

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาค้นคว้าข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ทำให้การวิจัยครั้งนี้บรรลุตามจุดมุ่งหมายที่ได้ตั้งไว้โดยแยกเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

2.1 ทฤษฎีกระบวนการ Hard anodize

2.1.1 การชุบผิวอลูมิเนียม (Anodize)

2.1.2 ขั้นตอนการ Hard anodize

2.1.3 ของเสียที่เกิดขึ้นในการ Hard anodize

2.1.4 สาเหตุที่ส่งผลให้เกิดการไหม้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.3 บทสรุป

2.1 ทฤษฎีการกระบวนการ Hard anodized

2.1.1 การชุบอะโนไดซ์ (Anodize)

การชุบผิวอลูมิเนียมหรือที่เรียกว่าการชุบอะโนไดซ์ (Anodize) เป็นกระบวนการเกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีประเภทหนึ่ง โดยการทำให้อลูมิเนียมเปลี่ยนสภาพไปเป็นผิวเคลือบอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่มีความแข็งแรงสูง มีการยึดเกาะกับชิ้นงานโลหะได้ดี มีความต้านทานการเสียดสีสูง และเมื่ออุปฏิกิริยาเคมีในสิ่งแวดล้อมต่างๆ ที่มีผลต่อการกัดกร่อน กระบวนการชุบอะโนไดซ์ให้ชิ้นงานที่ต้องการเคลือบผิวออกไซด์เป็นขั้วบวกหรือที่เรียกว่าแอโนด (Anode) อาจใช้ตะกั่วหรือกราไฟต์เป็นขั้วลบหรือที่เรียกว่าแคโทด (Cathode) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่นิยมใช้ในการทำปฏิกิริยามักเป็นกรดซัลฟิวริก กรดโครมิก กรดออกซาลิก กรดโครมิก เป็นต้น [1]

การชุบอะโนไดซ์ (Anodize) ด้วยกรดโครมิก เป็นวิธีการตั้งแต่ดั้งเดิม ที่รู้จักกันว่าเป็นวิธีแบบ Type I ซึ่งวิธีการใช้กรดโครมิกนี้จะให้ความหนาของชั้นฟิล์มบางตั้งแต่ 5-18 ไมโครเมตร และผิวชิ้นงานที่ทึบแสง แผ่นฟิล์มที่ได้จะอ่อนนุ่ม ยากต่อการชุบสี เหมาะสำหรับการเตรียมผิวอลูมิเนียมก่อนไปพ่นสี การใช้กระแสไฟต้องเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ตามกระบวนการชุบนั่นๆ

การชุบอะโนไดซ์ (Anodize) ด้วยกรดซัลฟิวริก เป็นวิธีที่นิยมกันมากที่สุด โดยกรดซัลฟิวริกเป็นสารละลายหลัก เรียกวิธีนี้ว่า Type II จะให้ความหนาของชั้นฟิล์มปานกลาง 1.8 – 25 ไมโครเมตร

แต่ถ้าการชุบให้ความหนาแน่นมากกว่า 25 ไมโครเมตร เรียกว่าเป็นการชุบบางที่เรียกว่า Type III, Hard Coat หรือ Engineering anodizing แต่ถ้าเป็นการชุบที่ให้ความหนาแน่นมากและยังคงให้กรดซัลฟิวริกเป็นสารละลาย เรียกวิธีนี้ว่า Type IIB

การชุบบางหนาแน่นๆ ต้องการกระบวนการและเครื่องมือในการควบคุมอุณหภูมิ โดยใช้เครื่องทำความเย็นควบคุมอุณหภูมิของสารละลายให้ใกล้จุดเยือกแข็งของน้ำ และใช้กระแสไฟฟ้าสูงกว่าการชุบบาง การชุบบางหนาแน่นจะมีชั้นฟิล์มตั้งแต่ 25 – 150 ไมโครเมตร การชุบอะโนไดซ์ (Anodize) หนาจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพต่อการกัดกร่อน มีผลดีต่อการเสียดสี ทนความร้อน และเป็นฉนวนไฟฟ้า

ปริญญ์ ศรีสัตยกุล [2] กล่าวว่า อลูมิเนียมออกไซด์ที่เกิดจากการอะโนไดซ์นั้นจะมีลักษณะอยู่บนผิวของอลูมิเนียม และมีอีกส่วนหนึ่งจะฝังลึกลงไปเนื้อผิวของอลูมิเนียมในอัตราส่วนเท่าๆกัน ยกตัวอย่างเช่น การอะโนไดซ์ที่ความหนา 2 ไมโครเมตร จะเป็นความหนาที่เพิ่มขึ้นบนผิวชิ้นงานเพียง 1 ไมโครเมตร และอีก 1 ไมโครเมตรจะฝังลึกลงไปเนื้อผิวของอลูมิเนียม ซึ่งการชุบผิวอลูมิเนียม นั้น มีด้วยกัน 3 ชนิดหลัก ได้แก่

Type I – Chromic Acid Anodization กระบวนการนี้โดยทั่วไปจะใช้กับชิ้นงานที่ไม่ต้องการความแข็งของผิวสูงมาก

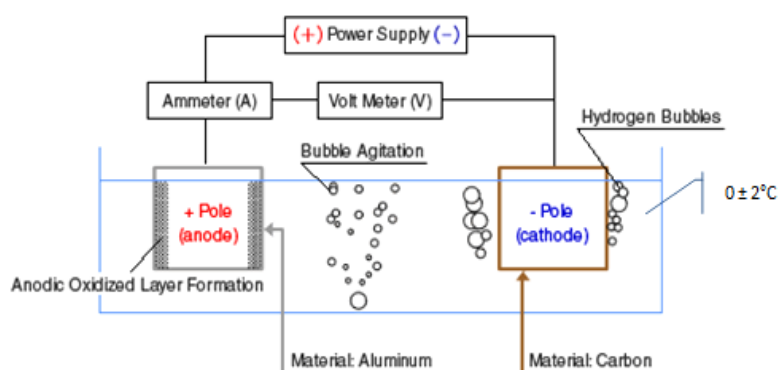
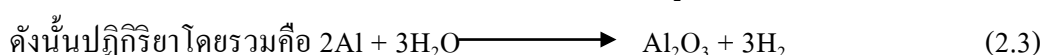
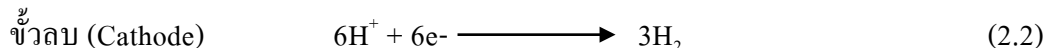
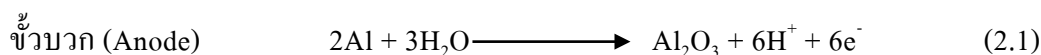
Type II – Sulfuric Acid Anodization กระบวนการนี้โดยทั่วไปจะใช้กับชิ้นงานที่ต้องการความแข็งของผิวสูง

Type III – Sulfuric Acid hard Coat Anodization กระบวนการนี้โดยทั่วไปจะใช้กับชิ้นงานที่ต้องการความแข็งของผิวสูงมาก

การ Hard anodize หมายถึง กระบวนการป้องกันการผุกร่อนของโลหะจำพวกอลูมิเนียม เป็นการชุบอลูมิเนียม Type III – Sulfuric Acid hard Coat Anodization โดยกระบวนการเกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีประเภทหนึ่ง โดยการทำผิวอลูมิเนียมเปลี่ยนสภาพไปเป็นผิวเคลือบอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่เสถียร การ Hard anodize มักใช้ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมที่ผลิตวัสดุเพื่อต้านทานการเสียดสีได้ดีนั้น ปัจจุบันการเคลือบการ Hard anodize เป็นกรรมวิธีการผลิตที่ได้รับความนิยมสูง เนื่องจากคุณสมบัติของผิวเคลือบออกไซด์ที่ถูกสร้างขึ้น มาเคลือบบนผิวโลหะนั้นมีความแข็งแรง ทดทานต่อการเสียดสี ได้ดี เนื้อต่อปฏิกิริยาเคมีในสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ ที่มีผลต่อการกัดกร่อน และยึดเกาะกับชิ้นงานโลหะได้ดี ส่วนมากใช้ในงานเพื่อต้านทานการสึกหรอสำหรับเครื่องบินและงานวิศวกรรมทั่วไป กระบวนการสร้างฟิล์มเคลือบทำเช่นเดียวกับกระบวนการอิเล็กโตรไลติก โดยใช้ชิ้นงานที่ต้องการเคลือบผิวออกไซด์จะเป็นขั้วบวก/แอโนด

(Anode) ส่วนขั้วลบ/แคโทด (Cathode) อาจใช้ตะกั่ว หรือกราไฟต์เป็นขั้วแคโทด สารละลายที่นิยมใช้ในการทำปฏิกิริยามักเป็นกรดซัลฟิวริก ลักษณะการ Hard anodized แสดงในรูปที่ 2.1 การเตรียมผิวสำหรับกระบวนการชุบเคลือบอลูมิเนียมด้วยการ Hard anodize ความแข็งผิวเคลือบอะโนไดซ์แบบแข็งจะมากกว่า 350 HV (วัดโดยใช้ Vickers micro hardness tester) ความหนาผิวเคลือบอยู่ในช่วง 25-100 ไมครอน ส่วนความหนา ฟิล์มเคลือบอะโนไดซ์ โดยทั่วไปที่ใช้ทางสถาปัตยกรรมมักอยู่ในช่วง 16-30 ไมครอน ผิวเคลือบ ทั่วไปประกอบด้วยชั้น 2 ชั้น คือ ชั้นแรกเป็นชั้นที่อัดแน่น ติดกับผิวโลหะ ไม่มีรูพรุน เรียกว่าชั้นเยื่อแก้ว ส่วนชั้นนอก สุดซึ่งเกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของชั้นออกไซด์กับสารละลาย (Oxide-solution interface) เรียกว่าชั้นรูพรุน มีความหนามากกว่าชั้นเยื่อแก้วมาก โครงสร้างชั้นนี้เป็น รูปทรงกระบอกหกเหลี่ยม (Columnar structure) ภายในประกอบด้วยรูพรุน พบว่าที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการ ที่สารอิเล็กโทรไลต์มาสัมผัสตลอดเวลาในขณะที่ชุบ ก่อนทำการ Hard anodize ต้องเตรียมผิวชิ้นงานก่อน เพื่อให้ได้ผิวที่เรียบและสม่ำเสมอ โดยชิ้นงานก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการ Hard anodize ควรขัดคราบไขมัน น้ำมัน และสิ่งสกปรกออกก่อน

ในการ Hard anodize จะใช้กระแสไฟฟ้าตรงผ่านไปยังอลูมิเนียมชิ้นงานเป็นขั้วบวก และแผ่นอลูมิเนียมซึ่งเป็นขั้วลบที่แช่อยู่ในสารละลายสำหรับชุบ กระแสไฟฟ้าจะปล่อยไฮโดรเจนออกที่ขั้วลบ และเริ่มสร้างอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผิวของชิ้นงาน โดยจะเกิดปฏิกิริยาเคมีดังสมการ [3]

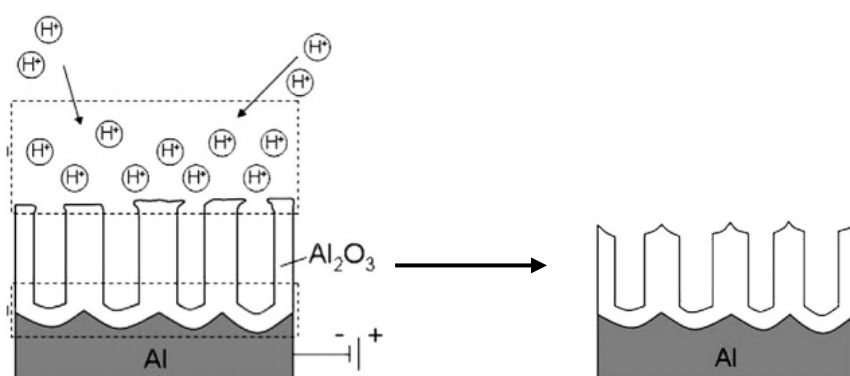


รูปที่ 2.1 ลักษณะปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการ Hard anodize

2.1.2 ขั้นตอนการ Hard anodize

ก่อนทำการ Hard anodize ต้องมีการทำความสะอาดผิวชิ้นงานด้วยผงซักฟอก หรือสบู่ หรือสารชำระล้างไขมัน เพื่อขจัดคราบไขมัน น้ำมัน และสิ่งสกปรกที่ติดอยู่บนผิวชิ้นงานออก หลังจากทำความสะอาดผิวแล้วสารชำระล้างไขมันแล้ว ต้องล้างด้วยน้ำเปล่าเพื่อเป็นการชำระล้างขั้นสุดท้าย ก่อนเข้าสู่กระบวนการ hard anodized

หลังจากทำความสะอาดชิ้นงาน และนำชิ้นงานเข้าสู่กระบวนการ Hard anodize โดยมีสารละลายกรดซัลฟิวริก 15% wt ระยะเวลาในกระบวนการ 30 นาที ควบคุมอุณหภูมิของสารละลาย -4°C ถึง $+4^{\circ}\text{C}$ ใช้ระบบการกวนเพื่อระบายความร้อนโดยการกวนเกิดจากฟองอากาศ [4] ในกระบวนการ Hard anodize จะใช้ไฟฟ้ากระแสตรงผ่านไปยังชิ้นงานที่เป็นอลูมิเนียม ในขณะที่แผ่นอลูมิเนียมแช่อยู่ในสารละลาย จะปล่อยไฮโดรเจนไอออนที่เป็นขั้วลบออกและเริ่มสร้างเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่ผิวของอลูมิเนียม แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การเกิดปฏิกิริยาเคมีในกระบวนการ Hard anodize [5]

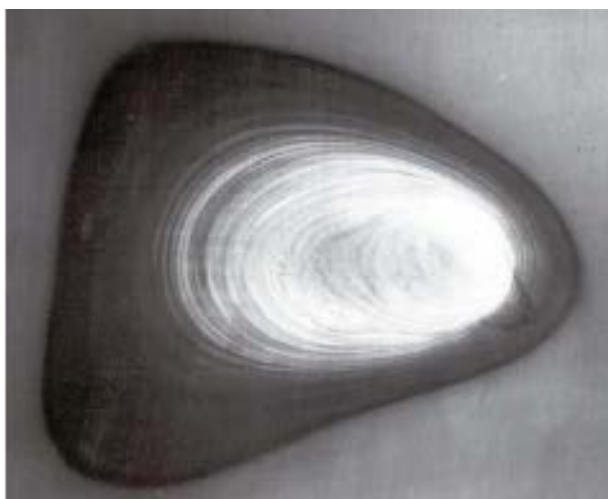
หลังจากครบเวลาชิ้นงานผ่านเข้าสู่กระบวนการทำความสะอาด เพื่อชำระสารละลาย (สารเคมี) ที่ติดอยู่ในชิ้นงาน และถือว่าสิ้นสุดกระบวนการ Hard anodize

ในกระบวนการ Hard anodize นั้น เงื่อนไขต่างๆและองค์ประกอบอื่นๆ เช่น ความเข้มข้นของสารละลายในการ Hard anodize อุณหภูมิของสารละลาย การระบายความร้อนของชิ้นงานในกระบวนการ Hard anodize และกระแสไฟฟ้าที่ใช้ งาน ล้วนแต่มีผลต่อการก่อตัวของชั้นอลูมิเนียมออกไซด์ ความหนาของชั้นอาจแตกต่างกัน เมื่อเงื่อนไขและองค์ประกอบต่างๆมีการเปลี่ยนแปลงไป ชั้นของออกไซด์ที่เกิดจะเพิ่มความแข็งแรงและความสามารถในการทนการกัดกร่อน

2.1.3 ของเสียที่เกิดขึ้นในการ Hard anodize

ในกระบวนการ Hard anodize เป็นการทำปฏิกิริยาเคมี ซึ่งมีทั้งกระแสไฟฟ้า สารเคมี และอุณหภูมิที่ต้องควบคุม ซึ่งปัญหาหลักที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ Hard anodize คือ อลูมิเนียมหลังกระบวนการ Hard anodize เกิดจุดขาว และอลูมิเนียมหลังกระบวนการ Hard anodize ไหม้

ปัญหาอลูมิเนียมหลังกระบวนการ Hard anodize ไหม้ เกิดขึ้นเนื่องจากความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในกระบวนการ Hard anodize เกิดการสะสมจนถึงจุดวิกฤต ซึ่งส่งผลให้ผิวอลูมิเนียมบริเวณนั้นถูกละลายไปอย่างรวดเร็ว การไหม้ของอลูมิเนียมมักเกิดในจุดที่อ่อนแอของอลูมิเนียม เช่น มีรอยขีดข่วน ผิวมีลักษณะเป็นหลุมเจาะ ซึ่งเป็นจุดที่ผิวอลูมิเนียมอ่อนแอ หรือมีความต้านทานต่ำนั้น ชั้นระหว่างผิวอลูมิเนียมและชั้นออกไซด์จะเกิดความร้อนกระแสไฟฟ้าจะมีสะสมได้ง่ายทำให้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นในขณะที่อุณหภูมิของบริเวณนั้นก็สูงขึ้นด้วย ซึ่งทำให้ขั้นตอนการ Hard anodize อลูมิเนียมหยุดลงเปลี่ยนเป็นรูปแบบเป็น electrolytic etching ในบางครั้งปัญหาการไหม้ของชิ้นงานอลูมิเนียมนั้นเกิดระหว่างชิ้นงานที่ทำการ Hard anodize กับชิ้นงานชิ้นงานเอง อีกสิ่งหนึ่งคือการกวนเพื่อระบายของสารละลายในการ Hard anodize ไม่ดีพอทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นไม่ถูกนำออกไปจากชิ้นงานได้เช่นเดียวกัน หากมีการผลิตอลูมิเนียมผสมทองแดง ความเสี่ยงที่จะเกิดการเผาไหม้ในกระบวนการ Hard anodize จะยิ่งเพิ่มสูงขึ้น วิธีการแก้ปัญหาการไหม้ของอลูมิเนียมในกระบวนการ Hard anodize สามารถทำได้โดยปรับปรุงการกวนในระบบให้ทั่วทุกส่วนของงานและไม่ใช้กระแสไฟฟ้าที่สูง[6]



รูปที่ 2.3 ลักษณะการไหม้ของอลูมิเนียมในกระบวนการ Hard anodize

ปัญหาอลูมิเนียมหลังกระบวนการ Hard anodize เกิดจุดขาว ในกระบวนการ Hard anodized นั้นเป็นอีกหนึ่งปัญหาที่พบบ่อยมากหากองค์ประกอบในขั้นตอนการ Hard anodize เปลี่ยนไป คือความ

เข้มข้นของสารละลายกรดที่มีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ชิ้นงานเกิดเป็นจุดขาวกระจายอยู่ทั่วบริเวณ [6]



รูปที่ 2.4 ลักษณะจุดขาวของอลูมิเนียมในกระบวนการ Hard anodize

2.1.4 สาเหตุที่ส่งผลให้เกิดการไหม้ของชิ้นงาน

เนื่องจากกระบวนการ Hard anodize เป็นการทำปฏิกิริยาเคมี ในเริ่มต้นของการทำปฏิกิริยาต้องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่ชิ้นงานหากมีปริมาณกระแสที่ไม่เหมาะสม ทำให้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในกระบวนการ Hard anodize เกิดการสะสมจนถึงจุดวิกฤต ซึ่งส่งผลให้ผิวอลูมิเนียมบริเวณนั้นถูกละลายไปอย่างรวดเร็ว การไหม้ของอลูมิเนียมมักเกิดในจุดที่อ่อนแอของอลูมิเนียม เช่น มีรอยขีดข่วน ผิวมีลักษณะเป็นหลุมเจาะ ซึ่งเป็นจุดที่ผิวอลูมิเนียมอ่อนแอ หรือมีความต้านทานต่ำนั้น ชั้นระหว่างผิวอลูมิเนียมและชั้นออกไซด์จะเกิดความร้อนกระแสไฟฟ้าจะมีสะสมได้ง่ายทำให้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นในขณะเดียวกันอุณหภูมิของบริเวณนั้นก็สูงขึ้นด้วย ซึ่งทำให้ขั้นตอนการ Hard anodize อลูมิเนียมหยุดลงเปลี่ยนเป็นรูปแบบเป็น electrolytic etching ในบางครั้งปัญหาการไหม้ของชิ้นงานอลูมิเนียมนั้นเกิดระหว่างชิ้นงานที่ทำการ Hard anodize กับชิ้นงานชิ้นงานเอง อีกสิ่งหนึ่งคือการกวนเพื่อระบายของสารละลายในการ Hard anodize ไม่ดีพอทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นไม่ถูกนำออกไปจากชิ้นงานได้เช่นเดียวกัน หากมีการผลิตอลูมิเนียมผสมทองแดง ความเสี่ยงที่จะเกิดการเผาไหม้ในกระบวนการ Hard anodize จะยิ่งเพิ่มสูงขึ้น วิธีการแก้ปัญหาการไหม้ของอลูมิเนียมในกระบวนการ Hard anodize สามารถทำได้โดยปรับปรุงการกวนในระบบให้ทั่วทุกส่วนของงานและไม่ใช้กระแสไฟฟ้าที่สูง

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทางผู้วิจัยได้ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ Hard anodized การออกแบบการทดลอง และวิเคราะห์ผล เพื่อใช้เป็นแนวทางในการดำเนินงานวิจัยดังนี้ สมร หิรัญประดิษฐ์กุล [1]] สรุปงานวิจัยได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการชุบเคลือบผิวอะโนไดซ์แบบแข็ง (Hard anodized) โดยใช้เทคนิคเกรเดียนท์เลิร์ซ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการทำงาน คือความเข้มข้นกรรอกออกซาลิก 75 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นอะลูมิเนียมซัลเฟต 75 กรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 3.5 A/dm² และใช้ระยะเวลาในการชุบ 90 นาที ผิวที่ผ่านการชุบในสภาวะดังกล่าวให้ความแข็ง 453.1 HV100 ความหนาเฉลี่ย 48.7 μm ปริญญญา ศรีสัตยกุล [2] สรุปงานวิจัยได้ว่าการออกแบบและสร้างเครื่องเคลือบสือลูมิเนียมโดยวิธีการ Anodized สามารถออกแบบเครื่องเคลือบสือลูมิเนียม ได้ทั้งหมด 6 ขั้นตอนการทำงาน คือ บ่อที่ 1 ล้างไขมันที่ผิวชิ้นงานด้วยโซเดียมฟอสเฟส บ่อที่ 2 ล้างน้ำสะอาด บ่อที่ 3 ทำการอะโนไดซ์ในสารละลายกรดซัลฟิวริก บ่อที่ 4 ล้างกรดซัลฟิวริก บ่อที่ 5 เป็นกระบวนการเคลือบสือลูมิเนียม บ่อที่ 6 ทำความสะอาดชิ้นงาน โดยเป็นกระบวนการอัตโนมัติถูกควบคุมด้วยระบบ PLC ส่งผลให้ประสิทธิภาพของกระบวนการเคลือบสือลูมิเนียมโดยวิธีการ Anodized มากกว่าการใช้แรงงานคน J.L. Trompette และคณะ [3] สรุปงานวิจัยได้ว่าการกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีของผิวลูมิเนียมในกระบวนการ anodize นั้นทำได้ดีในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ความเข้มข้น 0.01 โมล เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของไอออนกับ cosmotrope / chaotrope พบว่ามีความสัมพันธ์กัน Junghoon Lee และคณะ[4] สรุปงานวิจัยได้ว่าความหนา ความแข็งแรงความต้านทานการกัดกร่อนและสีของชั้นฟิล์ม anodize สามารถทำได้โดยหลังจากทำการ anodize ในสารละลายโครเมียมออกไซด์ (Cr₂O₃) แล้วให้นำชิ้นงานไปจุ่มในสารละลายที่มีความร้อนเพื่อที่ชั้นฟิล์มจะถูกปิดรูพรุนและมีความแข็งแรงขึ้น C.K. Chung และคณะ[5] สรุปงานวิจัยได้ว่าการทำ Hard anodize โดยการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DCA) และอุณหภูมิต่ำ (0°C - 5°C) ใช้สารละลายกรดออกซาลิกความเข้มข้น 0.5 โมล เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง ทำให้ลูมิเนียมออกไซด์มีความละเอียดและแข็งแรง Maria Datcheva และคณะ[7] สรุปงานวิจัยได้ว่าที่สภาวะต่างกัน 4 สภาวะ ได้แก่ อุณหภูมิต่ำ (-5°C) อุณหภูมิห้อง (25°C) มีการพ่นเคลือบ Anodized ในน้ำกลั่นเดือด และไม่มีการปิดพ่นเคลือบ Anodized ในน้ำกลั่นเดือด โดยทำการ Anodized ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ความเข้มข้นสารละลายกรดซัลฟิวริก 180 กรัมต่อลิตร ให้กระแสไฟฟ้าคงที่พบว่าที่อุณหภูมิต่างกันมีผลต่อชั้นผิว Anodized ของลูมิเนียม Tim Aerts และคณะ[8] สรุปงานวิจัยได้ว่าชิ้นงานใหม่จากกระบวนการ Hard anodized ในสารละลายกรดซัลฟิวริก เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปในตัวชิ้นงานและเกิดความร้อนขณะที่สร้างฟิล์ม และความหนาของชิ้นงานที่บางมีโอกาสเกิดการไหม้ได้สูงกว่างานหนา Woo Lee และคณะ[9] สรุปงานวิจัยได้ว่าการเตรียมผิวชิ้นงานแบบต่อเนื่องก่อนการทำ Anodized

ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก การจ่ายไฟแบบเป็นช่วง เพิ่ม-ลด ส่งผลให้โครงสร้างของชั้นฟิล์มแข็งแรง Tim Aerts และคณะ[10] สรุปงานวิจัยได้ว่าอุณหภูมิของขั้วบวกในกระบวนการ Hard anodized พบว่าที่อุณหภูมิ 25°C กระแสไฟ 25 A/dm² ไม่ส่งผลให้เกิดการไหม้ของชิ้นงาน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ 45°C ที่กระแสไฟ 30 A/dm² ไม่ส่งผลให้เกิดงานไหม้ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของขั้วบวกขึ้นเป็น 65 °C ไม่ก่อให้เกิดการไหม้ของชิ้นงานเนื่องจากพื้นที่ผิวของอลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้นทำให้ความต้านทานการไหม้สูงขึ้นตาม Ye Song และคณะ[11] สรุปงานวิจัยได้ว่าที่ความเข้มข้นสารละลายกรดออกซาลิก 0.3 โมลตา และอุณหภูมิสูง (16°C - 40°C) พบว่าความหนาของชั้นฟิล์ม จะลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายและอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น J.J. Roa และคณะ[12] สรุปงานวิจัยได้ว่าความหนา (H) และค่า Young's modulus (E) ที่เป็นคุณสมบัติเชิงกลของผิว Anodize ในสภาวะการ Anodized ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก ภายใต้สภาวะการเผาไหม้ ค่าความหนา (H) และค่า Young's modulus (E) ชิ้นงานบริเวณที่ไม่เกิดการไหม้ (POS) 3.8 ± 0.3 and 80 ± 4 GPa ตามลำดับ ในขณะที่บริเวณที่ชิ้นงานไหม้ (S-PAA) เป็น 6.8 ± 0.5 และ 125 ± 8 GPa ดังนั้นความแข็งแรงและความโมดูลัสบริเวณที่ไม่เกิดการไหม้ (POS) เป็นปัจจัยประมาณ 1.6-1.8 เท่าต่ำกว่าบริเวณที่ชิ้นงานไหม้ (S-PAA) แสดงให้เห็นว่า POS มีสมบัติเชิงกลที่ต่ำซึ่งเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันของโครงสร้าง X.Y. Han และ W.Z. Shen [13] สรุปงานวิจัยได้ว่าการทำ Anodize เมื่อทำสองขั้นตอน โดย ขั้นตอนแรกคือ hard anodization ในสารละลาย C₂H₂O₄ และในขั้นตอนที่ 2 คือ mild anodization ในสารละลาย H₃PO₄ ผลที่ได้คือชั้นฟิล์มของ Anodize ที่แข็งแรง

2.3 บทสรุป

ในบทนี้ ได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวกับกระบวนการ Hard anodize ขั้นตอนการ Hard anodize พร้อมทั้งเงื่อนไขต่างๆในกระบวนการ Hard anodize และสาเหตุที่ส่งผลให้ชิ้นงานไหม้ โดยงานวิจัยครั้งนี้จะพิจารณาเฉพาะเงื่อนไขที่เป็นสาเหตุหลักในการทำให้เกิดการไหม้ของชิ้นงานในกระบวนการ Hard anodize ซึ่งเงื่อนไขที่น่าสนใจคือ การระบายความร้อนให้ชิ้นงาน การจ่ายกระแสไฟฟ้า และความเข้มข้นของสารละลาย โดยใช้การเก็บข้อมูลทางสถิติในการวิเคราะห์ข้อมูลและออกแบบระบบเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการ Hard anodize อลูมิเนียม