ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
242951

การศึกษาอุณหภูมิผิวหน้าที่เหมาะสมในการพัฒนากระบวนการประดิษฐ์ซิลเวอร์เคลย์ในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ

ดลาภัค ชุมประเสริฐ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
มีนาคม 2554

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
242951

การศึกษาอุณหภูมิเผาผนึกเพื่อพัฒนากระบวนการประดิษฐ์ซิลเวอร์เคลย์ในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ

ลดาภัค ชุมประเสริฐ

วิทยานิพนธ์นี้เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัยเพื่อเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
มีนาคม 2554

การศึกษาอุณหภูมิเผาผนึกเพื่อพัฒนากระบวนการประดิษฐ์ซิลเวอร์เคลย์ในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ

ลดาภัค ชุมประเสริฐ

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
ศาสตราจารย์ (เกียรติคุณ) ดร. ทวี ตันฑศิริ

.....กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร. จีระพงษ์ ตันตระกูล

.....กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร. กอบวุฒิ รุจิจนากุล

.....กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กมลพรรณ เพ็งพัด

.....กรรมการ
อาจารย์ ดร. สุขุม อิสเสงี่ยม

.....กรรมการ
อาจารย์ ดร. อุไรวรรณ อินต๊ะถา

คณะกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
อาจารย์ ดร. สุขุม อิสเสงี่ยม

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
รองศาสตราจารย์ ดร. จีระพงษ์ ตันตระกูล

10 มีนาคม 2554

© ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ ดร. จีระพงษ์ ตันตระกูล และอาจารย์ ดร. สุขุม อิสเสงี่ยม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งกรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา และตรวจแก้ไขจึงทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จสมบูรณ์ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร. ทวี ตันฆศิริ ที่กรุณารับเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. กอบวุฒิ รุจิจนากุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กมลพรรณ เพ็งพัด และอาจารย์ ดร. อุไรวรรณ อินต๊ะถาที่กรุณารับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา และให้คำแนะนำเป็นอย่างดีเสมอมา

ขอกราบขอบพระคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และสมาคมอัญมณีแห่งประเทศไทยที่ได้มอบทุนเพื่อสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ คุณสุเทพ ตันติวีรสุต ผู้อำนวยการศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมเซรามิกจังหวัดลำปางที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เตาเผาอุณหภูมิสูง และเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติที่ให้ใช้เครื่องและเทคนิคต่างๆ ในการทำงานวิจัยนี้ได้สำเร็จและมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คุณสุขแก้ว คำเมืองสาที่ได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับเครื่องวัดขนาดอนุภาค และคำปรึกษาที่มีค่า คอยให้กำลังใจ และช่วยแก้ปัญหา

ขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ ที่แลบอิเล็กโทรเซรามิกที่ช่วยให้ทั้งคำปรึกษา และคำแนะนำในการใช้เครื่องมือในห้องแลบเพื่อการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ดี

ขอขอบคุณปัญหาและประสบการณ์ต่างๆ ที่มีในงานวิจัย ได้ทำให้เรียนรู้วิธีการแก้ปัญหาที่ถูกต้อง และสามารถนำประสบการณ์ที่ผ่านมามาเป็นแนวทางแก้ไขในงานวิจัยสืบไป

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ พลเรือเอกศราวุธ ชุมประเสริฐ คุณกฤตยา ชุมประเสริฐ คุณภราดร ชุมประเสริฐ และคุณเจียมจิตร เหลือจ้อย ที่เอาใจใส่ สนับสนุน ให้กำลังใจ กำลังทรัพย์ในการศึกษาตลอดมา คอยช่วยเหลือและรับฟังปัญหาที่เกิดขึ้น ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านที่เป็นผู้ส่งเสริมและสนับสนุนรวมทั้งให้กำลังใจแก่ผู้เขียนตลอดมาจนสำเร็จได้ด้วยดี

ลดาภัค ชุมประเสริฐ

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์	การศึกษาอุณหภูมิเผาผนึกเพื่อพัฒนากระบวนการประดิษฐ์ซิลเวอร์เคลย์ในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ
ผู้เขียน	นางสาวลดาภัค ชุมประเสริฐ
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วัสดุศาสตร์)
คณะกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	อาจารย์ ดร. สุขุม อิสเสงี่ยม อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก รศ. ดร. จีระพงษ์ ตันตระกูล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

บทคัดย่อ

242951

การเตรียมผงเงินที่มีความบริสุทธิ์สูงและมีขนาดเล็กเป็นส่วนสำคัญของกระบวนการผลิตซิลเวอร์เคลย์ ผงเงินที่ได้ผลิตจากกรรมวิธีทางเคมีโดยใช้ซิลเวอร์ไนเตรทและกลีเซอรอลเป็นตัวรีดิวซ์ เครื่องบดใช้เพื่อบดผงเงินที่จับตัวเป็นกลุ่มก้อนซึ่งได้จากกรรมวิธีนี้ให้มีการกระจายตัวของอนุภาคผงเงิน เครื่องวัดขนาดอนุภาค CILAS 1064 ผงเงินมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.34-2.58 ไมโครเมตร เทคนิคเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชันโชว์เพียงเฟสเงินเพียงเฟสเดียว และเครื่องไอซีพีสเปกโทรเมตรีผงเงินที่ผลิตขึ้นมีความบริสุทธิ์ 99.365 เปอร์เซ็นต์ โครงสร้างจุลภาคเมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผงเงินมีรูปร่างเป็นทรงหลายหน้าจนถึงรูปร่างไม่แน่นอน การศึกษาอุณหภูมิการเผาผนึกในอัตราส่วนการผสม 3 แบบที่แตกต่างกัน โดยเตรียมจากผงเงินในขนาดไมโครเมตร, นาโนเมตร ผงอลูมิเนียม และสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ชิ้นงานซิลเวอร์เคลย์ถูกขึ้นรูปด้วย 2 รูปร่างคือสี่เหลี่ยมผืนผ้าและเส้น ถูกเผาผนึกที่อุณหภูมิ 400°C, 500°C, 600°C, 700°C และ 800°C ภายใต้สภาวะอากาศปกติ ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของซิลเวอร์เคลย์ที่ผ่านการเผาผนึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลจากการตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์โชว์เพียงเฟสเงิน คุณสมบัติทางกายภาพพบว่าก้อนที่ 1 เผาผนึกที่อุณหภูมิ 800°C มีค่า 6.833 g/cm^3 และค่าความแข็งมีค่า 25 g/mm^2

Thesis Title	Study of Sintering Temperature to Improve the Silver Clay Fabrication in Jewelry Industry
Author	Ms. Ladapak Chumprasert
Degree	Master of Science (Materials Science)
Thesis Advisory Committee	Dr. Sukum Eitssayeam — Advisor Assoc. Prof. Dr. Jerapong Tontrakoon — Co-advisor

ABSTRACT

242951

Preparation of high purity and fine silver powder is an important processing for making silver clay. Silver powder was prepared by chemical method using silver nitrate and glycerol as reducing agent and milling machine was used to disperse the agglomerated silver powder from this method. The average particle size were in the range of 0.34 to 2.58 micron by particle size analyzer CILAS 1064. XRD patterns was shown the presence of silver phase in this powder and the purity was 99.365% as analysed by ICP. The microstructure of silver powder was shown a polyhedral to irregular shape as analysed by scanning electron microscope. Study of sintering temperature of silver clay was carried out. Three silver clay samples were prepared by mixing of micrometer (μm), nanometer (nm) sizes of silver powders and aluminium powder with CMC solution. The green bodies of the samples were formed into the rectangular and wire shapes. All samples were sintered at 400°C, 500°C, 600°C, 700°C and 800°C under normal atmosphere. Microstructure of the sintered clay samples was studied using a scanning electron microscope. Phase evolution of the samples was investigated employing a x-ray diffractometer as shown only silver phase. The physical property of density was observed that a condition 1 sintered at 800°C had 6.833 g/cm^3, hardness was shown 25 g/mm^2.

สารบาญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบาญตาราง	ฐ
สารบาญภาพ	ฑ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ท
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการศึกษาเชิงทฤษฎี หรือเชิงประยุกต์	3
1.5 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมปริทัศน์	
2.1 ซิลเวอร์เคลย์	6
2.2 กระบวนการขึ้นรูปซิลเวอร์เคลย์	6
2.3 ตัวประสาน	7
2.3.1 คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	7
2.3.2 สมบัติทางกายภาพของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	8
2.3.3 ประโยชน์ของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	8
2.4 ผงโลหะเงิน	8
2.5 กรรมวิธีการผลิตผงโลหะ	9
2.5.1 เทคนิคการผลิตเชิงกล	9
2.5.1.1 การตกแต่งด้วยเครื่องจักร	9
2.5.1.2 การบด	10

2.5.1.3 เทคนิคการกระแทกแบบอื่นๆ 12
2.5.1.4 เมคานิคัลอัลลอยอิง 12
2.5.2 เทคนิคการผลิตโดยการแยกสารละลายด้วยไฟฟ้า 17
2.5.3 เทคนิคการผลิตทางเคมี 19
2.5.3.1 การสลายตัวของของแข็งโดยใช้ก๊าซ 19
2.5.3.2 การสลายตัวด้วยความร้อน 20
2.5.3.3 การตกผลึกจากของเหลว 21
2.5.3.4 การตกผลึกจากก๊าซ 23
2.5.3.5 การสังเคราะห์จากปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง 23
2.5.4 เทคนิคการอะตอมไมเซชัน 24
2.5.4.1 การอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ 24
2.5.4.2 การอะตอมไมเซชันด้วยน้ำ 28
2.5.4.3 การอะตอมไมเซชันด้วยแรงหนีศูนย์กลาง 31
2.6 การเผาผนึก 33
2.6.1 ทฤษฎีการเผาผนึก 33
2.6.2 ขั้นตอนการเผาผนึก 35
2.6.3 โครงสร้างรูพรุนในการเผาผนึก 37
2.6.4 ผลกระทบของการอัดต่อการเผาผนึก 39
2.6.5 การเผาผนึกผงโลหะผสมที่มาจากอนุภาคหลายขนาดหรือหลายชนิด 40
2.6.6 บรรยากาศการเผาผนึก 40
2.6.7 เตาเผาผนึก 41
2.6.7.1 ทฤษฎีและหลักการ 41
2.6.7.2 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง 44
2.6.7.3 การเตรียมตัวอย่าง 45
2.6.7.4 ข้อควรระวัง 46
2.7 เครื่องศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน 46
2.7.1 ตัวอย่างงานที่ทดสอบ 46
2.7.2 ความสามารถในการทดสอบ 47
2.7.3 ข้อจำกัดของเครื่อง 47

2.8 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค 47
2.8.1 ทฤษฎีพื้นฐาน 48
2.8.2 หลักการเบื้องต้น 50
2.8.2.1 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง 50
2.8.2.2 การเตรียมตัวอย่าง 51
2.9 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน 52
2.9.1 หลักการทำงานของเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน 52
2.9.2 การวิเคราะห์ปริมาณ 54
2.9.3 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กเรย์ดิฟแฟรกชัน 54
2.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 55
2.10.1 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง 55
2.10.1.1 แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน 56
2.10.1.2 อิเล็กตรอนโทรแมกเนติกเลนส์ 56
2.10.1.3 ปั๊มสุญญากาศและระบบควบคุมความดัน 57
2.10.1.4 ช่องใส่ตัวอย่าง 57
2.10.1.5 ตัวตรวจวัดสัญญาณอิเล็กตรอน 58
2.10.2 การเตรียมตัวอย่าง 58
2.10.2.1 การติดตัวอย่างบนแท่นวางตัวอย่าง 58
2.10.2.2 การเคลือบผิวชิ้นงาน 59
2.11 การวัดความหนาแน่นแบบมวลรวม 61
2.12 การทดสอบความแข็ง 61
2.12.1 วัดความต้านทานต่อการขีดข่วน 62
2.12.2 วัดความต้านทานต่อการกดให้เกิดรอยกดถาวร 63
2.12.3 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ 64

บทที่ 3 วิธีการทดลอง
3.1 สารเคมี 66
3.2 เครื่องมือ/ อุปกรณ์ 66
3.3 การทดลอง 68
3.3.1 แผนภาพการเตรียมผงเงิน 68

3.3.2 ขั้นตอนการเตรียมผงเงิน 69
3.3.3 ขั้นตอนการบดผงเงิน 69
3.3.4 แผนภาพขั้นตอนการผสมซิลเวอร์เคลย์ 73
3.3.5 ขั้นตอนการผสมซิลเวอร์เคลย์ 74
3.3.6 ขั้นตอนการขึ้นรูปซิลเวอร์เคลย์ 75
3.3.7 ขั้นตอนการเผาผนึก 75
3.4 การตรวจสอบผงเงินที่ผลิตขึ้นจากกรรมวิธีทางเคมี 76
3.4.1 การตรวจสอบขนาดอนุภาคของผงเงินด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค 76
3.4.2 การตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ 76
3.4.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 77
3.4.4 การศึกษาความบริสุทธิ์ของผงเงินด้วย ICP 78
3.5 การตรวจสอบอุณหภูมิการสลายตัวของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน 79
3.6 การตรวจสอบผงเงินนาโนและผงอลูมิเนียม 80
3.6.1 การตรวจสอบขนาดอนุภาคของผงเงินด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค Zetasizer (Malvern) 80
3.6.2 การตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ 80
3.6.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 80
3.7 การตรวจสอบชิ้นงานซิลเวอร์เคลย์ 81
3.7.1 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ 81
3.7.1.1 ความหนาแน่นแบบมวลรวม 81
3.7.1.2 การหดตัวหลังเผา 82
3.7.1.2.1 เปอร์เซ็นต์หดตัวเชิงปริมาตร 82
3.7.1.2.2 เปอร์เซ็นต์หดตัวเชิงเส้น 82
3.7.1.3 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนัก 83
3.7.2 ความแข็ง 83
3.8 การทดลองขึ้นรูปซิลเวอร์เคลย์ 83

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ผลการศึกษาการเตรียมผงเงินจากกรรมวิธีทางเคมีโดยใช้กลีเซอรอลเป็นตัวรีดิวซ์ 84

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพ 84

4.1.2 ผงเงินที่ได้จากเครื่องบดผงเงิน 85

4.1.3 ผลการตรวจสอบขนาดอนุภาคด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค CILAS 1064 86

4.1.4 ผลการตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ 90

4.1.5 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 91

4.1.6 ผลการศึกษาความบริสุทธิ์ของผงเงินที่ผลิตขึ้นด้วยเครื่อง ICP 92

4.2 ผลการตรวจสอบผงคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 92

4.2.1 ผลการตรวจสอบอุณหภูมิการสลายตัวด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน 92

4.3 การตรวจสอบผงเงินนาโน 95

4.3.1 ผงเงินชนิดที่ 1 95

4.3.1.1 ผลการตรวจสอบขนาดอนุภาคของผงเงินด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค Zetasizer (Malvern) 95

4.3.1.2 ผลการตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ 97

4.3.1.3 ผลการศึกษาความบริสุทธิ์ของผงเงินนาโนเมตรด้วยเครื่อง ICP 97

4.3.1.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 98

4.3.2 ผงเงินชนิดที่ 2 99

4.3.2.1 ผลการตรวจสอบขนาดอนุภาคของผงเงินด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค Zetasizer (Malvern) 99

4.3.2.2 ผลการตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ 101

4.3.2.3 ผลการศึกษาความบริสุทธิ์ของผงเงินนาโนเมตรด้วยเครื่อง ICP 101

4.3.2.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 102

4.4 ผลการตรวจสอบผงอลูมิเนียม 103
4.4.1 ผลการตรวจสอบขนาดอนุภาคของผงอลูมิเนียม
ด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค Zetasizer (Malvern) 103
4.4.2 ผลการตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ 105
4.4.3 ผลการศึกษาความบริสุทธิ์ของผงอลูมิเนียมด้วยเครื่อง ICP 105
4.4.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค
ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 106
4.5 ผลการผสมซิลเวอร์เคลย์ 107
4.5.1 ก้อนที่ 1 107
4.5.2 ก้อนที่ 2 108
4.5.3 ก้อนที่ 3 109
4.6 ผลการขึ้นรูปซิลเวอร์เคลย์ 110
4.6.1 ก้อนที่ 1 110
4.6.1.1 สี่เหลี่ยมผืนผ้า 110
4.6.1.2 เส้น 110
4.6.2 ก้อนที่ 2 112
4.6.2.1 สี่เหลี่ยมผืนผ้า 112
4.6.2.2 เส้น 112
4.6.3 ก้อนที่ 3 114
4.6.3.1 สี่เหลี่ยมผืนผ้า 114
4.6.3.2 เส้น 114
4.7 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานซิลเวอร์เคลย์ภายหลังการเผาผนึก
โดยทำซ้ำ 2 ครั้ง 116
4.7.1 ลักษณะทางกายภาพ 116
4.7.1.1 ผลการเผาผนึกครั้งที่ 1 117
4.7.1.2 ผลการเผาผนึกครั้งที่ 2 118
4.7.2 ผลการตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ 120
4.7.3 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน
แบบส่องกราด 123
4.7.4 ความหนาแน่นแบบมวลรวม 127

4.7.5 ค่าการหดตัวหลังเผา 128
4.7.5.1 เปอร์เซ็นต์หดตัวเชิงปริมาตร 128
4.7.5.2 เปอร์เซ็นต์หดตัวเชิงเส้น 129
4.7.6 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนัก 132
4.8 ความแข็ง 133
4.9 ผลการขึ้นรูปเครื่องประดับซิลเวอร์เคลย์ 134

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ
5.1 สรุปผลการทดลอง 135
5.2 ข้อเสนอแนะ 139
เอกสารอ้างอิง 140
ภาคผนวก 143
ภาคผนวก ก 144
ภาคผนวก ข 148
ภาคผนวก ค 152

ประวัติผู้เขียน 160

สารบาญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	สภาวะของอิเล็กโทรไลต์สำหรับการผลิตผงทองแดง	18
2.2	การเปรียบเทียบกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซและน้ำ	30
2.3	แสดงสมบัติทางฟิสิกส์ของผงโลหะเงินที่ผ่านกรรมวิธีการผลิตแบบต่างๆ	32
3.1	แสดงอุณหภูมิ เวลา และความเร็วรอบของการผลิตผงเงินโดยกรรมวิธีทางเคมี	69
3.2	แสดงอัตร่าส่วนที่ใช้ในการผสมซิลเวอร์เคลย์ 3 ชนิดและรหัสชิ้นงาน	74
4.1	การสลายตัวของสารต่างๆ ในผงคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิ	92
4.2	ขนาดอนุภาคเมื่อตรวจสอบด้วยเครื่อง Zetasizer Nano (ZS)	95
4.3	ขนาดอนุภาคเมื่อตรวจสอบด้วยเครื่อง Zetasizer Nano (ZS)	99
4.4	ขนาดอนุภาคเมื่อตรวจสอบด้วยเครื่อง Zetasizer Nano (ZS)	103
4.5	แสดงรหัสชิ้นงานของแต่ละอุณหภูมิการเผาผนึก	116
4.6	แสดงรหัสชิ้นงานของการเผาครั้งที่ 1 ในแต่ละอุณหภูมิการเผาผนึก	117
4.7	แสดงรหัสชิ้นงานของการเผาครั้งที่ 2 ในแต่ละอุณหภูมิการเผาผนึก	118

สารบาญภาพ

รูป		หน้า
2.1	แสดงกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานเครื่องประดับด้วยซิลเวอร์เคลย์	7
2.2	การบดในภาชนะกระบอก เมื่อหมุนภาชนะแรงกระแทกของลูกบอลที่ตกลงมาจะบดวัสดุให้ละเอียด	10
2.3	รูปถ่าย SEM ผงไนโอเบียมบดจากการไฮไดรด์บดดีไฮไดรด์ในสุญญากาศได้อนุภาครูปเชิงมุม	11
2.4	แสดงเครื่องบดแอตทริเตอร์	14
2.5	แสดงการทำเมคานิคัลอัลลอยอิงโดยใช้แกนหมุนกวนภายในภาชนะที่บรรจุลูกบอล	15
2.6	(ก) การบดพลังงานสูงด้วยลูกบอลแบบแพลเนตและ (ข) ลักษณะการเคลื่อนที่ของลูกบอล	16
2.7	การบดพลังงานสูงด้วยลูกบอลแบบสั่น	16
2.8	การบดพลังงานสูงด้วยลูกบอลแบบสั่น	17
2.9	เซลล์อิเล็กโทรไลต์สำหรับการทำผง	18
2.10	โครงสร้างพรุนของผงโมลิบดีนัมที่ผลิตโดยวิธีออกไซด์รีดักชัน	19
2.11	ผงนิกเกิลที่ผลิตด้วยวิธีการสลายคาร์บอนิล	20
2.12	โครงสร้างของผง TiAl	24
2.13	การอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซแนวนอนเหมาะสำหรับผลิตผงโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ	25
2.14	เครื่องอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซแนวตั้ง	26
2.15	การฟอร์มตัวของผงโลหะด้วยอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ	27
2.16	แสดงรูปร่างของหยดโลหะเหลวที่เปลี่ยนแปลงขณะอะตอมไมเซชัน	27
2.17	ภาพ SEM ของผงที่อะตอมไมซ์ด้วยก๊าซเฉื่อย	28
2.18	ตัวอย่างการแจกแจงขนาดอนุภาคสะสมของผงอลูมิเนียมภายใต้สภาวะความดันและอุณหภูมิที่ต่างกัน	28
2.19	กระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยน้ำ	29
2.20	กลไกการเกิดอนุภาคในการอะตอมไมเซชันด้วยน้ำ	29
2.21	ภาพ SEM ของผงเหล็กกล้าไร้สนิมจากการอะตอมไมเซชันด้วยน้ำ	30

2.22	ผงเหล็กอะตอมไมซ์ด้วยน้ำภายหลังจากการรีดักชันด้วยไฮโดรเจนและผ่านการบด	31
2.23	การอะตอมไมเซชันด้วยแรงหนีศูนย์กลางโดยกระบวนการหมุนขั้ว	32
2.24	แสดงภาพถ่ายการฟอร์มตัวของคอคอดเนื่องจากการเผาผนึก	33
2.25	แสดงการเผาผนึกอนุภาคทรงกลมขนาดคอคอด X ขนาดอนุภาค D และเส้นล้อมรอบคอคอดรัศมี p	34
2.26	แสดงผลของเวลาในการเผาผนึกที่มีต่อขนาดคอคอด พื้นที่ผิว การหดตัว และการแน่นตัว	34
2.27	แสดงการแน่นตัวและการโตของเกรนขณะเผาผนึก และรูพรุนทรงกลมตามบริเวณขอบเกรน	35
2.28	แสดงแบบจำลองกลไกการเผาผนึกโดยที่ (ก) คือการเคลื่อนที่ตามพื้นที่ผิวและ (ข) การเคลื่อนที่แบบมวลรวม	36
2.29	แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของรูพรุนตามปริมาณการเผาผนึก	37
2.30	แสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างรูพรุนขณะเผาผนึก	37
2.31	แสดงลำดับการแยกตัวออกจากรูพรุนในขั้นตอนสุดท้ายของการเผาผนึก (ก) รูพรุนบนขอบเกรน (ข) และ ค) การโตของเกรนที่ลากรูพรุนไปด้วย (ง) รูพรุนโดดเดี่ยวเพราะขอบเกรนแยกตัวออก	38
2.32	แสดงลักษณะที่เป็นไปได้ของรูพรุนและขอบเกรนในการเผาผนึกโดยที่ (ก) ลักษณะรูพรุนที่อยู่ตามขอบเกรนทำให้มีการแน่นตัว (ข) รูพรุนที่แยกตัวออกจากขอบเกรนไม่ทำให้เกิดความหนาแน่น	38
2.33	กราฟรูปบนและกราฟรูปกลางแสดงอัตราส่วนขนาดคอคอดในรูปฟังก์ชันของแรงอัดและเวลาในการเผาผนึก กราฟรูปล่างแสดงการหดตัวลดลงเนื่องจากการอัด	39
2.34	ลักษณะของตารางการเผาวัสดุเซรามิก	41
2.35	เนื้อผลิตภัณฑ์ปอร์ซเลนที่ยังไม่เผา (บน) และที่ผ่านการเผาจนเกิดเนื้อแก้วแล้ว (ล่าง)	43
2.36	ผลจากขนาดของชิ้นงานที่มีต่อการกำหนดตารางการเผา	44
2.37	โครงสร้างของเตาไฟฟ้า	44
2.38	เครื่องศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน	47
2.39	ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค	50
2.40	หลักการทำงานของเครื่องเอกเรย์ดิฟเฟรกชัน	52
2.41	ส่วนประกอบของหลอดผลิตรังสีเอ็กซ์	52
2.42	ดิฟแฟรกโตแกรมของแผ่นซิลิกอน	53

2.43	ส่วนประกอบและหลักการทำงานเบื้องต้นของ SEM	56
2.44	ระบบความดันสุญญากาศของ SEM	57
2.45	ลักษณะอุปกรณ์ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง	59
2.46	แสดงความแข็งของแร่ชนิดต่าง ๆ	62
2.47	แสดงหัวกดทดสอบของวิธีการทดสอบแต่ละประเภท	63
2.48	แสดงลักษณะของหัวกดเพชรของการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ a) ลักษณะของหัวกดที่ทำมุม 136° ขณะกดลงไปบนชิ้นงาน b) ลักษณะการวัดเส้นทะแยงมุม	64
3.1	แสดงแผนภาพแสดงการผลิตเงินจากกระบวนการทางเคมี	68
3.2	(ก) แสดงภาพต้นแบบเครื่องบดที่ใช้ในอุตสาหกรรม (ข) แสดงใบมีดบดและใบมีดหมุน (ค) แสดงกรวยใส่ของก่อนที่จะบด	70
3.3	แสดงภาพรวมของเครื่องบดผงเงิน	71
3.4	(ก) แสดงภาพเครื่องบดผงเงินในส่วนของมอเตอร์ (Isometric view) (ข) แสดงภาพเครื่องบดผงเงินในส่วนของมอเตอร์ (Top view) (ค) แสดงภาพเครื่องบดผงเงินในส่วนของมอเตอร์ (Front view) (ง) แสดงภาพเครื่องบดผงเงินในส่วนของมอเตอร์ (Right view)	71
3.5	(ก) แสดงภาพสเกลการบดผงเงิน จากละเอียดไปหยาบเครื่องบดผงเงิน (Isometric view) (ข) แสดงส่วนที่บรรจุใบมีดบดผงเงินของเครื่องบดผงเงิน (Top view) (ค) แสดงส่วนที่บรรจุใบมีดบดผงเงินของเครื่องบดผงเงิน (Front view)	72
3.6	(ก) แสดงใบมีดบดผงเงิน (Isometric View) (ข) แสดงใบมีดหมุน (Isometric View)	72
3.7	(ก) แสดงภาพเครื่องบดผงเงินในส่วนของกรวยใส่สาร (Isometric view) (ข) แสดงภาพเครื่องบดผงเงินในส่วนของกรวยใส่สาร (Top view) (ค) แสดงภาพเครื่องบดผงเงินในส่วนของกรวยใส่สาร (Front view)	72
3.8	(ก) แสดงภาพเครื่องบดผงเงินในส่วนของฝาปิดกรวย (Isometric view) (ข) แสดงภาพเครื่องบดผงเงินในส่วนของฝาปิดกรวย (Top view) (ค) แสดงภาพเครื่องบดผงเงินในส่วนของฝาปิดกรวย (Front view)	72
3.9	(ก) แสดงภาพเครื่องบดผงเงินในส่วนของกล่องใส่สาร (Isometric view) (ข) แสดงภาพเครื่องบดผงเงินในส่วนของกล่องใส่สาร (Top view) (ค) แสดงภาพเครื่องบดผงเงินในส่วนของกล่องใส่สาร (Front view)	73
3.10	แสดงแผนภาพการผสมซิลเวอร์เคลย์	73

3.11	แผ่นภาพแสดงอุณหภูมิการเผาผนึกของชิ้นงานที่อุณหภูมิต่างๆ	75
3.12	แสดงเครื่องวัดขนาดอนุภาค CILAS 1064	76
3.13	เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์	77
3.14	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	78
3.15	เครื่อง Inductively Couple Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP)	79
3.16	เทคนิคการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน (Thermogravimetric Analysis)	79
3.17	เครื่องวัดขนาดอนุภาค Zetasizer (Malvern)	80
4.1	แสดงผงเงินที่จับตัวเป็นกลุ่มก้อน (agglomerated silver)	84
4.2	แสดงภาพผงเงิน โดยอนุภาคเล็กๆ เกาะตัวเป็นกลุ่มก้อน (agglomerated silver)	85
4.3	แสดงภาพการทำงานของใบมีดหมุน (สีเทา) ใบมีดบด (สีฟ้าอ่อน) และใบมีดบด (สีน้ำเงิน)	85
4.4	แสดงสเกลการบดจากหยาบ (หมายเลข 8) ไปจนถึงละเอียด (หมายเลข 1)	86
4.5	แสดงภาพผงเงินที่บดได้จากเครื่องบดผงเงิน	86
4.6	แสดงกราฟที่ได้จากการตรวจสอบ ด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค CILAS 1064 ทดลองครั้งที่ 1	87
4.7	แสดงกราฟที่ได้จากการตรวจสอบ ด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค CILAS 1064 ทดลองครั้งที่ 2	88
4.8	แสดงกราฟที่ได้จากการตรวจสอบ ด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค CILAS 1064 ทดลองครั้งที่ 3	89
4.9	แสดงเฟสองค์ประกอบของผงเงินที่ผลิตขึ้นจากกรรมวิธีทางเคมี	90
4.10	แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของผงเงินที่ผ่านการบดแล้ว	91
4.11	แสดงผลการทดสอบครั้งที่ 1 ด้วย TGA ของผงคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	93
4.12	แสดงผลการทดสอบครั้งที่ 2 ด้วย TGA ของผงคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	94
4.13	แสดงผลการทดสอบครั้งที่ 1 ของผงเงินนาโนชนิดที่ 1 ด้วยเครื่อง Zetasizer Nano (ZS)	95
4.14	แสดงผลการทดสอบครั้งที่ 2 ของผงเงินนาโนชนิดที่ 1 ด้วยเครื่อง Zetasizer Nano (ZS)	96
4.15	แสดงผลการทดสอบครั้งที่ 3 ของผงเงินนาโนชนิดที่ 1 ด้วยเครื่อง Zetasizer Nano (ZS)	96
4.16	แสดงผลการทดสอบของผงเงินนาโนชนิดที่ 1 ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	97

4.17 แสดงผลทดสอบของผงเงินนาโนชนิดที่ 1 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
(ก) ผงเงินนาโนชนิดที่ 1 กำลังขยาย 25,000 เท่า
(ข) ผงเงินนาโนชนิดที่ 1 กำลังขยาย 40,000 เท่า 98

4.18 แสดงผลการทดสอบครั้งที่ 1 ของผงเงินนาโนชนิดที่ 2 ด้วยเครื่อง Zetasizer Nano (ZS) 99

4.19 แสดงผลการทดสอบครั้งที่ 2 ของผงเงินนาโนชนิดที่ 2 ด้วยเครื่อง Zetasizer Nano (ZS) 100

4.20 แสดงผลการทดสอบครั้งที่ 3 ของผงเงินนาโนชนิดที่ 2
ด้วยเครื่อง Zetasizer Nano (ZS) 100

4.21 แสดงผลการทดสอบของผงเงินนาโนชนิดที่ 2 ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ 101

4.22 แสดงผลุทดสอบของผงเงินนาโนชนิดที่ 2 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
(ค) ผงเงินนาโนชนิดที่ 2 กำลังขยาย 25,000 เท่า
(ง) ผงเงินนาโนชนิดที่ 2 กำลังขยาย 40,000 เท่า 102

4.23 แสดงผลการทดสอบครั้งที่ 1 ของผงอลูมิเนียม ด้วยเครื่อง Zetasizer Nano (ZS) 103

4.24 แสดงผลการทดสอบครั้งที่ 2 ของผงอลูมิเนียม ด้วยเครื่อง Zetasizer Nano (ZS) 104

4.25 แสดงผลการทดสอบครั้งที่ 3 ของผงอลูมิเนียม ด้วยเครื่อง Zetasizer Nano (ZS) 104

4.26 แสดงผลการทดสอบของผงเงินนาโนชนิดที่ 2 ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ 105

4.27 แสดงผลทดสอบของผงอลูมิเนียมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
ของผงอลูมิเนียม กำลังขยาย 1,500 เท่า 106

4.28 ซิลเวอร์เคลย์ที่ผสมอัตราส่วนก้อนที่ 1 107

4.29 ซิลเวอร์เคลย์ที่ผสมอัตราส่วนก้อนที่ 2 108

4.30 ซิลเวอร์เคลย์ที่ผสมอัตราส่วนก้อนที่ 3 109

4.31 แสดงการขึ้นรูปซิลเวอร์เคลย์แบบแผ่นของส่วนผสมก้อนที่ 1 110

4.32 แสดงการขึ้นรูปซิลเวอร์เคลย์แบบแผ่นของส่วนผสมก้อนที่ 1 111

4.33 แสดงการขึ้นรูปซิลเวอร์เคลย์แบบเส้นของส่วนผสมก้อนที่ 1 111

4.34 แสดงการขึ้นรูปซิลเวอร์เคลย์แบบเส้นของส่วนผสมก้อนที่ 1 111

4.35 แสดงการขึ้นรูปซิลเวอร์เคลย์แบบแผ่นของส่วนผสมก้อนที่ 2 112

4.36 แสดงการขึ้นรูปซิลเวอร์เคลย์แบบแผ่นของส่วนผสมก้อนที่ 2 113

4.37 แสดงการขึ้นรูปซิลเวอร์เคลย์แบบเส้นของส่วนผสมก้อนที่ 2 113

4.38 แสดงการขึ้นรูปซิลเวอร์เคลย์แบบเส้นของส่วนผสมก้อนที่ 2 113

4.39 แสดงการขึ้นรูปซิลเวอร์เคลย์แบบแผ่นของส่วนผสมก้อนที่ 3 114

4.40 แสดงการขึ้นรูปซิลเวอร์เคลย์แบบแผ่นของส่วนผสมก้อนที่ 3 115

4.41	แสดงการขึ้นรูปซิลเวอร์เคลย์แบบเส้นของส่วนผสมก้อนที่ 3	115
4.42	แสดงการขึ้นรูปซิลเวอร์เคลย์แบบเส้นของส่วนผสมก้อนที่ 3	115
4.43	แสดงการตรวจสอบชิ้นงานซิลเวอร์เคลย์ด้วยเทคนิค XRD (ก้อนที่ 1)	120
4.44	แสดงการตรวจสอบชิ้นงานซิลเวอร์เคลย์ด้วยเทคนิค XRD (ก้อนที่ 2)	121
4.45	แสดงการตรวจสอบชิ้นงานซิลเวอร์เคลย์ด้วยเทคนิค XRD (ก้อนที่ 3)	122
4.46	แสดงการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก้อนที่ 1)	124
4.47	แสดงการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก้อนที่ 2)	125
4.48	แสดงการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก้อนที่ 3)	126
4.49	แสดงค่าความหนาแน่นแบบมวลรวม	127
4.50	แสดงเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตร	128
4.51	แสดงเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้นในด้านความกว้าง	129
4.52	แสดงเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้นในด้านความยาว	130
4.53	แสดงเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้นในด้านความหนา	131
4.54	แสดงเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนัก	132
4.55	แสดงผลความแข็งด้วย Vicker's hardness	133

อักษรย่อและสัญลักษณ์

CMC	คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส
MA	เมคานิคัลอัลลอยอิง
ODS	โลหะผสมที่เพิ่มความแข็งแรงโดยการกระจายออกไซด์
Al	อลูมิเนียม
Si	ซิลิกอน
PCA	การเติมสารควบคุมกระบวนการ
$Fe(CO_5)$	เหล็กคาร์บอนิล
$Ni(CO_4)$	นิกเกิลคาร์บอนิล
K_2SO_3	โปแทสเซียมซัลไฟต์
Ag	เงิน
KNO_3	โปแทสเซียมไนเตรท
SO_2	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์
$C_3H_8O_3$	กลีเซอรอล
$C_3H_5N_3O_9$	ไนโตรกลีเซอรีน
H_2O	น้ำ
MPa	เมกะปาสคาล
TGA	เครื่องศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน
TG curve	กราฟการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่ออุณหภูมิ
SDTA	กราฟการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ
XRD	เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
JCPDF	Joint Committee on Powder Diffraction Standard
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
$AgNO_3$	ซิลเวอร์ไนเตรท
ICP	Inductively Couple Plasma Optical Emission Spectrometry
ZS	เครื่องวัดขนาดอนุภาค Zetasizer