

การต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด Sulfate Resistance of Concrete with Ground Granulated Blast-Furnace Slag

ร่ำพิง ชัยหลี่เจริญ¹ ปิติศานต์ กร้ามาต^{2*} จตุพล ตั้งปกาศิต³ และนฤชาติ ชูเมือง³
rumpueng.c@en.rmutt.ac.th¹, pitisan.k@en.rmutt.ac.th²,
jatuphon_t@rmutt.ac.th³, x_kingdom@hotmail.com³

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด โดยวัดการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต คอนกรีตใช้ปริมาณวัสดุประสานเท่ากับ 320 กก./ม.³ และ 400 กก./ม.³ และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานใช้เท่ากับ 0.50 ผลการศึกษาพบว่า ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตนั้น การขยายตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ล้วน โดยการขยายตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่ใช้ปริมาณวัสดุประสานน้อยกว่า มีค่าน้อยกว่าของเมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสานมากกว่า ส่วนในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนั้น การขยายตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด มีค่ามากกว่าของคอนกรีต OPC ล้วน ยกเว้นคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณน้อย จะให้ค่าการขยายตัวน้อยกว่าของ OPC ล้วน โดยการขยายตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่ใช้ปริมาณวัสดุประสานน้อยกว่า มีค่ามากกว่าของเมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสานมากกว่า นอกจากนี้พบว่า การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด มีค่ามากกว่าของคอนกรีต OPC ล้วน โดยเมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสานที่น้อยกว่าส่งผลให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดน้อยกว่าของเมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสานที่มากกว่า

คำสำคัญ: คอนกรีต, ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด, การต้านทานซัลเฟต, การขยายตัว, การสูญเสียน้ำหนัก

^{1,3}อาจารย์

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์

³นักศึกษานิพนธ์โท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

*Corresponding Author, E-mail: pitisan.k@en.rmutt.ac.th

Abstract

This paper aimed to study the sulfate resistance of concrete with ground granulated blast-furnace slag (GGBS). The expansion and weight loss of concrete samples in sodium sulfate (NS) solution and magnesium sulfate (MS) solution were evaluated for the sulfate resistance. The binder content of concrete with GGBS of 320 and 400 kg/m³ was used. The water to binder ratio was kept at 0.50 for concrete. The results shown that the expansion in NS solution of concretes with GGBS had lesser than that of OPC concrete. The expansion in NS solution of GGBS concrete with low binder content had lesser than that with high binder content. In case of MS solution, the expansion of concrete with GGBS was higher than that of OPC concrete, except concrete with small amount of GGBS had smaller expansion than OPC concrete. Likewise, the weight loss in MS solution of concrete with GGBS was larger than that of OPC concrete. Finally, the weight loss in NS solution of GGBS concrete with low binder content had less than that with high binder content.

Keywords: concrete, ground granulated blast-furnace slag, sulfate resistance, expansion, weight loss.

1. บทนำ

เนื่องจากปัญหาสถานะโลกร้อนและ กระแสการอนุรักษ์พลังงาน รวมถึงสถานะ การแข่งขันทางด้านเศรษฐกิจปัจจุบันทำให้ มีการนำวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์มาใช้ใน อุตสาหกรรมคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น เป็นที่ทราบ กันดีว่าในการผลิตปูนซีเมนต์ในปัจจุบันก่อให้เกิด ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมาก [1] หากพิจารณาประโยชน์จากการใช้วัสดุทดแทน ปูนซีเมนต์โดยเฉพาะกรณีวัสดุเหลือใช้จาก อุตสาหกรรมต่าง ๆ ย่อมส่งผลโดยตรงต่อการ ลดลงของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิด ขึ้นจากอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ ยังสามารถลดต้นทุนในการผลิตและพัฒนา คุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น

รวมทั้งสามารถแก้ปัญหาการจัดของเสียและ ช่วยประหยัดพลังงานโดยรวมของประเทศ เช่น พลังงานที่ใช้ในการเผาวัตถุดิบเพื่อผลิต ปูนซีเมนต์ พลังงานที่ใช้ลำเลียงผลพลอยได้ ไปทิ้งในบ่อกลบฝัง พลังงานที่ใช้ในการระเบิด ภูเขาหินปูน และพลังงานที่ใช้ในการย่อยหินเพื่อ ผลิตปูนซีเมนต์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถยืด ระยะเวลาในการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดได้ ยาวนานยิ่งขึ้นอีกด้วย

ปัจจุบันสิ่งก่อสร้างต่าง ๆ ที่ใช้คอนกรีต เป็นวัสดุบางส่วนสัมผัสกับสารละลายซัลเฟต (SO_4^{2-}) ทำให้คอนกรีตถูกกัดกร่อน ส่งผลกระทบ ต่อโครงสร้างบางส่วนเสียหาย ดังนั้นการก่อสร้าง อาคารคอนกรีตจำเป็นต้องพิจารณาความคงทน ของคอนกรีตที่สัมผัสกับสารละลายซัลเฟต

ซึ่งเป็นปัจจัยหลักประการหนึ่งที่ต้องนำมาพิจารณาในการก่อสร้างอาคาร เช่น น้ำใต้ดิน น้ำทะเล บริเวณชายฝั่งทะเล และน้ำเสียจากโรงงาน เป็นต้น สารละลายซัลเฟตสามารถกัดกร่อนทำความเสียหายให้กับคอนกรีตโดยตรง ส่งผลกระทบให้สิ่งก่อสร้างนั้นเสียหายตามไปด้วยนำไปสู่การพังของโครงสร้างทำให้สิ้นเปลืองงบประมาณในการซ่อมแซม

ในปัจจุบันการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด นอกจากจะใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์แล้ว ยังใช้เป็นวัสดุประสานในส่วนผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดสามารถใช้ในรูปของปูนซีเมนต์ผสมหรือใช้เป็นส่วนผสมแยกต่างหากในการผสมคอนกรีต ซึ่งการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแยกผสมต่างหากในการผสมคอนกรีตมีเหตุผลสองประการ คือสามารถบดตะกรันเตาถลุงเหล็กได้ละเอียดจนถึงค่าที่ต้องการ และสามารถปรับส่วนผสมคอนกรีตที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดให้เหมาะสมกับงานแต่ละงานได้ง่าย [2] สำหรับในประเทศไทยยังมีข้อมูลการศึกษาวิจัยการนำเอาตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมาใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตนั้นพบว่าน้อยมาก หรืออาจกล่าวได้ว่าแทบไม่มีก็ได้ ส่วนผงหินปูนเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์อีกชนิดหนึ่งที่สามารถหาได้ในประเทศไทย เมื่อแทนที่ด้วยผงหินปูนบางส่วนในปูนซีเมนต์สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดในระยะต้นและความคงทนบางชนิดให้แก่คอนกรีตได้ [3] จากข้อดีของผงหินปูนดังกล่าวทำให้มีแนวโน้มที่จะถูกนำมาใช้ในปริมาณมากขึ้น

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้นจึงได้ทำการศึกษาการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด โดยวัดการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีต

ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกส่วนผสมที่เหมาะสมของการนำเอาตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด มาใช้ในงานคอนกรีต โดยเฉพาะเมื่อโครงสร้างคอนกรีตสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมซัลเฟต

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน มวลรวมใช้หินและทรายน้ำจืด สำหรับองค์ประกอบทางเคมี (โดยวิธี X-Ray Diffractometer: XRD) ความถ่วงจำเพาะ (ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C188) และความละเอียดโดยวิธีเบลน (ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C204) ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมี ความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดโดยวิธีเบลนของวัสดุประสานที่ใช้

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด	ผงหินปูน
SiO ₂	18.93	34.06	0.45
Al ₂ O ₃	5.51	16.27	0.05
Fe ₂ O ₃	3.31	1.70	0.03
CaO	65.53	36.05	55.20
MgO	1.24	7.38	0.34
Na ₂ O	0.15	2.16	< 0.01
K ₂ O	0.31	0.21	< 0.01
SO ₃	2.88	1.09	0.01
LOI	-	1.44	43.12
Free lime	1.00	-	-
ความถ่วงจำเพาะ	3.12	2.96	2.69
ความละเอียดโดยวิธีเบลน; ซม. ² /ก.	3,190	4,600	5,210

2.2 สัดส่วนผสม

สำหรับการศึกษาการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในครั้งนี้ ประกอบด้วยสัดส่วนของวัสดุประสานดังนี้

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน
- ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 50 60 และ 70 โดยน้ำหนัก
- ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 30 50 และ 60 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนัก
- ปริมาณวัสดุประสานใช้เท่ากับ 320 และ 400 กิโลกรัมต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร
- อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 โดยน้ำหนัก

หมายเหตุ ในการแทนที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ในปริมาณที่ค่อนข้างสูง (ร้อยละ 50 หรือ 60) ทั้งนี้เนื่องจากตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเป็นทั้งสารซีเมนต์และวัสดุปอซโซลาน ทำให้สามารถแทนที่ในปริมาณที่มากได้ ส่วนผงหินปูนนั้นเป็นวัสดุเติมเต็ม ดังนั้นเมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นวัสดุประสาน จึงใช้แทนที่ในปริมาณที่น้อย (ร้อยละ 10)

สัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา OPC หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน, ส่วน GS20 หมายถึงคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 20 และ GS30LS10 หมายถึงคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

2.3 สารละลายซัลเฟต

การศึกษาในครั้งนี้ใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ในการเตรียมสารละลายซัลเฟต โดยใช้โซเดียมซัลเฟต 50 กรัม (SO_4^{2-} เท่ากับ 33,800 ppm) ในสารละลาย 1 ลิตร และใช้แมกนีเซียมซัลเฟต 42.36 กรัม ในสารละลาย 1 ลิตร เพื่อให้ปริมาณ SO_4^{2-} เท่ากัน โดยเตรียมสารละลายซัลเฟตล่วงหน้า 1 วัน ที่อุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส ก่อนที่ใช้แช่ตัวอย่าง อัตราส่วนของปริมาตรสารละลายซัลเฟตต่อปริมาตรตัวอย่างที่แช่ประมาณ 4 : 1 โดยมีการเปลี่ยนสารละลายซัลเฟตทุก ๆ 2 เดือน

2.4 การวัดการขยายตัว

วิธีการวัดการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีต (ขนาด 3.75x3.75x28.5 ซม.) ที่แช่ในสารละลายซัลเฟต (กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 1012) โดยหลังจากแช่ตัวอย่างในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว 28 วัน ทำการวัดความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างด้วยเครื่องวัดความยาว (Length comparator) (ตามมาตรฐาน ASTM C 490) ต่อจากนั้นนำตัวอย่างแช่ในสารละลายซัลเฟตที่เตรียมไว้ แล้วทำการวัดความยาวของตัวอย่างที่อายุ 2 3 4 8 13 และ 16 สัปดาห์ จากนั้นทำการวัดทุก ๆ อายุ 2 เดือนของการแช่ในสารละลายซัลเฟต ค่าการขยายตัวของเป็นการเฉลี่ยการขยายตัวของ 3 ตัวอย่าง ค่าการขยายตัวของคอนกรีตคำนวณจากสมการ (1)

$$\text{การขยายตัว (\%)} = [(L_t - L_i)/L_i] \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ L_i คือค่าความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างหลังจากแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว 28 วัน และ L_t คือค่าความยาวของตัวอย่างหลังจากแช่ในสารละลายซัลเฟตที่อายุต่าง ๆ

2.5 การวัดการสูญเสียน้ำหนัก

ในส่วนการวัดการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างลูกบาศก์คอนกรีต (ขนาด 10×10×10 ซม.) ในสารละลายซัลเฟตนั้น โดยหลังจากถอดแบบที่อายุตัวอย่างคอนกรีต 1 วัน แล้วนำไปบ่มในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว เป็นเวลา 28 วัน หลังจากเสร็จสิ้นการบ่มในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาวแล้ว นำชิ้นตัวอย่างลูกบาศก์คอนกรีตของแต่ละสัดส่วนผสมซึ่งน้ำหนักโดยเป็นน้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่างลูกบาศก์คอนกรีต หลังจากซึ่งน้ำหนักเสร็จแล้วนำตัวอย่างคอนกรีตแช่ในสารละลายซัลเฟต เมื่อครบอายุที่ต้องการวัดการสูญเสียน้ำหนัก โดยนำตัวอย่างคอนกรีตมาขัดผิวด้วยแปรงเพื่อให้เศษคอนกรีตที่เสื่อมสภาพเนื่องจากการทำลายโดยสารละลายซัลเฟตหลุดออก จากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตไปชั่งน้ำหนัก เพื่อนำค่าไปหาการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟต โดยสามารถหาค่าการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีต (เป็นการเฉลี่ยจาก 3 ตัวอย่าง) ได้จากสมการ (2)

$$\text{การสูญเสียน้ำหนัก (\%)} = [(W_i - W_x) / W_i] \times 100 \quad (2)$$

โดยที่ W_i คือค่าน้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่าง หลังจากการแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว และ W_x คือค่าน้ำหนักของตัวอย่างหลังจากแช่ในสารละลายซัลเฟต ที่อายุต่าง ๆ

3. ผลการศึกษาและวิเคราะห์

สำหรับผลการศึกษาในครั้งนี้จะพิจารณาในการประเมินความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีต ใน 2 ลักษณะคือ 1) การขยายตัวของคอนกรีต โดยจะพิจารณาทั้งในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และ

2) การสูญเสียน้ำหนัก โดยจะพิจารณาเฉพาะในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเท่านั้น ทั้งนี้ เพราะจากกลไกการทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อคอนกรีตนั้นเป็นการเปลี่ยนแปลงเคมีซิลิเกตไฮเดรต ให้เป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน โดยทำให้มีการหลุดร่อนและสูญเสียผิวหรือส่วนของเพสต์ [4]

3.1 การขยายตัวของคอนกรีต

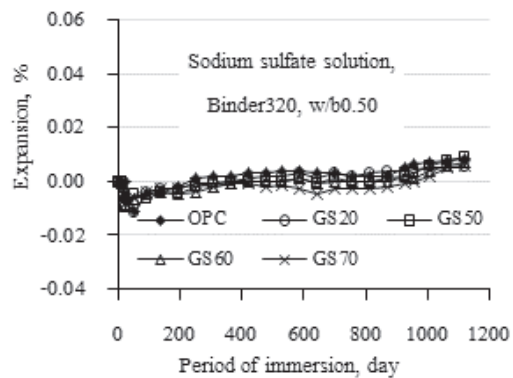
โดยผลทดสอบการขยายตัวของคอนกรีตในสารละลายซัลเฟตนั้น ได้พิจารณาจากผลกระทบของการแทนที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผลกระทบจากปริมาณของวัสดุประสานต่อการขยายตัวของคอนกรีต

3.1.1 ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

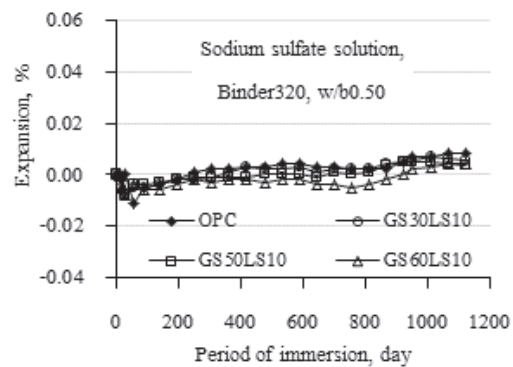
รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด เมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสาน 320 กก./ม.³ และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ซึ่งเป็นการพิจารณาถึงผลกระทบของการแทนที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดต่อการขยายตัวของคอนกรีต พบว่าการขยายตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่าไม่แตกต่างจากของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากการขยายตัวของตัวอย่างค่อนข้างน้อยมากแม้ว่าอายุในการแช่ในสารละลายซัลเฟตมีมากแล้วก็ตาม (160 สัปดาห์) นั้นแสดงว่าการใช้ปริมาณวัสดุประสานที่น้อย ไม่ว่าจะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน หรือใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด หรือผงหินปูนร่วมด้วย ก็ไม่ทำให้การขยายตัวของคอนกรีตในสารละลายโซเดียมซัลเฟตแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามก็มี

แนวโน้มว่าการขยายตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และ/หรือตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดหรือผงหินปูนเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง และผลของปฏิกิริยาปอซโซลาน (ของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด) ทำให้ลดปริมาณ Ca(OH)_2 ได้ ส่งผลให้ยับยั้งและ Ettringite เกิดได้น้อย โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณที่มากขึ้น ส่วนผงหินปูนนั้นเป็นการเติมเต็มทำให้คอนกรีตมีความทึบสูงขึ้น

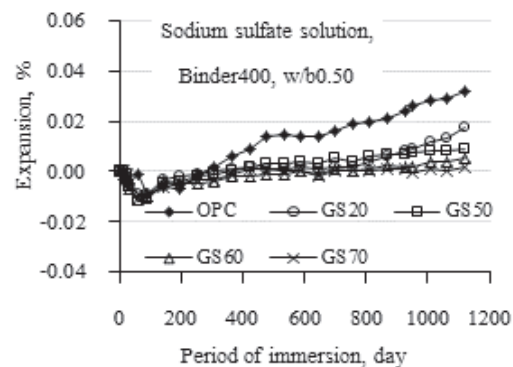
ส่วนรูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน เมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสาน 400 กก./ม.³ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 พบว่าการขยายตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูนทุกสัดส่วนผสม ไม่ว่าจะแทนที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดอย่างเดียว หรือแทนที่ร่วมกับผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง อีกทั้งผลของปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้น ทำให้ลดปริมาณ Ca(OH)_2 ได้ อีกทั้งยังมีการแทนที่ร่วมกับผงหินปูนซึ่งมีอนุภาคที่เล็ก ช่วยในการอุดช่องว่าง ทำให้ไอออนซัลเฟตเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ยากขึ้นจากเหตุผลดังกล่าว ส่งผลให้เกิดการขยายตัวที่น้อยกว่า



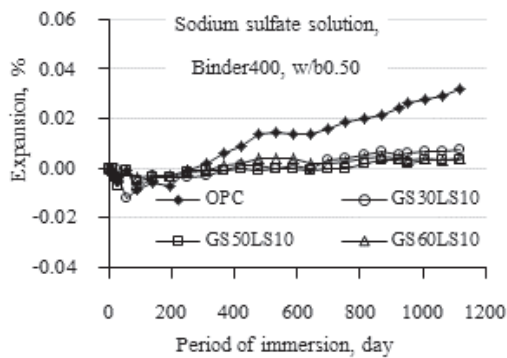
ก) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด



ข) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน
รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตเมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสาน 320 กก./ม.³



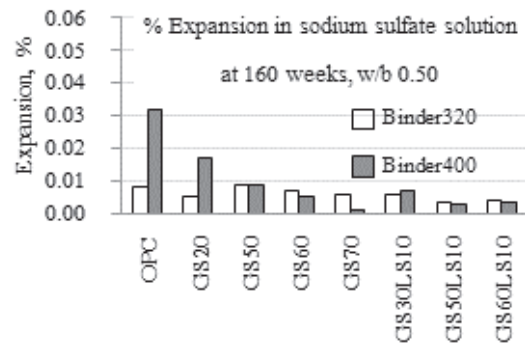
ก) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด



ข) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน

รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตเมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสาน 400 กก./ม.³

สำหรับผลกระทบจากปริมาณของวัสดุประสานต่อการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กแสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งเป็นการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีต ที่อายุ 160 สัปดาห์ (1,120 วัน) เป็นการเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสาน 320 กก./ม.³ และ 400 กก./ม.³ (อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50) พบว่าการขยายตัวของคอนกรีตที่ใช้ปริมาณวัสดุประสาบน้อยกว่า (320 กก./ม.³) มีแนวโน้มน้อยกว่าของคอนกรีตที่ใช้ปริมาณวัสดุประสานมากกว่า (400 กก./ม.³) ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ปริมาณวัสดุประสาบน้อยกว่า ทำให้เพสต์มีปริมาณที่น้อยกว่าในการทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมซัลเฟต รวมทั้งคอนกรีตที่มีปริมาณเพสต์น้อยยังมีแนวโน้มการเกิดความทึบน้ำได้ดีกว่า ทำให้สารละลายโซเดียมซัลเฟตเข้าไปทำปฏิกิริยาได้น้อยกว่า ส่งผลให้เกิดการขยายตัวน้อยกว่า

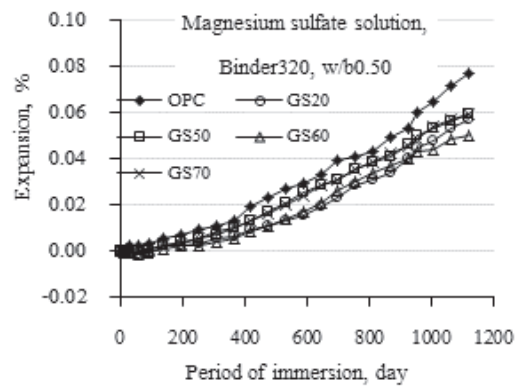


รูปที่ 3 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีต ที่อายุ 160 สัปดาห์

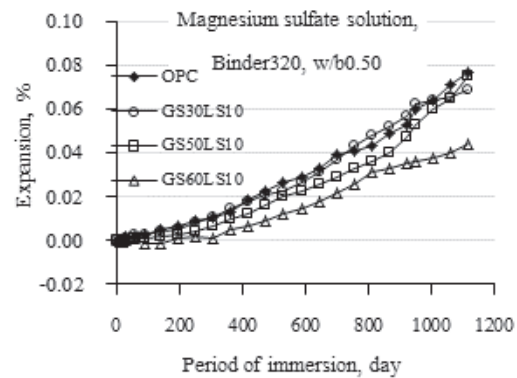
3.1.2 ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับระยะเวลาการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน เมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสาน 320 กก./ม.³ และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 พบว่าการขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (ทั้งร้อยละ 20, 50, 60 และ 70) (รูปที่ 4 ก) และคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 30 50 และ 60 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (รูปที่ 4 ข) มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เนื่องจาก เป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง และผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานจะช่วยลด Ca(OH)_2 จึงทำให้เกิดยิปซัมและ Ettringite น้อย ส่งผลให้การขยายตัวน้อยเช่นเดียวกับในกรณีของสารละลายโซเดียมซัลเฟต

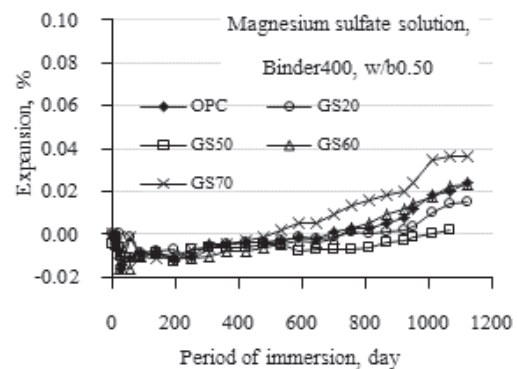
ส่วนรูปที่ 5 ก) เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับระยะเวลาการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสาน 400 กก./ม.³ พบว่า การขยายตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 20 และ 50 มีค่าน้อยกว่า ในขณะที่ของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 60 และ 70 มีแนวโน้มมากกว่า โดยเฉพาะเมื่อแทนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 70 เห็นได้ชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งอาจเป็นเพราะการใช้ปริมาณวัสดุประสานที่มาก (400 กก./ม.³) ทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดได้มาก ซึ่งลดความเป็นด่างลง ไม่มีเสถียรภาพในเฟสดี ทำให้ตัวอย่างคอนกรีตบวม ส่งผลให้การขยายตัวมาก ส่วนในกรณีการผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน (รูปที่ 5 ข) จะเห็นได้ชัดเจนว่าการขยายตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูนมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง และปฏิกิริยาปอซโซลาน ลดปริมาณ Ca(OH)_2 ส่งผลให้เสถียรภาพในคอนกรีตลดลง และผงหินปูนซึ่งมีอนุภาคที่เล็กซึ่งมีคุณสมบัติในการอุดช่องว่าง ทำให้คอนกรีตมีความทึบมากขึ้น ไม่พอสำหรับการเกิด Ettringite ส่งผลให้เกิดการขยายตัวมาก



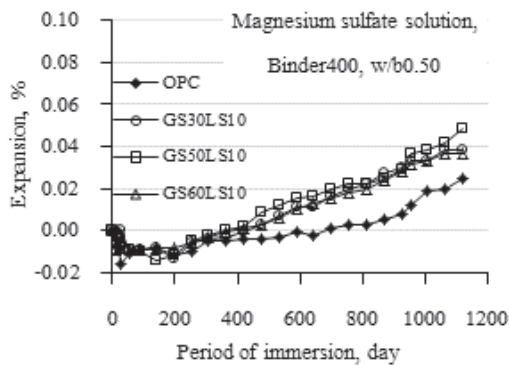
ก) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด



ข) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับระยะเวลาการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีต เมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสาน 320 กก./ม.³

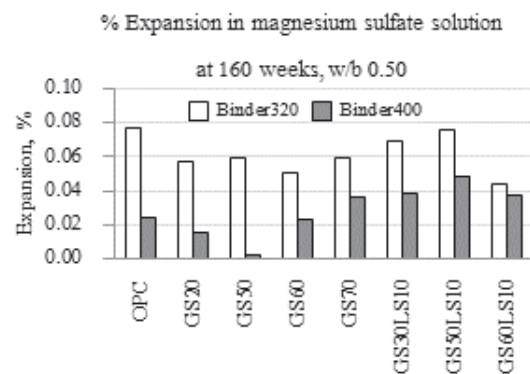


ก) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด



ข) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับระยะเวลา
การแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของ
คอนกรีต เมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสาน 400 กก./ม.³

รูปที่ 6 แสดงการขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีตที่อายุ 160 สัปดาห์ ในการพิจารณาถึงผลกระทบจากปริมาณของวัสดุประสานต่อการขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ระหว่างคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสาน 320 กก./ม.³ และ 400 กก./ม.³ พบว่าการขยายตัวของคอนกรีตที่ใช้ปริมาณวัสดุประสาณน้อยกว่า (320 กก./ม.³) มีค่ามากกว่าของคอนกรีตที่ใช้ปริมาณวัสดุประสานมากกว่า (400 กก./ม.³) อาจเนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ปริมาณวัสดุประสาณน้อย ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูงกว่า ทำให้สารละลายซัลเฟตทำที่ผิวของตัวอย่างคอนกรีต และเมื่อสารละลายซัลเฟตเข้าไป รวมทั้งมีช่องว่างจำกัดต่อการการเกิด Ettringite ส่งผลให้การขยายตัวมากขึ้น

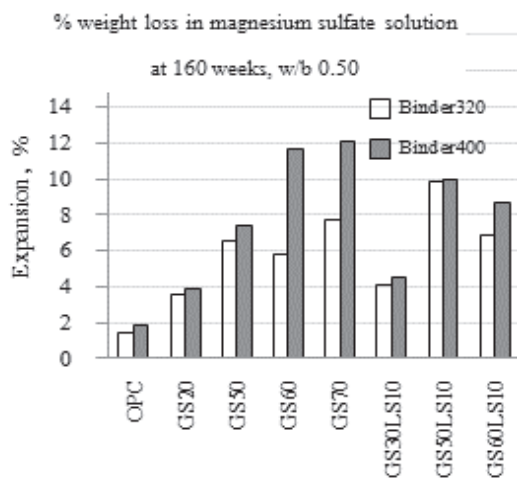


รูปที่ 6 การขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต
ของคอนกรีต ที่อายุ 160 สัปดาห์

3.2 การสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีต

รูปที่ 7 แสดงการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน เมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสาณ 320 และ 400 กก./ม.³ และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาณเท่ากับ 0.50 ที่อายุ 160 สัปดาห์ของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่าการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน โดยมีแนวโน้มค่าการสูญเสียน้ำหนักมากขึ้นตามปริมาณการที่แทนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการลดปูนซีเมนต์ลง และผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลง (ลด $\text{Ca}(\text{OH})_2$) ทำให้ความไม่เสถียรภาพเกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ จึงทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเปลี่ยนเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาณ [4] นอกจากนี้

พบว่าเมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสานที่น้อย (320 กก./ม.³) มีค่าการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตน้อยกว่าที่ใช้ปริมาณวัสดุประสานที่มากกว่า (400 กก./ม.³) ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ปริมาณเพสต์ปริมาณน้อยกว่า ทำให้ปฏิกิริยากับสารละลายซัลเฟตน้อยกว่า รวมทั้งความทึบของคอนกรีตที่มากกว่าสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจึงเข้าได้ยากกว่า ส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักที่น้อยกว่า



รูปที่ 7 การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีต ที่อายุ 160 สัปดาห์

4. สรุป

จากผลการศึกษาการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต การขยายตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยการขยายตัวของคอนกรีตที่ใช้ปริมาณวัสดุประสานน้อยกว่า มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตที่ใช้ปริมาณวัสดุประสานมากกว่า

2) ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต การขยายตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน มีค่ามากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ยกเว้นคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดอย่างเดียวในปริมาณน้อย จะให้ค่าการขยายตัวน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยการขยายตัวของคอนกรีตที่ใช้ปริมาณวัสดุประสานน้อยกว่า มีค่ามากกว่าของคอนกรีตที่ใช้ปริมาณวัสดุประสานมากกว่า

3) การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน มีค่ามากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสานที่น้อย ส่งผลให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตน้อยกว่าของคอนกรีตที่ใช้ปริมาณวัสดุประสานที่มากกว่า

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้สนับสนุนทุนการวิจัยประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 ในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Pitisan Krammart, Krisada Sisomphon, Somnuk Tangtermsirikul and Pichaya Rachdawong, "Properties of Cement Made by Partially Replacing Cement Raw Materials with Municipal Solid Waste Ashes and Calcium Carbide Waste," Proceedings of The ICCMC/IBST 2001 International Conference on Advanced Technologies in design, Construction and Maintenance of Concrete Structures, 28-29 March 2001, Hanoi, Vietnam, pp 494-500.

[2] ปริญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต. กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตไทย, 2547.

[3] ปิติศานต์ กร้ามาตร, สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล, การต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ฝุ่น หินปูน, การประชุมวิชาการคอนกรีต ประจำปี ครั้งที่ 3, ชลบุรี, 24-26 ตุลาคม, 2550.

[4] Al-Amoudi, O.S.B., "Mechanisms of Sulfate in Plain and Blended Cement. a Review," Proceeding of the International Seminar, University of Dundee, Scotland, UK., 1999. pp. 247.