

ความทนทานของมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบดำภายใต้ การกระทำของโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต

บุรฉัตร ฉัตรวีระ¹ ณรงค์ศักดิ์ มากุล² และ อนัญญ์ รอดอนันต์³
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต) อำเภอคลองหลวง ปทุมธานี 12121

รับเมื่อ 10 มีนาคม 2548 ตอรับเมื่อ 12 กันยายน 2548

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความทนทานภายใต้การกระทำจากซัลเฟตของมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบดำ โดยใช้เถ้าแกลบดำจากโรงผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานความร้อนซึ่งใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงและเถ้าแกลบจากโรงสีข้าวมาทำการบดเป็นเวลา 240 นาที (พื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 4,780 และ 5,760 ซม.²/ก. สำหรับเถ้าแกลบดำจากโรงผลิตกระแสไฟฟ้าและจากโรงสีข้าว ตามลำดับ) สมบัติที่ทดสอบได้แก่ การขยายตัวในรูปของการเปลี่ยนแปลงความยาวและการสูญเสียกำลังอัด ตัวแปรที่ใช้ได้แก่ อัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าแกลบดำในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนัก เท่ากับร้อยละ 0, 10, 30 และ 50 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (ปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบดำ) (w/b) เท่ากับ 0.55 และ 0.65 ตามลำดับ สารละลายซัลเฟตที่ใช้คือ โซเดียมซัลเฟต (Na₂SO₄) และแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO₄) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ตามมาตรฐาน ASTM C 1012

จากการทดสอบความทนทานต่อซัลเฟต พบว่าการขยายตัวในรูปของการเปลี่ยนแปลงความยาวของตัวอย่างแท่งในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่าการขยายตัวมากกว่าในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบดำในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการขยายตัวของมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบดำลดลง โดยที่อัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบเท่ากับร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าการขยายตัวน้อยกว่าปูนซีเมนต์ประเภทซัลเฟต ในขณะที่มอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบดำมีค่าอัตราการสูญเสียกำลังอัดเพิ่มขึ้นเมื่อบ่มในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและมีค่าการสูญเสียกำลังอัดมากกว่า มอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

¹ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

² นักวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

³ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

Durability of Cement Mortar Containing Black Rice Husk Ash under Sodium Sulfate and Magnesium Sulfate Attack

Burachat Chatveera ¹, Narongsak Makul ², and Anan Rodanan ³

Thammasat University (Rangsit Campus), Khlong Luang, Pathum Thani 12121

Received 10 March 2005 ; accepted 12 September 2005

Abstract

The objective of this research was to study the durability of cement mortar containing black rice husk ash (BRHA) under sulfate attack. In this study the BRHA obtained from electrical generating power plant using rice husk as fuel and from rice mill were ground for 240 minutes (the specific surface area of BRHA from electrical generating power plant and rice mill equal to 4,780 and 5,760 cm²/g respectively). The tested properties included expansion in term of length change and strength loss. The variables studied were the percentage replacements of BRHA by weight in Portland cement type I (0%, 10%, 30%, and 50%) and water-to-binder materials (w/b) ratios (Portland cement and BRHA) (0.55 and 0.65). The sodium sulfate (Na₂SO₄) and magnesium sulfate (MgSO₄) with the concentration of 5% by weight in accordance with the ASTM C 1012 standard were used.

From the tested results of sulfate resistant property, it was found that the expansion (length change) of specimens in sodium sulfate solution is more than those in magnesium sulfate solution. When the percentage replacements of BRHA in Portland cement increased, the rate of expansion of cement mortars containing BRHA decreased. At the percentage replacements of BRHA in Portland cement equal to 20% and 30%, it was found that the expansion of the mortars is smaller than that mixed with sulfate-resistant cement. Whereas the rate of strength loss increased when those of mortars were immersed in magnesium sulfate, the strength loss is more than those exposed in sodium sulfate.

¹ Associate Professor, Department of Civil Engineering.

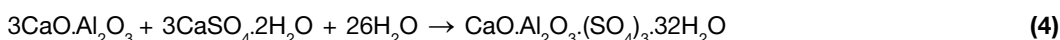
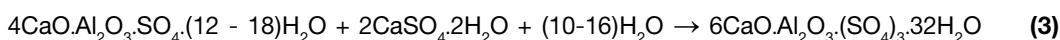
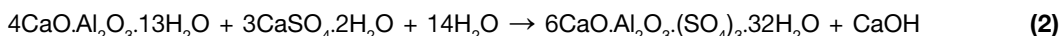
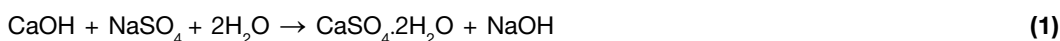
² Researcher, Department of Civil Engineering.

³ Graduate Student, Department of Civil Engineering.

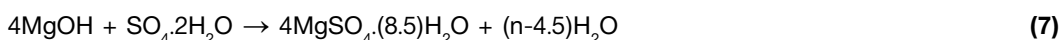
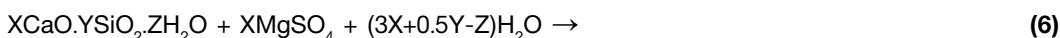
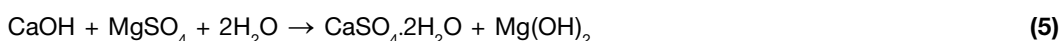
1. บทนำ

สืบเนื่องจากมุมมองของการวิจัยทางด้านซีเมนต์และคอนกรีตในปัจจุบันที่มีการนำของเสียหรือผลพลอยได้ (waste/by-product) จากทั้งภาคอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมกลับมาใช้เป็นวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์และ/หรือส่วนประกอบอื่นของคอนกรีตในอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยวัสดุเหล่านั้นต้องมีส่วนช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลและเพิ่มความทนทานให้กับคอนกรีต [1-3] อาทิเช่น แกลบซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าว ดังนั้นจึงมีการนำแกลบมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานความร้อน แต่กระนั้นถ้าแกลบที่เกิดขึ้นกลับกลายเป็นปัญหาที่ต้องหาทางออกบนพื้นฐานของการพัฒนาที่มีความยั่งยืนและครบวงจร โดยข้อสรุปของทางออกที่ดีทางหนึ่งคือ การนำแกลบมาใช้ในงานทางซีเมนต์และคอนกรีต ซึ่งจากการวิเคราะห์ทางเคมีเบื้องต้นพบว่าแกลบมีปริมาณซิลิคอนไดออกไซด์สูงกว่าร้อยละ 90 [4] และเมื่อนำมาผ่านการปรับปรุงคุณภาพเช่น การเผาหรือการบดเพื่อเพิ่มสมบัติการทำปฏิกิริยาจะทำให้แกลบที่ได้มีศักยภาพเพิ่มขึ้น จนจัดได้ว่าแกลบที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้อีกชนิดหนึ่ง [5-8]

ด้วยการพัฒนาที่นำไปสู่คอนกรีตที่มีสมรรถนะสูง (high performance concrete) ดังนั้น ความทนทานต่อการกระทำจากทุกสภาพแวดล้อมที่มีต่อการทำลายสมบัติของคอนกรีตในระยะยาว ประเด็นหนึ่งคือ ความทนทานต่อซัลเฟต โดยการศึกษากลไกความเสียหายเนื่องจากการกระทำซัลเฟตของคอนกรีต [9] เริ่มจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับโซเดียมซัลเฟต (NaSO_4) ก่อให้เกิดยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ต่อเนื่องด้วยการทำปฏิกิริยากับสารประกอบของอะลูมิเนียม ($(4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O})$, $(4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (\text{SO}_4)_3 \cdot (\text{SO}_4)_3 \cdot (12-18)\text{H}_2\text{O})$, $(3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)$) เกิดเป็นสารประกอบของเอ็ททริงไกท์ ($(6\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (\text{SO}_4)_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O})$) ที่มีปริมาตรและความไม่เสถียรเพิ่มขึ้น ทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวดังแสดงในสมการที่ (1) - (4) โดยเฉพาะคอนกรีตในสภาวะที่แข็งตัวแล้ว การขยายตัวที่มากเกินไปจะขัดขวางความสามารถในการรับกำลังดึงของคอนกรีตทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้ในที่สุด



ในขณะที่การกระทำจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เมื่อแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมซัลเฟตเกิดเป็นแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ เปลี่ยนโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต เป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งมีความสามารถในการเชื่อมประสานต่ำ ดังแสดงในสมการที่ (5) - (7)



จากสมการที่ (6) สารละลายอิมีตัวที่ได้มีค่าความเป็นด่างต่ำ ($\text{pH} = 10.5$) เมื่อเทียบกับความเป็นด่างของซีเมนต์เพสต์ ดังนั้น เพื่อรักษาความมีเสถียรภาพของระบบจึงทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ต้องปล่อยให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ละลายจากภายในโครงสร้างออกมา อันเป็นการเพิ่มความแตกต่างให้กับระบบ ดังนั้นแคลเซียมไฮดรอกไซด์จึงทำปฏิกิริยากับซัลเฟตอย่างต่อเนื่อง

จากการใช้สารปอซโซลานแทนที่ในปูนซีเมนต์ทำให้ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง ดังแสดงปฏิกิริยาปอซโซลานในสมการที่ (8) และ (9) ซึ่งจะเพิ่มความทนทานต่อการกระทำจากซัลเฟตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นถึงการนำเถ้าแกลบดำแทนที่ในปูนซีเมนต์เพื่อเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟตและการใช้ทรัพยากรธรรมชาติให้เกิดประโยชน์สูงสุด



2. วัตถุประสงค์

ศึกษาการนำเถ้าแกลบดำมาผสมร่วมกับปูนซีเมนต์เพื่อเพิ่มความทนทานต่อการกระทำของโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟตและเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภททนทานต่อซัลเฟต (ประเภทที่ 5)

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.1 ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการวิจัยเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5

3.1.2 เถ้าแกลบที่ใช้ในการวิจัยเป็นเถ้าแกลบดำจากโรงสีข้าวจังหวัดนครปฐม และโรงไฟฟ้าจังหวัดปทุมธานี นำมาทำการบดด้วยเครื่องบดชนิด Comparatively Low Cost ที่มีความเร็วในการหมุนเท่ากับ 52 รอบต่อนาที และใช้เวลาในการบดเท่ากับ 240 นาที โดยใช้ตัวกลางบดเป็นเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9, 12 และ 15 มม. จำนวน 45, 45 และ 35 เส้น ตามลำดับ ความยาว 750 มม. ซึ่งคิดปริมาตรของตัวกลางรวมได้ร้อยละ 6 ของปริมาตรถึงบด รวมทั้งทำการหุ้มด้วยท่ออย่างเพื่อป้องกันเสียงดังขณะทำการบด ดังแสดงในรูปที่ 1

3.1.3 สารซัลเฟตที่ใช้ ได้แก่ แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) และโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก หรือคิดเป็นปริมาณเท่ากับ 42.4 และ 50.0 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ



รูปที่ 1 เครื่องบดชนิด Comparatively Low Cost

3.2 วิธีการทดสอบ

3.2.1 วัดการเปลี่ยนแปลงความยาวเนื่องจากซัลเฟต (length change) ตามมาตรฐาน ASTM C 1012 [9] โดยใช้มอร์ตาร์รูปทรงลูกบาศก์ขนาด $50 \times 50 \times 50$ มม.³ และตัวอย่างขนาด $25 \times 25 \times 285$ มม.³ สัดส่วนผสมของทรายต่อวัสดุผงโดยน้ำหนักเท่ากับ 2.75 ตัวอย่างทดสอบทำการถอดแบบเมื่ออายุ $23\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$ ชั่วโมง นำก้อนตัวอย่างปมในน้ำปูนใสอิ่มตัว ทดสอบกำลังอัดถ้ากำลังอัดที่ได้เท่ากับ 20.0 ± 1.0 เมกะปาสคาล หรือมากกว่า ทำการวัดความยาวของมอร์ตาร์รูปทรงกระบอก ตามมาตรฐาน ASTM C 490 และนำก้อนตัวอย่างทั้งหมดแช่ในสารละลายซัลเฟต โดยทำการควบคุมค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของสารละลายซัลเฟตให้อยู่ในช่วง 6 - 8 ด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาริตี (M) เป็นตัวปรับค่าความเป็นกรดต่าง ทำการวัดการเปลี่ยนแปลงความยาวของมอร์ตาร์ที่อายุ 1, 2, 3, 4, 8, 13, 15, 17, 19, 21, 23 และ 25 สัปดาห์ โดยใช้เครื่อง Digital Length Comparator ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 เครื่อง Digital Length Comparator

3.2.2 วัดการสูญเสียกำลังอัด โดยใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์รูปทรงลูกบาศก์ขนาด $50 \times 50 \times 50$ มม.³ โดยส่วนผสมทรายต่อวัสดุผง (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าแกลบดำ) โดยน้ำหนักเท่ากับ 2.75 ต่อ 1 ทำการถอดแบบเมื่ออายุ $23\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$ ชั่วโมง ทำการบ่มตัวอย่างในน้ำปูนใสอิ่มตัว (saturated lime water) จนกระทั่งกำลังอัดเท่ากับ 20.0 ± 1.0 เมกะปาสคาล [9] หรือมากกว่า จึงนำตัวอย่างแช่ในสารละลายซัลเฟตและทำการทดสอบ กำลังอัดเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ซึ่งบ่มในน้ำที่อายุ 1, 7, 28, 56, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ

3.3 สัดส่วนที่ใช้ในการทดสอบ

ตัวแปรในการทดสอบประกอบด้วย

3.3.1 เถ้าแกลบดำมาจาก 2 แหล่งคือ เถ้าแกลบดำจากโรงสีข้าวและโรงผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง

3.3.2 อัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนัก เท่ากับร้อยละ 0, 10, 30 และ 50 ตามลำดับ

3.3.3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (ปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบดำ) (w/b) เท่ากับ 0.55 และ 0.65 ตามลำดับ

สัดส่วนของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัดส่วนของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบ

สัญลักษณ์	ปริมาณสัดส่วนผสม (กก./ม. ³)			
	ปูนซีเมนต์	ทราย	น้ำ	เถ้าแกลบ
OPC - 0.55	524	1,440	288	0
OPC - 0.65	498	1,368	323	0
SPC - 0.55	524	1,440	288	0
SPC - 0.65	498	1,368	323	0
10MRHA - 0.55	472	1,440	288	52
30MRHA - 0.55	367	1,440	288	157
50MRHA - 0.55	262	1,440	288	262
10MRHA - 0.65	448	1,368	323	50
30MRHA - 0.65	349	1,368	323	149
50MRHA - 0.65	249	1,368	323	249
10MRHA - 0.55	472	1,440	288	52
30MRHA - 0.55	367	1,440	288	157
50MRHA - 0.55	262	1,440	288	262
10MRHA - 0.65	448	1,368	323	50
30MRHA - 0.65	349	1,368	323	149
50MRHA - 0.65	249	1,368	323	249

หมายเหตุ สัญลักษณ์ที่ไม่มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

OPC - w/c คือ มอร์ตาร์ปกติซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ w/c

SPC - w/c คือ มอร์ตาร์ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ w/c

XMRHA/ERHA-w/b คือ มอร์ตาร์ซึ่งใช้เถ้าแกลบดำจากโรงสีข้าว (MRHA) หรือเถ้าแกลบจากโรงไฟฟ้า (ERHA) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ X โดยน้ำหนัก และมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ w/b โดยน้ำหนัก

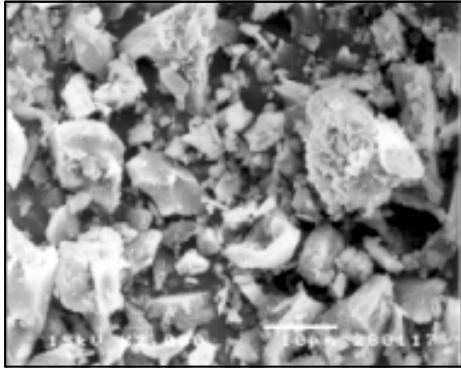
4. ผลการทดสอบ

4.1 สมบัติของเถ้าแกลบดำซึ่งผ่านการบดเป็นเวลา 240 นาที

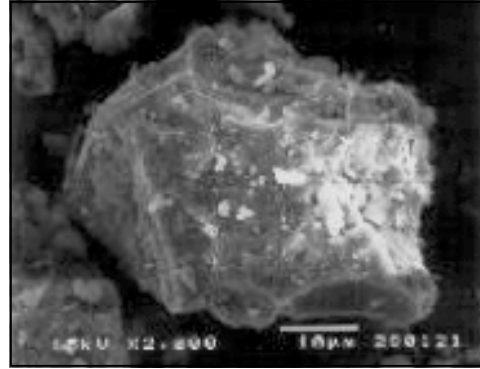
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของเถ้าแกลบดำจากโรงสีข้าวและโรงไฟฟ้าแสดงไว้ในตารางที่ 2 เถ้าแกลบดำประกอบด้วยซิลิคอนไดออกไซด์ร้อยละ 90 ซึ่งเมื่อผ่านกระบวนการบด ค่างค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบบด 240 นาที มีค่าที่ใกล้เคียงกับเถ้าแกลบไม่บด เมื่อพิจารณาสมบัติทางกายภาพในตารางที่ 2 ได้แก่ ค่าความละเอียดและพื้นที่ผิวของเถ้าแกลบมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อผ่านกระบวนการบด โดยจาก รูปที่ 4 การกระจายขนาดคละของเถ้าแกลบบด 240 นาที มีค่าใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เมื่อทำการคลุกเคล้าได้เนื้อส่วนผสมที่เป็นเนื้อเดียวกัน ค่าความต้องการน้ำมีค่าลดลงเนื่องจากลักษณะพื้นที่ผิวของเถ้าแกลบมีความพรุนและเป็นโพรงซึ่งมีความสามารถในการดูดน้ำสูง ซึ่งเมื่อผ่านการบดโพรงเหล่านี้มีจำนวนลดลง ส่งผลให้การดูดน้ำจึงลดลง นอกจากนั้นความละเอียดที่เพิ่มขึ้นทำให้การพัฒนากำลังรับแรงมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะเถ้าแกลบดำมีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบดำ ทั้งที่ไม่ผ่านและผ่านการบดเป็นเวลา 240 นาที

องค์ประกอบทางเคมี	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	LOI
ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	20.8	5.2	3.2	66.3	1.2	0.2	0.1	2.4	1.0
ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5	18.4	4.8	3.5	60.5	1.0	0.4	0.3	2.6	1.3
แกลบโรงไฟฟ้าไม่บด	91.9	1.8	2.4	1.0	0.4	2.1	0.0	0.1	1.0
แกลบโรงไฟฟ้าบด 240 นาที	93.0	0.5	1.8	0.8	0.3	1.8	0.0	0.0	0.8
แกลบโรงสีข้าวไม่บด	89.7	1.8	2.4	1.0	0.5	3.0	0.0	0.0	0.9
แกลบโรงสีข้าวบด 240 นาที	87.3	0.4	1.6	0.7	0.3	2.3	0.0	0.1	0.9
สมบัติทางกายภาพ	ปูนซีเมนต์ประเภทที่		เถ้าแกลบโรงไฟฟ้า		เถ้าแกลบโรงสีข้าว				
	1	5	ไม่บด	บด 240 นาที	ไม่บด	บด 240 นาที			
ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	0.19	0.23	1.23	1.13	13.16	1.47			
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ซม. ² / ก.)	3,250	2,880	หยาบ	4,780	หยาบ	5,760			
ความถ่วงจำเพาะ	3.11	3.08	หยาบ	2.30	หยาบ	2.27			
ดัชนีกำลังเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม (ร้อยละ)									
ที่อายุ 7 วัน	100	83	26	79	38	76			
ที่อายุ 28 วัน	100	92	30	75	43	82			
ความต้องการน้ำ (ร้อยละ)	100	100	161	103	141	101			



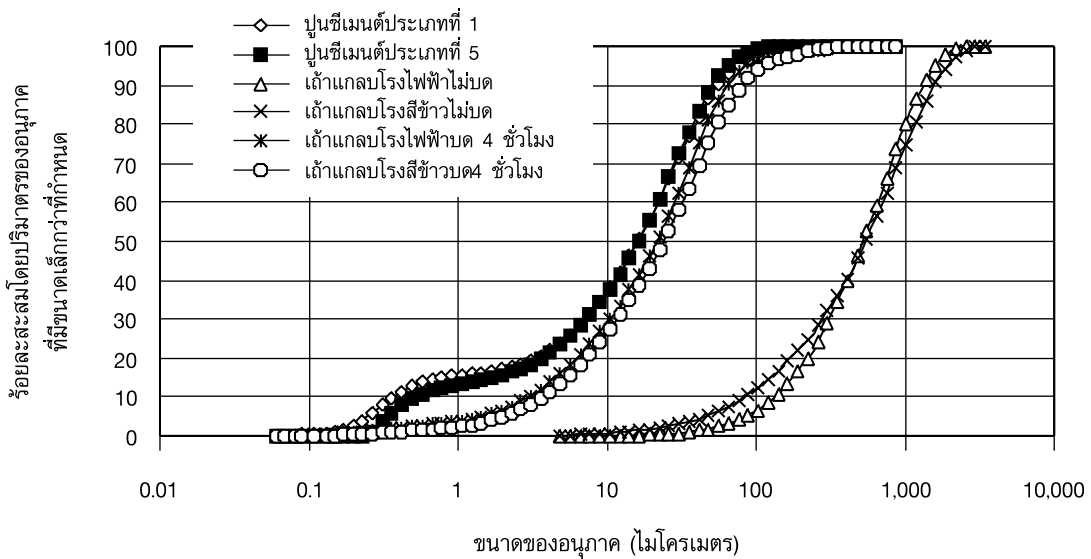
(ก) ถ้ำาแกลบดำโรงสีข้าว



(ข) ถ้ำาแกลบดำโรงไฟฟ้า

รูปที่ 3 ถ้ำาแกลบดำผ่านการบดเป็นเวลา 240 นาที ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า

โดยการเปรียบเทียบการกระจายขนาดคละของถ้ำาแกลบดำไม่บดและผ่านการบดเป็นเวลา 240 นาที เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ทั้ง 2 ประเภท ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าขนาดของอนุภาคถ้ำาแกลบที่ผ่านการบดมีขนาดเล็กกว่าถ้ำาแกลบไม่บด นอกจากนั้นถ้ำาแกลบที่ผ่านการบดจากโรงสีข้าวและถ้ำาแกลบจากโรงไฟฟ้ามีการกระจายขนาดคละที่ใกล้เคียงกัน

**รูปที่ 4** การกระจายขนาดคละของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และถ้ำาแกลบดำ ทั้งที่ไม่ผ่านการบดและผ่านการบดเป็นเวลา 240 นาที

จากผลการทดสอบในส่วนของระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มน้ำปูนใส่อิมตัวของมอร์ตาร์ปกติและมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบดำจนมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 20.0 ± 1.0 เมกะปาสคาล พบว่าการแทนที่เถ้าแกลบทั้งชนิดเถ้าแกลบจากโรงไฟฟ้าและเถ้าแกลบจากโรงสีข้าวในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นทำให้ต้องใช้เวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการที่ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ประกอบกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าแกลบที่ต่ำในช่วงแรกทำให้การพัฒนา กำลังมีค่าต่ำลงไปด้วย และสังเกตได้ว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 มีอัตราของการพัฒนา กำลังที่ใกล้เคียงกัน โดยดูได้จากเวลาในการบ่ม

ตารางที่ 3 ระยะเวลาการบ่มในน้ำปูนใส่อิมตัวของมอร์ตาร์จนสามารถรับกำลังอัดได้ 20.0 ± 1.0 เมกะปาสคาล ตามมาตรฐาน ASTM C 1012 [9]

สัญลักษณ์	เวลาบ่มในน้ำปูนใส่อิมตัว (วัน)	สัญลักษณ์	เวลาบ่มในน้ำปูนใส่อิมตัว (วัน)
OPC - 0.55	3	SPC - 0.55	3
OPC - 0.65	7	SPC - 0.65	7
10MRHA - 0.55	7	10ERHA - 0.55	7
30MRHA - 0.55	7	30ERHA - 0.55	7
50MRHA - 0.55	14	50ERHA - 0.55	14
10MRHA - 0.65	7	10ERHA - 0.65	7
30MRHA - 0.65	14	30ERHA - 0.65	14
50MRHA - 0.65	21	50ERHA - 0.65	21

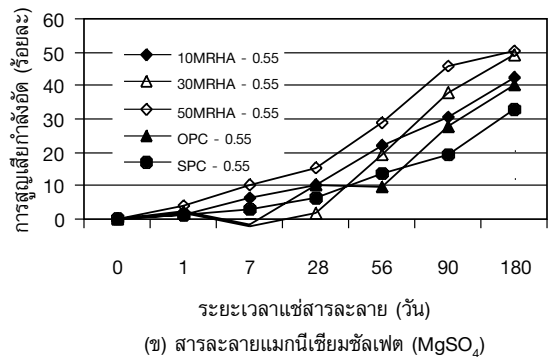
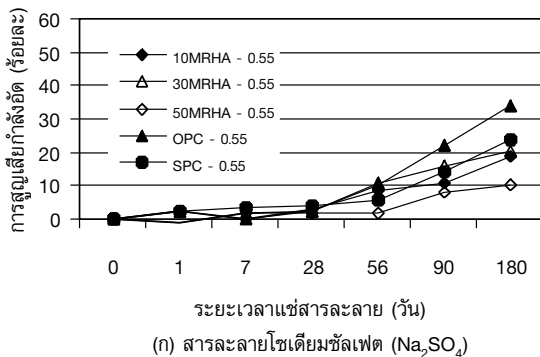
4.2 ผลการทดสอบเนื่องจากซัลเฟต

4.2.1 การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากซัลเฟต

จากรูปที่ 5 (ก) พบว่าอัตราการสูญเสียกำลังอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่ามากกว่ามอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าแกลบจากโรงสีข้าว ซึ่งผ่านการบดเป็นเวลา 240 นาที โดยการแทนที่เถ้าแกลบดำในปูนซีเมนต์ด้วยสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการสูญเสียกำลังอัดลดลงตามลำดับ ทั้งนี้เพราะเถ้าแกลบดำทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มขึ้นทำให้มอร์ตาร์มีความหนาแน่นและที่บ่มเพิ่มขึ้น ประกอบกับการลดลงของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งสารตั้งต้นของปฏิกิริยาเนื่องจากซัลเฟต (สมการที่ (1) และ (5)) ลดลงทำให้ความรุนแรงจากการกระทำของโซเดียมซัลเฟตลดลงหรือความทนทานต่อซัลเฟตเพิ่มขึ้น

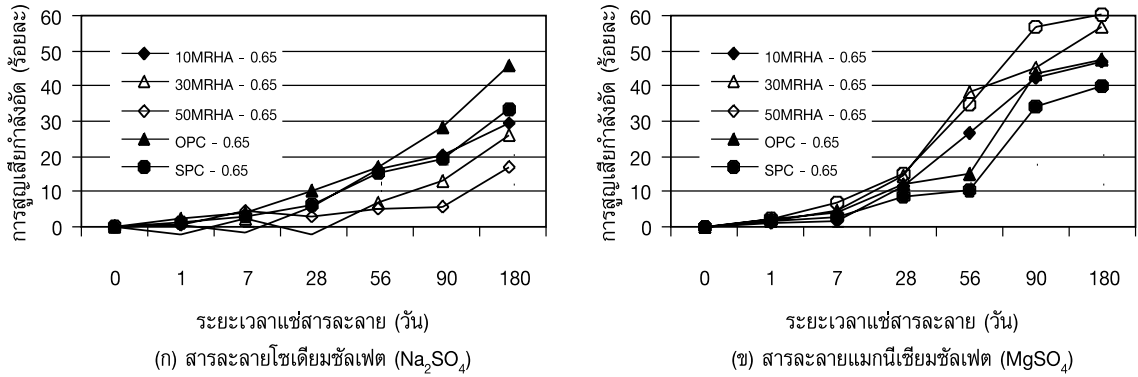
เมื่อเปรียบเทียบมอร์ตาร์ซึ่งบ่มในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (รูปที่ 5(ข)) มีอัตราการสูญเสียกำลังอัดมากกว่ามอร์ตาร์ซึ่งบ่มในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ทั้งนี้เนื่องจากการที่แมกนีเซียมซัลเฟตละลายน้ำได้ดีกว่าโซเดียมซัลเฟตจึงทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ดีกว่า ประกอบทั้งปฏิกิริยาที่เกิดระหว่างสารประกอบแคลเซียมและแมกนีเซียมซัลเฟตจะเปลี่ยนโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตไปเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ไม่มีสมบัติในการเชื่อมประสาน จึงมีผลทำให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลง [10]

สำหรับมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบดำมีค่าอัตราการสูญเสียกำลังอัดมากกว่ามอร์ตาร์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นทำให้การสูญเสียกำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เพราะในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานต้องใช้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิโคนไดออกไซด์และน้ำ ซึ่งปกติในโพรงจะมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca^{2+}) และ ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ละลายอยู่ เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปในระยะยาวไอออนทั้งสองชนิดมีปริมาณลดลง ระบบจึงพยายามรักษาสมดุลโดยเหนี่ยวนำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ละลายจากภายในโครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ออกมาเพื่อทำปฏิกิริยา จากผลดังกล่าวทำให้โครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์มีความไม่เสถียร [11] จึงยิ่งทำให้ไอออนของแมกนีเซียม (Mg^{2+}) ซึ่งมีความสามารถในการแทนที่ (substitution) แคลเซียมไอออนของโครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ได้สูงมาก [12] มีบทบาทมากขึ้น ผลที่ตามมาคือโครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ถูกเปลี่ยนเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ทำให้กำลังของมอร์ตาร์ลดลงมาก ในขณะที่เมื่อพิจารณาในกรณีของการกระทำของโซเดียมซัลเฟต ข้อสังเกตประการหนึ่งที่สำคัญคือ โซเดียมไอออน (Na^+) ซึ่งมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน (จำนวนอิเล็กตรอนวงนอกสุดของโครงสร้างอะตอม โดยอะตอมของโซเดียมมีค่า +1 (Na^+) ในขณะที่อะตอมของแมกนีเซียมมีค่า +2 (Mg^{2+})) ไม่เท่ากับแคลเซียม (จำนวนวาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ +2 (Ca^{2+})) ดังนั้นความสามารถในการแทนที่ในโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์จึงต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) เมื่อโครงสร้างดังกล่าวเปลี่ยนไปเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ซึ่งมีความสามารถในการยึดประสานต่ำจึงทำให้กำลังอัดลดลงตามไปด้วย



รูปที่ 5 อัตราการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากซัลเฟตของมอร์ตาร์ปกติและมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบดำจากโรงสีข้าวที่มีค่า w/b เท่ากับ 0.55 แช่สารละลาย (ก) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) (ข) แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4)

ผลการทดสอบมอร์ตาร์ปกติและมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบดำจากโรงสีข้าวที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.65 ในรูปที่ 6 พบว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงทำให้อัตราการสูญเสียกำลังอัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นทำให้ความพรุนของโครงสร้างเพิ่มขึ้น โดยกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ปริมาณและขนาดของโพรงคาวาลารี่มีมากขึ้น ซึ่งมีผลต่อโอกาสที่ไอออนของซัลเฟต (SO_4^{2-}) จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่แตกตัวอยู่ภายในเพิ่มขึ้น ทำให้กำลังของมอร์ตาร์มีค่าลดลง

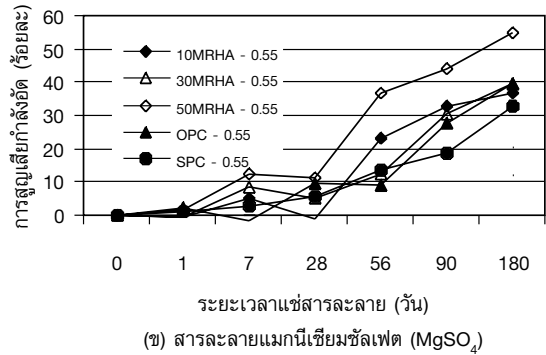
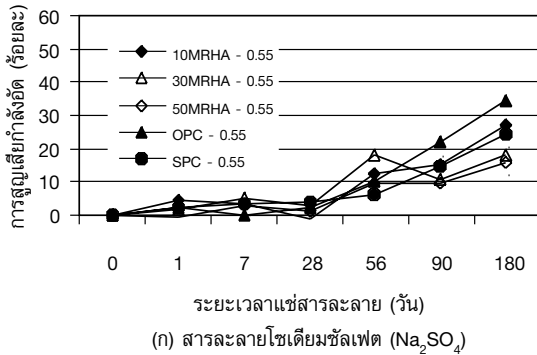


รูปที่ 6 อัตราการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากซัลเฟตของมอร์ตาร์ปกติและมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบดำจากโรงสีข้าว ที่มีค่า w/b เท่ากับ 0.65 แซ่สารละลาย (ก) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) (ข) แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4)

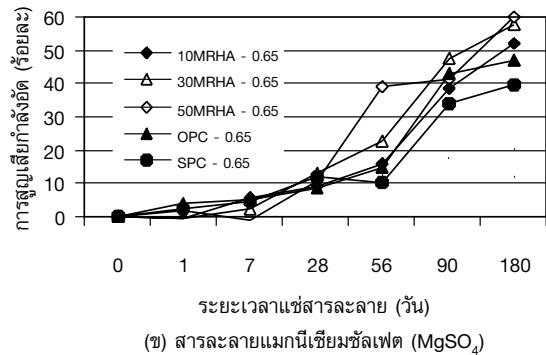
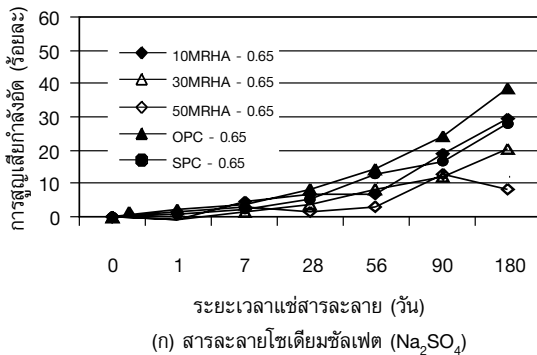
ในการณิการใช้เถ้าแกลบดำจากโรงไฟฟ้าผ่านการบดเป็นเวลา 240 นาที แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 พบว่าในกรณีของการบ่มในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ดังรูปที่ 7(ก) ได้ว่าการแทนที่เถ้าแกลบดำ ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการสูญเสียกำลังอัดลดลง โดยการแทนที่เถ้าแกลบเท่ากับร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีอัตราการสูญเสียน้ำหนักที่ใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ทนทานต่อซัลเฟต (ประเภทที่ 5) ในขณะที่อัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบเท่ากับร้อยละ 30 และ 50 ให้ค่าการสูญเสียกำลังอัดที่ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ซึ่งแตกต่างจากการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่มอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบ (รูปที่ 7(ข)) มีอัตราการสูญเสียกำลังอัดมากกว่ามอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 แต่มีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างเถ้าแกลบจากโรงสีข้าวกับเถ้าแกลบจากโรงไฟฟ้า จะเห็นว่าเถ้าแกลบจากโรงไฟฟ้าและจากโรงสีข้าวมีอัตราการสูญเสียกำลังอัดใกล้เคียงกัน

ในทำนองเดียวกับมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบดำจากโรงสีข้าว มอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบดำจากโรงไฟฟ้ามีอัตราการสูญเสียกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงในส่วนผสมมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความพรุนภายในโครงสร้างของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้น



รูปที่ 7 อัตราการสูญเสียกำลัซต์เนื่องจากซัลเฟตของมอร์ตาร์ปกติและมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบดำจากโรงไฟฟ้า ที่มีค่า w/b เท่ากับ 0.55 แช่สารละลาย (ก) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) (ข) แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4)

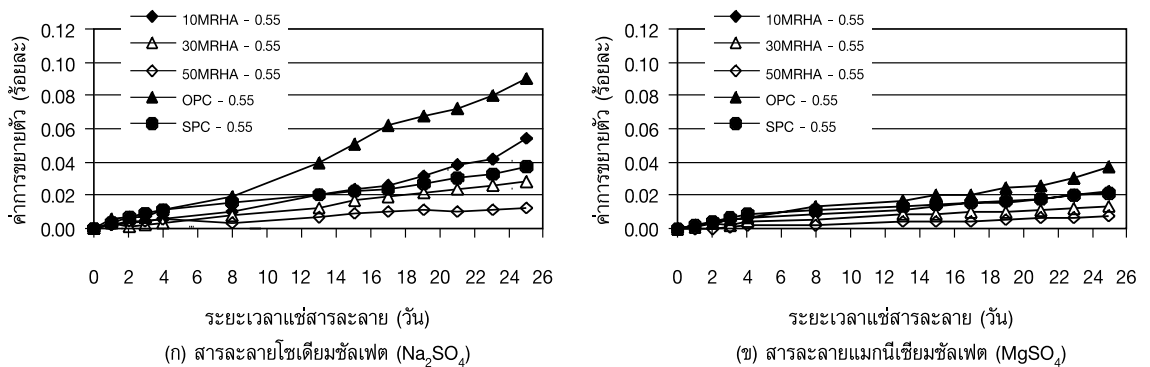


รูปที่ 8 อัตราการสูญเสียกำลัซต์เนื่องจากซัลเฟตของมอร์ตาร์ปกติและมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบดำจากโรงไฟฟ้า ที่มีค่า w/b เท่ากับ 0.65 แช่สารละลาย (ก) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) (ข) แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4)

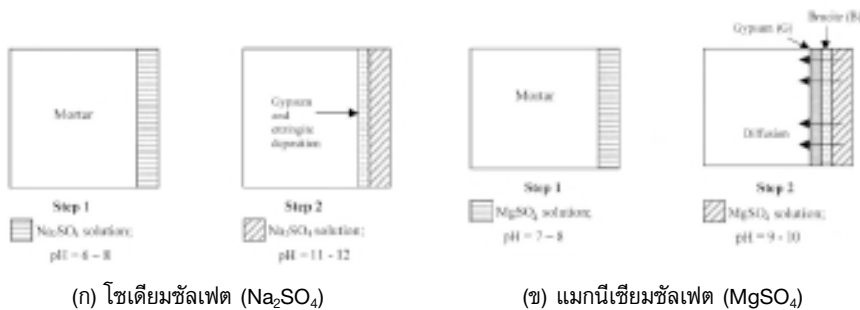
4.2.2 การขยายตัวของมอร์ตาร์

จากผลการทดสอบการขยายตัวของมอร์ตาร์ซึ่งบ่มในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก แสดงในรูปที่ 9 - 12 โดยการขยายตัวของมอร์ตาร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่าต่ำในช่วงแรก ในขณะที่ในช่วงหลังมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด (expansion increases suddenly) [13] ดังแสดงกลไกตามรูปที่ 10 กล่าวคือ ในชั้นที่ 1 หลังจากทำการแช่ตัวอย่างสารละลายโซเดียมซัลเฟตซึ่งมีค่า pH อยู่ในช่วง 6 - 8 จะทำให้ค่า pH เพิ่มขึ้นเป็นมีค่า 11 - 12 แต่ค่า pH ในธรรมชาติจริงจะมีค่าในช่วง 6 - 8 [13] เรียกช่วงนี้ว่าช่วงดอร์แมนท์ (Dormant Period) ต่อเนื่องด้วยชั้นที่ 2 ที่มีการก่อตัวของยิปซัมและเอ็ทริงไกท์ ดังแสดงสมการปฏิกิริยาเคมีที่ (1) ถึง (4) โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสารตั้งต้นทำให้เกิดการขยายตัวของมอร์ตาร์

จากรูปที่ 9 การขยายตัวของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่ามากกว่ามอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าแกลบดำจากโรงสีข้าว โดยการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าแกลบมีผลทำให้การขยายตัวมีค่าลดลงเนื่องจากการลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในการทำปฏิกิริยากับซัลเฟตไอออนเกิดยิปซัมและเอ็ททริงไกท์ และเมื่อเปรียบเทียบค่าการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ทนทานซัลเฟตล้วนกับมอร์ตาร์ที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าแกลบ พบว่าที่อัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบเท่ากับร้อยละ 30 และ 50 มอร์ตาร์มีค่าการขยายตัวต่ำกว่า ในขณะที่การแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 10 มีค่าการขยายตัวมากกว่ามอร์ตาร์ของปูนซีเมนต์ประเภททนซัลเฟต ดังนั้นจึงสามารถนำเถ้าแกลบมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อลดการขยายตัวเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟตได้



รูปที่ 9 ค่าการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตของมอร์ตาร์ปกติและมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบดำจากโรงสีข้าว ที่มีค่า w/b เท่ากับ 0.55 สารละลาย (ก) โซเดียมซัลเฟต (ข) แมกนีเซียมซัลเฟต

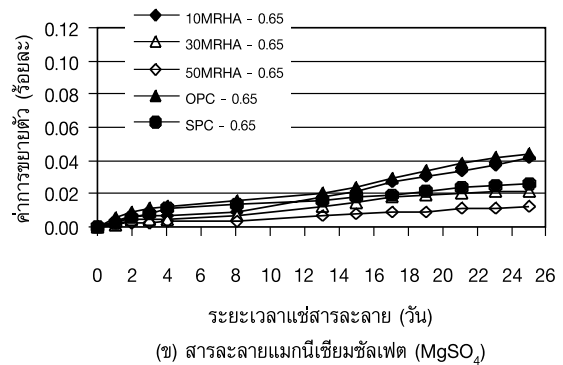
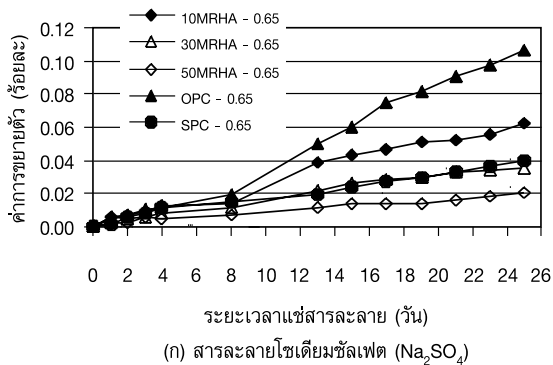


รูปที่ 10 กลไกการกระทำเนื่องจากซัลเฟต [13]

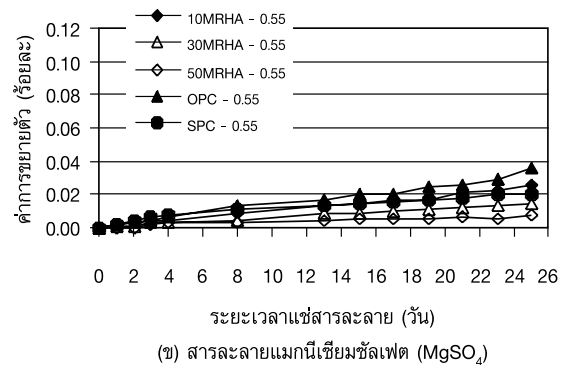
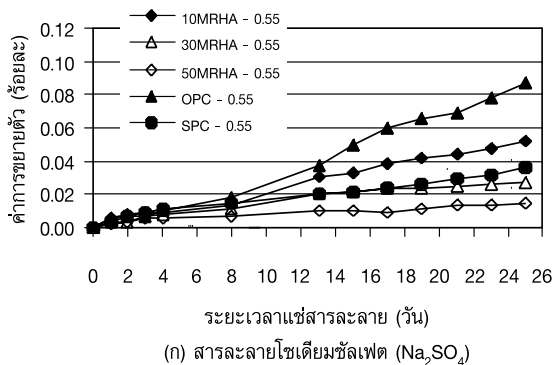
ในส่วนของกลไกการกระทำเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (รูปที่ 10(ข)) โดยภายหลังจากการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะมีการก่อตัวของบรูไซต์ (Brucite, $\text{Mg}(\text{OH})_2$) และยิปซัมที่ผิวของมอร์ตาร์ หลังจากการก่อตัวเสร็จไอออนของซัลเฟตจะสามารถแพร่เข้าสู่ภายในได้เพิ่ม ทำให้การทำลายของซัลเฟตมีค่าเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูง [13] แต่เป็นการเปลี่ยนโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งไม่มีความสามารถในการเชื่อมประสาน

จากผลการขยายตัวเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่ามีค่าน้อยกว่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตด้วยผลจากปฏิกิริยาเคมีเป็นหลักดังกล่าวข้างต้น และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเป็น 0.65 (รูปที่ 11) มีผลทำให้ค่าการขยายตัวเพิ่มขึ้นเนื่องจากความพรุนในโครงสร้างเพิ่มขึ้น [14] ทำให้ความสามารถในการซึมผ่านของไอออนซัลเฟตเพิ่มขึ้น

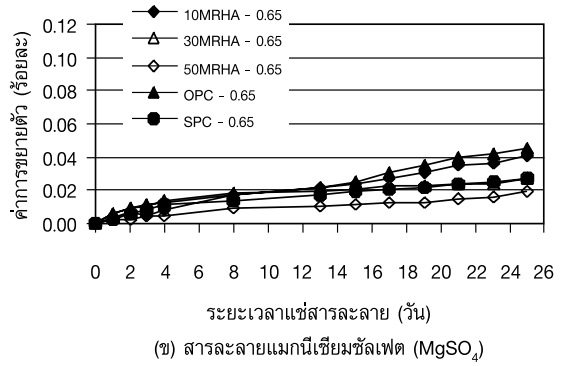
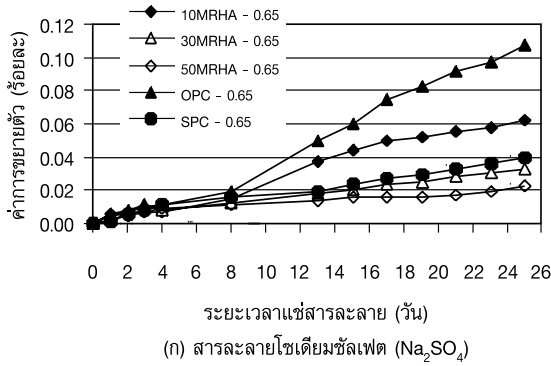
เมื่อพิจารณาการขยายตัวของมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบดำจากโรงไฟฟ้า พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับเถ้าแกลบดำจากโรงสีข้าว ดังแสดงในรูปที่ 12 และ 13



รูปที่ 11 ค่าการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตของมอร์ตาร์ปกติและมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบดำจากโรงสีข้าว ที่มีค่า w/b เท่ากับ 0.65 แช่สารละลาย (n) โซเดียมซัลเฟต (ข) แมกนีเซียมซัลเฟต



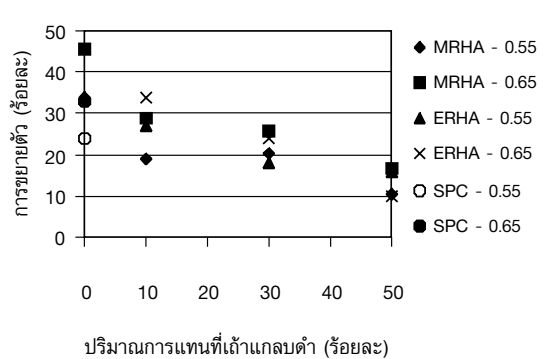
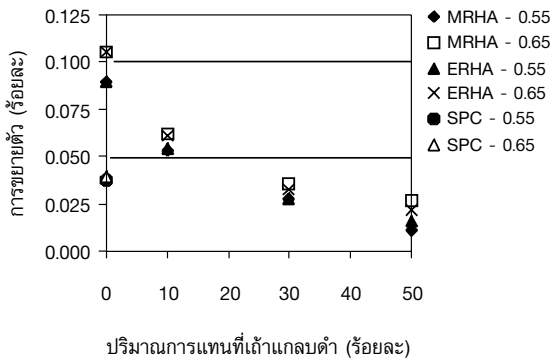
รูปที่ 12 ค่าการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตของมอร์ตาร์ปกติและมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบดำจากโรงไฟฟ้า ที่มีค่า w/b เท่ากับ 0.55 แช่สารละลาย (n) โซเดียมซัลเฟต (ข) แมกนีเซียมซัลเฟต



รูปที่ 13 ค่าการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตของมอร์ตาร์ปกติและมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบดำจากโรงไฟฟ้าที่มีค่า w/b เท่ากับ 0.65 แช่สารละลาย (ก) โซเดียมซัลเฟต (ข) แมกนีเซียมซัลเฟต

5. การประเมินศักยภาพระดับความทนทานต่อซัลเฟตตามมาตรฐาน ASTM C 1157 [15]

เมื่อเปรียบเทียบความทนทานต่อสารละลายโซเดียมซัลเฟตกับมาตรฐาน ASTM C 1157 โดยการประเมินค่าการขยายตัวที่อายุ 6 เดือน ซึ่งกำหนดระดับของความทนทานปานกลางไม่เกินร้อยละ 0.10 พบว่า การแทนที่เถ้าแกลบดำในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถึงร้อยละ 50 ให้ค่าการขยายตัวไม่เกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด ดังแสดงในรูปที่ 14 ในขณะที่ค่าอัตราการสูญเสียกำลังอัดมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ปกติ ดังแสดงในรูปที่ 15



SPC คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (ชนิดทนทานต่อซัลเฟต)

รูปที่ 14 ค่าการขยายตัวที่อายุ 6 เดือน ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบดำ ซึ่งป่มในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C 1157

รูปที่ 15 การสูญเสียกำลังอัดที่อายุ 6 เดือนของมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบดำ ซึ่งป่มในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

6. สรุปผลการวิจัย

1. ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) การใช้เถ้าแกลบดำบดที่เวลา 4 ชั่วโมง แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทำให้ค่าการขยายตัว การสูญเสียน้ำหนัก และการสูญเสียกำลังอัดมีค่าลดลง การประเมินศักยภาพระดับความทนทานต่อซัลเฟตตามมาตรฐาน ASTM C 1157 ที่อัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 - 50 โดยน้ำหนัก ให้ค่าการขยายตัวที่ไม่เกินร้อยละ 0.05 ซึ่งเป็นค่าขยายตัวระดับความทนทานสูงที่อายุ 6 เดือน ที่อัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 - 30 โดยน้ำหนัก มีค่าการขยายตัวที่ใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (ทนทานต่อซัลเฟต) เท่ากับร้อยละ 0.04

2. ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) การใช้เถ้าแกลบดำบดที่เวลา 4 ชั่วโมง แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทำให้การขยายตัวและน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงมีค่าลดลง แต่ในการทดสอบการสูญเสียกำลังอัดมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบดำมีค่าการสูญเสียกำลังมากกว่ามอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบดำในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการสูญเสียกำลังเพิ่มขึ้นร้อยละ 0 - 50

3. อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเป็นตัวแปรหนึ่งต่อความเสียหายเนื่องจากซัลเฟต เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเพิ่มขึ้นค่าการขยายตัว น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงและการสูญเสียกำลังมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งตัวอย่างที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4)

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณบริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ทดสอบสมบัติของเถ้าแกลบ บริษัท ปูนซีเมนต์เอเชีย จำกัด และ บริษัท ชลประทานซีเมนต์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 โรงสีข้าวไพมิตร ไบโพลย์ โรงไฟฟ้าปทุมโรสมิล แอนด์ แกรนารี ที่ให้ความอนุเคราะห์เถ้าแกลบดำที่ใช้ในการทดสอบ สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชียที่เอื้อเพื่อเครื่องบดแกลบ จงงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

8. เอกสารอ้างอิง

1. สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล, 2543, *ความคงทนของคอนกรีต*, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.
2. Tangtermsirikul, S. et al., June 1995, "Class C Fly Ash as a Shrinkage Reducer for Cement Paste", *Proceedings of the 5th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Milwaukee, Wisconsin, USA, pp. 385-402.
3. ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, จักรพันธ์ วงษ์พา และ สุคันธปรีย์, 2545, "การพัฒนาเถ้าแกลบ-เปลือกไม้เพื่อใช้ในงานคอนกรีต", *เอกสารการประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8*, หน้า 163 - 172.

4. ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2533, *คอนกรีตเทคโนโลยี*, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
5. Rodriguez-Camacho, 2002, "Importance of Using the Natural Pozzolans on Concrete Durability", *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, pp. 1851 -1858.
6. Mehta, P. K., September 1977, "Properties of Blended Cements Made from RHA", *ACI Materials Journal*, Vol. 74, No. 9.
7. Columnna, V. B., 1974, The Effect of Rice Husk Ash in Cement and Concrete Mixes, *Master's Thesis No. 678*, AIT, Bangkok.
8. Zhang, M. and Malhotra, V. M., 1996, High Performance Concrete Incorporation Rice Husk Ash as a Supplementary Cementing Material, *ACI Materials Journal*, No. 93, pp. 235 - 236.
9. American Society for Testing and Materials, 2002, "ASTM C 1012 - 04 Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution", *Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.01*, Philadelphia, PA, USA.
10. Omar Saed Baghabra Al - Moudi, 1995, "Effect of Magnesium Sulfate and Sodium Sulfate on the Durability Performance of Plain and Blended Cements." *ACI Materials Journal*, No. 92 - M3, pp. 15 - 24.
11. Bendsted, J. and Barnes, P., 2002, *Structure and Performance of Cement*, London, England.
12. Cohen M. D. and Benter A., 1998, "Durability of Portland Cement - Silica Fume Pastes in Magnesium Sulfate and Sodium Sulfate Solutions" *ACI Materials Journal*, No. 85 - M18, pp. 148 - 157.
13. Santhanum, M., Cohen, M. D., and Olek, J., 2003, "Mechanism of Sulfate Attack: A Fresh Look Part 2: Proposed Mechanism", *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 341 - 346.
14. Neville A. M., 1995, *Properties of Concrete*, Fourth Edition, Pitman Books, Limited, London, England.
15. American Society for Testing and Materials, 2002, "ASTM C 1157 - 03 Standard Performance Specification for Hydraulic Cement", *Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.01*, Philadelphia, PA, USA.