

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา
ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย

การพัฒนาคอนกรีตที่ทนทานต่อการทำลายของน้ำทะเล
(Development of durable concrete for seawater attack)

โดย

ผศ.ดร. ทวีชัย ตำราญวานิช

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยบูรพา

BK 0146628

๗๕๐/๑๖๒๘

29 พ.ค. 2560

370956

13 สิงหาคม 2552

เริ่มบริการ

28 ส.ย. 2560

สนับสนุนโดยทุนสนับสนุนโครงการวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2550

สำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา ผ่านคณะกรรมการบริหารเครือข่ายการวิจัยภาคกลางตะวันออก

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มุ่งพัฒนาคอนกรีตที่ทนทานต่อการทำลายของน้ำทะเล โดยได้ศึกษาการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 0.55 และ 0.60 อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารปอซโซลานที่ 0.20 0.40 และ 0.60 สารปอซโซลานที่ใช้ ได้แก่ เถ้าลอย เถ้าแกลบและตะกรันเตาถลุงเหล็ก และได้ศึกษาการสูญเสียกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต นอกจากนี้ได้ศึกษาความต้านทานการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ด้วย

จากผลการทดลองความคงทนของการทำลายของซัลเฟตพบว่า มอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50-0.55 และอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย 0.20-0.40 มีการขยายตัวน้อยที่สุด มอร์ตาร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและเถ้าแกลบในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีการสูญเสียกำลังรับแรงอัดมาก ส่วนมอร์ตาร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กไม่มีการสูญเสียกำลังอัด และจากผลการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์พบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำและอัตราส่วนแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย 0.40 จะมีการแทรกซึมคลอไรด์เข้าไปน้อยที่สุด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ส่วนผสมคอนกรีตที่ทนทานต่อการทำลายทั้งซัลเฟตและคลอไรด์ควรใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ และใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานในอัตรา 0.40

Abstract

This research project aims to develop the durable concrete for seawater attack. The expansion of Portland cement type I mortar with water to binder ratio of 0.50, 0.55 and 0.60 and pozzolan to binder ratio of 0.20, 0.40 and 0.60 in sodium sulfate solution were studied. The pozzolans were fly ash, rice husk ash and blast furnace slag. The strength reduction of mortar in magnesium sulfate solution was also investigated. Furthermore, the chloride penetration resistance of cement pastes was also studied.

From the experimental results of durability of sulfate attack, it was found that mortar with water to binder ratio of 0.50-0.55 and fly ash to binder ratio of 0.20-0.40 has the lowest expansion. Mortars with fly ash and rice husk ash at all water to binder ratios have high strength reduction while mortar with blast furnace slag has no strength reduction. From the results of chloride penetration resistance, it was found that cement paste with lower water to binder ratio and fly ash to binder ratio of 0.40 has the lowest chloride penetration. Therefore, it can be concluded that concrete mix for durable to sulfate and chloride attacks should be low water to binder ratio and use fly ash as a replacing material of binder at the ratio of 0.40

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยการพัฒนาคอนกรีตที่ทนทานต่อการทำลายของน้ำทะเลได้รับการสนับสนุนทุนสนับสนุนโครงการวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2550 จากสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา ผ่านคณะกรรมการบริหารเครือข่ายการวิจัยภาคกลางตะวันออก ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบคุณไว้เป็นอย่างสูง นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือทดสอบ บางส่วนในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ด้วย

ผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
สารบัญ	ง
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ปูนซีเมนต์และการทำปฏิกิริยา	4
2.2 ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์ผสมสารปอช โซลาน	6
2.3 การทำลายของซัลเฟต	6
2.4 การทำลายของคลอไรด์	7
บทที่ 3 การทดลอง	12
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	12
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	15
3.3 ส่วนผสมของตัวอย่าง	19
3.4 การทดสอบ	22
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล	32
4.1 การขยายตัวของมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต	32
4.2 การลดลงของกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต	55
4.3 การแทรกซึมของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์	68
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	69
5.1 ความคงทนของมอร์ตาร์ที่ผสมสารปอช โซลานต่อสารละลายโซเดียมซัลเฟต	95
5.2 ความคงทนของมอร์ตาร์ที่ผสมสารปอช โซลานต่อสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต	95
5.3 ความต้านทานการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์	96
5.4 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต	96
บรรณานุกรม	97

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

โดยทั่วไปสิ่งก่อสร้างในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced concrete structures) เนื่องจากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงและคงทน อีกทั้งยังมีต้นทุนในการก่อสร้างที่ไม่สูงเมื่อเทียบกับโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ (Steel structures) และสามารถทำการก่อสร้างได้ง่าย สร้างเป็นรูปทรงและขนาดต่างๆ ได้ตามที่ต้องการ นอกจากนี้ผู้รับเหมาก่อสร้างส่วนใหญ่ในประเทศไทยมีความคุ้นเคย เนื่องจากเคยทำมาเป็นระยะเวลานาน แต่ในปัจจุบันพบว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวนมากมีปัญหาการเสื่อมสภาพและชำรุดเสียหายอย่างรวดเร็วภายหลังจากที่เปิดใช้งานไปได้ไม่นาน ตัวอย่างเช่น สะพาน ท่าเทียบเรือ กำแพงกันคลื่นที่ตั้งอยู่บริเวณใกล้ชายฝั่งทะเลหรือสัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรง เช่น ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี และจังหวัดระยอง รวมทั้งจังหวัดอื่นๆ ในภาคตะวันออกของประเทศไทย เป็นต้น โดยพบว่าโครงสร้างเหล่านี้มีการเสื่อมสภาพเนื่องมาจากเนื้อคอนกรีตเกิดการขยายตัวและแตกร้าว และเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตก็ผุกร่อนเป็นสนิมด้วย ทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายและมีอายุการใช้งานสั้นกว่าอายุการใช้งานที่ออกแบบไว้ (Design service life) สาเหตุที่เกิดความเสียหายเช่นนี้เพราะว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมทะเลที่มีการทำลายสูง โดยในน้ำทะเล (Seawater) มีเกลือซัลเฟต (Sulfate) และเกลือคลอไรด์ (Chloride) ละลายอยู่ ซึ่งเกลือทั้งสองจะทำให้เกิดปัญหาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้ โดยเกลือโซเดียมซัลเฟต (NaSO_4) ในน้ำทะเลจะทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัว (Expansion) และเกลือแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ในน้ำทะเลทำให้คอนกรีตสูญเสียความสามารถยึดประสานของเนื้อคอนกรีต ซึ่งส่งผลให้เกิดการสูญเสียกำลังรับแรงอัด (Strength reduction) ของคอนกรีต ส่วนเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ในน้ำทะเลเมื่อแทรกซึมเข้ามาภายในเนื้อคอนกรีตและไปสะสมที่ระดับผิวเหล็กสูงเกินกว่าระดับปริมาณคลอไรด์วิกฤต (Chloride threshold level) จะทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิม (Depassivation) และหากมีออกซิเจนและน้ำจะทำให้เหล็กเสริมเกิดการผุกร่อน (Corrosion) และเป็นสนิม (Rust) ในที่สุด ซึ่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมทำให้พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมน้อยลง หน่วยแรงในเหล็กเสริมส่วนที่เหลืออยู่ก็จะมีค่าสูงขึ้นและอาจทำให้โครงสร้างวิบัติได้ นอกจากนี้ปริมาณสนิมเหล็กที่เกิดขึ้นจะดันให้คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมเอาไว้เกิดการแตกร้าวและหลุดร่อนได้ ซึ่งจะส่งผลต่อความแข็งแรงและความสวยงามของโครงสร้างเป็นอย่างมาก

แต่เนื่องจากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย อันเนื่องมาจากก่อสร้างทำได้ง่ายและมีราคาที่ไม่แพง ดังนั้นหากต้องก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมที่มีการทำลายสูง เช่น ในทะเลหรือติดชายฝั่งทะเล ก็ควรพิจารณาเลือกใช้คอนกรีตที่มีความ

คงทนต่อการทำลายของเกลือซัลเฟตและเกลือคลอไรด์ในน้ำทะเลได้สูง จะใช้คอนกรีตโดยทั่วไปไม่ได้ เพราะหากใช้คอนกรีตที่คงทนในการก่อสร้าง โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลแล้ว จะทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมีความทนทานต่อการทำลาย และมีอายุการใช้งานตามที่ ต้องการ ซึ่งเป็นการใช้ทรัพยากรเพื่อการก่อสร้างอย่างคุ้มค่าและเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซม และบำรุงรักษาในระยะยาวลงอีกด้วย

ในอดีตมีความเข้าใจว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องสัมผัสโดยตรงกับน้ำทะเล น้ำกร่อย หรืออยู่ใกล้ชายฝั่ง ต้องใช้คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (Sulfate-resisting Portland cement) เป็นส่วนผสมจึงจะป้องกันปัญหาการเสื่อมสภาพได้ แต่ความเป็นจริงแล้ว เกลือที่ละลายอยู่ใน น้ำทะเลประกอบด้วยเกลือซัลเฟตเพียงประมาณร้อยละ 10 แต่มีเกลือคลอไรด์ถึงร้อยละ 90 ด้วยเหตุนี้ โครงสร้างดังกล่าวถึงแม้จะใช้คอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แล้วก็ยัง เกิดปัญหาการเสื่อมสภาพอยู่ดี โดยเฉพาะปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ดังนั้นการใช้ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นส่วนผสมคอนกรีตจึงไม่สามารถป้องกันปัญหาการเสื่อมสภาพ ของโครงสร้างได้ เพราะว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ป้องกันได้เฉพาะสารซัลเฟตในน้ำทะเล แต่ไม่ป้องกันต่อการทำลายของเกลือคลอไรด์ในน้ำทะเล เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มี สารประกอบไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ในปริมาณที่ต่ำ เพื่อป้องกันไม่ให้ไตรแคลเซียมอลูมิเนตทำ ปฏิกิริยากับสารซัลเฟตที่แทรกซึมเข้ามาในเนื้อคอนกรีตเกิดเป็นสารประกอบเอททริงไกต์ (Ettringite) ซึ่งทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวและแตกร้าวขึ้น แต่ไตรแคลเซียมอลูมิเนตมีประโยชน์ในการป้องกันการ ทำลายเนื่องจากเกลือคลอไรด์ เพราะสามารถยึดจับเกลือคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้ามาในคอนกรีตให้ กลายเป็นคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) ซึ่งเคลื่อนที่ไม่ได้ จึงเหลือปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride) น้อยลง ที่จะสามารถเคลื่อนที่เข้าไปสะสมที่ผิวเหล็กเสริมภายในคอนกรีตได้ ทำให้คอนกรีตมี ความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ ดังนั้นวิธีการที่เหมาะสมในการป้องกันปัญหาการเสื่อมสภาพ ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในทะเลคือ ต้องพัฒนาคอนกรีตที่ป้องกันปัญหาทั้งเกลือซัลเฟตและ เกลือคลอไรด์ไปพร้อมๆ กัน มิใช่ป้องกันปัญหาใดปัญหาหนึ่งเท่านั้น ซึ่งหากทำได้ก็จะทำให้โครงสร้าง คอนกรีตเสริมเหล็กมีอายุการใช้งาน (Service life) ตามที่ต้องการ

ดังนั้นใน โครงการวิจัยนี้จึงวางกรอบแนวคิดของการวิจัยไว้ว่าศึกษาและพัฒนาคอนกรีตที่ใช้ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland cement) เป็นวัสดุประสานหลักในคอนกรีต แต่ จะปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้นด้วยการใช้สารปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย หรือสารปอซโซ ลานอื่นๆ ผสมแทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน เพื่อให้คอนกรีตมีความต้านทานต่อการทำลายของสาร ซัลเฟตและสารคลอไรด์ได้ดี

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อหาส่วนผสมคอนกรีตที่ทนทานต่อการทำลายของน้ำทะเล
- 2) เพื่อศึกษาความต้านทานการเสื่อมสภาพของคอนกรีตต่อสารซัลเฟต ทั้งการขยายตัวของมอร์ตาร์และการสูญเสียกำลังอัดของมอร์ตาร์
- 3) เพื่อศึกษาความต้านทานการเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าสู่ซีเมนต์เพสต์

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

สำหรับขอบเขตของโครงการวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนที่หนึ่งเป็นการศึกษาความต้านทานการเสื่อมสภาพของมอร์ตาร์ต่อเกลือซัลเฟต และส่วนที่สองเป็นการศึกษาความต้านทานการเคลื่อนที่ของเกลือคลอไรด์เข้าสู่ซีเมนต์เพสต์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

ส่วนที่ 1 การศึกษาความต้านทานการเสื่อมสภาพของมอร์ตาร์ต่อเกลือซัลเฟต มีขอบเขตการวิจัยดังนี้:

- 1) ศึกษาส่วนผสมมอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ และอัตราส่วนแทนที่วัสดุประสานด้วยสารปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย และสารปอซโซลานอื่นๆ ต่อการทำลายของเกลือโซเดียมซัลเฟตซึ่งทำให้เกิดการขยายตัว
- 2) ศึกษาส่วนผสมคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ และอัตราส่วนแทนที่วัสดุประสานด้วยสารปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย และสารปอซโซลานอื่นๆ ต่อการทำลายของเกลือแมกนีเซียมซัลเฟตซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียกำลังรับแรงอัด

ส่วนที่ 2 การศึกษาความต้านทานการเคลื่อนที่ของเกลือคลอไรด์เข้าสู่ซีเมนต์เพสต์ มีขอบเขตการวิจัยดังนี้:

- 3) ศึกษาส่วนผสมคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ และอัตราส่วนแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย ต่อการต้านทานการเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต

ทั้งนี้จากการศึกษาทั้งสองส่วนก็จะทำให้ทราบว่าส่วนผสมคอนกรีตใดที่เหมาะสมและมีความทนทานต่อเกลือคลอไรด์และเกลือซัลเฟตที่มีอยู่ในน้ำทะเล

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปูนซีเมนต์และการทำปฏิกิริยา

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ คือ ออกไซด์หลัก (Major oxides) และออกไซด์รอง (Minor oxides) ออกไซด์หลักได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกา (SiO₂) อลูมินา (Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) รวมกันประมาณ 90% ของน้ำหนักซีเมนต์ ส่วนออกไซด์รองได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไล (Na₂O และ K₂O) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO₂) และฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (P₂O₅) ออกไซด์เหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันและรวมตัวกันในระหว่างการเกิดปูนเม็ด เกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ได้แก่

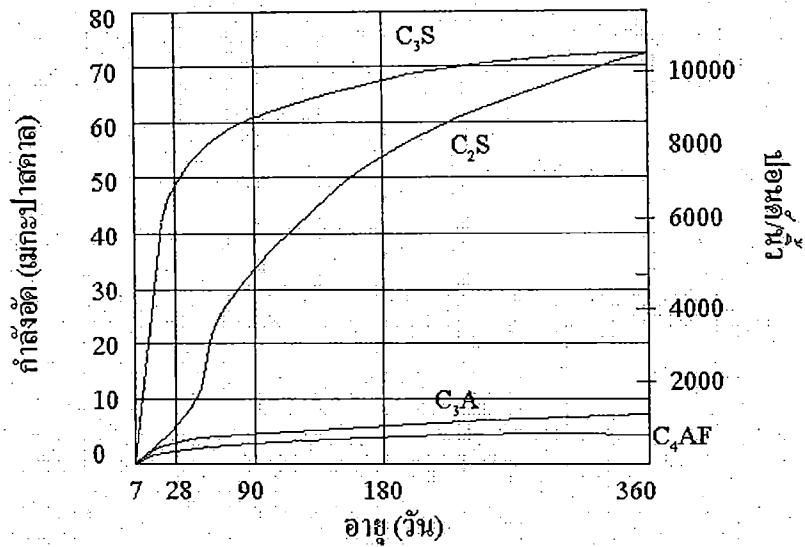
1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium silicate) 3CaO.SiO₂ (C₃S)
2. ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium silicate) 2CaO.SiO₂ (C₂S)
3. ไตรแคลเซียมอลูมินา (Tricalcium aluminate) 3CaO.Al₂O₃ (C₃A)
4. เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium aluminoferrite) 4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃ (C₄AF)

ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C₃S) จะมีอยู่มากที่สุดประมาณร้อยละ 45-55 เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและเกิดความร้อนเรียกว่า ความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Heat of hydration) และเกิดการก่อตัวและแข็งตัว ไตรแคลเซียมซิลิเกต จะพัฒนาให้กำลังได้ดีในช่วง 7 วันแรก

ไดแคลเซียมซิลิเกต (C₂S) มีอยู่ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 15-35 โดยไดแคลเซียมซิลิเกต มีอยู่ 4 รูปแบบ โดยเกิด α-C₂S ที่อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส และเย็นตัวลงจะแปลงสภาพเป็น α'-C₂S ซึ่งเปลี่ยนเป็น β-C₂S ที่อุณหภูมิต่ำลง และเป็น C₂S ที่อุณหภูมิปกติ แต่เนื่องจาก C₂S ในปูนซีเมนต์ไม่บริสุทธิ์มีสารแปลกปลอมอื่นผสมอยู่ ทำให้การแปลงสภาพจาก β-C₂S เป็น C₂S ไม่เกิดขึ้น ดังนั้น β-C₂S จะมีเสถียรภาพที่อุณหภูมิปกติ C₂S เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยจะปล่อยความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันออกมาไม่สูง และการพัฒนากำลังจะเป็นไปอย่างช้าๆ แต่ในระยะยาวจะได้กำลังใกล้เคียงกับ ไตรแคลเซียมซิลิเกต

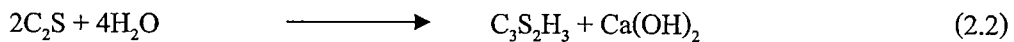
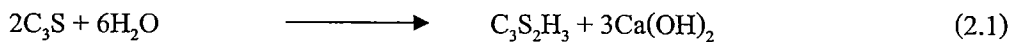
ไตรแคลเซียมอลูมินา (C₃A) มีอยู่ในซีเมนต์ประมาณร้อยละ 7-15 เมื่อผสมกับน้ำจะทำปฏิกิริยาทันทีและทำให้เพสต์ก่อตัวทันที แข็งตัวไว และการพัฒนากำลังจะเร็วมาก จะเกิดขึ้นภายใน 1-2 วัน แต่กำลังประลัยที่ได้มีค่าค่อนข้างต่ำ

เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C₄AF) มีอยู่ประมาณร้อยละ 5-10 เมื่อผสมกับน้ำจะทำปฏิกิริยารวดเร็วมาก และเกิดการก่อตัวภายในไม่กี่นาที ความร้อนจากปฏิกิริยามีค่าปานกลาง การพัฒนากำลังเป็นไปอย่างรวดเร็วแต่กำลังประลัยที่ได้มีค่าต่ำ

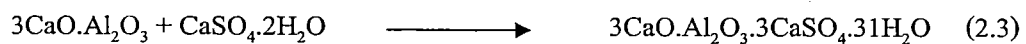


รูปที่ 2.1 การพัฒนากำลังของ C₃S, C₂S, C₃A และ C₄AF

การทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดย C₃S และ C₂S ทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) และสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (3CaO.2SiO₂.3H₂O หรือ C₃S₂H₃) ที่มีหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสาน และให้ความแข็งแรง ดังสมการ 2.1 และ 2.2



ส่วนการทำปฏิกิริยาของ C₃A จะเกิดขึ้นที่ทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว จึงมีการใส่ยิปซั่ม (CaSO₄.2H₂O) เพื่อหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C₃A ไม่ให้เกิดอย่างรวดเร็ว โดยยิปซั่มจะทำปฏิกิริยากับ C₃A ทำให้เกิดแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนตไฮเดรต (Calcium sulfoaluminate hydrate, 3CaO.AL₂O₃.3CaSO₄.31H₂O) เรียกว่า เอทริงไทต์ (Ettringite) โดยปฏิกิริยาที่เกิดเป็นการเพิ่มการขยายตัวดังสมการ 2.3



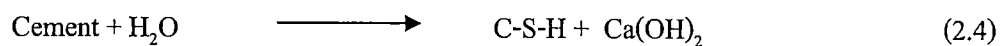
เมื่อเกิด Ettringite จะเกิดแรงดันที่มากจากการขยายตัวของของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตกออก และจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกครั้ง แต่ ถ้าอ็อกซิจินของซัลเฟตยังมีอยู่จะทำให้ C₃A ทำปฏิกิริยากับอ็อกซิจินของซัลเฟต เกิดเป็น Ettringite อีกครั้งเข้าไปแทนที่เป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกครั้งหนึ่ง ชั้นคอนจะเป็นไปจนกระทั่ง อ็อกซิจินของซัลเฟตมีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิด Ettringite จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C₃A โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็น แคลเซียมโมโนซัลเฟต

ส่วนของ C_4AF ทำปฏิกิริยากลาย C_3A แต่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะช้ากว่าและความร้อนของปฏิกิริยาน้อยกว่า ปฏิกิริยาระหว่าง C_4AF และยิปซัมทำให้เกิดแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตและซัลโฟเฟอร์ไรต์ ผลผลิตนี้มีลักษณะเหมือนเข็มคล้ายเอททริงไกต์และเปลี่ยนเป็นแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ที่มีซัลเฟตต่ำได้เช่นกัน แต่การแปลงกลับเป็นเอททริงไกต์ไม่เกิดขึ้น

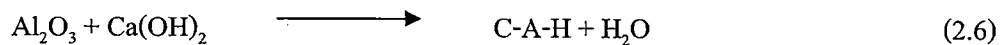
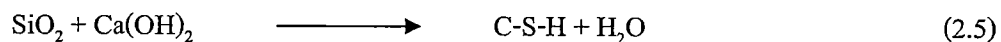
2.2 ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์ผสมสารปอซโซลาน

การใส่สารปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน ทำให้ปริมาณของสารประกอบ C_3S , C_2S , C_3A และ C_4AF ในคอนกรีตลดลง การทำปฏิกิริยาของสารซีเมนต์จะช้าลง การคายความร้อนจากปฏิกิริยาจะลดตัวออกไป เถ้าลอยมีอนุภาคขนาดเล็กและมีเม็ดทรงกลมทำให้สามารถกระจายตัวได้ดีในพาสต์ สามารถแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างทำให้พาสต์แน่นขึ้น เถ้าลอยประกอบไปด้วย SiO_2 , Al_2O_3 และ $Ca(OH)_2$ เป็นหลัก ปฏิกิริยาหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยและน้ำจะเกิดระหว่าง SiO_2 และ Al_2O_3 กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และน้ำ ดังสมการ 2.4 2.5 และ 2.6 โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction) โดยจะเกิดขึ้นค่อนข้างช้า

ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction)



ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction)

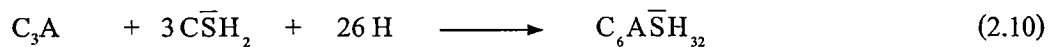
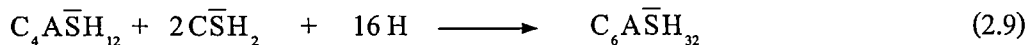
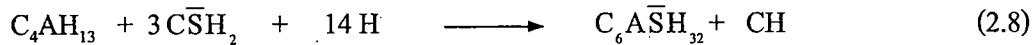
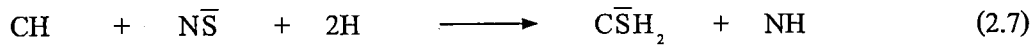


2.3 การทำลายของซัลเฟต

1. กลไกของการทำลายโดยเกลือโซเดียมซัลเฟต

กลไกนี้เริ่มต้นเมื่อเกิดปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมซัลเฟต (NS) กับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังแสดงในสมการ 2.7 ทำให้ได้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) ซึ่งทำให้ค่า pH ของซีเมนต์พาสต์สูงขึ้นเป็น 13.5 ซึ่งมากกว่าค่า pH ของสารละลาย CH อิ่มตัวที่มีค่าเพียง 12.4 ดังนั้นจึงเป็นการรักษาเสถียรภาพของ $C-S-H$ และ Ettringite ($C_6A\bar{S}H_{12}$) ไม่ให้ทำปฏิกิริยากลายไปเป็นผลผลิตอื่น สารยิปซัม ($C\bar{S}H_2$) ที่ได้จากสมการ 2.7 จะทำปฏิกิริยากับผลผลิตไฮเดรชันบางตัว เช่น แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C_4AH_{13}) โมโนซัลเฟต ($C_4A\bar{S}H_{12}$) และ/หรือ ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ได้ Secondary Ettringite อีก ดังแสดงในสมการ 2.8 ถึง 2.10 เนื่องจากโดยธรรมชาติแล้ว Ettringite จะมีความหนาแน่นต่ำกว่าผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชันชนิดอื่น

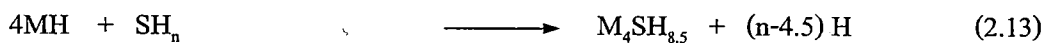
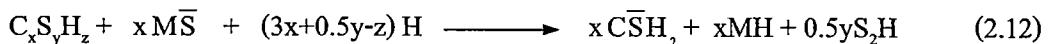
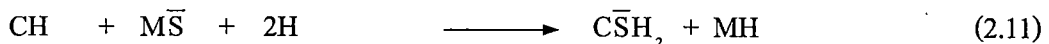
มาก จึงทำให้เกิดการขยายตัว ดังนั้นผลที่เกิดจากการทำลายโดยโซเดียมซัลเฟตจึงเป็นการขยายตัวและการแตกร้าวของคอนกรีต



โดยที่ C = CaO, N = Na₂O, M = MgO, S = SiO₂, $\bar{\text{S}}$ = SO₃, H = H₂O

2. กลไกของการทำลายโดยเกลือแมกนีเซียมซัลเฟต

กลไกการทำลายเริ่มต้นจากปฏิกิริยาในสมการ 2.11 อย่างไรก็ตาม MH ที่เกิดขึ้นนี้ไม่เหมือนกับ NH ตรงที่มีความสามารถในการละลายน้ำที่น้อยมาก และค่า pH ของสารละลาย MH ที่อิ่มตัวมีค่า 10.5 ดังนั้นจึงทำให้ทั้ง C-S-H และ Ettringite ไม่มีเสถียรภาพ



ดังนั้นกลไกในการทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟตจะเริ่มต้นจากสมการ 2.12 ถึง 2.13 โดยการเปลี่ยน C-S-H เป็น M-S-H ซึ่งไม่มีความสามารถในการประสานเลย การทำลายดังกล่าวจะทำให้เกิดการอ่อนตัวและเสื่อมสภาพของผิวซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัว และเกิดการสะสมของยิปซัมและ Brucite อย่างไรก็ดีในที่สุด Brucite จะถูกเปลี่ยนไปเป็น M-S-H ดังแสดงในสมการ 2.13 โดยที่ไม่เกิดการขยายตัวมากอย่างกรณีการทำลายโดยโซเดียมซัลเฟต

2.4 การทำลายของคลอไรด์

คลอไรด์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม โดยอิออนของคลอไรด์ (Chloride ions) เป็นตัวการที่ทำให้ชั้นฟิล์มที่ป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้เกิดสนิม (Passive film) สลายไปหลังจากที่ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวเหล็กเสริมมีค่าถึงคลอไรด์วิกฤต (Chloride threshold) แล้วหากมีน้ำหรือออกซิเจนเพียงพอก็จะทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้

แหล่งที่มาของคลอไรด์

คลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่น อยู่ใน น้ำที่ผสม หิน และทราย หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ที่มักมีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อ

ความทนทานของคอนกรีตนั้น ส่วนมากจะมาจากภายนอกคอนกรีตในช่วงใช้งานซึ่งคลอไรด์อาจเข้าสู่คอนกรีตได้โดยวิธี เช่น การซึมผ่านคอนกรีตที่แห้งของน้ำที่มีคลอไรด์ การแพร่ของไอออนคลอไรด์ จากภายนอกที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าภายในของคอนกรีต และการซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตของน้ำที่มีคลอไรด์โดยแรงดันน้ำ เป็นต้น

โดยทั่วไปแล้วแหล่งของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตนั้นมาจากน้ำทะเล สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา นั้น ถึงแม้ว่าคลอไรด์จะซึมเข้าไปในคอนกรีตได้ดี แต่ถ้าไม่มีออกซิเจนเพียงพอ การเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้จึงไม่เป็นปัญหามาก ส่วนที่มีความเสี่ยงสูงที่จะเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากที่สุด มักพบในบริเวณคลื่นละอองน้ำ ร่องลงมากที่เป็นบริเวณบรรยากาศทะเล และบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง

ในกรณีสภาพเปียกสลับแห้งนั้น น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้งโดย Absorption หรือ Capillary suction จนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพที่อิ่มตัว เมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นแห้งน้ำที่ผิวคอนกรีตจะระเหยออกไป เหลือไว้แต่คราบเกลือ เมื่ออยู่ในสภาพเปียกอีกครั้งความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวก็จะสูงขึ้น ดังนั้นความเข้มข้นของไอออนของคลอไรด์จึงมีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิวของคอนกรีต และจะทำให้คลอไรด์บริเวณใกล้ผิวมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อยๆ และจะเข้าสู่คอนกรีตมากขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งภายในคอนกรีตนั้นไม่สามารถทำให้แห้งได้โดยสมบูรณ์ ดังนั้นการแพร่ของไอออนคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตแบบที่สภาพเปียกสลับแห้งใช้เวลาเร็วกว่าคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำตลอดเวลา

การเคลื่อนตัวของไอออนของคลอไรด์ไปในคอนกรีตนั้น ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียกและแห้ง ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานที่และสภาพแวดล้อมเช่น อุณหภูมิ ความชื้น การไหลของน้ำ ทิศทางลม ทิศทางแสงอาทิตย์ และการใช้งานของโครงสร้าง โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียกมักจะเร่งให้อิออนของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตที่ถูกน้ำทะเลเป็นบางครั้งก็เวลาช่วงแห้งนานๆ จะมีโอกาสเกิดปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้มากกว่าคอนกรีตที่ถูกน้ำทะเลเป็นบางครั้งแต่เวลาช่วงแห้งสั้นๆ การกัดกร่อนของคลอไรด์จะเกิดขึ้นต่อเมื่อ ปริมาณไอออนของคลอไรด์ มีมากพอที่ผิวของเหล็กเสริม ซึ่งทำให้ค่าความเป็นด่างของคอนกรีตบริเวณรอบเหล็กเสริมลดต่ำลงจนถึงระดับวิกฤต

สถานะคลอไรด์ในคอนกรีต

คลอไรด์เมื่ออยู่ในคอนกรีตนั้นจะเรียกว่า คลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) โดยจะมีบางส่วนที่ถูกจับยึดไว้ เรียกว่า คลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) โดยกลไกการยึดจับสามารถแบ่งได้ดังนี้

1. การยึดจับทางเคมี (Chemical binding) คลอไรด์บางส่วนจะถูกจับโดยผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่น ผลผลิตของ C_3A และ C_4AF ในรูปของ $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ (Fridel's salt) หรือ $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ (Calcium chloroferrite) หรือแม้แต่ว่าอยู่ในโครงสร้างของผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน

2. การยึดจับทางกายภาพ (Physical binding) คลอไรด์บางส่วนสามารถถูกยึดด้วยแรงทางกายภาพ (Surface force) ได้บนผิวของผลิตภัณฑ์ของไฮดรเจน เช่น C-S-H และ C-A-H เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกยึดอยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิกิริยา เช่นมวลรวม หรือ ผงฝุ่น ได้ถึงแม้ปริมาณจะน้อยมากก็ตาม

คลอไรด์ส่วนใหญ่ที่ไม่ถูกจับยึดเรียกว่า คลอไรด์อิสระ (Free chloride) ซึ่งจะมีสภาพเป็นสารละลายอยู่ในน้ำที่อยู่ช่องว่างของคอนกรีต (Pore solution) คลอไรด์อิสระนี้เป็นส่วนของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นคลอไรด์อิสระต่ำกว่า และเป็นส่วนที่ทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลง ดังถ้ายึดจับคลอไรด์ไว้ได้เป็นจำนวนมากก็จะสามารถยืดระยะเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมออกไปได้

การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

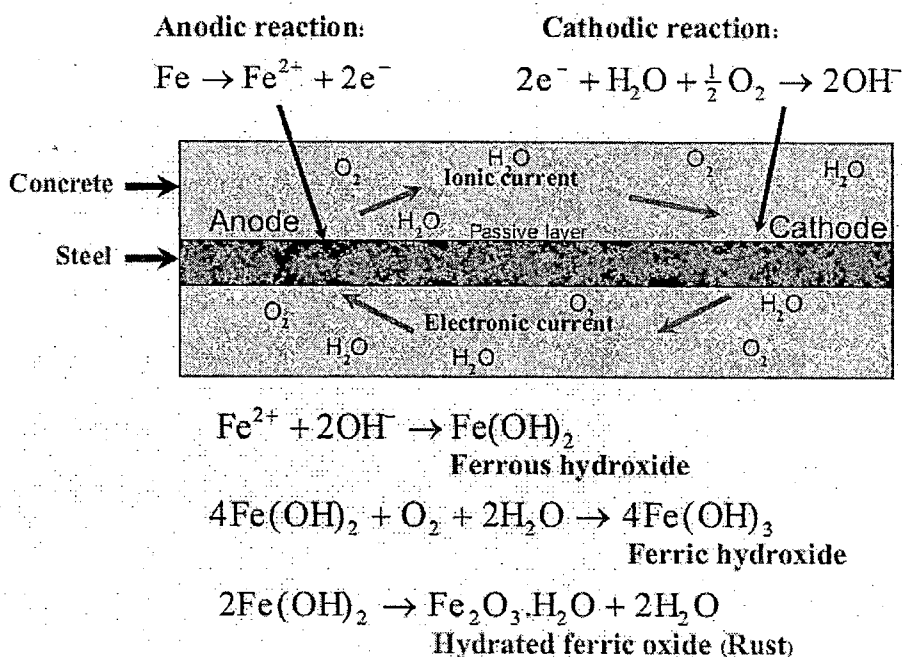
การเคลื่อนที่ของคลอไรด์ผ่านเข้าไปยังเนื้อคอนกรีตถือเป็นสิ่งที่สำคัญ เนื่องจากคลอไรด์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบของคอนกรีต ซึ่งมีผลต่อความคงทนของคอนกรีตทั้งทางตรงและทางอ้อม และนำไปสู่การเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีต โดยทั่วไปแล้วการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ เรียกว่า การแทรกซึมของคลอไรด์ (Chloride penetration) สามารถเกิดขึ้นจากสาเหตุต่างๆ เช่น ความแตกต่างของความเข้มข้น แรงดันน้ำ และประจุไฟฟ้า นอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับแรงขับเคลื่อนของกลไกและธรรมชาติของสสารที่เคลื่อนผ่าน ดังนั้นกลไกสำคัญของการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปยังเนื้อคอนกรีตสามารถแบ่งได้เป็น 4 กลไก ดังนี้

1. การแพร่ (Diffusion) เกิดจากการที่ระดับความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนในสิ่งแวดล้อมภายนอกของคอนกรีตมากกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนในบริเวณรูพรุนของคอนกรีต จะเกิดกลไกการแพร่ขึ้น โดยคลอไรด์ไอออนในสิ่งแวดล้อมภายนอกจะแพร่เข้ามาในตัวคอนกรีตซึ่งมีความเข้มข้นต่ำกว่า เป็นไปตามกฎข้อที่ 2 ของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion)
2. การดึงดูดแบบคาпилลารี (Capillary suction) การดึงดูดแบบคาпилลารีจะเกิดขึ้นเมื่อมีการผ่านเข้าไปของน้ำเค็มที่มีเกลือคลอไรด์เข้าไปในรูพรุนหรือโพรงช่องว่าง (Pore) เล็กๆ ที่อยู่ในคอนกรีต ซึ่งกลไกที่ดูดน้ำเค็มเก็บไว้ในรูพรุนของคอนกรีตนี้เรียกว่า การดึงดูดแบบคาпилลารี และการแทรกซึมของคลอไรด์จากวงจรสถานะเปียกและสถานะแห้ง (Cyclic wetting and drying) ก็คือการดึงดูดแบบคาпилลารีนั่นเอง
3. การดึงดูดไอออน (Ion adsorption) การดึงดูดไอออนเกิดขึ้นเพราะผลจากบริเวณผนังของโพรงช่องว่าง (Pore wall) ในคอนกรีตมีคุณสมบัติทางศักย์ไฟฟ้าเป็นประจุบวก จึงได้ดึงดูดคลอไรด์ไอออนที่เป็นประจุลบเข้ามา สำหรับโครงสร้างที่มีความพรุนสูง คอนกรีตจะมีค่าการดึงดูดไอออนที่สูงกว่าคอนกรีตที่มีความพรุนต่ำกว่า ดังนั้นการลดความพรุนในตัวโครงสร้างคอนกรีตเองก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะป้องกันการแทรกซึมของคลอไรด์ได้

4. ความดันน้ำ (Hydraulic pressure) โครงสร้างที่อยู่ภายใต้ความดันน้ำ เช่น กำแพงกันดิน อุโมงค์ เชื้อนริมทะเล เป็นต้น ความแตกต่างของ Hydraulic head จะทำให้บริเวณที่ Hydraulic head สูง ผลักดันน้ำเข้าไปยังบริเวณที่มี Hydraulic head ต่ำกว่า ซึ่งจะนำพาคลอไรด์ไอออนเข้าสู่ โครงสร้างคอนกรีตด้วย

ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการผุกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต

เกลือคลอไรด์เมื่อเข้าไปในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแล้วจะถูกแบ่งออกเป็นสองประเภท คือ คลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) และคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ทั้งนี้เฉพาะเกลือคลอไรด์อิสระเท่านั้นที่สามารถเคลื่อนที่ลึกเข้าไปในคอนกรีตได้ โดยเมื่อสะสมตรงบริเวณผิวหน้าเหล็กเสริมในคอนกรีตจนมีปริมาณมากพอถึงค่าระดับคลอไรด์วิกฤต (Chloride threshold level) ชั้นฟิล์มที่ปกป้อง ออกไซด์กันเหล็กเสริม (Passive film layer) ก็จะสลายตัว เหล็กเสริมก็สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจน และน้ำในคอนกรีตตามกระบวนการไฟฟ้าเคมีดังรูปที่ 2.2 เกิดเป็นสนิม (Rust) ขึ้นมา และมีการสูญเสียน้ำหนักเหล็กเนื่องจากการผุกร่อน (Corrosion) เกิดขึ้น ซึ่งทำให้พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมน้อยลง เมื่อรับน้ำหนักบรรทุกทุกอาจทำให้โครงสร้างวิบัติได้

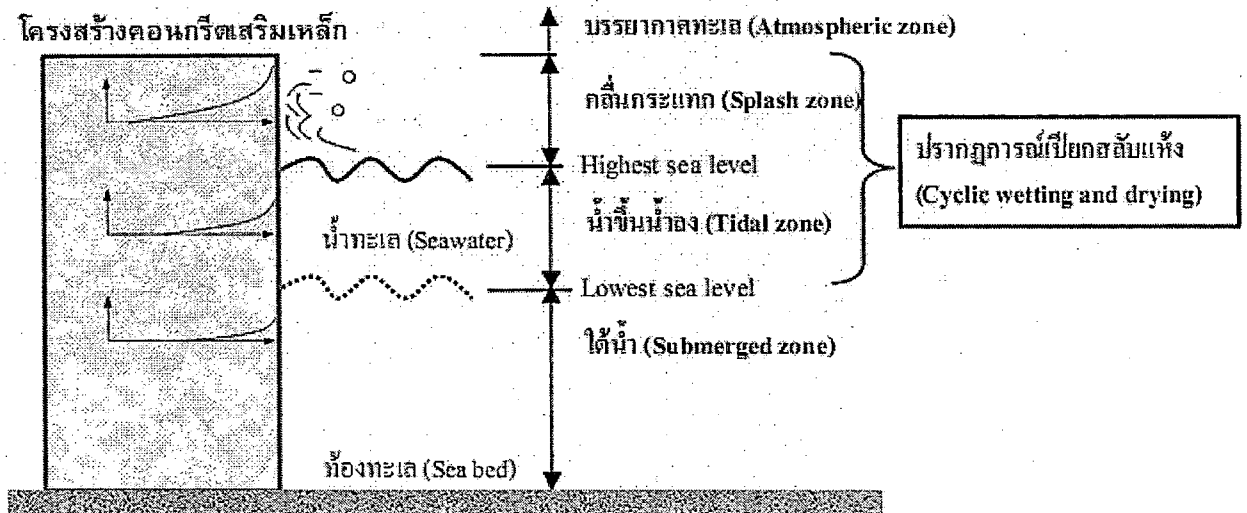


รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีของการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

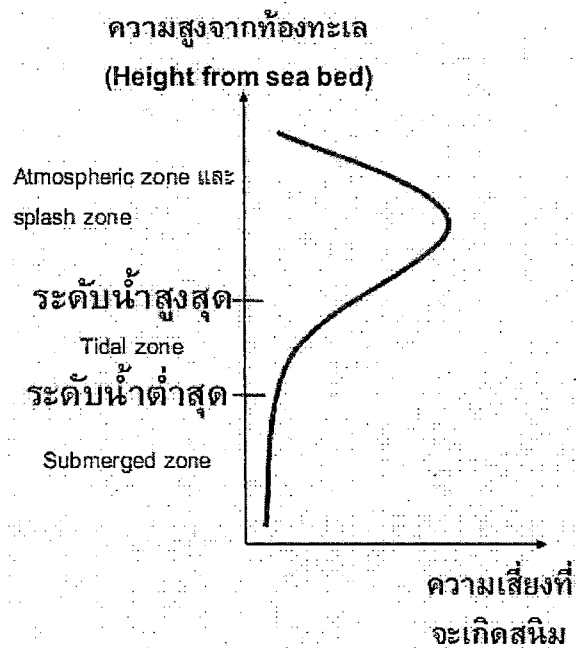
ความเสี่ยงที่จะเกิดสนิมของโครงสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเล

ทั้งนี้ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอันเนื่องมาจากการผุกร่อนของเหล็กเสริมเนื่องมาจากเกลือคลอไรด์จะเกิดมากที่สุดบริเวณละอองคลื่น (Splash zone) และบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal zone) เนื่องจากได้รับอิทธิพลของปรากฏการเปียกสลับแห้ง (Cyclic wetting and drying) ดัง

รูปที่ 2.3 รองลงมาคือส่วนโครงสร้างที่จมอยู่บริเวณใต้น้ำทะเล (Submerged zone) มักไม่พบปัญหาการกัดกร่อนเหล็กเสริมอันเนื่องมาจากคลอไรด์ เนื่องจากมีปริมาณออกซิเจนที่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันต่ำ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 รูปแสดงชั้นบริเวณในสิ่งแวดล้อมทะเล



รูปที่ 2.4 ความเสี่ยงที่จะเกิดสนิมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในแต่ละบริเวณ

บทที่ 3 การทดลอง

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

1. ปูนซีเมนต์ (Cement)

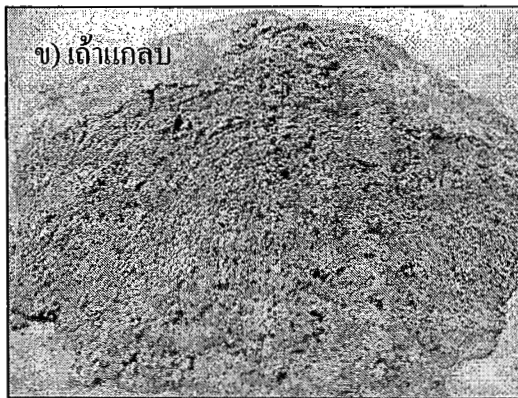
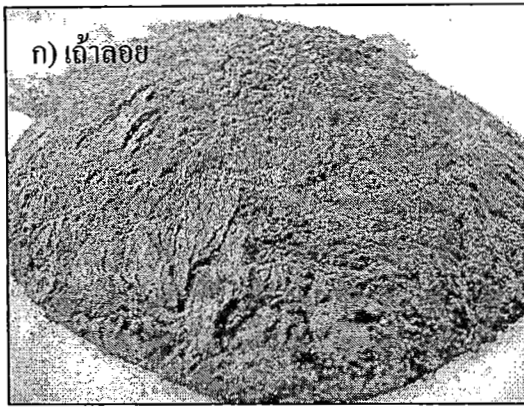
ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 โดยมีองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และสารปอซโซลาน

องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์		สารปอซโซลาน		
	ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 5	เถ้าลอย (Fly ash, F)	เถ้าแกลบ (Rice husk ash, R)	ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Blast furnace slag, S)
SiO ₂	21.5	21.0	37.58	85.42	21.08
Al ₂ O ₃	5.4	3.5	19.49	2.53	5.03
Fe ₂ O ₃	3.0	4.3	13.39	0.40	18.42
CaO	67.3	62.9	18.81	0.40	34.07
MgO	1.5	3.3	1.19	1.58	8.80
SO ₃	2.3	2.1	3.46	1.74	1.91
Na ₂ O	0.1	0.1	0.00	0.18	0.00
K ₂ O	0.3	0.5	4.78	4.73	0.00
Free lime	-	1.0	0.05	0.08	0.35
Loss on ignition (LOI)	2.9	1.2	0.61	2.52	7.66
คุณสมบัติทางกายภาพ					
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	3.13	2.27	2.01	2.96
ความละเอียดแบบเบลน (cm ² /g)	3,190	3,760	3,460	7,685	1,634

2. สารปอซโซลาน (Pozzolans)

สารปอซโซลานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ เถ้าลอย (Fly ash, F) เถ้าแกลบ (Rice husk ash, R) และตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Blast furnace slag, S) โดยมีองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพดังแสดงในตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.1 แสดงภาพถ่ายสารปอซโซลานที่ใช้



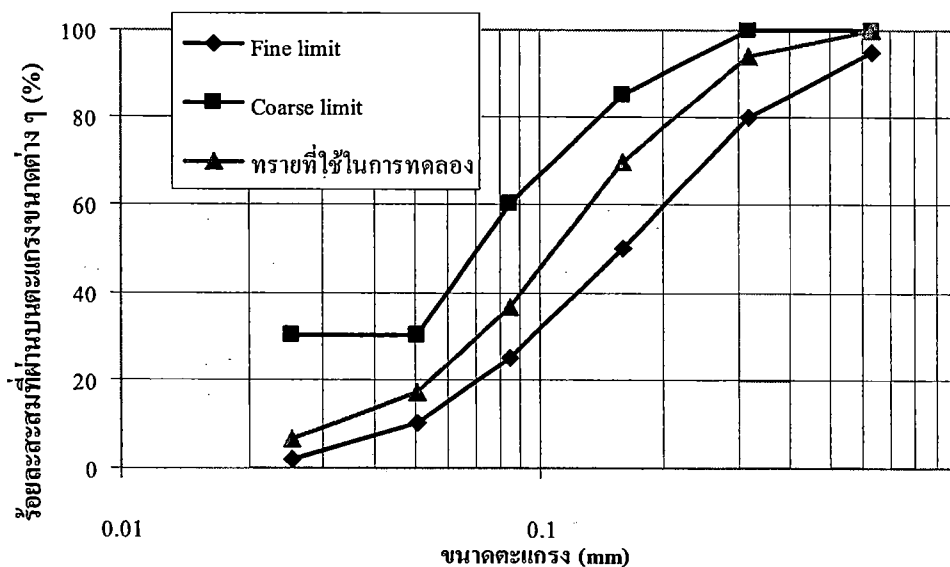
รูปที่ 3.1 สารปอชโซลานที่ใช้

3. ทราย (Sand)

ทรายที่ใช้ในการทดลองเป็นทรายบกในจังหวัดชลบุรี ทำการวิเคราะห์หาขนาดคละ (Sieve analysis) ของทรายตามมาตรฐาน ASTM C33 ตารางที่ 3.2 แสดงผลการวิเคราะห์หาขนาดคละของทราย และรูปที่ 3.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของร้อยละสะสมที่ผ่านตะแกรงขนาดต่างๆ กับขนาดของตะแกรง

ตารางที่ 3.2 ขนาดคละของทราย

ขนาด ตะแกรง (No.)	ขนาด ตะแกรง (mm)	น้ำหนัก หินที่ ค้างบน ตะแกรง (g)	ร้อยละที่ ค้าง บน ตะแกรง (%)	ร้อยละ สะสมที่ ค้าง บน ตะแกรง (%)	ร้อยละ สะสมที่ ผ่าน ตะแกรง (%)	ร้อยละสะสมที่ผ่าน ตะแกรงขนาดต่างๆ (ASTM)	
						Fine limit	Coarse limit
4	0.6350	0	0	0	100	95	100
8	0.3175	289.8	5.8	5.8	94.2	80	100
16	0.1588	1225.9	24.5	30.3	69.7	50	85
30	0.0847	1661.5	33.3	63.6	36.4	25	80
30	0.0508	961.6	19.3	82.9	17.2	50	30
100	0.0254	524.9	10.5	93.4	6.6	2	30
Pan	-	331.8	6.6	-	-	-	-
รวม	-	4995.5	100	276.0	-	-	-



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละสะสมที่ผ่านตะแกรงขนาดต่างๆของทรายกับขนาดของตะแกรง

4. น้ำ (Water)

น้ำที่ใช้ในการทดลองใช้น้ำประปาในห้องปฏิบัติการ โครงสร้างและวัสดุคอนกรีต ภาควิชา
วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

5. เกลือแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$)

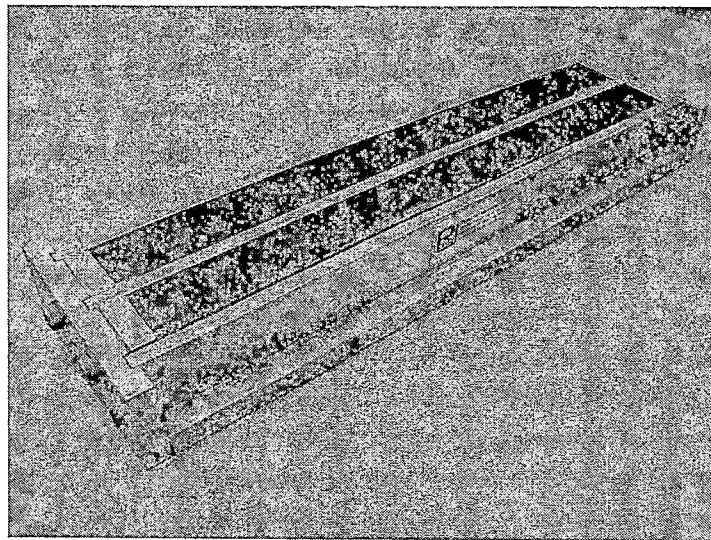
6. เกลือโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4)

7. เกลือโซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

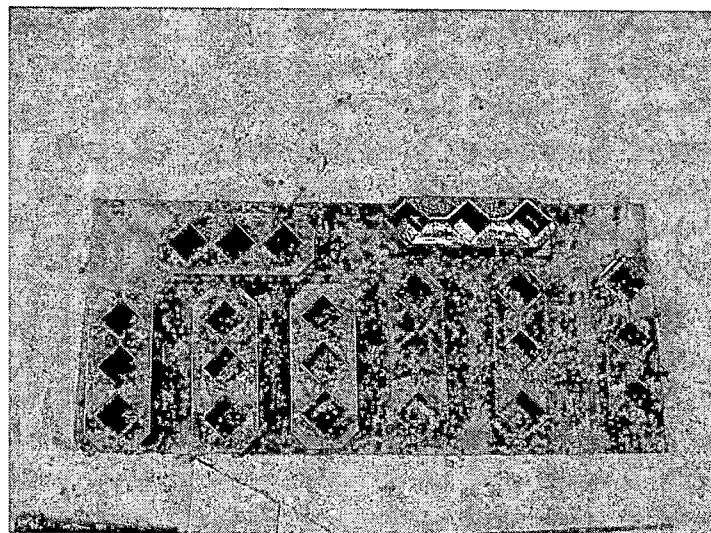
1. แบบหล่อตัวอย่าง

- แบบหล่อทรงปริซึมขนาด $2.5 \times 2.5 \times 28.5$ cm ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แบบหล่อทรงปริซึมขนาด $2.5 \times 2.5 \times 28.5$ cm

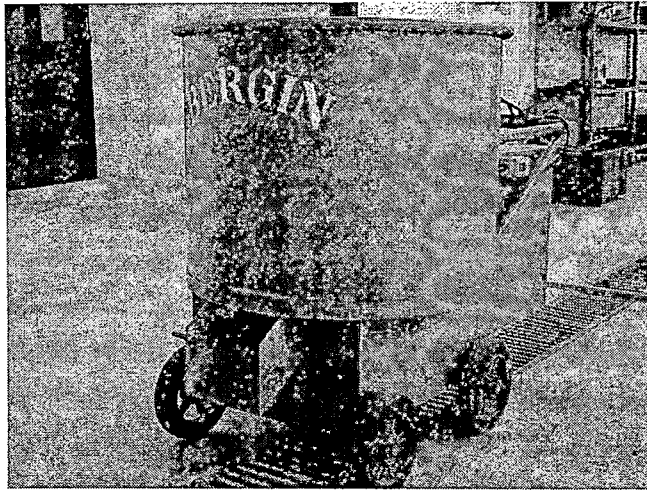
- แบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ cm ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ cm

- แบบหล่อทรงกระบอกขนาด $\phi 5 \times 10$ cm

2. เครื่องผสมมอร์ต้าร์ ดังรูปที่ 3.5



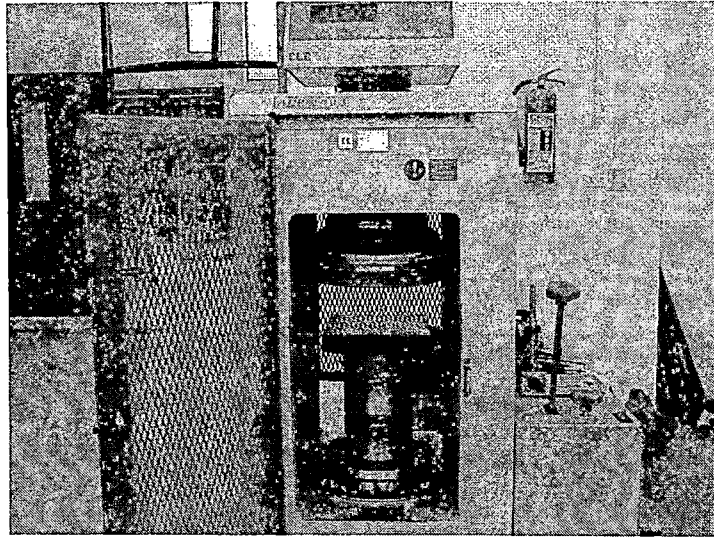
รูปที่ 3.5 เครื่องผสมมอร์ต้าร์

3. เครื่องผสมซีเมนต์เพสต์ ดังรูปที่ 3.6



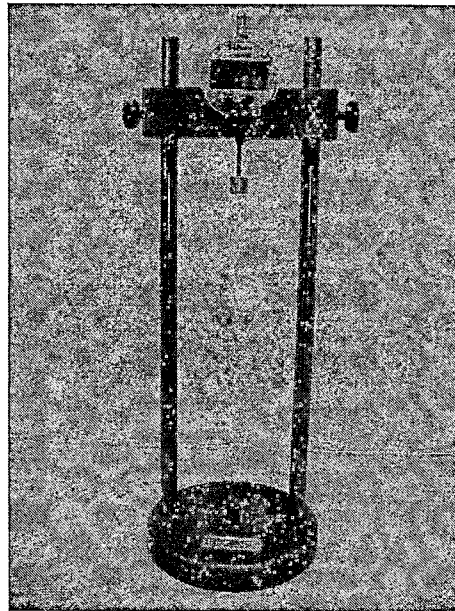
รูปที่ 3.6 เครื่องผสมซีเมนต์เพสต์

4. เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด ดังรูปที่ 3.7



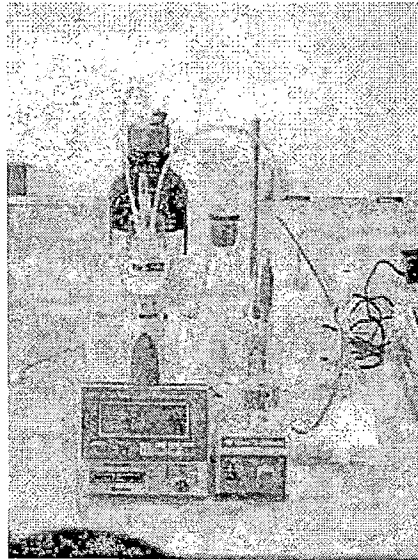
รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด

5. เครื่องวัดการขยายตัว (Length comparator) ดังรูปที่ 3.8



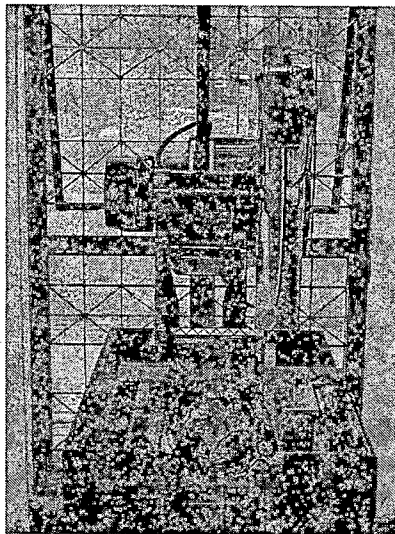
รูปที่ 3.8 เครื่องวัดการขยายตัว

1. เครื่องทดสอบการไตเตรทเพื่อหาปริมาณคลอไรด์โดยพิจารณาจุดยุติด้วยค่าศักย์ไฟฟ้า (Potensiotitration) ดังรูป 3.9



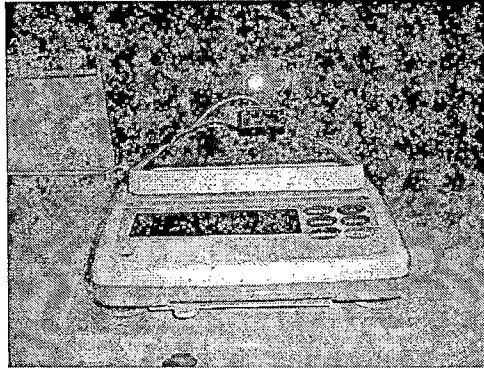
รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบการไตเตรทเพื่อหาปริมาณคลอไรด์โดยพิจารณาจุดยุติด้วยค่าศักย์ไฟฟ้า

7. เครื่องตัดคอนกรีต ดังรูป 3.10



รูปที่ 3.10 เครื่องตัดคอนกรีต

7. เครื่องชั่งดิจิตอล ดังรูป 3.11



รูปที่ 3.11 เครื่องชั่งดิจิตอล

3.3 ส่วนผสมของตัวอย่าง

ในการศึกษานี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนคือ

1. การศึกษาความต้านทานของมอร์ต้าร์ต่อการทำลายของโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต
 - 1.1 การทดสอบการขยายตัว (Expansion) ของมอร์ต้าร์เมื่อเผชิญกับสารละลายโซเดียมซัลเฟต
 - 1.2 การทดสอบการลดลงของกำลังอัด (Compressive strength reduction) หรือการลดลงของกำลัง (Strength reduction) ของมอร์ต้าร์เมื่อเผชิญกับสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต
2. การศึกษาความต้านทานต่อการแทรกซึมคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์

การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ (Chloride penetration) ของซีเมนต์เพสต์ เมื่อเผชิญกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์

โดยมีรายละเอียดของส่วนผสม (Mix proportion) ของตัวอย่างในแต่ละการทดสอบดังนี้

ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมมอร์ตาร์สำหรับการทดสอบการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

Mix I.D.	w/b	f/b	r/b	s/b	Remarks
มอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน					
M-WB50	0.50	-	-	-	อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 2.75
M-WB60	0.50	-	-	-	
มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่วัสดุประสาน (b) ด้วยเถ้าลอย (f)					
MF20-WB50	0.50	0.20	-	-	อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 2.75
MF40-WB50	0.50	0.40	-	-	
MF40-WB50	0.50	0.60	-	-	
MF20-WB55	0.55	0.20	-	-	
MF40-WB55	0.55	0.40	-	-	
MF60-WB55	0.55	0.40	-	-	
MF20-WB60	0.60	0.20	-	-	
MF40-WB60	0.60	0.40	-	-	
MF40-WB60	0.60	0.60	-	-	
มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่วัสดุประสาน (b) ด้วยเถ้ากลบ (r)					
MR20-WB50	0.50	-	0.20		อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 2.75
MR20-WB50	0.60	-	0.20		
MR40-WB60	0.60	-	0.40	-	
มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่วัสดุประสาน (b) ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็ก (s)					
MS20-WB50	0.50	-	-	0.20	อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 2.75
MS40-WB50	0.60	-	-	0.40	
MS60-WB50	0.50	-	-	0.60	
MF20-WB60	0.60	-	-	0.20	
MS40-WB60	0.60	-	-	0.40	
MS60-WB60	0.60	-	-	0.60	

ตารางที่ 3.4 ส่วนผสมมอร์ตาร์สำหรับการทดสอบการลดลงของกำลังรับแรงอัดในสารละลาย
แมกนีเซียมซัลเฟต

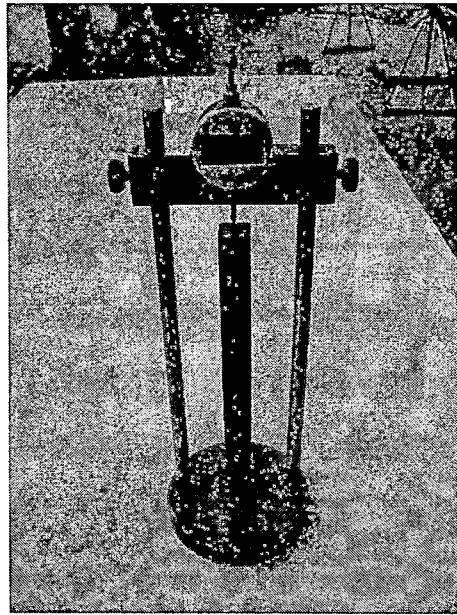
Mix I.D.	w/b	f/b	r/b	s/b	Remarks
มอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน					
M-WB50	0.50	-	-	-	อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 2.75
M-WB50	0.60	-	-	-	
มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่วัสดุประสาน (b) ด้วยเถ้าลอย (f)					
MF20-WB50	0.50	0.20	-	-	อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 2.75
MF20-WB50	0.50	0.40	-	-	
MF60-WB50	0.50	0.60	-	-	
MF20-WB60	0.60	0.20	-	-	
MF40-WB60	0.60	0.40	-	-	
MF40-WB60	0.60	0.60	-	-	
มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่วัสดุประสาน (b) ด้วยเถ้าแกลบ (r)					
MR20-WB50	0.50	-	0.20	-	อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 2.75
MR20-WB60	0.60	-	0.20	-	
MR40-WB60	0.60	-	0.40	-	
มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่วัสดุประสาน (b) ด้วยตะกั่วแดง (s)					
MS20-WB50	0.50	-	-	0.20	อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 2.75
MS20-WB50	0.50	-	-	0.40	
MS60-WB50	0.50	-	-	0.60	
MS20-WB60	0.60	-	-	0.20	
MS40-WB60	0.60	-	-	0.60	
MS60-WB60	0.60	-	-	0.60	

3.4 การทดสอบ

3.4.1 การขยายตัวของมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

วิธีการทดสอบโดยย่อ

1. ติดตั้งและเตรียมเครื่องวัดการขยายตัวให้เรียบร้อย
2. ทำการเทียบความยาวกับแท่งมาตรฐาน (Standard bar) แล้วกำหนดค่าเริ่มต้นเป็น 0.000 mm
3. นำตัวอย่างมอร์ต้าร์ทรงปริซึมที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ครบกำหนดอายุทดสอบหาการขยายตัว มาทำการวัดการขยายตัวด้วยเครื่องวัดการขยายตัว ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การวัดการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์ทรงปริซึม

ในการคำนวณหาค่าการขยายตัว (Expansion) ของมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต สามารถหาได้จากสูตรต่อไปนี้

$$Expansion(\%) = \frac{L_x - L_i}{L_g} \times 100 \quad (3.1)$$

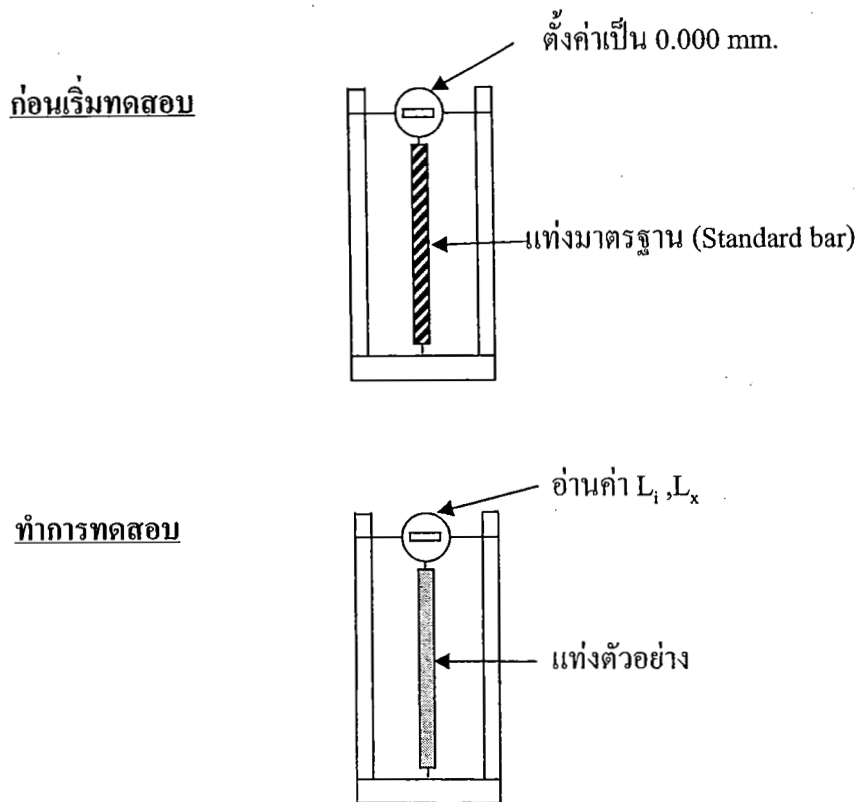
โดยที่

L_x = ความยาวเปรียบเทียบกับแท่งมาตรฐานของตัวอย่างที่อายุทดสอบ หลังจากแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

L_i = ความยาวเปรียบเทียบกับแท่งมาตรฐานของตัวอย่างตอนเริ่มต้น ก่อนแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

L_g = ความยาวตัวอย่าง (Nominal gage length) เท่ากับ 285 mm

สำนักทดสอบ มหาวิทยาลัยบูรพา
 ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131



รูปที่ 3.13 วิธีการวัดการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างและอ่านค่า L_i, L_x

3.4.2 การทดสอบหาการสูญเสียกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

วิธีการทดสอบโดยย่อ

- นำชิ้นตัวอย่างที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและแช่ในน้ำขึ้นมาวางทิ้งไว้ในอากาศจนชิ้นตัวอย่างแห้ง
- นำชิ้นตัวอย่างวางกึ่งกลางของแท่นทดสอบทดสอบแรงอัด
- เปิดเครื่องทดสอบแรงกด โดยในการทดสอบต้องควบคุมน้ำหนักที่กดให้มีอัตราการกดสม่ำเสมอ
- กดชิ้นตัวอย่างจนแตก บันทึกค่าน้ำหนักที่กดได้ แล้วนำค่าน้ำหนักที่กดได้และพื้นที่หน้าตัดที่ได้มาคำนวณหาค่ากำลังรับแรงอัด
- นำค่ากำลังรับแรงอัดของอัตราส่วนผสมเดียวกันที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและในน้ำมาหาการสูญเสียกำลังรับแรงอัด

สูตรในการคำนวณหาอัตราการสูญเสียกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตและมอร์ต้าร์ (Strength reduction) ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต มีดังนี้

370956

666.893
 ๒๑๙๓๐
 ๘.๖

$$\text{Strength reduction (\%)} = \frac{(f'_{c,\text{water}} - f'_{c,\text{MgSO}_4})}{f'_{c,\text{water}}} \times 100 \quad (3.2)$$

โดยที่

$$f'_{c,\text{water}} = \text{กำลังอัดประลัยของชิ้นตัวอย่างที่แช่ในน้ำ ที่อายุทดสอบ}$$

$$f'_{c,\text{MgSO}_4} = \text{กำลังอัดประลัยของชิ้นตัวอย่างที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อายุทดสอบ}$$

3.4.3 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์

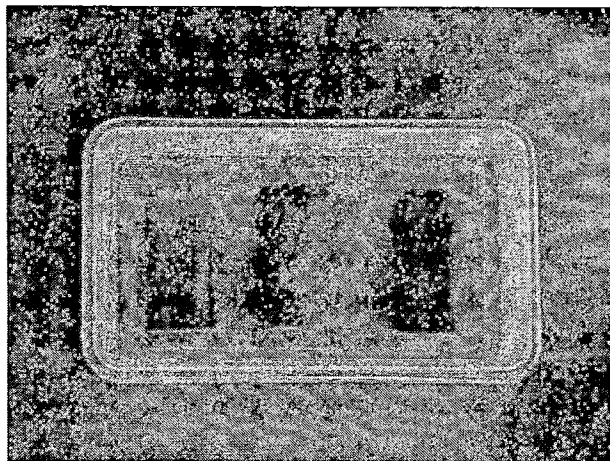
1. การเตรียมตัวอย่างซีเมนต์เพสต์

หล่อแท่งตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ (Cement paste) ทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม สูง 10 ซม โดยส่วนผสมที่ใช้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.5 แล้วทำการบ่มในน้ำดังรูปที่ 3.14 เมื่อครบอายุการบ่มจึงนำไปแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์ 5% ที่ระยะเวลาต่างๆ กัน โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ชุด การทดลอง ได้แก่

ชุดการทดลองที่ 1:	บ่มน้ำ 7 วัน และแช่ในน้ำเกลือคลอไรด์ 5% 28 วัน
ชุดการทดลองที่ 2:	บ่มน้ำ 7 วัน และแช่ในน้ำเกลือคลอไรด์ 5% 91 วัน
ชุดการทดลองที่ 3:	บ่มน้ำ 28 วัน และแช่ในน้ำเกลือคลอไรด์ 5% 28 วัน
ชุดการทดลองที่ 4:	บ่มน้ำ 28 วัน และแช่ในน้ำเกลือคลอไรด์ 5% 91 วัน

ตารางที่ 3.5 ส่วนผสมของซีเมนต์เฟสค์ที่ใช้ในการทดสอบ

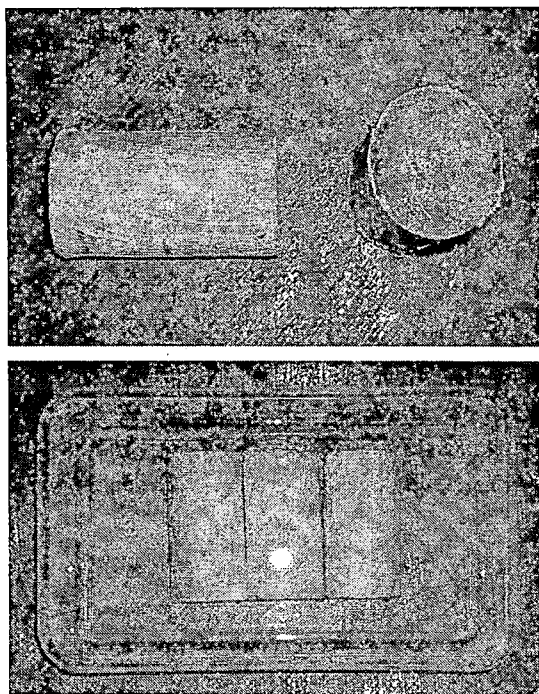
Mix I.D.	Cement Type	w/b	f/b	Mix proportion (kg/m ³)		
				cement	Fly ash	water
PD1	1	0.30	0.00	1619.5	0.0	485.9
PD2	1	0.30	0.20	1223.3	305.8	458.7
PD2	1	0.30	0.40	869.0	579.3	434.5
PD4	1	0.30	0.60	550.2	825.3	412.7
PD2	1	0.40	0.00	1393.8	0.0	557.5
PD4	1	0.40	0.60	1061.1	265.3	530.5
PD2	1	0.40	0.40	759.0	506.0	506.0
PD8	1	0.40	0.40	483.7	725.5	483.7
PD9	1	0.50	0.60	1223.3	0.0	611.7
PD10	1	0.50	0.20	936.8	234.2	585.5
PD11	1	0.30	0.40	673.8	449.2	561.5
PD11	1	0.30	0.60	431.5	647.3	539.4
PD13	5	0.30	0.60	1393.8	0.0	557.5



รูปที่ 3.14 การแช่มตัวอย่างในน้ำ

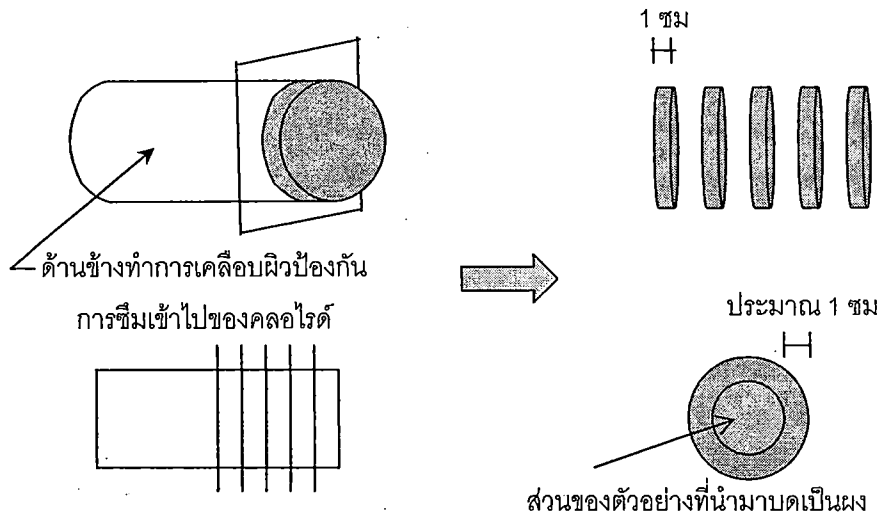
หลังจากปมน้ำตามเวลาที่กำหนดในแต่ละชุดการทดลองแล้ว นำเอาแท่งตัวอย่างซีเมนต์เฟสค์ มาทำการเคลือบผิวด้านข้างโดยใช้สารกันซึม Monoflex ทิ้งไว้ให้แห้ง ดังรูปที่ 3.15 ก่อนนำไปแช่ใน

น้ำเกลือคลอไรด์ความเข้มข้น 5% ที่ได้ทำการผสมทิ้งเอาไว้และแช่ทิ้งไว้ตามระยะเวลาที่กำหนด ทั้งนี้ เพื่อควบคุมให้คลอไรด์ไอออนแทรกซึมเข้าไปในตัวอย่างได้เพียงทิศทางเดียว

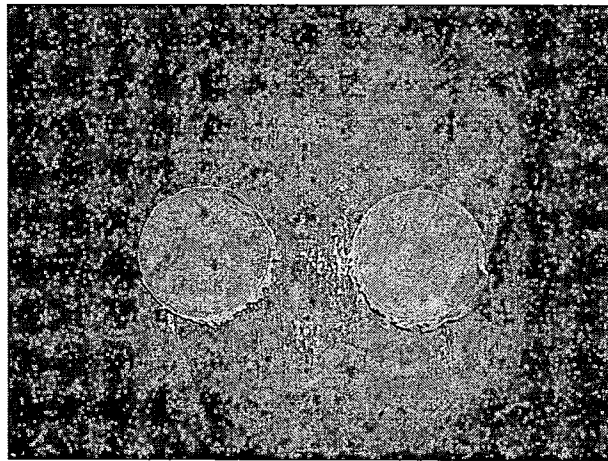


รูปที่ 3.15 ชิ้นตัวอย่างที่เคลือบผิวด้านข้างด้วยสารกันซึม Monoflex

2. หลังจากปอม้แห้งตัวอย่างในน้ำและแช่ในน้ำเกลือคลอไรด์ความเข้มข้น 5% ตามระยะเวลาที่กำหนดแล้ว ให้นำแท่งตัวอย่างที่ทิ้งไว้จนแห้งมาทำการตัดออกเป็นแผ่นลักษณะคล้ายแผ่นดิสก์หนา 1 ซม จำนวน 5 แผ่น แล้วทำการบดแผ่นตัวอย่างซึ่งเป็นสารซีเมนต์ให้เป็นผง โดยเลือกบดเฉพาะบริเวณที่อยู่กึ่งกลางของแผ่นตัวอย่างเท่านั้น ดังรูปที่ 3.16 และ 3.17 เพื่อนำไปใช้ทดสอบหาปริมาณสารคลอไรด์ทั้งหมดและสารคลอไรด์อิสระต่อไป



รูปที่ 3.16 การตัดแท่งตัวอย่างและส่วนของตัวอย่างที่นำมาบดเป็นผง



รูปที่ 3.17 แผ่นตัวอย่างหนา 1 เซนติเมตร

3. การทดสอบหาปริมาณสารคลอไรด์ทั้งหมดในระบบของสารซีเมนต์

คลอไรด์ที่ละลายในกรด (Acid-soluble chloride) ในระบบของสารซีเมนต์ก็คือ คลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ในระบบของสารซีเมนต์นั้น ซึ่งมีวิธีการทดสอบหาปริมาณดังนี้ (ตามมาตรฐาน ASTM C1152 และมาตรฐาน C 114)

1. นำสารซีเมนต์ที่บดเป็นผงและผ่านตะแกรงร่อนขนาดเบอร์ 20 ($850 \mu\text{m}$) มาจำนวนประมาณ 5 กรัม โดยชั่งละเอียดถึง 0.01 กรัม นำมาใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 ml
2. เติมน้ำลงไป 75 ml แล้วเติมสารละลายกรดไนตริกที่ dilute ในอัตราส่วน 1:1 ลงไป 25 ml ตามลงไปทันที โดยค่อยๆ เติมน้ำลงไป คอยคนก้อนซีเมนต์ที่จับตัวเป็นก้อน (lumps) ให้แยกออกจากกัน ถ้ามีกลิ่นของก๊าซไข่เน่า (hydrogen sulfide) ในระหว่างนี้ ให้เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์

ออกไซด์ (hydrogen peroxide) 30% ลงไป 3 ml และหยด methyl orange indicator จำนวน 3 หยด ปิดบีกเกอร์ด้วยแผ่นกระจกแล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ถึง 2 นาที ถ้ามีสีเหลืองถึงสีเหลืองส้ม ปรากฏบนด้านบนของของแข็งที่ตกตะกอนอยู่ แสดงว่าสารละลายมีฤทธิ์เป็นกรดไม่พอ ให้หยดสารละลายกรดไนตริกที่ dilute ในอัตราส่วน 1:1 ลงไปแล้วคนไปพร้อมๆ กันจนกระทั่งปรากฏเป็นสีชมพูหรือสีแดงเล็กน้อย จากนั้นหยดสารละลายกรดไนตริกเกินต่อไปอีกจำนวน 10 หยด

3. ให้ความร้อนแก่บีกเกอร์ที่ปิดฝาด้วยแผ่นกระจกด้วยการต้มให้เดือด อย่าให้เดือดเกิน 2 ถึง 3 นาที จากนั้นนำออกจากเครื่องต้ม (hot plate)
4. ล้างแผ่นกระดาษกรองเนื้อหยาบขนาด 9 cm ด้วยน้ำเพิ่มขึ้นครั้งละ 25 ml จำนวน 4 ครั้งโดยใช้การกรองดูด (suction filtering) ด้วยกรวย (Büchner funnel) ขนาด 250 หรือ 500 ml และขวดกรองแก้วก้นโป่ง (filtration flask) เล็กการล้างแล้วทำการล้างขวดแก้วก้นโป่งด้วยน้ำจำนวนเล็กน้อย ประกอบเครื่องดูด (suction apparatus) และกรองสารละลายตัวอย่าง ล้างบีกเกอร์และแผ่นกระดาษกรอง 2 ครั้งด้วยน้ำจำนวนเล็กน้อย ดังรูปที่ 3.18 ถ่ายสารละลายที่ผ่านการกรองจากขวดแก้วก้นโป่งไปยังบีกเกอร์ขนาด 250 ml และล้างขวดแก้วก้นโป่งทันทีด้วยน้ำ บีกเกอร์อันแรกที่ใช้อาจนำมาใช้ได้ ทั้งสารละลายที่ผ่านการกรองไว้ที่อุณหภูมิห้อง ปริมาตรต้องไม่เกิน 175 ml



รูปที่ 3.18 การกรองสารละลายตัวอย่าง

5. สำหรับบีกเกอร์สารที่เย็นแล้ว เติมสารละลายมาตรฐาน 0.05 N NaCl จำนวน 2 ml ด้วย pipet วางบีกเกอร์บนเครื่องกวนแม่เหล็กและใส่ TFE-fluorocarbon-coated magnetic stirring bar ลงไป แช่ electrode ลงในสารละลายด้วยความระมัดระวังอย่าให้ stirring bar ไปชน electrode เริ่มการกวนช้าๆ วางปลายส่งของ 10-ml buret ที่เต็มไปด้วยสารละลายมาตรฐาน 0.05 N ซิลเวอร์ไนเตรท (silver nitrate) ลงในหรืออยู่เหนือสารละลาย

6. ทำการไตเตรทอย่างช้าๆ บันทึกค่าปริมาณสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท 0.05 N ที่ต้องใช้ในการทำให้ millivoltmeter อ่านค่า -60.0 mV ของจุดสมมูล (equivalence point) ที่คิดในน้ำ
7. ทำการไตเตรทเพิ่มทีละ 0.20 ml และบันทึกค่า buret ที่อ่านได้และค่า millivoltmeter ในคอลัมน์ที่ 1 และ 2 ของแบบฟอร์ม ให้เวลาเพียงพอที่การเติมแต่ละครั้งจะทำให้สารละลายเกิดสมมูลจากประสบการณ์พบว่า การอ่านค่าที่ยอมรับได้เมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงภายในช่วงเวลา 5 วินาที (โดยทั่วไปภายใน 2 นาที)
8. เมื่อจุดสมมูลเกิดขึ้น การเติมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรทจะทำให้เกิดการเปลี่ยนอย่างสูงขึ้นของค่า millivoltmeter ที่อ่านได้ เมื่อผ่านจุดสมมูลการเปลี่ยนแปลงต่อการเพิ่มสารละลายจะลดลงอีกครั้ง ทำการไตเตรทต่อไปจนกระทั่งทำการอ่านค่าที่ผ่านจุดสมมูลประมาณ (approximate equivalence point) ไป 3 ค่า
9. ทำการคำนวณความแตกต่างระหว่างค่า millivoltmeter ที่อ่านได้ติดต่อกันของการเติมสาร titrant จำนวนค่าที่แตกต่างกันของคอลัมน์ที่ 3 มาใส่ในคอลัมน์ที่ 4 จุดสมมูลของการไตเตรทจะอยู่ภายในช่วง ช่วง ΔmV ที่มากที่สุดที่บันทึกไว้ในคอลัมน์ที่ 3 ความถูกต้องของจุดสมมูลสามารถ interpolate จากข้อมูลที่บันทึกในคอลัมน์ที่ 4
10. คำนวณร้อยละของคลอไรด์ให้ใกล้สุด 0.001% ดังนี้

$$Cl, \% = 3.5453 \cdot \frac{(V \cdot N - 0.10)}{W} \quad (3.3)$$

โดยที่

V = milliliters ของสารละลาย 0.05 N $AgNO_3$ ที่ใช้สำหรับการไตเตรทตัวอย่าง

N = exact normality ของสารละลาย 0.05 N $AgNO_3$

0.10 = milliequivalent ของ NaCl ที่เติม (2.0 ml x 0.05 M)

W = weight of sample, g

4. การทดสอบหาปริมาณสารคลอไรด์อิสระในระบบของสารซีเมนต์

คลอไรด์ที่ละลายน้ำ (Water-soluble chloride) ในระบบของสารซีเมนต์ก็คือ คลอไรด์อิสระ (Free chloride) ในระบบของสารซีเมนต์นั้น ซึ่งมีวิธีการทดสอบหาปริมาณดังนี้ (ตามมาตรฐาน ASTM C 1218 และมาตรฐาน C 114)

1. นำสารซีเมนต์ที่บดเป็นผงและผ่านตะแกรงร่อนขนาดเบอร์ 20 (850 μm) มาจำนวนประมาณ 5 กรัม โดยชั่งละเอียดถึง 0.01 กรัม นำมาใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 ml
2. เติมน้ำ (reagent water meeting Specification D 1193) ลงไป 50 ml ปิดด้วยกระจก นำไปต้มให้เดือด 5 นาที ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง กรองด้วยแรงโน้มถ่วงหรือการดูดผ่านกระดาษเนื้อละเอียด (a

fine-texture, Type II, Class G filter paper of Specification E832) ถ่ายสารละลายที่ผ่านการกรอง (filtrate) ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 ml

3. เติมสารละลายกรดไนตริกที่ dilute ในอัตราส่วน 1:1 ลงไป 3 ml และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) 30% ลงไป 3 ml ลงในสารละลายที่ผ่านการกรอง ปิดบีกเกอร์ด้วยแผ่นกระจกแล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ถึง 2 นาที ให้ความร้อนอย่างรวดเร็วแก่บีกเกอร์ที่ปิดฝาจนเดือด อย่าให้เดือดนานเกิน 2 ถึง 3 นาที จากนั้นนำออกจากเครื่องต้ม (hot plate)

[ทำการทดสอบเหมือนวิธีการหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด ตั้งแต่ข้อ 4 เป็นต้นไป]

4. ล้างแผ่นกระดาษกรองเนื้อหยาบขนาด 9 cm ด้วยน้ำเพิ่มขึ้นครั้งละ 25 ml จำนวน 4 ครั้งโดยใช้การกรองดูด (suction filtering) ด้วยกรวย (Büchner funnel) ขนาด 250 หรือ 500 ml และขวดกรองแก้วก้นโป่ง (filtration flask) เลิกการล้างแล้วทำการล้างขวดแก้วก้นโป่งด้วยน้ำจำนวนเล็กน้อย ประกอบเครื่องดูด (suction apparatus) และกรองสารละลายตัวอย่าง ล้างบีกเกอร์และแผ่นกระดาษกรอง 2 ครั้งด้วยน้ำจำนวนเล็กน้อย ถ่ายสารละลายที่ผ่านการกรองจากขวดแก้วก้นโป่งไปยังบีกเกอร์ขนาด 250 ml และล้างขวดแก้วก้นโป่งทันทีด้วยน้ำ บีกเกอร์อันแรกที่ใช้อาจนำมาใช้ได้ ทั้งสารละลายที่ผ่านการกรองไว้ที่อุณหภูมิห้อง ปริมาตรต้องไม่เกิน 175 ml
5. สำหรับบีกเกอร์สารที่เย็นแล้ว เติมสารละลายมาตรฐาน 0.05 N NaCl จำนวน 2 ml ด้วย pipet วางบีกเกอร์บนเครื่องกวนแม่เหล็กและใส่ TFE-fluorocarbon-coated magnetic stirring bar ลงไป ใส่ electrode ลงในสารละลายด้วยความระมัดระวังอย่าให้ stirring bar ไปชน electrode เริ่มการกวนช้าๆ วางปลายส่งของ 10-ml buret ที่เต็มไปด้วยสารละลายมาตรฐาน 0.05 N ซิลเวอร์ไนเตรท (silver nitrate) ลงในหรืออยู่เหนือสารละลาย
6. ทำการไตเตรทอย่างช้าๆ บันทึกค่าปริมาณสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท 0.05 N ที่ต้องใช้ในการทำให้ millivoltmeter อ่านค่า -60.0 mV ของจุดสมมูล (equivalence point) ที่คิดในน้ำ
7. ทำการไตเตรทเพิ่มทีละ 0.20 ml และบันทึกค่า buret ที่อ่านได้และค่า millivoltmeter ในคอลัมน์ที่ 1 และ 2 ของแบบฟอร์ม ปล่อยให้เวลาเพียงพอที่การเติมแต่ละครั้งจะทำให้สารละลายเกิดสมมูล จากการประสพการณ์พบว่า การอ่านค่าที่ยอมรับได้เมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงภายในช่วงเวลา 5 วินาที (โดยทั่วไปภายใน 2 นาที)
8. เมื่อจุดสมมูลเกิดขึ้น การเติมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรทจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างสูงชันของค่า millivoltmeter ที่อ่านได้ เมื่อผ่านจุดสมมูลการเปลี่ยนแปลงต่อการเติมสารละลายจะลดลงอีกครั้ง ทำการไตเตรทต่อไปจนกระทั่งทำการอ่านค่าที่ผ่านจุดสมมูลประมาณ (approximate equivalence point) ไป 3 ค่า
9. ทำการคำนวณความแตกต่างระหว่างค่า millivoltmeter ที่อ่านได้ติดต่อกันของการเติมสาร titrant คำนวณค่าที่แตกต่างของคอลัมน์ที่ 3 มาใส่ในคอลัมน์ที่ 4 จุดสมมูลของการไตเตรทจะอยู่

ภายในช่วง Δ_{mv} ที่มากที่สุดที่บันทึกไว้ในคอลัมน์ที่ 3 ความถูกต้องของจุดสมมูลสามารถ interpolate จากข้อมูลที่บันทึกในคอลัมน์ที่ 4

10. คำนวณร้อยละของคลอไรด์ให้ใกล้สุด 0.001% ตามสมการที่ 3.3

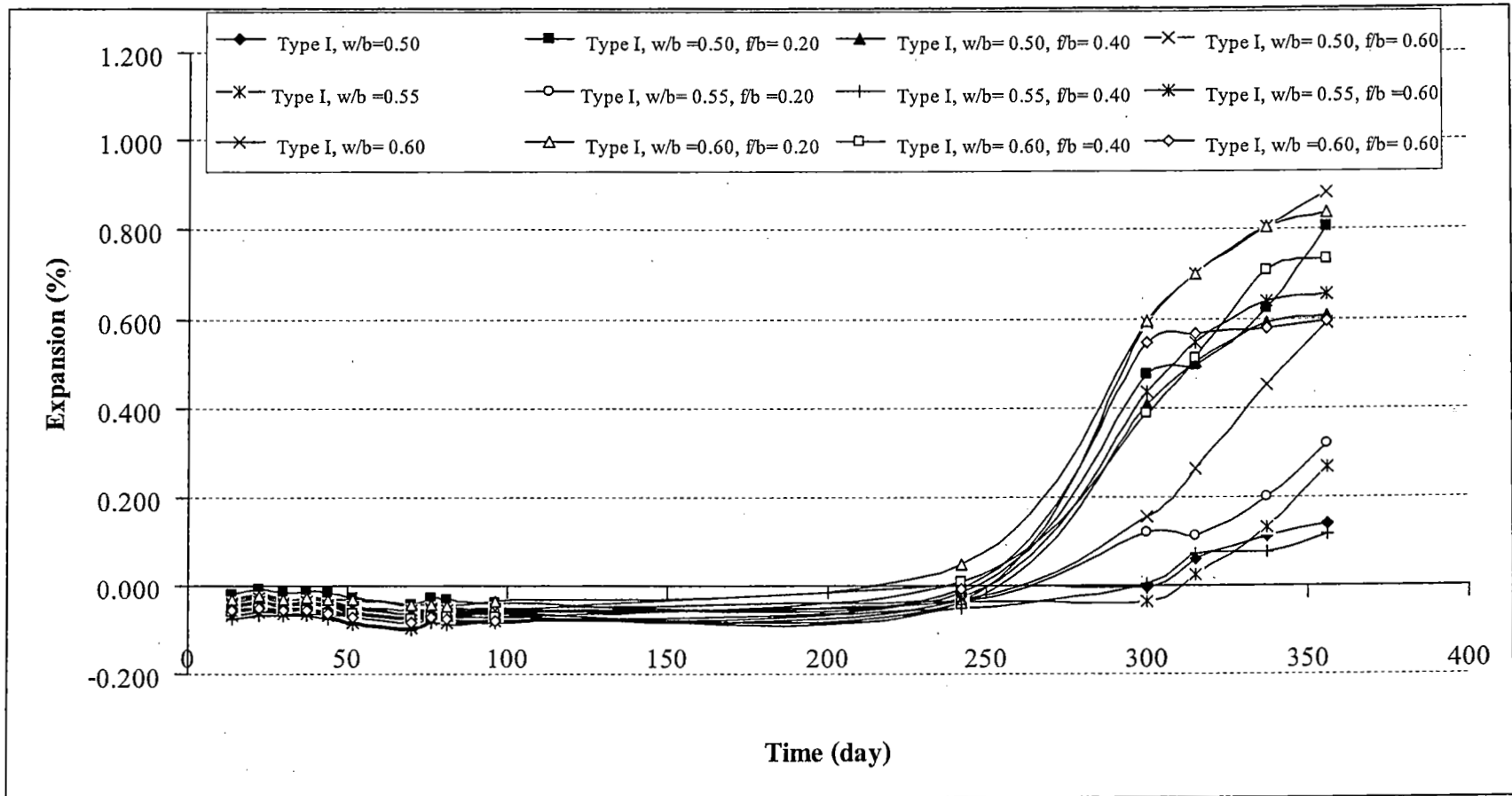
บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

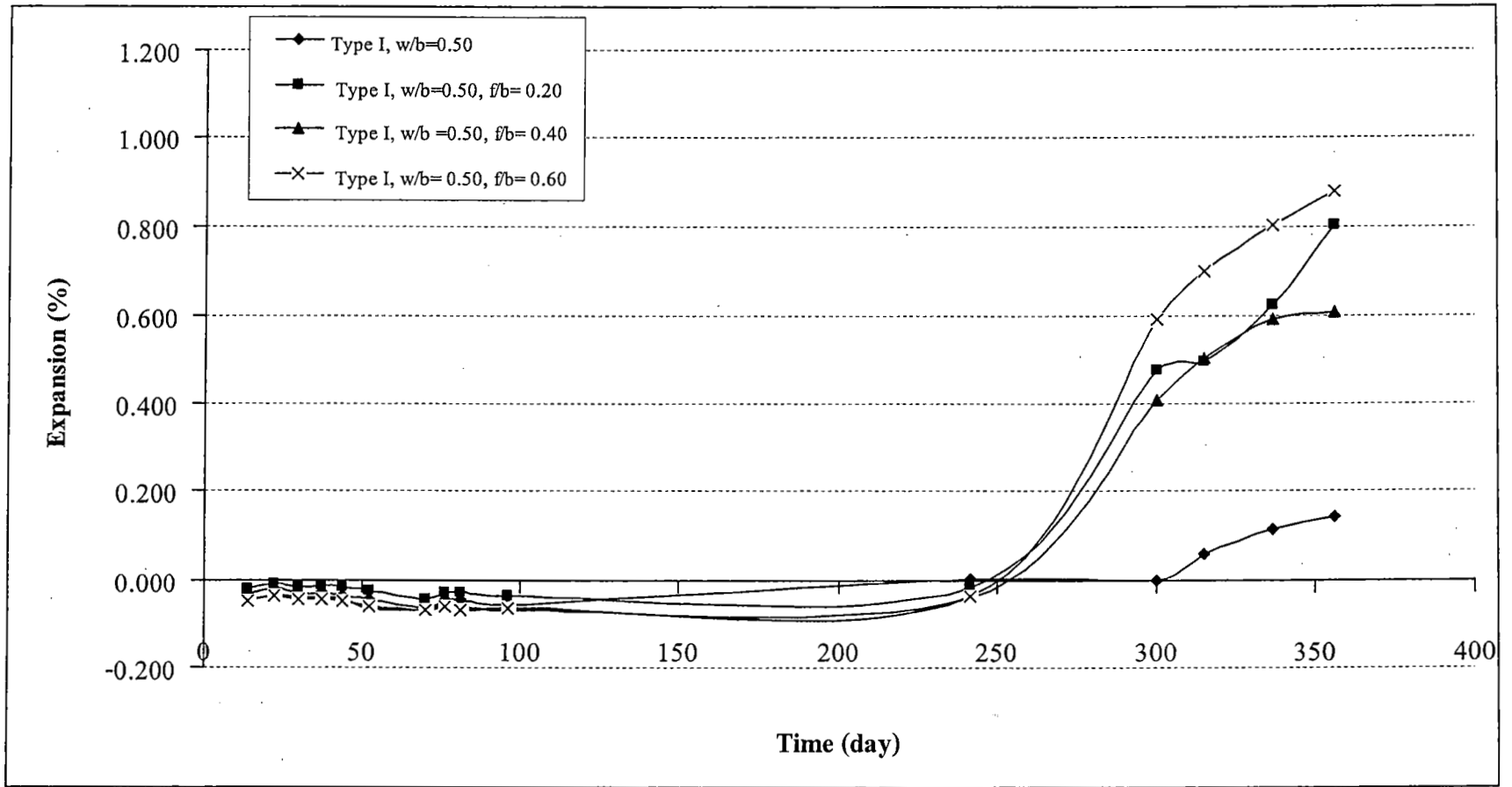
4.1 การขยายตัวของมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

ในการศึกษาได้ศึกษาการขยายตัวของมอร์ตาร์ทรงปริซึมที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เปรียบเทียบการขยายตัวของมอร์ตาร์ของที่ผสมด้วยเถ้าลอยอย่างเดียว ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 0.55 และ 0.60 และอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย 0.20 0.40 และ 0.60 และ ส่วนที่ 2 เปรียบเทียบการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารปอซโซลาน 3 ชนิด คือ เถ้าลอย เถ้าแกลบ และตะกรันเตาถลุงเหล็ก ซึ่งสามารถแสดงผลการทดลองเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการขยายตัวกับระยะเวลาที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตดังนี้

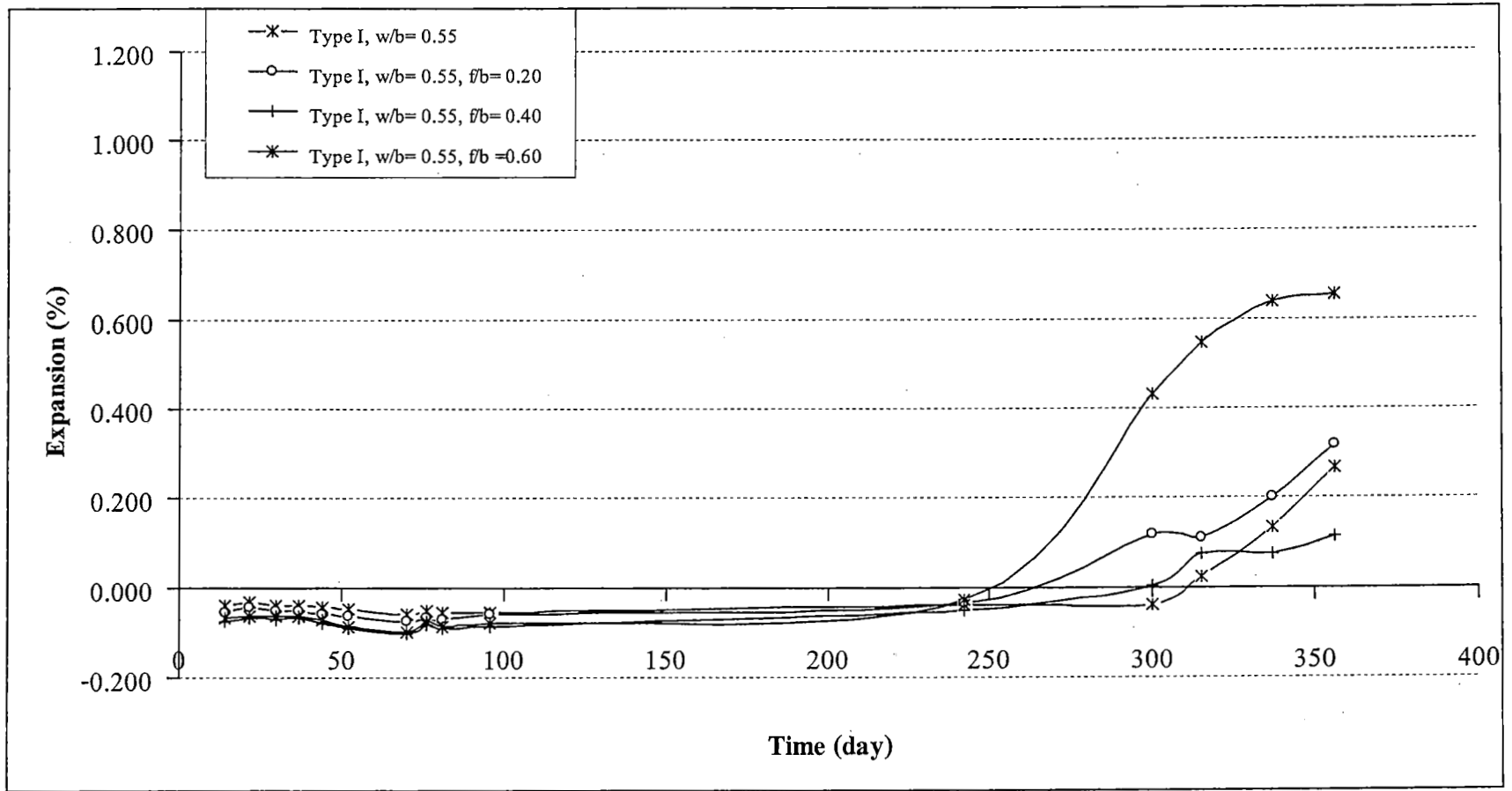
4.1.1 การขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย



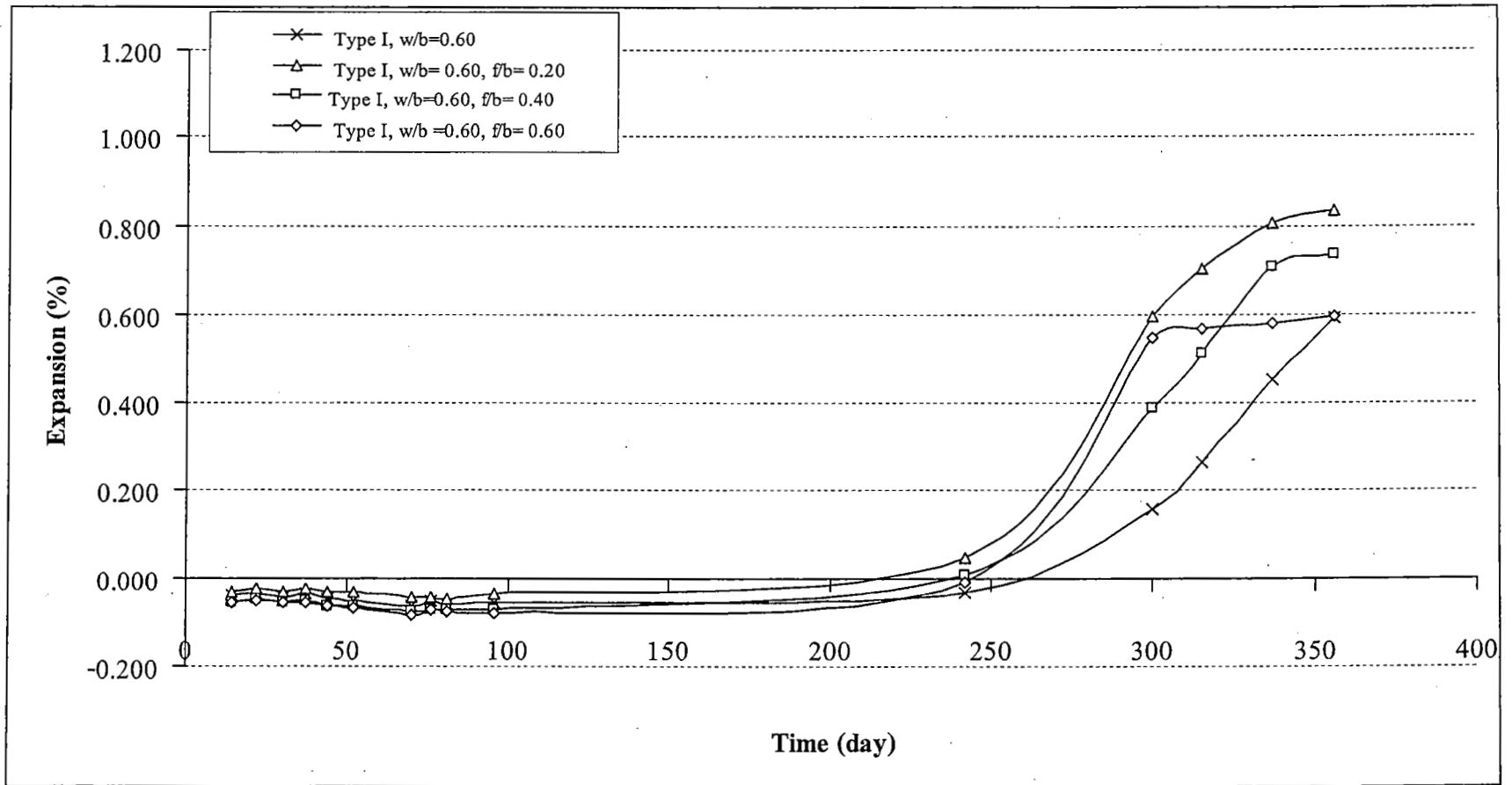
รูปที่ 4.1 ร้อยละการขยายตัวของมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50 0.55 และ 0.60 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย (f/b) 0.20 0.40 และ 0.60



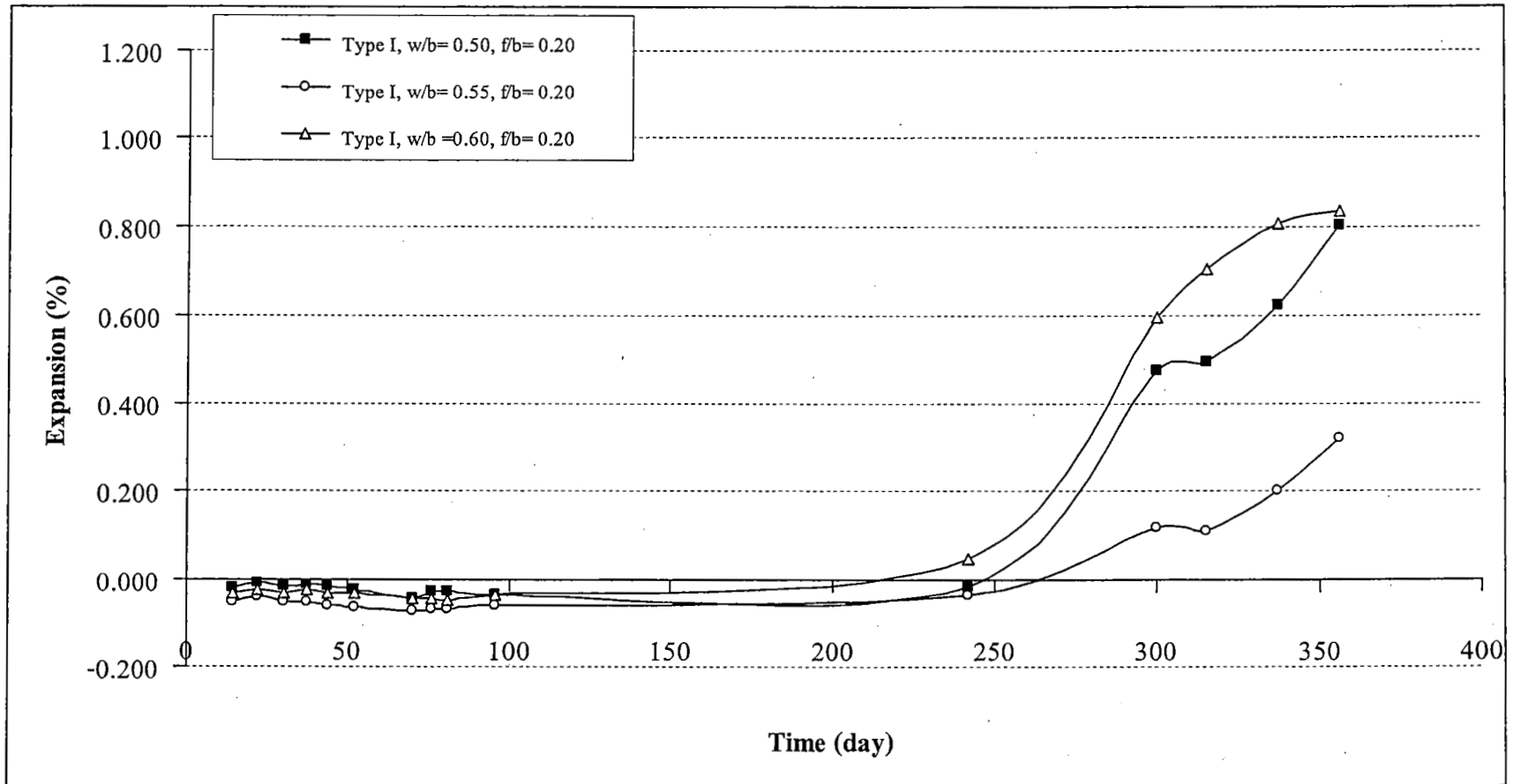
รูปที่ 4.2 ร้อยละการขยายตัวของมอร์ต้าร์ที่แชในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย (f/b) 0.20 0.40 และ 0.60



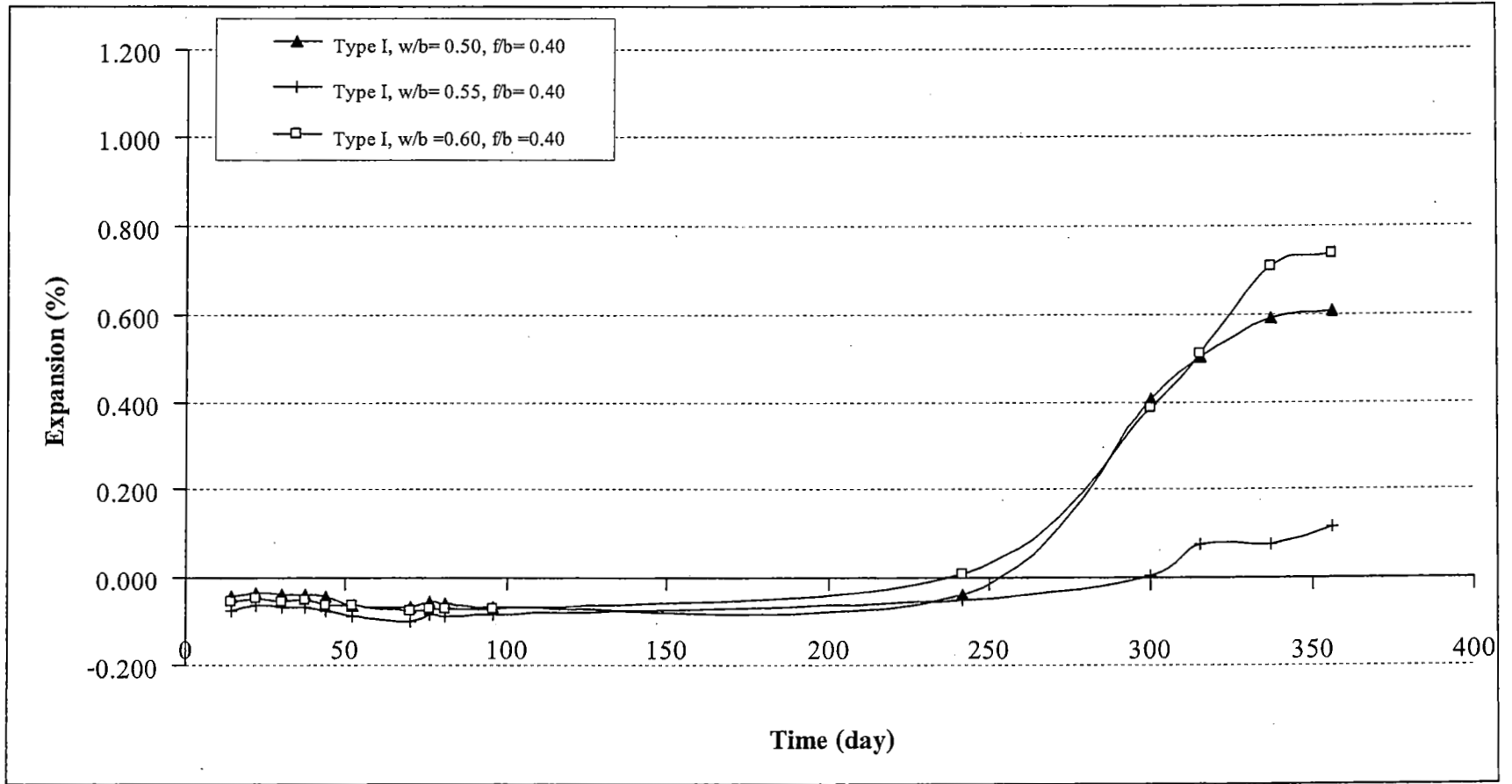
รูปที่ 4.3 ร้อยละการขยายตัวของมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.55 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย (f/b) 0.20 0.40 และ 0.60



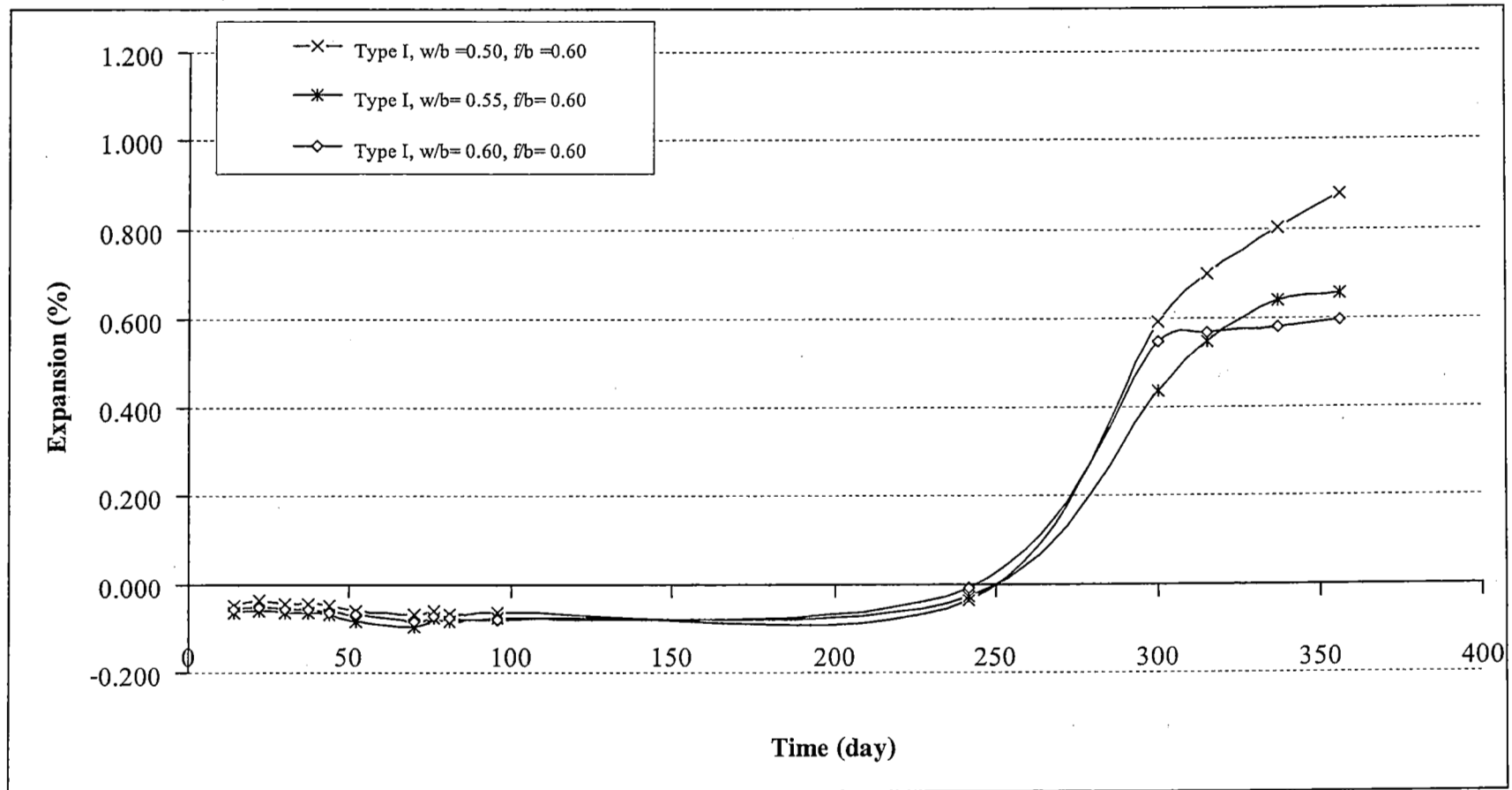
รูปที่ 4.4 ร้อยละการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.60 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย (f/b) 0.20 0.40 และ 0.600



รูปที่ 4.5 ร้อยละการขยายตัวของมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50 0.55 และ 0.60 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย (f/b) 0.20



รูปที่ 4.6 ร้อยละการขยายตัวของมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50 0.55 และ 0.60 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย (f/b) 0.40



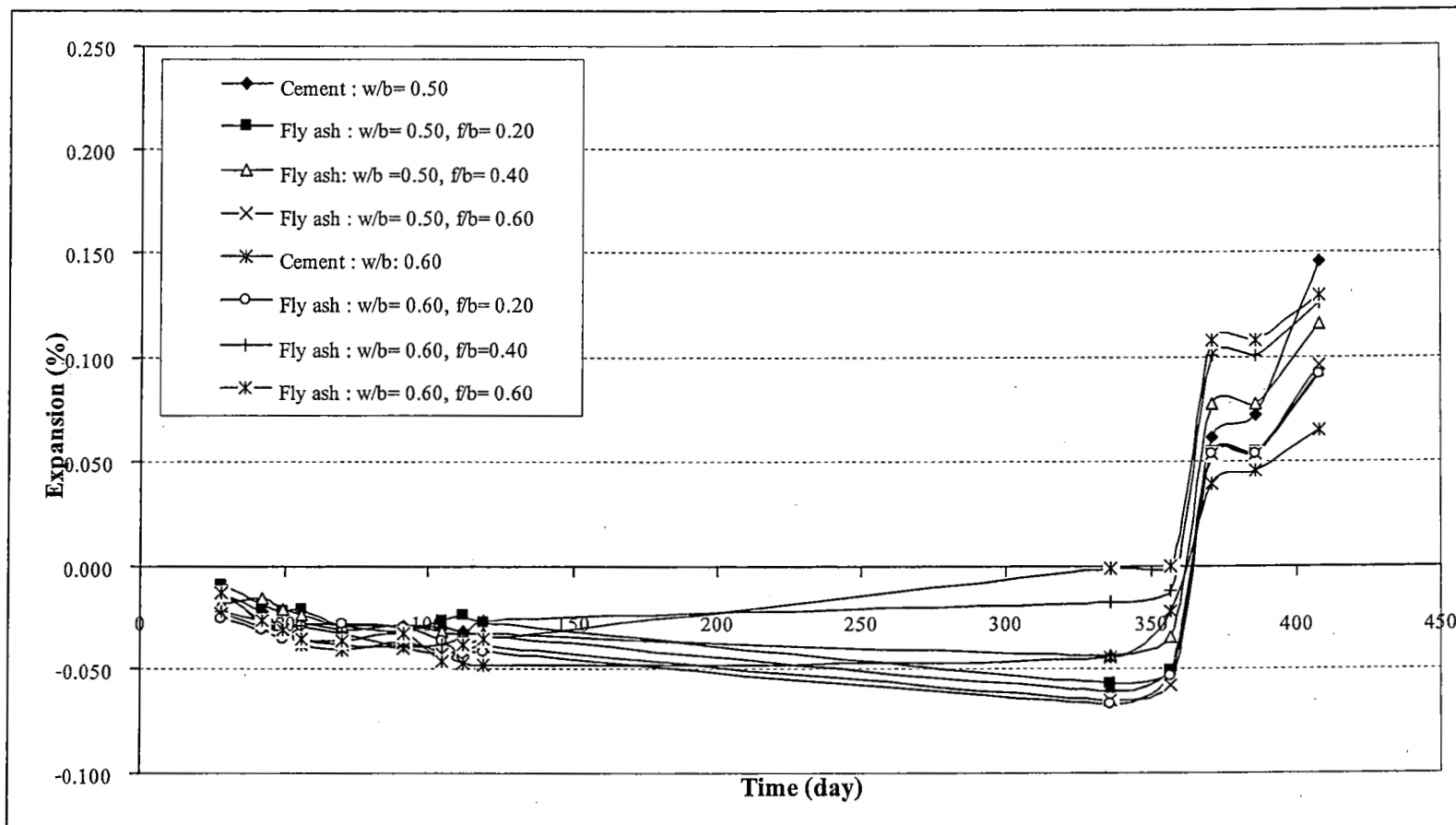
รูปที่ 4.7 ร้อยละการขยายตัวของมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50 0.55 และ 0.60 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย (f/b) 0.60

จากรูปที่ 4.5 กราฟแสดงตัวอย่างมอร์ตาร์ททรงปริซึมที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย ที่ใช้ในสารละลายโซเดียมซิลเฟต พบว่า ตัวอย่างที่มีการขยายตัวน้อยที่สุด คือ ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 การแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย 0.20 และตัวอย่างที่มีการขยายตัวมากที่สุด คือ ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 การแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย 0.20 จากกราฟนี้แสดงว่าถ้าใช้เถ้าลอย 0.20 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมคือ 0.55

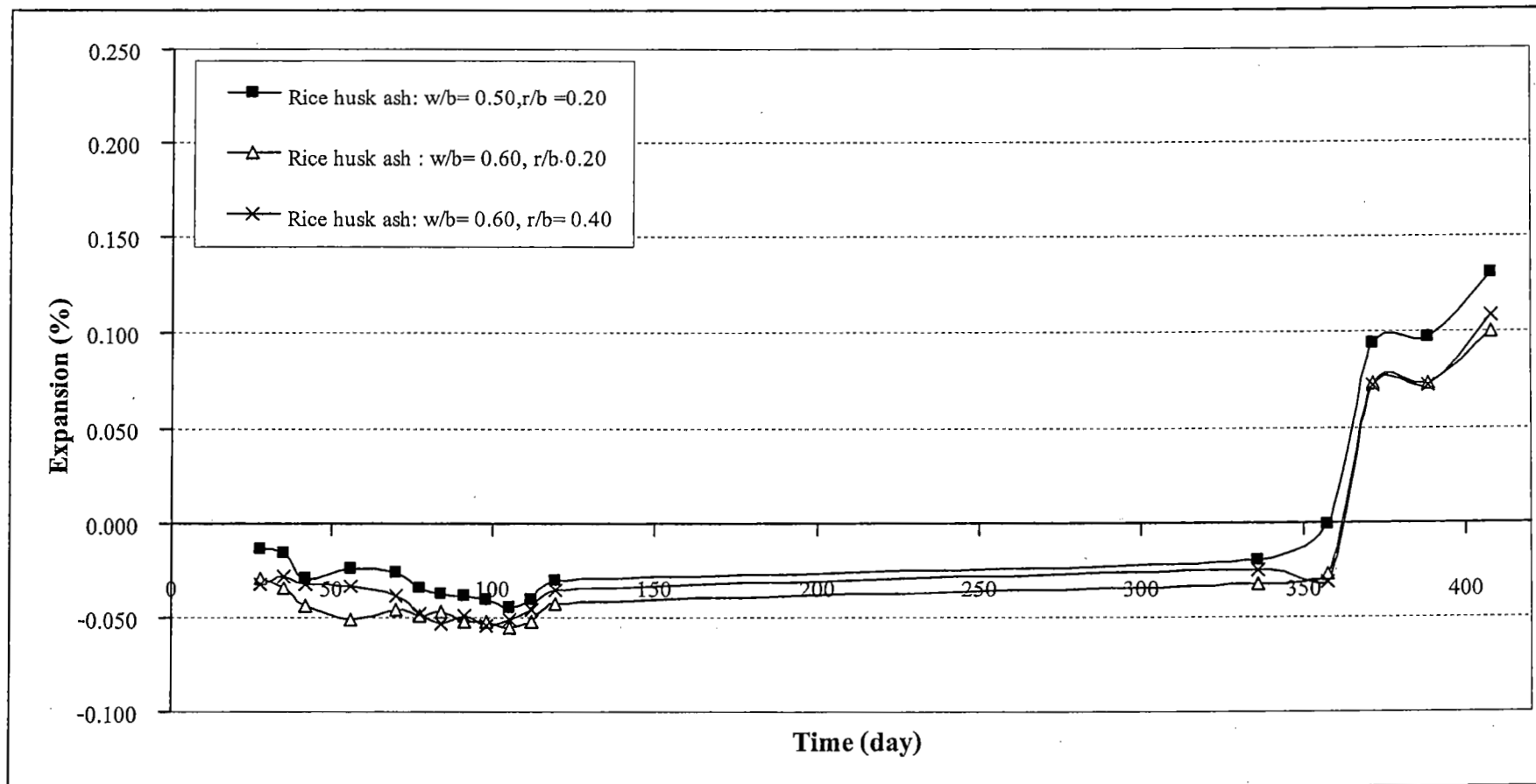
จากรูปที่ 4.6 กราฟแสดงตัวอย่างมอร์ตาร์ททรงปริซึมที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย ที่ใช้ในสารละลายโซเดียมซิลเฟต พบว่า ตัวอย่างที่มีการขยายตัวน้อยที่สุด คือ ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 การแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย 0.40 และตัวอย่างที่มีการขยายตัวมากที่สุด คือ ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 การแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย 0.40 จากกราฟนี้แสดงว่าถ้าใช้เถ้าลอย 0.40 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมคือ 0.55

จากรูปที่ 4.7 กราฟแสดงตัวอย่างมอร์ตาร์ททรงปริซึมที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย ที่ใช้ในสารละลายโซเดียมซิลเฟต พบว่าตัวอย่างที่มีการขยายตัวน้อยที่สุด คือ ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 การแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย 0.60 และตัวอย่างที่มีการขยายตัวมากที่สุด คือ ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 การแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย 0.60 จากกราฟนี้แสดงว่าถ้าใช้เถ้าลอย 0.60 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมคือ 0.60

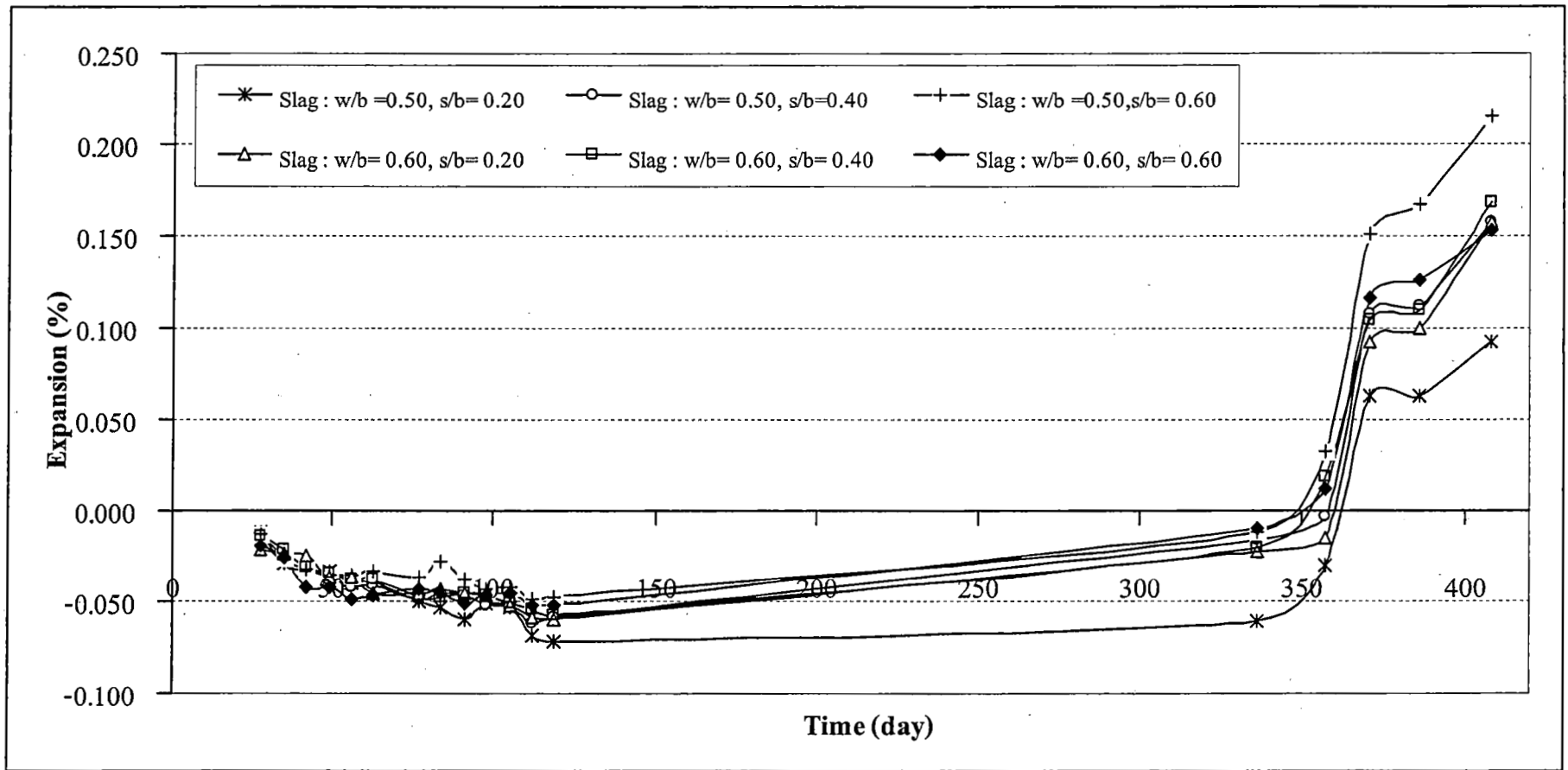
4. 1.2 การขยายตัวของมอร์ตาร์ทที่ผสมด้วยสารปอซโซลานชนิดต่างๆ



รูปที่ 4.8 ร้อยละการขยายตัวของมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50 และ 0.60 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย (f/b) 0.20 0.40 และ 0.60



รูปที่ 4.9 ร้อยละการขยายตัวของมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50 และ 0.60 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าแกลบ (r/b) 0.20 และ 0.40

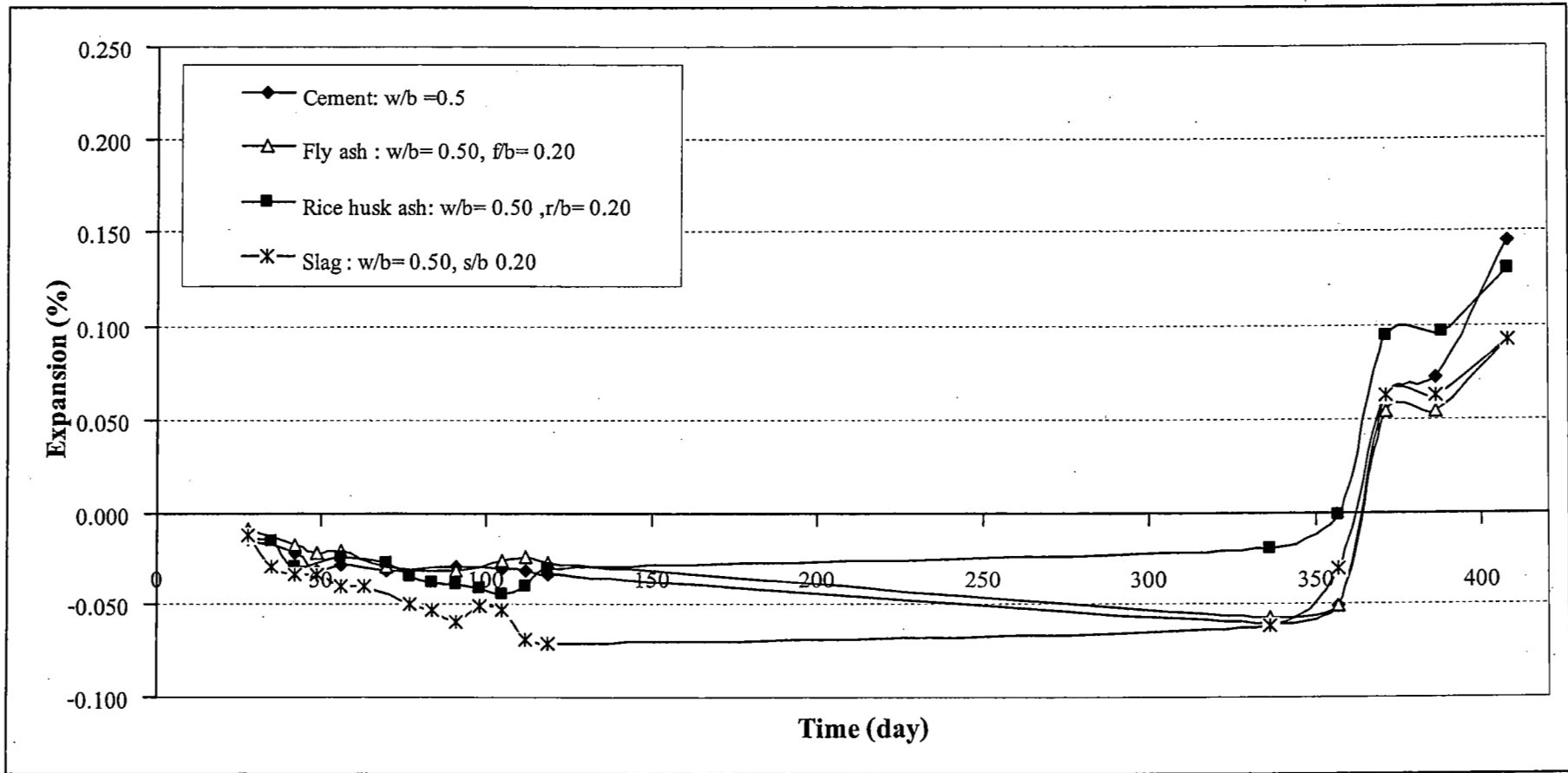


รูปที่ 4.10 ร้อยละการขยายตัวของมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50 และ 0.60 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็ก (s/b) 0.20 0.40 และ 0.60

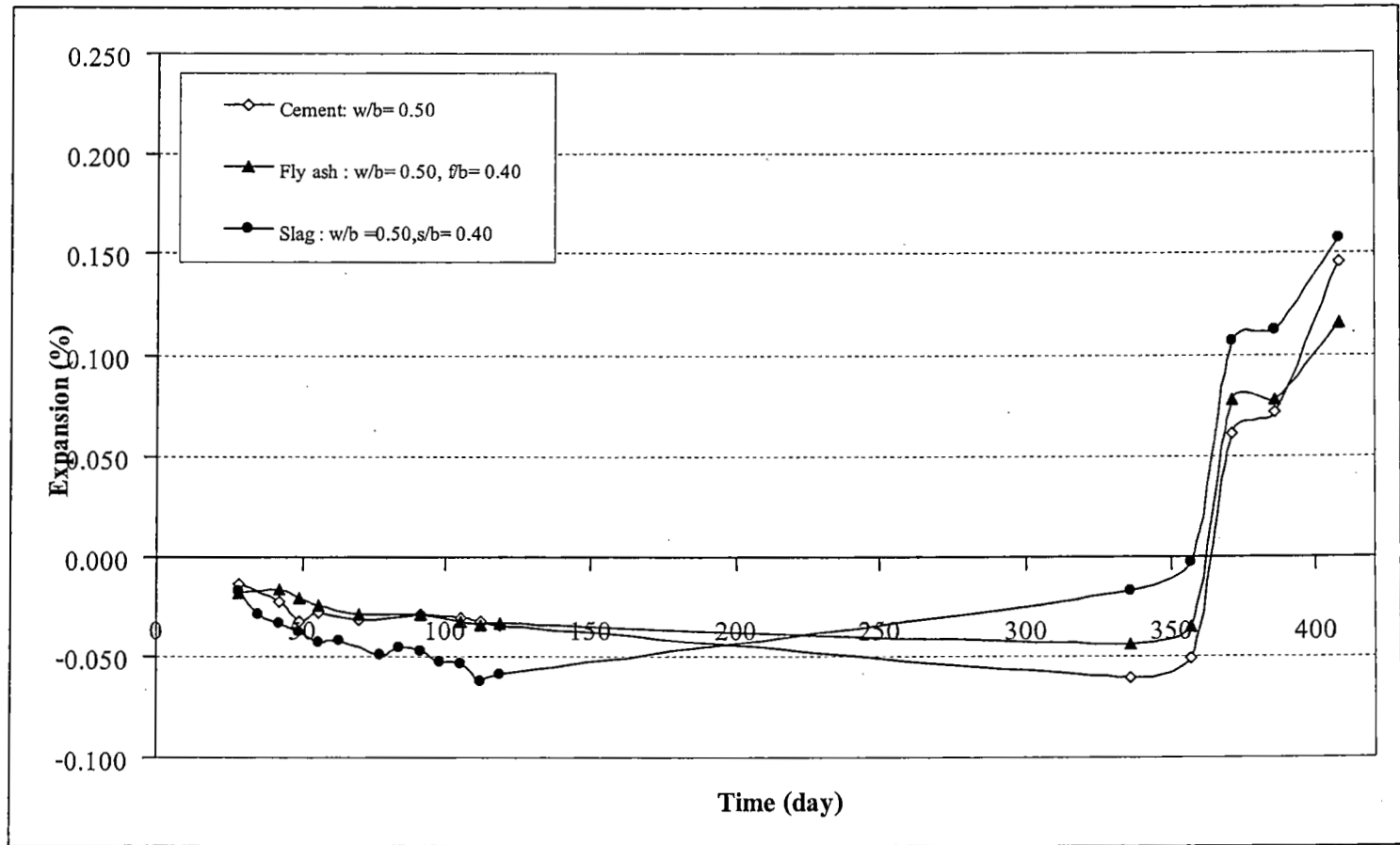
จากรูปที่ 4.8 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50 และ 0.60 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย (f/b) 0.20 0.40 และ 0.60 พบว่าในช่วงอายุต้นๆของแท่งมอร์ตาร์ในทุกอัตราส่วนมีค่าติดลบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามอร์ตาร์มีการหดตัว และหลังจากนั้นเมื่อมอร์ตาร์มีอายุมากขึ้นจะพบว่ามอร์ตาร์มีการขยายตัวขึ้นเรื่อยๆจนมีค่าเป็นบวก ซึ่งอัตราส่วนที่ทำให้แท่งมอร์ตาร์มีการขยายตัวน้อยที่สุดคืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 ไม่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย และอัตราส่วนที่ทำให้มอร์ตาร์มีการขยายตัวมากที่สุดคือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ไม่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย จากกราฟนี้แสดงว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 ไม่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยทนทานต่อสารละลายโซเดียมซัลเฟตมากที่สุด

จากรูปที่ 4.9 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50 และ 0.60 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าแกลบ (r/b) 0.20 และ 0.40 พบว่าในช่วงอายุต้นๆของแท่งมอร์ตาร์มีการหดตัว และหลังจากนั้นเมื่อมอร์ตาร์มีอายุมากขึ้นจะพบว่ามอร์ตาร์มีการขยายตัวขึ้นเรื่อยๆจนมีค่าเป็นบวก ซึ่งอัตราส่วนที่ทำให้แท่งมอร์ตาร์มีการขยายตัวน้อยที่สุดคือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าแกลบ 0.20 และอัตราส่วนที่ทำให้มอร์ตาร์มีการขยายตัวมากที่สุดคือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าแกลบ 0.20 จากกราฟนี้แสดงว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าแกลบ 0.20 ทนทานต่อสารละลายโซเดียมซัลเฟตมากที่สุด

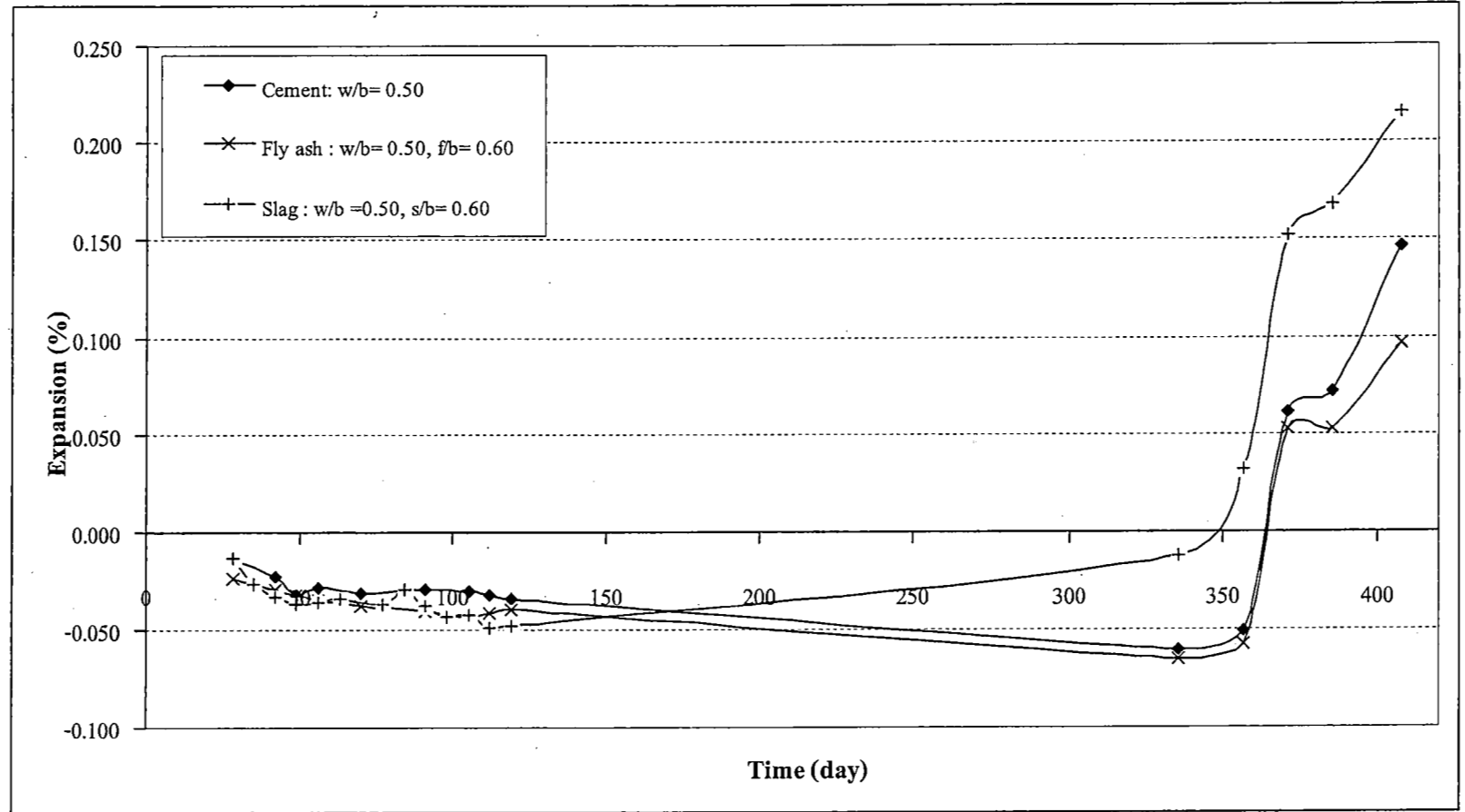
จากรูปที่ 4.10 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50 และ 0.60 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็ก (s/b) 0.20 , 0.40 และ 0.60 พบว่าในช่วงอายุต้นๆของแท่งมอร์ตาร์มีการหดตัว และหลังจากนั้นเมื่อมอร์ตาร์มีอายุมากขึ้นจะพบว่ามอร์ตาร์มีการขยายตัวขึ้นเรื่อยๆจนมีค่าเป็นบวก ซึ่งอัตราส่วนที่ทำให้แท่งมอร์ตาร์มีการขยายตัวน้อยที่สุดคือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็ก 0.20 และอัตราส่วนที่ทำให้มอร์ตาร์มีการขยายตัวมากที่สุดคือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าตะกรันเตาถลุงเหล็ก 0.60 จากกราฟนี้แสดงว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็ก 0.20 ทนทานต่อสารละลายโซเดียมซัลเฟตมากที่สุด



รูปที่ 4.11 ร้อยละการขยายตัวของมอร์ต้าร์ที่แฉะสารละลายโซเดียมซิลเฟต ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารปอซโซลาน (p/b) 0 และ 0.20



รูปที่ 4.12 ร้อยละการขยายตัวของมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารปอซโซลาน (p/b) 0 และ 0.40



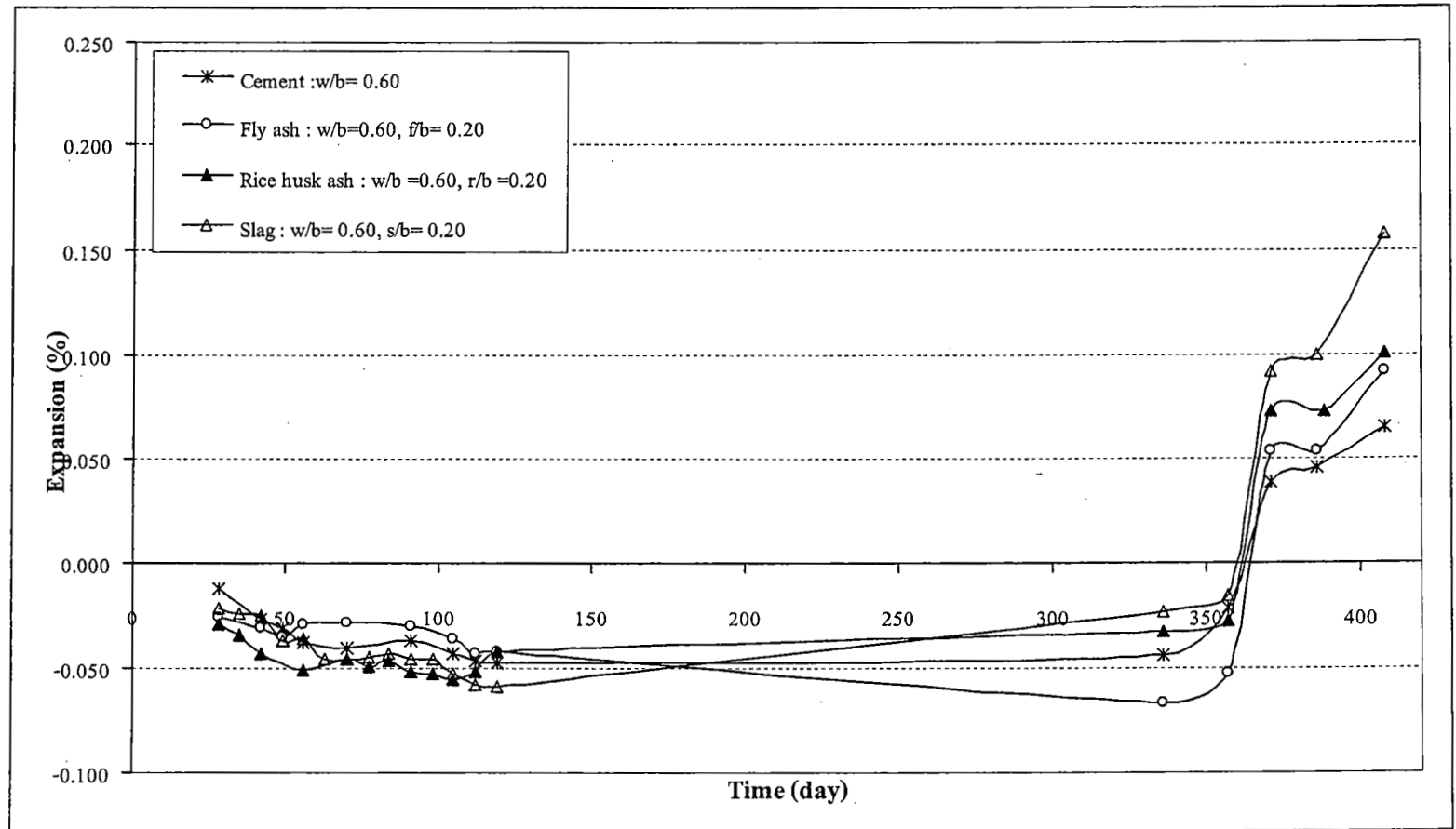
รูปที่ 4.13 ร้อยละการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารปอซโซลาน (p/b) 0 และ 0.60

จากรูปที่ 4.11 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารปอซโซลาน 0 และ 0.20 พบว่าตัวอย่างที่มีการขยายตัวน้อยที่สุดคืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย 0.20 และตัวอย่างที่มีการขยายตัวมากที่สุดคือ ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ไม่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารปอซโซลาน แสดงว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย 0.20 ทนทานต่อสารละลายโซเดียมซัลเฟตมากที่สุด

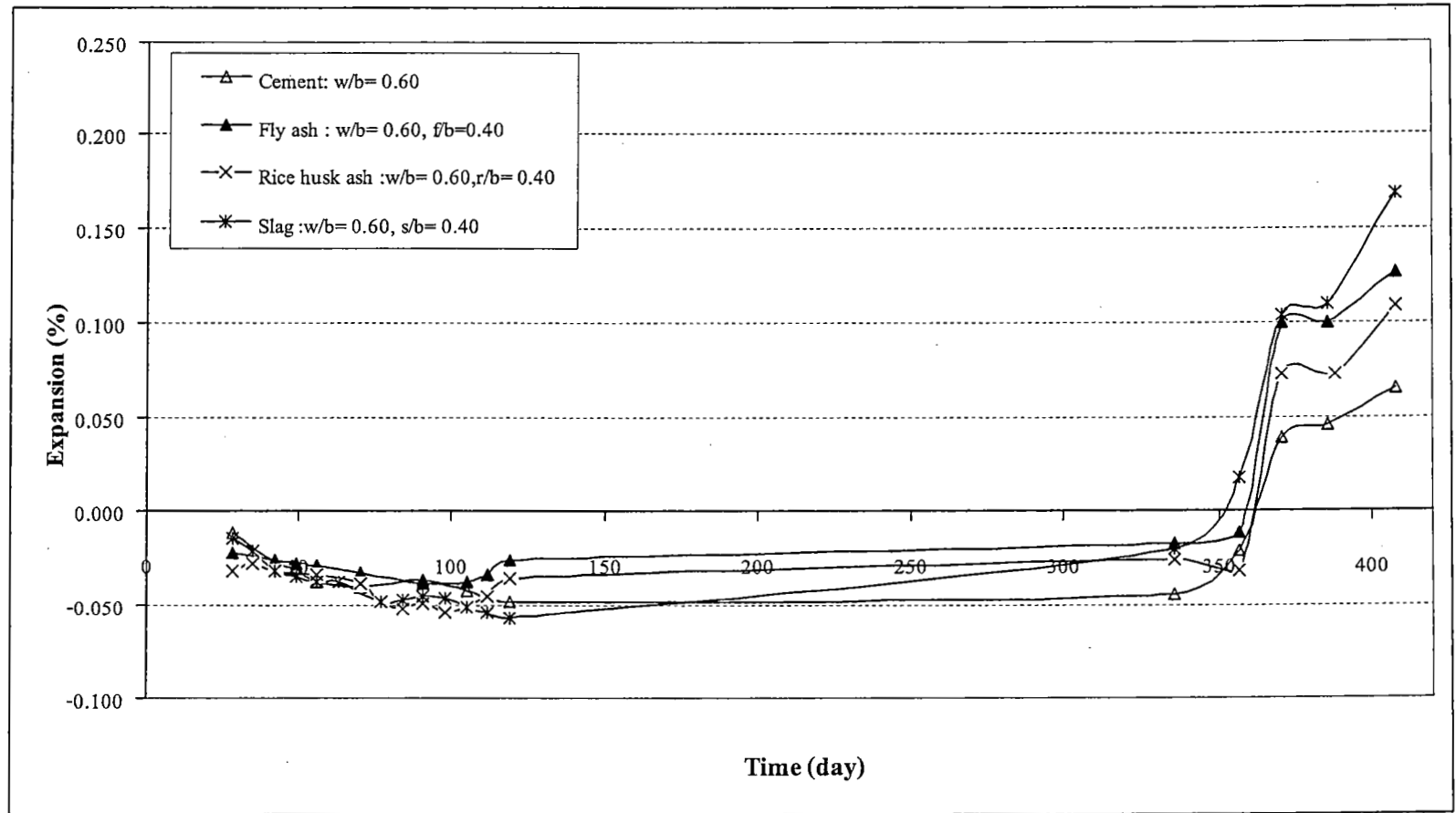
จากรูปที่ 4.12 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารปอซโซลาน 0 และ 0.40 พบว่าตัวอย่างที่มีการขยายตัวน้อยที่สุดคืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย 0.40 และตัวอย่างที่มีการขยายตัวมากที่สุดคือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็ก 0.40 แสดงว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วย เถ้าลอย 0.50 ทนทานต่อสารละลายโซเดียมซัลเฟตมากที่สุด

จากรูปที่ 4.13 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของมอร์ตาร์ที่แช่สารละลายโซเดียมซัลเฟตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารปอซโซลาน 0 และ 0.60 พบว่าตัวอย่างที่มีการขยายตัวน้อยที่สุดคืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย 0.60 และตัวอย่างที่มีการขยายตัวมากที่สุดคือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็ก 0.60 แสดงว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย 0.60ทนทานต่อสารละลายโซเดียมซัลเฟตมากที่สุด

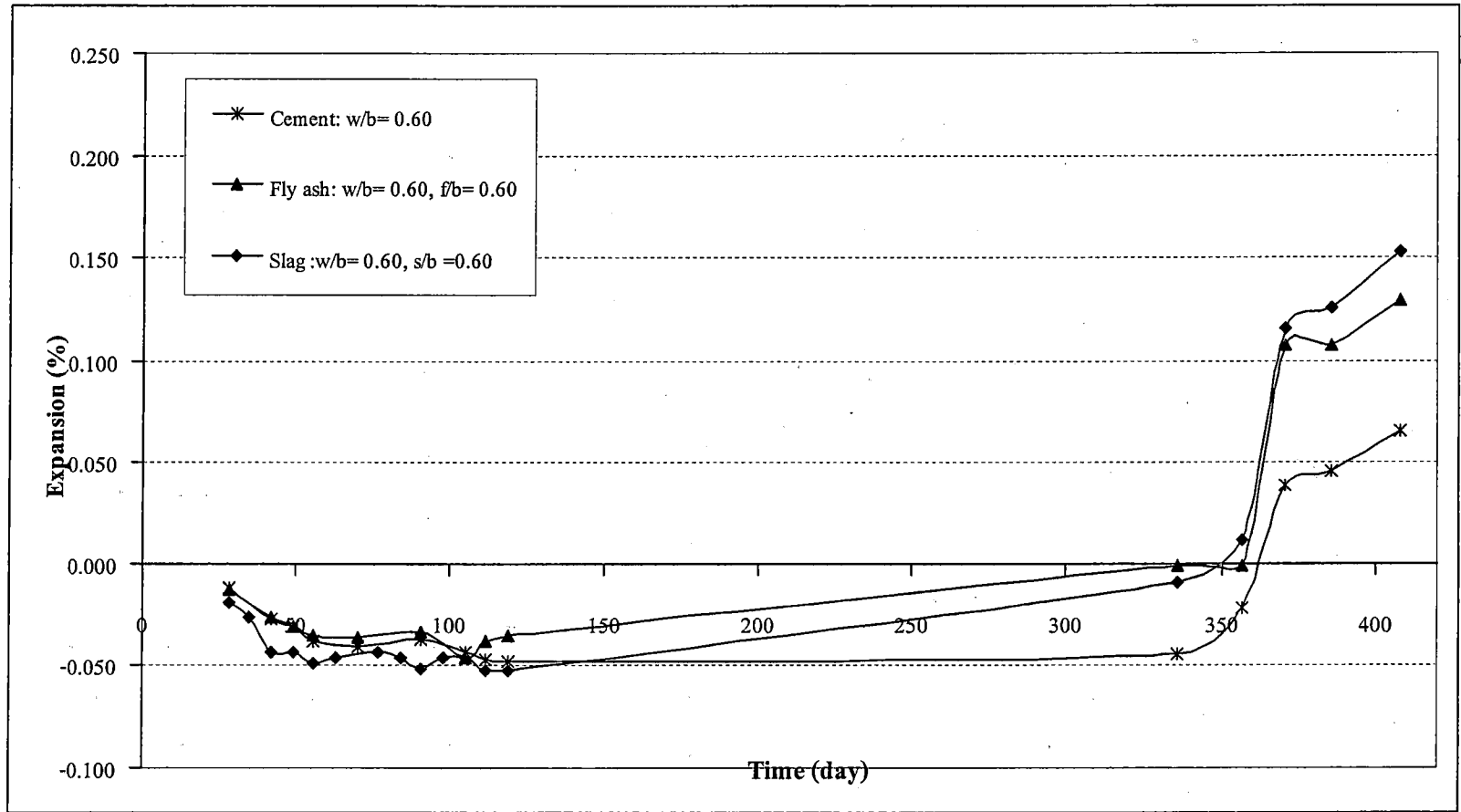
และเมื่อเปรียบเทียบกราฟทั้งสามจะเห็นได้ว่า ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็ก 0.20 ทนทานต่อสารละลายโซเดียมซัลเฟตมากที่สุด เพราะมอร์ตาร์เกิดการขยายตัวน้อยที่สุดตามระยะเวลาที่ได้ทำการทดลอง



รูปที่ 4.14 ร้อยละการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.60 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารปอซโซลาน (p/b) 0 และ 0.20



รูปที่ 4.15 ร้อยละการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.60 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารปอซโซลาน (p/b) 0 และ 0.40

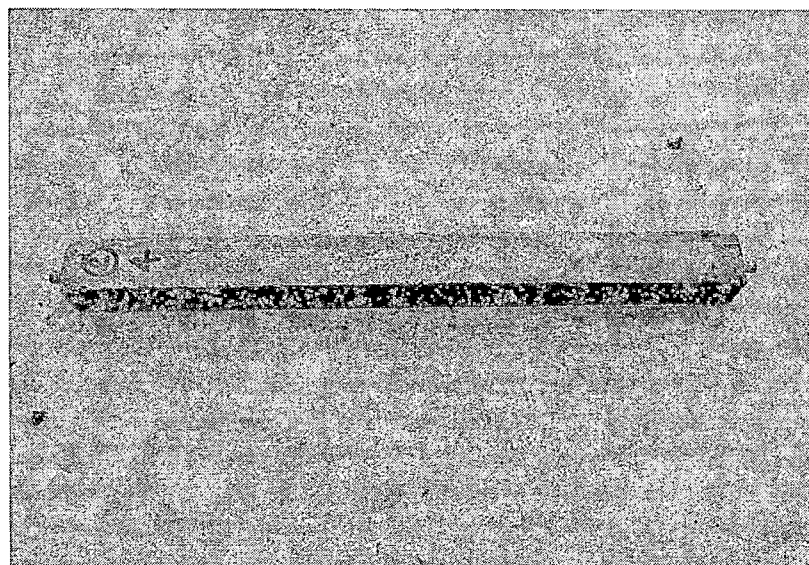


รูปที่ 4.16 ร้อยละการขยายตัวของมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.60 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารปอซโซลาน (p/b) 0 และ 0.60

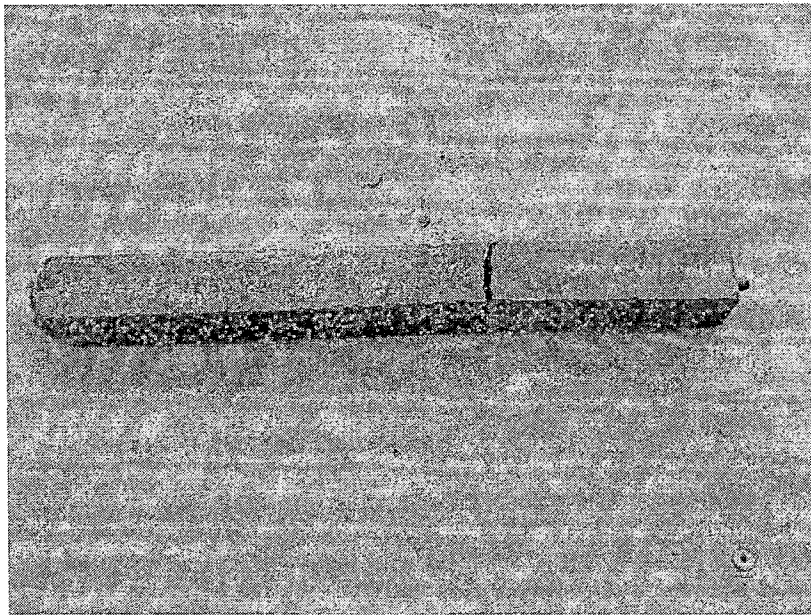
จากรูปที่ 4.14 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของมอร์ตาร์ดที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารปอซโซลาน 0 และ 0.20 พบว่าตัวอย่างที่มีการขยายตัวน้อยที่สุดคือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยสารปอซโซลานใดๆ และตัวอย่างที่มีการขยายตัวมากที่สุดคืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 แทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็ก 0.20 แสดงว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 มอร์ตาร์ดที่ไม่มีการแทนที่ด้วยสารปอซโซลาน มีความคงทนต่อสารละลายโซเดียมซัลเฟตมากที่สุด

จากรูปที่ 4.15 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของมอร์ตาร์ดที่แช่สารละลายโซเดียมซัลเฟตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารปอซโซลาน 0 และ 0.40 พบว่าตัวอย่างที่มีการขยายตัวน้อยที่สุดคือ ตัวอย่างของปูนซีเมนต์ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยสารปอซโซลานใดๆ และตัวอย่างที่มีการขยายตัวมากที่สุดคือ การแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็ก 0.40 แสดงว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 มอร์ตาร์ดที่ไม่มีการแทนที่ด้วยสารปอซโซลาน มีความคงทนต่อสารละลายโซเดียมซัลเฟตมากที่สุด

จากรูปที่ 4.16 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของมอร์ตาร์ดที่แช่สารละลายโซเดียมซัลเฟตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารปอซโซลาน 0 และ 0.60 พบว่าตัวอย่างที่มีการขยายตัวน้อยที่สุดคือ ตัวอย่างของปูนซีเมนต์ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยสารปอซโซลานใดๆ และตัวอย่างที่มีการขยายตัวมากที่สุดคือ การแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็ก 0.60 แสดงว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 มอร์ตาร์ดที่ไม่มีการแทนที่ด้วยสารปอซโซลาน มีความคงทนต่อสารละลายโซเดียมซัลเฟตมากที่สุด



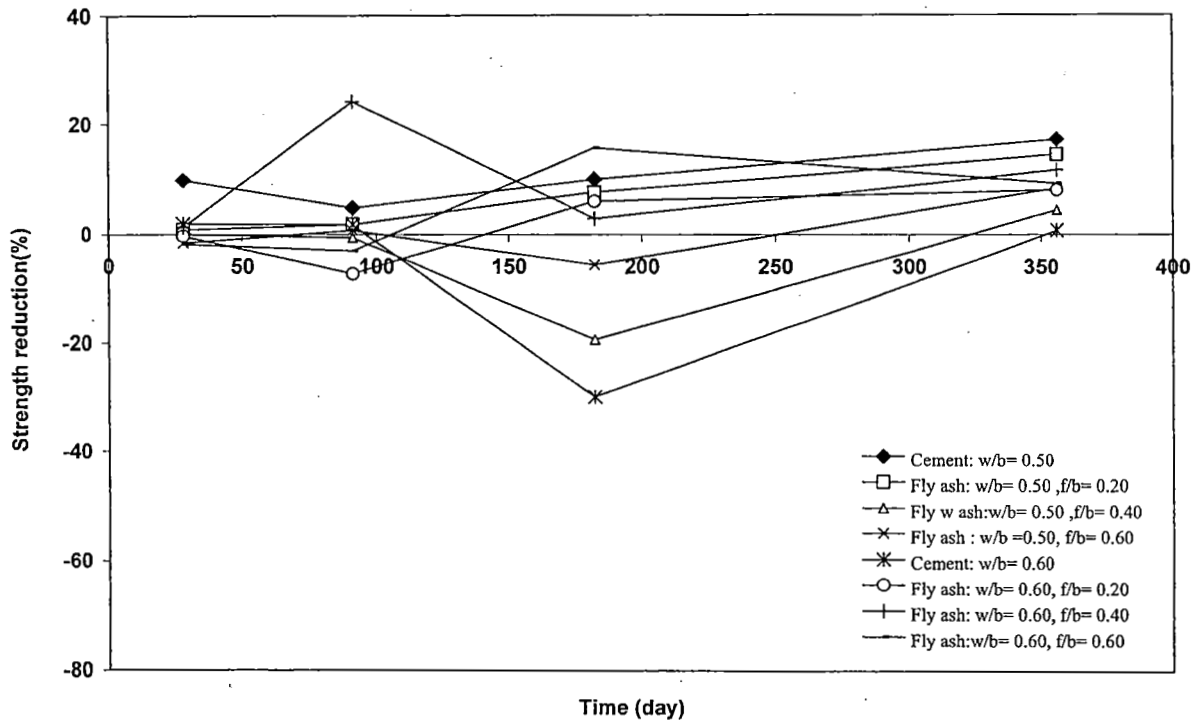
รูปที่ 4.17 ตัวอย่างมอร์ตาร์ดที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต



รูปที่ 4.18 ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่เซในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่มีการขยายตัวมากจนหัก

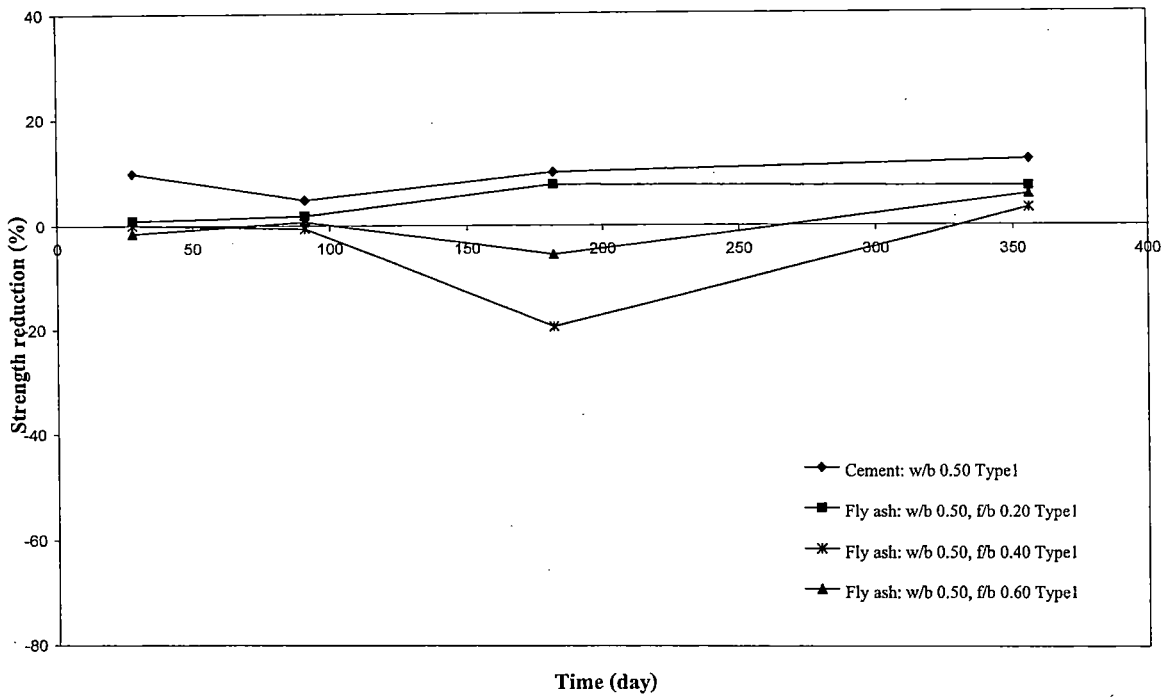
4.2 การลดลงของกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ที่แชในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

จากการทดลองใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50 และ 0.60 ใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารปอซโซลาน (p/b) 0 0.20 0.40 และ 0.60 ได้ทำการหล่อก้อนตัวอย่างมอร์ต้าร์ แล้วนำไปแชในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่มีความเข้มข้น 6.7% ได้ทำการทดลองที่อายุการแช 356 วัน โดยผลการทดลองได้นำมาจัดแสดงเป็นกราฟ เพื่อสะดวกต่อการพิจารณาดังต่อไปนี้

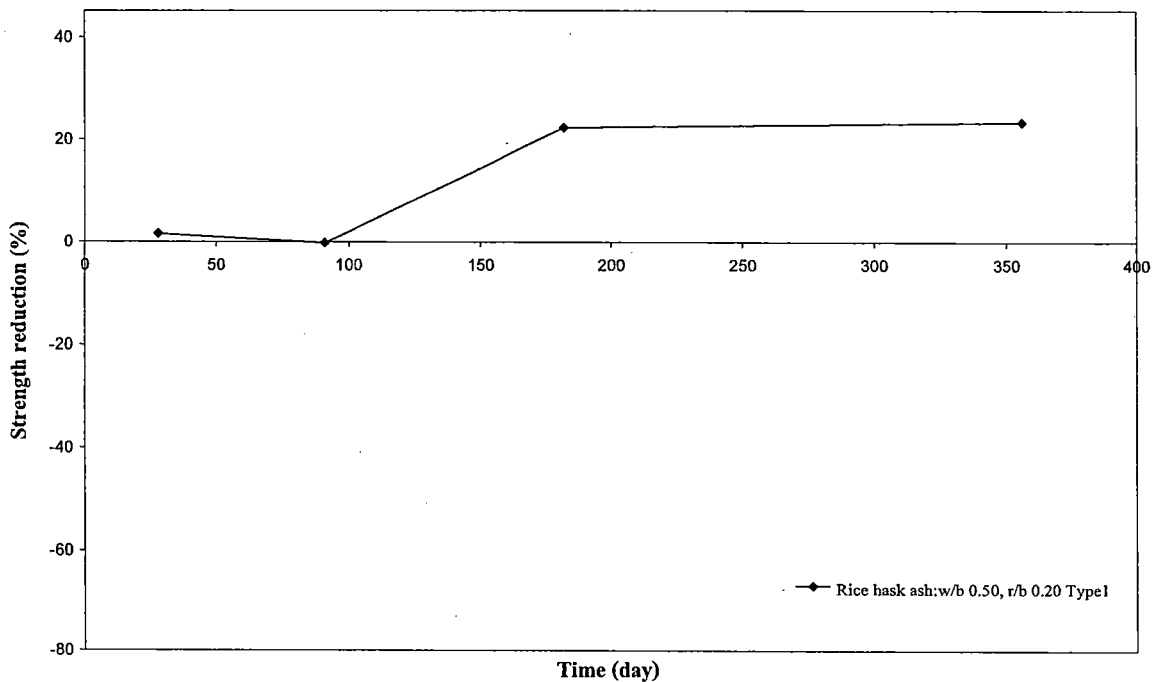


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย ที่แชในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน(w/b) 0.50 และ 0.60 ใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย (f/b) 0 0.20 0.40 และ 0.60 และจำนวนวันที่ทดสอบตัวอย่างที่อายุต่างๆ

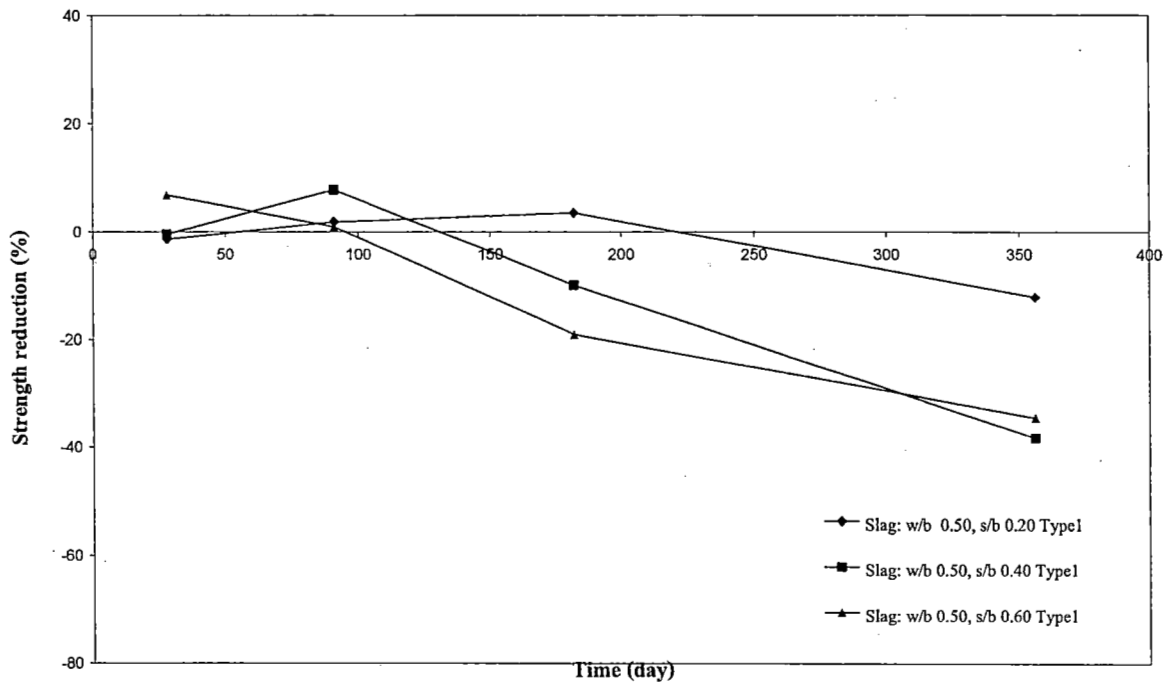
จากรูปที่ 4.19 เป็นการเปรียบเทียบการสูญเสียกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย ที่แชในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 ใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย 0 0.20 0.40 และ 0.60 และจำนวนวันที่ทดสอบตัวอย่างที่อายุต่างๆ ผลที่ได้คือ เมื่อจำนวนวันเพิ่มมากขึ้นค่าการสูญเสียกำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงในช่วงแรก ยกเว้น อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย 0.40 แต่หลังจากผ่านไปได้ช่วงหนึ่งก็มีค่าลดลงดังเช่นตัวอย่างอื่นๆ สุดท้ายเมื่อระยะเวลาผ่านไปในทุกๆตัวอย่างก็มีการสูญเสียกำลังรับแรงอัดในทิศทางที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน(w/b) 0.50 ใช้สัดส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย (f/b) 0.20 0.40 และ 0.60 และจำนวนวันที่ทดสอบตัวอย่างที่อายุต่างๆ

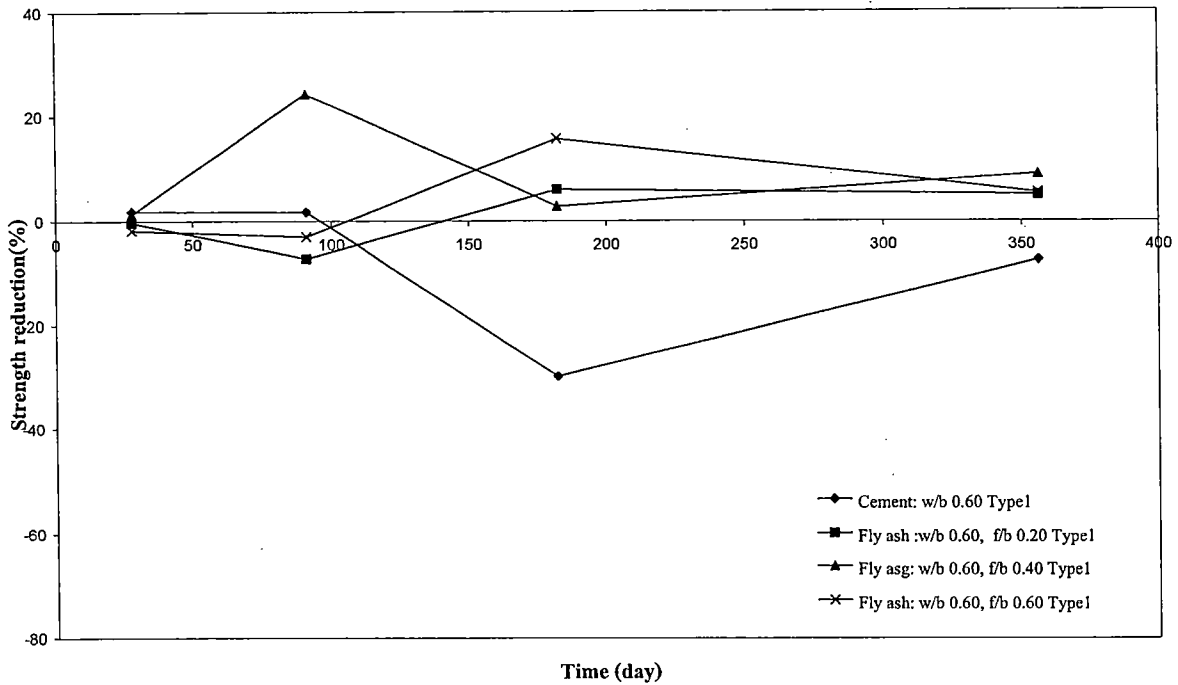


รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าแกลบที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน(w/b) 0.50 ใช้สัดส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าแกลบ (r/b) 0.20 และจำนวนวันที่ทดสอบตัวอย่างที่อายุต่างๆ

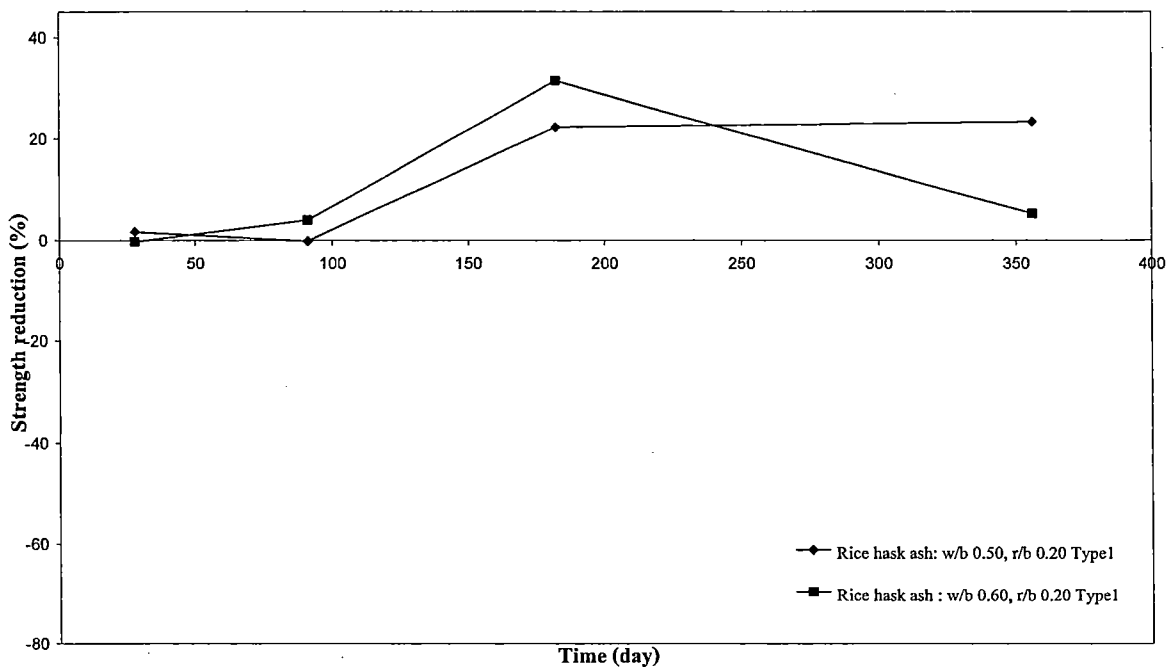


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน(w/b) 0.50 ใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็ก 0.20 0.40 และ 0.6 และจำนวนวันที่ทดสอบตัวอย่างที่อายุต่างๆ

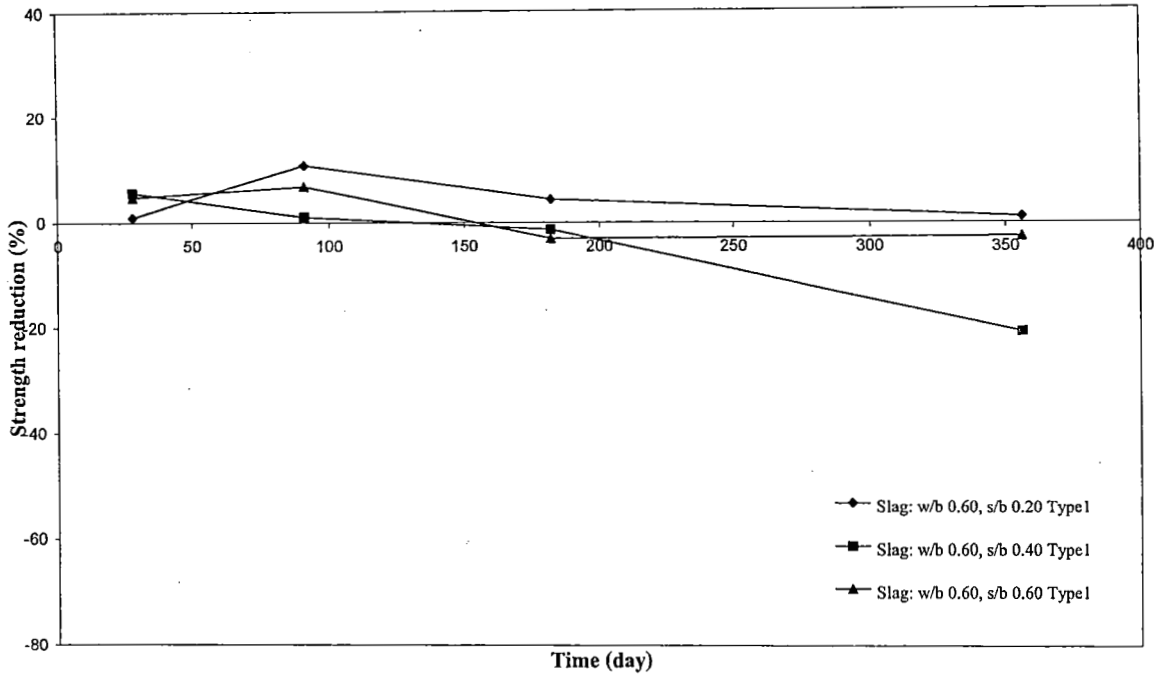
จากรูปที่ 4.20 – 4.22 เป็นการเปรียบเทียบการสูญเสียกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยสารปอซโซลานชนิดต่างๆ ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารปอซโซลาน 0 0.20 0.40 และ 0.60 และจำนวนวันที่ทดสอบตัวอย่างที่อายุต่างๆ ผลที่ได้คือ มอร์ต้าร์ที่ไม่มีที่การแทนที่ด้วยวัสดุประสานเมื่อเวลาผ่านไปค่าการสูญเสียกำลังรับแรงอัดมีการลดลงหลังจากนั้นก็เพิ่มขึ้นจนท้ายที่สุดมีค่าสูงกว่าตอนแรกเล็กน้อย อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน 0.20 ตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็กมีค่าการสูญเสียกำลังที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเวลาผ่านไปได้ช่วงหนึ่งตะกรันเตาถลุงเหล็กมีค่าการสูญเสียกำลังที่ลดลง ส่วนตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้ากลบในช่วงต้นจะมีการสูญเสียกำลังที่ลดลงแต่หลังจากนั้นมีการปรับสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน 0.40 ตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็กต่างกันในช่วงหลังตรงที่ค่าการสูญเสียกำลังของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยมีค่าสูงขึ้นแต่ตะกรันเตาถลุงเหล็กมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน 0.60 ตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยจะมีแนวโน้มที่มีค่าสูงขึ้นส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กมีค่าลดลงต่อเนื่องอย่างเห็นได้ชัดเจน แสดงว่า ตะกรันเตาถลุงเหล็กเหมาะสมในการใช้แทนที่วัสดุประสานบางส่วน



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียกำลังของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.60 ใช้ อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย (f/b) 0 0.20 0.40 และ 0.60



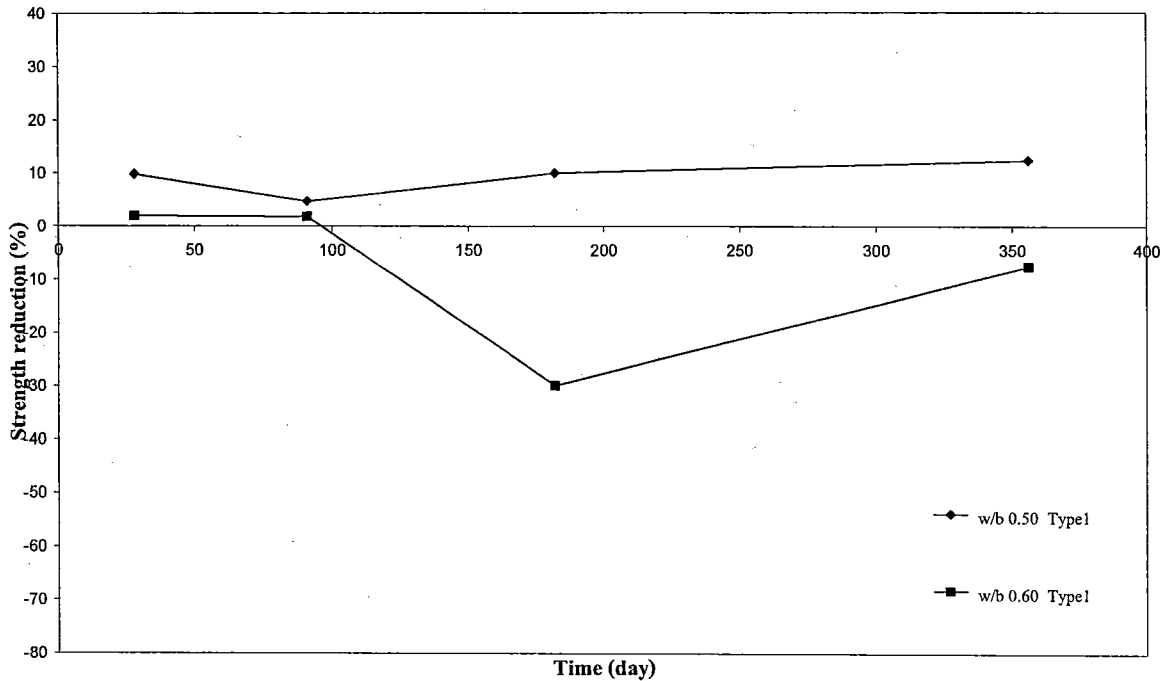
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าแกลบที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน(w/b) 0.60 ใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าแกลบ (r/b) 0.20และ 0.40



รูปที่4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียกำลังของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ แช่วในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.60 ใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็ก (s/b) 0.20 0.40 และ 0.60 และจำนวนวันที่ทดสอบตัวอย่างที่อายุต่างๆ

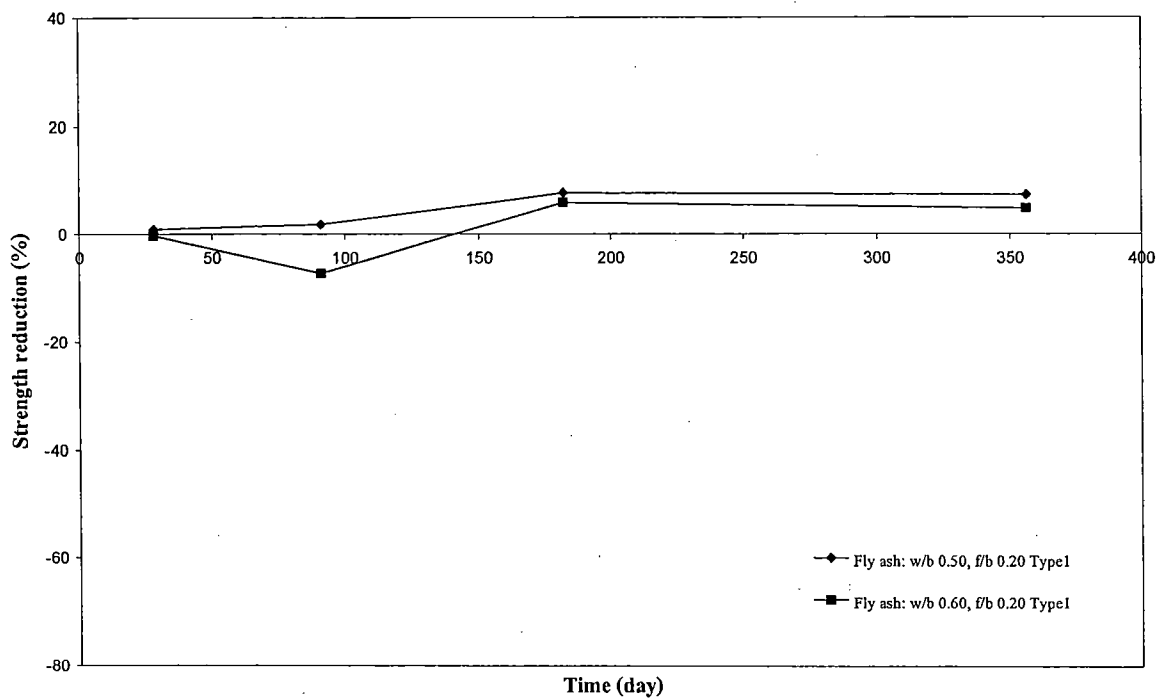
จากรูปที่ 4.23 – 4.25 เป็นการเปรียบเทียบการสูญเสียกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยสารปอซโซลานชนิดต่างๆ ที่แช่วในสารละลายแมกนีเซียม โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 ใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็ก 0 0.20 0.40 และ 0.60 และจำนวนวันที่ทดสอบตัวอย่างที่อายุต่างๆ ผลที่ได้คือมอร์ต้าร์ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยวัสดุประสานเมื่อเวลาผ่านไปมีแนวโน้มการสูญเสียกำลังรับแรงอัดมีการลดลงแม้มีจุดเปลี่ยนก็ยังอยู่ในโซนที่เป็นค่าลด อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน 0.20 ตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าแกลบและตะกรันเตาถลุงเหล็กมีค่าการสูญเสียกำลังที่เพิ่มขึ้นแต่เมื่อเวลาผ่านไปได้ช่วงหนึ่งมีค่าการสูญเสียกำลังที่ลดลง ส่วนตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยในช่วงต้นจะมีการสูญเสียกำลังที่ลดลงแต่หลังจากนั้นมีการปรับสูงขึ้น อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน 0.40 ตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและเถ้าแกลบมีแนวโน้มที่ปรับค่าสูงขึ้นแต่ตะกรันเตาถลุงเหล็กมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน 0.60 ตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยจะมีการเปลี่ยนค่าอยู่ตลอดแต่ก็ยังแนวโน้มที่มีค่าสูงขึ้นส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง

แสดงว่าถ้าใช้อัตราการส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กที่เหมาะสม และไม่ทำให้เกิดการสูญเสียกำลังรับแรงอัด คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็ก 0.40

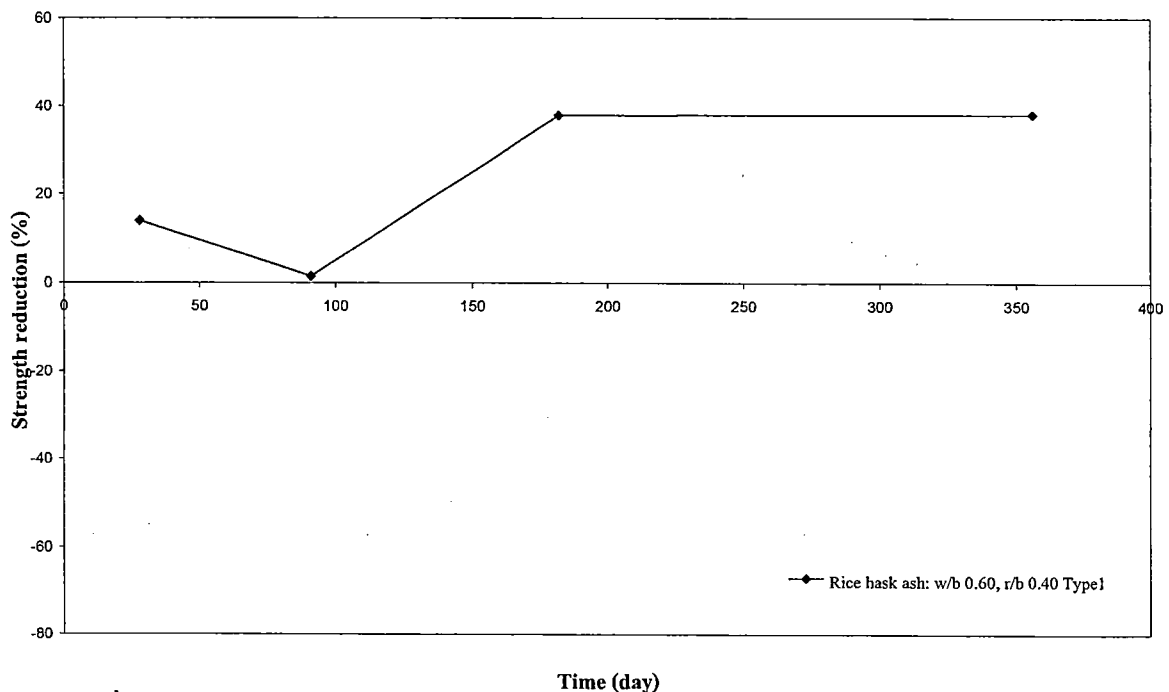


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ไม่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารปอซโซลานที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50 และ 0.60 และจำนวนวันที่ทดสอบตัวอย่างที่อายุต่างๆ

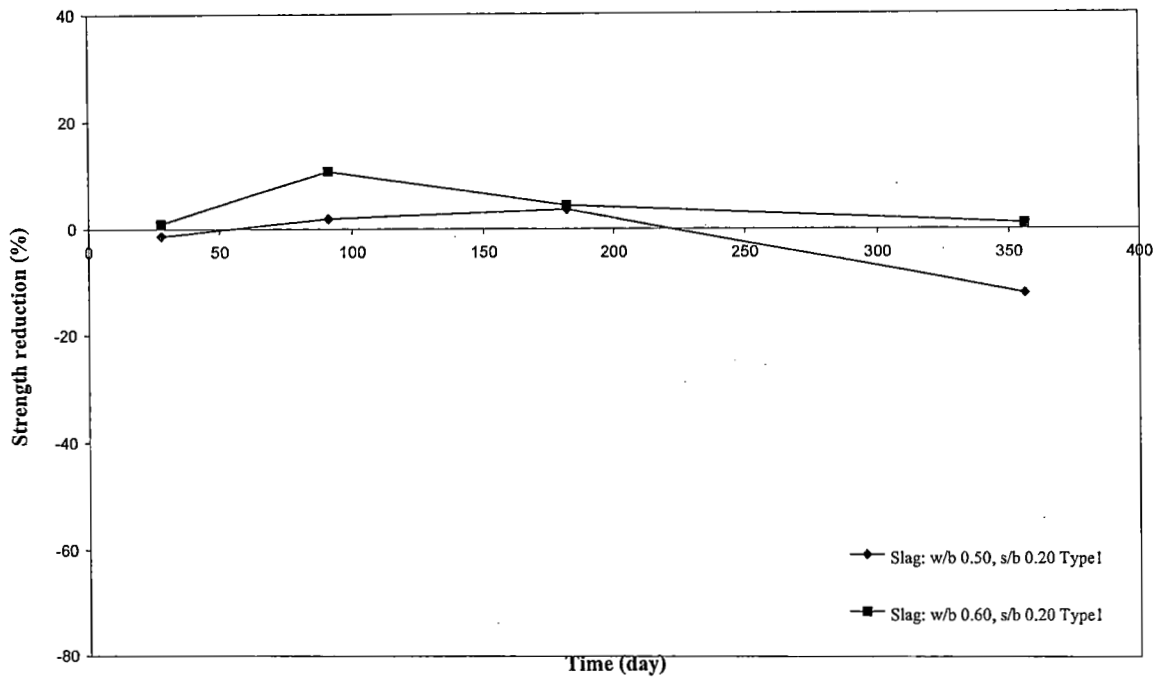
จากรูปที่ 4.26 เป็นการเปรียบเทียบการสูญเสียกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ไม่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารปอซโซลาน ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50 และ 0.60 และจำนวนวันที่ทดสอบตัวอย่างที่อายุต่างๆ ผลที่ได้คือ เมื่อเวลาผ่านไปอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มีค่าการสูญเสียกำลังรับแรงอัดในแนวโน้มที่สูงขึ้น แต่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 ยังไม่มีการสูญเสียกำลังรับแรงอัด



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียกำลังของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยที่ แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50 และ 0.60 ใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย (f/b) 0.20 และจำนวนวันที่ทดสอบตัวอย่างที่อายุต่างๆ

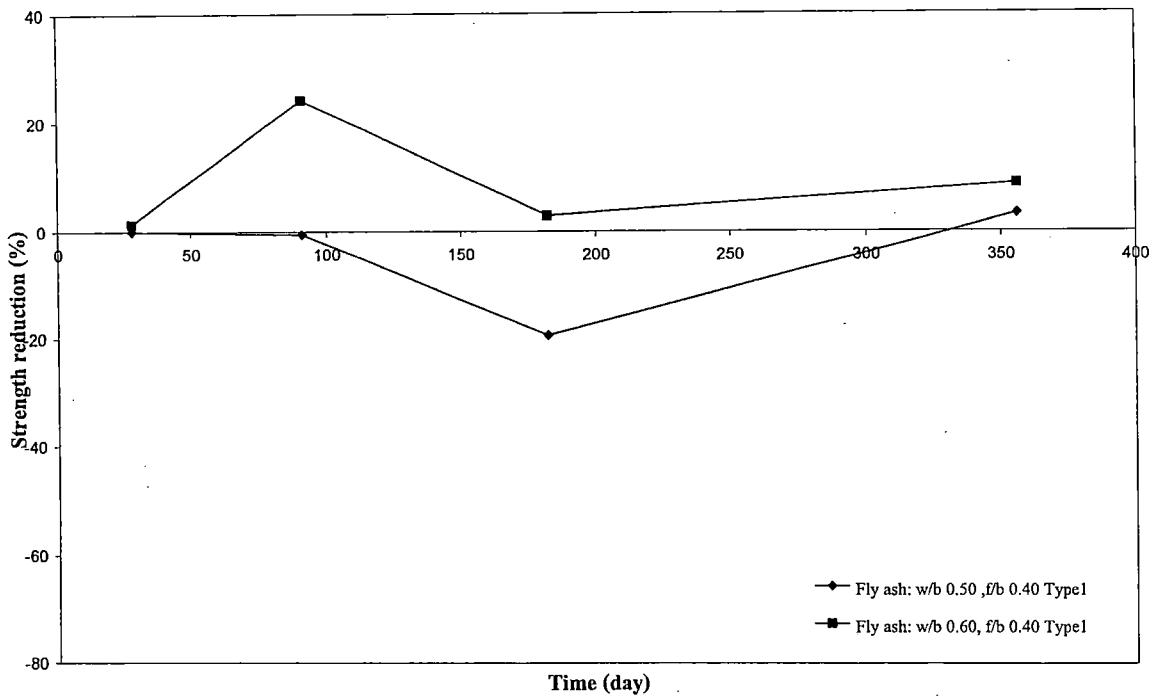


รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียกำลังของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าแกลบที่ แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50 และ 0.60 ใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าแกลบ (r/b) 0.20

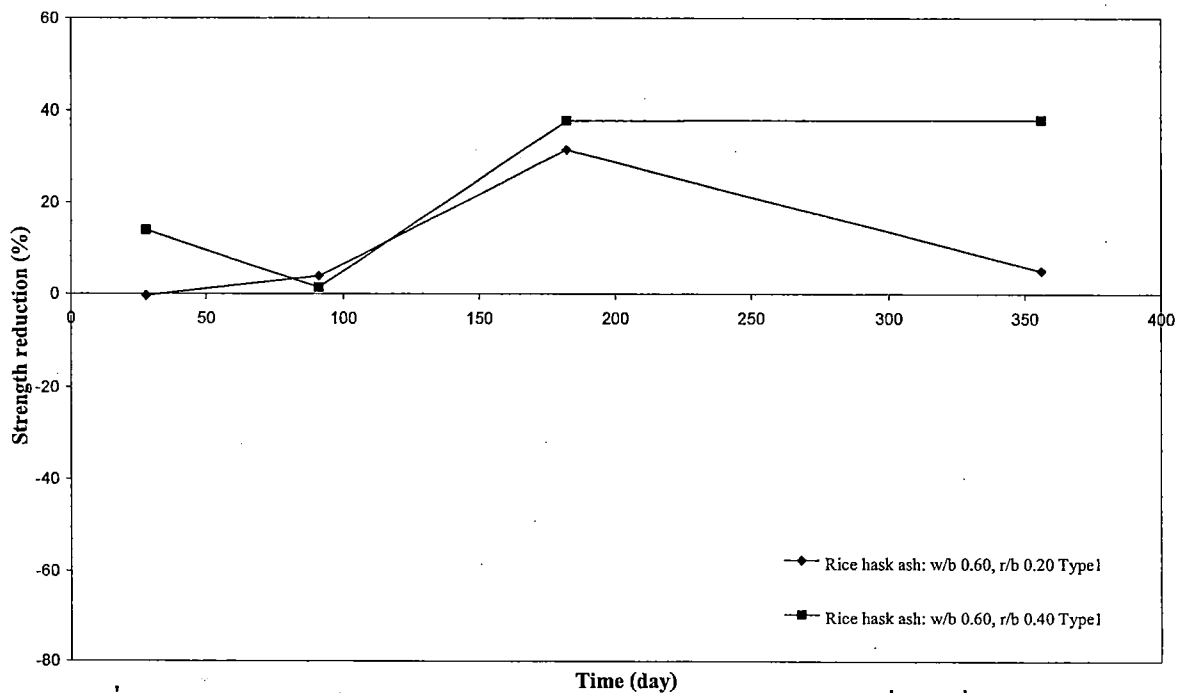


รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียกำลังของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ แชนในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50 และ 0.60 ใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็ก (s/b) 0.20 และจำนวนวันที่ทดสอบตัวอย่างที่อายุต่างๆ

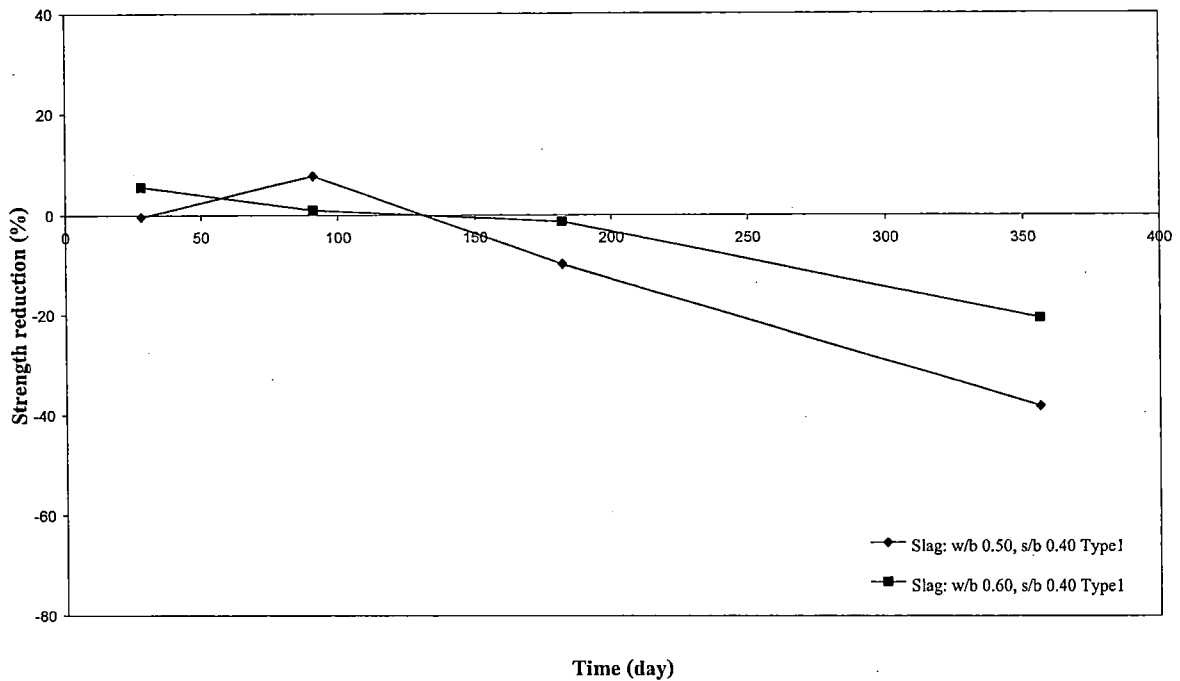
จากรูป 4.27 - 4.29 เป็นการเปรียบเทียบการสูญเสียกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยสารปอซโซลานชนิดต่างๆ ที่แชนในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50 และ 0.60 ใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็ก (s/b) 0.20 และจำนวนวันที่ทดสอบตัวอย่างที่อายุต่างๆ ผลที่ได้คือ อัตราการส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 เมื่อเวลาผ่านไปการสูญเสียกำลังของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและเถ้าแกลบมีแนวโน้มปรับตัวสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนแต่ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กมีแนวโน้มการปรับค่าที่เพิ่มขึ้นในช่วงต้นหลังจากนั้นลดลงอย่างต่อเนื่อง ส่วนอัตราการส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 เมื่อเวลาผ่านไปการสูญเสียกำลังของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยในช่วงต้นมีค่าลดลงหลังจากนั้นปรับค่าเพิ่มขึ้น แต่การสูญเสียกำลังของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าแกลบและตะกรันเตาถลุงเหล็กเมื่อเวลาผ่านไปมีการปรับค่าที่เพิ่มขึ้นจนถึงจุดๆหนึ่งจึงมีการปรับค่าการสูญเสียที่ลดต่ำลง



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียกำลังของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50 และ 0.60 ใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย (f/b) 0.40 และจำนวนวันที่ทดสอบตัวอย่างที่อายุต่างๆ

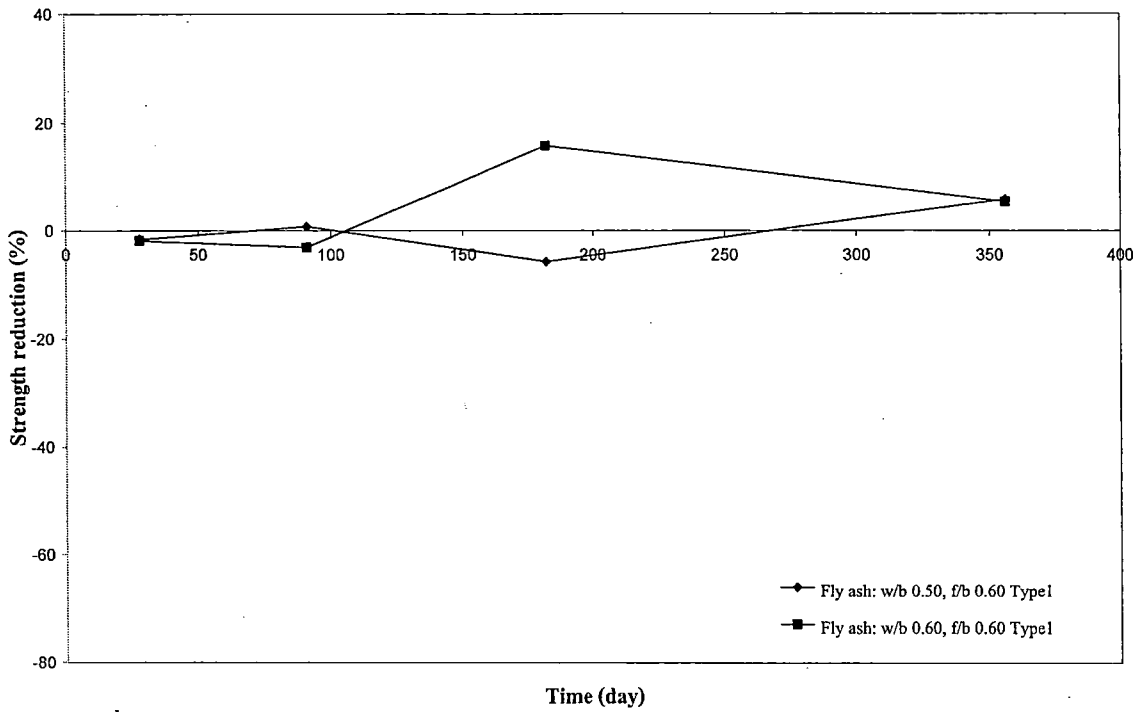


รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียกำลังของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าแกลบที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.60 ใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าแกลบ (r/b) 0.40 และจำนวนวันที่ทดสอบตัวอย่างที่อายุต่างๆ

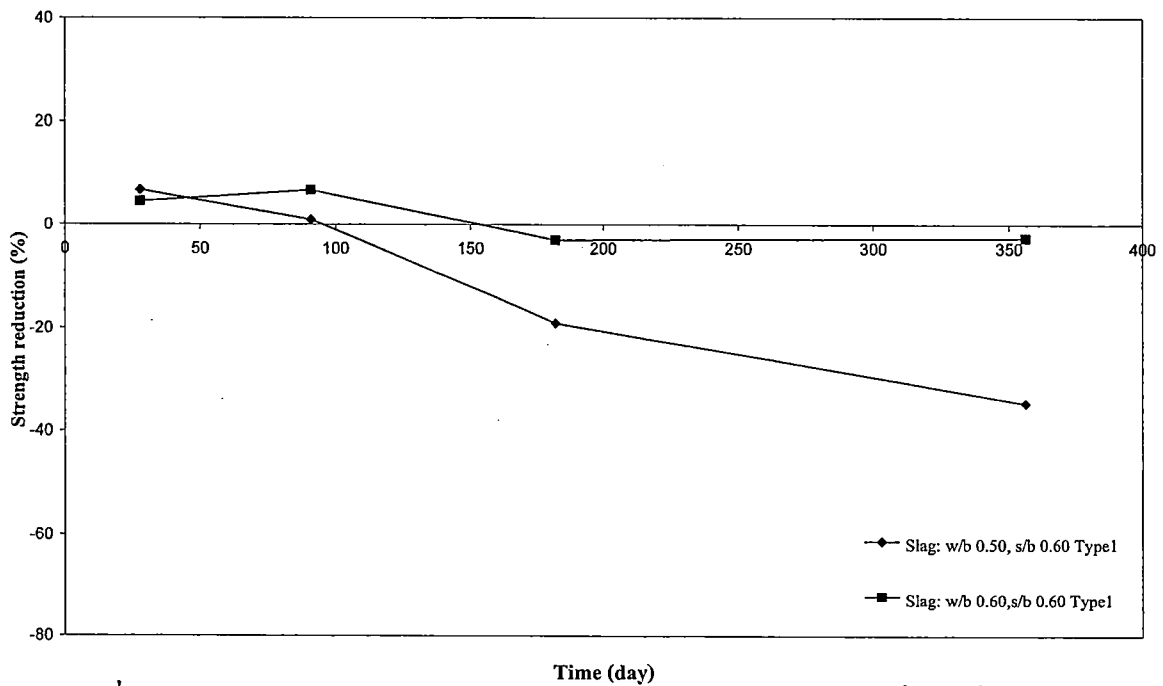


รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียกำลังของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50 และ 0.60 ใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็ก (s/b) 0.40 และจำนวนวันที่ทดสอบตัวอย่างที่อายุต่างๆ

จากรูปที่ 4.30 – 4.32 เป็นการเปรียบเทียบการสูญเสียกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยสารปอซโซลานชนิดต่างๆ ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50 และ 0.60 ใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารปอซโซลาน (p/b) 0.40 และจำนวนวันที่ทดสอบตัวอย่างที่อายุต่างๆ ผลที่ได้คือ เมื่อเวลาผ่านไปการสูญเสียกำลังของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและเถ้าแกลบมีแนวโน้มปรับค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแตกต่างจากตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กที่มีแนวโน้มการปรับค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง

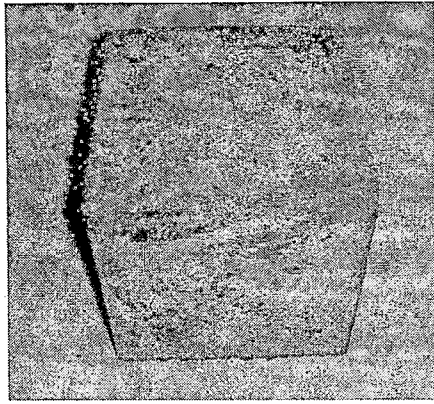


รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียกำลังของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50 และ 0.60 ใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย (f/b) 0.60 และจำนวนวันที่ทดสอบตัวอย่างที่อายุต่างๆ

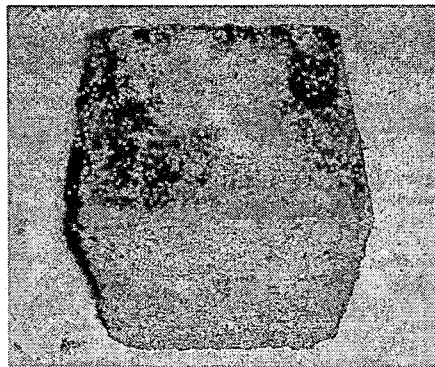


รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียกำลังของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยตะกั่วเตาถลุงเหล็กที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50 และ 0.60 ใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกั่วเตาถลุงเหล็ก (s/b) 0.60 และจำนวนวันที่ทดสอบตัวอย่างที่อายุต่างๆ

จากรูป 4.33 - 4.34 เป็นการเปรียบเทียบการสูญเสียกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยสารปอซโซลานชนิดต่างๆ ที่ใช้ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50 และ 0.60 ใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารปอซโซลาน (p/b) 0.60 และจำนวนวันที่ทดสอบตัวอย่างที่อายุต่างๆ ผลที่ได้คือ เมื่อเวลาผ่านไปตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยมีค่าการสูญเสียกำลังรับแรงอัดที่มีแนวโน้มปรับตัวสูงขึ้นถึงแม้จะมีบางช่วงปรับตัวลดลงแต่สุดท้ายก็ยังมีค่ามากกว่าในช่วงแรก ส่วนตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กมีแนวโน้มการปรับค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง แสดงให้เห็นว่าการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กแทนที่วัสดุประสานบางส่วนมีผลทำให้คุณสมบัติของมอร์ต้าร์ดีขึ้น



รูปที่ 4.35 ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แช่ในน้ำเปล่า



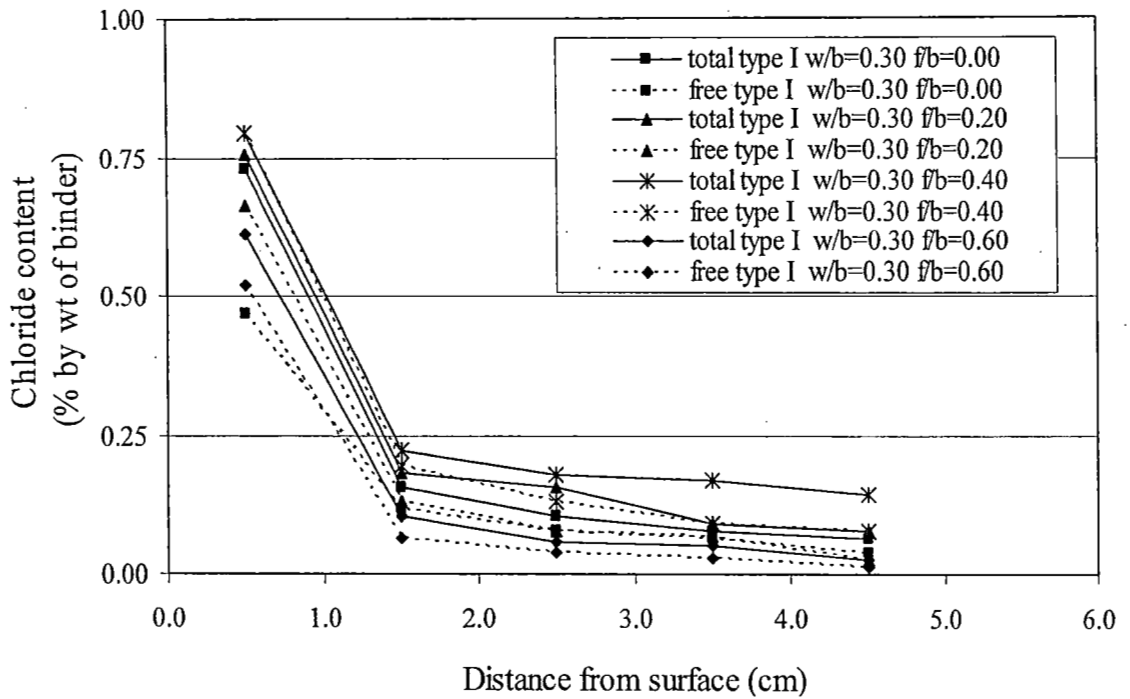
รูปที่ 4.36 ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจนเกิดการขุ่ย

4.3 การแทรกซึมของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์

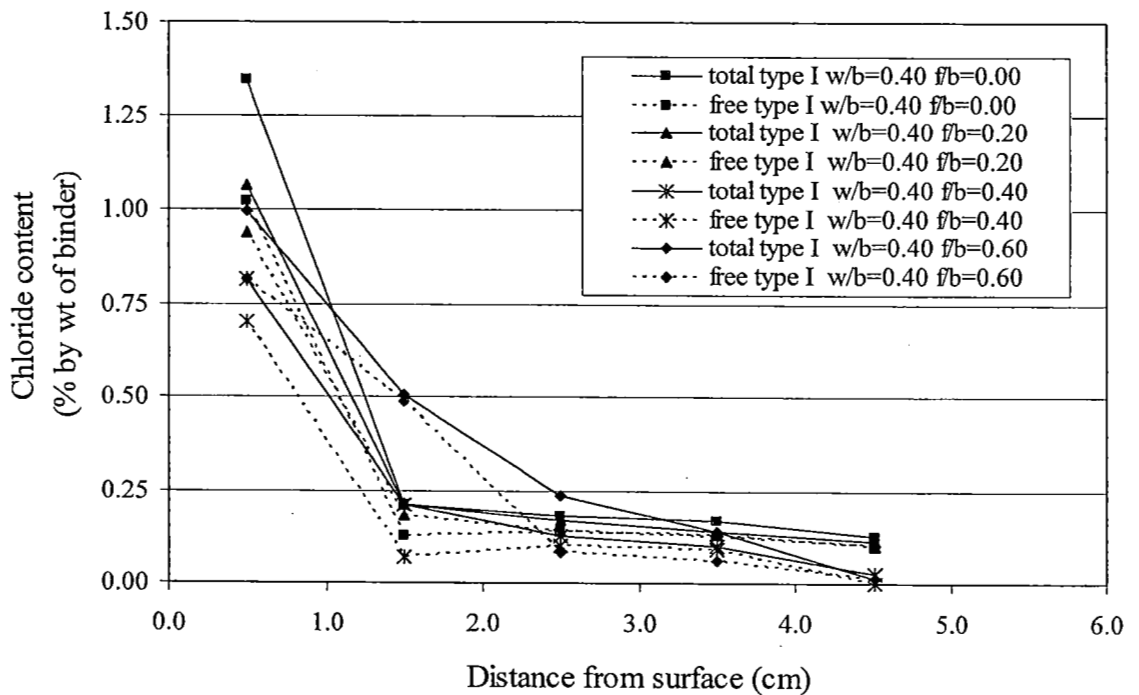
จากการทดลองหาปริมาณสารคลอไรด์ทั้งหมดและสารคลอไรด์อิสระในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่ได้จากการตัดตัวอย่างเป็นชิ้นหนา 1 ซม. สามารถแสดงผลการทดลองเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์เป็นร้อยละโดยน้ำหนักของปริมาณวัสดุประสาน (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่าง และมีสมมติฐานว่าเกลือคลอไรด์ที่ถูกยึดจับด้วยกระบวนการทางกายภาพอยู่ที่ผิวของผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชันและเกลือคลอไรด์ที่ถูกยึดจับโดยกระบวนการทางเคมีนี้ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงกลับมาอยู่ในรูปคลอไรด์อิสระได้ ซึ่งจากการทดลองนี้สามารถแบ่งได้ 4 ผลการทดลองย่อย ดังนี้

4.3.1 ผลการทดลองกรณีบ่มน้ำ 7 วัน และแช่ในน้ำเกลือคลอไรด์ 5% 28 วัน (ชุดการทดลองที่ 1)

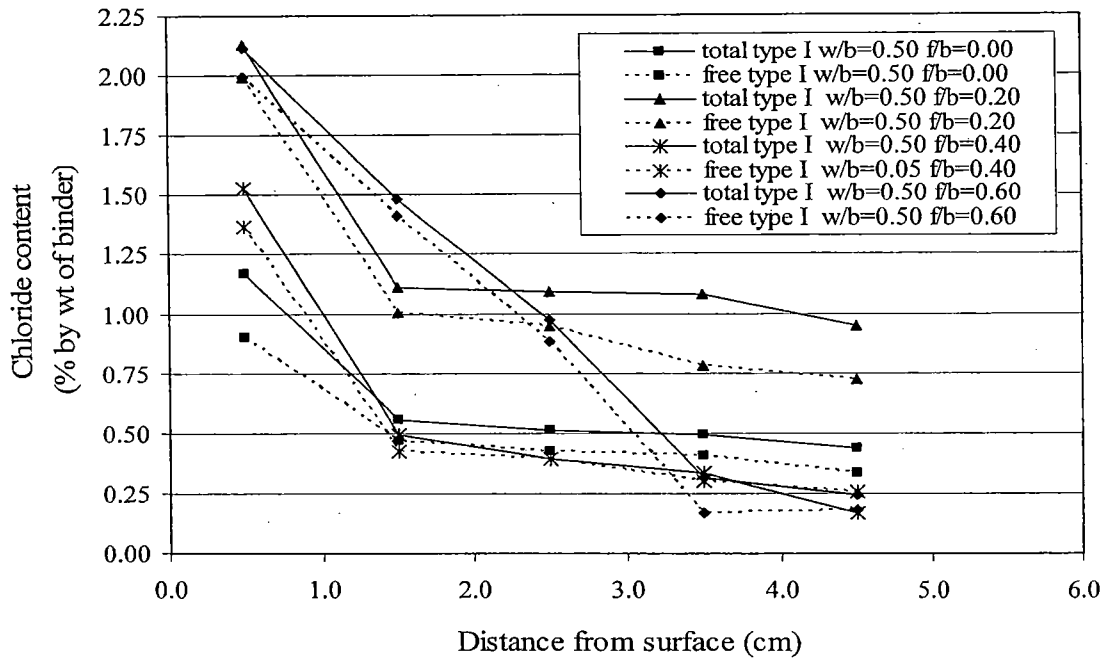
จากรูปที่ 4.37-4.44 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่าง พบว่าเมื่อระยะทางจากผิวด้านนอกของตัวอย่างเพิ่มขึ้น ปริมาณสารคลอไรด์ในแต่ละสัดส่วนผสมมีลักษณะลดลง และสังเกตว่าที่บริเวณที่ใกล้กับผิวของตัวอย่างมากที่สุด คือระยะ 0.5 ซม. จะมีปริมาณสารคลอไรด์มากกว่าในระยะอื่นๆ มาก แต่ที่ระยะที่ลึกเข้าไปจะมีปริมาณสารคลอไรด์ลดลงและค่อนข้างใกล้เคียงกัน นั่นหมายความว่าปริมาณสารคลอไรด์ที่เคลื่อนที่เข้าไปในตัวอย่างที่ระยะทางไกลขึ้นจะมีปริมาณน้อยกว่าบริเวณที่ใกล้ผิวด้านนอกของตัวอย่างซึ่งมีการสัมผัสกับน้ำเกลือคลอไรด์ 5% โดยตรง



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่าง ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.30 และอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในซีเมนต์เพสต์ (f/b) ในปริมาณต่าง ๆ



รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่าง ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.40 และอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในซีเมนต์เพสต์ (f/b) ในปริมาณต่าง ๆ

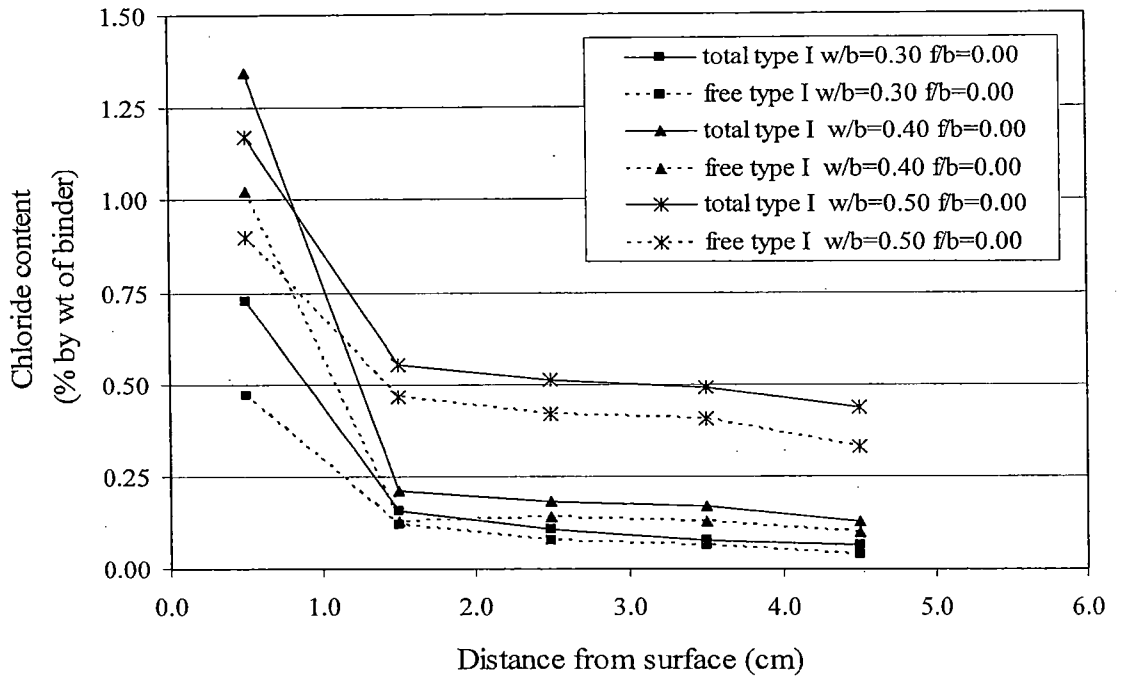


รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่าง ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50 และอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในซีเมนต์เพสต์ (f/b) ในปริมาณต่าง ๆ

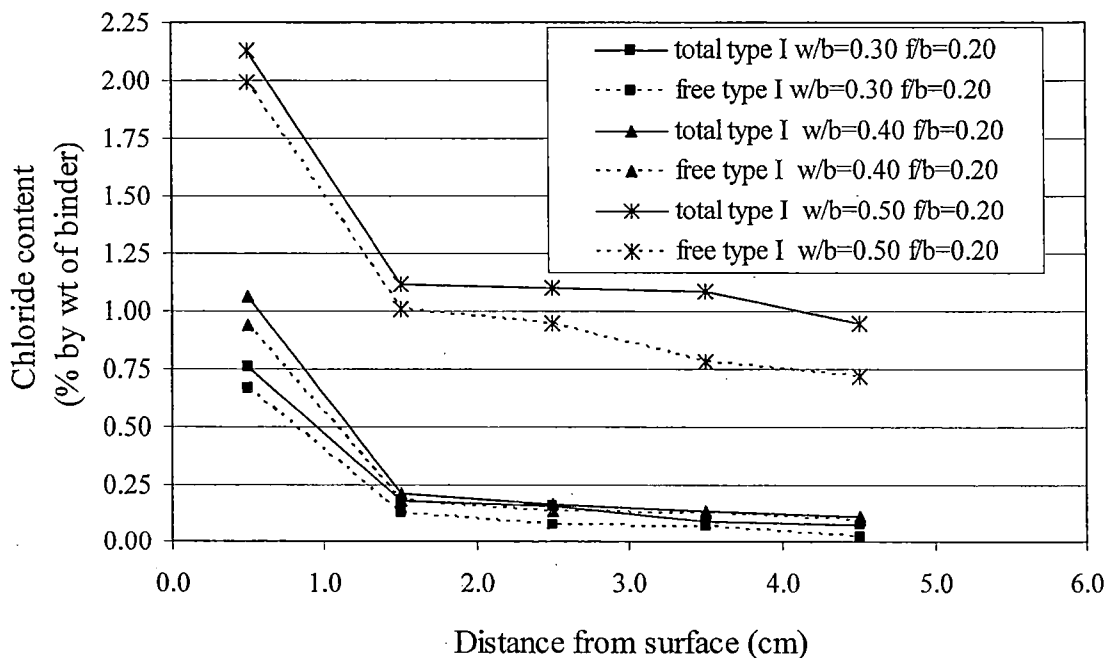
จากรูปที่ 4.37-4.39 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่เท่ากัน และแปรผันค่าอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (f/b) พบว่าที่ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ต่าง ๆ จะให้ผลการทดลองที่เหมือนและแตกต่างกันดังนี้

ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.30 0.40 และ 0.50 มีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระในแต่ละอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน และมีปริมาณคลอไรด์แตกต่างกันในแต่ละชุดข้อมูล ทั้งนี้อาจมีผลเนื่องจากความคลาดเคลื่อนในการทดลอง จึงทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์และสรุปผลของการแปรผันปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ที่เข้ามาในซีเมนต์เพสต์ได้

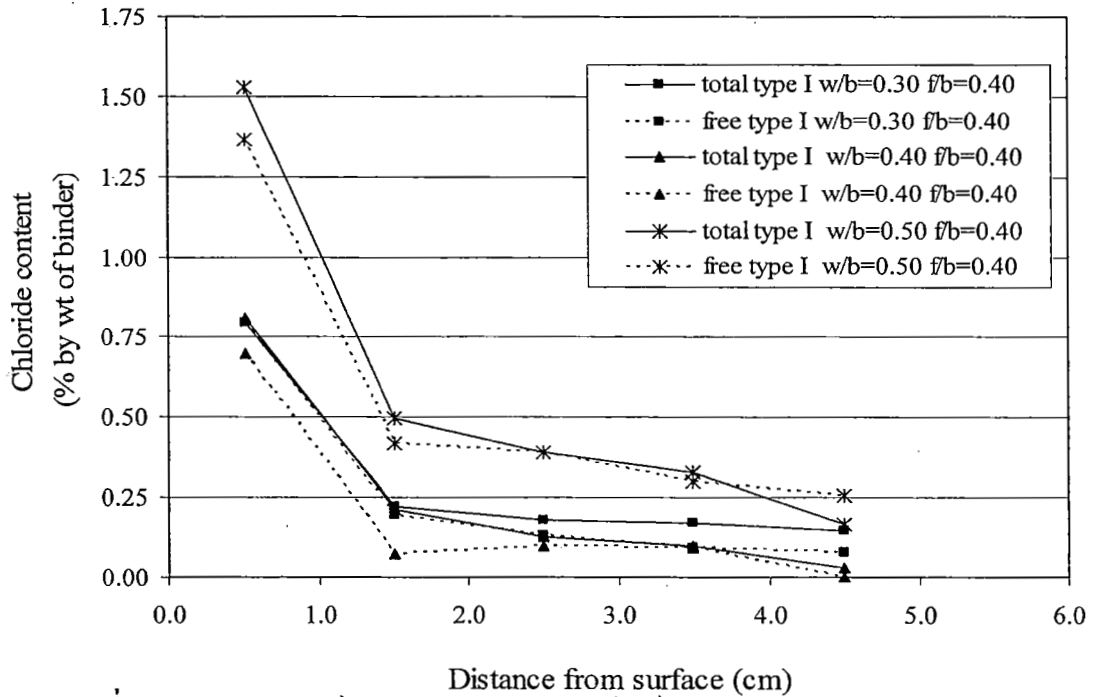
แต่อย่างไรก็ตามพบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.30 และอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่เปลี่ยนแปลงไป หากมีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วน 0.60 จะทำให้คลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระเคลื่อนที่เข้าไปในชั้นตัวอย่างได้น้อยที่สุด และเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นเป็น 0.40 และ 0.50 ปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วน 0.40 จะทำให้คลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระเคลื่อนที่เข้าไปในชั้นตัวอย่างได้น้อยที่สุด



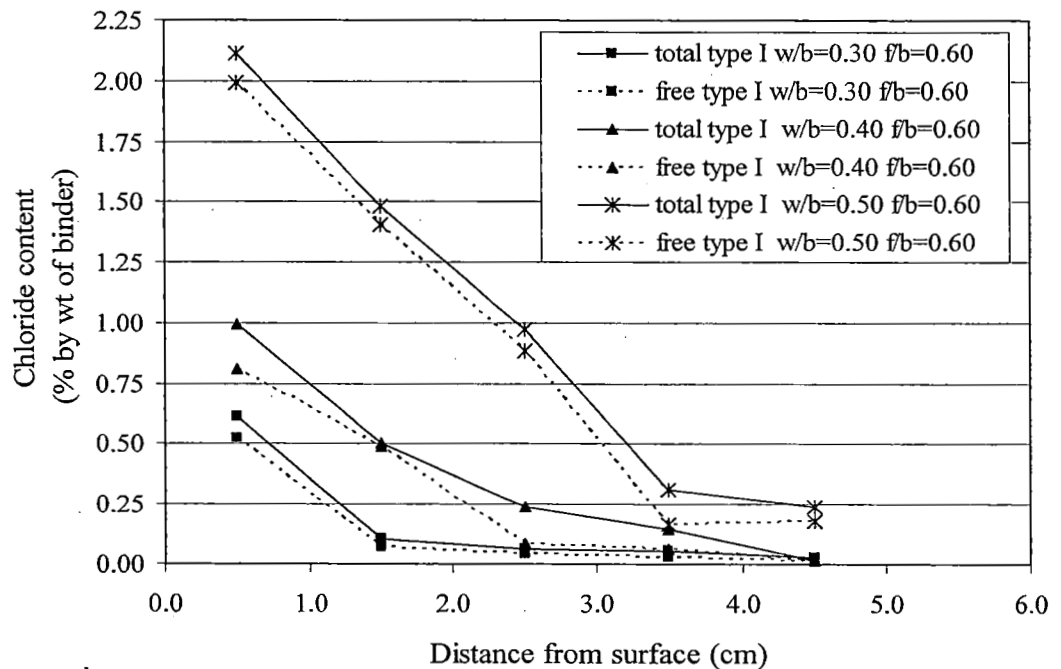
รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่าง ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในซีเมนต์เพสต์ (f/b) 0.00 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ในปริมาณต่าง ๆ



รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่าง ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในซีเมนต์เพสต์ (f/b) 0.20 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ในปริมาณต่าง ๆ

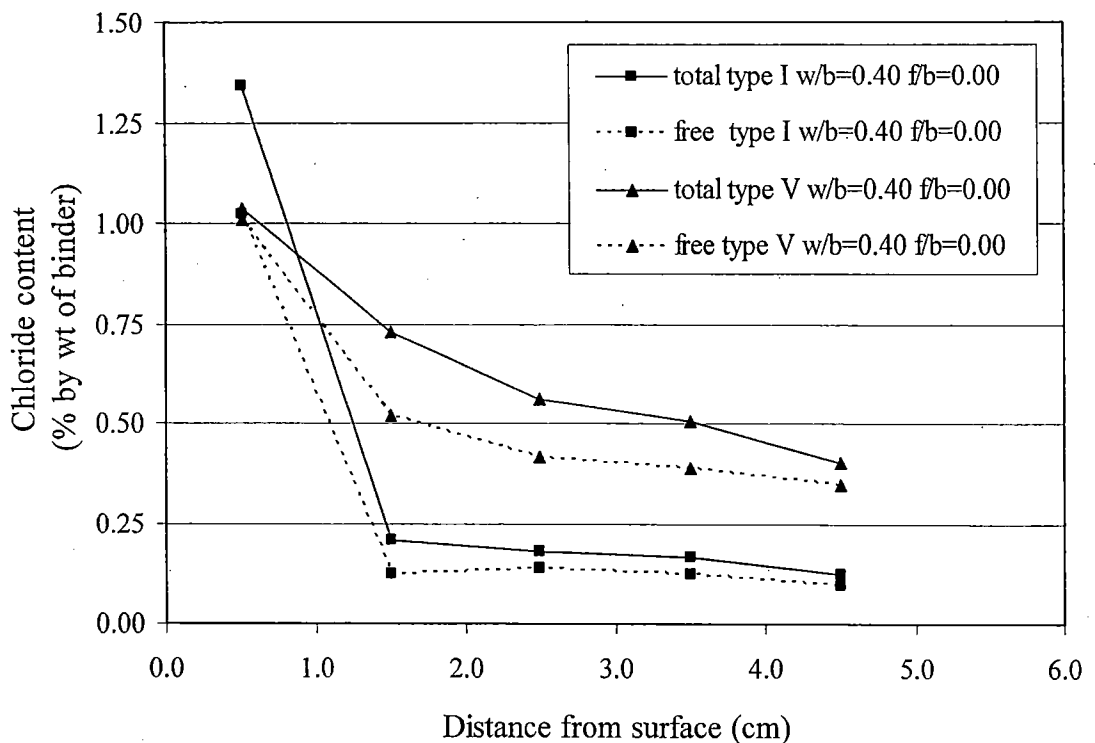


รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่าง ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในซีเมนต์เพสต์ (f/b) 0.40 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ในปริมาณต่าง ๆ



รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่าง ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในซีเมนต์เพสต์ (f/b) 0.60 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ในปริมาณต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.40-4.43 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (f/b) ที่คงที่ แต่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่แตกต่างกันพบว่า ในทุกๆ อัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่น้อยกว่าจะมีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระน้อยกว่าอัตราส่วนที่มีน้ำมากกว่า

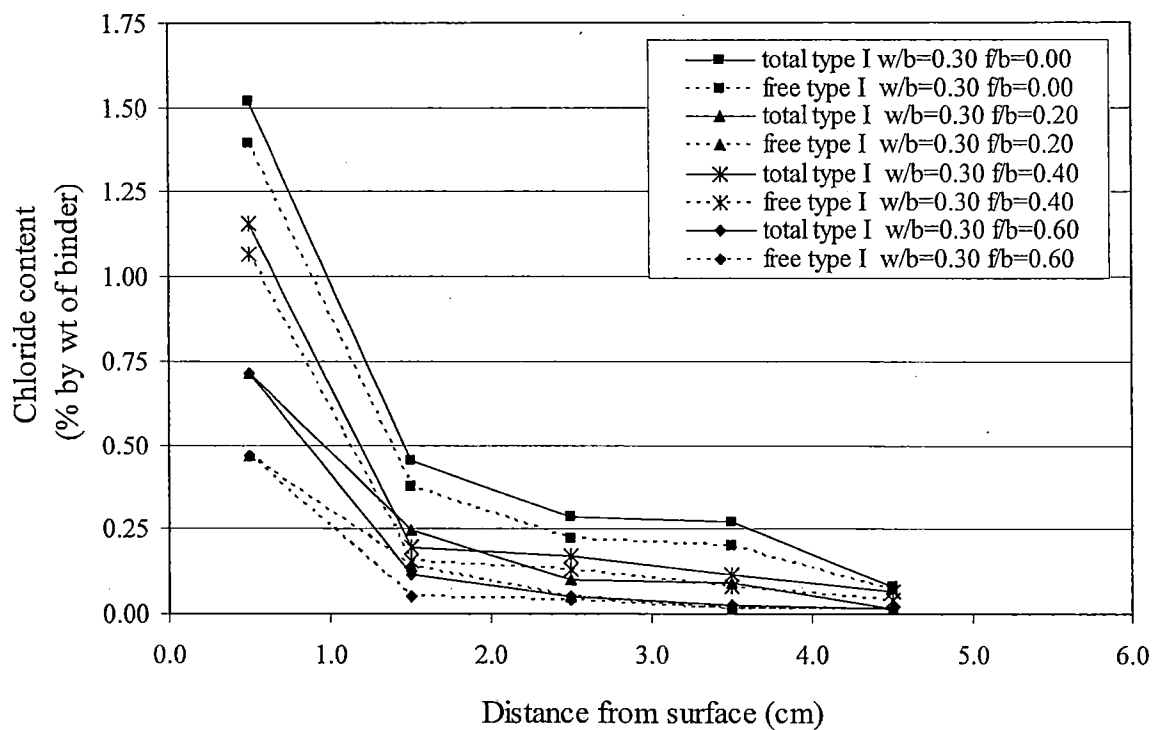


รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่าง ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.40 และ อัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในซีเมนต์เพสต์ (f/b) 0.00 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

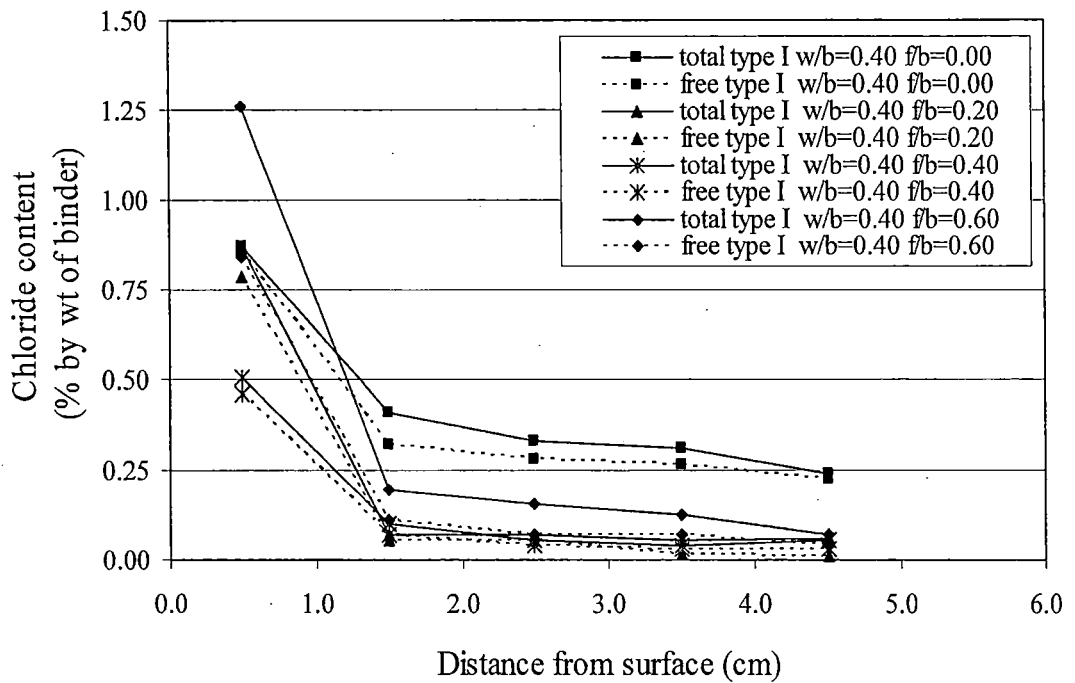
จากรูปที่ 4.44 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (f/b) และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่คงที่ แต่เปรียบเทียบระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 2 ประเภท พบว่าตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นส่วนผสมมีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระมากกว่าตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสม

4.3.2 กรณีบ่มน้ำ 7 วัน และแช่น้ำเกลือคลอไรด์ 5% 91 วัน (ชุดการทดลองที่ 2)

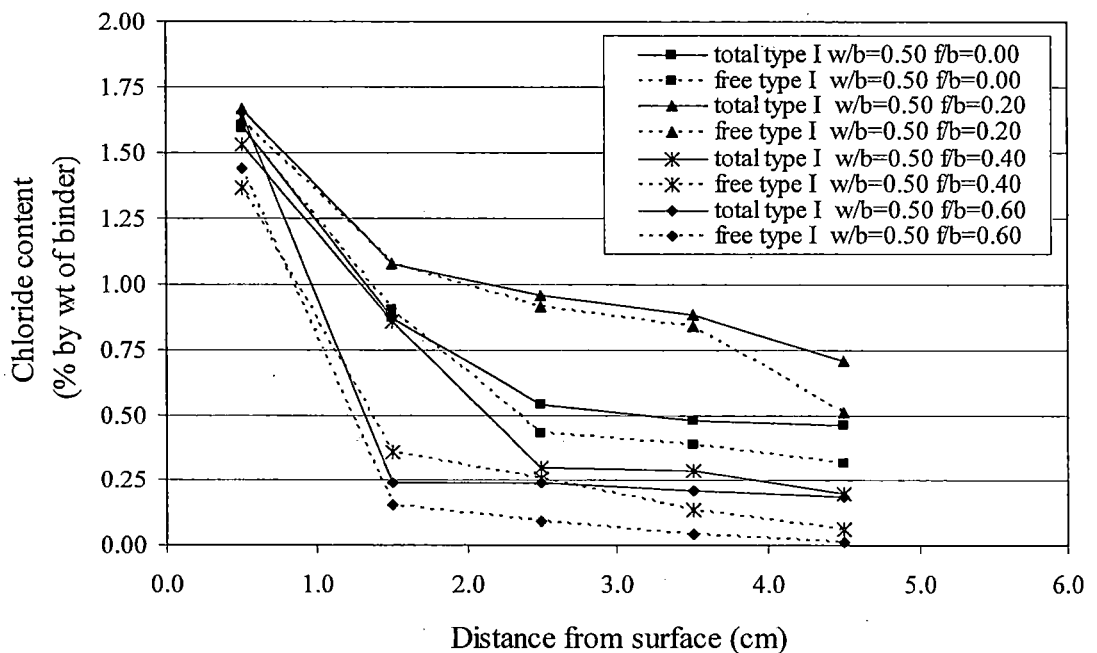
จากรูปที่ 4.45-4.52 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่าง พบว่าผลการทดลองเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับชุดการทดลองที่ 1 คือเมื่อระยะทางจากผิวของตัวอย่างเพิ่มขึ้น ปริมาณสารคลอไรด์ในแต่ละสัดส่วนผสมมีลักษณะลดลง นั่นหมายความว่าปริมาณสารคลอไรด์ที่เคลื่อนที่เข้าไปในตัวอย่างที่ระยะทางไกลขึ้นจะมีปริมาณน้อยกว่าบริเวณที่ใกล้ผิวด้านนอกของตัวอย่างซึ่งมีการสัมผัสกับน้ำเกลือคลอไรด์ 5% โดยตรง



รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่าง ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.30 และอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในซีเมนต์เพสต์ (f/b) ในปริมาณต่าง ๆ



รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่าง ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.40 และอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในซีเมนต์พิเศษ (f/b) ในปริมาณต่าง ๆ

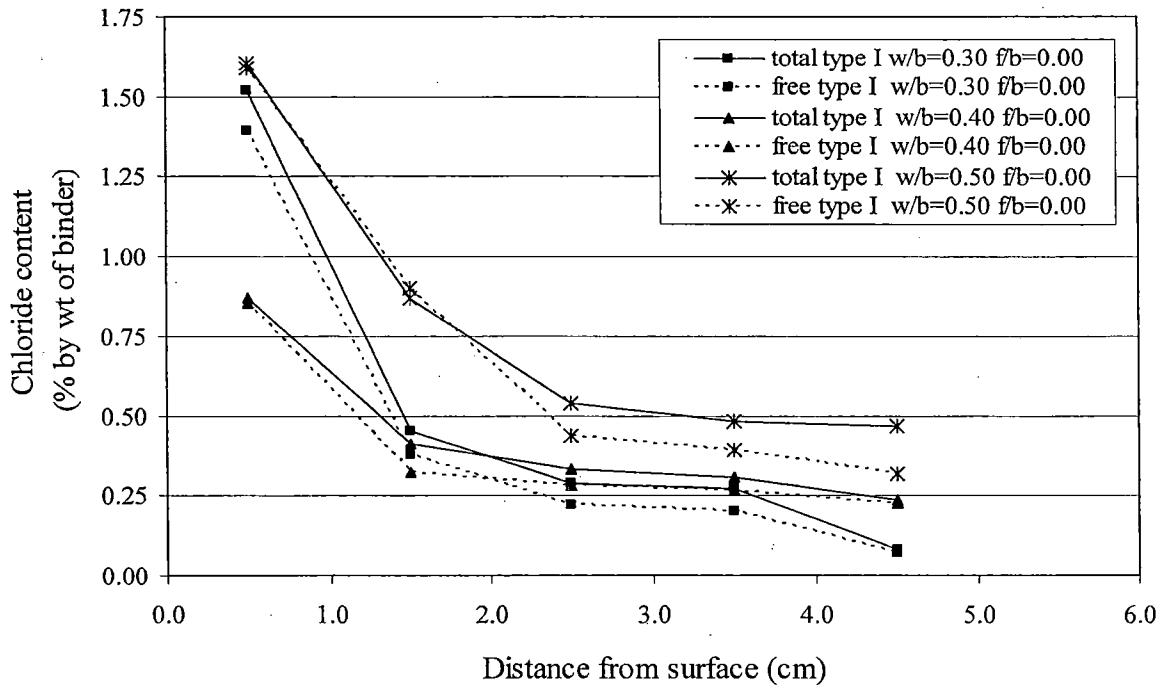


รูปที่ 4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่าง ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50 และอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในซีเมนต์พิเศษ (f/b) ในปริมาณต่าง ๆ

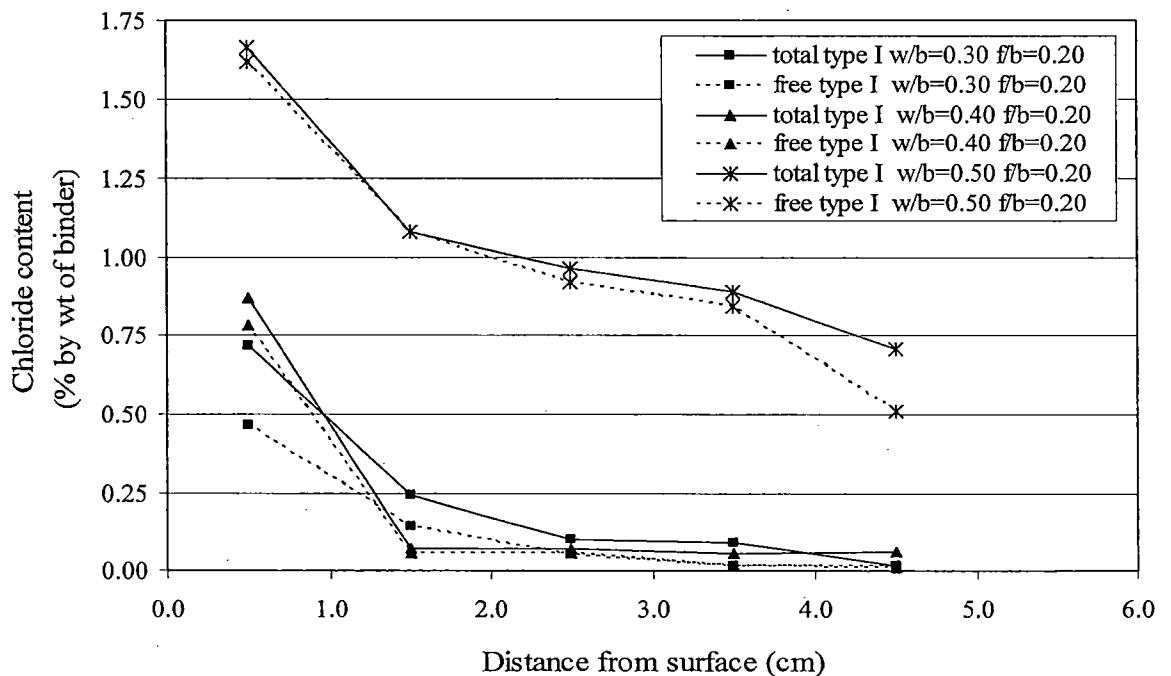
จากรูปที่ 4.45-4.47 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่เท่ากัน และแปรผันค่าอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (f/b) พบว่าที่ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ต่าง ๆ จะให้ผลการทดลองที่เหมือนและแตกต่างกันดังนี้

ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.30 0.40 และ 0.50 มีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระในแต่ละอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน และมีปริมาณคลอไรด์แตกต่างกันอย่างในแต่ละชุดข้อมูล ทั้งนี้มีเป็นผลเนื่องจากความคลาดเคลื่อนในการทดลอง จึงทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์และสรุปผลของการแปรผันปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ที่เข้ามาในซีเมนต์พาสต์ได้

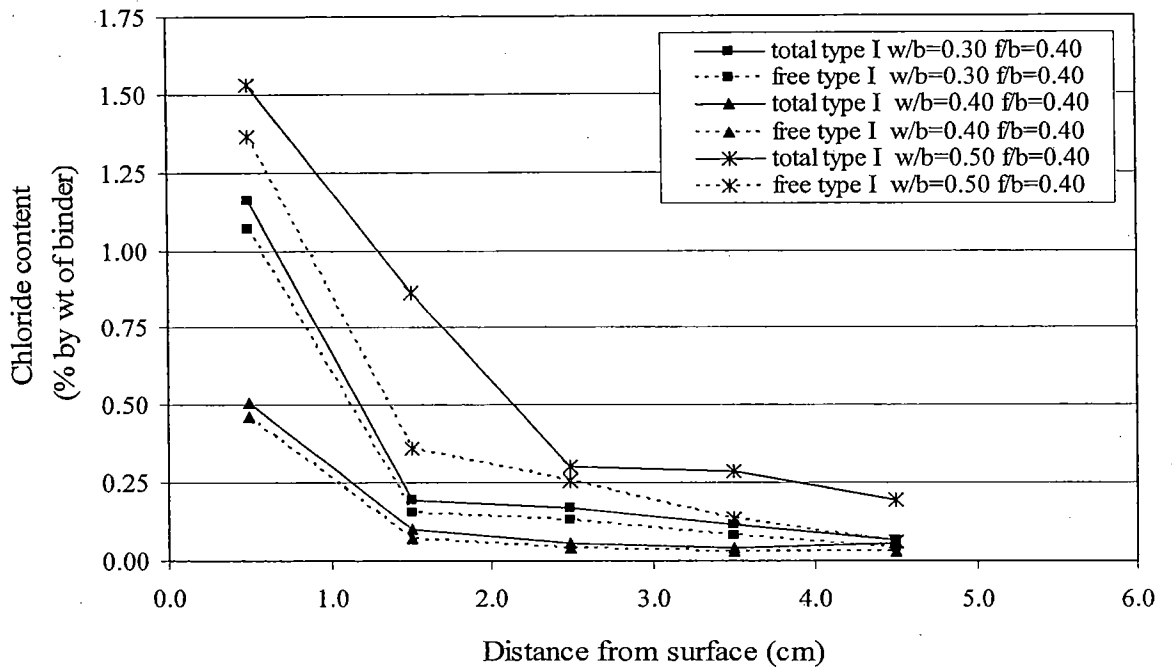
แต่อย่างไรก็ตามพบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.30 และ 0.50 และอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่เปลี่ยนแปลงไป หากมีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วน 0.60 จะทำให้คลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระเคลื่อนที่เข้าไปในชั้นตัวอย่างได้น้อยที่สุด และเมื่อเป็นปริมาณน้ำเป็น 0.40 ปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วน 0.40 จะทำให้คลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระเคลื่อนที่เข้าไปในชั้นตัวอย่างได้น้อยที่สุด และเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับชุดการทดลองที่ 1



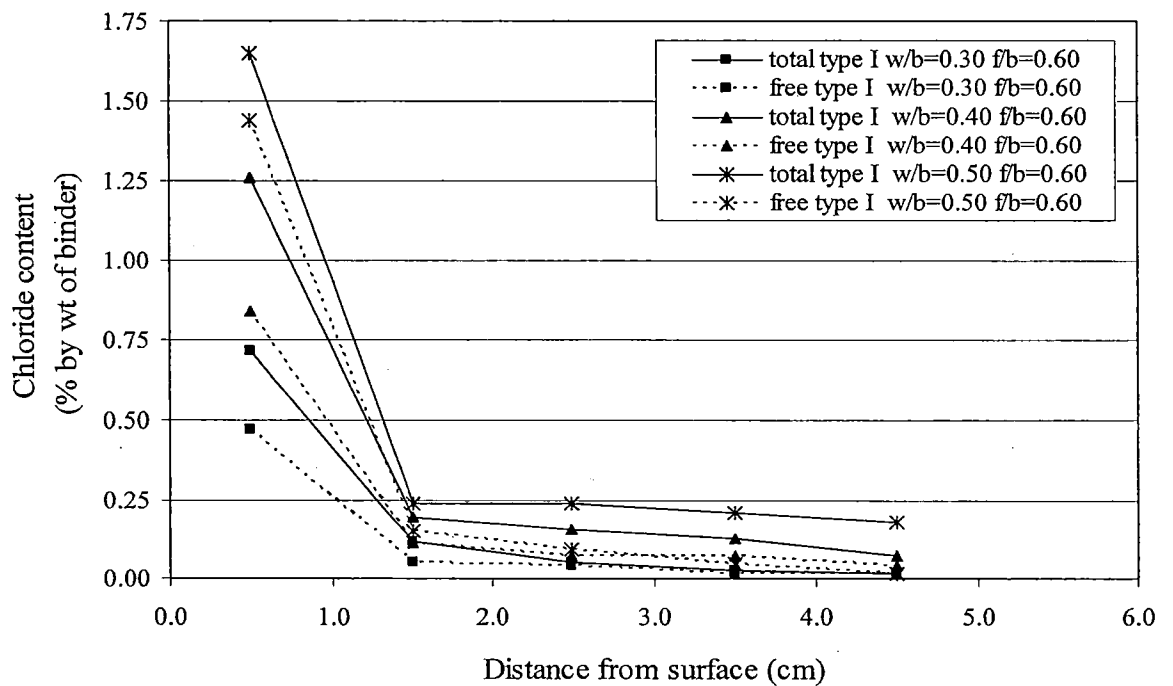
รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่าง ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในซีเมนต์เฟส (f/b) 0.00 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ในปริมาณต่าง ๆ



รูปที่ 4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่าง ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในซีเมนต์เฟส (f/b) 0.20 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ในปริมาณต่าง ๆ

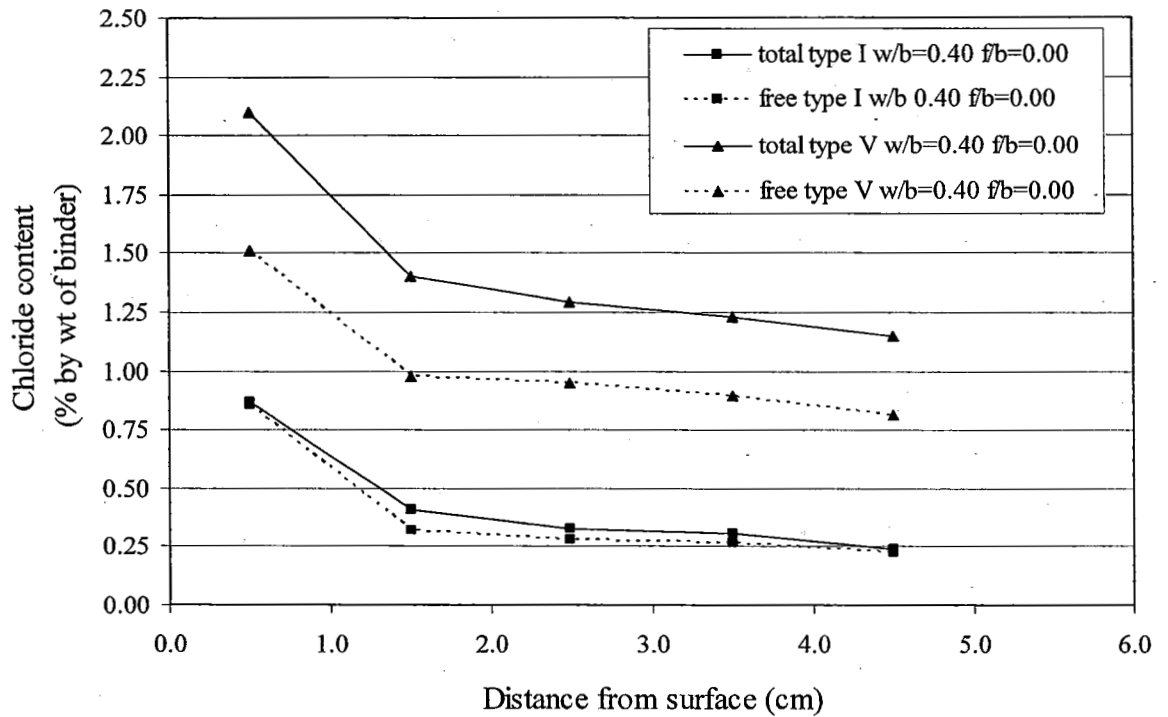


รูปที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่าง ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในซีเมนต์เพสต์ (f/b) 0.40 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ในปริมาณต่าง ๆ



รูปที่ 4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่าง ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในซีเมนต์เพสต์ (f/b) 0.60 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ในปริมาณต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.48-4.51 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (f/b) ที่คงที่ แต่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่แตกต่างกัน พบว่าในทุกๆ อัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่น้อยกว่าจะมีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระน้อยกว่าอัตราส่วนที่มีน้ำมากกว่า

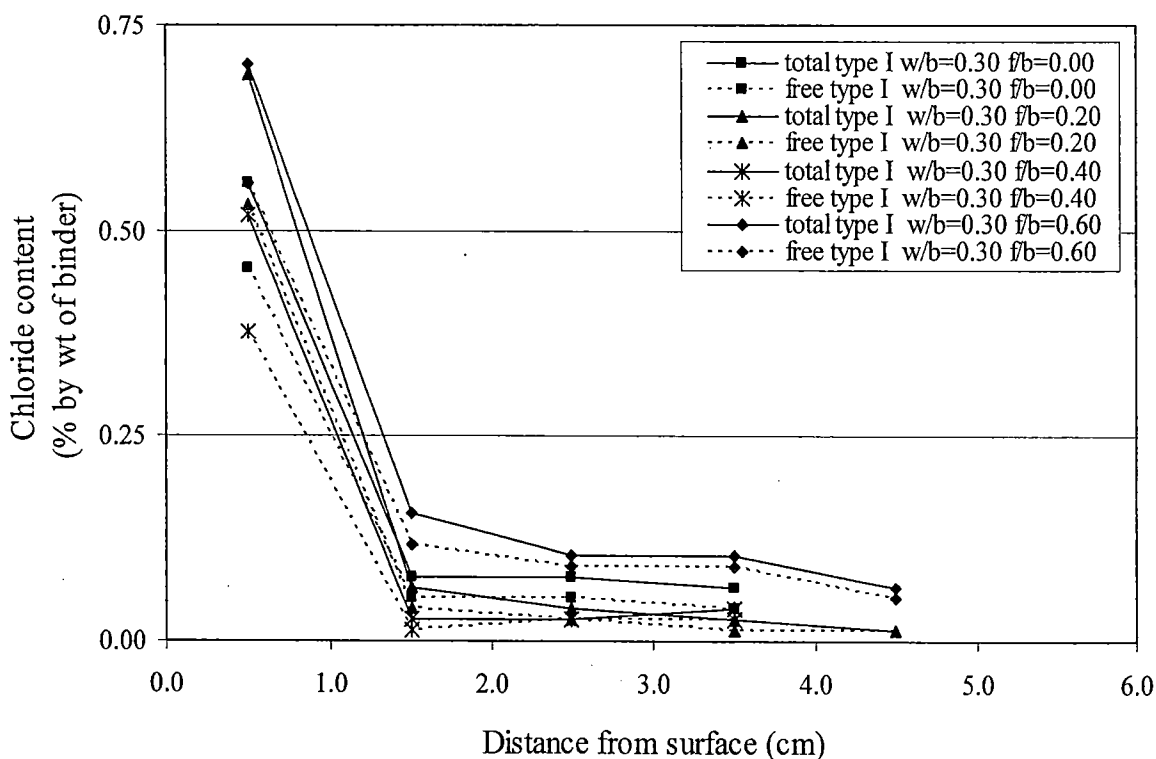


รูปที่ 4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่าง ง ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.40 และ อัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในซีเมนต์เพสต์ (f/b) 0.00 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

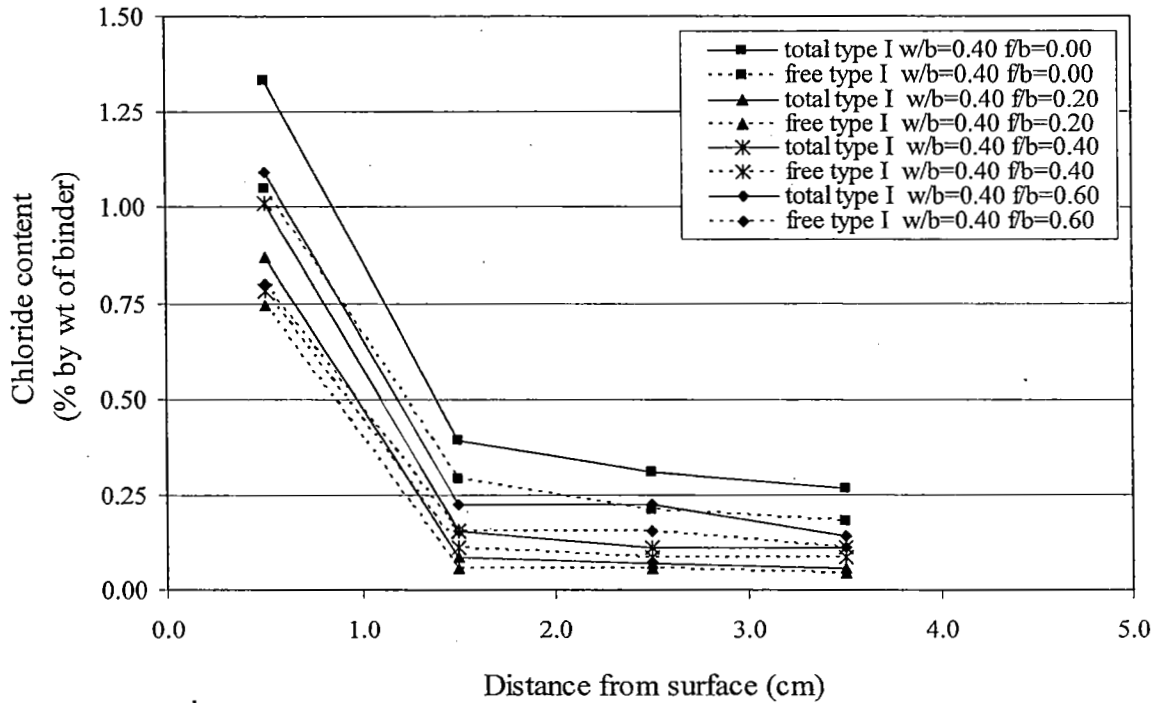
จากรูปที่ 4.52 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (f/b) และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่คงที่ แต่เปรียบเทียบระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 2 ประเภท พบว่าตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นส่วนผสม มีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระมากกว่าตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสม

4.3.3 กรณีบ่มน้ำ 28 วัน และแช่ในน้ำเกลือคลอไรด์ 5% 28 วัน (ชุดการทดลองที่ 3)

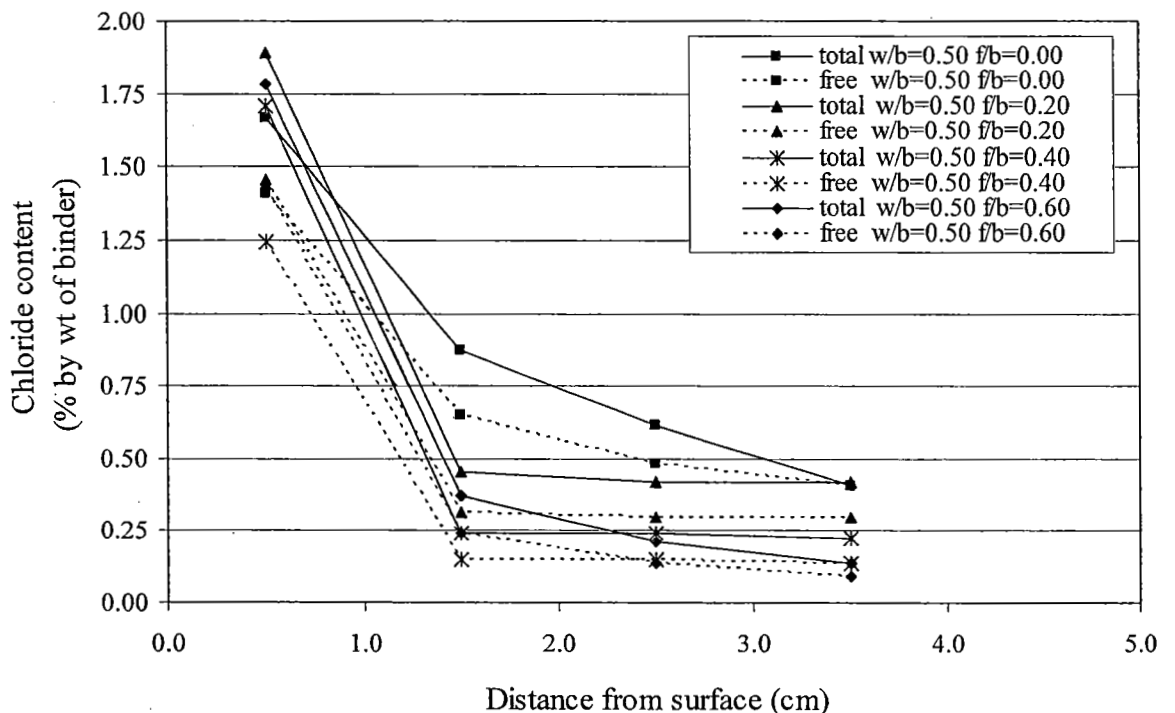
จากรูปที่ 4.53-4.60 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่าง พบว่าผลการทดลองเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับชุดการทดลองที่ 1 และ 2 คือเมื่อระยะทางจากผิวด้านนอกของตัวอย่างเพิ่มขึ้น ปริมาณคลอไรด์ในแต่ละสัดส่วนผสมจะมีลักษณะลดลง นั่นหมายความว่าปริมาณสารคลอไรด์ที่เคลื่อนที่เข้าไปในตัวอย่งที่ระยะทางไกลขึ้นจะมีปริมาณน้อยกว่าบริเวณที่ใกล้ผิวด้านนอกของตัวอย่างซึ่งมีการสัมผัสกับน้ำเกลือคลอไรด์ 5% โดยตรง



รูปที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่าง ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.30 และอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในซีเมนต์เพสต์ (f/b) ในปริมาณต่าง ๆ



รูปที่ 4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่าง ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.40 และอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในซีเมนต์เพสต์ (f/b) ในปริมาณต่าง ๆ

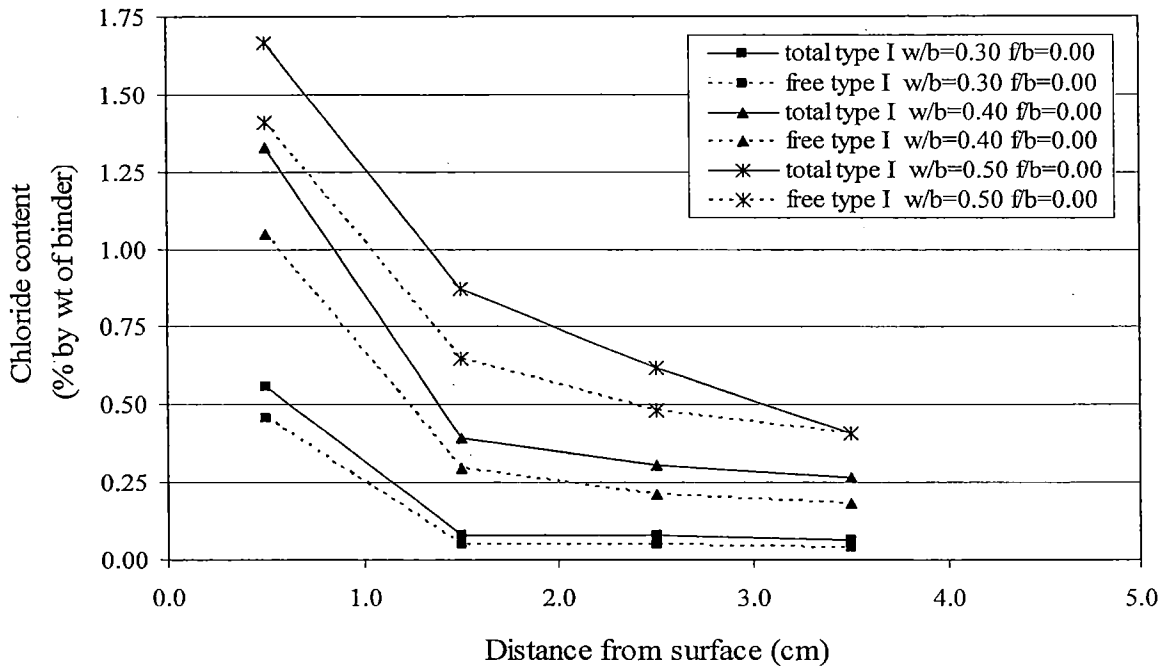


รูปที่ 4.55 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่าง ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50 และอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในซีเมนต์เพสต์ (f/b) ในปริมาณต่าง ๆ

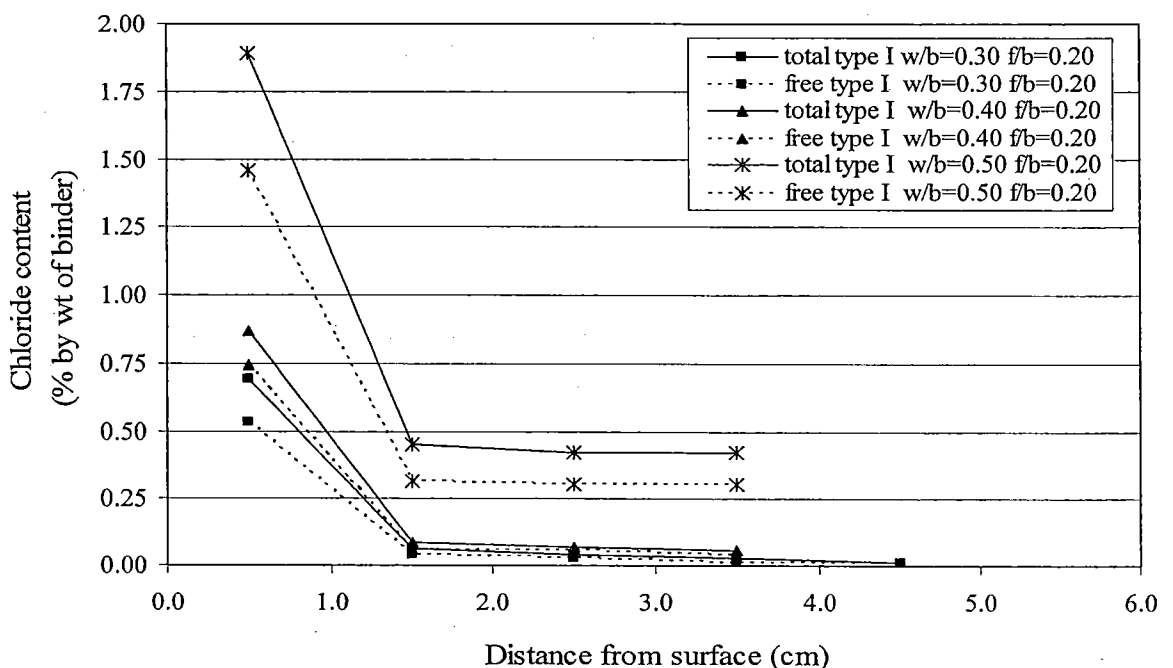
จากรูปที่ 4.53-4.55 เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่เท่ากัน และแปรผันค่าอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (f/b) พบว่าที่ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ต่าง ๆ จะให้ผลการทดลองดังนี้

ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.30 0.40 และ 0.50 มีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระในแต่ละอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน และมีปริมาณคลอไรด์แตกต่างกันในแต่ละชุดข้อมูล ทั้งนี้อาจมีผลเนื่องจากความคลาดเคลื่อนในการทดลอง จึงทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์และสรุปผลของการแปรผันปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ที่เข้ามาในซีเมนต์เพสต์ได้

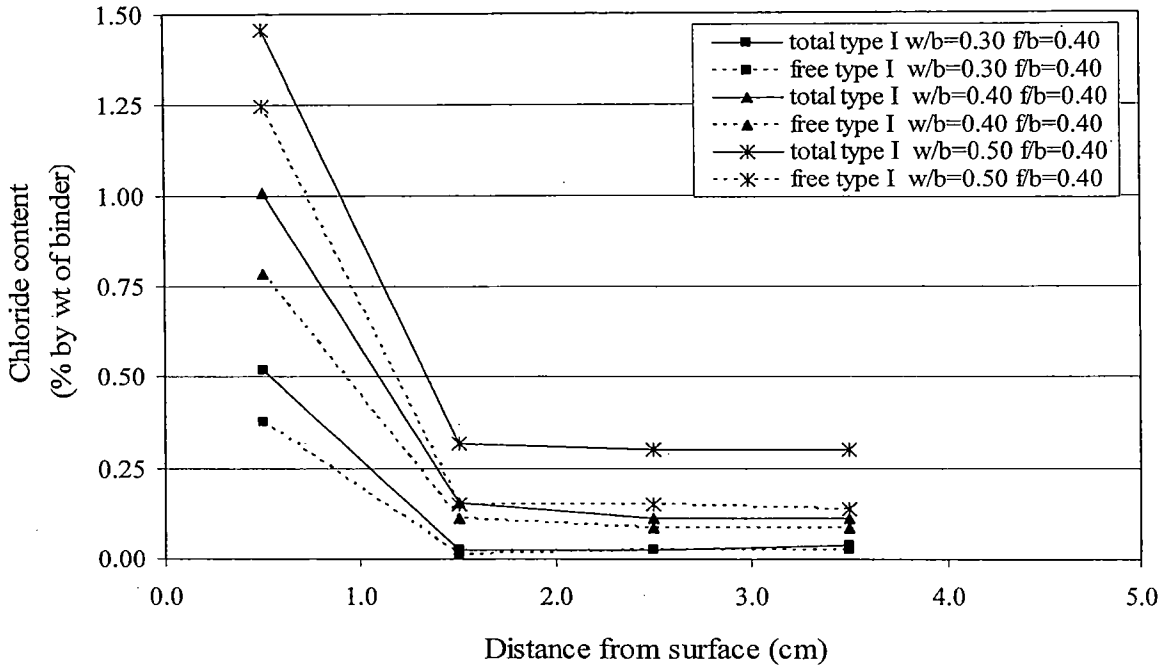
แต่อย่างไรก็ตามพบว่าในทุก ๆ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน หากมีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วน 0.40 -0.60 จะทำให้คลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระเคลื่อนที่เข้าไปในซีเมนต์ตัวอย่างได้น้อยที่สุด และเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับชุดการทดลองที่ 1 และ 2



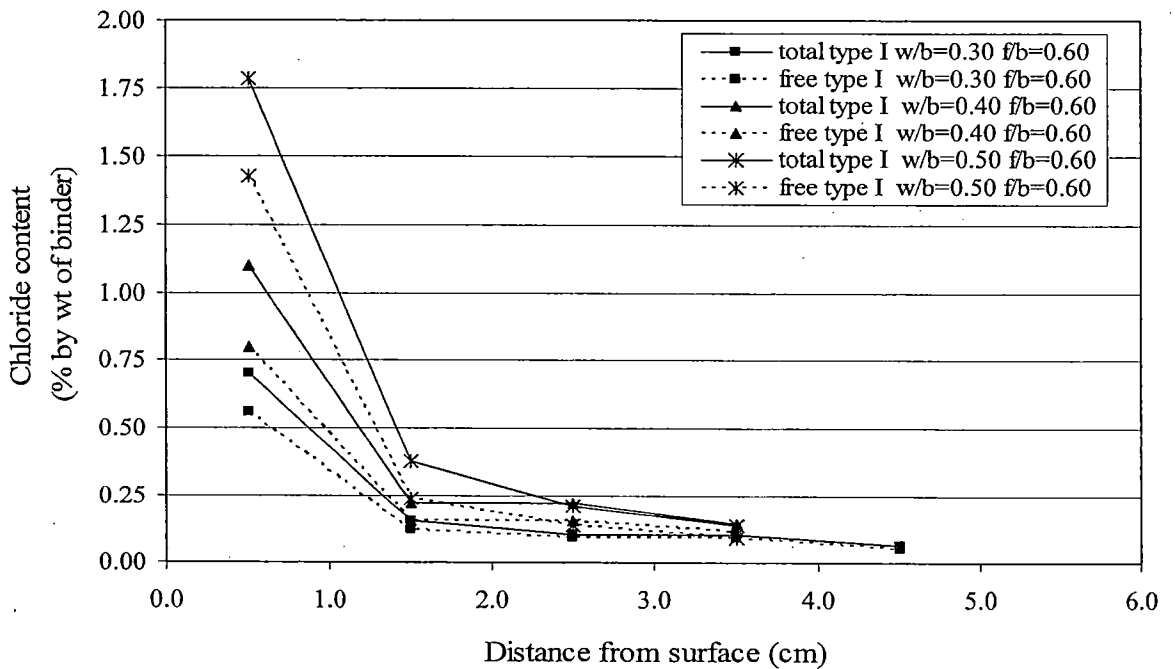
รูปที่ 4.56 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่าง ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในซีเมนต์เฟส (f/b) 0.00 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ในปริมาณต่าง ๆ



รูปที่ 4.57 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่าง ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในซีเมนต์เฟส (f/b) 0.20 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ในปริมาณต่าง ๆ

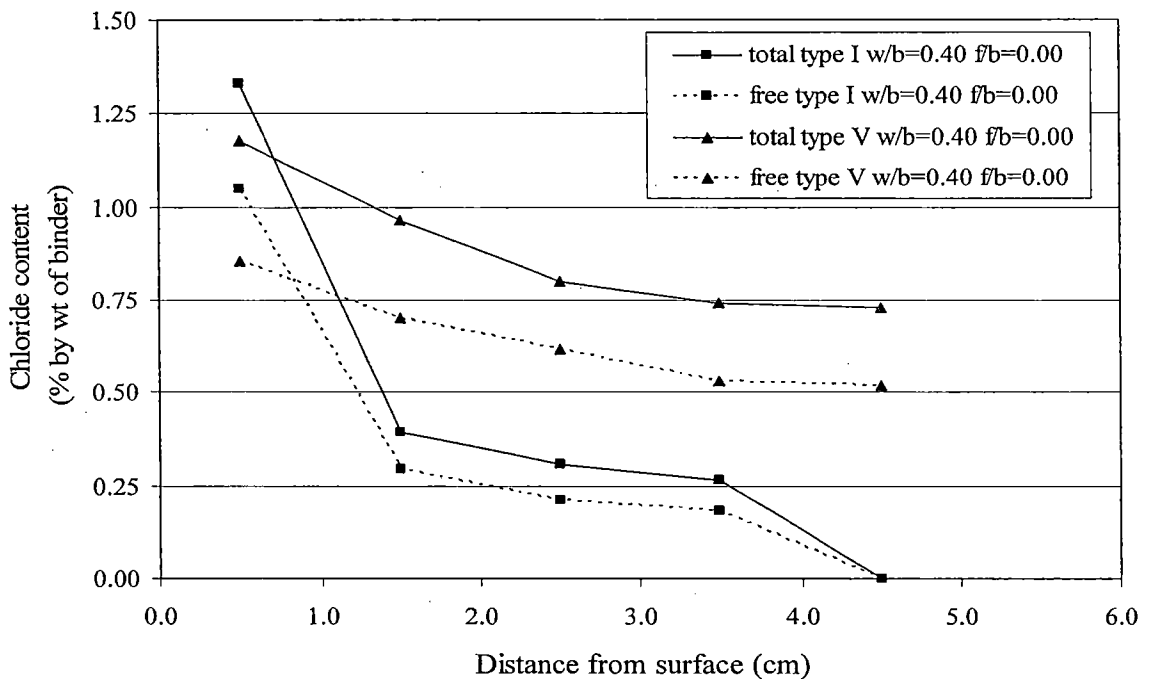


รูปที่ 4.58 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่าง ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในซีเมนต์เพสต์ (f/b) 0.40 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ในปริมาณต่าง ๆ



รูปที่ 4.59 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่าง ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในซีเมนต์เพสต์ (f/b) 0.60 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ในปริมาณต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.56-4.59 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (f/b) ที่คงที่ แต่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่แตกต่างกันพบว่า ในทุกๆ อัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่น้อยกว่าจะมีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระน้อยกว่าอัตราส่วนที่มีน้ำมากกว่า

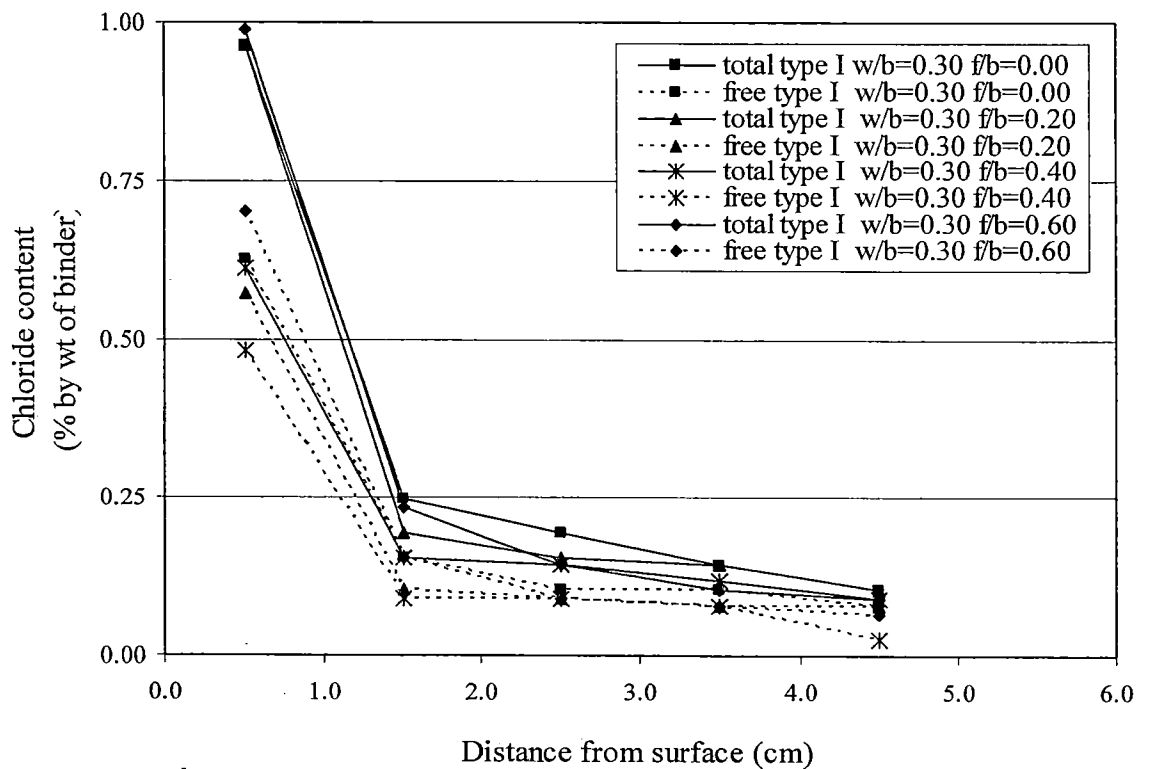


รูปที่ 4.60 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่าง ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.40 และ อัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในซีเมนต์เพสต์ (f/b) 0.00 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

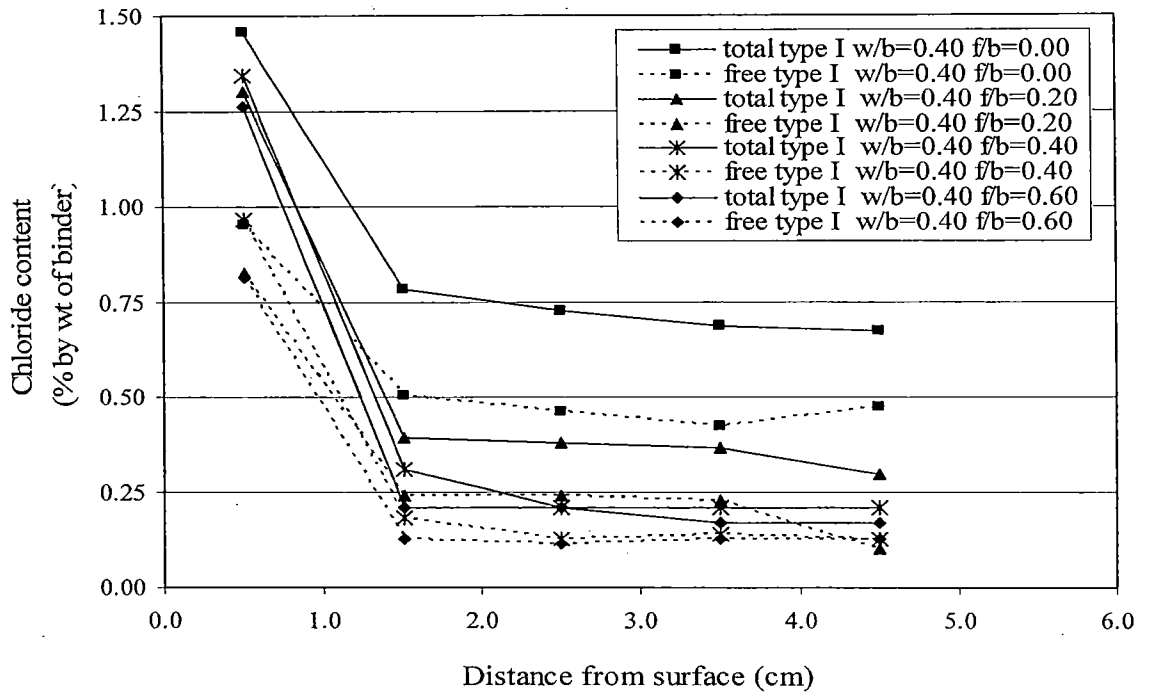
จากรูปที่ 4.60 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (f/b) และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่คงที่ แต่เปรียบเทียบระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 2 ประเภท พบว่าตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นส่วนผสมมีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระมากกว่าตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสม

4.3.4 กรณีบ่มน้ำ 28 วัน และแช่ในน้ำเกลือคลอไรด์ 5% 91 วัน (ชุดการทดลองที่ 4)

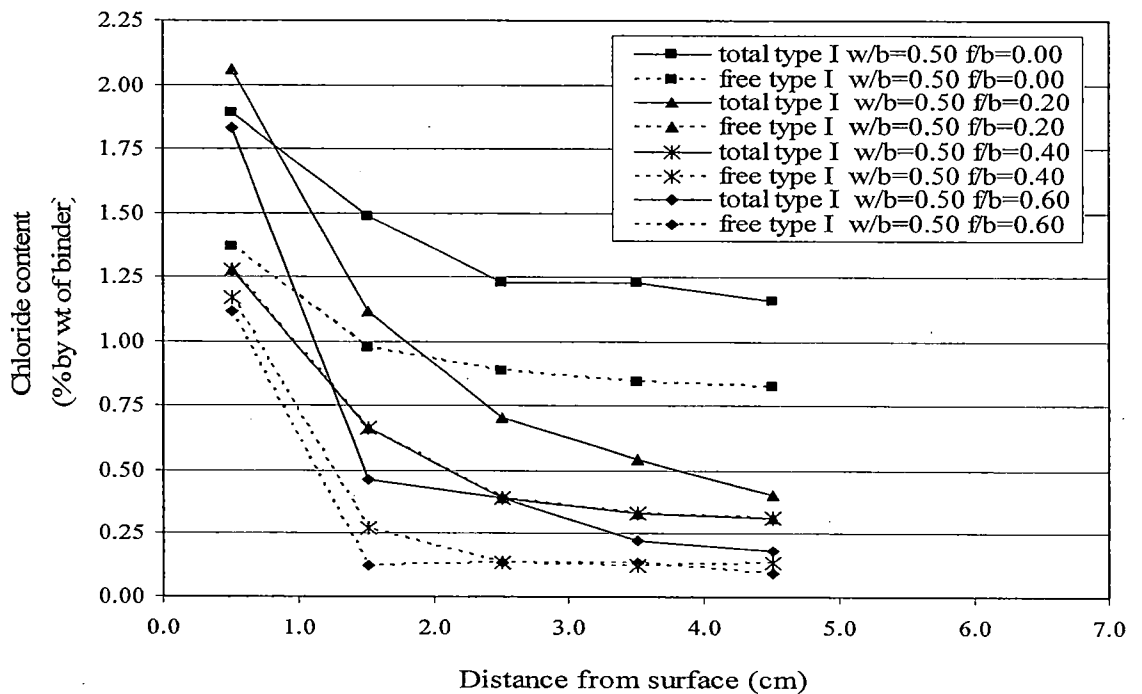
จากรูปที่ 4.61-4.68 แสดงกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่าง พบว่าผลการทดลองเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับชุดการทดลองที่ 1 2 และ 3 คือเมื่อระยะทางจากผิวของตัวอย่างเพิ่มขึ้น ปริมาณคลอไรด์ในแต่ละสัดส่วนผสมมีลักษณะลดลง นั่นหมายความว่าปริมาณสารคลอไรด์ที่เคลื่อนที่เข้าไปในตัวอย่งที่ระยะทางไกลขึ้นจะมีปริมาณน้อยกว่าบริเวณที่ใกล้ผิวด้านนอกของตัวอย่างซึ่งมีการสัมผัสกับน้ำเกลือคลอไรด์ 5% โดยตรง



รูปที่ 4.61 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่าง ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.30 และอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในซีเมนต์เฟส (f/b) ในปริมาณต่าง ๆ



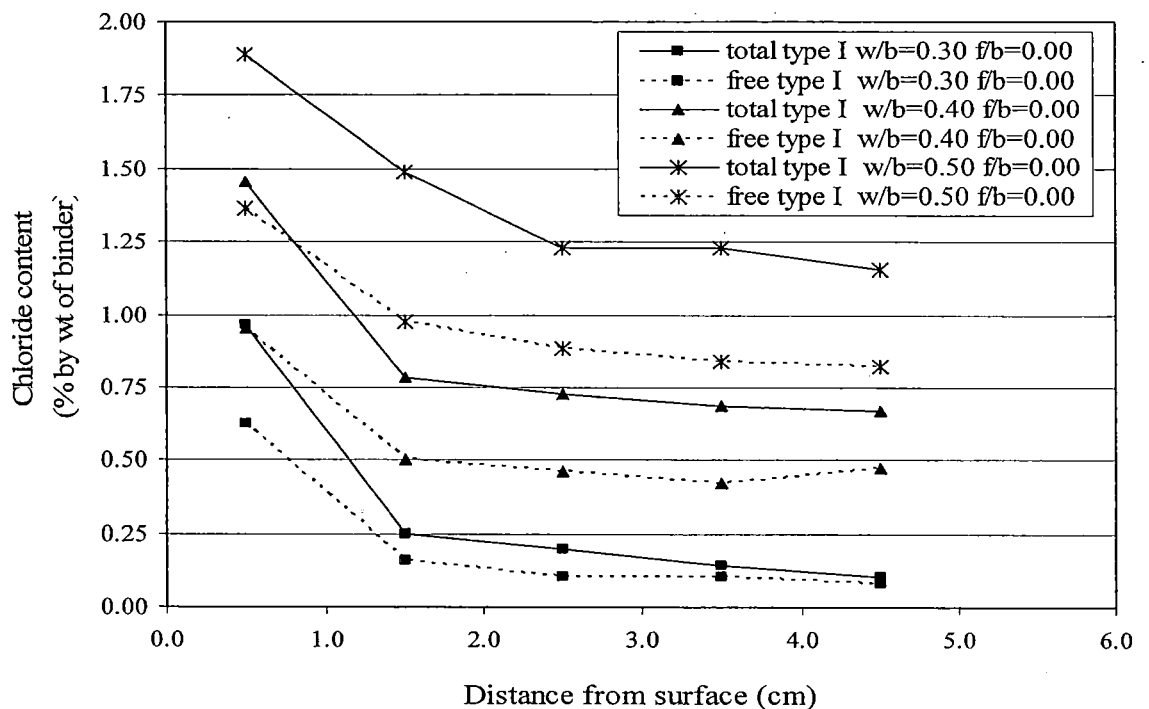
รูปที่ 4.62 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่าง ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.40 และอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในซีเมนต์เพสต์ (f/b) ในปริมาณต่าง ๆ



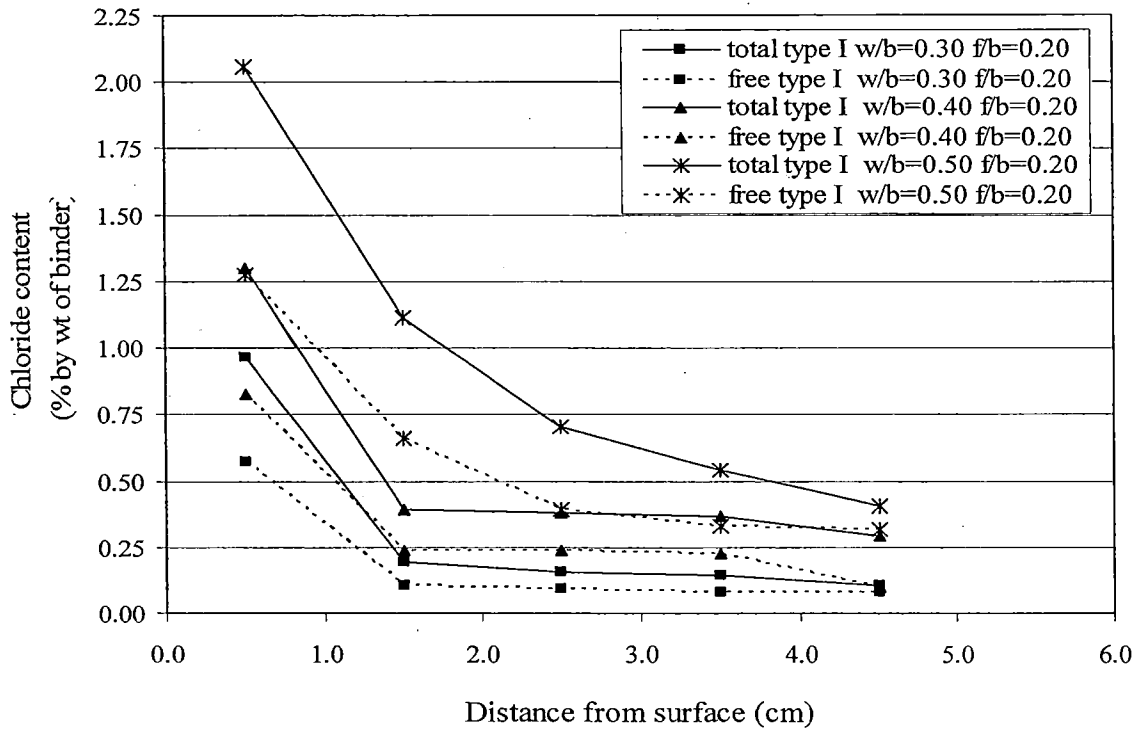
รูปที่ 4.63 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่าง ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50 และอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในซีเมนต์เพสต์ (f/b) ในปริมาณต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.61-4.63 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่เท่ากัน และแปรผันค่าอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (f/b) พบว่าที่ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ต่าง ๆ จะให้ผลการทดลองดังนี้

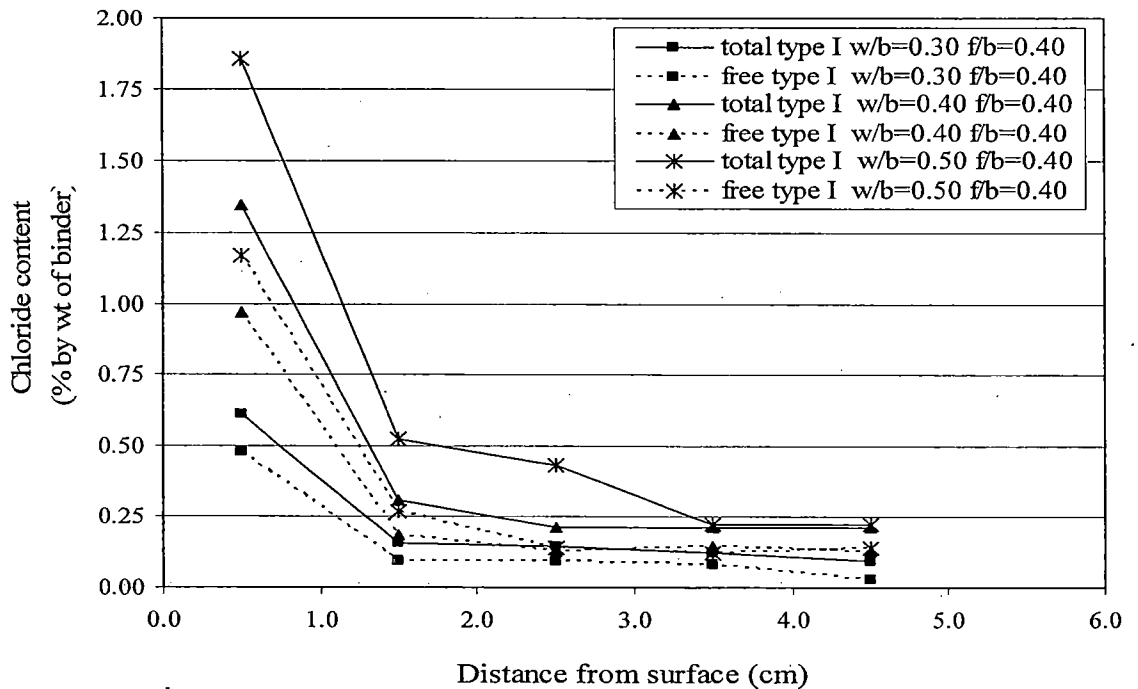
พบว่าในทุก ๆ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน หากมีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วน 0.40 -0.60 จะทำให้คลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระเคลื่อนที่เข้าไปในชั้นตัวอย่างได้น้อยที่สุดและเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับชุดการทดลองที่ 1 2 และ 3



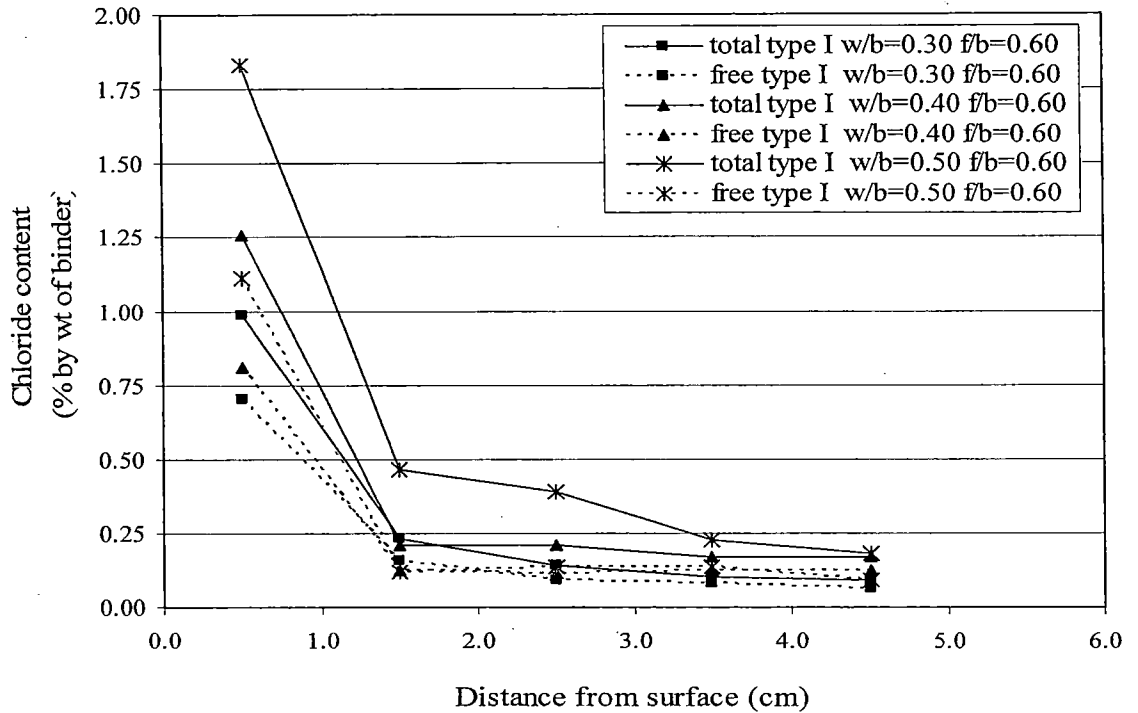
รูปที่ 4.64 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่าง ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในซีเมนต์เพสต์ (f/b) 0.00 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ในปริมาณต่าง ๆ



รูปที่ 4.65 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่าง ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในซีเมนต์เฟสค์ (f/b) 0.20 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ในปริมาณต่าง ๆ

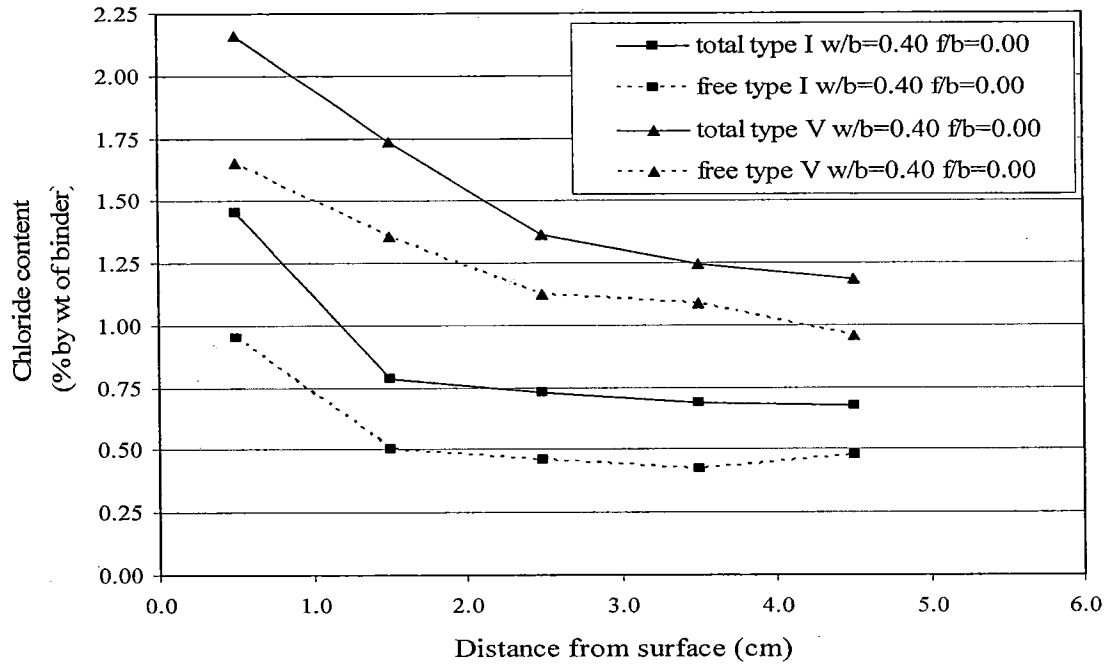


รูปที่ 4.66 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่าง ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในซีเมนต์เฟสค์ (f/b) 0.40 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ในปริมาณต่าง ๆ



รูปที่ 4.67 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่าง ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในซีเมนต์เพสต์ (f/b) 0.60 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ในปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 4.64-4.67 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (f/b) ที่คงที่ แต่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่แตกต่างกันพบว่า ในทุกๆ อัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่น้อยกว่าจะมีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระน้อยกว่าอัตราส่วนที่มีน้ำมากกว่า



รูปที่ 4.68 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่างที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.40 และ อัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในซีเมนต์เพสต์ (f/b) 0.00 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

จากรูปที่ 4.68 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (f/b) และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่คงที่ แต่เปรียบเทียบระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 2 ประเภท พบว่าตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นส่วนผสมมีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระมากกว่าตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสม

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างชุดการทดลองที่ 1 กับ 2 และชุดการทดลองที่ 3 กับ 4 ซึ่งมีระยะเวลาการบ่มเท่ากัน คือ 7 และ 28 วัน ตามลำดับ แต่ระยะเวลาการแช่น้ำเกลือคลอไรด์ 5% แตกต่างกัน คือ 28 และ 91 วัน โดยพิจารณารูปที่ ข-1 ถึง ข-26 ในภาคผนวก ข ซึ่งแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) และอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในซีเมนต์เพสต์ พบว่าอัตราส่วนผสมโดยส่วนใหญ่ที่มีระยะเวลาการแช่น้ำเกลือคลอไรด์ 5% นานกว่า จะมีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระมากกว่าตัวอย่างที่มีระยะเวลาการแช่น้ำเกลือคลอไรด์ 5% สั้นกว่า แต่จะมีบางอัตราส่วนผสมเท่านั้นที่ให้ผลกลับกัน คือ ที่ระยะเวลาการแช่น้ำเกลือคลอไรด์ 5% นาน

กว่า จะมีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระน้อยกว่าตัวอย่างที่มีระยะเวลาการแช่น้ำเกลือคลอไรด์ 5% สั้นกว่า ซึ่งคาดว่าอาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการทดลอง

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างชุดการทดลองที่ 1 กับ 3 และชุดการทดลองที่ 2 กับ 4 ซึ่งมีระยะเวลาการแช่น้ำเกลือคลอไรด์ 5% เท่ากัน คือ 28 และ 91 วันตามลำดับ แต่มีระยะเวลาการบ่มแตกต่างกัน คือ 7 และ 28 วัน โดยพิจารณาอยู่ที่ $x-27$ ถึง $x-52$ ในภาคผนวก ข ซึ่งแสดงกราฟความสัมพันธ์ปริมาณระหว่างสารคลอไรด์ (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) และอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในซีเมนต์เพสต์ พบว่าอัตราส่วนผสมโดยส่วนใหญ่ที่มีระยะเวลาการบ่มนานกว่า จะมีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระน้อยกว่าตัวอย่างที่มีระยะเวลาการบ่มน้อยกว่า แต่จะมีบางอัตราส่วนผสมเท่านั้นที่ให้ผลกลับกัน คือ ที่ระยะเวลาการบ่มนานกว่ากลับมีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระมากกว่าตัวอย่างที่มีระยะเวลาการบ่มน้อยกว่า ซึ่งคาดว่าอาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการทดลอง

จากผลการทดลองหาปริมาณสารคลอไรด์ทั้งหมดและสารคลอไรด์อิสระในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ ที่ได้จากการตัดตัวอย่างเป็นชิ้นหนา 1 ซม. ที่แสดงผลการทดลองเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอไรด์เป็นร้อยละโดยน้ำหนักของปริมาณวัสดุประสาน (% by wt of binder) กับระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวด้านนอกของตัวอย่างข้างต้น สามารถวิเคราะห์ผลโดยรวมทั้ง 4 ชุดการทดลองย่อย ดังนี้

การทดลองในแต่ละชุดให้ผลในลักษณะที่มีแนวโน้มเดียวกันคือ เมื่อพิจารณาตัวอย่างซึ่งมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยแตกต่างกัน พบว่าเมื่อระยะทางจากผิวด้านนอกของตัวอย่างเพิ่มขึ้น ปริมาณสารคลอไรด์จะมีแนวโน้มลดลง และสังเกตได้ว่าที่บริเวณที่ใกล้กับผิวของตัวอย่างมากที่สุด คือระยะ 0.5 ซม. มีปริมาณคลอไรด์มากกว่าในระยอื่น ๆ มาก แต่ที่ระยะที่ลึกเข้าไปจะมีปริมาณน้อยลงและค่อนข้างใกล้เคียงกัน นั่นหมายความว่าปริมาณสารคลอไรด์ที่เคลื่อนที่เข้าไปในตัวอย่างที่ระยะทางมากจะมีปริมาณน้อยกว่าบริเวณที่ใกล้ผิวของตัวอย่างซึ่งมีการสัมผัสกับน้ำเกลือคลอไรด์ 5% โดยตรง ทั้งนี้เนื่องจากที่ระยะทางห่างออกไปคลอไรด์จำเป็นต้องใช้ระยะเวลาที่มากกว่าในการเคลื่อนที่นั่นเอง

1) เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากัน แต่อัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วย
เถ้าลอยในซีเมนต์เพสต์ (f/b) ที่ต่างกัน

เมื่อพิจารณาตัวอย่างซึ่งมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เท่ากัน แต่อัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยแตกต่างกัน พบว่าทุกชุดการทดลองจะให้ผลการทดลองที่เหมือนและแตกต่างกันดังนี้

ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.30 0.40 และ 0.50 มีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระในแต่ละอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน และมีปริมาณคลอไรด์แตกต่างกันในแต่ละชุดข้อมูล คือไม่สามารถวิเคราะห์และสรุปผลของการแปรผันปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ที่เข้ามาในซีเมนต์เพสต์ได้

โดยพบว่าในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน หากมีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วน 0.40 - 0.60 จะทำให้คลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระเคลื่อนที่เข้าไปในชิ้นตัวอย่างได้น้อยที่สุด ซึ่งหมายความว่ามีโอกาสเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตน้อยกว่าอัตราส่วนการแทนที่อื่น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเถ้าลอยที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์นั้นมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ประมาณ 2 เท่า (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547) จึงช่วยทำให้ตัวอย่างซีเมนต์เพสต์แน่นขึ้นและมีความพรุนลดลง นอกจากนั้นแล้วการที่ปริมาณคลอไรด์อิสระลดลงอาจเกิดจากเถ้าลอยมีคุณสมบัติในการยึดจับคลอไรด์บางส่วนด้วยแรงทางกายภาพบนผิวของผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิก เช่น C-S-H

2) เมื่อพิจารณาอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในคอนกรีตที่เท่ากัน แต่อัตราส่วนของน้ำ
ต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่ต่างกัน

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในคอนกรีตที่เท่ากัน แต่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกัน พบว่าในทุกๆ อัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มากกว่าจะมีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระมากกว่าอัตราส่วนที่มีน้ำน้อยกว่า ทั้งนี้อาจเกิดเนื่องจากหากใช้น้ำในการผสมมากเกินไปจะทำให้ซีเมนต์เพสต์มีรูพรุนสูงส่งผลให้คลอไรด์สามารถเคลื่อนที่เข้าได้ง่าย

3) พิจารณาอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (f/b) และอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสาน
(w/b) ที่เท่ากันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5

พบว่า ตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นส่วนผสมมีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระมากกว่าตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสม ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คลอไรด์ทั้งหมดที่เคลื่อนที่เข้าไปถูกยึดจับโดยกระบวนการทางเคมี โดยคลอไรด์สามารถทำปฏิกิริยากับ C_3A ได้มากกว่า เพราะ

ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีสัดส่วนปริมาณ C_3A มากกว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ถึงประมาณ 3 เท่า คือเท่ากับ 12% และ 4% ตามลำดับ

4) เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างชุดการทดลองที่ 1 กับ 2 และชุดการทดลองที่ 3 กับ 4

เมื่อพิจารณาการทดลองซึ่งมีระยะเวลาการบ่มเท่ากัน คือ 7 และ 28 วัน ตามลำดับ แต่ระยะเวลาการแช่น้ำเกลือคลอไรด์ 5% แตกต่างกันคือ 28 และ 91 วัน พบว่าอัตราส่วนผสมโดยส่วนใหญ่ที่มีระยะเวลาการแช่น้ำเกลือคลอไรด์ 5% นานกว่า จะมีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระมากกว่าตัวอย่างที่มีระยะเวลาการแช่น้ำเกลือคลอไรด์ 5% สั้นกว่า เพราะการที่ตัวอย่างถูกแช่น้ำเกลือคลอไรด์ 5% นานกว่าย่อมมีปริมาณคลอไรด์เคลื่อนที่เข้าได้มากกว่า แต่จะมีบางอัตราส่วนผสมซึ่งเป็นส่วนน้อยมากให้ผลกลับกัน คือ ที่ระยะเวลาการแช่น้ำเกลือคลอไรด์ 5% นานกว่ากลับมีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระน้อยกว่าตัวอย่างที่มีระยะเวลาการแช่น้ำเกลือคลอไรด์ 5% สั้นกว่า ซึ่งอาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการทดลอง

5) เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างชุดการทดลองที่ 1 กับ 3 และชุดการทดลองที่ 2 กับ 4

เมื่อพิจารณาการทดลองซึ่งมีระยะเวลาการแช่น้ำเกลือคลอไรด์ 5% เท่ากันคือ 28 และ 91 วัน ตามลำดับ แต่มีระยะเวลาการบ่มแตกต่างกัน คือ 7 และ 28 วัน แต่ พบว่า อัตราส่วนผสมโดยส่วนใหญ่ที่มีระยะเวลาการบ่มนานกว่า จะมีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระน้อยกว่าตัวอย่างที่มีระยะเวลาการบ่มสั้นกว่า เพราะการที่ตัวอย่างถูกบ่มด้วยระยะเวลาที่นานกว่าย่อมทำให้ตัวอย่างเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้อย่างสมบูรณ์กว่า ตัวอย่างจึงมีกำลังมากและมีความพรุนน้อยกว่า นอกจากนั้นผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชันยังเพิ่มความสามารถในการยึดจับคลอไรด์ทางกายภาพได้ดีอีกด้วย แต่จะมีบางอัตราส่วนผสมซึ่งเป็นส่วนน้อยมากให้ผลกลับกัน คือ ที่ระยะเวลาการบ่มนานกว่ากลับมีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระมากกว่าตัวอย่างที่มีระยะเวลาการบ่มน้อยกว่า ซึ่งคาดว่าอาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการทดลอง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 ความคงทนของมอร์ตาร์ทที่ผสมสารปอชโซลานต่อสารละลายโซเดียมซัลเฟต

จากการทดสอบการวัดการขยายตัวของมอร์ตาร์ทที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้น 6.7% ซึ่งได้แบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งทำการเปรียบเทียบเฉพาะการแทนที่ด้วยเถ้าลอยเท่านั้น ซึ่งมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 0.55 และ 0.60 แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย 0.20 0.40 และ 0.60 ส่วนที่ 2 เป็นการเปรียบเทียบตัวอย่างที่มีการแทนที่ด้วยสารปอชโซลาน โดยสารปอชโซลานมี 3 ชนิด คือ เถ้าลอย เถ้าแกลบ และตะกรันเตาถลุงเหล็ก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย 0.20 0.40 และ 0.60 สรุปได้ดังนี้ ในส่วนที่หนึ่งที่มีการแทนที่เฉพาะเถ้าลอยพบว่า ตัวอย่างในทุกอัตราส่วนผสมจะมีการหดตัวในช่วงแรกและเมื่ออายุเพิ่มมากขึ้นก็จะค่อยๆ มีการขยายตัวขึ้น ซึ่งตัวอย่างที่มีการขยายตัวมากที่สุดคือตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย 0.60 และตัวอย่างที่มีความทนทานต่อสารละลายโซเดียมซัลเฟตได้ดีที่สุดคือ ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย 0.40 ในส่วนที่สองเป็นการเปรียบเทียบการใช้สารปอชโซลานทั้งสามชนิดเป็นส่วนผสมพบว่า ในช่วงแรกๆ ของอายุของตัวอย่างจะมีการหดตัวในทุกๆ อัตราส่วน และจะมีการเริ่มขยายตัวขึ้นเรื่อยๆ เมื่อมีอายุมากขึ้น และตัวอย่างที่มีการขยายตัวมากที่สุดก็คือ ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็ก 0.60 และตัวอย่างที่มีความทนทานต่อสารละลายโซเดียมซัลเฟตมากที่สุด คือ ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย 0.20 และจะเห็นได้ชัดว่า เมื่อตัวอย่างมีอายุมากขึ้นก็จะมีอัตราการขยายตัวมากขึ้นเช่นกัน

ผลการทดสอบทั้งสองส่วนเมื่อนำมาเปรียบเทียบกันจะเห็นได้ว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย 0.20 เกิดการขยายตัวน้อยที่สุด จึงเป็นส่วนผสมที่ดีที่สุด และจะสังเกตเห็นได้อีกว่าการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารปอชโซลานในปริมาณที่ไม่เหมาะสมและมากเกินไป จะมีผลทำให้มอร์ตาร์ทมีการขยายตัวมากขึ้น

5.2 ความคงทนของมอร์ตาร์ทที่ผสมสารปอชโซลานต่อสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

จากการทดสอบความทนทานต่อสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ทที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 6.7% เป็นตัวอย่างมอร์ตาร์ทที่ใช้สารปอชโซลาน 3 ชนิดเป็นวัสดุประสาน ซึ่งผลการทดลองพบว่า มอร์ตาร์ทที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและเถ้าแกลบในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีการสูญเสียกำลังรับแรงอัด มอร์ตาร์ทที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็ก 0.40 มีความทนทานต่อสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมากที่สุด และพบว่า

ถ้าหากแห้งตัวอย่างในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นระยะเวลาานานผิวมอร์ตาร์ดาร์จะเปื่อยยุ่ย จากการแทนที่วัสดุประสานด้วยตะกรันเตาสูงเหล็กมีผลดีทำให้มีค่าการสูญเสียกำลังรับแรงอัดลดลง

5.3 ความต้านทานการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์

จากการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ สามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1. ปริมาณสารคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในตัวอย่าง เมื่อระยะทางจากผิวหน้าตัวอย่างมากขึ้นจะมีปริมาณต่ำกว่าบริเวณที่ใกล้ผิวหน้าตัวอย่าง ซึ่งมีการสัมผัสกับน้ำเกลือคลอไรด์ 5% โดยตรง
2. ตัวอย่างที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.30 0.40 และ 0.50 หากมีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วน 0.40 จะทำให้คลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระเคลื่อนที่เข้าไปในชั้นตัวอย่างได้น้อยที่สุด ซึ่งหมายความว่ามีโอกาสเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตน้อยกว่าอัตราส่วนการแทนที่อื่น
3. ทุกๆ อัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ตัวอย่างที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระต่ำกว่าตัวอย่างที่อัตราส่วนที่มีน้ำสูงกว่า
4. ตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระมากกว่าตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
5. เมื่อระยะเวลาการแช่น้ำเกลือคลอไรด์ 5% นานขึ้น ตัวอย่างจะมีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระมากกว่าตัวอย่างที่มีระยะเวลาการแช่น้ำเกลือคลอไรด์ 5% สั้นกว่า
6. เมื่อระยะเวลาการบ่มนานขึ้น ตัวอย่างจะมีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระต่ำกว่าตัวอย่างที่มีระยะเวลาการบ่มสั้นกว่า

5.4 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

เนื่องจากในโครงการวิจัยนี้ได้ศึกษาทดลองความทนทานของมอร์ตาร์ดาร์และซีเมนต์เพสต์ต่อการทำลายของเกลือซัลเฟตและเกลือคลอไรด์แยกจากกัน และได้ทดสอบโดยใช้ตัวอย่างเป็นมอร์ตาร์ดาร์และซีเมนต์เพสต์ แต่ในน้ำทะเลตามธรรมชาตินั้นเกลือทั้งสองชนิดผสมอยู่ด้วยกัน ดังนั้นการศึกษาต่อไปในอนาคต ควรพิจารณาผลของเกลือซัลเฟตและเกลือคลอไรด์ไปควบคู่กันด้วย และควรพิจารณาทดสอบตัวอย่างคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเลจริงด้วย เพื่อเป็นข้อมูลสนับสนุนสำหรับการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้มีความคงทนต่อน้ำทะเลต่อไป

บรรณานุกรม

ASTM C1152, Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete. *Annual Book of ASTM Standards 2000 Volume 04.02*: 627-629

ASTM C1218, Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete. *Annual Book of ASTM Standards 2000 Volume 04.02*: 645-647

Mindess S., Young J.F., 1981. *Concrete*. New Jersey: Prentice-Hall.

Tangtermsirikul, S., 2003. *Durability and mix design of concrete*, 1st Edition, Printing house of Thammasat University, Thailand.

คณะกรรมการคอนกรีตและวัสดุ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2543. *ความคงทนของคอนกรีต*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: บริษัท จุดทองจำกัด. หน้า 40 – 42.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2548. *ปูนซีเมนต์ ปอชโซลานและคอนกรีต*. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สมาคมคอนกรีตไทย.

วินิต ช่อวิเชียร. 2544. *คอนกรีตเทคโนโลยี*. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ