

การเปรียบเทียบเทคนิคการเคลือบทองเหลืองด้วยไฟฟ้าระหว่าง กระแสตรงและกระแสแบบช่วงโดยปราศจากการใช้ไซยาไนด์ The Comparison of Brass-Electrodeposition Techniques between Direct and Pulse Current Without Cyanide

รณกร ปุณณะศิริ¹ ปิยนุช ม่วงทอง² และ อภิชาติ โรจนโรวรรณ³

ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์^{1,3}

สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี²

E-mail: rachakorn.pu@ku.th¹, piyanut.mua@rmutr.ac.th², fengacrw@ku.ac.th³

บทคัดย่อ

โดยทั่วไปกระบวนการเคลือบด้วยไฟฟ้าของโลหะผสมทองแดง-สังกะสี หรือทองเหลืองมักใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีไซยาไนด์เป็นองค์ประกอบในกระบวนการผลิต ซึ่งทำให้ชั้นเคลือบมีคุณภาพที่ดี จึงเป็นที่นิยมในอุตสาหกรรม แต่เนื่องจากการใช้ไซยาไนด์ในกระบวนการเคลือบนั้นส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตเป็นอย่างมาก นอกจากนั้นยังส่งผลให้การบำรุงรักษาเครื่องจักรในกระบวนการเคลือบมีต้นทุนที่สูงขึ้นเนื่องจากความเป็นพิษของไซยาไนด์ ดังนั้นบทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบวิธีการเคลือบโลหะผสมทองแดง-สังกะสี ด้วยไฟฟ้าที่ปราศจากการใช้ไซยาไนด์ที่เป็นองค์ประกอบในสารละลาย เปรียบเทียบระหว่างการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสแบบช่วง ซึ่งวิธีการการทำงานที่นำมาพิจารณา ได้แก่ 33%, 50% และ 67% ตามลำดับ ซึ่งจากผลการศึกษาและเปรียบเทียบพบว่า การเคลือบด้วยไฟฟ้ากระแสแบบช่วงที่วิธีการการทำงานที่ 33% ส่งผลให้ขนาดเกรนของชั้นเคลือบมีขนาดเล็กที่สุด มีค่าความแข็งของชั้นเคลือบสูงที่สุด และยังส่งผลให้ความต้านทานการกัดกร่อนของชั้นเคลือบมีค่าสูงที่สุดด้วยเช่นกัน

 **คำสำคัญ :** การเคลือบไฟฟ้า; ไซยาไนด์; ทองเหลือง; ไฟฟ้ากระแสแบบช่วง; ความต้านทานการกัดกร่อน

Abstract

Generally, the electrodeposition of Cu-Zn alloy or brass coating mostly uses a cyanide electrolyte in the manufacturing process. As the coating surface of the product is good quality by cyanide solution, it has led to being popular in the industries. The cyanide-containing electrolyte solution is not only dangerous to human health and the environment but also includes the cost increasing from machine maintenance. It stems from the cyanide toxicity. Therefore, this work aims to study the brass-electrodeposition technique with the cyanide-free solution. The comparison between direct current (DC) and pulse current (PC) is investigated

in the plating process that the duty cycle of PC is determined as 33%, 50% and 67% respectively. The results of studies and comparisons of electrodeposition technique pulse current at 33% of duty cycle resulted in the smallest coating layer grain size. The hardness of the coating layer is the highest. It also results in the highest corrosion resistance of the coating layer.

Keywords: Electroplating; Cyanide; Brass; Pulse Current; Corrosion resistance

1. บทนำ

ในปัจจุบันโลหะผสมจำพวกทองแดง-สังกะสี (Cu-Zn) หรือโลหะผสมชนิดอื่น เช่น สังกะสี-ดีบุก (Zn-Sn), สังกะสี-นิกเกิล (Zn-Ni), สังกะสี-แมงกานีส (Zn-Mn), นิกเกิล-ดีบุก (Ni-Sn), ทองแดง-ดีบุก (Cu-Sn), ทองแดง-นิกเกิล (Cu-Ni) และทองแดง-แมงกานีส (Cu-Mn) เป็นต้น [1] ได้ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในหลายอุตสาหกรรม โดยจุดประสงค์เพื่อป้องกันการกัดกร่อนที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อชิ้นงานหรืออุปกรณ์เครื่องจักร อีกทั้งยังช่วยปรับปรุงพื้นผิวให้มีความสวยงาม รวมถึงเพิ่มสมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติทางแม่เหล็ก ซึ่งวิธีการเคลือบด้วยไฟฟ้าของโลหะผสมทองแดง-สังกะสี มักจะใช้สารอิเล็กโทรไลต์ที่ประกอบไปด้วยสารประกอบเชิงซ้อน (Complexing agent) เพื่อลดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างโลหะผสมสองชนิด [2, 3]

การเคลือบโลหะผสมทองแดง-สังกะสี หรือทองเหลืองโดยวิธีการทางไฟฟ้า ถูกนำมาใช้ครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1841 โดยการใช้อ่างเคลือบไซยาไนด์ (Cyanide) ซึ่งเป็นโลหะผสมที่เป็นที่นิยมทั้งในงานวิจัยและด้านการนำไปประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรม [1] เนื่องจากมีต้นทุนต่ำในการผลิต และมีสมบัติทางกลที่ดี อีกทั้งยังส่งผลให้ชิ้นเคลือบมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคการเคลือบไฟฟ้าด้วยโลหะบริสุทธิ์เพียงอย่างเดียว [4]

อย่างไรก็ตาม พบว่าปัญหาในการเคลือบทองเหลืองด้วยวิธีนี้ คือการนำสารเคมีประเภทไซยาไนด์ (Cyanide) มาใช้เป็นองค์ประกอบทางเคมีของการเคลือบด้วยไฟฟ้า โดยไซยาไนด์เป็นสารเคมีที่ประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชัน $R-C\equiv N$ (หมู่ไนไตรล์ : Nitrile) ซึ่งสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของไนไตรท์ (Nitriles), คาร์บอนไนไตรด์ (Carbonitride) และ ไซยาไนด์ (Cyanide) โดยสารประกอบจำพวกนี้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมสกัดโลหะมีค่า [5] อีกทั้งไซยาไนด์ยังเป็นสารเคมีที่มีความเป็นพิษก่อให้เกิดอันตรายต่อทั้งมนุษย์ สัตว์ และสิ่งแวดล้อม ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาโดยตรงต่อระบบทางเดินหายใจเนื่องจากมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา และทำให้เกิดการหายใจที่ผิดปกติของเซลล์ โดยการเข้าไปยับยั้งไซโตโครม ซี ออกซิเดส (Cytochrome c oxidase) และนำไปสู่ภาวะการบกพร่องของออกซิเจน ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเป็นพิษของเซลล์ (Histotoxic hypoxia) และทำให้เกิดภาวะเลือดเป็นกรด (Acidosis) เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลต่อระบบประสาทส่วนกลาง และการทำงานของกล้ามเนื้อหัวใจผิดปกติ และส่งผลให้เสียชีวิตในที่สุด [6]

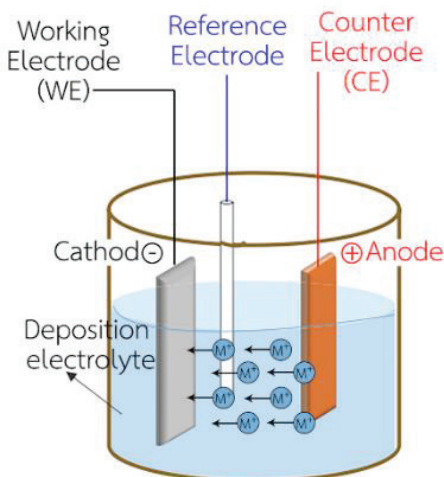
ส่งผลให้กระบวนการเคลือบทองเหลืองด้วยไฟฟ้าที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมกำลังได้รับความสนใจอย่างมาก รวมถึงงานวิจัยในด้านการพัฒนาสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่มีส่วนประกอบของไซยาไนด์ โดยนำสารประกอบเชิงซ้อน เช่น ดีแมนนิทอล (D-mannitol), กรดเอทิลีนไดอามีนเตตราอะซิติก (EDTA), กลูโคเนต (Gluconate),

ไกลซีน (Glycine), ซิเตรท (Citrate), ซอร์บิทอล (Sorbitol), ไพโรฟอสเฟต (Pyrophosphate), กลูโคเฮปโทเนต (Glucoheptonate) และ กรดไนตริโลไตรอะซิติก (NTA) โดยเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ถูกนำมาใช้ทดแทนไซยาไนด์ [1]

ดังนั้นบทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเทคนิคการเคลือบทองเหลืองด้วยไฟฟ้า ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยใช้กรดไนตริโลไตรอะซิติก เพื่อนำมาทดแทนสารประกอบเชิงซ้อนประเภทไซยาไนด์ และพัฒนาเทคนิคการเคลือบไฟฟ้าโดยใช้ไฟฟ้ากระแสแบบช่วงเพื่อค้นหาวัดการการเคลือบ (Duty cycle) ที่เหมาะสมที่สุด และได้ชั้นเคลือบที่มีคุณภาพ และสามารถเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนให้ดีขึ้น

2. หลักการเคลือบด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition)

การเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าเกี่ยวข้องกับกระบวนการทางไฟฟ้า เช่น อิเล็กโทรลิซิส (Electrolysis) และกระบวนการสะสมของอิเล็กโทรไฟรีติก (Electrophoretic deposition) ซึ่งจะทำให้อะตอมของโลหะไอออน หรือโลหะที่ใช้เคลือบ เคลือบลงบนขั้วอิเล็กโทรด ระบบของเทคนิคการเคลือบไฟฟ้า แสดงดังภาพที่ 1 [7]



ภาพที่ 1 ระบบการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า [7]

โดยปกติแล้วระบบของการเคลือบด้วยไฟฟ้า ประกอบไปด้วยสามขั้วไฟฟ้า ได้แก่ ขั้วทำงาน (Working electrode) ขั้วอิเล็กโทรดกระแส (Counter electrode) และขั้วอิเล็กโทรดมาตรฐาน (Reference electrode) โดยขั้วทำงานทำหน้าที่เป็นพื้นผิวที่ถูกเคลือบ ขั้วอิเล็กโทรดมาตรฐาน เพื่อใช้รักษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า และสำหรับขั้วอิเล็กโทรดกระแสถูกนำมาใช้เพื่อทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้าครบวงจร [7] ขั้วอิเล็กโทรดมาตรฐานมีด้วยกันหลายชนิด ซึ่งใช้สำหรับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ต่างกัน ได้แก่ ขั้วอิเล็กโทรดไฮโดรเจน (SHE) ประกอบด้วยสารละลาย $1.0 \text{ MH}^+ (\text{aq.})$ ใช้เพื่อเปรียบเทียบกับขั้วอิเล็กโทรดมาตรฐานอื่นๆ เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรดมาตรฐานไฮโดรเจน คือ 0 V ส่วนขั้วอิเล็กโทรดคาลาเมล (Saturated Calomel electrode; SCE) เป็นขั้วอิเล็กโทรดมาตรฐานที่ประกอบด้วยสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ซึ่งสร้างขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างปรอท และปรอทคลอไรด์ อย่างไรก็ตาม ปรอทเป็นสารเคมีที่อันตรายต่อการใช้งาน ดังนั้นขั้วอิเล็กโทรดมาตรฐานซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl) จึงถูกนำมาใช้แทนที่ขั้วอิเล็กโทรดคาลาเมล สำหรับขั้วอิเล็กโทรดมาตรฐานซิลเวอร์คลอไรด์มักถูกนำมาใช้ในการทดลองทางเคมีไฟฟ้า และการใช้งานในอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการผลิตที่ไม่ซับซ้อน

จากภาพที่ 1 จะเห็นว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จำเป็นต้องมีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดี ซึ่งส่งผลให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลได้ครบวงจร ดังนั้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์จึงควรที่จะสามารถแตกตัวทั้งไอออนบวก และไอออนลบได้ดี ขณะที่ละลายอยู่ในน้ำ โดยไอออนบวกและไอออนลบ คือตัวแปรสำคัญที่ทำให้สารละลายอิเล็กโทรไลต์สามารถนำไฟฟ้าได้ กล่าวคือเมื่อทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับระบบแล้ว ไอออนบวกจึงเคลื่อนที่ไปยังขั้วลบเพื่อมารับอิเล็กตรอนจากขั้วลบ และในทางกลับกันไอออนลบ จะวิ่งไปยังขั้วบวกเพื่อจ่ายอิเล็กตรอนให้กับขั้วบวก โดยปฏิกิริยานี้สามารถเกิดขึ้นได้ตลอดเวลาขณะทำการเคลือบไฟฟ้า [8]

นอกจากนั้นเทคนิคการเคลือบด้วยกระแสไฟฟ้าแบบช่วงเป็นวิธีการใหม่เพื่อนำมาพัฒนาหลักการเคลือบไฟฟ้าให้ดีขึ้น ทั้งด้านของความแข็งแรงของชั้นเคลือบและความต้านทานการกัดกร่อน โดยกระบวนการเคลือบโดยใช้ไฟฟ้ากระแสแบบช่วง เกี่ยวข้องกับการจ่ายกระแสไฟฟ้าเป็นช่วงระยะเวลาหนึ่ง (T_{on}) จากนั้นทำการหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าเป็นช่วงระยะเวลาหนึ่ง (T_{off}) โดยมีสมการที่เกี่ยวข้อง ได้แก่สมการที่ (1) และสมการที่ (2) ดังนี้ [9]

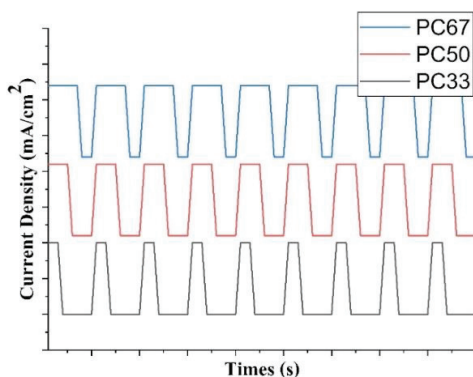
$$I_m = I_c \left(\frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \right) \quad (1)$$

โดย I_m คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย

I_c คือ ความหนาแน่นของกระแสแคโทด

$$\text{Duty cycle (\%)} = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \times 100 \quad (2)$$

โดยสมการที่ (2) เกี่ยวข้องกับวัฏจักรการทำงานของการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับระบบการเคลือบซึ่งทำให้สามารถควบคุมให้เกิดระบบการเคลือบที่ต่างกันได้ เช่น 33% 50% และ 67% เป็นต้น โดยทำให้เกิดโดอะแกรมของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ต่างกันดังภาพที่ 2 ดังนี้



ภาพที่ 2 โดอะแกรมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและเวลาที่วัฏจักรการเคลือบที่ต่างกัน [9]

3. ประสิทธิภาพของขั้วลบและขั้วบวก (Current Efficiency of Cathode and Anode)

โดยทั่วไปอ่างเคลือบไฟฟ้าที่ประกอบไปด้วยสารละลายของโลหะผสม ทองแดง-สังกะสี ซึ่งมีขั้วแพลตตินัมเป็นขั้วแอโนดหรือขั้วอิเล็กโทรดกระแส และมีชิ้นงานเป็นขั้วแคโทด โดยทั้งสองขั้วถูกต่อเข้าด้วยกันผ่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเกิดแคบริเวนขั้วแคโทด (ชิ้นงาน) เท่านั้น เนื่องจากขั้วแอโนดเป็นโลหะแพลตตินัมที่มีความเสถียร ดังนั้นจึงไม่เกิดปฏิกิริยาขึ้นที่บริเวณดังกล่าว โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด คือ



ปฏิกิริยาหลักเกิดจากการสะสมของโลหะ (Metal deposition) และปฏิกิริยาข้างเคียงคือ การผลิตไฮโดรเจน (Hydrogen evolution) [9] โดยประสิทธิภาพของปฏิกิริยาสามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{\text{ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจริง(ปฏิกิริยาหลัก)}}{\text{ปฏิกิริยารวม}} \times 100 \quad (3)$$

ในทางปฏิบัติการคำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาตามสมการที่ (3) เป็นเรื่องซับซ้อนและพบว่ามีผลคลาดเคลื่อน ดังนั้นประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าจึงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4) ดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{M}{E_{\text{brass}} \times Q} \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ M คือ มวลของโลหะผสมที่ถูกเคลือบ

E_{brass} คือ มวลสมมูลของทองเหลือง (Electrochemical Equivalent)

Q คือ ปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน (A/sec)

นอกจากนี้ประสิทธิภาพของกระแสสามารถ
สัมพันธ์กับความสามารถในการให้กระแสไหลผ่าน
ของระบบอีกด้วย

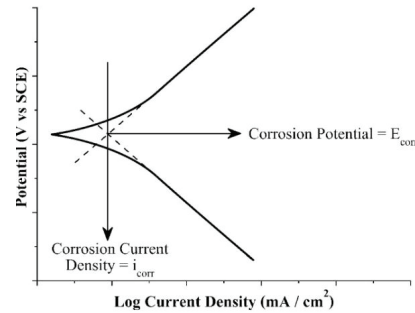
4. การวิเคราะห์พฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะ โดยใช้กราฟโพลาริเซชัน (Polarization Curve)

การประเมิณหาอัตราการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น
กับโลหะหรือชิ้นงาน ก่อนนำไปใช้งานจริงเป็นวิธีการ
ที่แพร่หลายในอุตสาหกรรมเนื่องจากสามารถที่จะ
ป้องกัน หรือยับยั้งความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นใน
อนาคตได้ โดยสามารถทำได้หลากหลายวิธี ซึ่งวิธี
ที่สนใจศึกษาคือวิธีการทดสอบการกัดกร่อนด้วย
ไฟฟ้าเคมี โดยวิเคราะห์และเปรียบเทียบอัตราการ
กัดกร่อนจากกราฟโพลาริเซชัน [10]

โดยวิธีการดังกล่าวเป็นการจำลองการเกิด
กระบวนการกัดกร่อนบนผิวชิ้นงานที่สัมผัสกับสารละลาย
ที่นำมาใช้ในการทดสอบ โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้า
ผ่านเครื่องโพเทนชิโอสแตท (Potentiostat/ galvanostat)
ให้กับชิ้นงาน ซึ่งทำให้ชิ้นงานเกิดการถ่ายเทประจุไฟฟ้า
หรือแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์
โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเรียกว่า ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า
(Electrochemical reaction) ซึ่งจะเกิดขึ้นทั้งปฏิกิริยา
รีดักชันและออกซิเดชัน โดยหลักการดังกล่าวเปรียบเสมือน
การเร่งให้อัตราการกัดกร่อนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว [10]

โดยค่าที่ได้จากการทดสอบจะอยู่ในรูปแบบ
ของเส้นโค้งโพลาริเซชัน (Polarization curve)
ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า
และค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า จากนั้นเริ่ม
มีการป้อนศักย์ไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจนกระทั่งโลหะเริ่มเกิด
การกัดกร่อนขึ้น โดยเรียกตรงจุดนั้นว่าค่าศักย์ไฟฟ้า
การกัดกร่อน (Corrosion potential, E_{corr})

ณ จุดนี้สามารถวัดค่าความหนาแน่นของกระแส
ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion current density, i_{corr})
ดังภาพที่ 3 เพื่อนำไปคำนวณหาอัตราการกัดกร่อน
(Corrosion rate) [10]



ภาพที่ 3 เส้นโค้งโพลาริเซชันสำหรับการกัดกร่อน
แบบทั่วผิวหน้าของโลหะ [10]

5. การเปรียบเทียบผลจากการเคลือบด้วยไฟฟ้า กระแสตรง (DC) ที่สัดส่วนของสารละลาย และ ความหนาแน่นของกระแสต่างกัน

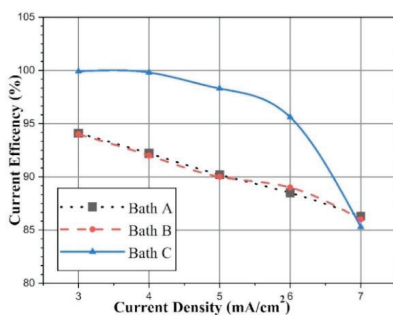
จากข้อมูลของการศึกษาก่อนหน้า [11]
พบว่าประสิทธิภาพของการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้า
(Current efficiency) มีค่าลดลงในขณะที่อัตราของ
การสร้างชั้นเคลือบ (Rate of build-up) เพิ่มขึ้น
ในทางกลับกันการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ใน
สารละลายทุกชนิด (อ่างสารละลายชนิด A B และ
C ดังตารางที่ 1) และการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น
ของคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) ในสารละลายไม่ส่งผล
ต่ออัตราการสร้างชั้นเคลือบ และประสิทธิภาพของ
กระแสไฟฟ้าของกระบวนการเคลือบ นอกจากนี้
การเพิ่มความเข้มข้นของซิงค์ซัลเฟต (ZnSO_4)
ที่ 0.08 โมลต่อลิตร (อ่างสารละลายชนิด C) พบว่า
ประสิทธิภาพของการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้า
สูงถึง 99.99% ในอ่างเคลือบ C ดังภาพที่ 4 [11]

จากภาพที่ 5 พบว่าในอ่างของการเคลือบ C
มีอัตราการสร้างชั้นเคลือบสูงกว่าอ่างเคลือบ A และ B
และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ 7 mA/cm^2
ให้อัตราการสร้างชั้นเคลือบสูงที่สุดคือ $9.5 \mu\text{m/hr}$ และ
อ่างเคลือบชนิด C ที่ความหนาแน่นของกระแสตั้งแต่
3 ถึง 6 mA/cm^2 มีประสิทธิภาพในการไหลผ่านของกระแส
ที่ดีกว่าอ่างเคลือบชนิด A และ B โดยสูงที่สุดอยู่ที่
99.9% และความหนาแน่นของกระแสที่ 3 mA/cm^2

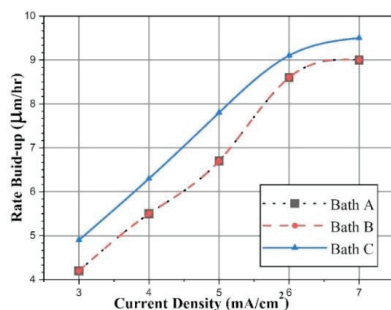
ดังนั้น พบว่าการเคลือบไฟฟ้าโดยใช้กระแสตรงที่ทำให้มีความสามารถในการไหลผ่านของกระแสสูงที่สุดคืออ่างเคลือบ C อยู่ที่ 99.9% และมีอัตราในการสร้างชั้นเคลือบอยู่ที่ 4.9 $\mu\text{m/hr}$

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบของอ่างสารละลาย แต่ละประเภท [11]

อ่างสารละลาย	สารเคมี	ความเข้มข้น (โมลต่อลิตร)
A	NaOH	0.75
	NTA	0.25
	ZnSO ₄	0.04
	CuSO ₄	0.05
B	NaOH	0.75
	NTA	0.25
	ZnSO ₄	0.04
	CuSO ₄	0.09
C	NaOH	0.75
	NTA	0.25
	ZnSO ₄	0.08
	CuSO ₄	0.05



ภาพที่ 4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระแสและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของการเคลือบด้วยไฟฟ้ากระแสตรงในสารละลายที่ต่างกัน [11]

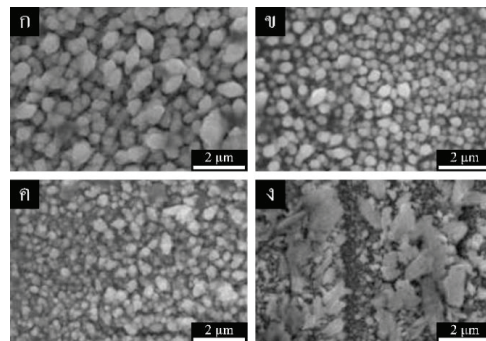


ภาพที่ 5 การเปรียบเทียบอัตราการเคลือบและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของการเคลือบด้วยไฟฟ้ากระแสตรงในสารละลายที่ต่างกัน [11]



6. ผลกระทบของการเคลือบด้วยไฟฟ้าโดยใช้กระแสแบบช่วง (Pulse current, PC) ที่ความหนาแน่นกระแสต่างกัน

การเคลือบโลหะผสมด้วยวิธีการทางไฟฟ้าโดยใช้ไฟฟ้ากระแสแบบช่วง พบว่าผลจากการใช้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ต่างกัน ได้แก่ 0.75, 1, 1.5 และ 1.75 mA/cm^2 ส่งผลให้ขนาดผลึกของชั้นเคลือบมีลักษณะเป็นเม็ดกลมเคลือบสม่ำเสมอทั้งพื้นผิว ดังภาพที่ 6ก, ข และ ค ตามลำดับ ซึ่งพบว่าการลดลงของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าส่งผลให้เกรนมีขนาดที่ลดลง อย่างไรก็ตามการเคลือบที่ความหนาแน่นกระแสที่ 1.75 mA/cm^2 ทำให้เกิดกลไกการเติบโตของเกรนและเปลี่ยนจากโครงสร้างเม็ดกลมเป็นโครงสร้างแบบเดนไดรต์ ดัง ง [12]



ภาพที่ 6 ภาพแสดงขนาดของผลึกของชั้นเคลือบโดยการเคลือบด้วยไฟฟ้ากระแสแบบช่วงที่วัฏจักรการทำงานที่ 50% ที่ความหนาแน่นกระแสที่ ก) 0.75 ข) 1 ค) 1.5 และ ง) 1.75 mA/cm^2 ตามลำดับ [12]
(*รูปภาพเผยแพร่โดยได้รับอนุญาต)

จากการศึกษาก่อนหน้าพบว่า การเพิ่มขึ้นของวัฏจักรการทำงานในกระบวนการเคลือบ ส่งผลให้ค่าความแข็งของชั้นเคลือบลดลงอย่างเห็นได้ชัดโดยการเคลือบด้วยไฟฟ้ากระแสแบบช่วงที่วัฏจักรการทำงานร้อยละ 33 50 67 และการเคลือบด้วยไฟฟ้ากระแสตรง มีค่าความแข็งอยู่ที่ 249, 233, 217 และ 170 HV ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของวัฏจักรการทำงาน ส่งผลให้ขนาดเกรนเพิ่มขึ้น และมีรูพรุน

เพิ่มขึ้นด้วย โดยลักษณะของเกรนในชั้นเคลือบที่ผ่าน การเคลือบด้วยไฟฟ้ากระแสแบบช่วงมีลักษณะโครงสร้าง เป็นแท่งคล้ายเม็ดข้าว (Acicular structure) โดย การลดลงของวัฏจักรการทำงานส่งผลให้ขนาดของ เกรนสม่ำเสมอมากขึ้น ซึ่งแตกต่างจากการเคลือบ ด้วยไฟฟ้ากระแสตรง ที่มีลักษณะโครงสร้างของเกรน เป็นเม็ดกลม (spherical nodules) เรียงต่อกัน เป็นเส้น [9]

การศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของชั้นเคลือบ พบว่าการเคลือบด้วยไฟฟ้ากระแสแบบช่วงที่ วัฏจักร การทำงานร้อยละ 33 50 67 และการชุบเคลือบ ด้วยไฟฟ้ากระแสตรง มีค่าของศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน อยู่ที่ -0.89, -0.90, -0.94 และ -0.97 V vs Ag/AgCl และมีค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนอยู่ที่ 0.2, 1.0, 5.5 และ 6.0 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ตามลำดับ โดยการเคลือบ ด้วยวัฏจักรการทำงานที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้า การกัดกร่อนมีค่าน้อยลง และค่ากระแสไฟฟ้าการ กัดกร่อนเพิ่มขึ้น [9] โดยชี้ให้เห็นว่า การลดลงของ ศักย์ไฟฟ้าการกัดส่งผลให้ชั้นเคลือบมีความสามารถ ในการต้านทานการกัดกร่อนลดลง และการเพิ่มขึ้น ของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีอัตราการกัดกร่อน เพิ่มขึ้น

ซึ่งการเคลือบด้วยไฟฟ้ากระแสแบบช่วงวัฏจักร การทำงานร้อยละ 33 มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน มากที่สุด และมีค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนน้อยที่สุด คือ -0.89 V vs Ag/AgCl และ 0.20 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ตามลำดับ [9]

7. สรุป

เทคนิคการเคลือบโลหะผสมทองแดง-สังกะสี โดยใช้กระแสไฟฟ้า จากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ประเภท กรดไนตริกไฮโดรอะซิติกที่ปราศจากไซยาไนด์โดยพบว่าการเคลือบโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง และกระแสแบบช่วง ให้ผลที่แตกต่างกัน คือ

- การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ในการเคลือบด้วยกระแสตรงส่งผลให้ขนาดผลึกของ ชั้นเคลือบลดลง

- การลดลงของวัฏจักรการทำงานของไฟฟ้า กระแสแบบช่วง (67% 50% และ 33%) โดยการเคลือบ ด้วยไฟฟ้ากระแสแบบช่วงที่วัฏจักรการทำงาน 33% ให้ผลของชั้นเคลือบดีที่สุด กล่าวคือ ส่งผลให้ขนาดของ ผลึกในชั้นเคลือบมีขนาดเล็กที่สุด ซึ่งทำให้ความต้านทาน การกัดกร่อนของชั้นเคลือบมีค่าสูงที่สุดด้วยเช่นกัน

- นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของ สังกะสีซัลเฟต (ZnSO_4) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ทำให้ส่งผลต่อระบบการเคลือบ ได้แก่ ประสิทธิภาพ ของกระแสในกระบวนการเคลือบและอัตราการสร้าง ชั้นเคลือบ

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Oulmas C et al. (2019). Comparative study of Cu-Zn coatings electrodeposited from sulphate and chloride baths. Heliyon, 5(7): p.e02058.

[2] Ibrahim M, E Ismail, and R Bakdash (2019). Copper-rich copper-zinc alloy coatings prepared by electrodeposition from glutamate complex electrolyte: current efficiency, Tafel kinetics and throwing power. Transactions of the IMF, 97:237-246.

[3] Fujiwara Y, and H Enomoto (2000). Electrodeposition of β' -Brass from Cyanide Baths with Accumulative Underpotential Deposition of Zn. Journal of The Electrochemical Society, 147(5): 1840.

[4] Senna L F, S L Díaz, and L Sathler (2003). Electrodeposition of copper-zinc alloys in pyrophosphate-based electrolytes. Journal of Applied Electrochemistry, 33: 1155-1161.



- [5] Luque-Almagro V M et al. (2011). Bacterial cyanide degradation is under review: *Pseudomonas pseudoalcaligenes* CECT5344, a case of an alkaliphilic cyanotroph. *Biochemical Society transactions*, 39(1): 269-74.
- [6] Sharma M, Y Akhter, and S Chatterjee (2019). A review on remediation of cyanide containing industrial wastes using biological systems with special reference to enzymatic degradation. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 35(5): 70.
- [7] Yi C, and S Majid (2018). The Electrochemical Performance of Deposited Manganese Oxide-Based Film as Electrode Material for Electrochemical Capacitor Application.
- [8] มะลิ แซ่อึ้ง (2544). การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความหนาของผิวเคลือบในกระบวนการเคลือบผิวไฟฟ้า. *จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*.
- [9] Kamnerdkhag P et al. (2017). The effects of duty cycles on pulsed current electrodeposition of Zn Ni Al₂ O₃ composite on steel substrate: Microstructures, hardness and corrosion resistance. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42.
- [10] รุจีภรณ์ นาคขุนทด (2560). การประเมินผลพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะจากเส้นโค้งโพลาไรเซชัน (polarization curve)-KM Tank.
- [11] Krishnan R M, V S Muralidharan, and S R Natarajan (1996). A non-cyanide brass plating bath. *Bulletin of Electrochemistry*, 12(5-6): 274-277.
- [12] Kartal M, A Alp, and H Akbulut (2017). Pulse Electrodeposition of Copper-Zinc Coatings from an Alkaline Bath. *Acta Physica Polonica A*, 132: 801-803.