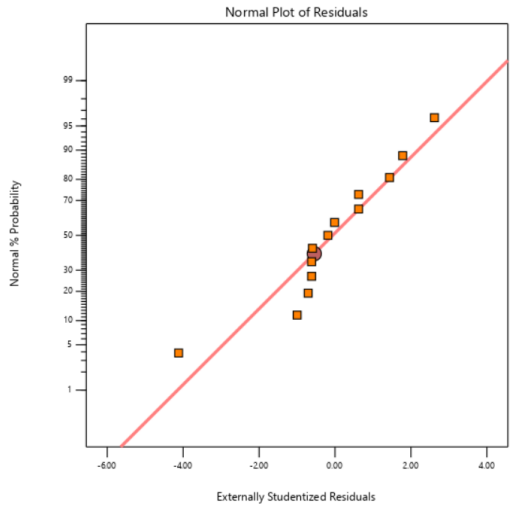
แหล่งที่มาของความแปรปรวน	ผลรวมกำลังสอง (SS)	องศาอิสระ (df)	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (MS)	ค่า F	ค่า P
Model	0.0129	5	0.0026	21.51	0.0004
ความถี่พัดลมเป่าลม (A-speed)	0.0007	1	0.0007	5.99	0.0443
การสั่นสะเทือน (B-vibration)	0.0097	1	0.0097	80.95	< 0.0001
AB	0.0008	1	0.0008	6.65	0.0366
A^2	0.0001	1	0.0001	1.07	0.3351
B^2	0.0016	1	0.0016	13.67	0.0077
ค่าความคลาดเคลื่อน (Residual)	0.0008	7	0.0001		
ความไม่สอดคล้องของตัวแบบ (Lack of Fit)	0.0007	3	0.0002	5.61	0.0645
ความคลาดเคลื่อนบริสุทธิ์ (Pure error)	0.0002	4	0.0000		
ผลรวมกำลังสองทั้งหมดของข้อมูล	0.0137	12			

R^2 = 0.9389, Adjusted R^2 = 0.8953, R^2= 0.6306

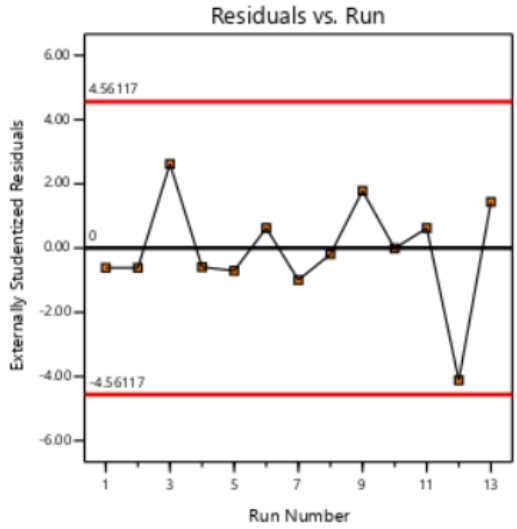
ตารางที่ 6 จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความน่าเชื่อถือสูงมาก โดยพิจารณาจากค่าความน่าจะเป็น (*p*-value) ของตัวแบบ (Model) ที่มีค่าเท่ากับ 0.0004 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ

ที่กำหนด (p-value < 0.05) นอกจากนี้ค่าความไม่สอดคล้องของตัวแบบมีค่า p–value เท่ากับ 0.0645 (p-value > 0.05) ซึ่งไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงให้เห็นว่าสมการที่สร้างขึ้นนี้มีความพอดีและสอดคล้องกับข้อมูลผลการทดลองจริงเป็นอย่างดีสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ที่มีค่าสูงถึงร้อยละ 93.8 และค่า Adjusted R^2 เท่ากับร้อยละ 89.5 ซึ่งบ่งชี้ว่าแบบจำลองนี้สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้สูงถึงร้อยละ 93.8 โดยมีข้อผิดพลาดหรือปัจจัยอื่นที่อธิบายไม่ได้เพียงร้อยละ 6.2 เท่านั้น ปัจจัยความถี่พัดลมเป่าลม มีผลต่อปริมาณทองแดงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่า p–value เท่ากับ 0.0443 (p–value < 0.05) ปัจจัยการสั่นสะเทือน ส่งผลต่อปริมาณทองแดงอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง โดยมีค่า p–value < 0.0001 และเมื่อพิจารณาจากค่า F–value ที่สูงถึง 80.95 บ่งชี้ว่าการสั่นสะเทือนเป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการนี้มากที่สุด รูปที่ 8 ข้อมูลเกาะกลุ่มตามเส้นทแยงมุมใน Normal Probability Plot ยืนยันการแจกแจงแบบปกติ การกระจายตัวในรูปที่ 9 พบว่าไม่มีค่าใดเกินเส้นขอบเขตที่กำหนด

ผลการทดสอบพบว่าอิทธิพลร่วมระหว่างความถี่พัดลมเป่าลมและการสั่นสะเทือน (AB) มีค่า p-value เท่ากับ 0.0366 (p-value < 0.05) แสดงให้เห็นว่าปัจจัยทั้งสองมีอิทธิพลร่วมกัน (Significant Interaction) ต่อปริมาณทองแดงอย่างมีนัยสำคัญ หมายความว่าผลของการปรับเปลี่ยนความถี่พัดลมเป่าลมจะให้ประสิทธิภาพการแยกทองแดงที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับว่าในขณะนั้นเครื่องตั้งระดับการสั่นสะเทือนไว้ที่เท่าใด การทำงานของทั้งสองกลไกมีความเกี่ยวเนื่องและส่งผลกระทบซึ่งกันและกัน



รูปที่ 8 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อน ขนาดสายไฟใช้แล้ว 1.5 ตารางมิลลิเมตร



รูปที่ 9 การกระจายตัวของค่าคลาดเคลื่อน ขนาดสายไฟใช้แล้ว 1.5 ตารางมิลลิเมตร

หากเราเพิ่มความถี่พัดลม (A) ให้สูงขึ้น ปริมาณทองแดงที่แยกได้จะมีแนวโน้มลดลงหากเราเพิ่มการสั่นสะเทือน (B) ปริมาณทองแดงจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

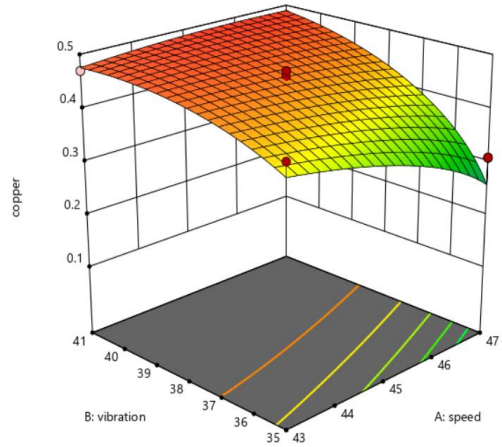
และสังเกตว่าตัวเลข 0.0348 มีค่ามากกว่า 0.0094 แสดงว่าการสั่นสะเทือน (B) ส่งผลต่อปริมาณทองแดงมากกว่าความถี่พัดลมเป่าลม (A) อย่างชัดเจน หากปรับเพิ่มปัจจัยทั้งสองตัวไปในทิศทางที่เหมาะสมร่วมกัน จะช่วยให้ได้ปริมาณทองแดงเพิ่มขึ้นมากกว่าการปรับแก้ทีละปัจจัย ดังสมการที่ (11)

สมการสำหรับสายไฟขนาด 1.5 ตารางมิลลิเมตร คือ

$$Y = 0.0974 - 0.0094A + 0.0348B + 0.0141AB - 0.0042A^2 - 0.0153B^2 \quad (11)$$

รูปที่ 10 กราฟพื้นผิว 3 มิติ สำหรับสายไฟขนาด 1.5 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนระหว่างความถี่พัดลมเป่าลม และการสั่นสะเทือนต่อประสิทธิภาพการแยกทองแดง พื้นผิวสามมิติแสดงรูปแบบที่แตกต่างจากข้อมูลรวมที่วิเคราะห์ก่อนหน้า โดยมีลักษณะของที่ราบสูง (Plateau) ในบริเวณที่การสั่นสะเทือนสูง 39–41 เฮิรตซ์ และความถี่พัดลมเป่าลมปานกลาง 43–45 เฮิรตซ์ ซึ่งให้ประสิทธิภาพการแยกทองแดงสูงสุดประมาณ 0.5–0.55 การมีพื้นที่สีเข้มที่กว้างในบริเวณนี้บ่งชี้ว่าระบบมีความเสถียรในการทำงานที่ประสิทธิภาพสูง

ตารางที่ 7 ความน่าเชื่อถือของแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือสูงมาก โดยมีค่า *p*–value เท่ากับ 0.0100 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าแบบจำลองสมการกำลังสองนี้มีนัยสำคัญทางสถิติและสามารถใช้อธิบายผลการทดลองได้ความไม่สอดคล้องของตัวแบบที่ค่า *p*–value ของ Lack of Fit เท่ากับ 0.3903 ซึ่งมากกว่า 0.05 (Not Significant) บ่งชี้ว่าแบบจำลองนี้มีความพอดีกับข้อมูลจริงได้เป็นอย่างดีโดยไม่เกิดความคลาดเคลื่อนที่ผิดปกติ



รูปที่ 10 3D Surface ของ Response : copper ขนาดสายไฟใช้แล้ว 1.5 ตารางมิลลิเมตร

ความถี่พัดลมเป่าลมมีค่า *p*–value เท่ากับ 0.2415 ซึ่งมากกว่า 0.05 หมายความว่าปัจจัยนี้ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ แต่ความถี่พัดลมเป่าลมมีผลต่อปัจจัยอิทธิพลร่วมของสองปัจจัย AB และ A^2 ที่มีนัยสำคัญ การสั่นสะเทือนส่งผลต่อกระบวนการอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่า *p*–value เท่ากับ 0.0429

ปัจจัยอิทธิพลร่วมของสองปัจจัย AB มีค่า *p*–value เท่ากับ 0.0267 ซึ่งมีนัยสำคัญทางสถิติ หมายความว่าความถี่พัดลมเป่าลมและการสั่นสะเทือนมีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกัน การปรับค่าความถี่พัดลมเป่าลมจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของการสั่นสะเทือนด้วย ปัจจัยทั้งสองไม่ได้ทำงานแยกจากกัน

อิทธิพลกำลังสอง A^2 มีค่า *p*–value เท่ากับ 0.0215 และ B^2 มีค่า *p*–value เท่ากับ 0.0152 แสดงว่าความสัมพันธ์ของปัจจัยทั้งสองที่มีต่อปริมาณทองแดงที่จุดตั้งค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Point) ของทั้งความถี่พัดลมเป่าลมและการสั่นสะเทือนจากการทดลองชุดนี้ได้อย่างแม่นยำ

สมการที่ (12) แสดงให้เห็นว่าหากมองในเชิงเส้นตรงการเพิ่มความถี่พัดลมเป่าลม (A) ให้สูงขึ้นจะทำให้ปริมาณทองแดงที่แยกได้มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย และการเพิ่มการสั่นสะเทือน (B) จะช่วยให้ปริมาณทองแดงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อเทียบตัวเลขกันแล้วการสั่นสะเทือน (0.0140) มีอิทธิพลต่อผลลัพธ์มากกว่าความถี่พัดลมเป่าลม (0.007) ถึง 2 เท่า การเร่งทั้งความถี่พัดลมและการสั่นสะเทือนให้สูงขึ้นพร้อม ๆ กันจะทำให้ปริมาณทองแดงลดลงอย่างรวดเร็ว แต่หากต้องการให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีอาจจะต้องตั้งค่าปัจจัยหนึ่งสูงและอีกปัจจัยหนึ่งต่ำและการตั้งค่าความถี่พัดลมไว้ตรงกลาง ๆ จะให้ผลลัพธ์ที่ลดลงอย่างมาก การจะให้ได้ทองแดงเพิ่มขึ้นต้องปรับความถี่พัดลมเป่าลมไปที่ค่าต่ำสุด

สมการสำหรับสายไฟขนาด 2.5 ตารางมิลลิเมตร คือ

$$Y = 0.486 - 0.007A + 0.0140B - 0.0225AB + 0.018A^2 - 0.00195B^2 \quad (12)$$

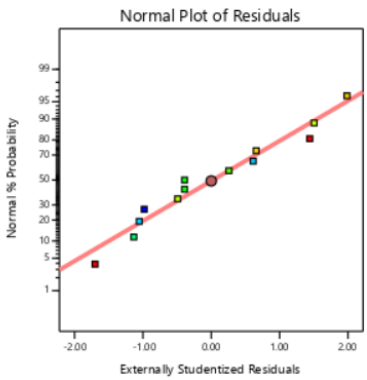
ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ขนาดสายไฟใช้แล้ว 2.5 ตารางมิลลิเมตร

แหล่งที่มาของความแปรปรวน	ผลรวมกำลังสอง (SS)	องศาอิสระ (df)	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (MS)	ค่า F	ค่า P
Model	0.0097	5	0.0019	7.45	0.0100
ความถี่พัดลมเป่าลม (A-speed)	0.0004	1	0.0004	1.64	0.2415
การสั่นสะเทือน (B-vibration)	0.0016	1	0.0016	6.09	0.0429
AB	0.0020	1	0.0020	7.81	0.0267
A^2	0.0023	1	0.0023	8.69	0.0215
B^2	0.0026	1	0.0026	10.20	0.0152
ค่าความคลาดเคลื่อน (Residual)	0.0018	7	0.0003		
ความไม่สอดคล้องของตัวแบบ (Lack of Fit)	0.0009	3	0.0003	1.30	0.3903
ความคลาดเคลื่อนบริสุทธิ์ (Pure error)	0.0009	4	0.0002		
ผลรวมกำลังสองทั้งหมดของข้อมูล	0.0115	12			

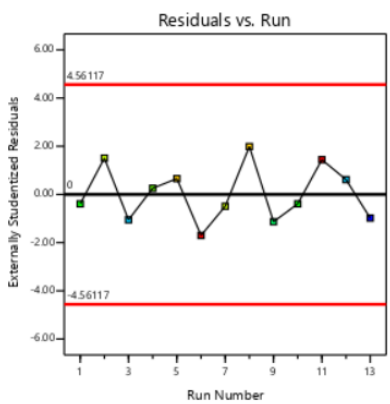
R^2 = 0.9389, Adjusted R^2 = 0.8953, Predicted R^2= 0.6306

รูปที่ 13 กราฟพื้นผิว 3 มิติ สำหรับสายไฟขนาด 2.5 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นถึงลักษณะที่แตกต่างจากสายไฟขนาดเล็กกว่าอย่างชัดเจน พื้นผิวสามมิติแสดงรูปแบบที่มีการไล่ระดับอย่างต่อเนื่องจากบริเวณประสิทธิภาพต่ำ (สีอ่อน) ไปสู่บริเวณประสิทธิภาพสูง (สีเข้ม) โดยมีแนวโน้มหลักตามแกนการสั่นสะเทือนมากกว่าแกนความถี่พัดลมเป่าลมซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่พบว่าการสั่นสะเทือนเป็นปัจจัยหลักที่มีนัยสำคัญ พื้นที่ประสิทธิภาพสูงสุด (0.53) อยู่ในบริเวณที่การสั่นสะเทือนสูง 40–41 เฮิรตซ์ และไม่ขึ้นกับความถี่

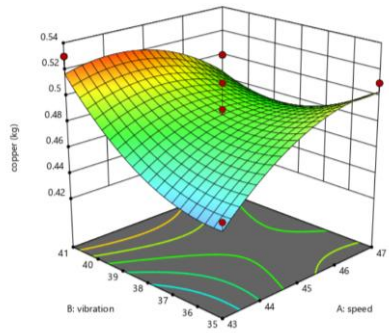
พัดลมเป่าลม รูปที่ 11 แผนภาพการแจกแจงแบบปกติของค่าเศษเหลือ แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีการเรียงตัวแนบสนิทตามแนวเส้นตรง บ่งชี้ว่ามีการแจกแจงแบบปกติ การกระจายตัวของข้อมูลในรูปที่ 12 แสดงการกระจายตัวของข้อมูลแบบสุ่มอย่างไร้ทิศทางและสลับสับเปลี่ยนอยู่ภายใต้ขอบเขตควบคุมวิกฤตยืนยันความเป็นอิสระต่อกัน และพิสูจน์ได้ว่าระบบวิเคราะห์นี้ปราศจากอิทธิพลจากปัจจัยรบกวนแฝงที่แปรผันตามเวลาตลอดช่วงกระบวนการทดลอง



รูปที่ 11 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อน ขนาดสายไฟใช้แล้ว 2.5 ตารางมิลลิเมตร



รูปที่ 12 การกระจายตัวของค่าคลาดเคลื่อน ขนาดสายไฟใช้แล้ว 2.5 ตารางมิลลิเมตร



รูปที่ 13 3D Surface ของ Response : copper ขนาดสายไฟใช้แล้ว 2.5 ตารางมิลลิเมตร

แบบจำลอง (Model) สามารถอธิบายข้อมูลชุดนี้ได้ดีและมีความน่าเชื่อถือ (Adjusted R^2) แต่ในการนำไปพยากรณ์ผลลัพธ์ข้อมูลชุดใหม่ (Predicted R^2) อาจยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง ซึ่งอาจเกิดจากปัจจัยรบกวน (Noise) ที่ควบคุมไม่ได้

ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะทองแดงมีความหนาแน่นที่แตกต่างกันอย่างมากกับฉนวนหุ้มจึงทำให้การสั่นสะเทือนมีผลต่อการคัดแยก ประกอบกับการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศมีผลต่อการจำแนกทองแดงและฉนวนหุ้มสายไฟใช้แล้ว และการสั่นสะเทือนเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมการจัดชั้นของอนุภาคในกระบวนการแยกเชิงกลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Shanmugam และคณะ [9] ที่ยืนยันความสำคัญของปัจจัยการสั่นสะเทือนที่มีผลต่อการคัดแยก ความถี่พัดลมเป่าลม และการสั่นสะเทือนมีผลร่วมซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้นต่อประสิทธิภาพการแยก จากผลการวิเคราะห์ที่บ่งชี้ว่าอิทธิพลของการสั่นสะเทือนเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการคัดแยกสายไฟขนาดใหญ่ (2.5 ตารางมิลลิเมตร) ในขณะที่ความถี่พัดลมเป่าลมมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อสายไฟขนาดเล็ก (0.75 และ 1.5 ตารางมิลลิเมตร) นั้น ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยหลักการ

ทางพลศาสตร์ของอนุภาค (Particle Dynamics) และกลศาสตร์ของไหล (Fluid Mechanics) กล่าวคือ เมื่อชิ้นส่วนวัสดุมีมวลและพื้นที่หน้าตัดที่เพิ่มขึ้น (สายไฟขนาดใหญ่) แรงฉุดทางอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic Drag Force) จากกระแสลมจะมีอิทธิพลต่อตัวอนุภาคลดลงส่งผลให้ระบบจำเป็นต้องอาศัยแรงกลจากการสั่นสะเทือนที่สูงขึ้น เพื่อเอาชนะแรงโน้มถ่วงและแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคในการแยกชั้นวัสดุ (Stratification) คัดแยกทองแดงออกจากฉนวนพลาสติก พฤติกรรมดังกล่าวซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen และคณะ [17] ที่พบว่าภายใต้ผลรวมของแรงสั่นสะเทือนและแรงลม กลุ่มอนุภาคเกิดการเรียงชั้นและแยกตัวได้ดีขึ้นเมื่อใช้ความถี่และการกระจายอากาศด้านข้างสูงขึ้น

การคัดแยกทองแดงด้วยเครื่องจักรบดออกจากฉนวนหุ้มสายไฟใช้แล้วจะเกิดความสูญเสียในกลไกการทำงานของเครื่องจักร ผลการดำเนินการพบว่าทั้ง 2 ปัจจัย คือ ความถี่พัดลมเป่าลม และการสั่นสะเทือนทำงานรวมกันทำให้เกิดผลต่อค่าตอบสนองคือ น้ำหนักของทองแดง ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะหลักการของวิธีการตอบสนองพื้นผิวที่กำหนดว่าปัจจัยหลายตัวและปฏิสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยจะส่งผลต่อค่าตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องกับ Xia และคณะ [14] นำเสนองานวิจัยเรื่อง การออกแบบการทดลองแบบผสมกลางวิธีการตอบสนองพื้นผิว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการเผาผนึกของโลหะผสม Ti–6Al–4V ผลการศึกษาครั้งนี้จึงสามารถยืนยันความน่าเชื่อถือของวิธี CCD ซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาโลหะผสมไทเทเนียมที่มีต้นทุนต่ำและคุณสมบัติเชิงกลสูง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bbumba และคณะ [15] กล่าวถึงว่า RSM ใช้ CCD/BBD (Box-Behnken Design) เพื่อออกแบบหลายตัวแปรและหาจุดเหมาะสมที่สุดของกระบวนการเครื่องจักรบดแยกทองแดงออกจากฉนวนหุ้มสายไฟใช้แล้วได้ดำเนินการอยู่ในจุดที่เหมาะสมตามโมเดลทางสถิติที่ใช้ CCD สร้างข้อมูลและใช้ RSM เพื่อหาค่าที่เหมาะสม (Optimum Point) ส่งผลให้ไม่มีการสูญเสียที่ยังค้างในกลไกของเครื่องจักร Zhao และคณะ [18] แสดงการใช้ RSM เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของกระบวนการรีไซเคิลโลหะ สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าหากผู้ปฏิบัติงานดำเนินการตามเงื่อนไขนี้ก็จะทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการดำเนินการ

3.2 ค่าเหมาะสมของตัวแปร

ตารางที่ 8 แสดงค่าฟังก์ชันความพึงพอใจที่ระดับ 1 ทั้ง 3 ขนาดสายไฟใช้แล้ว ซึ่งจะช่วยแยกทองแดงออกจากฉนวนหุ้มสายไฟใช้แล้วได้ร้อยละ 100 ระดับของปัจจัยทั้งสองที่กำหนดมานั้นจะทำงานรวมกันทำให้เกิดผลต่อค่าตอบสนองคือ น้ำหนักของทองแดงทั้งนี้อาจเป็นเพราะหลักการของ วิธีการตอบสนองพื้นผิวที่กำหนดว่าปัจจัยหลายตัวและปฏิสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยจะส่งผลต่อค่าตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องงานวิจัยของ Barbakadze และคณะ [19] นำเสนองานทดลองเชิงกลไกการแยกทองแดงออกจากฉนวนระบุว่าปัจจัย เช่น ขนาดอนุภาค เทคโนโลยีการแยก และการจัดการวัสดุป้อน มีผลต่ออัตราการแยกทองแดงอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 8 แสดงค่าฟังก์ชันความพึงพอใจ

ขนาดสายไฟใช้แล้ว (ตร.มม.)	ความถี่พัดลมเป่าลม (Hz)	การสั่นสะเทือน (Hz)	ค่าฟังก์ชันความพึงพอใจสูงสุด
0.75	46	37	1
1.5	45	39	1
2.5	45	40	1

3.3 การทดสอบสมมุติฐาน

3.3.1 ผลการทดสอบสมมติฐานการวิเคราะห์ความแปรปรวน กรณีสายไฟใช้แล้วทั้ง 3 ขนาด 0.75 1.5 และ 2.5 ตารางมิลลิเมตร

1. การทดสอบอิทธิพลหลักของความถี่พัดลมเป่าลมพบว่าจากการทดสอบสมมติฐานทั้ง 3 ขนาดสายไฟใช้แล้ว 0.75 1.5 และ 2.5 ตารางมิลลิเมตร แสดงให้อิทธิพลของความถี่พัดลมเป่าลมต่อการแยกทองแดงนั้น ไม่มีความคงที่และขึ้นอยู่กับบริบทของเงื่อนไขการทดลองในบางสภาวะ ความถี่พัดลมเป่าลมเป็นปัจจัยสำคัญที่ชี้วัดความสำเร็จของปริมาณทองแดงโดยตรง นั่นหมายความว่ายอมรับ H1 คือ ขนาดสายไฟใช้แล้ว 0.75 และ 1.5 ตารางมิลลิเมตร ซึ่งพบว่าความถี่พัดลมเป่าลมยังคงส่งผลกระทบและมีอิทธิพลต่อปริมาณทองแดงที่แยกได้อย่างมีนัยสำคัญ แม้ว่าระดับของอิทธิพลเมื่อพิจารณาจากค่า F จะลดลงเมื่อเทียบกับขนาดสายไฟใช้แล้ว 0.75 ตารางมิลลิเมตร แต่ในบางสภาวะอิทธิพลโดยตรงของพัดลมเป่าลมอาจลดทอนลงจนไม่มีนัยสำคัญ ยอมรับ H0 คือ ขนาดสายไฟใช้แล้ว 2.5 ตารางมิลลิเมตร แต่ปัจจัยความถี่พัดลมแฝงอยู่ในรูปแบบของอิทธิพลร่วม หรือความสัมพันธ์แบบเส้นโค้ง (Quadratic effect) ร่วมกับปัจจัยอื่นอย่างการสั่นสะเทือนแทน

2. การทดสอบอิทธิพลหลักของการสั่นสะเทือนพบว่าผลการวิเคราะห์ไปในทิศทางเดียวกันทั้งหมดคือปฏิเสธ H0 และยอมรับ H1 ทั้ง 3 ขนาดสายไฟใช้แล้วคือ 0.75 1.5 และ 2.5 ตารางมิลลิเมตร ซึ่งสามารถยืนยันว่าการสั่นสะเทือนเป็นปัจจัยหลักที่มีความเสถียร (Robustness) และมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อกระบวนการแยกทองแดงไม่ว่าสายไฟจะมีขนาดเท่าไรการสั่นสะเทือนก็ยังคงแสดงอิทธิพลต่อปริมาณผลผลิตอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเสมอ ผู้ปฏิบัติงานกับเครื่องจักรบดแยกทองแดงสายไฟใช้แล้วต้องให้ความสำคัญกับการควบคุมและปรับตั้งค่าการสั่นสะเทือนให้เหมาะสมที่สุด เพื่อให้ได้ปริมาณทองแดงสูงสุดในทุกขนาดสายไฟ

3. การทดสอบอิทธิพลร่วมผลการทดสอบพบว่าจากการทดสอบสมมติฐานทั้ง 3 ขนาดสายไฟใช้แล้วในประเด็นนี้คือ ขนาดสายไฟใช้แล้ว 0.75 ตารางมิลลิเมตร ไม่มีอิทธิพลร่วมกันของปัจจัยความถี่พัดลม และการสั่นสะเทือนไม่มีอิทธิพลร่วมกัน นั่นคือ ยอมรับ H0 แต่ขนาดสายไฟใช้แล้ว 1.5 และ 2.5 ตารางมิลลิเมตร มีปัจจัยทั้งสองเริ่มมีปฏิสัมพันธ์และส่งผลกระทบซึ่งกันและกันอย่างมีนัยสำคัญ นั่นคือ ยอมรับ H1 ซึ่งอาจเกิดจากน้ำหนักและหน้าตัดของสายไฟที่เพิ่มขึ้นทำให้กลศาสตร์ของไหลของแรงลมและกลศาสตร์ของแข็งของแรงสั่นสะเทือนต้องทำงานประสานกันเพื่อแยกวัสดุ ดังนั้นในการปฏิบัติงานจริงกับสายไฟขนาด 1.5 และ 2.5 ตารางมิลลิเมตร ผู้ปฏิบัติงานกับเครื่องจักรบดแยกทองแดงสายไฟใช้แล้วต้องใช้ความระมัดระวังในการตั้งค่าปัจจัยทั้งสองร่วมกันเพื่อให้ได้ผลผลิตสูงสุด

3.4 การเปรียบเทียบการคัดแยกทองแดงกับฉนวนหุ้มระหว่างการตั้งปัจจัยที่ระดับการทดลองเบื้องต้นกับการตั้งปัจจัยที่ระดับการทดลองที่เหมาะสม

เมื่อนำสภาวะที่เหมาะสมที่สุดจากแบบจำลองพื้นผิวตอบสนอง มาทดสอบยืนยันผลและเปรียบเทียบกับกระบวนการก่อนการปรับปรุง

ตารางที่ 9 แสดงผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักรในการคัดแยกทองแดงออกจากฉนวนสายไฟเก่า 3 ขนาด ได้แก่ 0.75 1.5 และ 2.5

ตารางมิลลิเมตร โดยประเมินจากการเปรียบเทียบระหว่างสภาวะการตั้งค่าระดับการทดลองเบื้องต้นกับการตั้งค่าระดับที่เหมาะสม (Optimal Setting) ซึ่งพิจารณาจาก 2 มาตรวัดหลักคือ ค่าเฉลี่ยปริมาณทองแดงที่แยกได้ (ร้อยละ) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation; SD) เพื่อประเมินความเสถียรของกระบวนการ

ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบการคัดแยกทองแดงกับฉนวนหุ้มระหว่างเครื่องจักรโดยการตั้งค่าปัจจัยระดับการทดลองเบื้องต้นกับการตั้งค่าปัจจัยระดับที่เหมาะสม

ขนาดสายไฟเก่า	หัวข้อ	วิธีการคัดแยกทองแดงออกจากฉนวนของสายไฟเก่า		สัดส่วน
		เครื่องจักรโดยการตั้งค่าปัจจัยระดับการทดลองเบื้องต้น	เครื่องจักรโดยการตั้งค่าปัจจัยระดับที่เหมาะสม	
0.75	ค่าเฉลี่ย	48.6%	45.7%	-2.9%
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.0521	0.0009	
1.5	ค่าเฉลี่ย	42.3%	46.6%	4.3%
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.0955	0.0013	
2.5	ค่าเฉลี่ย	48.6%	48.7%	0.1%
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.0297	0.0013	

จากการวิเคราะห์ผลลัพธ์ด้านค่าเฉลี่ยปริมาณทองแดงที่เป็นผลผลิตจากเครื่องจักรบดแยกทองแดงใช้แล้ว ส่งผลให้ประสิทธิภาพการคัดแยกในสายไฟขนาด 1.5 ตารางมิลลิเมตร มีการพัฒนาขึ้นอย่างเห็นได้ชัดที่สุด โดยปริมาณทองแดงเพิ่มขึ้นจาก 42.3% เป็น 46.6% เพิ่มขึ้น 4.3% ในขณะที่สายไฟขนาด 2.5 ตารางมิลลิเมตร มีปริมาณทองแดงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจาก 48.6% เป็น 48.7% อย่างไรก็ตามสำหรับสายไฟขนาด 0.75 ตารางมิลลิเมตร พบว่าค่าเฉลี่ยกลับมีแนวโน้มลดลงจาก 48.6% เหลือ 45.7% ซึ่งอาจเกิดจากข้อจำกัดเชิงกลศาสตร์ของสายไฟขนาดเล็กเมื่อถูกนำมาใช้งานในสภาวะที่ถูกปรับให้เป็นสากลมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาในด้านความเสถียรของกระบวนการ (Process Stability) ผ่านค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจะพบการพัฒนาอย่างโดดเด่นทุกขนาดสายไฟ การใช้ระดับการทดลองเบื้องต้นก่อให้เกิดความแปรปรวนของผลลัพธ์ค่อนข้างสูง ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ระหว่าง 0.0297–0.0955 แต่เมื่อนำการตั้งค่าระดับที่เหมาะสมมาใช้งาน ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานลดลงอย่างมากจนเข้าใกล้ศูนย์เหลือ 0.0009–0.0013 ในทุกขนาดสายไฟใช้แล้ว ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะการออกแบบการทดลองแบบมีโครงสร้าง [20] เพื่อหาค่าเหมาะสมและกระบวนการแยกหลายขั้นปัจจัยการทำงานของเครื่องจักรมีบทบาทสำคัญตามหลักการการลดขนาดทางกลและการแยกด้วยกายภาพ [5]

3.5 การเปรียบเทียบการคัดแยกทองแดงกับฉนวนหุ้มระหว่างเครื่องจักรกับแรงงานคน

การตัดสินใจเลือกใช้เครื่องจักรแทนแรงงานคนจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลเชิงเปรียบเทียบที่ชัดเจนและเป็นระบบ โดยเฉพาะในกรณีของการแยกทองแดงออกจากฉนวนหุ้มสายไฟฟ้าที่ใช้แล้ว ตารางที่ 9 พบว่าเครื่องจักรมีค่าเฉลี่ย ตามสมการที่ (1) สูงกว่าแรงงานคนเฉพาะสายไฟเก่าขนาด 0.75 ในทางตรงกันข้ามเครื่องจักรมี

ค่าเฉลี่ยของปริมาณทองแดงต่ำกว่าแรงงานคนเฉพาะขนาด 1.5 และ 2.5 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเครื่องจักรตามสมการที่ (2) สูงกว่าแรงงานคนในทุกขนาด แสดงถึงเครื่องจักรมีผลผลิตที่ไม่สม่ำเสมอ ดังรายละเอียดตารางที่ 10

ตารางที่ 10 การเปรียบเทียบการคัดแยกทองแดงกับฉนวนหุ้มระหว่างเครื่องจักรกับแรงงานคน

ขนาดสายไฟเก่า	หัวข้อ	วิธีการคัดแยกทองแดงออกจากฉนวนของสายไฟเก่า		สัดส่วน
		เครื่องจักรโดยการตั้งค่าปัจจัยระดับที่เหมาะสม	แรงงานคน	
0.75	ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	45.7% 0.0009	46.1 0.0010	-0.4%
1.5	ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	46.6% 0.0013	47.1 0.0010	-0.5%
2.5	ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	48.7% 0.0013	49.1 0.0007	-0.4%

ตารางที่ 10 แสดงผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพและเสถียรภาพในการคัดแยกทองแดงออกจากฉนวนสายไฟเก่าระหว่างการใช้เครื่องจักรที่ได้รับการตั้งค่าปัจจัยในระดับที่เหมาะสมและการใช้แรงงานคน (Manual Labor) โดยทำการทดสอบกับสายไฟ 3 ขนาด ได้แก่ 0.75 1.5 และ 2.5 ตารางมิลลิเมตร เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการนำเครื่องจักรมาใช้ทดแทนแรงงานมนุษย์ในระดับอุตสาหกรรม

จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยปริมาณทองแดง (Mean Output) พบว่าการคัดแยกด้วยแรงงานคนให้ผลผลิตทองแดงที่สูงกว่าการใช้เครื่องจักรในทุกขนาดสายไฟ โดยแรงงานคนสามารถแยกทองแดงได้ร้อยละ 46.1 47.1 และ 49.1 สำหรับสายไฟขนาด 0.75 1.5 และ 2.5 ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ ในขณะที่เครื่องจักรทำได้ร้อยละ 45.7 46.6 และ 48.7 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมื่อวิเคราะห์ส่วนต่างการเปลี่ยนแปลงจะเห็นได้ว่าช่องว่างของผลผลิตระหว่างสองวิธีนี้มีค่าน้อยมาก โดยเครื่องจักรให้ผลผลิตต่ำกว่าแรงงานคนเพียงร้อยละ 0.4–0.5 เท่านั้น ซึ่งในทางวิศวกรรมถือว่าเครื่องจักรมีสมรรถนะที่ยอมรับได้และใกล้เคียงกับความละเอียดถี่ถ้วนของมนุษย์เป็นอย่างมาก

ในด้านความเสถียรของกระบวนการ (Process Stability) ซึ่งพิจารณาจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน พบว่าทั้งสองวิธีมีความแปรปรวนในระดับที่ต่ำมากและเข้าใกล้ศูนย์ สำหรับสายไฟขนาด 0.75 ตารางมิลลิเมตร เครื่องจักรมีความเสถียรสูงกว่าแรงงานคนเล็กน้อย ค่าส่วนเบียงเบนมาตรฐาน 0.0009 เทียบกับ 0.0010 ส่วนในสายไฟขนาด 1.5 และ 2.5 ตารางมิลลิเมตร แรงงานคนแสดงความสม่ำเสมอได้ดีกว่าเครื่องจักรเล็กน้อย ค่าส่วนเบียงเบนมาตรฐาน 0.0010 และ 0.0007 เทียบกับ 0.0013 ของเครื่องจักรดังนั้นเราจำเป็นที่ต้องพิจารณาความสอดคล้องกับสัดส่วนผลผลิตที่ได้ก็ใกล้เคียงกับการใช้แรงงานคน ซึ่งการใช้เครื่องจักรบดช่วยลดการปลดปล่อย PM2.5 และสารอันตราย สอดคล้องกับงานวิจัยของ Li และคณะ [12] ที่แสดงให้เห็นว่าสายไฟใช้แล้วถูกเผา ซึ่งถือเป็นกรณีรุนแรงที่สุดของการปล่อย PM2.5 ดังนั้นถ้าชุมชนใช้เครื่องจักรบดแยกทองแดงออกจากฉนวนหุ้มสายไฟ

ใช้แล้วจะลด PM2.5 เมื่อเทียบกับการเผาสาเหตุที่ประสิทธิภาพการคัดแยกของแรงงานคนมีการกระจายตัวสูงกว่าเครื่องจักรในแต่ละขนาดสายไฟ เนื่องจากข้อจำกัดทางกายภาพและหลักการทำงานที่ต่างกัน ซึ่งแรงงานคนมีข้อจำกัดด้านความถนัดในการจับยึดและความเหนื่อยล้าสะสมทำให้ความสม่ำเสมอ แม้ว่าการคัดแยกทองแดงออกจากฉนวนหุ้มของสายไฟใช้แล้วมีอัตราที่สูงกว่าเครื่องจักรอย่างชัดเจนแต่ก็แตกต่างกันมาก อย่างไรก็ตามเครื่องจักรบดแยกอาศัยหลักการทางอากาศพลศาสตร์และความหนาแน่นของวัสดุ ซึ่งหากมีการตั้งค่าสภาวะที่เหมาะสมกับเครื่องจักรแบบเฉพาะเจาะจงในแต่ละขนาดสายไฟใช้แล้วจะทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

ในมิติของผลกระทบเชิงปฏิบัติ (Practical Impact) การประยุกต์ใช้สภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Conditions) จากแบบจำลองพื้นผิวตอบสนองในการวิจัยครั้งนี้มิได้ให้เพียงผลลัพธ์เชิงทฤษฎี แต่ยังสามารถนำไปขยายผลเพื่อยกระดับขีดความสามารถของภาคอุตสาหกรรมและวิสาหกิจชุมชนในการรีไซเคิลขยะอิเล็กทรอนิกส์ได้อย่างเป็นรูปธรรม การปรับตั้งพารามิเตอร์แบบจำเพาะเจาะจงตามขนาดของสายไฟช่วยลดความแปรปรวนของกระบวนการ (Process Variation) ได้อย่างมีนัยสำคัญ ดังจะเห็นได้จากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ที่ลดลงจนเข้าใกล้ระดับศูนย์ ซึ่งสะท้อนถึงเสถียรภาพ (Stability) และความน่าเชื่อถือ (Reliability) ของเครื่องจักรที่เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้กระบวนการที่ได้รับการปรับปรุงยังให้สัดส่วนการคืนสภาพทองแดง (Copper Recovery Rate) ที่มีประสิทธิภาพทัดเทียมกับความละเอียดของการใช้แรงงานคน ซึ่งผลลัพธ์ดังกล่าวช่วยลดการพึ่งพาแรงงาน ลดความสูญเปล่าด้านเวลาจากการปรับตั้งเครื่องจักรแบบลองผิดลองถูก (Trial–and– Error) และส่งผลให้ต้นทุนการดำเนินงานต่อหน่วยลดลง อันเป็นการสนับสนุนการเปลี่ยนผ่านสู่กระบวนการรีไซเคิลเชิงอุตสาหกรรมที่มีประสิทธิภาพและยั่งยืน

4. สรุปผลการทดลอง

การทดลองนี้สรุปได้ว่าการกำหนดระดับตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับเครื่องจักรบดแยกทองแดงออกจากฉนวนหุ้มสายไฟฟ้าใช้แล้วพบว่าการประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรหลายตัวที่มีต่อตัวแปรตาม ซึ่งเป็นเครื่องมือทางสถิติที่มีประสิทธิภาพในการจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่พัดลมเป่าลมและการสั่นสะเทือนเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดต่อปริมาณทองแดงที่ถูกบดแยกออกจากฉนวนหุ้มสายไฟใช้แล้ว

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อประเมินอิทธิพลของปัจจัยหลัก ได้แก่ ความถี่พัดลมเป่าลม (A) การสั่นสะเทือน (B) และอิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัย (AB) ที่มีต่อปริมาณทองแดงที่แยกได้จากสายไฟทั้ง 3 ขนาด 0.75 1.5 และ 2.5 ตารางมิลลิเมตร พบว่าปัจจัยด้านความถี่พัดลมเป่าลมเป็นปัจจัยที่ขึ้นอยู่กับขนาดของสายไฟคือความถี่พัดลมเป่าลมมีอิทธิพลโดยตรงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติสำหรับสายไฟใช้แล้วขนาด 0.75 และ 1.5 ตารางมิลลิเมตร เนื่องจากสายไฟขนาดเล็กมีน้ำหนักเบาความถี่พัดลมเป่าลมจึงมีผลอย่างมากต่อการพัดพาและคัดแยกทองแดงออกจากพลาสติก แต่สำหรับสายไฟขนาด 2.5 ตารางมิลลิเมตร ซึ่งเป็นสายไฟที่มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากที่สุดพบว่าความถี่พัดลมเป่าลมไม่มีอิทธิพลต่อปริมาณทองแดงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติความถี่พัดลมเป่าลมเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะกำหนดประสิทธิภาพการคัดแยกได้ชัดเจนเท่ากับการ

สั่นสะเทือนปัจจัยด้านการสั่นสะเทือนเป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อปริมาณทองแดงที่แยกได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติถือเป็นตัวแปรที่มีความเสถียรสูงสุดในการควบคุมกระบวนการคัดแยก การควบคุมการสั่นสะเทือนให้เหมาะสมคือหัวใจสำคัญที่จะทำให้ปริมาณทองแดงหลุดร่อนและแยกตัวออกจากฉนวนได้ดีที่สุด อิทธิพลร่วมระหว่างความถี่พัดลมและการสั่นสะเทือน (Interaction Effect; AB) พบว่ากลไกการทำงานร่วมกันของเครื่องจักรจะซับซ้อนขึ้นเมื่อสายไฟมีขนาดใหญ่ขึ้นนั่นคือ สายไฟใช้แล้วขนาด 0.75 ตารางมิลลิเมตร พบว่าปัจจัยทั้งสองไม่มีอิทธิพลร่วมกัน (Independent) ระหว่างความถี่พัดลมเป่าลมและการสั่นสะเทือนต่างคนต่างทำหน้าที่ของตนเอง การปรับค่าความถี่พัดลมเป่าลมจะไม่ไปกระทบประสิทธิภาพของการสั่นสะเทือน แต่สำหรับขนาดสายไฟใช้แล้ว 1.5 และ 2.5 ตารางมิลลิเมตร ปัจจัยทั้งสองมีอิทธิพลร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Synergistic Effect) ซึ่งนั่นคือเมื่อสายไฟใช้แล้วมีน้ำหนักและหน้าตัดเพิ่มขึ้นการจะแยกทองแดงให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดไม่สามารถปรับปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งทิ้งไว้ได้แต่จะต้องหาสมดุล (Balance) ระหว่างแรงลมที่ใช้เป่าและแรงสั่นสะเทือนที่ใช้ร่อนควบคู่กันไป

ผลการทดลองชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่าผู้ปฏิบัติงานไม่สามารถตั้งค่าความถี่พัดลมเป่าลมและความสั่นสะเทือนแบบสากล (One–size–fits–all) ให้กับเครื่องจักรบดแยกทองแดงออกจากฉนวนหุ้มทุกขนาดสายไฟใช้แล้ว เนื่องจากมวลและพื้นที่หน้าตัดของสายไฟที่แตกต่างกันส่งผลต่อพฤติกรรมการตอบสนองต่อค่าความถี่พัดลมเป่าลมและความสั่นสะเทือนต่างกัน สายไฟใช้แล้วขนาด 0.75 ตารางมิลลิเมตร มีปัจจัยความถี่พัดลมและการสั่นสะเทือนไม่มีอิทธิพลร่วมกัน การตั้งค่าที่เหมาะสมสามารถพิจารณาแยกปัจจัยกันได้

ผู้ปฏิบัติงานสามารถตั้งค่าความถี่พัดลมเป่าลมและความสั่นสะเทือนของเครื่องจักรบดแยกทองแดงออกจากฉนวนหุ้มสำหรับสายไฟใช้แล้วขนาด 1.5 และ 2.5 ตารางมิลลิเมตร ได้อย่างเหมาะสม เนื่องจากปัจจัยทั้งสองมีอิทธิพลร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญ การหาจุดที่เหมาะสมที่สุดจึงต้องเกิดจากการรักษาสมดุล (Balancing) ระหว่างความถี่พัดลมเป่าลมเพื่อพัดพาฉนวนพลาสติก และการสั่นสะเทือน เพื่อร่อนตะแกรงให้ทองแดงตกลงมา หากปรับค่าใดค่าหนึ่งมากเกินไปอาจทำให้ผลผลิตลดลง

การยกระดับเสถียรภาพของกระบวนการ (Process Stability Improvement) ประเด็นที่โดดเด่นที่สุดจากการทดสอบสภาวะที่เหมาะสมคือ การลดลงของความแปรปรวนในระบบ เมื่อเปลี่ยนจากการตั้งค่าระดับการทดลองเบื้องต้นมาเป็นการตั้งค่าที่เหมาะสมพบว่าในกรณีของสายไฟใช้แล้วขนาด 1.5 ตารางมิลลิเมตร การปรับตั้งค่าใหม่สามารถยกระดับผลผลิตเฉลี่ยจาก 42.3% เป็น 46.6% ได้อย่างชัดเจน ในขณะที่สายไฟขนาด 2.5 ตารางมิลลิเมตร ก็ยังคงรักษาระดับผลผลิตไว้ได้ที่ 48.7% สูงกว่าเดิมเล็กน้อยจาก 48.6% สายไฟใช้แล้วขนาด 0.75 ตารางมิลลิเมตร ที่ผลผลิตลดลงเล็กน้อย ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณทองแดงที่แยกได้ลดลงอย่างก้าวกระโดดจนเข้าใกล้ศูนย์ ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ระหว่าง 0.0009–0.0013 ในทุกขนาดสายไฟ สิ่งนี้ยืนยันว่าสภาวะที่เหมาะสมช่วยให้เครื่องจักรทำงานได้อย่างเสถียรและคาดการณ์ผลลัพธ์ได้ (Reliable & Predictable) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดสำหรับการขยายผลไปสู่ระดับอุตสาหกรรม (Scale-up)

ในมิติของผลกระทบเชิงปฏิบัติผลสัมฤทธิ์จากการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีพื้นผิวตอบสนอง เพื่อหาสภาวะที่

เหมาะสมที่สุดในครั้งนี้มิได้จำกัดอยู่เพียงความสำเร็จในระดับห้องปฏิบัติการ แต่ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเกณฑ์มาตรฐาน (Benchmark) ในการตั้งค่าเครื่องจักรสำหรับวิสาหกิจชุมชน และภาคอุตสาหกรรมได้จริง การทำงานภายใต้สภาวะดังกล่าวช่วยลดความสูญเปล่าด้านเวลา และทรัพยากร จากกระบวนการลองผิดลองถูกยกระดับความเสถียรของกระบวนการ โดยลดความแปรปรวนของผลผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งยังให้ประสิทธิภาพการคัดแยกทองแดงที่ทัดเทียมกับความละเอียดของการใช้แรงงานคน ซึ่งส่งผลดีต่อการลดต้นทุนการดำเนินงานและสนับสนุนการจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์อย่างยั่งยืน

องค์ความรู้สำคัญจากงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าการทำงานร่วมกันระหว่างความถี่พัดลมเป่าลมและการสั่นสะเทือนมีลักษณะเป็นความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเส้นตรง (Non–linear) ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมการแยกชั้นของพลาสติกและทองแดง โดยพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะมีความอ่อนไหวต่อขนาดหน้าตัดของสายไฟอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งการใช้สมการถดถอยที่ได้จากงานวิจัยนี้ สามารถใช้เป็นแนวทางตั้งต้นในการเซ็ตอัพเครื่องจักรสำหรับอุตสาหกรรมรีไซเคิลขนาดเล็กได้อย่างแม่นยำ และมีประสิทธิภาพเกือบเทียบเท่าแรงงานคน ปริมาณทองแดงที่ได้จากการบดแยกออกจากฉนวนหุ้มของเครื่องจักรโดยเฉลี่ยมีแนวโน้วเท่ากับแรงงานมนุษย์ (Comparable Performance to Manual Labor) ซึ่งในทางวิศวกรรมถือเป็นระดับผลผลิตที่ยอมรับได้ (Acceptable Yield) เมื่อหักลบกับข้อได้เปรียบด้านเวลา ต้นทุน และความต่อเนื่องในการทำงาน การตั้งค่าที่เหมาะสมนี้จึงเป็นกุญแจสำคัญที่ทำให้เครื่องจักรมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ คุณค่าที่เพิ่มขึ้นจากงานวิจัยนี้คือ การยืนยันทางสถิติว่าเครื่องจักรที่ปรับตั้งค่าด้วยระเบียบวิธี DOE มีประสิทธิภาพสูงกว่าและลดความแปรปรวนได้ดีกว่าการใช้แรงงานคนที่มีความชำนาญ ซึ่งเป็นประโยชน์โดยตรงต่อผู้ประกอบการในการกำหนดมาตรฐานการทำงานต่อไป

ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าประสิทธิภาพการคัดแยกด้วยเครื่องจักรยังคงมีปริมาณน้อยกว่าหรือเทียบเท่ากับแรงงานคน ดังนั้นข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนาในอนาคต คือ การปรับปรุงชุดบดละเอียดหรือการเพิ่มกลไก เพื่อลดอัตราการสูญเสียและเพิ่มประสิทธิภาพให้เหนือกว่าแรงงานคน อย่างไรก็ตามจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าแม้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นจะมีความเหมาะสมกับชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดลองเป็นอย่างดี (พิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแก้ หรือ Adjusted R–squared) แต่แบบจำลองดังกล่าวยังคงมีข้อจำกัดด้านความสามารถในการพยากรณ์ (Predictive Capability) สังเกตได้จากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับการพยากรณ์ (Predicted R–squared) ที่มีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่า Adjusted R–squared ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้อาจเป็นผลมาจากปัจจัยรบกวนที่ไม่ได้ควบคุม (Uncontrolled noise factors) ในระหว่างกระบวนการทดลอง เช่น ความผันแปรของความหนาฉนวนพลาสติก หรือคุณสมบัติทางกายภาพที่คละกันของสายไฟใช้แล้ว ดังนั้นข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต จึงควรมีการพิจารณาเพิ่มตัวแปรควบคุมอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องเข้ามาร่วมในสภาวะการทดลองหรือประยุกต์ใช้เทคนิคการสร้างแบบจำลองทางสถิติขั้นสูง เพื่อยกระดับความแม่นยำและเสถียรภาพของแบบจำลองในการพยากรณ์ผลลัพธ์สำหรับชุดข้อมูลใหม่ให้มีประสิทธิภาพสูงสุดต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา และคณาจารย์หลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีระบบการผลิตอัตโนมัติที่ให้การสนับสนุนข้อมูล โดยการวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากครอบครัวและคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

[1] Pollution Control Department. (2021). *Guidelines for addressing environmental contamination from electronic waste separation (Non-factory cases)*. 1st ed. Bangkok: Active Print Co., Ltd.,. [Online]. Available:https://www.pcd.go.th/publication /14848/ (in Thai).

[2] Center of Excellence for Hazardous Substances and Waste Managemen. (2020). *Guidelines for Proper Community-Level Dismantling of Electrical and Electronic Waste Products*. 1st ed. Bangkok: Center of Excellence for Hazardous Substances and Waste Management, Manual, [Online]. Available: https://shorturl.asia/AU3lt (in Thai).

[3] A. V. Meshcheryakov, T. P. Dialektova, A. N. Zadiranov, M. Malkova, D. V. Russkih, A. Gapeev, and S. V. Degtyarev, "Development and optimization of the parameters of processing (firing) of cable scrap with PVC insulation by steam gasification," *Metallurgist*, vol. 68, pp. 900–912, 2024, doi: 10.1007/s11015-024-01797-0.

[4] H. Kumar, S. Kumagai, T. Kameda, Y. Saito and T. Yoshioka, "One-pot wet ball-milling for waste wire-harness recycling," *Journal of Material Cycles and Waste Management*, vol. 23, no. 2, pp. 461–469, 2021, doi: 10.1007/s10163-020-01163-7.

[5] H. Kumar, S. Kumagai, Y. Saito, and T. Yoshioka. "Latest trends and challenges in PVC and copper recovery technologies for End-of-Life thin cables," *Waste Management*, vol. 174, pp. 400–410, 2024, doi: 10.1016/j.wasman.2023.12.012.

[6] E. Chicardi, A. Lopez-Paneque, V. H. G. García-Orta, R. E. Sepúlveda-Ferrer, and J. M. Gallardo, " Enrichment methods for metal recovery from waste from electrical and electronic equipment : A brief review," *Metals*, vol. 15, no. 2, 2025, Art. no. 140, doi: 10.3390/met15020140.

[7] A. Kaas, T. Mütze, and U. A. Peuker, "Review on zigzag air classifier," *Processes*, vol. 10, no. 4, pp. 1–17, 2022, doi: 10.3390/ pr10040764.

[8] M. Wedrychowicz, J. Kurowiak, T. Skrzekut, and P. Noga, "Recycling of Electrical cables–current challenges and future prospects," *Materials*, vol. 16, no. 20, 2023, Art. no. 6632, doi: 10.3390/ma16206632.

[9] B. K. Shanmugam, H. Vardhan, M. G. Raj, M. Kaza, R. Sah, and H. Hanumanthappa, "Evaluation of the parametric effects of separation of coal in vibration separator using Plackett–Burman design of experiments," *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 76, no. 5, pp. 1243–1252, 2023, doi: 10.1007/s12666-022-02842-9.

[10] C.Çelik, C. Arslan, and F. Arslan, "Recycling of waste electrical cables," *Material Science & Engineering International Journal*, vol. 3, no. 4, pp. 107–111, 2019, doi: 10.15406/mseij.2019.03.00099.

[11] L. Kwarteng, A. M. Devasurendra, Z. Laskaris, J. Arko-Mensah, A. A. A. Nti, S. Takyi, A. A. Acquah, D. Dwomoh, N. Basu, T. Robins, J. N. Fobil, and S. Batterman, "Occupational exposures to particulate matter and PM2.5 associated polycyclic aromatic hydrocarbons at the Agbogbloshie waste recycling site in Ghana," *Environment International*, vol. 158, 2022, Art. no. 106971, doi: 10.1016/j.envint.2021.106971.

[12] Z. Li, Y. Wang, S. Guo, Z. Li, Y. Xing, G. Liu, R. Fang, Y. Hu, H. Zhu, and Y. Yan, "PM2.5 associated PAHs and inorganic elements from combustion of biomass, cable wrapping, domestic waste, and garbage for power generation," *Aerosol and Air Quality Research*, vol. 19, pp. 2502–2517, 2019, doi: 10.4209/aaqr.2019.10.0495.

[13] A. Budiyarto, B. Clarke, and K. Ross, "Overview of waste bank application in Indonesian regencies," *Waste Management & Research*, vol. 43, no. 3, pp. 306–321, 2024, doi: 10.1177/0734242X241242697.

[14] J. Xia, S. Liu, B. Zhang, and Y. Chen, "Central Composite Experiment Design (CCD)-Response Surface Method (RSM) to optimize the sintering process of Ti-6Al-4V alloy," *Metals*, vol. 11, no. 2, 2021, Art. no. 197, doi: 10.3390/met11020197.

[15] S. Bbumba, M. Kigozi, J. Nabatanzi, I. Karume, C. T. Arum, H. K. Nsamba, I. Kiganda, M. Murungi, J. Ssekatawa, and R. A. Nazziwa. "Response surface methodology : A review on optimization of adsorption studies," *Asian Journal of Chemical Sciences*, vol. 14, no. 6, pp. 106–113, 2024, doi: 10.9734/ajocs/2024/v14i6338.

[16] S. J. S. Chelladurai, M. K., A. P. Ray, M. Upadhyaya, V. Narasimharaj, and G. S., "Optimization of process parameters using response surface methodology : A review," *in Materials Today : Proceedings*, vol. 37, pp. 1301–1304, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.06.466.

[17] Z. Chen, X. Xu, M. Pan, H. Deng, Y. Cao, S.

Zhao, E. Zhou, and C. Duan, "Effect of vibration and airflow on separation of 6–1 mm fine coal in compound dry separation bed," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 207, pp. 350–360, 2024, doi: 10.1016/j.cherd.2024.06.002.

[18] J.-Y. Zhao, P.-P. Mu, H. Liu, S. B. Chachina, X.-G. Zhang, S.-G. Zhang, and D. Pan, "Extraction and response surface methodology optimization of tungsten and molybdenum from spent fluidized catalytic cracking catalysts," *Tungsten*, vol. 7, pp. 268–283, 2025, doi: 10.1007/s42864-024-00310-z.

[19] K. Barbakadze, W. Brostow, G. Granowski, N. Hnatchuk, S. Lohse, and A. T. Osmanson, "Separation of metal and plastic wastes from wire and cable manufacturing for effective recycling," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 139, pp. 251–258, 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2018.06.022.

[20] J. Liu, S. Peng, Y. Xu, H. Xia, and L. Zhang, "Optimization of response surface method-leaching of valuable metal elements in copper-cadmium residue by waste electrolyte and selective enrichment of copper," *Separation and Purification Technology*, vol. 376, 2025, Art. no. 133972, doi: 10.1016/j.seppur.2025.133972.

ภาคผนวก

การกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับเครื่องจักรบดแยกทองแดงออกจากฉนวนหุ้มสายไฟฟ้าใช้แล้ว

Optimization of Factors Levels for Copper Separation from Insulated of Used Electrical Wires by the Granulator

ทวี วงศ์ณรัตน์ ณภัทร อินทนนท์ และ ชาญชัย เหลาหา*
สาขาวิชาเทคโนโลยีระบบการผลิตอัตโนมัติ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 7461 1414 อีเมล: chanchai.la@rmuti.ac.th

ภาคผนวก

การอธิบายตัวแปรกำหนดให้

x_i : ค่าข้อมูลตัวที่ i

$\bar{x}$: ค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง

s : ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง

n : จำนวนข้อมูลในตัวอย่าง

x_i : ค่าข้อมูลตัวที่ i

Y : ค่าตอบสนอง (Response)

β_0 : ค่าคงที่ (Intercept)

β_i : ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรหลัก (Linear terms)

β_{ii} : ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรกำลังสอง (Quadratic terms)

β_{ij} : ค่าสัมประสิทธิ์ของปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร i และ j

X_i : ค่าข้อมูลตัวที่ i

X_j : ค่าข้อมูลตัวที่ j

ε : ค่าความคลาดเคลื่อน (Error term)

Y_i : ค่าจริงของการทดลองที่ i

$\hat{Y}_i$: ค่าที่ได้จากสมการพยากรณ์

$\overline{Y}_i$: ค่าเฉลี่ยของค่าตอบสนองทั้งหมด

ss = ผลรวมของกำลังสองขององค์ประกอบ (Sum of square)

df : องศาอิสระขององค์ประกอบนั้น

x_i : ค่าข้อมูลตัวที่ i

$\bar{x}$: ค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง

F_{CDF} : ฟังก์ชันสะสมของการแจกแจง F (Cumulative Distribution Function of F-distribution)

df_1 : องศาอิสระของตัวแปรที่ทดสอบ

df_2 : องศาอิสระของส่วนคลาดเคลื่อน (Error)