



การพัฒนาและออกแบบอิฐฉนวนมวลเบากันความร้อนโดยใช้ดินท้องถิ่น
และผงยางรีเคลมร่วมกับระเบียบวิธีทางไฟไนต์อีลิเมนต์

**RESEARCH AND DEVELOPMENT OF CRUMB RUBBER
MIXED IN SOIL CEMENT BRICK AND EVALUATION
USING THE FINITE ELEMENT METHOD (FEM)**

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประยูร ยงค์อำนวย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ยอดสุดใจ

อาจารย์ ดร.รัตนกร ระวังกุล

อาจารย์ ดร.วีรพล นามบุญเรือง

ดร. ณัฐนันท์ สุขคดล

งานวิจัยนี้ได้ผ่านการพิจารณาจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ(วช.)

และได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานงบประมาณ ปีงบประมาณ 2556

มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง

พ.ศ. 2556



ใบรับรองงานวิจัย

สถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง

เรื่องการพัฒนาและออกแบบอิฐฉนวนมวลเบาทนความร้อนโดยใช้ดินท้องถิ่นและผงยางรีไซเคิล
ร่วมกับระเบียบวิธีทางไฟไนต์อีลิเมนต์

Research and development of crumb rubber mixed in soil cement brick and evaluation using the
Finite element method (FEM)

หัวหน้าโครงการวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประยูร ยงศ์อำนาจ

(BSc., M.Ed)

ผู้ร่วมวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันชัย ยอดสุคติ

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

ผู้ร่วมวิจัย

อาจารย์ ดร. รัตนกร ระวังกุล

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

ผู้ร่วมวิจัย

อาจารย์ ดร. วีรพล นามบุญเรือง

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

ผู้ร่วมวิจัย

อาจารย์ ดร. ณัฐนันท์ ศุกดล

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

สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชญาพร โพธิ์สุวรรณ)

ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

วันที่..... เดือน..... พ.ศ.....

งานวิจัย

เรื่อง

การพัฒนาและออกแบบอิฐฉนวนมวลเบาต้านความร้อนโดยใช้ดินท้องถิ่นและผงยางรีเคลมร่วมกับ
ระเบียบวิธีทางไฟไนต์อีลิเมนต์

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF CRUMB RUBBER MIXED IN SOIL CEMENT
BRICK AND EVALUATION USING THE FINITE ELEMENT METHOD (FEM)

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประยูร ขงศ์อำนาจ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ขอดสุคติ

อาจารย์ ดร.รัตนกร ระวังกุล

อาจารย์ ดร.วีรพล นามบุญเรือง

เสนอ

สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง

พ.ศ. 2556

บทคัดย่อ

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของอิฐดินเชิงประกอบผสมผงยางที่ได้จากการบดย่อยยางรถยนต์ใช้แล้ว โดยมีจุดประสงค์เพื่อผลิตอิฐมวลเบา ที่มีต้นทุนต่ำ คุณสมบัติกันความร้อนที่ดีและสามารถผลิตใช้เองในชุมชน โดยส่วนผสมที่ใช้จะเป็นผงยางปริมาณต่างๆผสมเข้ากับดินราชบุรี และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คงที่ร้อยละ 10 โดยผสมผงยางที่ปริมาณ ร้อยละ 10, 15, 20, 25, 30 และ 40 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อวัสดุผงเฉลี่ย ที่ (w/p) 0.2588, 0.2900, 0.3213, 0.3525, 0.383 และ 0.4463 ตามลำดับ ที่อายุการบ่มตั้งแต่ 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน โดยมีการทดสอบทั้งทางด้านเคมี ด้านกายภาพและสมบัติเชิงกล โดยผลการทดสอบพบว่าค่าหน่วยน้ำหนักมีค่าลดลงตามปริมาณผงยางที่เพิ่มขึ้นและให้ค่าหน่วยน้ำหนักสูงสุดที่อายุการบ่ม 3 วัน ค่าการดูดซึมความชื้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงยางที่เพิ่มขึ้นและให้ค่าสูงสุดที่อายุการบ่ม 3 วัน ค่าความเค้นแรงกดและโมดูลัสแรงดัดสูงสุดมีค่าลดลงตามปริมาณผงยางที่เพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดที่อายุการบ่ม 60 วัน และสุดท้ายค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของผงยาง และมีค่าสูงสุดที่อายุการบ่ม 60 วัน นั้นแสดงให้เห็นว่าข้อดีของการเติมผงยางক্রีမ်คือการลดปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านวัสดุ ซึ่งถ้าพิจารณาจากมาตรฐาน ASTM C129[1]ว่าด้วยอิฐที่ไม่รับแรง พบว่าค่าที่ทดสอบได้ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ดังนั้นอิฐดินเชิงประกอบผสมผงยางক্রีမ်ที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้สามารถใช้เป็นอิฐมวลเบาประหยัดพลังงานที่ใช้ในการก่อสร้างบ้านราคาประหยัดในท้องถิ่นชนบทได้

งานวิจัยชิ้นนี้ยังมีการศึกษาคุณสมบัติการส่งผ่านความร้อน โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ ทำการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากการทดสอบจริง อิฐดินเชิงประกอบที่ถูกทดสอบจะมีปริมาณผงยางที่แตกต่างกันคือร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตรซึ่งผลการเปรียบเทียบพบว่าค่าจากแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ให้ค่าที่สอดคล้องกับผลการทดสอบจริง โดยที่ผลการทดสอบจะให้ค่าต่ำกว่าผลการทดสอบจริงเล็กน้อย เนื่องจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นไม่ได้รวมฟองอากาศที่เกิดขึ้นขณะผสม ซึ่งฟองอากาศนี้สามารถลดค่าการส่งผ่านความร้อนได้อีกประการหนึ่ง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลการเปรียบเทียบ สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์สามารถใช้ในการทำนายคุณสมบัติการส่งผ่านความร้อนของอิฐเชิงประกอบได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ พร้อมกันนี้ทางคณะผู้วิจัยได้ดำเนินการถ่ายทอดงานวิจัยโดยจัดทำเป็นแบบจำลองของบ้านตัวอย่างซึ่งมีส่วนประกอบของอิฐมวลเบาเชิงประกอบได้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

Abstract

This work presents a study on the investigation of recycled waste tyre (crumb rubber) as aggregate in the combination of local soil-cement brick. The purpose is to develop a lightweight brick with low thermal conductivity that can produce as low cost materials in local area of Thailand. The different amount of crumb rubber particles at 0, 10, 15, 20, 25, 30, and 40% were replaced to local Ratchaburi soil by weight and then mixed with a constant of Portland cement content at 10%. The mechanical properties were studied and indicated that a significant reduction in sample unit weight, thereby resulting in a reduction of compressive strength and flexural strength. The results show that the presence of air voids and crumb rubber particles in the matrix can increase the water absorption but decrease the thermal conductivity. However, according to ASTM indicates that this hybrid material can be used as non-load bearing concrete masonry units (2.45 MPa) and is also suitable for construction as low cost and low energy consumption house in Thailand.

As widely known, the finite element method (FEM) is a tool used for finding accurate solutions of the heat transfer equation of materials including the composite bricks. In this paper an investigation of the heat transfer of a soil cement brick containing crumb rubber particles, is presented and compared to results of finite element analysis (FEA) simulation. To determine the effect of crumb rubber to the heat transfer behaviour of soil cement brick, different volume fractions are varied by 10, 20, 30 and 40%. It was reported that a modelling application reveals good correspondence with the experimental results.

กิตติกรรมประกาศ

ในการศึกษาครั้งนี้ต้องใช้เครื่องมือทางวิศวกรรมขั้นสูงและการศึกษาเพื่อเข้าใจในบริบทของผลิตภัณฑ์ใหม่นี้ค่อนข้างที่จะใช้ทรัพยากร ด้านกำลังคน สถานที่ เครื่องมือ ตลอดจนงบประมาณที่จำกัดจึงเป็นอุปสรรคที่ต้องฟันฝ่าเพื่อให้งานดำเนินไปอย่างสมดุษฎีภาพที่สุด ในกรอบที่จำกัดดังที่กล่าวมาก่อให้เกิดเป็นปัญหาและอุปสรรคต่อทางคณะผู้วิจัยเป็นอย่างมาก จึงขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.วันชัย ยอดสุดใจ อาจารย์ที่ปรึกษาฯกลุ่มวิจัย อาจารย์ ดร.วีรพล นามบุญเรือง ด้านการวิเคราะห์ผลการทดสอบทางวิศวกรรม อาจารย์ ดร.รัตนกร ระวังกุล ที่ตรวจความเรียบร้อยของข้อมูล และ ดร.ณัฐนันท์ สุขกมล ที่ให้ความกระจ่างด้านวิศวกรรมความร้อนและระบบการวิเคราะห์ด้วย FEM และสำนักงานงบประมาณที่เป็นผู้ให้ทุนวิจัยโดยผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ(วช.) ที่ทำให้การดำเนินงานนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ สุดท้ายนี้ขอขอบคุณคณาจารย์และนักศึกษาภาควิชาโยธาและสถาปัตยกรรม มรภ.หมู่บ้านจอมบึง และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้การสนับสนุนโครงการฯตลอดการดำเนินงานเป็นอย่างดีหากไม่มีบุคคลเหล่านี้งานวิจัยนี้คงมีอาจลุล่วงไปได้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประยูร ยงศ์อำนาจ
สาขาโยธาและสถาปัตยกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง
(ในฐานะตัวแทนคณะทีมงานวิจัยฯ)

สารบัญ

Contents

บทคัดย่อ	1
Abstract	2
กิตติกรรมประกาศ	3
สารบัญ	4
สารบัญรูปภาพ	7
สารบัญตาราง	11
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	11
บทที่ 1	12
บทนำ	12
1.1 คำนำ	12
1.2 วัตถุประสงค์	13
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	13
1.4 ระยะเวลาทำการวิจัย และแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย	14
RESEARCH SCHEDULE	15
บทที่ 2	16
การตรวจเอกสาร	16
2.1 ดิน	16
2.1.1 สมบัติทางกายภาพของดินและโครงสร้างของดิน	16
2.1.2 เนื้อดิน	16
2.1.3 อนุภาคของดิน	17
2.1.4 สมบัติบางประการของกลุ่มขนาดต่าง ๆ ของอนุภาคดิน	17
2.1.5 ประเภทของเนื้อดินโดยทั่ว ๆ ไป	18
2.1.6 การวิเคราะห์หาประเภทของเนื้อดิน	19
2.1.7 การใช้ไคอะแกรมสามเหลี่ยม	21
2.1.8 ความพรุนของดิน	22
2.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	22
2.2.1 คุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	22

2.3 ยางผง(Crumb rubber)	25
2.4 ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Method)	29
2.4.1 คำนียาม	29
2.4.2 การหาสมบัติเชิงกลของยาง (Material Properties)	31
2.5 รายงานการวิจัยทางด้านวิศวกรรมชิ้นส่วนประกอบ	31
บทที่ 3	34
วิธีดำเนินการวิจัย	34
3.1 ด้านวัสดุวิศวกรรมขั้นสูง (Advance Materials Engineering, AME)	35
3.1.1 ทดสอบคุณสมบัติด้านเคมีของดินท้องถิ่นราชบุรี โดยใช้มาตรฐานการทดสอบของสหรัฐอเมริกา (ASTM Standards) และ การทดสอบ-วิเคราะห์ ด้วยเครื่องมือขั้นสูงโดย XRF (X-Ray Fluorescence)	35
3.1.2 ทดสอบคุณสมบัติด้านกายภาพของดินท้องถิ่นราชบุรี โดยวิเคราะห์ทดสอบโดยการใช้ SEM (Scanning Electron Microscope)	35
3.1.3 ทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังอัด (Compressive strength)[27] และ กำลังดัด (Flexural strength)[28] ของอิฐดินซีเมนต์ผสมผงยางক্রัมป์เปรียบเทียบกับอิฐดินที่ไม่ผสมผงยางক্রัมป์ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, และ 60 วัน	35
3.1.4 ทดสอบหาอัตราการดูดซึมน้ำ (Water absorption), และ หน่วยน้ำหนัก (Unit weight) ของอิฐดินซีเมนต์ผสมผงยางรีเคลม	37
3.1.5 ทดสอบความสามารถในการนำความร้อน(thermal conductivity)[29]ของอิฐมวลเบาผสมผงยางক্রัมป์ที่ปริมาณต่างๆ โดยการทดสอบได้รับการอนุเคราะห์จากศูนย์วิจัยโลหะและวัสดุแห่งชาติ ทำการทดสอบ	37
3.1.6 หาอัตราส่วนที่เหมาะสม(Optimize),ของอิฐดินมวลเบาผสมผงยางক্রัมป์	37
3.1.7 ออกแบบและสร้างบ้านตัวอย่างสำหรับมอบให้ชุมชนเพื่อเป็นแนวทางการใช้เทคโนโลยีอย่างง่าย	37
3.2 การจำลองพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของอิฐดินซีเมนต์ผสมผงยางক্রัมป์โดยใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์และเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริง	38
3.3 แผนผังการดำเนินงานวิจัย	46
บทที่ 4	47
ผลและการวิจารณ์	47
4.1 การศึกษาคุณสมบัติทางเคมี (The study of chemical & physical properties)	47

4.1.1 คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของวัตถุดิบ (Chemical & physical properties of raw materials)	47
4.1.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์รูปร่างและขนาดอนุภาค (Shape and particle size analysis)	48
4.2 คุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ (Physical properties of products)	50
4.2.1 คุณสมบัติด้านหน่วยน้ำหนักของอิฐดินมวลเบาผสมผงยางรีเคลมที่ปริมาณส่วนผสมต่างๆ	50
4.2.2 คุณสมบัติด้านการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ของอิฐดินซีเมนต์ผสมผงยางครัมป์	53
4.3 คุณสมบัติทางกลศาสตร์ (Mechanical properties)	54
4.3.1 กำลังต้านแรงอัด (Compressive strength) ของอิฐดินซีเมนต์ ผสมผงยางรีเคลม	54
4.3.2 กำลังดัด (Flexural Strength on Modulus of Rupture) ของอิฐดินซีเมนต์ผสมผงยางรีเคลม	56
4.3.3 คุณสมบัติด้านการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของอิฐดินซีเมนต์ผสมผงยางครัมป์	58
4.4 ผลการจำลองพฤติกรรมโดยใช้ไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Analysis)	59
4.5 การวิเคราะห์ด้านราคา	71
บทที่ 5	73
สรุปผลการศึกษา	73
เอกสารอ้างอิง	74
ภาคผนวก	77

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1 แสดงพื้นที่ศึกษาและถ่ายทอดเทคโนโลยีงานวิจัย	14
รูปที่ 2 แสดงขนาดของอนุภาคทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว	18
รูปที่ 3 แสดงตารางมาตรฐานสำหรับใช้ประเมินประเภทของเนื้อดินที่มา: (บุญชุม เปียแดงและคณะ, 2526)	22
รูปที่ 4 แสดงยางรถยนต์ใช้แล้วก่อนทำการบดย่อย	26
รูปที่ 5 แสดงขั้นตอนการบดยางโดยวิธี Ambient grinding	27
รูปที่ 6 แสดงวิธีการบดโดยวิธี Cryogenic grinding	27
รูปที่ 7 พยางบดหลังจากผ่านกระบวนการย่อย	28
รูปที่ 8 (ก) การจำลองรูปร่างของล้อยางด้วยเอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยม (ข) การจำลองรูปร่างของล้อยางด้วยเอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า	29
รูปที่ 9 ชิ้นงานรูปดัมเบลล์สำหรับทำการวัดค่ามอดุลัสความยืดหยุ่นตามมาตรฐาน ASTM D-412-C (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)	31
รูปที่ 10 แสดงพยางค์ครี姆เบอร์ 6 ที่ใช้ในงานนี้	35
รูปที่ 11 แสดงการทดสอบหาค่ากำลังอัดของอิฐดินซีเมนต์	36
รูปที่ 12 แสดงการทดสอบหาค่ากำลังคัดของอิฐดินซีเมนต์	36
รูปที่ 13 เครื่องมือทดสอบการส่งผ่านความร้อนของอิฐดินผสมพยางค์ครี姆เบอร์	38
รูปที่ 14 แสดงขนาดและรูปร่างของแบบจำลองไฟในต้อลิเมนต์	39
รูปที่ 15 แสดงตัวอย่างการจำลองรูปร่างของวัสดุอิฐ โดยมีพยางค์บด (ทรงกลม) ปริมาณ volume fraction 20% บรรจุอยู่ข้างใน	40
รูปที่ 16 แสดงขั้นตอนการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุชนิดต่างๆลงในแบบจำลอง	41
รูปที่ 17 แสดงการกำหนดค่าทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณ ซึ่งในที่นี้คือการส่งผ่านความร้อน (Heat transfer)	42
รูปที่ 18 แสดงขั้นตอนการใส่แรงที่มีกระทำต่อวัสดุ ซึ่งจากภาพเป็นการใส่ความร้อน ณ ด้านหนึ่งของอิฐ	43
รูปที่ 19 แสดงการแบ่งแบบจำลองเป็นส่วนย่อย(mesh) เพื่อการคำนวณที่ถูกต้องแม่นยำ	44
รูปที่ 20 แสดงขั้นตอนการประมวลผลของไฟในต้อลิเมนต์และการตรวจสอบผลการดำเนินการ	45
รูปที่ 21 แผนงานการดำเนินงาน	46
รูปที่ 22 แสดงอนุภาคขยายของดินท้องถิ่นราชบุรี	49

รูปที่ 23 ภาพถ่ายอนุภาคขยายโดยใช้ Optical microscope ของอิฐมวลเบาผสมผงยางครัมป์ กำลังขยาย 50 เท่า	50
รูปที่ 24 ภาพถ่ายอนุภาคขยายโดยใช้ SEM ของอิฐมวลเบาผสมผงยางรีเคลม A คือผงยาง ส่วน B คือซีเมนต์ (กำลังขยาย 100 เท่า)	50
รูปที่ 25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยน้ำหนักและปริมาณการเพิ่มของผงยางครัมป์ ที่อายุการบ่ม 28 วัน	51
รูปที่ 26 แสดงค่าหน่วยน้ำหนักของอิฐดินซีเมนต์ผสมผงยางครัมป์ที่ปริมาณต่างๆ ที่อายุการบ่ม 3,7,14,28, และ 60 วัน	52
รูปที่ 27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption) และปริมาณการเพิ่มของผงยางครัมป์ ที่อายุการบ่ม 28 วัน	53
รูปที่ 28 แสดงค่าการดูดซึมน้ำ (water absorption) ของอิฐดินซีเมนต์ผสมผงยางครัมป์ที่ปริมาณต่างๆ ที่อายุการบ่ม 3,7,14,28, และ 60 วัน	54
รูปที่ 29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัด (Compressive strength) และปริมาณการเพิ่มของผงยางครัมป์ ที่อายุการบ่ม 28 วัน	55
รูปที่ 30 ค่ากำลังอัดของอิฐดินซีเมนต์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 3,7,14,28, และ 60	56
รูปที่ 31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดัด (Flexural strength) และปริมาณการเพิ่มของผงยางครัมป์ ที่อายุการบ่ม 28 วัน	57
รูปที่ 32 ค่ากำลังดัดของอิฐดินซีเมนต์ผสมผงยางครัมป์ ที่อายุการบ่ม 3,7,14,28, และ 60 วัน	58
รูปที่ 33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) และปริมาณการเพิ่มของผงยางครัมป์ ที่อายุการบ่ม 28 วัน	59
รูปที่ 34 ค่าการนำความร้อนของอิฐดินซีเมนต์ผสมผงยางครัมป์ ที่อายุการบ่ม 3,7,14,28, และ 60 วัน	59
รูปที่ 35 แสดงแบบจำลองที่ปริมาณยางผงที่ 0% โดยปริมาตร ที่เวลาการส่งผ่านความร้อน 0 วินาที	61
รูปที่ 36 แสดงแบบจำลองที่ปริมาณยางผงที่ 0% โดยปริมาตร ที่เวลาการส่งผ่านความร้อน 500 วินาที	61
รูปที่ 37 แสดงแบบจำลองที่ปริมาณยางผงที่ 0% โดยปริมาตร ที่เวลาการส่งผ่านความร้อน 1000 วินาที	62
รูปที่ 38 แสดงแบบจำลองที่ปริมาณยางผงที่ 0% โดยปริมาตร ที่เวลาการส่งผ่านความร้อน 1500 วินาที	62

รูปที่ 54 แสดงแบบจำลองที่ปริมาณยางผงที่ 40% โดยปริมาตร ที่เวลาการส่งผ่านความร้อน 1500 วินาที	70
รูปที่ 55 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นของอิฐดินผสมผงยาง ณ ปริมาณต่างๆ เปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์	71
ภาคผนวก 1 ตารางผลการทดสอบค่ากำลังอัด (Compressive strength) ของอิฐดินซีเมนต์ผสมผงยางक्रम์ ที่ปริมาณต่างๆ	77
ภาคผนวก 2 ตารางผลการทดสอบค่ากำลังคั้ด (Modulus of rupture) ของอิฐดินซีเมนต์ผสมผงยางक्रम์ ที่ปริมาณต่างๆ	77
ภาคผนวก 3 ตารางผลการทดสอบค่าการดูดซึ้มน้ำ (Water absorption) ของอิฐดินซีเมนต์ผสมผงยางक्रम์ ที่ปริมาณต่างๆ	78
ภาคผนวก 4 ตารางผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนัก (Unit weight) ของอิฐดินซีเมนต์ผสมผงยางक्रम์ ที่ปริมาณต่างๆ	78
ภาคผนวก 5 ตารางผลการทดสอบค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของอิฐดินซีเมนต์ผสมผงยางक्रम์ ที่ปริมาณต่างๆ	79
ภาคผนวก 6 ภาพแสดงขั้นตอนการาค่าอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุผงละเอียด (water powder ratio, w/p)	79
ภาคผนวก 7 ภาพการถ่ายทอดเทคโน โลยีให้แกชุมชน	80
ภาคผนวก 8 แสดงตัวอย่าง input file ของ ปริมาณยางक्रम์ 20 % โดยปริมาตร ที่เวลา 1000 วินาที	80

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 แสดงระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย	15
ตารางที่ 2 เกณฑ์ในการจัดกลุ่มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคดิน	17
ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	23
ตารางที่ 4 คุณสมบัติของสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	24
ตารางที่ 5 ข้อมูลการนำยางผงไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆของประเทศไทยอเมริกา	28
ตารางที่ 6 แสดงผลการทดสอบทางด้านเคมีของดินท้องถิ่นราชบุรี	48

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

LWIB	=	Light Weight Insulation Bricks
CRB	=	Crumb rubber brick
Compressive Strength	=	กำลังอัด
Flexural Strength	=	กำลังดัด
Soil Cement Bricks	=	อิฐดินซีเมนต์
Pozzolanic Reaction	=	ปฏิกิริยาปอซโซลาน
Hydration Reaction	=	ปฏิกิริยาไฮเดรชัน
XRF	=	X-Ray Fluorescence
FEA	=	Finite element analysis
FEM	=	Finite element method

บทที่ 1

บทนำ

1.1 คำนำ

อิฐดินเป็นวัสดุที่ง่ายต่อการผลิตและใช้พลังงานที่น้อย และสามารถนำวัสดุท้องถิ่นจำพวกดินที่มีคุณสมบัติเฉพาะพื้นที่ ที่มีราคาถูกมาเป็นส่วนประกอบหลักในการผลิตเพื่อใช้ประโยชน์ในท้องถิ่นกันมานาน เนื่องจากปัจจุบันการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของการใช้รถยนต์ ผลที่ตามมาคือการผลิตยางรถยนต์ที่เพิ่มขึ้น ปัญหาที่ตามมาคือยางที่ใช้แล้ว ถึงแม้จะมีการนำยางที่เหลือใช้ไปใช้ในด้านต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น การทำปะการังเทียม การทำถังขยะ หรือการนำโครงยางเก่าไปหล่อดอกลายใหม่ แต่อย่างไรก็ตามปริมาณของยางที่เหลือยังคงมีแนวโน้มในปริมาณที่ค่อนข้างสูง ซึ่งในต่างประเทศมีผู้ศึกษาเกี่ยวกับการนำยางมาผสมกับคอนกรีตและศึกษาคุณสมบัติในลักษณะต่างๆ [2-26]

อีกทั้งด้านสิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่ายางรถยนต์ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยวิธีการทางธรรมชาติ ดังนั้นโครงการนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำเศษยางรถยนต์บดแยกเส้นใยเหล็ก (Crumb Rubber, CR) มาผสมกับดินท้องถิ่นที่มีคุณสมบัติเฉพาะพื้นที่ เพื่อพัฒนาและออกแบบเป็นอิฐดินฉนวนมวลเบา (Light Weight Insulation Bricks, LWIB) ทั้งนี้คุณสมบัติของยางคือมีน้ำหนักเบา และมีความสามารถนำความร้อนต่ำและสามารถดูดซับพลังงานเสียงได้ดี ซึ่งจะสามารถป้องกันความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่จะเข้าตัวบ้านได้เพิ่มมากขึ้น และเป็นการลดค่าใช้จ่ายจากการใช้เครื่องทำความเย็นได้เพิ่มมากขึ้นอีกด้วย

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเน้นในการหาส่วนผสมที่เหมาะสมของยางรีเคลมและดินท้องถิ่น โดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการจนมั่นใจในคุณสมบัติต่างๆ อีกทั้งในการวิจัยครั้งนี้จะใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) ซึ่งเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูงร่วมวิเคราะห์และออกแบบผลิตภัณฑ์ให้มีคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมและคุณภาพตามมาตรฐานอุตสาหกรรม และที่สำคัญผลิตภัณฑ์จะต้องมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำ (Low cost scale) อีกทั้งชุมชนท้องถิ่นยังสามารถผลิตและสามารถสร้างที่อยู่อาศัยได้ด้วยตนเองโดยใช้นวัตกรรมที่มีเทคโนโลยีที่ง่ายและไม่ซับซ้อน ท้ายที่สุดชุมชนท้องถิ่นเองก็จะเข้มแข็งพึ่งตนเองได้ ด้วยการใช้นวัตกรรมที่ง่ายนี้ยังจะส่งผลประโยชน์ทางอ้อม กล่าวคือความสมัคร-สมาน สามัคคีในหมู่ชุมชนเองในการที่จะร่วมแรง-

ร่วมใจ ช่วยกันในห้องฉันนั่นเอง ดังปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียงขององค์พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว ประการหนึ่งที่ทรงพระราชดำรัสว่า “ ชุมชนต้องพึ่งตนเองได้ ”

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1. เพื่อทดสอบคุณสมบัติด้านเคมีและฟิสิกส์ของดินท้องถิ่นราชบุรี, ผงยาง รีเกลม และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1.

1.2.2. ทดสอบคุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties) ของอิฐดินฉนวนมวลเบา(Light Weight Insulation Bricks, LWIB)

1.2.3. ทดสอบการนำความร้อน(Thermal Conductivity) และใช้ Finite Element Method, FEM ร่วมวิเคราะห์เพื่อนำไปสู่การออกแบบคุณสมบัติของอิฐดินฉนวนมวลเบา (Light Weight Insulation Bricks, LWIB)

1.2.4. หาอัตราส่วนที่เหมาะสม(Optimization of Proportion) ของอิฐดินฉนวนมวลเบา (Light Weight Insulation Bricks, LWIB) เพื่อนำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์

1.2.5. เพื่อออกแบบบ้านชุมชนต้นแบบด้วยอิฐดินฉนวนมวลเบา(Light Weight Insulation Bricks, LWIB) สำหรับมอบให้ชุมชนเพื่อเป็นแนวทางการใช้เทคโนโลยีอย่างง่าย

1.2.6. วิเคราะห์และเปรียบเทียบต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ของการสร้างด้วยอิฐดินฉนวนมวลเบา(Light Weight Insulation Bricks, LWIB) กับที่อยู่อาศัยที่สร้างด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปในท้องถิ่น

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1. ดินท้องถิ่นราชบุรีจากแหล่งท่าหลวง อำเภอปากท่อ จังหวัดราชบุรี

2. การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมจะใช้มาตรฐานการทดสอบของอเมริกา(ASTM)เพื่อการวิเคราะห์และทดสอบ

1.3.3. ขนาดของอิฐดินฉนวนมวลเบา(Light Weight Insulation Bricks, LWIB) จะหล่อด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกส์ขนาดกว้าง 125 มิลลิเมตร ยาว 250 มิลลิเมตร และหนา 100 มิลลิเมตร

1.3.4. คุณสมบัติด้านกำลังอัด (Compressive strength) กำลังดัด (Flexural strength) ของอิฐดินฉนวนมวลเบา(Light Weight Insulation Bricks, LWIB) ที่อายุ 3, 7, 14, 28, และ 60 วัน

1.3.5. ทดสอบหาอัตราการดูดซึมน้ำ (Water absorption), และ หน่วยน้ำหนัก(Unit weight) ของอิฐดินฉนวนมวลเบา (Light Weight Insulation Bricks, LWIB) ที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน



รูปที่ 1. แสดงพื้นที่ศึกษาและถ่ายทอดเทคโนโลยีงานวิจัย

1.4 ระยะเวลาทำการวิจัย และแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย

ระยะเวลาในการวิจัยสามารถนำเสนอในรูปแบบ Research Schedule สถานที่ทำการทดสอบ-วิจัย คือห้องถื่น จ.ราชบุรี และการทดสอบวัสดุจากภาควิชาโยธาและสถาปัตยกรรม มรภ.หมู่บ้านจอมบึง ตำบลจอมบึง อำเภोजอมบึง จังหวัดราชบุรี หน่วยงานสนับสนุนด้านการทดสอบทางวิศวกรรม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน, วิทยาลัยพลังงานสิ่งแวดล้อมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ศาลายา- นครปฐม และ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ด้านการทดสอบคุณสมบัติวิศวกรรมวัสดุขั้นสูงด้วย X-Ray Fluorescence, (XRF) การทดสอบด้านนำความร้อน และนำมาวิเคราะห์ร่วมกับ Finite Element Method, FEM สำหรับเพื่อการออกแบบที่ดีที่สุดของอิฐฉนวนมวลเบา

RESEARCH SCHEDULE

ตารางที่1. แสดงระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย

No.	Description	Year 2012			Year 2013									Duration (Month)
		10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1.Engineering														
1.1	- Raw materials and equipment preparation	↔												1
1.2	-Properties test of raw materials	↔												2
1.3	-Trials mixes proportion & cure			↔										4
1.4	-Result and discussion						↔							1
1.5	-Conclusions						↔							1
2.Construction Site & Technology														
Transfer To Local Area														
2.1	- Demo Construction Site						↔							3
2.2	-Technology Transfer									↔				1
2.3	-Result and discussion										↔			1
2.4	-Final Conclusions											↔		1

บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุเชิงประกอบของอิฐระหว่างซีเมนต์ดินท้องถิ่นราชบุรี และผงยางรีไซเคิลบด ดังนั้นคุณสมบัติทั่วไปของวัสดุทั้ง 3 ชนิดจะถูกแสดงดังต่อไปนี้

2.1 ดิน

2.1.1 สมบัติทางกายภาพของดินและโครงสร้างของดิน

สมบัติทางกายภาพของดิน ได้แก่ เนื้อดิน โครงสร้างของดิน ความหนาแน่น ความพรุน อุณหภูมิ และสีของดิน เป็นต้น ซึ่งเป็นปัจจัยร่วมที่สำคัญกับธาตุอาหารในดินเพื่อเพิ่มผลผลิตของพืชมนุษย์รู้จักปรับปรุงเปลี่ยนแปลงสภาวะที่ไม่เหมาะสมทางกายภาพให้สามารถเพิ่มผลผลิตมานานแล้วเช่นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดิน โดยวิธีการไถพรวนทำการปรับปรุงดินเหนียวให้สามารถถ่ายเทอากาศและระบายน้ำได้ดีด้วยกลบในทางวิศวกรรมมนุษย์ได้อาศัยสมบัติทางกายภาพมาใช้ในการสร้างถนน หรือสร้างอาคารโดยการเลือกดินที่เหมาะสม ซึ่งใช้ดินที่ไม่หดรัดหรือขยายตัวมากเกินไปถ้าจำเป็นต้องใช้ต้องมีการตอกเสาเข็มเพื่อป้องกันการเสียหาย

2.1.2 เนื้อดิน

คำว่าเนื้อดิน หมายถึง ความหยาบ ความละเอียดของดินในส่วนของเนื้อดินนั้นเราพิจารณาเฉพาะส่วนที่เป็นอนินทรีย์สารเท่านั้นซึ่งมีประมาณไม่เกิน 96 เปอร์เซ็นต์ขององค์ประกอบที่เป็นของแข็งส่วนที่ควบคุมเนื้อดินก็คือสัดส่วนระหว่างอนุภาคทราย (sand) ดินทรายแป้ง (silt) และ ดินเหนียว (clay) นิยมพิจารณาอนุภาคอนินทรีย์สารที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 2 มิลลิเมตรเนื้อดินไม่มีผลโดยตรงต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืชเนื้อดินมีผลทางอ้อมเนื่องจากเป็นตัวควบคุมสมบัติอื่นๆที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช เช่นการดูดน้ำ การดูดซับไออนและการแลกเปลี่ยนก๊าซ เป็นต้น

2.1.3 อนุภาคของดิน

อนุภาคของดิน คือ ชั้นส่วนของหินและแร่ ที่สลายตัวหรือผุกร่อนเป็นชั้นเล็กชั้นน้อยทั้งทางด้านกายภาพและทางด้านเคมี พวกที่ขนาดเล็กโดยวัดเส้นผ่านศูนย์กลางสมมูลไม่เกิน 2 มิลลิเมตร เรียกว่า ดินผง (fine earth) อนุภาคของดินแบ่งเป็นกลุ่มได้ดังนี้

1. กลุ่มขนาดทราย (sand separate)
2. กลุ่มขนาดทรายแป้ง (silt separate)
3. กลุ่มขนาดดินเหนียว (clay separate)

เกณฑ์ในการจัดกลุ่มขนาดของอนุภาคดินที่นิยมแพร่หลายมีอยู่ด้วยกัน 3 ระบบ คือระบบของสหรัฐอเมริกา ระบบสากล และระบบของยุโรป มีรายละเอียดดังแสดงไว้ใน ตารางที่ 1.

ตารางที่ 2. เกณฑ์ในการจัดกลุ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคดิน

อนุภาคดิน	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคดินวัดเป็นมิลลิเมตร		
	ระบบสหรัฐอเมริกา	ระบบสากล	ระบบใหม่ของยุโรป
ดินทรายหยาบมาก (very coarse sand)	1.00 – 2.00	-	1.00 - 2.00
ดินทรายหยาบ (coarse sand)	0.50 – 1.00	0.20 – 2.00	0.50 - 1.00
ดินทราย (medium sand)	0.25 - 0.50	-	0.20 - 0.50
ดินทรายละเอียด (fine sand)	0.10 - 0.25	0.02 – 0.20	0.10 - 0.20
ดินทรายละเอียดมาก (very fine sand)	0.05 - 0.10	-	0.05 - 0.10
ดินทรายแป้งหยาบ (coarse silt)	-	-	0.02 - 0.05
ดินทรายแป้ง (silt)	0.002 - 0.05	0.002 - 0.02	-
ดินทรายแป้งละเอียด (fine silt)	-	-	0.002 - 0.02
ดินเหนียว (Clay)	เล็กกว่า 0.002	เล็กกว่า 0.002	เล็กกว่า 0.002

ที่มา : (บุญชุม เปียแดง และคณะ, 2526)

2.1.4 สมบัติบางประการของกลุ่มขนาดต่าง ๆ ของอนุภาคดิน

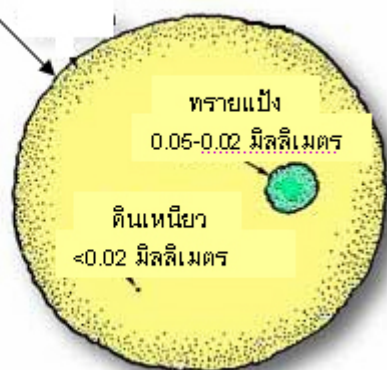
ดินผงจะมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กและใหญ่แตกต่างกันออกไปตั้งแต่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าจนถึงต้องใช้กล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กทรอนิกส์ส่องดูจึงจะเห็นได้จึงมีการแบ่งขนาดของอนุภาคดินออกเป็นกลุ่มขนาดต่างๆ ได้ 3 กลุ่มดังต่อไปนี้คือ

2.1.4.1 กลุ่มขนาดทราย (sand separate) รูปที่ 2.สามารถมองเห็นด้วยตาอนุภาคไม่เกาะยึดกับอนุภาคอื่น ๆ สากมือ ไม่เหนียว ปั้นเป็นรูปต่าง ๆ ไม่ได้และไม่พองตัวหรือหดตัว ประกอบด้วยแร่ ควอตซ์ และ เฟลด์สปาร์เป็นส่วนใหญ่

2.1.4.2 กลุ่มขนาดทรายแป้ง (silt separate) รูปที่ 2.สามารถมองเห็นด้วยกล้องจุลทรรศน์ธรรมดา มีลักษณะอ่อนนุ่มคล้ายแป้ง ผัดน้ำมีความเหนียวเล็กน้อย ยึดติดกับอนุภาคอื่นได้เล็กน้อย ปั้นเป็นรูปต่าง ๆ ได้ซึ่งประกอบด้วยแร่ ควอตซ์ และ เฟลด์สปาร์ เป็นส่วนใหญ่และมีแร่ดินเหนียวปริมาณเล็กน้อย

2.1.4.3 กลุ่มขนาดดินเหนียว (clay separate) รูปที่ 2.สามารถมองเห็นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน มีลักษณะเหนียวเหนอะหนะสามารถปั้นรูปต่าง ๆ ได้ดีเมื่อชุ่ม แข็งเมื่อแห้งพองตัวและหดตัวได้ประกอบด้วยแร่ดินเหนียวเป็นส่วนใหญ่

ทราย 2-0.05 มิลลิเมตร



รูปที่ 2. แสดงขนาดของอนุภาคทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว

2.1.5 ประเภทของเนื้อดินโดยทั่ว ๆ ไป

2.1.5.1 ประเภทของเนื้อดินโดยคิดจากเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ ทราย ทรายแป้งและดินเหนียวซึ่งเป็นส่วนประกอบของเนื้อดินมารวมกันสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้คือ

2.1.5.2 ดินเนื้อหยาบ (coarse textured soils) เป็นดินที่มีปริมาณอนุภาคทรายมากกว่าอนุภาคทรายแป้งและดินเหนียว ดินชนิดนี้ไถพรวนได้ง่าย ไม่เหนียวเหนอะหนะและไม่จับกันเป็นก้อน เรียกดินชนิดนี้ว่าดินเบา (light soil) เนื้อดินในกลุ่มนี้ได้แก่ ทราย และทรายร่วน

2.1.5.3 ดินเนื้อปานกลาง (medium - texture soils) เป็นดินที่มีปริมาณอนุภาคทราย ทรายแป้งและดินเหนียวไม่แตกต่างกันมากนัก ดินที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ได้แก่ ดินร่วนปนทรายดินร่วน ดิน

ร่วนปนดินทรายแป้ง ดินร่วนเหนียว ดินร่วนปนดินทรายแป้ง ดินร่วนปนดินทรายแป้ง และดินทรายแป้ง

1.1.5.4 ดินเนื้อละเอียด (fine - texture soils) หรือดินเหนียวเป็นดินที่มีปริมาณอนุภาคดินเหนียวมากกว่าอนุภาคทรายและดินทรายแป้งมีความเหนียวมากเมื่อได้รับความชื้นเนื้อดินละเอียดปกติจับกันเป็นก้อน เมื่อแห้งจะแข็ง เวลาไถพรวนต้องใช้แรงมากเราเรียกดินชนิดนี้ว่าดินหนัก (heavy soil) อยู่ในกลุ่มนี้ได้แก่ดินเหนียวปนทราย ดินเหนียวปนดินทรายแป้ง และดินเหนียว

2.1.6 การวิเคราะห์หาประเภทของเนื้อดิน

การวิเคราะห์เพื่อใช้หาประเภทของเนื้อดิน สามารถทำได้ 2 วิธี คือวิธีสัมผัส และวิธีวิเคราะห์เชิงกลวิธีสัมผัสนิยมใช้ในภาคสนามเนื่องจากมีความสะดวกในการประเมิน แต่ต้องอาศัยความชำนาญโดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

การใช้ความรู้สึกบอกลักษณะของเนื้อดินโดยการสัมผัสผู้ที่สามารถจะบอกได้อย่างถูกต้อง ผู้บอกรู้ต้องอาศัยประสบการณ์อย่างมากเพราะเมื่ออยู่ใกล้ช่วงเปลี่ยนแปลงของชั้นเนื้อดินมักจะผิดพลาดได้ง่ายเอิบเขียวรื่นรมย์ (2526) สรุปการบอกลักษณะของเนื้อดินโดยวิธีสัมผัสง่าย ๆ ดังต่อไปนี้

2.1.61. ทราย (sand) เมื่อสัมผัสจะรู้สึกมือมากเวลาสังเกตจะเห็นว่าไม่เกาะติดกันจะเห็นอยู่เป็นเม็ด ๆ เมื่อแห้งถ้าเป็นก้อนพอจับขึ้นมาจะแตกออกจากกัน ถ้าดินชื้นใส่ลงในฝ่ามือและกำให้แน่นเสร็จแล้วปล่อยมือออกดินจะแตกออกจากกันไม่จับกันเป็นก้อน หรือจับก็หลวมมากเนื้อดินลักษณะนี้ไม่ค่อยพบมากนัก

2.1.6.2 ทรายปนดินร่วน (loamy sand) สัมผัสจะรู้สึกมือเช่นเดียวกับทรายแต่น้อยกว่าเมื่อทำให้ชื้นแล้วใส่ลงในฝ่ามือเสร็จแล้วกำให้แน่นเมื่อปล่อยมือออกดินจะคงสภาพเป็นก้อนหลวมๆ แต่พอสัมผัสจะแตกออกจากกัน

2.1.6.3 ดินร่วนปนทราย (sandy loam) เมื่อจับดูยังรู้สึกมือแต่มีความนุ่มกว่าทรายปนดินร่วนดินเมื่อแห้งจะจับกันเป็นก้อน ๆ แต่พอใช้แรงกดเบา ๆ จะแตกออกจากกันเมื่อทำให้ดินชื้นแล้วใส่ลงในฝ่ามือ แล้วกำให้แน่น เสร็จแล้วปล่อยมือดินจะยังคงสภาพเป็นก้อนอยู่หรือถ้าใช้หัวแม่มือและนิ้วชี้กดลงบนดินชื้นจะเกิดเป็นแผ่นแต่พอขยับมือเล็กน้อยก็จะแยกออกจากกัน

2.1.6.4 ดินร่วน (loam) เมื่อสัมผัสดูจะดินชื้นจะนุ่มมือแต่ยังรู้สึกมืออยู่บ้างเล็กน้อยเป็นลักษณะของทรายละเอียดเมื่อแห้งจะจับกันเป็นก้อนแข็งพอประมาณต้องใช้แรงกดมากขึ้นจึงจะทำให้ดินแตกออกจากกันหรือถ้าทำให้ดินชื้นเมื่อใส่ลงในฝ่ามือกำให้แน่นแล้วปล่อยมือดินจะจับกันเป็นก้อนไม่แตกออกจากกัน

2.1.6.5 ดินร่วนปนทรายแป้ง (silt loam) เมื่อสัมผัสผิวดินชั้นจะอ่อนนุ่มมือและลื่น คล้ายกับแป้งดินสอพองเวลาแห้งจะจับกันเป็นก้อนเวลาจับขึ้นมาจะไม่แตกออกจากกันจะต้องใช้แรงบีบหรือกดค่อนข้างมากจึงจะแตกเวลาดินเปียกหรือชื้น พอจะทำให้เป็นแผ่น ๆ ได้โดยใช้หัวแม่มือกับนิ้วชี้ แต่จะแตกออกจากกันได้ง่ายมาก

2.1.6.6 ดินร่วนเหนียว (clay loam) เมื่อแห้งจะแตกออกเป็นก้อนแข็งเมื่อดินชื้นหรือเปียก จะทำให้เป็นแผ่นบาง ๆ ได้แต่เมื่อเวลาจับปลายข้างใดข้างหนึ่งไว้มันจะหักออกจากกันได้ง่ายหรือสามารถจะปั้นเป็นลูกกระสุนได้เวลาลงให้เป็นก้อนจะไม่ค่อยแน่นนักไม่สากมือ

2.1.6.7 ดินร่วนเหนียวปนทราย (sandy clay loam) เมื่อแห้งจะแตกออกเป็นก้อนแข็ง เช่นเดียวกับพวกดินร่วนเหนียวแต่เมื่อชื้นสัมผัสจะรู้สึกเหนียวและสากมือ และทำให้เป็นแผ่นบาง ๆ ได้สามารถปั้นให้เป็นลูกกลม ๆ

2.1.6.8 ดินเหนียวปนทราย (sandy loam) เมื่อแห้งจะแตกออกเป็นก้อนแข็งมากเมื่อเปียกหรือชื้นจะทำให้เป็นแผ่นบาง ๆ ได้จะเหนียวและสากมือดินแผ่นบาง ๆ ที่ทำขึ้นเมื่อเวลาจับปลายข้างใดข้างหนึ่งยกขึ้นจะไม่หักออกจากกันและสามารถจะคลึงให้เป็นก้อนกลม ๆ คล้ายลูกกระสุนได้ง่ายและแน่น

2.1.6.9 ดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง (silty clay loam) เมื่อสัมผัสผิวดินชั้นจะมีลักษณะคล้ายกับพวกดินร่วนเหนียวแต่มีความรู้สึกว่ามันนุ่มมือ และลื่นมือกว่าพวกดินร่วนเหนียว ทำให้เป็นแผ่นบาง ๆ ได้เช่นเดียวกัน และเมื่อแห้งจะแตกออกเป็นก้อนแข็ง

2.1.6.10 ดินเหนียวปนทรายแป้ง (silty clay) เมื่อแห้งจะแตกออกเป็นก้อนแข็งมากเมื่อเปียกจะเหนียวจัด แต่เมื่อสัมผัสจะรู้สึกนุ่มมือ สามารถทำให้เป็นแผ่นบาง ๆ ได้ และไม่หักออกจากกันเมื่อจับปลายข้างใดข้างหนึ่งชูขึ้น

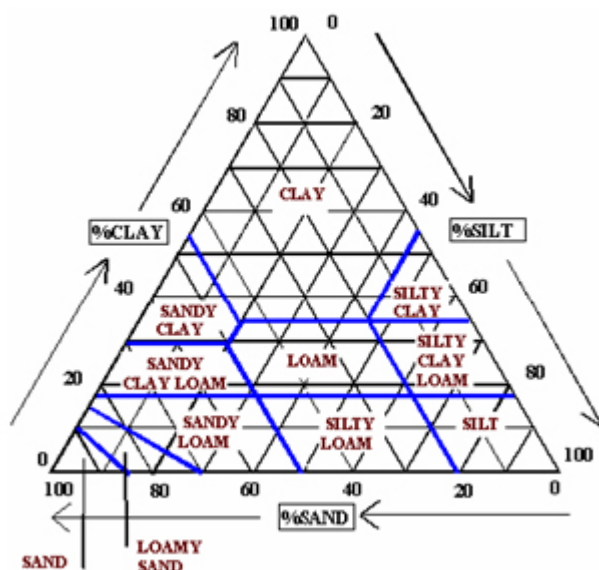
2.1.6.11 ดินเหนียว (clay) เมื่อแห้งจะแตกออกเป็นก้อนแข็งมากจะยึดหยุ่นและเหนียวมากเมื่อเปียกเมื่อดินชื้นเวลาบีบด้วยหัวแม่มือกับนิ้วชี้ จะทำให้เป็นแผ่นบาง ๆ และยาวได้และไม่หักออกจากกัน สามารถจะปั้นให้เป็นก้อนกลม ๆ และแน่นได้ง่ายเมื่อดินชื้นสำหรับชั้นของเนื้อดินที่เรียกว่าทรายแป้ง นั้นจะลื่นและนุ่มมือ แต่จะไม่เหนียวนัก มักจะไม่พบในดินตามปกติ โดยกล่าวทั่วไปการวิเคราะห์เชิงกล (mechanical analysis) และ วิธีการแจกแจงขนาดของอนุภาคเป็นวิธีวิเคราะห์ที่ใช้อุปกรณ์และสารเคมี สามารถแยกอนุภาคทราย ทรายแป้งและดินเหนียว ได้อย่างถูกต้องโดยอาศัยหลักการว่าวัตถุที่มีขนาดแตกต่างกันจะตกตะกอนที่เวลาต่างกันสามารถตรวจสอบเนื้อดินได้โดยอาศัยไดอะแกรมสามเหลี่ยม การวิเคราะห์เชิงกลกล่าวคือ แยกอินทรีย์สารจากส่วนอื่น ๆ โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำให้อนุภาคอินทรีย์ทุกอนุภาคให้อยู่ในสภาพเดี่ยวๆ (dispersing agent) โดยใช้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือแคลกอน (calgon) แยกส่วนดินผง ขนาดใหญ่กว่าขนาด

2 มิลลิเมตรออกไปโดยใช้วิธีร่อนด้วยตะแกรงที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร หาปริมาณอนุภาคในกลุ่มขนาดต่างๆในดินผงซึ่งทำได้ 2 วิธีคือโดยวิธีร่อนด้วยตะแกรงและวิธีการตกตะกอนซึ่งวิธีการหาปริมาณของอนุภาคในกลุ่มขนาดต่างๆโดยวิธีตกตะกอน แบ่งออกเป็น 3 วิธีได้แก่ วิธีไปเปต (pipette method) วิธีไฮโดรมิเตอร์ (hydrometer method) และวิธีแบ่งส่วนสารแขวนลอย (decapitation method)

ในห้องปฏิบัติการของประเทศไทยนิยมใช้วิธีไฮโดรมิเตอร์ (hydrometer method) ซึ่งมีขั้นตอนทำดังต่อไปนี้โดยนำตัวอย่างดินมาทำจัตดินทรียวัตถุ ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ร่อนดินในน้ำผ่านตะแกรง 2 มิลลิเมตรล้างดินด้วยน้ำทำให้ดินแห้ง ซึ่งตัวอย่างดินที่ได้แล้วนำไปทำเป็นสารแขวนลอยในน้ำด้วยการใส่สารส่งเสริมการกระจายของอนุภาคดิน (dispersion agent) เช่น สารละลายแคลกอน (calgon solution) 5 เปอร์เซ็นต์ปั่นสารแขวนลอยด้วยเครื่องปั่น ถ้วยของผสมลงใน กระบอกตวงแบบตกตะกอน (sedimentation cylinder) ให้หมดแล้วหย่อนไฮโดรมิเตอร์ ลงไปโดยตั้งเวลาอ่านที่ 40 วินาที และ 2 ชั่วโมง อ่านอุณหภูมิ ค่าที่อ่านได้ที่ 40 วินาทีเป็นปริมาณของกลุ่มทรายแป้ง และดินเหนียว และ แคลกอน รวมกัน ส่วน 2 ชั่วโมงเป็นปริมาณของกลุ่มขนาดของดินเหนียวและแคลกอน นำเอาผลการทดลองไปหาเปอร์เซ็นต์ของ ทราย ทรายแป้งและดินเหนียวจากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปหาประเภทของเนื้อดินโดยอาศัยไคอะแกรมสามเหลี่ยม

2.1.7 การใช้ไคอะแกรมสามเหลี่ยม

ไคอะแกรมสามเหลี่ยมเป็นสามเหลี่ยมด้านเท่าแต่ละด้านแบ่งออกเป็นหน่วยร้อยละของแต่ละกลุ่มขนาดดินเหนียว ดินทรายแป้ง และดินทราย เมื่อหาเปอร์เซ็นต์ ดินเหนียว ดินทรายแป้ง และ ทรายได้จากวิธีไฮโดรมิเตอร์แล้วให้นำมาลากเส้นทั้ง 3 ในไคอะแกรมสามเหลี่ยมตัดกันที่บริเวณใดให้เรียกว่าดินประเภทนั้นรูปที่ 3. การใช้ไคอะแกรมสามเหลี่ยมโดยนำเอาดินที่จะศึกษามาหาเปอร์เซ็นต์ ดินเหนียวได้ 70 เปอร์เซ็นต์ ดินทรายแป้งได้ 20 เปอร์เซ็นต์ และ ดินทรายได้ 10 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำเอา 3 เส้นมาลากไปพบกันในไคอะแกรมสามเหลี่ยมจะตกอยู่ในส่วนที่เรียกว่าดินเหนียวสรุปได้ว่าดินที่ศึกษาเป็นดินประเภท ดินเหนียว เป็นต้น



รูปที่ 3. แสดงตารางมาตรฐานสำหรับใช้ประเมินประเภทของเนื้อดิน

2.1.8. ความพรุนของดิน

ความพรุนของดิน คือช่องว่างในดิน ช่องว่างในดินประกอบด้วยช่องว่างขนาดใหญ่ (macropore) น้ำและอากาศสามารถเคลื่อนที่ได้ดี และช่องว่างขนาดเล็ก (micropore) ซึ่งเป็นส่วนที่เก็บความชื้นไว้ น้ำจะไหลผ่านได้ยากในดินประเภทดินทรายซึ่งเป็นเนื้อดินหยาบ จะมีช่องว่างขนาดใหญ่มีจำนวนมากโดยมีช่องว่างอยู่ระหว่าง 35 – 50 เปอร์เซ็นต์ ส่วนดินเหนียวซึ่งมีเนื้อดินละเอียดโดยมีช่องว่างขนาดเล็กอยู่เป็นจำนวนมากซึ่งมีช่องว่างอยู่ระหว่าง 40 -60 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนของดินที่อัดตัวแน่นจะมีช่องว่างทั้งหมดอยู่เพียง 25 – 30 เปอร์เซ็นต์

2.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2.2.1 คุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2.2.1.1 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบออกไซด์หลัก (Major Oxide) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกา (SiO₂) อลูมินา (Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) ออกไซด์ทั้ง 4 นี้รวมกันได้ร้อยละกว่า 90 ของปูนซีเมนต์ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์รอง (Minor Oxide) ซึ่งได้แก่แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไล (Na₂O และ K₂O) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) และมีส่วนประกอบของออกไซด์อื่นอยู่บ้าง เช่น ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO₂) และ

ฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (P_2O_5) นอกจากนี้ยังมีสิ่งแปลกปลอมและส่วนประกอบอื่นซึ่งจะจัดอยู่ในรูปของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss On Ignition) และกากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Insoluble Residue) ออกไซด์เหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันและรวมตัวกันอยู่ในรูปของสารประกอบที่สำคัญมี 4 อย่างดังนี้

- ก. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate) องค์ประกอบทางเคมีคือ $3CaO \cdot SiO_2$, (C_3S)
- ข. ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate) องค์ประกอบทางเคมีคือ $2CaO \cdot SiO_2$, (C_2S)
- ค. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate) องค์ประกอบทางเคมีคือ $3CaO \cdot Al_2O_3$, (C_3A)
- ง. เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite) องค์ประกอบทางเคมีคือ $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$, (C_4AF)

ตารางที่ 3. องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

องค์ประกอบทางเคมี	สัญลักษณ์	ร้อยละโดยน้ำหนัก
CaO	C	60 - 67
SiO ₂	S	17 - 25
Al ₂ O ₃	A	3 - 8
Fe ₂ O ₃	F	0.5 - 6
MgO	M	0.1 - 4
Na ₂ O	N	0.1 - 1.8
K ₂ O	K	0.1 - 1.8
SO ₃	S ⁻	0.5 - 3.
สารประกอบอื่นๆ	-	0.5 - 3.
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา	LOI	0.1 - 3

ที่มา: (ชลประทานซีเมนต์, 2538)

2.2.1.2 คุณสมบัติของสารประกอบหลัก

สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์คือ C_3S , C_2S , C_3A และ C_4AF เนื่องจากมีปริมาณมากถึงร้อยละ 90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติและคุณภาพของปูนซีเมนต์ ดังแสดงใน ตารางที่ 3.

ตารางที่ 4. คุณสมบัติของสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

คุณสมบัติ	สารประกอบ			
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
อัตราการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน	เร็ว (ชม.)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วมาก(นาที)
การพัฒนากำลัง	เร็ว (วัน)	ช้า (สัปดาห์)	เร็วมาก(วัน)	เร็วมาก(1วัน)
กำลังประลัย	สูง	สูง	ต่ำ	ต่ำ
ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน	ปานกลาง	ต่ำ	สูง	ปานกลาง

ที่มา: ชลประทานซีเมนต์ (2538)

2.2.1.2 ไตรแคลเซียมอลูมิเนต C_3A

มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 7 ถึง 15 ลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยม มีสีเทาอ่อน ทำปฏิกิริยากับน้ำมีความรุนแรงมากและทำให้เฟสก่อตัวทันทีที่ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าสูงมากคือ กว่า 800 จูล/กรัม การพัฒนากำลังของ C_3A จะเร็วมากแต่กำลังประลัยที่ได้มีค่าค่อนข้างต่ำมากเมื่อเทียบกับ C_3S หรือ C_2S

2.2.1.3 ไตรแคลเซียมซลิเกต C_3S

มีมากในปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 45 ถึง 55 มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมสีเทาแก่ที่อุณหภูมิในเตาเผา 1250 องศาเซลเซียส C_3S สามารถสลายตัวได้ซึ่งการสลายตัวนี้ค่อนข้างช้า และเมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่า 700 องศาเซลเซียส C_3S จะมีเสถียรภาพและจะไม่เปลี่ยนสภาพ เมื่อผสม C_3S กับน้ำจะเกิดการก่อตัวและแข็งตัวและให้กำลังค่อนข้างดีที่ 7 วันแรก

2.2.1.4 ไดแคลเซียมซลิเกต C_2S

มีมากในปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 15 ถึง 35 C_2S บริสุทธิ์มีอยู่ 4 รูปแบบคือ $\sim C_2S$ ซึ่งเกิดที่อุณหภูมิในเตาเผา 1450 องศาเซลเซียส และเมื่อเย็นลงจะกลายเป็น $\sim C_2S$ ซึ่งกลายเป็น BC_2S ซึ่งอุณหภูมิต่ำลงจะกลายเป็น C_2S ที่อุณหภูมิปกติ แต่เนื่องจาก C_2S อยู่ในสภาพที่ไม่บริสุทธิ์ สารแปลกปลอมอื่นและอัตราการลดลงของอุณหภูมิทำให้แปลงสภาพจาก BC_2S เป็น C_2S ไม่เกิดขึ้น ดังนั้น BC_2S จะมีเสถียรภาพที่อุณหภูมิปกติ C_2S มีลักษณะเป็นเม็ดกลมและแสดงลักษณะทวินนิง (Twining) เมื่อผสมกับน้ำสามารถทำปฏิกิริยาเกิดความร้อนขึ้น ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดร

ชั้นของ C_2S ก่อนข้างต่ำมีค่าประมาณ 250 จูล/กรัม และการพัฒนากำลังของ C_2S ก่อนข้างต่ำและข้างต่ำกว่า C_3S มากคือเริ่มให้กำลังหลังจาก 4 สัปดาห์ขึ้นไป

2.2.1.5 เติตระแคลเซียมอูมิโนเฟอร์ไรต์ C_4AF

มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 5 ถึง 10 และอยู่ในสภาพสารละลายแข็ง (Solid Solution) เมื่อผสมกับน้ำจะทำปฏิกิริยาและทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าปานกลางประมาณ 420 จูล/กรัม โดย C_4AF พัฒนากำลังได้เร็วมาก เช่นเดียวกับ C_3A แต่กำลังอัดประลัยก่อนข้างต่ำและต่ำกว่า C_3A เล็กน้อย

2.3 ยางผง(Crumb rubber)

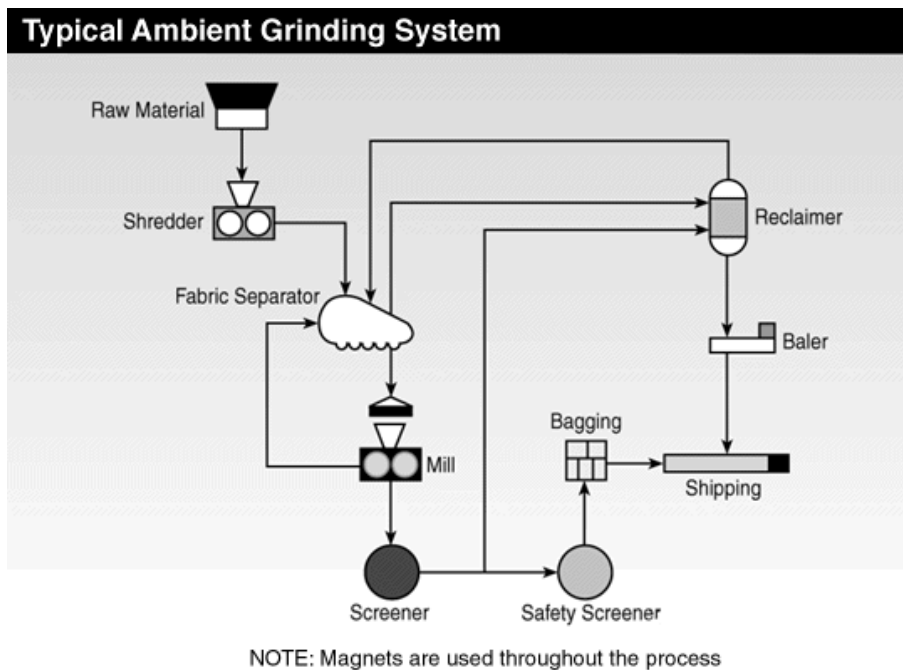
ยางผงหรือยางครัมบ์ (crumb rubber) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำขยะยาง (เช่นยางล้อเก่า เศษยางที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิต ดังแสดงในรูปที่ 4) ไปผ่านกระบวนการบดโดยใช้เครื่องมือเชิงกลต่างๆเช่นเครื่องแกรนูลเลเตอร์ (granulator) เครื่องฟัลเวอร์ไรเซอร์ (pulverizer) เครื่องบดกระแทก (hammer mill) เครื่องบดแบบ 2 ลูกกลิ้ง (two-roll mill) ทั้งนี้การบดสามารถทำได้ทั้งที่อุณหภูมิห้อง(ambient)และที่อุณหภูมิต่ำ(cryogenic process)

2.3.1. อุณหภูมิห้อง(ambient process) โดยทั่วไปการบดที่อุณหภูมิห้องจะเหมาะกับการผลิตยางผงที่มีขนาดอนุภาคก่อนข้างใหญ่ยางผงที่ได้จะมีรูปร่างที่ไม่เป็นระเบียบและมีพื้นผิวขรุขระ หากต้องการยางผงที่มีขนาดอนุภาคเล็กลงจำเป็นต้องนำขยะยางไปผ่านเครื่องบดซ้ำหลายรอบซึ่งจะส่งผลทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นขั้นตอนการผลิตมีหลายขั้นตอน ซึ่งแสดงดังภาพที่ 1 ยางรถยนต์จะถูกบดหรือตัดให้มีขนาดเล็กลง หลังจากนั้นกรรมวิธีการแยกเส้นลวดหรือชิ้นส่วนวัสดุผ้าใบ ชั้นลวดจะถูกแยกโดยใช้แม่เหล็ก ส่วนผ้าใบจะถูกแยกโดยใช้อากาศเป่า หลังจากนั้นผงยางขนาดต่างๆจะถูกแยกออกจากกันโดยเครื่องคัดขนาดซึ่งโดยปกติแล้วขนาดเฉลี่ยที่ได้คือ 3/8" -10 mesh

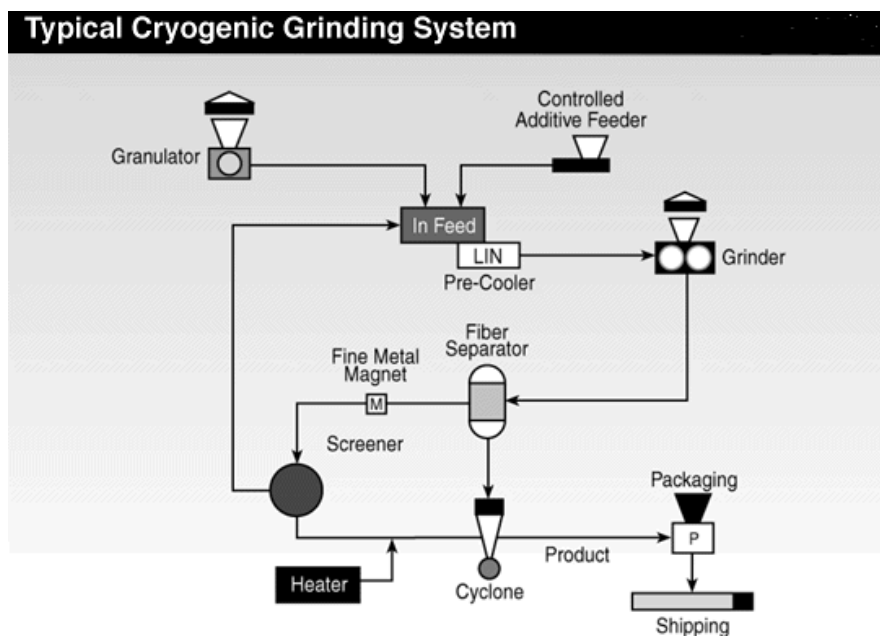
2.3.2. Cryogenic อุณหภูมิต่ำนั้นเป็นวิธีการบดที่มีต้นทุนสูงเพราะต้องใช้ไนโตรเจนเหลวปริมาณมากวิธีนี้จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางผงที่มีอนุภาคขนาดเล็กเท่านั้นยางผงที่ได้จากการบดด้วยวิธีนี้ส่วนใหญ่จะมีลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบปัจจุบันได้มีการนำยางผงที่ได้จากการรีไซเคิลไปประยุกต์ใช้งานในหลากหลายรูปแบบเช่นการนำไปใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมยางนำไปใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงในพลาสติกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตยางรีเคลมและยางเทอร์โมพลาสติกรวมถึงการนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมโยธาตารางที่ 4แสดงข้อมูลการนำยางผงไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆของประเทศสหรัฐอเมริกา



รูปที่ 4. แสดงยางรถยนต์ใช้แล้วก่อนทำการบดย่อย



รูปที่ 5. แสดงขั้นตอนการบดขยาดโดยวิธี Ambient grinding



รูปที่ 6. แสดงวิธีการบดโดยวิธี Cryogenic grinding

ตารางที่ 5. ข้อมูลการนำยางผงไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆของประเทศสหรัฐอเมริกา

การใช้งาน	ปริมาณ (%)
วิศวกรรมโยธา (ผสมกับยางมะตอย)	44
อุตสาหกรรมการผลิตยางล้อ	20
ผลิตยางรีเคลม	18
ทำลู่วิ่งลานกรีฑา	8
อุตสาหกรรมยางและพลาสติกอื่นๆ	10



รูปที่ 7. ผงยางบดหลังจากผ่านกระบวนการย่อย

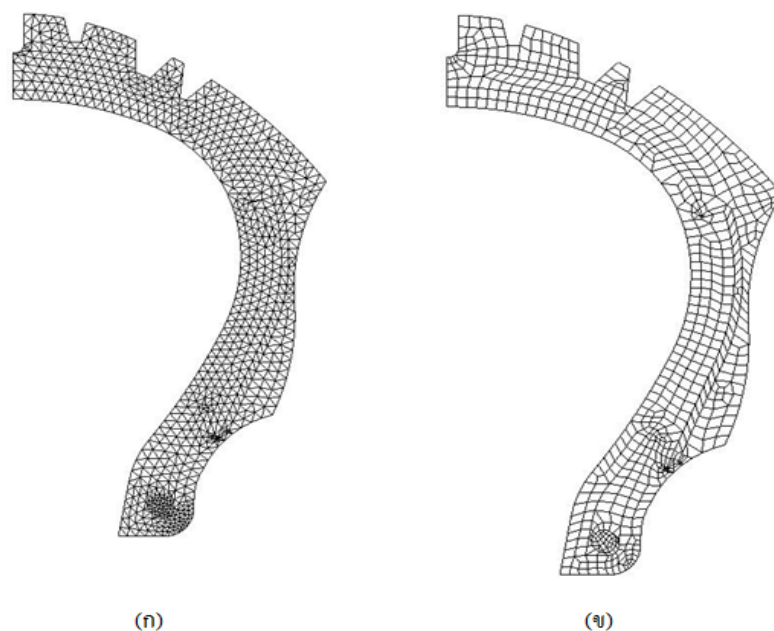
2.4 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์(Finite Element Method)

2.4.1 คำนิยาม

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือการใช้คณิตศาสตร์ขั้นสูง (advanced mathematics) ร่วมกับระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) ในการวิเคราะห์และแก้ปัญหาทางวิศวกรรม เช่น ปัญหาทางด้านการถ่ายเทความร้อน (heat transfer) ปัญหาทางด้านความแข็งแรงของโครงสร้าง (structural mechanics) และปัญหาที่เกิดจากการไหลของวัสดุ (fluid mechanics) เป็นต้น

การวิเคราะห์และแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบไปด้วย 7 ขั้นตอน คือ

ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งปัญหาที่สนใจจะทำการวิเคราะห์ (domain) ออกเป็นส่วนย่อยเล็กๆ เรียกว่า “เอลิเมนต์ (element)” โดยจะต้องเลือกใช้รูปร่าง (geometry) และจำนวนของเอลิเมนต์ให้เหมาะสมกับปัญหาที่จะทำการวิเคราะห์ เช่น อาจจะใช้เอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยม (triangle element) หรือเอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (quadrilateral element) ในการจำลองรูปร่าง (geometry) ของล้อยางได้ โดยแต่ละเอลิเมนต์จะต่อกันที่จุดต่อ (node) ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8. แสดงการจำลองรูปร่างของล้อยางด้วยเอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยม (ก), การจำลองรูปร่างของล้อยางด้วยเอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (ข)

อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของล้อยางด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นี้จะเลือกใช้เอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าในการจำลองรูปร่างของล้อยาง ทั้งนี้เนื่องจากในทางคณิตศาสตร์เอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าจะให้ค่าความถูกต้องของการวิเคราะห์ดีกว่าเอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยมในกรณีที่ใช้จำนวนเอลิเมนต์เท่าๆ กัน

ขั้นตอนที่ 2 การใช้คณิตศาสตร์ชั้นสูงเพื่อหาสมการทางคณิตศาสตร์ของเอลิเมนต์ที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของปัญหาที่ต้องการทำการวิเคราะห์ได้ ซึ่งโดยทั่วไปสมการที่ได้จะอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (partial differential equations)

ขั้นตอนที่ 3 การประมาณค่าสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 โดยการแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยให้อยู่ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายโดยอาศัยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งสมการที่ได้จะมีเพียงการบวก ลบ คูณ หรือหาร เท่านั้น ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการคำนวณหาคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยนั้น ๆ

ขั้นตอนที่ 4 การรวมสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 ให้เป็นระบบสมการรวมขนาดใหญ่ ซึ่งเปรียบเสมือนการต่อเอลิเมนต์แต่ละเอลิเมนต์ที่ตำแหน่งต่างๆ เข้าด้วยกันเพื่อให้สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมของปัญหาที่ต้องการทำการวิเคราะห์ได้

ขั้นตอนที่ 5 การแทนค่าสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำชิ้นงานและสภาวะการใช้งานซึ่งเรียกว่า “เงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions)” ลงในระบบสมการรวมที่ได้จากขั้นตอนที่ 4 เช่น ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ (Elastic Modulus or Young's Modulus) ขนาดของแรงที่มากระทำ และลักษณะการจับยึดของชิ้นงานตัวอย่าง เป็นต้น ทั้งนี้จะทำให้จำนวนตัวแปรที่ไม่รู้ค่าเท่ากับจำนวนตัวแปรที่รู้ค่า ซึ่งจะทำให้สามารถแก้ระบบสมการรวมได้

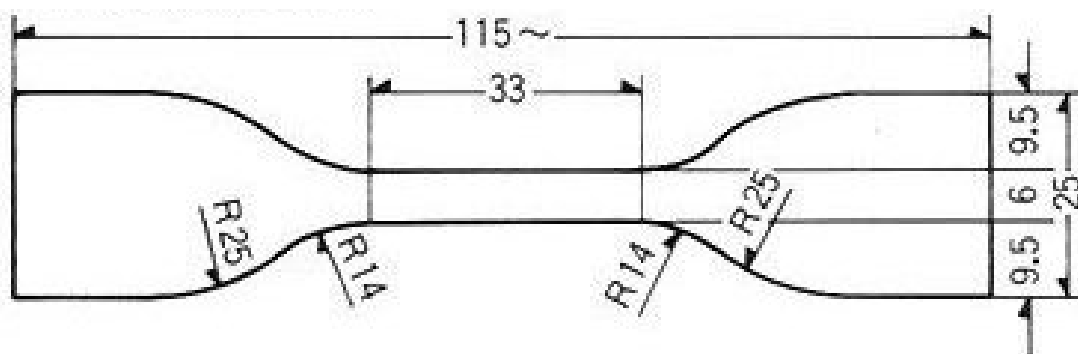
ขั้นตอนที่ 6 การแก้ระบบสมการรวมเพื่อหาคำตอบ ซึ่งในขั้นตอนนี้ถ้าระบบสมการรวมมีขนาดไม่ใหญ่มากนัก ก็สามารถทำการคำนวณหาคำตอบได้โดยง่าย แต่หากระบบสมการรวมมีขนาดใหญ่ก็จำเป็นต้องอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณหาคำตอบ

ขั้นตอนที่ 7 การแปลผลของคำตอบที่ได้เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุและเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ต่อไป เช่นเดียวกันกับขั้นตอนที่ 6 ถ้าระบบสมการรวมมีขนาดใหญ่ ก็จำเป็นต้องอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการแสดงผลของคำตอบให้อยู่ในรูปแบบที่สะดวกต่อการแปลผล เช่น การแสดงผลในรูปของกราฟหรือเจดสี เป็นต้น

2.4.2 การหาสมบัติเชิงกลของยาง (Material Properties)

การหาสมบัติเชิงกลของยางเพื่อนำไปแทนค่าในระบบสมการรวมในขั้นตอนที่ 5 ของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะแตกต่างไปจากการหาสมบัติเชิงกลของยางที่ใช้กันทั่วไป กล่าวคือ จะต้องทำการกำจัดผลอันเนื่องมาจากความหนืด (viscous effect) ของชิ้นงานเสียก่อน ก่อนที่จะนำไปวัดเพื่อหาค่าสมบัติเชิงกลของยางต่อไป ทั้งนี้เพื่อให้ยางอยู่ในสภาวะอยู่ตัว (steady state) ในขณะที่ทำการวัด

ในการหาค่าสมบัติเชิงกลของยางที่ใช้เป็นส่วนประกอบสำหรับการทำยางนอกทั้งสองรุ่น จะนำยางที่ผสมเคมีแล้วซึ่งเรียกว่ายางคอมพาวด์ไปทำการกดขึ้นรูปด้วยความดันที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที ซึ่งเป็นอุณหภูมิและเวลาเดียวกันกับที่ใช้ในโรงงานผลิตของบริษัท บางกอกพัฒนามอเตอร์จำกัด หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่อบขึ้นรูปแล้วไปตัดเป็นรูปดัมเบลล์ตามมาตรฐาน ASTM D-412-C ดังแสดงในรูปที่ 5 และนำไปหาค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นโดยใช้เครื่อง INSTRON Model 5569. ค่ามอดูลัสที่ได้สามารถนำไปหาค่าคงที่ความยืดหยุ่นของยางได้โดยใช้โปรแกรม MSC.Marc



รูปที่ 9. ชิ้นงานรูปดัมเบลล์สำหรับการวัดค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นตามมาตรฐาน ASTM D-412-C (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

2.5 รายงานการวิจัยทางด้านวิศวกรรมชิ้นส่วนประกอบ

J.J. del Coz Díaz, P.J. García Nieto, C. Betegón Biempica, M.B. Prendes Gero[7] ได้ศึกษาการนำความร้อนของอิฐทรงกลวง น้ำหนักเบา ที่ใช้ในอาคารประหยัดพลังงาน โดยวัสดุที่ใช้ไม่มีการผสมของวัสดุละเอียด เปรียบเทียบอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกัน และใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์

ทำนายพฤติกรรมการส่งผ่านความร้อน เปรียบเทียบกับสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งผลการทดสอบ แสดงว่าการใช้ไฟในต้อลิเมนต์ทำนายให้ผลที่สอดคล้องกับการทดสอบจริง

Ali R. Khaloo, M. Dehestani, P. Rahmatabadi[13] ได้ทำการศึกษาการนำพียงบดจากเศษ ยางรถยนต์ผสมกับคอนกรีตที่ปริมาณสูงซึ่งผลการทดสอบพบว่าค่าความแข็งแรงของก้อนคอนกรีต ลดลงตามปริมาณพียงบดที่เพิ่มขึ้น แต่สิ่งที่ได้จากการเพิ่มพียงบดคือค่าการแตกร้าวของก้อน ซีเมนต์มีค่าลดลง และจากการทดสอบโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกส์ พบว่าพียงบดสามารถดูดซับ คลื่นเสียงได้เพิ่มขึ้นตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของพียงบด

A. Benazzouk, O. Douzane, K. Mezreb, M. Que'neudec[4] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการนำพียงบด ผสมกับคอนกรีตเพื่อนำไปใช้เกี่ยวกับงานทางด้านคอนกรีตน้ำหนักเบา โดยทำการผสมสารพิเศษ เพื่อเพิ่มปริมาณฟองอากาศในคอนกรีต ซึ่งจากการทดสอบทางด้านฟิสิกส์และกลศาสตร์ พบว่าค่า ความแข็งแรงของคอนกรีตลดต่ำลงเมื่อเพิ่มฟองอากาศ แต่สิ่งที่ได้มาคือค่าการไหลของคอนกรีตที่ดี ขึ้นและปริมาณฟองอากาศที่เพิ่มขึ้นนี้ยังสามารถดูดซับเสียงได้ดีเพิ่มขึ้นด้วย

P. Turgut and B. Yesilata[25] ได้ศึกษาประสิทธิภาพด้านความร้อนและคุณสมบัติทางกล ของอิฐคอนกรีตผสมพียงบดที่ใช้แล้ว จากการศึกษาพบว่าอิฐอัดการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มที่ สูง หน่วยน้ำหนักมีแนวโน้มที่ลดลงตามอัตราส่วนของพียงบดต่อปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปริมาณร้อยละของพียงบดที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้านการเป็นฉนวนอยู่ระหว่างร้อยละ 5-11

P.Sukukkul[21] ได้ศึกษาการใช้พียงบดริเคลมเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านการนำความร้อน และเสียงสำหรับชิ้นส่วนอัดแรงคอนกรีต ในการศึกษาได้เพิ่มวัสดุมวลละเอียดที่อัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ จากการพิจารณาคุณสมบัติด้านการนำความร้อน(Thermal conductivity), การต้านทานความร้อน(Thermal resistivity), การถ่ายโอนความร้อน (Heat transfer), ค่า ความสามารถในการนำไฟฟ้า(Conductance value) และการดูดซับเสียง (Sound absorption) พบว่า ชิ้นส่วนคอนกรีตอัดแรงผสมพียงบดมีคุณสมบัติการดูดซับเสียงสูงและการถ่ายโอนความร้อนที่มากกว่า ชิ้นส่วนคอนกรีตทั่วไป

A. Dasaesamoh and D. ja-Aoe[6] ได้ทำการศึกษาอิฐดินที่ผสมด้วยเศษยางพาราใน อัตราส่วนร้อยละ 10, 15 และ 20 ตามลำดับโดยน้ำหนักดินแห้ง โดยการทดสอบคุณสมบัติทาง กายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่น อัตราการดูดซึมน้ำ และทดสอบการต้านทานต่อแรงกระแทก จาก การศึกษาพบว่าความหนาแน่นของอิฐลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของเศษยางพารา อัตราการดูด ซึมน้ำของอิฐ และ ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของเศษยาง อย่างไรก็ดีอิฐผสมเศษยางมีคุณสมบัติอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน มอก.1505-2541

D. Tonnayopas and W. Kawfai[23] ได้ศึกษาคอนกรีตมวลรวมเศษซีอย่างธรรมชาติเดิมด้วย ถ้ำเกลบขาวแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดย น้ำหนักเพื่อวัตถุประสงค์ในการผลิตคอนกรีตมวลเบาที่อุณหภูมิห้องก่อนคอนกรีตที่หล่อมี อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.4 คงที่ตลอดการศึกษาครั้งนี้และบ่มไว้ในน้ำเป็นเวลา 7 และ 28 วัน ทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของคอนกรีตมวลรวมซีอย่างธรรมชาติได้แก่ความหนาแน่นรวมการดูดซึมน้ำการหดตัวแบบแห้งความแข็งแรงแบบกระดอนและกำลังอัดจากสังเกตการทดลองพบว่าคอนกรีตผสมซีอย่างที่มีถ้ำเกลบขาวร้อยละ 10-20 ไม่แสดงการแตกเปราะอย่างทันใด ถึงแม้ว่าเลยแรงกดพิบัติไปแล้วบ่งชี้ว่ามีสมรรถนะการดูดกลืนพลังงานสูงลดความหนาแน่นอย่างค่อยลงและผิวเรียบดังนั้นจึงดูดกลืนแรงได้และยังเป็นไปได้ที่เป็นคอนกรีตมวลเบาที่อุณหภูมิห้องประเภทโครงสร้างไม่รับน้ำหนัก

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

แนวคิดในงานวิจัยได้นำดินท้องถิ่นจากแหล่งราชบุรี ผสมกับผงยางครีမ်ซึ่งแสดงดังรูปที่ 10 ซึ่งได้จากการบดเศษยางรถยนต์และผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อผลิตเป็นอิฐมวลเบาที่มีความร้อนต่ำซึ่งสามารถใช้ในการก่อสร้างบ้านประหยัดพลังงานในท้องถิ่น โดยทำการศึกษาคุณสมบัติด้านเคมีและฟิสิกส์ (Chemical and physical properties), คุณสมบัติด้านกลศาสตร์ (The mechanics investigations) ซึ่งประกอบด้วย ด้านกำลังอัดและดัด (Compressive and flexural strength properties) โดยใช้ชิ้นงานทดสอบขนาด $115 \times 225 \times 60$ มม. ด้านคุณสมบัติด้านกายภาพของอิฐประกอบด้วย การดูดซึมน้ำ (Water absorption), หน่วยน้ำหนัก (Unit weight) ของผลิตภัณฑ์ ที่อายุ 3, 7, 14, 28, และ 60 วัน ที่ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 คงที่ร้อยละ 10 และผงยางครีမ်ร้อยละ 10, 15, 20, 25, 30 และ 40

อย่างไรก็ตามส่วนปริมาณดินท้องถิ่นราชบุรีแปรผันตามปริมาณผงยางรีเคลม ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงทั้งหมด (w/p) 0.2588, 0.2900, 0.3213, 0.3525, 0.383 และ 0.4463 เปรียบเทียบกับอิฐดินซีเมนต์ควบคุม ซึ่งมีปริมาณปูนซีเมนต์คงที่ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงทั้งหมด (w/p) 0.1963 ผลการทดสอบจะถูกเปรียบเทียบถึงอิทธิพลของผงยางครีမ်ต่อคุณสมบัติต่างๆของอิฐดินซีเมนต์ รวมถึงประเมินความเป็นไปได้ในการนำมาผลิตเป็นอิฐมวลฉนวนกันความร้อนมวลเบา และสามารถก่อสร้างจริงเป็นบ้านทดสอบตัวอย่าง



รูปที่ 10. แสดงผงยางคาร์บอนเบอร์ 6 ที่ใช้ในการศึกษา

3.1 ด้านวัสดุวิศวกรรมขั้นสูง (Advance Materials Engineering, AME)

3.1.1 ทดสอบคุณสมบัติด้านเคมีของดินท้องถิ่นราชบุรี โดยใช้มาตรฐานการทดสอบของสหรัฐอเมริกา (ASTM Standards) และ การทดสอบ-วิเคราะห์ ด้วยเครื่องมือขั้นสูงโดย XRF (X-Ray Fluorescence)

3.1.2 ทดสอบคุณสมบัติด้านกายภาพของดินท้องถิ่นราชบุรี โดยวิเคราะห์ทดสอบโดยใช้ SEM (Scanning Electron Microscope)

3.1.3 ทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังอัด (Compressive strength)[27] และ กำลังดัด (Flexural strength)[28] ของอิฐดินซีเมนต์ผสมผงยางคาร์บอนเปรียบเทียบกับอิฐดินที่ไม่ผสมผงยางคาร์บอนที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน



รูปที่ 11. แสดงการทดสอบหาค่ากำลังอัดของอิฐดินซีเมนต์



รูปที่ 12. แสดงการทดสอบหาค่ากำลังดัดของอิฐดินซีเมนต์

3.1.4 ทดสอบหาอัตราการดูดซึมน้ำ (Water absorption), และ หน่วยน้ำหนัก(Unit weight) ของอิฐดินซีเมนต์ผสมผงยางรีเคลม

ทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 109-2517 นำตัวอย่างอิฐมอญทั้งหมด ส่วนผสมละ 5 ก้อน ไปเข้าเตาอบความร้อน 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งน้ำหนัก ซึ่งถือว่าเป็นน้ำหนักแห้ง จากนั้นนำอิฐมอญไปแช่ในน้ำสะอาด ให้ผิวน้ำท่วมขึ้นทดสอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้เกิดการอิ่มตัว จากนั้นนำอิฐมอญขึ้นมาจากน้ำวางทิ้งไว้ 1 นาที แล้วจึงซับผิวน้ำของอิฐมอญให้แห้ง โดยไม่ให้มีฟิล์มน้ำเหลืออยู่ แล้วทำการชั่งน้ำหนักทันที จะได้น้ำหนักเปียก โดยการชั่งนี้ต้องกระทำในเวลา 3 นาที หลังจากนั้นชั่งจากน้ำ ทั้งนี้เพื่อมิให้สูญเสียความชื้น จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาอัตราการดูดซึมน้ำโดยใช้สมการที่ 1.

$$\text{Absorption} = \frac{W_{\text{wet}} - W_{\text{dry}}}{W_{\text{dry}}} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ Absorption = อัตราการดูดซึมน้ำ (%)

W_{wet} = น้ำหนักเปียก (g)

W_{dry} = น้ำหนักแห้ง (g)

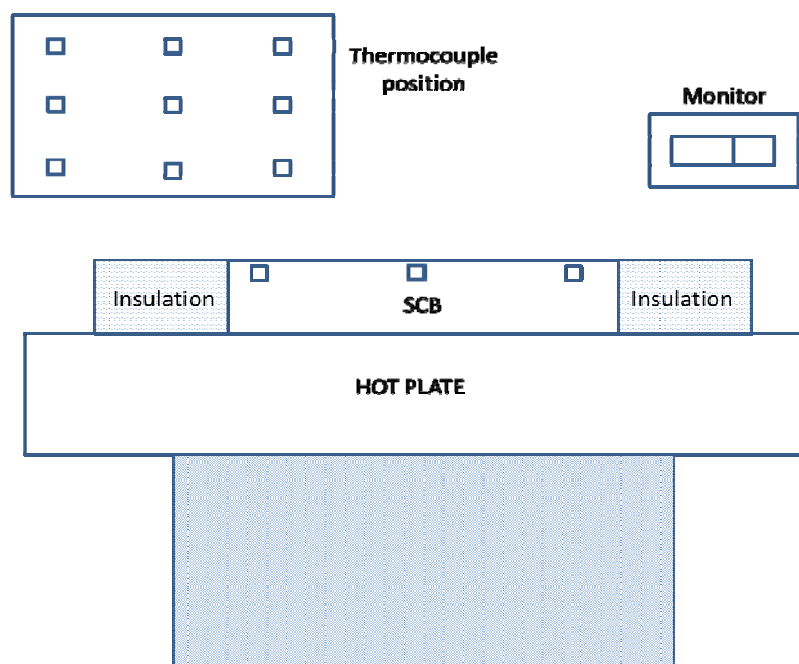
3.1.5 ทดสอบความสามารถในการนำความร้อน(thermal conductivity)[29] ของอิฐมวลเบาผสมผงยางครัมป์ที่ปริมาณต่างๆ โดยการทดสอบได้รับการอนุเคราะห์จากศูนย์วิจัยโลหะและวัสดุแห่งชาติ ทำการทดสอบ

3.1.6 หาอัตราส่วนที่เหมาะสม(Optimize),ของอิฐดินมวลเบาผสมผงยางครัมป์

3.1.7 ออกแบบและสร้างบ้านตัวอย่างสำหรับมอบให้ชุมชนเพื่อเป็นแนวทางการใช้เทคโนโลยีอย่างง่าย

3.2 การจำลองพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของอิฐดินซีเมนต์ผสมผงยางครัมป์โดยใช้ไฟไนต์อีลิเมนต์และเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริง

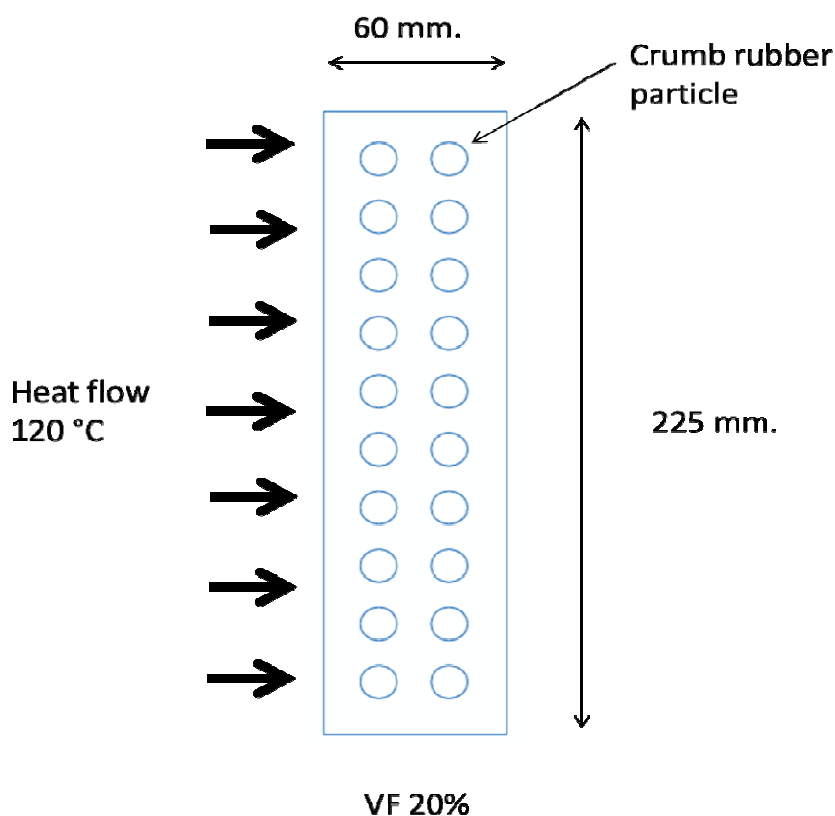
จุดประสงค์ของการใช้ไฟไนต์อีลิเมนต์คือการจำลองทิศทางการถ่ายเทความร้อนของอิฐซีเมนต์บล็อกผสมผงยางรีเคลม โดยแบบจำลองจะดำเนินการเปรียบเทียบปริมาณความร้อน ณ จุดๆ เดียวกันของอิฐดินซีเมนต์บล็อก แต่มีปริมาณสัดส่วนยางผงครัมป์ที่แตกต่างกัน การจำลองพฤติกรรมของวัสดุนี้ ได้ใช้ไฟไนต์อีลิเมนต์ โปรแกรม Simulia version 6.8.2 ซึ่งผลการทดสอบโดยการใช้ไฟไนต์อีลิเมนต์ จะถูกเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงซึ่งควบคุมการทดสอบและสภาพแวดล้อมเหมือนกับจากไฟไนต์อีลิเมนต์ แบบจำลองการทดสอบแสดง ดังรูปที่ 13.



รูปที่ 13. เครื่องมือทดสอบการส่งผ่านความร้อนของอิฐดินผสมผงยางครัมป์

ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ มีดังนี้

3.2.1แบบจำลองก้อนอิฐ ชนิด 2 มิติ ถูกสร้างขึ้น จำนวน 5 โมเดล โดยมีขนาดดังรูปที่ 14 แต่ละแบบจำลองมีปริมาณสัดส่วนยางผงรีเคลมที่แตกต่างกันดังนี้ 10% 20% 30% และ 40% โดยลำดับ



รูปที่ 14 แสดงขนาดและรูปร่างของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์

3.2.2 ดำเนินการใส่ค่าคุณสมบัติการนำความร้อนของวัสดุ ดังนี้

ชนิด	ค่าการนำความร้อน(W/mK)
ยางผงครัมป์	0.100518
อิฐดินซีเมนต์ควมคุมที่อายุการบ่ม 28 วัน	1.9428

ตารางที่ 1 ค่าการนำความร้อนของวัสดุต่างๆ

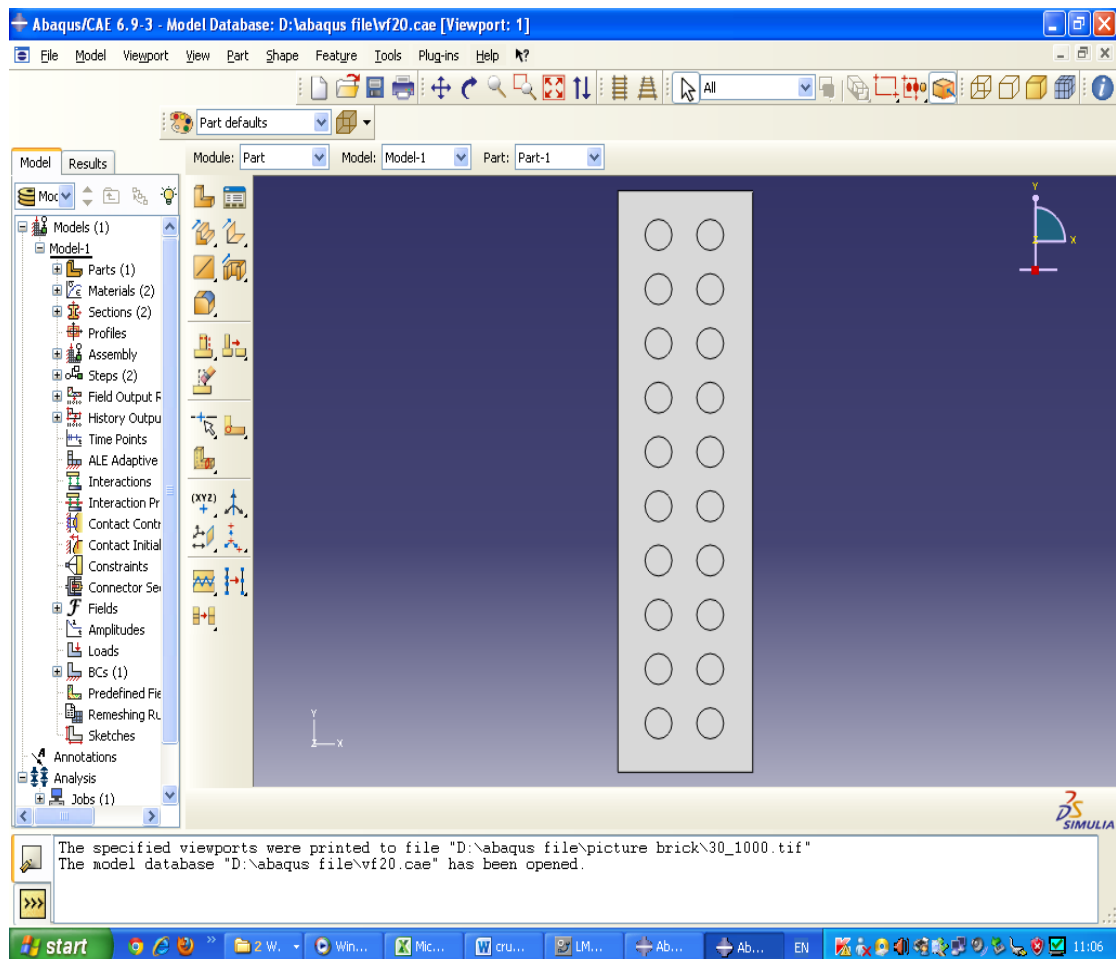
3.2.3 กำหนดชนิดของอีลิเมนต์ของวัสดุซึ่งในที่นี้คือ DCC2D4d (A4-node convection/diffusion quadrilateral, dispersion control)[30]

3.2.4 กำหนดค่า boundary condition และปริมาณความร้อนที่ต้องการเริ่มต้น

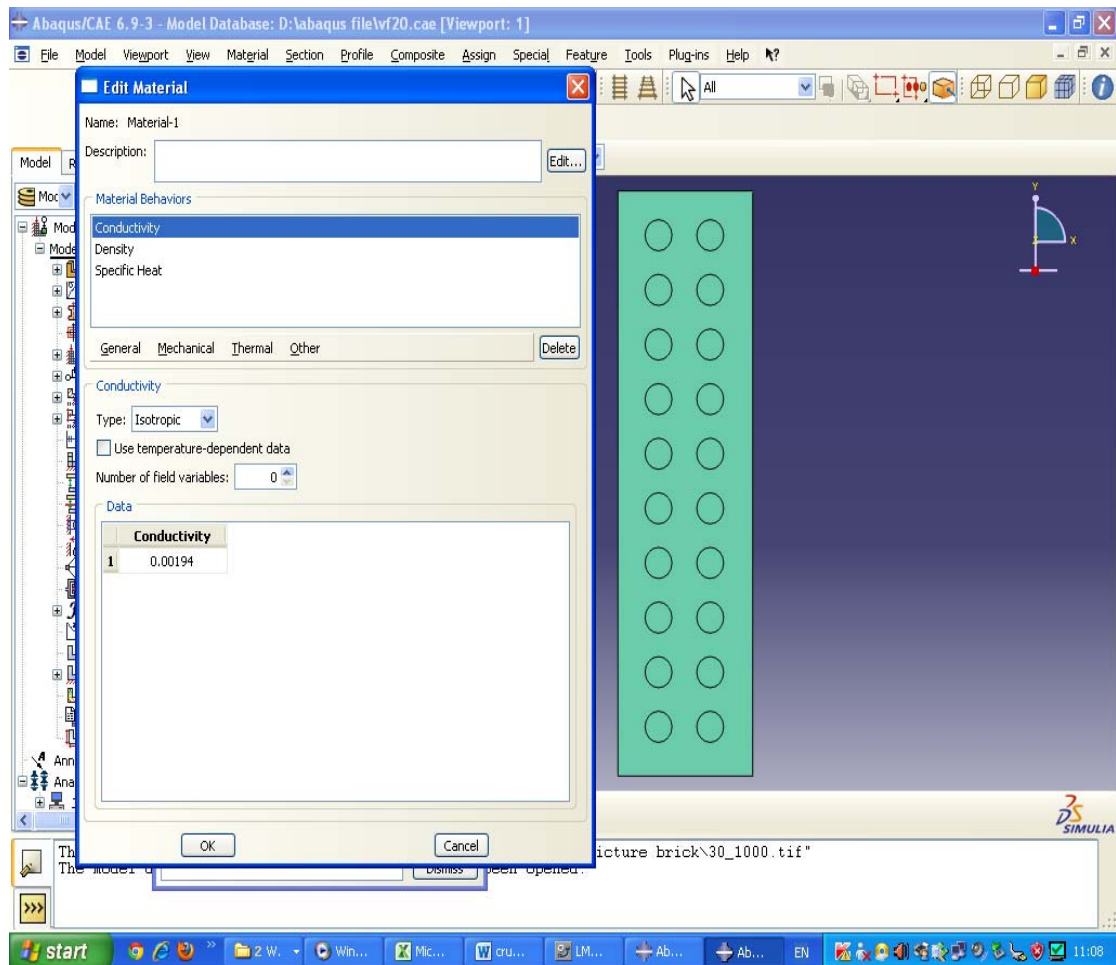
3.2.5 ใส่ผลลัพธ์ที่ต้องการซึ่งคือค่าอุณหภูมิที่จุดที่กำหนดไว้เปรียบเทียบกับเวลา

3.2.6 ดำเนินการประมวลผล ซึ่งเวลาของการประมวลผลขึ้นอยู่กับจำนวนลักษณะของอีลิเมนต์ที่กำหนด

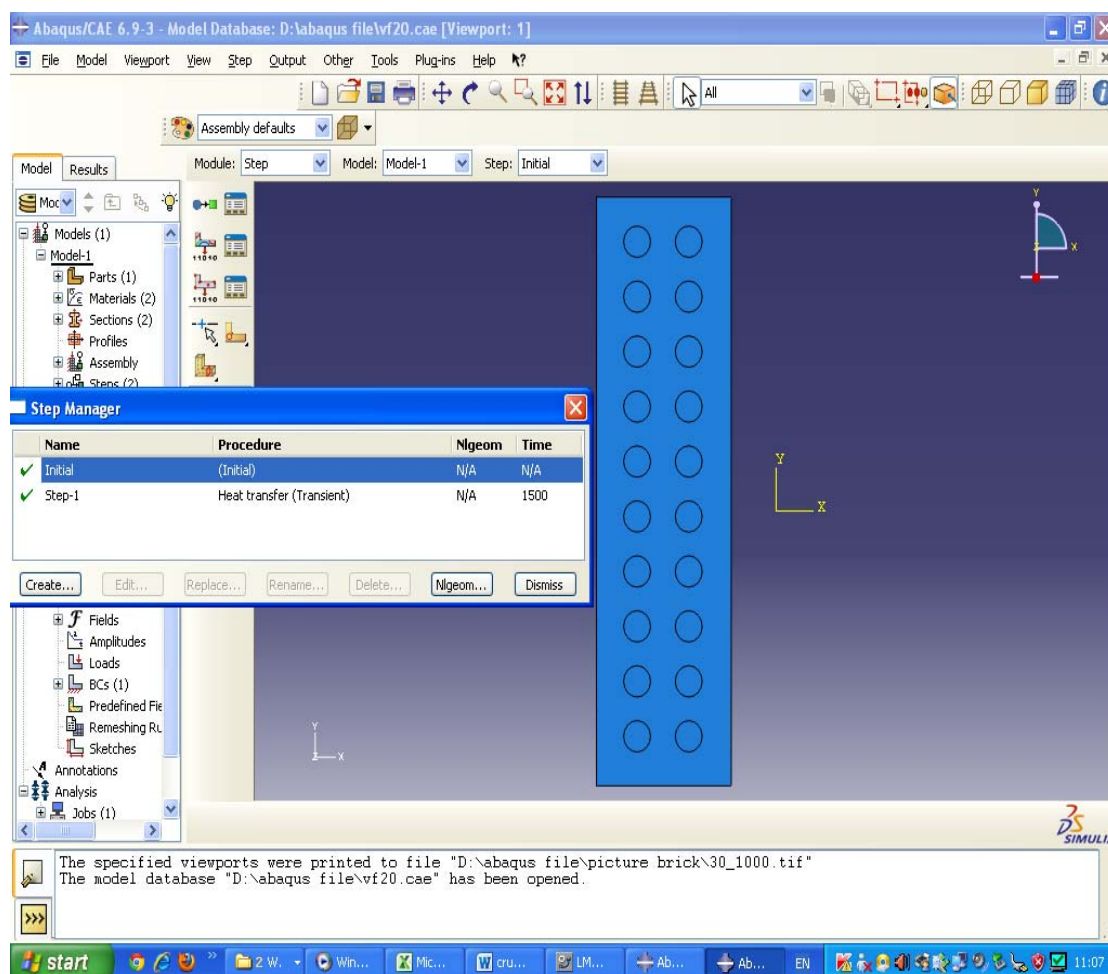
3.2.7 แสดงผลโดยขั้นตอนนี้จะแสดงถึงปริมาณความร้อนแต่ละจุดที่กำหนดไว้



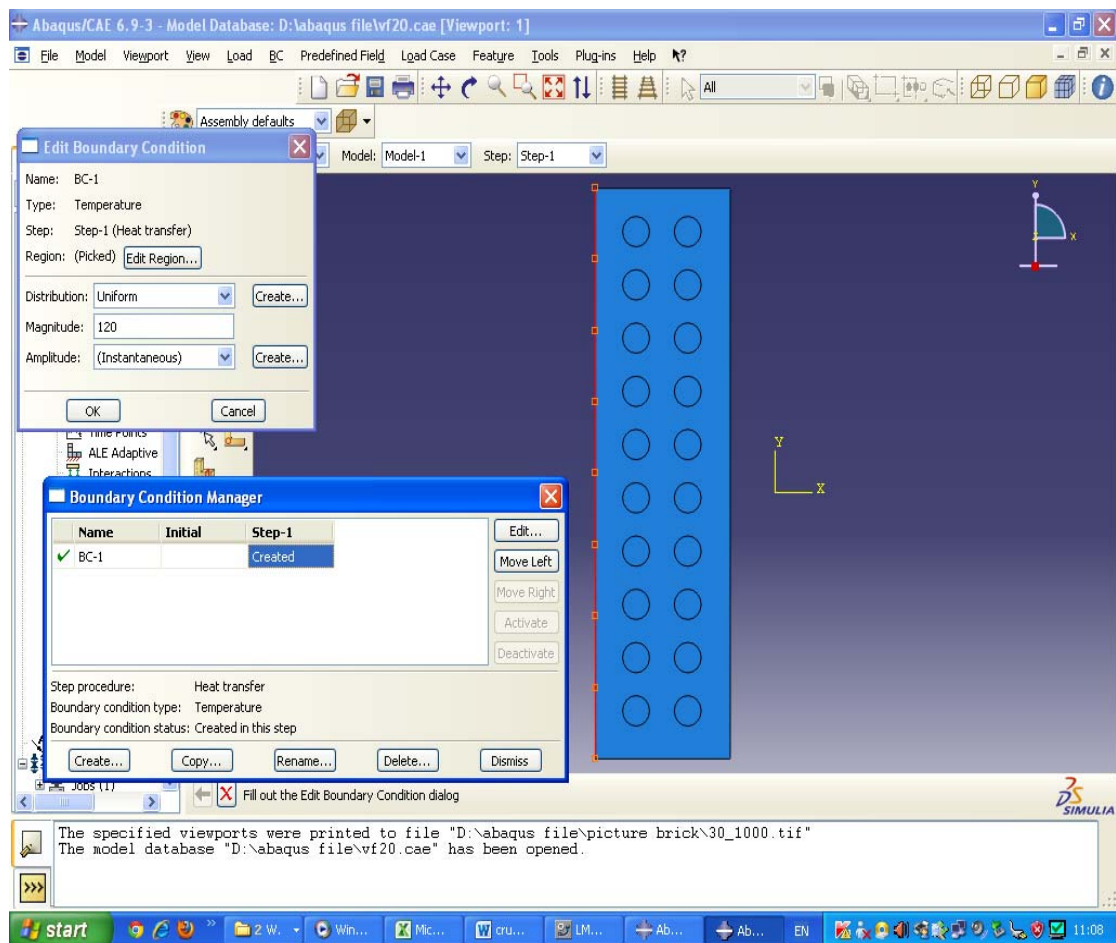
รูปที่ 15. แสดงตัวอย่างการจำลองรูปร่างของวัสดุอิฐโดยมีผงบด (ทรงกลม) ปริมาณ volume fraction 20% บรรจุอยู่ข้างใน



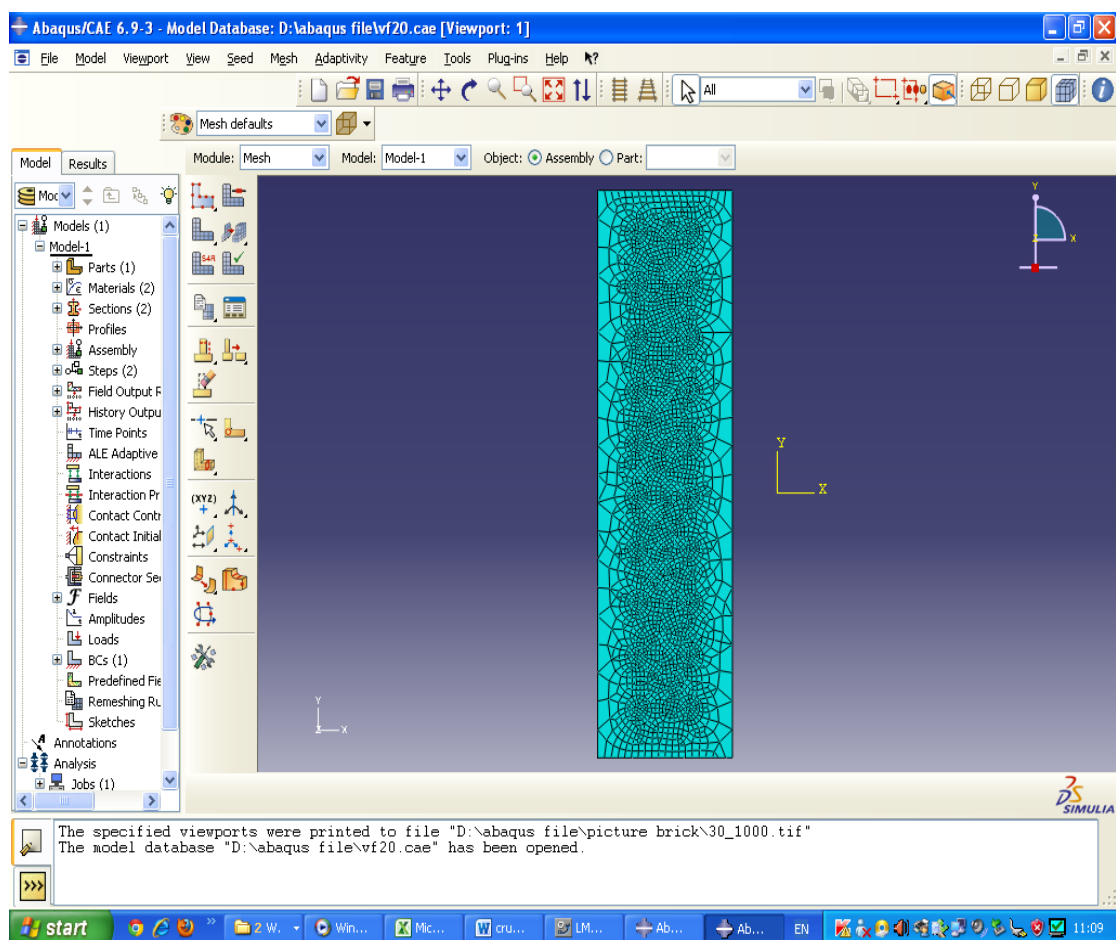
รูปที่ 16. แสดงขั้นตอนการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุชนิดต่างๆลงในแบบจำลอง



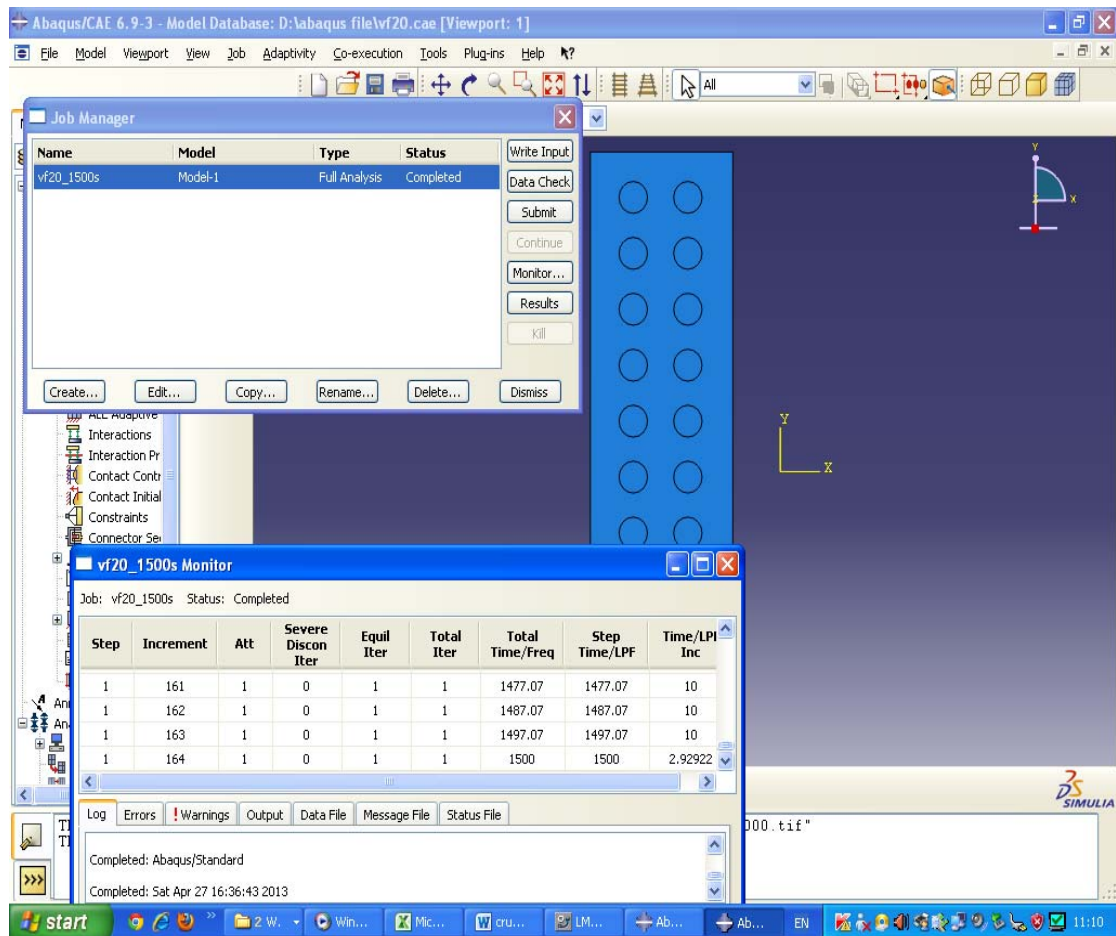
รูปที่ 17. แสดงการกำหนดค่าทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณ ซึ่งในที่นี้คือการส่งผ่านความร้อน (Heat transfer)



รูปที่ 18. แสดงขั้นตอนการใส่แรงที่มีกระทำต่อวัสดุ ซึ่งจากภาพเป็นการใส่ความร้อน ณ ตำแหน่ง
 อีกด้านหนึ่งของอิฐ



รูปที่ 19. แสดงการแบ่งแบบจำลองเป็นส่วนย่อย(mesh) เพื่อการคำนวณที่ถูกต้องแม่นยำ



รูปที่ 20. แสดงขั้นตอนการประมวลผลของไฟไนต์อีลิเมนต์และการตรวจสอบผลการดำเนินการ

3.3 แผนผังการดำเนินงานวิจัย



รูปที่ 21. แผนงานการดำเนินงาน

บทที่ 4

ผลและการวิจารณ์

ผลการศึกษาและการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านต่างๆ ของอิฐมวลเบาซึ่งเป็นส่วนผสมจาก ดินท้องถิ่นราชบุรี ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และผงยางক্রัมป์ โดยปริมาณส่วนผสมที่คงที่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 10 และผงยางক্রัมป์ร้อยละ 10, 15, 20, 25, 30, และ 40 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงทั้งหมด 0.2588, 0.2900, 0.3213, 0.3525, 0.383 และ 0.4463 ตามลำดับ และเปรียบเทียบกับอิฐดินผสมปูนซีเมนต์ควมคุมที่ไม่ผสมผงยางক্রัมป์ที่ส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงทั้งหมด 0.1963 สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

4.1 การศึกษาคุณสมบัติทางเคมี (The study of chemical & physical properties)

4.1.1 คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของวัตถุดิบ (Chemical & physical properties of raw materials)

จากการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีด้วยวิธี X-Ray Fluorescence (XRF) นั้น เมื่อพิจารณาถึงผลรวมของออกไซด์หลักที่มีผลต่อการทำปฏิกิริยา อาทิเช่นซิลิกอนไดออกไซด์(SiO_2) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และอลูมินา(Al_2O_3) ของหินฝุ่นจากแหล่งจังหวัดราชบุรี มีค่าร้อยละ 57.08 และดินท้องถิ่นจากจังหวัดราชบุรีมีค่าร้อยละ 81.91 และค่าสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ที่ร้อยละ 41.31 และ 2.39 ตามลำดับ ดังแสดงใน ตารางที่ 6.

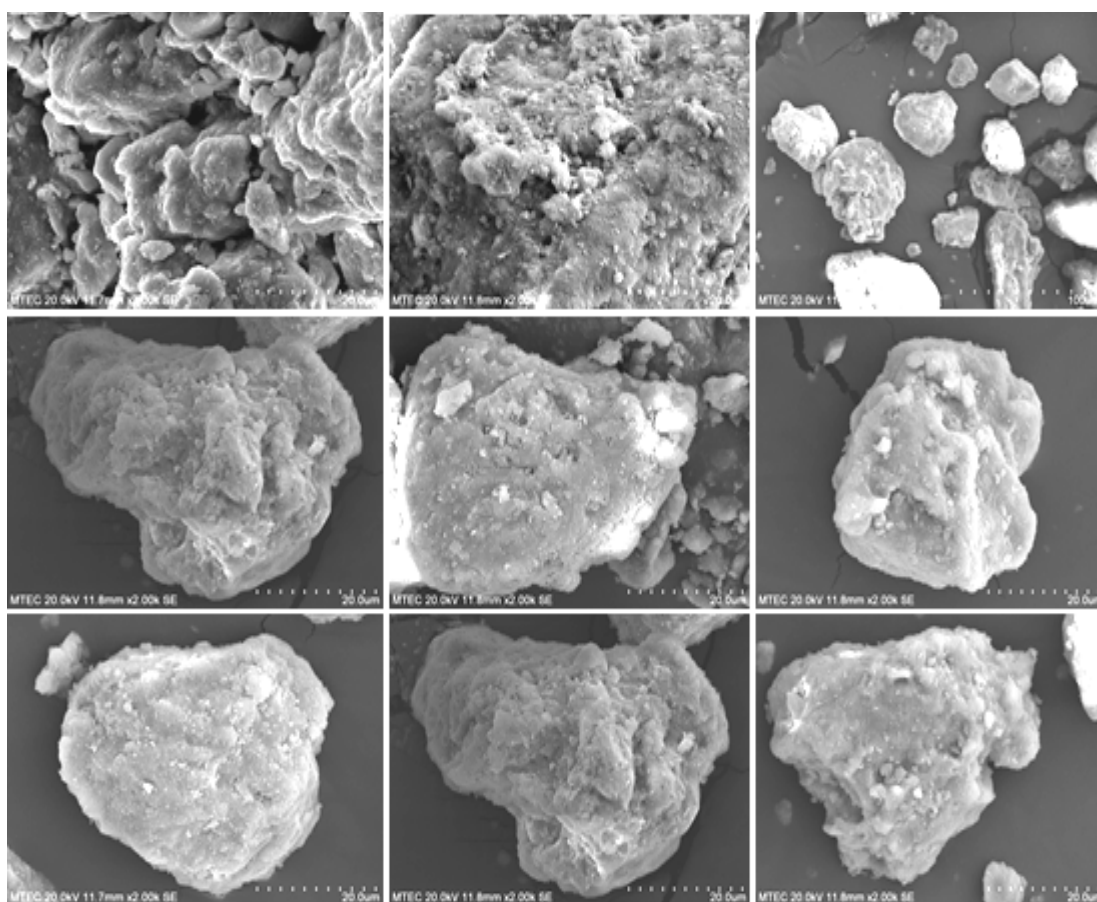
ตารางที่ 6. แสดงผลการทดสอบทางด้านเคมีของดินท้องถิ่นราชบุรี

Oxides	Concentrations
	Local Soil
MgO	1.25
Al ₂ O ₃	25.23
SiO ₂	38.47
P ₂ O ₅	0.17
SO ₃	6.04
Cl	0.04
K ₂ O	0.87
CaO	18.21
TiO ₂	1.2
MnO	0.07
Fe ₂ O ₃	7.85
NiO	0.01
CuO	0.01
Rb ₂ O	<0.01
SrO	0.05
BaO	0.07
LOI	2.39

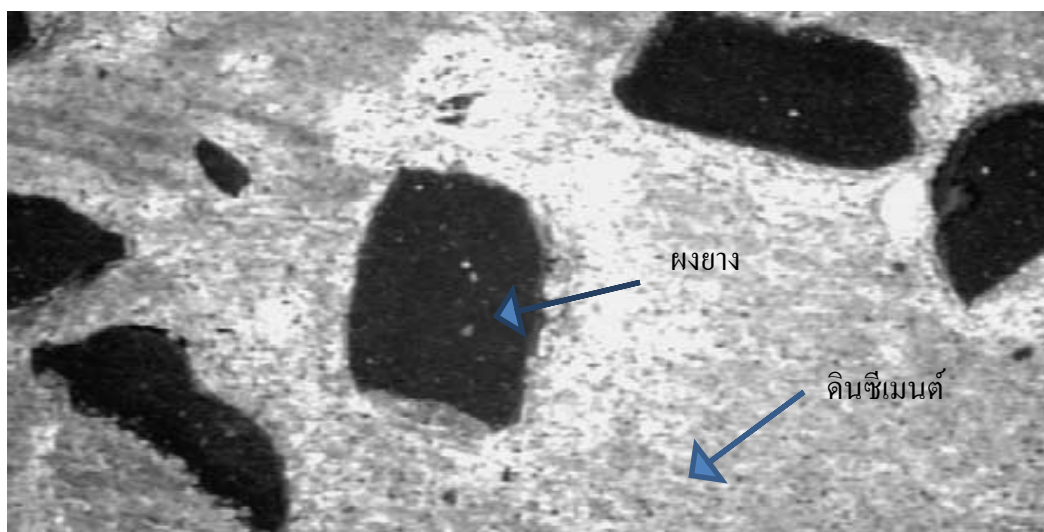
4.1.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์รูปร่างและขนาดอนุภาค (Shape and particle size analysis)

จากภาพถ่ายด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope(SEM) ของดินท้องถิ่นราชบุรีดังรูปที่ 5 พบว่ามีลักษณะและรูปร่างที่ค่อนข้างเป็นเหลี่ยมมุมเนื้อแน่นมากและผิวขรุขระจากการพิจารณาอนุภาคของดินเหนียวท้องถิ่นราชบุรีซึ่งมีขนาดเฉลี่ย 56.47 ไมโครเมตร และผลการวิเคราะห์การเข้า

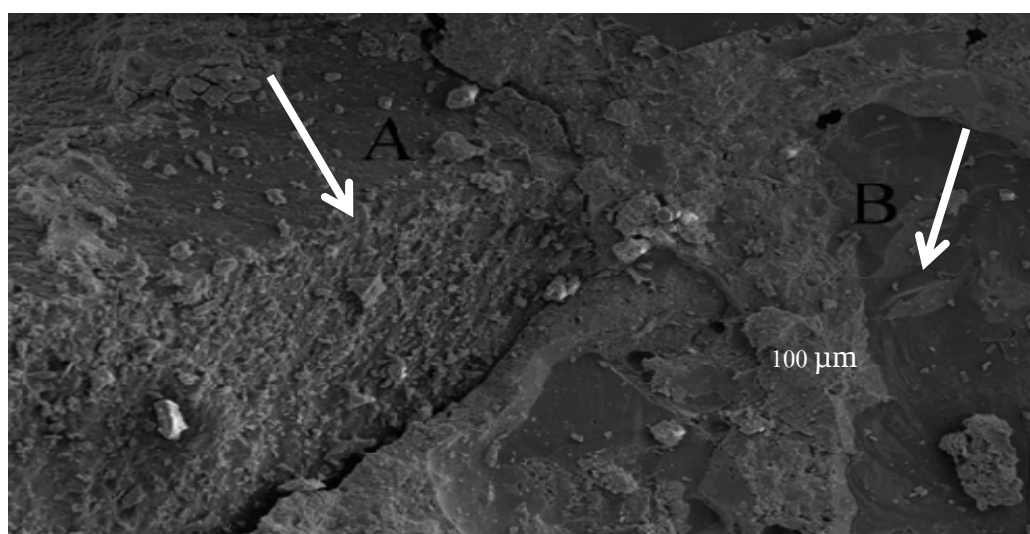
กันได้ของผงยางคาร์บอนและอิฐดินซีเมนต์แสดงดังรูปที่ 23 และ 24 จากภาพแสดงให้เห็นชัดว่ามีการแบ่งแยกระหว่างผงยางและซีเมนต์อย่างชัดเจน ซึ่งหมายความว่าไม่มีพันธะเคมีที่สามารถเชื่อมระหว่างผิวของวัสดุทั้งสอง ซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุหนึ่งของการลดถอยลงของประสิทธิภาพของอิฐดินซีเมนต์ผสมผงยางคาร์บอนได้



รูปที่ 22. แสดงอนุภาคขยายของดินท้องถิ่นราชบุรี



รูปที่ 23. ภาพถ่ายอนุภาคขยายโดยใช้ Optical microscope ของอิฐมวลเบาผสมผงยางক্রัมป์ กำลังขยาย 50 เท่า



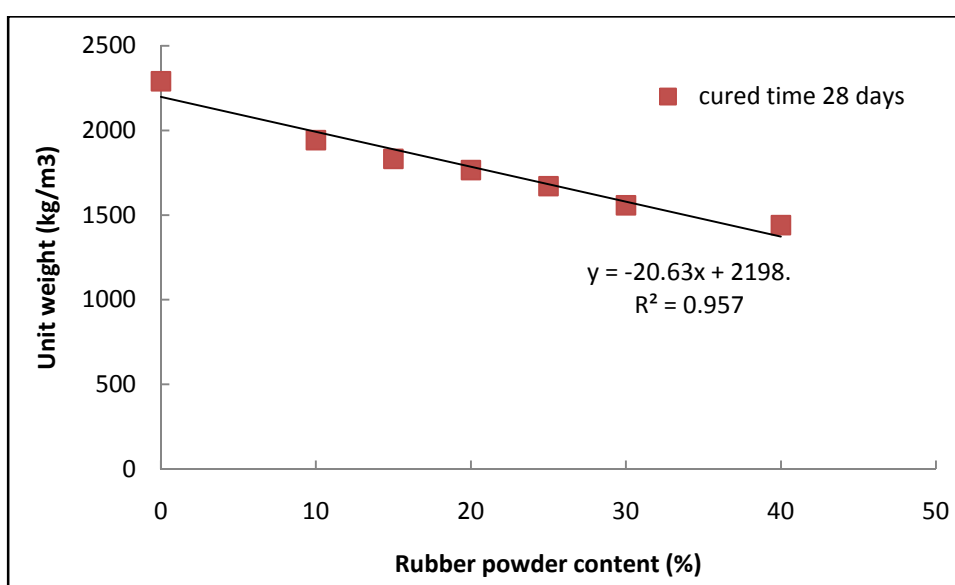
รูปที่ 24. ภาพถ่ายอนุภาคขยายโดยใช้ SEM ของอิฐมวลเบาผสมผงยางรีเคลม A คือผงยาง ส่วน B คือซีเมนต์ (กำลังขยาย 100 เท่า)

4.2 คุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ (Physical properties of products)

4.2.1 คุณสมบัติด้านหน่วยน้ำหนักของอิฐดินมวลเบาผสมผงยางรีเคลมที่ปริมาณส่วนผสมต่างๆ

a. ผลของหินฝุ่นราชบุรีที่ถูกแทนที่ด้วยผงยางครัมป์ต่อคุณสมบัติด้านหน่วยน้ำหนัก

จากการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของอิฐดินซีเมนต์ควบคุม เปรียบเทียบกับอิฐดินผสมยางรีเคลม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คงที่ร้อยละ 10 และถูกแทนที่ด้วยผงยางรีเคลม ร้อยละ 10, 15, 20, 25, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 25 พบว่าค่าหน่วยน้ำหนักของอิฐดินซีเมนต์ควบคุม (control) มีค่าสูงกว่าอิฐดินมวลเบาผสมผงยางครัมป์ในทุกสัดส่วน โดยการลดลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการเพิ่มปริมาณผงยางครัมป์ ซึ่งแสดงในรูปที่ 25 ค่าของหน่วยน้ำหนักของอิฐดินควบคุม มีค่า 2290.84 kg/m³ ส่วนอิฐดินผสมยางรีเคลม 40% มีค่าเท่ากับ 1440.33 kg/m³ ซึ่งลดลงถึง 37.62% จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่ายิ่งเติมยางรีเคลม เพื่อทดแทนปริมาณดินท้องถิ่นเพิ่มมากขึ้น ค่าหน่วยน้ำหนักยิ่งมีค่าลดลง เหตุผลสามารถอธิบายได้เป็นที่น่าสนใจเนื่องจากผงยางมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำใกล้เคียงกับ 1000 kg/m³ ดังนั้นยิ่งเติมยางรีเคลมมากเท่าไรค่าหน่วยน้ำหนักจึงลดลงมากเท่านั้น ซึ่งตรงตามวัตถุประสงค์ของงานชิ้นนี้คือผลิตอิฐมวลเบา จากวัสดุที่มีอยู่ในท้องถิ่น แต่อย่างไรก็ดีคุณสมบัติด้านอื่นๆต้องถูกพิจารณาซึ่งจะแสดงในหัวข้อถัดๆไป

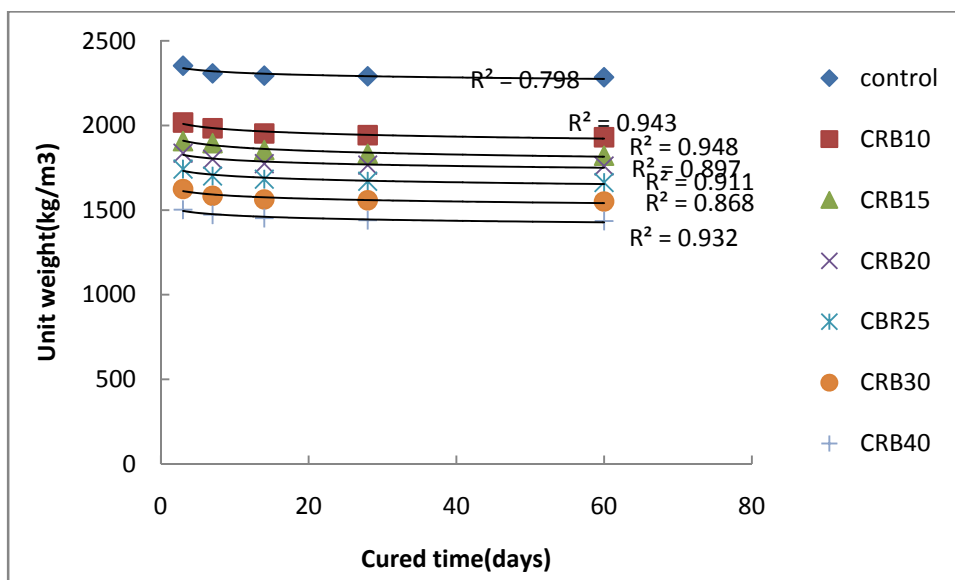


รูปที่ 25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยน้ำหนักและปริมาณการเพิ่มของผงยางครัมป์ ที่อายุการบ่ม 28 วัน

b. อิทธิพลของระยะเวลาการบ่มที่มีต่อค่าหน่วยน้ำหนัก ณ อัตราส่วนต่างๆ

พิจารณากราฟรูปที่ 26 แสดงความสัมพันธ์ของผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนัก ของอิฐดินซีเมนต์ควบคุม เปรียบเทียบกับอิฐดินซีเมนต์ ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คงที่ร้อยละ 10 ผสมกับผงยางครีမ်ที่มีปริมาณต่างๆ ร้อยละ 10,15, 20,25,30, และ 40 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อวัสดุผงเฉลี่ย ที่ (w/p)0.2588,0.2900,0.3213,0.3525,0.383 และ 0.4463 ตามลำดับ ที่อายุการบ่มตั้งแต่ 3, 7, 14, 28, และ 60 วัน ผลการทดสอบแสดงว่าทุกอัตราส่วนของปริมาณผงยางครีမ် ให้ค่าหน่วยน้ำหนักสูงสุดที่อายุการบ่ม 3 วัน

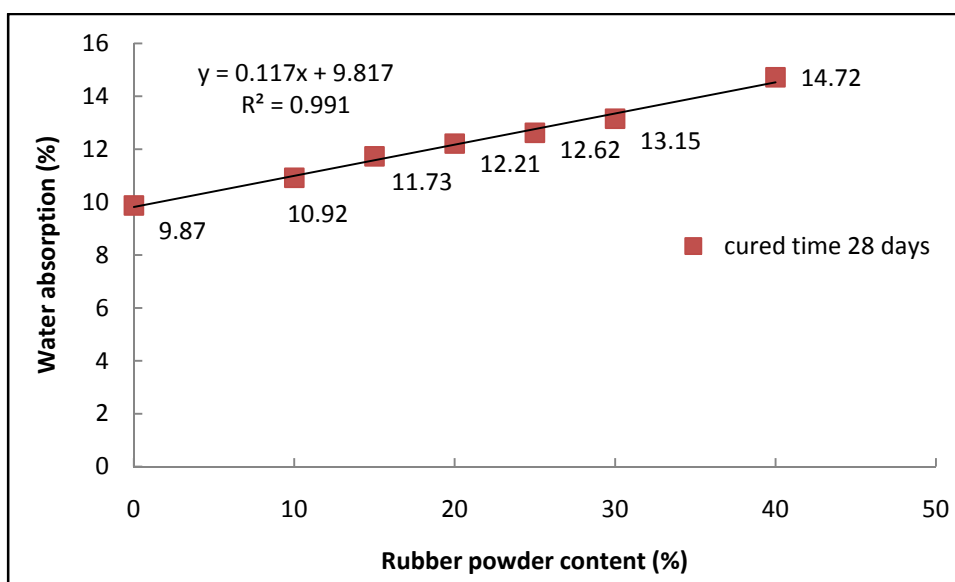
อย่างไรก็ตาม ค่าหน่วยน้ำหนักของอิฐดินซีเมนต์ควบคุม มีแนวโน้มที่ลดลงตามอายุการบ่มที่มากขึ้น ซึ่งปัจจัยการลดลงของหน่วยน้ำหนักน่าจะเกิดจากการสูญเสียปริมาณน้ำในการเกิดปฏิกิริยาของอิฐ กล่าวคือ ปริมาณน้ำบางส่วนไปทำปฏิกิริยากับซีเมนต์ (Hydration reaction) ในช่วงอายุ 28 วันแรกและ ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) ระหว่าง C-H และ SiO₂ ที่อายุหลัง 28 วัน และอีกทั้งบางส่วนได้ระเหยไปในระหว่างการบ่ม นี่จึงน่าเป็นสาเหตุของการลดลงของหน่วยน้ำหนักตามอายุการบ่มที่มากขึ้น เช่นเดียวกัน อิฐดินซีเมนต์ ผสมผงยางครีမ် มีค่าของหน่วยน้ำหนักลดลงตามปริมาณการบ่มที่เพิ่มขึ้น และอัตราการลดลงมีค่าใกล้เคียงกันทุกส่วนผสม ซึ่งเห็นได้ชัดจากรูปที่ 23 ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า การเพิ่มผงยางครีမ်ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่ดูดซึมน้ำ ดังนั้นอัตราการลดลงจึงมีค่าใกล้เคียงกัน



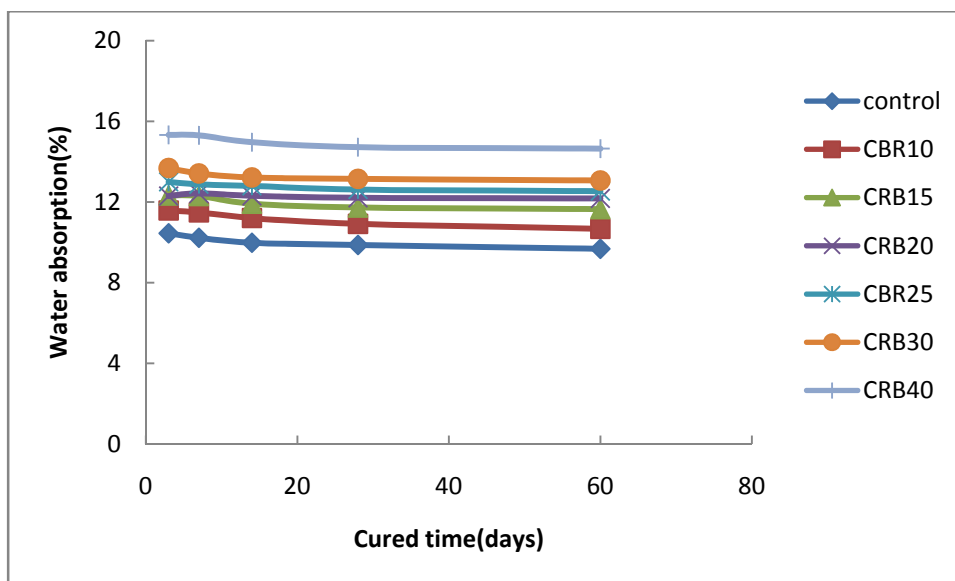
รูปที่ 26. แสดงค่าหน่วยน้ำหนักของอิฐดินซีเมนต์ผสมผงยางครีမ်ที่มีปริมาณต่างๆ ที่อายุการบ่ม 3,7,14,28, และ 60 วัน

4.2.2 คุณสมบัติด้านการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ของอิฐดินซีเมนต์ผสมผงยางครัมป์

พิจารณาผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของอิฐดินซีเมนต์ควบคุมที่ไม่ผสมผงยางครัมป์เปรียบเทียบกับ ผสมผงยางครัมป์ที่ปริมาณ 10,15,20,25,30,และ 40% โดยน้ำหนัก ที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่าค่าดูดซึมน้ำของอิฐดินซีเมนต์มีค่าสูงสุดที่ปริมาณผงยางครัมป์ร้อยละ 40 มีค่าร้อยละ 14.72 และมีค่าลดลงตามสัดส่วนการลดลงของปริมาณผงยางครัมป์ ซึ่งเห็นได้ชัดว่าอัตราการลดลงของค่าการดูดซึมน้ำมีอัตราส่วน โดยตรงกับการลดลงของผงยางรีเคลม โดยค่าดูดซึมน้ำของอิฐดินซีเมนต์ต่ำสุดที่ปริมาณผงยางครัมป์ร้อยละ 0 มีค่าร้อยละ 9.87 เหตุผลที่สามารถอธิบายผลการทดสอบคือจากการที่ผงยางไม้วัสดุที่ไม่ดูดซับน้ำ แต่จากผลการทดสอบซึ่งแสดงว่า เมื่อเติมผงยางรีเคลมเพิ่มมากขึ้น ค่าการดูดซึมน้ำสูงขึ้น ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าการรุกรานขึ้นภายในอิฐเนื่องจากความเข้ากันได้ของคอนกรีตและผงยางมีค่าต่ำมาก ยิ่งเพิ่มปริมาณผงยางมากขึ้นช่องว่างยิ่งเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นน้ำจะสามารถแทรกเข้าในช่องว่างได้มากยิ่งขึ้น รูปที่ 28 แสดงค่าการดูดซึมน้ำของอิฐดินซีเมนต์ ผสมผงยางครัมป์ที่ระยะเวลาการบ่มที่ต่างกันนี้ 3, 7, 14, 28, และ 60 วัน ผลการทดสอบแสดงว่าทุกอัตราส่วนของปริมาณผงยางรีเคลม ให้ค่าหน่วยน้ำหนักสูงสุดที่อายุการบ่ม 3 วันและค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น



รูปที่ 27. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption) และปริมาณการเพิ่มของผงยางครัมป์ ที่อายุการบ่ม 28 วัน



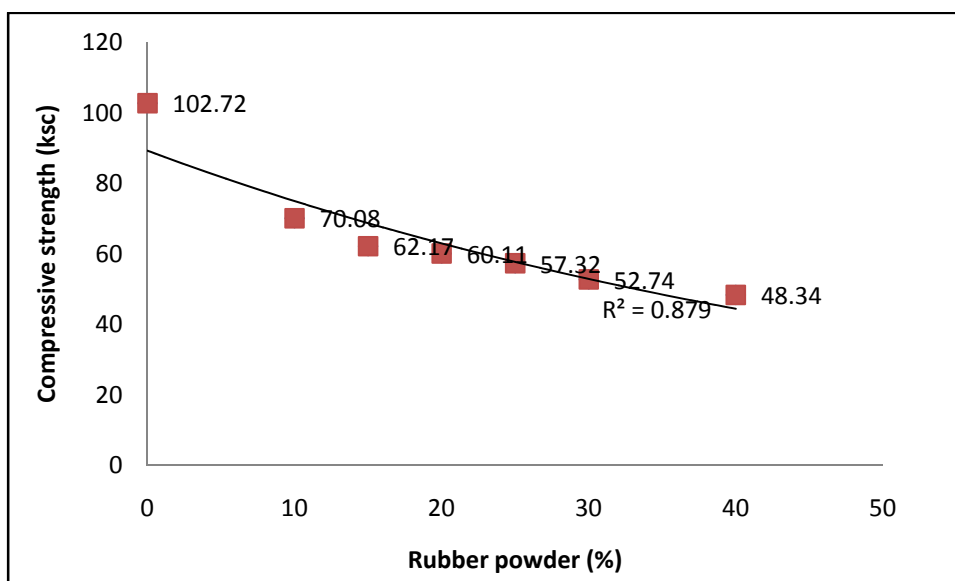
รูปที่ 28. แสดงค่าการดูดซึมน้ำ (water absorption) ของอิฐดินซีเมนต์ผสมผงยางครีမ်ที่ปริมาณต่างๆ ที่อายุการบ่ม 3,7,14,28, และ 60 วัน

4.3 คุณสมบัติทางกลศาสตร์ (Mechanical properties)

4.3.1 กำลังต้านแรงอัด (Compressive strength) ของอิฐดินซีเมนต์ ผสมผงยางรีเคลม

a. ผลของดินราชบุรีที่ถูกแทนที่ด้วยผงยางครีမ်ที่มีต่อกำลังอัดของวัสดุ

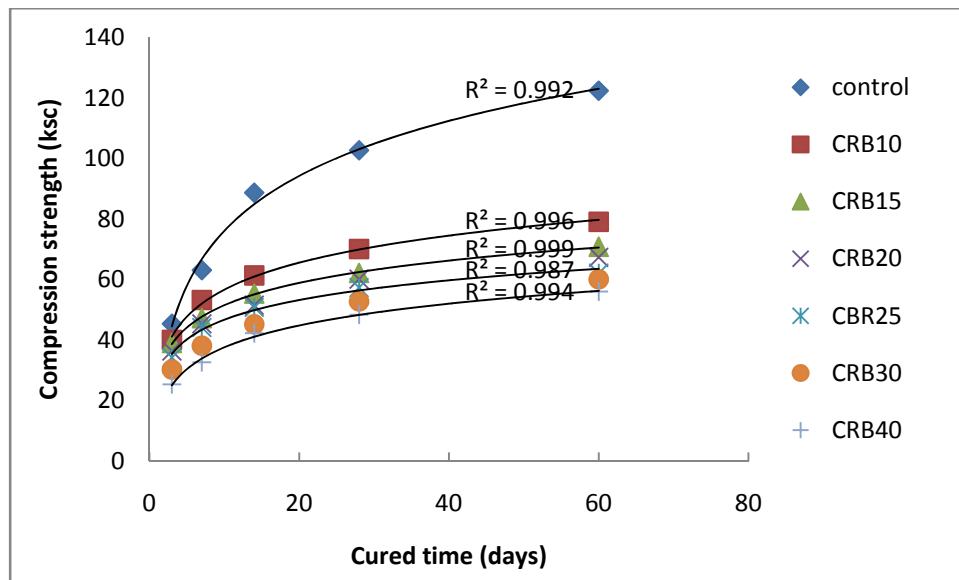
จากการทดสอบกำลังต้านแรงอัดของอิฐดินซีเมนต์ ปูนซีเมนต์กึ่งที่ร้อยละ 10 และผงยางรีเคลม ร้อยละ 10, 15, 20, 25, 30, และ 40 ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 29พบว่ากำลังต้านแรงอัดของอิฐดินซีเมนต์ควบคุมซึ่งมีปูนซีเมนต์ผสมอยู่ร้อยละ 10(control) มีค่า $102.72 \text{ Kg.cm}^{-2}$, กำลังอัดของอิฐดินซีเมนต์ผสมผงยางรีเคลม ร้อยละ 10,15,20,25,30,40 มีค่าเท่ากับ 70.08, 62.17, 60.11, 57.32, 52.74, และ 48.34 Kg.cm^{-2} ตามลำดับจากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณผงยางรีเคลมแทนที่ดินท้องถิ่นราชบุรี ค่ากำลังอัดมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าผงยางรีเคลมมีความสามารถในการรับแรงน้อยกว่าดินท้องถิ่นราชบุรี ซึ่งมีสาเหตุมาจากความเข้ากันได้ และค่าความแข็งแรงของยางซึ่งมีค่าต่ำกว่าดินมาก แต่อย่างไรก็ดีค่าต่ำสุดที่ปริมาณผงยางรีเคลม ร้อยละ 40 มีค่า 48.34 Kg.cm^{-2} ซึ่งยังคงผ่านมาตรฐานกำลังอัดของอิฐไม่รับแรง มอก.77-2531



รูปที่ 29. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัด (Compressive strength) และปริมาณการเพิ่มของผงยางครัมป์ ที่อายุการบ่ม 28 วัน

b. อิทธิพลของระยะเวลาการบ่มที่มีต่อแรงต้านกำลังอัด

รูปที่ 30 แสดงความสัมพันธ์ของผลการทดสอบค่ากำลังอัดของอิฐดินซีเมนต์ควบคุมเปรียบเทียบกับอิฐดินซีเมนต์ผสมผงยางครัมป์ อายุการบ่มตั้งแต่ 3, 7, 14, 28, และ 60 วัน โดยทำการพิจารณาถึงผลของการเพิ่มอายุการบ่มที่มีต่อค่ากำลังอัด พบว่าอิฐดินซีเมนต์ควบคุม มีค่าแรงต้านกำลังอัดเพิ่มขึ้น เมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นจะเป็นไปอย่างรวดเร็วในช่วงแรก ซึ่งอธิบายได้เป็นเพราะว่าการเกิดปฏิกิริยา ไฮเดรชัน หลังจาก 28 วัน ปฏิกิริยาเคมี ปอซโซลาน จะเกิดขึ้นเนื่องจากในส่วนผสมของดินราหบุรี มีธาตุจำพวก ซิลิกา ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยา ปอซโซลาน ทำให้คอนกรีตการแข็งตัวเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆเช่นเดียวกันเมื่อพิจารณาอิฐดินซีเมนต์ผสมผงยางรีเคลม พบว่าค่ากำลังอัดก็ยังมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามอายุการบ่มที่มากขึ้นโดยเป็นไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคือกำลังอัดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงประมาณ 28 วันหลังจากนั้นเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ซึ่งนั่นก็คือปฏิกิริยาการตั้งที่กล่าวมาข้างต้น

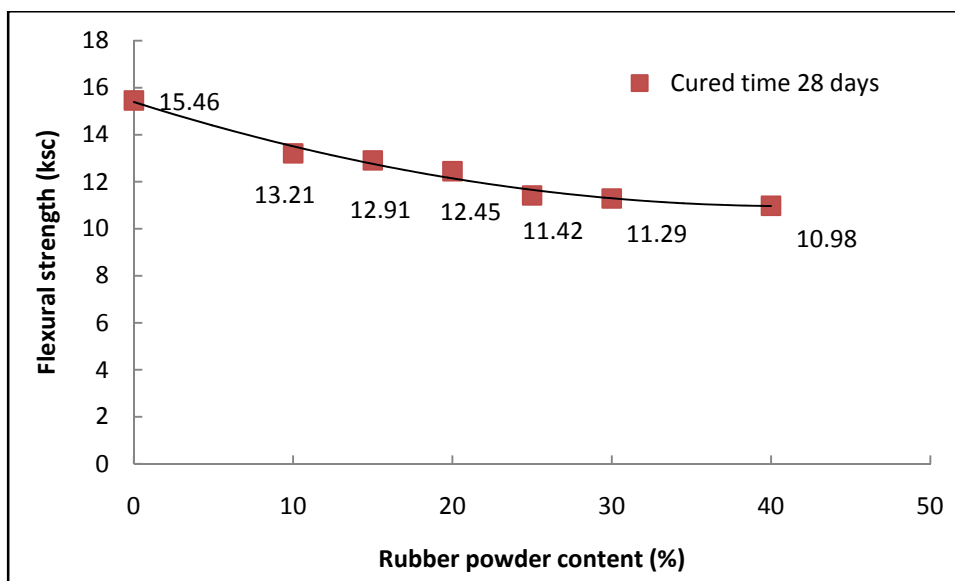


รูปที่ 30. ค่ากำลังอัดของอิฐดินซีเมนต์ควมคุม ที่อายุการป่ม 3,7,14,28, และ 60

4.3.2 กำลังคั้ด (Flexural Strength on Modulus of Rupture) ของอิฐดินซีเมนต์ผสมผงยางรีเคลม

a. ผลของดินราชบุรีที่ถูกแทนที่ด้วยผงยางครัมป์ที่มีต่อกำลังคั้ดของวัสดุ

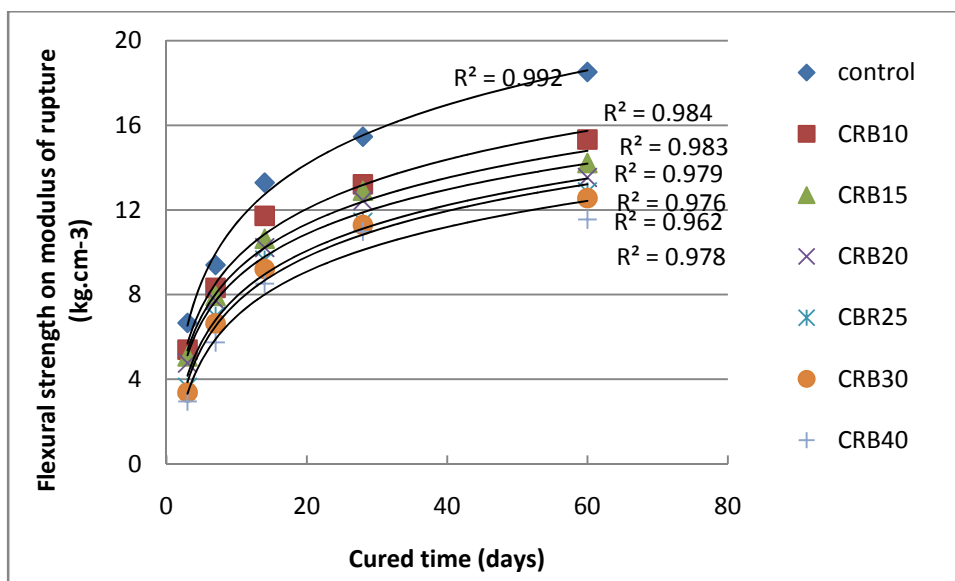
จากการทดสอบกำลังด้านแรงคั้ดในรูปของโมดูลัสการแตกหักของวัสดุภายใต้แรงคั้ดสูงสุดของอิฐดินซีเมนต์ควมคุมซึ่งไม่ได้ผสมผงยางครัมป์ เปรียบเทียบกับอิฐดินซีเมนต์ที่ผสมผงยางครัมป์ ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คงที่ร้อยละ 10 และผสมผงยางครัมป์ร้อยละ 0, 10, 15, 20, 25, 30, และ 40 โคน้ำหนัก ที่อายุการป่ม 28 วัน ดังแสดงในรูปที่31พบว่ากำลังด้านแรงคั้ดของอิฐดินซีเมนต์มีแนวโน้มที่เหมือนกับค่ากำลังแรงกดอัด นั่นคือมีค่าลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของผงยางรีเคลม โดยค่าสูงสุดที่ปริมาณผงยางรีเคลม 0% มีค่าคือ 15.46 ksc และค่าต่ำสุดที่ปริมาณผงยางรีเคลม 40% มีค่าคือ 10.98 ksc ซึ่งมีค่าลดลงถึง 29%



รูปที่ 31. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดัด (Flexural strength) และปริมาณการเพิ่มของผงยางครัมป์ ที่อายุการบ่ม 28 วัน

b. อิทธิพลของระยะเวลาการบ่มที่มีต่อแรงต้านกำลังดัด

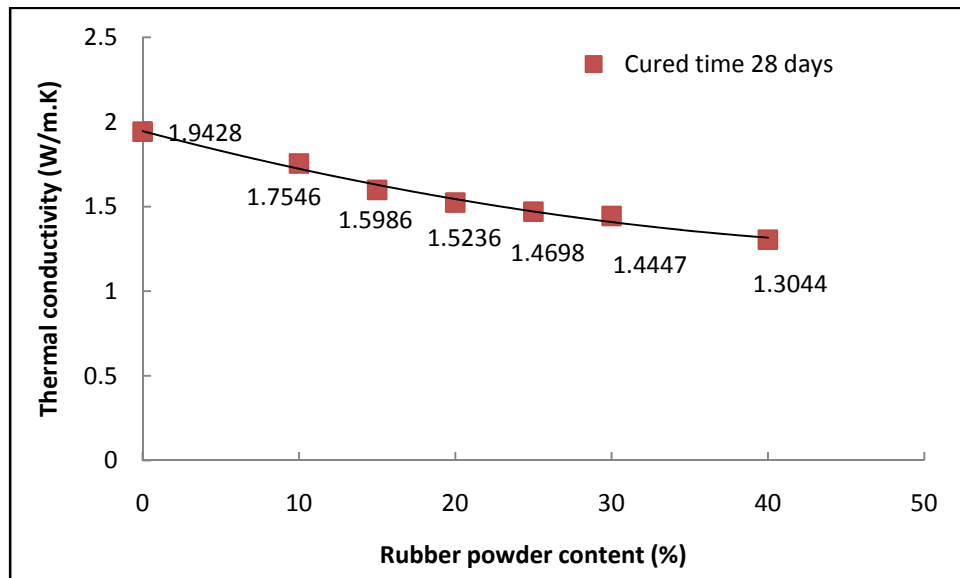
รูปที่ 32. แสดงความสัมพันธ์ของผลการทดสอบค่ากำลังดัดของอิฐดินซีเมนต์ที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คงที่ร้อยละ 10 อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อวัสดุผงเฉลี่ย (w/p) เท่ากับ 0.1963 ที่อายุการบ่มตั้งแต่ 3, 7, 14, 28, และ 60 วัน โดยจะทำการพิจารณาถึงผลของการเพิ่มอายุการบ่มที่มีต่อค่ากำลังดัด พบว่าอิฐดินซีเมนต์ควบคุม มีค่าแรงต้านกำลังดัดเพิ่มขึ้น เมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันเมื่อพิจารณาอิฐดินซีเมนต์ผสมผงยางครัมป์ พบว่าค่ากำลังดัดก็ยังมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามอายุการบ่มที่มากขึ้นโดยเป็นไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคือกำลังดัดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงประมาณ 28 วันหลังจากนั้นเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ซึ่งสอดคล้องกับผลของการทดสอบกำลังดัด ที่กล่าวมาข้างต้น



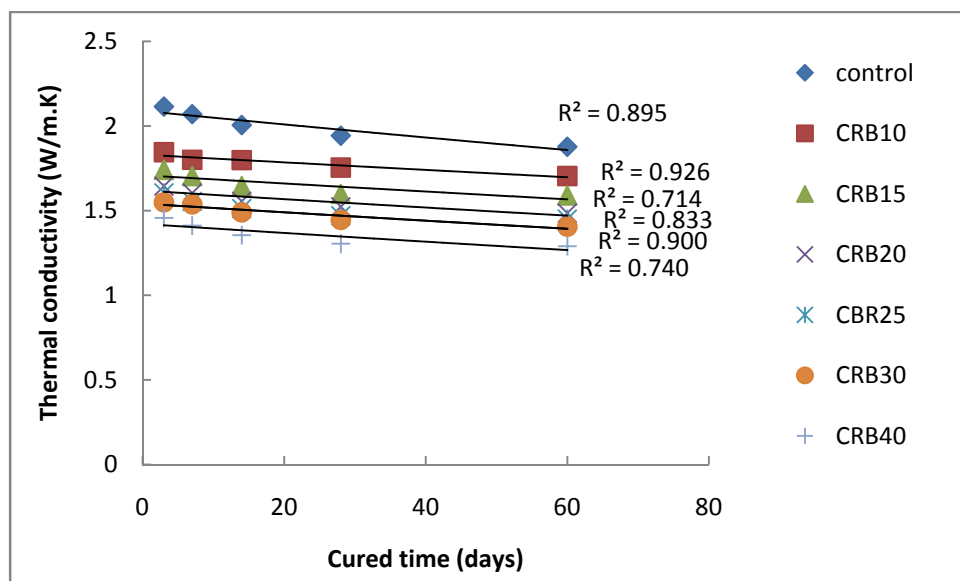
รูปที่ 32. ค่ากำลังดัดของอิฐดินซีเมนต์ผสมผงยางครัมป์ ที่อายุการบ่ม 3,7,14,28, และ 60 วัน

4.3.3 คุณสมบัติด้านการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของอิฐดินซีเมนต์ผสมผงยางครัมป์

จุดประสงค์หลักของงานชิ้นนี้คือการผลิตอิฐดินซีเมนต์มวลเบาผสมผงยางครัมป์ที่มีคุณสมบัติด้านน้ำหนักเบา ด้านการต้านทานความร้อน และเป็นการใช้วัสดุภายในท้องถิ่น ซึ่งผลการทดสอบด้านการนำความร้อนได้แสดงในรูปที่ 33 เป็นผลการทดสอบเปรียบเทียบอิฐดินซีเมนต์ผสมปริมาณผงยางครัมป์ที่ต่างกันตั้งแต่ ร้อยละ 0,10,15,20,25,30,และ 40 ตามลำดับ ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน ผลการทดสอบพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณผงยางรีเคลมลงไปในอิฐ ค่าการนำความร้อนของอิฐดินซีเมนต์ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนสูงสุดที่ปริมาณผงยางรีเคลม 0 % มีค่าคือ 1.9428 W/mK และค่าต่ำสุดที่ปริมาณผงยางรีเคลมร้อยละ 40 มีค่าคือ 1.3044 ซึ่งมีค่าลดลงถึง 32.86% ซึ่งเหตุผลที่สามารถอธิบายพฤติกรรมนี้คือ ค่าการนำความร้อนของยางมีค่าต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตคือ 0.100518 W/mK ดังนั้นจึงเป็นข้อมูลที่สอดคล้องกับผลการทดสอบที่เกิดขึ้น จากรูปที่16 แสดงผลการทดสอบของค่าการนำความร้อนของอิฐดินซีเมนต์ผสมผงยางรีเคลมที่ปริมาณต่างๆ และที่อายุการบ่มที่ต่างกัน ผลการทดสอบพบว่าค่าการนำความร้อนมีค่าลดลงเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ทุกส่วนผสมจะมีค่าอัตราการลดลงรวดเร็วใน 28 วันแรกหลังจากนั้นค่าจะค่อยๆลดลง ซึ่งอาจสามารถอธิบายปรากฏการณ์นี้ได้ว่า เป็นเพราะปริมาณน้ำซึ่งมีค่าการนำความร้อนที่ 0.56 W/mK ซึ่งยังมีอยู่ในอิฐยังคงมีอยู่ในช่วงแรก หลังจากนั้นน้ำระเหยไปบางส่วน และบางส่วนทำปฏิกิริยากับซีเมนต์และปฏิกิริยา ปอซโซลาน ทำให้ปริมาณน้ำลดลง นี่อาจจะเป็นสาเหตุของการลดลงของค่าการนำความร้อนของอิฐดินซีเมนต์ผสมผงยางรีเคลม



รูปที่ 33. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) และปริมาณการเพิ่มของผงยางครัมป์ ที่อายุการบ่ม 28 วัน



รูปที่ 34. ค่าการนำความร้อนของอิฐดินซีเมนต์ผสมผงยางครัมป์ ที่อายุการบ่ม 3,7,14,28, และ 60 วัน

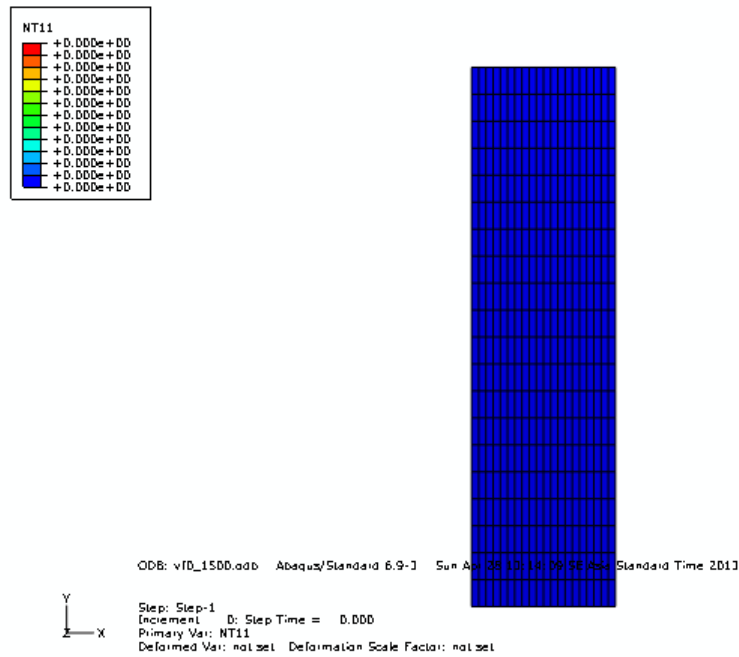
4.4 ผลการจำลองพฤติกรรมโดยใช้ ไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Analysis)

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติต่างๆของอิฐดินผสมผงยางบด รวมถึงคุณสมบัติการส่งผ่านความร้อน โดยทำการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ อิฐดิน

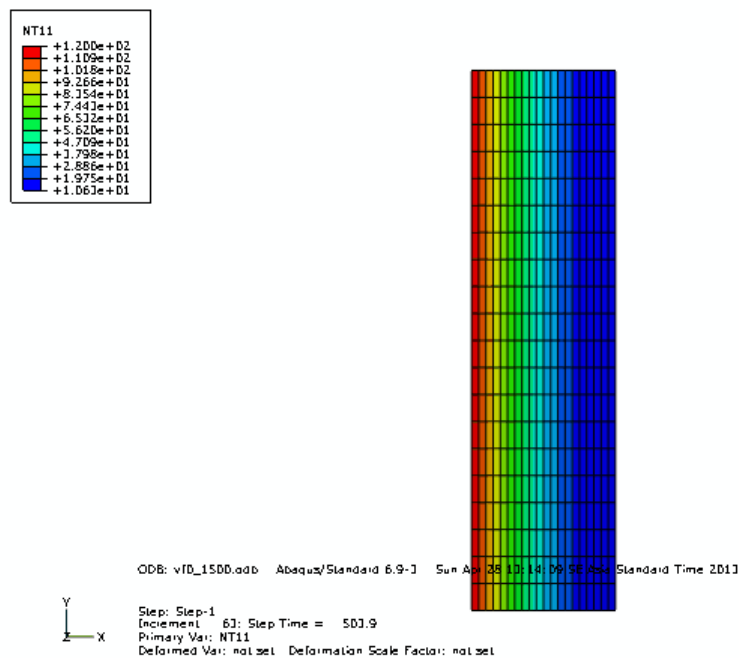
ที่ทำการทดสอบถูกทดสอบที่ปริมาณผงยางที่แตกต่างกันคือ 0, 10, 20, 30 และ 40 % โดยปริมาตร ความร้อนจะถูกใส่ทางด้านหนึ่งของอิฐที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส และอีกทางด้านของอิฐจะถูกวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ณ เวลาที่ 0, 500, 1000 และ 1500 วินาทีดังแสดงในรูปที่ 35-54 ซึ่งจากภาพแบบจำลองพบว่าที่ปริมาณผงยาง 0 % ความร้อนสามารถผ่านอิฐไปได้อย่างรวดเร็วและค่อนข้างเท่ากัน ต่างกับเมื่อเพิ่มปริมาณผงยาง ภาพแสดงเส้นความร้อนจะช้าลงเมื่อผ่านผงยาง ซึ่งเป็นผลมาจากค่าคงที่การส่งผ่านความร้อน (Thermal conductivity) ที่มีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์ จึงมีผลให้อุณหภูมิ ที่อีกด้านหนึ่งมีค่าต่ำกว่า

จากผลการทดสอบจากไฟไนต์อิลิเมนต์ พบว่าที่เวลาเท่ากันอิฐดินที่ผสมผงยางบดในปริมาณที่สูงกว่าสามารถชะลอการเพิ่มสูงขึ้นของอุณหภูมิได้ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบจริง การเปรียบเทียบผลการทดสอบจริงและจากโปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์ แสดงดังรูปที่ 53. จากกราฟเป็นการแสดงผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของอิฐกับเวลาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งทั้งสองผลการทดลองให้ค่าที่สอดคล้องกันคือ อุณหภูมิลดต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณผงยางคริมพ์ และเมื่อเปรียบเทียบในแต่ละปริมาณผงยางพบพบว่า ค่าทั้งสองมีความใกล้เคียงกันมาก โดยค่าจากไฟไนต์อิลิเมนต์มีค่าต่ำกว่าผลการทดสอบจริงเล็กน้อย

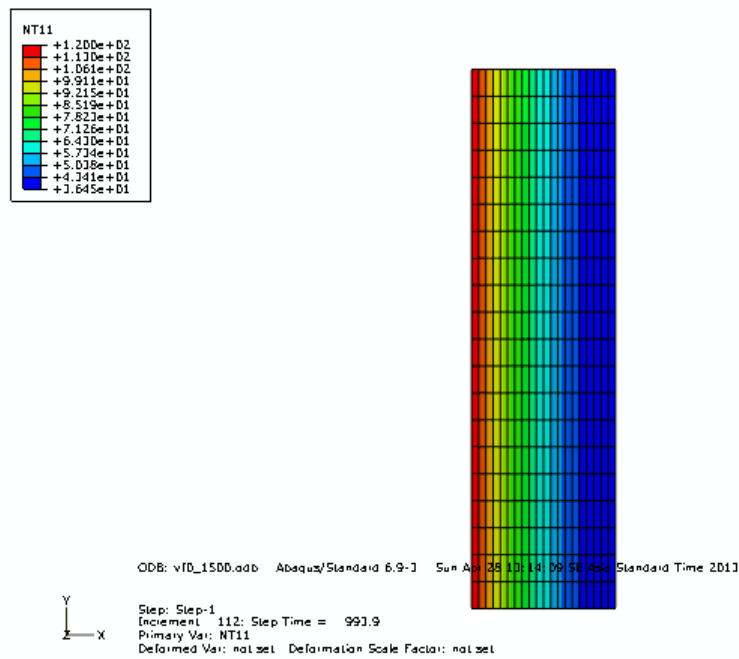
จากปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่าในวัสดุจริงปริมาณฟองอากาศซึ่งมีผลต่อค่าส่งผ่านความร้อน ฟองอากาศสามารถต้านทานการนำความร้อนได้เนื่องจากค่าการนำความร้อนที่ต่ำ แต่ในไฟไนต์อิลิเมนต์ ทางคณะวิจัยไม่ได้ทำการใส่ค่าฟองอากาศลงไปเนื่องจากความซับซ้อนและต้องการการแสดงผลที่ละเอียดและต้องการเวลาเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ดี ค่าที่ได้ถือว่ามีความใกล้เคียงกันอย่างยิ่ง ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าโปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์สามารถจำลองการส่งผ่านความร้อนของวัสดุได้อย่างถูกต้องซึ่งสามารถนำไปใช้ในการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นของวัสดุประเภทนี้สำหรับบ้านประหยัดพลังงานได้จริงตามวัตถุประสงค์ของการศึกษา



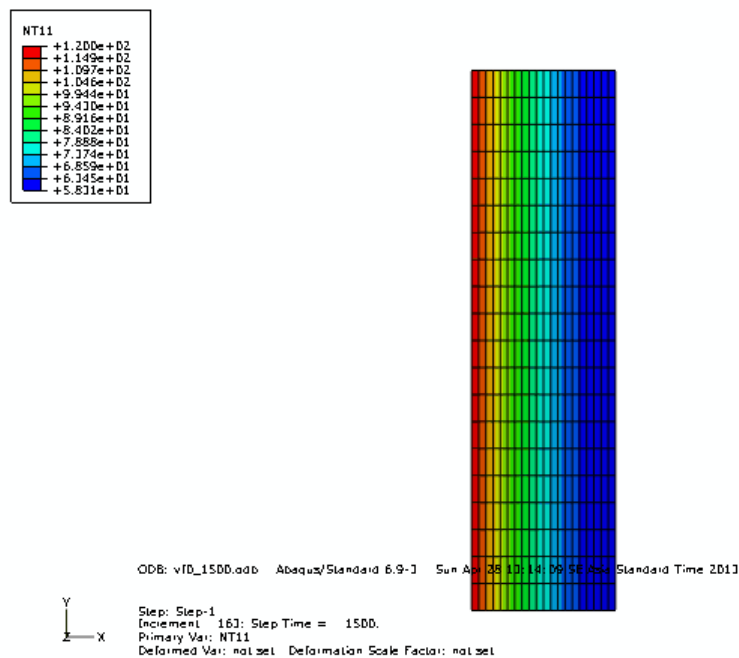
รูปที่ 35. แสดงแบบจำลองที่ปริมาณยางผงที่ 0% โดยปริมาตร ที่เวลาการส่งผ่านความร้อน 0 วินาที



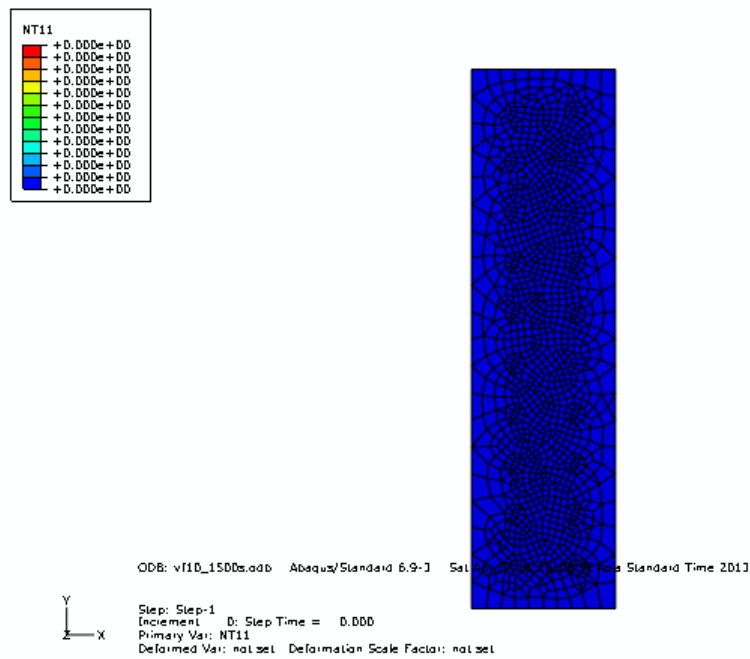
รูปที่ 36. แสดงแบบจำลองที่ปริมาณยางผงที่ 0% โดยปริมาตร ที่เวลาการส่งผ่านความร้อน 500 วินาที



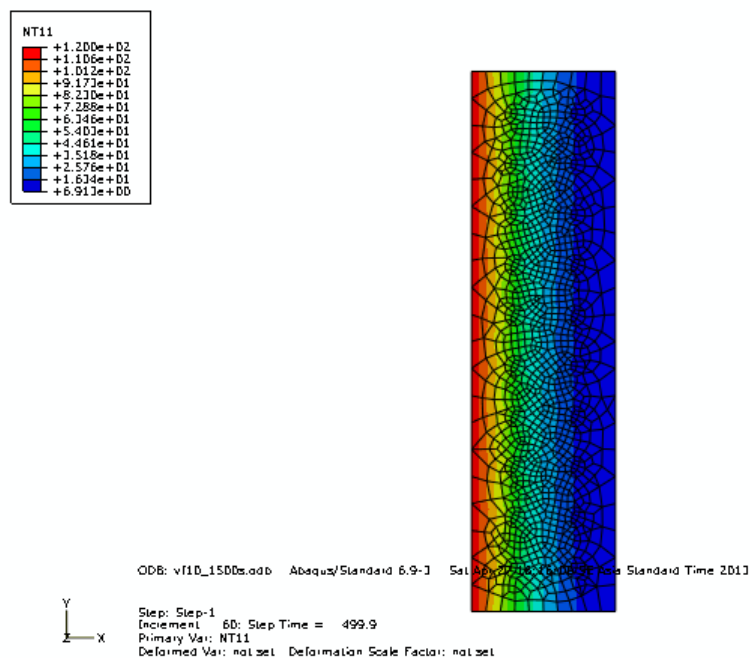
รูปที่ 37. แสดงแบบจำลองที่ปริมาณยางผงที่ 0% โดยปริมาตร ที่เวลาการส่งผ่านความร้อน 1000 วินาที



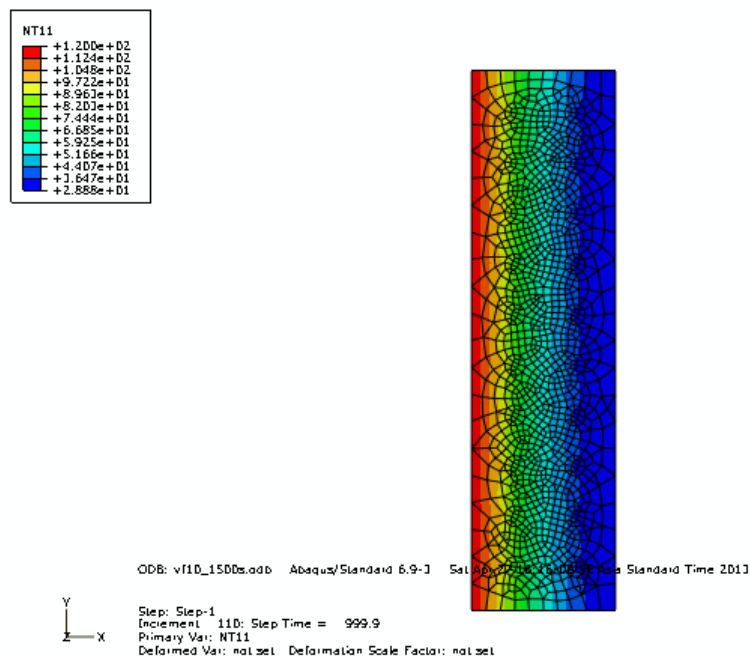
รูปที่ 38. แสดงแบบจำลองที่ปริมาณยางผงที่ 0% โดยปริมาตร ที่เวลาการส่งผ่านความร้อน 1500 วินาที



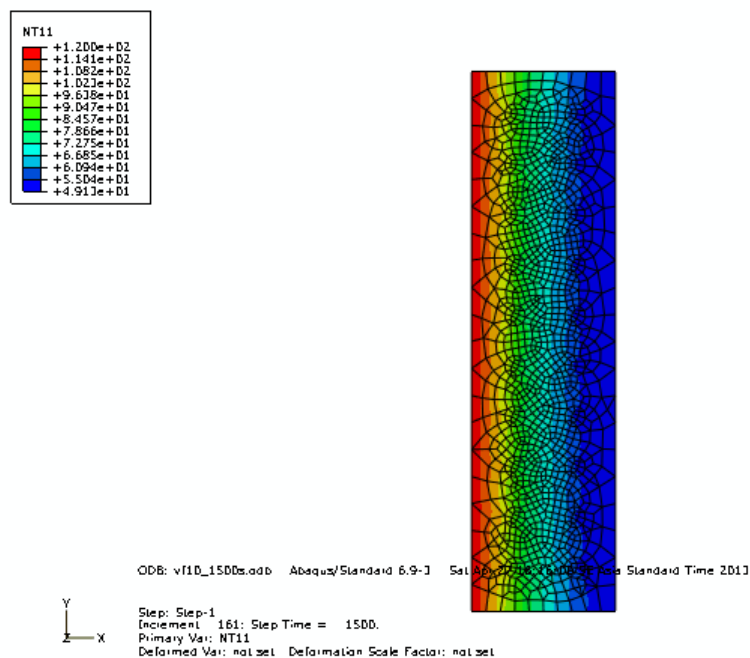
รูปที่ 39. แสดงแบบจำลองที่ปริมาณยางผงที่ 10% โดยปริมาตร ที่เวลาการส่งผ่านความร้อน 0 วินาที



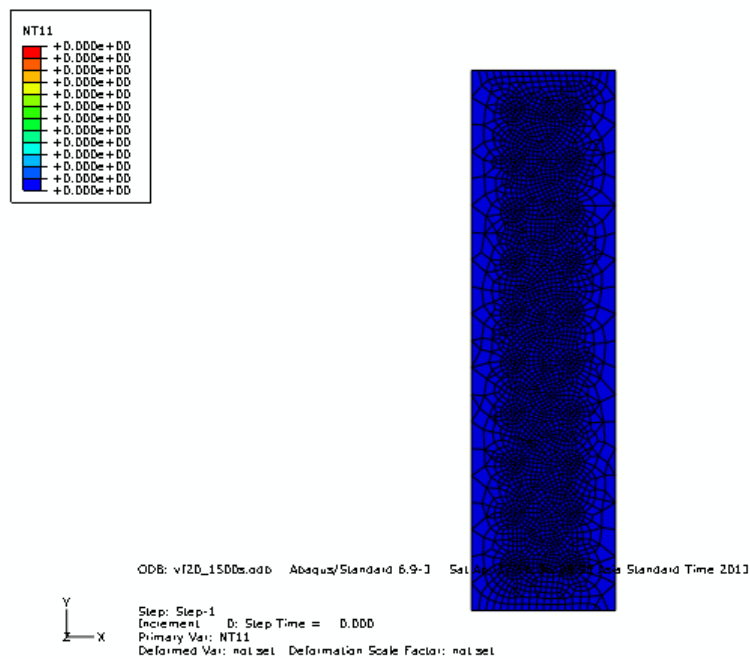
รูปที่ 40. แสดงแบบจำลองที่ปริมาณยางผงที่ 10% โดยปริมาตร ที่เวลาการส่งผ่านความร้อน 500 วินาที



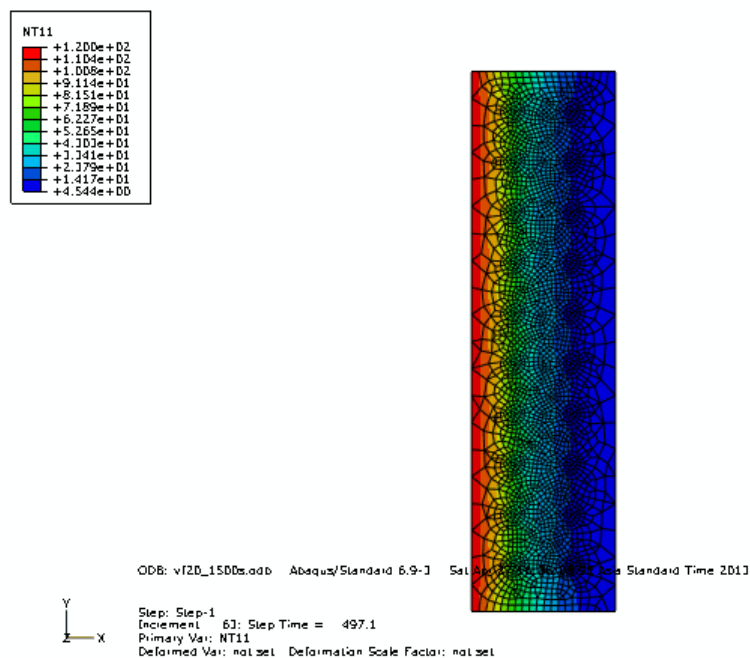
รูปที่ 41. แสดงแบบจำลองที่ปริมาณยางผงที่ 10% โดยปริมาตร ที่เวลาการส่งผ่านความร้อน 1000 วินาที



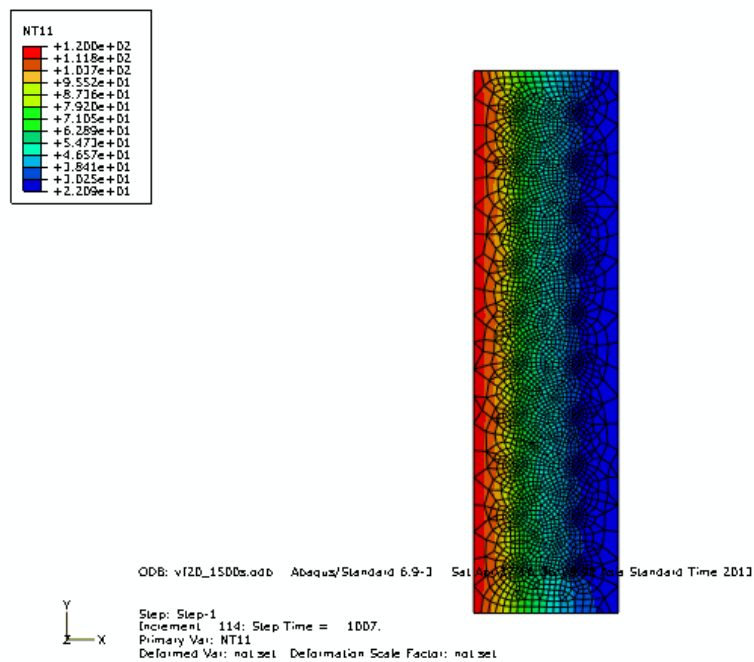
รูปที่ 42. แสดงแบบจำลองที่ปริมาณยางผงที่ 10% โดยปริมาตร ที่เวลาการส่งผ่านความร้อน 1500 วินาที



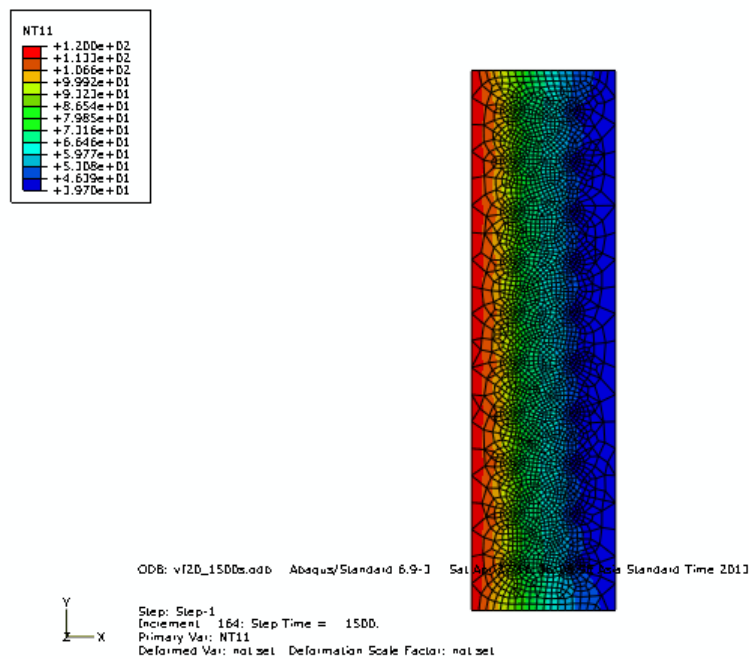
รูปที่ 43. แสดงแบบจำลองที่ปริมาณยางผงที่ 20% โดยปริมาตร ที่เวลาการส่งผ่านความร้อน 0 วินาที



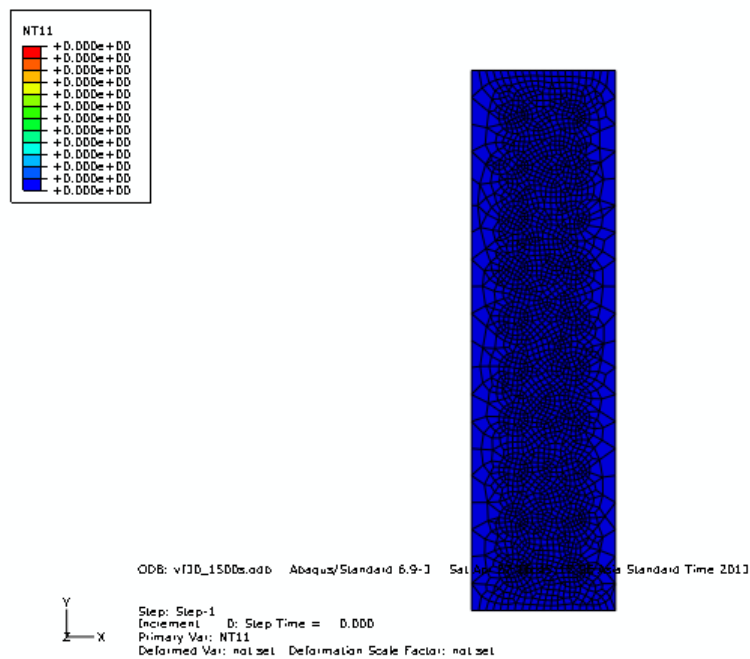
รูปที่ 44. แสดงแบบจำลองที่ปริมาณยางผงที่ 20% โดยปริมาตร ที่เวลาการส่งผ่านความร้อน 500 วินาที



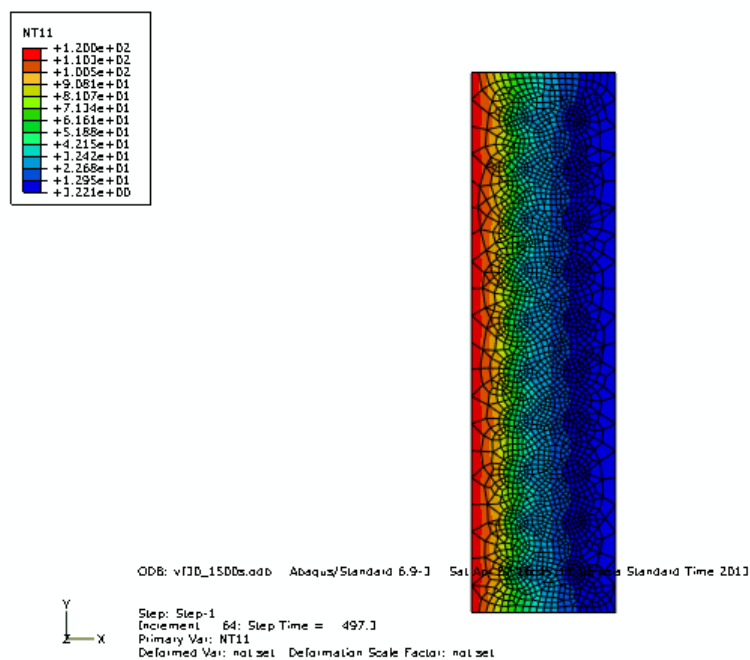
รูปที่ 45. แสดงแบบจำลองที่ปริมาณยางผงที่ 20% โดยปริมาตร ที่เวลาการส่งผ่านความร้อน 1000 วินาที



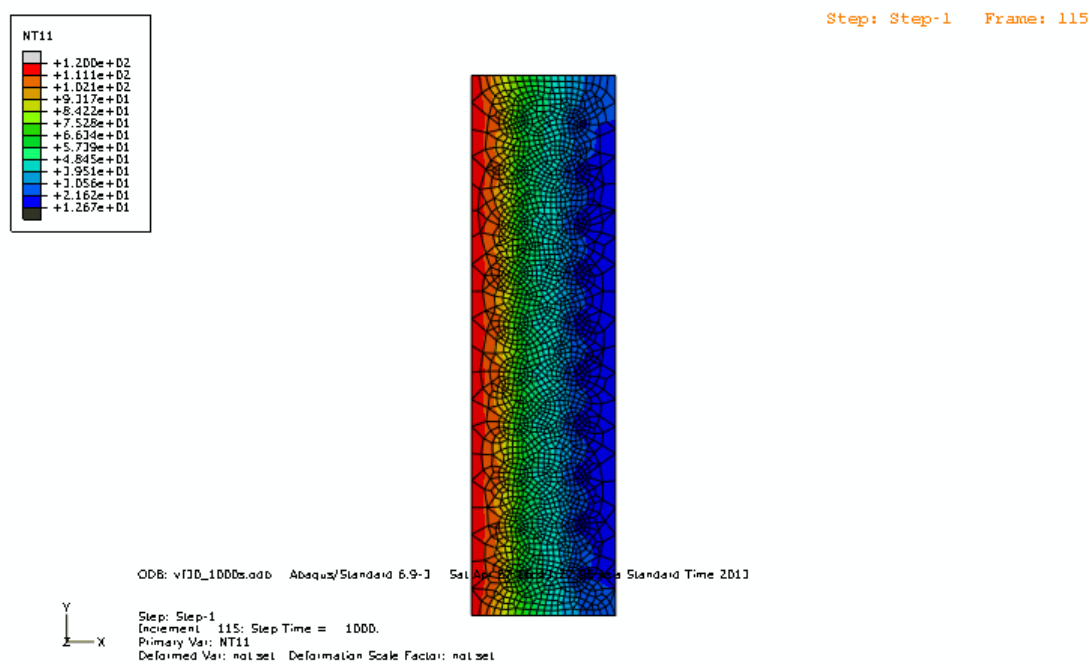
รูปที่ 46. แสดงแบบจำลองที่ปริมาณยางผงที่ 0% โดยปริมาตร ที่เวลาการส่งผ่านความร้อน 1500 วินาที



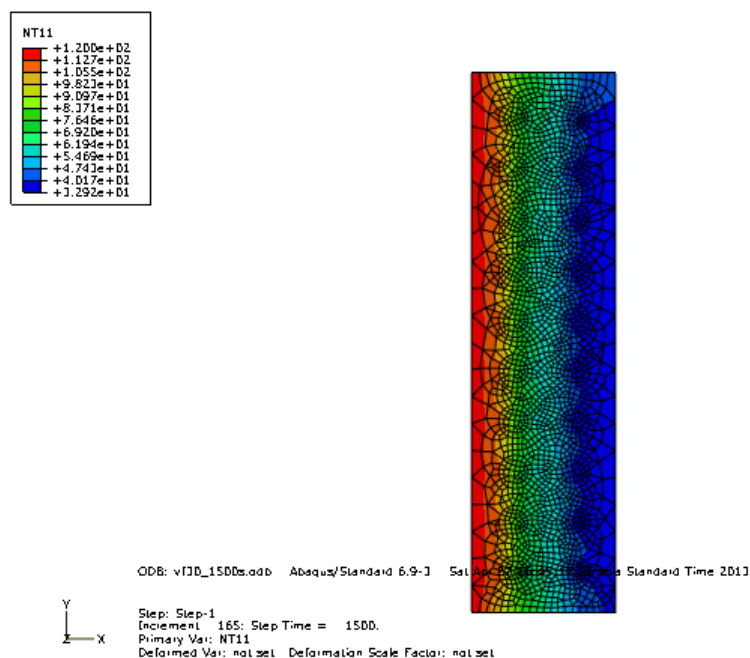
รูปที่ 47. แสดงแบบจำลองที่ปริมาณยางผงที่ 30% โดยปริมาตร ที่เวลาการส่งผ่านความร้อน 0 วินาที



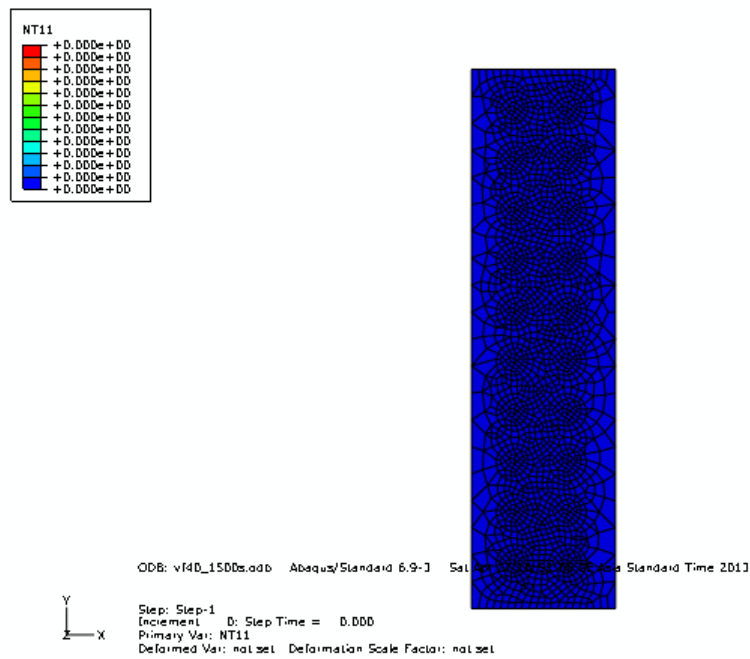
รูปที่ 48. แสดงแบบจำลองที่ปริมาณยางผงที่ 30% โดยปริมาตร ที่เวลาการส่งผ่านความร้อน 500 วินาที



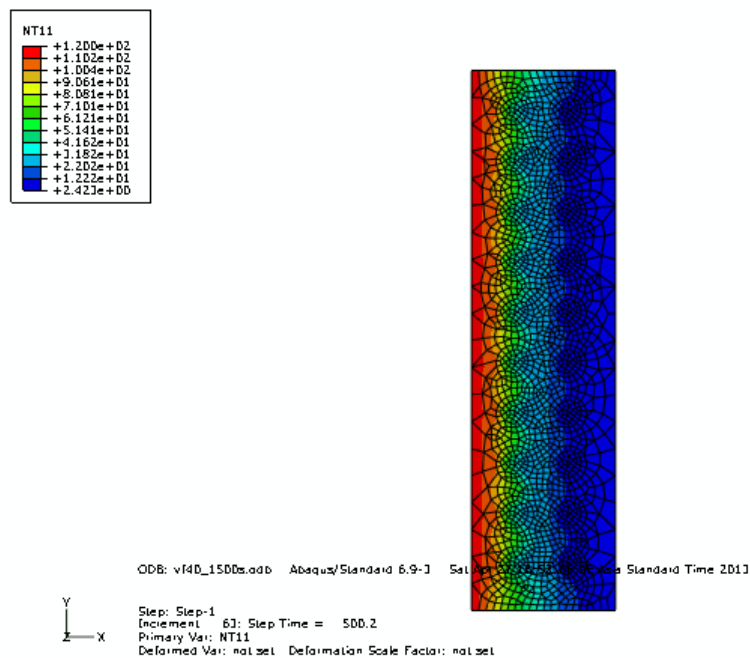
รูปที่ 49. แสดงแบบจำลองที่ปริมาณยางผงที่ 30% โดยปริมาตร ที่เวลาการส่งผ่านความร้อน 1000 วินาที



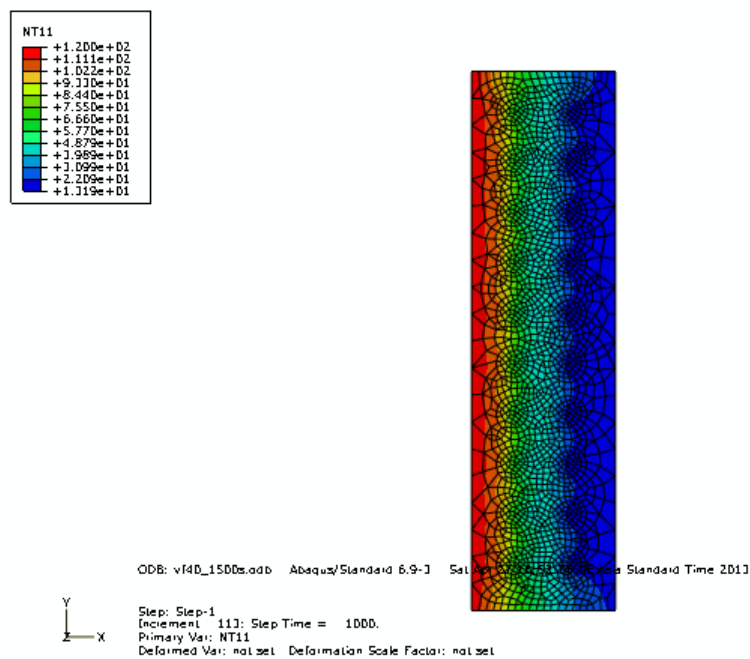
รูปที่ 50. แสดงแบบจำลองที่ปริมาณยางผงที่ 30% โดยปริมาตร ที่เวลาการส่งผ่านความร้อน 1500 วินาที



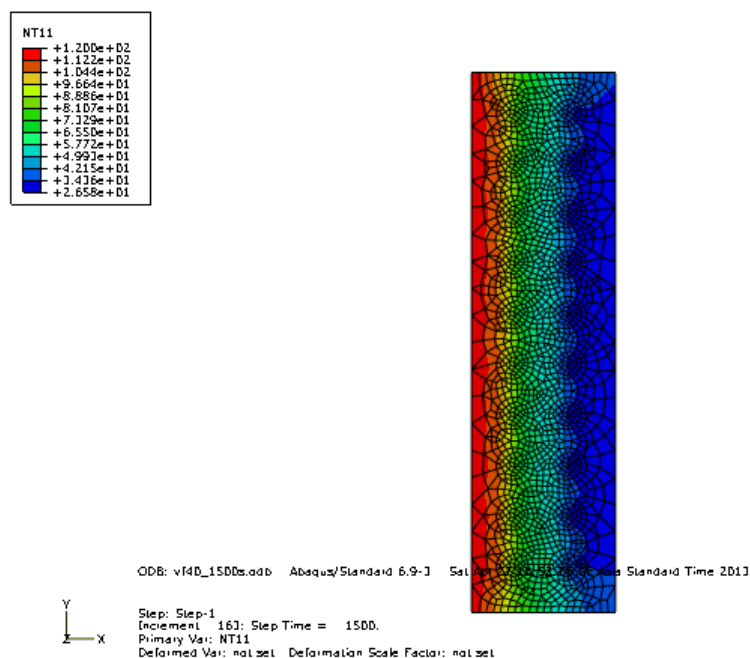
รูปที่ 51. แสดงแบบจำลองที่ปริมาตรยางผงที่ 40% โดยปริมาตร ที่เวลาการส่งผ่านความร้อน 0 วินาที



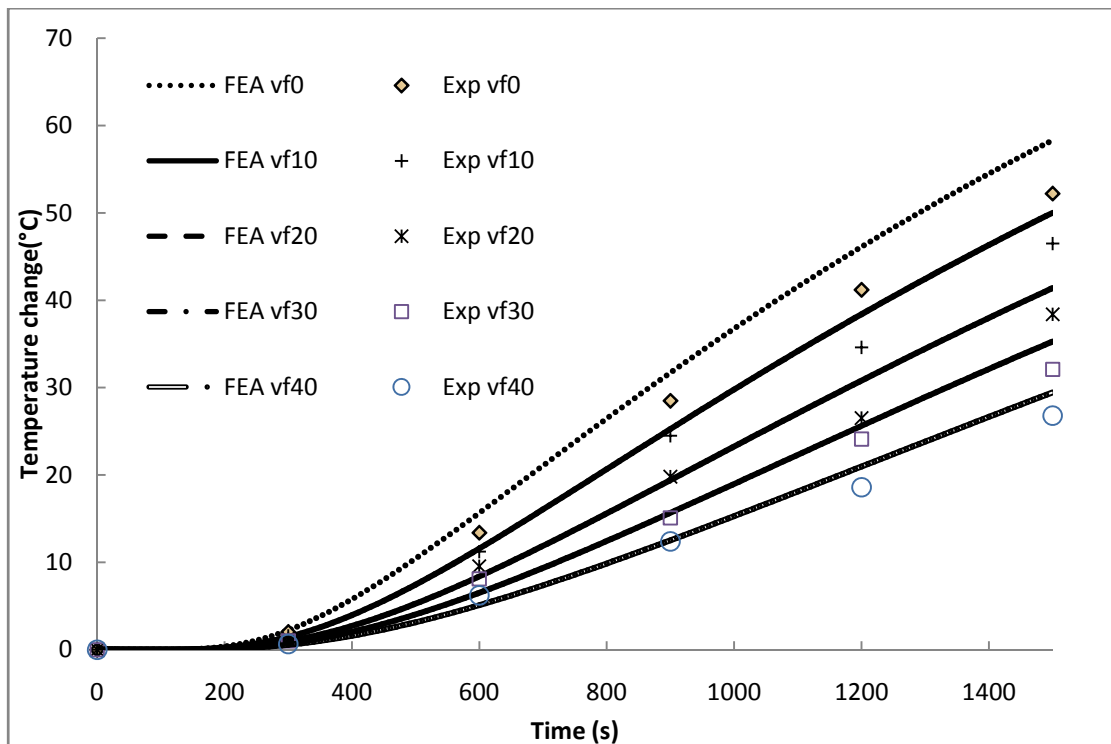
รูปที่ 52. แสดงแบบจำลองที่ปริมาตรยางผงที่ 40% โดยปริมาตร ที่เวลาการส่งผ่านความร้อน 500 วินาที



รูปที่ 53. แสดงแบบจำลองที่ปริมาณยางผงที่ 40% โดยปริมาตร ที่เวลาการส่งผ่านความร้อน 1000 วินาที



รูปที่ 54. แสดงแบบจำลองที่ปริมาณยางผงที่ 40% โดยปริมาตร ที่เวลาการส่งผ่านความร้อน 1500 วินาที



รูปที่ 55. เปรียบเทียบอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นของอิฐดินผสมผงยาง ณ ปริมาณต่างๆ เปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์

4.5 การวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์ (Economic analysis)

การผลิตอิฐดินผสมยางครัมป์ต่อก้อนมีต้นทุนที่ประมาณ 5.10 บาท ต่อก้อน ซึ่งโดยปกติวัสดุก่อผนังแบบไม่รับแรงทั่วไป ราคาขายในพื้นที่ที่ทำการศึกษาคือ (อำเภอจอมบึง จังหวัดราชบุรี ปี 2553-54) ต้นทุนผลิตจะอยู่ที่ประมาณก้อนละ 5.60 บาท สำหรับอิฐซีเมนต์บล็อก, 0.85 บาท สำหรับอิฐแดง และ 27.00 บาทสำหรับอิฐมวลเบา ตามลำดับ

ในด้านการก่อสร้างบ้านโดยทั่วไปจะประกอบด้วย 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ ด้านระบบโครงสร้าง, ด้านสถาปัตยกรรม และ ด้านสุขภัณฑ์และสิ่งอำนวยความสะดวก อาคารต้นแบบที่สร้างด้วยอิฐดินประสานปอชโซลานนั้นจะมีเพียง ด้านระบบโครงสร้างและด้านสุขภัณฑ์และสิ่งอำนวยความสะดวก เท่านั้น เนื่องจากมีสีสันทาสวยงามตามธรรมชาติจึงไม่จำเป็นต้องฉาบปูนและทาสี ซึ่ง จะเป็นในส่วน ของด้านสถาปัตยกรรม เช่นเดียวกันอาคารทั่วไปที่สร้างด้วยอิฐซีเมนต์บล็อกและอิฐแดงล้วนจะต้อง ทำการฉาบปูนและทาสีเพื่อความสวยงาม

อย่างไรก็ตามจึงเป็นข้อได้เปรียบขององค์อาคารที่ก่อสร้างด้วยอิฐดินผงยางครัมป์ เมื่อพิจารณาวัสดุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (1 ตารางเมตร, ฉาบผนัง 2 ด้าน) ของผนังที่ก่อสร้างด้วยอิฐดินผงยางครัมป์ฐานมีมูลค่า 244.10 บาทต่อตารางเมตร, อิฐซีเมนต์บล็อกมีมูลค่า 503.50 บาทต่อตารางเมตร, อิฐแดงมีมูลค่า 564.30 บาทต่อตารางเมตร และ อิฐมวลเบามีมูลค่า 638.81

อาจสามารถสรุปได้ว่าเมื่อให้ผนังที่ก่อสร้างด้วย อิฐซีเมนต์บล็อก, อิฐแดง และ อิฐมวลเบา เป็น 100 เปอร์เซ็น ดังนั้นค่าก่อสร้างของผนังอิฐดินปอชโซลานจะเป็นร้อยละ 48.48 ของผนังอิฐซีเมนต์บล็อก, ร้อยละ 43.26 ของผนังอิฐแดง และ เป็นร้อยละ 38.21 สำหรับผนังที่ก่อสร้างด้วยอิฐมวลเบา ตามลำดับ

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของอิฐเชิงประกอบที่สามารถผลิตเองได้ในชุมชน โดยเน้นถึงการประหยัด การลดพลังงานในการใช้ผลิต และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม พยายามซึ่งได้จากการบวนการย่อยของรถยนต์ใช้แล้วถูกผสมเข้ากับดินราชบุรี และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีจุดประสงค์เพื่อผลิตอิฐมวลเบาและต้านทานความร้อนได้ดี การทดลองดำเนินการโดยผสมผงยางที่ปริมาณ ร้อยละ 10,15, 20,25,30, และ 40 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อวัสดุผงเฉลี่ย ที่ (w/p)0.2588,0.2900,0.3213,0.3525,0.383 และ 0.4463 ตามลำดับ ที่อายุการบ่มตั้งแต่ 3, 7, 14, 28, และ 60 วัน ผลการทดสอบพบว่า ค่าหน่วยน้ำหนักมีค่าลดลงตามปริมาณผงยางที่เพิ่มขึ้นและให้ค่าหน่วยน้ำหนักสูงสุดที่อายุการบ่ม 3 วัน ค่าการดูดซับความชื้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงยางที่เพิ่มขึ้นและให้ค่าสูงสุดที่อายุการบ่ม 3 วัน ค่าความเค้นแรงกดและโมดูลัสแรงดัดสูงสุดมีค่าลดลงตามปริมาณผงยางที่เพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดที่อายุการบ่ม 60 วัน ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของผงยาง และมีค่าสูงสุดที่อายุการบ่ม 60 วัน ซึ่งถ้าพิจารณาจากมาตรฐาน ASTM C129[1]ว่าด้วยอิฐที่ไม่รับแรง พบว่าค่าที่ได้ ผ่านมาตรฐาน ดังนั้นอิฐดินเชิงประกอบผสมผงยางครัมป์ที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้สามารถใช้เป็นอิฐมวลเบาประหยัดพลังงานที่ใช้ในการก่อสร้างบ้านราคาถูกได้

และงานวิจัยชิ้นนี้ยังศึกษาคุณสมบัติการส่งผ่านความร้อน โดยทำการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากการทดสอบจริงและแบบจำลองไฟในต้อลิเมนต์ อิฐดินเชิงประกอบที่นำมาทดสอบจะมีปริมาณผงยางที่แตกต่างกันคือ 0, 10, 20, 30และ 40% โดยปริมาตร ซึ่งผลการเปรียบเทียบพบว่าค่าจากแบบจำลองไฟในต้อลิเมนต์ให้ค่าที่สอดคล้องกับผลการทดสอบจริง โดยที่ผลการทดสอบของไฟในต้อลิเมนต์จะให้ค่าต่ำกว่าผลการทดสอบจริงเล็กน้อย เนื่องจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นไม่ได้รวมฟองอากาศที่เกิดขึ้นขณะผสม ซึ่งฟองอากาศนี้สามารถลดค่าการส่งผ่านความร้อนได้อีกประการหนึ่ง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลการเปรียบเทียบ สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองไฟในต้อลิเมนต์สามารถใช้ในการทำนายคุณสมบัติการส่งผ่านความร้อนของอิฐเชิงประกอบได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ

เอกสารอ้างอิง

- [1] ASTM, Standard C129, Standard Specification for Nonloadbearing Concrete Masonry Units, in, American Standard Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA, USA, 1996.
- [2] M. Batayneh, I. Marie, I. Asi, Use of selected waste materials in concrete mixes, *Waste Management*, 27 (2007) 1870-1876.
- [3] A. Benazzouk, O. Douzane, K. Mezreb, B. Laidoudi, M. Que'neudec, Thermal conductivity of cement composites containing rubber waste particles: Experimental study and modelling, *Construction and Building Materials*, 22 (2008) 573-579.
- [4] A. Benazzouk, O. Douzane, K. Mezreb, M. Que'neudec, Physico-mechanical properties of aerated cement composites containing shredded rubber waste, *Cement and Concrete Composites*, 28 (2006) 650-657.
- [5] J.J.d. Coz Díaz, P.J.G. Nieto, J.L.S. Sierra, C.B. Biempica, Nonlinear thermal optimization of external light concrete multi-holed brick walls by the finite element method, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51 (2008) 1530-1541.
- [6] Dasaesamoh, D. ja-Aoe, Impact resistance properties of bricks mix with crumb rubber, Faculty of science technology and agricultural Yala rajabhat university (1998).
- [7] J.J. del Coz Díaz, P.J. García Nieto, C. Betegón Biempica, M.B. Prendes Gero, Analysis and optimization of the heat-insulating light concrete hollow brick walls design by the finite element method, *Applied Thermal Engineering*, 27 (2007) 1445-1456.
- [8] B. Demirel, Optimization of the composite brick composed of expanded polystyrene and pumice blocks, *Construction and Building Materials*, 40 (2013) 306-313.
- [9] F.C. F. Silvana, L. Graciela, Thermal behavior of building walls in summer: comparison of available analytical methods and experimental results for a case study, *Build Simul*, 2 (2009) 3-18.
- [10] N.I. Fattuhi, L.A. Clark, Cement-based materials containing shredded scrap truck tyre rubber, *Construction and Building Materials*, 10 (1996) 229-236.
- [11] E. Guneyisi, M. Gesoglu, T. Ozturan, Properties of rubberized concretes containing silica fume, *Journal of Cement and Concrete Research*, 34 (2004) 2309-2317.

- [12] M.R. Hall, K.B. Najim, C.J. Hopfe, Transient thermal behaviour of crumb rubber-modified concrete and implications for thermal response and energy efficiency in buildings, *Applied Thermal Engineering*, 33–34 (2012) 77-85.
- [13] A.R. Khaloo, M. Dehestani, P. Rahmatabadi, Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire “rubber particles, *Waste Management*, 28 (2008) 2472-2482.
- [14] T.-C. Ling, Prediction of density and compressive strength for rubberized concrete blocks, *Construction and Building Materials*, 25 (2011) 4303-4306.
- [15] T.-C. Ling, Effects of compaction method and rubber content on the properties of concrete paving blocks, *Construction and Building Materials*, 28 (2012) 164-175.
- [16] B.S. Mohammed, Structural behavior and m–k value of composite slab utilizing concrete containing crumb rubber, *Construction and Building Materials*, 24 (2010) 1214-1221.
- [17] B.S. Mohammed, K.M. Anwar Hossain, J.T. Eng Swee, G. Wong, M. Abdullahi, Properties of crumb rubber hollow concrete block, *Journal of Cleaner Production*, 23 (2012) 57-67.
- [18] F. Moreno, M.C. Rubio, M.J. Martinez-Echevarria, The mechanical performance of dry-process crumb rubber modified hot bituminous mixes: The influence of digestion time and crumb rubber percentage, *Construction and Building Materials*, 26 (2012) 466-474.
- [19] G. Pérez, A. Vila, L. Rincón, C. Solé, L.F. Cabeza, Use of rubber crumbs as drainage layer in green roofs as potential energy improvement material, *Applied Energy*, 97 (2012) 347-354.
- [20] S.P. Raut, R.V. Ralegaonkar, S.A. Mandavgane, Development of sustainable construction material using industrial and agricultural solid waste: A review of waste-create bricks, *Construction and Building Materials*, 25 (2011) 4037-4042.
- [21] P. Sukontasukkul, Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel, *Construction and Building Materials*, 23 (2009) 1084-1092.
- [22] P. Sukontasukkul, C. Chaikaew, Properties of concrete pedestrian block mixed with crumb rubber, *Construction and Building Materials*, 20 (2006) 450-457.
- [23] D. Tonnayopas, W. Kawfai, Development of Natural Crumbed Rubber Waste Aggregate Concrete Additive with White Rice Husk Ash, 7th Prince of songkhla University Convention on Engineering, (2009) 555-560.

- [24] A. Turatsinze, M. Garros, On the modulus of elasticity and strain capacity of Self-Compacting Concrete incorporating rubber aggregates, *Resources, Conservation and Recycling*, 52 (2008) 1209-1215.
- [25] P. Turgut, B. Yesilata, Physico-mechanical and thermal performances of newly developed rubber-added bricks, *Energy and Buildings*, 40 (2008) 679-688.
- [26] A. Yilmaz, N. Degirmenci, Possibility of using waste tire rubber and fly ash with Portland cement as construction materials, *Waste Management*, 29 (2009) 1541-1546.
- [27] ASTM, Standard C140, Standard Test Methods for Sampling and Testing Concrete Masonry Units and Related Units, in, *American Standard Testing and Materials (ASTM)*, West Conshohocken, PA,USA, 1996.
- [28] ASTM, Standard C293, Standard Test Methods for Flexural Strength of Concrete(Using Simple Beam with Center-Point Loading), in, *American Standard Testing and Materials (ASTM)*, West Conshohocken, PA,USA, 1996.
- [29] ASTM, Standard C117, Standard Test Methods for Steady State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded Hot-Plate Apparatus, in, *American Standard Testing and Materials (ASTM)*, West Conshohocken, PA,USA, 1996.
- [30] ABAQUS 6.9, in, *Analysis user's manual*.

ภาคผนวก

ภาคผนวก1ตารางผลการทดสอบค่ากำลังอัด (Compressive strength) ของอิฐดินซีเมนต์ผสมผง
ยางครัมป์ ที่ปริมาณต่างๆ

age	control	CRB10	CRB15	CRB20	CBR25	CRB30	CRB40
3	2.1145	1.8456	1.7415	1.645	1.6052	1.5487	1.4565
7	2.0697	1.8005	1.7041	1.6045	1.5545	1.5369	1.4112
14	2.0054	1.7984	1.6452	1.5554	1.5124	1.4896	1.3546
28	1.9428	1.7546	1.5986	1.5236	1.4698	1.4447	1.3044
60	1.8773	1.7041	1.5896	1.4852	1.4498	1.4052	1.2898
w/p	0.1963	0.2588	0.29	0.3213	0.3525	0.383	0.4463

ภาคผนวก2ตารางผลการทดสอบค่ากำลังดัด (Modulus of rupture) ของอิฐดินซีเมนต์ผสมผง
ยางครัมป์ ที่ปริมาณต่างๆ

age	control	CRB10	CRB15	CRB20	CBR25	CRB30	CRB40
3	6.66	5.4	5.08	4.76	3.62	3.38	2.95
7	9.4	8.32	7.94	7.72	6.98	6.64	5.74
14	13.29	11.72	10.64	10.22	9.64	9.21	8.52
28	15.46	13.21	12.91	12.45	11.42	11.29	10.98
60	18.52	15.33	14.22	13.54	12.86	12.56	11.55
w/p	0.1963	0.2588	0.29	0.3213	0.3525	0.383	0.4463

ภาคผนวก3ตารางผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ของอิฐดินซีเมนต์ผสมผง
ยางครัมป์ ที่ปริมาณต่างๆ

age	control	CRB10	CRB15	CRB20	CRB25	CRB30	CRB40
3	10.45	11.58	12.32	12.3	13	13.69	15.33
7	10.23	11.49	12.3	12.43	12.88	13.42	15.31
14	9.98	11.21	11.92	12.31	12.8	13.22	14.97
28	9.87	10.92	11.73	12.21	12.62	13.15	14.72
60	9.68	10.67	11.65	12.18	12.54	13.07	14.65
w/p	0.1963	0.2588	0.29	0.3213	0.3525	0.383	0.4463

ภาคผนวก4ตารางผลการทดสอบค่าน้ำหนัก (Unit weight) ของอิฐดินซีเมนต์ผสมผง
ยางครัมป์ ที่ปริมาณต่างๆ

age	control	CRB10	CRB15	CRB20	CRB25	CRB30	CRB40
3	2352.82	2017.38	1907.21	1836.22	1742.65	1624.54	1502.25
7	2307.77	1983.11	1895.65	1800.65	1701.52	1584.68	1472.98
14	2294.28	1952.33	1854.66	1774.52	1682.68	1562.96	1452.79
28	2290.84	1942.5	1832.22	1765.68	1670.87	1557.78	1440.33
60	2285.11	1930	1821.48	1760.78	1662.96	1550.98	1435.65
w/p	0.1963	0.2588	0.29	0.3213	0.3525	0.383	0.4463

ภาคผนวก 5. ตารางผลการทดสอบค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของอิฐดินซีเมนต์ผสมผงยางครัมป์ ที่ปริมาณต่างๆ

age	control	CRB10	CRB15	CRB20	CRB25	CRB30	CRB40
3	2.1145	1.8456	1.7415	1.645	1.6052	1.5487	1.4565
7	2.0697	1.8005	1.7041	1.6045	1.5545	1.5369	1.4112
14	2.0054	1.7984	1.6452	1.5554	1.5124	1.4896	1.3546
28	1.9428	1.7546	1.5986	1.5236	1.4698	1.4447	1.3044
60	1.8773	1.7041	1.5896	1.4852	1.4498	1.4052	1.2898
w/p	0.1963	0.2588	0.29	0.3213	0.3525	0.383	0.4463



ภาคผนวก 6. ภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุผงละเอียด (water powder ratio, w/p)



ภาคผนวก7. ภาพแสดงการถ่ายทอดเทคโนโลยีด้านวิศวกรรมอิฐดินให้แก่ประชาชน

ภาคผนวก 8. แสดงตัวอย่าง input file ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ด้านความร้อนด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์อีลิเมนต์(FEM) ของปริมาณยางครัมพ์ 20 % โดยปริมาตร ที่เวลา 1000 วินาที

.....
*Heading

** Job name: vf10_1500s Model name: Model-1

** Generated by: Abaqus/CAE 6.9-3

*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO

**

** PARTS

**

*Part, name=Part-1

*End Part

**

**

** ASSEMBLY

**

*Assembly, name=Assembly

**

*Instance, name=Part-1-1, part=Part-1

*Node

1, -28.7245884, -79.8254089

2, -28.7245884, -58.8254128

3, -28.7245884, -37.8254128

305, 1328, 1063, 1125

306, 1341, 922, 1054

307, 1093, 1342, 454

308, 1028, 979, 1343

*Nset, nset=_PickedSet3, internal

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16

17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32

33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48

49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64

65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80

81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96

97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112

113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128

129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144

145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160

161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176

177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192

193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208

209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224

225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240

241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256

257, 258, 259, 260, 408, 409, 410, 411, 412, 413, 414, 415, 416, 417, 418, 419

420, 421, 422, 423, 424, 425, 426, 427, 428, 429, 430, 431, 432, 433, 434, 435

436, 437, 438, 439, 440, 441, 442, 443, 444, 445, 446, 447, 448, 449, 450, 451

452, 453, 454, 455, 456, 457, 458, 459, 460, 461, 462, 463, 464, 465, 466, 467

468, 469, 470, 471, 472, 473, 474, 475, 476, 477, 478, 479, 480, 481, 482, 483
484, 485, 486, 487, 488, 489, 490, 491, 492, 493, 494, 495, 496, 497, 498, 499
500, 501, 502, 503, 504, 505, 506, 507, 508, 509, 510, 511, 512, 513, 514, 515
516, 517, 518, 519, 520, 521, 522, 523, 524, 525, 526, 527, 528, 529, 530, 531
532, 533, 534, 535, 536, 537, 538, 539, 540, 541, 542, 543, 544, 545, 546, 547
548, 549, 550, 551, 552, 553, 554, 555, 556, 557, 558, 559, 560, 561, 562, 563
564, 565, 566, 567, 568, 569, 570, 571, 572, 573, 574, 575, 576, 577, 578, 579
580, 581, 582, 583, 584, 585, 586, 587, 588, 589, 590, 591, 592, 593, 594, 595
596, 597, 598, 599, 600, 601, 602, 603, 604, 605, 606, 607, 608, 609, 610, 611
612, 613, 614, 615, 616, 617, 618, 619, 620, 621, 622, 623, 624, 625, 626, 627
628, 629, 630, 631, 632, 633, 634, 635, 636, 637, 638, 639, 640, 641, 642, 643
644, 645, 646, 647, 648, 649, 650, 651, 652, 653, 654, 655, 656, 657, 658, 659
660, 661, 662, 663, 664, 665, 666, 667, 668, 669, 670, 671, 672, 673, 674, 675
676, 677, 678, 679, 680, 681, 682, 683, 684, 685, 686, 687, 688, 689, 690, 691
692, 693, 694, 695, 696, 697, 698, 699, 700, 701, 702, 703, 704, 705, 706, 707
708, 709, 710, 711, 712, 713, 714, 715, 716, 717, 718, 719, 720, 721, 722, 723
724, 725, 726, 727, 728, 729, 730, 731, 732, 733, 734, 735, 736, 737, 738, 739
740, 741, 742, 743, 744, 745, 746, 747, 748, 749, 750, 751, 752, 753, 754, 755
756, 757, 758, 759, 760, 761, 762, 763, 764, 765, 766, 767, 768, 769, 770, 771
772, 773, 774, 775, 776, 777, 778, 779, 780, 781, 782, 783, 784, 785, 786, 787
788, 789, 790, 791, 792, 793, 794, 795, 796, 797, 798, 799, 800, 801, 802, 803
804, 805, 806, 807, 808, 809, 810, 811, 812, 813, 814, 815, 816, 817, 818, 819
820, 821, 822, 823, 824, 825, 826, 827, 828, 829, 830, 831, 832, 833, 834, 835
836, 837, 838, 839, 840, 841, 842, 843, 844, 845, 846, 847, 848, 849, 850, 851
852, 853, 854, 855, 856, 857, 858, 859, 860, 861, 862, 863, 864, 865, 866, 867
868, 869, 870, 871, 872, 873, 874, 875, 876, 877, 878, 879, 880, 881, 882, 883
884, 885, 886, 887, 888, 889, 890, 891, 892, 893, 894, 895, 896, 897, 898, 899
900, 901, 902, 903, 904, 905, 906, 907, 908, 909, 910, 911, 912, 913, 914, 915
916, 917, 918, 919, 920, 921, 922, 923, 924, 925, 926, 927, 928, 929, 930, 931
932, 933, 934, 935, 936, 937, 938, 939, 940, 941, 942, 943, 944, 945, 946, 947

948, 949, 950, 951, 952, 953, 954, 955, 956, 957, 958, 959, 960, 961, 962, 963
964, 965, 966, 967, 968, 969, 970, 971, 972, 973, 974, 975, 976, 977, 978, 979
980, 981, 982, 983, 984, 985, 986, 987, 988, 989, 990, 991, 992, 993, 994, 995
996, 997, 998, 999, 1000, 1001, 1002, 1003, 1004, 1005, 1006, 1007, 1008, 1009, 1010, 1011
1012, 1013, 1014, 1015, 1016, 1017, 1018, 1019, 1020, 1021, 1022, 1023, 1024, 1025, 1026,
1027
1028, 1029, 1030, 1031, 1032, 1033, 1034, 1035, 1036, 1037, 1038, 1039, 1040, 1041, 1042,
1043
1044, 1045, 1046, 1047, 1048, 1049, 1050, 1051, 1052, 1053, 1054, 1055, 1056, 1057, 1058,
1059
1060, 1061, 1062, 1063, 1064, 1065, 1066, 1067, 1068, 1069, 1070, 1071, 1072, 1073, 1074,
1075
1076, 1077, 1078, 1079, 1080, 1081, 1082, 1083, 1084, 1085, 1086, 1087, 1088, 1089, 1090,
1091
1092, 1093, 1094, 1095, 1096, 1097, 1098, 1099, 1100, 1101, 1102, 1103, 1104, 1105, 1106,
1107
1108, 1109, 1110, 1111, 1112, 1113, 1114, 1115, 1116, 1117, 1118, 1119, 1120, 1121, 1122,
1123
1124, 1125, 1126, 1127, 1128, 1129, 1130, 1131, 1132, 1133, 1134, 1135, 1136, 1137, 1138,
1139
1140, 1141, 1142, 1143, 1144, 1145, 1146, 1147, 1148, 1149, 1150, 1151, 1152, 1153, 1154,
1155
1156, 1157, 1158, 1159, 1160, 1161, 1162, 1163, 1164, 1165, 1166, 1167, 1168, 1169, 1170,
1171
1172, 1173, 1174, 1175, 1176, 1177, 1178, 1179, 1180, 1181, 1182, 1183, 1184, 1185, 1186,
1187
1188, 1189, 1190, 1191, 1192, 1193, 1194, 1195, 1196, 1197, 1198, 1199, 1200, 1201, 1202,
1203
1204, 1205, 1206, 1207, 1208, 1209, 1210, 1211, 1212, 1213, 1214, 1215, 1216, 1217, 1218,
1219

1220, 1221, 1222, 1223, 1224, 1225, 1226, 1227, 1228, 1229, 1230, 1231, 1232, 1233, 1234,
 1235
 1236, 1237, 1238, 1239, 1240, 1241, 1242, 1243, 1244, 1245, 1246, 1247, 1248, 1249, 1250,
 1251
 1252, 1253, 1254, 1255, 1256, 1257, 1258, 1259, 1260, 1261, 1262, 1263, 1264, 1265, 1266,
 1267
 1268, 1269, 1270, 1271, 1272, 1273, 1274, 1275, 1276, 1277, 1278, 1279, 1280, 1281, 1282,
 1283
 1284, 1285, 1286, 1287, 1288, 1289, 1290, 1291, 1292, 1293, 1294, 1295, 1296, 1297, 1298,
 1299
 1300, 1301, 1302, 1303, 1304, 1305, 1306, 1307, 1308, 1309, 1310, 1311, 1312, 1313, 1314,
 1315
 1316, 1317, 1318, 1319, 1320, 1321, 1322, 1323, 1324, 1325, 1326, 1327, 1328, 1329, 1330,
 1331
 1332, 1333, 1334, 1335, 1336, 1337, 1338, 1339, 1340, 1341, 1342, 1343
 *Elset, elset=_PickedSet3, internal, generate
 235, 1356, 1
 *Nset, nset=Set-1
 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16
 17, 18, 19, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36
 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52
 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68
 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84
 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100
 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116
 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132
 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148
 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164
 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180
 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 252

253, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 268
 269, 270, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284
 285, 286, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 300
 301, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 314, 315, 316
 317, 318, 319, 320, 321, 322, 323, 324, 325, 326, 327, 328, 329, 330, 331, 332
 333, 334, 335, 336, 337, 338, 339, 340, 341, 342, 343, 344, 345, 346, 347, 348
 349, 350, 351, 352, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 360, 361, 362, 363, 364
 365, 366, 367, 368, 369, 370, 371, 372, 373, 374, 375, 376, 377, 378, 379, 380
 381, 382, 383, 384, 385, 386, 387, 388, 389, 390, 391, 392, 393, 394, 395, 396
 397, 398, 399, 400, 401, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 1344, 1345, 1346, 1347, 1348
 1349,

*Elset, elset=Set-1

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16
 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32
 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48
 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64
 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80
 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96
 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112
 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128
 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144
 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160
 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176
 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192
 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208
 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224
 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 1357, 1358, 1359, 1360, 1361, 1362
 1363, 1364, 1365, 1366

** Section: Section-2

*Solid Section, elset=Set-1, material=rubber

```

1.,
** Section: Section-1
*Solid Section, elset=_PickedSet3, material=Material-1
1.,
*End Instance
**
*Nset, nset=Set-2, instance=Part-1-1
20, 23, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246
247, 248, 249, 250, 251
*Elset, elset=Set-2, instance=Part-1-1
260, 309, 427, 440, 450, 452, 458, 465, 470, 527, 529, 639, 640, 643, 736, 744
748, 750, 803, 998
*Nset, nset=_PickedSet60, internal, instance=Part-1-1
21, 22, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218
219, 220, 221, 222, 223
*Elset, elset=_PickedSet60, internal, instance=Part-1-1
368, 369, 372, 374, 375, 404, 405, 417, 422, 562, 563, 568, 602, 627, 634, 635
695, 823, 865, 1339
*End Assembly
**
** MATERIALS
**
*Material, name=Material-1
*Conductivity
0.00194,
*Density
2.29e-06,
*Specific Heat
960.,
*Material, name=rubber

```

```

*Conductivity
0.00013,
*Density
1.2e-06,
*Specific Heat
2010.,
** -----
**
** STEP: Step-1
**
*Step, name=Step-1, inc=1500
*Heat Transfer, end=PERIOD, deltmx=10.
10., 1500., 0.015, 10.,
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: BC-1 Type: Temperature
*Boundary
_PickedSet60, 11, 11, 120.
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field, variable=PRESELECT
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**

```

*Output, history

*Node Output, nset=Set-2

NT,

*Element Output, elset=Set-2

TEMP,

*Radiation Output, elset=Set-2

FTEMP,

*End Step

.....