



สมบัติการเรืองแสงและความต้านทานการหมองของโลหะทองแดงที่เติมสารเรืองแสงชนิดสตรอนเชียม
อะลูมินต

Phosphorescence and tarnish resistance properties of copper with strontium aluminate
addition

นายหัสวรรษ

กันแก้ว

นายรัชชานนท์

แก้วปานมา

โครงการทางวัสดุศาสตร์ เป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์
ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2564



สมบัติการเรืองแสงและความต้านทานการหมองของโลหะทองแดงที่เติมสารเรืองแสงชนิดสตรอนเชียม
อะลูมินต

Phosphorescence and tarnish resistance properties of copper with strontium aluminate
addition

นายหัสวรรษ

กันแก้ว

นายรัชชานนท์

แก้วปานมา

โครงการทางวัสดุศาสตร์ เป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์
ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2564

ชื่อเรื่อง

สมบัติการเรืองแสงและความต้านทานการหมองของโลหะทองแดงที่เติมสารเรือง
แสงชนิดสตรอนเซียมอะลูมิเนต
PHOSPHORESCENCE AND TARNISH RESISTANCE PROPERTIES OF
COPPER WITH STRONTIUM ALUMINATE ADDITION

ผู้วิจัย

นายหัสวรรษ กันแก้ว

นายรัชชานนท์ แก้วปานมา

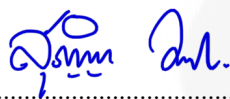
อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์สุภิญญา วงษ์ศรีรักษา

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐิตา ขวนเกริกกุล

โครงการทางวัสดุศาสตร์นี้ ให้นับเป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์
ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ



..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์สุภิญญา วงษ์ศรีรักษา)



..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐิตา ขวนเกริกกุล)

กิตติกรรมประกาศ

โครงการทางวัสดุศาสตร์เล่มนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์และสนับสนุนความรู้ทางวิชาการ การดำเนินงานวิจัยต่าง ๆ จากบุคคลทั้งหลายและสถานที่ในการทำวิจัยที่เกี่ยวข้อง ขอขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการทางวัสดุศาสตร์อาจารย์สุภิญญา วงษ์ศรีรักษา จากภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการทางวัสดุศาสตร์ร่วม รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐิตา ขวนเกริกกุล จากสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งท่านได้กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำทางด้านวิชาการและการแก้ไขปัญหา เพื่อเป็นแนวทางการปรับเปลี่ยนแก้ไขปัญหาลดระยะเวลาในการทำวิจัย ทำให้โครงการทางวัสดุศาสตร์นี้ไม่เกิดข้อผิดพลาดและเสร็จลงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการอำนวยความสะดวกทางอุปกรณ์และเครื่องมือการวิเคราะห์ทดสอบต่าง ๆ เช่น ผงโพลีเมอร์ เครื่องอัดขึ้นรูปวัสดุผง กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และอุปกรณ์เครื่องแก้ว เป็นต้น ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง เครื่องทดสอบความแบบวิกเกอร์ และเครื่องวัดสัณฐาน เป็นต้น

ขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านจากภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และขอบคุณเพื่อน ๆ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้ความช่วยเหลือแนะนำตลอดการดำเนินงานวิจัย

ห้สววรรษ กันแก้ว

รัชชานนท์ แก้วปานมา

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเติมสารเรืองแสงชนิดสตรอนเชียมอะลูมิเนตลงในโลหะทองแดง โดยวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการขึ้นรูปวัสดุผงโลหะทองแดงที่เติมผงสารสตรอนเชียมอะลูมิเนตด้วยวิธีการอัดขึ้นรูป เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกลด้านความแข็ง ความสามารถในการเรืองแสง การต้านทานการหมอง และเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของโลหะทองแดงหลังจากเติมสารสตรอนเชียมอะลูมิเนต โดยในการทดลองมีการใช้วัสดุผงโลหะทองแดงตั้งแต่ 70, 80, 90 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับปริมาณของผงเรืองแสงชนิดสตรอนเชียมอะลูมิเนตตั้งแต่ 30, 20, 10 และ 0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้ตัวเชื่อมประสานด้วยโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ เพื่อให้ผงโลหะทองแดงกับผงสตรอนเชียมอะลูมิเนตเชื่อมติดกัน โดยการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้แก๊สอาร์กอน หลังจากเผาผนึกแล้ว จะเป็นการกำจัด PVA และทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น โดยสรุปผลการทดสอบมีชิ้นงานที่ถูกทดสอบ 4 ชิ้นงาน คือ A, B, C และ D ผลการทดสอบสมบัติทางกลด้านความแข็งพบว่าชิ้นงาน A (Cu100) มีความแข็งมากที่สุด คือ 30.50 HV ผลการทดสอบความสามารถในการเรืองแสงโดยใช้คลื่นรังสีอัลตราไวโอเลต (UV) ที่ 390 นาโนเมตร ชิ้นงานที่เติมสตรอนเชียมอะลูมิเนตจะปลดปล่อยคลื่นแสงออกมาที่ 517 นาโนเมตร โดยชิ้นงาน D (Cu70) จะเรืองแสงดีที่สุด และชิ้นงาน B (Cu90) จะเรืองแสงน้อยที่สุด ผลการทดสอบความต้านทานการหมองพบว่าชิ้นงาน D (Cu70) ต้านทานการหมองได้ดีที่สุดจากการวัดค่าสีที่เปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวบนชิ้นงานซึ่งเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด และชิ้นงาน A (Cu100) เกิดการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด ซึ่งไม่สามารถต้านทานการหมองได้ การวิเคราะห์องค์ประกอบของชิ้นงานที่มีการเติมสตรอนเชียมอะลูมิเนตตามอัตราส่วนต่าง ๆ จะมีการเกิดออกไซด์ของสตรอนเชียมอะลูมิเนต 2 ชนิด คือ สตรอนเชียมอะลูมิเนียมออกไซด์ SrAl_4O_7 และเตตระสตรอนเชียมเตตระเดคะอะลูมิเนียมออกไซด์ $((\text{SrO})_4(\text{Al}_2\text{O}_3)_7)$

คำสำคัญ การเรืองแสง, การอัดขึ้นรูป, ความต้านทานการหมอง, ทองแดง, สตรอนเชียมอะลูมิเนต

Abstract

The purpose of this study is to examine what happened once strontium aluminate (SrAl_2O_4) powder was mixed with copper (Cu) powder to enhance a phosphorescence and tarnish resistance properties of the samples. The samples were fabricated by using the compression molding technique and then sintered in argon atmosphere. Phosphorescence, hardness, microstructure, tarnish resistance and XRD were studied. In the process of the compression molding, the 4 samples of 100, 90, 80 and 70 percent by weight of copper powder, were mixed with 0, 10, 20 and 30 percent by weight of strontium aluminate, and called chronologically sample A (Cu100), B (Cu90), C (Cu80) and D (Cu70). Polyvinyl alcohol (PVA) was used as a binder and mixed with copper and strontium aluminate powder to produce the green specimens using a hydraulic machine. Then, the green samples were sintered at 900 °C for one hour. Consequently, PVA was eliminated and the samples became denser. After Vickers hardness testing, it was found that the hardness of sample A (30.5 HV) is higher than that of sample B (12.84 HV). Furthermore, sample B, C and D containing strontium aluminate were phosphorescent under ultraviolet at 517 nm. Sample D (Cu70) with the largest amount of strontium aluminate has higher phosphorescence than sample B (Cu90). In sulfur atmosphere, the tarnish resistance was found to be improved when strontium aluminate was added into copper. The color changing of sample A (Cu100), which has no strontium aluminate, was higher than that of sample B, C and D. Sample D (Cu70), containing the highest amount of strontium aluminate, has the least color changing on its surface resulting in the resistance in tarnishing. The analysis of composition of the samples with strontium aluminate addition in several ratios could be 2 types of oxide compounds as follows: strontium aluminate oxide, SrAl_4O_7 and tetra strontium tetra deca aluminum oxide $(\text{SrO})_4(\text{Al}_2\text{O}_3)_7$.

Keywords: phosphorescence, compression molding, tarnish resistance, copper, strontium aluminate.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ	ข
บทคัดย่อ	ค
Abstract	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญรูป.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ท
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับโลหะทองแดง (Copper, Cu)	5
2.1.1 ความเป็นมาของโลหะทองแดง.....	5
2.1.2 สมบัติของโลหะทองแดง	6
2.1.3 ประโยชน์ของโลหะทองแดง.....	6
2.1.4 โลหะผสมทองแดง (Copper Alloys).....	8
2.1.4.1 ทองเหลือง (Brass)	8
2.1.4.2 ทองสัมฤทธิ์ (Bronze)	8
2.1.5 ปัญหาการเกิดความหมองบนพื้นผิวของโลหะทองแดง	9
2.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสตรอนเชียม (Strontium, Sr)	10

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.1 สารประกอบของสตรอนเชียม.....	10
2.3 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสตรอนเชียมอะลูมิเนต (Strontium Aluminate, SrAl_2O_4)	12
2.3.1 สตรอนเชียมอะลูมิเนต	12
2.3.2 การเรืองแสงของสตรอนเชียมอะลูมิเนต	12
2.4 หลักการเรืองแสง (Luminescence).....	13
2.4.1 ความแตกต่างของฟอสฟอเรสเซนต์และฟลูออเรสเซนต์	13
2.5 การฉีดขึ้นรูปวัสดุผง (Powder Injection Molding)	14
2.5.1 การฉีดขึ้นรูปวัสดุผง	14
2.5.2 ตัวเชื่อมประสาน (Binder).....	15
2.5.3 การกำจัดตัวเชื่อมประสาน (Debinding).....	16
2.5.4 การเผาผนึก (Sintering)	16
2.6 การฉีดขึ้นรูปโลหะ (Metal Injection Molding)	16
2.7 การอัดขึ้นรูป (Compression Molding).....	17
2.8 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer; XRD).....	18
2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(Scanning Electron Microscopy; SEM). 19	
2.10 การทบทวนวรรณกรรม.....	21
2.10.1 การฉีดขึ้นรูปวัสดุผง	21
2.10.2 การเรืองแสง	25
2.10.3 การต้านทานความหมอง (Tarnish Resistance)	29
2.10.4 การอัดขึ้นรูปวัสดุผง	29

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	31
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	31
3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	32
3.3 สารเคมี.....	32
3.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	32
3.5 วิธีการตรวจสอบ.....	34
3.5.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง	34
3.5.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	34
3.5.3 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test).....	35
3.5.4 การทดสอบความสามารถในการเรืองแสง	36
3.5.5 การทดสอบความต้านทานความหอม	36
3.5.6 การทดสอบเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	37
3.5.6 การวัดความหนาแน่น.....	37
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	39
4.1 ผลจากการศึกษาการอัดขึ้นรูปโลหะทองแดงที่เติมสารเรืองแสงชนิดสตรอนเชียมอะลูมิเนียม	39
4.2 ผลจากการศึกษาความหนาแน่นชิ้นงานทองแดงที่เติมสารเรืองแสงชนิดสตรอนเชียมอะลูมิเนียม.	43
4.3 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโลหะทองแดงด้วย	
กล้องจุลทรรศน์แบบแสง(Optical Microscope) และ	
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(Scanning Electron Microscope: SEM)	44
4.3.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope).....	44
4.3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	
(Scanning Electron Microscope: SEM)	48

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.3 Mapping Analysis	52
4.4 ผลจากศึกษาความแข็งแบบวิกเกอร์ของชิ้นงานโลหะทองแดงด้วย	
เครื่องมือทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers hardness testing machine).....	56
4.5 ผลจากศึกษาความสามารถในการเรืองแสงของชิ้นงานโลหะทองแดงด้วย	
เครื่องวัดการเรืองแสงสเปกโตรฟลูออโรมิเตอร์ (Fluorescence spectrophotometer)	58
4.6 ผลจากศึกษาการต้านทานการหมองของชิ้นงานโลหะทองแดงด้วย	
เครื่องวัดสีวัสดุ (Colorimeter).....	61
4.7 ผลจากศึกษาองค์ประกอบของชิ้นงานโลหะทองแดงหลังเผาผืนี้ด้วย	
เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer).....	67
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	70
5.1 สรุปผลการทดลอง	70
5.2 ข้อเสนอแนะ	71
เอกสารอ้างอิง	72
ภาคผนวก.....	76
ภาคผนวก ก.....	77
ภาคผนวก ข.....	81
ภาคผนวก ค.....	82
ภาคผนวก ง	83
ภาคผนวก จ.....	92

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ด..... 96

ประวัติผู้วิจัย 98



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 ธาตุทองแดง.....	5
รูปที่ 2.2 โลหะทองเหลือง	8
รูปที่ 2.3 โลหะทองสัมฤทธิ์.....	9
รูปที่ 2.4 ธาตุสตรอนเชียม.....	11
รูปที่ 2.5 ผงสตรอนเชียมอะลูมิเนียม	12
รูปที่ 2.6 กระบวนการทั้งหมดของการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง.....	15
รูปที่ 2.7 กระบวนการอัดขึ้นรูป.....	17
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการวิเคราะห์อนุภาคทองแดงโดยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	18
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างอนุภาคทองแดงโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	19
รูปที่ 4.1 ภาพชิ้นงานที่ได้จากการอัดขึ้นรูปโลหะผงปริมาณทองแดงก่อนเผาผืนิก	39
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเทียบกับเวลาในการเผาผืนิกของ ชิ้นงานทองแดงที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	40
รูปที่ 4.3 ภาพชิ้นงานที่ได้จากการอัดขึ้นรูปโลหะผงทองแดงและทำการเผาผืนิก ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส.....	41
รูปที่ 4.4 ภาพชิ้นงานที่ได้จากการอัดขึ้นรูปโลหะผงทองแดงและทำการเผาผืนิก ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส.....	42
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความหนาแน่นของชิ้นงานโลหะทองแดงทั้ง 4 อัตราส่วน.....	43
รูปที่ 4.6 ชิ้นงานหลังการขัดผิวที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงด้วยกำลังขยาย 50 เท่า	45
รูปที่ 4.7 ชิ้นงานหลังการขัดผิวที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงด้วยกำลังขยาย 100 เท่า.....	46
รูปที่ 4.8 ชิ้นงานหลังการขัดผิวที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงด้วยกำลังขยาย 200 เท่า.....	47

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.9 ภาพชิ้นงานที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ ชิ้นงานทองแดงที่กำลังขยาย 200 เท่า	48
รูปที่ 4.10 ภาพชิ้นงานที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ ชิ้นงานทองแดงที่กำลังขยาย 500 เท่า	50
รูปที่ 4.11 ภาพชิ้นงานที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ ชิ้นงานทองแดงที่กำลังขยาย 1,000 เท่า	51
รูปที่ 4.12 ภาพชิ้นงานที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ ชิ้นงานทองแดงที่กำลังขยาย 500 เท่า ของชิ้นงานที่มีปริมาณ ทองแดง 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเทียมอะลูมิเนียม 30 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ใช้ Mapping Analysis	53
รูปที่ 4.13 ภาพแสดงบริเวณที่มีองค์ประกอบของธาตุในชิ้นงาน	53
รูปที่ 4.14 สเปกตรัมของธาตุองค์ประกอบทั้งหมดในชิ้นงาน	55
รูปที่ 4.15 รอยกดชิ้นงานทดสอบความแข็งวิกเกอร์ โดยใช้น้ำหนักกด 0.2 กิโลกรัม เวลา 10 วินาที	56
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งวิกเกอร์กับชิ้นงานทดสอบ	57
รูปที่ 4.17 กราฟค่าความเข้มข้นของการปลดปล่อยแสงเทียบกับความยาวคลื่น ของชิ้นงาน A ปริมาณทองแดง 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	58
รูปที่ 4.18 กราฟค่าความเข้มข้นของการปลดปล่อยแสงเทียบกับความยาวคลื่น ของชิ้นงาน B ปริมาณทองแดง 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเทียมอะลูมิเนียม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.19 กราฟค่าความเข้มข้นของการปลดปล่อยแสงเทียบกับความยาวคลื่น ของชิ้นงาน C ปริมาณทองแดง 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	59
รูปที่ 4.20 กราฟค่าความเข้มข้นของการปลดปล่อยแสงเทียบกับความยาวคลื่น ชิ้นงาน D ปริมาณทองแดง 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	60
รูปที่ 4.21 กราฟค่าความเข้มข้นของการปลดปล่อยแสงเทียบกับความยาวคลื่น ชิ้นงานทั้ง 4 อัตราส่วน ทำการกระตุ้นที่ 390 นาโนเมตร.....	60
รูปที่ 4.22 ภาพชิ้นงานก่อนทดสอบการต้านทานการหมอง.....	63
รูปที่ 4.23 ภาพชิ้นงานหลังทดสอบการต้านทานการหมอง (15 นาที)	64
รูปที่ 4.24 ภาพชิ้นงานหลังทดสอบการต้านทานการหมอง (30 นาที)	65
รูปที่ 4.25 ภาพชิ้นงานหลังทดสอบการต้านทานการหมอง (120 นาที)	66
รูปที่ 4.26 กราฟค่าการเปลี่ยนสีบนพื้นผิวเทียบกับเวลาในการทดสอบ	67
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของชิ้นงานที่มี ปริมาณทองแดง 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	68
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของชิ้นงานทั้ง 4 อัตราส่วน	69
ข-1 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ทางแสง ของชิ้นงานก่อนขัดผิวด้วยกระดาษทราย ที่กำลังขยาย 50 เท่า.....	81
ง-1 แสดงผลจากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ชิ้นงาน A.....	83
ง-2 แสดงผลจากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ชิ้นงาน B.....	83
ง-3 แสดงผลจากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ชิ้นงาน C.....	84

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ง-4	แสดงผลจากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ชิ้นงาน D.....	84
ง-5	แสดงผลจากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ สตรอนเชียมอะลูมิเนียมและสารประกอบออกไซด์ของ สตรอนเชียมอะลูมิเนียมของชิ้นงาน D	85
ฉ-1	แสดงภาพวัสดุผงที่ใช้ในงานวิจัย	96
ฉ-2	แสดงภาพเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	97



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติโดยทั่วไปของโลหะทองแดง	6
ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติทั่วไปของสตรอนเชียม	11
ตารางที่ 3.1 แสดงส่วนผสมของโลหะทองแดงและน้ำหนักรที่ใช้	33
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความหนาแน่นที่ค่าความหนาแน่นจากปริมาณส่วนผสม และค่าความหนาแน่นจากการวัดความหนาแน่น	44
ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบของธาตุที่มีอยู่ในชิ้นงานมีปริมาณทองแดง 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเชียมอะลูมิเนียม 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	55
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทองแดงโดยเครื่องทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ เทียบกับปริมาณทองแดงและสตรอนเชียมอะลูมิเนียม	56
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิวของชิ้นงานทองแดงทั้ง 4 อัตราส่วน	62
ก-1 แสดงความหนาแน่นของวัสดุ ในหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร	77
ก-2 แสดงสัดส่วนของวัสดุผงและตัวเชื่อมประสานในหน่วยน้ำหนัก (ก.) และเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	77
ก-3 แสดงการเปรียบเทียบความหนาแน่นจากปริมาณส่วนผสมกับ ความหนาแน่นของชิ้นงานก่อนและหลังจากการเผาผิวดังตาราง	77
ก-4 แสดงผลของการวัดความหนาแน่นของชิ้นงานหลังการเผาผิวดัง แบบอาร์คิมิดีสและความพรุนของชิ้นงาน	78
ก-5 แสดงข้อมูลการวัดปริมาตรของชิ้นงาน A	78
ก-6 แสดงข้อมูลการวัดปริมาตรของชิ้นงาน B	79
ก-7 แสดงข้อมูลการวัดปริมาตรของชิ้นงาน C	79
ก-8 แสดงข้อมูลการวัดปริมาตรของชิ้นงาน D	80

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค-1	แสดงค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ของชิ้นงาน A และ B..... 82
ง-6	แสดงข้อมูลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของทองแดง จาก JCPDS หมายเลขรูปแบบ 03-065-9026 86
ง-7	แสดงข้อมูลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสตรอนเชียมอะลูมิเนต (SrAl_2O_4) จาก JCPDS หมายเลขรูปแบบ 00-034-0379 87
ง-8	แสดงข้อมูลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสตรอนเชียมอะลูมิเนียมออกไซด์ (SrAl_4O_7) จาก JCPDS หมายเลขรูปแบบ 00-025-1289 89
ง-9	แสดงข้อมูลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสตรอนเชียมอะลูมิเนียมออกไซด์ (SrO) $_4$ (Al_2O_3) $_7$ หรือ Tetra strontium tetra deca aluminum oxide จาก JCPDS หมายเลขรูปแบบ 01-089-8206 90
จ-1	แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิวของชิ้นงาน ที่เวลา 15 นาที ของชิ้นงาน A..... 92
จ-2	แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิวของชิ้นงาน ที่เวลา 15 นาที ของชิ้นงาน B 92
จ-3	แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิวของชิ้นงาน ที่เวลา 15 นาที ของชิ้นงาน C 92
จ-4	แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิวของชิ้นงาน ที่เวลา 15 นาที ของชิ้นงาน D..... 93
จ-5	แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิวของชิ้นงาน ที่เวลา 30 นาที ของชิ้นงาน A..... 93
จ-6	แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิวของชิ้นงาน ที่เวลา 30 นาที ของชิ้นงาน B 93
จ-7	แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิวของชิ้นงาน ที่เวลา 30 นาที ของชิ้นงาน C 94
จ-8	แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิวของชิ้นงาน ที่เวลา 30 นาที ของชิ้นงาน D..... 94
จ-9	แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิวของชิ้นงาน ที่เวลา 120 นาที ของชิ้นงาน A..... 94
จ-10	แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิวของชิ้นงาน ที่เวลา 120 นาที ของชิ้นงาน B 95
จ-11	แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิวของชิ้นงาน ที่เวลา 120 นาที ของชิ้นงาน C..... 95
จ-12	แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิวของชิ้นงาน ที่เวลา 120 นาที ของชิ้นงาน D..... 95

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

การเติบโตของสภาพเศรษฐกิจในประเทศไทยส่วนมากจะขึ้นอยู่กับอุตสาหกรรมภายในประเทศเป็นหลักและในปัจจุบันได้มีการเติบโตของอุตสาหกรรมโลหะ รวมทั้งโลหะบริสุทธิ์หรือโลหะผสม ก็สามารถบอกถึงสภาพเศรษฐกิจได้โดยที่โลหะที่มีความนิยมนิยมมากและมีราคาไม่สูงสามารถเข้าถึงทุกภาคส่วนได้ ซึ่งก็คือโลหะทองแดงและโลหะผสมทองแดง (Copper and Copper Alloys) โครงสร้างอุตสาหกรรมทองแดงของประเทศไทยในปัจจุบันเริ่มต้นจากการผลิตในอุตสาหกรรมชั้นกลางน้ำและชั้นปลายน้ำโดยมีการใช้งานหลักอยู่ในการผลิตลวดและสายไฟที่ทำจากโลหะทองแดง และอุตสาหกรรมท่อโลหะทองแดง ซึ่งมีการใช้โลหะทองแดงในปริมาณ 80 – 90 เปอร์เซ็นต์ ของการใช้งานทั้งหมด อีกทั้งส่วนใหญ่เป็นการนำเข้าโลหะทองแดงบริสุทธิ์ คือโลหะทองแดงแคโทด (Copper Cathode) นำมาหล่อหลอมเพื่อแปรรูปไปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ และนอกจากการนำเข้าแคโทดมาแปรรูปแล้วอีกทั้งยังมีโรงงานอุตสาหกรรมที่นำเศษโลหะทองแดงที่เหลือมาหลอมเพื่อนำมาใช้ใหม่ แต่ก็มีจำนวนน้อย เนื่องจากเศษทองแดงส่วนใหญ่จะอยู่ในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ และยังมีการส่งออกเนื่องจากเทคโนโลยีในการหลอมโลหะทองแดงให้เป็นโลหะทองแดงบริสุทธิ์เหมือนเดิมนั้นประเทศไทยในปัจจุบันยังไม่สามารถรองรับได้ส่งผลให้อุตสาหกรรมโลหะทองแดงในประเทศจึงต้องนำเข้าโลหะทองแดงที่มีความบริสุทธิ์จากต่างประเทศมาเป็นจำนวนมาก [1]

โลหะทองแดงเป็นโลหะที่ถูกใช้ประโยชน์มาตั้งแต่ยุคสำริดจนกระทั่งถึงยุคปัจจุบันและยังเป็นโลหะที่ถูกนำมาใช้มากเป็นรองจากเหล็กและอะลูมิเนียม ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำโลหะทองแดงมาใช้เป็นส่วนผสมของโลหะทองและโลหะเงินเพื่อเพิ่มสมบัติทางกลให้ดียิ่งขึ้น เช่น ความสวยงาม การต้านทานการหมอง ความแข็งแรง ความแข็ง และความต้านทานต่อการกัดกร่อน โดยการใช้โลหะทองแดงในรูปแบบของการเจือซึ่งสามารถใช้งานได้หลายด้าน โลหะทองแดงบริสุทธิ์จะเป็นโลหะทองแดงที่มีส่วนผสมของธาตุอื่นไม่เกิน 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและโลหะทองแดงผสมกับธาตุอื่น ที่มีปริมาณของโลหะทองแดงไม่ต่ำกว่า 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และไม่มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก [2] โลหะทองแดงเป็นโลหะที่มีความเหนียวและเนื้ออ่อนสามารถอัดขึ้นรูปตามที่ต้องการได้ และมีสมบัติเป็นตัวนำความร้อนและนำไฟฟ้าที่ดี มีความต้านทานต่อการกัดกร่อน [2] โลหะทองแดงมีความสามารถในการขึ้นรูปได้ง่ายจึงมักนำมาใช้ในอุตสาหกรรมของเครื่องประดับและอุปกรณ์เครื่องใช้ภายในครัวเรือนเป็นจำนวนมาก อีกทั้งมีความนิยมในการนำโลหะทองแดงมาทำเครื่องประดับเพราะสามารถผลิตได้หลายสีและมีกระบวนการในการสร้างสีของพื้นผิวได้ตั้งแต่สีชมพู สีขาว สีเหลือง สีแดง และสีดำสามารถทำได้ ซึ่งจัดให้โลหะทองแดงใช้สำหรับเป็นเครื่องประดับเทียมหรือเรียกได้ว่าเป็นเครื่องประดับตามสมัยนิยมหรือเครื่องประดับแฟชั่น [3] แต่การใช้โลหะทองแดงก็ยังมีข้อจำกัด คือความเสียหายที่เกิดจากงานวิศวกรรม เช่น ความเสียหายทางเคมีหรือเรียกว่าการกัดกร่อนและความเสียหาย

ทางกลหรือเรียกว่าการสีกหรือ เมื่อทั้งสองกระบวนการนี้เกิดขึ้นบนผิวทองแดงจะทำให้ทองแดงเกิดความเสียหายบริเวณผิวเป็นอย่างมาก [4] ส่งผลให้เกิดการหมองของทองแดงขึ้น

การหมองของทองแดงเกิดจากทองแดงนั้นทำปฏิกิริยาเคมีกับออกซิเจนในน้ำและอากาศจะเกิดเป็นคราบสีเขียวที่บริเวณผิว ถ้าปล่อยให้สัมผัสกับน้ำและอากาศเป็นเวลานานทำให้เกิดคราบสีดำ หรือเกิดเป็นคราบสีชมพูได้เมื่อโดนความร้อน อุตสาหกรรมเครื่องประดับหรืออุตสาหกรรมของใช้ต่าง ๆ ความต้องการหลักคือ ความสวยงามและการป้องกันการหมองของตัวโลหะที่นำมาใช้ทำวัตถุดิบ [5] ทำให้ในปัจจุบันมีการนิยมนำวัสดุหรืออุปกรณ์ต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นเครื่องประดับหรือเฟอร์นิเจอร์ภายในบ้านก็ต้องมีสีที่โดดเด่นและสะดุดตา เช่น การเรืองแสง การวาวแสง

ในปัจจุบันได้มีการเติบโตของอุตสาหกรรมแฟชั่นเป็นจำนวนมาก ซึ่งในอนาคตก็ยังคงมีการเจริญเติบโตเป็นอย่างมากทำให้สีนํ้าเงินหรือสีเรืองแสงได้รับความสนใจจากทุก ๆ มุมมองไม่ว่าจะเป็นเสื้อผ้าเครื่องประดับของตกแต่งหรือแม้แต่เฟอร์นิเจอร์ [6] การทำให้โลหะผสมทองแดงมีความสามารถในการต้านทานความหมองและมีความสามารถในการเรืองแสงก็จะทำให้ได้รับความนิยมและความน่าสนใจเป็นอย่างมาก

การเรืองแสง คือ การที่สารดูดกลืนพลังงานโฟตอนของแสงเข้าไปแล้วจนไม่สามารถยับยั้งได้ในโครงสร้าง จึงทำให้เกิดความเครียดภายในโครงสร้างเป็นอย่างมาก โมเลกุลของสารจึงต้องปล่อยพลังงานโฟตอนที่มิพลังงานต่ำกว่าออกมาให้เร็วที่สุด ซึ่งทำให้เกิดการเรืองแสงแบบฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence) แต่ถ้าหากโมเลกุลของสารมีความสามารถในการเก็บพลังงานโฟตอนแล้วเก็บพลังงานไว้ ซึ่งพลังงานแสงไม่ได้ถูกปลดปล่อยออกมาได้ในทันที ทำให้มีการใช้เวลาระยะหนึ่ง เมื่อเข้าสู่สภาวะที่มีดแล้วการเรืองแสงคงอยู่ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง การเกิดปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดการเรืองแสงแบบฟอสฟอเรสเซนส์ (Phosphorescence) ซึ่งความแตกต่างของฟอสฟอเรสเซนส์และฟลูออเรสเซนซ์ จะเป็นระยะเวลาการที่ใช้ในปล่อยพลังงานโฟตอนออกหลังจากที่ดูดกลืนพลังงานโฟตอนเข้าไปแล้ว ระดับพลังงานของโฟตอนที่ถูกคายออกมาจากกระบวนการฟอสฟอเรสเซนส์จะมีค่าต่ำกว่า จึงทำให้แสงที่เรืองออกมาจากฟอสฟอเรสเซนส์เป็นสีเหลือง-สีเขียว และการกระบวนการของฟลูออเรสเซนซ์เป็นสีน้ำเงิน-สีม่วง [7] โดยชนิดของการเรืองแสงมีดังนี้ ไบโolumิเนสเซนส์จะมีไบโอเคมีคัลรีแอคชั่นเป็นตัวกระตุ้น แคลโทลูมิเนสเซนส์จะมีรังสีแคโทดเป็นตัวกระตุ้น เคมีมิเนสเซนส์จะมีเคมีคัลรีแอคชั่นเป็นตัวกระตุ้น อิเล็กโตรลูมิเนสเซนส์จะมี สนามไฟฟ้าเป็นตัวกระตุ้น โฟโตลูมิเนสเซนส์จะมีโฟตอนเป็นตัวกระตุ้น ไตรโบลูมิเนสเซนส์จะมีวิธีทางกลเป็นตัวกระตุ้น และเทอร์โมลูมิเนสเซนส์จะมีความร้อนเป็นตัวกระตุ้น ตัวอย่างการใช้สารเรืองแสงโดยใช้ทริเทียม เป็นสารเรืองแสงบนหน้าปัดและเข็มนาฬิกาให้สามารถมองเห็นในที่มืดได้ การเรืองแสงที่จำเป็นในการมองหน้าปัดนาฬิกาในความมืดจะขึ้นอยู่กับปริมาณของสารฟอสฟอเรสเซนส์ ซึ่งการที่จะทำให้เรืองแสงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นผิวและความหนาของการเคลือบ [8]

วัสดุเรืองแสงที่มีความสามารถในการเรืองแสงได้ด้วยตัวเองชนิดที่ดีที่สุด คือ วัสดุกลุ่มสตรอนเชียมอะลูมินาเป็นวัสดุที่มีคุณภาพการเรืองแสงที่ดีและมีระยะเวลาในการเรืองแสงยาวนาน มีความนิยมนำมาใช้ในงานทางด้านการป้องกันภัยและความปลอดภัยเพราะว่าต้องการความสว่างในการเรืองแสงที่ดีและเป็นระยะ

เวลานาน โดยใช้เป็นสารที่มีความสามารถในการเก็บพลังงานแสงจากที่สว่างและเปล่งแสงออกมาในที่มืดโดยไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้าทำให้สามารถใช้งานสารเรืองแสงกลุ่มสตรอนเชียมอะลูมิเนตได้ เช่น การใช้งานสารเรืองแสงไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้าทำให้ช่วยลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อีกทั้งยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การติดตั้งสารเรืองแสงไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้าจึงทำได้ง่ายและสะดวก และช่วยลดค่าใช้จ่ายระหว่างการใช้งานและลดค่าซ่อมบำรุง สารเรืองแสงสตรอนเชียมอะลูมิเนตเป็นสารเรืองแสงกึ่งถาวรไม่ค่อยเกิดการชำรุดหรือเสียหาย แล้วยังมีความสามารถในการทนต่อสารเคมีและแสงยูวี เมื่อทำการทดสอบด้วยเครื่องจำลองระบบสภาพอากาศเป็นเวลา 2,000 ชั่วโมง ไม่พบความชำรุดหรือเสียหาย สมบัติของสตรอนเชียมอะลูมิเนตสามารถเก็บแสงที่มีความยาวคลื่นได้ตั้งแต่ 200 - 400 นาโนเมตรซึ่งสามารถครอบคลุมได้ตั้งแต่แสงยูวีไปจนถึงแสงจากหลอดแอลอีดี ซึ่งเหมาะสมในการใช้งานได้หลายประเภท ส่วนมากผงเรืองแสงหรือสตรอนเชียมอะลูมิเนตจะนำมาผสมกับพลาสติก หรือโลหะโดยการผสมขึ้นรูปและทาเคลือบบนผิวของวัสดุ [9]

การชุบโลหะเป็นอีกหนึ่งวิธีในการป้องกันความหมองโดยการทำให้โลหะชนิดหนึ่งเคลือบอยู่บนผิวของโลหะอีกชนิดหนึ่งเพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลหรือทางเคมีของชิ้นงานให้มีความแข็งแรง ความทนทานต่อการสึกหรอ การเสียดสี ความร้อน ความต้านทานต่อการกัดกร่อน ความหมอง การชุบเคลือบเป็นการนำเอาวัสดุมาเคลือบบนพื้นผิวชิ้นงาน ได้แก่ การพ่นเคลือบความร้อน การชุบเคลือบผิวด้วยพลังงานไฟฟ้า การเคลือบผิวด้วยไอทางกายภาพและไอทางเคมี การทาสี และการเคลือบสารแม่เหล็กลงบนแผ่นดิสก์ [10]

จากการศึกษาสมบัติการเรืองแสงและความต้านทานการหมองของโลหะผสมทองแดงที่เติมสารเรืองแสงชนิดสตรอนเชียมอะลูมิเนตเพื่อต้องการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นกับโลหะทองแดงผสมในการเกิดการหมองของตัวโลหะที่ทำปฏิกิริยากับสภาพแวดล้อมต่าง ๆ และเพื่อให้ตัวโลหะทองแดงผสมเป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมแพคเกจและเครื่องประดับเนื่องจากความสวยงามและความสามารถในการเรืองแสงได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการขึ้นรูปโลหะทองแดงที่เติมสารสตรอนเชียมอะลูมิเนตโดยวิธีการอัดขึ้นรูปวัสดุผง
- 1.2.2 เพื่อศึกษาความสามารถในการเรืองแสงของโลหะทองแดงเมื่อเติมสารสตรอนเชียมอะลูมิเนต
- 1.2.3 เพื่อศึกษาความสามารถในการต้านทานการหมองของโลหะทองแดงก่อนและหลังเติมสารสตรอนเชียมอะลูมิเนต
- 1.2.4 เพื่อศึกษาผลของการเติมสารสตรอนเชียมอะลูมิเนตที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคของโลหะทองแดง

- 1.2.5 เพื่อศึกษาสมบัติความแข็งของโลหะทองแดงเมื่อเติมสารสตรอนเชียมอะลูมิเนต
- 1.2.6 เพื่อวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของโลหะทองแดงเมื่อเติมสารสตรอนเชียมอะลูมิเนต

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ขึ้นรูปโลหะทองแดงที่มีปริมาณทองแดงบริสุทธิ์ 70 – 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสารสตรอนเชียมอะลูมิเนต 0, 10.0, 20.0 และ 30.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยวิธีการอัดขึ้นรูปวัสดุผง
- 1.3.2 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโลหะทองแดงที่ได้จากการอัดขึ้นรูปวัสดุผง
- 1.3.3 ศึกษาความสามารถในการเรืองแสงโดยการทดสอบฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรสโกปี
- 1.3.4 ศึกษาความสามารถในการต้านทานความหมองของโลหะทองแดงที่ส่วนผสมต่าง ๆ
- 1.3.5 ศึกษาสมบัติเชิงกลในด้านความแข็งของโลหะทองแดงที่ส่วนผสมต่าง ๆ
- 1.3.6 วิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของโลหะทองแดงเมื่อเติมสารสตรอนเชียมอะลูมิเนต

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทำให้ทราบถึงวิธีการอัดขึ้นรูปวัสดุผงโลหะทองแดง
- 1.4.2 ทำให้สามารถผลิตชิ้นงานโลหะทองแดงที่มีความสามารถในการเรืองแสงได้
- 1.4.3 ทำให้สามารถผลิตชิ้นงานโลหะทองแดงที่มีความสามารถในการต้านทานความหมองได้
- 1.4.4 นำชิ้นงานโลหะทองแดงไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมด้านต่าง ๆ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับโลหะทองแดง (Copper, Cu)

2.1.1 ความเป็นมาของโลหะทองแดง

เริ่มต้นมนุษย์มีความรู้จักและมีการใช้งานโลหะชนิดแรก ๆ คือ โลหะทองแดง มีการค้นพบหลักฐานว่า มนุษย์รู้จักคิดค้นและใช้ประโยชน์ด้านต่าง ๆ ช่วงยุคก่อนประวัติศาสตร์ โดยมีการถลุงแร่โลหะทองแดงขึ้นมา แล้วนำมาใช้ทำเป็นเครื่องมือด้านต่างๆและเครื่องใช้สำหรับการดำรงเผ่าพันธุ์ แต่โลหะทองแดงนั้นเป็นธาตุโลหะที่ถูกค้นพบได้ไม่มากภายในเปลือกโลกมีอยู่แค่เพียง 0.0001 เปอร์เซ็นต์ของทั้งหมด โลหะทองแดงจัดได้ว่าเป็นโลหะที่มีค่าและมีตระกูล ซึ่งส่วนมากจะสามารถพบได้ทั้งในรูปแบบอิสระและรูปของสารประกอบ ในปัจจุบันการจะนำทองแดงมาใช้ต้องเริ่มจากการถลุงแร่ทองแดง จะต้องนำสินแร่โลหะทองแดงในธรรมชาติ มาเผาภายในอากาศให้ได้โลหะทองแดงที่มีความบริสุทธิ์สูง และนำมาแยกต่อด้วยกระแสไฟฟ้า จะทำให้ได้ทองแดงที่มีความบริสุทธิ์สูงมากถึง 99 เปอร์เซ็นต์ และสามารถนำมาใช้งานได้เต็มที่ประสิทธิภาพ [11]



รูปที่ 2.1 ธาตุทองแดง

ที่มา: <https://images.app.goo.gl/VNCGS2nVS2amqV4Q7>

2.1.2 สมบัติของโลหะทองแดง

สมบัติทางกลและความต้านทานการกัดกร่อนของทองแดงสามารถปรับปรุงได้ด้วยการเติมธาตุผสม โลหะผสมของทองแดงส่วนใหญ่ไม่สามารถทำให้แข็งหรือเพิ่มความแข็งแรงได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อนจึงต้องใช้การขึ้นรูปเย็นหรือการทำให้เป็นสารละลายของแข็งเพื่อเพิ่มสมบัติทางกล ซึ่งในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะนิยมใช้โลหะผสมทองแดง คือ ทองเหลือง (Brass) ซึ่งผสมด้วยธาตุสังกะสีเป็นธาตุหลักซึ่งละลายอยู่แบบแทนที่ โดยส่วนผสมจะอยู่ที่ 35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของสังกะสี และทองสัมฤทธิ์ (Bronze) คือ โลหะผสมของทองแดงกับธาตุอื่น เช่น ดีบุก อะลูมิเนียม ซิลิคอน และนิกเกิล โดยมีธาตุโลหะทองแดงประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โลหะผสมเหล่านี้ค่อนข้างจะแข็งแรงกว่าทองเหลืองแต่สามารถทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดี [12, 13]

ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติโดยทั่วไปของโลหะทองแดง [12]

สมบัติของโลหะทองแดง	
เลขอะตอม	29
มวลอะตอม	63.54 amu
จุดเดือด	1,083 °C (1,981 °F)
จุดหลอมเหลว	2,582 °C (4,680 °F)
ค่าความถ่วงจำเพาะ	8.95
เลขออกซิเดชัน	+1, +2
การจัดเรียงอิเล็กตรอน	[Ar] 3d ¹⁰ 4s ¹
ค่าความร้อนจำเพาะ	24.44 J/(mol·K) (25 °C)
ความหนาแน่น	8.96 g/cm ³

2.1.3 ประโยชน์ของโลหะทองแดง

ทองแดง เป็นโลหะที่มีความสำคัญในการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงเครื่องเรือนต่าง ๆ เพราะมีคุณสมบัติที่ดีมาก คือ โลหะที่ส่งผ่านไฟฟ้าได้ดี และถ่ายเทพลังงานความร้อนได้ดี มีความสามารถทนทานต่อการกัดกร่อนสูง และสามารถรีดขึ้นรูปได้ง่าย อุตสาหกรรมที่นำทองแดงมาใช้เป็นองค์ประกอบได้แก่ [2]

1) อุตสาหกรรมในการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

เนื่องจากทองแดงเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีจึงนำมาใช้เป็นวัสดุในการทำผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น สายไฟ สายเคเบิล มอเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พัดลม อุปกรณ์ไฟฟ้า เครื่องปรับอากาศ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ [13]

2) อุตสาหกรรมผลิตเครื่องประดับ

ทองแดงที่ใช้ในการทำเครื่องประดับนั้น เพราะว่าโลหะผสมทองแดงสามารถผลิตได้หลากหลายสี และมีกรรมวิธีในการสร้างสีของผิวขึ้นได้มาก ตั้งแต่สีชมพู สีเหลือง สีขาว สีแดง และสีดำ ถึงแม้ว่าโลหะทองแดงและโลหะผสมทองแดงนั้นจะมีปริมาณมาก แต่สมบัติโดยรวมไม่สามารถเทียบเท่าโลหะมีค่า จึงมักจะจัดให้โลหะนี้ใช้สำหรับเป็นเครื่องประดับเทียม หรืออาจเรียกได้ว่าเครื่องประดับตามสมัยนิยม [13, 14]

3) อุตสาหกรรมด้านงานก่อสร้าง

โลหะทองแดงถูกนำมาใช้ในการก่อสร้างหลากหลายรูปแบบ เช่น ทำหลังคา ท่อน้ำ ข้อต่อระบบระบายความร้อน และระบบปรับอากาศ

4) อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์

นำโลหะทองแดงมาใช้ทำเป็นชิ้นส่วนต่าง ๆ ภายในยานพาหนะ

5) อุตสาหกรรมผลิตเครื่องใช้ภายในครัวเรือน

ใช้ทำเป็นถ้วย จาน ชาม และของประดับตกแต่งภายในบ้าน

6) อุตสาหกรรมเครื่องทำความเย็น

ชิ้นส่วนของเครื่องทำความเย็น

7) อุตสาหกรรมการผลิตกระป๋องบรรจุภัณฑ์

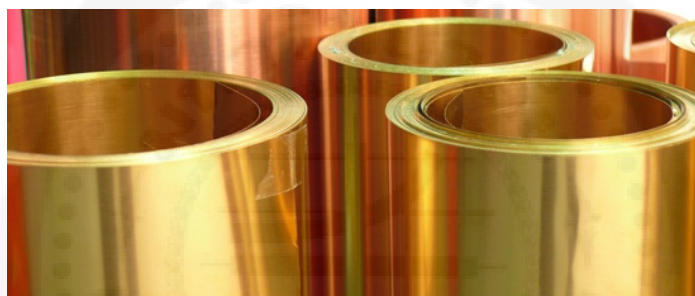
กระป๋องที่สามารถบรรจุอาหาร น้ำ สี และอื่น ๆ

2.1.4 โลหะผสมทองแดง (Copper Alloys)

โลหะผสมทองแดงที่มีทองแดงเป็นโลหะหลัก ที่นิยมใช้มานาน คือ ทองเหลืองและทองสัมฤทธิ์ แต่ยังมีโลหะทองแดงประเภทอื่น เช่น โลหะผสมทองแดงกับอะลูมิเนียม โลหะผสมทองแดง-นิกเกิล เป็นต้น [15]

2.1.4.1 ทองเหลือง

ทองเหลือง คือ โลหะที่ผสมกันระหว่างโลหะทองแดงและสังกะสี ซึ่งมีส่วนประกอบของธาตุทองแดงประมาณ 65 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนที่เหลือเป็นธาตุสังกะสีและธาตุอื่น ๆ มีลักษณะผิวที่แวววาว มีความแข็งแรงมาก สามารถทนต่อการกัดกร่อนและแรงกระแทกได้ดี จะนำไปใช้ประโยชน์ในเครื่องใช้ในครัวเรือน งานก่อสร้าง เครื่องประดับ เครื่องดนตรี เป็นต้น [15]



รูปที่ 2.2 โลหะทองเหลือง

ที่มา: <https://images.app.goo.gl/SHeH1JkwqHHwPDij9>

2.1.4.2 ทองสัมฤทธิ์

ทองสัมฤทธิ์ คือ โลหะที่ผสมกันระหว่างทองแดงและดีบุก [17] ซึ่งมีส่วนประกอบของธาตุทองแดงประมาณ 80 ส่วนที่เหลือเป็นธาตุดีบุกและธาตุอื่น ๆ หรือบางชนิดอาจจะสังกะสีและตะกั่วปะปนอยู่ จะนิยมใช้ทำเป็นชิ้นส่วนประกอบของเครื่องจักร ส่วนมากพบในงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เป็นหลัก [15]



รูปที่ 2.3 โลหะทองสัมฤทธิ์

ที่มา: <https://images.app.goo.gl/FJcmLdLoAjsBF4Lv7>

2.1.5 ปัญหาการเกิดความหมองบนพื้นผิวของโลหะทองแดง

การเกิดการหมองของทองแดงเกิดขึ้นในกระบวนการหลายขั้นตอน โดยในขั้นแรกจะทำให้โลหะมีสีแดงเข้ม จากนั้นเปลี่ยนเป็นสีดำ และสุดท้ายจะเป็นคราบสีเขียวน้ำทะเล ซึ่งตัวอย่างที่เห็นได้ชัด คือ เทพีเสรีภาพและสถานที่สำคัญของโลก เช่น มหาวิหารเบอร์ลิน พระราชวังเบลเวเดียร์ของเวียนนา และอาคารรัฐสภาในวิกตอเรีย การเสื่อมสภาพของทองแดงอาจจะเป็นลักษณะเฉพาะของโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม [16]

เครื่องใช้ทองแดงในชีวิตประจำวัน จะก่อให้เกิดการเสื่อมเสียเป็นสนิมน้ำตาลหรือสีดำเมื่อมีออกซิเจน ความชื้น การสัมผัสของมนุษย์ ฝุ่น และสารเคมีบางชนิด การหมองนี้สามารถนำไปสู่การกัดกร่อน นอกจากนี้ ความร้อนและสารประกอบที่เป็นกรดที่พบในอาหาร เช่น น้ำส้มสายชู หรือไวน์ ยังสามารถทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ในทันที [17]

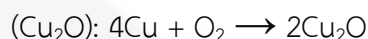
สาเหตุของการเกิดการหมอง มีดังนี้ [17]

- 1) ออกซิเจน: โลหะทองแดงเกิดการหมองได้ ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อมีออกซิเจน ไอออนและทองแดงทำปฏิกิริยากันเกิดกระบวนการออกซิเดชัน สร้างเป็นคอปเปอร์ออกไซด์
- 2) ความชื้น: ความชื้นจะช่วยกระตุ้นการเกิดกระบวนการออกซิเดชัน ซึ่งเพิ่มปฏิกิริยาของทองแดงและนำไปสู่การเกิดการหมอง
- 3) การสัมผัส: น้ำมันที่มีอยู่บนผิวของมนุษย์เป็นสาเหตุที่ทำให้ทองแดงเกิดการหมองได้ ในขณะที่การสัมผัสสิ่งของที่เป็นทองแดงบางอย่าง เช่น เครื่องใช้ เครื่องประดับ
- 4) ฝุ่น: อนุภาคฝุ่นประกอบด้วยเซลล์ผิวที่ตายแล้วและเศษซากจากทั้งมนุษย์และสัตว์เลี้ยง เศษซากอาจมีสารเคมีที่ทำปฏิกิริยากับทองแดงแล้วเกิดการหมอง

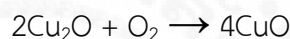
- 5) สารที่เป็นกรด: สารที่เป็นกรดจะทำปฏิกิริยากับผิวของทองแดง ทำให้เกิดการหมองและสึกกร่อนทันที อีกทั้งทำให้เกิดเกลือทองแดงที่เป็นพิษในอาหาร ด้วยเหตุนี้จึงไม่ควรนำภาชนะที่ทำจากทองแดงสำหรับอาหารมาใช้ใส่ที่มีความเป็นกรดสูง เช่น น้ำส้มสายชู นม และไวน์
- 6) ความร้อนและสารเคมี: ความร้อนและผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดบางชนิดอาจทำให้ทองแดงหมองได้ ความร้อนทำให้ทองแดงสามารถทำปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น

ขั้นตอนของการกัดกร่อนของทองแดงประกอบไปด้วย [16]

- 1) ขั้นตอนแรกของการเกิดคราบ ทองแดงจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศเพื่อสร้างคอปเปอร์ (I) ออกไซด์:



- 2) ทำให้ทองแดงเป็นสีแดง ในขั้นตอนที่สอง สารประกอบนี้ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเพื่อสร้างคอปเปอร์ (II) ออกไซด์ (CuO) ซึ่งเป็นสีดำ:



- 3) ขั้นตอนสุดท้ายจะเกิดขึ้นช้ากว่าและใช้เวลาหลายปี คอปเปอร์ (II) ออกไซด์ และ คอปเปอร์ (II) ซัลไฟด์ (CuS) ซึ่งเป็นสารประกอบสีดำอีกชนิดหนึ่งที่ก่อตัวเมื่อมีกำมะถันในอากาศ ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ที่เกิดจากน้ำในอากาศ เพื่อสร้าง 3 สารประกอบ คือ $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$, $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$, $\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$

2.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสตรอนเชียม (Strontium, Sr)

2.2.1 สารประกอบของสตรอนเชียม

สารประกอบสตรอนเชียมมีมูลค่าทางการค้ามาก โดยทั่วไปแล้วสารประกอบแคลเซียมและแบเรียมมีสมบัติคล้ายกันแต่มีราคาถูกกว่า อย่างไรก็ตาม มีการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมและที่อื่น ๆ ขณะนี้ยังไม่มีสิ่งอื่นมาทดแทนสีแดงเข้มที่ผลิตได้จากสตรอนเชียม เช่น สตรอนเชียมไนเตรต [$\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$] และสตรอนเชียมคลอเรต [$\text{Sr}(\text{ClO}_3)_2$] ในดอกไม้ไฟ พลุ และกระสุนติดตาม ประมาณ 5 - 10 เปอร์เซ็นต์ของการผลิตสตรอนเชียมทั้งหมดถูกใช้ในการทำดอกไม้ไฟ บางครั้งใช้สารสกัดจากน้ำตาลจากกากน้ำตาลเพราะรูปแบบมอนแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำได้จากการที่น้ำตาลที่สามารถสร้างขึ้นใหม่ได้อย่างง่ายดายโดยการกระทำของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสตรอนเชียมมอนแซ็กคาไรด์ใช้เป็นยากำจัดขนและเป็นส่วนผสมในสารเรืองแสงสำหรับอุปกรณ์เรืองแสงและสีเรืองแสง [18]



รูปที่ 2.4 ธาตุสตรอนเชียม

ที่มา: <https://images.app.goo.gl/3PUZS3TGQUR8tTfg8>

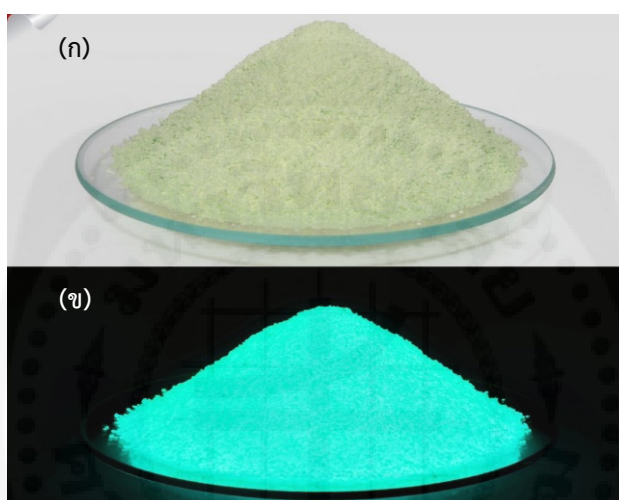
ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติทั่วไปของสตรอนเชียม [18, 19]

สมบัติของสตรอนเชียม	
เลขอะตอม	38
มวลอะตอม	87.62 amu
จุดเดือด	769 °C (1,416 °F)
จุดหลอมเหลว	1,384 °C (2,523 °F)
ค่าความถ่วงจำเพาะ	2.63
เลขออกซิเดชัน	+2
การจัดเรียงอิเล็กตรอน	[Kr] 5s ²
ค่าความร้อนจำเพาะ	26.4 J/(mol·K) (25 °C)
ความหนาแน่น	2.64 g/cm ³

2.3 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสตรอนเชียมอะลูมิเนต (Strontium Aluminate, SrAl_2O_4)

2.3.1 สตรอนเชียมอะลูมิเนต

สตรอนเชียมอะลูมิเนต เป็นสารประกอบอะลูมิเนตที่มีสูตรทางเคมี คือ SrAl_2O_4 และมีน้ำหนักโมเลกุล 205.58 กรัมต่อโมล [20] เป็นวัสดุเรืองแสงที่สามารถเรืองแสงได้ด้วยตัวเอง อีกทั้งเป็นวัสดุที่มีคุณภาพในการเรืองแสงที่มีประสิทธิภาพ ส่วนมากจึงนำมาใช้ในงานด้านความปลอดภัยที่ต้องการความสว่างในการเรืองแสงอย่างมากและยาวนาน และวัสดุกลุ่มสังกะสีซัลไฟด์ (Zinc Sulfide) เป็นวัสดุเรืองแสงที่มีคุณภาพรองจากกลุ่มสตรอนเชียมอะลูมิเนต จึงนิยมนำมาใช้อุปกรณ์ตกแต่งหรือของเล่นเท่านั้น เนื่องจากมีราคาไม่แพงเท่ากับวัสดุเรืองแสงกลุ่มแรก แต่คุณภาพการเรืองแสงก็ต่ำกว่าแบบสตรอนเชียมอะลูมิเนต [9]



รูปที่ 2.5 ผงสตรอนเชียมอะลูมิเนต (ก) ภายใต้แสงปกติ (ข) ภายใต้แสงยูวี

ที่มา: <https://images.app.goo.gl/b12zyoS13owdy8Jy5>

2.3.2 การเรืองแสงของสตรอนเชียมอะลูมิเนต [21]

สตรอนเชียมอะลูมิเนตจำเป็นต้องเจือด้วยวัสดุอื่น ซึ่งจะเป็นธาตุยูโรเพียมหรือดีสโพรเซียม เพื่อให้เกิดการเรืองแสงขึ้น การมีอยู่ของธาตุเจือปนนี้ในโครงสร้างผลึกทำให้สตรอนเชียมอะลูมิเนตสามารถยึดติดกับพลังงานจากโฟตอนที่เข้ามาได้ การรวมกันของสตรอนเชียมอะลูมิเนตและยูโรเพียมส่งผลให้วัสดุเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่ใช้มากในทั่วไปมีระยะเวลายาวนาน เป็นการเรืองแสงที่สามารถอยู่ได้นานถึง 14 ชั่วโมง

วัสดุเรืองแสงให้แสงอันเป็นผลมาจากพลังงานที่เก็บไว้ในอะตอม เมื่ออิเล็กตรอนตกลงมาจากวงโคจรที่มีพลังงานสูงไปพลังงานต่ำ จะเกิดการปล่อยโฟตอนของแสง ส่วนโฟโตลูมิเนสเซนซ์จะทำให้ว่าพลังงานที่ใช้ในการชนอิเล็กตรอนขึ้นไปในระดับที่สูงกว่านั้นมาจากแสง ในกรณีนี้จะอยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ต ดังนั้นสิ่งที่สตรอนเชียมอะลูมิเนตสามารถทำได้คือการดูดซับโฟตอนเมื่อสัมผัสกับแสง จากนั้นจะค่อย ๆ ปล่อยโฟตอนออกมาหลังจากที่ไม่เกิดการกระตุ้นแล้ว

2.4 หลักการเรืองแสง (Luminescence)

การเรืองแสง คือ การเกิดความสามารถในการปลดปล่อยแสงเมื่อวัตถุรับเอาพลังงานอย่างอื่นเข้ามา แล้วจึงเปลี่ยนกลับไปเป็นพลังงานในการเรืองแสงสว่าง สัตว์ที่มีความสามารถเรืองแสง เช่น หิ่งห้อยจะเปล่งแสงได้ก็ต่อเมื่อพลังงานเคมีภายในร่างกายเปลี่ยนไปเป็นพลังงานแสงสว่าง จอภาพเครื่องรับโทรทัศน์ จะประกอบขึ้นโดยอาศัยหลักการเรืองแสง ซึ่งจะสว่างขึ้นก็ต่อเมื่อเกิดการชนกันของลำอิเล็กตรอน การเรืองแสงแบ่งได้ 2 ประเภท คือ ฟอสฟอเรสเซนซ์ (Phosphorescence) และฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence) [22]

2.4.1 ความแตกต่างของฟอสฟอเรสเซนซ์และฟลูออเรสเซนซ์

การเรืองแสงนั้นส่วนมากจะเกิดจากการที่สารตัวนั้นดูดกลืนพลังงานโฟตอนของแสงเข้าไป ทำให้ไม่เกิดการยับยั้งของโครงสร้าง ทำให้เกิดความเครียดภายในโครงสร้างมาก ซึ่งทำให้โมเลกุลของสารเหล่านี้ต้องปลดปล่อยพลังงานในรูปแบบโฟตอนที่มีพลังงานต่ำกว่าปกติออกมาภายในทันที จึงเกิดการเรืองแสงแบบฟลูออเรสเซนซ์ ถ้าโมเลกุลนั้นสามารถที่จะเก็บพลังงานในรูปแบบโฟตอนเข้าหาตัวแล้วมันสะสมไว้ภายในโครงสร้าง ทำให้พลังงานแสงไม่สามารถถูกปลดปล่อยออกมาได้ทันที จึงทำให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานเมื่อเข้าสู่ที่มีตัวการสะท้อนแสงนั้นยังคงอยู่ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดการเรืองแสงแบบฟอสฟอเรสเซนซ์ [7]

ความแตกต่างของฟอสฟอเรสเซนซ์และฟลูออเรสเซนซ์ นอกจากจะเป็นระยะเวลาการปล่อยพลังงานโฟตอนออกมาหลังจากที่เกิดการดูดกลืนพลังงานโฟตอนเข้าไป ระดับพลังงานของโฟตอนถูกปล่อยออกมาจากกระบวนการฟอสฟอเรสเซนซ์นั้นจะมีค่าต่ำกว่า ซึ่งทำให้เห็นแสงที่เรืองออกมาจากฟอสฟอเรสเซนซ์ ภายใต้แสงยูวีเกิดสีในช่วงสีเหลืองถึงสีเขียว ในส่วนของฟลูออเรสเซนซ์ภายใต้แสงยูวีเกิดสีในช่วงน้ำเงินถึงสีม่วง [23]

2.5 การฉีดขึ้นรูปวัสดุผง (Powder Injection Molding)

2.5.1 การฉีดขึ้นรูปวัสดุผง [14]

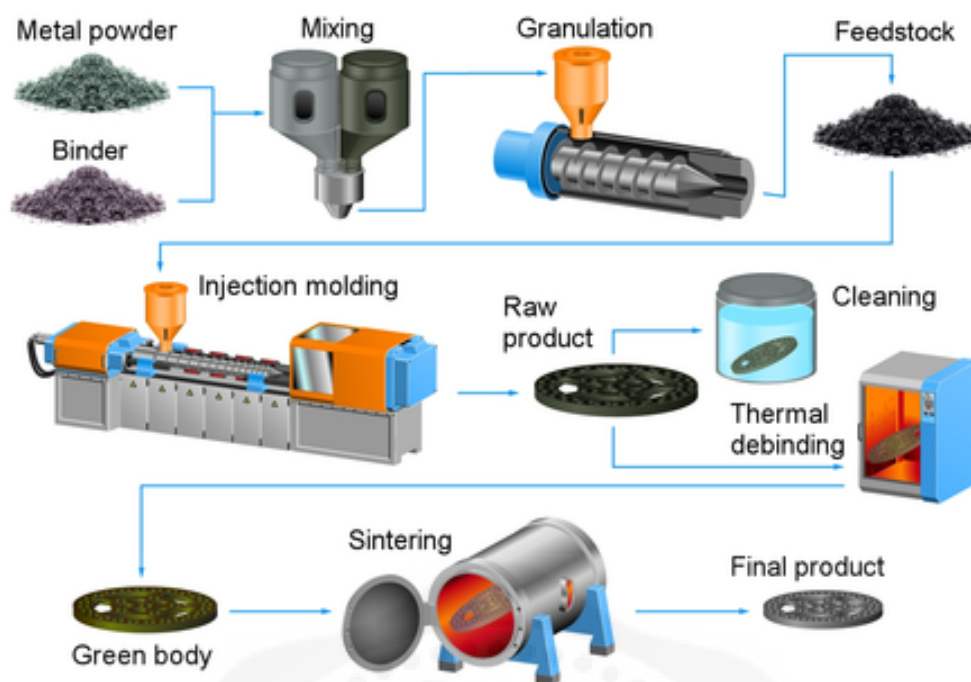
การฉีดขึ้นรูปวัสดุผงเป็นกระบวนการผลิตที่ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการฉีดพลาสติก (Plastic Injection Molding) และเทคโนโลยีทางโลหะผงวิทยา (Powder Metallurgy) โดยใช้เทคโนโลยีการฉีดพลาสติกสำหรับขึ้นรูป และเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงานฉีดโดยวิธีทางโลหะผงวิทยา ซึ่งหลักการทำงานคือการผสมผงวัสดุให้เข้ากับตัวประสาน (Binder) ผงวัสดุสามารถเป็นได้ทั้งโลหะ เซรามิก และวัสดุคอมโพสิต ซึ่งอนุภาคของผงควรมีขนาดต่ำกว่า 20 ไมโครเมตร เพื่อช่วยให้การเผาผนึกใช้เวลาน้อยลงและง่ายขึ้น

ข้อดีของการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง มีดังนี้ [14]

- 1) สามารถผลิตชิ้นงานที่มีขนาดเล็กและมีความซับซ้อนได้
- 2) ได้ความหนาแน่นของชิ้นงานสูง
- 3) ต้นทุนการผลิตต่อชิ้นงานต่ำ
- 4) ชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้มีขนาดใกล้เคียงกันและหัดตัวน้อย
- 5) ชิ้นงานที่บกพร่องสามารถนำมาขึ้นรูปใหม่ได้

ข้อจำกัดของการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง มีดังนี้ [14]

- 1) ต้นทุนของเครื่องจักรสูง
- 2) ชิ้นงานควรมีน้ำหนักต่ำกว่า 100 กรัม เพื่อให้ง่ายต่อการกำจัดตัวเชื่อมประสาน
- 3) บุคลากรในประเทศไทยยังไม่ได้ทราบถึงกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผงมากนัก



รูปที่ 2.6 กระบวนการทั้งหมดของการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง

ที่มา: <https://images.app.goo.gl/1sPaXMvH4PJau22R9>

2.5.2 ตัวเชื่อมประสาน (Binder)

ตัวเชื่อมประสานที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน คือ วัสดุโพลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก เช่น เทอร์โมพลาสติกชนิดโพลิเอทิลีน เทอร์โมพลาสติกชนิดโพลิโพรพิลีนและซีพีอี สำหรับเกรดสเตียริกจะนำมาใช้ในปริมาณต่ำเพื่อนำมาใช้เป็นสารลดแรงตึงผิวของวัสดุ และหล่อลื่นวัสดุต่าง ๆ โดยอัตราส่วนผสมจะใช้ผงวัสดุอัตราส่วนร้อยละ 60 โดยปริมาตร และตัวเชื่อมประสานใช้อัตราส่วนร้อยละ 40 โดยปริมาตร โดยที่ส่วนผสมจะเริ่มเกิดการผสมที่อุณหภูมิสูง จึงจะทำให้ตัวเชื่อมประสานอยู่ในสถานะของเหลว เครื่องผสมที่นิยมใช้มากที่สุด คือ เครื่องรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder) เนื่องจากสามารถผสมแล้วมีความสม่ำเสมอ แล้วถูกอัดรีดให้เป็นส่วนผสมเม็ดที่มีขนาดเล็กก่อนเย็นตัวลงส่วนผสมเม็ดที่จะนำไปเข้าเครื่องฉีดขึ้นรูปวัสดุผง ซึ่งลักษณะการทำงานจะคล้ายกับการฉีดขึ้นรูปพลาสติก แต่จะมีส่วนที่แตกต่าง คือ วัสดุที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป และสกรู ในการฉีดขึ้นรูปจะต้องเป็นวัสดุที่ทนทานต่อการสึกหรอได้ดี เนื่องจากความแข็งแรงของผงวัสดุที่ใช้ปริมาณสูงกับตัวเชื่อมประสาน อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปเป็นอุณหภูมิที่สูงพอทำให้ตัวเชื่อมประสานอยู่ในสถานะของเหลวในช่วงประมาณ 50 – 200 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเชื่อมประสาน ที่อุณหภูมินี้ผงวัสดุซึ่งมีจุดหลอมเหลวสูงกว่าตัวเชื่อมประสานมากยังคงอยู่ในสถานะของแข็ง อุณหภูมิที่ต่ำไปอาจจะส่งผลทำให้การฉีดขึ้นรูปวัสดุเกิดข้อผิดพลาดไม่เต็มแม่พิมพ์ ส่วนอุณหภูมิที่สูงมากเกินไปก็สามารถทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของตัวเชื่อมประสานได้ [14]

2.5.3 การกำจัดตัวเชื่อมประสาน (Debinding)

เมื่อฉีดขึ้นรูปชิ้นงานแล้วจะเกิดการเย็นตัวลงทำให้มีความแข็งแรง กระบวนการต่อไปเป็นการกำจัดตัวเชื่อมประสานออกจากวัสดุ เป็นขั้นตอนที่ใช้เวลานานมากที่สุดเมื่อเทียบกับขั้นตอนอื่น ๆ ในการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง โดยวิธีการกำจัดตัวเชื่อมประสานจะนิยมใช้ ความร้อน และสารละลาย แต่จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ตัวเชื่อมประสานที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป สำหรับการกำจัดตัวเชื่อมประสานจะใช้เวลา 18 – 24 ชั่วโมง โดยประมาณ จะใช้ความร้อนสูงกว่าในการผสมและการฉีดขึ้นรูป แต่จะต้องต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาผนึก หลังจากกระบวนการนี้อาจจะมีตัวเชื่อมประสานหลงเหลืออยู่พอที่จะรักษาสภาพของชิ้นงานไว้ สามารถนำไปเผาผนึกเพื่อไล่ตัวเชื่อมประสานออกได้ในขั้นตอนของการเผาผนึก [14]

2.5.4 การเผาผนึก (Sintering)

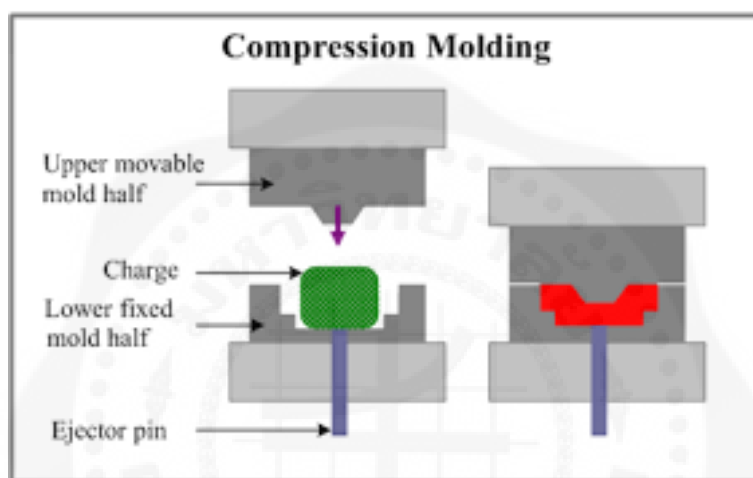
การเผาผนึกจะช่วยกำจัดตัวเชื่อมประสานที่หลงเหลืออยู่ แล้วช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความแกร่งให้กับชิ้นงาน ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาผนึกจะขึ้นอยู่กับชนิดของผงวัสดุที่เลือกใช้หลังจากการเผาผนึกชิ้นงาน จะเกิดการหดตัวลงเล็กน้อยร้อยละ 12 ของขนาดชิ้นงาน เพราะตัวเชื่อมประสานถูกกำจัดออก และจะเกิดรูพรุนภายในโครงสร้างของชิ้นงาน ทำให้การฉีดขึ้นรูปวัสดุผงต้องมีการพิจารณาแม่พิมพ์สำหรับการเปลี่ยนแปลงของขนาดชิ้นงาน และต้องทำอย่างระมัดระวังเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายกับชิ้นงาน [14]

2.6 การฉีดขึ้นรูปโลหะ (Metal Injection Molding)

การฉีดขึ้นรูปโลหะ (Metal Injection Molding) เป็นที่เติบโตอย่างรวดเร็วของโลหะวิทยาผง เนื่องจากชิ้นส่วนที่ผลิตโดย MIM สามารถแสดงคุณสมบัติการดัด ลักษณะ และโครงสร้างจุลภาค เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคที่มีเนื้อละเอียดที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับโลหะผสม สมบัติทางกลที่เป็นผลผลิตชิ้นงานออกมาแล้วจะมีความเทียบเท่ากับสมบัติการดัดและดีกว่าการหล่อชิ้นส่วนแบบดั้งเดิม โดยหลักการแล้ว การฉีดขึ้นรูปเป็นกระบวนการที่ค่อนข้างง่าย วัสดุดิบถูกทำให้หลอม ซึ่งประกอบด้วยให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิการฉีด จากนั้นจึงฉีดปริมาตรควบคุมของวัสดุดิบที่หลอมเหลวจากเครื่องฉีดวัสดุภายใต้แรงดันลงในแม่พิมพ์แบบปิด โดยเริ่มแข็งตัวที่ผนังโพรงของแม่พิมพ์[24] ถึงแม้ว่าเทคนิคการฉีดขึ้นรูปโลหะสามารถใช้สำหรับสร้างผงโลหะต่าง ๆ ได้ แต่การใช้งานมักจะจำกัดเฉพาะเหล็ก เหล็กกล้า และผงโลหะผสมเท่านั้น เนื่องจากมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในด้าน เช่น การผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ เครื่องจักรในสำนักงาน เครื่องมือทางการแพทย์และทันตกรรม ในที่นี้ เป็นที่น่าสนใจที่จะกล่าวถึงว่าไม่มีรายงานที่สำคัญของการใช้ผงทองแดงที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ทองแดงพิเศษบางอย่าง เช่น แผงวงจรระบายความร้อน[25] โดยทั่วไป การฉีดขึ้นรูปด้วยผงประกอบด้วย 4 ขั้นตอนพื้นฐานซึ่งประกอบด้วยเตรียมวัสดุดิบ การฉีดขึ้นรูป กระบวนการกำจัดตัวเชื่อมประสาน และกระบวนการเผาผนึก [14]

2.7 การอัดขึ้นรูป (Compression Molding)

กระบวนการขึ้นรูปโดยการอัดขึ้นรูปที่นิยมใช้กับใช้โพลิเมอร์ชนิดเทอร์โมเซต เช่น เมลามีน (melamine) และใช้ในการผลิตชิ้นงานที่ไม่มีความซับซ้อนมากนัก โดยจะนำวัตถุดิบใส่ลงในแม่พิมพ์แล้ว ทำการปิดแม่พิมพ์โดยใช้ความดันสูงพร้อมกับให้ความร้อนเพื่อให้พลาสติกเกิดการหลอมเหลวและแพร่ตัวไปตามช่องว่างของแม่พิมพ์ เมื่อโพลิเมอร์แข็งตัวจึงปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ซึ่งข้อเสียของกระบวนการนี้ คือ ผลิตชิ้นงานได้เป็นจำนวนน้อย และใช้เวลาในการผลิตนาน [26] ในการขึ้นรูปวัสดุผงที่ใช้วิธีการนี้จะเป็นการผสมผงวัสดุและตัวเชื่อมประสาน จากนั้นนำไปอัดผงเพื่อขึ้นรูปให้เป็นชิ้นงานก่อนที่จะนำไปเผาผนึก ดังนั้นการเผาผนึกทำให้ผงในชิ้นงานมีการเชื่อมติดกันยิ่งขึ้นและมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น



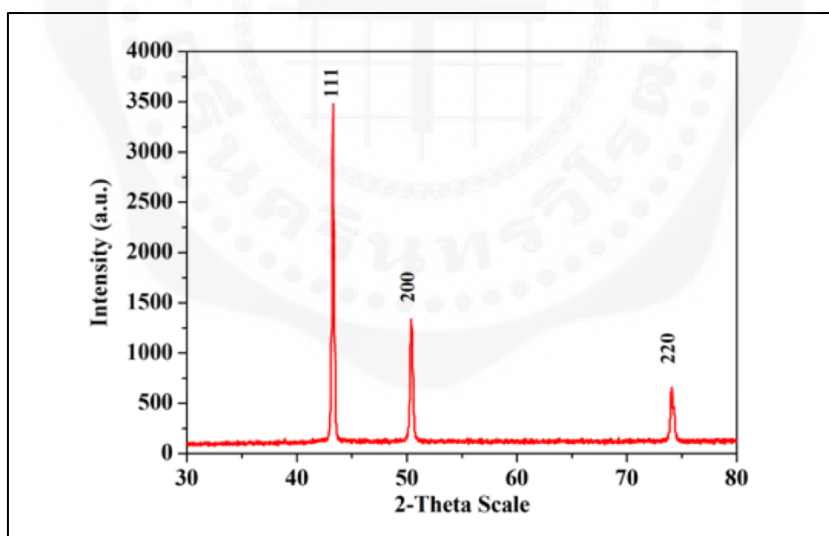
รูปที่ 2.7 กระบวนการอัดขึ้นรูป

ที่มา: <https://images.app.goo.gl/jQMmmN6UXW8PkHq99>

2.8 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer; XRD)

เทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เป็นการนำเอารังสีเอ็กซ์(X-ray) มาใช้วิเคราะห์และบอกชนิดของสารประกอบ โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่มีอยู่ในชิ้นงานตัวอย่าง สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพ (Qualitative) และเชิงปริมาณ (Quantitative) [27] ผลจากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ยังสามารถคำนวณหาขนาดของอนุภาคของชิ้นงานตัวอย่าง และองค์ประกอบต่าง ๆ ในชิ้นงานที่เป็นแผ่นฟิล์มได้อีกด้วย

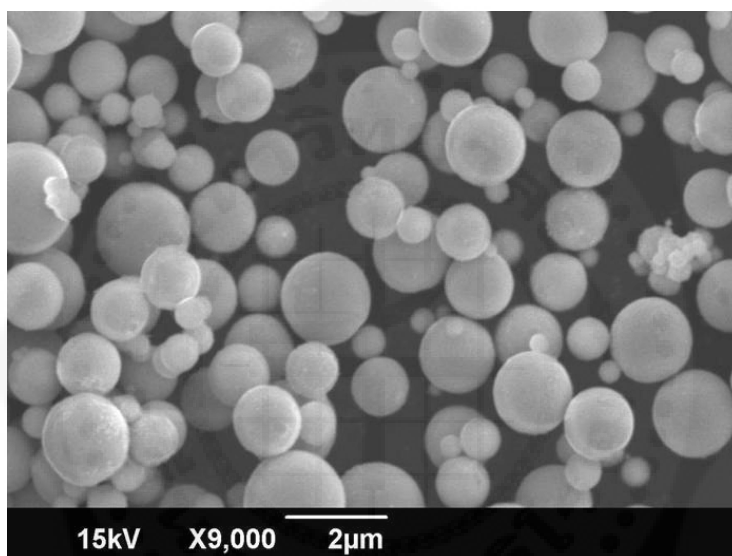
โดยหลักการทำงานของเครื่อง คือ จะอาศัยหลักการของการยิงรังสีเอ็กซ์ไปกระทบที่บริเวณผิวหรือผิงานชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบน และสะท้อนออกมาที่มุมต่าง ๆ กันโดยมีหัววัดสัญญาณ (Detector) เป็นตัวรับข้อมูล องค์ประกอบและโครงสร้างของสารจะมีองค์การในการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ในมุมที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นกับองค์ประกอบ และรูปร่างผลึกซึ่งผลที่ได้จึงสามารถบ่งชี้ชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้นๆได้นอกจากนั้นแล้วยังสามารถศึกษาและวิเคราะห์ ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก และความเค้นของสารประกอบในสารตัวอย่าง และเมื่อวิเคราะห์กับอุปกรณ์เสริม เช่น อุปกรณ์ให้ความเย็น ความร้อน จะสามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกในขณะทดสอบเปลี่ยนแปลงไป [27]



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการวิเคราะห์อนุภาคทองแดงโดยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ [28]

2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นการสร้างภาพที่ทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่าง ซึ่งภาพที่ได้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษา สัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง นิยมนำมาตรวจสอบลักษณะผิวภายนอกของตัวอย่าง ตรวจสอบการเรียงตัวของผลึกด้วยระบบการรับสัญญาณเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของตัวอย่างของแรงดึง โดย Energy Dispersive Spectrometry (EDS) เครื่องตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ ทำให้สามารถทำการวิเคราะห์ธาตุต่างๆ ที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้เพิ่มเติม โดยประเภทของวัสดุตัวอย่างเป็น โลหะ เซรามิก โพลีเมอร์ [29]



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างอนุภาคทองแดงโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [30]

ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Energy Dispersive Spectrometry สามารถวิเคราะห์ได้ 3 วิธี คือ [31]

1. Point analysis เป็นวิธีการวิเคราะห์ที่ให้ค่าของอิเล็กตรอนตกกระทบบนพื้นผิวของตัวอย่างตรงจุดที่ต้องการวิเคราะห์เพื่อวัดค่าปริมาณรังสีเอ็กซ์เฉพาะจุดตามที่ต้องการ
2. Line scan analysis เป็นวิธีการวิเคราะห์โดยใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดตามแนวบนตัวอย่างตรงตำแหน่งที่ต้องการ จะนิยมใช้หาเฟสในโครงสร้างผลึก
3. Mapping analysis เป็นวิธีการวิเคราะห์โดยใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดบนพื้นผิวของตัวอย่าง โดยทำการตรวจสอบแบบกระจายไปบนพื้นผิวของตัวอย่าง ซึ่งภาพที่ได้จะวิธีนี้จะเป็นการแสดงลักษณะของการกระจายของธาตุบริเวณพื้นที่นั้น ๆ



2.10 การทบทวนวรรณกรรม

2.10.1 การฉีดขึ้นรูปวัสดุผง (Powder Injection Molding)

จากการศึกษาวิจัยของ Ali Keshavarz Panahi และ Hossein Khoshkish ใช้วิธีการขึ้นรูปแบบวัสดุผงหรือ Powder injection molding ซึ่งสามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตและขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้เป็นอย่างดี โดยใช้วัสดุเป็นผงโลหะทองแดงขนาด 10 ไมโครเมตร ที่ผสมกับตัวเชื่อมประสานเป็นผงโพลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติกที่ช่วยให้ผงโลหะทองแดงเชื่อมติดกันได้ดียิ่งขึ้น โดยจะใช้เป็น Low density polyethylene 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร Paraffin wax 53 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และ Stearic Acid 7 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่ง Stearic Acid เป็นตัวช่วยหล่อลื่นวัสดุผงให้ฉีดขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น จะใช้อัตราส่วนผสมระหว่างผงวัสดุและตัวเชื่อมประสานคือ 68:32 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในกระบวนการขึ้นรูปมีการตั้งพารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการอย่างอุณหภูมิในการฉีดขึ้นรูป 130 องศาเซลเซียส ความดันในการฉีดขึ้นรูป 40 MPa และอุณหภูมิของแม่พิมพ์จะอยู่ที่ 40 องศาเซลเซียส ในการกำจัดตัวเชื่อมประสานจะทำโดยใช้ตัวทำละลายเป็นเบนซีนเป็นเวลา 72 ชั่วโมง แล้วตัวเชื่อมประสานที่เป็น Stearic Acid และ Paraffin wax จะถูกกำจัดออกไปและที่เหลืออยู่จะเป็น Low density polyethylene ซึ่งจะไปทำการเผาพริกภายใต้บรรยากาศของอาร์กอน โดยเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ต่อนาที และใช้อุณหภูมิในการเผาพริก 800, 870, 950 และ 1,050 °C เมื่อเผาพริกแล้วชิ้นงานจะมีการหดตัวลงเล็กน้อยในทุก ๆ อุณหภูมิ โดยในงานวิจัยนี้อุณหภูมิในการเผาพริกดีที่สุดคือ 1,050 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ความหนาแน่น 8.44 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีค่าความแข็ง 220 MPa ค่าความแข็งแรงขึ้นอยู่กัอุณหภูมิในการเผาพริกที่สูงขึ้น [32]

จากการศึกษาวิจัยของ Ali S. Muhsan และ Faiz Ahmad ได้ใช้วิธีการฉีดขึ้นรูปผงวัสดุซึ่งทำให้ประสบผลสำเร็จ โดยวัสดุที่ใช้จะเป็นผงโลหะทองแดงที่มีความบริสุทธิ์ 99.95 เปอร์เซ็นต์ แล้วอนุภาคมีขนาด 22 ไมโครเมตร กับ Multi-walled carbon nano tubes (MWCNTs) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 – 20 นาโนเมตร ความยาว 5 – 15 ไมโครเมตร และมีความบริสุทธิ์ 95 – 99 เปอร์เซ็นต์ แล้วนำมาผสมกับตัวเชื่อมประสานเป็น Paraffin wax, High density polyethylene (HDPE) และ Stearic acid ซึ่งได้ทำหลายส่วนผสมของตัวเชื่อมประสาน แต่ส่วนผสมที่ดีที่สุดคือ Paraffin wax 70 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร High density polyethylene 25 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และ Stearic acid 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งในการขึ้นรูปจะใช้อุณหภูมิในการฉีด 160 องศาเซลเซียส ความดัน 4 บาร์ กับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30 – 40 องศาเซลเซียส เมื่อทำการฉีดขึ้นรูปเสร็จแล้วทำการกำจัดตัวเชื่อมประสานออกโดยตัวทำละลายเฮปแทนที่ 60 องศาเซลเซียส จะกำจัด Paraffin wax และ Stearic acid ออกจากตัวชิ้นงาน จากนั้นนำไปกำจัดตัวเชื่อมประสานโดยใช้ความร้อนพร้อมทั้งการเผาพริกในขั้นตอนต่อไปโดยเพิ่มอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึง

450 องศาเซลเซียส แล้วคงอุณหภูมิไว้ 1 ชั่วโมง จะเป็นการกำจัด High density polyethylene (HDPE) ออก แล้วทำการเผาฟลักโดยเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที จาก 450 องศาเซลเซียส จนถึง 900 องศาเซลเซียส คงอุณหภูมิไว้ 1 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้อง หลังจากการเผาฟลักชิ้นงานจะมีการหดตัวประมาณ 21 เปอร์เซ็นต์ และน้ำหนักลดลง 14 เปอร์เซ็นต์ แต่ก็ยังมีสมบัติที่ดี [33]

จากการศึกษางานวิจัยของ R. Zauner, R. Nagel, E. Neubauer, K. Portschy, P.A Davies, M.A.Kearns ได้ใช้วิธีการฉีดขึ้นรูปโลหะหรือ Metal injection molding โดยการใช้ผงโลหะทองแดง ซึ่งงานวิจัยนี้จะศึกษาเกี่ยวกับความพรุนและสิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนในกระบวนการที่จะส่งผลกระทบต่อค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นส่วนที่ขึ้นรูปแล้ว วัสดุที่ใช้เป็นผงโลหะทองแดงที่มีค่าการนำไฟฟ้าที่สูง ขนาดของผงวัสดุ 22 และ 31 ไมโครเมตร และใช้ตัวเชื่อมประสานเป็น Wax-polymer ซึ่งจะใช้อัตราส่วนระหว่างผงโลหะ 60 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร กับตัวเชื่อมประสาน 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เมื่อฉีดขึ้นรูปแล้วจะทำการกำจัดตัวเชื่อมประสานและการเผาฟลักพร้อมกันภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 1,030 องศาเซลเซียส ชิ้นงานหลังจากการเผาแล้วจะมีขนาดกว้าง 56 mm x ยาว 48 mm x สูง 32 mm ผลที่ได้ค่าการนำไฟฟ้าของผงทองแดง 2 ขนาดมีมากกว่า 85 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นมาตรฐานของวัสดุโลหะทองแดง แต่ผงขนาด 22 ไมโครเมตร มีประสิทธิภาพต่ำกว่าขนาด 31 ไมโครเมตร เพราะขนาดที่เล็กทำให้การกระจายความร้อนและการนำไฟฟ้าได้ไม่ดีเท่ากับขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า [34]

จากการศึกษางานวิจัยของ N.N. Kadiman, M.O.A. Rashid, N. Muhamad and A.B. Sulong ได้ใช้วิธีการฉีดขึ้นรูปวัสดุผงในการทำคอมโพสิต Cu/GNPs เพื่อศึกษาอุณหภูมิการเผาฟลักที่ดีที่สุดที่จะทำให้มีความหนาแน่นสูงและความแข็งแรงดึงที่สูง โดยใช้วัสดุผงโลหะทองแดง ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 22 ไมโครเมตร กับผง Graphene nanoplatelets (GNPs) ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 15 ไมโครเมตร และตัวเชื่อมประสานเป็น Polyethylene glycol, Polymethyl methacrylate และ Stearic acid อัตราส่วนที่ใช้จะเป็นผงโลหะทองแดง 57.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร, ผง Graphene nanoplatelets (GNPs) 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และตัวเชื่อมประสาน 42 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในส่วนของตัวเชื่อมประสานมีการใช้ Polyethylene glycol (PEG) 73 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร Polymethyl methacrylate (PMMA) 25 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และ Stearic acid (SA) 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งในการฉีดขึ้นรูปจะใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ 40 องศาเซลเซียส อุณหภูมิในการฉีดขึ้นรูป 150 องศาเซลเซียส และความดันในการฉีด 9 บาร์ เมื่อได้ชิ้นงานแล้วทำการกำจัดตัวเชื่อมประสานโดยแช่น้ำกลั่นเป็นเวลา 7 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกำจัดตัวเชื่อมประสานโดยใช้ความร้อนในเตาเผาควอตซ์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส โดยเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึง 450 องศาเซลเซียส จากอุณหภูมิห้อง แล้วทำการเผาฟลัก 3 อุณหภูมิ คือ 950 องศาเซลเซียส, 1,000 องศาเซลเซียส และ 1,050 องศาเซลเซียส เพิ่มอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียสต่อนาที แล้วคงอุณหภูมิเป็น

เวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิห้อง ผลที่ได้จากการขึ้นรูปอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิเผาผนึกที่ดีที่สุด ในการทำให้มีความหนาแน่น 8 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และความต้านทานแรงดึง 210 MPa ซึ่งมากกว่าอุณหภูมิการเผาผนึกที่อุณหภูมิอื่น ๆ [35]

จากการศึกษาของ Nalattaporn Saelee, Nutthita ChuankrerkkuL, and Panitarn Wanakamol เป็นการผลิตคอมโพสิต zirconia-alumina โดยวิธีการขึ้นรูปวัสดุผงหรือ Powder injection molding และศึกษาผลของการเติมอะลูมินาต่อโครงสร้างจุลภาคกับสมบัติทางกายภาพ โดยวัสดุที่ใช้จะเป็นผง Zirconia และผง Alumina ใช้ตัวเชื่อมประสานเป็น Polyethylene glycol (PEG) กับ Polyvinyl butyral (PVB) อัตราส่วนที่ใช้จะเป็นผงวัสดุ 38 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร กับตัวเชื่อมประสาน 62 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในส่วนของตัวเชื่อมประสานจะเป็น Polyethylene glycol (PEG) 80 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และ Polyvinyl butyral (PVB) 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในงานวิจัยนี้มีการเติมส่วนผสมของอะลูมินาที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร การฉีดขึ้นรูปจะใช้อุณหภูมิในการฉีด 190 องศาเซลเซียส หลังจากการฉีดขึ้นรูปแล้วทำการกำจัด Polyethylene glycol (PEG) โดยแช่ในน้ำเปล่าอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อย่างน้อย 1 วัน จากนั้นกำจัด Polyvinyl butyral (PVB) โดยใช้ความร้อนโดยเพิ่มอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึง 450 องศาเซลเซียส แล้วค้างอุณหภูมิไว้ 1 ชั่วโมง แล้วทำการเผาผนึกต่อโดยเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึง 1,450 องศาเซลเซียส แล้วค้างอุณหภูมิไว้ 2 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้อง ซึ่งงานวิจัยนี้การเติมอะลูมินาที่มากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ทำให้มีรูพรุนที่มากและทำให้สมบัติการดัดงอลดลง การเติมอะลูมินาที่ต่ำกว่า 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จะได้สมบัติกำลังรับแรงดัดที่ 290 MPa และมอดุลัสแรงดัดที่ 46 GPa [36]

จากการศึกษาของ G. Goudah, F. Ahmad, O. Mamat และ Mohd. Afian Omar ได้กล่าวไว้ว่า กระบวนการ debinding เป็นกระบวนการเพื่อลดข้อบกพร่องด้วยการกำจัดสารยึดเกาะที่ปลดปล่อยและรวดเร็ว จึงมีการนำการ debinding ตัวทำละลาย ตามด้วยการ debinding ด้วยความร้อน สารยึดเกาะที่มีหลายองค์ประกอบที่เลือก รวมถึงส่วนประกอบที่มีความคงตัวที่ต่ำกว่าของพาราฟิน และกรดสเตียริก ซึ่งถูกกำจัดออกในระยะเริ่มต้นของการขจัดคราบและสร้างช่องรูพรุน การแยกสารตัวทำละลายใช้เฮปเทนในฐานะตัวทำละลายที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที เท่านั้น สำหรับชิ้นงานที่ถูกขึ้นรูปหลังจาก 45 นาที, 70 เปอร์เซ็นต์ และหลังจาก 5 ชั่วโมง, 96 เปอร์เซ็นต์ ของไขพาราฟิน และกรดสเตียริกสามารถถูกกำจัดออกได้ ในขั้นตอนนี้กระบวนการ debinding และ sintering ด้วยความร้อนได้ดำเนินการไปพร้อมๆ กัน เพื่อปรับอัตราการให้ความร้อนและสภาพแวดล้อมการเผาผนึกให้เหมาะสมที่สุด การเตรียมและศึกษาการเตรียมวัตถุดิบตั้งต้นที่มีปริมาณของแข็งต่างกัน ระบบสารยึดเกาะที่มีสูตรผสมเป็น 65 เปอร์เซ็นต์ PW, HDPE 30 เปอร์เซ็นต์ และเปอร์เซ็นต์น้ำหนั SA 5 เปอร์เซ็นต์ ถูกใช้โดยอิงตามคุณสมบัติทางรีโอโลยี พบว่า

อุณหภูมิการย่อยสลายเริ่มต้นที่ 170 องศาเซลเซียส ซึ่งหมายความว่าอุณหภูมิในกระบวนการผลิต เช่น อุณหภูมิการผสมและการฉีดขึ้นรูปจะต้องต่ำกว่าเพื่อไม่ให้เกิดการเสื่อมสภาพของสารยึดเกาะ การฉีดขึ้นรูปที่ความดันต่ำและการลอกและการเผาผนึกของตัวอย่างขึ้นรูปโดยใช้ตัวทำละลายและการแยกตัวด้วยความร้อน ตามมาด้วยการเผาผนึกภายใต้อัตราการให้ความร้อนและสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน และวัตถุดิบมี 59 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรทองแดง ที่มีอัตราการให้ความร้อนช้าลงส่งผลให้เป็นอิสระ ตัวอย่างข้อบกพร่อง การหดตัวแบบมีมิติของตัวอย่างที่เผาผนึกของวัตถุดิบต่าง ๆ ที่จัดเตรียมไว้แสดงให้เห็นว่าการหดตัวเกือบจะเท่ากันในสามมิติ [37]

จากการศึกษาวิจัยของ Faiz Ahmad, Ali Samer Muhsan และ M. Rafi Raza ได้กล่าวไว้ว่า การฉีดขึ้นรูป (MIM) ของวัสดุที่ไม่ใช่เหล็กเป็นวัสดุใหม่และซับซ้อนเนื่องจากลักษณะของวัสดุ MIM ของทองแดงสำหรับการใช้งานทางไฟฟ้า และในระบบอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมเป็นแผ่นระบายความร้อน อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ไฮเทคมีข้อกังวลอย่างจริงจังในการบรรลุผลสูงสุด ประสิทธิภาพของชิปอิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะที่มีอุณหภูมิสูงระหว่างการทำงาน ผลของมัน ประสิทธิภาพลดลง MIM เป็นเทคโนโลยีล้ำสมัยและสามารถผลิตแผ่นระบายความร้อนได้ตามกับรูปทรงของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การผลิตแผ่นระบายความร้อนรูปทรงที่ซับซ้อนโดยใช้ MIM ต้องการวัตถุดิบที่สามารถไหลได้ในเครื่องขึ้นรูป ความหนืดของวัตถุดิบในการขึ้นรูปขึ้นอยู่กับ การไหลฟิลเลอร์ MIM ได้รับการทดสอบสำหรับการขึ้นรูปและการไหลของโลหะ วัตถุดิบผสม มีความพยายามที่จะสร้าง เมทริกซ์โลหะที่ไม่มีข้อบกพร่อง คอมโพสิตโดยใช้ MIM อย่างไรก็ตาม การรวมคาร์บอนนาโนทิวบ์เข้ากับวัตถุดิบคือ แนวทางใหม่และการพัฒนาที่ดีซึ่งมีประสิทธิภาพสูงสำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จะจัดหาแอปพลิเคชัน MIM อย่างกว้างขวางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของชิปอิเล็กทรอนิกส์ ข้อมูลความหนืดที่ได้จากระบบสารยึดเกาะทำให้เกิดการเลือกสารยึดเกาะที่ใช้ Paraffin wax 70 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร, HDPE 25 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และ Stearic Acid 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่มีค่าต่ำกว่า ความหนืดเพื่อศึกษาต่อและพิจารณาว่าเหมาะสมที่จะนำมาผสมผงทองแดง ดีพอสมควรเนื้อหาที่เป็นของแข็งของทองแดงได้มาจากสารยึดเกาะที่ใช้ Paraffin wax 70 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร, HDPE 25 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และ Stearic Acid 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความหนืดของส่วนผสมเหมาะสมสำหรับ MIM และส่วนผสมถูกหล่อหลอมสำเร็จ ส่วนผสมตาม MWCNTs มีค่าสูงเล็กน้อยความหนืดและมากกว่า 1000 Pa.S อย่างไรก็ตาม แรงดันในการฉีดเพิ่มขึ้นในการผลิต ตัวอย่างทดสอบโดยไม่มีข้อบกพร่อง [38]

จากการศึกษาวิจัยของ Joamin Gonzalez-Gutierrez, Santiago Cano, Josef Valentin Ecker, Michael Kitzmantel, Florian Arbeiter, Christian Kukla and Clemens Holzer กล่าวไว้ว่า การผลิตสารเติมแต่ง (AM) มีศักยภาพที่จะเป็นวิธีการผลิตที่ยืดหยุ่นได้ที่สามารถนำไปประดิษฐ์ผลิตภัณฑ์เฉพาะตัวที่มีน้ำหนักเบา ปรับแต่งได้ คุณสมบัติทางกล ทางไฟฟ้า ความร้อน และยา สำหรับการใช้งานที่หลากหลายด้วยเหตุนี้ AM จึงมีความสำคัญในการวิจัยทางวิชาการและ

อุตสาหกรรมใน 20 ปีที่ผ่านมา ในบรรดาวัสดุที่ใช้ใน AM โลหะยังคงเป็นวัสดุที่สำคัญที่สุด โลหะชนิดหนึ่งนี้อาจได้รับประโยชน์จากการแปรรูปโดย AM คือทองแดงบริสุทธิ์ทองแดงและโลหะผสมมีค่าการนำความร้อนและไฟฟ้าสูงมาก ทำให้พวกเขาเป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดสำหรับระบบการจัดการความร้อนและไฟฟ้า นอกจากนี้ทองแดงและโลหะผสมมีคุณสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรียและไวรัส ผสมผสานสิ่งเหล่านี้คุณสมบัติที่มีอิสระในการออกแบบที่ AM นำมาอาจส่งผลให้มนุษย์ผลิตอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีประสิทธิภาพและเส้นทางนำไฟฟ้าที่ซับซ้อน เครื่องใช้ไฟฟ้า และอุปกรณ์ป้องกันการแพร่กระจายของโรค ที่พบมากที่สุดเทคนิคที่ใช้ในการผลิตสารเติมแต่งของโลหะ ได้แก่ การหลอมผงเบด (PBF) เทคนิคต่างๆ มีข้อสังเกตว่าการใช้ PBF กับทองแดงมีความท้าทายเนื่องจากมีค่าสูง การนำความร้อนทำให้เกิดการกระจายความร้อนสูงมากในระหว่างการประมวลผลซึ่งทำให้เกิดความเครียดตกค้าง ทองแดงยังมีการสะท้อนแสงสูงต่อแสงเลเซอร์ ทำให้การหลอมด้วยเลเซอร์แบบซีเล็กทีฟ (SLM) ของทองแดงบริสุทธิ์มีปัญหา และส่วนใหญ่จะใช้ในโลหะผสมทองแดงด้วยค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่า และการสะท้อนแสงที่ต่ำกว่า ข้อจำกัดนี้บางครั้งเอาชนะได้ด้วยการใช้ลำแสงเลเซอร์ที่มีกำลังมากกว่า (1000 W) โดยการทำเช่นนี้ความหนาแน่นสูงถึงสามารถหาได้จากทฤษฎี 99.9% ด้วย SLM ความเป็นไปได้อีกอย่างหนึ่งคือการเคลือบผงที่มีโพลีเมอร์ตามด้วยขั้นตอนการ debinding และ sintering แต่ความหนาแน่น และความบริสุทธิ์ของส่วนสุดท้ายอาจต่ำกว่าที่คาดหวัง การผลิตชิ้นส่วนทองแดงโดยการหลอมด้วยลำอิเล็กตรอน (EBM) ได้ค่อนข้างดีเนื่องจากการดูดกลืนและการสะท้อนของอิเล็กตรอนจะแตกต่างจากโฟตอน ดังนั้นพลังงานส่วนใหญ่จึงถ่ายเท โดยอิเล็กตรอนจะถูกดูดกลืนภายในอนุภาคทองแดง พลังงานที่สะสมเพียงพอเพื่อรวมทองแดงบริสุทธิ์ที่มีค่าการนำความร้อนสูงมาก การนำความร้อนสูงของทองแดงต้องให้ความร้อนกับผงแบ่งเพื่อลดข้อบกพร่อง เกิดจากการกระจายพลังงานความร้อนอย่างรุนแรงระหว่างกระบวนการหลอมเหลว อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการเผาไหม้ของผงทองแดงสูง อันตรายที่แบ่งหลวม ไม่สามารถเอาออกได้หากให้ความร้อนล่วงหน้าที่อุณหภูมิสูงหรือเป็นเวลานานๆ นอกจากนี้ยังมีต้นทุนเงินทุนที่สูงของอุปกรณ์ AM แบบแสง และโครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นในการจัดการกับผงระเบิดได้อย่างปลอดภัย ความซับซ้อนเหล่านี้มีนำไปสู่การพัฒนาเส้นทางการประมวลผล AM ที่ใช้สารยึดเกาะอื่น ๆ สำหรับตัวอย่างทองแดงประดิษฐ์ [39]

2.10.2 การเรืองแสง (Luminescence)

จากการศึกษาวิจัยของนายสุธี จูอิน วัสดุสารเรืองแสงมีการสร้างขึ้นจากสารสตรอนเชียมอะลูมินา ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับพลังงานจากแสงจากดวงอาทิตย์ และปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปแบบการเรืองแสงในที่มืด หรือเวลากลางคืน ซึ่งวัสดุชนิดนี้ไม่เป็นอันตรายและไม่มีรังสีใด ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อมนุษย์ มีอายุการใช้งานนานถึง 10 ปี เมื่อเก็บไว้ในพื้นที่ที่ความชื้นเข้าไม่ถึง วัสดุสารเรืองแสงสามารถจำแนกออกได้ 2 ประเภทคือ ผงเรืองแสงประเภทธรรมดา และผงเรืองแสงประเภท Ultraviolet (UV) ซึ่งแบบประเภทที่หนึ่งจะแสดงการ Glow Powder ที่มีความสามารถเรืองออกมานั้นจะมีประสิทธิภาพมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับคุณภาพ และขนาดของ

Glow Powder Pigment โดยที่เมื่อวัสดุผงมีขนาดของผงใหญ่จะให้ความสว่างมากขึ้นและระยะเวลาในการเรืองแสงได้นานกว่า 15 ชั่วโมง แต่ถ้าขนาดของผงมีความเล็กจะทำให้ความสามารถในการเรืองแสงออกมาได้น้อยมาก และเมื่อนำมาใช้ Glow Powder ที่ไม่เติมผงสีเข้าไปเลยจะให้ระยะเวลาการเรืองแสงนานที่สุดโดยเฉพาะสีเขียวที่เป็นสีเรืองแสงธรรมชาติที่ให้ ระยะเวลาเรืองแสงได้นานมากกว่า 13 ชั่วโมง และแบบประเภทที่สองเป็นวัสดุสารเรืองแสงที่มี UV นี้มีความสามารถใกล้เคียงกับ Glow Powder ทุกประการแต่มีคุณสมบัติพิเศษกว่า คือจะเกิดปฏิกิริยาในการเรืองแสงต่อแหล่งพลังงานที่ให้แสง Black Light ถ้าไม่ให้แหล่งพลังงานก็ จะหยุดทำปฏิกิริยาทันที แต่เมื่ออยู่ในที่มืดก็สามารถเรืองแสงตามปกติสามารถนำเอาวัสดุประเภทนี้ไปใช้ได้ เช่น ร้านอาหาร สถานบันเทิง หรือสถานที่ต่าง ๆ ที่ไม่มีแดดและสว่างมาก UV Glow Powder ไม่ละลายในน้ำ ดังนั้นสามารถนำเอา UV Glow Powder ไปใช้ร่วมกับสีหมึกพิมพ์ พลาสติก ยาง เรซิน และแก้วได้ อีกทั้งเรืองแสงออกมาได้หลายสี เช่น น้ำเงิน เขียว ม่วง [40]

จากการศึกษางานวิจัยของ Ivita Bite และคณะ เป็นการศึกษาเพื่อนำเสนอแนวทางใหม่ในการผลิตสารเคลือบเรืองแสงบนพื้นผิววัสดุโลหะ สตรอนเซียมอะลูมิเนียมเป็นวัสดุเรืองแสงสมัยใหม่ที่ได้รับคามนิยมนมากที่สุด โดยมีการเรืองแสงยาวที่อุณหภูมิห้องและมีการกระจายสเปกตรัมที่กว้างของการเรืองแสงในช่วงที่สามารถมองเห็นได้ อย่างไรก็ตาม แม้จะมีการวิจัยเป็นจำนวนมาก แต่วิธีการสังเคราะห์วัสดุดังกล่าวยังคงไม่มีประสิทธิภาพด้านพลังงานและไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สารเรืองแสงสตรอนเซียมอะลูมิเนียมเมื่อนำไปเจอกับยูโรเพียมไดวาเลนต์และไอออนดิสโพรเซียมไตรวาเลนต์ทำให้วัสดุเรืองแสงสามารถแสดงการเรืองแสงได้มีประสิทธิภาพมากที่สุด เรืองแสงได้ยาวนาน มีความทนทานต่อสารเคมีและความร้อนอีกทั้งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม การนำไปใช้งานในด้านความปลอดภัย เสื้อผ้า สัญญาณที่อยู่ในสนามบินและอาคาร ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการวิจัยนี้จะเป็นสตรอนเทียมคาร์บอเนต ยูโรเพียมออกไซด์ ดิสโพรเซียมออกไซด์ ผงสตรอนเซียมอะลูมิเนียม โลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด Al6082 แล้วทำการเคลือบด้วยกระบวนการ Plasma Electrolytic Oxidation บนพื้นผิวของโลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด Al6082 เมื่อทำการเคลือบจะได้ความหนาเฉลี่ยประมาณ 40 ไมโครเมตร จากนั้นขจัดสตรอนเทียมคาร์บอเนตส่วนเกินด้วยกรดไฮโดรคลอริก จากนั้นล้างด้วยน้ำที่ปราศจากไอออนและทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง แล้วทำการกระตุ้นด้วย UV เพื่อที่จะทำให้ทราบพลังงานที่กระตุ้นให้เกิดการเรืองแสงได้ สเปกตรัมของการเรืองแสงอยู่ที่ 540 นาโนเมตร ที่ทำการฉายแสง UV ที่ 320 นาโนเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับการเรืองแสงโดยทั่วไปของสตรอนเซียมอะลูมิเนียม ผลที่ได้ผงสตรอนเซียมอะลูมิเนียมให้สมบัติการเรืองแสงที่ดี มีแนวโน้มที่ดีสำหรับการใช้งานที่ต้องการการป้องกันโลหะจากสิ่งแวดล้อม [41]

จากการศึกษางานวิจัยของ Tawfik A.Khattab, Mohamed Rehan และ Tamer Hamouda เป็นการศึกษาสิ่งทอที่ตอบสนองต่อสิ่งเร้า เช่น สิ่งเร้าภายนอก เช่น แสง ค่า pH อุณหภูมิ ความดัน ตัวทำละลายที่มีขั้วต่างกัน ผลกระทบทางกลหรือแม่เหล็ก สารเคมี และไฟฟ้า แล้วเกิดการ

เปลี่ยนแปลง เช่น เสื้อผ้าอัจฉริยะที่สามารถปล่อยยาหรือสารให้ความชุ่มชื้นสู่ผิว หรือช่วยควบคุมการสั่นสะเทือนของกล้ามเนื้อระหว่างทำกิจกรรมกีฬา โดยทั่วไปองค์ประกอบหลักมี 3 อย่างที่ต้องปรากฏอยู่ในเสื้อผ้าอัจฉริยะ ได้แก่ การตรวจจับ การส่งงาน และหน่วยควบคุม ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้วัสดุเป็นผ้าฝ้าย 100 เปอร์เซ็นต์ และสารสีสตรอนเชียมอะลูมิเนียมเตทราฟอสเฟต เมื่อทำการผลิตผ้าฝ้ายออกมาแล้วทำการดูสีของผ้าฝ้ายที่พิมพ์ก่อนและหลังการฉายรังสี UV วัดโดยใช้เครื่องวัด Chroma Konica Minolta CR-400 พร้อมไฟส่องสว่าง D65 (แสงแดด อุณหภูมิสี 6504 K) ฟังก์ชันมาตรฐาน 2° และพื้นที่ส่องสว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มม. ค่าสีถูกกำหนดโดยใช้พื้นที่สีของห้องปฏิบัติการ CIE (International Commission on Illumination) ซึ่งเป็นระบบสามมิติที่มีพิกัด L^* (ความสว่าง) a^* (เขียว/แดง) และ b^* (สีน้ำเงิน/เหลือง) L^* ถือว่าเป็นค่าจาก 0 (สีดำที่มืดที่สุด) ถึง 100 (สีขาวที่สว่างที่สุด) a^* หมายถึงสีแดงเมื่อเป็นค่าบวกและสีเขียวเมื่อเป็นค่าลบ และ b^* หมายถึงสีเหลืองเมื่อเป็นค่าบวกและสีน้ำเงินเมื่อเป็นค่าลบ ในการทดลองนี้ ผ้าถูกฉายรังสีเป็นเวลา 1 นาทีโดยวางหลอด UV 365 นาโนเมตร และ 6 วัตต์ ฟลูออเรสเซนต์ไฟโตโครมิกของเม็ดสีฟอสเฟตบนผ้าสิ่งทอที่สามารถแปลงจากแสงยูวีไปเป็นแสงที่สามารถมองเห็นได้ สารฟอสเฟตรวมเข้ากับผ้าฝ้ายด้วยกระบวนการพิมพ์สกรีนที่มีทั้งเอฟเฟกต์ไฟโตโครมิกและฟลูออเรสเซนต์ วิธีนี้เป็นวิธีที่รวดเร็ว ง่ายต่อการจัดการ มีความคุ้มค่า และไม่กระทบต่อคุณสมบัติด้านความสวยงามของเสื้อผ้า ผ้าที่พิมพ์ด้วยเม็ดสีสตรอนเชียมอะลูมิเนียมเตทราฟอสเฟตจะมีคุณสมบัติความคงทนของสีได้ดีกว่าผ้าที่พิมพ์ด้วยเม็ดสีอินทรีย์ธรรมดา [42]

จากการศึกษางานวิจัยของ Doory Kim เป็นการศึกษาการพัฒนาสารเรืองแสงที่เจือด้วยแลนทาไนด์ที่มีการเรืองแสงที่เพิ่มขึ้นและคงอยู่ยาวนานมากขึ้น อะลูมิเนียมเอิร์ธเจือธาตุเราร์เอิร์ธได้รับการพัฒนาให้เป็นสารเรืองแสงที่มีประสิทธิภาพดี เมื่ออะลูมิเนียมเอิร์ธอะลูมิเนียมเตทราฟอสเฟต (Al_2O_3) ถูกเจือด้วยไอออนของเราร์เอิร์ธสามารถแสดงการเรืองแสงได้เป็นระยะเวลานาน จึงถือเป็นวัสดุเรืองแสงที่ดีเยี่ยม ธาตุเราร์เอิร์ธเป็นกลุ่มของธาตุ 17 ชนิดซึ่งประกอบด้วยแลนทาไนด์ อิตเทรียม (Y) และสแกนเดียม (Sc) อะลูมิเนียมสตรอนเชียมเจือยูโรเพียม ($\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$) ซึ่ง Eu^{2+} จะถูกใช้เป็นสารเจือของตัวกระตุ้นใน SrAl_2O_4 เพราะสามารถแสดงการเรืองแสงที่ยาวนาน เพราะ Sr^{2+} และ Eu^{2+} ไอออนมีรัศมีไอออนิกที่คล้ายกัน และมีการใช้วิธีการสังเคราะห์หลายวิธีในการเตรียมฟอสเฟตอะลูมิเนียมเตทราฟอสเฟตชนิดอัลคาไลน์เอิร์ธเจือแลนทาไนด์ และพบว่าข้อดีและข้อเสียเกิดขึ้นจากอุณหภูมิปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน และขนาดอนุภาคของผลิตภัณฑ์ คุณสมบัติการเรืองแสงของสารเรืองแสงอะลูมิเนียมเตทราฟอสเฟตส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของไอออนแลนทาไนด์เจือและเมทริกซ์โฮสต์สภาพแวดล้อมเป็นตัวกระตุ้นแลนทาไนด์ ซึ่งเป็นการเรืองแสง [43]

จากการศึกษางานวิจัยของ Anesh Manjaly Poullose และคณะ ซึ่งวัสดุเรืองแสงที่ใช้สตรอนเชียมอะลูมิเนียมเตทราฟอสเฟตสองชนิดที่แตกต่างกัน $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}, \text{Dy}$ (S1) และ $\text{Sr}_4\text{Al}_{14}\text{O}_{25}:\text{Eu}, \text{Dy}$ (S2) หลอมรวมกับโพลิโพรพิลีน (PP) และประเมินคุณสมบัติการเรืองแสงหลังจากการกระตุ้นที่ 320 นาโน

เมตรคอมโพสิต PP/S1 มีการปล่อยสีเขียวและ PP/S2 สร้างการปล่อยสีน้ำเงินที่ 520 นาโนเมตรและ 495 นาโนเมตรตามลำดับ แล้วการทดสอบการเรืองแสงโดยใช้เครื่อง Fluorescence Spectrophotometer สเปกตรัมการแผ่รังสีเรืองแสงของคอมโพสิต PP/S1 และ PP/S2 สเปกตรัมการแผ่รังสีถูกรวบรวมที่การกระตุ้น 320 นาโนเมตร ตามที่คาดไว้ ความเข้มของการปล่อยก๊าซในสเปกตรัมของ S1 และ S2 นั้นสูงกว่าของคอมโพสิต PP เนื่องจากความทึบแสงและความทนทานต่อรังสียูวีของ PP ใน PP / S1 และ PP / S2 โดยการปล่อยการเรืองแสงของคอมโพสิต S1 และ PP/S1 ความยาวคลื่นที่กระตุ้น 320 นาโนเมตร จะมีการแผ่รังสีสีเขียวที่ 520 นาโนเมตร และคอมโพสิต S2 และ PP/S2 ความยาวคลื่นที่กระตุ้น 320 นาโนเมตร จะมีการปล่อยสีน้ำเงินที่ 495 นาโนเมตร [44]

จากการศึกษาวิจัยของ Tianyou Peng และคณะ เป็นการเจือสตรอนเชียมอะลูมินตในยูโรเพียมและดิสโพรเซียม เพื่อให้เกิดการเรืองแสงที่สว่างและยาวนาน โดยการสังเคราะห์กับ Aluminum nitrate, Strontium nitrate, Dysprosium nitrate และ Europium nitrate นำไปละลายกับน้ำกลั่นแล้วนำไปเผาในเตาหมuffle ที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส ถ้าที่ได้จากการเผาไหม้มีปริมาณมากและเกิดฟอง ซึ่งทำให้สามารถบดได้เพื่อให้ได้ผงตั้งต้นของ $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu,Dy}$ หลังจากบดแล้วนำมาอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศคาร์บอน แล้วเมื่อนำมาทดสอบการเรืองแสงโดยสเปกตรัมของการกระตุ้นและการปล่อยออกมา ซึ่งการกระตุ้นด้วยแสงยูวีที่ 513 นาโนเมตรให้เกิดการเรืองแสงเป็นสีเขียว ทำให้ทราบว่าอนุภาคนาโนของสารเรืองแสง $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu,Dy}$ สามารถสังเคราะห์ได้โดยกระบวนการเผาไหม้ ควบคุมไปกับการให้ความร้อนแก่ผงที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ 1,100 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศคาร์บอน ผลการวิเคราะห์พบว่าฟอสเฟอร์ระดับนาโนเมตรมีเฟส $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu,Dy}$ แบบ monoclinic บริสุทธิ์ โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 15 – 45 นาโนเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีปฏิกิริยาโซลิดสเตต จะเกิดการกระตุ้นและการปล่อยการเรืองแสงระดับนาโนเมตร [45]

2.10.3 การต้านทานความหมอง (Tarnish Resistance)

จากงานวิจัยของดร.ณัฐพล ชมแสง และคณะ งานวิจัยเกี่ยวกับการป้องกันการหมองนั้น ส่วนมากนิยมใช้การเคลือบป้องกันการหมอง ดังนั้นจึงมีวิธีการในการป้องกันการหมองหลากหลาย เช่น มีการพัฒนาระบบการเคลือบด้วย plasma polymer เพื่อใช้ในการผลิตเงินในการทำเครื่องประดับขึ้นในประเทศเยอรมันพบว่าชั้นฟิล์มที่เคลือบบนตัวเรือนเครื่องประดับนั้น สามารถป้องกันการหมองได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังสามารถป้องกันการขีดข่วนที่เกิดขึ้นตอนการบรรจุได้นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการป้องกันการหมองด้วยการเคลือบด้วยฟิล์มของ poly (amino-triazole) และ hexadecane-thiol โดยการใช้กระบวนการสังเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมี การวิเคราะห์ฟิล์มที่เคลือบโดยการวัดการสะท้อนแสงและการทดสอบด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี พบว่าฟิล์มที่เกิดขึ้นมีลักษณะใส ไม่มีสี แต่ฟิล์มของ thiol จะมีการหลุดลอกได้ง่ายเมื่อโดนความร้อนจากการทดลองหล่อโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงระบบ Ag-Al, Ag-Cu-Al และ Ag-Cu-Al-Si-Mg ในห้องปฏิบัติการหล่อโลหะ คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา [46]

จากการศึกษางานวิจัยของ สุภิญญา วงษ์ศรีรักษา เป็นการศึกษาการต้านทานการหมองของโลหะผสมเงิน ทองแดง และแมงกานีส ซึ่งการวัดการต้านทานความหมองของโลหะจะทำการวัดค่าสีผิววัสดุและสมบัติทางกลโดยการวัดสมบัติทางกลในงานวิจัยจะใช้วิธีการวัดความแข็งวิกเกอร์ ใช้ น้ำหนักกดที่ 1 กิโลกรัม เป็นเวลา 10 วินาที แล้ววัดความยาวเส้นทแยงมุมทั้ง 2 ด้าน หาค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ จะทำให้ทราบว่าการที่ชิ้นงานมีส่วนผสมของทองแดงในปริมาณมากจะทำให้มีความแข็งมากเช่นกัน และการวัดค่าสีผิววัสดุใช้วิธีวัดค่าความสว่าง L^* และค่าสี a^* , b^* ที่สะท้อนจากพื้นผิวของชิ้นงานด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ ทั้งก่อนการทดสอบในบรรยากาศซัลเฟอร์และหลังการทดสอบในบรรยากาศซัลเฟอร์ ใช้ระบบการวัดสีคือค่าความสว่าง L^* คือ $L^* = 0$ จะเป็นสีดำ $L^* = 100$ จะเป็นสีขาว ค่าสี a^* ถ้าเป็นค่าบวกจะเป็นสีแดง และถ้าเป็นค่าลบจะเป็นสีเขียว และ ค่าสี b^* ถ้าเป็นค่าบวกจะเป็นเหลือง และถ้าเป็นค่าลบจะเป็นสีน้ำเงิน ซึ่งค่านี้สามารถนำมาหาสีที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงานได้ ซึ่งชิ้นงานที่เติมแมงกานีสในปริมาณมากในโลหะผสมก็ทำให้สามารถมีความสามารถในการต้านทานความหมองได้ดีขึ้น [47]

2.10.4 การอัดขึ้นรูปวัสดุผง

จากการศึกษางานวิจัยของ อ. ปพน สมประสงค์ เป็นงานเกี่ยวกับการศึกษาสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคโดยการอัดด้วยแม่พิมพ์ ซึ่งวัสดุผงที่ใช้มีหลายชนิด ได้แก่ ผงเหล็ก ผงทองแดง ผงคาร์บอน และตัวเชื่อมประสานเป็น Zinc Stearate นำไปผสมในเครื่องผสมโลหะที่ต้องไม่ทำให้อุณหภูมิของวัสดุเล็กลงไปกว่าเดิม เมื่อทำการอัดขึ้นรูปได้แล้วต้องทำการตรวจสอบให้ความหนาแน่นตรงตามทฤษฎี หรือใกล้เคียงมากที่สุด แต่ชิ้นงานที่ได้จะต้องนำไปเผาผนึกเพื่อให้ผงหลอมจับตัวกันแน่นยิ่งขึ้น ในขั้นตอนการเผาผนึกจะนำชิ้นงานลำเลียงผ่านสายพานที่ความเร็ว 8 เซนติเมตรต่อนาที

อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ใช้เวลาประมาณ 27 นาที จากนั้นเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,121 องศาเซลเซียส ใช้เวลาประมาณ 25 นาที โดยมีการเติมแก๊สไฮโดรเจน 0.3 – 0.8 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และแก๊สไนโตรเจน 2.5 – 3.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เพื่อเป็นการกำจัดอากาศที่อยู่ในเตาเผา หลังจากนั้นนำไปตรวจสอบความหนาแน่น เมื่อได้ชิ้นงานออกมาแล้วนำไปทดสอบสมบัติทางกลในด้านการต้านแรงดึง และการทนต่อแรงกระแทก ผลที่ได้จากการทดสอบสมบัติทางกลเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปแบบทั่วไปและการขึ้นรูปแบบอัด พบว่าสมบัติทางกลของการอัดนั้นมีค่าต่ำกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปแบบทั่วไปตามมาตรฐานเหล็ก AISI 1090 [48]



บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 3.1.1 เทอร์มิเตอร์ (Thermometer)
- 3.1.2 ชุดเครื่องแก้วในการเตรียมสารเคมี
- 3.1.3 เครื่องขัดโลหะพร้อมกับอุปกรณ์ขัดโลหะ
- 3.1.4 กระดาษ SiC เบอร์ 1,000 และ 1,200
- 3.1.5 เครื่องชั่งน้ำหนักของขึ้นงาน
- 3.1.6 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope)
- 3.1.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)
- 3.1.8 เครื่องมือทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers hardness tester)
- 3.1.9 เครื่องวัดการเรืองแสงสเปกโตรฟลูออโรมิเตอร์ (Fluorescence spectrophotometer)
- 3.1.10 เครื่องมือวัดค่าสีบนผิววัสดุ (Colorimeter)
- 3.1.11 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer)
- 3.1.12 เครื่องอัดขึ้นรูปวัสดุผง (Compression molding machine)
- 3.1.13 แม่พิมพ์สำหรับอัดผง

3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 ผงโลหะทองแดงบริสุทธิ์ ขนาด 300 mesh หรือประมาณ 40 – 50 ไมโครเมตร

3.2.2 ผงเรืองแสงสตรอนเชียมอะลูมิเนต (สีเขียว MPG450) ขนาด 30 ไมโครเมตร

3.2.3 โพลีไวนิลแอลกอฮอล์

3.3 สารเคมี

3.3.1 โซเดียมซัลไฟด์ไฮเดรต

3.3.2 ผงซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ขนาด 1 และ 0.25 ไมครอน

3.3.3 แอลกอฮอล์

3.3.4 น้ำ Reverse Osmosis (RO)

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

ในแต่ละส่วนผสมของโลหะผสมทองแดงทั้ง 4 ชุด ทำการทดลอง ดังนี้

3.4.1 เตรียมผงโลหะทองแดงบริสุทธิ์ที่ปริมาณ 70, 80, 90 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและผงเรืองแสงสตรอนเชียมอะลูมิเนต 30, 20, 10 และ 0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ชั่งน้ำหนักของผงชิ้นงานรวม 12 กรัม ของทั้ง 4 อัตราส่วน นำไปอัดขึ้นรูปชิ้นงาน 8 ชิ้นงาน โดยมีอัตราส่วนดังนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงส่วนผสมของโลหะทองแดงและน้ำหนักรั้วที่ใช้

ชิ้นงาน	ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)		น้ำหนักรั้วที่ใช้ (กรัม)	
	ผงทองแดง	ผงสตรอนเซียม	ผงทองแดง	ผงสตรอนเซียม
		อะลูมิเนียม		อะลูมิเนียม
A, Cu100	100	-	12.00	-
B, Cu90	90	10	10.80	1.20
C, Cu80	80	20	9.60	2.40
D, Cu70	70	30	8.40	3.60

- 3.4.2 จากนั้นนำส่วนผสมระหว่างผงโลหะทองแดงกับผงเรืองแสงสตรอนเซียมอะลูมิเนียมมาผสมกับ
ตัวเชื่อมประสานชนิดโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ที่มีปริมาณ 0.0631 กรัม ผสมกับน้ำ Reverse
Osmosis (RO) 0.5684 กรัม
- 3.4.3 นำชุดทดสอบมาเข้าเครื่องอัดขึ้นรูปวัสดุผง โดยใช้แรงอัด 34.23 MPa โดยมีขนาดของ
ชิ้นงานทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.50 เซนติเมตร ความหนา 0.64 เซนติเมตร รัศมี
1.25 เซนติเมตร
- 3.4.4 นำชิ้นงานไปทำการเผาขึ้นรูปภายใต้บรรยากาศอาร์กอน ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ซึ่งทำ
การเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่อนาทีจนถึงอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส แล้วคง
อุณหภูมิไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้อง เพื่อกำจัด
ตัวเชื่อมประสาน

3.5 วิธีการตรวจสอบ

นำชิ้นงานมาทดสอบ 5 การทดสอบ ดังนี้

3.5.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

3.5.1.1 เตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมทองแดง ที่มีส่วนผสมของปริมาณสตรอนเชียมอะลูมิเนียมแตกต่างกัน โดยนำชิ้นงานที่อัดขึ้นรูปแล้วเตรียมผิวโดยขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1,000 และ 1,200 ตามลำดับ แล้วขัดละเอียด ด้วยผงขัดอะลูมินา ขนาด 1 และ 0.25 ไมครอน ตามลำดับ หลังจากนั้นล้างคราบสกปรกด้วยน้ำและแอลกอฮอล์ แล้วเป่าให้แห้ง

3.5.1.2 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

3.5.1.3 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ทางแสง ที่กำลังขยาย 50, 100 และ 200 เท่า เพื่อบันทึกรูปตามกำลังขยาย

3.5.1.4 วิเคราะห์และสรุปผล

3.5.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.5.2.1 เตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมทองแดง ที่มีส่วนผสมของปริมาณสตรอนเชียมอะลูมิเนียมแตกต่างกัน โดยนำชิ้นงานที่อัดขึ้นรูปแล้วเตรียมผิวโดยขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1,000 และ 1,200 ตามลำดับ แล้วขัดละเอียด ด้วยผงขัดอะลูมินา ขนาด 1 และ 0.25 ไมครอน ตามลำดับ หลังจากนั้นล้างคราบสกปรกด้วยน้ำและแอลกอฮอล์ แล้วเป่าให้แห้ง

3.5.2.2 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.5.2.3 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ทางแสง ที่กำลังขยาย 200, 500 และ 1,000 เท่า เพื่อบันทึกรูปตามกำลังขยาย

3.5.2.4 ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของบริเวณพื้นผิวชิ้นงานด้วยเทคนิค Mapping analysis

3.5.2.5 วิเคราะห์และสรุปผล

3.5.3 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers hardness test)

3.5.3.1 เตรียมชิ้นงานเพื่อทำการวัดความแข็ง โดยขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1,000

และ 1,200 ตามลำดับ แล้วขัดละเอียดด้วยผงขัดอะลูมินา ขนาด 1 และ 0.25 ไมครอน

ตามลำดับ ล้างคราบสกปรกด้วยน้ำและแอลกอฮอล์ แล้วเป่าให้แห้ง

3.5.3.2 วัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ตามมาตรฐาน ด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ระบบ

ดิจิตอล โดยให้น้ำหนักกด 0.2 กิโลกรัม เป็นเวลา 10 วินาที

3.5.3.3 วัดขนาดรอยกดทั้งสองแกน (d_1 และ d_2) แล้วคำนวณค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (HV)

จากสูตรดังสมการ

$$HV = \frac{2P \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d^2} = \frac{1.8544P}{d^2}$$

เมื่อ P = แรงกด (กิโลกรัม)

d = ความยาวเฉลี่ยของเส้นทแยงมุม 2 ด้าน (d_1 และ d_2) หน่วยเป็น

มิลลิเมตร

α = มุมระหว่างหน้าของหัวกดเพชรทรงปิรามิด = 136 องศา

3.5.3.4 เปลี่ยนบริเวณกดใหม่ แล้วกดซ้ำตามข้อ 3.5.2.2 และ 3.5.2.3 อีกจำนวน 6 ครั้ง จากนั้น

คำนวณค่าความแข็งวิกเกอร์

3.5.3.5 หาค่าเฉลี่ยของความแข็ง แล้ววิเคราะห์และสรุปผล

3.5.4 การทดสอบความสามารถในการเรืองแสง

- 3.5.4.1 นำชิ้นงานที่ได้จากการอัดขึ้นรูปมาเตรียมผิวชิ้นงานโดยขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1,000 และ 1,200 ตามลำดับ ล้างด้วยน้ำและแอลกอฮอล์ แล้วเป่าให้แห้ง ชั่งน้ำหนักชิ้นงานก่อนการทดสอบ
- 3.5.4.2 กำหนดค่าการกระตุ้น (Excitation) ที่ 390 นาโนเมตร ที่เครื่องวัดการเรืองแสงสเปกโตรฟลูออโรมิเตอร์ แล้วนำชิ้นงานไปวัดค่าการปลดปล่อยแสง
- 3.5.4.3 วิเคราะห์และสรุปผล

3.5.5 การทดสอบความต้านทานความหมอง

- 3.5.5.1 นำชิ้นงานที่ได้จากการอัดขึ้นรูปมาเตรียมผิวชิ้นงานโดยขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1,000 และ 1,200 ตามลำดับ ล้างด้วยน้ำและแอลกอฮอล์ แล้วเป่าให้แห้ง ชั่งน้ำหนักชิ้นงานก่อนการทดสอบ แล้ววัดค่าความสว่าง L^* และค่าสี a^* , b^* ด้วยเครื่องวัดค่าสี (Colorimeter)
- 3.5.5.2 แขนงชิ้นงานไว้ในภาชนะปิดที่มีบรรยากาศของไอซัลเฟอร์ ซึ่งได้จากการละลายโซเดียมซัลไฟด์ไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{S} \cdot \text{H}_2\text{O}$) ในน้ำจนอิ่มตัว แล้วสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงสีผิวของชิ้นงาน เมื่อเวลาผ่านไป 15, 30 และ 120 นาที จากนั้นบันทึกผล
- 3.5.5.3 ชั่งน้ำหนักชิ้นงานหลังจากการทดสอบการหมอง แล้วนำชิ้นงานไปวัดค่าความสว่าง L^* และค่าสี a^* , b^* ด้วยเครื่องวัดค่าสี (Colorimeter) อีกครั้ง
- 3.5.5.4 นำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิวของชิ้นงาน (DE^*) จะได้ค่า DE^* ของชิ้นงาน ทดสอบแต่ละชุดที่เวลาทดสอบต่างกัน แล้ววิเคราะห์และสรุปผล

3.5.6 การทดสอบเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

3.5.6.1 นำชิ้นงานที่ได้จากการอัดขึ้นรูปและเผาผนึกแล้ว เตรียมสำหรับวิเคราะห์การเลี้ยวเบน

ของรังสีเอ็กซ์ ด้วยการขัดกระดาษทรายเบอร์ 1,000 และ 1,200 ตามลำดับ

3.5.6.2 ทำการบดชิ้นงานให้เป็นผงอย่างละเอียด แล้วนำไปทดสอบวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

3.5.6.3 วิเคราะห์และสรุปผล

3.5.7 การวัดความหนาแน่น

3.5.7.1 นำชิ้นงานที่ได้จากการอัดขึ้นรูปและเผาผนึกแล้ว มาชั่งน้ำหนัก

3.5.7.2 ทำการชั่งน้ำหนักชิ้นงานแห้ง บันทึกค่าที่ได้

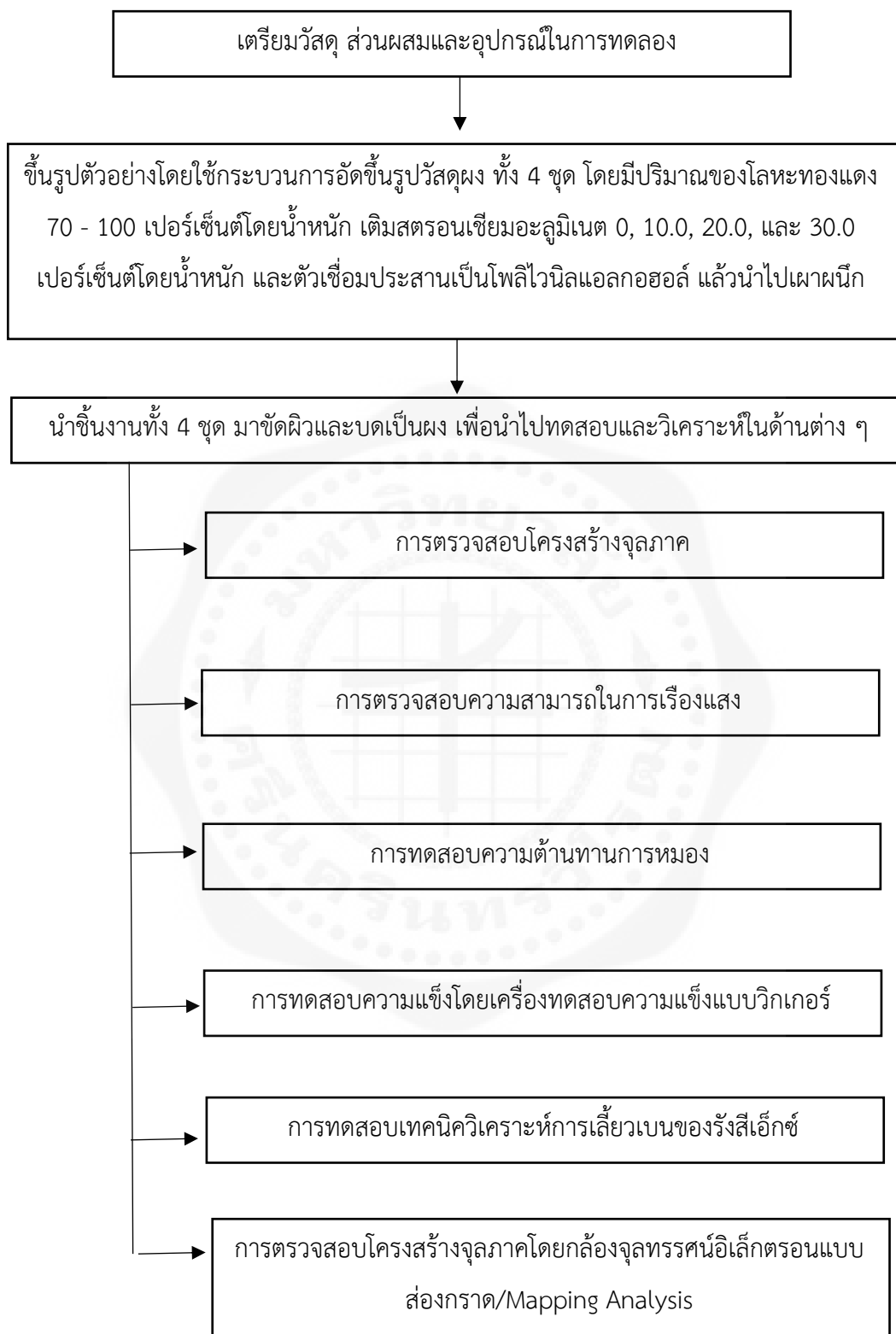
3.5.7.3 ทำการชั่งน้ำหนักชิ้นงานในน้ำ บันทึกค่าที่ได้

3.5.7.4 ทำการชั่งน้ำหนักชิ้นงานที่เปียกบนอากาศ บันทึกค่าที่ได้

3.5.7.5 นำค่าที่ได้มาคำนวณหาความหนาแน่นวัสดุพูน (Bulk density)

3.5.7.6 สรุปผล

แผนภูมิกระบวนการทดลอง

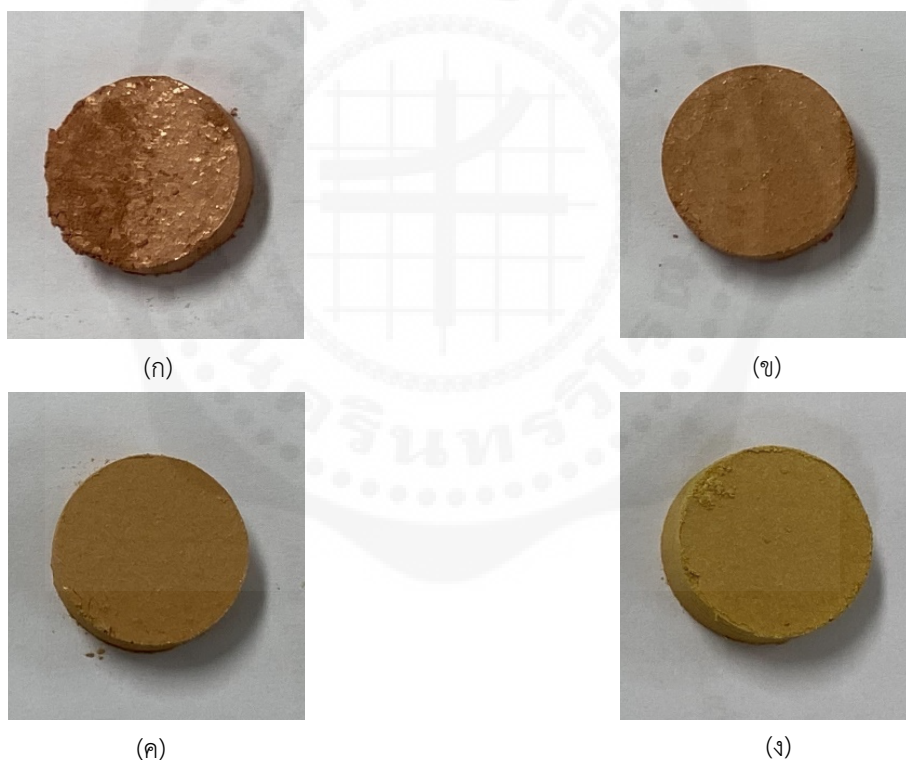


บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 ผลจากการศึกษาการอัดขึ้นรูปโลหะทองแดงที่เติมสารเรืองแสงชนิดสตรอนเชียมอะลูมิเนต

โลหะทองแดงทั้ง 4 อัตราส่วน ที่เติมสารเรืองแสงชนิดสตรอนเชียมอะลูมิเนตในขั้นตอนการอัดขึ้นรูปโลหะผงที่ปริมาณทองแดงตั้งแต่ 70, 80, 90 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 30, 20, 10, และ 0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้วอัดขึ้นรูปวัสดุผงโดยใช้แรงอัด 34.23 MPa จากนั้นทำการเผาผนึกภายใต้บรรยากาศอาร์กอน ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราความร้อน 3 องศาเซลเซียสต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 3 มิลลิลิตรต่อนาที ชิ้นงานที่ได้จากการอัดขึ้นรูปโลหะผงก่อนการเผาผนึก และกราฟการเผาผนึก แสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ



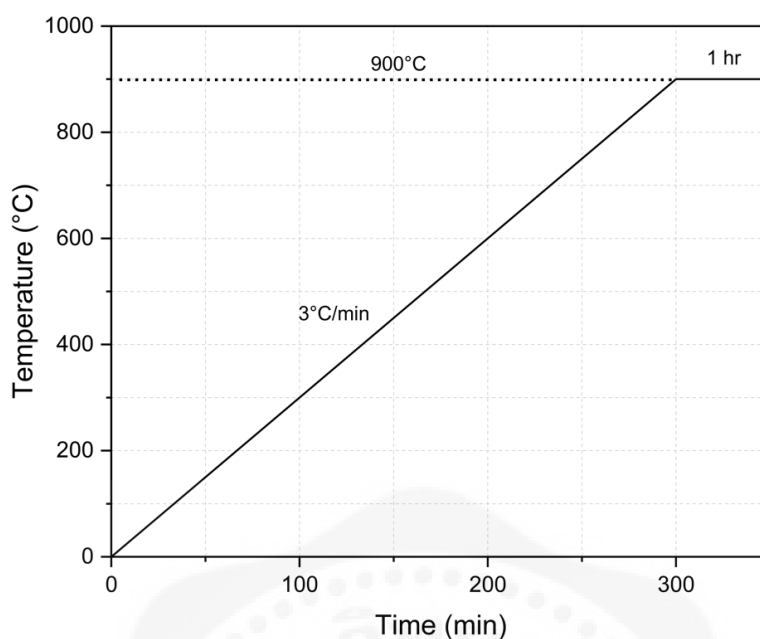
รูปที่ 4.1 ภาพชิ้นงานที่ได้จากการอัดขึ้นรูปโลหะผงปริมาณทองแดงก่อนเผาผนึก

(ก) ชิ้นงานทองแดง 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

(ข) ชิ้นงานทองแดง 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

(ค) ชิ้นงานทองแดง 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

(ง) ชิ้นงานทองแดง 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเทียบกับเวลาในการเผาไหม้ของชิ้นงาน

ทองแดงที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

จากการศึกษางานวิจัยของ Ali Keshavarz Panahi และ Hossein Khoshkish โดยใช้วัสดุเป็นผงโลหะทองแดงขนาด 10 ไมโครเมตร ที่ผสมกับตัวเชื่อมประสานเป็นผงพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติกที่ช่วยให้ผงโลหะทองแดงเชื่อมติดกันได้ดียิ่งขึ้น แล้วนำไปเผาไหม้ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน ที่อุณหภูมิ 800 – 1,050 องศาเซลเซียส [35] ซึ่งก๊าซอาร์กอนจะใช้ในกระบวนการเผาไหม้เพื่อที่จะช่วยทำให้ทองแดงไม่เกิดการไหม้ เพราะการเผาไหม้ในบรรยากาศปกติจะมีก๊าซออกซิเจนในบรรยากาศ

การเผาไหม้ชิ้นงานทำให้พบว่าชิ้นงานทองแดงที่ผ่านการอัดขึ้นรูปโลหะผงจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ตัวเชื่อมประสาน อุณหภูมิในการเผาไหม้ และปริมาณของสารเรืองแสงชนิดสตรอนเทียมอะลูมิเนียม เป็นต้น เนื่องจากการทดลองรอบแรกในการอัดขึ้นรูปโลหะผงทองแดงทั้งหมด 4 อัตราส่วน พบว่าเมื่ออัดขึ้นรูปโลหะผงแล้วเกิดการหลุดร่วงของผง และไม่แข็งแรง จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสตามทฤษฎี เมื่อเผาสำเร็จตัวชิ้นงานที่มีปริมาณของสตรอนเทียมอะลูมิเนียมมากตั้งแต่ 20-30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่เกิดการเกาะตัวกันเป็นชิ้นงาน แสดงดังรูป 4.3 จึงทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 900 องศาเซลเซียสโดยเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่อนาทีจนถึงอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส แล้วคงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้อง พบว่าชิ้นงานทองแดงทั้งหมด 4 อัตราส่วนสามารถขึ้นรูปได้ และเกาะตัวกันเป็นชิ้นงานได้ แสดงดังรูป 4.4



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.3 ภาพชิ้นงานที่ได้จากการอัดขึ้นรูปโลหะผงทองแดง และทำการเผาผนึกภายใต้
บรรยากาศอาร์กอน ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

- (ก) ชิ้นงานทองแดง 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เดิมสตรอนเทียมอะลูมิเนียม 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
(ข) ชิ้นงานทองแดง 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เดิมสตรอนเทียมอะลูมิเนียม 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.4 ภาพชิ้นงานที่ได้จากการอัดขึ้นรูปโลหะผงทองแดง และทำการเผาผนึกภายใต้
บรรยากาศอาร์กอน ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

(ก) ชิ้นงานทองแดง 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

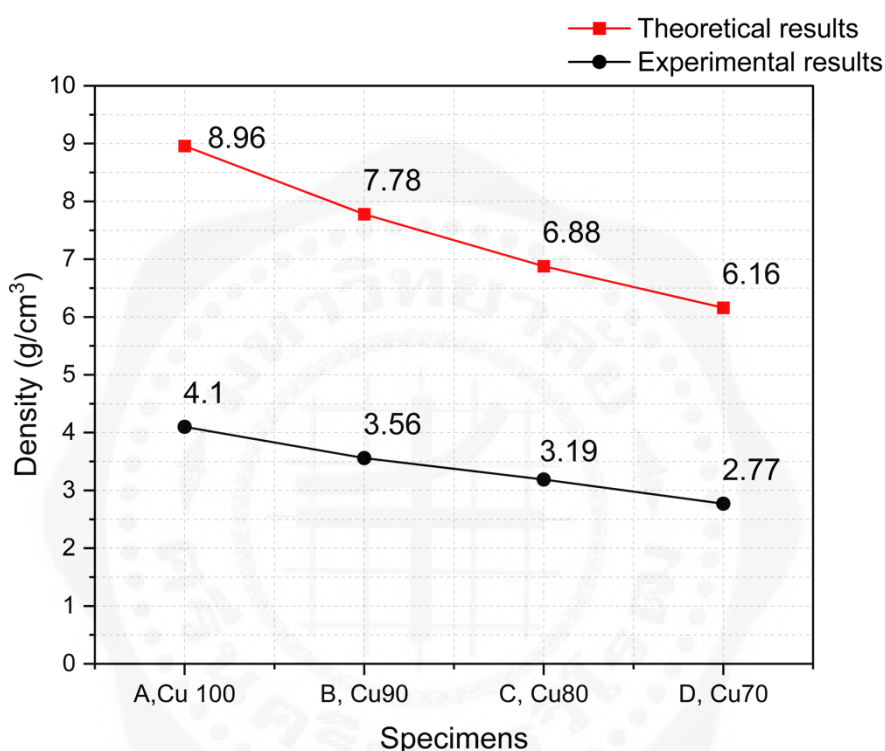
(ข) ชิ้นงานทองแดง 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

(ค) ชิ้นงานทองแดง 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

(ง) ชิ้นงานทองแดง 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.2 ผลจากการศึกษาความหนาแน่นของชิ้นงานทองแดงที่เติมสารเรืองแสงชนิดสตรอนเชียมอะลูมิเนต

จากการขึ้นรูปชิ้นงานโลหะทองแดงทั้ง 4 อัตราส่วน ที่เติมสารเรืองแสงชนิดสตรอนเชียมอะลูมิเนตในขั้นตอนการอัดขึ้นรูปโลหะผงที่ปริมาณทองแดงตั้งแต่ 70, 80, 90 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 30, 20, 10, และ 0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และผ่านกระบวนการเผาผนึกใช้อุณหภูมิอยู่ที่ 900 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน จากนั้นนำชิ้นงานมาหาความหนาแน่นโดยใช้หลักการของอาร์คิมิดีส โดยการใช้เครื่องชั่งน้ำหนักและชุดเครื่องมือวัดความหนาแน่น แสดงดังรูป 4.5



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความหนาแน่นของชิ้นงานโลหะทองแดงทั้ง 4 อัตราส่วน

จากการทดลองพบว่าความหนาแน่นของชิ้นงานโลหะทองแดงทั้ง 4 อัตราส่วนก่อนเผาผนึก และหลังเผาขึ้นอยู่กับการเติมสารสตรอนเชียมอะลูมิเนต เมื่อมีปริมาณสตรอนเชียมมากก็จะทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานโลหะทองแดงลดต่ำลง เมื่อทำการเผาผนึกชิ้นงานโลหะทองแดงที่ 900 องศาเซลเซียส ทำให้อนุภาคของผงทองแดง และผงสตรอนเชียมอะลูมิเนต มาจับตัวกันชิดกันมากขึ้น ทำให้ได้ความหนาแน่นของชิ้นงานโลหะทองแดงทั้ง 4 อัตราส่วนมากขึ้น โดยทดลองจากเครื่องชั่งและชุดเครื่องมือวัดความหนาแน่น ซึ่งค่าความหนาแน่นที่ได้จะนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นเพื่อจะทำการทราบค่าชิ้นงานหลังจากการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส โดยที่มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของ Theoretical results กับ Experimental results คือ 45.71 เปอร์เซ็นต์, 48.33 เปอร์เซ็นต์, 49.44 เปอร์เซ็นต์ และ 49.50 เปอร์เซ็นต์

ของชิ้นงาน A, B, C และ D ตามลำดับ ดังนั้นชิ้นงานทั้ง 4 อัตราส่วนหลังจากการเผาผนึกมีความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก แสดงดังตาราง 4.1

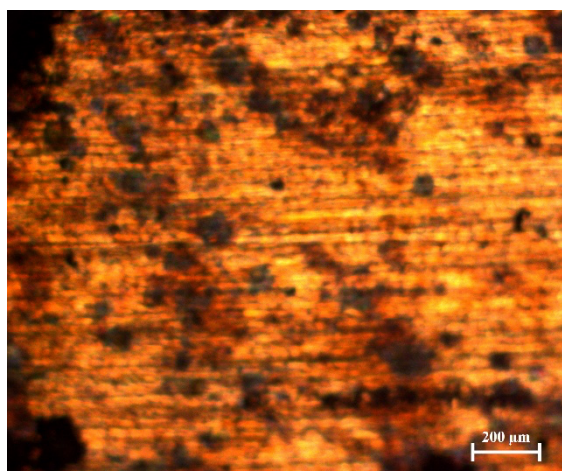
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความหนาแน่นที่ค่าความหนาแน่นจากปริมาณส่วนผสมและค่าความหนาแน่นจากการวัดความหนาแน่น หน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3)

ชิ้นงาน	ค่าความหนาแน่นจากปริมาณส่วนผสม	ค่าความหนาแน่นจากการวัดความหนาแน่น
A, Cu100	8.96	4.10
B, Cu90	7.78	3.56
C, Cu80	6.88	3.19
D, Cu70	6.16	2.77

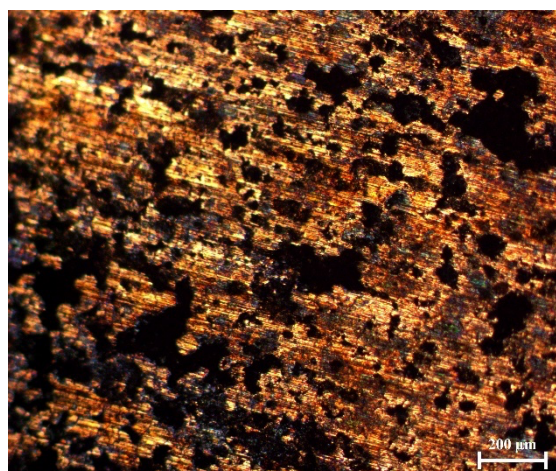
4.3 ผลจากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโลหะทองแดงด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

4.3.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope)

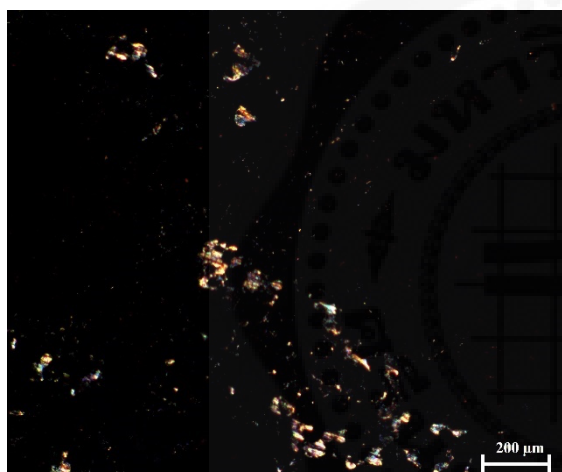
การขึ้นรูปชิ้นงานโลหะทองแดงทั้ง 4 อัตราส่วน ที่เติมสารเรืองแสงชนิดสตรอนเชียมอะลูมิเนตในขั้นตอนการอัดขึ้นรูปโลหะผงที่มีปริมาณทองแดงตั้งแต่ 70, 80, 90 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 30, 20, 10, และ 0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และผ่านกระบวนการเผาผนึกใช้อุณหภูมิอยู่ที่ 900 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน จากนั้นนำชิ้นงานไปขัดเปิดผิวด้วยการขัดหยาบกระดาษทรายเบอร์ 1,000 และ 1,200 ขัดเงาโดยใช้ผงอะลูมินาขนาด 1 และ 0.25 ไมครอน ตามลำดับ นำชิ้นงานโลหะทองแดงไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคหลังขัดผิวชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโดยใช้กำลังขยายที่ 50, 100 และ 200 เท่า แสดงดังรูป 4.6, 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ



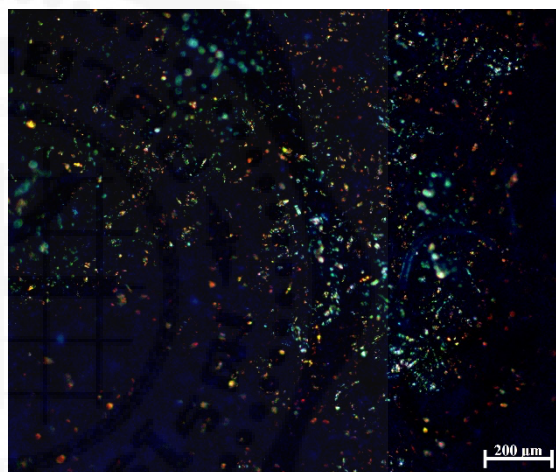
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.6 ชิ้นงานหลังการขัดผิวที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงด้วยกำลังขยาย 50 เท่า

(ก) ชิ้นงานทองแดง 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

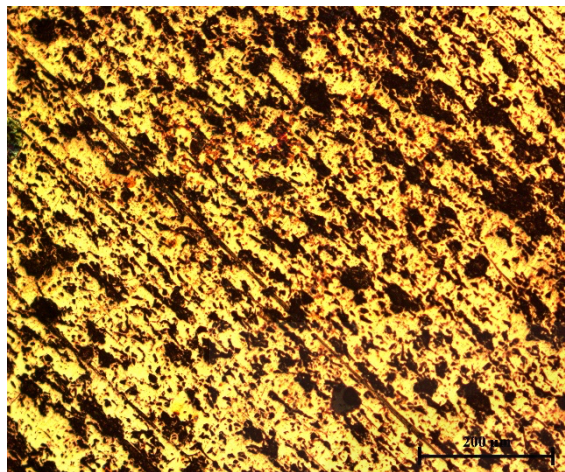
(ข) ชิ้นงานทองแดง 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เดิมสตรอนเทียมอะลูมิเนียม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

(ค) ชิ้นงานทองแดง 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เดิมสตรอนเทียมอะลูมิเนียม 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

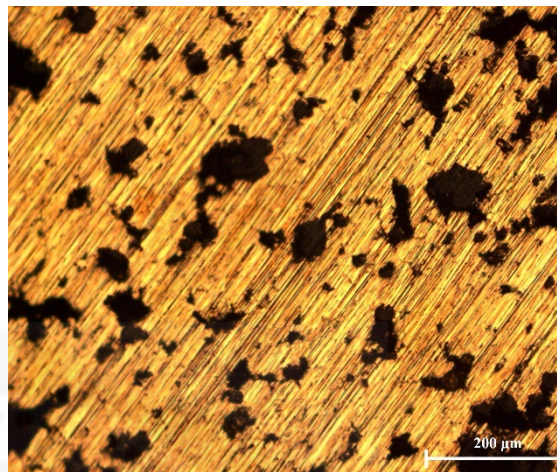
(ง) ชิ้นงานทองแดง 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เดิมสตรอนเทียมอะลูมิเนียม 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

จากรูป 4.6(ก) จะเห็นได้ว่าชิ้นงานหลังจากขัดผิวแล้ว มีเนื้อของทองแดงทั้งหมดส่วนบริเวณที่มีสีดำเกิดจากการที่เฟาพนักแล้วทองแดงบางส่วนไม่เชื่อมติดกันจึงทำให้มีลักษณะคล้ายรูปพรุน รูป 4.6(ข) เป็นชิ้นงานที่มีการเติมสตรอนเทียมอะลูมิเนียมเข้าไป ที่เห็นในรูปจะมีเนื้อของทองแดงและส่วนที่มีสีดำเป็นรูปพรุนและสตรอนเทียมอะลูมิเนียม รูป 4.6(ค) จะเห็นเนื้อทองแดงบางส่วนที่สะท้อนแสงออกมาให้เห็นแล้วที่เป็นสีดำเป็นบริเวณที่เป็นรูปพรุนแล้วเป็นสตรอนเทียมอะลูมิเนียม รูป 4.6(ง) เป็นชิ้นงานที่มีองค์ประกอบของสตรอนเทียม

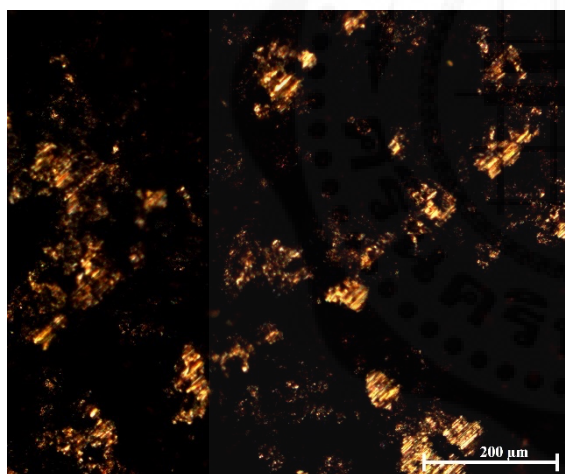
อะลูมิเนียมมากที่สุดทำให้บริเวณที่สะท้อนแสงออกมาเป็นส่วนประกอบของทั้งทองแดงและสตรอนเชียมอะลูมิเนียม



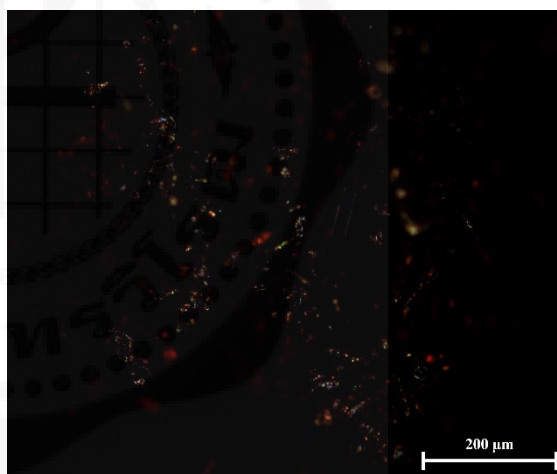
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.7 ชิ้นงานหลังการขัดผิวที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงด้วยกำลังขยาย 100 เท่า

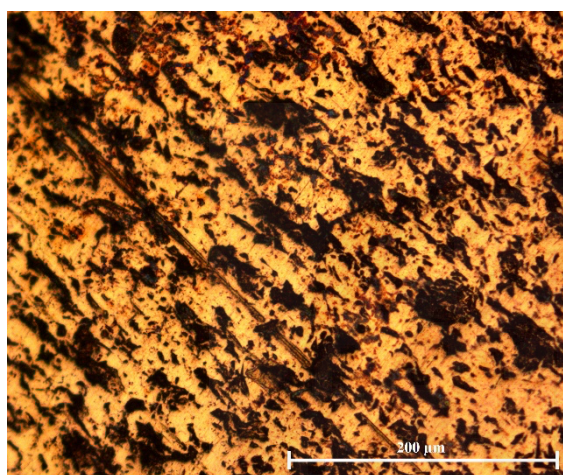
(ก) ชิ้นงานทองแดง 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

(ข) ชิ้นงานทองแดง 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเชียมอะลูมิเนียม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

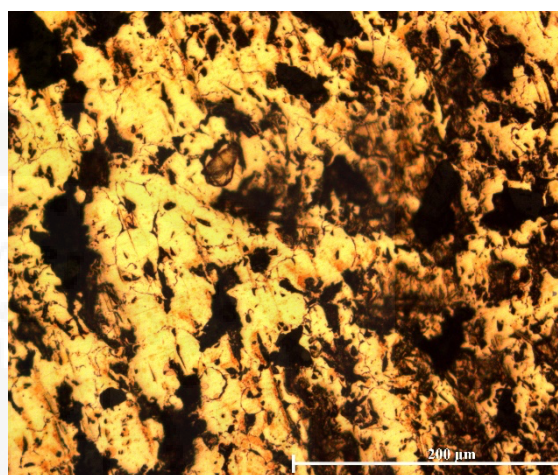
(ค) ชิ้นงานทองแดง 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเชียมอะลูมิเนียม 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

(ง) ชิ้นงานทองแดง 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเชียมอะลูมิเนียม 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

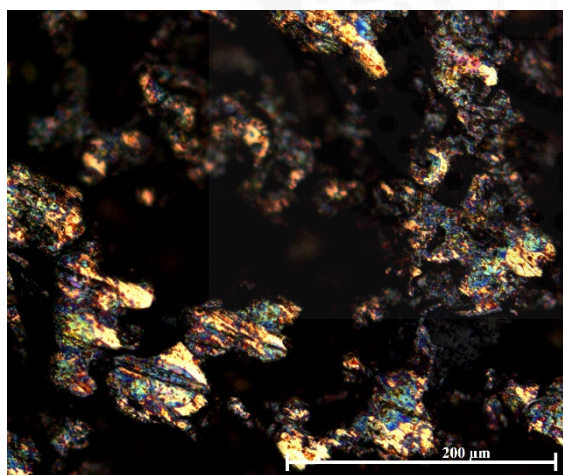
จากรูป 4.7(ก) จะเห็นได้ว่าชิ้นงานหลังจากขัดผิวแล้ว มีเนื้อของทองแดงทั้งหมดส่วนบริเวณที่มีสีดำเกิดจากการที่เผาผืนิกแล้วทองแดงบางส่วนไม่เชื่อมติดกันจึงทำให้มีลักษณะคล้ายรูพรุน มีร่องรอยของการขัดผิวที่ไม่ดีจึงมีการขรุขระอยู่เป็นบางส่วน รูป 4.7(ข) จะเห็นว่าเนื้อของทองแดงเรียบและเห็นได้ชัดเจน มีรูพรุนและสตรอนเซียมอะลูมิเนตอยู่ในโครงสร้าง รูป 4.7(ค) จะเห็นเนื้อทองแดงบางส่วนที่สะท้อนแสงออกมาบางส่วน มีรูพรุนและสตรอนเซียมอะลูมิเนตในโครงสร้าง รูป 4.7(ง) บริเวณผิวส่วนใหญ่เป็นสตรอนเซียมอะลูมิเนต และเห็นเนื้อทองแดงแค่ส่วนน้อย



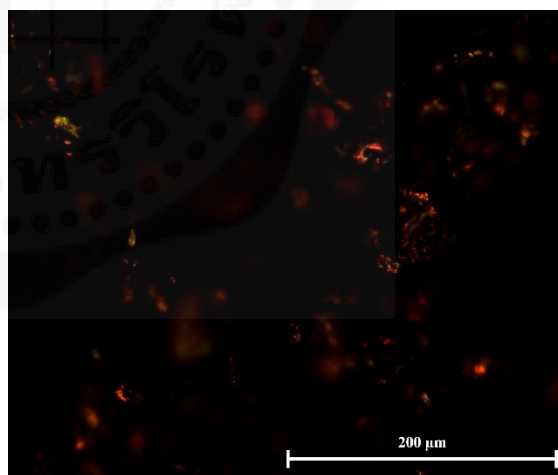
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.8 ชิ้นงานหลังการขัดผิวที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงด้วยกำลังขยาย 200 เท่า

(ก) ชิ้นงานทองแดง 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

(ข) ชิ้นงานทองแดง 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเซียมอะลูมิเนต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

(ค) ชิ้นงานทองแดง 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเซียมอะลูมิเนต 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

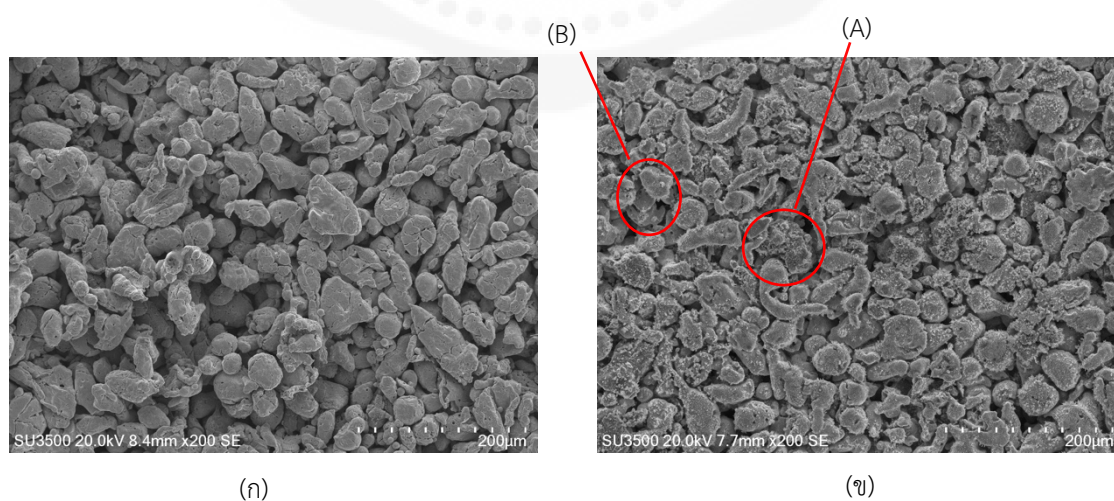
(ง) ชิ้นงานทองแดง 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเซียมอะลูมิเนต 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

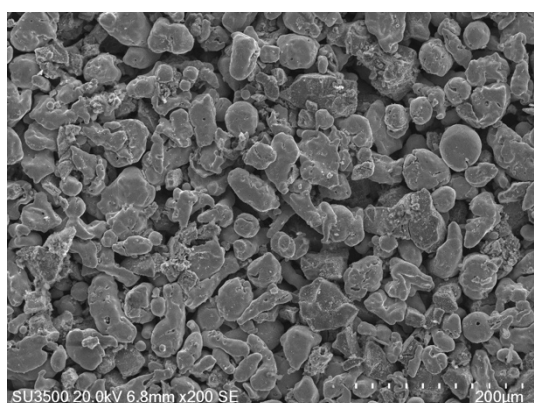
จากรูป 4.8(ก) จะเห็นได้ว่าชิ้นงานหลังจากขัดผิวแล้ว มีเนื้อของทองแดงทั้งหมดส่วนบริเวณที่มีสีดำมีลักษณะของรูพรุน มีร่องขรุขระอยู่เป็นบางส่วน รูป 4.8(ข) จะเห็นว่าเนื้อของทองแดงเรียบและเห็นได้ชัดเจน มีรูพรุนและสตรอนเทียมอะลูมิเนียมในโครงสร้าง รูป 4.8(ค) จะเห็นเนื้อทองแดงบางส่วนที่สะท้อนแสงออกมาบางส่วน มีรูพรุนและสตรอนเทียมอะลูมิเนียมในโครงสร้าง รูป 4.8(ง) บริเวณผิวส่วนใหญ่เป็นสตรอนเทียมอะลูมิเนียม และเห็นเนื้อทองแดงเป็นบางส่วนในโครงสร้าง

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโลหะทองแดงด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง พบว่าชิ้นงานโลหะทองแดงที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการการอัดขึ้นรูปวัสดุผงมีรูพรุนในชิ้นงานอย่างมาก อาจเกิดจากการอัดวัสดุผงที่ไม่แน่นชิดกันทำให้เกิดรูพรุนของชิ้นงานโลหะทองแดง เนื่องจากชิ้นงานที่มีสตรอนเทียมอะลูมิเนียมมากทำให้ผิวของชิ้นงานมีความขรุขระ และไม่เกิดการสะท้อนแสงทำให้การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงไม่ค่อยเห็นผลที่ชัดเจนจึงต้องนำชิ้นงานโลหะทองแดงทั้ง 4 อัตราส่วน ไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

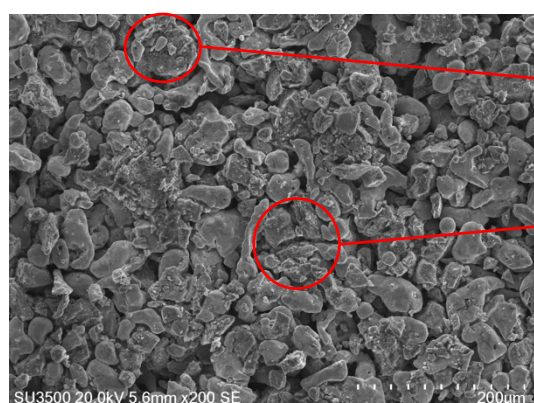
4.3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

การขึ้นรูปชิ้นงานโลหะทองแดงทั้ง 4 อัตราส่วน ที่เติมสารเรืองแสงชนิดสตรอนเทียมอะลูมิเนียมในขั้นตอนการอัดขึ้นรูปโลหะผงที่มีปริมาณทองแดงตั้งแต่ 70, 80, 90 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเติมสตรอนเทียมอะลูมิเนียม 30, 20, 10 และ 0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และผ่านกระบวนการเผาขึ้นรูปอุณหภูมิอยู่ที่ 900 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน จากนั้นนำชิ้นงานไปขัดเปิดผิวด้วยการขัดกระดาษทรายเบอร์ 1,000 และ 1,200 ขัดเงาโดยใช้อะลูมินาขนาด 1 และ 0.25 ไมครอน ตามลำดับ นำชิ้นงานโลหะทองแดงไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 200, 500 และ 1,000 เท่า แสดงดังรูป 4.9, 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ





(ก)



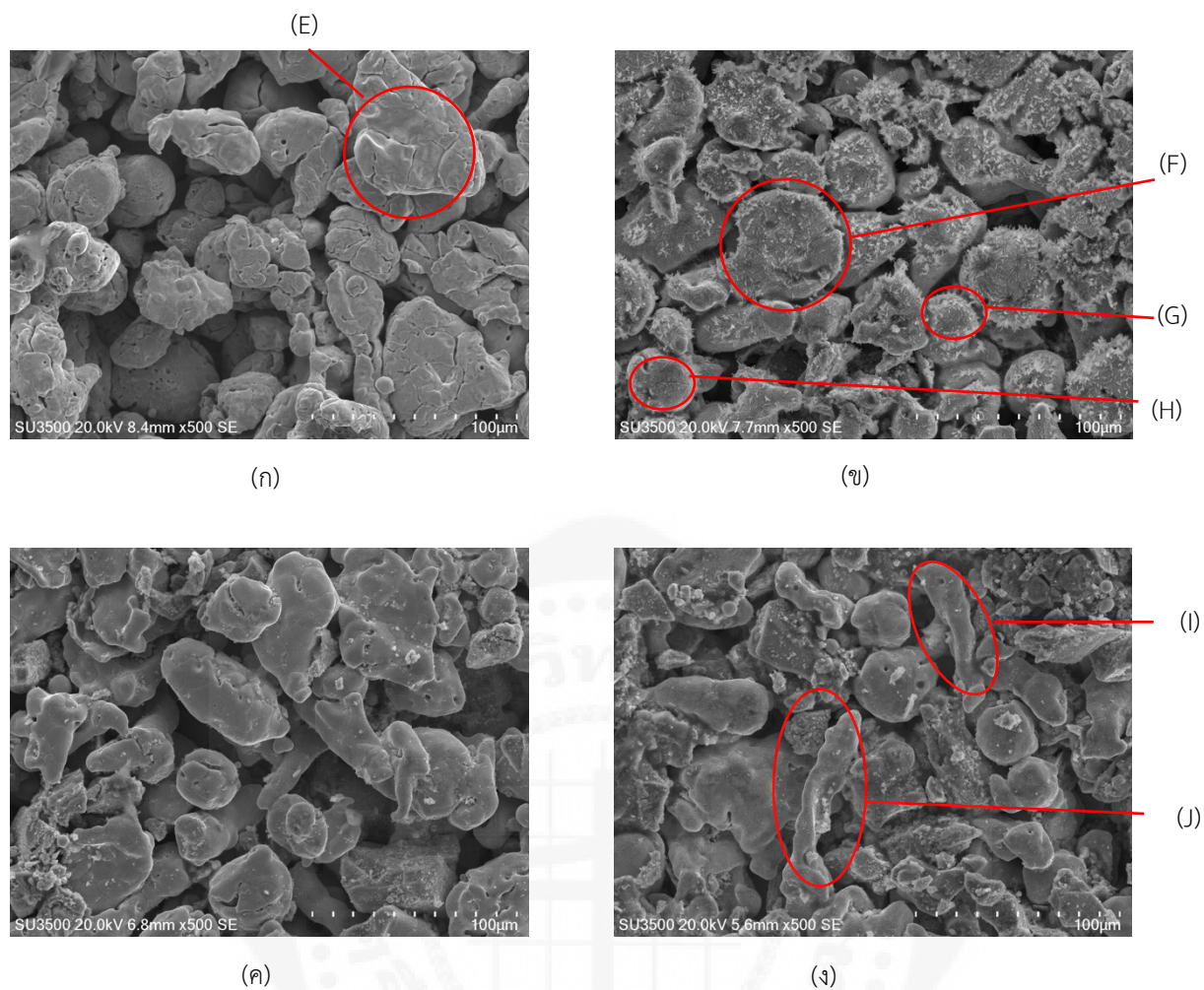
(ง)

รูปที่ 4.9 ภาพชิ้นงานที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานทองแดงที่ กำลังขยาย 200 เท่า

(ก) ชิ้นงานทองแดง 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

- (ข) ชิ้นงานทองแดง 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
- (ค) ชิ้นงานทองแดง 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
- (ง) ชิ้นงานทองแดง 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรูปจะเห็นอนุภาคของผงทองแดงหลังจากการเผาฟลักที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้ว ที่กำลังขยาย 200 เท่า รูป 4.9(ก) เป็นอนุภาคของทองแดง 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีการเชื่อมติดกันเป็นบางส่วน เนื่องจากผงทองแดงมีขนาด 40 – 50 ไมครอน จึงทำให้เห็นจากรูปว่ามีขนาดที่แตกต่างกัน รูป 4.9(ข) เป็นชิ้นงานที่มีอนุภาคของทองแดงและสตรอนเชียมอะลูมิเนต โดยบริเวณที่มีสีอ่อนกว่าจะเป็นทองแดงดังจุด (A) และบริเวณที่มีสีเข้มกว่าจะเป็นสตรอนเชียมอะลูมิเนต ดังจุด (B) มีการเกาะกันที่ดีเพราะอนุภาคของสตรอนเชียมอะลูมิเนตไปแทรกอยู่ตามช่องว่างของทองแดง รูป 4.9(ค) บริเวณส่วนใหญ่ที่เห็นจะเป็นสตรอนเชียมอะลูมิเนต ส่วนทองแดงจะเห็นแทรกอยู่เป็นบางส่วน แต่ยังคงมีรูพรุนอยู่ในชิ้นงาน รูป 4.9(ง) จะเห็นว่าการกระจายตัวของสตรอนเชียมอะลูมิเนตอยู่เป็นบริเวณกว้าง ดังจุด (C) และมีทองแดงแทรกอยู่เป็นบางส่วน ดังจุด (D)



รูปที่ 4.10 ภาพชิ้นงานที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานทองแดงที่กำลังขยาย 500 เท่า

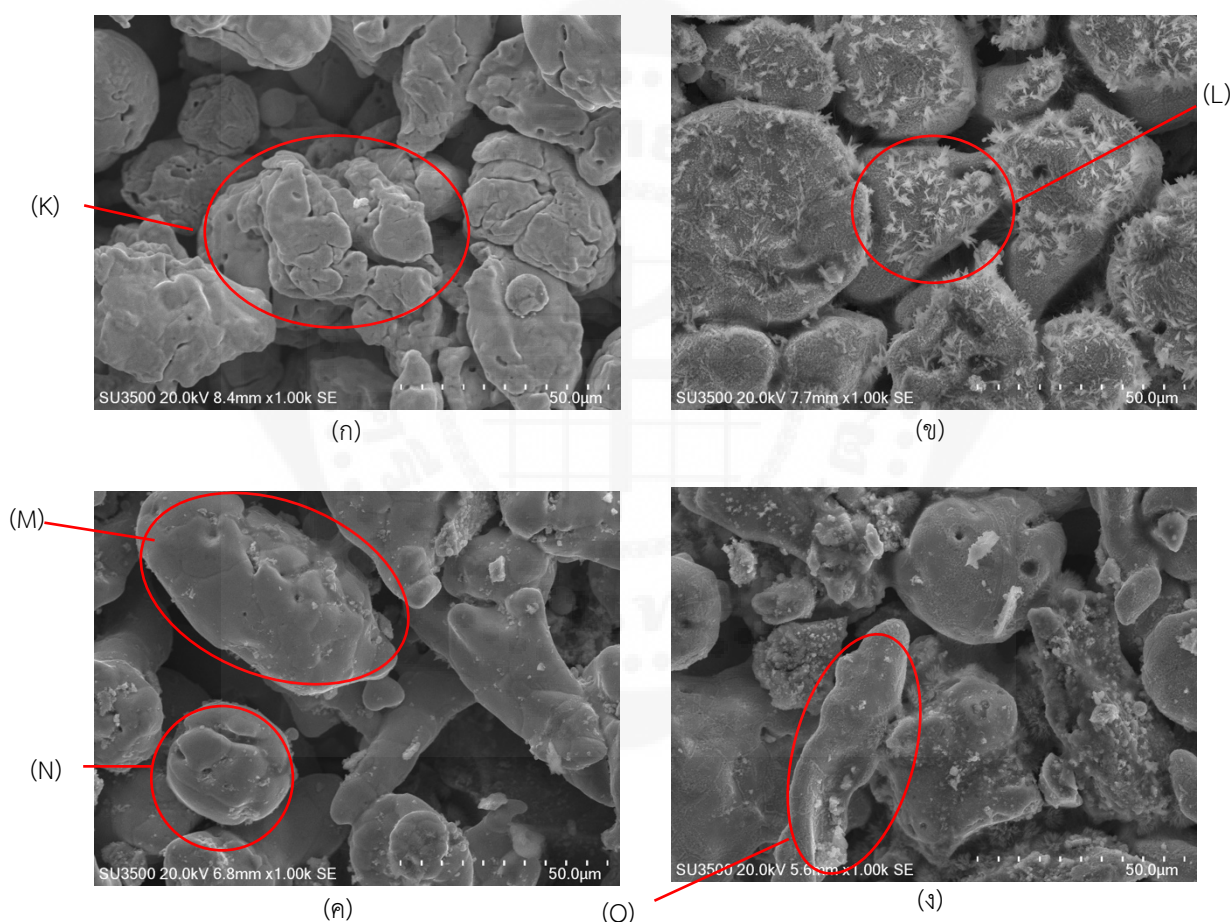
(ก) ชิ้นงานทองแดง 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

(ข) ชิ้นงานทองแดง 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

(ค) ชิ้นงานทองแดง 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

(ง) ชิ้นงานทองแดง 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรูปจะเห็นอนุภาคของผงทองแดงหลังจากการเผาฟลัก ที่กำลังขยาย 500 เท่า รูป 4.10(ก) จะเห็นอนุภาคของทองแดงที่มีลักษณะสว่าง และบางอนุภาคมีการเชื่อมติดกัน ดังจุด (E) รูป 4.10(ข) เป็นชิ้นงานที่มีอนุภาคของทองแดงและสตรอนเชียมอะลูมิเนต โดยบริเวณที่มีสีอ่อนกว่าจะเป็นทองแดงดังจุด (F) และบริเวณที่มีสีเข้มกว่าจะเป็นสตรอนเชียมอะลูมิเนต ดังจุด (H) ชิ้นงานอัตราส่วนที่มีปริมาณของทองแดง 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เกิดเกล็ดออกไซด์ขึ้นบริเวณอนุภาคทองแดงและสตรอนเชียมอะลูมิเนต ดังจุด (G) รูป 4.10(ค) จะเห็นอนุภาคของทองแดงที่จับกลุ่มเป็นก้อนและอนุภาคสตรอนเชียมอะลูมิเนตที่อยู่แทรกเป็นบางส่วน สาเหตุที่อนุภาคบางส่วนไม่เชื่อมติดกัน เพราะอนุภาคของสตรอนเชียมอะลูมิเนตไปขัดขวางการหลอมตัวเพื่อเชื่อมติดกันของทองแดง รูป 4.10(ง) อนุภาคทองแดงมีการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนและเชื่อมติดกัน ดังจุด (I) และ (J) มีอนุภาคสตรอนเชียมอะลูมิเนตแทรกตัวอยู่บางส่วน



รูปที่ 4.11 ภาพชิ้นงานที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานทองแดงที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

(ก) ชิ้นงานทองแดง 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

(ข) ชิ้นงานทองแดง 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

(ค) ชิ้นงานทองแดง 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

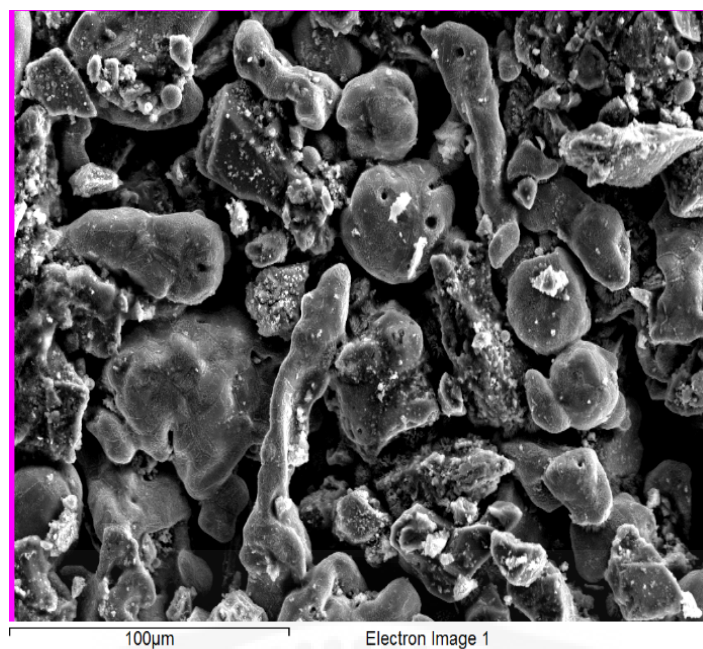
(ง) ชิ้นงานทองแดง 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรูปจะเห็นอนุภาคของผงทองแดงหลังจากการเผาผนึก ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า รูป 4.11(ก) จะเห็นอนุภาคทองแดงที่มีการเชื่อมติดกันแล้วมีหลากหลายขนาด บางอนุภาคมีลักษณะเป็นก้อนที่มีลักษณะขรุขระ ไม่เรียบ ดังจุด (K) รูป 4.11(ข) เป็นชิ้นงานที่มีอนุภาคสตรอนเชียมอะลูมิเนียม จะเห็นว่าเกิดออกไซด์ที่อนุภาคที่มีสีเข้มกว่า นั่นคือสตรอนเชียมอะลูมิเนียม ดังจุด (L) ส่วนสีที่สว่างคือ ทองแดง ซึ่งมีการเกิดออกไซด์น้อย รูป 4.11(ค) จะเห็นว่าอนุภาคทองแดงมีขนาดใหญ่ เกิดจากการเชื่อมติดกัน ดังจุด (M) จะเห็นอนุภาคของสตรอนเชียมอะลูมิเนียมที่แยกออกมาอย่างชัดเจน ดังจุด (N) รูป 4.11(ง) จะเห็นอนุภาคของทองแดงที่มีการเชื่อมติดกันเป็นลักษณะเรียวยาว ดังจุด (O) และมีอนุภาคของสตรอนเชียมอะลูมิเนียมแทรกอยู่เป็นบางส่วน

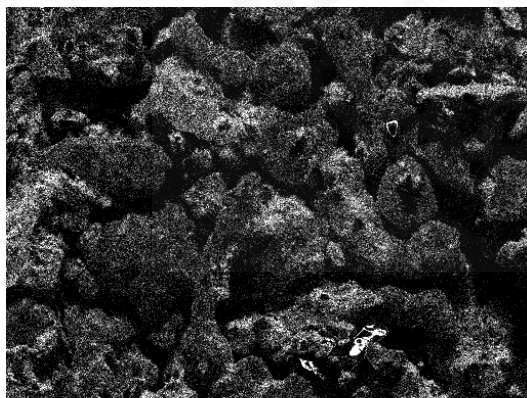
จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทั้ง 4 อัตราส่วน หลังจากการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่าชิ้นงานแต่ละชิ้นมีการกระจายตัวกันของอนุภาคทองแดงและสตรอนเชียมอะลูมิเนียม ส่วนอนุภาคที่มีร่องรอย หรือผิวขรุขระเกิดจากการขัดด้วยผงอะลูมินาขนาด 1 และ 0.25 ไมครอน เนื่องจากการขัดผิวทำให้เกิดร่องรอยขึ้นบนชิ้นงาน และความแตกต่างของอนุภาคทองแดงกับสตรอนเชียมอะลูมิเนียม เมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์ทางแสงจะเห็นเนื้อทองแดงสะท้อนออกมา ส่วนบริเวณที่มีดเป็นทั้งรูปวงและสตรอนเชียมอะลูมิเนียม ส่วนการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะเห็นโครงสร้างจุลภาคที่ชัดเจนขึ้น ทำให้แยกแยะระหว่างอนุภาคทองแดงและสตรอนเชียมอะลูมิเนียมได้

4.3.3 Mapping Analysis

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทั้ง 4 อัตราส่วน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ได้มีการวิเคราะห์อีกหนึ่งอย่าง คือ Mapping Analysis เพื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบบริเวณพื้นผิวชิ้นงาน ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ชิ้นงานที่มีปริมาณทองแดง 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเชียมอะลูมิเนียม 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้กำลังขยาย 500 เท่า และรูปของแต่ละธาตุ แสดงดังรูป 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ

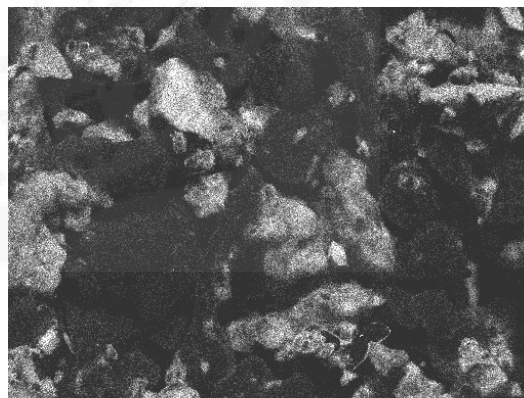


รูปที่ 4.12 ภาพชิ้นงานที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงาน
ทองแดงที่กำลังขยาย 500 เท่า ของชิ้นงานที่มีปริมาณทองแดง 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
เติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้ Mapping Analysis



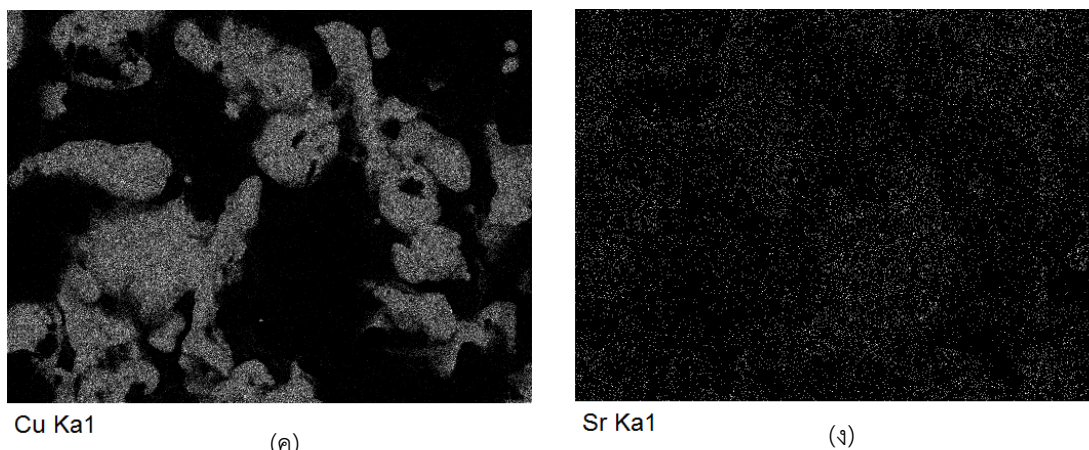
O Ka1

(ก)



Al Ka1

(ข)



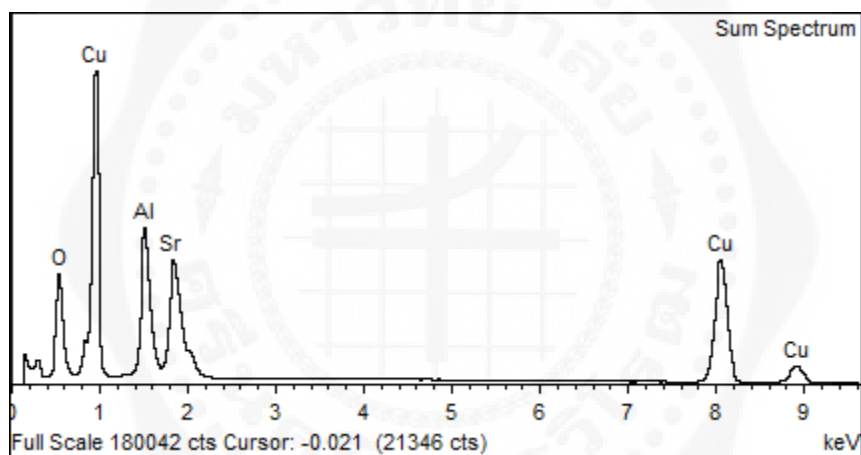
รูปที่ 4.13 ภาพแสดงบริเวณที่มีองค์ประกอบของธาตุในชิ้นงาน

- (ก) องค์ประกอบของธาตุออกซิเจน
- (ข) องค์ประกอบของธาตุอะลูมิเนียม
- (ค) องค์ประกอบของธาตุทองแดง
- (ง) องค์ประกอบของธาตุสตรอนเชียม

จากรูปที่ 4.13 ใช้การวิเคราะห์เพื่อหาองค์ประกอบของชิ้นงานที่มีปริมาณทองแดง 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยรูป 4.13(ก) บริเวณที่สังเกตได้ส่วนใหญ่มีองค์ประกอบของธาตุออกซิเจน รูป 4.13(ข) บริเวณที่สังเกตได้ส่วนใหญ่มีองค์ประกอบของธาตุอะลูมิเนียม รูป 4.13(ค) บริเวณที่สังเกตได้ส่วนใหญ่มีองค์ประกอบของธาตุทองแดง รูป 4.13(ง) บริเวณที่สังเกตได้ส่วนใหญ่มีองค์ประกอบของธาตุสตรอนเชียม ซึ่งจะเห็นได้ว่าทองแดงมีการเกาะกลุ่มกันและกระจายตัวอยู่รอบโดยที่มีสตรอนเชียมอะลูมิเนตอยู่ด้วย โดยสรุปปริมาณของธาตุ แสดงดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.14 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบของธาตุที่มีอยู่ในชิ้นงานมีปริมาณทองแดง 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติม สตรอนเชียมอะลูมิเนต 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ธาตุ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก(weight%)	เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม(atomic%)
ออกซิเจน	20.18	47.25
อะลูมิเนียม	10.80	14.99
ทองแดง	50.96	30.00
สตรอนเชียม	18.06	7.72
รวม	100	



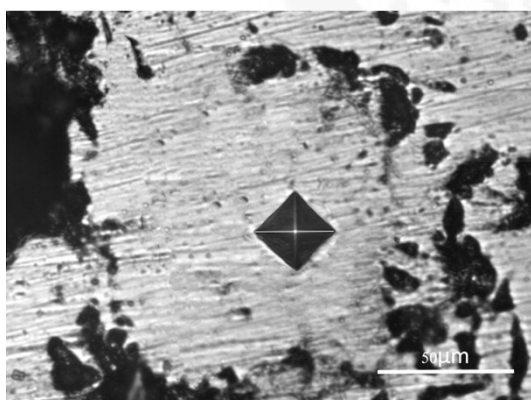
รูปที่ 4.14 สเปกตรัมของธาตุองค์ประกอบทั้งหมดในชิ้นงาน

4.4 ผลจากการศึกษาความแข็งแบบวิกเกอร์ของชิ้นงานโลหะทองแดงด้วยเครื่องมือทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers hardness testing machine)

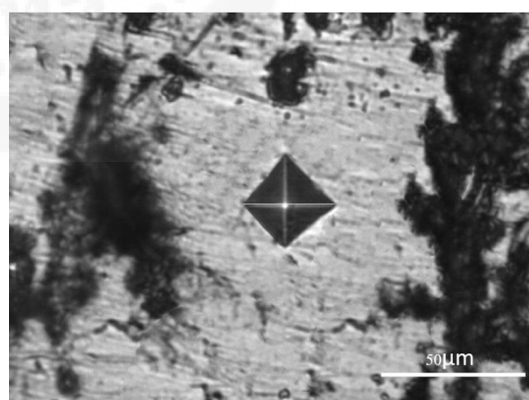
การทดสอบสมบัติทางกลโดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งวิกเกอร์ระบบดิจิทัล โดยให้น้ำหนักกด 0.2 กิโลกรัม เป็นเวลา 10 วินาที แล้ววัดความยาวของเส้นทแยงมุมทั้ง 2 ด้าน แล้วคำนวณค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (HV) ซึ่งชิ้นงานทองแดงสามารถวัดความแข็งได้ 2 ส่วนผสม คือ ชิ้นงานทองแดง 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและชิ้นงานทองแดง 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าความแข็งเฉลี่ย (HV) แสดงดังตารางที่ 4.3 รูปของชิ้นงานทดสอบและกราฟผลการทดสอบความแข็งแสดงดังรูป 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานทองแดงโดยเครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ เทียบกับปริมาณทองแดงและสตรอนเชียมอะลูมิเนต

ชิ้นงาน	ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)		ค่าความแข็งเฉลี่ย (HV)
	Cu	SrAl ₂ O ₄	
A, Cu100	100	-	30.50
B, Cu90	90	10	12.84



(ก)

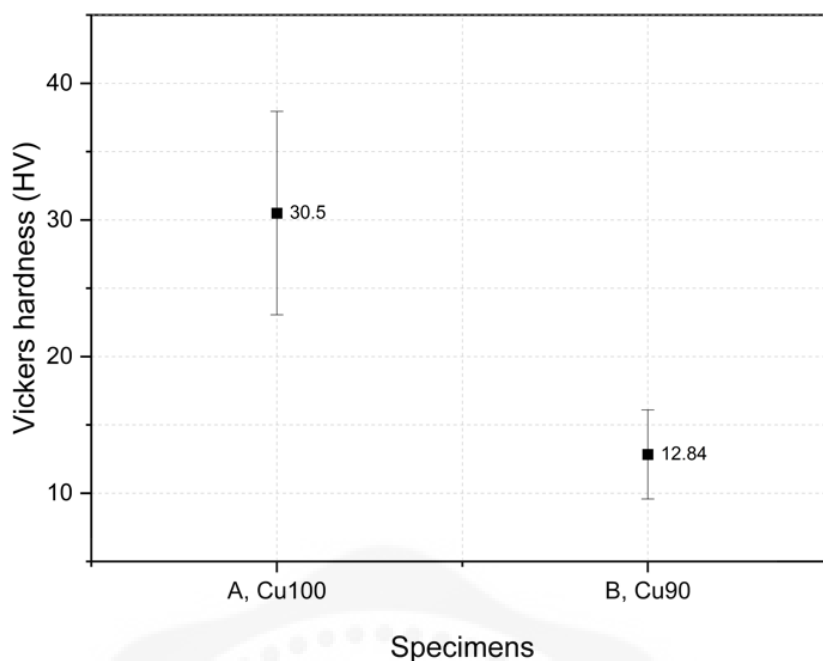


(ข)

รูปที่ 4.15 รอยกดชิ้นงานทดสอบความแข็งวิกเกอร์ โดยใช้น้ำหนักกด 0.2 กิโลกรัม เวลา 10 วินาที

(ก) ชิ้นงานทองแดง 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

(ข) ชิ้นงานทองแดง 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

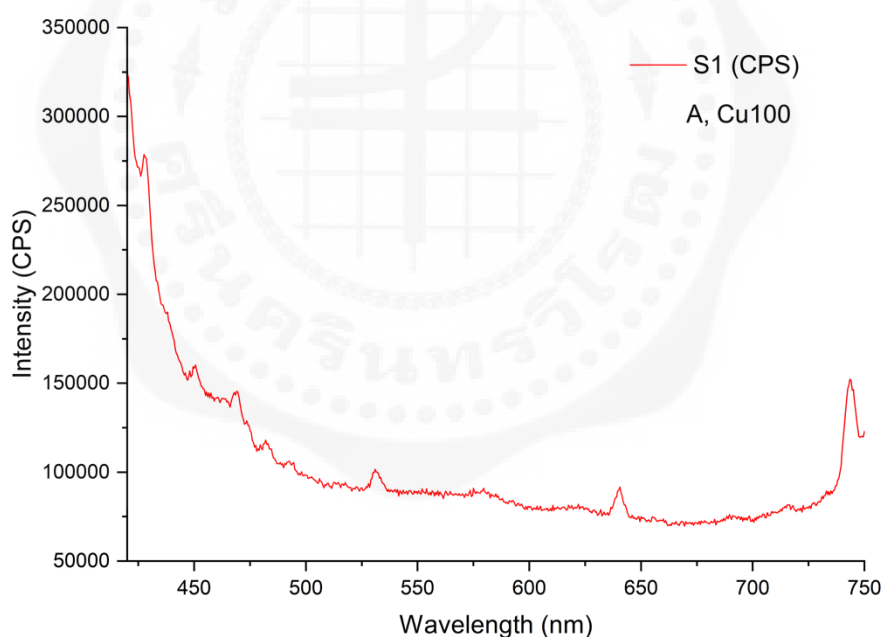


รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งวิกเกอร์กับชิ้นงานทดสอบ

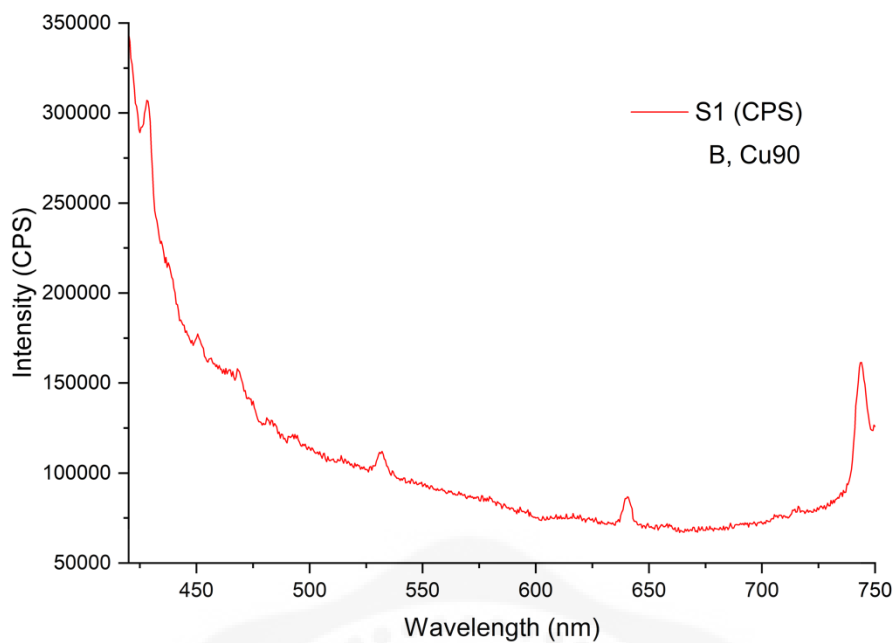
จากการทดสอบสมบัติทางกลโดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งวิกเกอร์ระบบดิจิตอล ในส่วนของชิ้นงานทองแดงอีก 2 อัตราส่วน คือ ชิ้นงาน C ปริมาณทองแดง 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเชียมอะลูมิเนียม 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ ชิ้นงาน D ปริมาณทองแดง 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเชียมอะลูมิเนียม 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่สามารถวัดค่าความแข็งได้ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งวิกเกอร์ระบบดิจิตอล เนื่องจากบริเวณพื้นผิวของชิ้นงานไม่เรียบสม่ำเสมอ และมีความขรุขระ ซึ่งอาจจะทำให้บริเวณหัวกดของเครื่องมือทดสอบเกิดความเสียหาย เมื่อมีการเติมสตรอนเชียมอะลูมิเนียมลงไปในชิ้นงานทำให้ไปขัดขวางการเชื่อมติดกันของอนุภาคทองแดงในการขั้นตอนการเผาผนึก จึงทำให้บริเวณที่ทำการทดสอบความแข็งเมื่อกดลงไปแล้วตรงบริเวณที่มีทองแดงจะมีสตรอนเชียมอะลูมิเนียมอยู่รอบ ๆ อย่างไม่รู้ตัวจากการที่เติมสตรอนเชียมอะลูมิเนียมในปริมาณที่มากก็ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งที่ลดลง

4.5 ผลจากศึกษาความสามารถในการเรืองแสงของชิ้นงานโลหะทองแดงด้วยเครื่องวัดการเรืองแสงสเปกโตรฟลูออโรมิเตอร์ (Fluorescence spectrophotometer)

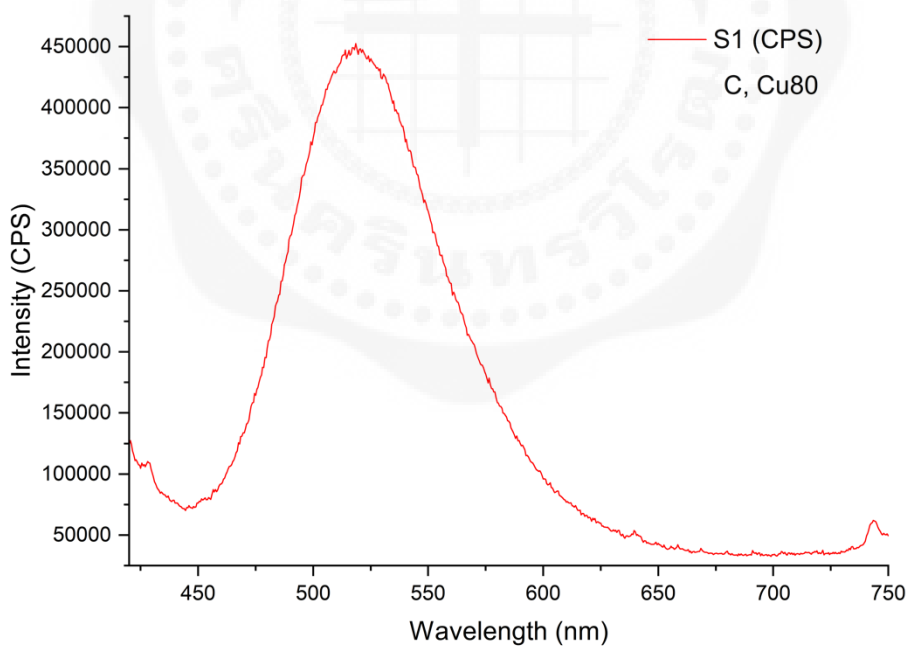
การทดสอบความสามารถในการเรืองแสงของชิ้นงานทองแดงทั้ง 4 อัตราส่วน ที่เติมสารเรืองแสงชนิด สตรอนเชียมอะลูมิเนต มีปริมาณทองแดงตั้งแต่ 70, 80, 90 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเติม สตรอนเชียมอะลูมิเนต 30, 20, 10 และ 0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หลังจากการเผาขึ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสโดยใช้เครื่องวัดการเรืองแสงสเปกโตรฟลูออโรมิเตอร์ รุ่น FluoroMax+ Spectrofluorometer ซึ่ง เป็นการวัดการเรืองแสงที่เปล่งออกมาจากสารเรืองแสง ซึ่งได้จากการที่โมเลกุลของสารดูดกลืนพลังงานแสง เข้าไป แล้วเรืองแสงที่มีความยาวคลื่นยาวกว่าความยาวคลื่นที่โมเลกุลดูดกลืนเข้าไป ทำการกระตุ้น (Excitation) ที่ความยาวคลื่น 390 นาโนเมตร สำหรับชิ้นงานที่มีปริมาณทองแดง 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำการวัดเพื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่มีการเติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต ชิ้นงาน A, B, C และ D แสดงดังรูป 4.17, 4.18, 4.19, 4.20 ตามลำดับ และเปรียบเทียบทั้ง 4 ชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 4.21



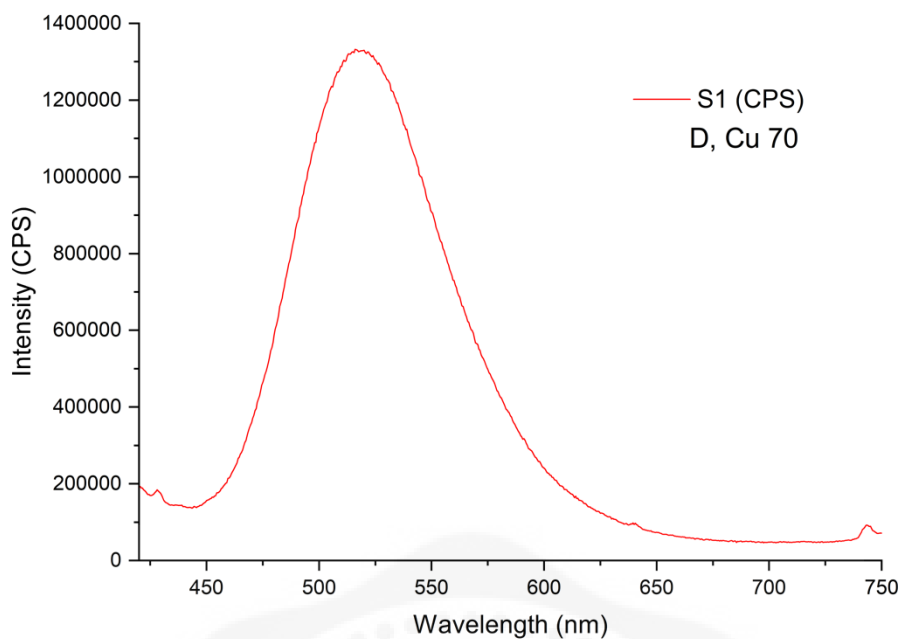
รูปที่ 4.17 กราฟค่าความเข้มข้นของการปลดปล่อยแสงเทียบกับความยาวคลื่น ของ ชิ้นงาน A ปริมาณทองแดง 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



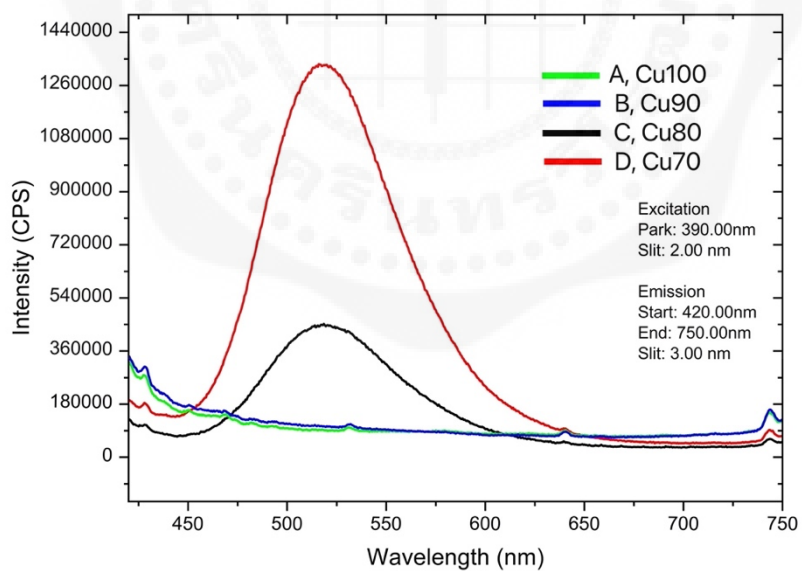
รูปที่ 4.18 กราฟค่าความเข้มข้นของการปลดปล่อยแสงเทียบกับความยาวคลื่น ของ
ชิ้นงาน B ปริมาณทองแดง 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 10
เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.19 กราฟค่าความเข้มข้นของการปลดปล่อยแสงเทียบกับความยาวคลื่น ของ
ชิ้นงาน C ปริมาณทองแดง 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 20
เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.20 กราฟค่าความเข้มข้นของการปลดปล่อยแสงเทียบกับความยาวคลื่น
ชิ้นงาน D ปริมาณทองแดง 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมนีออนเชื่อมอะลูมิเนียม 30
เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.21 กราฟค่าความเข้มข้นของการปลดปล่อยแสงเทียบกับความยาวคลื่น ชิ้นงานทั้ง
4 อัตราส่วน

จากการทดสอบความสามารถในการเรืองแสงของชิ้นงานทั้ง 4 อัตราส่วน โดยทำการกระตุ้น (Excitation) ที่ 390 นาโนเมตร โดยเครื่องวัดการเรืองแสงสเปกโตรฟลูออโรมิเตอร์ ซึ่งชิ้นงานที่มีการเติม สตรอนเชียมอะลูมิเนตนั้นมีการปลดปล่อยแสงออกมาที่ $517 (\pm 0.5)$ นาโนเมตร โดยชิ้นงานที่มีอัตราส่วนของ สตรอนเชียมอะลูมิเนต 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นั้นมีความเข้มข้นของการปลดปล่อยแสงมากที่สุด แต่ละ ชิ้นงานที่มีอัตราส่วนของสตรอนเชียมอะลูมิเนตที่ลดลงมาก็มีความเข้มข้นของการปลดปล่อยแสงลดลงเช่นกัน และแสงสีที่ได้จากการปลดปล่อยออกมา คือ แสงสีเขียว

การศึกษางานวิจัยของ Anesh Manjaly Poullose และคณะ ซึ่งวัสดุเรืองแสงที่ใช้สตรอน เชียมอะลูมิเนตสองชนิดที่แตกต่างกัน $\text{SrAl}_2\text{O}_4 : \text{Eu, Dy}$ (S1) และ $\text{Sr}_4\text{Al}_{14}\text{O}_{25} : \text{Eu, Dy}$ (S2) หลอมรวมกับ พอลิโพรพิลีน (PP) และประเมินคุณสมบัติการเรืองแสงหลังจากการกระตุ้นที่ 320 นาโนเมตรคอมโพสิต PP/S1 มีการปล่อยสีเขียวและ PP/S2 สร้างการปล่อยสีน้ำเงินที่ 520 นาโนเมตรและ 495 นาโนเมตร ตามลำดับ โดยการปล่อยการเรืองแสงของคอมโพสิต S1 และ PP/S1 ความยาวคลื่นที่กระตุ้น 320 นาโนเมตร จะมีการแผ่รังสีสีเขียวที่ 520 นาโนเมตร [44]

4.6 ผลจากการศึกษาการต้านทานการหมองของชิ้นงานโลหะทองแดงด้วยเครื่องวัดสีวัสดุ (Colorimeter)

การนำชิ้นงานทองแดงทั้ง 4 อัตราส่วน มาทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของบริเวณพื้นผิวของชิ้นงาน ตัวอย่าง ซึ่งใช้เวลา 15, 30 และ 120 นาที โดยใช้สารประกอบโซเดียมซัลไฟด์โนนาไฮดรตในน้ำ จะได้บรรยากาศของไอซัลเฟอร์ในโถที่ปิดสนิท ทำการวัดค่า L^* , a^* และ b^* ด้วยเครื่องวัดค่าสี รุ่น X-rite RM200QC (D65, มุม 10 องศา) ทั้งก่อนและหลังจากการนำชิ้นงานเข้าทดสอบภายใต้บรรยากาศของซัลเฟอร์ เมื่อวัดค่าการเปลี่ยนแปลงสีแล้วนำมาคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นงาน (ΔE^*) แสดงดังตารางที่ 4.4 และรูปของชิ้นงานก่อนทดสอบและหลังทดสอบ ทั้งเวลา 15, 30 และ 120 นาที แสดงดังรูป 4.22, 4.23, 4.24, 4.25 และ 4.26

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิวของชิ้นงานทองแดงทั้ง 4 อัตราส่วน

ชิ้นงาน	ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)		ค่าการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิว (DE*)		
	Cu	SrAl ₂ O ₄			
			15 นาที	30 นาที	120 นาที
A	100	-	5.73	6.42	3.73
B	90	10	3.02	3.50	6.60
C	80	20	1.07	1.37	1.99
D	70	30	0.66	0.49	0.85



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.22 ภาพชิ้นงานก่อนทดสอบการต้านทานการหมอง

(ก) ชิ้นงานทองแดง 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

(ข) ชิ้นงานทองแดง 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

(ค) ชิ้นงานทองแดง 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

(ง) ชิ้นงานทองแดง 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.23 ภาพชิ้นงานหลังทดสอบการต้านทานการหมอง (15 นาที)

(ก) ชิ้นงานทองแดง 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

(ข) ชิ้นงานทองแดง 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

(ค) ชิ้นงานทองแดง 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

(ง) ชิ้นงานทองแดง 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

จากการสังเกตชิ้นงานด้วยตาเปล่าหลังจากการทดสอบ 15 นาที จะเห็นว่าชิ้นงาน ดังรูป 4.23(ก) มีการเปลี่ยนแปลงหรือเกิดการหมองอย่างเห็นได้ชัด รูป 4.23(ข) มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย รูป 4.23(ค) และ 4.23(ง) ไม่สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิวได้ด้วยตาเปล่า หรือเกิดการหมองเล็กน้อย



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.24 ภาพชิ้นงานหลังทดสอบการต้านทานการหมอง (30 นาที)

(ก) ชิ้นงานทองแดง 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

(ข) ชิ้นงานทองแดง 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เดิมสตรอนเซียมอะลูมิเนต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

(ค) ชิ้นงานทองแดง 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เดิมสตรอนเซียมอะลูมิเนต 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

(ง) ชิ้นงานทองแดง 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เดิมสตรอนเซียมอะลูมิเนต 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

จากการสังเกตชิ้นงานด้วยตาเปล่าหลังจากการทดสอบ 30 นาที จะเห็นว่าชิ้นงาน ดังรูป 4.24(ก) มีการเปลี่ยนแปลงหรือเกิดการหมองอย่างเห็นได้ชัด รูป 4.24(ข) มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย รูป 4.24(ค) และ 4.24(ง) ไม่สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิวได้ด้วยตาเปล่า หรือเกิดการหมองเพียงเล็กน้อย



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.25 ภาพชิ้นงานหลังทดสอบการต้านทานการหมอง (120 นาที)

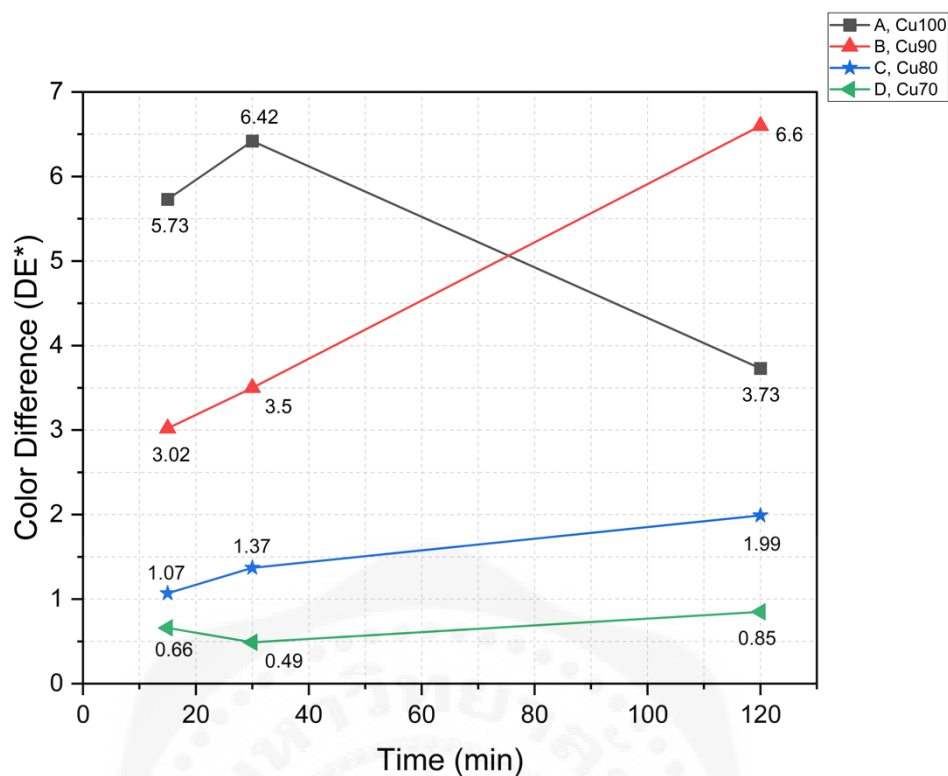
(ก) ชิ้นงานทองแดง 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

(ข) ชิ้นงานทองแดง 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

(ค) ชิ้นงานทองแดง 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

(ง) ชิ้นงานทองแดง 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

จากการสังเกตชิ้นงานด้วยตาเปล่าหลังจากการทดสอบ 30 นาที จะเห็นว่าชิ้นงาน ดังรูป 4.25(ก) มีการเปลี่ยนแปลงหรือเกิดการหมองน้อยลงจากเวลา 15 และ 30 นาที เกิดจากการที่ไอโซลเฟอร์อิมตัว รูป 4.25(ข) มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย รูป 4.25(ค) และ 4.25(ง) ไม่สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิวได้ด้วยตาเปล่า หรือเกิดการหมองเพียงเล็กน้อย



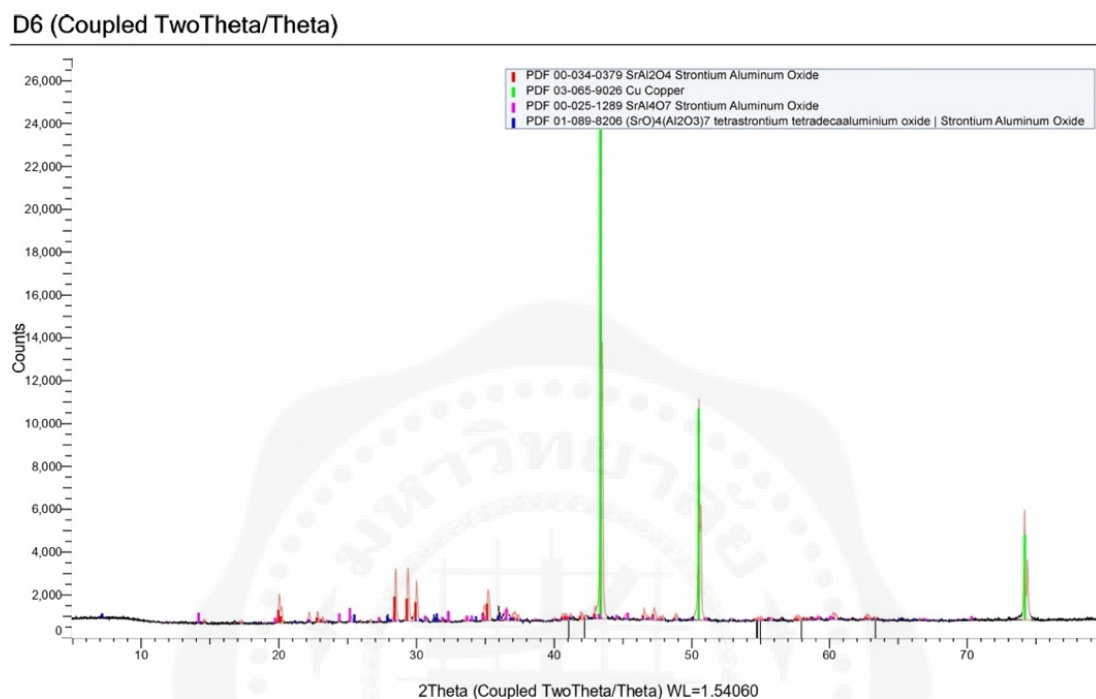
รูปที่ 4.26 กราฟค่าการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิวเทียบกับเวลาในการทดสอบ

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิวของชิ้นงาน โดยใช้ค่า L^* , a^* และ b^* ที่เป็นค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดสี สามารถนำมาคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิว (DE^*) จากงานวิจัยที่กล่าวว่าหากค่า DE^* คำนวณได้เท่ากับ 1 แสดงว่าไม่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิวชิ้นงานได้ แต่ถ้าหากคำนวณได้เท่ากับ 4 หรือมากกว่าขึ้นไป แสดงว่าเริ่มสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิวชิ้นงานได้ โดยค่า DE^* ที่เพิ่มสูงขึ้น จะมีความแตกต่างของสีผิวก่อนและหลังการทดสอบการต้านทานการหมองสูง (สุภิญญา วงษ์ศรีรักษา, 2545, น.11) ซึ่งเมื่อเติมสตรอนเชียมอะลูมิเนตตั้งแต่อัตราส่วน 10.0, 20.0 และ 30.0 สามารถทำให้ชิ้นงานทองแดงต้านทานการหมองได้มาก

4.7 ผลจากการศึกษาองค์ประกอบของชิ้นงานโลหะทองแดงหลังเผาผนึกด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer)

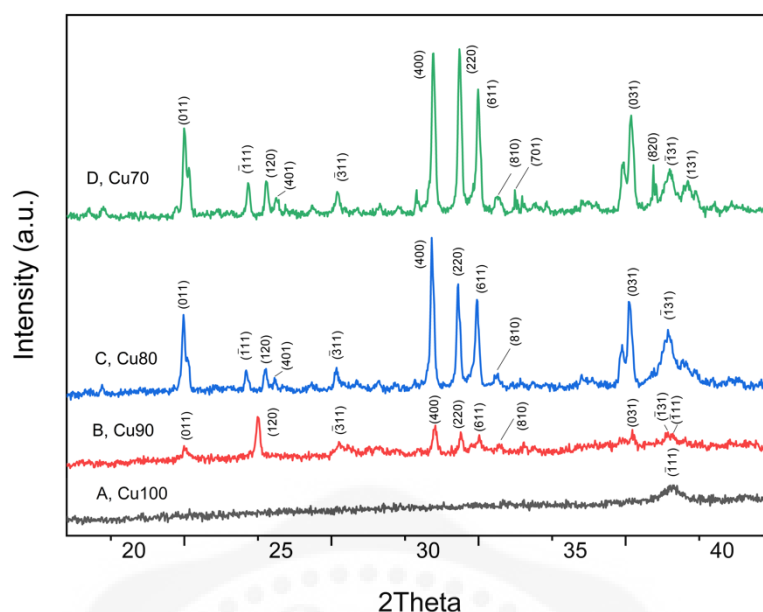
การวิเคราะห์องค์ประกอบของชิ้นงานหลังจากการอัดขึ้นรูปวัสดุผงที่ผ่านกระบวนการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยชิ้นงานที่ทดสอบมีปริมาณทองแดง 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเชียมอะลูมิเนต 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่ามีปริมาณของทองแดงมากที่สุด เนื่องจากอัตราส่วนมีปริมาณทองแดงที่มาก ส่วนสตรอนเชียมอะลูมิเนตจะพบสารประกอบอีก 2 ชนิด คือ สตรอนเชียม

อะลูมิเนียมออกไซด์ (SrAl_4O_7) และ สตรอนเทียมอะลูมิเนียมออกไซด์ หรือ Tetra strontium tetra deca aluminum oxide ($(\text{SrO})_4(\text{Al}_2\text{O}_3)_7$) และเปรียบเทียบชิ้นงาน 4 อัตราส่วน แสดงดังรูป 4.29 และ 4.30 ตามลำดับ



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของชิ้นงานที่มีปริมาณทองแดง 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเทียมอะลูมิเนียม 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

จากการเกิดสารประกอบออกไซด์ของสตรอนเทียมอะลูมิเนียม เกิดจากการที่ออกซิเจนทำปฏิกิริยากับ สารประกอบสตรอนเทียมอะลูมิเนียม หรือการเกิดออกซิเดชันทำให้ได้สารประกอบใหม่ทั้ง 2 ชนิด คือ สตรอนเทียมอะลูมิเนียมออกไซด์ (SrAl_4O_7) และ สตรอนเทียมอะลูมิเนียมออกไซด์ หรือ Tetra strontium tetra deca aluminum oxide ($(\text{SrO})_4(\text{Al}_2\text{O}_3)_7$) จากการที่สังเกตจากชิ้นงานจะมีออกไซด์ฟิล์มสีขาวขึ้นบน ผิวชิ้นงาน ซึ่งมักจะเกิดในชิ้นงานที่มีปริมาณทองแดง 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเทียมอะลูมิเนียม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากธาตุอะลูมิเนียมในสารประกอบสตรอนเทียมอะลูมิเนียมทำปฏิกิริยากับน้ำ และออกซิเจนในอากาศ จึงทำให้มีการเกิดออกไซด์ที่ผิวของชิ้นงาน



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงผลจากการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของชิ้นงานทั้ง 4 อัตราส่วน

จากการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของชิ้นงานโดยการเปรียบเทียบชิ้นงานทั้ง 4 อัตราส่วน พบว่าในชิ้นงานที่มีปริมาณทองแดง 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบองค์ประกอบของธาตุของทองแดงองค์ที่สูง เมื่อได้ทำการศึกษาผลการวิเคราะห์ทำให้พบว่ามีปริมาณของออกไซด์ที่เกิดขึ้นในโลหะทองแดง แต่มีปริมาณที่น้อยมาก ชิ้นงานที่มีปริมาณทองแดง 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เต็มสตรอนเซียมอะลูมินเนต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบองค์ประกอบของธาตุทองแดง สตรอนเซียมอะลูมินเนต สตรอนเซียมอะลูมิเนียมออกไซด์ (SrAl_4O_7) และสตรอนเซียมอะลูมิเนียมออกไซด์ หรือ Tetra strontium tetra deca aluminum oxide ($\text{SrO}_4(\text{Al}_2\text{O}_3)_7$) เมื่อมีปริมาณของสตรอนเซียมอะลูมินเนตที่เพิ่มขึ้นก็จะเห็นองค์ประกอบของสารประกอบออกไซด์ของสตรอนเซียมอะลูมินเนตทั้ง 2 ชนิด ได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การอัดขึ้นรูปชิ้นงานทองแดง โดยมีปริมาณทองแดง 70, 80, 90 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเทียมอะลูมิเนียมตั้งแต่ 30, 20, 10 และ 0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ หลังกระบวนการเผาพูนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ชิ้นงานทั้ง 4 อัตราส่วน มีความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นจากก่อนการเผาพูน

5.1.2 ความสามารถในการเรืองแสงของชิ้นงานที่เติมสตรอนเทียมอะลูมิเนียมตั้งแต่ 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เมื่อกระตุ้นที่ความยาวคลื่น 390 นาโนเมตร ได้ปลดปล่อยการเรืองแสงออกมาที่ 517 นาโนเมตร ซึ่งแนวโน้มของความเข้มข้นในการปลดปล่อยแสงออกมาที่มากจะขึ้นอยู่กับปริมาณของสตรอนเทียมอะลูมิเนียมที่เติมไป แสงที่ได้หลังเมื่อวัดการปลดปล่อยแสงออกมา คือ สีเขียวส่วนชิ้นงานที่ไม่ได้เติมสตรอนเทียมอะลูมิเนียมไม่เกิดการเรืองแสงขึ้น

5.1.3 ความสามารถในการต้านทานการหมองของชิ้นงานทั้ง 4 อัตราส่วน จากการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นงาน (DE*) สืบค้นพื้นผิวของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปเพราะบรรยากาศของไอซัลเฟอร์ โดยชิ้นงานที่มีปริมาณทองแดง 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิวที่มากที่สุด ที่เวลา 15 นาที ซึ่งทำให้ทราบว่าไม่สามารถต้านทานการหมองได้ ส่วนชิ้นงานที่มีการเติมสตรอนเทียมอะลูมิเนียมจะสามารถต้านทานการหมองได้ดี มีเทียบกับค่าการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นงาน ซึ่งการต้านทานการหมองนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของสตรอนเทียมอะลูมิเนียม เมื่อมีปริมาณที่มากก็สามารถทำให้มีสมบัติการต้านทานการหมองที่ดีขึ้น

5.1.4 โครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ทางแสง ชิ้นงานที่มีปริมาณทองแดง 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีผิวที่ขรุขระ ไม่เรียบ อีกทั้งมีจุดสีดำแทรกอยู่ตามบริเวณผิวชิ้นงาน เมื่อมีการเติมสตรอนเทียมอะลูมิเนียมที่มากขึ้นจะทำให้ไม่สามารถสังเกตโครงสร้างที่ชัดเจนได้ เพราะเนื้อทองแดงไม่ค่อยสะท้อนแสงออกมา อีกทั้งทำให้ชิ้นงานไม่เงางาม และการศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดทำให้สังเกตโครงสร้างที่ชัดเจนขึ้น สามารถเห็นอนุภาคของทองแดงและสตรอนเทียมอะลูมิเนียมซึ่งอนุภาคของทองแดงและสตรอนเทียมอะลูมิเนียมแยกกันอย่างชัดเจน บางอนุภาคของทองแดงมีการเชื่อมติดกันสังเกตได้จากลักษณะอนุภาคที่เป็นก้อนใหญ่หรือเรียวยาว เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วย Mapping Analysis ของชิ้นงานที่มีปริมาณทองแดง 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเทียมอะลูมิเนียม 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้สังเกตได้ถึงบริเวณที่มีสารประกอบทางเคมีที่ได้เติมในชิ้นงานอย่างชัดเจน มีการกระจายตัวและมีการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนที่ใหญ่

5.1.5 สมบัติทางกลด้านความแข็งของชิ้นงาน จะมีค่าความแข็ง (HV) ลดลงเมื่อมีการเติมสตรอนเทียมอะลูมิเนียมที่มากขึ้น จากชิ้นงานที่มีปริมาณทองแดง 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าความแข็ง 30.50 HV และ

ชิ้นงานที่มีปริมาณทองแดง 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเซียมอะลูมิเนต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าความแข็ง 12.84 HV ส่วนชิ้นงานที่มีปริมาณทองแดง 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเซียมอะลูมิเนต 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และทองแดง 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสตรอนเซียมอะลูมิเนต 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่สามารถวัดค่าความแข็งได้ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งวิกเกอร์ เนื่องจากบริเวณพื้นผิวของชิ้นงานไม่เรียบสม่ำเสมอ และมีความขรุขระ ซึ่งอาจจะทำให้บริเวณหัวกดของเครื่องทดสอบเกิดความเสียหายได้

5.1.6 การวิเคราะห์องค์ประกอบภายในชิ้นงานทั้ง 4 อัตราส่วน มีการพบสารประกอบที่ได้เติมในชิ้นงาน เช่น ทองแดง และสตรอนเซียมอะลูมิเนต เมื่อชิ้นงานที่มีการเติมสตรอนเซียมอะลูมิเนตตามอัตราส่วนต่าง ๆ จะมีการเกิดออกไซด์ของสตรอนเซียมอะลูมิเนต ทั้ง 2 สารประกอบ คือ สตรอนเซียมอะลูมิเนียมออกไซด์ (SrAl_2O_4) และ สตรอนเซียมอะลูมิเนียมออกไซด์ ($(\text{SrO})_4(\text{Al}_2\text{O}_3)_7$) หรือมีชื่อว่า Tetra strontium tetra deca aluminum oxide เนื่องจากขั้นตอนการขัดเปิดผิวมีการใช้น้ำและมีการสัมผัสกับอากาศทำให้เกิดสารประกอบออกไซด์ขึ้นในชิ้นงาน

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการเผาผนึกที่อุณหภูมิสูงกว่า 900 องศาเซลเซียส เช่น 950, 1,050 องศาเซลเซียส แต่ไม่เกินอุณหภูมิในการหลอมเหลวของโลหะทองแดง เพื่อสังเกตดูถึงลักษณะภายนอกชิ้นงาน รวมถึงความหนาแน่นของชิ้นงานหลังการเผาผนึก
- 5.2.2 ควรศึกษาโครงสร้างจุลภาคหรือลักษณะของผงวัสดุทองแดงและสตรอนเซียมอะลูมิเนตก่อนที่จะนำมาขึ้นรูปโดยวิธีการอัดขึ้นรูปวัสดุผง
- 5.2.3 ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการใช้วัสดุผงชนิดอื่น ๆ มาผสมกับผงเรืองแสงชนิดสตรอนเซียมอะลูมิเนต
- 5.2.4 ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการผสมกันของวัสดุคอมโพสิต เช่น โลหะผสมกับเซรามิก
- 5.2.5 ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการวัดความหนาแน่นของชิ้นงานที่มีรูพรุน เช่น วัสดุเซรามิก
- 5.2.6 ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการปรับปรุงสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิต

เอกสารอ้างอิง

1. สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย. (2557). การสำรวจสถานภาพอุตสาหกรรมโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non-ferrous metals) ทองแดง. สืบค้นจาก <https://iiu.isit.or.th>
2. สยามเคมีดอทคอม. ทองแดง (Copper) ประโยชน์ และพิษทองแดง. สืบค้นจาก <https://www.siamchemi.com/ทองแดง/>
3. (องค์การมหาชน), ส. น. ณ. ณ. อ. บ. ง. รอบรู้เรื่องโลหะ. สืบค้นจาก <https://www.git.or.th/g20131127.html>
4. อติชัย บุตรเพชร. (2544). การสีกรหรือและการกัดกร่อนของทองแดงและทองเหลือง. 11(4), 49-55. สืบค้นจาก <https://www.thaiscience.info/Journals/Article/TJKM/10470125.pdf>
5. ณรงค์ ฤทธิ์สนใจธรรม, น. ช. พ., ชุมพล อินทร์มณี, สุรัตน์ วรรณศรี. (2559). อิทธิพลของธาตุเจือทองแดงและดีบุกที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ และพฤติกรรมความต้านทานการหมองของโลหะเงินเจือ. (750), 21-28.
6. อาเทอมิส. (2563). อินเทอร์เน็ตก่อนใครในแฟชั่นสุดจี๊ดกับแฟชั่นสไตล์สีนีออน. สืบค้นจาก <https://th.priceprice.com/womens-fashion/news/neon-fashion-trend-2020-7775/>
7. สื่อการสอนฟิสิกส์. ความแตกต่างของ PHOSPHORESCENCE และ FLUORESCENCE สืบค้นจาก http://www.rmutphysics.com/teaching-glossary/index.php?option=com_content&task=view&id=9277
8. รักดีแจ่มใส, ข. ต. (2545). เวลาในความมืด. 13-16. สืบค้นจาก https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/282_13.pdf
9. ลูมิโกล. (2561). ข้อควรรู้เกี่ยวกับวัสดุเรืองแสง. สืบค้นจาก http://lumiglow.fudo.co.th/about_material.html
10. พิมพ์ดี, ณ. ช. (2560). ความหมายของการชุบโลหะ. สืบค้นจาก <https://www.scimath.org/lesson-chemistry/item/7179-2017-06-05-14-14-44>
11. ไชยเจริญเทศ. ทองแดง โลหะที่มนุษย์รู้จัก และมีการนำมาใช้งานเป็นชนิดแรก ๆ. สืบค้นจาก <https://www.chi.co.th/article/article-850/>
12. Waratita. (2558). โลหะทองแดง. สืบค้นจาก <https://sites.google.com/site/varayagrp/khxxkhwam-thekhnikh/khxmuk-khwr-ru/loha-thxngdaeng>
13. วิลเลียมส์ ดี, & อาร์., ค. ส. เ. (2548). วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน (Materials Science and Engineering). (สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์, เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร, มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อยุธยา, กอบบุญ หล่อทองคำ, ธาชาย เหลืองวรานันท์, & ป. วิสุทธิพิทักษ์กุล, Trans.). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ท็อป.

14. มโนกุล, อ. ญ. (2548). การฉีดขึ้นรูปวัสดุผง. 53-56. สืบค้นจาก https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/217_53-56.pdf
15. สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนฯ. โลหะผสมทองแดง. สืบค้นจาก <https://www.saranukromthai.or.th/sub/book/book.php?book=2&chap=5&page=t2-5-infodetail07.html>
16. D, C. (2563). What Causes Copper to Tarnish?. Retrieved from <https://sciencing.com/causes-copper-tarnish-13011.html>
17. COPPERH2O. (2022). How to Clean Copper: Complete Guide (Updated 2022). Retrieved from <https://www.copperh2o.com/blogs/blog/how-to-clean-copper-the-complete-guide>
18. TP, H. (2021). strontium. Retrieved from <https://www.britannica.com/science/strontium>
19. เจนวาณิชย์. สมบัติของสตรอนเทียม. สืบค้นจาก <http://oho.ipst.ac.th/bookroom/snet5/topic2/Sr.html>
20. Wikipedia. สตรอนเทียมอลูมิเนต. สืบค้นจาก https://hmong.in.th/wiki/Strontium_aluminate
21. CLEGG, B. (2018). Strontium aluminate. Retrieved from <https://www.chemistryworld.com/podcasts/strontium-aluminate/3008606.article>
22. สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล. การเรืองแสง (Luminescence). สืบค้นจาก <http://www.rmutphysics.com/charud/specialnews/3/fluorescent/fluorescent1.htm>
23. สหสิทธิวัฒน์, ส. ญ. (2549). ของเล่นเรืองแสง. 53-56. สืบค้นจาก https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/225_52-56.pdf
24. Sivadee. (2021). การพิมพ์โลหะ 3D (FLM) กับการฉีดขึ้นรูปโลหะ (MIM) ต่างกันอย่างไร. สืบค้นจาก <https://www.toolmakers.co/การพิมพ์โลหะ-3d-flm-กับการฉีด/>
25. Plexpert. (2019). การฉีดขึ้นรูปโลหะ (Metal Injection Molding). Retrieved from <https://www.plexpert.ca/th/glossary/การฉีดขึ้นรูปโลหะ/>
26. กระบวนการขึ้นรูปโดยการอัดขึ้นรูป (compression molding). Retrieved from <https://www.slri.or.th/bdd/th/22-บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์/71-x-ray-diffractometer-xrd.html>
27. กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. X-Ray Diffractometer (XRD) เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์. Retrieved from <https://www.slri.or.th/bdd/th/22-บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์/71-x-ray-diffractometer-xrd.html>
28. Phul, R., Kaur, C., Farooq, U., & Ahmad, T. (2018). Ascorbic acid assisted synthesis, characterization and catalytic application of copper nanoparticles. 2.

29. Center, M. I. (2012). SCANNING ELECTRON MICROSCOPY (SEM). Retrieved from http://mic.eng.ku.ac.th/facilities-detail.php?id_sub=42&id=39
30. Phul, R., Kaur, C., Farooq, U., & Ahmad, T. (2018). Ascorbic acid assisted synthesis, characterization and catalytic application of copper nanoparticles. 2.
31. การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS). Retrieved from <http://www3.rdi.ku.ac.th/cl/knowledge/EDS.pdf>
32. Keshavarz Panahi, A., & Khoshkish, H. (2010). Powder Injection Molding of Copper and the Effect of Sintering Temperature on Its Mechanical Properties. Paper presented at the ASME 2010 International Mechanical Engineering Congress and Exposition.
33. Muhsan, A., & Ahmad, F. (2011). Development of nanocomposites heat sink (MWCNTs/Cu) using powder injection moulding for electronic applications.
34. Zauner, R., Nagel, R., Neubauer, E., Portschy, K., Davies, P., Kearns, M., & Works, R. J. (2006). Development of copper MIM powders for thermal management applications. *Euro PM*, 2, 71-77.
35. Kadiman, N., Rashid, M., Muhamad, N., & Sulong, A. (1). Effects of Sintering Temperature on the Physical and Mechanical Properties of Injection-Molded Copper/Graphene Composite. *Journal of Advanced Manufacturing Technology (JAMT)*, 12(1), 49-60. Retrieved from <https://jamt.utem.edu.my/jamt/article/view/4258>
36. SAELEE, N., CHUANKRERKKUL, N., & WANAKAMOL, P. (2021). Microstructure and properties of zirconia-alumina composites fabricated via powder injection molding. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 31(1). Retrieved from <http://jmmm.material.chula.ac.th/index.php/jmmm/article/view/1019>
37. Muhsan, A.S., F. Ahmad, N.M. Mohamed, P.S.M.B.T.M. Yusoff and M.R. Raza, 2012. Carbon nanotube reinforced copper matrix nanocomposites via metal injection molding technique. *J. Applied Sci.*, 12: 2397-2403.
38. Muhsan, A., Ahmad, F., & Raza, M. (2011). Rheological Behavior of Carbon Nanotubes / Copper Feedstocks for Metal Injection Molding. *Advanced Materials Research*, 403-408, 5335-5340.
39. Gonzalez-Gutierrez, J., Cano, S., Ecker, J. V., Kitzmantel, M., Arbeiter, F., Kukla, C., & Holzer, C. (2021). Bending Properties of Lightweight Copper Specimens with Different Infill Patterns Produced by Material Extrusion Additive Manufacturing, Solvent Debinding and Sintering. *Applied Sciences*, 11(16), 7262. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/16/7262>

40. จูอิน, ส. ธ. (2548). โครงการศึกษาแนวทางการใช้วัสดุสารเรืองแสงเพื่อการประหยัดพลังงานในงานออกแบบโฆษณา 1-175. สืบค้นจาก
<http://www.sure.su.ac.th/xmlui/bitstream/handle/123456789/3272/Fulltext.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
41. Bite, I., Krieke, G., Zolotarjovs, A., Laganovska, K., Liepina, V., Smits, K., Skuja, L. (2018). Novel method of phosphorescent strontium aluminate coating preparation on aluminum. *Materials & Design*, 160, 794-802.
42. Khattab, T. A., Rehan, M., & Hamouda, T. (2018). Smart textile framework: Photochromic and fluorescent cellulosic fabric printed by strontium aluminate pigment. *Carbohydrate Polymers*, 195, 143-152.
43. Kim, D. (2021). Recent Developments in Lanthanide-Doped Alkaline Earth Aluminate Phosphors with Enhanced and Long-Persistent Luminescence. *Nanomaterials*, 11(3), 723. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2079-4991/11/3/723>
44. Poulose, A. M., Anis, A., Shaikh, H., Alhamidi, A., Siva Kumar, N., Elnour, A. Y., & Al-Zahrani, S. M. (2021). Strontium Aluminate-Based Long Afterglow PP Composites: Phosphorescence, Thermal, and Mechanical Characteristics. *Polymers*, 13(9), 1373. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/9/1373>
45. Peng, T., Yang, H., Pu, X., Hu, B., Jiang, Z., & Yan, C. (2004). Combustion synthesis and photoluminescence of SrAl₂O₄:Eu,Dy phosphor nanoparticles. *Materials Letters*, 58(3), 352-356.
46. อนุรักษ์ ชุมแสง, ชูติมันต์ จันทรเมือง, พรเกียรติ ชื่นจิตอภิรมย์, & อิมอุไร, ส. ท. ล. (2559). การปรับปรุงความแข็งแรงโลหะเงินสเตอร์ลิงสำหรับเทคนิคการฝังไร้หนา. สืบค้นจาก
http://dspace.lib.buu.ac.th/xmlui/bitstream/handle/1234567890/3659/2563_148.pdf?sequence=3&isAllowed=y
47. สุภิญญา วงษ์ศรีรักษา. (2549) สมบัติทางกลและความต้านทานการหมอง ของโลหะผสมเงิน 92.5 เปอร์เซ็นต์-ทองแดง-แมงกานีส . จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย/กรุงเทพฯ.
48. สมพงษ์ พิริยานนท์, ประวิทย์ ตฤณรัชตเมธี, & วัฒนนภาเกษม, บ. ญ. ศ. (2557). การศึกษาสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของผลิตภัณฑ์ โลหะผงจากกรรมวิธีการอัดด้วยแม่พิมพ์. Retrieved from <https://research.rmutsb.ac.th/fullpaper/2557/2557239875658.pdf>



ภาคผนวก ก
สัดส่วนของชิ้นงาน ความหนาแน่น และการเผาผนึก

ภาคผนวก ก-1 แสดงความหนาแน่นของวัสดุ ในหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm³)

ความหนาแน่นของวัสดุ	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
ทองแดง	8.96
สตรอนเซียมอะลูมิเนต	3.56
ตัวเชื่อมประสานชนิดโพลีไวนิลแอลกอฮอล์	1.19

ภาคผนวก ก-2 แสดงสัดส่วนของวัสดุผงและตัวเชื่อมประสานในหน่วยน้ำหนัก (ก.) และเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt.%)

ชิ้นงาน	ทองแดง (ก.)	สตรอนเซียมอะลูมิเนต (ก.)	ตัวเชื่อมประสาน (ก.)	น้ำ Reverse Osmosis (ก.)	ทองแดง (wt.%)	สตรอนเซียมอะลูมิเนต (wt.%)
A	12.0	-	0.06	0.57	100	0
B	10.80	1.20	0.06	0.57	90	10
C	9.60	2.40	0.06	0.57	80	20
D	8.40	3.60	0.06	0.57	70	30

ภาคผนวก ก-3 แสดงการเปรียบเทียบความหนาแน่นจากปริมาณส่วนผสมกับความหนาแน่นของชิ้นงานก่อนและหลังจากการเผาผนึก

ชิ้นงาน	ความหนาแน่นจากการคำนวณปริมาณส่วนผสม (ก./ลบ.ซม.)	ความหนาแน่นของชิ้นงานก่อนการเผาผนึก (ก./ลบ.ซม.)	ความหนาแน่นของชิ้นงานหลังการเผาผนึก (ก./ลบ.ซม.)
A	8.96	3.86	3.92
B	7.78	3.42	3.52
C	6.88	3.16	3.02
D	6.16	2.82	2.84

ภาคผนวก ก-4 แสดงผลของการวัดความหนาแน่นของชิ้นงานหลังการเผาผนึกแบบอาร์คิมิดีสและความพรุนของชิ้นงาน

ชิ้นงาน	น้ำหนัก ชิ้นงาน เปียก บน อากาศ (ก.)	น้ำหนัก ชิ้นงานใน น้ำ (ก.)	น้ำหนัก ชิ้นงานที่ แห้ง (ก.)	ความ หนาแน่นของ ชิ้นงาน (ก./ลบ.ซม.)	Apparent Porosity	Water Absorption
A	12.82	10.01	11.51	4.10	46.82	11.44
B	12.97	9.76	11.42	3.56	48.34	13.59
C	13.14	9.57	11.38	3.19	49.45	15.52
D	13.77	9.55	11.68	2.77	49.50	17.86

ภาคผนวก ก-5 แสดงข้อมูลการวัดปริมาตรของชิ้นงาน A

ชิ้นงาน	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)	ความ สูง (มม.)	รัศมี (มม.)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (ซม.)	ความ สูง (ซม.)	รัศมี (ซม.)	น้ำหนัก ของ ชิ้นงาน (ก.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	ความ หนาแน่น (ก./ลบ. ซม.)
A1	25.02	6.69	12.51	2.50	0.67	1.25	12.42	3.29	3.78
A2	24.98	6.26	12.49	2.50	0.63	1.25	11.85	3.07	3.86
A3	25.14	6.07	12.57	2.51	0.61	1.26	11.94	3.01	3.96
A4	25.14	6.82	12.57	2.51	0.68	1.26	12.41	3.39	3.67
A5	25.28	6.05	12.64	2.53	0.61	1.26	11.90	3.04	3.92
A6	25.21	6.31	12.61	2.52	0.63	1.26	11.92	3.15	3.78
A7	25.00	6.32	12.50	2.50	0.63	1.25	12.42	3.10	4.00
A8	25.24	6.20	12.62	2.52	0.62	1.26	12.06	3.10	3.89
ค่าเฉลี่ย							12.12	3.14	3.86

ภาคผนวก ก-6 แสดงข้อมูลการวัดปริมาตรของชั้นงาน B

ชั้นงาน	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)	ความ สูง (มม.)	รัศมี (มม.)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (ซม.)	ความ สูง (ซม.)	รัศมี (ซม.)	น้ำหนัก ของ ชั้นงาน (ก.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	ความ หนาแน่น (ก./ลบ. ซม.)
B1	25.27	6.92	12.64	2.53	0.69	1.26	12.17	3.47	3.51
B2	25.18	6.96	12.59	2.52	0.70	1.26	12.01	3.47	3.47
B3	25.24	7.41	12.62	2.52	0.74	1.26	12.50	3.71	3.37
B4	25.27	7.11	12.64	2.53	0.71	1.26	12.40	3.57	3.48
B5	25.26	7.22	12.63	2.53	0.72	1.26	12.13	3.62	3.35
B6	25.05	7.23	12.53	2.51	0.72	1.25	12.28	3.56	3.45
B7	25.46	7.30	12.73	2.55	0.73	1.27	12.21	3.72	3.28
B8	25.13	6.34	12.57	2.51	0.63	1.26	10.88	3.14	3.46
ค่าเฉลี่ย							12.07	3.53	3.42

ภาคผนวก ก-7 แสดงข้อมูลการวัดปริมาตรของชั้นงาน C

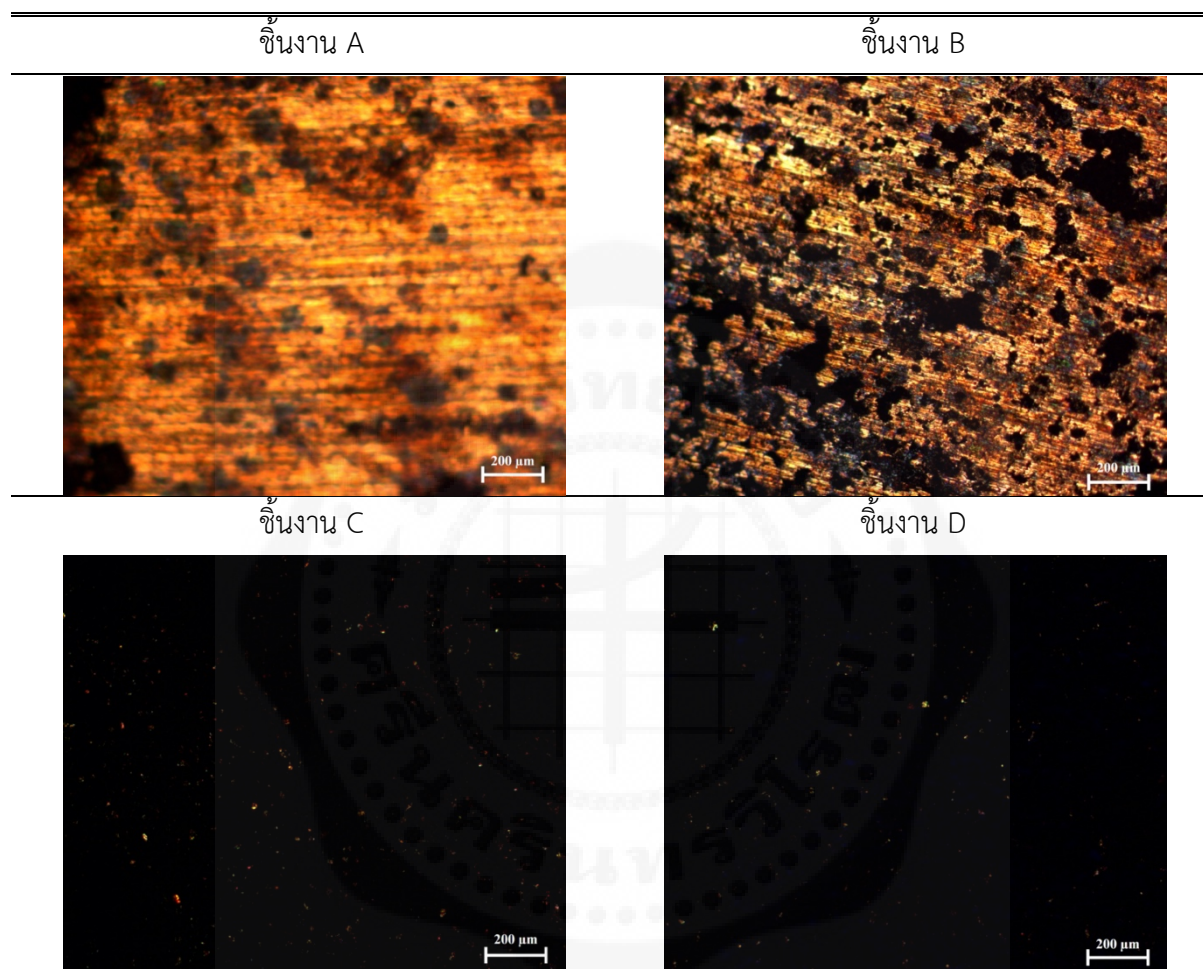
ชั้นงาน	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)	ความ สูง (มม.)	รัศมี (มม.)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (ซม.)	ความ สูง (ซม.)	รัศมี (ซม.)	น้ำหนัก ของ ชั้นงาน (ก.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	ความ หนาแน่น (ก./ลบ. ซม.)
C1	25.25	7.52	12.63	2.53	0.75	1.26	12.01	3.77	3.19
C2	25.20	7.68	12.60	2.52	0.77	1.26	12.23	3.83	3.19
C3	25.33	7.61	12.67	2.53	0.76	1.27	12.13	3.83	3.16
C4	25.15	7.67	12.58	2.52	0.77	1.26	12.13	3.81	3.18
C5	25.23	7.66	12.62	2.52	0.77	1.26	12.02	3.83	3.14
C6	25.22	7.64	12.61	2.52	0.76	1.26	12.11	3.82	3.17
C7	25.31	7.60	12.66	2.53	0.76	1.27	12.14	3.82	3.17
C8	25.25	7.80	12.63	2.53	0.78	1.26	11.85	3.91	3.03
ค่าเฉลี่ย							12.08	3.83	3.16

ภาคผนวก ก-8 แสดงข้อมูลการวัดปริมาตรของชิ้นงาน D

ชิ้นงาน	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)	ความ สูง (มม.)	รัศมี (มม.)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (ซม.)	ความ สูง (ซม.)	รัศมี (ซม.)	น้ำหนัก ของ ชิ้นงาน (ก.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	ความ หนาแน่น (ก./ลบ. ซม.)
D1	25.37	8.54	12.69	2.54	0.85	1.27	12.15	4.32	2.82
D2	25.24	8.61	12.62	2.52	0.86	1.26	12.23	4.31	2.84
D3	25.36	8.40	12.68	2.54	0.84	1.27	12.19	4.24	2.87
D4	25.15	8.53	12.58	2.52	0.85	1.26	12.22	4.24	2.88
D5	25.51	8.65	12.76	2.55	0.87	1.28	12.37	4.42	2.80
D6	25.30	8.81	12.65	2.53	0.88	1.27	12.18	4.43	2.75
D7	25.26	8.86	12.63	2.53	0.89	1.26	12.19	4.44	2.75
D8	25.25	8.52	12.63	2.53	0.85	1.26	12.20	4.27	2.86
ค่าเฉลี่ย							12.22	4.33	2.82

ภาคผนวก ข
โครงสร้างจุลภาคและสัณฐานวิทยา

ภาคผนวก ข-1 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ทางแสง (Optical microscope) ของชิ้นงานก่อนขัดผิวด้วยกระดาษทราย ที่กำลังขยาย 50 เท่า



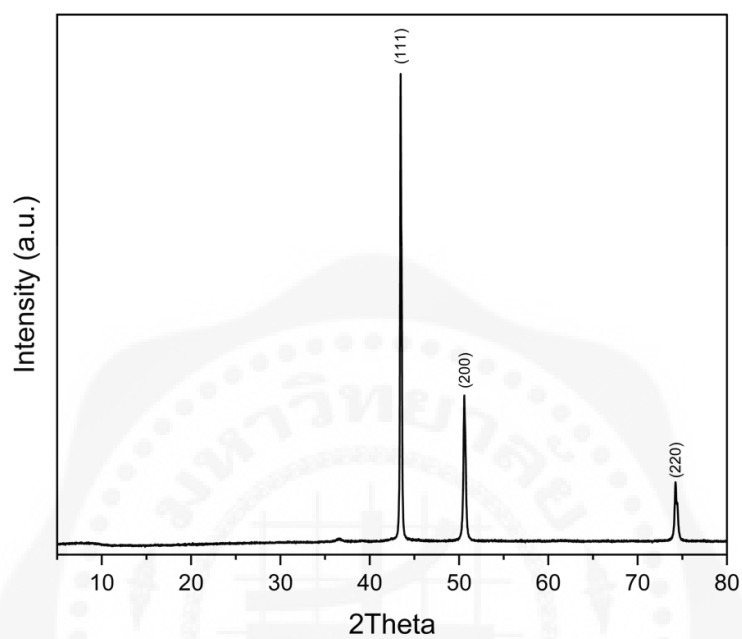
ภาคผนวก ค
การทดสอบความแข็งโดยเครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์

ภาคผนวก ค-1 แสดงค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ของชิ้นงาน A และ B

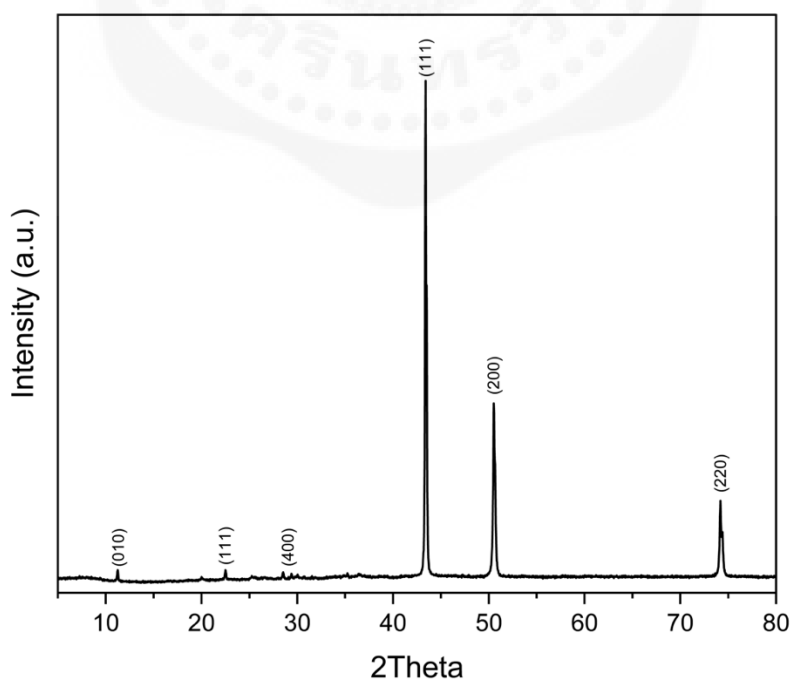
ชิ้นงาน	ค่าความแข็ง (HV)	ค่าความแข็งเฉลี่ย (HV)	Standard Deviation
A	36.30	30.50	7.44
	21.60		
	21.40		
	39.10		
	31.90		
	32.70		
B	12.00	12.84	3.26
	15.00		
	17.50		
	13.90		
	9.17		
	9.44		

ภาคผนวก ง
วิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

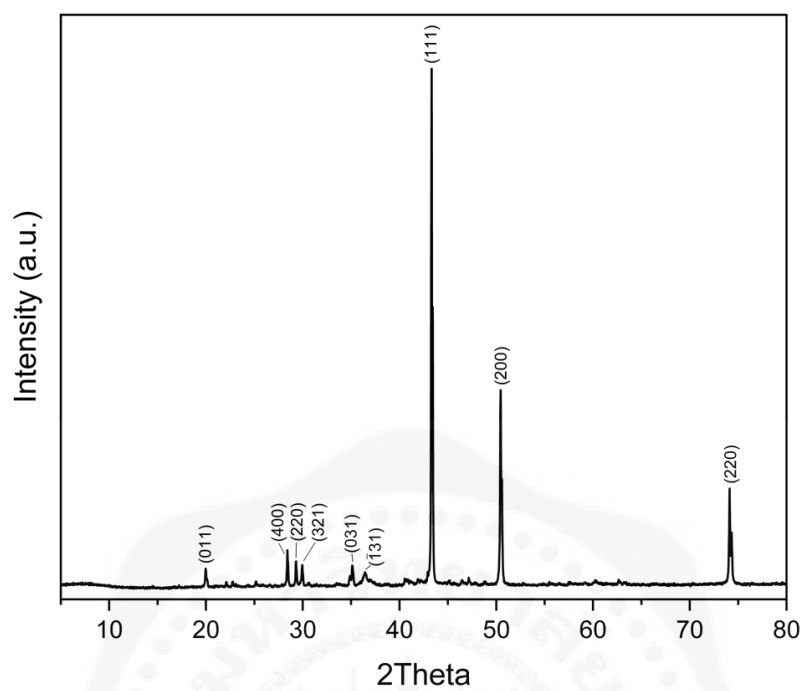
ภาคผนวก ง-1 แสดงผลจากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ชิ้นงาน A



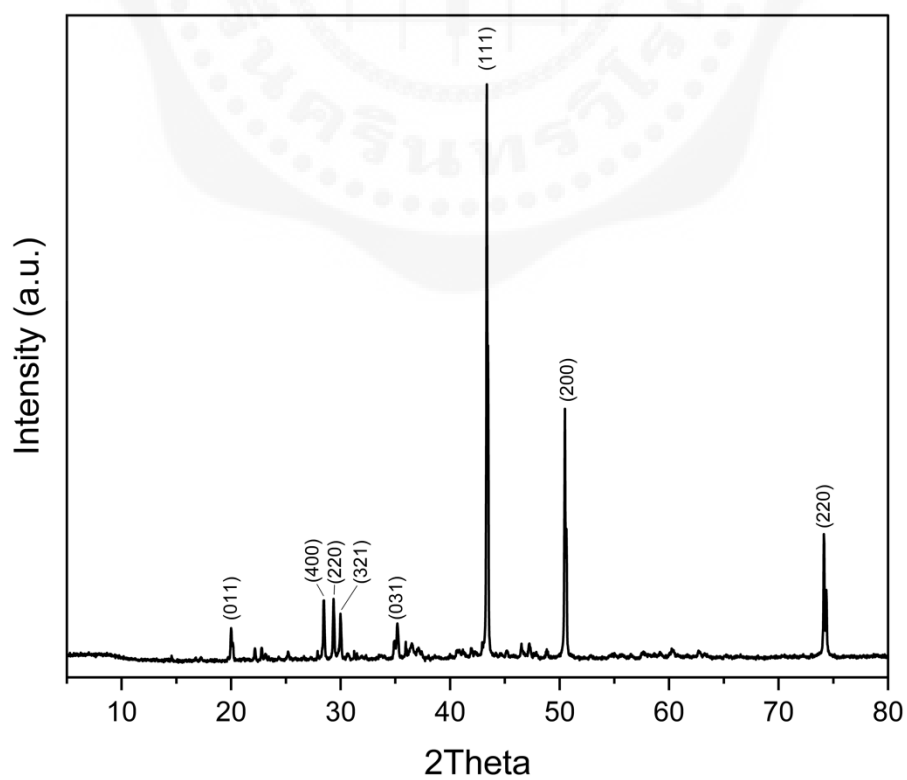
ภาคผนวก ง-2 แสดงผลจากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ชิ้นงาน B



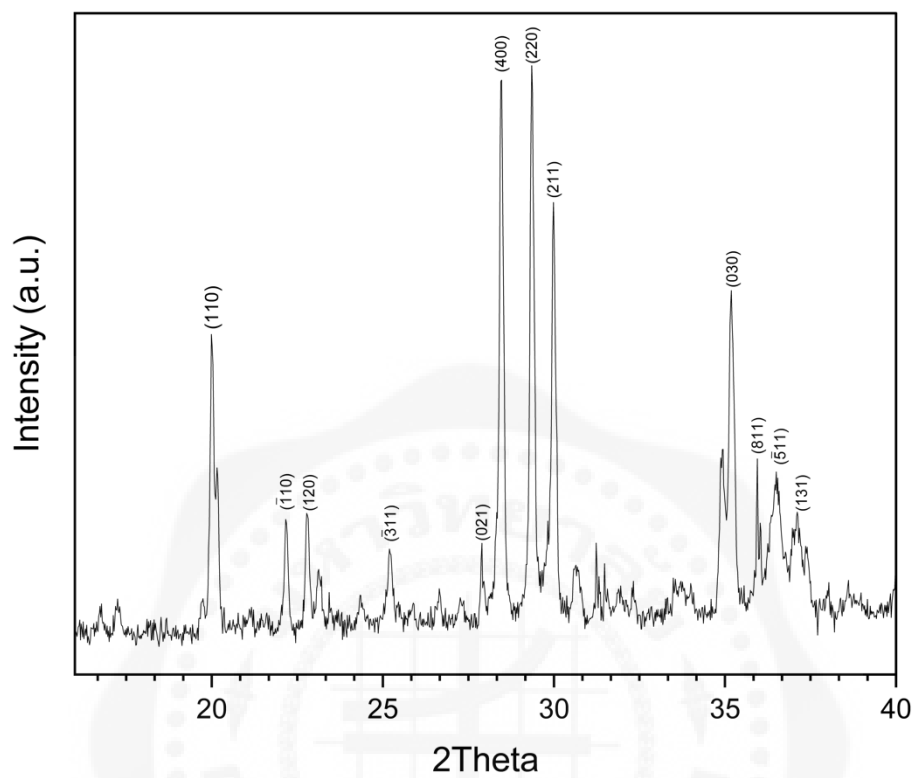
ภาคผนวก ง-3 แสดงผลจากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ชิ้นงาน C



ภาคผนวก ง-4 แสดงผลจากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ชิ้นงาน D



ภาคผนวก ง-5 แสดงผลจากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสตรอนเทียมอะลูมิเนียมและสารประกอบออกไซด์ของสตรอนเทียมอะลูมิเนียมของชิ้นงาน D



Formula	Cu		d	2θ	I fix	h	k	l
Name	Copper		2.08597	43.342	1000	1	1	1
Name (mineral)			1.80650	50.479	427	2	0	0
Name (common)			1.27739	74.174	171	2	2	0
Status	Primary		1.08936	90.001	157	3	1	1
Ambient	Yes		1.04298	95.217	42	2	2	2
			0.90325	117.037	18	4	0	0
Lattice:	Cubic	Mol. weight =	0.82888	136.660	57	3	3	1
S.G.:	Fm-3m (225)	Volume [CD] =	0.80789	144.906	54	4	2	0
		Dx =						
		Dm =						
a =	3.61300	I/Icor =						
a/b =	1.00000							
c/b =	1.00000							
Z =	4							
ANX: N NIST M&A collection code: A 22857 53930 1 Temperature Factor: TF TF was not given, B set to 1.000 for calc Temperature of Data Collection: 293 K Minor Warning: No e.s.d reported/abstracted on the cell dimension. No Rfactor reported/abstracted Unit Cell Data Source: Powder Diffraction								
Primary Reference Publication: Calculated from NIST using POWD-12++ Publication: J. Mater. Sci. Detail: volume 23, page 757 (1988) Authors: Suh, I.-K., Ohta, H., Waseda, Y.								
Radiation:	CuKα1	Filter:	Not specified					
Wavelength :	1.54060	d-spacing:						
SS/FOM:	F(8)= 999.9 (0.0001, 8)							

ภาคผนวก ง-7 แสดงข้อมูลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสตรอนเชียมอะลูมินेट (SrAl_2O_4) จาก JCPDS หมายเลขรูปแบบ 00-034-0379

Pattern: PDF 00-034-0379 Radiation: 1.54060 Quality: Star (*)

Formula		SrAl2O4	
Name		Strontium Aluminum Oxide	
Name (mineral)			
Name (common)			
Status		Primary	
Ambient		Yes	
Lattice: Monoclinic		Mol. weight = 205.58	
S.G.: P*/* (0)		Volume [CD] = 383.68	
		Dx =	
		Dm =	
		l/lcor = -1.000	
a = 8.44240	beta = 93.415		
b = 8.82200			
c = 5.16070			
a/b = 0.95697			
c/b = 0.58498			
Z = 4			
Additional Patterns: To replace 00-009-0039			
General Comments: Pattern at 26(1) C. There is a hexagonal phase formed above 650 C (Ito et al., 1977)			
Sample Preparation: One mole of "Sr C O3" was reacted with two moles of "Al (O H)3" by heating from 500 to 1000 C, where it was held for 3 hours, then at 1500 C for 40 hours. The sample was sieved and heated at 550 C for 7 hours			
Structures: The cell was found by use of the Visser program (1969). A unit cell given by Ito et al., (1977) was that of a supercell with four times the volume of the Visser cell			
Unit Cell Data Source: Powder Diffraction			
Primary Reference			
Publication: Natl. Bur. Stand. (U. S.) Monogr. 25			
Detail: volume 20, page 91 (1984)			
Radiation: CuKα1		Filter: M	
Wavelength: 1.54060		d-spacing:	
SS/FOM: F(30)= 83.0 (0.0071, 51)			

ภาคผนวก ง-7 แสดงข้อมูลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสตรอนเชียมอะลูมินิต (SrAl_2O_4) จาก JCPDS หมายเลขรูปแบบ 00-034-0379 (ต่อ)

d	2 θ	I fix	h	k	l
1.49135	62.197	4	4	2	2
1.48250	62.610	13	5	2	1
1.47907	62.772	8	-4	4	1
1.47056	63.177	10	0	6	0
1.45888	63.742	3	-4	3	2
1.43149	65.110	3	-5	1	2
1.41433	66.000	3	0	6	1
1.40997	66.230	3	3	1	3
1.40444	66.525	5	6	0	0



ภาคผนวก ง-8 แสดงข้อมูลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสตรอนเชียมอะลูมิเนียมออกไซด์ (SrAl_4O_7) จาก JCPDS หมายเลขรูปแบบ 00-025-1289

Pattern: PDF 00-025-1289 Radiation: 1.54060 Quality: Indexed

Formula		SrAl4O7	
Name		Strontium Aluminum Oxide	
Name (mineral)			
Name (common)			
Status		Primary	
Ambient		Yes	
Lattice: Monoclinic		Mol. weight = 307.54 Volume [CD] = 625.14 Dx = Dm = I/Icor = -1.000	
a = 13.04000 b = 9.00000 c = 5.55000 a/b = 1.44889 c/b = 0.61667	beta = 106.310		
General Comments: Metastable modification. Stable near 1400 C Warning: Lines with abs(delta 2Theta)>0.06 DEG Unit Cell Data Source: Powder Diffraction			
Primary Reference Publication: Rev. Int. Hautes Temp. Refract. Authors: Ibid. Publication: Rev. Int. Hautes Temp. Refract. Detail: volume 9, page 297 (1972) Authors: Appendino.			
Radiation: CuKα1 Wavelength: 1.54060 SS/FOM: F(30)= 12.9 (0.0228, 102)		Filter: F d-spacing:	

ภาคผนวก ง-9 แสดงข้อมูลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสตรอนเชียมอะลูมิเนียมออกไซด์ ($\text{SrO})_4(\text{Al}_2\text{O}_3)_7$ หรือ Tetra strontium tetra deca aluminum oxide จาก JCPDS หมายเลขรูปแบบ 01-089-8206

Pattern: PDF 01-089-8206 Radiation: 1.54060 Quality: Star (*)

Formula (SrO) ₄ (Al ₂ O ₃) ₇			Name Strontium Aluminum Oxide			d	2θ	I fix	h	k	l	d	2θ	I fix	h	k	l
Name (mineral)			Name (common) tetrastrontium tetradecaaluminium oxide			12.3725 0	7.139	558	2	0	0	2.61267	34.295	593	8	0	1
Status Primary			Ambient Yes			8.47350	10.432	2	0	1	0	2.56936	34.891	59	4	3	0
						6.99111	12.652	11	2	1	0	2.52796	35.482	9	6	2	1
						6.18627	14.306	150	4	0	0	2.49820	35.919	571	8	1	1
						4.99640	17.737	6	4	1	0	2.49820	35.919	571	8	2	0
						4.88080	18.161	178	0	0	1	2.47451	36.274	95	10	0	0
Lattice: S.G.: Orthorhombic Pmma (51)			Mol. weight = Volume [CD] = Dx = Dm = I/Icor = 1128.2 1023.39 3.66 0.910			4.78854	18.514	71	1	0	1	2.44040	36.800	363	0	0	2
a = 24.74509 b = 8.47350 c = 4.88080 a/b = 2.92029 c/b = 0.57601			Z = 2			4.54029	19.536	9	2	0	1	2.44040	36.800	363	0	3	1
						4.22935	20.988	82	0	2	0	2.42862	36.984	259	1	0	2
						4.22935	20.988	82	0	1	1	2.42862	36.984	259	1	3	1
						4.20050	21.134	80	3	0	1	2.39552	37.514	145	2	0	2
						4.16890	21.296	9	1	1	1	2.39552	37.514	145	9	0	1
						4.12418	21.529	135	6	0	0	2.37530	37.846	211	7	2	1
						4.00826	22.160	301	2	1	1	2.37530	37.846	211	10	1	0
						4.00826	22.160	301	2	2	0	2.34508	38.352	121	3	3	1
						3.83179	23.194	97	4	0	1	2.34508	38.352	121	0	1	2
						3.76346	23.621	201	3	1	1	2.33037	38.604	182	6	3	0
						3.70828	23.978	43	6	1	0	2.33037	38.604	182	1	1	2
						3.49556	25.461	914	4	1	1	2.30517	39.043	7	2	1	2
						3.49556	25.461	914	4	2	0	2.30517	39.043	7	9	1	1
						3.19948	27.863	750	0	2	1	2.27014	39.671	52	4	0	2
						3.17307	28.099	221	1	2	1	2.27014	39.671	52	4	3	1
						3.15017	28.308	79	6	0	1	2.25569	39.936	60	3	1	2
						3.09314	28.841	74	8	0	0	2.22382	40.533	221	8	2	1
						3.09314	28.841	74	2	2	1	2.20706	40.854	19	10	0	1
						2.98294	29.931	138	3	2	1	2.19183	41.151	287	5	3	1
						2.95272	30.244	321	6	1	1	2.19183	41.151	287	4	1	2
						2.95272	30.244	321	6	2	0	2.18876	41.211	271	5	0	2
						2.90560	30.747	7	8	1	0	2.13580	42.282	55	10	2	0
						2.86298	31.216	304	7	0	1	2.13580	42.282	55	10	1	1
						2.84190	31.454	100 0	4	2	1	2.11838	42.646	247	5	1	2
						2.75366	32.489	44	2	3	0	2.11838	42.646	247	0	4	0
						2.71234	32.998	74	7	1	1	2.10297	42.974	123	6	0	2
						2.68689	33.320	148	5	2	1	2.10297	42.974	123	6	3	1
Radiation: Wavelength: SS/FOM:			Filter: d-spacing: Not specified														
CuKα1 1.54060 F(30)= 160.5 (0.0049, 38)																	

ภาคผนวก ง-9 แสดงข้อมูลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสตรอนเตียมอะลูมิเนียมออกไซด์ ($\text{SrO})_4(\text{Al}_2\text{O}_3)_7$ หรือ Tetra strontium tetra deca aluminum oxide จาก JCPDS หมายเลขรูปแบบ 01-089-8206 (ต่อ)

d	2 θ	I fix	h	k	l	d	2 θ	I fix	h	k	l	d	2 θ	I fix	h	k	l	d	2 θ	I fix	h	k	l
2.08799	43.298	38	2	4	0	1.76946	51.613	3	14	0	0	1.57161	58.699	42	3	4	2	1.41955	65.727	71	8	1	3
2.08799	43.298	38	8	3	0	1.74778	52.301	130	8	4	0	1.57161	58.699	42	3	5	1	1.41423	66.005	97	13	2	2
2.06209	43.870	38	12	0	0	1.74570	52.368	127	8	2	2	1.56752	58.867	26	6	5	0	1.41423	66.005	97	12	4	1
2.04843	44.178	128	3	2	2	1.73909	52.582	18	10	3	1	1.56752	58.867	26	3	1	3	1.41225	66.110	162	0	6	0
2.01069	45.052	159	7	3	1	1.73909	52.582	18	10	0	2	1.56282	59.062	6	15	0	1	1.41225	66.110	162	14	1	2
2.01069	45.052	159	7	0	2	1.73328	52.772	112	13	1	1	1.54657	59.745	164	16	0	0	1.40978	66.240	230	0	3	3
2.00413	45.208	119	4	2	2	1.73328	52.772	112	12	2	1	1.54657	59.745	164	4	1	3	1.40314	66.595	35	2	6	0
2.00413	45.208	119	4	4	0	1.73026	52.871	85	5	3	2	1.54078	59.992	31	11	2	2	1.40017	66.754	77	9	0	3
1.98609	45.641	48	11	1	1	1.73026	52.871	85	14	1	0	1.53690	60.159	12	15	1	1	1.40017	66.754	77	2	3	3
1.95740	46.349	78	10	2	1	1.70214	53.815	94	7	4	1	1.53295	60.330	15	9	3	2	1.39822	66.860	72	10	5	0
1.95740	46.349	78	7	1	2	1.70214	53.815	94	10	1	2	1.52831	60.533	9	10	4	1	1.39243	67.174	48	0	5	2
1.94324	46.707	199	5	2	2	1.68538	54.394	51	6	3	2	1.52219	60.802	31	5	1	3	1.39243	67.174	48	16	2	1
1.94324	46.707	199	0	4	1	1.67623	54.715	64	9	2	2	1.52219	60.802	31	5	4	2	1.38978	67.320	13	3	3	3
1.93727	46.859	40	1	4	1	1.66547	55.099	7	12	3	0	1.51595	61.079	56	1	2	3	1.38978	67.320	13	1	5	2
1.91589	47.414	62	8	0	2	1.65536	55.464	17	11	3	1	1.51343	61.191	59	6	0	3	1.38272	67.710	33	9	4	2
1.91589	47.414	62	8	3	1	1.65536	55.464	17	11	0	2	1.50189	61.713	9	13	3	1	1.38272	67.710	33	2	5	2
1.89952	47.848	45	12	0	1	1.64546	55.827	61	8	4	1	1.50189	61.713	9	13	0	2	1.37683	68.039	18	17	1	1
1.89146	48.065	21	3	4	1	1.63675	56.150	84	7	3	2	1.49832	61.876	6	14	3	0	1.37683	68.039	18	4	6	0
1.88173	48.329	43	6	2	2	1.63675	56.150	84	13	2	1	1.49369	62.089	50	6	4	2	1.37454	68.168	11	4	3	3
1.88173	48.329	43	6	4	0	1.63124	56.357	36	14	2	0	1.49369	62.089	50	3	2	3	1.37454	68.168	11	18	0	0
1.86872	48.687	12	8	1	2	1.63124	56.357	36	14	1	1	1.48625	62.434	5	8	5	0	1.37257	68.279	13	3	5	2
1.86125	48.895	19	10	3	0	1.62340	56.653	40	1	0	3	1.47792	62.826	61	12	4	0	1.36670	68.613	17	15	0	2
1.85392	49.101	278	12	1	1	1.62340	56.653	40	11	1	2	1.47792	62.826	61	7	0	3	1.36670	68.613	17	15	3	1
1.85392	49.101	278	4	4	1	1.61305	57.050	3	2	0	3	1.47054	63.178	5	11	4	1	1.36332	68.807	5	8	2	3
1.84022	49.491	41	11	2	1	1.60761	57.261	7	10	2	2	1.46625	63.384	18	15	2	1	1.35803	69.113	39	4	5	2
1.84022	49.491	41	1	3	2	1.60761	57.261	7	10	4	0	1.45745	63.812	33	7	1	3	1.35698	69.174	39	14	2	2
1.82693	49.876	34	2	3	2	1.59974	57.569	52	0	5	1	1.45745	63.812	33	7	4	2	1.35698	69.174	39	18	1	0
1.82693	49.876	34	9	3	1	1.59974	57.569	52	0	4	2	1.45197	64.081	35	16	1	1	1.34927	69.626	29	15	1	2
1.81475	50.234	61	7	2	2	1.59641	57.700	83	1	4	2	1.45197	64.081	35	5	2	3	1.34927	69.626	29	2	6	1
1.80880	50.411	10	5	4	1	1.59641	57.700	83	3	0	3	1.43990	64.683	5	8	0	3						
1.80200	50.614	27	3	3	2	1.58555	58.133	77	8	3	2	1.43235	65.066	298	14	3	1						
1.78423	51.154	5	9	1	2	1.58555	58.133	77	9	4	1	1.43235	65.066	298	14	0	2						
1.77338	51.490	9	13	0	1	1.57623	58.510	57	12	3	1	1.42523	65.432	18	6	2	3						
1.76946	51.613	3	4	3	2	1.57623	58.510	57	12	0	2	1.41955	65.727	71	8	4	2						

ภาคผนวก จ
การเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิว

ภาคผนวก จ-1 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิวของชิ้นงาน ที่เวลา 15 นาที ของชิ้นงาน A

ชิ้นงาน	ก่อนบรรยากาศซัลเฟอร์					หลังบรรยากาศซัลเฟอร์				
	L_1^*	a_1^*	b_1^*	c_1^*	h_1	L_2^*	a_2^*	b_2^*	c_2^*	h_2
A	39.40	8.60	12.90	15.50	56.30	37.60	12.40	9.30	15.50	37.00
	41.30	9.30	14.90	17.60	58.00	36.50	6.80	11.20	13.10	58.70
	41.90	10.50	16.20	19.30	57.00	37.20	13.80	11.40	17.90	39.50
ค่าเฉลี่ย	40.87	9.47	14.67	17.47	57.10	37.10	11.00	10.63	15.50	45.07

ภาคผนวก จ-2 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิวของชิ้นงาน ที่เวลา 15 นาที ของชิ้นงาน B

ชิ้นงาน	ก่อนบรรยากาศซัลเฟอร์					หลังบรรยากาศซัลเฟอร์				
	L_1^*	a_1^*	b_1^*	c_1^*	h_1	L_2^*	a_2^*	b_2^*	c_2^*	h_2
B	34.00	4.60	10.70	11.70	56.30	32.90	9.90	8.70	13.20	41.30
	31.90	7.60	9.20	11.90	58.00	36.70	11.50	12.60	17.10	47.60
	33.70	8.60	10.70	13.70	57.00	35.80	5.80	12.00	13.40	64.30
ค่าเฉลี่ย	33.20	6.93	10.20	12.43	57.10	35.13	9.07	11.10	14.57	51.07

ภาคผนวก จ-3 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิวของชิ้นงาน ที่เวลา 15 นาที ของชิ้นงาน C

ชิ้นงาน	ก่อนบรรยากาศซัลเฟอร์					หลังบรรยากาศซัลเฟอร์				
	L_1^*	a_1^*	b_1^*	c_1^*	h_1	L_2^*	a_2^*	b_2^*	c_2^*	h_2
C	33.00	9.50	15.70	18.40	58.80	33.40	9.10	14.90	17.40	58.50
	33.70	9.50	15.70	18.30	58.90	33.90	9.60	14.30	17.20	56.30
	33.30	9.50	15.60	18.30	58.70	33.30	9.30	14.70	17.40	57.80
ค่าเฉลี่ย	33.33	9.50	15.67	18.33	58.80	33.53	9.33	14.63	17.33	57.53

ภาคผนวก จ-4 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิวของชิ้นงาน ที่เวลา 15 นาที ของชิ้นงาน D

ชิ้นงาน	ก่อนบรรจุอากาศซีลเฟอร์					หลังบรรจุอากาศซีลเฟอร์				
	L_1^*	a_1^*	b_1^*	c_1^*	h_1	L_2^*	a_2^*	b_2^*	c_2^*	h_2
D	28.30	10.00	16.00	18.90	58.00	28.00	9.60	14.90	17.70	57.20
	28.70	9.40	14.60	17.40	57.30	28.30	9.70	14.80	17.70	56.80
	29.30	9.10	13.60	16.30	56.10	28.10	9.70	14.70	17.60	56.60
ค่าเฉลี่ย	28.77	9.50	14.73	17.53	57.13	28.13	9.67	14.80	17.67	56.87

ภาคผนวก จ-5 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิวของชิ้นงาน ที่เวลา 30 นาที ของชิ้นงาน A

ชิ้นงาน	ก่อนบรรจุอากาศซีลเฟอร์					หลังบรรจุอากาศซีลเฟอร์				
	L_1^*	a_1^*	b_1^*	c_1^*	h_1	L_2^*	a_2^*	b_2^*	c_2^*	h_2
A	40.10	8.50	12.50	15.50	56.10	43.20	2.90	10.40	10.80	74.40
	39.60	9.10	13.60	16.70	57.90	44.40	3.70	13.90	14.40	74.90
	41.50	9.80	15.10	17.20	56.90	45.80	6.40	13.00	14.40	63.80
ค่าเฉลี่ย	40.40	9.13	13.73	16.47	56.97	44.47	4.33	12.43	13.20	71.03

ภาคผนวก จ-6 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิวของชิ้นงาน ที่เวลา 30 นาที ของชิ้นงาน B

ชิ้นงาน	ก่อนบรรจุอากาศซีลเฟอร์					หลังบรรจุอากาศซีลเฟอร์				
	L_1^*	a_1^*	b_1^*	c_1^*	h_1	L_2^*	a_2^*	b_2^*	c_2^*	h_2
B	33.90	4.60	10.30	11.50	65.90	35.00	8.50	8.60	12.10	45.40
	34.10	7.50	10.10	11.60	64.30	38.40	9.20	9.70	13.30	46.50
	32.50	8.50	9.70	11.90	62.40	35.90	7.90	9.00	12.00	48.70
ค่าเฉลี่ย	33.50	6.87	10.03	11.67	64.20	36.43	8.53	9.10	12.47	46.87

ภาคผนวก จ-7 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิวของชิ้นงาน ที่เวลา 30 นาที ของชิ้นงาน C

ชิ้นงาน	ก่อนบรรจุอากาศซัลเฟอร์					หลังบรรจุอากาศซัลเฟอร์				
	L_1^*	a_1^*	b_1^*	c_1^*	h_1	L_2^*	a_2^*	b_2^*	c_2^*	h_2
C	33.10	9.40	15.00	18.50	58.90	25.50	8.20	12.30	14.80	56.40
	34.00	9.30	14.90	18.40	57.90	25.20	7.70	10.90	13.40	55.00
	33.50	9.70	15.70	18.40	57.80	25.20	7.70	11.00	13.40	55.10
ค่าเฉลี่ย	33.53	9.47	15.20	18.43	58.20	25.30	7.87	11.40	13.87	55.50

ภาคผนวก จ-8 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิวของชิ้นงาน ที่เวลา 30 นาที ของชิ้นงาน D

ชิ้นงาน	ก่อนบรรจุอากาศซัลเฟอร์					หลังบรรจุอากาศซัลเฟอร์				
	L_1^*	a_1^*	b_1^*	c_1^*	h_1	L_2^*	a_2^*	b_2^*	c_2^*	h_2
D	28.50	9.90	15.70	18.50	58.10	28.20	9.50	14.40	17.30	56.60
	29.10	9.40	14.70	17.60	57.30	28.10	9.60	14.50	17.40	56.50
	27.80	9.10	14.10	16.50	55.60	28.10	9.70	14.60	17.50	56.40
ค่าเฉลี่ย	28.47	9.47	14.83	17.53	57.00	28.13	9.60	14.50	17.40	56.50

ภาคผนวก จ-9 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิวของชิ้นงาน ที่เวลา 120 นาที ของชิ้นงาน A

ชิ้นงาน	ก่อนบรรจุอากาศซัลเฟอร์					หลังบรรจุอากาศซัลเฟอร์				
	L_1^*	a_1^*	b_1^*	c_1^*	h_1	L_2^*	a_2^*	b_2^*	c_2^*	h_2
A	39.40	8.70	12.90	15.50	56.30	37.50	9.10	14.10	16.80	57.10
	41.30	9.10	13.90	16.50	58.00	36.80	8.70	11.80	14.70	53.60
	40.80	10.10	15.10	18.90	57.00	36.90	8.10	14.80	16.90	61.30
ค่าเฉลี่ย	40.50	9.30	13.97	16.97	57.10	37.07	8.63	13.57	16.13	57.33

ภาคผนวก จ-10 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิวของชิ้นงาน ที่เวลา 120 นาที ของชิ้นงาน B

ชิ้นงาน	ก่อนบรรจุอากาศซีลเฟอร์					หลังบรรจุอากาศซีลเฟอร์				
	L_1^*	a_1^*	b_1^*	c_1^*	h_1	L_2^*	a_2^*	b_2^*	c_2^*	h_2
B	34.00	5.10	10.50	11.70	65.60	28.20	7.70	6.70	10.20	41.00
	31.90	7.60	9.20	11.80	50.10	26.20	3.70	9.10	9.80	68.10
	32.90	8.50	10.40	13.70	51.00	26.30	3.70	9.10	9.80	68.10
ค่าเฉลี่ย	32.93	7.07	10.03	12.40	55.57	26.90	5.03	8.30	9.93	59.07

ภาคผนวก จ-11 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิวของชิ้นงาน ที่เวลา 120 นาที ของชิ้นงาน C

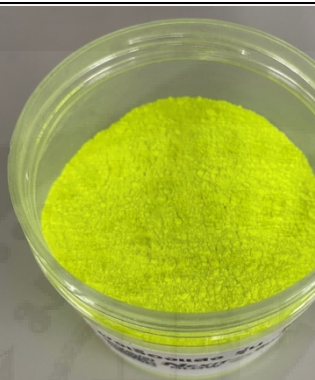
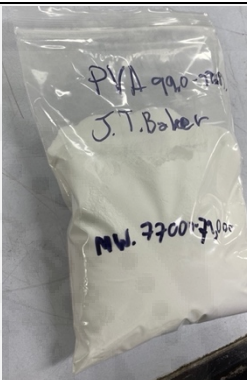
ชิ้นงาน	ก่อนบรรจุอากาศซีลเฟอร์					หลังบรรจุอากาศซีลเฟอร์				
	L_1^*	a_1^*	b_1^*	c_1^*	h_1	L_2^*	a_2^*	b_2^*	c_2^*	h_2
C	33.00	9.40	15.60	18.30	58.80	32.40	9.80	15.60	18.40	57.80
	33.30	9.40	15.40	18.40	58.90	31.10	9.10	15.20	17.70	59.00
	34.10	9.50	15.40	18.40	58.90	31.10	9.10	14.20	17.00	57.00
ค่าเฉลี่ย	33.47	9.43	15.47	18.37	58.87	31.53	9.33	15.00	17.70	57.93

ภาคผนวก จ-12 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิวของชิ้นงาน ที่เวลา 120 นาที ของชิ้นงาน D

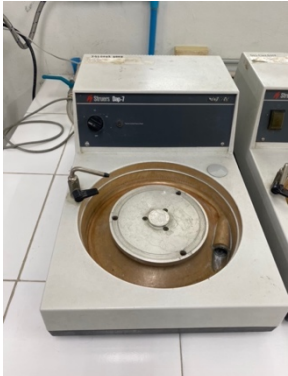
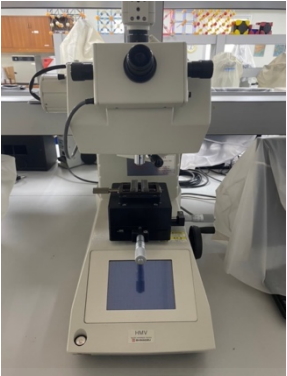
ชิ้นงาน	ก่อนบรรจุอากาศซีลเฟอร์					หลังบรรจุอากาศซีลเฟอร์				
	L_1^*	a_1^*	b_1^*	c_1^*	h_1	L_2^*	a_2^*	b_2^*	c_2^*	h_2
D	28.30	10.10	16.10	18.90	58.00	28.60	9.90	14.80	17.80	56.30
	28.50	9.60	15.60	17.40	57.30	29.00	9.90	14.80	17.80	56.10
	28.90	9.50	14.90	16.30	56.10	29.10	9.80	14.70	17.70	56.20
ค่าเฉลี่ย	28.57	9.73	15.53	17.53	57.13	28.90	9.87	14.77	17.77	56.20

ภาคผนวก ฉ
วัสดุและอุปกรณ์

ภาคผนวก ฉ-1 แสดงภาพวัสดุผงที่ใช้ในงานวิจัย

Copper Powder (Cu)	Strontium Aluminate Powder (SrAl_2O_4)	Poly Vinyl Alcohol Powder (PVA)	Reverse Osmosis water (RO)
			

ภาคผนวก ฉ-2 แสดงภาพเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องชั่งน้ำหนัก	เครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์	กล้องจุลทรรศน์แบบแสง
		
เครื่องอัดไฮดรอลิก	แม่พิมพ์สำหรับอัด	Carbolite Furnace
		
Colorimeter	Weighing Apparatus	Fluorescence Spectrophotometer
		

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล หัสวรรณ ก้นแก้ว
 วัน เดือน ปี เกิด 14 กุมภาพันธ์ 2543
 สถานที่เกิด กรุงเทพมหานคร
 วุฒิการศึกษา มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสตรีสมุทรปราการ จังหวัดสมุทรปราการ พ.ศ.2560
 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ พ.ศ.2564

ชื่อ-สกุล รัชชานนท์ แก้วปานมา
 วัน เดือน ปี เกิด 30 ตุลาคม 2542
 สถานที่เกิด กรุงเทพมหานคร
 วุฒิการศึกษา มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนอัสสัมชัญลำปาง จังหวัดลำปาง พ.ศ.2560
 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ พ.ศ.2564

