บทที่ 2

ปริทรรศน์วรรณกรรม

2.1 ความรู้เบื้องต้นของกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อะลูมิเนียมรีดขึ้นรูป ที่ผ่านการสร้างฟิล์มอะโนดิค

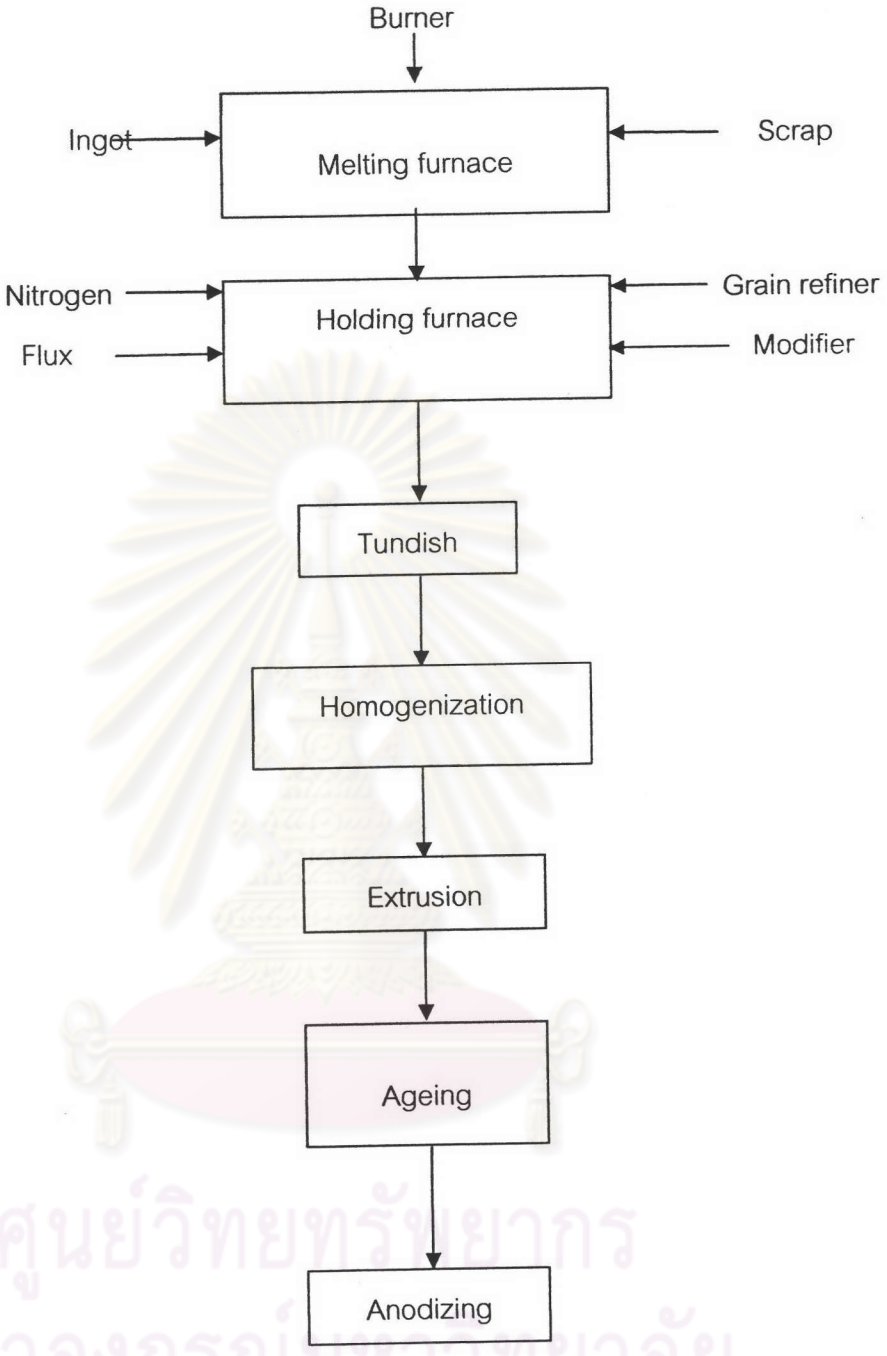
กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อะลูมิเนียมรีดขึ้นรูปที่ผ่านการสร้างฟิล์มอะโนดิค โดยทั่วไปสามารถนำมาเขียนแผนภาพได้ดังแสดงในรูปที่ 2-1 การผลิตแท่งอะลูมิเนียมจะทำในเตาหลอมใหญ่ (Melting furnace) ที่อุณหภูมิประมาณ 750 องศาเซลเซียส วัตถุดิบที่ใช้ ได้แก่ อะลูมิเนียมแท่ง (Ingot) และเศษอัลลอยอะลูมิเนียม (Scrap) เพื่อให้ได้ส่วนผสมตามระบุ (AA 6063) เชื้อเพลิงที่ใช้ ได้แก่ น้ำมันเตาและอากาศ จากนั้นจะส่งอะลูมิเนียมหลอมเหลวไปยังเตาเล็ก (Holding furnace) เพื่อเติมก๊าซไนโตรเจนและสารเคมีสำหรับปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม หลังจากนั้นอะลูมิเนียมหลอมเหลวจะไหลผ่าน Tundish ที่มีอุปกรณ์ลดความแรงของน้ำโลหะขณะเทและผ่านตะแกรงเซรามิกที่ใช้ควบคุมระดับน้ำโลหะผ่านสเปรย์น้ำ และหล่อออกมาเป็นแท่งรูปทรงต่างๆ โดยมีปั๊มไฮโดรลิครองรับที่ฐานแท่งอะลูมิเนียม ซึ่งจะเลื่อนลงมาให้ได้ขนาดความยาวของแท่งอะลูมิเนียมตามความต้องการ แท่งอะลูมิเนียมที่ได้จะผ่านเข้าสู่เตาอบเพื่อทำโฮโมจีไนเซชัน (Homogenization) ที่อุณหภูมิประมาณ 550 องศาเซลเซียส และก่อนนำแท่งอะลูมิเนียมดังกล่าวมารีดขึ้นรูป จะต้องนำมาอบให้ร้อนก่อน ชิ้นงานที่ผ่านเครื่องรีดจะถูกตัดให้มีขนาดความยาวตามความต้องการ จากนั้นจะนำชิ้นงานไปอบบ่มตัว(Ageing)ที่อุณหภูมิ 175 ถึง 200 องศาเซลเซียส และถูกทำให้เย็นตัวก่อนจะเข้าสู่กระบวนการสร้างฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ แผนภาพของกระบวนการสร้างฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์แสดงในรูปที่ 2-2

ก่อนทำการสร้างฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ ต้องทำความสะอาด และเตรียมผิวชิ้นงาน ซึ่งมีหลายวิธี ทั้งวิธีทางเคมีและวิธีทางกล วิธีทางเคมีที่ได้รับความนิยม ได้แก่ การล้างคราบไขมัน (Degreasing) การกัดผิวหรือการกัดขึ้นรอย (Etching) และการสะเทิน (Desmutting) การเตรียมผิวก่อนการสร้างฟิล์มฯมีความสำคัญมาก เนื่องจากฟิล์มฯจะมีสมบัติสม่ำเสมอหรือไม่นั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะชิ้นงานก่อนการอะโนไดส์ และหลังจากนั้นจึงจะเข้าสู่ขั้นตอนการสร้างฟิล์มฯ โดยทั่วไป กระบวนการสร้างฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์นิยมใช้อิเล็คโตรไลท์ประเภทกรดซัลฟูริก บ่อที่บรรจุอิเล็คโตรไลท์อาจทำจากคอนกรีตที่เคลือบผนังบ่อด้วยใยแก้วและทาเรซินทับ เป็นต้น โดยมีชิ้นงานอะลูมิเนียมที่ต้องการสร้างฟิล์มฯทำหน้าที่ขั้วบวก (Anode) และอะลูมิเนียมหรือตะกั่วทำหน้าที่ขั้วลบ (Cathode) เมื่อทำการอะโนไดส์เครื่องจ่ายไฟจะปล่อยกระแสไฟฟ้าตรงเข้าสู่ระบบ

ไปตามสะพานไฟ อิออนของออกซิเจนในอิเล็คโตรไลท์ จะวิ่งเข้าสู่ขั้วบวกรวมตัวกับอิออนของอะลูมิเนียมเพื่อสร้างฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ และอิออนของไฮโดรเจนจะวิ่งเข้าสู่ขั้วลบ การสร้างฟิล์มฯให้มีสมบัติสม่ำเสมอตามความต้องการนั้น จะขึ้นกับปัจจัยหลายประการซึ่งจะกล่าวต่อไปในภายหลัง

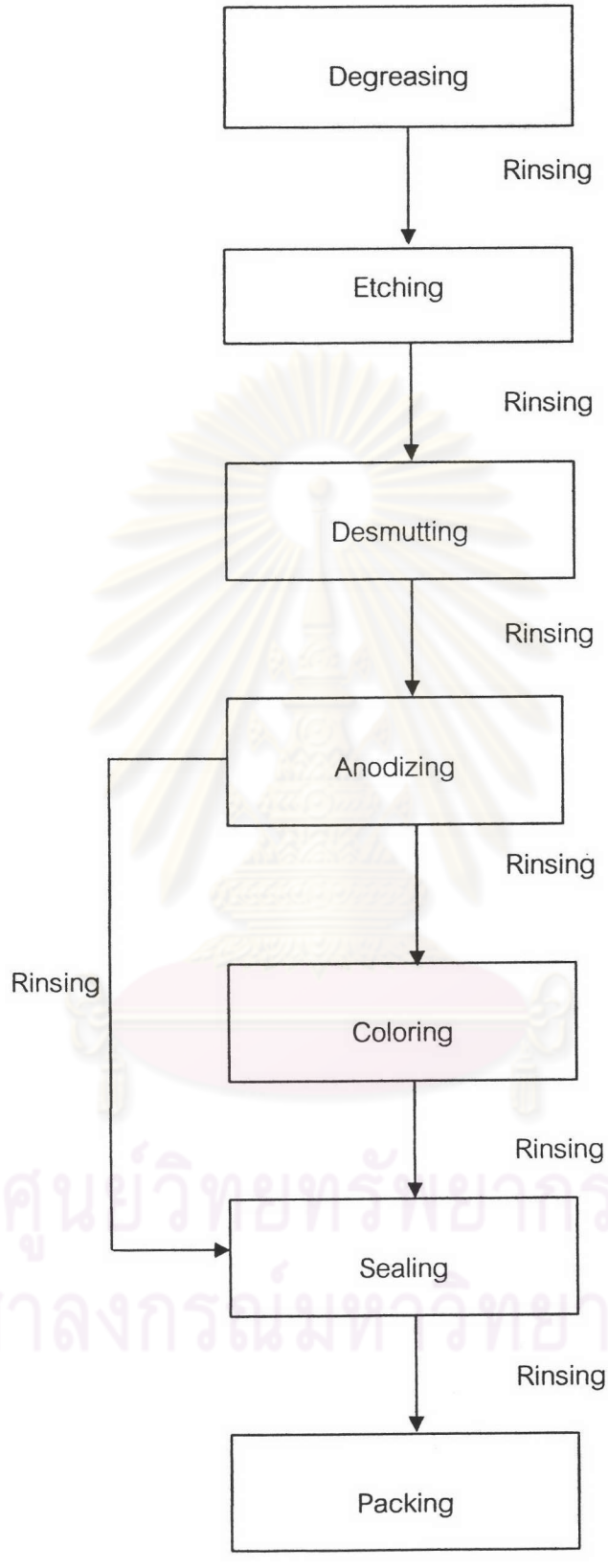
ชิ้นงานที่ผ่านการอะโนไดส์จะเกิดฟิล์มที่ไม่มีสี ดังนั้นหากต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีสีสันจะนำชิ้นงานผ่านการทำสี (Colouring) วิธีหนึ่งที่ได้รับความนิยม ได้แก่ การทำสีด้วยวิธีทางไฟฟ้า (Electrolytic colouring) การทำสีด้วยวิธีดังกล่าวสามารถสร้างสีได้หลายเฉดขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมีและค่าสีจะขึ้นกับระยะเวลาของการทำสี และขั้นตอนสุดท้าย ได้แก่ การซีล (Sealing) ปิดรูพรุนของฟิล์มเพื่อเพิ่มความทนทานให้ผิวชิ้นงาน ในระหว่างทุกๆขั้นตอนของการสร้างฟิล์มฯที่กล่าวมา ชิ้นงานจะถูกล้างด้วยน้ำก่อนเข้าสู่ขั้นตอนถัดไปเพื่อกำจัดสารเคมีตกค้างจากขั้นตอนก่อนหน้านั้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2-1 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อะลูเนียมรีดขึ้นรูปและผ่านการสร้างฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2-2 กระบวนการสร้างฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 โลหะผสมอะลูมิเนียม แมกนีเซียม ซิลิคอน AA 6063

Aluminium Association กำหนดให้โลหะและโลหะผสมของอะลูมิเนียมประเภท Wrought ในกลุ่ม 6xxx มีธาตุผสมหลักคือ แมกนีเซียม และซิลิคอน (David ed., 1993) โดยมีปริมาณในสัดส่วนที่สามารถเป็นแมกนีเซียมซิลิไซด์ (Mg_2Si) ซึ่งเป็น Intermetallic compound ที่ทำให้อะลูมิเนียมกลุ่มนี้สามารถปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคด้วยการผ่านกระบวนการทางความร้อนได้ จึงสามารถควบคุมสมบัติความแข็งหรือความแข็งแรงโดยการควบคุมวงจรของการทำความร้อนและการเย็นตัว (David ed., 1993) แสดงด้วยสัญลักษณ์ T (ระบบสำหรับโลหะผสมที่สามารถปรับปรุงสมบัติด้วยกระบวนการทางความร้อน)

AA 6063 ถูกกำหนดให้มีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 2-1 โดยมีสมบัติสามารถเพิ่มความแข็งหรือความแข็งแรง ความต้านทานการกัดกร่อน และมีผิวชิ้นงานที่ดีภายหลังขึ้นรูปด้วยการผ่านกระบวนการทางความร้อน (David ed., 1993) ดังนั้นจึงนิยมขึ้นรูปด้วยการรีดขึ้นรูป (Extrusion) และนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อน สมบัติเชิงกลของ AA 6063 - T5 และ AA 6063-T6 (T5 คือ ทำให้ชิ้นงานเย็นตัวภายหลังการขึ้นรูปและทำ Artificially aged, T6 คือ ทำ Solution heat-treated และทำ Artificially aged) แสดงในตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-1 ส่วนผสมทางเคมีของ AA 6063 (David ed., 1993)

ธาตุผสม	ค่าจำกัดของส่วนผสม (% โดยน้ำหนัก)
Si	0.2 - 0.6
Fe	0.35 max
Cu	0.10 max
Mn	0.10 max
Mg	0.45 - 0.90
Cr	0.10 max
Zn	0.10 max
Ti	0.10 max
อื่นๆ	0.15 max
Al	bal

ตารางที่ 2-2 สมบัติเชิงกลของ AA 6063-T5 และ AA 6063-T6 (David ed., 1993)

Temper	Ultimate tensile strength MPa	Tensile yield strength MPa	Elongation %	Hardness HB
T5	185	145	12	60
T6	240	215	12	73

2.3 โฮโมจีไนเซชัน (Homogenization)

โฮโมจีไนเซชันเป็นกระบวนการทางความร้อนอันดับแรก ภายหลังการหล่ออะลูมิเนียม ขั้นตอนดังกล่าวเริ่มจากอบบิลเลทให้ร้อนจนมีอุณหภูมิสูงเพียงพอในระยะเวลาที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มความสามารถในการละลาย และการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของส่วนผสมในเนื้ออะลูมิเนียม อันได้แก่ แมกนีเซียมซิลิไซด์ (Mg_2Si) โฮโมจีไนเซชันจะช่วยลด Microsegregation และ Coring ที่มีสาเหตุมาจากงานหล่อเย็นตัวอย่างรวดเร็ว นอกจากนั้น วัตถุประสงค์ของการโฮโมจีไนเซชันโลหะผสมอะลูมิเนียม แมกนีเซียม ซิลิคอน AA6063 เพื่อปรับปรุงความสามารถในการรีดขึ้นรูป ปรับปรุงผิวและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานรีดขึ้นรูป(Nisaratanaporn, 1995)

2.4 การรีดขึ้นรูป (Extrusion)

การรีดขึ้นรูป เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงบิลเลทให้เกิดความยาวของรูปทรงที่มีหน้าตัดสม่ำเสมอโดยใช้แรงดันโลหะให้ไหลผ่านแม่พิมพ์ โครงสร้างภายหลังการรีดจะมีเกรนเดิมที่ยาวไปตามแนวรีด และเกรนย่อยเกิดการจัดเรียงตัวเล็กน้อย รวมทั้งเกิด precipitate ตามแนวการรีดขึ้นรูป (Nisaratanaporn, 1995)

2.5 กระบวนการทางความร้อนของโลหะผสม AA 6063

โดยทั่วไปกระบวนการทางความร้อนประกอบด้วย Solution heat – treated และ Artificially aged ซึ่งกระบวนการทางความร้อนที่นิยมในงานรีดขึ้นรูปของโลหะผสม AA 6063 ได้แก่

1. T5 ทำให้ชิ้นงานเย็นตัวภายหลังการรีดขึ้นรูป จากนั้นทำ Artificially aged ($180^{\circ}C$ นาน 8 ชั่วโมง)

2. T6 ทำ Solution heat – treated ($525^{\circ}C$ นาน 1 ชั่วโมง) จากนั้นทำ Artificially aged ($180^{\circ}C$ นาน 8 ชั่วโมง)

สาเหตุที่นำอะลูมิเนียม AA 6063 ที่ผ่านการรีดขึ้นรูป มาผ่านกระบวนการทางความร้อน เนื่องจากโครงสร้างภายหลังการรีดขึ้นรูปจะมีเกรนย่อยที่ไม่เสถียร สามารถเกิด Recrystallisation nuclei ดังนั้นกระบวนการทางความร้อนจะเปลี่ยนโครงสร้างที่ไม่เสถียร (มีพลังงานสูง) ให้เป็นโครงสร้างที่มีเสถียรภาพได้โดยการกำจัดจุดบกพร่องในโครงสร้างจุลภาค(Nisaratanagorn, 1995) นอกจากนั้นกระบวนการทางความร้อนยังทำให้เกิดการตกผลึกใหม่และการเติบโตของเกรน ซึ่งจะช่วยลดพลังงานพื้นที่ผิวของขอบเกรนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร จึงทำให้เกรนเพิ่มขนาดสม่ำเสมออย่างทั่วถึง เหตุผลอีกประการหนึ่งของการทำกระบวนการทางความร้อน คือ การทำให้ Mg_2Si เข้าไปสู่สารละลายของแข็งและป้องกัน Mg_2Si เกิด Precipitate รวมทั้งรักษาปริมาณแมกนีเซียมและซิลิกอนในสารละลายของแข็งอิ่มตัว (Supersaturated solid sotion)

2.6 กระบวนการสร้างฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์โดยใช้อิเล็กโตรไลท์ประเภทกรดซัลฟูริก

ขั้นตอนของกระบวนการอะโนไดส์แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การเตรียมผิวก่อนสร้างฟิล์มฯ การสร้างฟิล์มอะโนดิค และกระบวนการภายหลังการสร้างฟิล์มฯ รายละเอียดของขั้นตอนดังกล่าวมีดังต่อไปนี้

2.6.1 การเตรียมผิว

ขั้นตอนการเตรียมผิวชิ้นงานก่อนสร้างฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ มีความสำคัญมาก เนื่องจากผิวอะลูมิเนียมที่สะอาดและพร้อมที่จะสร้างฟิล์มฯ จะให้ฟิล์มที่มีสมบัติสม่ำเสมอ สามารถแบ่งขั้นตอนการเตรียมผิวทั่วๆ ไปได้ดังนี้

1. การล้างคราบไขมัน (Degreasing) เป็นการกำจัดคราบไขมันบนผิวชิ้นงานโดยใช้สารเคมีจึงต้องหมั่นตรวจสอบคุณภาพของสารเคมี ทั้งความเข้มข้นของสารเคมี หรือสิ่งเจือปนในสารเคมี นอกจากนั้นระยะเวลาของขั้นตอนนี้ควรให้เหมาะสมกับปริมาณพื้นที่ผิวและรูปทรงของชิ้นงาน เนื่องจากถ้าใช้ช่วงเวลาสั้นเกินไปอาจกำจัดคราบไขมันได้ไม่หมดและจะส่งผลเสียต่อคุณภาพฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ เช่น บริเวณที่ล้างคราบไขมันออกไม่หมดจะไม่เกิดฟิล์มฯ หรือเกิดฟิล์มเพียงเล็กน้อยหลังจากผ่านกระบวนการสร้างฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ เป็นต้น

2. การกัดขึ้นรอย (Etching) เป็นการใช้สารเคมีกัดผิวอะลูมิเนียมให้หยาบเล็กน้อย เพื่อเป็นจุดกำเนิดของการเกิดฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ โดยทั่วไปสารเคมีที่นิยมใช้ ได้แก่ สารเคมีประเภทเบสโดยเฉพาะโซดาไฟ (NaOH) ส่วนสารเคมีประเภทกรดจะใช้ในงานเฉพาะทาง (Brace และ Sheasby, 1979)

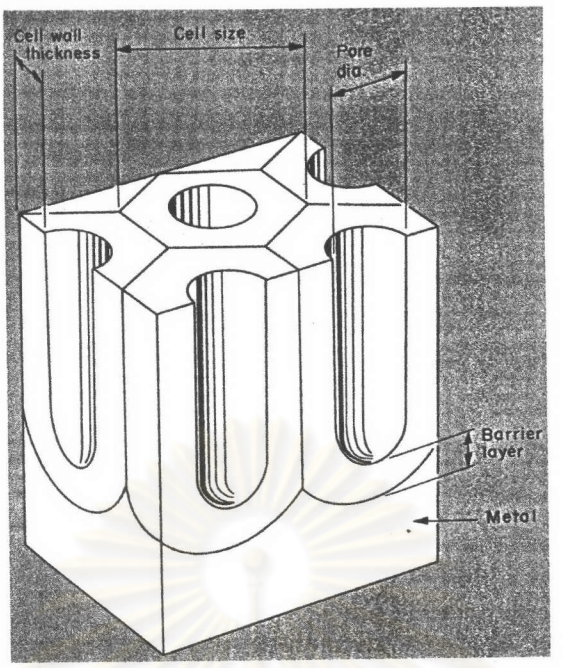
3. การสะเทิน (Desmutting) เป็นการกำจัดคราบวัสดุที่มิได้ละลายไปกับสารละลายเบสในขั้นตอนการกัดผิว (Henley, 1982) ในขั้นตอนนี้นิยมใช้สารเคมีประเภทกรด ได้แก่ กรดไนตริก หรืออาจผสมกรดซัลฟูริกปริมาณเล็กน้อยลงในกรดไนตริก

2.6.2 การสร้างฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ (Anodizing)

กระบวนการสร้างฟิล์มออกไซด์ หรือกระบวนการอะโนไดส์ (Anodizing) คือ กระบวนการทำให้สารละลายแตกตัวเป็นอิออนด้วยไฟฟ้า (Electrolytic process) ผิวโลหะหรือโลหะผสมจะถูกเปลี่ยนกลายเป็นออกไซด์ เพื่อสร้างฟิล์มออกไซด์ให้หนากว่าฟิล์มออกไซด์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และเรียกฟิล์มที่ได้จากกระบวนการดังกล่าวว่า อะโนดิค (Anodic) ภายหลังการเตรียมผิว จะนำชิ้นงานอะลูมิเนียมเข้าสู่กระบวนการสร้างฟิล์มอะโนดิค ซึ่งโดยทั่วไปนิยมใช้กรดซัลฟูริกเป็นอิเล็กโตรไลท์

2.6.2.1 ลักษณะของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์และกลไกการเกิดฟิล์มฯ

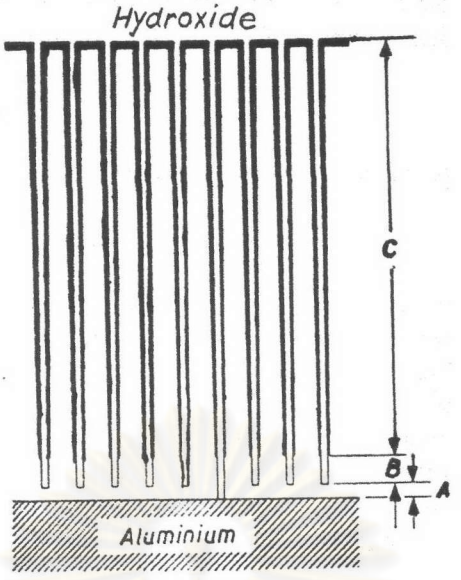
ฟิล์มออกไซด์ตามธรรมชาติของอะลูมิเนียมมีความหนาประมาณ $0.25*10^{-2}$ ถึง $1*10^{-2}$ ไมครอน (Henley, 1982) ทำหน้าที่ปกป้องผิวโลหะอะลูมิเนียมและโลหะผสมอะลูมิเนียมจากการกัดกร่อนในบรรยากาศ หากนำอะลูมิเนียมมาผ่านกระบวนการสร้างฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ จะได้ฟิล์มที่มีความหนาเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปนิยมใช้อิเล็กโตรไลท์ประเภทกรดซัลฟูริก เนื่องจากกระบวนผลิตไม่แพงนักและควบคุมได้ง่าย รวมทั้งปรับปรุงสมบัติของผิวอะลูมิเนียม (Jack George, n.d.) ลักษณะของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์จะมีรูพรุน (Porous oxide layer) หรือมีเนื้อแน่น (Compact oxide layer) จะขึ้นอยู่กับชนิดอิเล็กโตรไลท์ที่เลือกใช้ ถ้าอิเล็กโตรไลท์เป็นประเภทกรดซัลฟูริก กรดออกซาลิก หรือกรดฟอสฟอริก (Debuyck, Moors และ Peterghem Van, 1993) จะได้ฟิล์มฯที่มีลักษณะเป็นรูพรุน ที่มี Barrier layer คั่นอยู่ระหว่างเนื้ออะลูมิเนียมกับรูพรุนดังแสดงในรูปที่ 2-3 จากรูปพบว่าโครงสร้างฟิล์มอะโนดิคมีลักษณะเซลล์คอลัมน์รูปทรงหกเหลี่ยม และแต่ละคอลัมน์มีรูรูปทรงกระบอกกลมอยู่ตรงกึ่งกลาง ซึ่งรูจะลึกลงไปถึง Barrier layer สาเหตุที่อิเล็กโตรไลท์ประเภทกรดซัลฟูริกทำให้เกิดฟิล์มที่มีรูพรุน เนื่องจากสารละลายประเภทนี้สามารถละลายฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งเป็นการจำกัดความหนาของฟิล์มฯอีกด้วย (Brace และ Sheasby, 1979) แต่ในกรณีที่อิเล็กโตรไลท์เป็นสารละลายประเภทกรดบอริค (Debuyck et al., 1993) สารละลายอัลคาไลน์ของบอเรท ทาร์เทรต หรือฟอสเฟต จะได้ฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีเนื้อแน่นและมีความต้านทานไฟฟ้าสูง (William ed., 2 nd ed.)



รูปที่ 2-3 โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มอะโนดิคที่ได้จากการอะโนไดส์ที่ใช้อิเล็กโตรไลท์ประเภทกรดซัลฟูริก หรือกรดออกซาลิก หรือกรดฟอสฟอริก (Henley, 1982)

ในทางอุตสาหกรรมนิยมสร้างฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ โดยใช้อิเล็กโตรไลท์ประเภทกรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 165 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้า (Current density)130 ถึง 260 แอมป์ต่อตารางเมตร แรงดันไฟฟ้า 12 ถึง 22 โวลต์ และความหนาของฟิล์มอะโนดิคที่ใช้ในงานทั่วไปประมาณ 7 ถึง 10 ไมครอน ฟิล์มส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) มีน้ำ (Unbound water) 0.5 ถึง 1.5 % และซัลเฟต 12 ถึง 16 % (William ed., 2 nd ed.)

กลไกการเกิดฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ โดยใช้อิเล็กโตรไลท์ประเภทกรดซัลฟูริก มีดังนี้ อะลูมิเนียมที่ต้องการสร้างฟิล์มฯ ทำหน้าที่ขั้วอาโนดหรือขั้วบวก และใช้อะลูมิเนียมหรือตะกั่วทำหน้าที่ขั้วคาโทดหรือขั้วลบ ต่อวงจรเข้ากับกระแสไฟฟ้าตรง และใช้อิเล็กโตรไลท์ประเภทกรดซัลฟูริก อิออนของออกซิเจนและอิออนของซัลเฟอร์จาก อิเล็กโตรไลท์จะวิ่งไปสู่อาโนด และเกิดอิออนของไฮโดรเจนที่คาโทด อิออนของออกซิเจนและอิออนของซัลเฟอร์จะทำปฏิกิริยากับอิออนของอะลูมิเนียมที่อาโนด มีนักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาและตั้งข้อสันนิษฐานกลไกการเกิดฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ ข้อสันนิษฐานของ T.Rummell (Wernick และ Pinner 4 th ed., 1972) กล่าวว่า ฟิล์ม Barrier layer ถูกทำให้เกิดรูพรุนโดยกระแสไฟฟ้า และฟิล์มที่เกิดขึ้นใหม่จะอยู่บริเวณส่วนล่างของรู กลไกจะเกิดซ้ำไปมาจนกระทั่งรูมีความยาวมากจนแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ไม่เพียงพอต่อการเกิดฟิล์มรูปที่ 2-4 แสดงการเกิดฟิล์มอะโนดิคตามข้อสันนิษฐานของ Rummell



รูปที่ 2-4 การเกิดฟิล์มอะโนดิคตามข้อสันนิษฐานของ Rummell (Wernick และ Pinner 4 th ed., 1972)

ก. ออกไซด์ชั้นเดิมและมีบางส่วนแตกผ่านลงมา

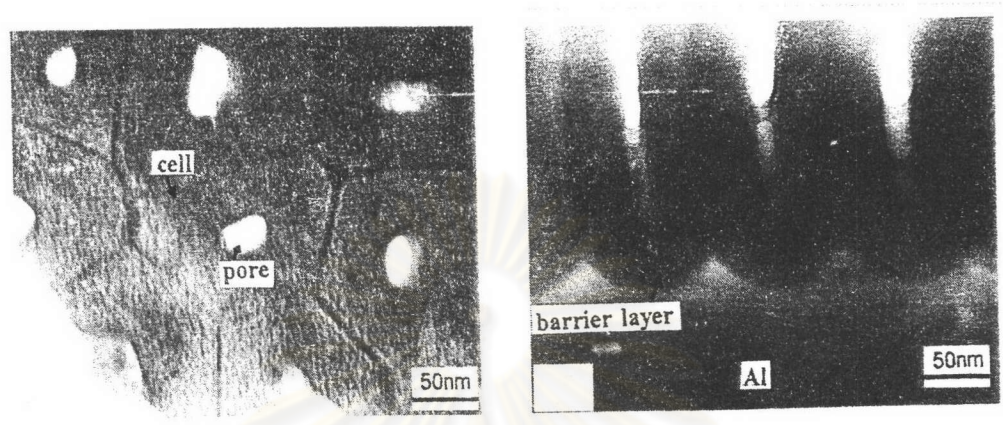
ข. ออกไซด์ที่ถูกสร้างมาจากออกไซด์ชั้นเดิมแต่ชั้นนี้ไม่สัมผัสอิเล็กโตรไลท์

ค. ชั้นออกไซด์ไฮดรอกไซด์ที่สัมผัสกับอิเล็กโตรไลท์

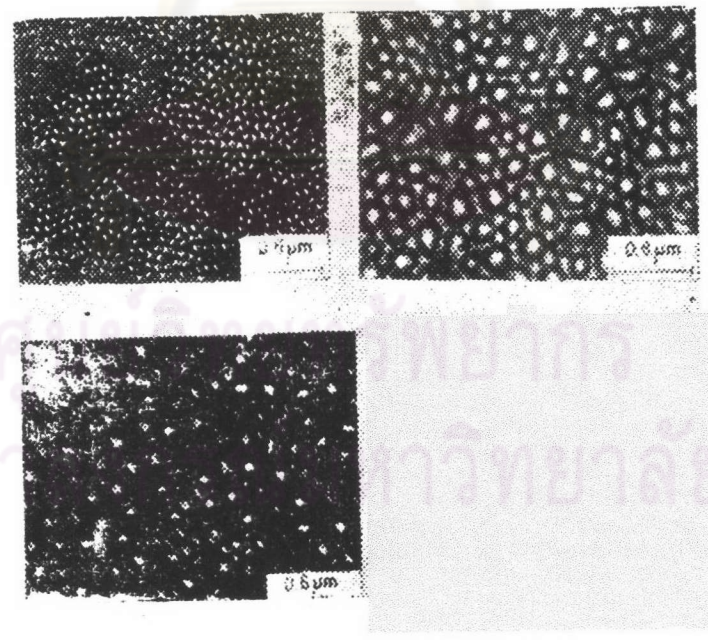
มีทฤษฎีหนึ่งที่น่าสนใจโดย W.Baumann (Wernick และ Pinner 4 th ed., 1972) อ้างว่ามีฟิล์มของไอ (Vapour film) อยู่บริเวณก้นของรูจากข้อสันนิษฐานได้กล่าวว่าอิออนของออกซิเจนถูกสร้างในบริเวณระหว่างก๊าซกับอิเล็กโตรไลท์ ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความร้อนมาจากกระแสไฟฟ้าและปฏิกิริยาเคมี ผลคือเกิดออกไซด์ที่ฐานของรู โดยกลไกนี้จะเกิดขึ้นได้นานตราบเท่าที่มีความต่างศักย์เพียงพอที่จะนำออกซิเจนเข้าสู่แลททิสของอะลูมิเนียม แต่ฟิล์มจะไม่เกิดรูถ้าวัสดุในรูกลายเป็นอะตอมและไปสัมผัสกับอิเล็กโตรไลท์ และยังกล่าวว่ากระแสไฟฟ้าจะนำอิออนของออกซิเจนให้ออกมาซึ่งช่วยให้เกิดการละลาย (Dissolution) ของออกไซด์และยังมีผลต่อความกว้างของรู กลไกข้างต้นจะหยุดเมื่อมีแรงดันไฟฟ้าไม่เพียงพอ ถึงแม้จะเพิ่มแรงดันไฟฟ้าก็ไม่อาจทำให้เกิดกลไกต่อไปได้ และถ้าแรงดันไฟฟ้ามีค่าถึง Breakdown voltage จะทำให้ฟิล์มแตกร่อนได้ (Wernick และ Pinner 4 th ed., 1972)

ในรูป 2-5 แสดงโครงสร้างของฟิล์มอะโนดิคที่อะโนไดส์ด้วยอิเล็กโตรไลท์ประเภทกรดออกซาลิก โครงสร้างของฟิล์มอะโนดิคประกอบด้วยเซลล์ที่มีรูอยู่กึ่งกลางเซลล์ และรูมีขนาดลึกลงถึง Barrier layer รูป 2-6 แสดงโครงสร้างฟิล์มที่ถูกอะโนไดส์ด้วยกรดซัลฟูริก

20 v/o อุณหภูมิ 15°C ที่แรงดันไฟฟ้า 15 โวลต์ พบว่าเมื่อเริ่มอะโนไดส์ประมาณ 2 วินาทีฟิล์มมีรูขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับขนาดเซลล์ ที่ระยะเวลา 3 วินาที รูมีขนาดเล็กลงและเซลล์มีขนาดใหญ่ขึ้น และที่ 5 วินาที พบว่ามีจำนวนรูมากขึ้น

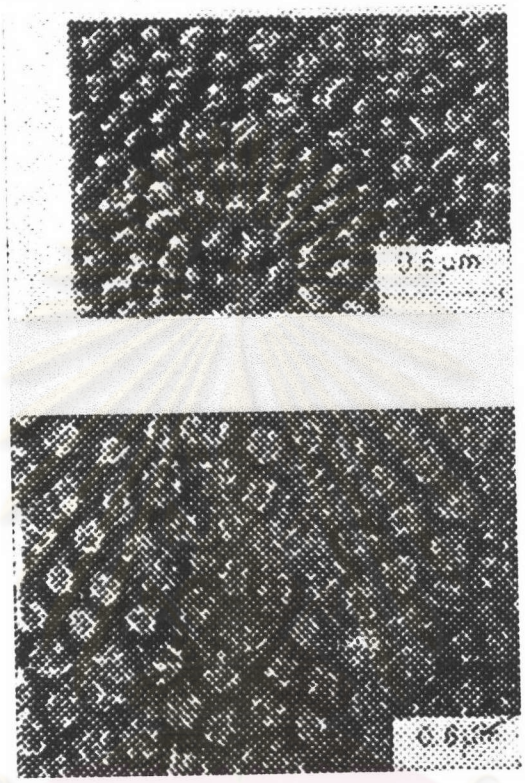


รูปที่ 2-5 โครงสร้างฟิล์มอะโนดิคที่ได้จากการอะโนไดส์ด้วยอิเล็กโตรไลท์ประเภทกรดออกซาลิก ถ่ายด้วย TEM ซ้าย คือผิวระนาบฟิล์ม ขวา คือ ภาคตัดขวางฟิล์ม (Tao, Shangkui, Jiazheng และJianmin, 1996)

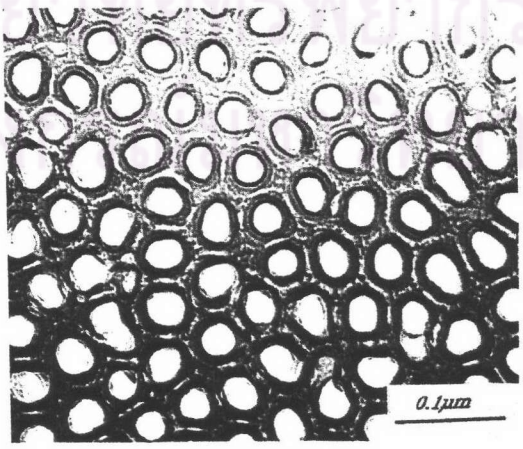


รูปที่ 2-6 โครงสร้างฟิล์มที่ถูกอะโนไดส์ด้วยกรดซัลฟูริก 20 v/o อุณหภูมิ 15°C ที่แรงดันไฟฟ้า 15 โวลต์ ระยะเวลาอะโนไดส์ (บนซ้าย) 5 วินาที (บนขวา) 2 วินาที (ล่าง) 3 วินาที (Hussain, Dwarakadasa และ Ismail, 1984)

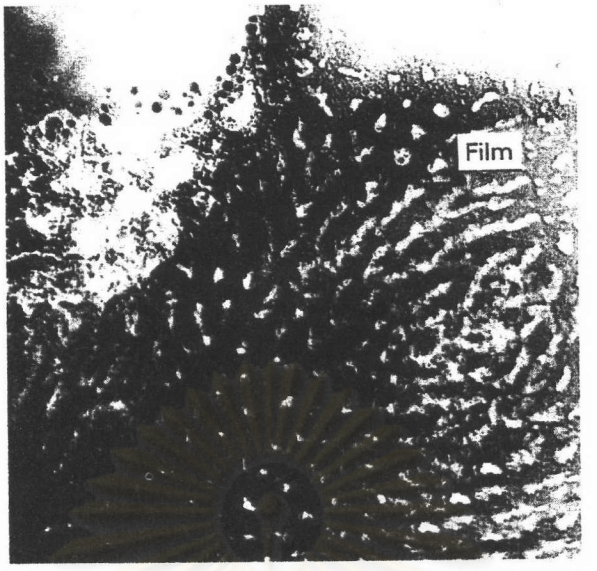
โครงสร้างของฟิล์มอะโนดิคอาจมีรูปแบบแตกต่างไปจากโครงสร้างปกติได้ เช่น ภายในเซลล์มีรูมากกว่าหนึ่งรู หรืออาจเกิดรูขึ้นบริเวณขอบเซลล์ (รูป 2-7) มีเซลล์ล้อมรอบแต่ละเซลล์มากกว่าหรือน้อยกว่าหกเซลล์ (รูป 2-8) ซึ่งอาจมีสาเหตุจากเซลล์หนาแน่นจนเบียดกันทำให้เซลล์เรียงตัวไม่เป็นระเบียบ (Long และ Wei, 2000) เซลล์และรูอาจเรียงตัวเกิดรูปแบบเฉพาะ เช่น รูปลายนิ้วมือ (รูป 2-9) ซึ่งมีสาเหตุจากสิ่งเจือปนที่แทรกอยู่ในเนื้อฟิล์ม (Shahid, 1997)



รูปที่ 2-7 โครงสร้างฟิล์มที่เซลล์และรูบางบริเวณมีลักษณะแตกต่างจากโครงสร้างทั่วไป (บน) ภายในเซลล์มีรูมากกว่าหนึ่งรู (ล่าง) เกิดรูบริเวณขอบเซลล์ (Hussain, Dwarakadasa และ Ismail, 1984)

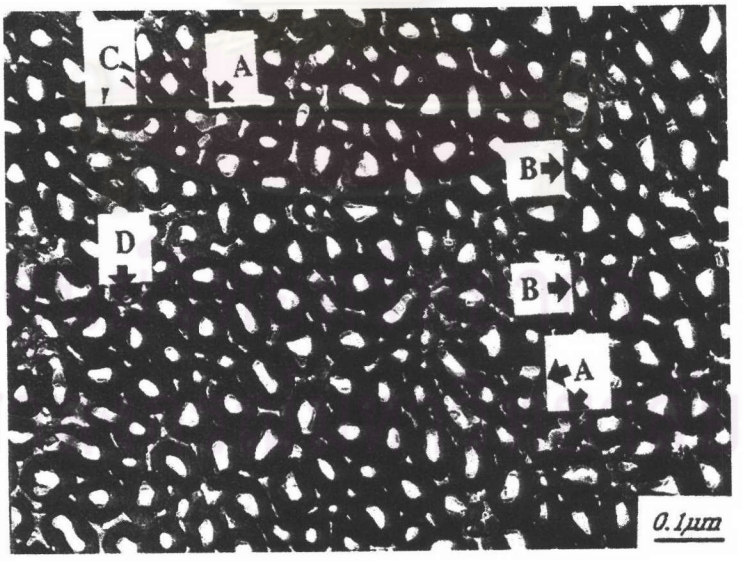


รูปที่ 2-8 โครงสร้างฟิล์มอะโนดิดอะลูมิเนียม AA6063 ที่มีเซลล์ล้อมรอบแต่ละเซลล์ไม่เท่ากับหกเซลล์ (Komisarov และ Thölén, 1992)

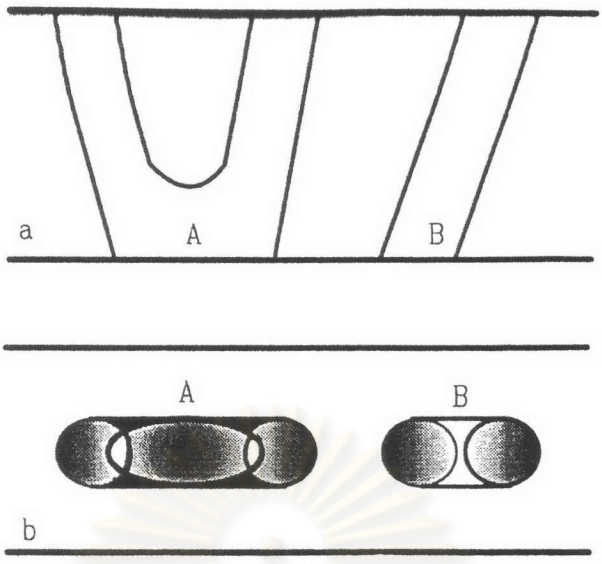


รูปที่ 2-9 โครงสร้างเซลล์และรูเรียงตัวเกิดรูปแบบเฉพาะรูปลายนิ้วมือ (Shahid, 1997)

รูของฟิล์มอาจมองเห็นจากผิวระนาบไม่เป็นรูปร่างกลม อาจมีสาเหตุมาจากรูแตกช่องสาขาจากรูหลัก หรือเกิดช่องจากมุมรู หรืออาจเกิดรูที่ขอบเซลล์ หรือรูอาจไม่ดิ่งในแนวตรงแต่อาจดิ่งเฉียงไป (รูป 2-10 และ 2-11)



รูปที่ 2-10 โครงสร้างของฟิล์มที่เซลล์และรูมีรูปร่างแตกต่างจากโครงสร้างปกติ ลูกศร A แสดงช่องที่แตกสาขามาจากรูหลัก ลูกศร B แสดงรูที่ดิ่งตรงในลักษณะเฉียง ลูกศร C แสดงรูที่ด้านข้างเซลล์ และลูกศร D แสดงช่องเชื่อมต่อระหว่างมุมของรู (Komisarov และ Thölén, 1992)



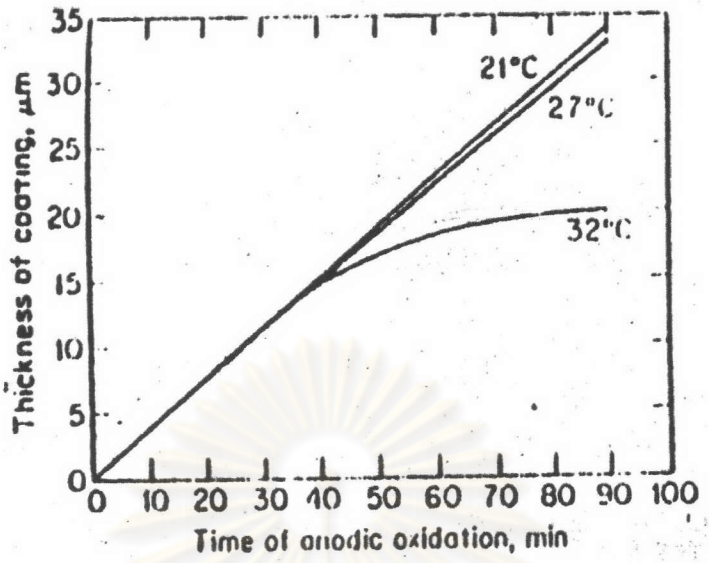
รูปที่ 2-11 ภาพจำลอง A แสดงช่องที่แตกสาขามาจากรูหลัก และ B แสดงรูที่ไม่ดิ่งในแนวตรง โดย a แสดงภาคตัดขวาง b แสดงผิวระนาบ (Komisarov และ Thölén, 1992)

2.6.2.2 พารามิเตอร์และผลของพารามิเตอร์ในกระบวนการสร้างฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์

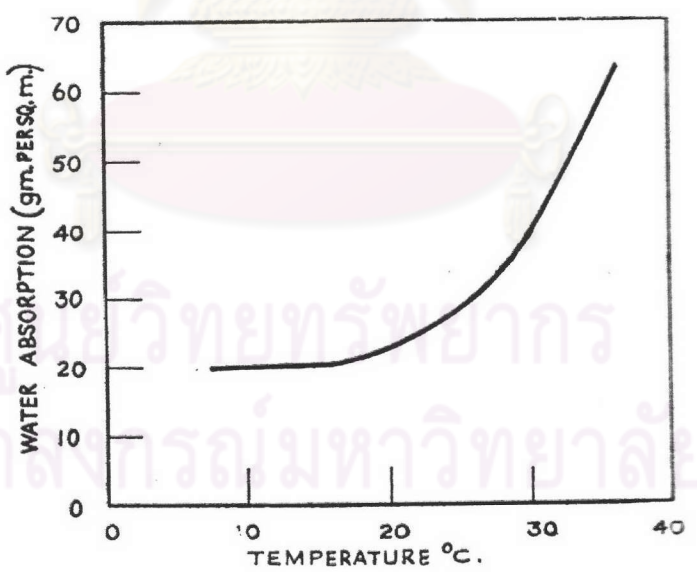
กระบวนการสร้างฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ ที่ใช้อิเล็กโตรไลท์ประเภทกรดซัลฟูริกมีหลายพารามิเตอร์ควบคุมกลไกการเกิดฟิล์มฯ พารามิเตอร์เหล่านี้ ได้แก่ อุณหภูมิและความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลท์ แรงดันไฟฟ้า ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้า (Current density) และสิ่งเจือปนในสารละลาย

<u>อุณหภูมิของอิเล็กโตรไลท์</u>

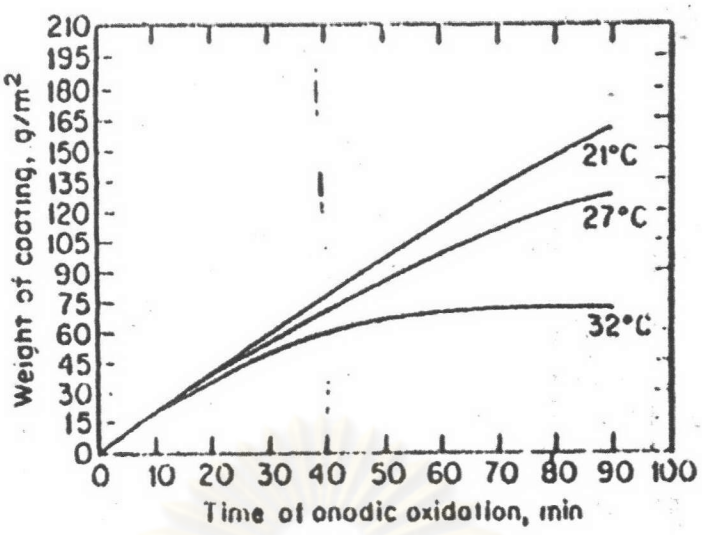
โดยทั่วไป อิเล็กโตรไลท์ประเภทกรดซัลฟูริกมีอุณหภูมิระหว่างการอะโนไดส์ 18 ถึง 22 องศาเซลเซียส หากอิเล็กโตรไลท์มีอุณหภูมิสูงจะทำให้ฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์เกิดการละลายกลับสู่อิเล็กโตรไลท์ จึงทำให้ฟิล์มฯมีความแข็งลดลง (Brace และ Sheasby, 1979) จากรูปที่ 2-12 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิอิเล็กโตรไลท์มีผลต่อความหนาของฟิล์มฯ เมื่อระยะเวลาการอะโนไดส์เพิ่มขึ้น ฟิล์มจะมีความหนาเพิ่มขึ้น และอิเล็กโตรไลท์ที่มีอุณหภูมิสูงจะเกิดฟิล์มที่มีความหนาต่ำกว่าอิเล็กโตรไลท์ที่มีอุณหภูมิต่ำ นอกจากนั้น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีผลต่อลักษณะรูพรุน จากรูปที่ 2-13 เมื่ออุณหภูมิอิเล็กโตรไลท์สูงขึ้น ฟิล์มฯ ที่ได้จะสามารถดูดซับน้ำได้มากขึ้นเนื่องจากฟิล์มฯ มีความพรุนเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 2-14 เมื่อระยะเวลาการอะโนไดส์เพิ่มขึ้น ฟิล์มฯจะมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น และอิเล็กโตรไลท์ที่มีอุณหภูมิสูงจะเกิดฟิล์มที่มีน้ำหนักน้อยกว่าอิเล็กโตรไลท์ที่มีอุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 2-12 อิทธิพลของเวลาต่อความหนาของฟิล์ม ณ อุณหภูมิอิเล็กโตรไลท์ต่างๆ ของการอะโนไดส์อะลูมิเนียม 1100 ในกรดซัลฟูริกเข้มข้น 15 % ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้า 130 แอมป์ต่อตารางเมตร (Jack George, n.d.)



รูปที่ 2-13 ผลของอุณหภูมิอิเล็กโตรไลท์ต่อการดูดซับน้ำของฟิล์ม (ความพรุนของฟิล์ม) จากฟิล์มหนา 10 ไมครอน ที่อะโนไดส์ในกรดซัลฟูริกเข้มข้น 20 % ที่ 200 แอมป์ต่อตารางเมตร และจุ่มลงในน้ำเดือดนาน 30 นาที (Wernick และ Pinner 4 th ed., 1972)



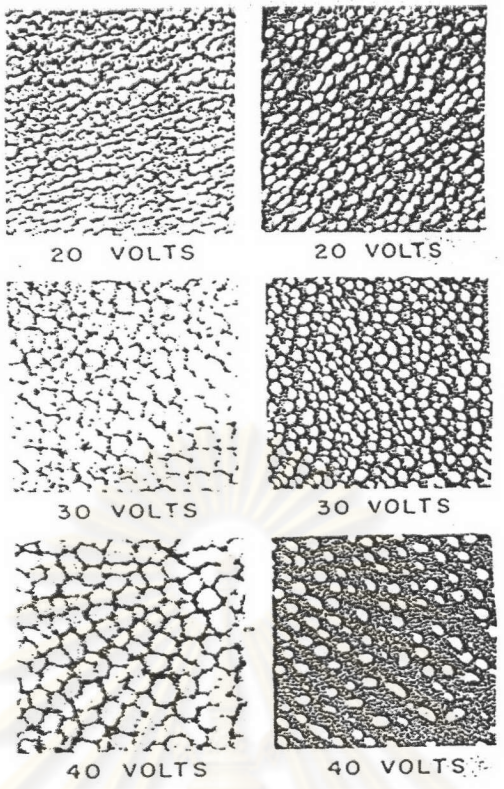
รูปที่ 2-14 อิทธิพลของเวลาต่อน้ำหนักของฟิล์ม ณ อุณหภูมิอิเล็กโตรไลท์ต่างๆ ของการอะโนไดส์อะลูมิเนียม 1100 ในกรดซัลฟูริกเข้มข้น 15 % ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้า 130 แอมป์ต่อตารางเมตร (Jack George, n.d.)

<u>แรงดันไฟฟ้า</u>

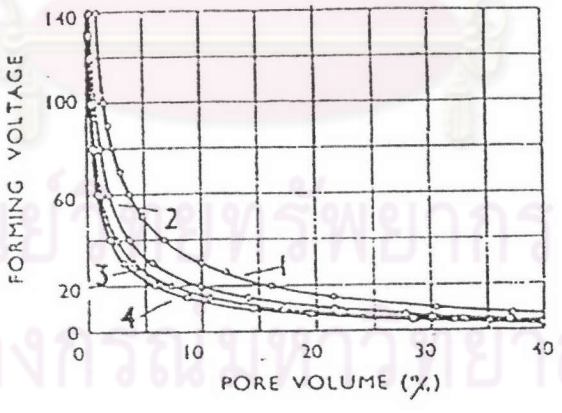
โดยทั่วไปการอะโนไดส์งานประดับตกแต่ง (Architecture) โดยใช้อิเล็กโตรไลท์ประเภทกรดซัลฟูริกจะใช้แรงดันไฟฟ้าประมาณ 17 ถึง 19 โวลต์ (Brace และ Sheasby, 1979) การใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่สูง จะลดความมันเงา (Brightness) ของฟิล์มอะลูมิเนียม นอกจากนั้นการใช้อุณหภูมิหรือความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลท์ต่ำจะส่งผลให้ใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าสูง เพื่อรักษาความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้าให้คงที่ ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าของการอะโนไดส์ที่สูงจะทำให้ได้ฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีความพรุนต่ำและมีความแข็งสูง (Brace และ Sheasby, 1979) จากรูปที่ 2-15 เมื่อแรงดันไฟฟ้าของการอะโนไดส์เพิ่มขึ้นจะเกิดโครงสร้างของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีขนาดเซลล์ใหญ่ขึ้นและจำนวนรูต่อพื้นที่ลดลง รูปที่ 2-16 แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้า ฟิล์มมีปริมาตรของรูพรุนลดลง และรูปที่ 2-17 เมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จะทำให้ขนาดเซลล์เพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นฟิล์มจะเพิ่มขนาดของเซลล์

<u>ความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลท์</u>

โดยทั่วไป การอะโนไดส์ที่ใช้อิเล็กโตรไลท์ประเภทกรดซัลฟูริกจะใช้ความเข้มข้น 150 ถึง 250 กรัมต่อลิตร (Brace และ Sheasby, 1979) จากรูปที่ 2-18 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกสูงขึ้น จะใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าเพื่อรักษาความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าของการอะโนไดส์ต่ำลง นอกจากนั้นความสามารถในการละลายฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ของกรดซัลฟูริกจะทำให้ฟิล์มฯมี น้ำหนัก ความหนา และความต้านทานต่อการขัดสีลดลงเพราะฟิล์มฯ เกิดการละลายกลับสู่อิเล็กโตรไลท์ เมื่อความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลท์สูง (Brace และ Sheasby, 1979)

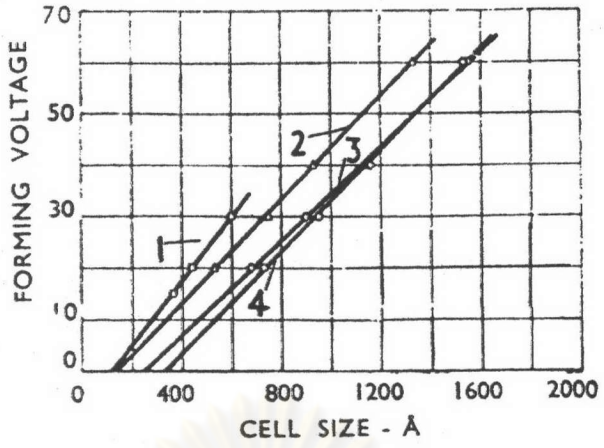


รูปที่ 2-15 โครงสร้างของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ รูปซ้าย คือเซลล์ (cell) รูปขวา คือ รูฟิล์มของการอะโนไดส์ที่ใช้กรดฟอสฟอริกเข้มข้น 4 % ถ่ายด้วยกล้องอิเล็กตรอน กำลังขยาย 35,000 เท่า (Wernick และ Pinner 4 th ed., 1972)



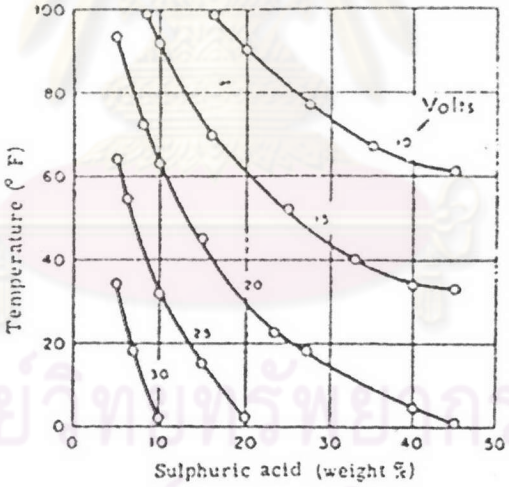
รูปที่ 2-16 ความสัมพันธ์ของปริมาตรของรู (Pore volume) ต่อค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้สร้างฟิล์มอะโนดิคในอิเล็กโตรไลท์ประเภทต่าง (Wernick และ Pinner 4 th ed., 1972)

1. กรดฟอสฟอริก 4 % ที่ 25 องศาเซลเซียส
2. กรดโครมิก 3 % ที่ 50 องศาเซลเซียส
3. กรดออกซาลิก 2 % ที่ 25 องศาเซลเซียส
4. กรดซัลฟูริก 15 % ที่ 10 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2-17 ความสัมพันธ์ของขนาดเซลล์ต่อแรงดันไฟฟ้าของการอะโนไดส์
(Wernick และ Pinner 4 th ed., 1972)

1. กรดซัลฟูริกความเข้มข้น 15 % ณ 10°C
2. กรดออกซาลิกความเข้มข้น 2 % ณ 25°C
3. กรดโครมิกความเข้มข้น 3 % ณ 50°C
4. กรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 4 % ณ 25°C



รูปที่ 2-18 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลท์
และค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างการอะโนไดส์อะลูมิเนียมแผ่น 99.99 %
ในกรดซัลฟูริกที่ใช้ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้า130แอมป์ต่อตารางเมตร
(Brace และ Sheasby, 1979)

<u>ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า</u>

โดยทั่วไป การอะโนไดส์ที่ใช้อิเล็กโตรไลท์ประเภทกรดซัลฟูริก จะใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 120 ถึง 150 แอมป์ต่อตารางเมตร (Brace และ Sheasby, 1979) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของการอะโนไดส์สูง จะใช้แรงดันไฟฟ้าสูงเช่นกัน ซึ่งจะได้ฟิล์มที่มีความต้านทานต่อ

การขัดสีได้ดีแต่จะมีความมันเงา (Brightness)ลดลง นอกจากนั้น ขณะอะโนไดส์ที่แรงดันไฟฟ้าคงที่ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจะลดลง เพราะภายหลังเริ่มอะโนไดส์ ฟิล์มจะมีความหนาเพิ่มขึ้น จึงต้องเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเพื่อเร่งอิออนของออกซิเจนเข้าไปในรูเพื่อรักษาระดับอัตราการเกิดฟิล์มฯ ดังนั้นหากต้องการรักษาสภาพของฟิล์มให้มีความหนาตามความต้องการ จะต้องควบคุมที่ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Brace และ Sheasby, 1979)

<u>สิ่งแปลกปลอมในสารละลาย</u>

การอะโนไดส์จำเป็นที่จะต้องควบคุมปริมาณของสิ่งแปลกปลอมในอิเล็กโตรไลท์ ที่ส่งผลต่อสมบัติของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ ระดับของสิ่งแปลกปลอมที่สำคัญ ควรมีเหล็กอยู่ในอิเล็กโตรไลท์ไม่เกิน 50 ppm เพราะอาจส่งผลต่อเสียต่อความแวววาวของผิวฟิล์มฯ มีปริมาณทองแดงไม่เกิน 125 ppm เพราะอาจลดความต้านทานต่อการกัดกร่อนของฟิล์มฯ มีอิออนของคลอไรด์ไม่เกิน 0.08 กรัมต่อลิตร เพราะทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบ Pitting ควรมีปริมาณอะลูมิเนียมในอิเล็กโตรไลท์อย่างน้อย 5 กรัมต่อลิตรเพื่อช่วยการสร้างฟิล์มฯ แต่ไม่ควรเกิน 15 กรัมต่อลิตรเพราะจะลดการนำไฟฟ้าของอิเล็กโตรไลท์ เป็นต้น

2.6.2.3 ผลของธาตุผสมต่อฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์

ถ้าอะลูมิเนียมมีธาตุผสมในปริมาณสูงเกินไปอาจส่งผลต่อสมบัติของฟิล์มอะโนดิค ดังแสดงในตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 ปริมาณสูงสุดของธาตุผสมและผลของธาตุผสมที่มีค่าเกินปริมาณสูงสุดต่อสมบัติของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ (Guide Book for Aluminium Anodizing)

ธาตุผสม	ปริมาณสูงสุด (%)	ผลของธาตุผสมเมื่อมีค่าเกินปริมาณสูงสุด
เหล็ก	0.5	ฟิล์มมีสีเทา และมีเส้น (Stripe) สีดำ
ซิลิคอน	4 - 5	ผิวอะลูมิเนียมมีความเงางามลดลง
ทองแดง	2	อะลูมิเนียมมีความแข็งลดลง
แมงกานีส	0.5 – 0.8	ฟิล์มมีสีน้ำตาล
สังกะสี	6 - 8	ฟิล์มมีสีน้ำตาล
โครเมียม	0.3	ฟิล์มมีสีเหลือง
ไทเทเนียม	0.3	ผิวอะลูมิเนียมมีความเงางามลดลง

2.6.3 **กระบวนการภายหลังการสร้างฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์**

1. การทำให้ฟิล์มเกิดสี (Colouring) สามารถทำให้ฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีรูพรุนเกิดสีที่มิใช่สีตามธรรมชาติของฟิล์มได้หลายวิธี วิธีหนึ่งที่นิยมใช้อย่างกว้างขวาง ได้แก่ การทำให้ฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์เกิดสีด้วยวิธีทางไฟฟ้า (Electrolytic colouring) นิยมใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วไฟฟ้า เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าสลับเข้าสู่วงจร อนุภาคโลหะในอิเล็กโตรไลท์จะเข้าสู่รูของฟิล์มอะโนดิค (Henley, 1982) ซึ่งความหลากหลายของสีจะขึ้นอยู่กับโลหะแต่ละชนิด เช่น สารละลายของนิกเกิล ดีบุก หรือโคบอลต์ หรือส่วนผสมของโลหะเหล่านี้ จะให้เฉดสีตั้งแต่สีเบจ ไปจนถึงสีบรอนซ์ หรือสีดำ ฯลฯ โดยสีของฟิล์มเกิดมาจากอนุภาคของโลหะเหล่านี้เข้าไปอยู่ภายในรูและทำให้เกิดการกระจายของแสง ซึ่งฟิล์มฯจะมีสีเข้มเพียงใดจะขึ้นอยู่กับปริมาณของอนุภาคสีที่อยู่ภายในรู (Gohausen และ Puderbach, 1983) และหากใช้ระยะเวลาทำสีนานยิ่งขึ้นจะส่งผลให้อนุภาคเหล่านี้เข้าไปอยู่ในรูพรุนในปริมาณมากยิ่งขึ้น

2. การปิดรูพรุนของฟิล์ม (Sealing) การปิดรูพรุนเป็นขั้นตอนสุดท้าย และเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของการสร้างฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ ไม่ว่าจะผ่านการทำให้ฟิล์มเกิดสีหรือไม่ก็ตาม เพราะโครงสร้างของฟิล์มฯมีลักษณะเป็นรูพรุนจึงง่ายต่อการถูกทำลาย ดังนั้นถ้าต้องการฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีสมบัติที่ดี การควบคุมคุณภาพของการปิดรูพรุนจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง การปิดรูพรุนมีหลากหลายวิธี วิธีดั้งเดิม คือ การจุ่มชิ้นงานลงในน้ำที่มีอุณหภูมิสูงเกือบถึงจุดเดือด ทำให้เกิดโครงสร้าง Böhmite ปิดรูพรุน (Brace และ Sheasby, 1979) นอกจากวิธีการปิดรูพรุนดังกล่าวแล้ว ยังมีการใช้สารเคมีบางอย่าง เช่น ใช้สารละลายนิกเกิลซัลเฟตปิดรูพรุน โดยเกิดปฏิกิริยาเคมีจะทำให้อนุภาคของนิกเกิลไฮดรอกไซด์เข้าไปอยู่ในรูพรุน (Guidebook for Aluminium Anodizing) เป็นต้น ซึ่งยังมีอีกหลายวิธีที่มิได้กล่าวถึงและแต่ละวิธีจะมีลักษณะเฉพาะแตกต่างกัน

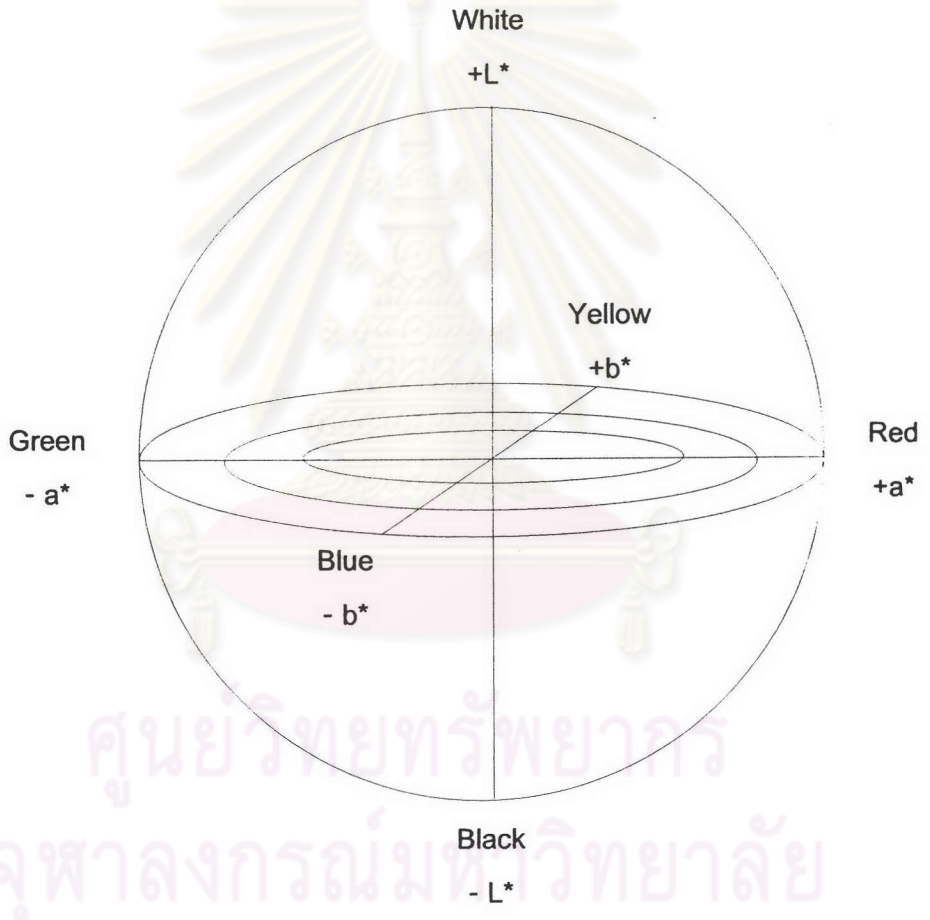
2.7 การตรวจสอบลักษณะรูของฟิล์มอะโนดิคด้วย Transmission Electron Microscope (Shahid, 1997)

วิธีหนึ่งที่ใช้ตรวจสอบลักษณะรูของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ คือ การใช้ Transmission Electron Microscope หรือ TEM โดยใช้เทคนิคต่างๆ ในการเตรียมชิ้นงาน เช่น replica จำลองฟิล์มฯ ดังเช่น Keller Hunter และ Robinson (Wernick และ Pinner 4 th ed., 1972) ผู้ทำการศึกษากลไกการเกิดฟิล์มฯ และวิเคราะห์ความพรุนของฟิล์ม โดยใช้ Polystyrene impressions และ Silica replicas จำลองหน้าตัดของฟิล์มอะโนดิค และตรวจสอบด้วย TEM เป็นการจำลองพื้นผิวเดิมขึ้นมาไว้บนวัสดุ โดยใช้ฟิล์มบางของวัสดุใดๆเคลือบลงบนผิวชิ้นงานที่ต้องการจำลอง จากนั้นจึงจะนำฟิล์มดังกล่าวมาตรวจสอบด้วยวิธีต่างๆ เช่น TEM SEM ฯลฯ อีก

วิธีหนึ่งที่นิยมใช้ตรวจสอบลักษณะรูของฟิล์มฯ คือ การลอกฟิล์มโดยแช่ชิ้นงานลงในสารเคมี เช่น สารละลาย เมอร์คิวรีคลอไรด์ ฯลฯ ก่อนนำฟิล์มที่ได้ไปตรวจสอบด้วย TEM

2.8 การตรวจวัดค่าสีของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

การวัดค่าสีด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย ค่าสีที่ได้ถูกนำเสนอได้หลายรูปแบบ แบบที่นิยมแบบหนึ่ง ได้แก่ L* a* และ b* โดย L* ระบุถึงความสว่าง (Lightness) a* และ b* ระบุถึงพิกัดค่าสี โดย +a* คือ ทิศทางของสีแดง –a* คือ ทิศทางของสีเขียว +b* คือทิศทางของสีเหลือง และ-b* คือทิศทางของสีน้ำเงิน (รูปที่ 2-19)



รูปที่ 2-19 แสดงสัญลักษณ์ค่าสี L*, a* และ b*

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย