

บทความวิจัย

อิทธิพลของเซอร์โคเนียมซิลิเกตและบิสมัทออกไซด์ที่มีผลต่อสมบัติของบอโรซิลิเกตอีนาเมลสำหรับเครื่องประดับ

อโนชา หมั่นภักดี^{1*} สุพิชมา สุพรรณสมบุรณ์¹ สุภิญญา วงษ์ศรีรักษา¹
นิรันดร์ พงษ์พันธุ์² และ ญัฐพงศ์ พิณจักษ์¹

บทคัดย่อ

บอโรซิลิเกตอีนาเมลเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจในการแทนที่อะลูมินาเมล บอโรซิลิเกตอีนาเมลในงานวิจัยนี้วัดคุณสมบัติประกอบไปด้วย SiO_2 0-51.28%, CaO 12.05-17.24%, อัลคาไลน์ออกไซด์รวม 6.03-18.39%, BaO 3.68-12.05%, Al_2O_3 1.20-1.72%, TiO_2 1.20-1.72%, ZrO_2 0-1.59%, Bi_2O_3 6.02-14.71%, B_2O_3 12.05-22.06%, และ ZrSiO_4 0-49.40% วัดคุณสมบัติจะถูกหลอมที่ 1200°C นาน 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นเทน้ำอีนาเมลลงบนแม่พิมพ์เพื่อทดสอบสมบัติต่างๆ จากผลการทดลองพบว่า บอโรซิลิเกตอีนาเมลที่เตรียมได้มีค่าความถ่วงจำเพาะระหว่าง 2.7454-3.2262 และมีค่าดัชนีหักเห (RI) ในช่วง 1.59-1.65 โดยค่า ถ.พ. และค่า RI มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณ Bi_2O_3 และ ZrSiO_4 อย่างไรก็ตามค่า ถ.พ. และค่า RI จะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ B_2O_3 บอโรซิลิเกตอีนาเมลที่เตรียมได้มีผิวเรียบ และแข็ง (546.6-634.8 HV) ทนต่อการละลายสารส้มได้ในระหว่าง 0.02-0.05% มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวที่ดี จากงานวิจัยนี้มี 2 สูตรที่มีความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ทางเครื่องประดับ คือ สูตร I และ J เนื่องจากหลอมและไหลตัวได้ง่าย มีจุดหลอมไหลที่ต่ำกว่าโลหะเชื่อมประสานเงิน ทำให้เครื่องประดับไม่ได้รับความเสียหายขณะอยู่ในกระบวนการเป่าไฟขณะลงเคลือบอีนาเมล นอกจากนี้อีนาเมลยังสามารถปิดผิวโลหะเครื่องประดับได้ดีเนื่องจากมีความหนืดต่ำ

คำสำคัญ: อีนาเมล บอโรซิลิเกตอีนาเมล อีนาเมลไร้ตะกั่ว ฟริต

¹ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

² ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน, E-mail: anocha@g.swu.ac.th

Effect of Zirconium Silicate and Bismuth Oxide on the Properties of Borosilicate Enamels for Jewelry

Anocha Munpakdee^{1*}, Supitcha Supansomboon¹, Supinya Wongsriruksa¹,
Nirand Pongpun² and Natthapong Phinichka¹

ABSTRACT

Borosilicate glass is a good candidate as Lead-free enamel. In this work, Borosilicate enamel samples were produced by fusing raw materials, which consist of SiO₂ 0-51.28 wt%, CaO 12.05-17.24 wt%, alkaline oxide 6.03-18.39 wt%, BaO 3.68-12.05 wt%, Al₂O₃ 1.20-1.72 wt%, TiO₂ 1.20-1.72 wt%, ZrO₂ 0-1.59 wt%, Bi₂O₃ 6.02-14.71%, B₂O₃ 12.05-22.06 wt% and ZrSiO₄ 0-49.40 wt% at 1200°C for 2 hours in the furnace. The molten enamel was then poured into a metal mold for determining its properties. Borosilicate enamels obtained from this method have the specific gravity of 2.7454-3.2262 and the refractive index of 1.59-1.65. The specific gravity and the refractive index of enamels increased with increasing the amount of Bi₂O₃ and ZrSiO₄ and decreases with increasing of B₂O₃. Borosilicate enamel has many excellent properties: it is smooth, hard (546.6-634.8 HV), good acid resistant about 0.02-0.05 wt% and good coefficient of expansion. From the experiment, there were 2 preferred compositions (composition I and J) for jewelry applications. The melting points of both enamels were lower than silver solders. Therefore, silver jewelry remains in good condition without damage during the enamel firing process. Enamels also covered on metal jewelry item very well due to its low viscosity.

Keywords: enamel, borosilicate enamel, lead-free enamel, frit

¹Department of General Science, Faculty of Science, Srinakharinwirot University.

²Department of Chemistry, Faculty of Science, Srinakharinwirot University.

*Corresponding author, E-mail: anocha@g.swu.ac.th

บทนำ

กระแสในเรื่องความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมกำลังมีอิทธิพลต่อการซื้อของผู้บริโภค มีงานวิจัยจำนวนมากที่มีความพยายามจะผลิตอีนาเมลปราศจากตะกั่ว เพื่อใช้ในงานเครื่องประดับ โดยการพัฒนาอีนาเมลจากแก้วในระบบต่างๆ เช่น อะลูมิโนฟอสเฟต อะลูมิโนโบโรซิลิเกต โบโรฟอสเฟต หรือ โบโรซิลิเกต เป็นต้น [1-9] โดยการพัฒนาอีนาเมลจะต้องคำนึงถึงสมบัติการเป็นอีนาเมลที่ดีจากเกณฑ์การพิจารณาดังต่อไปนี้ มีผิวเป็นมันแวววาว มีสีล้วนสวยงาม หลอมเหลวที่อุณหภูมิไม่เกิน 800°C เพื่อป้องกันการเกิดความเสียหายบริเวณรอยเชื่อมบนชิ้นงาน มีความหนืดต่ำ ทำให้เกิดการไหลและการเปียกที่ดี (Wettability) การขยายตัวเนื่องจากความร้อนมีค่าต่ำกว่าค่าการขยายตัวเนื่องจากความร้อนของโลหะที่ใช้เล็กน้อย เพราะจะทำให้ผิวเคลือบอีนาเมลเกิดแรงยึดเกาะกับผิวโลหะได้ดีโดยไม่เกิดการหลุดร่อน หรือ แตกกราน อันเป็นข้อบกพร่อง (Defect) ที่ไม่ต้องการของเครื่องประดับ มีความแข็งแรงทนทานต่อการขีดข่วน แรงกระแทกและต้านทานการกัดกร่อนจากกรดได้ดี เนื่องจากในขั้นตอนการลงอีนาเมลจะต้องมีการให้ความร้อนแก่โลหะ ส่งผลให้ชิ้นงานโลหะมักเกิดฟิล์มออกไซด์สีดำที่ผิว โดยในทางเทคนิคนั้นจะต้องมีการแซ่กรดเจือจาง เช่น สารละลายสารส้ม หรือ กรดเกลือ เพื่อกำจัดฟิล์มออกไซด์ดังกล่าวออกในขั้นตอนการทำความสะอาดหลังเผา

จากเกณฑ์การพิจารณาคุณภาพอีนาเมลดังกล่าว แก้วโบโรซิลิเกตนั้นมีจุดเด่นในเรื่องมีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ เกิดการฟอร์มตัวเป็นแก้วได้ที่อุณหภูมิต่ำ เกิดการตกผลึกได้ยากกว่าแก้วฟอสเฟต และมีความต้านทานสารเคมีค่อนข้างสูง สามารถทนแรงกระแทกได้มากกว่าแก้วโซดาไลม์ 3 เท่า จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาผลิตเป็น อีนาเมลปราศจากตะกั่ว แต่แก้วโบโรซิลิเกตนั้น มีค่าดัชนีหักเหของแสงค่อนข้างต่ำประมาณ 1.52 อย่างไรก็ตามสามารถปรับเพิ่มค่านี้ได้โดยการปรับองค์ประกอบทางเคมีในสูตรแก้วโบโรซิลิเกตด้วยการเติมโลหะหนักออกไซด์ที่เหมาะสมลงไปเช่น แบริียม สตรอนเตียม แคลเซียม ไทเทเนียม เซอร์โคเนียม บิสมัทออกไซด์ เป็นต้น [10-15] ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงมีความต้องการที่จะผลิตอีนาเมลปราศจากตะกั่วที่มีค่าดัชนีหักเหสูงจากแก้วโบโรซิลิเกต โดยนำผลไปเปรียบเทียบกับอีนาเมลที่มีตะกั่วที่ผลิตและใช้งานกันอย่างแพร่หลายอยู่ ณ ปัจจุบัน

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

วัสดุและกรรมวิธีผลิตอีนาเมล

สารตั้งต้นผงโลหะออกไซด์ถูกผสมในอัตราส่วนดังตารางที่ 1 เป็นวัตถุดิบในการผลิตอีนาเมล โดยทำการผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันภายในเบ้าหลอมอะลูมินา และทำการเผาด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้นของอุณหภูมิ $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ หลังจากนั้นนำน้ำแก้วที่เป็นเนื้อเดียวกัน เกลบบัพพิมพ์ทองเหลืองขนาด $2.5\text{ cm} \times 7\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ และอบไล่ความเครียดที่อุณหภูมิ 500°C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมงด้วยเตาไฟฟ้าเช่นกัน ชิ้นงานแท่งอีนาเมลนี้ใช้สำหรับในการทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ ความแข็งที่ผิว ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ค่าความต้านทานการละลายในสารละลายสารส้มเข้มข้น 10 wt% (pH 3.3) ค่าดัชนีหักเหของแสง ค่าความถ่วงจำเพาะ และค่าความหนืด เป็นต้น สำหรับน้ำแก้วที่เหลือภายหลังการเทพิมพ์แล้ว จะทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการจุ่มลงในน้ำ (quenching) เพื่อให้ได้เป็นก้อนฟريت (frit) ใช้สำหรับทำการทดลองเคลือบโบโรซิลิเกตอีนาเมล

บนแผ่นชิ้นงานเครื่องประดับทองเหลือง (70%Cu-30%Zn) รูปแอปเปิ้ลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 cm เพื่อดูการไหลตัวและการเป็ยกผิว

ตารางที่ 1 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของสารตั้งต้นในการเตรียมอีนาเมล

องค์ประกอบทางเคมี (wt%)	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Sum Alkaline	18.39	19.84	21.55	8.63	7.35	6.85	6.50	6.41	6.03	6.03	6.03
BaO	3.68	3.97	4.31	8.62	7.35	6.85	6.41	6.41	12.05	12.05	12.05
CaO	14.71	15.87	17.24	17.24	14.71	13.70	12.82	12.82	12.05	12.05	12.05
Al ₂ O ₃	1.47	1.59	1.72	1.72	1.47	1.37	1.28	1.28	1.20	1.20	1.20
Bi ₂ O ₃	14.71	7.94	8.62	8.62	7.36	6.85	6.41	6.41	6.02	6.02	6.02
B ₂ O ₃	22.06	23.81	17.24	17.24	14.71	13.70	12.82	12.82	12.05	12.05	12.05
SiO ₂	22.06	23.81	25.86	34.49	44.12	47.96	51.28	39.74	37.35	25.30	0
TiO ₂	1.47	1.59	1.72	1.72	1.47	1.36	1.28	1.28	1.20	1.20	1.20
ZrO ₂	1.47	1.59	1.72	1.72	1.47	1.36	1.28	0	0	0	0
ZrSiO ₄	0	0	0	0	0	0	0	12.82	12.05	24.10	49.40
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

การตรวจสอบ

แท่งอีนาเมลที่เตรียมได้จะถูกนำมาตัดให้เป็นชิ้น แต่ละชิ้นงานจะถูกนำมาขัดหยาบและขัดละเอียดด้วยกระดาษทรายจนถึงการขัดมันด้วยผงขัดอะลูมินาขนาด 1 ไมครอน เพื่อนำมาทดสอบดังนี้

- ค่าดัชนีหักเหของแสงด้วยเครื่อง Refractometer ยี่ห้อ Gem Instrument Corp. รุ่น Dupexll
- ค่าความถ่วงจำเพาะด้วยเครื่องชั่งยี่ห้อ METTLER TOLEDO รุ่น CG1003
- ค่าความแข็งที่ผิว ด้วยเครื่อง MICRO HARDNESS TESTER SHIMADZU รุ่น HMV2

TDA ด้วยมาตรฐาน ASTM E384 โหลด 0.1 HV เวลา 10 วินาที

- ค่า Tg ค่าจุดอ่อนตัว และ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Coefficient of Thermal Expansion: COE) วัดด้วยเครื่อง NETZSCH DIL 402 PC ด้วยมาตรฐาน ISO 7884-8

- ค่าความเหนียวด้วยวิธี Fiber Elongation ยี่ห้อ BÄHR Thermoanalyse GmbH รุ่น VIS402 ด้วยมาตรฐาน ISO 7884-3

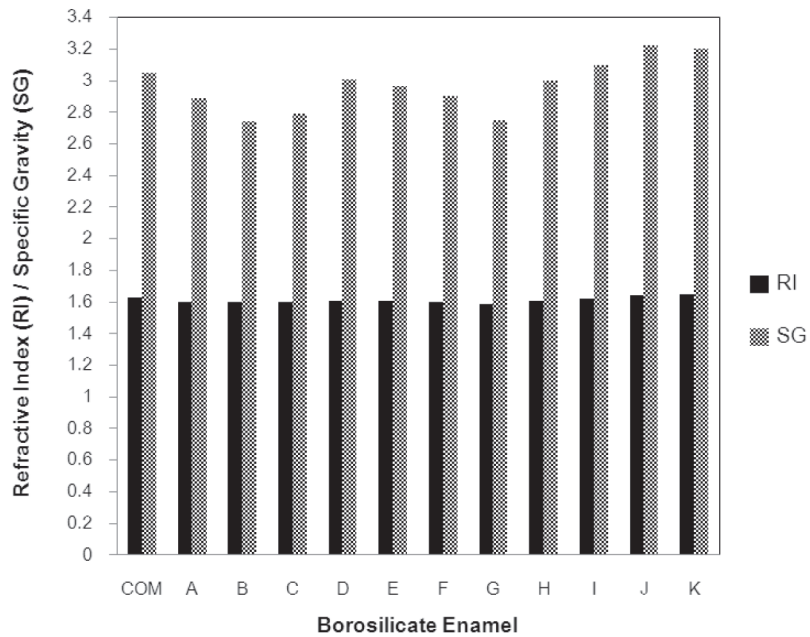
- เครื่องประดับอีนาเมลจะต้องมีขั้นตอนการทำความสะอาดด้วยการต้มในสารละลายสารส้มที่มีฤทธิ์เป็นกรด (pH 3.3) โดยเมื่อชิ้นงานผ่านขั้นตอนการขัดเรียบร้อยแล้ว นำชิ้นงานไปซังน้ำหนักรีด แล้วนำไปต้มในสารละลายสารส้มเข้มข้น 10 wt% ปล่อยให้สารละลายสารส้มเดือดนาน 5 นาที จากนั้นนำชิ้นงานออกมาทำความสะอาดและเป่าให้แห้ง แล้วทำการวัดน้ำหนักที่หายไปคิดเป็นร้อยละน้ำหนักรีดที่หายไป เพื่อความสะดวกในการพิจารณาการละลายจากการขีดจางของสีเขียว ด้วยการเติมโครเมียมออกไซด์ ในปริมาณที่เท่ากันในทุกสูตรๆ ละ 2 กรัม

ผลการทดลอง

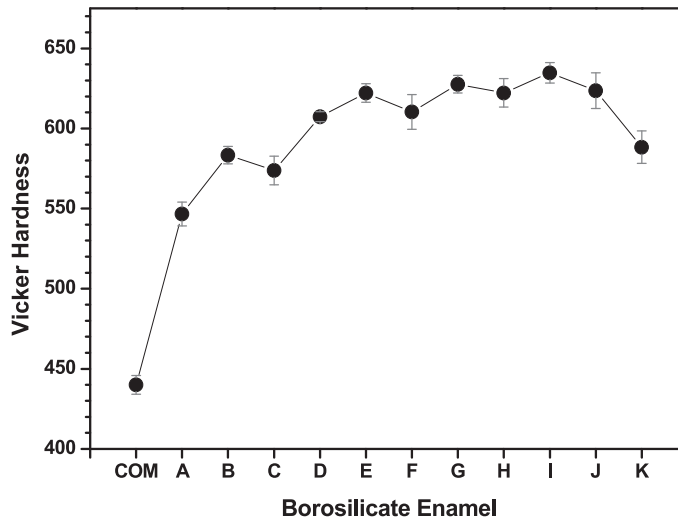
จากผลการทดลองพบว่า การหลอมส่วนผสมที่ใช้ทำอีนาเมลที่อุณหภูมิ 1200°C เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมงนั้น เพียงพอที่จะทำให้บอโรซิลิเกตอีนาเมลเกิดการหลอมเป็นเนื้อเดียวกันได้ดี จากการทดสอบค่าความหนืด พบว่า บอโรซิลิเกตอีนาเมลมีจุดอุณหภูมิการไหลตัวในการขึ้นรูป (working point) อยู่ในช่วงที่ 900-950°C ซึ่งมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิในการขึ้นรูปอีนาเมลทางการค้า (815°C) สมบัติอื่นๆ ที่ตรวจวัดสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สมบัติต่างๆ ของบอโรซิลิเกตอีนาเมลที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับอีนาเมลทางการค้า

Code	SG	RI	HV	Loss (wt%)	T _g (°C)	Softening Point (°C)	COE × 10 ⁻⁶ (°C ⁻¹)
A	2.8920	1.60	546.6	2.6950	431.0	484.7	11.36
B	2.7454	1.60	583.4	0.7906	430.0	486.7	11.89
C	2.7950	1.60	573.8	1.5635	418.8	474.0	12.45
D	3.0088	1.61	607.4	0.3966	N/A	N/A	N/A
E	2.9663	1.61	622.2	0.0795	N/A	N/A	N/A
F	2.9030	1.60	610.4	0.0492	N/A	N/A	N/A
G	2.7533	1.59	627.6	0.0288	N/A	N/A	N/A
H	2.9990	1.61	622.2	0.0148	588.2	647.3	8.35
I	3.1011	1.62	634.8	0.0454	579.9	641.2	8.28
J	3.2262	1.64	623.6	0.0512	582.5	633.9	8.66
K	3.2062	1.65	588.4	0.0884	N/A	N/A	N/A
Commercial Lead-Enamel	3.0490	1.63	440	0.0250	N/A	575.1	N/A



(a)

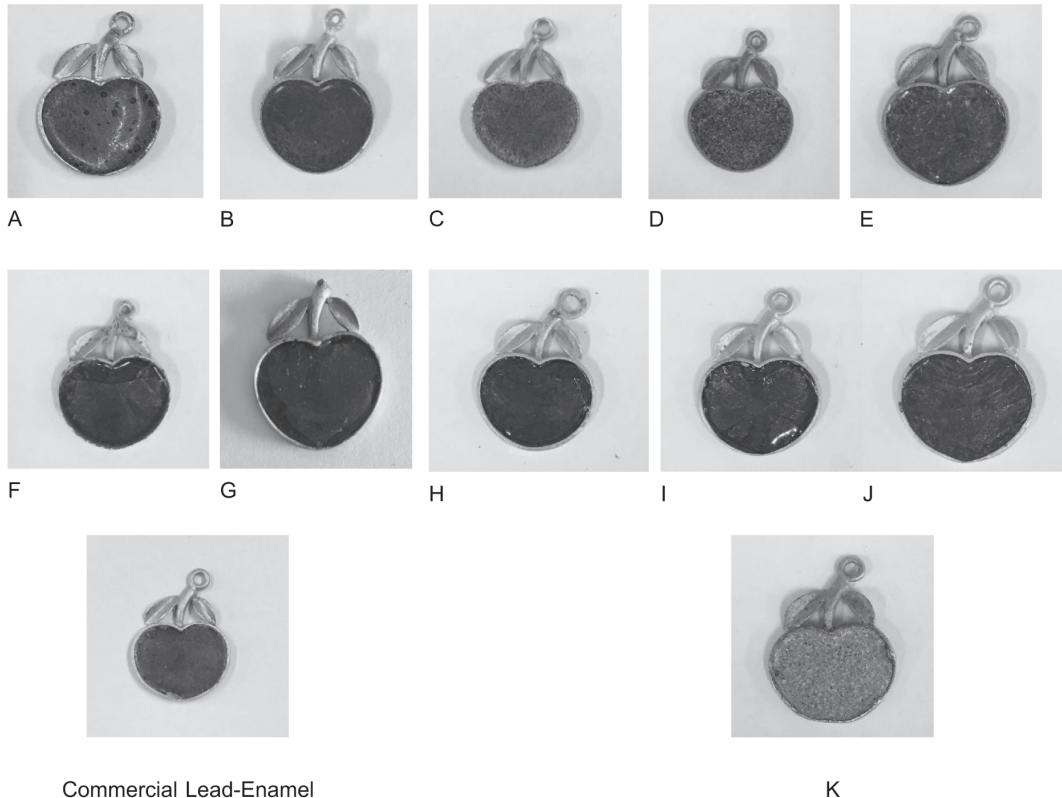


(b)

รูปที่ 1 (a) ความถ่วงจำเพาะและค่าดัชนีหักเห (b) ค่าความแข็งที่ผิวของบอโรซิลิเกตอีนาเมล สูตร A-K

ค่าดัชนีหักเหมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าความถ่วงจำเพาะดังรูปที่ 1 (a) จากการทดลองพบว่า อิทธิพลของบิสฟีนอล A (ตัวอย่าง A=14.71 wt% และ B=7.94 wt%) อิทธิพลของแบเรียมออกไซด์ (ตัวอย่าง H=6.41 wt% กับ I=12.05 wt%) หรือ อิทธิพลของเซอร์โคเนียมซิลิเกต (ตัวอย่าง I=12.05 wt%, J=24.10 wt% ถึง K=49.40 wt%) ซึ่งปริมาณเซอร์โคเนียมที่เพิ่มสูงขึ้น สามารถทำให้แก้วบอโรซิลิเกตมีค่าดัชนีหักเหสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารดังกล่าว ซึ่งทำให้บอโรซิลิเกตอีนามีค่าดัชนีหักเหอยู่ในช่วง 1.59-1.65 แต่อย่างไรก็ตามไม่ควรเพิ่มปริมาณบิสฟีนอล A เกิน 20 wt% เพราะจะทำให้อีนามีเกิดการแยกเฟส หรือ เกิดการตกผลึกออกมาส่งผลทำให้เกิดการสูญเสียความใสและความแวววาว นอกจากนี้ยังพบอีกว่า การเพิ่มปริมาณเซอร์โคเนียมซิลิเกตเกิน 40 wt% จะทำให้เกิดการหลอมไม่สมบูรณ์เนื่องจากเซอร์โคเนียมซิลิเกตนั้นมีจุดหลอมเหลวที่สูง (2550°C) นั่นเอง และผลจากการวัดค่าความแข็งที่ผิวแสดงดังตารางที่ 2 บอโรซิลิเกตอีนามีความแข็งอยู่ในช่วง 546-634 HV (รูปที่ 1(b)) ซึ่งมีค่าสูงกว่าอีนามีค่าในทุกรณี นั้นเพราะการเติมแบเรียมออกไซด์ และปริมาณเซอร์โคเนียม (มาจากสารเซอร์โคเนียมซิลิเกต ทำให้บอโรซิลิเกตอีนามีความเสถียรในโครงสร้างโครงข่าย (Network) มากยิ่งขึ้น ส่งผลให้อีนามีความแข็งเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้หากใส่อัลคาไลออกไซด์ในปริมาณที่มากแล้วนั้นจะส่งผลให้อีนามีค่าการละลายเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการลดปริมาณอัลคาไลออกไซด์ให้ต่ำไม่เกิน 9 wt% ส่งผลให้อีนามีค่าการต้านทานต่อสารละลายสารส้มที่ดีขึ้น ดังตัวอย่าง E-K (อัลคาไลออกไซด์มีค่าอยู่ในช่วง 6.03-7.35 wt%) มีค่าการละลายต่ำลงไม่ถึง 0.1 wt% ซึ่งสามารถสังเกตได้จากสีของอีนามีจะไม่ซีดจาง โดยตัวอย่าง H มีค่าต่ำที่สุดเพียง 0.014 wt% น่าจะเกิดจากอิทธิพลของเซอร์โคเนียมซิลิเกตที่ประกอบไปด้วยซิลิกาและเซอร์โคเนียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบที่ทำให้โครงข่ายแก้วมีความแข็งแรงทนทานต่อสารเคมี [11-14]

COE คือ ค่าของความแตกต่างของความยาวของชิ้นงานที่เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป 1°C เมื่อเทียบกับความยาวเริ่มต้น ซึ่งค่า COE นั้นเป็นลักษณะเฉพาะตัวของอีนามีนั้นๆ จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของอีนามี การเคลือบผิวโลหะด้วยอีนามีนั้น ค่า COE ของโลหะ ควรจะมีค่าสูงกว่าค่า COE ของอีนามี เพื่อให้ชิ้นอีนามีเกิดการเกาะติดอยู่ในสภาพของแรงอัด (Compressive) แต่ไม่ควรให้มีค่า COE ของโลหะแตกต่างจากค่า COE ของอีนามีมากเกินไป เพราะจะทำให้เกิดปัญหาอีนามีลอก (Peeling) ผลการตรวจสอบค่า COE จากตารางที่ 2 พบว่า บอโรซิลิเกตอีนามีทั้งหมด ตัวอย่าง A-K มีค่าต่ำกว่าค่า COE ของทองเหลือง ($19 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) โดยบอโรซิลิเกตอีนามีสูตร A, B และ C นั้นเป็นบอโรซิลิเกตอีนามีที่มีการเติมอัลคาไลออกไซด์ในปริมาณสูง 18.39-21.55 wt% ส่งผลทำให้ค่า COE ของอีนามีมีค่าค่อนข้างสูงโดยมีค่าประมาณ $11.36 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, $11.86 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ และ $12.45 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ตามลำดับ และมีค่าต่ำกว่า COE ของทองเหลืองเพียงเล็กน้อย ส่งผลทำให้เกิดการเกาะติดระหว่างบอโรซิลิเกตอีนามีกับผิวโลหะทองเหลืองนั้นค่อนข้างดี ไม่ก่อให้เกิดข้อบกพร่องหรือปรากฏรอยแตกเลย ดังรูปที่ 2 ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Tsareva [6] และ Bragina [17] ที่พบว่าค่า COE ของอีนามีที่เหมาะสมในการเกาะติดผิวโลหะมีค่าจะมีค่าอยู่ในช่วง $9-12 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$



รูปที่ 2 ลักษณะที่ปรากฏของบอโรซิลิเกตอีนาเมลสูตร A-K และอีนาเมลสูตรมีตะกั่วทางการค้า

จากผลการทดลองพบว่าเริ่มปรากฏข้อบกพร่องของบอโรซิลิเกตอีนาเมลของตัวอย่าง F-J ที่มีลักษณะเกิดการแตกร้าวเป็นแผ่น (Crab-shape) หรือ เป็นสะเก็ดขึ้นเล็กๆ (Flaking) หรือ การหลุดออกเป็นแผ่นๆ ที่บริเวณขอบโลหะ (Splitting-off at edge) เนื่องจากค่า COE บอโรซิลิเกตตัวอย่าง H-J นั้นมีค่าต่ำกว่าค่า COE ของทองเหลืองมากเกินไป สาเหตุน่าจะมาจากการลดปริมาณบิสมีออกไซด์ (จาก 14.71 wt% เหลือเพียง 6.02 wt%) และโบรอนออกไซด์ลง (จาก 22 wt% เหลือ 12 wt%) หรือ ปริมาณเซอร์โคเนียมซิลิเกตที่เพิ่มมากขึ้น (จาก 12 wt% เพิ่มขึ้นเป็น 49.40 wt%) ทำให้ค่า COE ของบอโรซิลิเกตอีนาเมลมีค่าลดลงเหลือเพียง $8.35 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, $8.28 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ และ $8.66 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ตามลำดับ ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นนี้ สะท้อนให้เห็นปัญหาที่เกิดจากการเกาะติดกันระหว่างบอโรซิลิเกตอีนาเมลกับผิวทองเหลืองที่อ่อนแอ แต่อย่างไรก็ตามบอโรซิลิเกตที่ผลิตได้ในงานวิจัยนี้ ยังสามารถเกิดการเกาะติดของเหลืองได้ค่อนข้างดีสังเกตได้จากภายหลังจากขั้นตอนการทำความสะอาดโดยการต้มในสารละลายสารส้ม บอโรซิลิเกตยังสามารถเกาะติดอยู่ได้โดยไม่หลุดร่อน

ผู้วิจัยจึงได้นำบอโรซิลิเกตอีนาเมลตัวอย่าง I และ J ซึ่งเป็นสูตรที่มีการไหลตัวดี และมีค่าการต้านทานต่อสารละลายสารส้มต่อที่ดี มาผสมสารออกไซด์ให้สีต่างๆ เช่น นิกเกิล ทองแดง โครเมียม ออกไซด์ เป็นต้น ไปทดลองลงกับชิ้นงานเครื่องประดับโบราณของจังหวัดสุโขทัยซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของร้านมนตรีเครื่องเงินสุโขทัย เพื่อทดสอบการใช้งานจริง เพื่อให้ทราบถึงปัญหา และความพึงพอใจจากช่างที่เชี่ยวชาญ พบว่าสามารถลงชิ้นงานจริงได้ เนื่องจากผลิตภัณฑ์อีนาเมลนั้น มีการลงอีนาเมลแค่เพียงพื้นที่เล็กๆ จึงมีการเกาะติด และความสวยงามในระดับดี ช่างมีความพึงพอใจในการใช้งาน ผลปรากฏดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 เครื่องประดับสุโขทัยลงบอโรซิลิเกตอีนามาเมลที่ผลิตได้ในงานวิจัยนี้

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

การเพิ่มปริมาณบิสมีออกไซด์ แบเรียมออกไซด์ และ เซอร์โคเนียมซิลิเกตช่วยทำให้ค่าดัชนีหักเหของบอโรซิลิเกตอีนามาเมลมีค่าสูงขึ้น 1.59-1.65 โดยค่าดัชนีหักเหที่ได้จะมีความสัมพันธ์แปรผันตามค่าความถี่เฉพาะ หากอีนามาเมลมีค่าความถี่เฉพาะสูงก็จะมีค่าดัชนีหักเหสูงด้วย ในทางกลับกันหากมีการเพิ่มปริมาณโบรอนออกไซด์ให้มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความถี่เฉพาะและค่าดัชนีหักเหของอีนามาเมลลดลง การเติมสารเซอร์โคเนียมซิลิเกตนอกจากจะส่งผลในเรื่องของค่าดัชนีหักเหแล้วยังส่งผลทำให้บอโรซิลิเกตอีนามาเมลมีความแข็งแรงมากขึ้น และค่าการละลายในสารละลายสารส้มลดลงซึ่งเป็นผลดีต่อการใช้งานในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ ผลจากทดลองสามารถชี้ได้ว่าบอโรซิลิเกตอีนามาเมลที่ปราศจากตะกั่ว มีค่าดัชนีหักเหที่สูง มีความแข็งแรง ทนต่อสารละลายสารส้มได้ดี และสามารถหลอมเหลวได้ที่อุณหภูมิตำ่กว่านั้น ได้แก่ บอโรซิลิเกตอีนามาเมลสูตร I และ J ซึ่งความเหมาะสมที่จะนำมาพัฒนาเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผลงานวิจัยสำเร็จลงได้คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ สำหรับเงินทุนสนับสนุนการวิจัยบรยายได้มหาวิทยาลัย ประจำปีงบประมาณ 2558 (สัญญาเลขที่ 026/2558) และขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้ความช่วยเหลือในการทดลองและเตรียมตัวอย่าง ขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เป็นอย่างยิ่งด้วย

เอกสารอ้างอิง

1. Gnesin, G. G. 2016. Glass, Glaze, and Enamel over the Millennia. *Glazes and Enamels. Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 54(12): 750-756.
2. Tsareva, E. V., Pirogova, M.F., and Spiridonov, Y.A. 2012. Opacified and Opaline Enamel on Precious Metals. *Glass and Ceramics*. 68(11): 376-377.

3. Eliseev, S. Y., Anisovich, A. G., and Rodtsevich, S.P. 2002. Enameling of Brass. *Glass and Ceramics*. 59(11): 106-108.
4. Yatsenko, E. A., Zubekhin, A. P., and Shkurakova, E. A. 2001. Tinted Low-Melting Enamels for Aluminum. *Glass and Ceramics*. 58(11): 428-430.
5. Eliseev, S. Y., Rodtsevich, S. P., and Dostanko, E.V. 2000. Enamel with the Aventurine Effect. *Glass and Ceramics*. 57(11): 140-142.
6. Tsareva, E.V., and Spiridonov, Y. A. 2011. Decorative Enamels on Precious Metals. *Glass and Ceramics*. 68(11): 308-309.
7. Spiridonov, Y. A., and Tsareva, E. V. 2013. Contact Layer on Enamel-Precious Metal Interface. *Glass and Ceramics*. 70(11): 63-64.
8. Lazutkina, O. R., and Kazak, A. K. 2008. Low-Temperature Covering Enamels for Steel and Aluminum. *Glass and Ceramics*. 65(11): 63-64.
9. Shinkareva, E. V. 2004. Lead-free for Decoration of Glass Articles. *Glass and Ceramics*. 61(11) 303-305.
10. Bobkova, N. M., Trusova, E. E., and Zakharevich, G. B. 2013. Lead-free High-Quality Glass for Assorted Glassware. *Glass and Ceramics*. 70(11): 41-42.
11. Comte, M. J. M., US Patent No. 5,468,693: Nov. 21, 1995 (Lead-free Glasses Exhibiting Characteristics of Crystal).
12. Ogata, H., Komiya, H., and Inaba, S., US Patent No. 5,376,597: Dec. 27, 1994 (Lead-free Glass Composition having Properties Similar to Lead Crystal Glass).
13. Lenhart, A., US Patent No. 7,202,188 B2 : Arp. 10, 2007 (Lead- and Barium-Free Crystal Glass).
14. Clement, M., Brix, P., and Gaschler L., US patent number 5,434,111 A 1995, (Lead-and Barium-free Crystal Glass having High Optical Transmission).
15. พิศุทธิ์ ดารารัตน์. 2550. Effect of Zirconium Dioxide on Properties of Lead-free High Refractive Index Glass Prepared from Local Sand. การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 33. (วทท. 33), 18-20 ตุลาคม 2550 ณ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ จ.นครศรีธรรมราช.
16. เทพีวรรณ จิตวัชรโกมล. 2552. แก้วเจียระไนที่ปราศจากตะกั่วและแบเรียม. กรมวิทยาศาสตร์บริการ. ปีที่ 57 (ฉบับที่ 179): 8.
17. Bragina, L.L., and Voronov, G.K. 2008. Effect of a Complex of Aliovalent Cations on Processes in an Enamel Melt-Low-Carbon Steel System. *Glass and Ceramics*. 65(11): 59-62.

ได้รับบทความวันที่ 18 ตุลาคม 2559

ยอมรับตีพิมพ์วันที่ 10 พฤศจิกายน 2559