รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย การแพร่ของคลอไรด์และความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย ผงหินปูน สารขยายตัวและเส้นใย

(Chloride diffusion and chloride binding capacity of cement paste containing fly ash, limestone powder, expansive agent and fiber)

ผศ.ดร. ทวีชัย สำราญวานิช

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้
จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณเงินแผ่นดิน)
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559
มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 222396

สัญญาเลขที่ 124/2559

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย การแพร่ของคลอไรด์และความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย ผงหินปูน สารขยายตัวและเส้นใย

(Chloride diffusion and chloride binding capacity of cement paste containing fly ash, limestone powder, expansive agent and fiber)

ผศ.ดร. ทวีชัย สำราญวานิช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

มีนาคม 2561

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2559 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 124/2559

Acknowledgement

This work was financially supported by the Research Grant of Burapha University through National Research Council of Thailand (Grant No. 124/2559)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการแพร่คลอไรด์และความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอยและสารขยายตัว โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและสารขยายตัว 0.30 และ 0.10 ตามลำดับ ทำการทดสอบการแพร่คลอไรด์โดยผสมเกลือโซเดียมคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ตั้งแต่แรกที่ปริมาณคลอไรด์ 3.0% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน จากนั้นบ่มตัวอย่างด้วยแผ่นพลาสติก ครบกำหนดจึงเคลือบผิวด้วยอีพ๊อกซีทุกด้านยกเว้นปลายด้านหนึ่ง แล้วนำไปแช่ในน้ำเปล่า 28 และ 91 วัน เมื่อครบกำหนดจึงนำตัวอย่างมาหาปริมาณคลอไรด์ตามระดับความลึกจากผิวหน้า และทำการทดสอบความสามารถเก็บกักคลอไรด์โดยนำชิ้นตัวอย่างไปแช่ไว้ในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ 5.0% โดยน้ำหนัก แล้วจึงนำมาทำการทดสอบที่อายุ 91 วัน นอกจากนี้ทำการทดสอบการแพร่คลอไรด์ของซีมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใย ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใย 0.25% และ 0.50% โดยปริมาตร ผสมเกลือคลอไรด์ในปริมาณเริ่มต้น 3.0% โดยน้ำหนักวัสดุประสานด้วย

จากผลการทดลองพบว่า ซีเมนต์เพสต์ล้วนมีความต้านทานการแพร่คลอไรด์มากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอยหรือสารขยายตัวและซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอยและสารขยายตัวตามลำดับ ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอย สารขยายตัวและฝุ่นหินปูนมีความสามารถเก็บกักคลอไรด์ดีกว่าซีเมนต์เพสต์ล้วน ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยมีความต้านทานการแพร่ของคลอไรด์ได้ดีกว่าซีเมนต์เพสต์ล้วน การแพร่คลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยที่ระยะเวลาการแช่น้ำเปล่า 28 วัน ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยที่ปริมาณ 0.25% มีการแพร่คลอไรด์ไม่แตกต่างกัน แต่ที่ปริมาณเส้นใย 0.50% ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยแก้วมีการแพร่คลอไรด์มากสุด ส่วนซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยเหล็กมีการแพร่คลอไรด์ต่ำสุด แต่ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 91วัน พบว่า ทั้งที่ปริมาณเส้นใย 0.25% และ 0.50% ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยแก้วมีการแพร่คลอไรด์มากที่สุดและซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยเหล็กมีการแพร่ต่ำสุด สุดท้ายพบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยแก้วความต้านทานการแพร่ของคลอไรด์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น

Abstract

This research aims to study chloride diffusion and chloride binding capacity of cement paste with fly ash and expansive agent. Type I Portland cement was used as main cementitious material. Water to binder ratios of 0.40 and 0.50 were used. Fly ash and expansive agent were replaced in binder at ratio of 0.30 and 0.10, respectively. Chloride diffusion test were performed by mixing initial chloride in cement paste at 3.0% by weight of binder. Cement pastes were cured in plastic sheet, then coated with epoxy except one end and exposed in pure water for 91 days. After exposure, cement pastes were cut and investigated chloride content along the depth from exposed surface. Moreover, the chloride diffusion test was also done for cement pastes containing fibers at water to binder ratio of 0.40 and fiber contents of 0.25% and 0.50% by volume of paste with initial chloride content of 3.0% by weight of binder.

From the experimental results, it was found that cement-only paste has higher chloride diffusion resistance than cement paste with fly ash or expansive agent and cement paste with both fly ash and expansive agent, respectively. Cement paste with fly ash, expansive agent and limestone powder has higher chloride binding capacity than cement-only paste. Cement paste containing fiber has better chloride diffusion resistance than cement-only paste. The chloride diffusion of cement paste changes with time. At 28-day exposure in pure water, there is no difference in chloride diffusion of cement paste at 0.25% fiber content. Cement paste with glass fiber has the highest chloride diffusion, while cement paste with steel fiber has the lowest chloride diffusion at 0.50% fiber content. However, at 91-day exposure in pure water, cement paste with glass fiber has the highest chloride diffusion, while cement paste with steel fiber has the lowest chloride diffusion at both 0.25% and 0.50% fiber contents. Finally, it was noted that cement paste with glass fiber has clearly higher chloride diffusion resistance with the increase of fiber content.

สารบัญเรื่อง

เรื่อง	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
สารบัญเรื่อง	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
บทนำ	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
ขอบเขตของงานวิจัย	2
ประโยชน์ที่ได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
แหล่งที่มาของคลอไรด์	4
การเคลื่อนที่ของคลอไรด์ในคอนกรีต	5
การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต	6
การเกิดสนิมในเหล็ก	7
ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการแทรกซึมของคลอไรด์	9
การป้องกันการซึมผ่านของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	11
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	15
วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	15
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	20
วิธีทำการทดลอง	22
บทที่ 4 ผลการทดลอง	34
การแพร่คลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์	34
ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์	68
กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์	72

บทที่ 5 สรุปผล 77
สรุปผล 77
ข้อเสนอแนะ 78
ผลผลิต (Output)
บรรณานุกรม
ภาคผนวก
ประวัตินักวิจัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5	16
3.2	องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย ฝุ่นหินปูนและสารขยายตัว	19
3.3	ส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์แทนที่ด้วยเส้นใย	22
3.4	ส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์แทนที่ด้วยสารผสมเพิ่ม	23
3.5	ส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ด้วยสารขยายตัว เถ้าลอยและฝุ่นหินปูน	30

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ความเสี่ยงที่จะเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตที่โครงสร้างสัมผัสกับน้ำทะเล	4
2.2	การจำลองข้อมูลการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ในคอนกรีตภายใต้อิทธิพลของวงจรสภาวะเปียกสลับแห้ง	5
2.3	ผลของอุณหภูมิและอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์	10
2.4	ภาพจำลองการให้แรงกับตัวอย่างคอนกรีต	11
2.5	ภาพเส้นใยไฟเบอร์ชนิดต่างๆที่ใช้ในการทดลอง	12
2.6	ภาพการทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์	12
2.7	ภาพแม่พิมพ์และการตัดตัวอย่างคอนกรีต	13
2.8	กราฟการเปลี่ยนแปลงระดับการแทรกซึมของคลอไรด์กับระดับหน่วยแรงอัด	13
2.9	กราฟการเปลี่ยนแปลงระดับการแทรกซึมของคลอไรด์กับระดับหน่วยแรงดึง	14
3.1	เส้นใยสังเคราะห์อาคิลิก (Acrylic fiber)	17
3.2	เส้นใยแก้ว (Glass fiber)	17
3.3	เส้นใยเหล็ก (Steel fiber)	18
3.4	เครื่องตัดตัวอย่างทดสอบ	21
3.5	ชุดอุปกรณ์เครื่องแก้ว	21
3.6	เครื่อง Potentiometric titration และเครื่องกวนแม่เหล็ก	21
3.7	ชิ้นตัวอย่างที่เคลือบผิวด้านข้างด้วยสารกันซึม	25
3.8	การตัดแท่งตัวอย่างและส่วนของตัวอย่างที่นำมาบดเป็นผง	25
3.9	แผ่นตัวอย่าง หนา 1ซม	26
3.10	การกรองสารละลายตัวอย่าง	27
3.11	การไตเตรทหาปริมาณคลอไรด์	28

3.12	ชิ้นตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ	29
3.13	หลักการความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์	30
3.14	เครื่องกดชิ้นตัวอย่าง	31
3.15	ชิ้นตัวอย่างที่แช่ในน้ำเกลือ	31
3.16	การเก็บน้ำเกลือภายนอก	32
3.17	การซับน้ำจากชิ้นตัวอย่าง	32
3.18	การเตรียมตัวอย่างเพื่อไตเตรท	33
3.19	ชิ้นตัวอย่างทรงลูกบาศก์	33
4.1	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างกัน	34
4.2	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลัก เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างกัน	35
4.3	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างกัน	36
4.4	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างกัน	36
4.5	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยเท่ากับ 0.30 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างกัน	37
4.6	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัวกับเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวกับเถ้าลอยเท่ากับ 0.10 และ0.30 ตามลำดับเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างเท่ากัน	38

4.7	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมกับสารขยายตัวและเถ้าลอยในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวและเถ้าลอยที่แตกต่างกัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากันที่ 0.40	39
4.8	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมกับสารขยายตัวและเถ้าลอยในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวและเถ้าลอยที่แตกต่างกัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากันที่ 0.50	39
4.9	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก	41
4.10	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก	41
4.11	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักและมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสาน 0.40 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก	42
4.12	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักและมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก	43
4.13	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัวในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก	43
4.14	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัวในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก	44
4.15	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัวในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก	45

4.16	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัวในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก	45
4.17	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยเท่ากับ 0.30 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก	46
4.18	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยเท่ากับ 0.30 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก	46
4.19	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมสารขยายตัวและเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวและเถ้าลอยเท่ากับ 0.10 และ 0.30 ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก	47
4.20	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมสารขยายตัวและเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวและเถ้าลอยเท่ากับ 0.10 และ 0.30 ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก	47
4.21	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยสังเคราะห์อาคิลิก ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 28 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใยแตกต่างกัน	49
4.22	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยเหล็ก ที่ระยะเวลาแช่น้ำประปา 28 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใยแตกต่างกัน	50
4.23	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยแก้ว ที่ระยะเวลาแช่น้ำประปา 28 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใยแตกต่างกัน	50

4.24	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ล้วนและซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยต่างๆ ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 28 วัน เทียบกับระยะทางจาก ผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใย 0.25% โดยปริมาตร	51
4.25	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ล้วนและซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยต่างๆ ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 28 วัน เทียบกับระยะทางจาก ผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใย 0.50% โดยปริมาตร	52
4.26	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยสังเคราะห์อาคิลิก ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 91 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใยแตกต่างกัน	52
4.27	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยเหล็ก ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 91 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใยแตกต่างกัน	53
4.28	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยแก้ว ที่ระยะเวลาแช่น้ำประปา 91 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใยแตกต่างกัน	54
4.29	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ล้วนและซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยต่างๆ ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 91 วัน เทียบกับระยะทางจาก ผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใย 0.25% โดยปริมาตร	55
4.30	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ล้วนและซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยต่างๆ ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 91 วัน เทียบกับระยะทางจาก ผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใย 0.50% โดยปริมาตร	55
4.31	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยสังเคราะห์อาคิลิก ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 28 และ91 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใย 0.25% โดยปริมาตร	56
4.32	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยสังเคราะห์อาคิลิก ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 28 และ91 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใย 0.50% โดยปริมาตร	57
4.33	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยเหล็ก ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 28 และ91 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใย 0.25% โดยปริมาตร	57

4.34	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยเหล็ก ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 28 และ91 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใย 0.50 % โดยปริมาตร	58
4.35	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยแก้ว ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 28 และ91 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใย 0.25% โดยปริมาตร	59
4.36	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยแก้ว ที่ระยะเวลาแช่น้ำประปา 28 และ91 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใย 0.50% โดยปริมาตร	59
4.37	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนค์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แช่น้ำเปล่าเป็นระยะเวลา 28 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก	60
4.38	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนค์เพสต์ที่ผสมเส้นใยสังเคราะห์อาคิลิกที่แช่น้ำเปล่าเป็นระยะเวลา 28 วัน และผสมเส้นใยในปริมาณ 0.25% โดยปริมาตร เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก	61
4.39	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนค์เพสต์ที่ผสมเส้นใยสังเคราะห์อาคิลิกที่แช่น้ำเปล่าเป็นระยะเวลา 28 วัน และผสมเส้นใยในปริมาณ 0.50% โดยปริมาตร เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก	61
4.40	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนค์เพสต์ที่ผสมเส้นใยเหล็กที่แช่น้ำเปล่าเป็นระยะเวลา 28 วัน และผสมเส้นใยในปริมาณ 0.25% โดยปริมาตร เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก	62
4.41	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนค์เพสต์ที่ผสมเส้นใยเหล็กที่แช่น้ำเปล่าเป็นระยะเวลา 28 วัน และผสมเส้นใยในปริมาณ 0.50% โดยปริมาตร เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก	62
4.42	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนค์เพสต์ที่ผสมเส้นใยแก้วที่แช่น้ำเปล่าเป็นระยะเวลา 28 วัน และผสมเส้นใยในปริมาณ 0.25% โดยปริมาตร เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก	63
4.43	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนค์เพสต์ที่ผสมเส้นใยแก้วที่แช่น้ำเปล่าเป็นระยะเวลา 28 วัน และผสมเส้นใยในปริมาณ 0.50% โดยปริมาตร เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก	63

4.44	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แช่น้ำเปล่าเป็นระยะเวลา 91 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก	64
4.45	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยสังเคราะห์อาคิลิกที่แช่น้ำเปล่าเป็นระยะเวลา 91 วัน และผสมเส้นใยในปริมาณ 0.25% โดยปริมาตร เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก	65
4.46	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยสังเคราะห์อาคิลิกที่แช่น้ำเปล่าเป็นระยะเวลา 91 วัน และผสมเส้นใยในปริมาณ 0.50% โดยปริมาตร เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก	65
4.47	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยเหล็กที่แช่น้ำเปล่าเป็นระยะเวลา 91 วัน และผสมเส้นใยในปริมาณ 0.25% โดยปริมาตร เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก	66
4.48	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยเหล็กที่แช่น้ำเปล่าเป็นระยะเวลา 91 วัน และผสมเส้นใยในปริมาณ 0.50% โดยปริมาตร เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก	66
4.49	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยแก้วที่แช่น้ำเปล่าเป็นระยะเวลา 91 วัน และผสมเส้นใยในปริมาณ 0.25% โดยปริมาตร เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก	67
4.50	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยแก้วที่แช่น้ำเปล่าเป็นระยะเวลา 91 วัน และผสมเส้นใยในปริมาณ 0.50% โดยปริมาตร เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก	67
4.51	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ ในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวกับเถ้าลอย และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่างกัน	69
4.52	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ ในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่างกัน	71
4.53	กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวกับเถ้าลอย และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่างกัน	72
4.54	กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่ระยะทางจากผิวด้านนอกที่สัมผัสกับน้ำเปล่า 10 มม. เทียบกับกำลังรับแรงอัด	73

4.55	กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยต่างๆที่มีและปริมาณเส้นใย 0.25% และ 0.50% โดยปริมาตร	74
4.56	กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่ระยะทางจากผิวด้านนอกที่สัมผัสกับน้ำเปล่า 10 มม. เทียบกับกำลังรับแรงอัด	75
4.57	กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานฝุ่นหินปูนและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่างกัน	76

บทที่1

บทนำ

บทนำ

การแพร่ของคลอไรด์ (Chloride diffusion) ถือเป็นกลไกหลักในการแทรกซึมคลอไรด์ (Chloride penetration) จากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้าสู่ภายในคอนกรีต และส่งผลให้เหล็กเสริมภายในคอนกรีตเป็นสนิมและความทนทานของโครงสร้างลดลง โดยเมื่อค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ในคอนกรีตตรงบริเวณผิวเหล็กเสริมมีค่าเกินกว่าค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤต (Chloride threshold content) จะทำให้เหล็กเสริมเริ่มสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิม (Depassivation) และหากมีอ๊อกซิเจนและน้ำตรงบริเวณนั้น กระบวนการเกิดสนิมก็จะเกิดขึ้นได้ ทั้งนี้การแพร่ของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตนั้นจะแพร่ผ่านเนื้อซีเมนต์เพสต์ของคอนกรีต ดังนั้นหากต้องการศึกษาผลกระทบของการแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีตนั้นก็สามารถศึกษาจากการแพร่ของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ได้เช่นกัน

ในระหว่างที่เกลือคลอไรด์แทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตนั้น ซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตสามารถในการยึดจับคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้ามา โดยความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์มีความสำคัญเป็นอย่างมาก เพราะหากซีเมนต์เพสต์มีความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์สูงจะช่วยป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมให้เกิดช้าลง ดังนั้นความหมายของความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์คือ ความสามารถในการจับคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ให้กลายเป็นคลอไรด์ที่ถูกจับยึด (Fixed chloride) ด้วยกลไกการยึดเหนี่ยวทางกายภาพ (Physical binding) และทางเคมี (Chemical binding) โดยคลอไรด์ที่ถูกจับยึดนี้ไม่สามารถจะไปทำอันตรายเหล็กเสริมในคอนกรีตได้ ทั้งนี้ซีเมนต์เพสต์แต่ละส่วนผสมจะมีความสามารถเก็บกักคลอไรด์ที่ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุประสานที่ใช้ ปริมาณวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อายุการบ่ม และระยะเวลาการเผชิญเกลือคลอไรด์ด้วย เป็นต้น

ดังนั้นการปรับปรุงส่วนผสมคอนกรีตเพื่อให้มีความต้านทานคลอไรด์ที่ดี รวมถึงการทดสอบหาความต้านทานคลอไรด์คอนกรีตเพื่อทำตรวจสอบประสิทธิภาพในการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตก่อน จึงเป็นเรื่องที่จำเป็นและสำคัญสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องเผชิญกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ ทั้งนี้ มีการนำสารปอซโซลานต่างๆ มาใช้ทดแทนบางส่วนของปูนซีเมนต์เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้น ซึ่งเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่า เถ้าลอย (Fly ash) เป็นสารปอซโซลานที่ช่วยทำให้ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตดีขึ้น แต่มีข้อเสียคือการพัฒนากำลังรับแรงในช่วงอายุเริ่มต้นค่อนข้างช้าเนื่องจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกต้องใช้เวลานาน ในขณะที่การใช้วัสดุเฉื่อยอย่างเช่น ผงหินปูน (Limestone powder) ในคอนกรีตมีข้อดีในการช่วยเพิ่มปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่ช่วงเริ่มต้นทำให้การพัฒนากำลังในช่วงอายุเริ่มต้นมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ปัจจุบันยังมีการใช้สารขยายตัว

(Expansive agent) ใส่ในส่วนผสมคอนกรีตเพื่อช่วยลดผลกระทบจากการแตกร้าวของคอนกรีตเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง (Drying shrinkage) อีกด้วย นอกจากการลดการแตกร้าวของคอนกรีตด้วยสารขยายตัวแล้ว ยังมีการผสมเส้นใย (Fiber) ลงไปในคอนกรีต เพื่อให้เส้นใยทำหน้าที่รับแรงดึงที่เกิดขึ้น ช่วยลดการแตกร้าวให้น้อยลง ทั้งนี้เส้นใยที่ผสมเพิ่มลงไปนั้น ยังพบว่าสามารถช่วยลดการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตลงด้วย เนื่องจากตัวเส้นใยจะขวางการแทรกซึมของคลอไรด์

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งทำการศึกษาการแพร่ของคลอไรด์และความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย ผงหินปูน สารขยายตัวและเส้นใย เพื่อหาส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแพร่ของคลอไรด์ที่ต่ำและมีความสามารถเก็บกักคลอไรด์ที่ดี โดยใช้สารผสมเพิ่มได้แก่ เถ้าลอย ผงหินปูน สารขยายตัวแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ และใช้เส้นใยแทนที่ในซีเมนต์เพสต์ตามอัตราส่วนโดยปริมาตรต่างๆ ซึ่งผลจากการศึกษานี้จะช่วยให้การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่ต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการแพร่ของคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย ผงหินปูน สารขยายตัวและเส้นใย
2. เพื่อศึกษาความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย ผงหินปูนและสารขยายตัว
3. เพื่อหาส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแพร่ของคลอไรด์ที่ต่ำและมีความสามารถเก็บกักคลอไรด์ที่ดี

ขอบเขตของงานวิจัย

ทำการศึกษาการแพร่ของคลอไรด์และความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย ผงหินปูน สารขยายตัวและเส้นใย โดยตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย อัตราส่วนแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูน อัตราส่วนแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัว ปริมาณเส้นใยที่ใช้ ชนิดของเส้นใย และระยะเวลาแผ่ชิญเกลือคลอไรด์ต่างๆ เป็นต้น พร้อมทั้งมุ่งหาส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแพร่ของคลอไรด์ที่ต่ำและมีความสามารถเก็บกักคลอไรด์ที่ดี

ประโยชน์ที่ได้รับ

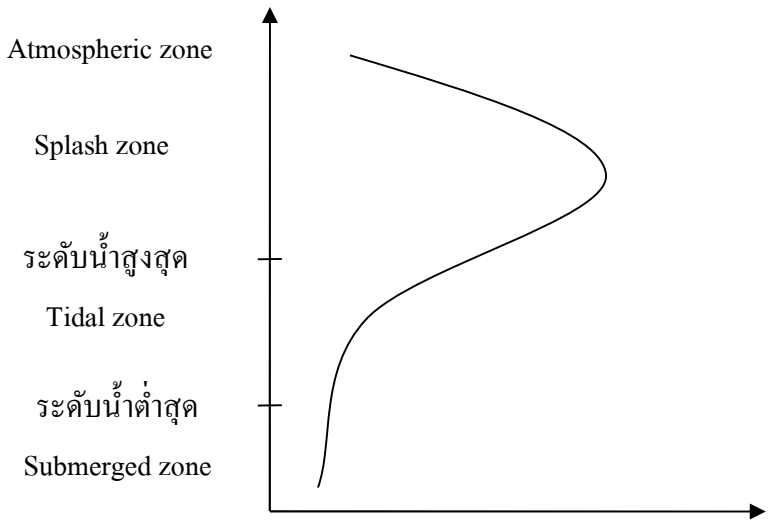
1. ทำให้ทราบถึงการแพร่ของคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย ผงหินปูน สารขยายตัว และเส้นใย
2. ทำให้ทราบถึงความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย ผงหินปูนและสารขยายตัว
3. ทำให้ทราบถึงส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแพร่ของคลอไรด์ที่ต่ำและมีความสามารถเก็บกักคลอไรด์ที่ดี

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แหล่งที่มาของคลอไรด์

โดยมากแล้วเกลือคลอไรด์จะมีมากในน้ำทะเล ดังนั้นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้งานในสถานที่มีน้ำทะเลอยู่หรือในบริเวณใกล้เคียงจะมีโอกาสที่เกิดการพังทลายของโครงสร้างจากการที่คลอไรด์เข้าไปทำให้เหล็กเสริมในโครงสร้างเป็นสนิม และคลอไรด์อาจจะมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่น อยู่ใน น้ำที่ผสม หิน และทราย หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ที่มักมีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อความทนทานของคอนกรีตนั้น ส่วนมากจะมาจากภายนอกคอนกรีตในช่วงใช้งานซึ่งคลอไรด์อาจเข้าสู่คอนกรีตได้โดยวิธีต่างๆ เช่น การซึมผ่านคอนกรีตที่แห้งของน้ำที่มีคลอไรด์ (น้ำทะเล,น้ำเกลือในอุตสาหกรรม),การแพร่ของอิออนคลอไรด์ จากภายนอกที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าภายในของคอนกรีต และ การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตของน้ำที่มีคลอไรด์ โดยแรงดันน้ำ สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลานั้น ถึงแม้ว่าคลอไรด์จะซึมเข้าไปในคอนกรีตได้ดี แต่ถ้าไม่มีออกซิเจนเพียงพอ การเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้จึงไม่เป็นปัญหามาก ส่วนที่มีความเสี่ยงสูงที่จะเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากที่สุด มักพบในบริเวณคลื่นละอองน้ำ รองลงมาก็เป็นบริเวณบรรยากาศทะเล และบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง ส่วนบริเวณใต้น้ำทะเลจะมีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมในเหล็กเสริมน้อยมาก ดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ความเสี่ยงที่จะเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตที่โครงสร้างสัมผัสกับน้ำทะเล

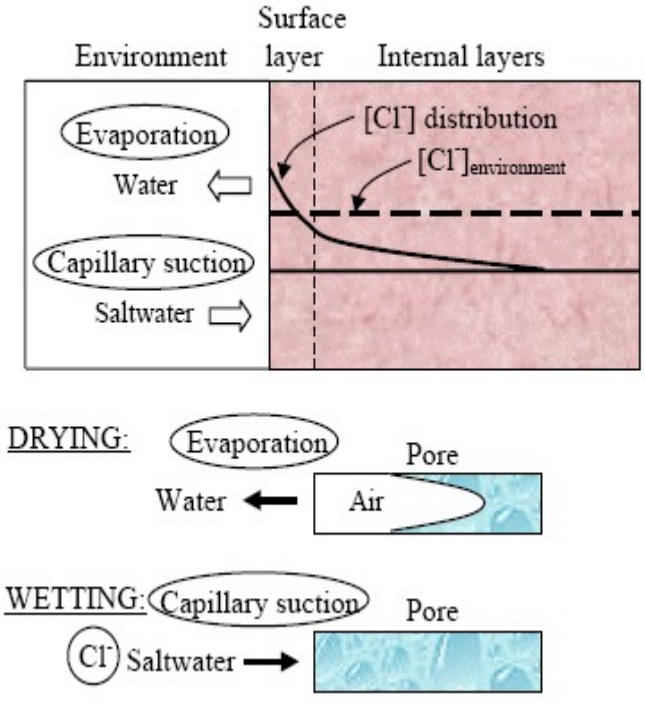
การที่ในบริเวณใต้น้ำทะเลมีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมน้อยกว่าบริเวณอื่น เนื่องจากบริเวณใต้น้ำทะเลมีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อยและอัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปในคอนกรีตต่ำมาก เนื่องจากช่องว่างภายในคอนกรีตเป็นช่องว่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งออกซิเจนละลายน้ำได้น้อยมาก ทำให้อัตราการแพร่เกิดขึ้นน้อย

การเคลื่อนที่ของคลอไรด์ในคอนกรีต

มีการศึกษาจำลองการเคลื่อนไหวของคลอไรด์ในคอนกรีตมากมาย โดยอาศัยทฤษฎีในการแพร่กระจายตัวของคลอไรด์ที่แตกต่างกันไป ทว่าไม่มีข้อพิสูจน์ว่าแบบจำลองใดๆมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับโครงสร้างของจริงตามธรรมชาติ เนื่องมาจากว่ายังมีความเข้าใจไม่เพียงพอเกี่ยวกับเรื่องการทำปฏิกิริยาของคลอไรด์

แบบจำลองของวงจรสภาวะเปียกสลับแห้ง

ในสิ่งแวดล้อมทางทะเลจะเกิดวงจรสภาวะเปียกและสภาวะแห้งกับโครงสร้างคอนกรีตอยู่เสมอ เนื่องมาจากการขึ้น-ลงของน้ำทะเล โดยจะเกิดวงจรนี้ขึ้น 2 ครั้งต่อวันตามปกติ ซึ่งกลไกนี้ก่อให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงกับโครงสร้างคอนกรีต ระหว่างที่เกิดสภาวะแห้งกับโครงสร้างคอนกรีตในช่วงที่เกิดน้ำลง น้ำจะระเหยเป็นไอจากคอนกรีต เหลือไว้แต่เกลือในช่องรูพรุนของคอนกรีต เมื่อถึงเวลาน้ำขึ้น น้ำทะเลจากภายนอกจะแทรกเข้าไปในคอนกรีต ทำให้ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตเพิ่มขึ้น ในขณะที่เกิดวงจรสภาวะเปียกและสภาวะแห้งนี้สลับกันไปมาเป็นระยะเวลานาน ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นแต่จะมีผลกับพื้นผิวด้านนอกของคอนกรีตมากกว่าภายในเนื้อของคอนกรีต



ภาพที่ 2.2 การจำลองข้อมูลการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ในคอนกรีต
ภายใต้อิทธิพลของวงจรสภาวะเปียกสลับแห้ง

การจำลองข้อมูลการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ในคอนกรีตภายใต้อิทธิพลของการอยู่ใต้น้ำทะเลเป็นไปตามกฎข้อที่ 2 ของฟิค เป็นสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial C_t(x,t)}{\partial t} = -D_{CL}(x,t)\frac{\partial^2 C_f(x,t)}{\partial^2 x}$$

เมื่อ

$C_t(x,t)$ และ $C_f(x,t)$ คือ ปริมาณคอไรด์ทั้งหมดและ คลอไรด์อิสระที่ระยะ x จากผิวของคอนกรีต มีหน่วยเป็น โมล/ลิตร

$D_{CL}(x,t)$ คือ ค่าสัมประสิทธิการกระจายตัวของคลอไรด์จากระยะ x ที่เวลา t มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตร/วัน (เครื่องหมายลบที่ค่าสัมประสิทธิการกระจายตัวของคลอไรด์บ่งบอกว่าการกระจายตัวเกิดขึ้นในทิศทางตรงกันข้ามกับการเพิ่มของคลอไรด์)

x คือ ระยะจากพื้นผิวของคอนกรีตมีหน่วยเป็นเซนติเมตร

t คือ เวลาในการทดสอบมีหน่วยเป็นวัน

การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

การแทรกซึมของคลอไรด์ สามารถเกิดขึ้นจากสาเหตุต่างๆ เช่น ความแตกต่างของความเข้มข้น แรงดันน้ำ และประจุไฟฟ้า นอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับแรงขับเคลื่อนของกลไกและธรรมชาติของสสารที่เคลื่อนผ่าน กลไกสำคัญของการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปยังเนื้อคอนกรีตสามารถแบ่งได้เป็น 4 กลไก ดังนี้

1. การแพร่ (Diffusion) เกิดจากการที่ระดับความเข้มข้นของ คลอไรด์ไอออน ในสิ่งแวดล้อมภายนอกของคอนกรีต มากกว่า คลอไรด์ไอออนในบริเวณรูพรุนของคอนกรีต จะเกิด กลไกลการแพร่ขึ้น โดยคลอไรด์ไอออน ในสิ่งแวดล้อมภายนอกจะแพร่เข้ามาในตัวคอนกรีต ซึ่งมีความเข้มข้นต่ำกว่า เป็นไปตามกฎข้อที่ 2 ของฟิค

2. การดึงดูดแบบคาปิลลารี (Capillary suction) การดึงดูดแบบคาปิลลารีจะเกิดขึ้นเมื่อมีการผ่านเข้าไปของน้ำเค็มที่มี เกลือคลอไรด์ เข้าไปในรูพรุนที่อยู่ในตัวคอนกรีต ซึ่งกลไกที่ดูดน้ำเค็มเก็บไว้ในรูพรุนของคอนกรีตนี้ เรียกว่า การดึงดูดแบบคาปิลลารี ซึ่งการแทรกซึมของคลอไรด์จากวงจรสภาวะเปียกและสภาวะแห้งก็คือการดึงดูดแบบคาปิลลารี

3. การดึงดูดไอออน (Ion adsorption) การดึงดูดไอออนเกิดขึ้นเพราะผลจากรูพรุนที่บริเวณผนังของคอนกรีตที่มีคุณสมบัติเป็นประจุบวกได้ดึงดูด คลอไรด์ไอออน ที่เป็นประจุลบ ในโครงสร้างที่มี

ความพรุนสูงคอนกรีตจะมีค่าการดึงดูดไอออนที่สูงกว่าคอนกรีตที่มีความพรุนต่ำกว่า ดังนั้นการลดความพรุนในตัวโครงสร้างคอนกรีตเองก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะป้องกันการแทรกซึมของคลอไรด์ได้

4. แรงดันน้ำ (Hydraulic pressure) โครงสร้างที่อยู่ภายใต้แรงดันน้ำ เช่น กำแพงกันดิน อุโมงค์ ความแตกต่างของ hydraulic head จะทำให้บริเวณที่ hydraulic head สูงไปยังบริเวณที่มี hydraulic head ต่ำกว่า ซึ่งจะนำพาคลอไรด์ไอออนเข้าสู่โครงสร้างคอนกรีตด้วย

สภาวะคลอไรด์ในคอนกรีต

คลอไรด์เมื่ออยู่ในคอนกรีตนั้น จะมีคลอไรด์บางส่วนที่ถูกจับยึด (Fixed Chloride) โดยกลไกล การยึดเหนี่ยวทางกายภาพและทางเคมี โดยที่คลอไรด์ส่วนใหญ่ที่ไม่ถูกจับยึดเรียกว่า คลอไรด์อิสระ (Free Chloride) ซึ่งจะมีสภาพเป็นสารละลายอยู่ในน้ำที่อยู่ช่องว่างของคอนกรีต (Pore Solution) คลอไรด์อิสระนี้เป็นส่วนของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นคลอไรด์อิสระต่ำกว่า และเป็นส่วนที่ทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลง ดังถ้ายึดจับคลอไรด์ไว้ได้เป็นจำนวนมากก็จะสามารถยืดระยะเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมออกไปได้

การยึดเหนี่ยวทางเคมีเกิดจากการที่คลอไรด์บางส่วนถูกจับโดยผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น เช่น ผลผลิตของ C_3A และ C_4AF ในรูปของ $3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.10H_2O$ (Fridel's salt) หรือ $3CaO.Fe_2O_3.CaCl_2.10H_2O$ (Calcium chloroferrite) หรือแม้แต่อยู่ในโครงสร้างของผลิตผลของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

ส่วนการยึดเหนี่ยวทางกายภาพมีสาเหตุมาจากคลอไรด์บางส่วนถูกยึดด้วยแรงทางกายภาพ (Surface Force) ได้บนผิวของผลิตผลของไฮเดรชั่น เช่น C-S-H และ C-A-H เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกยึดอยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิกิริยา เช่นมวลรวม หรือ ผงฝุ่น ได้ถึงแม้ปริมารจะน้อยมากก็ตาม

การเกิดสนิมในเหล็ก

เกิดจากการทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electrochemical reaction) ของเหล็กกับสารประกอบที่มีอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่สัมผัสกับเหล็ก ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะเกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนระหว่างสารประกอบที่เกี่ยวข้อง ทำให้เกิดขั้วของประจุไฟฟ้าบวกและขั้วของประจุไฟฟ้าลบในแท่งเหล็กและกระแสไฟฟ้าจะไหลเป็นวงจรต่อเนื่องกันระหว่างขั้วประจุนั้น

ทฤษฎีการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต (สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, 2543)

การเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตเป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีซึ่งจะเกิดขึ้น เมื่อมีองค์ประกอบครบทั้ง 3 ประการ คือ ปริมาณคลอไรด์ไอออนถึงจุดวิกฤต มีน้ำหรือความชื้นที่เหมาะสม และมีออกซิเจน แต่โดยปกติแล้วค่าความเป็นด่างของคอนกรีตจะมีค่า pH สูงประมาณ 12 - 13 ซึ่งจะช่วย

ต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ เนื่องมาจากการเกิดฟิล์มออกไซด์ของเหล็ก (γ-Fe_2O_3) เคลือบผิวของเหล็กไว้ไม่ให้เป็นสนิม หากฟิล์มออกไซด์นี้ถูกทำลายลง เหล็กเสริมก็พร้อมจะเกิดสนิมได้ ซึ่งเรียกว่า การสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิม (Depassivation) โดยสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อค่า pH ของคอนกรีตลดต่ำลงมาที่ค่าประมาณ 11.5 - 12.0 ทั้งนี้อาจเกิดขึ้นเนื่องจากสาเหตุต่างๆ เช่น การเกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น (Carbonation) หรือการซึมผ่านของน้ำที่มีคลอไรด์ไอออน (Chloride ions) แทรกซึมผ่านเนื้อคอนกรีตมาสะสมที่ผิวของเหล็กเสริมจนมีความเข้มข้นถึงระดับวิกฤต เป็นต้น

กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตโดยคลอไรด์ (Steel Corrosion due to Chloride)

คลอไรด์ไอออนเป็นตัวการหนึ่งที่ทำให้เกิดสนิมขึ้นในเหล็ก โดยคลอไรด์ไอออนจะแทรกผ่านเนื้อคอนกรีตเข้าไปจับตัวกับเหล็ก เมื่อคลอไรด์ไอออนเข้าไปสะสมที่ผิวของเหล็กเสริมมากจนถึงจุดวิกฤต เหล็กเสริมจะเริ่มเกิดสนิมและพัฒนาการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต จนกระทั่งโครงสร้างอาคารเกิดการวิบัติ โดยกระบวนการเกิดสนิมเนื่องจากคลอไรด์แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

1. ระยะเวลาช่วงแรก (Initial period) คือ ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มหล่อคอนกรีตเสร็จจนถึงช่วงเวลาที่เหล็กเสริมคอนกรีตเริ่มเกิดสนิม โดยในช่วง นี้ คลอไรด์ไอออนจะเข้ามาสะสมในเนื้อเหล็กจนมีความเข้มข้นถึงระดับวิกฤต และจะไปทำปฏิกิริยากับ O_2 และ H_2O ที่ซึมผ่านคอนกรีตเข้าไปที่เนื้อเหล็กเสริม ดังนี้

$$Fe^{2+} + 2Cl^- \longrightarrow FeCl_2$$

$$FeCl_2 + 2H_2O \longrightarrow Fe(OH)_2 + 2HCl$$

2. ระยะเวลาช่วงขยายตัวต่อเนื่อง (Propagation period) คือ ช่วงระยะเวลาที่เกิดการพัฒนาการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต เป็นช่วงที่เกิดกระบวนการไฟฟ้าเคมีของการเกิดสนิมเหล็กอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งโครงสร้างอาคารเกิดการวิบัติ หรืออยู่ในสภาพที่ไม่ปลอดภัยในการใช้งาน

กระบวนการไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้น จะทำให้เหล็กเสริมบริเวณขั้วลบถูกกัดกร่อนให้มีขนาดหน้าตัดเล็กลงและเหล็กเสริมบริเวณขั้วบวกก็จะเกิดเป็นสนิม ซึ่งสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตที่เกิดขึ้นนี้จะมีการพัฒนาเพิ่มปริมาณมากขึ้นเรื่อย ๆ ประมาณ 4-6 เท่า ดันให้คอนกรีตที่หุ้มอยู่กะเทาะออก เมื่อการกัดกร่อนเกิดเพิ่มมากยิ่งขึ้น เปลือกหุ้มคอนกรีตก็จะหลุดร่อนออกเป็นชั้นๆ (Delamination) ทำให้เกิดการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตและทำให้โครงสร้างของอาคารสูญเสียความสามารถในการรับกำลังในที่สุด ส่งผลให้โครงสร้างขาดความมั่นคงแข็งแรงและมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกลดลง อัตราการพัฒนาการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตจะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมรอบ ๆ โครงสร้าง

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการแทรกซึมของคลอไรด์

ความสามารถในการกักกันคลอไรด์ของคอนกรีตจะมีผลต่อปริมาณคลอไรด์ที่สามารถแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีต โดยปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการแทรกซึมของคลอไรด์ ได้แก่

1. ระยะคอนกรีตหุ้มผิว

อัตราการแทรกซึมของคลอไรด์จะขึ้นอยู่กับความพรุนและระยะของคอนกรีตที่หุ้มผิวเหล็กเสริม ความพรุนของคอนกรีต คือ ปริมาณรูพรุนที่อยู่ในเนื้อของคอนกรีต ถ้ารูพรุนน้อยไม่ต่อเนื่องกันก็จะทำให้คอนกรีตทึบน้ำส่งผลให้อัตราการแทรกซึมของคลอไรด์ลดลง

ตามทฤษฎีของ Neville (1995) ยิ่งมีระยะคอนกรีตหุ้มมากเท่าใด เวลาที่ใช้จนกระทั่งความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ระดับของเหล็กเสริมถึงค่าวิกฤตจะมากขึ้น ซึ่งระยะคอนกรีตหุ้มผิวนี้จะมีความ-สัมพันธ์กับคุณภาพของคอนกรีต หากคุณภาพของคอนกรีตดีจะสามารถลดระยะคอนกรีตหุ้มลงได้

และจากทฤษฎีของ Soroka (1993) ระยะที่ใช้จนกระทั่งคลอไรด์มีความเข้มข้นเป็นร้อยละ 0.4 ที่ระยะหนึ่งวัดจากผิวของคอนกรีต จะเพิ่มขึ้นเมื่อความพรุนของคอนกรีตลดลง หรือระยะที่มีปริมาณวิกฤตที่เวลาหนึ่งจะเพิ่มขึ้นเมื่อความพรุนของคอนกรีตเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นยังพบว่า อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และระยะเวลาในการบ่มต่างส่งผลต่ออัตราการแทรกซึมของคลอไรด์ คือเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการแทรกซึมของคลอไรด์เพิ่มขึ้น ดังนั้นในการควบคุมอัตราการแทรกซึมของคลอไรด์ จะต้องบ่มคอนกรีตหุ้มให้ดี และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำตลอดแนวของเหล็กเสริม

2. ชนิดและปริมาณของปูนซีเมนต์

จากทฤษฎีของ Soroka (1993) กล่าวว่าสภาพการสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิมเกิดจากคลอไรด์อิสระหรือคลอไรด์ที่ไม่ถูกกักกันโดยผลิตผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่คลอไรด์จะเข้าร่วมสารผลิตภัณฑ์ของ C_3A เกือบทั้งหมด กลายเป็น Friedels salt ($3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.10H_2O$) หรือเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นสูง จะเกิดแคลเซียมออกซีคลอไรด์ ($CaO.CaCl_2.10H_2O$) ด้วยความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะขึ้นอยู่กับปริมาณ C_3A ถ้า C_3A มาก ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ก็จะมากตามไปด้วย ดังนั้นถ้าปูนซีเมนต์ยิ่งมีความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์มากเท่าใดก็ย่อมจะหน่วงการแทรกซึมของคลอไรด์ที่เข้าไปในคอนกรีตให้ช้าลงเท่านั้นและจะทำให้ระยะเวลาช่วงแรกของการกัดกร่อนช้าออกไปอีก

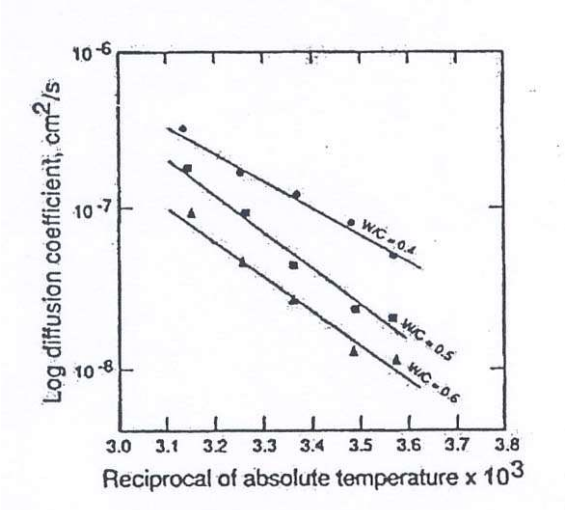
ทั้งส่วนประกอบและปริมาณของปูนซีเมนต์ ต่างมีผลต่อปริมาณของคลอไรด์ที่เข้าทำปฏิกิริยา เมื่อปูนซีเมนต์ที่ใช้มีปริมาณมาก ก็ย่อมสามารถกักเก็บคลอไรด์ได้ในปริมาณมาก จึงทำให้อัตราการแทรกซึมลดลง ดังนั้นอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และประเภทปูนซีเมนต์จะเป็นตัวบอกคุณภาพความซึมผ่านได้ของคอนกรีต ซึ่งคุณภาพดังกล่าวขึ้นอยู่กับการทำให้คอนกรีตแน่นและเงื่อนไขการบ่ม

3. ตัวขัดขวางการกัดกร่อน

ตัวขัดขวางการกัดกร่อน คือสารที่มีคุณสมบัติต่อต้านการสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิมของคลอไรด์ ไม่ว่าจะเป็นลักษณะการป้องกันหรือหน่วงให้เหล็กเสริมผุกร่อนช้าลง มีทั้งแบบที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ แต่ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือประเภทไนไตรต์ ได้แก่ แคลเซียมไนไตรต์และโซเดียมไนไตรต์ซึ่งเป็นประเภทสารอนินทรีย์

4. อุณหภูมิ

จากทฤษฎีของ Soroka (1993) อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ในรูปลอกการิทึม กับส่วนกลับของอุณหภูมิที่มีหน่วยเป็นเคลวินจะเป็นเส้นตรง ดังภาพที่ 2.5 โดยในสภาพอากาศร้อน เวลาที่คลอไรด์ใช้ในการเคลื่อนที่ถึงเหล็กจะสั้นกว่าในสภาพอากาศเป็นกลาง และจะสังเกตว่าอัตราการแทรกซึมของคลอไรด์จะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์



ภาพที่ 2.3 ผลของอุณหภูมิและอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์
ต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์

5. คุณภาพของคอนกรีต

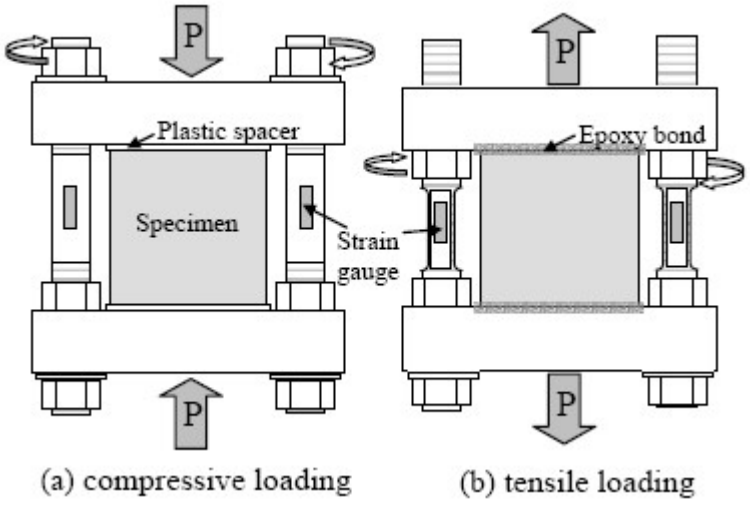
ส่วนประกอบของคอนกรีตและอุณหภูมิที่ใช้บ่มมีความสำคัญกับโครงสร้างของโพรง เมื่อเพิ่มระดับของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ความสามารถในการแทรกซึมของคลอไรด์จะลดลง ซึ่งจะเป็นจริงเมื่อคอนกรีตไม่มีการสูญเสียน้ำเท่านั้น หากสูญเสียน้ำระดับของปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเปลี่ยนไปตามระยะจากผิว เนื่องจากการลดลงของความชื้นจะทำให้ความสามารถซึมผ่านได้เพิ่มขึ้น หากบ่มคอนกรีตไว้นาน การแทรกซึมของคลอไรด์ก็จะลดลง นอกจากนี้หากการทำให้คอนกรีตแน่นไม่เพียงพอ การแทรกซึมของคลอไรด์จะเพิ่มขึ้น

การป้องกันซึมผ่านของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

เมื่อปัญหาการพังทลายของโครงสร้างทางทะเลจากการแทรกซึมของคลอไรด์เป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ จึงได้มีการคิดหาทางป้องกันการแทรกซึมของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีต นอกจากการปรับเพิ่มอัตราส่วนของปูนซีเมนต์และน้ำในคอนกรีตแล้ว การป้องกันวิธีหนึ่งก็คือ การปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตโดยการใส่สารผสมเพิ่มจำพวก เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุง หรือซิลิกาฟูม เป็นต้นการผสมสารผสมเพิ่มเข้าไปในส่วนผสมคอนกรีตนั้น สามารถช่วยป้องกันการแทรกซึมของคลอไรด์ในโครงสร้างทางทะเลได้โดยการลดความพรุนของคอนกรีต อีกวิธีหนึ่งคือ การใช้วัสดุจำพวกเส้นใยเข้ามาแทนที่เหล็กเสริมวิธีการนี้จะใช้เส้นใยจำพวกโพลิเมอร์ ที่ไม่มีส่วนผสมของเหล็กมาแทนที่การใช้เหล็ก จึงไม่มีการเกิดสนิม แต่จะมีปัญหาด้านการลดลงของแรงรับในโครงสร้างมาแทน และวิธีสุดท้าย คือการนำสารที่มีความสามารถทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวเข้ามาผสมในคอนกรีต เพื่อลดการแตกร้าวในตัวคอนกรีตอันเป็นสาเหตุ ให้คลอไรด์สามรถเข้าสู้เหล็กเสริมได้โดยตรง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

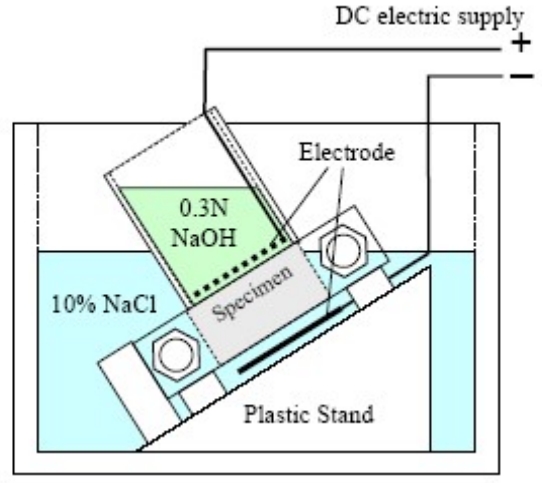
Antoni et al. (2005) ศึกษาการแทรกซึมของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตผสมเส้นใยไฟเบอร์ภายใต้การรับแรงอัดแบบสถิตย์และแบบวัฏจักร์ โดยทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ ในโครงสร้างคอนกรีตที่ใส่เส้นใยจำพวก โพลีโพพีลีน ภายใต้ใต้การรับแรงแบบต่างๆ



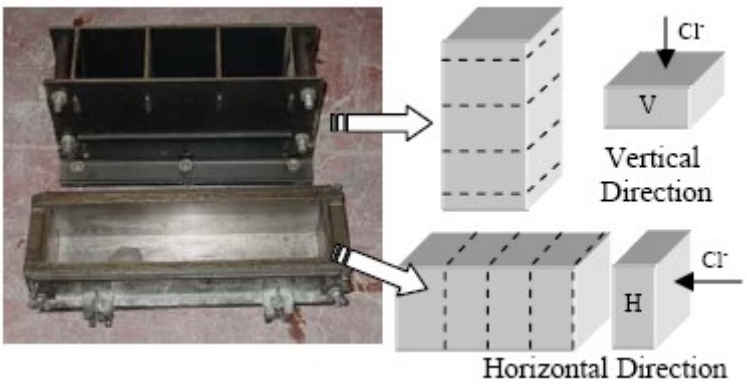
ภาพที่ 2.4 ภาพจำลองการให้แรงกับตัวอย่างคอนกรีต

ภาพที่ 2.5 ภาพเส้นใยไฟเบอร์ชนิดต่างๆที่ใช้ในการทดลอง

การทดสอบโดยการนำตัวอย่างคอนกรีตทรงปริซึมที่ผสมเส้นใยชนิดเดียวกันแต่ขนาดแตกต่างกัน 3 ขนาด มาใส่ในอุปกรณ์ให้แรง สแตนเลสเฟรม และทดสอบในสภาวะต่างๆ อาทิเช่น สภาวะไร้แรงกระทำ สภาวะรับแรงอัด สภาวะรับแรงดึง เป็นต้น โดยทำการให้แรงในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างมาตัดเป็นชิ้นๆและนำไปทดสอบ



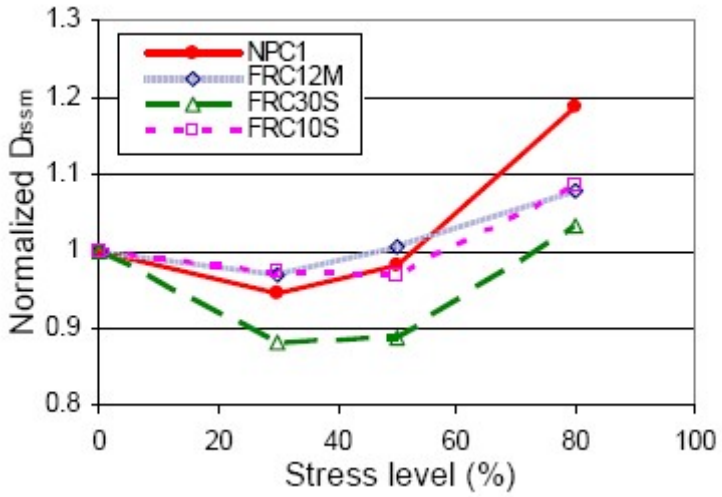
ภาพที่ 2.6 การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์



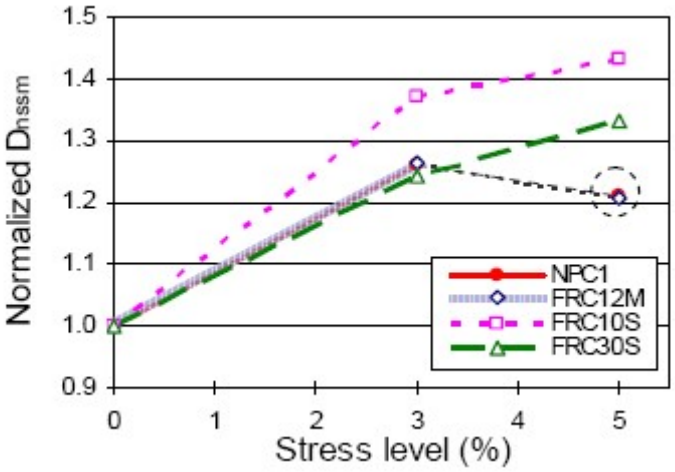
ภาพที่ 2.7 แม่พิมพ์และการตัดตัวอย่างคอนกรีต

จากการทดลองนี้ได้ผลความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของโครงสร้างคอนกรีตผสมเส้นใยไฟเบอร์จากสภาวะต่างๆ ดังนี้

ที่สภาวะไร้แรงกระทำนั้นอัตราส่วนของเส้นใย 0.1% โดยปริมาตรนั้นมีความสามารถในการต้านทานคลอไรด์ได้ดีที่สุด โดยการใส่เส้นใยไฟเบอร์มากไปกว่านี้นอกจากจะไม่ทำให้ความต้านทานคลอไรด์เพิ่มขึ้นแล้ว ยังส่งผลกระทบด้านความแข็งแรงของคอนกรีตอีกด้วย จากภาพที่ 2.8 ภายใต้สภาวะแรงอัดนั้นพบว่าการผสมเส้นใยในโครงสร้างคอนกรีต ช่วยในการเพิ่มความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์อย่างมาก ยิ่งโครงสร้างคอนกรีตรับแรงอัดมากเท่าไร ประสิทธิภาพในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์จะเพิ่มตามไปด้วย และจากภาพที่ 2.9 ที่ใต้สภาวะแรงดึง เมื่อรับแรงดึงมากขึ้นถึงระดับหนึ่งความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์จะลดลง



ภาพที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงระดับการแทรกซึมของคลอไรด์กับระดับหน่วยแรงอัด



ภาพที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงระดับการแทรกซึมของคลอไรด์กับระดับหน่วยแรงดึง

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัย มีการศึกษาทดลองต่างๆ ดังนี้

1) กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ล้วน ซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใย ซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยและซีเมนต์เพสต์ผสมสารขยายตัว

2) การแพร่ของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ล้วน ซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใย ซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยและซีเมนต์เพสต์ผสมสารขยายตัว

3) ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ล้วน ซีเมนต์เพสต์ผสมสารขยายตัวและซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

1. ปูนซีเมนต์ (Cement) ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ซึ่งมีคุณสมบัติตรงตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม มอก.15-2532

1.1 ปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่ง หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland cement) สำหรับใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา และสำหรับใช้ในการก่อสร้างตามปกติทั่วไปที่ไม่อยู่ในภาวะอากาศที่รุนแรง หรือในที่มีอันตรายจาก ซัลเฟตเป็นพิเศษ หรือความร้อนที่เกิดจากการรวมตัวกับน้ำจะไม่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงขั้น อันตรายที่คอนกรีตจะแตกร้าวเสียหาย ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราช้าง

1.2 ปูนซีเมนต์ประเภทห้า หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภททนซัลเฟตได้สูง (Sulphate resistance Portland cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มี C_3A ต่ำ เพื่อจะป้องกันไม่ให้ซัลเฟตจากภายนอกมาทำลายเนื้อคอนกรีต เหมาะสำหรับโครงสร้างที่มีการกระทำของซัลเฟต ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้กำลังกำลังอัดช้าและให้ความร้อนต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดที่หนึ่ง ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราช้างฟ้า

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5

องค์ประกอบทางเคมี (% by weight)	Cement Type I	Cement Type V
Silicon Dioxide ,SiO_2	20.80	21.52
Aluminum Oxide,Al_2O_3	5.50	3.56
Iron Oxide, Fe_2O_3	3.16	4.51
Calcium Oxide, CaO	64.97	66.70
Magnesium Oxide ,MgO	1.06	1.20
Sodium Oxide ,Na_2O	0.08	0.10
Potassium Oxide ,K_2O	0.55	0.24
Sulfur Trioxide ,SO_3	2.96	2.11
Loss on Ignition ,LOI	2.89	1.74
Tricalcium Silicate ,C_3S	56.50	71.60
Dicalcium Silicate, C_2S	17.01	7.68
Tricalcium Aluminate, C_3A	9.23	1.80
Tetracalcium Aluminoferrite, C_4AF	9.62	13.72

2. เส้นใย (Fiber) เส้นใยที่ใช้ในการผสมเพิ่มเข้าไปในอัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ทดสอบครั้งนี้ มี 3 ชนิดด้วยกัน คือ เส้นใยสังเคราะห์อาคิลิก (Acrylic fiber) เส้นใยแก้ว (Glass fiber) และ เส้นใยเหล็ก (Steel fiber) ซึ่งจะมีรายละเอียดและคุณสมบัติของเส้นใย แต่ละชนิดดังนี้

2.1 เส้นใยสังเคราะห์อาคิลิก (Acrylic fiber) ที่ใช้ในอัตราส่วนผสมของคอนกรีตใช้ผลิตภัณฑ์ที่มีชื่อเรียกว่า “Ricem MC fiber” ดังแสดงในภาพที่ 3.1 ซึ่งเส้นใยสังเคราะห์อาคิลิก นี้มีอะคริโรไนไตร์ (Acrylonitrile) เป็นส่วนประกอบอย่างน้อย 85 % โดยน้ำหนัก และเส้นใยสังเคราะห์ อาคิลิก ที่ใช้นี้มีคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกล ดังนี้

เส้นผ่านศูนย์กลาง	16	ไมครอน
ความยาวของเส้นใย	8-40	มิลลิเมตร
ความถ่วงจำเพาะ	1.18	
กำลังรับแรงดึง	> 5,810	กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
อิลาสติกโมดูลัส	> 137,615	กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
การยืดตัวสูงสุด	< 13	%

ประโยชน์ที่สำคัญของการใช้เส้นใยสังเคราะห์อาคิลิก คือ

- ช่วยเพิ่มความทนทานของปูนซีเมนต์ มอร์ต้า และ คอนกรีต
- ช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านแรงกระแทกได้ดี
- ช่วยเพิ่มความเหนียวของคอนกรีต
- มีความต้านทานต่อปฏิกิริยาทางเคมี และทางกายภาพสูง
- มีความต้านทานต่อกรดคลอไรด์ กรดเกลือ รวมถึงรังสีอัลตราไวโอเลต
- มีเส้นใยจำนวนมาก คือ ใน 1 กิโลกรัมจะมีเส้นใยยาว 24 มิลลิเมตร จำนวน 160 ล้านเส้น

ภาพที่ 3.1 เส้นใยสังเคราะห์อาคิลิก (Acrylic fiber)

2.2 เส้นใยแก้ว (Glass fiber) ได้ถูกพัฒนามาเป็นเวลานานแล้วแต่สามารถเข้าสู่กระบวนการผลิตในเชิงพาณิชย์เมื่อปี พ.ศ.2481 (ค.ศ.1938) โดยบริษัทเวนคอนนิง ไฟเบอร์กลาส ในประเทศสหรัฐอเมริกาและใช้ชื่อทางการค้าของผลิตภัณฑ์สิ่งทอที่ทำขึ้นว่า Fiberglass ความแข็งแรงของเส้นใยแก้วนับได้ว่าดีมากเป็นรองเฉพาะเส้นใยอะรามิดเท่านั้น โดยเส้นใยแก้ว (Glass fiber) ที่ใช้ในอัตราส่วนผสมคอนกรีตในครั้งนี้ มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.33 ดังภาพที่ 3.2

ภาพที่ 3.2 เส้นใยแก้ว (Glass fiber)

2.3 เส้นใยเหล็ก (Steel fiber) ที่ใช้ในอัตราส่วนผสมของคอนกรีตในครั้งนี้ ผลิตโดย บริษัท ดรา มิกซ์ (Dramix) มีชื่อ เรียกว่า “RC-65/35-BN” ดังแสดงในภาพที่ 3.3 ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นลวด รูปร่างคง ตัว และตัดให้ได้ตามความยาวที่ต้องการ เพื่อใช้เป็นวัสดุผสมในคอนกรีตเสริมเหล็ก มอร์ต้า และวัสดุ ประกอบอื่น ๆ

ภาพที่ 3.3 เส้นใยเหล็ก (Steel fiber)

RC-65/35-BN นี้ เป็นลวดเส้นใยรีดเย็น มีปริมาณคาร์บอนต่ำ ที่ปลายทั้งสองข้างหักงอ และมีกาว ยึดลวดแต่ละเส้นที่อยู่ในกลุ่ม โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter) เท่ากับ 0.55 มิลลิเมตร ค่าตัวเลข 35 ที่ปรากฏในชื่อ หมายถึง ความยาวของลวดเส้นใย มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร และค่าตัวเลข 65 หมายถึง ค่า อัตราส่วนรูปทรง (Aspect ratio) ซึ่งการแบ่งชั้นประสิทธิภาพของเส้นใยหาได้จากอัตราส่วนระหว่าง ความยาวกับเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเส้นใย ซึ่งในที่นี้อัตราส่วนรูปทรงมีค่าเท่ากับ 64 แต่เนื่องจาก ประสิทธิภาพของลวดเส้นใยจะแบ่งได้เป็นชั้น 45 65 และ 80 ลวดเส้นใย “RC-65/35-BN” จึงถูกจัดให้ อยู่ในชั้น 65 เส้นใยเหล็กชนิดนี้ในน้ำหนัก 1.0 กิโลกรัมนั้นจะมีลวด เส้นใยประมาณ 14,500 ชิ้น และมี กำลังรับแรงดึง น้อยที่สุด เท่ากับ 11,213 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ เส้นใยเหล็กชนิดนี้มี ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้น และ ความเครียด ดังแสดงในภาพที่ 3.3

3. ปอซโซลาน (Pozzolan)

วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกา หรือซิลิกาอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดมากและมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอจะสามาทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน ในการทดสอบในครั้งนี้ได้ใช้วัสดุปอซโซลาน 3 ชนิดคือ เถ้าลอย ฝุ่นหินปูนและสารขยายตัว

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย ฝุ่นหินปูนและสารขยายตัว

Oxide compound	Concentration (%)		
	Limestone powder	Fly ash	Expansive agent
SiO_2	0.06	36.10	9.60
Al_2O_3	0.09	19.40	2.50
Fe_2O_3	0.04	15.10	1.30
CaO	54.80	17.40	67.30
MgO	0.57	2.97	0.40
SO_3	-	0.77	18.00
Na_2O	-	0.55	-
K_2O	-	2.17	-
LOI	43.80	2.81	0.40
Specific gravity	2.70	2.27	3.04
Fineness (cm^2/g)	9,260	2,460	3,500

4. น้ำ (Water)

น้ำที่ใช้ในการทดลองจะใช้น้ำเปล่าจากห้องปฏิบัติการคอนกรีต

5. เกลือคลอไรด์

เกลือคลอไรด์ที่ใช้ในการทดลองเป็นเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โดยมีความบริสุทธิ์ 99.9%

6. สารเคลือบผิว

สารเคลือบผิวชนิด Monoflex สำหรับการทดลองเพื่อศึกษาการแพร่ของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์

อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลองการแพร่ของคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์

1.1 อุปกรณ์ที่ใช้

1) แบบหล่อชิ้นตัวอย่างทดสอบทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม และสูง 10 ซม
2) เครื่องผสมซีเมนต์เพสต์ (Cement paste mixer)
3) เครื่องตัดตัวอย่างทดสอบ ดังภาพที่ 3.4
4) กล่องพลาสติกบรรจุชิ้นตัวอย่างทดสอบ
5) ครกหินบดตัวอย่างทดสอบ
6) บิกเกอร์ ขนาด 100 และ 250 ml ดังภาพที่ 3.5
7) กระบอกตวง ขนาด 100 ml ดังภาพที่ 3.5
8) ปิเปต (Pipet) ขนาด 25 ml ดังภาพที่ 3.5
9) ขวดปรับปริมาตร ขนาด 1000 ml ดังภาพที่ 3.5
10) ขวดรูปชมพู่ ขนาด ดังภาพที่ 3.5
11) แท่งแก้วคน ดังภาพที่ 3.5
12) แผ่นกระจก ดังภาพที่ 3.5
13) กรวย (Büchner funnel) ดังภาพที่ 3.5
14) ขวดกรองแก้วก้นโปร่ง (filtration flask) ดังภาพที่ 3.5
15) TFE-fluorocarbon-coated magnetic stirring bar ดังภาพที่ 3.6
16) ช้อนตักสาร ดังภาพที่ 3.5
17) เครื่อง Auto titration รุ่น 721 NET titrino metrohm ดังภาพที่ 3.6
18) เครื่องกวนแม่เหล็ก ดังภาพที่ 3.6
19) เครื่องดูด (suction apparatus)
20) เครื่องต้ม (hot plate)
21) เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล (Digital balance)
22) แผ่นกระดาษกรองเนื้อหยาบขนาด 9 ซม
23) ตะแกรงร่อนขนาดเบอร์ 20 (850 □m)

ภาพที่ 3.4 เครื่องตัดตัวอย่างทดสอบ

ภาพที่ 3.5 ชุดอุปกรณ์เครื่องแก้ว

รูปที่ 3.6 เครื่อง Potentiometric titration และเครื่องกวนแม่เหล็ก

1.2 สารเคมีที่ใช้

1) กรดไนตริก (Nitric Acid)
2) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)
3) methyl orange indicator
4) สารละลายมาตรฐาน 0.05 *N* NaCl
5) สารละลายมาตรฐาน 0.05 *N* ซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate)
6) น้ำกลั่น
7) สารกันซึมเคลือบชิ้นตัวอย่างทดสอบ Monoflex

2. วิธีการทดลอง

2.1 วิธีการทดลองการแพร่คลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์

เตรียมแท่งตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ (Cement paste) หล่อแท่งตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม สูง 10 ซม ทั้งนี้ได้ผสมเกลือคลอไรด์ 3.0% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตั้งแต่ต้นในส่วนผสมเพื่อนำตัวอย่างไปแช่ในน้ำเปล่าเพื่อให้คลอไรด์แพร่ออก โดยสัดส่วนผสมที่ใช้และจำนวนแท่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 3.4 โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ใช้เส้นใยอาคิลิก,เส้นใยเหล็กและเส้นใยแก้วแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 ในอัตราส่วนปริมาณเส้นใย 0.25% และ 0.50% โดยปริมาตร ส่วนซีเมนต์เพสต์แทนที่ด้วยสารผสมเพิ่มแสดงไว้ในตารางที่ 3.5 ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสานหลักของซีเมนต์เพสต์ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ใช้เท่ากับ 0.40 และ 0.50 อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและสารขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.30 และ 0.10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์แทนที่ด้วยเส้นใย

Mix id	Cement type	Fiber type	% Fiber by vol	w/b
C1AF0.25-W40	1	Acrylic	0.25	0.40
C1AF0.50-W40		Acrylic	0.50	
C1SF0.25-W40		Steel	0.25	
C1SF0.50-W40		Steel	0.50	
C1GF0.25-W40		Glass	0.25	
C1GF0.50-W40		Glass	0.50	
C1-W40		-	0.00	

หมายเหตุ :

ค่าความถ่วงจำเพาะของ ปูนซีเมนต์ = 3.15

ค่าความถ่วงจำเพาะของ เส้นใยเหล็ก(Steel Fiber) = 7.8

ค่าความถ่วงจำเพาะของ เส้นใยสังเคราะห์อาคิลิก (Acrylic Fiber) = 1.18

ค่าความถ่วงจำเพาะของ เส้นใยแก้ว (Glass Fiber) = 2.33

ความหมายของสัญลักษณ์ในแต่ละอัตราส่วนผสมมีความหมายดังนี้

“C1” หมายถึง ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน

“AF,SF,GF” หมายถึง เส้นใยอาคิลิก เส้นใยเหล็กและเส้นใยแก้วตามลำดับ

“0.25,0.50” หมายถึง ปริมาณเส้นใยที่ใช้ 0.25% และ 0.50% โดยปริมาตร ตามลำดับ

“w40” หมายถึง อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์

“C1AF0.25-W40” หมายถึง ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใช้ปริมาณเส้นใยอาคิลิก 0.25% โดยปริมาตร มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

“C1AF0.50-W40” หมายถึง ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใช้ปริมาณเส้นใยอาคิลิก 0.50% โดยปริมาตร มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

ตารางที่ 3.4 ส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์แทนที่ด้วยสารผสมเพิ่ม

Mix id.	Cement type	Additive type	Additive (% by vol.)		w/b
			EA	F	
C1-W40	1	-	-	-	0.40
C1-W50			-	-	0.50
C5-W40	5	-	-	-	0.40
C5-W50			-	-	0.50
C1E10-W40	1	Expansive agent	0.10	-	0.40
C1E10-W50			0.10	-	0.50
C5E10-W40	5	Expansive agent	0.10	-	0.40
C5E10-W50			0.10	-	0.50
C1F30-W40	1	Fly ash	-	0.30	0.40
C1F30-W50			-	0.30	0.50
C1E10F30-W40	1	Expansive agent + Fly ash	0.10	0.30	0.40
C1E10F30-W50			0.10	0.30	0.50

หมายเหตุ :

ค่าความถ่วงจำเพาะของ ปูนซีเมนต์ = 3.15

ค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย (Fly ash) = 2.27

ค่าความถ่วงจำเพาะของสารขยายตัว (Expansive agent) = 3.04

ความหมายของสัญลักษณ์ในแต่ละอัตราส่วนผสมมีความหมายดังนี้

“C1,C5” หมายถึง ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1และ 5 เป็นวัสดุประสาน ตามลำดับ

“E,F” หมายถึง สารขยายตัว,เถ้าลอย ตามลำดับ

“10,30” หมายถึง ปริมาณสารผสมเพิ่มที่ใช้ร้อยละ 0.30 และ 0.10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ

“W40,W50” หมายถึง อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.50 ตามลำดับ

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์

“C1E10-W40” หมายถึง ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใช้สารทำให้ขยายตัวร้อยละ 0.10 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

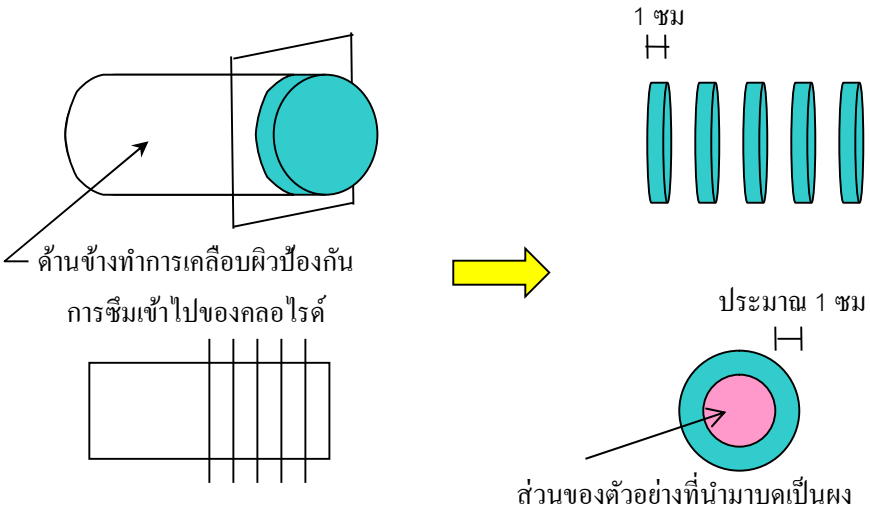
“C1F30-W40” หมายถึง ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใช้เถ้าลอยร้อยละ 0.30 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

“C1E10F30-W40” หมายถึง ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใช้สารขยายตัวร้อยละ 0.10 และเถ้าลอยร้อยละ0.30 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

หลังจากบ่มน้ำตามเวลาที่กำหนดในแต่ละชุดการทดลองแล้ว นำเอาแท่งตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ มาทำการเคลือบผิวด้านข้างโดยใช้สารกันซึม Monoflex ทิ้งไว้ให้แห้ง ดังภาพที่ 3.7 ก่อนนำไปแช่ในน้ำเปล่าและแช่ทิ้งไว้ตามระยะเวลาที่กำหนด ทั้งนี้เพื่อควบคุมให้คลอไรด์แพร่ออกจากตัวอย่างตัวอย่างได้เพียงทิศทางเดียว

ภาพที่ 3.7 ชิ้นตัวอย่างที่เคลือบผิวด้านข้างด้วยสารกันซึม

หลังจากบ่มแท่งตัวอย่างในน้ำและแช่ในน้ำเปล่าตามระยะเวลาที่กำหนดแล้ว ให้นำแท่งตัวอย่างที่ทิ้งไว้จนแห้งมาทำการตัดออกเป็นแผ่นลักษณะคล้ายแผ่นดิสก์ หนา 1 ซม จำนวน 5 แผ่น แล้วทำการบดแผ่นตัวอย่างซึ่งเป็นสารซีเมนต์ให้เป็นผง โดยเลือกบดเฉพาะบริเวณที่อยู่กึ่งกลางของแผ่นตัวอย่างเท่านั้น ดังภาพที่ 3.8 และ3.9 เพื่อนำไปใช้ทดสอบหาปริมาณสารคลอไรด์ทั้งหมดและสารคลอไรด์อิสระต่อไป



ภาพที่ 3.8 การตัดแท่งตัวอย่างและส่วนของตัวอย่างที่นำมาบดเป็นผง

ภาพที่ 3.9 แผ่นตัวอย่าง หนา 1ซม

2.2 การทดสอบปริมาณสารคลอไรด์ทั้งหมดในระบบ

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

1. นำสารซีเมนต์ที่บดเป็นผงและผ่านตะแกรงร่อนขนาดเบอร์ 20 (850 □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 เติมลงไป คอยคนก้อนซีเมนต์ที่จับตัวเป็นก้อน (lumps) ให้แยกออกจากกัน ถ้ามีกลิ่นของก๊าซไข่เน่า (hydrogen sulfide) ในระหว่างนี้ ให้เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอรออกไซด์ (hydrogen peroxide) 30% ลงไป 3 ml และหยด methyl orange indicator จำนวน 3 หยด ปิดบีกเกอร์ด้วยแผ่นกระจกแล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ถึง 2 นาที ถ้ามีสีเหลืองถึงสีเหลืองส้มปรากฏบนด้านบนของของแข็งที่ตกตะกอนอยู่ แสดงว่าสารละลายมีฤทธิ์เป็นกรดไม่พอ ให้หยดสารละลายกรดไนตริกที่ dilute ในอัตราส่วน 1:1 ลงไปแล้วคนไปพร้อมๆ กันจนกระทั่งปรากฏเป็นสีชมพูหรือสีแดงเลือนๆ 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) เลิกการล้างแล้วทำการล้างขวดแก้วก้นโป่งด้วยน้ำจำนวนเล็กน้อย ประกอบเครื่องดูด (suction apparatus) และกรองสารละลายตัวอย่าง ล้างบีกเกอร์และแผ่นกระดาษกรอง 2 ครั้งด้วยน้ำจำนวนเล็กน้อย ดังภาพที่ 3.10 ถ่ายสารละลายที่ผ่านการกรองจากขวดแก้วก้นโป่งไปยังบีกเกอร์ขนาด 250 mlและล้างขวดแก้วก้นโป่งทันทีด้วยน้ำบีกเกอร์อันแรกที่ใช้อาจนำมาใช้ได้ทิ้งสารละลายที่ผ่านการกรองไว้ที่อุณหภูมิห้องปริมาตรต้องไม่เกิน175 ml

ภาพที่ 3.10 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. เครื่อง Potentiometric titration จะทำการไตรเตรทให้โดยอัตโนมัติ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าของของตัวอย่าง เมื่อถึงจุดยุติ (End point) เครื่อง Potentiometric titration จะแสดงปริมาณคลอไรด์และปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรท (silver nitrate) ที่ใช้และประจุ
7. จดและทำการบันทึกผลที่ได้จากเครื่อง Potentiometric titration

ภาพที่ 3.11 การไตเตรทหาปริมาณคลอไรด์

2.3 การทดสอบปริมาณสารคลอไรด์อิสระในระบบ

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

1. นำสารซีเมนต์ที่บดเป็นผงและผ่านตะแกรงร่อนขนาดเบอร์ 20 (850 □m) 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]

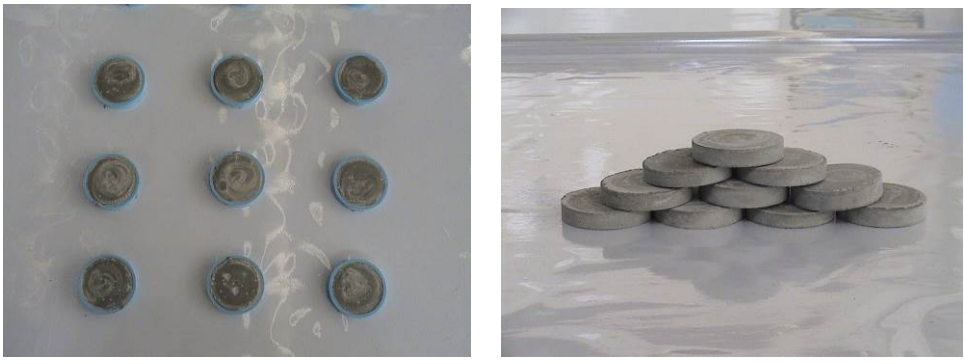
4. ล้างแผ่นกระดาษกรองเนื้อหยาบขนาด 9 cm ด้วยน้ำเพิ่มขึ้นครั้งละ 25 ml จำนวน 4 ครั้งโดยใช้การกรองดูด (suction filtering) ด้วยกรวย (Büchner funnel) ขนาด 250 หรือ 500 ml และขวดกรองแก้วก้นโป่ง (filtration flask) เลิกการล้างแล้วทำการล้างขวดแก้วก้นโป่งด้วยน้ำจำนวนเล็กน้อย ประกอบเครื่องดูด (suction apparatus) และกรองสารละลายตัวอย่าง ล้างบีกเกอร์และแผ่นกระดาษกรอง 2 ครั้งด้วยน้ำจำนวนเล็กน้อย ถ่ายสารละลายที่ผ่านการกรองจากขวดแก้วก้น

โป่งไปยังบีกเกอร์ขนาด 250 ml และล้างขวดแก้วก้นโป่งทันทีด้วยน้ำ บีกเกอร์อันแรกที่ใช้อาจนำมาใช้ได้ ทิ้งสารละลายที่ผ่านการกรองไว้ที่อุณหภูมิห้อง ปริมาตรต้องไม่เกิน 175 ml

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. เครื่อง Potentiometric titration จะทำการไตรเตรทให้โดยอัตโนมัติ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าของของตัวอย่าง เมื่อถึงจุดยุติ (End point) เครื่อง Potentiometric titration จะแสดงปริมาณคลอไรด์และปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรท (silver nitrate) ที่ใช้และประจุ
7. จดและทำการบันทึกผลที่ได้จากเครื่อง Potentiometric titration

2.4 วิธีการทดลองความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์

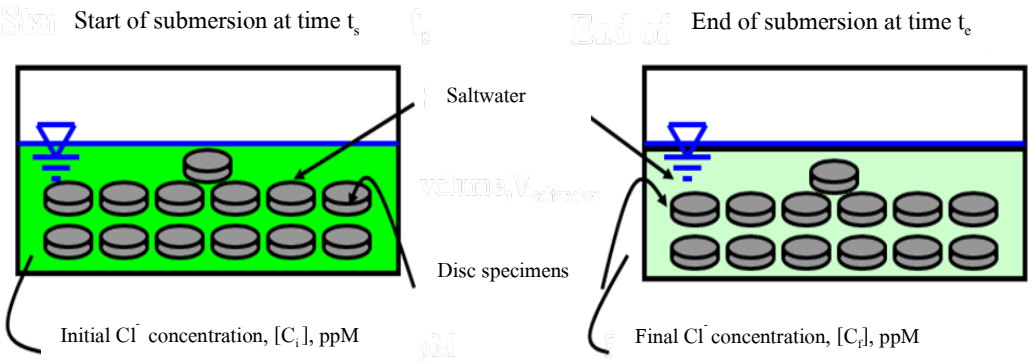
หล่อตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm หนา 1 cm โดยสัดส่วนผสมที่ใช้และจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสานหลักของซีเมนต์เพสต์ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ใช้เท่ากับ 0.40 และ 0.50 อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยและสารขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.30 และ 0.10 อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากับร้อยละ 5,15 และ25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และแช่ในน้ำเกลือคลอไรด์5%ที่ระยะเวลา 91 วันดังภาพที่ 3.13 โดยแบ่งออกเป็น 9 ชุดการทดลอง



ภาพที่ 3.12 ชิ้นตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 3. 5 ส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ด้วยสารขยายตัว เถ้าลอยและผงฝุ่นหินปูน

Mix id.	Cement type	Additive type	Additive (% by weight.)			w/b
			EA	F	L	
C1-W40	1	-	-	-	-	0.40
C1-W50			-	-	-	0.50
C5-W40	5	-	-	-	-	0.40
C5-W50			-	-	-	0.50
C1E10-W40	1	Expansive agent	0.10	-	-	0.40
C1E10-W50			0.10	-	-	0.50
C5E10-W40	5	Expansive agent	0.10	-	-	0.40
C5E10-W50			0.10	-	-	0.50
C1F30-W40	1	Fly ash	-	0.30	-	0.40
C1F30-W50			-	0.30	-	0.50
C1E10F30-W40	1	Expansive agent + Fly ash	0.10	0.30	-	0.40
C1E10F30-W50			0.10	0.30	-	0.50
C1L5-W40	1	Limestone powder	-	-	0.05	0.40
C1L5-W50			-	-	0.05	0.50
C1L15-W40	1	Limestone powder	-	-	0.15	0.40
C1L15-W50			-	-	0.15	0.50
C1L25-W40	1	Limestone powder	-	-	0.25	0.40
C1L25-W50			-	-	0.25	0.50



ภาพที่ 3.13 หลักการความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์

หลังจากแช่ในน้ำเกลือคลอไรด์ความเข้มข้น 5% ครบกำหนดระยะเวลาทดสอบได้นำชิ้นตัวอย่างไปกดทำลาย เพื่อบีบเอาน้ำภายในซีเมนต์ออกมา ดังรูป

วิธีการคำนวณหาความสามารถกักเก็บคลอไรด์ (Calculation of chloride binding capacity)

$$\text{Total } Cl^-_{\text{ in disc specimens}} = ([C_i] - [C_f]) \times V_{\text{ salt water}}$$

$$\text{Free } Cl^-_{\text{ in disc specimens}} = [C_{\text{free}}] \times V_{\text{ water in disc specimens}}$$

$$\text{Where, } V_{\text{ water in disc specimens}} = \frac{W_{evaporable}}{100} \times W_{\text{ disc specimens}}$$

$$\text{So, Fixed } Cl^-_{\text{ in disc specimens}} = \text{Total } Cl^-_{\text{ in disc specimens}} - \text{Free } Cl^-_{\text{ in disc specimens}}$$

ภาพที่ 3.14 เครื่องกดชิ้นตัวอย่าง

ภาพที่ 3.15 ชิ้นตัวอย่างที่แช่ในน้ำเกลือ

วิธีการเก็บน้ำจากตัวอย่างซีเมนต์เพสต์

1. ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเกลือคลอไรด์ที่แช่ตัวอย่างใส่ภาชนะที่ปิดสนิท (น้ำเกลือภายนอก) จดบันทึกชื่อตัวอย่าง

ภาพที่ 3.16 การเก็บน้ำเกลือภายนอก

2. ซับน้ำจากตัวอย่างให้แห้งด้วยกระดาษทิชชู่

ภาพที่ 3.17 การซับน้ำจากชิ้นตัวอย่าง

3. ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 3 ชิ้นเพื่อนำมาหาปริมาณ Water content ของตัวอย่าง
4. กดตัวอย่างจำนวน 10 ชิ้นเพื่อ เอาน้ำจากภายในชิ้นตัวอย่าง
5. เก็บตัวอย่างน้ำจากตัวอย่างที่ได้ภายในภาชนะที่ปิดสนิท (น้ำภายใน) บันทึกชื่อตัวอย่าง
6. นำตัวอย่างที่เก็บไว้ 3 ชิ้นไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 95 °c ใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง
7. ทำการไตรเตรทเพื่อหาปริมาณคลอไรด์ของน้ำเกลือภายนอกและสารละลายภายในตัวอย่าง

การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์

1. นำสารละลายที่ได้จากการกดตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ออกมาประมาณ 1 มิลลิลิตร นำไปชั่งน้ำหนัก โดยชั่งละเอียดถึง 0.01 กรัม นำมาใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 ml.
2. เติมน้ำกลั่นลงไปประมาณ 150 ml.
3. ทำการไตเตรท ดังรูป บันทึกค่าปริมาณสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ที่ใช้รวมไปถึงค่าปริมาณคลอไรด์

ภาพที่ 3.18 การเตรียมตัวอย่างเพื่อไตเตรท

2.5 การทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์

สำหรับมาตรฐานที่ใช้สำหรับตัวอย่างทรงลูกบาศก์ (BS 1881: PART 4) Method of TESTING CONCRETE FOR STRENGTH ซึ่งมีวิธีการทดสอบ ดังนี้

1. นำก้อนตัวอย่าง วางกึ่งกลางของแท่นทดสอบ โดยให้แกนอยู่ในแนวศูนย์กลางของแท่งกด
2. เปิดเครื่องทดสอบโดยในการทดสอบ นี้จะต้องควบคุมน้ำหนักที่กดให้มีอัตราสม่ำเสมออัตราที่ใช้ คือ 1.4-3.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที
3. กดก้อนตัวอย่างจนแตก บันทึกค่าน้ำหนักที่ได้
4. นำค่าน้ำหนัก และ พื้นที่หน้าตัดที่ได้มาหาค่ากำลังอัดประลัย (F)

$$F = \frac{P}{A}$$

เมื่อกำหนด P = น้ำหนักของแรงที่กระทำ (กิโลกรัม)

A = พื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่าง (เซนติเมตร^2)

กำลังอัดประลัยของคอนกรีต $f_c' = \frac{p_U}{A_C}$ หน่วยที่ใช้คือกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ภาพที่ 3.19 ชิ้นตัวอย่างทรงลูกบาศก์

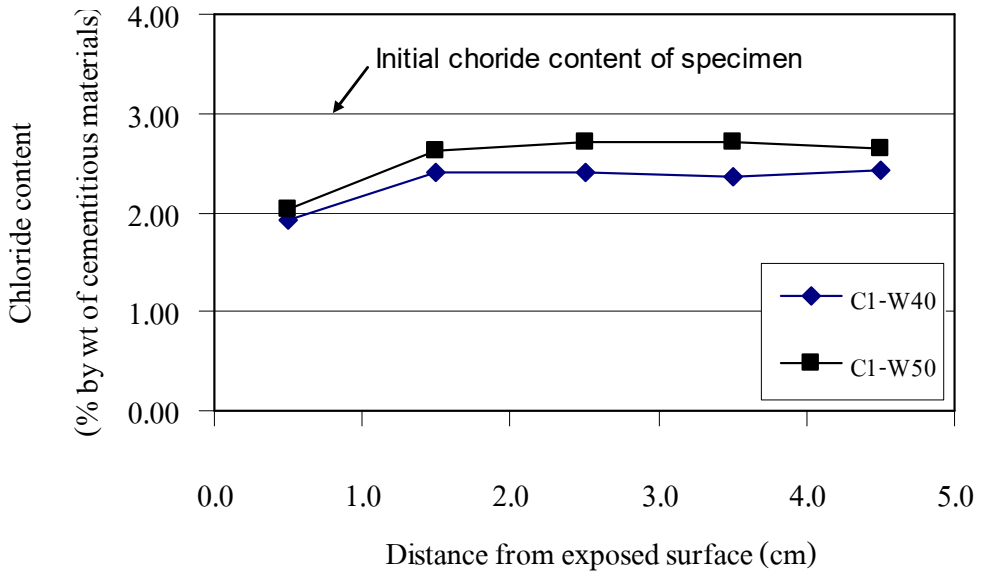
บทที่ 4

ผลการทดลอง

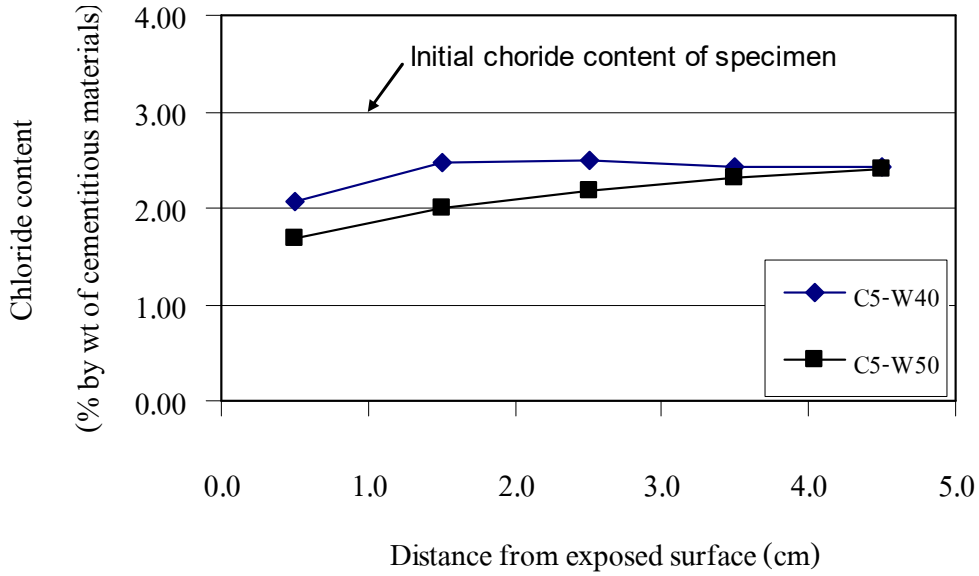
การแพร่คลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์

1. **การแพร่คลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอยและสารขยายตัว**

จากการทดลองได้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 2 อัตราส่วน คือ 0.40 และ 0.50 อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยเท่ากับ 0.30 และ อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 และผสมเกลือโซเดียมคลอไรด์ในระหว่างการผสมซีเมนต์เพสต์ เพื่อให้มีปริมาณคลอไรด์ 3.0% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน



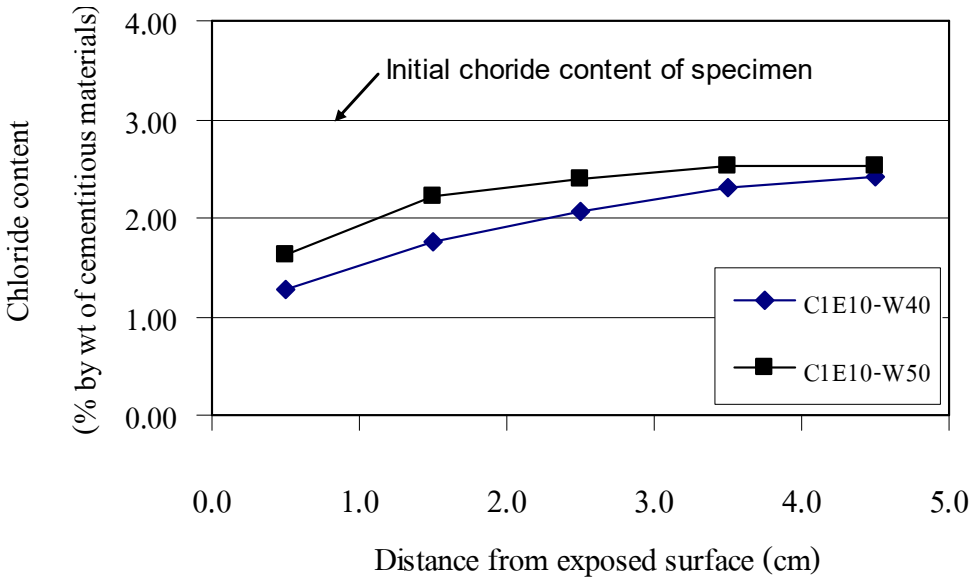
ภาพที่ 4.1 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างกัน



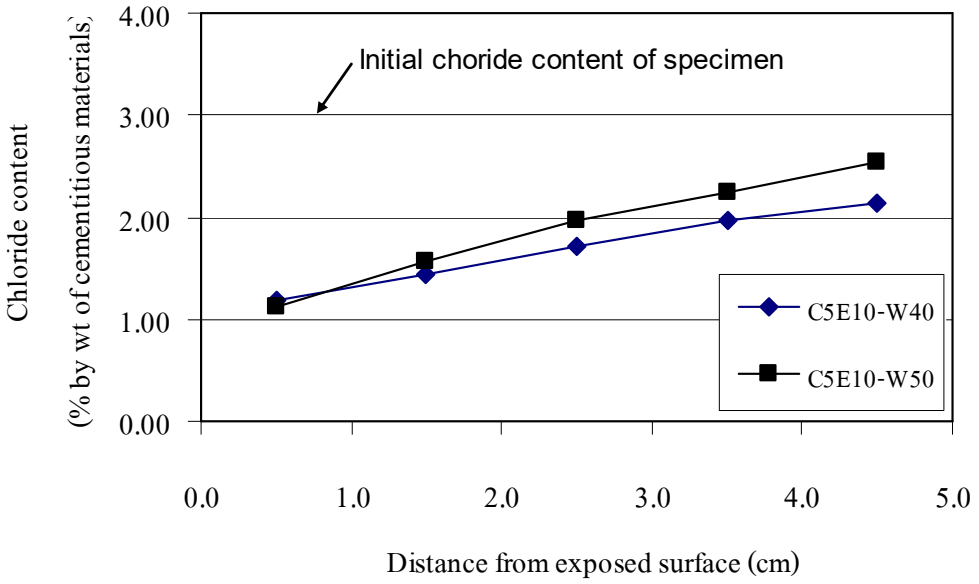
ภาพที่ 4.2 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลัก เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างกัน

เมื่อพิจารณาการทดลองภาพที่ 4.1 เปรียบเทียบระหว่างซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และไม่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยหรือสารขยายตัวเช่นเดียวกัน แต่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแตกต่างกันที่ 0.40 และ 0.50 แล้วพบว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40 จะเกิดการแพร่ของคลอไรด์มากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50

และเมื่อพิจารณาการทดลองภาพที่ 4.2 เปรียบเทียบระหว่างซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลัก และไม่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยหรือสารขยายตัวเช่นเดียวกัน แต่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแตกต่างกันที่ 0.40 และ 0.50 แล้ว พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 จะเกิดการแพร่ของคลอไรด์มากกว่า ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40



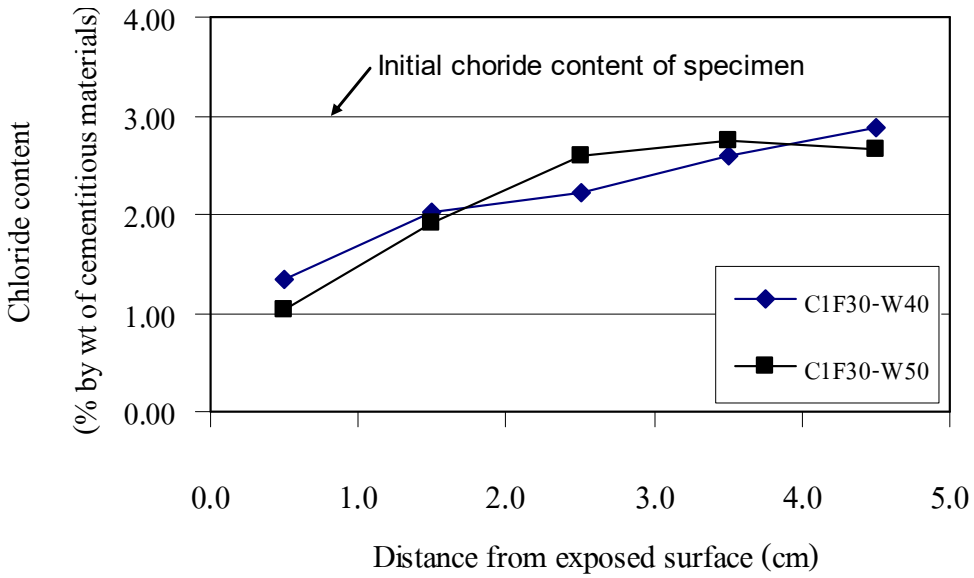
ภาพที่ 4.3 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างกัน



ภาพที่ 4.4 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างกัน

จากการทดลองภาพที่ 4.3 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมกับสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 แต่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแตกต่างกันที่ 0.40 และ 0.50 แล้ว พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40 จะเกิดการแพร่ของคลอไรด์มากกว่า ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50

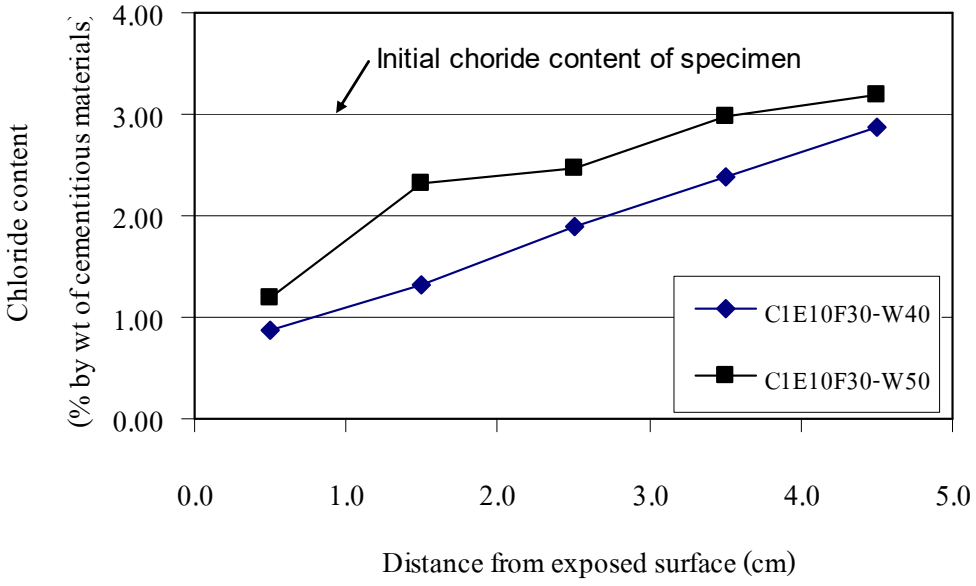
จากการทดลองภาพที่ 4.4 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมกับสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 แต่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแตกต่างกันที่ 0.40 และ 0.50 แล้ว พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40 จะเกิดการแพร่ของคลอไรด์มากกว่า ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50



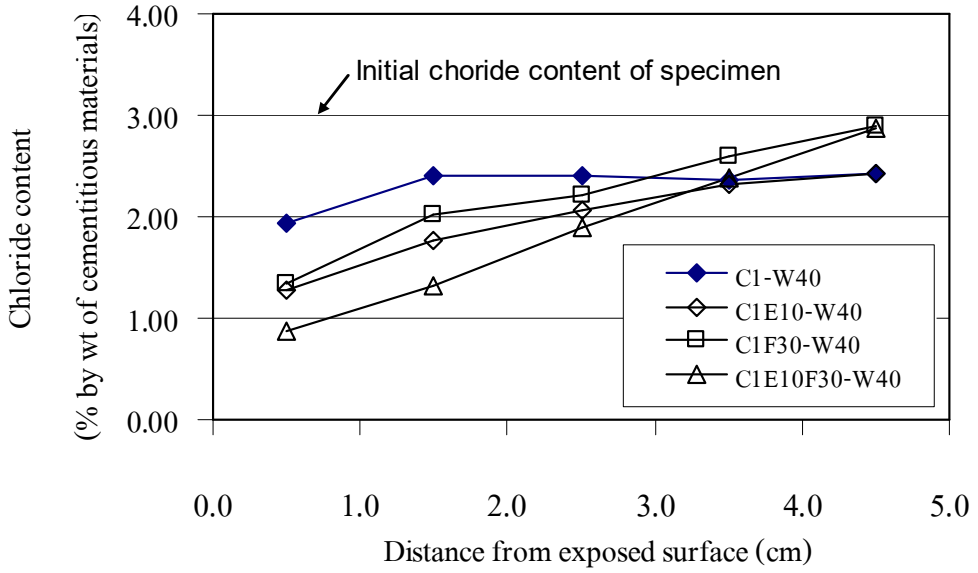
ภาพที่ 4.5 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยเท่ากับ 0.30 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างกัน

จากการทดลองภาพที่ 4.5 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมกับเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยเท่ากับ 0.30 แต่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแตกต่างกันที่ 0.40 และ 0.50 แล้ว พบว่าที่ระยะจากผิวด้านนอกที่สัมผัสกับน้ำเปล่า 10 และ 50มม. ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 จะเกิดการแพร่ของคลอไรด์มากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 แต่ที่ระยะจากผิวด้านนอกที่สัมผัสกับน้ำเปล่า 20,30 และ 40 มม. ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.4 จะเกิดการแพร่ของคลอไรด์มากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5

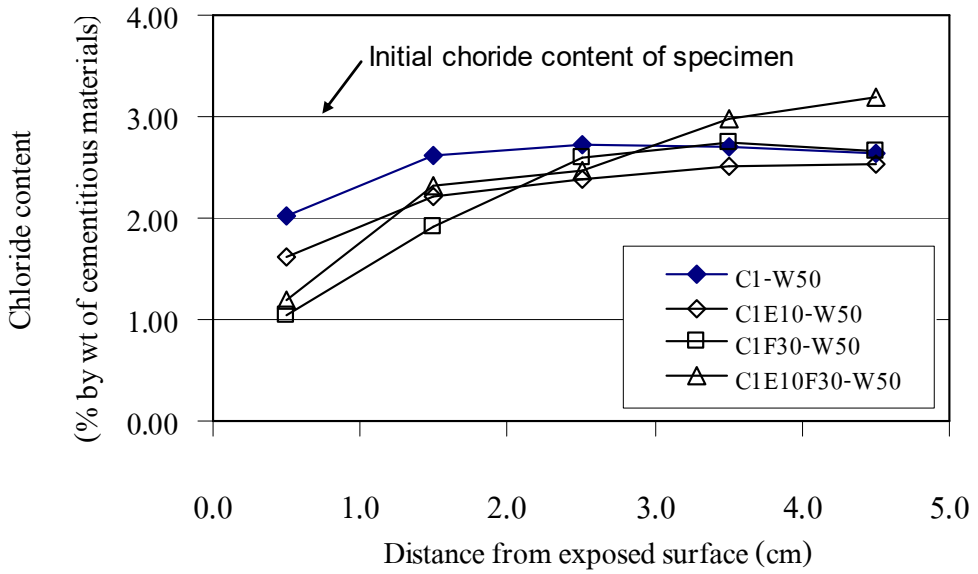
และเมื่อพิจารณาการทดลองภาพที่ 4.6 เปรียบเทียบระหว่างซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัวกับเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวกับเถ้าลอยเท่ากับ 0.10 และ0.30 ตามลำดับเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างกันแล้ว พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40 จะเกิดการแพร่ของคลอไรด์มากกว่า ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50



ภาพที่ 4.6 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัวกับเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวกับเถ้าลอยเท่ากับ 0.10 และ0.30 ตามลำดับเทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างเท่ากัน



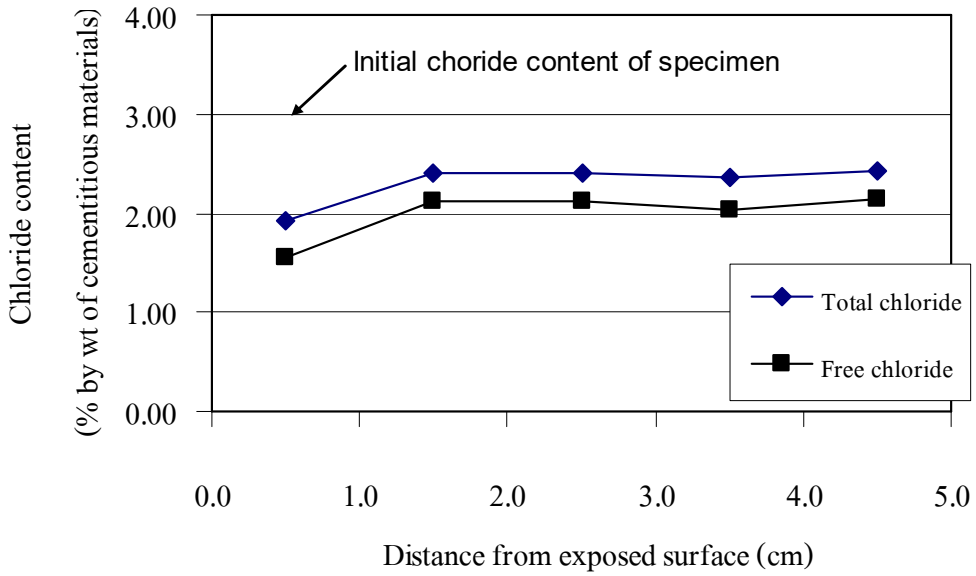
ภาพที่ 4.7 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมกับสารขยายตัวและเถ้าลอยในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวและเถ้าลอยที่แตกต่างกัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากันที่ 0.40



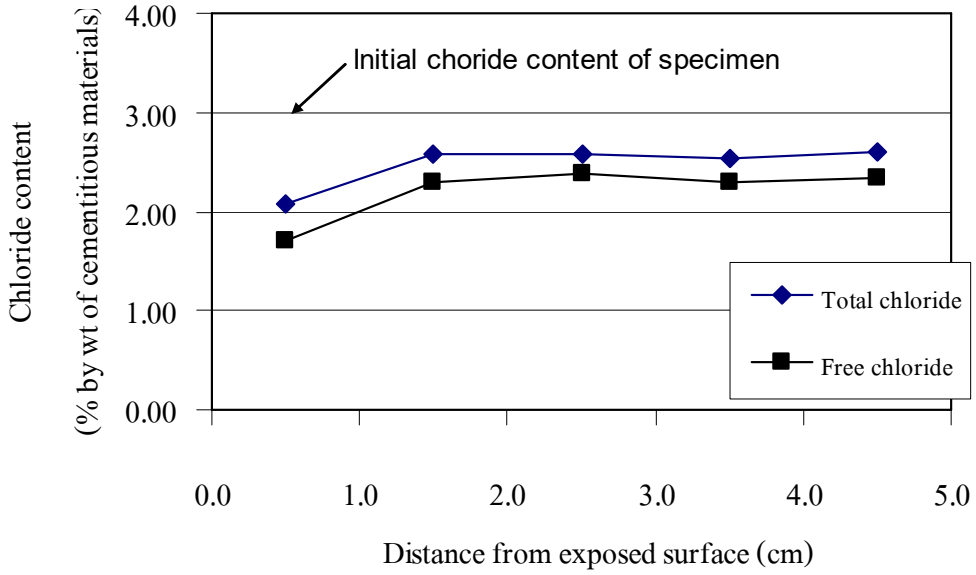
ภาพที่ 4.8 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมกับสารขยายตัวและเถ้าลอยในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวและเถ้าลอยที่แตกต่างกัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากันที่ 0.50

จากการทดลองภาพที่ 4.7 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมกับสารขยายตัวและเถ้าลอยในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวและเถ้าลอยที่แตกต่างกัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากันที่ 0.40 แล้ว พบว่าที่ระยะทางจากผิวด้านนอกที่สัมผัสกับน้ำเปล่า 10 และ 20 มม. การแพร่ของคลอไรด์จะเกิดในซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัว 0.10 และอัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย 0.30 มากที่สุด รองลงมาจะเป็นซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัว 0.10 และซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย 0.30 ตามลำดับ และในซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวหรือเถ้าลอย จะมีการแพร่ของคลอไรด์เกิดขึ้นน้อยที่สุด แต่ที่ระยะทางจากผิวด้านนอกที่สัมผัสกับน้ำเปล่า 30,40 และ 50 มม. การแพร่ของคลอไรด์จะมีแนวโน้มที่เปลี่ยนไป ในซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัว 0.10 จะมีการแพร่ของคลอไรด์เกิดขึ้นมากที่สุด รองลงมากคือซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวหรือเถ้าลอยเลย และจะมีค่าปริมาณคลอไรด์ที่ใกล้เคียงกันมาก ที่ระยะทางจากผิวด้านนอกที่สัมผัสกับน้ำเปล่า 50 มม. และการแพร่ของคลอไรด์จะเกิดน้อยที่สุด ในซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย 0.30 รองลงมาคือ ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัว 0.10 และอัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย 0.30 และจะมีค่าปริมาณคลอไรด์ที่ใกล้เคียงกันมาก ที่ระยะทางจากผิวด้านนอกที่สัมผัสกับน้ำเปล่า 50 มม.

และเมื่อพิจารณาจาก ผลการทดลอง ภาพที่ 4.8 เปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมกับสารขยายตัวและเถ้าลอยในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวและเถ้าลอยที่แตกต่างกัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากันที่ 0.50 แล้ว พบว่าที่ระยะจากผิวนอกเข้าไป 10 ถึง 50 มิลลิเมตร ซีเมนต์เพสต์ล้วนและซีเมนต์เพสต์ผสมสารขยายตัว มีแนวโน้มของปริมาณคลอไรด์ในลักษณะเดียวกัน โดยปริมาณคลอไรดในซีเมนต์เพสต์ล้วนจะมีมากกว่าที่ทุกระยะจากผิวนอกเข้าไป 10 ถึง 50 มิลลิเมตร แต่ในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอยที่ระยะจากผิวนอกเข้าไป 10 ถึง 20 มิลลิเมตร มีปริมาณคลอไรด์ต่ำที่สุด แต่ที่ระยะ 30 ถึง 50 มิลลิเมตร ปริมาณคลอไรด์มีแนวโน้มใกล้เคียงกับตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ล้วน และในซีเมนตีเพสต์ที่ผสมทั้งเถ้าลอยและสารขยายตัว ที่ระยะจากผิวนอกเข้าไป 10 ถึง 30 มิลลิเมตร มีปริมาณคลอไรด์ที่ต่ำกว่า ซีเมนต์เพสต์ล้วน แต่ที่ระยะ 40 และ 50 มิลลิเมตร มีปริมาณคลอไรด์สูงสุด

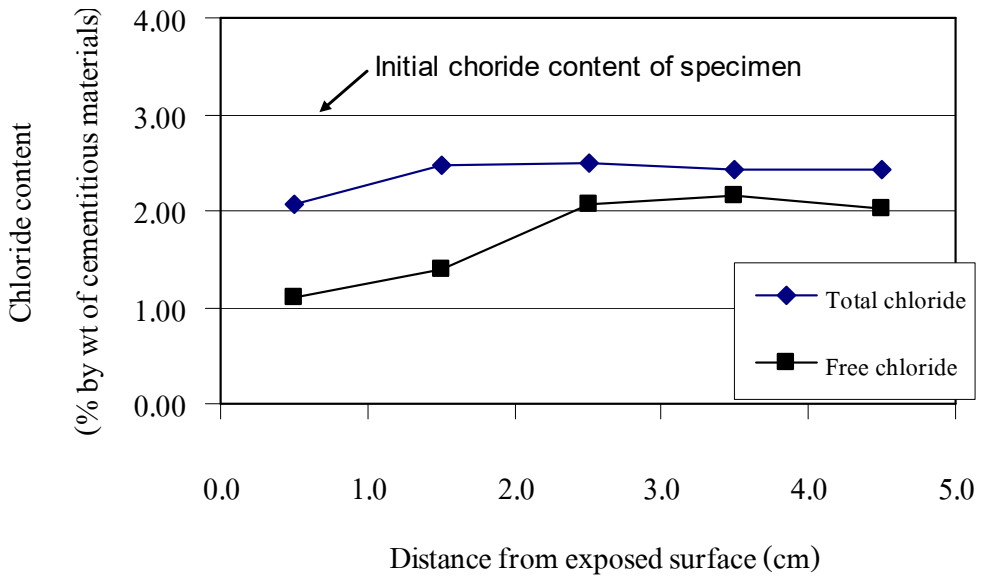


ภาพที่ 4.9 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก

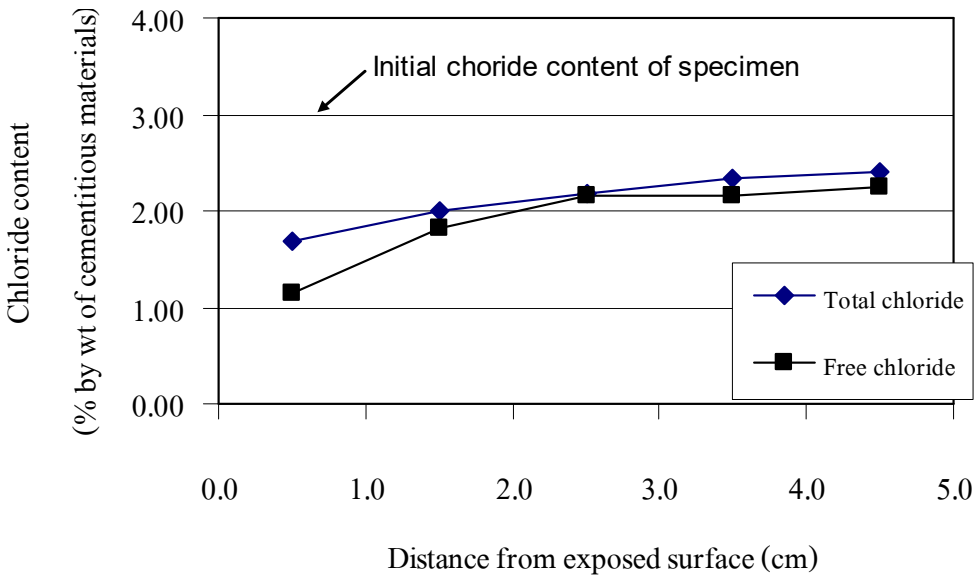


ภาพที่ 4.10 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก

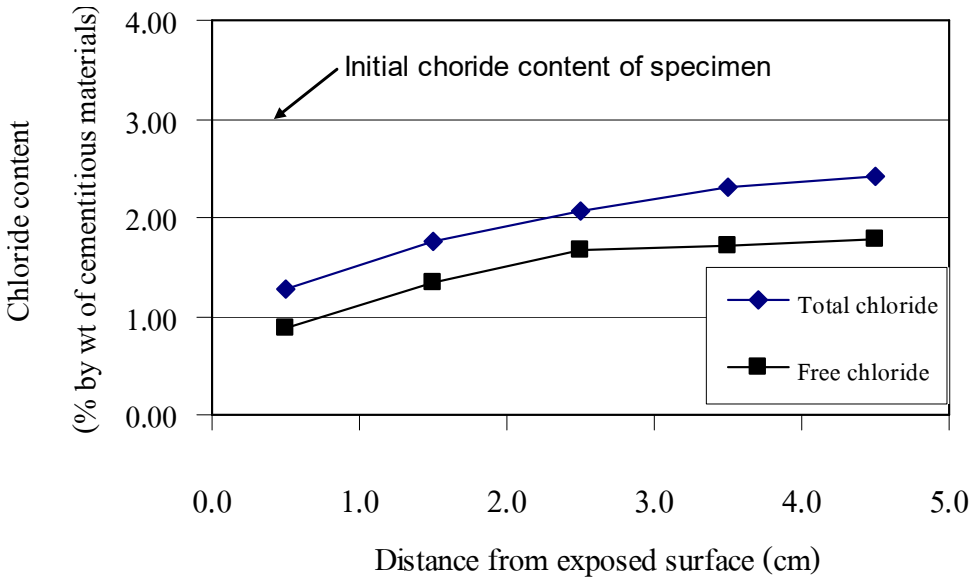
เมื่อพิจารณา ผลการทดลอง ภาพที่ 4.9 และ 4.10 พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และไม่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยหรือสารขยายตัวเช่นเดียวกัน แต่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแตกต่างกันที่ 0.40 และ 0.50 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด และปริมาณคลอไรด์อิสระในตัวอย่าง มีแนวโน้มในลักษณะเดียวกัน และมีค่าปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ ซึ่งหาได้จากค่าความแตกต่างระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด และปริมาณคลอไรด์อิสระ ที่ทุกๆระยะจากผิวด้านนอกที่สัมผัสกับน้ำเปล่าตั้งแต่ 10 ถึง 50 มม. มีปริมาณที่เกือบเท่ากัน ดังนั้นตัวอย่างซีเมนต์เพสต์จึงน่าจะมีความสามารถในการยึดจับคลอไรด์ที่จำกัด และพบว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40 จะมีปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับมากกว่า ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50



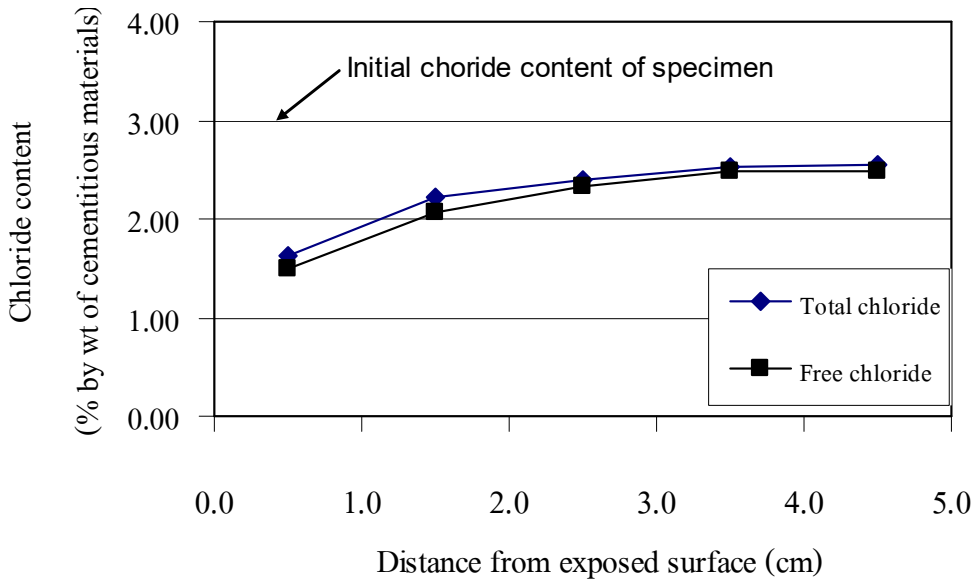
ภาพที่ 4.11 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนค์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักและมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก



ภาพที่ 4.12 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักและมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก



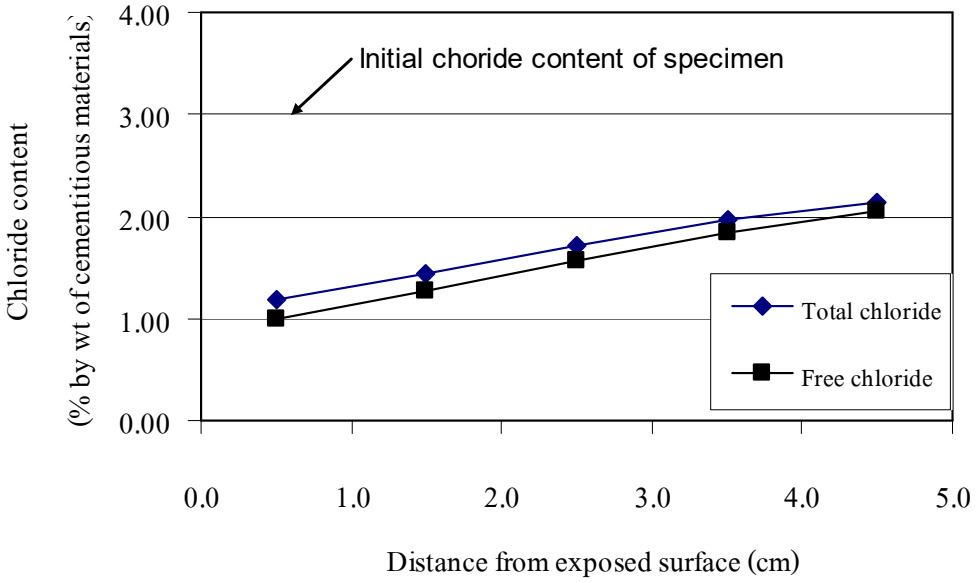
ภาพที่ 4.13 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก



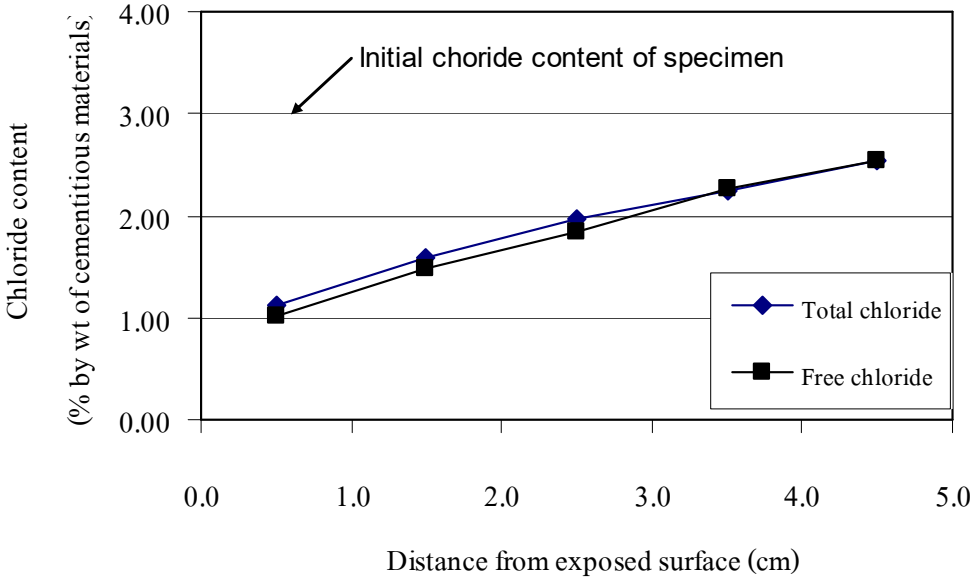
ภาพที่ 4.14 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก

เมื่อพิจารณา ผลการทดลอง ภาพที่ 4.11 และ 4.12 พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลัก และไม่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยหรือสารขยายตัวเช่นเดียวกัน แต่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแตกต่างกันที่ 0.40 และ 0.50 ในซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40 จะมีปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับมากกว่า ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50

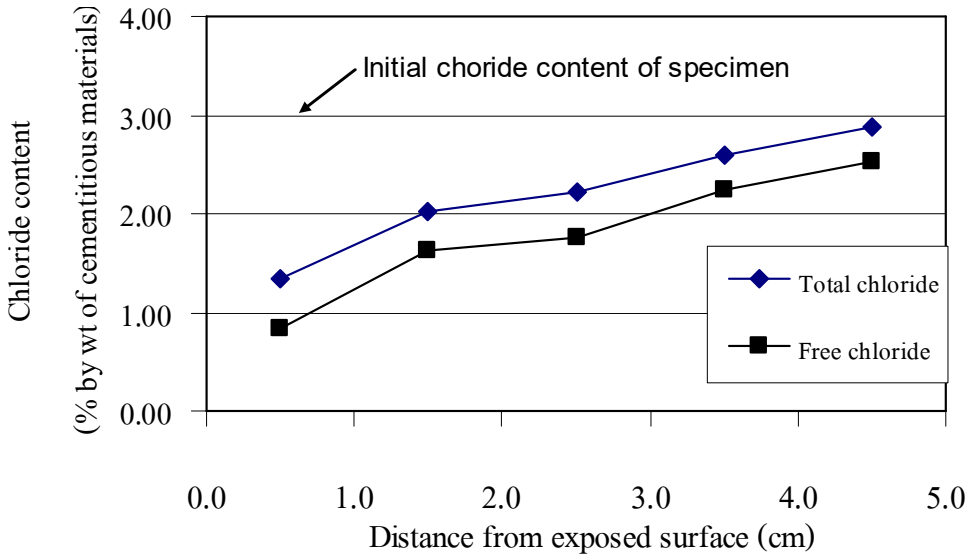
และเมื่อพิจารณา ผลการทดลอง ภาพที่ 4.13 และ 4.14 พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 แต่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแตกต่างกันที่ 0.40 และ 0.50 ในซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40 จะมีปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับมากกว่า ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50



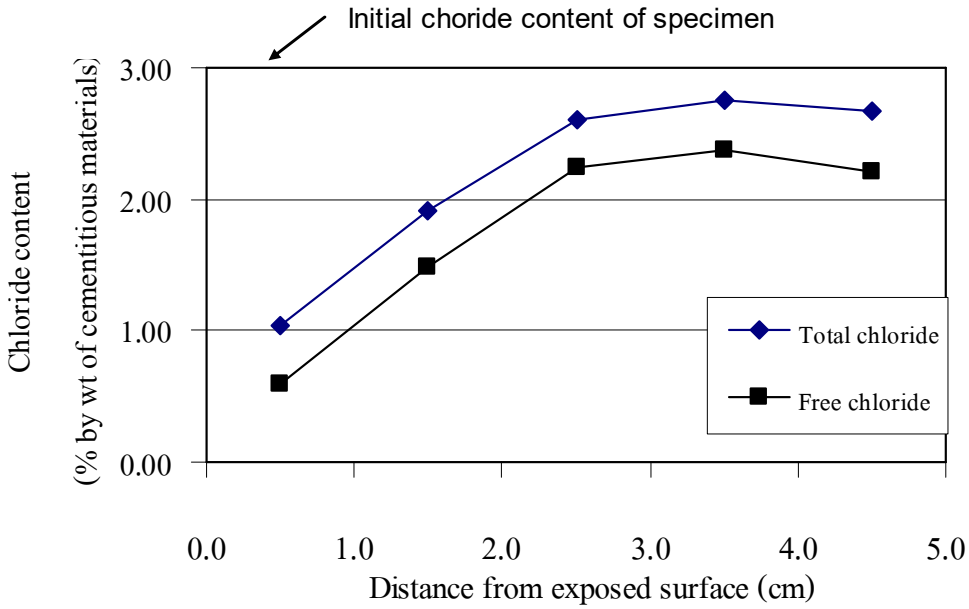
ภาพที่ 4.15 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านบนลก



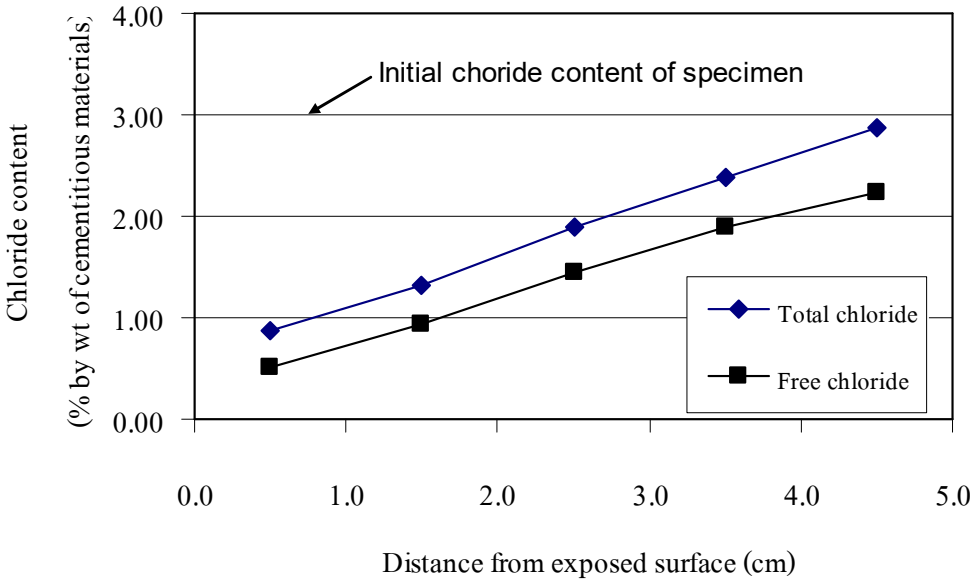
ภาพที่ 4.16 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก



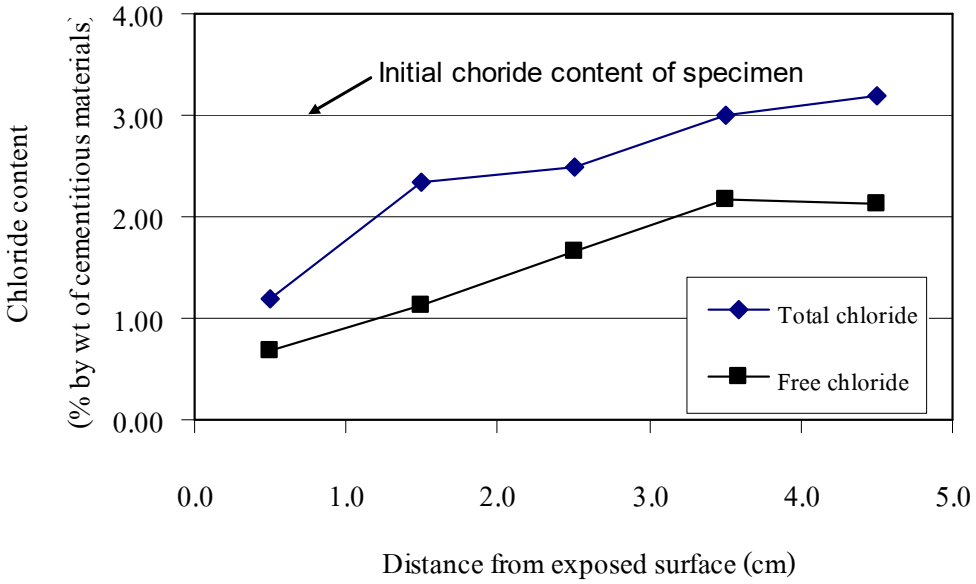
ภาพที่ 4.17 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยเท่ากับ 0.30 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก



ภาพที่ 4.18 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยเท่ากับ 0.30 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก



ภาพที่ 4.19 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมสารขยายตัวและเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวและเถ้าลอยเท่ากับ 0.10 และ 0.30 ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก



ภาพที่ 4.20 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมสารขยายตัวและเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวและเถ้าลอยเท่ากับ 0.10 และ 0.30 ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก

เมื่อพิจารณา ผลการทดลอง ภาพที่ 4.15 และ 4.16 พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลักและผสมสารขยายตัว ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 แต่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแตกต่างกันที่ 0.40 และ 0.50 ในซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40 จะมีปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับมากกว่า ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50

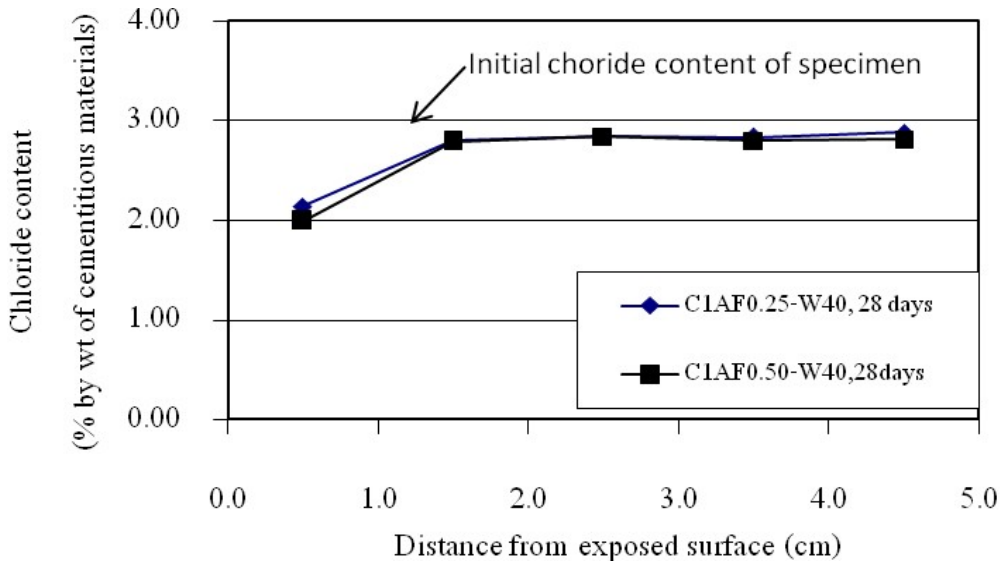
จากนั้นเมื่อพิจารณา ผลการทดลอง ภาพที่ 4.17 และ 4.18 พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1เป็นวัสดุประสานหลักและผสมเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยเท่ากับ 0.30 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแตกต่างกันที่ 0.40 และ 0.50 พบว่าตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 มีปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับใกล้เคียงกัน

และเมื่อพิจารณา ผลการทดลอง ภาพที่ 4.19 และ 4.20 พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักผสมสารขยายตัวและเถ้าลอย ในอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ0.10 และ 0.30 ตามลำดับ แต่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแตกต่างกันที่ 0.40 และ 0.50 ในซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 จะมีปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับมากกว่า ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40

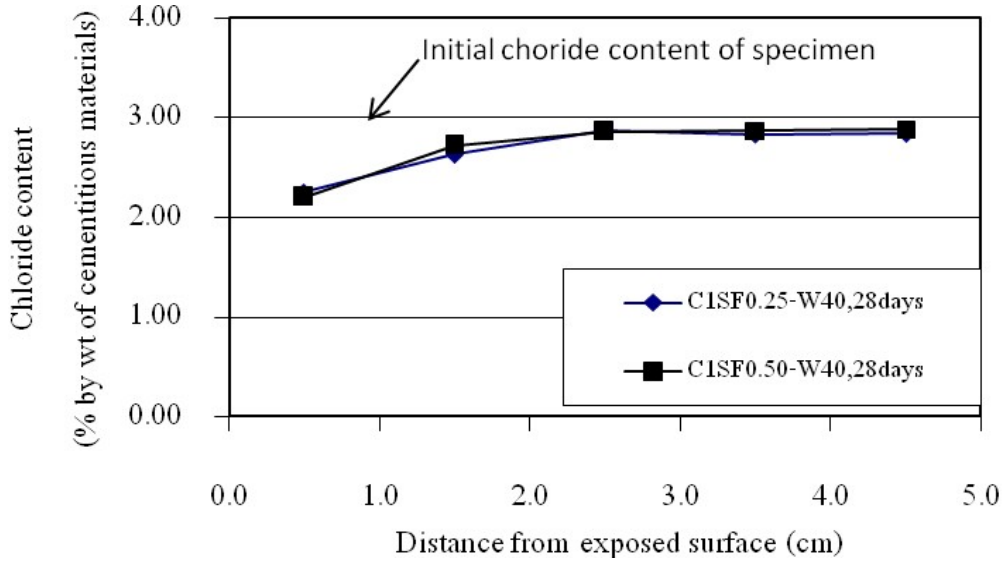
2. **การแพร่คลอไรด์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใย**

จากการทดลองได้ใช้เส้นใย 3 ชนิดได้แก่ เส้นใยสังเคราะห์อาคิลิก เส้นใยแก้ว และเส้นใยเหล็กผสมในซีเมนต์เพสต์โดยซีเมนต์เพสต์ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใย 0.25% และ 0.50% โดยปริมาตร ผสมเกลือคลอไรด์ในปริมาณ 3.0% โดยน้ำหนักวัสดุประสานลงในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์

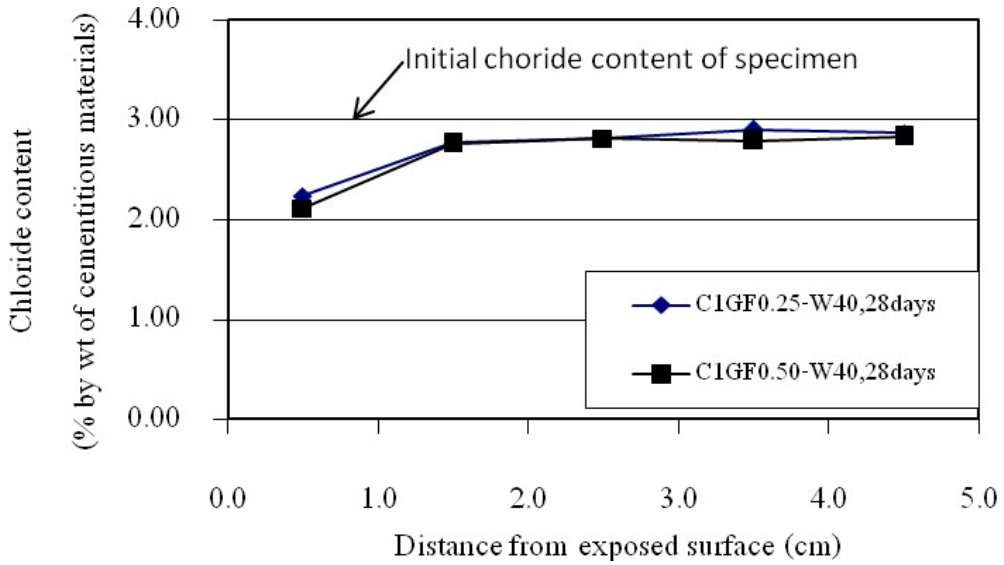
จากการทดลองภาพที่ 4.21 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยสังเคราะห์อาคิลิก ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 28 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใยแตกต่างกันที่ 0.25%และ 0.50% โดยปริมาตร พบว่า การแพร่ของคลอไรด์ในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่มีปริมาณเส้นใยแตกต่างกัน มีค่าใกล้เคียงกันมาก



ภาพที่ 4.21 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยสังเคราะห์อาคิลิก ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 28 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใยแตกต่างกัน



ภาพที่ 4.22 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยเหล็ก ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 28 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใยแตกต่างกัน

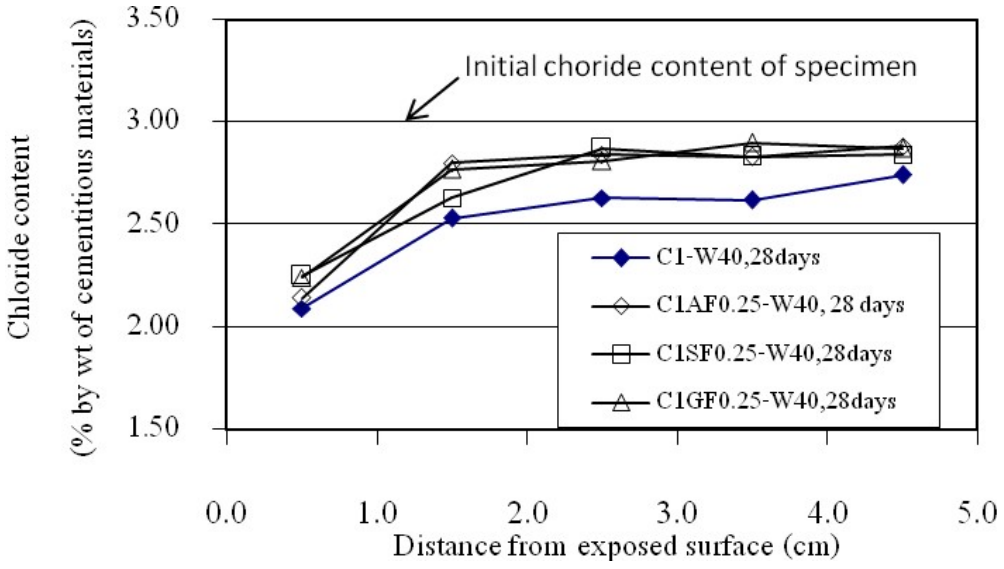


ภาพที่ 4.23 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยแก้ว ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 28 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใยแตกต่างกัน

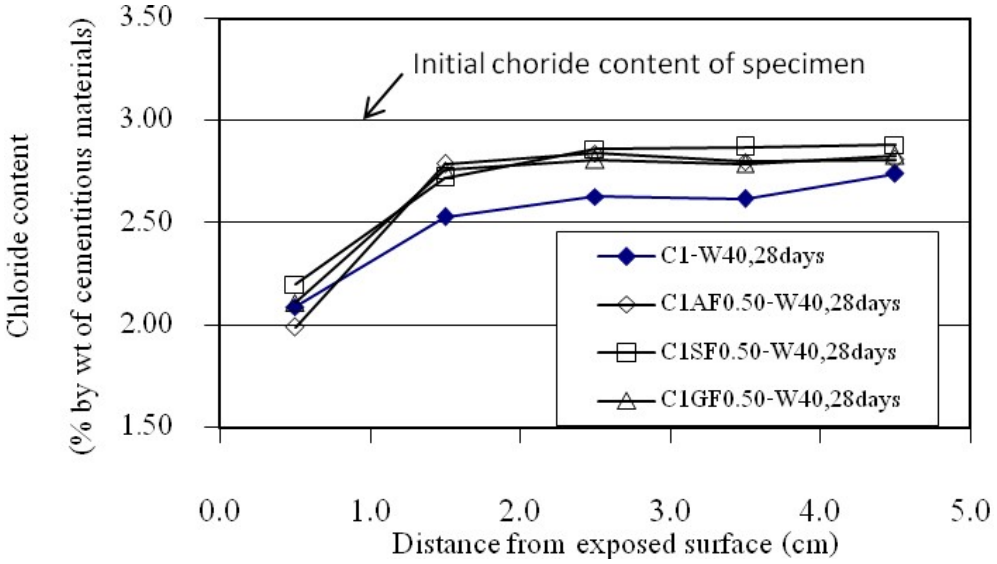
จากภาพที่ 4.22 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยเหล็ก ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 28 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใยแตกต่างกันที่ 0.25%และ 0.50% โดยปริมาตร พบว่า การแพร่ของคลอไรด์ในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่มีปริมาณเส้นใยแตกต่างกัน มีค่าใกล้เคียงกันมาก

และจากภาพที่ 4.23 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยแก้ว ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 28 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใยแตกต่างกันที่ 0.25%และ 0.50% โดยปริมาตร พบว่า การแพร่ของคลอไรด์ในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่มีปริมาณเส้นใยแตกต่างกัน มีค่าใกล้เคียงกันมาก

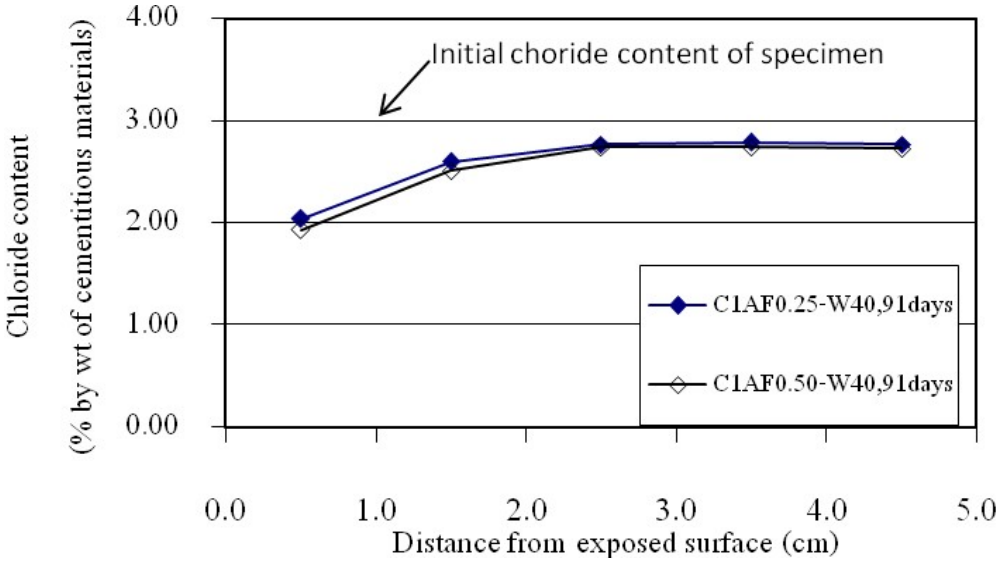
จากภาพที่ 4.24 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างซีเมนต์เพสต์ล้วนและซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยต่างๆ ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 28 วัน เทียบกับระยะทางจาก ผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใย 0.25% โดยปริมาตร พบว่าซีเมนต์ที่ผสมเส้นใยมีการแพร่ออกของคลอไรด์น้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ล้วน โดยซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยชนิดต่างๆมีการแพร่ออกของคลอไรด์ที่ใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 4.24 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ล้วนและซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยต่างๆ ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 28 วัน เทียบกับระยะทางจาก ผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใย 0.25% โดยปริมาตร



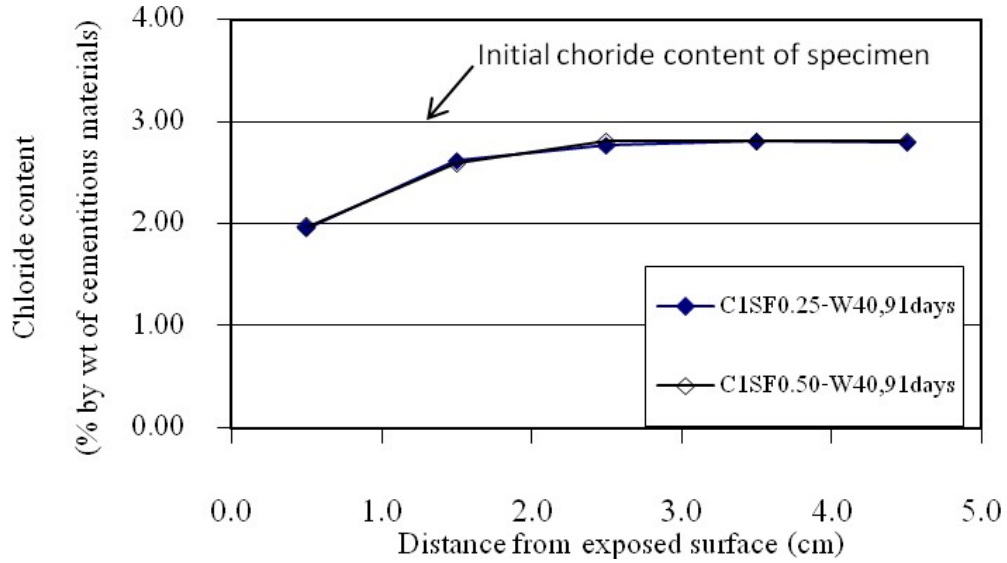
ภาพที่ 4.25 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ล้วนและซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยต่างๆ ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 28 วัน เทียบกับระยะทางจาก ผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใย 0.50% โดยปริมาตร



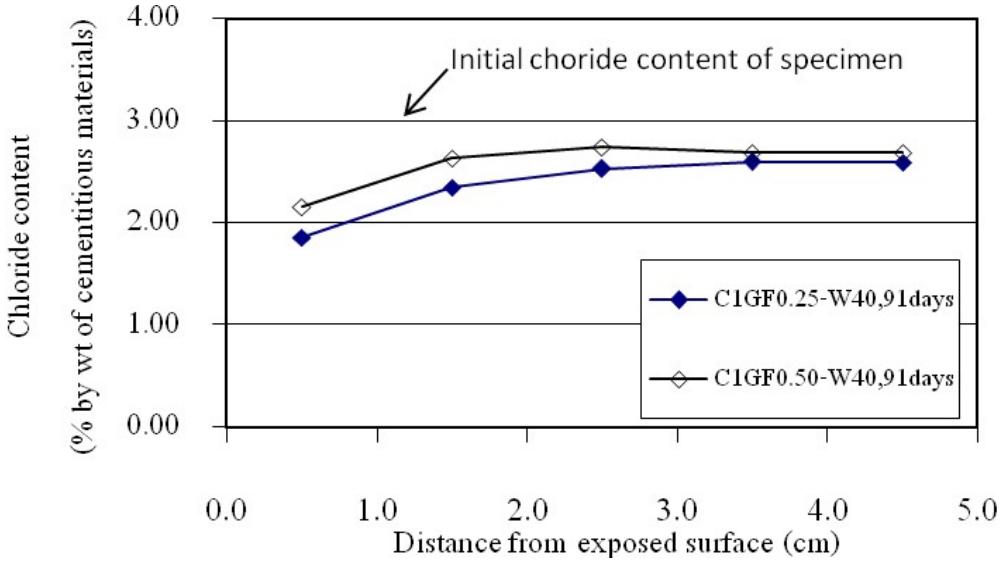
ภาพที่ 4.26 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยสังเคราะห์อาคิลิก ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 91 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใยแตกต่างกัน

จากการทดลองภาพที่ 4.25 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างซีเมนต์เพสต์ล้วนและซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยต่างๆ ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 28 วัน เทียบกับระยะทางจาก ผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใย 0.50% โดยปริมาตร พบว่าซีเมนต์ที่ผสมเส้นใยมีการแพร่ออกของคลอไรด์น้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ล้วน โดยซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยชนิดต่างๆมีการแพร่ออกของคลอไรด์ที่ใกล้เคียงกัน

จากการทดลองภาพที่ 4.26 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยสังเคราะห์อาคิลิก ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 91 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใยแตกต่างกันที่ 0.25%และ 0.50% โดยปริมาตร พบว่า การแพร่ของคลอไรด์ในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่มีปริมาณเส้นใยแตกต่างกัน มีค่าใกล้เคียงกัน โดยซีเมนต์เพสต์ที่มีปริมาณเส้นใย 0.50% มีการแพร่ออกของคลอไรด์น้อยกว่า ซีเมนต์เพสต์ที่มีปริมาณเส้นใย 0.25% เล็กน้อย



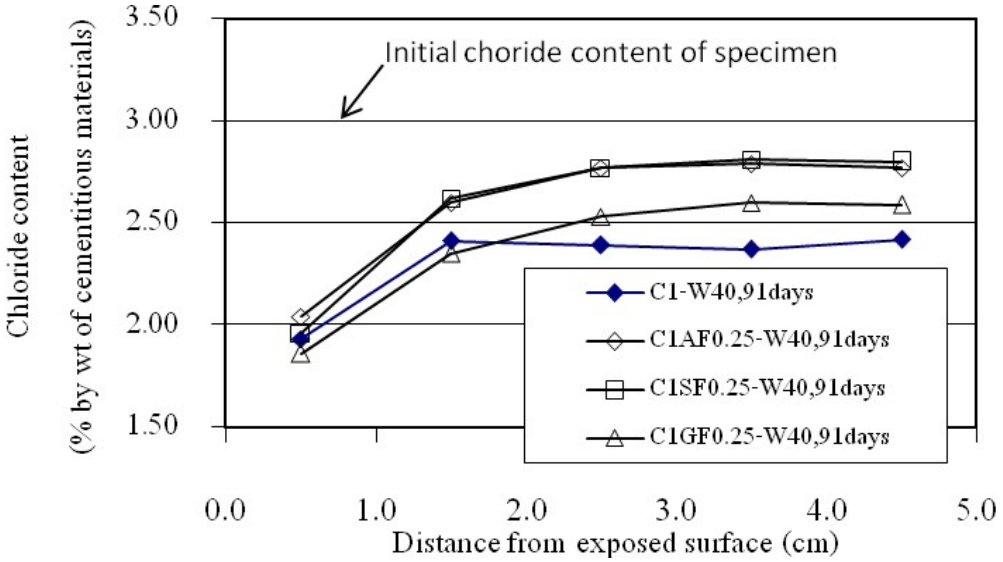
ภาพที่ 4.27 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยเหล็ก ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 91 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใยแตกต่างกัน



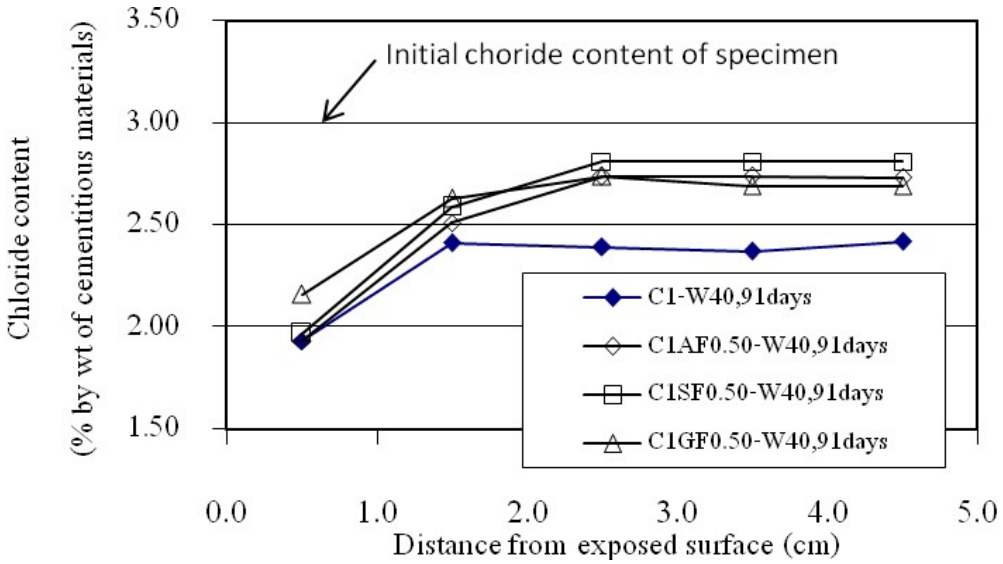
ภาพที่ 4.28 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยแก้ว ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 91 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใยแตกต่างกัน

จากการทดลองภาพที่ 4.27 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยเหล็ก ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 91 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใยแตกต่างกันที่ 0.25%และ 0.50% โดยปริมาตร พบว่า การแพร่ของคลอไรด์ในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่มีปริมาณเส้นใยแตกต่างกัน มีค่าใกล้เคียงกันมาก

และจากการทดลองภาพที่ 4.28 เมื่อพิจารณา เปรียบเทียบระหว่างซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยแก้ว ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 91 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใยแตกต่างกันที่ 0.25%และ 0.50% โดยปริมาตร พบว่า เกิดการแพร่ของคลอไรด์ในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่มีปริมาณเส้นใย 0.25% มากกว่า ในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่มีปริมาณเส้นใย 0.50%



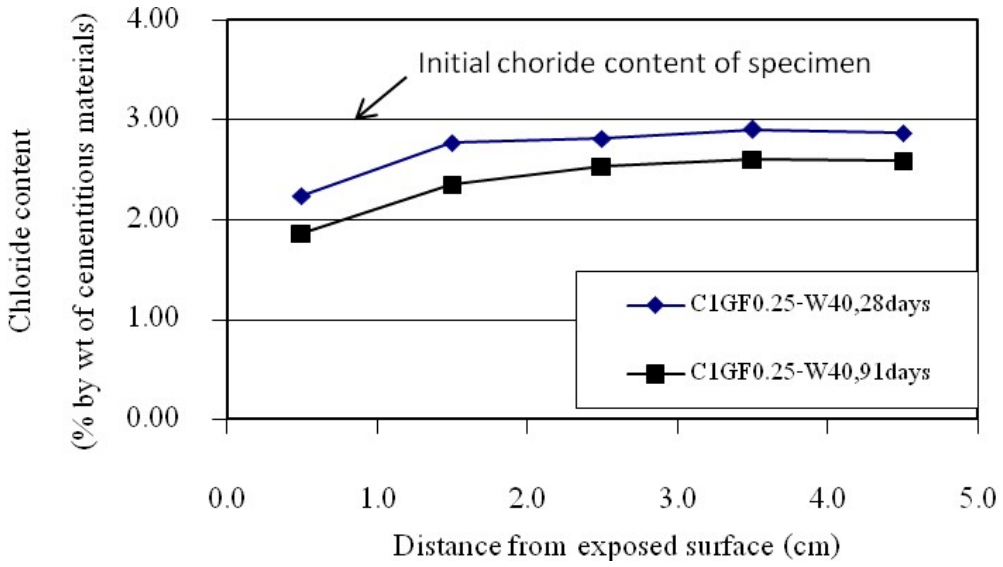
ภาพที่ 4.29 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ล้วนและซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยต่างๆ ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 91 วัน เทียบกับระยะทางจาก ผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใย 0.25% โดยปริมาตร



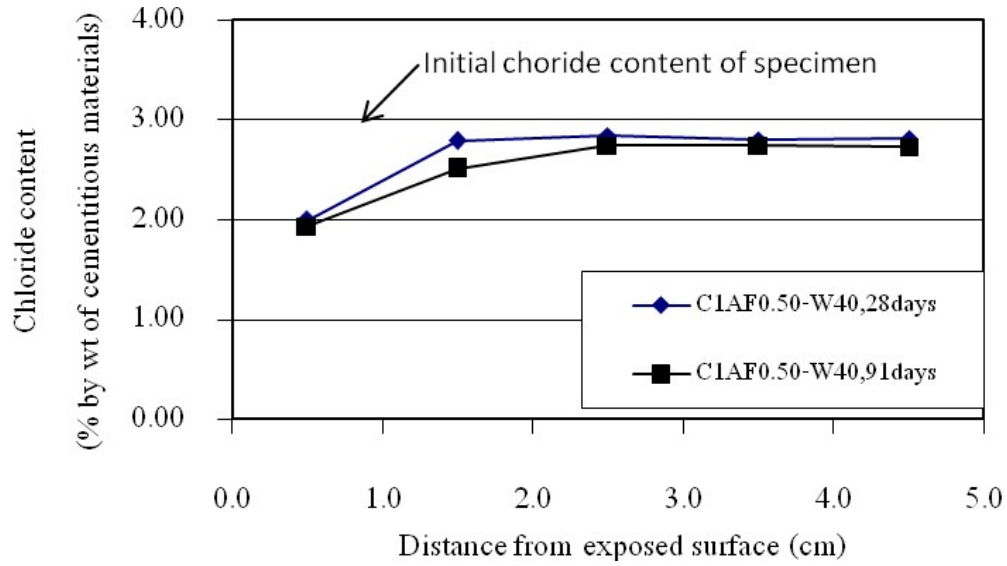
ภาพที่ 4.30 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ล้วนและซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยต่างๆ ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 91 วัน เทียบกับระยะทางจาก ผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใย 0.50% โดยปริมาตร

จากการทดลองภาพที่ 4.29 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างซีเมนต์เพสต์ล้วนและซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยต่างๆ ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 91 วัน เทียบกับระยะทางจาก ผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใย 0.25 % โดยปริมาตร พบว่าการแพร่ออกของคลอไรด์เกิดขึ้นมากที่สุดในซีเมนต์เพสต์ล้วน และรองลงมาคือซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยแก้ว,เส้นใยสังเคราะห์อะคริลิกและเส้นใยเหล็กจะมีปริมาณคลอไรด์อยู่ใกล้เคียงกัน

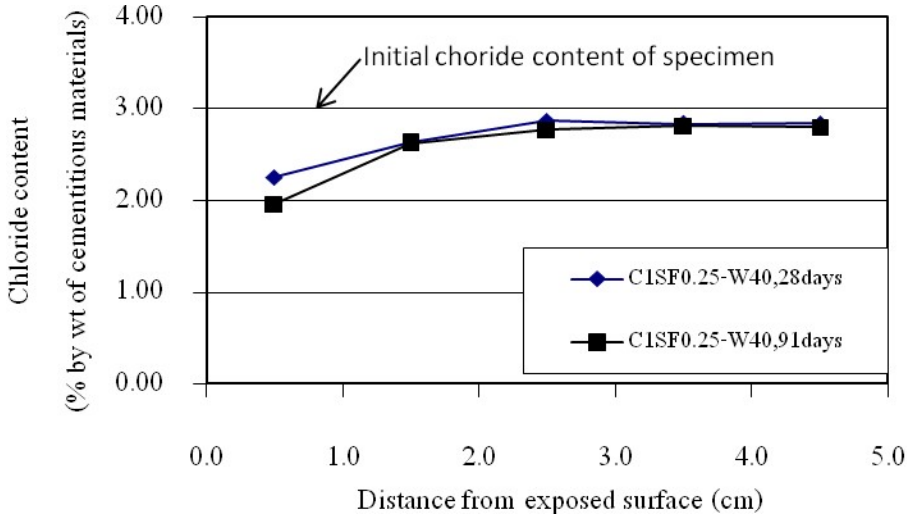
และจากการทดลองภาพที่ 4.30 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างซีเมนต์เพสต์ล้วนและซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยต่างๆ ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 91 วัน เทียบกับระยะทางจาก ผิวด้านนอกที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใย 0.50% โดยปริมาตร พบว่าการแพร่ออกของคลอไรด์เกิดขึ้นมากที่สุดในซีเมนต์เพสต์ล้วน และรองลงมาคือซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยแก้ว ,เส้นใยสังเคราะห์อะคริลิกและเส้นใยเหล็ก ตามลำดับ แต่จะมีปริมาณคลอไรด์ใกล้เคียงกันมากกว่าซีเมนต์เพสต์ ที่มีปริมาณเส้นใย 0.25%



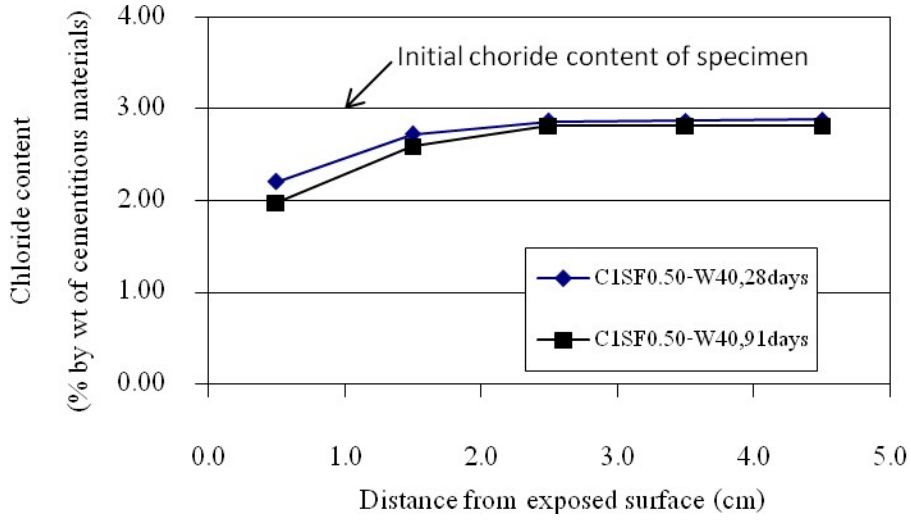
ภาพที่ 4.31 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยสังเคราะห์อาคิลิก ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 28และ91 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใย 0.25% โดยปริมาตร



ภาพที่ 4.32 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยสังเคราะห์อาคิลิก ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 28และ91 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใย 0.50% โดยปริมาตร



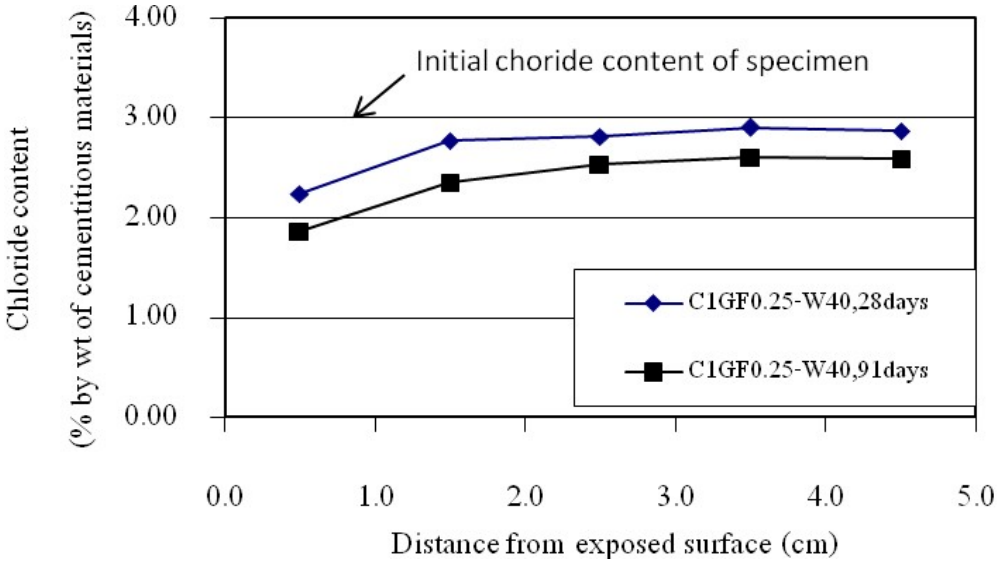
ภาพที่ 4.33 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยเหล็ก ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 28และ91 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใย 0.25% โดยปริมาตร



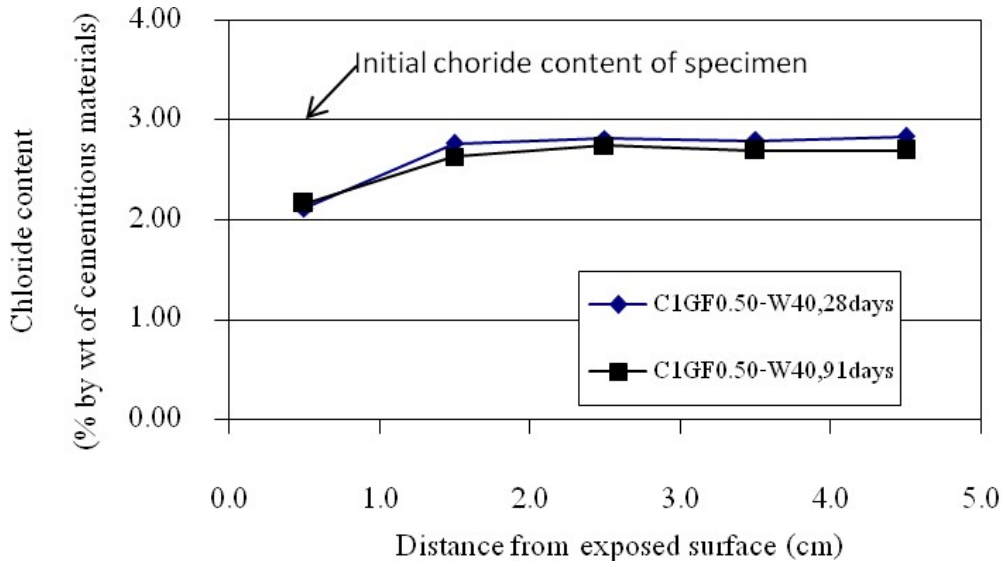
ภาพที่ 4.34 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยเหล็ก ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 28และ91 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใย 0.50 % โดยปริมาตร

เมื่อพิจารณา ผลการทดลอง ภาพที่ 4.31 และ 4.32 เปรียบเทียบระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยสังเคราะห์อาคิลิก ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 28และ91 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 โดยมีปริมาณเส้นใยสังเคราะห์อะคริลิกต่างกันที่ 0.25% และ 0.50% พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 91 วันจะเกิดการแพร่ของคลอไรด์ที่มากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 28 วัน ทั้งในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยสังเคราะห์อะคริลิกที่ 0.25% และ 0.50% โดยปริมาตร

และเมื่อพิจารณา ผลการทดลอง ภาพที่ 4.33 และ 4.34 เปรียบเทียบระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยเหล็ก ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 28และ91 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 โดยมีปริมาณเส้นใยเหล็กต่างกันที่ 0.25% และ 0.50% พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 91 วันจะเกิดการแพร่ของคลอไรด์ที่มากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 28 วัน ทั้งในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยเหล็กที่ 0.25% และ 0.50% โดยปริมาตร



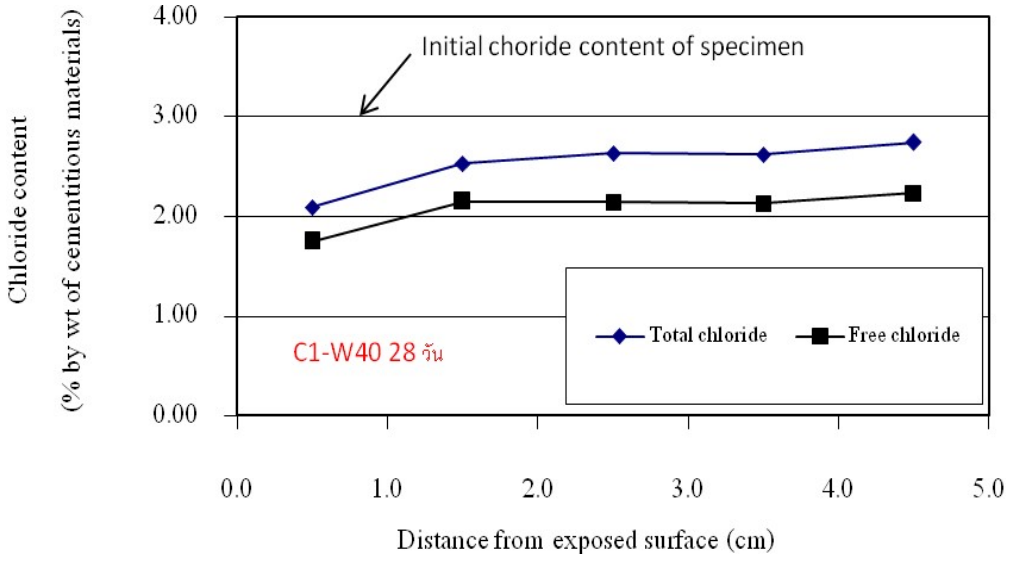
ภาพที่ 4.35 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยแก้ว ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 28และ91 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใย 0.25% โดยปริมาตร



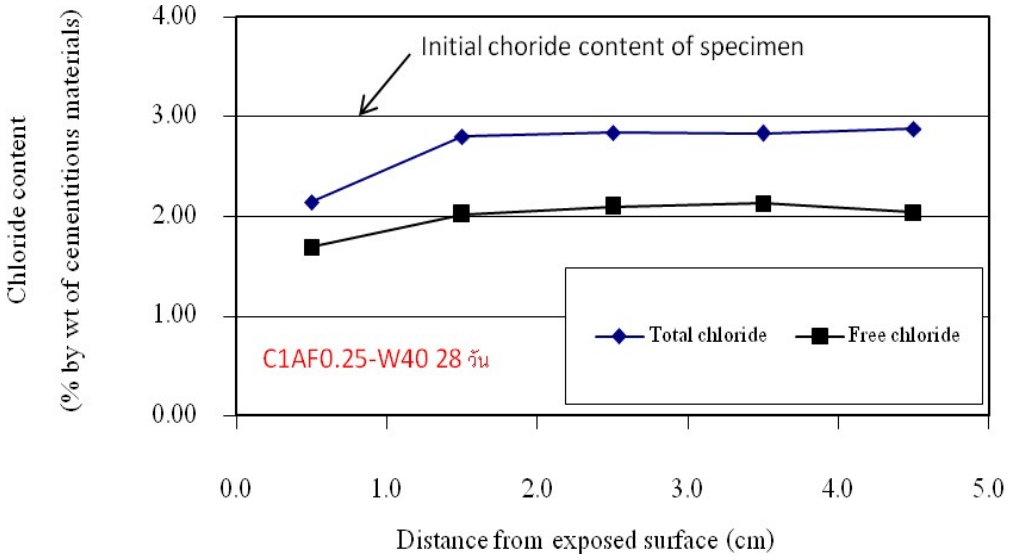
ภาพที่ 4.36 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยแก้ว ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 28และ91 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใย 0.50% โดยปริมาตร

เมื่อพิจารณา ผลการทดลอง ภาพที่ 4.35 และ 4.36 เปรียบเทียบระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยแก้ว ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 28และ91 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 โดยมีปริมาณเส้นใยแก้วต่างกันที่ 0.25% และ 0.50% พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 91 วันจะเกิดการแพร่ของคลอไรด์ที่มากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 28 วัน ทั้งในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยแก้วที่ 0.25% และ 0.50% โดยปริมาตร

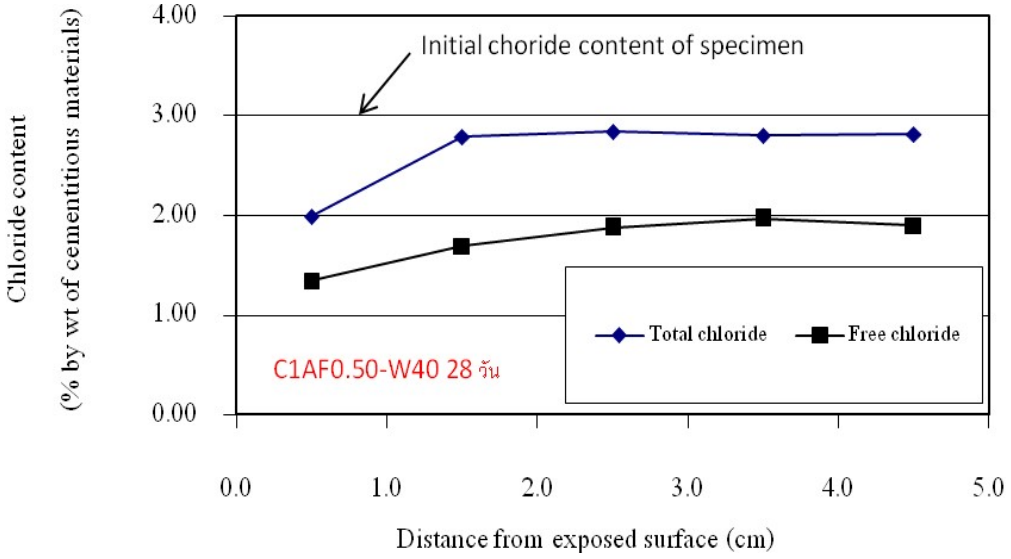
นอกจากนี้ ยังได้ทำการเปรียบเทียบค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ได้จากการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์แบบกรด กับปริมาณคลอไรด์อิสระที่ได้จากการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์แบบน้ำ ตั้งแต่ระยะทางจากผิวด้านนอกของซีเมนต์เพสต์เข้าไปเป็นระยะทาง 10 ถึง 50 มิลลิเมตร เพื่อตรวจสอบปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์



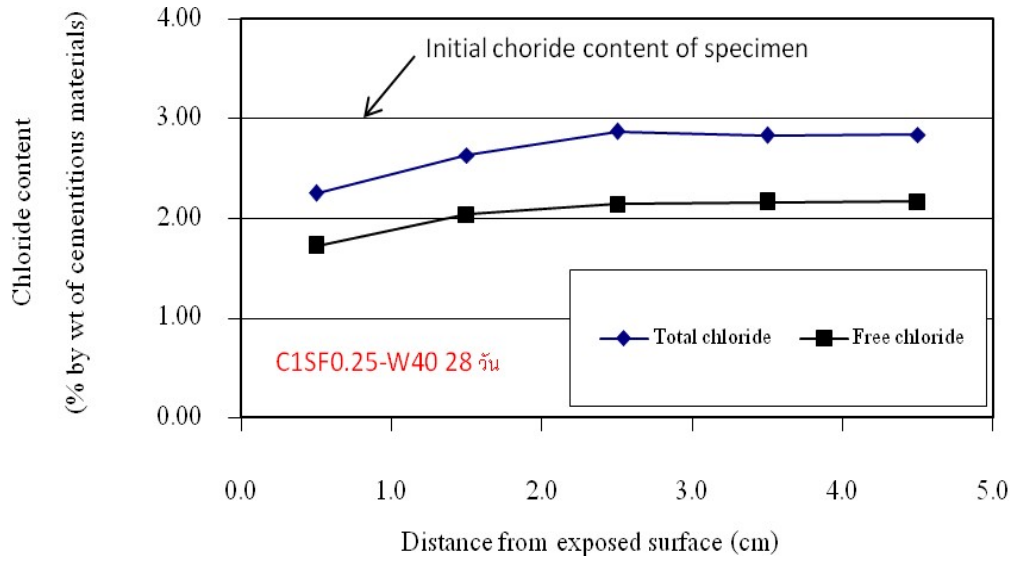
ภาพที่ 4.37 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แช่น้ำเปล่าเป็นระยะเวลา 28 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก



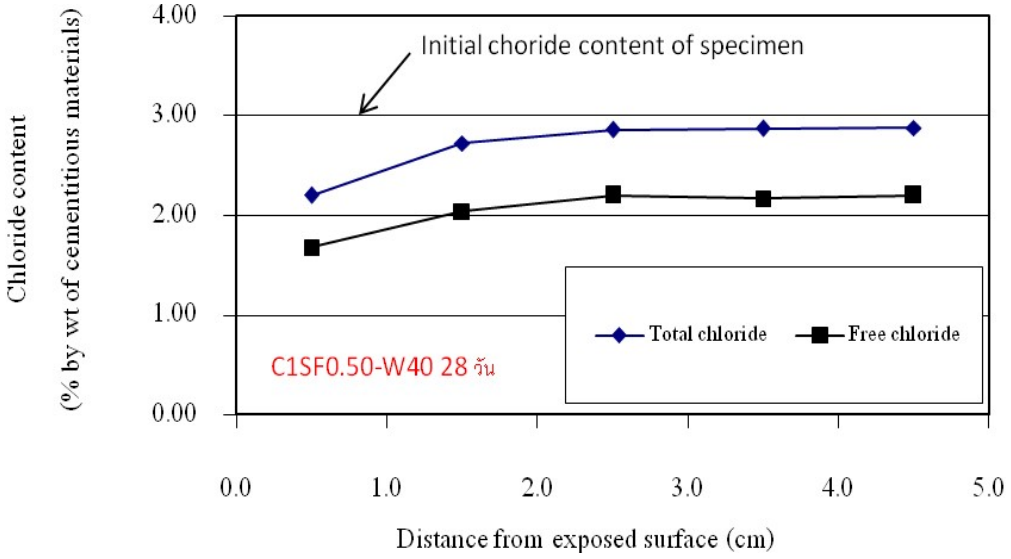
ภาพที่ 4.38 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยสังเคราะห์อาคิลิกที่แช่น้ำเปล่าเป็นระยะเวลา 28 วัน และผสมเส้นใยในปริมาณ 0.25% โดยปริมาตร เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก



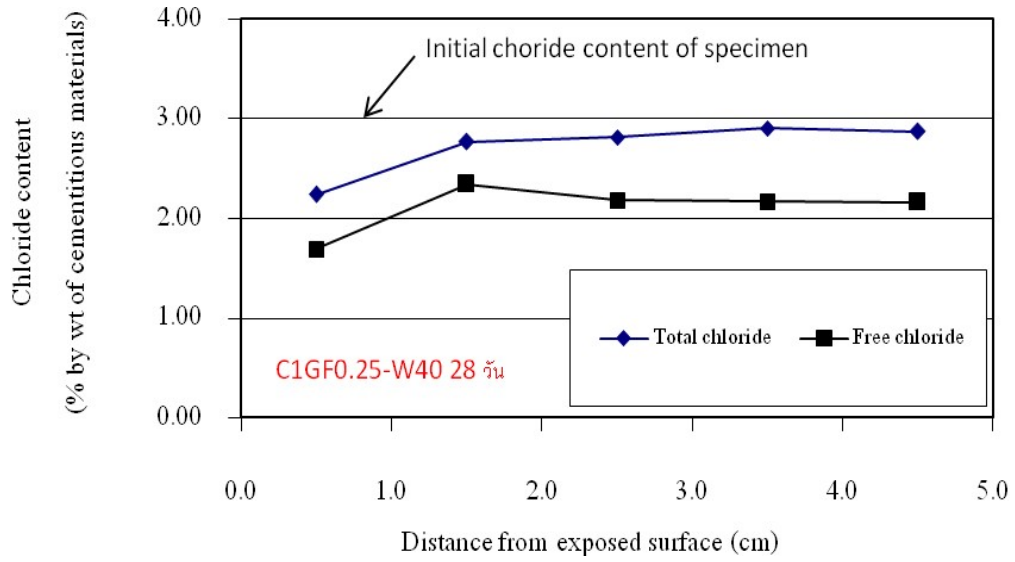
ภาพที่ 4.39 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยสังเคราะห์อาคิลิกที่แช่น้ำเปล่าเป็นระยะเวลา 28 วัน และผสมเส้นใยในปริมาณ 0.50% โดยปริมาตร เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก



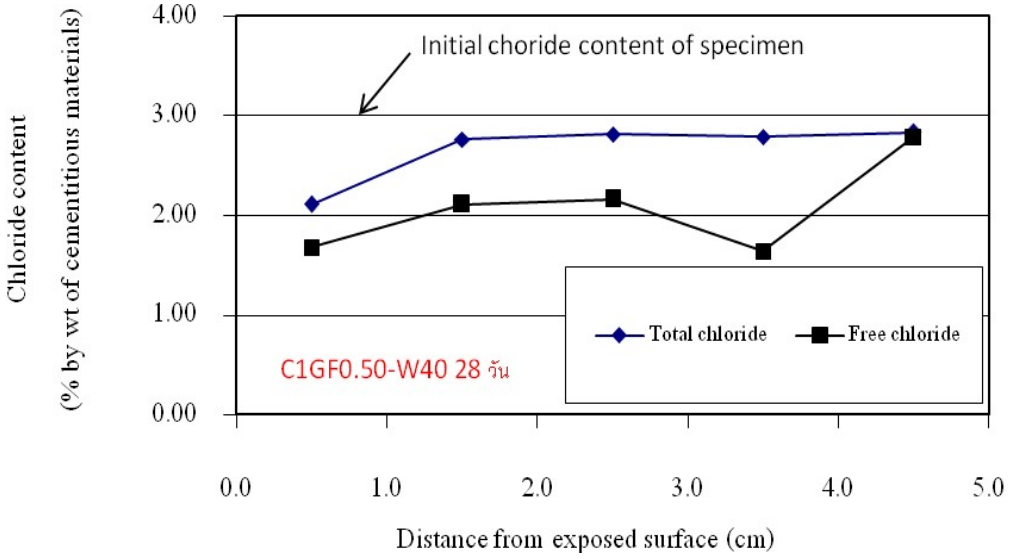
ภาพที่ 4.40 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยเหล็กที่แช่น้ำเปล่าเป็นระยะเวลา 28 วัน และผสมเส้นใยในปริมาณ 0.25% โดยปริมาตร เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก



ภาพที่ 4.41 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยเหล็กที่แช่น้ำเปล่าเป็นระยะเวลา 28 วัน และผสมเส้นใยในปริมาณ 0.50% โดยปริมาตร เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก



ภาพที่ 4.42 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยแก้วที่แช่น้ำเปล่าเป็นระยะเวลา 28 วัน และผสมเส้นใยในปริมาณ 0.25% โดยปริมาตร เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก

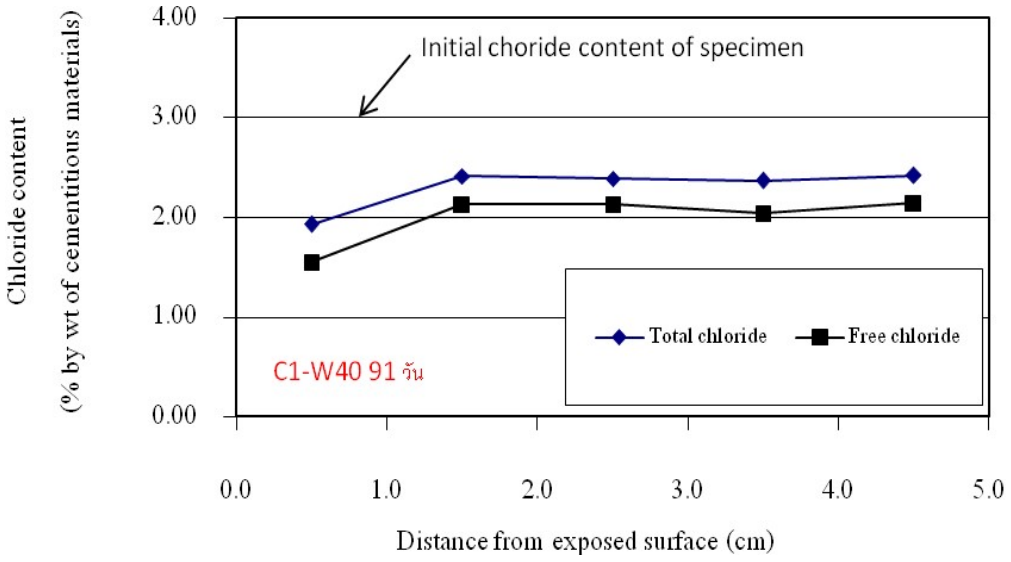


ภาพที่ 4.43 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยแก้วที่แช่น้ำเปล่าเป็นระยะเวลา 28 วัน และผสมเส้นใยในปริมาณ 0.50% โดยปริมาตร เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก

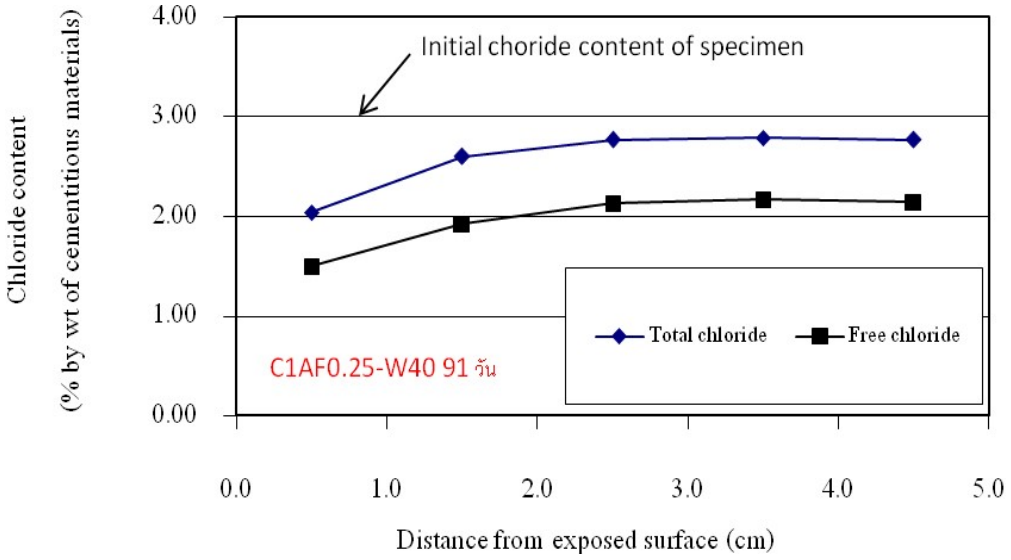
เมื่อพิจารณา ผลการทดลอง ภาพที่ 4.37, 4.38 และ 4.39 พบว่าซีเมนค์เพสต์ที่ผสมเส้นใยสังเคราะห์อาคิลิก ในปริมาณ 0.50% โดยปริมาตร มีปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับมากกว่า ซีเมนค์เพสต์ที่ผสมเส้นใยสังเคราะห์อาคิลิก ในปริมาณ 0.25% โดยปริมาตร ที่ทุกระยะทางจากผิวด้านนอก และซีเมนต์เพสต์ล้วนที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 28 วัน แสดงว่าการใส่เส้นใยและปริมาณเส้นใยในซีเมนต์เพสต์ มีผลในการยึดจับคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์

และเมื่อพิจารณาจากการทดลองภาพที่ 4.40 และ 4.41 พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยเหล็กในปริมาณ 0.25% และ 0.50% โดยปริมาตร มีปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับใกล้เคียงกัน ที่ทุกระยะจากผิวด้านนอก ที่ระยะเวลาแช่น้ำเปล่า 28 วัน แต่จากผลการทดลองภาพที่ 4.42 และ 4.43 กลับพบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยแก้วในปริมาณ 0.50 % โดยปริมาตร มีปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับมากกว่า ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยแก้วในปริมาณ 0.25 % โดยปริมาตร ที่ระยะจากผิวด้านนอกเข้าไป 10 ถึง 40 มิลลิเมตร แต่ที่ระยะ 50 มิลลิเมตร กลับไม่พบปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ

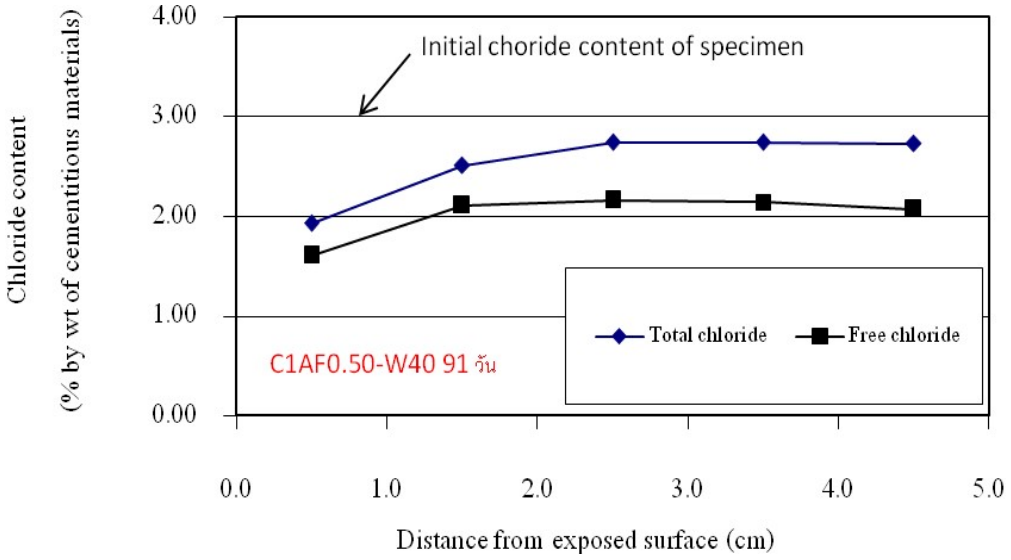
เพื่อพิจารณาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงของเวลาต่อการแพร่ของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ จึงทำกราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใย ที่ทำการแช่ในน้ำเปล่าเป็นระยะเวลา 91 วัน



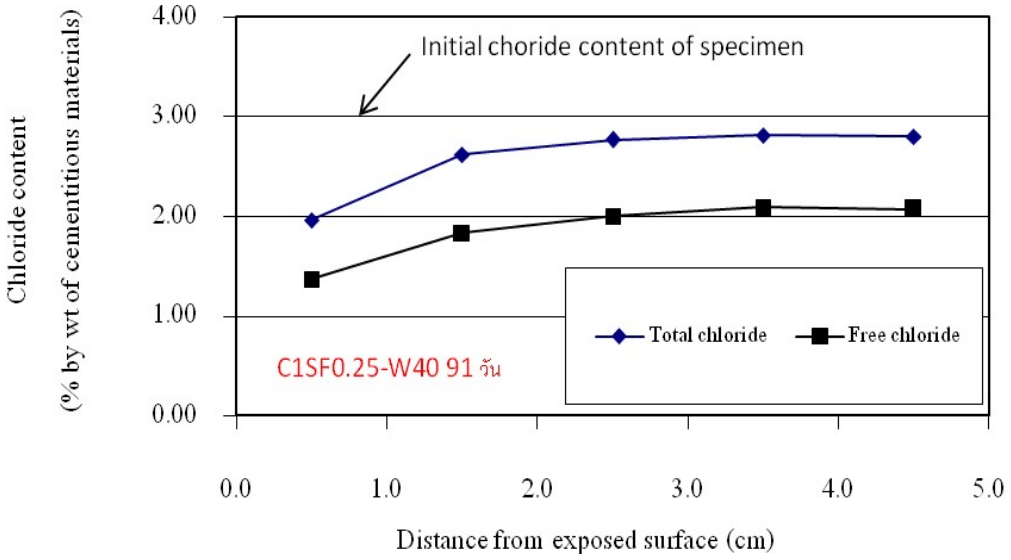
ภาพที่ 4.44 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนค์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แช่น้ำเปล่าเป็นระยะเวลา 91 วัน เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก



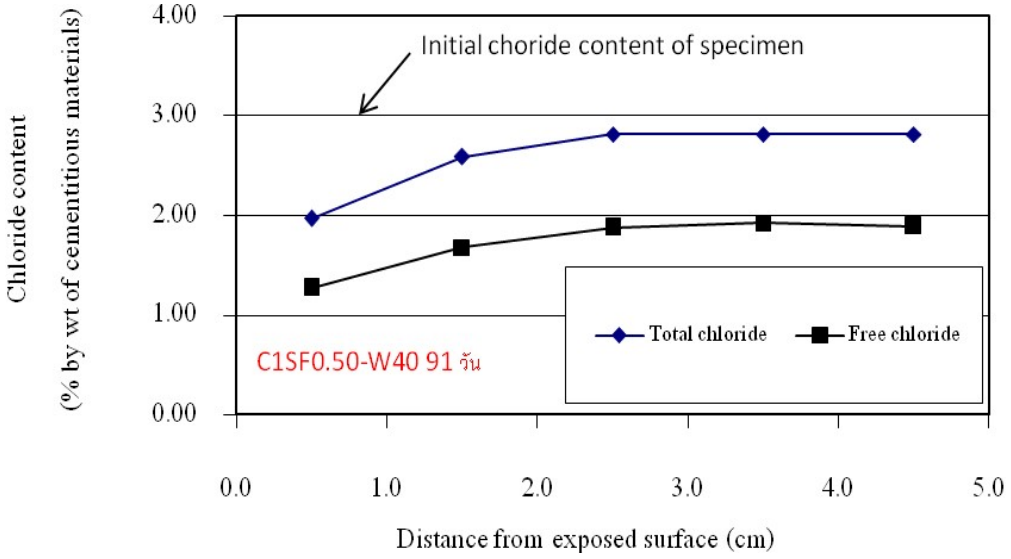
ภาพที่ 4.45 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยสังเคราะห์อาคิลิกที่แช่น้ำเปล่าเป็นระยะเวลา 91 วัน และผสมเส้นใยในปริมาณ 0.25% โดยปริมาตร เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก



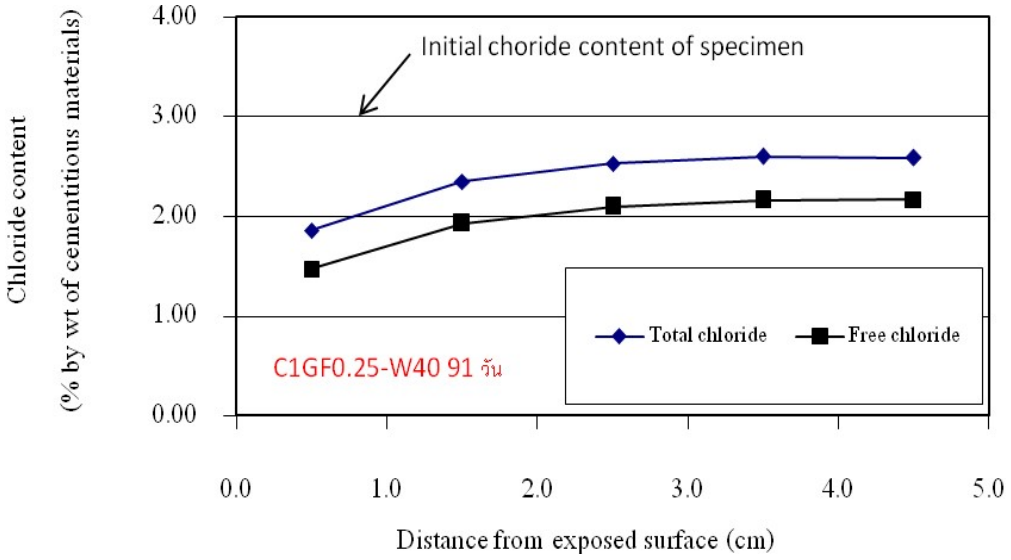
ภาพที่ 4.46 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยสังเคราะห์อาคิลิกที่แช่น้ำเปล่าเป็นระยะเวลา 91 วัน และผสมเส้นใยในปริมาณ 0.50% โดยปริมาตร เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก



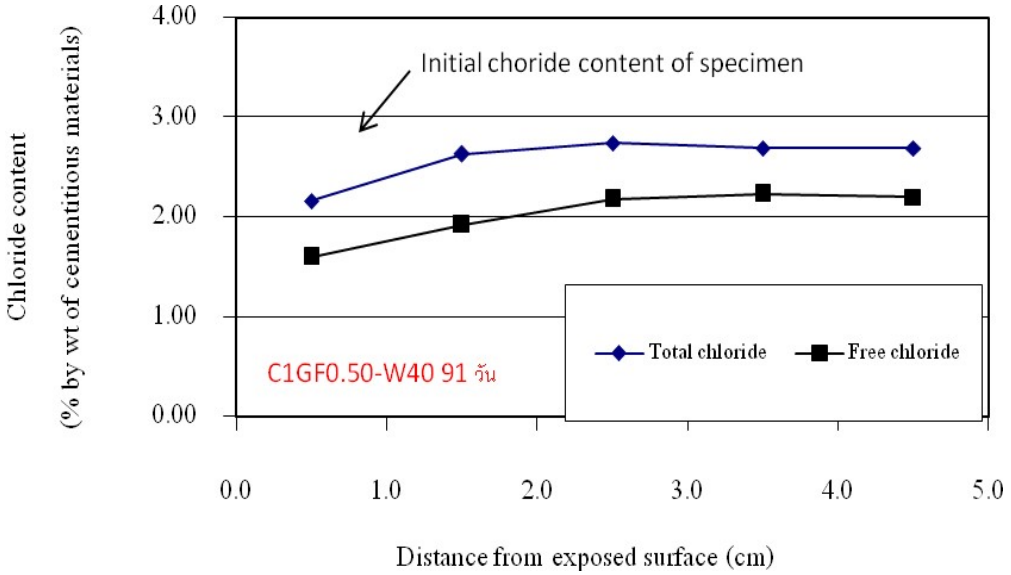
ภาพที่ 4.47 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยเหล็กที่แช่น้ำเปล่าเป็นระยะเวลา 91 วัน และผสมเส้นใยในปริมาณ 0.25% โดยปริมาตร เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก



ภาพที่ 4.48 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยเหล็กที่แช่น้ำเปล่าเป็นระยะเวลา 91 วัน และผสมเส้นใยในปริมาณ 0.50% โดยปริมาตร เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก



ภาพที่ 4.49 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยแก้วที่แช่น้ำเปล่าเป็นระยะเวลา 91 วัน และผสมเส้นใยในปริมาณ 0.25% โดยปริมาตร เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก



ภาพที่ 4.50 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเทียบกับปริมาณคลอไรด์อิสระของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยแก้วที่แช่น้ำเปล่าเป็นระยะเวลา 91 วัน และผสมเส้นใยในปริมาณ 0.50% โดยปริมาตร เทียบกับระยะทางจากผิวด้านนอก

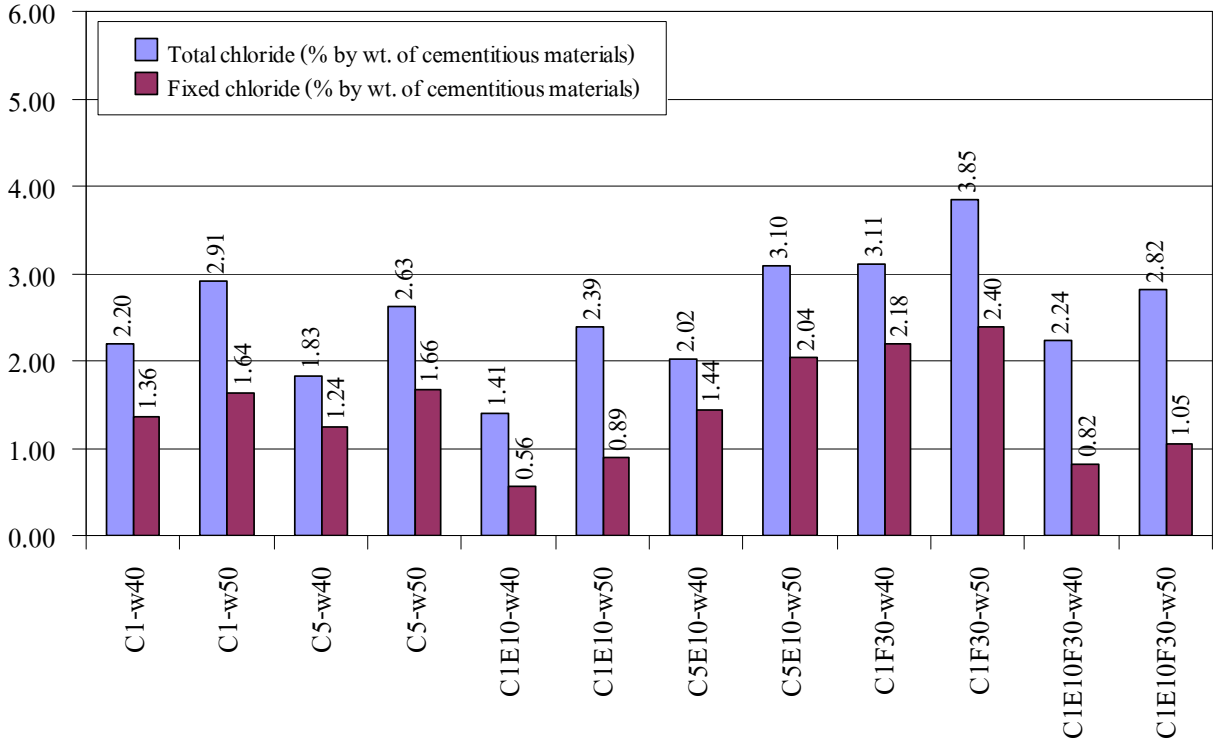
จากผลการทดลองภาพที่ 4.44 ถึง 4.50 พบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยชนิดต่างๆ มีปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับมากกว่าในซีเมนต์เพสต์ล้วน ที่ระยะเวลาการแช่น้ำเปล่า 91 วัน และที่ทุกระยะจากผิวด้านนอกเข้าไปในตัวอย่าง 10 ถึง 50 มิลลิเมตร

ในการทดลองภาพที่ 4.45 และ 4.46 ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยสังเคราะห์อะคริลิกที่ปริมาณ 0.25% และ 0.50% โดยปริมาตร มีปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับใกล้เคียงกันมาก ที่ระยะเวลาการแช่น้ำเปล่า 91 วัน และที่ทุกระยะเทียบจากผิวด้านนอก แต่จากการทดลองภาพที่ 4.47, 4.48, 4.49 และ 4.50 ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยเหล็กและเส้นใยแก้วที่ปริมาณ 0.50% โดยปริมาตร มีปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับมากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยเหล็กและเส้นใยแก้วที่ปริมาณ 0.25 % โดยปริมาตร ที่ระยะเวลาการแช่น้ำเปล่า 91 วัน และที่ทุกระยะเทียบจากผิวด้านนอก แสดงว่าปริมาณเส้นใยมีผลต่อการแพร่ของคลอไรด์ และระยะเวลามีผลทำให้ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับลดลง

ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์

1. ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอยและสารขยายตัว

การทดลองในส่วนนี้ ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 2 อัตราส่วน คือ 0.40 และ 0.50 อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยเท่ากับ 0.30 และ อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 ทำการทดสอบโดยนำตัวอย่างไปแช่ไว้ในน้ำที่ผสมเกลือโซเดียมคลอไรด์ 3% โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.51 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ ในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวกับเถ้าลอย และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่างกัน

จากผลการทดลองภาพที่ 4.51 พบว่าที่ส่วนผสมเดียวกันแต่อัตราน้ำต่อวัสดุประสานแตกต่างกัน ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 จะมีการเก็บกักคลอไรด์และมีปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับมากกว่า ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 แต่เมื่อพิจารณาถึงคลอไรด์อิสระในตัวอย่างแล้วซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 จะมีปริมาณคลอไรด์อิสระเกิดขึ้นน้อยกว่าตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีผลต่อความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์

ในซีเมนต์เพสต์ล้วนที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากันซีเมนต์เพสต์ล้วนที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะมีความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ที่ดีกว่าซีเมนต์เพสต์ล้วนที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แต่ว่าในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมสารขยายตัว ที่อัตราส่วน

น้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน ซีเมนต์เพสต์ล้วนที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 กลับมีความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ที่ดีกว่าซีเมนต์เพสต์ล้วนที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1

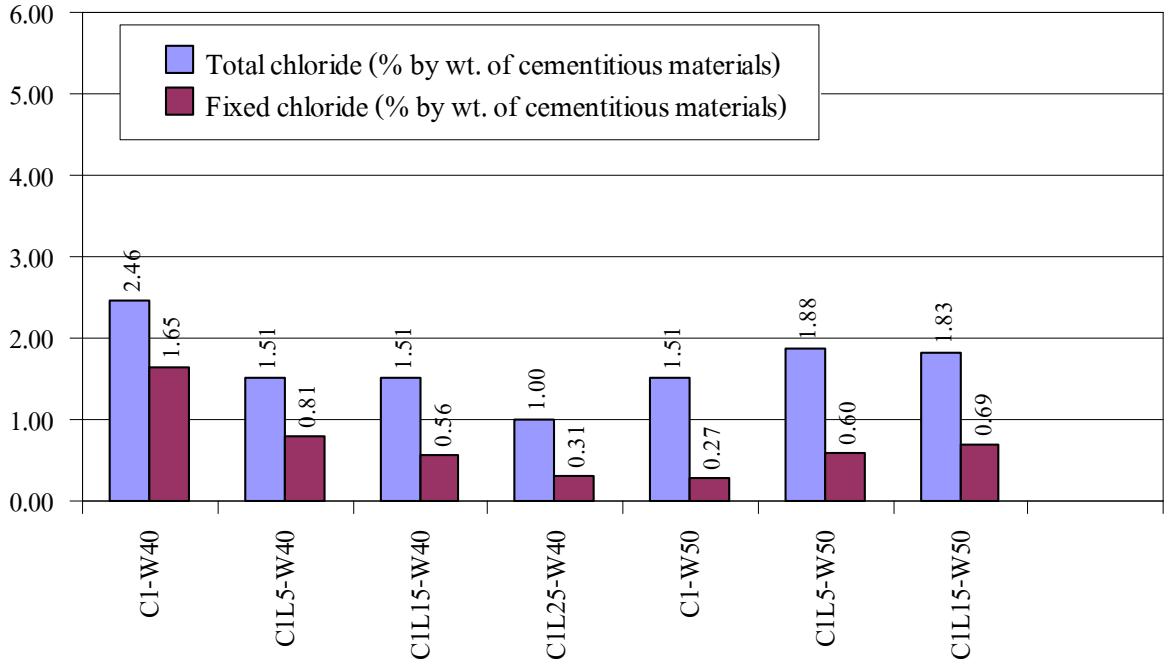
ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน ตัวอย่างที่มีความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์สูงที่สุด คือ ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับเถ้าลอย และในซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมสารขยายตัว กับซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผสมทั้งเถ้าลอยและสารขยายตัว มีปริมาณคลอไรด์ที่ใกล้เคียงกัน แต่ในซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมสารขยายตัว จะมีปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับมากกว่า และในซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผสมทั้งเถ้าลอยและสารขยายตัวมีปริมาณคลอไรด์อิสระที่มากกว่า

และที่อัตราส่วนน้ำในซีเมนต์เพสต์ล้วนที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ที่ดีกว่า ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมสารขยายตัว แต่ในซีเมนต์เพสต์ล้วนที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 กลับมีความในการเก็บกักคลอไรด์ที่ต่ำกว่า ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมสารขยายตัว

2. **ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมฝุ่นหินปูน**

การทดลองในส่วนนี้ ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 2 อัตราส่วน คือ 0.40 และ 0.50 มีอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูน 3 อัตราส่วน คือ 0.05 ,0.15 และ 0.25 ทำการทดสอบโดยนำตัวอย่างไปแช่ไว้ในน้ำที่ผสมเกลือโซเดียมคลอไรด์ 3% โดยน้ำหนัก

ผลการทดลองภาพที่ 4.52 ได้ตัดการพิจารณาข้อมูลของตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และมีการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูน 0.25 ออกไป เนื่องจากเกิดความผิดพลาด ทำให้หาปริมาณคลอไรด์ไม่ได้



ภาพที่ 4.52 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ ในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่างกัน

จากผลการทดลองภาพที่ 4.52 พบว่าที่ส่วนผสมเดียวกันแต่อัตราน้ำต่อวัสดุประสานแตกต่างกัน ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 จะมีการเก็บกักคลอไรด์และมีปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับมากกว่า ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ยกเว้นในส่วนผสมที่ใช้ซีเมนต์เพสต์ล้วน แต่เมื่อพิจารณาถึงคลอไรด์อิสระในตัวอย่างแล้วซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 จะมีปริมาณคลอไรด์อิสระเกิดขึ้นน้อยกว่าตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีผลต่อความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์

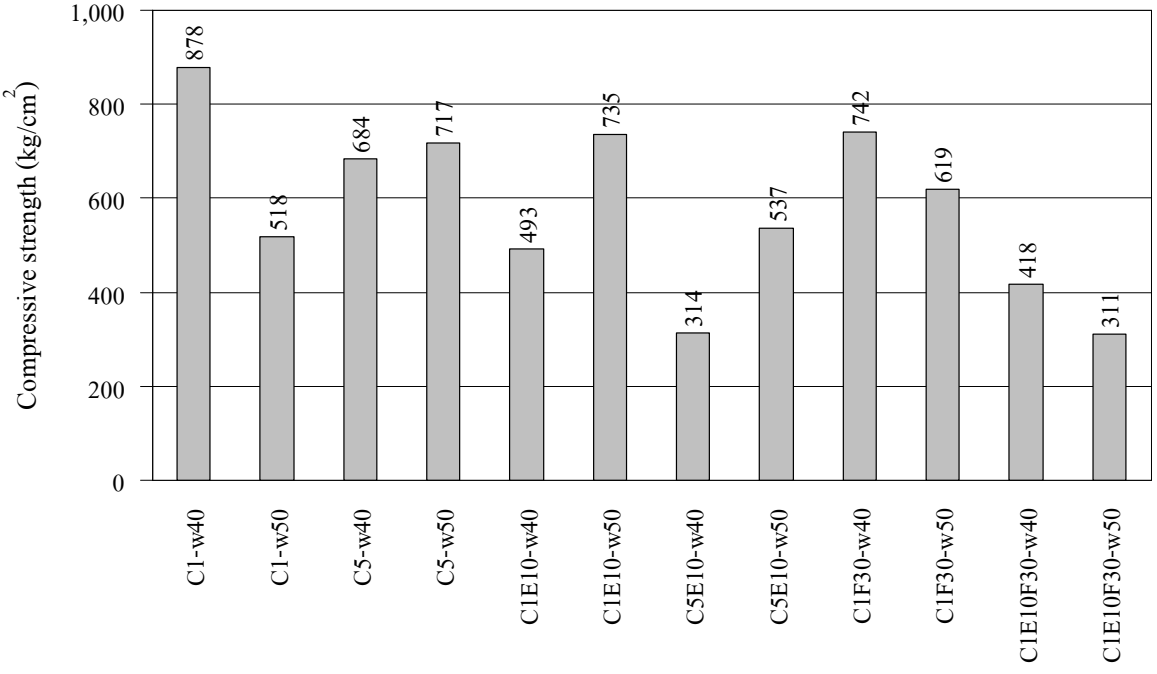
ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ตัวอย่างที่ใช้ซีเมนต์เพสต์ล้วน มีการเก็บกักคลอไรด์ที่ดีกว่าตัวอย่างที่มีการแทนที่ของวัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูน โดยที่อัตราส่วนการแทนที่ของวัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนยิ่งมาก การเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ยิ่งลดลง แต่ว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ตัวอย่างที่มีการแทนที่ของวัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนกลับมีการเก็บกัก

คลอไรด์ที่ดีกว่าตัวอย่างที่ใช้ซีเมนต์เพสต์ล้วนโดยที่อัตราส่วนการแทนที่ของวัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนยิ่งมาก การเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ยิ่งมากขึ้นตามไปด้วย

กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์

1. กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอยและสารขยายตัว

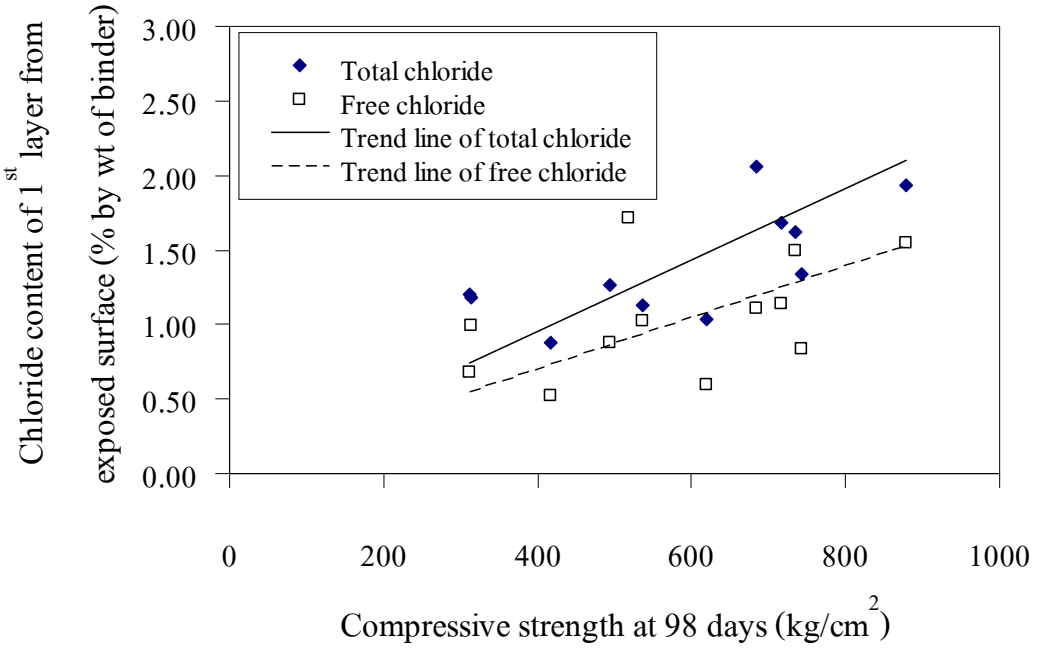
จากการทดลองได้ ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 2 อัตราส่วน คือ 0.40 และ 0.50 อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยเท่ากับ 0.30 และ อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 0.10 และผสมเกลือโซเดียมคลอไรด์ในระหว่างการผสมซีเมนต์เพสต์ เพื่อให้มีปริมาณคลอไรด์ 3.0% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 128 วัน



ภาพที่ 4.53 กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวกับเถ้าลอย และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่างกัน

จากผลการทดลองภาพที่ 4.53 สามารถเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ได้ว่า ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และไม่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยหรือสารขยายตัวเลย มีค่าการรับแรงอัดสูงที่สุด รองลงมาเป็นซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และมีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย 0.30 โดยซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัว ในบางชิ้นมีการแตกร้าวเกิดขึ้น เช่น C1E10-w40, C5E10-w40 และ C1E10F30-w50 ทำให้ตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ดังกล่าวมีค่าการรับแรงอัดที่ต่ำ

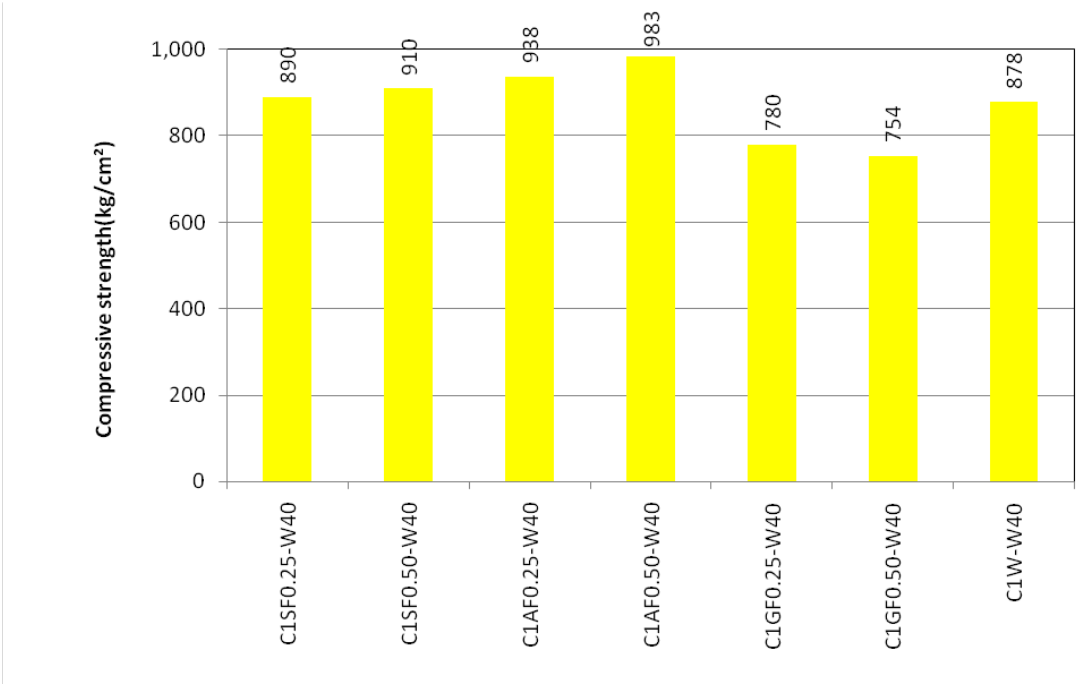
นอกจากนี้ยังได้ทำการพล็อตกราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่ระยะทางจากผิวด้านนอกที่สัมผัสกับน้ำเปล่า 10 มม.เทียบกับกำลังอัด เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานคลอไรด์กับกำลังอัดพบว่าเมื่อตัวอย่างซีเมนต์เพสต์มีกำลังอัดมากขึ้น จะมีปริมาณคลอไรด์และคลอไรด์อิสระมากขึ้นตามไปด้วย สรุปได้ว่าเมื่อกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์มากการแพร่ของคลอไรด์ในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์จะเกิดขึ้นน้อยลง



ภาพที่ 4.54 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่ระยะทางจากผิวด้านนอกที่สัมผัสกับน้ำเปล่า 10 มม.เทียบกับกำลังอัด

2. กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใย

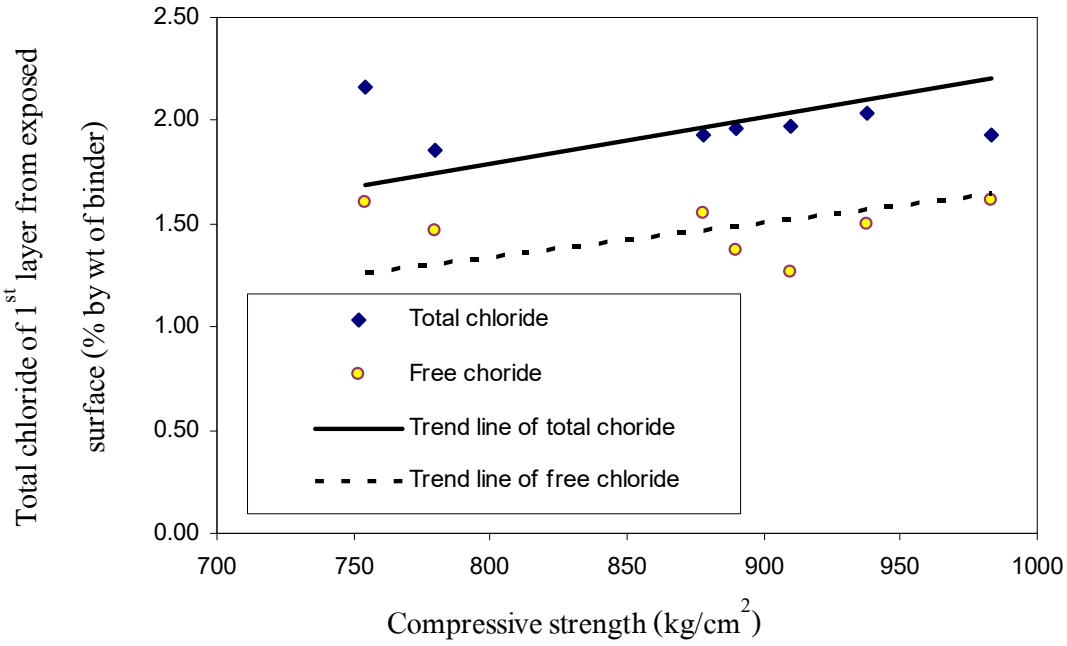
จากการทดลองได้ใช้เส้นใย 3 ชนิดได้แก่ เส้นใยสังเคราะห์อาคิลิก เส้นใยแก้ว และเส้นใยเหล็กผสมในซีเมนต์เพสต์โดยซีเมนต์เพสต์ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และปริมาณเส้นใย 0.25% และ 0.50% โดยปริมาตร ผสมเกลือคลอไรด์ในปริมาณ 3.0% โดยน้ำหนักวัสดุประสานลงในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ ทำการทดสอบตัวอย่างที่อายุ 128 วัน



ภาพที่ 4.55 กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยต่างๆที่มีและปริมาณเส้นใย 0.25% และ 0.50% โดยปริมาตร

จากผลการทดลองภาพที่ 4.55 ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยเหล็กและเส้นใยสังเคราะห์อะครีลิก มีกำลังอัดที่สูงกว่าซีเมนต์เพสต์ล้วน แต่ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยแก้วกลับมีกำลังอัดที่ต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ล้วนและในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยเหล็กและเส้นใยสังเคราะห์ อะครีลิก ที่ปริมาณเส้นใย 0.50% โดยปริมาตรจะมีกำรับแรงอัดที่สูงกว่า ซีเมนต์เพสต์ที่มีปริมาณเส้นใย 0.25% สรุปได้ว่าปริมาณและชนิดของเส้นใยมีผลต่อกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์

และเมื่อทำการพล็อตกราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่ระยะทางจากผิวด้านนอกที่สัมผัสกับน้ำเปล่า 10 มม.เทียบกับกำลังอัด พบแนวโน้มเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อ 4.3.1 คือ เมื่อตัวอย่างซีเมนต์เพสต์มีกำลังอัดมากขึ้น จะมีปริมาณคลอไรด์, คลอไรด์อิสระ และ คลอไรด์ที่ถูกยึดจับมากขึ้นตามไปด้วย

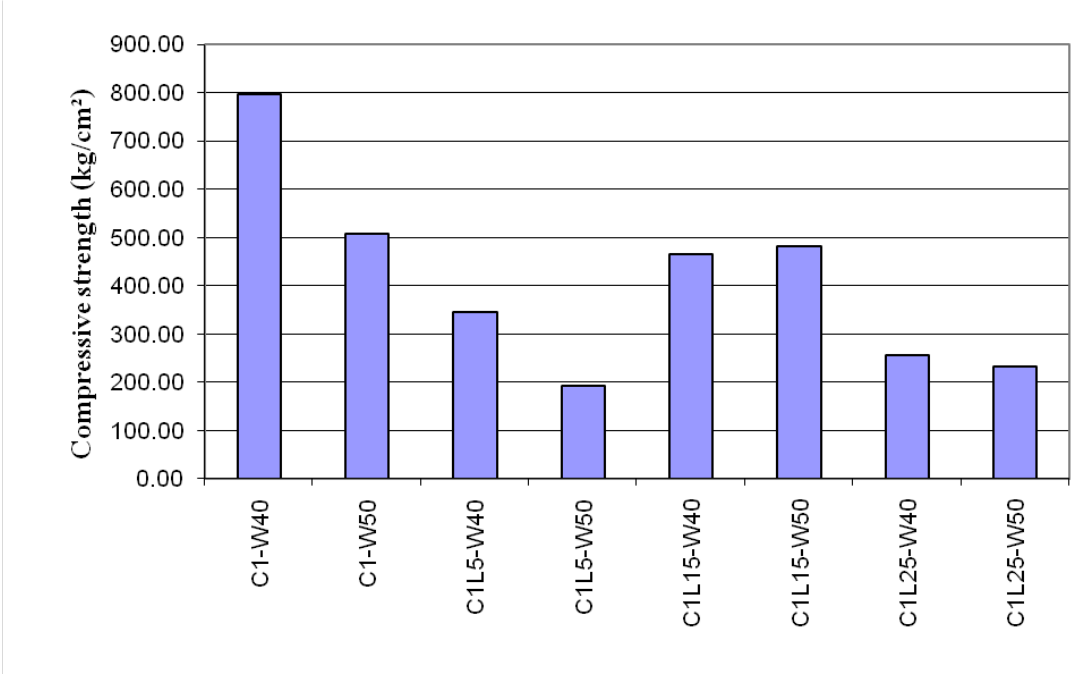


ภาพที่ 4.56 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่ระยะทางจากผิวด้านนอกที่สัมผัสกับน้ำเปล่า 10 มม.เทียบกับกำลังอัด

3. กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมฝุ่นหินปูน

การทดลองในส่วนนี้ ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 2 อัตราส่วน คือ 0.40 และ 0.50 มีอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูน 3 อัตราส่วน คือ 0.05 ,0.15 และ 0.25 ทำการทดสอบโดยผสมเกลือโซเดียมคลอไรด์ 5% เข้าไปในตัวอย่าง และนำไปแช่น้ำเปล่า ทำการทดสอบตัวอย่างที่อายุ 128 วัน

จากรูปผลการทดลองที่ 4.57 ตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเท่ากัน ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 จะมีกำลังอัดที่มากกว่า ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ยกเว้นในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูน 0.15 โดยตัวอย่างที่ใช้ซีเมนต์เพสต์ล้วนจะมีกำลังอัดสูงที่สุด รองลงมาคือ ตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูน 0.15 ดังรูป



ภาพที่ 4.57 กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานฝุ่นหินปูน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่างกัน

บทที่ 5

สรุปผล

สรุปผล

จากผลการศึกษา สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดมากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 แต่ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีการยึดจับคลอไรด์ที่มากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

2. ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานในอัตราส่วน 0.30 มีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดมากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ใช้สารขยายตัวแทนที่วัสดุประสานในอัตราส่วน 0.10 ทั้งที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 และซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ทั้งเถ้าลอยและสารขยายตัวแทนที่วัสดุประสานในอัตราส่วน 0.30 และ 0.10 ตามลำดับ มีปริมาณคลอไรด์น้อยที่สุด แต่เมื่อพิจารณาถึงคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ ซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยมีปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับมากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ทั้งเถ้าลอยและสารขยายตัวแทนที่วัสดุประสานและซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัว ทั้งที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50

3. เมื่อระยะเวลาการแพร่คลอไรด์สั้น (28 วัน) และใช้ปริมาณเส้นใย 0.25% โดยปริมาตรของซีเมนต์เพสต์พบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยเหล็กมีการแพร่คลอไรด์มากที่สุดและซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยแก้วมีการแพร่น้อยที่สุด แต่เมื่อใช้ปริมาณเส้นใย 0.50% โดยปริมาตรของซีเมนต์เพสต์พบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยแก้วมีการแพร่มากที่สุดและซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยเหล็กมีการแพร่น้อยที่สุด ในขณะที่เมื่อระยะเวลาการแพร่คลอไรด์นาน (91 วัน) และใช้ปริมาณเส้นใย 0.25% หรือ 0.50% โดยปริมาตรของซีเมนต์เพสต์พบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยแก้วมีการแพร่มากที่สุดและซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยเหล็กมีการแพร่น้อยที่สุด

4. ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมีความสามารถเก็บกักคลอไรด์และปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับมากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง และซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน 0.30 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีความสามารถเก็บกักคลอไรด์มากที่สุด และซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัว 0.10 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีความสามารถเก็บกักคลอไรด์น้อยที่สุด

5.ซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนมีความสามารถเก็บกักคลอไรด์ต่ำลง และเมื่อใช้อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนสูงขึ้น ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ยิ่งต่ำลง

6. ซีเมนต์เพสต์ล้วนที่มีค่ากำลังอัดมากที่สุด รองลงมาคือซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย 0.30 และซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัว 0.10 ตามลำดับ

7. ซีเมนต์เพสต์ที่มีปริมาณเส้นใย 0.50% มีกำลังอัดมากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีปริมาณเส้นใย 0.25% และซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยเหล็กและเส้นใยอาคิลิกมีกำลังอัดมากกว่าซีเมนต์เพสต์ล้วน แต่ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยแก้วมีกำลังอัดต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ล้วน

8. ซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนมีกำลังอัดที่ต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ล้วน ซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูน 0.15 มีกำลังอัดมากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูน 0.05 และ 0.25

ข้อเสนอแนะ

1. การใช้สารผสมเพิ่ม เช่น เถ้าลอย ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติความต้านทานคลอไรด์ของซีเมนต์ให้ดีขึ้น แต่ต้องพิจารณาเรื่องกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ด้วย

2. การใช้เส้นใยผสมในซีเมนต์ช่วยส่งผลทั้งในด้านกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นและความต้านทานคลอไรด์ที่ดีขึ้นด้วย แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิด ขนาดและปริมาณของเส้นใยที่ใช้ด้วย

ผลผลิต (Output)

ผลงานตีพิมพ์

L. Prak, T. Sumranwanich, S. Tangtermsirikul, Prediction of repair-free service life of concrete after repairing with crystalline material and fly ash concrete, The 2nd ACF Symposium 2017, Chiang Mai, Thailand, November 23-25, 2017

บรรณานุกรม

[1] ณรงค์ฤทธิ์ เย็นอารมณ์. 2548. สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์อิออนในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมสารปอซโซลาน, โครงงานทางวิศวกรรมโยธา, หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัญฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา

[2] วินิต ช่อวิเชียร. 2544. *คอนกรีตเทคโนโลยี*. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ:

[3] ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2547. *ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และ คอนกรีต*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตไทย

[4] พีระชล สุภัททธรรม บุรฉัตร ฉัตรวีระ และสมนึก ตั้งเติมสิริกุล. 2542. ความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย. วิศวกรรมสาร. เล่มที่ 52 (ฉบับที่ 4) : หน้า 62-66.

[5] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2543, *ความคงทนของคอนกรีต*.

[6] อภินันท์ ภูชัน และสุรสิทธิ์ หมั่นวิชา, พฤติกรรมและการคำนวนกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเส้นใย, โครงงานทางวิศวกรรมโยธา หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา, 2548.

[7] Antoni, Horiguchi T., Saeki N., Chloride penetration into fiber reinforced concrete under static and cyclic compressive loading, International Conference on Durability of Building Materials and Components, France, Lyon, April 17-20, 2005

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

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

[10] Maltese C., Pistolesi C., Lolli A., Bravo A., Cerulli T., Salvioni D., Combined effect of expansive and shrinkage reducing admixtures to obtain stable and durable mortars. Cement and Concrete Research. 2005; (35), 2244-2251.

[11] Michael D.A., Phil B., 1998. Modeling chloride diffusion in concrete Effect of fly ash and slag. *Cement and Concrete research* 29: 487-495.

[12] Sumranwanich T. and Tangtermsirikul S., Simulation of chloride profile in concrete under effect of cyclic wetting and drying conditions, Proceedings of the 9th National Convention on Civil Engineering Cha-Am, Petchaburi May 19-21, 2004.

ภาคผนวก

การคำนวณส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์

ส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ที่เส้นใย สำหรับทดสอบหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์

ทั้งนี้ผสม Cl^- = 3.0% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตั้งแต่ต้นในส่วนผสม เพื่อจะนำตัวอย่างแช่ในน้ำเปล่าให้คลอไรด์แพร่ออก

ต้องการผสมซีเมนต์เพสต์ปริมาตรครั้งละ 1,700 cm^3 จะต้องใช้ส่วนผสมดังนี้

Mix No.	Mix designation	w/b	Cement type	Fiber type	% fiber by vol.	Sp. Gr. of fiber	Cement (g)	Water (g)	Fiber (g)	Multiplier factor	NaCl (g)
1	C1-W40	0.40	I	-	-	-	2,369	948	-	2.369	117
2	C1SF0.25-W40	0.40	I	Steel	0.25	7.85	2,369	948	14.1	2.369	117
3	C1SF0.50-W40	0.40	I	Steel	0.50	7.85	2,369	948	28.2	2.369	117
4	C1GF0.25-W40	0.40	I	Glass	0.25	2.33	2,369	948	4.2	2.369	117
5	C1GF0.50-W40	0.40	I	Glass	0.50	2.33	2,369	948	8.4	2.369	117
6	C1AF0.25-W40	0.40	I	Acrylic	0.25	1.18	2,369	948	2.1	2.369	117
7	C1AF0.50-W40	0.40	I	Acrylic	0.50	1.18	2,369	948	4.2	2.369	117

ส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอยและสารขยายตัว สำหรับทดสอบหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์

ทั้งนี้ผสม Cl- = 3.0% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตั้งแต่ต้นในส่วนผสม เพื่อจะนำตัวอย่างแช่ในน้ำเปล่าให้คลอไรด์แพร่ออก

ต้องการผสมซีเมนต์เพสต์ปริมาตรครั้งละ 1,000 cm^3 จะต้องใช้ส่วนผสมดังนี้

Mix No.	Mix designation	w/b	Replacement ratio of binder with EA	Replacement ratio of cement with FA	Cement type	Cement (g)		Fly ash, FA (g)	Expansive agent, EA (g)	Water (g)	Multiplier factor	NaCl (g)
						Type I	Type V					
1	C1-W40	0.40	-	-	I	1,394	-	-	-	558	1.394	69
2	C5-W40	0.40	-	-	V	-	1,394	-	-	558	1.394	69
3	C1F30-W40	0.40	-	0.30	I	923	-	395	-	527	1.318	65
4	C1E10-W40	0.40	0.10	-	I	1,254	-	-	139	558	1.394	69
5	C5E10-W40	0.40	0.10	-	V	-	1,254	-	139	558	1.394	69
6	C1E10F30-W40	0.40	0.10	0.30	I	835	-	358	133	530	1.325	66
7	C1-W50	0.50	-	-	I	1,223	-	-	-	612	1.223	60
8	C5-W50	0.50	-	-	V	-	1,223	-	-	612	1.223	60
9	C1F30-W50	0.50	-	0.30	I	815	-	349	-	582	1.165	58
10	C1E10-W50	0.50	0.10	-	I	1,101	-	-	122	612	1.223	60
11	C5E10-W50	0.50	0.10	-	V	-	1,101	-	122	612	1.223	60
12	C1E10F30-W50	0.50	0.10	0.30	I	737	-	316	117	585	1.170	58

ส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมผงหินปูน สำหรับทดสอบหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์

ทั้งนี้ผสม Cl- = 3.0% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตั้งแต่ต้นในส่วนผสม เพื่อจะนำตัวอย่างแช่ในน้ำเปล่าให้คลอไรด์แพร่ออก

ต้องการผสมซีเมนต์เพสต์ปริมาตรครั้งละ 2,400 cm^3 จะต้องใช้ส่วนผสมดังนี้

Mix designation	w/b	Replacement ratio of binder with LP	Cement type	Cement(g)	Limestone powder	Water
C1-w40	0.4	-	I	3350	-	1340
C1L5-w40	0.4	0.5	I	3167	167	1334
C1L15-w40	0.4	0.15	I	2813	496	1324
C1L25-w40	0.4	0.25	I	2466	822	1315
C1-w50	0.5	-	I	2934	-	1467
C1L5-w50	0.5	0.5	I	2780	146	1463
C1L15-w50	0.5	0.15	I	2473	436	1454
C1L25-w50	0.5	0.25	I	2169	723	1446

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบ Chloride binding capacity of cementitious materials

Initial chloride concentration in container 5% , 7 วันบ่ม, แช่คลอไรด์ 91 วัน

Mix.No.	นน. น้ำเกลือ (g)	$[Cl^-]$ใน น้ำเกลือ (%)	Total Cl 13 ชิ้น (g)	$[Cl^-]$ น้ำใน ตย. (%)	นน.ตย. 10 ชิ้น (g)	Water content (%)	ปริมาณน้ำ ใน ตย.10 ชิ้น (g)	Free CL 10 ชิ้น (g)	Total Cl 10 ชิ้น (g)	Fixed CL 10 ชิ้น (g)	Free CL (% by wt ce. mat.)	Total CL (% by wt ce. mat.)	Fixed CL (% by wt ce. mat.)	Fiexd CL ratio
C1-W40	912	3.97	9.39	4.26	458	11.9	54.7	2.33	7.08	4.75	0.81	2.46	1.65	0.67
C1L5-W40	804	4.26	5.95	4.33	478	10.4	49.7	2.15	4.62	2.46	0.70	1.51	0.81	0.53
C1L15-W40	763	4.25	5.72	4.39	476	13.4	64.0	2.81	4.46	1.65	0.95	1.51	0.56	0.37
C1L25-W40	750	4.49	3.83	4.37	499	10.2	50.7	2.21	3.21	1.00	0.69	1.00	0.31	0.31
C1-W50	716	4.33	4.80	4.38	427	15.8	67.6	2.96	3.62	0.66	1.24	1.51	0.27	0.18
C1L5-W50	785	4.20	6.28	4.32	465	16.5	76.8	3.32	4.88	1.56	1.28	1.88	0.60	0.32
C1L15-W50	745	4.18	6.11	4.33	466	15.0	69.7	3.02	4.83	1.82	1.14	1.83	0.69	0.38
C1L25-W50	766	4.73	2.07	5.14	433	15.2	65.7	3.38	1.59	-1.78	1.38	0.65	-0.73	-1.12

Mix.No.	นน. น้ำเกลือ (g)	[Cl^-]ใน น้ำเกลือ (%)	Total Cl (g)	[Cl^-] น้ำ ใน ตย. (%)	นน.ตย. 10 ชิ้น (g)	Water content (%)	ปริมาณน้ำ ใน ตย.10 ชิ้น (g)	Free CL (g)	Fixed CL (g)	Total CL (g)	Free CL (% by wt ce. mat.)	Fixed CL (% by wt ce. mat.)	Total CL (% by wt ce. mat.)	Fiexd CL ratio
C1-w40	714	3.96	7.42	4.03	484	13	62.92	2.54	4.08	6.62	0.84	1.36	2.20	0.62
C1-w50	704	3.82	8.31	4.45	466	16	74.56	3.32	4.27	7.59	1.27	1.64	2.91	0.56
C5-w40	740	4.21	5.85	3.78	468	10	46.80	1.77	3.73	5.50	0.59	1.24	1.83	0.68
C5-w50	720	3.95	7.56	4.30	434	13	56.42	2.43	4.19	6.62	0.97	1.66	2.63	0.63
C1E10-w40	698	4.26	5.16	4.07	524	13	68.12	2.77	1.81	4.58	0.85	0.56	1.41	0.40
C1E10-w50	748	4.07	6.96	4.29	430	19	81.70	3.50	2.06	5.56	1.51	0.89	2.39	0.37
C5E10-w40	774	4.12	6.81	4.20	518	9	46.62	1.96	4.85	6.81	0.58	1.44	2.02	0.71
C5E10-w50	698	3.57	9.98	3.68	518	16	82.88	3.05	5.93	8.98	1.05	2.04	3.10	0.66
C1F30-w40	736	3.68	9.72	4.08	456	14	63.84	2.60	6.12	8.72	0.93	2.18	3.11	0.70
C1F30-w50	748	3.65	10.10	3.88	436	20	87.20	3.38	5.57	8.95	1.45	2.40	3.85	0.62
C1E10F30-w40	766	4.12	6.74	4.32	500	19	95.00	4.10	2.38	6.48	1.42	0.82	2.24	0.37
C1E10F30-w50	768	4.06	7.22	4.19	490	22	107.80	4.50	2.68	7.19	1.77	1.05	2.82	0.37

ผลการทดสอบ Chloride diffusion profile

ผลการทดสอบปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในกรด (Acid-soluble chloride) แช่น้ำประปาเป็นเวลา 28 วัน

C1AF0.25-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	4.98	23.90	99	2.14
1.5	5.04	27.07	120	2.80
2.5	4.97	27.09	139	2.84
3.5	4.98	27.04	84	2.83
4.5	5.04	27.90	121	2.88

C1AF0.50-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.00	19.12	204	1.99
1.5	5.00	26.79	115	2.79
2.5	5.01	27.36	110	2.84
3.5	5.01	26.95	133	2.80
4.5	5.01	27.07	92	2.81

C1SF0.25-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.00	21.82	110	2.25
1.5	5.02	25.57	100	2.63
2.5	5.00	27.75	94	2.87
3.5	5.00	27.39	99	2.83
4.5	5.00	27.45	82	2.84

C1SF0.50-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.00	21.23	136	2.20
1.5	5.01	26.30	100	2.72
2.5	5.00	27.66	99	2.86
3.5	5.00	27.74	112	2.87
4.5	5.00	27.90	86	2.88

C1GF0.25-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.01	21.67	104	2.24
1.5	5.00	26.82	80	2.77
2.5	5.00	27.20	118	2.81
3.5	5.01	28.02	91	2.90
4.5	5.00	27.67	92	2.87

C1GF0.50-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	4.99	20.40	131	2.11
1.5	5.03	26.80	102	2.76
2.5	5.00	27.22	108	2.81
3.5	5.00	26.97	123	2.79
4.5	4.97	27.19	90	2.83

C1-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	4.99	40.45	97	2.09
1.5	5.00	50.48	128	2.53
2.5	5.01	50.52	96	2.63
3.5	4.99	49.68	98	2.62
4.5	5.00	50.76	111	2.74

ผลการทดสอบปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในกรด (Acid-soluble chloride) แช่น้ำประปาเป็นเวลา 91 วัน

C1-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	4.99	40.45	97	1.93
1.5	5.00	50.48	128	2.41
2.5	5.01	50.52	96	2.39
3.5	4.99	49.68	98	2.37
4.5	5.00	50.76	111	2.42

C1-W50	(g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.00	39.64	101	2.03
1.5	5.01	51.42	87	2.63
2.5	5.00	53.10	107	2.72
3.5	5.02	53.27	116	2.70
4.5	5.00	51.89	91	2.64

C5-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	4.80	41.54	93	2.06
1.5	5.01	51.82	124	2.46
2.5	5.03	52.61	124	2.49
3.5	5.00	51.16	107	2.44
4.5	5.02	51.30	109	2.44

C5-W50	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	4.80	16.93	119	1.68
1.5	5.01	21.14	125	2.01
2.5	4.92	22.40	117	2.18
3.5	4.48	21.80	130	2.33
4.5	4.84	24.36	109	2.40

C1E10-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.01	14.27	119	1.27
1.5	5.01	19.84	111	1.76
2.5	5.01	23.07	119	2.06
3.5	5.00	25.87	106	2.31
4.5	5.00	27.20	121	2.42

C1E10-W50	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.00	16.99	109	1.62
1.5	5.01	23.23	90	2.22
2.5	5.00	24.99	145	2.39
3.5	5.00	26.45	104	2.52
4.5	5.01	26.61	128	2.54

C5E10-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.01	13.29	117	1.18
1.5	5.02	16.23	127	1.44
2.5	5.01	19.14	112	1.71
3.5	5.01	21.97	137	1.96
4.5	5.02	23.91	115	2.13

C5E10-W50	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.00	11.74	116	1.13
1.5	5.00	16.46	157	1.58
2.5	5.00	20.50	109	1.97
3.5	5.00	23.51	123	2.25
4.5	5.00	26.74	120	2.55

C1F30-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.00	15.12	143	1.34
1.5	5.00	22.80	140	2.03
2.5	5.03	24.90	133	2.21
3.5	4.99	28.95	120	2.59
4.5	4.99	32.16	121	2.88

C1F30-W50	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.01	10.88	121	1.04
1.5	5.00	20.16	126	1.92
2.5	5.01	27.27	147	2.60
3.5	5.00	28.66	146	2.75
4.5	5.01	28.07	147	2.67

C1E10F30-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.00	8.53	143	0.88
1.5	5.02	12.69	107	1.32
2.5	5.01	18.15	122	1.89
3.5	4.99	22.77	134	2.38
4.5	5.01	27.60	140	2.87

C1E10F30-W50	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	4.99	10.74	112	1.20
1.5	4.98	15.73	115	2.33
2.5	5.02	22.26	103	2.48
3.5	4.99	26.67	113	2.99
4.5	5.00	28.58	140	3.20

C1AF0.25-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.00	19.11	141	2.04
1.5	5.00	24.41	144	2.60
2.5	5.01	26.04	141	2.77
3.5	5.01	26.15	113	2.79
4.5	5.00	25.90	138	2.77

C1AF0.50-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.00	18.06	143	1.93
1.5	5.01	23.51	114	2.51
2.5	5.01	25.70	101	2.74
3.5	5.00	25.74	125	2.74
4.5	5.01	25.63	103	2.73

C1SF0.25-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.00	18.38	138	1.96
1.5	5.00	24.55	101	2.62
2.5	5.00	25.99	102	2.77
3.5	4.99	26.28	108	2.81
4.5	5.01	26.21	104	2.80

C1SF0.50-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	4.99	18.40	123	1.97
1.5	5.01	24.32	127	2.59
2.5	5.00	26.31	125	2.81
3.5	5.00	26.39	124	2.81
4.5	5.01	26.33	95	2.81

C1GF0.25-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.00	18.81	98	1.86
1.5	5.01	23.94	100	2.35
2.5	5.01	25.75	112	2.53
3.5	5.01	26.45	96	2.60
4.5	4.99	26.20	100	2.59

C1GF0.50-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.00	21.81	130	2.16
1.5	5.00	26.64	125	2.63
2.5	5.00	27.83	97	2.74
3.5	5.00	27.16	146	2.69
4.5	5.01	27.31	116	2.69

C1-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	4.99	40.45	97	1.93
1.5	5.00	50.48	128	2.41
2.5	5.01	50.52	96	2.39
3.5	4.99	49.68	98	2.37
4.5	5.00	50.76	111	2.42

ผลการทดสอบ Chloride diffusion profile

ผลการทดสอบปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในน้ำ(Water-soluble chloride) ที่ระยะเวลาแช่น้ำประปา 28 วัน

C1AF0.25-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.01	18.14	53	1.69
1.5	5.00	21.59	63	2.02
2.5	5.00	22.44	90	2.10
3.5	5.01	22.76	47	2.13
4.5	5.01	21.91	64	2.04

C1AF0.50-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.00	14.36	75	1.34
1.5	5.00	18.13	76	1.69
2.5	5.01	20.09	56	1.88
3.5	5.01	21.15	74	1.97
4.5	5.01	20.48	35	1.90

C1SF0.25-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	4.28	15.78	72	1.72
1.5	4.14	18.16	117	2.04
2.5	5.00	22.92	119	2.14
3.5	5.00	23.05	66	2.16
4.5	5.00	23.26	69	2.17

C1SF0.50-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.00	17.92	54	1.68
1.5	5.00	21.92	71	2.04
2.5	5.00	23.54	74	2.20
3.5	5.00	23.17	62	2.17
4.5	5.00	23.46	90	2.20

C1GF0.25-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.01	18.12	46	1.69
1.5	4.99	24.93	56	2.34
2.5	4.77	22.27	114	2.18
3.5	4.99	23.12	115	2.17
4.5	5.01	23.08	106	2.16

C1GF0.50-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.00	18.03	74	1.68
1.5	5.00	22.63	111	2.11
2.5	5.01	23.10	103	2.16
3.5	5.01	17.60	119	1.64
4.5	3.83	22.79	110	2.79

C1-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.00	15.07	56	1.75
1.5	5.00	20.61	66	2.15
2.5	5.00	20.57	87	2.14
3.5	5.00	19.79	108	2.13
4.5	4.24	17.54	52	2.23

ผลการทดสอบปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในน้ำ(Water-soluble chloride) ที่ระยะเวลาแช่น้ำประปา 91 วัน

C1-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.00	15.07	56	1.55
1.5	5.00	20.61	66	2.13
2.5	5.00	20.57	87	2.13
3.5	5.00	19.79	108	2.04
4.5	4.24	17.54	52	2.14

C1-W50	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.00	15.49	113	1.71
1.5	5.00	20.64	88	2.30
2.5	5.00	21.51	98	2.39
3.5	5.00	20.69	120	2.30
4.5	5.00	21.14	77	2.34

C5-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	4.30	12.20	101	1.11
1.5	4.84	17.18	87	1.39
2.5	4.84	18.83	107	2.07
3.5	5.00	20.21	116	2.16
4.5	5.00	18.87	91	2.02

C5-W50	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	4.35	8.68	67	1.14
1.5	5.01	16.08	98	1.83
2.5	4.54	17.18	76	2.16
3.5	3.80	14.34	98	2.16
4.5	4.54	17.68	50	2.24

C1E10-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.00	8.97	49	0.88
1.5	5.00	13.54	80	1.33
2.5	5.00	16.88	51	1.67
3.5	4.99	17.46	50	1.72
4.5	5.01	18.16	61	1.79

C1E10-W50	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.00	14.25	111	1.50
1.5	4.99	19.55	73	2.07
2.5	5.00	21.95	72	2.33
3.5	4.99	23.47	69	2.49
4.5	4.99	23.51	103	2.49

C5E10-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.00	10.12	53	0.99
1.5	5.01	12.97	49	1.27
2.5	5.00	15.91	97	1.57
3.5	5.00	18.75	85	1.85
4.5	5.00	20.90	53	2.06

C5E10-W50	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.00	9.62	60	1.02
1.5	5.01	14.05	95	1.49
2.5	5.01	17.45	63	1.85
3.5	5.00	21.39	97	2.27
4.5	5.01	24.06	67	2.54

C1F30-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	4.99	7.82	72	0.84
1.5	4.54	13.84	110	1.62
2.5	5.01	16.40	99	1.75
3.5	4.99	21.01	66	2.25
4.5	5.00	23.77	59	2.53

C1F30-W50	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.01	5.19	108	0.60
1.5	5.01	13.02	94	1.49
2.5	4.99	19.54	64	2.24
3.5	5.00	20.68	83	2.37
4.5	4.32	16.60	88	2.21

C1E10F30-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.00	5.24	95	0.52
1.5	5.00	9.43	87	0.94
2.5	5.00	14.66	62	1.44
3.5	5.00	19.09	86	1.89
4.5	5.01	22.57	79	2.23

C1E10F30-W50	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	4.99	6.39	90	0.68
1.5	5.01	10.68	60	1.13
2.5	5.00	15.62	99	1.67
3.5	4.99	20.25	57	2.16
4.5	5.00	19.90	185	2.12

C1AF0.25-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.00	15.09	65	1.50
1.5	5.00	19.29	80	1.92
2.5	5.01	21.53	64	2.13
3.5	5.00	21.93	54	2.17
4.5	5.00	21.63	60	2.14

C1AF0.50-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.00	17.26	94	1.61
1.5	5.01	22.73	86	2.11
2.5	5.01	23.17	94	2.16
3.5	5.01	23.03	103	2.14
4.5	5.01	22.28	81	2.07

C1SF0.25-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.00	13.86	65	1.37
1.5	4.97	18.46	92	1.83
2.5	4.51	18.30	74	2.00
3.5	5.00	21.18	77	2.09
4.5	5.00	20.94	51	2.07

C1SF0.50-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.00	13.66	92	1.27
1.5	5.00	18.01	62	1.68
2.5	5.00	20.12	80	1.88
3.5	5.00	20.47	89	1.92
4.5	5.01	20.26	59	1.89

C1GF0.25-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.01	14.92	84	1.47
1.5	5.01	19.50	80	1.93
2.5	5.01	21.30	106	2.10
3.5	5.01	21.79	69	2.16
4.5	5.00	21.93	73	2.17

C1GF0.50-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.00	16.07	113	1.60
1.5	5.00	19.32	108	1.92
2.5	5.01	22.15	67	2.18
3.5	5.01	22.48	97	2.23
4.5	5.00	22.24	66	2.20

C1-W40	Wt. (g)	$AgN0_3$ (ml)	mv	CL % by wt. ce. mat.
0.5	5.00	15.07	56	1.55
1.5	5.00	20.61	66	2.13
2.5	5.00	20.57	87	2.13
3.5	5.00	19.79	108	2.04
4.5	4.24	17.54	52	2.14

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมกับสารผสมเพิ่ม ที่ระยะเวลาแช่น้ำประปา 91 วัน

Test No.	น้ำหนัก (g)	Area(a)	Area(b)	Total area	LOAD(kn)	Load(kg)	f'c(kg/cm^2)
C1-W40	255.62	5.10	5.00	25.50	219.60	22385.32	877.86
C1-W50	226.04	5.10	4.80	24.48	124.40	12680.94	518.01
C5-W40	254.39	5.30	5.20	27.56	184.80	18837.92	683.52
C5-W50	227.84	5.10	4.70	23.97	168.70	17196.74	717.43
C1E10-W40	258.64	5.10	5.10	26.01	125.70	12813.46	492.64
C1E10-W50	216.78	5.00	4.90	24.50	176.60	18002.04	734.78
C5E10-W40	248.06	5.20	5.10	26.52	81.80	8338.43	314.42
C5E10-W50	227.04	5.10	4.90	24.99	131.70	13425.08	537.22
C1F30-W40	236.66	5.00	4.90	24.50	178.40	18185.52	742.27
C1F30-W50	209.49	5.00	4.70	23.50	142.70	14546.38	618.99
C1E10F30-W40	234.87	5.20	5.00	26.00	106.60	10866.46	417.94
C1E10F30-W50	209.04	5.10	4.80	24.48	74.80	7624.87	311.47

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมกับสารผสมเพิ่ม ที่ระยะเวลาแช่น้ำประปา 182 วัน

Test No.	น้ำหนัก (g)	Area (a)	Area(b)	Total area	LOAD(kn)	Load(kg)	f'c(kg/cm^2)
C1-W40	260.00	5.10	5.00	25.50	226.60	23098.88	905.84
C1-W50	235.01	5.00	4.90	24.50	153.40	15637.10	638.25
C5-W40	258.99	5.10	5.00	25.50	179.90	18338.43	719.15
C5-W50	234.84	5.10	4.70	23.97	168.60	17186.54	717.00
C1E10-W40	249.68	5.10	5.00	25.50	137.20	13985.73	548.46
C1E10-W50	222.86	5.00	4.80	24.00	152.20	15514.78	646.45
C5E10-W40	252.48	5.10	5.10	26.01	109.70	11182.47	429.93
C5E10-W50	231.21	5.00	4.80	24.00	167.10	17033.64	709.73
C1F30-W40	241.75	5.00	4.90	24.50	177.90	18134.56	740.19
C1F30-W50	217.31	5.00	4.70	23.50	116.30	11855.25	504.48
C1E10F30-W40	248.69	5.20	5.10	26.52	104.80	10682.98	402.83
C1E10F30-W50	223.02	5.10	4.90	24.99	93.40	9520.90	380.99

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใย ที่ระยะเวลาแช่น้ำประปา 91 วัน

Test No.	น้ำหนัก (g)	Area (a)	Area(b)	Total area	LOAD(kn)	Load(kg)	f'c(kg/cm^2)
C1SF.25-W40	249.32	5.00	5.00	25.00	218.30	22252.80	890.11
C1SF.50-W40	258.21	5.10	5.10	26.01	232.10	23659.53	909.63
C1AF.25-W40	243.34	5.00	5.00	25.00	230.00	23445.46	937.82
C1AF.50-W40	255.02	5.00	5.00	25.00	241.20	24587.16	983.49
C1GF.25-W40	255.39	5.10	5.00	25.50	195.00	19877.68	779.52
C1GF.50-W40	241.82	5.00	5.00	25.00	185.00	18858.31	754.33

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใย ที่ระยะเวลาแช่น้ำประปา 91 วัน

Test No.	น้ำหนัก (g)	Area (a)	Area(b)	Total area	LOAD(kn)	Load(kg)	f'c(kg/cm^2)
C1SF.25-W40	262.88	5.20	5.10	26.52	199.90	20377.17	768.37
C1SF.50-W40	258.94	5.10	5.00	25.50	197.00	20081.55	787.51
C1AF.25-W40	262.05	5.10	5.00	25.50	210.60	21467.89	841.88
C1AF.50-W40	261.67	5.10	5.00	25.50	203.70	20764.53	814.30
C1GF.25-W40	250.57	5.10	5.00	25.50	177.50	18093.78	709.56
C1GF.50-W40	243.63	5.00	4.90	24.50	154.70	15769.62	643.66

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นหินปูน ที่ระยะเวลาแช่น้ำประปา 91 วัน

Mix NO.	Area (a)	Area (b)	Total area	Load(KN)	Load(kg)	Ksc
C1-W40	5.00	4.90	24.50	191.60	19531.09	797.19
C1-W50	4.80	5.00	24.00	119.60	12191.64	507.99
C1L5-W40	5.00	4.90	24.50	83.00	8460.75	345.34
C1L5-W50	5.00	5.00	25.00	47.40	4831.80	193.27
C1L15-W40	5.00	5.00	25.00	114.30	11651.38	466.06
C1L15-W50	5.00	5.00	25.00	118.20	12048.93	481.96
C1L25-W40	5.00	5.10	25.50	64.00	6523.96	255.84
C1L25-W50	5.00	5.00	25.00	57.20	5830.78	233.23