

บทที่ 2

เคมีไฟฟ้าและการชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า

(Electrochemistry and Electroplating)

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการ ชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า (electroplating) ซึ่งเป็นกระบวนการที่เราจะนำมาประยุกต์ใช้ในการชุบผิวโลหะลงบนผิวพลาสติก หรือแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ที่เราสังเคราะห์ขึ้น เพื่อใช้ในการวิจัยในครั้งนี้โดยเฉพาะ ทฤษฎีที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการวิจัยครั้งนี้ก็คือ กระบวนการอิเล็กโทรลิซิส กฎของฟาราเดย์เกี่ยวกับอิเล็กโทรลิซิส การนำไฟฟ้าในสารละลาย วิธีการชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า ทรายตกกล่าวถึงขั้นตอนและวิธีการชุบทอง ซึ่งเป็นการชุบแบบหนึ่งที่นิยมกันมากในปัจจุบัน ในตอนสุดท้ายนั้น จะบรรยายถึงขั้นตอนและวิธีการชุบผิวโลหะลงบนผิวพลาสติก เพื่อให้ผู้อ่านได้เข้าใจแนวทาง และวิธีการที่ทำการอยู่ในปัจจุบันนี้ เพื่อให้เข้าใจถึงขั้นตอน วิธีการ ปัญหา และประโยชน์ที่จะได้รับเมื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ซึ่งจะเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาครั้งต่อไป

2.1 กระบวนการอิเล็กโทรลิซิส(electrolysis)

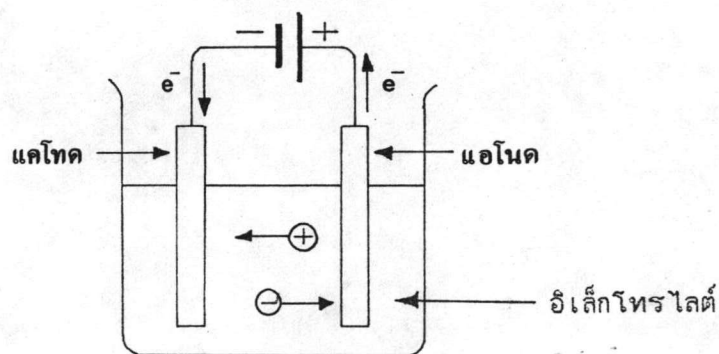
เนื่องจากการชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า (electroplating) ได้พัฒนามาจาก กระบวนการอิเล็กโทรลิซิส(electrolysis) ซึ่งการศึกษากระบวนการนี้เป็นสาขาหนึ่งของวิชาไฟฟ้าเคมี (electrochemistry) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงระหว่างพลังงานไฟฟ้ากับพลังงานเคมี ผลจากการศึกษาวิชานี้ ทำให้เรามีแหล่งไฟฟ้าใช้ในชีวิตรประจำวัน เช่น ถ่านไฟฉายชนิดต่าง ๆ แบตเตอรี่ และนอกจากนั้นยังใช้วัดสมบัติเฉพาะตัวบางประการในเชิงปริมาณของปฏิกิริยาเคมี เช่น วัดค่า pH ค่าคงที่ของสมดุลของปฏิกิริยา ค่าคงที่ของความสามารถในการละลาย (K_{sp}) ของสารที่ละลายได้น้อยหรือมาก เป็นต้น

ต่อไปนี้จะกล่าวถึงกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส เพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาและวิจัยในครั้งนี้ แต่พอสังเขป ดังนี้

กระบวนการอิเล็กโทรลิซิส ก็คือปฏิกิริยาหรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมี โดยอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานไฟฟ้าภายนอก (ทบวงมหาวิทยาลัย, 2533) ส่วนประกอบอันสำคัญของกระบวนการนี้ ก็คือ แหล่งให้พลังงานไฟฟ้าหรือแบตเตอรี่ อิเล็กโทรดคู่ขนานสองขั้ว และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) สารละลายอิเล็กโทรไลต์นั้นในภาวะปกติจะ

แตกตัวเป็นไอออนบวกและไอออนลบ ซึ่งมีการเคลื่อนที่โดยเสรี ถ้าแตกตัวเป็นไอออนได้มาก จะจัดเป็นอิเล็กโทรไลต์แก่ ซึ่งสามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่าสารที่แตกตัวเป็นไอออนได้น้อย (อิเล็กโทรไลต์อ่อน) แต่สำหรับกรณีการนำไฟฟ้าของสารละลาย ที่ไม่มีอิเล็กตรอนอิสระที่จะมาช่วยนำไฟฟ้านั้น ก็จะต้องพิจารณาว่ากระแสไฟฟ้าไหลได้อย่างไรในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดนั้น

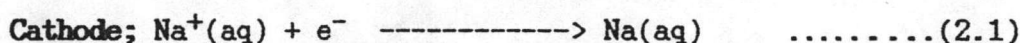
เมื่อเราก่อแบตเตอรี่เข้ากับขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง ซึ่งจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ดังรูปที่ 2.1 (คณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 2526)



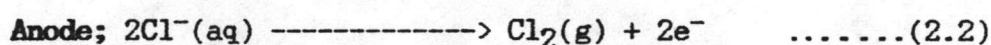
รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส

แบตเตอรี่จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าผลักดันให้อิเล็กตรอนไหลเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่แสดงโดยลูกศร อิเล็กตรอนจะไปชุมนุมกันอยู่ทางขั้วไฟฟ้าทางซ้ายมือ และรวมตัวกับขั้วไฟฟ้าทางขวามือ วงจรนี้จะไม่สมบูรณ์ จนกว่าจะมีการใช้อิเล็กตรอนที่ขั้วทางซ้ายมือ พร้อมกับทำให้เกิดขึ้นใหม่ที่ขั้วทางขวามือ นั่นคือจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ที่ขั้วทางซ้ายมือนั้นจะมีกระบวนการรีดักชัน (reduction process) เกิดขึ้น ซึ่งเป็นกระบวนการที่ไอออนหรืออนุมูลบางตัว รับอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้าเข้าไว้ จึงถูก "รีดิวซ์" เราเรียกขั้วไฟฟ้าที่มีการรีดักชันเกิดขึ้นว่า แคโทด (cathode) ส่วนขั้วทางขวามือ ไอออน หรืออนุมูลจะปล่อยอิเล็กตรอนให้กับขั้ว เกิดกระบวนการออกซิเดชัน (oxidation process) ขึ้น เราเรียกขั้วไฟฟ้าที่เกิดออกซิเดชันว่า แอโนด (Anode) แต่เพื่อที่จะให้เกิดรีดักชันขึ้นเสมอที่แคโทด ไอออนจะต้องวิ่งไปทางขั้วนั้นตลอดเวลา ไอออนเหล่านี้เป็นไอออนบวก และมีชื่อเรียกว่า แคตไอออน (cations) ในขณะที่ขั้วอีกอันลบก็จะวิ่งไปยังแอโนดตลอดเวลา และมีชื่อเรียกว่า แอนไอออน (anions)

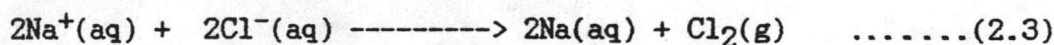
จะยกตัวอย่างกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสของโซเดียมคลอไรด์เหลว (molten NaCl) คือ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิสูง โดยสมมติว่าใช้ขั้วไฟฟ้าที่เฉื่อยมาทำปฏิกิริยาเคมีกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งในที่นี้ก็คือโซเดียมคลอไรด์เหลวนั่นเอง โซเดียมคลอไรด์จะแตกตัวเป็น Na^+ และ Cl^- ไอออน Na^+ จะวิ่งเข้าหาขั้วลบหรือแคโทด แล้วถูกรีดิวซ์หรือเกิดปฏิกิริยารีดักชัน โดย Na^+ จะรับอิเล็กตรอนที่ขั้วนี้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจึงเขียนได้ดังนี้



เราเรียกปฏิกิริยานี้ว่า "ครึ่งปฏิกิริยาของแคโทด" (cathode half-reaction) ส่วน Cl^- จะวิ่งเข้าหาขั้วบวกหรือแอโนด แล้วถูกออกซิไดซ์หรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดย Cl^- จะปล่อยอิเล็กตรอนไปที่แอโนด แล้วเกิดเป็นอะตอมของคลอรีนซึ่งเป็นกลาง คลอรีนสองอะตอมจะรวมกันเป็นโมเลกุลของคลอรีน ผุดออกมาเป็นแก๊สคลอรีนที่ขั้วบวก ครึ่งปฏิกิริยาของแอโนด (anode half-reaction) สามารถเขียนได้ดังนี้



ที่แคโทดมีการใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อทำให้ Na^+ กลายเป็นโลหะ Na และขณะเดียวกันก็ทำให้ Cl^- ที่แอโนดกลายเป็น Cl_2 ถ้าเรารวมครึ่งปฏิกิริยาของแคโทดและแอโนดเข้าด้วยกัน เราจะได้ปฏิกิริยาอันเดียว เรียกว่า "ปฏิกิริยาของเซลล์" (cell reaction) และเพื่อมิให้อิเล็กตรอนสะสมในเซลล์ จำนวนอิเล็กตรอนที่หายไปจากแคโทดควรจะทำกับอิเล็กตรอนที่ปรากฏที่แอโนด ในการดุลปฏิกิริยาทั้งสอง เราต้องเอาสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมคูณครึ่งปฏิกิริยาเพื่อทำให้อิเล็กตรอนหักล้างกันหมดไป เช่น เมื่อเรานำครึ่งปฏิกิริยาทั้งสองของกริ่งโซเดียมคลอไรด์มารวมกัน จะได้ดังนี้



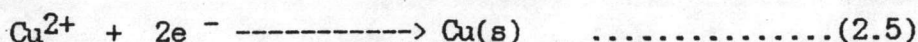
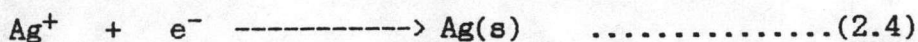
จะเห็นว่าการทำงานอิเล็กโทรลิซิสของโซเดียมคลอไรด์เหลว จะได้โลหะ Na ที่แคโทด และแก๊ส Cl_2 ที่แอโนด วิธีนี้จึงเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในทางอุตสาหกรรมเพื่อเตรียมโลหะโซเดียม และแก๊ส Cl_2 แต่เนื่องจาก $\text{NaCl}(\text{s})$ มีจุดหลอมเหลวสูงมาก คือประมาณ 800 องศาเซลเซียส ดังนั้นการเตรียมโลหะ Na จึงใช้โซเดียมคาร์บอเนตผสมกับ NaCl สารผสมที่ได้มีจุดหลอมเหลวลดต่ำลง คือเหลือเพียง 600 องศาเซลเซียสเท่านั้น จึงช่วยประหยัดต้นทุนการผลิตได้มาก เพราะใช้พลังงานความร้อนในกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสน้อย

2.2 กฎของฟาราเดย์เกี่ยวกับอิเล็กโทรลิซิส (Faraday's Laws of electrolysis)

ไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) พบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟฟ้าและ



การเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรดเมื่อคอนตันศตวรรษที่ 19 โดยพบว่าในกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส ความมากน้อยของการเปลี่ยนแปลงทางเคมี จะมีความสัมพันธ์กับจำนวนอิเล็กตรอนที่มีการถ่ายเทในปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน (ทววงมหาวิทยาลัย, 2533) เช่น การรีดักชันของไอออนของเงินและทองแดงให้เป็นโลหะ ตามปฏิกิริยาคงต่อไปนี้



จะเห็นว่าปฏิกิริยา(2.4)นั้น เงินหนึ่งไอออนรับอิเล็กตรอนหนึ่งตัว ได้โลหะเงินหนึ่งอะตอมเกิดขึ้นที่แคโทด หรือกล่าวได้ว่า เงินหนึ่งโมลไอออนจะรับอิเล็กตรอนหนึ่งโมลได้โลหะเงินหนึ่งโมลหนัก 107.87 กรัม เคลือบอิเล็กโทรดที่เป็นแคโทด ส่วนปฏิกิริยา(2.5)ก็กล่าวได้ทำนองเดียวกันว่า ทองแดงหนึ่งโมลไอออนทำปฏิกิริยากับสองโมลอิเล็กตรอน ได้โลหะทองแดงหนึ่งโมล ที่แคโทด จากกฎของฟาราเดย์จะสรุปได้ว่า ในการรีดักชันของไอออนของทองแดงเพื่อให้ได้โลหะหนึ่งโมล จะต้องใช้ปริมาณไฟฟ้าสองเท่าของปริมาณไฟฟ้าที่ใช้กับเงิน เราเรียกปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในเซลล์อิเล็กโทรลิซิส เพื่อให้อิเล็กตรอนหนึ่งโมล ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันว่า หนึ่งฟาราเดย์(Faraday) ฉะนั้นกรณีข้างบน จึงใช้ปริมาณไฟฟ้าหนึ่งฟาราเดย์เพื่อทำให้ไอออนของโลหะเป็นโลหะเงินหนัก 107.87 กรัม หรือใช้ปริมาณไฟฟ้า 2 ฟาราเดย์เพื่อทำให้เกิดทองแดงหนัก 63.54 กรัม

เนื่องจากประจุไฟฟ้า(Q)ปริมาณหนึ่งคูลอมป์ ก็คือปริมาณประจุไฟฟ้าที่ถูกถ่ายเทขณะเมื่อมีกระแสไฟฟ้า(I)หนึ่งแอมแปร์ ไหลผ่านอยู่เป็นเวลา(t)นานหนึ่งวินาที หากได้จากสมการดังนี้

$$Q = It \dots\dots\dots(2.6)$$

เมื่อ Q เป็นปริมาณประจุไฟฟ้าในหน่วยคูลอมป์ (C), I เป็นกระแสไฟฟ้าในหน่วยแอมแปร์(A) ส่วน t เป็นเวลาในหน่วยวินาที (sec)

ฉะนั้นปริมาณไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ จะเท่ากับ ประจุของอิเล็กตรอนหนึ่งตัว(e)คูณกับจำนวนอิเล็กตรอนหนึ่งโมล(N_A) แสดงว่า 1 ฟาราเดย์

$$\begin{aligned} F &= eN_A \\ &= (1.60210 \times 10^{-19} \text{ C}) (6.02252 \times 10^{23}) \\ &= 9.648679292 \times 10^4 \text{ C} \\ &= 96486.79292 \text{ C} \\ &= 96,487 \text{ C} \dots\dots\dots(2.7) \end{aligned}$$

น้ำหนักของสารที่เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรดอันเนื่องจากการผ่านกระแสไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ เข้าไปในเซลล์อิเล็กโทรลิซิส จะเป็นน้ำหนักสมมูลของสารนั้น ซึ่งเป็นน้ำหนักที่เกิดขึ้นจาก ไอออนของโลหะรับอิเล็กตรอนหนึ่งโมล จึงสรุปได้ว่า

ปริมาณไฟฟ้าหนึ่งฟาราเดย์ หากให้เกิดผลผลิตที่แคโทดจากออกซิเดชันหรือรีดักชัน ใน กระบวนการอิเล็กโทรลิซิสหนัก เท่ากับหนึ่งกรัมสมมูลเสมอ เช่น เซลล์อิเล็กโทรลิซิสที่ใช้ออน ของเงินและทองแดง ถ้าหากผ่านปริมาณไฟฟ้าเท่ากับหนึ่งฟาราเดย์ จะมีเงินและทองแดง ที่เกิดจากปฏิกิริยารีดักชันที่แคโทด มีน้ำหนัก 107.87 กรัม และ $63.54/2 = 31.77$ กรัม ตามลำดับ ซึ่งเป็นน้ำหนักสมมูลของเงินและทองแดงนั่นเอง

เมื่อพิจารณาจะสรุปได้ว่า ปริมาณผลผลิตที่เกิดขึ้นจากออกซิเดชันและรีดักชัน จะมีความสัมพันธ์กับปริมาณไฟฟ้าหรือจำนวนฟาราเดย์ เราจึงนำความสัมพันธ์ดังกล่าว มาสรุปเป็น กฎเกณฑ์เรียกว่า กฎอิเล็กโทรลิซิสของฟาราเดย์ (Faraday's Law of electrolysis) โดยมีใจความดังต่อไปนี้

ก. มวลสารที่เกิดขึ้นที่แอโนดหรือแคโทดในขณะ เกิดอิเล็กโทรลิซิส จะเป็นปริมาณ โดยตรงกับปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในเซลล์

ข. มวลสารชนิดต่าง ๆ กันที่เกิดขึ้นในระหว่างการเกิดอิเล็กโทรลิซิส ที่ใช้ปริมาณ ไฟฟ้าเท่ากัน จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักสมมูลของสารนั้น

กฎของฟาราเดย์ ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสดังกล่าวมาแล้วนี้ จะ พิสูจน์ให้เห็นจริงดังต่อไปนี้

2.3 การพิสูจน์กฎของฟาราเดย์

ถ้าในขณะที่เกิดกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสนั้น สมมติว่ามวลของไอออนแต่ละไอออน ที่ไปเกาะขั้วลบ เท่ากับ m_0 และเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเป็นปริมาณ Q คูลอมป์ จะมีไอออนที่ ไปเกาะขั้วลบเป็นจำนวน N ไอออน เพราะฉะนั้นมวลของไอออนทั้งหมดที่เกาะขั้วลบเมื่อผ่าน กระแสไฟฟ้าปริมาณ Q จะเท่ากับ (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, คณะวิทยาศาสตร์, ภาควิชาฟิสิกส์, 2530)

$$m = m_0 N \quad \dots \dots \dots (2.8)$$

$$\text{แต่ } m_0 = \text{มวลอะตอม/เลขอะวอกาโดร} = A/N_A \quad \dots \dots \dots (2.9a)$$

กำหนดให้ $z =$ วาเลนซ์ของธาตุ, $e =$ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

เพราะฉะนั้นประจุไฟฟ้า (q) ของไอออนของธาตุ จะเป็นดังสมการ

$$q = ze$$

$$\text{ฉะนั้น } N = Q/q = Q/ze \quad \dots\dots\dots (2.9b)$$

นำสมการทั้งสอง แทนลงในสมการที่(2.8) จะได้

$$m = (A/N_A) \cdot (Q/ze) = KQ = KIt \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

$$\text{เมื่อ } K = A/N_Aze \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

พิจารณาสมการที่(2.10)จะเห็นว่า มวลสาร m ที่ไปเกาะที่ขั้วไฟฟ้าจะเป็นปริมาณโดยตรงกับประจุไฟฟ้าที่ผ่านสารละลาย ซึ่งสอดคล้องกับกฎข้อที่หนึ่งของฟาราเดย์ ค่า K นี้ เรียกว่า **สมมูลไฟฟ้าเคมีของธาตุ (electrochemical equivalent of the element)** ซึ่งหมายถึงมวลของธาตุคิดเป็นโมลกรัมที่ถูกแยกออกจากสารละลายไฟฟ้า โดยใช้ปริมาณไฟฟ้าหนึ่งคูลอมบ์ ส่วนค่า N_Ae เรียกว่า ค่าคงที่ฟาราเดย์ (Faraday's constant) มีสัญลักษณ์เป็น F ค่านี้หมายถึงขนาดของปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านสารละลาย แล้วก่อให้เกิดสารไปเกาะที่ขั้วไฟฟ้าหนึ่งสมมูลเคมี ดังกล่าวมาแล้วในสมการที่ (2.7) ค่า A/z เรียกว่า **สมมูลเคมีของธาตุ** ใช้สัญลักษณ์เป็น ϵ นั่นคือ

$$\epsilon = A/z \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

ดังนั้นสมการที่ (2.11) อาจเขียนได้เป็น

$$\text{หรือ } K = (1/F) \epsilon \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

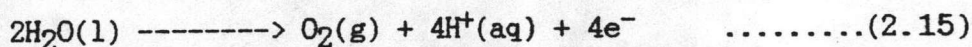
จากสมการ (2.13) จะพบว่าสมมูลไฟฟ้าเคมีของธาตุ จะเป็นปริมาณโดยตรงกับสมมูลเคมี ซึ่งเป็นกฎข้อที่สองของฟาราเดย์นั่นเอง และเมื่อพิจารณาค่าไปอีกจะพบว่า ถ้าใช้ปริมาณไฟฟ้าเท่า ๆ กันผ่านสารละลายไฟฟ้าต่างชนิดกัน มวลสารของธาตุที่แยกออกมาจากสารละลายจะเป็นปริมาณโดยตรงกับสมมูลเคมีของธาตุนั้น ฉะนั้นในสารละลายชนิดหนึ่ง ถ้ามีมวลสารของธาตุที่ถูกแยกออกมา m_1 เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าไปจำนวนหนึ่ง และในสารละลายอีกชนิดหนึ่งมีมวลสารของธาตุที่ถูกแยกออกมาเป็น m_2 เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเป็นจำนวนเท่า ๆ กัน ถ้า ϵ_1 และ ϵ_2 เป็นสมมูลเคมีของธาตุในสารละลายทั้งสองชนิดตามลำดับ จะได้ว่า

$$m_1/m_2 = \epsilon_1/\epsilon_2 \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

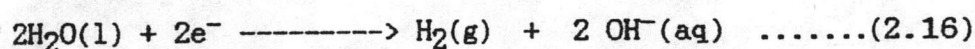
ในทางปฏิบัติกระแสไฟฟ้าจากวงจรไฟฟ้าจะไม่คงที่ ทำให้การคำนวณปริมาณไฟฟ้าในถูกต้องตามความเป็นจริง จึงวัดปริมาณไฟฟ้าโดยเครื่องคูลอมมิเตอร์ (Coulometer) ชนิดที่มีอิเล็กโทรดทองคำด้วยโลหะเงินและใช้สารละลายที่มีไอออนเงิน เมื่อต่อคูลอมมิเตอร์แบบอนุกรมเข้ากับเซลล์อิเล็กโทรลิซิสแล้วอาศัยน้ำหนักของเงินที่เพิ่มขึ้นที่แคโทด เราจะสามารถคำนวณหาปริมาณไฟฟ้าที่เข้าในการอิเล็กโทรลิซิสได้ เพราะว่าปริมาณไฟฟ้าหนึ่งฟาราเดย์ สามารถหาให้เงินแยกตัวออกได้ 107.87 กรัม หรือกล่าวได้ว่าเมื่อผ่านปริมาณไฟฟ้าหนึ่งคูลอมบ์เข้าไป จะหาให้น้ำหนักของเงินเพิ่มขึ้นที่แคโทดเท่ากับ $107.87 \text{ g}/96,487 \text{ C} = 1.1180 \times 10^{-3}$

กรมต่อคุณอมรม(ทบวงมหาวิทยาลัย, 2533)

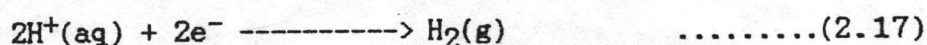
เนื่องจากอิเล็กโทรลิซิสเป็นกระบวนการที่นำพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งภายนอก ความยากง่ายในการหาที่ให้เกิดปฏิกิริยาจึงขึ้นกับความยากง่ายของการให้ หรือการรับอิเล็กตรอนของ ไอออนที่อยู่ในสารละลายนั้น ๆ ซึ่งความยากง่ายนี้จะดูได้จากแรงเคลื่อนไฟฟ้า แต่ถ้าหาก เซลล์ อยู่ในสภาวะสมดุล(Standard state)ก็ดูจากค่า E^0 (ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์, 2530) ซึ่งเป็น ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดที่ 25 เซลเซียส ส่วนในกรณีที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย การแข่งขันในการให้หรือการรับอิเล็กตรอนนั้น นอกจากไอออนต่าง ๆ ในสารละลายแล้ว ก็ยังมีโมเลกุลของน้ำเข้าร่วมแข่งขันด้วย โดยโมเลกุลของน้ำอาจเสียอิเล็กตรอนหรือถูกออกซิไดซ์ แล้วกลายเป็น O_2 กับ H^+ คือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ตามปฏิกิริยา



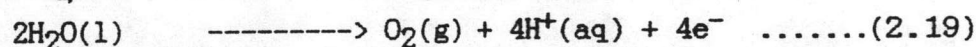
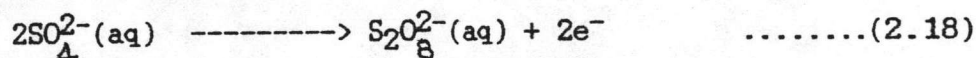
หรือโมเลกุลของน้ำอาจรับอิเล็กตรอนเข้ามา หรือถูกรีดิวซ์เป็น H_2 กับ OH^- คือ เกิดรีดักชัน ตามปฏิกิริยา



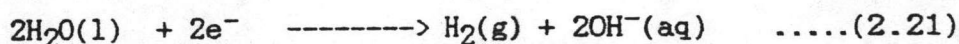
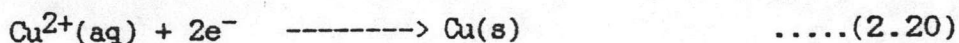
นอกจากนี้ ในสารละลายกรด H^+ อาจถูกรีดิวซ์ เป็น H_2 ได้ ดังนี้



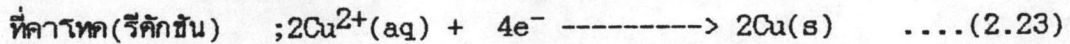
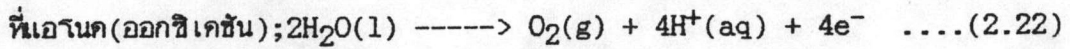
แต่ปฏิกิริยาตามสมการ (2.17) เกิดขึ้นยากนักในสารละลายที่เจือจางมาก หรือ ในสารละลายที่เป็นกลาง เพราะ H_2O มีความเข้มข้นน้อยกว่า H^+ มาก สรุปได้ว่าอิเล็กโทรลิซิสของสารละลาย มีการแข่งขันกันระหว่างไอออนของอิเล็กโทรไลต์และน้ำ ซึ่งสารใด จะถูกออกซิไดซ์หรือรีดิวซ์นั้น ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาใดจะเกิดขึ้นได้ง่ายหรือยากกว่ากัน และ เพื่อให้เห็นรายละเอียดที่ชัดเจน จึงจะขอยกตัวอย่างอิเล็กโทรลิซิสของสารละลาย $CuSO_4$ ในน้ำ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด คือ



ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่แคโทด คือ



แต่ในระหว่างการหาอิเล็กโทรลิซิสพบว่าเกิด O_2 ที่แอโนด และ $Cu(s)$ ไปเกาะที่แคโทด แสดงว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจริงคือปฏิกิริยาที่(2.19) และ (2.20) เพราะฉะนั้นปฏิกิริยาของเซลล์นี้ คือ

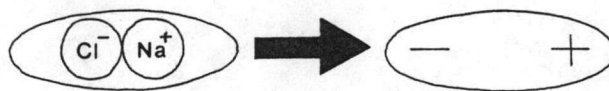


สรุปได้ว่า อิเล็กโทรลีสของสารละลาย CuSO_4 นี้จะถูกออกซิเดชันได้ง่ายกว่า SO_4^{2-} ส่วน Cu^{2+} ถูกรีดิวซ์ได้ง่ายกว่า H_2O

เนื่องจากเรื่องราวเกี่ยวกับกลไกการนำไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ นับว่ามีความสำคัญต่อการวิจัยในครั้งนี้นัก จึงจะขอสู่ถึงกลไกการนำกระแสไฟฟ้าในสารละลายสักเล็กน้อย ดังต่อไปนี้

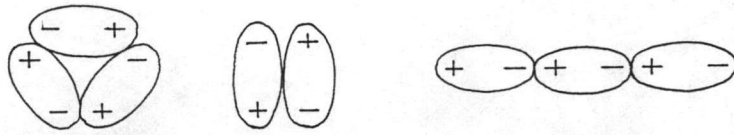
2.4 การนำไฟฟ้าในสารละลาย

อะตอมของธาตุที่รวมตัวกันเป็นโมเลกุลของสารประกอบเคมี อาจแบ่งแยกการรวมตัวเป็นสองแบบ คือ โมเลกุลมีขั้ว(polar molecule) กล่าวคือภายในโมเลกุลมีการจัดตัวของประจุไฟฟ้า โดยมีประจุบวกอยู่ข้างหนึ่ง และประจุลบอยู่ข้างหนึ่ง เช่น โมเลกุลของเกลือแกง(NaCl) (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, คณะวิทยาศาสตร์, ภาควิชาฟิสิกส์, 2530) ในหนึ่งอะตอมของเกลือแกงประกอบด้วยโซเดียมและคลอรีนอย่างละอะตอม ว่าจะเลขอิเล็กตรอนของโซเดียมที่มีเพียงอะตอมเดียว จะเข้าสู่นิวเคลียสของอิเล็กตรอนวงนอกสุดของคลอรีนอะตอมโซเดียมจึงขาดประจุลบ แสดงสภาพเป็นไอออนบวก ส่วนคลอรีนมีประจุลบเกินมา แสดงสภาพเป็นไอออนลบ โมเลกุลเกลือแกงจึงมีประจุไฟฟ้าบวกข้างหนึ่งและลบข้างหนึ่ง ดังแสดงในรูป 2.2 โมเลกุลชนิดนี้จะมีโมเมนต์ขั้วคู่(dipole moment)



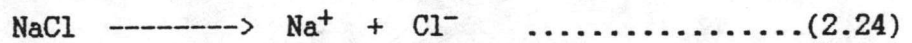
รูปที่ 2.2 แสดงโมเลกุลมีขั้ว

ส่วนโมเลกุลอีกแบบหนึ่งคือโมเลกุลไม่มีขั้ว(nonpolar molecule) โมเลกุลพวกนี้ประจุบวกและลบจะกระจายอยู่สม่ำเสมอโดยทั่ว ตัวอย่างของโมเลกุลพวกนี้ ได้แก่ โมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ต่าง ๆ เช่น น้ำตาลและกลีเซอริน โมเลกุลพวกนี้จะไม่มียโมเมนต์ขั้วคู่ ส่วนโมเลกุลของน้ำเป็นโมเลกุลมีขั้ว เมื่อมาอยู่รวมกันมาก ๆ จะจัดตัวโดยเอาประจุต่างชนิดกันอยู่ใกล้กัน ซึ่งมีการจัดตัวให้หลายลักษณะ ดังรูปที่ 2.3

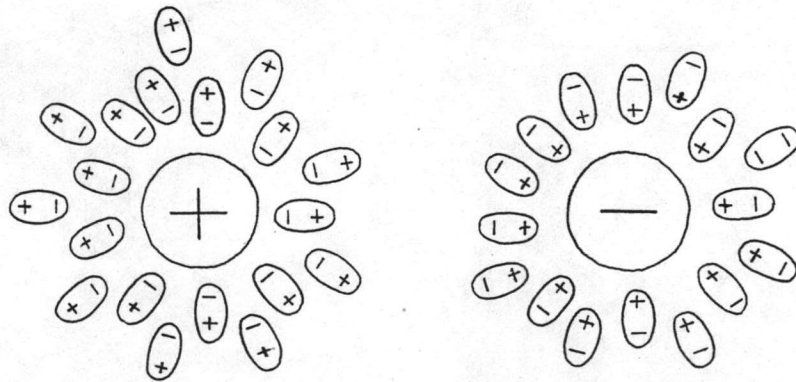


รูปที่ 2.3 แสดงการจับกันระหว่างโมเลกุลมีขั้ว

ในสารละลายจะประกอบด้วยตัวถูกละลาย และตัวทำละลาย โมเลกุลของตัวถูกละลายและตัวทำละลายจะต้องเป็นประเภทเดียวกันเท่านั้น จึงจะละลายกันได้ เช่น เกลือแกงกับน้ำ ซึ่งในกรณีนี้ แรงดึงดูดระหว่างไอออนบวกกับลบภายในโมเลกุลของ เกลือแกงมีค่าน้อยกว่าแรงดึงดูดระหว่างน้ำกับไอออนของเกลือ ประกอบกับโมเลกุลของน้ำเล็กกว่าเกลือ ฉะนั้นโมเลกุลของน้ำจึงแทรกเข้าาไป ทำให้โมเลกุลของเกลือแกงแตกตัวออกเป็นไอออนบวกและคลอไรด์ไอออน ซึ่งสามารถเขียนได้ว่า



เมื่อเกลือแกงแตกตัวแล้ว โมเลกุลของน้ำจะเข้าห้อมล้อมทันที โดยจัดเรียงตัวของไอออนเป็นดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงการล้อมรอบของโมเลกุลของตัวทำละลายต่อไอออนของตัวถูกละลาย

ถ้าโมเลกุลของน้ำมากกว่า ไอออนจะถูกโมเลกุลของน้ำล้อมมาก โอกาสชนกันจะน้อย ด้วยเหตุนี้สารละลายที่เจือจางโมเลกุลของตัวถูกละลายจึงมีโอกาสแตกตัวได้มาก เมื่อต่อขั้วไฟฟ้ามากและสมบูรณ์ในสารละลาย จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างขั้ว ไอออนบวกจะ

ถูกแรงกระทำให้เคลื่อนที่ไปยังขั้วลบหรือหามลกุลน้ำที่ล้อมไปด้วย ส่วนไอออนลบจะถูกแรงกระทำให้เคลื่อนที่เข้าขั้วบวก หรือหามลกุลน้ำที่ล้อมไปด้วยเช่นกัน ฉะนั้นสารละลายที่เจือจางจึงนำกระแสไฟฟ้าได้ดีกว่าสารละลายที่เข้มข้น

สิ่งที่เราทราบมาแล้วว่า กระแสไฟฟ้าในสารละลายเกิดจากการเคลื่อนที่ของไอออนบวกและไอออนลบ ถ้าเราสมมติให้ไอออนบวกมีประจุ Q_+ เคลื่อนที่เข้าหาขั้วลบด้วยความเร็ว v_+ และไอออนลบมีประจุ Q_- เคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวกด้วยความเร็ว v_-

$$\text{จากสมการ} \quad J = nev$$

$$\text{จะได้ว่า} \quad J = (Q_+n_+v_+) + (Q_-n_-v_-) \dots\dots\dots(2.25)$$

เมื่อ n_+ และ n_- เป็นจำนวนไอออนบวกและลบต่อปริมาตรของสารละลายตามลำดับ แต่การเกิดไอออนและปริมาณไฟฟ้าทั้งสองชนิดในสารละลายย่อมมีปริมาณ v เท่ากัน และเป็นจำนวนเดียวกันกับจำนวนโมเลกุลที่แตกตัวเป็นไอออนทั้งสอง ซึ่งให้เท่ากับ n

$$\text{เพราะฉะนั้น} \quad Q_+n_+ = Q_-n_- = Qn \dots\dots\dots(2.26)$$

$$\text{จึงได้} \quad J = Qn(v_+ + v_-) \dots\dots\dots(2.27)$$

ถ้าความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายเป็น C ก็รวมลต่อปริมาตรของสารละลาย 1 ลูกบาศก์เมตร ให้ $\alpha = (n/CN_A)$ เป็นองศาของการแตกตัว (degree of dissociation) ฉะนั้นจำนวนโมเลกุลที่แตกตัวเป็นไอออน (n) จะเป็น

$$n = \alpha CN_A \dots\dots\dots(2.28)$$

ให้ z เป็นวาเลนซี (valency) อิเล็กตรอนของธาตุที่เป็นตัวถูกละลาย ส่วน e เป็นประจุของอิเล็กตรอน ฉะนั้นประจุไฟฟ้าของไอออนจะเป็น

$$Q = ze \dots\dots\dots(2.29)$$

แทนค่าสมการ (2.28), (2.29) และสภาพการเคลื่อนที่ได้ ; b (mobility)

โดย $b = v/E$ และ $F = eN_A$ ลงในสมการ (2.27) จะได้

$$J = \alpha CzF(b_+ + b_-)E \dots\dots\dots(2.30)$$

การที่ไอออนเคลื่อนที่ได้ นั้น เป็นเพราะสนามไฟฟ้าออกแรงกระทำต่อไอออนด้วยแรงขนาด QE แต่ในขณะที่ไอออนเคลื่อนที่นั้นมันจะต้องเคลื่อนที่ผ่านไปในระหว่างโมเลกุลต่าง ๆ ในสารละลาย จึงเกิดแรงเนื่องจากความหนืด คำนเอาไว้ แรงนี้เป็นไปตามกฎของสโตกส์ (Stokes' law) ตามสมการ

$$f = 6\pi\eta rv \dots\dots\dots(2.31)$$

เมื่อ η คือสัมประสิทธิ์ความหนืดของสารละลาย r คือรัศมีของไอออนในขณะที่มีโมเลกุลของตัวถูกละลายล้อมรอบอยู่ ถ้าไอออนเคลื่อนที่เร็วขึ้น แรงต้านทานจะมีความมากขึ้น

ฉะนั้นไอออนจะมีความเร็วสูงสุดก็ต่อเมื่อ แรงกระชากบนไอออนเนื่องจากสนามไฟฟ้าสมดุลกับแรงเนื่องจากความหนืดพอดี นั่นคือ

$$6\pi\eta r v_{max} = QE$$

$$v_{max} = (QE/6\pi\eta r) \dots\dots\dots(2.32)$$

ดังนั้นสภาพการเคลื่อนที่ได้สูงสุดของไอออนจะเป็น

$$b_{max} = v_{max}/E = Q/6\pi\eta r \dots\dots(2.33)$$

จากสมการนี้ จะเห็นได้ชัดเจนว่า ไอออนที่ถูกล้อมด้วยรัศมีของตัวพาละลาย น้อย ๆ จะสามารถนำไฟฟ้าได้ดี เพราะมีรัศมีขนาดเล็ก นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ยังมีผลให้สารละลายมีความหนืดน้อยลง ทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าสูงขึ้นอีกด้วย ค่าความสามารถในการนำไฟฟ้าหรือค่าสภาพเคลื่อนที่ได้(mobility) ของไอออนบางชนิดในสารละลายมีค่าดังตารางที่ 2.1

ชนิดของไอออน	สภาพเคลื่อนที่ได้; b (m ² /v ⁻¹ s ⁻¹)
H ⁺	3.26 * 10 ⁻⁷
K ⁺	6.7 * 10 ⁻⁸
Ag ⁺	5.6 * 10 ⁻⁸
NO ₃	6.4 * 10 ⁻⁸
Cl ⁻	6.8 * 10 ⁻⁸

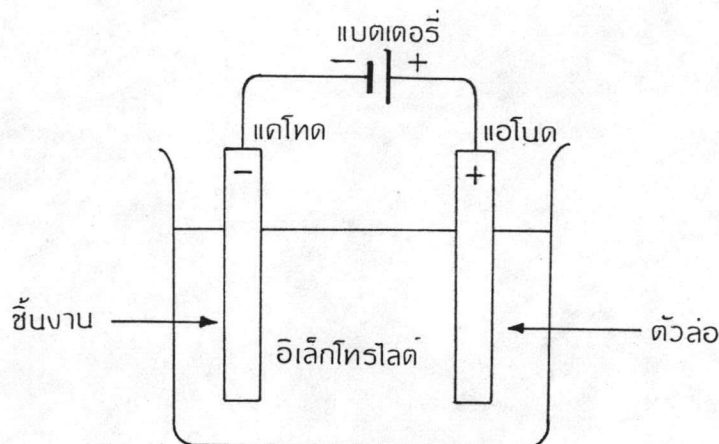
ตารางที่ 2.1 แสดงค่าสภาพเคลื่อนที่ได้ของไอออนบางชนิดในสารละลาย

ประโยชน์ที่สำคัญอย่างหนึ่งของกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสคือ การนำมาประยุกต์ใช้ในการเคลือบผิววัสดุหรือผิวชิ้นงานด้วยโลหะ ซึ่งเราเรียกว่า " การชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า " (Electroplating) รายละเอียดในเรื่องนี้ จะกล่าวดังต่อไปนี้

2.5 การชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า(Electroplating)

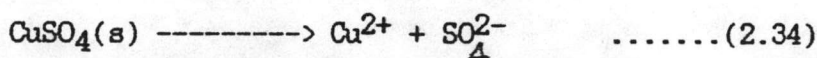
การชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า ก็คือการนำหลักการของกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสมาพัฒนา เพื่อผลิตหรือเพิ่มคุณภาพของวัสดุหรือสิ่งของเครื่องใช้ในชีวิตรประจำวันของมนุษย์ วัตถุประสงค์ของการชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้าก็คือ เพื่อชุบผิวโลหะที่เป็นชิ้นงานด้วยโลหะชนิด

ต่าง ๆ เช่น ทองแดง นิกเกิล ทองเหลือง หรือทองคำ เป็นต้น ซึ่งจะทาให้ผิวโลหะที่เป็นชิ้นงานเรียบ สวยงาม ป้องกันสนิม จึงคงทนการกัดกร่อนการใช้งานได้มากขึ้น วิธีการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

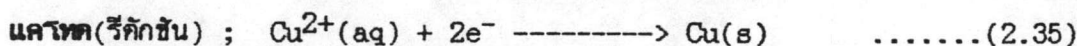


รูปที่ 2.5 แสดงการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

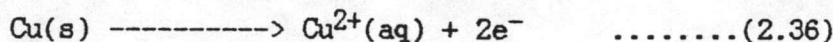
ตามรูปที่ 2.5 เป็นการแสดงวิธีการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า จะเห็นว่าโลหะที่ใช่เคลื่อนผิวจะเป็นขั้วแอโนด(บวก) โดยเราเรียกข่ง ๆ ว่า "ตัวล่อ" สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้จะต้องมีไอออนของโลหะที่ใช่เคลื่อนบนอยู่ด้วย ส่วนโลหะที่ต้องการเคลื่อนผิวจะเป็นขั้วแคโทด(ลบ) เช่น การเคลือบผิวทองแดงลงบนแผ่นสังกะสี จะใช้ตัวล่อเป็นแผ่นทองแดงบริสุทธิ์เป็นขั้วแอโนด อิเล็กโทรไลต์จะต้องมีไอออนของทองแดงบนอยู่ด้วย ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ $CuSO_4$ ละลายน้ำเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ส่วนสังกะสีจะเป็นขั้วแคโทด(อนันต์ ทองมอย, 2531) บกที่ $CuSO_4$ ที่ละลายอยู่ในน้ำ จะแตกตัวออกเป็นอนุภาคเล็ก ๆ 2 ส่วน คือ Cu^{2+} และ SO_4^{2-} ตามสมการ



เมื่อต่อแบตเตอรี่ให้ครบวงจรตามรูปที่ 2.6 Cu^{2+} จะวิ่งไปหาสังกะสีที่เป็นแคโทด(ขั้วลบ) เพื่อรับอิเล็กตรอนจากขั้วลบและเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ผิวสังกะสี ตามสมการ

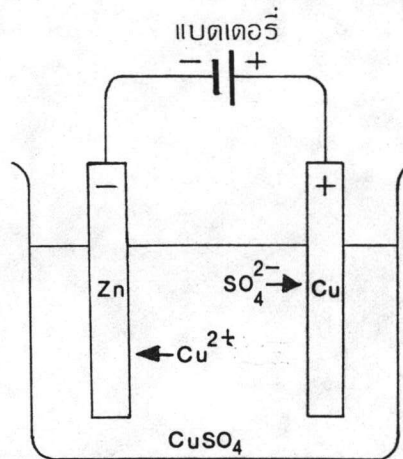


ส่วนที่ขั้วแอโนด(บวก)ซึ่งทองแดงเป็นตัวล่อ จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ตามสมการ



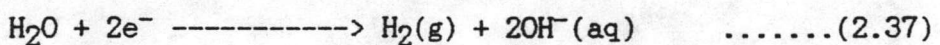
อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นนี้ จะวิ่งตามเส้นลวดไฟฟ้าผ่านแบตเตอรี่ไปยังขั้วลบ เพื่อทดแทนอิเล็กตรอนตัวเดิมที่เสียไปในการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ส่วน Cu^{2+} ที่เกิดขึ้นจะรวมตัวกับ SO_4^{2-}

ซึ่งวิ่งมาอยู่ที่ขั้วบวกอยู่ก่อนแล้วกลายเป็น CuSO_4 แทนที่ CuSO_4 ตัวก่อนที่หมดไป CuSO_4 ที่
 เกิดาตรงนี้ก็จะแตกตัวเป็น Cu^{2+} และ SO_4^{2-} เหมือนเดิม เกิดปฏิกิริยาหมุนเวียนเช่นนี้ตลอดไป
 ทรายเท่าที่ต่อแบตเตอรี่หรือมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน โดยที่ความเข้มข้นของ Cu^{2+} จะคงที่เสมอ
 และเมื่อเวลาผ่านไป จะมีโลหะทองแดง ($\text{Cu}(s)$) เคลือบผิวสังกะสีมากขึ้นเรื่อย ๆ จนผิวของ
 สังกะสีกลายเป็นผิวทองแดงไปในที่สุด

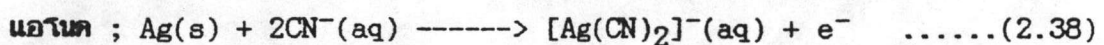


รูปที่ 2.6 แสดงการชุบผาผิวทองแดงลงบนสังกะสี

เพื่อป้องกันไม่ให้สารละลายมีลักษณะเป็นเบส ควรเติมกรด H_2SO_4 ลงไปเล็กน้อย
เพราะถ้าหากสารละลายเป็นเบสแล้ว วมเลขของน้ำอาจรับอิเล็กตรอน ทำให้เกิดปฏิกิริยาคังนี้



ซึ่งอาจทำให้ผิวทองแดงที่เคลือบแปรสภาพเป็น CuO หรือ $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ได้ และใน
 บางกรณีการเคลือบโลหะจากการรีดักชันของไอออนของโลหะโดยตรง อาจเกิดขึ้นด้วยความ
 รวดเร็วเกินไป ทำให้ผิวของโลหะที่เคลือบนั้นขรุขระได้ ถ้าสามารถหาให้อัตราการเคลือบ
 นั้นช้าลงได้ ผิวเคลือบก็จะเรียบ ซึ่งทำได้โดยการรักษาความเข้มข้นของไอออนโลหะให้ต่ำ
 โดยวิธีทำให้ไอออนเป็นไอออนเชิงซ้อน (Complex ion) เช่น การเคลือบเงิน ถ้าเติม CN^-
 ลงไปก็จะเกิดเป็น Complex ion ของ $[\text{Ag}(\text{CN})_2]^-$ อัตราการเคลือบจะช้าลงกว่าเดิม
 ทำให้ผิวเรียบ ปฏิกิริยาจะเป็นคังนี้ (ทวารงมหาวิทยาลัย, 2533)



สำหรับการฉาบผิวโลหะชนิดอื่น เช่น เงิน ทองคำ นิกเกิล ก็ยังคงมีหลักการ เหมือนกับการที่ตัวอย่างข้างต้น แต่อาจแตกต่างกันด้านรายละเอียดและวิธีการบางอย่างเล็กน้อย ในปัจจุบันการชุบฉาบผิวโลหะด้วยไฟฟ้าได้ถูกพัฒนาขึ้นอย่างมาก และนำไปใช้ในอุตสาหกรรมชุบโลหะขนาดใหญ่หลายชนิด เช่น ชุบตัวถังรถยนต์ ชุบเครื่องมือและชิ้นส่วนอุปกรณ์ในเครื่องยนต์ ชุบเคลือบผิวเครื่องประดับด้วยทองเหลือง นาก เงิน หรือทองคำ เป็นต้น

จากการศึกษารวบรวมข้อมูลทางด้านเทคนิค และวิธีการของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า พบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการชุบ มีดังต่อไปนี้ (อนันต์ ทองมอย, 2531)

ก). **ประสิทธิภาพของน้ำยาชุบ** หรือสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ ซึ่งนอกจากต้องประกอบด้วยไอออนของโลหะที่ใช้เคลือบบนอยู่ด้วยแล้ว ยังต้องเจือปนด้วยสารชนิดอื่นลงไป ด้วย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของน้ำยาชุบให้ดีขึ้น โดยปกติน้ำยาชุบสำหรับการชุบโลหะแต่ละชนิด จะแตกต่างกันในส่วนผสมและสารเคมีที่ใช้อยู่แล้ว แต่การชุบโลหะชนิดเดียวกัน เช่น ทองแดง ก็ยังมีการพัฒนาส่วนผสมของน้ำยาชุบแตกต่างกันออกไปอีกด้วย โดยน้ำยาชุบแต่ละสูตร จะเหมาะสมต่อลักษณะงานที่แตกต่างกันไป น้ำยาชุบนั้นว่ามีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของการชุบ การชุบแต่ละครั้งจึงต้องมีการตรวจสอบคุณสมบัติของน้ำยาชุบอยู่เสมอ เช่น ค่า pH ของน้ำยาชุบ ความสะอาด อุณหภูมิของน้ำยาขณะชุบ และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าขณะชุบ ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะกำหนดไว้สำหรับน้ำยาชุบแต่ละสูตร โดยผู้ใช้งานจำเป็นต้องศึกษาและความคุมให้เป็นไปตามที่กำหนดไว้

ประสิทธิภาพของน้ำยาชุบนี้ เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการชุบฉาบผิวโลหะด้วยไฟฟ้ามากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับปัจจัยด้านอื่น ๆ

ข). **ประสิทธิภาพของขั้วบวกและขั้วลบ** ซึ่งมีผลเกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของน้ำยาชุบโดยตรง จากการทดลองชุบนิกเกิล ซึ่งความถี่ของฟาราเดย์ซีลที่หนึ่ง จะได้ว่า เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าจำนวน 1 ฟาราเดย์ หรือ 26.8 แอมป์ เกล็ดผ่านสารละลายนิกเกิลเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตามทฤษฎีควรจะได้โลหะนิกเกิล เกาะที่แคโทดมีน้ำหนัก 29.35 กรัม แต่จากการทดลองจริง ๆ ผลปรากฏว่าได้โลหะนิกเกิลเกาะที่แคโทดเพียง 27.9 กรัมเท่านั้น เมื่อตรวจสอบน้ำหนักนี้จึงพบว่า กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไปในน้ำยาชุบนิกเกิลนั้น ไม่ได้สิ้นเปลืองไปกับการแยกสลายน้ำที่นิกเกิลไปเกาะที่แคโทดแต่เพียงอย่างเดียว หากแต่ยังต้องสิ้นเปลืองไปกับการแยกสลายสิ่งอื่น ๆ ที่มีอยู่ในน้ำยาอีกด้วย เช่น แก๊สไฮโดรเจน เป็นต้น ซึ่งหากเรานำเอาน้ำหนักของนิกเกิลที่ไปเกาะที่ขั้วลบซึ่งได้จากการทดลอง มาเปรียบเทียบกับน้ำหนักนิกเกิลที่ควรจะไปเกาะตามทฤษฎี ก็จะสามารถบอกประสิทธิภาพของขั้วลบ ซึ่งก็คือประสิทธิภาพของโลหะที่ใช้หาเป็นตัวล่อได้ ซึ่งในการนี้ของการชุบนิกเกิลตามการทดลองที่กล่าวมานี้ หากให้เราทราบว่า

ประสิทธิภาพของตัวล่อนิเกิล ที่ใช้ทำเป็นขั้วลบ เท่ากับ

$$= (27.9/29.35) * 100 = 95\%$$

นั่นคือปริมาณของกระแสไฟฟ้า 26.8 แอมแปร์ที่ไหลผ่านน้ำยาชุบโลหะนิกเกิล เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะมีกระแสเพียง 95% เท่านั้น ที่สิ้นเปลืองไปในการแยกสลายให้โลหะไปเกาะที่ขั้วลบ ส่วนอีก 5% จะเป็นปริมาณกระแสที่สูญเสียไป กับการแยกสลายแก๊สไฮโดรเจน เรากล่าวว่าตัวล่อนิเกิลที่ใช้ในการทดลองมีประสิทธิภาพ 95%

ส่วนประสิทธิภาพของขั้วลบของน้ำยาชนิดต่าง ๆ จะแตกต่างกันออกไป เช่น น้ำยาชุบโครเมียมจะมีประสิทธิภาพต่ำมาก คือประมาณ 10-25% เท่านั้น น้ำยาชุบเงินมีประสิทธิภาพขั้วลบสูงสุด คือเกือบ 100% ส่วนน้ำยาชุบดีบุกมีประสิทธิภาพขั้วลบประมาณ 50-75% เป็นต้น

ส่วนที่แอมแปร์นั้น กระแสไฟฟ้าที่ไปช่วยทำให้แอโนดละลายก็ไม่ได้นำมาใช้ทั้งหมดไป ในการละลายแอโนดแต่เพียงอย่างเดียว แต่ต้องสูญเสียไปกับสิ่งอื่น ๆ อีก เช่น ต้องเอาชนะความต้านทานที่เกิดขึ้นในขบวนการอิเล็กโทรเคมี ซึ่งจะทำให้เกิดเยื่อบาง ๆ รอบ ๆ แอโนด และต้องสูญเสียไปกับการละลายสิ่งเจือปนอื่น ๆ ที่ผสมอยู่ในแอโนด เป็นต้น จากการสูญเสียดังที่กล่าวมา จึงต้องคำนวณหาประสิทธิภาพของขั้วบวกหรือแอโนดด้วย แต่มีวิธีการคำนวณนี้ ส่วนมากจะคำนวณโดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้วลบ หรืออาจคำนวณด้วยวิธีหาประสิทธิภาพของขั้วลบก็ได้ ถ้าประสิทธิภาพของขั้วลบและขั้วบวกเท่ากันและคือ 100% จะแสดงว่าถ้ามีโลหะไปเกาะที่แคโทดเท่าใด ก็ต้องมีโลหะที่แอโนดละลายลงน้ำยาชุบเป็นปริมาณเท่ากัน ซึ่งน้ำยาชุบเคมีลักษณะเช่นนี้ จะจัดเป็นน้ำยาชุบที่ดีเลิศนั้นมีปัญหาใด ๆ ที่ต้องแก้ไขเลย แต่โดยปกติน้ำยาชุบจะไม่มีคุณสมบัติเช่นนี้เต็ม 100% เพราะฉะนั้นในขณะที่ชุบนั้นน้ำยาเกือบทุกชนิดจะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเร็วมาก การละลายของโลหะที่ขั้วบวก และการเกาะจับที่ขั้วลบจะแตกต่างกันอยู่ตลอดเวลา ด้วยเหตุนี้เองน้ำยาชุบจึงต้องประกอบด้วยสารหลายชนิด ซึ่งสารแต่ละตัวจะทำหน้าที่ต่างกัน เช่น สารตัวที่หนึ่งมีหน้าที่ปล่อยโลหะออกมา ตัวที่สองทำให้แอโนดละลายสม่ำเสมอและช่วยเป็นสื่อไฟฟ้า ตัวที่สามช่วยควบคุมไม่ให้มีน้ำยาเป็นกรด หรือเป็นด่างมากเกินไป ทั้งนี้เป็นต้น ทั้งนี้ก็เพราะต้องการให้น้ำยาชุบมีประสิทธิภาพของขั้วลบ สูงมากที่สุดเท่าที่จะทำได้

ค). ค่า pH ของน้ำยาชุบ ถ้าน้ำยามีไฮดรอกไซด์มากกว่าไฮดรอกซิลไอออน น้ำยาชุบนั้นจะมีสภาพเป็นกรด คือมีค่า pH น้อยกว่า 7 และน้ำยาชุบเคมีค่า pH น้อยกว่า 7 มาก ๆ แสดงว่ามีสภาพเป็นกรดมาก และในทางตรงกันข้ามน้ำยาชุบที่มีปริมาณไฮดรอกซิลไอออนมากกว่าปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออน ก็จะมีสภาพเป็นด่างหรือเบส ซึ่งค่า pH ของน้ำยาชุบจะมากกว่า 7 แต่ถ้าน้ำยาชุบมีค่า pH เท่ากับ 7 หรือ ประมาณ 7 น้ำยาชุบนั้นจะมี

สภาพเป็นกลาง

ค่า pH นี้มีอิทธิพลต่อน้ำยาชุบมาก กล่าวคือถ้าค่า pH น้อยกว่า 7 น้ำยาชุบนั้นจะมีสภาพเป็นกรด ประสิทธิภาพของขี้ผึ้งเคลือบจะลดต่ำลง แต่ถ้าค่า pH มากกว่า 7 น้ำยาชุบจะมีสภาพเป็นด่าง ทำให้ประสิทธิภาพขี้ผึ้งเคลือบต่ำลง เช่นเดียวกัน ดังนั้นในการชุบแต่ละครั้ง จึงต้องพยายามควบคุมค่า pH ให้เหมาะสมที่เฉพาะค่าค่าหนึ่ง ตามที่น้ำยาชุบสูตรที่ใช้ได้กำหนดมาให้ จึงจะทำให้การชุบมีประสิทธิภาพดี

ง). ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current density) ที่ขี้ผึ้ง ซึ่งก็คือกระแสที่ช่วยทำให้เกิดการเคลือบที่ขี้ผึ้งต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ โดยปกติจะใช้หน่วยเป็นแอมแปร์ต่อตารางฟุต หรือแอมแปร์ต่อตาราง เซนติเมตร การคำนวณหาพื้นที่ของแคโทด เพื่อหาปริมาณความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ต้องจ่ายให้ขี้ผึ้ง จะต้องกระทำกันเสมอก่อนที่จะมีการชุบ ซึ่งน้ำยาชุบแต่ละสูตรแต่ละชนิดจะกำหนดค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามาให้ด้วย เราต้องนำค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่กำหนดค่านี้ มาคำนวณหาปริมาณความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ที่ต้องใช้สำหรับการชุบชนิดนั้น ๆ อีกครั้งหนึ่ง นอกจากนี้ในขณะที่ชุบถ้าความนำยาคือเครื่อง-กวน หรือผสมเข้ากับควบคุมอุณหภูมิของน้ำยาชุบตามที่กล่าวมาแล้วแต่ต้น จะช่วยทำให้สามารถนำค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าให้มากขึ้น ซึ่งจะทำการระยะเวลาการชุบสั้นลง uly ได้ความหนาแน่นของผิวที่เท่ากัน

จ). ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะผิวของชิ้นงานและกำลังเคลือบผิว โดยปกติแล้วรูปร่างของชิ้นงานที่ต้องการจะชุบเคลือบผิวนั้น มักมีรูปร่างที่ต่างกันออกไป เช่น กลม แบน รัศมีงอ เป็นต้น รูปร่างต่าง ๆ เหล่านี้จะทำให้มีผิวเคลือบที่หนาสม่ำเสมอทั่วกันตลอดทั้งแผ่นนั้นทำได้ยากมาก จากการศึกษาธรรมชาติทางเดินของกระแสไฟฟ้าในการชุบโลหะพบว่า กระแสเดินทางไปยังจุดที่ใกล้เชิงที่สุดมากกว่าจุดที่อยู่ไกล เพราะฉะนั้น บริเวณที่อยู่ใกล้กับขี้ผึ้งข้อมมีผิวของการเคลือบที่หนาว่าจุดที่อยู่ไกลออกไป

2.6 การชุบทองและขั้นตอนการชุบทอง

ในการปฏิบัติการ การชุบโลหะด้วยไฟฟ้าจริง ๆ นั้น มีขั้นตอน เทคนิค และวิธีการที่ซับซ้อนหลายประการ จึงจะได้ประสิทธิภาพของการชุบที่ดีและมีคุณภาพ ต่อมานี้จะกล่าวถึงขั้นตอนของ การชุบทอง ซึ่งเป็นการชุบที่นิยมกันมากโดยเฉพาะทางด้านเครื่องประดับ เพราะโลหะที่ชุบเคลือบผิวด้วยทองคำมีความสวยงามมาก มองเหมือนวัตถุชิ้นนั้นเป็นทองคำจริง และยังประหยัดในการจัดหาอีกด้วย แต่เนื่องจากรายละเอียดในค่านคุณสมบัติ และหน้าที่ของสารเคมีแต่ละชนิด ที่เป็นส่วนผสมในน้ำยาชุบซึ่งจะกล่าวต่อไป นี้ไม่สามารถค้นคว้าและศึกษาโดย

ละเอียดยกได้ เพราะมีเหตุผลมาจากการแข่งขันทางการค้าของบริษัทผู้ผลิต จึงไม่สามารถอธิบายคุณสมบัติและการทำงานของน้ำยาขุดแต่ละชนิดโดยละเอียดไว้ ณ ที่นี้ได้ สำหรับขั้นตอนการขุดของมีดขุดขุดต่อไปนี้ (พิซิค เลียมพิทคณ์, 2533; อนันต์ ทองมอญ, 2531)

2.6.1 ทำความสะอาดผิวของชิ้นงาน (โลหะที่ต้องการขุดเคลื่อนผิว) เพื่อให้ผิวชิ้นงานสะอาด ไม่มีสนิม ไขมันและสิ่งอื่น ๆ เกาะ ขั้นตอนนี้นับว่าสำคัญมากขั้นตอนหนึ่ง เพราะถ้าผิวชิ้นงานไม่เรียบหรือสะอาดเพียงพอ บริเวณที่ไม่สะอาดอนุภาคโลหะจะไม่มีมาเกาะเลย หรืออาจหลุดลอกได้เมื่อใช้งานในระยะหนึ่ง การทำความสะอาดชิ้นงานนี้มีหลายวิธี ตั้งแต่วิธีง่าย ๆ คือล้างและขัดด้วยผงซักฟอกธรรมดา จนถึงการใช้สารเคมี หรือการใช้คลื่นเสียงเทคนิควิธีที่ทันสมัย ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมการขุดขนาดใหญ่ เป็นต้น การทำความสะอาดผิวของชิ้นงานมีวิธีการต่าง ๆ กัน ดังจะกล่าวต่อไปนี้

ก). ล้างและขัดด้วยผงซักฟอก โดยแช่ชิ้นงานในน้ำผสมผงซักฟอกที่เข้มข้นมากไว้สักครู่หนึ่ง แล้วใช้แปรงขนหยาบและละเอียด ขัดทำความสะอาดให้ทั่วผิวแล้วล้างน้ำให้สะอาด

ข). ขัดผิวและสนิมด้วยเครื่องขัดผิวหรือล้อขัด แล้วนำมาล้างน้ำให้สะอาดอีกครั้ง วิธีนี้เป็นวิธีหนึ่งที่ดีแต่ลงทุนสูง จะใช้เฉพาะในทางอุตสาหกรรมเท่านั้น จึงไม่นิยมทำกันในการขุดขนาดเล็ก

ค). ล้างสนิม สิ่งแปลกปลอม ทรายชิ้นงานไปจุ่ม เพื่อทำความสะอาดผิวด้วยสารเคมี ซึ่งนิยมทำกันมาก เพราะมีประสิทธิภาพและลงทุนไม่มาก วิธีนี้มีสารเคมีที่ใช้หลายชนิด เช่น น้ำชิ้นงานไปจุ่มในกรดกำมะถัน 5 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ นานพอสมควร หรือน้ำยากัดผิวซึ่งมีส่วนผสมดังต่อไปนี้

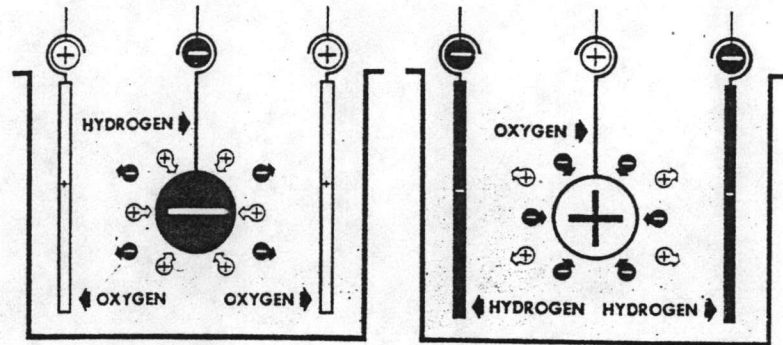
สูตรน้ำยากัดผิว

กรดกำมะถัน(ถ.พ. 1.84)(H ₂ SO ₄)	500	ลูกบาศก์ เซนติ เมตร
กรดคินประสิว(ถ.พ.1.38)(HNO ₃)	185	ลูกบาศก์ เซนติ เมตร
โซเดียมคลอไรด์(NaCl)	1.5	ลูกบาศก์ เซนติ เมตร
น้ำกลั่น	350	ลูกบาศก์ เซนติ เมตร

ในระหว่างการกัดผิวให้เงา นี้ จะมีไอแก๊สเกิดขึ้น จึงควรระมัดระวัง นอกจากนี้ยังอาจใช้กรดเกลือชนิดเข้มข้น 1 ส่วน ผสมกับน้ำ 5 ส่วนโดยปริมาตร เป็นน้ำยากัดสนิมก็ได้ ซึ่งมีประสิทธิภาพดีพอสมควร

ง). ล้างด้วยไฟฟ้า(electro clean) ซึ่งทำได้โดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านน้ำยาที่ร้อนประมาณ 60 ถึง 90 องศาเซลเซียส ซึ่งมีชิ้นงานจุ่มอยู่ในน้ำยาที่ร้อนนี้ด้วย

เพราะน้ำยาต่างที่ร้อนทุกชนิดจะมีปฏิกิริยากระทำความสะอาทต่อโลหะทุกชนิด สำหรับวิธีการล้างนั้นมีด้วยกัน 2 วิธี คือ การล้างรอยใช้ชิ้นงานเป็นขั้วลบ(cathodic clean)และการล้างรอยใช้ชิ้นงานเป็นขั้วบวก(anodic clean) ซึ่งทั้งสองวิธีมีการต่ออุปกรณ์ดังรูปที่ 2.7



ล้างรอยใช้ชิ้นงานเป็นขั้วลบ
(cathodic clean)

ล้างรอยใช้ชิ้นงานเป็นขั้วบวก
(anodic clean)

รูปที่ 2.7 แสดงวิธีการล้างชิ้นงานด้วยไฟฟ้า

สำหรับน้ำยาต่างที่ใช้นั้น เป็นน้ำยาสำเร็จซึ่งมีจำหน่ายตามท้องตลาด โดยนำมาผสมกับน้ำกลั่นเข้ากันได้ทันที แต่ถ้าจะผสมเอาเองก็สามารถผสมเองได้ ตามสูตรข้างล่างนี้

สูตรน้ำยาล้าง

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	15 กรัม/ลิตร
ไตรโซเดียมฟอสเฟต (Na ₃ PO ₄)	25 กรัม/ลิตร
โซเดียมคาร์บอเนต (Na ₂ CO ₃)	25 กรัม/ลิตร
โซเดียมเมตทาคาซิลิเกต (Na ₂ SiO ₃)	8 กรัม/ลิตร
(เติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวมเท่ากับ 1 ลิตร)	

ในการใช้ต้องควบคุมน้ำยาให้อุณหภูมิประมาณ 60 ถึง 70 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าประมาณ 6 โวลต์

สำหรับกรณีหัว ๆ ไปแล้ว จะใช้กระแสไฟฟ้าประมาณ 5 ถึง 10 แอมแปร์/ตารางเซนติเมตร หรือใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าประมาณ 4 ถึง 6 โวลต์ แต่มีข้อที่ควรคำนึงข้อหนึ่งคือ

การทำความสะอาดชิ้นงานแบบ cathodic clean นั้น ถ้าใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงเกินกว่าที่กำหนดแล้ว จะทำให้ผิวของชิ้นงานเกิดการรวมตัวกับออกซิเจนและเปลี่ยนสีไป ซึ่งถ้าเกิดลักษณะดังที่กล่าวมานี้ สามารถแก้ไขได้โดยการลดความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า หรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าลง มีข้อควรคำนึงอีกอย่างคือ การทำความสะอาดชิ้นงานด้วยวิธีล้างด้วยไฟฟ้านี้ ไม่เหมาะต่อการใช้ทำความสะอาดชิ้นงานครั้งละจำนวนมาก ๆ

2.6.2 ขุบเคลือบผิวด้วยทองแดง การชุบผาผิววัตถุเกือบทุกชนิด จะเริ่มต้นที่ การชุบผาผิวด้วยทองแดงก่อน เพราะทำได้ง่าย ประกอบกับอนุภาคทองแดงมีกำลังในการเคลือบสูง ไม่หลุดลอกง่าย จึงเหมาะที่จะใช้เป็นรองพื้นก่อนที่จะชุบโลหะชนิดอื่น ๆ วัตถุที่ชุบผาผิวด้วยทองแดงแล้วจะมีผิวที่เรียบ เงางาม นำไฟฟ้าได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังมีวัตถุบางประเภทที่ทาปฏิกิริยากับน้ำยาชุบ เช่น การชุบเคลือบนิเกิลลงบนสังกะสี ถ้าเรานำสังกะสีจุ่มน้ำยาชุบนิเกิล สังกะสีจะละลายในน้ำยาชุบนิเกิลทันที จึงต้องชุบรองพื้นด้วยทองแดงก่อน วัตถุที่ชุบรองพื้นด้วยทองแดงนี้ เมื่อนำไปชุบผาผิวด้วยโลหะชนิดอื่น ๆ จะทำได้ง่าย และสามารถควบคุมให้มีประสิทธิภาพตามที่เราร้องการได้

การชุบทองแดง ยังแยกออกเป็นการชุบทองแดงค้ำงและทองแดงกรด โดยจะเริ่มที่ชุบทองแดงค้ำงก่อน เพราะเป็นการชุบที่ทำได้ง่ายที่สุด เมื่อผ่านการชุบทองแดงค้ำงแล้ววัตถุหรือชิ้นงานจะมีผิวเป็นทองแดง จึงเรียบ แต่แน่นมันวาว มีกำลังการเคลือบสูงมาก ผิวของอนุภาคทองแดงไม่หลุดลอกง่าย น้ำยาชุบทองแดงค้ำงมีหลายสูตร แต่จะยกตัวอย่างสูตรที่ทำได้ง่าย นิยมใช้กันมากพอสมควร ซึ่งมีรายละเอียดของส่วนผสมดังนี้(พิชิต เลี่ยมพิทคณ, 2533)

สูตรผสมน้ำยาชุบทองแดงค้ำง

คอปเปอร์ไซยาไนด์ (CuCN)	15 กรัม/ลิตร
โซเดียมไซยาไนด์ (NaCN)	23 กรัม/ลิตร
โซเดียมคาร์บอเนต (Na ₂ CO ₃)	15 กรัม/ลิตร
(เติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวมเท่ากับ 1 ลิตร)	

วิธีการชุบ ใช้วิธีการชุบดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยใช้แรง เคลื่อนไฟฟ้าประมาณ 6 ถึง 12 โวลต์ หรือความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าประมาณ 10 ถึง 12 แอมแปร์/ตารางฟุต และถ้าควบคุมอุณหภูมิของน้ำยาชุบในขณะชุบให้อยู่ในช่วง 40 ถึง 60 องศาเซลเซียส ค่า pH ของน้ำยาชุบประมาณ 10 ถึง 11 และค่าความต่างจาเพาะประมาณ 1.16 ก็จะทำให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น

จากนั้น นำชิ้นงานมาล้างน้ำให้สะอาด แล้วนำมาชุบเคลือบผิวด้วยทองแดงกรดหรือ

ทองแดงเงา ซึ่งจะหาให้ชิ้นงานมีผิวเรียบยิ่งขึ้น มันวาวยิ่งขึ้น ซึ่งเมื่อนำชิ้นงานไปชุบโลหะชนิดอื่น ๆ จะได้ผิวที่เรียบและสวยงามมาก ส่วนผสมของน้ำยาชุบทองแดงกรดหรือทองแดงเงามีดังต่อไปนี้

สูตรผสมน้ำยาชุบทองแดงกรดหรือทองแดงเงา

คอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4)	250 กรัม/ลิตร
กรดกำมะถันเข้มข้น (ถ.พ. 1.84) (H_2SO_4)	10 - 30 กรัม/ลิตร
	หรือประมาณ 5-16 ลูกบาศก์เซนติเมตร
น้ำยาเพิ่มความเงาทองแดงกรด	3 ลูกบาศก์เซนติเมตร
(เติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวมเท่ากับ 1 ลิตร)	

วิธีการชุบ ใช้วิธีการชุบด้วยแสงแบบที่ 2.5 โดยใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าประมาณ 1 โวลต์ หรือความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าประมาณ 50 ถึง 75 แอมแปร์/ตารางฟุต สำหรับอุณหภูมิของน้ำยาชุบขณะชุบจะเป็นอุณหภูมิปกติ ส่วนตัวล่อที่ใช้ จะใช้ตัวล่อเป็นแท่งทองแดงชนิดพิเศษสำหรับงานชุบทองแดงกรดโดยเฉพาะ คือเป็นฟอสฟอไรซ์คอปเปอร์ (phosphorized copper anode) ซึ่งมีส่วนผสมของฟอสฟอรัสอยู่ด้วย

และเพื่อให้ น้ำยาชุบมีประสิทธิภาพเต็มที่ จึงควรควบคุมค่า pH ของน้ำยาชุบให้มีค่าประมาณ 1 หรือ 2 และค่าความต่างจาเพาะของน้ำยาประมาณ 1.16 ด้วย จะทำให้คุณภาพของการชุบจะดีขึ้น

2.6.3 ชุบเคลือบผิวด้วยนิกเกิล โดยปกติแล้ว นิกเกิลเป็นโลหะมีสีขาวก้ำกึ่ง มีจุดหลอมเหลวสูงมาก (ประมาณ 1,452 องศาเซลเซียส) มีความทนทานต่อการสึกกร่อนได้ดีมาก ในการชุบนั้นจะใส่น้ำยาเงาลงไปในน้ำยาชุบนิกเกิลด้วย ทำให้ผิวของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลนั้นเป็นสีขาวคล้ายเงิน สวยงามสามารถป้องกันการเกิดสนิมได้ด้วย จึงนิยมชุบนิกเกิลเป็นครั้งสุดท้ายก่อนการชุบโลหะชนิดอื่น ๆ เช่น ทองคำ หรือโครเมียม เป็นต้น

การชุบนิกเกิลนี้มีหลายชนิด คือ นิกเกิลดำ นิกเกิลเงา นิกเกิลทั้งเงา และนิกเกิลค่า เป็นต้น แต่ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะนิกเกิลเงาเท่านั้น เพราะในการชุบทองจะใช้เฉพาะนิกเกิลเงาเท่านั้น ซึ่งมีส่วนผสมของน้ำยาชุบนิกเกิลเงามีดังนี้

สูตรน้ำยาชุบนิกเกิลเงา

นิกเกิลซัลเฟต (NiSO_4)	250 กรัม/ลิตร
นิกเกิลคลอไรด์ (NiCl_2)	60 กรัม/ลิตร
กรดบอริก (H_3BO_3)	40 กรัม/ลิตร

น้ำยาพื้นนิเกิล	10	ลูกบาศก์เซนติเมตร/ลิตร
น้ำยานิเกิลเงา	10	ลูกบาศก์เซนติเมตร/ลิตร
(เติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวมเท่ากับ 1 ลิตร)		

วิธีการชุบ ใช้วิธีการชุบคังแสดงในรูปที่ 2.5 ระบายใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าประมาณ 1 โวลต์ หรือความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าประมาณ 40 ถึง 69 แอมแปร์/ตารางฟุต ปรับอุณหภูมิของน้ำยาชุบให้อยู่ในช่วง 50 ถึง 60 องศาเซลเซียส แต่อาจใช้ชุบที่อุณหภูมิปกติได้ แต่คุณภาพการชุบอาจไม่ดีนัก สำหรับตัวล่อจะใช้แผ่นนิเกิลที่ผลิตมาใช้กับงานค้ำนี้โดยเฉพาะ ซึ่งมีจำหน่ายตามท้องตลาด อนึ่งหากมีการควบคุมค่า pH ของน้ำยาชุบให้อยู่ในช่วง 3.5 ถึง 4.5 และความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.1 ก็จะทำให้น้ำยาชุบมีประสิทธิภาพมากขึ้น

2.6.4 ชุบทองคำ จัดเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการชุบทอง ซึ่งเสร็จสิ้นจากขั้นตอนที่แล้ว เราจะได้ชิ้นงานที่มีผิวเป็นทองคำ สุกใส แวววาว สวยงามมาก น้ำยาชุบทองคำมีหลายสูตร แต่ในที่นี้จะกล่าวเพียงหนึ่งสูตรที่มีคุณภาพดีและจัดเตรียมได้ไม่ยุ่งยาก ซึ่งมีรายละเอียดของส่วนผสมดังต่อไปนี้

สูตรน้ำยาชุบทองคำ

แผ่นทองคำจริง ๗ ประมาณ	0.75	กรัม
กรดคินบะลิว(HNO ₃)	10	ลูกบาศก์เซนติเมตร/ลิตร
กรดเกลือ(HCl)	20	ลูกบาศก์เซนติเมตร/ลิตร
โซเดียมคลอไรด์(NaCl)	20	ลูกบาศก์เซนติเมตร/ลิตร
(เติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวมเท่ากับ 1 ลิตร)		

วิธีการชุบ ใช้วิธีการชุบคังแสดงในรูปที่ 2.5 แต่สำหรับตัวล่ออาจใช้ตัวล่อเป็นแท่งทองคำจริง หรือ แท่งแพลตตินั่มแทนก็ได้ จะใช้เวลาในการชุบนานเท่าไรก็ได้ ตามแต่เราต้องการ แต่ผิวเคลือบของทองคำจะหมองคล้ำเร็วมาก จึงจะไม่สดใสและแวววาวเหมือนเดิม จึงต้องเคลือบผิวกันหมอง ซึ่งมีวิธีการหลายวิธี แต่ที่นิยมทำกันมีอยู่ 2 วิธี ดังนี้

ก). นำผิวที่ชุบทองคำมาล้างน้ำให้สะอาด แล้วอบหรือเป่าให้แห้ง จากนั้นนำใบพันหรือจุ่ม หรือทาด้วยแล็กเกอร์น้ำ ที่ใช้สำหรับงานชุบโลหะโดยตรง หรือใช้โพลียูรีเทน ก็ได้

ข). จุ่มชิ้นงานที่ชุบทองคำแล้วลงในสารละลายของกรดโครมิก 100 กรัม ในน้ำ 1 ลิตร นาน 10 - 30 นาที แล้วยกชิ้นงานมาล้างน้ำและเป่าให้แห้ง สำหรับขั้นตอนทั้งหมดของการชุบทองคำ สามารถสรุปได้ดังนี้

2.6.5 สรุปขั้นตอนการชุบทองคำ

- ทำความสะอาดผิวของชิ้นงาน โดยการซัก ล้างด้วยผงซักฟอก
ล้างด้วยน้ำฟอก หรือล้างโดยวิธีอื่น ๆ
- ล้างน้ำ
- ชุบทองแดงต่ำ
- ล้างน้ำ
- ชุบทองแดงกรด
- ล้างน้ำ
- ชุบนิเกิลเงา
- ล้างน้ำ
- ชุบทองคำ
- ล้างน้ำ
- เคลือบผิวกันหมอง

อย่างไรก็ตาม เทคนิค วิธีการ รายละเอียด และขั้นตอนการชุบทองนี้ แตกต่างกันออกไปมากมาย แม้แต่การผสมสารเคมีของน้ำยาชุบ ความสุครที่กล่าวมาแล้ว ก็ยังมีเทคนิค และขั้นตอนอีกมากเช่นกัน ซึ่งไม่สามารถกล่าวโดยละเอียดในที่นี้ได้ แต่โดยสรุปแล้วก็ยังมีขั้นตอนหลัก ๆ เหมือนดังที่แสดงมาข้างบน จะแตกต่างกันในรายละเอียดปลีกย่อยออกไปเล็กน้อย ซึ่งผู้ที่สนใจสามารถศึกษาได้จากตำราและสอบถามจากผู้เชี่ยวชาญด้านนี้ ซึ่งมีอยู่หลายท่านในปัจจุบันนี้

2.7 การชุบพลาสติก

สำหรับการชุบพลาสติก ซึ่งเป็นจุดหลักที่จะนำมาวิจัยในครั้งนี้ ได้มีการค้นคว้าวิธีการชุบขึ้นมาโดยเฉพาะ ซึ่งมีขั้นตอนการชุบที่ซับซ้อนกว่าการชุบประเภทอื่น ๆ มาก เพราะพลาสติกเป็นวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า และบางครั้งยังไวต่อการทำปฏิกิริยากับสารละลายอโลหะหรือโลหะอีกด้วย แต่พลาสติกมีลักษณะเด่นพิเศษหลายประการที่โลหะไม่มี เช่น น้ำหนักเบา สามารถขึ้นรูปได้ตามต้องการ สามารถควบคุมสมบัติทางด้านกายภาพ เช่น ความแข็ง ความยืดหยุ่น และอายุการใช้งานได้เป็นอย่างดี แม้ว่าการทนต่อความร้อน และความแข็งของพลาสติกจะไม่ดีเท่าโลหะ แต่ปัจจุบันได้มีการปรับปรุงโดยเติมสารบางอย่างลงไปในพลาสติก ซึ่งทำให้พลาสติกมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น จึงนิยมนำพลาสติกมาประดิษฐ์เป็นเครื่องมือและเครื่องใช้ในชีวิตประจำวันมากมาย

สำหรับพลาสติกที่จะนำมาชุบได้นั้น จะต้องนำเอาพลาสติกที่มีผิวอ่อน ต้องเป็นพลาสติกที่มีผิวค่อนข้างแข็ง แต่ไม่แข็งมากเกินไป เพราะฉะนั้น สารละลายที่ใช้ในกระบวนการชุบจะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของผิวพลาสติกได้ พลาสติกที่นำมาชุบกันในปัจจุบันมีหลายชนิด เช่น A.B.S. (Acrylonitrile Butadiene Styrene), และ P.P. (Poly propylene) เป็นต้น แต่ที่นิยมกันมากคือ A.B.S. เพราะผิวของพลาสติกชนิดนี้ไม่แข็ง และไม่อ่อนเกินไป และยังสามารรถเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของผิวได้ง่ายอีกด้วย

A.B.S. เป็นพลาสติกที่ทนแรงกระแทกได้ดีมาก ทนความร้อนได้ประมาณ 80 - 85 องศาเซลเซียส ทนกรดและด่างได้ดีพอสมควร นิยมใช้ทำลูกบิดวิทยุ - โทรทัศน์ ลูกบิดก๊อกน้ำของเครื่องสุขภัณฑ์ ชิ้นส่วนในรถยนต์ ชิ้นส่วนของตู้เย็น และอื่น ๆ อีกมากมาย พลาสติก A.B.S. เกิดจากการเกิดพอลิเมอร์ร่วม (copolymerization) ของ Acrylonitrile Butadiene และ Styrene โดยส่วนประกอบที่มีหลายอัตราส่วนแล้วลักษณะและการใช้งานสำหรับ A.B.S. เพื่อการชุบนั้นต้องมีส่วนผสมของ Butadiene อยู่ 20 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์ พลาสติก A.B.S. เพื่อการชุบนี้ มีหลายเกรด แต่ละเกรดก็มีขั้นตอนการชุบแตกต่างกันไป

ต่อไปนี้จะอธิบายถึงวิธีการและขั้นตอนในการชุบพลาสติก A.B.S. ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้ โดยมีหลักการย่อ ๆ คือ หากผิวของพลาสติกให้สามารถนำไฟฟ้าได้ โดยการเคลือบผิวของพลาสติกด้วยอนุภาคทองแดงเป็นอันดับแรก หลังจากนั้นนำพลาสติกที่เคลือบผิวด้วยทองแดงนี้ไปชุบโลหะชนิดอื่น ๆ ตามที่เราต้องการ ด้วยวิธีชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้าดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.5 และ 2.6 ตามปกติ รายละเอียดของวิธีการในแต่ละขั้นตอน มีดังต่อไปนี้

2.7.1 ขั้นตอนการชุบพลาสติก

ขั้นตอนต่อไปนี้ เป็นการหาผิวของพลาสติกให้นำไฟฟ้า โดยการเคลือบผิวด้วยอนุภาคทองแดง ดังมีรายละเอียดของวิธีการ ดังต่อไปนี้ (อนันต์ ทองมฤต, 2531)

ก). ทำความสะอาดผิวพลาสติก (Cleaning) เพื่อกำจัดคราบน้ำมันและไขมันต่าง ๆ ที่ติดบนผิวพลาสติก โดยล้างและขัดด้วยผงซักฟอก หรือน้ำยาล้างที่มีส่วนประกอบดังต่อไปนี้

น้ำยาทำความสะอาดผิวพลาสติก

โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3)	20 กรัม/ลิตร
โซเดียมฟอสเฟต (Na_2PO_4)	20 กรัม/ลิตร
โซเดียมเมตคาซิลิเกต (Na_2SiO_4)	5 กรัม/ลิตร
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	10 กรัม/ลิตร

(เติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวมเท่ากับ 1 ลิตร)

วิธีการใช้ นำพลาสติกที่ต้องการจะชุบ จุ่มลงในน้ำยาตามสูตรข้างบนนี้ นานประมาณ 5 นาที โดยปรับอุณหภูมิของน้ำยาให้ประมาณ 40 องศาเซลเซียส แล้วนำมาล้างน้ำสะอาดอีกครั้งหนึ่ง แล้วนำมาจุ่มกรดกำมะถัน 10% (โดยปริมาตร) นานพอประมาณ แล้วนำไปล้างน้ำสะอาดอีกครั้งหนึ่ง

ข). Chemical Etching เป็นการกัดผิวพลาสติกให้ขยาบ เพื่อให้การซึมซับของสารเคมีในชั้นคอนต่อไปเป็นไปด้วยดี จึงมีความสำคัญมากชั้นคอนหนึ่ง การทำงานของน้ำยาที่ใช้ในชั้นคอนนี้ จะขึ้นกับความเข้มข้นและอุณหภูมิของน้ำยาเป็นหลัก จึงต้องควบคุมความเข้มข้นและอุณหภูมิของน้ำ ให้เป็นไปตามที่กำหนดมา มิฉะนั้นจะทำให้คุณภาพของการชุบไม่ดีเท่าที่ควร น้ำยาที่ใช้ในชั้นคอนนี้ มีส่วนประกอบดังนี้

น้ำยา Chemical Etching

กรดโครมิก (H_2CrO_4)	420 กรัม/ลิตร
กรดกำมะถัน (H_2SO_4)	380 กรัม/ลิตร
(เติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวมเท่ากับ 1 ลิตร)	

วิธีการใช้ ปรับอุณหภูมิของน้ำยาให้ประมาณ 65 องศาเซลเซียส นำพลาสติกที่ผ่านชั้นคอนข้อ ก มาแล้ว จุ่มลงในน้ำยาสูตรดังกล่าวนี้ นานประมาณ 7 นาที จากนั้นนำมาล้างน้ำสะอาดอีกครั้งหนึ่ง

ค). Sensitizing ชั้นคอนนี้ เป็นการทำให้ผิวพลาสติกไวต่อปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อประโยชน์ในชั้นคอนต่อไป ซึ่งก็คือการทำให้เกิดชั้นดีบุกชั้นบนผิวของพลาสติกนั่นเอง น้ำยาที่ใช้ มีส่วนผสมดังต่อไปนี้

น้ำยา Sensitizing

สแตนนัส คลอไรด์ ($SnCl_2$)	10 กรัม/ลิตร
กรดเกลือ (HCl)	40 กรัม/ลิตร
(เติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวมเท่ากับ 1 ลิตร)	

วิธีการใช้ นำพลาสติกที่ผ่านชั้นคอนข้อ ข. จุ่มลงในน้ำยาตามสูตรข้างบนนี้ นานประมาณ 2 - 3 นาที ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำมาล้างน้ำสะอาดอีกครั้งหนึ่ง

ง). Activate ชั้นคอนนี้จะเร่งผิวพลาสติกให้ไวต่อปฏิกิริยาเคมียิ่งขึ้น โดยให้พลาตทินัมคลอไรด์ ($PdCl_2$) ซึมลงเกาะบนผิวของพลาสติก น้ำยาที่ใช้มีส่วนผสม ดังต่อไปนี้

น้ำยา Activate

พลาตาเทียม คลอไรด์(PdCl ₂)	0.25 - 0.5	กรัม/ลิตร
กรดเกลือ(HCl)	10	มิลลิกรัม/ลิตร
(เติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวมเท่ากับ 1 ลิตร)		

วิธีใช้ จุ่มพลาตินิกที่ผ่านชั้นคอนซอร์ ค.มาแล้ว ลงในน้ำยาสูตรดังกล่าวนี้ นานประมาณ 2 นาที ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำมาล้างน้ำสะอาดอีกครั้งหนึ่ง

๑). **ชุบทองแดงแบบไม่ใช้ไฟฟ้า หรือชุบนิกเกิลแบบไม่ใช้ไฟฟ้า** (Electroless copper or Electroless nickel) ขั้นตอนนี้เป็นการเคลือบโลหะทองแดง หรือนิกเกิลลงบนผิวพลาตินิกโดยนำเข้าไปเพื่อทำให้ผิวของพลาตินิกสามารถนำไฟฟ้าได้ วิธีการเช่นนี้เรียกว่า Reducing agent น้ำยาที่ใช้มีส่วนประกอบดังต่อไปนี้

น้ำยาชุบทองแดงแบบไม่ใช้ไฟฟ้า

คอปเปอร์ ซัลเฟต(CuSO ₄)	5	กรัม/ลิตร
โซเดียม ไฮดรอกไซด์(NaOH)	7	กรัม/ลิตร
โซเดียมโบรไมด์ไฮดรอกไซด์(NaKC ₄ H ₄ O ₆)	40	กรัม/ลิตร
พอมอลคัลไฮด์ 37%	30	มิลลิกรัม/ลิตร
(เติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวมเท่ากับ 1 ลิตร)		

น้ำยาชุบนิกเกิลแบบไม่ใช้ไฟฟ้า

นิกเกิลซัลเฟต(NiSO ₄)	40	กรัม/ลิตร
โซเดียมซีเตรต(NaC ₆ H ₇ O ₇)	24	กรัม/ลิตร
โซเดียมอะซิเตต(CH ₃ COONa)	14	กรัม/ลิตร
โซเดียมไฮโปฟอสไฟท์(Na ₃ PO ₂)	20	กรัม/ลิตร
แอมโมเนียมคลอไรด์(NH ₃ Cl)	5	กรัม/ลิตร
(เติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวมเท่ากับ 1 ลิตร)		

การใช้งาน นำพลาตินิกที่ผ่านชั้นคอนซอร์ จากข้อ ๑. จุ่มลงในน้ำยาชุบทองแดงแบบไม่ใช้ไฟฟ้า นานประมาณ 10 - 15 นาที ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำมาล้างน้ำสะอาด จากนั้น นำไปจุ่มในน้ำยาชุบนิกเกิลแบบไม่ใช้ไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นานประมาณ 10 ถึง 15 นาที นำไปล้างน้ำสะอาดอีกครั้งหนึ่ง

เมื่อผ่านขั้นตอนทั้งหมดที่กล่าวมาแล้ว ผิวพลาสติกจะมีโลหะทองแดง และนิกเกิลเคลือบอยู่ ผิวพลาสติกจึงนำไฟฟ้าได้ จากนั้นจะนำพลาสติกที่ผ่านกระบวนการทั้งหมดมาแล้วนี้ไปชุบฉาบผิวด้วยโลหะชนิดอื่น ๆ แบบใช้ไฟฟ้า เช่น ทองคำ โครเมียม เงิน ทองเหลือง หรือสังกะสี โดยใช้อันตอนและวิธีการของการชุบโลหะชนิดนั้น ๆ เหมือนเดิมทุกประการ ซึ่งงานที่นี้ จะนำกล่าวถึงรายละเอียดของการชุบของโลหะแต่ละชนิด เพราะเห็นว่ามีส่วนเกี่ยวข้องกับภารกิจวิจัยในครั้งนี้เท่าไรนัก แต่สำหรับผู้สนใจ ก็สามารถศึกษาได้จากหนังสือที่พิมพ์จำหน่ายตามท้องตลาดทั่ว ๆ ไป

และเพื่อให้เห็นถึงลำดับของขั้นตอนการชุบพลาสติกที่ชัดเจน จึงได้สรุปขั้นตอนการชุบพลาสติก โดยย่อไว้ดังนี้

2.7.2 สรุปขั้นตอนการชุบพลาสติก

1. ล้างไขมัน
2. ล้างน้ำสะอาด
3. จุ่มกรดกำมะถัน 10% (โดยปริมาตร) นานพอประมาณ
4. ล้างน้ำ
5. กัดผิว (chemical etching) นานประมาณ 7 นาที
6. ล้างน้ำ
7. sensitizing นานประมาณ 2 - 3 นาที
8. ล้างน้ำ
9. activate นานประมาณ 2 นาที
10. ล้างน้ำ
11. ชุบทองแดงแบบไม่ใช้ไฟฟ้า นานประมาณ 10 - 15 นาที
12. ล้างน้ำ
13. ชุบทองแดงเงา นานประมาณ 10 - 15 นาที
14. ล้างน้ำ
15. ชุบนิกเกิลเงา นานประมาณ 10 - 15 นาที
16. ล้างน้ำ
17. ชุบโครเมียม หรือชุบโลหะชนิดอื่น ๆ ตามต้องการ
18. ล้างน้ำ

ปัจจุบันนี้การชุบพลาสติก ได้ปรับปรุงให้ดีขึ้น และย่อกรรมวิธีการชุบให้ชั้นคอนน้อยลง โดยให้ชั้นคอน Sensitive ร่วมกับชั้นคอน Activate และเรียกรวมว่า Catalyst ซึ่ง มีน้ำยาที่ใช้หลายสูตร แต่จะยกตัวอย่างมาเพียง 3 สูตร ซึ่งมีส่วนผสมของน้ำยาในแต่ละสูตร ดังต่อไปนี้

Catalyst สูตรที่ 1

สนเคนนิสคลอไรด์(SnCl_2)	2 กรัม/ลิตร
พาลาเดียมคลอไรด์(PdCl_2)	0.2 กรัม/ลิตร
กรดเกลือ(HCl)	10 มิลลิลิตร/ลิตร
(เติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวมเท่ากับ 1 ลิตร)	

Catalyst สูตรที่ 2

พาลาเดียมคลอไรด์(PdCl_2)	0.7 กรัม/ลิตร
สนเคนนิสคลอไรด์(SnCl_2)	35 กรัม/ลิตร
สนเคนนิคคลอไรด์(SnCl_4)	4.5 กรัม/ลิตร
กรดเกลือ(HCl)	500 กรัม/ลิตร
(เติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวมเท่ากับ 1 ลิตร)	

Catalyst สูตรที่ 3

Catalyst สูตรที่ 3 นี้ เป็น Catalyst สำเร็จรูปสำหรับใช้ในอุตสาหกรรม ชุบพลาสติกโดยตรง หาซื้อได้ตามท้องตลาดทั่วไป โดยต้องนำมาผสมกับกรดเกลือ ซึ่งมีส่วนผสมดังต่อไปนี้

แคททาไลส(ซื้อตามท้องตลาด)	1 ส่วน
กรดเกลือ 35%	1 ส่วน
(เติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวมเท่ากับ 1 ลิตร)	

การใช้งาน นานแผ่นพลาสติกที่ผ่านชั้นคอน การล้างไขมัน และกัดผิว (etching) มาแล้ว จุ่มลงในน้ำยา Catalyst สูตรใดสูตรหนึ่งตามข้างบน นานประมาณ 3 - 5 นาที ที่อุณหภูมิปกติ

สำหรับชั้นคอนการชุบพลาสติก แบบ Catalyst นี้ สามารถเป็นชั้นคอนได้ดังนี้

2.7.3 สรุปขั้นตอนการชุบพลาสติกแบบ Catalyst

- ล้างไขมัน
- ล้างน้ำ
- กัดผิว(etching) นานประมาณ 7 นาที
- จุ่มกรดเกลือ 50 มิลลิลิตร/ลิตร (นานพอประมาณ)
- ล้างน้ำ
- จุ่ม Catalyst นานประมาณ 3 - 5 นาที
- ล้างน้ำ
- จุ่มกรดกำมะถัน 50 - 150 มิลลิลิตร/ลิตร นานประมาณ 2 - 5 นาที
- จุ่มนาเอมมเนี่ย 50 มิลลิลิตร/ลิตร นานประมาณ 5 - 10 วินาที
- ล้างน้ำ
- ชุบนิเกิลแบบนำเข้าไฟฟ้า นานประมาณ 4 - 10 นาที
- ล้างน้ำ
- ชุบทองแดงเงา นานประมาณ 10 - 15 นาที
- ล้างน้ำ
- ชุบนิเกิลเงา นานประมาณ 10 - 15 นาที
- ล้างน้ำ
- ชุบโครเมียม นานประมาณ 30 วินาที - 2 นาที
- ล้างน้ำ

ในการชุบ บางครั้งจำเป็นต้องลอกผิวชิ้นงานที่ชุบทองแดงแบบนำเข้าไฟฟ้า และชิ้นงานที่ชุบนิกเกิลแบบนำเข้าไฟฟ้าออก เพราะมีคุณภาพไม่ดี ซึ่งสามารถกระทำได้ดังนี้ คือ นำชิ้นงานเช่นนี้มาตามสูตรต่อไปนี้

กรดเกลือ(HCl)	210 กรัม/ลิตร
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์(H ₂ O ₂)	50 มิลลิลิตร/ลิตร
(เติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวมเท่ากับ 1 ลิตร)	

จะเห็นว่า การชุบผิวโลหะลงบนผิวพลาสติกที่ทำกันในปัจจุบันนี้ มีวิธีการและขั้นตอนที่ยุ่งยาก ซับซ้อนมาก เพราะพลาสติกไม่นำไฟฟ้า การชุบจึงต้องเคลือบผิวพลาสติกด้วยทองแดงก่อนเพื่อให้นำไฟฟ้า กำลังเคลือบจึงมีดีนัก เมื่อใช้งานไปนาน ๆ ผิวโลหะที่เคลือบจะ

หลุดลอกออก การนำพอลิเมอร์น้ำพื้อซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิตพลาสติกประเภทหนึ่ง มาพัฒนาหาเทคนิคและวิธีการชุบฉาผิวด้วยโลหะ จึงนำเป็นวิธีการที่ดี เพราะอนุภาคของโลหะ จะเกาะติดกับอนุภาคของพลาสติกโดยตรง และคาดว่าอนุภาคโลหะบางอนุภาคคงจะฝังติดลึกไปถึงเนื้อภายในของพลาสติก กำลังการยัดติดคงสูงมาก น้หลุดลอกแม้ว่าจะใช้งานเป็นระยะเวลาที่ยาวนาน ผลที่ได้จึงจะเป็นประโยชน์อย่างมาก เมื่อนำมาประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวัน

ในบทต่อไป จะกล่าวถึงการวัดความต้านทานไฟฟ้าที่ผิว และสภาพความนำไฟฟ้าที่ผิวของแผ่นฟิล์มพอลิไพร์โรลที่สังเคราะห์ขึ้นมา สำหรับใช้ในการวิจัยครั้งนี้โดยเฉพาะ ส่วนในตอนสุดท้ายจะกล่าวถึง การประดิษฐ์เครื่องมือ เพื่อนำมาใช้ช่วยในการวิจัยครั้งนี้ รายละเอียดของเรื่องต่าง ๆ ดังที่กล่าวมานี้ มีดังต่อไปนี้