

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

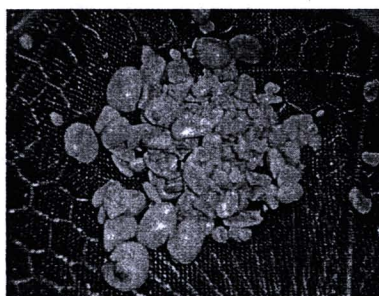
ในบทนี้เป็นการนำเสนอผลการทดลอง และอภิปรายผลการทดลองของผงเงิน โดยผงเงินที่ผลิตขึ้นจากกรรมวิธีทางเคมีโดยใช้กลีเซอรอลเป็นตัวรีดิวซ์ เพื่อศึกษาความบริสุทธิ์ของผงเงิน ขนาดของผงเงิน และโครงสร้างทางจุลภาค จากนั้นจึงเตรียมซิลเวอร์เคลย์ โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปซิลเวอร์เคลย์ อุณหภูมิการเผาผนึก รวมถึงปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนศึกษาถึงสมบัติในด้านต่างๆ ของซิลเวอร์เคลย์ ประกอบด้วย การวิเคราะห์เฟส องค์ประกอบ สมบัติทางกายภาพ โครงสร้างทางจุลภาค และความแข็ง ตลอดจนการอภิปรายผลการทดลอง โดยมีรายละเอียดของผลการทดลองดังนี้

4.1 ผลการศึกษาการเตรียมผงเงินจากกรรมวิธีทางเคมีโดยใช้กลีเซอรอลเป็นตัวรีดิวซ์

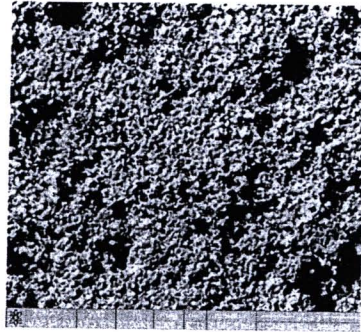
ผงเงินที่ได้จากกรรมวิธีทางเคมีโดยมีกลีเซอรอลเป็นตัวรีดิวซ์ ใช้ซิลเวอร์ไนเตรท 5 กรัม กลีเซอรอล 100 มิลลิลิตร ซึ่งจะได้ผงเงินที่จับตัวเป็นกลุ่มก้อน ซึ่งการให้ความร้อนต้องควบคุม อุณหภูมิการให้ความร้อนอย่างสม่ำเสมอ และต้องคอยควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ เพื่อให้ผงเงินที่ผลิตขึ้นได้จำนวนมาก อัตราการกวนที่ใช้ต้องมีการกวนที่ไม่เร็วจนเกินไป คือไม่เกิน 575 รอบ/นาที ถ้าใช้ความเร็วรอบในการกวนมากเกินไปจะทำให้เกิดผงเงินช้า ซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนในการผลิตด้วย

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพ

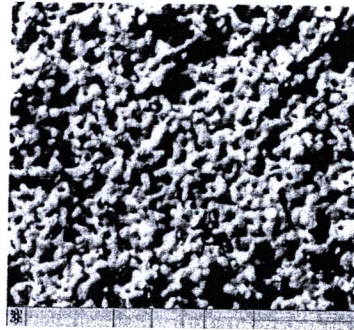
ผงเงินที่ผลิตได้จะมีขนาดอนุภาคเล็กๆ โดยจะจับตัวเป็นกลุ่มก้อน ดังรูป 4.1 เมื่อส่องด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะเห็นอนุภาคเล็กๆ เกาะตัวกัน ดังรูป 4.2(ก)-(ข)



รูป 4.1 แสดงผงเงินที่จับตัวเป็นกลุ่มก้อน (agglomerated silver)



(ก)



(ข)

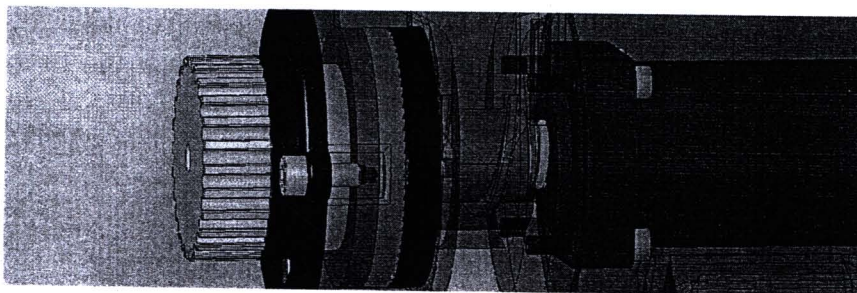
รูป 4.2 แสดงภาพผงเงิน โดยอนุภาคเล็กๆ เกาะตัวเป็นกลุ่มก้อน (agglomerated silver)

จะเห็นได้ว่าผงเงินที่ได้จากกรรมวิธีนี้เกาะตัวเป็นกลุ่มก้อน จึงต้องผ่านกระบวนการบดเพื่อลดขนาดอนุภาคให้เล็กลง และสามารถนำผงเงินที่ได้ไปใช้ประโยชน์ได้ในลำดับต่อไป

4.1.2 ผงเงินที่ได้จากเครื่องบดผงเงิน

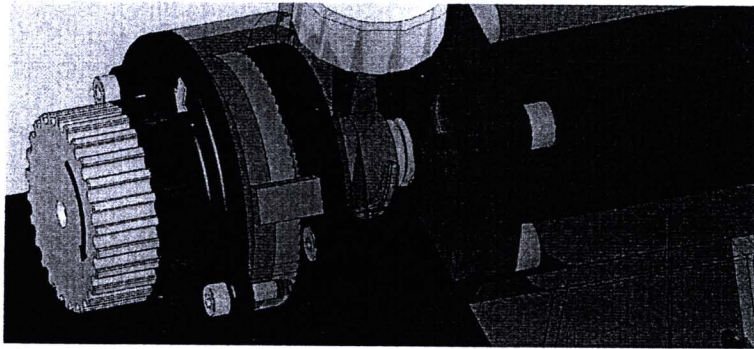
เครื่องบดถูกประดิษฐ์ขึ้นเพื่อประหยัดเวลาในการบด เนื่องจากถ้าใช้ครกอาเกตนอกจากเสียเวลามากแล้ว ทั้งยังเกิดการสูญเสียของผงเงินในระหว่างขั้นตอนการบดมาก โดยเครื่องบดที่ผลิตขึ้นถูกใช้เพื่อแก้ปัญหาในทางอุตสาหกรรม โดยสามารถผลิตได้จำนวนมากโดยใช้เวลาในการบดน้อยลง โดยหลักการทำงานของเครื่องบดมีหลักการทำงานดังนี้ คือ

1. ไบมีคหมุน (สีเทาเข้ม) ทำให้ไบมีคบด (สีฟ้าอ่อน) ทำงาน เมื่อไบมีคบดทำงานไบมีคบด (สีน้ำเงิน) อีกด้านหนึ่งจะยึดติดกับมอเตอร์ ซึ่งมอเตอร์จะทำหน้าที่หมุน โดยแสดงในรูป 4.3



รูป 4.3 แสดงภาพการทำงานของไบมีคหมุน (สีเทา) ไบมีคบด (สีฟ้าอ่อน) และไบมีคบด (สีน้ำเงิน)

2. เมื่อใส่ก้อนเงินลงไป ไบมีคบดทั้ง 2 ชิ้น จะทำหน้าที่บดก้อนเงินให้อนุภาคของเงินมีขนาดเล็กลง
3. เมื่อต้องการบดให้มีขนาดอนุภาคที่เล็กลง สามารถทำได้โดยการหมุนสเกล จากหมายเลข 8 คือการบดที่มีความหยาบสุด ไปจนถึง หมายเลข 1 คือการบดที่มีความละเอียดสุด แสดงในรูป 4.4



รูป 4.4 แสดงสเกลการบดจากหยาบ (หมายเลข 8) ไปจนถึงละเอียด (หมายเลข 1)

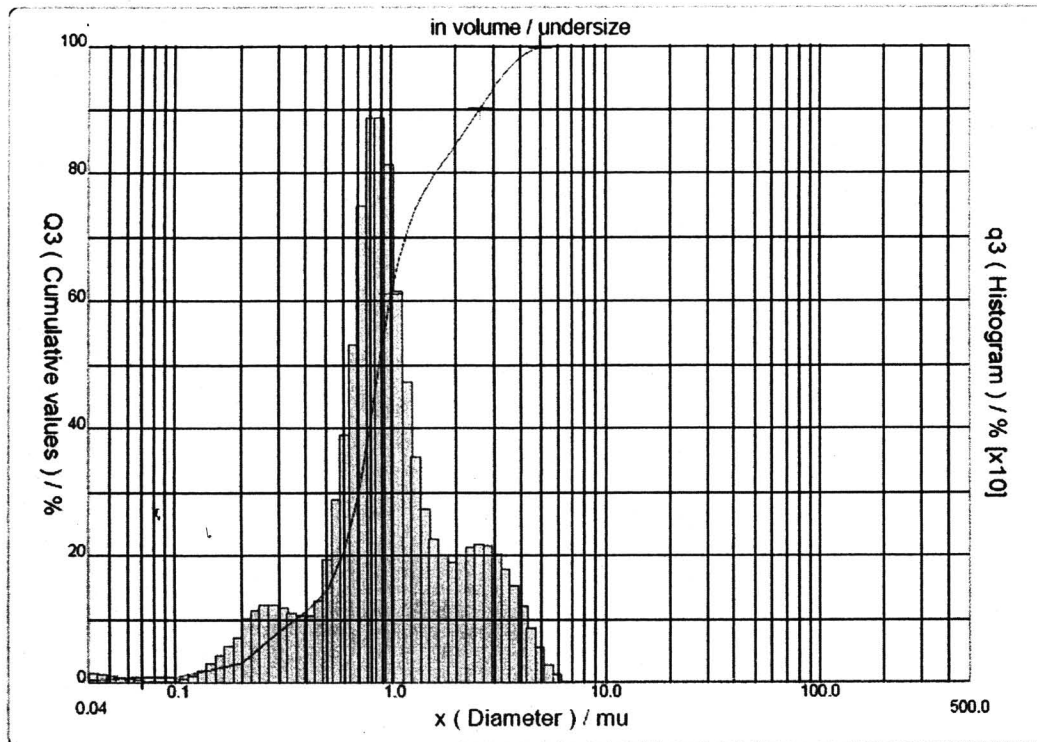
โดยผงเงินที่ได้จากการบดมีขนาดเล็กกว่า 45 ไมครอน วัดขนาดด้วยตะแกรงร่อน ถ้าผงเงินที่ผ่านรูของตะแกรงร่อน แสดงว่าผงเงินที่ได้มีขนาดเล็กกว่า 45 ไมครอน ส่วนผงเงินที่ไม่ผ่านรูของตะแกรงร่อนจะมีขนาดใหญ่กว่า 45 ไมครอน และสามารถนำมาบดซ้ำได้ โดยภาพผงเงินที่บดได้จากเครื่องบดแสดงในรูป 4.5 โดยผงเงินที่ได้มีลักษณะเป็นสีเทา และมีขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับ 45 ไมครอน แต่ยังไม่ทราบขนาดที่แน่นอน จึงต้องศึกษาด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค CILAS 1064 เพื่อให้ทราบขนาดที่แน่นอนต่อไป



รูป 4.5 แสดงภาพผงเงินที่บดได้จากเครื่องบดผงเงิน

4.1.3 ผลการตรวจสอบขนาดอนุภาคด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค CILAS 1064

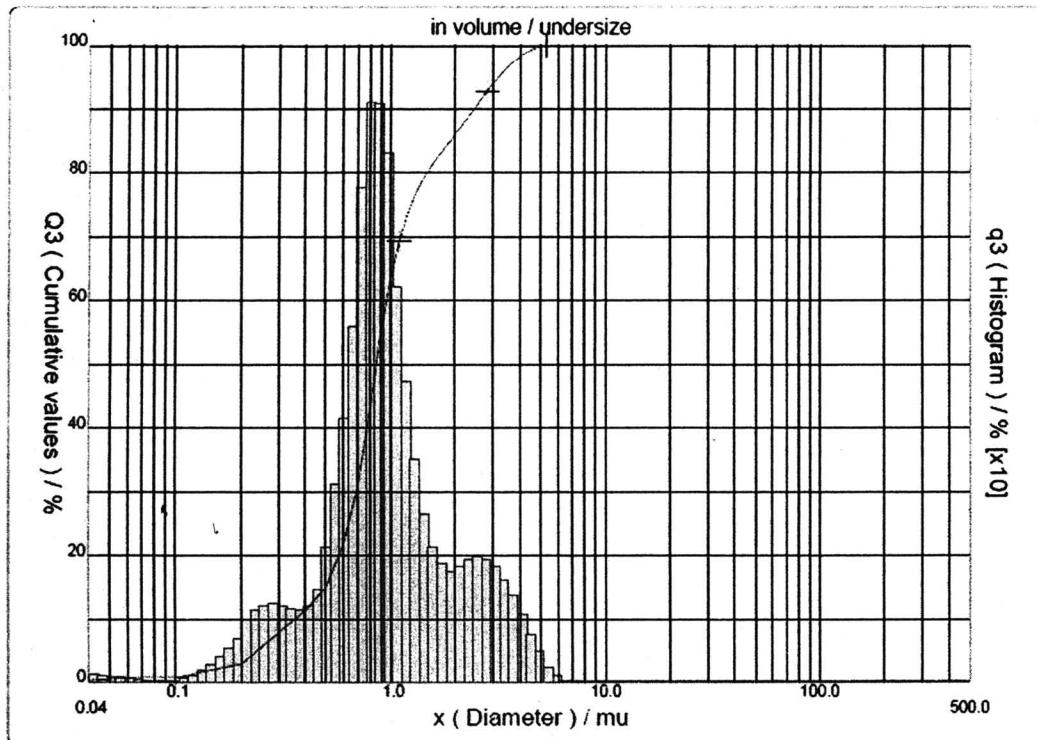
ภายหลังจากกระบวนการบด นำผงเงินที่ผ่านการคัดขนาดไปตรวจสอบขนาดอนุภาคของผงเงิน โดยทำซ้ำ 3 รอบ แล้วหาค่าเฉลี่ย โดยกราฟที่ได้เป็นการแสดงให้เห็นว่าผงเงินมีขนาดอยู่ในระดับไมครอน กราฟแสดงในรูป 4.6-4.8



รูป 4.6 แสดงกราฟที่ได้จากการตรวจสอบด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค CILAS 1064 ทดลองครั้งที่ 1

การทดสอบด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาคจะมีตัววัดขนาดอนุภาคเป็นเลเซอร์ โดยตัวเลเซอร์จะวัดขนาดขณะที่เครื่องกวณพเงินซึ่งใส่ไว้ในน้ำ ทำให้พเงินที่ได้มีการกระจายของอนุภาค และผลที่ได้จากการตรวจสอบขนาดอนุภาคครั้งที่ 1 โดยทดสอบในน้ำ ใช้เวลากวณ 60 วินาที ความเข้มข้น 86 ผลที่ได้ปรากฏว่าขนาดอนุภาคของพเงินมีขนาดตามดังนี้ คือ

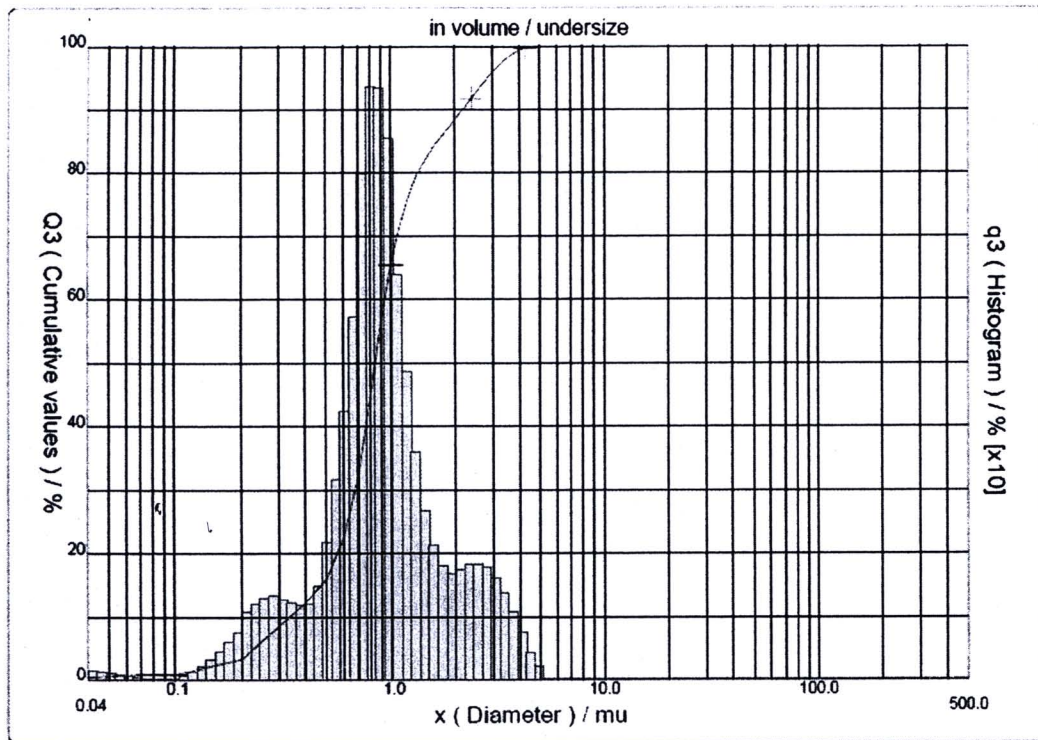
1. ขนาดอนุภาคพเงินจากการตรวจสอบที่มีปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ คือ ขนาด 0.36 ไมครอน
1. ขนาดอนุภาคพเงินจากการตรวจสอบที่มีปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ คือ ขนาด 0.88 ไมครอน
2. ขนาดอนุภาคพเงินจากการตรวจสอบที่มีปริมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ คือ ขนาด 2.58 ไมครอน
3. ค่า mean คือ 1.18 ไมครอน



รูป 4.7 แสดงกราฟที่ได้จากการตรวจสอบด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค CILAS 1064 ทดลองครั้งที่ 2

การทดสอบด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาคจะมีตัววัดขนาดอนุภาคเป็นเลเซอร์ โดยตัวเลเซอร์จะวัดขนาดขณะที่เครื่องกวณพเงินซึ่งใส่ไว้ในน้ำ ทำให้พเงินที่ได้มีการกระจายของอนุภาค และผลที่ได้จากการตรวจสอบขนาดอนุภาคครั้งที่ 2 โดยทดสอบในน้ำ ใช้เวลาทวน 60 วินาที ความเข้มข้น 81 ผลที่ได้ปรากฏว่าขนาดอนุภาคของพเงินมีขนาดตามดังนี้ คือ

1. ขนาดอนุภาคพเงินจากการตรวจสอบที่มีปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ คือ ขนาด 0.36 ไมครอน
4. ขนาดอนุภาคพเงินจากการตรวจสอบที่มีปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ คือ ขนาด 0.86 ไมครอน
5. ขนาดอนุภาคพเงินจากการตรวจสอบที่มีปริมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ คือ ขนาด 2.45 ไมครอน
6. ค่า mean คือ 1.14 ไมครอน



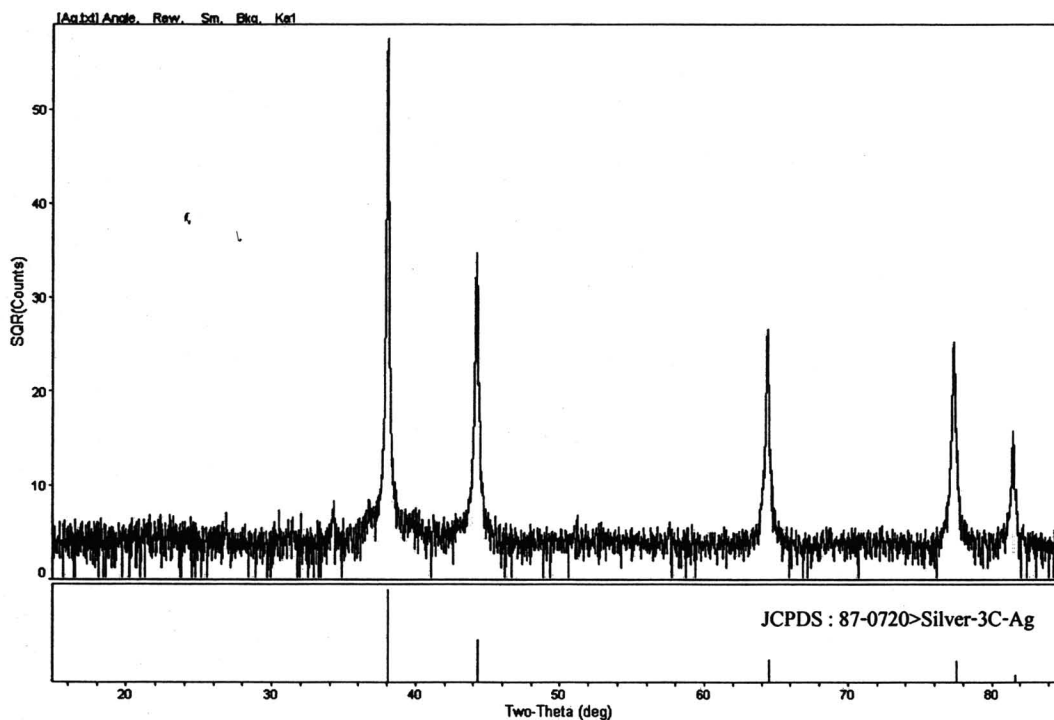
รูป 4.8 แสดงกราฟที่ได้จากการตรวจสอบด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค CILAS 1064 ทดลองครั้งที่ 3

การทดสอบด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาคจะมีตัววัดขนาดอนุภาคเป็นเลเซอร์ โดยตัวเลเซอร์จะวัดขนาดขณะที่เครื่องกวณพเงินซึ่งใส่ไว้ในน้ำ ทำให้พเงินที่ได้มีการกระจายของอนุภาค และผลที่ได้จากการตรวจสอบขนาดอนุภาคครั้งที่ 3 โดยทดสอบในน้ำ ใช้เวลาทวน 60 วินาที ความเข้มข้น 83 ผลที่ได้ปรากฏว่าขนาดอนุภาคของพเงินมีขนาดตามดังนี้ คือ

1. ขนาดอนุภาคพเงินจากการตรวจสอบที่มีปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ คือ ขนาด 0.34 ไมครอน
7. ขนาดอนุภาคพเงินจากการตรวจสอบที่มีปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ คือ ขนาด 0.85 ไมครอน
8. ขนาดอนุภาคพเงินจากการตรวจสอบที่มีปริมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ คือ ขนาด 2.19 ไมครอน
9. ค่า mean คือ 1.06 ไมครอน

4.1.4 ผลการตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (XRD)

ผลการนำผงเงินที่ได้ไปตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (XRD) ผลการตรวจสอบเฟสองค์ประกอบพบว่า ผงเงินที่ผ่านการผลิตโดยกรรมวิธีทางเคมีมีความเป็นผลึกอยู่ กล่าวคือไม่มีความเป็นอสัณฐาน (amorphous) ดังรูป 4.9



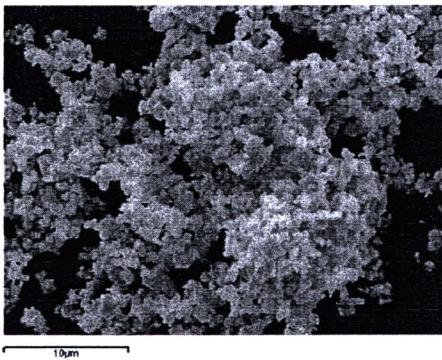
รูป 4.9 แสดงเฟสองค์ประกอบของผงเงินที่ผลิตขึ้นจากกรรมวิธีทางเคมี

เฟสเงินที่ปรากฏออกมาจากการตรวจสอบบ่งบอกให้เห็นว่าองค์ประกอบของผงเงินที่ผลิตขึ้นจากกรรมวิธีทางเคมี คือประกอบไปด้วยโลหะเงิน (Ag) โดยมีการเปรียบเทียบกับมาตรฐาน คือ JCPDF : 87-0720>Silver-3C-Ag เพื่อต้องการทราบว่าผงเงินที่ผลิตขึ้นมีความบริสุทธิ์เท่าไรจึงต้องนำไปตรวจสอบโดยเครื่อง Inductively Couple Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP) ในขั้นตอนต่อไป

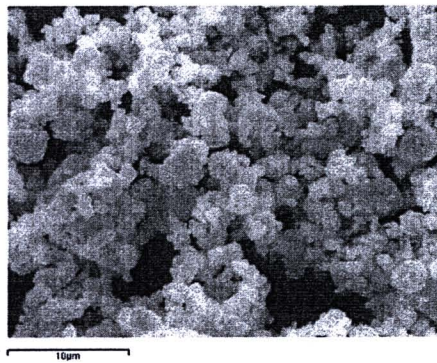
4.1.5 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy)

ผงเงินที่ถูกผลิตขึ้นจากกรรมวิธีทางเคมีโดยใช้กลีเซอรอลเป็นตัวรีดิวซ์ ผงเงินที่ได้เกาะตัวเป็นกลุ่มก้อน เมื่ออบจนก้อนเงินเกิดการกระจายตัวของอนุภาคผงเงินเป็นขนาดเล็กๆ แล้ว ผงเงินที่ได้นำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อดูรูปร่าง และขนาดอนุภาค ผลที่ได้ปรากฏว่าผงเงินยังคงเหลือลักษณะของการบดอยู่ เนื่องจากอนุภาคของผงเงินในระดับไมครอนเห็นเป็นการตัดเหลี่ยมมุมอย่างชัดเจน สาเหตุเนื่องมาจากในขั้นตอนการบดจากเครื่องบดผงเงิน โดยโครงสร้างจุลภาคของผงเงินมีรูปร่างลักษณะเป็นทรงหลายหน้า หรืออาจมองได้ว่ามีรูปร่างค่อนข้างกลม จนกระทั่งเมื่ออนุภาคถูกบดซ้ำหลายๆ รอบ อาจมองเป็นรูปทรงกลมที่ถูกตัดเหลี่ยมมุมออก โดยแสดงในรูป 4.10 (ก)-(ค)

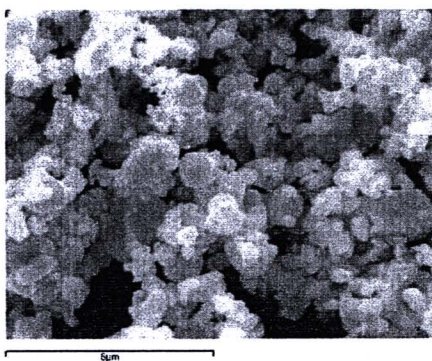
ขนาดอนุภาคเฉลี่ยมีขนาดอยู่ในช่วง 1-3 ไมครอน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการตรวจสอบขนาดอนุภาคด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาคมีผลที่ใกล้เคียงกัน กล่าวคือ ขนาดอนุภาคเมื่อส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดอนุภาคเมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งมีขนาดอนุภาคของผงเงิน 2.407 ไมครอน



(ก)



(ข)



(ค)

รูป 4.10 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผงเงินที่ผ่านการบดแล้ว

4.1.6 ผลการศึกษาความบริสุทธิ์ของผงเงินที่ผลิตขึ้นด้วยเครื่อง Inductively Couple Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP)

เป็นการตรวจสอบว่าผงเงินที่ผลิตขึ้นมีเงินเป็นส่วนประกอบอยู่ร้อยละเท่าไร กล่าวคือผงเงินมีความบริสุทธิ์คิดเป็นเปอร์เซ็นต์จากผงเงินตัวอย่างที่ทดสอบ โดยอาศัยหลักการของพลาสมาผลที่ได้จากการตรวจสอบทดสอบซ้ำ 2 ครั้ง มีดังนี้ คือ

- 1. ผลการทดสอบครั้งที่ 1 มีเงินเป็นส่วนประกอบ 99.25 เปอร์เซ็นต์
- 2. ผลการทดสอบครั้งที่ 2 มีเงินเป็นส่วนประกอบ 99.48 เปอร์เซ็นต์

4.2 ผลการตรวจสอบผงคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

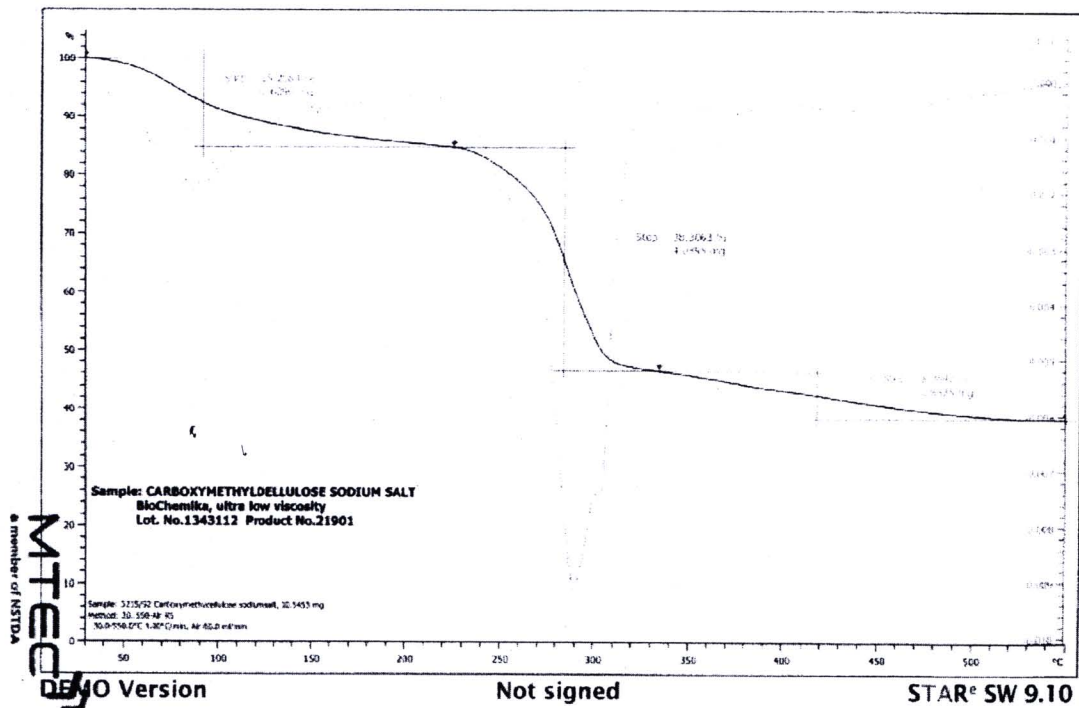
4.2.1 ผลการตรวจสอบอุณหภูมิการสลายตัวด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน (Thermogravimetric Analysis)

ผลการตรวจสอบผงคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพื่อหาอุณหภูมิการสลายตัวของผงชนิดนี้เป็นการนำอุณหภูมิที่หาได้ไปใช้ในขั้นตอนการเผาผนึกต่อไป เนื่องจากการเผาผนึกต้องทำให้ชิ้นงานซิลเวอร์เคลย์มีความบริสุทธิ์มากที่สุด ส่วนผงคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสทำหน้าที่เสมือนกาวหรือที่เรียกว่าตัวประสานทำหน้าที่ให้อนุภาคแต่ละอนุภาคของผงเงินติดกัน ทำให้การขึ้นรูปได้ง่ายยิ่งขึ้น ดังนั้นผงคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจะถูกไล่ออกจนหมด ผลจากการตรวจสอบด้วยเทคนิค ผลที่ได้โดยการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ผลปรากฏดังตาราง 4.1

ตาราง 4.1 การสลายตัวของสารต่างๆ ในผงคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิ

ครั้งที่ทดสอบ	องค์ประกอบ	อุณหภูมิ (°C)
1	ปริมาณองค์ประกอบที่สลายตัวในช่วงที่ 1 (ความชื้น)	30-225°C
	ปริมาณองค์ประกอบที่สลายตัวในช่วงที่ 2 (สารประกอบอินทรีย์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำ)	225-335°C
	ปริมาณองค์ประกอบที่สลายตัวในช่วงที่ 3 (สารประกอบอินทรีย์ที่มีมวลโมเลกุลสูง)	335-550°C
2	ปริมาณองค์ประกอบที่สลายตัวในช่วงที่ 1 (ความชื้น)	0-220°C
	ปริมาณองค์ประกอบที่สลายตัวในช่วงที่ 2 (สารประกอบอินทรีย์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำ)	220-340°C
	ปริมาณองค์ประกอบที่สลายตัวในช่วงที่ 3 (สารประกอบอินทรีย์ที่มีมวลโมเลกุลสูง)	340-550°C

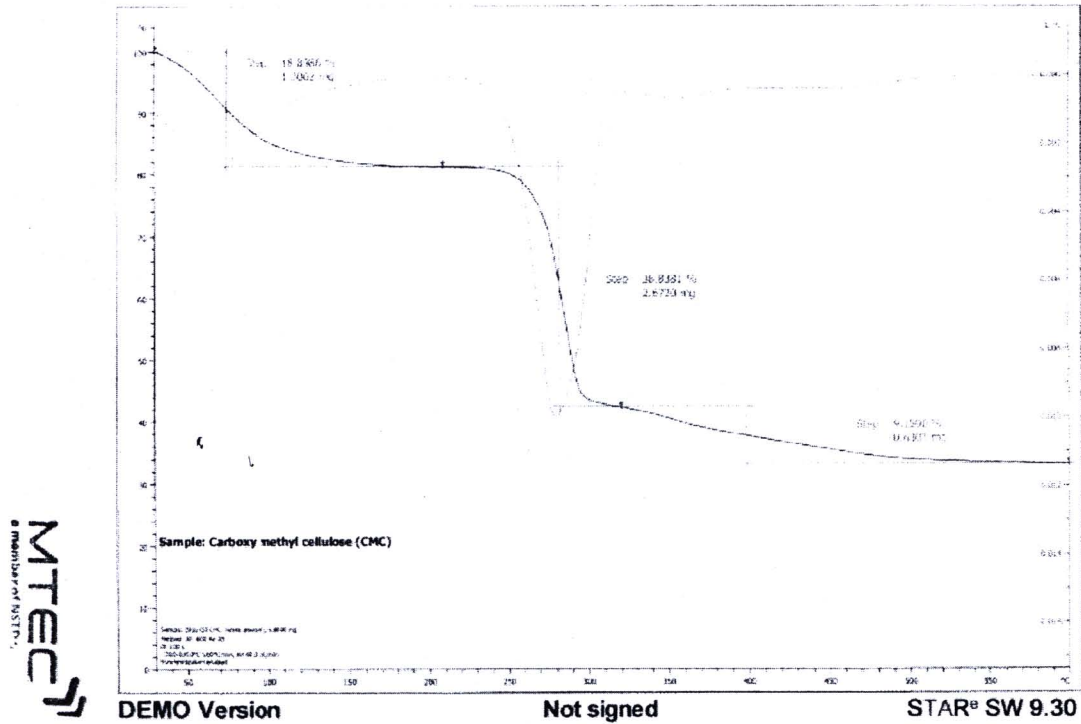
1. แผนภาพแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 1 ด้วย TGA ของผงคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส



รูป 4.11 แสดงผลการทดสอบครั้งที่ 1 ด้วย TGA ของผงคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส



2. แผนภาพแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 2 ด้วย TGA ของผงคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส



รูป 4.12 แสดงผลการทดสอบครั้งที่ 2 ด้วย TGA ของผงคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

4.3 ผลการตรวจสอบผงเงินนาโน

4.3.1 ผงเงินชนิดที่ 1

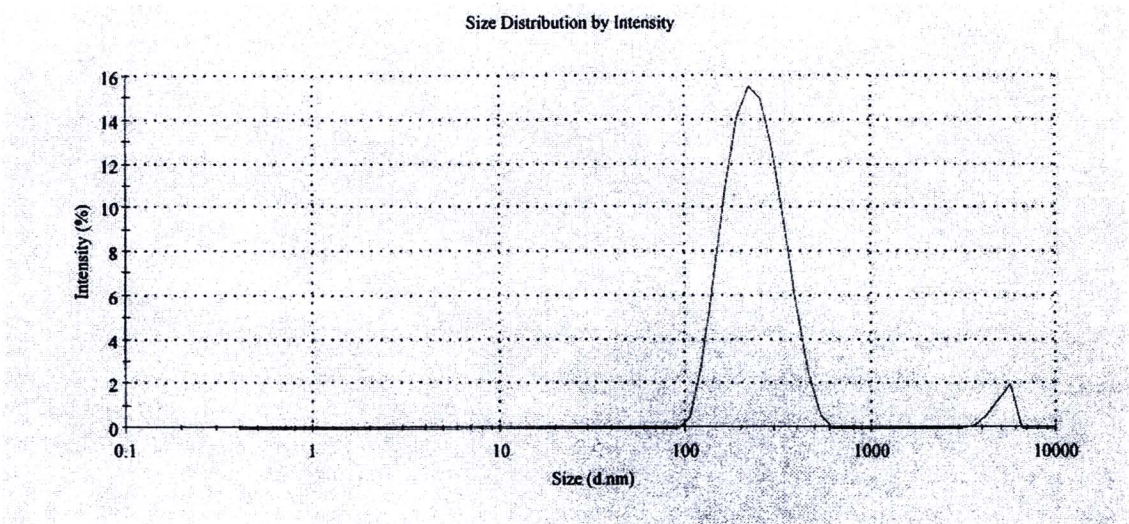
4.3.1.1 ผลการตรวจสอบขนาดอนุภาคของผงเงินด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค Zetasizer (Malvern)

เป็นการทดสอบผงเงินในขนาดนาโน โดยการวิเคราะห์หาขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคใน ระดับนาโน ช่วงตั้งแต่ 0.6 - 6,000 นาโนเมตร โดยใช้เทคนิคการกระเจิงของแสงแบบพลวัต ด้วยเครื่อง Zetasizer Nano (ZS) โดยการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง ผลที่ได้แสดงในตาราง 4.2

ตาราง 4.2 ขนาดอนุภาคเมื่อตรวจสอบด้วยเครื่อง Zetasizer Nano (ZS)

ขนาดอนุภาค (นาโนเมตร)					
ครั้งที่ทดสอบ	1	2	3	เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	244.20	242.10	236.10	241.07	3.76

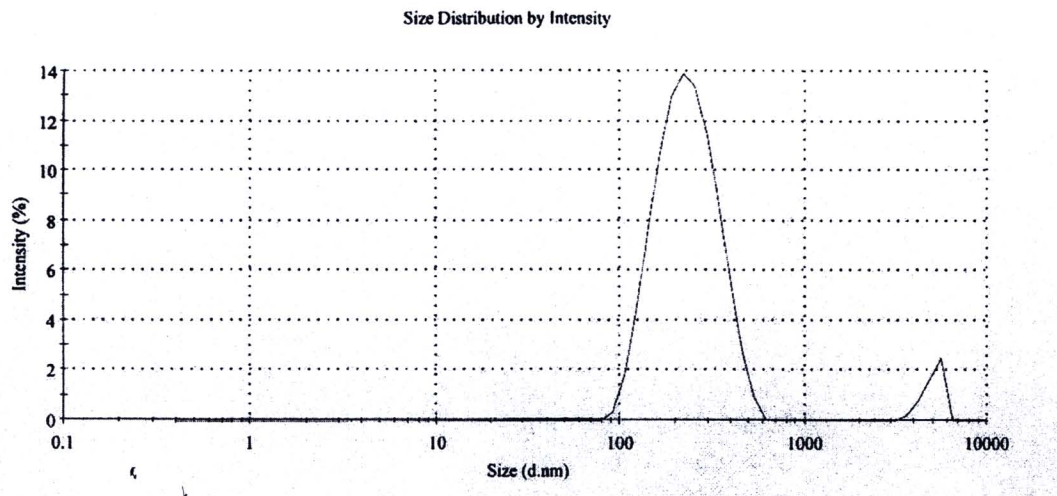
1. ผลการทดสอบครั้งที่ 1



รูป 4.13 แสดงผลการทดสอบครั้งที่ 1 ของผงเงินนาโนชนิดที่ 1 ด้วยเครื่อง Zetasizer Nano (ZS)

การทดสอบครั้งที่ 1 ด้วยน้ำ de-ionized 10 มิลลิลิตร และผ่านการอุลตราโซนิก 5 นาที ผลที่ได้ปรากฏว่ามีขนาดอนุภาค 244.20 นาโนเมตร

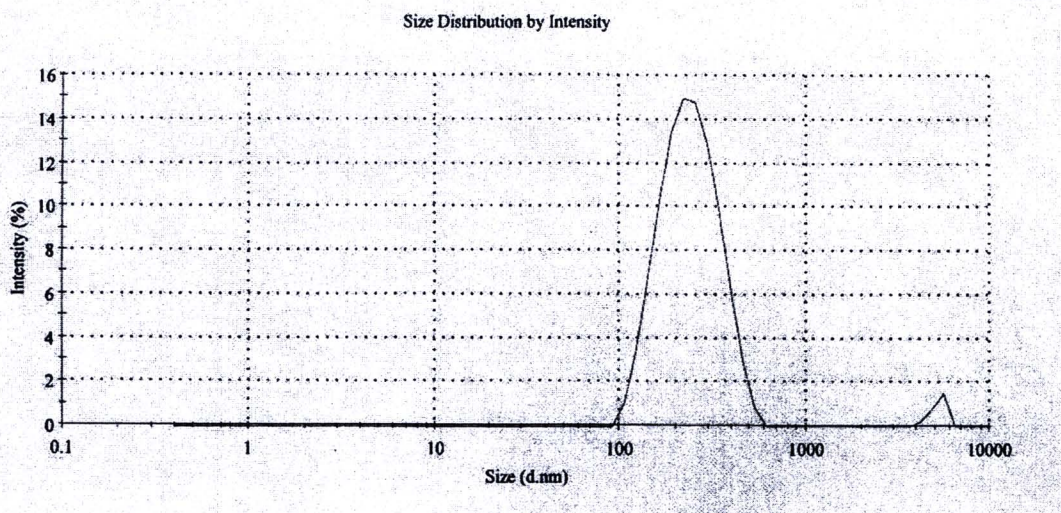
2. ผลการทดสอบครั้งที่ 2



รูป 4.14 แสดงผลการทดสอบครั้งที่ 2 ของผงเงินนาโนชนิดที่ 1 ด้วยเครื่อง Zetasizer Nano (ZS)

การทดสอบครั้งที่ 2 ด้วยน้ำ de-ionized 10 มิลลิลิตร และผ่านการอุลตราโซนิก 5 นาที ผลที่ได้ปรากฏว่ามีขนาดอนุภาค 242.10 นาโนเมตร

3. ผลการทดสอบครั้งที่ 3

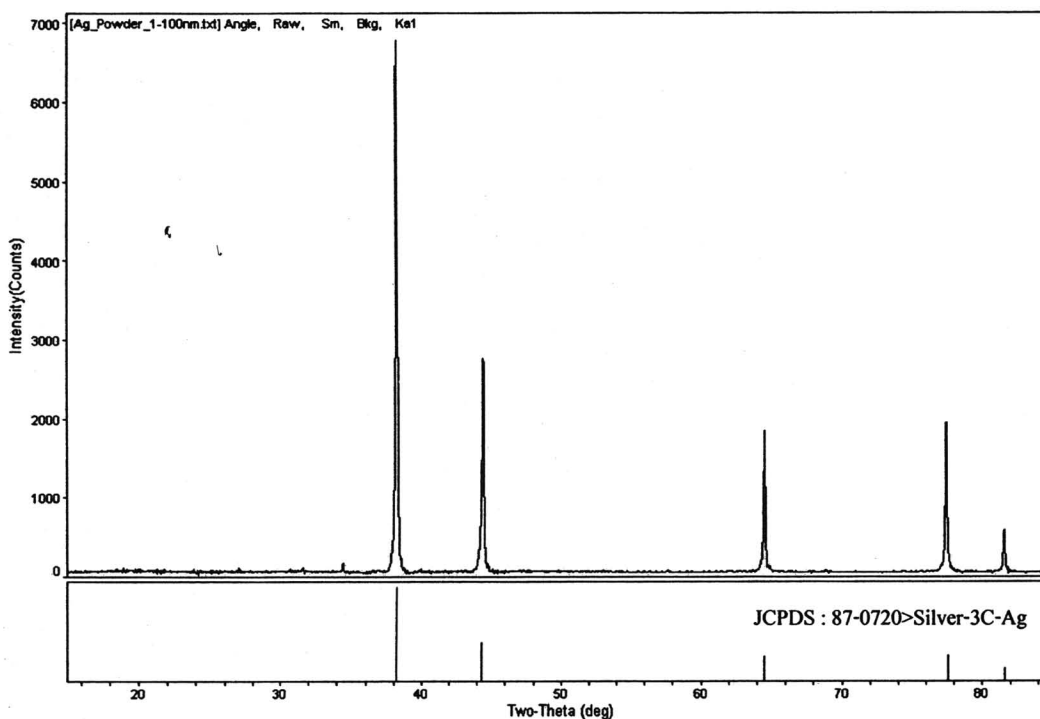


รูป 4.15 แสดงผลการทดสอบครั้งที่ 3 ของผงเงินนาโนชนิดที่ 1 ด้วยเครื่อง Zetasizer Nano (ZS)

การทดสอบครั้งที่ 2 ด้วยน้ำ de-ionized 10 มิลลิลิตร และผ่านการอุลตราโซนิก 5 นาที ผลที่ได้ปรากฏว่ามีขนาดอนุภาค 236.90 นาโนเมตร

4.3.1.2 ผลการตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

ผลการนำผงเงินนาโนชนิดที่ 1 ไปตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (XRD) ผลการตรวจสอบเฟสองค์ประกอบพบว่า ผงเงินที่ผ่านการผลิตโดยกรรมวิธีทางเคมีมีความเป็นผลึก อยู่ กล่าวคือ ไม่มีความเป็นอสัณฐาน (amorphous) ดังรูป 4.16



รูป 4.16 แสดงผลการทดสอบของผงเงินนาโนชนิดที่ 1 ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

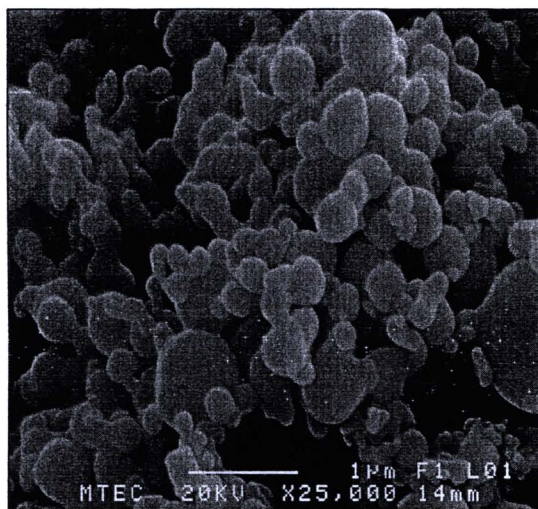
4.3.1.3 ผลการศึกษาความบริสุทธิ์ของผงเงินนาโนเมตรด้วยเครื่อง Inductively Couple Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP)

เป็นการตรวจสอบว่าผงเงินชนิดที่ 1 มีเงินเป็นส่วนประกอบอยู่ร้อยละเท่าไร กล่าวคือผงเงินมีความบริสุทธิ์คิดเป็นเปอร์เซ็นต์จากผงเงินตัวอย่างที่ทดสอบ โดยอาศัยหลักการของพลาสมา ผลที่ได้จากการตรวจสอบทดสอบซ้ำ 2 ครั้ง มีดังนี้ คือ

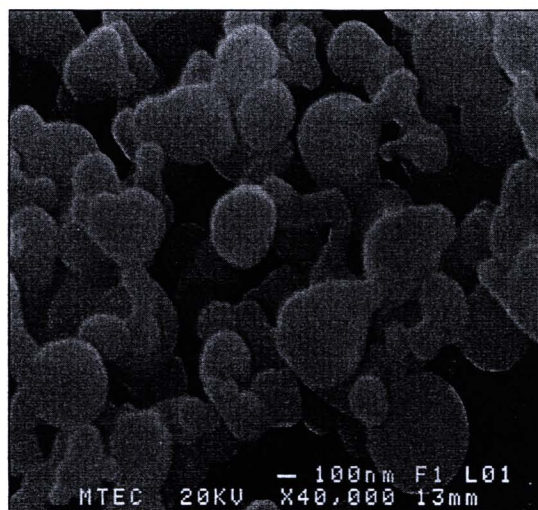
1. ผลการทดสอบครั้งที่ 1 มีเงินเป็นส่วนประกอบ 98.25 เปอร์เซ็นต์
2. ผลการทดสอบครั้งที่ 2 มีเงินเป็นส่วนประกอบ 97.91 เปอร์เซ็นต์

4.3.1.4 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy)

ผงเงินนาโนชนิดที่ 1 นำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยายสูง 25,000 และ 40,000 เท่า เพื่อดูรูปร่าง ผลที่ได้ปรากฏว่าโครงสร้างจุลภาคของผงเงินมีรูปร่างค่อนข้างกลม โดยแสดงในรูป 4.17 (ก)-(ข)



(ก)



(ข)

รูป 4.17 แสดงผลทดสอบของผงเงินนาโนชนิดที่ 1 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(ก) ผงเงินนาโนชนิดที่ 1 กำลังขยาย 25,000 เท่า

(ข) ผงเงินนาโนชนิดที่ 1 กำลังขยาย 40,000 เท่า

4.3.2 ผงเงินชนิดที่ 2

3.3.2.1 ผลการตรวจสอบขนาดอนุภาคของผงเงินนาโนเมตรด้วยเครื่องวัดขนาด

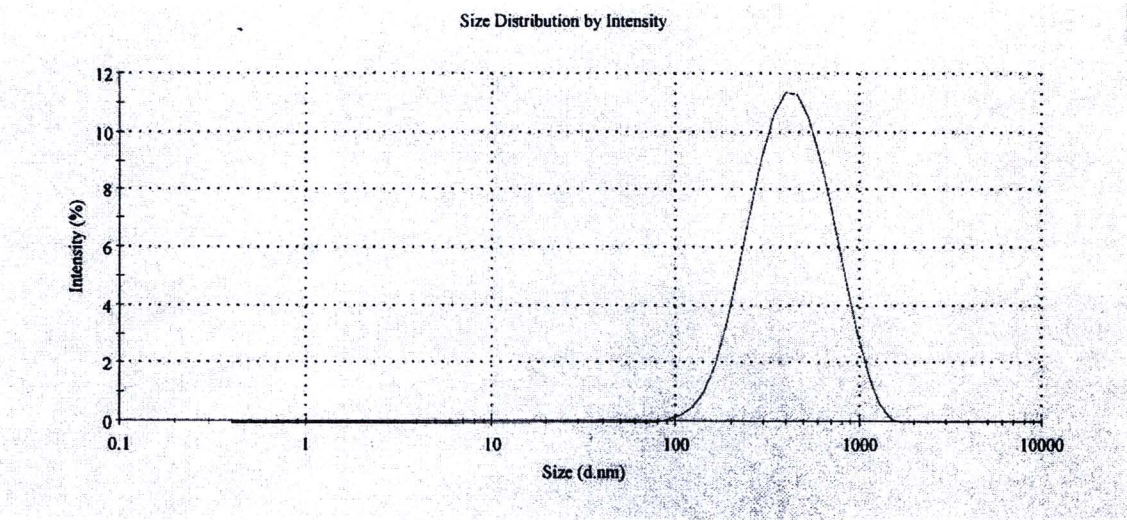
อนุภาค Zetasizer (Malvern)

เป็นการทดสอบผงเงินในขนาดนาโน โดยการวิเคราะห์หาขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคใน ระดับนาโน ช่วงตั้งแต่ 0.6 - 6,000 นาโนเมตร โดยใช้เทคนิคการกระเจิงของแสงแบบพลวัต ด้วยเครื่อง Zetasizer Nano (ZS) โดยการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง ผลที่ได้แสดงในตาราง 4.3

ตาราง 4.3 ขนาดอนุภาคเมื่อตรวจสอบด้วยเครื่อง Zetasizer Nano (ZS)

ขนาดอนุภาค (นาโนเมตร)					
ครั้งที่ทดสอบ	1	2	3	เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	380.50	369.00	360.20	369.90	10.18

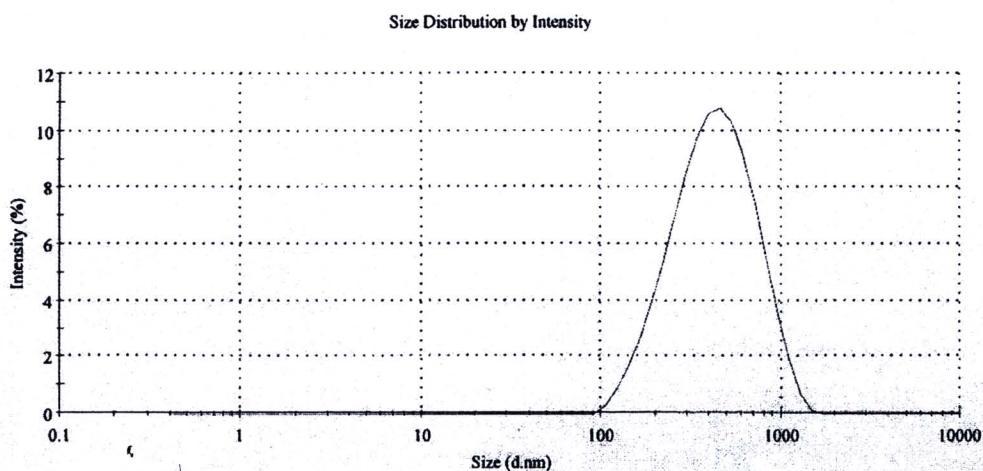
1. ผลการทดสอบครั้งที่ 1



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

การทดสอบครั้งที่ 1 ด้วยน้ำ de-ionized 10 มิลลิลิตร และผ่านการอุลตราโซนิก 5 นาที ผลที่ได้ปรากฏว่ามีขนาดอนุภาค 380.50 นาโนเมตร

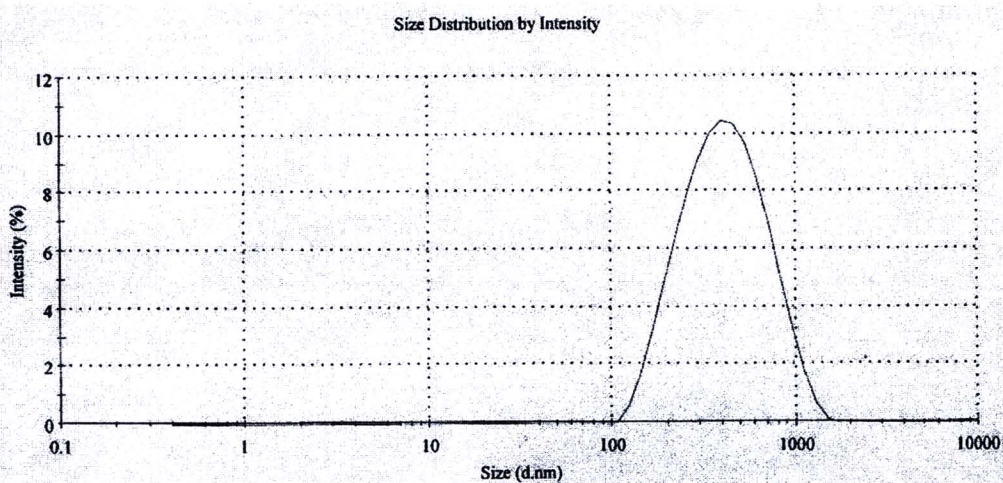
2. ผลการทดสอบครั้งที่ 2



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

การทดสอบครั้งที่ 2 ด้วยน้ำ de-ionized 10 มิลลิลิตร และผ่านการอุลตราโซนิก 5 นาที ผลที่ได้ปรากฏว่ามีขนาดอนุภาค 369.00 นาโนเมตร

3. ผลการทดสอบครั้งที่ 3

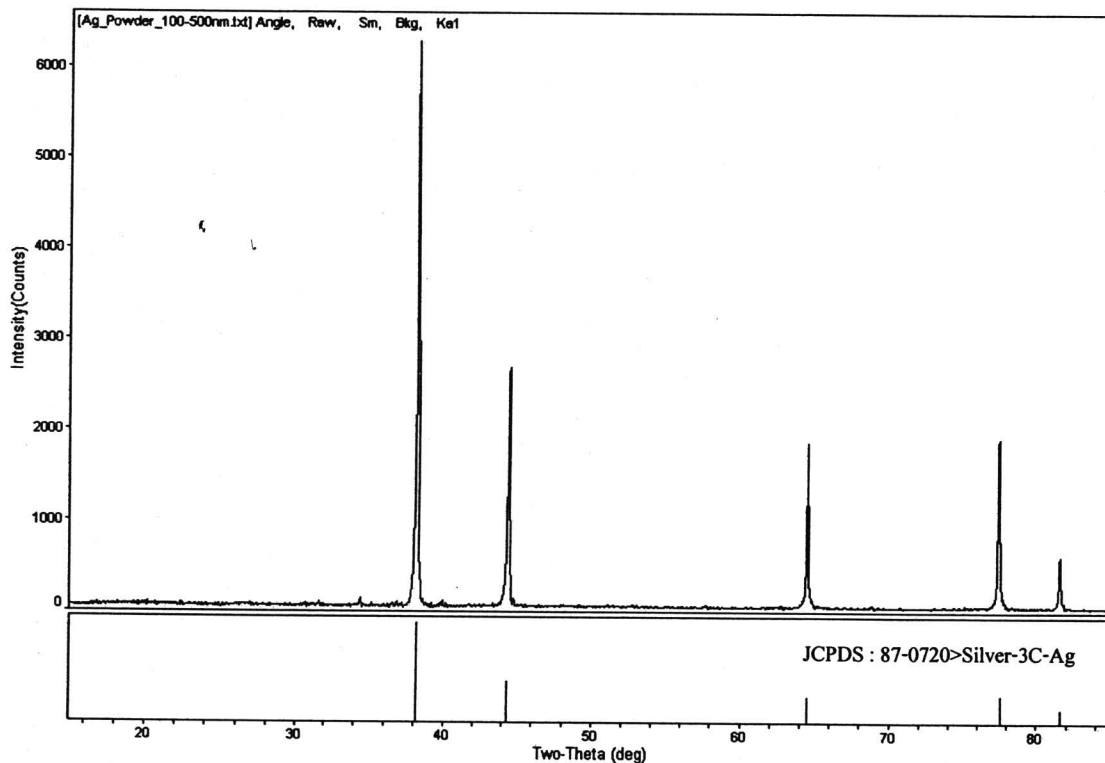


รูป 4.20 แสดงผลการทดสอบครั้งที่ 3 ของผงเงินนาโนชนิดที่ 2 ด้วยเครื่อง Zetasizer Nano (ZS)

การทดสอบครั้งที่ 3 ด้วยน้ำ de-ionized 10 มิลลิลิตร และผ่านการอุลตราโซนิก 5 นาที ผลที่ได้ปรากฏว่ามีขนาดอนุภาค 360.20 นาโนเมตร

4.3.2.2 ผลการตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

ผลการนำผงเงินนาโนชนิดที่ 2 ไปตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (XRD) ผลการตรวจสอบเฟสองค์ประกอบพบว่า ผงเงินที่ผ่านการผลิตโดยกรรมวิธีทางเคมีมีความเป็นผลึก อยู่ กล่าวคือไม่มีความเป็นอสัณฐาน (amorphous) ดังรูป 4.20



รูป 4.21 แสดงผลการทดสอบของผงเงินนาโนชนิดที่ 2 ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

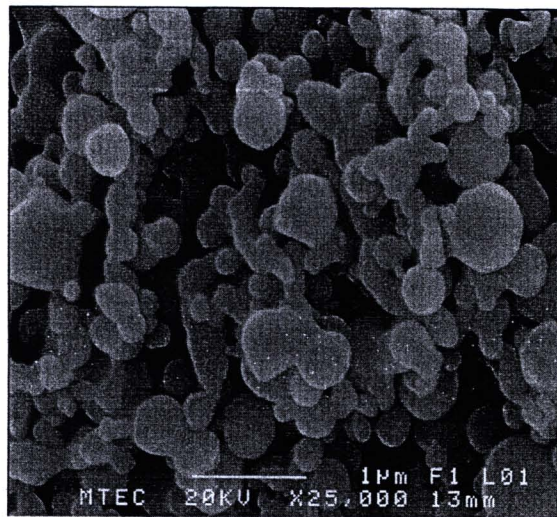
4.3.2.3 ผลการศึกษาความบริสุทธิ์ของผงเงินนาโนเมตรด้วยเครื่อง Inductively Couple Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP)

เป็นการตรวจสอบว่าผงเงินชนิดที่ 2 มีเงินเป็นส่วนประกอบอยู่ร้อยละเท่าไร กล่าวคือผงเงินมีความบริสุทธิ์คิดเป็นเปอร์เซ็นต์จากผงเงินตัวอย่างที่ทดสอบ โดยอาศัยหลักการของพลาสมาผลที่ได้จากการตรวจสอบทดสอบซ้ำ 2 ครั้ง มีดังนี้ คือ

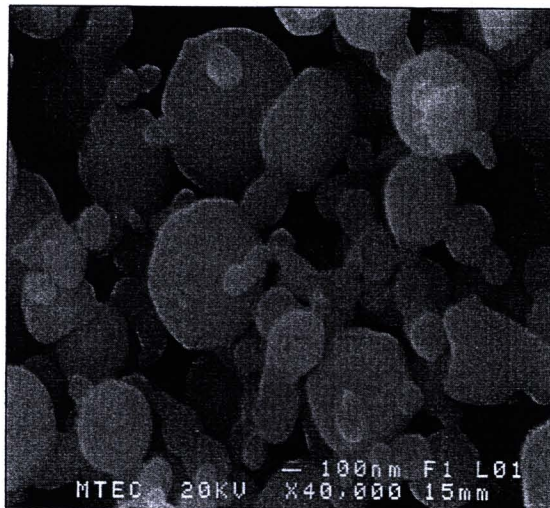
1. ผลการทดสอบครั้งที่ 1 มีเงินเป็นส่วนประกอบ 98.23 เปอร์เซ็นต์
2. ผลการทดสอบครั้งที่ 2 มีเงินเป็นส่วนประกอบ 98.91 เปอร์เซ็นต์

4.3.2.4 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy)

ผงเงินนาโนชนิดที่ 2 นำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ กำลังขยายสูง 25,000 และ 40,000 เท่า เพื่อดูรูปร่าง ผลที่ได้ปรากฏว่าโครงสร้างจุลภาคของผงเงินมีรูปร่างค่อนข้างกลม โดยแสดงในรูป 4.22 (ก)-(ข)



(ก)



(ข)

รูป 4.22 แสดงผลทดสอบของผงเงินนาโนชนิดที่ 2 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(ก) ผงเงินนาโนชนิดที่ 2 กำลังขยาย 25,000 เท่า

(ข) ผงเงินนาโนชนิดที่ 2 กำลังขยาย 40,000 เท่า

4.4 ผลการตรวจสอบผงอลูมิเนียม

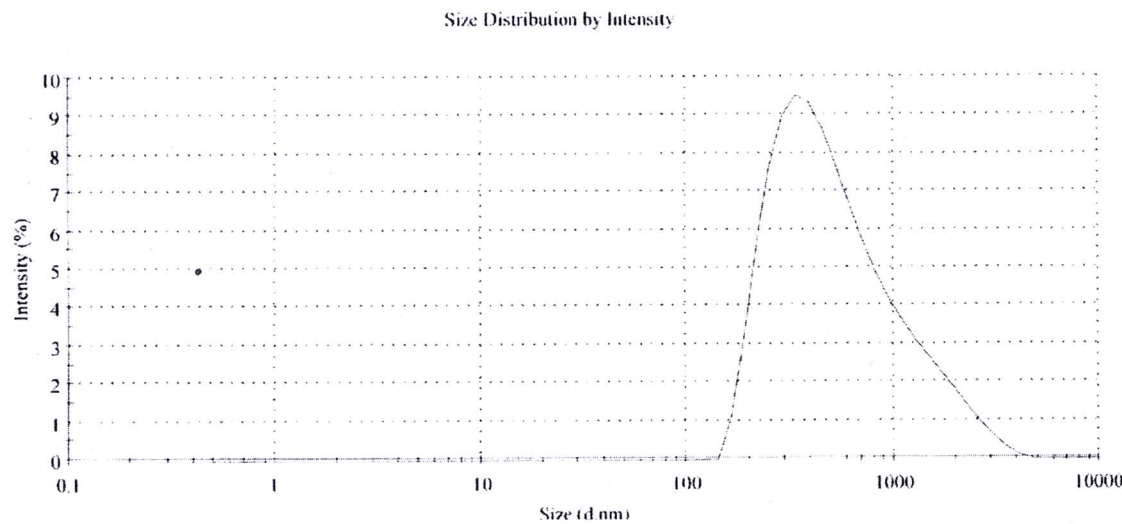
4.4.1 ผลการตรวจสอบขนาดอนุภาคของผงอลูมิเนียมด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค Zetasizer (Malvern)

เป็นการทดสอบผงอลูมิเนียมในขนาดนาโน โดยการวิเคราะห์หาขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคใน ระดับนาโน ช่วงตั้งแต่ 0.6 - 6,000 นาโนเมตร โดยใช้เทคนิคการกระเจิงของแสงแบบพลวัต ด้วยเครื่อง Zetasizer Nano (ZS) โดยการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง ผลที่ได้แสดงในตาราง 4.4

ตาราง 4.4 ขนาดอนุภาคเมื่อตรวจสอบด้วยเครื่อง Zetasizer Nano (ZS)

ขนาดอนุภาค (นาโนเมตร)					
ครั้งที่	1	2	3	เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ทดสอบ	434.10	433.30	438.90	435.43	3.03

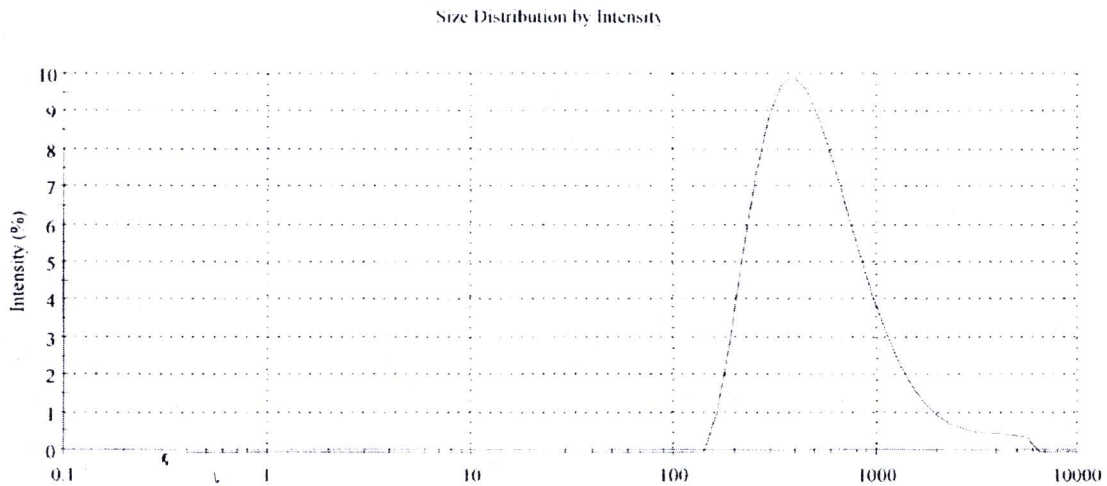
1. ผลการทดสอบครั้งที่ 1



รูป 4.23 แสดงผลการทดสอบครั้งที่ 1 ของผงอลูมิเนียม ด้วยเครื่อง Zetasizer Nano (ZS)

การทดสอบครั้งที่ 1 ด้วยน้ำ de-ionized 10 มิลลิลิตร และผ่านการอุลตราโซนิก 5 นาที ผลที่ได้ปรากฏว่ามีขนาดอนุภาค 434.10 นาโนเมตร

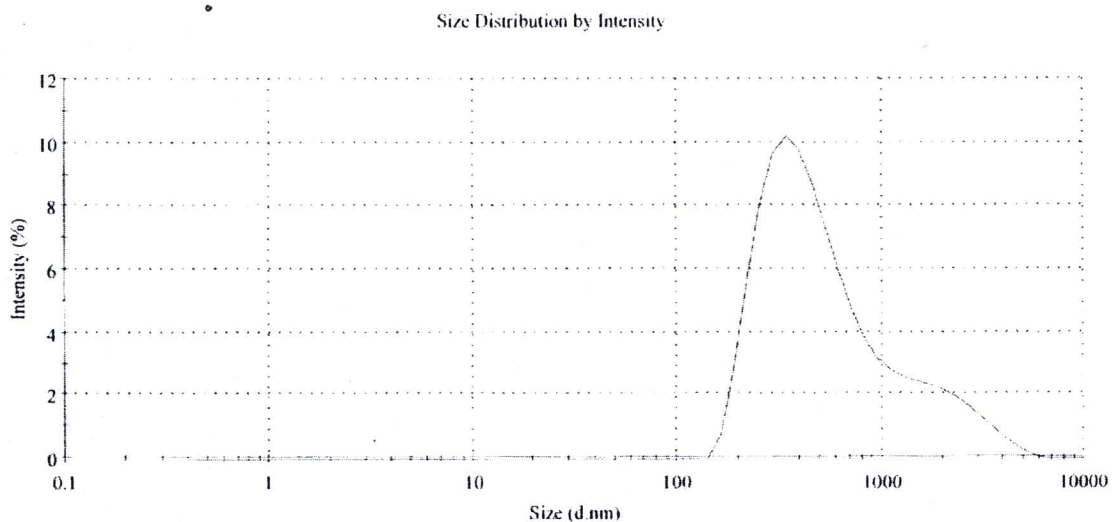
2. ผลการทดสอบครั้งที่ 2



รูป 4.24 แสดงผลการทดสอบครั้งที่ 2 ของผงอลูมิเนียม ด้วยเครื่อง Zetasizer Nano (ZS)

การทดสอบครั้งที่ 2 ด้วยน้ำ de-ionized 10 มิลลิลิตร และผ่านการอุลตราโซนิก 5 นาที ผลที่ได้ปรากฏว่ามีขนาดอนุภาค 433.30 นาโนเมตร

3. ผลการทดสอบครั้งที่ 3



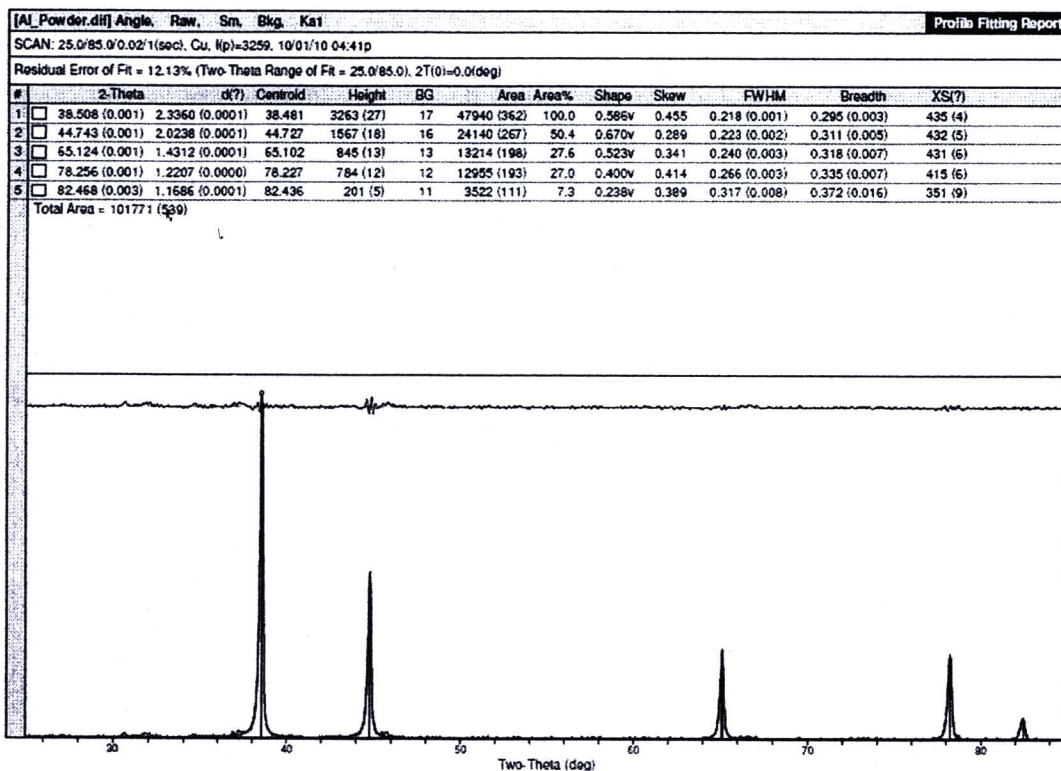
รูป 4.25 แสดงผลการทดสอบครั้งที่ 3 ของผงอลูมิเนียม ด้วยเครื่อง Zetasizer Nano (ZS)

การทดสอบครั้งที่ 3 ด้วยน้ำ de-ionized 10 มิลลิลิตร และผ่านการอุลตราโซนิก 5 นาที ผลที่ได้ปรากฏว่ามีขนาดอนุภาค 438.90 นาโนเมตร



4.4.2 ผลการตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

ผลการนำผงอลูมิเนียม ไปตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (XRD) ผลการตรวจสอบเฟสองค์ประกอบพบว่า ผงอลูมิเนียมไม่มีความเป็นผลึกอยู่ กล่าวคือมีความเป็นอสัณฐาน (amorphous) ดังรูป 4.26



รูป 4.26 แสดงผลการทดสอบของผงเงินนาโนชนิดที่ 2 ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

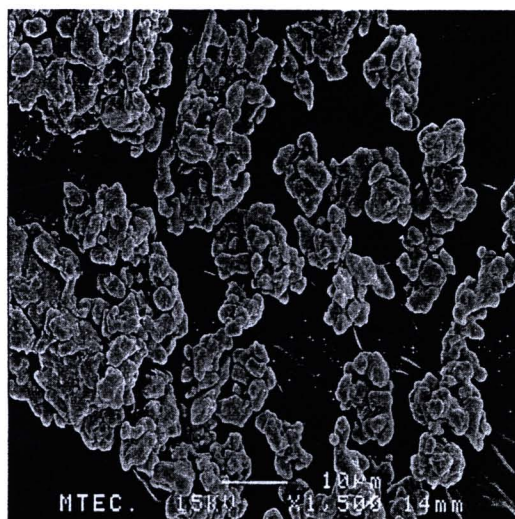
4.4.3 ผลการศึกษาความบริสุทธิ์ของผงอลูมิเนียมด้วยเครื่อง Inductively Couple Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP)

เป็นการตรวจสอบว่าผงอลูมิเนียม มีโลหะอลูมิเนียมเป็นส่วนประกอบอยู่ร้อยละเท่าไร กล่าวคือผงอลูมิเนียมมีความบริสุทธิ์คิดเป็นเปอร์เซ็นต์จากผงอลูมิเนียมตัวอย่างที่ทดสอบ โดยอาศัยหลักการของพลาสมา ผลที่ได้จากการตรวจสอบทดสอบซ้ำ 2 ครั้ง มีดังนี้ คือ

1. ผลการทดสอบครั้งที่ 1 มีอลูมิเนียมเป็นส่วนประกอบ 72.56 เปอร์เซ็นต์
2. ผลการทดสอบครั้งที่ 2 มีอลูมิเนียมเป็นส่วนประกอบ 71.91 เปอร์เซ็นต์

4.4.4 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
(scanning electron microscopy)

ผงอลูมิเนียม นำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,500 เท่า เพื่อดูรูปร่าง ผลที่ได้ปรากฏว่าโครงสร้างจุลภาคของผงอลูมิเนียมมีรูปร่างค่อนข้างกลม โดยแสดงในรูป 4.27



รูป 4.27 แสดงผลทดสอบของผงอลูมิเนียมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
ของผงอลูมิเนียม กำลังขยาย 1,500 เท่า

4.5 ผลการผสมซิลเวอร์เคลย์

4.5.1 ก่อนที่ 1

อัตราส่วนที่ใช้ผสมซิลเวอร์เคลย์ก่อนที่ 1 ประกอบด้วยผงเงินในขนาดไมโครเมตร ผงคาร์บอนซีเมติกเซลลูโลสซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวประสาน และน้ำในอัตราส่วนที่กำหนดไว้ การผสมเมื่อทิ้งผงคาร์บอนซีเมติกเซลลูโลสให้ละลายกับน้ำไว้ 1 คืน เมื่อนำผงทั้งหมดและคาร์บอนซีเมติกเซลลูโลสผสมกัน การผสมก่อนที่ 1 ผสมง่ายวก่อนอื่นๆ และใช้เวลาในการผสมน้อยที่สุด ดังนั้นจึงเหมาะกับการทำในอุตสาหกรรม เนื่องจากใช้เวลาในการผลิตน้อย โดยก่อนที่ 1 ภายหลังผสมแล้วซิลเวอร์เคลย์ที่ได้มีลักษณะการจับตัวของผงเงินจับตัวเป็นกลุ่มก้อนมีสีเทา ผลที่ได้จากการผสมก่อนที่ 1 แสดงดังรูป 4.28 เหนียวติดมือเล็กน้อย สามารถนำมาปั้นขึ้นรูปได้ และปั้นขึ้นรูปได้ง่ายวก่อนที่ 2 และก่อนที่ 3 โดยอัตราส่วนที่ชั่งน้ำหนักประกอบด้วยอัตราส่วนดังนี้ คือ

- ผงเงิน (ไมโครเมตร) ใช้ปริมาณ 17 กรัม
- คาร์บอนซีเมติกเซลลูโลส ใช้ปริมาณ 0.37 กรัม



รูป 4.28 ซิลเวอร์เคลย์ที่ผสมอัตราส่วนก่อนที่ 1

4.5.2 ก้อนที่ 2

อัตราส่วนที่ใช้ผสมซิลเวอร์เคลย์ก้อนที่ 2 ประกอบด้วยผงเงินในขนาดไมโครเมตรและนาโนเมตร ผงคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวประสาน และน้ำในอัตราส่วนที่กำหนดไว้ การผสมเมื่อทั้งผงคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสให้ละลายกับน้ำไว้ 1 คืน เมื่อนำผงทั้งหมดและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสผสมกัน การผสมก้อนที่ 2 ผสมยากกว่าก้อนที่ 1 และใช้เวลาในการผสมมากกว่าก้อนที่ 1 ดังนั้นจึงไม่เหมาะกับการทำในอุตสาหกรรม เนื่องจากใช้เวลาในการผลิตมาก โดยก้อนที่ 2 ภายหลังผสมแล้วซิลเวอร์เคลย์ที่ได้มีลักษณะการจับตัวของผงเงินจับตัวเป็นกลุ่มก้อนมีสีเทา ผลที่ได้จากการผสมก้อนที่ 2 แสดงดังรูป 4.29 ไม่เหนียวติดมือ สามารถนำมาปั้นขึ้นรูปได้ง่าย และปั้นขึ้นรูปได้ยากกว่าก้อนที่ 1 และก้อนที่ 3 โดยอัตราส่วนที่ชั่งน้ำหนักประกอบด้วยอัตราส่วนดังนี้ คือ

- ผงเงิน (ไมโครเมตร) ใช้ปริมาณ 17 กรัม
- ผงเงิน (200 นาโนเมตร) ใช้ปริมาณ 2.42 กรัม
- ผงเงิน (300 นาโนเมตร) ใช้ปริมาณ 2.42 กรัม
- คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ใช้ปริมาณ 0.48 กรัม



รูป 4.29 ซิลเวอร์เคลย์ที่ผสมอัตราส่วนก้อนที่ 2

4.5.3 ก้อนที่ 3

อัตราส่วนที่ใช้ผสมซิลเวอร์เคลย์ก้อนที่ 3 ประกอบด้วยผงเงินในขนาดไมโครเมตรและนาโนเมตร ผงอลูมิเนียม และผงคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวประสาน และน้ำในอัตราส่วนที่กำหนดไว้ การผสมเมื่อทิ้งผงคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสให้ละลายกับน้ำไว้ 1 คืน เมื่อนำผงทั้งหมดและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสผสมกัน การผสมก้อนที่ 3 ผสมยากกว่าก้อนที่ 1 และก้อนที่ 2 โดยก้อนที่ 3 ภายหลังผสมแล้วซิลเวอร์เคลย์ที่ได้มีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน มีสีเทาเข้ม เนื่องจากสีของอลูมิเนียมมีสีเข้มกว่าเงิน ผลที่ได้จากการผสมก้อนที่ 3 แสดงดังรูป 4.30 เห็นชัดว่ามีมือมาก สามารถนำมาปั้นขึ้นรูปได้ยากมาก โดยอัตราส่วนที่ชั่งน้ำหนักประกอบด้วยอัตราส่วนดังนี้

- ผงเงิน (ไมโครเมตร) ใช้ปริมาณ 17 กรัม
- ผงเงิน (200 นาโนเมตร) ใช้ปริมาณ 2.30 กรัม
- ผงเงิน (300 นาโนเมตร) ใช้ปริมาณ 2.30 กรัม
- คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ใช้ปริมาณ 0.48 กรัม
- อลูมิเนียม (นาโนเมตร) ใช้ปริมาณ 0.24 กรัม



รูป 4.30 ซิลเวอร์เคลย์ที่ผสมอัตราส่วนก้อนที่ 3

4.6 ผลการขึ้นรูปซิลเวอร์เคลย์

4.6.1 ก้อนที่ 1

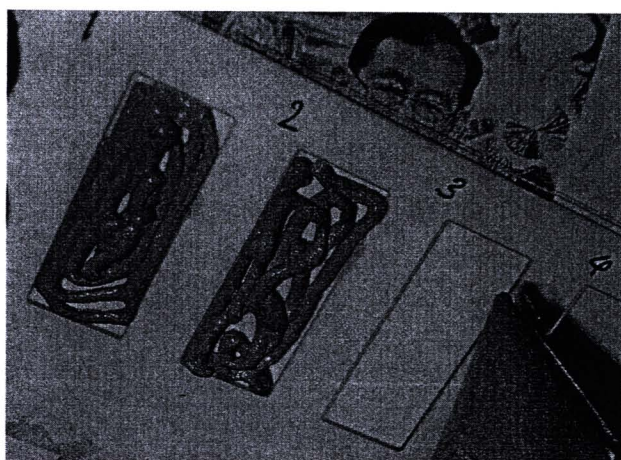
จากส่วนผสมที่ผสมเป็นก้อนที่ 1 หนัก 40.63 กรัม นำมาแบ่งเป็น 2 ส่วน เพื่อนำมาขึ้นรูปเป็น 2 รูปร่าง โดยแต่ละรูปร่างเมื่อขึ้นรูปเสร็จเรียบร้อย หลังจากนั้นทิ้งไว้ให้แห้ง 1 คืน โดยผลการขึ้นรูปมีดังนี้ คือ

4.6.1.1 สี่เหลี่ยมผืนผ้า

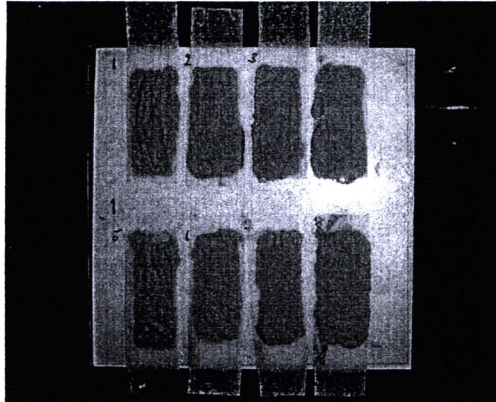
การขึ้นรูปเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าให้มีความกว้าง 1.5 เซนติเมตร ความยาว 4 เซนติเมตร ความหนา 0.1 เซนติเมตร ผลการขึ้นรูปแสดงดังรูป 4.31-4.32 จะเห็นว่าเทคนิคการขึ้นรูปที่ไม่ทำให้ชิ้นงานติดกับแผ่นพลาสติกคือการทาวาสลิน ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปต้องทิ้งไว้ให้แห้ง 1 คืน ในบรรยากาศปกติ ถ้านำชิ้นงานทิ้งไว้ให้แห้งโดยการนำเข้าเตาอบจะทำให้ชิ้นงานที่เกิดการแตกหักได้ เนื่องจากการที่ทำให้ชิ้นงานแห้งเร็วจนเกินไปจะทำให้ชิ้นงานเกิดการหดตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้ชิ้นงานเสียหาย แต่สามารถนำชิ้นงานนั้นกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการผสมน้ำไปแล้วผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันก็จะได้ชิ้นงานซิลเวอร์เคลย์ที่สามารถนำกลับมาขึ้นรูปใหม่ได้

4.6.1.2 เส้น

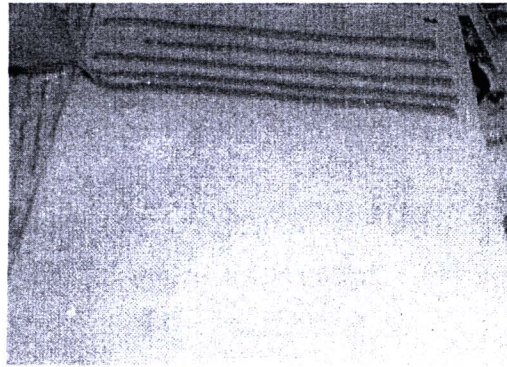
การขึ้นรูปเป็นเส้นให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เซนติเมตร ความยาว 4 เซนติเมตร การขึ้นรูปแบบเส้นทำได้โดยการนำซิลเวอร์เคลย์ใส่ในถุงแล้วตัดปากถุงให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เซนติเมตร หรืออาจใส่ในหลอดฉีดยาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรู 0.1 เซนติเมตร ผลการขึ้นรูปแสดงดังรูป 4.33-4.34



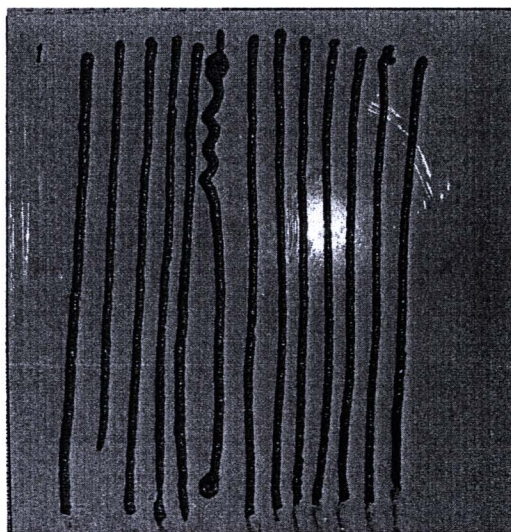
รูป 4.31 แสดงการขึ้นรูปซิลเวอร์เคลย์แบบแผ่นของส่วนผสมก้อนที่ 1



รูป 4.32 แสดงการขึ้นรูปซิลเวอร์เคลือบแบบแผ่นของส่วนผสมก้อนที่ 1



รูป 4.33 แสดงการขึ้นรูปซิลเวอร์เคลือบแบบเส้นของส่วนผสมก้อนที่ 1



รูป 4.34 แสดงการขึ้นรูปซิลเวอร์เคลือบแบบเส้นของส่วนผสมก้อนที่ 1

4.6.2 ก้อนที่ 2

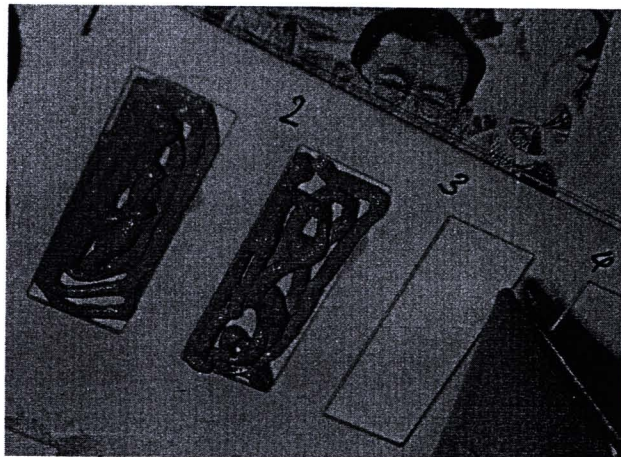
จากส่วนผสมที่ผสมเป็นก้อนที่ 2หนัก 49.19 กรัม นำมาแบ่งเป็น 2 ส่วน เพื่อนำมาขึ้นรูปเป็น 2 รูปร่าง โดยแต่ละรูปร่างเมื่อขึ้นรูปเสร็จเรียบร้อยแล้ว หลังจากนั้นทิ้งไว้ให้แห้ง 1 คืน โดยผลการขึ้นรูปมีดังนี้ คือ

4.6.2.1 สี่เหลี่ยมผืนผ้า

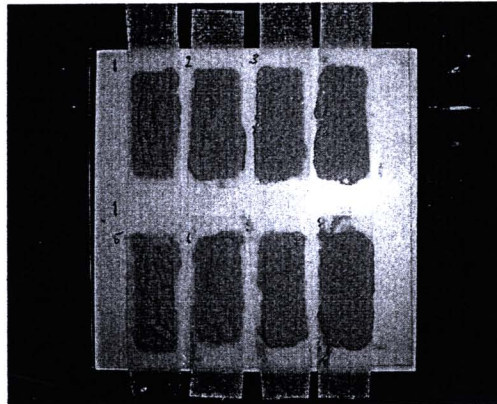
การขึ้นรูปเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าให้มีความกว้าง 1.5 เซนติเมตร ความยาว 4 เซนติเมตร ความหนา 0.1 เซนติเมตร ผลการขึ้นรูปแสดงดังรูป 4.35-4.36 จะเห็นว่าเทคนิคการขึ้นรูปที่ไม่ทำให้ชิ้นงานติดกับแผ่นพลาสติกคือการทาวาสลิน ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปต้องทิ้งไว้ให้แห้ง 1 คืน ในบรรยากาศปกติ ถ้านำชิ้นงานทิ้งไว้ให้แห้งโดยการนำเข้าเตาอบจะทำให้ชิ้นงานที่ได้เกิดการแตกหักได้ เนื่องจากการที่ทำให้ชิ้นงานแห้งเร็วจนเกินไปจะทำให้ชิ้นงานเกิดการหดตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้ชิ้นงานเสียหาย แต่สามารถนำชิ้นงานนั้นกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการผสมน้ำไปแล้วผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันก็จะได้ชิ้นงานซิลเวอร์เคลย์ที่สามารถนำกลับมาขึ้นรูปใหม่ได้

4.6.2.2 เส้น

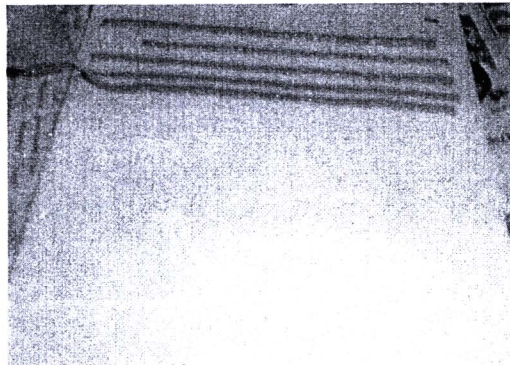
การขึ้นรูปเป็นเส้นให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เซนติเมตร ความยาว 4 เซนติเมตร การขึ้นรูปแบบเส้นทำได้โดยการนำซิลเวอร์เคลย์ใส่ในถุงแล้วตัดปากถุงให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เซนติเมตร หรืออาจใส่ในหลอดฉีดยาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรู 0.1 เซนติเมตร ผลการขึ้นรูปแสดงดังรูป 4.37-4.38



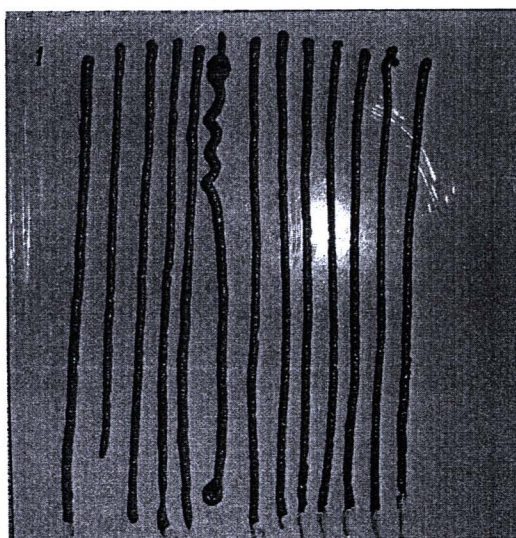
รูป 4.35 แสดงการขึ้นรูปซิลเวอร์เคลย์แบบแผ่นของส่วนผสมก้อนที่ 2



รูป 4.36 แสดงการขึ้นรูปซิลเวอร์เคลย์แบบแผ่นของส่วนผสมก้อนที่ 2



รูป 4.37 แสดงการขึ้นรูปซิลเวอร์เคลย์แบบเส้นของส่วนผสมก้อนที่ 2



รูป 4.38 แสดงการขึ้นรูปซิลเวอร์เคลย์แบบเส้นของส่วนผสมก้อนที่ 2



4.6.3 ก้อนที่ 3

จากส่วนผสมที่ผสมเป็นก้อนที่ 3 หนัก 32.42 กรัม นำมาแบ่งเป็น 2 ส่วน เพื่อนำมาขึ้นรูปเป็น 2 รูปร่าง โดยแต่ละรูปร่างเมื่อขึ้นรูปเสร็จเรียบร้อย หลังจากนั้นทิ้งไว้ให้แห้ง 1 คืน โดยผลการขึ้นรูปมีดังนี้ คือ

4.6.3.1 สี่เหลี่ยมผืนผ้า

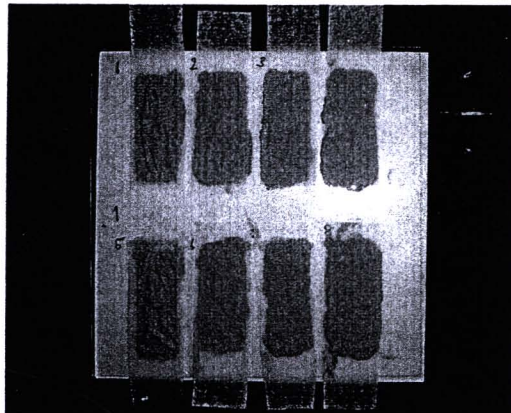
การขึ้นรูปเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าให้มีความกว้าง 1.5 เซนติเมตร ความยาว 4 เซนติเมตร ความหนา 0.1 เซนติเมตร ผลการขึ้นรูปแสดงดังรูป 4.39-4.40 จะเห็นได้ว่าเทคนิคการขึ้นรูปที่ไม่ทำให้ชิ้นงานติดกับแผ่นพลาสติกคือการทาวาสลิน ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปต้องทิ้งไว้ให้แห้ง 1 คืน ในบรรยากาศปกติ ถ้านำชิ้นงานทิ้งไว้ให้แห้งโดยการนำเข้าเตาอบจะทำให้ชิ้นงานที่เกิดการแตกหักได้ เนื่องจากการที่ทำให้ชิ้นงานแห้งเร็วเกินไปจะทำให้ชิ้นงานเกิดการหดตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้ชิ้นงานเสียหาย แต่สามารถนำชิ้นงานนั้นกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการผสมน้ำไปแล้วผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันก็จะได้ชิ้นงานซิลเวอร์เคลย์ที่สามารถนำกลับมาขึ้นรูปใหม่ได้

4.6.3.2 เส้น

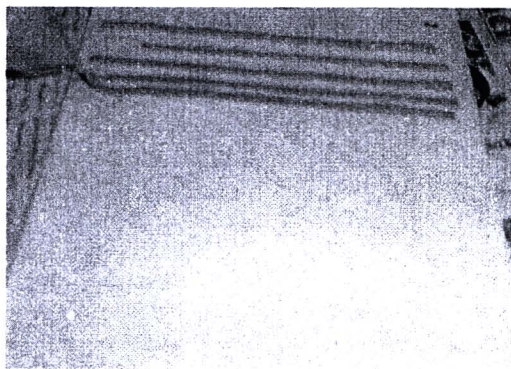
การขึ้นรูปเป็นเส้นให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เซนติเมตร ความยาว 4 เซนติเมตร การขึ้นรูปแบบเส้นทำได้โดยการนำซิลเวอร์เคลย์ใส่ในถุงแล้วตัดปากถุงให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เซนติเมตร หรืออาจใส่ในหลอดฉีดยาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรู 0.1 เซนติเมตร ผลการขึ้นรูปแสดงดังรูป 4.41-4.42



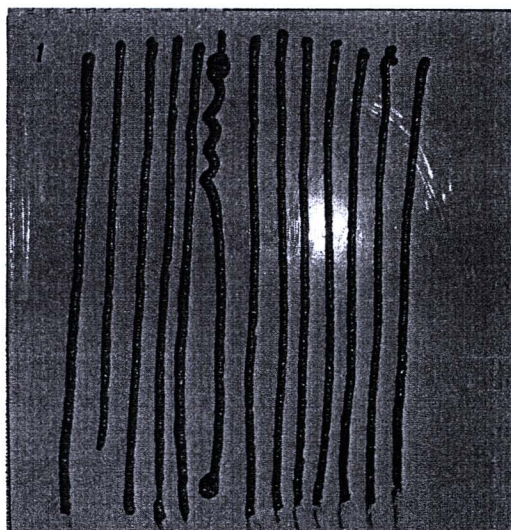
รูป 4.39 แสดงการขึ้นรูปซิลเวอร์เคลย์แบบแผ่นของส่วนผสมก้อนที่ 3



รูป 4.40 แสดงการขึ้นรูปซิลเวอร์เคลย์แบบแผ่นของส่วนผสมก้อนที่ 3



รูป 4.41 แสดงการขึ้นรูปซิลเวอร์เคลย์แบบเส้นของส่วนผสมก้อนที่ 3



รูป 4.42 แสดงการขึ้นรูปซิลเวอร์เคลย์แบบเส้นของส่วนผสมก้อนที่ 3

4.7 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานซิลเวอร์เคลย์ภายหลังการเผาผนึก โดยทำซ้ำ 2 ครั้ง
ผลแสดงดังนี้ คือ

4.7.1 ลักษณะทางกายภาพ

ชิ้นงานซิลเวอร์เคลย์เมื่อผ่านกระบวนการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 400°C, 500°C, 600°C, 700°C และ 800°C จะศึกษาชิ้นงานแต่ละชิ้นตามรหัสชิ้นงานต่างๆ ตามลักษณะทางกายภาพในแต่ละอุณหภูมิการเผา ทำให้ทราบลักษณะภายนอกเมื่อมองด้วยตาเปล่า รหัสชิ้นงานแสดงตามตาราง 4.5

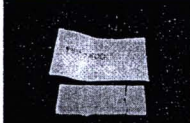
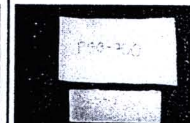
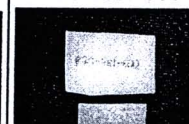
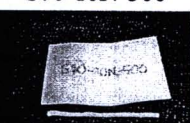
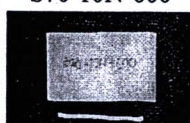
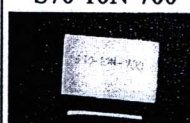
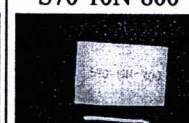
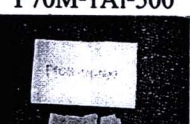
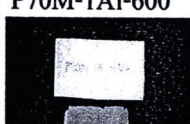
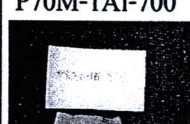
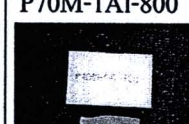
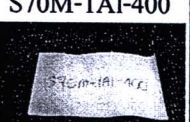
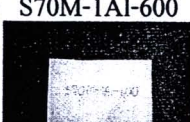
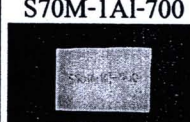
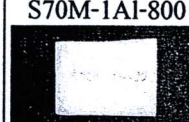
ตาราง 4.5 แสดงรหัสชิ้นงานของแต่ละอุณหภูมิการเผา

ก้อนที่		อุณหภูมิการเผาผนึก (°C)				
		400°C	500°C	600°C	700°C	800°C
1	แบบแผ่น	P90-400	P90-500	P90-600	P90-700	P90-800
	แบบเส้น	S90-400	S90-500	S90-600	S90-700	S90-800
2	แบบแผ่น	P70-10N-400	P70-10N-500	P70-10N-600	P70-10N-700	P70-10N-800
	แบบเส้น	S70-10N-400	S70-10N-500	S70-10N-600	S70-10N-700	S70-10N-800
3	แบบแผ่น	P70M-1AI-400	P70M-1AI-500	P70M-1AI-600	P70M-1AI-700	P70M-1AI-800
	แบบเส้น	S70M-1AI-400	S70M-1AI-500	S70M-1AI-600	S70M-1AI-700	S70M-1AI-800

4.7.1.1 ผลการเผาพูนีกครั้งที่ 1

ก้อนที่ 1 ถูกขึ้นรูปเป็น 2 รูปร่าง คือแบบแผ่นเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีความกว้าง 1.5 เซนติเมตร ความยาว 4 เซนติเมตร และแบบเส้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เซนติเมตร ความยาว 4 เซนติเมตร โดยเผาที่อุณหภูมิ 400°C, 500°C, 600°C, 700°C และ 800°C ภายหลังจากการเผาพูนีก ต้องบันทึกขนาดชิ้นงานอีกครั้งเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาคุณสมบัติทางกายภาพต่อไป โดยผลการเผาครั้งที่ 1 แสดงตามผลที่ปรากฏดังตาราง 4.6

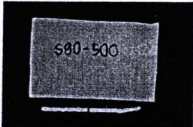
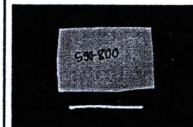
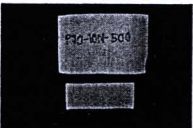
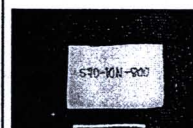
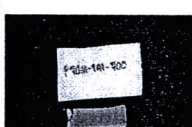
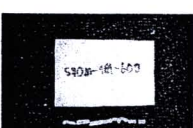
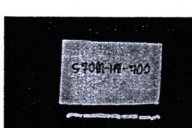
ตาราง 4.6 แสดงรหัสชิ้นงานของการเผาครั้งที่ 1 ในแต่ละอุณหภูมิการเผา

ก้อนที่		อุณหภูมิการเผาพูนีก (°C)				
		400°C	500°C	600°C	700°C	800°C
1	แผ่น	P90-400 	P90-500 	P90-600 	P90-700 	P90-800 
	เส้น	S90-400 	S90-500 	S90-600 	S90-700 	S90-800 
2	แผ่น	P70-10N-400 	P70-10N-500 	P70-10N-600 	P70-10N-700 	P70-10N-800 
	เส้น	S70-10N-400 	S70-10N-500 	S70-10N-600 	S70-10N-700 	S70-10N-800 
3	แผ่น	P70M-1AI-400 	P70M-1AI-500 	P70M-1AI-600 	P70M-1AI-700 	P70M-1AI-800 
	เส้น	S70M-1AI-400 	S70M-1AI-500 	S70M-1AI-600 	S70M-1AI-700 	S70M-1AI-800 

4.7.1.2 ผลการเผาพนักครั้งที่ 2

ก้อนที่ 1 ถูกขึ้นรูปเป็น 2 รูปร่าง คือแบบแผ่นเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีความกว้าง 1.5 เซนติเมตร ความยาว 4 เซนติเมตร และแบบเส้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เซนติเมตร ความยาว 4 เซนติเมตร โดยทำซ้ำรอบ 2 เพื่อความแน่ใจว่าผลที่ได้ครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 มีผลที่เหมือนกันหรือไม่ โดยเผาที่อุณหภูมิ 400°C, 500°C, 600°C, 700°C และ 800°C เหมือนกัน ภายหลังจากการเผาพนักต้องบันทึกขนาดชิ้นงานอีกครั้งเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาคุณสมบัติทางกายภาพต่อไป โดยผลการเผาครั้งที่ 2 แสดงตามผลที่ปรากฏดังตาราง 4.7

ตาราง 4.7 แสดงรหัสชิ้นงานของการเผาครั้งที่ 2 ในแต่ละอุณหภูมิการเผา

ก้อนที่		อุณหภูมิการเผาพนัก (°C)				
		400°C	500°C	600°C	700°C	800°C
1	แผ่น	P90-400 	P90-500 	P90-600 	P90-700 	P90-800 
	เส้น	S90-400 	S90-500 	S90-600 	S90-700 	S90-800 
2	แผ่น	P70-10N-400 	P70-10N-500 	P70-10N-600 	P70-10N-700 	P70-10N-800 
	เส้น	S70-10N-400 	S70-10N-500 	S70-10N-600 	S70-10N-700 	S70-10N-800 
3	แผ่น	P70M-1AI-400 	P70M-1AI-500 	P70M-1AI-600 	P70M-1AI-700 	P70M-1AI-800 
	เส้น	S70M-1AI-400 	S70M-1AI-500 	S70M-1AI-600 	S70M-1AI-700 	S70M-1AI-800 

ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานซิลเวอร์เคลย์ภายหลังการเผาผนึกที่อุณหภูมิต่างๆ คือที่ อุณหภูมิ 400°C, 500°C, 600°C, 700°C และ 800°C โดยการทดสอบซ้ำ 2 ครั้งพบว่าชิ้นงานมีสีจาก เข้มจนถึงสีอ่อนลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเรื่อยๆ แต่ก่อนที่ 3 ซึ่งผสมผงอลูมิเนียมภายหลังการเผาผนึก แล้วชิ้นงานซิลเวอร์เคลย์ที่ได้จะมีสีเข้มจากก่อนที่ 1 และก่อนที่ 2 จะสังเกตได้ว่าเมื่อเผาที่อุณหภูมิ เผาผนึก 400°C และ 500°C ชิ้นงานเปราะ เมื่อใช้มือบีบจับแรงๆ สามารถหักได้โดยง่าย เมื่อเผาที่ อุณหภูมิสูงขึ้นถึงอุณหภูมิ 600°C ผลที่ได้ปรากฏว่าจากการใช้แรงหักด้วยมือทำให้ชิ้นงานงอ ส่วน การเผาที่อุณหภูมิ 700°C และ 800°C ชิ้นงานที่ได้ภายหลังมีความแข็งแรงมาก สามารถบิดโค้งได้ โดยไม่เกิดการแตกหัก

เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนในการผสมทั้ง 3 ก่อน พบว่าก่อนที่ 1 หดตัวใกล้เคียงกับก่อนที่ 2 ซึ่งในช่วงอุณหภูมิ 400°C, 500°C และ 600°C พบว่าก่อนที่ 1 มีการหดตัวน้อยกว่าก่อนที่ 2 แต่เมื่อ เผาผนึกที่อุณหภูมิสูงขึ้นถึง 700°C และ 800°C ผลที่ได้ปรากฏว่าก่อนที่ 2 มีการหดตัวน้อยกว่าก่อน ที่ 1 แสดงว่าผงเงินในขนาดไมโครเมตรมีผลทำให้เกิดช่องว่างระหว่างชิ้นงานมากกว่า กล่าวคือ ชิ้นงานที่ผสมผงเงินไมโครเมตรเกิดการหดตัวมากกว่าเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงคือที่อุณหภูมิ 700°C, 800°C ก่อนที่ 3 มีการผสมผงอลูมิเนียมทำให้ชิ้นงานที่ได้มีการหดตัวสูงเมื่อเปรียบเทียบกับ 3 ก่อน

ส่วนรูพรุนเมื่อเปรียบเทียบในแต่ละอุณหภูมิการเผา ผลที่ได้ปรากฏว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นรู พรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานซิลเวอร์เคลย์จะลดน้อยลง จากอุณหภูมิ 400°C ก่อนการเผาผนึกอนุภาคของ ผงเงินจะเกาะกันด้วยตัวประสานซึ่งคือผงคาร์บอนซีเมตลเซลลูโลส เมื่อผ่านกระบวนการเผาผนึก แล้วผงคาร์บอนซีเมตลเซลลูโลสถูกเผาออกไป ทำให้แต่ละอนุภาคของผงเงินการเชื่อมติดกัน ตามทฤษฎีการเผาผนึก และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาผนึกไปจนถึง 800°C มีผลทำให้อนุภาคของผง เงินเกิดการเชื่อมติดกันมากขึ้นและเกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคของผงเงินลดลงนั่นเอง

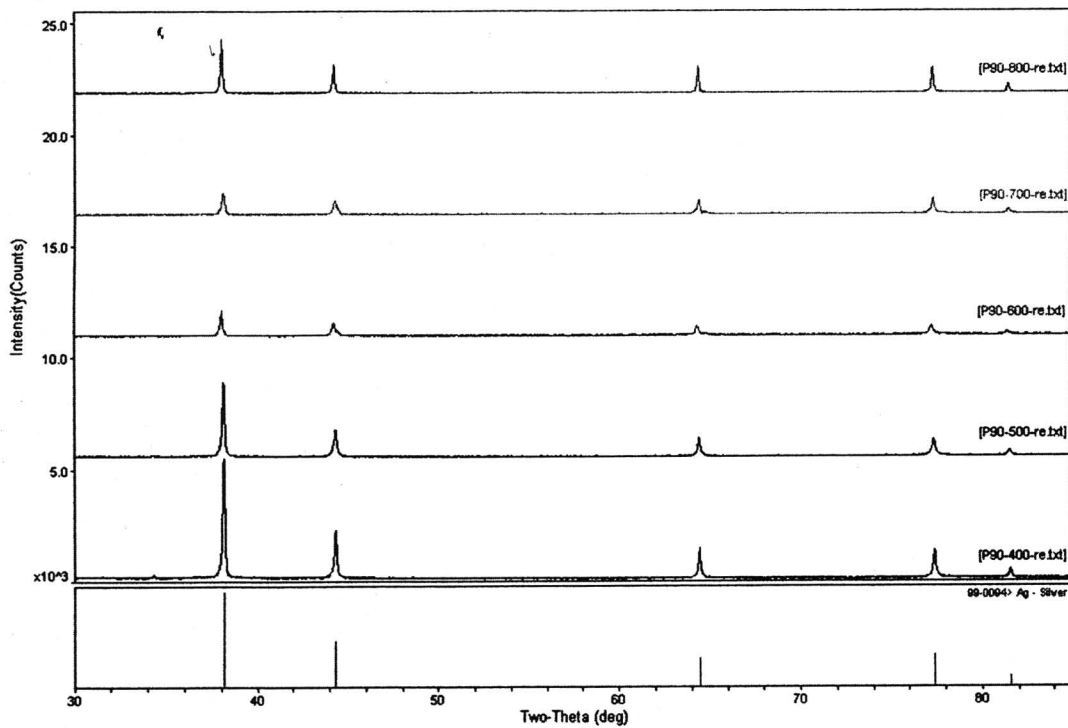
รูพรุนเมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนในการผสมทั้ง 3 ก่อน ในอัตราส่วนก่อนที่ 1 เป็นการผสม ผงเงินในขนาดไมโครเมตร ภายหลังจากการเผาผนึกรูพรุนที่ได้เกิดใกล้เคียงกับก่อนที่ 2 ซึ่งผสมผง เงินในขนาดนาโนเมตร ส่วนก่อนที่ 3 โดยผสมผงอลูมิเนียมเกิดรูพรุนมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทั้ง 3 ก่อน สาเหตุเนื่องมาจากถ้านำผงเงินและผงอลูมิเนียมผสมกันจะเกิดเป็นของผสมทำให้เนื้อของซิล เวอร์เคลย์ที่ได้ไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันมีผลทำให้เกิดรูพรุนมาก และสามารถสรุปผลในแต่ละ อุณหภูมิการเผาดังนี้ คือ

1. ที่อุณหภูมิ 400°C ชิ้นงานยังมีสีเทาเข้มทั้งยังแตกหักได้ง่าย แสดงถึงความไม่แข็งแรงของชิ้นงาน
2. ที่อุณหภูมิ 500°C ชิ้นงานยังมีสีเทาอ่อนลง แตกหักได้ง่าย แสดงถึงความไม่แข็งแรงของชิ้นงาน
3. ที่อุณหภูมิ 600°C ชิ้นงานยังมีสีเทาอ่อนลงกว่าที่อุณหภูมิ 500°C บิดงอได้ มีความแข็งแรง
4. ที่อุณหภูมิ 700°C ชิ้นงานยังมีสีเทาอ่อนลงกว่าที่อุณหภูมิ 600°C บิดงอได้ มีความแข็งแรงมากขึ้น
5. ที่อุณหภูมิ 800°C ชิ้นงานยังมีสีเทาอ่อนลงกว่าทุกชิ้นงาน บิดงอได้ มีความแข็งแรงมากที่สุด

4.7.2 ผลการตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (XRD)

1. ก้อนที่ 1

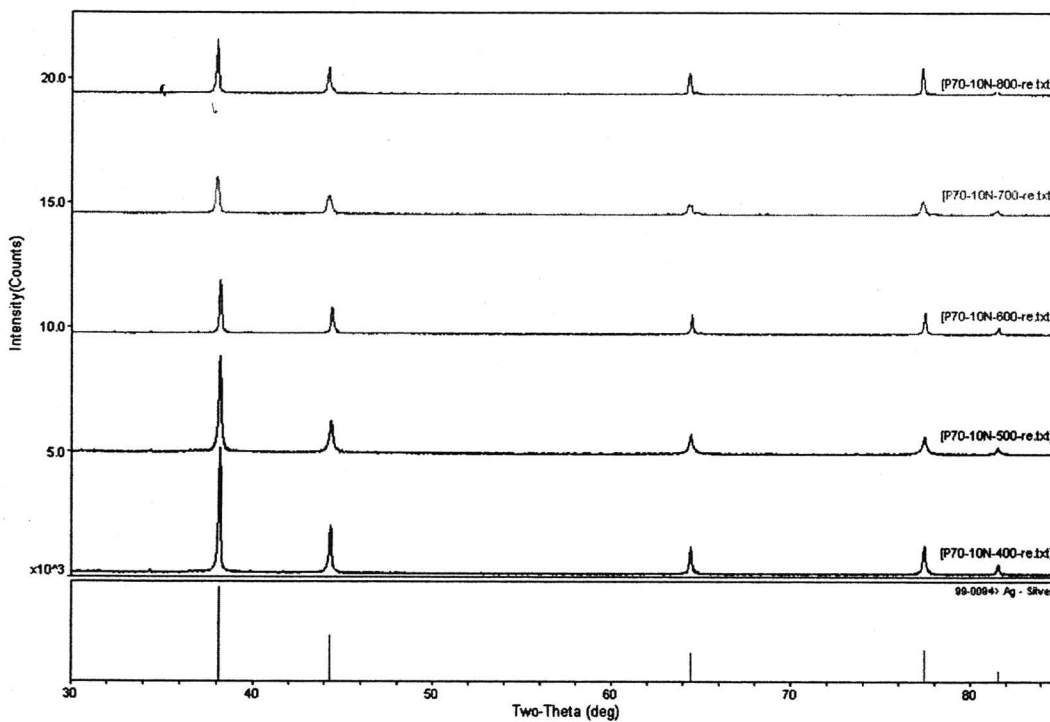
ผลจากการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 400°C, 500°C, 600°C, 700°C และ 800°C ของชิ้นงานซิลเวอร์เคลย์ภายหลังการเผา โดยการผสมแบบก้อนที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยผงเงินในขนาดไมครอน ผลที่ได้จากการตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (XRD) ผลที่ได้ปรากฏปรากฏว่าซิลเวอร์เคลย์ที่ผ่านการเผาผนึกมีความเป็นผลึกอยู่ กล่าวคือไม่มีความเป็นอสัณฐาน (amorphous) โดยผลการตรวจสอบแสดงในรูป 4.43



รูป 4.43 แสดงการตรวจสอบชิ้นงานซิลเวอร์เคลย์ด้วยเทคนิค XRD (ก้อนที่ 1)

2. ก้อนที่ 2

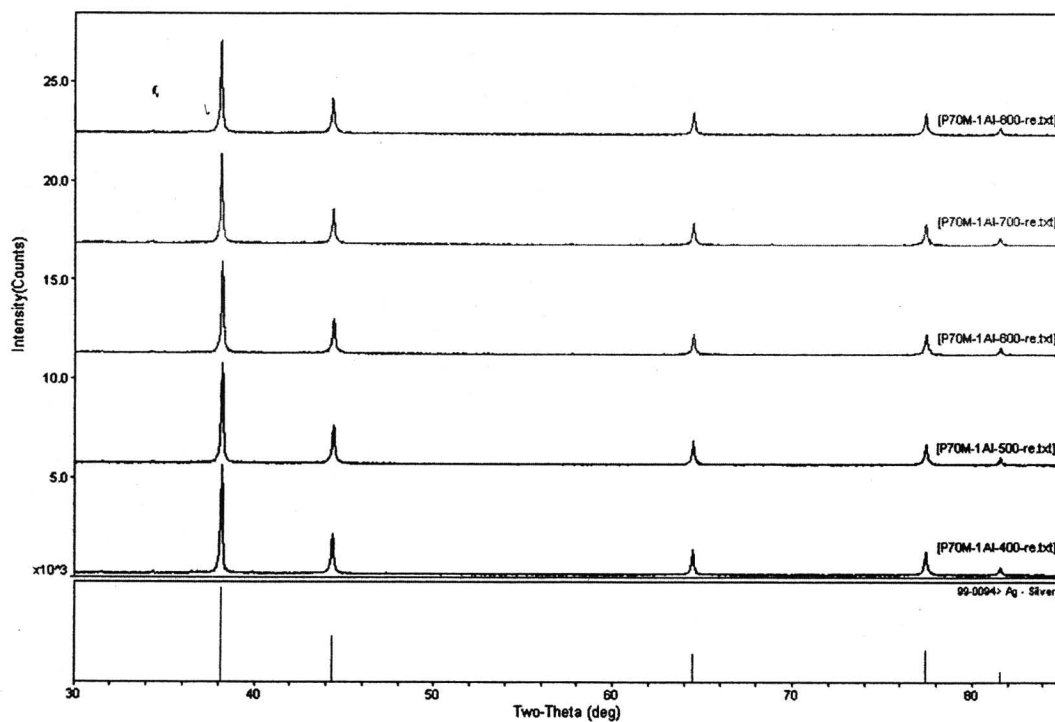
ผลจากการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 400°C, 500°C, 600°C, 700°C และ 800°C ของชิ้นงานซิลเวอร์เคลือบภายหลังการเผา โดยการผสมแบบก้อนที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยผงเงินในขนาดไมครอนและผงเงินในขนาดนาโนเมตร ผลที่ได้จากการตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (XRD) ผลที่ได้ปรากฏปรากฏว่าซิลเวอร์เคลือบที่ผ่านการเผาผนึกก็มีความเป็นผลึกอยู่ กล่าวคือ ไม่มีความเป็นอสัณฐาน (amorphous) โดยผลการตรวจสอบแสดงในรูป 4.44



รูป 4.44 แสดงการตรวจสอบชิ้นงานซิลเวอร์เคลือบด้วยเทคนิค XRD (ก้อนที่ 2)

3. ก้อนที่ 3

ผลจากการเผาผลึกที่อุณหภูมิ 400°C, 500°C, 600°C, 700°C และ 800°C ของชิ้นงานซิลเวอร์เคลย์ภายหลังการเผา โดยการผสมแบบก้อนที่ 3 ซึ่งประกอบด้วยผงเงินในขนาดไมครอน ผงเงินในขนาดนาโนเมตร และผงอลูมิเนียม ผลที่ได้จากการตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (XRD) ผลที่ได้ปรากฏปรากฏว่าซิลเวอร์เคลย์ที่ผ่านการเผาก็มีความเป็นผลึกอยู่ กล่าวคือไม่มีความเป็นอสัณฐาน (amorphous) โดยผลการตรวจสอบแสดงในรูป 4.45



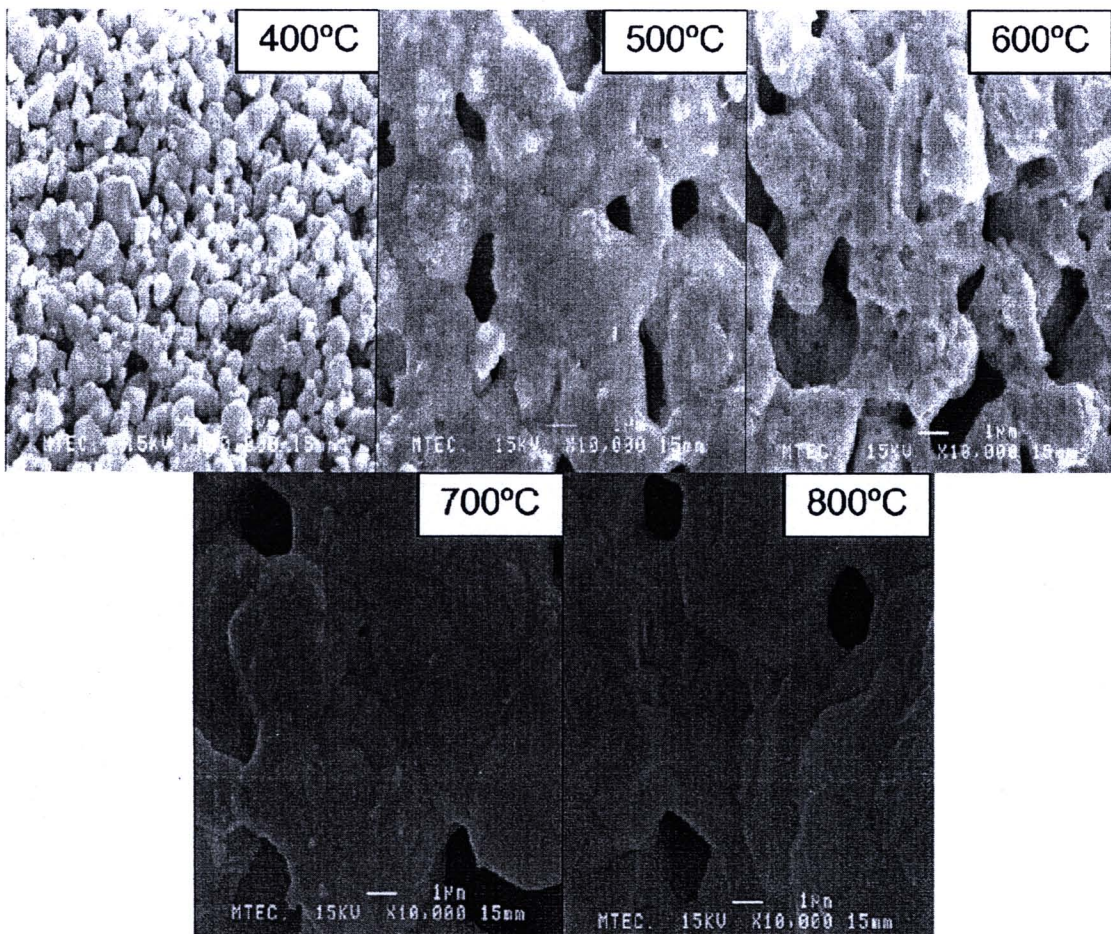
รูป 4.45 แสดงการตรวจสอบชิ้นงานซิลเวอร์เคลย์ด้วยเทคนิค XRD (ก้อนที่ 3)

4.7.3 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy)

การศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานซิลเวอร์เคลย์ภายหลังการเผาผนึกที่อุณหภูมิต่างๆ กัน โดยในแต่ละส่วนผสมซึ่งประกอบด้วยส่วนผสมที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ ก้อนที่ 1 ก้อนที่ 2 และก้อนที่ 3 โดยก้อนที่ 1 มีส่วนผสมของผงเงินในขนาดไมโครเมตร ก้อนที่ 2 มีส่วนผสมของผงเงินในขนาดไมโครเมตรและนาโนเมตร ส่วนก้อนที่ 3 มีส่วนผสมของผงเงินในขนาดไมโครเมตรและนาโนเมตร ทั้งยังผสมผงอลูมิเนียมเข้าไปด้วย การที่มีส่วนผสมที่แตกต่างกันมีผลทำให้ชิ้นงานที่ได้มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป กล่าวคือ เมื่อใช้ปริมาณของผงต่างๆ ในปริมาณที่ไม่เท่ากันมีผลต่อการเกาะกันของอนุภาคและเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดอนุภาคของผงเงินที่ผสมในก้อนที่ 1 ซึ่งเป็นผงเงินที่ผลิตขึ้นเองจากกรรมวิธีทางเคมีโดยมีขนาดในระดับไมโครเมตร ย่อมมีความแตกต่างกับผงเงินที่ผสมในก้อนที่ 2 ซึ่งผสมด้วยผงเงินในขนาดไมโครเมตรและนาโนเมตร ส่วนก้อนที่ 3 ที่ผสมผงอลูมิเนียมมีความเปราะมาก ดังนั้นผลการตรวจสอบจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดทำให้ทราบโครงสร้างจุลภาคของการเกาะตัวกันของผงเงิน โดยผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิต่างๆ กันมีผลทำให้การเกาะตัวของอนุภาคผงมีความแตกต่างกันไปด้วย ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานซิลเวอร์เคลย์ต่อไป โดยผลการเผาผนึกแสดงในรูป 4.46, 4.47, 4.48

1. ก้อนที่ 1

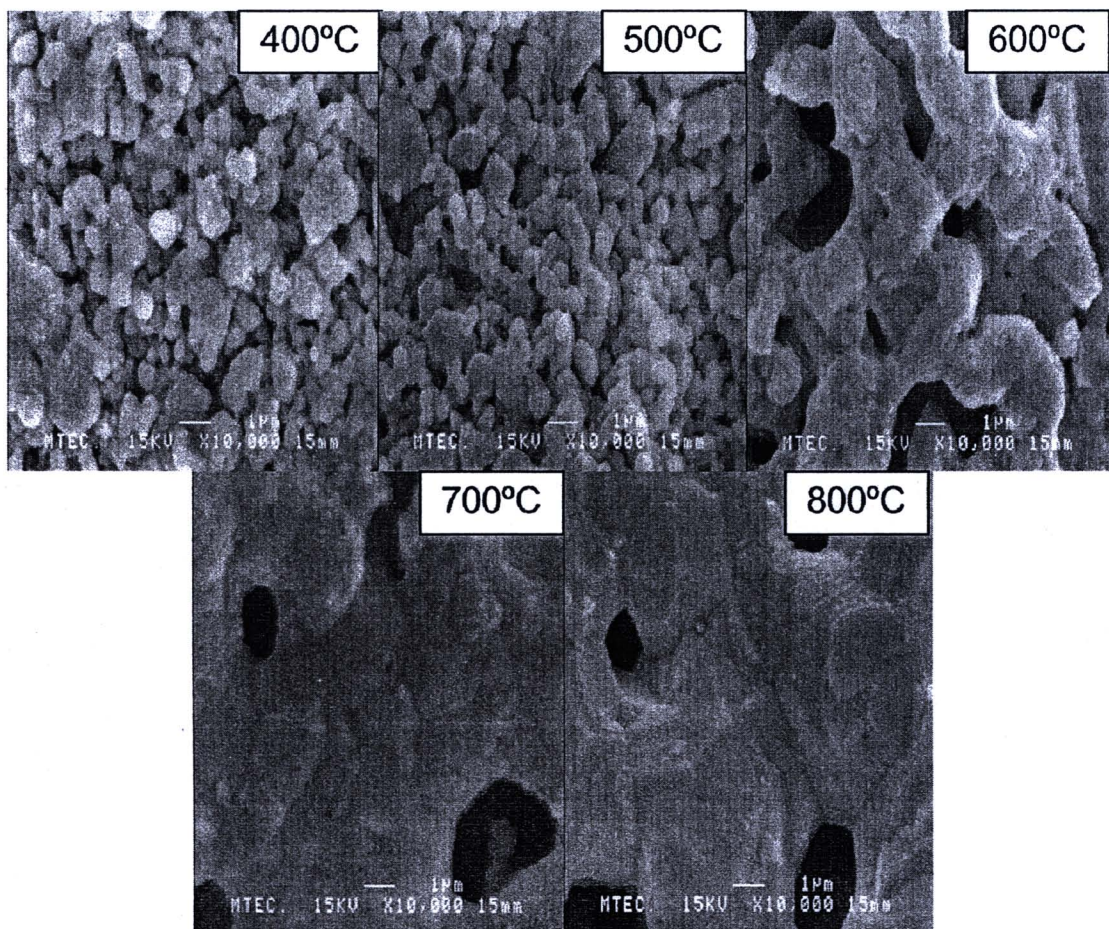
ผลจากการเผาผนึกที่อุณหภูมิต่างๆ กัน คือที่อุณหภูมิ 400°C, 500°C, 600°C, 700°C และ 800°C มีผลทำให้อนุภาคของผงในขนาดไมโครเมตรของส่วนผสมก้อนที่ 1 มีการเชื่อมติดที่แตกต่างกันดังนี้ คือ ที่อุณหภูมิ 400°C อนุภาคของผงเงินมีการเกาะตัวกันเป็นกลุ่ม และยังเกิดรูพรุนระหว่างอนุภาคของผงเงินแต่ละอนุภาคอยู่มาก เป็นสาเหตุทำให้ชิ้นงานที่ได้ภายหลังจากการเผาที่อุณหภูมินี้เกิดการแตกหักได้ง่ายเนื่องมาจากการรูพรุนมาก ที่อุณหภูมิ 500°C และ 600°C จะสังเกตเห็นว่าอนุภาคของผงเงินในแต่ละอนุภาคเริ่มเชื่อมติดกัน มีผลทำให้เกิดความแข็งแรงมากขึ้นเมื่อเผาด้วยอุณหภูมิดังกล่าว ที่อุณหภูมิ 700°C ผงเงินในแต่ละอนุภาคเกิดการเชื่อมติดกันเห็นเป็นขอบเกรนชัดเจน และรูพรุนเกิดขึ้นน้อยลง ส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมินี้มีความแข็งแรงกว่าการเผาที่อุณหภูมิ 400°C, 500°C และ 600°C ที่อุณหภูมิ 800°C รูพรุนมีน้อยลง ส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมาก สามารถหักงอได้ และอนุภาคของผงเงินมีการเชื่อมติดกันเป็นชั้นๆ



รูป 4.46 แสดงการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก้อนที่ 1)

2. ก่อนที่ 2

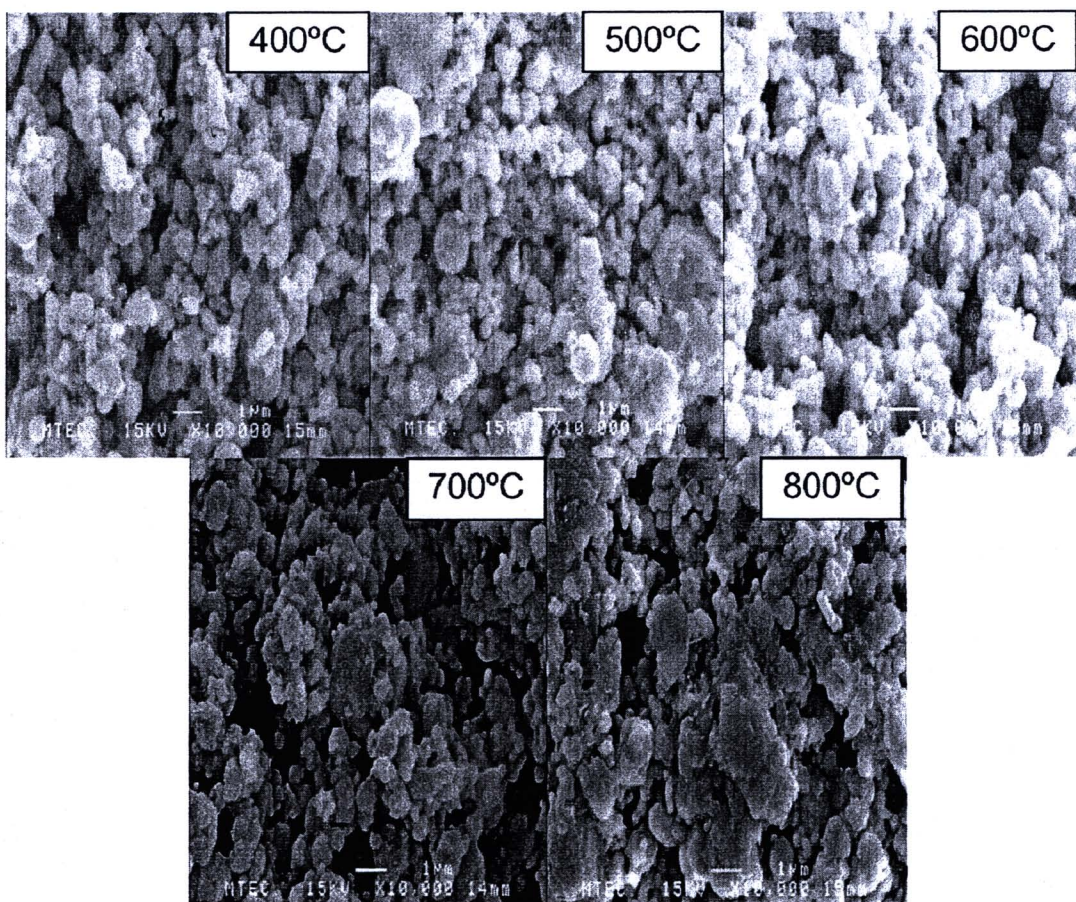
ผลจากการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ กัน คือที่อุณหภูมิ 400°C, 500°C, 600°C, 700°C และ 800°C มีผลทำให้อนุภาคของผงเงินในขนาดไมโครเมตรและนาโนเมตรของส่วนผสมก่อนที่ 2 มีการเชื่อมติดที่แตกต่างกันดังนี้ คือ ที่อุณหภูมิ 400°C อนุภาคของผงเงินไมโครเมตรมีการเกาะตัวกันเป็นกลุ่ม และยังเกิดรูพรุนระหว่างอนุภาคของผงเงินไมโครเมตรและนาโนเมตรแต่ละอนุภาคน้อยกว่าก่อนที่ 1 เป็นสาเหตุทำให้ชิ้นงานที่ได้ภายหลังจากการเผาที่อุณหภูมินี้เกิดการแตกหักได้ยากกว่าชิ้นงานที่เผาที่อุณหภูมิเดียวกันของส่วนผสมก่อนที่ 1 ที่อุณหภูมิ 500°C และ 600°C จะสังเกตเห็นว่าอนุภาคของผงเงินในแต่ละอนุภาคในขนาดไมโครเมตรและนาโนเมตรเริ่มเชื่อมติดกัน มีผลทำให้เกิดความแข็งแรงมากขึ้นเมื่อเผาด้วยอุณหภูมิดังกล่าว ที่อุณหภูมิ 700°C เห็นเป็นขอบเกรนชัดเจนติดกัน และรูพรุนเกิดน้อยลง ส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมินี้มีความแข็งแรงกว่าการเผาที่อุณหภูมิ 400°C, 500°C และ 600°C ที่อุณหภูมิ 800°C รูพรุนมีน้อยลงมาก ส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมาก มีการเชื่อมติดกันเป็นชั้นๆ



รูป 4.47 แสดงการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก่อนที่ 2)

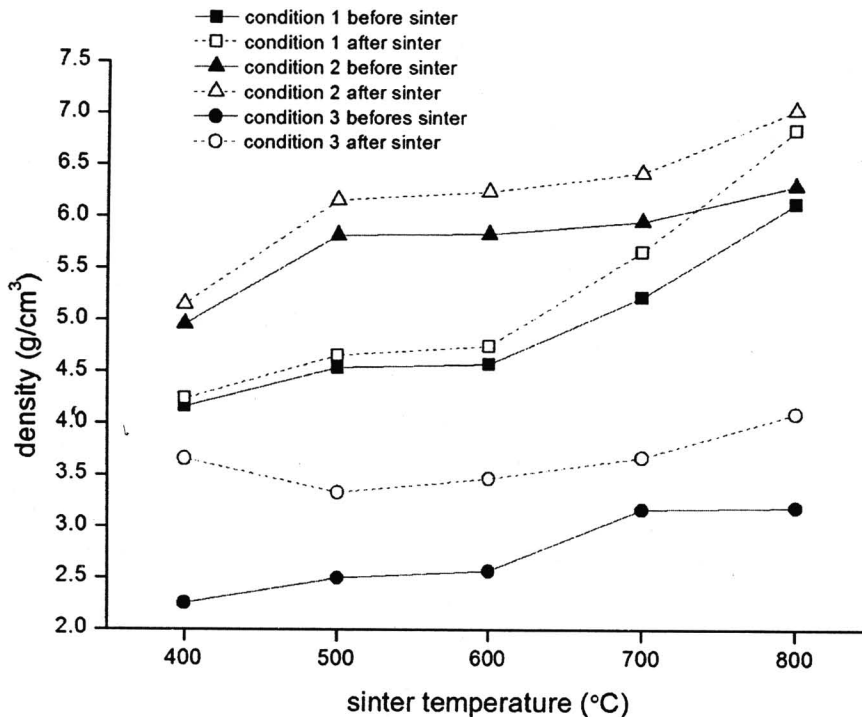
3. ก้อนที่ 3

ผลจากการเผาผนึกที่อุณหภูมิต่างๆ กัน คือที่อุณหภูมิ 400°C, 500°C, 600°C, 700°C และ 800°C มีผลทำให้อนุภาคของผงเงินในขนาดไมโครเมตรและนาโนเมตรและผงอลูมิเนียมของส่วนผสมก้อนที่ 3 การที่ผสมผงเงินและผงอลูมิเนียมเข้าด้วยกันมีผลทำให้เกิดเป็นของผสม และผลจากการเผาผนึกในทุกอุณหภูมิการเผาไม่มีผลทำให้อนุภาคของผงชนิดต่างๆ เกิดการเชื่อมติดกัน มีผลทำให้ผงเงินที่ได้มีรูปทรงอยู่มาก และชิ้นงานเปราะและแตกง่าย



รูป 4.48 แสดงการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก้อนที่ 3)

4.7.4 ความหนาแน่นแบบมวลรวม



รูป 4.49 แสดงค่าความหนาแน่นแบบมวลรวม

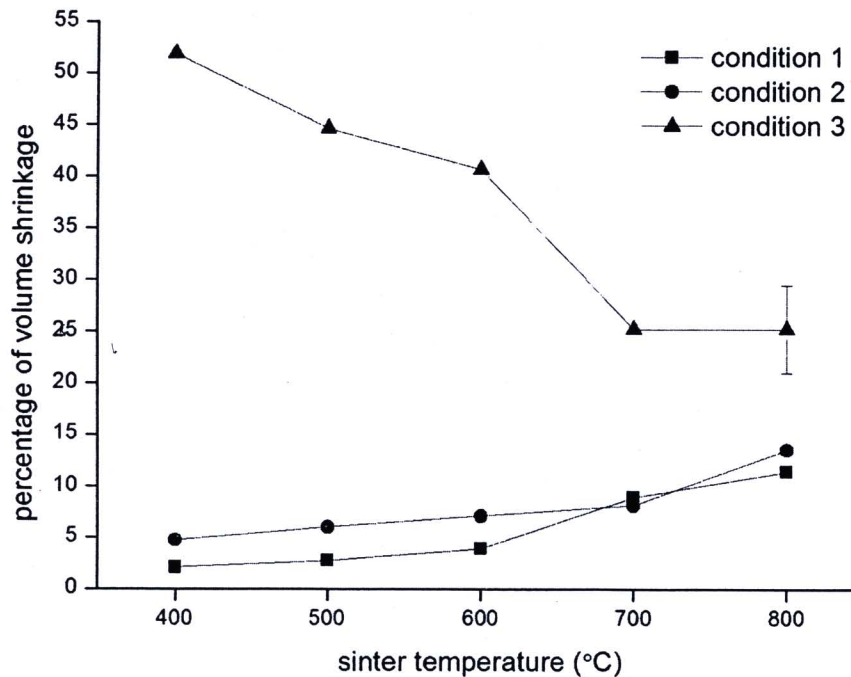
ผลที่ได้ปรากฏว่าเมื่อเปรียบเทียบส่วนผสมทั้ง 3 ก้อน พบว่าในทั้ง 3 อัตราส่วน โดยเป็นการเปรียบเทียบก่อนเผาและหลังเผานี้ก็ ภายหลังจากการเผานี้ความหนาแน่นจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดทั้ง 3 ส่วนผสม กล่าวคือ ก้อนที่ 1, ก้อนที่ 2 และก้อนที่ 3 มีความหนาแน่นมากขึ้นเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นจนกระทั่งถึงที่อุณหภูมิ 800°C

เมื่อเปรียบเทียบในแต่ละส่วนผสม ผลที่ได้ปรากฏว่าในส่วนผสมที่ 2 (ก้อนที่ 2) มีค่าความหนาแน่นที่สูงที่สุด และรองลงมาคือที่ส่วนผสมที่ 1 (ก้อนที่ 1) และในส่วนผสมที่ 3 (ก้อนที่ 3) มีค่าความหนาแน่นน้อยสุด อาจเนื่องมาจากผลจากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดปรากฏว่ามีรูพรุนอยู่มาก



4.7.5 ค่าการหดตัวหลังเผา

4.7.5.1 เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตร



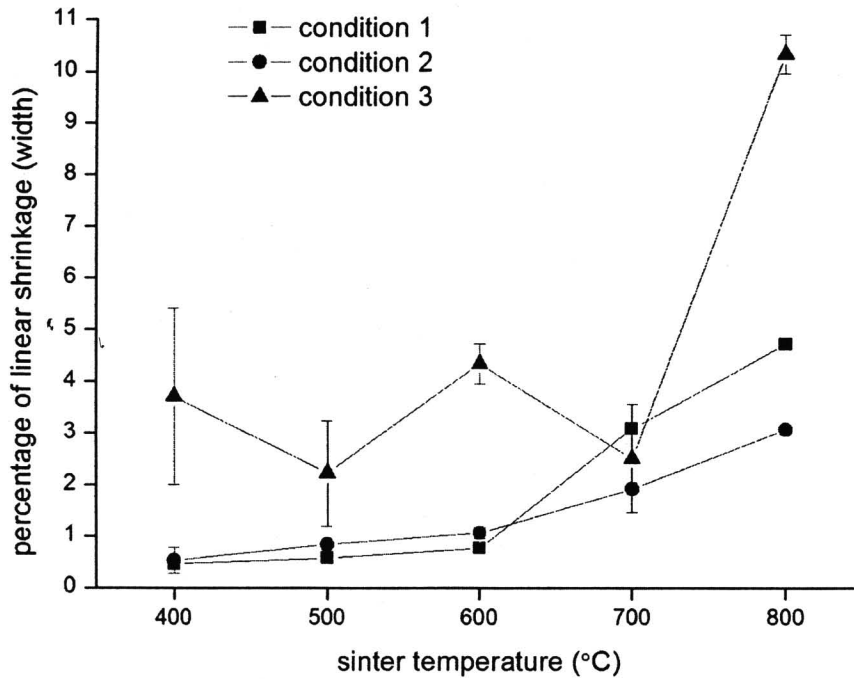
รูป 4.50 แสดงเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตร

ผลที่ได้ปรากฏว่าเมื่อเปรียบเทียบส่วนผสมทั้ง 3 ก้อน พบว่าในทั้ง 3 อัตราส่วน ภายหลังการเผาเพอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรของส่วนผสมก้อนที่ 1 และก้อนที่ 2 จะมีแนวโน้มที่มากขึ้นเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงยิ่งขึ้นจากอุณหภูมิ 400°C ไปจนถึงเผาที่อุณหภูมิสูงที่ 800°C ส่วนแนวโน้มในก้อนที่ 3 มีผลซึ่งแตกต่างจากทั้ง 2 ก้อน ผลที่ได้ปรากฏว่าเมื่อผ่านการเผานี้ที่อุณหภูมิสูงขึ้นเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรยิ่งมากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบในแต่ละส่วนผสม ผลที่ได้ปรากฏว่าในส่วนผสมที่ 1 (ก้อนที่ 1) มีค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรต่ำที่สุด และรองลงมาคือที่ส่วนผสมที่ 2 (ก้อนที่ 2) และในส่วนผสมที่ 3 (ก้อนที่ 3) มีค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรมากที่สุด

4.7.5.2 เปอร์เซ็นต์หดตัวเชิงเส้น

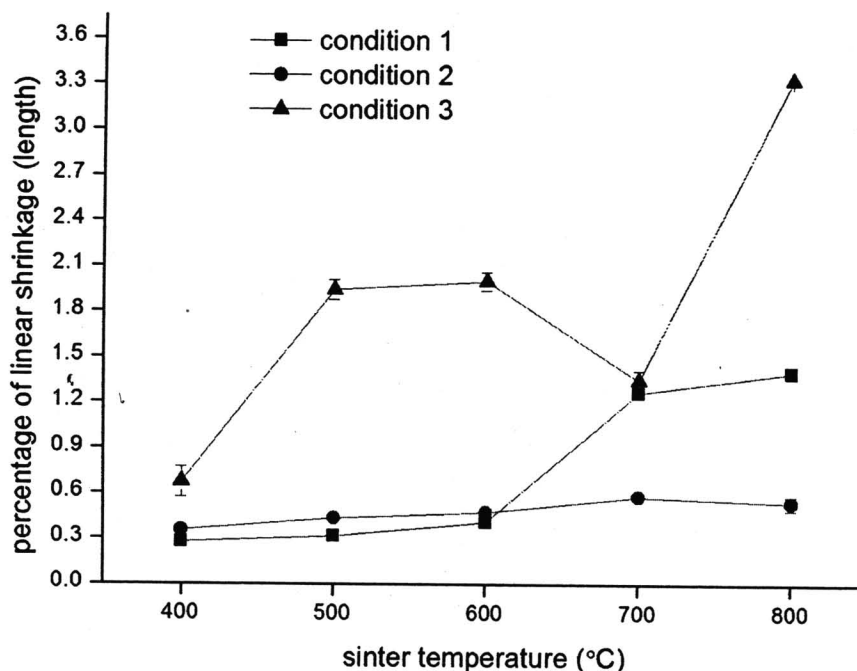
● ความกว้าง



รูป 4.51 แสดงเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้นในด้านความกว้าง

ผลที่ได้ปรากฏว่าเมื่อเปรียบเทียบส่วนผสมทั้ง 3 ก้อน พบว่าที่อุณหภูมิ 400°C, 500°C และ 600°C มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้นในด้านความกว้างของก้อนที่ 1 และก้อนที่ 2 มีค่าใกล้เคียงกัน โดยก้อนที่ 1 มีค่าน้อยกว่าเล็กน้อย แต่เมื่ออุณหภูมิการเผาขึ้นมีค่ามากขึ้นที่อุณหภูมิ 700°C และ 800°C ผลที่ได้แสดงว่าก้อนที่ 1 มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้นในด้านความกว้างมากกว่าก้อนที่ 2 ส่วนในก้อนที่ 3 มีค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้นในด้านความกว้างไม่คงที่ และที่อุณหภูมิ 800°C มีค่าที่สูงมาก แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานซิลเวอร์เคลย์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมินี้เกิดการหดตัวมากนั่นเอง เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ถูกศึกษาลักษณะทางกายภาพมาก่อน ชิ้นงานที่ส่วนผสมที่ 3 เกิดการงอตัวคล้ายคลื่น

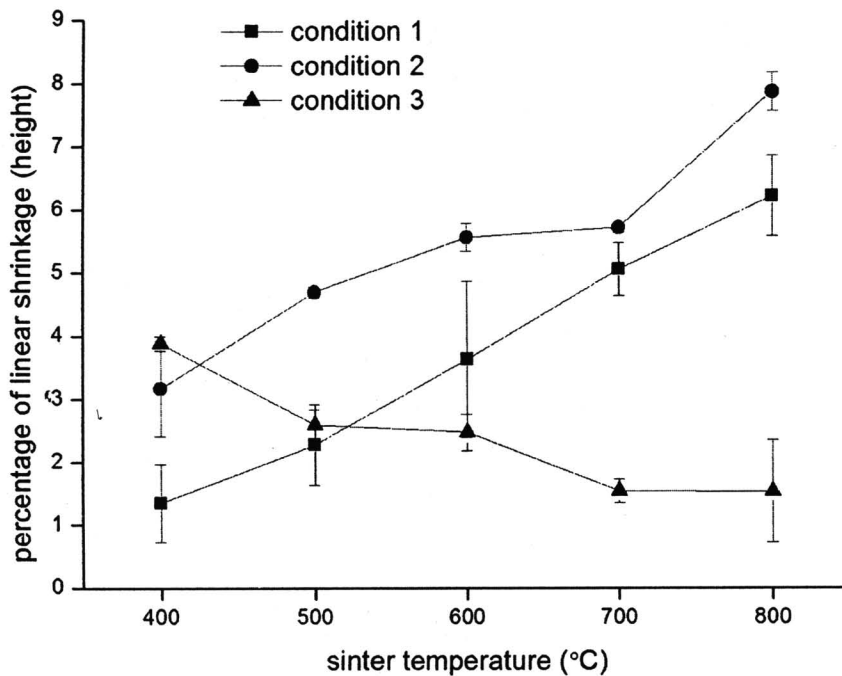
● ความยาว



รูป 4.52 แสดงเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้นในด้านความยาว

ผลที่ได้ปรากฏว่าเมื่อเปรียบเทียบส่วนผสมทั้ง 3 ก้อน พบว่าที่อุณหภูมิ 400°C, 500°C และ 600°C มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้นในด้านความยาวของก้อนที่ 1 และก้อนที่ 2 มีค่าใกล้เคียงกัน โดยก้อนที่ 1 มีค่าน้อยกว่าเล็กน้อย แต่เมื่ออุณหภูมิการเผาขึ้นที่อุณหภูมิ 700°C และ 800°C ผลที่ได้แสดงว่าก้อนที่ 1 มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้นในด้านความยาวมากกว่าก้อนที่ 2 ส่วนในก้อนที่ 3 มีค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้นในด้านความยาวไม่คงที่ และที่อุณหภูมิ 800°C มีค่าที่สูงมาก แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานซิลเวอร์เคลย์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมินี้เกิดการหดตัวมากนั่นเอง เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ถูกศึกษาลักษณะทางกายภาพมาก่อน ชิ้นงานที่ส่วนผสมที่ 3 เกิดการหดตัวกลายคลื่น

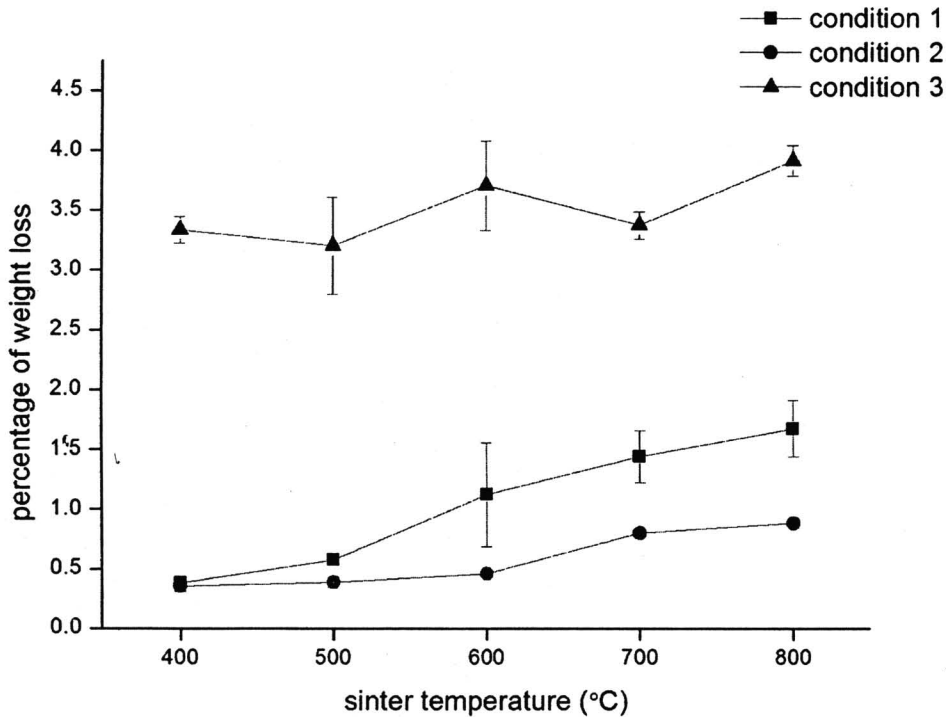
● ความหนา



รูป 4.53 แสดงเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้นในด้านความหนา

ผลที่ได้ปรากฏว่าเมื่อเปรียบเทียบส่วนผสมทั้ง 3 ก้อน พบว่าส่วนผสมก้อนที่ 1 และก้อนที่ 2 มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้นด้านความหนาสูงขึ้น เมื่อเผาผนึกที่อุณหภูมิสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างก้อนที่ 1 และก้อนที่ 2 พบว่าก้อนที่ 1 มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้นด้านความหนาน้อยกว่า ก้อนที่ 2 อาจเนื่องมาจากว่าก้อนที่ 1 มีผงเงินในขนาดไมโครเมตรเป็นส่วนประกอบซึ่งมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าผงเงินในขนาดนาโนเมตร ทำให้มีการหดตัวน้อยกว่า ในส่วนก้อนที่ 2 ซึ่งมีผงเงินในขนาดนาโนเมตรเป็นส่วนประกอบทำให้เกิดการหดตัวที่มากขึ้นเมื่อผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิสูงขึ้น แต่ในก้อนที่ 3 ผลที่ได้กลับตรงกันข้าม ชิ้นงานเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นกลับมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้นในด้านความหนาน้อยลง

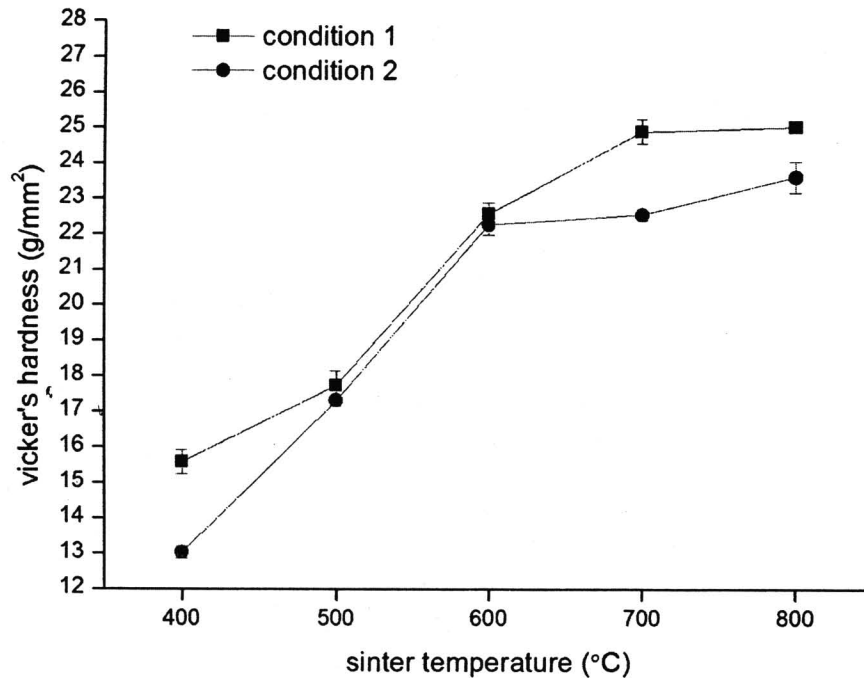
4.7.6 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนัก



รูป 4.54 แสดงเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนัก

ผลที่ได้ปรากฏว่าเมื่อเปรียบเทียบส่วนผสมทั้ง 3 ก้อน พบว่าในทั้ง 3 อัตราส่วน โดยก้อนที่ 1 และก้อนที่ 2 มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักที่ใกล้เคียงกันมาก ในก้อนที่ 1 ผลที่ได้ปรากฏว่าเมื่อขึ้นงานผ่านการเผาฟลักที่อุณหภูมิสูงขึ้นมีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักมากขึ้น เช่นเดียวกับก้อนที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบก้อนที่ 1 และก้อนที่ 2 พบว่า อัตราส่วนการผสมซิลเวอร์เคลย์ก้อนที่ 2 มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักที่น้อยกว่า ส่วนในก้อนที่ 3 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักไม่คงที่เมื่อผ่านการเผาฟลักที่อุณหภูมิต่างๆ กัน

4.8 ผลความแข็ง

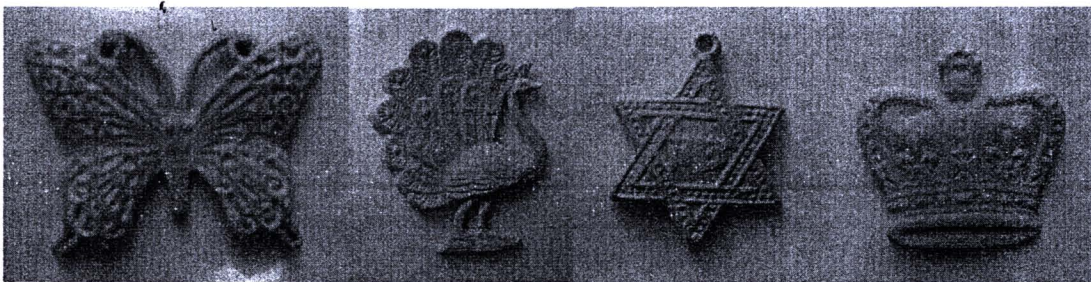


รูป 4.55 แสดงผลความแข็งด้วย Vicker's hardness

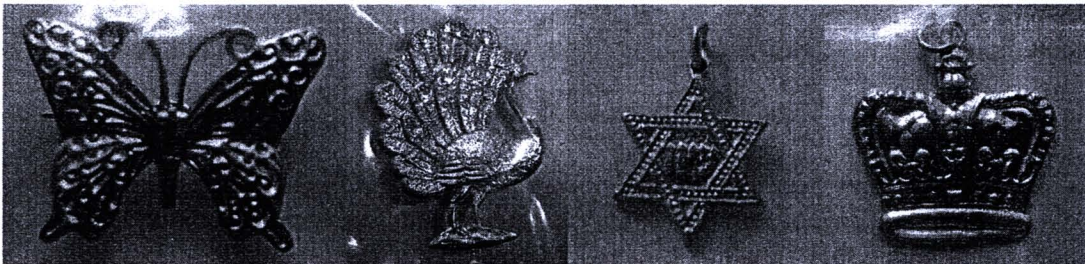
ผลที่ได้จากกราฟปรากฏว่าชิ้นงานที่นำมาตรวจสอบความแข็งคือชิ้นงานซิลเวอร์เคลย์ก้อนที่ 1 และก้อนที่ 2 เนื่องจากชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกของชิ้นงานก้อนที่ 3 ซึ่งผสมผงอลูมิเนียมมีความเปราะมาก และแตกหักได้ง่าย ผลที่ได้จากการตรวจสอบความแข็งพบว่าเมื่ออุณหภูมิการเผาผนึกเพิ่มสูงขึ้น ค่าความแข็งก็จะมากขึ้นตามไปด้วย โดยเมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานซิลเวอร์เคลย์ก้อนที่ 1 และก้อนที่ 2 พบว่า ค่าความแข็งของก้อนที่ 1 มีค่ามากกว่าก้อนที่ 2 และค่าความแข็งที่สูงสุดคือชิ้นงานซิลเวอร์เคลย์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800°C

4.9 ผลการขึ้นรูปเครื่องประดับซิลเวอร์เคลย์

จากส่วนผสมที่ 1 ที่ผสมผงเงินในขนาดไมครอนในอัตราส่วน 90wt% และผลการเผาพูนิกที่อุณหภูมิที่ดี คือ ที่อุณหภูมิ 800°C จึงนำมาผสมในอัตราส่วนดังกล่าวแล้วนำมาขึ้นรูปโดยการอัดขึ้นรูปจากแบบได้เป็น 4 รูปร่าง คือ ผีเสื้อ นกยูง ดาว และมงกุฏ ภายหลังจากทิ้งให้เย็นตัวลงภายใต้สภาวะอากาศปกติเป็นเวลา 2 คืน จึงนำไปเผาพูนิกที่อุณหภูมิ 800°C ชิ้นงานที่ได้ภายหลังจากการเผาพูนิกแสดงดังรูป 4.56 เมื่อนำชิ้นงานที่ได้ไปขัดตกแต่งจะได้ชิ้นงานซิลเวอร์เคลย์ซึ่งผลิตได้จากผงเงินที่สามารถผลิตขึ้นได้เองจากกรรมวิธีทางเคมี ชิ้นงานเครื่องประดับที่แสดงเป็นสีของโลหะเงินและมีความแวววาว เมื่อนำมาเชื่อมสามารถเชื่อมได้ตามปกติแสดงดังรูป 4.57



รูป 4.56 แสดงซิลเวอร์เคลย์ที่ทิ้งไว้ให้แห้งภายใต้สภาวะอากาศปกติ



รูป 4.57 แสดงซิลเวอร์เคลย์ผ่านการเผาพูนิกอุณหภูมิ 800°C ผ่านการขัดตกแต่งและการเชื่อม