การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติการขยายตัวเมื่อร้อนของเคลือบเซรามิก โดยวิธีคำนวณและทดสอบด้วยเครื่อง Dilatometer

ลดา พันธ์สุขุมธนา* วรรณา ต.แสงจันทร์* จันทรัตน์ วรสรรพวิทย์**

บทคัดย่อ

สมบัติการขยายตัวเมื่อร้อนเป็นสมบัติที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาสูตรเคลือบเซรามิกหรือการควบคุมคุณภาพเคลือบในการผลิต เนื่องจากเป็นสมบัติที่มีผลต่อความแข็งแรงและความทนต่อการรานของเคลือบ การหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อร้อนสามารถทำโดยการทดสอบด้วย Dilatometer หรือการคำนวณจากส่วนประกอบของเคลือบ ในงานวิจัยนี้ได้สร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อแสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อร้อนเชิงเส้นของเคลือบทดลอง แก้วฟริต และเคลือบสำเร็จรูป โดยใช้ Dilatometer กับโปรแกรมคำนวณแก้ว 2 โปรแกรม (โปรแกรม A และ B) ด้วยการวิเคราะห์การถดถอย พบว่า เมื่อ y_A และ y_B เท่ากับ 1/สัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อร้อนด้วยการคำนวณโดยใช้โปรแกรม A และ B การใช้โปรแกรม A และ B ในการคำนวณสมบัติแก้วที่มีส่วนผสมของโซเดียมออกไซด์และซิลิกาให้ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงโดยมีสมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย $y_A = 0.1729-0.0073x$ มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9733 และ $y_B = 0.18-0.0077x$ มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9734 ใกล้เคียงกัน ส่วนการคำนวณสมบัติฟริตและเคลือบที่มีส่วนผสมของออกไซด์ที่หลากหลาย พบว่าสามารถอธิบายความผันแปรของการคำนวณด้วยโปรแกรม B ได้ดีกว่าการใช้โปรแกรม A มีสมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย $y_B = 0.2252-0.0113x$ และค่า R^2 เท่ากับ 0.8922

Abstract

Thermal expansion is a ceramic glaze property normally used to develop new glaze or control glaze quality. This is because the thermal expansion can affect on the strength and the craze resistance of the glaze. The thermal expansion of the glaze can be evaluated by Dilatometer or composition calculation. In this study, mathematic model was used to study the relationship between the coefficient of linear thermal expansions of glazes and glasses, together with, ready to used frits and glazes from Dilatometer and two glass calculation programs (Program A and B). The relationship between the two methods was determined by regression analysis and coefficient of determination (R^2). Y_A and Y_B were 1/ the coefficient of linear thermal expansions from calculation by Program A and 1/ the coefficient of linear thermal expansions from calculation by Program B consecutively. For glasses composed of simple oxides as sodium oxide and silica, the simple linear regression analysis results of both programs were similar $y_A = 0.1729-0.0073x$, $R^2 = 0.973$ and $y_B = 0.18-0.0077x$, $R^2 = 0.973$. However, for frits and glazes which composed of more complex oxides, the simple linear regression analysis results of both programs were significantly different. It was concluded that the linear thermal expansion coefficient from Dilatometer could be calculated by using Program B better than by using Program A with the simple linear regression as $y_B = 0.2252 - 0.0113x$, and $R^2 = 0.892$

1. บทนำ

เคลือบเซรามิก คือ ชั้นแก้วบางๆ ที่ฉาบบนเนื้อดินเซรามิก มีเพื่อเพิ่มความสวยงามแก่ผลิตภัณฑ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความคงทนมากขึ้น ฯลฯ สมบัติของเคลือบเซรามิกที่ผู้ผลิตมักใช้ในการพัฒนาสูตรเคลือบหรือควบคุมกระบวนการผลิต ได้แก่ การขยายตัวเมื่อร้อน ความหนืด สี และรูปลักษณะเป็นหลัก

* นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการพิเศษ สำนักเทคโนโลยีชุมชน

** นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ สำนักบริหารและรับรองห้องปฏิบัติการ

ซึ่งการขยายตัวเมื่อร้อนของเคลือบต้องเหมาะสมกับเนื้อดิน เป็นสมบัติที่มีผลต่อความแข็งแรงและความทนต่อการรานของเคลือบ เช่น การขยายตัวเมื่อร้อนของเคลือบมากกว่าเนื้อดิน เคลือบอาจเกิดการรานได้ และเมื่อการขยายตัวเมื่อร้อนของเคลือบน้อยกว่าเนื้อดิน เคลือบจะอยู่ภายใต้แรงอัด มีความแข็งแรงดี การขยายตัวเมื่อร้อนของเคลือบสามารถทดสอบด้วยเครื่องมือวิทยาศาสตร์ Dilatometer ซึ่งมีราคาสูง ในปัจจุบันมีโปรแกรมการคำนวณสมบัติแก้ว ที่สามารถใช้ในการทำนายสมบัติแก้วได้ เช่น การขยายตัวเมื่อร้อน แต่การทดลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลจากการคำนวณสมบัติแก้วกับผลการทดสอบสมบัติเคลือบไม่แพร่หลาย โดยเฉพาะในเคลือบไฟต่ำระดับ 1000 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นเคลือบที่สามารถช่วยลดพลังงานในการเผาและเป็นกระแสที่ผู้ผลิตให้ความสนใจในปัจจุบัน

สัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อร้อนที่ได้จากการทดสอบด้วย Dilatometer เป็นการวัดขนาดที่เปลี่ยนหรือเพิ่มขึ้นเทียบกับหน่วยของขนาดตัวอย่างเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศา มีสูตร

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L \Delta T}$$

โดย ΔL คือขนาดที่เปลี่ยนแปลง

L คือขนาดตั้งต้น

ΔT คือช่วงอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

ส่วนการคำนวณสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อร้อนต้องอาศัยสมบัติเฉพาะของออกไซด์แต่ละตัว มีสูตร

$$\alpha = \sum_{i=1}^{n} a_i X_i$$

โดย a คือร้อยละน้ำหนักของออกไซด์แต่ละชนิด

X คือค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อร้อนของออกไซด์แต่ละชนิด

การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเคลือบโดยวิธีคำนวณกับวิธีทดสอบทางกายภาพ จะทำให้ทราบข้อจำกัดของการใช้โปรแกรมคำนวณ หรือทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ดังกล่าว และสามารถทำนายสมบัติเคลือบก่อนลงมือทดลองจริงในห้องปฏิบัติการได้ ช่วยลดขั้นตอนหรือเวลาในการพัฒนาสูตรเคลือบ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ ช่วยผู้ผลิตในการลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการพัฒนาสูตรเคลือบใหม่ๆ ต่อไป

2. วัตถุดิบและวิธีการทดลอง

2.1 วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย วัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมเคลือบและแก้ว รวมถึงการใช้ฟริตและเคลือบสำเร็จรูปที่มีในท้องตลาด มีรายละเอียดดังนี้

- ฟริต#1 ฟริต#2 ฟริต#3 ฟริต#4 ของ บริษัท สยามฟริต จำกัด
- ฟริตตะกั่วซิลิเกต(FT995) และเคลือบสำเร็จรูป CG466 ของ บริษัท อัมรินทร์ จำกัด
- ฟริต 54026 ของ บริษัท ปะการัง เซรามิค ซัพพลาย จำกัด
- เคลือบสำเร็จรูป CRU103 ของ บริษัท เซรามิคส์ อาร์ อัส จำกัด
- แร่ฟันม้า (IMD#2) ดินขาว (ระนอง) และควอตซ์ ของ บริษัท อินดัสเตรียล มินเนอรัล ดิวิลอปเมนท์ จำกัด
- ลิเธียมคาร์บอเนต (Li_2CO_3) หินปูน ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และโคลีมาไนต์ (Colemanite) ของ บริษัทเซอร์นิค จำกัด

องค์ประกอบเคมีของวัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมเคลือบแสดงดังตารางที่ 1 สูตรเคลือบทดลองได้จาก “โครงการการพัฒนาเคลือบไฟต่ำและการศึกษาสมบัติของเคลือบโดยวิธีคำนวณและวิธีทดสอบสมบัติทางกายภาพ” ของกรมวิทยาศาสตร์บริการ แสดงดังตารางที่ 2 องค์ประกอบเคมีของฟริตเคลือบสำเร็จรูป และแก้ว แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบเคมีของวัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมเคลือบ

	B_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	PbO	ZrO_2	BaO	Li_2O	SrO	ZnO	LOI
ฟริต (FT995)*	11.5	22.9	3.28	0.06	-	0.10	0.07	0.24	0.18	59.7	0.37	-	-	-	-	-
แร่ฟันม้า*	-	66.4	18.6	0.05	0.02	0.22	0.05	3.0	11.4	-	-	-	-	-	-	0.26
โคลีมาไนต์*	41.3	4.2	0.06	0.02	-	21.8	1.96	0.05	-	-	-	-	-	0.93	-	29.5
หินปูน*	-	0.83	0.24	0.13	-	55.8	0.5	-	-	-	-	-	-	-	-	42.2
ดินขาว (ระนอง)*	-	46.5	36.9	1.57	0.08	0.06	0.14	0.10	2.38	-	-	-	-	-	-	11.9
ควอรตซ์												-				
ซิงก์ออกไซด์	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	99.5	-
ลิเธียมคาร์บอเนต												-				
*ทดสอบด้วย XRF (Bruker S8Tiger) โดยโครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ																

ตารางที่ 2 แสดงสูตรเคลือบทดลอง

วัตถุดิบ	ฟริต (FT995)	แร่ฟันม้า	โคลีมาไนต์	หินปูน	ดินขาว (ระนอง)	ควอรตซ์	ซิงก์ออกไซด์	ลิเธียมคาร์บอเนต
LT1	62.9	29.9	-	-	3.5	3.7	-	-
LT2	43.4	33.0		3.0	3.9	11.8	4.9	
LT3.2	59.0	18.7	7.2	7.0	4.4	4.1	-	-
LT4.2	39.6	24.1	16.0	6.2	6.7	7.3	-	-
LC1	15.4	23.1	46.2	-	7.7	7.7	-	-
LC3	-	27.3	54.6	-	9.1	9.1	-	-
LC4	-	19.1	66.0	-	9.5	4.8	-	-
LLT1.3	-	21.95	37.21	-	10.13	16.49	-	8.72
LLT2.3	-	22.05	37.39	-	10.18	16.57	6.39	5.84
LLT2.6	-	19.71	33.43	1.41	9.10	25.40	5.72	5.22
LLT3.13	-	23.56	43.41	4.21	16.31	2.53	6.86	3.12
LC3.3	-	26.0	52.0	-	8.7	8.7	4.8	-

ตารางที่ 3 องค์ประกอบเคมีของ ฟริต เคลือบสำเร็จรูป และแก้ว ที่ใช้ในการทดลอง*

	B_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	PbO	ZrO_2	BaO	Li_2O	SrO	ZnO	LOI
ฟริต																
ฟริต #1	28.3	39.4	0.9	0.04	-	10.5	0.2	11.5	0.2	-	8.5	0.03	-	-	-	0.5
ฟริต #2	10.2	62.2	8.4	0.14	-	12.5	1.7	1.8	2.2	-	0.005	0.5	-	-	-	0.3
ฟริต #3	19.4	49.7	8.5	0.1	-	11.6	0.4	6.5	2.4	-	0.03	0.16	-	-	-	0.4
ฟริต #4	19.6	52.2	6.9	0.1	-	11.6	0.2	4.4	3.2	-	1.4	0.1	-	-	-	0.3

ตารางที่ 3 องค์ประกอบเคมีของ ฟริต เคลือบสำเร็จรูป และแก้ว ที่ใช้ในการทดลอง* (ต่อ)

ฟริต 54026	9.9	57.4	7.2	0.2	-	9.3	0.8	5.5	1.9	3.5	3	0.2	-	-	-	1.2
เคลือบสำเร็จรูป																
CRU103	16.4	58.4	9.2	0.1	-	5.5	0.1	6.7	2.1	0.04	0.1	0.1	-	-	-	1.1
CG466	12.3	55.9	10.2	0.2	-	8	0.7	5.5	2.6	0.02	2.8	0.24	-	-	-	1.4
แก้ว																
N1.5S	-	69.54	0.13	0.05	-	0.06	-	30.22	-	-	-	-	-	-	-	-
N1.75S	-	73.25	0.17	0.06	-	0.15	-	26.36	-	-	-	-	-	-	-	-
N2.0S	-	74.61	0.22	0.19	-	0.13	-	24.84	-	-	-	-	-	-	-	-
N2.25S	-	76.68	0.13	0.06	-	0.07	-	23.06	-	-	-	-	-	-	-	-
N2.5S	-	79.44	0.18	0.06	-	0.07	-	20.25	-	-	-	-	-	-	-	-
N3.0S	-	82.63	0.17	0.07	-	0.06	-	17.07	-	-	-	-	-	-	-	-

*ทดสอบด้วย XRF (Bruker S8Tiger) โดยโครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ

2.2 วิธีการทดลอง

วิธีการทดลองประกอบด้วยการทดสอบหาสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อร้อนเชิงเส้นของตัวอย่างด้วย Dilatometer (UNITHERM™ Model 1161) และการคำนวณสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อร้อนเชิงเส้นโดยใช้โปรแกรมคำนวณแก้วที่มีในท้องตลาด 2 โปรแกรม (โปรแกรม A และ โปรแกรม B) ตัวอย่างที่ใช้ได้แก่ เคลือบทดลอง ฟริต เคลือบสำเร็จรูป และแก้วดังตารางที่ 2 และ 3 นำค่าที่ได้มาทดสอบการแจกแจงแบบปกติของประชากรด้วยสถิติ Shapiro-Wilk test ตรวจสอบเงื่อนไขการวิเคราะห์การถดถอย หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าทดสอบและค่าคำนวณด้วยสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (pearson correlation test, r) สร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ด้วยการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) และหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (The coefficient of determination, R^2)

การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบด้วยเครื่อง Dilatometer ทำโดยการนำตัวอย่างมาหลอมในเบ้าอะลูมินาที่อุณหภูมิ 1600 °C เทเป็นเส้น แล้วจึงนำมาตัดให้มีขนาด 5 × 5 × 50 มิลลิเมตร ทดสอบสมบัติการขยายตัวเมื่อร้อนในช่วงอุณหภูมิ 25 - 1000 องศาเซลเซียส ใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที

3. ผลและวิจารณ์การทดลอง

ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อร้อนเชิงเส้นด้วย Dilatometer และ การคำนวณด้วยโปรแกรม A และ B แสดงดังตารางที่ 4 พบว่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อร้อนเชิงเส้นด้วย Dilatometer ของเคลือบอยู่ในช่วง 5.93-9.19 x 10^{-6} °C^{-1} ของฟริตอยู่ในช่วง 6.20-9.68 x 10^{-6}°C^{-1} ของเคลือบสำเร็จรูปอยู่ในช่วง 7.32 - 7.57 x 10^{-6} °C^{-1} และของแก้วอยู่ในช่วง 8.40-14.30 x 10^{-6}°C^{-1} จากการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของประชากรด้วยสถิติ Shapiro-Wilk test พบว่าประชากรของข้อมูลจาก Dilatometer โปรแกรม A และ โปรแกรม B มีค่า P-value 0.0005 0.0037 0.006 ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าประชากรของข้อมูลมีการแจกแจงไม่เป็นปกติ ได้ดำเนินการแปลงข้อมูลโดยใช้ 1/สัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อร้อนด้วยการคำนวณโดยใช้โปรแกรม A และ 1/สัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อร้อนด้วยการคำนวณโดยใช้โปรแกรม B พบว่ามีค่า P-value 0.328 และ 0.054 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่า 0.05 แสดงว่าประชากรของข้อมูลที่แปลงได้มีการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งเมื่อตรวจสอบเงื่อนไขการวิเคราะห์การถดถอย พบว่าค่าเฉลี่ยของค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับศูนย์ ค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่ทุกค่าของ x ค่าความคลาดเคลื่อนเป็นอิสระกัน และค่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ สามารถสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ด้วยการวิเคราะห์การถดถอย

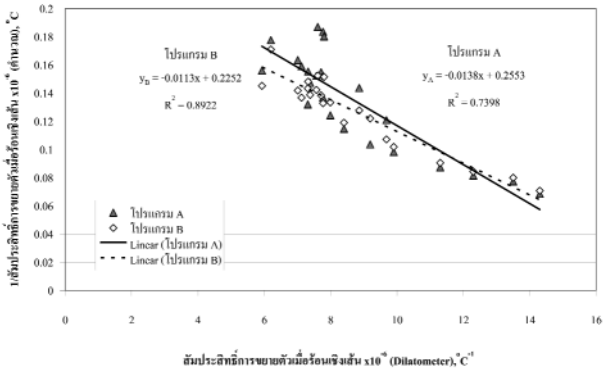
ตารางที่ 4 แสดงสมบัติสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อร้อนเชิงเส้นของเคลือบ โดย Dilatometer และการคำนวณโดยโปรแกรม A และ B

ตัวอย่าง	Dilatometer ($x10^{-6}$ $^{o}C^{-1}$)	โปรแกรม A ($x10^{-6}$ $^{o}C^{-1}$)	โปรแกรม B ($x10^{-6}$ $^{o}C^{-1}$)
เคลือบ			
LT1	5.93	6.41	6.89
LT3.2	7.12	6.29	7.31
LT4.2	7.01	6.12	7.05
LC3	7.77	5.45	6.59
LC4	7.61	5.35	6.56
LLT1.3	9.19	9.65	8.2
LLT2.3	7.99	8.05	7.5
LLT2.6	7.31	7.58	6.98
LLT3.13	7.77	7.31	7.53
LC3.3	7.80	5.55	6.60
ฟริต			
ฟริต#1	9.68	8.28	9.33
ฟริต#2	6.20	5.63	5.85
ฟริต#3	8.86	6.96	7.83
ฟริต#4	7.71	6.46	7.23
ฟริต54026	7.38	6.79	7.21
เคลือบสำเร็จรูป			
CRU103	7.32	6.44	6.75
CG466	7.57	6.57	7.03
แก้ว			
N1.5S	14.30	14.60	14.14
N1.75S	13.50	12.93	12.50
N2S	12.30	12.27	11.86
N2.25S	11.30	11.45	11.05
N2.5S	9.90	10.18	9.82
N3S	8.40	8.72	8.40

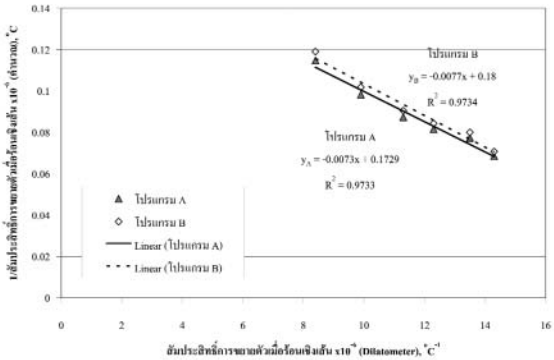
การสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้สำหรับพยากรณ์ด้วยการวิเคราะห์การถดถอย ของสมบัติสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อร้อนเชิงเส้นของแก้วซึ่งประกอบด้วยโซเดียมออกไซด์และซิลิกา จากการทดสอบด้วย Dilatometer และคำนวณด้วยโปรแกรม A และ B แสดงดังภาพที่ 1 พบ r = -0.987 มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงได้สมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย y_A = 0.1729-0.0073x มีค่า R^2 เท่ากับ 0.973 สำหรับการคำนวณด้วยโปรแกรม A และ ได้ r = -0.987 สมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย y_B = 0.1800-0.0077x มีค่า R^2 เท่ากับ 0.973 สำหรับการคำนวณด้วยโปรแกรม B แสดงว่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อร้อนของแก้วจากการทดสอบด้วย Dilatometer สามารถนำไปอธิบายความผันแปรของสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อร้อนด้วยการคำนวณโดยใช้โปรแกรม A และ B ได้สัมประสิทธ์ของการตัดสินใจใกล้เคียงกันคือ ร้อยละ 97.3 เมื่อ y_A และ y_B เท่ากับ 1/สัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อร้อนด้วยการคำนวณโดยใช้โปรแกรม A และ B

สำหรับการสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ระหว่างสมบัติสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อร้อนเชิงเส้นของ เคลือบทดลอง ฟริต เคลือบสำเร็จรูป แก้ว ซึ่งประกอบด้วยออกไซด์ที่หลากหลาย จากการทดสอบโดย Dilatometer และคำนวณด้วยโปรแกรม A และ B

แสดงดังภาพที่ 2 พบ r = -0.8601 มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงได้สมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย y_A = 0.255-0.0138x มีค่า R^2 = 0.740 สำหรับการคำนวณด้วยโปรแกรม A และได้ r = -0.9446 มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงได้สมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย y_B = 0.2252-0.0113x มีค่า R^2 = 0.8922 สำหรับการคำนวณด้วยโปรแกรม B ตามลำดับ เมื่อ y_A และ y_B เท่ากับ 1/สัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อร้อน ด้วยการคำนวณโดยใช้โปรแกรม A และ B แสดงว่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อร้อนเชิงเส้นจากการทดสอบ Dilatometer สามารถนำไปอธิบายความผันแปรของสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อร้อนด้วยการคำนวณโดยใช้โปรแกรม B ได้ร้อยละ 89.2 มากกว่าการใช้โปรแกรม A ซึ่งอธิบายได้ร้อยละ 74.0



ภาพที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ของสมบัติสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อร้อนของแก้วที่ประกอบด้วยโซเดียมออกไซด์และซิลิกา จากการทดสอบ Dilatometer กับการคำนวณโดยโปรแกรม A และ B



ภาพที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ของสมบัติสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อร้อนของเคลือบทดลอง แก้ว ฟริต เคลือบสำเร็จรูป จากการทดสอบ Dilatometer กับการคำนวณโดยโปรแกรม A และ B

4. สรุป

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการขยายตัวเมื่อร้อนของเคลือบและแก้วด้วย Dilatometer และการคำนวณด้วยโปรแกรมคำนวณแก้วมีความสัมพันธ์กันสูง เมื่อส่วนผสมไม่ซับซ้อนคือประกอบด้วยโซเดียมออกไซด์และซิลิกาพบว่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อร้อนของเคลือบและแก้วด้วย Dilatometer สามารถนำไปอธิบายความผันแปรของสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อร้อนด้วยการคำนวณโดยใช้โปรแกรม A หรือ B ได้ใกล้เคียงกัน คือร้อยละ 97.33 ด้วยสมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย y_A = 0.1729-0.0073x และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.973 สำหรับการคำนวณด้วยโปรแกรม A และได้สมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย y_B = 0.1800-0.0077x สำหรับการคำนวณด้วยโปรแกรม B แต่เมื่อองค์ประกอบเคมีซับซ้อน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจในการใช้โปรแกรมคำนวณ B มีค่าร้อยละ 0.8922 สูงกว่าการใช้โปรแกรม A ซึ่งมีค่าร้อยละ 0.7398 โดยมีสมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายด้วยโปรแกรม B y_B = 0.2252-0.0113x ผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้โปรแกรมคำนวณแก้วในการทำนายสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อร้อนของเคลือบเซรามิก ซึ่งจะช่วยประหยัดเวลาและลดค่าใช้จ่ายในการพัฒนาสูตรเคลือบใหม่ๆ ได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์เชี่ยวชาญด้านแก้ว โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่ให้ความร่วมมือในการทดสอบ XRF อนุเคราะห์โปรแกรมคำนวณแก้ว และร่วมวิเคราะห์ผล ดร.พิชญ์รัตน์ อินทร์เอื้อ ที่ได้อนุเคราะห์โปรแกรมคำนวณแก้ว และขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนในการวิจัยของโครงการนี้

เอกสารอ้างอิง

Boakes, W.R. Using your PC. for reformulation, **Ceramics Engineering Science Proceeding,** March, 1995, vol.16, no.3, p 9-14.

English, S.; and Turner, W.E. S. Relation between chemical composition and the thermal expansion of glasses, **Journal of American Ceramics Society.,** March, 1930, vol.13, no.3, p. 182.

Villa, C.E,et al. A Spreadsheet program to predict glazecomposition I, Interceram, May, 1997, vol.46 no.5, p 303-308.

_____. A Spreadsheet program to predict glaze composition II, **Interceram,** June, 1997, vol. 46, no.6, p. 425-429.

กรมวิทยาศาสตร์บริการ. สถิติที่ใช้ในห้องปฏิบัติการทดสอบ. **เอกสารฝึกอบรมหลักสูตรสถิติที่ใช้ในห้องปฏิบัติการทดสอบ.** สิงหาคม, 2549, วันที่ 15-16, ณ อาคารสถานศึกษาเคมีปฏิบัติ กรุงเทพมหานคร: กรม, 2549.