

บทที่ 3

วัตถุดิบ วัสดุอุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

3.1 วัตถุดิบ

วัตถุดิบหลักในการนำมาใช้ในการทดลองครั้งนี้คือ

ดิน หิน แร่

1. ดินดำปิ่นผสมสำเร็จ (บริษัทคอมพาวด์เคลย์)
2. ดินขาวลำปาง (บริษัทไทยเกาลิน)
3. หินฟ้าน้ำ (บริษัทเคลย์แอนด์ มินอรัล จำกัด)
4. ควอร์ตซ์ (บริษัทเคลย์แอนด์ มินอรัล จำกัด)
5. หินปูน (บริษัทเพิ่มพูน)
6. ทัลคัม (บริษัทเพิ่มพูน)

สารเคมี (บริษัทเชอร์นิค จำกัด)

1. แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3)
2. สังกะสีออกไซด์ (ZnO)
3. เถ้ากระดูก (Bone ash)
4. ดีบุกออกไซด์ (SnO_2)
5. คอปเปอร์คาร์บอเนต (CuCO_3)
6. เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3)
7. ซิลิกอน (Si)

3.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์

3.2.1 เครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์ทดสอบ

1. เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray fluorescence : XRF)
รุ่น Magix pro T84005 บริษัท Philips
2. เครื่องเอกเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometry : XRD)
รุ่น X pert pro MPD X-ray บริษัท Panalytical
3. เครื่องวัดสี สำหรับวัดค่าสี (Color meter) Color reader CR-10 บริษัท Minolta

4. เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size analyzer) รุ่น Mastersizer S บริษัทMalvern
5. เครื่องอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ (Electron spin resonance : ESR)
รุ่น JES-RE2X ยี่ห้อ JEOL Japan.
6. เครื่องวัดค่าการขยายตัว (Thermal expansion tester)
7. เครื่องไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer)
- 3.2.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเตรียมตัวอย่างขึ้นทดสอบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์
 1. พิมพ์ปูนพลาสติกสำหรับขึ้นรูปขึ้นทดสอบ (Test piece)
 2. เวอร์เนียดิจิตอล (Digital vernier)
 3. แป้นหมุนไฟฟ้า (Potter wheel)
- 3.2.3 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเตรียมน้ำเคลือบ
 1. โกร่งบดไฟฟ้า (Electric mortar) ANM-150 , Japan.
 2. หม้อบด (Pot mill) ขนาด 1 กิโลกรัม และ 5 กิโลกรัม
 3. เครื่องชั่งไฟฟ้า(Electric balance) รุ่น PB 3002-S Mettler toledo , Switzerland
 4. เครื่องชั่งชนิดจาน ขนาด 10 กิโลกรัม
 5. ตะแกรงร่อน (Sieve) เบอร์ 200 Mesh
- 3.2.4 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการอบและเผาผลิตภัณฑ์
 1. เตาอบ อุณหภูมิ 60 ° C โดยใช้ไฟฟ้าเป็นตัวให้ความร้อน
 2. เตาเผาทดสอบขนาด 1 คิวบิกเมตร ใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิง
 3. เตาเผาผลิตภัณฑ์ขนาด 2 คิวบิกเมตร ใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิง ยี่ห้อ Port o kiln
 4. เครื่องมือวัดอุณหภูมิ (Thermocouple)
 5. เครื่องวัดปริมาณออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์
(Flue gas analyzer)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

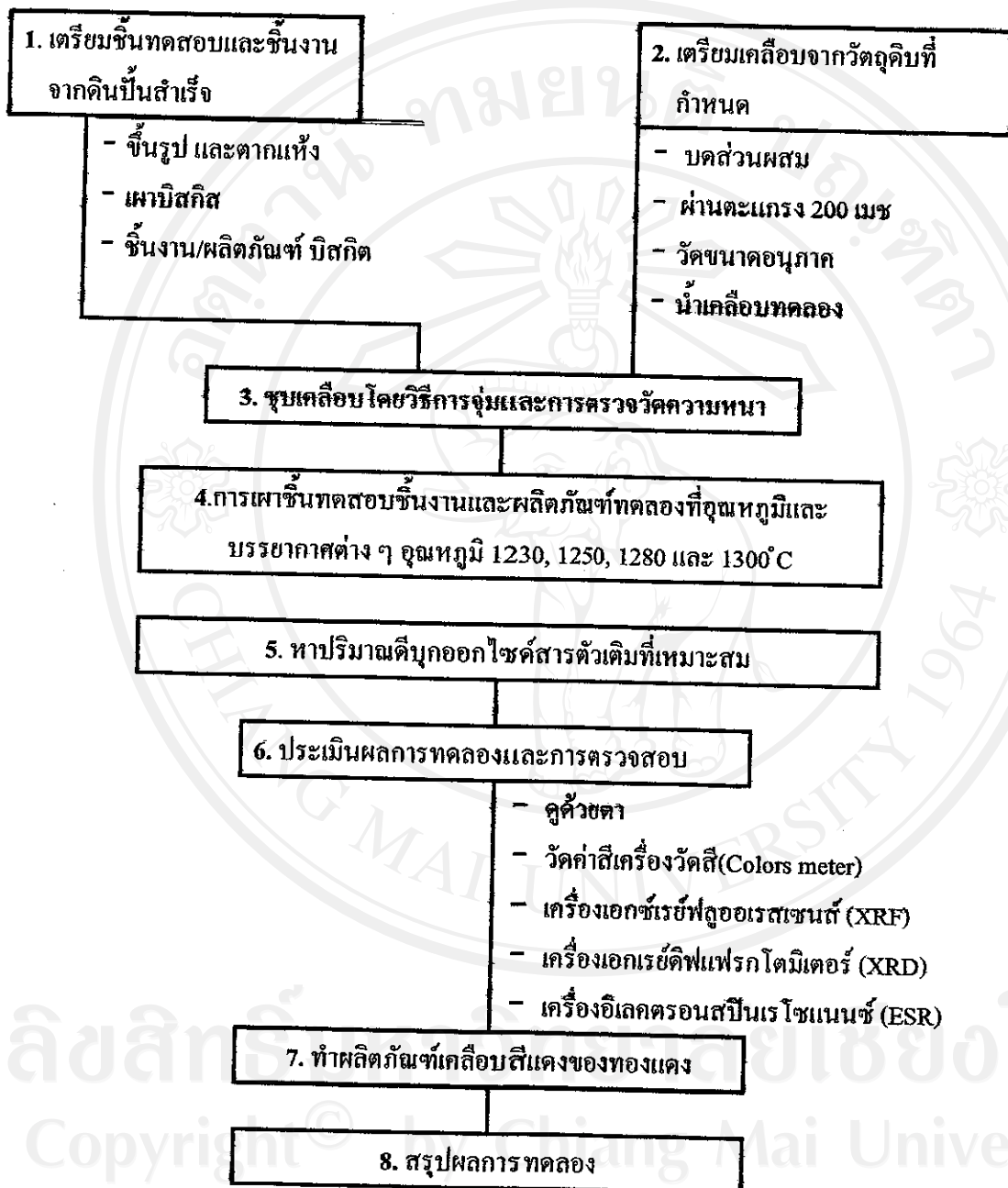
Copyright© by Chiang Mai University

All rights reserved

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานการทดลอง

แสดงเป็นแผนการทดลองตามลำดับต่อไปนี้

แผนดำเนินงาน และการทดลอง

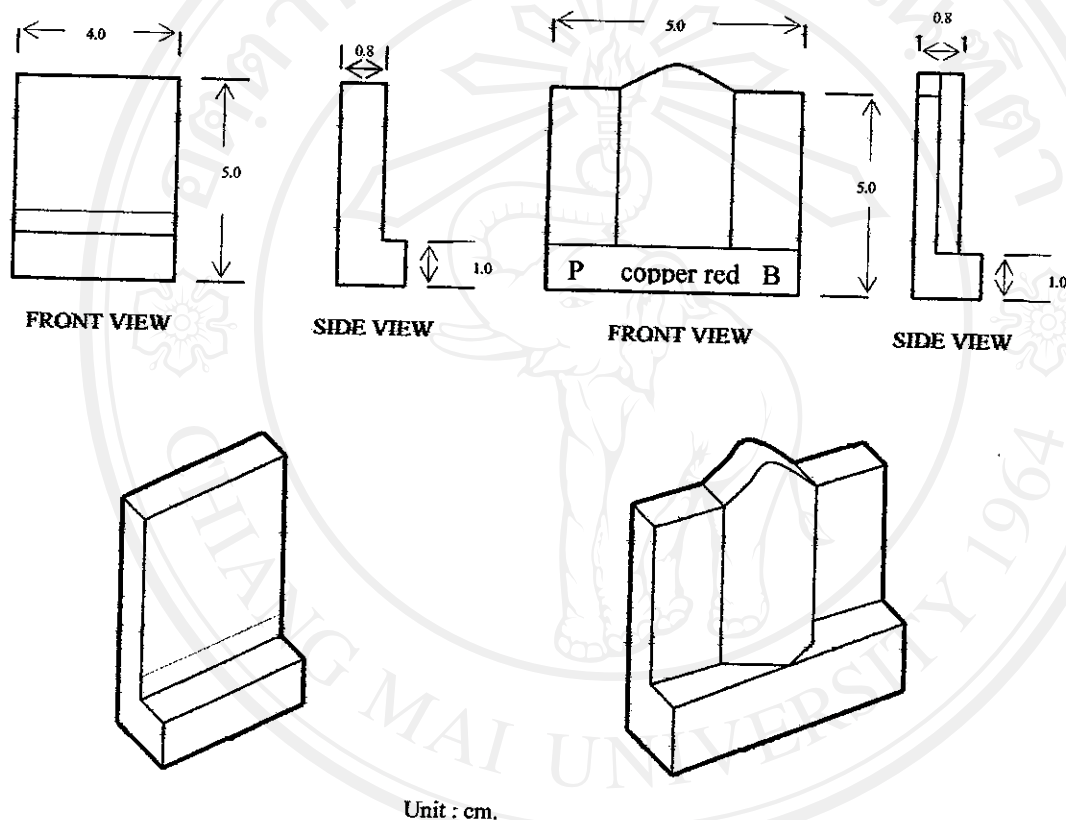


รูป 3.1 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินงานการทดลองศึกษาเคลือบสีแดงของทองแดง

3.3.1 การเตรียมชิ้นทดสอบ และชิ้นงานผลิตภัณฑ์จากดินปั้นสำเร็จรูป

3.3.1.1 ชิ้นทดสอบ (Test piece)

ดินปั้นสำเร็จจากบริษัทคอมพาวด์เคลย์ ดินผสมชนิดนี้นิยมใช้ทั่วไปในโรงงานผลิตเครื่องปั้นดินเผา โดยเฉพาะภาคเหนือจังหวัดเชียงใหม่ จังหวัดลำปาง มีความสะดวกต่อการจัดหา ดังนั้นผู้วิจัยต้องการเคลือบสีแดงของทองแดงให้มีความเหมาะสมกับดินปั้นชนิดนี้ โดยนำเนื้อดินปั้นอัดลงในแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์จำนวน 200 ชิ้น เพื่อทดสอบดูสีและการไหลตัวของเคลือบ ได้ลักษณะชิ้นทดสอบ รูป 3.1



แบบชิ้นทดสอบ 1

แบบชิ้นทดสอบ 2

รูป 3.2 แบบชิ้นทดสอบ

3.3.1.2 ชิ้นรูปชิ้นงานผลิตภัณฑ์ (Forming)

ขึ้นรูปด้วยแป้นหมุน (Throwing) เป็นวิธีที่ผลิตได้รวดเร็ว ใช้ดินสำเร็จคอมพาวด์ขึ้นรูป มีคุณสมบัติเหนียวอ่อนนุ่ม มีน้ำอยู่ในดิน 22.25 % สามารถปั้นขึ้นรูปทรงขนาดเล็กจนถึงรูปทรง

ขนาดใหญ่ได้หลากหลาย ผลิตภัณฑ์ที่ปั้นขึ้นรูป เช่น แจกันจำนวน 8 รูปทรงๆ ละ 5 ใบ แก้ว
น้ำจำนวน 50 ใบรวมทั้งหมด 90 ใบ



1



2



3



4

รูป 3.3 ตัวอย่างขั้นตอนการปั้นรูปทรงแจกันด้วยแป้นหมุน (Throwing)

3.3.1.3 ดากแห้ง (Drying)

ขั้นตอนอบและขึ้นงานที่ผ่านการตกแต่ง ดากแห้งในอุณหภูมิห้อง โดยขั้นตอนอบใช้
เวลา 2 วัน ผลิตภัณฑ์ใช้เวลา 5 วัน นำเข้าเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 60°C นาน 8 ชั่วโมง เพื่อให้
ผลิตภัณฑ์แห้งสนิท มีความชื้นไม่เกิน 2-3 %

3.3.1.4 เผาบิสกิต (Biscuit firing)

ขั้นตอนอบและขึ้นงานนำเข้าเตาเผาบิสกิต ที่อุณหภูมิ 780°C - 800°C พบว่าได้ผลิตภัณฑ์
บิสกิตมีความพรุนตัวสูง 33-35 % ของความพรุนตัวปรากฏ

3.3.2 การเตรียมน้ำเคลือบ (Glaze preparation)

3.3.2.1 สูตรเคลือบ (Glaze formula)

สูตรเคลือบต่าง ๆ ได้ตั้งต้นจากผลงานของผู้ที่เคยศึกษา และเอกสารต่าง ๆ [17,18,19,20,21]
ทำให้รวบรวมสูตรเคลือบสีแดงของทองแดงได้ 18 สูตร ผ่านกรรมวิธีชุบเคลือบและการเผาด้วย
เทคนิควิธีเป็นระบบเดียวกัน โดยการบดในโถร่ง การชุบเคลือบ กำหนดการเผาที่อุณหภูมิ 1250°C
ด้วยบรรยากาศขึ้นอุณหภูมิเป็นรีดักชัน และลดอุณหภูมิลงด้วยออกซิเดชัน นำผลการปรากฏของสี

แดงมาประเมินด้วยตาเปล่า และวัดค่าของสีด้วยเครื่องวัดสี จากนั้นปรับปรุง เปลี่ยนแปลงสูตร
เคลือบเพิ่มอีก 4 สูตร รวม 22 สูตรเคลือบ

ตาราง 3.1 สูตรเคลือบสีแดงของทองแดง จำนวน 22 สูตร

No.	เฟลตซ์ ปร %	โทนาช เฟลตซ์ปร %	ทินนุ %	แมริยม %	คินขาว %	จิงค์ %	ควอซ %	ทัลคัม %	โบน แอช %	คอป เปอร์ %	สีก ออกไซด์ %	ฟอร์ริก %
1	-	32	12	15	14.7	6	21	-	6	1.5	3	-
2	44	-	17	6	-	-	22	4	3	1	4	-
3	-	39	8.5	14	4.6	7.7	20	-	6.2	1.8	3.2	-
4	-	39	8	15	4	7	20	-	6	1.5	2.5	0.5
5	-	34	5.5	18	4	9.5	18	-	6.5	1.5	4.5	-
6	37	-	16	16	-	-	17	-	3	1	3	-
7	-	37.3	13	13	5.9	6.7	21.6	4.6	3.5	1.5	3	-
8	27	-	17	12	9	2	28	-	2	1	3	-
9	35	-	10	8	6.5	14	15	5.5	15	1	4	-
10	35.8	-	13	13.2	6	7	21.5	4.8	3.2	1.5	3	-
11	42	-	14	14	5	24	24	-	-	1.5	3	-
12	26.5	-	17.5	12.5	8.2	2.6	26.7	-	2.0	1.5	4	-
13	40	-	-	27	6	-	19	-	-	0.5	2	-
14	35.8	-	14.7	13	7	6.7	21	4	2.5	1	3	-
15	30	-	18	14	7	3	26	-	-	1.5	2	-
16	41	-	14	14	3.5	-	21	-	3.5	1	3	-
17	-	31	9	7	9	12	22	5	2	1	3	-
18	27		18	12	9	2	28	-	1	1	3	-
19	20	15	18	10	3	5	18	3	-	1.5	3.5	-
20	28		20	13	9	3	28	-	-	1.5	3	-
21	35	-	17	12	5	7	21	4	-	1.2	3	-
22	33.7	-	16.5	11.9	6.8	6.7	22.8	4.8	-	1.2	3.1	-

3.3.2.2 ขนาดอนุภาคของเกลือบ (Particle size)

ปัจจัยเกี่ยวกับเกลือบคือการมีขนาดอนุภาคที่เหมาะสม เพื่อต้องการให้เกลือบหลอมตัวได้ สมบูรณ์ ณ ที่อุณหภูมิสูงสุด จึงทดลองหาขนาดอนุภาคเกลือบโดยมีการปฏิบัติดังต่อไปนี้ นำ ส่วนผสมของเกลือบหมายเลข 22 ซึ่งปริมาณตามสูตร ให้มีน้ำหนักรวม 3 กิโลกรัม ใส่ในหม้อบด รูป 3.4



รูป 3.4 บดสูตรส่วนผสมเกลือบสำหรับขึ้นทดสอบเพื่อหาขนาดอนุภาค

ทำการบดโดยใช้ระยะเวลา 3 , 5 และ 8 ชั่วโมง ทุก ๆ ระยะเวลาให้นำเอาส่วนผสมของเกลือบ ที่ผ่านการบด นำไปเข้าเครื่องวัดการกระจายตัวขนาดอนุภาค (Particle size analyzer) พร้อมกับ ส่วนผสมเกลือบที่ไม่ได้บด เกลือบเมื่อผ่านการบดทำให้ขนาดอนุภาคเล็กลงตามจำนวนชั่วโมง จากนั้นนำขึ้นทดสอบไปหุบเกลือบ และเข้าสู่กระบวนการเผาด้วยเทคนิควิธีกำหนด จากนั้นทำการ ประเมินด้วยตาเปล่า เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของสีแดงและการไหลตัวและการหลอม

3.3.2.3 ความเข้มข้นของน้ำเกลือบ (Specific gravity)

น้ำเกลือบสำหรับหุบผลิตภัณฑ์จะต้องมีความเข้มข้นพอเหมาะ มีปริมาณตัวเนื้อวัตถุดิบ และน้ำที่พอดี เติมน้ำ 80 % ของปริมาณวัตถุดิบ เมื่อเกลือบผ่านการบดแล้วผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 200 เมช จากนั้นนำน้ำเกลือบมาวัดความเข้มข้นมีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ด้วย เครื่องมือไฮโดรมิเตอร์ให้มีค่าอยู่ในระหว่าง Sp. gr. 1.50-1.55 นำน้ำเกลือบที่เตรียมแล้วไปทดลอง หุบขึ้นทดสอบให้ได้ความหนาที่ต้องการของชั้นตอนต่อไป

3.3.2.4 ความเหมาะสมระหว่างเคลือบและดินปั้นขยายตัวเมื่อเผาผ่านความร้อน

(Thermal expansion of body and glaze)

ความเหมาะสมเนื่องจากการขยายตัวด้วยความร้อนระหว่างเคลือบและดินปั้น จะมีค่าใกล้เคียงกัน จะทำให้ไม่เกิดการแตก (Crack) หรือการรานตัว (Craze) เกิดขึ้น ผลจากการแตกหรือรานตัวจะทำให้ผลิตภัณฑ์เคลือบทองแดงของมีสีแดงไม่สวยงาม จึงวัดค่าการขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนของเคลือบและดินปั้น ณ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตั้งแต่อุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 800°C โดยใช้เครื่องวัด Thermal expansion tester การวัดค่าการขยายตัวนี้ได้ทำเฉพาะสูตรเคลือบที่ 22 ผ่านการบดเคลือบ 5 ชั่วโมงเท่านั้น ซึ่งเห็นว่าเป็นการเตรียมเคลือบที่ให้ผลสีแดงได้ดี

3.3.3 การหุบเคลือบด้วยวิธีการจุ่มและตรวจวัดความหนา

(Thickness and dipping glazing)

ขั้นตอนการหุบเคลือบ ผู้วิจัยได้พิจารณาถึงความหนาของเคลือบบนชิ้นทดสอบ และชิ้นงาน ที่ให้ความหนาสม่ำเสมอ โดยเลือกวิธีการจุ่ม (Dipping) เมื่อความหนาของผลิตภัณฑ์ที่มีความเหมาะสมจะทำให้ได้เห็นสีแดงจากเคลือบทองแดงได้ชัดเจน ด้วยเหตุนี้จึงได้หุบเคลือบทดสอบให้มีความหนาต่าง ๆ กัน ด้วยการจับเวลาในระหว่างจุ่มชิ้นทดสอบ (Biscuit) ลงในน้ำเคลือบที่ทำการกวนให้เคลือบลอยตัวได้ดี เริ่มตั้งแต่ 2 วินาที เปรียบเทียบกับ 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, และ 12 วินาที ทำให้ได้ความหนาของเคลือบเมื่อแห้ง วัดด้วยดิจิตอลเวอร์เนียรพบความหนาดังแต่ 0.3, 0.5, 0.8, 1.1, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.4, 2.7 และ 2.9 มิลลิเมตร รวม 12 ความหนา จากนั้นนำเข้ากระบวนการเผาที่อุณหภูมิ 1250°C เพื่อติดตามผลของเคลือบหลังเผาต่อไป



รูป 3.5 หุบเคลือบชิ้นทดสอบด้วยวิธีการจุ่มและตรวจวัดความหนา

3.3.4 การทดลองเผาขึ้นทดสอบที่อุณหภูมิและบรรยากาศต่าง ๆ (Atmosphere and temperature firing)

3.3.4.1 อุณหภูมิเผาที่เหมาะสม (Temperature)

ขั้นตอนทดสอบการเผา ผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์ต้องการทราบถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมของการเผาเคลือบสีแดงของทองแดง โดยใช้สูตรเคลือบที่ 22 เป็นเคลือบที่เหมาะสมกับงานวิจัย ทำการทดลองเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ เช่น 1230, 1250, 1280 และ 1300 °C โดยต้องการเคลือบที่ลอมตัวได้ดี สมบูรณ์ให้สีแดงชัดเจน จะอยู่ในช่วงอุณหภูมิใด ซึ่งการทดลองได้ใช้สูตรเคลือบ 22 ผ่านการบด และการเตรียมน้ำเคลือบ ที่เห็นว่ามีเหมาะสมจากการทดลองที่ผ่านมา รวมทั้งการชุบเคลือบผลิตภัณฑ์ให้มีความหนาประมาณ 1.8 มิลลิเมตร นำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยมีบรรยากาศของการเผาเป็นไปตามหลักการที่กำหนด ช่วงขึ้นอุณหภูมิเป็นบรรยากาศรีดักชันและลดอุณหภูมิลงด้วยบรรยากาศออกซิเดชัน โดยกำหนดระยะเวลาการเผาและอัตราการขึ้นและลงอุณหภูมิ วัฏจักรที่เหมือนกันคือ 3-5 °C/นาที ประเมินผลการทดลองอุณหภูมิต่าง ๆ และเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสม (แสดงกราฟการเผา รูป ข1 ภาคผนวก ข)

3.3.4.2 บรรยากาศที่เหมาะสม (Atmosphere)

บรรยากาศเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดสีแดงของทองแดง ผู้วิจัยต้องการทดสอบและหาบรรยากาศอื่น ๆ มาเปรียบเทียบกับเห็นผลการทดลอง รวมทั้งความเข้มของบรรยากาศที่เป็นบรรยากาศอ่อนหรือแก่ เพื่อให้ได้ผลงานที่เหมาะสมกับบรรยากาศ จึงได้ทำการทดลองเผาขึ้นทดสอบกำหนดความคงที่ในวิธีการ ทำการเปลี่ยนแปลงบรรยากาศการเผาพร้อมด้วยความอ่อนแก่ของบรรยากาศร่วมในการทดลอง บรรยากาศ 3 ระบบ ได้จากผลการทดลองที่ผ่านมาคือ ระบบของ N-R ช่วงขึ้นอุณหภูมิจาก 980-1250 °C บรรยากาศเป็นกลาง (Neutral) ลดอุณหภูมิลงจาก 1250 °C ถึงประมาณ 500 °C ใช้บรรยากาศรีดักชัน พร้อมกันนี้ได้ทำการเปรียบเทียบ เปรียบเทียบเผาบรรยากาศระบบ R-O และระบบ R-R ทุกระบบเผาภายใต้อุณหภูมิกงที่ 1250 °C การทดลองครั้งนี้ผู้วิจัยได้ใช้ความอ่อน-แก่ ของบรรยากาศที่อยู่ในระดับกลาง ๆ เพื่อเป็นหลักในการเปรียบเทียบ พิจารณาผลคัดเลือกระบบที่ดีที่สุด (แสดงกราฟการเผา รูป ข2 ภาคผนวก ข)

การวิจัยครั้งนี้ไม่ได้พิจารณาระบบอื่น ๆ เช่นระบบ R-R, R-N, O-O, O-N, O-R, N-O เพราะได้รวบรวมผลการทดลองจากเอกสารงานวิจัยที่ผ่านมา ไม่พบการเกิดสีแดงจากเคลือบทองแดง จึงไม่นำมาแสดงไว้ในงานวิจัยนี้

ความอ่อน-แก่ของบรรยากาศ ผู้วิจัยได้กำหนดความเข้มของบรรยากาศอ่อน-แก่ ใช้ปฏิบัติการเผาและการควบคุมบรรยากาศภายในเตาให้มีค่าของตัวให้ออกซิเจน (Oxidizing agent)

และค่าของตัวลดออกซิเจน (Reducing agent) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีค่าความอ่อน-แก่ และบรรยากาศปานกลาง แสดงในตาราง 3.2 (แสดงกราฟการเผา รูป ข3 ภาคผนวก ข)

ตาราง 3.2 ความเข้มบรรยากาศในเตามีค่าความอ่อน-กลาง-แก่ของบรรยากาศการเผา

การเผาด้วยบรรยากาศ	ความเข้มบรรยากาศการเผาในเตา		
	บรรยากาศอ่อน (Weakly)	บรรยากาศกลาง (Mean)	บรรยากาศแก่ (Strongly)
Oxidation (O ₂) %	5.0-6.0	7.0-8.0	9-10
Reduction (CO) ppm x 1000	2-3	4-5	6-7
Neutral	-	-	-

วัดค่าความเข้มของบรรยากาศ Oxidation และ Reduction ด้วยเครื่องมือ (Flue gas analyzer)

3.3.4.3 การศึกษาความอ่อน-แก่ของบรรยากาศเมื่อเผาด้วยระบบ R-O

(Firing atmosphere intensity)

การทดลองให้ความสำคัญถึงการควบคุมบรรยากาศให้ได้ความเข้ม ความอ่อน-แก่หรือปานกลาง ของบรรยากาศในเตาเผา ช่วงเพิ่มอุณหภูมิเผาบรรยากาศรีดักชัน และช่วงอุณหภูมิลงใช้บรรยากาศออกซิเดชัน ด้วยระบบ Reduction-Oxidation (R-O) ทำการทดลองเผาขึ้นทดสอบ ภายใต้เงื่อนไขการกำหนดให้คงที่ เพียงแต่ทำการเปลี่ยนความอ่อน-แก่ของบรรยากาศมาเปรียบเทียบกับ จำแนกความแตกต่างของบรรยากาศได้ 9 การทดลอง กำหนดแผนปฏิบัติ แสดงในตาราง 3.3

ตาราง 3.3 แสดงความอ่อน-กลาง-แก่ ช่วงขึ้นอุณหภูมิ และช่วงอุณหภูมิลง

ลำดับ	ช่วงขึ้นอุณหภูมิ Reduction และช่วงอุณหภูมิลง Oxidation	
	ขึ้น R	ลง O
1	อ่อน	อ่อน
2	อ่อน	กลาง
3	อ่อน	แก่
4	กลาง	อ่อน
5	กลาง	กลาง
6	กลาง	แก่
7	แก่	อ่อน
8	แก่	กลาง
9	แก่	แก่

3.3.4.4 การเปลี่ยนแปลงอัตราขึ้น-ลงอุณหภูมิ (Rate of heating up and cooling down)

ระบบการเผาขึ้นทดสอบให้ผลดีในระบบ R-O ต้องการทราบอัตราของการเผาทั้งขึ้นและลงของอุณหภูมิ ทำการจำแนกอัตราเป็น 3 ชนิด ของการทดลองประกอบด้วย อัตราอย่างช้า อย่างปานกลาง และอย่างเร็ว โดยให้กำหนดค่าอัตราการขึ้นลงอุณหภูมิดังต่อไปนี้

อัตราอย่างช้า 1-3 °C/นาที่ อัตราอย่างกลาง 4-5 °C/นาที่ อัตราอย่างเร็ว 7-8 °C/นาที่
มีแผนปฏิบัติงานเป็น 9 การทดลองแสดงในตาราง 3.4

ตาราง 3.4 แสดงการเปรียบเทียบอัตราเร็วของการเผาด้วยการขึ้นและลงอุณหภูมิเผาขึ้นทดลอง

ลำดับ	อัตราการขึ้นอุณหภูมิ ด้วยบรรยากาศ Reduction ระดับปาน กลาง	อัตราการลดอุณหภูมิลงด้วย บรรยากาศ Oxidation ระดับ ปานกลาง	ระยะเวลาเผาใน 1 รอบ (ชม.)	
			ขึ้น	ลง
1	ช้า	ช้า	9 ชม นาที่	9 ชม 8 นาที่
2	ช้า	กลาง	9 ชม นาที่	4 ชม 9 นาที่
3	ช้า	เร็ว	9 ชม นาที่	2 ชม 8 นาที่
4	กลาง	ช้า	4 ชม.50 นาที่	9 ชม 8 นาที่
5	กลาง	กลาง	4 ชม 50 นาที่	4 ชม 9 นาที่
6	กลาง	เร็ว	4 ชม 50 นาที่	2 ชม 8 นาที่
7	เร็ว	ช้า	2 ชม 25 นาที่	9 ชม 8 นาที่
8	เร็ว	กลาง	2 ชม 25 นาที่	4 ชม 9 นาที่
9	เร็ว	เร็ว	2 ชม 25 นาที่	2 ชม 8 นาที่

3.4 การหาปริมาณของสารตัวเติมดีบุกออกไซด์ในเคลือบทองแดงให้เหมาะสม

(Tin oxide additives in copper red glaze)

การทดลองในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เข้าสู่งานในหัวข้อการวิจัยเรื่องผลของสารเติมแต่งดีบุกออกไซด์ในเคลือบสีแดงของทองแดงสำหรับผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผา ต้องการหาปริมาณที่เหมาะสมของดีบุกออกไซด์ในเคลือบทองแดงเพื่อให้เกิดสีแดงเด่นชัดได้มากที่สุด และต้องการทราบกลไกของดีบุกออกไซด์ที่ทำให้เกิดสีแดงของเคลือบทองแดง โดยจำแนกการปฏิบัติงานแต่ละกรณีต่อไปนี้

3.4.1 การหาปริมาณที่เหมาะสมของดีบุกออกไซด์ในเคลือบทองแดง

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการทดลอง สามารถทราบปัจจัยต่าง ๆ อย่างชัดเจนที่เกี่ยวข้องกับเคลือบสีแดงของทองแดง ที่จะนำมาปฏิบัติไปสู่การทำผลิตภัณฑ์ ต้องการทราบว่า การใช้ปริมาณดีบุกออกไซด์เป็นสารตัวเติมในเคลือบทองแดง ซึ่งแต่เดิมใช้ปริมาณดีบุกออกไซด์ที่กำหนดไว้ด้วยปริมาณ 3.1 % ของน้ำหนักวัตถุดิบ ดังนั้นแผนการทดลองจึงได้กำหนดปริมาณตัวเติมดีบุกออกไซด์เพื่อแสดงการเปรียบเทียบแตกต่างไปจาก 3.1% แสดงเป็นในตาราง 3.5

ตาราง 3.5 การทดลองเปรียบเทียบปริมาณดีบุกออกไซด์ด้วยเปอร์เซ็นต์ต่าง ๆ และเทียบอัตราส่วนระหว่างปริมาณคอปเปอร์คาร์บอเนต 1:2

ลำดับ	ปริมาณตัวเติมดีบุกออกไซด์ SnO_2	อัตราส่วนระหว่าง $\text{CuCO}_3 : \text{SnO}_2$
1	1.0	1 : 0.8
2	1.5	1 : 1.2
3	2.0	1 : 1.6
4	2.5	1 : 2
5	3.0	1 : 2.5
6	3.5	1 : 2.9
7	4.0	1 : 3.3
8	4.5	1 : 3.7
9	5.0	1 : 4.1
10	6.0	1 : 5
11	7.0	1 : 5.8

ใช้ปริมาณคงที่ของคอปเปอร์คาร์บอเนต 1:2 % ในสูตรเคลือบ จะให้ผลถึงอัตราส่วนสารให้สีจากวัตถุดิบคอปเปอร์คาร์บอเนตและตัวเติมดีบุกออกไซด์ ควรจะมีสัดส่วนเป็นอย่างไร โดยทำการทดลองไปตามปัจจัยต่าง ๆ ที่กำหนดของผลจากการทดลอง ประเมินการเกิดสีแดงได้เด่นชัดเมื่อพบอัตราส่วนเหมาะสมระหว่างปริมาณดีบุกออกไซด์ และปริมาณคอปเปอร์คาร์บอเนตในสูตรเคลือบที่ 22 ทำให้ได้ความสมบูรณ์ของการทดลองที่ครอบคลุมทุกปัจจัยเกี่ยวข้อง มากำหนดปฏิบัติทำผลิตภัณฑ์ปั้นดินเผา ด้วยเคลือบสีแดงของทองแดงตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาเรื่องนี้

3.4.2 การแสดงเป็นเหตุผลเพื่อหาอธิบายถึงกลไกการเกิดสีแดงในเคลือบทองแดง

ผู้วิจัยได้มีแผนปฏิบัติสร้างข้อมูลให้เป็นเหตุผลของการเกิดสีแดง โดยมีดินบุกออกไซด์เข้ามาร่วมแสดงบทบาทของการเกิดสีแดงด้วยการจำแนกเป็น 2 แนวทาง

(1) แนวทางจากผลของปริมาณสารตัวเติมดินบุกออกไซด์ ซึ่งได้ทำการทดลองแล้วในข้อ 3.4.1 ซึ่งประกอบด้วย 11 การทดลองพร้อมการเปรียบเทียบกับสูตรเคลือบที่ใช้ทดลอง (สูตร 22) และสูตรเคลือบไม่มีการเติมดินบุกออกไซด์ เปรียบเทียบสีกับการที่เติมดินบุกด้วยเปอร์เซ็นต์ต่าง ๆ จึงจะเป็นเหตุผลของกลไกการเกิดสีแดงในการปฏิบัติที่เห็นด้วยตาเปล่า สามารถอธิบายได้ว่าปริมาณดินบุกออกไซด์ที่มากเกินไปจะทำให้สีแดงเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร

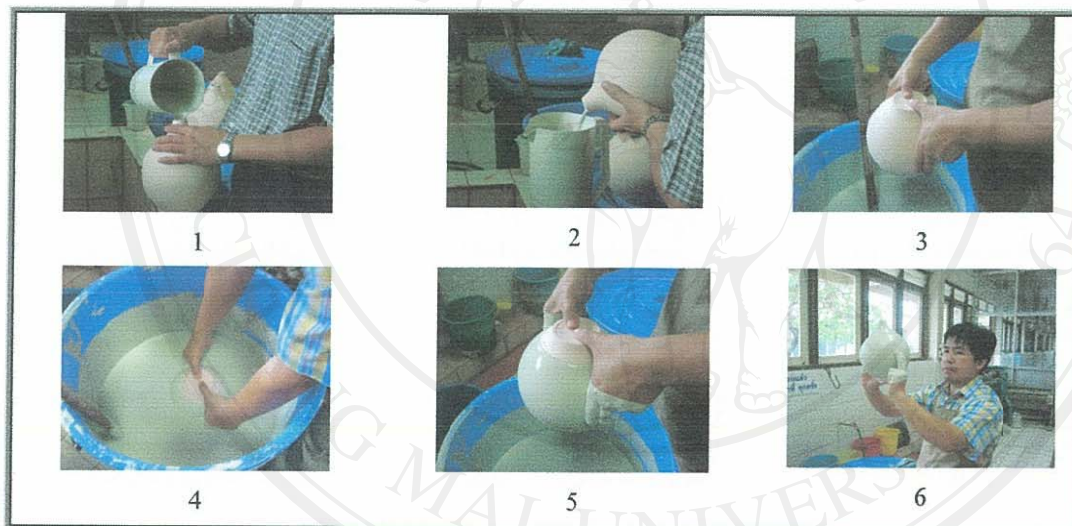
(2) กลไกการเกิดสีแดงมีเหตุผลอีกแนวทางหนึ่งที่สามารถอธิบายด้วยทฤษฎี ทั้งนี้ทฤษฎีที่จะนำมารายงานจะต้องใช้เครื่องมือมาเป็นหลักฐานยืนยันของการเกิดสี ความเป็นไปของปฏิกิริยาเคมี เมื่อเคลือบถูกเผาตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิขึ้นจนกระทั่งเคลือบหลอมตัว และลดอุณหภูมิลง ในช่วงเคลือบเย็นลงจะมีสภาพความเป็นแก้วและทำให้สีแดงเกิดขึ้น ด้วยเหตุผลและคำอธิบายจะสามารถใช้เครื่องมือตรวจวัดด้วย ESR และ XRD ผู้วิจัยได้นำมาตรวจวัดเพื่อให้ทราบเกี่ยวกับข้อมูลในปฏิกิริยาเคมี ใช้เป็นการอธิบายเกี่ยวกับกลไกในปฏิกิริยาเคมีของเคลือบทองแดงที่ทำให้สีแดงเกิดขึ้น โดยมีบทบาทของดินบุกออกไซด์ร่วมกับทองแดง

3.5 การประเมินผลทดลองและตรวจสอบ

ในข้อนี้ได้นำมาใช้ตั้งแต่ต้นของทุกขั้นตอนการทดลอง เพื่อติดตามความจริงและช่วยการตัดสินใจในแต่ละปัจจัย นำมาเป็นการกำหนดของภาคปฏิบัติต่อไปจนกระทั่งถึงขั้นตอนสุดท้าย ประเมินการใช้ปริมาณสารตัวเติมดินบุกออกไซด์ เริ่มจากการประเมินการใช้สารปริมาณตัวเติมดินบุกออกไซด์ และประเมินทุก ๆ ครั้งของการทดลอง ด้วยการวัดค่าความเข้มของสีแดงด้วยเครื่อง Color Meter และวัดค่าของอนุภาคในเคลือบด้วยเครื่อง Particle size analyzer วัดความเข้มข้นของน้ำเคลือบวัดเป็นค่าความถ่วงจำเพาะด้วยเครื่อง Hydrometer วัดความหนาของการชุบเคลือบด้วย Digital vernier วัดอุณหภูมิเผาด้วย Thermocouple วัดบรรยากาศการเผาด้วย Oxygen probe ควบคุมและวัดอัตราการขึ้นและลงของอุณหภูมิด้วยการจับเวลา และท้ายของการศึกษาในวัตถุประสงค์ของงานวิจัย เป็นการติดตามกลไกของการเกิดสีในเคลือบทองแดงเมื่อมีดินบุกออกไซด์เป็นสารตัวเติม ซึ่งผลการทดลองประเมินและวัดธาตุไอออนต่าง ๆ จากเครื่อง ESR รวมทั้งสารประกอบออกไซด์วัดด้วยเครื่อง XRD และใช้เครื่อง XRF ติดตามปริมาณธาตุต่าง ๆ ที่ปรากฏในเคลือบ อุปกรณ์เครื่องมือเหล่านี้นำมาใช้แต่กรณีเฉพาะเรื่องในกระบวนการทดลองทั้งหมด

3.6 การทำผลิตภัณฑ์เคลือบสีแดงของทองแดง

ขั้นตอนสุดท้ายเป็นผลมาจากการทดลองที่ผ่านมาทำให้ทราบถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับเคลือบสีแดงของทองแดง รวมทั้งการมีสารตัวเติมดินบุกออกไซด์ในสูตรส่วนผสมเคลือบชนิดนี้ ผู้วิจัยได้มีแผนการทำผลิตภัณฑ์ขนาดต่าง ๆ ทั้งเล็กและใหญ่ รวมถึงให้มีรูปแบบของผลิตภัณฑ์หลากหลายในสภาพที่เป็นผลิตภัณฑ์แนวตั้ง แนวนอน แนวเอียง รูปทรงขนาดใหญ่ได้หลากหลาย ผลิตภัณฑ์ที่ปั้นขึ้นรูป เช่น แจกันจำนวน 8 รูปทรง ๆ ละ 5 ใบ แก้วน้ำจำนวน 50 ใบ รวมทั้งหมุด 90 ใบ ผ่านการตากแห้งและเผาบิสกิตไม่พบการเสียหาย จากนั้นได้ทำการเตรียมน้ำเคลือบจำนวนครั้งละ 20 กิโลกรัม โดยยึดหลักการส่วนผสมและการเตรียมน้ำเคลือบจากผลการทดลองที่ผ่านมา ทำการชุบเคลือบให้มีความหนาประมาณ 1.8 มิลลิเมตร ทั้งนี้ก็เพื่อจะได้ติดตามผลที่อาจเกิดเป็นปัญหาเนื่องมาจากเคลือบไหล และปัญหาเนื่องด้วยเคลือบมีพื้นที่ขนาดใหญ่

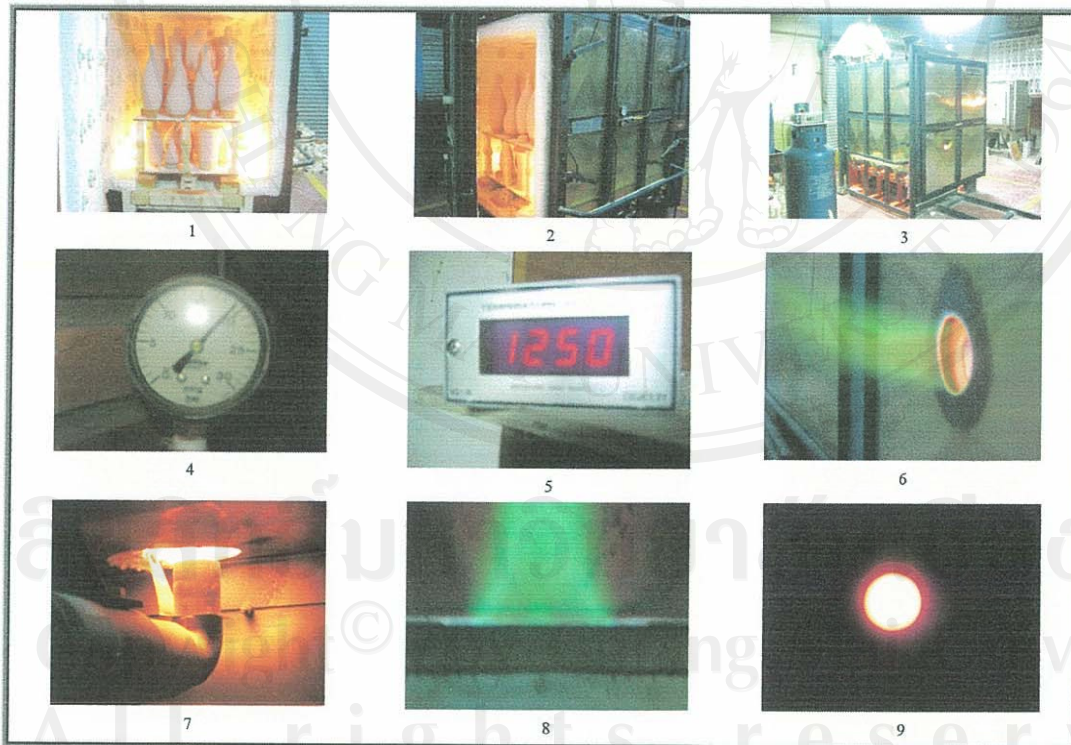


รูป 3.6 แสดงขั้นตอนการชุบเคลือบผลิตภัณฑ์ประเภทแจกัน

ในการชุบเคลือบผลิตภัณฑ์ประเภทแจกัน จะต้องเคลือบด้านในก่อนโดยการนำเคลือบใส่เหยือกแล้วรอกกลงในผลิตภัณฑ์ประมาณครึ่งหนึ่ง แล้วรอกกลับขณะเอียงกลิ้งหมุนไปรอบ ๆ ตัว จากนั้นก็รินเคลือบออกให้หมด เมื่อเคลือบข้างในเสร็จแล้ว ทิ้งไว้ประมาณอย่างน้อย 1-2 ชั่วโมง จนกว่าผิวด้านในส่วนใดส่วนหนึ่งของผลิตภัณฑ์ ตามถนัดขึ้นอยู่กับรูปทรงผลิตภัณฑ์ (ดังรูปประกอบ 3.5) จุ่มลงไปในถังเคลือบแช่ทิ้ง ๆ ให้นับ นาทีถึงห้าวินาที ดึงขึ้นงานขึ้นมาจากถังเคลือบ จะได้ความหนาของเคลือบติดผลิตภัณฑ์ประมาณ 1.5 –1.8 มม. เป็นความหนากำลังพอเหมาะ

ผลิตภัณฑ์ที่ชุบเคลือบเสร็จแล้ว ต้องตรวจสอบความเรียบร้อย เช่น รอยมือหรือรอยคีมจับที่จับ ขณะชุบเคลือบต้องใช้เคลือบป้ายซ่อมให้ได้ระดับสม่ำเสมอ ถ้าที่ผิวเคลือบเป็นรูเล็ก ๆ เมื่อเคลือบแห้งใช้มือถูเบา ๆ ผงเคลือบจะลงไปอุดจนเรียบ ทำความสะอาดเช็ดส่วนที่สัมผัสกับพื้น ภาชนะใช้งานด้วยฟองน้ำให้สะอาด เพื่อป้องกันการติดพื้นรองในเตาเผา เนื่องจากการหลอมละลายของเคลือบ และการนำเข้าเตาเผานั้น ต้องทิ้งไว้ให้เคลือบแห้งสนิทเสียก่อน ถ้าเผาขณะเคลือบยังเปียกอยู่ เมื่อโดนความร้อนในทันทีจะทำให้เคลือบหลุดร่อนออกจากผลิตภัณฑ์มากองอยู่กับพื้น หรือกระเด็นไปติดชิ้นงานรอบข้าง ทำให้เกิดความเสียหายได้

นำผลิตภัณฑ์เข้าเตาเผาและดำเนินการเผาตามเทคนิควิธีทุกประการ ผู้วิจัยได้ให้ความระมัดระวังเกี่ยวกับบรรยากาศทั้งในช่วงอุณหภูมิขึ้นและลดอุณหภูมิลงบรรยากาศทั้ง 2 นั้น จะอยู่ในสภาพที่มีความเข้มข้นในระดับปานกลาง หมายถึงการให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทั้ง 2 ช่วงเป็นไปอย่างช้าและไม่เร็วเกินไป โดยคาดว่าจะทำให้ความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาเคมีเป็นไปด้วยดี และจะทำให้การเกิดสีแดงเป็นผลดีอีกด้วย หลังจากอุณหภูมิ 700 °C การลดอุณหภูมิลง ให้เป็นไปอย่างช้า ๆ จนกระทั่งถึงอุณหภูมิประมาณ 200 °C หรือต่ำกว่าจึงจะเปิดเตานำผลิตภัณฑ์ออกได้ ดังแสดงขั้นตอนการเผาในรูป 3.7



รูป 3.7 แสดงขั้นตอนนำผลิตภัณฑ์เข้าเตาเผาและดำเนินการเผาตามเทคนิควิธีทุกประการ