

การทดสอบคุณลักษณะของปูนทนไฟที่พัฒนาขึ้น

นางสาวณัฐริญา ชาติกานนท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR) are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

CHARACTERIZATION OF DEVELOPED REFRACTORY CEMENT

Miss Nuttariya Chatikanon

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การทดสอบคุณลักษณะของปูนทนไฟที่พัฒนาขึ้น

โดย

นางสาวณัฐธริญา ชาทิกานนท์

สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อังศุมาลิน เสนจันทร์ฉิมไชย)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.อิสราวิทย์ เชาวน์พานิช)

ณัฐริญา ชาทิกานนท์ : การทดสอบคุณลักษณะของปูนทนไฟที่พัฒนาขึ้น.

(CHARACTERIZATION OF DEVELOPED REFRACTORY CEMENT)

อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร, 92 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาส่วนผสมและคุณสมบัติของปูนทนไฟที่ผลิตขึ้นและเปรียบเทียบกับมาตรฐานของวัสดุทนไฟ ตามมาตรฐาน ASTM C401-91 และปูนทนไฟที่ใช้ในตลาดปัจจุบัน งานวิจัยได้เตรียมชิ้นงานปูนทนไฟที่มีส่วนผสมระหว่างอลูมินาซีเมนต์กับวัสดุผสมต่างๆ ได้แก่ เพอร์ไลต์ที่ 10, 20, 30, 40, 50, และ 60 เวอร์มิคูไลต์ที่ 10, 20, 30, 40, 50, และ 60 และโพลีสไตรีนโฟมที่ 1, 2, 3, 4, 5, 7 และ 10 ส่วนในร้อยละของอลูมินาซีเมนต์โดยน้ำหนัก นำส่วนผสมเติมน้ำและบ่มให้เข้ากัน เทส่วนผสมลงแบบหล่อ อบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ตรวจสอบความหนาแน่นรวมก่อน การทนต่ออุณหภูมิที่ 1,000 องศาเซลเซียส การนำความร้อน การทนต่อแรงดัด และแรงกด

ผลการศึกษาพบว่า (1) ทุกส่วนผสมของปูนทนไฟสามารถทนอุณหภูมิที่ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง ความหนาแน่นรวมก่อนมีค่าน้อยกว่า 1.04 กรัม/ลบ.ซม. และการหดตัวน้อยกว่า 1.5% ตามมาตรฐาน ASTM C401-91 (2) อิทธิพลของปัจจัยหลัก พบว่าปริมาณเพอร์ไลต์และเวอร์มิคูไลต์เพิ่มขึ้น มีผลให้คุณสมบัติด้านการทนต่อแรงกด แรงดัด และความหนาแน่นรวมก่อนลดลง (3) อิทธิพลของอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย พบว่าเพอร์ไลต์และเวอร์มิคูไลต์ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการทนต่อแรงกดและแรงดัด และ (4) ส่วนผสมที่เหมาะสมสอดคล้องกับข้อกำหนดปูนทนไฟ คือการใช้ ปริมาณเพอร์ไลต์ 60, เวอร์มิคูไลต์ 40, และโพลีสไตรีนโฟม 4 ส่วนต่อร้อยละของอลูมินาซีเมนต์ ตามลำดับ ให้คุณสมบัติด้านการทนต่อแรงกดและแรงดัดเท่ากับ 6.03 และ 4.02 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ และการนำความร้อนที่อุณหภูมิ 260, 538, และ 811 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.12, 0.14, และ 0.18 วัตต์/เมตร-องศาเคลวิน ตามลำดับ

ภาควิชา.....วิศวกรรมอุตสาหกรรม.....ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมอุตสาหกรรม.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา.....2555.....

5371500821: MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS: REFRACTORY / PERLITE / PHYSICAL PROPERTIES / CEMENT

NUTTARIYA CHATIKANON: CHARACTERIZATION OF DEVELOPED
REFRACTORY CEMENT. ADVISOR: ASST. PROF.SOMCHAI PUAJINDANETR,
Ph.D., 92 pp.

This research studied the compositions and properties of refractory cement produced and compared to the standard of refractory cement with the ASTM C401-91 and with the product in market. According to the study, the Perlite of 10, 20, 30, 40, 50 and 60, the Vermiculite of 10, 20, 30, 40, 50, and 60, and the Polystyrene foam of 1, 2, 3, 4, 5, 7, and 10 per hundred alumina cement (phc) were studied via mixed with Alumina cement and water, poured in molds, and dried at temperature of 110 degree Celsius for 24 hrs. The properties of the specimens which were fired bulk density (FBD), fire-proof at 1,000 degree Celsius for 3 hrs, heat conductivity (TC), cold crushing strength (CCS) and bend strength (BS) were characterized.

The results showed that (1) all the specimens produced were conformed to ASTM C401-91 being fire-proof at 1,000 degree Celsius for 3 hrs, FBD < 1.04 g/cm³, and linear shrinkage < 1.5%, (2) considering the main factor effect, the increasing Perlite and Vermiculite could remarkably decrease the CCS, BS, and FBD whereas polystyrene form was not effect. (3) the interaction factors between the Perlite and Vermiculite were significantly influence on the CCS and BS, (4) the suitable composition that conformed to the specification of refractory cement was found that using of 60 phc of Perlite, 40 phc of Vermiculite and 4 phc of Polystyrene form provided the CCS of 6.03 kg/cm², BS of 4.02 kg/cm², and the heat conductivity at the temperatures of 260, 538, and 811 degree Celsius for 0.12, 0.14, and 0.18 w/m-k, respectively.

Department: Industrial Engineering..... Student's Signature

Field of Study: Industrial Engineering..... Advisor's Signature

Academic Year: 2012.....

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี จากความอนุเคราะห์ของบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆระหว่างทำงานวิจัย ตลอดจนให้กำลังใจ และเอาใจใส่ในการแก้ไขข้อบกพร่อง เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สมบูรณ์ที่สุด

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.อังศุมาลิน เสนจันทร์มิไชย ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ และ ดร.อิศราวิทย์ เชาวพานิช กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณผู้บริหารโรงงานกรณีศึกษาเป็นอย่างสูง ที่ให้การสนับสนุนในการทำการวิจัยและขอขอบพระคุณคณะทำงานในการช่วยระดมความคิดและให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ บิดาและมารดา ตลอดจนเพื่อนๆที่สนับสนุนและให้กำลังใจในการทำวิจัยครั้งนี้ทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญรูป.....	ญ
สารบัญสมการ.....	ต
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 หลักการพื้นฐานเกี่ยวกับวัสดุทนไฟ.....	5
2.1.1 วัสดุทนไฟและคุณสมบัติ.....	8
2.1.2 คุณสมบัติวัสดุทนไฟ.....	18
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	35
3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา.....	35
3.2 วิธีการทดลอง.....	35
3.2.1 ศึกษาขอบเขตของวัสดุส่วนผสมแต่ละชนิดที่ใช้.....	36
3.2.2 ศึกษาส่วนผสมและคุณสมบัติของปูนทนไฟ.....	37
3.3 วิธีการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุทนไฟ.....	37
3.3.1 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกายภาพ.....	37
3.3.2 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล.....	43
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ.....	45

	หน้า
บทที่ 4 การวิเคราะห์การทดลองและการอภิปราย	47
4.1 ผลการศึกษาขอบเขตวัสดุส่วนผสมที่ใช้	47
4.2 ผลของวัสดุผสมที่มีต่อคุณสมบัติของปูนทนไฟ	56
4.2.1 ผลของวัสดุผสมที่มีต่อคุณสมบัติความหนาแน่น (FBD)	56
4.2.2 ผลของวัสดุผสมที่มีต่อคุณสมบัติการทนต่อแรงดัด (BS)	64
4.2.3 ผลของวัสดุผสมที่มีต่อคุณสมบัติการทนต่อแรงกด(CCS)	72
4.2.4 ผลของวัสดุผสมที่มีต่อคุณสมบัติทนอุณหภูมิ (PCE)	81
4.2.5 ผลของวัสดุผสมที่มีต่อคุณสมบัติการหดตัว (Permanent Linear Change) หลังเผาที่ อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส	81
4.2.6 ผลของวัสดุผสมที่มีต่อคุณสมบัติการนำความร้อน (Thermal Conductivity)	82
4.3 ผลการพิจารณาเลือกส่วนผสมที่เหมาะสม	84
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	86
5.1 สรุปผลการทดลอง	86
5.2 งานวิจัยที่ควรศึกษาต่อไปในอนาคต	87
รายการอ้างอิง	88
ภาคผนวก	90
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	92

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของแร่หินเพอร์ไลต์.....	11
ตารางที่ 2.2 ตารางการเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมด้วยเพอร์ไลต์ กับปูนซีเมนต์ผสมแบบธรรมดา.....	13
ตารางที่ 2.3 ตารางสถิติการผลิตหินเพอร์ไลต์.....	13
ตารางที่ 2.4 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของน้ำแหล่งต่างๆ (ppm).....	18
ตารางที่ 2.5 ข้อกำหนดและขอบเขตคุณสมบัติการใช้งานของผลิตภัณฑ์ปูนทนไฟ.....	30
ตารางที่ 2.6 ตารางการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์กับเพอร์ไลต์.....	34
ตารางที่ 2.7 ผลการศึกษา Relative price ของราคาต้นทุนต่อหน่วยของวัสดุดิบวัสดุทนไฟ.....	34
ตารางที่ 3.1 ปริมาณการใช้วัสดุที่ส่วนผสมต่างๆ.....	46
ตารางที่ 4.1 ผลการผสม P, V_1, V_2 , และ F ในส่วนผสมต่อร้อยละส่วนอลูมินาซีเมนต์.....	49
ตารางที่ 4.2 ปริมาณการใช้วัสดุที่ส่วนผสมต่างๆ.....	54
ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองของส่วนผสมต่างๆที่มีต่อคุณสมบัติ ความทนต่อแรงกด ความทนต่อแรงดัด และคุณสมบัติด้านความหนาแน่น.....	55
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลคุณสมบัติด้านความหนาแน่น.....	57
ตารางที่ 4.5 สรุปความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติด้านความหนาแน่น (FBD)กับปริมาณ เพอร์ไลต์ (P), ปริมาณเวอร์มิคูไลต์ (V_2) และ โพลีสไตรีนโฟม (F).....	62
ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลคุณสมบัติด้านการทนต่อแรงดัด.....	65
ตารางที่ 4.7 สรุปความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติด้านการทนต่อแรงดัด (BS) กับปริมาณ เพอร์ไลต์ (P), ปริมาณเวอร์มิคูไลต์ (V_2) และ โพลีสไตรีนโฟม (F).....	70
ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลคุณสมบัติด้านการทนต่อแรงกด.....	73
ตารางที่ 4.9 สรุปความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติด้านการทนต่อแรงกด (CCS)กับปริมาณ เพอร์ไลต์ (P), ปริมาณเวอร์มิคูไลต์ (V_2)และ โพลีสไตรีนโฟม (F).....	78
ตารางที่ 4.10 ผล P-Value ของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อความหนาแน่น (FBD) การทนต่อแรงกด (CCS) และการทนต่อแรงดัด (BS) ในเชิงสถิติ.....	80
ตารางที่ 4.11 ผลของวัสดุผสมที่มีต่อคุณสมบัติการหดตัว (Permanent Linear Change) หลังเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส.....	81

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบคุณสมบัติการนำความร้อนของวัสดุผสม.....	82
ตารางที่ 4.13 ผลของคุณสมบัติความทนต่อแรงกด ความทนต่อแรงดัด และคุณสมบัติ ด้านความหนาแน่นของส่วนผสมที่ได้ทำการพิจารณา.....	83
ตารางที่ 4.14 ผลการพิจารณาตามเกณฑ์ของ BS, CCS ที่สูงที่สุด.....	84
ตารางที่ 4.15 ผลการพิจารณาตามเกณฑ์ของ ค่า Thermal Conductivity ของส่วนผสมที่ $P = 40, 50$, และ 60 phc ขณะที่ $V_2 = 40, F = 4$	85

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1	แสดงตารางธาตุแบ่งตามชนิดของออกไซด์..... 6
รูปที่ 2.2	แสดงกระบวนการผลิตสินค้าประเภท (Shaped Refractories) เช่น อิฐทนไฟ..... 7
รูปที่ 2.3	แสดงกระบวนการผลิตสินค้าประเภท (Unshaped Refractories) เช่น คอนกรีตทนไฟ..... 7
รูปที่ 2.4	แสดงลักษณะของหินเพอร์ไลต์..... 8
รูปที่ 2.5	แสดงลักษณะของเพอร์ไลต์สีเขียวแถบแดง..... 9
รูปที่ 2.6	แสดงลักษณะของเพอร์ไลต์สีเขียว..... 9
รูปที่ 2.7	แสดงลักษณะของเพอร์ไลต์สีขาว..... 10
รูปที่ 2.8	แสดงภาพ Exfoliated vermiculite..... 15
รูปที่ 2.9	แสดงลักษณะการกดของการทดสอบ Cold Crushing Strength..... 20
รูปที่ 2.10	แสดงลักษณะการแตกของชิ้นงานเมื่อทดสอบ Cold crushing strength..... 21
รูปที่ 2.11	แสดงลักษณะการกดของการทดสอบการทนต่อแรงกด..... 22
รูปที่ 2.12	แสดงค่าการนำความร้อน (THERMAL CONDUCTIVITY) ของ ผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ชนิดต่างๆ..... 24
รูปที่ 2.13	แสดงตำแหน่งการติด Thermocouple บนแผ่นเหล็ก..... 27
รูปที่ 2.14	แสดงการเปรียบเทียบ LITER WEIGHT น้ำหนักของวัตถุดิบในภาชนะ บรรจุปริมาตร 1 ลิตร ของวัตถุดิบแต่ละชนิด..... 31
รูปที่ 2.15	แสดงการเปรียบเทียบ ราคา High Alumina Cement ในตลาดปัจจุบัน..... 32
รูปที่ 2.16	แสดงผลการวิเคราะห์หองค์ประกอบเฟสของปูนทนไฟ โดยเครื่องมือ ทดสอบ X-ray Diffraction จากบริษัทสยามวิจัยและนวัตกรรม จำกัด..... 33
รูปที่ 3.1	แสดงไม่ผสม Hobart Mixer..... 36
รูปที่ 3.2	แสดงแบบเหล็กใช้สำหรับหล่อชิ้นงานขนาด 40x160 x40 มิลลิเมตร..... 36
รูปที่ 3.3	แสดงชิ้นงานหลังจากทำการแกะออกจากแบบ..... 36
รูปที่ 3.4	ตัวอย่างถัง Vacuum-Pressure..... 38
รูปที่ 3.5	ลักษณะการวางตัวอย่างลงในถัง Vacuum-Pressure..... 38
รูปที่ 3.6	เตรียมชิ้นงานที่จะทำการทดสอบ PCE..... 39

รูปที่ 3.7	เครื่องบดหยาบ Jaw Crusher.....	39
รูปที่ 3.8	ตัวอย่างหลังบดด้วย Vibratory Disc Mill.....	40
รูปที่ 3.9	ผงตัวอย่างที่มาผสมกับ dextrin 5% โดยน้ำหนัก.....	40
รูปที่ 3.10	โมลเหล็กที่ใช้ขึ้นรูป Cone.....	40
รูปที่ 3.11	เทส่วนผสมลงในโมลแล้วขึ้นรูป Cone shape.....	40
รูปที่ 3.12	ส่วนผสมที่ทำการขึ้นรูป Cone shape.....	40
รูปที่ 3.13	ชิ้นงาน Cone standard ของ ORTON.....	40
รูปที่ 3.14	ตัวอย่างชิ้นงาน Cone Plate.....	41
รูปที่ 3.15	วิธีการติดชิ้นงานที่ต้องการทดสอบบน Cone Plate.....	41
รูปที่ 3.16	นำ cone plate เข้าเผา.....	41
รูปที่ 3.17	ตัวอย่างชิ้นงานที่เริ่มหลอม เปรียบเทียบกับ Standard Cone.....	41
รูปที่ 3.18	ลักษณะการเตรียมตัวอย่างชิ้นงานเพื่อทดสอบค่าการนำความร้อน.....	42
รูปที่ 3.19	เครื่องทดสอบ Thermal Conductivity ยี่ห้อ NETZSCH รุ่น TCT 426.....	43
รูปที่ 3.20	เครื่อง Universal Testing Press (Shimadzu: รุ่น UH 100A).....	44
รูปที่ 3.21	ชิ้นงานก่อนทดสอบ CCS.....	45
รูปที่ 3.22	ลักษณะการทดสอบแบบ Three point bending สำหรับการทดสอบ MOR.....	45
รูปที่ 4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเพอร์ไลต์ (P) กับความหนาแน่น (FBD).....	50
รูปที่ 4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ เวิร์มิกูไลต์ทั้ง 2 ขนาด (V_1 และ V_2) กับความหนาแน่น (FBD).....	50
รูปที่ 4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโพลีสไตรีนโฟม (F) กับ ความหนาแน่น (FBD).....	51
รูปที่ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเพอร์ไลต์ (P) กับคุณสมบัติการทนต่อแรงดัด(BS).....	51
รูปที่ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเวิร์มิกูไลต์ทั้ง 2 ขนาดได้แก่ V_1 และ V_2 กับคุณสมบัติการทนต่อแรงดัด (BS)	52
รูปที่ 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโพลีสไตรีนโฟม (F) กับคุณสมบัติ การทนต่อแรงดัด (BS)	52

รูปที่ 4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเพอร์ไลต์ (P) กับคุณสมบัติการทนต่อแรงกด (CCS)	53
รูปที่ 4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเวอร์มิคูไลท์ทั้ง 2 ขนาดได้แก่ V_1 และ V_2 กับคุณสมบัติการทนต่อแรงกด (CCS).....	53
รูปที่ 4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโพลีสไตรีนโฟม (F) กับคุณสมบัติการทนต่อแรงกด (CCS)	54
รูปที่ 4.10(ก)	ผลวิเคราะห์สำหรับปัจจัยหลักที่มีต่อความหนาแน่น (FBD) ของปูนทนไฟ.....	58
รูปที่ 4.10(ข)	ผลวิเคราะห์สำหรับอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่มีต่อความหนาแน่น (FBD) ของปูนทนไฟ.....	58
รูปที่ 4.11	ผลของการวิเคราะห์ General Linear Model สำหรับ FBD โดย MINITAB โปรแกรม.....	59
รูปที่ 4.12	ผลการทดสอบสมมติฐานการแจกแจงปกติของค่าตกค้าง.....	59
รูปที่ 4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตกค้างและ FBD.....	60
รูปที่ 4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตกค้างของ FBD ตามลำดับการทดลอง.....	61
รูปที่ 4.15	ผลของการวิเคราะห์ Regression สำหรับ FBD โดย MINITAB โปรแกรม.....	63
รูปที่ 4.16(ก)	ผลวิเคราะห์สำหรับปัจจัยหลักที่มีต่อการทนต่อแรงดัด (BS) ของปูนทนไฟ.....	66
รูปที่ 4.16(ข)	ผลวิเคราะห์สำหรับอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย ที่มีต่อการทนต่อแรงดัด (BS) ของปูนทนไฟ.....	66
รูปที่ 4.17	ผลของการวิเคราะห์ General Linear Model สำหรับ BS โดย MINITAB โปรแกรม.....	67
รูปที่ 4.18	ผลการทดสอบสมมติฐานการแจกแจงปกติของค่าตกค้าง.....	67
รูปที่ 4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตกค้างและ BS.....	68
รูปที่ 4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตกค้างของ BS ตามลำดับการทดลอง.....	69
รูปที่ 4.21	ผลของการวิเคราะห์ Regression สำหรับ BS โดย MINITAB โปรแกรม.....	71
รูปที่ 4.22 (ก)	ผลวิเคราะห์สำหรับปัจจัยหลักที่มีต่อการทนต่อแรงกด (CCS) ของปูนทนไฟ.....	74
รูปที่ 4.22 (ข)	ผลวิเคราะห์สำหรับอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย ที่มีต่อการทนต่อแรงกด (CCS) ของปูนทนไฟ.....	74

รูปที่ 4.23	ผลของการวิเคราะห์ General Linear Model สำหรับ CCS โดย MINITAB โปรแกรม.....	75
รูปที่ 4.24	ผลการทดสอบสมมติฐานการแจกแจงปกติของค่าตกค้าง.....	75
รูปที่ 4.25	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตกค้างและ CCS.....	76
รูปที่ 4.26	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตกค้างของ CCS ตามลำดับการทดลอง.....	77
รูปที่ 4.27	ผลของการวิเคราะห์ Regression สำหรับ CCS โดย MINITAB โปรแกรม.....	79
รูปที่ 4.28	ผลปริมาณ P ที่มีต่อการนำความร้อน (TC) เมื่อ V_2 และ F เท่ากับ 40 และ 4 phc ตามลำดับ.....	85

สารบัญสมการ

	หน้า
สมการที่ 2.1 สมการการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับคาร์บอนไดออกไซด์.....	17
สมการที่ 2.2 สมการแสดงปฏิกิริยาการเกิดตะกั่ว.....	17
สมการที่ 2.3 สมการแสดงค่าความหนาแน่น.....	18
สมการที่ 2.4 สมการแสดงค่าการหดตัวหลังเผาเชิงเส้น.....	19
สมการที่ 2.5 สมการแสดงค่าการทนต่อแรงกด.....	21
สมการที่ 2.6 สมการแสดงค่าการทนต่อแรงดัด.....	22

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันโครงสร้างหลักของอาคารมักประกอบไปด้วยเหล็กเป็นส่วนใหญ่ และเมื่ออาคารถูกเพลิงไหม้ โครงสร้างเหล็กจะได้รับความร้อน ทำให้คุณสมบัติเชิงกลของเหล็กลดลง จนไม่สามารถรับน้ำหนักของอาคารและทำให้อาคารเกิดการวิบัติได้ในที่สุด อย่างไรก็ตาม ความต้องการใช้เหล็กในการก่อสร้างยังคงปรับตัวสูงขึ้น เนื่องจากการขยายตัวของอุตสาหกรรม การก่อสร้างอย่างต่อเนื่อง และจากประกาศของกฎกระทรวง ฉบับที่ 48 ปี พ.ศ. 2540 ของพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร กำหนดให้ โครงสร้าง เสา คาน ของอาคาร จะต้องทนไฟได้ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 3 ชั่วโมง ทำให้ผู้ประกอบการวัสดุก่อสร้างโดยเฉพาะผู้ผลิตปูนซีเมนต์จำเป็นต้องพัฒนาผลิตภัณฑ์ปูนซีเมนต์เคลือบผิวโครงสร้างเหล็กให้มีความเป็นฉนวนกันความร้อน เพื่อหน่วงเวลาไม่ให้เหล็กได้รับอุณหภูมิมากเกินไป หรือเพื่อป้องกันให้โครงสร้าง เสา และคาน ของอาคารสามารถทนอุณหภูมิ ที่ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 3 ชั่วโมง

ผลิตภัณฑ์ปูนทนไฟที่ใช้ในตลาดปัจจุบัน มักใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์เป็นวัสดุผสมและใช้เพอร์ไลต์ซึ่งเป็นสารทนไฟเป็นส่วนผสม แต่เนื่องจากปูนซีเมนต์ชนิดปอร์ตแลนด์ซีเมนต์จะให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดได้ ต้องรอให้ปูนมีการเซตตัวไม่น้อยกว่า 28 วัน ขณะที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่มีปริมาณอลูมินาออกไซด์ผสมระหว่าง 40-80 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการเซตตัวภายใน 24 ชั่วโมง และสามารถทนอุณหภูมิได้มากกว่า 1,400 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ผลดีต่อผู้ใช้งาน อย่างไรก็ตาม ยังไม่พบว่ามีผู้นำปูนอลูมินาซีเมนต์ผสมร่วมกับการใช้สารทนไฟชนิดอื่นที่ไม่ใช่ เพอร์ไลต์ ได้แก่ เเวอร์มิคูไลท์ โพลีสไตรีน และโฟม

ดังนั้น เพื่อให้สอดคล้องกับปริมาณความต้องการใช้โครงสร้างเหล็กในขนาดคณนวกกับการป้องกันโครงสร้างเหล็กจากสภาวะอุณหภูมิสูง การพัฒนาออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์สารเคลือบทนไฟ ซึ่งมีส่วนช่วยในการลดปัญหาดังกล่าวได้ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาเพื่อหาส่วนผสมระหว่างสารทนไฟและอลูมินาซีเมนต์ของผลิตภัณฑ์สารเคลือบทนไฟ ที่มีคุณสมบัติเชิงกลและกายภาพ เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดโดยเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของวัสดุทนไฟ ประเภทฉนวนกันความร้อนของ American Society for Testing and Materials (ASTM C401-91), และสินค้าปูนทนไฟที่ใช้ในท้องตลาดปัจจุบัน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาส่วนผสมของปูนทนไฟที่พัฒนาขึ้นที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ได้มีการจำกัดขอบเขตของการศึกษาไว้เป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

- 1.3.1 ศึกษาข้อกำหนดและขอบเขตคุณสมบัติการใช้งานของผลิตภัณฑ์ปูนทนไฟโดยการศึกษา ดำเนินการสำรวจข้อกำหนดและขอบเขตคุณสมบัติการใช้งานผลิตภัณฑ์ปูนทนไฟ จากแหล่งข้อมูลหลัก ได้แก่ มาตรฐานของวัสดุทนไฟ ประเภทฉนวนกันความร้อน (American Society for Testing and Materials; ASTM C401-91) และผลิตภัณฑ์ปูนทนไฟ ที่ใช้ในท้องตลาด
- 1.3.2 ศึกษาขอบเขตของวัสดุส่วนผสมแต่ละชนิดที่ใช้
- 1.3.3 ศึกษาส่วนผสมและคุณสมบัติของปูนทนไฟ
- 1.3.4 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ จะทำการศึกษาดังนี้
 - 1) ความหนาแน่น (Fired bulk density; FBD)
 - 2) การยืดหดตัว (Permanent Linear Change; LC)
 - 3) การทนอุณหภูมิ (Standard Test Method for Pyro metric Cone Equivalent; PCE)
 - 4) การทดสอบการนำความร้อน (Thermal Conductivity; TC)
- 1.3.5 คุณสมบัติเชิงกลที่จะทำการศึกษาที่มีความสำคัญต่อการนำไปใช้งานหลักๆซึ่งมีดังต่อไปนี้
 - 1) การทนต่อแรงกด (Compressive strength; CCS)
 - 2) การทนต่อแรงดัด (Bend strength; BS)
- 1.3.6 การทดสอบปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM (The American Society for Testing and Material) ดังนี้
 - 1) การทดสอบคุณสมบัติเชิงกายภาพ ได้แก่ความหนาแน่น และการยืดหดตัว (Permanent Linear Change; LC) ได้ดำเนินการทดสอบชิ้นงาน ตามมาตรฐาน ASTM C401-91

- 2) การทนอุณหภูมิ (Standard Test Method for Pyro metric Cone Equivalent ; PCE) ดำเนินการทดสอบชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM C24-89
- 3) การทดสอบหาค่าการนำความร้อน ได้ทดสอบชิ้นงานตามมาตรฐาน ISO 8894-2 (Hot wire method)
- 4) การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล ได้แก่ การทนต่อแรงกด (CCS) และการทนต่อแรงดัด (BS) ได้ทดสอบชิ้นงาน ตามมาตรฐาน ASTM C133-97
- 5) การทดสอบแต่ละครั้งใช้ขนาดตัวอย่างจำนวน 3 ชิ้น โดยทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง แบบสุ่มในการทดสอบคุณสมบัติ ข้อ 3.4 และ 3.5

1.3.7 วิเคราะห์ผลของส่วนผสมวัสดุที่มีต่อคุณสมบัติต่างๆ โดยทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป MINITAB

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเคลือบโครงสร้างเหล็กที่สามารถทนต่อสภาวะอุณหภูมิสูง
- 2) เป็นการเพิ่มคุณค่าของซีเมนต์ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง
- 3) เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาสำหรับวัสดุทนไฟประเภทอื่นๆ

1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

การศึกษางานวิจัยนี้ได้กำหนดขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังขั้นตอนต่อไปนี้

- 1) สัมภาษณ์งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
- 2) กำหนดการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้
 - 2.1 ศึกษาข้อกำหนดและขอบเขตคุณสมบัติการใช้งานของผลิตภัณฑ์ปูนทนไฟ
 - 2.2 ศึกษาขอบเขตของวัสดุส่วนผสมแต่ละชนิดที่ใช้

การศึกษาได้ดำเนินการทดลอง ดังนี้

- 1) นำอลูมินาซีเมนต์ (HAC) มาผสมกับวัสดุแต่ละชนิดที่ส่วนผสมต่างๆ ในสัดส่วนต่อร้อยละ ส่วนอลูมินาซีเมนต์ (per hundred alumina cement; phc) ได้แก่ เพอร์ไลท์ (P) ตั้งแต่ 10 ถึง 60 phc เวอร์มิคูไลท์ (V_1) ตั้งแต่ 10 ถึง 60 phc เวอร์มิคูไลท์ (V_2) ตั้งแต่ 10 ถึง 60 phc และโพลีสไตรีนโฟม (F) ตั้งแต่ 1 ถึง 5 phc

2) นำแต่ละส่วนผสมที่ได้มาใส่โม่ผสม Hobart Mixer ผสมแห้ง 2 นาที เติมน้ำและปั่น เป็นระยะเวลา 3 นาที จากนั้นทำการหล่อส่วนผสมลงในแบบหล่อทำด้วยเหล็กที่มี 4 ช่องว่างแต่ละช่อง มีขนาดกว้างยาวหนาเท่ากับ 40x160x40 มิลลิเมตร

3) รอให้ชิ้นงานเกิดการแข็งตัวประมาณ 4-6 ชั่วโมง และทำการแกะชิ้นงานออกจากแบบ นำเข้าอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

4) นำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพ

2.3 ศึกษาส่วนผสมและคุณสมบัติของปูนทนไฟ

การศึกษาได้ดำเนินการ ดังนี้

1) นำผลการศึกษาที่ได้จากหัวข้อ 2.2 มากำหนดขอบเขตสูงและต่ำของแต่ละวัสดุที่ใช้ในการทดลองผสมร่วมกัน โดยจำแนกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ระดับสูง กลาง และต่ำ ทดลองซ้ำ 2 ครั้งแบบสุ่ม

2) วิธีการเตรียมชิ้นงานผสมวัสดุต่างๆ ใช้วิธีการเดียวกันดังได้กล่าวในหัวข้อ 2.2

3) นำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบคุณสมบัติเชิงกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่น (Fired bulk density; FBD) และการทนอุณหภูมิ และการทดสอบเชิงกล ได้แก่ การทนต่อแรงกด (Compressive strength; CCS) และการทนต่อแรงดัด (Bend strength; BS) การทดสอบแต่ละครั้งใช้ขนาดตัวอย่างจำนวน 3 ชิ้น

4) การทดสอบคุณสมบัติเชิงกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่น และการยึดหดตัว (Permanent Linear Change; LC) ได้ดำเนินการทดสอบชิ้นงาน ตามมาตรฐาน ASTM C401-91 การทนอุณหภูมิ (Standard Test Method for Pyro metric Cone Equivalent; PCE) ดำเนินการทดสอบชิ้นงาน ตามมาตรฐาน ASTM C24-89 และการทดสอบการนำความร้อน (Thermal Conductivity; TC) ดำเนินการทดสอบชิ้นงานตามมาตรฐาน ISO 8894-2 (Hot wire method)

5) การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล ได้แก่ การทนต่อแรงกด (CCS) และการทนต่อแรงดัด (BS) ได้ทดสอบชิ้นงาน ตามมาตรฐาน ASTM C133-97

6) วิเคราะห์ผลของส่วนผสมวัสดุที่มีต่อคุณสมบัติต่างๆ โดยทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป MINITAB

3) สรุปผลวิจัย

4) จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

หลักการพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการพื้นฐานเกี่ยวกับวัสดุทนไฟ

วัสดุทนไฟ หรือวัสดุทนไฟ (Refractory) เป็นคำมาจาก ภาษาละตินว่า Refractarius ซึ่งมีความหมายว่า คือ ไม่เปลี่ยนแปลง เป็นสารประกอบประเภท Inorganic ที่มีคุณสมบัติทนต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูง วัสดุทนไฟ จะมีคุณสมบัติพื้นฐานดังนี้ คือ

- 1) ไม่เปลี่ยนแปลงสภาพ หรือรูปร่าง ที่อุณหภูมิสูง
- 2) ทนต่อการขีดสี ที่อุณหภูมิสูง
- 3) ทนต่อการทำปฏิกิริยาเคมี ที่อุณหภูมิสูง
- 4) ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ในช่วงการใช้งานที่อุณหภูมิสูง

และได้มีการจำแนกประเภทของวัสดุทนไฟได้ 2 ลักษณะ คือ ตามองค์ประกอบทางเคมี และ ตามลักษณะ

1. การจำแนกประเภทวัสดุทนไฟตามองค์ประกอบทางเคมี ดังรูปที่ 2.1 แบ่งย่อยได้ดังนี้
 - 1.1. เซิงกรด มีองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบ ลักษณะ $[[MO_2]]$ เช่น SiO_2 เป็นต้น
 - 1.2. เซิงกลาง มีองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบ ลักษณะ $[[M_2O_3]]$ เช่น Al_2O_3 เป็นต้น
 - 1.3. เซิงด่าง มีองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบ ลักษณะ MO เช่น CaO, MgO เป็นต้น
 2. การจำแนกประเภทวัสดุทนไฟ ตามลักษณะ
 - 2.1. วัสดุทนไฟ ที่มีรูปร่างแน่นอน (Shaped Refractory) เช่น อิฐทนไฟ
 - 2.2. วัสดุทนไฟ ที่ไม่มีรูปร่างแน่นอน (Unshaped Refractory หรือ Monolithic) ได้แก่ คอนกรีตทนไฟ (Refractory Concrete) , ปูนทนไฟ (Refractory Mortar) , ผงต้ำ (Ramming Mixes) ผงยิง (Gunning Mixes), ผงฉาบ (Patching Material)
- การใช้งานวัสดุทนไฟ โดยเบื้องต้น จะต้องเลือกให้เหมาะสมกับลักษณะในการติดตั้ง จากนั้นจึงเลือกวัสดุทนไฟ ที่มีองค์ประกอบที่เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน สำหรับวิธีการผลิต มีแตกต่างกันหลายแบบ ส่วนใหญ่จะขึ้นกับลักษณะของวัสดุทนไฟ จากนั้นกระบวนการผลิตวัสดุทนไฟ จะมี 2 วิธีที่แตกต่างกันขึ้นกับประเภทของวัสดุทนไฟ เช่นเป็นแบบ Shaped Refractory ดังรูปที่ 2.2 หรือแบบ Unshaped Refractory ดังรูปที่ 2.3 เพราะหลังจากผ่านกระบวนการเตรียมวัตถุดิบ และผสมแล้ว จะนำมาขึ้นรูปโดยใช้วิธีต่างๆ กัน เช่น

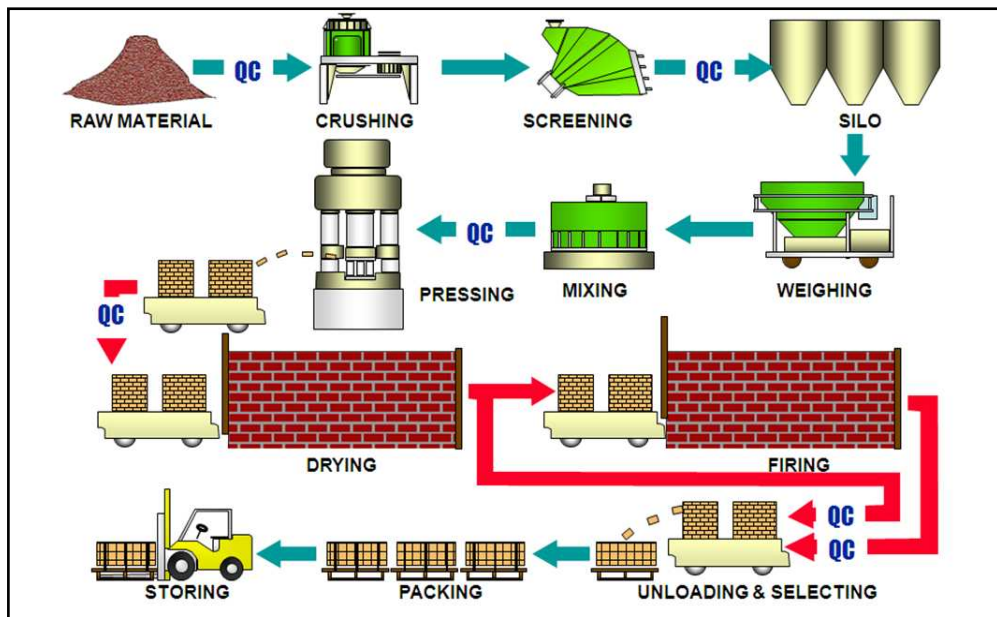
1) การอัดขึ้นรูป (Pressing) อาจจะใช้เครื่องอัดขึ้นรูป (Machine Pressing) หรือใช้ การขึ้นรูปด้วยมือ (Hand mold) ,การรีด (Extruder),การหล่อเทแบบ (Casting),การหลอมเทแบบ (Fused Cast) หรือ การขึ้นรูปโดยการปั้นแบบ (Plastic Hand Forming) ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแล้ว จะถูกทำให้รูปร่างคงตัว และมีความแข็งแรงสูงขึ้น ซึ่งอาจจะใช้ปฏิกิริยาเคมี หรือการเผาที่อุณหภูมิแตกต่างกันตามชนิดของวัสดุทนไฟดังกล่าว

2) Unshaped Refractory หรือ Monolithic หลังจากกระบวนการเตรียมวัตถุดิบ และผสมแล้ว จะบรรจุในภาชนะบรรจุตามลักษณะของการใช้งาน เช่น ปูนทนไฟ, คอนกรีตทนไฟ เป็นต้น

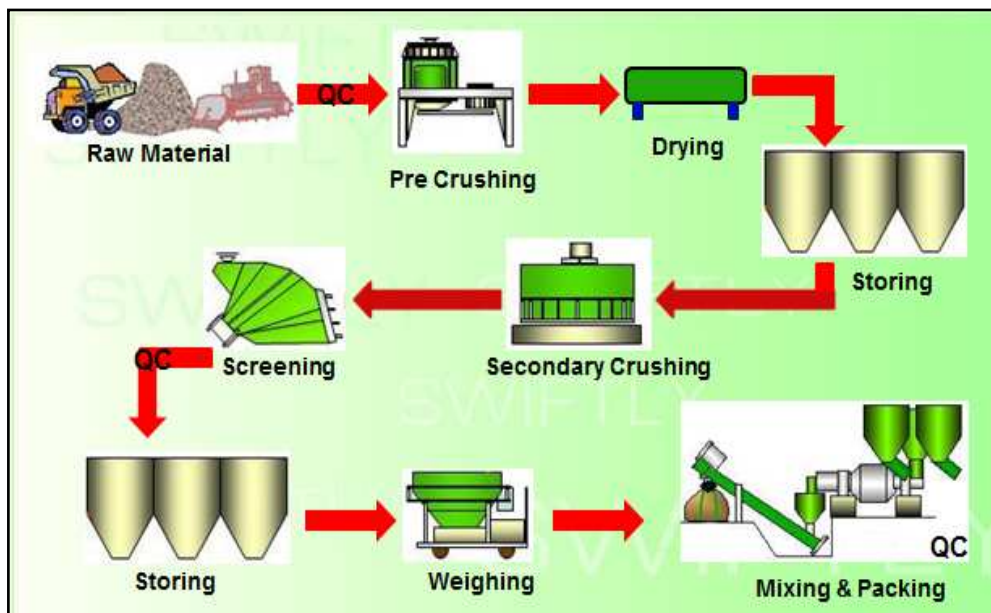
3) Fibrous Refractory ลักษณะการผลิตโดยเบื้องต้นจะคล้ายกับการผลิตใยแก้ว หลังจากได้เส้นใย (Bulk) มา จะทำให้เป็นแผ่นหนา (Blanket) หรือนำ Blanket มาพับซ้อน (Folding) กัน เป็น Block เพื่อนำไปใช้งานตามความเหมาะสมต่อไป

Periodic Table of the Elements																		© www.elementsdatabase.com													
1 H																	2 He														
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne														
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar														
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr														
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe														
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn														
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Unq	105 Unp	106 Unh	107 Uns	108 Uno	109 Une	110 Unn																						
																		58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
																		90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

รูปที่ 2.1 แสดงตารางธาตุแบ่งตามชนิดของออกไซด์



รูปที่ 2.2 แสดงกระบวนการผลิตสินค้าประเภท (Shaped Refractories) เช่น อิฐทนไฟ



รูปที่ 2.3 แสดงกระบวนการผลิตสินค้าประเภท (Unshaped Refractories) เช่น คอนกรีตทนไฟ

2.1.1 วัสดุทนไฟและคุณสมบัติ

1) เพอร์ไลต์

เพอร์ไลต์ หมายถึงหินภูเขาไฟเนื้อแก้วทุกชนิด เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิที่เหมาะสมในเวลาที่รวดเร็วจะขยายตัว มีน้ำหนักเบา และมีความพรุนสูง หินเพอร์ไลต์ ดังรูปที่ 2.4 ได้แก่ หินภูเขาไฟเนื้อแก้ว ที่มีลักษณะรอยแตกเป็นวงซ้อนกันคล้ายกลีบหัวหอม และเมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิที่เหมาะสมในเวลาที่รวดเร็วจะขยายตัวโดยมีขนาด ตั้งแต่ 4 - 20 เท่าของปริมาตรเดิม ทำให้เปลี่ยนสภาพเป็นสารที่มีน้ำหนักเบา มีความพรุนสูง และมีลักษณะคล้ายหินพัมมิส สารที่ได้จากการขยายตัวของหินเพอร์ไลต์นี้ เรียกว่า “เพอร์ไลต์”

(กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2012 : ออนไลน์)



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะของหินเพอร์ไลต์ (ณรงค์ศักดิ์ นันทคำภีรา และคณะ, ออนไลน์, 2012)

เพอร์ไลต์ที่พบในประเทศไทยมี 3 ชนิด คือ

1) สีเขียวแถบแดง (banded perlite) เพอร์ไลต์สีเขียวเนื้อประสานอัดแน่น จุดสีขาวทั่วไปคือ Feldspar เนื้อเดิมเป็น Glass แล้วแปรสภาพมาเป็นแถบแดง ที่เรียกว่า Red Devitrification Product ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะของเพอร์ไลต์สีเขียวแถบแดง

2) เพอร์ไลต์สีเขียว (classical perlite) เป็นเพอร์ไลต์เนื้ออัดแน่นมีผลึกสีเขียว ถ้าดูด้วยกล้องขยายจะพบรอยแตกร้าวโค้ง คือ Perlite Crack และยังมีจุดขาว Feldspar รวมอยู่ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.6 แร่เพอร์ไลต์ชนิดนี้ถือว่ามีคุณภาพดี ขยายตัวได้สูง แต่อุณหภูมิการขยายตัวอาจแตกต่างกัน



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะของเพอร์ไลต์สีเขียว

3) เพอร์ไลท์สีขาว (pumicious perlite) ประกอบไปด้วยเส้นใยของแก้ว (glass fiber) สีค่อนข้างขาว มีรูปทรงสูง อาจมี Feldspar ปะปน และมีการขยายตัวบ้าง ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะของเพอร์ไลท์สีขาว

ลักษณะการเกิดของหินเพอร์ไลท์

เพอร์ไลท์จัดอยู่ในประเภทหินอัคนีพุ มีเนื้อละเอียดเป็นแก้ว เนื่องจากเกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของหินหนืด เป็นแร่องค์ประกอบร่วมกับหินไรโอไลต์ ที่เกิดในระดับตื้น และมีการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว บริเวณที่พบในประเทศไทย ได้แก่ จังหวัดลพบุรี และกาญจนบุรี ประโยชน์ใช้เป็นส่วนผสมวัสดุอุดก่อสร้างน้ำหนักเบา และเป็นส่วนผสมเติมเต็มในอุตสาหกรรมปุ๋ยและอุตสาหกรรมสี (ณรงค์ศักดิ์ นันทคำภีรา และคณะ, 2012 : ออนไลน์) แหล่งที่ผลิตที่สำคัญ เช่น ประเทศอาร์มาเนีย จีน, กรีซ, อิตาลี, ญี่ปุ่น, ตุรกี, ฮังการี, แม็กซิโก, รัสเซีย และสหรัฐอเมริกา (Refractory minerals, 2007: ออนไลน์)

คุณสมบัติทางกายภาพของหินเพอร์ไลท์

หินเพอร์ไลท์ส่วนใหญ่เนื้อหามีลักษณะเป็นแก้ว มักจะมีรอยแตกเป็นวงๆ ซ้อนกันคล้ายกลีบหัวหอม รอยแตกนี้อาจจะมองเห็นด้วยตา หรืออาจจะต้องอาศัยดูด้วยแว่นขยายหรือใช้กล้องจุลทรรศน์ โดยทั่วไปจะมีสีเทาอ่อนแต่อาจจะพบสีดำ สีน้ำตาล หรือสีเขียวได้ และในเนื้อหินมักจะมีผลึกแร่ควอตซ์ แร่เฟลด์สปาร์ แร่ไบโอไทต์ แร่ฮอร์นเบลนด์ และมีชิ้นส่วนของเศษหินชนิดอื่นฝังตัวอยู่

ความถ่วงจำเพาะ 2.3 - 2.8

จุดหลอมตัว 760 - 1,300 องศาเซลเซียส

ค่าดัชนีหักเหแสง 1.490 - 1.610

(Refractory minerals, 2007: ออนไลน์)

และเนื่องจากหินเพอร์ไลต์เป็นหินภูเขาไฟเนื้อแก้ว ที่มีส่วนประกอบของออกไซด์ของธาตุซิลิกาค่อนข้างสูง ประมาณร้อยละ 70 หรือมากกว่า มีน้ำเป็นส่วนประกอบประมาณร้อยละ 2 - 5 ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารเคมีอื่นๆ ได้ง่ายนัก จัดอยู่ในจำพวกสารเฉื่อยต่อปฏิกิริยาทางเคมี เนื้อแก้วของหินเพอร์ไลต์จะมีการเปลี่ยนสภาพแก้วเป็นผลึก (diversification) เมื่อระยะเวลา (อายุ) ของหินเพอร์ไลต์มากขึ้น ดังนั้นหินเพอร์ไลต์ที่จะมีคุณภาพดีและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้นั้น เนื้อแก้วจะต้องไม่เปลี่ยนสภาพแก้วเป็นผลึก ซึ่งจะพบได้ในหินภูเขาไฟยุคใหม่ประมาณยุคเทอร์เชียรีขึ้นมา หรือน้อยกว่า 65 ล้านปี

ส่วนประกอบทางเคมีของหินเพอร์ไลต์ในรูปของออกไซด์ของธาตุต่างๆ ดูได้จากตารางที่ 2.1 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าเฉลี่ยของหินเพอร์ไลต์ทั่วโลกกับของประเทศไทย

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของแร่หินเพอร์ไลต์

องค์ประกอบเคมี	ค่าเฉลี่ยหินเพอร์ไลต์ (ทั่วโลก)	ประเทศไทย
SiO ₂	71.0 - 75.0	71.02
Al ₂ O ₃	12.5 - 18.0	16.09
Fe ₂ O ₃	0.50 - 1.50	0.71
FeO	0.00 - 0.10	0.73
MgO	0.10 - 0.50	0.41
CaO	0.50 - 2.00	0.58
Na ₂ O	2.90 - 4.00	0.90
K ₂ O	4.00 - 5.00	5.59
H ₂ O (comb)	3.00 - 5.00	3.57

การใช้ประโยชน์

การนำเพอร์ไลต์ไปใช้ให้เป็นประโยชน์ได้หลายอย่าง ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพของเพอร์ไลต์ ส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้ในงานด้านก่อสร้าง เพื่อประโยชน์ในการลดน้ำหนักของสิ่งก่อสร้าง ช่วยเป็นฉนวนป้องกันความร้อนและความเย็น และยังสามารถเป็นผนังป้องกันเสียงได้ นอกจากนี้ได้มีการนำไปใช้ในงานด้านต่างๆ ตลอดจนถึงงานทางด้านเกษตร และงานด้านอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น

ด้านอุตสาหกรรมการก่อสร้าง

มีการนำเพอร์ไลต์มาใช้ในด้านอุตสาหกรรมก่อสร้างประมาณ 70% ของปริมาณที่ผลิตได้ทั่วโลก เนื่องจากมีคุณสมบัติ คือ มีน้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ มีความพรุนสูง ทนไฟ และมีความแข็งแรง ด้วยคุณสมบัติเด่นดังกล่าว เพอร์ไลต์จึงนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น ฝ้าเพดาน เนื่องจากเพอร์ไลต์เป็นส่วนประกอบของฝ้าเพดาน และผลิตภัณฑ์ยิปซัมแผ่นเรียบบางชนิด เพอร์ไลต์เป็นส่วนผสมที่ทำให้กระเบื้องไม่เป็นตัวนำความร้อน คลื่นเสียงผ่านทะลุไม่ได้ มีความหนาแน่นต่ำ และเป็นวัสดุทนไฟ เมื่อนำไปผสมกับปูนซีเมนต์ จะทำให้ได้คุณภาพที่ดีกว่าปูนซีเมนต์ธรรมดา เมื่อนำไปฉาบผนังตึกหรือเพดานจะทำให้ปูนสามารถยึดติดผนังได้ดี แข็งเร็ว และไม่เกิดรอยร้าว เนื่องจากมีความยืดหยุ่นได้ดี และยังเป็นฉนวนป้องกันความร้อนอีกด้วย

นอกจากนี้เมื่อนำเพอร์ไลต์ไปผสมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ในการทำคอนกรีตใช้งานก่อสร้างต่างๆ จะทำให้ลดน้ำหนักของสิ่งก่อสร้างนั้นลงได้ และยังทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันความร้อน และป้องกันการสะท้อนของเสียงได้เป็นอย่างดี คอนกรีตที่ใช้เพอร์ไลต์ผสมจะมีความหนาแน่นต่ำถึง 320 kg/m^3 และถ้ามีความหนาประมาณ 2 inch จะมีประสิทธิภาพในการเป็นฉนวนได้เท่ากับแผ่นฉนวนมาตรฐาน แต่มีความแข็งแรงและคงทนกว่าแผ่นฉนวนมาตรฐานมาก ซึ่งได้มีการทดลองและเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมด้วยเพอร์ไลต์กับปูนซีเมนต์ผสมแบบธรรมดา โดยบริษัทผลิตเพอร์ไลต์ของประเทศญี่ปุ่น ดังแสดงในตารางที่ 2.2

(กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2012 : ออนไลน์)

ตารางที่ 2.2 ตารางการเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมด้วยเพอร์ไลต์กับปูนซีเมนต์ผสมแบบธรรมดา (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2012 : ออนไลน์)

	Air Dry Unit Volume Weight (kg/l)	Thermal Conductivity (Kcal/mh °C)
คอนกรีตผสมเพอร์ไลต์	1.20 - 1.60	0.27 - 0.36
ปูนผสมทราย	2.01	1.24

การผลิตและตลาด

แหล่งปริมาณสำรองแหล่งใหญ่ของโลกอยู่ในประเทศสหรัฐอเมริกา รัสเซีย กรีซ และอิตาลี มีการผลิตหินเพอร์ไลต์มาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นอุตสาหกรรมก่อสร้างกันอย่างแพร่หลาย ตารางที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงผลผลิตหินเพอร์ไลต์ในประเทศต่างๆ ของโลก ในปี ค.ศ. 2000 โดยประเทศกรีซผู้ผลิตอันดับหนึ่งของโลก รองลงมาก็เป็นประเทศสหรัฐอเมริกา สหรัฐอเมริกา และญี่ปุ่น ซึ่งผลผลิตรวมของโลกในปี ค.ศ.2000 มากถึง 2,203,591 เมตริกตัน (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2012 : ออนไลน์)

ตารางที่ 2.3 ตารางสถิติการผลิตหินเพอร์ไลต์

Country	1996	1997	1998	1999	2000
	metr.t	metr.t	metr.t	metr.t	metr.t
Argentina	21 547	27 578	21 495	20 000	19 800
Armenia	6 000	6 000	10 000	40 000	40 000
Australia	3 500	3 400	3 200	3 000	2 800
Greece	598 640	695 917	658 332	777 898	817 825
Hungary	104 300	151 800	148 500	141 000	151 000
Iran	1 000	3 500	3 800	2 100	5 400
Japan	200 000	288 000	250 000	260 000	260 000
Mexico	37 417	35 000	36 000	38 000	39 000
New Zealand	1 880	1 900	2 000	1 900	1 800
Philippines	20 000	25 941	6 356	10 235	11 000
Russia	90 000	80 000	70 000	65 000	63 000

สถานการณ์เพอร์ไลต์ในประเทศไทย

ในปัจจุบันเพอร์ไลต์ มีการผลิตจากประทานบัตรของ หจก.คลองยาง จำนวน 1 แปลง เพียงแหล่งเดียว ตั้งอยู่ที่ตำบลมหาโพธิ์ อำเภอสระโบสถ์ จังหวัดลพบุรี มีอัตราการผลิตประมาณ 2,400 ตันต่อปี สำหรับแร่เกรดสูงเพื่อเผาสำหรับทำวัสดุกรองคุณภาพสูงและถูกจำหน่ายให้กับโรงงานน้ำผลไม้ การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (Hydroponic) ตัวเติมสำหรับปูนฉาบสำเร็จ และอิฐทนไฟ โดยจำหน่ายให้กับโรงเผาที่จังหวัดราชบุรี ราคาของเพอร์ไลต์คุณภาพสูงก่อนการเผาที่ 650 บาทต่อตัน เมื่อเผาแล้วราคาจะเพิ่มขึ้นเป็น 6,000 – 12,000 บาทต่อตัน ขึ้นกับคุณสมบัติความขาว และความหนาแน่น

สำหรับเพอร์ไลต์เกรดต่ำสำหรับใช้ในการเกษตร และปรับสภาพน้ำในการเลี้ยงกุ้งทะเลเป็นลูกค้าหลัก มีอัตราการผลิตประมาณ 6,000 ตันต่อปี โดยนำไปบดที่โรงบดที่จังหวัดสระบุรี ราคาของเพอร์ไลต์บดประมาณ 2,000บาทต่อตัน

ปริมาณของเพอร์ไลต์ที่ผลิตทั้งคุณภาพต่ำและสูงยังไม่เพียงพอสำหรับความต้องการ การใช้ภายในประเทศ ทำให้ใช้ต้องมีการนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งเพอร์ไลต์ที่มีคุณภาพสูงนำเข้าจากประเทศญี่ปุ่น และจีน เป็นหลัก ส่วนที่ใช้ในการเกษตรถูกนำเข้าจากประเทศออสเตรเลีย

(กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2012 : ออนไลน์)

2) เวอร์มิคูไลต์

เวอร์มิคูไลต์ (Vermiculite) เป็นแร่ในกลุ่ม alumino-silicate ชนิดหนึ่ง มีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ คล้ายเกล็ดปลาซ้อนกันหลาย ๆ ชั้น แร่เวอร์มิคูไลต์ดิบยังไม่เหมาะที่จะใช้เป็นวัสดุปลูก จะต้องนำมาเผาที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เพื่อให้แผ่น alumino-silicate ที่ซ้อนทับกันปริขยายออก เรียกกระบวนการนี้ว่า exfoliation แร่เวอร์มิคูไลต์ ที่ผ่านกระบวนการนี้แล้วมีความหนาแน่นรวมลดลงเหลือประมาณ 95 - 145 kg/m³ ที่ขยายตัวเพิ่มขึ้นมาเมื่อได้รับความร้อน ถ้าทำการเผาที่อุณหภูมิ 900 ถึง 1000 องศาเซลเซียส จะสามารถขยายตัวมากถึง 10 เท่า ของปริมาตรเดิม เมื่อขยายตัวจะมีน้ำหนักเบามาก มีปฏิริยาเป็นกลาง ด้านทานการเปลี่ยน pH ได้ดี ไม่ละลายน้ำ แต่ดูดน้ำได้ 3-4 แกลลอน/ลบ.ฟุต หรือ 500% (w/w) มีความสามารถแลกเปลี่ยนประจุบวกสูง สามารถดูดซับธาตุอาหารแล้วค่อยๆปลดปล่อยไว้ในภายหลัง นิยมนำ Exfoliated vermiculite มาทำเป็นวัสดุทนไฟประเภทที่มีน้ำหนักเบา (Insulating Refractory)

แหล่งของเวอร์มิคูไลท์พบในประเทศต่างๆดังนี้ ออสเตรเลีย บราซิล จีน รัสเซีย สหรัฐอเมริกา และ ซิมบับเวย์ เวอร์มิคูไลท์ทำจากแร่ไมกา โดยมีน้ำเป็นส่วนประกอบในกระบวนการผลิต อนุภาคของแร่ไมกาจะได้รับความร้อนอย่างรวดเร็วจนเกิดการล่อนเป็นเกล็ด การใช้งานจะเป็นลักษณะของฉนวนกันความร้อนแบบเทปบรรจุเข้าไปในบล็อกหรือโพรงผนัง ถ้านำไปผสมกับปูนซีเมนต์หรือทรายจะได้เป็นคอนกรีตเวอร์มิคูไลท์ ที่มีสภาพการนำความร้อนต่ำกว่าคอนกรีตปกติถึง 10 เท่า โดยทั่วไปจะผสมสารเคมีบางชนิด เพื่อใช้สำหรับพ่นกันไฟให้กับโครงสร้างเหล็ก นิยมใช้ในยุโรป และสหรัฐอเมริกา (บริษัท อี เอ็ม กรู๊ป จำกัด, 2013 :ออนไลน์)



รูปที่ 2.8 แสดงภาพ Exfoliated vermiculite

3) **อลูมินาซีเมนต์ (CALCIUM ALUMINATES (HIGH ALUMINA CEMENT))**
CALCIUM ALUMINATES เป็นส่วนผสมที่ให้คุณสมบัติ Cementitious เมื่อผสมกับน้ำ จะกลายเป็นเนื้อเหลว (PASTE) และเกิดการแข็งตัวกลายเป็นของแข็ง

คุณสมบัติเทคนิคพื้นฐานทางกายภาพ

1) Specific surface and fineness (พื้นที่ผิวและความละเอียด) ซึ่งหลังผ่านการผลิต Clinker ความละเอียด มีผลต่อคุณสมบัติของ Cement

2) Color (สี) สำหรับ Calcium aluminate ที่มีเปอร์เซ็นต์อลูมินาปริมาณ 40-50% alumina จะมีสีค่อนข้างดำ เทา แต่ถ้ามีเปอร์เซ็นต์อลูมินาปริมาณ มากกว่า 70% จะมีสีค่อนข้างขาว เนื่องจากปริมาณสิ่งเจือปนมีน้อย

3) pH -Alkalinity ในสารละลาย Calcium aluminate cement แสดงลักษณะของ Alkaline เมื่อสัมผัสกับน้ำ pH 10-11.5

4) โดยทั่วไปไม่มีกลิ่น

5) คุณสมบัติด้านการทนไฟ (Temperature resistance) เมื่อใช้ Calcium aluminate cement เป็น Binder ในปูนทนไฟหรือคอนกรีตทนไฟ สามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 2000°C ซึ่งสามารถใช้ประโยชน์ได้ในหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมผลิตเหล็ก อุตสาหกรรมปิโตรเคมี นอกจากความทนไฟของ Calcium aluminate cement แล้วองค์ประกอบทางเคมีในส่วนผสมก็มีส่วนสำคัญ เนื่องจากถ้าในส่วนผสมมีปริมาณ Alumina เป็นองค์ประกอบสูงก็จะส่งผลให้การทนไฟเพิ่มขึ้น แต่ถ้าปริมาณ Alumina ใน Calcium aluminate cement ที่ใช้ในส่วนผสมต่ำ องค์ประกอบหรือสารเจือปนอื่นๆ เช่น ปริมาณ Fe_2O_3 ก็ส่งผลต่อค่าความทนไฟที่ลดลงเช่นกัน

นอกจากนี้ Calcium aluminate cement มีคุณสมบัติที่ช่วยการทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน Thermal shock resistance เนื่องจากมีการขยายตัวต่ำหรือ Low Thermal Expansion ซึ่งคุณสมบัติการขยายตัวต่ำของ Calcium aluminate cement เป็นประโยชน์มากในด้านวัสดุทนไฟ เพราะคุณสมบัติด้านการขยายตัวต่ำจะเป็นช่วยจำกัดความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุทนไฟเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

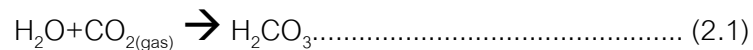
4) โพลีสไตรีนโฟม

โพลีสไตรีนเป็นโฟมกันความร้อนที่มีการใช้อยู่ทั่วไป เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมมากขึ้นในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นวัสดุน้ำหนักเบา เคลื่อนย้ายง่ายและนำมาใช้ได้อย่างกว้างขวาง รูปแบบหลากหลายลักษณะ เช่น ใช้เป็นกล่องใส่อาหาร หรือใช้เป็นแผ่นรองกันกระแทกในภาชนะบรรจุภัณฑ์ ใช้เป็นแผ่นบุผนังอาคาร เพื่อป้องกันความร้อน และใช้ในการออกแบบงานศิลป์ด้านต่างๆ ซึ่งมีการผลิตขึ้นมาใช้งาน 2 รูปแบบ คือ แบบรีดและแบบหล่อ แต่เนื่องจากโพลีสไตรีน เป็นวัสดุประเภทเซลลูลอร์ธรรมชาติ ซึ่งสามารถติดไฟและทำให้เกิดการลุกไหม้ได้ ดังนั้นในการนำมาใช้งาน จึงต้องมีเปลือกหุ้มที่สามารถต้านเปลวไฟได้หุ้มอยู่ เช่น แผ่นยิปซัมบอร์ด และนอกจากนี้ยังต้องป้องกันไม่ให้โพลีสไตรีนโฟม สัมผัสกับแสงอาทิตย์โดยตรง เนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเล็ต จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากสีขาวเป็นสีเหลืองและเสื่อมสภาพได้ อุณหภูมิการใช้งานสูงสุดประมาณ 80 องศาเซลเซียส

5) น้ำ

น้ำ หรือ Aqueous (Water base) น้ำเป็นตัวกลางหรือตัวทำละลายของเหลวที่ใช้งานมากที่สุด โดยเฉพาะใน Traditional ceramic ในน้ำกลั่นที่มีความบริสุทธิ์สูง ที่ประกอบด้วยโมเลกุลของ H_2O ซึ่งมีขั้ว โดยธรรมชาติจะมีการแตกตัวให้อิออนของ H_3O^+ และ OH^- ซึ่งค่า pH อยู่

ที่ 7 และจะมีค่าการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง 0.555 $\mu\text{mho/cm}$ แต่หากถูกสัมผัสกับอากาศซึ่งมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก็จะละลายลงไปใต้น้ำทำปฏิกิริยากลายสภาพเป็นกรดอ่อน ดังสมการ



ซึ่งก็จะทำให้น้ำมีความบริสุทธิ์น้อยลง มีค่าการนำไฟฟ้ามากขึ้น ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นได้โดยปกติใต้น้ำฝน และจากการชะล้าง ละลายหินปูน หรือรวมตัวกับไอออนของแคลเซียม เกิดเป็นสารประกอบไบคาร์บอเนตที่ละลายน้ำได้ดี เรียกว่าเป็น น้ำกระด้าง ซึ่งหมายรวมกับน้ำที่มีปริมาณ $\text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}$ ในปริมาณสูงด้วย โดยจะเกิดการตกตะกอนเป็นตะกรัน เมื่อมีการต้มด้วยความร้อนให้เดือดดังสมการ



แต่จะไม่สามารถใช้ได้ในกรณีของน้ำกระด้างที่เกิดจากซัลเฟตและคลอไรด์ จากตารางที่ 1 ซึ่งแสดงองค์ประกอบทางเคมีของน้ำจากบ่อบาดาล และน้ำประปา ซึ่งพบว่าในบ่อน้ำบาดาลจะมีความกระด้างหรือมีปริมาณของแคลคาไลต์เอิร์ทไอออน คือ $\text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}$ อยู่ในปริมาณค่อนข้างสูง และจะมีผลต่อการไหลตัวของน้ำดินที่ใช้น้ำเป็นส่วนผสม ทำให้ต้องสิ้นเปลืองปริมาณสารช่วยกระจาย (Deflocculated) ในปริมาณที่มากขึ้นด้วย หากในการผสมปูนทนไฟ ใช้น้ำบาดาลเป็นส่วนผสมจำเป็นที่จะต้องมีการบำบัดให้เหมาะสมก่อน แต่หากใช้น้ำประปาหรือน้ำดื่ม ปัญหาดังกล่าวก็จะหมดไป ในกรณีของน้ำทะเล พบว่ามีไอออนต่างๆ ที่ส่งผลต่อการไหลตัวของเนื้อคอนกรีตอยู่ในปริมาณมาก ดังนั้นจึงไม่สามารถนำมาบำบัดหรือนำมาใช้งานเป็นส่วนผสมของวัสดุได้

ตาราง ที่ 2.4 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของน้ำแหล่งต่างๆ (ppm)

องค์ประกอบ	น้ำบาดาล	น้ำประปา	น้ำทะเล
Ca ²⁺	300	78	416
Mg ²⁺	172	42	1,295
Na ⁺	8	360	10,752
HCO ₃ ⁻	350	350	145
CO ₃ ²⁻	0	0	90
SO ₄ ²⁻	100	125	2,701
Cl ⁻	30	5	19,400
NO ₃ ⁻	0	0	12
pH	7.8	7.9	7.6
การนำไฟฟ้า (μmho/cm)	670	650	47,800

(General physics, 2012 : online)

2.1.2 คุณสมบัติวัสดุทนไฟ

1) ความหนาแน่น

ความหนาแน่น(Fired Bulk Density) อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C401-91 ซึ่งเป็นการทดสอบหาความหนาแน่นที่รวมรูเปิด โดยทดสอบด้วยถัง Vacuum – Pressure สมการแสดงค่าความหนาแน่น

$$\text{Fired Bulk Density} = \frac{D}{(W - S)} \quad (\text{g/cm}^3) \dots\dots\dots (2.3)$$

เมื่อ D = น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง (g)
 S = น้ำหนักในน้ำของตัวอย่าง (g)
 W = น้ำหนักเปียกของตัวอย่าง (g)

2) การทนอุณหภูมิ

การทนอุณหภูมิ Refractoriness (Pyro metric Cone Equivalent) (Standard Test Method for Pyro metric Cone Equivalent; PCE) ดำเนินการทดสอบชิ้นงาน ตามมาตรฐาน ASTM C24-89 คุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุทนไฟ คือ ต้องไม่อ่อนตัว หรือหลอมเหลวที่อุณหภูมิใช้งาน ความทนไฟ หรือ จุดอ่อนตัวของวัสดุทนไฟ โดยทั่วไปจะระบุไว้ เป็นค่า PCE-Cone เบอร์ต่างๆ จากเบอร์ของ PCE-Cone สามารถเปลี่ยนเป็นค่าอุณหภูมิองศาเซลเซียส อ้างอิงได้จากตารางที่ 1 ในภาคผนวก การที่ระบุค่าความทนไฟของวัสดุทนไฟเป็นค่า Cone แทนอุณหภูมิ เนื่องจากวิธีการทดสอบ กล่าวคือ

ค่า PCE ของวัสดุทนไฟ เป็นค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานที่เรียกว่า Standard Pyrometric Cone ซึ่งมีส่วนผสม และช่วงการอ่อนตัว หรือหลอมตัวที่แน่นอนตามสภาวะการหนึ่ง วิธีการหาค่า PCE ของวัสดุทนไฟใดๆ ทำได้โดยการนำตัวอย่างส่วนผสมวัสดุทนไฟมาขึ้นรูป ให้มีลักษณะรูปทรงเหมือนกับรูปทรงของ Standard Pyrometric Cone คือมีรูปทรงเป็นรูปปิรามิด ฐานสามเหลี่ยม สูงประมาณ 1 นิ้ว จากนั้นเผาตัวอย่างพร้อมกันกับ Standard Pyrometric Cone ภายใต้สภาวะการเดียวกัน เมื่อตัวอย่างอ่อนตัวจนปลายบนเกิดการงอ ในขณะเวลาเดียวกันกับ Standard Pyrometric Cone หมายเลขใดแล้ว กล่าวได้ว่า ตัวอย่างนั้นมีค่าความทนไฟ เทียบเท่ากับ Standard Pyrometric Cone หมายเลขนั้น ซึ่งก็คือค่า PCE ของวัสดุทนไฟนั่นเอง

ค่า PCE ไม่ใช่ตัวบ่งบอกอุณหภูมิ ที่วัสดุทนไฟนั้นสามารถถูกนำไปใช้งานอุณหภูมิการใช้งานของวัสดุทนไฟจริง จะต้องต่ำกว่านี้ ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบอื่นๆที่เกี่ยวข้อง การบ่งบอกความทนไฟด้วยวิธีนี้ มักนิยมใช้กับวัสดุทนไฟ ประเภท Alumina – Silica เท่านั้น

(ปรีดา พิมพ์ขาวซ่า, 2538 : 183-184)

3) การยืดหดตัว

การยืดหดตัว (Permanent Linear Change; LC) ได้ดำเนินการทดสอบชิ้นงาน ตามมาตรฐาน ASTM C401-91 การหดตัวหลังเผา (Firing Shrinkage) เป็นการวัดการหดตัว ตั้งแต่ผลิตภัณฑ์แห้งสนิท จนถึงหลังเผา

สมการแสดงค่าการหดตัวหลังเผาเชิงเส้น

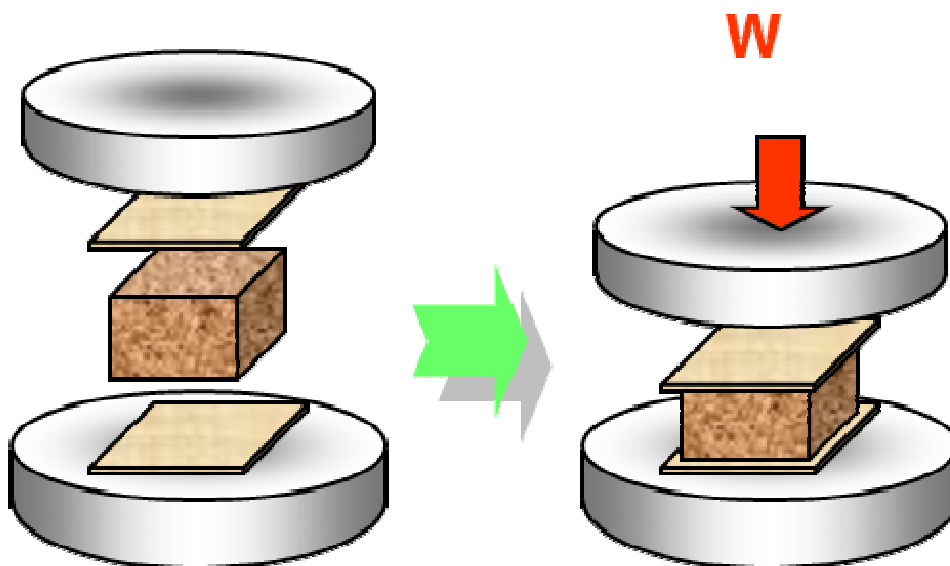
$$\%LC = \frac{L_d - L_f}{L_d} \times 100 \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

เมื่อ L_d = ความยาวของแท่งทดสอบเมื่อแห้ง (มิลลิเมตร)

L_f = ความยาวของแท่งทดสอบหลังเผา (มิลลิเมตร)

4) การทนต่อแรงกด

การทนต่อแรงกด Cold Crushing Strength; (CCS) คือค่าความเค้นแรงอัดสูงสุดที่วัสดุสามารถทนแรงอัดได้ขณะที่แตกหัก เป็นค่า Stress at which micro plastic yield point ซึ่งค่า CCS จะต่ำกว่า micro plastic yield point เพราะมีตำหนิในเนื้อวัสดุ เช่น รอยแตก, รูพรุน, สิ่งเจือปน และขนาดของเม็ดวัตถุดิบ เป็นค่าที่ใช้บอกความเหมาะสมของการเลือกวัสดุทนไฟในการทำโครงสร้าง วิธีการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM Standard C133-97(2003) เรื่อง Standard Test Methods for Cold Crushing Strength and Modulus of Rupture of Refractories แสดงตามรูปที่ 2.9 และทดสอบโดยเครื่อง Universal Testing Press (Shimadzu : รุ่น UH 100A) โดยตัวอย่างที่ดีขณะทดสอบจะแตกเป็นรูปกรวยสมมาตร ซึ่งแสดงว่าได้รับ load อย่างทั่วถึงกันทั้งผิวหน้าของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะการกดของการทดสอบ Cold Crushing Strength
(Thailand Institute of Science and Technological Research, สไลด์)



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะการแตกของชิ้นงานเมื่อทดสอบ Cold crushing strength
(Thailand Institute of Science and Technological Research, สไลด์)

ซึ่งสามารถคำนวณค่า CCSได้จากสูตร
สมการแสดงค่าการทนต่อแรงกด

$$CCS = \frac{W}{A} \dots\dots\dots (2.5)$$

เมื่อ CCS = ค่าความเค้นแรงอัดสูงสุดที่วัสดุสามารถทนแรงอัดได้ขณะที่แตกหัก
(kg/cm²)

W = Load ที่มากที่สุดที่ได้รับจากแรงกด (kg.)

A = พื้นที่ผิวเฉลี่ยของด้านบนและด้านล่างของชิ้นทดสอบก่อนทดสอบที่ตั้ง
ฉากกับแรงกด (cm²)

5) การทนต่อแรงดัด

การทนต่อแรงดัด Bending Strength หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า Modulus of Rupture เป็นการทดสอบโดยใช้แรงกดบนชิ้นทดสอบที่วางอยู่บนขาของที่วางอยู่ห่างกัน ความแข็งแรงต่อแรงดัดเป็นการตรวจสอบโดยการวัด ความสามารถในการต้านทานต่อแรงดัด (Bending Load) และรายงาน

ค่า ทดสอบเป็น ค่าโมดูลัสของการแตกหัก (Modulus of Rupture; MOR) ทดสอบโดยเครื่อง Universal Testing Press(Shimadzu: รุ่น UH 100A)

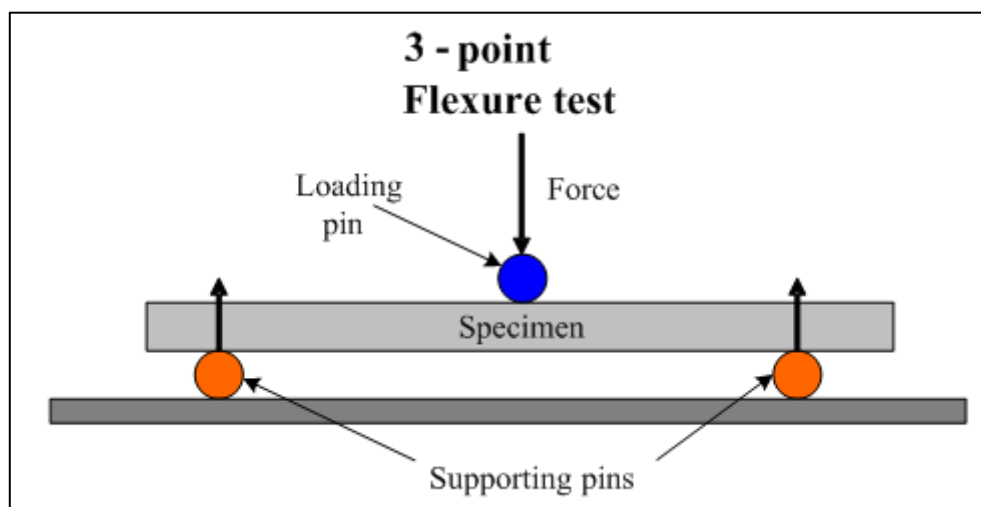
(दनัย อารยะพงษ์, 2538: 20)

โดยคำนวณจากสมการ 2.6

$$MOR = \frac{3PL}{2bd^2} \dots\dots\dots (2.6)$$

เมื่อ	Modulus of Rupture	=	การทนต่อแรงดัด (kg/cm ²)
	P	=	ขนาดของแรงที่กระทำที่ทำให้แท่งทดสอบหัก (kg)
	L	=	ความกว้างของบารอง (Span Length) ซึ่งควรกำหนดให้มีความ กว้างเป็น 2/3 เท่าของ ความยาวแท่งทดสอบ(cm) กำหนดความยาว Span เท่ากับ 130 mm
	b	=	ความกว้างของชิ้นงานทดสอบ (cm)
	d	=	ความหนาของชิ้นงานทดสอบ (cm)

เครื่องทดสอบ ความแข็งแรงต่อแรงดัดมีหลักการทำงาน คือ เครื่องจะเพิ่มน้ำหนัก กดลงบนแท่งทดสอบ โดยแรงกระทำอยู่กับที่ และเพิ่มขนาดของแรงอย่างช้า ๆ สม่่าเสมอ จนกระทั่งแท่งทดสอบหัก เครื่องจะแสดง น้ำหนักที่กระทำให้แท่งทดสอบหัก ทั้งนี้หน่วย ของน้ำหนักจะแตกต่างกันตามแหล่งที่มา หรือผู้ผลิต เครื่องทดสอบ ซึ่งหน่วยอาจเป็น กิโลกรัม ปอนด์ หรือ นิวตัน นอกจากนี้เครื่องทดสอบ ความแข็งแรง ต่อแรงดัด มีความแตกต่างของ จำนวนจุดที่ให้แรงกระทำ คือมีแบบแรงกด 3 จุด (Three Point Loading) โดยมีแรงกระทำให้ แท่งทดสอบหักจำนวน 1 จุด และบารองอีก 2 จุด (รูปที่ 2.11)



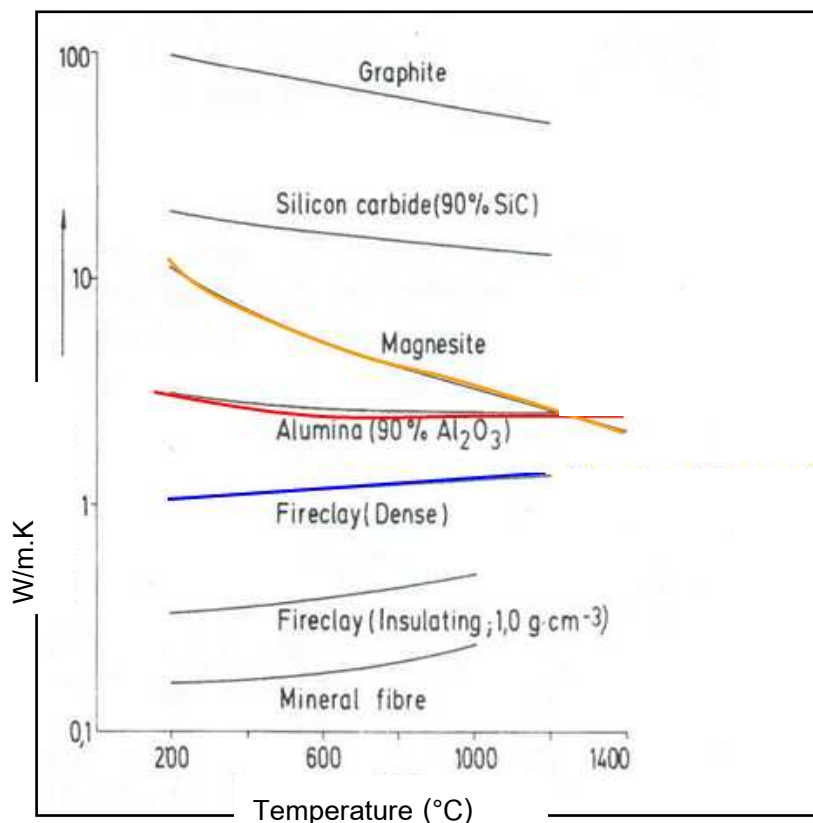
รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะการกดของการทดสอบการทนต่อแรงกด (Flexural strength tests of ceramics, 2013: online)

6) ทดสอบการนำความร้อน

เป็นคุณสมบัติอันหนึ่งที่จะบอกว่าผลิตภัณฑ์นั้นเป็นฉนวนความร้อนหรือเป็นตัวนำความร้อน ค่า Thermal Conductivity (K) คือ ปริมาณความร้อน ซึ่งไหลผ่านวัสดุทึนไฟใน 1 หน่วยเวลา ต่อ ผิวหน้า 1 หน่วยพื้นที่, ต่อความหนา 1 หน่วยความยาว และมีความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่าง ผิวหน้าเป็น 1 หน่วยองศา

ความหนาแน่นกับการขยายตัวของผลึกด้วยความร้อนมีความสัมพันธ์กัน กล่าวคือ ปริมาตรของวัสดุที่รูปผลึกและการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิซึ่งมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับโครงสร้างของผลึก และโครงสร้างของผลึกซึ่งแสดง ประสิทธิภาพของการจัดเรียงอะตอมในผลึก แสดงถึงความหนาแน่นในโครงสร้างผลึก นั่นก็คือ แสดงให้เห็นว่า ความหนาแน่นของวัสดุที่มีรูปผลึกกับการขยายตัวของผลึกด้วยความร้อนมีความสัมพันธ์กัน โดยทั่วไปแล้วความหนาแน่นของสารที่มีรูปผลึกจะลดลงเมื่ออุณหภูมิหรือได้รับ พลังงานความร้อนสูงขึ้น เนื่องจากอะตอมในโครงสร้างของผลึกสั่นสะเทือนกว้างมากขึ้น เป็นผล ทำให้ผลึกมีโครงสร้างใหญ่ขึ้น สภาพการนำความร้อนของผลิตภัณฑ์เซรามิกมีองค์ประกอบหลาย อย่างเข้าไปเกี่ยวข้อง ได้แก่ โครงสร้าง การละลายกันและกันของเนื้อสาร ความพรุนตัว และ ส่วนผสมที่ซับซ้อนของเนื้อผลิตภัณฑ์ ทำให้สภาพการนำความร้อนเปลี่ยนแปลงและแตกต่างกัน ออกไป

ค่า Thermal Conductivity จะช่วยในการคำนวณปริมาณความร้อนที่ไหลผ่าน(Heat Flow) หรือสูญเสียไปจากเตา ค่า Thermal Conductivity นั้น นอกจากจะมีค่าแตกต่างตามชนิดของวัสดุทึนไฟแล้วยังมีความแตกต่างกันตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิด้วย ค่า Thermal Conductivity มีความสัมพันธ์กับความพรุนตัวที่มีอยู่ในเนื้อของวัสดุทึนไฟ วัสดุทึนไฟที่มี % ความพรุนตัวสูงขึ้น จะมีค่า Thermal Conductivity ต่ำลง เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุทึนไฟชนิดเดียวกัน (ปรีดา พิมพ์ขาวขำ, 2538 : 189-190)



รูปที่ 2.12 แสดงค่าการนำความร้อน(THERMAL CONDUCTIVITY) ของผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ชนิดต่างๆ (Pocket Manual refractory materials ,2004 : 444)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาและการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ในอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟมีความสำคัญอย่างยิ่งเพื่อตอบสนองความต้องการและรักษาความพึงพอใจของลูกค้าเป็นสำคัญทั้งด้านคุณภาพของสินค้า เวลาในการติดตั้งและบริการ จำเป็นต้องมีระบบและแผนการออกแบบพัฒนา ที่ช่วยให้ผลิตภัณฑ์ใหม่ที่พัฒนาออกมาสามารถเป็นประโยชน์ให้กับผู้ที่สามารถใช้งานได้จริง และเมื่อพิจารณาในส่วนของอุตสาหกรรม การออกแบบและวางแผนที่ดีต้องบริหารจัดการที่ทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด ไม่ว่าจะเป็นการพิจารณาเลือกชนิดวัตถุดิบ ได้ผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมกับการใช้งานจริงในอุตสาหกรรม

สรุจณี ญาณภีร์ (2002) ได้ทำการศึกษาหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุเคลือบผิวเหล็กโครงสร้างรูปพรรณป้องกันไฟที่มีเพอร์ไลต์เป็นส่วนผสม โดยทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณเพอร์ไลต์ในสัดส่วนผสมของวัสดุเคลือบผิวป้องกันไฟ คือ 50%,100%,150%,200%,250% และ 300% โดยนำหนักของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 1 ซึ่งจากผลการทดสอบปริมาณเพอร์ไลต์ที่

เหมาะสมสำหรับวัสดุเคลือบผิวเหล็กโครงสร้างรูปพรรณป้องกันไฟที่เหมาะสม คือ 150% และ 200% โดยนำหน้าของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 1 และได้ทำการทดสอบอัตราการทนไฟเกินกว่า 3 ชั่วโมงโดยทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของวัสดุเคลือบที่ 2,3 และ 4 มิลลิเมตร ผลการทดสอบพบว่าที่ค่าความหนาของวัสดุเคลือบผิวป้องกันไฟประมาณ 4 เซนติเมตร เหมาะสำหรับสัดส่วนผสมที่มีปริมาณเพอร์ไลท์ 150% โดยนำหน้าของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 1 นอกจากนี้งานวิจัยยังทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการต้านทานไฟและความหนาของวัสดุเคลือบผิวป้องกันไฟสำหรับแต่ละสัดส่วนผสมและองค์ประกอบหน้าตัดเพื่อนำไปใช้ในการหาความหนาของวัสดุเคลือบผิวป้องกันไฟที่ให้ค่าอัตราการต้านทานไฟที่ต้องการได้ และเป็นที่ทราบกันดีว่าโครงสร้างเหล็กไม่สามารถทนต่อสภาวะอุณหภูมิสูงๆ เป็นเวลานานอย่างในกรณีไฟไหม้ได้ ดังนั้นการแก้ปัญหาการทนต่อสภาวะแวดล้อม เช่น ความทนไฟของโครงสร้างเหล็ก เนื่องจากคุณสมบัติเชิงกลของโครงสร้างเหล็กจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นความสามารถทนไฟของอาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณสามารถใช้วัสดุ เคลือบผิวป้องกันไฟ ซึ่งปกติแล้วการใช้วัสดุเคลือบผิวป้องกันไฟด้วยความหนาที่น้อยเกินไปจะทำให้โครงสร้างเหล็กไม่สามารถทนไฟได้ภายในเวลาที่กำหนด และถ้ามีการใช้วัสดุเคลือบผิวป้องกันไฟด้วยความหนาที่มากเกินไปจะทำให้เกิด ความสิ้นเปลืองในด้านงบประมาณการลงทุน วัตถุประสงค์ที่ใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์เคลือบโครงสร้างเหล็กที่สามารถทนไฟได้ นอกจากเพอร์ไลท์ ดังเช่นในงานวิจัยของ T.G.Swansinger ; Alcoa Technical Centre,USA (1998) ได้ทำการศึกษาวัตถุประสงค์สำหรับเป็นฉนวนกันความร้อน ซึ่งมีชื่อว่า SLA92 เป็นวัตถุประสงค์ที่ใช้เป็นฉนวนกันความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 1200 องศาเซลเซียส ซึ่งคุณสมบัติหลักของวัตถุประสงค์ชนิด ดังกล่าว คือ มีค่าการนำความร้อนที่ต่ำมากและมีคุณสมบัติการทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้ดี เนื่องจากตัวเนื้อวัตถุประสงค์มีรูพรุนสูงประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนขนาด 0.5 ถึง 2.5 ไมครอน ซึ่งวัสดุประสานในเนื้อของผลิตภัณฑ์สารเคลือบทนไฟที่ใช้ในปัจจุบัน นอกจากปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ก็สามารถใช้ยิปซัมเป็นตัวประสานได้ ซึ่ง A. Çolak (2000) ได้ทำการศึกษาค่าความหนาแน่นและค่าความแข็งแรงของวัสดุที่มีเนื้อเป็นยิปซัม โดยสามารถทำให้เกิดฟองขึ้นภายในเนื้อยิปซัมซึ่ง สารอลูมิเนียมซัลเฟต ได้ถูกค้นพบว่าสามารถเป็นตัวที่ทำให้เกิดโฟมในเนื้อยิปซัมได้ดีที่สุด โดยปริมาณที่เหมาะสม คือ 30 ,35 เปอร์เซ็นต์ และยังสามารถเติมกรดมะนาวและ CARBOXYMETHYL CELLULOSE เพื่อช่วยให้ค่าความหนาแน่นของเนื้อยิปซัมเพลงลดลง แต่ข้อควรระวังในการเติม CARBOXYMETHYL CELLULOSE ถ้าเติมปริมาณมากกว่า 0.1 หรือ 0.2 เปอร์เซ็นต์ จะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของ

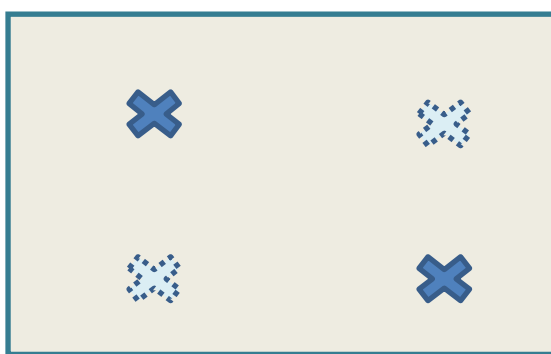
ยิปซัมเพลลิตเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากสาร CARBOXYMETHYL CELLULOSE ทำให้เกิดการกักกัน ฟองอากาศภายในเนื้อยิปซัมเพลลิตและความแข็งแรงจะอยู่ที่ 10 เมกะปาสคาล

ปัจจุบันโพลีเอสไทรลีนโฝมได้ถูกนำมาศึกษาเพื่อทดแทนวัตถุดิบที่มีน้ำหนักเบาได้ดีในงาน ผสมคอนกรีตและมอร์ตาร์ทั่วไป โดย K. Ganesh Babu and D. Saradhi Babu (2004) ใช้ซีเมนต์ เป็นสัดส่วน 50 ต่อ 50 เปอร์เซ็นต์ในสูตรการทดลองซึ่งค่าความหนาแน่นของเนื้อที่ได้ประมาณ 550 ถึง 2200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่าสูตรที่ใช้ โพลีเอสไทรลีนโฝมกับซีเมนต์แสดงคุณสมบัติ การดูดซึมน้ำต่ำกว่าสูตรคอนกรีตปกติที่ใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์และการทนต่อการกัดกร่อนของ สารเคมีที่ต่ำกว่า และนอกจากนี้ B. Chen and J. Liu (2004) ได้ศึกษาคุณสมบัติของการใช้โพลี เอสไทรลีนโฝม ร่วมกับ SILICA FUME ในอุตสาหกรรมคอนกรีต เนื่องจาก SILICA FUME สามารถ ช่วยปรับปรุงการยึดเกาะกันระหว่างเม็ดโพลีเอสไทรลีนโฝมกับซีเมนต์เพลลิต และการเพิ่ม SILICA FUME สามารถช่วยปรับปรุงการหดตัวหลังการอบได้ U.S.Patent No. 4,043,862 ได้เสนอวัสดุ เคลือบผิวป้องกันไฟ โดยมีส่วนผสมคือ Vermiculite, Ceramic clay , Hydrate cellulose gel, defiberized wood และ Starch ซึ่งวัสดุเคลือบผิวป้องกันไฟชนิดนี้มีข้อเสียคือ Vermiculite จะ ขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนสูง ทำให้ความร้อนสามารถแทรกผ่านเข้ามาได้ นอกจากนี้ Cellulose, starch และสารอินทรีย์ที่มีในส่วนผสมจะสลายตัวเกิดเป็นก๊าซที่ทำให้ติดไฟได้และทำ ให้เกิดการกระจายของไฟ

นอกจากเรื่องวัตถุดิบที่สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับ ผลิตภัณฑ์สารเคลือบทนไฟ คุณสมบัติที่สำคัญและจำเป็นของผลิตภัณฑ์สารเคลือบโครงสร้างเหล็กก็ได้รับการศึกษาจาก William A.Rains (1976) เนื่องจากได้ทำการศึกษาคุณสมบัติและลักษณะของวัสดุเคลือบผิวเหล็ก ป้องกันไฟ ได้แก่ คุณสมบัติการเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีหรือมีค่าการนำความร้อนต่ำ ,มีลักษณะ เป็นโฝมซึ่งอาจเกิดการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนสูง,มีการก่อกับน้ำเป็นผลึก,มีความสามารถ ในการต้านทานการสึกกร่อน ,จะเกิดควันเมื่อได้รับความร้อน ,มีการระเหย,การแผ่รังสี,และ เกิดปฏิกิริยาดูดซับความร้อนทั้งทางด้านเคมีและด้านกายภาพ โดยในอดีตจะใช้คอนกรีตเป็นวัสดุ เคลือบผิวป้องกันไฟ แต่มีปัญหาเรื่องค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและน้ำหนักที่มาก ดังนั้นในยุคต่อมา จึงใช้วัสดุประเภทเส้นใยมาผสม เพื่อช่วยลดปัญหาดังกล่าว โดยในเบื้องต้นใช้ Asbestos แต่ ต่อมาพบว่า เป็นสารอันตราย ซึ่งก่อให้เกิดอันตรายต่อปอดของมนุษย์ จึงได้ยกเลิกการใช้ และได้ ทดลองใช้วัสดุเส้นใยชนิดอื่นแทน ซึ่งวัสดุเคลือบผิวป้องกันไฟที่มีวัสดุเส้นใยผสมอยู่เป็นวัสดุที่มี ประสิทธิภาพสูง ราคาถูก แต่มีข้อเสีย คือขาดความแข็งแรง และมีความอ่อนนุ่ม ทำให้สามารถเกิด การหลุดร่อนออกจากโครงสร้างเหล็กได้ง่าย ซึ่งวัสดุที่นำมาใช้จะมีความหนาแน่นประมาณ 240-400

kg/m³ โดยวัสดุเส้นใยแร่ที่นำมาใช้คือ ยิปซัม ,เวอร์มิคูไลท์ และเพอร์ไลท์ และต่อมาได้มีการใช้วัสดุประเภทที่เรียกว่า Intumescence

และนอกจากการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ตามที่กล่าวไว้เบื้องต้น การทดสอบความสามารถในการทนไฟตามมาตรฐานของการทดสอบการทนไฟ ASTM E119 Standard Method of Fire Test of Building Construction and Material ก็เป็นคุณสมบัติที่สำคัญ ซึ่งทางวასนา กมลมาลย์นิวัฒน์ และคณะ(2008) ได้ทำการศึกษาการเตรียมอนุภาคทนไฟด้วยวิธีอิมัลชันในการเตรียมอนุภาคสามารถเตรียมได้จากสารเคมีหลายชนิด ซึ่งในส่วนของสารเคลือบผิว (Intumescent Coating) จะทำการเตรียมโดยนำอนุภาคที่เตรียมได้ไปผสมกับสารยึด (Binder) จากนั้นจึงนำไปทดสอบเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของอนุภาคทนไฟที่เตรียมได้ ตามมาตรฐานการทดสอบการทนไฟ ASTM E119 Standard Method of Fire Test of Building Construction and Material โดยนำสารเคลือบทนไฟ พ่นเคลือบที่ผิวเหล็กที่ต้องการทดสอบ พ่นความหนาประมาณ 10 มิลลิเมตร ขนาด 30x30 เซนติเมตร โดยก่อนที่จะทำการพ่นเคลือบผิวเหล็ก ไม่จำเป็นต้องทาสารเคลือบที่ผิว จากนั้นทำการติด Thermocouple ด้านละ 2 จุด รวมทั้งหมด 4 จุด ที่ตำแหน่งต่างๆ จากนั้นนำแผ่นเหล็กไปทดสอบด้วยเตาเผามาตรฐาน ASTM E119 ซึ่งเครื่องมือดังกล่าวต้องขอความร่วมมือในการทดสอบจากศูนย์วิจัยเพื่อความปลอดภัยจากอัคคีภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.13 แสดงตำแหน่งการติด Thermocouple บนแผ่นเหล็ก

วงศ์วี คงมาก (2004) ได้ทำการวิจัยเพื่อศึกษาวิธีการประมาณค่าความหนาที่เหมาะสมของ วัสดุเคลือบผิวป้องกันไฟสำหรับองค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณ ซึ่งจะทำให้โครงสร้างเหล็กสามารถทนไฟได้ภายในเวลาที่กำหนด วิธีการประมาณหาความหนาที่เหมาะสมของวัสดุเคลือบผิวป้องกันไฟที่นำเสนออาศัย การสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการวิเคราะห์ ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนในสองมิติแบบสภาวะไม่คงที่ ในการทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลอง พบว่าผลการประมาณค่าความหนาของวัสดุเคลือบผิวป้องกันไฟและผลการทดสอบการทนไฟ จากงานวิจัยในอดีตมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี วิธีการที่นำเสนอมีความไวต่อความคลาดเคลื่อนของค่าการนำความร้อนของ วัสดุเคลือบผิวป้องกันไฟค่อนข้างสูงโดยเฉพาะในกรณีที่ค่าการนำความร้อนคงที่ แต่มีความไวต่อความคลาดเคลื่อนของค่าความร้อนจำเพาะและความหนาแน่นของ วัสดุเคลือบผิวป้องกันไฟต่ำ

นอกจากนี้ชนิดของวัสดุดิบที่จะนำมาใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตทนไฟ ผู้นำนักเขาพบว่า จิตรกร ตังอนุสรณ์สุข และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาเพอร์ไลต์ที่มีอยู่ในประเทศไทย โดยใช้วิธี X-ray fluorescence (XRF) ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี แล้วนำองค์ประกอบดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยใช้วิธีดังกล่าวในการวิจัยเช่นกัน ดังตารางที่ 2.6 เพื่อจะทำการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของเพอร์ไลต์และของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้เป็นข้อมูลคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุทั้ง 2 ชนิด ที่สำคัญ ให้สามารถใช้เป็นวัตถุดิบที่สามารถนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมก่อสร้างได้ เช่น นำมาใช้ในการทำคอนกรีตนำหนักเบาที่ทำเป็นฉนวนกันไฟ เป็นต้น

ในปัจจุบันเพอร์ไลต์มีการผลิตจากประทานบัตรของ หจก.คลองยาง จำนวน 1 แปลงเพียงแหล่งเดียว ตั้งอยู่ที่ตำบลมหาโพธิ์ อำเภอสระโบสถ์ จังหวัดลพบุรี มีอัตราการผลิตประมาณ 2,400 ตันต่อปี สำหรับแร่เกรดสูงเพื่อเผาสำหรับทำวัสดุกรองคุณภาพสูงและถูกจำหน่ายให้กับโรงงานน้ำผลไม้ การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (hydroponic) ตัวเต็มสำหรับปูนฉาบสำเร็จ และอิฐทนไฟ โดยจำหน่ายให้กับโรงเผาที่จังหวัดราชบุรี ราคาของเพอร์ไลต์คุณภาพสูงก่อนการเผาที่ 650 บาทต่อตัน เมื่อเผาแล้วราคาจะเพิ่มขึ้นเป็น 6,000 – 12,000 บาทต่อตัน ขึ้นกับคุณสมบัติความขาว และความหนาแน่น (สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน, 2012:ออนไลน์) และได้มีการศึกษาที่นำเอาวัสดุเพอร์ไลต์มาผสมในส่วนผสมเพื่อทำเป็นคอนกรีตมวลเบา เช่น ประพัทธ์ กรังพานิชย์ (1997) ได้ศึกษาถึงการนำกากแร่สังกะสีและวัสดุเพอร์ไลต์มาผลิตเป็นคอนกรีตมวลเบา โดยการนำกากแร่สังกะสีใช้เป็นวัสดุผสมแทนทรายและผสมเพอร์ไลต์เพื่อลดน้ำหนักของเนื้อคอนกรีต และได้ศึกษาถึงความหนาแน่นรวม (bulk density) โดยการนำเพอร์ไลต์มาบดแล้วคัดขนาดด้วย

ตะแกรงมาตรฐาน เพื่อหาขนาดของเพอร์ไลต์ที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นมวลผสมคอนกรีต ซึ่งจากการทดสอบพบว่า ขนาด 0.850 มิลลิเมตรหรือขนาด 200 ไมครอน มีความเหมาะสมในการใช้งาน และค่าความหนาแน่นมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่มีการใช้โดยทั่วไป คือ $40 - 300 \text{ kg/m}^3$ และจากนำเพอร์ไลต์ปกติมาใช้ประโยชน์มากมายในหลายอุตสาหกรรม จากงานวิจัยต่างๆยังพบว่า มีการนำ Expanded Perlite มาใช้ในงานคอนกรีตทนไฟน้ำหนักเบาด้วย R. Demirboga, I. Orung and R. Gul (2001) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของ Expanded Perlite ในคอนกรีตมวลเบากำลังสูง ซึ่งในการศึกษาได้ใช้ Expanded Perlite และหินพัมมิช เป็น Aggregate โดยศึกษาถึงผลกระทบด้านกำลังอัดที่เกิดขึ้นกับคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ซิลิกาฟูมและเถ้าลอย Class C แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก และควบคุมปริมาณของมวลรวมให้อยู่ที่ 200 kg/m^3 และใช้สารลดน้ำจํานวนมากร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน จากการทดสอบพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ Expanded Perlite ความหนาแน่นของตัวอย่างทั้งหมดลดลงจาก $1,150$ เหลือ 753 kg/m^3 ทั้งส่วนผสมที่ใช้ซิลิกาฟูม และเถ้าลอย ค่ากำลังอัดที่อายุ 7 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 52, 85 และ 55 และที่อายุ 28 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 80, 84 และ 108 เมื่อใช้ Expanded Perlite แทนที่หินพัมมิช 20, 40 และ 60% ตามลำดับ และ I.B.Topcu and B.Isikdag (2007) ได้ตระหนักถึงประโยชน์ของ Expand Perlite Aggregate ว่า เป็นได้ทั้งฉนวนกันความร้อนและกันเสียง และยังเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา ซึ่งเป็นที่แน่นอนว่าจะสามารถทำให้ประหยัดต้นทุนค่าก่อสร้างได้ จึงได้ทำการศึกษาคูณสมบัติของคอนกรีตเบาที่ใช้ Expanded Perlite เป็น Aggregate ในส่วนผสมคอนกรีต ควบคุมปริมาณซีเมนต์ที่ $300, 350$ และ 400 kg/m^3 และแทนที่ซีเมนต์ด้วย EPA ร้อยละ 0, 15, 30, 45 และ 60 ทำการทดสอบพฤติกรรมทั้งคอนกรีตที่อยู่ในสภาพคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว โดยหล่อแท่งตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$ และทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 mm สูง 300 mm ทดสอบตัวอย่างที่อายุการบ่ม 28 วัน จากการทดสอบพบว่าค่าความหนาแน่นที่น้อยที่สุดคือ $1,800 \text{ kg/m}^3$ ที่ปริมาณซีเมนต์ 300 kg/m^3 และค่ากำลังอัดของ EPAC (expanded perlite aggregate concrete) ที่ได้ประมาณ 200 และ 300 kg/cm^2 ที่ปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ซึ่งสามารถกล่าวสรุปได้ว่า EPAC มีคุณสมบัติในการเป็น Aggregate สำหรับคอนกรีตมวลเบา นอกจากนี้ R. Demirboga and R. Gul (2003) ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของสารผสมเพิ่มต่อคุณสมบัติด้านการนำความร้อนของคอนกรีตที่ใช้ Perlite เป็นมวลรวม โดยในการศึกษาจะใช้ซิลิกาฟูม และเถ้าลอย แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10, 20 และ 30 และควบคุมปริมาณของมวลรวมให้อยู่ที่ 200 kg/m^3 และใช้สารลดน้ำจํานวนมากร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน จากการทดสอบได้แสดงให้เห็นว่า

คุณสมบัติด้านการนำความร้อนลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมและเถ้าลอยที่ปริมาณร้อยละ 14 และ 18 ตามลำดับ และเมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารผสมเพิ่มส่งผลให้ความหนาแน่นของคอนกรีตลดลงจาก 522 kg/m^3 เหลือ 483 kg/m^3 กำลังอัดมีค่าลดลงร้อยละ 12, 19 และ 29 ที่อายุการบ่ม 7 วัน แต่ค่ากำลังอัดจะเพิ่มขึ้นร้อยละ 9, 13 และ 4 ที่อายุการบ่ม 28 วัน ที่การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ แต่สำหรับเถ้าลอยนั้นจะส่งผลทำให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 36 และ 27 ที่อายุการบ่ม 28 วัน

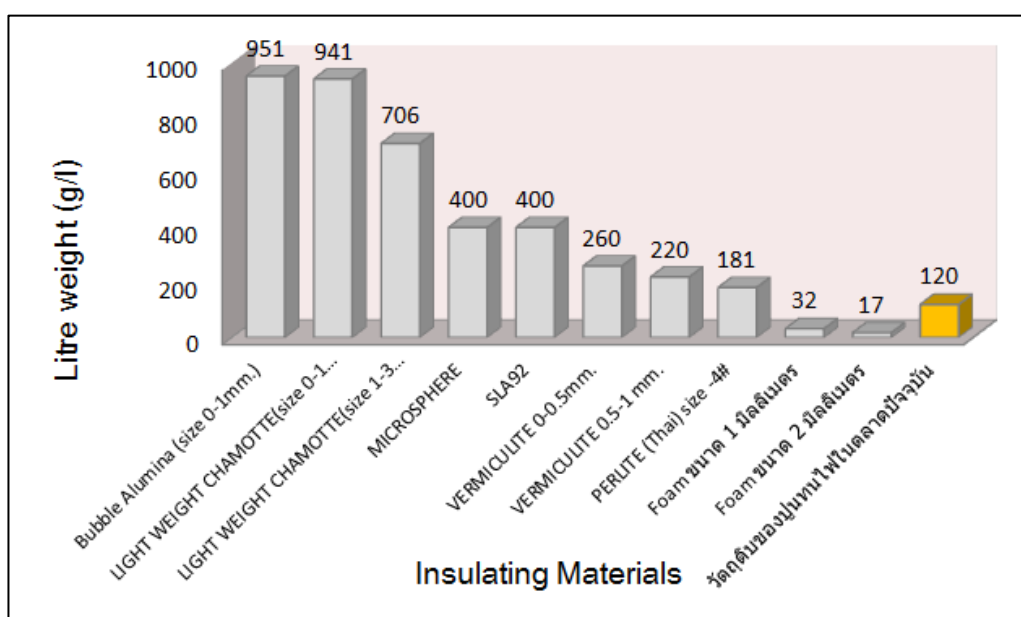
ตารางที่ 2.5 ข้อกำหนดและขอบเขตคุณสมบัติการใช้งานของผลิตภัณฑ์ปูนทนไฟ

ประเภทคุณสมบัติ	หน่วย	ค่ากำหนด	อ้างอิง
1. ความหนาแน่น (FBD)	กรัม/ลบ.ซม.	<1.04	ASTM C401-91
2. การทนอุณหภูมิที่ 1000°C			
2.1) PCE	CONE NUMBER	≥ 05	ASTM C401-91
2.2) LC	%	< 1.5	ASTM C401-91
3. การทนแรงดัด(BS)	กิโลกรัม/ตร.ซม.	> 3.5	สินค้าในท้องตลาด
4. การทนต่อแรงกด (CCS)	กิโลกรัม/ตร.ซม.	> 5	สินค้าในท้องตลาด

ในงานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการศึกษาข้อกำหนดและขอบเขตคุณสมบัติการใช้งานของผลิตภัณฑ์ปูนทนไฟโดยสำรวจข้อกำหนดและขอบเขตคุณสมบัติการใช้งานผลิตภัณฑ์ปูนทนไฟจากแหล่งข้อมูลหลัก ได้แก่ มาตรฐานของวัสดุทนไฟ ประเภทฉนวนกันความร้อน (American Society for Testing and Materials; ASTM C401-91) และผลิตภัณฑ์ปูนทนไฟที่ใช้ในท้องตลาด ผลการศึกษาข้อกำหนดและขอบเขตคุณสมบัติสำหรับใช้งานผลิตภัณฑ์ปูนทนไฟ แสดงดังตารางที่ 2.5 แสดงคุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของปูนทนไฟที่ต้องการ โดยปูนทนไฟต้องมีค่าความหนาแน่น (FBD) ไม่น้อยกว่า 1.04 กรัม/ลบ.ซม. ทนอุณหภูมิได้ที่ 1,000 องศาเซลเซียส ให้ค่า (PCE) ≥ 05 และค่า (LC) < 1.5 % ตามมาตรฐาน ASTM C401-91 สำหรับ ค่าการทนแรงดัด (BS) ต้องมีค่ามากกว่า 3.5 กิโลกรัม/ตร.ซม. และ การทนแรงกด (CCS) มีค่ามากกว่า 5 กิโลกรัม/

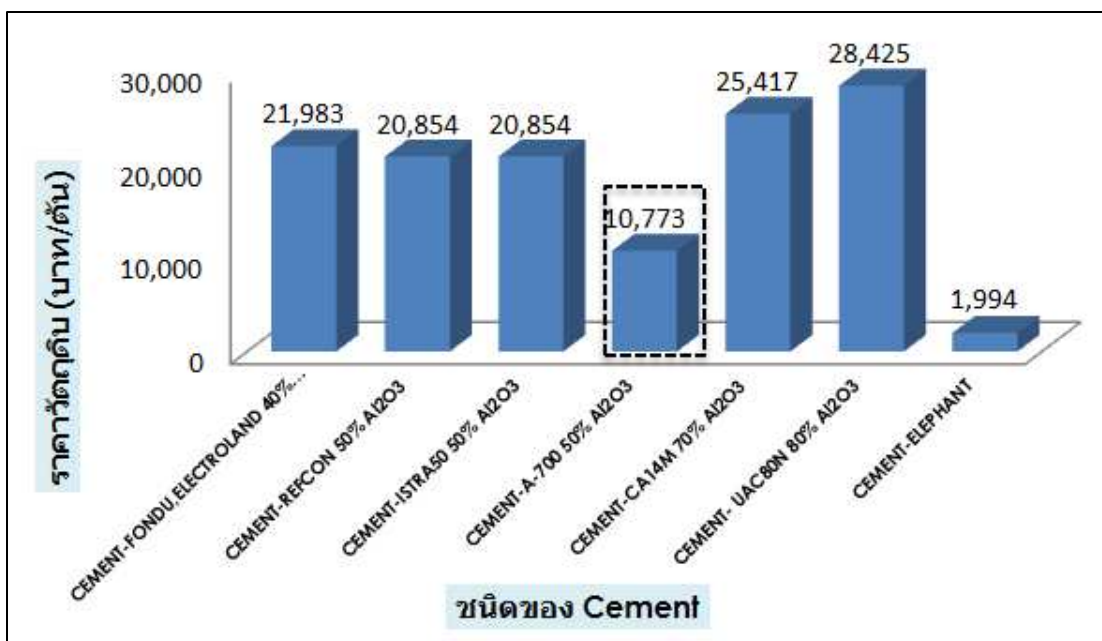
ตร.ชม. โดยอิงจากปูนทนไฟที่ใช้ในท้องตลาด และเมื่อทำการศึกษา Relative price ของราคาต้นทุนต่อหน่วยของวัสดุฉนวนไฟแต่ละชนิด อธิบายได้ดังตารางที่ 2.7

และเนื่องจากค่าการนำความร้อนเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุทนไฟประเภทฉนวนกันความร้อน ซึ่งคุณสมบัติด้านการนำความร้อนมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นวัสดุโดยตรง เพราะเมื่อความหนาแน่นต่ำก็จะให้ค่าการนำความร้อนต่ำ ดังนั้นเมื่อต้องการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของวัสดุฉนวน สามารถพิจารณาได้จากค่า LITER WEIGHT หรือน้ำหนักของวัสดุฉนวนในภาชนะบรรจุปริมาตร 1 ลิตร



รูปที่ 2.14 แสดงการเปรียบเทียบ LITER WEIGHT

น้ำหนักของวัสดุฉนวนในภาชนะบรรจุปริมาตร 1 ลิตร ของวัสดุฉนวนแต่ละชนิด ดังนั้นเมื่อทำการพิจารณาวัสดุหลักที่จะนำมาเป็นวัสดุหลักในการทดลอง จึงได้ทำการพิจารณาจากวัสดุของสินค้าปูนทนไฟที่มีอยู่ในตลาดปัจจุบัน และค่าน้ำหนักของวัสดุฉนวนในภาชนะบรรจุปริมาตร 1 ลิตร เพื่อให้ได้ค่าการนำความร้อนที่ต่ำที่สุด และค่าความหนาแน่นเป็นไปตามวัสดุทนไฟประเภท O จากมาตรฐานการทดสอบวัสดุทนไฟตามเอกสาร American Society for Testing and Materials (ASTM C401-91) ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการเลือกวัสดุฉนวนเพอร์ไลต์ เวอร์มิคิวไลต์ และ โพลีสไตรีนโฟม มาทำการวิจัย



รูปที่ 2.15 แสดงการเปรียบเทียบ ราคา High Alumina Cement ในตลาดปัจจุบัน
(รายงานทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์แต่ละชนิด, สไลด์)

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติเชิงกลเพื่อให้ได้ค่าความแข็งแรง วัตถุดิบหลักที่ต้องพิจารณาคือ ซีเมนต์ ซึ่งผู้วิจัยสามารถแบ่งซีเมนต์ โดยแบ่งตามปริมาณของออกไซด์ของอลูมินา ได้ดังนี้

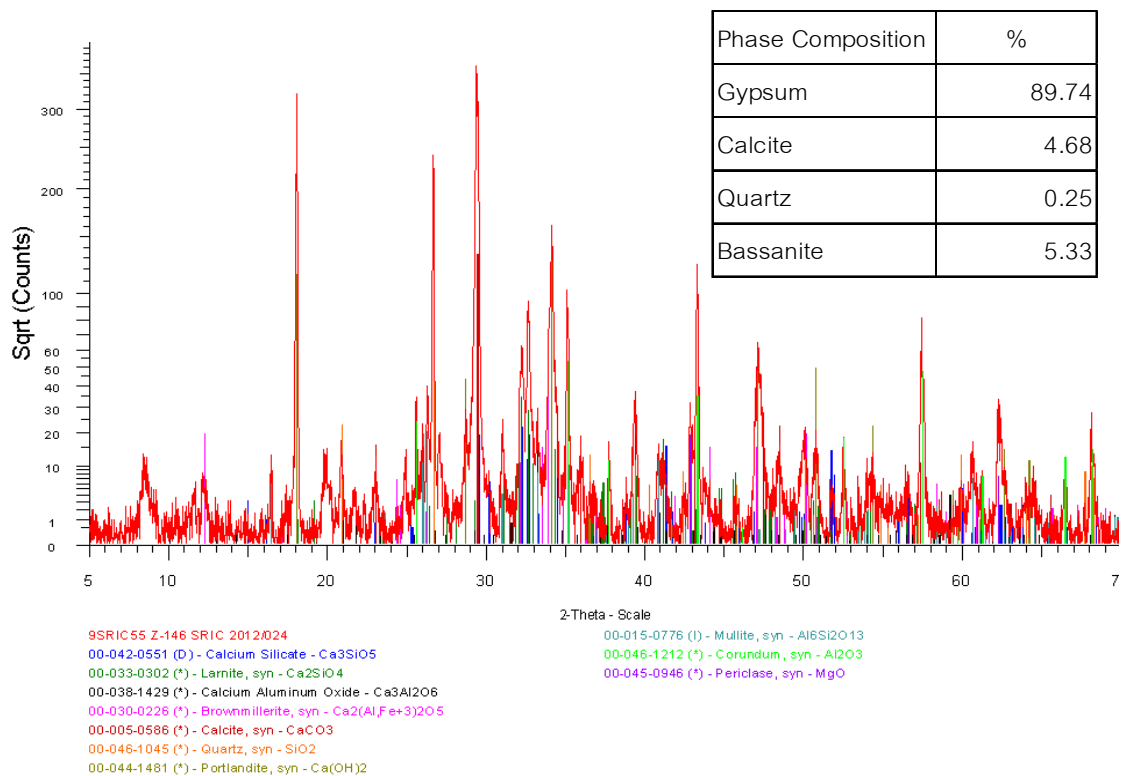
1. ปริมาณออกไซด์ของอลูมินา 40% คือ CEMENT FONDUELECTROLAND
2. ปริมาณออกไซด์ของอลูมินา 50% คือ REFCON ,ISTRA50 และ A700
3. ปริมาณออกไซด์ของอลูมินา 70% คือ CA14M
4. ปริมาณออกไซด์ของอลูมินา 80% คือ UAC80N
5. PORTLAND CEMENT TYPE 1

เนื่องจากเป้าหมายต้องการให้วัสดุผสมสามารถทนไฟได้ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส จึงสามารถเลือกใช้ได้ทุกประเภทของซีเมนต์ดังที่กล่าวข้างต้น แต่ซีเมนต์ชนิดปอร์ตแลนด์ซีเมนต์จะให้ค่าการเซตตัวนานมากกว่า 28 วัน เพื่อพัฒนาค่าความแข็งแรงได้สูงสุด ดังนั้นจึงไม่สามารถเลือกเข้ามาพิจารณาได้เนื่องจากในการใช้งานจริง ทางผู้ใช้งานต้องการพัฒนาค่าความแข็งแรงสูงสุดภายใน 24 ชั่วโมง ซึ่งซีเมนต์ประเภทที่มีปริมาณออกไซด์ของอลูมินา 40-80% สามารถพัฒนาให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดภายใน 24 ชั่วโมงและ เมื่อพิจารณาร่วมกับต้นทุนของราคาวัตถุดิบ ซีเมนต์ชนิด A700 ประเภท ปริมาณออกไซด์ของอลูมินา 50% สามารถทำให้ได้ต้นทุนต่ำ

ที่สุดโดยสามารถใช้งานได้ นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของปูนทนไฟที่มีจำหน่ายในตลาดปัจจุบัน พบว่าคุณสมบัติหลักของสินค้า

- 1 เป็นวัสดุป้องกันไฟประเภท มียิปซัมและซีเมนต์ เป็นองค์ประกอบหลัก
- 2 ติดตั้งด้วยวิธีพ่นบนโครงสร้างเหล็กเพื่อป้องกันไฟได้อย่างมีประสิทธิภาพ ป้องกันการเสียหายและ พังทลายของโครงสร้างเมื่ออยู่ในสภาวะอุณหภูมิสูงขณะเกิดไฟไหม้ทำให้สามารถป้องกันไฟได้ตั้งแต่ 1-4 ชั่วโมง
- 3 มีแรงยึดเกาะ (Bond Strength) สูงมากกว่า 3.5 kg/cm^2 และ CCS สูงมากกว่า 5 kg/cm^2
- 4 ทนทานต่อการสึกกร่อนจากสภาวะอากาศได้ดีไม่ต้องใช้วัสดุเคลือบผิวอีกชั้นหนึ่ง

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนทนไฟ



รูปที่ 2.16 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของปูนทนไฟ โดยเครื่องมือทดสอบ X-ray Diffraction จากบริษัทสยามวิจัยและนวัตกรรม จำกัด

ตารางที่ 2.6 ตารางการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์กับเพอร์ไลต์
(จิตรกร, 2548)

องค์ประกอบเคมี	สัญลักษณ์	ร้อยละโดยน้ำหนัก ของซีเมนต์	ร้อยละโดยน้ำหนัก ของเพอร์ไลต์ ในประเทศไทย
CaO	C	60 – 67	0.57
SiO ₂	S	17 – 25	71.01
Al ₂ O ₃	A	3 – 8	16.07
Fe ₂ O ₃	F	0.5 - 6.0	0.71
MgO	M	0.1 - 4.0	0.40
Na ₂ O	N	0.1 - 1.8	0.92
K ₂ O	K	0.1 - 1.8	5.57
SO ₃	S	0.5 - 3.0	-
FeO	Fe	-	0.71
H ₂ O (comb)	-	-	3.57
(Loss on ignition)	LOI	0.1 - 3.0	-

ตารางที่ 2.7 ผลการศึกษา Relative price ของราคาต้นทุนต่อหน่วยของวัสดุดิบวัสดุทนไฟ

ประเภทวัสดุทนไฟ	ราคาต้นทุน (บาท/ตัน)		สัดส่วนราคาเมื่อ เทียบกับ (P)
1. เพอร์ไลต์ (P)	12,000	12,000/12,000	1
2. เฮอร์มิคูไลต์ (V ₁ ,V ₂)	15,000	15,000/12,000	1.25
3. โพลีสไตรีนโฟม (F)	120,000	120,000/12,000	10

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุที่ใช้ในการศึกษา มีดังนี้

- 1) เพอร์ไลต์ (P) ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1 มิลลิเมตร และมีค่าความหนาแน่น (Bulk density) เท่ากับ 90 กิโลกรัมต่อลบ.ม.
- 2) เวอร์มิคูไลท์ (V) ที่นำมาศึกษา มี 2 ชนิด ขึ้นกับขนาดของอนุภาค ได้แก่ เวอร์มิคูไลท์ที่มีอนุภาคขนาดเล็ก (V_1) และขนาดใหญ่ (V_2) โดย V_1 และ V_2 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย และค่าความหนาแน่น (Bulk density) เท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร และ 100 กิโลกรัมต่อลบ.ม.ตามลำดับ และ (V_2) มีค่าเท่ากับ 0.75 มิลลิเมตร และ 80 กิโลกรัมต่อลบ.ม.ตามลำดับ
- 3) โพลีสไตรีนโฟม (F) ที่ใช้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1 มิลลิเมตร และมีค่าความหนาแน่น (Bulk density) เท่ากับ 1.05 กิโลกรัมต่อลบ.ม.
- 4) อลูมินาซีเมนต์ที่ใช้ ในที่นี้คือ ปูนซีเมนต์ที่มีส่วนผสมของอลูมินาออกไซด์ 50 เปอร์เซนต์ (HAC)

3.2 วิธีการทดลอง

การศึกษาได้ดำเนินการทดลอง ดังนี้

3.2.1 ศึกษาขอบเขตของวัสดุส่วนผสมแต่ละชนิดที่ใช้

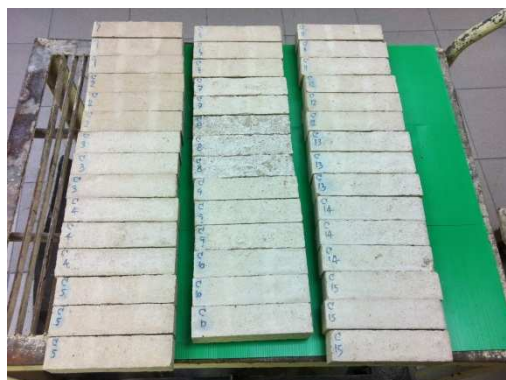
- 1) นำอลูมินาซีเมนต์ (HAC) มาผสมกับวัสดุแต่ละชนิดที่ส่วนผสมต่างๆ ในสัดส่วนต่อร้อยละ ส่วนอลูมินาซีเมนต์ (per hundred alumina cement; phc) ได้แก่ เพอร์ไลต์ (P) ตั้งแต่ 10 ถึง 60 phc เวอร์มิคูไลท์ (V_1) ตั้งแต่ 10 ถึง 60 phc เวอร์มิคูไลท์ (V_2) ตั้งแต่ 10 ถึง 60 phc และโพลีสไตรีนโฟม (F) ตั้งแต่ 1 ถึง 5 phc
- 2) นำแต่ละส่วนผสมที่ได้มาใส่โม่ผสม Hobart Mixer (ดังรูปที่ 3.1) ผสมแห้ง 2 นาที เติมน้ำและปั่นเป็นระยะเวลา 3 นาที จากนั้นทำการหล่อส่วนผสมลงในแบบหล่อทำด้วยเหล็กที่มี 4 ช่องว่างแต่ละช่องมีขนาดกว้างยาวหนาเท่ากับ 40 x 160 x 40 มิลลิเมตร (ดังรูปที่ 3.2)
- 3) รอให้ชิ้นงานเกิดการแข็งตัวของชิ้นงานประมาณ 4-6 ชั่วโมง และทำการแกะชิ้นงานออกจากแบบนำเข้าอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง (ดังรูปที่ 3.3)
- 4) นำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพ



รูปที่ 3.1 ไม่นผสม Hobart Mixer



รูปที่ 3.2 แบบเหล็กใช้สำหรับหล่อชิ้นงานขนาด 40x160 x40 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.3 ชิ้นงานหลังจากทำการแกะออกจากแบบ

3.2.2 ศึกษาส่วนผสมและคุณสมบัติของปูนทนไฟ

การศึกษาได้ดำเนินการ ดังนี้

- 1) นำผลการศึกษาที่ได้จากหัวข้อ 3.2.1 มากำหนดขอบเขตสูงและต่ำของแต่ละวัสดุที่ใช้ในการทดลองผสมร่วมกัน โดยจำแนกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ระดับสูง กลาง และต่ำ ทดลองซ้ำ 2 ครั้ง แบบสุ่ม ดังตารางที่ 3.1
- 2) วิธีการเตรียมชิ้นงานผสมวัสดุต่างๆ ใช้วิธีการเดียวกันดังได้กล่าวในหัวข้อ 3.2.1

3.3 วิธีการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุทนไฟ

3.3.1 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกายภาพ

3.3.1.1 ความหนาแน่น(Fired Bulk Density) ได้ดำเนินการทดสอบชิ้นงาน ตามมาตรฐาน ASTM C830-88 เป็นการทดสอบหาความหนาแน่นที่รวมรูเปิด โดยทดสอบด้วยถัง Vacuum – Pressure ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) นำตัวอย่างชิ้นที่เหลือหลังจากทดสอบการทนต่อแรงดัดมาทำการทดสอบ
- 2) ชั่งน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง, D(g) โดยใช้เครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียดทศนิยม ตำแหน่งที่ 2
- 3) นำตัวอย่างใส่ลงในถัง Vacuum-Pressure ที่ปิดสนิทและเปิดเครื่อง vacuum ให้มีความดัน -26 in. Hg เป็นเวลา 10 นาที ดังรูปที่ 3.4 และ 3.5
- 4) ปิด vacuum และปล่อยน้ำเข้าถัง
- 5) เปิดลม pressure ให้มีความดัน 50 psi เป็นเวลา 45 นาที
- 6) ปล่อยความดันให้เป็นปกติ
- 7) ชั่งน้ำหนักในน้ำของตัวอย่าง, S (g) โดยตัวอย่างจะต้องจมอยู่ในน้ำทั้งชิ้น
- 8) ชับน้ำที่ผิวตัวอย่างออกด้วยผ้าที่เปียกน้ำหมาดๆ
- 9) ชั่งน้ำหนักเปียกในอากาศของตัวอย่าง, W (g)
- 10) คำนวณค่าความหนาแน่น ตามสมการแสดงค่าความหนาแน่น (อ้างอิงสมการ 2.3 ในบทที่ 2)



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างถัง Vacuum-Pressure



รูปที่ 3.5 การวางตัวอย่างลงในถัง Vacuum-Pressure

3.3.1.2 การทนอุณหภูมิ Refractoriness (Pyro metric Cone Equivalent) (Standard Test Method for Pyro metric Cone Equivalent; PCE) ดำเนินการทดสอบชิ้นงาน ตามมาตรฐาน ASTM C24-89 เป็นการทดสอบหาช่วงอุณหภูมิในการหลอมตัวของตัวอย่าง โดยการเตรียมเป็น cone แล้วเผาแล้วสังเกตการล้มตัวของตัวอย่างเทียบกับตารางที่ 1 เทียบอุณหภูมิกับเบอร์ของ Orton cone อ้างอิงใน ภาคผนวก

ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) เตรียมชิ้นงานที่จะทำการทดสอบ ดังรูปที่ 3.6
- 2) บดหยาบด้วยเครื่อง Jaw crusher ดังรูปที่ 3.7
- 3) บดละเอียดด้วย Vibratory Disc Mill ประมาณ 20 วินาทีและได้ตัวอย่าง ดังรูปที่ 3.8
- 4) นำผงตัวอย่างที่ได้มาผสมกับ dextrin 5% โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 3.9
- 5) เติมน้ำเล็กน้อยผสมให้เข้ากันและขึ้นรูปเป็น cone shape ในโมลเหล็ก (ดังรูปที่ 3.10, 3.11, และ 3.12) ตัวอย่างละ 2-3 ชิ้น
- 6) อบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง
- 7) นำ cone ที่ได้พร้อมๆกับ Standard cone ของ Orton ดังรูปที่ 3.13 ตามความทนไฟที่เลือก มาปักลงบน cone plate ดังรูปที่ 3.14 โดยใช้ Mortar A-90 ในการช่วยยึดและอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็น ระยะเวลา 1 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.15
- 8) นำ cone plate ที่ได้วางบนฐาน Support ในเตา PCE และเผา ดังรูปที่ 3.16
- 9) บันทึกผลการล้มของ cone ตัวอย่างเทียบกับ Orton cone ดังรูปที่ 3.17
- 10) เปิดตารางเทียบอุณหภูมิกับเบอร์ของ Orton cone ได้อุณหภูมิในการหลอมตัวของตัวอย่าง (ดังตารางที่ 1 ตารางเทียบอุณหภูมิกับเบอร์ของ Orton cone อ้างอิงในภาคผนวก)



รูปที่ 3.6 เตรียมชิ้นงานที่จะทำการทดสอบ



รูปที่ 3.7 เครื่องบดหยาบ Jaw Crusher



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างหลังบดด้วย Vibratory Disc Mill



รูปที่ 3.9 ผงตัวอย่างที่มาผสมกับ dextrin 5% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 3.10 โมลเหล็กที่ใช้ขึ้นรูป Cone



รูปที่ 3.11 เทส่วนผสมลงในโมลแล้วขึ้นรูป Cone shape



รูปที่ 3.12 ส่วนผสมที่ทำการขึ้นรูป Cone shape

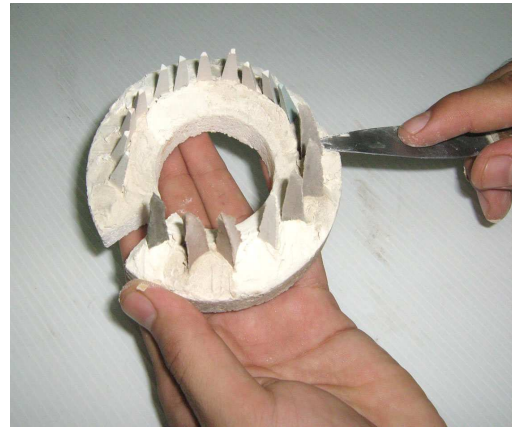


รูปที่ 3.13 ชิ้นงาน Cone standard ของ



รูปที่ 3.14 Cone Plate

ORTON



รูปที่ 3.15 ติดชิ้นงานที่ต้องการทดสอบบน Cone Plate



รูปที่ 3.16 นำ cone plate เข้าเผา



รูปที่ 3.17 ชิ้นงานที่เริ่มหลอม เปรียบเทียบกับ Standard Cone

3.3.1.3 การยืดหดตัว (Permanent Linear Change; LC) ได้ดำเนินการทดสอบชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM C113 การหดตัวหลังเผา (Firing Shrinkage) เป็นการวัดการหดตัวตั้งแต่ผลิตภัณฑ์แห้งสนิท จนถึงหลังเผา

ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) นำแท่งทดสอบ ขนาด 40x160x40 มิลลิเมตร
- 2) อบแท่งทดสอบให้แห้ง วัดความยาวหลังอบ บันทึกเป็น L_d (Dry Length)
- 3) นำแท่งทดสอบเข้าเผาที่อุณหภูมิใช้งาน 1,000 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมงและวัดความยาวหลังเผาบันทึกค่าเป็น L_f (Fired Length)
- 4) คำนวณร้อยละการหดตัวจากสูตรในสมการที่ 3.2
(Griffiths, R., Ceram, F.I., and Radford, C., 1964:18-20)

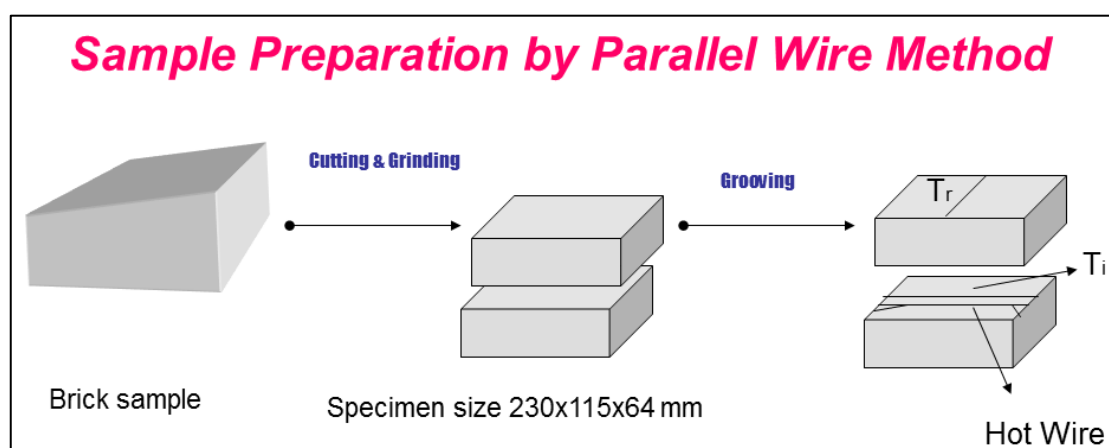
คำนวณค่าการหัดตัวหลังเผาเชิงเส้น (อ้างอิงสมการ 2.4 ในบทที่ 2)

3.3.1.4 ทดสอบการนำความร้อน

เป็นคุณสมบัติอันหนึ่งที่จะบอกว่าผลิตภัณฑ์นั้นเป็นฉนวนความร้อนหรือเป็นตัวนำความร้อนโดยทำการทดสอบโดยเครื่อง Thermal conductivity ยี่ห้อ NETZSCH รุ่น TCT 426 - Thermal Conductivity Tester: furnace/hot-wire method ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 8894-2 สามารถวัดค่าการนำความร้อนได้ ถึง 20 W/m.K และ Maximum Service Temperature เท่ากับ 1,400 องศาเซลเซียส

วิธีการทดสอบ

- 1) นำอิฐหรือคอนกรีตที่ต้องการทดลองมาทำการขึ้นรูปและตัดให้ได้ขนาด 230x115x64 mm. จำนวน 2 ชิ้น
- 2) นำชิ้นงานมาทำการเจาะร่องเพื่อฝังเส้นลวดนำความร้อนลงไปในพื้นที่ของชิ้นงานแล้วปิดผิวด้วยเนื้อของชิ้นงานบดละเอียด ดังรูป 3.18
- 3) นำตัวอย่างชิ้นงานเข้าทดสอบที่เครื่อง Thermal conductivity ดังรูป 3.19
- 4) ค่าการนำความร้อนที่ได้จะแสดงหน่วยเป็น W/m.K



รูปที่ 3.18 ลักษณะการเตรียมตัวอย่างชิ้นงานเพื่อทดสอบค่าการนำความร้อน



รูปที่ 3.19 เครื่องทดสอบ Thermal Conductivity ยี่ห้อ NETZSCH รุ่น TCT 426

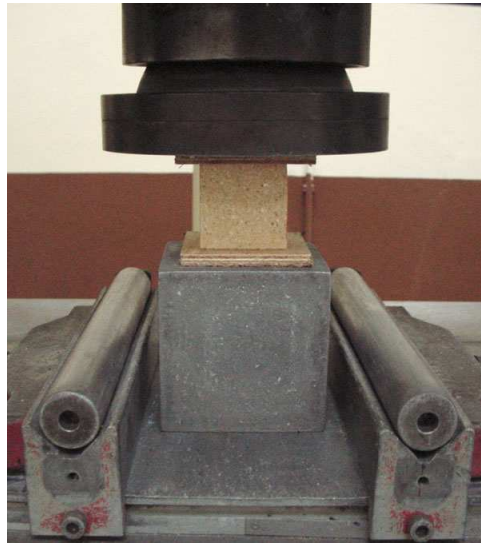
3.3.2 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

คุณสมบัติเชิงกลที่ทำการศึกษาในงานวิจัย คือ

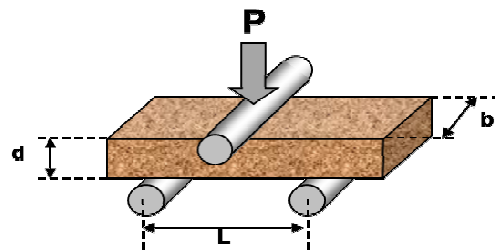
3.3.2.1 การทนต่อแรงกด Cold Crushing strength; (CCS) คือค่าที่บอกถึงความต้านทานต่อแรงบีบอัดของวัสดุทนไฟที่อุณหภูมิห้อง วิธีการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM Standard (C 133) เรื่อง Standard Test Methods for Cold Crushing Strength and Modulus of Rupture of Refractories โดยวัดความ กว้าง x ยาว ของด้านที่รับ load ของตัวอย่าง ประกอบด้วยแผ่นไม้ด้านที่รับ load และด้านตรงข้าม ทดสอบโดยเครื่อง Universal Testing Press (Shimadzu : รุ่น UH 100A) แสดงตาม รูปที่ 3.20 โดยตัวอย่างที่ดีขณะทดสอบจะแตกเป็นรูปกรวยสมมาตร ซึ่งแสดงว่าได้รับ load อย่างทั่วถึงกันทั้งผิวหน้าของชิ้นงาน

ค่าการทนต่อแรงกด(CCS) คำนวณได้จากสมการ (อ้างอิงสมการที่ 2.5 ในบทที่ 2)

3.3.2.2 การทนต่อแรงดัด Modulus of Rupture หรือ Bend Strength (BS) การทดสอบความแข็งแรง ต่อแรงดัด เป็นการตรวจสอบโดยการวัด ความสามารถ ในการต้านทานต่อแรงดัด (Bending Load) และรายงานค่า ทดสอบเป็น ค่าโมดูลัสของการแตกหัก



รูปที่ 3.21 ชิ้นงานก่อนทดสอบ CCS



รูปที่ 3.22 ลักษณะการทดสอบแบบ Three point bending สำหรับการทดสอบ MOR

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

ผลของคุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลที่ได้จากส่วนผสมวัสดุจะนำมาวิเคราะห์และพิจารณาโดยทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป MINITAB โดยมีลำดับการวิเคราะห์ข้อมูลดังนี้

- 1) การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (ANOVA)
- 2) การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสหสัมพันธ์และส่วนตกค้างของข้อมูล (Residual Plot)

บทที่ 4

การวิเคราะห์ผลการทดลองและการอภิปราย

4.1 ผลการศึกษาขอบเขตวัสดุส่วนผสมที่ใช้

จากการนำอลูมินาซีเมนต์ (HAC) มาผสมกับวัสดุแต่ละชนิดที่ส่วนผสมต่างๆ ในสัดส่วนต่อร้อยละอลูมินาซีเมนต์ (per hundred alumina cement; phc) ได้แก่ เพอร์ไลท์ (P) ตั้งแต่ 10 ถึง 60 phc เวอร์มิคูไลท์ (V_1) ตั้งแต่ 10 ถึง 60 phc เวอร์มิคูไลท์ (V_2) ตั้งแต่ 10 ถึง 60 phc และ โพลีสไตรีนโฟม (F) ตั้งแต่ 1 ถึง 5 phc

ผลการผสม P, V_1 , V_2 ,และ F ในส่วนผสมต่อร้อยละอลูมินาซีเมนต์ (per hundred alumina cement; phc) ได้ผลดังตารางที่ 4.1 และเมื่อนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบคุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกล ได้ผลดังรูปที่ 4.1- 4.9

รูปที่ 4.1 แสดงปริมาณเพอร์ไลท์ (P) กับความหนาแน่นของชิ้นงานหลังอบ 110 องศาเซลเซียส (FBD) พบว่าปริมาณ P เพิ่มมากขึ้นมีผลให้ค่า FBD ลดลง โดยปริมาณ P ที่มากกว่า 40 phc จะให้ความหนาแน่นน้อยกว่าเกณฑ์ที่กำหนดคือต้องน้อยกว่า 1.04 กรัม/ลบ.ซม. ดังนั้นขอบเขตของปริมาณการใช้เพอร์ไลท์ (P) ในที่นี้ จึงเลือกค่าตั้งแต่ 40, 50, และ 60 phc

รูปที่ 4.2 แสดงปริมาณเวอร์มิคูไลท์ทั้ง 2 ขนาดได้แก่ V_1 และ V_2 กับความหนาแน่นของชิ้นงานหลังอบ 110 องศาเซลเซียส (FBD) พบว่า ทั้ง V_1 และ V_2 ที่เพิ่มขึ้นมีผลให้ค่า FBD ลดลง ปริมาณเวอร์มิคูไลท์เท่ากับ 40 phc V_2 ซึ่งมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า V_1 จะให้ค่าความหนาแน่น (FBD) ต่ำกว่า 1.04 กรัม/ลบ.ซม. ขณะที่ V_1 ให้ค่าเท่ากับ 1.3 กรัม/ลบ.ซม. ซึ่งสูงกว่าขอบเขตที่กำหนด คือ 1.04 กรัม/ลบ.ซม. ดังนั้นการเลือกใช้ V_2 ในส่วนผสมจะให้ต้นทุนที่น้อยกว่า ขณะที่ราคาต่อหน่วยของเวอร์มิคูไลท์ทั้ง 2 ในท้องตลาดมีค่าเท่ากัน อ้างอิง ตารางที่ 2.7 ผลการศึกษา Relative price ของราคาต้นทุนต่อหน่วยของวัสดุพิเศษในบทที่ 2 สรุปขอบเขตของการใช้ปริมาณ V_2 กำหนดที่ 40, 50, และ 60 phc

รูปที่ 4.3 แสดงปริมาณโพลีสไตรีนโฟม (F) กับความหนาแน่นของชิ้นงานหลังอบ 110 องศาเซลเซียส (FBD) พบว่าปริมาณ โฟม (F) ที่เพิ่มมากขึ้นมีผลให้ค่า FBD ลดลง และปริมาณ F ที่มากกว่า 4 phc จะให้ความหนาแน่นน้อยกว่า 1.04 กรัม/ลบ.ซม. แต่ปริมาณ F ที่สามารถใช้ได้ไม่ควรเกิน 10 phc เนื่องจากชิ้นงานหลังอบ 110 องศาเซลเซียส จะไม่มีความแข็งแรงพอที่จะเคลื่อนย้ายได้ เมื่อปริมาณ F เกิน 10 phc และเมื่อพิจารณาพร้อมกับต้นทุนต่อหน่วยของ F พบว่า F มีต้นทุนต่อหน่วยที่แพงกว่า P และ V ประมาณ 10 เท่า โดยอ้างอิงจาก ตารางที่ 2.7 ผลการศึกษา Relative price ของราคาต้นทุนต่อหน่วยของวัสดุพิเศษในบทที่ 2 ดังนั้นจึงกำหนด

ขอบเขตการใช้งานของปริมาณ F ที่ 4 ,7, และ 10 phc โดยให้ F เท่ากับ 10 phc เป็นระดับสูงสุดในการทดลอง

รูปที่ 4.4 แสดงปริมาณเพอร์ไลต์ (P) กับคุณสมบัติการทนต่อแรงดัด (BS) ของชิ้นงานหลังอบ 110 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณ P เพิ่มมากขึ้นมีผลให้ค่า BS ลดลง ดังนั้นจากผลการทดลองไม่ควรใช้ปริมาณ P เกินกว่า 60 phc เนื่องจากจะทำให้ได้ค่า BS ที่ต่ำกว่าเกณฑ์ 3.5 kg/cm²

รูปที่ 4.5 แสดงปริมาณเวอร์มิคูไลท์ทั้ง 2 ขนาดได้แก่ V₁ และ V₂ กับคุณสมบัติการทนต่อแรงดัด (BS) ของชิ้นงานหลังอบ 110 องศาเซลเซียส พบว่า ทั้ง V₁ และ V₂ ที่เพิ่มขึ้นมีผลให้ค่า BS ลดลง

รูปที่ 4.6 แสดงปริมาณโพลีสไตรีนโฟม (F) กับคุณสมบัติการทนต่อแรงดัด (BS) ของชิ้นงานหลังอบ 110 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณ โฟม (F) ที่เพิ่มมากขึ้นมีผลให้ค่า BS ลดลงและปริมาณ F ไม่ควรมากกว่า 10 phc เนื่องจากถ้าปริมาณ F มากกว่า 10 phc จะทำให้ไม่สามารถหาค่า BS ได้จากการทดลอง ดังนั้นทำให้ขอบเขตของการใช้ปริมาณโพลีสไตรีนโฟม(F) ในที่นี้พิจารณาที่ 4, 7, และ 10 phc

รูปที่ 4.7 แสดงปริมาณเพอร์ไลต์ (P) กับคุณสมบัติการทนต่อแรงกด (CCS) ของชิ้นงานหลังอบ 110 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณ P เพิ่มมากขึ้นมีผลให้ค่า CCS ลดลง

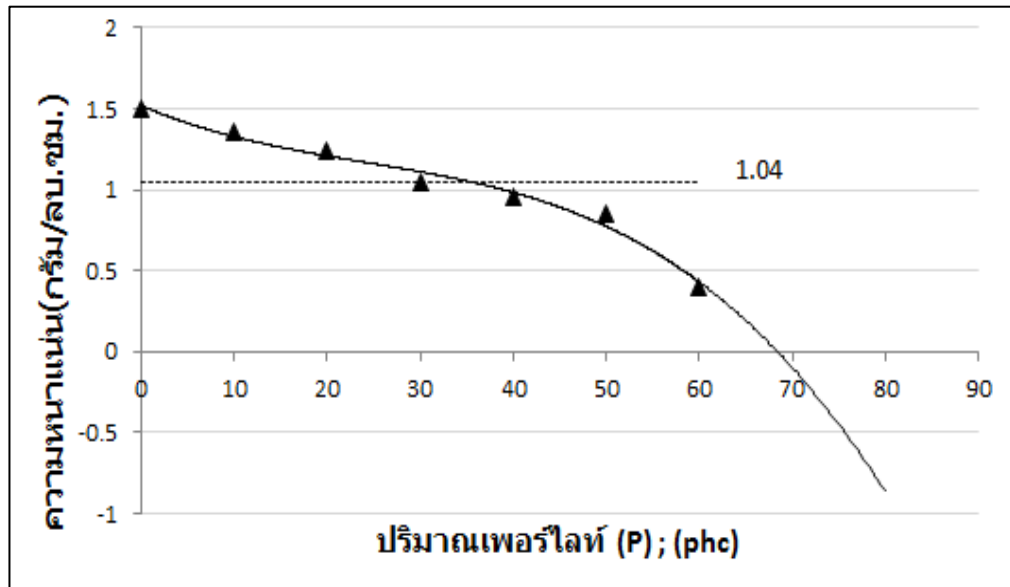
รูปที่ 4.8 แสดงปริมาณเวอร์มิคูไลท์ทั้ง 2 ขนาดได้แก่ V₁ และ V₂ กับคุณสมบัติการทนต่อแรงกด (CCS) ของชิ้นงานหลังอบ 110 องศาเซลเซียส พบว่า ทั้ง V₁ และ V₂ ที่เพิ่มขึ้นมีผลให้ค่า CCS ลดลง

รูปที่ 4.9 แสดงปริมาณโพลีสไตรีนโฟม (F) กับคุณสมบัติการทนต่อแรงกดของชิ้นงานหลังอบ (CCS) พบว่าปริมาณ โฟม (F) ที่เพิ่มมากขึ้นมีผลให้ค่า CCS ลดลง ปริมาณ F ไม่ควรมากกว่า 10 phc เนื่องจากถ้า ปริมาณ F มากกว่า 10 phc จะทำให้ไม่สามารถหาค่า CCS ได้จากการทดลอง ดังนั้นทำให้ขอบเขตของการใช้ปริมาณโพลีสไตรีนโฟม(F) ในที่นี้พิจารณาที่ 4, 7, และ 10 phc

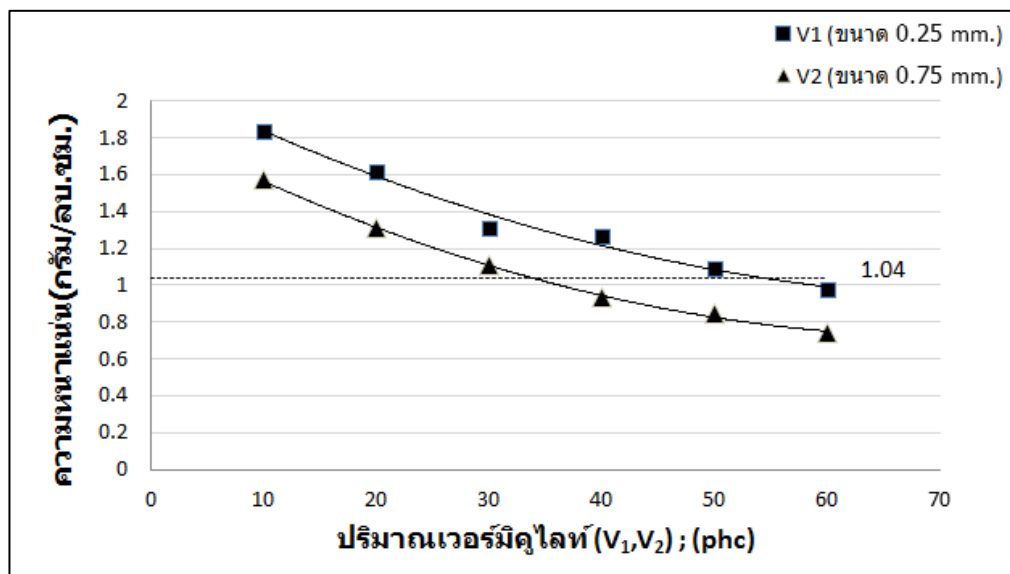
ดังนั้นจึงได้ทำการกำหนดขอบเขตของปริมาณวัสดุที่ใช้ในการทดลองได้ผลดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ผลการผสม P,V₁,V₂,และ F ในส่วนผสมต่อร้อยละของมวลซีเมนต์

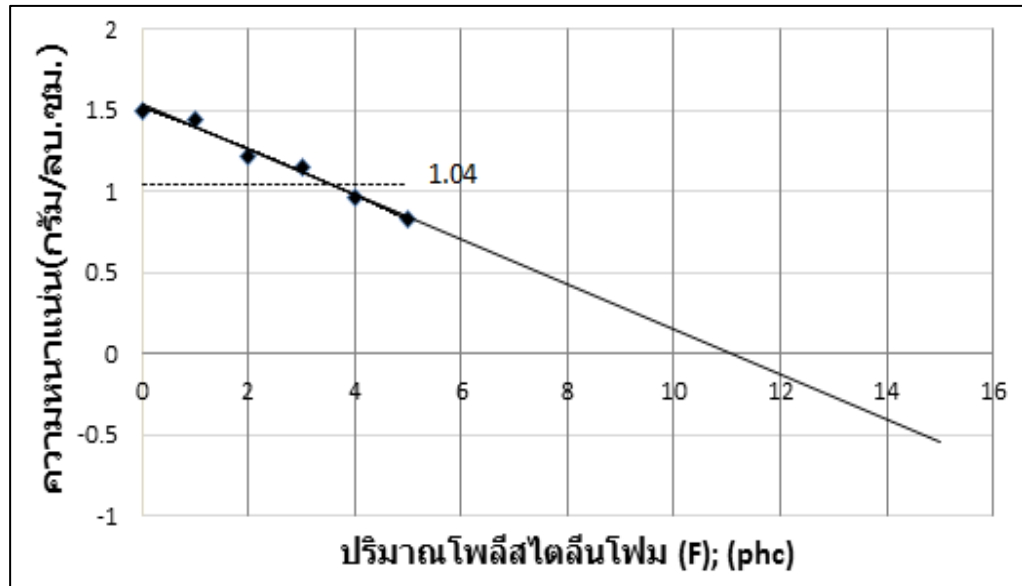
ชนิดวัสดุ	(phc)	หน่วย (phc)		
		P (phc)		
		FBD (g/cm ³)	BS (kg/cm ²)	CCS (kg/cm ²)
P	10	1.36	57	170
	20	1.24	47	152
	30	1.04	31	84
	40	0.96	18	65
	50	0.85	12	42
	60	0.4	9	28
V ₁	10	1.84	97	281
	20	1.62	76	198
	30	1.31	41	106
	40	1.27	35	104
	50	1.09	22	61
	60	0.98	14	34
V ₂	10	1.57	79	202
	20	1.31	49	114
	30	1.11	34	77
	40	0.93	18	44
	50	0.85	12	28
	60	0.74	7	15
F	1	1.44	56	133
	2	1.22	42	86
	3	1.15	36	65
	4	0.96	31	60
	5	0.83	23	44



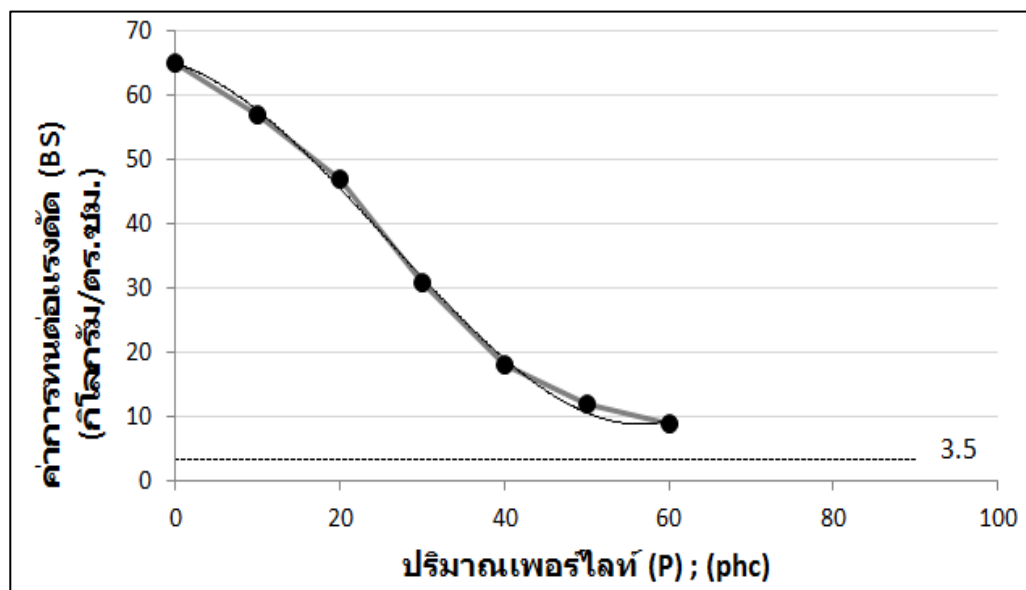
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเพอร์ไลต์ (P) กับความหนาแน่น (FBD)



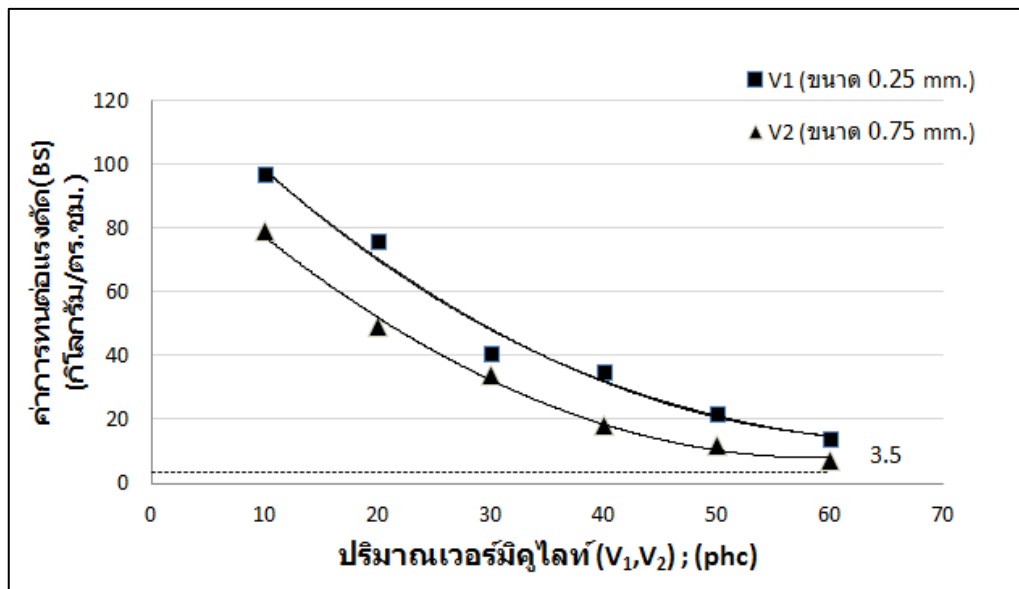
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ เวอร์มิคูไลต์ทั้ง 2 ขนาด (V₁) และ (V₂) กับความหนาแน่น (FBD)



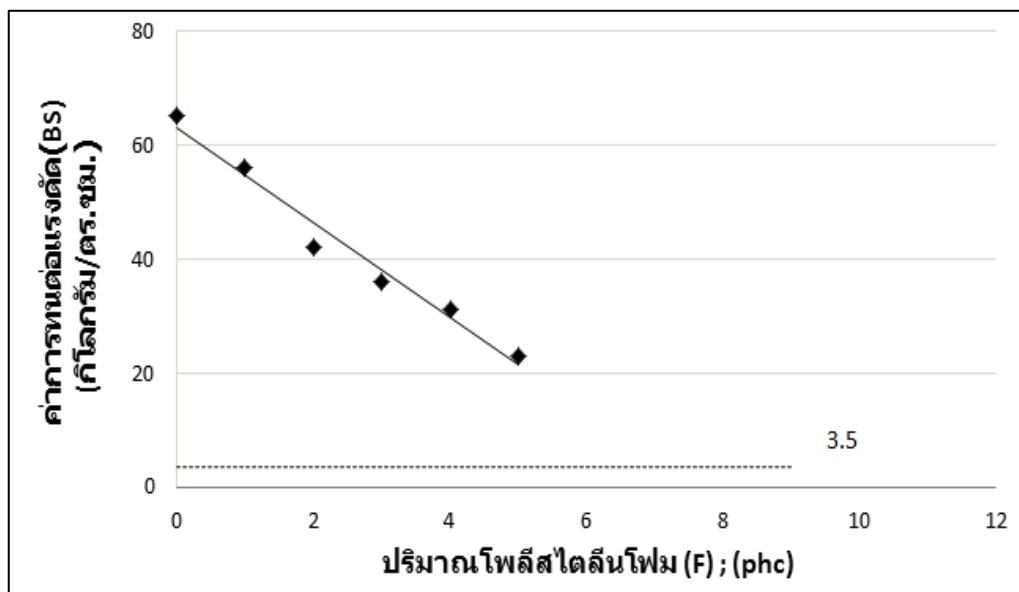
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโพสฟอรัสไดคัลไฟฟ (F) กับความหนาแน่น (FBD)



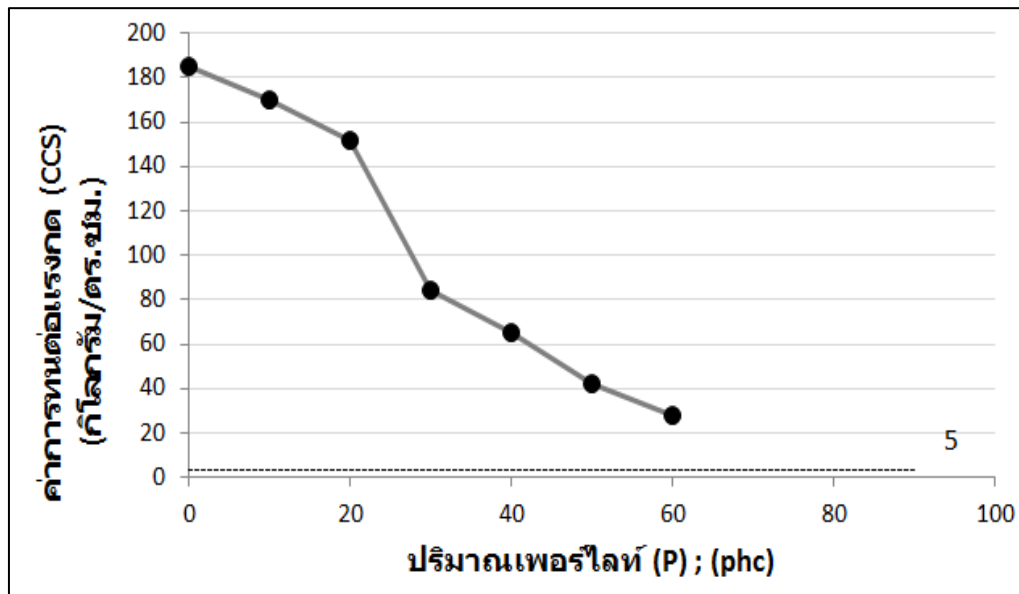
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเพอร์ไลท์ (P) กับคุณสมบัติการทนต่อแรงดัด (BS)



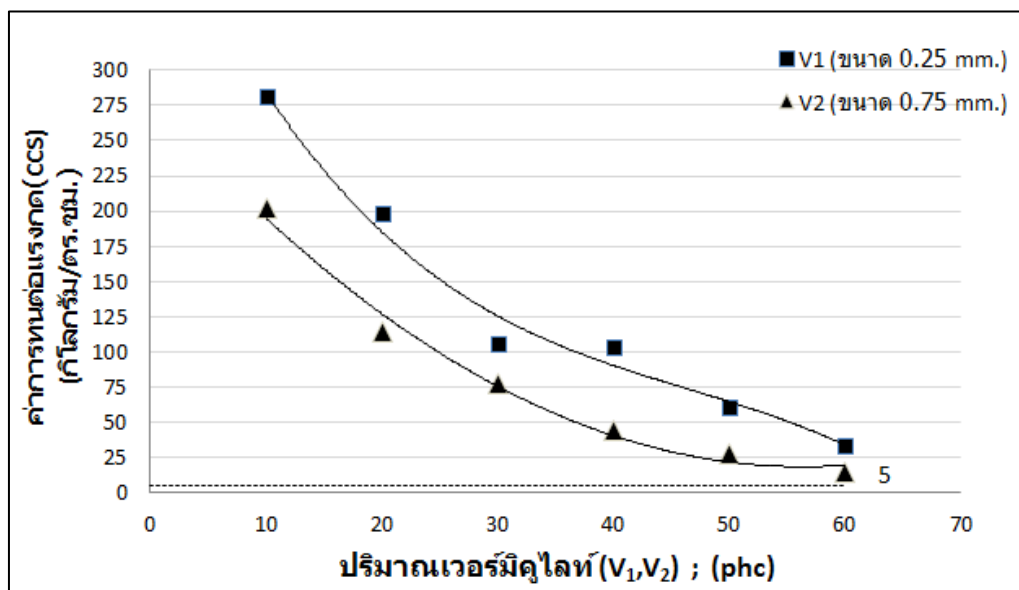
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเวอร์มิคูไลท์ทั้ง 2 ขนาดได้แก่ V_1 และ V_2 กับคุณสมบัติการทนต่อแรงดัด (BS)



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโพลีสไตรีนโฟม (F) กับคุณสมบัติการทนต่อแรงดัด (BS)



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเพอร์ไลต์ (P) กับคุณสมบัติการทนต่อแรงกด (CCS)



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเวอร์มิคูไลต์ทั้ง 2 ขนาดได้แก่ V₁ และ V₂ กับคุณสมบัติการทนต่อแรงกด (CCS)

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองของส่วนผสมต่างที่มีต่อคุณสมบัติ ความทนต่อแรงกด ความทนต่อแรงดัด และคุณสมบัติด้านความหนาแน่น

V ₂ (phc)	F (phc)	Properties	Unit	หน่วย (phc)					
				P (phc)					
				40		50		60	
40	4	FBD	g/cm ³	0.64	±0.0	0.56	±0.0	0.53	±0.0
		BS	kg/cm ²	11.26	±0.8	4.18	±0.5	4.02	±0.3
		CCS	kg/cm ²	18.35	±0.7	7.00	±0.1	6.03	±0.2
	7	FBD	g/cm ³	0.63	±0.0	0.58	±0.0	0.54	±0.0
		BS	kg/cm ²	10.30	±0.7	3.95	±0.7	3.47	±0.3
		CCS	kg/cm ²	14.33	±0.4	7.71	±0.2	6.72	±0.2
	10	FBD	g/cm ³	0.59	±0.0	0.57	±0.0	0.59	±0.0
		BS	kg/cm ²	4.94	±0.4	3.38	±0.3	3.79	±0.3
		CCS	kg/cm ²	8.05	±0.3	5.22	±0.1	6.02	±0.1
50	4	FBD	g/cm ³	0.57	±0.0	0.50	±0.0	0.48	±0.0
		BS	kg/cm ²	4.51	±0.1	3.06	±0.3	3.13	±0.1
		CCS	kg/cm ²	6.96	±0.4	4.22	±0.3	4.02	±0.2
	7	FBD	g/cm ³	0.55	±0.0	0.52	±0.0	0.55	±0.0
		BS	kg/cm ²	3.82	±0.3	3.00	±0.5	4.17	±0.3
		CCS	kg/cm ²	6.38	±0.1	4.24	±0.1	5.57	±0.1
	10	FBD	g/cm ³	0.53	±0.0	0.52	±0.0	0.53	±0.0
		BS	kg/cm ²	3.07	±0.0	3.13	±0.2	3.01	±0.3
		CCS	kg/cm ²	4.63	±0.2	5.09	±0.2	4.21	±0.4
60	4	FBD	g/cm ³	0.52	±0.0	0.49	±0.0	0.47	±0.0
		BS	kg/cm ²	2.98	±0.2	2.62	±0.3	2.96	±0.0
		CCS	kg/cm ²	4.37	±0.3	3.06	±0.1	3.76	±0.2
	7	FBD	g/cm ³	0.42	±0.0	0.41	±0.0	0.50	±0.0
		BS	kg/cm ²	1.52	±0.3	1.94	±0.2	2.85	±0.0
		CCS	kg/cm ²	1.81	±0.2	2.18	±0.1	3.97	±0.2
	10	FBD	g/cm ³	0.46	±0.0	0.41	±0.0	0.50	±0.0
		BS	kg/cm ²	2.40	±0.0	2.67	±0.1	3.17	±0.2
		CCS	kg/cm ²	2.65	±0.3	2.85	±0.1	4.31	±0.1

4.2 ผลของวัสดุผสมที่มีต่อคุณสมบัติของปูนทนไฟ

จากผลการศึกษาที่ได้จากหัวข้อ 4.1 นำมากำหนดขอบเขตสูงและต่ำของแต่ละวัสดุที่ใช้ในการทดลองผสมร่วมกัน โดยจำแนกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ระดับสูง กลาง และต่ำ โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial Design ทดลองซ้ำ 2 ครั้งแบบสุ่ม โดยวิธีการเตรียมชิ้นงานผสมวัสดุต่างๆ ใช้วิธีการเดียวกันดังได้กล่าวในหัวข้อ 3.2.1 ของบทที่ 3 และนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบคุณสมบัติเชิงกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่น (Fired bulk density; FBD) และการทนอุณหภูมิ และการทดสอบเชิงกล ได้แก่ การทนต่อแรงกด (Compressive strength; CCS) และการทนต่อแรงดัด (Bend strength; BS) การทดสอบแต่ละครั้งใช้ขนาดตัวอย่างจำนวน 3 ชิ้น

4.2.1 ผลของวัสดุผสมที่มีต่อคุณสมบัติความหนาแน่น (Fired bulk density; FBD)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อพิจารณาปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างปริมาณเพอร์ไลต์ (P) เวอร์มิคูไลต์ (V_2) และโพลีสไตรีนโฟม (F) กับ ที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติความหนาแน่น (Fired bulk density; FBD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลคุณสมบัติด้านความหนาแน่น โดยที่มีวัสดุเพอร์ไลต์ (P) เวอร์มิคูไลต์ (V_2) และโพลีสไตรีนโฟม (F) เป็นตัวแปรอิสระ ที่มีขอบเขตของปริมาณการใช้ที่ 40, 50, และ 60 phc สำหรับวัสดุเพอร์ไลต์ (P) เวอร์มิคูไลต์ (V_2) และที่ 4, 7, และ 10 phc สำหรับโพลีสไตรีนโฟม (F) ได้ผลดังตารางที่ 4.4

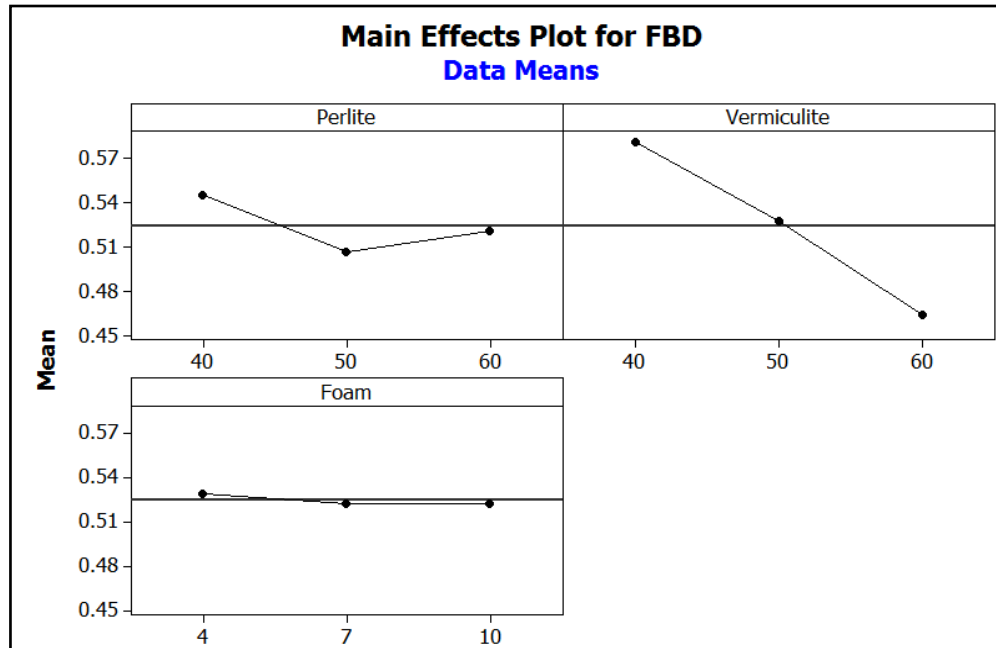
เมื่อพิจารณาปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติต่างๆ ที่ระดับ α เท่ากับ 0.05 ได้ผลวิเคราะห์ดังนี้ เมื่อพิจารณาคุณสมบัติด้านความหนาแน่น (FBD) พบว่า (1) ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพล คือ ปริมาณเพอร์ไลต์ (P) และ ปริมาณเวอร์มิคูไลต์ (V_2) โดยมีค่า p-value เท่ากับ 0.019 และ 0 ตามลำดับ และมีค่า Percent contribution เท่ากับ 8.86 และ 78.22 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.11 โดยค่าความหนาแน่น (FBD) ของปูนทนไฟจะมีค่าลดลง เมื่อปริมาณเพอร์ไลต์ (P) และ เวอร์มิคูไลต์ (V_2) มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ขณะที่โพลีสไตรีนโฟม (F) ไม่มีผล ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ก) (2) อันตรกิริยาระหว่างปริมาณเพอร์ไลต์ (P) กับ ปริมาณโพลีสไตรีนโฟม (F) มีอิทธิพลต่อความหนาแน่น (FBD) ของชิ้นงาน โดยมีค่า p-value เท่ากับ 0.044 และมีค่า Percent contribution เท่ากับ 5.25 ขณะที่ อันตรกิริยาระหว่างปริมาณเพอร์ไลต์ (P) กับ ปริมาณเวอร์มิคูไลต์ (V_2) และ เวอร์มิคูไลต์ (V_2) กับโพลีสไตรีนโฟม (F) ไม่มีอิทธิพล และมีค่า p-value เท่ากับ 0.069 และ 0.149 ตามลำดับ และความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 95.58 % R^2 (adj) = 85.63 % และ (3) รูปที่ 4.10 (ข) แสดงผลของปัจจัยร่วมแต่ละคู่ที่มีต่อความหนาแน่น พบว่า ที่ P และ V_2 40 phc จะให้ค่า FBD มากที่สุดเท่ากับ 0.64 ซึ่งน้อยกว่า 1.04 กรัม/ลบ.ซม. ตามข้อกำหนด และ(4) เมื่อ

พิจารณาขอบเขตของข้อกำหนดด้านความหนาแน่นรวมก้อน (FBD) พบว่าทุกส่วนผสมให้ค่า < 1.04 กรัม/ลบ.ซม.

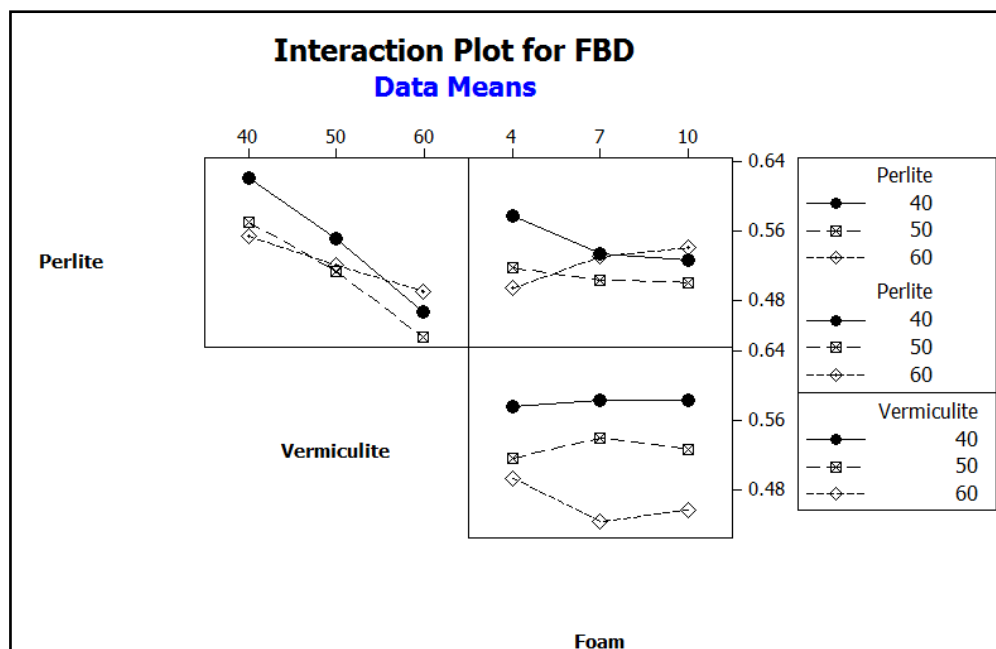
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลคุณสมบัติด้านความหนาแน่น โดยที่มีวัสดุเพอร์ไลต์ (P) เวอร์มิคูไลต์ (V₂) และโฟลีสไต้ลีนโฟม (F) เป็นตัวแปรอิสระ ที่มีขอบเขตของปริมาณการใช้ที่ 40, 50, และ 60 phc สำหรับวัสดุเพอร์ไลต์ (P) เวอร์มิคูไลต์ (V₂) และที่ 4, 7, และ 10 phc สำหรับโฟลีสไต้ลีนโฟม (F)

Source	DF	SS	MS	F	P
Perlite	2	0.006956	0.00348	6.8	0.019
Vermiculite	2	0.0614	0.0307	60.07	0.000
Foam	2	0.000267	0.00013	0.26	0.777
Perlite*Vermiculite	4	0.006844	0.00171	3.35	0.069
Perlite*Foam	4	0.008244	0.00206	4.03	0.044
Vermiculite*Foam	4	0.004667	0.00117	2.28	0.149
Error	8	0.004089	0.00051		
Total	26	0.092467			

S = 0.023 R-Sq = 95.58 % R-Sq (adj) = 85.63 %



รูปที่ 4.10 (ก) ผลวิเคราะห์สำหรับปัจจัยหลักที่มีต่อความหนาแน่น (FBD) ของปูนทนไฟ



รูปที่ 4.10 (ข) ผลวิเคราะห์สำหรับอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย ที่มีต่อความหนาแน่น (FBD) ของปูนทนไฟ

General Linear Model: FBD versus Perlite, Vermiculite, Foam

Factor	Type	Levels	Values
Perlite	fixed	3	40, 50, 60
Vermiculite	fixed	3	40, 50, 60
Foam	fixed	3	4, 7, 10

Analysis of Variance for FBD, using Adjusted SS for Tests

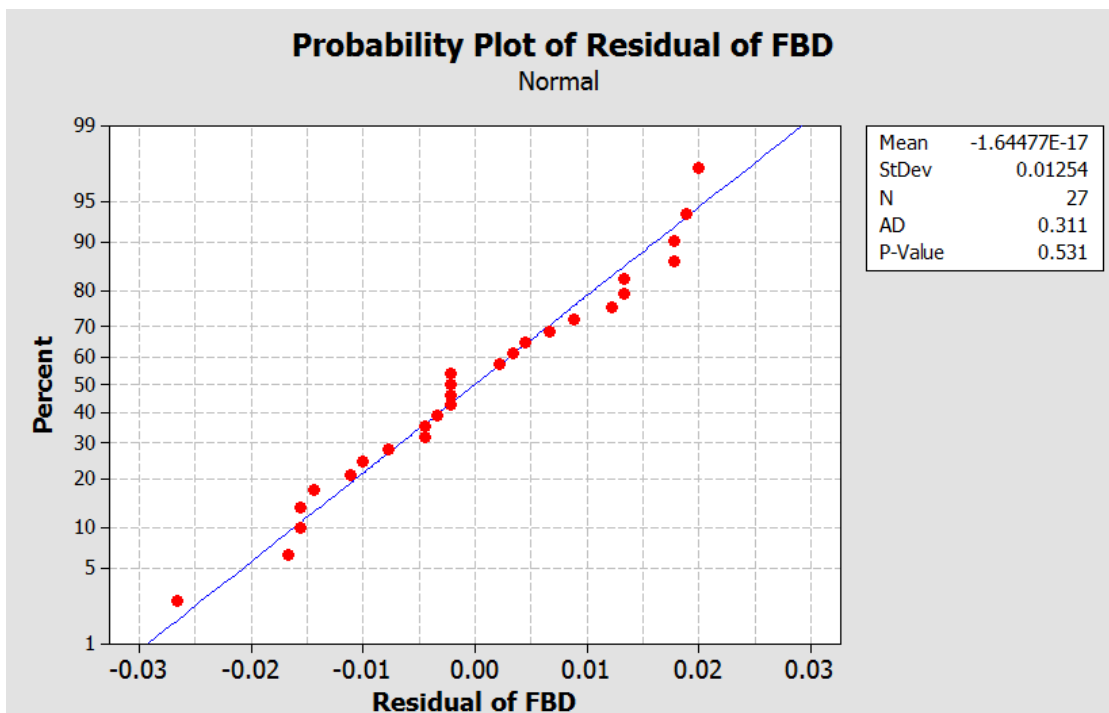
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Percent Contribution
Perlite	2	0.0069556	0.0069556	0.0034778	6.80	0.019	8.86
Vermiculite	2	0.0614000	0.0614000	0.0307000	60.07	0.000	78.22
Foam	2	0.0002667	0.0002667	0.0001333	0.26	0.777	0.34
Perlite*Vermiculite	4	0.0068444	0.0068444	0.0017111	3.35	0.069	4.36
Perlite*Foam	4	0.0082444	0.0082444	0.0020611	4.03	0.044	5.25
Vermiculite*Foam	4	0.0046667	0.0046667	0.0011667	2.28	0.149	2.97
Error	8	0.0040889	0.0040889	0.0005111			
Total	26	0.0924667					

S = 0.0226078 R-Sq = 95.58% R-Sq(adj) = 85.63%

Unusual Observations for FBD

Obs	FBD	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
20	0.540000	0.566667	0.018965	-0.026667	-2.17 R

รูปที่ 4.11 ผลของการวิเคราะห์ General Linear Model สำหรับ FBD โดย MINITAB โปรแกรม



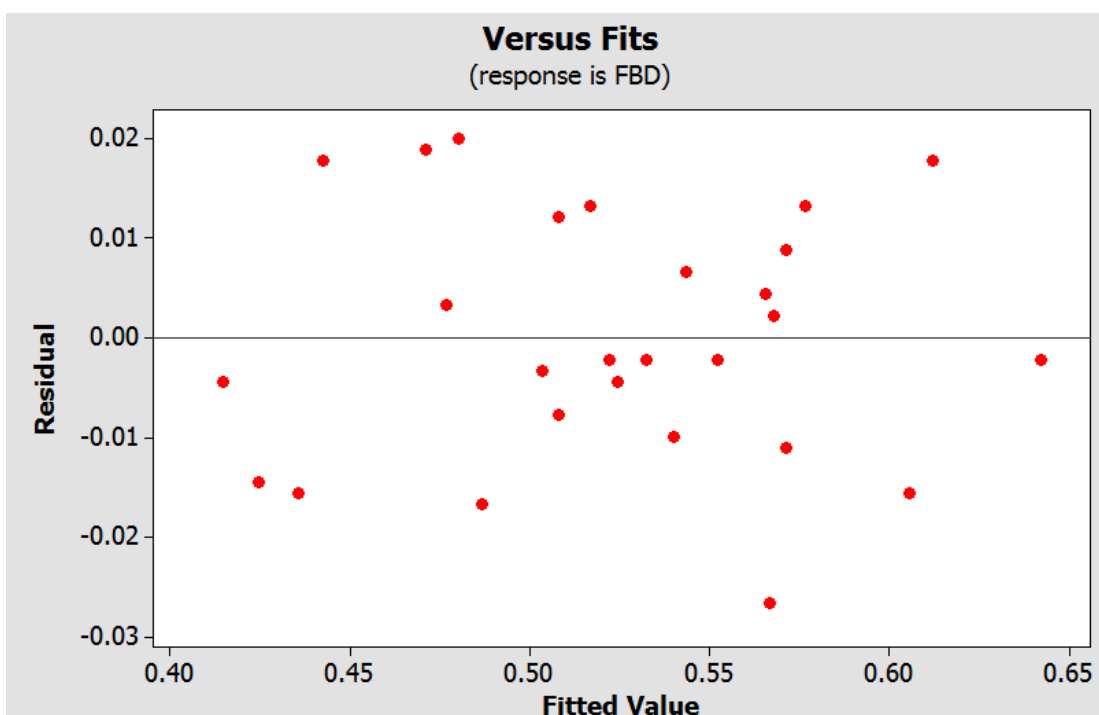
รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบสมมติฐานการแจกแจงปกติของค่าตกค้าง

การทดสอบว่าค่าตกค้างมีการแจกแจงปกติและค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ สามารถพิจารณาได้จากกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าตกค้าง และการทดสอบสมมติฐานว่าค่าตกค้างมีการแจกแจงปกติด้วย ค่าสถิติทดสอบ Anderson-Darling (AD)

จากการทดสอบข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่าค่าตกค้างมีการกระจายตัวเป็นปกติ คือมีลักษณะการเรียงตัวของค่าตกค้างกระจายรอบๆ เส้นตรง และเมื่อทำการทดสอบสมมติฐานว่าค่าตกค้างมีการแจกแจงปกติหรือไม่ พบว่าที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 สามารถยอมรับได้ว่าค่าตกค้างมีการแจกแจงปกติ เนื่องด้วยค่าสถิติทดสอบ AD มีค่า p-value เท่ากับ 0.531 ซึ่งมากกว่า 0.05

การทดสอบว่าค่าตกค้างมีความแปรปรวนคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามระดับของปัจจัย สามารถพิจารณาได้จากกราฟระหว่างค่าตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตต้องมีการกระจายแบบสุ่ม คืออยู่เหนือและใต้เส้นกึ่งกลางเท่ากัน

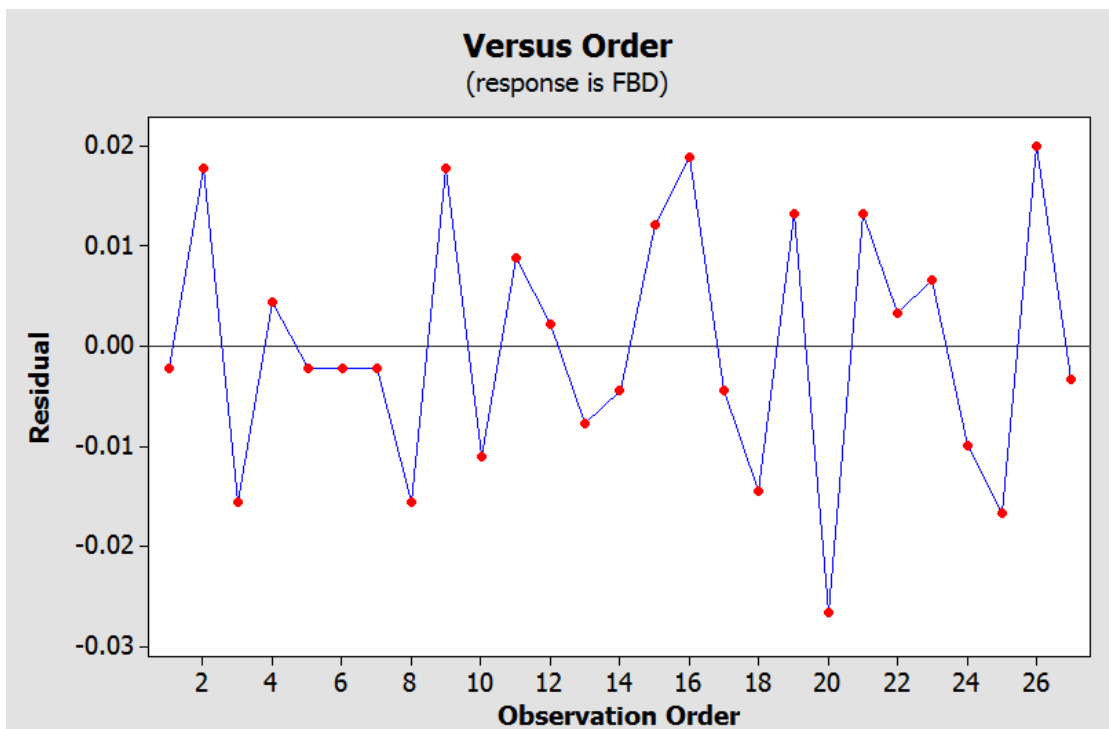
จากผลการทดสอบข้อมูลดังแสดงในรูป 4.13 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าตกค้าง (Residual) และที่ถูกฟิตของ FBD มีการกระจายตัวเป็นแบบสุ่ม ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่าตกค้างมีความแปรปรวนคงที่ตรงตามสมมติฐาน



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตกค้างและ FBD

ค่าตกค้างต้องเป็นอิสระต่อกันไม่แปรผันตามปัจจัยหรือลำดับการทดลองพิจารณาได้จากกราฟระหว่างค่าตกค้างกับลำดับการทดลอง

จากการทดสอบข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าค่าตกค้างมีการกระจายตัวแบบสุ่ม มีรูปแบบเป็นอิสระต่อกัน ไม่มีลักษณะข้อมูลที่เป็นแนวโน้ม ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกันตรงตามสมมติฐาน และผลการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากค่าการทดสอบคุณสมบัติ FBD พบว่าข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์ของการออกแบบการทดลองเป็นไปตามสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ คือ ข้อมูลมีการแจกแจงปกติ ข้อมูลมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน และข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นสามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์ผลในขั้นตอนต่อไปได้



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตกค้างของ FBD ตามลำดับการทดลอง

เมื่อทำการวิเคราะห์สหสัมพันธ์และ ผลสรุปสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเพอร์ไลต์(P), ปริมาณเวอร์มิคูไลต์ (V_2) และ โพลีสไตรีนโฟม (F) ที่มีต่อคุณสมบัติด้านความหนาแน่น (FBD) สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.5 โดยจากการวิเคราะห์ ค่า $R^2 = 85\%$ เนื่องจากค่า R^2 ที่ได้มีค่าเข้าใกล้ 1 ดังนั้นแสดงถึงค่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเพอร์ไลต์ (P), ปริมาณเวอร์มิคูไลต์ (V_2) และ โพลีสไตรีนโฟม (F) มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติด้านความหนาแน่นอย่างมาก และ สมการการประมาณค่าจะมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานได้มาก และเมื่อทำการทดลองแทนค่า ปริมาณเพอร์ไลต์ (P) = 40, ปริมาณเวอร์มิคูไลต์ (V_2) = 40 และ โพลีสไตรีนโฟม (F) = 4,7,10 ลงในสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเพอร์ไลต์ (P), ปริมาณเวอร์มิคูไลต์ (V_2) และ โพลีสไตรีนโฟม (F) ที่มีต่อคุณสมบัติด้านความหนาแน่น (FBD) ตามลำดับ พบว่าค่าที่ได้อยู่ที่ 0.63 ,0.61 และ 0.597 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงได้ค่าอยู่ที่ 0.64,0.63 และ 0.59 ตามลำดับ จะมีความแตกต่างกันอยู่ที่ 1.56 %,3.17% และ 1.18 % ของค่าที่ได้จากการทดลองจริง

เมื่อพิจารณาถึงสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) หรือสัมประสิทธิ์การพยากรณ์ ซึ่งเป็นค่าความชันของกราฟเส้นตรง ที่เกิดจากสมการเชิงเส้น สามารถสรุปได้ดังนี้ คือ ปริมาณเพอร์ไลต์ (P), ปริมาณเวอร์มิคูไลต์ (V_2) และ โพลีสไตรีนโฟม (F) และ (PF) เท่านั้น ที่มีความสัมพันธ์ต่อคุณสมบัติด้านความหนาแน่น (FBD) ไปในทิศทางตรงกันข้าม หมายถึง ถ้าค่าของ P, V_2 ,F และ PF มีปริมาณสูงขึ้น ค่าของความหนาแน่น (FBD) ก็จะมีค่าต่ำลงด้วย ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง

ตารางที่ 4.5 สรุปความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติด้านความหนาแน่น (FBD) กับปริมาณเพอร์ไลต์ (P), ปริมาณเวอร์มิคูไลต์(V_2)และ โพลีสไตรีนโฟม (F)

คุณสมบัติ(Y)	สมการความสัมพันธ์	R^2 (%)
ความหนาแน่น (FBD)	$FBD = 1.60 - 0.0181 P - 0.0146 V_2 - 0.0233 F + 0.000225 P*V_2 + 0.000806 P*F - 0.000361 V_2*F$	85

$$S = 0.026 \quad R\text{-Sq} = 85 \% \quad R\text{-Sq} (\text{adj}) = 80.5 \%$$

เมื่อพิจารณาปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติต่างๆ ที่ระดับ α เท่ากับ 0.05 ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ได้ผลวิเคราะห์ดังนี้ เมื่อพิจารณาคูณสมบัติด้านความหนาแน่น (FBD) พบว่า (1) ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพล คือ ปริมาณเพอร์ไลต์ (P) และ ปริมาณเวอร์มิคูไลต์ (V_2) โดยมีค่า p-value เท่ากับ 0 และ 0.003 ตามลำดับ โดยค่าความหนาแน่น (FBD) ของปูนทนไฟจะมีค่าลดลง เมื่อปริมาณเพอร์ไลต์ (P) และ เวอร์มิคูไลต์ (V_2) มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ขณะที่โฟลีสไตลีนโฟม (F) ไม่มีผล (2) อันตรกิริยาระหว่างปริมาณเพอร์ไลต์ (P) กับ ปริมาณโฟลีสไตลีนโฟม (F) และ ปริมาณเพอร์ไลต์ (P) กับ ปริมาณเวอร์มิคูไลต์ (V_2) มีอิทธิพลต่อความหนาแน่น (FBD) ของชิ้นงาน โดยมีค่า p-value เท่ากับ 0.005 และ 0.008 ตามลำดับ ขณะที่ อันตรกิริยาระหว่าง เวอร์มิคูไลต์ (V_2) กับโฟลีสไตลีนโฟม (F) ไม่มีอิทธิพล และมีค่า p-value เท่ากับ 0.169 ตามลำดับ และความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 85 % R^2 (adj) = 80.5 % ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ General Linear Model พบว่า จากการวิเคราะห์ด้วย Regression มีอันตรกิริยาระหว่างปริมาณเพอร์ไลต์ (P) กับ ปริมาณโฟลีสไตลีนโฟม (V) ที่มีอิทธิพลต่อความหนาแน่น (FBD) ของชิ้นงานเพิ่มขึ้น

Regression Analysis: FBD versus Perlite, Vermiculite, ...

The regression equation is

$$\begin{aligned} \text{FBD} = & 1.60 - 0.0181 \text{ Perlite} - 0.0146 \text{ Vermiculite} - 0.0233 \text{ Foam} \\ & + 0.000225 \text{ Perlite*Vermiculite} + 0.000806 \text{ Perlite*Foam} \\ & - 0.000361 \text{ Vermiculite*Foam} \end{aligned}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	1.6031	0.2321	6.91	0.000	
Perlite	-0.018111	0.004235	-4.28	0.000	46.667
Vermiculite	-0.014556	0.004235	-3.44	0.003	46.667
Foam	-0.02333	0.01802	-1.30	0.210	76.000
Perlite*Vermiculite	0.00022500	0.00007593	2.96	0.008	76.000
Perlite*Foam	0.0008056	0.0002531	3.18	0.005	46.667
Vermiculite*Foam	-0.0003611	0.0002531	-1.43	0.169	46.667

S = 0.0263022 R-Sq = 85.0% R-Sq(adj) = 80.5%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	6	0.078631	0.013105	18.94	0.000
Residual Error	20	0.013836	0.000692		
Total	26	0.092467			

รูปที่ 4.15 ผลของการวิเคราะห์ Regression สำหรับ FBD โดย MINITAB โปรแกรม

4.2.2 ผลของวัสดุผสมที่มีต่อคุณสมบัติการทนต่อแรงดัด (Bend Strength; BS)

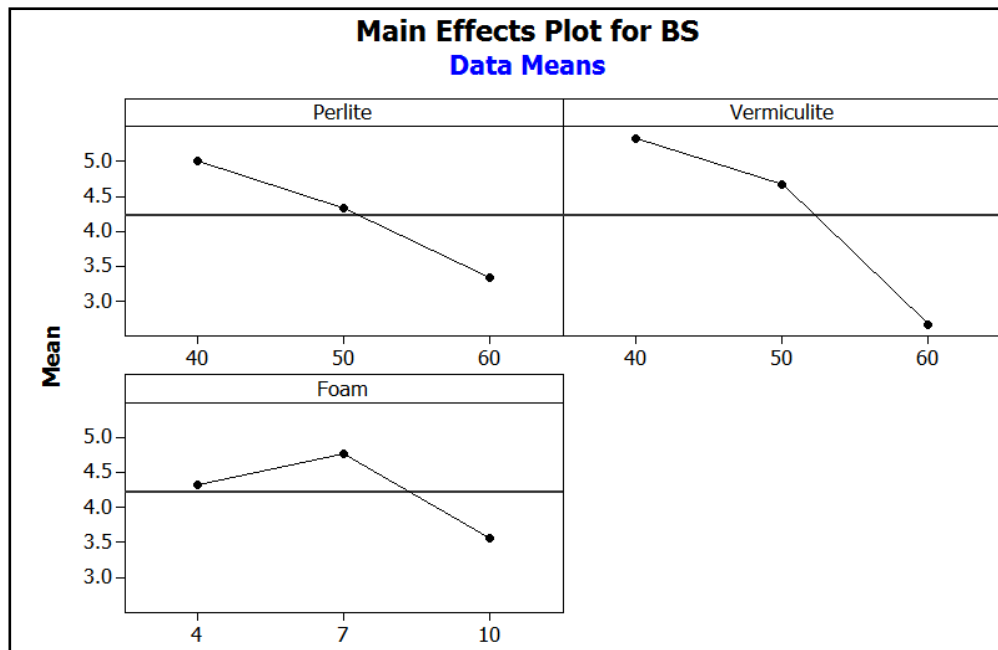
การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อพิจารณาปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างปริมาณเพอร์ไลต์ (P) เวกอร์มิคูไลต์ (V_2) และโพลีสไตรีนโฟม (F) กับ ที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติการทนต่อแรงดัด (Bend Strength; BS) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลคุณสมบัติการทนต่อแรงดัด (Bend strength; BS) โดยที่มีวัสดุเพอร์ไลต์ (P) เวกอร์มิคูไลต์ (V_2) และโพลีสไตรีนโฟม (F) เป็นตัวแปรอิสระ ที่มีขอบเขตของปริมาณการใช้ที่ 40, 50, และ 60 phc สำหรับวัสดุเพอร์ไลต์ (P) เวกอร์มิคูไลต์ (V_2) และที่ 4, 7, และ 10 phc สำหรับโพลีสไตรีนโฟม (F) ได้ผลดังตารางที่ 4.6

เมื่อพิจารณาปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติต่างๆ ที่ระดับ α เท่ากับ 0.05 ได้ผลวิเคราะห์ดังนี้ ปัจจัยที่มีผลต่อการทนต่อแรงดัด พบว่า (1) อิทธิพลของปัจจัยหลักที่มีต่อการทนแรงดัด คือ ปริมาณเพอร์ไลต์ (P) และปริมาณเวกอร์มิคูไลต์ (V_2) โดยมีค่า p-value เท่ากับ 0.009 และ 0.001 ตามลำดับ และมีค่า Percent contribution เท่ากับ 20.98 และ 46.04 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.17 โดยค่าการทนต่อแรงดัด (BS) มีค่าลดลงเมื่อปริมาณเพอร์ไลต์ (P) และปริมาณเวกอร์มิคูไลต์ (V_2) มีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงรูปที่ 4.16 (ก) ขณะที่ โพลีสไตรีนโฟม (F) ไม่มีผลที่ระดับ α เท่ากับ 0.05 (2) อันตรกิริยาที่มีผลต่อการทนต่อแรงดัด พบว่า ปัจจัยร่วมระหว่างเพอร์ไลต์ (P) กับ เวกอร์มิคูไลต์ (V_2) มีอิทธิพลต่อการทนต่อแรงดัด (BS) ของชิ้นงาน โดยมีค่า p-value เท่ากับ 0.006 และมีค่า Percent contribution เท่ากับ 19.52 ขณะที่ อันตรกิริยาร่วมระหว่างปริมาณเพอร์ไลต์ (P) กับ โพลีสไตรีนโฟม (F) และเวกอร์มิคูไลต์ (V_2) กับโพลีสไตรีนโฟม (F) ไม่มีอิทธิพล โดยมีค่า p-value เท่ากับ 0.226 และ 0.258 ตามลำดับ และความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 93.10 % $R\text{-Sq (adj)} = 77.58$ % และ (3) รูปที่ 4.16 (ข) แสดงผลของปัจจัยร่วมแต่ละคู่ที่มีต่อ BS พบว่า P และ V_2 ที่ 40 phc ให้ค่า BS สูงที่สุดเท่ากับ 11 กก./ตร.ซม. ซึ่งมากกว่า 3.5 กก./ตร.ซม. ตามข้อกำหนด และ (4) เมื่อพิจารณาขอบเขตของข้อกำหนดการทนต่อแรงดัด (BS) ดังรูปที่ 4.13 (ข) พบว่า ส่วนผสมให้ค่า BS ≥ 3.5 กก./ตร.ซม. คือ V_2 เท่ากับ 40 F เท่ากับ 4 และ P เท่ากับ 40, 50, และ 60 phc

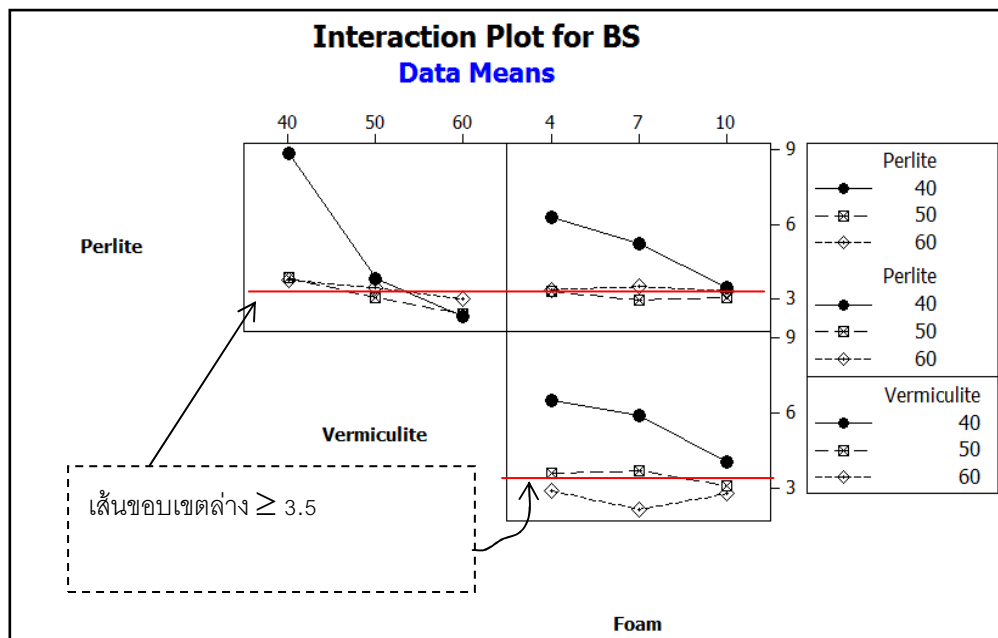
ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลคุณสมบัติด้านการทนต่อแรงดัด (BS)โดยที่มีวัสดุเพอร์ไลต์ (P) เวอร์มิคูไลต์ (V₂) และโฟลีสไต้ลีนโฟม (F) เป็นตัวแปรอิสระ ที่มีขอบเขตของปริมาณการใช้ที่ 40, 50, และ 60 phc สำหรับวัสดุเพอร์ไลต์ (P) เวอร์มิคูไลต์ (V₂) และที่ 4, 7, และ 10 phc สำหรับโฟลีสไต้ลีนโฟม (F)

Source	DF	SS	MS	F	P
Perlite	2	18.298	9.149	8.88	0.009
Vermiculite	2	40.158	20.079	19.48	0.001
Foam	2	4.719	2.359	2.29	0.164
Perlite*Vermiculite	4	34.060	8.515	8.26	0.006
Perlite*Foam	4	7.337	1.834	1.78	0.226
Vermiculite*Foam	4	6.713	1.678	1.63	0.258
Error	8	8.247	1.031		
Total	26	119.532			

S = 1.015 R-Sq = 93.10 % R-Sq (adj) = 77.58 %



รูปที่ 4.16 (ก) ผลวิเคราะห์สำหรับปัจจัยหลักที่มีต่อการทนต่อแรงดัด (BS) ของปูนทนไฟ



รูปที่ 4.16 (ข) ผลวิเคราะห์สำหรับอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย ที่มีต่อการทนต่อแรงดัด (BS) ของปูนทนไฟ

General Linear Model: BS versus Perlite, Vermiculite, Foam

Factor	Type	Levels	Values
Perlite	fixed	3	40, 50, 60
Vermiculite	fixed	3	40, 50, 60
Foam	fixed	3	4, 7, 10

Analysis of Variance for BS, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Percent Contribution
Perlite	2	18.298	18.298	9.149	8.88	0.009	20.98
Vermiculite	2	40.158	40.158	20.079	19.48	0.001	46.04
Foam	2	4.719	4.719	2.359	2.29	0.164	5.41
Perlite*Vermiculite	4	34.060	34.060	8.515	8.26	0.006	19.52
Perlite*Foam	4	7.337	7.337	1.834	1.78	0.226	4.21
Vermiculite*Foam	4	6.713	6.713	1.678	1.63	0.258	3.85
Error	8	8.247	8.247	1.031			
Total	26	119.532					

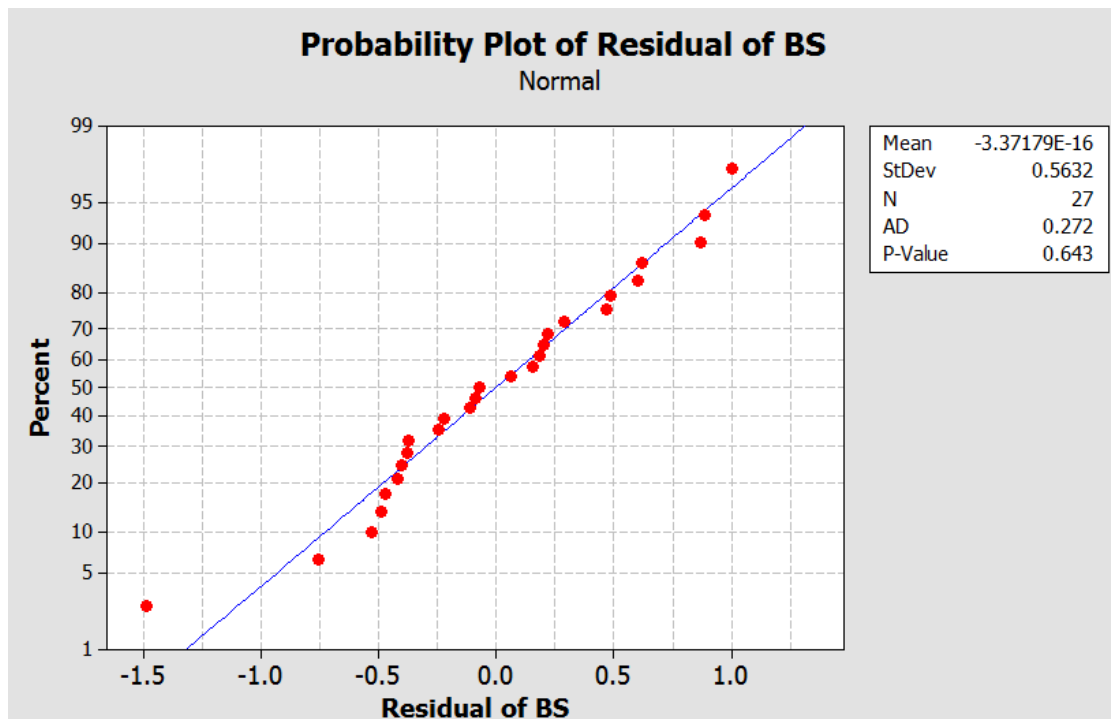
S = 1.01532 R-Sq = 93.10% R-Sq(adj) = 77.58%

Unusual Observations for BS

Obs	BS	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
3	4.9400	6.4270	0.8517	-1.4870	-2.69 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

รูปที่ 4.17 ผลของการวิเคราะห์ General Linear Model สำหรับ BS โดย MINITAB โปรแกรม



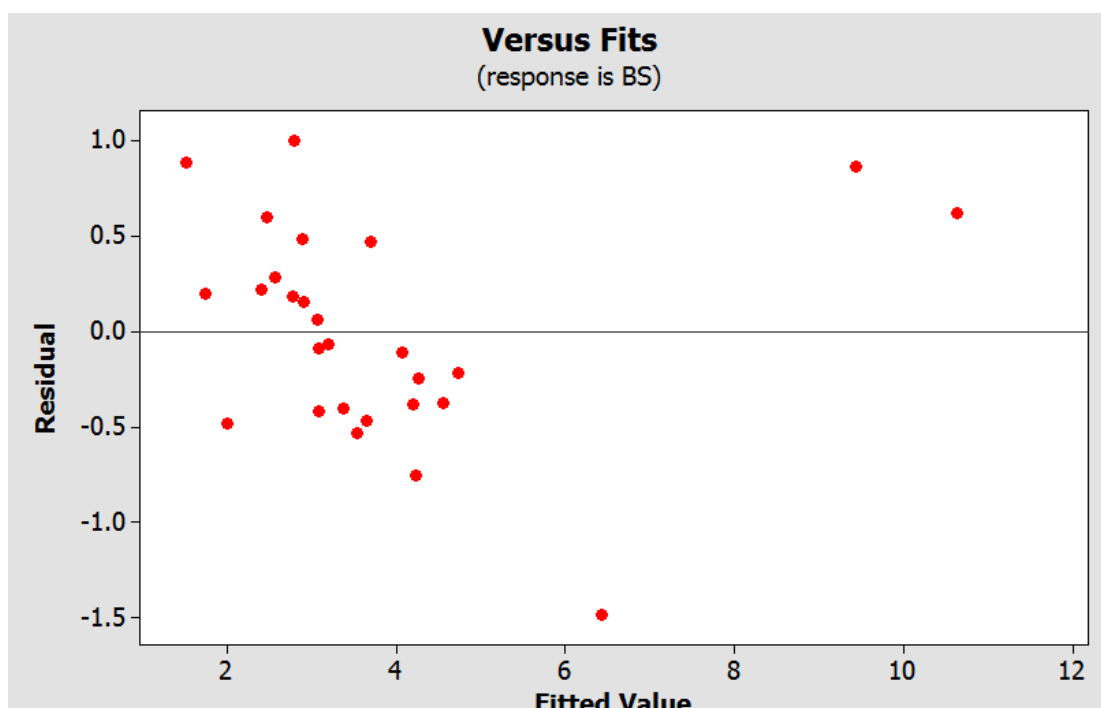
รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบสมมติฐานการแจกแจงปกติของค่าตกค้าง

การทดสอบว่าค่าตกค้างมีการแจกแจงปกติและค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ สามารถพิจารณาได้จากกราฟ ความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าตกค้าง และการทดสอบสมมติฐานว่าค่าตกค้างมีการแจกแจงปกติด้วย ค่าสถิติทดสอบ Anderson-Darling (AD)

จากการทดสอบข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 4.18 พบว่าค่าตกค้างมีการกระจายตัวเป็นปกติ คือมีลักษณะการเรียงตัวของค่าตกค้างกระจายรอบๆ เส้นตรง และเมื่อทำการทดสอบสมมติฐานว่าค่าตกค้างมีการแจกแจงปกติหรือไม่ พบว่าที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 สามารถยอมรับได้ว่าค่าตกค้างมีการแจกแจงปกติ เนื่องด้วยค่าสถิติทดสอบ AD มีค่า p-value เท่ากับ 0.643 ซึ่งมากกว่า 0.05

การทดสอบว่าค่าตกค้างมีความแปรปรวนคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามระดับของปัจจัย สามารถพิจารณาได้จากกราฟระหว่างค่าตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตต้องมีการกระจายแบบสุ่ม คืออยู่เหนือและใต้เส้นกึ่งกลางเท่ากัน

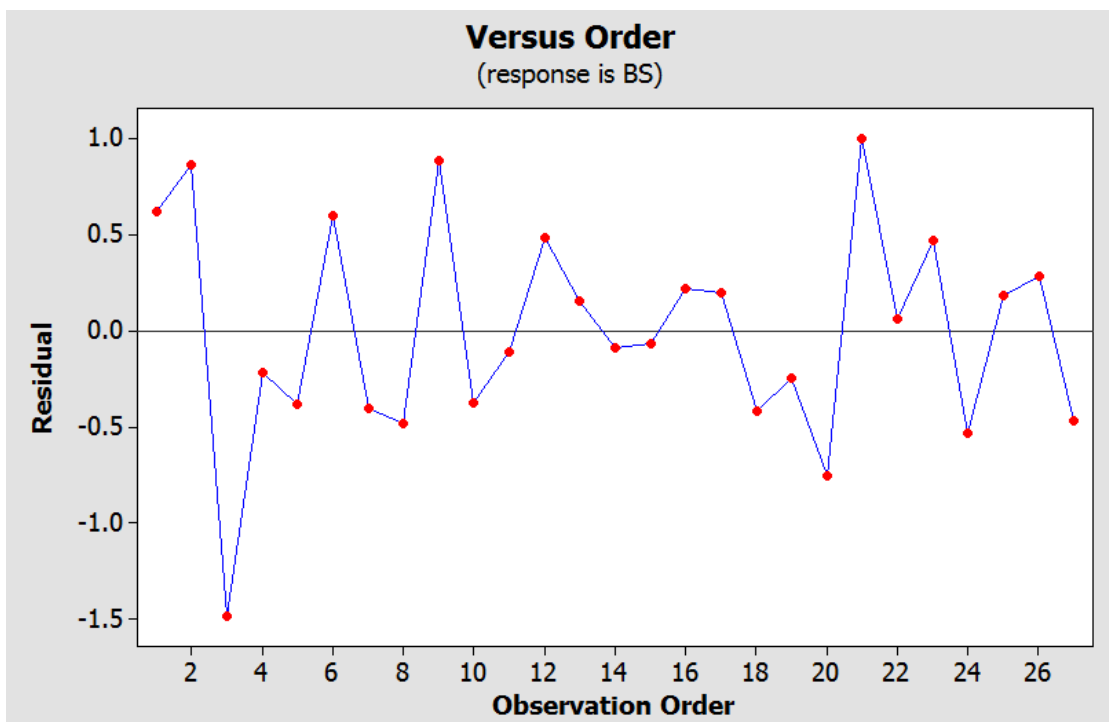
จากผลการทดสอบข้อมูลดังแสดงในรูป 4.19 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าตกค้าง (Residual) และที่ถูกฟิตของ BS มีการกระจายตัวเป็นแบบสุ่ม ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่าตกค้างมีความแปรปรวนคงที่ตรงตามสมมติฐาน



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตกค้างและ BS

ค่าตกค้างต้องเป็นอิสระต่อกันไม่แปรผันตามปัจจัยหรือลำดับการทดลองพิจารณาได้จากกราฟระหว่างค่าตกค้างกับลำดับการทดลอง

จากการทดสอบข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 4.20 พบว่าค่าตกค้างมีการกระจายตัวแบบสุ่ม มีรูปแบบเป็นอิสระต่อกัน ไม่มีลักษณะข้อมูลที่เป็นแนวโน้ม ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกันตรงตามสมมติฐาน และผลการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากค่าการทดสอบคุณสมบัติ BS พบว่าข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์ของการออกแบบการทดลองเป็นไปตามสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ คือ ข้อมูลมีการแจกแจงปกติ ข้อมูลมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน และข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นสามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์ผลในขั้นตอนต่อไปได้



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตกค้างของ BS ตามลำดับการทดลอง

เมื่อทำการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ ผลสรุปสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเพอร์ไลต์(P), ปริมาณเวอร์มิคูไลต์ (V_2) และ โพลีสไตรีนโฟม (F) ที่มีต่อคุณสมบัติการทนต่อแรงดัด (Bend Strength; BS) สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.7 โดยจากการวิเคราะห์ ค่า $R^2 = 74.2\%$ เนื่องจากค่า R^2 ที่ได้มีค่าเข้าใกล้ 1 ดังนั้นแสดงว่าค่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเพอร์ไลต์ (P), ปริมาณเวอร์มิคูไลต์ (V_2) และ โพลีสไตรีนโฟม (F) มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติการทนต่อแรงดัด และ สมการการประมาณค่าจะมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานได้ และเมื่อทำการทดลองแทนค่า ปริมาณเพอร์ไลต์ (P) = 40, ปริมาณเวอร์มิคูไลต์ (V_2) = 40 และ โพลีสไตรีนโฟม (F) = 4,7,10 ลงในสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเพอร์ไลต์ (P), ปริมาณเวอร์มิคูไลต์ (V_2) และ โพลีสไตรีนโฟม (F) ที่มีต่อคุณสมบัติการทนต่อแรงดัด (Bend Strength; BS) ตามลำดับ พบว่าค่าที่ได้อยู่ที่ 9.428,7.664 และ 5.9 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 11.26 ,10.30 และ 4.94 ตามลำดับ จะมีความแตกต่างกันอยู่ที่ 16.41 %, 25.59% และ 19.43 % ของค่าที่ได้จากการทดลองจริง

เมื่อพิจารณาถึงสัมประสิทธิ์การถดถอย(Regression Coefficient) หรือสัมประสิทธิ์การพยากรณ์ ซึ่งเป็นค่าความชันของกราฟเส้นตรง ที่เกิดจากสมการเชิงเส้น สามารถสรุปได้ดังนี้ คือ ปริมาณเพอร์ไลต์ (P), ปริมาณเวอร์มิคูไลต์ (V_2) และ โพลีสไตรีนโฟม (F) เท่านั้น ที่มีความสัมพันธ์ต่อคุณสมบัติการทนต่อแรงดัด (Bend Strength; BS) ไปในทิศทางตรงกันข้าม หมายถึง ถ้าค่าของ P, V_2 ,และ F มีปริมาณสูงขึ้น ค่าของการทนต่อแรงดัด (Bend strength; BS) ก็จะมีค่าต่ำลงด้วย

ตารางที่ 4.7 สรุปความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติด้านการทนต่อแรงดัด (BS) กับปริมาณเพอร์ไลต์ (P), ปริมาณเวอร์มิคูไลต์ (V_2) และ โพลีสไตรีนโฟม (F)

คุณสมบัติ(Y)	สมการความสัมพันธ์	R^2 (%)
การทนต่อแรงดัด (BS)	BS = 67.1 - 0.959 P - 1.00 V - 2.28 F + 0.0144 P*V + 0.0228 P*F + 0.0195 V*F	74.2

$$S = 1.242 \quad R\text{-Sq} = 74.2\% \quad R\text{-Sq (adj)} = 66.4\%$$

เมื่อพิจารณาปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติต่างๆ ที่ระดับ α เท่ากับ 0.05 ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ได้ผลวิเคราะห์ดังนี้ เมื่อพิจารณาคูณสมบัติด้านการทนต่อแรงดัด (BS) พบว่า (1) ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพล คือ ปริมาณเพอร์ไลต์ (P) ปริมาณเวอร์มิคูไลต์ (V_2) และโพลีสไตรีนโฟม (F) โดยมีค่า p-value เท่ากับ 0,0 และ 0.014 ตามลำดับ โดยค่าการทนต่อแรงดัด (BS) ของปูนทนไฟจะมีค่าลดลง เมื่อปริมาณเพอร์ไลต์ (P) ,เวอร์มิคูไลต์ (V_2) และโพลีสไตรีนโฟม (F) มีค่าเพิ่มสูงขึ้น (2) อันตรกิริยาระหว่างปริมาณเพอร์ไลต์ (P) กับ ปริมาณเวอร์มิคูไลต์ (V_2) มีอิทธิพลต่อการทนต่อแรงดัด (BS) ของชิ้นงาน โดยมีค่า p-value เท่ากับ 0.001 ขณะที่ อันตรกิริยาระหว่าง เวอร์มิคูไลต์ (V_2) กับโพลีสไตรีนโฟม (F) และ ปริมาณเพอร์ไลต์ (P) กับโพลีสไตรีนโฟม (F) ไม่มีอิทธิพล และมีค่า p-value เท่ากับ 0.118 และ 0.071 ตามลำดับ และความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 74.2 % R^2 (adj) = 66.4 % ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ General Linear Model พบว่า จากการวิเคราะห์ด้วย Regression พบว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลเพิ่มขึ้นคือ ปริมาณโพลีสไตรีนโฟม (F) โดยมีค่า p-value เท่ากับ 0.014

Regression Analysis: BS versus Perlite, Vermiculite, ...

The regression equation is

$$BS = 67.1 - 0.959 \text{ Perlite} - 1.00 \text{ Vermiculite} - 2.28 \text{ Foam} \\ + 0.0144 \text{ Perlite*Vermiculite} + 0.0228 \text{ Perlite*Foam} \\ + 0.0195 \text{ Vermiculite*Foam}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	67.09	10.97	6.12	0.000	
Perlite	-0.9593	0.2001	-4.79	0.000	46.667
Vermiculite	-1.0030	0.2001	-5.01	0.000	46.667
Foam	-2.2849	0.8511	-2.68	0.014	76.000
Perlite*Vermiculite	0.014417	0.003587	4.02	0.001	76.000
Perlite*Foam	0.02278	0.01196	1.90	0.071	46.667
Vermiculite*Foam	0.01953	0.01196	1.63	0.118	46.667

S = 1.24260 R-Sq = 74.2% R-Sq(adj) = 66.4%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	6	88.651	14.775	9.57	0.000
Residual Error	20	30.881	1.544		
Total	26	119.532			

Residual Plots for BS

รูปที่ 4.21 ผลของการวิเคราะห์ Regression สำหรับ BS โดย MINITAB โปรแกรม

4.2.3 ผลของวัสดุผสมที่มีต่อคุณสมบัติการทนต่อแรงกด

(Compressive strength; CCS)

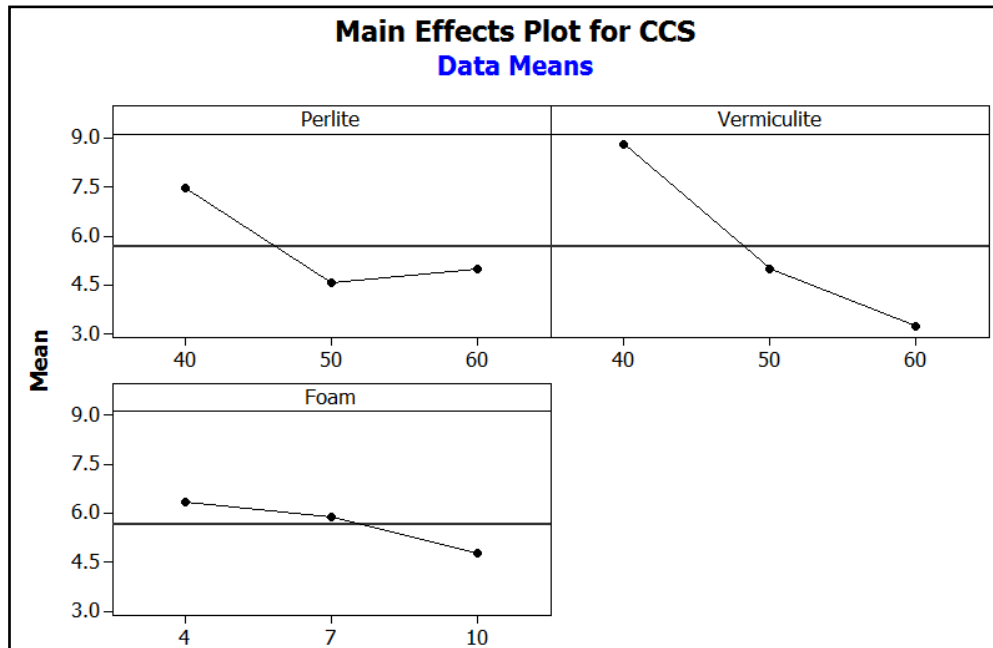
การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อพิจารณาปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างปริมาณเพอร์ไลต์ (P) เวอร์มิคูไลต์ (V_2) และโพลีสไตรีนโฟม (F) ที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติการทนต่อแรงกด (Compressive Strength; CCS) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลคุณสมบัติการทนต่อแรงกด (Compressive Strength; CCS) โดยที่มีวัสดุเพอร์ไลต์ (P) เวอร์มิคูไลต์ (V_2) และโพลีสไตรีนโฟม (F) เป็นตัวแปรอิสระ ที่มีขอบเขตของปริมาณการใช้ที่ 40, 50, และ 60 phc สำหรับวัสดุเพอร์ไลต์ (P) เวอร์มิคูไลต์ (V_2) และที่ 4, 7, และ 10 phc สำหรับโพลีสไตรีนโฟม (F) ได้ผลดังตารางที่ 4.8

เมื่อพิจารณาปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติด้านการทนต่อแรงกด (CCS) พบว่า (1) ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อแรงกด คือ ปริมาณเพอร์ไลต์ (P) และ ปริมาณเวอร์มิคูไลต์ (V_2) โดยมีค่า p-value เท่ากับ 0.003 และ 0 ตามลำดับ และมีค่า Percent contribution เท่ากับ 17.43 และ 57.39 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.23 โดยเมื่อ เวอร์มิคูไลต์ (V_2) และ ปริมาณเพอร์ไลต์ (P) มีค่าเพิ่มสูงขึ้นมีผลให้ค่าการทนต่อแรงกด (CCS) ของชิ้นงานมีค่าลดลง ขณะที่โพลีสไตรีนโฟม (F) ไม่มีผล ดังแสดงในรูปที่ 4.22 (ก) (2) อันตรกิริยาระหว่างปริมาณเพอร์ไลต์ (P) กับ ปริมาณเวอร์มิคูไลต์ (V_2) มีอิทธิพลต่อการทนต่อแรงกด (CCS) ของชิ้นงาน โดยมีค่า p-value เท่ากับ 0.004 และมีค่า Percent contribution เท่ากับ 12.48 ขณะที่ อันตรกิริยาระหว่างปริมาณเพอร์ไลต์ (P) กับ โพลีสไตรีนโฟม (F) และเวอร์มิคูไลต์ (V_2) กับโพลีสไตรีนโฟม (F) ไม่มีอิทธิพล และมีค่า p-value เท่ากับ 0.068 และ 0.127 ตามลำดับและมีค่า Percent contribution เท่ากับ 4.5 และ 3.32 ตามลำดับ และความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 95.75 % และ(3) จากรูปที่ 4.22 (ข) แสดงผลของปัจจัยร่วมแต่ละคู่ที่มีต่อการทนต่อแรงกด (CCS) พบว่า P และ V_2 ที่ 40 phc จะให้ค่า CCS สูงที่สุดเท่ากับ 18 กก./ตร.ซม. ซึ่งมากกว่า 5 กก./ตร.ซม. ตามข้อกำหนด และ (4) เมื่อพิจารณาขอบเขตของข้อกำหนดด้านการทนต่อแรงกด (CCS) ดังรูปที่ 4.22 (ข) พบว่า ส่วนผสมให้ค่า $CCS \geq 5$ กก./ตร.ซม. คือ V_2 เท่ากับ 40, F เท่ากับ 4 และ P เท่ากับ 40, 50, และ 60 phc

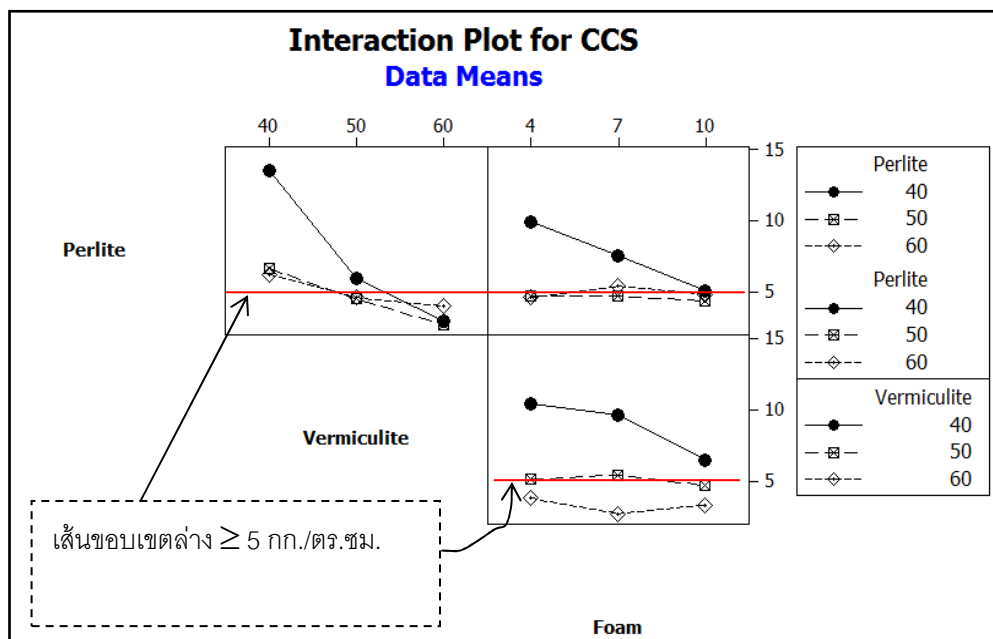
ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลคุณสมบัติด้านการทนต่อแรงกด (CCS) โดยที่มีวัสดุเพอร์ไลต์ (P) เวอร์มิคูไลต์ (V₂) และโฟลีสไต้ลีนโฟม (F) เป็นตัวแปรอิสระ ที่มีขอบเขตของปริมาณการใช้ที่ 40, 50, และ 60 phc สำหรับวัสดุเพอร์ไลต์ (P) เวอร์มิคูไลต์ (V₂) และที่ 4, 7, และ 10 phc สำหรับ โพลีสไต้ลีนโฟม (F)

Source	DF	SS	MS	F	P
Perlite	2	44.759	22.379	13.07	0.003
Vermiculite	2	147.347	73.673	43.03	0.000
Foam	2	12.537	6.269	3.66	0.074
Perlite*Vermiculite	4	64.093	16.023	9.36	0.004
Perlite*Foam	4	23.085	5.771	3.37	0.068
Vermiculite*Foam	4	17.038	4.259	2.49	0.127
Error	8	13.697	1.712		
Total	26	322.556			

$$S = 1.309 \quad R\text{-Sq} = 95.75 \% \quad R\text{-Sq (adj)} = 86.20\%$$



รูปที่ 4.22 (ก) ผลวิเคราะห์สำหรับปัจจัยหลักที่มีต่อการทนต่อแรงกด (CCS) ของปูนทนไฟ



รูปที่ 4.22 (ข) ผลวิเคราะห์สำหรับอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย ที่มีต่อการทนต่อแรงกด (CCS) ของปูนทนไฟ

General Linear Model: CCS versus Perlite, Vermiculite, Foam

Factor	Type	Levels	Values
Perlite	fixed	3	40, 50, 60
Vermiculite	fixed	3	40, 50, 60
Foam	fixed	3	4, 7, 10

Analysis of Variance for CCS, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Percent Contribution
Perlite	2	44.759	44.759	22.379	13.07	0.003	17.43
Vermiculite	2	147.347	147.347	73.673	43.03	0.000	57.39
Foam	2	12.537	12.537	6.269	3.66	0.074	4.88
Perlite*Vermiculite	4	64.093	64.093	16.023	9.36	0.004	12.48
Perlite*Foam	4	23.085	23.085	5.771	3.37	0.068	4.50
Vermiculite*Foam	4	17.038	17.038	4.259	2.49	0.127	3.32
Error	8	13.697	13.697	1.712			
Total	26	322.556					

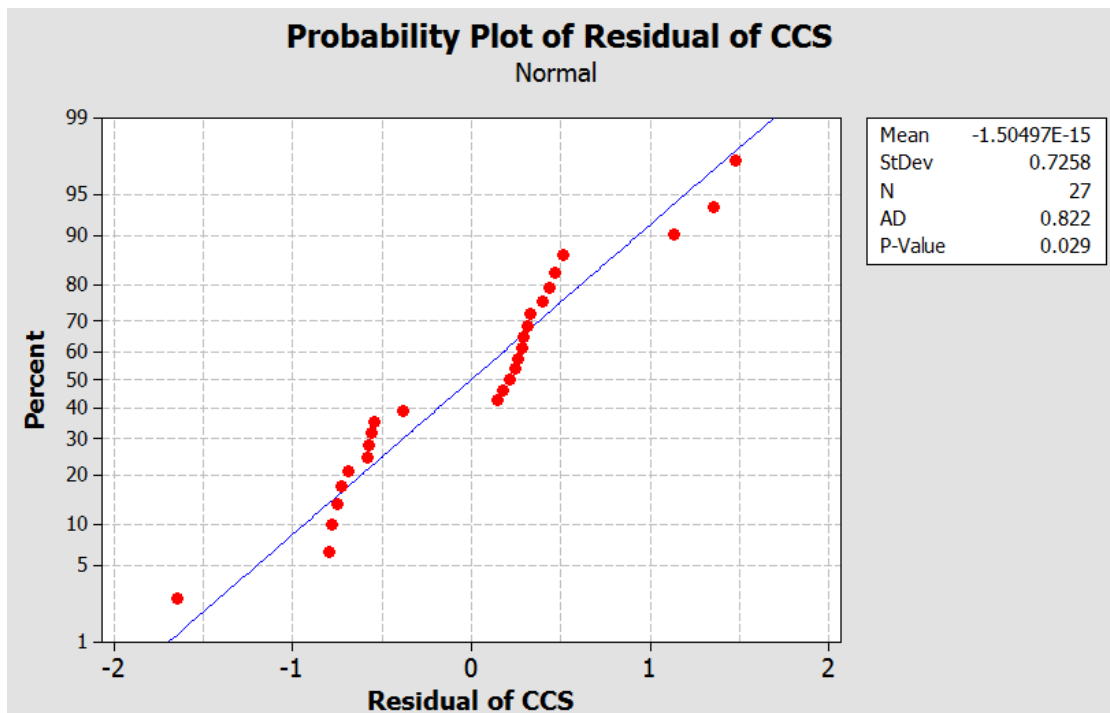
S = 1.30850 R-Sq = 95.75% R-Sq(adj) = 86.20%

Unusual Observations for CCS

Obs	CCS	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	18.3500	16.8752	1.0977	1.4748	2.07 R
3	8.0500	9.6996	1.0977	-1.6496	-2.32 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

รูปที่ 4.23 ผลของการวิเคราะห์ General Linear Model สำหรับ CCS โดย MINITAB โปรแกรม



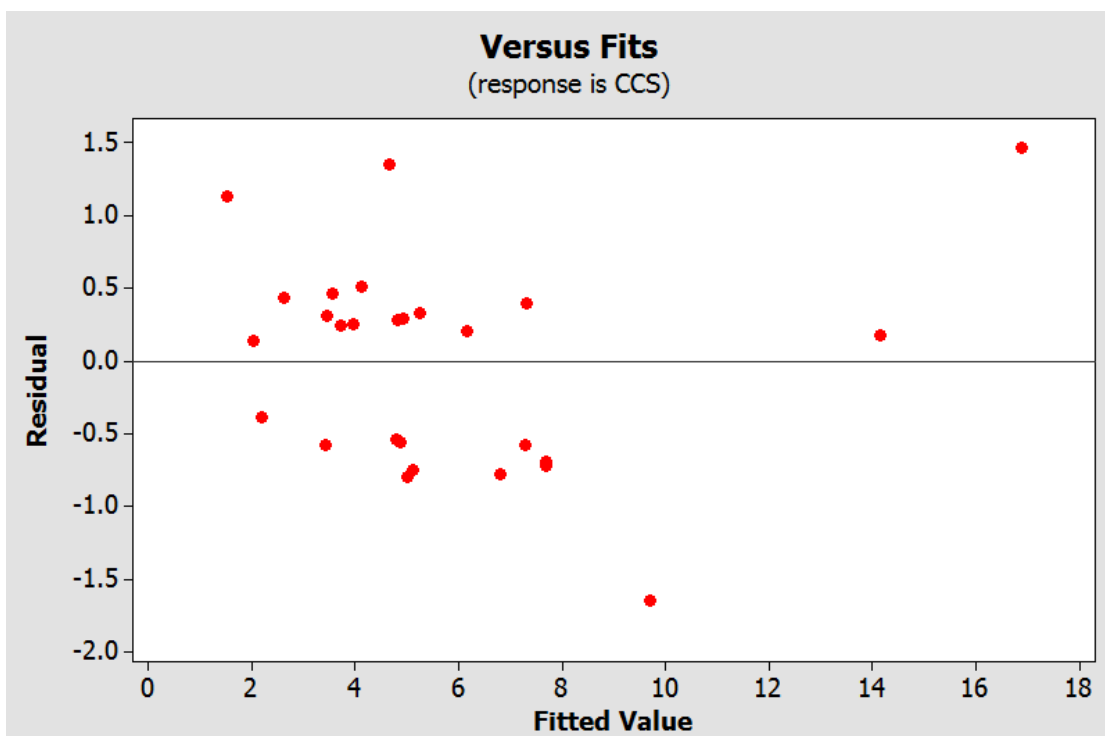
รูปที่ 4.24 ผลการทดสอบสมมติฐานการแจกแจงปกติของค่าตกค้าง

การทดสอบว่าค่าตกค้างมีการแจกแจงปกติและค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ สามารถพิจารณาได้จากกราฟ ความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าตกค้าง และการทดสอบสมมติฐานว่าค่าตกค้างมีการแจกแจงปกติด้วย ค่าสถิติทดสอบ Anderson-Darling (AD)

จากการทดสอบข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 4.24 พบว่าค่าตกค้างมีการกระจายตัวเป็นปกติ คือมีลักษณะการเรียงตัวของค่าตกค้างกระจายรอบๆ เส้นตรง และเมื่อทำการทดสอบสมมติฐานว่าค่าตกค้างมีการแจกแจงปกติหรือไม่ พบว่าที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.01 สามารถยอมรับได้ว่าค่าตกค้างมีการแจกแจงปกติ เนื่องด้วยค่าสถิติทดสอบ AD มีค่า p-value เท่ากับ 0.029 ซึ่งมากกว่า 0.01

การทดสอบว่าค่าตกค้างมีความแปรปรวนคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามระดับของปัจจัย สามารถพิจารณาได้จากกราฟระหว่างค่าตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตต้องมีการกระจายแบบสุ่ม คืออยู่เหนือและใต้เส้นกึ่งกลางเท่ากัน

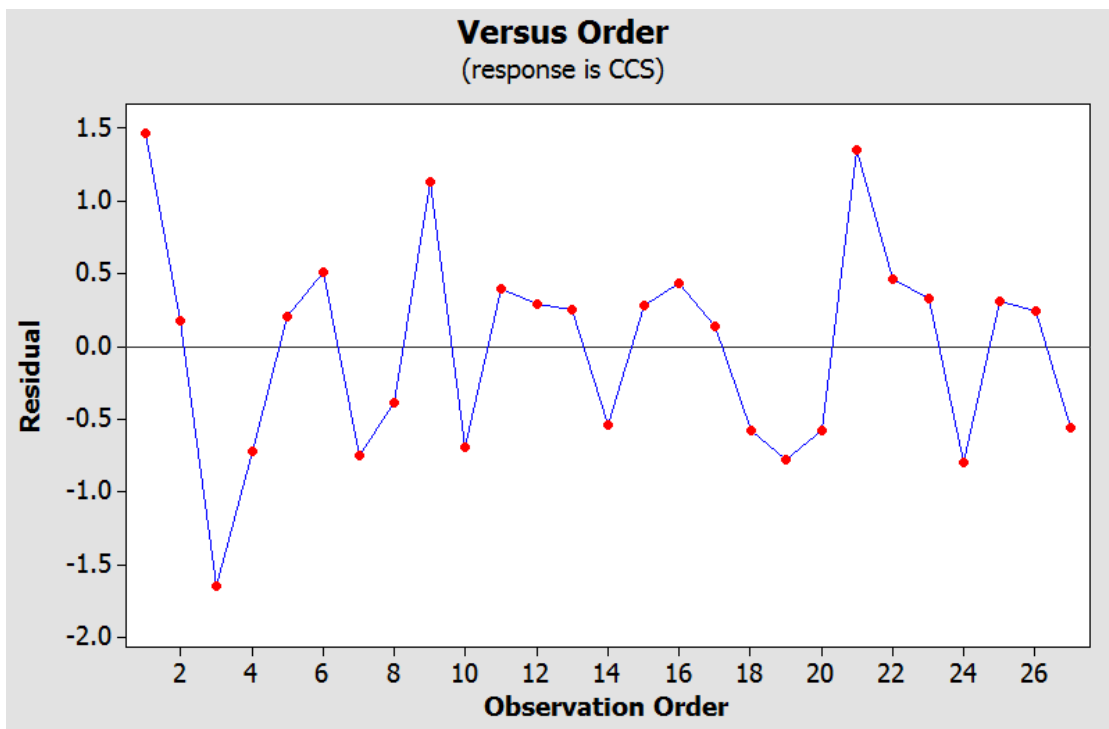
จากผลการทดสอบข้อมูลดังแสดงในรูป 4.25 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าตกค้าง (Residual) และที่ถูกฟิตของ CCS มีการกระจายตัวเป็นแบบสุ่ม ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่าตกค้างมีความแปรปรวนคงที่



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตกค้างและ CCS

ค่าตกค้างต้องเป็นอิสระต่อกันไม่แปรผันตามปัจจัยหรือลำดับการทดลองพิจารณาได้จากกราฟระหว่างค่าตกค้างกับลำดับการทดลอง

จากการทดสอบข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 4.26 พบว่าค่าตกค้างมีการกระจายตัวเป็นแบบสุ่ม มีรูปแบบเป็นอิสระต่อกัน ไม่มีลักษณะข้อมูลที่เป็นแนวโน้ม ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกันตรงตามสมมติฐาน และผลการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากค่าการทดสอบคุณสมบัติ CCS พบว่าข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์ของการออกแบบการทดลองเป็นไปตามสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ คือ ข้อมูลมีการแจกแจงปกติ ข้อมูลมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน และข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นสามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์ผลในขั้นตอนต่อไปได้



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตกค้างของ CCS ตามลำดับการทดลอง

เมื่อทำการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ ผลสรุปสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเพอร์ไลต์(P), ปริมาณเวอร์มิคูไลต์ (V_2) และ โพลีสไตรีนโฟม (F) ที่มีต่อคุณสมบัติการทนต่อแรงกด (Compressive strength; CCS) สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.9 โดยจากการวิเคราะห์ ค่า $R^2 = 81.9\%$ เนื่องจากค่า R^2 ที่มีค่าเข้าใกล้ 1 ดังนั้นแสดงว่าค่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเพอร์ไลต์ (P), ปริมาณเวอร์มิคูไลต์ (V_2) และ โพลีสไตรีนโฟม (F) มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติการทนต่อแรงกดอย่างมาก และสมการการประมาณค่าจะมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานได้มาก และเมื่อทำการทดลองแทนค่าปริมาณเพอร์ไลต์ (P) = 40, ปริมาณเวอร์มิคูไลต์ (V_2) = 40 และ โพลีสไตรีนโฟม (F) = 4,7,10 ลงในสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเพอร์ไลต์ (P), ปริมาณเวอร์มิคูไลต์ (V_2) และ โพลีสไตรีนโฟม (F) ที่มีต่อคุณสมบัติการทนต่อแรงกด (Compressive strength; CCS)ตามลำดับ พบว่าค่าที่ได้อยู่ที่ 15.256 , 12.298 และ 9.34 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริงจะได้ 18.35 ,14.33 และ 8.05 ดังนั้นค่าที่ได้จะมีความแตกต่างกันอยู่ที่ 16.86 % , 14.18 % และ 16.02 % ของค่าที่ได้จากการทดลองจริง

เมื่อพิจารณาถึงสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) หรือสัมประสิทธิ์การพยากรณ์ ซึ่งเป็นค่าความชันของกราฟเส้นตรง ที่เกิดจากสมการเชิงเส้น สามารถสรุปได้ดังนี้ คือ ปริมาณเพอร์ไลต์ (P), ปริมาณเวอร์มิคูไลต์ (V_2) และ โพลีสไตรีนโฟม (F) เท่านั้น ที่มีความสัมพันธ์ต่อคุณสมบัติการทนต่อแรงกด (Compressive Strength; CCS) ไปในทิศทางตรงกันข้าม หมายถึง ถ้าค่าของ P, V_2 ,และ F มีปริมาณสูงขึ้น ค่าของการทนต่อแรงกด (Compressive Strength; CCS) ก็จะมีค่าต่ำลงด้วย

ตารางที่ 4.9 สรุปความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติด้านการทนต่อแรงกด (CCS) กับ ปริมาณเพอร์ไลต์ (P), ปริมาณเวอร์มิคูไลต์(V_2)และ โพลีสไตรีนโฟม (F)

คุณสมบัติ(Y)	สมการความสัมพันธ์	R^2 (%)
การทนต่อแรงกด (CCS)	$CCS = 106 - 1.47 P - 1.54 V - 3.85 F + 0.0210 P*V + 0.0419 P*F + 0.0297 V*F$	81.9

จากการวิเคราะห์ด้วย Regression เมื่อพิจารณาปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติต่างๆ ที่ระดับ α เท่ากับ 0.05 ดังแสดงในรูปที่ 4.27 ได้ผลวิเคราะห์ดังนี้ เมื่อพิจารณาคูสมบัติด้านการทนต่อแรงกด (CCS) พบว่า (1) ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพล คือ ปริมาณ

เพอร์ไลต์ (P) ปริมาณเวอร์มิคูไลต์ (V_2) และโฟลีสไต้ลีนโฟม (F) โดยมีค่า p-value เท่ากับ 0,0 และ 0.004 ตามลำดับ โดยค่าการทนต่อแรงกด (CCS) ของปูนทนไฟจะมีค่าลดลง เมื่อปริมาณ เพอร์ไลต์ (P) ,เวอร์มิคูไลต์ (V_2) และโฟลีสไต้ลีนโฟม (F) มีค่าเพิ่มสูงขึ้น (2) อันตรกิริยาระหว่าง ปริมาณเพอร์ไลต์ (P) กับ ปริมาณเวอร์มิคูไลต์ (V_2) และ เพอร์ไลต์ (P) กับโฟลีสไต้ลีนโฟม (F) มี อิทธิพลต่อการทนต่อแรงกด (CCS) ของชิ้นงาน โดยมีค่า p-value เท่ากับ 0 และ 0.019 ตามลำดับ ขณะที่ อันตรกิริยาระหว่าง ปริมาณเวอร์มิคูไลต์ (V_2) กับ โฟลีสไต้ลีนโฟม (F) ไม่มี อิทธิพล และมีค่า p-value เท่ากับ 0.086 และความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 81.96 % R^2 (adj) = 76.4 % ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ General Linear Model พบว่า จากการวิเคราะห์ด้วย Regression พบว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพล เพิ่มขึ้นคือ ปริมาณโฟลีสไต้ลีนโฟม (F) โดยมีค่า p-value เท่ากับ 0.004 และอันตรกิริยาระหว่าง เพอร์ไลต์ (P) กับโฟลีสไต้ลีนโฟม (F) มีอิทธิพลต่อการทนต่อแรงกด (CCS) ของชิ้นงาน โดยมีค่า p-value เท่ากับ 0.019

Regression Analysis: CCS versus Perlite, Vermiculite, ...

The regression equation is

$$\begin{aligned} \text{CCS} = & 106 - 1.47 \text{ Perlite} - 1.54 \text{ Vermiculite} - 3.85 \text{ Foam} \\ & + 0.0210 \text{ Perlite*Vermiculite} + 0.0419 \text{ Perlite*Foam} \\ & + 0.0297 \text{ Vermiculite*Foam} \end{aligned}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	105.50	15.09	6.99	0.000	
Perlite	-1.4693	0.2753	-5.34	0.000	46.667
Vermiculite	-1.5374	0.2753	-5.58	0.000	46.667
Foam	-3.855	1.171	-3.29	0.004	76.000
Perlite*Vermiculite	0.020975	0.004936	4.25	0.000	76.000
Perlite*Foam	0.04189	0.01645	2.55	0.019	46.667
Vermiculite*Foam	0.02975	0.01645	1.81	0.086	46.667

S = 1.71004 R-Sq = 81.9% R-Sq(adj) = 76.4%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	6	264.071	44.012	15.05	0.000
Residual Error	20	58.485	2.924		
Total	26	322.556			

Residual Plots for CCS

รูปที่ 4.27 ผลของการวิเคราะห์ Regression สำหรับ CCS โดย MINITAB โปรแกรมสรุปการแสดงผลการคำนวณค่า P-Value ของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อความหนาแน่น (FBD) การทนต่อแรงกด (CCS) และการทนต่อแรงดัด (BS) ในเชิงสถิติดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ผล P-Value ของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อความหนาแน่น (FBD) การทนต่อแรงกด (CCS) และการทนต่อแรงดัด (BS) ในเชิงสถิติ

	ค่า P-Value		
	FBD(g/cm ³)	CCS (kg/cm ²)	BS(kg/cm ²)
1) P	0.019	0.003	0.009
2) V ₂	0.000	0.000	0.001
3) F	0.777	0.074	0.164
4) P V ₂	0.069	0.004	0.006
5) P F	0.044	0.068	0.226
6) V ₂ F	0.149	0.127	0.258
R ² (%)	95.58	95.75	93.1

และจากผลการศึกษาในหัวข้อ 4.1 ที่นำมากำหนดขอบเขตสูงและต่ำของแต่ละวัสดุที่ใช้ในการทดลองผสมร่วมกัน โดยจำแนกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ระดับสูง กลาง และต่ำ ทดลองซ้ำ 2 ครั้ง แบบสุ่ม และทดลองในหัวข้อที่ 4.2 นั้น ถ้าการทดลองสามารถจำแนกเป็น 5 ระดับ จะทำให้เห็นแนวโน้มของผลการทดลองได้ชัดเจนมากขึ้น

และจากการทดลองที่ทำการศึกษ ปริมาณเพอร์ไลต์ (P) กับ เวอร์มิคูไลต์ (V₂) และ โพลีสไตรีนโฟม (F) พบว่าจากรูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโพลีสไตรีนโฟม (F) กับคุณสมบัติการทนต่อแรงกด (CCS) วัสดุโพลีสไตรีนโฟม (F) ที่ปริมาณ 4 -5 phc ไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติการทนต่อแรงกด (CCS) อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจาก ปริมาณโพลีสไตรีนโฟม (F) มีสัดส่วนน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณวัสดุอื่น ๆ ในส่วนผสม อาจจะสามารถตัดส่วนผสมของวัสดุโพลีสไตรีนโฟม (F) ออกไปได้ เนื่องจากถ้าใส่ปริมาณโพลีสไตรีนโฟม (F) เพิ่มมากขึ้นก็จะส่งผลกระทบต่อต้นทุนของสินค้าอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากวัสดุโพลีสไตรีนโฟม (F) มีต้นทุนที่สูงกว่าเพอร์ไลต์ (P) กับ เวอร์มิคูไลต์ (V₂) โดยต้นทุนต่อหน่วยของโพลีสไตรีนโฟม (F) สูงกว่าเพอร์ไลต์ (P) และ เวอร์มิคูไลต์ (V₂) ประมาณ 10 เท่า อ้างอิงจาก ตารางที่ 2.7 ผลการศึกษา Relative price ของราคาต้นทุนต่อหน่วยของวัตถุดิบวัสดุทนไฟในบทที่ 2

4.2.4 ผลของวัสดุผสมที่มีต่อคุณสมบัติทนอุณหภูมิได้ (PCE)

ในทุกสัดส่วนผสมของการทดลอง พบว่าชิ้นงานทุกชิ้นสามารถทนอุณหภูมิได้ที่ 1,000 องศาเซลเซียส เนื่องจากผลการทดสอบ PCE ได้ Cone > เบอร์ 05^{1/2} ทุกส่วนผสม

4.2.5 ผลของวัสดุผสมที่มีต่อคุณสมบัติการหดตัว (Linear Change) หลังเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

ในทุกสัดส่วนผสมของการทดลอง พบว่าชิ้นงานทุกชิ้น เมื่อนำไปทดลองเผาที่ 1,000 องศาเซลเซียส มีค่า % LC ไม่เกิน -1.5 % ได้ผลดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ผลของวัสดุผสมที่มีต่อคุณสมบัติการหดตัว (Linear Change) หลังเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

				หน่วย (phc)		
V ₂ (phc)	F (phc)	Properties	Unit	P (phc)		
				40	50	60
40	4	LC	%	-0.56	-0.58	-0.63
	7	LC	%	-0.53	-0.63	-0.65
	10	LC	%	-0.57	-0.66	-0.7
50	4	LC	%	-0.59	-0.57	-0.63
	7	LC	%	-0.58	-0.68	-0.70
	10	LC	%	-0.62	-0.69	-0.75
60	4	LC	%	-0.85	-0.88	-0.89
	7	LC	%	-0.83	-0.86	-0.90
	10	LC	%	-0.87	-0.85	-1.0

4.2.6 ผลของวัสดุผสมที่มีต่อคุณสมบัติการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ที่อุณหภูมิ 260,538 และ 815 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ปูนทนไฟที่มีวัสดุเพอร์ไลต์ (P) เวอร์มิคูไลท์ (V_2) และ โพลีสไตรีนโฟม (F) เป็นตัวแปรอิสระ ที่มีขอบเขตของปริมาณการใช้ที่ 40, 50, และ 60 phc สำหรับวัสดุเพอร์ไลต์ (P) เวอร์มิคูไลท์ (V_2) และที่ 4, 7, และ 10 phc สำหรับโพลีสไตรีนโฟม (F) โดยมีตัวแปรตอบสนองได้แก่ ความหนาแน่น (FBD) การทนอุณหภูมิที่ 1,000 องศาเซลเซียส การทนต่อแรงดัด (BS) และการทนต่อแรงกด (CCS) จากการทดลองพบว่า สัดส่วนที่เหมาะสมที่จะนำมาทำการทดลองคุณสมบัติการนำความร้อนมีด้วยกัน 3 สัดส่วนคือส่วนผสมที่มีเพอร์ไลต์ (P) เป็นส่วนผสมที่ 40,50 และ 60 phc เวอร์มิคูไลท์ (V_2) และโพลีสไตรีนโฟม (F) 40, และ 4 phc ตามลำดับ เนื่องจาก ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าทั้ง 3 ส่วนผสมเป็นส่วนผสมที่ใช้ปริมาณวัสดุโพลีสไตรีนโฟม (F) น้อยที่สุด แต่ให้คุณสมบัติเชิงกลสูงสุด และเนื่องจากต้นทุนต่อหน่วยของโพลีสไตรีนโฟม (F) สูงกว่าต้นทุนของ P และ V ประมาณ 10 เท่า โดยอ้างอิงจาก ตารางที่ 2.7 ผลการศึกษา Relative price ของราคาต้นทุนต่อหน่วยของวัสดุปูนทนไฟในบทที่ 2 ดังนั้น และเรื่องระยะเวลาในการทดสอบการนำความร้อน เนื่องจากการทดสอบ 1 ตัวอย่างจะใช้เวลาประมาณ 4 วัน ดังนั้น ผู้วิจัยจึงพิจารณาเลือกผลการทดลองที่มีปริมาณ โพลีสไตรีนโฟม (F) ที่ 4 phc มาทำการทดลองค่าการนำความร้อน และพบว่า เมื่อนำมาทดสอบค่าการนำความร้อน ปริมาณเพอร์ไลต์ (P) มีอิทธิพลต่อค่าการนำความร้อน โดยเมื่อปริมาณเพอร์ไลต์ (P) เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการนำความร้อนลดลง ดังตาราง 4.12

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบคุณสมบัติการนำความร้อนของวัสดุผสม

Temperature (°C)	หน่วย phc					
	P (phc), $V_2 = 40$ (phc), F = 4 (phc)					
	40		50		60	
260	0.15	± 0.006	0.13	± 0.005	0.12	± 0.006
538	0.17	± 0.005	0.15	± 0.006	0.14	± 0.004
815	0.21	± 0.005	0.19	± 0.005	0.18	± 0.006

ตารางที่ 4.13 ผลของคุณสมบัติความทนต่อแรงกด ความทนต่อแรงดัด และคุณสมบัติด้านความหนาแน่นของส่วนผสมที่ได้ทำการพิจารณา

V ₂	F	Properties	Unit	หน่วย (phc)					
				P (phc)					
				40		50		60	
(phc)	(phc)								
40	4	FBD	g/cm ³	0.64	±0.0	0.56	±0.0	0.53	±0.0
		BS	kg/cm ²	11.26	±0.8	4.18	±0.5	4.02	±0.3
		CCS	kg/cm ²	18.35	±0.7	7.00	±0.1	6.03	±0.2
	7	FBD	g/cm ³	0.63	±0.0	0.58	±0.0	0.54	±0.0
		BS	kg/cm ²	10.30	±0.7	3.95	±0.7	3.47	±0.3
		CCS	kg/cm ²	14.33	±0.4	7.71	±0.2	6.72	±0.2
	10	FBD	g/cm ³	0.59	±0.0	0.57	±0.0	0.59	±0.0
		BS	kg/cm ²	4.94	±0.4	3.38	±0.3	3.79	±0.3
		CCS	kg/cm ²	8.05	±0.3	5.22	±0.1	6.02	±0.1
50	4	FBD	g/cm ³	0.57	±0.0	0.50	±0.0	0.48	±0.0
		BS	kg/cm ²	4.51	±0.1	3.06	±0.3	3.13	±0.1
		CCS	kg/cm ²	6.96	±0.4	4.22	±0.3	4.02	±0.2
	7	FBD	g/cm ³	0.55	±0.0	0.52	±0.0	0.55	±0.0
		BS	kg/cm ²	3.82	±0.3	3.00	±0.5	4.17	±0.3
		CCS	kg/cm ²	6.38	±0.1	4.24	±0.1	5.57	±0.1
	10	FBD	g/cm ³	0.53	±0.0	0.52	±0.0	0.53	±0.0
		BS	kg/cm ²	3.07	±0.0	3.13	±0.2	3.01	±0.3
		CCS	kg/cm ²	4.63	±0.2	5.09	±0.2	4.21	±0.4
60	4	FBD	g/cm ³	0.52	±0.0	0.49	±0.0	0.47	±0.0
		BS	kg/cm ²	2.98	±0.2	2.62	±0.3	2.96	±0.0
		CCS	kg/cm ²	4.37	±0.3	3.06	±0.1	3.76	±0.2
	7	FBD	g/cm ³	0.42	±0.0	0.41	±0.0	0.50	±0.0
		BS	kg/cm ²	1.52	±0.3	1.94	±0.2	2.85	±0.0
		CCS	kg/cm ²	1.81	±0.2	2.18	±0.1	3.97	±0.2
	10	FBD	g/cm ³	0.46	±0.0	0.41	±0.0	0.50	±0.0
		BS	kg/cm ²	2.40	±0.0	2.67	±0.1	3.17	±0.2
		CCS	kg/cm ²	2.65	±0.3	2.85	±0.1	4.31	±0.1

4.3 ผลการพิจารณาเลือกส่วนผสมที่เหมาะสม

ผลการพิจารณาเลือกส่วนผสมที่เหมาะสม จากตารางที่ 4.13 สรุปว่าช่องที่ทำกรากบาท คือสัดส่วนที่ค่า BS, CCS ที่ไม่ผ่านเกณฑ์ ช่องที่ไม่แข็งแรง คือสัดส่วนที่มีต้นทุนสูงเนื่องจากมีปริมาณ F ที่ 7, 10 phc และช่องที่ทำกรากบาท คือสัดส่วนที่น่าสนใจที่นำมาพิจารณาโดยมีต้นทุนของสินค้าที่ต่ำที่สุด โดยการพิจารณาดังนี้

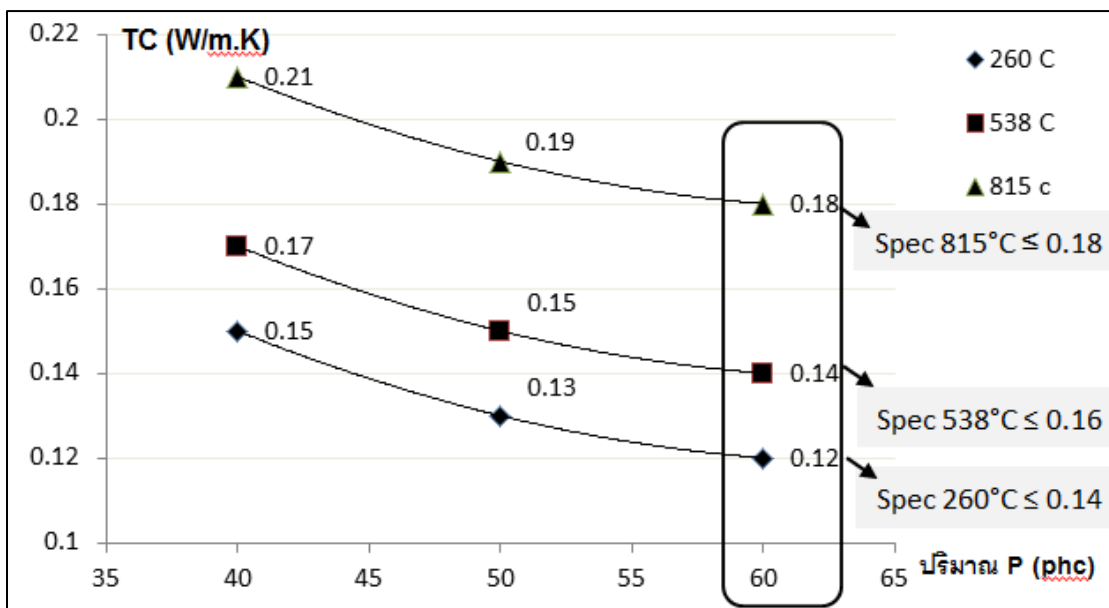
1. พิจารณาจากการออกแบบการทดลองแบบ Full factorial Design พบว่าเมื่อพิจารณาในเรื่องของค่า BS สูงที่สุดเท่ากับ 11.26 kg/cm^2 และค่า CCS สูงที่สุดเท่ากับ 18.35 kg/cm^2 สูตรที่เหมาะสม คือ $P = 40$, $V_2 = 40$, $F = 4$
2. พิจารณาที่ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ดังตารางที่ 4.15 จากการพิจารณาปริมาณ P ที่ 40, 50, 60 พบว่า มีเพียงปริมาณ $P = 60$ เท่านั้นที่ค่า Thermal conductivity ยังอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด สูตรที่เหมาะสมที่สุด คือ $P = 60$, $V_2 = 40$, $F = 4$ เท่านั้น

ตารางที่ 4.14 ผลการพิจารณาตามเกณฑ์ของ BS, CCS ที่สูงที่สุด

การพิสูจน์โดยใช้	คุณสมบัติ	หน่วย	P	V_2	F	ค่า	หมายเหตุ	เกณฑ์
การออกแบบการทดลองโดยใช้ Full Factorial Design (27 การทดลอง)	FBD	g/cm^3	40	60	4	0.64	ต่ำสุด	≤ 1.04
	BS	kg/cm^2	40	40	4	11.26	สูงสุด	≥ 3.5
	CCS	kg/cm^2	40	40	4	18.35	สูงสุด	≥ 5

ตารางที่ 4.15 ผลการพิจารณาตามเกณฑ์ของ ค่า Thermal Conductivity ของส่วนผสมที่ P= 40 , 50 และ 60 phc ขณะที่ $V_2 = 40$ และ $F = 4$

คุณสมบัติ	เกณฑ์	หน่วย	P (phc) โดย $V_2=40$; $F=4$					
			40		50		60	
FBD	≤ 1.04	g/cm^3	0.64	± 0.0	0.56	± 0.0	0.53	± 0.0
BS	≥ 3.5	kg/cm^2	11.26	± 0.8	4.18	± 0.5	4.02	± 0.3
CCS	≥ 5	kg/cm^2	18.35	± 0.7	7	± 0.1	6.03	± 0.2
TC at 260°C	≤ 0.14	W/m.K	0.15	± 0.006	0.13	± 0.005	0.12	± 0.006
TC at 538°C	≤ 0.16	W/m.K	0.17	± 0.005	0.15	± 0.006	0.14	± 0.004
TC at 815°C	≤ 0.18	W/m.K	0.21	± 0.005	0.19	± 0.005	0.18	± 0.006



รูปที่ 4.28 ผลปริมาณ P ที่มีต่อการนำความร้อน (TC) เมื่อ V_2 และ F เท่ากับ 40 และ 4 phc ตามลำดับ

พบว่า ค่าการนำความร้อน (TC) มีค่าลดลงเมื่อ P มีค่าเพิ่มขึ้น และอยู่ภายใต้ข้อกำหนด เมื่อ P มีค่าเท่ากับ 60 phc โดยให้ค่า TC เท่ากับ 0.12, 0.14, และ 0.18 วัตต์/เมตร-องศาเคลวิน ที่ อุณหภูมิ 260, 538, และ 811°C ตามลำดับ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษากาการผลิตชิ้นงานปูนทนไฟที่ใช้วัสดุเพอร์ไลต์ (P) เวอร์มิคูไลต์, (V_2) และ โพลีสไตรีนโฟม (F) เป็นส่วนผสมในลูมีนาซีเมนต์ซึ่งเป็นวัสดุผสม สรุปได้ ดังนี้

1. ข้อกำหนดคุณสมบัติของปูนทนไฟที่ต้องการคือ สามารถทนอุณหภูมิได้ที่ 1,000 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นรวมก้อนไม่เกิน 1.04 กรัม/ลบ.ซม. ตามมาตรฐาน ASTM C401-91 การทนต่อแรงกด (CCS) และแรงดัด (BS) ไม่น้อยกว่า 5 และ 3.5 กิโลกรัม/ตร.ซม. ตามข้อกำหนดของปูนทนไฟในปัจจุบัน ตามลำดับ

2. ในทุกสัดส่วนผสมของการทดลอง พบว่าชิ้นงานทุกชิ้นสามารถทนอุณหภูมิได้ที่ 1,000 องศาเซลเซียสและมีค่า % LC น้อยกว่า -1.5 % ตามมาตรฐาน ASTM C401-91

3. คุณสมบัติความหนาแน่น (FBD) ,ความทนต่อแรงดัด (BS) และการทนต่อแรงกด (CCS) ของส่วนผสมปูนทนไฟที่ได้ พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน เมื่อปริมาณเพอร์ไลต์ (P) และปริมาณเวอร์มิคูไลต์ (V_2) ลดลง ขณะที่ปริมาณโพลีสไตรีนโฟม (F) ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ α เท่ากับ 0.05

4. ผลของปัจจัยร่วมแต่ละคู่ที่มีต่อคุณสมบัติความหนาแน่น FBD พบว่า ที่ P และ V_2 ที่มีปริมาณเท่ากับ 40 phc จะให้ค่า FBD มากที่สุดเท่ากับ 0.64 ซึ่งน้อยกว่า 1.04 กรัม/ลบ.ซม. ตามข้อกำหนด และเมื่อพิจารณาขอบเขตของข้อกำหนดด้านความหนาแน่นรวมก้อน (FBD) พบว่าทุกส่วนผสมให้ค่าน้อยกว่า 1.04 กรัม/ลบ.ซม.

5. ผลของปัจจัยร่วมแต่ละคู่ที่มีต่อการทนต่อแรงกด (CCS) พบว่า P และ V_2 ที่มีปริมาณเท่ากับ 40 phc จะให้ค่า CCS สูงที่สุดเท่ากับ 18 กก./ตร.ซม. ซึ่งมากกว่า 5 กก./ตร.ซม. ตามข้อกำหนด และเมื่อพิจารณาขอบเขตของข้อกำหนดด้านการทนต่อแรงกด (CCS) พบว่า ส่วนผสมให้ค่า CCS มากกว่าหรือเท่ากับ 5 กก./ตร.ซม. คือ V_2 เท่ากับ 40 , F เท่ากับ 4 และ P เท่ากับ 40, 50, และ 60 phc

6. ผลของปัจจัยร่วมแต่ละคู่ที่มีต่อ BS พบว่า P และ V_2 ที่มีปริมาณเท่ากับ 40 phc ให้ค่า BS สูงที่สุดเท่ากับ 11 กก./ตร.ซม. ซึ่งมากกว่า 3.5 กก./ตร.ซม. ตามข้อกำหนด และเมื่อพิจารณาขอบเขตของข้อกำหนดการทนต่อแรงดัด (BS) พบว่า ส่วนผสมให้ค่า $BS \geq 3.5$ กก./ตร.ซม. คือ V_2 เท่ากับ 40 , F เท่ากับ 4 และ P เท่ากับ 40, 50, และ 60 phc

7. ส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ปูนทนไฟที่มีเพอร์ไลต์ (P) เวอร์มิคูไลท์ (V_2) และโพลีสไตรีนโฟม (F) เป็นส่วนผสมที่ 60, 40, และ 4 phc ตามลำดับ ซึ่งเป็นส่วนผสมที่ให้คุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลอยู่ในข้อกำหนด คือ การนำความร้อนที่อุณหภูมิ 260, 538, และ 815°C เท่ากับ 0.12, 0.14, และ 0.18 วัตต์/เมตร-องศาเซลเซียส ตามลำดับ ความหนาแน่นรวมก้อน เท่ากับ 0.53 กรัม/ลบ.ซม. การทนต่อแรงกด และการทนต่อแรงดัด เท่ากับ 4.02 และ 6.03 กิโลกรัม/ตร.ซม. ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังให้คุณสมบัติทนอุณหภูมิที่ 1,000 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ASTM C401-91 โดยมีค่า Pyrometric Cone Equivalent (PCE) ได้มากกว่า เบอร์ 05^{1/2}

5.2 งานวิจัยที่ควรศึกษาต่อไปในอนาคต

1. ศึกษาในกรณีของการเพิ่มความแข็งแรงของการทนต่อแรงดัด (Bend Strength) และการทนต่อแรงกด (Cold crushing Strength) แต่ยังคงการให้ค่าความหนาแน่น ต่ำกว่า 0.5 kg/cm^3
2. ศึกษาเกี่ยวกับสารช่วยในการยึดเกาะหรือ Coupling Agent ว่ามีผลต่อทำให้เกิดการช่วยยึดเกาะและเพิ่มความแข็งแรงในวัสดุทนไฟ ประเภทนวนกันความร้อนได้หรือไม่

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

วาสนา กมลมาลย์นิวัฒน์ ธวัชชัย ชรินพาศิขกุล ปรีชา แสงธีระปิติกุล และณัฐพร โทณานนท์. การเตรียมอนุภาคทนไฟด้วยอิมัลชันเพื่อการเคลือบผิวที่ขยายตัวได้. ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีอนุภาค.ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

วงศ์วี คงมาก.การประมาณค่าความหนาที่เหมาะสมของวัสดุเคลือบผิวป้องกันไฟสำหรับองค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณ.วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต,ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2547.

สรุฒิ ญาณภีร์.การศึกษาคุณสมบัติของสัดส่วนผสมของวัสดุเคลือบผิวป้องกันไฟ ที่มีเพอร์ไลต์เป็นส่วนผสมสำหรับองค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2545.

จิตรกร ตังอนุสรณ์สุข และคณะ. ผลกระทบของเพอร์ไลต์ต่อการซึมผ่านอากาศ และปริมาณช่องว่างอากาศภายในซีเมนต์มอร์ตาร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี,2548.

ประพัทธ์ กรังพานิชย์,การนำกากแร่สังกะสีและวัสดุพูนเบาเพอร์ไลต์มาผลิตเป็นคอนกรีตเบา. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,2540.

ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. เศวามิกซ์: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2539.

ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. วัตถุดิบไฟ.พิมพ์ครั้งที่ 1:บริษัท สุรพิมพ์ จำกัด: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2538.

ภาษาอังกฤษ

Routschka,G.,Pocket Manual REFRACTORY MATERIALS. Die Deutsche Bibliothek, 2004.

Çolak A., Density and strength characteristics of foamed gypsum, Cement and Concrete Composites, vol. 22, 2000: 193-200.

Swansinger T.G. New Insulating Raw Material for High Temperature Applications, Alcoa Technical Centre, USA, 1998.

- Montgomery R., 4 - Heat-resisting and refractory concretes, in Advanced Concrete Technology Set, N. John, et al., Eds., ed Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003, :1-13.
- Ramamurthy K., et al., A classification of studies on properties of foam concrete, Cement and Concrete Composites, vol. 31, 2009 : 388-396.
- R. Demirboga and R. Gul., Thermal conductivity and compressive strength of expanded perlite aggregate concrete with mineral admixtures. Energy and Buildings vol 35, 2003 : 1155-1159.
- R. Demirboga, I. Orung and R. Gul. ,Effects of Expanded Perlite Aggregate and Mineral Admixtures on The Compressive Strength of Low-Density Concretes, Cement and Concrete Research vol 31,2001:1627-1632.
- I.B.Topcu and B.Isikdag. Effect of Expanded Perlite Aggregate on The Properties of Lightweight Concrete. Journal of Materials Processing Technology PROTEC-11355, 2007: 5
- ASTM C401 – 12.2005 Standard Classification of Alumina and Alumina-Silicate Castable Refractories, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken,Pennsylvania,U.S.A.
- ASTM C24-89.2005 Standard Test Method for Pyro metric Cone Equivalent, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken,Pennsylvania,U.S.A.
- ASTM C133.2005 Test Methods for Cold Crushing Strength and Modulus of Rupture of Refractories, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken,Pennsylvania,U.S.A.
- ASTM C830-88.2008 Apparent Porosity, Liquid Adsorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Refractory Shapes by Vacuum Pressure, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken,Pennsylvania,U.S.A.
- ASTM C113-02.2008 Standard Test Method for Reheat Change of Refractory Brick, , American Society for Testing and Materials, West Conshohocken,Pennsylvania,U.S.A.

ภาคผนวก

ตารางที่ 1 ตารางเทียบอุณหภูมิกับเบอร์ของ Orton cone

Using Orton Pyrometric Cones



Cone Numbers 022-14

Pyrometric cones have been used to monitor ceramic firings for more than 100 years. They are useful in determining when a firing is complete, if the kiln provided enough heat. If there was a temperature difference in the kiln or if a problem occurred during the firing.

Cones are made from carefully controlled compositions. They bend in a repeatable manner (over a relatively small temperature range - usually less than 40°F). The final bending position is an indication of how much heat was absorbed.

Behavior of Pyrometric Cones

Typically, it takes 15 to 25 minutes for a cone to bend once it starts. This depends on the cone number. The cone bends slowly at first but once it reaches the half way point (3 o'clock), it bends quickly. When the cone tip reaches a point level with the base, it is considered properly fired. This is the point for which temperature equivalents are determined. Differences between a cone touching the shelf and a cone at the 4 o'clock position are small, usually 1 or 2 degrees.

Temperatures shown on the charts were determined under controlled firing conditions in electric kilns and an air atmosphere. Temperatures are shown for specific heating rates. These heating rates are for the last 100°C or 200°F of the firing. Different heating rates will change the equivalent temperature. The temperature will be higher for faster heating rates and lower for slower heating rates.

Cone bending may also be affected by reducing atmospheres or those containing sulfur oxides. Orton recommends the use of Iron-Free cones for all reduction firings (cones 010-3). If a cone is heated too fast, the cone surface fuses and binders used to make cones form gases that bloated the cone. If cones are to be fired rapidly, they should be calcined (pre-fired) before use. Cones should be calcined to about 850°F (455°C) in an air atmosphere.

If a cone is soaked at a temperature near its equivalent temperature, it will continue to mature, form glass and bend. The time for the cone to bend depends on several factors and as a general rule, a 1 to 2 hour soak may be sufficient to deform the next higher cone number. A soak of 4 to 6 hours will be required to deform two higher (hotter) cones.

For more information on pyrometric cones, contact Orton or visit us at www.ortonceramic.com



The Edward Orton Jr. Ceramic Foundation
P.O. Box 2760 • Westerville, OH 43086-2760
(614) 895-2663 • (614) 895-9610 fax
info@ortonceramic.com • www.ortonceramic.com

©2008 Orton Foundation

These tables provide a guide for the selection of cones. The actual bending temperature depends on firing conditions. Once the appropriate cones are selected, excellent, reproducible results can be expected.

Temperature Equivalents (°F) For Orton Pyrometric Cones

Cone	Self Supporting Cones						Large Cones				Small
	Regular			Iron Free			Regular		Iron Free		Regular
	Heating Rate °F/hour (last 200 °F of firing)										
	27	108	270	27	108	270	108	270	108	270	540
022		1087	1094				N/A	N/A			1195
021		1112	1143				N/A	N/A			1189
020		1159	1190				N/A	N/A			1231
019	1213	1252	1283				1249	1279			1333
018	1267	1319	1353				1314	1350			1386
017	1301	1360	1405				1357	1402			1443
016	1368	1422	1465				1416	1461			1517
015	1382	1456	1504				1450	1501			1549
014	1445	1485	1540				1488	1537			1598
013	1485	1539	1582				1539	1578			1616
012	1549	1592	1630				1576	1616			1652
011	1675	1697	1641				1603	1638			1679
010	1636	1657	1679	1600	1627	1639	1648	1675	1623	1636	1686
09	1665	1688	1706	1630	1666	1702	1683	1702	1683	1699	1751
08	1692	1728	1753	1695	1735	1755	1728	1749	1733	1751	1801
07	1764	1789	1809	1747	1780	1800	1783	1805	1778	1796	1846
06	1798	1828	1855	1776	1816	1828	1823	1852	1816	1825	1873
05 1/2	1839	1859	1877	1814	1854	1870	1854	1873	1852	1868	1909
05	1870	1888	1911	1855	1899	1915	1886	1915	1890	1911	1944
04	1915	1945	1971	1909	1942	1956	1940	1958	1940	1953	2008
03	1960	1987	2019	1951	1990	1999	1987	2014	1989	1996	2068
02	1972	2016	2052	1983	2021	2039	2014	2048	2016	2035	2098
01	1999	2046	2090	2014	2053	2073	2043	2079	2052	2070	2152
1	2028	2079	2109	2046	2082	2098	2077	2109	2079	2095	2182
2	2034	2088	2127				2088	2124			2174
3	2039	2106	2138	2098	2109	2124	2106	2134	2104	2120	2185
4	2086	2124	2161				2120	2158			2208
5	2118	2167	2205				2163	2201			2230
5 1/2	2133	2197	2237				2194	2233			N/A
6	2165	2232	2269				2228	2266			2291
7	2194	2262	2295				2259	2291			2307
8	2212	2290	2320				2277	2316			2372
9	2235	2300	2336				2295	2332			2403
10	2284	2345	2381				2340	2377			2426
11	2322	2381	2419				2359	2394			2437
12	2345	2383	2420				2379	2415			2471
13*	2389	2428	2458				2410	2455			N/A
14*	2464	2489	2523				2530	2491			N/A

Temperature Equivalents (°C) For Orton Pyrometric Cones

Cone	Self Supporting Cones						Large Cones				Small
	Regular			Iron Free			Regular		Iron Free		Regular
	Heating Rate °C/hour (last 100 °C of firing)										
	15	60	150	15	60	150	60	150	60	150	300
022		596	590				N/A	N/A			630
021		600	617				N/A	N/A			643
020		626	638				N/A	N/A			666
019	656	678	695				676	693			723
018	686	715	734				712	732			752
017	705	738	763				736	761			784
016	742	772	796				769	794			825
015	750	791	818				788	816			848
014	787	807	838				807	836			870
013	807	837	861				837	859			890
012	843	861	882				859	880			900
011	857	875	894				873	891			915
010	891	903	915	871	886	893	898	913	884	891	919
09	907	920	930	899	919	928	917	928	917	926	955
08	922	942	956	924	946	957	942	954	945	965	983
07	962	976	987	953	971	982	973	985	970	980	1008
06	981	998	1013	969	991	999	995	1011	991	996	1023
05 1/2	1004	1025	1025	990	1012	1021	1013	1023	1011	1020	1043
05	1021	1031	1044	1013	1037	1046	1030	1046	1032	1044	1062
04	1046	1062	1077	1043	1061	1069	1050	1070	1060	1070	1098
03	1071	1086	1104	1066	1088	1093	1086	1101	1087	1091	1131
02	1078	1102	1122	1084	1105	1115	1101	1120	1102	1113	1148
01	1080	1119	1138	1101	1123	1134	1117	1137	1122	1132	1178
1	1109	1137	1154	1119	1139	1148	1136	1154	1137	1146	1184
2	1112	1142	1164				1142	1162			1190
3	1115	1152	1170	1130	1154	1162	1152	1168	1151	1160	1196
4	1141	1162	1183				1160	1181			1209
5	1159	1186	1207				1184	1205			1221
5 1/2	1187	1203	1225				1201	1223			N/A
6	1185	1222	1243				1220	1241			1255
7	1201	1239	1257				1237	1255			1264
8	1211	1249	1271				1247	1269			1300
9	1224	1260	1280				1257	1278			1317
10	1251	1285	1305				1282	1303			1330
11	1272	1294	1315				1293	1312			1336
12	1285	1306	1326				1304	1324			1355
13*	1310	1331	1348				1321	1346			N/A
14*	1351	1365	1384				1388	1366			N/A

Temperatures shown are for specific mounted height above base. For Self Supporting - 1 1/2"; for Large - 2"; for Small - 1 1/2". For Large Cones mounted at 1 1/2" height, use Self Supporting temperatures.
* These Self Supporting Cones and Large Cones have different compositions which result in different temperature equivalents.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ ชื่อสกุล	นางสาว ณัฐริญา ชาติกานนท์
วัน เดือน ปี เกิด	เมื่อวันที่ 15 ธันวาคม พ.ศ. 2528
สถานที่เกิด	จังหวัด กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียน หอวัง จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2549 เข้ารับการศึกษาต่อหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาค ปลายของปีการศึกษา 2553