



การศึกษาปัจจัยของวัสดุซิลิกาเพื่อพัฒนาร่วมเป็นวัสดุทนไฟสำหรับใช้
ในอุตสาหกรรมภาคการเกษตรพลังงานความร้อน

**STUDY THE EFFECT OF MIXING SILICA IN REFRACTORY
MATERIALS USING FOR THERMAL AGRICULTURAL
MANUFACTURING**

อาจารย์ อนุชา บุญเกิด

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ยอดสุดใจ

อาจารย์ ดร.รัตนกร ระวิงกุล

อาจารย์ ดร.วีรพล นามบุญเรือง

อาจารย์ ดร.ณัฐนันท์ ศุภคด

งานวิจัยนี้ได้ผ่านการพิจารณาจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ(วช.)
และได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานงบประมาณ ปีงบประมาณ 2556

มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง

พ.ศ. 2556



ใบรับรองงานวิจัย

สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง

เรื่อง การศึกษาปัจจัยของวัสดุซิลิกาเพื่อพัฒนาร่วมเป็นวัสดุทนไฟสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมภาคการเกษตรพลังงานความร้อน

Study the effect of mixing silica in refractory materials using for thermal agricultural manufacturing

หัวหน้าโครงการวิจัย

อาจารย์ อนุชา บุญเกิด

(B.Eng, M.Eng)

ผู้ร่วมวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันชัย ยอดสุดใจ

(B.Eng., M.Eng., D.Eng)

ผู้ร่วมวิจัย

อาจารย์ ดร. รัตนากร ระวังกุล

(B.Eng., M.Eng., Ph.D)

ผู้ร่วมวิจัย

อาจารย์ ดร. วีรพล นามบุญเรือง

(B.Eng., M.Eng., Ph.D)

ผู้ร่วมวิจัย

อาจารย์ ดร. ณัฐนันท์ ศุภคณ

(B.Eng., M.Eng., Ph.D)

สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชญาพร โพธิ์สุวรรณ)

ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

วันที่..... เดือน..... พ.ศ.....

การศึกษาปัจจัยของวัสดุซิลิกาเพื่อพัฒนาร่วมเป็นวัสดุทนไฟสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมภาค
การเกษตรพลังงานความร้อน

STUDY THE EFFECT OF MIXING SILICA IN REFRACTORY MATERIALS USING FOR
THERMAL AGRICULTURAL MANUFACTURING

โดย

อาจารย์ อนุชา บุญเกิด
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ขอดสุคใจ
อาจารย์ ดร.รัตนกร ระวังกุล
อาจารย์ ดร.วีรพล นามบุญเรือง
อาจารย์ ดร.ณัฐนันท์ ศุภคต

เสนอ

งานวิจัยนี้ได้ผ่านการพิจารณาจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ(วช.)
และได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานงบประมาณ ปีงบประมาณ 2556

มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง

พ.ศ. 2556

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมของการนำวัสดุจำพวกซิลิกาที่มีราคาถูกลงและมีคุณภาพที่เพียงพอสำหรับใช้กับอุตสาหกรรมเกษตรท้องถิ่น มาบูรณาการร่วมเพื่อพัฒนาเป็นวัสดุทนไฟ ซึ่งจะช่วยให้ลดค่าใช้จ่ายในส่วนของการบำรุงรักษาที่ต้องใช้วัสดุทนไฟที่นำเข้าจากต่างประเทศทั้งหมด จากการทดสอบคุณสมบัติด้านเคมีและกายภาพของวัสดุทนความร้อนผสมกับซิลิกาที่ปริมาณร้อยละ 15, 30, 45 และ 60 โดยน้ำหนัก พบว่า การเพิ่มปริมาณซิลิกา ผลให้ค่า Cold crushing strength (CCS) ของวัสดุทนความร้อนมีค่าลดลง เมื่อทดสอบชิ้นตัวอย่างที่ 815 องศาเซลเซียส และพบว่า ที่อายุการบ่มเพิ่มมากขึ้น มีผลต่อค่ากำลังอัดที่สูงขึ้น และพบว่าลักษณะทางกายภาพของชิ้นตัวอย่าง หลังทดสอบไม่พบการแตกร้าวเนื่องจากการขยายและหดตัวเนื่องจากอุณหภูมิซึ่งน่าจะเกิดจากการที่ SRM มีวัสดุซิลิกาผสมอยู่จึงมีคุณสมบัติด้านการต้านทานการขยายและหดตัวเนื่องจากอุณหภูมิได้ดี เมื่อพิจารณาค่า Permanent Linear Change (PLC) ของวัสดุ SRM พบว่ามีแนวโน้มที่ลดลงตามอายุการบ่มซึ่งค่าต่ำสุดที่อายุ 28 วัน และมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มส่วนผสมของซิลิกา

อย่างไรก็ดีเมื่อทำการเผาวัสดุที่อุณหภูมิสูงขึ้นคือที่ 1200 °C และ 1500 °C พบว่าวัสดุทนไฟที่ผสมซิลิกาทุกสัดส่วนมีรอยแตกร้าวขึ้น เนื่องจากการขยายตัวและหดตัว จากการศึกษาทำให้ทราบว่าซิลิกาสามารถช่วยลดการยืดหดตัวที่อุณหภูมิที่ไม่สูงมาก ส่วนสมบัติทางกายภาพชนิดอื่นที่ทำการทดสอบคือค่าหน่วยน้ำหนัก และค่าการนำความร้อน มีทิศทางการลดลงคล้ายกันคือ มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกา จากการพิจารณาตามมาตรฐานแล้วพบว่า มีเพียงวัสดุ SRM15 เท่านั้นที่ผ่านคุณสมบัติทางด้านกำลังอัด ดังนั้นอาจจะกล่าวได้ว่าวัสดุ SRM มีคุณสมบัติที่เพียงพอสำหรับใช้เป็นวัสดุทนไฟแบบ Conventional Cast/Pound ที่อุณหภูมิ 815 องศาเซลเซียส สำหรับอุตสาหกรรมด้านพลังงานความร้อนการเกษตรท้องถิ่น

Abstract

This work emphasizes on the studying of using silica mixed with the conventional refractory materials. This is for reducing of refractory cost that is mostly imported from abroad. Silica materials are mixed to conventional refractory grade gunning 3000°F with varying silica contents of 15, 30, 45 and 60% by weight at cured times of 7, 14 and 28 days. The chemical and ohysical properties are observed. Results show that the cold crushing strength, flexural strength and bulk density increase with increasing cured times. On the other hand, the permanent linear change (PLC) decreases with increasing cured times. It is also found that adding more silica contents can increase the durability of cracking property.

However, at very high temperature, silica cannot resist the cracking due to temperature changes. This study concludes that the silica refractory materials (SRM) shows the enough quality to produce as the refractory material, type of the Conventional Cast/Pound (815 °C) for the agro-industry using the thermal energy of Thailand

กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยการได้รับความช่วยเหลือแนะนำจากหลายส่วน โดยเฉพาะผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ยอดสุดใจ หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งเป็นที่ปรึกษาโครงการวิจัย ได้กรุณาให้คำแนะนำข้อคิดเห็นตรวจสอบและแก้ไขงานวิจัยมาโดยตลอดขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.วีรพล นามบุญเรือง ดร.รัตนกร ระวังกุล และ ดร. ณัฐนันท์ สุขคด ที่ให้คำปรึกษาแนะนำในทุกๆด้านตลอดจน คุณสมล ห่อชัย และ คุณอตุลย์ แก้วทอง และเจ้าหน้าที่ของบริษัท ที่กรุณาประสานงานสำหรับการทดสอบ Silica refractory ที่โรงงานอุตสาหกรรมความร้อน จ.ระยอง และ ชลบุรี จนได้ผลที่น่าพอใจ รวมถึงเจ้าหน้าที่สาขาวิชาโยธาและสถาปัตยกรรม มรภ.หมู่บ้านจอมบึงทุกท่านที่ให้ความสะดวกด้านอำนวยความสะดวก และประสานงาน ในการทำวิจัยด้วยดีมาโดยตลอด รวมถึงนักศึกษาระดับปริญญาตรี ปริญญาโท และ ปริญญาเอก จากหลายแห่ง ที่อุทิศแรงกายและสติปัญญาอันเกษม จึ่งทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ท้ายนี้ผู้เขียนขอโน้มรำลึกถึงอำนาจบารมีของคุณพระศรีรัตนตรัย และสิ่งศักดิ์สิทธิ์ทั้งหลายที่อยู่ในสากลโลก อันเป็นที่พึ่งให้มีสติปัญญาในการจัดทำวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยในฐานะหัวหน้าทีมวิจัยจึงขอให้เป็นกตเวทิตาแด่บิดา มารดา ครอบครัวของคณะวิจัยฯ ตลอดจนผู้เขียนหนังสือและบทความต่าง ๆ ที่ให้ความความกระจำและความรู้จนสามารถทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

อาจารย์ อนุชา บุญเกิด

สาขาโยธาและสถาปัตยกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง

(ในฐานะตัวแทนคณะทีมงานวิจัยฯ)

สารบัญ

Contents

บทคัดย่อ	1
Abstract	2
กิตติกรรมประกาศ	3
สารบัญ	4
สารบัญรูปภาพ	6
สารบัญตาราง	8
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	9
บทที่ 1	10
บทนำ	10
1.1 คำนำ	10
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	11
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	11
1.4 ระยะเวลาทำการวิจัย และแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย	12
	12
บทที่ 2	13
หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	13
2.1 วัสดุทนไฟ (Refractory Materials)	13
2.2 การจำแนกและชนิดของวัสดุทนไฟ (Classification and Types)	14
2.3 สมบัติเฉพาะของวัสดุทนไฟ (Characteristic Properties of Refractory materials)	16
2.3.1 ความทนไฟ (Refractoriness)	16
2.3.2 การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน (Thermal of Expansion)	18
2.3.3 การทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน (Thermal Shock Resistance)	19
2.4 ทราาย (ซิลิกา)	21
2.4.1 ทราายแก้ว (Silica Sand)	21
2.4.2 ทราายโครไมด์ (Chromte sand)	22
2.2.3 ทราายเซอร์คอน (Zircon sand)	22

2.2.4	ทรายโอลิวีน (Olivine Sand)	23
2.2.5	ทรายอลูมิเนียมซิลิเกต (Aluminum Silicate)	23
2.2.6	ทรายซีโอทู (CO ₂ sand)	24
2.2.7	ทรายซิลิกา	24
2.3	รายงานการวิจัยต่างประเทศ	25
บทที่ 3		27
3.1	การทดสอบด้านวัสดุวิศวกรรมขั้นสูง (Advance Materials Engineering, AME)	28
บทที่ 4		33
	ผลการทดสอบและวิจารณ์	33
4.1	คุณสมบัติทางเคมี	33
4.2	คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุทนไฟผสมซิลิกา (Silica refractory materials (SRM))	34
4.3	การทดสอบวัสดุ SRM กับ บางชิ้นส่วนที่กระทบกับความร้อนของ ภาคอุตสาหกรรมการเกษตรสำหรับ Gunning Lining type	43
บทที่ 5		44
	สรุปผล	44
	เอกสารอ้างอิง	45
	ภาคผนวก	48

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1 แสดงขนาดต่างๆของทรายที่พบกันทั่วไปในประเทศไทย (a) ทรายหยาบ (b) ทรายกลาง (c) ทรายละเอียด	25
รูปที่ 2 สาธิตวิธีการทดสอบ ball in hand test	27
รูปที่ 3 แสดงแผนภูมิการให้ความร้อนของวัสดุทนไฟ ที่อัตราส่วนซิลิการ้อยละ 0, 15, 30, 45 และ 60 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 815 ° C	29
รูปที่ 4 แสดงแผนภูมิการให้ความร้อนของวัสดุทนไฟ ที่อัตราส่วนซิลิการ้อยละ 0, 15, 30, 45 และ 60 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 1200 ° C	29
รูปที่ 5 แสดงแผนภูมิการให้ความร้อนของวัสดุทนไฟ ที่อัตราส่วนซิลิการ้อยละ 0, 15, 30, 45 และ 60 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 1500 ° C	30
รูปที่ 6 แสดงเครื่องผสมไฟฟ้า	31
รูปที่ 7 แสดงแผนงานการทดสอบ	32
รูปที่ 8 แสดงค่า CCS ของวัสดุทนไฟผสมกับซิลิกาที่ปริมาณร้อยละ 0, 15 ,30, 45, และ 60 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิการเผา 850 °C	35
รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CCS ของวัสดุทนไฟที่อัตราส่วนซิลิกาแตกต่างกัน ณ อุณหภูมิการเผาที่ 850 °C ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน	35
รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CCS ของวัสดุทนไฟควบคุม ณ อุณหภูมิการเผาที่ 850, 1200 และ 1500 °C	36
รูปที่ 11 แสดงค่า PCL ของวัสดุทนไฟผสมกับซิลิกาที่ปริมาณร้อยละ 0, 15 ,30, 45, และ 60 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิการเผา 850 °C	37
รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า PLC ของวัสดุทนไฟที่อัตราส่วนซิลิกาแตกต่างกัน ณ อุณหภูมิการเผาที่ 850 °C ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน	38
รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า PLC ของวัสดุทนไฟควบคุม ณ อุณหภูมิการเผาที่ 850, 1200 และ 1500 °C	39
รูปที่ 14 แสดงค่าหน่วยน้ำหนัก (Density) ของวัสดุทนไฟผสมกับซิลิกาที่ปริมาณร้อยละ 0, 15 ,30, 45, และ 60 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิการเผา 850 °C	40
รูปที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยน้ำหนัก (density) ของวัสดุทนไฟที่อัตราส่วนซิลิกาแตกต่างกัน ณ อุณหภูมิการเผาที่ 850 °C ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน	41

รูปที่ 16 แสดงค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของวัสดุทนไฟผสมกับซิลิกาที่ปริมาณร้อยละ 0, 15 ,30, 45, และ 60 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิการเผา 850 °C	42
รูปที่ 17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity)ของวัสดุทนไฟที่อัตราส่วนซิลิกาแตกต่างกัน ณ อุณหภูมิการเผาที่ 850 °C ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน	42
รูปที่ 18 ทำการเตรียมชิ้นส่วนก่อนการขึ้นรูปด้วย Silica refractory	43
รูปที่ 19 ตำแหน่งวัสดุทนไฟหลังทำการที่ผสม Silica refractory แล้ว	43
รูปภาคผนวกที่ 1. แสดงการหล่อโมดูล I. ของชิ้นส่วนเตากระทบบความร้อนของ silica refractory แบบ casting type	50
รูปภาคผนวกที่ 2. แสดงการหล่อโมดูล II. ของชิ้นส่วนเตากระทบบความร้อนของ silica refractory แบบ casting type	50
รูปภาคผนวกที่ 3. แสดงการหล่อโมดูล III. ของชิ้นส่วนเตากระทบบความร้อนของ silica refractory แบบ casting type	51
รูปภาคผนวกที่ 4. แสดงการหล่อโมดูล IV. ของชิ้นส่วนเตากระทบบความร้อนของ silica refractory แบบ casting type	51
รูปภาคผนวกที่ 5. แสดงการหล่อโมดูลของชิ้นส่วนปล่องควันกระทบบความร้อนของ silica refractory แบบ casting type(1)	52
รูปภาคผนวกที่ 6. แสดงการหล่อโมดูลของชิ้นส่วนปล่องควันกระทบบความร้อนของ silica refractory แบบ casting type (2)	52
รูปภาคผนวกที่ 7. แสดงการหล่อโมดูลของชิ้นส่วนปล่องควันกระทบบความร้อนขนาดใหญ่ของ silica refractory แบบ casting type (1)	53
รูปภาคผนวกที่ 8. แสดงการหล่อโมดูลของชิ้นส่วนปล่องควันกระทบบความร้อนขนาดใหญ่ของ silica refractory แบบ casting type (2)	53
รูปภาคผนวกที่ 9. แสดงการหล่อของชิ้นส่วนกระทบบความร้อนฝาเตาหลอมของ silica refractory แบบ casting type (1)	54
รูปภาคผนวกที่ 10. แสดงการหล่อของชิ้นส่วนกระทบบความร้อนฝาเตาหลอมของ silica refractory แบบ casting type (2)	54
รูปภาคผนวกที่ 11. แสดงการหล่อของชิ้นส่วนรางกระทบบความร้อนของ silica refractory แบบ casting type (1)	55
รูปภาคผนวกที่ 12. แสดงการหล่อของชิ้นส่วนรางกระทบบความร้อนของ silica refractory แบบ casting type (2)	55

รูปภาคผนวกที่ 13. แสดงการหล่อของชิ้นส่วนสำเร็จรูปของรางกระแทกความร้อนของ silica refractory แบบ casting type (1)	56
รูปภาคผนวกที่ 14. แสดงการหล่อของชิ้นส่วนสำเร็จรูปของรางกระแทกความร้อนของ silica refractory แบบ casting type (1)	56
รูปภาคผนวกที่ 15. แสดงการหล่อของชิ้นส่วนสำเร็จรูปของรางกระแทกความร้อนของ silica refractory แบบ casting type (3)	57
รูปภาคผนวกที่ 16. แสดงการหล่อของชิ้นส่วนสำเร็จรูปของรางกระแทกความร้อนของ silica refractory แบบ casting type (4)	57
รูปภาคผนวกที่ 17. แสดงการหล่อผนังภายในกระแทกความร้อนของ silica refractory แบบ casting type (1)	58
รูปภาคผนวกที่ 18. แสดงการหล่อผนังภายในกระแทกความร้อนของ silica refractory แบบ casting type (2)	58

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 วัสดุทนไฟที่แบ่งตามสมบัติทางเคมีเป็นกลุ่มกรด กลาง ด่าง [4]	22
ตารางที่ 2 การแบ่งวัสดุทนไฟตามลักษณะการใช้งาน[4]	22
ตารางที่ 3 ส่วนประกอบทางเคมีของทราย	24
ตารางที่ 4 ส่วนประกอบทางเคมีของทรายโครไมด์	33
ตารางที่ 5 ตัวเลขแสดงขนาดของเม็ดทรายซิลิกา (%)	34
ตารางที่ 6. แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของ Gunning castable refractory	33
ตารางที่ 7. แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของทรายที่ใช้ในการทดลอง	34
ตารางภาคผนวกที่ 1 แสดงผลการทดสอบค่า Cold crushing strength (CCS) ของวัสดุทนไฟผสมซิลิกา ที่อุณหภูมิการเผา 850 °C	48
8	
ตารางภาคผนวกที่ 2 แสดงผลการทดสอบค่า Cold crushing strength (CCS) ของวัสดุทนไฟควบคุม ที่อุณหภูมิการเผา 850 °C, 1200 °C, 1500 °C	48

ตารางภาคผนวกที่ 3 แสดงผลการทดสอบค่า Permanent linear change (PLC) ของวัสดุทนไฟผสมซิลิกา ที่อุณหภูมิการเผา 850 °C	48
ตารางภาคผนวกที่ 4 แสดงผลการทดสอบค่าน้ำหนัก (Density) ของวัสดุทนไฟผสมซิลิกา ที่อุณหภูมิการเผา 850 °C	49
ตารางภาคผนวกที่ 5 แสดงผลการทดสอบค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของวัสดุทนไฟผสมซิลิกา ที่อุณหภูมิการเผา 850 °C	49

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

SRM	=	Silica refractory materials
SRMC	=	Silica refractory materials for control
CCS	=	Cold crushing strength
MOR	=	Modulus of rupture
XRF	=	X-Ray Fluorescence

บทที่ 1

บทนำ

1.1 คำนำ

ในปัจจุบันการพัฒนาเศรษฐกิจของไทยในรอบไม่เกิน 10 กว่าปีที่ผ่านมาการเติบโตของภาวะเศรษฐกิจที่มีทิศทางที่สูงขึ้นทั้งภาคการเกษตรรวมถึงภาคอุตสาหกรรมที่มีอัตราการเพิ่มขึ้นเป็นลำดับ สำหรับอุตสาหกรรมนั้นมีทั้งภาคอุตสาหกรรมขนาดใหญ่จนถึงกลางและเล็กซึ่งรวมถึงอุตสาหกรรมภาคการเกษตรที่เป็นตัวขับเคลื่อนภาคเศรษฐกิจสำหรับท้องถิ่นซึ่งจะอาศัยวัตถุดิบและผลิตผลทางการเกษตรในท้องถิ่นเป็นหลัก เป็นที่ทราบกันดีว่าในสภาวะการแข่งขันทางธุรกิจอุตสาหกรรมการเกษตรท้องถิ่นจะประสบปัญหาด้านนี้เป็นอันดับแรกๆ กล่าวคือด้าน “ต้นทุนการผลิต” ซึ่งหมายถึง ต้นทุนด้านวัตถุดิบ, ต้นทุนด้านแรงงาน และรวมไปถึง ด้านค่าใช้จ่ายเครื่องจักรและซ่อมบำรุงรักษา โดยเฉพาะปัจจัยหลังนี้เป็นปัจจัยที่สำคัญอีกปัจจัยหนึ่งที่มองข้ามไปไม่ได้ เช่นเดียวกันเช่นเดียวกับสองปัจจัยแรกที่กล่าวมาข้างต้น

ดังที่กล่าวมาข้างต้นแล้วนั้น ภาคอุตสาหกรรมการเกษตรท้องถิ่นเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมหลายๆประเภทที่ใช้พลังงานความร้อนเป็นปัจจัยหลักในขบวนการผลิตภัณฑ์เช่นเดียวกับโรงงานขนาดใหญ่ โดยมีภาคส่วนของขบวนการผลิตที่ต้องสัมผัสกับความร้อนตลอดเวลาเช่น หม้อเผา (Kiln) ในอุตสาหกรรมภาชนะดินเผาและเซรามิกส์ เตาเผาให้พลังงานความร้อน (Incinerator) สำหรับโรงงานอบผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เป็นต้น ซึ่งโรงงานเหล่านี้จำเป็นต้องใช้วัสดุทนไฟที่มีคุณภาพและเหมาะสมกับอุณหภูมิของแต่ละประเภทของอุตสาหกรรม โดยเฉพาะในปัจจุบันการใช้วัสดุทนไฟเมื่อมีการซ่อมบำรุงนั้นผลิตภัณฑ์ร้อยละ 80-90 ถูกนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีราคาที่สูงขึ้นจึงทำให้ค่าใช้จ่ายด้านซ่อมบำรุงนั้นสูงตามไปด้วย และจะส่งผลกระทบต่อต้นทุนของการผลิตนั้นที่สูงขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะประยุกต์วัสดุทนไฟผสมกับวัสดุจำพวกซิลิกา (Silica materials) ที่มีราคาถูกและมีคุณภาพที่เพียงพอสำหรับใช้กับอุตสาหกรรมเกษตรท้องถิ่น ซึ่งจะทำให้ลดค่าใช้จ่ายในส่วนของการซ่อมบำรุงที่ต้องใช้วัสดุทนไฟที่นำเข้าจากต่างประเทศทั้งหมด โดยจะส่งผลในภาพรวมของต้นทุนการผลิตที่ลดลงและทำให้โรงงานอุตสาหกรรมท้องถิ่นเหล่านี้สามารถสู้กับภาวะเศรษฐกิจซึ่งนับวันจะมีการแข่งขันที่สูงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อทดสอบคุณสมบัติด้านเคมี, ฟิสิกส์ และกำลังทางกลของวัสดุทนไฟ(3000 F°ควบคุม) และวัสดุทนไฟผสมวัสดุซิลิกา (Silica materials)

1.2.2 เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสม(Optimization of Proportion) ของวัสดุทนไฟที่ผสมวัสดุซิลิกาสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมภาคการเกษตรท้องถิ่น

1.2.3 วิเคราะห์และเปรียบเทียบต้นทุน (Cost analysis) ของการนำเข้า Refractory จากต่างประเทศกับการประยุกต์ Refractory ที่ผสมซิลิกาที่มาตรฐานและ Capacity เดียวกัน

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 ทนไฟ (3000 F°ควบคุม) ใช้เกรด Gunning refractory 3000 F° capacity.

1.3.2 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมจะใช้มาตรฐานการทดสอบของอเมริกา ASTM ว่าด้วยมาตรฐานวัสดุทนไฟ

1.3.2 เพื่อทดสอบคุณสมบัติด้านเคมีและฟิสิกส์ของวัสดุทนไฟ (3000 F°ควบคุม), วัสดุซิลิกา (Silica materials)

1.3.2 ทดสอบคุณสมบัติด้าน Cold Crushing Strength (CCS)

1.3.2 ทดสอบคุณสมบัติด้าน Thermal Permanent Linear Change (TPLC)

1.3.2 ทดสอบคุณสมบัติด้าน Heat at 3000 F° and Density

1.3.2 ทดสอบคุณสมบัติ Thermal Conductivity

1.3.2 การทดสอบ Test of scale จะใช้ module ของบางชิ้นส่วนที่กระทบกับความร้อนของภาคอุตสาหกรรมการเกษตรสำหรับ Gunning Lining type.

การนำเข้าวัสดุจำพวก “วัสดุทนไฟ” ร้อยละ 80 มาจากต่างประเทศซึ่งมีราคาที่แพงสำหรับใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับด้านความร้อนเช่น โรงกลั่นหรือโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เป็นต้น ซึ่งโรงงานพวกนี้ใช้ความร้อนค่อนข้างสูง แต่สำหรับอุตสาหกรรมภาคการเกษตรท้องถิ่นซึ่งมีกระบวนการผลิตและใช้ความร้อนที่ค่อนข้างต่ำกว่าโรงงานอุตสาหกรรมที่กล่าวมาข้างต้น แต่กลับต้องมีการใช้วัสดุทนไฟที่นำเข้าจากต่างประเทศที่มีราคาค่อนข้างสูง และ ทำให้มีต้นทุนในการ maintenance ที่สูงตามไปด้วยอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาพฤติกรรมทางกลด้านความร้อนของวัสดุทนไฟที่ผสมวัสดุซิลิกาซึ่งมีราคาที่ถูกลงและได้มาตรฐาน มาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมการเกษตรพลังงานความร้อน โดยเฉพาะ ทางกลุ่มวิจัยเล็งเห็นว่างานวิจัยนี้ถ้าสำเร็จในระดับหนึ่งก็จะทำให้ลดต้นทุนการซ่อม

บำรุงรักษาเกี่ยวกับวัสดุทนไฟในโรงงานอุตสาหกรรมได้ดีเป็นอย่างยิ่งและประโยชน์ทางอ้อมจะทำให้อุตสาหกรรมการเกษตรท้องถิ่นมีกำลังที่จะต่อสู้กับสถานการณ์ด้านเศรษฐกิจในส่วนของคุณทุนการผลิตได้เป็นอย่างดี

1.4 ระยะเวลาทำการวิจัย และแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย

ระยะเวลาในการวิจัย 1 ปี สถานที่ทำการทดสอบ-วิจัย คือท้องถิ่น จ.ราชบุรี และการทดสอบวัสดุจากภาควิชาโยธาและสถาปัตยกรรม มรภ.หมู่บ้านจอมบึง ตำบลจอมบึง อำเภोजอมบึง จังหวัดราชบุรี หน่วยงานสนับสนุนมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน, กทม, วิทยาลัยพลังงานสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ศาลายา- นครปฐม, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการนำซิลิกาจากธรรมชาติมาผสมกับวัสดุทนไฟที่ขายตามท้องตลาดทั้งนี้เพื่อลดต้นทุนการนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของการผสมวัสดุซิลิกาลงในวัสดุทนไฟ มีนักวิจัยหลายท่าน[1-23] ทำการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ แต่สำหรับการศึกษางานชิ้นนี้จะเป็นการผสมทรายที่มาจากธรรมชาติกับวัสดุทนไฟเกรด Gunning refractory 3000 F° capacity คุณสมบัติต่างๆจะถูกเปรียบเทียบและทำการประเมิน

2.1 วัสดุทนไฟ (Refractory Materials)

วัสดุทนไฟ หมายถึง วัสดุเซรามิกชนิดหนึ่งที่มีความทนทานต่อความร้อนได้สูงกว่าอุณหภูมิ 1500° C วัสดุชนิดนี้จึงมีอุณหภูมิจุดอ่อนตัวและจุดหลอมตัวสูง และยังสามารถทนทานยืนตัวอยู่ในสภาพอุณหภูมิสูงได้ และยาวนานโดยไม่เปลี่ยนแปลงรูปร่าง หรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัสดุ ความทนทานต่อความร้อนโดยตรงของวัสดุทนไฟ [1] และควรมีสมบัติอื่นๆเช่น

- ทนต่อการกดทับที่อุณหภูมิสูง (Thermal Loading)
- ทนต่อปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical Attack) จากสารหลอมละลาย (Slags) หรือจากไอบรรยากาศภายในเตา (Furnace Atmosphere)
- ทนต่อการสึกกร่อนเนื่องจากการเสียดสี (Abrasion Resistance)
- ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างกะทันหัน (Thermal Shock)
- ทนต่อการแตกเสียหาย เนื่องด้วยวัสดุถูกความร้อนมีการยืดขยายตัวและหดตัว (Thermal Spalling)
- ทนต่อการขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน (Thermal Expansion) โดยไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง เนื่องด้วยการยืดตัว และหดตัว (Elastic and Plastic Deformation) เป็นต้น

สมบัติเหล่านี้ ถือเป็นสมบัติสำคัญของวัสดุทนไฟ ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์งานตามความต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีอายุการใช้งานได้ยาวนาน ดังนั้นวัสดุทนไฟจึงถูกนำไปใช้งานได้หลายด้าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในงานผลิตสินค้าในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ในเตาเผาเซรามิก เตาหลอมโลหะ เตาหลอมแก้ว และเตาเผาอื่นๆ ตามที่ผู้ใช้วัสดุทนไฟจะได้พิจารณาเลือกใช้ชนิดของวัสดุทนไฟให้เหมาะสม ทั้งชนิดเนื้อของวัสดุทนไฟและรูปร่างที่ผลิตออกจำหน่าย ซึ่งผู้ออกแบบสร้างจะต้องมีความรู้กับวัสดุหรือวัสดุทนไฟชนิดต่างๆ เหล่านี้เป็นอย่างดี โดย

สามารถทราบถึง สมบัติ (Properties) และลักษณะเฉพาะ (Characteristics) ของวัสดุทนไฟที่เหมาะสม [1, 3]

2.2 การจำแนกและชนิดของวัสดุทนไฟ (Classification and Types)

วัสดุทนไฟ (Refractory) มีหลายลักษณะและรูปแบบขึ้นกับการนำไปใช้งานในทางอุตสาหกรรม การจำแนกชนิดของวัสดุทนไฟ [1] สามารถทำได้หลายวิธี เช่น

2.2.1 จำแนกเป็นกลุ่มตามสมบัติทางเคมี เช่น กรด กลาง ต่าง

2.2.2 จำแนกตามลักษณะทางกายภาพ และลักษณะการใช้งาน

2.2.3 จำแนกตามองค์ประกอบทางเคมี เป็นออกไซด์ชนิดเดียว ออกไซด์ผสม หรือไม่ใช่ออกไซด์ เป็นต้น [4] ตัวอย่างการจัดแบ่งวัสดุทนไฟตามสมบัติทางเคมีได้แสดงดังตารางที่ 1.

ตารางที่ 1. วัสดุทนไฟที่แบ่งตามสมบัติทางเคมีเป็นกลุ่มกรด กลาง ต่าง [4]

ชนิดประเภทวัสดุทนไฟ	องค์ประกอบทั่วไป	องค์ประกอบหลักทางเคมี
กรด (Acid) โดยมากประกอบด้วยกลุ่มของ RO_2	ซิลิกา, เซมิซิลิกา ไฟโรฟิวไลต์ ดินทนไฟ	SiO_2 $SiO_2 \cdot Al_2O_3$ SiC
กลาง (Neutral) โดยมากประกอบด้วยกลุ่มของ R_2O_3 RO	อะลูมินา โครม สปิเนล คาร์บอน (แกรไฟต์)	$Al_2O_3 \cdot SiO_2$ $Cr_2O_3 \cdot Al_2O_3 \cdot MgO$ $FeO \cdot Al_2O_3 \cdot MgO$ C
ต่าง (Basic) โดยมากประกอบด้วยกลุ่มของ RO	ฟอสเฟอไรต์ โครม-แมกนีเซีย แมกนีเซีย ไดอะทอไมต์	$MgO \cdot SiO_2$ $MgO \cdot Cr_2O_3 \cdot Al_2O_3 \cdot FeO$ MgO $MgO \cdot CaO$

ตารางที่ 2. การแบ่งวัสดุทนไฟตามลักษณะการใช้งาน[4]

ลักษณะการใช้งาน	ประเภท
วัสดุทนไฟที่มีรูปร่างที่แน่นอน	อิฐทนไฟ อิฐฉนวนทนไฟ เครื่องใช้เป็นอุปกรณ์ในเตาเผาชนิดต่างๆ เช่น วัสดุทนไฟคอร์เดียไรต์-มุลไลต์
วัสดุทนไฟที่มีรูปร่างไม่แน่นอน (จะมีรูปร่างที่แน่นอนเมื่อทำการติดตั้ง)	วัสดุทนไฟที่มีความเหนียว วัสดุทนไฟที่ได้จาก การหล่อ อุปกรณ์แรมที่ใช้ในเครื่องคอมพิวเตอร์
วัสดุทนไฟประเภทตัวประสานระหว่าง อิฐทนไฟ	ปูนซีเมนต์สำหรับฉาบชนิดที่แข็งตัวได้ที่ อุณหภูมิ สูง ปูนซีเมนต์สำหรับฉาบชนิดที่แข็งตัวได้ที่ อุณหภูมิต่ำ
วัสดุทนไฟฉนวน (มีลักษณะเป็นม้วน แผ่นแข็ง ก้อน)	อะลูมิโนซิลิเกตไฟเบอร์ เซอร์โคเนียไฟเบอร์

ในการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกชนิดต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นถ้วยชาม ลูกถ้วยไฟฟ้า สุขภัณฑ์ กระเบื้องหลังคา ของตกแต่ง และอื่นๆ ถ้าเป็นการเผาในเตาชักเทิล และในเตาอุโมงค์ (Tunnelkiln) นั้นจำเป็นจะต้องใช้อุปกรณ์ที่ช่วยรองรับชิ้นงานไม่ว่าจะเป็นแผ่นรองเผา ขาดัง คานเป็นแท่งซึ่งเรามักจะเรียกรวมกันว่าเครื่องใช้เป็นอุปกรณ์ในเตาเผา (Kiln furniture) ซึ่งในปัจจุบันนี้วัสดุหลักๆ ที่นำมาทำใช้เป็นอุปกรณ์ในเตาเผา สำหรับงานอุตสาหกรรม เซรามิกแบบดั้งเดิมนั้นจะมีอยู่ด้วยกันสองชนิดคือ ซิลิคอนคาร์ไบด์ และคอร์เดียไรต์-มุลไลต์ ซึ่งมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไปซิลิคอนคาร์ไบด์นั้นจะรับน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ได้มากกว่า โดยเฉพาะการรับน้ำหนักที่อุณหภูมิสูงเพราะซิลิคอนคาร์ไบด์จะมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงกว่าที่อุณหภูมิปกติ ดังนั้นจึงสามารถทำให้บางลงได้ทำให้น้ำหนักของเครื่องใช้เป็นอุปกรณ์ในเตาเผาลดลงได้ แต่ข้อเสียของซิลิคอนคาร์ไบด์คือราคาสูงกว่าคอร์เดียไรต์-มุลไลต์ และมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนสูงกว่าทำให้ค่าความทนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยเฉียบพลันจะต่ำกว่าคอร์เดียไรต์-มุลไลต์ แต่ผู้ผลิตแผ่นซิลิคอนคาร์ไบด์ก็ลดปัญหาการแตกร้าวลงโดยทำเป็นช่องที่ตัดเป็นทางยาว (Slit) ไว้ในแต่ละด้านของแผ่นเพื่อช่วยเรื่องปัญหาการเกิดเศษเล็กๆ (Spalling) ขึ้นเนื่องจากการแตกร้าว นอกจากนี้ปัญหาอีกประการหนึ่งของซิลิคอนคาร์ไบด์คือสามารถเกิดซิลิกา ซึ่งจะมีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มสีขาวขุ่นที่ผิวของชิ้นงานเนื่องจากถูกออกไซด์ด้วยออกซิเจน ซิลิกาที่เกิดขึ้นบนผิวของซิลิคอนคาร์ไบด์นี้จะทำ

ให้ความแข็งแรงลดลง และเศษซิลิกาอาจหลุดล่อนแล้วปลิวไปติดกับชิ้นงานที่เราต้องการเผา ทำให้เกิดตำหนิขึ้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์ได้

2.3 สมบัติเฉพาะของวัสดุทนไฟ (Characteristic Properties of Refractory materials)

2.3.1 ความทนไฟ (Refractoriness)

ความทนไฟ คือ ความสามารถของวัสดุที่สามารถทนต่อความร้อนได้สูงโดยไม่เปลี่ยนแปลงทั้งสภาพทางกายภาพหรือทางเคมี การวัดค่าความทนไฟ สามารถวัดเทียบในเทอมทูนไฟ (Pyrometric cone equivalent หรือ PCE) วัสดุทนไฟ (Refractory materials) จะถูกพิจารณาถึงความสามารถทนต่อความร้อนได้มากกว่า 1500°C ในสภาพปกติ แต่ถ้าวัสดุทนไฟถูกกดทับในที่ที่มีอุณหภูมิสูง อาจทำให้ความทนไฟภายใต้ น้ำหนักกด (Refractoriness under load) ลดลงบ้าง อย่างไรก็ตามสมบัติความร้อนประเภทแรกที่สำคัญของวัสดุทนไฟก็ย่อมมีความทนไฟเป็นสำคัญ ยิ่งทนต่อน้ำหนักกดได้ที่อุณหภูมิสูงก็ยิ่งทำให้เป็นวัสดุทนไฟมีคุณภาพดีมากขึ้นปัจจัยที่ทำให้วัสดุมีความทนไฟสูงขึ้นอยู่กับหลายเหตุผลที่เป็นปัจจัยสำคัญ คือ

(1) องค์ประกอบทางเคมีและทางแร่วิทยาของวัสดุ (Chemical and mineralogical composition)

เมื่อพบว่าผลวิเคราะห์ทางเคมี (Chemical analysis) ของวัสดุทนไฟส่วนใหญ่ประกอบด้วย ซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา Al_2O_3 เป็นองค์ประกอบหลักย่อมมีความทนไฟจากออกไซด์ของธาตุเหล่านี้ ถึงแม้จะเกิดเป็นสารประกอบของอะลูมินอซิลิเกต เช่น มุลไลต์ ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) และสไปเนล ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$) ก็มีความทนไฟโดยสมบัติประจำตัว โดยที่มุลไลต์สามารถทนความร้อนได้ถึง 1910°C และซิลลิมาไนต์ทนไฟถึง 1550°C นอกจากนี้ CaO , MgO , ZrO_2 , Cr_2O_3 เป็นออกไซด์ที่มีสมบัติให้ความทนไฟ ทั้งในสภาพของสารเคมีจากการสังเคราะห์ หรือเป็นแร่ในธรรมชาติที่ปราศจากสิ่งเจือปนสูง ก็ให้สมบัติความทนไฟได้สูงเป็นจำนวนมาก

(2) โครงสร้างของการจัดรูปแบบของอนุภาค โครงสร้างผลึก

โครงสร้างโมเลกุลและโครงสร้างอะตอม ที่เป็นเนื้อของวัสดุชนิดนั้นการจัดรูปแบบอนุภาคที่เกาะตัวกันแน่น (Close packing) ย่อมมีความทนไฟของอนุภาคได้ [1] และเมื่อพิจารณาถึงโครงสร้างผลึก (Crystal structure) อาจมีรูปแบบต่างๆ กัน เช่น โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลเตตราฮีดรัล เป็นต้น โครงสร้างของผลึกเหล่านั้นย่อมมีผลต่อการทนความร้อนได้แตกต่างกันด้วย ยกตัวอย่างเช่น โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลของคอร์เดียไรต์มีความทนไฟ 1450°C ส่วนโครงสร้างผลึกแบบออโรมบิกของมุลไลต์มีความทนไฟถึง 1850°C เป็นต้น [1, 6, 7] ครั้นเมื่อ

พิจารณาถึงโครงสร้างของโมเลกุล (Molecular structure) และโครงสร้างอะตอม (Atomic structure) ที่ยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะโควาเลนต์ [8] ทำให้มีผลต่อ

การทนความร้อนด้วยความคงทนของพันธะยึดเหนี่ยวอย่างแข็งแรงระหว่างอะตอมในโมเลกุล เหล่านั้น (Bonding strength) ความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยวจะทำให้โครงสร้างมีความทนไฟ [1]

(3) ขนาดของอนุภาค (Particle size)

ในเนื้อวัสดุขนาดอนุภาคโตในเนื้อวัสดุจะมีความทนไฟได้สูงกว่าอนุภาคเล็ก [1] จากข้อมูลการวิจัยของ Camerucci และคณะ [9] ยังได้ใช้อัตราส่วนของคอร์เดี่ยวไรต์ขนาดเดียว (Single Fraction) โดยทำการบดให้มีขนาดต่างกัน คือ หยาบ (C) กลาง (M) และละเอียด (F) นำไปอัดที่ความดัน 20 MPa โดยไม่มีการเติมตัวเชื่อมประสาน แล้วจึงนำไปเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1450 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนของคอร์เดี่ยวไรต์ขนาดเดียวที่มีความทนไฟเรียงจากมากไปน้อย คือ $C > M > F$ ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าเมื่ออนุภาคมีขนาดหยาบจะมีความทนไฟมากขึ้น นอกจากนี้อาจมีส่วนเกี่ยวข้องกับรูปร่างของอนุภาค (Particle shape) ที่พิจารณาเห็นว่าอนุภาคทรงกลม น่าจะมีเหตุผลทนความร้อนได้ดีกว่าอนุภาคทรงรูปร่างอื่น ซึ่งยังอาจไม่แน่นอนเสมอไป [1].

(4) ความไม่บริสุทธิ์หรือการมีสิ่งเจือปนในเนื้อวัสดุ

ในกรณีที่เนื้อวัสดุทนไฟมีสิ่งเจือปนเป็นชนิดสารประกอบของธาตุอัลคาไลด์ (Alkalies) ชนิด Na, K และ Ca สารประกอบเหล่านี้เป็นตัวช่วยหลอม (Fluxing agents) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Na, K จะช่วยทำให้วัสดุทนไฟมีความทนไฟต่ำลง จึงมักถูกกำหนดว่าวัสดุทนไฟจะต้องมีเนื้อวัสดุที่มีอัลคาไลที่น้อยกว่า 2 % หรือยิ่งน้อยกว่านี้ยิ่งดี นอกจากอัลคาไลจะยังพิจารณาถึงปริมาณเหล็ก (Fe_2O_3) ในวัสดุทนไฟซึ่งควรมีปริมาณต่ำ เพราะเหล็กเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ดีกับซิลิกาได้สารประกอบเหล็กซิลิเกตที่มีจุดหลอมตัวต่ำ ยิ่งทำการเผาในบรรยากาศรีดักชันปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์รัสออกไซด์ (FeO_2) กับซิลิกา (SiO_2) จะยิ่งเกิดปฏิกิริยาเคมีหลอมตัวได้เร็วยิ่งขึ้น ด้วยเหตุนี้สิ่งเจือปนในเนื้อวัสดุทนไฟเมื่อถูกนำมาผสมจากสภาพการเป็นวัตถุดิบ ก็จะถูกพิจารณาแยกสิ่งเจือปนที่เป็นแร่เจือปนเหล่านั้นออกไปหรือลดให้มัน้อยที่สุด เช่น แร่ไมกา (Mica) หินฟันม้า (Feldspar) และอื่นๆ ซึ่งล้วนมีส่วนประกอบของ Na_2 , K_2 , Ca และ Fe เป็นต้นตอของการหลอมตัวได้ง่ายกับทรายหรือซิลิกา และวัสดุทนไฟชนิดกรด [1].

2.3.2 การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน (Thermal of Expansion)

วัสดุทนไฟเป็นวัสดุที่ทนอุณหภูมิสูงที่ผ่านการเผาแล้วก่อนการใช้งาน และจะต้องเผาที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิใช้งานอีกด้วย เพราะต้องการให้วัสดุทนไฟมีการหดตัวหลังเผา โดยไม่เปลี่ยนแปลงขนาดอีกต่อไปเมื่อถูกใช้งาน สมบัติการขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนของวัสดุทนไฟ จะมีช่วงอุณหภูมิหนึ่งที่วัตถุจะแสดงการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง เป็นสัดส่วนกับอุณหภูมิ จนทำให้สามารถเขียนสัดส่วนนี้มีความสัมพันธ์ กล่าวคือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของการขยายตัว ($\Delta L/L_0$)จะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับช่วงอุณหภูมิที่วัตถุนั้นมีการขยายตัว (ΔT) จึงสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน (α) หรือ Coefficient of Expansion (COE) สามารถเขียนเป็นสูตรการคำนวณสมการที่ 2.1

$$\alpha = \frac{L-L_0}{L_0 \Delta t} \quad 2.1$$

เมื่อ α = สัมประสิทธิ์โดยเฉลี่ยของการขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน (Mean Coefficient of Thermal Expansion)

L_0 = ความยาวเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ

L = ความยาวของชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิต่างๆ

α = ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของชิ้นทดสอบ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)

Δt = อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)

ค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวของวัสดุทนไฟ ยิ่งมีค่ามากเท่าใด การขยายตัวก็จะสูงด้วยเช่นกัน ซึ่งผลของการขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนนี้ จะเป็นส่วนสำคัญในสมบัติของวัสดุทนไฟ กล่าวได้ว่า วัสดุใดที่มีการขยายตัวมาก ย่อมมีผลเสียต่อโครงสร้างภายในเนื้อวัตถุ ที่อาจทำให้วัตถุเกิดการแตกหักเสียหาย ด้วยเหตุผล เมื่อวัตถุนั้นเกิดการขยายตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และถูกทำให้มีการหดตัวเมื่ออุณหภูมิลดลงอย่างฉับพลัน (Thermal Shock) การแตกและเสียหายที่เป็น Thermal Spalling นั้น จะเกิดขึ้นได้รวดเร็ว ครั้นเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ การขยายตัว-หดตัวต่ำก็มีค่าต่ำ จึงสามารถทนทานต่อการแตกเสียหาย (Spalling Resistance) ได้ดีกว่า อย่างไรก็ตามวิธีการแก้ไขการขยายตัวสูงและการหดตัวสูงของวัสดุทนไฟ ก็ด้วยการทำให้วัสดุมีความพรุนตัวมากขึ้น [1] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ibrahim และคณะ [10] ศึกษาสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของวัสดุผสมคอร์เดียไรต์-มุลไลต์ โดยใช้

คอร์เดียไรต์และมุลไลต์ ในอัตราส่วน 70 : 30 เป็นวัตถุดิบตั้งต้น โดยใช้ กร๊อกเป็นตัวเติม ตั้งแต่ 0, 10, 30, 50 และ 100 % ตามลำดับ กร๊อกที่ใช้ในการทดลองได้จากการเตรียม ดิน พัลกัม และบอกลีไคต์ ผสมกร๊อกระหว่างที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 °C กับที่ยังไม่เผาในอัตราส่วน 1 : 1 จากนั้นนำวัตถุดิบมาผสมกัน โดยไม่มีการเติมตัวประสาน ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบกึ่งแห้ง ใช้แรงอัด 30 kN จากนั้นเผาที่อุณหภูมิตั้งแต่ 1200 °C ถึง 1400 °C จากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนอยู่ในช่วงระหว่าง $1.77-1.79 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ และเมื่อเปรียบเทียบการทดสอบค่าความแข็งแรงมีค่าต่ำลง จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำลงเช่นกัน เนื่องจากเกิดรูพรุนขึ้นในเนื้อวัตถุมากขึ้น

2.3.3 การทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน (Thermal Shock Resistance)

การทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของวัตถุหรือผลิตภัณฑ์ เมื่อได้รับความร้อนจะมีการขยายตัวและเมื่อเย็นตัวจะหดตัว การเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันที่เกิดจากความร้อนและความเย็น ยังผลทำให้วัตถุซึ่งถูกกระทำด้วยแรงเค้นเนื่องจากความร้อนและความเย็น ทำให้วัตถุมีความเครียดเกิดขึ้น วัตถุจะสามารถทนสภาพความเครียดได้มากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุที่มีลักษณะเฉพาะและสมบัติของวัตถุ ประกอบด้วยปัจจัยต่างๆเช่น การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน โมดูลัสความยืดหยุ่นของวัตถุ ความสามารถกระจายความร้อนในวัตถุ ความแข็งแรงเชิงกลของวัตถุนั้นๆ เป็นต้น ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน ได้แก่

(1) การกระจายความร้อน (Thermal Diffusivity)

วัสดุเมื่อได้รับความร้อนจะกระจายความร้อนได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ทั้งนี้โดยมีอัตราของการเคลื่อนตัวของความร้อน สัมประสิทธิ์การกระจายตัวแผ่ความร้อน วัสดุเมื่อถูกเผาจะทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง หากทำให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกะทันหันอย่างรวดเร็ว วัสดุที่มีการกระจายความร้อนได้ดีจะเป็นวัสดุที่ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันได้ดีด้วย [1]

(2) การนำความร้อน (Thermal Conductivity)

เมื่อวัสดุได้รับความร้อน ความร้อนจะเคลื่อนตัวหรือกระจายตัวในวัสดุจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งโดยการเคลื่อนตัวของความร้อนคิดเป็นต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ทั้งนี้การเคลื่อนตัวของความร้อนจะอยู่ในช่วงระยะทางหนึ่ง ผลของการเคลื่อนตัวของความร้อนในระยะทางนั้นๆย่อมจะมีอุณหภูมิแตกต่างกันระหว่างจุดเริ่มต้นของความร้อนจะขึ้นโดยตรงอยู่กับปริมาณความร้อนที่วัสดุได้รับและระยะทางการเคลื่อนที่ กล่าวคือ การนำความร้อนจะมีมากเมื่อปริมาณ

ความร้อนมีค่าสูงและมีระยะทางที่สั้น แต่การนำความร้อนจะเป็นปฏิภาคกลับกับหนึ่งหน่วยพื้นที่ และความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิจากอุณหภูมิที่จุดความร้อนต้นถึงจุดที่ความร้อนเคลื่อนที่ไปในระยะทางตามกำหนด ในเรื่องนี้ทำให้เข้าใจถึงวัสดุควรมีพื้นที่น้อยหรือมีขนาดเล็กจึงช่วยให้การนำความร้อนได้ดี และทำนองเดียวกันกับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเมื่อความร้อนเคลื่อนที่ควรมีค่าน้อยอีกเช่นกัน จึงเป็นเหตุผลให้ค่าการนำความร้อนของวัสดุมีค่าสูงขึ้น เมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันในที่นี้จะมีความหมายเกี่ยวกับค่าของผลต่างระหว่างอุณหภูมิ เมื่อวัสดุนั้นมีการนำความร้อนที่ดีในเรื่องของการนำความร้อนและการกระจายความร้อนจะมีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กันและกันเป็นปฏิภาคโดยตรงซึ่งกันและกัน สมบัติทางความร้อนทั้งสองนี้ย่อมเกิดขึ้นโดยตรงในวัสดุเมื่อวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน ซึ่งในเรื่องนี้ สำหรับกรณีวัสดุเซรามิก มักจะมีค่าการนำความร้อนและการกระจายความร้อนค่อนข้างต่ำ จึงเป็นเหตุผลให้วัสดุเซรามิกได้รับความร้อนแล้วเกิดอุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างผิวภายนอกกับภายในค่อนข้างสูง เนื่องจากวัสดุเซรามิกมีค่าการกระจายความร้อนและค่าการนำความร้อนต่ำ เมื่อเป็นเช่นนี้ความสามารถในการทนต่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงฉับพลันของวัสดุเซรามิกจำเป็นต้องอาศัยปัจจัยอื่นช่วยเสริมให้เกิดความทนทาน เช่น การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนต่ำ และมีความแข็งแรงเชิงกลในโครงสร้างวัสดุที่สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน [11, 12]

(3) สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน (Coefficient of Thermal Expansion)

เมื่อวัสดุถูกกระทำด้วยความร้อนจะเกิดความเค้น (Stress) ในเนื้อวัสดุ เนื่องจากความร้อนทำให้เนื้อวัสดุซึ่งมีอนุภาคเป็นองค์ประกอบแต่ละอนุภาคมีโครงสร้างผลึก โครงสร้างโมเลกุล โครงสร้างอะตอมเกิดการขยายตัวโดยแรงยึด (Bonding) ระหว่างอะตอมที่ยึดออกด้วยพลังงานความร้อนทำให้วัสดุเกิดการขยายตัว อีกนัยหนึ่งการขยายตัวของวัสดุอาจเกิดจากความดันภายในเนื้อวัสดุซึ่งอยู่ในช่องว่างของเนื้อวัสดุ เมื่อถูกความร้อนกระทำ ทำให้มีความดันไอเพิ่มขึ้นจึงเป็นการสนับสนุนการขยายตัวของวัสดุ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนของวัสดุยิ่งมากจะทำให้วัสดุมีการขยายตัวมากย่อมมีผลเสียต่อโครงสร้างภายในเนื้อวัสดุ อาจทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเสียหาย [13, 14]

(4) ความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical Strength)

ความแข็งแรงเชิงกล คือ ความทนทานของวัสดุเมื่อได้รับแรงกระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ซึ่งถูกกระทำด้วยแรงอัตราคงที่หนึ่งๆ ที่วัสดุสามารถทนได้ก่อนการแตกหักเสียหายความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงและความทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน สามารถกล่าวได้คือ ถ้าวัสดุมีค่าความแข็งแรงเชิงกลสูง จะสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันได้มากกว่าวัสดุ

ที่มีค่าความแข็งแรงต่ำ ความแข็งแรงเชิงกลของวัสดุใดๆขึ้นอยู่กับวัสดุนั้นเมื่อถูกแรงกระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หรือความเค้น (Stress) โดยแรงกระทำมีลักษณะแตกต่างกันได้แก่ แรงดึง (Tension) แรงกด (Compressive) แรงหัก (Bending) แรงกระแทก (Impact) แรงบิด (Torsion) และแรงเฉือน (Shear)

(6) ความทนไฟ (Refractoriness)

ความทนไฟของวัสดุ หมายถึง วัสดุนั้นสามารถทนต่อการกระทำเนื่องด้วยความร้อน (Thermal stress) ได้ถึงอุณหภูมิมากกว่า 1500 °C โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและไม่ถึงจุดอ่อนตัวหรือหลอมตัว วัสดุที่มีความทนไฟจะพบว่าเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างการเกาะยึดระหว่างผลึกระหว่างโมเลกุล อะตอมในโครงสร้างจะมีความแข็งแรง ดังนั้นวัสดุที่มีความทนไฟสูงจะทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันได้ดี

(7) รูพรุน (Porosity)

วัสดุที่มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันได้ดีโดยไม่เกิดการแตกเสียหาย ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับเรื่องนี้คือคุณสมบัติการยึดหรือหดตัวเมื่อถูกความร้อนหรือความเย็นมากระทำ และสามารถปรับตัวได้ทันที นั่นคือวัสดุสามารถนำความร้อนได้ดีและขยายตัวต่ำ ถ้าวัสดุมีความพรุนสูง การขยายตัวและหดตัวจะมีการต้านทานได้ดี โดยรูพรุนสามารถจะรองรับการขยายหรือหดตัวได้เมื่อมีอุณหภูมิฉับพลัน

2.4 ททราย (ซิลิกา)

ททราย เป็นสสารแบบเม็ด ซึ่งเกิดจากหินชั้นที่แตกย่อยเป็นเม็ดละเอียด อาจเป็นการแตกของเปลือกหอยในทะเลและถูกน้ำซัดไปมาจนแตกละเอียด เรียกว่าททรายที่มีอยู่ตามชายทะเลบางแห่ง ททรายได้จากในแม่น้ำ หรือจากบ่อทรายซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีททรายเป็นจำนวนมาก มนุษย์นำททรายไปใช้ในการก่อสร้าง เช่น ใช้ในการผสมคอนกรีต ใช้ผสมปูนขาวและปูนซีเมนต์ ทำปูนก่อ ปูนฉาบ ทำเตาเผาเหล็ก เป็นต้น

2.4.1 ททรายแก้ว (Silica Sand)

เป็นททรายที่พบตามแหล่งต่างๆ โดยธรรมชาติมีส่วนผสมที่สำคัญคือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) ลักษณะของททรายจะมีสีขาว มีความละเอียดประมาณ 50 – 100 เมชททรายแก้วมีคุณสมบัติที่ไม่ดี คือ จะมีการขยายตัวมากในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 500 – 600 องศา เป็นช่วงที่ททรายแก้วจะเปลี่ยนสถานะในช่วงอุณหภูมินี้จะมีอัตราการขยายตัวสูง ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อแบบหล่อถ้าไม่ลดการขยายตัวของททรายอาจจะทำให้แบบพังบริเวณผิวแบบส่วนที่ได้รับความร้อน

ตารางที่ 3. ส่วนประกอบทางเคมีของทราย

		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	สูญเสียเนื่องจากเผาไหม้
ทรายธรรมชาติ	A	75.40	14.88	1.94	0.32	0.36	4.32
		79.50	8.00	5.40	0.41	0.20	3.30
ทรายแม่น้ำ	B	76.60	13.50	2.19	2.20	0.78	4.30
ทรายซิลิกาที่ถูกบด	A	98.25	0.90	0.17	0.15	0.09	0.03
ทรายชายหาด	A	95.48	2.29	0.44	0.03	0.20	-
	B	95.65	4.40	0.14	0.25	0.09	0.15

2.4.2 ทรายโครไมต์ (Chromite sand)

เป็นทรายที่มีสีดำ มีสภาพความถ่วงจำเพาะ 4.3-4.6 ความแข็งแรง 5.5-7 สเกลมอร์อัตราขยายตัว 0.005 (นิ้ว/นิ้ว) อัตราถ่ายเทความร้อนค่อนข้างสูง จุดหลอมเหลวต่ำ ทรายโครไมต์มีทั้งที่พบตามธรรมชาติและที่ได้มาจากผลของการถลุงเฟอร์โรโครเมียม ที่พบตามแหล่งธรรมชาติส่วนมากมักจะมีเหล็กปะปนอยู่มาก ทำให้จุดหลอมเหลวต่ำ และในลักษณะที่เป็นสายแร่ไม่ใช่ที่เป็นเม็ดทราย อย่างที่พบแหล่งทรายแก้ว ดังนั้นจึงต้องมาขยี้ล้างทำความสะอาด และคัดขนาดด้วยตะแกรง เพื่อให้ได้ขนาดเม็ดทรายที่พอเหมาะสำหรับใช้ในงานหล่อ

ตารางที่ 4. ส่วนประกอบทางเคมีของทรายโครไมต์

Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	CaO	MnO	V ₂ O ₅	TiO ₂
45.3	25.1	24.7	1.6	10.1	0.13	0.26	0.37	0.61

2.2.3 ทรายเซอร์คอน (Zircon sand)

เป็นทรายที่มีสีขาวจนถึงสีน้ำตาลมีสภาพเป็นกรดและมีความถ่วงจำเพาะ 4.4 – 4.7 ความแข็งแรง 7-7.5 สเกลมอร์อัตราขยายตัว 0.003 อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงและจุดหลอมเหลวต่ำ 2030-2200 องศา ทรายพบตามแหล่งธรรมชาติปะปนอยู่กับแร่ต่างๆ โดยเฉพาะแร่ดีบุก ในประเทศไทยจะมีเซอร์คอนในสภาพที่มาจากแร่ดีบุกจึงมีขนาดเม็ดเล็กละเอียดและ มีราคาค่อนข้างแพงจึงทำให้ไม่เป็นที่นิยมใช้ทรายเซอร์คอนกันมากนัก

2.2.4 ทรายโอลิวีน (Olivine Sand)

เป็นทรายที่มีสีเขียวปนเทาที่มีสภาพเป็นค้างมีค่าความถ่วงจำเพาะ 3.2-3.6 ความแข็งแรง 6.5 -7 อัตราการขยายตัว 0.83 อัตราการถ่ายเทความร้อน น้อยกว่า 0.001 อุณหภูมิหลอมเหลว 1538-1760 องศา เป็นทรายตามแหล่งธรรมชาติที่พบมากในประเทศนอร์เวย์ ส่วนในประเทศไทยไม่พบว่าโรงงานใดใช้ทรายชนิดนี้ เพราะมีราคาแพงนั่นเอง

2.2.5 ทรายอลูมิเนียมซิลิเกต (Aluminum Silicate)

หรือที่เรียกกันว่า ซิลิมาไนท์ (Silimanite) เป็นทรายที่มีสีน้ำตาลอ่อน มีความถ่วงจำเพาะ 3.5 ความแข็งแรง อัตราการขยายตัว 0.007 สูงกว่าทรายโครไมต์ อัตราการถ่ายเทความร้อนสูง อุณหภูมิจุดหลอมเหลว 1849 องศา เป็นทรายที่พบตามธรรมชาติ โดยเฉพาะอเมริกา แต่ในประเทศไทยไม่พบทรายชนิดนี้ ลักษณะของเม็ดทรายทุกชนิดที่พบมีทั้งชนิดเม็ดกลมและชนิดที่มีแฉกมุม (Angular) ส่วนมากที่พบตามแหล่งธรรมชาติจะเป็นชนิดที่ปนทั้งส่วนที่กลมและส่วนที่มีแฉกมุม ดังแสดงในรูป

โดยทรายที่ดินนั้นจะต้องมีแรงยึดที่ดีจะทำให้ได้ทรายที่มีเม็ดกลมมาใช้งานได้ง่ายขึ้นและมีอัตราลมผ่านที่ดี แต่ถ้านำมาผสมกับตัวประสานที่เป็นดิน จะมีความแข็งแรงน้อยกว่าทรายที่เป็นสีเหลี่ยม ทรายชนิดนี้จะมีค่าความแข็งแรงเมื่อได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างกะทันหัน แต่จะไปเป็นจุดเสียเรียกว่าสแค๊ป ส่วนทรายสีเหลี่ยมที่ใช้ทำเป็นแบบจะกระทุ้งแบบได้ยาก ถ้านำมาเปรียบเทียบกับทรายชนิดกลมแต่ความแข็งแรงของแบบหล่อน้อยกว่าเนื่องจากความแข็งแรงน้อยกว่า ถ้าได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างกะทันหัน

ลักษณะขนาดของเม็ดทรายจะมีส่วนสัมพันธ์โดยตรงต่อคุณสมบัติทางด้านความพรุนหรือความโปร่งอากาศ (Permeability) ของทรายที่มีคุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของทรายที่ใช้ทำแบบหล่อ ที่จะยอมให้อากาศหรือก๊าซผ่านเม็ดทรายออกไปได้อย่างสะดวก ความโปร่งของอากาศสัมพันธ์กับขนาดของเม็ดทราย จะเห็นได้ชัดเจนว่าถ้าทรายมีขนาดเม็ดโตและสม่ำเสมอจะมีคุณสมบัติความโปร่งอากาศสูง และคุณสมบัตินี้จะลดลงตามลำดับ เมื่อเม็ดทรายมีขนาดที่ปนกันทั้งเล็กและใหญ่ คุณสมบัติความโปร่งจะลดลงอีก

2.2.6 ทรายชีโอทู (CO₂ sand)

ทรายชนิดนี้เมื่อนำมาทำแบบหล่อจะใช้โซเดียมซิลิเกตหรือน้ำแก้วประมาณ 4-6% ผสมกับทรายซิลิกา ซึ่งจะทำให้แข็งตัวทันทีเมื่อผ่านแก๊ส CO₂ ลงไป ซึ่งอัตราส่วนของน้ำแก้วปกติแล้ว SiO₂/Na₂O จะเท่ากับ 2:3 และจะต้องรักษาให้มีอัตราส่วนเป็น 2.5 ในฤดูหนาว และ 2.1 ในฤดูร้อน ข้อดีของการทำแบบทรายหล่อจากทรายชีโอทูนี้ก็คือ แข็งตัวเองโดยไม่ต้องใช้เตาอบ สามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย ราคาถูก ดัดความขึ้นได้ง่าย

2.2.7 ทรายซิลิกา

ส่วนประกอบและส่วนผสมทางเคมีของทรายซิลิกาและส่วนผสมทางเคมีของทรายในทางธรณีวิทยา ทรายซิลิกาจะมีปริมาณควอตซ์อยู่สูงเพราะควอตซ์แข็งแรง และมีอุณหภูมิหลอมตัวสูง นับเป็นวัสดุที่เหมาะสมที่สุดในการทำแบบหล่อ หินปูนหรือเฟลด์สปาร์ทนต่อความร้อนได้น้อยกว่าและแตกหักได้ง่าย ดังนั้นจึงควรให้มีอยู่จำนวนน้อยๆ ดีกว่า ดินก็มีเจือปนอยู่ในทรายซิลิกาบ้างในรูปของสิ่งเจือปน แต่ปริมาณดินในทรายธรรมชาติมีประมาณ 5-30% ความทนต่อความร้อนของดินอยู่ที่ 1,600-1,700 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 5. ตัวเลขแสดงขนาดของเม็ดทรายซิลิกา (%)

หมายเลข ขนาด	เส้นผ่าศูนย์กลางของตะแกรง (ไมครอน)			ค่าที่มาก ที่สุด	% น้ำหนักบน ตะแกรงที่เม็ด ทราย อยู่มากที่สุด	% น้ำหนัก รวม 3 ตะแกรง	
10 Mesh	2380(8)	1680(10)	1190(14)	1680(10)	>40	>70	
14 Mesh	1680(10)	1190(14)	840(20)	1190(14)			
20 Mesh	1190(14)	840(20)	590(28)	1190(14)			
28 Mesh	840(20)	590(28)	420(35)	590(28)			
35 Mesh	590(28)	420(35)	297(48)	420(35)			
48 Mesh	420(35)	297(48)	840(20)	297(48)	>30		
65 Mesh	297(48)	210(65)	149(100)	210(65)			
100 Mesh	210(65)	149(100)	105(150)	149(100)			
150 Mesh	149(100)	105(150)	74(200)	105(150)			
200 Mesh	105(150)	74(200)	53(270)	1680(10)			



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 1. แสดงขนาดต่างๆของทรายที่พบกันทั่วไปในประเทศไทย (a) ทรายหยาบ (b) ทรายกลาง (c) ทรายละเอียด

2.3 รายงานการวิจัยต่างประเทศ

Fabio A. Cadoso, Murilo D.M. Innocentini, Mario M. Akiyoshi, and Victor C. Pandolfelli, (2004)[24] ได้ทำการศึกษาปัจจัยคุณสมบัติการบ่มของแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุทนไฟแคลเซียมอลูมิเนตซีเมนต์(CAC) พบว่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุทนไฟบ่มที่ 10 องศาเซลเซียสที่มีปริมาณอลูมินาสูง มีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นระหว่าง 2 ชั่วโมง ถึง 30 วัน พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงขนาดลดลง Salah A. Abo-El-Enein, Morsy M. Abou-Sekkina, Nagy M. Khalil and Osama A. Shalma.,(2010)[25] จากการศึกษาพบว่าคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงความยาวเนื่องจากอุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียสมีทิศทางไปในทิศทางบวกคือมีค่า PLC น้อยกว่า ร้อยละ 1 การเพิ่มขึ้นปริมาณของ Slag และ Spinel มีแนวโน้มของสนิม ตัวอย่างวัสดุทนไฟที่ผสม spinel และหล่อที่หน้า

งานเพิ่มความต้านทานการกัดและสไลต์ที่สูงเมื่อถูกกระทำด้วยสถานะของสนิม โดยการเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่หล่อโดยไม่มีการเพิ่มปริมาณของ spinel. F. Valenza, R. Botter, P. Cirillo, F. Barberis, M. di Foggia and D. Sottle.,(2010)[26] ได้ศึกษาศึกษาการนำเซลล์เพื่อเผาเป็นวัสดุมวลหายาสำหรับการเป็นกระเบื้องทนไฟ จากการศึกษาพบว่า การบดให้มีขนาด 1-10 ไมครอน ที่อุณหภูมิการเผาอย่างน้อย 1400 องศาเซลเซียส มีคุณสมบัติที่ใช้เป็นวัสดุมวลหายาของกระเบื้องทนไฟได้

L.A. Diaz and R. Torrecillas.,(2009)[27] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของกำลังอัดและการคืบที่ 1000-1400 องศาเซลเซียส ของวัสดุทนไฟอลูมินาสูงผสม spinel, paricase และ dolomite จากการศึกษาพบว่าวัสดุทนไฟที่ผสม spinel จะให้ค่ากำลังอัดที่น้อยกว่าวัสดุทนไฟที่ผสม paricase ในอุณหภูมิที่สูง การคืบเมื่อทดสอบที่อุณหภูมิ 1100-1300 องศาเซลเซียส เกิดการเสียรูปเมื่อเกิดการทำปฏิกิริยาระหว่าง อลูมินาและแคลเซียมอลูมินेटในเฟสของซีเมนต์ และเมื่ออุณหภูมิที่มากกว่า 1300 องศาเซลเซียส วัสดุทนไฟที่ผสม spinel, paricase และ dolomite มีแนวโน้มของการเสียรูปที่เพิ่มขึ้น

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาพฤติกรรมทางกลด้านความร้อนของวัสดุทนไฟที่ผสมวัสดุซิลิกาซึ่งมีราคาที่ถูกและได้มาตรฐาน มาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมการเกษตรพลังงานความร้อน ยกตัวอย่างเช่น หม้อเผา (Kiln) ในอุตสาหกรรมภาชนะดินเผาและเซรามิกส์ เตาเผาให้พลังงานความร้อน (Incinerator) สำหรับโรงงานอบผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เป็นต้น การทดสอบจะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างวัสดุทนไฟควมคุมเกรด Gunning refractory 3000 F° capacity และเปรียบเทียบกับวัสดุทนไฟ ที่ผสมกับวัสดุซิลิกาที่ปริมาณร้อยละ 15, 30, 45 และ 60 โดยน้ำหนัก ซึ่งวัสดุซิลิกาที่ก่อนนำมาทดสอบ จะถูกร้อนด้วยตะแกรงเบอร์ 8 หลังจากนั้น ทำการทดสอบอัตราส่วนของน้ำที่เหมาะสม โดยทำการผสมวัสดุทนไฟและวัสดุซิลิกา ให้เข้ากันโดยใช้เครื่องกวนไฟฟ้า ความเร็วประมาณ 50-60 รอบต่อนาที หลังจากนั้น เทปริมาณน้ำลงไปประมาณ 80 % ของที่คาดการณ์ไว้ เริ่มผสมอีกทีจนเห็นว่าเข้ากันดีแล้ว ทำการทดสอบหาค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมโดยใช้วิธี ball-in hand test (ASTM C860-10)[28].



รูปที่ 2. สาธิตวิธีการทดสอบ ball in hand test

ถ้าส่วนผสมหนืดเกินไปให้ค่อยๆเติมน้ำ และทดสอบอีกที จนพบค่าส่วนผสมของน้ำที่เหมาะสม การผสมควรจะมีระดับที่วางในการคำนวณค่าต่างๆ เนื่องจากอัตราส่วนที่ผิดพลาดจะมีผลต่อคุณสมบัติของวัสดุทนไฟ เช่น ถ้าน้ำมากเกินไป จะมีผลต่อคุณสมบัติ Cold crushing strength (CCS) ลดลง และเพิ่มการแตกร้าว (Shrinkage) ส่วนถ้าปริมาณน้ำน้อยเกินไป จะมีผลทำให้เกิดรูพรุนสูง และทำให้การผสมไม่เข้ากันเท่าที่ควร ส่งผลให้คุณสมบัติต่างๆลดถอยลง เมื่อได้ปริมาณน้ำที่เหมาะสม จะถูกบ่มโดยใช้วิธี air cure ที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุทนความร้อน จะทำการทดสอบทั้งทางด้านกายภาพ และทางเคมี รวมถึงคุณสมบัติทางกลศาสตร์ และสุดท้ายคือการนำส่วนผสมที่ดีที่สุดเพื่อใช้ในการทดสอบ Test of scale โดยใช้ module ของบางชิ้นส่วนที่กระทบกับความร้อนของภาคอุตสาหกรรมการเกษตรสำหรับ Gunning Lining type การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมจะใช้มาตรฐานการทดสอบของอเมริกา ASTM ว่าด้วยมาตรฐานวัสดุทนไฟ

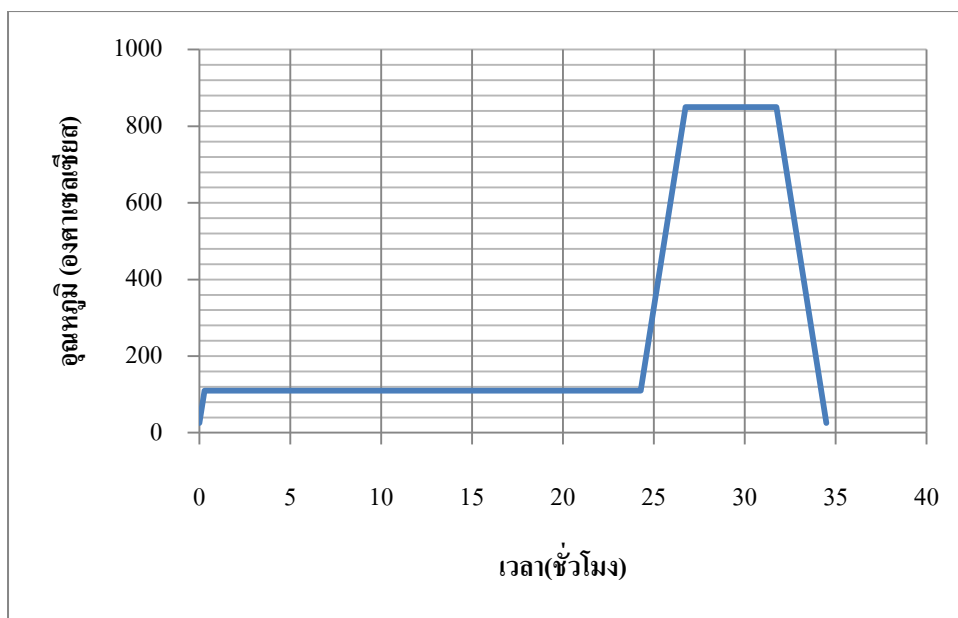
3.1 การทดสอบด้านวัสดุวิศวกรรมขั้นสูง (Advance Materials Engineering, AME)

3.1.1 ทดสอบคุณสมบัติด้านเคมีของวัสดุทนไฟเกรด Gunning refractory 3000 F° capacity โดยใช้มาตรฐานการทดสอบของสหรัฐอเมริกา (ASTM Standards) และ การทดสอบ-วิเคราะห์ ด้วยเครื่องมือขั้นสูงโดย XRF (X-Ray Fluorescence)

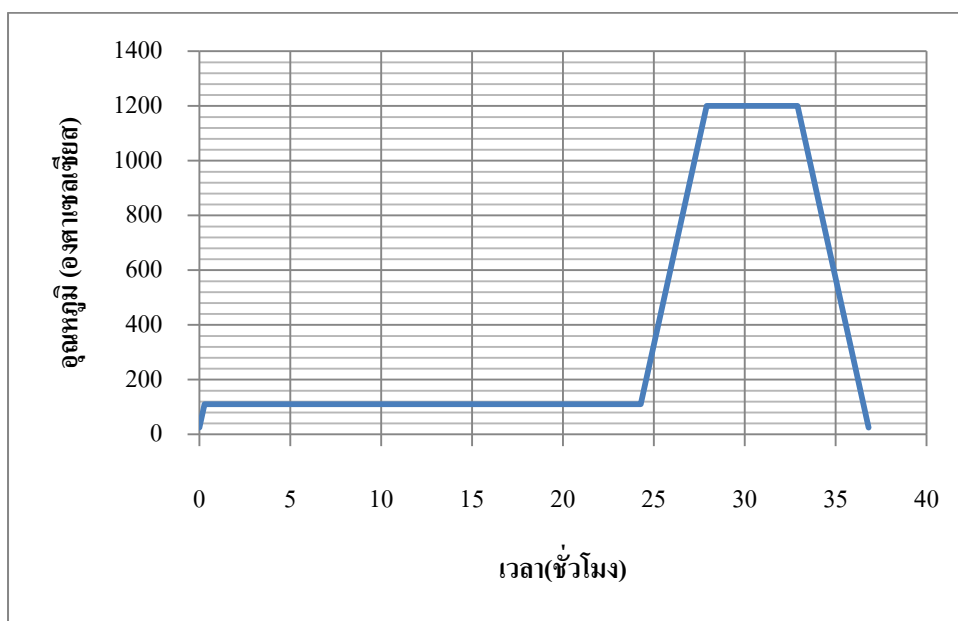
3.1.2 ทดสอบคุณสมบัติด้านกายภาพของเกรด Gunning refractory 3000 F° capacity และวัสดุซิลิกาโดยวิเคราะห์ทดสอบโดยการใช้ SEM (Scanning Electron Microscope)

3.1.3 ทดสอบคุณสมบัติด้าน Cold Crushing Strength (CCS) ASTM C133-97[29] โดยจะทดสอบเปรียบเทียบทั้งวัสดุทนไฟควบลุม และวัสดุทนไฟที่ผสมวัสดุซิลิกา ที่ปริมาณร้อยละ 15, 30, 45 และ 60 โดยน้ำหนัก อายุการบ่ม ที่ 7, 14 และ 28 วัน นำมาทดสอบการเผาที่อุณหภูมิต่างกัน คือ 815°C, 1200°C และ 1500 °C โดยก่อนที่จะทำการทดสอบ วัสดุทนไฟถูกเผาที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนที่จะถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิที่กำหนดเป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง โดยกำหนดอัตราการเพิ่มขึ้นเป็น 5 °C ต่อนาที หลังจากนั้นทำการลดความร้อนจนถึงอุณหภูมิห้อง ดังแสดงรูปที่ 1, 2, และ 3 จากนั้นจะนำไปทดสอบหาค่าสมบัติของวัสดุต่างๆ การทดสอบจะดำเนินการโดยนำวัสดุทนไฟผสมซิลิกาที่อัตราส่วนต่างๆ ทดสอบหาแรงกดโดยใช้เครื่อง (digimatic caliper, Serial No. MW072967) ทำการกดจนวัสดุพังทลายหลังจากนั้นทำการหา Cold Crushing Strength (CCS) ซึ่งสามารถคำนวณดังนี้

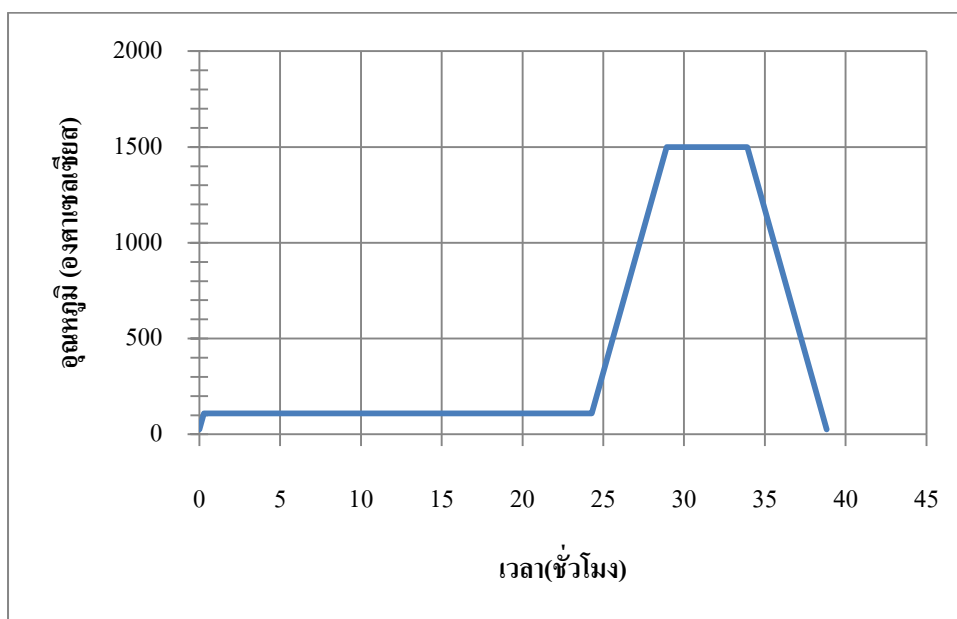
$$CCS = \frac{\text{แรงกด}}{\text{พื้นที่รับแรง}} \quad (3.1)$$



รูปที่ 3. แสดงแผนภูมิการให้ความร้อนของวัสดุทนไฟ ที่อัตราส่วนซิลิการ้อยละ 0, 15, 30, 45 และ 60 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 815 C



รูปที่ 4. แสดงแผนภูมิการให้ความร้อนของวัสดุทนไฟ ที่อัตราส่วนซิลิการ้อยละ 0, 15, 30, 45 และ 60 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 1200 C



รูปที่ 5. แสดงแผนภูมิการให้ความร้อนของวัสดุทนไฟ ที่อัตราส่วนซิลิการ้อยละ 0, 15, 30, 45 และ 60 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 1500 °C

3.1.4 ทดสอบคุณสมบัติด้าน Thermal Permanent Linear Change (TPLC)[30] โดยจะเป็นการทดสอบหาค่าปริมาตรหรือขนาดของวัสดุทนไฟ ที่เปลี่ยนไปเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งเป็นการทดสอบที่สำคัญสำหรับวัสดุทนไฟ ยกตัวอย่างเช่นเตาเผา เนื่องจากได้รับความร้อน และทำให้เย็นลง ซ้ำๆ กัน ถ้าการมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของวัสดุ การแตกร้าวจะเกิดขึ้น ซึ่งการแตกร้าวนี้เป็นผลเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาเคมีของวัสดุ หรือการแยกเฟสของวัสดุต่างๆ โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้

3.1.4.1 ทำการวัดความยาวของวัสดุทนไฟ ที่ตำแหน่ง สามจุดและทำการเฉลี่ยค่าก่อนนำเข้าเตาเผาอุณหภูมิสูงโดยใช้ Vernier calliper

3.1.4.2 ทำการเผาวัสดุทนไฟ ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ที่ 815°C, 1200°C และ 1500 °C โดยแผนภูมิการเพิ่มของอุณหภูมิมีอัตราเช่นเดียวกับการทดสอบค่า CCS

3.1.4.3 วัดขนาดอีกครั้ง ผลที่ได้ให้นำมาคำนวณค่าที่เปลี่ยนแปลงไปดังนี้

$$TPLC = \frac{l_0 - l_n}{l_0} \times 100 \quad (3.2)$$

โดย l_0 คือความยาวของชิ้นงานก่อนเผา และ l_n คือความยาวหลังจากถูกเผาที่อุณหภูมิกำหนดไว้

3.1.6 ทดสอบคุณสมบัติด้าน Bulk Density ASTM C134-95[31]

3.1.7 ทดสอบคุณสมบัติ Thermal Conductivity เป็นการวัดความสามารถของวัสดุที่จะให้ปริมาณของความร้อนเคลื่อนที่ผ่านต่อเวลาและหน้าตัดคงที่ ถ้าความร้อนสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ดีนั้นหมายความว่า วัสดุมีค่าการส่งผ่านความร้อนที่สูง การทดสอบนี้จะเป็นการทดสอบค่าการนำความร้อนของวัสดุทนไฟควมคุมและวัสดุทนไฟผสมซิลิกา โดยการทดสอบได้รับการอนุเคราะห์จากศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ

3.1.8 การทดสอบ Test of scale จะใช้ module ของบางชิ้นส่วนที่กระทบกับความร้อนของภาคอุตสาหกรรมการเกษตรสำหรับ Gunning Lining type. โดยการทดสอบจะเลือกส่วนผสมของวัสดุทนไฟและวัสดุซิลิกาที่เหมาะสมที่สุดมาทำการทดสอบ



รูปที่ 6. แสดงเครื่องผสมไฟฟ้า



รูปที่ 7. แสดงแผนงานการทดสอบ

บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิจารณ์

จากผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุทนไฟเกรด Gunning refractory 3000 F° capacity เปรียบเทียบกับวัสดุทนไฟที่ผสมซิลิกาที่อัตราส่วนร้อยละ 15(SRM15), 30(SRM30), 45(SRM45) และ 60(SRM60) โดยน้ำหนัก โดยทำการทดสอบหาคุณสมบัติทั้งทางด้านเคมีและกายภาพ รายละเอียดการทดสอบและวิจารณ์สามารถแสดงดังต่อไปนี้

4.1 คุณสมบัติทางเคมี

จากตารางที่ 1 และ 2 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุทนไฟเกรด Gunning refractory 3000 F° และทราย (ซิลิกา) ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 8 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า วัสดุทนไฟ ควบคุมมีส่วนประกอบหลัก คือ อะลูมินา (Al_2O_3), ซิลิกา (SiO_2) และ ปูนขาว (CaO) โดยผลรวมมีค่าเท่ากับ 96.6% ซึ่งทั้ง 3 สารประกอบนี้สามารถทำปฏิกิริยาเคมีและมีผลต่อความแข็งแรงของวัสดุ และส่วนประกอบทางเคมีของทราย ประกอบด้วยซิลิกา (SiO_2) และ อะลูมินา (Al_2O_3) โดยมี ส่วนประกอบของ ซิลิกาสูงถึง 93.2% ดังนั้นการผสมทรายกับวัสดุทนไฟจึงเป็นเพิ่มปริมาณซิลิกา โดยตรงการวัสดุ ซึ่งการทดสอบทางกายภาพ จะแสดงถึงผลกระทบของการเติมซิลิกา ต่อสมบัติ ต่างๆของวัสดุทนไฟ

ตารางที่ 6. แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของ Gunning castable refractory

Chemical	Concentration (%)
Al_2O_3	34.5
CaO	9
Fe_2O_3	0.6
MgO	0.3
SiO_2	53.1
$\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$	1.6
TiO_2	0.7

ตารางที่ 7. แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของทรายที่ใช้ในการทดลอง

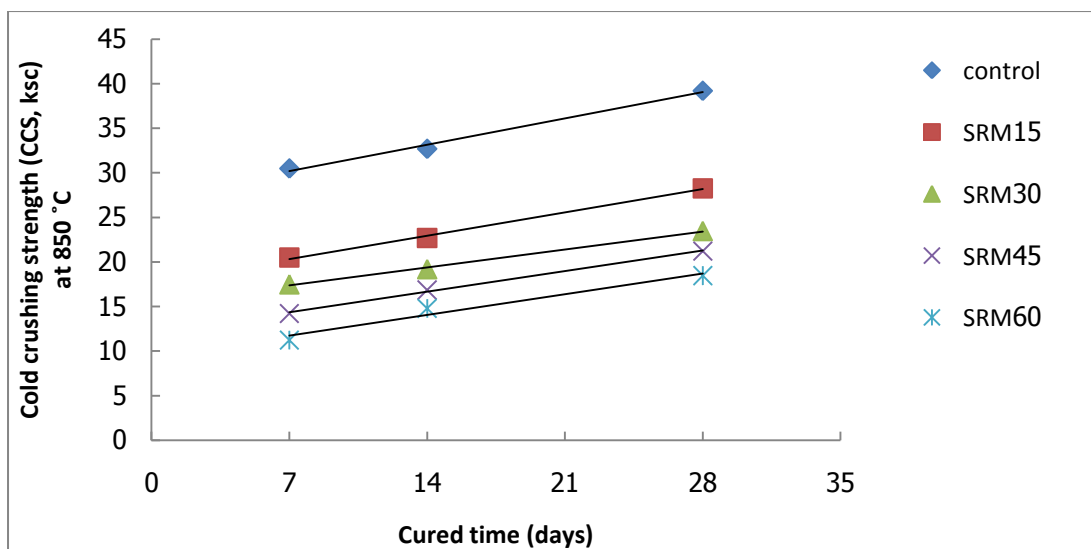
Chemical	Concentration (%)
Al_2O_3	6.22
Fe_2O_3	0.0374
K_2O	0.538
SiO_2	93.2
TiO_2	0.05

4.2 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุทนไฟผสมซิลิกา (Silica refractory materials (SRM))

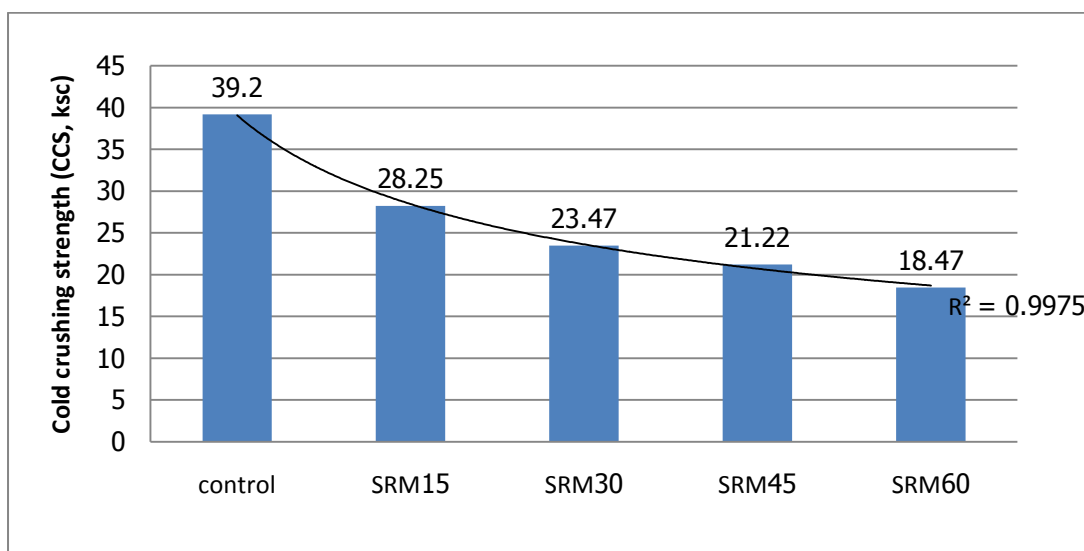
4.2.1 อิทธิพลของปริมาณซิลิกาต่อค่าคุณสมบัติ Cold crushing strength (CCS) ของวัสดุทนไฟ

จากกราฟรูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CCS ณ อุณหภูมิการเผาที่ 850 °C ที่ระยะเวลาการบ่มที่แตกต่างกัน คือ 7, 14 และ 28 วัน ผลการทดสอบพบว่า ทุกอัตราส่วนของวัสดุทนไฟมีค่า CCS ที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของอายุการบ่ม ซึ่งการเพิ่มขึ้นของแต่ละอัตราส่วนเปรียบเทียบ ที่อายุ 28 วันและ 7 วัน พบว่าค่าการเพิ่มขึ้นของ วัสดุทนไฟควบคุม (control), SRM15, SRM30, SRM45, และ SRM60 คิดเป็น 28.52, 37.8, 34.11, 49.33, และ 64.32% ตามลำดับ

สำหรับการเพิ่มขึ้นดังกล่าวอาจเป็นผลมาจากการทำปฏิกิริยาเคมีของสารประกอบหลักของวัสดุทนไฟคือ อะลูมินา (Al_2O_3), ซิลิกา (SiO_2) และ ปูนขาว (CaO) และเมื่อเปรียบเทียบกับที่อายุการบ่ม 28 วันดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่า ค่า CCS มีค่าลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของปริมาณซิลิกา โดยมีค่าดังนี้ 39.2, 28.5, 23.47, 21.22 และ 18.47 ksc ที่ปริมาณซิลิการ้อยละ 0, 15, 30, 45, และ 60 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาตามมาตรฐาน (ASTM C133-97 กำหนดค่า CCS แบบพ่น (Gunned on after 815 °C)) จะต้องมียุ่ระหว่าง 28.00-55.00 Kg.cm-2 ดังนั้นค่า CCS ของวัสดุ SRM ที่ ร้อยละ 15 ก็ยังเพียงพอที่อยู่ในมาตรฐานกำหนด



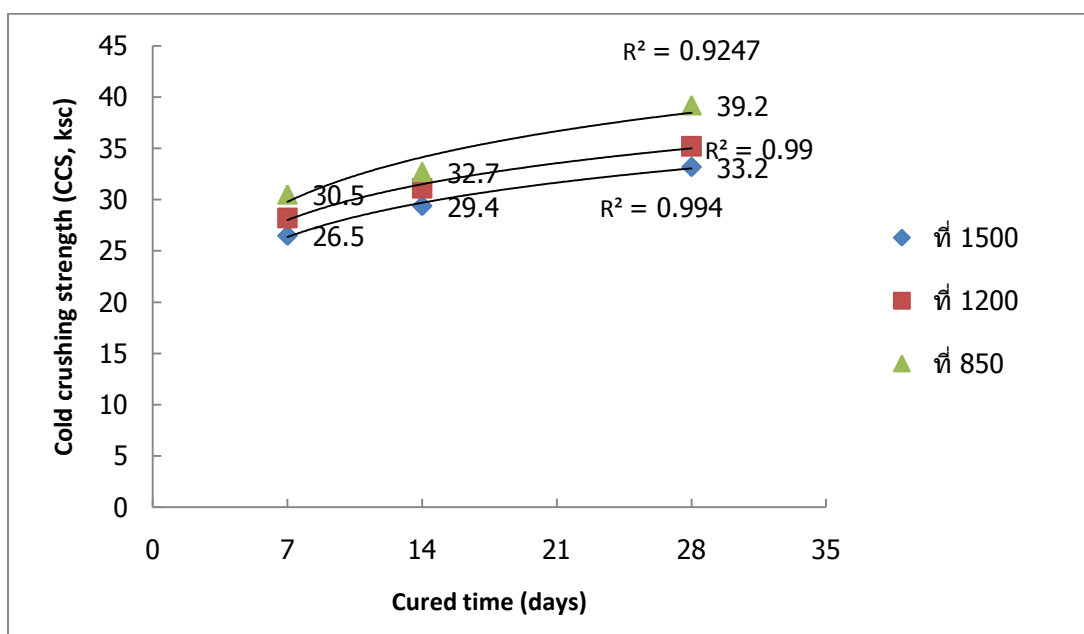
รูปที่ 8. แสดงค่า CCS ของวัสดุทนไฟผสมกับซิลิกาที่ปริมาณร้อยละ 0, 15 ,30, 45, และ 60 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิการเผา 850 °C



รูปที่ 9. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CCS ของวัสดุทนไฟที่อัตราส่วนซิลิกาแตกต่างกัน ณ อุณหภูมิการเผาที่ 850 °C ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

รูปที่ 10 แสดงผลการทดสอบค่า CCS ของวัสดุทนไฟควบคุมที่อายุการบ่ม 7, 14, และ 28 วัน ที่อุณหภูมิการเผา 850, 1200 และ 1500 ° จากรูปมีการผลการทดสอบเฉพาะวัสดุทนไฟควบคุม เนื่องจาก วัสดุทนไฟที่ผสมซิลิกา ทุกส่วนผสม ที่อุณหภูมิการเผาที่ 1200 °C และ 1500 °C มีการแตกร้าวของวัสดุทั้งหมดจึงไม่สามารถทดสอบหาค่า CCS ได้ มีเพียงวัสดุทนไฟควบคุม ประเภทเดียวที่ไม่แตกร้าว ซึ่งแสดงว่าการเพิ่มซิลิกาในส่วนผสมของวัสดุทนไฟ สามารถทนอุณหภูมิการเผาได้ที่อุณหภูมิไม่สูงมาก ซึ่งจากการทดสอบนี้คือ 850 °C ยิ่งเพิ่มปริมาณซิลิกามากเท่าไรค่า CCS จึงมีค่าลดลงจากผลการทดสอบ

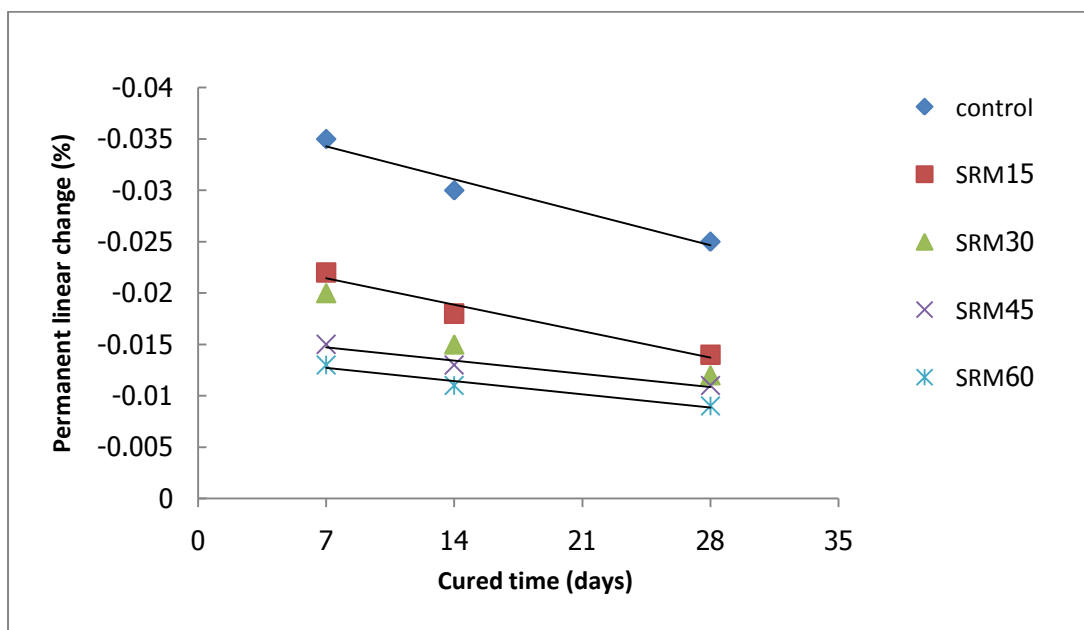
พิจารณารูปที่ 3 แสดงว่าค่า CCS ของวัสดุทนไฟควบคุม มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการเผา ทุกอายุการบ่ม ค่าต่ำสุดคือที่อายุการบ่ม 7 วัน ที่อุณหภูมิการเผา 1500 °C การลดลงของค่า CCS สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อวัสดุถูกเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาเคมีบางส่วนอาจถูกทำลายหรือเสื่อมสภาพ การขยายตัวมากขึ้น ทำให้วัสดุทนไฟเปราะมากขึ้น รับแรงกดได้น้อยลง



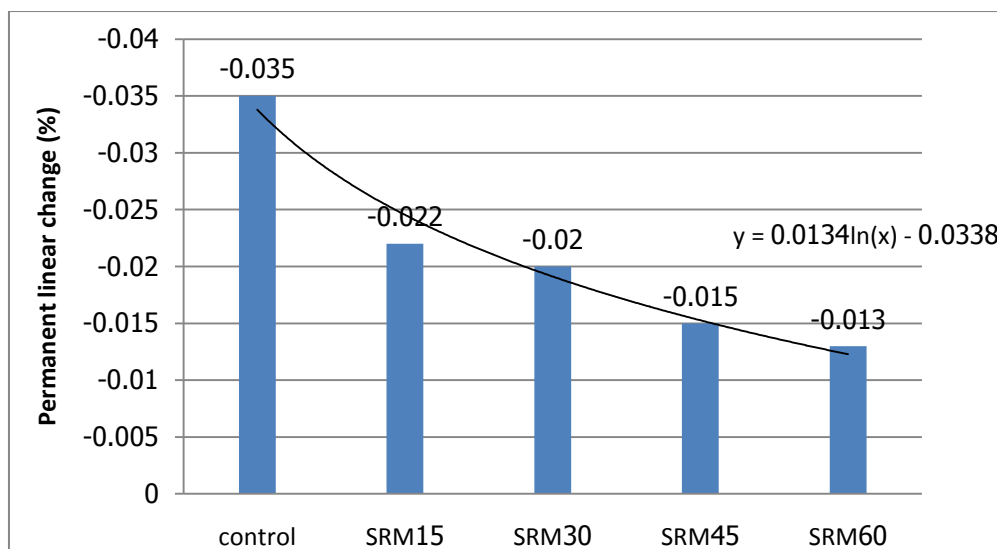
รูปที่ 10. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CCS ของวัสดุทนไฟควบคุม ณ อุณหภูมิการเผาที่ 850, 1200 และ 1500 °C

4.2.2 อิทธิพลของปริมาณซิลิกาต่อค่าคุณสมบัติ Permanent linear change (PLC) ของวัสดุทนไฟ

พิจารณาค่า Permanent Linear Change (PLC) ของวัสดุทนไฟ ทำการเผาที่อุณหภูมิ 850 °C ทุกส่วนผสมของซิลิกาพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ลดลงตามอายุการบ่มซึ่งค่าต่ำสุดที่อายุ วัน 28 ทุกส่วนผสมของซิลิกา ดังแสดงในรูปที่ 11 นั้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อปล่อยวัสดุเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เพียงพอ วัสดุจะมีความต้านทานต่อการยืดตัวเพิ่มมากขึ้น และเมื่อพิจารณาค่าในรูปที่ ที่อายุการ 5 บ่มพบว่า การเพิ่มปริมาณซิลิกาในวัสดุทนไฟมากขึ้น สามารถลดอัตราการขยายตัวของวัสดุทนไฟได้ มีค่าการลดลงเป็นไปตามสมการ $y = 0.0134\ln(x) - 0.0338$ โดยค่า PLC ต่ำสุดมีค่าเท่ากับ -0.013% ที่ปริมาณซิลิการ้อยละ 60 (SRM60) และค่าสูงที่สุดที่วัสดุทนไฟควบคุม มีค่าเท่ากับ -0.035%

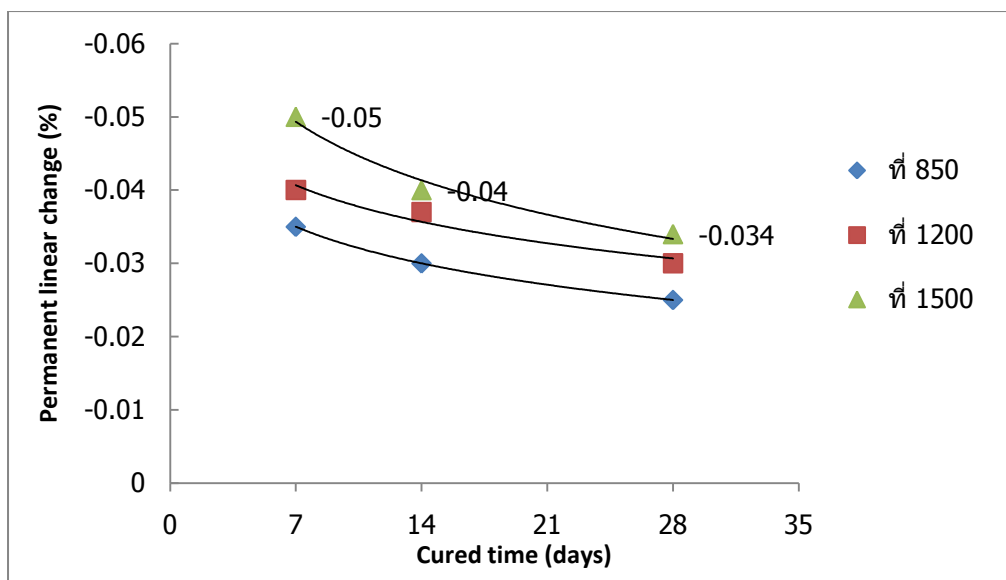


รูปที่ 11. แสดงค่า PCL ของวัสดุทนไฟผสมกับซิลิกาที่ปริมาณร้อยละ 0, 15, 30, 45, และ 60 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิการเผา 850 °C



รูปที่ 12. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า PLC ของวัสดุทนไฟที่อัตราส่วนซิลิกาแตกต่างกัน ณ อุณหภูมิการเผาที่ 850 °C ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

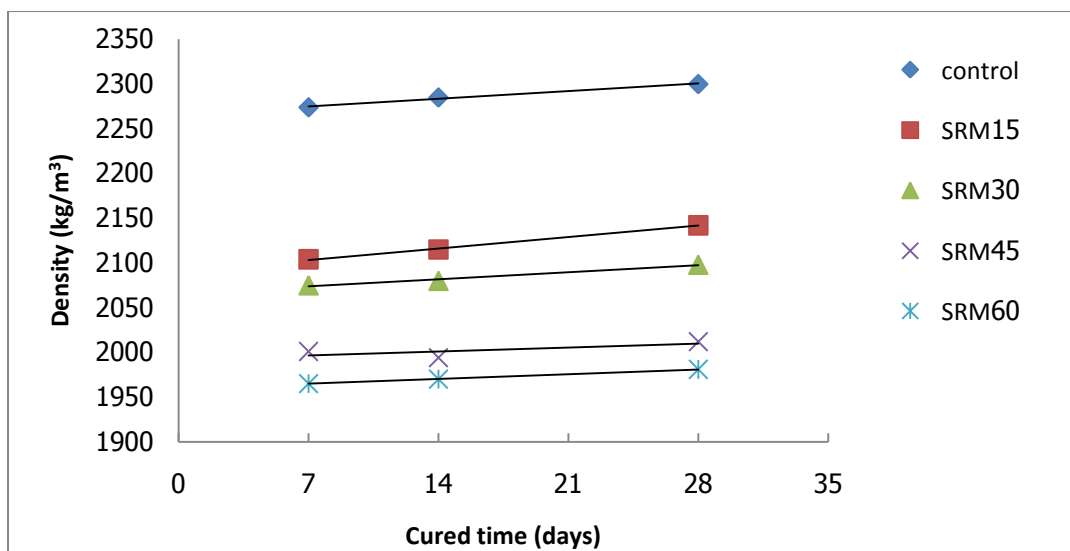
แต่เมื่อพิจารณาค่า PLC ของวัสดุทนไฟที่อุณหภูมิการเผาสูงขึ้นคือ 1200 และ 1500 °C ดังแสดงในรูปที่ 13 พบว่าสามารถวัดค่า PLC ได้เพียงวัสดุทนไฟควบคุม (control) เนื่องจากเมื่อเพิ่มวัสดุซิลิกาลงในส่วนผสมพบว่า วัสดุทั้งหมดเกิดการแตกร้าว จึงไม่สามารถวัดค่า PLC ได้ จากการพิจารณาค่า PLC เฉพาะวัสดุทนไฟควบคุมพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาที่สูงขึ้น โดยค่าขยายตัวสูงสุดเกิดขึ้นที่อายุการบ่ม 7 วัน อุณหภูมิการเผา 1500 °C มีค่าเท่ากับ -0.05% จากการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าการเติมซิลิกาลงในส่วนผสมของวัสดุทนไฟ สามารถลดการลดหรือขยายตัวของวัสดุได้ แต่สำหรับการเผาที่อุณหภูมิการเผาที่สูงมากกว่า 850 °C วัสดุซิลิกาที่เข้าไปแทนที่ของวัสดุทนไฟควบคุมไม่สามารถทนความร้อนได้ อาจเป็นผลเนื่องมาจากการเสื่อมสลายของพันธะเคมีบางตัว ซึ่งต่างกับวัสดุทนไฟควบคุม ซึ่งยังคงทนสภาพการยืดหดตัวได้ แม้แต่การเผาที่อุณหภูมิสูง



รูปที่ 13. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า PLC ของวัสดุทนไฟควบคุม ณ อุณหภูมิการเผาที่ 850, 1200 และ 1500 °C

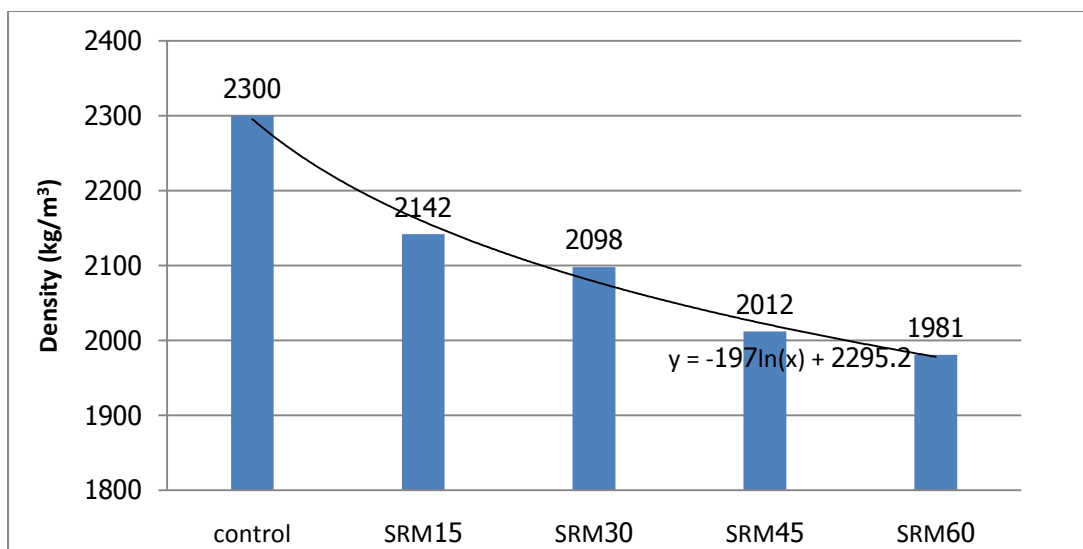
4.2.3 อิทธิพลของปริมาณซิลิกาต่อค่าคุณสมบัติหน่วยน้ำหนัก (Density) ของวัสดุทนไฟ

เมื่อพิจารณาถึงค่าหน่วยน้ำหนักของวัสดุทนไฟผสมซิลิกาทุกสัดส่วน พบว่าค่าหน่วยน้ำหนักมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ตามอายุการบ่มที่มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบอายุบ่มที่ 7 และ 28 วัน ของวัสดุทนไฟควบคุม (control), SRM15, SRM30, SRM45 และ SRM60 พบว่า มีค่าหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 1.14, 1.80, 1.10, 0.55 และ 0.81 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 14 ซึ่งการเพิ่มขึ้นนี้สามารถอธิบายได้ว่าอาจเกิดจากการระเหยของน้ำ และเกิดปฏิกิริยาเคมีที่มากขึ้นเมื่อเวลาการบ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่า CCS



รูปที่ 14. แสดงค่าหน่วยน้ำหนัก (Density) ของวัสดุทนไฟผสมกับซิลิกาที่ปริมาณร้อยละ 0, 15, 30, 45, และ 60 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิการเผา 850 °C

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าของหน่วยน้ำหนักที่ปริมาณวัสดุซิลิกาแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิการเผา 850 °C ดังแสดงในรูปที่ 15 พบว่า ค่าหน่วยน้ำหนักมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเติมวัสดุซิลิกาเพิ่มมากขึ้น โดยการลดต่ำลงนี้สามารถเขียนในรูปของสมการ $y = -197\ln(x) + 2295.2$ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุควบคุมพบว่าค่าของหน่วยน้ำหนักของ SRM15, SRM30, SRM45 และ SRM60 มีค่าคิดเป็น 6.87%, 8.78%, 12.52% และ 13.87% ของวัสดุทนไฟควบคุม ซึ่งสามารถอธิบายการลดลงของหน่วยน้ำหนักเนื่องจากค่าหน่วยน้ำหนักของซิลิกานั้นเอง ซึ่งมีค่าประมาณ 1200kg/m^3 ซึ่งแตกต่างกับค่าหน่วยน้ำหนักของวัสดุควบคุมคือ 2300kg/m^3 ดังนั้นการเพิ่มปริมาณซิลิกามากเท่าไร ค่าหน่วยน้ำหนักของวัสดุยังมีค่าลดลง

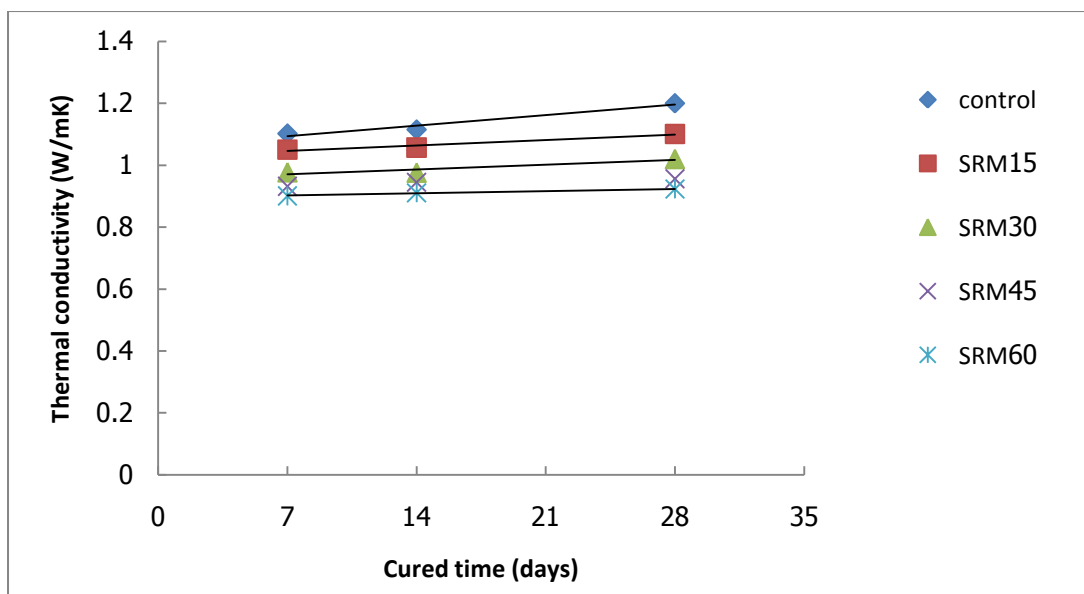


รูปที่ 15. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยน้ำหนัก (density) ของวัสดุทนไฟที่อัตราส่วนซิลิกาแตกต่างกัน ณ อุณหภูมิการเผาที่ 850 °C ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

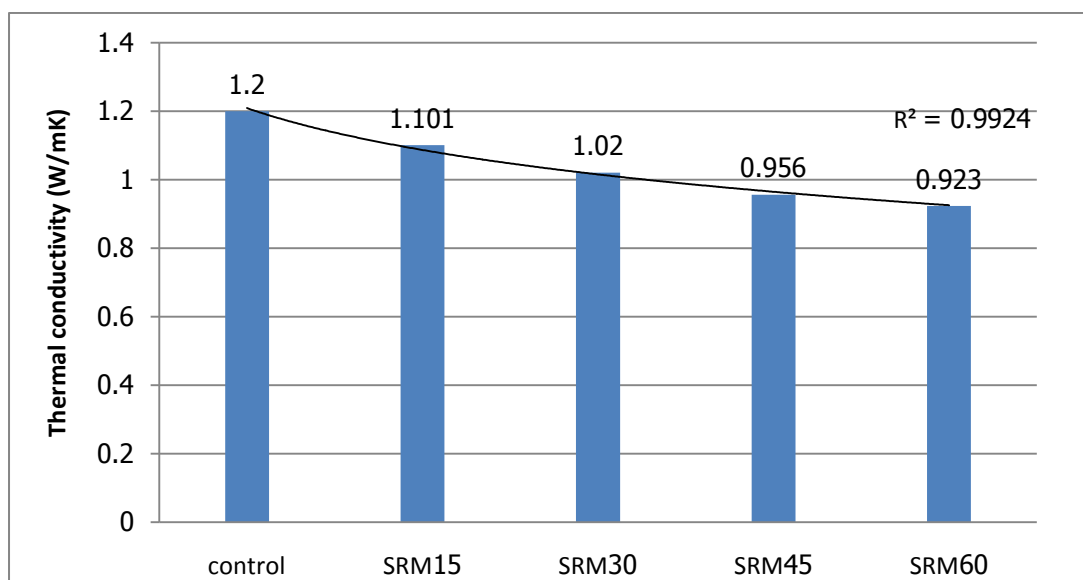
4.2.4 อิทธิพลของปริมาณซิลิกาต่อค่าคุณสมบัติ การนำความร้อน (Thermal conductivity) ของวัสดุทนไฟ

พิจารณาค่าการนำความร้อนของวัสดุทนไฟผสมวัสดุซิลิกาที่ปริมาณต่างๆ เมื่อผ่านการเผาที่ 850 °C ดังแสดงในรูปที่ 16 พบว่าค่าการนำความร้อนของวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้นกับระยะเวลาการบ่ม เมื่อทำการเปรียบเทียบ ระหว่างระยะเวลาการบ่มที่ 28 วัน และ 7 วัน พบว่าค่าการนำความร้อนของ SRM(control), SRM15, SRM30, SRM45 และ SRM60 มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 8.89, 4.86, 4.40, 2.57 และ 2.44

จากการเพิ่มขึ้นนี้แสดงให้เห็นว่า ถ้าปริมาณซิลิกาเพิ่มมากขึ้น ระยะเวลาบ่มจะมีผลต่อค่าการนำความร้อนลดลง ซึ่งอาจจะเป็นผลของการเกิดปฏิกิริยาที่ต่ำลงเนื่องจากการแทนที่ของซิลิกา ในรูปที่ 10 เป็นการเปรียบเทียบค่าการนำความร้อน ของวัสดุทนไฟเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาที่ ร้อยละ 15, 30, 45 และ 60 โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบแสดงว่าค่าการนำความร้อนมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกา ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 8.25, 15, 20 และ 23 ของวัสดุควบคุม



รูปที่ 16. แสดงค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของวัสดุทนไฟผสมกับซิลิกาที่ปริมาณร้อยละ 0, 15, 30, 45, และ 60 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิการเผา 850 °C



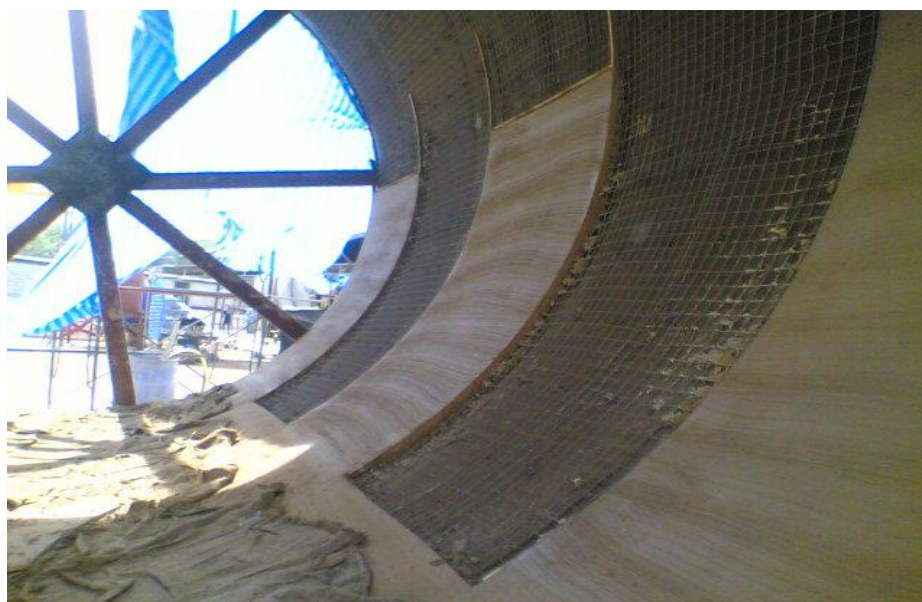
รูปที่ 17. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของวัสดุทนไฟที่อัตราส่วนซิลิกาแตกต่างกัน ณ อุณหภูมิการเผาที่ 850 °C ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

4.3 การทดสอบวัสดุ SRM กับ บางชิ้นส่วนที่กระทบกับความร้อนของภาคอุตสาหกรรม การเกษตรสำหรับ Gunning Lining type

โดยการทดสอบจะเลือกวัสดุ SRM 15 มาใช้ในการขึ้นรูปและการผลิต แสดงในรูปที่ 18 และ 19 ซึ่งเป็นการเอาความรู้ที่ได้ไปใช้ในการซ่อมเตาเผาจริง ซึ่งผลการดำเนินการเป็นไปอย่างราบรื่น วัสดุที่ประยุกต์ใช้สามารถใช้ได้จริงในวงการอุตสาหกรรมความร้อนประเภทเตาเผาสำหรับอุตสาหกรรมท้องถิ่น



รูปที่ 18. ทำการเตรียมชิ้นส่วนก่อนการขึ้นรูปด้วย Silica refractory



รูปที่ 19. ตำแหน่งวัสดุทนไฟหลังทำการที่ผสม Silica refractory แล้ว

บทที่ 5

สรุปผล

จากการทดสอบคุณสมบัติด้านเคมีและกายภาพของวัสดุทนความร้อนผสมกับซิลิกาที่ปริมาณร้อยละ 15, 30, 45 และ 60 โดยน้ำหนัก พบว่า การเพิ่มปริมาณซิลิกา ผลให้ค่า Cold crushing strength, (CCS) ของวัสดุทนความร้อนมีค่าลดลง เมื่อทดสอบชิ้นตัวอย่างที่ 815 องศาเซลเซียส และพบว่าที่อายุการบ่มเพิ่มมากขึ้น มีผลต่อค่ากำลังอัดที่สูงขึ้น และพบว่าลักษณะทางกายภาพของชิ้นตัวอย่างหลังทดสอบไม่พบการแตกร้าวเนื่องจากการขยายและหดตัวเนื่องจากอุณหภูมิซึ่งน่าจะเกิดจากการที่ SRM มีวัสดุซิลิกาผสมอยู่จึงมีคุณสมบัติด้านการต้านทานการขยายและหดตัวเนื่องจากอุณหภูมิได้ดี

พิจารณาค่า Permanent Linear Change (PLC) ของวัสดุ SRM พบว่ามีแนวโน้มที่ลดลงตามอายุการบ่มซึ่งค่าต่ำสุดที่อายุ 28 วัน และมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มส่วนผสมของซิลิกา อย่างไรก็ดีเมื่อทำการเผาวัสดุที่อุณหภูมิสูงขึ้นคือที่ 1200 °C และ 1500 °C พบว่าวัสดุทนไฟที่ผสมซิลิกาทุกสัดส่วนมีรอยแตกร้าวขึ้น เนื่องจากการขยายตัวและหดตัว ทำให้ทราบว่าซิลิกาสามารถช่วยลดการยืดหดตัวที่อุณหภูมิที่ไม่สูงมาก ส่วนสมบัติทางกายภาพชนิดอื่นที่ทำการทดสอบคือค่าหน่วยน้ำหนัก และค่าการนำความร้อน มีทิศทางการลดลงคล้ายกันคือ มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกา

จากการพิจารณาตามมาตรฐานแล้วพบว่า มีเพียงวัสดุ SRM15 เท่านั้นที่ผ่านคุณสมบัติทางด้านกำลังอัด แต่ดังนั้นอาจจะกล่าวได้ว่าวัสดุ SRM มีคุณสมบัติที่เพียงพอสำหรับใช้เป็นวัสดุทนไฟแบบ Conventional Cast/Pound ที่อุณหภูมิ 815 องศาเซลเซียส สำหรับอุตสาหกรรมด้านพลังงานความร้อนการเกษตรสำหรับอุตสาหกรรมท้องถิ่น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Silica refractories, factors affecting their quality and methods of testing the raw materials and finished ware, *Journal of the Franklin Institute*, 187 (1919) 353-355.
- [2] Lung cancer risk among refractory brick workers exposed to crystalline silica: A retrospective cohort study : F. Merlo, M. Costantini, G. Reggiardo, M. Ceppi and R. Puntoni. *Epidemiology and Biostatistics*, Istituto Nazionale Ricerca sul Cancro, Genova, Italia, *European Journal of Cancer and Clinical Oncology*, 27, Supplement 3 (1991) S48.
- [3] 95/00732 High-silica refractory bricks for the repair of coke ovens, and their manufacture, *Fuel and Energy Abstracts*, 36 (1995) 43.
- [4] 98/03291 Simulation of attack by dust from blast-furnace gas cleaning on a silica-alumina refractory brick: Scudeller, L. A. M. et al. *Ceramica*, 1996, 42, (276), 411–414. (In Portuguese), *Fuel and Energy Abstracts*, 39 (1998) 304.
- [5] C. Aksel, The microstructural features of an alumina–mullite–zirconia refractory material corroded by molten glass, *Ceramics International*, 29 (2003) 305-309.
- [6] B. Amrane, E. Ouedraogo, B. Mamen, S. Djaknoun, N. Mesrati, Experimental study of the thermo-mechanical behaviour of alumina-silicate refractory materials based on a mixture of Algerian kaolinitic clays, *Ceramics International*, 37 (2011) 3217-3227.
- [7] E.R. Begley, P.O. Herndon, 8 - Zirconia-Alumina-Silica Refractories, in: M.A. Allen (Ed.) *Refractory Materials*, Elsevier, 1971, pp. 185-208.
- [8] C.B. Belcher, L.B. Skelton, The rapid analysis of silica in refractories and minerals an improved method of sample preparation, *Analytica Chimica Acta*, 22 (1960) 567-570.
- [9] K. Ghanbari Ahari, J.H. Sharp, W.E. Lee, Hydration of refractory oxides in castable bond systems—II: alumina–silica and magnesia–silica mixtures, *Journal of the European Ceramic Society*, 23 (2003) 3071-3077.
- [10] A.J. Kessman, K. Ramji, N.J. Morris, D.R. Cairns, Zirconia sol–gel coatings on alumina–silica refractory material for improved corrosion resistance, *Surface and Coatings Technology*, 204 (2009) 477-483.
- [11] M. Kolli, M. Hamidouche, G. Fantozzi, J. Chevalier, Elaboration and characterization of a refractory based on Algerian kaolin, *Ceramics International*, 33 (2007) 1435-1443.

- [12] J.J. Laskowski, J. Young, R. Gray, R. Acheson, S.D. Forder, The identity, development and quantification of phases in devitrified, commercial-grade, aluminosilicate, refractory ceramic fibres: an x-ray powder diffractometry study, *Analytica Chimica Acta*, 286 (1994) 9-23.
- [13] E. Lidén, S. Karlsson, B. Tokarz, Silica sols as refractory fibre binders, *Journal of the European Ceramic Society*, 21 (2001) 795-808.
- [14] A.U. Mane, J.P. Greene, J.A. Nolen, U. Sampathkumaran, T.W. Owen, R. Winter, J.W. Elam, Refractory nanoporous materials fabricated using tungsten atomic layer deposition on silica aerogels, *Applied Surface Science*, 258 (2012) 6472-6478.
- [15] A.G.T. Martinez, A.P. Luz, M.A.L. Braulio, V.C. Pandolfelli, Creep behavior modeling of silica fume containing Al₂O₃–MgO refractory castables, *Ceramics International*, 38 (2012) 327-332.
- [16] I. May, J.J. Rowe, Solution of rocks and refractory minerals by acids at high temperatures and pressures : Determination of silica after decomposition with hydrofluoric acid, *Analytica Chimica Acta*, 33 (1965) 648-654.
- [17] M. Nouri-Khezrabad, M.A.L. Braulio, V.C. Pandolfelli, F. Golestani-Fard, H.R. Rezaie, Nano-bonded refractory castables, *Ceramics International*, 39 (2013) 3479-3497.
- [18] U.C. Nwaogu, T. Poulsen, R.K. Stage, C. Bischoff, N.S. Tiedje, New sol–gel refractory coatings on chemically-bonded sand cores for foundry applications to improve casting surface quality, *Surface and Coatings Technology*, 205 (2011) 4035-4044.
- [19] W.S. Resende, R.M. Stoll, S.M. Justus, R.M. Andrade, E. Longo, J.B. Baldo, E.R. Leite, C.A. Paskocimas, L.E.B. Soledade, J.E. Gomes, J.A. Varela, Key features of alumina/magnesia/graphite refractories for steel ladle lining, *Journal of the European Ceramic Society*, 20 (2000) 1419-1427.
- [20] R. Salomão, L.R.M. Bittencourt, V.C. Pandolfelli, A novel approach for magnesia hydration assessment in refractory castables, *Ceramics International*, 33 (2007) 803-810.
- [21] T.M. Souza, M.A.L. Braulio, A.P. Luz, P. Bonadia, V.C. Pandolfelli, Systemic analysis of MgO hydration effects on alumina–magnesia refractory castables, *Ceramics International*, 38 (2012) 3969-3976.

- [22] J. Stjernberg, M.A. Olivas-Ogaz, M.L. Antti, J.C. Ion, B. Lindblom, Laboratory scale study of the degradation of mullite/corundum refractories by reaction with alkali-doped deposit materials, *Ceramics International*, 39 (2013) 791-800.
- [23] Y.-S. Su, D.E. Campbell, J.P. Williams, Determination of silica in glasses, ceramics and refractories, *Analytica Chimica Acta*, 32 (1965) 559-567.
- [24] F.A. Cadoso, M.D.M. Innocentini, M.M. Akiyoshi, V.C. Pandolfelli, Effect of curing time the properties of CAC bonded refractory castable, *European Ceramic Society*, 24 (2004) 2073-2078.
- [25] S.A. Abo-El-Enen, M.M. Abou-Sekkina, N.M. Khalil, O.A. Shalma, Microstructure and refractory properties of spinel containing castables, *Ceramic International*, 36 (2010) 1711-1717.
- [26] F. Valenza, R. Botter, P. Cirillo, F. Barberis, M.d. Foggia, D. Sottle, Sintering of waste of superalloy casting investment shells as a fine aggregate for refractory tile, *Ceramic International*, 36 (2010) 459-463.
- [27] L.A. Diaz, R. Torrecillas, Hot bending and creep behaviour at 1000-1400 C of high alumina refractory castables with spinel, periclase and dolomite additions, *European Ceramic Society*, 29 (2009) 53-58.
- [28] ASTM, Standard Test Method for Determining the Consistency of Refractory Castable Using the Ball-In-Hand Test, in: C860 - 10
- [29] ASTM, Standard Test Methods for Cold Crushing Strength and Modulus of Rupture of Refractories, in: C133 - 97(2008)e1.
- [30] ASTM, Standard Test Method for Reheat Change of Insulating Firebrick, in: C210 - 95(2007)e1.
- [31] ASTM, Standard Test Methods for Size, Dimensional Measurements, and Bulk Density of Refractory Brick and Insulating Firebrick, in: C134 - 95(2010).

ภาคผนวก

ตารางภาคผนวกที่ 2. แสดงผลการทดสอบค่า Cold crushing strength (CCS) ของวัสดุทนไฟผสมซิลิกา ที่อุณหภูมิการเผา 850 °C

Cured time(days)	Cold crushing strength (CCS), ksc				
	control	SRM15	SRM30	SRM45	SRM60
7	30.5	20.5	17.5	14.21	11.24
14	32.7	22.7	19.2	16.86	14.78
28	39.2	28.25	23.47	21.22	18.47
w/p	0.028	0.032	0.035	0.0371	0.039

ตารางภาคผนวกที่ 3. แสดงผลการทดสอบค่า Cold crushing strength (CCS) ของวัสดุทนไฟควมคุม ที่อุณหภูมิการเผา 850 °C, 1200 °C, 1500 °C

cured time(days)	Cold crushing strength(CCS), ksc		
	at 1500 °C	at 1200 °C	at 850 °C
7	26.5	28.21	30.5
14	29.4	31.1	32.7
28	33.2	35.21	39.2

ตารางภาคผนวกที่ 4. แสดงผลการทดสอบค่า Permanent linear change (PLC) ของวัสดุทนไฟผสมซิลิกา ที่อุณหภูมิการเผา 850 °C

Cured time(days)	PLC(%)				
	control	SRM15	SRM30	SRM45	SRM60
28	-0.025	-0.014	-0.012	-0.011	-0.009
14	-0.03	-0.018	-0.015	-0.013	-0.011
7	-0.035	-0.022	-0.02	-0.015	-0.013
w/p	0.028	0.032	0.035	0.0371	0.039

ตารางภาคผนวกที่ 5. แสดงผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนัก (Density) ของวัสดุทนไฟผสมซิลิกา ที่อุณหภูมิการเผา 850 °C

Cured time(days)	Density (kg/m ³)				
	control	SRM15	SRM30	SRM45	SRM60
7	2274	2104	2075	2001	1965
14	2285	2115	2080	1994	1970
28	2300	2142	2098	2012	1981
w/p	0.028	0.032	0.035	0.0371	0.039

ตารางภาคผนวกที่ 6. แสดงผลการทดสอบค่าการนำความร้อน(Thermal conductivity) ของวัสดุทนไฟผสมซิลิกา ที่อุณหภูมิการเผา 850 °C

Cured time(days)	Thermal conductivity (W/mK)				
	control	SRM15	SRM30	SRM45	SRM60
7	1.102	1.05	0.977	0.932	0.901
14	1.115	1.057	0.976	0.945	0.911
28	1.2	1.101	1.02	0.956	0.923
w/p	0.028	0.032	0.035	0.0371	0.039



รูปภาคผนวกที่ 7. แสดงการหล่อโมดูล I. ของชิ้นส่วนเตากระทบบความร้อนของ silica refractory แบบ casting type



รูปภาคผนวกที่ 2. แสดงการหล่อโมดูล II. ของชิ้นส่วนเตากระทบบความร้อนของ silica refractory แบบ casting type



รูปภาคผนวกที่ 3. แสดงการหล่อโมดูล III. ของชิ้นส่วนเตากระแทกความร้อนของ silica refractory แบบ casting type



รูปภาคผนวกที่ 4. แสดงการหล่อโมดูล IV. ของชิ้นส่วนเตากระแทกความร้อนของ silica refractory แบบ casting type



รูปภาคผนวกที่ 5. แสดงการหล่อโมดูลของชิ้นส่วนปล่องควันกระทบความร้อนของ silica refractory แบบ casting type(1)



รูปภาคผนวกที่ 6. แสดงการหล่อโมดูลของชิ้นส่วนปล่องควันกระทบความร้อนของ silica refractory แบบ casting type (2)



รูปภาคผนวกที่ 7. แสดงการหล่อโมดูลของชิ้นส่วนปล่องควันทะบความร้อนขนาดใหญ่ของ silica refractory แบบ casting type (1)



รูปภาคผนวกที่ 8. แสดงการหล่อโมดูลของชิ้นส่วนปล่องควันทะบความร้อนขนาดใหญ่ของ silica refractory แบบ casting type (2)



รูปภาคผนวกที่ 9. แสดงการหล่อของชิ้นส่วนกระทบความร้อนเผาหลอมของ silica refractory
แบบ casting type (1)



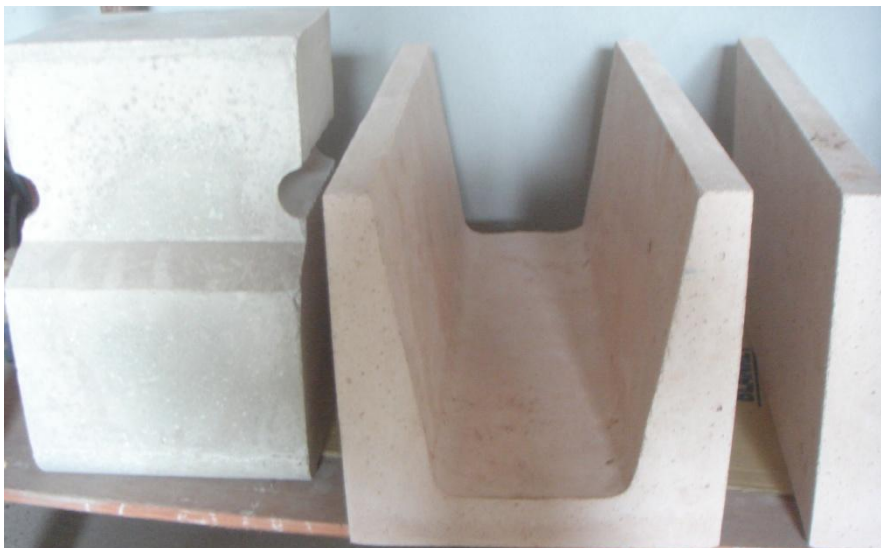
รูปภาคผนวกที่ 10. แสดงการหล่อของชิ้นส่วนกระทบความร้อนเผาหลอมของ silica refractory
แบบ casting type (2)



รูปภาคผนวกที่ 11. แสดงการหล่อของชิ้นส่วนรางกระแทกความร้อนของ silica refractory แบบ casting type (1)



รูปภาคผนวกที่ 12. แสดงการหล่อของชิ้นส่วนรางกระแทกความร้อนของ silica refractory แบบ casting type (2)



รูปภาคผนวกที่ 13. แสดงการหล่อของชิ้นส่วนสำเร็จรูปของรางกระแทกความร้อนของ silica refractory แบบ casting type (1)



รูปภาคผนวกที่ 14. แสดงการหล่อของชิ้นส่วนสำเร็จรูปของรางกระแทกความร้อนของ silica refractory แบบ casting type (1)



รูปภาคผนวกที่ 15. แสดงการหล่อของชิ้นส่วนสำเร็จรูปของรางกระแทกความร้อนของ silica refractory แบบ casting type (3)



รูปภาคผนวกที่ 16. แสดงการหล่อของชิ้นส่วนสำเร็จรูปของรางกระแทกความร้อนของ silica refractory แบบ casting type (4)



รูปภาคผนวกที่ 17. แสดงการหล่อผนังภายในกระทบความร้อนของ silica refractory แบบ casting type (1)



รูปภาคผนวกที่ 18. แสดงการหล่อผนังภายในกระทบความร้อนของ silica refractory แบบ casting type (2)