

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ผลการทดลองจากแผนดำเนินงานและวิธีการทดลองในบทที่ 3 ผลงานทั้งหมดได้มาประเมินผลและการตรวจสอบด้วย 5 วิธีประกอบด้วย

1. ดูด้วยตาเปล่า (Eye appearance)
2. วัดค่าสีเครื่องวัดสี (Color meter)
3. เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (XRF)
4. เครื่องเอกเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (XRD)
5. เครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ (ESR)

การประเมินผลการทดลองได้จากผลการปฏิบัติงานดำเนินเป็นเรื่อง ๆ มาแล้วในบทที่ 3 ของวิธีการทดลองดังต่อไปนี้

4.1 ผลการเตรียมชิ้นทดสอบและชิ้นงานจากดินปั้นสำเร็จ

เมื่อนำดินปั้นสำเร็จมาขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบ ชิ้นงานและผลิตภัณฑ์ทดลอง โดยไม่เกิดการเสียหาย ทำให้ได้ดินปั้นที่สามารถขึ้นรูปได้ดี (Formability) จากนั้นนำชิ้นงานขึ้นรูปทุกประเภทอบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 - 70 °C มีระยะเวลาที่ต่างกัน ชิ้นทดสอบจะใช้เวลาอบแห้งประมาณ 5 - 6 ชั่วโมง ส่วนผลิตภัณฑ์ที่มีความหนามากใช้ระยะเวลาอบแห้งประมาณ 3 วัน ซึ่งชิ้นทดสอบและผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งจะมีค่าความชื้นอยู่ในระหว่าง 1 - 3 % โดยน้ำหนัก และพบว่าทุกชิ้นงานหลังอบแห้งไม่เกิดความเสียหาย มีการหดตัวไม่เกิน 5 % ของปริมาตร โดยไม่เสียรูปทรงและบิดเบี้ยว จากนั้นนำไปเผาอบที่อุณหภูมิ 780 - 800 °C ใช้เวลาเผาประมาณ 5 โมง ทำให้ได้ชิ้นงานและผลิตภัณฑ์อบที่สมบูรณ์ไม่พบปัญหาของการแตกร้าว สามารถนำไปใช้งานเพื่อการทดลองชุบเคลือบในขั้นตอนต่อไปได้ตามต้องการ ปริมาณค่าความพรุนตัวของชิ้นงานและผลิตภัณฑ์วัดได้ 33 - 35 % ของค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ค่าความพรุนตัวในช่วงนี้จะช่วยให้การดูดเคลือบได้ดี ดังรูป 4.1

All rights reserved



รูป 4.1 ตัวอย่างชิ้นทดสอบและชิ้นงานจากดินปั้นสำเร็จที่ผ่านการเผาปกติ

4.2 ผลการเตรียมเคลือบจากวัตถุดิบที่กำหนด

เมื่อติดตามเตรียมเคลือบจากการปฏิบัติบทที่ 3 หัวข้อ 3.3.2 ให้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

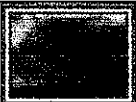
4.2.1 ผลการทดลองสูตรเคลือบ

จากจำนวนสูตรเคลือบทั้งหมด 22 สูตร เริ่มต้นจากการรวบรวมสูตรเคลือบสีแดงของทองแดงจากผู้ที่เคยศึกษาและเอกสารวิชาการทำให้ได้สูตรเคลือบ นำมาทำการทดลองในระยะแรกได้ 18 สูตร โดยมีเป้าหมายเพื่อการเลือกสูตรที่ดีภายใต้การเผาเคลือบที่กำหนดขึ้น โดยใช้หลักการทั่วไป ผลการทดลองสูตรเคลือบที่ 18 ให้สีแดงเด่นชัดกว่าสูตรอื่น ๆ จากนั้นทำการปรับปรุงให้ดีขึ้นอีกจำนวน 4 สูตรเคลือบ และพบว่าสูตรที่ 22 ความเข้มของสีแดงเด่นชัดที่สุด (รูป 4.2) โดยมีส่วนผสมสูตรเคลือบดังต่อไปนี้ เฟลด์สปาร์ 33.7 % ดินขาวล่าปาง 6.8 % ควอตซ์ 22.8 % แคลเซียมคาร์บอเนต 11.9 % แบเรียมคาร์บอเนต 16.5 % ซิงค์ออกไซด์ 6.7 % ทัลคัม 4.8 % ดินบุกออกไซด์ 3.1 % และทองแดงคาร์บอเนต 1.2 % ตามตาราง 4.1 ผลการวัดสีด้วยเครื่องวัดสีและการดูผิวเคลือบด้วยตาเปล่า



รูป 4.2 ผลของลักษณะผิวเคลือบและสีบนชิ้นทดลองเนื้อดินคอมพาวด์เคลย์ จากสูตรเคลือบทองแดง 22 สูตร

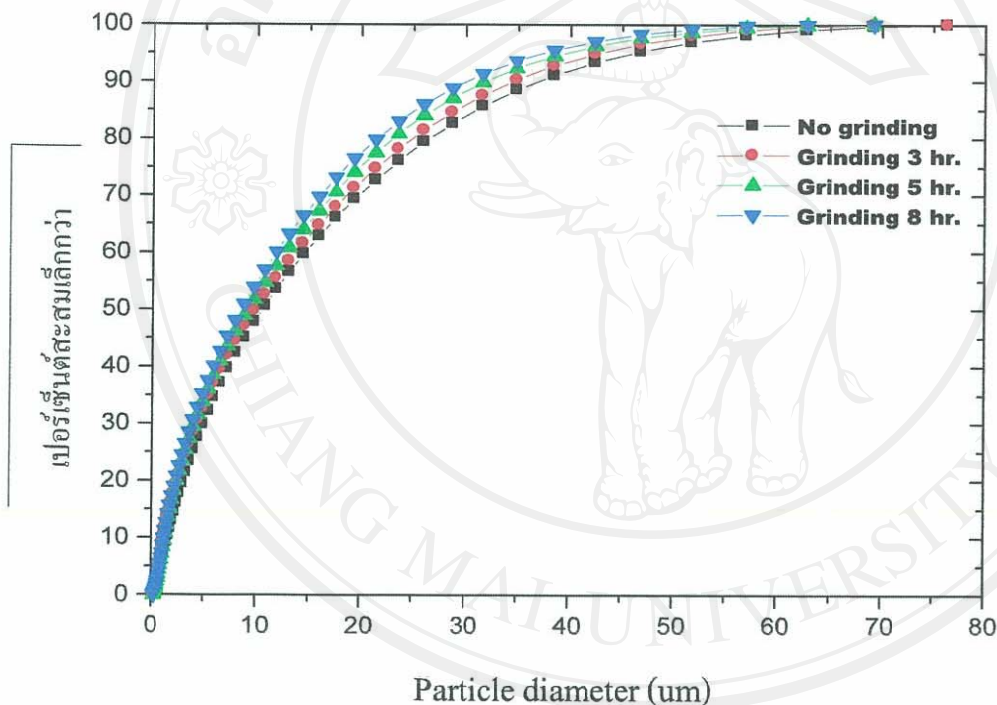
ตาราง 4.1 ผลของลักษณะเคลือบและสีจากสูตรเคลือบทองแดงต่างๆ จำนวน 22 สูตร
ทดลองด้วยเนื้อดินคอมพาวด์เคลย์ เเผาที่อุณหภูมิ 1250 °C RF

ลำดับ สูตรเคลือบ	จากชั้นแห่งทดลองเนื้อดินคอมพาวด์เคลย์		
	ผลจากการวัดด้วยเครื่อง (Color meter)		ลักษณะผิวเคลือบจากการมองด้วยตา
1 	Target a+ 14.2	L 40.0 b- 2.7	ผิวเคลือบมัน ให้สีม่วง
2 	Target a+ 11.6	L 51.1 b+ 3.4	ผิวเคลือบมัน ให้สีม่วงมีจุด
3 	Target a+ 13.3	L 44.2 b- 5.6	ผิวเคลือบมัน ให้สีม่วง
4 	Target a+ 15.6	L 42.4 b- 1.3	ผิวเคลือบมัน ไหลตัวให้สีม่วงเข้ม
5 	Target a+ 7.6	L 40.7 b- 0.5	ผิวเคลือบมัน ให้สีม่วงเข้ม
6 	Target a+ 9.4	L 57.0 b+ 6.5	ผิวเคลือบมัน ให้สีแดงอ่อน
7 	Target a+ 4.0	L 61.1 b+ 8.7	ผิวเคลือบมัน ไหลตัวมาก ให้สีแดงอ่อน
8 	Target a+ 23.8	L 37.0 b+ 8.9	ผิวเคลือบมัน ให้สีแดงจุดดำ
9 	Target a+ 16.1	L 40.1 b+ 8.1	ผิวเคลือบมัน ให้สีแดงอ่อน
10 	Target a+ 17.0	L 43.9 b+ 9.6	ผิวเคลือบมัน ให้สีแดงอ่อน
11 	Target a+ 19.4	L 47.8 b+ 8.3	ผิวเคลือบมัน ให้สีแดงอ่อน

12		Target a+ 15.3	L 40.0 b+ 7.3	ผิวเคลือบมัน ให้สีแดงอ่อน
13		Target a+ 15.1	L 37.0 b+ 6.0	ผิวเคลือบด้าน ให้สีแดง
14		Target a+ 19.0	L 43.4 b+ 8.5	ผิวเคลือบมัน ไหลตัวมาก ให้สีแดงอ่อน
15		Target a+ 17.2	L 48.8 b+ 7.3	ผิวเคลือบมัน ไหลตัวมาก ให้สีแดงอ่อน
16		Target a+ 19.9	L 43.6 b+ 8.3	ผิวเคลือบมัน ไหลตัวมาก ให้สีแดงอ่อน
17		Target a+ 17.6	L 36.6 b+ 6.6	ผิวเคลือบมัน ไหลตัวมาก ให้สีแดงอ่อน
18		Target a+ 18.7	L 49.4 b+ 5.7	ผิวเคลือบมัน ไหลขาวตามขอบ ให้สีแดง
19		Target a+ 17.6	L 34.5 b+ 4.9	ผิวเคลือบมัน ไหลตัวมาก ให้สีแดง
20		Target a+ 23.0	L 36.8 b+ 6.3	ผิวเคลือบมัน ไหลตัวมาก ให้สีแดง
21		Target a+ 17.8	L 32.7 b+ 5.9	ผิวเคลือบเคลือบมัน ไหลตัวมาก สีแดง
22		Target a+ 18.5	L 32.8 b+ 5.4	ผิวเคลือบมัน ไหลตัวพอเหมาะ สีแดงเข้ม

4.2.2 ผลของขนาดอนุภาคของเกลือบ

ผลของการใช้ส่วนผสมของเกลือบมีขนาดอนุภาคอย่างเหมาะสม เพื่อต้องการให้เกลือบหลอมตัวได้สมบูรณ์เมื่อถึงอุณหภูมิสูงสุดของการเผา ผลการทดลองวัดขนาดอนุภาคของเกลือบทำการบดเกลือบสูตร 22 ในหม้อบดขนาดความจุ 3 กิโลกรัม ใช้เวลาในการบด 3, 5, และ 8 ชั่วโมง แล้วติดตามการกระจายขนาดอนุภาค พร้อมผ่านขั้นตอนการทดสอบเผาอุณหภูมิ 1250 °C ดูการหลอมตัว พบว่าการบดใช้เวลา 3-5 ชั่วโมง จะหลอมตัวได้ดีและมีอนุภาคกระจาย มีขนาดเหมาะสม ปริมาณขนาดอนุภาค 9.2 - 9.8 ไมครอนเป็นหลัก รูป ค1 , ค2 , ค3 , และ ค4 ภาคผนวก ค ประกอบ และรูป 4.3 แสดงเปอร์เซ็นต์สะสมเล็กกว่า สมควรมีขนาดเป็น 90 % ต่ำกว่า 35 ไมครอน



รูป 4.3

การกระจายตัวขนาดอนุภาคของเกลือบ ทดสอบก่อนบด และที่ผ่านการบดเกลือบเป็นเวลา 3,5 และ 8 ชั่วโมง ด้วย Particle size analyzer (ดูภาคผนวก ค ประกอบ)

ผลของสปีผิวและการหลอมของเคลือบ แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 การลดขนาดของเคลือบที่ผ่านการบดและไม่บดจะมีขนาดไม่แตกต่างกันมากนัก ทำให้เห็นว่าการหลอมตัวของเคลือบด้วยขนาดอนุภาคบด 3-5 ชั่วโมง สามารถเกิดการหลอมตัวได้ดี มีสีแดงเข้ม ผิวเคลือบมันไหลตัวพอเหมาะ ส่วนเคลือบที่ไม่ผ่านการบดผลที่ได้เคลือบไม่สุกตัว แต่เมื่อใช้ระยะเวลาการบดมากขึ้น การสุกตัวดี มีความใสและมันวาวได้ดีกว่า แต่จะมีการไหลตัวของเคลือบเมื่ออบ 8 ชั่วโมง เนื่องจากมีอนุภาคเล็กเกินไป จึงควรทำการบดเคลือบด้วยระยะเวลา 5 ชั่วโมง เพื่อต้องการควบคุมขนาดให้คงที่

ตาราง 4.2 ทดสอบเผาเคลือบ ก่อนบด และบดเคลือบใช้เวลา 3, 5 และ 8 ชั่วโมง จากสูตร 22 เเผาที่อุณหภูมิ 1250 °C RF

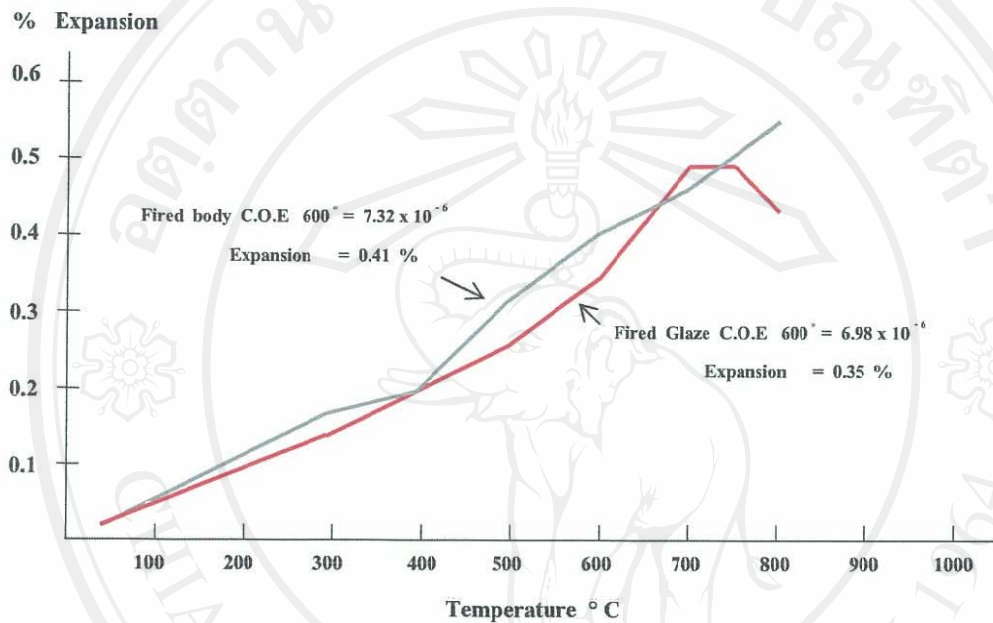
แผ่นทดลองเนื้อดิน คอมพาวด์เคย์	จำนวนชั่วโมง บดเคลือบ	ลักษณะผิวเคลือบ จากการมองด้วยตาเปล่า
	ไม่บด	การหลอมตัวไม่ดี ผิวเคลือบด้าน ให้สีแดง
	บด 3 ชั่วโมง	การหลอมตัวได้ดี ผิวเคลือบมันไหลตัวพอเหมาะ สีแดงเข้ม
	บด 5 ชั่วโมง	การหลอมตัวได้ดี ผิวเคลือบมันไหลตัวพอเหมาะ สีแดงเข้ม
	บด 8 ชั่วโมง	การหลอมตัวได้ดี ผิวเคลือบมันไหลตัวมาก สีแดงเข้ม

4.2.3 ผลการเตรียมความเข้มข้นของน้ำเคลือบที่เหมาะสม

ปริมาณน้ำที่ผสมในเคลือบมีผลต่อการทดลอง ถ้าปริมาณน้ำมากเกินไปมีความถ่วงจำเพาะ 1.4 - 1.45 จะใช้เวลาในการชุบเคลือบนานเกินไป และทำให้ชั้นทดสอบบิสกิตดูดน้ำมาก แต่ถ้าใช้ปริมาณน้ำน้อยก็จะทำให้เคลือบมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่า 1.6 และความเข้มข้นมากเกินไป ทำให้ยากต่อการควบคุมความหนาของชั้นเคลือบบนผลิตภัณฑ์ และในที่สุดเห็นว่าความเข้มข้นของน้ำเคลือบควรมีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ในระหว่าง 1.50 - 1.55 จะให้ผลดีกับการชุบเคลือบ

4.2.4 ผลการวัดการขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนของเคลือบและดินปั้น

ผลการวัดการขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิห้อง (27°C) ถึงอุณหภูมิ 800°C ให้ผลการขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนดังแสดงในรูป 4.4



รูป 4.4 ผลการวัดการขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนของเคลือบและดินปั้น

การขยายตัวของเคลือบและดินปั้นที่ผ่านการเผามาก่อน (Fired glaze and fired body) มีผลใกล้เคียงกัน เพียงแต่มื่อนำไปหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน (Coefficient of expansion $\equiv$ C.O.E.) พบว่าเคลือบหลังเผา (Fired glaze) มีค่าที่ $27-600^{\circ}\text{C}$ เท่ากับ $6.98 \times 10^{-6}, ^{\circ}\text{C}^{-1}$ และดินปั้นหลังเผา (Fired body) มีค่า C.O.E.อุณหภูมิ $27-600^{\circ}\text{C} = 7.32 \times 10^{-6}, ^{\circ}\text{C}^{-1}$ หรือมีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของเคลือบและเนื้อดินอยู่ในระหว่าง 0.35 - 0.41 % ซึ่งถือว่าไม่แตกต่างกันมาก

4.3 ผลการหุบเคลือบ ตรวจวัดความหนาของเคลือบและสีแดงปรากฏหลังเผา

ผลจากการหุบเคลือบลงบนชิ้นทดสอบและชิ้นงานบิสกิต ความหนาของเคลือบเมื่อใช้ระยะเวลาในการจุ่ม 2-12 วินาที ทำให้ได้เคลือบที่มีความหนาต่าง ๆ กันประกอบด้วย 0.3, 0.5, 0.8, 1.1, 1.4, 1.6, 1.8 2.2, 2.4, 2.7 และ 2.9 มิลลิเมตรตามลำดับ ฟังชิ้นทดสอบและชิ้นงานเพื่อต้องการให้เคลือบแห้งก่อนนำเข้าเตาเผา พบว่าเคลือบที่มีความหนามาก ๆ ตั้งแต่ในช่วงระหว่าง 2.4-2.9 มิลลิเมตร จะมีรอยแตกเมื่อเคลือบแห้ง ซึ่งอาจมีผลทำให้เคลือบไหลหรือแยกหลังเผา ชิ้นทดสอบทั้งหมดได้นำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 1250 °C ผลการทดลองชิ้นทดสอบหลังเผาปรากฏดังแสดงในรูป 4.5



รูป 4.5 ผลการทดลองหุบเคลือบให้มีความหนาต่างกัน

ผลของสีแดงกรณีที่หุบเคลือบมีความบาง 0.3 มิลลิเมตร จะได้สีแดงจางกว่า และเมื่อความหนาของเคลือบมากขึ้นสีแดงจะดูเข้มและชัดกว่า แต่ถ้าความหนามากกว่า 2.4 มิลลิเมตรขึ้นไป จะมีสีแดงคล้ำ ลักษณะของผิวเคลือบจะแยกและไหลตัว ผลการวัดค่าของสีที่ปรากฏในแต่ละความหนา 12 ชิ้น แสดงในตาราง 4.3

ตาราง 4.3 ผลการทดลองหุบเคลือบให้มีความหนาต่างกัน

ลำดับ	จากชั้นแท่งทดลองเนื้อดินคอมพาวด์เคลย์ อุณหภูมิ 1250°C RF			
	ความหนา-บาง มิลลิเมตร	ผลจากการวัดด้วยเครื่อง (Color meter)	ลักษณะผิวเคลือบ จากการมองด้วยตาเปล่า	
1	0.6 	Target L 42.8 a+ 19.0 b+ 8.9	ผิวเคลือบมัน เคลือบไหลตัวพอเหมาะ ให้สีเงางามมองเห็นสีแดงไม่ชัด	
2	0.8 	Target L 39.0 a+ 21.0 b+ 9.2	ผิวเคลือบมัน เคลือบไหลตัวพอเหมาะ ให้สีเงางาม สีแดงไม่สม่ำเสมอ	
3	1.0 	Target L 38.4 a+ 22.4 b+ 10.0	ผิวเคลือบมัน เคลือบไหลตัวพอเหมาะ ให้สีเงางาม สีแดงไม่สม่ำเสมอ	
4	1.2 	Target L 42.8 a+ 19.0 b+ 8.9	ผิวเคลือบมัน เคลือบไหลตัวพอเหมาะ ให้สีเงางาม สีแดงไม่สม่ำเสมอ	
5	1.4 	Target L 38.1 a+ 20.0 b+ 8.7	ผิวเคลือบมัน เคลือบไหลตัวพอเหมาะ ให้สีเงางาม สีแดงไม่สม่ำเสมอ	
6	1.6 	Target L 37.8 a+ 21.3 b+ 8.1	ผิวเคลือบมัน เคลือบไหลตัวพอเหมาะ ให้สีแดงสม่ำเสมอ ผิวข้างใน ปรากฏผลึกเล็กๆ กระจายอยู่ทั่วไป	
7	1.8 	Target L 36.2 a+ 22.0 b+ 8.3	ผิวเคลือบมัน เคลือบไหลตัวพอเหมาะ ให้สีแดงสม่ำเสมอ ผิวข้างใน ปรากฏผลึกเล็กๆ กระจายอยู่ทั่วไป	
8	2.0 	Target L 36.2 a+ 22.0 b+ 8.3	ผิวเคลือบมัน เคลือบไหลตัวมากให้สีแดงสม่ำเสมอ ผิวข้างใน ปรากฏผลึกเล็กๆ กระจายทั่วไป	
9	2.2 	Target L 37.9 a+ 21.3 b+ 7.9	ผิวเคลือบมัน เคลือบไหลตัวค่อนข้างมาก ให้สีแดงสม่ำเสมอ ปรากฏผลึกเล็กๆ กระจายทั่วไป	
10	2.4 	Target L 36.0 a+ 21.6 b+ 7.52	ผิวเคลือบมัน เคลือบไหลตัวค่อนข้างมาก ให้สีแดงสม่ำเสมอ ปรากฏผลึกเล็กๆ กระจายทั่วไป	
11	2.7 	Target L 36.2 a+ 22.0 b+ 8.3	ผิวเคลือบมัน เคลือบไหลตัวมากให้สีแดงสม่ำเสมอ ปรากฏผลึกเล็กๆ กระจายทั่วไป	
12	2.9 	Target L 37.9 a+ 21.3 b+ 7.9	ผิวเคลือบมัน เคลือบไหลตัวมากให้สีแดง	

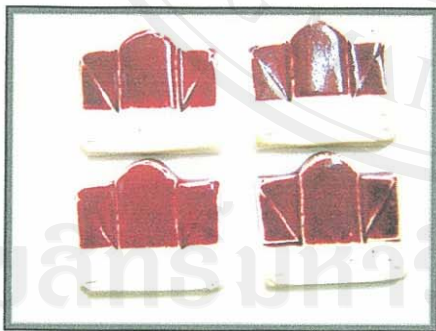
ผลการติดตามและประเมินสีแดงของเคลือบพร้อมทั้งความเหมาะสมที่เคลือบมีความหนาสมควรนำมาใช้ในทางปฏิบัติคือสีแดงชัดเจนและไม่มีการแตกหรือไหลของเคลือบ ได้เห็นว่าความหนาของเคลือบอยู่ในช่วง 1.6-2.0 มิลลิเมตร จะให้ผลดีอย่างไรก็ตามได้

ผลการทดลองพบว่าเคลือบที่มีความบางตั้งแต่ 0.2 – 1.0 มิลลิเมตร ให้ปริมาณเนื้อแก้วน้อยเกินไป แต่เมื่อความหนาดั้งเดิม 1.5 มิลลิเมตรขึ้นไปปริมาณเนื้อแก้วหลังจากเผาเคลือบมีเพียงพอ และให้สีแดงชัดเจนขึ้น แต่เมื่อความหนาดั้งเดิม 2.2 - 2.9 พบว่าเคลือบไหลตัว ทั้งนี้จึงพิจารณาเลือกความหนา 1.8 มิลลิเมตร ด้วยการจุ่มเคลือบในระยะเวลา 8-9 วินาที

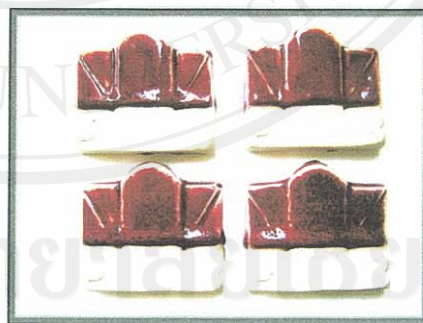
4.4 การทดลองเผาขึ้นทดสอบในแต่ละอุณหภูมิและบรรยากาศต่าง ๆ

4.4.1 ผลการใช้อุณหภูมิเผาและการคัดเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสม

ได้กำหนดอุณหภูมิเผา ประกอบด้วยเช่น 1230, 1250, 1280 และ 1300 °C เพื่อการเปรียบเทียบผลโดยใช้ความคงที่ของสูตรเคลือบ การเตรียมเคลือบ การชุบเคลือบ และการปรับบรรยากาศ พร้อมด้วยอัตราการขึ้นและลงอุณหภูมิอย่างคงที่ของทุก ๆ ปัจจัย เพื่อต้องการให้ได้อุณหภูมิที่เหมาะสมทำให้เคลือบหลอมตัวได้ดี มีสีแดงเด่นชัด ไม่เป็นอุณหภูมิที่ต่ำจนเคลือบไม่สุกตัว หรืออุณหภูมิสูงเกินไปจนเคลือบไหลตัวมาก ผลการทดลองแสดงในรูป 4.6, 4.7, 4.8 และ 4.9 ของการเผาที่อุณหภูมิ 1230, 1250, 1280 และ 1300 °C และผลการวัดค่าของสีด้วยเครื่องวัดสี แสดงในตาราง 4.6



รูป 4.6 ผลการทดลองใช้อุณหภูมิเผา 1230 °C



รูป 4.7 ผลการทดลองใช้อุณหภูมิเผา 1250 °C



รูป 4.8 ผลการทดลองใช้ชุนหมูมิเผา 1280 °C

รูป 4.9 ผลการทดลองใช้ชุนหมูมิเผา 1300 °C

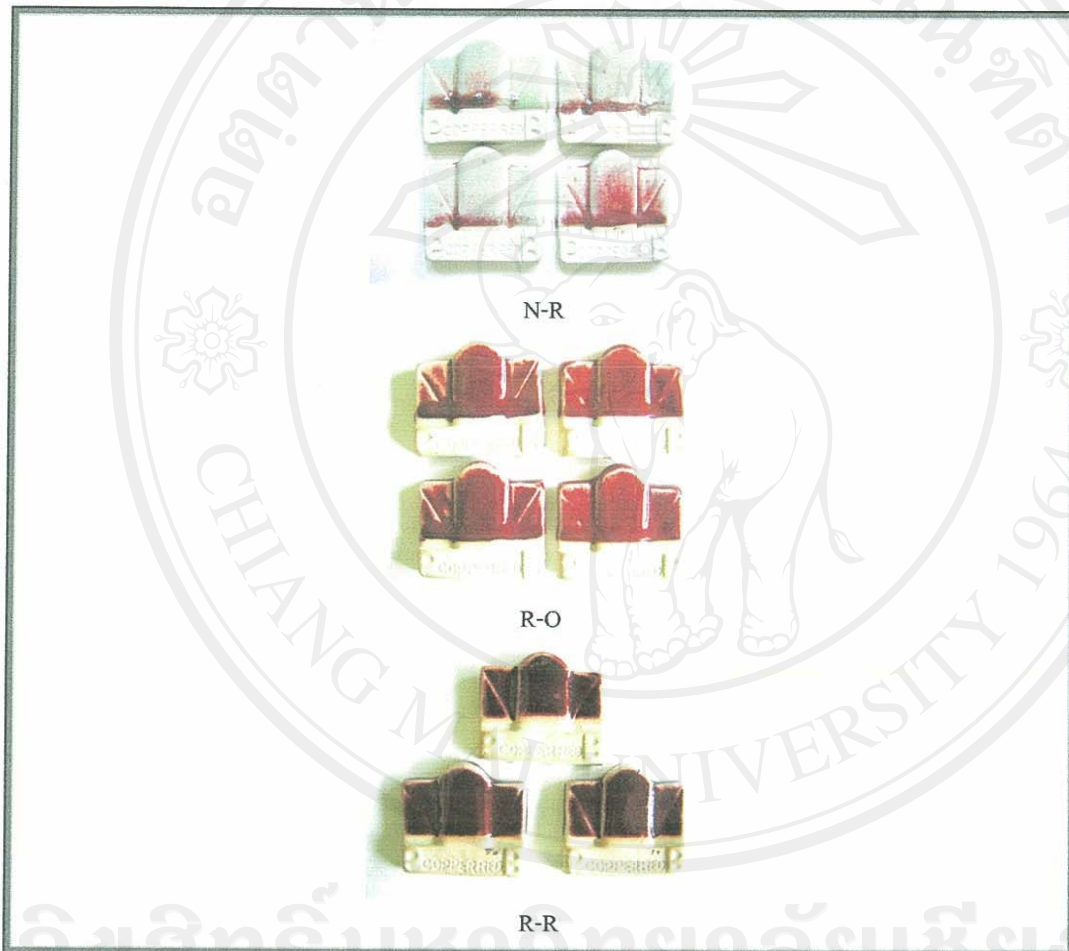
ตาราง 4.4 ผลการทดลองใช้ชุนหมูมิเผา ชุนหมูมิที่ต่างกันประกอบด้วย 1230°, 1250°, 1280° และ 1300 °C ภายใต้การปรับบรรยากาศด้วยระบบ R-O

อุณหภูมิ เผา °C	ผลจากการวัดด้วยเครื่อง (Color meter)	ลักษณะผิวเคลือบ จากการมองด้วยตาเปล่า
1230 °C	 Target L 32.2 a+ 18.0 b+ 4.7	ผิวเคลือบมัน เคลือบสุกตัวดีไม่ปรากฏผลึก
1250 °C	 Target L 23.0 a+ 23.9 b+ 6.4	ผิวเคลือบมัน เคลือบไหลตัวพอเหมาะ ให้สีแดงสม่ำเสมอ ผิวข้างใน ปรากฏผลึกเล็กๆ กระจายอยู่ทั่วไป
1280 °C	 Target L 36.6 a+ 23.5 b+ 8.6	ผิวเคลือบมัน เคลือบไหลตัวมากให้สีแดงสม่ำเสมอ ผิวข้างใน ปรากฏผลึกเล็กๆ กระจายทั่วไป
1300 °C	 Target L 37.1 a+ 23.7 b+ 5.9	ผิวเคลือบมัน เคลือบไหลตัวมาก ให้สีแดงสม่ำเสมอ ผิวข้างใน ปรากฏผลึกเล็กๆ กระจายทั่วไป

การเผาอุณหภูมิสูงขึ้น สีแดงจะมีความเข้มได้ดีกว่าอุณหภูมิต่ำ ดังกรณีเผาที่ 1300 °C เครื่องวัดสีแดงบอกความเข้มของสีได้สูงกว่าอุณหภูมิอื่น ลำดับรองลงมาที่ 1280°C แต่ ณ อุณหภูมิ ทั้ง 2 (1280 , 1300 °C) เคลือบไหลตัวมาก จึงเห็นว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ที่ 1250° C ให้สีแดงที่ดี ไม่มีการไหลตัวและเคลือบสุกตัวได้อย่างเหมาะสม ส่วนอุณหภูมิ 1230 °C เคลือบสุกตัวได้ไม่ดีเท่าที่ควรจึงได้สีแดงไม่เด่นชัด

4.4.2 ผลของบรรยากาศการเผาที่เหมาะสม

จาก 3 ระบบการเผา ที่ประกอบด้วยบรรยากาศระหว่างบรรยากาศในช่วงขึ้นอุณหภูมิ (Heating up atmosphere) และบรรยากาศช่วงอุณหภูมิลง (Cooling down atmosphere) ประกอบด้วยระบบ N-R, R-O และ R-R เผาที่อุณหภูมิ 1250°C ด้วยความอ่อน-แก่ ของบรรยากาศอย่างเป็นกลาง ๆ บรรยากาศรีดักชันที่มีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ประมาณ 4-5 PPM. และบรรยากาศออกซิเดชันที่มีออกซิเจน 9-10 % ผลการทดลองดังรูป 4.10 และผลการวัดค่าของสีด้วยเครื่องวัดสีแสดงในตาราง 4.5



รูป 4.10 ผลการทดลองเผาเปรียบเทียบปรับสภาพบรรยากาศ 3 ระบบ N-R, R-O และ R-R เผาที่อุณหภูมิ 1250°C ด้วยความอ่อน-แก่ ของบรรยากาศอย่างเป็นกลาง ๆ

ตาราง 4.5 ผลการทดลองเผาเปรียบเทียบปรับสภาพบรรยากาศ 3 ระบบ N-R, R-O, R-R เเผาที่อุณหภูมิ 1250 °C

บรรยากาศ การเผา	ผลจากการวัดด้วยเครื่อง (Color meter)	ลักษณะผิวเคลือบจากการมองด้วยตา
N-R	 Target L 65.2 a+ 3.2 b+ 6.4	ผิวเคลือบมัน เคลือบไหลตัวสีแดง หายไป พื้นผิวจางใส สีแดงปรากฏใน ส่วนที่ไหล
R-O	 Target L 27.9 a+ 24.2 b+ 6.7	ผิวเคลือบมัน เคลือบไหลตัวพอเหมาะ ให้สีแดงสม่ำเสมอ ผิวข้างใน ปรากฏ ผลึกเล็กๆ กระจายอยู่ทั่วไป
R-R	 Target L 29.4 a+ 8.7 b+ 1.4	ผิวเคลือบมัน เคลือบไหลตัวพอเหมาะ ให้สีแดงไม่สม่ำเสมอมีจุดดำและ บางส่วนคล้ำไม่สม่ำเสมอ

ผลการทดลองเผาระบบการเผา R-O ให้สีแดงเด่นชัดได้ดี ระบบ N-R เกิดสีแดงได้น้อยมาก ระบบ R-R ให้สีแดงไม่เด่นชัดมีจุดคล้ำ จึงเห็นว่าการเผาด้วยบรรยากาศระบบ R-O เป็นระบบการเผาที่ดีที่สุด จึงเลือกและยึดหลักการเผาระบบ R-O ทำการทดลองครั้งนี้

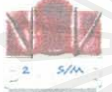
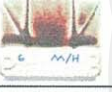
4.4.3 ผลการศึกษาความอ่อน-แก่ของบรรยากาศเมื่อเผาด้วยระบบ R-O

ผลการเผาขึ้นทดสอบและผลจากการวัดสีแดงด้วยเครื่องวัดสี ทำให้สามารถประเมินผลการทดลอง การเผาขึ้นทดสอบด้วยระบบ R-O ที่มีบรรยากาศความเข้มข้นเป็นระดับปานกลาง จะให้ผลสีแดงได้ดีกว่าการเผาบรรยากาศที่มีความอ่อนและแก่ ผลจากการทดลองดังรูป 4.11 และแสดงในตารางที่ 4.6



รูป 4.11 ผลการทดลองเผาบรรยากาศในเตาเผาช่วงขึ้นอุณหภูมิ R และช่วงลงอุณหภูมิ O (R-O) จำนวน 9 บรรยากาศ

ตาราง 4.6 แสดงความอ่อน-กลาง-แก่ ของบรรยากาศในเตาเผา ด้วยระบบ
Reduction-Oxidation (R-O)

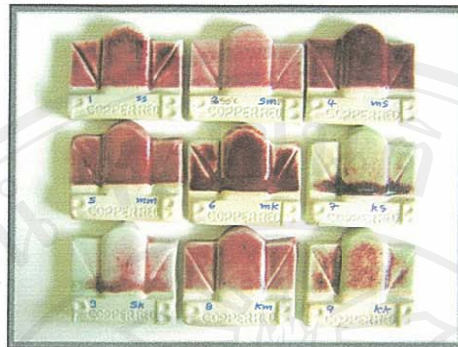
ลำดับ	ชั้นอุณหภูมิ Reduction อุณหภูมิ Oxidation		ผลจากการเผาขึ้น ทดสอบ	ผลจากการวัดด้วยเครื่อง (Color meter)		
	ขึ้น R	ลง O				
1	อ่อน	อ่อน			Target a+ 17.3	L 36.0 b+ 6.5
2	อ่อน	กลาง			Target a+ 19.2	L 33.6 b+ 5.3
3	อ่อน	แก่			Target a+ 5.1	L 32.0 b+ 6.0
4	กลาง	อ่อน			Target a+ 15.1	L 33.0 b+ 3.5
5	กลาง	กลาง			Target a+ 23.9	L 23.0 b+ 6.4
6	กลาง	แก่			Target a+ 12.5	L 47.9 b+ 9.4
7	แก่	อ่อน			Target a+ 11.6	L 30.4 b+ 2.3
8	แก่	กลาง			Target a+ 11.0	L 30.0 b+ 2.0
9	แก่	แก่			Target a+ 14.0	L 35.3 b+ 4.0

ผลการพิจารณาบรรยากาศที่เป็นความอ่อน-แก่ จากการทดลองของตาราง 4.6 ทำให้เห็นว่า
การเกิดสีแดง ด้วยการเผาระบบ R-O ที่มีบรรยากาศเข้มข้นในระดับกลางจะให้ผลดีกว่าบรรยากาศที่
มีความอ่อนและแก่

All rights reserved

4.4.4 ผลการเปลี่ยนแปลงอัตราการเผาขึ้นและลงอุณหภูมิ

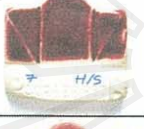
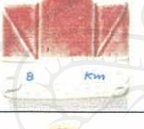
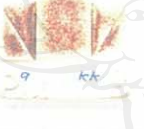
เผาขึ้นทดสอบให้ผลการทดลองทั้ง 9 แผนการทดลองดังรูป 4.12 และแสดงในตาราง 4.7



รูปที่ 4.12 ผลของสีแดงจากการทดลองเผาขึ้นทดสอบ เปรียบเทียบอัตราเร็วของการเผาด้วยการขึ้นและลงอุณหภูมิ

ตาราง 4.7 แสดงการเปรียบเทียบอัตราเร็วของการเผาด้วยการขึ้นและลงอุณหภูมิเผาขึ้นทดลอง

ลำดับ	ระยะเวลาเผาใน 1 รอบ (ชม.)		ผลจากการเผาขึ้นทดสอบ	ผลจากการวัดด้วยเครื่อง (Color meter)	
	อุณหภูมิ Reduction ปานกลาง	อุณหภูมิลง Oxidation ปานกลาง			
1	ช้า 9 ชม.	ช้า 9 ชม.8 นาที		Target a+ 20.7	L 33.8 b+ 6.7
2	ช้า 9 ชม.	กลาง 4 ชม.9 นาที		Target a+ 17.9	L 34.4 b+ 5.7
3	ช้า 9 ชม.	เร็ว 2 ชม.8 นาที		Target a+ 8.1	L 60.7 b+ 5.5

4	กลาง 4 ชม.50 นาที	ช้า 9 ชม.8 นาที			Target a+ 17.3	L 33.6 b+ 5.0
5	กลาง 4 ชม.50 นาที	กลาง 4 ชม.9 นาที			Target a+ 24.0	L 34.2 b+ 6.6
6	กลาง 4 ชม.50 นาที	เร็ว 2 ชม.8 นาที			Target a+ 15.9	L 26.6 b+ 3.6
7	เร็ว 2 ชม.25 นาที	ช้า 9 ชม.8 นาที			Target a+ 1.2	L 63.2 b+ 13.8
8	เร็ว 2 ชม.25 นาที	กลาง 4 ชม.9 นาที			Target a+ 17.5	L 39.0 b+ 7.2
9	เร็ว 2 ชม.25 นาที	เร็ว 2 ชม.8 นาที			Target a+ 13	L 47.1 b+ 10.2

ผลการทดลองประเมินได้ว่าการเผาด้วยบรรยากาศระบบ R-O สมควรใช้อัตราการขึ้นอุณหภูมิใช้บรรยากาศรีดักชัน ลดอุณหภูมิลงใช้บรรยากาศออกซิเดชันและใช้อัตราที่อยู่ในระหว่าง 4-5 °C/นาที คืออัตราอย่างกลางมาปฏิบัติงาน ทำให้เห็นผลการปรากฏสีแดงได้ดีกว่าอัตราอย่างอื่น

4.5 ผลการเผาปริมาณที่เหมาะสมของสารตัวเติมดินบุกออกไซด์ในเคลือบทองแดง

จากผลการทดลอง ได้กำหนดเปลี่ยนแปลงปริมาณสารตัวเติมดินบุกออกไซด์ (SnO_2) ประกอบด้วยเปอร์เซ็นต์ต่าง ๆ จำนวน 12 การทดลอง ทั้งนี้ในแผนปฏิบัติงานให้มีปริมาณดินบุกออกไซด์จำนวนแรกต่ำกว่า 3.0 % (0-2.5%) จำนวนที่สองสูงกว่า 3.1 % (3.5-7.0 %) ผลการทดลองได้ปรากฏให้เห็นดังรูป 4.13 และแสดงในตาราง 4.8 เปรียบเทียบสีแดงที่เกิดขึ้นถึงปริมาณดินบุกออกไซด์ที่ให้สีแดง



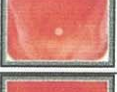
ชุดที่ 1



ชุดที่ 2

รูป 4.13 ผลของสีแดงจากการทดลองการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมของปริมาณดินบุกออกไซด์ด้วยเปอร์เซ็นต์ต่าง ๆ

ตาราง 4.8 ผลการเปลี่ยนแปลงและเปรียบเทียบของสีแดงปรากฏทั้งที่อ่านด้วยเครื่องวัดสีและดูจากตาปริมาณดินบุกออกไซด์ด้วยเปอร์เซ็นต์ต่าง ๆ

ลำดับ	อัตราส่วน ระหว่าง $\text{CuCO}_3 \cdot \text{SnO}_2$	เดิมดินบุก ออกไซด์ SnO_2	ผลจากการวัดด้วยเครื่อง (Color meter)	ลักษณะผิวเคลือบจากชั้น ทดสอบ มองด้วยตาเปล่า
1	1	0	 Target L 34.7 a+ 11.7 b+ 2.6	สีแดงจาง ไม่มีผลึก
2	1 : 0.8	1.0	 Target L 32.8 a+ 16.0 b+ 4.1	สีแดงมีผลึก
3	1 : 1.2	1.5	 Target L 31.8 a+ 16.5 b+ 3.3	สีแดงจาง มีผลึก
4	1 : 1.6	2.0	 Target L 32.8 a+ 17.9 b+ 5.0	ผิวเคลือบมัน สีแดงจางลง มีผลึก กระจายในผิวเคลือบ
5	1 : 2	2.5	 Target L 26.6 a+ 20.6 b+ 4.8	ผิวเคลือบมัน สีแดงสม่ำเสมอ มี ผลึกกระจายในผิวเคลือบ
6	1 : 2.5	3.0	 Target L 34.1 a+ 21.7 b+ 6.8	ผิวเคลือบมัน สีแดงสม่ำเสมอ มี ผลึกกระจายในผิวเคลือบ
7	1 : 2.9	3.5	 Target L 21.5 a+ 23.8 b+ 5.9	เคลือบมันให้สีแดงเข้มสม่ำเสมอ มีผลึกกระจายในผิวเคลือบ
8	1 : 3.3	4.0	 Target L 23.8 a+ 19.0 b+ 4.2	สีแดงถูกบังด้วยจุดขาวปนเขียว
9	1 : 3.7	4.5	 Target L 32.7 a+ 9.1 b- 0.7	สีแดงน้อย มีจุดขาวปะปน ปิดผิวเคลือบ
10	1 : 4.1	5.0	 Target L 35.3 a+ 7.0 b- 1.7	สีแดงน้อย มีจุดขาวปะปน
11	1 : 5	6.0	 Target L 57.5 a - 1.4 b+ 0.2	สีคล้ำและจะมีปริมาณสีขุนขาว ปนเขียว ปิดผิวเคลือบ
12	1 : 5.8	7.0	 Target L 57.5 a - 1.4 b+ 0.2	สีคล้ำและจะมีปริมาณสีขุนขาว ปนเขียว ปิดผิวเคลือบ

All rights reserved

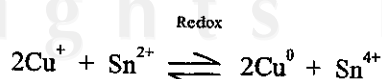
ผลจากการเปรียบเทียบของสีแดงปรากฏจากเครื่องวัดสีและคู่ด้วยตาเปล่า ทำให้เชื่อว่า ปริมาณดีบุกออกไซด์ที่เหมาะสมจะอยู่ในระหว่าง 2.5 – 3.5 % ของน้ำหนักเคลือบคิดเป็นอัตราส่วน ระหว่าง $\text{CuCO}_3/\text{SnO}_2$ คือ 1 : 2.5 ที่สามารถนำมาปฏิบัติการทำเคลือบสีแดงของทองแดง เห็นว่า เปอร์เซ็นต์ในช่วงที่มากกว่า 3.0 % จะให้สีแดงได้ดีกว่า ลักษณะของผิวเคลือบจะดูใสมันวาวไม่ ปรากฏความขุ่นภายในเนื้อแก้ว เมื่อปริมาณการเติมดีบุกออกไซด์มากขึ้น ลักษณะของชั้น ตะกอนหรือผลึกจะหยาบ และมีปริมาณสูงขึ้นจากระดับผิวดินปืนขึ้นมาถึงตอนบนของผิวเคลือบทำให้ เป็นความขุ่นของเนื้อแก้ว และสีแดงเริ่มน้อยลง เป็นไปตามปริมาณของดีบุกออกไซด์ที่เติม ซึ่งเป็น ปริมาณที่มากเกินไป ปริมาณดีบุกออกไซด์ในสูตรเคลือบที่ดี (สูตร 22) โดยเติมปริมาณดีบุก ออกไซด์ 3.5 % ของน้ำหนักเคลือบ นำมาใช้เป็นสูตรเคลือบทำผลิตภัณฑ์

ผลการทดลองเพื่อให้ได้ข้อมูลเป็นเหตุผลการอธิบายถึงกลไกของดีบุกออกไซด์ ทำให้เกิดสีแดงในเคลือบทองแดง

ทั้งนี้ได้แบ่งแนวทางการปฏิบัติงาน 2 แนวทางให้ผลดังนี้

(1) แนวทางจากการประเมินถึงปริมาณสารตัวเติมดีบุกออกไซด์ ซึ่งได้ทำการทดลอง ไว้แล้วในบทที่ 3 ข้อ 3.5.1 ได้เห็นว่าจากปริมาณดีบุกออกไซด์แตกต่างกันใน 12 การทดลอง พร้อม การเปรียบเทียบกับสูตรเคลือบทดลอง (สูตร 22) และไม่มีเติมดีบุกออกไซด์ ดังแสดงในรูป 4.13 ได้กระทำซ้ำเป็น 2 ชุด ชุดละครั้ง เพื่อการเปรียบเทียบ ทำให้เห็นถึงการปรากฏสีแดงของเคลือบ ทองแดง เมื่อปริมาณดีบุกออกไซด์เป็นเปอร์เซ็นต์ต่ำ เช่น 1-2 % ได้สีแดงจาง 2.5-3.5 % ความเข้ม ของสีจะเด่นชัด และปริมาณดีบุกออกไซด์สูงตั้งแต่ 4 - 7 % สีแดงของเคลือบจะออกกล้าและจะมี ปริมาณสีขุ่นขาวปนอยู่ในเคลือบสีแดงมากขึ้น

(2) เหตุผลการแสดงกลไกของดีบุกออกไซด์ทำให้เกิดสีแดงในเคลือบทองแดง โดย ติดตามจากปฏิกิริยาทางเคมี ข้อมูลในขั้นตอนการเผาที่มีอุณหภูมิของการเผาและบรรยากาศในช่วง อุณหภูมิขึ้นและช่วงอุณหภูมิลดลง การขึ้นอุณหภูมิเมื่อวัตถุดิบอยู่ในสภาพเป็นของแข็งหรืออยู่ใน รูปของสารประกอบออกไซด์ การปรากฏของสารทองแดงที่มี CuO , Cu_2O และโลหะ Cu ส่วนดีบุก ออกไซด์จะประกอบด้วย SnO_2 และ SnO จากนั้นเมื่อออกไซด์ถูกเผาลงถึงอุณหภูมิสูงสุด จนกระทั่ง หลอมเป็นเนื้อแก้ว ทำให้ธาตุต่าง ๆ ในเนื้อแก้วอยู่ในสภาพเป็น Ionic form ประกอบด้วยธาตุ ทองแดงที่เป็น Cu^{2+} , Cu^{1+} และ Cu^0 ดีบุกจะเป็น Sn^{2+} , Sn^{4+} จนในที่สุดเกิดปฏิกิริยาเคมีรีดอกซ์ ระหว่างการหลอมและเย็นตัวลงด้วยปฏิกิริยาเคมีดังนี้

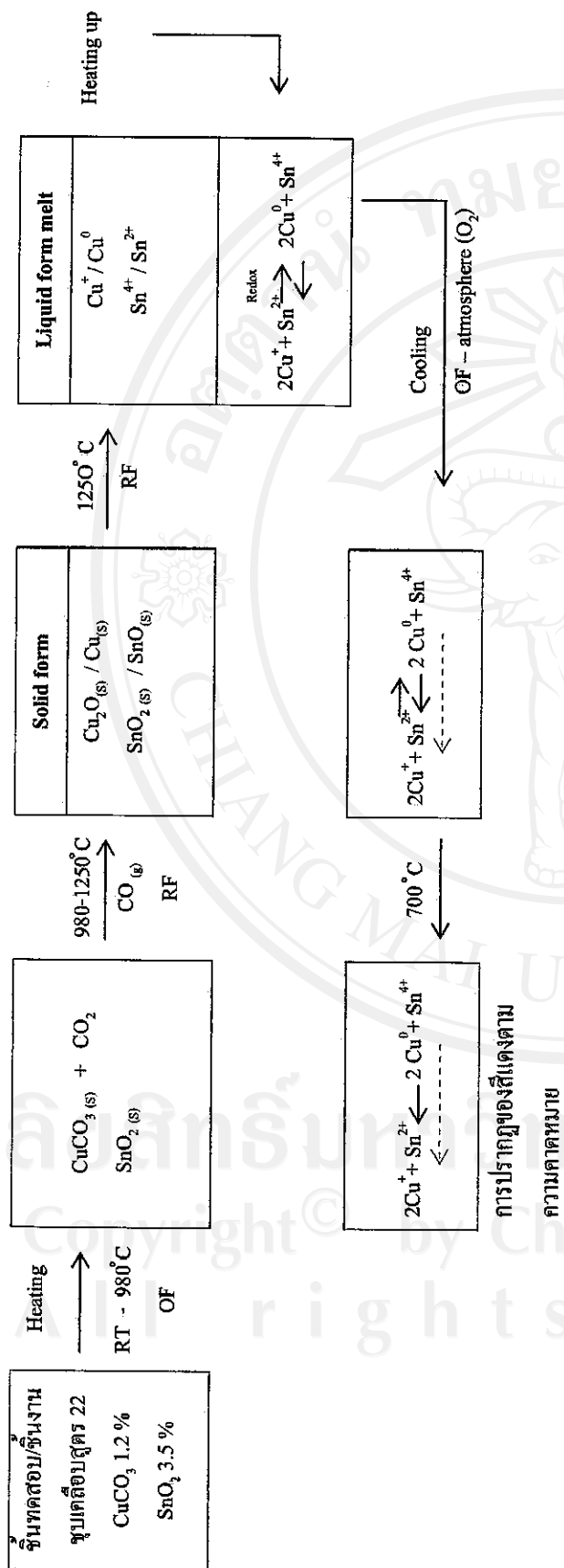


จนในที่สุดเมื่อการเย็นตัวลงภายใต้บรรยากาศออกซิเดชัน ทำให้คาดหมายถึงทิศทางของปฏิกิริยาเคมีเคลื่อนตัวจากขวาไปซ้าย เป็นเหตุผลทำให้สีแดงของเคลือบทองแดงน่าจะมาจากการเกาะกลุ่มกันของ Cu^+ ions และ Sn^{2+} ions ปรากฏสีแดงในเคลือบตามความคาดหมาย ดังแสดงในแผนภูมิ

4.1 ขั้นตอนและกลไกของการเกิดสีแดงกระบวนการเผาเคลือบทองแดง

4.6 ประเมินผลการทดลองและการตรวจสอบ

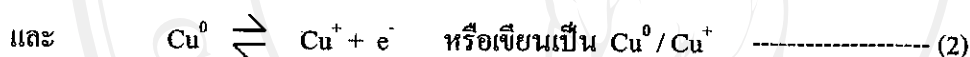
การประเมินผลการทดลอง พร้อมตรวจสอบผลการศึกษาคือเคลือบสีแดงของสีแดง โดยมีวัตถุประสงค์ถึงการติดตามความเหมาะสมของเคลือบที่สามารถให้สีแดงได้มากที่สุด ในเรื่องนี้ได้ทำการประเมินเบื้องต้นด้วยตาเปล่าไปแล้วจากทุก ๆ ครั้งที่ทำทดลองกับชิ้นทดสอบและชิ้นงาน พร้อมทั้งทำการตรวจสอบวัดค่าความเข้มของสีแดงด้วยเครื่องวัดสี (Color meter) ทำให้ทราบผลของการทดลอง ที่สามารถประเมินผลการเกิดสีแดงของเคลือบทองแดง ด้วยการตัดสินใจใช้สูตรเคลือบที่เหมาะสม โดยการปรับปรุงสูตรเคลือบ 22 เพียงแต่ใช้ปริมาณดินบุกออกไซด์เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ให้เป็นสูตรเคลือบเพื่อนำไปทำผลิตภัณฑ์ พร้อมด้วยการยึดถือกรรมวิธีในทางปฏิบัติเกี่ยวกับความละเอียดของอนุภาคเคลือบ ความเข้มข้นของน้ำเคลือบ ความหนาของการชุบชิ้นทดสอบหรือชิ้นงาน ใช้เทคนิคเกี่ยวกับการเผาที่อุณหภูมิ 1250°C ด้วยบรรยากาศระบบขึ้นอุณหภูมิด้วยบรรยากาศรีดักชัน ลดอุณหภูมิลงด้วยบรรยากาศออกซิเดชัน ระดับความเข้มของบรรยากาศและอัตราการเร็วทั้งขึ้น-ลงอุณหภูมิเป็นอย่างกลางมาปฏิบัติงาน จนในที่สุดได้ผ่านการทดลองเลือกใช้ปริมาณดินบุกออกไซด์ได้เหมาะสม ทำผลการทดลองให้สีแดงเด่นชัด ซึ่งผู้วิจัยได้นำเสนอผลงานของเคลือบสีแดง มาประเมินผลว่าการปรากฏสีแดงในเคลือบเกิดจากธาตุหรือโลหะ หรือสารประกอบใดที่ทำให้เกิดสีแดงของทองแดง (Copper staining) ขึ้นได้ จึงทำให้คำนึงถึงการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยพิจารณาระหว่างทองแดงกับดินบุกออกไซด์เป็นสำคัญ ซึ่งคาดว่าสารทั้ง 2 ชนิดนี้น่าจะเป็นตัวทำให้เกิดสีแดงในเคลือบ ด้วยเหตุผลดังแสดงขั้นตอนและกลไกของการเผาชิ้นทดสอบและชิ้นงานเคลือบสีแดงของแดง ดังรูป 4.14 แผนภูมิ



รูป 4.14 แผนภูมิแสดงขั้นตอนและกลไกของการเกิดสีแดงในกระบวนการเผาเคลือบของแดงตามความคาดหมาย

หมายเหตุ	RT	= Room temperature
	OF	= Oxidation firing
	RF	= Reduction firing
	(S)	= Solid form
	CO(g)	= Carbonmonoxide gas

คำอธิบายการเผา เมื่อใช้ความร้อนเพิ่มขึ้นเป็นลำดับตั้งต้นด้วยส่วนผสมของสูตรเคลือบดิน โดยมีปริมาณคาร์บอนเปอร์คาร์บอนเนต 1.2 % และตัวเติมดินบุกออกไซด์ 3.5 % ถูกเผาตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 980 °C ใช้บรรยากาศเป็นออกซิเดชัน (OF) ณ อุณหภูมินี้ เป็นระยะของการไล่สารระเหย ปริมาณคาร์บอนเนตจะถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เริ่มปรับบรรยากาศเป็นรีดักชัน โดยมีปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นตัวรีดิวส์ (Reducing agent) จนอุณหภูมิการเผาถึง 1250 °C ทำให้คาดว่าออกไซด์ทั้งหมดจะเกิดขึ้นอยู่ในสภาพเป็นรูปแบบรีดิวส์ ออกไซด์ทองแดงจะอยู่ในรูปของคิวปรัสออกไซด์ Cu_2O และอาจถูกรีดิวส์ถึงการเป็นโลหะทองแดง (Copper metal) ดินบุกออกไซด์จะเกิดสแตนนัสออกไซด์ (SnO) และอาจยังคงหลงเหลือสแตนนิกที่เปื้อน (SnO_2) คงค้างอยู่ ยังสภาพเป็นของแข็ง (Solid form) ขณะเดียวกันอาจจะเริ่มก่อให้เกิดสภาพของเหลว (Liquid form) เกิดการหลอม (Melt) เคลือบถูกเปลี่ยนแปลงสภาพภายใต้อุณหภูมิ 1250 °C เป็นน้ำแก้วหลอมเหลว และขณะเมื่อเป็นของเหลวหรืออยู่ในสภาพเป็นสารละลายทำให้ธาตุต่าง ๆ ถูกแปรสภาพเป็น Ionic electron form ทองแดงจะเปลี่ยนเป็น Cu^+ และ Cu^0 และดินบุกจะอยู่ในรูปแบบของ Sn^{2+} และ Sn^{4+} เขียนเป็นสมการในรูปแบบไอออน Ion electron half equation



การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีร่วมกันภายในน้ำแก้วเหลว จะแสดงปฏิกิริยาทางเคมีเป็นรีดอกซ์ (Redox reaction) เกิดขึ้น



เมื่อเข้าสู่ขั้นตอนการลดอุณหภูมิลง (Cooling down) ด้วยการใช้อัตราปานกลาง คือ 4-5 °C / นาที พร้อมปรับบรรยากาศเป็นออกซิเดชัน ปฏิกิริยารีดอกซ์จะมีแนวโน้มไปทางใด (ระหว่างขวาไปซ้ายหรือซ้ายไปขวา) ในที่สุดเมื่อน้ำแก้วหรือน้ำเคลือบหลอมเย็นตัวลง คาดว่าเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 700 °C จะเข้าสู่ขั้นตอนจุดอ่อนตัว (Softening) ไปจนถึงจุดเปลี่ยนแปลงของเคลือบ (Transition point) ที่คาดว่าน่าจะอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 500-600 °C ทำให้ปฏิกิริยาหยุดภายใต้การคาดคะเนถึงปฏิกิริยาที่เดินจากขวาไปซ้ายด้วยการปรากฏไอออนของธาตุ เรียงลำดับดังนี้ $\text{Cu}^+ \text{ Sn}^{2+} \text{ Cu}^0$ ซึ่งไอออนของธาตุควรนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องอิเล็กตรอนเรโซแนนซ์ (ESR) และ Cu^0 อาจวิเคราะห์ด้วย XRD ส่วน Sn^{4+} คาดว่าไม่น่าจะปรากฏในเคลือบหลังเผา แต่ถ้าจะปรากฏก็ควรมีปริมาณน้อยมาก ในเรื่องนี้เมื่อติดตามจากการศึกษาเติมปริมาณดินบุกออกไซด์ พบว่ายิ่งปริมาณดินบุกออกไซด์

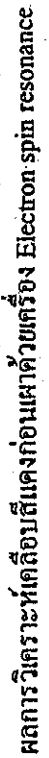
มากขึ้นเท่าใด สีแดงจะถูกบดบังไปมากตามลำดับ จึงเห็นว่าสีแดงน่าจะมาจาก Cu^+ , Sn^{2+} และ Cu^0 เป็นตัวสำคัญทำให้เกิดสี (Copper staining) ทั้งนี้ Cu^0 อาจอยู่ในรูปของโลหะทองแดงตกจมอยู่ระดับล่างของผิวเคลือบ ที่อาจถูกข้อมสีอื่นเนื่องมาจากการมีส่วนผสมของ Cu^+ และ Sn^{2+} เป็นตัวหลัก หรือโดยภาพรวมว่า Cu^+ และ Sn^{2+} รวมทั้ง Cu^0 เป็นตัวทำให้เกิดสีแดงของเคลือบทองแดง

ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Electron spin resonance : ESR และเครื่อง X-ray diffractometer : XRD ให้ผลแสดงในรูป 4.14 , 4.15 และ 4.16

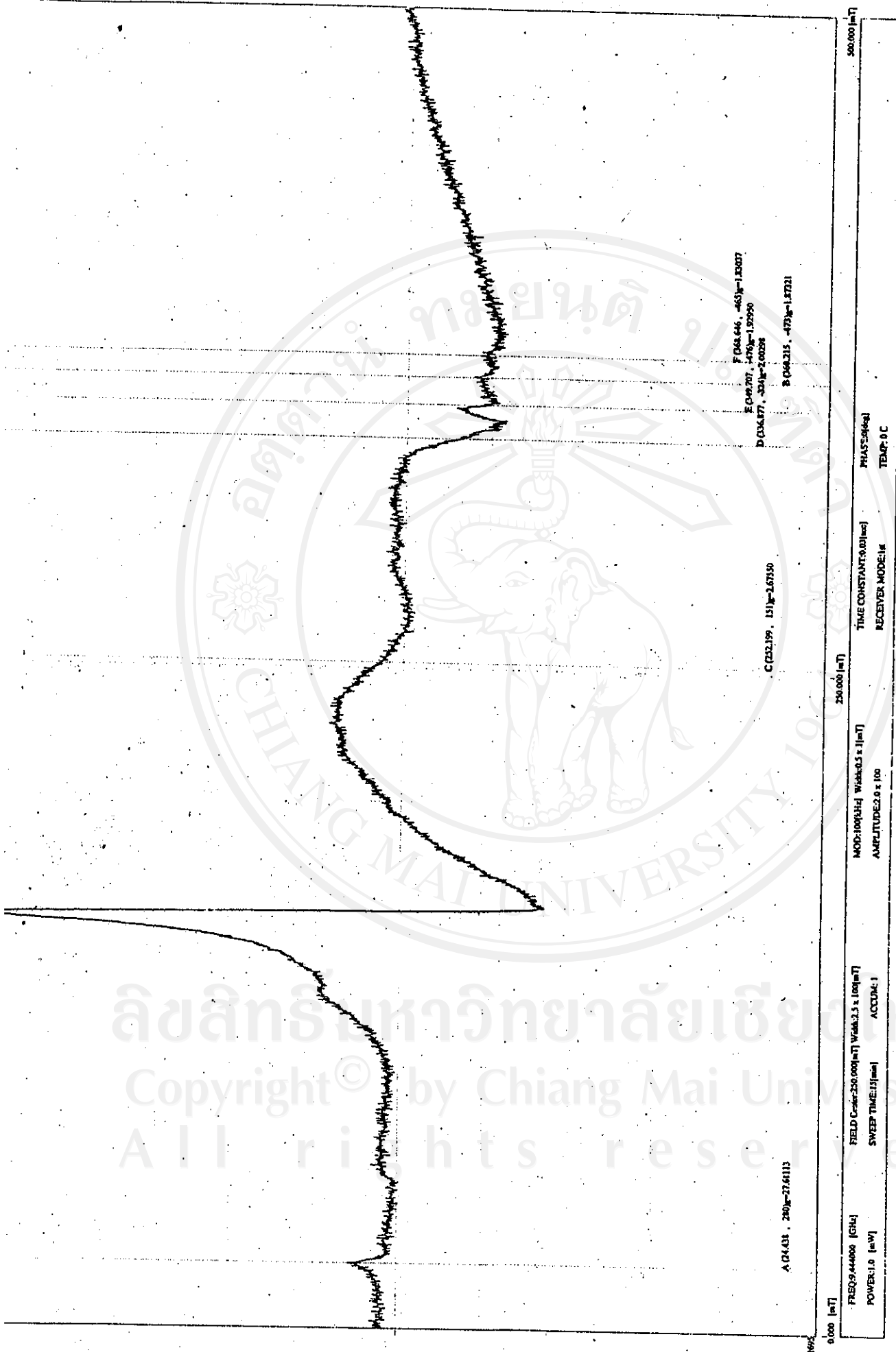
จาก ESR Spectra ในรูป 4.14 ทำให้ทราบตำแหน่งของสนามแม่เหล็ก (Magnetic field) ที่วัดค่าด้วยความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นมิลลิเทสลา (Milli-tesla) Mt. ในแกนนอน โดยมีแกนตั้งแสดงความเข้มเป็นปริมาณของการปรากฏไอออนของธาตุหรือโลหะธาตุ แสดงตำแหน่งของสนามแม่เหล็กระบุเป็นค่า g ตรวจพบได้ค่า $g = 4.23 - 4.25$ เป็นปริมาณค่อนข้างสูงที่ความเข้มสนามแม่เหล็กระหว่าง 160,000 - 170,000 Mt. นอกจากนี้ยังพบค่า $g = 2.675$ แต่มีปริมาณเล็กน้อยที่ 250,000 Mt. เมื่อนำค่า g ต่าง ๆ ไปเทียบกับ Spectra [7] ได้บอกให้ทราบถึงค่า g ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ค่า $g = 1.0 - 2.1$	จะเป็น Cu^{2+}
ค่า $g = 3.0 - 4.0$	จะเป็น Cu^+ คาดว่าจะเป็นตัวให้สีแดง
ค่า $g = 5.0$	จะเป็น Cu^0 หรือ Cu-metal

ทำให้ได้รับผลการทดลองใน ESR Spectra ว่าได้พบไอออนของทองแดงที่เป็น Cu^{1+} ปรากฏได้ชัดแต่เมื่อติดตามโลหะทองแดง (Cu^0) ไม่ปรากฏใน ESR Spectra ที่สามารถประเมินได้ และจากการตรวจสอบ X-ray Diffractometer : XRD พบว่าไม่สามารถบอกได้ว่ามีผลึกอะไรเกิดขึ้น ทั้งนี้อาจจะเนื่องมาจากการที่ในเคลือบนั้นมีผลึกอยู่ในปริมาณที่น้อยเกินไป



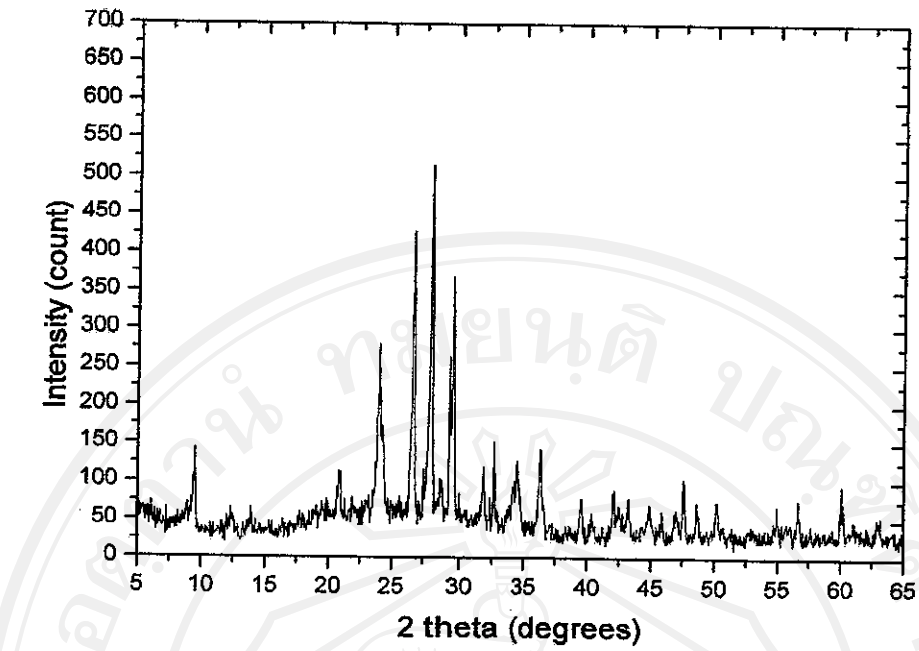
37 4.15



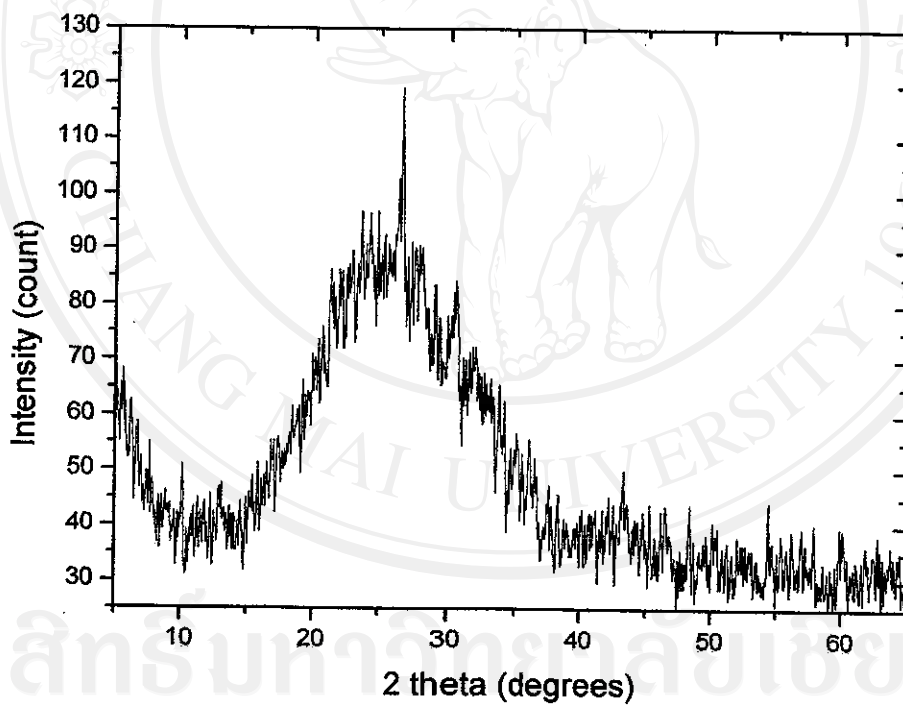
ผลการวิเคราะห์คลื่นที่แสดงหลังเสาคำเครื่อง Electron spin resonance

รูป 4.16

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



ก่อนเผา (ดูผนวก ค5 ประกอบ)



หลังเผา ดูผนวก ค6 ประกอบ

รูป 4.17

ผลการวิเคราะห์เคลือบทองแดงด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer : XRD

อย่างไรก็ตามแนวคิดจากผู้ที่ได้เคยทำเคลือบสีแดงของทองแดง ด้วยคำอ้างเกี่ยวกับการมีปริมาณเหล็กออกไซด์อยู่ในวัตถุดิบซึ่งปริมาณเหล็กเหล่านี้อาจจะอยู่เจือปน (Impurities) รวมทั้งอาจมีปริมาณเหล็กเจือปนอยู่ดินปั้นซึ่งมีความเป็นไปได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ติดตามการตรวจสอบด้วย X-ray Fluorescence : XRF ที่ให้ผลวิเคราะห์ตาราง 4.9

ตาราง 4.9 ผลวิเคราะห์ทางเคมีส่วนผสมเคลือบทองแดง ก่อนเผาและหลังเผาอุณหภูมิ 1250 °C

Glazes composition	Concentration (Wt % , ppm)	
	Before	After
MgO	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	3.57	5.04
SiO ₂	35.41	42.56
P ₂ O ₅	0.82	1.01
SO ₃	1674	0.24
Cl	1294	454
K ₂ O	0.30	1.53
CaO	15.37	15.67
Fe ₂ O ₃	1.36	1.86
NiO	318	311
CuO	2.29	1.80
ZnO	15.71	10.26
As ₂ O ₃	408	940
Rb ₂ O	225	413
SrO	1368	1444
Y ₂ O ₃	103	131
ZrO ₂	344	1097
SnO	8.94	4.64
BaO	15.61	14.89
PbO	417	255

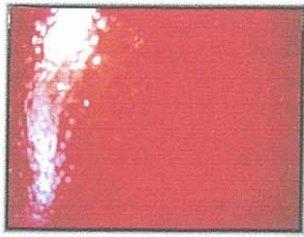
ผลจากการวิเคราะห์ XRF พบว่าปริมาณเหล็ก Fe_2O_3 หลังเผามีค่าเท่ากับ 1.86 % ซึ่งถือว่าเป็นปริมาณน้อย ดังนั้น ไม่น่าจะมีเหล็กอยู่ในเคลือบทดลองเพียงพอที่จะทำให้ผลของสีแดงเกิดการเปลี่ยนแปลงโทนสีเป็นอย่างอื่น

4.7 ผลการทำผลิตภัณฑ์เคลือบสีแดงของทองแดง

ผลิตภัณฑ์เคลือบสีแดงของทองแดง เพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อผู้ประกอบการอุตสาหกรรมเซรามิก ผลการศึกษาผลของสารเติมแต่งดินบุกออกไซด์ในเคลือบสีแดงของทองแดงสำหรับผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผา ได้ทำการทดลองตั้งแต่ต้นจนในที่สุดทำให้ได้ผลของเคลือบมีสีแดงเด่นชัดตามต้องการอย่างน่าพอใจ จึงได้นำข้อมูลจากผลการทดลองมาทำผลิตภัณฑ์

รูปทรงของผลิตภัณฑ์ แจกันจำนวน 8 รูปทรง ๆ ละ 5 ใบ แก้วน้ำจำนวน 50 ใบรวมทั้งหมด 90 ใบ โดยใช้ดินสำเร็จรูปจากบริษัทคอมพาวด์เคลย์ ที่ผ่านการขึ้นรูปเป็นหมุน การตากแห้งและเผาบิสกิตไม่พบการเสียหาย และผ่านการชุบเคลือบที่มีความหนาประมาณ 1.8 มิลลิเมตร นำเข้าเตาเผาและดำเนินการเผาตามเทคนิควิธีทุกประการ พบว่าผลิตภัณฑ์ไม่เสียหายและไม่เกิดตำหนิร้าวหรือแตก ผลทำให้ได้รับผลิตภัณฑ์หลังเผามีสีแดงของเคลือบทองแดงอย่างน่าพอใจ และเคลือบสามารถเข้ากับเนื้อดินปั้นสุกตัวได้เหมาะสม แต่อย่างไรก็ตามผลการทดลองทำผลิตภัณฑ์ยังพบการปรากฏสีจางของเคลือบทองแดง ตรงบริเวณสูงสุดของผลิตภัณฑ์หลังเผา โดยเฉพาะบริเวณขอบปากลงมา มีระยะประมาณ 0.2-1.0 เซนติเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสูงของผลิตภัณฑ์ ที่เป็นเช่นนี้เข้าใจว่าเกิดจากกระแสไอร้อนที่เคลื่อนตัวค่อนข้างรวดเร็ว (Turbulent flow) เมื่อการเผาถึงอุณหภูมิสูงสุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงของการยืนไฟ (Soaking) ผลงานผลิตภัณฑ์เคลือบสีแดงของทองแดง แสดงในรูป 4.18 – 4.30

อนึ่งผลิตภัณฑ์ขึ้นทดสอบ จีงาน และผลิตภัณฑ์จำนวนหนึ่งที่ผู้วิจัยได้มีการทดลองด้วยเงื่อนไขอย่างอื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการปรับบรรยากาศ ที่มีความสนใจด้วยหลากหลายของบรรยากาศรวมทั้งการปรับสูตรเคลือบ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงอัตราความเร็วและอื่น ๆ นำผลงานการทดลองที่ไม่เกิดสีแดง รวบรวมไว้ในผนวก ก



สีผิวเคลือบ



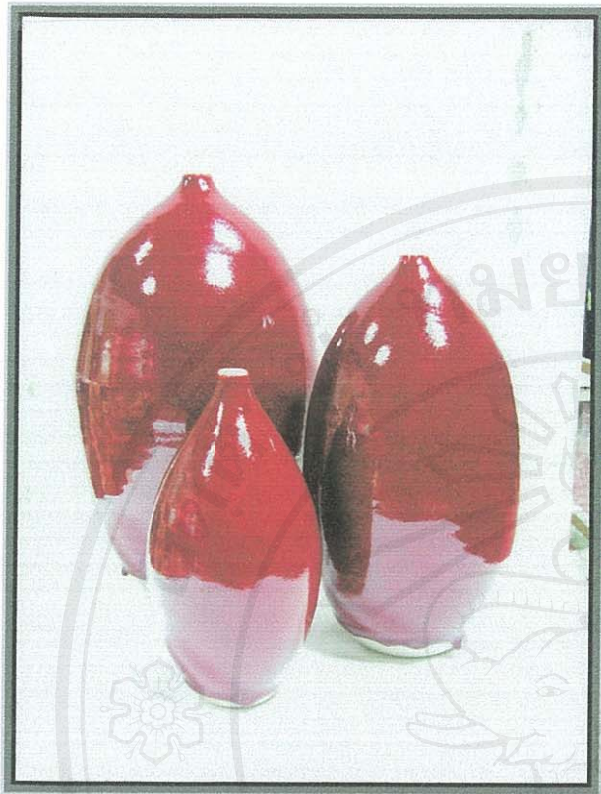
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

รูป 4.18

ผลิตภัณฑ์จากเทียนไข 3 ขนาด เคลือบสีแดงของทองแดง

ใบที่ 1 สูง	38 เซนติเมตร
ใบที่ 2 สูง	34 เซนติเมตร
ใบที่ 3 สูง	22 เซนติเมตร

Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 4.19 ผลิตภัณฑ์แจกันทรงไข่ 3 ขนาด เคลือบสีแดงของทองแดง



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University

All rights reserved

รูป 4.20 แจกันรูปทรงไข่เคลือบสีแดงของทองแดง

สูง 38 เซนติเมตร



รูป 4.21 ผลัดภัณฑ์แจกันทรงน้ำเต้า 4 ขนาด เคลือบสีแดงของทองแดง

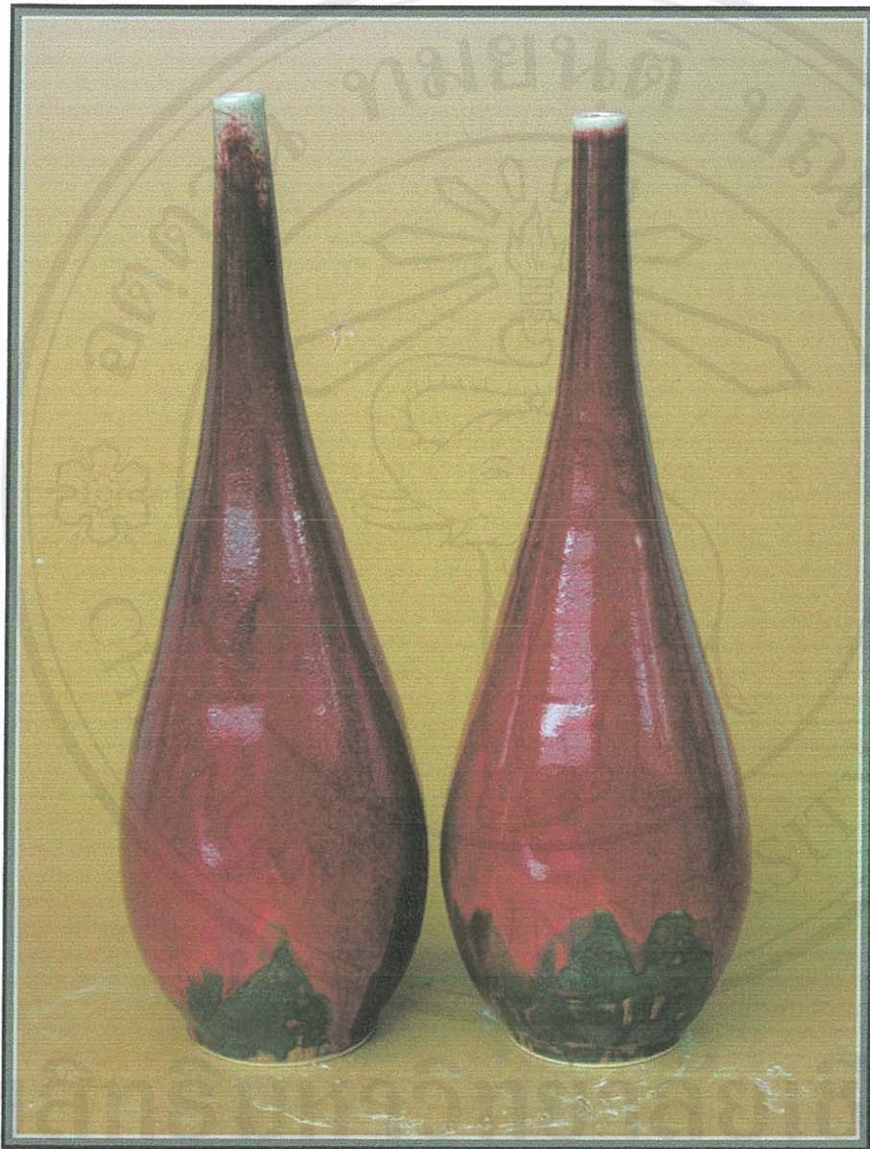
ใบที่ 1 สูง 35 เซนติเมตร

ใบที่ 2 สูง 25 เซนติเมตร

ใบที่ 3 สูง 20 เซนติเมตร

ใบที่ 4 สูง 15 เซนติเมตร

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



ลิขสิทธิ์ © by Chiang Mai University

All rights reserved

รูป 4.22 ผลิตภัณฑ์เคลือบสีแดงของทองแดงทรงขวดสูง 43 เซนติเมตร ได้จากการทดลอง



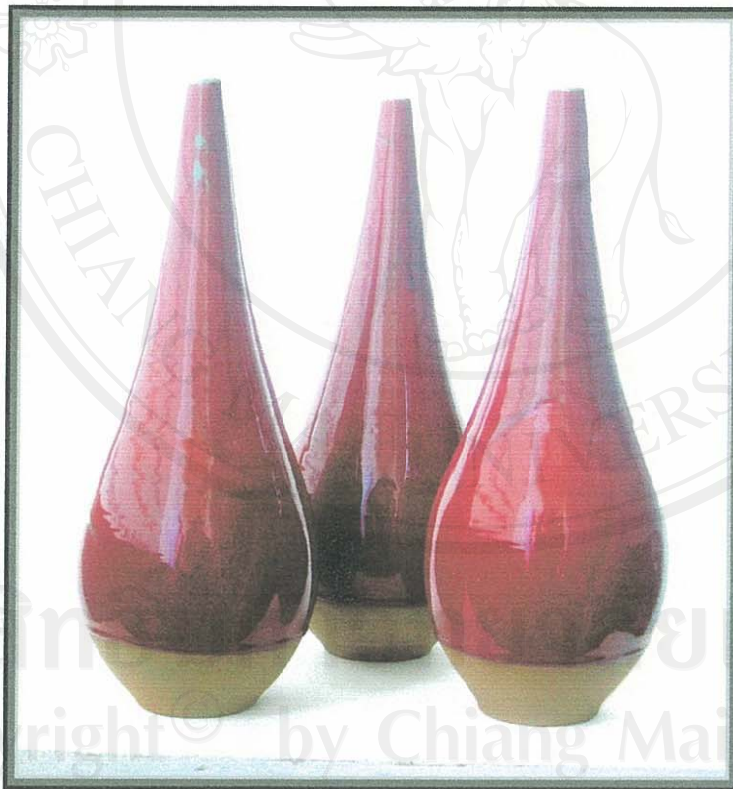
รูป 4.23 ผลิตภัณฑ์แจกันทรงขวด 3 ใบ เคลือบสีแดงของทองแดง สูง 30 เซนติเมตร



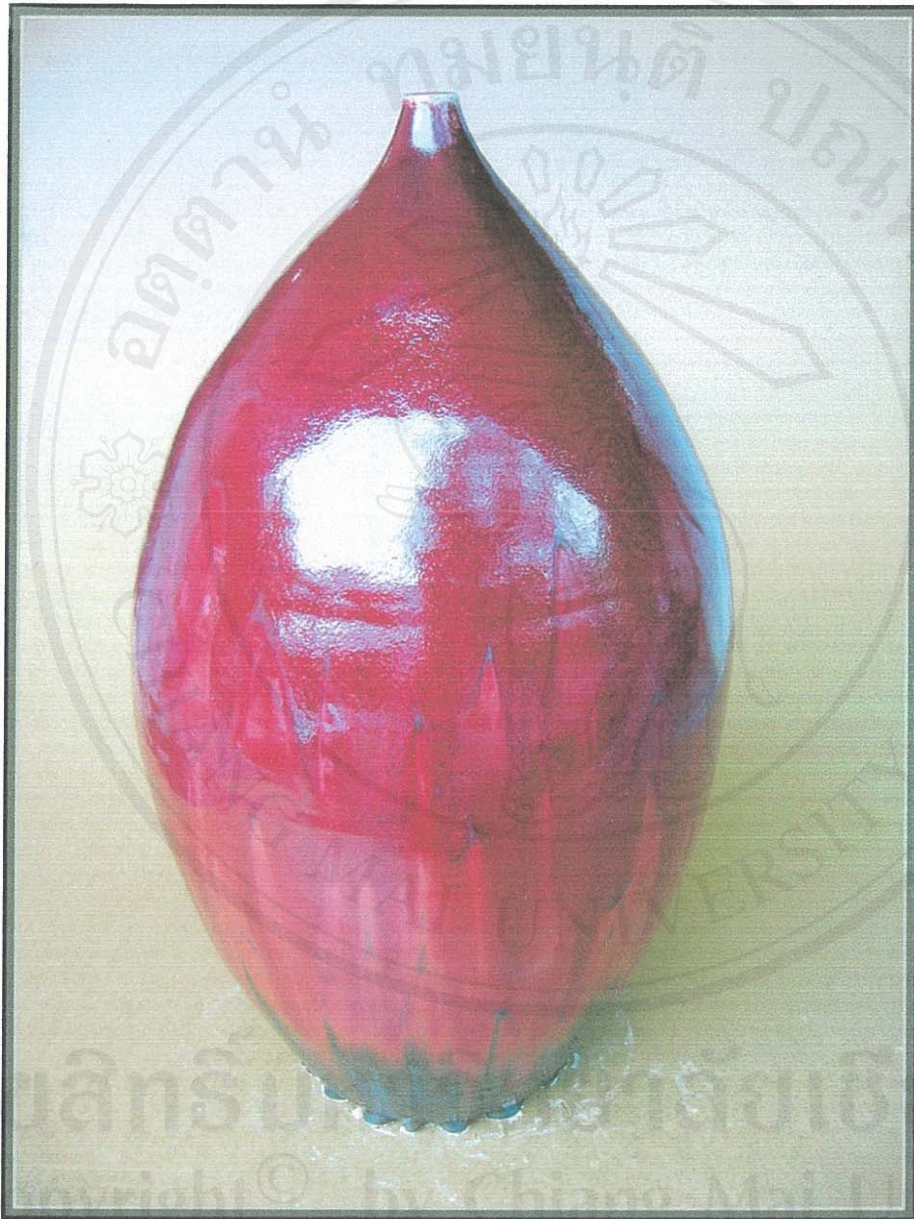
รูป 4.24 ผลิตภัณฑ์แจกันทรงคนโท 4 ใบ เคลือบสีแดงของทองแดง สูง 35 เซนติเมตร



รูป 4.25 ผลิตภัณฑ์แจกัน 3 รูปทรง เคลือบสีแดงของทองแดง



รูป 4.26 ผลิตภัณฑ์แจกันทรงสูง 3 ใบ เคลือบสีแดงของทองแดง สูง 40 เซนติเมตร



รูป 4.27 ผลัดภัณฑ์แจกันทรงไข่เคลือบสีแดงของทองแดง สูง 65 เซนติเมตร



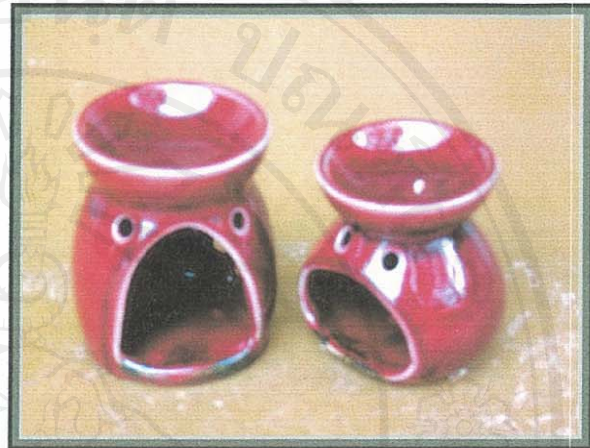
รูป 4.28

ผลิตภัณฑ์แก้วน้ำ เคลือบสีแดงของทองแดง สูง 9 เซนติเมตร

แจกันเหลี่ยม



เตาน้ำมันหอม



ตะเกียงเทียนหอม



ที่วางแผ่นพับ



รูป 4.29 ผลิตภัณฑ์หลากหลายรูปทรง เคลือบสีแดงของทองแดง



เส้นผ่าศูนย์กลาง 35 เซนติเมตร



ลิขสิทธิ์โดยมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University

All rights reserved

รูป 4.30 ชุดผลิตภัณฑ์งานหาม เกลือบสีแดงของทองแดง