บทที่ 3

กระบวนการตกแต่งผิวโลหะประเภทสังกะสี – โครเมี่ยม

3.1 ภาพรวมของกระบวนการผลิต

กระบวนการตกแต่งผิวโลหะประเภทชุบสังกะสี – โครเมี่ยม ประกอบด้วยหลักใหญ่ 3 ขั้น คือ การเตรียมผิวชิ้นงาน การชุบเคลือบผิวโลหะ และการปรับปรุงคุณภาพชิ้นงานหลังชุบเคลือบ

3.1.1 กระบวนการเตรียมผิวชิ้นงาน เป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อให้แน่ใจว่าจะไม่ก่อให้เกิดปัญหาในระหว่างการชุบเคลือบผิวโลหะ และเพื่อให้ชิ้นงานมีคุณภาพสูง ตัวอย่างกระบวนการเตรียมผิว เช่น การล้างไขมัน การล้างน้ำ การกัดกรดกำจัดออกไซด์ของโลหะ การล้างกรด และการกัดกรดกระตุ้นผิวชิ้นงาน เป็นต้น

3.1.2 กระบวนการชุบเคลือบผิวโลหะ เป็นกลไกทางเคมีไฟฟ้า หรือเคมีฟิสิกส์สำหรับเคลือบผิวโลหะ เช่น การชุบสังกะสี ซึ่งภายหลังจากการชุบเคลือบผิวชิ้นงานด้วยโลหะเรียบร้อยแล้ว จำเป็นต้องล้างชิ้นงานเพื่อล้างน้ำยาเคมีออก ก่อนเข้าสู่กระบวนการขั้นต่อไป โดยเป็นการล้างด้วยน้ำในถังล้าง

3.1.3 การปรับปรุงคุณภาพชิ้นงานหลังชุบเคลือบผิวโลหะ เป็นการป้องกันพื้นผิวจากความชื้นไม่ทำให้ผิวหมองและเกิดสนิม ทั้งยังเพิ่มคุณสมบัติการต้านทานความร้อน ความเงางาม สี เช่น การเคลือบโครเมตหลังการชุบสังกะสี เป็นต้น

ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญของกระบวนการตกแต่งผิวโลหะ ได้แก่ การใช้น้ำและการเกิดน้ำเสีย ซึ่งกระบวนการที่มีการใช้น้ำและก่อให้เกิดน้ำเสียในปริมาณมากที่สุด ได้แก่ กระบวนการเตรียมผิวชิ้นงาน โดยเฉพาะในขั้นตอนการล้างชิ้นงานด้วยน้ำซึ่งจะก่อให้เกิดน้ำเสียที่มีฤทธิ์เป็นกรด-ด่าง และไขมันปนเปื้อน

3.2 กระบวนการล้างน้ำ (Rinsing)

การล้างน้ำเป็นขั้นตอนสำคัญในกระบวนการตกแต่งผิวโลหะทุกประเภท โดยเป็นการใช้น้ำสะอาดในการล้างสารเคมีที่ติดออกมากับชิ้นงาน หรือที่เรียกว่า "แดรก-เอาท์ (Drag Out)" ก่อนจะเข้าสู่กระบวนการอื่น ๆ ต่อไป ซึ่งขั้นตอนการล้างน้ำนี้จะพบอยู่ในทุกช่วงของกระบวนการตกแต่งผิวโลหะ เช่น การล้างน้ำภายหลังชิ้นงานผ่านการทำความสะอาดด้วยสารเคมี การล้างน้ำภายหลังชิ้นงานผ่านการชุบเคลือบผิวโลหะ เป็นต้น ซึ่งหากชิ้นงานที่ผ่านการล้างไม่ดี นอกจากจะมีผลต่อการชุบแล้ว ยังมีผลทำให้สารเคมีต่าง ๆ ในทุกบ่อของการผลิตมีการปนเปื้อน และเสื่อมสภาพได้เร็ว

3.2.1 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการล้างน้ำ

B.Kushner และ S.Kushner (1994) อธิบายหลักการของการล้างน้ำว่า เป็นกระบวนการเจือจาง (Dilution Process) ซึ่งต้องอาศัยหลักการถ่ายโอนมวลเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยมวลของสารที่ถูกถ่ายโอน ได้แก่ เกลือละลายน้ำ (dissolved salts) ที่ติดอยู่บริเวณผิวของชิ้นงานหรือบาร์เรลของชิ้นงานไปอยู่ในน้ำของบ่อน้ำล้าง ซึ่งการถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้นมี 2 ปรากฏการณ์หลัก คือ การแพร่ (Diffusion) และ การพา (Convection)

การแพร่เป็นกระบวนการทางอะตอมมิก ซึ่งอะตอมหรือโมเลกุลของสารที่ละลายน้ำได้เคลื่อนผ่านอะตอมอื่น เช่น น้ำ พลังงานอิสระที่ทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลดังกล่าวมาจากผลต่างของความเข้มข้นของสารละลายในบริเวณผิวชิ้นงานซึ่งเข้มข้นมาก กับสารละลายในถังน้ำล้างซึ่งเจือจางกว่า ซึ่งการแพร่จะขึ้นกับลักษณะเฉพาะในการเคลื่อนที่ของแต่ละโมเลกุล แต่ที่สำคัญมันจะเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นอย่างช้า โดยความเร็วของการแพร่จะขึ้นกับอุณหภูมิ และขนาดของโมเลกุลที่แพร่ผ่านเมื่อเทียบกับขนาดของโมเลกุลโดยรอบ

การพาเป็นกระบวนการที่ชั้นของของเหลวซึ่งประกอบด้วยเกลือที่ละลายน้ำได้ เคลื่อนผ่านชั้นของของเหลวอื่น ๆ เช่น น้ำ ซึ่งกระบวนการนี้สามารถใส่พลังงานจากภายนอก เช่น การกวน การปั๊ม หรือการสั่น เพื่อให้เกิดการถ่ายโอนมวลได้เร็วขึ้น ซึ่งในกระบวนการล้างน้ำถ้ามีการใส่พลังงานเข้าไปมากจะช่วยให้ประสิทธิภาพในการล้างน้ำสูงขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าสามารถใช้เวลาในการล้างได้สั้นลง

Clarke, Tallmadge และคณะ (1989) พยายามอธิบายกระบวนการล้างน้ำ บนพื้นฐานของหลักการแพร่เพียงอย่างเดียว โดยประยุกต์ใช้กฎการแพร่ของฟิกส์ (Fick's laws) ดังสมการที่ 3.1 แต่พบว่ายังไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ของกระบวนการล้างน้ำได้เนื่องจากสภาวะดังกล่าวจะไม่เกิดขึ้นจริงในบ่อน้ำล้าง และไม่มีผู้สนใจมากนักเนื่องจากไม่มีความหมายและไม่มีผลต่อการนำไปใช้จริง จึงเป็นเพียงสิ่งที่น่าศึกษาสำหรับทางวิชาการเท่านั้น

$$C_r = C_p Q_D / (\tfrac{1}{2} D^* t)^{\frac{1}{2}} \qquad (3.1)$$

เมื่อ C = ความเข้มข้นของสิ่งเจือปนในบ่อน้ำล้าง

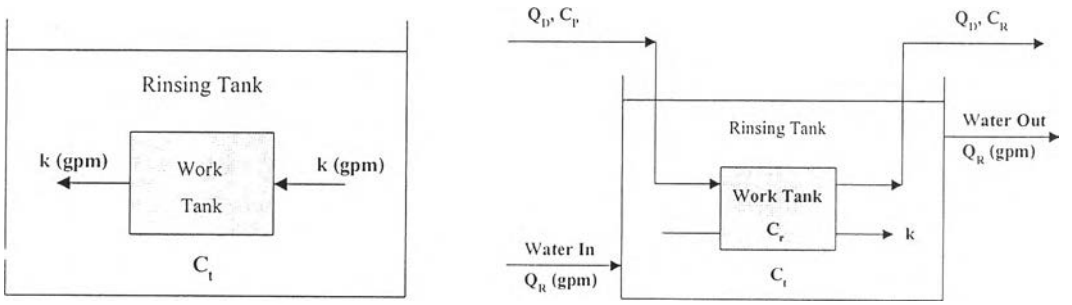
C_p = ความเข้มข้นของสิ่งเจือปนที่ติดอยู่ในชิ้นงาน

Q_D = ปริมาณแดรก-เอาท์ (หน่วยเป็นปริมาตรต่อพื้นที่ผิวชิ้นงาน)

D = ค่าคงที่การแพร่ของเกลือ

t = ระยะเวลาสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับน้ำก่อนถูกยกขึ้นมา

B.Kushner และ S.Kushner (1994) อธิบายกระบวนการล้างน้ำด้วยสมการในรูปแบบที่ง่ายกว่า และได้เรียกว่า "Tank-in-Tank Rinsing Model" (ดังรูป 3.1) ซึ่งเป็นการตั้งสมมติฐานว่าชิ้นงานหรือบาร์เรลที่เข้ากระบวนการล้างน้ำมีลักษณะเป็นถังหนึ่งถังที่มีสารเคมีติดออกมาด้วย จุ่มลงในถังน้ำล้าง โดยมีการนำค่าอัตราประสิทธิผลการผสม (effective mixing rate, k) เข้ามาเกี่ยวข้องกับการทำดุลมวลสาร



(ก) การล้างแบบน้ำนิ่ง (ข) การล้างแบบน้ำล้นต่อเนื่อง

รูป 3.1 "Tank-in-Tank Rinsing Model" สำหรับการล้างแบบน้ำนิ่ง การล้างแบบน้ำล้นต่อเนื่อง

จากรูป 3.1 อธิบายได้ด้วยสมการดุลมวลสารในรูปของดิฟเฟอเรนเชียล (Differential) และสมการดุลมวลสารที่สภาวะคงตัว (Steady State) ดังต่อไปนี้

การล้างแบบน้ำนิ่ง

(สำหรับชิ้นงานหรือบาร์เรล) $dC_r = (k/Q_D)(C_t - C_t)dt$ (3.2)

(สำหรับถังน้ำล้าง) $dC_t = (k/V)(C_r - C_t)dt$ (3.3)

ที่สภาวะคงตัวจากสมการ 3.2 และ 3.3 จะได้เป็นสมการ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ

(สำหรับชิ้นงานหรือบาร์เรล) $C_r = (Q_D C_p/V)(1 + (V/Dr)\exp(-kt/Q_D))$ (3.4)

(สำหรับถังน้ำล้าง) $C_t = (Q_D C_p/V)(1 - \exp(-kt/Q_D))$ (3.5)

การล้างแบบน้ำล้นต่อเนื่อง

(สำหรับชิ้นงานหรือบาร์เรล) $dC_r = (C_p + kC_t/Q_D - C_r - kC_r/Q_D)dt$ (3.6)

(สำหรับถังน้ำล้าง) $dC_t = (kC_r/V - kC_t/V - Q_R C_t/V)dt$ (3.7)

ที่สภาวะคงตัวจากสมการ 3.6 และ 3.7 จะได้เป็นสมการ 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ

(สำหรับชิ้นงานหรือบาร์เรล) $C_r = C_p/(1 + Q_R/Q_D + Q_R/k)$ (3.8)

(สำหรับถังน้ำล้าง) $C_t = C_p/(1 + Q_R/Q_D + Q_R/k)$ (3.9)

เมื่อ C_r = ความเข้มข้นของสิ่งเจือปนที่อยู่ในชิ้นงาน

C_t = ความเข้มข้นของสิ่งเจือปนที่อยู่ในถังน้ำล้าง

k = ค่าอัตราประสิทธิผลการผสม (หน่วย : ปริมาตรต่อเวลา)

Q_R = อัตราการไหลของน้ำล้าง

exp = ลอการิมิทฐานธรรมชาติ (e)

V = ปริมาตรของน้ำล้างในบ่อน้ำล้าง

จากสมการข้างต้นเห็นได้ว่าหากกระบวนการล้างน้ำใดที่มีค่าอัตราประสิทธิผลการผสมสูงมาก ๆ ($k = \infty$) กระบวนดังกล่าวจะเข้าใกล้เคียงกับรูปแบบของสมการที่มีสมมติฐานว่าเป็นการผสมแบบสมบูรณ์ (Perfect Mixing)

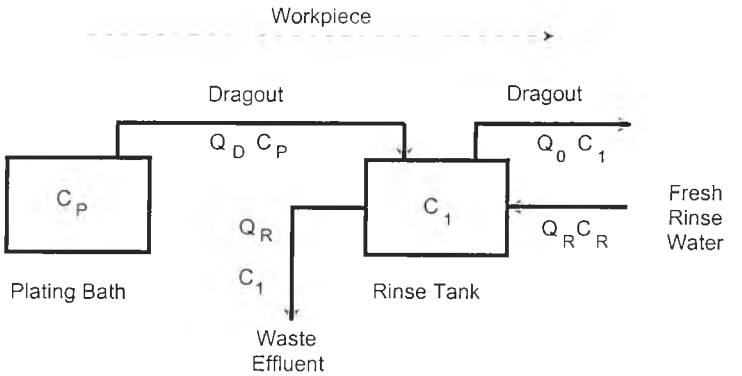
Edward และ Angela (1994) ประยุกต์ใช้หลักการดุลมวลสารสำหรับการลดน้ำเสียในกระบวนการตกแต่งผิวโลหะ โดยดำเนินการสร้างแบบจำลองของกระบวนการล้างน้ำล้นต่อเนื่อง ซึ่งแบบจำลองที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับผลการวัดข้อมูลจริงจึงได้ใช้แบบจำลองดังกล่าวในการศึกษาถึงแนวทางลดการใช้น้ำของกระบวนการล้างน้ำใน 2 แนวทาง ได้แก่ 1) การปรับลดปริมาณแดรก-เอาท์ และ 2) การปรับลดปริมาณน้ำล้าง ซึ่งจากการศึกษาทำให้สามารถลดการใช้น้ำลงได้ถึงร้อยละ 24 โดยที่ระบบบำบัดน้ำเสียยังสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.2.2 รูปแบบของกระบวนการล้างน้ำ

กระบวนการล้างน้ำที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีหลายรูปแบบ ตามวัตถุประสงค์และขนาดพื้นที่ใช้สอยของโรงงาน ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นรูปแบบหลัก ๆ ดังต่อไปนี้

3.2.2.1 การล้างน้ำนิ่ง (Drag-out Rinse)

การล้างน้ำนิ่ง เป็นการล้างชิ้นงานโดยจุ่มชิ้นงานลงในบ่อน้ำล้างที่ไม่มีการเปิดน้ำไหลเข้ามา ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไปน้ำล้างในบ่อจะมีความเข้มข้นของสารเคมีสูงขึ้นจนต้องถ่ายทิ้ง หรืออาจมีการนำน้ำในส่วนนี้กลับไปใช้ในการเตรียมเคมีต่อไป ลักษณะดังรูป 3.2



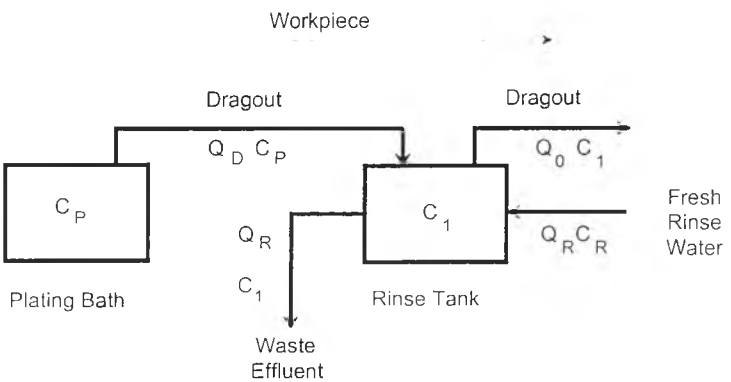
รูป 3.2 กระบวนการล้างแบบน้ำนิ่ง

สมการของบ่อน้ำล้างนิ่งในกรณีที่เป็นการชุบแบบต่อเนื่อง (continuous operation) จะมีรูปแบบสมการที่สภาวะคงตัว ดังสมการ 3.10

$$C = C_p*[1-\exp(-Q_D/V)] \quad (3.10)$$

3.2.2.2 การล้างน้ำล้นหรือการล้างน้ำไหลต่อเนื่อง

บ่อล้างน้ำจะมีการเปิดน้ำไหลล้นตลอดโดยน้ำที่ไหลล้นนี้จะกลายเป็นน้ำเสียส่งไปสู่ระบบบำบัดต่อไป



รูป 3.3 กระบวนการล้างน้ำแบบน้ำล้น

สมการของกระบวนการล้างน้ำแบบน้ำล้นที่สภาวะคงตัว และมีการผสมแบบสมบูรณ์สามารถแทนได้ด้วยสมการที่ 3.11

$$C = [Q_D*C_p/(Q_D + Q_R)] \quad (3.11)$$

หากอัตราการไหลของน้ำล้าง (Q) มากกว่าปริมาณแดรก-เอาท์มาก ๆ หรือมีเกณฑ์ว่า $Q_R > 10Q_D$ (Hartinger, 1994) เทอมของ $(Q_D + Q_R)$ จะตัดเหลือเพียงเทอม Q_R ได้ ดังสมการ 3.12

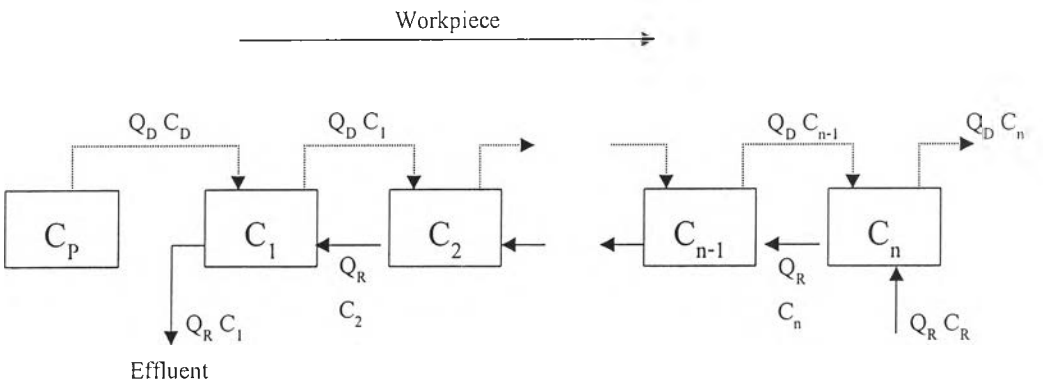
$$C = C_p/(1+A) \quad (3.12)$$

โดยที่ $A = Q_R/Q_D$

3.2.2.3 **แบบล้างน้ำล้นหลายขั้น** (cascade rinsing)

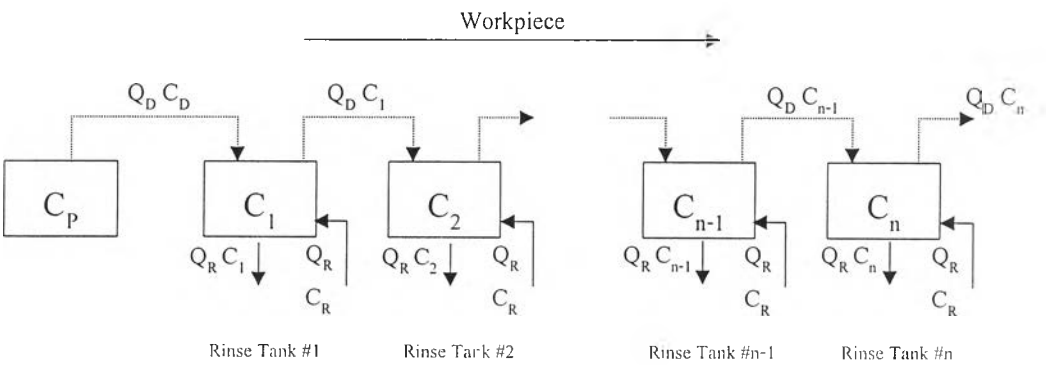
การล้างน้ำที่มีการเปิดน้ำไหลล้นตลอดการผลิตเช่นกัน แต่จะประหยัดน้ำกว่าแบบล้างน้ำล้นปกติ คือจะมีบ่อล้างน้ำ ตั้งแต่ 2 บ่อขึ้นไปติดกัน (ถ้ามี 2 บ่อจะเรียกว่า การล้างน้ำล้น 2 ขั้น) โดยน้ำที่ไหลล้นจากบ่อที่ 2 จะเข้าสู่บ่อที่ 1 และปล่อยสู่ระบบบำบัด เป็นต้น โดยทั่วไปกระบวนการล้างแบบน้ำล้นหลายขั้นที่นิยมใช้กันมากมี 2 รูปแบบดังนี้

แบบที่ 1 แบบอนุกรม



รูป 3.4 กระบวนการล้างแบบน้ำล้นหลายขั้นแบบอนุกรม

แบบที่ 2 แบบขนาน



รูป 3.5 กระบวนการล้างแบบน้ำล้นหลายขั้นแบบขนาน

กระบวนการล้างแบบน้ำล้นหลายขั้น มีรูปแบบสมการที่สภาวะคงตัว และการผสมเป็นแบบสมบูรณ์ ดังสมการที่ 3.13 และ 3.14

(แบบอนุกรม) $C_n = C_p^*(A - 1)/(A^{n+1} - 1)$ (3.13)

(แบบขนาน) $C_n = C_p^*(1 + A^n)$ (3.14)

เมื่อ n = จำนวนบ่อน้ำล้าง

และสำหรับกระบวนการล้างน้ำเป็นน้ำล้นนั้นมีคำหนึ่งที่นิยมใช้กันมากได้แก่ สัดส่วนการล้างน้ำ (Rinsing Ratio) หรือสัดส่วนการเจือจาง (Dilution Ratio) หรือเกณฑ์การล้างน้ำ (Rinsing Criteria) ซึ่งคำเหล่านี้มีความหมายเหมือนกัน หมายถึง สัดส่วนของปริมาณน้ำล้างที่จำเป็นต้องใช้เพื่อให้สามารถล้างชิ้นงานได้ตามที่ต้องการ สมการคำนวณได้จาก

$$C_p/C = (Q_R/Q_D)^n \quad (3.15)$$

ซึ่งรูปแบบสมการเหล่านี้ทั้งหมดเป็นรูปแบบของกระบวนการล้างน้ำแบบง่ายที่นิยมใช้กันทั่วไปมีสมมติฐานที่สภาวะคงที่ เพื่อใช้คำนวณหาปริมาณการใช้น้ำที่เหมาะสมของกระบวนการโดยให้มีประสิทธิภาพตามที่ต้องการ ซึ่งหมายถึงความเข้มข้นของสิ่งเจือปนที่ออกจากบ่อน้ำล้างสุดท้ายต้องอยู่ในเกณฑ์ที่กระบวนการของโรงงานยอมรับได้