การสูญเสียกำลังอัด การสูญเสียน้ำหนัก และการขยายตัวของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำบดละเอียดและซิลิกาฟูมภายใต้การกระทำของสารละลายซัลเฟต

บุรฉัตร ฉัตรวีระ [1] และ วินัย หอมศรีประเสริฐ [2]

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต คลองหลวง ปทุมธานี 12120

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของเถ้าแกลบดำบดละเอียดและซิลิกาฟูมในคอนกรีตซีเมนต์ภายใต้การกระทำของซัลเฟต โดยคุณสมบัติที่ศึกษาประกอบด้วย คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าแกลบดำบดละเอียดและซิลิกาฟูม การสูญเสียกำลังอัด การขยายตัว และการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีต สารละลายซัลเฟตที่ใช้ได้แก่ สารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ตามมาตรฐาน ASTM C 1012 สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงของคอนกรีตที่ศึกษาเท่ากับ 0.25, 0.35 และ 0.45 และอัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าแกลบดำบดละเอียดและซิลิกาฟูมในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ 0, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก

จากการทดสอบพบว่าในสารละลายโซเดียมซัลเฟต การใช้เถ้าแกลบดำบดละเอียดหรือซิลิกาฟูมแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้การสูญเสียกำลังอัด การขยายตัว และการสูญเสียน้ำหนักมีค่าลดลง ในส่วนของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตการใช้เถ้าแกลบดำบดละเอียดหรือซิลิกาฟูมแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้การขยายตัว และการสูญเสียน้ำหนักมีค่าลดลง แต่ในด้านของกำลังอัดเมื่อแช่คอนกรีตที่อายุ 90 วัน พบว่าการใช้ซิลิกาฟูมแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นทำให้การสูญเสียกำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่การใช้เถ้าแกลบดำบดละเอียดแทนที่ในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นทำให้การสูญเสียกำลังอัดมีค่าลดลง และที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้การสูญเสียกำลังอัด การขยายตัว และการสูญเสียน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ทั้งที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

งานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่าการใช้เถ้าแกลบดำบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.25 ช่วยให้คอนกรีตมีความทนทานต่อซัลเฟตทั้งในด้านของการสูญเสียกำลังอัด การขยายตัว และการสูญเสียน้ำหนัก นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบในด้านเศรษฐศาสตร์แล้วเถ้าแกลบดำบดละเอียดมีราคาต่ำกว่าซิลิกาฟูมมาก และที่สำคัญเถ้าแกลบดำบดละเอียดถือว่าเป็นผลิตผลทางการเกษตรที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีตทนทานซัลเฟต

---

1 รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

2 นักศึกษาปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

Compressive Strength Loss Weight Loss and Expansion of Concrete Containing Ground Black Rice Husk Ash and Silica Fume under Sulfate Solution Attacks

Burachat Chatveera [1] and Winai Homsriprasert [2]

Thammasat University, Rangsit Campus, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

Abstract

The objective of this research was to study the influence of ground black rice husk ash (BRHA) and silica fume on sulfate resistance of concrete. The tested properties consisted of physical and chemical properties of ground BRHA and silica fume, compressive strength loss, expansion and weight loss of concrete. The sulfate solutions were sodium sulfate (Na_2SO_4) and magnesium sulfate ($MgSO_4$) with the concentration of 5% by weight in accordance with the ASTM C 1012 standard. The water-to-binder ratios of concrete were 0.25, 0.35 and 0.45 and the percentage replacements of ground BRHA and silica fume in Portland cement Type I were 0 , 10 and 20 by weight of binder.

From the tested results of sodium sulfate attack, it was found that the compressive strength loss, expansion and weight loss of concrete decreased when increasing the percentage replacements of ground BRHA and silica fume. In the case of magnesium sulfate attack, it was observed that the rate of expansion and weight loss decreased when increasing the percentage replacements of ground BRHA and silica fume. On the other hand, the compressive strength of concrete due to magnesium sulfate attack increased when increasing the percentage replacements of silica fume, but decreased when increasing the percentage replacements of ground BRHA. Furthermore, the rate of the compressive strength loss, expansion and weight loss of concrete due to sodium and magnesium sulfate attacks increased when increasing water-to-binder ratios.

This research can be concluded that at the replacement levels of ground BRHA 20% by weight of binder and 0.25 water-to-binder ratios, the sulfate resistance of concrete including compressive strength loss, expansion and weight loss were improved. Additionally, in the case of the economics, it was observed that the cost of fineness ground BRHA was much lower than that of silica fume. Since the ground BRHA was a by-product from agriculture and also friendly to the environment, therefore, the ground BRHA was suitable material to be used as a pozzolanic material for sulfate resisting concrete.

---

[1] *Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.*

[2] *Undergraduate Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.*

1. บทนำ

ท่ามกลางการพัฒนาอย่างไม่หยุดยั้งในทุกภาคส่วนของนานาอารยประเทศ การลงทุนก่อสร้างโครงการขนาดใหญ่จะพบว่างบประมาณในการก่อสร้างส่วนมากอยู่ที่วัสดุก่อสร้างและวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างส่วนใหญ่ประกอบด้วยคอนกรีตเป็นวัสดุหลัก แต่การก่อสร้างในปัจจุบันมีตัวแปรและเงื่อนไขที่สำคัญมากมายหลายปัจจัย และหนึ่งในนั้นคือ ปัญหาการผุกร่อน การพองตัว และการแตกร้าวอย่างรุนแรงของคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่ปนเปื้อนไปด้วยความเป็นกรดและความเป็นซัลเฟต โดยเฉพาะเกลือซัลเฟตนั้นจะพบมากแถบบริเวณในน้ำทะเล น้ำกร่อยในดินหรือน้ำใต้ดิน น้ำเสียจากบ้านเรือนจากโรงงานอุตสาหกรรมหรือจากโรงงานผลิตสารเคมีบางประเภท และแหล่งน้ำพุร้อนตามธรรมชาติบางแห่งด้วย ซึ่งเกลือซัลเฟตที่อยู่ในรูปของสารละลายสามารถทำอันตรายต่อคอนกรีตได้มากที่สุดคือ โซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต เนื่องจากซัลเฟตที่อยู่ในรูปสารละลายจะเข้าทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตแล้วทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวและแตกร้าวทำให้โครงสร้างคอนกรีตไม่สามารถมีอายุการใช้งานตามที่ออกแบบไว้ได้ในที่สุด [1] ดังนั้นการเลือกใช้คอนกรีตที่สามารถทนทานต่อความเสียหายจากซัลเฟตเป็นโจทย์ที่ท้าทายให้ทำการศึกษาวิจัยว่าทำอย่างไรคอนกรีตจึงจะมีความทนทาน และยังคงรักษากำลังรับแรงอัดไว้ได้หรือเมื่อเวลาผ่านไป ทำอย่างไรให้คอนกรีตมีการสูญเสียกำลังรับแรงอัดที่น้อยที่สุด เนื่องจากคอนกรีตประกอบด้วยส่วนผสมหลัก ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบเมื่อสัมผัสกับสารละลายซัลเฟตที่ปะปนอยู่ในธรรมชาติทั้งในดินและในน้ำย่อมส่งผลกระทบโดยตรงทั้งในมิติของกำลังรับแรงอัดและความคงรูปของคอนกรีต ดังนั้นวัสดุปอซโซลานจึงนำมาใช้ในงานวิจัยนี้โดยมีเงื่อนไขสำคัญที่ว่าวัสดุปอซโซลานที่นำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ต้องเป็นวัสดุที่มาจากธรรมชาติและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

จากข้อมูลของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรปี พ.ศ. 2551 พบว่าประเทศไทยมีผลผลิตข้าวนาปีและนาปรังรวมกันประมาณ 32 ล้านตันต่อปี ในจำนวนนี้จะได้แกลบประมาณ 6 ล้านตัน และจากผลการวิเคราะห์ทางเคมีพบว่าเถ้าแกลบดำบดละเอียดมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบถึงร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก [2] ซึ่งทำให้มีคุณสมบัติความเป็นวัสดุปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618 [3] ดังนั้นเถ้าแกลบดำบดละเอียดจึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาเป็นวัสดุปอซโซลานเพื่อทำการศึกษาวิจัยในการผลิตคอนกรีตทนทานต่อสารละลายซัลเฟต

สำหรับงานวิจัยในอดีตของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบเพื่อใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มได้มีมาตั้งแต่ปี คศ. 1970 โดยในระยะแรกเป็นการนำมาใช้โดยไม่ได้คำนึงถึงอุณหภูมิในการเผาไหม้ทำให้เถ้าแกลบที่ได้มีลักษณะเป็นผลึกซึ่งมีความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาจนกระทั่งได้แสดงให้เห็นผลของตัวแปรจากกระบวนการทางความร้อนที่มีต่อปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าแกลบ หลังจากนั้นการนำเถ้าแกลบมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานจึงแพร่หลายมากยิ่งขึ้น [4] ได้แก่ งานวิจัยที่ศึกษาความทนทานของมอร์ต้าร์ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบดำจากการกระทำของโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต [5] การศึกษาความต้านทานการกัดกร่อนของสารซัลเฟตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยหรือเถ้าแกลบโดยตัวอย่างที่ใช้ศึกษาเป็นมอร์ต้าร์ [6] จากงานวิจัยดังกล่าวข้างต้นส่วนใหญ่จะเน้นการศึกษาวิจัยตัวอย่างที่เป็นมอร์ต้าร์ ดังนั้นความแตกต่างของงานวิจัยกับงานวิจัยที่ผ่านมา คือ ประการแรก งานวิจัยนี้ได้พัฒนาตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยจากที่เคยวิจัยมาในอดีตโดยใช้มอร์ต้าร์มาเป็นการใช้คอนกรีต ประการที่สอง งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิจัยสารละลายที่สามารถทำอันตรายต่อคอนกรีตได้มากที่สุดคือสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักตามมาตรฐาน ASTM C 1012 [7] ประการที่สาม งานวิจัยนี้ศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อคอนกรีตทั้งในด้านการสูญเสียกำลังอัด การขยายตัว และการสูญเสียน้ำหนัก และประการสุดท้าย งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบคอนกรีตที่อายุ 30, 60 และ 90 วัน

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาเปรียบเทียบการสูญเสียกำลังอัด การขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตที่มีส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน การใช้เถ้าแกลบดำบดละเอียดและซิลิกาฟูม แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ภายใต้การกระทำของสารละลาย

โซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต

3. การทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาประกอบไปด้วย

1. ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการวิจัยเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ของบริษัท ทีพีไอ โพลีน จำกัด (มหาชน)

2. เถ้าแกลบที่ใช้เป็นเถ้าแกลบดำที่ได้จากโรงไฟฟ้าปทุมไรซมิล แอนด์ แกรนารี จำกัด และทำการบดเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ซึ่งมีค่าความละเอียด (พื้นที่ผิวจำเพาะ) เท่ากับ 5,127 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม

3. ซิลิกาฟูมที่ใช้เป็นซิลิกาฟูมประเภท Force 10,000 D Dens Micro Silica ของบริษัท ดับบริว อาร์ เกรซ ประเทศไทย จำกัด ซึ่งค่าความละเอียด (พื้นที่ผิวจำเพาะ) ของซิลิกาฟูมที่ใช้นั้นเป็นชนิดอัดแน่น (Densified Silica Fume) จึงไม่สามารถหาพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธีแบบเบลนได้

4. สารลดน้ำที่ใช้เป็นสารลดน้ำประเภท สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer Type F) ADVA CAST 207 ของบริษัท ดับบริว อาร์ เกรซ ประเทศไทย จำกัด

5. สารละลายซัลเฟตที่ใช้ ได้แก่ โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) โดยมีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ตามมาตรฐาน ASTM C 1012 [7]

6. มวลรวมละเอียดหรือทราย ใช้ทรายแม่น้ำขนาดใหญ่สุดต้องผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ทำการหาขนาดคละและค่าโมดูลัสความละเอียด ค่าความถ่วงจำเพาะที่สภาพอิ่มตัวผิวแห้งและค่าการดูดซึมน้ำ และค่าอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมที่ผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 136 [8] ASTM C 128 [9] และ ASTM C 29 [10] ซึ่งมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.9 ค่าความถ่วงจำเพาะที่สภาพอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.63 ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 2.46 และค่าอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวม (S/A) เท่ากับ 0.45

7. มวลรวมหยาบหรือหิน ใช้หินปูนขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 3/4 นิ้ว ทำการหาขนาดคละและค่าโมดูลัสความละเอียด ค่าความถ่วงจำเพาะที่สภาพอิ่มตัวผิวแห้งและค่าการดูดซึมน้ำ ที่ผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 136 [8] ASTM C 127 [11] ซึ่งมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 7.2 ค่าความถ่วงจำเพาะที่สภาพอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.71 และค่าร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.07

8. น้ำที่ใช้เพื่อเป็นส่วนผสมของคอนกรีตและในกระบวนการบ่มได้ใช้น้ำจากห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

3.2 วิธีการเตรียมวัสดุ การผสม และการทำตัวอย่างทดสอบ

เถ้าแกลบดำบดละเอียดที่ใช้ในการศึกษาเมื่อนำมาจากโรงไฟฟ้าแล้วจะนำไปบดด้วยเครื่องบดชนิด Comparatively low cost ที่มีความเร็วในการหมุนเท่ากับ 52 รอบต่อนาที ใช้เวลาในการบดเท่ากับ 4 ชั่วโมง โดยใช้ตัวกลางบดเป็นเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9, 12 และ 15 มม. จำนวน 45, 45 และ 35 เส้น ตามลำดับ ความยาว 750 มม. ซึ่งคิดปริมาตรของตัวกลางรวมได้ร้อยละ 6 ของปริมาตรถังบด ปริมาณเถ้าแกลบดำที่ใส่ในเครื่องบดหนัก 10 กิโลกรัม

การผลิตคอนกรีตเริ่มจากการนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าแกลบดำบดละเอียดและซิลิกาฟูมมาชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วน การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0, 10 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ลงผสมในเครื่องผสมจากนั้นปล่อยให้เครื่องผสมคลุกส่วนผสมที่เป็นวัสดุผงให้เข้ากันแล้วจึงเติมน้ำที่ผสมกับสารลดน้ำพิเศษในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของวัสดุผงลงไปในเครื่องผสมแล้วปล่อยให้เครื่องผสมคลุกส่วนผสมให้ได้ที่จากนั้นใส่ทรายและหินลงไปและปล่อยให้เครื่องผสมคลุกส่วนผสมให้ได้ที่แล้วทำการทดสอบหาค่ายุบตัวของคอนกรีต จากนั้นทำการเทคอนกรีตลงในแบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด 10 x 10 x 10 ซม. เพื่อใช้ทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตและการสูญเสียน้ำหนัก และทรงปริซึมขนาด 5 x 5 x 15 ซม. เพื่อใช้ทดสอบการขยายตัวแล้วทำการจี้เขย่าคอนกรีตด้วยเครื่องจี้เขย่า หลังจากนั้นทำการตกแต่งผิวหน้าให้เรียบร้อยแล้วทำการบ่มคอนกรีตทั้งแบบหล่อตั้งไว้ในห้อง

ปฏิบัติการคอนกรีตจนครบ 24 ชั่วโมง จึงนำคอนกรีตออกจากแบบหล่อ หลังจากนั้นนำคอนกรีตไปชั่งน้ำหนักและวัดขนาดแล้วนำก้อนตัวอย่างไปทำการทดสอบที่ 24 ชั่วโมง และนำก้อนตัวอย่างไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจนมีอายุครบ 30, 60 และ 90 วัน แล้วนำตัวอย่างไปทดสอบกำลังรับแรงอัด ชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่าการสูญเสียน้ำหนัก และวัดการขยายตัว

ตารางที่ 1 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ

สัญญลักษณ์	ปฏิภาคส่วนผสม (กก./ม.^{3})						
	ปูนซีเมนต์	ทราย	หิน	น้ำ	เถ้าแกลบดำบดละเอียด	ซิลิกาฟูม	สารลดน้ำพิเศษ (% of binder)
OPC - 0.25	516	829	1015	127	-	-	5
OPC - 0.35	516	829	1015	180	-	-	5
OPC - 0.45	516	829	1015	232	-	-	5
10RHA - 0.25	464	829	1015	127	51	-	5
20RHA - 0.25	413	829	1015	127	103	-	5
10RHA - 0.35	464	829	1015	180	51	-	5
20RHA - 0.35	413	829	1015	180	103	-	5
10RHA - 0.45	464	829	1015	232	51	-	5
20RHA - 0.45	413	829	1015	232	103	-	5
10SF - 0.25	460	829	1015	127	-	55	5
20SF - 0.25	404	829	1015	127	-	111	5
10SF - 0.35	460	829	1015	180	-	55	5
20SF - 0.35	404	829	1015	180	-	111	5
10SF - 0.45	460	829	1015	232	-	55	5
20SF - 0.45	404	829	1015	232	-	111	5

หมายเหตุ OPC หมายถึง คอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
RHA หมายถึง คอนกรีตที่มีเถ้าแกลบดำบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
SF หมายถึง คอนกรีตที่มีซิลิกาฟูมแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
ตัวเลข 10 และ 20 หมายถึง ร้อยละการแทนที่โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน
ตัวเลข 0.25, 0.35, และ 0.45 หมายถึง อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง

3.3 วิธีการทดสอบ

3.3.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าแกลบดำบดละเอียด และซิลิกาฟูม

ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพโดยการทดสอบหาลักษณะรูปร่างของอนุภาคด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) การทดสอบหาลักษณะการกระจายขนาดคละของอนุภาคโดยใช้เทคนิค Laser Particle Size Distribution การทดสอบความเป็นผลึกของอนุภาคโดยใช้เทคนิค X - Ray Diffraction (XRD) และการทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมี

3.3.2 การทดสอบคุณสมบัติความคงทนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบดำบดละเอียดและซิลิกาฟูม

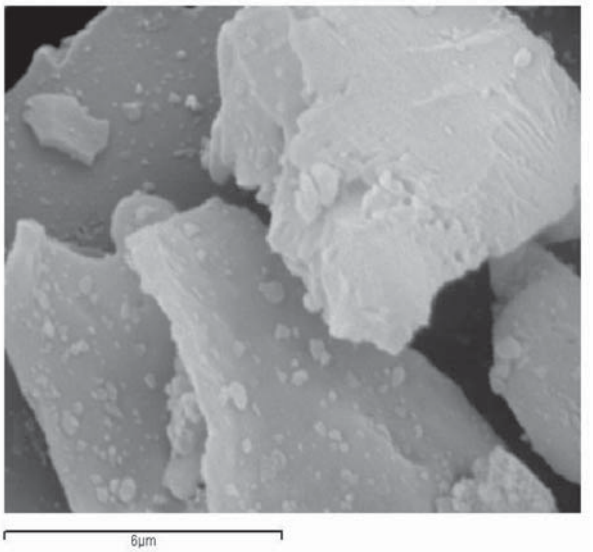
ศึกษาคุณสมบัติความคงทนของคอนกรีตต่อสภาวะการกัดกร่อนของสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต โดยทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด การสูญเสียน้ำหนัก และการขยายตัวที่แช่ในสารละลายซัลเฟตที่อายุ 30, 60 และ 90 วัน โดยใช้จำนวนตัวอย่าง 3 ตัวอย่างต่อหนึ่งรายการทดสอบ

4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

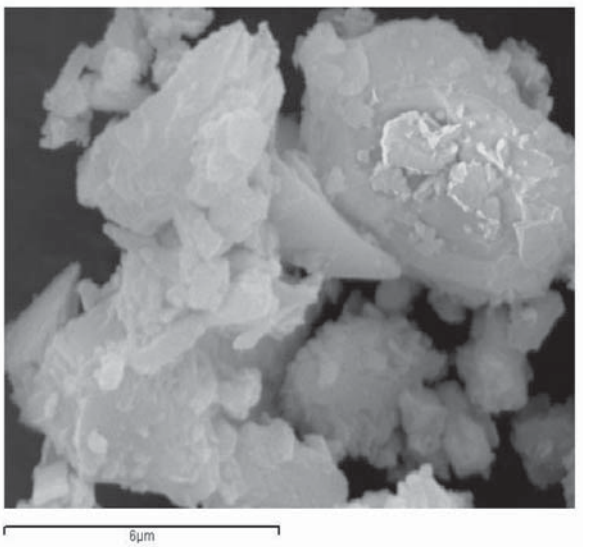
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี

4.1.1 ลักษณะของอนุภาคโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

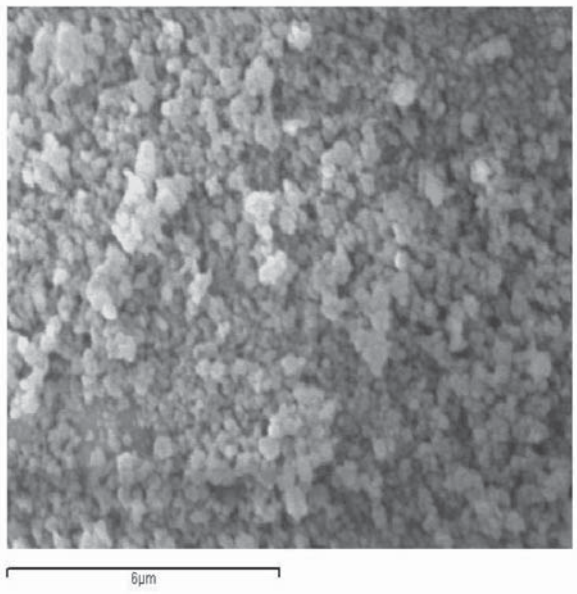
เมื่อนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าแกลบดำบดละเอียด และซิลิกาฟูม ไปขยายลักษณะอนุภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า พบว่าอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะหยาบเป็นเหลี่ยมมุม ดังแสดงในรูปที่ 1 ส่วนเถ้าแกลบดำบดละเอียดมีลักษณะเป็นเหลี่ยมขนาดอนุภาคเล็กใหญ่คละกันพื้นที่ผิวขรุขระมีลักษณะเป็นโพรง ดังแสดงในรูปที่ 2 และซิลิกาฟูมพบว่าอนุภาคมีขนาดใหญ่มากมีพื้นที่ผิวสูงมากลักษณะขรุขระและเป็นโพรงมีความพรุนมากทำให้มีความสามารถในการกักเก็บน้ำสูง ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 1 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (กำลังขยาย 10,000 เท่า)



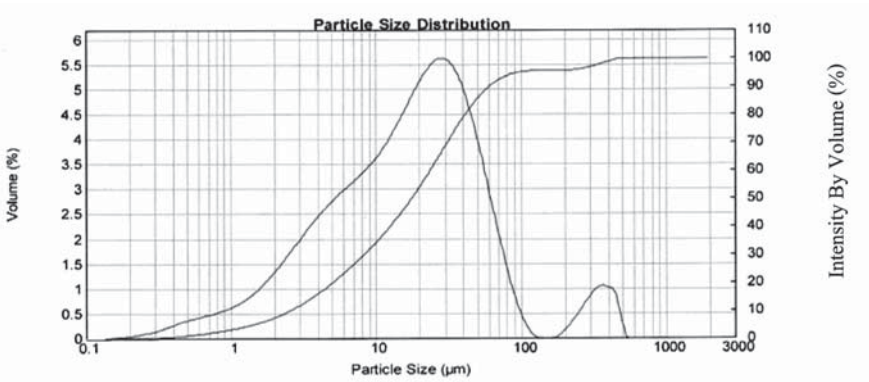
รูปที่ 2 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของเถ้าแกลบดำบดละเอียด (กำลังขยาย 10,000 เท่า)



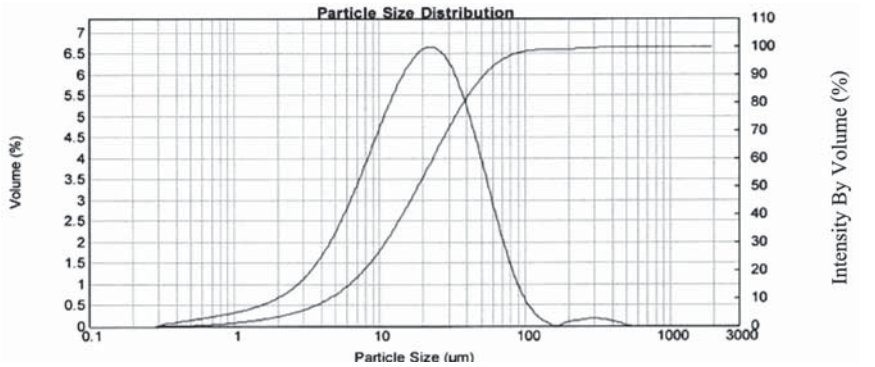
รูปที่ 3 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของซิลิกาฟูม (กำลังขยาย 10,000 เท่า)

4.1.2 ลักษณะการกระจายขนาดคละของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าแกลบดำบดละเอียด และซิลิกาฟูม โดยใช้เทคนิค Laser Particle Size Distribution

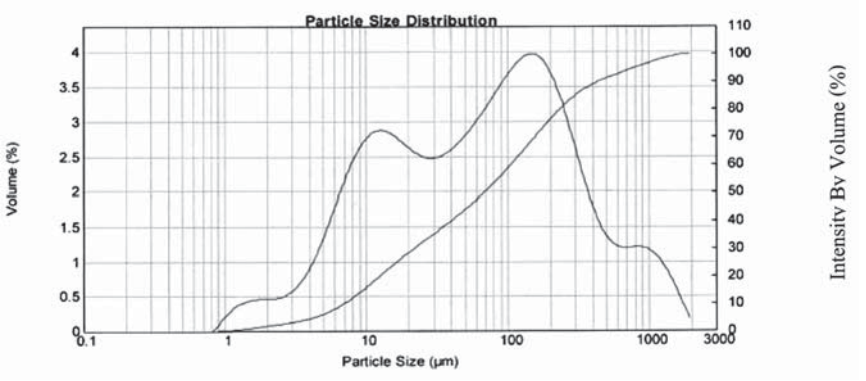
จากผลการทดสอบการกระจายขนาดคละของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่าอนุภาคโดยส่วนใหญ่กระจายอยู่ในช่วงขนาด 1 ถึง 100 ไมโครเมตร และขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 37.28 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4 สำหรับของเถ้าแกลบดำบดละเอียดพบว่าอนุภาคโดยส่วนใหญ่กระจายอยู่ในช่วงขนาด 1 ถึง 100 ไมโครเมตร และขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 27.17 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5 และในส่วนของซิลิกาฟูมกระจายขนาดคละของอนุภาคโดยส่วนใหญ่กระจายอยู่ในช่วงขนาด 1 ถึง 2,000 ไมโครเมตร และขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 175.32 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 6 ดังนั้นจากภาพถ่ายขยายอนุภาคและลักษณะการกระจายขนาดคละของอนุภาคพบว่ามีความสอดคล้องกัน โดยอนุภาคของซิลิกาฟูมจะมีขนาดใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าแกลบดำบดละเอียด



รูปที่ 4 การกระจายขนาดคละของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



รูปที่ 5 การกระจายขนาดคละของเถ้าแกลบดำบดละเอียด

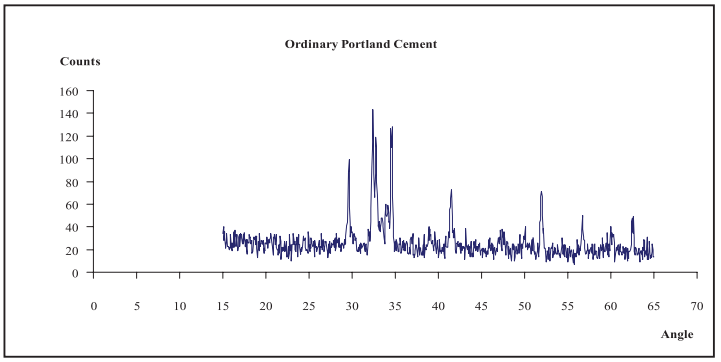


รูปที่ 6 การกระจายขนาดคละของซิลิกาฟูม

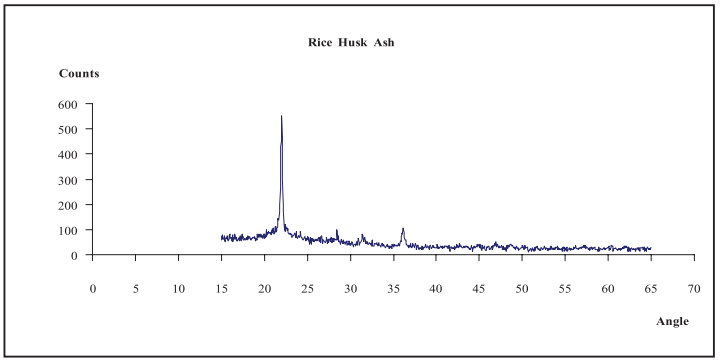
4.1.3 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

เถ้าแกลบดำบดละเอียดและซิลิกาฟูมโดยใช้เทคนิค X - Ray Diffraction (XRD)

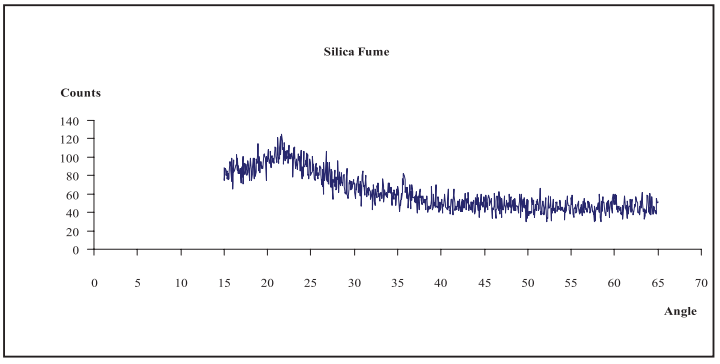
จากการวิเคราะห์อนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่ามีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) อยู่ร้อยละ 65.20 และมีซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) อยู่ร้อยละ 20.66 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 2 และมีค่าระดับการสะท้อน (Counts) สูงสุด เท่ากับ 122 ที่มุมสะท้อน (2θ) เท่ากับ 32.45 องศา ดังแสดงในรูปที่ 7 ขณะที่เถ้าแกลบดำบดละเอียดมีปริมาณซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) อยู่ร้อยละ 90.63 และมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) อยู่เพียงร้อยละ 0.90 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 2 และมีระดับการสะท้อนสูงสุดเท่ากับ 509 ที่มุมสะท้อน (2θ) เท่ากับ 22.04 องศา โดยมุมสะท้อนนั้นเป็นมุมที่สะท้อนสถานะ Cristobalite ซึ่งเป็นมุมที่บ่งบอกถึงระดับสถานะผลึกในวัสดุ [12] และพบว่าเมื่อนำค่าสูงสุดของสเปกตรัมไปเทียบกับตารางสเปกตรัมของธาตุซิลิคอนไดออกไซด์ของเถ้าแกลบดำบดละเอียดพบว่าผลึกนั้นอยู่ในรูปของผลึกคริสโตบาไรด์ (SiO_2) ซึ่งเป็นผลึกที่ได้จากการเผาเถ้าแกลบด้วยอุณหภูมิสูง [5] และ ในส่วนซิลิกาฟูมนั้นพบว่ามีซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) อยู่ร้อยละ 86.43 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) อยู่เพียงร้อยละ 0.71 ดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 7 ความเป็นผลึกของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



รูปที่ 8 ความเป็นผลึกของอนุภาคเถ้าแกลบดำบดละเอียด



รูปที่ 9 ความเป็นผลึกของอนุภาคซิลิกาฟูม

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าแกลบดำบดละเอียด และซิลิกาฟูม

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าแกลบดำบดละเอียด	ซิลิกาฟูม
1. ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)	20.66	90.63	86.43
2. อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	5.38	0.52	3.78
3. ไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3)	3.32	1.40	4.65
4. แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	65.20	0.90	0.71
5. แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.39	0.20	1.45
6. โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	0.38	1.90	1.85
7. โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	0.07	0.01	0.11
8. ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	2.24	0.03	0.87
9. ไททาเนียมออกไซด์ (TiO_2)	0.25	0.11	-
10. ปูนขาวอิสระ (Free CaO)	0.50	0.06	-

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าแกลบดำบดละเอียด และซิลิกาฟูม

คุณสมบัติทางกายภาพ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าแกลบดำบดละเอียด	ซิลิกาฟูม
1. การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (ร้อยละ) (Loss on ignition,%)	1.50	0.84	2.15
2. ปริมาณความชื้น (ร้อยละ) (Moisture Content , %)	0.19	1.13	2.24
3. พื้นที่ผิวจำเพาะ (ซม.^{2}/ก.) (Surface Area , cm^2/g)	3,376	5,127	*
4. ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	3.15	2.11	2.20
5. ความละเอียดขนาดของอนุภาค (ร้อยละผ่าน , ไมโครเมตร) (Fineness Particle Size , % Passing : micrometer)			
≥ 75 ไมโครเมตร	0.80	0.95	69.56
75 ไมโครเมตร	5.25	6.06	19.30
45 ไมโครเมตร	3.60	5.50	2.25
≤ 36 ไมโครเมตร	90.62	87.49	8.89
6. ดัชนีการพัฒนากำลัง (ร้อยละ) (Strength Activity Index, day)			
ที่อายุ 7 วัน	100	79	83
ที่อายุ 28 วัน	100	75	110
7. ปริมาณน้ำที่ต้องการ (ร้อยละ) (Water Requirement, % of control)	100	103	120
8. ค่าความหนาแน่น (กก./ล.) (Bulk Density, kg/l)	1.03	0.70	0.58

หมายเหตุ : * เนื่องจากซิลิกาฟูมที่ใช้เป็นชนิดอัดแน่น (Densified Silica Fume) จึงไม่สามารถหาพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธีแบบเบลนได้

4.2 คุณสมบัติด้านความทนทานต่อซัลเฟต

4.2.1 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายซัลเฟต

จากรูปที่ 10, 11 และ 12 เป็นผลการทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/B) เท่ากับ 0.25, 0.35 และ 0.45 ตามลำดับ ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่อายุ 30, 60 และ 90 วัน

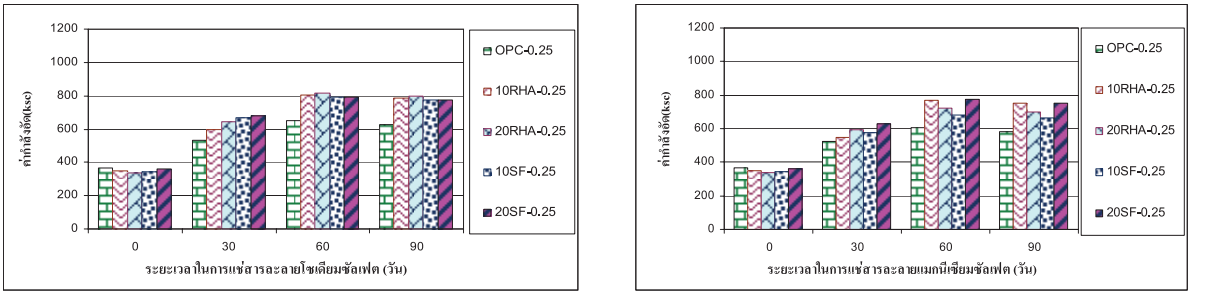
พบว่าคอนกรีตที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อายุ 30 และ 60 วัน กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทุกปฏิภาคส่วนผสมยังคงมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งที่อายุ 90 วัน ของการแช่พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทุกปฏิภาคส่วนผสมจะมีค่าลดลงโดยคอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะมีค่าร้อยละการสูญเสียกำลังรับแรงอัดมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อายุ 60 วัน รองลงมาคือ คอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบดำบดละเอียดร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก และสุดท้ายคือ คอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก จะมีค่าร้อยละการสูญเสียกำลังรับแรงอัดน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อายุ 60 วัน ทั้งนี้เพราะเถ้าแกลบดำบดละเอียดเมื่อทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีความหนาแน่นและความทึบน้ำเพิ่มมากขึ้นประกอบกับการลดลงของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งสารตั้งต้นของปฏิกิริยาเนื่องจากซัลเฟตลดลงทำให้ความรุนแรงจากการกระทำสารละลายโซเดียมซัลเฟตลดลงหรือคอนกรีตมีความต้านทานต่อซัลเฟตเพิ่มขึ้น [13]

คอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 30 และ 60 วัน พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทุกปฏิภาค ส่วนผสมยังคงมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งที่อายุ 90 วันของการแช่ พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทุกปฏิภาคส่วนผสมจะมีค่าลดลงโดยคอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าร้อยละการสูญเสียกำลังรับแรงอัดมากที่สุด รองลงมาคือ คอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบดำบดละเอียด และซิลิกาฟูมร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และสุดท้ายคือ คอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบดำบดละเอียดและซิลิกาฟูมร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และจากผลการทดสอบคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) พบว่าค่าร้อยละการสูญเสียกำลังอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบดำบดละเอียดหรือซิลิกาฟูมที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกต้องใช้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในการทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิคอนไดออกไซด์และน้ำ ซึ่งโดยปกติแล้วในโพรงจะประกอบไปด้วยแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ละลายอยู่ เมื่อปฏิกิริยาดำเนินต่อไปในระยะยาวจะส่งผลให้ไอออนทั้งสองชนิดนี้มีปริมาณลดลง และระบบพยายามรักษาสมดุลไว้โดยเหนี่ยวนำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ละลายภายในโครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตออกมาเพื่อทำปฏิกิริยา จากผลดังกล่าวทำให้โครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีความไม่เสถียร [14] จึงยิ่งทำให้ไอออนของแมกนีเซียม (Mg^{2+}) ซึ่งมีความสามารถในการแทนที่แคลเซียมไอออนของโครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตได้สูงมาก [15] ผลที่ตามมาคือโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจะถูกเปลี่ยนเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตส่งผลให้คอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) มีค่าร้อยละการสูญเสียกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบดำบดละเอียดหรือซิลิกาฟูมที่เพิ่มขึ้น

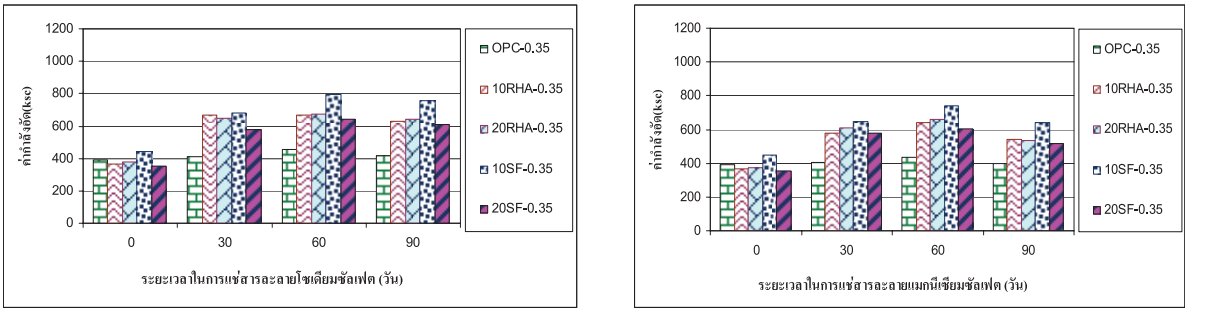
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบจากรูปที่ 10, 11 และ 12 พบว่าคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตในทุกปฏิภาคส่วนผสมมีค่าร้อยละการสูญเสียกำลังรับแรงอัดมากกว่าคอนกรีต ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาของแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ก่อให้เกิดการสลายตัวของแคลเซียม ซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ไปเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งไม่มีความสามารถในการเชื่อมประสานทำให้เกิดการกัดกร่อนของพื้นที่ผิวรับแรง เมื่อพื้นที่ผิวรับแรงมีปริมาณลดลงก็จะทำให้ความสามารถในการรับกำลังของคอนกรีตมีค่าลดลง [16] และข้อสังเกตอีกประการหนึ่งคือ การที่โซเดียมไอออน (Na^+) ซึ่งมีวาเลนต์อิเล็กตรอน (จำนวนอิเล็กตรอนวงนอกสุดของโครงสร้างอะตอมโดยอะตอมของโซเดียมมีค่า +1 (Na^+) ใน

ขณะที่อะตอมของแมกนีเซียมมีค่า +2 (Mg^{2+})) ไม่เท่ากับของแคลเซียมที่มีวาเลนต์อิเล็กตรอน +2 (Ca^{2+}) ดังนั้นความสามารถในการแทนที่ในโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจึงต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) เมื่อโครงสร้างดังกล่าวเปลี่ยนไปเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งมีความสามารถในการยึดประสานต่ำจึงทำให้กำลังอัดลดลงตามไปด้วย [14]

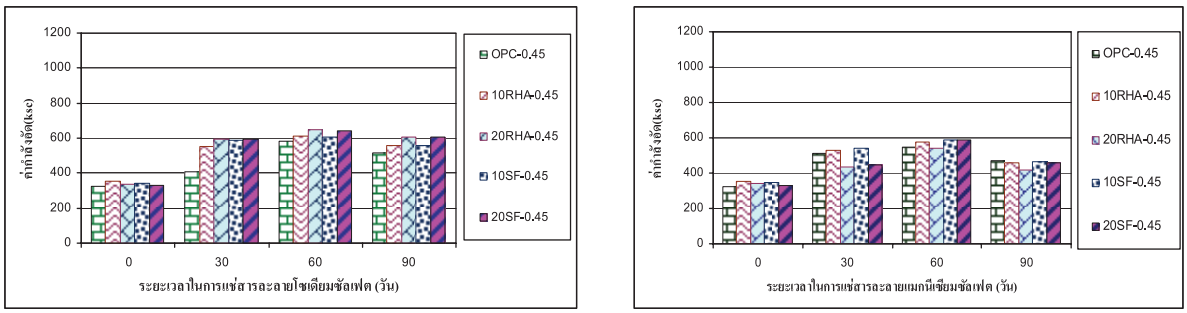
ในส่วนของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/B) เมื่อทำการเปรียบเทียบที่เท่ากับ 0.25, 0.35 และ 0.45 นั้น พบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/B) เท่ากับ 0.25 คอนกรีตมีค่าร้อยละการสูญเสียกำลังรับแรงอัดน้อยที่สุด รองลงมาคือที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/B) เท่ากับ 0.35 และที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/B) เท่ากับ 0.45 พบว่าคอนกรีตจะมีค่าร้อยละการสูญเสียกำลังรับแรงอัดมากที่สุดทั้งที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นทำให้ความพรุนของโครงสร้างเพิ่มมากขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ปริมาณและขนาดของโพรงคาพิวลารีมีมากขึ้นซึ่งมีผลต่อโอกาสที่อิออนของซัลเฟต (SO_4^{2-}) จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่แตกตัวอยู่ภายในเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าลดลง



รูปที่ 10 กำลังอัดของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/B) เท่ากับ 0.25 แช่ในสารละลายซัลเฟต



รูปที่ 11 กำลังอัดของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/B) เท่ากับ 0.35 แช่ในสารละลายซัลเฟต



รูปที่ 12 กำลังอัดของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/B) เท่ากับ 0.45 แช่ในสารละลายซัลเฟต

4.2.2 ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตเนื่องจากซัลเฟต

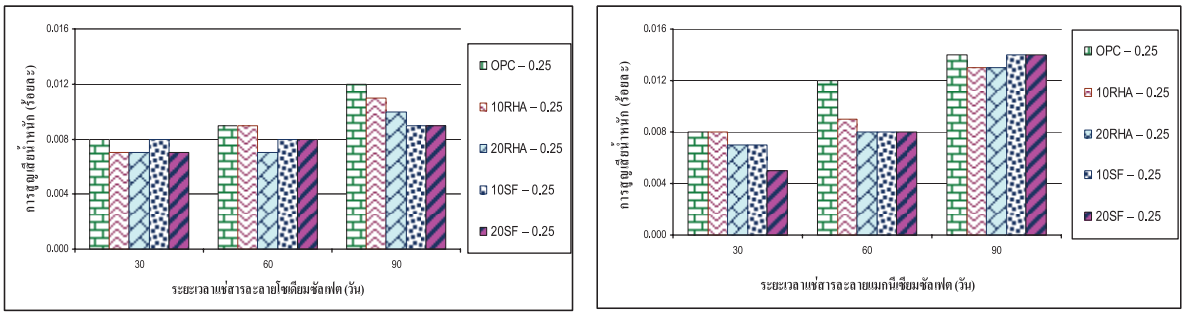
รูปที่ 13, 14 และ 15 เป็นการเปรียบเทียบร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/B) เท่ากับ 0.25, 0.35 และ 0.45 ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักที่อายุ 30, 60 และ 90 วัน

คอนกรีตที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 30 และ 60 วันมีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักน้อยมากซึ่งค่าน้ำหนักที่หายไปอาจเนื่องมาจากการหลุดร่อนของผิวทางกายภาพของคอนกรีต แต่เมื่อแช่คอนกรีตที่ 90 วัน พบว่าคอนกรีตมีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงอัดที่มีค่าลดลงเมื่อแช่คอนกรีตที่ 90 วัน โดยคอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 มีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุด รองลงมาคือ คอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบดำบดละเอียดร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก และสุดท้ายคือ คอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุด

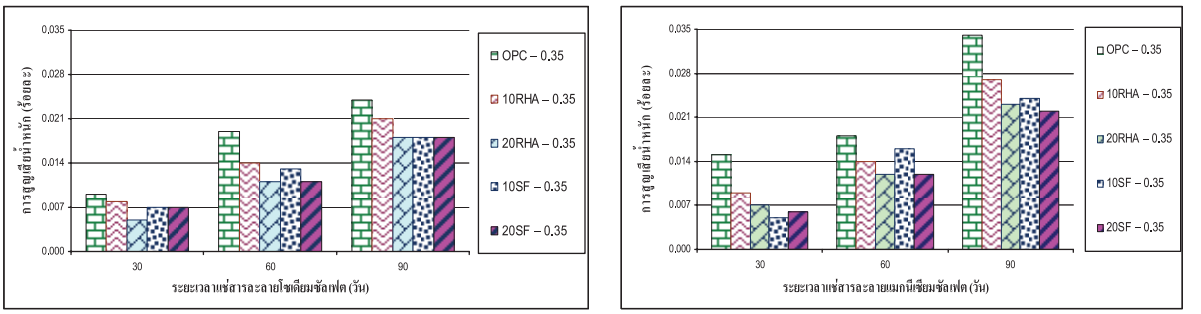
เมื่อพิจารณาร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบดำบดละเอียดและซิลิกาฟูมพบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบดำบดละเอียดและซิลิกาฟูมในปริมาณที่เพิ่มขึ้นช่วยให้คอนกรีตที่แช่ในสารละลายซัลเฟตมีการสูญเสียน้ำหนักน้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าแกลบดำบดละเอียดและซิลิกาฟูมมีคุณสมบัติของความเป็นวัสดุปอซโซลาน [17] โดยซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่มีอยู่ในเถ้าแกลบดำบดละเอียดและซิลิกาฟูมจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ซึ่งได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้วเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) จากปฏิกิริยานี้ทำให้เป็นการลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ก่อให้เกิดการสูญเสียน้ำหนัก

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบจากรูปที่ 13, 14 และ 15 พบว่าคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 90 วัน ในทุกปฏิภาคส่วนผสมมีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าคอนกรีตที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ทั้งนี้เนื่องจากกลไกหลักในการกัดกร่อนของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) คือ การเปลี่ยนแปลงจากสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ไปเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งไม่มีความสามารถในการเชื่อมประสาน

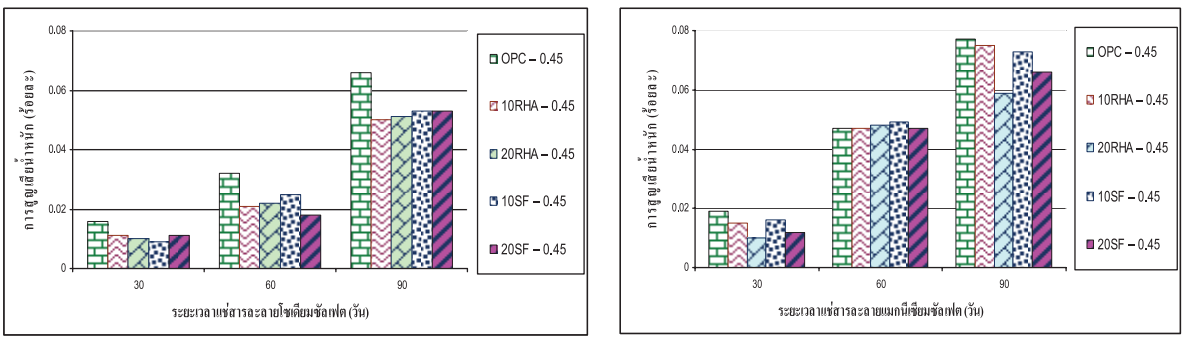
คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/B) เท่ากับ 0.25 มีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุด รองลงมาคือคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.35 และคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.45 มีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุดทั้งที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต เนื่องจากคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงต่ำมีคุณสมบัติความทึบน้ำสูง ส่งผลให้อิออนของซัลเฟตซึมผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ยากขึ้น ทำให้เป็นการลดการถูกกัดกร่อนจากซัลเฟตลดลง



รูปที่ 13 การสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีต (ร้อยละ) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/B) เท่ากับ 0.25 แช่ในสารละลายซัลเฟต



รูปที่ 14 การสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีต (ร้อยละ) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/B) เท่ากับ 0.35 แช่ในสารละลายซัลเฟต



รูปที่ 15 การสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีต (ร้อยละ) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/B) เท่ากับ 0.45 แช่ในสารละลายซัลเฟต

4.2.3 ผลการทดสอบการขยายตัวของคอนกรีตเนื่องจากซัลเฟต

รูปที่ 16, 17 และ18 เป็นการเปรียบเทียบร้อยละการขยายตัวของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/B) เท่ากับ 0.25, 0.35 และ 0.45 ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่อายุ 30, 60 และ 90 วัน

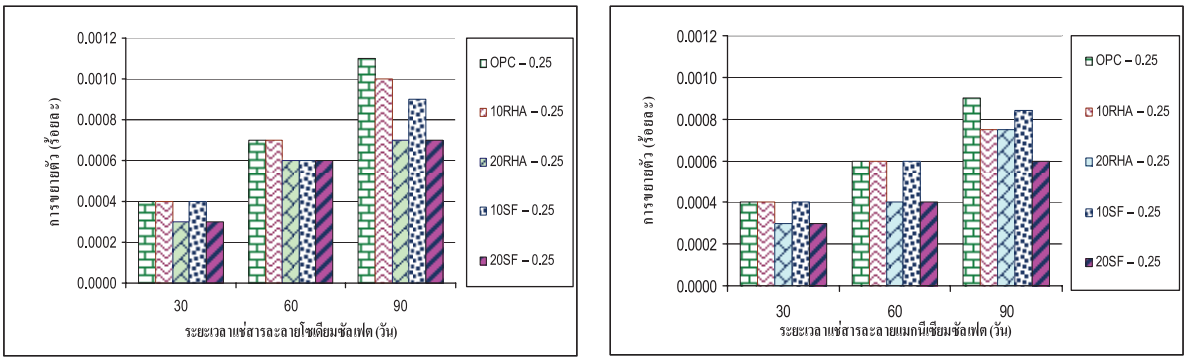
คอนกรีตที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อายุ 30, 60 และ 90 วัน มีการขยายตัวเพิ่มขึ้นในทุกปฏิภาคส่วนผสมโดยคอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าร้อยละการขยายตัวมากที่สุด รองลงมาคือ คอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบดำบดละเอียดและซิลิกาฟูมร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และสุดท้าย คอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบดำบดละเอียดและซิลิกาฟูมร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะมีค่าร้อยละการขยายตัวน้อยที่สุด

สำหรับคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 30, 60 และ 90 วัน พบว่าการขยายตัวของคอนกรีตในทุกปฏิภาคส่วนผสมมีค่าเพิ่มขึ้นโดยคอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าร้อยละการขยายตัวมากที่สุด รองลงมาคือ คอนกรีตที่มีการแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบดำบดละเอียดร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก และสุดท้าย คอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าร้อยละการขยายตัวน้อยที่สุด

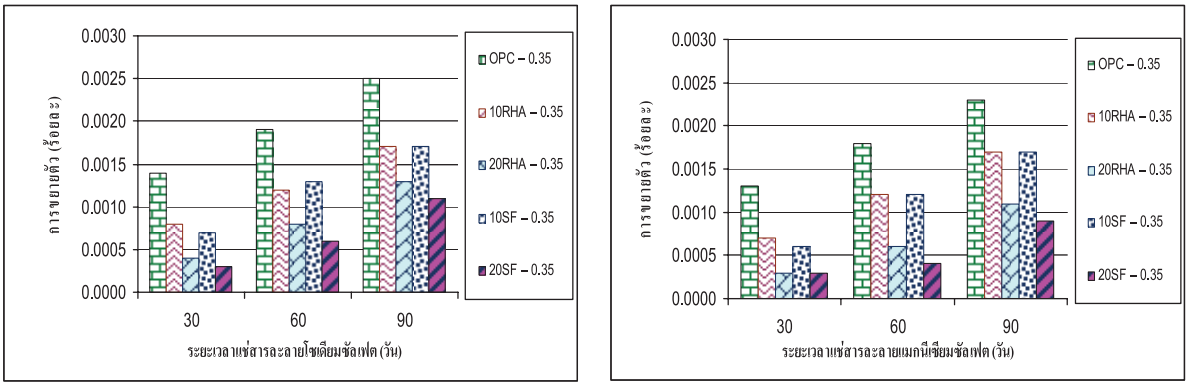
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบจากรูปที่ 16, 17 และ 18 พบว่าคอนกรีตที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตในทุกปฏิภาคส่วนผสมจะมีค่าร้อยละการขยายตัวมากกว่าคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ทั้งนี้เป็นผลมาจากปฏิกิริยาเคมีหลักของโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) เป็นการขยายตัวที่เกิดจากยิปซั่มและเอททริงไกต์ (Ettringite) ในสภาวะแข็งตัวของคอนกรีต ส่วนปฏิกิริยาเคมีหลักของแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) เป็นการเปลี่ยนแปลงจากสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ไปเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ไม่มีความสามารถในการเชื่อมประสาน [18]

การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบดำบดละเอียดและซิลิกาฟูมในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าร้อยละการขยายตัวของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายซัลเฟตมีค่าลดลง ทั้งนี้เพราะการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบดำบดละเอียดหรือซิลิกาฟูม เป็นการลดปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ส่งผลให้ปริมาณของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) และสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ลดลง [19] นอกจากนี้เถ้าแกลบดำบดละเอียดหรือซิลิกาฟูม ยังมีคุณสมบัติความเป็นวัสดุปอซโซลาน ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และน้ำแล้วจะได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำเพิ่มมากขึ้นช่วยลดการซึมผ่านของอิออนซัลเฟตลง ขณะที่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัว โดยผลของปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) กับอิออนของซัลเฟต จะทำให้ได้ยิปซั่ม และยิปซั่มที่ได้นี้จะไปทำปฏิกิริยากับโมโนซัลเฟตหรือไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) ได้เอททริงไกต์ และเมื่อปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับอิออนของซัลเฟต ลดลง ทำให้การก่อตัวของยิปซั่มและเอททริงไกต์ ลดลง ส่งผลให้การขยายตัวของคอนกรีตมีค่าลดลง

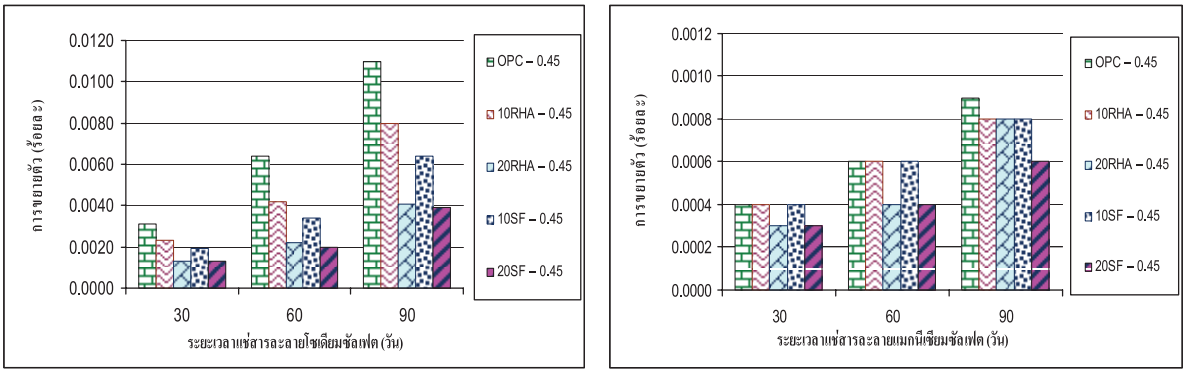
คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/B) เท่ากับ 0.25 คอนกรีตมีค่าร้อยละการขยายตัวน้อยที่สุด รองลงมาคือคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/B) เท่ากับ 0.35 และคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/B) เท่ากับ 0.45 พบว่ามีค่าร้อยละการขยายตัวมากที่สุดทั้งที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นทำให้โพรงน้ำอิสระที่เหลือจากปฏิกิริยามีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณโพรงและช่องว่างเพิ่มขึ้น ทำให้การซึมผ่านของอิออนของซัลเฟตเข้าสู่ภายในโครงสร้างคอนกรีตง่ายขึ้นเป็นการเพิ่มสภาวะการถูกกัดกร่อนจากซัลเฟต [20]



รูปที่ 16 การขยายตัวของคอนกรีต (ร้อยละ) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/B) เท่ากับ 0.25 แช่ในสารละลายซัลเฟต



รูปที่ 17 การขยายตัวของคอนกรีต (ร้อยละ) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/B) เท่ากับ 0.35 แช่ในสารละลายซัลเฟต



รูปที่ 18 การขยายตัวของคอนกรีต (ร้อยละ) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/B) เท่ากับ 0.45 แช่ในสารละลายซัลเฟต

5. บทสรุป

จากการทดสอบคุณสมบัติวัสดุปอซโซลานประเภทเถ้าแกลบดำบดละเอียด (Fineness Black Rice Husk Ash) และ ซิลิกาฟูม (Silica Fume) ที่นำมาใช้ในการวิจัย สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1 เถ้าแกลบดำบดละเอียด

เถ้าแกลบดำจากโรงไฟฟ้าบดเป็นเวลา 4 ชั่วโมง มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C 618 มีองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และ ไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3) เป็นส่วนใหญ่ โดยมีปริมาณซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก ร้อยละ 90.63 ในส่วนของคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญคือ อนุภาคมีขนาดใหญ่และหยาบ โดยปริมาณส่วนใหญ่อยู่ที่ขนาด 27.17 ไมโครเมตร และค่าความต้องการปริมาณน้ำมีค่าร้อยละ 103

5.2 ซิลิกาฟูม

ซิลิกาฟูมมีซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นส่วนใหญ่ถึงร้อยละ 86.43 คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ คือ อนุภาคมีขนาดใหญ่และหยาบ โดยปริมาณส่วนใหญ่จะอยู่ที่ขนาด 175.32 ไมโครเมตร และค่าความต้องการปริมาณน้ำมีค่าร้อยละ 120

5.3 ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

การใช้เถ้าแกลบดำบดละเอียดหรือซิลิกาฟูมแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้การสูญเสียกำลังอัด การขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักมีค่าลดลง

5.4 ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

การใช้เถ้าแกลบดำบดละเอียดหรือซิลิกาฟูมแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้การขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักมีค่าลดลง แต่การสูญเสียกำลังอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้น

5.5 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง

เป็นตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญต่อความเสียหายอันเนื่องมาจากการกระทำของซัลเฟตโดยเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/B) มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นผลทำให้คุณสมบัติความทึบน้ำลดต่ำลง ทำให้คอนกรีตมีการสูญเสียกำลังอัด การขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้น ทั้งที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$)

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บริษัททีพีไอ โพลีน จำกัด (มหาชน) ที่ได้อนุเคราะห์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โรงไฟฟ้าปทุมไรซมิล แอนด์ แกรนารี ที่ได้อนุเคราะห์เถ้าแกลบดำ บริษัทดับบริว อาร์เกรซ ประเทศไทย จำกัด ที่ได้อนุเคราะห์สารเคมีผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำพิเศษและสารปอซโซลานประเภท ซิลิกาฟูม บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ที่ได้อนุเคราะห์ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ เถ้าแกลบดำบดละเอียด และซิลิกาฟูม ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ได้อนุเคราะห์ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและการกระจายขนาดคละของอนุภาคของปูนซีเมนต์ เถ้าแกลบดำบดละเอียดและซิลิกาฟูม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ได้อนุเคราะห์ทดสอบความเป็นผลึกโดยใช้เทคนิค XRD ของปูนซีเมนต์ เถ้าแกลบดำบดละเอียด และซิลิกาฟูม และสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชียที่ได้อนุเคราะห์การบดเถ้าแกลบดำและแบบหล่อตัวอย่างคอนกรีต

7. เอกสารอ้างอิง

1. ปริญญา จินดาประเสริฐ, สุรเชษฐ์ มั่งมีศรี, สมศักดิ์ พื้นชมพู และ อาภา สธนเสาวภาคย์, 2546, “การศึกษาความต้านทานสารซัลเฟตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน” *การประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติ ครั้งที่ 1*, หน้า 109-116.

2. อนุวรรตน์ โค้ววารินทร์, 2542, *การพัฒนาความร้อนต่ำโดยใช้เถ้าแกลบ*, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยรังสิต, หน้า 25-31.

3. American Society for Testing Materials, 2003, "ASTM C 618 : Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete", *Annual Book of ASTM Standard* Vol. 402 Philadelphia, PA, USA.

4. Zhang, M. and Malhotra, V., "High-Performance Concrete Incorporating Rice Husk Ash as a Supplementary Cementing Material", *ACI Material Journal*, Vol. 93, No. 6, pp. 629-636.

5. อนัญญ์ รอดอนันต์, 2547, *ความทนทานของมอร์ต้าร์ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบดำจากการกระทำของโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต*, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, หน้า 9-44.

6. อาภา สธนเสาวภาคย์, 2544, *การศึกษาความต้านทานการกัดกร่อนของสารซัลเฟตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยหรือเถ้าแกลบ*, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

7. American Society for Testing Materials, 2003, "ASTM C 1012 : Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution", *Annual Book of ASTM Standard Vol 4.02 Philadelphia*, PA, USA.

8. American Society for Testing Materials, 2003, "ASTM C 136 : Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates", *Annual Book of ASTM Standard,* Vol. 402 Philadelphia, PA, USA.

9. American Society for Testing Materials, 2003, "ASTM C 128 : Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate", *Annual Book of ASTM Standard,* Vol. 402 Philadelphia, PA, USA.

10. American Society for Testing Materials, 2003, "ASTM C 29 : Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate", *Annual Book of ASTM Standard,* Vol. 402 Philadelphia, PA, USA.

11. American Society for Testing Materials, 2003, "ASTM C 127 : Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate", *Annual Book of ASTM Standard,* Vol. 402, Philadelphia, PA, USA.

12. วัชรากร วงศ์คำจันทร์, 2544, *พฤติกรรมทางกลของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียด*, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, หน้า 65-66.

13. บุรฉัตร ฉัตรวีระ, ณรงค์ศักดิ์ มากุล และ อนัญญ์ รอดอนันต์, 2549, "ความทนทานของมอร์ต้าร์ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบดำภายใต้การกระทำของโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต" *วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ.*, ปีที่ 29, ฉบับที่ 1, หน้า 55-71.

14. Bendsted, J. and Barnes, P., 2002, *Structure and Performance of Cement*, London, England.

15. 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.

16. 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.

17. Rodrirnhoguez - Camacho, R.E. and Uribe - Afif., R., 2002, "Importance of Using the Natural Pozzolans on Concrete Durability", *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 12, pp. 1851-1858.

18. Santhanam, M., Cohen, M.D., and Olek, J., 2003, "Mechanism of Sulfate Attack: A Fresh Look; Part II - Proposed Mechanisms", *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No. 3, pp. 341-346.

19. Djuric, M., 1996 "Sulfate Corrosion of Portland Cement-Pure and Blended with 30% of Fly Ash", *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, No. 9, pp. 1295-1300.

20. Khatri, R.P. and Sirivivatnanon, V., 1997, "Role of Permeability in Sulphate Attack", *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No. 8, pp. 1179-1189.