การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติการหดตัวเมื่อเผาของอุปกรณ์ตรวจสอบอุณหภูมิแบบวงกลม
A comparative study of the firing shrinkage properties of the process temperature control rings

ลดา พันธ์สุขุมธนา[1*], จันทรัตน์ วรสรรพวิทย์[1], ศิริวรรณ แซ่ภู่[1], ฉัตรชัย บาลศรี[1]
Lada Punsukmtana[1*], Chantarat Vorasapavit[1], Siriwan Saephoo[1], Chatchai Balsri[1]
Wanna T.saengchantara[1*], Pranee Junlar[1], Sansanee Rugthaicharoencheep[1],
and Sutthima Sriprasertsuk[1]

บทคัดย่อ

อุปกรณ์ตรวจสอบอุณหภูมิแบบวงกลมได้พัฒนาจากสูตรที่ประกอบด้วย ทัลคัม แมกนีเซียมคาร์บอเนต แบเรียมคาร์บอเนต เหล็กออกไซด์ ดินขาว และควอตซ์ เป็นองค์ประกอบ ขึ้นรูปอุปกรณ์ฯด้วยวิธีอัดแห้งให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 ซม. ความหนาแน่น 1.8 กรัม/ลบ.ซม. ตัวอย่างมีสมบัติการหดตัวเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 960 ˚C, 1100 ˚C, 1140 ˚C และ 1200 ˚C อยู่ในช่วงร้อยละ 2.21-9.98 และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.00-0.06 งานวิจัยนี้ได้ใช้สถิติในการประมวลผลสมบัติของอุปกรณ์ฯที่พัฒนาเมื่อเผา พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิมีผลให้การหดตัวเมื่อเผาเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการหดตัวเมื่อเผา งานวิจัยนี้ยังได้แสดงข้อมูลเปรียบเทียบสมบัติของอุปกรณ์ฯที่พัฒนากับอุปกรณ์ฯที่จำหน่ายในท้องตลาด ในค่าเฉลี่ยของการหดตัวเมื่อเผา ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการหดตัวเมื่อเผา และการเปลี่ยนแปลงของค่าการหดตัวเมื่อเผากับระดับอุณหภูมิ

Abstract

A process temperature control ring was developed from talc, magnesium carbonate, barium carbonate, iron oxide, kaolin, and quartz. The ring is formed by dry pressing method into a 2.5 cm diameter ring with the density 1.8 g/cm^3. The ring had the firing shrinkage after fired at 960 ˚C, 1100 ˚C, 1140 ˚C, and 1200 ˚C varied in the range 2.21-9.98 % with the standard deviation varied in the range 0.00-0.06. In this study, the properties of the ring were statistical analyzed. It was found that an increasing temperature resulted in an increasing firing shrinkage but had no effect on the standard deviation values. The study also presented the comparative properties of the ring with the one available in the market in terms of the average firing shrinkage, the standard deviation and the change of the shrinkage with temperature.

คำสำคัญ : เซรามิก, เตาเผา, อุปกรณ์ตรวจสอบอุณหภูมิ
Keywords : Ceramic, Kiln, Process Temperature Control Rings

[1]กรมวิทยาศาสตร์บริการ
*Corresponding author E-mail address : lada@dss.go.th

1. บทนำ (Introduction)

การเผาเป็นกระบวนการสุดท้ายของกระบวนการผลิตที่มีผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ออกมามีคุณภาพหรือเสียหายได้ การเผาเซรามิกใช้อุณหภูมิสูงถึงประมาณ 1200 องศาเซลเซียส มีการใช้เชื้อเพลิงประเภทต่างๆ เช่น ไม้ ไฟฟ้า แก๊ส ถ่านหิน เป็นต้น กระบวนการนี้จึงมีต้นทุนสูง และเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญ ต้องมีการควบคุม อุณหภูมิ เวลา และบรรยากาศ ให้ผลิตภัณฑ์ที่เผาได้รับ heat work และบรรยากาศที่เหมาะสม ทำให้เนื้อดินและเคลือบสุกตัว เกิดความแข็งแรงและสวยงาม heat work เป็นผลของทั้งอุณหภูมิและเวลา การตรวจสอบระดับและความสม่ำเสมอของ heat work ที่เกิดภายในเตาเผาจึงเป็นสิ่งจำเป็น ปัจจุบันมีการใช้ Thermocouple ควบคู่กับอุปกรณ์ตรวจสอบซึ่งมีหลายประเภท และล้วนเป็นอุปกรณ์ที่นำเข้าจากต่างประเทศ มีอายุการใช้งาน 1ครั้งต่อการเผาแต่ละครั้ง(1)

การใช้ Thermocouple ตรวจสอบการเผาเป็นการวัดอุณหภูมิ ไม่ได้วัด heat work ที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ ส่วนการใช้อุปกรณ์ประเภท pyrometric device จะสามารถตรวจสอบ heat work โดยใช้หลักการของการหดตัวหรือการเสียรูปเมื่อเกิดการสุกตัวของอุปกรณ์หลังเผา ระดับของการหดตัวหรือการสุกตัวของอุปกรณ์จะขึ้นกับระดับของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผา รายงานผลเป็น temperature equivalent มีหลายประเภท ได้แก่ ring bar และ cone โดยอุปกรณ์ที่มีลักษณะเป็นวงกลมหรือวงแหวน ที่มีในท้องตลาดได้แก่ Bullers Rings(2-3), PTCR Rings(4), TempCHEKs(5) เป็นต้น อุปกรณ์เหล่านี้ใช้สมบัติการหดตัวเมื่อเผาในการแปลผล มีเกรดต่างๆเพื่อให้สามารถตรวจสอบอุณหภูมิระดับต่างๆได้

งานวิจัยนี้ได้นำอุปกรณ์ตรวจสอบอุณหภูมิแบบวงกลมที่มีลักษณะแบน ที่ใช้สมบัติการหดตัวเมื่อเผาในการตรวจสอบ heat work ที่พัฒนาโดยกรมวิทยาศาสตร์บริการ(6) มาตรวจสอบสมบัติการหดตัวเมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างๆ เปรียบเทียบกับอุปกรณ์นำเข้าที่มีจำหน่ายในท้องตลาด เพื่อพิสูจน์ศักยภาพในการนำมาใช้ในการตรวจสอบ heat workในเตาเผาของกระบวนการผลิตเซรามิก

2. วิธีการวิจัย(Experimental)

2.1. การผลิตอุปกรณ์ตรวจสอบอุณหภูมิแบบวงกลม

2.1.1. วัตถุดิบและสูตรส่วนผสมวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตอุปกรณ์ฯได้แก่ ทัลคัม แมกนีเซียมคาร์บอเนต และแบเรียมคาร์บอเนต จากบริษัท ล็อกซเล่ย์ จำกัด เหล็กออกไซด์จากบริษัท ปะการัง เซรามิค ซัพพลาย จำกัด ดินขาวระนองเกรด cerafast และซิลิกาเกรดบริสุทธิ์ร้อยละ 99 (Pure 99 %) จากบริษัท อินดัสเตรียล มินเนอรัล ดิวิลอปเมนท์ จำกัด องค์ประกอบเคมีของวัตถุดิบแสดงดังตารางที่ 1 และส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมอุปกรณ์ฯ (ตัวอย่าง S)แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 องค์ประกอบเคมีของวัตถุดิบ และส่วนผสมของตัวอย่าง S

ร้อยละ	วัตถุดิบ	Fe_2O_3	TiO_2	Na_2O	K_2O	CaO	MgO	BaO	SiO_2	Al_2O_3	LOI
32.8	ทัลคัม	0.26	0.0	0.0	0.0	0.46	34.5	0.0	60.1	0.33	0.0
30.0	แมกนีเซียมคาร์บอเนต	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	42.9	0.0	0.0	0.0	54.9
3.0	แบเรียมคาร์บอเนต	0.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	99.0	0.0	0.0	0.7
3.0	ดินขาว	1.0	0.0	0.4	1.7	0.1	0.06	0.0	47.2	37.3	13.0
30.3	ซิลิกา	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	99.2	0.2	0.2
0.9	เหล็กออกไซด์	87.7	0.0	0.0	0.0	0.5	0.7	0.0	2.8	4.3	0.0

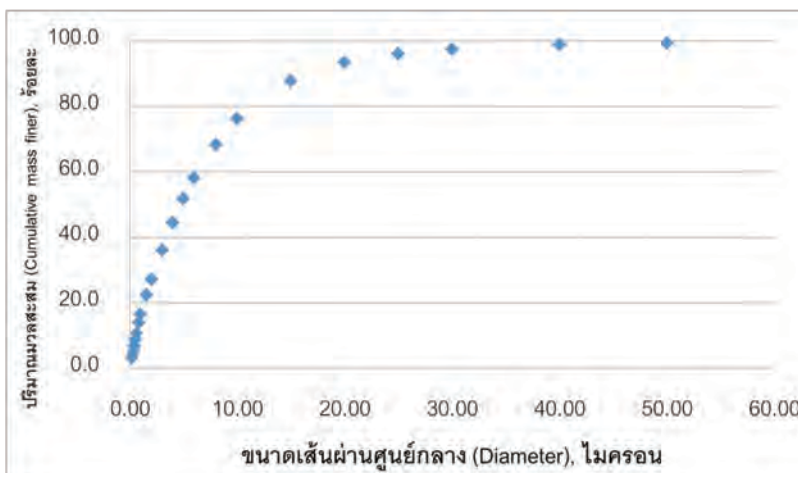
2.1.2. วิธีการเตรียมแกลนูลและการอัดขึ้นรูป บดส่วนผสมของวัตถุดิบปริมาณ 3 กิโลกรัม ที่ผสมน้ำในอัตราส่วน 45:55 ในหม้อบดขนาด 5 กิโลกรัมเป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยเติม STPP ร้อยละ 3 เป็นสารช่วยลอยกระจายตัว วัตถุดิบหลังบดมีการกระจายขนาดอนุภาคดังรูปที่ 1 และมีขนาดมัธยฐานที่ 4.76 ไมครอน เตรียมสลิปปริมาณ 60 กก. ผสมในเครื่องกวนให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน และใช้ Darvan ปรับความหนืดของสลิปให้ได้ ถ.พ. 1.80 กรัม/ลบ.ซม. ความหนืด 45 cps ก่อนนำสลิปที่ได้มาเตรียมแกรนูลด้วยเครื่องเตรียมผงพ่นแห้ง(Okawara รุ่น FL-12 ประเทศญี่ปุ่น) ที่สภาวะ rotational speed 50 เฮิรตซ์ และ feed rate 50 รอบต่อนาที เตรียมให้ได้แกลนูลปริมาณ 40 กก. ได้แกลนูลทรงกลมดังรูปที่ 2 นำแกลนูลที่ได้มาขึ้นรูปโดยการอัดในเครื่องอัดไฮดรอลิคด้วยมือ ใช้แบบโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. น้ำหนักตัวอย่าง 4.48 กรัม แรงอัด 2100 psi ควบคุมอุปกรณ์ฯที่ขึ้นรูปให้มีความหนาแน่น 1.80 ± 0.03 กรัม/ลบ.ซม.

ผ่านศูนย์กลางประมาณ 60 มม. ทดสอบสมบัติการหดตัวเมื่อเผา เปรียบเทียบผลระหว่างอุปกรณ์ฯที่จำหน่ายในท้องตลาดกับอุปกรณ์ฯที่พัฒนา ที่อุณหภูมิการเผา 960 ˚C 1100 ˚C 1140 ˚C และ 1200 ˚C ใช้สถิติในการประมวลผลเพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และหาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติดังกล่าวระหว่างตัวอย่าง A B และ S กับระดับอุณหภูมิการเผา

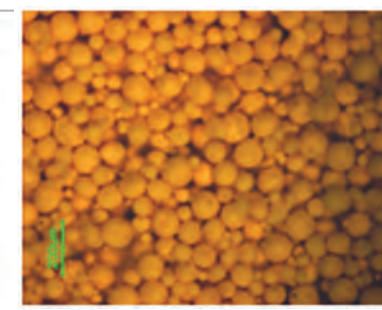
2.3. การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยการใช้สถิติ

2.3.1. ทดสอบระดับของอุณหภูมิมีผลต่อการหดตัวเมื่อเผาของตัวอย่างหรือไม่โดยใช้ One way ANOVA หากค่า F คำนวณ (F) มีค่ามากกว่าค่าวิกฤต F (F critical) แสดงว่าระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกันมีผลต่อร้อยละการหดตัวเมื่อเผาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

2.3.2. ทดสอบค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการหดตัวเมื่อเผาของตัวอย่าง A B และ S ขึ้นกับระดับอุณหภูมิการเผาที่เปลี่ยนแปลงหรือไม่ โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการหดตัวเมื่อเผากับระดับอุณหภูมิการเผาพิจารณาจากความ



รูปที่ 1 การกระจายขนาดอนุภาคของตัวอย่าง S



รูปที่ 2 แกลนูลสำหรับอัด

2.2. **การเปรียบเทียบสมบัติการหด**ตัวเมื่อเผาของอุปกรณ์ฯที่พัฒนาและอุปกรณ์ฯที่มีในท้องตลาด สุ่มอุปกรณ์ฯนำเข้าจากต่างประเทศที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมา 2 ตัวอย่าง ตัวอย่าง A มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 มม. และตัวอย่าง B มีขนาดเส้น

สัมพันธ์ระหว่างตัวแปรจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, r) และการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) หากค่า significance F มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่ขึ้นกับอุณหภูมิการเผาที่เปลี่ยนแปลงไปในรูปเชิงเส้น

2.3.3 ทดสอบความส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานการหดตัวเมื่อเผาของตัวอย่าง A B และ S แตกต่างกันหรือไม่ ตัวอย่างใดมีค่าต่ำสุด โดยเปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือค่าความแปรปรวนของการหดตัวเมื่อเผาระหว่างตัวอย่าง A และ B ระหว่างตัวอย่าง A และ S ระหว่างตัวอย่าง B และ S ด้วย F-test เมื่อ F คำนวณ (F) มีค่ามากกว่าค่าวิกฤต F (F critical) แสดงว่าความแปรปรวนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

2.3.4 ทดสอบค่าเฉลี่ยของการหดตัวเมื่อเผาของตัวอย่าง A B และ S ในแต่ละระดับอุณหภูมิแตกต่างกันหรือไม่ ตัวอย่างใดมีค่าสูงสุด โดยใช้ One way ANOVA หากค่า F คำนวณ (F) มีค่ามากกว่าค่าวิกฤต F (F critical) แสดงว่าชนิดของตัวอย่างที่แตกต่างกันมีผลต่อร้อยละการหดตัวเมื่อเผาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของการหดตัวเมื่อเผาระหว่างตัวอย่าง A และ B ระหว่างตัวอย่าง A และ S ระหว่างตัวอย่าง B และ S ด้วยt-test เมื่อค่า t คำนวณ (t) มีค่ามากกว่าค่า t วิกฤต (t critical) แสดงว่าค่าเฉลี่ยของตัวอย่างแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

2.3.5 ทดสอบการเปลี่ยนแปลงของค่าการหดตัวเมื่อเผากับระดับอุณหภูมิของแต่ละตัวอย่างตัวอย่างใดมีค่าสูง โดยเปรียบเทียบค่าความชันของกราฟระหว่างการหดตัวเมื่อเผากับระดับอุณหภูมิ ค่าความชันที่สูงแสดงว่ามีการเปลี่ยนแปลงของค่าการหดตัวเมื่อเผากับระดับอุณหภูมิสูง

2.4. วิธีทดสอบ

2.4.1. การเผาและการวัดอุณหภูมิเตาเผา ในการทดลองใช้เตาเผาไฟฟ้า ตัวอย่างจะถูกบรรจุในจ๊อคอร์เดียไรต์ขนาด 20x25x15 ซม. เผาเตาที่อัตราการเผา 2 ˚C/นาที ยืนไฟ 1 ชั่วโมง การตรวจสอบอุณหภูมิภายในจ๊อใช้ค่าที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐานชนิด R ซึ่งประกอบด้วยพลาตินัมผสมโรเดียมร้อยละ 13 และพลาตินัมบริสุทธิ์ที่มีการสอบเทียบอุณหภูมิเรียบร้อยแล้ว ควบคุมการวัดอุณหภูมิด้วยดาต้าล็อกเกอร์ จำนวน 8 จุดภายในจ๊อ ผลการตรวจสอบอุณหภูมิภายในจ๊อพบว่าอุณหภูมิในการเผาตัวอย่างมีความเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่มากกว่า 2 ˚C

2.4.2. การทดสอบการหดตัวเมื่อเผา ทดสอบการหดตัวเมื่อเผาโดยเปรียบเทียบขนาดก่อนและหลังเผาตามวิธีของ ASTM C326 — 09 Standard Test Method for Drying and Firing Shrinkages of Ceramic Whiteware Clays จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ 7-10 รายการ/ตัวอย่าง ขึ้นกับขนาดตัวอย่างที่สามารถบรรจุได้ในจ๊อ คำนวณร้อยละการหดตัวเมื่อเผาจากสมการ

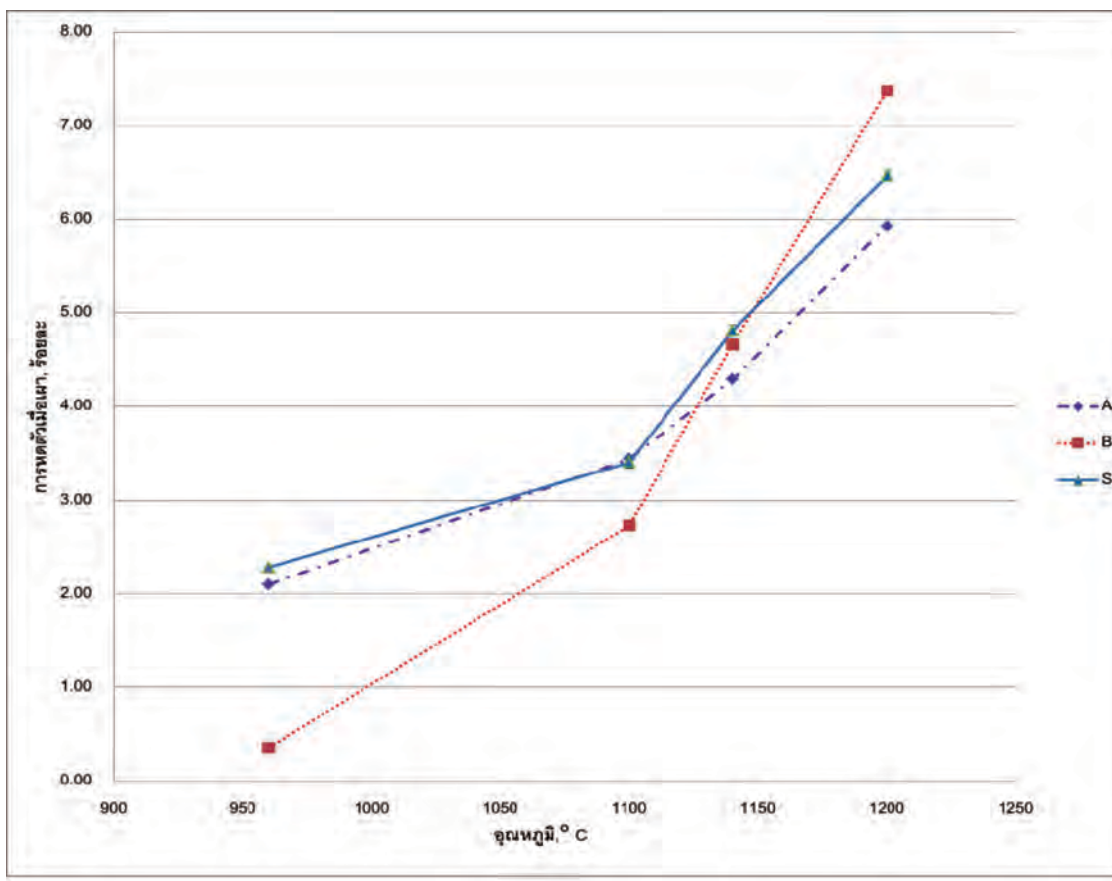
$$\text{การหดตัว, ร้อยละ} = \frac{\text{ความยาวเมื่อแห้} - \text{ความยาวเมื่อเผา}}{\text{ความยาวเมื่อแห้ง}} \times 100$$

3. ผลและวิจารณ์ผล (Results and discussion)

ผลการทดสอบการหดตัวเมื่อเผาของอุปกรณ์ฯที่มีในท้องตลาด(ตัวอย่าง A และ B) และอุปกรณ์ฯที่พัฒนา (ตัวอย่าง S) แสดงดังตารางที่ 2 รูปที่ 3 ค่าเฉลี่ย(mean) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ของการหดตัวเมื่อเผาของตัวอย่าง A มีค่าเฉลี่ยในช่วงร้อยละ 2.10-5.93 มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในช่วง 0.04-0.10 การหดตัวเมื่อเผาของตัวอย่าง B มีค่าเฉลี่ยในช่วงร้อยละ 0.35-7.38 มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในช่วง 0.04-0.11 การหดตัวเมื่อเผาของตัวอย่าง S มีค่าเฉลี่ยในช่วงร้อยละ 2.28-6.46 มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในช่วง 0.02-0.06 ผลการทดลองแสดงแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นของค่าเฉลี่ยการหดตัวเมื่อเผาเมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้นโดยตัวอย่าง A และ S มีสมบัติการหดตัวเมื่อเผาในช่วงอุณหภูมิ 960 ˚C- 1100 ˚C สูงกว่าตัวอย่าง B และที่อุณหภูมิ 1200 ˚C ตัวอย่าง A และ S มีสมบัติการหดตัวเมื่อเผาต่ำกว่าตัวอย่าง B การสรุปผลค่าเฉลี่ยหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละตัวอย่างในแต่ละระดับอุณหภูมิมีความแตกต่างอย่างเป็นนัยสำคัญหรือไม่ หรือการเปรียบเทียบสมบัติของอุปกรณ์ฯที่พัฒนากับที่มีจำหน่ายในท้องตลาดจำเป็นต้องใช้การวิเคราะห์ด้วยสถิติในการพิสูจน์ เพื่อสร้างความเชื่อถือในคุณภาพของอุปกรณ์ฯที่พัฒนา

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการหดตัว เมื่อเผาของตัวอย่าง A B และ S ที่อุณหภูมิ 960 ˚C 1100 ˚C 1140 ˚C และ 1200 ˚C

อุณหภูมิ (°C)	A				B				S			
	960	1100	1140	1200	960	1100	1140	1200	960	1100	1140	1200
1	2.10	3.52	4.20	5.96	0.35	2.70	4.90	7.39	2.29	3.41	4.83	6.45
2	2.10	3.42	4.20	5.96	0.35	2.73	4.71	7.41	2.27	3.35	4.73	6.43
3	2.15	3.37	4.15	5.91	0.35	2.72	4.58	7.33	2.27	3.37	4.79	6.43
4	2.15	3.47	4.20	5.96	0.36	2.72	4.65	7.36	2.27	3.37	4.77	6.43
5	2.10	3.42	4.20	5.91	0.36	2.76	4.60	7.36	2.31	3.35	4.73	6.45
6	2.05	3.52	4.35	5.95	0.36	2.68	4.52	7.33	2.29	3.35	4.77	6.43
7	2.15	3.42	4.35	5.86	0.36	2.78	4.71	7.42	2.29	3.37	4.77	6.43
8	2.10	3.37	4.40	5.95	-	2.78	4.63	7.35	2.31	3.51	4.89	6.61
9	2.05	3.37	4.45	5.95	-	-	-	-	2.29	3.47	4.85	6.47
10	2.05	3.52	4.35	5.86	-	-	-	-	2.27	3.49	4.91	6.49
ค่าเฉลี่ย	2.10	3.44	4.29	5.93	0.35	2.73	4.66	7.37	2.28	3.41	4.81	6.46
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.04	0.06	0.10	0.04	0.01	0.04	0.11	0.04	0.02	0.06	0.06	0.06



รูปที่ 3 กราฟการหดตัวเมื่อเผาของตัวอย่าง A B และ S

ผลการทดสอบระดับของอุณหภูมิมีผลต่อการหดตัวเมื่อเผาของตัวอย่าง A B และ S โดยใช้ One way ANOVA สรุปผลการทดสอบดังตารางที่ 3 พบว่าทุกตัวอย่างมีค่า F มากกว่าค่า F critical แสดงว่าระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกันมีผลต่อร้อยละการหดตัวเมื่อเผาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แปลว่าตัวอย่างหดตัวเมื่อเผาสูงขึ้นเมื่อเพิ่มระดับอุณหภูมิการเผา การหดตัวนี้เป็นกระบวนการสุกตัว (vitrification) ที่เกิดเมื่อเผาเนื้อดินเกิดการหลอมเป็นเนื้อแก้วบางส่วนเชื่อมอนุภาคที่มีความทนไฟเข้าด้วยกัน เป็นผลให้ความพรุนตัวลดลง เกิดการหดตัวเพิ่มขึ้น(7,8)

ตารางที่ 4 การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการหดตัวเมื่อเผากับระดับอุณหภูมิการเผา ของตัวอย่าง A B และ S โดยใช้ correlation coefficient และ Regression analysis

Regression statistics	A	B	S
correlation coefficient, r	0.31	0.49	0.05
significance F	0.69	0.51	0.95

ทดสอบความแปรปรวนของการหดตัวเมื่อเผาระหว่างตัวอย่าง A B และ S ที่อุณหภูมิ 960 ˚C 1100 ˚C 1140 ˚C และ 1200 ˚C โดยใช้ F-test สรุปผลการทดสอบดังตารางที่ 5 และตารางที่ 6 พบว่าผลการทดสอบระหว่างตัวอย่าง A และ S กับระหว่างตัวอย่าง A และ B ที่ 960 ˚C มีค่า F มากกว่า F critical แสดงว่าความแปรปรวนระหว่างตัวอย่างมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ แต่ที่อุณหภูมิสูงขึ้นมีค่า F มีค่าน้อยกว่า F critical แสดงว่าความแปรปรวนระหว่างตัวอย่าง A B และ S ไม่มีความแตกต่าง สรุปได้ว่าผลการทดสอบการหดตัวเมื่อเผาที่ 1100-1200 ˚C ของตัวอย่าง S มีความแปรปรวนอยู่ในระดับเดียวกับค่าของตัวอย่าง A และ B แต่ที่อุณหภูมิต่ำ 960 ˚C ความแปรปรวนของตัวอย่าง B และ S มีค่าต่ำกว่าของตัวอย่าง A อย่างเป็นนัยสำคัญ

ตารางที่ 3 การทดสอบระดับของอุณหภูมิมีผลต่อการหดตัวเมื่อเผาของตัวอย่าง A B และ S โดยใช้ One way ANOVA

อุณหภูมิ (°C)	A			B			S		
	average	F	Fcrit	average	F	Fcrit	average	F	Fcrit
960	2.10	5815.05	2.87	0.35	16409.54	2.96	2.28	11887.26	2.87
1100	3.44			2.73			3.41		
1140	4.29			4.66			4.81		
1200	5.93			7.37			6.46		

ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการหดตัวเมื่อเผากับระดับอุณหภูมิการเผา ของตัวอย่าง A B และ S ด้วยการพิจารณาค่า r และการวิเคราะห์การถดถอย แสดงดังตารางที่ 4 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าทุกตัวอย่างมีค่า r น้อย เข้าใกล้ 0 และมีค่า significance F มากกว่า 0.05 แสดงให้เห็นว่าไม่พบความสัมพันธ์ของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานกับอุณหภูมิ แปลว่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการหดตัวเมื่อเผาของตัวอย่าง A B และ S ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิการเผาที่เปลี่ยนแปลงไปในรูปเชิงเส้น การที่ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการหดตัวเมื่อเผาไม่ขึ้นกับระดับอุณหภูมิการเผาจะช่วยให้ผลการตรวจสอบ heat work ในการเผามีความแม่นยำไม่แปรตามระดับอุณหภูมิ

ตารางที่ 5 การทดสอบความแปรปรวนของการหดตัวเมื่อเผาระหว่างตัวอย่าง A B และ S ที่อุณหภูมิ 960 ˚C 1100 ˚C 1140 ˚C และ 1200 ˚C โดยใช้ F-test

Sample	960°C						1100°C						1140°C						1200°C					
	A	S	A	B	B	S	A	S	A	B	B	S	A	S	A	B	B	S	A	S	A	B	B	S
Mean	2.10	2.28	2.10	0.35	0.35	2.28	3.44	3.41	3.44	2.73	2.73	3.41	4.29	4.81	4.29	4.66	4.66	4.81	5.93	6.46	5.93	7.37	7.37	6.46
Variance	0.00156	0.00023	0.00156	0.00007	0.00007	0.00023	0.00378	0.00380	0.00378	0.00129	0.00129	0.00380	0.01058	0.00386	0.01058	0.01307	0.01307	0.00386	0.00173	0.00308	0.00173	0.00124	0.00124	0.00308
Observations	10	10	10	7	7	10	10	10	10	8	8	10	10	10	10	8	8	10	10	10	10	8	8	10
F	6.70920		22.18642			3.30687		1.00465	2.92394			2.93753	2.73970			1.23482	3.38303			1.77991	1.39165			2.47701
F Critical one-tail	4.02599		5.52341			5.52341		4.02599	4.82322			4.82322	4.02599			4.19705	4.19705			4.02599	4.82322			4.82322

ตารางที่ 6 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ F-test

อุณหภูมิ (˚C)	A และ S	A และ B	B และ S
960	ไม่เท่ากัน (S<A)	ไม่เท่ากัน (B<A)	เท่ากัน
1100	เท่ากัน	เท่ากัน	เท่ากัน
1140	เท่ากัน	เท่ากัน	เท่ากัน
1200	เท่ากัน	เท่ากัน	เท่ากัน

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของการหดตัวเมื่อเผาระหว่างตัวอย่าง A B และ S ที่อุณหภูมิ 960 ˚C 1100 ˚C 1140 ˚C และ 1200 ˚C โดยใช้ One way ANOVA แสดงดังตารางที่ 7 พบว่าในแต่ละอุณหภูมิ ค่า F มีค่ามากกว่าค่า Fcritical แสดงว่าชนิดของตัวอย่างที่แตกต่างกันมีผลต่อร้อยละการหดตัวเมื่อเผาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของการหดตัวเมื่อเผาระหว่างตัวอย่าง A และ B ระหว่างตัวอย่าง A และ S ระหว่างตัวอย่าง B และ Sโดยใช้ t-test แสดงดังตารางที่ 8 และสรุปผลการทดสอบดังตารางที่ 9 พบว่าค่า t มากกว่า t critical แสดงว่าค่าเฉลี่ยของตัวอย่างแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นที่อุณหภูมิ 1100 ˚C ค่า t น้อยกว่า t critical แสดงว่าค่าเฉลี่ยระหว่างตัวอย่าง B และ S ไม่แตกต่างกัน

สรุปผลการเปรียบเทียบการหดตัวเมื่อเผาในแต่ละระดับอุณหภูมิดังนี้ ที่อุณหภูมิ 960 ˚C ลำดับการหดตัวเมื่อเผาของตัวอย่าง S>A>B ที่อุณหภูมิ 1100 ˚C ลำดับการหดตัวเมื่อเผาของตัวอย่าง S = A>B ที่อุณหภูมิ 1140 ˚C ลำดับการหดตัวเมื่อเผาของตัวอย่าง S>B >A และที่อุณหภูมิ 1200 ˚C ลำดับการหดตัวเมื่อเผาของตัวอย่าง B > S>A แสดงว่าการหดตัวเมื่อเผาของตัวอย่าง S สูงอย่างเป็นนัยสำคัญ ยกเว้นที่อุณหภูมิ 1200 ˚C ที่มีค่าต่ำกว่าตัวอย่าง B

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของการหดตัวเมื่อเผาระหว่างตัวอย่าง A B และ S ที่อุณหภูมิ 960 ˚C 1100 ˚C 1140 ˚C และ 1200 ˚C โดยใช้ One way ANOVA

ตัวอย่าง	960°C			1100°C			1140°C			1200°C		
	average	F	Fcrit	average	F	Fcrit	average	F	Fcrit	average	F	Fcrit
A	2.10	12830.17	3.40	3.44	440.84	3.39	4.29	81.10	3.39	5.93	2247.71	3.39
B	0.35			2.73			4.66			7.37		
S	2.28			3.41			4.81			6.46		

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของการหดตัวเมื่อเผาระหว่างตัวอย่าง A และ B ระหว่างตัวอย่าง A และ S และระหว่างตัวอย่าง B และ S ที่อุณหภูมิ 960 ˚C 1100 ˚C 1140 ˚C and 1200 ˚C โดยใช้ t-test

ตัวอย่าง	960°C						1100°C						1140°C						1200°C					
	A	S	A	B	B	S	A	S	A	B	B	S	A	S	A	B	B	S	A	S	A	B	B	S
Mean	2.10	2.28	2.10	0.35	0.35	2.28	3.44	3.41	3.44	2.73	2.73	3.41	4.29	4.81	4.29	4.66	4.66	4.81	5.93	6.46	5.93	7.37	7.37	6.46
Variance	0.00156	0.00023	0.00156	0.00007	0.00007	0.00023	0.00378	0.00380	0.00378	0.00129	0.00129	0.00380	0.01058	0.00386	0.01058	0.01307	0.01307	0.00386	0.00173	0.00308	0.00173	0.00124	0.00124	0.00308
Observations	10	10	10	7	7	10	10	10	10	8	8	10	10	10	10	8	8	10	10	10	10	8	8	10
Pooled Variance	-	-	-	-		0.00017	0.00379		0.00269		0.00270		0.00722		0.01167		0.00789		0.00240		0.00152		0.00227	
df	12		10			15	18		16		16		18		16		16		18		16		16	
t Stat	-13.62		135.63			302.49	1.23		28.72		-27.29		-13.72		-7.36		-3.42		-24.39		-78.19		40.20	
t Critical two-tail	2.18		2.23			2.13	2.10		2.12		2.12		2.10		2.12		2.12		2.10		2.12		2.12	

ตารางที่ 9 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของการหดตัวเมื่อเผาระหว่างตัวอย่าง A และ B ระหว่างตัวอย่าง A และ S และระหว่างตัวอย่าง B และ S ที่อุณหภูมิ 960 ˚C 1100 ต่ำ 1140 ˚C and 1200 ˚C โดยใช้ t-test

อุณหภูมิ (˚C)	A และ S	A และ B	B และ S
960	ไม่เท่ากัน (A<S)	ไม่เท่ากัน (B<A)	ไม่เท่ากัน (B<S)
1100	เท่ากัน	ไม่เท่ากัน (B<A)	ไม่เท่ากัน (B<S)
1140	ไม่เท่ากัน (A<S)	ไม่เท่ากัน (A<B)	ไม่เท่ากัน (B<S)
1200	ไม่เท่ากัน (A<S)	ไม่เท่ากัน (A<B)	ไม่เท่ากัน (S<B)

ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงของค่าการหดตัวเมื่อเผากับระดับอุณหภูมิโดยเปรียบเทียบค่าความชันของกราฟ (slope) จากสมการเชิงเส้นแสดงดังตารางที่ 10 ค่าความชันสูงแสดงว่ามีการเปลี่ยนแปลงของค่าการหดตัวเมื่อเผากับระดับอุณหภูมิสูง ตัวอย่าง B มีการเปลี่ยนแปลงของค่าการหดตัวเมื่อเผากับระดับอุณหภูมิสูงกว่าตัวอย่าง A และ S ทุกช่วงอุณหภูมิการทดลอง ในขณะที่ ตัวอย่าง S และ A มีการเปลี่ยนแปลงของค่าการหดตัวเมื่อเผากับระดับอุณหภูมิใกล้เคียงกัน

อุปกรณ์ฯที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าการหดตัวเมื่อเผากับระดับอุณหภูมิสูง ผนวกกับค่าการหดตัวเมื่อเผาสูงและค่าการหดตัวเมื่อเผามีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำจะทำให้ผลการตรวจสอบที่ระดับอุณหภูมิใกล้เคียงมีค่าที่แตกต่างกันและแม่นยำมากยิ่งขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่จำหน่ายในท้องตลาด A และ B พบว่าตัวอย่าง S มีค่าการหดตัวเมื่อเผาสูงยกเว้นที่อุณหภูมิสูง(1200 ˚C) มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในระดับเดียวกับตัวอย่างที่จำหน่ายในท้องตลาดและมีค่าต่ำที่อุณหภูมิต่ำ(960˚C) อีกทั้งมีค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าการหดตัวเมื่อเผาอยู่ในระดับเดียวกับตัวอย่างที่จำหน่ายในท้องตลาด A แต่มีค่าต่ำกว่าตัวอย่าง B

ตารางที่ 10 ค่าความชันของกราฟจากสมการเชิงเส้นของการหดตัวเมื่อเผากับระดับอุณหภูมิ ของตัวอย่าง A B และ S

ตัวอย่าง	ความชันของกราฟ
A	0.0151
B	0.0280
S	0.0166

4. สรุปผลการทดลอง (Conclusion)

อุปกรณ์ตรวจสอบอุณหภูมิแบบวงกลมที่พัฒนาขึ้นจากทัลคัม แมกนีเซียมคาร์บอเนต แบเรียมคาร์บอเนต เหล็กออกไซด์ ดินขาว และควอตซ์ และขึ้นรูปด้วยวิธีอัดแห้ง มีสมบัติการหดตัวเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 960 ˚C 1100 ˚C 1140 ˚C และ 1200 ˚C อยู่ในช่วงร้อยละ 2.21-9.98 มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.00-0.06 ผลการเปรียบเทียบสมบัติการหดตัวเมื่อเผาของอุปกรณ์ฯที่พัฒนากับอุปกรณ์ที่จำหน่ายในท้องตลาดด้วยวิธีทางสถิติแสดงให้เห็นว่า

1)อุปกรณ์ฯที่พัฒนาและจำหน่ายในท้องตลาดมีค่าการหดตัวเมื่อเผาเพิ่มขึ้นเมื่อระดับอุณหภูมิเพิ่มขึ้น

2)อุปกรณ์ฯที่พัฒนามีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการหดตัวเมื่อเผาไม่ขึ้นกับระดับอุณหภูมิการเผาเช่นเดียวกับอุปกรณ์ที่จำหน่ายในท้องตลาดอุปกรณ์ฯ

3)อุปกรณ์ฯที่พัฒนามีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือความแปรปรวนอยู่ในระดับเดียวกับค่าของตัวอย่างอุปกรณ์ที่จำหน่ายในท้องตลาด โดยที่อุณหภูมิต่ำ 960 ˚C ความแปรปรวนของอุปกรณ์ฯที่พัฒนามีค่าต่ำกว่าของอุปกรณ์ที่จำหน่ายในท้องตลาด A อย่างเป็นนัยสำคัญ

4)อุปกรณ์ฯที่พัฒนามีค่าเฉลี่ยของการหดตัวเมื่อเผา เท่ากับอุปกรณ์ที่จำหน่ายในท้องตลาด A ที่อุณหภูมิ 1100 ˚C และมีค่าสูงกว่าอุปกรณ์ที่จำหน่ายในท้องตลาด A และ B อย่างเป็นนัยสำคัญ ที่อุณหภูมิ 960 ˚C และ 1140 ˚C แต่อุปกรณ์ฯที่พัฒนามีค่าเฉลี่ยของการหดตัวเมื่อเผาต่ำกว่าอุปกรณ์ที่จำหน่ายในท้องตลาด B อย่างเป็นนัยสำคัญ ที่อุณหภูมิ 1200 ˚C

5)อุปกรณ์ฯที่พัฒนามีการเปลี่ยนแปลงของค่าการหดตัวเมื่อเผากับระดับอุณหภูมิอยู่ในระดับใกล้เคียงกับอุปกรณ์ที่จำหน่ายในท้องตลาด A แต่ต่ำกว่าตัวอย่าง B

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณกรมวิทยาศาสตร์บริการที่สนับสนุนการวิจัย และขอขอบคุณนางสาวปริดา จำปีเรื่อง ที่ดำเนินการเตรียมตัวอย่างและทดสอบเพื่อหาข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการพัฒนางานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง (References)

(1) ลดา พันธ์สุขุมธนา. การตรวจสอบอุณหภูมิการเผา. วารสารเซรามิกส์, 2554, 15(36), 22-34

(2) Using bullers rings in statistical process control (Online). (Viewed 8 June 2014). Available from:http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8172

(3) Bullers™ pyrometric Rings (Online). (Viewed 8 June 2014). Available from : http://www.mantectechnicalceramics.com/sites/default/files/bullers_rings_brochure.pdf

(4) Process temperature control rings (PTCR) (Online). (Viewed 8 June 2014). Available from: http://www.ferro.com/nr/rdonlyres/74f71fe1-407d-4a48-b386-24e90542a3fa/0/is04_e_ptcr.pdf

(5) TempCHEKs (Online). (Viewed 8 June 2014). Available from: http://www.ortonceramic.com/products/tempcheks/

(6) กรมวิทยาศาสตร์บริการ. รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจสอบอุณหภูมิสำหรับเตาเผาอุณหภูมิสูง (ระดับต้นแบบ). 2556.

(7) REED, S. J. Introduction to the principles of ceramic processing. New York : John Wiley & Sons, 1989, pp.464-466

(8) KINGERY, W.D., H. K. BOWEN, and Donald R. UHLMANN. Introduction to ceramics. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons, 1991, pp. 495-497, pp.507-508