

## บทที่ 2

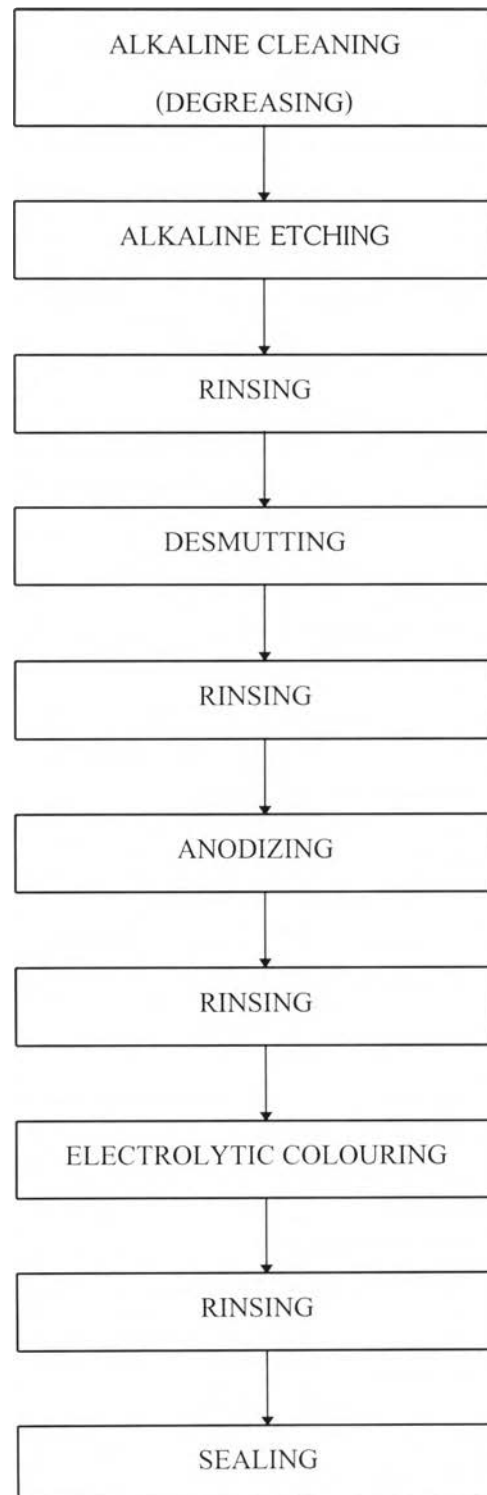
### หลักการพื้นฐาน

#### 2.1 การอะโนไดซ์และการชุบสีด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยใช้ไฟฟ้าบนชิ้นงานเอกซ์ทรูชันอะลูมิเนียม (Anodizing and Electrolytic Colouring of Aluminium Extrusions)

ชิ้นงานเอกซ์ทรูชันอะลูมิเนียมที่นำมาใช้งานเป็นวัสดุตกแต่งทางสถาปัตยกรรมต้องผ่านการทำอะโนไดซ์และการชุบสีด้วยไฟฟ้าก่อน การอะโนไดซ์เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดชั้นของฟิล์มที่สามารถต้านทานการผุกร่อนและเพิ่มความสวยงามให้กับชิ้นงานอะลูมิเนียม โดยชิ้นงานที่ผ่านการอะโนไดซ์จะมีผิวสีขาว ต่อจากนั้นถ้าต้องการให้ชิ้นงานเอกซ์ทรูชันอะลูมิเนียมมีสีต่าง ๆ (เช่น น้ำตาล ดำ) จะต้องนำชิ้นงานที่ผ่านการอะโนไดซ์แล้วมาผ่านขบวนการชุบสีด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยใช้ไฟฟ้า ขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับการอะโนไดซ์และการชุบสีด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยใช้ไฟฟ้าบนชิ้นงานเอกซ์ทรูชันอะลูมิเนียมจะเป็นไปตามแผนภูมิดังรูปที่ 2.1 และสามารถอธิบายพอสังเขปได้ดังนี้

##### 2.1.1 การทำความสะอาดชิ้นงานก่อนชุบ (Cleaning)

เนื่องด้วยชิ้นงานส่วนมากจะมีคราบไขมัน น้ำมัน และรอยเปื้อนอื่นต่าง ๆ ซึ่งติดมาจากกรรมวิธีการผลิต ฉะนั้นการทำความสะอาดชิ้นงานก่อนที่จะนำไปทำการชุบจึงเป็นสิ่งสำคัญมาก [1, 2, 6] ถ้าชิ้นงานไม่สะอาดเพียงพอแล้วจะทำให้การชุบไม่ประสบผลสำเร็จ เพราะโลหะที่ไปเกาะเคลือบผิวชิ้นงานจะเกาะได้ไม่แน่น หรือเกาะติดเป็นจุด หรืออาจจะไม่เกาะติดเลย และผลเสียอีกข้อหนึ่งคือทำให้น้ำยาชุบสกปรกอีกด้วย



รูปที่ 2.1 แผนภูมิการชุบสีด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยใช้ไฟฟ้าของชิ้นงาน อะลูมิเนียมที่ถูกอะโนไดซ์ [15]

นอกจากจะทำความสะอาดชิ้นงานเพื่อกำจัดพวกไขมัน น้ำมัน และรอยเปื้อนต่าง ๆ แล้ว ยังจะต้องทำการกำจัดพวกสนิมโลหะหรือสะเก็ดบาง ๆ ของโลหะที่ติดอยู่ที่ผิวชิ้นงานอีกด้วย และมีบ่อยครั้งที่ขั้นของการทำความสะอาดยังช่วยกระตุ้นให้ผิวโลหะมีคุณสมบัติที่จะทำให้ได้การเคลือบที่มีคุณภาพดี สำหรับชิ้นงานที่จัดคราบไขมันออกหมดหรือไม่ นั้นอาจจะทดสอบได้โดยการพ่นน้ำให้เป็นฝอยละเอียดไปบนชิ้นงาน ถ้าบนผิวของชิ้นงานมีหยดน้ำรวมตัวเป็นเม็ดกลมเล็ก ๆ ก็แสดงว่ายังกำจัดคราบไขมันไม่หมด แต่ถ้าบนผิวของชิ้นงานปรากฏเป็นลักษณะฟิล์มบาง ๆ ของน้ำอย่างสม่ำเสมอโดยทั่ว ๆ ไปแล้ว ก็แสดงว่าชิ้นงานนั้นได้กำจัดคราบไขมันออกจนหมดแล้ว

ขั้นตอนของการทำความสะอาดชิ้นงานประกอบด้วย

ก. การทำความสะอาดเบื้องต้น (Preliminary หรือ Degreasing)

ข. การกัดผิว (Etching)

ค. การจุ่มในกรด (Acid Dip) หรือ การล้างคราบดำ (Desmutting)

### ก. การทำความสะอาดเบื้องต้น (Preliminary หรือ Degreasing)

ขั้นนี้ทำเพื่อล้างเอาคราบไขมันที่ติดอยู่เป็นจำนวนมาก หรือพวกสะเก็ดของแข็งที่ติดอยู่บนผิวชิ้นงาน โดยเฉพาะพวกที่เกิดจากผงขัดออก [11] สารที่ใช้ทำความสะอาดและวิธีการในขั้นตอนนี้ได้แก่

1. ตัวทำละลายเพื่อขจัดไขมัน
2. สเปรย์หรือจุ่มในน้ำยาขจัดไขมันที่ร้อน
3. ต้มในสารละลายสบู่หรือผงซักฟอก
4. สเปรย์ด้วยสารละลายด่าง
5. ต้มในสารละลายด่าง

### ข. การกัดผิว (Etching)

การกัดผิวเป็นวิธีการหนึ่งที่สำคัญ และนิยมมากในการเตรียมผิวก่อนทำการอะโนไดซ์ (Anodize) และหรือการชุบสีด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยใช้ไฟฟ้า (Electrolytic Colouring) ทั้งนี้เพื่อให้ความสกปรกของสารองค์ประกอบ (Constituents) ที่มีอยู่ในอะลูมิเนียมอัลลอยด์ (Aluminium Alloy) ละลายออกมา สารกัดผิวส่วนใหญ่มีคุณสมบัติเป็นด่าง (Alkaline) โดยด่างที่นิยมใช้ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์

ไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, NaOH) ส่วนสารกัดผิวที่มีคุณสมบัติเป็นกรดจะมีการนำมาใช้แล้วแต่กรณี การกัดผิวมีวิธีการให้เลือกทำได้หลายวิธี ขึ้นอยู่กับภาวะที่ใช้ในการกัดผิว และชนิดของสารกัดผิว

ปัจจัยที่ใช้ประกอบในการพิจารณาเลือกสารกัดผิวมีดังนี้

1. ความละเอียดของผิวชิ้นงานที่ผลิตออกมา
2. ความสามารถในการแทรกซึม และละลายความสกปรกที่เกิดขึ้นกับผิวชิ้นงาน
3. ความสม่ำเสมอในการกัดผิว
4. คุณสมบัติความเป็นสบู่ (Detergent) ที่จะให้ผลในการทำความสะอาดได้
5. ความสามารถในการต้านตะกรัน โดยทำให้อยู่ในรูปโคลนตม (Soft Sludge) มากกว่าจะเป็นตะกรันแข็ง (Hard Scale)
6. อายุการใช้งานที่ยาวนาน
7. ทำงานภายใต้อุณหภูมิที่ควบคุมได้

การเลือกใช้วิธีการกัดผิวควรมีการพิจารณาถึงวิธีการที่ดี และเหมาะสมสำหรับแต่ละสถานประกอบการ

### หลักการเตรียมสารกัดผิว (Principles of etchant formulation)

#### ก. สารองค์ประกอบพื้นฐาน (Basic Constituent)

กรณี que เลือกสารกัดผิวที่มีคุณสมบัติเป็นด่าง มักนิยมใช้โซดาไฟ (Caustic Soda, NaOH) เป็นตัวหลักในการกัดผิว ส่วนสารกัดผิวที่มีคุณสมบัติเป็นกรดอาจใช้กรดซัลฟิวริก (Sulphuric acid,  $H_2SO_4$ ) กรดไนตริก (Nitric acid,  $HNO_3$ ) กรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid,  $H_3PO_4$ ) หรือกรดฟลูออไรด์ (Fluorides acid,  $Fl_2$ ) เป็นต้น

#### ข. สารปรับแต่ง (Modifier)

สารปรับแต่งใช้เพื่อปรับปรุงผลที่ได้จากสารองค์ประกอบพื้นฐาน สารปรับแต่งอาจช่วยให้อัตราการกัดผิวทำได้เร็วขึ้น ได้ผิวที่มีความด้าน (Matt) หรือสว่าง (Bright) มากขึ้น หรือปรับปรุงด้านความเรียบ (Levelling) ของผิวชิ้นงาน

#### ค. ตัวต้านตะกรัน (Scale Inhibitors)

สิ่งจำเป็นอย่างหนึ่งในการเลือกพิจารณาเมื่อใช้สารกัดผิวที่มีคุณสมบัติเป็นด่าง นั่นได้แก่ การใช้ตัวต้านตะกรัน เพราะถ้าไม่มีตัวต้านตะกรันแล้วจะทำให้อะลูมิเนียม

ไฮดรอกไซด์ (Aluminium Hydroxide,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) ที่เกิดขึ้นจากการกัดผิวสามารถเกาะติดกับผนังถังหรือบริเวณที่ให้ความร้อน (Heater) ได้โดยง่าย และเกิดเป็นตะกรันหินปูนที่แข็งมากอีกทั้งยังขจัดออกได้ยากด้วย ดังนั้นจึงใส่ตัวต้านตะกรันเพื่อจะทำให้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์มีลักษณะเป็นโคลนตม (Soft Sludge) ที่สามารถขจัดหรือดูดออกไปจากถังได้ง่ายเมื่อถึงเวลาอันสมควร ตัวอย่างตัวต้านตะกรัน ได้แก่ Gluconates, Heptonates, Tartrates, Dextrin, Gum Arabic เป็นต้น

### ง. สารขัดขวางปฏิกิริยาข้างเคียง (Sequestering Agents)

เป็นสารที่เติมเพื่อขัดขวางหรือหน่วง (Counteract) ปฏิกิริยาข้างเคียง (Side Reactions) อันจะส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาหลัก ตัวอย่างของสารที่ใช้กันมากได้แก่ สารประกอบเชิงซ้อนประเภทฟอสเฟต (Complex Phosphates)

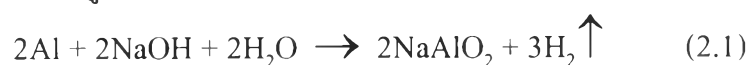
### จ. สารสบู่ (Detergents)

สารสบู่ใช้ช่วยขั้นตอนการล้าง (Rinsing) และช่วยในการขจัดไขมันหรือสิ่งสกปรกต่าง ๆ ออกไป

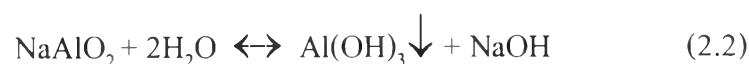
### ปฏิกิริยาการกัดผิว

ปฏิกิริยาพื้นฐานของสารกัดผิวที่มีคุณสมบัติความเป็นด่าง สามารถแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้ [2, 14]

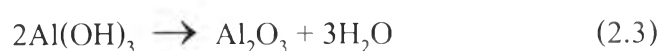
1. การละลายของอะลูมิเนียม (Dissolution of Aluminium)



2. การตกตะกอนของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Precipitation of Aluminium Hydroxide)



3. การเกิดตะกรันแข็งที่ไม่ละลายน้ำ (Formation of an Insoluble Hard Scale)



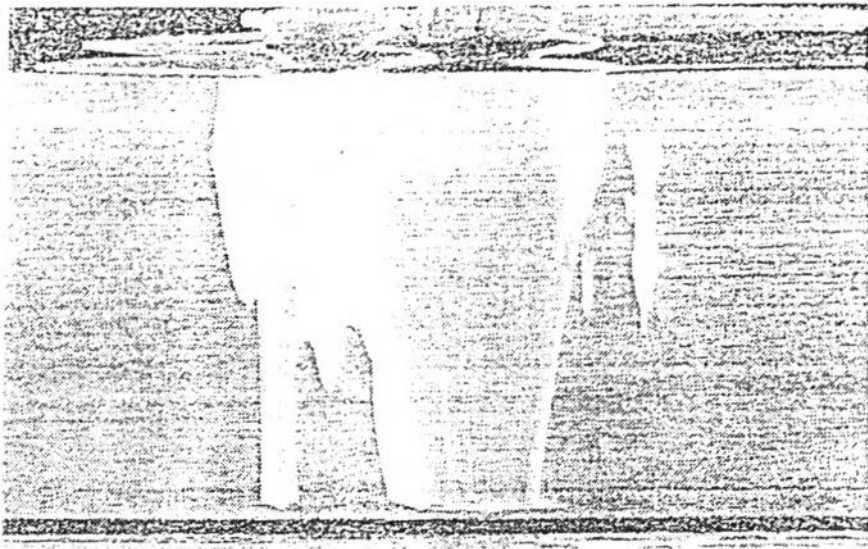
ปฏิกิริยาที่ 1 ได้แสดงถึงการละลายของอะลูมิเนียมในโซดาไฟ (Caustic Soda, NaOH) เกิดเป็นผลิตภัณฑ์โซเดียมอะลูมิเนต (Sodium Aluminate,  $\text{NaAlO}_2$ ) พร้อมกับก๊าซไฮโดรเจน (Hydrgen,  $\text{H}_2$ )

ปฏิกิริยาที่ 2 เป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ (Reversible) และเป็นปฏิกิริยาที่เป็นปัญหาสำคัญที่สุดปัญหาหนึ่ง กล่าวคือ โซเดียมอะลูมิเนตที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยาต่อได้ผลิตภัณฑ์เป็นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminium Hydroxide,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) ที่สามารถตกตะกอนลงมาพร้อมกับการปลดปล่อยโซดาไฟอิสระออกมาด้วย อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะคล้ายโคลนตม (Soft Sludge) อยู่ก้นถังซึ่งมีผลทำให้อัตรากัดผิวช้าลง การแก้ไขปัญหาดังกล่าวมานี้ทำได้ด้วยการเพิ่มหรือเติมโซดาไฟอิสระ เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดความสมดุลระหว่างปริมาณโซดาไฟอิสระและอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ดังนั้นควรมีการตรวจหาปริมาณของโซดาไฟอิสระ และปริมาณอะลูมิเนียมอย่างน้อย 1 ครั้ง/วัน นอกจากนี้การเกิดความสมดุลของปฏิกิริยายังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการกัดผิวด้วย

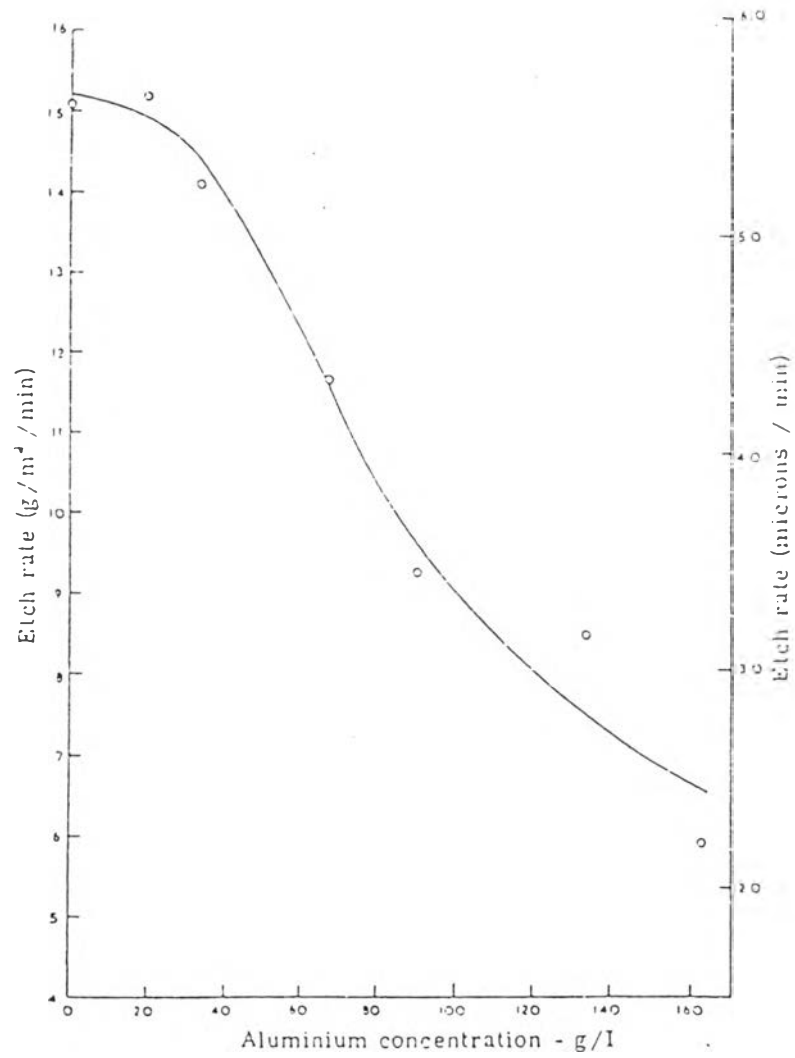
สำหรับปฏิกิริยาที่ 3 เป็นปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (Dehydration) ของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นตะกอนแข็งและไม่ละลายน้ำ พบได้ในบริเวณที่ให้ความร้อน (Heater) และขอบผนังของถัง (Tank Walls) การแก้ไขปัญหาคือการเกิดตะกอนแข็งสามารถทำได้ด้วยการใช้ตัวต้านตะกอน (Scale Inhibitors)

อัตรากัดผิวจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโซดาไฟอิสระ รวมทั้งอุณหภูมิขณะทำการกัดผิวด้วย ในขณะที่ทำการกัดผิวนี้อาจเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนขึ้น ดังนั้นหากใช้อุณหภูมิสูงมากจนเกินไป จะกระตุ้นให้อุณหภูมิของสารละลายสูงได้ง่ายมาก และอาจทำให้เกิดปัญหาหลายโซดา (Etch Staining) สำหรับอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการกัดผิวอยู่ระหว่าง  $50 - 60$  °C ในทางปฏิบัติเมื่อยกชิ้นงานขึ้นจากถังกัดผิว ปฏิกิริยายังคงดำเนินอยู่ได้โดยปฏิกิริยานี้จะมีสีม่วงที่เข้มข้นกว่าขณะอยู่ในถังกัดผิว และกลายเป็นลายโซดาบนผิวของชิ้นงาน ดังรูปที่ 2.2 [2] ด้วยเหตุนี้ควรมีการควบคุมอุณหภูมิให้ลดลงด้วยการนำชิ้นงานลงจุ่มในถังน้ำล้าง (Rinse) ทันทีภายหลังการกัดโซดาแล้ว สำหรับโรงงานอะโนไดซ์ขนาดใหญ่มักแก้ปัญหาดังกล่าวนี้ด้วยการติดตั้งระบบพ่นน้ำความดันสูงไว้ที่ขอบบ่อกัดผิว เพื่อให้สามารถพ่นน้ำล้างคราบโซดาก่อนที่จะยกออกไปยังถังน้ำล้าง

ตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่ควรพิจารณาคือ ปริมาณอะลูมิเนียมซึ่งมีผลต่ออัตราการกัดผิวกล่าวคือ อัตราการกัดผิวจะลดลงเมื่อปริมาณอะลูมิเนียมสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3 [2] ฉะนั้น หากควบคุมให้อัตราการกัดผิวคงที่แล้วจะทำให้การกัดผิวทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างการเกิดปัญหาหลายโซดา (Etch Staining) [2]



รูปที่ 2.3 อัตราการกัดผิว (Etch Rates) [2]



### ค. การจุ่มในกรด (Acid dip) หรือ การล้างคราบดำ (Desmutting)

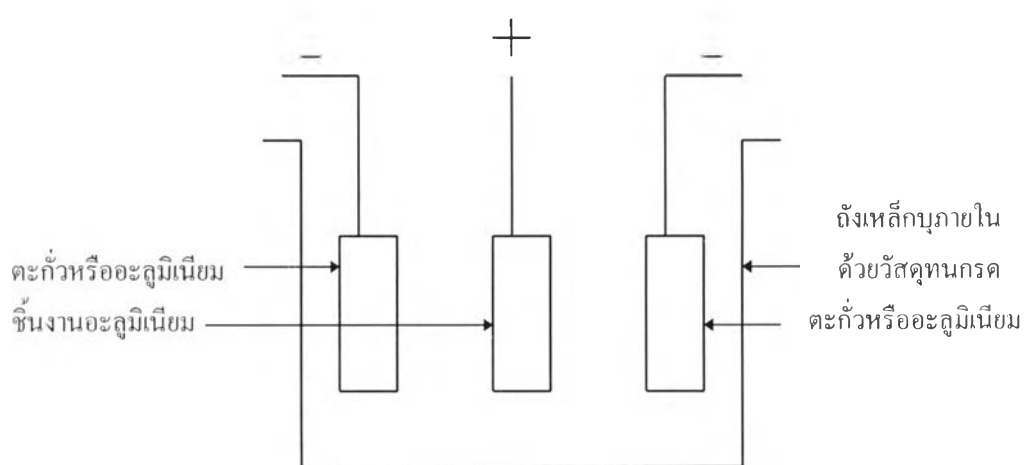
ขั้นนี้มักจะทำต่อจากขั้นการกัดผิว (Etching) ทั้งนี้เนื่องจากการใช้สารกัดผิวที่มีคุณสมบัติความเป็นด่างไม่สามารถทำให้สารองค์ประกอบที่มีอยู่ในอะลูมิเนียมอัลลอยด์ละลายออกมาได้ทั้งหมด โดยวัสดุส่วนที่ไม่ละลายนี้จะรวมตัวเป็นขี้เขม่า (Smut) หรือคราบสีดำติดอยู่บนพื้นผิวอะลูมิเนียม ขี้เขม่าหรือคราบดำดังกล่าวสามารถชำระล้างด้วยการจุ่มในกรด หรือการล้างคราบดำได้ อีกทั้งขั้นตอนนี้ยังช่วยกัดผิวให้มีรอยหยาบ เพื่อเพิ่มกำลังการยึดเกาะเมื่อจะทำการชุบผิวต่อไป [4, 6] สำหรับโลหะที่เป็นชิ้นงานต่างชนิดกัน จะใช้น้ำกรดที่มีความแรงแตกต่างกัน และน้ำกรดที่ได้รับความนิยมมากในการล้างคราบดำคือ กรดไนตริก (Nitric acid,  $\text{HNO}_3$ ) ความเข้มข้นร้อยละ 10 - 50 โดยปริมาตร ณ อุณหภูมิห้อง กรดไนตริกนี้จะทำให้ผิวของชิ้นงานมีความสะอาดโดยจะทำให้เกิดการฟอกขาว (Bleaching) ขึ้นบนชิ้นงานภายหลังการขจัดขี้เขม่าหรือคราบดำ โดยทั่วไปการใช้น้ำกรดไนตริกในการล้างคราบดำนิยมทำกับชนิดของอัลลอยด์ (Alloys) ที่มีส่วนประกอบของซิลิคอน (Silicon, Si) และทองแดง (Copper, Cu) เป็นส่วนผสมหลัก

นอกจากนี้ขั้นตอนการล้างคราบดำยังใช้สำหรับเวีย่นชิ้นงานซ้ำ (Reprocessing) ในกระบวนการชุบสีได้กล่าวคือ ใช้ล้างสีออกจากชิ้นงานที่มีผลการชุบสีไม่เป็นที่พอใจ อีกทั้งยังใช้ประโยชน์สำหรับกัดขาโหลดและจิก (Jig) ที่ตอกติดอยู่บนโหลดด้วย [2]

อย่างไรก็ตามเมื่อชิ้นงานได้ผ่านการล้างคราบดำเรียบร้อยแล้วควรส่งผ่านต่อไปยังถังล้างน้ำโดยทันทีเพื่อป้องกันการเกิดรอยเปื้อน (Staining) หรือเกิดจุดดำ (Corrosion Spots)

## 2.1.2 ขั้นการทำอะโนไดซ์ (Anodizing)

การทำอะโนไดซ์อะลูมิเนียมดังรูปที่ 2.4 คือ การทำผิวของอะลูมิเนียมให้เป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ในลักษณะเป็นฟิล์ม [4] ในการทำอะโนไดซ์ ชิ้นงานจะเป็นขั้วบวก แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ใช้ในช่วง 10 - 30 โวลต์ และไม่มีโลหะชนิดอื่นไปเกาะจับที่ผิวอะลูมิเนียม (ซึ่งกรรมวิธีนี้ต่างจากการเคลือบผิวด้วยกระแสไฟฟ้า (Electroplating) คือ ในการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า ชิ้นงานจะเป็นขั้วลบ ใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่อยู่ในช่วงต่ำกว่าการทำอะโนไดซ์ และจะมีโลหะชนิดหนึ่งไปเคลือบโลหะอีกชนิดหนึ่ง)



รูปที่ 2.4 วิธีการอะโนไดซ์อะลูมิเนียม

### อุปกรณ์สำคัญ

ถังที่เหมาะสมสำหรับนำยาชุบอะโนไดซ์ควรบุภายในถังด้วยตะกั่ว ยาง อิฐทนกรด หรือ พีวีซี (PVC) ระบบทำความร้อนไม่จำเป็นมากนัก ในทางตรงกันข้ามนำยาชุบอะโนไดซ์ทำงานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ ๆ ดังนั้นระบบทำความเย็นสำหรับควบคุมอุณหภูมิของนำยาชุบจึงค่อนข้างจำเป็น การกวนนำยาชุบด้วยอากาศจากถังอัดอากาศ และท่อดูดไอระเหยที่ควรจะต้องติดตั้งไว้ด้วย [4]

ถ้าถังด้วยตะกั่วจะใช้ถึงนั้นเองเป็นขั้วลบก็ได้ อย่างไรก็ตามกรณีที่ต้องทำแผ่นขั้วลบขึ้นมา แผ่นขั้วลบควรมีพื้นที่ผิวเท่า ๆ กับแผ่นของขั้วบวก หรือถ้าจะใช้ท่อลมทำด้วยตะกั่วเป็นขั้วลบในตัวเสร็จก็ได้เหมือนกัน [4]

## สภาพการทำงาน

อุณหภูมิที่นำยาซุบอะโนไคซ์ทำงานได้คืออยู่ระหว่าง 21 - 24 °C ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าโดยปกติอยู่ระหว่าง 10 - 20 แอมแปร์/ตารางฟุต หรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าโดยเฉลี่ยประมาณ 12 - 16 โวลท์ [4]

เพื่อให้ได้ลักษณะของฟิล์มที่หนาสม่ำเสมอ ควรควบคุมความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในขณะที่ทำการอะโนไคซ์ให้คงที่ตลอดเวลา ทั้งนี้เพราะความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจะเป็นตัวหนึ่งที่ควบคุมระดับของออกซิเจนที่จะทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมเกิดเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ และสร้างฟิล์มอะโนไคซ์ปกคลุมผิว [2] ฉะนั้นหากเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ก็จะส่งผลให้เพิ่มอัตราการเกิดฟิล์มออกไซด์ และทำให้ความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น อนึ่งความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจะลดลงเรื่อยๆ ขณะที่ทำการอะโนไคซ์ เพราะความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจะถูกควบคุมด้วยความต้านทานของน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการทำอะโนไคซ์ ปัจจัยที่มีผลต่อความต้านทานของน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ได้แก่ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก และอุณหภูมิของอิเล็กโทรไลต์ โดยปัจจัยเหล่านี้จะต้องถูกควบคุมให้มีค่าอยู่ในช่วงจำกัด ด้วยเหตุผลดังกล่าว หากต้องการควบคุมความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าให้มีค่าคงที่ จึงต้องมีการเพิ่มแรงเคลื่อนไฟฟ้าอยู่ตลอดเวลา เพื่อไม่ให้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าลดต่ำลงมา การควบคุมสามารถทำได้ทั้งแบบควบคุมด้วยมือ (Manual) และแบบอัตโนมัติ (Automatic) ทั้งนี้การควบคุมแบบควบคุมด้วยมือต้องได้รับการฝึกฝนและอาศัยประสบการณ์เรียนรู้มาเป็นอย่างดี ดังนั้นการควบคุมแบบอัตโนมัติมักจะทำได้ดีกว่า โดยปกติการควบคุมแบบอัตโนมัติจะใช้เครื่องแปลงไฟที่ควบคุมได้จากระยะไกล (remotely controlled rectifier) การตั้งค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าแบบควบคุมด้วยมือหรือแบบอัตโนมัติก็ดี ควรมีการควบคุมเวลาในการทำอะโนไคซ์ประกอบด้วย และควรทำให้ตู้แปลงไฟสามารถกลับไปตั้งต้นที่ศูนย์ได้โดยอัตโนมัติเช่นเดียวกันเมื่อครบรอบหนึ่ง ๆ ของการทำอะโนไคซ์

ปัญหาที่พบเสมอ ๆ ในการควบคุมค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า เกิดจากความยากในการคำนวณหาพื้นที่ผิวของชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน อย่างเช่น ชิ้นงานที่มี

รูปหน้าตัดกลวง (Hollow Section) และการที่จะทำให้กระแสไฟฟ้ากระจายอย่างสม่ำเสมอรอบชิ้นงาน

ระยะเวลาของการอะโนไดซ์จะแตกต่างกันไปตั้งแต่ 10 - 20 นาที ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนาของฟิล์มอะโนไดซ์ที่ต้องการ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 15 แอมแปร์/ตารางฟุต จะทำให้ได้ความหนาของฟิล์มอะโนไดซ์เพิ่มขึ้น 0.0001 นิ้ว (2.5 ไมครอน) ทุก ๆ 5 นาที [4]

**ตัวอย่างภาวะการทำอะโนไดซ์ [14] คือ**

กรดซัลฟิวริก (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) ร้อยละ 10 โดยปริมาตร:	180 - 190	กรัม/ลิตร
อุณหภูมิ	:	18 - 20 °ซ
ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า	:	1.3 - 1.7 แอมแปร์/ดม <sup>2</sup>
แรงเคลื่อนไฟฟ้า	:	12 - 17 โวลท์
เวลา	:	1/2 ชม. สำหรับฟิล์ม 10 ไมครอน หรือ 1 ชม. สำหรับฟิล์ม 20 ไมครอน

ปฏิกิริยาการเกิดอะโนไดซ์ [2, 14] สามารถแสดงได้ดังนี้



เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าลงในน้ำยาชุบอะโนไดซ์ชนิดกรรมวิธีใช้กรดซัลฟิวริก ร้อยละ 10 โดยปริมาตรเป็นน้ำยาสำหรับการอะโนไดซ์นั้น จะเกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดก๊าซออกซิเจนที่ขั้วบวก (Anode) และไฮโดรเจนที่ขั้วลบ (Cathode) ดังนั้นเมื่อใช้ชิ้นงานอะลูมิเนียมแทนที่ขั้วบวก ก๊าซออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมเกิดเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium Oxide, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และสร้างฟิล์มอะโนไดซ์ขึ้นปกคลุมผิวดังสมการที่ (2.4) แต่จะมีบางส่วนของอะลูมิเนียมที่ไม่สามารถรวมกับก๊าซออกซิเจนได้ และจะ

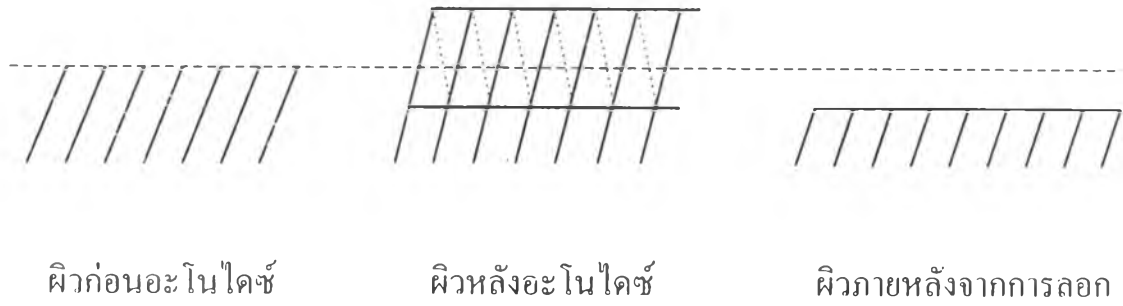
ละลายอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่นี้ดังสมการที่ (2.6) นอกจากนั้นแล้วจะมีซัลเฟตไอออน (Sulphate Ions) เกิดขึ้น เพราะในชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นจะมีซัลเฟตไอออนดังสมการ (2.5) ซัลเฟตไอออนจะเคลื่อนตัวอย่างอิสระและรวดเร็ว อีกทั้งยังเป็นตัวช่วยในการเคลื่อนตัวของโปรตอนผ่านฟิล์มและช่วยลดค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าในการทำอะโนไดซ์ได้ด้วย

ฟิล์มที่เกิดจากการอะโนไดซ์ประกอบด้วยส่วนที่เป็นออกไซด์ที่มีเนื้อแน่นที่เรียกว่า เยื่อกั้น (Barrier Layer) ข้างบนเยื่อกั้นจะมีเซลล์ลักษณะเป็นรูพรุนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 100 - 250 อังสตรอม (Angstrom) ความยาวของช่องรูพรุนมีค่าเท่ากับ 5,000 - 25,000 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุน หน่วยของเซลล์ออกไซด์จะมีรูปร่างคล้ายแท่งดินสอดำ [2] และเรียงตัวกันในลักษณะเป็นรูปหกเหลี่ยมด้านเท่า (Hexagonal) ดังรูปที่ 2.5 โดยชั้นฟิล์มที่ได้นี้จะมีเซลล์ออกไซด์เป็นจำนวนหลายล้านเซลล์ต่อตารางนิ้ว ฟิล์มที่เกิดจากการอะโนไดซ์จะทำให้อะลูมิเนียมมีปริมาตรมากกว่าเดิม และถ้าลอกฟิล์มออก ความหนาของชิ้นงานจะน้อยกว่าเมื่อก่อนเริ่มงาน [4]

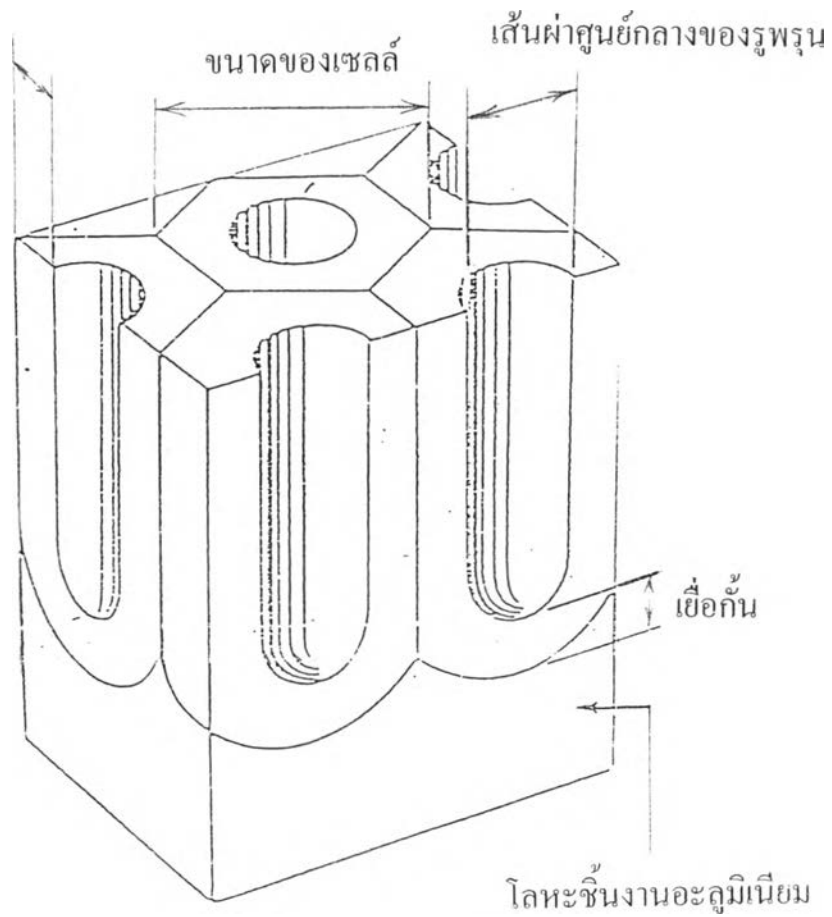
ความหนาของเยื่อกั้นและผนังเซลล์เป็นปฏิภาคโดยตรงกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ใช้ ขนาดของรูพรุนและเซลล์ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของน้ำยา อุนทุมิ และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เมื่อน้ำยากรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) มีความเข้มข้นมากและทำงานที่อุนทุมิสูง จะทำให้โครงสร้างของเซลล์กว้างขึ้น แต่ถ้าใช้กรดซัลฟิวริกเจือจางลงและอุนทุมิต่ำลงด้วย จะทำให้ขนาดของรูพรุนเล็กและฟิล์มแข็งแรงขึ้น

### ประโยชน์ของการอะโนไดซ์ [9]

1. เพื่อป้องกันการกัดกร่อนบนผิวชิ้นงานอะลูมิเนียม
2. ทำให้เกิดความสวยงาม เพิ่มคุณค่า
3. เพิ่มความหนาที่ผิวชิ้นงาน
4. ทำให้ผิวแข็ง ป้องกันการขีดข่วนได้ดี
5. ไม่เป็นสื่อไฟฟ้า
6. อะลูมิเนียมที่ทำการอะโนไดซ์แล้ว สามารถนำไปย้อมสีให้สวยงามได้ตามต้องการ (อะลูมิเนียมที่ไม่ได้ผ่านการอะโนไดซ์จะย้อมสีไม่ติด)



ความหนาของผนังเซลล์



รูปที่ 2.5 รูปตัดขยายของฝิวอะโนไดซ์แสดงให้เห็น โครงสร้างของรูเซลล์ [1, 2, 3, 14]

## การย้อมสีอะลูมิเนียมหลังการอะโนไดซ์

ผิวบาง ๆ ที่เกิดขึ้นบนแผ่นชิ้นงานอะลูมิเนียมหลังผ่านกรรมวิธีอะโนไดซ์สามารถนำไปย้อมสีต่าง ๆ ได้ตามความประสงค์ ทั้งนี้การย้อมจะต้องใช้สีที่เหมาะสมและผลิตขึ้นมาเพื่อใช้ในการย้อมโดยเฉพาะ การย้อมเช่นที่ว่าจะช่วยเพิ่มอำนาจต้านทานการผุกร่อนได้เป็นอย่างดี สีที่ได้จากการย้อมจะทนแดดและทนฝนดีมาก [4]

ผิวอะโนไดซ์ที่เหมาะสมที่จะนำมาย้อมสี [4] ควรมีลักษณะดังนี้

1. ผิวอะโนไดซ์ที่มีความหนาเท่ากันตลอดทั้งแผ่น เพราะความหนาของผิวจะเกี่ยวข้องโดยตรงกับการดูดซับของสี เช่น ผิวอะโนไดซ์ที่หนาจะดูดซับสีไว้ได้มาก ทำให้ได้สีที่มีความเข้มหรือมีความทึบมาก เป็นต้น
2. ผิวอะโนไดซ์ที่มีจำนวนรูพรุนมากพอที่จะสามารถดูดซับได้ดี
3. ผิวอะโนไดซ์มีสีที่เหมาะสมกับสีที่จะย้อม
4. ผิวที่ปราศจากการขีดข่วนเป็นหลุมและบ่อ

การเลือกใช้กรรมวิธีการอะโนไดซ์จะมีผลเกี่ยวข้องโดยตรงกับผิวอะโนไดซ์ที่ได้และการย้อมสี กรรมวิธีที่เหมาะสมที่จะนำผิวอะโนไดซ์มาย้อมสีมากที่สุดคือ กรรมวิธีการใช้กรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) เพราะให้ผิวอะโนไดซ์ที่ไม่มีสีและสว่าง

### 2.1.3 การชุบสีด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยใช้ไฟฟ้า

คือขั้นตอนที่ทำให้เกิดสี สามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งจักได้กล่าวในหัวข้อ 2.2 วิธีการชุบสีต่อไป

### 2.1.4 ขั้นการปิดรูพรุนหรือการซีลลิ่ง (Sealing)

ผิวของอะลูมิเนียมหลังจากผ่านการอะโนไดซ์ และหรือผ่านการชุบสีด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยใช้ไฟฟ้ามาแล้ว จะเป็นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ซึ่งมีลักษณะเป็นรูพรุน และถ้าปล่อยให้แห้งจะเป็นผลเสียหลายอย่าง ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องปิดรูพรุนให้หมด โดยใช้กรรมวิธีที่เรียกว่าการปิดรูพรุนหรือการซีล (Sealing) [1, 2]

การซีลนี้มีความสำคัญและมีประโยชน์หลายประการ กล่าวคือ

1. ทำให้ผิวของอะโนไดซ์มีความเหนียวสามารถยึดตัวได้
2. เพิ่มอำนาจต้านทานการผุกร่อน
3. เพื่อทำให้ผิวที่ผ่านการอะโนไดซ์ไม่มีรอยคราบน้ำมือติดเมื่อมีการจับถือ เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้สีที่ข้อมไว้ละลายหลุดออกมาจากผิวอะโนไดซ์

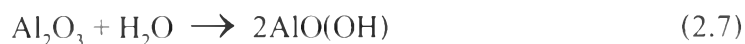
**กรรมวิธีการซีลสามารถทำได้หลายวิธีดังนี้**

1. การซีลด้วยน้ำร้อน (Hot Water Sealing)
2. การซีลด้วยไอน้ำ (Steam Sealing)
3. การซีลโดยใช้น้ำยาไดโครเมต (Dichromate Sealing)

#### **1. การซีลด้วยน้ำร้อน (Hot Water Sealing)**

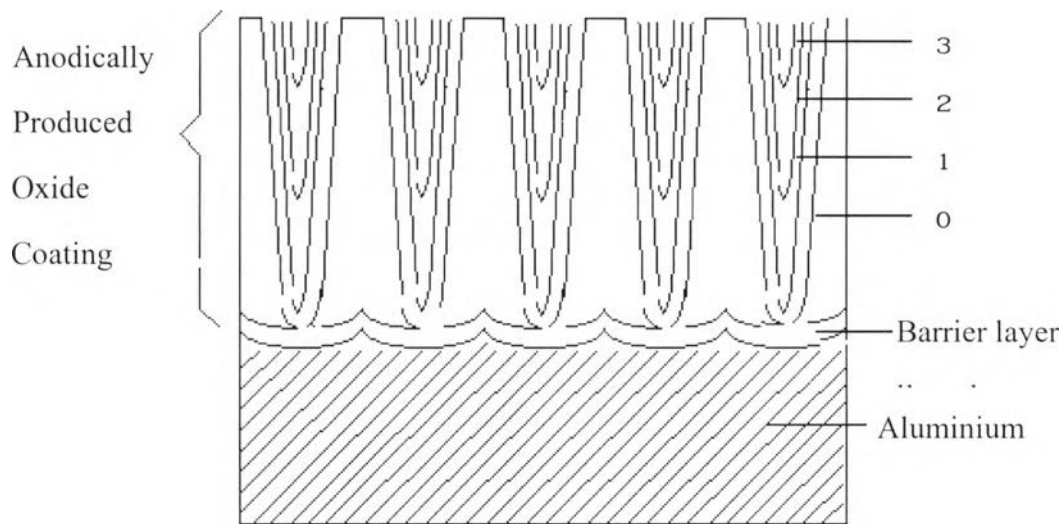
วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายและใช้ได้ผลดีมากที่สุด [4] น้ำที่ใช้ควรจะเป็นน้ำที่สะอาด อาจเป็นน้ำกลั่นหรือน้ำที่ผ่านการกำจัดอิมานมาแล้ว ความเป็นกรดด่าง (pH) ของน้ำต้องควบคุมให้อยู่ระหว่าง 5.5 - 6.0 ซึ่งสามารถทำได้โดยการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, NaOH) หรือกรดอะซิติก (Acetic Acid, CH<sub>3</sub>COOH) อยู่เสมอ อุณหภูมิของน้ำที่ใช้ไม่ควรน้อยกว่า 98 °C เวลาที่ใช้ในการซีลปกติแล้วมักจะเท่า ๆ กับระยะเวลาที่ใช้ทำการอะโนไดซ์

ในขณะที่จุ่มชิ้นงานอยู่ในถังซีล ผิวของชิ้นงานที่ผ่านการอะโนไดซ์และหรือการชุบสีด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยใช้ไฟฟ้ามาแล้ว จะทำปฏิกิริยากับน้ำร้อน เปลี่ยนเป็นผิวไฮดรอกไซด์ ดังสมการ



จากปฏิกิริยาดังกล่าวจะเป็นเหตุทำให้เกิดชั้นต่าง ๆ ของผิวไฮดรอกไซด์ขึ้นภายในรูพรุน และเมื่อจุ่มชิ้นงานอยู่ในถังซีลชั่วระยะเวลาหนึ่ง ชั้นต่าง ๆ ของผิวไฮดรอกไซด์จะเกิดขึ้นที่ละชั้น ๆ จนรูพรุนเหล่านั้นเต็มและปิดตันในที่สุดดังรูปที่ 2.6





รูปที่ 2.6 การเกิดชั้นไฮดรอกไซด์ในขณะทำการซีล [4]

จากรูปที่ 2.6 สามารถอธิบายได้ว่า ชั้น 0 คือชั้นที่แสดงรูพรุนขณะที่ยังไม่ได้ทำการซีล และชั้น 1 - 2 - 3 คือ ผิวไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นทีละชั้น ๆ ตามลำดับในขณะทำการซีล สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการซีลมาแล้ว หากยังไม่ได้ผลเป็นที่พอใจ สามารถนำมาซีลได้อีกจนกว่าจะเป็นที่พอใจ

## 2. การซีลด้วยไอน้ำ (Steam Sealing)

กรรมวิธีนี้เป็นกรรมวิธีซีลที่ได้ผลดีมากวิธีหนึ่ง ไอน้ำที่ใช้เป็นไอน้ำที่เปียกและมีความดันต่ำ ข้อดีของกรรมวิธีนี้คือ สามารถป้องกันสีที่ขังอยู่ในรูพรุนของผิวอะโนไดซ์ไม่ให้ซึมออกมาภายนอกได้ [4] เพราะชิ้นงานไม่ได้จุ่มอยู่ในน้ำ ส่วนข้อเสียก็คือ เป็นกรรมวิธีที่ค่อนข้างแพงกว่าวิธีอื่น ๆ สำหรับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นก็คล้ายกันกับการซีลด้วยน้ำร้อน

## 3. การซีลโดยใช้น้ำยาไดโครเมต (Dichromate Sealing)

หลังจากการซีลผิวชิ้นงานที่ผ่านการอะโนไดซ์ด้วยกรรมวิธีนี้แล้ว ผิวอะโนไดซ์จะมีสีค่อนข้างเหลือง [4] ดังนั้นจึงไม่เหมาะสำหรับชิ้นงานที่มีจุดมุ่งหมายจะนำไปใช้ทางด้านความสวยงาม

การซีลด้วยน้ำยาไดโครเมทเกิดจากปฏิกิริยา 2 ปฏิกิริยาเกิดขึ้นผสมกัน กล่าวคือ

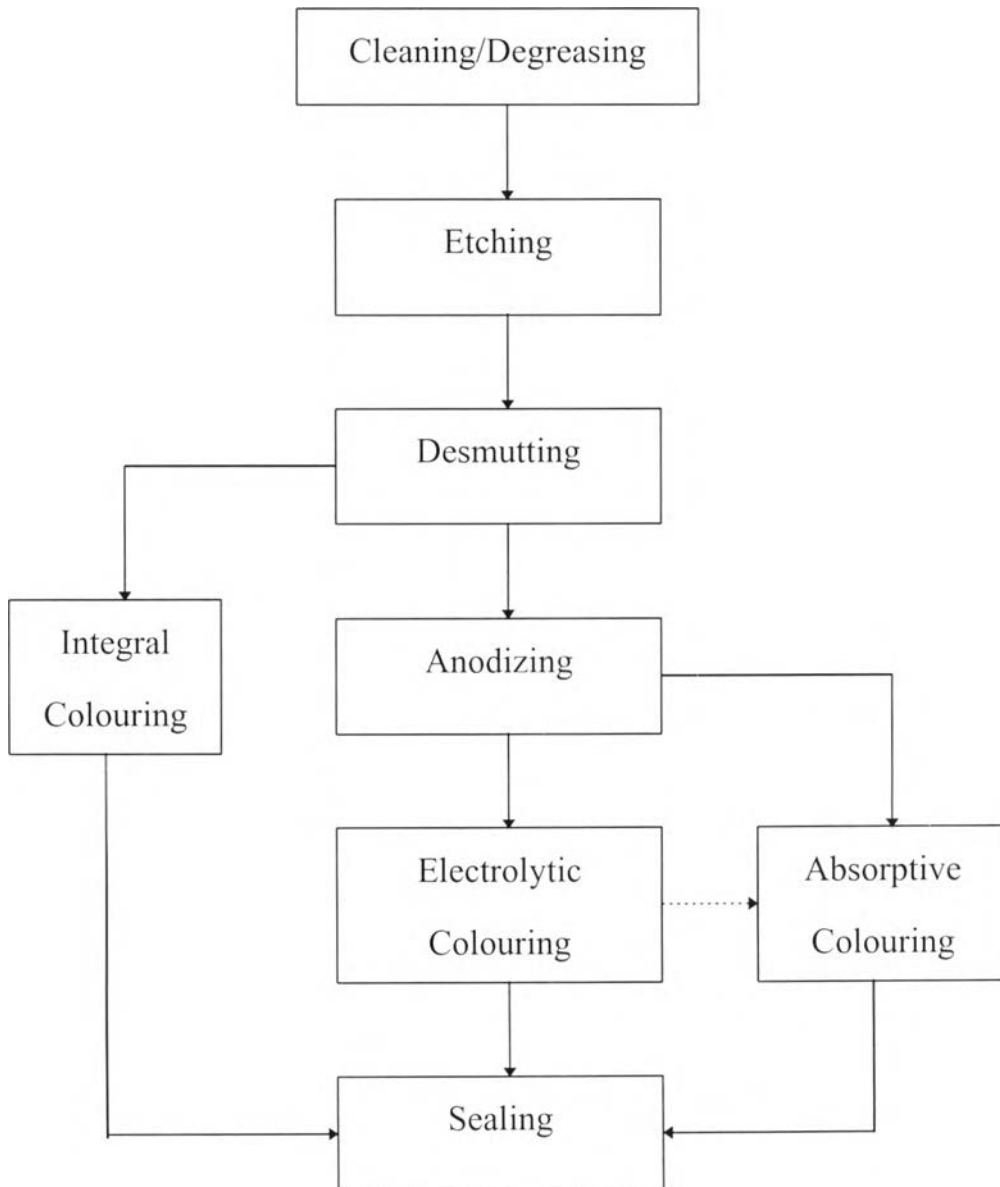
- ก. การดูดซับโครเมทเข้าไปเก็บไว้ภายในรูพรุนของผิวอะโนไดซ์
- ข. การเกิดการปิดตันของรูพรุนโดยความร้อนของน้ำยา ขณะเดียวกันก็ขังเอาโครเมทให้ออนไว้ภายในรูพรุนนั้นด้วย ในการซีลด้วยน้ำยาไดโครเมทนี้ น้ำยาจะต้องเป็นชนิดที่ปราศจากสารคลอรีนและซัลเฟต

### **2.1.5 การทดสอบคุณภาพหลังการชุบสี**

โดยทั่ว ๆ ไปเมื่อการชุบสีด้วยสารละลายอิเล็กโตรไลต์โดยใช้ไฟฟ้าเสร็จสิ้นลงแล้วจะมีการพิจารณาถึงคุณสมบัติภายหลังการชุบด้วย อาทิ การต้านทานความร้อน ความคงทนต่อแสง เป็นต้น (สามารถดูวิธีการทดสอบคุณภาพหลังการชุบสีได้ในภาคผนวก ง และ จ)

## 2.2 วิธีการชุบสี

ผิวอะลูมิเนียมที่ผ่านการอะโนไดซ์สามารถที่จะตกแต่งให้เกิดสีสรรได้ 3 วิธี ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนปกติของการอะโนไดซ์และการชุบสีชิ้นงานอะลูมิเนียม

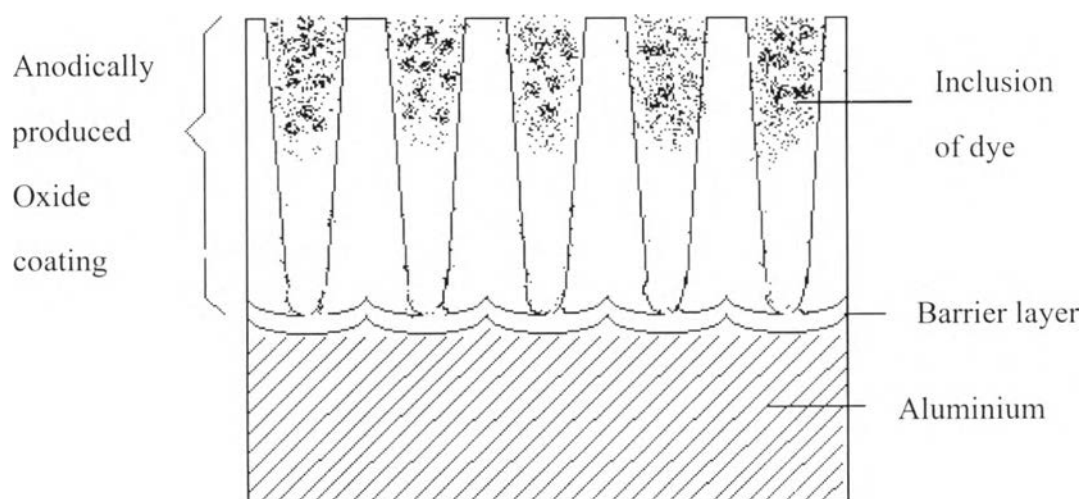
(Typical Anodizing Line) [14, 17]

การชุบสีมีวิธีการทำได้ 3 วิธีดังต่อไปนี้

### 2.2.1 วิธีการย้อมสีแบบการดูดซับ (Adsorptive Dyeing)

จากอดีตจนถึงปัจจุบัน ได้มีการนำเอาวิธีการย้อมสีแบบการดูดซับ (Adsorptive Dyeing) เข้ามาทำให้เกิดสีบนชิ้นงานอะลูมิเนียม โดยแบ่งชนิดของสีย้อมออกเป็น 2 ชนิด [2] ได้แก่ สีย้อมอินทรีย์ (Organic Dyestuff) และสีย้อมอนินทรีย์ (Inorganic Dyestuff) สำหรับงานโครงสร้างที่ใช้อะลูมิเนียมย้อมสีเป็นส่วนสำคัญ จะมีความต้องการคุณสมบัติการสะท้อนแสงค่อนข้างมาก ฉะนั้นการนำสีย้อมอนินทรีย์มาใช้จะได้ผลดีกว่าสีย้อมอินทรีย์

วิธีการย้อมสีแบบการดูดซับนี้เป็นการทำให้สีจับอยู่บนผิวของอะลูมิเนียม โดยที่ผงสีจะถูกดูดซับเข้าไปอยู่ในเซลล์ของชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ดังรูปที่ 2.11 และสามารถทำให้สียึดติดอยู่ได้หลังจากผ่านกรรมวิธีการซีลแล้ว [14] สีที่นิยมทำโดยวิธีการย้อมนี้ ได้แก่ สีดำและสีทอง นอกจากนี้สีอื่น ๆ ก็อาจทำได้ด้วยวิธีนี้เช่นกัน

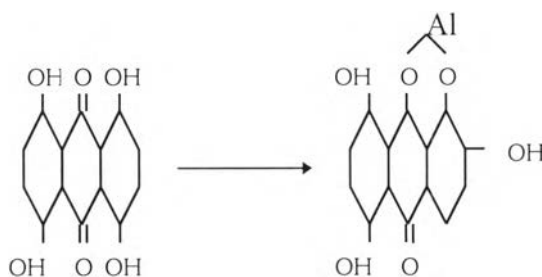


รูปที่ 2.8 การย้อมสีแบบการดูดซับ (Adsorptive Dyeing) [14]

การย้อมสีบนชิ้นงานอะลูมิเนียมควรมีการทดลองย้อมสี (Colour Matching) ลงบนชิ้นงานตัวอย่างที่ได้รับมาจากลูกค้าเสียก่อน เพื่อศึกษาและสังเกตถึงภาวะการทำงานต่าง ๆ ของการย้อมสี เช่น ความเข้มข้นของสีที่ใช้ย้อมนั้นจะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับว่าต้องการความเข้มของสีบนชิ้นงานมากหรือน้อยเพียงใด ซึ่งโดยปกติบริษัทผู้ผลิตสีจะแนบตัวอย่างสีมาให้ พร้อมคำอธิบายถึงวิธีการใช้เพื่อให้ได้สีตามตัวอย่างนั้น ๆ นอกจากนี้ควรศึกษาถึงการใช้อุณหภูมิและเวลาในการย้อม ตลอดจนการควบคุมความเป็นกรดต่าง (pH) ของสีย้อม เป็นต้น

ตัวอย่างการย้อมสีอนินทรีย์ (Inorganic Dyestuff) ได้แก่ การชุบสีทอง (Gold) ลงบนฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ โดยการนำชิ้นงานมาจุ่มลงในน้ำยาชุบที่มีส่วนประกอบของ Ferric Ammonium Oxalate เป็นสำคัญ ซึ่งสามารถทำให้เกิดสีได้ตั้งแต่สีทองเหลืองอ่อน (Pale Brass) จนถึงสีแดงออกส้ม (Red-Orange) เป็นต้น สีย้อมนี้มักจะผสมได้ง่ายโดยวิธีละลายในน้ำธรรมดาเท่านั้น โดยปกติจะใช้สีปริมาณ 5 - 50 กรัม/ลิตร อุณหภูมิ 30 - 60 °C และมีการเติมกรดอะซิติกเจือจาง (Dilute Acetic Acid,  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) หรือแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium Hydroxide,  $\text{NH}(\text{OH})_3$ ) เพื่อควบคุมค่าความเป็นกรดต่าง (pH) เป็นต้น

ตัวอย่างของสีย้อมอินทรีย์ เช่น Alizarin Bordeaux R จะทำให้ฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ได้มีสีแดงออกเหลืองเข้ม ซึ่งมีความคงทนคืดังรูปที่ 2.9 ดังนี้



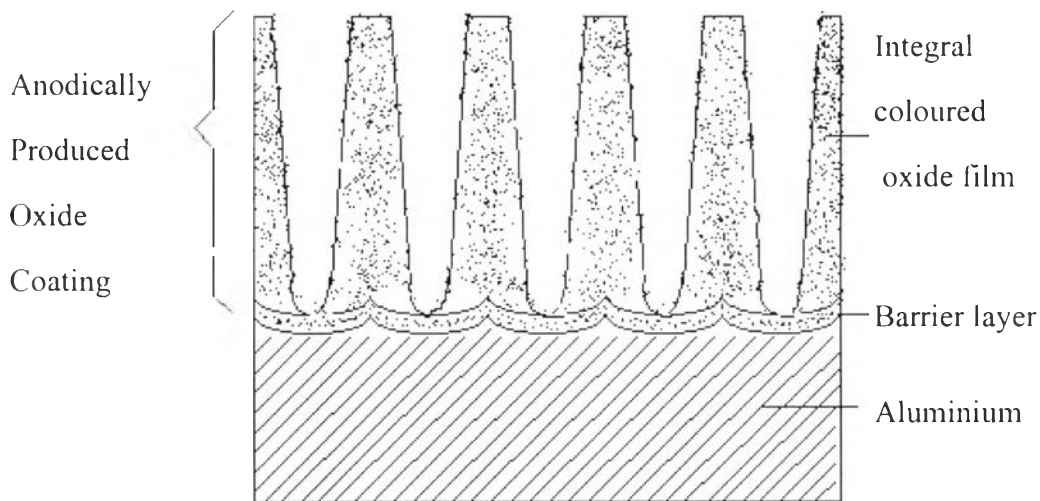
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการเกิดปฏิกิริยาของสีย้อมอินทรีย์ [2]

จะเห็นว่าอะลูมิเนียมสามารถรวมตัวกับสีย้อมอินทรีย์ได้ และให้ผลการย้อมที่น่าพอใจ กล่าวคือให้คุณสมบัติความคงทนที่ดี

นอกจากนี้ยังมีการนำเอาสีย้อมอินทรีย์ที่ทำจากสารประกอบโลหะเชิงซ้อนซึ่งมีคุณสมบัติเป็นกรดมาใช้ในการย้อมด้วยเหมือนกัน เช่น Chrome Fast Orange R

## 2.2.2 วิธีการชุบสีอะโนไดซ์ (Colour Anodizing) หรือการชุบสี พร้อมกับการอะโนไดซ์ (Integral Colouring)

วิธีนี้ทำให้สีสามารถเข้ารวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันกับฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ [14] ดังรูปที่ 2.10 โดยในน้ำยาชุบอะโนไดซ์จะมีทั้งสีและกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) อยู่ด้วยกัน สีที่เกิดขึ้นจะแพร่จากจุดศูนย์กลางของรูเซลล์และเข้าผนังตัวลงในฟิล์มออกไซด์ ผลการชุบโดยวิธีนี้จะได้สีผิวออกไซด์ที่คล้ายสีธรรมชาติมาก ในระดับตั้งแต่สีน้ำตาลอ่อน (Light Bronze) สีน้ำตาลเข้ม (Dark Bronze) ไปจนถึงสีดำ (Black) ทั้งนี้ความเข้มของสีจะขึ้นอยู่กับความหนาของฟิล์มด้วย ซึ่งสามารถทราบความเข้มของสีได้ด้วยการวัดความหนาของฟิล์ม



รูปที่ 2.10 การชุบสีอะโนไดซ์ (Colour Anodizing) หรือการชุบสีพร้อมกับการอะโนไดซ์ (Integral Colouring) [14]

ขณะทำการอะโนไดซ์จะใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้า และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่สูง เพื่อให้ได้ฟิล์มออกไซด์ที่มีความแข็งแรงและทนทาน โลหะอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ที่ใช้ในการทำให้เกิดสีนี้จะต้องผ่านการทำให้สะอาด บริสุทธิ์ และปราศจากสิ่งเจือปน ด้วยกรรมวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนอย่างต่อเนื่อง (Continuous Ion Exchange) เพื่อที่จะรักษาระดับของปริมาณอะลูมิเนียมในสารละลายให้คงที่ ฉะนั้นการชุบสีด้วยวิธีดังกล่าวนี้จะมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบ และการบำรุงรักษาที่มีราคาสูง ส่งผลให้การชุบสีอะโนไดซ์นี้มีราคาค่อนข้างสูงตามไปด้วย

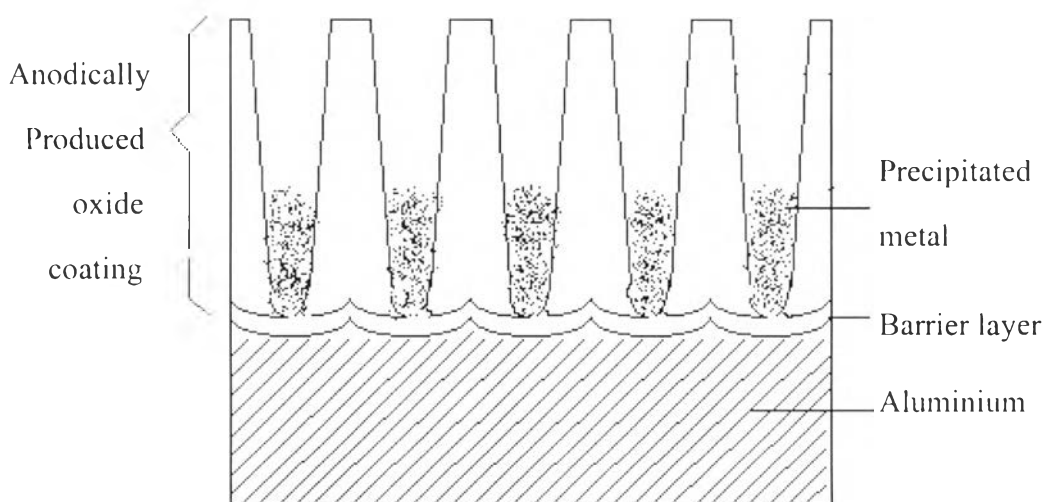


## 2.2.3 วิธีการชุบสีด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยใช้ไฟฟ้า

### (Electrolytic Colouring)

การชุบสีด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยใช้ไฟฟ้า หรือเรียกอีกชื่อว่า การชุบสีแบบสองขั้นตอน (Two Stage Colouring Process) [14, 15] ประกอบด้วยขั้นตอนการสร้างฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ด้วยวิธีอะโนไดซ์ตามปกติก่อน จากนั้นจึงต่อด้วยขั้นตอนการชุบสีด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยใช้ไฟฟ้า (ใช้กระแสไฟฟ้าสลับ) วิธีนี้ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายมานานกว่า 15 ปี ทั้งนี้เนื่องจากมีวิธีในการทำที่ง่ายและราคาค่าลงทุนที่ไม่สูงมากนัก [1, 2]

เนื่องจากชั้นเยื่อกั้น (Barrier Layer) มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ (Semi Conductor) ทำให้โลหะสามารถตกผลึกที่ก้นของรูพรุนอย่างเหนียวแน่น ดังรูปที่ 2.11 ความเข้มข้นของสีขึ้นอยู่กับปริมาณของโลหะที่ตกผลึก โลหะที่นิยมนำมาใช้เป็นสีมาก เช่น ทิน (Tin) โคบอลต์ (Cobalt) นิกเกิล (Nickel) และ ทองแดง (Copper) เป็นต้น วิธีนี้สามารถทำให้ได้ระดับสีค่อนข้างกว้างตั้งแต่สีน้ำตาลอ่อนจนถึงสีดำ สำหรับความเข้มของสีโดยวิธีนี้จะไม่ขึ้นอยู่กับความหนาของฟิล์ม [15]



รูปที่ 2.11 การชุบสีด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยใช้ไฟฟ้า

(Electrolytic Colouring) [14]

## อุปกรณ์สำคัญ

ถังที่เหมาะสมสำหรับน้ำยาชุบสีควรทำด้วยวัสดุที่สามารถป้องกันการสึกกร่อนได้เป็นอย่างดี และภายในถังด้วยยาง พีวีซี หรือใยแก้วก็ได้ ขนาดของตัวถังควรออกแบบให้กว้างพอที่จะบรรจุอุปกรณ์ต่าง ๆ ลงถังได้ เช่น สะพานไฟ และระบบการกวนน้ำยาด้วยอากาศ (Air Agitation System) น้ำยาชุบสีทำงานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ ๆ ดังนั้นระบบทำความเย็นสำหรับควบคุมอุณหภูมิน้ำยาชุบสีจึงค่อนข้างจำเป็น

## สภาพการทำงาน

อุณหภูมิที่น้ำยาชุบสีทำงานได้ดีอยู่ระหว่าง  $18 - 22^{\circ}\text{C}$  ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าโดยปกติอยู่ระหว่าง  $0.2 - 0.8$  แอมแปร์/ดม<sup>2</sup> ใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าประมาณ 30 โวลต์ [13]

สำหรับไฟฟ้าที่ใช้ในการชุบสีด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยใช้ไฟฟ้าส่วนใหญ่ใช้นั้นใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ การควบคุมความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในขณะที่ทำการชุบสีให้คงที่ตลอดเวลาจะส่งผลให้ได้ความเข้มของสีที่มีความสม่ำเสมอ (Uniform Colouring) ในทางปฏิบัติสำหรับการชุบสีครั้งแรก ๆ ควรพิจารณาการใช้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าตามขนาดและจำนวนเนื้อที่ของชิ้นงาน นอกจากนี้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ายังมีความสัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ในการเกิดสีอีกด้วย [14]

## ตัวอย่างภาวะการชุบสี [14] คือ

สารเคมีที่ใช้ : ทินอิเล็กโทรไลต์	:	8 - 10	กรัม/ลิตร
สารเพิ่มความเสถียร	:	20	กรัม/ลิตร
กรดซัลฟิวริก (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	:	20	กรัม/ลิตร
ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า	:	0.3 - 0.4	แอมแปร์/ดม <sup>2</sup>
แรงเคลื่อนไฟฟ้า	:	16 - 18	โวลต์
อุณหภูมิ	:	18 - 22	<sup>o</sup> C
เวลา	:	ขึ้นอยู่กับสีที่ต้องการ	

## โลหะที่นำมาใช้ในการชุบสี

โลหะที่สามารถใช้ในการชุบสีมีมากมายและให้ผลการชุบที่แตกต่างกันออกไป เช่น การใช้ทองแดง (Copper) เป็นอิเล็กโทรไลต์สามารถทำให้เกิดสีเลือดคนกปนน้ำตาล (Maroon) จนถึงสีดำ (Black) การใช้ซีลีเนียม (Selenium) และเงิน (Silver) เป็นอิเล็กโทรไลต์สามารถทำให้เกิดสีทอง (Gold) หรือการใช้โมลิบเดต (Molybdate) และทังสเตต (Tungstate) เป็นอิเล็กโทรไลต์จะให้สีน้ำเงิน (Blue) และการใช้บิสมัท (Bismuth) หรือโคบอลต์ (Cobalt) เป็นอิเล็กโทรไลต์สามารถทำให้เกิดสีเทา เป็นต้น

ปัจจุบันได้นิยมนำโลหะที่มากกว่าหนึ่งตัวมาเป็นอิเล็กโทรไลต์ในการทำให้เกิดสี เช่น การใช้นิกเกิล (Nickel) - ทิน (Tin) เป็นอิเล็กโทรไลต์สามารถทำให้เกิดสีน้ำตาล (Bronze) จนถึงสีดำ (Black) การใช้ทองแดง (Copper) เดิมลงในนิกเกิล (Nickel) หรือโคบอลต์ (Cobalt) สามารถชุบสีบรอนซ์ได้เรียบ สวย และสม่ำเสมอ นอกจากนี้การชุบทองแดง (Copper) ถังหนึ่ง และต่อด้วยการชุบด้วยนิกเกิล (Nickel) อีกถังหนึ่งจะได้สีช็อกโกแลต (Chocolate) เป็นต้น

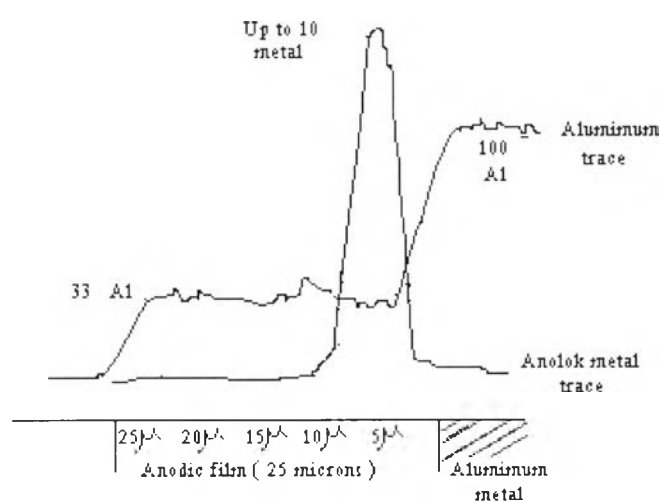
## กลไกการชุบสีด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยใช้ไฟฟ้า

ขณะทำการชุบสี โลหะอิเล็กโทรไลต์ที่นำมาใช้ในการชุบสีจะเกิดตะกอนขึ้น [2] โดยตะกอนดังกล่าวนี้จะถูกพัดพาเข้ามาภายในรูเซลล์ของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ และตกลงส่วนล่างของรูเซลล์กลายเป็นฟิล์มที่ได้จากการชุบสี ตะกอนของโลหะดังกล่าวจะมีคุณสมบัติความเป็นโลหะอยู่ด้วย ซึ่งสามารถตรวจสอบความเป็นโลหะของตะกอนได้ด้วยวิธี X - ray, หรือ Electron Spectroscopy (E.S.C.A) เป็นต้น ปริมาณของตะกอนโลหะที่อยู่ในเซลล์มีไม่มากนัก ตัวอย่างเช่นในกรณีการชุบสีโดยใช้โลหะทิน (Tin) เป็นอิเล็กโทรไลต์ในการทำให้เกิดสี วัสดุตะกอนได้ 5 - 20 มก./ดม.<sup>2</sup> เท่านั้น

รูปที่ 2.12 แสดงตำแหน่งและความหนาของชั้นฟิล์มสีที่ได้จากการชุบสีด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยใช้ไฟฟ้า ตะกอนโลหะจะอยู่ที่ก้นของรูเซลล์และมีความหนาประมาณ 3 - 5 ไมครอน โดยที่ถ้าตะกอนมีความหนามากขึ้นจะได้สีเข้มมากขึ้น ส่วนพื้นที่หน้าตัดของตะกอนมีขนาดแคบเพียง 15 - 18 นาโนเมตรเท่านั้นซึ่งทำให้เกิดสีโดยการกระจายของแสง (แทนที่จะเป็นการเกิดสีโดยการดูดซับแสง) การกระจายแสงเป็นแบบ Rayleigh จึงขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของแสงที่ตกกระทบอย่างมาก แสงสีฟ้าจะ

กระจายได้ดีกว่าแสงสีแดงจึงทำให้ชิ้นงานมีสีน้ำตาล และถ้าตะกอนมีความหนามากขึ้น จะทำให้แสงสูญเสียไปเพราะการกระจายมากขึ้น จึงทำให้ชิ้นงานมีสีดำหรือเข้มมากขึ้น [1, 2]

ฟิล์มที่ได้จากการชุบสีด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยใช้ไฟฟ้าจะมีความทนแสง (คือสีไม่ซีดง่าย) และทนความร้อนได้ดีมาก



รูปที่ 2.12 ฟิล์มอะโนไดซ์ที่ถูกชุบสีด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยใช้ไฟฟ้า  
(Electrolytically pigmented anodic film) [1]

### 2.3 การชุบสีด้วยน้ำยาชุบทิน (Tin)

ทินเป็นโลหะที่มีสีขาว เนื้อค่อนข้างอ่อน จัดแต่งผิวได้ง่าย มีจุดหลอมเหลวต่ำคือประมาณ  $232^{\circ}\text{C}$  ไม่เป็นพิษต่อร่างกาย ไม่ทำปฏิกิริยากับกรดอินทรีย์ที่เจือปนอยู่ในอาหาร จึงนิยมเอาทินมาเคลือบผิวหน้าของภาชนะที่ใช้บรรจุอาหารกันมาก แต่ทินจะทำปฏิกิริยากับพวกกรดอินทรีย์ เช่น กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl) กรดไนตริก (Nitric acid,  $\text{HNO}_3$ ) เป็นต้น และยังสามารถที่จะละลายในสารละลายด่างที่ร้อน เช่น ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อนได้ ฉะนั้นจึงไม่ควรทำความสะอาดหรือขัดไข่มันบนชิ้นงานที่ชุบทินด้วยสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นด่าง

การชุบผิววัสดุด้วยทินนั้นมีความมุ่งหมายในการป้องกันการกัดกร่อน และรักษาความเงาของชิ้นงาน ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นเหล็กหรือโลหะผสมของเหล็ก ในอดีตการชุบทินทำได้ด้วยการนำเอาชิ้นงานจุ่มลงในน้ำยาทินที่หลอมเหลว จากนั้นยกชิ้นงานออกแล้วปล่อยให้เย็นลงก็จะทำให้ทินที่ติดมาแข็งตัวเคลือบอยู่บนชิ้นงานนั่นเอง แต่ต่อมานิยมการชุบทินแบบใช้ไฟฟ้ามากกว่าการจุ่ม [11] โดยมีเหตุผลดังนี้

1. น้ำยาชุบในปัจจุบันได้รับการพัฒนาจนทำให้คุณภาพของชิ้นงานที่ผ่านการชุบเป็นที่ยอมรับกัน
2. การดำเนินการชุบผิวด้วยไฟฟ้าสะดวกกว่า
3. ต้นทุนประหยัดและให้การเคลือบที่ดีกว่า
4. สามารถชุบได้หนากว่า
5. สามารถจะเลือกชุบด้านใดด้านหนึ่งหรือบางส่วนของชิ้นงานได้
6. โลหะหรือชิ้นงานบางอย่างไม่สามารถจะนำไปจุ่มในน้ำยาทินที่กำลังหลอมเหลวได้

## ส่วนประกอบทางเคมีของน้ำยาชุบทิน (Tin)

### 1. ทิน (Tin)

เป็นโลหะอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเป็นผลึกสูง [13, 14, 15] อยู่ในรูปของ Tin (II) Sulphate ที่ไม่เสถียร และมักจะเปลี่ยนไปเป็นรูป Tin (IV) Sulphate ซึ่งตกตะกอนได้ง่าย ฉะนั้นจึงต้องมีการนำเอาสารเติม (Additive) เข้ามาช่วยเพิ่มความเสถียรให้กับทิน

### 2. สตาบิไลเซอร์ (Stabilizer)

เป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นกรด มีความสามารถช่วยเพิ่มความเสถียรให้กับ Tin (II) Sulphate ที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ในการชุบสีนี้ [13, 14, 15] อีกทั้งยังเป็นตัวเพิ่มกำลังการเคลือบผิว (Throwing Power) อีกด้วย

### 3. กรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) หรือกรดกำมะถัน

เป็นตัวทำให้การนำไฟฟ้าในน้ำยาชุบเพิ่มขึ้น [10] และทำให้การโพลาริเซชันของขั้วลบลดลงอย่างมาก นอกจากนั้นกรดยังป้องกันการตกตะกอนของเกลือโลหะต่างๆ ที่ผสมในน้ำยาชุบอีกด้วย หากมีปริมาณกรดน้อยจะทำให้กำลังการเคลือบผิวไม่ดีและส่งผลให้การนำไฟฟ้าของสารละลายชุบต่ำ

## 2.4 ปัญหาที่พบในการชุบสีโดยใช้ทินอิเล็กโทรไลต์และการแก้ไข

### 1. ปัญหาของน้ำยาชุบทิน [15]

เป็นปัญหาอันเนื่องมาจากความไม่เสถียรของเกลือสแตนนัส (Stannous Salts) ที่จะถูกออกซิไดส์ให้กลายเป็นเกลือสแตนนิก (Stannic Salts) ที่ไม่สามารถละลายได้ หรืออาจกล่าวได้ว่าทินซัลเฟตเปลี่ยนสภาพเนื่องจากถูกไฮโดรไลต์กลายเป็นทินที่ใช้งานไม่ได้ ( $Sn^{4+}$ ) และจะตกตะกอนจำนวนมากลงต่อไป [14] ปัญหาดังกล่าวจะทำให้ความเข้มข้นของน้ำยาชุบไม่อยู่ในสัดส่วนที่ต้องการตามสูตร และส่งผลกระทบต่อกระบวนการชุบสี

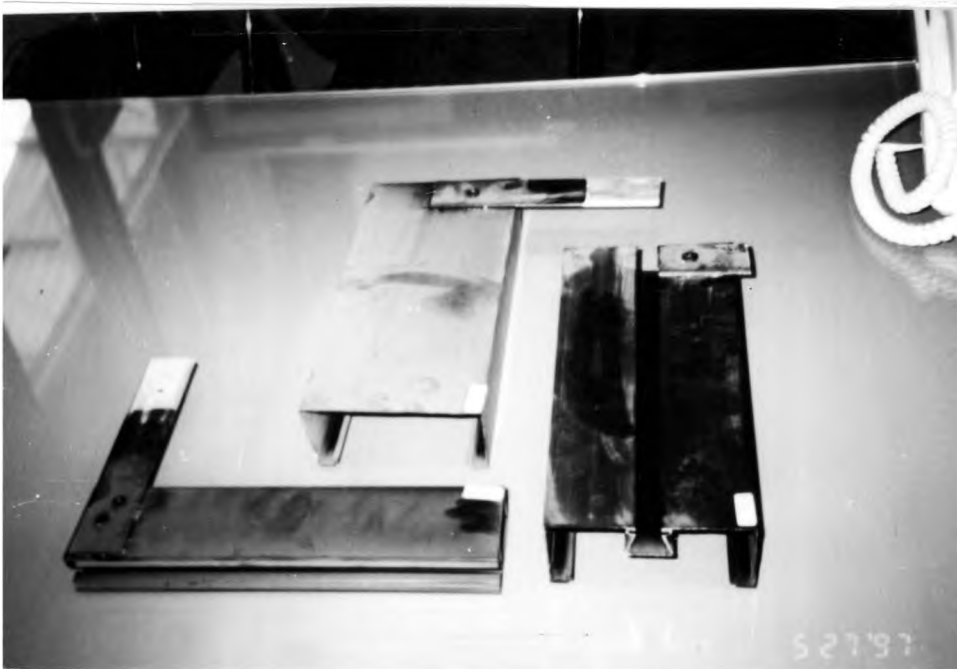
การที่จะทำให้น้ำยาชุบทินเสถียรโดยสมบูรณ์ทำได้ค่อนข้างยาก [1,2] แต่ก็พอจะแก้ไขได้โดยการทำให้เกิดปฏิกิริยารวมตัว (Addition Reaction) ระหว่างทินกับสารเพิ่มความเสถียร เช่น Sulphophthallic, Phenol Sulphonic Acid หรือ Cresol Sulphonic Acid ให้กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีความเสถียร ดังนั้นการใช้สารเพิ่มความเสถียร

(Stabilizer) จะเป็นจุดเด่นอย่างหนึ่งสำหรับกระบวนการชุบสี [1, 2, 13, 14, 15] อันส่งผลให้การชุบสีที่ได้แตกต่างกันออกไป

## 2. การเกิดปัญหาฝุ่นแป้ง

“ฝุ่นแป้ง” เกิดจากการที่ไฮโดรเจนก่อตัวขึ้นในฟิล์มส่งผลให้ชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์บนชิ้นงานถูกทำลาย [1, 13, 14, 15] ดังแสดงในรูปที่ 2.13

ฝุ่นแป้งเกิดขึ้นจากการควบคุมภาวะการทำงานที่ไม่ดีพอ เช่นการใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สูงเกินไป หรือการใช้เวลาในการชุบนานนั่นเอง ฉะนั้นการแก้ไขปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้ด้วยการลดแรงเคลื่อนไฟฟ้า และควรปรับลดเวลาชุบให้สั้นลง



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างการเกิดฝุ่นแป้ง (16)