



การพยากรณ์ค่ากระแสไฟฟ้าในกระบวนการชุบทองแดงด้วยกระแสไฟฟ้าในการผลิตแผ่น PCB โดยใช้การเรียนรู้ของเครื่อง

The prediction of electricity values in the process of electrolytic copper plating in PCB production through machine learning

เบญจพร ประทีปอรุณไทย วิกานดา ผาพันธุ์* และ ชนาพันธุ์ ชนาเนตร

ภาควิชาสถิติประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
กรุงเทพมหานคร 10800

Benjaporn Pratheeparunothai, Wikanda Phaphan* and Chanaphun Chananet

Department of Applied Statistics, Faculty of Applied Science,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok 10800

Received: 15 May 2020/ Revised: 20 June 2020/ Accepted: 23 June 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพยากรณ์ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการชุบทองแดงด้วยกระแสไฟฟ้า (electrolytic copper plating) เพื่อเพิ่มความหนาของทองแดงในรูและบนผิวของแผ่น PCB ตามความต้องการของลูกค้า โดยเก็บรวบรวมข้อมูลการกำหนดกระแสไฟฟ้าจากบริษัทผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์แห่งหนึ่ง ย้อนหลังตั้งแต่เดือนมกราคม 2561 ถึงเดือนกันยายน 2562 แบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด ตามประเภทเครื่องจักรที่ใช้ชุบทองแดง ได้แก่ line gate type และ line VCP และเตรียมข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมเพื่อนำเข้าไปเก็บในฐานข้อมูล ผู้วิจัยหาตัวแบบพยากรณ์ที่ดีที่สุดสำหรับแต่ละประเภทเครื่องจักร โดยใช้โปรแกรมภาษา R ในการวิเคราะห์และพยากรณ์ ผลการวิจัยพบว่าใน line gate type ตัวแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์เรเกรสชันให้ค่า MSE และ MAPE ต่ำสุด เท่ากับ 1.6259 และ 5.1991 รองลงมา คือ ตัวแบบการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณและตัวแบบต้นไม้การตัดสินใจแบบรีเกรสชัน ตามลำดับ ส่วน line VCP ตัวแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์เรเกรสชันให้ค่า MSE และ MAPE ต่ำสุด เท่ากับ 5.5466 และ 7.8465 รองลงมาคือ ตัวแบบการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณและตัวแบบต้นไม้การตัดสินใจแบบรีเกรสชัน ตามลำดับ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ตัวแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์เรเกรสชัน พยากรณ์ค่ากระแสไฟฟ้าในกระบวนการชุบทองแดงด้วยกระแสไฟฟ้าสำหรับเครื่องจักรทั้งสองประเภท ทำให้เพิ่มความแม่นยำและลดระยะเวลาในการทำงานอันเนื่องมาจากความผิดพลาดในการกำหนดกระแสไฟฟ้า

คำสำคัญ: กระบวนการชุบทองแดงด้วยกระแสไฟฟ้า ซัพพอร์ตเวกเตอร์เรเกรสชัน การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ ต้นไม้การตัดสินใจแบบรีเกรสชัน



Abstract

The purpose of this study was to predict electricity values using in the process of electrolytic copper plating to increase the thickness of copper in holes and on the surface of the PCB board according to customer's needs. The configuration data of electricity, collected from an electronics components manufacturing company, were the data that went back from January 2018 to September 2019. The studied data were divided into two data sets (according to types of machines using copper plating): line gate type and line VCP. We prepared the proper data to save it into the database by employing the best prediction model for each type of machine and using the R programming language for analyzing and predicting. The results showed that the lowest MSE and MAPE values which derived from the line gate of the support vector regression model are 1.6259 and 5.1991, respectively, followed by the multiple linear regression and the decision tree regression model. The MSE and MAPE values of the line VCP of the support vector regression model are also minimal values equal to 5.5466 and 7.8465, respectively, followed by the multiple linear regression and the decision tree regression model. Therefore, we use the support vector regression model to predict electricity values in the process of electrolytic copper plating for two types of machines to increase the accuracy in assigning electricity values and reduce working time due to an error in controlling electric current.

Keywords: Electrolytic copper plating, Support vector regression, Multiple linear regression, Decision tree regression

บทนำ

แผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้า (Printed Circuit Board; PCB) เป็นส่วนประกอบสำคัญของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทุกประเภท ลักษณะเป็นแผ่นที่มีลายวงจรทองแดงเป็นทางเดินสัญญาณไฟฟ้า ใช้สำหรับต่อวงจรอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อประกอบเป็นวงจรแทนการต่อวงจรด้วยสายไฟซึ่งมีความซับซ้อนและยุ่งยาก แผ่น PCB ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ในอุตสาหกรรมยานยนต์ อุปกรณ์โทรคมนาคมต่าง ๆ รวมถึงเครื่องมือทางการแพทย์ โทรศัพท์มือถือ และอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ เป็นต้น แผ่น PCB ของบริษัทผู้ผลิตที่ศึกษา มีอยู่ 2 แบบ คือ งานที่มีลายวงจร 2 ชั้น (PCB double side board) และงานที่มีลายวงจรมากกว่า 2 ชั้น ขึ้นไป (PCB multilayer board) ซึ่งในปัจจุบันบริษัทมีความสามารถในการผลิตได้ตั้งแต่ 4 ชั้น ถึง 24 ชั้น แผ่น PCB ทั้ง 2 แบบ จะต้องเชื่อมลายวงจรเพื่อ

เชื่อมสัญญาณระหว่างชั้นตามที่ลูกค้ากำหนด ซึ่งต้องผ่านกระบวนการเจาะรูบนแผ่น PCB ขุดทองแดงบาง ๆ บนผนังรู (electroless copper plating) เมื่อผ่านกระบวนการนี้ ด้านในของรูจะสามารถนำไฟฟ้าได้ แล้วจึงชุบทองแดงด้วยกระแสไฟฟ้า (electrolytic copper plating)

กระบวนการชุบทองแดงด้วยกระแสไฟฟ้าเป็นกระบวนการของการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี เมื่อมีการไหลของกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้ว โดยผ่านสารละลายซึ่งมีส่วนผสมของเกลือของทองแดง ซึ่งกระแสจะไหลผ่านสารละลายในทิศทางของไอออนบวก โดยทองแดงจะถูกทำให้ละลายอยู่ในรูปของไอออน ไอออนที่วุ่นนี้เป็นอะตอมของทองแดงซึ่งสูญเสียอิเล็กตรอนตั้งแต่ 1 ตัว ขึ้นไป และมีประจุทางไฟฟ้าซึ่งมองไม่เห็นด้วยตาเปล่า เมื่อเกิดประจุทางไฟฟ้าซึ่งเป็นอะตอมของโลหะที่ละลายออกมาอยู่ในรูปของ

ประจวบ เนื่องจากการสูญเสียอิเล็กทรอนิกส์ และวัสดุที่ถูกเคลือบถูกทำให้เป็นประจุลบก็จะดึงดูดประจุบวกให้วิ่งเข้าหาและรวมตัวกันกลายเป็นอะตอมของโลหะใหม่อีกครั้งแล้วตกเคลือบบนผิวของชิ้นงาน [1] ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลายจะมีผลต่อความหนาของทองแดงที่ใช้เคลือบชิ้นงาน มีนักวิจัยหลายท่านที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการชุบทองแดงด้วยกระแสไฟฟ้าในการผลิตแผ่น PCB เช่น Garich และคณะ [2] พัฒนาและหาลักษณะของการชุบรูปทรงเรขาคณิตของเซลล์สำหรับแผ่น PCB Chen และคณะ [3] ศึกษาผลของสารเพิ่มความสว่างในอ่างชุบทองแดงที่มีต่อการให้พลังงานความร้อนของการชุบผ่านรูในการผลิตแผ่น PCB Ji และคณะ [4] สร้างแบบจำลองทางเคมีไฟฟ้าสำหรับกระบวนการ microvia filling ในอุตสาหกรรมการผลิตแผ่น PCB เป็นต้น

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องไม่พบงานวิจัยใดที่ศึกษาเกี่ยวกับการพยากรณ์ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลายในการชุบด้วยทองแดง เพื่อเพิ่มความหนาของทองแดงบนลายวงจรและในรูให้ได้ตามที่ลูกค้ากำหนด ด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง (machine learning) โดยปัจจุบันวิศวกรของบริษัทผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่ศึกษา จะกำหนดกระแสไฟฟ้าจากประสบการณ์และเปรียบเทียบจากงานที่มีลักษณะคล้ายกัน อาจทำให้การกำหนดกระแสไฟฟ้าผิดพลาด ทำให้ความหนาของทองแดงไม่ตรงตามที่ลูกค้ากำหนด จึงต้องมีการปรับกระแสไฟฟ้าใหม่จนกว่าจะเหมาะสมหรือเรียกว่าการลองผิดลองถูก (trial and error) ทำให้เกิดความล่าช้า เสียค่าใช้จ่ายในการผลิตงานใหม่ให้กับลูกค้า ข้อมูลของงานที่กำหนดกระแสไฟฟ้าผ่านแล้ว จะถูกจัดเก็บบันทึกเป็นไฟล์ PDF เพื่อเก็บไว้ใช้งานและเปรียบเทียบกับงานอื่น ๆ ต่อไป ดังนั้นต้องกำหนดกระแสไฟฟ้าให้เหมาะสมกับความหนาของทองแดงที่ลูกค้ากำหนด และต้องให้เหมาะสมกับตัวแปรอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับลักษณะของ

ผลิตภัณฑ์ (product) ด้วย เช่น เวลาที่ใช้ในการชุบ พื้นที่บนแผ่น PCB ที่ต้องการชุบ และจำนวนดัมมี่ที่ใช้ในการชุบแต่ละครั้ง เป็นต้น

ด้วยความสำคัญของการกำหนดกระแสไฟฟ้านี้ ผู้วิจัยจึงเกิดแนวคิดที่จะสร้างเครื่องมือที่ช่วยพยากรณ์ค่ากระแสไฟฟ้าโดยใช้หลักสถิติเข้ามาช่วย เพื่อให้การกำหนดกระแสไฟฟ้ามีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ช่วยลดระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการผลิตงานใหม่ พิจารณาตัวแบบในการพยากรณ์ 3 ตัวแบบ คือ 1) ตัวแบบการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (multiple linear regression) 2) ตัวแบบต้นไม้การตัดสินใจแบบรีเกรสชัน (decision tree regression) และ 3) ตัวแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์รีเกรสชัน (support vector regression) ซึ่งเป็นวิธีการในการเรียนรู้แบบมีผู้สอน (supervised learning) ประเภทการถดถอย (regression) ที่ใช้พยากรณ์ค่าที่เป็นเลขจำนวนจริง โดยเปรียบเทียบความแม่นยำในการพยากรณ์ เพื่อหาตัวแบบที่เหมาะสมที่สุด ด้วยเกณฑ์ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Mean Squares Error : MSE) และค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Mean Absolute Percentage Error : MAPE) และเลือกใช้โปรแกรมภาษา R เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์และพัฒนาโปรแกรมเพื่อให้ผู้ใช้สามารถนำตัวแบบในการพยากรณ์ไปใช้งานได้ง่ายขึ้น

กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดกระแสไฟฟ้า

ขั้นตอนการผลิตแผ่น PCB ของบริษัทผู้ผลิตที่ศึกษาทั้งหมด 23 ขั้นตอน แบ่งเป็นรอบ inner, outer front และ outer back ดังนี้



ตารางที่ 1 ขั้นตอนการผลิตแผ่น PCB

รอบ	ขั้นตอน	วิธีการ
Inner	1. M-Cut	ตัดแผ่นลามิเนตให้ได้ตามขนาดที่ออกแบบไว้
	2. Thin core	สร้างเส้นลายวงจรบนแผ่นลามิเนต (รีดฟิล์ม/ถ่ายแสง/ล้างฟิล์มส่วนที่ไม่โดนฉายแสง/กัดทองแดง/ล้างฟิล์ม)
	3. MAOI	ตรวจสอบลายวงจรเปรียบเทียบกับเส้นลายวงจรต้นแบบ
	4. Lamination	จัดวางลำดับชั้นงานและอัดให้ประกบติดกันด้วยความร้อน ประกอบไปด้วย 1. Thin core คือ แผ่นงานที่มีลายวงจรที่ผ่านการเคลือบ oxide แล้ว 2. Prepreg คือ แผ่น fiber เป็นฉนวนประกบที่ thin core ทั้ง 2 ด้าน 3. Copper foil คือ แผ่นทองแดงที่ใช้วางประกบชั้นบนสุดทั้ง 2 ด้านเพื่อเป็นตัวสร้างลายวงจรชั้นนอกต่อไป
	5. X-Ray Drill & Rout	นำงานมาเจาะรู X-ray Drill แล้วมาตัดขอบบอร์ดให้เรียบ
Outer front	6. Drilling	เจาะรูเพื่อเชื่อมนำไฟฟ้าของวงจรชั้นในและวงจรชั้นนอก
	7. Electroless copper plating	ชุบทองแดงบาง ๆ ลงในรูด้วยน้ำยาเคมีไม่ใช้กระแสไฟฟ้า
	8. Imaging	สร้างเส้นลายวงจรชั้นนอก (รีดฟิล์ม/ถ่ายแสง/ล้างฟิล์มส่วนที่ไม่โดนฉายแสง)
	9. Electrolytic copper plating	ชุบเพิ่มความหนาทองแดงให้ได้ตามความต้องการของลูกค้า ชุบแบบใช้กระแสไฟฟ้าและชุบตีบุกลุมทับ
	10. SES	ล้างฟิล์ม/กัดทองแดง/ล้างตีบุก เพื่อให้ได้เส้นลายวงจรชั้นนอก
	11. PAOI	ตรวจสอบลายวงจรเปรียบเทียบกับเส้นลายวงจรต้นแบบ



ตารางที่ 1 (ต่อ)

รอบ	ขั้นตอน	วิธีการ
Outer back	12. Solder mask	พิมพ์หมึก solder mask ทับเพื่อป้องกันการ short
	13. Lead free hot air	ชุบ lead free ให้ติดบริเวณทองแดง
	14. Immersion gold	ชุบเคลือบผิวทองแดงด้วย nickel และ gold โดยใช้ปฏิกิริยาทางเคมี
	15. Thermal printing	ปฏิบัติงานที่เกี่ยวกับการพิมพ์แบบต่าง ๆ ลงในตัวงาน
	16. Fabrication	ตัดแต่งชิ้นงานให้มีรูปร่าง ขนาด ตามที่ลูกค้าต้องการ
	17. Electrical test	ทดสอบคุณภาพการนำไฟฟ้าของเส้นลายวงจรทดสอบ 100%
	18. Final inspection	ตรวจสอบความสมบูรณ์ของงาน 100%
	19. Immersion tin	เคลือบผิวหน้าทองแดงที่เปิดไว้เพื่อใช้งานด้วยดีบุกโดยน้ำยาเคมี
	20. Immersion silver	เคลือบผิวหน้าทองแดงที่เปิดไว้เพื่อใช้งานด้วยเงินโดยน้ำยาเคมี
	21. Surface finish	ตรวจสอบความสมบูรณ์ 100% ที่ผ่านขั้นตอนที่ 19 และ 20
	22. Packing	บรรจุห่องาน
	23. Stock finished goods	นำชิ้นงานที่ห่อแล้วมาจัดใส่กล่องเตรียมส่งมอบให้ลูกค้า

การกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลาย อยู่ในกระบวนการ electrolytic copper plating ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าจะมีผลต่อความหนาของทองแดงที่เคลือบ โดยมีกระบวนการที่เกี่ยวข้องอยู่ในรอบ outer front ประกอบไปด้วยขั้นตอน drilling, electroless plating, image , SES และ PAOI

กระบวนการ drilling

เป็นขั้นตอนการเจาะรูลงบนงาน เพื่อเป็นการเชื่อมนำไฟฟ้าของวงจรชั้นในและวงจรชั้นนอก

กระบวนการ electroless copper plating

เป็นขั้นตอนการชุบทองแดงบาง ๆ ลงไปในรูที่เจาะ ในน้ำยาเคมี ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าในการชุบ เพื่อเป็นสื่อให้เกิดการนำไฟฟ้าได้ มี 3 ขั้นตอน ดังนี้

1) Deburring คือ การนำงานที่ผ่านการเจาะรูที่แผนก drilling แล้วเข้าเครื่อง deburring เพื่อขัดผิวหน้าทองแดง/ปากรูให้เรียบ และขัดทำความสะอาดผิวทองแดง/ขจัดฝุ่นที่อยู่ในรู

2) Electroless copper plating คือ การนำงานชุบทองแดงบาง ๆ บนผิวและในรูด้วยน้ำยาเคมี

3) Post clean คือ การล้างทำความสะอาดผิวบอร์ดหลังชุบ

กระบวนการ imaging

เป็นขั้นตอนการสร้างเส้นลายวงจรชั้นนอก มี 3 ขั้นตอน ดังนี้

1) Dry film คือ การรีดฟิล์มคลุมผิวบอร์ดทั้ง 2 ด้าน



2) Exposure คือ การใช้ working film ที่ทำมาจากฟิล์มต้นแบบของลูกค้าวางประกบทั้ง 2 ด้าน หลังจากนั้นถ่ายแสงให้แสงทำปฏิกิริยากับเนื้อฟิล์ม จนเกิดมีเส้นลายวงจรที่เนื้อฟิล์ม

3) Develop คือ การล้างฟิล์มส่วนที่ไม่โดนถ่ายแสงออกหรือส่วนของเส้นลายวงจร

กระบวนการ electrolytic copper plating

การกำหนดกระแสไฟฟ้าเพื่อนำมาใช้ในกระบวนการ electrolytic copper plating เป็นขั้นตอนการชุบเพิ่มความหนาทองแดงบนเส้นลายวงจร หัววงจร รูวงจร และทุกบริเวณที่เปิดเป็นทองแดงไว้ นอกจากการชุบทองแดงแล้วต้องชุบดีบุก (Tin) เคลือบบนผิวทองแดงที่ผ่านการชุบแล้วด้วย เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้ทองแดงถูกกัดที่ขั้นตอนต่อไป มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) โหลดงานเข้า line การชุบ Copper
- 2) คำนวณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ต่อพื้นที่ที่ต้องการชุบทั้งหมด ทั้ง 2 ด้าน (Copper และ Tin)
- 3) เมื่องานลงชุบ Copper ปรับกระแสไฟฟ้าตามที่คำนวณไว้
- 4) เมื่อลงบ่อ Tin ปรับกระแสไฟฟ้าตามที่คำนวณไว้

กระบวนการ SES

เป็นขั้นตอนการล้างฟิล์ม/กัดทองแดง/ล้างดีบุกออก เพื่อให้ได้งานที่เป็นเส้นลายวงจรที่ผ่านการชุบความหนาทองแดงแล้ว มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) Strip film คือ การล้างฟิล์มส่วนที่คลุมทองแดงที่ไม่ต้องการชุบความหนาทองแดงเพิ่มออก

2) Etching คือ การกัดทองแดงส่วนที่อยู่ใต้ฟิล์มที่ล้างออก ขั้นตอนนี้หากงานไม่ได้ชุบดีบุกคลุมเส้นลายวงจรมา จะทำให้เส้นลายวงจรถูกน้ำยา etching กัดได้

3) Strip tin คือ การล้างดีบุกที่คลุมเส้นลายวงจรออก หลังจากการผ่าน strip tin จะได้งานที่มีเส้นลายวงจรเป็นทองแดงบนพื้นลามิเนต

กระบวนการ AOI outer

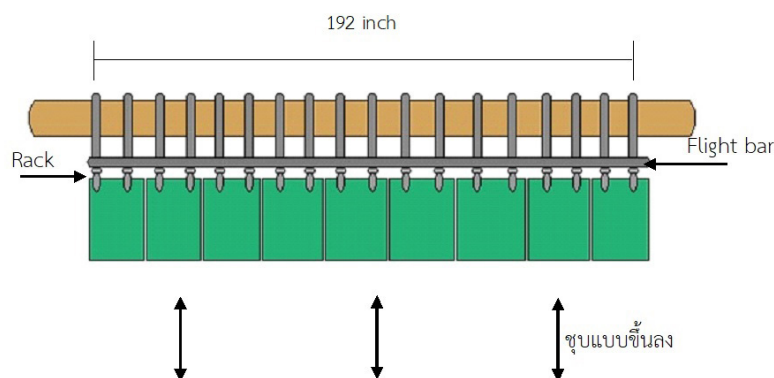
เป็นขั้นตอนการตรวจสอบลายวงจรเปรียบเทียบกับเส้นลายวงจรต้นแบบของลูกค้าของงานนั้น ๆ การทำงานมี 2 ขั้นตอนดังนี้

- 1) Scan คือ ตรวจสอบหาข้อบกพร่อง
- 2) Open คือ เส้นลายวงจรเดียวกันเกิดการขาดออกจากกันทำให้ไฟไม่สามารถผ่านได้

ประเภทเครื่องจักร

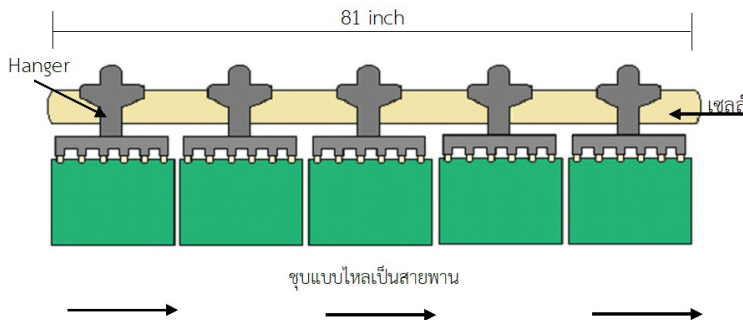
ประเภทของเครื่องจักรในขั้นตอน electrolytic copper plating ของบริษัทผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่ศึกษามี 2 ประเภท แต่ละประเภทมีลักษณะการชุบทองแดงแตกต่างกัน

1) Line gate type ลักษณะการชุบ จะใช้ rack หนีบแผ่นบอร์ดให้เต็ม 1 flight bar การชุบจะชุบแนวตั้ง flight bar เคลื่อนที่ในลักษณะยกกลุ่มลงไปในแต่ละบ่อ line gate type ได้แก่ line 1, 2 และ 3 (ภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 จำลองบ่อชุบทองแดงประเภท line gate type

2) Line VCP ลักษณะการซูป จะใช้ hanger หันขึ้น จะซูปแบบแนวนอน เซลล์เคลื่อนที่ไหลเป็นสายพานในแต่ละ บอร์ดให้เต็มเซลล์ ประกอบไปด้วยเซลล์ A และ B การซูป บ่อ ประกอบไปด้วย line 4 และ 5 (ภาพที่ 2)



ภาพที่ 2 จำลองบ่อซูปทองแดงประเภท line VCP

การเรียนรู้ของเครื่อง (machine learning)

Machine learning หรือการเรียนรู้ของเครื่องเป็น สาขาหนึ่งของปัญญาประดิษฐ์ หมายถึง การสอนให้ระบบ คอมพิวเตอร์ทำการเรียนรู้ได้ด้วยตนเองจากข้อมูลที่ ป้อนเข้าไป โดยไม่ต้องเขียนโปรแกรมสั่งงาน เพื่อสร้างตัว แบบหรือขั้นตอนวิธี และนำไปใช้ในการทำนายค่าตอบหรือ ผลลัพธ์เมื่อคอมพิวเตอร์เรียนรู้แล้ว ความรู้ที่เรียนรู้ได้จะ ถูกเก็บไว้ในฐานความรู้ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น กฎ หรือฟังก์ชัน ดังนั้นเมื่อมีข้อมูลใหม่ ๆ เข้ามาในฐานข้อมูล คอมพิวเตอร์ก็ จะทำการปรับเปลี่ยนกฎหรือฟังก์ชันใหม่ให้เหมาะสมกับฐาน ข้อมูล สามารถแบ่งออกเป็นการเรียนรู้ได้ 2 แบบใหญ่ๆ [5] ได้แก่

1) การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (supervised learning) คือ การเรียนรู้ที่อาศัยผู้สอน โดยที่คอมพิวเตอร์จะสามารถ หาค่าตอบหรือผลลัพธ์ได้ด้วยตัวมันเอง หลังจากที่ได้เรียนรู้ จากข้อมูลและผลลัพธ์ที่ป้อนเข้าไปและสอนมันไปก่อนหน้านี้

เมื่อคอมพิวเตอร์เรียนรู้แล้วในรอบต่อไปเมื่อใส่ข้อมูลลงไป คอมพิวเตอร์จะบอกผลลัพธ์ได้ทันทีตามที่คอมพิวเตอร์ได้ เรียนรู้

2) การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (unsupervised learning) คือ การเรียนรู้ที่ไม่ต้องอาศัยผู้สอน โดยที่ใส่ข้อมูล ไปในคอมพิวเตอร์และไม่ได้กำหนดผลลัพธ์ และให้ คอมพิวเตอร์เรียนรู้ที่จะแยกกลุ่มด้วยตัวเอง

การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (multiple linear regression)

การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (multiple linear regression) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นของกลุ่ม ตัวแปรอิสระตั้งแต่ 2 ตัว ขึ้นไปที่ร่วมกันส่งผลต่อตัวแปรตาม ทำให้สามารถใช้ความสัมพันธ์นี้ประมาณหรือทำนายค่าของ ตัวแปรตามได้ โดยมีลักษณะสมการเป็นดังนี้ [6]

$$\hat{Y} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_kX_k$$

$\hat{Y}$ คือ ค่าประมาณของ Y

b_0 คือ ระยะตัดแกน Y เมื่อทุกค่า X_j เป็นศูนย์

b_j คือ สัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระ ตัวที่ 1 ถึงตัวที่ k เมื่อ $j = 1, 2, \dots, k$



ต้นไม้การตัดสินใจแบบรีเกรสชัน (decision tree regression)

ต้นไม้ตัดสินใจแบบรีเกรสชัน (decision tree regression) คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อพยากรณ์ค่าต่อเนื่อง โดยการนำข้อมูลมาสร้างแบบจำลองการพยากรณ์ในรูปแบบของโครงสร้างต้นไม้ จะทำการแบ่งข้อมูลออกที่ละ 2 ส่วน จากโหนดล่างสุดของโครงสร้างต้นไม้ เรียกว่า root node และทำการพยากรณ์ค่าตัวแปรตามด้วยค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามที่อยู่ในโหนดนั้น โดยทำการแบ่งข้อมูลจาก root node จนถึงโหนดบนสุด เรียกว่า Leaf node จนกว่าจะได้เงื่อนไขที่กำหนด เช่น ความลึกของโครงสร้างต้นไม้ไม่เกิน 10 ชั้น หรือจำนวนข้อมูลในแต่ละ

กลุ่มที่แบ่งออกมามีจำนวนขั้นต่ำ 5 ค่าสังเกต [7] โดยมีหลักในการพยากรณ์ ดังนี้

- 1) เลือกตัวแปรอิสระ X มา 1 ตัวแปร โดยเลือกจากตัวแปร X_j ที่ให้ค่า residual sum of squares (RSS) น้อยที่สุดมาทำการเรียงลำดับข้อมูล
- 2) หาจุดแบ่งข้อมูล (split point) ที่เป็นไปได้ทั้งหมด จากข้อมูล n ค่าสังเกต
- 3) สำหรับการแบ่งข้อมูลแต่ละแบบที่เป็นไปได้ ทำการคำนวณค่า residual sum of squares (RSS) โดยกำหนดให้ค่าพยากรณ์ คือค่าเฉลี่ยของตัวแปรตาม Y ภายในโหนดของตัวเอง

$$RSS = \sum_{w=1}^W \sum_{i \in R_w} (Y_i - \hat{Y}_{R_w})^2$$

R_w คือ แต่ละกลุ่มของค่าสังเกตที่ถูกแบ่งออกมาเป็นทั้งหมด W กลุ่ม

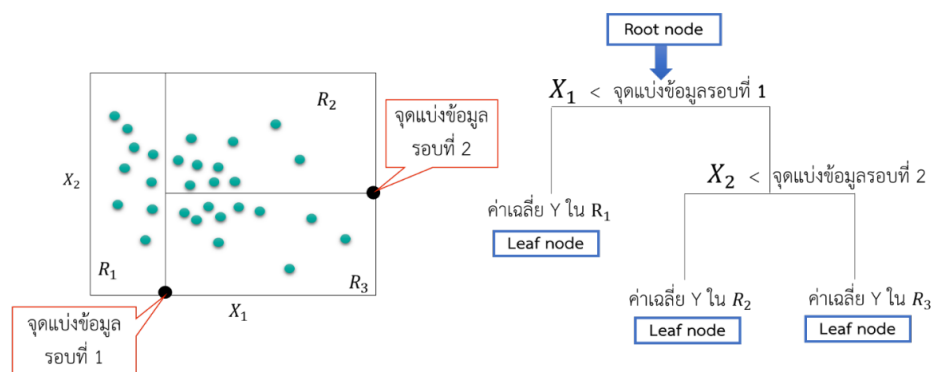
Y_i คือ ตัวแปรตาม

$\hat{Y}_{R_w}$ คือ ค่าประมาณในแต่ละกลุ่ม คำนวณมาจากค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามในกลุ่มนั้น ๆ

4) เลือกจุดแบ่งข้อมูลที่ให้ค่า RSS น้อยที่สุด และสร้างเงื่อนไขจากจุดแบ่งข้อมูลในโครงสร้างต้นไม้

5) หาจุดแบ่งข้อมูลของตัวแปรอิสระ X_1 ที่เหลือจนครบ (ตามข้อ 1. - 4.) เมื่อสิ้นสุดการแบ่งข้อมูลแล้วจะ

พยากรณ์ค่าตัวแปรตาม Y จากค่าเฉลี่ยของตัวแปรตาม Y ภายในโหนดของตัวเอง สำหรับโหนดที่ยังสามารถแบ่งข้อมูลได้ต่อไป จะแบ่งต่อไปจนได้เงื่อนไขที่กำหนด



ภาพที่ 3 หลักการของการพยากรณ์ด้วยเทคนิคต้นไม้ตัดสินใจ กรณีมีตัวแปรอิสระ X 2 ตัวแปร

ซัพพอร์ตเวกเตอร์รีเกรสชัน (Support Vector Regression : SVR)

ซัพพอร์ตเวกเตอร์รีเกรสชัน (Support Vector Regression : SVR) นำเสนอโดย Corinna และ Vladimir

[8] เป็นวิธีที่ดัดแปลงมาจากวิธีซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน โดยใช้สมการไฮเปอร์เพลน (hyperplane) เป็นสมการที่ใช้ในการพยากรณ์ค่าที่เป็นเลขจำนวน โดยมีสมการถดถอยของ SVR [9] เป็นดังนี้

$$\hat{Y} = \langle w, x \rangle + b$$

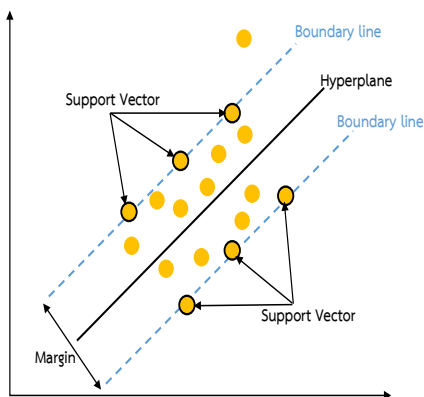
w คือ เวกเตอร์น้ำหนักหรือความชันของเส้นถดถอย

b คือ ค่าความคลาดเคลื่อน (bias)

X คือ เวกเตอร์ข้อมูลนำเข้า (Input data) แทนด้วยสัญลักษณ์ $(x_1, \dots, x_n)^T$ ขนาดเท่ากับ n ; $x_i \in \mathbb{R}^n$; $i = 1, 2, \dots, n$

หลักการในการหา hyperplane ที่เหมาะสมที่สุด สำหรับกลุ่มของข้อมูล ในกรณีของซัพพอร์ตเวกเตอร์ จะหาตำแหน่งของข้อมูลที่เป็นซัพพอร์ตเวกเตอร์ (support vector) ซึ่งจะเป็ข้อมูลในตำแหน่งที่อยู่ห่างจาก hyperplane มากที่สุด และตำแหน่งดังกล่าวจะอยู่บนเส้นแบ่งระยะขอบเขต

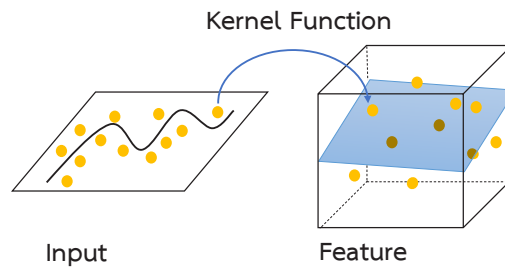
(boundary line) ที่กำหนดขึ้น ในทางทฤษฎีจะพยายามให้ข้อมูลทั้งหมดอยู่ภายใน boundary line และสร้าง hyperplane ที่ใช้แทนกลุ่มข้อมูลขึ้น [10]



ภาพที่ 4 การหา hyperplane ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้แทนกลุ่มข้อมูล

สำหรับกรณีปัญหาแบบไม่เชิงเส้นจะต้องใช้ฟังก์ชันเคอร์เนล ทำการส่งผ่าน (mapping) ข้อมูลนำเข้า (input data) ให้มีมิติเพิ่มมากขึ้นในปริภูมิลักษณะเด่น (feature

space) เพื่อจัดระเบียบข้อมูลเบื้องต้นให้สะดวกต่อการสร้าง hyperplane สำหรับใช้แทนกลุ่มข้อมูลได้อย่างเหมาะสมที่สุด และเพื่อให้สามารถใช้วิธีการแบบเชิงเส้นได้ในปริภูมินี้



ภาพที่ 5 การส่งผ่านข้อมูลอินพุตให้มีมิติเพิ่มมากขึ้นในปริภูมิลักษณะเด่น

ฟังก์ชันเคอร์เนลที่นิยมใช้ แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ฟังก์ชันเคอร์เนลที่นิยมใช้ในการสร้างตัวแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน คือ radial basic function

ตารางที่ 2 ฟังก์ชันเคอร์เนลต่างๆ [11]

ชนิดของฟังก์ชันเคอร์เนล	$k(x, x_i)$
Radial basis function	$\exp(-\gamma \ x - x_i\ ^2), \gamma > 0$
Polynomial	$((x^T \cdot x_i) + \eta)^d$
Sigmoidal	$\tanh(\gamma(x^T \cdot x_i) + \eta), \gamma > 0$
Linear	$x^T \cdot x_i$

ดังนั้นสมการ hyperplane สามารถเขียนใหม่ในรูปแบบการถดถอยไม่เชิงเส้น โดยใช้ฟังก์ชันเคอร์เนลได้สมการดังนี้

$$\hat{Y} = \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) k(x_i, x_j) + b$$

โดยที่ x_i คือ เวกเตอร์ข้อมูลนำเข้า (input data)

x_j คือ ซัพพอร์ตเวกเตอร์ (support vector)

α_i, α_i^* คือ ตัวคูณลากรางจ์ (lagrange multipliers) โดยกำหนดให้ค่าตัวคูณลากรางจ์มีค่ามากกว่าศูนย์ และสามารถหาค่าโดยใช้ขั้นตอนวิธีการโปรแกรมกำลังสอง (quadratic programming)

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การศึกษาโจทย์ที่ต้องการทำ (business understanding)

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาการสร้างตัวแบบเพื่อใช้พยากรณ์ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลายในกระบวนการชุบทองแดงด้วยกระแสไฟฟ้าเพื่อ 1) เพิ่มความ

แม่นยำในการให้กระแสไฟฟ้า 2) เพื่อกำหนดกระแสไฟฟ้าอย่างเป็นระบบ 3) เพื่อลดระยะเวลาในการทำงานของวิศวกรในการกำหนดค่ากระแสไฟฟ้า 4) เพื่อลดระยะเวลาในการผลิตในกระบวนการชุบด้วยกระแสไฟฟ้า



2. การศึกษาข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย (data understanding)

ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็น ข้อมูลทุติยภูมิ (secondary data) ซึ่งถูกจัดเก็บในรูปแบบไฟล์ PDF ผู้วิจัยได้แปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปตารางข้อมูล โดยจัดเก็บไว้ในโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อให้สะดวกต่อการนำไปวิเคราะห์ทางสถิติ โดยแบ่งเป็น 2 ชุดข้อมูล ตามประเภทเครื่องจักรที่ใช้ชุบทองแดงดังนี้

- 1) ข้อมูล line gate type จำนวน 1,982 ข้อมูล
- 2) ข้อมูล line VCP จำนวน 364 ข้อมูล

3. การเตรียมข้อมูล (data preparation)

ผู้วิจัยได้จัดการกับข้อมูลดิบ (raw data) ที่ได้รับมาก่อนโหลดเข้าฐานข้อมูลโดยมีขั้นตอนดังนี้

3.1 การคัดเลือกข้อมูล (data selection)

คัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการ electrolytic copper plating โดยพิจารณาจากทฤษฎี (กฎฟาราเดย์) และสอบถามข้อมูลจากวิศวกรที่ทำหน้าที่ดูแลกระบวนการ electrolytic copper plating จำนวน 16 ปัจจัย ได้แก่

- 1) เวลาที่ใช้ชุบ (ชื่อตัวแปร time)
- 2) เครื่องจักร (ชื่อตัวแปร l1)
- 3) ความกว้าง (ชื่อตัวแปร width)
- 4) ความยาว (ชื่อตัวแปร length)
- 5) ความหนาทองแดงในรูหลังชุบ (ชื่อตัวแปร hole.con.min)
- 6) ความหนาทองแดงของรูสำหรับเสียบ
- 7) ความหนาทองแดงในรูเฉลี่ยต่ำสุด
- 8) ความหนาทองแดงในรูต่ำสุด
- 9) พื้นที่ที่ต้องการชุบ (ชื่อตัวแปร area)

10) การใส่ dummy (เป็นค่า dummy ที่ใส่เข้าไปในกระบวนการชุบทองแดง โดยมีค่าเป็น 0 = ไม่ใส่ dummy, 1 = ใส่หนึ่งข้าง, 2 = ใส่สองข้าง กำหนดชื่อตัวแปร d1 และ d2)

- 11) การเตรียมผิว superbond
- 12) การทำ surfacefinish
- 13) จำนวนแผ่นบอร์ด (ชื่อตัวแปร pnls)
- 14) ขนาดเส้นลายวงจร (ชื่อตัวแปร linewidth)
- 15) ระยะห่างเส้นลายวงจร (ชื่อตัวแปร spacing)
- 16) ความหนาของบอร์ด (ชื่อตัวแปร board.thk)

3.2 การกลั่นกรองข้อมูล (data preprocessing)

กลั่นกรองข้อมูลโดยลบข้อมูลซ้ำซ้อน แก้ไขข้อมูลที่ผิดพลาด เช่น ข้อมูลที่ผิดรูปแบบ ข้อมูล outlier ที่แปลกแยกจากค่าอื่นค่อนข้างมาก และแทนค่าข้อมูลสูญหาย (missing) โดยแทนที่ด้วยค่าที่เหมาะสมที่สุด ดังนี้

1) สเปคความหนาทองแดงในรู (spec copper thickness in hole) แบ่งเป็นค่าความหนาทองแดงในรูต่ำสุด (min) ค่าความหนาทองแดงในรูเฉลี่ยต่ำสุด (min average) ค่าความหนาทองแดงในรูเสียขาอุปกรณ์ (pressfit) และค่าความหนาทองแดงในรูหลังการชุบ (control after plating) ซึ่งในแต่ละงานกำหนดค่าสเปคความหนาทองแดงในรูแตกต่างกัน บางงานอาจให้ครบทุกค่า หรือบางงานอาจกำหนดเพียงค่าต่ำสุด (min) มาค่าเดียว ในกรณีดังกล่าวจะทำให้เกิด 3 ค่าที่เหลือ จะเกิดข้อมูลสูญหายขึ้น จึงต้องมีการกำหนดค่าใหม่เพื่อเป็นค่าตัวแทนสเปคความหนาทองแดงในรู โดยมีเงื่อนไข ดังตารางที่ 3 และใช้คำสั่ง if-else ในโปรแกรม R เพื่อจัดการข้อมูลสูญหาย ดังภาพที่ 6 ดังนั้นตัวแปรที่ 5, 6, 7 และ 8 จะเหลือเพียง 1 ตัวแปร คือ ตัวแปร hole.con.min



ตารางที่ 3 เกณฑ์การกำหนดค่าสเปคความหนาทองแดงในรู

ลำดับการเลือก spec ความหนาทองแดงในรู	มี Superbond	ไม่มี Superbond มี Surfacefinish	ไม่มี Superbond มี Surfacefinish
1. ความหนาทองแดงในรูหลังการชุบ (control after plating)	-	-	-
2. ความหนาทองแดงสำหรับรูที่ใช้เสียบขา อุปกรณ์ (Pressfit)	+5 จากค่าspec*	ชุบ Tin +3 จากค่า spec* ชุบอย่างอื่น เช่น gold +2 จากค่า spec*	-
3. ความหนาทองแดงในรูเฉลี่ยต่ำสุด (Min average)			
4. ความหนาทองแดงในรูต่ำสุด (Min)			

หมายเหตุ - ค่า spec หมายถึงค่าหมายเลข 1-4 ในตารางที่ 3 เลือกใช้เพียงหนึ่งค่า ถ้างานกำหนดค่าความหนาทองแดงในรูหลังชุบมา จะใช้ค่านี้คือค่า spec

- ถ้างานไม่ได้กำหนดค่าความหนาทองแดงในรูหลังชุบมา ให้ใช้ค่าความหนาทองแดงสำหรับรูที่ใช้เสียบอุปกรณ์
- ถ้างานไม่ได้กำหนดทั้งค่าความหนาทองแดงในรูหลังชุบ และค่าความหนาทองแดงสำหรับรูที่ใช้เสียบอุปกรณ์ จะใช้ค่าความหนาทองแดงในรูเฉลี่ยต่ำสุด
- ถ้างานไม่ได้กำหนดค่าความหนาทองแดงในรูหลังชุบ ความหนาทองแดงสำหรับรูที่ใช้เสียบอุปกรณ์ และค่าความหนาทองแดงในรูเฉลี่ยต่ำสุด จะใช้ค่าความหนาทองแดงในรูต่ำสุด

```
plus<-ifelse(superbond==5,plus<-5,plus<-surface.finish)
hole.minA<-ifelse(is.na(hole.minA),hole.min,hole.minA)
pressfit<-ifelse(is.na(pressfit),hole.minA,pressfit)
hole.con.min<-ifelse(is.na(hole.con.min),pressfit+plus,hole.con.mi
```

ภาพที่ 6 คำสั่งการกำหนดค่าสเปคความหนาในรู (spec) โดยโปรแกรม R

2) ขนาดเส้นลาย (linewidth) และระยะห่างเส้นลายวงจร (spacing) เกิดข้อผิดพลาดขึ้น เนื่องจากงานรอบนั้น ให้เท่ากับสองเท่าของความกว้าง ใช้คำสั่ง if-else ในโปรแกรม R เพื่อจัดการข้อผิดพลาด ดังภาพที่ 7

ไม่มีลายวงจร หรือเกิดจากงานรอบนั้นมีขนาดเส้นลายวงจร และระยะห่างเส้นลายวงจรมีความกว้างมาก ๆ จึงทำให้ไม่

```
linewidth<-ifelse(is.na(linewidth),width*2,linewidth)
spacing<-ifelse(is.na(spacing),width*2,spacing)
```

ภาพที่ 7 คำสั่งการกำหนดค่าขนาดเส้นลายวงจร และระยะห่างเส้นลายวงจรที่สูญหายโดยใช้โปรแกรม R

3.3 การแปลงรูปแบบของข้อมูล (data transformation)

การเตรียมข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบที่พร้อมนำไปใช้ในการวิเคราะห์ ดังนี้

3.3.1 ข้อมูลเชิงคุณภาพไม่สามารถวัดค่าออกมา

ได้ว่าค่านั้นมากหรือน้อยจะต้องทำการแปลงเป็นตัวแปรหุ่นก่อนนำไปวิเคราะห์

3.3.2 คำนวณตัวแปรที่ส่งผลต่อการเพิ่มค่ากระแส

ไฟฟ้า นอกเหนือจากตัวแปรที่ทำการคัดเลือกมา ได้แก่



3.3.2.1. ค่ากระแสไฟฟ้าจาก Faraday's Law โดยเปลี่ยนหน่วยให้เหมาะสมกับข้อมูลนำเข้า (ชื่อตัวแปร formula) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Formula} = \frac{\text{Copper Thickness In Hole} \times 42.23}{\text{Time} \times 0.85}$$

โดยที่ ค่า Copper Thickness In Hole คือ ความหนาทองแดงในรูหลังชุบ (hole.con.min) และ Time คือ เวลาที่ใช้ชุบ (time)

3.3.2.2. อัตราส่วนของพื้นที่ที่ต้องการเพิ่มความหนาทองแดงต่อพื้นที่บอร์ดทั้งหมด (ชื่อตัวแปร ratio) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Ratio} = \frac{\text{Copper Plating Area}}{\text{Total PNLS Area}}$$

โดยที่ ค่า Copper Plating Area คือ พื้นที่ที่ต้องการชุบ (area) และ ค่า Total PNLS Area คำนวณจาก

$$\text{Total PNLS Area} = \frac{\text{Width} \times \text{Length}}{144}$$

โดยที่ Width คือความกว้าง (ตัวแปร width) และ Length คือความยาว (ตัวแปร length)

3.3.3 การจัดรูปแบบข้อมูล การกำหนดกระแสไฟฟ้าจะกำหนดกระแสไฟฟ้าแยกเป็นหน้า A และ B (แต่ละฝั่งของแผ่นบอร์ด) เนื่องจากแต่ละหน้ามีลายวงจรแตกต่างกัน ทำให้ตัวแปร พื้นที่ที่ต้องการเพิ่มความหนาทองแดง ขนาดเส้นลายวงจร และระยะห่างเส้นลายวงจร ของแต่ละหน้าแตกต่างกัน ส่วนตัวแปรที่เหลือมีค่าเท่ากันทั้งหน้า A และ B จึงทำการเก็บข้อมูลใหม่โดยเก็บแยกระหว่างหน้า A และ B ทำให้ใน 1 Part Number เก็บข้อมูลได้เป็น 2 แถว

3.4 การแบ่งข้อมูล

เพื่อป้องกันการเกิด overfitting ผู้วิจัยจึงแบ่งข้อมูลโดยวิธี split test ซึ่งเป็นการแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน คือ ข้อมูลฝึกสอน (training dataset) จำนวน 80% ของข้อมูลทั้งหมด ใช้ในการสร้างโมเดล และข้อมูลทดสอบ (test dataset) จำนวน 20% ของข้อมูลทั้งหมด ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของโมเดล โดยใช้คำสั่ง sample.split ของแพ็คเกจ 'caTools' ในโปรแกรมภาษา R ช่วยในการประมวลผล

4. การสร้างแบบจำลอง (modeling)

ผู้วิจัยได้ศึกษาตัวแบบเพื่อพยากรณ์ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการชุบทองแดงด้วยกระแสไฟฟ้า ด้วยวิธีการพยากรณ์ 3 วิธีได้แก่ วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ วิธีต้นไม้การตัดสินใจแบบรีเกรสชัน และวิธีซัพพอร์ตเวกเตอร์รีเกรสชัน

5. การประเมินผล (evaluation)

เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวแบบทั้ง 3 ตัวแบบ โดยพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error : MSE) และค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อน (Mean Absolute Percent Error : MAPE) เพื่อหาตัวแบบพยากรณ์ที่แม่นยำที่สุด

6. นำตัวแบบมาใช้งาน (deployment)

จัดทำ API ด้วยโปรแกรมภาษา R พร้อมคู่มือการใช้งาน



ผลการวิจัย

1. การสร้างแบบจำลอง

เมื่อการเตรียมข้อมูลเสร็จสมบูรณ์ขั้นตอนถัดมาคือสร้างตัวแบบเพื่อพยากรณ์ค่ากระแสไฟฟ้า ซึ่งจะทำการสร้างตัวแบบเพื่อพยากรณ์ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการชุบทองแดงด้วยกระแสไฟฟ้าด้วยวิธีการพยากรณ์ 3 วิธีได้แก่วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (multiple linear regression) วิธีต้นไม้การตัดสินใจแบบรีเกรสชัน (decision tree

regression) และวิธีซัพพอร์ตเวกเตอร์รีเกรสชัน (support vector regression)

1.1 ตัวแบบ multiple linear regression

สร้างตัวแบบ multiple linear regression โดยใช้ฟังก์ชัน `lm()` ในโปรแกรมภาษา R กำหนดตัวแปรตามคือกระแสไฟฟ้า (current density) และตัวแปรที่เหลือทั้งหมดเป็นตัวแปรอิสระ ได้สมการถดถอยเป็นดังนี้

1.1.1 Line gate type

$$\begin{aligned} \text{current} = & 17.742 + 0.642 \text{ l1} - 0.066 \text{ time} - 0.090 \text{ width} - 0.132 \text{ length} + 1.323 \text{ area} \\ & + 0.361 \text{ hole.con.min} - 0.095 \text{ d1} - 0.254 \text{ d2} + 0.037 \text{ pnls} - 6.626 \text{ ratio} + 0.173 \text{ formula} \\ & + 1.081 \text{ board.thk} + 0.007 \text{ linewidth} - 0.018 \text{ spacing} \end{aligned}$$

1.1.2 Line VCP

$$\begin{aligned} \text{current} = & 30.058 - 0.170 \text{ l1} + 0.049 \text{ time} - 0.556 \text{ width} - 0.372 \text{ length} + 3.398 \text{ area} \\ & - 0.408 \text{ hole.con.min} - 0.632 \text{ pnls} - 18.033 \text{ ratio} + 1.415 \text{ formula} + 24.983 \text{ board.thk} \\ & - 0.003 \text{ linewidth} - 0.012 \text{ spacing} \end{aligned}$$

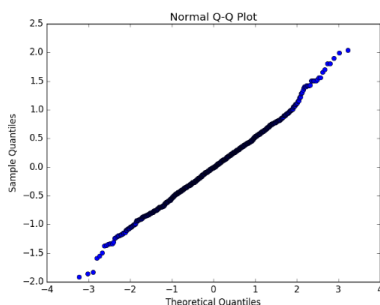
```
##### multiple linear regression #####
regressor1 = lm(formula = training_set$current ~ ., data = training_set)
```

ภาพที่ 8 คำสั่งการสร้างตัวแบบ multiple linear regression โดยใช้โปรแกรม R

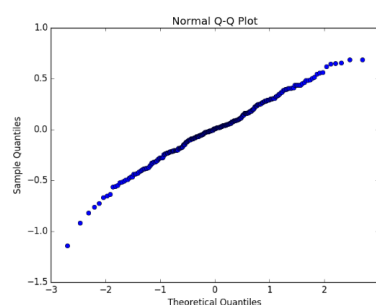
1.1.3 ข้อสมมติฐานเกี่ยวกับการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ

1) การตรวจสอบการแจกแจงปกติของค่าความคลาดเคลื่อน ได้ผลลัพธ์ดังภาพที่ 9 พบว่ากราฟที่ได้มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง สรุปได้ว่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ

2) การตรวจสอบค่าความแปรปรวนและความเป็นอิสระของค่าคลาดเคลื่อน ได้ผลลัพธ์ดังภาพที่ 10 จะเห็นได้ว่าค่าความแปรปรวนของค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่ และค่าความคลาดเคลื่อนเป็นอิสระกัน

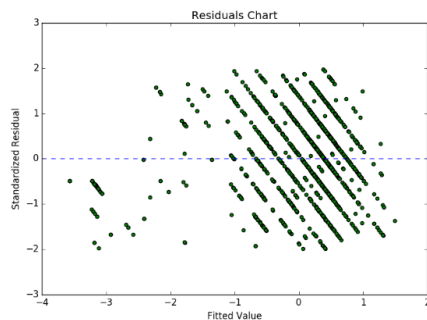


(ก) Line gate type

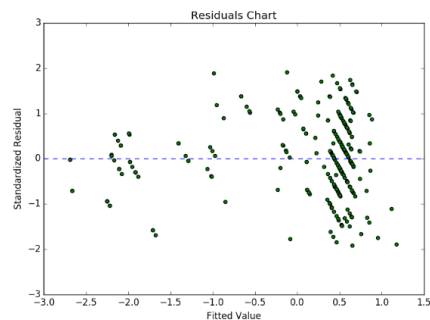


(ข) Line VCP

ภาพที่ 9 Normal quantile-quantile plot ของ regression standardized residual ของค่าพยากรณ์กระแสไฟฟ้าของ line gate type และ line VCP โดยใช้ข้อมูลฝึกสอน (training dataset)



(ก) Line gate type



(ข) Line VCP

ภาพที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนและค่าพยากรณ์ของกระแสไฟฟ้าของ line gate type และ line VCP โดยใช้ข้อมูลฝึกสอน (training dataset)

1.2 ตัวแบบ decision tree regression

คือกระแสไฟฟ้า และตัวแปรที่เหลือเป็นตัวแปรอิสระ และ

สร้างตัวแบบ decision tree regression โดยใช้ ฟังก์ชัน rpart() ในแพ็คเกจชื่อ 'rpart' กำหนดตัวแปรตาม

กำหนดค่าพารามิเตอร์เป็นค่า default

```
##### decision tree regression#####  
install.packages('rpart')  
library(rpart)  
regressor2 = rpart(formula = training_set$current ~ .,  
                    data = training_set,  
                    control = rpart.control(minsplit = 1))
```

ภาพที่ 11 คำสั่งการสร้างตัวแบบ decision tree regression โดยใช้โปรแกรม R

1.3 ตัวแบบ support vector regression

กำหนด type คือ 'eps-regression' สำหรับตัวแปรตาม

สร้างตัวแบบ support vector regression โดยใช้ฟังก์ชัน svm() ในแพ็คเกจชื่อ 'e1071' กำหนดตัวแปรตามคือ กระแสไฟฟ้า และตัวแปรที่เหลือเป็นตัวแปรอิสระ

เป็นจำนวนต่อเนื่อง และกำหนดค่าพารามิเตอร์เป็นค่า default

```
##### support vector regression #####  
install.packages('e1071')  
library(e1071)  
regressor3 = svm(formula = training_set$current ~ .,  
                  data = training_set,  
                  type = 'eps-regression')
```

ภาพที่ 12 คำสั่งการสร้างตัวแบบ support vector regression โดยใช้โปรแกรม R

2. การเปรียบเทียบค่า MSE และ MAPE

vector regression มีค่าต่ำสุด ลองลงมาคือ ตัวแบบ

จากการพยากรณ์ค่ากระแสไฟฟ้าของทั้ง 3 ตัวแบบ ใน line gate type และ line VCP ได้ผลลัพธ์ดัง ตารางที่ 4 และ 5 พบว่าค่า MSE และ MAPE ของตัวแบบ support

multiple linear regression และตัวแบบ decision tree regression ตามลำดับ



ตารางที่ 4 ค่าความคลาดเคลื่อนของทั้ง 3 ตัวแบบของ line gate type

Line gate type	MSE	MAPE
Multiple linear regression	2.2035	6.5025
Decision tree regression	8.0874	12.9842
Support vector regression	1.6259	5.1991

ตารางที่ 5 ค่าความคลาดเคลื่อนของทั้ง 3 ตัวแบบของ line VCP

Line gate type	MSE	MAPE
Multiple linear regression	8.2880	10.2141
Decision tree regression	33.8127	26.1111
Support vector regression	5.5466	7.8465

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการสร้างตัวแบบเพื่อพยากรณ์ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลายในกระบวนการ electrolytic copper plating ของบริษัทผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ โดยเก็บรวบรวมข้อมูลการกำหนดกระแสไฟฟ้าย้อนหลังตั้งแต่เดือนมกราคม 2561 ถึงเดือนกันยายน 2562 รวมระยะเวลา 21 เดือน โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel ในการจัดเก็บข้อมูล ทำการสร้างตัวแบบการพยากรณ์ที่ดีที่สุดสำหรับเครื่องจักร line gate type และ line VCP โดยใช้การเรียนรู้ของเครื่อง พิจารณาวิธีที่แตกต่างกัน 3 วิธี ได้แก่ วิธีการสร้างตัวแบบการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple Linear Regression) วิธีการสร้างตัวแบบต้นไม้การตัดสินใจแบบรีเกรสชัน (Decision Tree Regression) และวิธีการสร้างตัวแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์รีเกรสชัน (Support Vector Regression)

จากผลการทดลองในตารางที่ 4 และ 5 พบว่า line gate type ตัวแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์รีเกรสชันเป็นตัวแบบที่ให้ความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด คือ ค่า MSE = 1.6259 และค่า MAPE = 5.1991 รองลงมาคือตัวแบบการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (MSE = 2.2035, MAPE = 6.5025) และตัวแบบต้นไม้การตัดสินใจแบบรีเกรสชัน (MSE = 8.0874, MAPE = 12.9842) ตามลำดับ ส่วน line VCP ตัวแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์รีเกรสชันเป็นตัวแบบที่ให้ความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด

คือ ค่า MSE = 5.5466 และค่า MAPE = 7.8465 รองลงมาคือตัวแบบการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (MSE = 8.2880, MAPE = 10.2141) และตัวแบบต้นไม้การตัดสินใจแบบรีเกรสชัน (MSE = 33.8127, MAPE = 26.1111) ตามลำดับ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ตัวแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์รีเกรสชันจึงเป็นตัวแบบที่มีความแม่นยำมากที่สุดในการพยากรณ์ค่ากระแสไฟฟ้าของเครื่องจักร line gate type และ line VCP ผู้วิจัยจึงใช้ตัวแบบนี้จัดทำโปรแกรมภาษา R เพื่อพยากรณ์ค่ากระแสไฟฟ้าให้กับบริษัท โดยโปรแกรมสามารถเรียนรู้ได้ด้วยตนเอง พร้อมจัดทำสื่อการเรียนรู้ในรูปแบบเอกสารคู่มือการใช้โปรแกรม

นอกจากนี้จากตารางที่ 4 และ 5 จะเห็นได้ว่าผลการวิเคราะห์ของเครื่องจักรทั้งสองประเภทนั้นสอดคล้องกันคือ ตัวแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์รีเกรสชันและตัวแบบการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณมีประสิทธิภาพใกล้เคียง โดยตัวแบบการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณมีประสิทธิภาพต่ำกว่าเล็กน้อยทั้งนี้อาจเป็นเพราะตัวแบบการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณเกิดปัญหาภาวะร่วมเส้นตรงเชิงพหุ (multicollinearity) เนื่องจากในขั้นตอนของการเตรียมข้อมูล มีการนำค่าตัวแปรอิสระบางตัวมาใช้ในการคำนวณค่าของตัวแปร formula และ ratio ทำให้ค่าพยากรณ์คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง สำหรับงานวิจัยครั้งต่อไปควรมีการศึกษาและแก้ปัญหาในเรื่องนี้



เอกสารอ้างอิง

1. Synchrotron Thailand Central Lab. การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating). [อินเทอร์เน็ต]. 2563 [เข้าถึงเมื่อ 19 มิ.ย. 2563]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.slri.or.th/bl6a/process/film-deposition/12-process/45-electroplating.html>
2. Garich H, Gebhart L, Taylor EJ, Inman M, McCrabb H. Development and characterization of plating cell geometry for printed circuit board and packaging applications. ECS Trans 2007;3(16):1-10.
3. Chen TC, Tsai YL, Hsu CF, Dow WP, Hashimoto Y. Effects of brighteners in a copper plating bath on throwing power and thermal reliability of plated through holes. Electrochim Acta 2016;212:572-82.
4. Ji LX, Wang C, Wang SX, He W, Xiao DJ. An electrochemical model for prediction of microvia filling process. Trans IMF 2016;94(1):49-56.
5. สมาคมโปรแกรมเมอร์ไทย. การเรียนรู้ของเครื่อง (machine learning). [อินเทอร์เน็ต]. 2561 [เข้าถึงเมื่อ 1 ส.ค. 2562]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.thaiprogrammer.org/2018/12/อะไรคือ-การเรียนรู้ของเครื่อง/>
6. จิตาเดียว มยุรีสุวรรณ. การวิเคราะห์การถดถอย regression analysis. พิมพ์ครั้งที่ 1. ขอนแก่น : บริษัท เพ็ญพรินตัง จำกัด; 2559.
7. วิชญ์พงษ์ ตรุณธรรม. รู้จัก decision tree, random forest และ XGBoost!!! – PART 1. [อินเทอร์เน็ต]. 2561 [เข้าถึงเมื่อ 17 ก.ย. 2562]. เข้าถึงได้จาก: <https://medium.com/@witchapongdaroontham/รู้จัก-decision-tree-random-forest-และ-xgboost-part-1-cb49c4ac1315>
8. Cortes C, Vapnik V. Support-vector networks. Mach Learn 1995;20:273-97.
9. รณชัย ชื่นธวัช, กิตติศักดิ์ เกิดประสพ, นิตยา เกิดประสพ. การพยากรณ์ความต้องการใช้งานหน่วยจำหน่ายไฟฟ้าด้วยซัพพอร์ตเวกเตอร์รีเกรสชันแบบตรวจสอบสลับ 3 ส่วน. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 2560;19(1):215-32.
10. Smola AJ, Schölkopf B. A tutorial on support vector regression. Stat Comput 2004;14:199-222.
11. Kaewwijit T. The improvement of support vector regression to forecast time series. Master's Engineering Thesis, Suranaree University of Technology. Thailand; 2016.