เงินที่ได้ไม่งอ ผิดรูป แล้วนำเข้าเตาเผา อุณหภูมิที่ใช้เผา คือ 600-900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-4 ชั่วโมง และรักษาอุณหภูมิในการเผาให้คงที่เป็นเวลา 30-120 นาที (แล้วแต่ชนิดของชิ้นงานและเทคนิคที่เลือกใช้) รอจนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตาเผาใกล้เคียงอุณหภูมิห้องจึงเปิดเตานำเครื่องประดับออกมา ตัวประสานอินทรีย์ วัสดุธรรมชาติ ดินน้ำมัน และแวกซ์ ที่นำมาเป็นตัวช่วยในการขึ้นรูปเครื่องประดับทั้งหมดจะสลายตัวไปเหลือเพียงชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นโลหะเงิน และมีลวดลายตามแบบที่ได้ลอกลายไว้ หรือมีรูปร่างตามที่ได้ประดิษฐ์ขึ้น ชิ้นงานหลังเผาจะมีผิวสีขาวเนื่องจากออกไซด์ของเงิน สามารถทำการขัดแต่งชิ้นงานได้ง่ายด้วยตะไบ หรือแปรงทองเหลือง เพื่อให้ได้ชิ้นงานเงินที่มีผิวมัน วาว สวยงาม ชิ้นงานสำเร็จสามารถนำมาขัดตกแต่ง เจาะรู ประกอบ เป็นเครื่องประดับประเภทต่างๆ ได้ เช่น สร้อย แหวน กำไลข้อมือ จี้ ต่างหู เป็นต้น

4. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

จากการทดลองเมื่อทำการเผาชิ้นงานทั้งหมดแล้วนำชิ้นงานไปตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพต่างๆ โดยการศึกษาอิทธิพลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ในช่วง 200-900 องศาเซลเซียส ศึกษาอิทธิพลการเปลี่ยนแปลงอัตราเร่ง ตั้งแต่ 10-30 องศาเซลเซียสต่อนาที และอิทธิพลการเปลี่ยนแปลงเวลาการยืนไฟ โดยเปลี่ยนแปลงเวลาการยืนไฟจาก ไม่ยืน-60 นาที นำไปศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความแข็ง ความหนาแน่น เปอร์เซ็นต์การหดตัว และขนาดอนุภาค ได้ผลดังต่อไปนี้

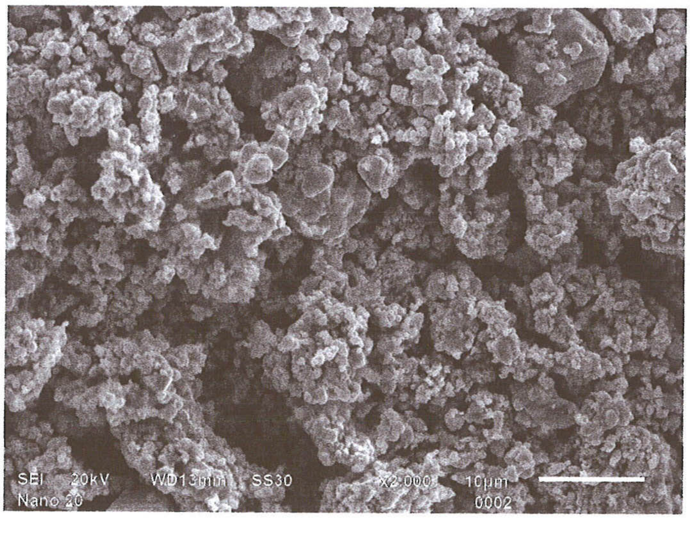
4.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการเผานาโนซิลเวอร์เคลย์

4.1.1 การศึกษาลักษณะและขนาดอนุภาคเงินด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ซิลเวอร์เคลย์ที่ผลิตขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถปั้นขึ้นรูปได้ดี เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ได้ผลดังรูปที่ 8 การศึกษาขั้นแรกจะศึกษาขนาดอนุภาคของนาโนซิลเวอร์เคลย์ที่ยังไม่เผาด้วย SEM และโปรแกรม Image J เพื่อศึกษาขนาดอนุภาคที่ใช้ทำนาโนซิลเวอร์เคลย์อยู่ในช่วงขนาดกี่นาโนเมตร ด้วยการนำภาพ SEM ของตัวอย่างมาวัดขนาดอนุภาคด้วยโปรแกรม Image J โดยวัดจากเส้นผ่าศูนย์กลางหรือด้านกว้างยาวของอนุภาค ซึ่งภาพ SEM 1 ภาพจะทำการวัดทั้งหมด 20 จุด โดยเลือกขนาดอนุภาคตั้งแต่เล็กสุดจนถึงใหญ่สุด เพื่อหาช่องกว้างของขนาดอนุภาคที่นำมาทำเป็นนาโนซิลเวอร์เคลย์ของตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการเผา แสดงในรูปที่ 9 พบว่าขนาดอนุภาคซิลเวอร์เคลย์ที่สังเคราะห์ได้อยู่ในช่วง 0.12-2.20 ไมครอน หรือ120-220 นาโนเมตร (จากตารางที่ 2) ซึ่งเรียกได้ว่าขนาดอนุภาคของซิลเวอร์เคลย์ยังอยู่ในระดับนาโนเมตร

ตารางที่ 2 ขนาดอนุภาคและขนาดของรูพรุนวัดด้วยโปรแกรม Image J จากภาพ SEM ของตัวอย่างนาโนซิลเวอร์เคลย์ที่เผาโดยศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

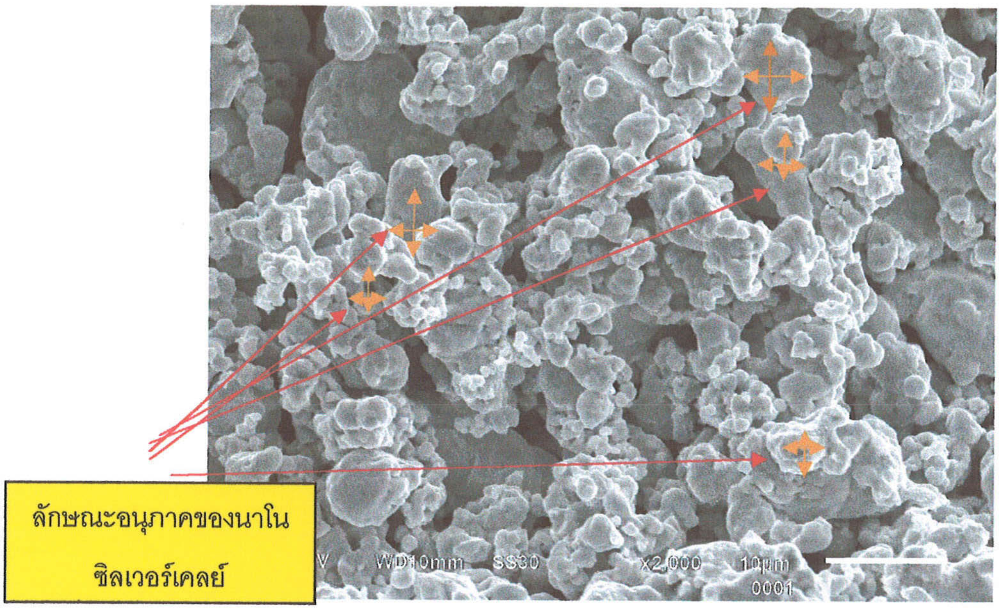
อุณหภูมิ (°C)	อัตราเร่ง (°C นาที)	เวลายืนไฟ (นาที)	ขนาดอนุภาค วัดด้วยโปรแกรม Image J (ไมครอน)	ขนาดรูพรุน วัดด้วยโปรแกรม Image J (ไมครอน)
ไม่เผา	-	-	0.12-2.27	-
200	20	60	0.24-3.92	0.72-8.15
300	20	60	0.36-3.03	0.56-4.69
400	20	60	1.91-7.13	0.96-8.82
500	20	60	2.13-7.48	0.33-4.76
600	20	60	-	0.65-13.44
650	20	60	-	0.20-12.49
700	20	60	-	0.41-17.68
800	20	60	-	0.26-15.24
900	20	60	-	0.67-11.35



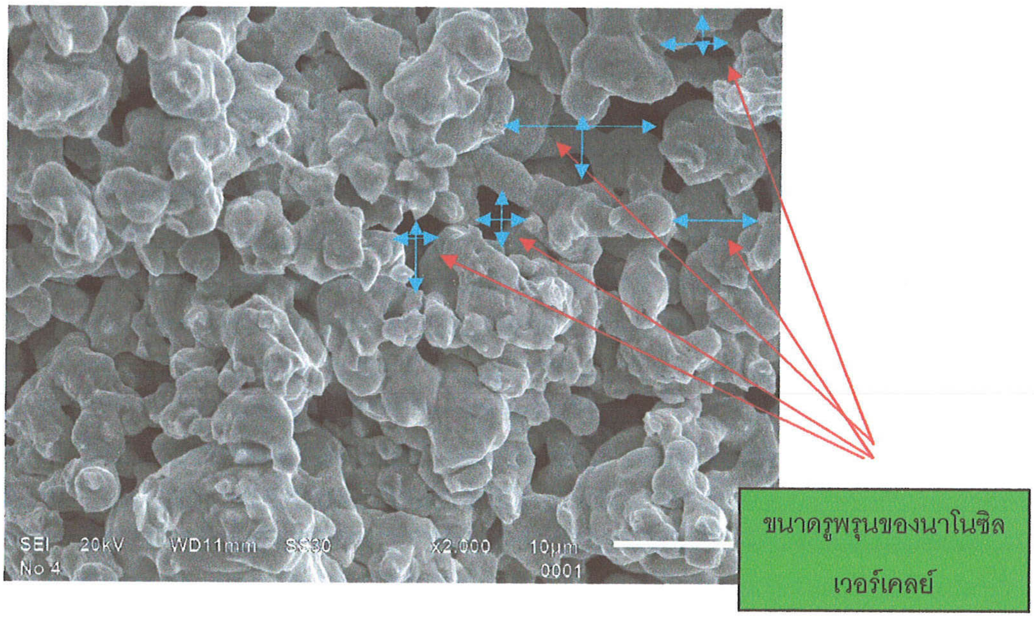
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย

รูปที่ 8 ภาพ SEM ของตัวอย่างนาโนซิลเวอร์เคลย์ที่ไม่ได้ผ่านการเผา

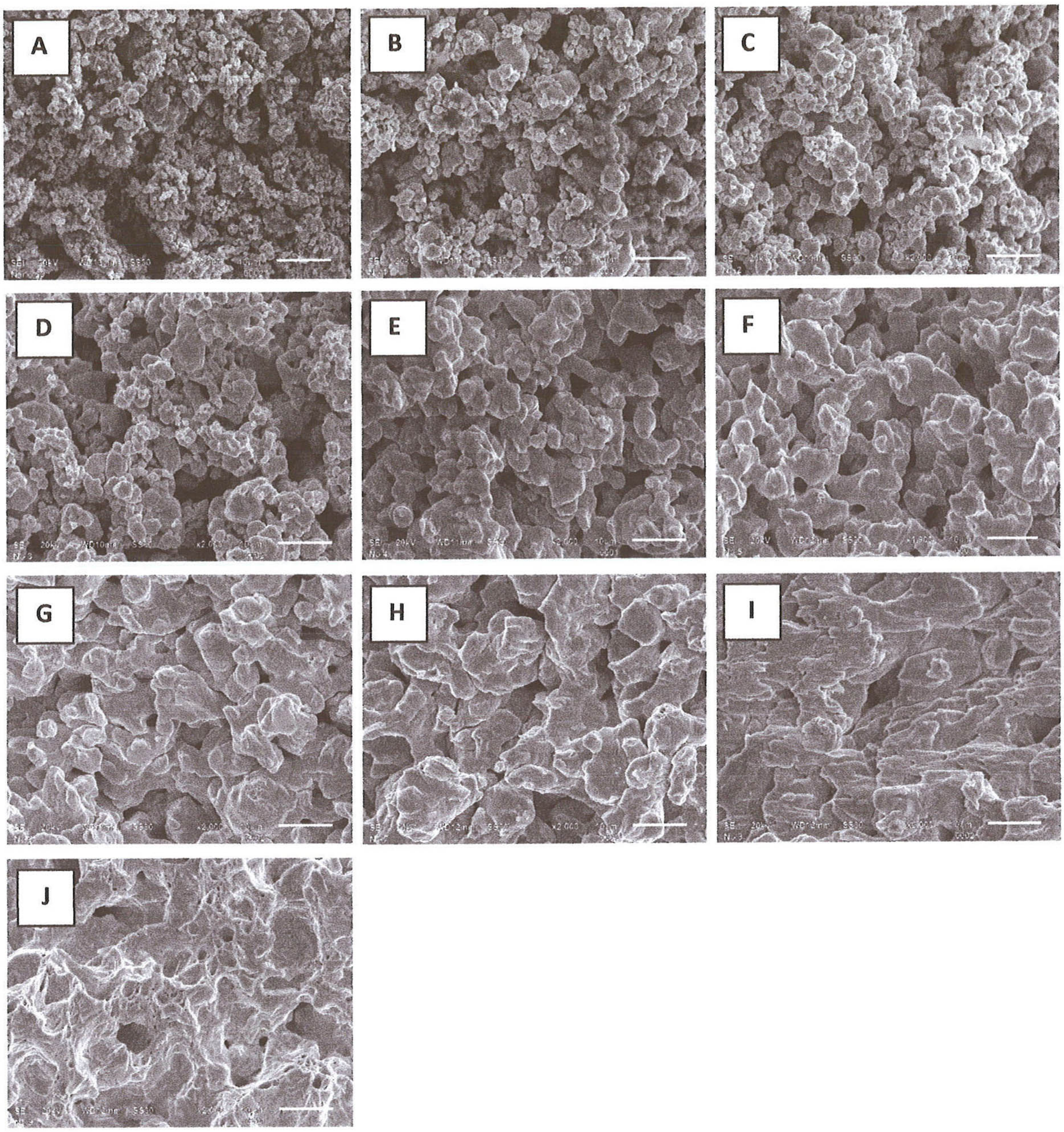
การเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคหลังการเผาที่อุณหภูมิตั้งแต่ 600-900 องศาเซลเซียส พบว่าอนุภาคบางส่วนของนาโนซิลเวอร์เคลย์เริ่มมีการรวมตัวกันใหญ่ขึ้นจนไม่มีลักษณะรูปทรงอนุภาค ทำให้ไม่สามารถวัดอนุภาคได้ จึงทำการศึกษาลักษณะขนาดรูพรุนที่เกิดขึ้นจากการเผาผนึกตัว วิธีการวัดขนาดอนุภาคและขนาดความกว้างของรูพรุนวัดด้วยโปรแกรม Image J แสดงตัวอย่างการวัดดังรูป 9 และ 10 ตามลำดับ



รูปที่ 9 ตัวอย่างการวัดลักษณะอนุภาคด้วยโปรแกรม Image J



รูปที่ 10 ตัวอย่างการวัดขนาดรูพรุนด้วยโปรแกรม Image J



รูปที่ 11 ภาพ SEM ของตัวอย่างนาโนซิลเวอร์เคลย์ที่เผาโดยการศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (A) ไม่เผา, (B) 200 °C, (C) 300 °C, (D) 400 °C, (E) 500 °C, (F) 600 °C, (G) 650 °C, (H) 700 °C, (I) 800 °C, (J) 900 °C

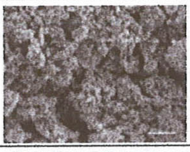
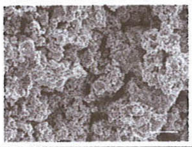
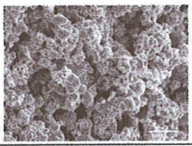
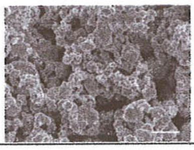
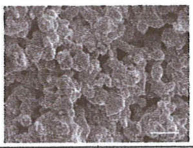
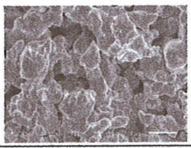
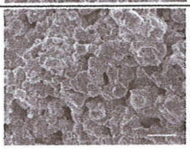
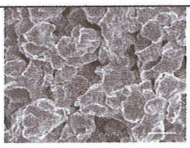
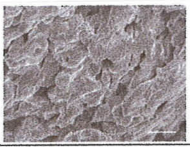
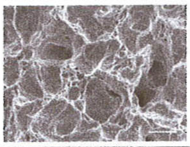
หลังจากนำตัวอย่างไปเผาที่อุณหภูมิตั้งแต่ 200-900 องศาเซลเซียส แล้วทำการศึกษาลักษณะอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ได้ผลดังรูปที่ 11 พบว่าตั้งแต่ตัวอย่างที่ไม่ได้เผาถึงตัวอย่างที่เผาอุณหภูมิ 200 องศาเซลซียส ยังพบลักษณะอนุภาคเป็นเม็ดเงินซึ่งจะยังไม่มีการผนึกกัน (sintering) สมบูรณ์แต่จะเริ่มมีการผนึกกันมากขึ้น ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสขึ้นไป อาจกล่าวได้ว่า อุณหภูมิเผาผนึก

ของซิลเวอร์เคลย์นี้อยู่ที่ประมาณ300 องศาเซลเซียส จากภาพ SEM เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นนาโนซิลเวอร์เคลย์จะมีการรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้น มีขนาดรูพรุนกว้างเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และเมื่ออุณหภูมิที่ 800 องศาเซลเซียส และผิวของชิ้นมีการเชื่อมประสานอย่างสม่ำเสมอ แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ 900 องศาเซลเซียส ชิ้นงานจะมีรูพรุนเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองขั้นต้นสรุปได้ว่า การเชื่อมกันของอนุภาคเริ่มสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นกว่านั้น โครงสร้างของอนุภาคและรูพรุนระหว่างอนุภาคจะเกิด collapse ทำให้ชิ้นงานเชื่อมตัวกันเป็นเงินมากขึ้นที่อุณหภูมิสูง

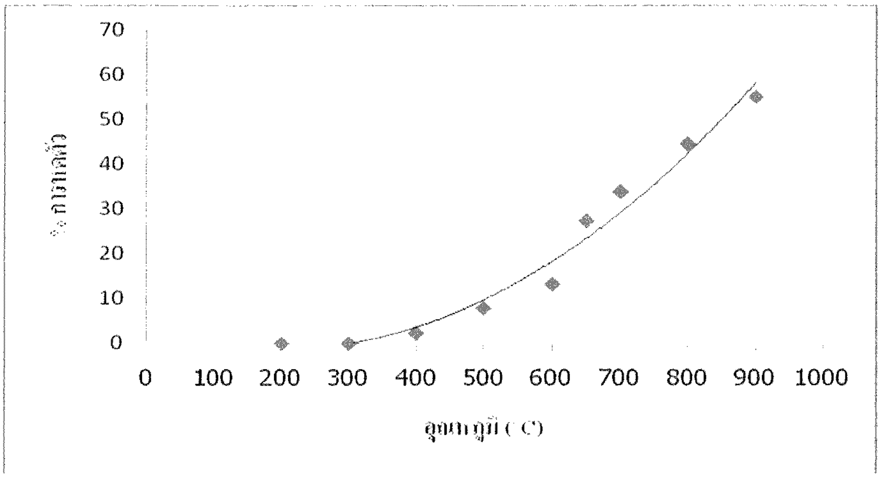
4.1.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของนาโนซิลเวอร์เคลย์ที่ผ่านการเผา

ผลที่ได้จากการเผานาโนซิลเวอร์เคลย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยให้อัตราเร่งคงที่ การยืนไฟคงที่โดยเผาที่อุณหภูมิช่วง 200-900 องศาเซลเซียส อัตราเร่ง 20 องศาเซลเซียส/นาที เวลาในการยืนไฟ 1 ชั่วโมง คงที่ทุกตัวอย่าง จากนั้นนำมาศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของตัวชิ้นงานที่ผ่านการเผา ได้แก่ เปอร์เซนต์การหดตัว ขนาดอนุภาค ความแข็ง ความหนาแน่น ผลจะแสดงในตารางที่ 3 จากตารางพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การหดตัว ความแข็ง และความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้น

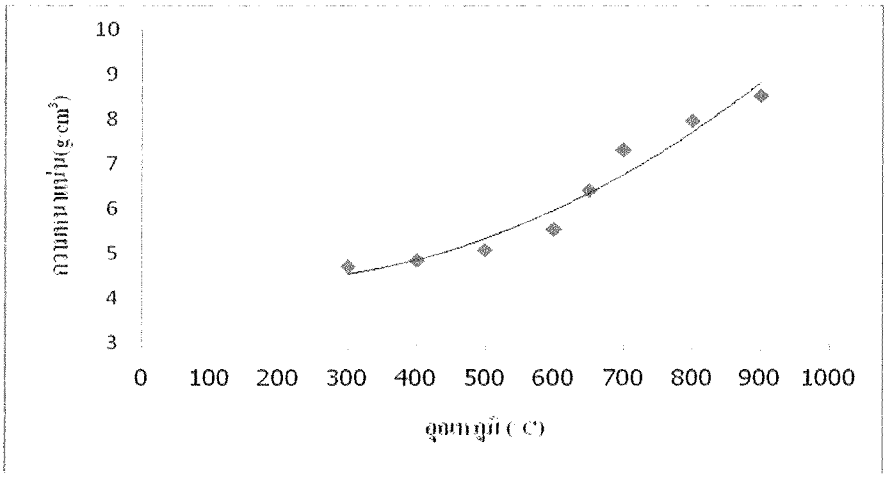
ตารางที่ 3 ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการเผานาโนซิลเวอร์เคลย์ (อัตราเร่งและเวลายืนไฟคงที่)

อุณหภูมิ (°C)	%การหดตัว	ความหนาแน่น (g/cm^3)	ความแข็ง (Kgf/mm^2)	ปริมาตรรูพรุนเปิด	ภาพ SEM
ไม่เผา	-	-	-	-	
200	0	5.313±0.73	-	0.035±0.12	
300	0	4.514±0.63	2.80±0.25	0.016±0.04	
400	2.16±0.44	4.880±0.24	3.24±0.14	0.020±0.09	
500	7.87±0.35	5.180±0.41	5.19±0.28	0.023±0.09	
600	13.16±1.40	5.496±0.34	12.94±0.53	0.025±0.08	
650	27.39±2.17	6.338±0.38	14.09±0.32	0.014±0.03	
700	33.82±1.39	6.857±0.95	16.37±0.94	0.013±0.03	
800	44.47±1.14	7.824±0.54	19.46±0.14	0.016±0.04	
900	55.11±2.03	8.701±0.57	18.97±0.37	0.011±0.06	

ผลการศึกษาเปอร์เซนต์การหดตัวและความหนาแน่นเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างกันดังตาราง 3 นำมาพลอตกราฟจะได้ดังรูป 12 และ 13 ตามลำดับ จากกราฟรูป 12 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเผาโดยใช้อุณหภูมิสูงขึ้นนาโนซิลเวอร์เคลย์มีแนวโน้มที่มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวสูงขึ้น เนื่องจากตัวประสานอินทรีย์ได้สลายไป และเมื่ออุณหภูมิมากขึ้น อนุภาคมีการรวมตัวกันอย่างหนาแน่น จึงมีการหดตัวมากขึ้นตามลำดับ ผลการศึกษาความหนาแน่นจากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อให้ความร้อนที่มากขึ้นอนุภาคผงเงินจะเกิดการผนึกตัวกัน (Sintering) เชื่อมกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้น อนุภาคเล็กๆระดับนาโนเมตรรวมตัวกันเป็นระดับไมครอน จึงทำให้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งยืนยันได้จากภาพ SEM (รูป 11) และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มการรวมตัวของอนุภาคเป็นเนื้อเดียวกัน ปริมาตรรูพรุนมีแนวโน้มลดลง (ดังรูป 14) จึงทำให้ความหนาแน่นมากขึ้น

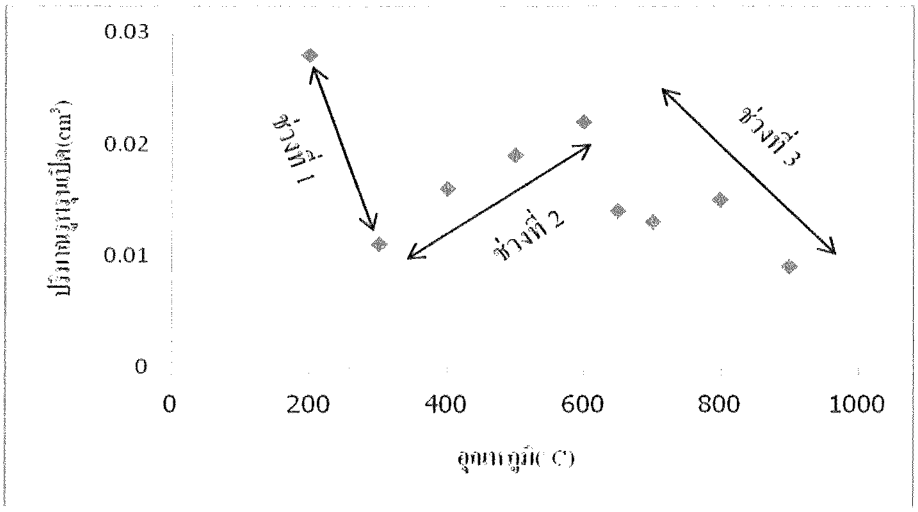


รูปที่ 12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การหดตัวของซิลเวอร์เคลย์ที่เผาที่อุณหภูมิต่างกัน



รูปที่ 13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของซิลเวอร์เคลย์ที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆกัน

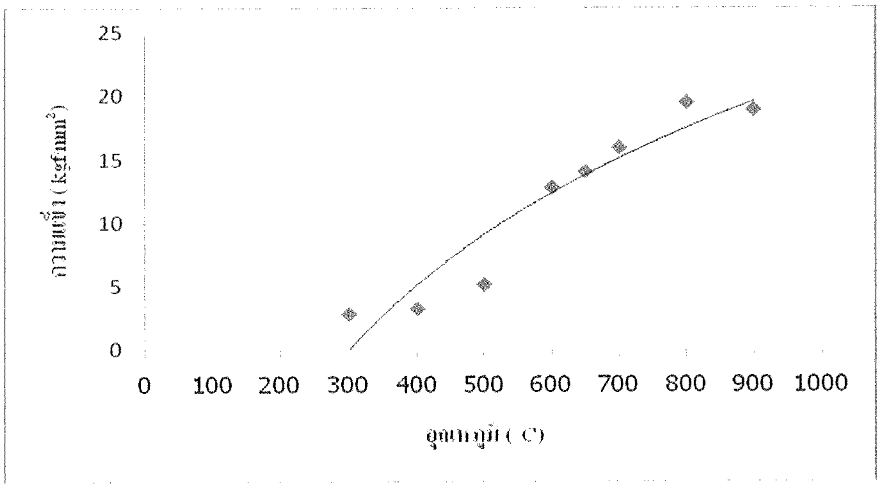
รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรรูพรุนเปิดของซิลเวอร์เคลย์ที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆกัน จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มของปริมาตรรูพรุนน้อยลง ซึ่งจะแปรผกผันกับความหนาแน่น ในช่วงที่ 1 เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 200 °C นาโนซิลเวอร์เคลย์มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กกระจายตัวกันอยู่ ปริมาตรรูพรุนจึงสูงมาก เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 300 °C เกิดการ sintering อนุภาคจะรวมกันมีขนาดใหญ่ระดับไมครอน ปริมาตรรูพรุนจะลดลงอย่างรวดเร็ว และในช่วงที่ 2 อุณหภูมิสูงขึ้น โครงสร้างเริ่มเชื่อมประสานในช่วงแรกจะยังไม่สมบูรณ์ ความพรุนตัวจะสูงขึ้น (ยืนยันจากภาพ SEM) เมื่อช่วงที่ 3 อุณหภูมิที่ 600 °C การเชื่อมกันจะสมบูรณ์และสม่ำเสมอ ปริมาตรรูพรุนจะเริ่มลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 600 °C เพราะมีการเชื่อมกันมากของอนุภาคเป็นเนื้อเดียวกันได้ดี ปริมาตรรูพรุนจึงต่ำลง ดังแสดงในภาพ SEM (รูปที่ 11) ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการเผาที่มีผลต่อความแข็งของชิ้นงานดังตารางที่ 3 เมื่อนำมาพลอตกราฟจะได้ดังรูปที่ 15 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคเงินจะเชื่อมประสานกันได้ดีและแน่นรวมเป็นเนื้อเดียว ความหนาแน่นสูง (จากภาพ SEM รูปที่ 11)



รูปที่ 14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรรูพรุนเปิดของซิลเวอร์เคลย์ที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆกัน

ผลจากการทดลองสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ใช้ในการเผานาโนซิลเวอร์เคลย์ คือ อุณหภูมิที่ 650 °C ขึ้นไป เนื่องจากมีค่าคุณสมบัติทางกายภาพที่วิเคราะห์เริ่มคงที่ หรือมีค่าใกล้เคียงกันกับการเผาที่อุณหภูมิ อุณหภูมิ 700°C, 800°C และ 900°C แต่การเผาที่อุณหภูมิ 650°C มีค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวต่ำกว่า ทำให้สามารถประหยัดพลังงานในการเผาได้ อย่างไรก็ตามหากต้องการได้ชิ้นงานที่มีความคงทน

แข็งแรงที่สุด ควรจะเผาที่อุณหภูมิสูง 900 °C แต่ชิ้นงานจะมีการหดตัวสูงเช่นกัน ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ทำเครื่องประดับ เทคนิคการขึ้นรูป และรูปแบบเครื่องประดับที่ประดิษฐ์ขึ้นด้วย

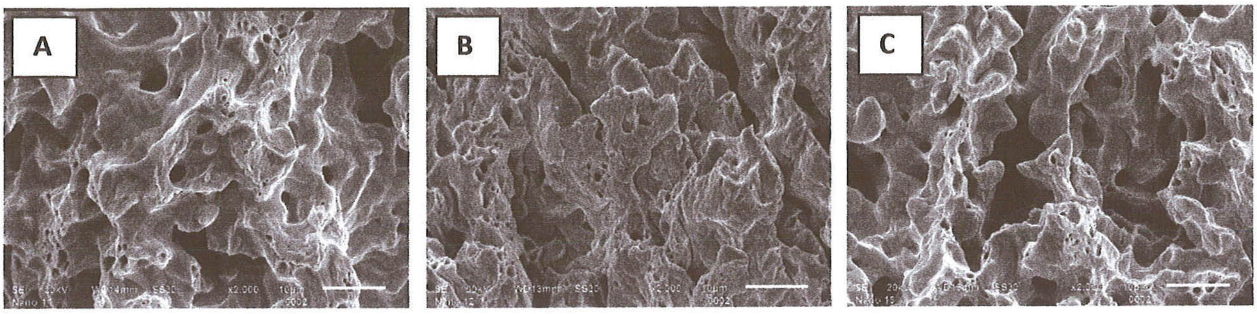


รูปที่ 15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของซิลเวอร์เคลย์ที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆกัน

4.2 ผลการศึกษาอิทธิพลอัตราเร่งที่ใช้ในการเผานาโนซิลเวอร์เคลย์

4.2.1 การศึกษาลักษณะและขนาดอนุภาคเงินด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากการทดสอบการศึกษาลักษณะอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของตัวอย่างที่เผาโดยการศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอัตราเร่ง แสดงในรูปที่ 16 จากรูป SEM พบว่าการใช้อัตราเร่งที่ 10 และ 30 องศาเซลเซียสต่อนาที มีขนาดรูพรุนและลักษณะการเชื่อมประสานของอนุภาคของผิวชิ้นงานใกล้เคียงกัน แต่มีขนาดรูพรุนที่กว้างเมื่อเทียบกับการใช้อัตราเร่งที่ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ซึ่งมีลักษณะเนื้อที่เชื่อมประสานตัวอย่างสม่ำเสมอ และรวมตัวกันได้อย่างดี อีกทั้งยังมีขนาดรูพรุนที่ต่ำ ซึ่งการศึกษาขนาดรูพรุนแสดงผลดังตารางที่ 4 ซึ่งภาพ SEM ในรูปที่ 16 และผลการวัดขนาดรูพรุนด้วยโปรแกรม Image J จะสอดคล้องกันคือ เมื่อใช้อัตราเร่งต่ำจะมีขนาดความกว้างรูพรุนไม่สม่ำเสมอ แต่มีปริมาณน้อย เมื่อเพิ่มอัตราเร่ง 20 °C/นาที ขนาดรูพรุนเล็กและสม่ำเสมอ แต่มีปริมาณมาก ในขณะที่อัตราเร่ง 30 °C/นาที ปริมาณรูพรุนกว้างมากขึ้นแต่ไม่สม่ำเสมอ



รูปที่ 16 ภาพ SEM ของตัวอย่างนาโนซิลเวอร์เคลย์ที่เผาโดยการศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอัตราเร่ง (A) 10 °C/นาที, (B) 20 °C/นาที, (C) 30 °C/นาที

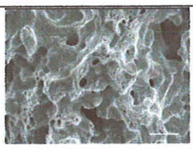
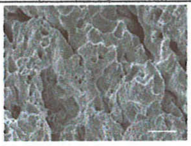
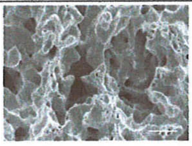
ตารางที่ 4 ขนาดอนุภาคและขนาดของรูพรุนด้วยโปรแกรม Image J จากภาพ SEM ของตัวอย่างนาโนซิลเวอร์เคลย์ที่เผาโดยศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอัตราเร่ง

อัตราเร่ง (°C /นาที)	เวลายืนไฟ (นาที)	ขนาดรูพรุน วัดด้วยโปรแกรม Image J (ไมครอน)
10	60	0.21-19.44
20	60	0.24-11.55
30	60	0.42-23.09

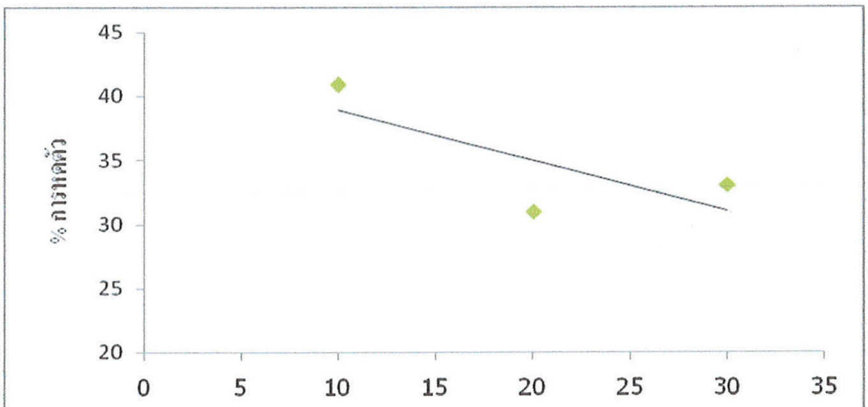
4.2.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของนาโนซิลเวอร์เคลย์ที่เผาด้วยอัตราเร่งต่างกัน

ผลที่ได้จากการเผานาโนซิลเวอร์เคลย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราเร่งโดยให้อุณหภูมิและเวลายืนไฟคงที่ โดยใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมจากการทดลองกลุ่มที่ 2 อัตราเร่ง 10, 20 และ 30 องศาเซลเซียส/นาที เวลาในการยืนไฟ 1 ชั่วโมง คงที่ทุกตัวอย่างซึ่งจะศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของตัวชิ้นงานที่ผ่านการเผา ได้แก่ เปอร์เซนต์การหดตัว ขนาดอนุภาค ความแข็ง ความหนาแน่น ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 5 เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การหดตัว ความหนาแน่น ปริมาตรรูพรุน และความแข็ง พบว่าค่าที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากการให้เวลายืนไฟเป็นระยะเวลานาน ทำให้ผลที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงอัตราเร่งไม่แตกต่างกัน และพบว่าเมื่อใช้อัตราเร่งต่ำ เปอร์เซ็นต์การหดตัว ความหนาแน่น ความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น

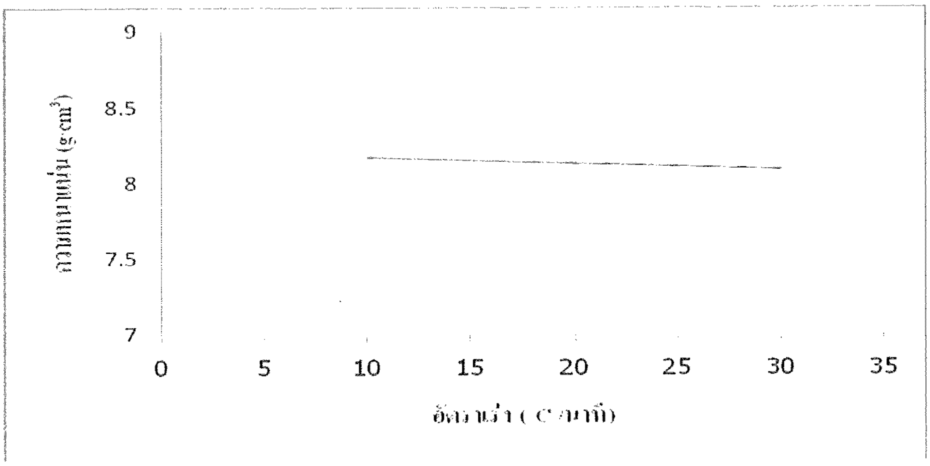
ตารางที่ 5 ผลการศึกษาอิทธิพลการเปลี่ยนแปลงอัตราเร่งโดยให้อุณหภูมิคงที่ การยืนไฟคงที่

อัตราเร่ง (°C /นาที)	%การหดตัว	ความหนาแน่น (g/cm^3)	ความแข็ง (Kgf/mm^2)	ปริมาตรรูพรุนเปิด	ภาพ SEM
10	40.62±0.72	8.293±0.46	17.18±0.32	0.0095±0.03	
20	30.565±0.89	8.229±0.53	15.82±0.32	0.017±0.4	
30	33.785±1.22	8.090±0.2	16.46±0.28	0.012±0.3	

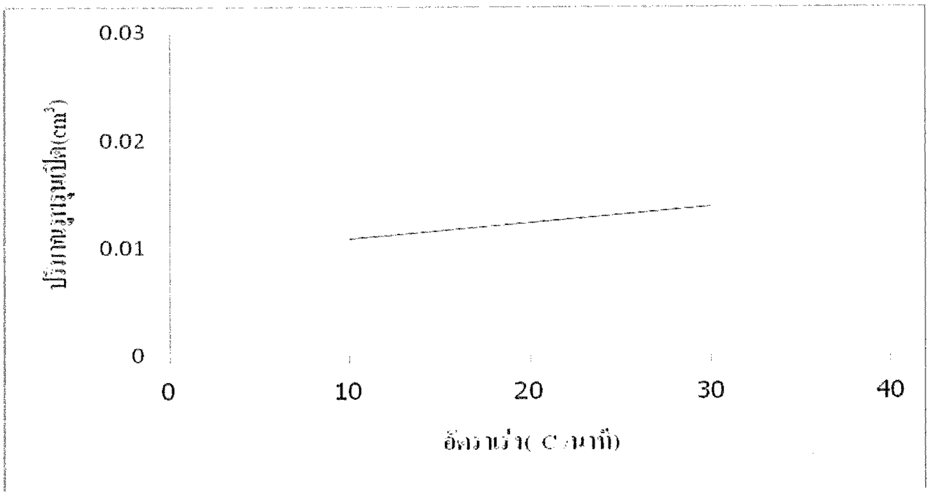
ผลการศึกษาเปอร์เซนต์การหดตัว ความหนาแน่นและปริมาตรรูพรุน เมื่อทำการเผานาโนซิลเวอร์เคลย์ที่อัตราเร่งต่างกันดังตารางที่ 5 เมื่อนำมาพลอตกราฟจะได้ดังรูป 17, 18 และ 19 ตามลำดับ จากกราฟแสดงให้เห็นได้ว่า เมื่อให้อัตราเร่งที่ 10 °C/นาที จะมีการหดตัวมากซึ่งเกิดจากการให้ความร้อนในเวลาที่ช้าทำให้อนุภาคมีการรวมตัวกันได้ดี และเมื่อใช้อัตราเร่งที่ 20 °C/นาที การหดตัวจะมีค่าต่ำสุด และเมื่อใช้อัตราเร่งต่ำ ความหนาแน่นจะมาก เนื่องจากเวลาที่ให้ความร้อนเพิ่มขึ้นทีละน้อยการรวมตัวกันของอนุภาคจะดี ทำให้มีความหนาแน่นที่มาก และปริมาตรรูพรุนเปิดจะแปรผกผันกับความหนาแน่น เมื่อความหนาแน่นมากปริมาตรรูพรุนตัวจะน้อย ค่าความแข็งมาก และการหดตัวสูงตามไปด้วย



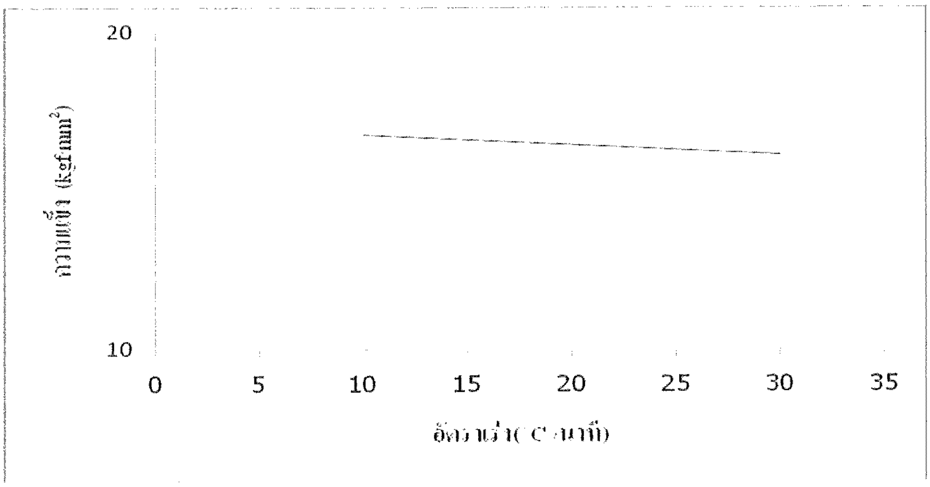
รูปที่ 17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การหดตัวของซิลเวอร์เคลย์ที่เผาที่อัตราเร่ง ต่างๆกัน



รูปที่ 18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของซิลเวอร์เคลย์ที่เผาที่อัตราเร่งต่างๆกัน



รูปที่ 19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรรูพรุนเปิดของซิลเวอร์เคลย์ที่เผาที่อัตราเร่งต่างๆกัน



รูปที่ 20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของซิลเวอร์เคลย์ที่เผาที่อัตราเร่งต่างๆกัน

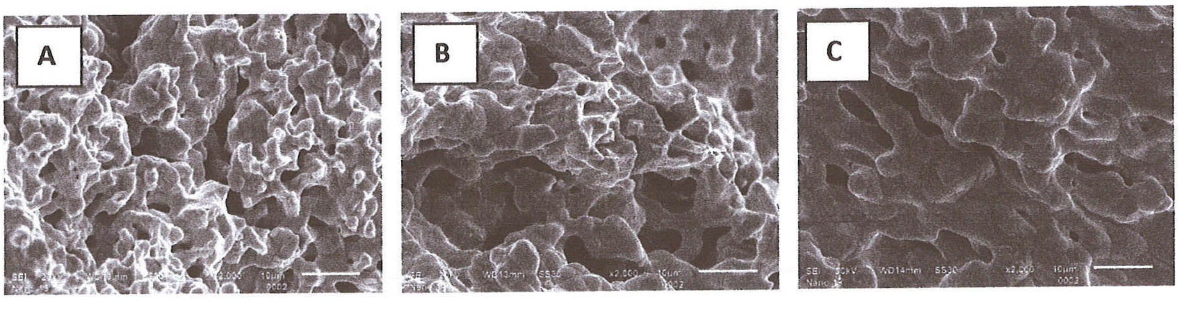
ผลการศึกษาค่าความแข็ง เมื่อทำการเผานาโนซิลเวอร์เคลย์ที่อัตราเร่งต่างกันดังตารางที่ 5 เมื่อนำมาพลอตกราฟจะได้ดังรูป 20 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อให้อัตราเร่งที่ต่ำลักษณะของความแข็งของชิ้นงานจะมีความแข็งมากกว่าขึ้น เนื่องจากการค่อย ๆ เพิ่มอัตราเร่งทีละน้อย ในขณะเผาเกิดการรวมตัวกันและมีความหนาแน่นมากกว่า จึงมีความแข็งมาก

จากการทดลองสรุปได้ว่าอัตราเร่งที่เหมาะในการเผานาโนซิลเวอร์เคลย์คือ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที แม้ว่าความแข็งของอัตราเร่งที่ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จะน้อยกว่าที่อัตราเร่งอื่นแต่ไม่มากนัก เมื่อเทียบกับเปอร์เซ็นต์การหดตัวต่ำกว่าอัตราเร่งอื่นมากๆ ดังนั้นจึงเลือกอัตราเร่งที่ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที

4.3 ผลการศึกษาการอิทธิพลของเวลายืนไฟที่ใช้ในการเผานาโนซิลเวอร์เคลย์

4.3.1 การศึกษาลักษณะอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ภาพ SEM แสดงลักษณะอนุภาคของนาโนซิลเวอร์เคลย์ที่เผาโดยการศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงเวลายืนไฟ ดังรูป 21 และขนาดรูพรุนแสดงดังตารางที่ 6 จากภาพจะเห็นได้ว่าเมื่อไม่ทำการยืนไฟ แม้อนุภาคเงินจะมีการเชื่อมประสานกันดีแต่มีความกว้างรูพรุนมาก ในขณะที่การยืนไฟ 30 นาที ลักษณะการเชื่อมประสานดีขึ้น รูพรุนกระจายตัวสม่ำเสมอ แต่มีความกว้างรูพรุนอยู่มาก และเวลาในการยืนไฟที่ 60 นาที จะมีลักษณะของเนื้อผิวมีความเรียบที่ดีกว่ายืนไม่ไฟและยืนไฟ 30 นาที และขนาดรูพรุนมีน้อยกว่าไม่ยืนไฟและยืนไฟ 30 นาที



รูปที่ 21 ภาพ SEM ของตัวอย่างนาโนซิลเวอร์เคลย์ที่เผาโดยการศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงเวลายืนไฟ (A) ไม่ยืนไฟ, (B) 30 นาที, (C) 60 นาที

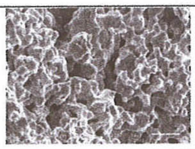
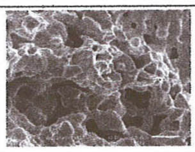
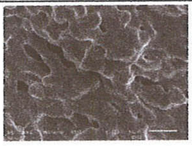
ตารางที่ 6 ขนาดอนุภาคและขนาดของรูพรุนด้วยโปรแกรม Image J จากภาพ SEM ของตัวอย่างนาโนซิลเวอร์เคลย์ที่เผาโดยศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงเวลาการยืนไฟ

เวลายืนไฟ (นาที)	อัตราเร่ง (°C /นาที)	ขนาดรูพรุน วัดด้วยโปรแกรม Image J (ไมครอน)
ไม่ยืน	20	1.14-20.24
30	20	0.26-21.79
60	20	0.85-20.14

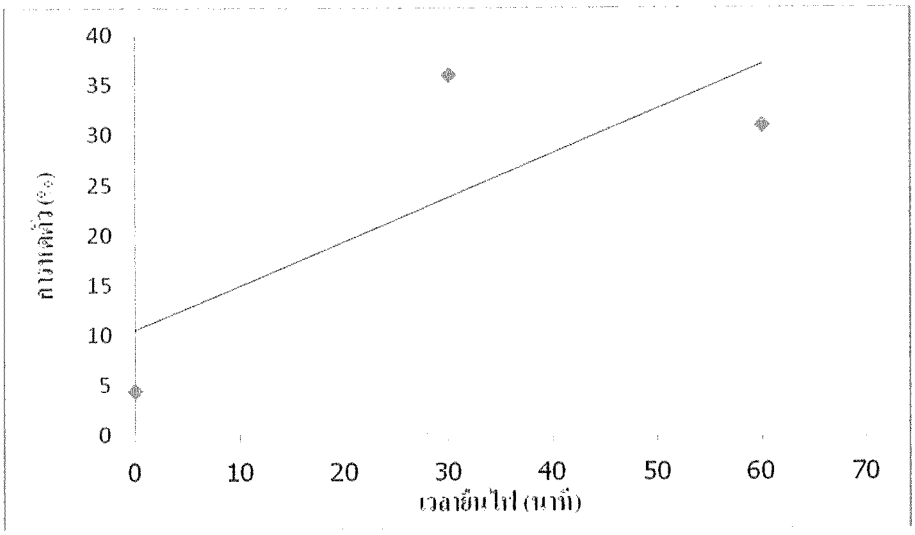
4.3.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของนาโนซิลเวอร์เคลย์ที่เผาด้วยเวลายืนไฟต่างกัน

ผลที่ได้จากการเผานาโนซิลเวอร์เคลย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงเวลาการยืนไฟโดยให้อุณหภูมิและอัตราเร่งคงที่ โดยใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมจากการทดลองกลุ่มที่ 2 เวลาในการยืนไฟ ไม่ยืนไฟ, 30, 60 นาที อัตราเร่ง 20 องศาเซลเซียส/นาที คงที่ทุกตัวอย่าง ซึ่งจะศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของตัวชิ้นงานที่ผ่านการเผา ได้แก่ เปอร์เซนต์การหดตัว ขนาดอนุภาค ความแข็ง ความหนาแน่น ผลการทดลอง แสดงในตารางที่ 7 จากตารางพบว่าเมื่อใช้เวลาในการยืนไฟมากขึ้น เปอร์เซ็นต์การหดตัว ความหนาแน่น ความแข็ง มีค่าเพิ่มขึ้นและปริมาณรูพรุนน้อยลง

ตารางที่ 7 ผลการศึกษาการเผานาโนซิลเวอร์เคลย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงเวลาการยืนไฟ

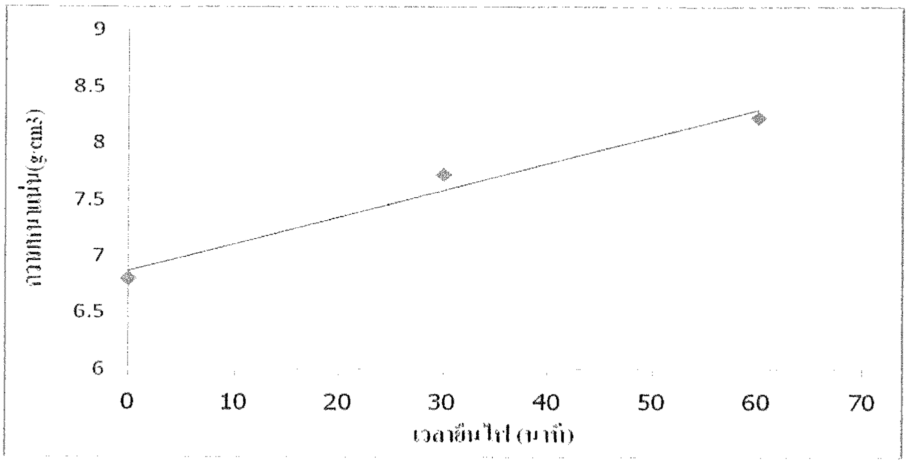
การยืนไฟ	%การหดตัว	ความหนาแน่น (g/cm^3)	ความแข็ง (Kgf/mm^2)	ปริมาตรรูพรุนเปิด	ภาพ SEM
ไม่ยืน	4.48±0.35	7.047±0.71	8.58±0.73	0.010±0.04	
30	35.89±0.51	8.059±0.82	14.11±0.14	0.013±0.05	
60	31.03±0.40	8.555±0.81	15.43±0.58	0.009±0.04	

ผลการศึกษาเปอร์เซนต์การหดตัว เมื่อทำการเผานาโนซิลเวอร์เคลย์ที่เวลาการยืนไฟต่างกันดังตารางที่ 7 เมื่อนำมาพลอตกราฟ จะได้ดังรูปที่ 21 จากกราฟแสดงให้เห็นได้ว่าเมื่อใช้เวลาในการยืนไฟมากจะมีแนวโน้มในการหดตัวมาก เนื่องจากการให้ความร้อนเรื่อยๆจะทำให้อนุภาคมีการรวมตัวกันมากขึ้นและค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นมากและปริมาตรรูพรุนก็น้อย

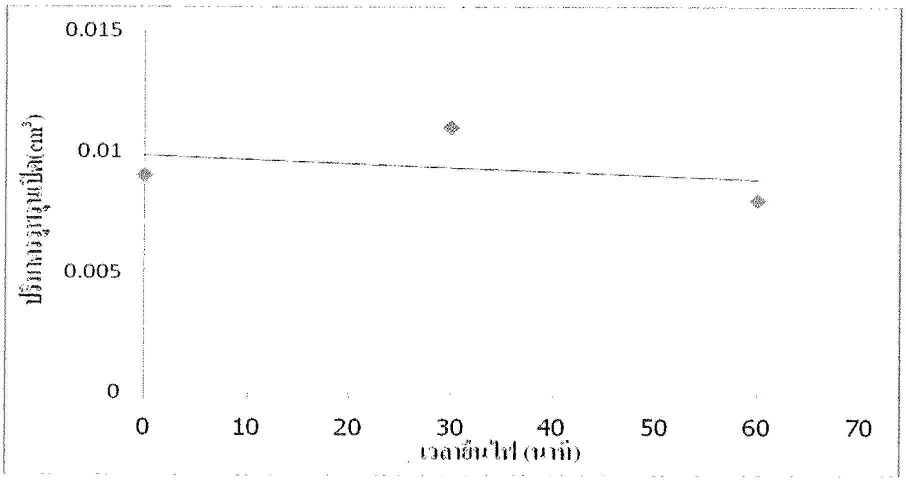


รูปที่ 22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซนต์การหดตัวของซิลเวอร์เคลย์ที่เผาที่เวลายืนไฟต่างกัน

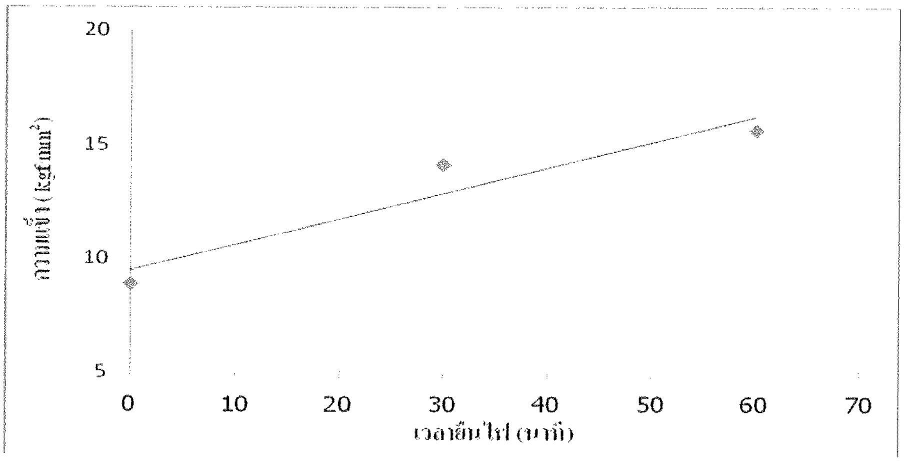
ผลจากการศึกษาความหนาแน่น และปริมาตรรูพรุนเปิด ดังตารางที่ 7 เมื่อนำมาพลอตกราฟจะได้ดังรูปที่ 23 และ 24 ตามลำดับ จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้เวลาในการยืนไฟมากขึ้นค่าความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเวลาที่ได้รับความร้อนทำให้ชิ้นงานเกิดการรวมตัวกันและเชื่อมประสานได้ดียิ่งขึ้น แต่ปริมาตรรูพรุนเปิดจะแปรผกผันกับความหนาแน่น เมื่อความหนาแน่นมากปริมาตรรูพรุนจะน้อยและค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้น การหดตัวจะน้อย ซึ่งจะสอดคล้องกัน สำหรับค่าความแข็งดังตารางที่ 7 เมื่อนำมาพลอตกราฟจะได้ดังรูปที่ 25 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้เวลาในการยืนไฟที่มากค่าความแข็งเพิ่ม เนื่องจากเมื่อให้ความร้อนจะเกิดการรวมตัวกันมากขึ้น ค่าความแข็งจึงมากขึ้น ความหนาแน่นมากขึ้น ปริมาตรรูพรุนน้อยลงแต่เปอร์เซ็นการหดตัวจะมาก



รูปที่ 23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของซิลเวอร์เคลย์ที่เผาที่เวลายืนไฟต่างๆกัน



รูปที่ 24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรรูพรุนเปิดของซิลเวอร์เคลย์ที่เผาที่เวลายืนไฟต่างๆกัน



รูปที่ 25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของซิลเวอร์เคลย์ที่เผาที่เวลายืนไฟต่างๆกัน

จากรูปที่ 24 แสดงให้เห็นว่า กรณีไม่ยืนไฟมีการเชื่อมประสานกันดีแต่มีความกว้างรูพรุนมาก ในขณะที่การยืนไฟ 30 นาที ลักษณะการเชื่อมประสานดีขึ้น รูพรุนกระจายตัวสม่ำเสมอ แต่มีความกว้างรูพรุนอยู่มาก และเวลาในการยืนไฟที่ 60 นาที จะมีลักษณะของเนื้อผิวมีความเรียบที่ดีกว่ายืนไม่ไฟและยืนไฟ 30 นาที และขนาดรูพรุนมีน้อยกว่าไม่ยืนไฟและยืนไฟ 30 นาที ซึ่งสอดคล้องกับความแข็งและความหนาแน่น ดังนั้นจากการทดลองการศึกษาการยืนไฟทั้งหมดจึงเลือกเวลาที่ใช้ในการยืนไฟที่ 60 นาที จากการทดลองทั้งหมดในส่วนการผลิตนาโนซิลเวอร์เคลย์ จึงสรุปได้ว่าสภาวะการเผาที่เหมาะสมสำหรับนาโนซิลเวอร์เคลย์ที่ผลิตขึ้นได้คือ อุณหภูมิ 600-900°C อัตราเร่ง 20°C ต่อนาที่ เวลายืนไฟ 1 ชั่วโมง

4.4 ผลการทดลองการพัฒนาเทคนิคในการขึ้นรูปเครื่องประดับเงินจากนาโนซิลเวอร์เคลย์

การขึ้นรูปโดยทั่วไปนอกจากการขึ้นรูปด้วยมือแล้วยังมีอีกหลากหลายวิธี แต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อจำกัดแตกต่างกัน เช่นหากต้องการทำเครื่องประดับที่มีลักษณะเป็นเส้น การขึ้นรูปแบบเส้นจะใช้การปั้นเป็นเส้นด้วยมือ ซึ่งหากต้องการควบคุมให้เส้นมีขนาดเท่ากันจะทำได้ยาก หรือหากต้องการขึ้นรูปในลักษณะผิวโค้งหรือเป็นทรง 3 มิติ จะควบคุมได้อย่างเช่นกัน สำหรับเทคนิคการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการพิมพ์ลายจากวัสดุธรรมชาติจะได้ชิ้นงานที่มีลักษณะแข็ง ไม่อ่อนช้อยงดงาม หากทำการวางวัสดุธรรมชาติ เช่น ใบไม้ โดยไม่มีความปราณีต อาจทำให้เกิดตามด หรือลักษณะฟองอากาศอย่างชัดเจน และมีปัญหาเรื่องน้ำหนักในการกดวัสดุตัวอย่างลงบนซิลเวอร์เคลย์ การขึ้นรูปด้วยการเผาพร้อมฝังพลอยโดยส่วนใหญ่จะทำการฝังหุ้ม ทำให้ลดประกายความเงางามของพลอย ได้เครื่องประดับที่ขาดประกายงดงาม และสำหรับการขึ้นรูปโดยการใส่พลอยหรืออัญมณีลงในเครื่องประดับเงินที่มีลักษณะกลวงเป็นลูกตะกร้อ จะใช้ซิลิโคน (Silicone) เป็นตัวหุ้มพลอยและขึ้นโครงเป็นทรง 3 มิติ ซึ่งซิลิโคนจะมีราคาสูง เมื่อนำมาทำเครื่องประดับแล้วต้องเผาสลายตัวไปจะเป็นการสิ้นเปลือง นอกจากนี้เทคนิคการพันเส้นซิลเวอร์เคลย์รอบรูปทรงที่ทำด้วยซิลิโคนนี้จะทำการพันเส้นซิลเวอร์เคลย์ด้วยมือ ทำให้กระบวนการทำค่อนข้างยุ่งยาก

จากข้อจำกัดด้านการผลิตข้างต้น ดังนั้นนอกจากการพัฒนาสูตรที่เหมาะสมกับการผลิตนาโนซิลเวอร์เคลย์และสภาวะการเผาที่เหมาะสมแล้ว ผู้วิจัยได้ต่อยอดนวัตกรรมดังกล่าว โดยศึกษาและพัฒนากรรมวิธีการขึ้นรูป พร้อมเทคนิคการผลิตเครื่องประดับประเภทต่างๆ ที่เหมาะกับผลิตภัณฑ์นาโนซิเวอร์เคลย์ เพื่อนำไปประยุกต์เป็นเครื่องประดับอัญมณีที่สวมใส่ได้จริง และคงทนแข็งแรง จะทำให้สามารถทราบข้อดี ข้อเสีย และข้อจำกัดของผลิตภัณฑ์ และนำมาแก้ไข หรือประยุกต์ใช้กับเครื่องประดับชนิดต่างๆ หรืออุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับอื่นๆ ต่อไป เทคนิคดังกล่าวมีทั้งที่คิดค้นขึ้นใหม่และที่ประยุกต์ต่อยอดจากเทคนิคที่ใช้กันโดยทั่วไป ได้แก่ เทคนิคการลอกลายวัสดุธรรมชาติ เทคนิคการขึ้นรูปแบบเส้นด้วย

กระบอกฉีดยา เทคนิคการขึ้นรูปแบบเส้นร่วมกับการเผาพร้อมหุ้มพลอย เทคนิคการเผาพร้อมฝังพลอย และเทคนิคการทำเครื่องประดับโดยการลอกลายจากวัสดุที่ไม่สามารถสลายตัวได้ด้วยการเผา และการขึ้นรูปนาโนซิลเวอร์เคลย์พร้อมแก้ว

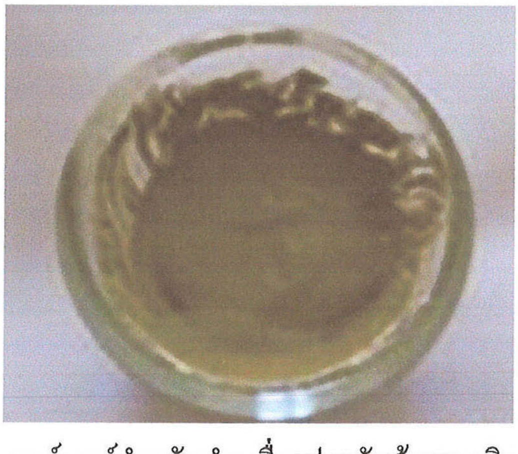
4.4.1 เทคนิคการลอกลายวัสดุธรรมชาติ (การผลิตเครื่องประดับเงินจากนาโนซิลเวอร์เคลย์ด้วยเทคนิคการลอกลาย อนุสิทธิบัตรเลขที่คำขอ 0902000823)

วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

1. ซิลเวอร์เคลย์ชนิดเหลว
2. วัสดุธรรมชาติที่สามารถสลายตัวได้ เช่น ใบไม้ กิ่งไม้
3. อุปกรณ์ในการผลิตชิ้นงาน
   - อุปกรณ์สำหรับทาซิลเวอร์เคลย์ ได้แก่ ภู่กัน
   - อุปกรณ์ขัดตกแต่งชิ้นงาน ได้แก่ กระดาษทราย แปรงทองเหลือง
   - อุปกรณ์ในการทำเครื่องประดับ
4. เตาเผาไฟฟ้าที่สามารถตั้งอุณหภูมิได้ถึง 1000 องศาเซลเซียส

การผลิตเครื่องประดับด้วยซิลเวอร์เคลย์เพื่อต้องการนำลวดลายธรรมชาติมาทำเครื่องประดับด้วยการลอกลายโดยทั่วไปนั้นจะใช้เทคนิคปั้มหรือพิมพ์ลาย (print technique) โดยการกดวัสดุธรรมชาติที่มีลวดลายชัดเจน และสามารถสลายตัวได้เมื่อได้รับความร้อน เช่น ใบไม้ โดยกดใบไม้ลงบนแผ่นซิลเวอร์เคลย์ แล้วนำไปเผาสลายวัสดุธรรมชาตินั้นออก ทำให้ลักษณะเครื่องประดับหรือชิ้นงานที่ได้มีลักษณะเป็นแผ่นแข็ง ไม่มีความอ่อนช้อยเหมือนธรรมชาติ และประสบปัญหาเรื่องน้ำหนักในการกดวัตถุลงบนแผ่นซิลวอร์เคลย์ดังเช่นที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่สำหรับเทคนิคการลอกลายวัสดุธรรมชาติเพื่อทำเครื่องประดับจากนาโนซิลเวอร์เคลย์ที่พัฒนาขึ้น นี้จะนำนาโนซิลเวอร์เคลย์ที่เตรียมได้ตามสูตร มาทำการเติมน้ำสะอาดเพิ่มอีก 20 % โดยน้ำหนักของนาโนซิลเวอร์เคลย์ที่เตรียมไว้ แล้วคนให้เข้ากันจะได้ลักษณะที่เป็นดินโคลนเหลว (ดังรูปที่ 26) นาโนซิลเวอร์เคลย์เหลวดังกล่าวสามารถนำมาทาได้ด้วยภู่กัน การทำเครื่องประดับด้วยวัสดุธรรมชาตินี้ มีข้อจำกัดอยู่ที่ วัสดุธรรมชาตินั้นๆ ต้องสลายตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา คือควรสลายตัวได้ที่อุณหภูมิประมาณ 200-500 องศาเซลเซียส และหากเป็นกลีบดอกไม้ หรือใบไม้ ไม่ควรมีขนใบ เนื่องจากจะทำให้ชิ้นงานที่ได้หลังเผามีลักษณะเป็นรูเล็กๆ ตามลักษณะของขนใบ ทำให้ได้ชิ้นงานที่ไม่สวยงาม

การทำเครื่องประดับทำได้โดยทานาโนซิลเวอร์เคลย์ลงบนใบไม้ หรือวัสดุธรรมชาติที่เตรียมไว้ ดังรูปที่ 27 หลังจากนั้นรอให้แห้งแล้วทาทับทีละชั้น จะได้ความหนาที่ต้องการ หากความหนามากเกินไปจะทำให้ชิ้นงานดูแข็ง ไม่ธรรมชาติ แต่หากบางเกินไปจะทำให้ชิ้นงานไม่แข็งแรง คงทน ดังนั้นจึงควรทาด้วยจำนวนชั้นที่เหมาะสม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดชิ้นงาน และวัสดุที่นำมาใช้ด้วย ตัวอย่างเช่น หากเป็นใบไม้ขนาดใหญ่ไม่เกิน 10 เซนติเมตร ไม่ควรทาเกิน 15 ชั้น ภายหลังจากการเผาแล้วชิ้นงานจะมีลักษณะโค้งงอเล็กน้อยเหมือนใบไม้ธรรมชาติ ได้ชิ้นงานที่อ่อนช้อย แต่มีความคงทนแข็งแรง ระหว่างทาส่วนผสมนาโนซิลเวอร์เคลย์ ลงบนวัสดุระมัดระวังอย่าให้มีฟองอากาศเกิดขึ้น เนื่องจากจะทำให้เครื่องประดับที่ได้มีลักษณะเป็นรูที่ผิวชิ้นงานที่เรียกว่า ตามด หลังจากส่วนผสมนาโนซิลเวอร์เคลย์ ที่ทาลงบนวัสดุที่นำมาลอกลายแห้งสนิท จึงนำเข้าเตาเผา เนื่องจากการเตรียมนาโนซิลเวอร์เคลย์ด้วยเทคนิคนี้มีการเติมน้ำลงไปเพิ่มเพื่อช่วยในการยืดหยุ่นและทาได้ง่าย ดังนั้นจึงอาจมีการหดตัวเพิ่มขึ้น การเตรียมชิ้นงานด้วยเทคนิคนี้จะมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวร้อยละ 8-30 ดังนั้นการออกแบบขนาดชิ้นงานควรเผื่อขนาดไว้ก่อนและทิ้งชิ้นงานให้แห้งสนิทก่อนเข้าเตาเผา ลักษณะชิ้นงานแบบดั้งเดิมและแบบที่พัฒนาขึ้นนี้จะให้ความสวยงามอ่อนช้อยแตกต่างกัน ดังรูปที่ 28 เทคนิคที่พัฒนาขึ้นในโครงการวิจัยนี้ให้ชิ้นงานที่มีลวดลายคมชัด และไม่มีตามด การทำเครื่องประดับจากเทคนิคนี้แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 29 และชิ้นงานสำเร็จรูปของการขึ้นรูปนาโนซิลเวอร์เคลย์ด้วยเทคนิคลอกลายนี้แสดงดังรูปที่ 30



รูปที่ 26 นาโนซิลเวอร์เคลย์สำหรับทำเครื่องประดับด้วยเทคนิคการลอกลาย

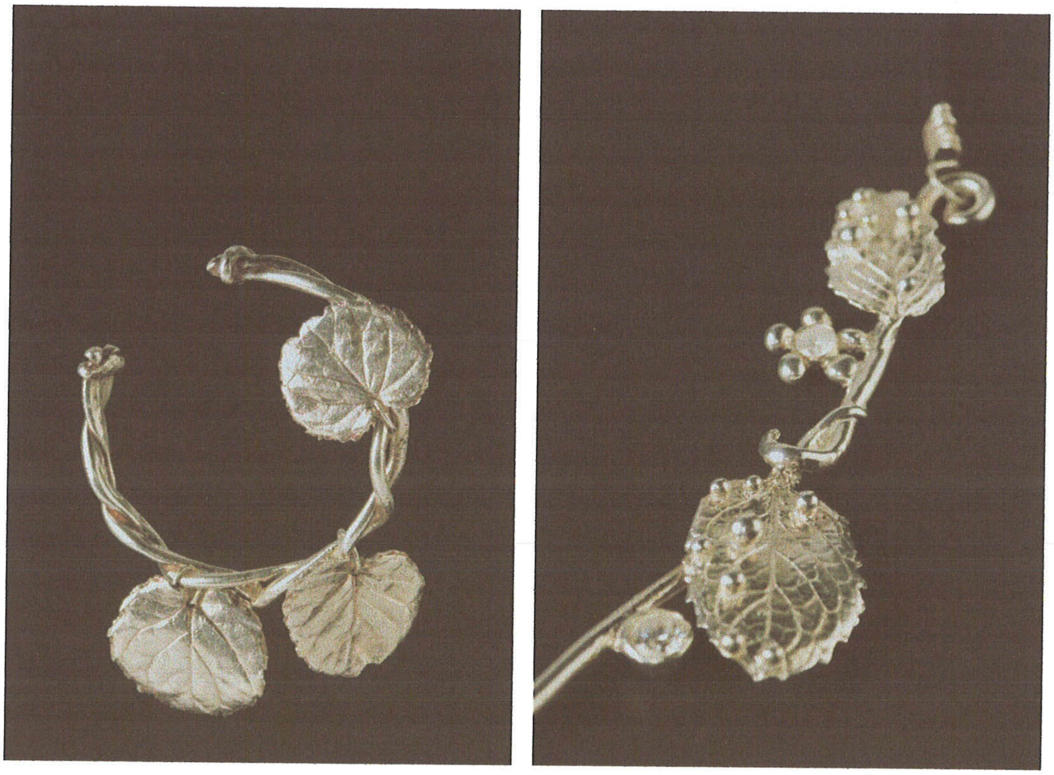
รูปที่ 27 การทาซิลเวอร์เคลย์ลงบนใบไม้ และภาพใบไม้ที่ทาซิลเวอร์เคลย์เรียบร้อยแล้ว

ใบไม้ที่ได้จากเทคนิคการปั๊มที่ใช้ทั่วไป

ใบไม้ที่ได้จากเทคนิคการลอกลายแบบใหม่

รูปที่ 28 ชิ้นงานหลังเผาที่ได้จากเทคนิคการลอกลายที่คิดค้นขึ้น เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ได้จากเทคนิคการปั๊มที่นิยมทำโดยทั่วไป

รูปที่ 29 ตัวอย่างการประดิษฐ์เครื่องประดับเงินจากเทคนิค surface forming



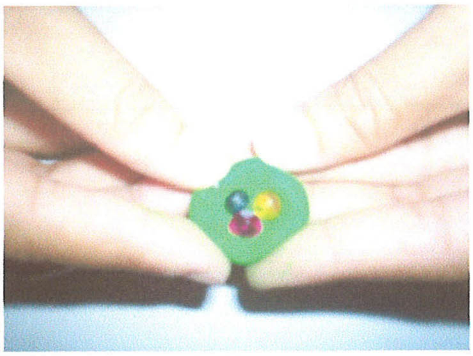
รูปที่ 30 ชุดเครื่องประดับที่ขึ้นรูปจากเทคนิคการลอกลายธรรมชาติที่พัฒนาขึ้น

4.4.2 เทคนิคการฉีดเป็นเส้นด้วยกระบอกฉีดยา เป็นเทคนิคที่พัฒนาขึ้นเพื่อช่วยให้การขึ้นรูปซิลเวอร์เคลย์แบบเส้นทำได้ง่ายขึ้น เดิมจะใช้วิธีการปั้นมือเป็นเส้น แต่จะประสบความยุ่งยากให้การขึ้นรูปซิลเวอร์เคลย์แบบเส้นบนชิ้นงานที่โค้ง มน หรือต้องการการเท่ากันของเส้นทั้งชิ้นงาน ดังนั้นเทคนิคนี้จึงทำได้โดยการนำนาโนซิลเวอร์เคลย์ที่เตรียมไว้ตามสูตรมาเติมน้ำสะอาดเพิ่มไปอีก 10% โดยน้ำหนัก เพื่อให้มีความยืดหยุ่นมากขึ้น แล้วนวดซ้ำอีกครั้งหนึ่ง หลังจากนั้นนำนาโนซิลเวอร์เคลย์ใส่ลงในกระบอกฉีดยาซึ่งไม่มีเข็ม แล้วทำการบีบให้นาโนซิลเวอร์เคลย์เข้าออกจากกระบอกฉีดยา 2-3 ครั้ง เพื่อเป็นการบังคับให้มีการอัดตัวของนาโนซิลเวอร์เคลย์ให้แน่นขึ้น และลดฟองอากาศที่จะเกิดขึ้น หลังจากนั้นสามารถที่จะใช้เทคนิคนี้ร่วมกับเทคนิคอื่นๆ ในการทำเครื่องประดับเงินได้ โดยขนาดของเส้นนาโนซิลเวอร์เคลย์จะขึ้นกับขนาดปากกระบอกฉีดยาที่เลือกใช้ การเตรียมนาโนซิลเวอร์เคลย์ด้วยเทคนิคนี้มีการเติมน้ำลงไปเพิ่มเพื่อช่วยในสามารถฉีดนาโนซิลเวอร์เคลย์ด้วยกระบอกฉีดยาได้ง่าย ดังนั้นจึงอาจมีการหดตัวเพิ่มขึ้นเป็น 8-30% ดังนั้นการออกแบบขนาดชิ้นงานควรเผื่อขนาดไว้ก่อนและทิ้งชิ้นงานให้แห้งสนิทก่อนเข้าเตาเผาเช่นกัน

รูปที่ 31 การเตรียมนาโนซิลเวอร์เคลย์โดยการใส่นาโนซิลเวอร์เคลย์ลงในกระบอกฉีดยา

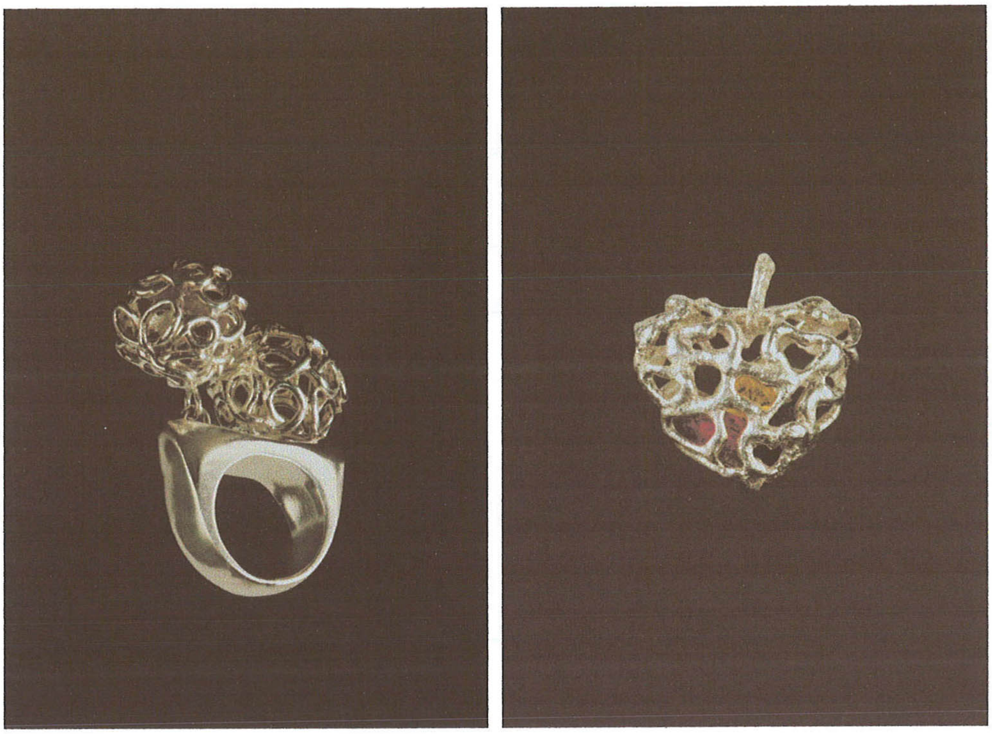
4.4.3 เทคนิคการขึ้นรูปแบบเส้นร่วมกับการเผาพร้อมหุ้มพลอย เป็นเทคนิคที่ประยุกต์ขึ้น เนื่องจากเดิมนั้นเทคนิคนี้ที่นิยมทำในต่างประเทศโดยใช้ซิลเวอร์เคลย์ที่มีขายเชิงพาณิชย์นั้นจะใช้ซิลิโคนเป็นตัวห่อหุ้มพลอย แต่ในการประดิษฐ์นี้จะใช้ดินน้ำมัน แวกซ์ หรือเศษแวกซ์ที่เหลือจากการแกะชิ้นงานเครื่องประดับและไม่มีมูลค่าแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ โดยร่วมกับการขึ้นรูปแบบเส้นโดยการใช้กระบอกฉีดยาดังข้อ 4.4.2 กรรมวิธีในการทำเริ่มจากเลือกพลอยหรืออัญมณีที่ต้องการนำมาใส่ในเครื่องประดับ ควรเป็นพลอยเนื้อแข็งธรรมชาติหรือสังเคราะห์ที่ทนต่อการเผาที่อุณหภูมิสูงได้ เนื่องจากหากใช้พลอยเนื้ออ่อน สีพลอยอาจจะเปลี่ยน และในกรณีที่พลอยมีตำหนิมาก พลอยอาจจะแตกเมื่อทำการเผา หลังจากนั้นนำดินน้ำมันมาปั้นหุ้มพลอยที่เลือกไว้เป็นรูปแบบต่างๆ ตามต้องการ หรือ อาจใช้แวกซ์ หรือเศษแวกซ์เหลือใช้

นำมาหลอมด้วยเทียนไขให้เป็นชิ้นเดียวกันเหมือนดินน้ำมันแล้วนำมาปั้นหุ้มพลอยตามรูปทรงที่ต้องการ ดังรูปที่ 32 (การใช้แวกซ์จะดีกว่าใช้ดินน้ำมัน เนื่องจากมีการสลายตัวที่ดีกว่า และ ไม่ติดเครื่องประดับ) หลังจากนั้นนำนาโนซิลเวอร์เคลย์ที่เตรียมใส่กระบอกฉีดยาไว้ดังข้อ 4.4.2 มาพันหุ้มรอบรูปทรงชิ้นงานที่เตรียมไว้ ดังรูปที่ 32 การประดิษฐ์จะพันเป็นลักษณะใดก็ได้ตามต้องการ แต่ควรทำให้มีการพันทับกันหรือชิดกัน เพื่อให้การนาโนซิลเวอร์เคลย์เกาะตัวกันได้ดี จะได้เครื่องประดับที่ทนทาน และป้องกันพลอยข้างในหลุดออกมา หลังจากนั้นนำชิ้นงานทั้งชิ้นเข้าเตาเผา เมื่อให้ความร้อนแวกซ์หรือดินน้ำมันที่ใช้จะสลายตัวเหลือเพียงพลอยที่อยู่ในเครื่องประดับเงินรูปทรงที่เตรียมไว้ ดังรูปที่ 33 แล้วนำชิ้นงานไปประกอบบนตัวเรือนเครื่องประดับดังรูปที่ 34



รูปที่ 32 การปั้นแวกซ์หุ้มพลอยเป็นรูปทรงที่ต้องการ

รูปที่ 33 การขึ้นรูปนาโนซิลเวอร์เคลย์แบบเส้นทับรูปทรงกลมเครื่องประดับที่เตรียมไว้ (ในรูป 32) และตัวอย่างหลังเผาและขัดชิ้นงาน

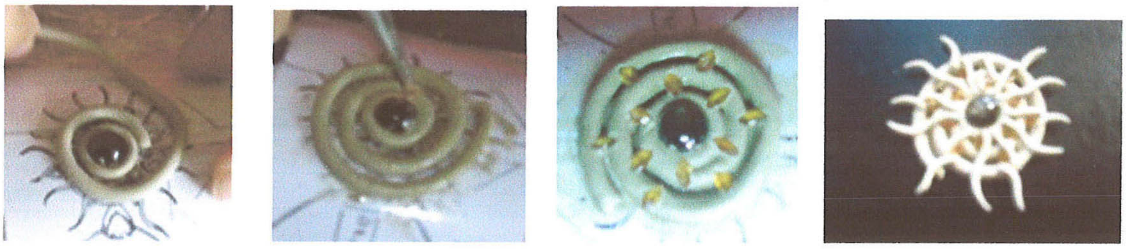


รูปที่ 34 ชุดเครื่องประดับที่ขึ้นรูปจากเทคนิคการขึ้นรูปแบบเส้นด้วยกระบอกฉีดยาร่วมกับการใส่อัญมณี

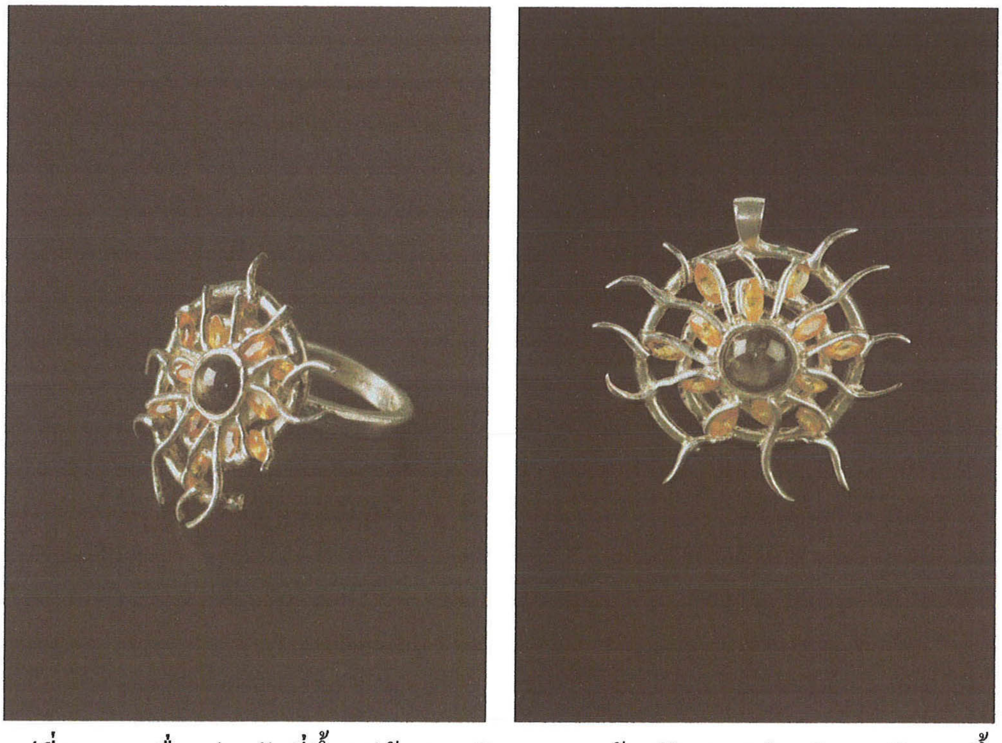
4.4.4 เทคนิคการเผาพร้อมฝังพลอย เป็นเทคนิคที่ประยุกต์ขึ้นจากเทคนิคเดิมที่มีอยู่แล้ว แต่เดิมนั้นการเผาพร้อมฝังพลอยจะนำพลอยฝังลงไปในซิลเวอร์เคลย์โดยส่วนใหญ่จะทำการฝังแบบหุ้ม ดังรูปที่ 35(ข) คือ ก้นพลอยจมลงไปในซิลเวอร์เคลย์ ทำให้ความงามของประกายของพลอยลดลง เนื่องจากไม่มีแสงสะท้อนกลับสู่ผิวหน้าพลอย ดังนั้นเทคนิคนี้จึงนิยมใช้กับพลอยที่มีสีสันสดใส เพื่อเน้นสีสันมากกว่าประกายความงามของพลอย (พลอยที่ใช้ในเทคนิคนี้ต้องเป็นพลอยเนื้อแข็งเช่นกัน) แต่เทคนิคที่ประยุกต์ขึ้นนี้คือ จะทำการวางพลอย หรือฝังพลอยลงระหว่างเส้นของนาโนซิลเวอร์เคลย์ (ดังรูปที่ 35ก) เพื่อให้เส้นของนาโนซิลเวอร์เคลย์เป็นตัวล็อคพลอยให้ติดกับเครื่องประดับ พลอยบนชิ้นงานหลังเผาจะไม่หลุด และเนื่องจากพลอยไม่ได้วางฝังหุ้มลงในซิลเวอร์เคลย์ จะทำให้แสงผ่านและสะท้อนกลับจากก้นพลอยได้ได้ ทำให้พลอยมีประกายเงางามกว่าเทคนิคเดิม (เปรียบเทียบเหลี่ยมและประกายของพลอยดังรูป 35) เทคนิคที่ประยุกต์ขึ้นมานี้สามารถใช้ได้กับพลอยที่มีการเจียระไนทุกรูปแบบ ตัวอย่างการทำเครื่องประดับจากเทคนิคนี้แสดงดังรูป 36 และชิ้นงานสำเร็จแสดงดังรูปที่ 37

(ก) (ข)

รูปที่ 35 เปรียบเทียบการฝังพลอยแบบเทคนิคการฝังร่วมกันการขึ้นรูปแบบเส้นของนาโนซิลเวอร์เคลย์ (ก) และเทคนิคการฝังโดยการกดพลอยลงไปบนแผ่นซิลเวอร์นาโนเคลย์ (ข)



รูปที่ 36 การวางพลอยลงบนนาโนซิลเวอร์เคลย์สำหรับการทำเครื่องประดับเงินด้วยเทคนิคการเผาพร้อมฝังในขั้นตอนเดียว

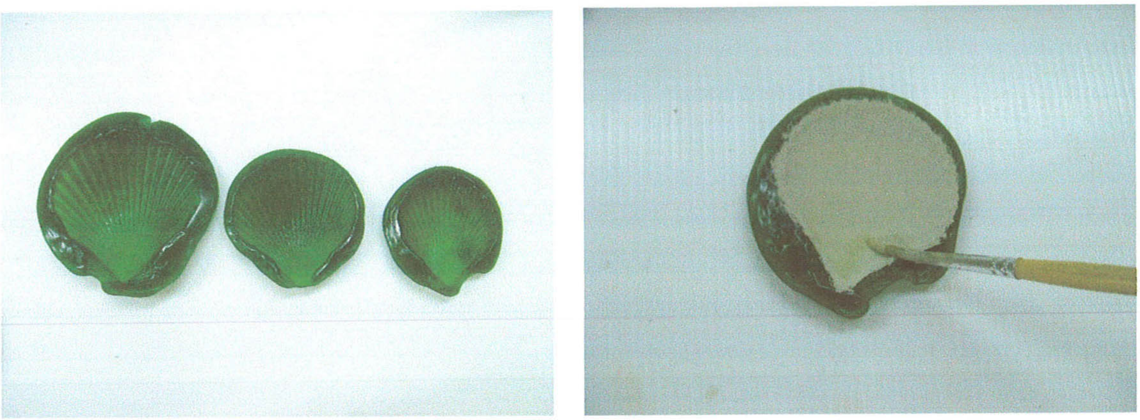


รูปที่ 37 ชุดเครื่องประดับที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการเผาพร้อมฝังพลอยร่วมกับเทคนิคการขึ้นรูปแบบเส้น

4.4.5 การผลิตเครื่องประดับด้วยเทคนิคการลอกลายจากวัสดุที่ไม่สามารถสลายตัวได้เมื่อเผา

เดิมกรรมวิธีการลอกลายที่ใช้ในการผลิตเครื่องประดับด้วยนาโนซิลเวอร์เคลย์จะใช้กับวัสดุที่สามารถสลายตัวได้เมื่อได้รับความร้อน หรือเผาที่อุณหภูมิไม่เกิน 600 องศาสเซลเซียส แต่สำหรับการลอกลายวัสดุที่ไม่สามารถสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนนั้น ในเชิงพาณิชย์จะมีแม่พิมพ์สำเร็จรูปจำหน่าย เปลือกหอยเป็นวัสดุหนึ่งที่ไม่สามารถสลายตัวเมื่อได้รับความร้อน แม่พิมพ์เปลือกหอยที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศนั้น ไม่มีความงามตามลวดลายจริงของเปลือกหอย ทำให้นักวิจัยคิดที่จะทำแม่พิมพ์เปลือกหอยขึ้นเองจากเปลือกหอยธรรมชาติที่เก็บได้จากทะเล การสร้างแม่พิมพ์เปลือกหอยไม่สามารถใช้แม่พิมพ์ปูนได้เหมือนการทำแม่พิมพ์เซรามิค เนื่องจากเมื่อทานาโนซิลเวอร์เคลย์ลงไปในแม่พิมพ์ปูน ปูนจะดูดนาโนซิลเวอร์เคลย์ในติดในเนื้อปูนไม่สามารถแกะชิ้นงานออกมาเผาได้ ดังนั้นจึงต้องใช้แม่พิมพ์ขี้ผึ้ง หรือแวกซ์ (Wax) วิธีการทำสามารถทำได้ง่ายๆ โดยการละลายขี้ผึ้งให้ร้อน แล้วเทลงในภาชนะที่สามารถแกะออกได้ง่าย เช่น กล่องกระดาษ หรือถ้วยพลาสติก (อาจทำการฉีดสเปรย์หล่อลื่นป้องกันการติดกันของผิวชิ้นงานที่ภาชนะก่อนเทแวกซ์ เพื่อให้แกะแม่พิมพ์แวกซ์ออกจากภาชนะได้ง่าย) แล้วนำเปลือกหอยที่ล้างสะอาดมาฉีดสเปรย์หล่อลื่นไว้ที่เปลือกหอย แล้วค่อยๆ วางเปลือกหอยแนบลงไปในเนื้อแวกซ์ การทำงานต้องทำด้วยความระมัดระวังเพื่อไม่ให้เกิดฟองอากาศที่ผิวหน้าชิ้นงาน ทิ้งไว้ให้แวกซ์แข็งตัว แล้วแกะเปลือกหอยออกจากแวกซ์จะได้แม่พิมพ์เปลือกหอยที่ต้องการดังแสดงในรูปที่ 38

กระบวนการทำเครื่องประดับจากเปลือกหอยทำได้โดยนำนาโนซิลเวอร์เคลย์สูตรเดียวกันกับที่ใช้ในการผลิตเครื่องประดับด้วยกระบวนการลอกลายมาทาลงบนแม่พิมพ์หอยที่ทำไว้ ทาหลายๆ ชั้นเพื่อให้ได้ความหนาตามต้องการ หลังจากชิ้นงานแห้งสนิท จึงนำไปเข้าเตาเผาทั้งแม่พิมพ์ เผาที่อุณหภูมิ 600-900 องศาสเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง (การเผาแม่พิมพ์แวกซ์ต้องเผาโดยใส่ชิ้นงานในถ้วยกระเบื้องปิดผา เพื่อไม่ให้แวกซ์ที่สลายตัวไปจับกับขดลวดในเตา ซึ่งอาจทำให้ขดลวดไหม้และขาดได้) แม่พิมพ์แวกซ์จะสลายตัว เหลือเพียงชิ้นงานเปลือกหอย แล้วนำเปลือกหอยทีทำจากนาโนซิลเวอร์เคลย์ไปประกอบเป็นเครื่องประดับที่ออกแบบไว้ต่อไป ตัวอย่างเครื่องประดับที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคนี้แสดงดังรูปที่ 39



(ก) แม่พิมพ์แวกซ์เปลือกหอย (ข) การทาซิลเวอร์เคลย์เหลวลงบนแม่พิมพ์

รูปที่ 38 กรรมวิธีการทำแม่พิมพ์เปลือกหอย และการทาซิลเวอร์เคลย์ชนิดเหลว

รูปที่ 39 เสื้อชั้นในลายเปลือกหอยที่ทำจากนาโนซิลเวอร์เคลย์ สิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์ "เสื้อชั้นใน" เลขที่คำขอ 1002000179

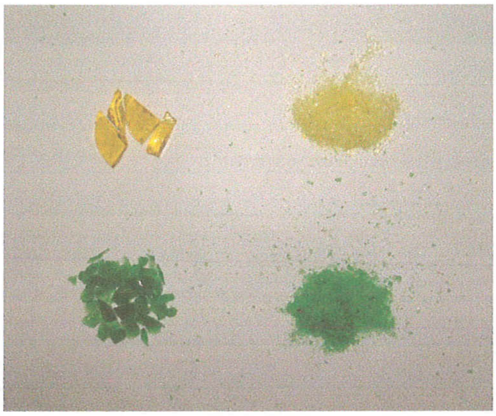
4.4.6 การขึ้นรูปนาโนซิลเวอร์เคลย์พร้อมแก้ว

ผู้วิจัยได้ศึกษาเพิ่มเติมการขึ้นรูปนาโนซิลเวอร์เคลย์พร้อมแก้วเพื่อหาเทคนิคการผลิต และสภาวะการเผาที่เหมาะสมในการผลิตเครื่องประดับจากนาโนซิลเวอร์เคลย์และแก้ว เพื่อช่วยเพิ่มสีสัน ความงดงามแปลกใหม่ ให้กับเครื่องประดับเงินแนวใหม่นี้ ในขั้นแรกของงานวิจัยเรื่องนี้ ผู้วิจัยได้ใช้แก้วชนิดบอโรซิลิ

เกตมาศึกษาการขึ้นรูป พบว่าสารให้สีในแก้วมีผลต่อการเปลี่ยนสีของแก้วหลังการเผา นอกจากนี้ได้ทดสอบลักษณะทางกายภาพของแก้ว การเกาะติดระหว่างชิ้นงานแก้วกับเนื้อนาโนซิลเวอร์เคลย์ และอุณหภูมิการเผาที่เหมาะสม

วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ

วัสดุต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย นาโนซิลเวอร์เคลย์ เศษแก้ว และผงแก้วสีเขียวและสีเหลือง แสดงดังรูป 40



รูปที่ 40 เศษแก้วและผงแก้วชนิด Borosilicate

<u>**ขั้นตอนการทดลอง**</u> การทดลองในส่วนเทคนิคการทำเครื่องประดับ แบ่งออกเป็น 4 การทดลองหลัก ได้แก่

ก. การทดลองหาอุณหภูมิในการเผานาโนซิลเวอร์เคลย์

เผาขึ้นรูปนาโนซิลเวอร์เคลย์ที่อุณหภูมิ 700-900 $^{\circ}$C อัตราเร่ง 20°C ต่อนาที ยืนไฟ 1 ชั่วโมง เพื่อศึกษานาโนซิลเวอร์เคลย์ว่าอุณหภูมิใดเหมาะสำหรับที่จะขึ้นรูปพร้อมแก้ว โดยนำนาโนซิลเวอร์เคลย์ที่ยังไม่ได้เผา และเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ไปวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

ข. การศึกษาการเผาแก้วที่อุณหภูมิต่างๆ

การทดลองนี้จะทำการเผาเศษแก้วสีเหลืองและเศษแก้วสีเขียวชนิด Borosilicate ที่อุณหภูมิ 700-900°C อัตราเร่ง 20°C ต่อนาที ยืนไฟ 1 ชั่วโมง เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาแก้ว เพื่อให้ได้รูปร่างที่ต้องการ โดยศึกษารูปร่างการเผาที่เปลี่ยนไป และสีของแก้วที่เปลี่ยนไปหลังการเผา

ค. การทดลองเผาแก้วพร้อมนาโนซิลเวอร์เคลย์ในแบบต่างๆ

การทดลองเผาแก้วพร้อมนาโนซิลเวอร์เคลย์ ได้แบ่งการทดลองเป็น 6 วิธี โดยใช้ตัวอย่างแก้วเป็นเศษแก้วสีเหลือง ผงแก้วสีเหลือง เศษแก้วสีเขียว และผงแก้วสีเขียว ชนิด Borosilicate ทดลองเผาพร้อมนา

โนซิลเวอร์เคลย์ดิบ (ยังไม่ผ่านการเผา) และนาโนซิลเวอร์เคลย์ที่ผ่านการเผาแล้ว โดยในการทดลองนี้เพื่อต้องการหาเทคนิคในการขึ้นรูป ซึ่งดูจากการเกาะติดของแก้วกับนาโนซิลเวอร์เคลย์ ซึ่งทุกวิธีเผาที่อุณหภูมิ 700-900° C อัตราเร่ง 20° C ต่อนาที ยืนไฟ 1 ชั่วโมง วิธีการทดลองทั้ง 6 วิธีแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 การทดลองเผาแก้วพร้อมนาโนซิลเวอร์เคลย์ในแบบต่างๆ

วิธีที่	**นาโนซิลเวอร์เคลย์**		**เศษแก้วสีเหลืองและสีเขียว**		**ผงแก้วสีเหลืองและสีเขียว**	
	ดิบ	เผาแล้ว	ที่ยังไม่ได้เผา	เผาแล้ว	ที่ยังไม่ได้เผา	เผาแล้ว
1	√		√			
2	√			√		
3		√		√		
4	√				√	
5	√					√
6		√				√

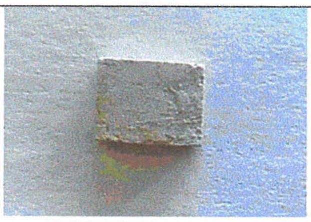
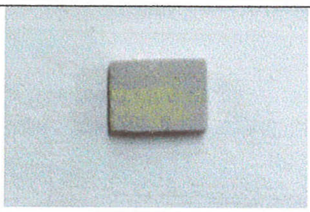
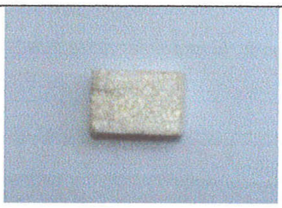
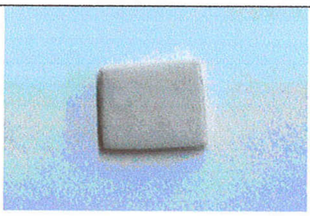
ง. การทดสอบการเกาะติดของชิ้นงาน

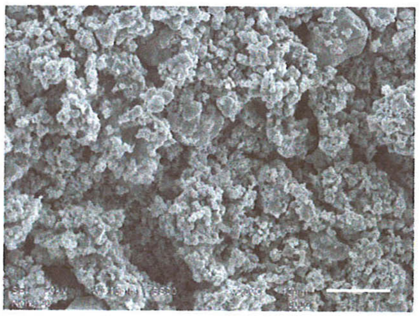
นำชิ้นงานที่เลือกแล้วว่าเหมาะสมในการนำมาทำเครื่องประดับจากข้อ ค. มาทดสอบการเกาะติดของแก้วที่ผิวนาโนซิลเวอร์เคลย์ ทั้ง 3 อุณหภูมิ 700 800 และ 900 ° C วิเคราะห์ด้วย SEM

4.4.6.1 ผลการทดลองหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผานาโนซิลเวอร์เคลย์

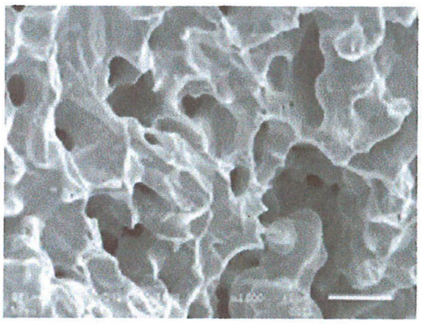
การทดลองในส่วนนี้เพื่อต้องการศึกษาลักษณะผิวหน้าชิ้นงานหลังการเผาที่อาจมีผลต่อการเกาะติดของแก้วบนพื้นผิวของซิลเวอร์เคลย์ จึงศึกษาพื้นผิวซิลเวอร์เคลย์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900° C ลักษณะชิ้นงานแสดงดังตารางที่ 9 จากผลการวิเคราะห์ภาพ SEM พบว่า นาโนซิลเวอร์เคลย์ก่อนเผาอนุภาคของโลหะเงินจะเป็นเม็ดเล็กๆ มีช่องว่างและรูพรุนจำนวนมาก ส่วนนาโนซิลเวอร์เคลย์ที่เผาทั้ง 3 อุณหภูมิคือ 700 , 800 และ 900° C เมื่อเผาแล้วอนุภาคของโลหะเงินรวมตัวเป็นโลหะเงิน มีผิวที่เรียบขึ้น ปริมาณพื้นที่ผิวลดลง และความพรุนลดลงเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น ดังแสดงในรูป 41

ตารางที่ 9 นาโนซิลเวอร์เคลย์เผาที่อุณหภูมิ 700-900° C

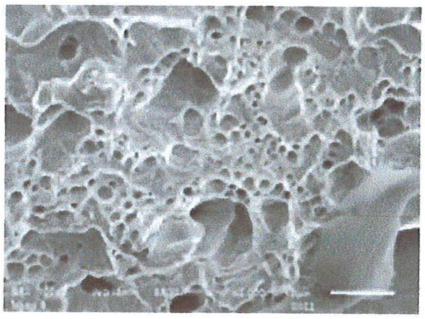
อุณหภูมิ	ก่อนเผา	หลังเผา
700° C		
800° C		
900° C		



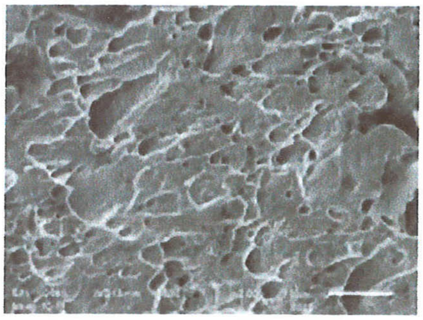
ก. นาโนซิลเวอร์เคลย์ที่ยังไม่ได้ผ่านการเผา



ข. นาโนซิลเวอร์เคลย์เผาที่อุณหภูมิ 700° C



ค. นาโนซิลเวอร์เคลย์เผาที่อุณหภูมิ 800° C



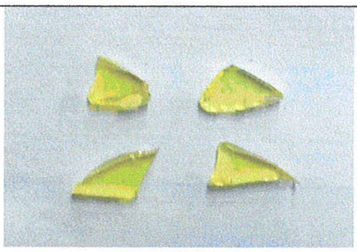
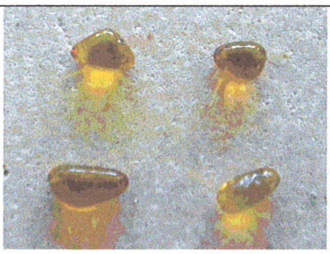
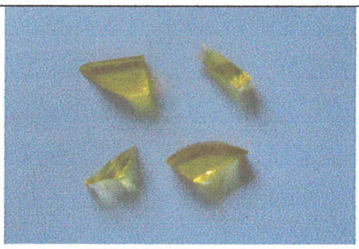
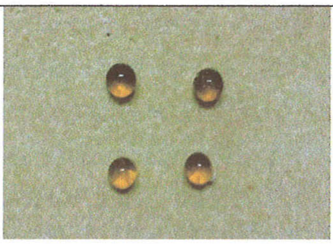
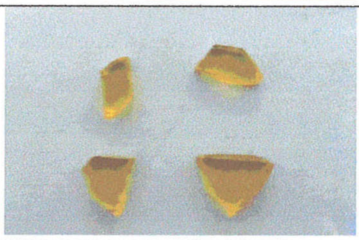
ง. นาโนซิลเวอร์เคลย์เผาที่อุณหภูมิ 900° C

รูปที่ 41 (ก) ภาพ SEM นาโนซิลเวอร์เคลย์ที่ยังไม่ได้ผ่านการเผา, (ข) ภาพ SEM นาโนซิลเวอร์เคลย์เผาที่อุณหภูมิ 700° C, (ค) ภาพ SEM นาโนซิลเวอร์เคลย์เผาที่อุณหภูมิ 800° C และ (ง) ภาพ SEM นาโนซิลเวอร์เคลย์เผาที่อุณหภูมิ 900° C

4.4.6.2 ผลการศึกษาการเผาแก้ว

การทดลองในส่วนนี้เพื่อต้องการศึกษารูปร่างและสีสันของแก้วที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิที่ใช้เผา สำหรับเป็นแนวทางในการเลือกอุณหภูมิที่ใช้เผาให้เหมาะสมกับชิ้นงานที่ออกแบบไว้ จึงนำตัวอย่างแก้วสีเหลืองและสีเขียวมาทดลองเผาที่อุณหภูมิเดียวกัน ได้ผลดังตารางที่ 10 และ 11

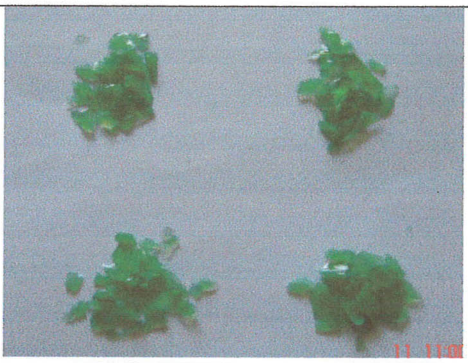
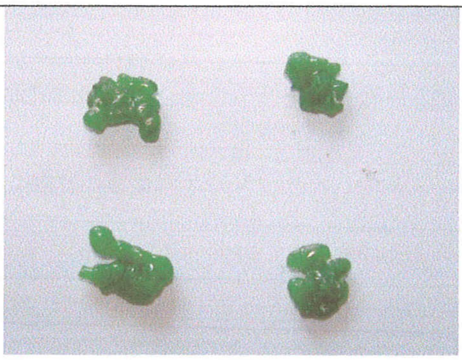
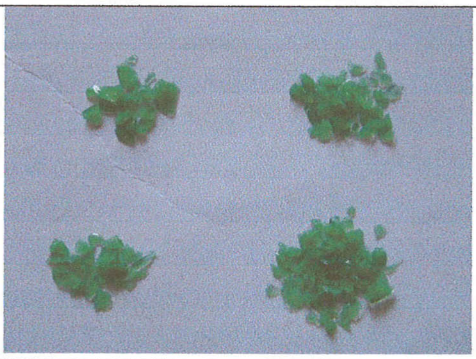
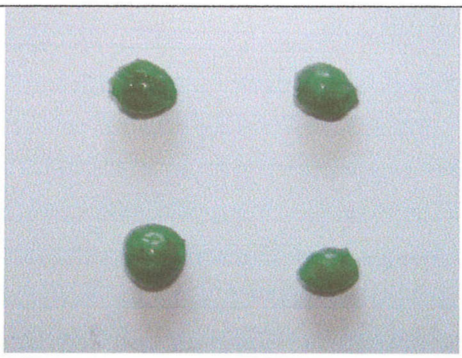
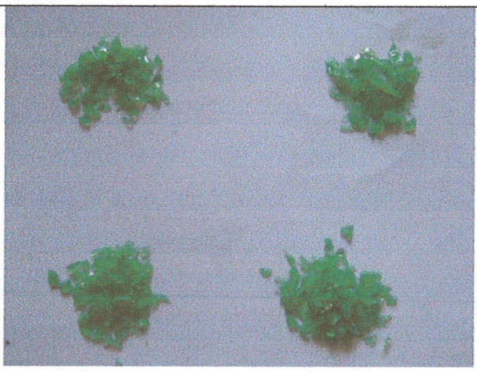
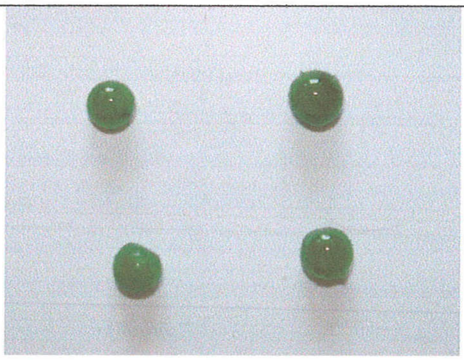
ตารางที่ 10 การทดลองเผาเศษแก้วสีเหลือง ชนิด Borosilicate

อุณหภูมิ	ก่อนเผา	หลังเผา
700° C		
800° C		
900° C		หลอมละลายติดแผ่นรองเตา

จากผลการทดลองพบว่า เศษแก้วสีเหลืองที่เผาที่อุณหภูมิ 700° C มีการเปลี่ยนรูปร่างไปเล็กน้อยเท่านั้นและมีสีเข้มขึ้น เศษแก้วสีเหลืองที่เผาที่อุณหภูมิ 800° C จะหลอมเข้ามาติดกันจนมีรูปร่างกลม และมีสีเข้มขึ้นจนถึงสีน้ำตาล และเศษแก้วหลอมละลายที่อุณหภูมิ 900° C และมีสีดำ สำหรับเศษแก้วสีเขียวมีผลการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากการเผาเช่นเดียวกัน เศษแก้วสีเขียวที่เผาที่อุณหภูมิ 700°C มีรูปร่างเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยจากการหลอม แต่ละชิ้นไม่หลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน ยังคงรูปร่างเดิมก่อนเผาไว้บางส่วน และสีไม่เปลี่ยนแปลง เศษแก้วสีเขียวที่เผาที่อุณหภูมิ 800°C หลอมเป็นชิ้นเดียวกัน มีลักษณะผิวด้านและสีไม่เปลี่ยนแปลง เศษแก้วสีเขียวที่เผาที่อุณหภูมิ 900°C มีรูปร่างกลมมีลักษณะผิวมันวาวขึ้นและสีไม่

เปลี่ยนแปลง ดังนั้นหากต้องการเลือกเทคนิคในการเผาที่ให้แก้วติดกันแต่ยังคงรูปร่างเดิมอยู่ ควรเลือกเผาที่อุณหภูมิ 700°C แต่หากต้องการเผาให้แก้วหลอมเป็นเนื้อเดียวกัน ควรเลือกเผาที่อุณหภูมิ 800°C

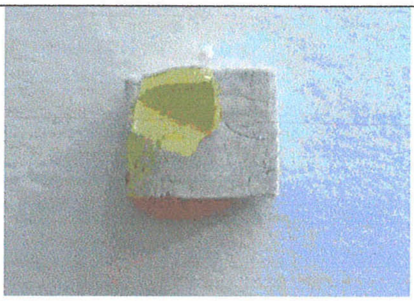
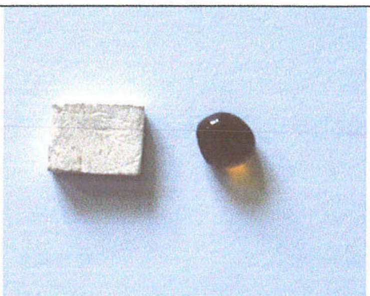
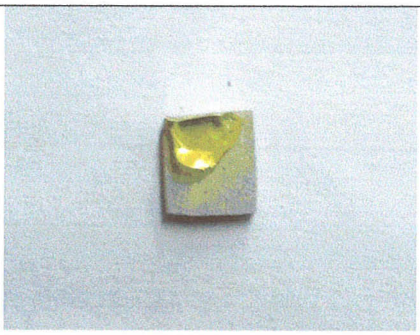
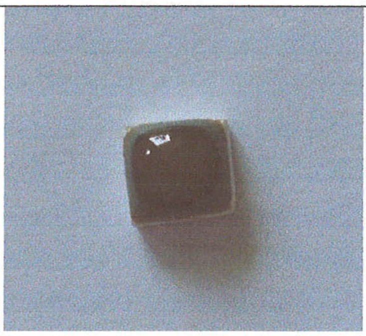
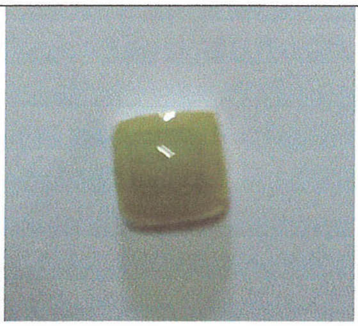
ตารางที่ 11 การทดลองเผาเศษแก้วสีเขียว

อุณหภูมิ	ก่อนเผา	หลังเผา
700° C		
800° C		
900° C		

4.4.6.3 การทดลองเผาแก้วพร้อมนาโนซิลเวอร์เคลย์ในแบบต่างๆ

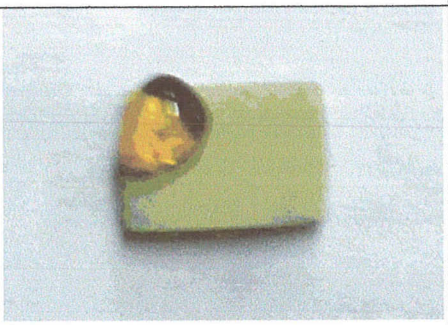
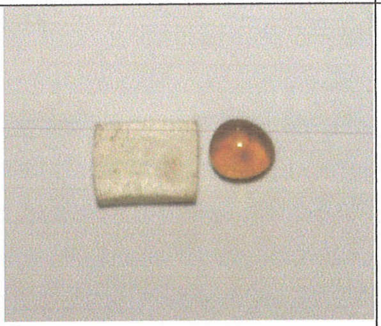
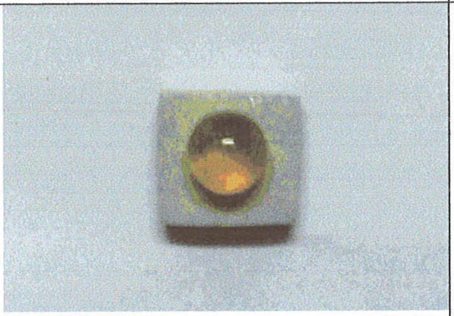
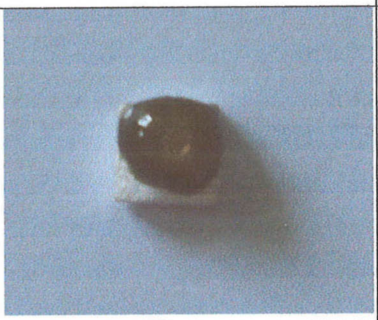
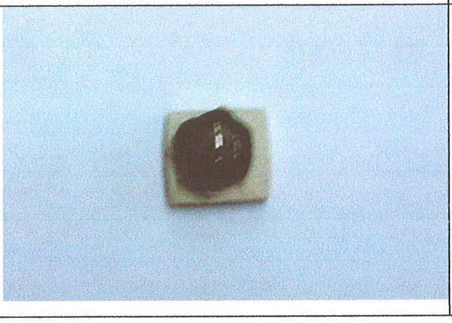
การทดลองส่วนนี้จะทำการทดลองตามตางรางที่ 8 โดยทำการศึกษาอุณหภูมิในการเกาะติดแก้วที่เหมาะสมทั้ง 6 วิธี การทดลองวิธีต่างๆ โดยทำการเผาเศษแก้วสีเหลือง และผงแก้วสีเหลือง ได้ผลการทดลองแสดงดังตาราง 12-17 สำหรับการทดลองของเศษแก้วสีเขียว และผงแก้วเขียว แสดงดังตาราง 18-23

ตารางที่ 12 การเผาซิลเวอร์เคลย์ดิบพร้อมกับเศษแก้วสีเหลืองที่ยังไม่ได้ผ่านการหลอม (วิธีที่ 1)

อุณหภูมิ	ก่อนเผา	หลังเผา	ลักษณะชิ้นงาน
700° C			แก้วมีสีส้ม แก้วไม่ติดกับนาโนซิลเวอร์เคลย์
800° C			แก้วมีสีเหลืองดำ และ บริเวณขอบมีสีดำ
900° C			แก้วมีสีเทาขุ่นมากๆ

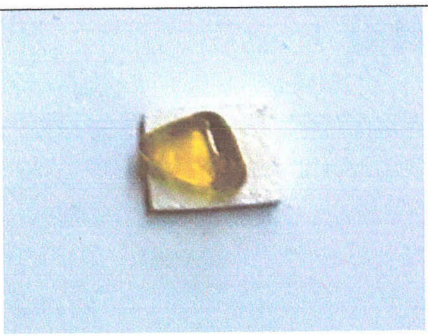
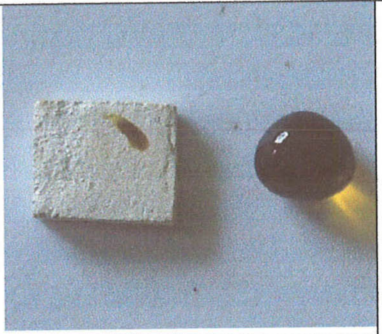
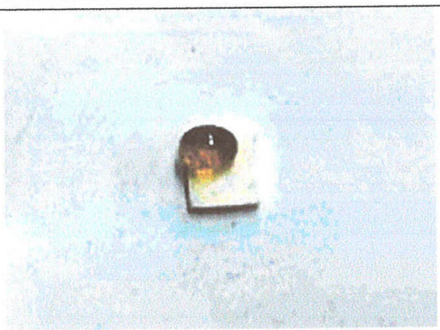
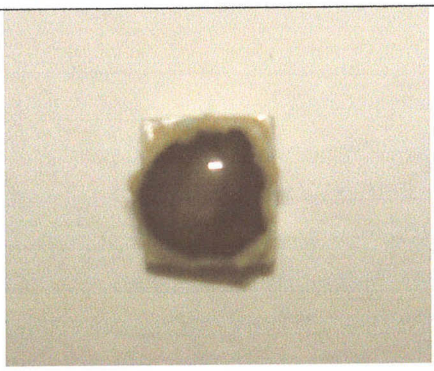
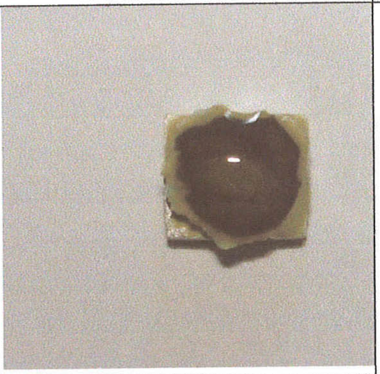
จากผลการทดลองในตารางที่ 12 การเผาเศษแก้วสีเหลืองตามวิธีที่ 1 นี้ พบว่าเมื่อเผาแล้วแก้วมีสีเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากทั้ง 3 อุณหภูมิ และที่อุณหภูมิ 700°C เศษแก้วไม่ติดนาโนซิลเวอร์เคลย์ เนื่องจากชิ้นงานแก้วมีผิวเรียบ ทำให้เมื่อเผาไม่มีการยึดติดกับซิลเวอร์เคลย์ ดังนั้นจึงไม่เลือกวิธีที่ 1 นี้มาเป็นเทคนิคสำหรับขึ้นรูปเครื่องประดับนาโนซิลเวอร์เคลย์พร้อมแก้ว

ตารางที่ 13 การเผานาโนซิลเวอร์เคลย์ดิบพร้อมกับเศษแก้วสีเหลืองที่ทำการหลอมแล้ว (วิธีที่ 2)

อุณหภูมิ	ก่อนเผา	หลังเผา	ลักษณะชิ้นงาน
700° C			แก้วมีสีส้ม แก้วไม่ติดกับนาโนซิลเวอร์เคลย์
800° C			แก้วมีสีเหลืองดำ และบริเวณขอบมีสีดำ
900° C			แก้วมีสีเหลืองดำ มีรอยแตกสีดำที่ผิว

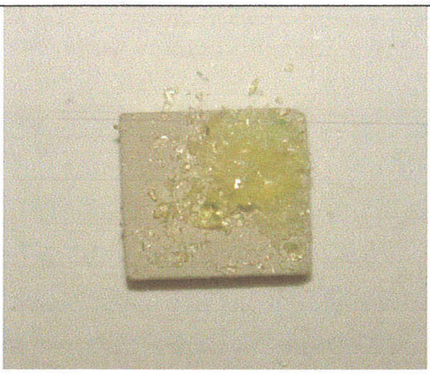
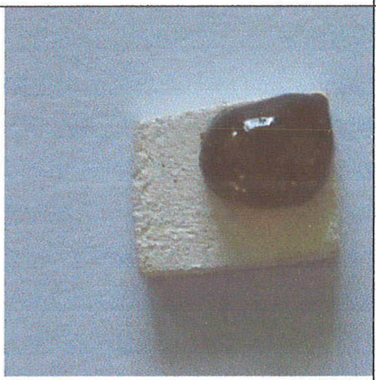
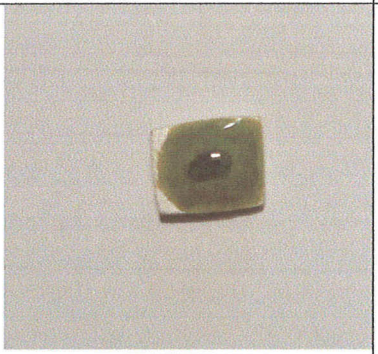
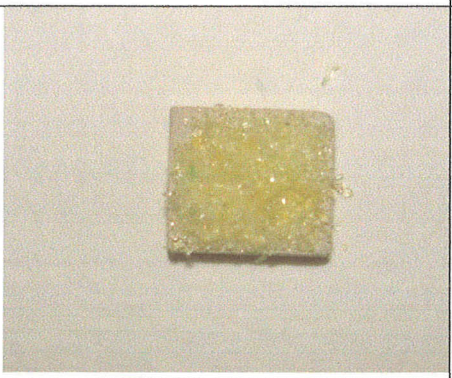
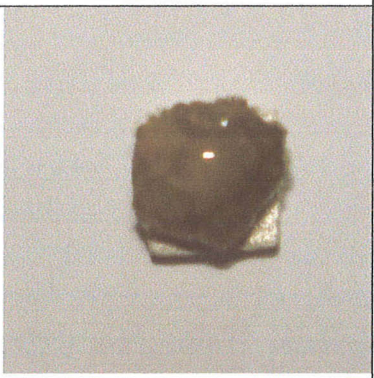
จากผลการทดลองในตารางที่ 13 การเผาเศษแก้วสีเหลืองตามวิธีที่ 2 นี้ พบว่าเมื่อเผาแล้วแก้วมีสีเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากทั้ง 3 อุณหภูมิ และที่อุณหภูมิ 700 และ 900°C เศษแก้วไม่ติดนาโนซิลเวอร์เคลย์ ดังนั้นจึงไม่เลือกวิธีที่ 2 นี้มาเป็นเทคนิคสำหรับขึ้นรูปเครื่องประดับ

ตารางที่ 14 การเผาซิลเวอร์เคลย์ที่ผ่านการเผาแล้วพร้อมกับเศษแก้วสีเหลืองที่ผ่านการหลอมแล้ว (วิธีที่ 3)

อุณหภูมิ	ก่อนเผา	หลังเผา	ลักษณะชิ้นงาน
700° C			แก้วมีสีส้ม แก้วไม่ติดกับนาโนซิลเวอร์เคลย์
800° C			แก้วมีสีส้ม แก้วไม่ติดกับนาโนซิลเวอร์เคลย์
900° C			แก้วมีสีเหลืองดำ มีรอยแตกสีดำที่ผิว

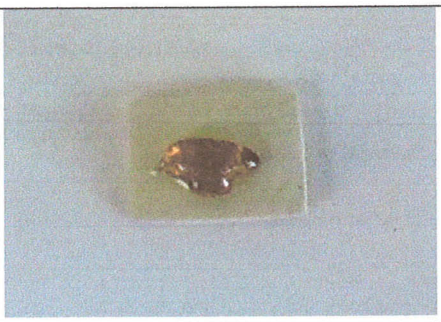
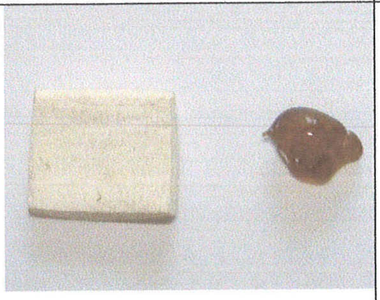
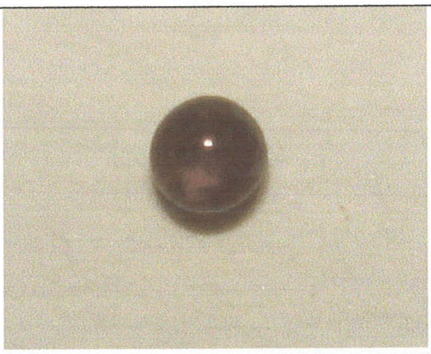
จากผลการทดลองในตารางที่ 14 การเผาเศษแก้วสีเหลืองตามวิธีที่ 3 นี้ พบว่าเมื่อเผาแล้วแก้วมีสีเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากทั้ง 3 อุณหภูมิ และที่อุณหภูมิ 700 และ 800°C และเศษแก้วไม่ติดนาโนซิลเวอร์เคลย์ แต่ที่อุณหภูมิ 900°C สีของแก้วเปลี่ยนเป็นสีดำ อาจเกิดจากการสลายตัวของธาตุให้สีที่เป็นองค์ประกอบของแก้ว ดังนั้นจึงไม่เลือกวิธีที่ 3 นี้มาเป็นเทคนิคสำหรับขึ้นรูปเครื่องประดับ

ตารางที่ 15 การเผานาโนซิลเวอร์เคลย์ดิบพร้อมกับผงแก้วสีเหลืองที่ยังไม่ได้หลอม (วิธีที่ 4)

อุณหภูมิ	ก่อนเผา	หลังเผา	ลักษณะชิ้นงาน
700° C			แก้วมีสีน้ำตาล
800° C			แก้วมีสีเทาขุ่นตรงกลางดำ
900° C			แก้วมีสีเหลืองดำ มีรอยแตกสีดำที่ผิว

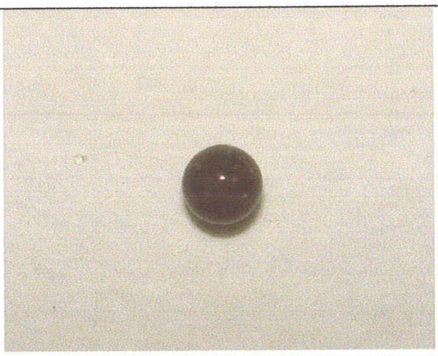
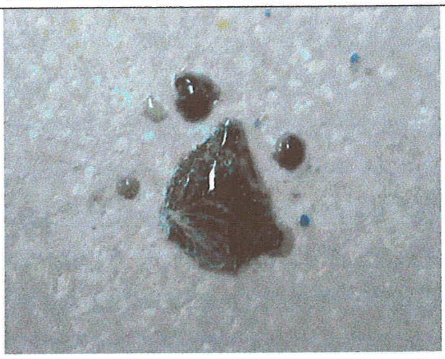
จากผลการทดลองในตารางที่ 15 การเผาผงแก้วสีเหลืองตามวิธีที่ 4 นี้ พบว่าผงแก้วจะติดนาโนซิลเวอร์เคลย์ทั้ง 3 อุณหภูมิ แต่สีของแก้วเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีน้ำตาลเข้ม ดังนั้นจึงเลือกวิธีที่ 4 นี้มาทดสอบการเกาะติดของชิ้นงานต่อไป

ตารางที่ 16 การเผานาโนซิลเวอร์เคลย์ดิบพร้อมกับผงแก้วสีเหลืองที่ผ่านการหลอมแล้ว (วิธีที่ 5)

อุณหภูมิ	ก่อนเผา	หลังเผา	ลักษณะชิ้นงาน
700° C			แก้วมีสีน้ำตาล แก้วไม่ติดกับนาโนซิลเวอร์
800° C		-	เมื่อเผาแก้วแล้ว แก้วมีสีน้ำตาลดำ เลยไม่นำไปเผากับนาโนซิลเวอร์เคลย์ต่อ
900° C		-	เมื่อเผาแก้วแล้ว แก้วหลอมละลายติดแผ่นรองเตา

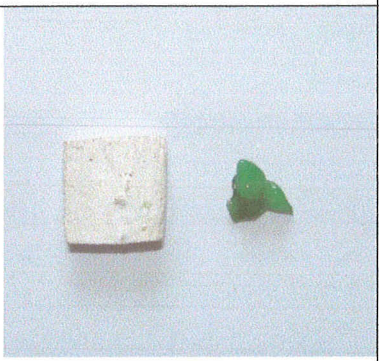
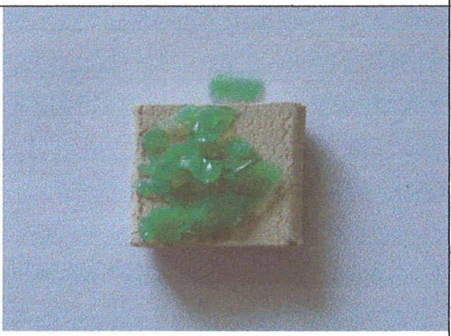
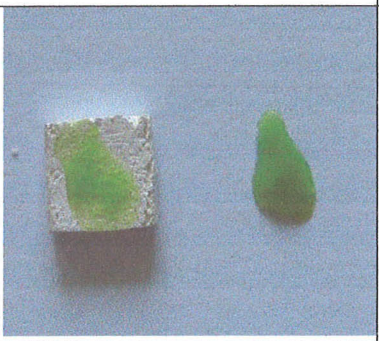
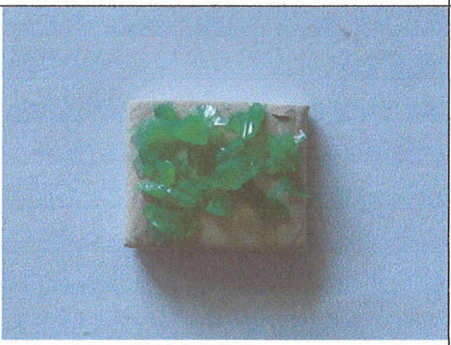
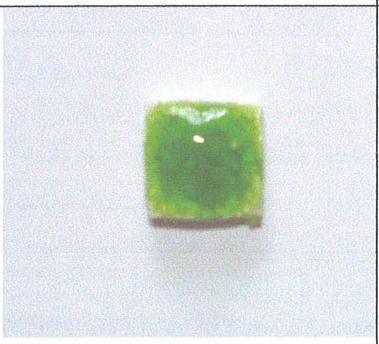
จากผลการทดลองตามตารางที่ 16 การเผาผงแก้วสีเหลืองตามวิธีที่ 5 นี้ พบว่าเมื่อเผาแล้วผงแก้วมีสีเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากทั้ง 3 อุณหภูมิ และผงแก้วไม่ติดนาโนซิลเวอร์เคลย์ ดังนั้นจึงไม่เลือกวิธีที่ 5 นี้มาเป็นเทคนิคสำหรับขึ้นรูปเครื่องประดับ

ตารางที่ 17 การเผานาโนซิลเวอร์เคลย์ที่เผาแล้วพร้อมกับผงแก้วสีเหลืองที่ผ่านการหลอมแล้ว (วิธีที่ 6)

อุณหภูมิ	ก่อนเผา	หลังเผา	ลักษณะชิ้นงาน
700° C			แก้วมีสีส้ม น้ำตาล แก้วไม่ติดกับนาโนซิลเวอร์เคลย์
800° C		-	เมื่อเผาแก้วแล้ว แก้วมีสีน้ำตาลดำ เลยไม่นำไปเผากับนาโนซิลเวอร์เคลย์ต่อ
900° C		-	เมื่อเผาแก้วแล้ว แก้วหลอมละลายติดแผ่นรองเตา

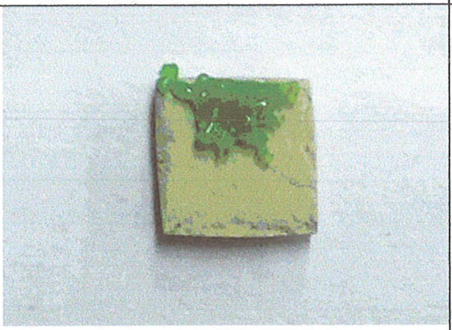
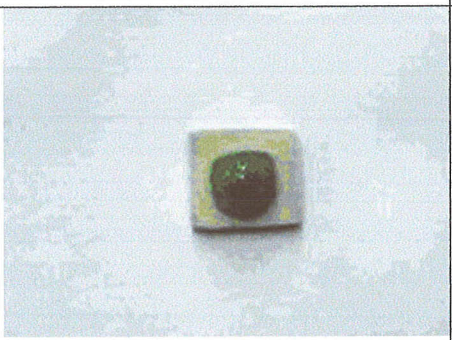
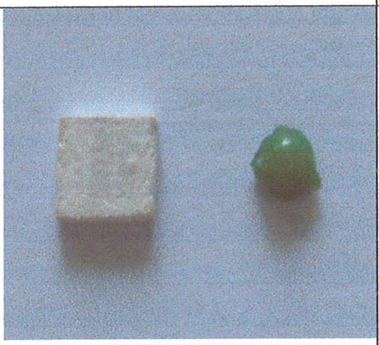
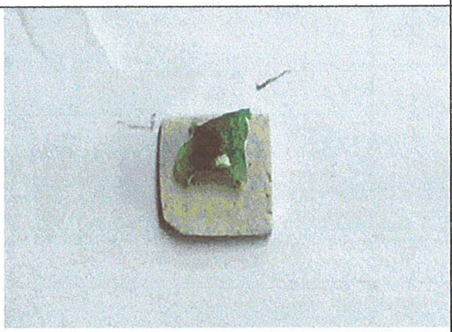
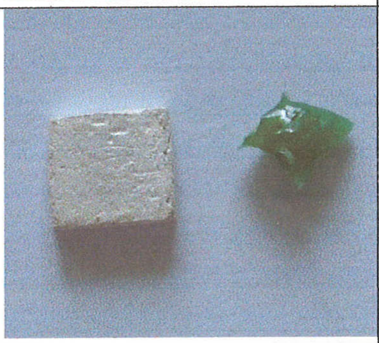
จากผลการทดลองตามตารางที่ 17 การเผาผงแก้วสีเหลืองตามวิธีที่ 6 นี้ พบว่าเมื่อเผาแล้วผงแก้วมีสีเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากทั้ง 3 อุณหภูมิ และผงแก้วก็ไม่ติดนาโนซิลเวอร์เคลย์ ดังนั้นจึงไม่เลือกวิธีที่ 6 นี้มาเป็นเทคนิคสำหรับขึ้นรูปเครื่องประดับ

ตารางที่ 18 การเผานาโนซิลเวอร์เคลย์ดิบพร้อมเศษแก้วสีเขียวที่ยังไม่ได้ผ่านการหลอมพร้อมกัน (วิธีที่ 1)

อุณหภูมิ	**ก่อนเผา**	**หลังเผา**	**ลักษณะชิ้นงาน**
700° C			แก้วมีสีเขียว แก้วไม่ติดกับนาโนซิลเวอร์เคลย์
800° C			แก้วมีสีเขียว แก้วไม่ติดกับนาโนซิลเวอร์เคลย์
900° C			แก้วมีสีเขียว

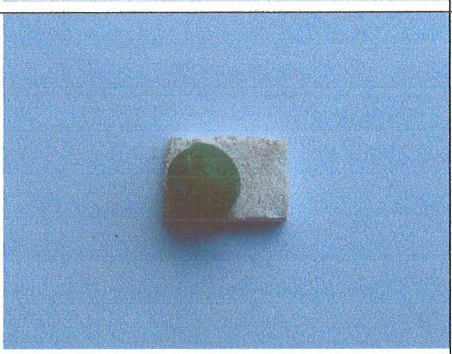
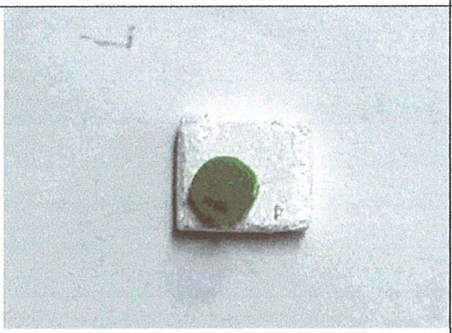
จากผลการทดลองตามตารางที่ 18 การเผาเศษแก้วสีเขียวตามวิธีที่ 1 นี้ พบว่าเมื่อเผาแล้วทั้ง 3 อุณหภูมิเศษแก้วสีเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเล็กน้อย แต่ไม่เลือกวิธีที่ 1 นี้มาเป็นเทคนิคสำหรับขึ้นรูปเครื่องประดับ เนื่องจากวิธีนี้ที่อุณหภูมิ 700 และ 800° C เศษแก้วยังไม่ติดกับนาโนซิลเวอร์เคลย์

ตารางที่ 19 การเผานาโนซิลเวอร์เคลย์ดิบพร้อมเศษแก้วสีเขียวที่ทำการหลอมแล้วที่อุณหภูมิต่างๆ (วิธีที่ 2)

อุณหภูมิ	ก่อนเผา	หลังเผา	ลักษณะชิ้นงาน
700° C			แก้วมีสีเขียว แก้วไม่ติดกับนาโนซิลเวอร์เคลย์
800° C			แก้วมีสีเขียว แก้วไม่ติดกับนาโนซิลเวอร์เคลย์
900° C			แก้วมีสีเขียว แก้วไม่ติดกับนาโนซิลเวอร์เคลย์

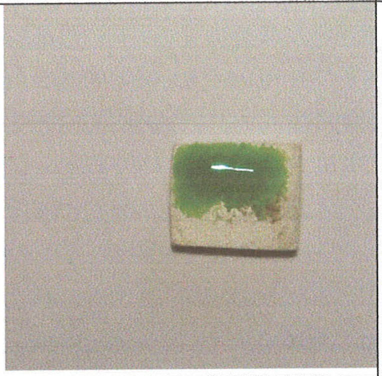
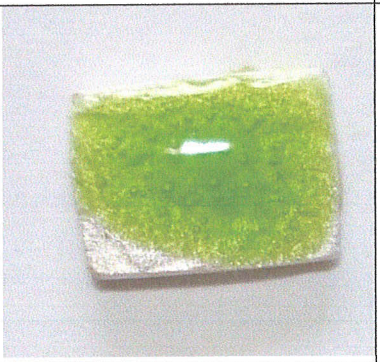
จากผลการทดลองตามตารางที่ 19 การเผาเศษแก้วสีเขียวตามวิธีที่ 2 นี้ พบว่า เมื่อเผาแล้วทั้ง 3 อุณหภูมิเศษแก้วสีเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมน้อยมาก แต่ไม่เลือกวิธีที่ 2 นี้มาเป็นเทคนิคสำหรับขึ้นรูปเครื่องประดับ เนื่องจากวิธีนี้เศษแก้วยังไม่ติดกับนาโนซิลเวอร์เคลย์

ตารางที่ 20 การเผานาโนซิลเวอร์เคลย์ที่เผาแล้วพร้อมกับเศษแก้วสีเขียวที่ผ่านการหลอมแล้ว (วิธีที่ 3)

อุณหภูมิ	ก่อนเผา	หลังเผา	ลักษณะชิ้นงาน
700° C			แก้วมีสีเขียว แก้วไม่ติดกับนาโนซิลเวอร์เคลย์
800° C			แก้วมีสีเขียว แก้วไม่ติดกับนาโนซิลเวอร์เคลย์
900° C			แก้วมีสีเขียว แก้วไม่ติดกับนาโนซิลเวอร์เคลย์

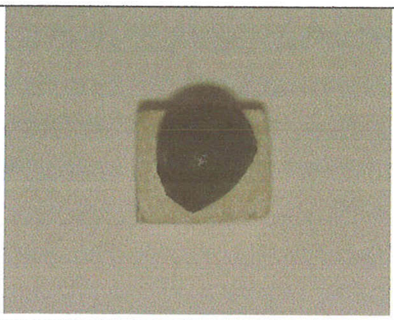
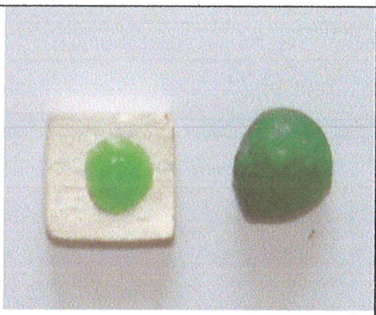
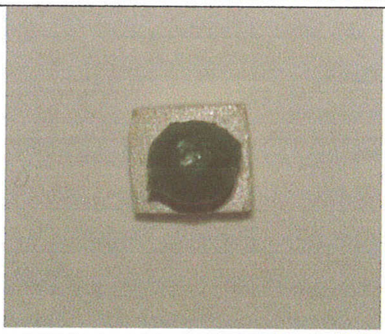
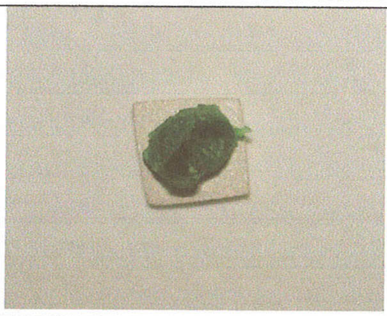
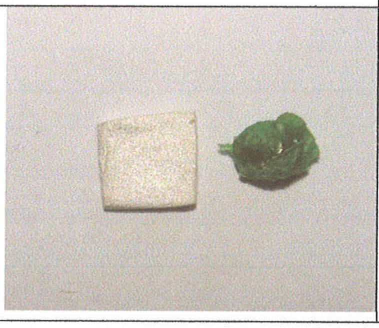
จากผลการทดลองตามตารางที่ 20 การเผาเศษแก้วสีเขียวตามวิธีที่ 3 นี้ พบว่าเมื่อเผาแล้วทั้ง 3 อุณหภูมิเศษแก้วสีเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมน้อยมาก แต่ไม่เลือกวิธีที่ 3 นี้มาเป็นเทคนิคสำหรับขึ้นรูปเครื่องประดับ เนื่องจากวิธีนี้เศษแก้วยังไม่ติดกับนาโนซิลเวอร์เคลย์

ตารางที่ 21 การเผานาโนซิลเวอร์เคลย์ดิบพร้อมกับผงแก้วสีเขียวที่ยังไม่ได้หลอม (วิธีที่ 4)

อุณหภูมิ	ก่อนเผา	หลังเผา	ลักษณะชิ้นงาน
700° C			แก้วมีสีเขียว แก้วติดนาโนซิลเวอร์เคลย์
800° C			แก้วมีสีเขียวอ่อน แก้วติดนาโนซิลเวอร์เคลย์
900° C			แก้วมีสีเขียวอ่อน แก้วติดนาโนซิลเวอร์เคลย์

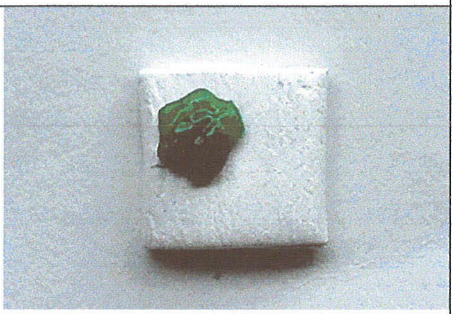
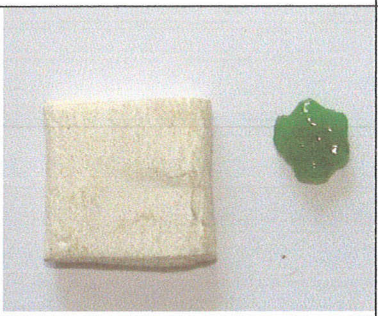
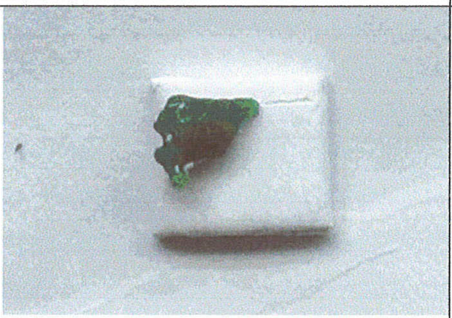
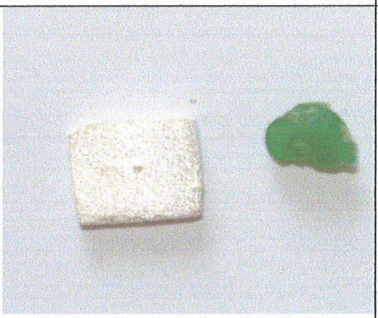
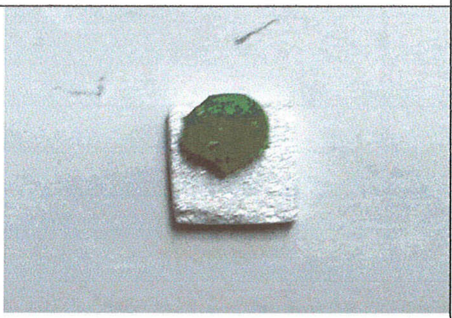
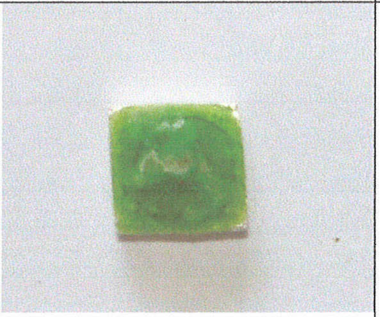
จากผลการทดลองตามตารางที่ 21 การเผาผงแก้วสีเขียวตามวิธีที่ 4 นี้ พบว่าเมื่อเผาแล้วทั้ง 3 อุณหภูมิผงแก้วสีเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเล็กน้อย และผงแก้วก็ติดกับนาโนซิลเวอร์เคลย์ด้วย ดังนั้นจึงเลือกวิธีที่ 4 นี้มาทดสอบการเกาะติดของชิ้นงาน และใช้ผงแก้วสีเขียวนี้มาทำเครื่องประดับเพราะสีของผงแก้วเปลี่ยนเล็กน้อยเท่านั้น

ตารางที่ 22 การเผานาโนซิลเวอร์เคลย์ดิบพร้อมกับผงแก้วสีเขียวที่ผ่านการหลอมแล้ว (วิธีที่ 5)

อุณหภูมิ	ก่อนเผา	หลังเผา	ลักษณะชิ้นงาน
700° C			แก้วมีสีเขียว แก้วไม่ติดกับนาโนซิลเวอร์เคลย์
800° C			แก้วมีสีเขียว แก้วไม่ติดกับนาโนซิลเวอร์เคลย์
900° C			แก้วมีสีเขียว แก้วไม่ติดกับนาโนซิลเวอร์เคลย์

จากผลการทดลองตามตารางที่ 22 การเผาผงแก้วสีเขียวตามวิธีที่ 5 นี้ พบว่าเมื่อเผาแล้วทั้ง 3 อุณหภูมิผงแก้วสีเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมน้อยมาก แต่ไม่เลือกวิธีที่ 5 นี้มาเป็นเทคนิคสำหรับขึ้นรูปเครื่องประดับ เนื่องจากวิธีนี้ผงแก้วยังไม่ติดกับนาโนซิลเวอร์เคลย์

ตารางที่ 23 การเผานาโนซิลเวอร์เคลย์ที่เผาแล้วพร้อมกับผงแก้วสีเขียวที่ผ่านการหลอมแล้ว (วิธีที่ 6)

อุณหภูมิ	ก่อนเผา	หลังเผา	ลักษณะชิ้นงาน
700° C			แก้วมีสีเขียว แก้วไม่ติดกับนาโนซิลเวอร์เคลย์
800° C			แก้วมีสีเขียว แก้วไม่ติดกับนาโนซิลเวอร์เคลย์
900° C			แก้วมีสีเขียว แก้วติดกับนาโนซิลเวอร์เคลย์

จากผลการทดลองตามตารางที่ 23 การเผาผงแก้วสีเขียวตามวิธีที่ 6 นี้ พบว่าเมื่อเผาแล้วทั้ง 3 อุณหภูมิผงแก้วสีเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมน้อยมาก แต่ไม่เลือกวิธีที่ 6 นี้มาเป็นเทคนิคสำหรับขึ้นรูปเครื่องประดับ เนื่องจากวิธีนี้ผงแก้วยังไม่ติดกับนาโนซิลเวอร์เคลย์

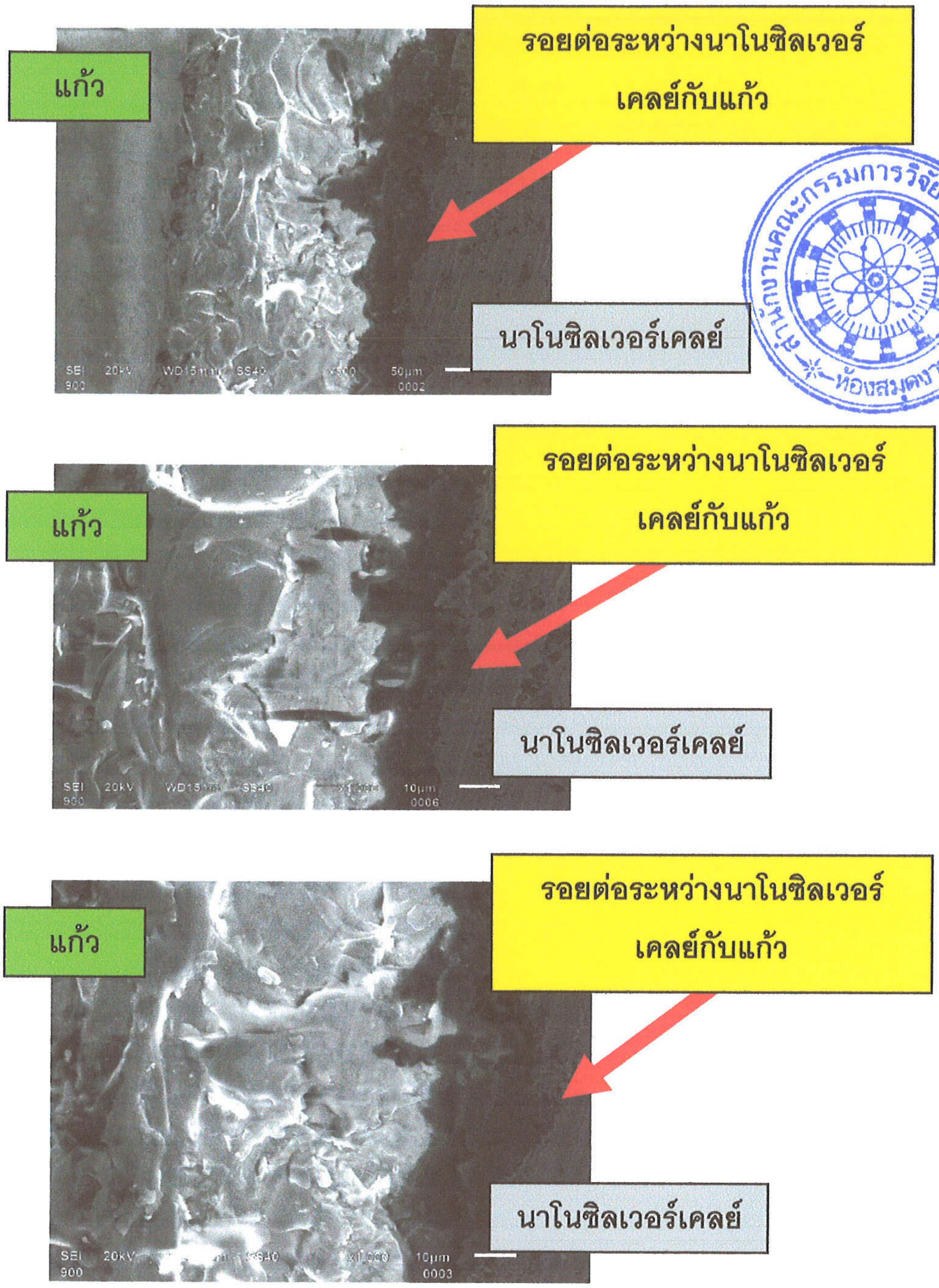
4.4.6.3 ผลการทดสอบการเกาะติดของชิ้นงาน

จากการทดลองในข้อ 4.4.6.2 การทดสอบการเกาะติดนี้เราเลือกวิธี 4 คือการเผานาโนซิลเวอร์เคลย์ดิบพร้อมกับผงแก้วที่ยังไม่ได้หลอม มาทำการทดสอบการเกาะติดของชิ้นงานทั้ง 3 อุณหภูมิ โดยดูการเกาะติดระหว่างแก้วกับนาโนซิลเวอร์เคลย์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลการวิเคราะห์

ของแก้วสีเหลืองและสีเขียวเป็นเช่นเดียวกัน ตัวอย่างภาพ SEM ที่นำมาวิเคราะห์การเกาะติดของแก้วสีเขียวแสดงดังรูปที่ 42 - 44

รูปที่ 42 ภาพ SEM บริเวณรอยต่อของแก้วสีเขียวกับนาโนซิลเวอร์เคลย์ที่บริเวณต่างๆ ที่เผาที่อุณหภูมิ 700°C กำลังขยาย 250X และ 500X

รูปที่ 43 ภาพ SEM บริเวณรอยต่อของแก้วสีเขียวกับนาโนซิลเวอร์เคลย์ที่บริเวณต่างๆ ที่เผาที่อุณหภูมิ 800°C กำลังขยาย 500X และ 1,000X

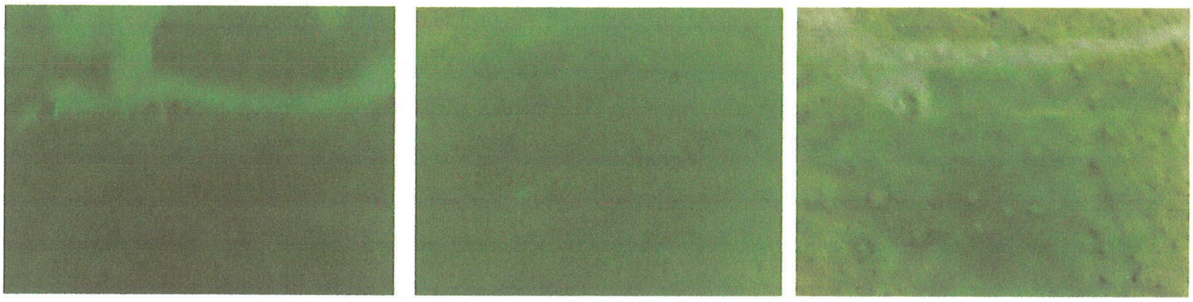


สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย

รูปที่ 44 ภาพ SEM บริเวณรอยต่อของแก้วสีเขียวกับนาโนซิลเวอร์เคลย์ที่บริเวณต่างๆ ที่เผาที่อุณหภูมิ 900°C กำลังขยาย 500X และ 1,000X

จากผลการวิเคราะห์ภาพ SEM ในรูปที่ 42-44 พบว่าที่อุณหภูมิ 700°C การเกาะติดกันของแก้วกับนาโนซิลเวอร์เคลย์ยังไม่ดี เห็นรอยต่อระหว่างแก้วกับนาโนซิลเวอร์เคลย์ซึ่งยังแบ่งแยกชั้นกันอย่างชัดเจน ส่วนผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 800 และ 900°C การเกาะติดกันของแก้วกับนาโนซิลเวอร์เคลย์มีการยึดเกาะกันดีในลักษณะที่เนื้อแก้วเข้าไปยึดเกาะกับนาโนซิลเวอร์เคลย์ด้านใน แต่คุณภาพชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ

800°C มีความสวยงามกว่าที่อุณหภูมิ 900°C เนื่องจากผิวแก้วที่เผาที่อุณหภูมิ 800°C ให้สีสวยงามไม่แตก แต่ในขณะที่ชิ้นงานที่เผาที่อุณหภูมิ 900°C จะมีลักษณะเป็นฟองอากาศและรอยแตก รวมทั้งมีสีเปลี่ยนเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 45



ก. ผิวแก้วเผาที่อุณหภูมิ 700°C　　ข. ผิวแก้วเผาที่อุณหภูมิ 800°C　　ค. ผิวแก้วเผาที่อุณหภูมิ 900°C

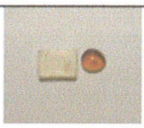
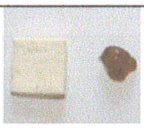
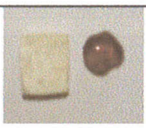
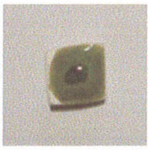
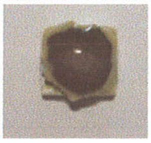
รูปที่ 45 (ก) ภาพถ่ายที่ผิวแก้วที่เผาพร้อมนาโนซิลเวอร์เคลย์ดิบเผาที่อุณหภูมิ 700°C
(ข) ภาพถ่ายที่ผิวแก้วที่เผาพร้อมนาโนซิลเวอร์เคลย์ดิบเผาที่อุณหภูมิ 800°C
(ค) ภาพถ่ายที่ผิวแก้วที่เผาพร้อมนาโนซิลเวอร์เคลย์ดิบเผาที่อุณหภูมิ 900°C

4.4.6.4 สรุปผลการทดลองในการเลือกเศษแก้วมาทำเครื่องประดับร่วมกับนาโนซิลเวอร์เคลย์

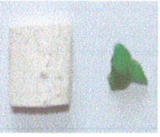
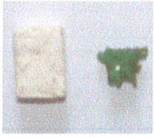
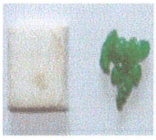
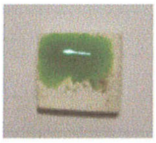
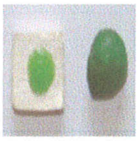
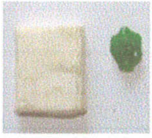
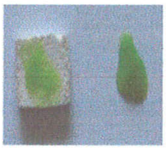
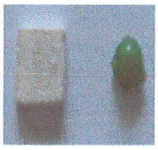
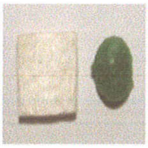
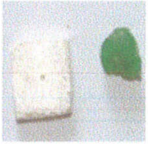
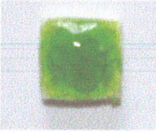
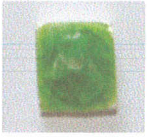
จากการศึกษาการเผาแก้วที่อุณหภูมิต่างๆ สรุปได้ดังตารางที่ 24 และ 25 พบว่าเศษแก้วสีเหลืองชนิด Borosilicate ที่เผาทั้ง 3 อุณหภูมิคือ 700, 800 และ 900°C แก้วสีเหลืองมีสีเข้มขึ้น รูปร่างของเศษแก้วสีเหลืองเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยที่อุณหภูมิ 700°C และเริ่มหลอมตัวเป็นรูปร่างกลมที่อุณหภูมิ 800°C จนถึงอุณหภูมิ 900°C เศษแก้วได้หลอมละลาย สำหรับเศษแก้วสีเขียวชนิด Borosilicate สีเปลี่ยนไปจากเดิมน้อยมากทั้ง 3 อุณหภูมิ รูปร่างของเศษแก้วสีเขียวที่อุณหภูมิ 700°C เริ่มมีการเกาะตัวกันของชิ้นเศษแก้วเล็กๆแต่ยังคงรูปร่างเดิมไว้ ส่วนที่อุณหภูมิ 800 และ 900°C แก้วหลอมรวมตัวกันมีรูปร่างกลม

ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการหลอมให้แก้วติดกันคือ 700°C แต่หากต้องการหลอมให้แก้วเป็นเนื้อเดียวกันควรเลือกเผาที่อุณหภูมิ 800°C

ตารางที่ 24 การเผาแก้วสีเหลืองเหลืองชนิด Borosilicate พร้อมนาโนซิลเวอร์เคลย์

อุณหภูมิ	วิธีที่ 1 ซิลเวอร์เคลย์ดิบ + เศษแก้วที่ยังไม่เผา	วิธีที่ 2 ซิลเวอร์เคลย์ดิบ + เศษแก้วเผาแล้ว	วิธีที่ 3 ซิลเวอร์เคลย์เผา + เศษแก้วเผาแล้ว	วิธีที่ 4 ซิลเวอร์เคลย์ดิบ + ผงแก้วที่ยังไม่เผา	วิธีที่ 5 ซิลเวอร์เคลย์ดิบ + ผงแก้วเผาแล้ว	วิธีที่ 6 ซิลเวอร์เคลย์เผา + ผงแก้วเผาแล้ว
700 °C						
800 °C						
900 °C						

ตารางที่ 25 การเผาแก้วสีเขียวชนิด Borosilicate พร้อมนาโนซิลเวอร์เคลย์

อุณหภูมิ	วิธีที่ 1 ซิลเวอร์เคลย์ดิบ + เศษแก้วที่ยังไม่เผา	วิธีที่ 2 ซิลเวอร์เคลย์ดิบ + เศษแก้วเผาแล้ว	วิธีที่ 3 ซิลเวอร์เคลย์เผา + เศษแก้วเผาแล้ว	วิธีที่ 4 ซิลเวอร์เคลย์ดิบ + ผงแก้วที่ยังไม่เผา	วิธีที่ 5 ซิลเวอร์เคลย์ดิบ + ผงแก้วเผาแล้ว	วิธีที่ 6 ซิลเวอร์เคลย์เผา + ผงแก้วเผาแล้ว
700 °C						
800 °C						
900 °C						

การเปลี่ยนสีของแก้ว แก้วสีเหลืองเมื่อเผาแล้วเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลจนถึงสีเหลืองดำ เนื่องจากธาตุแก้วสีเหลืองมียูเรเนียม (Uranium, U) เป็นองค์ประกอบที่ทำให้เกิดสีเหลือง ส่วนที่ทำให้แก้วเปลี่ยนสีเป็นสีส้มน้ำตาลจนถึงดำ ได้เนื่องจากธาตุยูเรเนียมได้รับความร้อน[9] แล้วมีการคายพลังงานนั่นเอง สำหรับแก้วสีเขียวเมื่อเผาแล้วสีเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมน้อย เนื่องจากแก้วมีเขียวมีสีที่เกิดจากโครเมียมออกไซด์ (Chromium Oxide, Cr_2O_3) ซึ่งเป็นสารที่มีความเสถียรจึงไม่ทำให้สีของแก้วเปลี่ยนแปลงไปมากเมื่อโดนความร้อน[9]

การทดสอบการเกาะติดของชิ้นงาน ผลจากภาพ SEM แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 700°C การเกาะติดยังเห็นรอยต่อระหว่างแก้วกับนาโนซิลเวอร์เคลย์ ซึ่งยังแบ่งแยกชั้นกันอย่างชัดเจน ซึ่งถ้าเลือกเผาชิ้นงานที่อุณหภูมินี้อาจทำให้แก้วหลุดออกจากนาโนซิลเวอร์เคลย์ได้ เพราะการเกาะติดยังไม่ดี ที่อุณหภูมิ 800 และ 900°C แก้วติดกับนาโนซิลเวอร์เคลย์ดี ในลักษณะที่เนื้อแก้วเข้าไปยึดเกาะกับนาโนซิลเวอร์เคลย์ด้านใน จากภาพถ่ายรูปที่ 45 ที่อุณหภูมิ 900°C สังเกตได้ว่าที่บริเวณรอยต่อระหว่างแก้วกับนาโนซิลเวอร์เคลย์จะสามารถมองเห็นฟองอากาศได้อย่างชัดเจน ในขณะที่ 800°C บริเวณรอยต่อระหว่างแก้วกับนาโนซิลเวอร์เคลย์เห็นฟองอากาศเพียงเล็กน้อยหรือแทบจะมองไม่เห็นเลย ดังนั้น จึงเลือกวิธีการที่ 4 คือการเผานาโนซิลเวอร์เคลย์ดิบพร้อมกับผงแก้วที่ยังไม่ได้หลอม เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 800°C อัตราเร่ง 20° C/นาที ยืนไฟ 1 ชั่วโมง มาทำเครื่องประดับ ต้นแบบเครื่องประดับที่ทำจากนาโนซิลเวอร์เคลย์และแก้ว แสดงดังรูปที่ 46

รูปที่ 46 ต้นแบบเครื่องประดับที่ทำจากนาโนซิลเวอร์เคลย์และแก้ว