

สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการชุบโลหะเพื่อลดของเสียในกระบวนการผลิต

โดยการออกแบบการทดลอง

Optimal Condition of Metal Plating Process for Reducing Defect in Process by Design of Experiment

ฉัตรพล พิมพา (Chatpon Phimpha)^{1*}

(Received: July 3, 2021; Revised: August 24, 2021; Accepted: August 30, 2021)

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตและสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการปรับตั้งปัจจัยในกระบวนการผลิตสำหรับนำไปใช้ในการลดของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการชุบโลหะของผู้ผลิตในกรณีศึกษา ซึ่งพบปัญหาชิ้นงานมีความหนาไม่ได้ตามมาตรฐานจำนวนร้อยละ 4.52 จากผลการศึกษากระบวนการผลิตของผู้ผลิตในกรณีศึกษาพบว่าปัจจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการประกอบด้วย กระแสที่ใช้ในกระบวนการชุบโลหะ กระแสที่ใช้ในกระบวนการอิเล็กโทรดแฟลต เวลาที่ใช้ในกระบวนการอิเล็กโทรดแฟลต แรงดันน้ำในกระบวนการล้างด้วยแรงดันน้ำ ความเร็วของสายพานในกระบวนการล้างด้วยแรงดันน้ำ จากข้อมูลของปัจจัยดังกล่าวผู้วิจัยได้ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความหนาของชิ้นงานในกระบวนการชุบโลหะพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญคือ กระแสที่ใช้ในกระบวนการชุบโลหะ ซึ่งผลการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการผลิตพบว่า การปรับตั้ง ค่ากระแสที่ใช้ในกระบวนการชุบโลหะที่ 5 แอมป์ กระแสที่ใช้ในกระบวนการอิเล็กโทรดแฟลตที่ 60 แอมป์ เวลาที่ใช้ในกระบวนการอิเล็กโทรดแฟลตที่ 30 วินาที แรงดันน้ำในกระบวนการล้างด้วยแรงดันน้ำที่ 2.0 บาร์ และความเร็วของสายพานในกระบวนการล้างด้วยแรงดันน้ำที่ 40 เซนติเมตรต่อวินาที จะทำให้ได้ค่าความหนาของผิวที่ชุบเฉลี่ยที่ 10.66 ไมครอน ซึ่งผลการทดลองใช้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดดังกล่าวมาผลิตงานจริงจำนวน 3,000 ชิ้นงาน ผลคือไม่พบของเสียที่เกิดขึ้นจากความหนาของชิ้นงานที่ไม่ได้ตามมาตรฐานและสามารถลดเวลาลงได้ 1,084 นาทีต่อเดือนเมื่อไม่มีของเสียเกิดขึ้นในกระบวนการ

ABSTRACT

This research aims to find the factors affecting the production process and the optimal conditions in setting the appropriate manufacturing factors. In reducing the plating process defect, it was found from the case study that, 4.52 percent of the thicknesses did not meet the manufacturer's standard. From the manufacturer study result, it was found that there were 5 factors involving in the processes; Current in plating process, Current in Electro deflash process, Time in Electro deflash process, Water pressure in water jet cleaning process and Conveyor speed in water jet cleaning process. This research employed fractional factorial design to analyze the factors affecting the specimen thickness in plating process. The significant factor was PL current. The experimental results for finding the optimal condition in the manufacturing process shown that Current in plating process at 5 Amp., Current in Electro deflash process at 60 Amp., Time in Electro deflash process at 30 Sec., Water pressure in water jet process at 2.0 Bar and Conveyor speed in water jet process at 40 Cm./Minute give the average plating thickness of 10.66 μm . 3,000 specimens were produced according to the optimal condition. There was no defect associated with specimen thickness occurred and reduce time by 1,084 minutes per month when there is no defect in the process.

คำสำคัญ: กระบวนการชุบโลหะ การออกแบบการทดลอง แฟกทอเรียลเชิงเศษส่วน

Keywords: Plating process, Design of experiment, Fractional factorial design

¹Corresponding author: Perpetually09@gmail.com

*อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

บทนำ

จากสถานะในปัจจุบันที่เกิดการระบาดของเชื้อ COVID- 19 ส่งผลให้อุตสาหกรรมในประเทศไทยมีแนวโน้มการผลิตที่ปรับตัวลดลง อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ก็เป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่ได้รับผลกระทบแต่ยังนับว่าเป็นอุตสาหกรรมที่ได้รับผลกระทบน้อยเนื่องจากชิ้นงานส่วนใหญ่จะถูกส่งออกไปยังตลาดในประเทศจีนและฮ่องกงที่เศรษฐกิจเริ่มฟื้นตัว อย่างไรก็ตามก็ยังพบว่าอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทยก็ยังมีการปรับตัวลดลงของการผลิตร้อยละ 5.55 [1] จากปัญหาที่เกิดขึ้นนั้น ผู้ผลิตจำเป็นต้องปรับตัวและใช้กลยุทธ์ต่างๆ ในการผลิตเพื่อให้สามารถอยู่รอดได้ในสถานการณ์ปัจจุบัน [2] การเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตเป็นวิธีหนึ่งที่น่าสนใจใช้ในสถานการณ์เช่นนี้เพื่อให้ผู้ผลิตยังสามารถประกอบกิจการได้อย่างต่อเนื่องและได้รับผลกระทบจากสถานการณ์น้อยที่สุด [3] การลดของเสียจากกระบวนการผลิต เป็นหนึ่งในวิธีที่มีประสิทธิภาพรวมถึงยังสามารถใช้ลดต้นทุนในกระบวนการได้ [4] จากข้อมูลในกรณีศึกษาของบริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ในนิคมอุตสาหกรรมที่ตั้งอยู่ในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ผู้ซึ่งประกอบกิจการชุบเคลือบผิวโลหะโดยใช้วิธีการชุบด้วยไฟฟ้า (Electroplating) สำหรับชุบชิ้นงานประเภท แผงวงจรไฟฟ้า วงจรอิเล็กทรอนิกส์และวงจรคอมพิวเตอร์ เป็นต้น พบว่าผู้ผลิตชิ้นงานในกรณีศึกษาประสบปัญหาในกระบวนการผลิตคือ ความหนาจากการชุบโลหะในกระบวนการชุบโลหะ (Plating process) ไม่เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดจำนวนร้อยละ 4.52 โดยบริษัทผู้ผลิตในกรณีศึกษามียอดการผลิตชิ้นงานรุ่นที่ทำการศึกษาเฉลี่ย 3,000 ชิ้นต่อเดือนหรือคิดเป็นชิ้นงานย่อย 108,000 ชิ้นต่อเดือน (งานหนึ่งชิ้นประกอบด้วยชิ้นงานย่อย 36 ชิ้น) และเวลามาตรฐานในการผลิตเฉลี่ยต่อชิ้นงานย่อยคือ 0.22 นาทีต่อชิ้นงานย่อย ซึ่งปัญหาความหนาจากการชุบโลหะไม่เป็นไปตามมาตรฐานจำนวนร้อยละ 4.52 นั้นจะทำให้ผู้ผลิตต้องสูญเสียเวลา 1,084 นาทีต่อเดือน จากเหตุดังกล่าวจึงได้มีการหาแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการเพื่อลดของเสียที่เกิดขึ้น จากข้อมูลงานวิจัยต่างๆ พบว่ามีการนำวิธีการออกแบบการทดลองมาใช้เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยในกระบวนการและยังสามารถหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตและลดของเสียที่เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ [5]

การออกแบบการทดลองเป็นกระบวนการทดลองทางสถิติที่ประกอบด้วยลักษณะการทดลองหลายประเภท ซึ่งการเลือกใช้การออกแบบการทดลองต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมและข้อจำกัดของการออกแบบการทดลองในแต่ละประเภท เพื่อให้สอดคล้องกับกระบวนการผลิตในกรณีศึกษา [6] ดังเช่น การทดลองทีละปัจจัย (One factor at a time) หรือการทดลองพิจารณาผลกระทบของปัจจัยทีละปัจจัย โดยใช้ระดับของปัจจัยที่ต้องการศึกษาเพิ่มหรือลดลงจากนั้นจึงวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยที่ส่งผลต่อผลตอบของสิ่งที่ต้องการศึกษา ซึ่งถือว่าเป็นวิธีที่ง่ายสะดวกแต่ไม่สามารถวิเคราะห์ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยในกรณีที่ปัจจัยที่ต้องการศึกษาที่จำนวนมากกว่าหนึ่งปัจจัย [7] ซึ่งการออกแบบการทดลองที่เหมาะสมนำไปใช้กับการศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่มีจำนวนมากกว่าหนึ่งปัจจัยรวมถึงยังสามารถหาผลกระทบร่วมของปัจจัยที่เกิดขึ้นได้คือการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Experiment) [8] ซึ่งเป็นวิธีการออกแบบการทดลองที่สามารถคัดกรองผลกระทบของปัจจัย วิเคราะห์ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยและหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ [9] จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลนั้นมีทั้งแบบเต็มจำนวน (Full Factorial Experiment) และแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วน (Fractional Factorial Experiment) ซึ่งการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนนั้น สามารถใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทำงานและยังสามารถลดจำนวนการทดลองได้มากกว่าการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวน [10]

งานวิจัยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นในศึกษาปัจจัยในกระบวนการชุบโลหะเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด [11-12] ในขณะที่งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยในกระบวนการอื่นที่เกี่ยวข้องกับการชุบโลหะซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความหนาในการชุบโลหะมาศึกษาด้วย โดยเลือกนำเสนอผลการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยจำนวน 5 ปัจจัยในกระบวนการชุบโลหะ

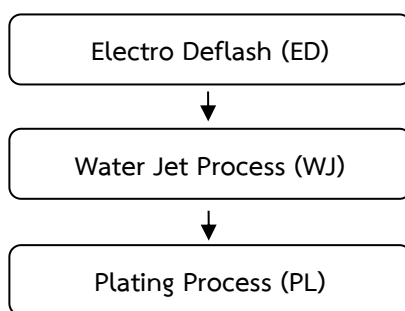
รวมถึงแสดงสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการปรับตั้งระดับของปัจจัยในกระบวนการ โดยวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนเพื่อลดจำนวนของเสียในกระบวนการผลิต

วิธีการวิจัย

วิธีการวิจัยในงานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักคือส่วนที่หนึ่งเป็นการศึกษากระบวนการและส่วนที่สองเป็นขั้นตอนการออกแบบการทดลอง โดยในส่วนของการศึกษากระบวนการนั้นมียัตถุประสงค์เพื่อศึกษาข้อมูลโดยสรุป เพื่อนำข้อมูลมาใช้ในการกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลองรวมถึงระดับที่ใช้ในการทดลอง สำหรับส่วนที่สองจะกล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบการทดลองซึ่งจะแสดงขั้นตอนรวมถึงรายละเอียดต่างๆ ของข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง

1. การศึกษากระบวนการ

กระบวนการชุบโลหะในกรณีศึกษานั้น มีกระบวนการย่อยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการชุบโลหะจำนวน 3 กระบวนการ ซึ่งเป็นกระบวนการที่อาจส่งผลกระทบต่อความหนาของการชุบผิวโลหะประกอบด้วย กระบวนการอิเล็กโทรดีฟเลต Electro Deflash Process (ED) กระบวนการล้างด้วยแรงดันน้ำ Water Jet Process (WJ) และกระบวนการชุบโลหะ Plating Process (PL) ดังแสดงในภาพที่ 1

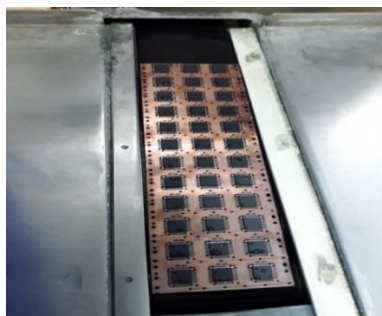


ภาพที่ 1 แสดงกระบวนการผลิตในการชุบผิวโลหะ

กระบวนการกระบวนการอิเล็กโทรดีฟเลต (ED) เป็นการใช้กระแสไฟฟ้าจ่ายลงบนชิ้นงาน เพื่อให้ง่ายต่อการกำจัดสิ่งแปลกปลอมที่ติดมากับชิ้นงาน โดยกระบวนการทำงานจะนำเอาชิ้นงานเรียงเข้าในอุปกรณ์เพื่อผ่านเข้ากระบวนการ ดังภาพที่ 2(ก) ผลจากการศึกษากระบวนการร่วมกับผู้ผลิตทำให้พบว่า กระบวนการ ED มีปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อความหนาของการชุบผิวโลหะคือ กระแสที่ใช้ในกระบวนการ ED (ED Current) และเวลาใช้ในกระบวนการ ED (ED Time) ขั้นตอนต่อมาเป็นการนำชิ้นงานที่ผ่านจากกระบวนการ ED แล้วเข้าสู่กระบวนการล้างด้วยแรงดันน้ำ (WJ) ซึ่งเป็นกระบวนการที่แรงดันน้ำในการล้างชิ้นงาน โดยจะนำชิ้นงานวางเรียงบนสายพานและผ่านเข้าเครื่องจักรที่พ่นน้ำเพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมที่ติดมากับตัวชิ้นงานก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการชุบต่อไป ดังภาพที่ 2(ข) ผลจากการศึกษากระบวนการร่วมกับผู้ผลิตพบว่า ปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อความหนาของการชุบผิวโลหะคือ แรงดันน้ำในกระบวนการ WJ (WJ Pressure) และความเร็วของสายพานในกระบวนการ WJ (WJ Speed) ขั้นตอนสุดท้ายเมื่อล้างชิ้นงานในกระบวนการ WJ เสร็จเรียบร้อยแล้วผู้ผลิตจะนำชิ้นงานเข้ากระบวนการชุบโลหะ (PL) ซึ่งเป็นการชุบผิวโลหะ เพื่อให้ได้ค่าความหนาตรงตามที่ลูกค้ากำหนด ดังภาพที่ 2(ค) สำหรับกระบวนการชุบผิวโลหะจะใช้การปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านไปชิ้นงานเพื่อชุบชิ้นงานได้ความหนาตามมาตรฐานที่กำหนด ผลจากการศึกษากระบวนการร่วมกับผู้ผลิตพบว่าในกระบวนการมีปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อความหนาของการชุบผิวโลหะจำนวนหนึ่งปัจจัยคือ กระแสที่ใช้ในกระบวนการ PL (PL Current)



(ก) กระบวนการ ED



(ข) กระบวนการ WJ



(ค) กระบวนการ PL

ภาพที่ 2 แสดงกระบวนการผลิตในการชุบผิวโลหะ

จากผลการศึกษากระบวนการผู้วิจัยจึงทำการสรุปข้อมูลร่วมกับผู้ผลิต ประกอบด้วยวิศวกรและหัวหน้างานในส่วนที่เกี่ยวข้องเพื่อกำหนดปัจจัยที่จะใช้ในการทดลอง ในส่วนของระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองนั้นจะพิจารณาจากข้อกำหนดของเครื่องจักรที่สามารถปรับตั้งได้และข้อจำกัดต่างๆ ในกระบวนการเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายกับชิ้นงานที่ทดลองหรือเกิดความเสียหายกับชิ้นงานที่ใช้ทดลองให้น้อยที่สุด ซึ่งปัจจัยที่จะนำมาใช้ในการทดลองมีจำนวน 5 ปัจจัยจากกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการชุบโลหะจำนวน 3 กระบวนการย่อย ประกอบด้วย กระแสที่ใช้ในกระบวนการ PL (PL Current) กระแสที่ใช้ในกระบวนการ ED (ED Current) เวลาที่ใช้ในกระบวนการ ED (ED Time) แรงดันน้ำในกระบวนการ WJ (WJ Pressure) และความเร็วของสายพานในกระบวนการ WJ (WJ Conveyor Speed) ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย			หน่วย
	ระดับต่ำ (-)	ระดับกลาง (0)	ระดับสูง (+)	
PL Current	3.0	3.0	5.0	Amp (แอมป์)
ED Current	40	50	60	Amp (แอมป์)
ED time	30	40	50	Sec (วินาที)
WJ Pressure	2.0	2.5	3.0	Bar (บาร์)
WJ Conveyor speed	20	30	40	cm./minute (เซนติเมตรต่อนาที)

การกำหนดผลตอบและค่าเป้าหมายของการทดลองจะใช้ข้อมูลในกระบวนการ เพื่อกำหนดผลตอบของการทดลอง ผู้วิจัยจะอ้างอิงตามข้อกำหนดมาตรฐานของกระบวนการผลิต เพื่อให้สามารถผลิตชิ้นงานได้ความหนาของผิวที่เป็นไปตามมาตรฐานที่ลูกค้ากำหนด โลหะ โดยในกระบวนการผลิตมีมาตรฐานความหนาของผิวโลหะที่ต้องชุบคือ 5-15 μm จากข้อมูลผู้วิจัยสามารถกำหนดผลตอบของงานวิจัยได้คือ ความหนาของการชุบผิว และค่าเป้าหมายในการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือค่าเฉลี่ยของค่าความหนามาตรฐานที่ 10 μm

2. ขั้นตอนการออกแบบการทดลองและการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด

การกำหนดการออกแบบการทดลองในงานวิจัยนี้จะใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วน 2^{5-1} เพื่อคัดกรองผลกระทบของปัจจัยที่ส่งผลต่อความหนาของการชุบโลหะ โดยในการทดลองนั้นจะใช้หลักการพื้นฐานใน

การออกแบบการทดลอง 3 ข้อ [13] ประกอบด้วย การควบคุมกระบวนการซึ่งในการควบคุมกระบวนการนั้น ผู้วิจัยจะควบคุมผู้ปฏิบัติงาน เครื่องจักรและเวลาในการทดลองให้อยู่ในช่วงเวลาเดียวกันทุกการทดลอง การทดลองซ้ำจะทดลองซ้ำ 3 ครั้งร่วมกับการทดลองที่จุดศูนย์กลางจำนวน 9 ครั้ง เพื่อตรวจสอบความเป็นส่วนโค้งของแบบจำลองเชิงเส้น โดยใช้ระดับนัยสำคัญในการทดลองที่ $\alpha = 0.05$ ทำให้มีจำนวนการทดลองทั้งสิ้น 57 การทดลอง สำหรับการสุ่มนั้นจะใช้การสุ่มลำดับการทดลองโดยโปรแกรมทางสถิติ จากนั้นเมื่อทำการทดลองแล้วจึงนำผลการทดลองมาวิเคราะห์เพื่อคำนวณหาผลกระทบของปัจจัยที่ส่งผลต่อความหนาของการชุบผิวโลหะ

การวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัย

การพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความหนาในการชุบผิวโลหะอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจะพิจารณาจากปัจจัยที่มีค่า P-Value น้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ ($P\text{-Value} < \alpha = 0.05$) สำหรับปัจจัยที่ไม่ส่งผลกระทบต่อความหนาของกระบวนการชุบโลหะอย่างมีนัยสำคัญจะพิจารณาจาก จากปัจจัยที่มีค่า P-Value มากกว่าค่าระดับนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ ($P\text{-Value} > \alpha = 0.05$) การตรวจสอบความเป็นส่วนโค้งของแบบจำลองจะพิจารณาจาก P-Value ของ Curvature (Ct Pt) โดยใช้หลักการพิจารณาเช่นเดียวกับผลกระทบของปัจจัย [14]

การวิเคราะห์ส่วนตกค้าง

การพิจารณาส่วนตกค้างของการทดลอง (Residual) จะพิจารณา 3 ส่วนประกอบด้วย ส่วนที่หนึ่งคือการตรวจสอบการกระจายตัวของข้อมูลแบบปกติซึ่งจะทำการตรวจสอบโดยการพิจารณารูป Normal Probability และ Histogram ส่วนที่สองการตรวจสอบส่วนตกค้างเปรียบเทียบกับค่าทำนายซึ่งไม่ควรพบว่ามีลักษณะเป็นแนวโน้ม โดยการพิจารณารูป Versus Fits ส่วนที่สามเป็นการตรวจสอบส่วนตกค้างกับลำดับในการทดลองซึ่งควรมีการกระจายตัวแบบอิสระไม่มีรูปแบบที่แน่นอนเพื่อแสดงว่าส่วนตกค้างมีอิสระต่อกันโดยการพิจารณารูป Versus Orders [15]

การหาสถานะที่เหมาะสม

การหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการจะใช้ผลจากการคัดกรองปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความหนาของการชุบผิวโลหะนำมาคำนวณในฟังก์ชัน Response optimizer ของโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติซึ่งเป็นเครื่องมือที่สามารถนำมาใช้ในการหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ [16] โดยในงานวิจัยนี้จะกำหนดค่าตามค่ามาตรฐานความหนาของผิวชุบโลหะที่ได้จากการศึกษากระบวนการเพื่อให้สามารถผลิตชิ้นงานได้ตามมาตรฐานผู้ผลิต สำหรับค่าเป้าหมายจะกำหนดโดยใช้ค่าเฉลี่ยของค่ามาตรฐานความหนาที่ผู้ผลิตกำหนด การวัดค่าความพึงพอใจรวมของผลตอบ Composite desirability (D) จะพิจารณาจากค่าความพึงพอใจรวมของผลตอบนั้น ซึ่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 ถ้าพึงพอใจรวมของผลตอบมีค่าเท่ากับ 1 หมายถึง ผลตอบนั้นได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์ [17]

การทดลองยืนยันผล

การทดลองยืนยันผลเป็นขั้นตอนที่ใช้สถานะที่เหมาะสมที่สุดไปทำการผลิตแล้วนำค่าเฉลี่ยของความหนาจากชิ้นงานที่ผลิตโดยสถานะที่เหมาะสมที่สุดเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ โดยในขั้นตอนนี้จะดำเนินการผลิตชิ้นงานจำนวน 30 ชิ้น จากนั้นนำมาทดสอบสมมุติฐานแบบ One Sample T-Test ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ การพิจารณาว่าค่าเฉลี่ยความหนาของชิ้นงานที่ผลิตโดยสถานะที่เหมาะสมมีค่าต่างจากค่าที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่นั้น พิจารณาจาก ค่า P-Value ในกรณีที่ค่า P-Value น้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญ ($P\text{-Value} < \alpha = 0.05$) หมายความว่ายอมรับสมมุติฐานรองปฏิเสธสมมุติฐานหลัก กล่าวคือค่าเฉลี่ยความหนาของชิ้นงานที่ผลิตโดยสถานะที่เหมาะสมมีค่าไม่เท่ากับค่าที่ได้จากการคำนวณ ในทางกลับกันถ้าค่า P-Value มากกว่าค่าระดับนัยสำคัญ ($P\text{-Value} > \alpha = 0.05$) หมายความว่ายอมรับสมมุติฐานหลักปฏิเสธสมมุติฐานรอง กล่าวคือค่าเฉลี่ยความหนาของชิ้นงานที่ผลิตโดยสถานะที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับค่าที่ได้จากการคำนวณ [18]

ผลการวิจัย

1. การวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัย

จากการทดลองเพื่อคัดกรองผลกระทบของปัจจัยที่ส่งผลต่อความหนาของการชุบโลหะ โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วน 2^{5-1} ที่ระดับนัยสำคัญในการทดลองที่ $\alpha = 0.05$ ซึ่งมีการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ร่วมกับการทดลองที่จุดศูนย์กลางจำนวน 9 ครั้ง เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ผู้วิจัยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังตารางที่ 2 และภาพที่ 3

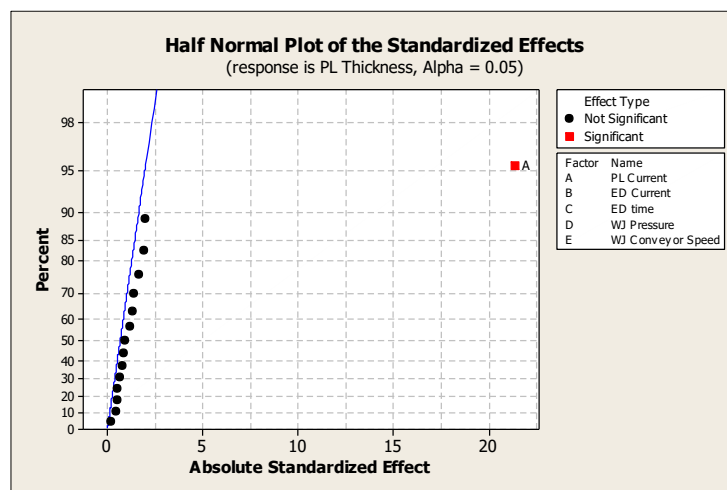
ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยที่ส่งผลต่อความหนาของการชุบโลหะ

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P-Value
Main Effects	5	719.90	719.90	143.98	92.91	0.00
PL Current	1	707.63	707.63	707.63	456.63	0.00 (P-Value<0.05)
ED Current	1	0.06	0.06	0.06	0.04	0.84
ED time	1	5.62	5.62	5.62	3.62	0.06
WJ Pressure	1	6.16	6.16	6.16	3.97	0.05
WJ Conveyor Speed	1	0.43	0.43	0.43	0.28	0.60
2-Way Interactions	10	17.33	17.33	1.73	1.12	0.37
PL Current*ED Current	1	0.73	0.73	0.73	0.47	0.50
PL Current*ED time	1	1.41	1.41	1.41	0.91	0.35
PL Current*WJ Pressure	1	2.89	2.89	2.89	1.87	0.18
PL Current*WJ Conveyor Speed	1	4.29	4.29	4.29	2.76	0.10
ED Current*ED time	1	0.98	0.98	0.98	0.63	0.43
ED Current*WJ Pressure	1	0.31	0.31	0.31	0.20	0.66
ED Current*WJ Conveyor Speed	1	2.30	2.30	2.30	1.48	0.23
ED time*WJ Pressure	1	2.79	2.79	2.79	1.80	0.19
ED time*WJ Conveyor Speed	1	1.21	1.21	1.21	0.78	0.38
WJ Pressure*WJ Conveyor Speed	1	0.41	0.41	0.41	0.26	0.61
Curvature	1	0.04	0.04	0.04	0.02	0.88
Residual Error	40	61.99	61.99	1.55		
Pure Error	40	61.99	61.99	1.55		
Total	56	799.25				

R-Sq = 92.24%

จากตารางที่ 2 ผลการทดลองโดยการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วน 2^{5-1} สามารถวิเคราะห์ได้ว่า ปัจจัยที่มีค่า P-Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ (P-Value < $\alpha = 0.05$) ซึ่งบ่งชี้ว่าปัจจัยนั้นส่งผลต่อความหนาของการชุบผิวโลหะอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติมีจำนวน 1 ปัจจัยคือ ผลกระทบหลักของปัจจัยจากกระแสที่ใช้ในการทำงานของ

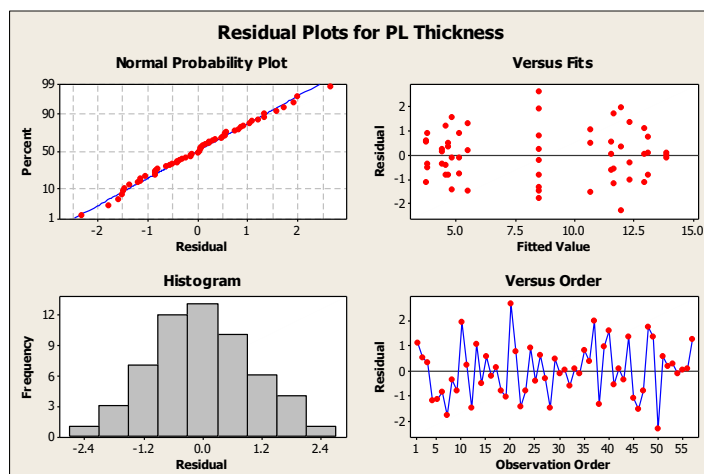
กระบวนการ PL (PL Current) สำหรับผลกระทบหลักของปัจจัยและผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยตัวอื่นๆ นั้น ไม่ส่งผลต่อความหนาของการชุบโลหะเนื่องจากค่า P-Value มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ($P\text{-Value} > \alpha = 0.05$) สำหรับการวิเคราะห์ความเป็นส่วนโค้งของแบบจำลองพบว่า มีลักษณะเป็นเชิงเส้นเนื่องจากค่า P-Value ของ Curvature มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ ($P\text{-Value} > \alpha = 0.05$) เมื่อผู้วิจัยนำข้อมูลจากทดลองไปพล็อตเป็นกราฟเพื่อแสดงผลกระทบของปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการชุบโลหะสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อความหนาของการชุบผิวโลหะ

2. ผลการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง

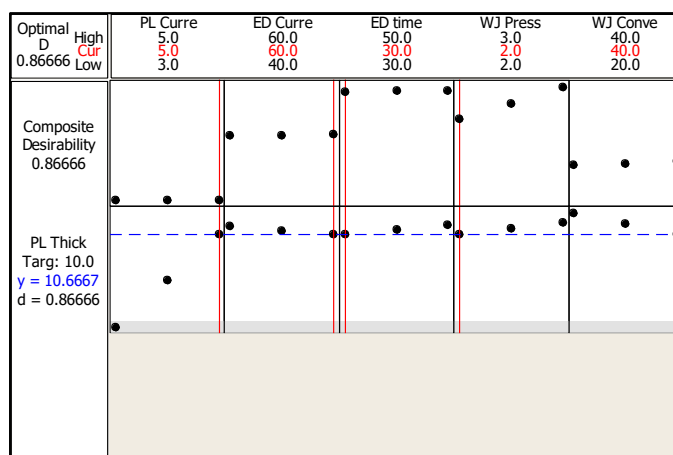
ผลการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของการทดลอง (Residual Analysis) จากสมมติฐานในการทดลองนั้นส่วนตกค้างจะต้องมีการแจกแจงแบบปกติและมีการกระจายตัวเป็นอิสระ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ส่วนตกค้างจากการทดลองพบว่าข้อมูลส่วนตกค้าง ที่แสดงการแจกแจงของข้อมูลใน Normal Probability Plot และ Histogram แสดงการลักษณะการแจกแจงของข้อมูลเป็นการแจกแจงแบบปกติ โดยข้อมูลที่ได้แสดงแนวโน้มเป็นเส้นตรงและไม่มีจุดใดออกนอกเส้นตรงอย่างชัดเจน สำหรับข้อมูลการวิเคราะห์ส่วนตกค้างเทียบกับค่าทำนาย (Versus Fits) พบว่าการกระจายตัวของส่วนตกค้างไม่มีแนวโน้มแสดงว่ากระจายตัวเป็นอิสระและการวิเคราะห์ส่วนตกค้างเทียบกับลำดับการทดลอง (Versus Order) พบว่าการกระจายตัวของส่วนตกค้างไม่มีแนวโน้มแสดงว่ากระจายตัวเป็นอิสระเช่นเดียวกัน ผู้วิจัยจึงสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ส่วนตกค้างว่าถูกต้องตามสมมติฐานและไม่เกิดความผิดปกติของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ผลการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง

3. ผลการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด

การหาค่าระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้ความหนาของการชุบผิวโลหะที่อยู่ในค่ามาตรฐานนั้น จะใช้ฟังก์ชัน Response optimizer ในโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ซึ่งการกำหนดค่าเป้าหมายในฟังก์ชันนั้นกำหนดค่าเป้าหมายแบบ Target โดยกำหนดค่าเป้าหมาย (Target) ที่ 10 μm ค่าน้อยที่สุด (Lower) ที่ 5 μm และค่ามากที่สุด (Upper) ที่ 15 μm ซึ่งอ้างอิงจากค่ามาตรฐานในการชุบผิวโลหะของลูกค้ายเป็นหลักโดยค่ามาตรฐานของลูกค้ายมีความหนาอยู่ระหว่าง 5-15 μm เมื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์จะแสดงผลได้ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 สภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่ใช้ชุบผิวโลหะ

ผลจากการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดจากภาพที่ 5 สรุปได้ว่ากรณีของบริษัทต้องการปรับปรุงกระบวนการชุบโลหะเพื่อให้ได้ค่าตามค่าเป้าหมายที่กำหนดไว้ จะต้องปรับตั้งค่า PL Current ไว้ที่ 5 Amp. ค่า ED Current ไว้ที่ 60 Amp. ค่า ED Time ไว้ที่ 30 sec. ค่า WJ Pressure ไว้ที่ 2.0 Bar. และค่า WJ Conveyor Speed ไว้ที่ 40 cm./minute ซึ่งจะทำให้ได้ค่าความหนาของผิวที่ชุบเฉลี่ยที่ 10.66 μm ซึ่งเป็นค่าระหว่างกลางของมาตรฐาน (5-15 μm) โดยที่มีค่าความพึงพอใจรวมของผลตอบ Composite desirability (D) อยู่ที่ 0.866

4. ผลการทดลองยืนยันผล

จากสภาวะที่เหมาะสมที่สุดนั้นผู้วิจัยได้นำไปใช้ปรับตั้งเพื่อทดสอบยืนยันโดยการทดลองผลิตชิ้นงานจำนวน 30 ชิ้นและใช้การทดสอบสมมติฐานแบบ One Sample T-Test โดยใช้ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ เพื่อยืนยันผล โดยกำหนดสมมติฐานดังนี้

$$H_0 : \mu = 10.66$$

$$H_1 : \mu \neq 10.66$$

โดยที่ μ คือค่าเฉลี่ยของความหนาในการชุบผิวชิ้นงาน

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์การทดลองยืนยันผล

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI
Confirm optimal condition	30	10.6099	0.2187	0.0399	(10.5282 , 10.6915)

ผลจากการทดสอบสมมติฐานแบบ One Sample T-Test พบว่าค่า P-Value ที่ได้จากการทดสอบมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ จึงสรุปได้ว่ายอมรับสมมติฐานหลักและปฏิเสธสมมติฐานรอง กล่าวคือค่าเฉลี่ยของความหนาของชิ้นงานที่ได้จากการชุบผิวโลหะโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดมีค่าเท่ากับ 10.66 ซึ่งเป็นไปตามข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ ดังผลในตารางที่ 3 จากนั้นผู้วิจัยและบริษัทผู้ผลิตในกรณีศึกษาจึงนำเอาสภาวะดังกล่าวไปปรับตั้งค่าของกระบวนการเพื่อผลิตชิ้นงานจริงต่อเนื่อง จำนวน 3,000 ชิ้น จากผลการตรวจสอบความหนาของการชุบโลหะผลคือ ไม่พบของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการชุบโลหะ ส่งผลให้สามารถลดเวลาในการผลิตในส่วนที่เกิดของเสียลงได้ 1,084 นาทีต่อเดือน

สรุปผลการวิจัย

การศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการชุบโลหะ โดยการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนเนื่องจากวิธีการทดลองดังกล่าวเป็นวิธีที่สามารถวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยในกรณีที่มีปัจจัยจำนวนมากกว่าหนึ่งปัจจัย รวมถึงสามารถวิเคราะห์ผลกระทบจากปัจจัยหลักและผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยจึงเหมาะแก่การนำไปใช้ในการศึกษากระบวนการผลิต ทั้งยังสามารถนำผลจากการวิเคราะห์ไปใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังในงานวิจัยนี้ที่ศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่ส่งผลต่อการชุบผิวโลหะพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อความหนาในกระบวนการชุบผิวโลหะคือ กระแสที่ใช้ในกระบวนการชุบโลหะ (PL Current) และเมื่อนำผลจากการทดลองมาหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตสามารถสรุปได้ว่าการปรับตั้งค่ากระแสที่ใช้ในกระบวนการชุบโลหะที่ 5 แอมป์ กระแสที่ใช้ในกระบวนการอิเล็กโทรดแฟลตที่ 60 แอมป์ ค่าเวลาที่ใช้ในกระบวนการอิเล็กโทรดแฟลตที่ 30 วินาที ค่าแรงดันน้ำในกระบวนการล้างด้วยแรงดันน้ำที่ 2.0 บาร์ และค่าความเร็วของสายพานในกระบวนการล้างด้วยแรงดันน้ำที่ 40 เซนติเมตรต่อนาที จะทำให้ได้ค่าความหนาของผิวที่ชุบเฉลี่ยที่ 10.66 ไมครอน โดยการใช้สภาวะดังกล่าวช่วยให้กระบวนการผลิตลดของเสียลงได้ร้อยละ 4.52 กล่าวคือผู้ผลิตไม่พบของเสียเมื่อนำสภาวะที่เหมาะสมที่สุดไปใช้ในการผลิตและสามารถลดเวลาลงได้ 1,084 นาทีต่อเดือนเมื่อไม่มีของเสียเกิดขึ้นในกระบวนการ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิที่มอบทุนในการวิจัยครั้งนี้ และบริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์แห่งหนึ่ง ที่ตั้งอยู่ในนิคมอุตสาหกรรมจังหวัดพระนครศรีอยุธยาที่ให้เข้าไปเก็บข้อมูล

เอกสารอ้างอิง

1. The Office of Industrial Economics. The impact and direction of the industry after the spread of COVID-19. Direction industry after COVID-19. 2020. 1-4 p.
2. Singtanasarn P. Increasing the competitiveness of the canned food export business and dried food export business in Thailand using the resource-based theory. Journal of Economics and Management Strategy. 2019; 6(1): 103-117. Thai.
3. Laopawatchai P, Jarutirasarn P. Increasing efficiency of performance process electronic part, study by ABC company. Journal of Management and Marketing. 2016; 3(1): 142-155. Thai.

4. Mekboon S, Plongmai J. Defect reduction in metal parts production process. *Kasem Bundit Engineering Journal*. 2016; 6(1): 91-106. Thai.
5. Sumali W, Kanchana R. Defect reduction in mobile phone display component assembly process by applying the design of experiments. *Engineering Journal Chiang Mai University*. 2018; 25(1): 156-165. Thai.
6. Knight KL. Study/Experiment/Research Design: Much More than statistics. *Journal of Athletic Training*. 2010; 45(1): 98-100.
7. Antony J. *Design of Experiments for Engineering and Scientists*. 2nd ed. London: Elsevier Ltd; 2014.
8. Visedmanee J, Khadwilard A. Analysis of factors affecting the volume of lemongrass oil from distiller by experimental design. *RMUTP Research Journal*. 2017; 11(1), 34-42. Thai.
9. Capetillo A, Ibarra F. Multiphase injector modelling for automotive SCR systems: A full factorial design of experiment and optimization. *Computers and Mathematics with Applications*. 2017; 74(1): 188-200.
10. Cacia K, Buitrago-Sierra R, Herrera B, Chejne F, Pabon B. Influence of different parameters and their coupled effects on the stability of alumina nano fluids by a fractional factorial design approach. *Advanced Powder Technology*. 2017; 28(10): 2581-2588.
11. Jaturanonda C, Phiphatthananan P, Wuttiornpun T. White Stain reduction in electroplating process of Flexible printed circuit board by using design of experiment. *The Journal of KMUTNB*. 2018; 28(2): 291-298. Thai.
12. Lorza R, Calvo MAM, labara CB. Using the multi-response method with desirability functions to optimize the zinc electroplating of steel screws. *Metal*. 2018; 8(9): 711.
13. Mayer RM, Montgomery DC, Anderson Cook CM. *Response Surface Methodology: Process and product Optimization using Design Experiment*. 3th ed. U.S.A: John Wiley & Sons Inc; 2009.
14. Montgomery DC, Runger GC. *Applied Statistics and Probability for Engineering*. 5th ed. USA: John Wiley & Son; 2011.
15. Sabry I, El-Kassas AM, Mourad AH, Thekkuden DT, Abu Qudeiri J. Friction stir welding of T-Joints: experimental and statistical analysis. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2019; 3(2): 38.
16. Giwa A, Adeyi AA, Gaiwa SO. Empirical modelling and optimization of PAME reactive distillation process using Minitab. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2015; 6(6): 1-12.
17. Awapark D, Mahae N, Pichairat D. Optimization of polysaccharide extraction from gracilaria fisheri using response surface methodology. *KKU Science Journal*. 2013; 41(2): 414-430. Thai.
18. Montgomery DC. *Design and analysis of experiment*. 7th ed. U.S.A: John Wiley & Sons Ltd; 2009.