



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การปรับปรุงสภาพผิวของโลหะเงินให้เกิดสีโดยวิธีการอะโนไดซ์  
Color Variation on Silver Surface by Anodization

ว่าที่ร้อยตรีรุ่งโรจน์ ยิ่งสง่า

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้  
จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)  
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561  
มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 1678  
สัญญาเลขที่ 219/2561

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การปรับปรุงสภาพผิวของโลหะเงินให้เกิดสีโดยวิธีการอะโนไดซ์  
Color Variation on Silver Surface by Anodization

ว่าที่ร้อยตรีรุ่งโรจน์ ยิ่งสง่า  
คณะอำนวยการ มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี

กันยายน 2562

## กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2561 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 219/2561

คณะผู้วิจัย

## บทคัดย่อ

การทำเลือบสีบนผิวชิ้นงานโลหะเงินและโลหะเงินสเตอร์ลิง ใช้เทคนิคทางไฟฟ้าเคมี คือ กระบวนการอะโนไดซ์ การศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการอะโนไดซ์บนชิ้นงานโลหะเงินและโลหะเงินสเตอร์ลิงจะถูกนำไปทำอะโนไดซ์เพื่อให้เกิดฟิล์มบนผิวชิ้นงานที่กำลังไฟฟ้า เวลาและความเข้มข้นสารละลายซัลเฟอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างกัน การเกิดเลือบสีบนผิวโลหะเงินสามารถตรวจสอบได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง ลักษณะการเรียงตัวของอนุภาคสีที่ผิวของชิ้นงานตรวจสอบได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพร้อมวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS และมีการทดสอบความคงทนสีผิวของชิ้นงาน ด้วยการติดเทปใสบนผิวชิ้นงานแล้วทำการลอกออกเพื่อดูสีที่ติดออกมา

จากการทดลองพบว่าลักษณะของชั้นฟิล์มที่เคลือบอยู่บนผิวชิ้นงาน เมื่อด้วยกล้องจุลทรรศน์ทั้งสองชนิดพบว่า ผิวของชิ้นงานเกิดการเลือบสีและมีอนุภาคการเรียงตัวสีแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นสารละลาย เวลาและกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทำอะโนไดซ์ สภาวะอะโนไดซ์ที่เหมาะสมสำหรับการทำเลือบสีบนผิวชิ้นงานโลหะเงินและโลหะเงินสเตอร์ลิงด้วยกระบวนการอะโนไดซ์ คือ การอะโนไดซ์ในซัลเฟอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้นในอัตราส่วนที่ 1:1 เวลา 15 วินาที กำลังไฟฟ้า 3 โวลต์ สีที่ได้จากการทำเลือบสีบนชิ้นงานด้วยกระบวนการอะโนไดซ์ มีความคงทนไม่หลุดลอกง่าย

## ABSTRACT

Electrochemical techniques that gives glimpse of the color on surface of silver and sterling silver is call anodization. The anodized film creates cause of color on the surface. Using sulfur and sodium hydroxide mixture. In this study, the electromotive force, reaction time and solution concentration were varied. A glimpse of the color on the metal surface was observed using an optical microscope. Colored particles on the surface of the specimen was examined by scanning electron microscopy (SEM) and elemental analysis technique EDS. Durability of colored surface was tested by peeling off sticky tap from the surface.

The study showed the characteristics of the coating layer on the surface of silver and sterling silver. Microscopic images of the specimen showed a glimpse of the anodized color and the arrangement of particles of different colors. Suitable anodized conditions for the characteristic anodized color was at 1:1 ratio of sulfur and sodium hydroxide, for 15 minutes of anodized time and 3 volts of anodized voltage. The anodized film with a glimpse of the characteristic color on the metal surface was able to resist the peeling off testing process.

# สารบัญ

## (Table of Contents)

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	iii
บทคัดย่อ	vi
Abstract	vii
สารบัญ	viii
สารบัญตาราง	x
สารบัญรูป	xi
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตของการดำเนินงานวิจัย	2
1.5 แผนการดำเนินงาน	2
<b>บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 สมบัติทั่วไปของโลหะ	5
2.2 กระบวนการอะโนไดซ์ (Anodization)	6
2.3 การทำสีโดยไฟฟ้าเคมี (Electrolytic coloring)	11
2.4 ระบบการวัดสี (CIE LAB)	14
2.5 ผลงานที่เคยศึกษามาก่อน	16
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ</b>	
3.1 วัสดุ สารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องมือ	19
3.2 ขั้นตอนการทดลอง	24
<b>บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและอภิปรายผล</b>	
4.1 โลหะเงินที่นำมาทำการอะโนไดซ์	33

	หน้า
4.2 การตรวจสอบลักษณะผิวหลังผ่านกระบวนการอะโนไดซ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	45
4.3 4.3 การทดสอบความคงทนของสี	56
<b>บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน</b>	
5.1 สรุปผลการวิจัย	58
5.2 ข้อเสนอแนะ	58
5.3 ผลผลิต (Output)	58
<b>บทสรุปทางการเงิน</b>	68
<b>เอกสารอ้างอิง (Reference)</b>	69
<b>ประวัตินักวิจัยและคณะ</b>	72







## สารบัญรูป (List of Illustrations)

รูปที่		หน้า
1.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	4
2.1	วัสดุและอุปกรณ์ในการอะโนไดซ์	7
2.2	การอะโนไดซ์โลหะเงิน	7
2.3	ขั้นตอนการ Bath anodizing	9
2.4	อุปกรณ์ของเทคนิคการ Anodic painting	10
2.5	ชิ้นงานที่ทำโดยเทคนิค anodic painting	10
2.6	โลหะที่ผ่านการเคลือบผิวโดยวิธีการอะโนไดซ์	11
2.7	ปริภูมิสี $L^*a^*b^*$	15
2.8	ไดอะแกรมสัมประสิทธิ์สี $a^*$ และ $b^*$ ของระบบสี CIELAB	15
3.1	วัสดุประกอบการทดลอง	19
3.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการอะโนไดซ์	21
3.3	อุปกรณ์การหลอมโลหะ	22
3.4	เครื่องจ่ายไฟกระแสตรง	22
3.5	เครื่องรีดโลหะ	23
3.6	เครื่องตัดโลหะ	23
3.7	เครื่องอัลตราโซนิก	24
3.8	เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล	24
3.9	การวางอุปกรณ์ในการหลอมโลหะ	25
3.10	การหลอมโลหะเงิน	25
3.11	การเทโลหะหลอมเหลวลงในรางเท	25
3.12	โลหะเงิน	26
3.13	การรีดโลหะเงิน	26
3.14	โลหะเงินที่ผ่านการรีด	27
3.15	ตัวอย่างชิ้นงานหลังตัด	27
3.16	การล้างชิ้นงานโลหะก่อนการอะโนไดซ์	28
3.17	ชิ้นงานเงินที่สะอาดแล้ว	28
3.18	การล้างชิ้นงาน	28
3.19	การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง	29

รูปที่	หน้า	
3.20	ซึ่งสารเคมี	29
3.21	คนสารเคมีให้เข้ากัน	30
3.22	การกรองสารเคมี	30
3.23	สารละลายที่มีอัตราส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ	31
3.24	การวางอุปกรณ์การอะโนไดซ์	31
3.25	การอะโนไดซ์โลหะเงิน	32
4.1	โลหะเงินบริสุทธิ์หลังขัดผิวด้วยกระดาษทราย	46
4.2	โลหะเงินสเตอร์ลิงหลังขัดผิวด้วยกระดาษทราย	46
4.3	โลหะเงินบริสุทธิ์ที่ผ่านกระบวนการอะโนไดซ์ที่อัตราส่วน 1:2 โดยน้ำหนัก เวลา 1 วินาที กำลังไฟ 3 โวลต์	47
4.4	โลหะเงินบริสุทธิ์ที่ผ่านกระบวนการอะโนไดซ์ที่อัตราส่วน 1:3 โดยน้ำหนัก เวลา 1 วินาที กำลังไฟ 5 โวลต์	47
4.5	โลหะเงินบริสุทธิ์ที่ผ่านกระบวนการอะโนไดซ์ที่อัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก เวลา 5 วินาที กำลังไฟ 10 โวลต์	48
4.6	โลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการอะโนไดซ์ที่อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก เวลา 15 วินาที กำลังไฟ 3 โวลต์	49
4.7	โลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการอะโนไดซ์ที่อัตราส่วน 3:1 โดยน้ำหนัก เวลา 15 วินาที กำลังไฟ 10 โวลต์	49
4.8	ปริมาณธาตุหลังกระบวนการอะโนไดซ์โลหะเงินบริสุทธิ์ที่อัตราส่วน 1:2 โดย น้ำหนัก เวลา 1 วินาที กำลังไฟ 3 โวลต์	51
4.9	ปริมาณธาตุหลังกระบวนการอะโนไดซ์โลหะเงินบริสุทธิ์ที่อัตราส่วน 1:3 โดย น้ำหนัก เวลา 1 วินาที แรงเคลื่อนไฟฟ้า 5 โวลต์	52
4.10	ปริมาณธาตุหลังกระบวนการอะโนไดซ์โลหะเงินบริสุทธิ์ที่อัตราส่วน 2:1 โดย น้ำหนัก เวลา 5 วินาที กำลังไฟ 10 โวลต์	53
4.11	ปริมาณธาตุหลังกระบวนการอะโนไดซ์โลหะเงินสเตอร์ลิงที่อัตราส่วน 1:1 โดย น้ำหนัก เวลา 15 วินาที กำลังไฟ 3 โวลต์	54
4.12	ปริมาณธาตุหลังกระบวนการอะโนไดซ์โลหะเงินสเตอร์ลิงที่อัตราส่วน 3:1 โดย น้ำหนัก เวลา 5 วินาที กำลังไฟ 10 โวลต์ วิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS	55
4.13	โลหะเงินสเตอร์ลิงในอัตราส่วน 1:1 เวลา 15 วินาที กำลังไฟ 3 โวลต์	56
4.14	โลหะเงินสเตอร์ลิงในอัตราส่วน 1:2 เวลา 1 วินาที กำลังไฟ 3 โวลต์	57
4.15	โลหะเงินบริสุทธิ์ในอัตราส่วน 1:3 เวลา 3 วินาที กำลังไฟ 10 โวลต์	57
5.1	เครื่องประดับที่ผ่านการอะโนไดซ์ในซัลเฟอร์และโซเดียมไฮ	59

รูปที่	หน้า
5.2 เครื่องประดับที่ผ่านการอะโนไดซ์ในซัลเฟอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วนที่ 1:1 เวลา 15 วินาที กำลังไฟ 3 โวลต์	60
5.3 เครื่องประดับที่ผ่านการอะโนไดซ์ในซัลเฟอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์	61

# บทที่ 1 บทนำ

## 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตอัญมณีและเครื่องประดับ นิยมใช้โลหะเงินในการทำเป็นตัวเรือนของเครื่องประดับ เนื่องจากโลหะเงินมีสีขาว แวววาว มีผิวมันเงาทำให้สามารถนำมาขัดมันได้อย่างดี มีความเหนียวสูงทำให้สามารถนำมาตีขึ้นรูปได้ดี มีการนำไฟฟ้าดีเยี่ยมจึงเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีที่สุด และยังมีราคาถูกกว่าทองคำโดยประมาณถึง 70 เท่า แต่เครื่องใช้และเครื่องประดับที่ทำมาจากโลหะเงินนั้น เมื่อผิวของโลหะเงินเมื่อสัมผัสกับอากาศเป็นเวลานานจะเกิดการหมองขึ้นที่ผิว จึงต้องนำโลหะมาทำการชุบเพื่อเป็นการปกปิดผิวชั้นนอกของโลหะ ทำให้ผิวของโลหะมีความสวยงามอยู่เสมอและยังสามารถป้องกันการระคายเคืองที่ผิวของผู้สวมใส่อีกด้วย นอกจากนี้ในอุตสาหกรรมการผลิตอัญมณีและเครื่องประดับ นิยมการชุบโลหะด้วยไฟฟ้ากันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า มีให้เลือกอย่างหลากหลายอาทิเช่น การชุบเงิน ชุบทอง ชุบนิกเกิล ชุบนาค ชุบดำเทา เป็นต้น ซึ่งขึ้นอยู่กับรสนิยมของผู้สวมใส่

จากการที่ได้ศึกษาข้อมูลข้างต้นและการสำรวจข้อมูลในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องประดับ พบว่าการชุบโลหะด้วยไฟฟ้ามีความสำคัญมากในอุตสาหกรรมนี้ ปัจจุบันการชุบอะโนไดซ์ เป็นกรรมวิธีการผลิตที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากคุณสมบัติของผิวเคลือบออกไซด์ที่ถูกสร้างขึ้น มาเคลือบบนผิวโลหะนั้นเป็นการป้องกันการผุกร่อนของผิวโลหะ เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีในสิ่งแวดล้อมต่างๆ ที่มีผลต่อการกัดกร่อนและยึดเกาะกับชิ้นงานโลหะได้ดี ส่วนมากใช้เพื่อต้านทานการสึกหรอสำหรับเครื่องบินและงานวิศวกรรมทั่วไป

การอะโนไดซ์เป็นปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีประเภทหนึ่ง โดยการทำให้ผิวโลหะเปลี่ยนสภาพไปเป็นผิวโลหะออกไซด์ของโลหะนั้น ๆ โดยให้ชิ้นงานที่ต้องการชุบเคลือบผิวออกไซด์เป็นอะโนดหรือขั้วบวก และสารละลายเป็นแคโทดหรือขั้วลบ รายงานการศึกษาแสดงว่า ผิวเคลือบทั่วไปประกอบด้วยชั้น 2 ชั้น คือ ชั้นแรกเป็นส่วนที่อัดแน่นติดกับผิวโลหะไม่มีรูพรุน เรียกว่าชั้นเยื่อแก้ว ส่วนชั้นนอกสุด ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของชั้นออกไซด์กับสารละลาย เรียกว่าชั้นรูพรุน มีความหนาแน่นกว่าชั้นเยื่อแก้วมาก เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน พบว่าโครงสร้างชั้นนี้เป็นรูปทรงกระบอกหกเหลี่ยม (Columnar structure) ภายในประกอบด้วยรูพรุน พบว่าที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากการที่สารอิเล็กโตรไลต์มาสัมผัสตลอดเวลาในขณะชุบ (สมร หิรัญประดิษฐ์กุล.2559 [online])

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงกระบวนการชุบเคลือบผิวอะโนไดซ์บนผิวโลหะเงินและโลหะเงินสเตอร์ลิง เพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าการชุบอะโนไดซ์สามารถป้องกันการผุกร่อนและทำให้อายุการใช้งานของโลหะเงินได้จริง การศึกษาครั้งนี้มีเป้าหมายหลักเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการชุบเคลือบผิวนี้ มีตัวแปรที่ใช้ 3 ตัวแปรได้แก่ ความเข้มข้นของกรด ระยะเวลา และกำลังไฟฟ้าในการชุบ มีการใช้ค่าความเข้มข้นของกรดซัลเฟอร์กับกรดโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามสัดส่วนดังนี้ 1:1, 1:2, 1:3, 2:1, 3:1 โดยเทียบกับ 1 ซอนโตะ มีค่าเท่ากับ 15 กรัมต่อสัดส่วนหนึ่งค่า เช่น ในสัดส่วน 1:2 ใช้กรดซัลเฟอร์ 15 กรัมต่อกรดโซเดียมไฮดรอกไซด์ 30 กรัม เป็นต้น ระยะเวลาที่ใช้ในการชุบคือ 5 วินาที 10 วินาที 15 วินาที กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการชุบคือ 3 โวลต์ 5 โวลต์ 10 โวลต์ นอกจากนั้นยังได้ศึกษา

การเปลี่ยนแปลงผิวโลหะเงินก่อนและหลังการชุบโดยใช้กล่องจุลทรรศน์โลหะ รวมถึงการทดสอบความคงทนของสีหลังการชุบด้วยเทปใส

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. ศึกษาความเข้มข้นของกรดซัลเฟอร์ (S) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่เหมาะสมสำหรับการทำอะโนไดซ์
2. ศึกษาเวลาในการทำอะโนไดซ์ที่เหมาะสม

## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงเทคนิคการทำอะโนไดซ์
2. ทราบถึงอิทธิพลของความเข้มข้นของกรดซัลเฟอร์ (S) กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และเวลา ที่มีผลต่อการทำอะโนไดซ์และการเปลี่ยนแปลงของสีบนชิ้นงานเงิน
3. สามารถทำเหลือบสีด้วยการอะโนไดซ์ได้

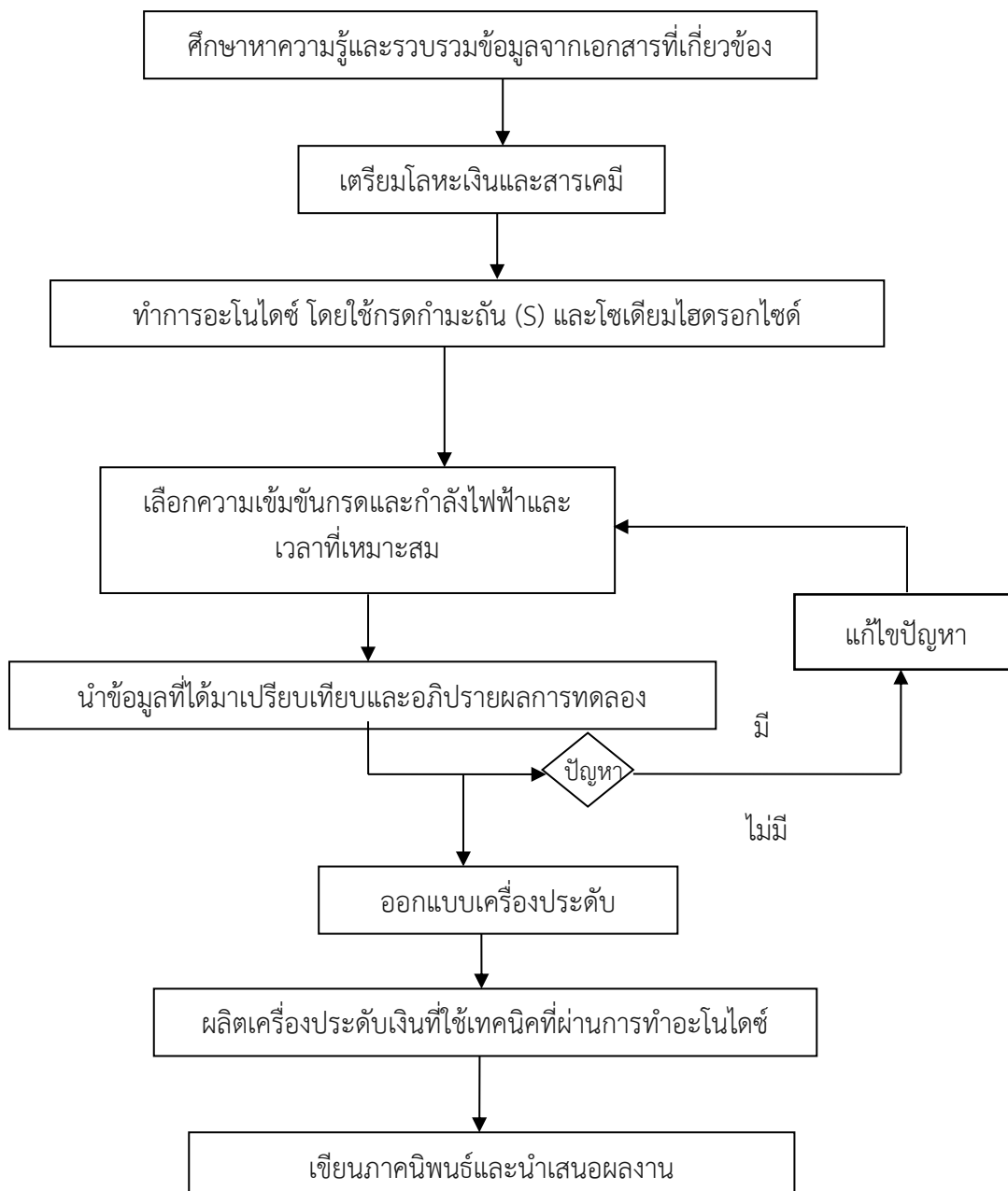
## 1.4 ขอบเขตของการดำเนินงานวิจัย

1. ทำอะโนไดซ์โลหะเงินและโลหะเงินสเตอร์ลิงในกรดซัลเฟอร์ (S) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
2. ทำเหลือบสีชิ้นงานจากกรดซัลเฟอร์ (S) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ด้วยการอะโนไดซ์ โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทำสี (กำหนดความเข้มข้นของกรดที่อัตรา 1:1, 1:2, 2:1, 1:3, 3:1 โลหะเงินใช้เวลาที่ 1, 3, 5 วินาทีและโลหะเงินสเตอร์ลิงใช้เวลาที่ 5, 10, 15 วินาที)
3. กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทำอะโนไดซ์อยู่ที่ 3, 5, 10 โวลต์
4. ตรวจสอบความคงทนของสี โดยใช้สก็อตเทปหรือเทปใส โดยการใช้เทปใสติดลงบนชิ้นงานแล้วทำการลอกออก หากชิ้นงานมีการติดสีที่ไม่คงทนเมื่อลอกเทปใสออกจะมีสีหลุดติดเทปใส
5. ตรวจสอบผิวชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์โลหะ
6. นำชิ้นงานที่ผ่านการอะโนไดซ์มาทำเป็นเครื่องประดับ

## 1.5 แผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงานแสดงดังตารางที่ 1.1 และมีวิธีการดำเนินโครงการงาน แสดงดังรูปที่ 1.1





รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย



## บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 สมบัติทั่วไปของโลหะ

#### 2.1.1 โลหะเงิน (Silver)

โลหะเงินเป็นธาตุในกลุ่มโลหะหนัก เงินเป็นโลหะที่ได้รับความนิยมชนิดหนึ่งสำหรับการผลิตเครื่องประดับ เนื่องจากมีข้อเด่นคือมีสีขาวแวววาว มีผิวเป็นมันและราคาถูกกว่าทองคำถึง 70 เท่า สาเหตุที่เราไม่นิยมใช้เงินบริสุทธิ์ผลิตเป็นเครื่องประดับเพราะเงินบริสุทธิ์นั้นมีความอ่อนตัวมากเกินไป ทำให้เสียรูปทรงได้ง่ายเมื่อมีการกระทบ และยังทำให้ไม่สามารถฝังพลอยบนเงินเหล่านี้ได้ เนื่องจากขาดความแข็งแรงนั่นเอง ดังนั้นจึงต้องมีการเติมโลหะชนิดอื่น ๆ ลงไป โดยโลหะเงินจะได้รับการยอมรับให้เป็นเครื่องประดับที่ได้มาตรฐานต้องมีปริมาณเงินอย่างน้อย 92.5% หรือที่เรียกว่าเงินสเตอร์ลิง (Sterling Silver) (โลหะเงิน. 2559 [online])

#### 2.1.2 เงินสเตอร์ลิง (Sterling Silver)

โลหะมีเงินผสมชนิดนี้ยังเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เงินมาตรฐาน (Standard Silver) มีการใช้งานอย่างกว้างขวางมานานกว่า 800 ปี แล้ว ซึ่งกำเนิดของการใช้โลหะชนิดนี้มาจากสมัยโรมัน และเหรียญเงินเพนนี่ของอังกฤษ (Anglo-Saxon) ก็ทำมาจากโลหะผสมนี้ คำว่า สเตอร์ลิง มีการใช้กันมาตั้งแต่ยุคศตวรรษที่ 12 ในสมัยพระเจ้าเฮนรีที่ 2 นำมาทำช่องหลอมและช่องทำเหรียญที่มาจากเมืองอีสเตอร์ลิง ในประเทศเยอรมันตะวันตก มีการปรับปรุงและทำเหรียญมาตรฐานของเหรียญในเครือจักรภพ ดังนั้นคำว่า สเตอร์ลิง จึงมีที่มาจากคำว่า อีสเตอร์ลิง ซึ่งธาตุผสมที่สำคัญที่ใช้ผสมกับเนื้อเงิน คือ โลหะทองแดง ดังนั้นในการผลิตเราจะสามารถเติมทองแดงผสมระหว่างการหล่อได้มากที่สุดคือ 7.5% การเติมทองแดงนี้ส่งผลดีอย่างมากในเรื่องของการช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้เงิน แต่ขณะเดียวกันก็มีข้อเสียที่สำคัญคือจะทำให้โลหะผสมเงินมีการหมองได้ง่าย การหมองที่ว่าเป็นคือการเกิดสีน้ำตาลดำบนผิวโลหะ ซึ่งจะทำให้โลหะนั้นหมองและไม่ขาว การหมองนี้สามารถขัดออกได้เนื่องจากเป็นชั้นบาง ๆ บนผิวเท่านั้น แต่เมื่อขัดออกไปแล้วและทิ้งโลหะไว้อีกไม่นาน โลหะนั้นก็จะกลับมาหมองอีกดังนั้นการพัฒนาในปัจจุบันจึงได้มีการนำธาตุอื่นมาใช้ผสมด้วยเพื่อให้ได้คุณสมบัติพิเศษอื่นๆ เช่น นิกเกิล เพื่อผลิตเงินสปริงหรือผสมสังกะสี อินเดียม ซิลิคอน เจอร์มาเนียม เพื่อเพิ่มความสามารถในการต้านทานการหมอง (โลหะเงิน. 2559 [online]) และสมบัติของโลหะเงิน แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติของโลหะเงิน

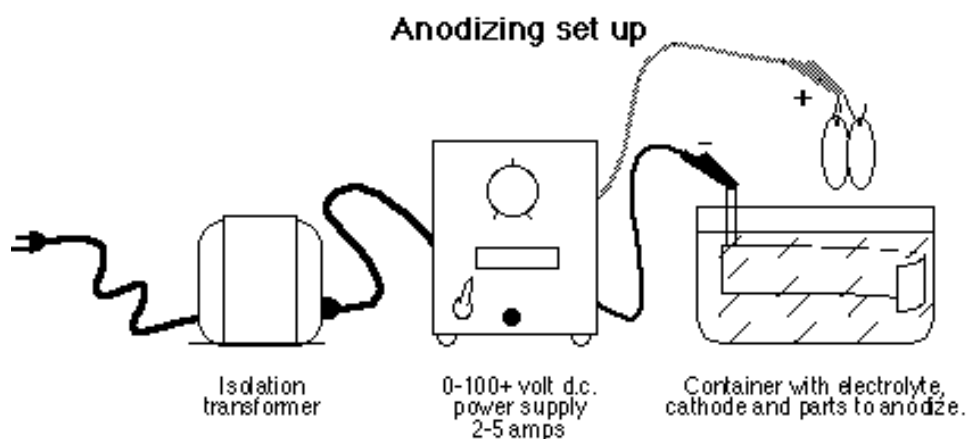
ชื่อ	โลหะเงิน
สัญลักษณ์	Ag
เลขอะตอม	47
อนุกรมเคมี	โลหะทรานซิชัน
ลักษณะ	สีขาวเป็นประกาย
โครงสร้างผลึก	Fcc (Face center cubic)
ความหนาแน่น	10.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
อุณหภูมิหลอมเหลว	960 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	2162 องศาเซลเซียส
ความแข็ง	2.5 โมห์สเกล
ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย	12.28 กิโลจูลต่อโมล
ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ	250.58 กิโลจูลต่อโมล
การนำความร้อน	300 เคลวิน

## 2.2 กระบวนการอะโนไดซ์ (Anodization)

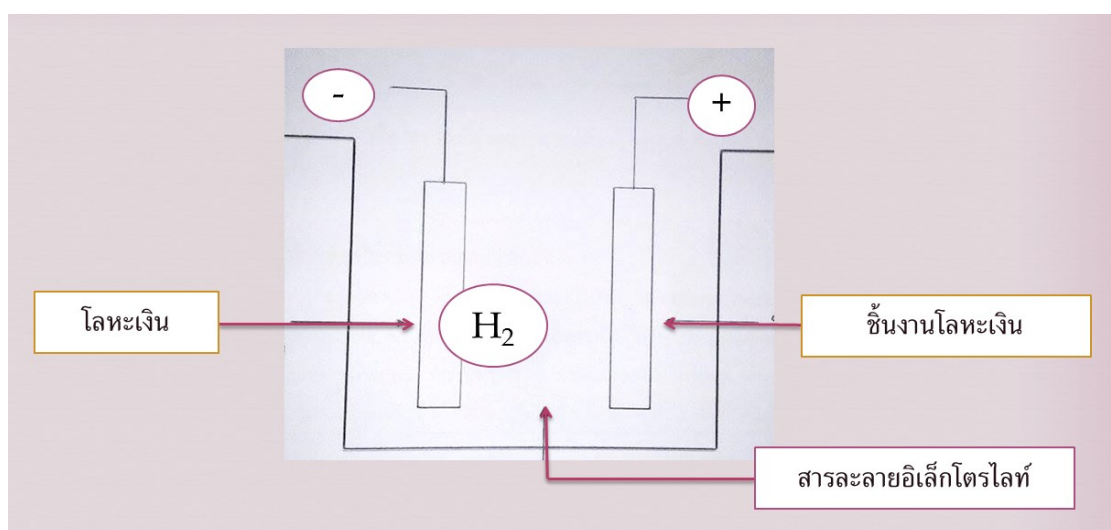
### 2.2.1 ความหมายของการอะโนไดซ์

การอะโนไดซ์ (Anodizing) คือการใช้กระแสไฟฟ้าทำให้ผิวหน้าของโลหะกลายเป็นโลหะออกไซด์แล้วโลหะออกไซด์นั้นจะเคลือบผิวของโลหะไม่เกิดการผุกร่อนต่อไป เช่น อะลูมิเนียม ทำได้โดยการผ่านไฟฟ้ากระแส ตรงไปบนแผ่นอะลูมิเนียม ซึ่งจุ่มอยู่ในสารละลายที่เป็นกรด ที่ขั้วแอโนดเกิดเป็นก๊าซ  $O_2$  ซึ่งเกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์อะลูมิเนียมทำให้เป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ ส่วนโลหะที่ขั้วแคโทดพบว่ามีก๊าซ  $H_2$  เกิดขึ้นและขั้วโลหะอะลูมิเนียมไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง (อนันต์ ทองมอย, 2540)

การอะโนไดซ์ (Anodizing) ของโลหะเงิน คือการทำให้ผิวของโลหะเงินเป็นชั้นฟิล์มของโลหะเงินในลักษณะที่เป็นฟิล์ม ซึ่งเป็นวิธีที่คล้ายกับการชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า แตกต่างกันคือการทำอะโนไดซ์ขึ้นงานจะต้องเป็นขั้วบวก ใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงกว่าและไม่มีโลหะชนิดอื่นไปเกาะจับที่ผิวของโลหะเงิน ส่วนการชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าขึ้นงานจะต้องเป็นขั้วลบ ใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ำและจะมีโลหะชนิดหนึ่งไปเคลือบโลหะอีกชนิดหนึ่ง สามารถย้อมสีโลหะเงินหลังจากการอะโนไดซ์ โดยทั่วไปมักใช้สีที่มาจากอินทรีย์สาร (organic dyes) แต่สำหรับงานที่มีความต้องการสะท้อนแสงมากๆ สีที่ทำมาจากอนินทรีย์สาร (inorganic dyes) จะใช้ได้ผลดีกว่า (อนันต์ ทองมอย, 2540)



รูปที่ 2.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการอะโนไดซ์ (Anodizing.2559 [online])



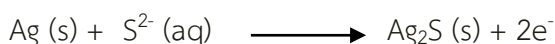
รูปที่ 2.2 การอะโนไดซ์โลหะเงิน (อนันต์ ทองมอญ, 2540)

เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในระบบ จะเกิดฟองก๊าซออกซิเจนขึ้นที่ขั้วบวก (Anode) บริเวณผิวของโลหะเงิน ซึ่งออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับโลหะเกิดเป็นออกไซด์ฟิล์ม ออกไซด์ฟิล์มที่เกิดขึ้นจะมีสีเทาเงินและมีความหนาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยความหนาของออกไซด์ฟิล์มจะขึ้นอยู่กับปริมาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ใช้ ส่วนที่ขั้วลบ (Cathode) จะมีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการอะโนไดซ์เป็นดังนี้

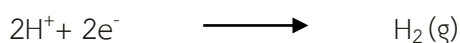
ปฏิกิริยาที่ขั้วบวก ( Anode Reaction )



ก๊าซออกซิเจนไปออกไซด์ (Oxidize) ชิ้นงานโลหะเงินเป็น Silver sulfide ( $\text{Ag}_2\text{S}$ ) เคลือบที่ผิวโลหะ



ปฏิกิริยาที่ขั้วลบ ( Cathode Reaction )



เกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนที่ขั้วลบระหว่างกระบวนการอะโนไดซ์ (การอะโนไดซ์. 2559[online]) บริเวณผิวของโลหะเงินจะเกิดการอะโนไดซ์ขึ้น จะมีออกไซด์ฟิล์มที่มีเนื้อแน่นเรียกว่าเยื่อกั้น (Barrier layer) ข้างบนมีลักษณะเป็นรูพรุน หน่วยเซลล์จะเรียงตัวกันลักษณะเป็นรูปหกเหลี่ยมสม่ำเสมอ ตรงกลางรูพรุนลึกไปจากผิวออกไซด์ฟิล์มจนถึงเยื่อกั้น ความหนาของเยื่อกั้นและผนังเซลล์เป็นปฏิภาคโดยตรงกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ใช้ ขนาดรูพรุนและผนังเซลล์ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของน้ำยา อุณหภูมิ และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เช่น เมื่อใช้น้ำยากรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้นมากและทำงานที่อุณหภูมิสูง จะให้โครงสร้างของเซลล์ที่กว้างขึ้น แต่ถ้าใช้กรดซัลฟิวริกเจือจางและอุณหภูมิต่ำลงด้วย จะทำให้ขนาดของรูพรุนเล็กลงและฟิล์มแข็งแรงขึ้น เพราะเมื่อรูพรุนเล็กลงจะเรียงตัวชิดกันมากขึ้น จึงทำให้ฟิล์มแข็งแรงขึ้นเพราะเมื่อรูพรุนเล็กลงจะเรียงตัวชิดกันมากขึ้น จึงทำให้ฟิล์มแข็งแรงมากขึ้น (อนันต์ ทองมอย, 2540)

### 2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำอะโนไดซ์

การเกิดปฏิกิริยาขณะทำการอะโนไดซ์นี้ มีปัจจัยต่างๆ ดังนี้ (Tsangaraki-Kaplanoglou, 2559 [online])

1. แรงเคลื่อนไฟฟ้ามีผลต่อความหนาของเยื่อกั้นและผนังเซลล์ ถ้าใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้ามาก จะทำให้ความหนาของเยื่อกั้นและผนังเซลล์มากขึ้น ในทางกลับกันถ้าให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าน้อย ความหนาของเยื่อกั้นและผนังเซลล์จะน้อยลง

2. ความเข้มข้นของน้ำยา มีผลต่อขนาดของรูพรุนและเซลล์ ถ้าความเข้มข้นน้ำยามาก จะทำให้ขนาดของรูพรุนและเซลล์มากขึ้นด้วย

3. ความหนาแน่นของกระแสตกอยู่บนชิ้นงาน บริเวณที่มีความหนาแน่นของกระแสสูง จะมีการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยามากกว่าบริเวณที่มีความหนาแน่นของกระแสต่ำ ดังนั้นในการอะโนไดซ์ หากมีความหนาแน่นของกระแสสูงหรือน้อยเกินไป อาจทำให้ได้สมบัติของรูพรุนไม่ตรงตามที่ต้องการ

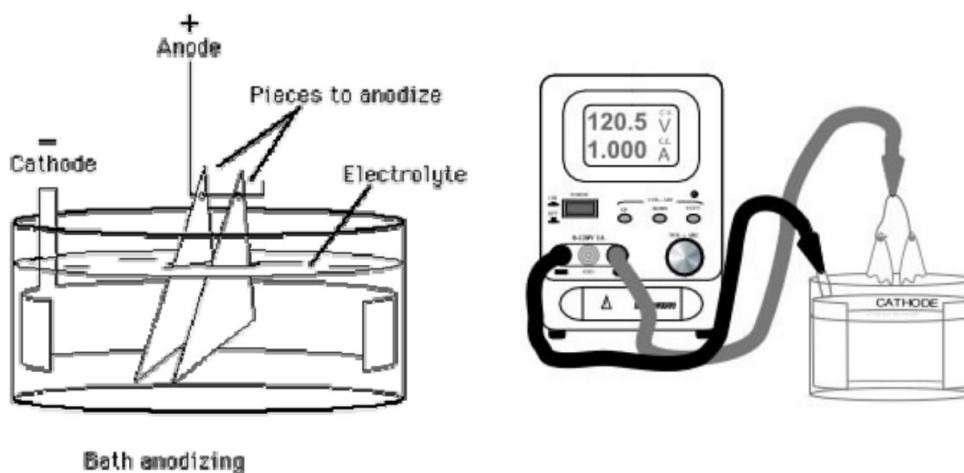
4. อุณหภูมิในการทำอะโนไดซ์ ต้องอาศัยอุณหภูมิที่เหมาะสม จึงจะได้ขนาดของรูพรุน และเซลล์ตรงตามที่ต้องการ ซึ่งอุณหภูมิจะแตกต่างกันไปตามชนิดของสารละลายกรดที่ใช้ในการอะโนไดซ์

### 2.2.3 ประเภทของวิธีการอะโนไดซ์ (Anodizing techniques)

การอะโนไดซ์แบบแห้งเป็นกระบวนการปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีประเภทหนึ่ง โดยการทำให้อโลหะเปลี่ยนสภาพไปเป็นอโลหะออกไซด์ที่มีความแข็งสูงกว่าอโลหะนั้นๆ โดยให้ชิ้นงานที่ต้องการชุบเคลือบผิวออกไซด์เป็นขั้วบวก (Anode) จากรายงานการศึกษาแสดงว่าผิวเคลือบทั่วไปประกอบด้วยชั้น 2 ชั้น คือ ชั้นแรกเป็นส่วนที่อัดแน่นติดกับอโลหะไม่มีรูพรุน เรียกว่าชั้นเยื้องกัน ส่วนชั้นนอกสุดซึ่งเกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของชั้นออกไซด์กับสารละลาย (Oxide-solution interface) เรียกว่าชั้นรูพรุน มีความหนาแน่นมากกว่าชั้นเยื้องกันมาก โครงสร้างชั้นนี้เป็นรูปทรงกระบอกหกเหลี่ยม (Columnar structure) ภายในประกอบด้วยรูพรุน พบว่าที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการที่สารอิเล็กโทรไลต์มาสัมผัสตลอดเวลาในขณะที่ชุบ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

#### 2.2.3.1 Bath anodizing

เทคนิคที่ทำการทดลองในถังน้ำ โดยที่ตัวชิ้นงานอะโนไดซ์จะอยู่บริเวณตรงกลางเป็นขั้วบวก (Anode) และมีแผงตัวล่อที่เป็นโลหะบริเวณรอบนอกเป็นขั้วลบ (Cathode) และสารละลายที่อยู่รอบๆ เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เป็นเทคนิคการอะโนไดซ์ที่ดีที่สุดสำหรับงานที่ต้องการสีเดียว แสดงดังรูปที่ 2.3

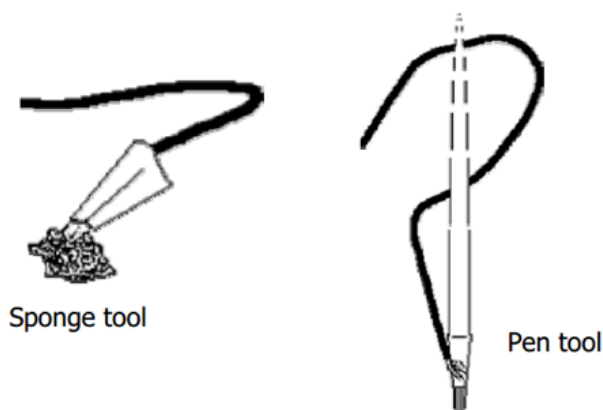


รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการ Bath anodizing (Anodizing, 2016 [online])

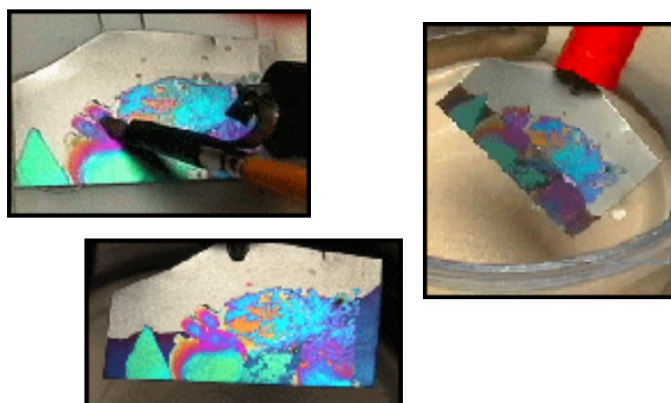
#### 2.2.3.2 Anodic painting

อุปกรณ์ที่ใช้ในเทคนิคนี้คือแปรงทาสีหรือฟู่กันที่มีปกเป็นโลหะ โลหะและวัสดุที่นำมาทดลองเป็นตัวนำไฟฟ้าควรจะมีการเคลือบด้วยพลาสติก อุปกรณ์ที่ใช้ทำได้ด้วยการนำลวดที่เป็นตัวนำไฟฟ้าไปพันบนแปรงฟู่กันในบริเวณปกโลหะ ทำให้แปรงฟู่กันมีขั้วลบ (Cathode) หรือนำ

พองน้ำมาตะเศษลวดที่ตัดออกมาแทนก็ได้ และนำไปวาดบนชิ้นงานโลหะที่เป็นขั้วบวก (Anode) ซึ่ง เป็นไปตามกระบวนการอะโนไดซ์ แสดงดังรูปที่ 2.4 และ 2.5 (Anodizing, 2016 [online])



รูปที่ 2.4 อุปกรณ์ของเทคนิคการ Anodic painting (Anodizing, 2016 [online])



รูปที่ 2.5 ชิ้นงานที่ทำโดยเทคนิค anodic painting (Anodizing, 2016 [online])

#### 2.2.4 โลหะที่สามารถนำมาเคลือบผิวโดยวิธีการอะโนไดซ์

โลหะบางชนิด เช่น Al Cr Sn Zn เมื่อทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนในอากาศจะเกิด ออกไซด์ของโลหะเคลือบบนผิวของโลหะนั้นและจับผิวแน่น ทำให้ผิวด้านในไม่สัมผัสกับน้ำและแก๊ส ออกซิเจน จึงช่วยป้องกันการผุกร่อนได้ แต่การเกิดออกไซด์ตามธรรมชาติเป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอ ในทางอุตสาหกรรมใช้วิธีอะโนไดซ์ซึ่งเป็นวิธีการทำให้พื้นผิวของโลหะเกิดออกไซด์อย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นโลหะที่นิยมนำมาทำอะโนไดซ์ได้แก่ อะลูมิเนียม (Al) เงิน (Ag) ไทเทเนียม (Ti) โครเมียม (Cr) ดีบุก (Sn) สังกะสี (Zn) เป็นต้น (อะโนไดซ์, 2559 [online]) แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โลหะที่ผ่านการเคลือบผิวโดยวิธีการอะโนไดซ์ (Anodize, 2016 [online])

## 2.3 การทำสีโดยไฟฟ้าเคมี (Electrolytic coloring)

การทำโลหะให้เกิดสีด้วยไฟฟ้าเคมี มีสาเหตุต่างๆ ดังนี้

### 2.3.1 ส่วนประกอบในการทำสีด้วยไฟฟ้าเคมี (Electrolytic coloring)

Electrolytic coloring เป็นการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าอย่างหนึ่ง จึงกระบวนการที่มีการตัดแปลงสมบัติของผิวโลหะ มีการเปลี่ยนแปลงผิวโลหะคือโลหะหนึ่งเกาะติดกับโลหะอีกชั้นหนึ่ง โดยใช้หลักการไฟฟ้าเคมี คือ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน – รีดักชัน (Oxidtion – Reduction) หรือปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reation) นั่นคือเมื่อกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Eletrolyte) จะมีการให้และรับอิเล็กตรอน ซึ่งตัวให้อิเล็กตรอนคือ ตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) และตัวรับอิเล็กตรอนคือ ตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) (ชุตินา ศรีวิบูลย์, 2541) โดยผ่านตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม เช่น ลวดตัวนำไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านตัวนำคือ การไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นต่อเมื่อ มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าไปในระบบ

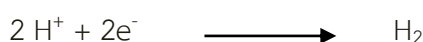
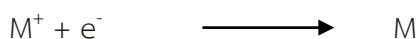
ส่วนประกอบที่สำคัญของกระบวนการ Electrolytic coloring คือ แหล่งให้พลังงานไฟฟ้า อิเล็กโทรด (Eletrode) สองขั้ว และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Eletrolyte) อิเล็กโทรดที่ขั้วบวกจะเกิดปฏิกิริยา Oxidation เรียกว่า Anode และอิเล็กโทรดที่ขั้วลบจะเกิดปฏิกิริยา Reduction เรียกว่า Cathode

กระบวนการ Electrolytic coloring ทำโดยการจุ่มชิ้นงานที่ต้องการชุบลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยผ่านไฟฟ้ากระแสไปยังชิ้นงานที่อยู่ขั้วลบ ส่วนที่ขั้วบวกแขวนตัวล่อกระแสไฟฟ้าจะไปบังคับให้ประจุโลหะมาเกาะที่ขั้วลบซึ่งเป็นชิ้นงานและเกิดก๊าซออกซิเจน (ทบวงมหาวิทยาลัย, 2540) มีการแตกตัวเป็นโลหะไอออนไปเกาะที่ขั้วลบ ส่วนที่ขั้วลบโลหะไอออน

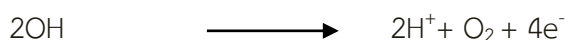
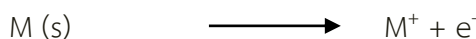


จะไปจับกับอิเล็กตรอนเกิดเป็นโลหะที่เกาะที่ชิ้นงานทำให้ชิ้นงานเกิดสี โดยสีที่ได้จะเป็นสีของโลหะ ไอออนจากขั้วบวก ดังในสมการ (อนันต์ ทองมอย, 2540)

ปฏิกิริยาที่ขั้วลบ ( Cathode Reaction ):



ปฏิกิริยาที่ขั้วบวก ( Anode Reaction ):



### 2.3.2 ผิวอะโนไดซ์ที่เหมาะสมสำหรับการทำสีด้วยไฟฟ้าเคมี

เพื่อให้ผิวที่ได้มีคุณลักษณะตามที่ต้องการ การทำอะโนไดซ์เพื่อให้เกิดฟิล์มบนแผ่น ชิ้นงานเงินจึงเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญต่อการทำสีด้วยไฟฟ้าเคมี ซึ่งเกี่ยวข้องกับการทำงานที่ อุณหภูมิที่แน่นอน ระยะเวลาและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า โดยผิวอะโนไดซ์ที่เหมาะสมในการ ทำสีด้วยไฟฟ้าเคมี ควรมีลักษณะดังนี้ (อนันต์ ทองมอย, 2540)

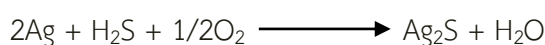
1. ผิวอะโนไดซ์มีความหนาแน่นเท่ากันตลอดทั้งแผ่น เพราะความหนาของผิวอะโนไดซ์จะ เกี่ยวข้องกับการดูดซับปริมาณของสี ผิวอะโนไดซ์หนาจะดูดซับสีได้มากทำให้สีที่ได้มีความเข้มหรือ ทึบมาก ผิวอะโนไดซ์บางจะดูดซับสีได้น้อยลง

2. ผิวอะโนไดซ์ควรมีรูพรุนมากพอและสามารถดูดซับสีได้ดี

3. ผิวของชิ้นงานอะโนไดซ์ต้องปราศจากรอยขีดข่วน เป็นหลุมเป็นบ่อ

### 2.3.3 กลไกการเกิดความหมองของโลหะเงิน

โลหะเงินเมื่ออยู่ในบรรยากาศจะถูกออกซิเดชัน ด้วยออกซิเจนในอากาศที่มีความชื้น และหากโลหะผสมเงินอยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่ใกล้โรงงานอุตสาหกรรมและเมืองใหญ่ที่มีการจราจร คับคั่ง ซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่ในสภาวะที่มี  $H_2S$  600 ppm จะทำให้เงินสเตอร์ริงหมองเร็วขึ้น สารที่มักทำ ให้ผิวโลหะเงินดำลงคือสารประกอบของซัลเฟอร์ ซึ่งมักเป็น  $H_2S$  มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มี ซัลเฟอร์อยู่ ปฏิกิริยาที่ทำให้ผิวเงินหมองในบรรยากาศ  $H_2S$  คือ



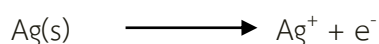
โลหะเงินและโลหะเงินผสมเกิดปฏิกิริยากับสภาพแวดล้อมได้คล้ายกัน ซึ่งโลหะเงินจะถูก กัดกร่อนในบรรยากาศเมื่อมีความชื้นสูงอยู่ด้วยเท่านั้น เนื่องจากความชื้นจะถูกดูดติดและปกคลุมที่ผิว



โลหะเงินกลายเป็นน้ำที่ติดอยู่ที่ผิว โดยขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ ถ้าในบรรยากาศมีความชื้นสัมพัทธ์น้อย น้ำจะถูกดูดติดที่ผิวโลหะได้น้อย ทำให้โลหะเงินถูกกัดกร่อนได้น้อยและการกัดกร่อนของโลหะเงินจะเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น ถ้าในบรรยากาศมีสารประกอบที่ทำให้เงินหมองอยู่ด้วย สารเหล่านี้จะละลายในน้ำที่ผิวเงิน ทำให้เงินมีฟิล์มดำติดที่ผิว ดังนั้นน้ำที่ผิวโลหะจึงมีฤทธิ์กัดกร่อนโลหะเงินได้

โดยน้ำที่อยู่ที่ผิวเงิน ซึ่งเกิดจากไอน้ำที่ควบแน่นมาเกาะที่ผิว หรืออนุภาคฝุ่นที่สามารถดูดความชื้นได้เกาะที่ผิวเงิน ไอออนของโลหะเงิน ( $\text{Ag}^+$ ) ละลายจากโลหะเงินลงมาในน้ำหรือสารละลายที่ผิวแล้วเกิดปฏิกิริยาต่อไป

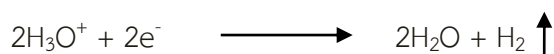
ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะเงินคือ



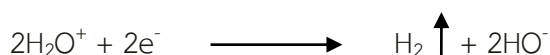
ปฏิกิริยารีดักชันที่เกิดขึ้นเมื่อสารละลายมีฤทธิ์เป็นกรดคือ



และ



ปฏิกิริยารีดักชันที่เกิดขึ้น เมื่อสารละลายมีฤทธิ์เป็นกลางคือ



และ



จากการศึกษาพบว่าโลหะเงินเจือ 92.25 Ag / 7.5 Cu เมื่ออยู่ในบรรยากาศที่มีซัลเฟอร์ จะเกิดเป็นคอปเปอร์ซัลไฟด์ ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) ที่ผิว ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยา Sulfidation rate ของทองแดงเกิดขึ้นได้เร็วกว่าเงิน ถ้าโลหะเงินเจือสังกะสี ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาการกัดกร่อนคือ  $\text{Ag}_2\text{S}$ , ZnO และ ZnS (สมนึก วัฒนศรีกุล, 2547 [online])

### 2.3.4 การเห็นเหลื่อมสี (Muti – color interference)

การเห็นเหลื่อมสี สามารถอธิบายได้ด้วยปรากฏการณ์แทรกสอดของแสง (Optical – Interference) ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นได้กับวัสดุที่มีชั้นฟิล์มบางๆ ที่โปร่งแสง บางมากระดับไมครอน และผิววัสดุทึบแสงเนื่องจากความแตกต่างกันของค่าดัชนีหักเห (Refractive index) ของฟิล์มโปร่งแสงและวัสดุทึบแสงนั้น จะทำให้เกิดการสะท้อน หักเห และการแทรกสอดของแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ กัน ทำให้มองเห็นการเหลื่อมสีเกิดขึ้น

## 2.4 ระบบการวัดสี (CIE LAB)

ระบบ CIE ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาในปี ค.ศ. 1931 โดย Commission International de l'Eclairage (CIE) เขาได้เห็นความจำเป็นที่ต้องมีระบบการวัดสีในรูปของ Objective ที่ไม่ต้องอาศัยประสบการณ์หรือความจำของมนุษย์ในการวัดสี โดยจะวัดสีออกมาเป็นตัวเลข ซึ่งมีข้อดีอยู่หลายประการ คือ เป็นระบบที่ไม่ขึ้นอยู่กับการมองเห็นของแต่ละคน ทำให้ลดปัญหาความขัดแย้งลงจนได้ระบบวัดสีออกมาเป็นตัวเลข ดังนั้นถึงแม้ชิ้นงานตัวอย่างจะซีดงตามกาลเวลา แต่ตัวเลขที่มีอยู่ทำให้ทราบได้ว่าสีเดิมเป็นอย่างไร จึงสามารถนำไปคำนวณและทำนายสูตรสีผสมได้ ระบบ CIE เนื่องจากปัจจัยในการมองเห็นสีของมนุษย์ ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง วัตถุสีและสายตาของมนุษย์ ดังนั้นถ้าสามารถวัดปัจจัยทั้งสามอย่างออกมาจะสามารถวัดสีออกมาเป็นตัวเลขได้ ปัจจุบัน ระบบ CIE L\* a\* b\* (CIELAB) เป็นระบบที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการนำมาระบุสี ซึ่งมีลักษณะของ Color space ดังรูปที่ 2.2 โดยที่ L\* ใช้กำหนดค่าความสว่าง (Lightness) แสดงดังรูปที่ 2.7 และ 2.8

L = 0    perfect black sample

L = 100    perfect white sample

a\* ใช้กำหนดสีแดงหรือสีเขียว

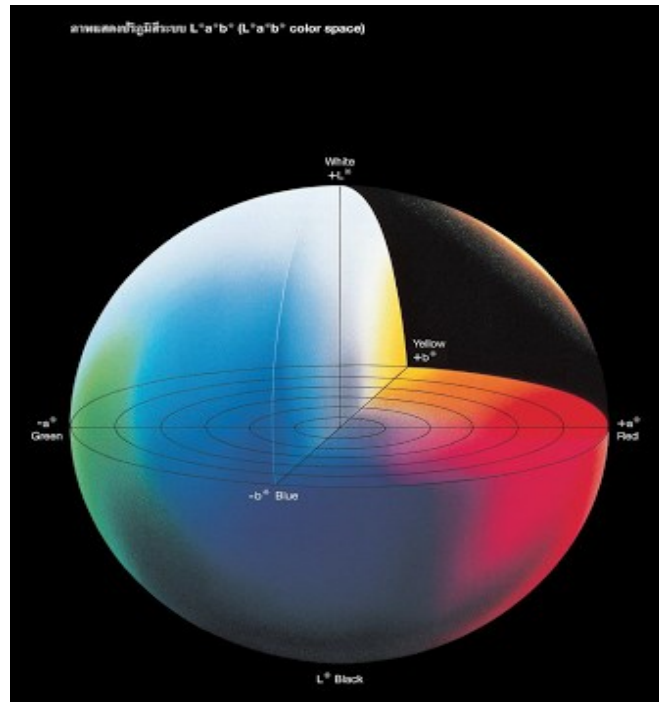
a = + วัตถุสีสีแดง

a = - วัตถุสีออกเขียว

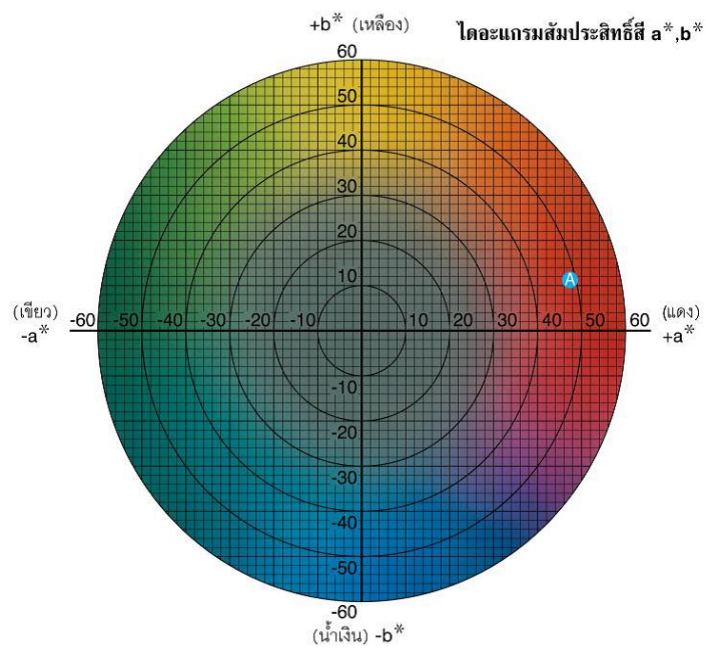
b\* ใช้กำหนดสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน

b = + วัตถุสีออกเหลือง

b = - วัตถุสีออกน้ำเงิน



รูปที่ 2.7 ปริภูมิสี  $L^*a^*b^*$  (CIE-Lab, 2016 [online])



รูปที่ 2.8 ไดอะแกรมสัมประสิทธิ์สี  $a^*$  และ  $b^*$  ของระบบสี CIELAB (CIE-Lab, 2016 [online])

## 2.5 ผลงานที่เคยศึกษามาก่อน

มีการทำให้ผิวเงินเกิดสีโดยการใช่วิธีการ Electrochemical Anodizing คือการทำให้พื้นผิวของเงินเกิดสีโดยการอะโนไดซ์ โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และซัลเฟอร์เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ มีการใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ (ถ่านไฟฉาย) ที่ 3 โวลต์ จุ่มไปที่ชิ้นงานเงิน ทำให้เกิดเป็นปฏิกิริยาออกซิไดซ์เป็นซิลเวอร์ซัลไฟด์ ( $Ag_2S$ ) เคลือบบนผิวของชิ้นงาน โดยแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ที่ 3 โวลต์ ระยะเวลาในการจุ่มแต่ละครั้งประมาณ 5 วินาทีผิวของชิ้นงานเป็นสีน้ำเงินปนแดงปนเหลืองไม่เท่ากัน 10 วินาทีผิวของชิ้นงานเป็นสีเขียวปนน้ำเงิน 30 วินาที ผิวของชิ้นงานเป็นสีเทาอมเขียว 10 นาที ผิวของชิ้นงานเป็นสีเทาอมน้ำเงิน 15 วินาที ผิวของชิ้นงานเป็นสีเทาเข้ม (ganoksin, 1996 [online])

การศึกษาผลกระทบของชนิดโลหะผสมที่มีผลต่อกระบวนการ Electrolytic coloring โดยตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดลองนี้มี 3 ชนิด คือ อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ โลหะผสม AA5083 และโลหะผสม AA6111 โดยตัวอย่างจะถูกนำไปทำอะโนไดซ์ในกรดซัลฟูริกที่สภาวะต่างๆ กัน ก่อนทำการ Electrolytic coloring มีลักษณะเหมือนกันทั้งในอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และโลหะผสมภายใต้สภาวะมาตรฐานของกระบวนการ Electrolytic coloring ประสิทธิภาพของกระแสไฟในการเกาะติดของดีบุกอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ดีกว่าในโลหะผสม แรงดันไฟฟ้าในการทำอะโนไดซ์มีผลต่อกระบวนการ Electrolytic coloring การทำความเข้าใจในเรื่องผลกระทบของโลหะผสมที่มีผลต่อกระบวนการ Electrolytic coloring ทำให้เข้าใจถึงรูปแบบของสีและเฉดสี (Tsangaraki-Kaplonglou and others, 2006 [online])

การศึกษาลักษณะเชิงพื้นผิวของฟิล์มบางด้วยวิธีอะโนไดซ์เซชัน งานวิจัยนี้ได้ศึกษาลักษณะเชิงพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีอะโนไดซ์โดยการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ความหนา 10 นาโนเมตร ด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริงบนฐานซิลิกอนและเตรียมสารละลายเอทิลีนไกลคอล ความเข้มข้น 0.25 โมล และสารละลายกรดออกซาลิก ความเข้มข้น 0.25 โมล ผสมในอัตราส่วน 60 : 40 โดยปริมาตรและทำการอะโนไดซ์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 โวลต์ ที่ระยะเวลา 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมงตามลำดับ และทำการอะโนไดซ์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 40, 50 และ 60 โวลต์ ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง นำตัวอย่างที่ได้ไปศึกษาลักษณะเชิงพื้นผิวด้วยเทคนิคกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ผลการศึกษาลักษณะเชิงพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ด้วยวิธีอะโนไดซ์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 โวลต์ ระยะเวลา 2 ชั่วโมง เกิดรูพรุนที่ดีที่สุด ศึกษาลักษณะเชิงพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนฐานซิลิกอนเพื่อนำไปพัฒนาให้เกิดประโยชน์แก่อุตสาหกรรมด้านต่างๆ (นงคันทา ศรีคำ และคณะ, 2559 [online])

การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานเครื่องเคลือบสีอะลูมิเนียมโดยวิธีการอะโนไดซ์ จะเป็นการค้นหาระยะเวลาที่เหมาะสมของกับขนาดของชิ้นงานที่มีความแตกต่างกัน โดยประยุกต์ใช้หลักการวิเคราะห์และออกแบบการทดลอง (DOE) ด้วยเทคนิคการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล มาเป็นเครื่องมือทางสถิติในการวิเคราะห์ผลการทดลอง เครื่องเคลือบสีอะลูมิเนียมโดยวิธีการอะโนไดซ์ สามารถทำงานอัตโนมัติได้โดยใช้ระบบ PLC เข้ามาควบคุมการทำงานทั้ง 6 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนที่ 1 การล้างไขมันที่ผิวโซเดียมฟอสเฟต, ขั้นตอนที่ 2 การล้างน้ำสะอาด, ขั้นตอนที่ 3 การทำปฏิกิริยาอะโนไดซ์

โดยใช้สารละลายกรดซัลฟูริก, ขั้นตอนที่ 4 การล้างกรดซัลฟูริก, ขั้นตอนที่ 5 การเคลือบสีอะลูมิเนียม และขั้นตอนที่ 6 การทำความสะอาดขั้นตอนสุดท้าย ผลการทดลองเชิงสถิติในการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องเคลือบสีอะลูมิเนียมพบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทั้ง 3 ขนาด คือ 4 มิลลิเมตร, 6 มิลลิเมตร, 8 มิลลิเมตร จะใช้ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาอะโนไดซ์ 10 นาที, 15 นาที, 20 นาที ตามลำดับ กล่าวคือ เมื่อขนาดของชิ้นงานมีพื้นที่มากขึ้นนั้น จะส่งผลให้เวลาการทำปฏิกิริยาอะโนไดซ์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย (ปริญา ศรีสัตยกุลม และคณะ, 2559 [online])

การเตรียมและการศึกษาคุณสมบัติผิวเคลือบอะโนไดซ์แบบแข็งบนผิวรองรับอะลูมิเนียม เป็นวิทยานิพนธ์มหาบัณฑิตของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันพระจอมเกล้าธนบุรีได้อธิบายไว้ดังนี้ ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมที่ผลิตวัสดุเพื่อต้านทานการเสียดสีได้ดีนั้น ปัจจุบันการเคลือบผิวอะโนไดซ์แบบแข็ง (Hard Anodizing) เป็นกรรมวิธีการผลิตที่ได้รับความนิยมเนื่องจากคุณสมบัติของผิวเคลือบออกไซด์ที่ถูกสร้างขึ้น มาเคลือบบนผิวโลหะนั้นมีความแข็งแรงสูงทนทานต่อการเสียดสีได้ดี เมื่อเทียบกับปฏิกิริยาเคมีในสิ่งแวดล้อมต่างๆ ที่มีผลต่อการกัดกร่อนและยึดเกาะกับชิ้นงานโลหะได้ดี ส่วนมากใช้ในงานเพื่อต้านทานการสึกหรอสำหรับเครื่องบินและงานวิศวกรรมทั่วไป ความแข็งผิวเคลือบอะโนไดซ์แบบแข็งจะมากกว่า 350 HV (วัดโดยใช้ Vickers micro hardness tester) ความหนาผิวเคลือบอยู่ในช่วง 25-100 ไมครอน ส่วนความหนา ฟิล์มเคลือบอะโนไดซ์ โดยทั่วไปที่ใช้ทางสถาปัตยกรรมมักอยู่ในช่วง 16-30 ไมครอน การอะโนไดซ์แบบแข็งเป็นกระบวนการปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีประเภทหนึ่ง โดยการทำผิวโลหะเปลี่ยนสภาพไปเป็นผิวโลหะออกไซด์ที่มีความแข็งแรงสูงกว่าผิวโลหะนั้น ๆ กระบวนการดำเนินการเคลือบผิวอะโนไดซ์แบบแข็งเหมือนกระบวนการอะโนไดซ์ทั่วไป เพียงแต่ผิวเคลือบจะมีความหนาและความแข็งแรงสูงกว่า ผิวเคลือบอะโนไดซ์ทั่วไป โดยให้ชิ้นงานที่ต้องการชุบเคลือบผิวออกไซด์เป็นอะโนด รายงานการศึกษาแสดงว่า ผิวเคลือบทั่วไปประกอบด้วยชั้น 2 ชั้น คือ ชั้นแรกเป็นส่วนที่อัดแน่นติดกับผิวโลหะไม่มีรูพรุน เรียกว่าชั้นเยื่อแก้ว ส่วนชั้นนอก สุดซึ่งเกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของชั้นออกไซด์กับสารละลาย (Oxide-solution interface) เรียกว่าชั้นรูพรุน มีความหนามากกว่าชั้นเยื่อแก้วมาก โครงสร้างชั้นนี้เป็น รูปทรงกระบอกหกเหลี่ยม (Columnar structure) ภายในประกอบด้วยรูพรุน พบว่าที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการ ที่สารอิเล็กโทรไลต์มาสัมผัสตลอดเวลาในขณะที่ชุบ ในงานวิจัยนี้ศึกษาถึงกระบวนการชุบเคลือบผิวอะโนไดซ์ แบบแข็งบนผิวรองรับอะลูมิเนียม โดยใช้เทคนิคเกรเดียนท์เสิร์ช หาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการชุบเคลือบผิวนี้ มีฟังก์ชัน เป้าหมายคือค่าความแข็งผิวมีค่าสูงสุด นอกจากนี้ ได้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง และค่าความต้านทานการเสียดสี รวมถึงการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ผลการวิจัยหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการชุบเคลือบ ผิวอะโนไดซ์แบบแข็ง มีตัวแปรที่ใช้ทดลอง 4 ตัวแปรได้แก่ความ เข้มข้นกรดออกซาลิก ความเข้มข้นอะลูมิเนียมซัลเฟต ความ หนาแน่นกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาการชุบ ฟังก์ชันเป้าหมาย คือค่าความเข้มข้นกรดออกซาลิก 75 g/l ความเข้มข้น อะลูมิเนียมซัลเฟต 75 g/l ความเข้มข้นอะลูมิเนียมซัลเฟต 75 g/l ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 3.5 A/dm<sup>2</sup> และระยะเวลาการชุบ 90 นาที ผิวเคลือบที่ได้มีค่าความแข็ง 453.1 HV ความ หนาเฉลี่ย 48.7 m และมีค่าความต้านทานการเสียดสี 46.67 ds/mg เมื่อวัดโดย Reciprocating Motion Wear Resistance Test การศึกษาค่าความต้านทานการเสียดสีจะแปรผันตรงกับค่า ความแข็ง ซึ่งแสดงว่ากรณีของผิว

เคลือบอะโนไดซ์แบบแข็ง ค่าความแข็ง (ซึ่งสามารถวัดได้แม่นยำ) จะเป็นตัวบ่งบอกถึงค่าความต้านทานการเสียดสีของผิวเคลือบได้ ด้านการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน พบว่าสามารถถ่ายภาพโครงสร้างเห็นเป็นลักษณะรูพรุนทรงกระบอก ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน โดยไม่เห็นโครงสร้างส่วนชั้นเยื่อชั้น (สมร หิรัญประดิษฐ์กุล, 2559 [online])

## บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการงาน

### 3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ

#### 3.1.1 วัสดุ

วัสดุต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังรูปที่ 3.1 ประกอบด้วย

1. โลหะเงิน
2. โลหะทองแดง
3. กรดซัลเฟอร์ (S)
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)



รูปที่ 3.1 วัสดุประกอบการทดลอง

#### 3.1.2 อุปกรณ์

อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองสามารถจำแนกเป็นอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้

##### 3.1.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการอะโนไดซ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการอะโนไดซ์ แสดงดังรูปที่ 3.2 ประกอบด้วย

1. ปีกเกอร์
2. กระดาษกรอง
3. แท่งแก้ว
4. ข้อนตักสาร
5. กรวยแก้ว
6. จานเพาะเชื้อ
7. ถังซีปล็อกเบอร์ 1
8. เทปใส
9. ลวดทองแดง
10. สายไฟ
11. ถังมือยางกันสารเคมี
12. ผ้าปิดจมูก
13. ขวดใส่น้ำดื่ม



14. น้ำกลั่น
15. เกลือปน
16. เบกิ้งโซดา
17. ฟลอยล์อะลูมิเนียม
18. พลาสติกแกลบ



1



2



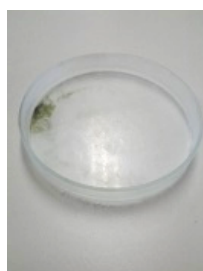
3



4



5



6



7



8



9



10



11



12





13



14



15



16



17



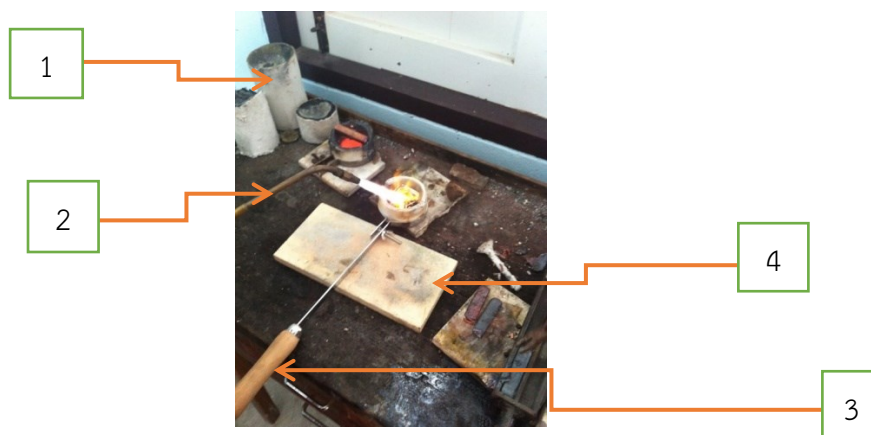
18

### รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการอะโนไดซ์

#### 3.1.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการหลอมโลหะ

อุปกรณ์การหลอมโลหะ แสดงดังรูปที่ 3.3 ประกอบด้วย

1. เบ้าหลอม
2. หัวพ่นไฟ
3. ด้ามจับเบ้าหลอม
4. กระจาดทนไฟ
5. โถน้ำ
6. ไฟแช็ก
7. แหนบสแตนเลส
8. รางเทโลหะ



5



6



7



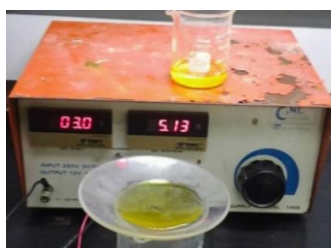
8

รูปที่ 3.3 อุปกรณ์การหลอมโลหะ

### 3.1.3 เครื่องมือ

เครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย

1. เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ใช้สำหรับจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่กระบวนการอะโนไดซ์ โดยปรับกำลังไฟฟ้าได้ตามที่กำหนด แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

2. เครื่องรีดโลหะ ใช้ในการรีดโลหะให้มีลักษณะเป็นแผ่น และมีความหนาตามที่กำหนด แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องรีดโลหะ

3. เครื่องตัดโลหะ ใช้ในการตัดแผ่นโลหะให้มีขนาดตามที่กำหนด หลังจากการรีดโลหะ แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องตัดโลหะ

4. เครื่องอัลตราโซนิก ใช้ในการล้างแผ่นคราบฝุ่นผงขนาดเล็ก และคราบต่าง ๆ ที่ติดอยู่ที่ผิวชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เครื่องอัลตราโซนิก

5. เครื่องชั่งดิจิตอล ทศนิยม 4 ตำแหน่ง ใช้สำหรับชั่งน้ำหนักโลหะ และสารเคมี ในการทดลอง แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอล

### 3.2 ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองการอะโนไดซ์โลหะเงินบริสุทธิ์ และโลหะเงินสเตอร์ลิงมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

#### 3.2.1 ขั้นตอนการหลอมโลหะเงิน

1. นำโลหะเงินใส่ในเบ้าหลอมใช้คีมเทคิปที่เบ้าหลอมแล้วนำมาวางบนกระดานทนไฟ แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การวางอุปกรณ์ในการหลอมโลหะ

2. ใช้ไฟแช็กจุดที่หัวพันไฟแล้วนำไฟมาจ่อที่ผิวของโลหะเงินที่อยู่ในเบ้าหลอม เมื่อโลหะเงินหลอมละลายจนหมด แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การหลอมโลหะเงิน

3. เทโลหะเงินหลอมเหลวลงในรางเท เมื่อโลหะเงินแข็งตัวแล้ว ใช้แหนบสแตนเลสคีบโลหะเงินออกจากรางเท แล้วนำไปจุ่มในโกนน้ำเพื่อให้โลหะเงินเย็นตัว แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การเทโลหะหลอมเหลวลงในรางเท

#### 4. ชิ้นงานโลหะเงินที่ได้จากการหลอม แสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 โลหะเงิน

หมายเหตุ ถ้าเป็นการหลอมโลหะเงินสเตอร์ลิงจะต้องเพิ่มโลหะทองแดง 3.86 กรัมในการหลอมโลหะเงินน้ำหนัก 124.90 กรัม

##### วิธีคำนวณส่วนผสมโลหะเงินสเตอร์ลิง

โลหะเงิน 97 %      เพิ่มโลหะทองแดง 3 กรัม

โลหะเงินน้ำหนัก 124.90 กรัม ใช้โลหะทองแดง  $\left(\frac{124.90 \times 3}{97}\right) = 3.86$  กรัม

#### 3.2.2 ขั้นตอนการรีดโลหะ

1. นำชิ้นงานโลหะเงินบริสุทธิ์ และโลหะเงินสเตอร์ลิง ที่ได้จากขั้นตอนการหลอม ไปรีดโดยใช้เครื่องรีดโลหะ ให้มีลักษณะเป็นแผ่นบาง แสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การรีดโลหะเงิน

2. ริดโลหะจนกระทั่งได้ความหนาตามที่กำหนด แสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 โลหะเงินที่ผ่านการริด

### 3.2.3 ขั้นตอนการตัดโลหะ

1. นำแผ่นโลหะเงินที่ผ่านการริดมาตัดเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมให้มีขนาด กว้าง 2 เซนติเมตร ยาว 2 เซนติเมตร โดยใช้เครื่องตัดโลหะตัด
2. นำแผ่นโลหะใส่ในช่องตัดโลหะของเครื่องตัดโลหะ แล้วจึงทำการตัด
3. ชิ้นงานตัวอย่างที่ตัดเสร็จแล้ว แสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ตัวอย่างชิ้นงานหลังตัด

### 3.2.4 ขั้นตอนการเตรียมผิวโลหะก่อนการอะโนไดซ์

1. ทำการล้างแผ่นโลหะเงินในเครื่องอัลตราโซนิกที่มีฟลอยด์อะลูมิเนียมรองพื้นอยู่ โดยนำเกลือกับเบกกิ้งโซดาปริมาณ 90 กรัม ผสมกับน้ำปริมาตร 400 มิลลิลิตร แล้วทำการเทลงไปในเครื่องอัลตราโซนิกแล้ว แสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การล้างชิ้นงานโลหะก่อนการอะโนไดซ์

2. นำแผ่นโลหะเงินใส่ในเครื่องอัลตราโซนิก จนกระทั่งแผ่นโลหะเงินสะอาด จากนั้นใช้แท่นบสเทนเลสตีบชิ้นงานออกมา แสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 ชิ้นงานเงินที่สะอาดแล้ว

3. นำชิ้นงานมาล้างในน้ำกลั่นที่เตรียมไว้ เพื่อเป็นกระทำความสะอาดผิวของชิ้นงานก่อนการอะโนไดซ์ แสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 การล้างชิ้นงาน

หมายเหตุ ชิ้นงานที่ใช้มีทั้งหมด 90 ตัวอย่างคือโลหะเงินบริสุทธิ์ 45 ตัวอย่าง และเงินสเตอร์ลิง 45 ตัวอย่าง โดยอัตราส่วนความเข้มข้นของกรดซัลเฟอร์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่กำหนดไว้คือ 1:1, 1:2, 1:3, 2:1, 3:1 และอัตราส่วนเวลาที่กำหนดไว้คือ 1 วินาที 3 วินาที 5 วินาที ใช้กับโลหะเงินและเวลา 5 วินาที 10 วินาที 15 วินาที ใช้กับโลหะเงินสเตอร์ลิง กำลังไฟฟ้าที่ใช้คือ 3 โวลต์ 5 โวลต์ 10 โวลต์



### 3.2.5 ขั้นตอนการตรวจสอบผิวของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์โลหะ

1. วางชิ้นงานโลหะก่อน-หลังการอะโนไดซ์วางลงบนแท่นวางสไลด์ จากนั้นหมุนกำลังขยายไปที่ 10 เท่า ทำการปรับโฟกัสชิ้นงานให้ชัด แล้วทำการบันทึกภาพ แสดงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

2. นำภาพถ่ายที่ได้มาทำการวิเคราะห์ความแตกต่างของผิวชิ้นงานก่อน และหลังการอะโนไดซ์
3. อภิปรายและสรุปผลการทดลอง

### 3.2.6 ขั้นตอนการเตรียมสารเคมี

1. ทำการชั่งน้ำหนักซัลเฟอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ใส่ในบีกเกอร์ ตวงให้ได้ปริมาณตามอัตราส่วนที่กำหนด แสดงดังรูปที่ 3.20

หมายเหตุ– อัตราส่วนความเข้มข้นกรดที่ใช้คือ 1:1, 1:2, 1:3, 2:1, 3:1

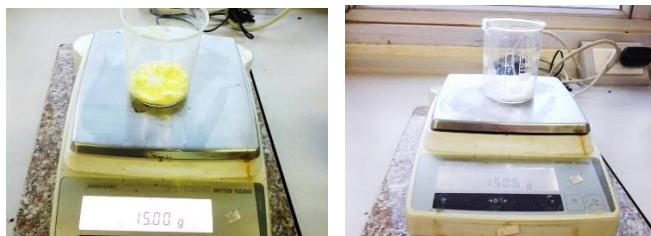
- น้ำหนักที่ใช้ในการชั่งสารเทียบกับ 1 ซ่อนโตะ มีค่าเท่ากับ 15 กรัม

ตัวอย่าง หาความเข้มข้นของกรดในสัดส่วน 1:2

สมมติกำหนดสัดส่วนเป็น S : NaOH

ดังนั้น ปริมาณกำมะถันที่ใช้ในการทดลองคือ 15 กรัม

ปริมาณโซดาไฟที่ใช้ในการทดลองคือ 30 กรัม



รูปที่ 3.20 ชั่งสารเคมี

2. นำสารเคมีที่ซั่งแล้วเทรวมกันในปิ๊กเกอร์ แล้วเติมน้ำกลั่น ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นใช้ช้อนคนสารคนประมาณ 10 นาที



รูปที่ 3.21 คนสารเคมีให้เข้ากัน

3. นำกระดาษกรองวางในกรวยกรองแก้ว แล้วนำสารละลายที่คนเสร็จมากรองเพื่อแยกกากออก



รูปที่ 3.22 การกรองสารเคมี

4. นำสารละลายที่ได้วางพักไว้แล้วนำพลาสติกแรปมาขึ้นไว้เพื่อกันฝุ่นละออง จากนั้นทำการผสมกรดให้ครบ 5 สัดส่วนความเข้มข้น



รูปที่ 3.23 สารละลายที่มีอัตราส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ

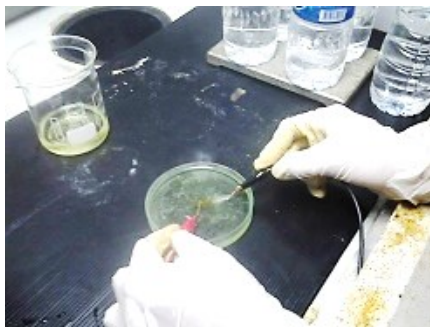
### 3.2.7 ขั้นตอนการอะโนไดซ์

1. ทำการติดตั้งเครื่องจ่ายไฟ ต่อสายไฟเข้ากับเครื่องจ่ายไฟทั้งขั้วบวกและขั้วลบ โดยระวังไม่ให้สายไฟทั้งสองสัมผัสกัน
2. นำสารละลายที่เตรียมไว้เทใส่จานเพาะเชื้อในปริมาณที่พอเหมาะ จากนั้นเตรียมน้ำสะอาดใส่ขวดน้ำ จำนวน 4 ขวด เพื่อใช้ล้างชิ้นงานหลังการอะโนไดซ์



รูปที่ 3.24 การวางอุปกรณ์การอะโนไดซ์

3. ทำการอะโนไดซ์โดยปรับกำลังไฟฟ้า คือ 3 โวลต์ 5 โวลต์ 10 โวลต์ เวลา 1 วินาที 2 วินาที 5 วินาที สำหรับโลหะเงินบริสุทธิ์ และเวลา 5 วินาที 10 วินาที 15 วินาที สำหรับโลหะเงินสเตอร์ลิง โดยใช้สายไฟขั้วบวกจี้ที่ผิวของชิ้นงานและขั้วลบจุ่มในสารละลาย แสดงดังรูปที่



รูปที่ 3.25 การอะโนไดซ์โลหะเงิน

4. เมื่อครบตามเวลาที่ตั้งไว้แล้วให้นำชิ้นงานมาล้างในน้ำสะอาดที่เตรียมไว้ จากนั้นนำทิชชูมาซับชิ้นงานให้แห้ง
5. จากนั้นนำสัดส่วนที่เหมาะสมไปใช้กับเครื่องประดับจริงที่เตรียมไว้สำหรับงานวิจัย

## บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและอภิปรายผล

จากผลการทดลองการทำอะโนไดซ์บนผิวของโลหะเงินบริสุทธิ์และโลหะเงินสเตอร์ลิง ที่มีอัตราส่วนความเข้มข้นซัลเฟอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1:1 1:2 1:3 2:1 และ 3:1 ตามลำดับ กำลังไฟที่ 3 5 และ 10 โวลต์ เวลา 1 3 และ 5 วินาที ของโลหะเงินบริสุทธิ์ และ 5 10 และ 15 วินาที ของโลหะเงินสเตอร์ลิง ณ อุณหภูมิห้อง แล้วนำชิ้นงานที่ผ่านการอะโนไดซ์ไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง ที่กำลังขยาย 10 เท่า พบว่าเกิดการสีเหลืองบนผิวของโลหะเงินทั้งสองชนิด โดยเกิดเป็นเหลืองสีฟ้าและเหลืองสีม่วงไหม้ บนผิวของโลหะเงินที่ผ่านการอะโนไดซ์ เนื่องมาจากความเข้มข้นกรด เวลา และกำลังไฟฟ้าในการทำอะโนไดซ์ที่ต่างกันจึงทำให้เกิดสีเหลืองต่างๆ บนผิวโลหะเงิน (อนันต์ ทองมอย. 2549)

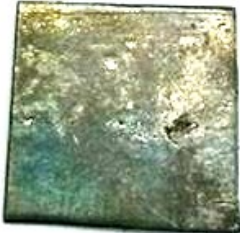





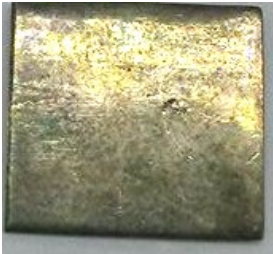
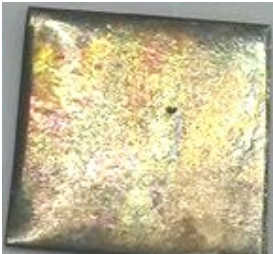

### 4.1 โลหะเงินที่นำมาทำการอะโนไดซ์

จากการเตรียมแผ่นโลหะเงินบริสุทธิ์ และแผ่นโลหะเงินสเตอร์ลิง ให้มีขนาดตามขนาดที่กำหนด จากนั้นเข้าสู่กระบวนการอะโนไดซ์ ซึ่งผลที่ได้มีดังนี้

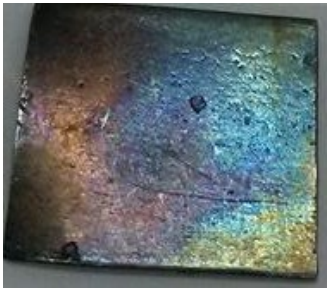

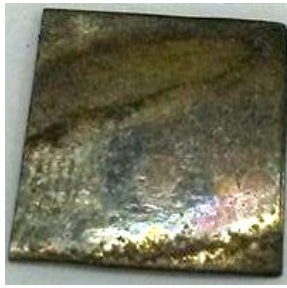



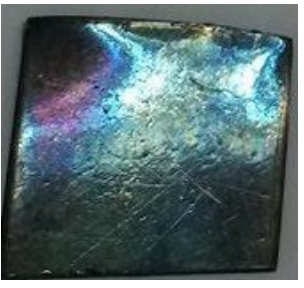

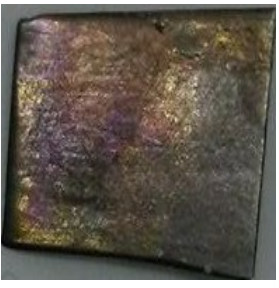
#### 4.1.1 โลหะเงินบริสุทธิ์

จากการทำอะโนไดซ์กับโลหะเงินบริสุทธิ์ ที่มีอัตราส่วนของซัลเฟอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วนที่ 1:1 1:2 1:3 2:1 และ 3:1 โดยน้ำหนัก ที่เวลา 1 3 และ 5 วินาที และกำลังไฟที่ 3 5 และ 10 โวลต์ ณ อุณหภูมิห้อง ผลที่ได้ แสดงดังตารางที่ 4.1 - 4.5

ตารางที่ 4.1 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นงานโลหะเงินบริสุทธิ์ที่ผ่านการอะโนไดซ์ในซัลเฟอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ถ่ายด้วยกล้องดิจิทัลที่มีความเข้มข้นในอัตราส่วน 1:1



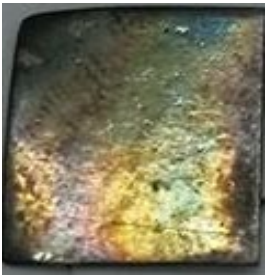






เวลา (วินาที)		
1	3	5
<b>กำลังไฟฟ้า 3 โวลต์</b>		
		
<b>กำลังไฟฟ้า 5 โวลต์</b>		
		
<b>กำลังไฟฟ้า 10 โวลต์</b>		
		

ตารางที่ 4.2 ลักษณะการเคลือบสีของชิ้นงานโลหะเงินบริสุทธิ์ที่ผ่านการอะโนไดซ์ในซัลเฟอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ถ่ายด้วยกล้องดิจิทัลที่มีความเข้มข้นในอัตราส่วน 1:2

เวลา (วินาที)		
1	3	5
กำลังไฟฟ้า 3 โวลต์		
		
กำลังไฟฟ้า 5 โวลต์		
		
กำลังไฟฟ้า 10 โวลต์		
		





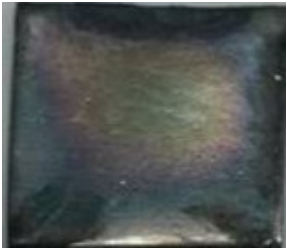
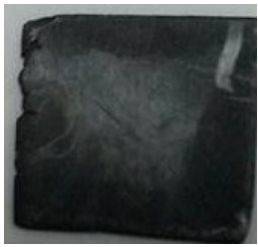

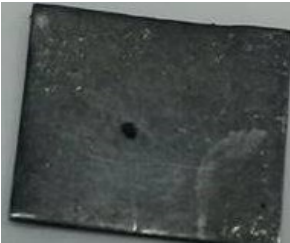
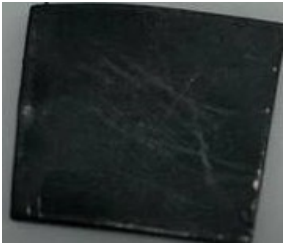


ตารางที่ 4.3 ลักษณะการเคลือบสีของชิ้นงานโลหะเงินบริสุทธิ์ที่ผ่านการอะโนไดซ์ในซัลเฟอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ถ่ายด้วยกล้องดิจิทัลที่มีความเข้มข้นในอัตราส่วน 1:3


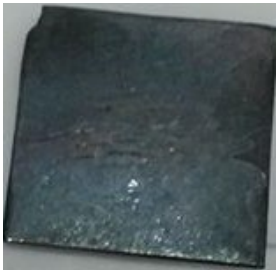





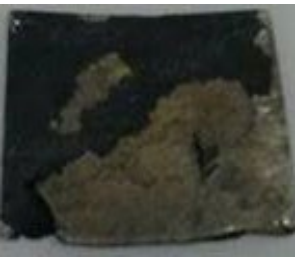

เวลา (วินาที)		
1	3	5
กำลังไฟฟ้า 3 โวลต์		
		
กำลังไฟฟ้า 5 โวลต์		
		
กำลังไฟฟ้า 10 โวลต์		
		



ตารางที่ 4.4 ลักษณะการเคลือบสีของชิ้นงานโลหะเงินบริสุทธิ์ที่ผ่านการอะโนไดซ์ในซัลเฟอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ถ่ายด้วยกล้องดิจิทัลที่มีความเข้มข้นในอัตราส่วน 2:1

เวลา (วินาที)		
1	3	5
กำลังไฟฟ้า 3 โวลต์		
		
กำลังไฟฟ้า 5 โวลต์		
		
กำลังไฟฟ้า 10 โวลต์		
		

ตารางที่ 4.5 ลักษณะการเคลือบสีของชิ้นงานโลหะเงินบริสุทธิ์ที่ผ่านการอะโนไดซ์ในซัลเฟอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ถ่ายด้วยกล้องดิจิทัลที่มีความเข้มข้นในอัตราส่วน 3:1

เวลา (วินาที)		
1	3	5
กำลังไฟฟ้า 3 โวลต์		
		
กำลังไฟฟ้า 5 โวลต์		
		
กำลังไฟฟ้า 10 โวลต์		
		

จากการทำอะโนไดซ์บนผิวโลหะเงินบริสุทธิ์ ที่อัตราส่วนของซัลเฟอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ในที่ 1:1 1:2 1:3 2:1 และ 3:1 โดยน้ำหนัก ที่เวลา 1 3 5 10 และ 15 วินาที และกำลังไฟที่ 3 5 และ 10 โวลต์ พบว่าที่อัตราส่วน 1:1 จะเกิดเคลือบสีเหลืองที่ผิวของชิ้นงาน ซึ่งเห็นได้ชัดและมีลักษณะของสีเกิดขึ้นคล้ายกันในทุกเวลา และกำลังไฟฟ้า

จากตารางที่ 4.1 – 4.5 ที่อัตราส่วน 1:2 ผิวชิ้นงานเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงของสีที่เกิดขึ้นที่ผิวของชิ้นงาน โดยมีการเคลือบสีเหลือง และมีการเคลือบของสีม่วง แดง แทรกเข้ามาเล็กน้อย โดยสังเกตเห็นได้เมื่อเวลา และกำลังไฟ เพิ่มขึ้น

ที่อัตราส่วนที่ 1:3 ผิวชิ้นงานมีการเกิดเคลือบเหลืองที่น้อยลงมาก เพื่อเทียบกับที่อัตราส่วน 1:1 และ 1: 2 แต่มีการเคลือบของโตนสีฟ้าที่เพิ่มขึ้น และมีโตนสีม่วงแทรกเข้ามา เมื่อเวลา และกำลังไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น







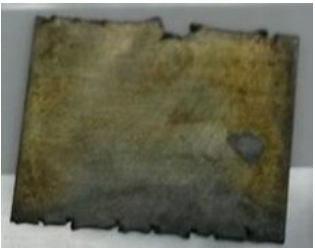

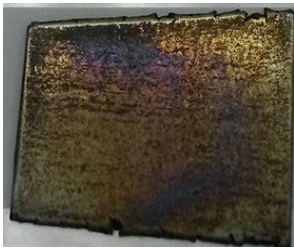
ที่อัตราส่วน 2:1 ผิวชิ้นงานมีสีที่คล้ายกัน คือการเคลือบสีที่ผิวของชิ้นงานเกิดน้อยมาก โดยมีลักษณะเป็นสีดำที่ไม่เข้มมากเคลือบที่ผิว ซึ่งเห็นได้ชัดเมื่อ เวลาและกำลังไฟเพิ่มขึ้น

ที่อัตราส่วน 3:1 ผิวชิ้นงานที่มีกำลังไฟที่ 3 โวลต์ มีลักษณะผิวที่คล้ายกับการอะโนไดซ์ที่อัตราส่วน 2:1 แต่เมื่อเพิ่มกำลังไฟเป็น 5 โวลต์ ผิวของชิ้นงานเริ่มมีสีดำเกิดขึ้นทั่วทั้งชิ้นงาน และไม่มีการเคลือบสีที่ผิว และที่กำลังไฟที่ 10 โวลต์ สีดำที่เกิดที่ผิวชิ้นงานจะมีความหนาและร้อนออกเป็นแผ่น ซึ่งเห็นได้ชัดเมื่อกำลังไฟสูงขึ้น





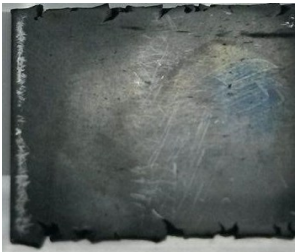


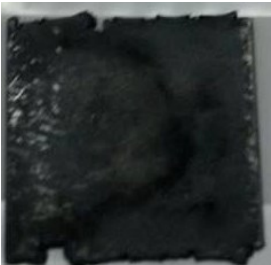

#### 4.1.2 โลหะเงินสเตอร์ลิง

จากการทำอะโนไดซ์กับโลหะเงินสเตอร์ลิง ที่มีอัตราส่วนของซัลเฟอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วนที่ 1:1 1:2 1:3 2:1 และ 3:1 โดยน้ำหนัก ที่เวลา 5 10 และ 15 วินาที และกำลังไฟที่ 3 5 และ 10 โวลต์ ณ อุณหภูมิห้อง ผลที่ได้ แสดงดังตารางที่ 4.6 - 4.11



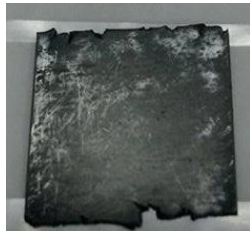






ตารางที่ 4.6 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นงานโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการอะโนไดซ์ในซัลเฟอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ถ่ายด้วยกล้องดิจิทัลที่มีความเข้มข้นในอัตราส่วน 1:1

เวลา (วินาที)		
5	10	15
<b>แรงเคลื่อนไฟฟ้า 3 โวลต์</b>		
		
<b>แรงเคลื่อนไฟฟ้า 5 โวลต์</b>		
		
<b>แรงเคลื่อนไฟฟ้า 10 โวลต์</b>		
		

ตารางที่ 4.7 ลักษณะการเคลือบสีของชิ้นงานโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการอะโนไดซ์ในซัลเฟอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ถ่ายด้วยกล้องดิจิทัลที่มีความเข้มข้นในอัตราส่วน 1:2










เวลา (วินาที)		
5	10	15
<b>แรงเคลื่อนไฟฟ้า 3 โวลต์</b>		
		
<b>แรงเคลื่อนไฟฟ้า 5 โวลต์</b>		
		
<b>แรงเคลื่อนไฟฟ้า 10 โวลต์</b>		
		

ตารางที่ 4.8 ลักษณะการเล็บบสีของชิ้นงานโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการอะโนไดซ์ในซัลเฟอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ถ่ายด้วยกล้องดิจิทัลที่มีความเข้มข้นในอัตราส่วน 1:3



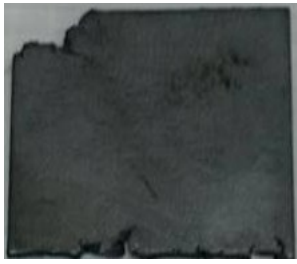






เวลา (วินาที)		
5	10	15
<b>แรงเคลื่อนไฟฟ้า 3 โวลต์</b>		
		
<b>แรงเคลื่อนไฟฟ้า 5 โวลต์</b>		
		
<b>แรงเคลื่อนไฟฟ้า 10 โวลต์</b>		
		



ตารางที่ 4.9 ลักษณะการเสื่อมสีของชิ้นงานโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการอะโนไดซ์ในซัลเฟอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ถ่ายด้วยกล้องดิจิทัลที่มีความเข้มข้นในอัตราส่วน 2:1

เวลา (วินาที)		
5	10	15
<b>แรงเคลื่อนไฟฟ้า 3 โวลต์</b>		
		
<b>แรงเคลื่อนไฟฟ้า 5 โวลต์</b>		
		
<b>แรงเคลื่อนไฟฟ้า 10 โวลต์</b>		
		

ตารางที่ 4.10 ลักษณะการเคลือบสีของชิ้นงานโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการอะโนไดซ์ในซัลเฟอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ถ่ายด้วยกล้องดิจิทัลที่มีความเข้มข้นในอัตราส่วน 3:1

เวลา (วินาที)		
5	10	15
<b>แรงเคลื่อนไฟฟ้า 3 โวลต์</b>		
		
<b>แรงเคลื่อนไฟฟ้า 5 โวลต์</b>		
		
<b>แรงเคลื่อนไฟฟ้า 10 โวลต์</b>		
		

จากตารางที่ 4.6 - 4.10 พบว่าที่อัตราส่วน 1:1 และ 2:1 สีที่ผิวชิ้นงานมีลักษณะคล้ายกันคือเกิดสีที่เกิดขึ้นที่ผิวของชิ้นงานและเห็นการเคลือบของสีที่ชัดเจน โดยมีการเคลือบสีเหลือง และมีการเคลือบสีฟ้าแทรกเข้ามา แต่ที่อัตราส่วน 2:1 จะมีการเคลือบของสีม่วง ๆ แดง ๆ แทรกมาแทนการเคลือบสีฟ้า และยังพบได้ในอัตราส่วน 1:1 ที่กำลังไฟฟ้าที่สูง



ที่อัตราส่วน 1:2 และอัตราส่วน 1:3 มีลักษณะของสีที่ผิวคล้ายกันคือ ผิวขื่นงานมีลักษณะเป็นสีดำ เมื่อกำลังไฟเพิ่มขึ้นสีดำนั้นจะเข้มขึ้น และมีบางตำแหน่งของชิ้นงานมีการเคลือบสี น้ำเงินแทรกเข้ามาเพียงเล็กน้อย

ที่อัตราส่วน 3:1 พบว่ามีลักษณะของผิวคล้ายกับการอะโนไดซ์ที่ผิวของโลหะเงินบริสุทธิ์ ที่อัตราส่วน 2:1 คือไม่พบการเคลือบสีที่ผิวของชิ้นงาน และมีผิวสีดำเกิดขึ้นทั่วทั้งแผ่นของชิ้นงาน

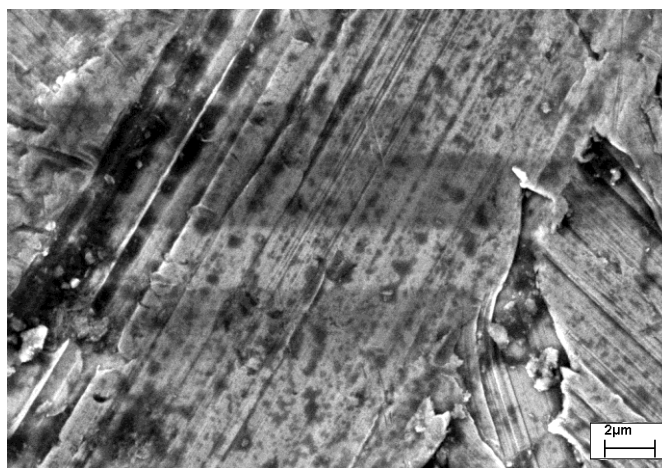
จากกระบวนการอะโนไดซ์ที่ผิวของโลหะเงินบริสุทธิ์ ที่กำลังไฟ 3 5 และ 10 โวลต์ ที่เวลา 1 3 และ 5 วินาที และเงินสเตอร์ลิง ที่กำลังไฟ 3 5 และ 10 โวลต์ ที่เวลา 5 10 และ 15 วินาที พบว่าการอะโนไดซ์ให้เกิดสีที่ผิวของโลหะเงินบริสุทธิ์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของสีที่ผิวที่อัตราส่วนของซัลเฟอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1:1 1:2 และ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่เวลา 1 3 และ 5 วินาที กำลังไฟที่ 3 5 และ 10 โวลต์ มีการเกิดการเคลือบสีในโทนสีเหลือง เหลือง-ม่วง-แดง น้ำเงิน-ม่วง-ฟ้า ตามลำดับ โดยในอัตราส่วนเดียวกัน เมื่อเวลาและกำลังต่างกันนั้นมีความแตกต่างของสีที่ใกล้เคียงกัน แต่ที่อัตราส่วนของซัลเฟอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 2:1 และ 3:1 พบว่าการเคลือบสีที่ผิวน้อยมาก โดยมีลักษณะเป็นฟิล์มสีดำเคลือบอยู่ที่ผิวชิ้นงาน ซึ่งในอัตราส่วนที่ 3:1 พบว่ามีฟิล์มสีดำเคลือบผิวที่หนากว่าที่อัตราส่วนที่ 3:1 และหลุดร่อนออกเป็นแผ่นได้เมื่อกำลังไฟที่ 10 โวลต์

ส่วนการการอะโนไดซ์ให้เกิดสีที่ผิวของโลหะเงินสเตอร์ลิง พบว่าที่อัตราส่วนของซัลเฟอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 1:1 และ 2:1 โดยน้ำหนัก มีการเคลือบสีที่มีลักษณะของโทนสีเหลืองที่คล้ายกัน แต่ที่อัตราส่วน 1:1 มีการเคลือบของสีฟ้าแทรกเข้ามาในกำลังไฟที่ 3 และ 5 โวลต์ และที่กำลังไฟ 10 โวลต์ มีลักษณะการเคลือบสีคล้ายกับที่อัตราส่วน 2:1 คือมีการเคลือบของสีเหลือง และมีสีม่วง-แดง แทรกเข้ามา ซึ่งพบได้ที่กำลังไฟ 3 โวลต์ ของทุกเวลา และที่กำลังไฟ 5 และ 10 โวลต์ ของทุกเวลา มีการเคลือบของสีน้ำเงิน-ม่วง เข้ามาแทนที่สีม่วง-แดง แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเป็น 1:2 1:3 และ 3:1 โดยน้ำหนัก พบว่าที่ผิวของชิ้นงานของทุกกำลังไฟ และเวลามีสีที่ผิวคล้ายกันเป็นลักษณะของฟิล์มสีดำที่ผิวของชิ้นงาน โดยมีสถานะของชิ้นงานที่มีเกิดการเคลือบสีในโทนสีน้ำเงิน ดังตารางที่ 4.7 และ 4.8 แต่จะไม่เกิดฟิล์มที่หนาจนกระทั่งหลุดร่อนออกเป็นแผ่นเหมือนกันที่อัตราส่วน 3:1 กำลังไฟที่ 10 โวลต์ ในการอะโนไดซ์ของโลหะเงินบริสุทธิ์

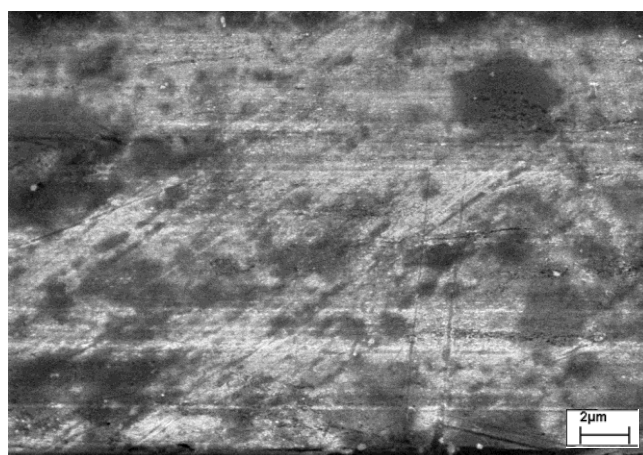
## 4.2 การตรวจสอบลักษณะผิวหลังผ่านกระบวนการอะโนไดซ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์

### อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

จากกระบวนการอะโนไดซ์โลหะเงินบริสุทธิ์และเงินสเตอร์ลิงที่อัตราส่วนซัลเฟอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1:1 1:2 1:3 2:1 และ 3:1 โดยน้ำหนัก กำลังไฟที่ 3 5 และ 10 โวลต์ เวลา 1 3 และ 5 วินาที ของโลหะเงินบริสุทธิ์ และ 5 10 และ 15 วินาที ของโลหะเงินสเตอร์ลิง โดยตัวอย่างไปตรวจสอบทั้งหมด 7 ชิ้น ได้แก่ โลหะเงินบริสุทธิ์และโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ผ่านการอะโนไดซ์ มีจำนวน 2 ตัวอย่าง โลหะเงินบริสุทธิ์ที่ผ่านการอะโนไดซ์ จำนวน 3 ตัวอย่าง ได้แก่อัตราส่วน 1:2 โดยน้ำหนัก กำลังไฟ 3 โวลต์ เวลา 1 วินาที อัตราส่วน 1:3 โดยน้ำหนัก กำลังไฟ 5 โวลต์ เวลา 1 วินาที และอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก กำลังไฟ 10 โวลต์ เวลา 5 วินาที และโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการอะโนไดซ์จำนวน 2 ตัวอย่าง ได้แก่อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก กำลังไฟ 3 โวลต์ เวลา 15 วินาทีและอัตราส่วน 3:1 โดยน้ำหนัก กำลังไฟ 10 โวลต์ เวลา 15 วินาที โดยผลที่ได้ แสดงดังรูปที่ 4.1-4.7



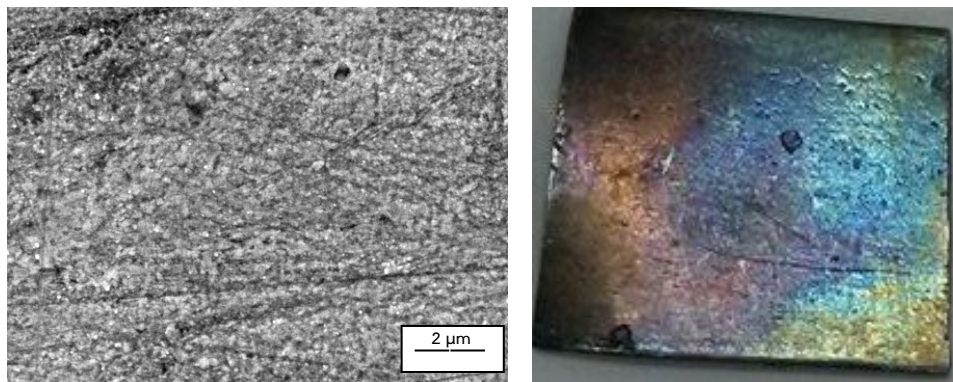
รูปที่ 4.1 โลหะเงินบริสุทธิ์หลังขีดผิวด้วยกระดาษทราย



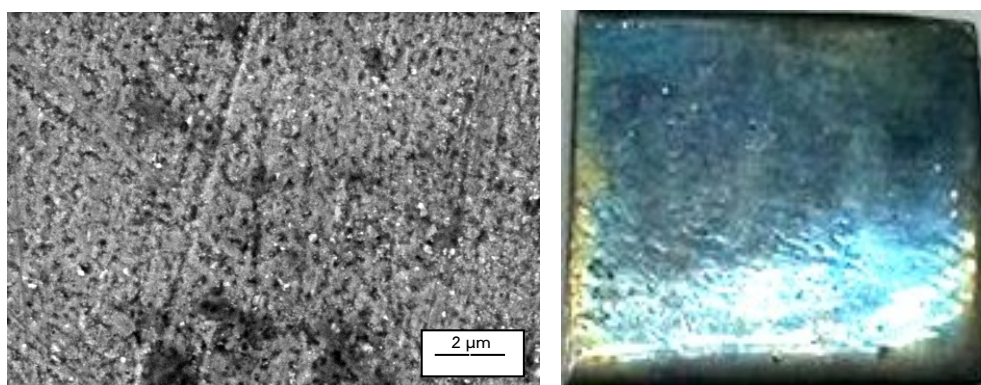
รูปที่ 4.2 โลหะเงินสเตอร์ลิงหลังขีดผิวด้วยกระดาษทราย

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 ผิวของโลหะเงินบริสุทธิ์และโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการขีดด้วยกระดาษทรายและยังไม่ผ่านกระบวนการอะโนไดซ์ พบว่าบริเวณผิวของโลหะทั้ง 2 ชนิด มีลักษณะเป็นแนวเส้นขนานกันมีทั้งเป็นทิศทางเดียวกัน และทิศทางตัดกัน เนื่องจากมีทิศทางการขีดที่หลากหลายทิศทาง

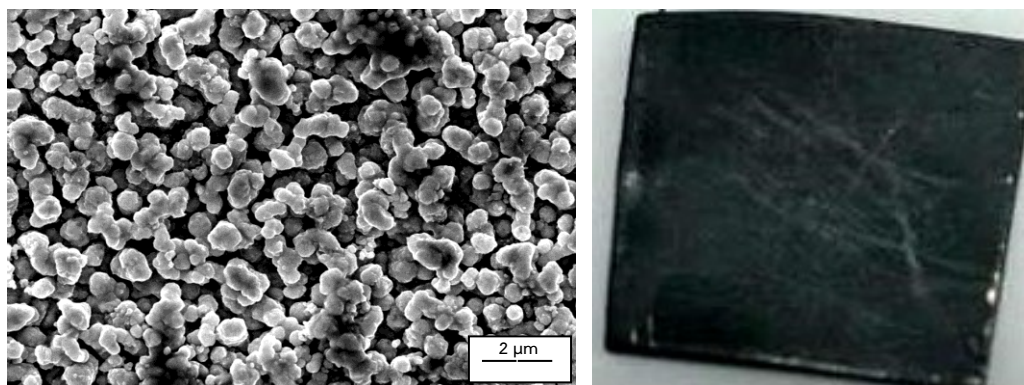
เมื่อนำชิ้นงานโลหะเงินบริสุทธิ์ที่ผ่านการอะโนไดซ์ในซัลเฟอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:2 โดยน้ำหนัก เวลา 1 วินาที กำลังไฟ 3 โวลต์ อัตราส่วนที่ 1:3 เวลา 1 วินาที กำลังไฟ 5 โวลต์ และอัตราส่วนที่ 2:1 เวลา 10 วินาที กำลังไฟ 5 โวลต์ ผลที่ได้ แสดงดังรูปที่ 4.3 - 4.5



รูปที่ 4.3 โลหะเงินบริสุทธิ์ที่ผ่านกระบวนการอะโนไดซ์ที่อัตราส่วน 1:2 โดยน้ำหนัก เวลา 1 วินาที กำลังไฟ 3 โวลต์ (ซ้าย)ภาพถ่ายด้วย SEM (ขวา)สีที่เกิดที่ผิวของโลหะ



รูปที่ 4.4 โลหะเงินบริสุทธิ์ที่ผ่านกระบวนการอะโนไดซ์ที่อัตราส่วน 1:3 โดยน้ำหนัก เวลา 1 วินาที กำลังไฟ 5 โวลต์ (ซ้าย)ภาพถ่ายด้วย SEM (ขวา)สีที่เกิดที่ผิวของโลหะ

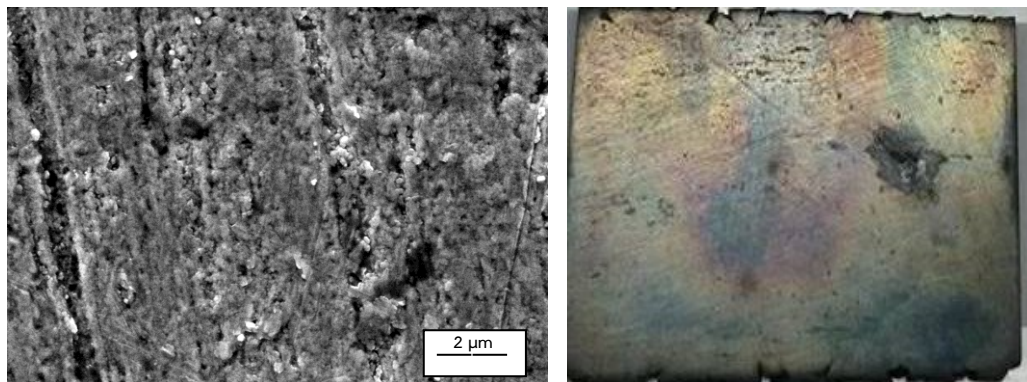


รูปที่ 4.5 โลหะเงินบริสุทธิ์ที่ผ่านกระบวนการอะโนไดซ์ที่อัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก เวลา 5 วินาที กำลังไฟ 10 โวลต์ (ซ้าย)ภาพถ่ายด้วย SEM (ขวา)สีที่เกิดที่ผิวของโลหะ

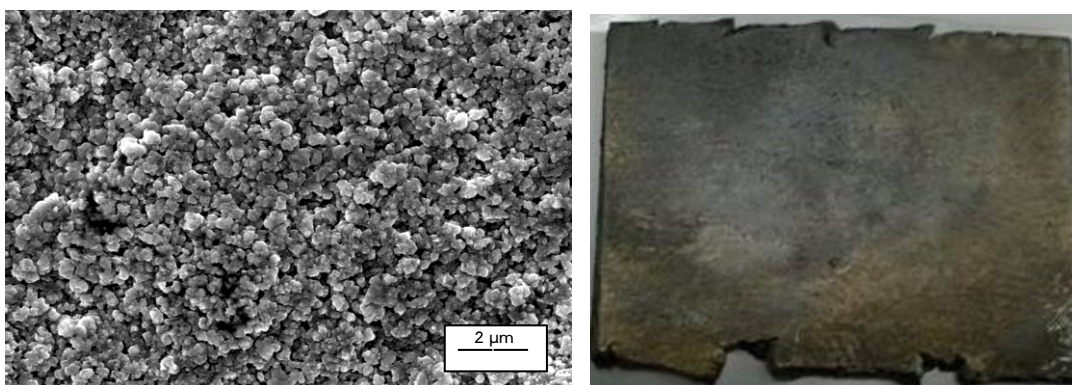
จากรูปที่ 4.3-4.5 เมื่อวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วย SEM ของโลหะเงินบริสุทธิ์ที่อัตราส่วน 1:2 โดยน้ำหนักเวลา 1 วินาที กำลังไฟ 3 โวลต์ อัตราส่วน 1:3 โดยน้ำหนัก เวลา 1 วินาที กำลังไฟ 5 โวลต์ และที่อัตราส่วน 1:2 โดยน้ำหนัก เวลา 5 วินาที กำลังไฟ 10 โวลต์ พบว่าที่ผิวมีการก่อตัวของอนุภาคเป็นชั้นฟิล์มที่ผิว โดยฟิล์มนี้จะมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งอนุภาคที่มีขนาดเล็กและละเอียด แสดงดังรูปที่ 4.3 จะส่งผลให้เกิดการเคลือบสีที่หลากหลายที่ผิวของโลหะ แต่เมื่อใช้เวลา และกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้น อนุภาคจะก่อตัวมีขนาดใหญ่ มีความหนา และไม่แสดงการเคลือบสีที่ผิวของโลหะ

จากนั้นนำชิ้นงานโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการอะโนไดซ์ในซัลเฟอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1: โดยน้ำหนัก เวลา 15 วินาที กำลังไฟ 3 โวลต์ และอัตราส่วนที่ 3:1 เวลา 15 วินาที กำลังไฟ 10 โวลต์ ผลที่ได้ แสดงดังรูปที่ 4.6 - 4.7





รูปที่ 4.6 โลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการอะโนไดซ์ที่อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก เวลา 15 วินาที กำลังไฟ 3 โวลต์ (ซ้าย)ภาพถ่ายด้วย SEM (ขวา)สีที่เกิดที่ผิวของโลหะ



รูปที่ 4.7 โลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการอะโนไดซ์ที่อัตราส่วน 3:1 โดยน้ำหนัก เวลา 15 วินาที กำลังไฟ 10 โวลต์ (ซ้าย)ภาพถ่ายด้วย SEM (ขวา)สีที่เกิดที่ผิวของโลหะ

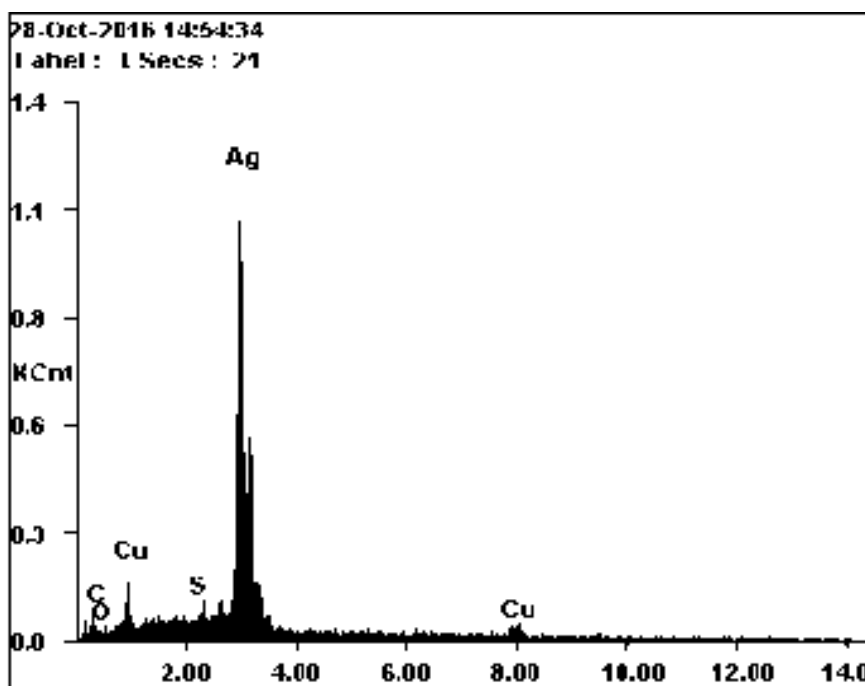
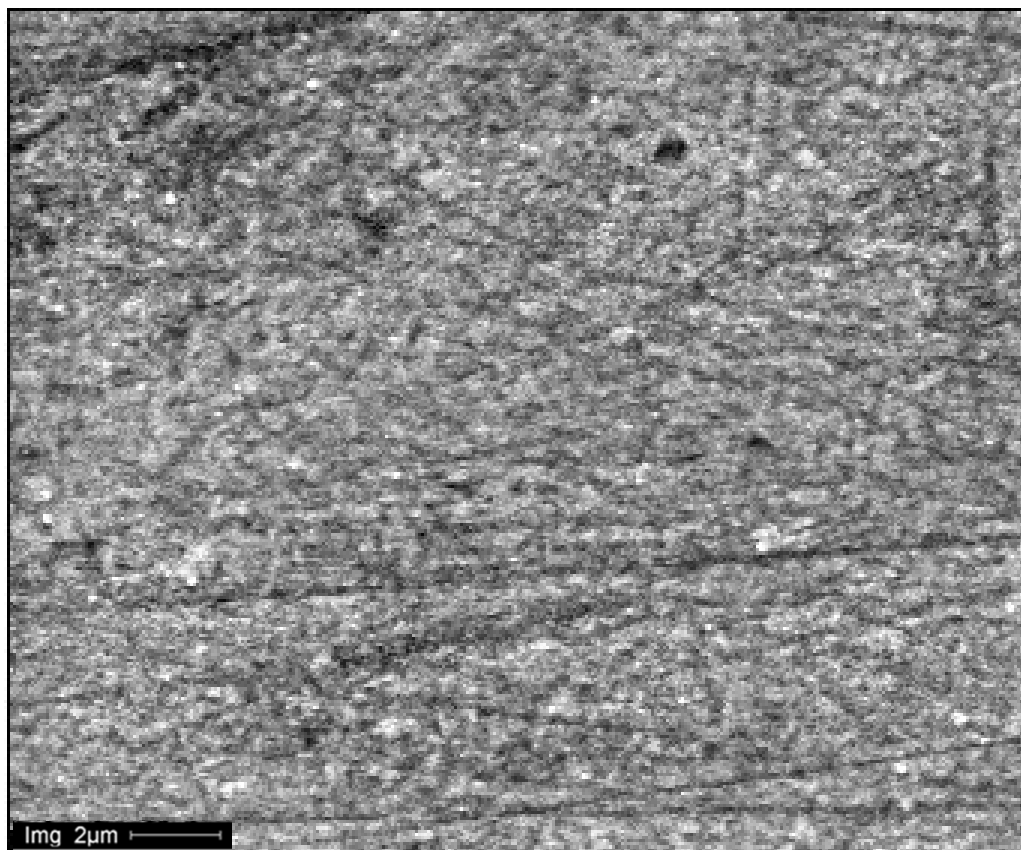
จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 เมื่อวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วย SEM ของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ที่อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนักเวลา 15 วินาที กำลังไฟ 3 โวลต์ และอัตราส่วน 3:1 โดยน้ำหนัก เวลา 15 วินาที กำลังไฟ 10 โวลต์ พบว่า ลักษณะการเกิดการเคลือบสีคล้ายกับลักษณะการเกิดการเคลือบสีที่ผิวของโลหะเงินบริสุทธิ์ แต่การเกิดการเคลือบที่ผิวของโลหะเงินสเตอร์ลิงจะเกิดในอัตราส่วน 1:1 และ 2:1 แต่ที่อัตราส่วน 1:2 1:3 และ 3:1 โดยน้ำหนัก จะไม่เกิดการเคลือบสีที่ชัดเจน โดยอนุภาคก่อตัวมีขนาดใหญ่ และมีความหนา ส่งผลให้เกิดฟิล์มสีดำ

จากการทดลองการอะโนไดซ์โลหะเงินบริสุทธิ์และเงินสเตอร์ลิง จากนั้นตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ทำให้ทราบถึงความแตกต่างจัดเรียงตัวของอนุภาคสีบนผิวชิ้นงานโลหะเงินที่ผ่านการอะโนไดซ์ ซึ่งมีผลมาจากความเข้มข้นของสารละลาย เวลา และกำลังไฟฟ้า คือความเข้มข้นของกรดมีผลต่อขนาดของรูพรุนและอนุภาค ถ้าความเข้มข้นของกรดมาก จะทำให้ขนาดของรูพรุนและอนุภาคมากขึ้น เวลามีผลต่อการจัดเรียงตัวของรูพรุน ถ้าเวลาในการอะ

โนโตซ์มาก จะทำให้รูพรุนมีขนาดใหญ่ ถ้าเวลาน้อยรูพรุนจะมีขนาดเล็ก กำลังไฟที่มีผลต่อความหนาของชั้นฟิล์ม ถ้าใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สูง ส่งผลให้มีความหนาเพิ่มขึ้น ซึ่งถ้าใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้า และอัตราส่วนที่เหมาะสม จะส่งผลให้มีความหนาของชั้นฟิล์มและขนาดอนุภาคที่ให้แสงแทรกสอดให้เกิดการเลี้ยวเบนได้ (Tsangaraki-Kaplanoglou, 2559 [online])

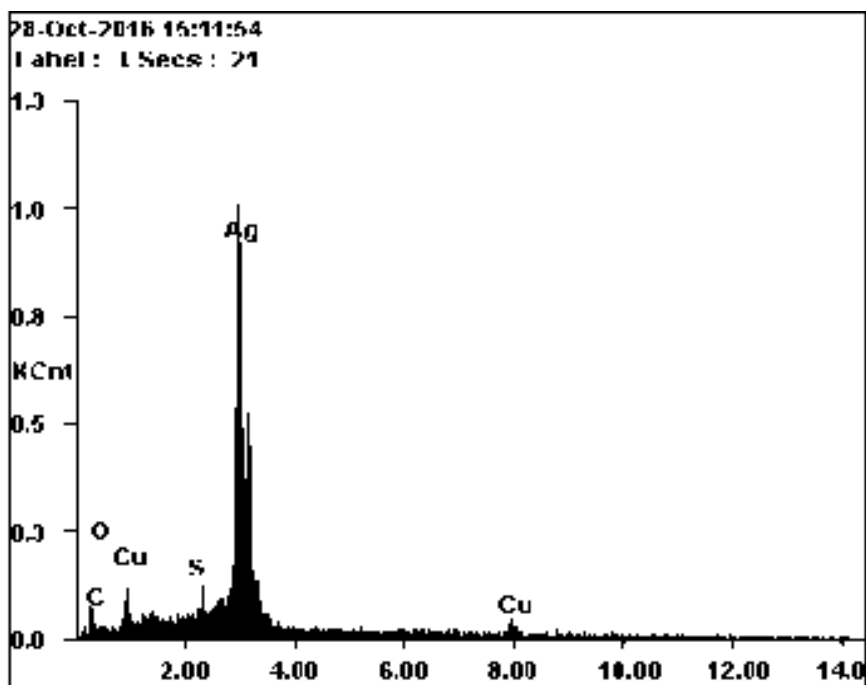
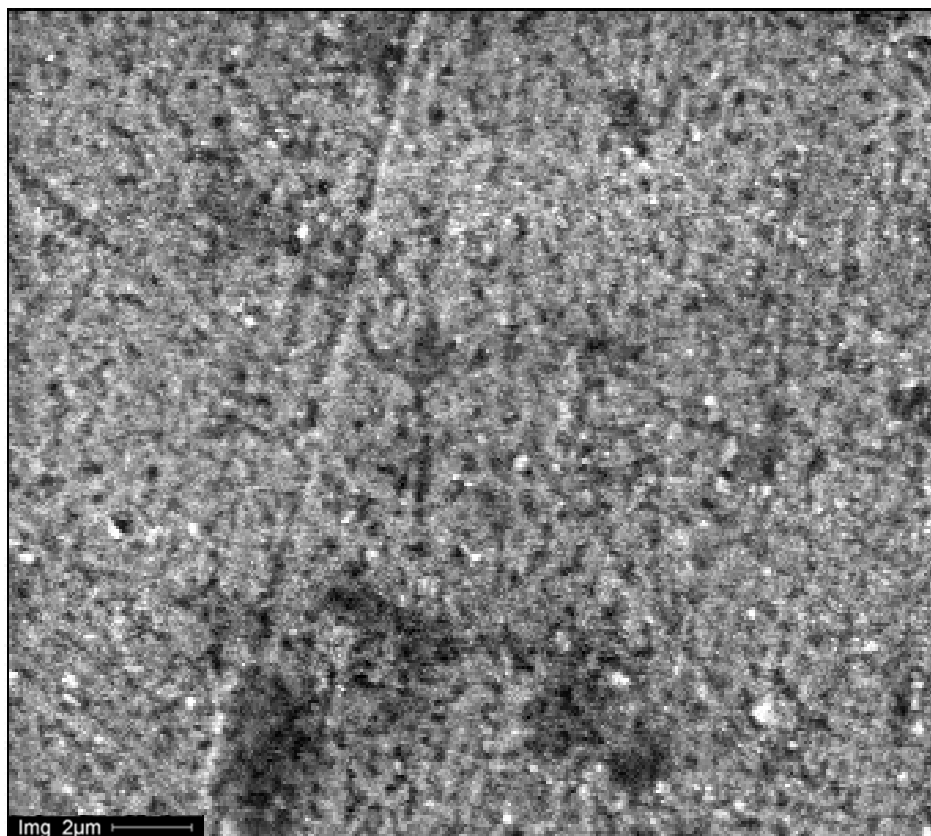
จากนั้นนำชิ้นงานโลหะเงินบริสุทธิ์และเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านกระบวนการอะโนไดซ์ ไปวิเคราะห์เพิ่มเติมด้วยเทคนิค EDS ทำให้ทราบธาตุที่เกิดขึ้น ขณะทำการอะโนไดซ์ ดังนั้นอัตราความเข้มข้นกรดเวลา และกำลังไฟที่ใช้ในการทำอะโนไดซ์ที่ต่างกัน จึงทำให้เกิดเลี้ยวเบนต่างกัน เพราะขนาดของอนุภาคไม่เท่ากัน เมื่อแสงตกกระทบจะเกิดการกระเจิงแสงต่างกัน จึงทำให้มองเห็นสีต่างกัน แสดงดังตารางที่ 4.1-4.5 และตารางที่ 4.6- 4.10

จากการวิเคราะห์ ด้วยเทคนิค EDS ที่ผิวของการอะโนไดซ์โลหะเงินบริสุทธิ์และเงินสเตอร์ลิงพบว่าที่ผิวมีปริมาณธาตุซัลเฟอร์ (S) ไม่เท่ากันในแต่ละอัตราส่วน แสดงดังรูปที่ 4.8-4.12



<i>Element</i>	<i>Wt%</i>
<i>S</i>	02.31
<i>Ag</i>	96.43
<i>Cu</i>	01.26

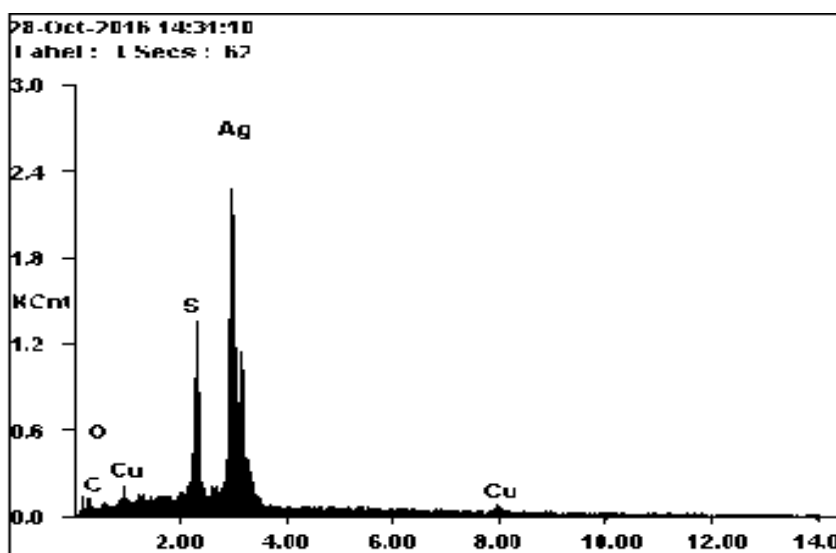
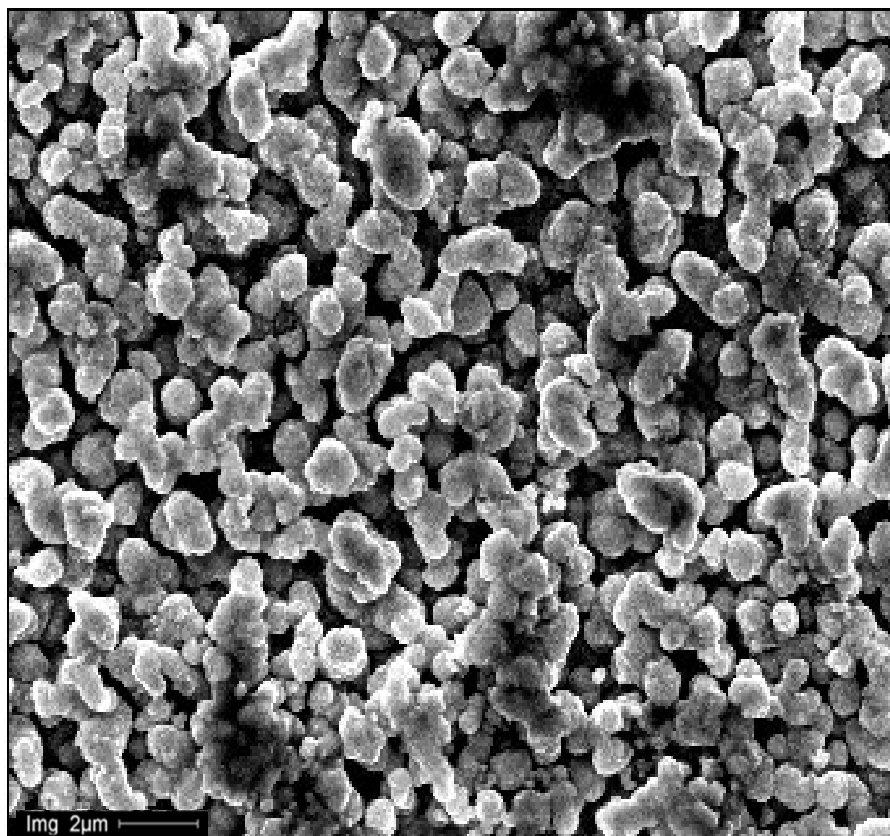
รูปที่ 4.8 ปริมาณธาตุหลังกระบวนการอะโนไดซ์โลหะเงินบริสุทธิ์ที่อัตราส่วน 1:2 โดยน้ำหนัก เวลา 1 วินาที กำลังไฟ 3 โวลต์



<i>Element</i>	<i>Wt%</i>
<i>S</i>	02.26
<i>Ag</i>	96.28
<i>Cu</i>	01.46

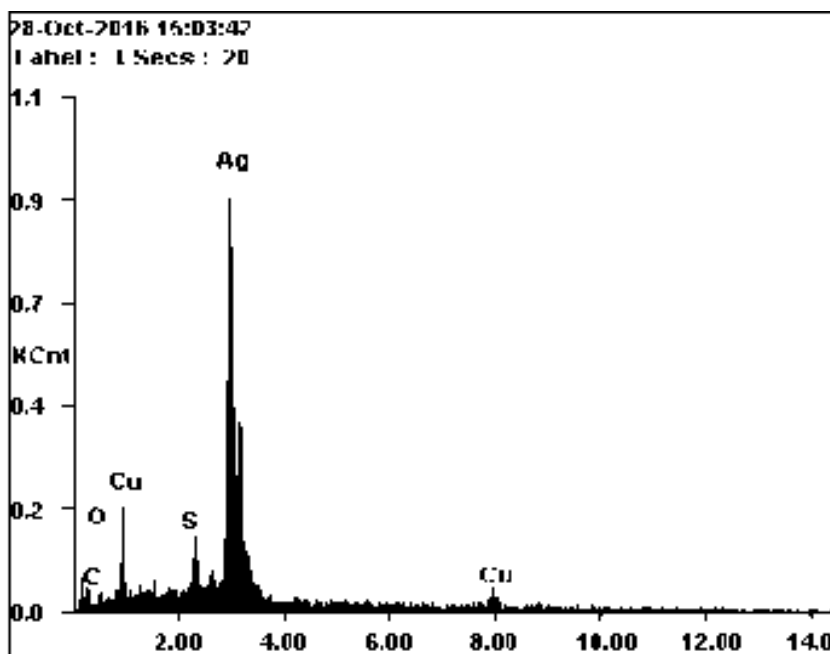
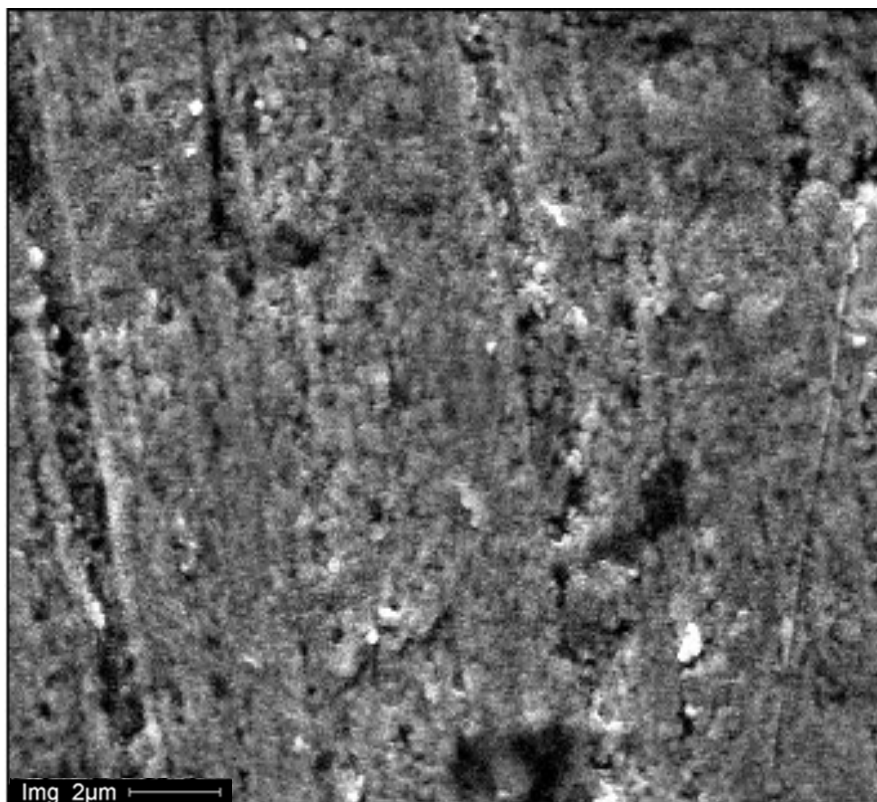
รูปที่ 4.9 ปริมาณธาตุหลังกระบวนการอะโนไดซ์โลหะเงินบริสุทธิ์ที่อัตราส่วน 1:3 โดยน้ำหนัก เวลา 1 วินาที แรงเคลื่อนไฟฟ้า 5 โวลต์





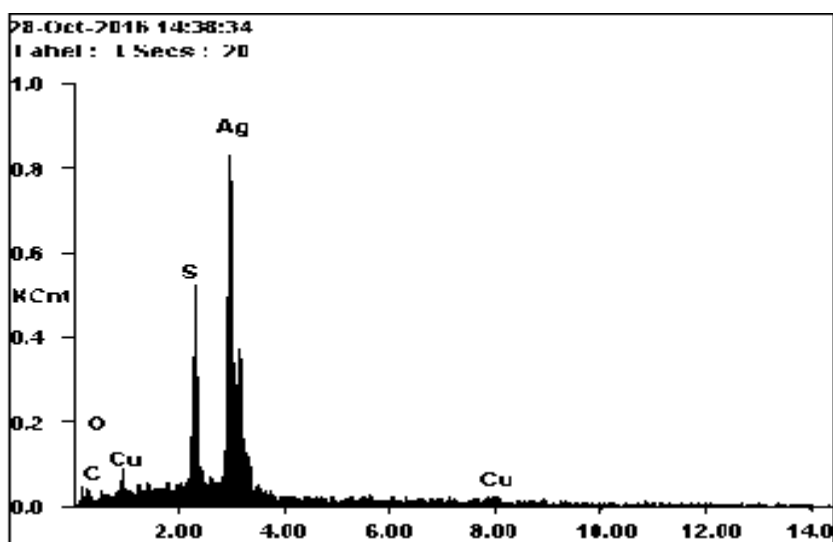
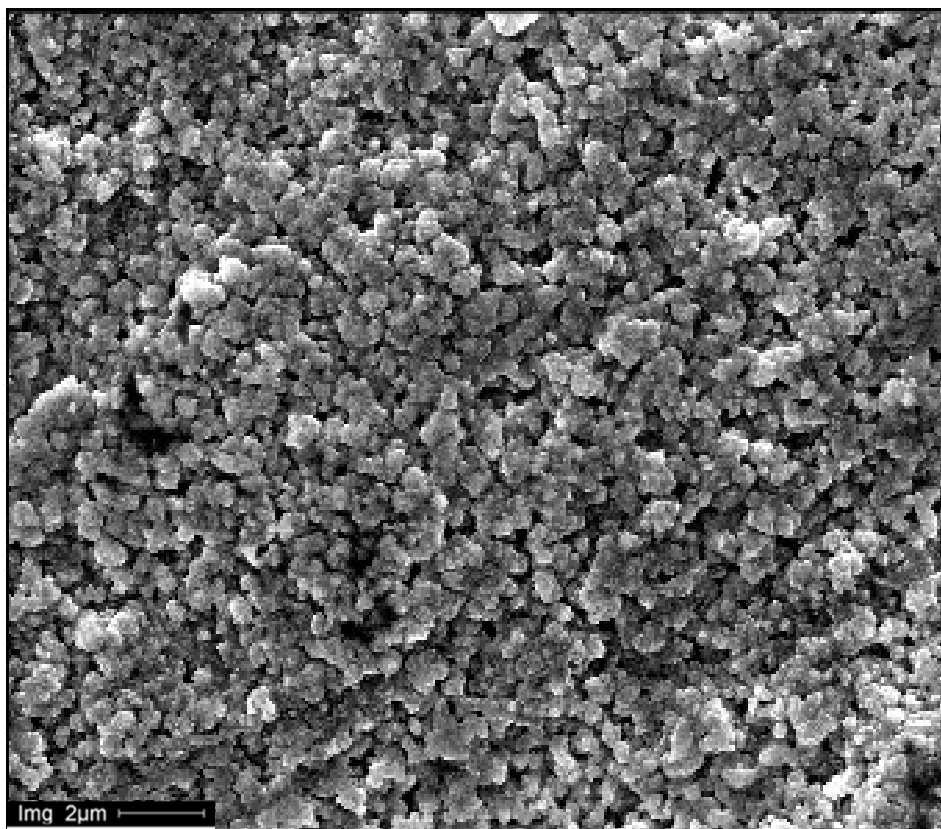
<i>Element</i>	<i>Wt%</i>
<i>S</i>	11.77
<i>Ag</i>	86.93
<i>Cu</i>	01.30

รูปที่ 4.10 ปริมาณธาตุหลังกระบวนการอะโนไดซ์โลหะเงินบริสุทธิ์ที่อัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก เวลา 5 วินาที กำลังไฟ 10 โวลต์



<i>Element</i>	<i>Wt%</i>
<i>S</i>	04.66
<i>Ag</i>	86.38
<i>Cu</i>	8.96

รูปที่ 4.11 ปริมาณธาตุหลังกระบวนการอะโนไดซ์โลหะเงินสเตอร์ลิงที่อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก เวลา 15 วินาที กำลังไฟ 3 โวลต์



<i>Element</i>	<i>Wt%</i>
<i>S</i>	12.26
<i>Ag</i>	79.13
<i>Cu</i>	08.61

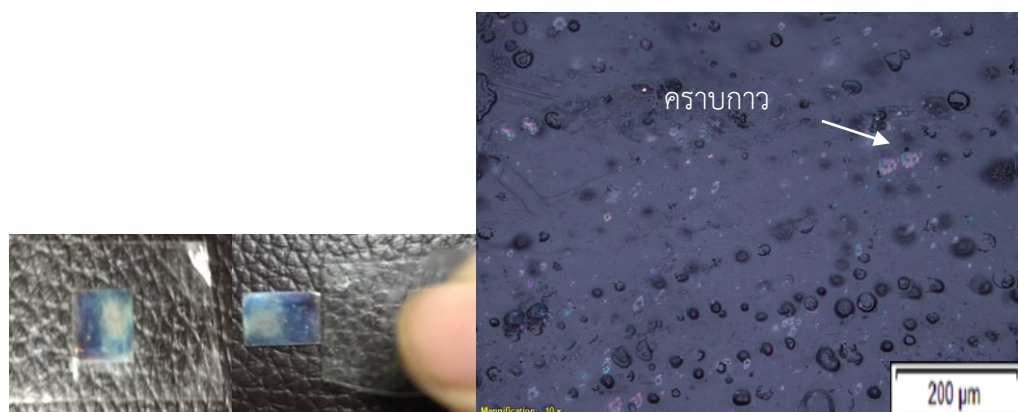
รูปที่ 4.12 ปริมาณธาตุหลังกระบวนการอะโนไดซ์โลหะเงินสเตอร์ลิงที่อัตราส่วน 3:1 โดยน้ำหนัก เวลา 5 วินาที กำลังไฟ 10 โวลต์ วิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS

จากการตรวจสอบปริมาณธาตุซัลเฟอร์ (S) ในชิ้นงานโลหะเงินบริสุทธิ์และโลหะเงินสเตอร์ลิง ที่ผ่านการอะโนไดซ์ด้วยซัลเฟอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วนต่างๆ ด้วยเทคนิค EDS พบว่า ชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นเป็นผลมากจากการเกิดปฏิกิริยาของซัลเฟอร์ (S) ที่ก่อตัวเป็นอนุภาคและมีขนาดใหญ่ขึ้น ตามกำลังไฟ และเวลา ที่สูงขึ้น โดยที่ผิวของโลหะเงินบริสุทธิ์เกิดเป็นชั้นฟิล์มของ  $\text{Ag}_2\text{S}$  ส่วนที่ผิวของโลหะเงินสเตอร์ลิง มีการเกิดทั้ง  $\text{Ag}_2\text{S}$  และ  $\text{Cu}_2\text{S}$  (สมนึก วัฒนศรีกุล, 2547 [online]) เนื่องจากมีองค์ประกอบของทองแดงผสมอยู่ในเงินสเตอร์ลิง โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังหัวข้อที่ 2.3

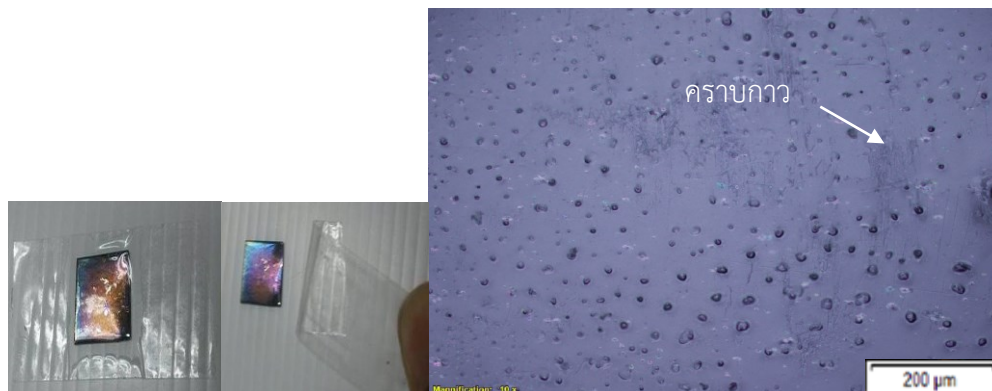
เมื่อใช้เวลาและกำลังไฟในการทำอะโนไดซ์เท่ากัน พบว่าขนาดของอนุภาคไม่เท่ากัน คือ ในอัตราส่วนที่ 2:1 โดยน้ำหนัก มีขนาดใหญ่ของอนุภาคที่ใหญ่กว่าอัตราส่วนที่ 3:1 โดยน้ำหนัก แต่ในอัตราส่วนที่ 3:1 รูพรุนมีการจัดเรียงตัวหนาแน่นและสม่ำเสมอกว่าอัตราส่วนที่ 2:1 เนื่องจากส่วนผสมและความเข้มข้นกรดในแต่ละอัตราส่วนขนาดของรูพรุนจะต่างกัน เมื่อใช้เวลาในการทำอะโนไดซ์มากขึ้นจะทำให้รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่เมื่อรูพรุนมีขนาดใหญ่ที่สุดจนไม่สามารถเพิ่มขึ้นได้อีก เมื่อเพิ่มเวลาจะทำให้รูพรุนจัดเรียงตัวเป็นระเบียบและสม่ำเสมอมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.5 กับ 4.7

#### 4.3 การทดสอบความคงทนของสี

จากการทดลองได้ทำการเลือกชิ้นงานที่ผ่านการอะโนไดซ์ในซัลเฟอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ไปทดสอบความคงทนของสีโดยใช้เทปใสลอกออก แล้วสังเกตสีที่ติดออกมากับเทปใสโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 20 เท่า ตรวจสอบพบว่าไม่มีสีติดที่เทปใส แสดงว่าสีที่ติดอยู่บนชิ้นงานมีความคงทน ไม่หลุดลอกง่าย โดยเลือกชิ้นงานที่ใช้ทดสอบมี 3 ตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 4.34 – 4.36



รูปที่ 4.13 โลหะเงินสเตอร์ลิงในอัตราส่วน 1:1 เวลา 15 วินาที กำลังไฟ 3 โวลต์



รูปที่ 4.14 โลหะเงินสเตอร์ลิงในอัตราส่วน 1:2 เวลา 1 วินาที กำลังไฟ 3 โวลต์



รูปที่ 4.15 โลหะเงินบริสุทธิ์ในอัตราส่วน 1:3 เวลา 3 วินาที กำลังไฟ 10 โวลต์

## บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินโครงการ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากทำให้เกิดสีที่ผิวของโลหะเงินบริสุทธิ์และเงินสเตอร์ลิง ด้วยกระบวนการอะโนไดซ์ โดยใช้สารละลายซัลเฟอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1:1 1:2 1:3 2:1 และ 3:1 ตามลำดับ กำลังไฟที่ 3 5 และ 10 โวลต์ เวลา 1 3 และ 5 วินาที ของโลหะเงินบริสุทธิ์ และ 5 10 และ 15 วินาที ของโลหะเงินสเตอร์ลิง ณ อุณหภูมิห้อง ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. สภาวะอะโนไดซ์ที่เหมาะสมสำหรับการทำเคลือบสีบนผิวชิ้นงานโลหะเงินและโลหะเงินสเตอร์ลิงด้วยกระบวนการอะโนไดซ์เซชัน คือ การอะโนไดซ์ในซัลเฟอร์ปริมาณ 15 กรัม และโซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 15 กรัม เวลา 15 วินาที โดยใช้กำลังไฟฟ้า 3 โวลต์ ณ อุณหภูมิห้อง

2. จากการตรวจสอบผิวชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง พบว่าสีเคลือบที่เกิดบนชิ้นงานมีลักษณะที่ต่างกันโลหะเงินบริสุทธิ์และโลหะเงินสเตอร์ลิง เช่นความเข้มข้นในอัตราส่วนที่ 1:3 เวลา 5 วินาที กำลังไฟ 3 โวลต์ พบว่าผิวของชิ้นงานโลหะเงินบริสุทธิ์มีการเคลือบสี ม่วง ฟ้ำ เหลือง ส้ม ส่วนผิวของชิ้นงานโลหะเงินสเตอร์ลิงเกิดคาบไหม้จนเป็นสีดำ จากการทดลองในความเข้มข้นสารละลาย เวลา และกำลังไฟฟ้าเดียวกัน พบลักษณะการเคลือบสีที่แตกต่างกัน เนื่องมาจากส่วนผสมของโลหะที่แตกต่างกัน

3. ตรวจสอบผิวชิ้นงานด้วยกล้อง SEM พบว่าความเข้มข้นสารละลาย เวลา และกำลังไฟที่ต่างกัน มีผลต่อขนาดรูพรุนและอนุภาคการจัดเรียงตัวของสี คือความเข้มข้นของสารละลายมีผลต่อขนาดของอนุภาค ถ้าความเข้มข้นของสารละลายมากจะทำให้ขนาดของอนุภาคใหญ่ขึ้น เวลาที่มีผลต่อการจัดเรียงตัวของรูพรุนถ้าเวลาในการทำอะโนไดซ์มากจะทำให้ รูพรุนมีขนาดใหญ่ กำลังไฟฟ้ามี่ผลต่อความหนาของรูพรุน ถ้าใช้กำลังไฟฟ้ามักทำให้รูพรุนมีการเรียงตัวที่หนาแน่นมาก ดังนั้นการทำอะโนไดซ์ในอัตราส่วนที่เหมาะสมจึงเกิดการเคลือบสีขึ้น

4. จากการตรวจสอบธาตุด้วยเทคนิค EDS พบว่าธาตุที่ตรวจพบบนชิ้นงาน ได้แก่ C, O, S, Ag, Cu ในทุกเงื่อนไขที่ทำการทดลอง

5. สีที่ได้จากกระบวนการอะโนไดซ์ มีความคงทน ไม่หลุดลอกง่าย

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ถ้าหากมีการตรวจสอบชิ้นงานด้วยเครื่อง SEM ชิ้นงานที่ใช้ควรมีขนาดไม่เกิน 1x1 เซนติเมตร
2. ในการตรวจสอบผิวครั้งต่อไป ควรมีการตรวจสอบผิวด้วยเครื่อง UV-VIS-NIR Spectrophotometer เพื่อวัดปริมาณสีที่เกิดบนชิ้นงาน

### 5.3 ผลผลิต (Output)

#### 5.3.1 สร้างสรรค์ชิ้นงานเครื่องประดับเงินบริสุทธิ์ และเงินสเตอร์ลิง

จากผลการทดลองกระบวนการอะโนไดซ์บนผิวของโลหะเงินบริสุทธิ์และโลหะเงินสเตอร์ลิง ที่มีอัตราส่วนความเข้มข้นซัลเฟอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1:1 1:2 1:3 2:1 และ 3:1 ตามลำดับ



กำลังไฟที่ 3 5 และ 10 โวลต์ เวลา 1 3 และ 5 วินาที ของโลหะเงินบริสุทธิ์ และ 5 10 และ 15 วินาที ของโลหะเงินสเตอร์ลิง ณ อุณหภูมิห้อง ได้เลือกสภาวะของการเกิดการเคลือบสีที่ผิวของโลหะทั้ง 2 แสดงดังรูปที่ 5.1-5.3



รูปที่ 5.1 เครื่องประดับที่ผ่านการอะโนไดซ์ในซัลเฟอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์  
อัตราส่วนที่ 1:2 เวลา 1 วินาที กำลังไฟ 3 โวลต์





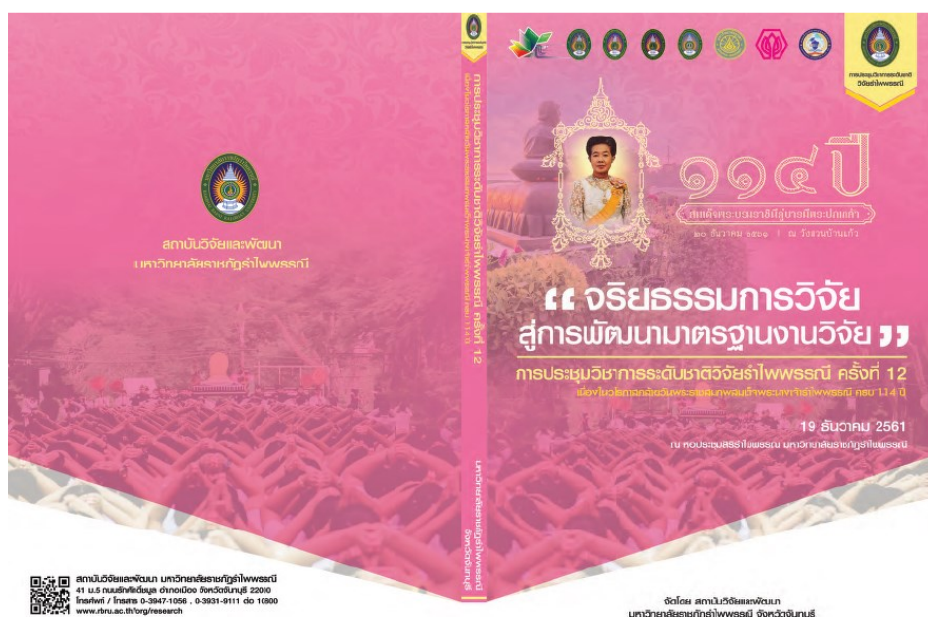
รูปที่ 5.2 เครื่องประดับที่ผ่านการอะโนไดซ์ในซัลเฟอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์  
อัตราส่วนที่ 1:1 เวลา 15 วินาที กำลังไฟ 3 โวลต์





รูปที่ 5.3 เครื่องประดับที่ผ่านการอะโนไดซ์ในซิลเฟอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์

### 5.3.2 ผลงานตีพิมพ์





SRI AYUTTHAYA CLUSTER  
RAJABHAT UNIVERSITY



งานประชุมวิชาการระดับชาติวิจัยรำไพพรรณี ครั้งที่ 12  
เนื่องในโอกาสคล้ายวันพระราชสมภพสมเด็จพระนางเจ้ารำไพพรรณี ครบ 114 ปี  
วันที่ 19 ธันวาคม 2561 ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

## การปรับสภาพผิวโลหะเงินบริสุทธิ์ให้เกิดสีโดยวิธีการอะโนไดซ์ Color Variation on Pure Silver Surface by Anodization

รุ่งโรจน์ ยิ่งสง่า, ชมพรรณ จันทรรพร  
คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี

### บทคัดย่อ

กระบวนการอะโนไดซ์ เป็นการทำให้โลหะเงินชั้นงานโลหะเงิน ใช้เทคนิคทางไฟฟ้าเคมีเพื่อให้เกิดฟิล์มบนผิวชั้นงาน ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นบนชั้นงานโลหะเงิน ที่กำลังไฟฟ้า เวลาและความเข้มข้นสารละลายซัลเฟอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างกัน การเกิดฟิล์มบนผิวโลหะเงินสามารถตรวจสอบได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง ลักษณะการเรียงตัวของอนุภาคสีที่ผิวของชั้นงานตรวจสอบได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพร้อมวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS และมีการทดสอบความคงทนสีผิวของชั้นงาน ด้วยการติดเทปใสบนผิวชั้นงานแล้วทำการลอกออกเพื่อดูสีที่ติดออกมา

ผลจากการทดลองพบว่า ลักษณะของชั้นฟิล์มที่เคลือบอยู่บนผิวชั้นงาน เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ทั้งสองชนิด พบว่า ผิวของชั้นงานเกิดการเคลือบสีและมีอนุภาคการเรียงตัวสีแตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นสารละลายเวลาและกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทำอะโนไดซ์

**คำสำคัญ:** โลหะเงิน, โลหะเงินสเตอร์ลิง, อะโนไดซ์เงิน

### Abstract

An electrochemical technique that gives color glimpse or variation on the surface of pure silver is called anodization. The study of anodization process would be used for silver anodizing in order to create film on its surface with different electromotive force; reaction time and solution concentration of sulfur and sodium hydroxide solutions. The glimpse could be examined by an optical microscope. Particle arrangement of color on the silver surface could be examined by scanning electron microscope (SEM). The element was analyzed using EDS technique.

The study showed that when examined the layer of film coating on the silver surface with both types of microscopes, there were color glimpses on the surface. The arrangement of color particles was different depending on the solution concentration, time and electromotive force of anodization.

**Keywords:** silver, Sterling silver, anodization



งานประชุมวิชาการระดับชาติวิจัยรำไพพรรณี ครั้งที่ 12  
เนื่องในวโรกาสคล้ายวันพระราชสมภพสมเด็จพระนางเจ้ารำไพพรรณี ครบ 114 ปี  
วันที่ 19 ธันวาคม 2561 ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

## บทนำ

การสำรวจข้อมูลในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องประดับ พบว่า การชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมี หรือกระบวนการอะโนไดซ์ มีความสำคัญและกำลังได้รับความสนใจมากในปัจจุบัน เนื่องจากสมบัติของผิวเคลือบออกไซด์ที่ถูกสร้างขึ้นมาเคลือบบนผิวโลหะนั้นสามารถป้องกันการผุกร่อนของผิวโลหะ มีความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีในสิ่งแวดล้อมต่างๆ ที่มีผลต่อการกัดกร่อนและยึดเกาะกับชิ้นงานโลหะได้ดี ส่วนมากใช้เพื่อต้านทานการสึกหรอสำหรับเครื่องบินและงานวิศวกรรมทั่วไป

การอะโนไดซ์เป็นปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีประเภทหนึ่ง โดยการทำให้ผิวโลหะเปลี่ยนสภาพไปเป็นผิวโลหะออกไซด์ของโลหะนั้นๆ โดยให้ชิ้นงานที่ต้องการชุบเคลือบผิวออกไซด์เป็นอะโนดหรือขั้วบวก และสารละลายเป็นแคโทดหรือขั้วลบ จากรายงานการศึกษาพบว่า ผิวเคลือบทั่วไปประกอบด้วยชั้น 2 ชั้น คือ ชั้นแรกเป็นส่วนที่อัดแน่นติดกับผิวโลหะไม่มีรูพรุน เรียกว่าชั้นเยื่อแก้ว ส่วนชั้นนอกสุดที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของชั้นออกไซด์กับสารละลาย เรียกว่าชั้นรูพรุน มีความหนามากกว่าชั้นเยื่อแก้วมาก เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน พบว่าโครงสร้างชั้นนี้เป็นรูปทรงกระบอกหกเหลี่ยม (Columnar structure) ภายในประกอบด้วยรูพรุน พบว่าที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากการที่สารอิเล็กโตรไลต์มาสัมผัสตลอดเวลาในขณะที่ชุบ (สมร ทิรัฐประดิษฐ์กุล, 2537)

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการชุบเคลือบผิวของโลหะเงินบริสุทธิ์ให้เกิดสี ด้วยกระบวนการอะโนไดซ์ โดยการศึกษาสภาวะของกระบวนการชุบเคลือบผิวนี้ มีตัวแปรที่ใช้ 3 ตัวแปร ได้แก่ ความเข้มข้นของอัตราส่วนซัลเฟอร์กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ เวลา และกำลังไฟฟ้า ที่มีผลต่อการเคลือบสีที่ผิวของโลหะเงินบริสุทธิ์

## วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาสภาวะการทำอะโนไดซ์บนโลหะเงินบริสุทธิ์ โดยมีความเข้มข้นของซัลเฟอร์กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ เวลา และกำลังไฟฟ้าต่างๆ ที่มีผลต่อการเคลือบสีที่ผิวของโลหะเงินบริสุทธิ์

## วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองเพื่อทำการเปรียบเทียบการเกิดสีด้วยกระบวนการอะโนไดซ์ โดยมีขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย ดังนี้ 1) ทำการหลอมโลหะเงินบริสุทธิ์ ด้วยหัวเป่าไฟในเบ้าเซรามิก 2) ทำการรีดโลหะด้วยเครื่องรีด 3) ตัดแผ่นโลหะให้มีขนาด 20\*20\*0.7 มิลลิเมตร (กว้าง\*ยาว\*หนา) 4) ทำความสะอาดแผ่นโลหะด้วยเครื่องอัลตราโซนิค 5) เป่าชิ้นงานให้แห้ง 6) ทำการอะโนไดซ์โลหะเงินในสารละลายซัลเฟอร์กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ แสดงดังรูปที่ 1 ที่มีความเข้มข้น 1:1, 1:2, 1:3, 2:1, 3:1 โดยปริมาตร ใช้กระแสไฟฟ้า 3, 5 และ 10 โวลต์ เวลา 1,3 และ 5 วินาที



รูปที่ 1 สารละลายซัลเฟอร์ (S) กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีอัตราส่วนต่างๆ โดยน้ำหนัก

7) ทำการตรวจสอบผิวชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และบันทึกผล



งานประชุมวิชาการระดับชาติวิจัยรำไพพรรณี ครั้งที่ 12  
 เนื่องในโอกาสคล้ายวันพระราชสมภพสมเด็จพระนางเจ้ารำไพพรรณี ครบ 114 ปี  
 วันที่ 19 ธันวาคม 2561 ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

**ผลการวิจัย**

จากการทดลอง พบว่าเมื่อทำการอะโนไดซ์ที่ผิวโลหะเงินบริสุทธิ์ ในอัตราส่วนของสารละลายซัลเฟอร์ (S) กับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่อัตราส่วนร้อยละ 1:1, 1:2, 1:3, 2:1 และ 3:1 โดยน้ำหนัก โดยใช้กระแสไฟฟ้า 3, 5 และ 10 โวลต์ เวลา 1, 3 และ 5 วินาที พบว่าการเกิดสีที่ผิวของชิ้นงานสามารถเกิดได้ตั้งแต่ 1 วินาทีแรก ของการใช้กระแสไฟฟ้า โดยที่อัตราส่วนร้อยละ 1:1 โดยน้ำหนัก สีที่เกิดขึ้นที่ผิวมีลักษณะคล้ายกันของทุกสภาวะ คือมีสีเหลืองปนเหลือง โดยเห็นได้ชัดเจนที่สุด ที่เวลา 5 วินาที แสดงดังรูปที่ 2



ก. กำลังไฟ 3 โวลต์



ข. กำลังไฟ 5 โวลต์



ค. กำลังไฟ 10 โวลต์

**รูปที่ 2** ลักษณะสีที่ผิวหลังทำการอะโนไดซ์ที่อัตราส่วนร้อยละ 1:1 โดยน้ำหนัก เวลา 5 วินาที

เมื่อปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของสารละลายเป็นร้อยละ 1:2 โดยน้ำหนัก พบว่า ทุกเวลาของการอะโนไดซ์ มีสีเกิดขึ้นที่ผิวของแผ่นโลหะเงิน เมื่อใช้เวลา 1 วินาที ที่กระแสไฟฟ้าเดียวกัน จะมีการเหลืองของโตนสีฟ้าที่มากกว่าโตนสีเหลือง แสดงดังรูปที่ 3



ก. กำลังไฟ 3 โวลต์



ข. กำลังไฟ 5 โวลต์



ค. กำลังไฟ 10 โวลต์

**รูปที่ 3** การเหลืองสีของสารละลายเป็นร้อยละ 1:2 โดยน้ำหนัก ที่เวลา 1 วินาที

แต่เมื่อเวลาผ่านไป 5 วินาที การเหลืองของโตนสีฟ้าจะลดลง และมีการเหลืองของโตนสีม่วงปนโตนสีเหลือง แสดงดังรูปที่ 4



ก. กำลังไฟ 3 โวลต์



ข. กำลังไฟ 5 โวลต์



ค. กำลังไฟ 10 โวลต์

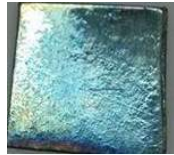
**รูปที่ 4** ลักษณะสีที่ผิวหลังทำการอะโนไดซ์ที่อัตราส่วน 1:2 โดยน้ำหนัก ที่เวลา 5 วินาที





งานประชุมวิชาการระดับชาติวิจัยรำไพพรรณี ครั้งที่ 12  
 เนื่องในโอกาสคล้ายวันพระราชสมภพสมเด็จพระนางเจ้ารำไพพรรณี ครบ 114 ปี  
 วันที่ 19 ธันวาคม 2561 ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสมของสารละลายเป็นร้อยละ 1:3 โดยน้ำหนัก พบว่าทุกเวลาของการอะโนไดซ์ มีการเคลือบสีที่ผิวของแผ่นโลหะเงินคล้ายกับอัตราส่วนร้อยละ 1:2 โดยน้ำหนัก แต่มีความเข้มของสีที่มากกว่า โดยที่เวลา 1 วินาที ทุกกำลังไฟฟ้า มีการเคลือบของโตนสีน้ำเงินปนสีม่วง แสดงดังรูปที่ 5



ก. กำลังไฟ 3 โวลต์



ข. กำลังไฟ 5 โวลต์



ค. กำลังไฟ 10 โวลต์

รูปที่ 5 ลักษณะสีที่ผิวหลังทำการอะโนไดซ์ที่อัตราส่วนร้อยละ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่เวลา 1 วินาที

แต่เมื่อเวลาผ่านไป 5 วินาที การเคลือบของโตนสีน้ำเงินปนสีม่วงลดลง แต่มีการเคลือบของโตนสีม่วงปนโตนสีเหลือง และมีความเข้มของสีที่มากกว่าของอัตราส่วนที่ 1:2 แสดงดังรูปที่ 6



ก. กำลังไฟ 3 โวลต์



ข. กำลังไฟ 5 โวลต์



ค. กำลังไฟ 10 โวลต์

รูปที่ 6 ลักษณะสีที่ผิวหลังทำการอะโนไดซ์ที่อัตราส่วนร้อยละ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่เวลา 5 วินาที

เมื่อปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของสารละลายเป็นร้อยละ 2:1 และ 3:1 โดยน้ำหนัก พบว่าแผ่นโลหะเงินของทั้ง 2 อัตราส่วน ไม่เกิดการเคลือบสี โดยเป็นคราบสีดำทั่วทั้งแผ่น ซึ่งเกิดขึ้นในลักษณะเดียวกันของทุกกระแสไฟฟ้าและเวลา แสดงดังรูปที่ 7(ก) และ(ข)



ก. กำลังไฟ 3 โวลต์

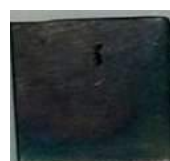


ข. กำลังไฟ 5 โวลต์



ค. กำลังไฟ 10 โวลต์

รูปที่ 7 (ก) ลักษณะสีที่ผิวหลังทำการอะโนไดซ์ที่อัตราส่วนร้อยละ 2:1 โดยน้ำหนัก เวลา 1 วินาที



ก. กำลังไฟ 3 โวลต์



ข. กำลังไฟ 5 โวลต์



ค. กำลังไฟ 10 โวลต์

รูปที่ 7(ข) ลักษณะสีที่ผิวหลังทำการอะโนไดซ์ที่อัตราส่วนร้อยละ 3:1 โดยน้ำหนัก เวลา 1 วินาที



งานประชุมวิชาการระดับชาติวิจัยรำไพพรรณี ครั้งที่ 12  
 เนื่องในโอกาสคล้ายวันพระราชสมภพสมเด็จพระนางเจ้ารำไพพรรณี ครบ 114 ปี  
 วันที่ 19 ธันวาคม 2561 ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

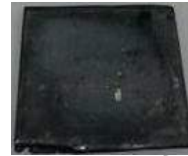
แต่เมื่อใช้กำลังไฟที่ 10 โวลต์ ของทุกเวลา ที่อัตราส่วน 3:1 คราบสีดำจะมีความนูนจะมีความหนาและสามารถ  
 หลุดร่อนเป็นแผ่นได้ ซึ่งเกิดขึ้นได้ตั้งแต่วินาทีที่ 1 แสดงดังรูปที่ 8



ก. 1 วินาที



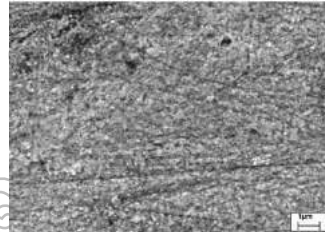
ข. 2 วินาที



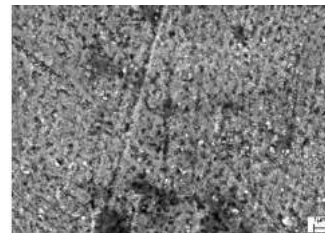
ค. 3 วินาที

รูปที่ 8 ลักษณะสีที่ผิวที่หลุดร่อน หลังทำการอะโนไดซ์ที่อัตราส่วนร้อยละ 3:1 โดยน้ำหนัก กระแสไฟฟ้า 10 โวลต์

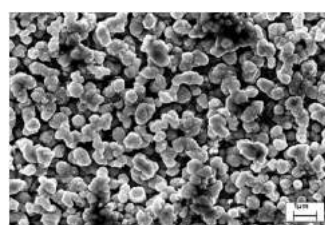
จากนั้นทำการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของโลหะเงินบริสุทธิ์ที่ผ่านกระบวนการอะโนไดซ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์  
 แบบส่องกราด (SEM) โดยเลือกชิ้นงานที่มีการเคลือบที่หลากสี เหลือบสีเดียว และไม่เคลือบสี เพื่อเปรียบเทียบลักษณะ  
 ของพื้นผิว แสดงดังรูปที่ 9



อัตราส่วนร้อยละ 1:2 โดยน้ำหนัก เวลา 1 วินาที กระแสไฟฟ้า 3 โวลต์



อัตราส่วนร้อยละ 1:3 โดยน้ำหนัก เวลา 1 วินาที กระแสไฟฟ้า 5 โวลต์



อัตราส่วนร้อยละ 2:1 โดยน้ำหนัก เวลา 5 วินาที กระแสไฟฟ้า 10

รูปที่ 9 ลักษณะพื้นผิวของโลหะเงินบริสุทธิ์ที่ผ่านกระบวนการอะโนไดซ์



งานประชุมวิชาการระดับชาติวิจัยรำไพพรรณี ครั้งที่ 12  
เนื่องในวโรกาสคล้ายวันพระราชสมภพสมเด็จพระนางเจ้ารำไพพรรณี ครบ 114 ปี  
วันที่ 19 ธันวาคม 2561 ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

จากการวิเคราะห์ลักษณะของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า พื้นผิวของโลหะเงินบริสุทธิ์มีลักษณะเป็นอนุภาคที่มีขนาดใกล้เคียงกัน และก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มที่ผิวอย่างสม่ำเสมอ โดยที่อัตราส่วนร้อยละ 1:1 โดยน้ำหนักของทุกเวลา กระแสไฟฟ้า จะเกิดอนุภาคและก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มที่คล้ายกับอัตราส่วนร้อยละ 1:2 และ 1:3 โดยน้ำหนัก ซึ่งจะมีการเคลือบหลากสีที่ผิวของโลหะเงินบริสุทธิ์ แต่ที่อัตราส่วนร้อยละ 2:1 และ 3:1 โดยน้ำหนัก พบว่าอนุภาคก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มที่ผิวอย่างสม่ำเสมอแต่มีขนาดของอนุภาคที่ใหญ่กว่ามาก และชั้นฟิล์มมีความหนา ส่งผลให้ผิวของโลหะเงินเป็นสีดำ จึงไม่มีการเคลือบสีที่ผิวโลหะเงิน และที่อัตราส่วนร้อยละ 3:1 โดยน้ำหนัก กระแสไฟฟ้า 10 โวลต์ ของทุกเวลา ชั้นฟิล์มจะมีความหนาที่สุดและหลุดเป็นแผ่น สอดคล้องกับงานวิจัยของ B. Karagianni และคณะ และ T. Takenaka, H. Habazaki และคณะ พบว่า ความเข้มข้นของสารละลายและเวลาเพิ่มขึ้นมีผลให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนกระแสไฟฟ้าจะกระตุ้นให้เกิดชั้นฟิล์มมีความหนาซึ่งกระแสไฟฟ้าที่มากขึ้น ชั้นฟิล์มจะมีความหนาเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเป็นชั้นฟิล์มของซัลไฟด์ แต่เมื่อทำการอะโนไดซ์ในสารละลายที่มีอัตราส่วน เวลา และใช้กระแสไฟฟ้าที่ต่ำ จะเกิดชั้นฟิล์มซัลไฟด์ที่บางกว่า อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า จึงส่งผลให้ผิวโลหะเงินมีการกระเจิงของแสงได้ดี จึงเห็นการเคลือบสีได้ชัดเจนกว่า

### สรุปผลและอภิปรายผล

1. การอะโนไดซ์ที่เวลา และกำลังไฟฟ้าที่เท่ากัน ที่อัตราส่วนร้อยละ 1:1 โดยน้ำหนัก มีการเคลือบสีโทนเหลือง และมีการเคลือบสีที่ชัดเจนที่เวลา 5 วินาที ที่อัตราส่วนร้อยละ 1:2 โดยน้ำหนัก ที่เวลา 1 วินาที การเคลือบของโทนสีฟ้าที่มากกว่าโทนสีเหลือง เมื่อเวลามากขึ้น การเคลือบของโทนสีฟ้าจะลดลง และมีการเคลือบของโทนสีม่วงปนโทนสีเหลืองที่อัตราส่วนร้อยละ 1:3 โดยน้ำหนัก มีการเคลือบของโทนสีน้ำเงินปนสีม่วง เมื่อเวลามากขึ้น จะมีการเคลือบของโทนสีม่วงปนโทนสีเหลือง แต่มีความเข้มกว่าอัตราส่วนที่ 1:2 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนร้อยละ 2:1 โดยน้ำหนักขอทุกกระแสไฟฟ้า และเวลา พบว่าไม่เกิดการเคลือบสี โดยเป็นคราบสีดำทั่วทั้งแผ่น แต่ที่อัตราส่วน 3:1 โดยน้ำหนัก ที่กำลังไฟฟ้า 10 โวลต์ คราบสีดำที่ผิวของโลหะเงินจะมีความหนาจนกระทั่งหลุดร่อนเป็นแผ่นได้ ซึ่งเกิดขึ้นได้ตั้งแต่ 1 วินาทีแรก

2. พื้นผิวชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการอะโนไดซ์ พื้นผิวมีชั้นฟิล์มเกิดขึ้น เป็นอนุภาคเรียงตัวกันอย่างสม่ำเสมอ เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย กำลังไฟฟ้า และเวลา เพิ่มขึ้น ขนาดของอนุภาคจะมีขนาดใหญ่และมีความหนาของชั้นฟิล์มมากกว่าความเข้มข้นของสารละลาย กำลังไฟฟ้า และเวลาที่น้อย โดยความเข้มข้นของสารละลาย และเวลา ส่งผลต่อขนาดของอนุภาค และกำลังไฟฟ้ามีผลต่อชั้นความหนาของฟิล์ม เมื่อชั้นฟิล์มมีความหนาและมีอนุภาคขนาดใหญ่ การเคลือบสีที่ผิวโลหะจะน้อยกว่าชั้นฟิล์มที่มีความบางและอนุภาคขนาดเล็ก เนื่องจากการแทรกสอดของแสงน้อยผ่านชั้นฟิล์มที่มีความหนาได้น้อยกว่าชั้นฟิล์มที่บาง

### ข้อเสนอแนะการวิจัย

1. ควรมีการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชั้นฟิล์มอะโนไดซ์
2. ควรทำการทดลองกับโลหะสเตอริงที่ขึ้นในการทำเครื่องประดับ
3. การเคลือบสีจะเห็นได้ชัดเมื่อชิ้นงานมีพื้นผิวที่เรียบหรือมีลวดลายของชิ้นงานที่น้อย

### เอกสารอ้างอิง

- สมร หิรัญประดิษฐ์กุล. (2537). การเตรียมและการศึกษาคุณสมบัติผิวเคลือบอะโนไดซ์แบบแข็งบน ผิวงอรับอะลูมิเนียม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- B. Karagianni & I. Tsangaraki-Kaplanoglou, (1996), *Plating & Surface Finishing*, 83 (9): 73.
- T. Takenaka, H. Habazaki & H. Konno, (2003), *Surf. Coat. Technol.*, 169-170, 155.

## รายงานสรุปการเงิน

เลขที่โครงการระบบบริหารงานวิจัย (NRMS 13 หลัก)...256109A1080069...สัญญาเลขที่ 219/2561  
โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)  
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 มหาวิทยาลัยบูรพา

ชื่อโครงการ การปรับปรุงสภาพผิวของโลหะเงินให้เกิดสีโดยวิธีการอะโนไดซ์

ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน .....ว่าที่ร้อยตรีรุ่งโรจน์ ยิ่งสง่า.....

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่.....1.....ตุลาคม 2560..... ถึงวันที่.....31 สิงหาคม 2562.....

ระยะเวลาดำเนินการ.....1.....ปี.....10.....เดือน ตั้งแต่วันที่.....1.....ตุลาคม 2560.....

### รายรับ

จำนวนเงินที่ได้รับ

งวดที่ 1 (50%)	112,500	บาท	เมื่อ วันที่	.....
งวดที่ 2 (40%)	90,000	บาท	เมื่อ วันที่	.....
งวดที่ 3 (10%)	22,500	บาท	เมื่อ วันที่	ไม่ได้เบิก
			รวม	225,000

### รายจ่าย

รายการ	งบประมาณที่ตั้งไว้	งบประมาณที่ใช้จริง	จำนวนเงินคงเหลือ/เกิน
1. ค่าวัสดุ	50,000	50,000	-
2. ค่าตอบแทน	20,000	20,000	-
4. ค่าใช้สอย	132,500	92,500	40,000
6. ค่าธรรมเนียมอุดหนุนสถาบัน	22,500	22,500	-
รวม	225,000	185,000	-

(ว่าที่ร้อยตรีรุ่งโรจน์ ยิ่งสง่า)

ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน



## รายการอ้างอิง

- การป้องกันการผุกร่อนโดยวิธีการอะโนไดซ์. (2550). วันที่ค้นข้อมูล 9 มีนาคม 2559, เข้าถึงได้จาก [http://my.dek-d.com/poo\\_pluplam/writer/viewlongc.php?id=353886&chapter=2](http://my.dek-d.com/poo_pluplam/writer/viewlongc.php?id=353886&chapter=2)
- การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า. (2559). วันที่ค้นข้อมูล 26 กุมภาพันธ์ 2559, เข้าถึงได้จาก [http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewbulletin/2319-%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%8A%E0%B8%B8%E0%B8%9A%E0%B9%82%E0%B8%A5%E0%B8%AB%E0%B8%B0%E0%B8%94%E0%B9%89%E0%B8%A7%E0%B8%A2%E0%B9%84%E0%B8%9F%E0%B9%89%E0%B8%B2+\(Electroplating\)?groupid=385](http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewbulletin/2319-%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%8A%E0%B8%B8%E0%B8%9A%E0%B9%82%E0%B8%A5%E0%B8%AB%E0%B8%B0%E0%B8%94%E0%B9%89%E0%B8%A7%E0%B8%A2%E0%B9%84%E0%B8%9F%E0%B9%89%E0%B8%B2+(Electroplating)?groupid=385)
- กล้องจุลทรรศน์แสง. (2559). วันที่ค้นข้อมูล 27 ตุลาคม 2559, เข้าถึงได้จาก <http://nbschoolscitool.tripod.com/microscope.htm>
- ค่าไตรสตีมูลัส XYZ และปริภูมิสี่ YXY และ  $L^*C^*H^*$ . (2559). วันที่ค้นข้อมูล 9 มีนาคม 2559, เข้าถึงได้จาก <http://alwayyours.blogspot.com/2013/07/xyz-yxy-lch.html>
- ความรู้เกี่ยวกับวิธีการชุบอะลูมิเนียมอะโนไดซ์. (2559). วันที่ค้นข้อมูล 26 กุมภาพันธ์ 2559, เข้าถึงได้จาก <http://wadsin.lnshop.com/article/24/ความรู้เกี่ยวกับ-วิธีการชุบอะลูมิเนียมอะโนไดซ์>
- เงิน (โลหะ). (2559). *วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี*. วันที่ค้นข้อมูล 26 กุมภาพันธ์ 2559, เข้าถึงได้จาก [https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%80%E0%B8%87%E0%B8%B4%E0%B8%99\\_\(%E0%B9%82%E0%B8%A5%E0%B8%AB%E0%B8%B0\)](https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%80%E0%B8%87%E0%B8%B4%E0%B8%99_(%E0%B9%82%E0%B8%A5%E0%B8%AB%E0%B8%B0))
- เงินโลหะมีค่าที่ไม่ควรมองผ่าน. (2559). วันที่ค้นข้อมูล 26 กุมภาพันธ์ 2559, เข้าถึงได้จาก <http://www.git.or.th/2014/g20131120.html>
- เงิน. (2559). วันที่ค้นข้อมูล 26 กุมภาพันธ์ 2559, เข้าถึงได้จาก [http://www.bigsthailand.com/lib\\_silver.asp](http://www.bigsthailand.com/lib_silver.asp)
- ชุดิมา ศรีวิบูลย์. (2541). เคมีวิเคราะห์ 1. พิมพ์ครั้งที่ 12. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยรามคำแหง
- ชุดิมนต์ จันทร์เมือง. (2555). *ผลของการหล่อต่อความแข็ง การกันหมองและโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินเครื่องประดับเงิน-ทองแดง-สังกะสี-ซิลิกอน*. วันที่ค้นข้อมูล 26 กุมภาพันธ์ 2559, เข้าถึงได้จาก [https://www.google.co.th/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjAocCoxoZQAhXDrRoKHSvhBs0QFggIMAI&url=http%3A%2F%2Fwww.geo.sc.chula.ac.th%2FTRF\\_Gem%2Ffile%2Fproject%2FSilver\\_TRF.pdf&usq=AFQjCNGfvU3AH5qjMfryBaAl6ndH7PLP9w&bvm=bv.137132246,d.bGg](https://www.google.co.th/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjAocCoxoZQAhXDrRoKHSvhBs0QFggIMAI&url=http%3A%2F%2Fwww.geo.sc.chula.ac.th%2FTRF_Gem%2Ffile%2Fproject%2FSilver_TRF.pdf&usq=AFQjCNGfvU3AH5qjMfryBaAl6ndH7PLP9w&bvm=bv.137132246,d.bGg)

- ธิดาวรรณ วันวิเศษ. (2549). *การทำสีบนโลหะผสมของอลูมิเนียมที่ผ่านการอะโนไดซ์โดยวิธีไฟฟ้าเคมี*. ภาคนิพนธ์ศึกษาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีอัญมณี, คณะวิทยาลัยอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา.
- ภักนัย ทองท้อพร.(2559).การมองเห็นและการเกิดสี. วันที่ค้นข้อมูล 27 กุมภาพันธ์ 2559, เข้าถึงได้จาก <http://www.rmutphysics.com/charud/pdf-learning/6/pdf1/color.pdf>
- นงคณา ศรีสคำ, วิมลรัตน์ เถาว์ทอง, วชิรินกร เมฆลา. (2559).การศึกษาลักษณะฟิล์มบางด้วยอะโนไดเซชัน. วันที่ค้นข้อมูล 27 กุมภาพันธ์ 2559, เข้าถึงได้จาก <http://www.nestc.sci.ubu.ac.th/2015/upload/Poster/N2015243.pdf>
- บุญรอด วงษ์สวาท. (2556). *การทำอะโนไดซ์*. เพชรบุรี: กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ โรงเรียนพรหมานุสรณ์. บทเรียนออนไลน์. วันที่ค้นข้อมูล 16 สิงหาคม 2559, เข้าถึงได้จาก [http://www.promma.ac.th/main/chemistry/web\\_electrochemistry/anodize.htm](http://www.promma.ac.th/main/chemistry/web_electrochemistry/anodize.htm)
- ปริญญา ศรีสัตยกุลและภาณุเดช แสงสีดำ. (2554). เครื่องเคลือบสีอะลูมิเนียมโดยวิธีการอะโนไดซ์. วันที่ค้นข้อมูล 9 มีนาคม 2559, เข้าถึงได้จาก <http://www.eg.mahidol.ac.th/dept/egie/images/IE-Network-Archives/2011/PDF/6.MPM/MPM78.pdf>
- ยูโร อีนิอก . (2554). การทำสีเหล็กกล้าไร้สนิม. วันที่ค้นข้อมูล 9 มีนาคม 2559, เข้าถึงได้จาก <http://www.siamstainless.com/?p=2008>
- วีระ สวนไธสง. (2559). การสกัดแยกเงินจากของทิ้งในห้องปฏิบัติการ. *วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ*. วันที่ค้นข้อมูล 26 กุมภาพันธ์ 2559, เข้าถึงได้จาก [http://siweb.dss.go.th/journal/subject\\_search.asp?offset=1240](http://siweb.dss.go.th/journal/subject_search.asp?offset=1240)
- สมร หิริญประดิษฐกุล. (2537). *การเตรียมและการศึกษาคุณสมบัติผิวเคลือบอะโนไดซ์แบบแข็งบนผิวรองรับอะลูมิเนียม*.วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมเคมี. คณะวิศวกรรมศาสตร์. บัณฑิตวิทยาลัย. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. วันที่ค้นข้อมูล 26 กุมภาพันธ์ 2559, เข้าถึงได้จาก <http://www.thaithesis.org/detail.php?id=531>
- หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน. (2559). วันที่ค้นข้อมูล 27 ตุลาคม 2559, เข้าถึงได้จาก [https://www.google.co.th/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiw49PhzizQAUMto8KHasDCrKQFggfMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.microscopic.center.sci.buu.ac.th%2Fimages%2Fwebsite%2FEM.pdf&usq=AFQjCNFduVEztrMLnmWEKNGOr\\_GTWlontg&bvm=bv.137132246,d.bGg](https://www.google.co.th/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiw49PhzizQAUMto8KHasDCrKQFggfMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.microscopic.center.sci.buu.ac.th%2Fimages%2Fwebsite%2FEM.pdf&usq=AFQjCNFduVEztrMLnmWEKNGOr_GTWlontg&bvm=bv.137132246,d.bGg)
- อนันต์ ทองมอย. (2540). *ชุบโลหะด้วยไฟฟ้า*. *หนังสือทั่วไป*, หน้า12-39.
- Anodizing. (2016). Retrieved April 7, 2016, from <http://www.anoplate.com/finishes/anodizing/>

- Coloring sterling silver or other metals. (2013). Retrieved April 7, 2016, from <http://www.finishing.com/128/57.shtml>
- Nurd Rage. (2010). *Make silver different colors by anodizing*. Retrieved April 7, 2016, from [http://science.wonderhowto.com/how-to/make-silver-different-colors-by-anodizing-273263/http://www.amanet.org/research/pdfs/Email\\_Policies\\_Practices.pdf](http://science.wonderhowto.com/how-to/make-silver-different-colors-by-anodizing-273263/http://www.amanet.org/research/pdfs/Email_Policies_Practices.pdf)
- Rosemarie Gallagher, Paul Ingram. (1997). *Complete Chemistry*. Retrieved April 7, 2016, from [https://books.google.co.th/books?id=VDglvQK1SZAC&pg=PA111&lpg=PA111&dq=anodizing+silver+chemistry&source=bl&ots=f55qaZPgA&sig=ZbPCeWnl4WW2MmoetAmoV2LxMyU&hl=th&sa=X&ved=0ahUKEwiKh\\_-1ulHOAhWGKpQKHZpvCyl4ChDoAQhMMAg#v=onepage&q&f=trueBan](https://books.google.co.th/books?id=VDglvQK1SZAC&pg=PA111&lpg=PA111&dq=anodizing+silver+chemistry&source=bl&ots=f55qaZPgA&sig=ZbPCeWnl4WW2MmoetAmoV2LxMyU&hl=th&sa=X&ved=0ahUKEwiKh_-1ulHOAhWGKpQKHZpvCyl4ChDoAQhMMAg#v=onepage&q&f=trueBan) Chiang dig gets a lift. (2006, April 5). *The Nation*, p. 3A.
- Susan Lomuto. (2008). *Search Results for anodised jewelry*. Retrieved April 7, 2016, from <http://dailyartmuse.com/?s=anodised+jewelry>
- Supinya Wongsriruksa. (2016). *Anodizing*. Retrieved April 7, 2016, from <https://www.google.co.th/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiNxryw0ozQAhXFqY8KHbfoDJ4QFggZMAA&url=http%3A%2F%2Ffacstaff.swu.ac.th%2Fsupinya%2Fanodizing.pdf&usg=AFQjCNH SfilRQBfrgsa55cRla2-Uik2QXA&bvm=bv.137132246,d.bGg>
- Impedance characterization of anodized silver/silver chloride electrodes. (2016). Retrieved Nov 8, 2016. from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000326700185114X>