4.การวิจารณ์และสรุปผล

ในการศึกษาเคลือบสีแดงของทองแดงสำหรับผลิตภัณฑ์เนื้อสโตนแวร์ มีวัตถุประสงค์และเป้าหมายเพื่อต้องการให้ได้เคลือบสีแดงที่เด่นชัด เนื่องจากทองแดงออกไซด์ (CuO) ในเคลือบเมื่อถูกเผาในบรรยากาศรีดักชันจะให้สีแดงในหลักทฤษฎี ซึ่งการเกิดสีแดงที่ดีนั้นย่อมขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยที่สำคัญดังนี้

1.ส่วนผสมของเคลือบ

2.สารตัวเติมที่ช่วยเพิ่มความเข้มของสีแดง

3.อุณหภูมิในการเผา

4.ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบในเคลือบ

5.ความหนา-บางของเคลือบบนผิวผลิตภัณฑ์

6.ชนิดของดินปั้นซึ่งในที่นี้เน้นสโตนแวร์

7.บรรยากาศในการเผา

8.การเผาผลิตภัณฑ์ในหีบดิน(แซกการ์) หรือปราศจากหีบดิน

9.การเย็นตัวลงด้วยบรรยากาศเป็นออกซิเดชัน หรืออย่างอื่น

ปัจจัยต่างๆเหล่านี้จะได้ถูกนำมาพิจารณาเป็นผลของการทดลองเคลือบสีแดงของทองแดงตามลำดับดังนี้

4.1 ส่วนผสมของเคลือบ (glaze composition)

ผลจากการทดลองเมื่อเคลือบพื้นฐาน(basic glaze) มีส่วนผสมต่างกัน คือ เคลือบกลุ่มที่ 1 เป็น Lime-Barium-Zinc glaze ซึ่งประกอบด้วย 6 สูตรผสม และเคลือบกลุ่มที่ 2 เป็น Lime-Barium glaze ซึ่งมี 1 สูตรผสม ทำให้ทราบว่าในกรณีเคลือบกลุ่มที่ 1 เมื่อมีปริมาณ Lime(CaO)ต่ำ(0.21-0.55 โมล) จะก่อทำให้ความเข้มของสีแดงได้เด่นชัดกว่าเมื่อมีปริมาณ Lime สูง(0.59-0.63 โมล) และปริมาณของ Barium (BaO) ที่เหมาะสมจะอยู่ระหว่าง 0.20-0.54 โมล) ซึ่งจะสามารถให้ผลสีแดงได้เด่นชัดกว่าการมีปริมาณของ Barium ที่ต่ำ(0.12-0.16 โมล) อย่างไรก็ตาม ความเหมาะสมเพื่อที่จะให้ได้สีแดงที่ดีอันเนื่องมาจากการทดลองครั้งนี้พบว่า ปริมาณของ Lime

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

จะอยู่ในช่วงระหว่าง 0.50-0.55 โมล และ Barium จะอยู่ในระหว่าง 0.20-0.25 โมล นอกจากนี้มีข้อควรสังเกตว่าเมื่อมีปริมาณ Lime ต่ำ(0.21-0.38 โมล)และมีปริมาณ Barium สูง(0.38-0.54 โมล) จะทำให้เคลือบของทองแดงนี้มีสีคล้ำออกดำ

ดังนั้นถ้าพิจารณาจากสูตรผสมในกลุ่มที่ 1 จึงสมควรให้ความสนใจสูตรผสมที่ 1,2,4 และ6 ส่วนในกรณีเคลือบกลุ่มที่ 2 ก็สามารถให้สีแดงที่น่าสนใจอีกสูตรเคลือบหนึ่งเช่นกัน จึงใคร่สรุปว่าสูตรเคลือบสีแดงของทองแดงจะสามารถให้ความเข้มของสีเด่นชัดเมื่อมีปริมาณของ CaO เป็น 0.30-0.55 โมล และBaO เป็น 0.20-0.30 โมล ส่วนปริมาณของเฟลสปาร์นั้นจะใช้ตามความเหมาะสมเมื่อคิดเป็นจำนวนโมลภายในกลุ่มของออกไซด์ที่มีคุณสมบัติเป็นด่าง (basic oxide) ซึ่งรวมกันเท่ากับ 1.0 โมลเสมอ และอีกประการหนึ่ง การจะใช้ ZnO เข้าผสมในสูตรเคลือบหรือไม่ก็ตาม จะมีผลกระทบกระเทือนต่อการเปลี่ยนแปลงสีแดงของทองแดงไม่มากนัก หากจะมีการใช้ ZnO ในสูตรเคลือบชนิดนี้ ก็ควรจะใช้ในปริมาณ 0.10 โมล ในสูตรเซเกอร์

สูตรเคลือบทองแดงที่ใช้หินฟันม้าเป็นวัตถุดิบช่วยหลอมตัวในเคลือบ ได้มีการทดลองเปรียบเทียบการใช้หินฟันม้าชนิดที่เป็นโซเดียม (โซดาเฟลสปาร์จากบริษัทเคลย์แอนด์มิเนอรัล จำกัด) และชนิดที่เป็นโพแทสเซียม(โพแทสเฟลสปาร์ จากจังหวัดตาก) ให้ผลการทดลองว่าทุกสูตรผสมของเคลือบกลุ่มที่ 1 และ กลุ่มที่ 2 นั้น เมื่อใช้โพแทสเฟลสปาร์ จะสามารถให้ความเข้มของสีแดงได้ดีกว่าเมื่อใช้โซเดียมเฟลสปาร์เล็กน้อย ในเรื่องนี้จะหาความแตกต่างที่เด่นชัดเกี่ยวกับชนิดของเฟลสปาร์ยังอาจคลาดเคลื่อนได้ แต่มีความเห็นว่าเฟลสปาร์ที่มีทั้งโซเดียมและโพแทสเซียมอาจช่วยให้สีแดงของทองแดงมีความเด่นชัดของสีได้ดีกว่า ทั้งนี้เนื่องจากว่าการหลอมตัวของโซเดียมและโพแทสเซียมในเฟลสปาร์ ย่อมช่วยให้มีการหลอมตัวได้ดีที่อุณหภูมิต่างกัน โดยมองเห็นว่าถ้าใช้โพแทสเฟลสปาร์ย่อมต้องมีอุณหภูมิในการหลอมตัวสูงกว่าการใช้โซดาเฟลสปาร์ ดังนั้นกรณีของหินฟันม้าที่มีทั้งโซเดียมและโพแทสเซียมหากเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1250 °C คือเป็น 1220 °C ก็อาจจะให้ความเหมาะสมที่ดีขึ้น

4.2 การใช้ตัวเติม (additive) เพื่อเพิ่มสีแดงให้เด่นชัดขึ้น

จากผลงานการวิจัย[16] และเอกสาร[11] ได้ให้ข้อเสนอแนะที่ทราบว่าการใช้ทินออกไซด์ (SnO_2) และ Bone ash ($Ca_3(PO_4)_2$) จะสามารถช่วยให้การปรากฏสีแดงของทองแดงในเคลือบดีขึ้น ดังนั้นการทดลองจึงใช้ตัวเติมทั้ง 2 ชนิดดังกล่าว

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ผสมในเคลือบ ในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน และเนื่องจากสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดนี้ เป็นสารประกอบที่ทำให้ทึบแสง (opacifier) จึงมีความสนใจที่จะเลือกสารประกอบหรือออกไซด์ชนิดอื่น ซึ่งเป็นสารที่ทำให้ทึบแสงมาทำการทดลอง เช่น เซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO_2) พร้อมกันนี้ยังได้สนใจนำเอาออกไซด์บางชนิดซึ่งเข้าใจว่า จะสามารถช่วยเพิ่มสีแดงของทองแดง นั่นคือ สารซึ่งให้สีในกลุ่มสีแดง เช่น เหล็กออกไซด์ : Fe_2O_3 , Fe_3O_4 (สีน้ำตาล) และ แคดเมี่ยมคาร์บอเนต : $CdCO_3$ (สีส้ม) มาทดลองใช้เป็นสารตัวเติมร่วมด้วย จากผลการทดลองทำให้ทราบว่าการใช้ SnO_2 และ Bone ash มีความเหมาะสม ช่วยให้สีแดงของทองแดงในเคลือบเพิ่มความเด่นชัดของสีมากขึ้น แต่การใช้สารตัวเติมเพียงตัวใดตัวหนึ่ง (SnO_2 หรือ Bone ash) จะให้การปรากฏของสีแดงน้อยกว่าการใช้ผสมกัน และในที่สุดทำให้พบว่าเมื่อใช้ SnO_2 3.0-5.0 % และ Bone ash 1.0-2.0 % จะสามารถให้ผลสีแดงที่ดี

สำหรับในกรณีการศึกษาเมื่อใช้ Opacifier ที่เป็น ZrO_2 จะเห็นได้ว่า ZrO_2 ไม่ทำให้ทองแดงปรากฏสีแดง โดยสีที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะสีเทาอมแดงเรื่อ ๆ ทั้งนี้เข้าใจว่า เพราะ ZrO_2 เป็นวัตถุทนไฟ ที่ไม่ทำให้ทองแดงในเคลือบเกิดการหลอมตัวได้ดี พร้อมทั้งไม่เอื้ออำนวยในการเปลี่ยนเลขออกซิเดชัน ของทองแดงถึงแม้จะเผาในบรรยากาศรีดักชันก็ตาม จึงไม่น่าสนใจ

เมื่อศึกษาการใช้สารที่สามารถช่วยให้เกิดสีแดงได้บ้าง เช่น เหล็กออกไซด์และแคดเมี่ยมคาร์บอเนต พบว่า หากมี SnO_2 และ Bone ash ร่วมด้วย จะทำให้ได้ผลสีแดงที่น่าสนใจเช่นกัน และการใช้เหล็กออกไซด์ในรูป Fe_2O_3 และ Fe_3O_4 ก็ให้ผลที่ไม่แตกต่างกันมากนัก จึงควรใช้ Fe_2O_3 เนื่องจากมีราคาถูกกว่า ดังนั้นในกรณีที่ใช้สารตัวเติม คือ Fe_2O_3 1.2 % และ SnO_2 5.0 % ในเคลือบทองแดงจะให้สีแดงดีขึ้น แต่ก็มีลักษณะคล้ำไปบ้าง ส่วนในกรณีที่พิจารณาเลือกใช้ แคดเมี่ยมคาร์บอเนต ควรจะมีการใช้ในปริมาณไม่เกิน 1.0 % แต่จัดว่าเป็นสารตัวเติมที่ไม่น่าสนใจมากนัก เนื่องจากแคดเมี่ยมเป็นสารที่เป็นอันตรายต่อร่างกาย

สรุปความคิดเห็นเกี่ยวกับเรื่องสารตัวเติม ใคร่ขอเสนอว่าการมีสารตัวเติมในลักษณะของ opacifier คือ SnO_2 และ Bone ash จะมีส่วนช่วยเพิ่มความเข้มของสีแดงในสูตรเคลือบทองแดง และยังได้พบอีกว่า หากมีการเติมเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) 1.0-1.5 % ก็จะทำให้สีแดงของทองแดงมีความเข้มน่าสนใจเช่นกัน จึงขอเสนอการใช้ opacifier ในสูตรเคลือบทองแดงไว้ดังนี้ SnO_2 3.0 % ,

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

Bone ash 2.0 % และ Fe_2O_3 1.2 %

จากผลการทดลองเกี่ยวกับการศึกษาสูตรผสมของเคลือบ และสารตัวเติม ในหัวข้อ 4.1 และ 4.2 ที่กล่าวมาแล้ว พบว่า การทดลองให้ผลแสดงความเหมาะสม ใน 3 สูตรเคลือบคือ

สูตรเคลือบกลุ่มที่ 1 หมายเลข 4

0.15	KNaO	0.25 Al_2O_3 . 2.50 SiO_2	
0.55	CaO	+ $CuCO_3$	1.5 %
0.20	BaO	SnO_2	3.0 %
0.10	ZnO	Bone ash	2.0 %

สูตรเคลือบกลุ่มที่ 1 หมายเลข 6

0.15	KNaO	0.25 Al_2O_3 . 2.50 SiO_2	
0.63	CaO	+ $CuCO_3$	1.5 %
0.12	BaO	SnO_2	3.0 %
0.10	ZnO	Bone ash	2.0 %

สูตรเคลือบกลุ่มที่ 2

0.48	KNaO	0.55 Al_2O_3 . 4.76 SiO_2	
0.31	CaO	+ $CuCO_3$	3.0 %
0.21	BaO	Fe_2O3	1.2 %

4.3 การศึกษาอุณหภูมิเผาเคลือบทองแดงที่เหมาะสม

จากวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาหาข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับเคลือบสีแดงของทองแดงสำหรับผลิตภัณฑ์สโตนแวร์ เมื่อใช้อุณหภูมิให้เหมาะสมที่เข้าใจว่าควรจะต่ำกว่า 1250 °C ทั้งนี้เนื่องจากว่า การเผาที่อุณหภูมิสูง (1250 °C หรือมากกว่า) จะพบว่าสีแดงในสารประกอบของทองแดงในเคลือบจะสามารถระเหย (Volatile) ได้ดี จึงสมควรที่จะใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 1250 °C ดังนั้น สูตรเคลือบทองแดงที่น่าสนใจทั้ง 3 สูตร (สูตรเคลือบกลุ่มที่ 1 หมายเลข 4 และ 6 และ สูตรเคลือบกลุ่มที่ 2) เมื่อนำมา

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ทดลองเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน คือ 1250 °C , 1230 °C , 1220 °C และ 1200 °C มีผลการทดลองทำให้ทราบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิสูง (1250 °C) จะมีการระเหยของเคลือบได้ดี และถ้าใช้อุณหภูมิต่ำ(1200 °C) การสุกตัวของเคลือบไม่ดี ซึ่งอาจจะเป็นเพราะการแปรสภาพของทองแดงด้วยเลขออกซิเดชันยังไม่สมบูรณ์ จึงทำให้ได้เคลือบมีสีแดงที่ไม่ดี สำหรับอุณหภูมิที่เหมาะสม ควรอยู่ระหว่าง 1220 °C-1230 °C ดังนั้นสำหรับสูตรเคลือบที่เหมาะสมและอุณหภูมิที่ใช้เผาจึงขอเสนอ สูตรเคลือบกลุ่มที่ 1 หมายเลข 4 และควรปรับปรุงสูตรเคลือบนี้โดยการเติม 1.2 % Fe_2O_3 เมื่อใช้อุณหภูมิ 1220 °C ซึ่งในที่สุดการทดลองได้สรุปการศึกษาเคลือบทองแดงสำหรับดินปั้นสโตนแวร์โดยยึดถือสูตรเคลือบทองแดง 2 สูตรหลังนี้ พร้อมด้วยการเผาที่อุณหภูมิ 1220 °C ดำเนินการทดลองรายละเอียดเป็นขั้นตอนต่อไป

สูตรเคลือบ

0.15	KNaO	0.25 Al_2O_3 , 2.50 SiO_2	
0.55	CaO	+ $CuCO_3$	1.5 %
0.20	BaO	SnO_2	3.0 %
0.10	ZnO	Bone ash	2.0 %

สูตรเคลือบปรับปรุง

0.15	KNaO	0.25 Al_2O_3 , 2.50 SiO_2	
0.55	CaO	+ $CuCO_3$	1.5 %
0.20	BaO	SnO_2	3.0 %
0.10	ZnO	Bone ash	2.0 %
		Fe_2O_3	1.2 %

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.4 ผลการศึกษาความละเอียดของวัตถุดิบในเคลือบ

การศึกษาในเรื่องนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการหาข้อมูลที่เกี่ยวกับความเหมาะสมของเคลือบซึ่งถูกเผาที่อุณหภูมิ 1220 °C ให้ถึงจุดสุกตัวพอดี เนื่องจากว่า ผลการทดลองเมื่อบดเคลือบในหม้อบดทดลองขนาดเล็ก (Pot Mill) ที่ใช้ระยะเวลานานทำให้วัตถุดิบในเคลือบมีความละเอียดมาก ซึ่งให้ผลแตกต่างกับการบดที่ใช้เวลาน้อย

ผลที่ปรากฏพบว่า ความละเอียดของวัตถุดิบเคลือบยิ่งมาก จะทำให้เคลือบไหลตัวได้ดี (Crawling) และนอกจากนี้ยังทำให้เคลือบบางส่วนเกาะไม่ติดผิวผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า เคลือบมีการหดตัวสูงแตกต่างจากเนื้อดินปั้นมาก จึงเป็นผลทำให้เคลือบที่มีความละเอียดเกินไปเป็นเคลือบที่ไม่เหมาะสม ด้วยเหตุนี้ จึงทำการศึกษาหาความเหมาะสมเกี่ยวกับความละเอียดของวัตถุดิบในเคลือบอย่างคร่าว ๆ คือ วัตถุดิบเคลือบที่ละเอียดมาก,ละเอียดปานกลางและหยาบขึ้น โดยอาศัยจำนวนชั่วโมงที่ต่างกันของการบดเคลือบในหม้อบดขนาดเล็ก แล้ววัดปริมาณความละเอียดและความหยาบของเคลือบที่บดแล้วโดยผ่านตะแกรงขนาด 250 เมช และ 325 เมช ทำให้พบว่าความเหมาะสมของเคลือบทองแดงซึ่งมีจุดสุกตัวที่ 1220 °C ควรจะถูกบดในหม้อบดขนาดเล็ก 5 ชั่วโมง ซึ่งความละเอียดของวัตถุดิบ คือ ไม่สามารถผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช 3.37 % และผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช ได้ 95.49 %

ผลดีของเคลือบที่มีความละเอียดเหมาะสม จะทำให้การหลอมตัวของวัตถุดิบในเคลือบเมื่อถึง 1220 °C ได้พอเหมาะกับการสุกตัว และพอเหมาะกับดินปั้นที่เป็นเนื้อสโตนแวร์ สำหรับเคลือบที่มีวัตถุดิบในเคลือบหยาบ คือ ใช้ระยะเวลาในการบด 3 ชั่วโมง พบว่า ไม่สามารถผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช 16.50 % และผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช ได้ 82.56 % ซึ่งผลปรากฏว่า สีเคลือบจะมีสีแดงน้อยกว่า เนื่องจากว่าเคลือบยังไม่ถึงจุดสุกตัวได้ดีพอ และการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชันของทองแดงในเตาเผาคาดว่ายังเกิดไม่สมบูรณ์

4.5 ผลการชุบเคลือบให้มีความหนาพอเหมาะ

ผลการทดลองเกี่ยวกับความหนาของเคลือบที่เหมาะสม เมื่อทำการชุบเคลือบ ก็ย่อมมีความสำคัญ กล่าวคือ หากเคลือบมีความหนาน้อย หรือเคลือบบางมาก ซึ่งวัดความหนาของชั้นเคลือบบนผิวผลิตภัณฑ์ได้น้อยกว่า 0.5 มิลลิเมตร มีผลให้ความเข้มของสีแดงปรากฏน้อยมาก ทั้งนี้เนื่องจากว่าปริมาณของเคลือบไม่เพียงพอ จึงถูกดูดด้วยผิวของผลิตภัณฑ์และทำให้ผิวของเคลือบค่อนข้างด้าน เมื่อทำการทดลองชุบเคลือบให้หนาขึ้นประมาณ 1.5 มิลลิเมตร พบว่าทำให้เกิดสีแดงชัดขึ้น และเคลือบมีลักษณะเริ่มไหลตัวอยู่บ้าง ครั้นเมื่อมีการชุบเคลือบที่หนามาก ๆ คือหนามากกว่า 2.0 มิลลิเมตร สีเคลือบจะปรากฏสีแดงคล้ำ และนอกจากนั้น ปริมาณของเคลือบที่มากเกินพอจะมีการไหลตัวมากจนถึงแผ่นรองในเตาเผา จึงไม่เหมาะสม ดังนั้นความหนาของเคลือบ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ที่พอเหมาะสำหรับเคลือบสีแดงของทองแดงควรเป็น 1.5-2.0 มิลลิเมตร ทั้งนี้การควบคุมความหนาให้ได้ผลดีควรใช้เทคนิค 2 วิธี คือ การจุ่มผลิตภัณฑ์ลงในเคลือบอย่างเร็วครั้งหนึ่ง วางทิ้งไว้สักครู่จนกระทั่งเคลือบแห้งตัวดีแล้ว จึงมีการพ่น(spray) เคลือบซ้ำอีกครั้งหนึ่งให้ทั่วผลิตภัณฑ์ และโดยเฉพาะบริเวณขอบผลิตภัณฑ์ควรให้เคลือบมีความหนาเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย เนื่องจากเคลือบชนิดนี้มักจะมีการไหลตัวที่ดี ทำให้บริเวณขอบผลิตภัณฑ์ มักจะเป็นสีขาว

ความหนาของเคลือบสีแดงของทองแดงที่ชุบลงบนผลิตภัณฑ์จะชุบบางย่อมไม่ให้ผลดีและถ้าชุบหนาเกินไปจะทำให้เคลือบไหลตัวได้ง่าย จึงสรุปได้ว่า ความหนาของเคลือบทองแดงที่ชุบลงบนผลิตภัณฑ์ จึงควรมีความหนาปานกลางคือ ประมาณ 1.5-2.0 มิลลิเมตร ทั้งนี้เมื่อใช้อุณหภูมิสำหรับเผาเคลือบส่วนผสมดังกล่าวข้างต้น ที่ 1220 °C

4.6 ผลของเคลือบสีแดงของทองแดงที่มีต่อเนื้อดินปั้น

ความเข้มของสีแดงของเคลือบทองแดงยังมีผลจากชนิดของเนื้อดินปั้น ทั้งนี้เมื่อเนื้อดินปั้นเป็น ปอร์สเลนแวร์ , กึ่งปอร์สเลนแวร์ และสโตนแวร์ จากผลงานวิจัยที่ผ่านมา [16] ได้พบว่าดินปั้นเนื้อสโตนแวร์ จะสามารถให้การปรากฏของสีแดงได้ชัดกว่า ดินปั้นขาวเนื้อกึ่งปอร์สเลนแวร์ และเนื้อปอร์สเลนแวร์ ในเรื่องนี้ เมื่อทำการทดลองอีกครั้งหนึ่งก็ยังยืนยันตามผลการทดลองที่กล่าวมา พร้อมทั้งยังทราบข้อมูลเพิ่มเติมว่าดินปั้นเนื้อสโตนแวร์ หากมีหินฟันม้าเป็นส่วนผสมในสัดส่วน 10-15 % โดยน้ำหนัก จะช่วยทำให้เกิดสีแดงของเคลือบทองแดงได้อย่างเด่นชัดขึ้น [16]

4.7 ผลของบรรยากาศรีดักชัน

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าบรรยากาศที่ใช้ในการเผาเคลือบทองแดงเพื่อให้เกิดสีแดงนั้น ย่อมต้องใช้บรรยากาศแบบรีดักชัน ซึ่งหมายถึง การเผาที่ลดปริมาณออกซิเจนให้น้อยกว่าปกติ เป็นเหตุให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ จึงทำให้เชื้อเพลิงที่ถูกเผาไหม้สร้างก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) อยู่ในบรรยากาศการเผาภายในเตา ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีสมบัติเป็นตัวช่วยลด(reducing agent) ที่สามารถเปลี่ยนแปลงสภาพเลขออกซิเดชันจาก +2 ไปเป็น +1 หรือจาก Cupric (Cu^{2+}) เป็น Cuprous (Cu^{1+}) ซึ่งก่อให้เกิดสีแดง ได้ทำการทดลองศึกษาหาข้อมูลเพื่อที่จะทราบว่าปริมาณของบรรยากาศรีดักชัน หรือปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ จะต้องถูกสร้างขึ้นหลังจาก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การเผาไหม้เป็นจำนวนมากน้อยเท่าใดจึงจะเพียงพอที่จะทำให้เกิดสีแดงของทองแดงอย่างเด่นชัด จากผลการทดลอง 2.4.10 ซึ่งทำการศึกษาเกี่ยวกับปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งมีอยู่ในก๊าซในบรรยากาศเตา หลังจากการเผาไหม้ที่เริ่มปรับสภาพบรรยากาศเป็นรีดักชันตั้งแต่อุณหภูมิ 930 °C เป็นต้นไป จนถึงอุณหภูมิ 1220 °C นั้น ได้ทำการตรวจสอบโดยดูดก๊าซในบรรยากาศเตาผ่านเข้าเครื่องมือออร์ซัท (Orsat Apparatus) เมื่อต้องการให้อุณหภูมิสูงขึ้นจะต้องเร่งก๊าซเชื้อเพลิงเข้าในเตามากขึ้น ซึ่งการเผาไหม้จะทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ มากขึ้นตามลำดับ การทดลองได้ปรับช่องอากาศที่หัวพ่นไฟของ Primary air เพื่อให้ได้การเผาไหม้เป็น 3 ลักษณะของการเผาแบบรีดักชัน กล่าวคือ รีดักชันอย่างอ่อน (slight or low reduction), รีดักชันปานกลาง (medium reduction) และรีดักชันอย่างแรง (strong or high reduction) มีข้อน่าสังเกตว่าในช่วงอุณหภูมิต่ำ ๆ ตั้งแต่เริ่มปรับบรรยากาศเป็นรีดักชัน (950-975 °C) ปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เมื่อเผาเป็นลักษณะรีดักชันอย่างอ่อน จะสูงกว่ารีดักชันปานกลางและรีดักชันอย่างแรง ครั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้การเผาในลักษณะรีดักชันอย่างแรงมีปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ สูงกว่าเมื่อเผาในลักษณะรีดักชันปานกลางและรีดักชันอย่างอ่อนตามลำดับ ดังแสดงในกราฟรูป 3.6

ผลการทดลองศึกษาสีแดงของเคลือบปรากฏว่า การเผาด้วยบรรยากาศรีดักชันอย่างอ่อนให้ผลได้ดีกว่าการเผาในบรรยากาศรีดักชันปานกลาง และรีดักชันอย่างแรง ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า ปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งเป็น reducing agent ถึงแม้จะเกิดขึ้นไม่มากในบรรยากาศรีดักชัน คือ วัดได้ประมาณ 2-3 % โดยปริมาตรของก๊าซผสมในเตา แต่ก็มีปริมาณเพียงพอต่อการใช้เปลี่ยนเลขออกซิเดชันของทองแดงจาก Cupric (Cu^{2+}) เป็น Cuprous (Cu^{1+}) ครั้นเมื่อการปรับบรรยากาศที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่มีเชื้อเพลิงมากขึ้นเป็นรีดักชันปานกลาง ซึ่งวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ประมาณ 4-5 % โดยปริมาตร และเป็นรีดักชันอย่างแรงซึ่งวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ประมาณ 6-7 % โดยปริมาตรนั้น เข้าใจว่าอัตราเร็วของก๊าซเชื้อเพลิงมีความเร็วสูง จนเป็นเหตุให้เกิดการนำพาในลักษณะการเป็นไอระเหยของทองแดงหลุดออกไปได้ง่าย หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง เคลือบทองแดงจะสามารถเกิดการระเหยตัวออกไปในบรรยากาศที่เป็นแบบรีดักชันปานกลางได้สูงกว่าการเผาด้วยบรรยากาศรีดักชันอย่างอ่อน และยิ่งเป็นการเผาด้วยบรรยากาศรีดักชันอย่างแรงก็จะยิ่งทำให้สีแดงของเคลือบทองแดงมีสีจางซีดลงไป ดังเหตุผลที่กล่าวมา

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ผลการทดลองนี้ยังสอดคล้องกับผลงานของ M.Wakamatsu et al. [24] ที่ได้เสนอไว้ว่า การใช้บรรยากาศรีดักชันเผาเคลือบทองแดงเพื่อให้ปรากฏสีแดงที่ดี ในทางปฏิบัตินั้นจะใช้ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเป็น reducing agent ประมาณ 2.8 % โดยปริมาตรของก๊าซทั้งหมดในเตา จึงเป็นการเสริมและสอดคล้องกับข้อมูลจากการทดลองในการปรับบรรยากาศของเตาตรงกับที่กล่าวว่า เป็นการเผาบรรยากาศรีดักชันอย่างอ่อนสำหรับการทดลองนี้

4.8 ผลของบรรยากาศในเตาเมื่อหยุดการเผา

ได้พบข้อมูลเพิ่มเติมจากการทดลองหลังจากหยุดเผาหรือปิดเตา มีผลให้ความแตกต่างของเคลือบทองแดงประกอบด้วย 2 กรณี กรณีแรก มีผลการทดลองพบว่าหลังจากเสร็จสิ้นการเผาทำการปิดก๊าซเชื้อเพลิงเรียบร้อยแล้ว หากปล่อยให้เตาเย็นลงในลักษณะของการเปิดทางลมร้อนออกปล่องไฟ และปล่อยให้อากาศเข้าส่วนล่างของเตาตรงตำแหน่งหัวพ่นไฟ ทำให้อากาศถูกดูดเข้าไปในเตาผ่านผลิตภัณฑ์แล้วลอยตัวขึ้นสู่ปล่อง เป็นเหตุผลทำให้ผลิตภัณฑ์เย็นตัวเร็วกว่าปกติ และมีบรรยากาศภายในเตาเป็นออกซิเดชันตลอดการเย็นตัวของเคลือบ อีกกรณีหนึ่งเมื่อหยุดการเผา แล้วทำการปิดช่องปล่องเตาให้สนิทด้วย damper ซึ่งจะทำให้อากาศไม่เข้าไปในเตาได้เลย ผลการเปรียบเทียบทั้ง 2 กรณี พบว่า สีแดงจากเคลือบทองแดงสามารถปรากฏความเด่นชัดของสีแดงได้ไม่แตกต่างกันมากนัก พร้อมกันนี้ได้พบอีกว่า ทั้งสองวิธีนี้เมื่อผลิตภัณฑ์เย็นตัวลงจะเห็นสีของผลิตภัณฑ์บางส่วนเป็นสีเขียว คืออยู่ในรูป cupric (Cu^{2+}) เนื่องด้วยสภาพความแตกต่างของการเย็นตัวลงได้มีผู้ศึกษาคือ M.Wakamatsu [25] และให้ความคิดเห็นว่าสีแดงของทองแดงปรากฏขึ้นหลังจากปิดเตา แล้วปล่อยให้บรรยากาศเป็นออกซิเดชันตามวิธีดังกล่าวข้างต้น ได้มีคำอธิบายว่า เมื่อทองแดงออกไซด์ (CuO) ซึ่งเป็นวัตถุดิบถูกรีดิวซ์ในระหว่างการเผาเป็น cuprous (Cu^{+}) ผลของการรีดิวซ์อย่างต่อเนื่องทำให้ cuprous แปรสภาพเป็นโลหะทองแดง (Cu) และเมื่อถึงจุดนี้ถือว่าการเผาได้เสร็จสิ้นต่อจากนั้นเมื่อหยุดการเผาได้ปล่อยให้อากาศเข้าในเตาขณะร้อนจัด ในเตามีบรรยากาศเป็นออกซิเดชัน เป็นเหตุให้โลหะทองแดงถูกออกซิไดซ์ไปเป็น cuprous (Cu^{+}) และ cupruos form นี้เองที่ทำให้เกิดสีแดง ในกรณีที่พบว่าบางส่วนเคลือบมีสีเขียวเป็นเพราะออกซิเจนเข้าในเตามากเกินพอ คำอธิบายของ M.Wakamatsu [25] คาดว่าจะเป็นเหตุผลที่อาจเป็นไปได้ ซึ่งในเรื่องนี้จะนำไปกล่าวในท้ายของการสรุปอีกครั้ง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.9 ผลจากการเผาในหีบดิน (Saggar) และไม่ใช้หีบดิน

การทดลองเคลือบสีแดงของทองแดงเมื่อเผาในหีบดินนั้น เนื่องจากมี เหตุผลต้องการให้มีการกระจายของความร้อนไปยังเคลือบบนผิวผลิตภัณฑ์อย่างสม่ำเสมอ ส่วนการเผาที่ไม่ใช้หีบดิน เข้าใจว่าการกระจายความร้อนภายในเตาไม่สม่ำเสมอ ในเรื่องนี้มีผลการทดลองที่พบว่า การเผาในหีบดินมักจะทำให้ผิวของผลิตภัณฑ์มีสีแดงสม่ำเสมอได้ดี สำหรับในกรณีการเผาที่ไม่ใช้หีบดิน จะพบความเข้มของสีแดงไม่สม่ำเสมอ ซึ่งตรงกับความคาดหมายก่อนทำการทดลอง นอกจากนี้ยังมีข้อสังเกตคือการเผาในหีบดินนั้น ถ้าผลิตภัณฑ์ที่เผาเป็นภาชนะที่มีฝาปิด เช่น กาน้ำ จะพบว่าผิวเคลือบภายนอกผลิตภัณฑ์ จะปรากฏสีแดงที่เด่นชัด แต่ผิวเคลือบภายในของผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีฝาปิดขณะเผา จะปรากฏสีจางกว่าเข้าใจว่าปริมาณความร้อน 1220 °C อาจจะกระจายเข้าไปไม่ทั่วถึงภายในภาชนะซึ่งปิดก็เป็นได้ ในเรื่องนี้ได้สังเกตการเผาในหีบดินเมื่อปรับเป็นบรรยากาศเป็นรีดักชันอย่างแรง จะให้ผลทางตรงกันข้าม คือ ภายในภาชนะที่ปิดฝาจะปรากฏความเข้มของสีแดงที่เด่นชัดอย่างสนใจ แต่ภายนอกภาชนะสีแดงกลับจางลง ซึ่งอาจจะอธิบายได้ว่านั่นเป็นเพราะความเหมาะสมของบรรยากาศและอุณภูมิภายในภาชนะปิดฝา ถึงจุดพอเหมาะสำหรับเคลือบสีแดงของทองแดงในขณะนั้นเป็นอย่างดี การทดลองเปรียบเทียบเมื่อเผาด้วยบรรยากาศอย่างอ่อน ภายในหีบดินให้ผลตรงกันข้ามกับการเผารีดักชันอย่างแรง กล่าวคือผิวภายนอกให้สีแดงเด่นชัดกว่าภายใน ก็อธิบายได้ว่า ผิวนอกมีบรรยากาศและอุณหภูมิพอเหมาะกว่าภายใน

ในเรื่องของการเผาผลิตภัณฑ์ เมื่อเผาภายในหีบดินหรือไม่ใช้หีบดินก็ตามพบว่าอาจต้องคำนึงถึงลักษณะของภาชนะว่ามีฝาปิดหรือไม่ ซึ่งกรณีเป็นภาชนะไม่มีฝาปิดจะให้ผลที่ไม่แตกต่างระหว่างภายนอกและภายในภาชนะ แต่อย่างไรก็ตาม สำหรับการเผาเคลือบสีแดงของทองแดง สรุปได้ว่าการวางผลิตภัณฑ์ในหีบดิน จะทำให้การปรากฏของสีแดงเด่นชัดกว่าการไม่ใช้หีบดิน และถ้าไม่ใช้หีบดินก็อาจใช้ buffle กั้นเปลวไฟไม่ให้กระแทกโดนผลิตภัณฑ์โดยตรง ก็สามารถให้สีแดงที่ดีเช่นเดียวกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลทำนองเดียวกับการใช้หีบดิน นั่นคือ แผ่นกั้นนี้ จะเป็นเสมือนกำแพงที่ช่วยลดความเร็วของกระแสไอร้อนที่จะนำพาเอาไอระเหยของทองแดงออกไป สีแดงของทองแดงจึงยังคงอยู่

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.10 ความคิดเห็นเกี่ยวกับการเกิดสีแดงของเคลือบทองแดง

เคลือบสีแดงของทองแดงสามารถอธิบายการเกิดสีแดงในเคลือบ อันเนื่องมาจากทองแดงซึ่งเป็นสารให้สี จะต้องอยู่ในสภาพที่เป็น cuprous form (Cu^{+}) เรื่องนี้มีคำอธิบายทางเคมีดังนี้

$$Cu^{2+} \xrightarrow[CO]{\text{reduction}} Cu^{+}$$

Cupric Cuprous

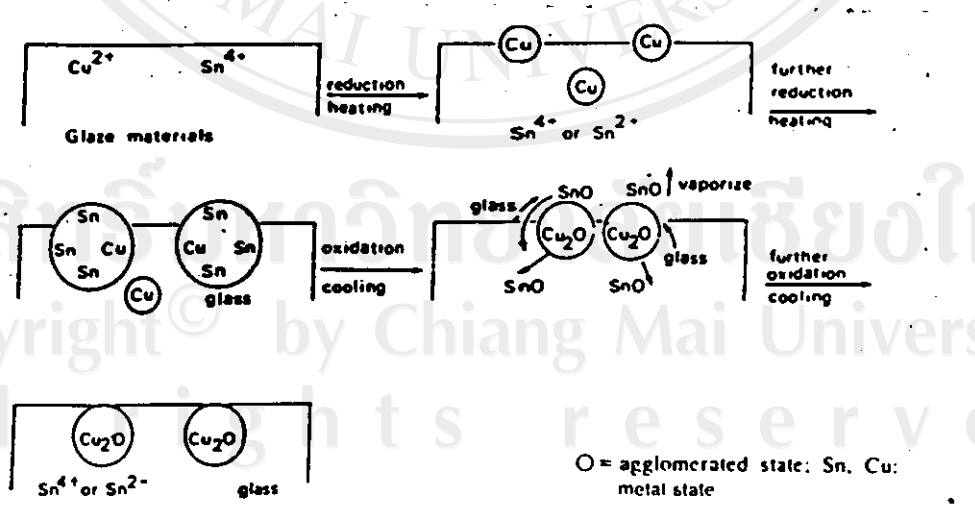
การลดเลขออกซิเดชันของ Cu^{2+} เป็น Cu^{+} นั้นมาจากการใช้ตัวช่วยลด (reducing agent) ที่เป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซชนิดนี้เกิดจากการเผาไหม้ชนิดไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง หากปฏิกิริยาเป็นเช่นนี้และหยุดคงที่ได้แค่นี้ก็จะได้สีแดงของทองแดงในเคลือบ คาดว่าเนื่องจากว่าสารประกอบที่เป็น Cuprous oxide (Cu_2O) และอาจเกิด Cuprous silicate (Cu_2SiO_3) ซึ่งมีสีแดง ความเข้มและความเด่นชัดของสีแดงย่อมขึ้นอยู่กับปริมาณของ Cupruos form ที่มีอยู่ในเคลือบ ซึ่งในที่นี้เชื่อแน่ว่าจะมีส่วนผสมของ Cupruos oxide และ Cuprous silicate ปะปนกัน หากให้ความสังเกตดูด้วยเลนส์ขยายจะมองเห็นว่ามีอนุภาคสีแดง ทั้งที่เป็นก้อนและเป็นเม็ดละเอียดลอยตัวอยู่ในแก้วใส อนุภาคสีแดงเหล่านี้ควรอยู่ในสภาพเป็น Cupruos oxide ปะปนกับ Cuprous silicate ปรากฏเป็นเคลือบสีแดงที่ได้จากการทดลองโดยทั่วไป ด้วยเหตุผลที่กล่าวนี้ จึงมีความเชื่อที่จะอธิบายการเกิดสีแดงของทองแดงดังที่กล่าวมา ดังนั้นเมื่อสีแดงของทองแดงในรูป Cuprous เกิดได้สมบูรณ์ในเตาเผาที่มีบรรยากาศรีดักชัน โดยเฉพาะการเผาแบบรีดักชันอย่างอ่อน (slight reduction) ย่อมให้ผลสีแดงในเคลือบทองแดงดีกว่าการเผารีดักชันอย่างแรง ซึ่งมักจะพบเสมอว่าทำให้เคลือบของทองแดงมีสีจางลง เป็นเพราะอัตราเร็วของไอร้อนอันเนื่องมาจากการเร่งเชื้อเพลิงเข้าในเตามากขึ้น เป็นผลให้ Cuprous oxide และ / หรือ Cuprous silicate ระเหยตัวออกไปได้ดี ดังนั้นเมื่อเผาเคลือบถึงอุณหภูมิจุดสุกตัว (1220 °C) หากทำการหยุดเผาแล้วปิดปล่องไฟด้วย damper อย่างมิดชิด ย่อมทำให้บรรยากาศในเตาเผามีสภาพเป็นกลาง (neutral atmosphere) จึงทำให้สีแดงของ Cupruos form (Cuprous oxide และ Cuprous silicate) อยู่คงที่ได้ เมื่อเตาเย็นลงจะมีแก้วปิดคลุมไม่ให้ถูกออกซิไดส์ไปเป็น Cu^{2+}

สีแดงของเคลือบทองแดงจะเด่นชัดมากขึ้นนั้นย่อมมีปัจจัยหลายประการ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ดังกล่าวแล้วข้างต้น คือ ส่วนผสมของวัตถุดิบในเคลือบ, สารตัวเติมในเคลือบ, อุณหภูมิที่ใช้เผา, ความละเอียดของวัตถุดิบในน้ำเคลือบ, ความหนาของเคลือบที่เหมาะสม, ชนิดของดินปั้นที่เหมาะสมกับเคลือบ, บรรยากาศรีดักชันที่ใช้เผา, ผลของบรรยากาศในเตาเมื่อหยุดการเผา และการเผาภายในหีบดินหรือไม่ใช้หีบดิน เหล่านี้เป็นต้น หากมีสิ่งใดผิดปกติไปจากความเหมาะสม เช่น เมื่อบรรยากาศเป็นออกซิเดชันในระหว่างการเผา ย่อมจะทำให้สีของเคลือบทองแดงปรากฏสีเขียว พร้อมกันนั้นได้พบอีกว่าสีของเคลือบทองแดงมีสีเทาและสีน้ำตาลปนดำ ทั้งนี้เนื่องจากว่าเกิดสภาพบรรยากาศที่เปลี่ยนแปลงหรือผสมกัน ซึ่งอาจมีทั้งที่เป็นรีดักชัน ออกซิเดชัน และเป็นกลางในเวลาเดียวกัน กรณีที่พบว่าสีเคลือบทองแดงมีสีจางลงโดยเฉพาะปากขอบผลิตภัณฑ์ เข้าใจว่าเคลือบจะไหลตัวลงสู่เบื้องล่าง ปราศจากอนุภาคหรือสารประกอบของ Cuprous oxide หรือ Cupruos silicate

อนึ่ง M.Wakematsu [๒๕] ให้เหตุผลว่า การเกิดสีแดงของเคลือบทองแดงนั้น มีคำอธิบายด้วยปฏิกิริยาเคมีแตกต่างออกไป โดยเฉพาะได้เน้นการเกิดสีแดงของทองแดงว่า จะเกิดขึ้นหลังจากการหยุดเผาผลิตภัณฑ์ คำอธิบายเรื่องนี้แสดงเป็นขั้นตอนดังรูป 4.1



<u>รูป 4.1</u> กลไกการเกิดสีแดงของเคลือบทองแดง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

อธิบายว่าเมื่อทำการเผาทองแดงในสภาพของ Cupric (Cu^{2+}) เช่น CuO รวมทั้ง Sn^{4+} คือ SnO_2 จะถูกรีดิวซ์ด้วยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์กลายเป็นโลหะทองแดงและโลหะดีบุกในขั้นตอนของการเผา จนถึงอุณหภูมิสุกตัว (1250 °C) จากนั้นเมื่อหยุดการเผา ได้มีการปรับบรรยากาศในเตาเป็นออกซิเดชันทำให้โลหะทองแดงและโลหะดีบุกถูกออกซิไซด์ ด้วยออกซิเจนในขณะร้อนกลายเป็น Cuprous oxide (Cu_2O) และ SnO ตามลำดับ จึงก่อให้เกิดอนุภาคสีแดงของทองแดง และเมื่อเคลือบเย็นตัวลงจะเกิดการแข็งตัวและป้องกันไม่ให้เกิดการออกซิเดชันอีกต่อไป ด้วยเหตุนี้จึงเกิดเป็นสีแดงของเคลือบทองแดง

มีความเห็นว่า คำอธิบายของ M.Wakamatsu [28] อาจจะถูกต้องแต่อย่างไรก็ตาม เชื่อว่าคำอธิบายที่เสนอว่า เกิดเป็น Cuprous oxide และ Cuprous silicate ก็น่าจะเป็นไปได้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved