



รหัสโครงการ SUT7-719-57-12-44

รายงานการวิจัย

คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์ของซีเมนต์ในรอยแตก

ของหิน

(Mechanical and Hydraulic Performance of Cements
in Rock fracture)



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-719-57-12-44

รายงานการวิจัย

คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์ของซีเมนต์

ในรอยแตกของหิน

(Mechanical and Hydraulic Performance of Cements
in Rock fracture)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เฟื่องขจร

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

สิงหาคม 2557

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากทีมงานหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีในการทดสอบและ นางสาวกัลญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

สิงหาคม 2557



บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้เพื่อประเมินประสิทธิภาพเชิงกลศาสตร์และพลศาสตร์ของซีเมนต์เกรดที่ใช้สำหรับอุดรอยแตกในมวลหิน และเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้ในรูปแบบของกำลังกด สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น ความซึมผ่าน และกำลังเฉือนของซีเมนต์เกรด โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C150 จาก 5 บริษัทผู้ผลิตและจำหน่ายซีเมนต์ชั้นนำของประเทศไทย ผลการวิจัยพบว่า ค่าความหนืดของซีเมนต์เหลวมีค่าระหว่าง 0.6–0.8 Pa.s ค่ากำลังกดของซีเมนต์หลังจากการบ่ม 28 วันคือ 25.77 ± 2.54 MPa ซีเมนต์ที่มีค่ากำลังกดสูงที่สุดคือซีเมนต์จากบริษัทปูนซีเมนต์ไทย มีค่าเท่ากับ 27.64 ± 2.67 MPa ซีเมนต์ที่มีค่ากำลังดึงสูงที่สุดคือซีเมนต์จากบริษัทเซเม็กซ์ไทยแลนด์ มีค่าเท่ากับ 2.95 ± 0.10 MPa กำลังยึดติดเฉลี่ยของซีเมนต์จากทั้ง 5 ผู้ผลิตมีค่าเท่ากับ 1.90 ± 0.42 MPa โดยซีเมนต์ที่ให้กำลังยึดติดสูงสุดคือซีเมนต์จากบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง การตรวจวัดความซึมผ่านพบว่าเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของซีเมนต์จะลดลง ความคล้ายคลึงและแตกต่างกันของประสิทธิภาพการเกราท์ในเชิงคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์และพลศาสตร์ของซีเมนต์เกรดเกรดการค้าได้ถูกเปรียบเทียบเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นซีเมนต์เกรดสำหรับอุดรอยแตกของหินต่อไป

Abstract

The objective of this study is to assess the mechanical and hydraulic performance of commercial grade cement grouts in rock fracture. Their results are compared in terms of compressive strength, elastic modulus, permeability and shear strength for against rock fracture. The ordinary Portland cement (ASTM C150) type 1 from five cement supplier in Thailand have been tested. The results indicate that the viscosity of grout slurry it is 0.6–0.8 Pascal·sec. The compressive strength after 28 day curing times is 25.77 ± 2.54 MPa. The highest compressive strengths is from SCG cement supplier equal to 27.64 ± 2.67 MPa. The average tensile strength is 2.80 ± 0.27 MPa. The highest tensile strength is from CEMEX Thailand equal to 2.95 ± 0.10 MPa. The bond strength is 1.90 ± 0.42 MPa. The highest bond strength is from SCCC. When the curing time increases the intrinsic permeability of cement grouts decreases. Similarities and discrepancies of the grouting performance in terms of mechanical and hydraulic properties are compared to apply the commercial grade cement grouts in rock fractures.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	3
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.6 ผลสำเร็จของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	6
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 คุณสมบัติด้านการไหลของซีเมนต์เหลว.....	7
2.2 คุณสมบัติด้านกลศาสตร์ของซีเมนต์แข็ง.....	9
2.3 ค่าความซึมผ่านกับวัสดุเกราท์.....	10
2.4 งานวิจัยและกรณีศึกษา.....	11
บทที่ 3 การจัดเตรียมตัวอย่าง.....	15
3.1 วัตถุประสงค์.....	15
3.2 การเตรียมตัวอย่างซีเมนต์.....	15
3.2.1 ซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	15
3.2.2 การผสมและเตรียมซีเมนต์เหลว.....	15

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.3 การเตรียมแท่งซีเมนต์เพสต์.....	20
3.2.4 การเตรียมซีเมนต์เพสต์เพื่อใช้ทดสอบความซึมผ่าน.....	20
3.3 ตัวอย่างหินทรายภูกระดึง.....	21
3.4 ตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่หล่อติดกับหินทรายชุดภูกระดึง.....	21
บทที่ 4 การทดสอบคุณสมบัติเชิงซีเมนต์เหลว.....	25
4.1 วิธีการทดสอบ.....	25
4.2 ผลการทดสอบ.....	25
บทที่ 5 การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติของซีเมนต์เกรดที่.....	29
5.1 การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์.....	29
5.1.1 การทดสอบหาค่ากำลังกดในแกนเดียว.....	29
5.1.2 การทดสอบหาค่ากำลังดึงแบบบราซิล.....	29
5.1.3 การทดสอบหาค่ากำลังกดในสามแกน.....	38
5.2 การทดสอบค่ากำลังยึดติด.....	43
5.2.1 การทดสอบแรงดึงอแบบสี่จุด.....	43
5.2.2 การทดสอบ Push out.....	46
5.3 การทดสอบหาค่าคุณสมบัติความซึมผ่าน.....	50
บทที่ 6 สรุปผลการทดสอบ.....	55
6.1 สรุปผลการทดสอบ.....	55
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	55
บรรณานุกรม.....	57
ประวัตินักวิจัย.....	61

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 1-2547 และมาตรฐาน ASTM C150.....	16
4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์เหลวในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.6.....	27
5.1 ผลการทดสอบค่ากำลังกดในแกนเดียวของปูนซีเมนต์จาก 5 บริษัทผู้ผลิต.....	30
5.2 ผลการทดสอบค่ากำลังดึงแบบบราซิชของปูนซีเมนต์จาก 5 บริษัทผู้ผลิต.....	34
5.3 ผลการทดสอบค่ากำลังกดในสามแกน.....	39
5.4 สรุปผลการทดสอบแรงดัดงอแบบสี่จุด และการทดสอบ Push out หลังจากปรมซีเมนต์ 28 วัน.....	50



สารบัญรูปรภาพ

รูปที่	หน้า
3.1	17
3.2	17
3.3	19
3.4	19
3.5	20
3.6	22
3.7	22
3.8	23
4.1	26
4.2	26
4.3	27
5.1	30
5.2	31
5.3	31
5.4	32
5.5	32
5.6	33
5.7	33
5.8	34

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.9 ผลการทดสอบค่ากำลังดึงแบบบราซิช (σ_B) ของซีเมนต์จาก ACC ในฟังก์ชันของ ระยะเวลาการบ่มซีเมนต์.....	35
5.10 ผลการทดสอบค่ากำลังดึงแบบบราซิช (σ_B) ของซีเมนต์จาก CEMEX ในฟังก์ชันของ ระยะเวลาการบ่มซีเมนต์.....	35
5.11 ผลการทดสอบค่ากำลังดึงแบบบราซิช (σ_B) ของซีเมนต์จาก SCG ในฟังก์ชันของ ระยะเวลาการบ่มซีเมนต์.....	36
5.12 ผลการทดสอบค่ากำลังดึงแบบบราซิช (σ_B) ของซีเมนต์จาก SCCC ในฟังก์ชันของ ระยะเวลาการบ่มซีเมนต์.....	36
5.13 ผลการทดสอบค่ากำลังดึงแบบบราซิช (σ_B) ของซีเมนต์จาก TPI ในฟังก์ชันของ ระยะเวลาการบ่มซีเมนต์.....	37
5.14 ผลการทดสอบค่ากำลังดึงแบบบราซิช (σ_B) ของซีเมนต์จาก 5 บริษัทผู้ผลิต ในฟังก์ชัน ของระยะเวลาการบ่มซีเมนต์.....	37
5.15 ตัวอย่างบางส่วนของซีเมนต์เกรดที่ใช้ในการทดสอบหาค่ากำลังกดในสามแกน.....	38
5.16 ตัวอย่างบางส่วนหลังการทดสอบค่ากำลังกดในสามแกน ที่ความดันปิดล้อม (σ_3) ต่างกันตั้งแต่ 0.35 MPa ถึง 1.70 MPa.....	38
5.17 ผลการทดสอบค่ากำลังกดในสามแกนของปูนซีเมนต์จาก ACC ในรูปของวงกลมมอร์.	41
5.18 ผลการทดสอบค่ากำลังกดในสามแกนของปูนซีเมนต์จาก CEMEX ในรูปของวงกลมมอร์	41
5.19 ผลการทดสอบค่ากำลังกดในสามแกนของปูนซีเมนต์จาก SCG ในรูปของวงกลมมอร์.	42
5.20 ผลการทดสอบค่ากำลังกดในสามแกนของปูนซีเมนต์จาก SCCC ในรูปของวงกลมมอร์	42
5.21 ผลการทดสอบค่ากำลังกดในสามแกนของปูนซีเมนต์จาก TPI ในรูปของวงกลมมอร์	43
5.22 ตัวอย่างบางส่วนจากการทดสอบแรงดัดงอแบบสี่จุด ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 mm ยาว 200 mm.....	44
5.23 ชุดอุปกรณ์ทดสอบแรงดัดงอแบบสี่จุด.....	44
5.24 ผลการทดสอบแรงดัดงอแบบสี่จุดของปูนซีเมนต์จาก ACC.....	45
5.25 ผลการทดสอบแรงดัดงอแบบสี่จุดของปูนซีเมนต์จาก CEMEX.....	45
5.26 ผลการทดสอบแรงดัดงอแบบสี่จุดของปูนซีเมนต์จาก SCG.....	45
5.27 ผลการทดสอบแรงดัดงอแบบสี่จุดของปูนซีเมนต์จาก SCCC.....	46
5.28 ผลการทดสอบแรงดัดงอแบบสี่จุดของปูนซีเมนต์จาก TPI.....	46

สารบัญรูปรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.29 ตัวอย่างภายหลังการทดสอบ Push out.....	47
5.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการขจัดที่ได้จากการทดสอบ Push out ของปูนซีเมนต์จาก ACC.....	47
5.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการขจัดที่ได้จากการทดสอบ Push out ของปูนซีเมนต์จาก CEMEX.....	48
5.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการขจัดที่ได้จากการทดสอบ Push out ของปูนซีเมนต์จาก SCG.....	48
5.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการขจัดที่ได้จากการทดสอบ Push out ของปูนซีเมนต์จาก SCCC.....	49
5.34 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการขจัดที่ได้จากการทดสอบ Push out ของปูนซีเมนต์จาก TPI.....	49
5.35 ชุดอุปกรณ์ทดสอบแรงดันน้ำแบบคงที่.....	51
5.36 ค่า Intrinsic permeability (k) ของปูนซีเมนต์จาก ACC ในฟังก์ชันของระยะเวลา บ่มตัวของซีเมนต์.....	51
5.37 ค่า Intrinsic permeability (k) ของปูนซีเมนต์จาก CEMEX ในฟังก์ชันของระยะเวลา บ่มตัวของซีเมนต์.....	52
5.38 ค่า Intrinsic permeability (k) ของปูนซีเมนต์จาก SCG ในฟังก์ชันของระยะเวลา บ่มตัวของซีเมนต์.....	52
5.39 ค่า Intrinsic permeability (k) ของปูนซีเมนต์จาก SCCC ในฟังก์ชันของระยะเวลา บ่มตัวของซีเมนต์.....	53
5.40 ค่า Intrinsic permeability (k) ของปูนซีเมนต์จาก TPI ในฟังก์ชันของระยะเวลา บ่มตัวของซีเมนต์.....	53

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

การเสริมสร้างเสถียรภาพของมวลหินที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันคือการยาแนวหรือการเกราท์ (Grout) เพื่ออุดรอยแตกในความไม่ต่อเนื่อง (Discontinuities) ของมวลหิน เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องในมวลหินนั้นเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดความไม่เสถียรภาพของโครงสร้างที่วางอยู่บนมวลหิน การเกราท์ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Ordinary portland cement) เป็นเทคนิคทางด้านวิศวกรรมที่ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อประยุกต์ใช้ในงานด้านการเสริมสร้างเสถียรภาพของมวลหิน ด้วยวิธีการฉีดซีเมนต์เหลวเข้าไปยาแนวในช่องว่าง รอยแตก และโพรงในมวลหิน เพื่อเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์และทางด้านชลศาสตร์ของมวลหิน โดยเฉพาะการเสริมสร้างความแข็งแรง ความทนทาน รวมไปถึงการลดความซึมผ่านของน้ำและการยุบตัวของชั้นหิน โดยปกติแล้วซีเมนต์เกราท์มักอยู่ในรูปซีเมนต์ผสมน้ำ เรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ ซีเมนต์ผสมน้ำและทรายเรียกว่ามอร์ตาร์ หรือซีเมนต์ผสมน้ำ ทราย และสารเติมแต่งอื่นๆ ซึ่งคุณลักษณะของซีเมนต์เกราท์เหล่านี้มักขึ้นกับอิทธิพลของตัวแปรที่หลากหลาย สิ่งสำคัญประการหนึ่งที่ส่งผลต่อคุณลักษณะของซีเมนต์เกราท์คือ อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ องค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์ ลักษณะทางกายภาพของผงซีเมนต์ รวมไปถึงประสิทธิภาพในการผสมและการบ่มซีเมนต์

การศึกษานี้ได้มุ่งเน้นไปที่ประสิทธิภาพเชิงกลศาสตร์และเชิงชลศาสตร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จาก 5 บริษัทผู้ผลิตและจัดจำหน่ายชั้นนำของประเทศไทย โดยทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการตามมาตรฐานการทดสอบ เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพและศักยภาพของปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นวัสดุยาแนวในรอยแตกของหิน ซึ่งข้อมูลดังกล่าวยังไม่เคยมีผู้ใดทำการศึกษาและเผยแพร่ข้อมูลออกสู่ภาคประชาชนอย่างจริงจังแบบเป็นรูปธรรมเพียงพอที่จะสามารถนำไปใช้ในการออกแบบในสภาวะจริงตามธรรมชาติได้ งานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนาองค์ความรู้นี้ให้สามารถนำไปใช้เป็นตัวชี้วัดและเป็นทางเลือกในการออกแบบตามสภาวะจริงได้อย่างเป็นรูปธรรม

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์ของค่าความแข็ง ความยืดหยุ่น กำลังยึดติด ความซึมผ่าน ความหนาแน่น และความหนืดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15 เล่ม 1-2547 และ ASTM C150 จาก 5 บริษัทผู้ผลิตและจัดจำหน่ายชั้นนำของประเทศไทย เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติในเชิงประสิทธิภาพการยาแนวรอยแตกของหิน

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบนี้คือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15 เล่ม 1-2547 และมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา ASTM C150 TYPE I จาก 5 บริษัทผู้ผลิตชั้นนำประกอบด้วย
 - (1) ตราช้าง จากบริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน)
 - (2) ตราอินทรีเพชร จากบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)
 - (3) ตราดอกบัวแดง จากบริษัท ปูนซีเมนต์เอเชีย จำกัด (มหาชน)
 - (4) ตราทีพีไอ (สีแดง) จากบริษัท ทีพีไอ โพลีน จำกัด (มหาชน)
 - (5) ตราลูกโลกน้ำเงิน จากบริษัท เซเม็กซ์ (ประเทศไทย) จำกัด
- 2) ทดสอบค่าความแข็งของตัวอย่างซีเมนต์ด้วยการทดสอบกำลังกดในแกนเดียวและสามแกนในห้องปฏิบัติการ
- 3) ทดสอบค่ากำลังยึดติด (Bond strength) ด้วยการทดสอบแรงดึงดงแบบสี่จุด (Four point bending test)
- 4) ทดสอบหาค่าความซึมผ่านของซีเมนต์ด้วยการให้แรงดันน้ำแบบคงที่ (Constant head permeability test)
- 5) ตัวอย่างหินที่ใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการคือหินทรายชุดภูกระดึงเพียงชนิดเดียว
- 6) รอยแตกที่ใช้ในการทดสอบได้ใช้รอยแตกที่ถูกจัดเตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการ
- 7) การผสมและระยะเวลาการบ่มปูนซีเมนต์ได้ดำเนินการตามคำแนะนำของบริษัทตัวแทนผู้จัดจำหน่ายและตามมาตรฐาน ASTM
- 8) งานวิจัยนี้ไม่มีการออกสำรวจภาคสนาม
- 9) การทดสอบทุกประเภทได้ดำเนินการที่อุณหภูมิลบห้อง

1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

กรรมวิธีการเสริมสร้างเสถียรภาพของมวลหินที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องในปัจจุบันคือการฉีดซีเมนต์เหลวเข้าไปในแนวเพื่ออุดในช่องว่าง รอยแตก และโพรงในมวลหิน ซึ่งเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์และทางด้านชลศาสตร์ของมวลหินเพื่อเสริมสร้างความแข็งแรงและความทนทาน รวมไปถึงการลดความซึมผ่านของน้ำและการยุบตัวของชั้นหิน โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นทำการศึกษาคุณสมบัติของซีเมนต์เกรดที่ที่อยู่ในรูปซีเมนต์ผสมน้ำหรือที่เรียกว่าซีเมนต์เพสต์ ทางด้านศักยภาพและประสิทธิภาพการยาแนวในรอยแตกของหิน

การทดสอบในห้องปฏิบัติการได้ดำเนินการเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์จาก 5 ผู้ผลิตปูนซีเมนต์ในเชิงการเป็นวัสดุยาแนว โดยเริ่มจากการทดสอบและตรวจวัดค่าความหนืดและความหนาแน่นของซีเมนต์เหลวที่อัตราส่วนการผสมน้ำต่อซีเมนต์เท่ากัน เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านการไหลตัวของซีเมนต์แต่ละชนิด มีการศึกษาคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ของซีเมนต์เพสต์โดยมีค่าปัจจัยและตัวแปรที่สำคัญคือ กำลังกดในแกนเดียว กำลังกดในสามแกน กำลังดึงแบบบราซิล สัดส่วนความยืดหยุ่น กำลังยึดติดของซีเมนต์กับรอยแตกของหิน โดยนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์เปรียบเทียบและจัดลำดับในเชิงค่ากำลังของซีเมนต์เพื่อประสิทธิภาพด้านการเป็นวัสดุยาแนวที่ช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงทนทานในมวลหินของซีเมนต์แต่ละชนิด นอกจากนี้ยังศึกษาคุณสมบัติทางด้านชลศาสตร์ ซึ่งลักษณะการไหลได้กำหนดให้ซีเมนต์เป็นวัสดุพรุน โดยนำกฎการไหลของดาร์ซี (Darcy's law) มาประยุกต์ใช้ ผลที่ได้จากการทดสอบถูกนำมาวิเคราะห์ เปรียบเทียบ และจัดลำดับในเชิงประสิทธิภาพของวัสดุอุดที่สามารถช่วยลดค่าความซึมผ่านของน้ำในรอยแตกของมวลหินได้อย่างเหมาะสมของซีเมนต์แต่ละชนิด

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องออกเป็น 2 ประเด็นหลักประกอบด้วย การนำซีเมนต์ไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุอุด และการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุอุดหรือวัสดุที่ใช้ทำกำแพงที่บ่อน้ำใต้ดินโดยการใช้ปูนซีเมนต์ รวมไปถึงการประยุกต์ใช้วัสดุอุดในงานวิศวกรรมต่างๆ

ขั้นตอนที่ 2 การเก็บและเตรียมตัวอย่าง

ในขั้นตอนนี้ได้ทำการจัดเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

1) การจัดเตรียมวัสดุยาแนวที่ใช้สำหรับการทดสอบ ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15 เล่ม 1-2547 และมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา ASTM C150 TYPE I ทั้งหมด 5 ผู้ผลิตชั้นนำ โดยซื้อจากตัวแทนผู้จัดจำหน่าย

2) ตัวอย่างหินสำหรับการทดสอบแรงดัดงอแบบสี่จุด คือตัวอย่างหินทรายชุดกฎกระดิ่งรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 mm ความยาว 100 mm โดยทำรอยแตกจำลองภายในห้องปฏิบัติการ และหล่อติดด้วยปูนซีเมนต์ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความยาวเท่ากับตัวอย่างหิน ทำการบ่มซีเมนต์และตัวอย่างหินในน้ำสะอาดเป็นเวลา 28 วัน ที่อุณหภูมิห้อง ตัวอย่างหินที่ใช้ทดสอบกับซีเมนต์แต่ละชนิดรวมทั้งสิ้น 20 ตัวอย่าง

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบหาค่าคุณสมบัติพื้นฐานของซีเมนต์เหลว

การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของซีเมนต์เหลวประกอบด้วย

1) การทดสอบความหนาแน่น ดำเนินการเพื่อหาค่าความหนาแน่นของซีเมนต์เหลวจากการออกแบบส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามคำแนะนำของบริษัทผู้จัดจำหน่ายและทดสอบตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา ASTM C188

2) การทดสอบความชื้นเหลวของซีเมนต์ ดำเนินการเพื่อตรวจวัดค่าความหนืดและคุณสมบัติการไหลของซีเมนต์เพสต์เหลว โดยใช้เครื่องวิสโคมิเตอร์รุ่น RI:2:M และทดสอบตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา ASTM D2573

ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบหาค่าคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของซีเมนต์เกรทท์

การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของซีเมนต์เกรทท์ประกอบด้วย การทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงในแกนเดียว ความแข็งแรงในสามแกน และค่ากำลังยึดติดของซีเมนต์ทั้ง 5 ผู้ผลิต ตามส่วนผสมและระยะเวลาการบ่มปูนซีเมนต์ตามคำแนะนำของบริษัทตัวแทนผู้จัดจำหน่ายและตามมาตรฐาน ASTM

1) การทดสอบหาค่ากำลังดึงแบบบราซึล เพื่อหาค่ากำลังดึงของตัวอย่างซีเมนต์ โดยชุดการทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึงแบบบราซึลได้ดำเนินการบนตัวอย่างซีเมนต์รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 mm ความยาว 27 mm ตามมาตรฐาน ASTM C496

2) การทดสอบหาค่ากำลังกดในแกนเดียว เพื่อหาค่ากำลังกดในแกนเดียวและสัดส่วนความยืดหยุ่นของตัวอย่างซีเมนต์ ชุดการทดสอบหาค่าความแข็งแรงในแกนเดียวได้ดำเนินการบนตัวอย่างซีเมนต์รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 mm ความยาว 135 mm ตามมาตรฐาน ASTM D7012

3) การทดสอบหาค่ากำลังกดในสามแกน เพื่อหาค่ากำลังกดในสามแกน ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น ค่าอัตราส่วนปัวซอง ค่าความเค้นยึดติด และค่ามุมเสียดทานของตัวอย่างซีเมนต์ภายใต้สภาวะความเค้นล้อมรอบโดยผันแปรค่าความเค้นล้อมรอบระหว่าง 0–2 MPa ชุดการทดสอบหาค่าความแข็งในสามแกนดำเนินการบนตัวอย่างซีเมนต์รูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 mm ความยาว 108 mm ตามมาตรฐาน ASTM D7012-04

4) การทดสอบแรงดัดงอแบบสี่จุด เพื่อหาค่ากำลังยึดติดระหว่างซีเมนต์กับรอยแตกของหินที่อายุการบ่มตัวของซีเมนต์ 28 วัน (ในน้ำสะอาด) ชุดการทดสอบแรงดัดงอแบบสี่จุด ดำเนินการบนตัวอย่างหินที่หล่อติดกับซีเมนต์รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 mm ความยาวตัวอย่างหิน 100 mm และความยาวของซีเมนต์ที่หล่อติด 100 mm โดยดำเนินการทดสอบแรงดัดงอแบบสี่จุดตามมาตรฐาน ASTM D6272-10

ขั้นตอนที่ 5 การทดสอบหาค่าคุณสมบัติความซึมผ่านของซีเมนต์เกราท

ในขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติความซึมผ่านของซีเมนต์เกราทที่ใช้ชุดในรอยแตกของหินด้วยการทดสอบความซึมผ่านด้วยการให้แรงดันน้ำแบบคงที่ที่ 20 psi เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของซีเมนต์ทั้ง 5 ผู้ผลิต และทำการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านที่ระยะเวลาการบ่มตัวของซีเมนต์ 3, 7, 14 และ 28 วัน ในน้ำสะอาด

ขั้นตอนที่ 6 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ผลจากการทดสอบของซีเมนต์ทั้ง 5 ผู้ผลิตในห้องปฏิบัติการถูกนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบ และจัดลำดับในลักษณะของประสิทธิภาพการยาแนวรอยแตกของหินตามคุณสมบัติที่นำมาใช้ในการพิจารณาดังต่อไปนี้

1) คุณสมบัติการไหลตัวพื้นฐาน ได้ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบในเชิงความหนาแน่นและความชื้นเหลวของซีเมนต์เหลว

2) คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ ได้ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบในเชิงกำลังดึงและกำลังกด ตามสัดส่วนความยืดหยุ่นของซีเมนต์เพสต์ที่ระยะเวลาการบ่มตัวของซีเมนต์ 3, 7, 14, และ 28 วัน ในน้ำสะอาด

3) คุณสมบัติทางด้านกำลังยึดติด ได้ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบในเชิงกำลังดัดงอของซีเมนต์เพสต์หล่อติดกับตัวอย่างหินทรายชุดฎุกระดิ่งที่ระยะเวลาการบ่มตัวของซีเมนต์ 28 วัน ในน้ำสะอาด

4) คุณสมบัติด้านชลศาสตร์ ได้ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบในเชิงค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของซีเมนต์เพสต์ที่ระยะเวลาการบ่มตัวของซีเมนต์ 3, 7, 14 และ 28 วัน ในน้ำสะอาด

ขั้นตอนที่ 7 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิด ขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุป ถู้นำเสนอโดยละเอียดในรายงานฉบับสมบูรณ์ เพื่อส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ และตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติ

1.6 ผลสำเร็จของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ

ผลงานวิจัยที่เสนอมานี้มีประโยชน์มากมายกับงานด้านวิศวกรรมธรณี ธรณีวิทยา และวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

- 1) ตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารระดับชาติ
- 2) เผยแพร่องค์ความรู้ให้กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั้งภาครัฐและเอกชน

1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยที่เสนอมานี้มีประโยชน์อย่างมากและโดยตรงกับหลายหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชน สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ และวิศวกรรมธรณี รวมถึงไปถึงหน่วยงานที่ทำงานเกี่ยวข้องกับการก่อสร้างในชั้นหิน เช่น การสร้างเขื่อน การสร้างอุโมงค์ เหมืองแร่บนดินและใต้ดิน หน่วยงานเหล่านี้ได้แก่

- 1) กรมทรัพยากรน้ำ
- 2) กองธรณีเทคนิค กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
- 3) สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
- 4) กองธรณีเทคนิค กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน
- 5) สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ และวิศวกรรมธรณี
- 6) บริษัทเอกชนที่ออกแบบและก่อสร้างอุโมงค์ และความลาดชันในมวลหิน
- 7) กระทรวงพลังงาน
- 8) บริษัทสำรวจและขุดเจาะน้ำมันในประเทศไทย
- 9) องค์การบริหารส่วนตำบล และองค์การบริหารส่วนจังหวัด

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเกราะถือเป็นวิธีการเฉพาะที่เพิ่งมีการคิดค้นได้ไม่นาน วัตถุประสงค์คือ การอุดรอยแตกที่เกิดขึ้นภายในดินหรือชั้นหินที่มักเกิดขึ้นในกระบวนการขุดเจาะ เพื่อให้โครงสร้างเกิดความแข็งแรงและมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน การเกราะสามารถนำไปใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมได้หลายรูปแบบ (Nonveiller 1989, Fransson 2001, Yesilnacar 2003, Yeon and Han 1997) นอกจากนี้ตัววัสดุเกราะยังมีส่วนผสมที่หลากหลายแล้วแต่ประเภทของการใช้งาน (Anagnostopoulos and Hadjispyrou, 2004) โดยส่วนผสมหลักๆ ประกอบด้วย ซีเมนต์ น้ำ ทราาย และวัสดุเติมเต็ม ในการใช้งานจะมีอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกันไป ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุเกราะจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างน้ำกับซีเมนต์ องค์ประกอบทางเคมี ความละเอียดของซีเมนต์ วัสดุเติมเต็ม ระยะเวลาในการผสมวัสดุให้เข้ากัน และอุณหภูมิ (Anagnostopoulos, 2006)

เนื้อหาในบทนี้ได้เสนอผลสรุปที่ได้จากการทบทวนและศึกษาวารสาร รายงานการประชุม และวารสารที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และพลศาสตร์ ของวัสดุเกราะในหลายรูปแบบ รวมไปถึงรูปแบบการใช้งานของวัสดุเกราะ โดยสรุปดังต่อไปนี้

2.1 คุณสมบัติด้านการไหลของซีเมนต์เหลว

Frantzis and Baggott (1997) ได้ทดสอบความหนืดของซีเมนต์เหลวที่มีส่วนผสมหลักเป็น ฟอสเฟต (phosphate-based) ด้วยเครื่อง Viscometer และเปรียบเทียบกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หลังจากปั่นวัสดุให้เข้ากันเป็นเวลา 15 นาที นอกจากนั้น Mesbah and Yahia (1988) ได้ทดสอบหาคุณสมบัติด้านการไหลของซีเมนต์เกราะ ด้วยการอัดเข้าไปตามช่องว่างและหาค่าคุณสมบัติด้านการไหลด้วยเครื่อง Coaxial cylinder viscometer

พฤติกรรมของวัสดุยาแนวมักขึ้นกับคุณสมบัติด้านการไหล ดังนั้นการอุดรอยแตกในมวลหินจึงจำเป็นต้องใช้วัสดุยาแนวที่สามารถไหลเข้าไปตามรอยแตกได้ง่ายและต้องมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ดี เพื่อให้การอุดรอยแตกมีประสิทธิภาพ การทดสอบคุณสมบัติการไหลในภาคสนามด้วยการหาค่าความหนืดของวัสดุทางอ้อมเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM (C39) ซึ่งควรใช้อุปกรณ์ทดสอบที่มีความทันสมัยเพื่อให้ได้ค่าความหนืดที่ถูกต้องที่สุด เครื่องทดสอบความหนืดที่เหมาะสมคือเครื่อง Coaxial cylinder viscometer สามารถใช้ได้กับของไหลนิวโตเนียน (Newtonian) และของไหลบิงแฮม (Bingham) นักวิจัยหลายท่านได้ทดสอบด้วยเครื่องมือดังกล่าวและแสดงผลการทดสอบค่าความหนืดไว้มากมาย เช่น Yang and Jennings

(1995) Williams et al. (1999) Banfill (1999) Saak et al. (1999) และ Yang and Jennings (1999) แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมด้านการไหลของซีเมนต์มีความซับซ้อนมาก ซึ่งเกิดจากกลไกทางเคมีและทางกลระหว่างการแข่งขันกัน แม้แต่ระหว่างการผสมวัสดุให้เข้ากัน กลไกเหล่านี้ก็ยังมีผลต่อพฤติกรรมของซีเมนต์ด้วย ดังนั้นการทดสอบเพื่อหาความหนืดของซีเมนต์เหลวจึงต้องปรับเปลี่ยนสภาวะไปตามเครื่องมือและส่วนประกอบของซีเมนต์

Huang and Chen (2002) ได้คิดส่วนผสมของซีเมนต์เกรดที่เรียกว่า Wet-ground Fine Cement (WFC) เพื่อลดต้นทุนในการผลิต โดยนำวัสดุมาบดให้มีขนาดไม่เกิน 40 mm และมีขนาดเฉลี่ยที่น้อยกว่า 10 mm ซีเมนต์เหลวที่ได้สามารถฉีดเข้าไปในรอยแตกได้

ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นซีเมนต์สำหรับทำวัสดุเกรดที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีค่ากำลังรับแรงอัดสูง อายุการใช้งานยาวนาน และราคาถูก แต่มีข้อจำกัดที่สามารถอุดรอยแตกในมวลหินที่มีขนาดมากกว่า 0.2 mm ขึ้นไป เนื่องจากมีอนุภาคขนาดใหญ่ เมื่ออัตราส่วนระหว่างน้ำกับซีเมนต์มากกว่า 2 จะทำให้ไม่สามารถแทรกเข้าไปในรอยแตกขนาดเล็กได้ ดังนั้นการคิดค้นวัสดุเกรดที่มีอนุภาคขนาดเล็กจึงมีความสำคัญมากขึ้นต่อการนำไปใช้งานจริงในภาคสนาม

Park and Noh (2004) กล่าวว่าส่วนผสมของซีเมนต์มักประกอบด้วยอนุภาคของวัสดุเติมเต็มจำพวกแร่ต่างๆ ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ด้วยเครื่อง Rotovisco RT 20 Rheometer (Haake) ประกอบด้วย กากแร่ (BFS) ชี้เถ้า (FA) และซิลิกา (SF) ส่วนประกอบเหล่านี้จะถูกนำไปผสมกับกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) ซึ่งจะให้คุณสมบัติที่แตกต่างกันไปตามส่วนประกอบที่แบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ 1) ส่วนประกอบ OPC เพียงอย่างเดียว สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการไหลด้วยการเติมสารเติมเต็มจำพวกพลาสติกแบบ PNS-based 2) ส่วนประกอบระหว่าง BFS-FA สามารถลดความหนืดและค่าความเค้นครากได้ และ 3) ส่วนประกอบของ OPC-BFS-SF หรือ OPC-FA-SF จากการทดสอบพบว่าส่วนประกอบที่มี BFS สามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้านการไหลได้ดีกว่าส่วนประกอบที่มี FA เพียงอย่างเดียว

Schwartzentruber and Roy (2004) ทดสอบปูนซีเมนต์ SCC เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านการไหลที่มีสูตรผสมหลายรูปแบบแตกต่างกัน จุดประสงค์คือเพื่อแสดงให้เห็นถึงความจำเป็นของการทดสอบคุณสมบัติด้านการไหลในซีเมนต์เหลวที่มีวัสดุเติมเต็มประเภท Super plasticizer กับ Viscosity Enhancing Admixture (VEA) สอดคล้องกับ Jarny et al. (2005) ที่ทดสอบคุณสมบัติด้านการไหลของซีเมนต์อย่างรวดเร็ว โดยลดระยะเวลาของการทดสอบให้เร็วขึ้น

Emoto and Bier (2007) ได้ศึกษาผลกระทบของวัสดุหยาบต่อคุณสมบัติด้านการไหลของซีเมนต์ การทดสอบแสดงให้เห็นว่า ส่วนประกอบหลักของ Calcium aluminates มีความสำคัญต่อคุณสมบัติการไหลในระยะสั้น ส่วนประกอบที่เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีความสำคัญต่อคุณสมบัติการไหลในระยะยาว

2.2 คุณสมบัติด้านกลศาสตร์ของซีเมนต์แข็ง

Tango (1998) ทำการทดสอบหาค่ากำลังกดในแกนเดียวเพื่อหาคุณสมบัติของวัสดุเกราทต่างชนิดกันคือ ซีเมนต์ มอร์ต้า และคอนกรีต โดยไม่ต้องรอให้อายุครบ 28 วัน ด้วยหลากหลายวิธีการ เช่น การทำให้ซีเมนต์แห้งอย่างรวดเร็วภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง การทดสอบกับซีเมนต์ที่อายุน้อย (3 ถึง 7 วัน) เพื่อหาความสัมพันธ์ในการคาดคะเนค่ากำลังรับแรงอัดที่มีอายุ 28 วัน เป็นต้น

Shannag and Haddad (2005) ได้ทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุเกราทที่มีซีเมนต์เป็นส่วนประกอบหลัก และผสมด้วยวัสดุเติมเต็มที่อัตราส่วน 0%, 5%, 10% และ 15% โดยน้ำหนัก จากการทดสอบพบว่าการใช้เมตะคาโอลิน (Metakaolin) เป็นสารเติมเต็มในอัตราส่วน 15% จะทำให้วัสดุเกราทมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด

David et al. (2005) ระบุว่าคุณสมบัติเฉพาะของซีเมนต์ยาแนวสำหรับงานก่อสร้างถูกนำเสนอโดย ASTM C476 ซึ่งอนุญาตให้ซีเมนต์ยาแนวที่ใช้ในงานก่อสร้างจะต้องมีสัดส่วนระหว่างซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เป็นวัสดุเชื่อมประสานกับซีเมนต์ผสม สารเติมแต่ง และมวลรวมหยาบอื่นต้องน้อยกว่า 1 ต่อ 10 โดยปริมาตร ใน ASTM ไม่มีการจำกัดระยะยุบตัวของซีเมนต์ แต่มาตรฐานอุตสาหกรรมต้องการระยะยุบตัวของซีเมนต์ที่แน่นอนไม่เกิน 8 ถึง 11 นิ้ว วิธีต่อมาของ ASTM ได้ระบุคุณสมบัติของซีเมนต์ยาแนวด้วยกำลังกดในแกนเดียวของซีเมนต์ยาแนวที่อายุ 28 วัน ต้องไม่น้อยกว่า 2,000 psi อย่างไรก็ตามสำหรับผู้รับเหมาก่อสร้างที่ใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมในโครงสร้างที่หนาน้อยกว่า 5 ฟุต สามารถประยุกต์ใช้ค่าความอยู่ตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ได้ตามที่ ASTM C476 ระบุไว้ การระบุคุณสมบัติเฉพาะของซีเมนต์ยาแนวจะไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของสัดส่วน เพราะกำหนดให้สัดส่วนของหินปูนที่ผสมมากเกินไปซึ่งมักส่งผลให้ระยะการยุบตัวมากเกินไป งานวิจัยนี้มุ่งเน้นทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านกำลังกดในแกนเดียวและค่ากำลังดึงในซีเมนต์กับสมอฮีดหินของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type S และ Type N ตามมาตรฐานสัดส่วนการผสมหินปูนในซีเมนต์และมอร์ตาร์ ASTM C270 และมาตรฐานของวัสดุยาแนว ASTM C476 โดยยาแนวที่มีสัดส่วนเทียบเคียงได้กับปูนขาวและมอร์ตาร์ Type S สนับสนุนข้อสรุปดังต่อไปนี้ ความอยู่ตัวของชั้นมอร์ตาร์ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว Type S จะดำเนินการทดสอบและนำไปใช้งานเช่นเดียวกับ Low-Lift Grout

Murat Mollamahmutoglu et al. (2006) ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติด้านการยาแนวของปูนซีเมนต์ละเอียด (Microfine cement) และซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) ผสมกับทรายละเอียดถึงปานกลางคุณสมบัติการไหลพื้นฐานของปูนซีเมนต์ผสมสารแขวนลอยซิลิกาฟุ้ง (ปูนซีเมนต์ละเอียด 90% และซิลิกาฟุ้ง 10% โดยน้ำหนักของมวลรวมทั้งหมดที่เป็นของแข็ง) กำหนดสัดส่วนการผสมให้น้ำต่อมวลรวมทั้งหมดที่เป็นของแข็งที่ 1 ต่อ 1 นอกจากนี้ยังทำการศึกษาประสิทธิภาพการแทรกซึมตัวของสารแขวนลอยและทรายละเอียดถึงปานกลางที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันด้วย โดยดำเนินการทดสอบกำลังกดในแกนเดียว และดำเนินการทดสอบคุณสมบัติความซึมผ่านบนตัวอย่างซีเมนต์เกรนทำ ให้พบว่าค่ากำลังกดในแกนเดียวของตัวอย่างซีเมนต์ยาแนวผสมทรายและสารเติมแต่งซิลิกาฟุ้งมีค่าสูงกว่าค่ากำลังกดในแกนเดียวของตัวอย่างซีเมนต์ผสมทรายที่ไม่มีสารเติมแต่ง จากการทดสอบคุณสมบัติความซึมผ่านพบว่า ค่าความซึมผ่านของตัวอย่างซีเมนต์ยาแนวผสมซิลิกาฟุ้งมีค่าต่ำกว่าค่าความซึมผ่านของตัวอย่างซีเมนต์เพียงอย่างเดียว

2.3 ค่าความซึมผ่านกับวัสดุเกรน

Halamickova and Detwiler (1995) กล่าวว่า โครงสร้างช่องว่างของมอร์ต้าและคอนกรีตมีความแตกต่างกันไม่มากเมื่อเทียบกับซีเมนต์บริสุทธิ์ จึงนำน้ำ ซีเมนต์ และทราย ผสมเข้าด้วยกันแล้วทดสอบหาค่าความซึมผ่านด้วยการวัดกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่าน โดยวัดจากค่าสัมประสิทธิ์ของคลอไรด์ไอออน ในกระบอกความดันที่ 45% ถึง 70% ของการแข็งตัว ผลที่ได้สามารถใช้ความสัมพันธ์ของ Katz-Thompson เพื่อคำนวณค่าความซึมผ่านได้ เช่นเดียวกับ Christensen และคณะ (1996) ที่ใช้ความสัมพันธ์ของ Katz-Thompson คำนวณหาค่าความซึมผ่าน

Valenza and Thomas (2011) ได้ทำการทดสอบค่าความซึมผ่านและค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของซีเมนต์ที่อุณหภูมิระหว่าง 8°C ถึง 60°C จากการทดสอบพบว่าค่าความซึมผ่านเพิ่มสูงขึ้น 100 เท่า ในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว และเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดตั้งแต่อุณหภูมิ 40°C ถึง 60°C ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น มีการเปลี่ยนแปลงน้อยตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 20°C ถึง 60°C

Wong et al. (2011) หาค่าความซึมผ่านด้วยกล้องอิเล็กตรอน โดยสมมุติฐานให้ช่องว่างทั้งหมดเป็นทรงลูกบาศก์ และคำนวณค่า Hydraulic conductance ของช่องว่างด้วยการประมาณค่าจาก Hydraulic radius การทดสอบประกอบด้วย มอร์ต้าที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์อายุการบ่ม และปริมาณทราย แตกต่างกัน 46 แบบ ผลที่ได้พบว่าสามารถหาค่าความซึมผ่านที่อยู่ในช่วง $3 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ ถึง $5.8 \times 10^{-16} \text{ m}^2$

2.4 งานวิจัยและกรณีศึกษา

เนื้อหาในส่วนนี้ได้สรุปผลจากการทบทวนวรรณกรรมวิจัยเบื้องต้นด้านงานวิจัยและกรณีศึกษาที่ผ่านมาในอดีตเกี่ยวกับการนำซีเมนต์ไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุอุด การปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุอุดหรือวัสดุที่ใช้ทำกำแพงที่บ้น้ำใต้ดินโดยการใช้ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้วัสดุอุดในงานวิศวกรรมต่างๆ เช่น ด้านสิ่งแวดล้อม เหมืองแร่ และเขื่อน เป็นต้น

Huang (1997) ได้ศึกษาในห้องปฏิบัติการเกี่ยวกับการตรวจสอบคุณสมบัติของซีเมนต์ที่มีส่วนผสมของซีเมนต์ลอย (อนุภาคขนาดเล็กซึ่งเกิดจากการเผาไหม้อย่างไม่สมบูรณ์ของถ่านหินหรือเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งอื่นๆ) ซึ่งเป็นอุปสรรคในการแยกของเสียอันตรายและสารกัมมันตรังสีระดับต่ำ ในการศึกษานี้ได้ใช้ซีเมนต์แทนที่ 30% โดยมวลของซีเมนต์ และยังมีส่วนผสมอีกสามชนิดที่ถูกผสมเข้าไปในซีเมนต์ได้แก่ สารเบนทอไนต์ ผงฝุ่นซิลิกา และเส้นใยโพรพิลีน โดยจะผสมเข้าไปที่ละชนิดเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของซีเมนต์ในลักษณะต่างๆ นอกจากนี้ ค่าความสามารถในการไหล การตั้งค่าเวลาของการผสมซีเมนต์ ค่ากำลังอัดในทิศทางเดียว การกระจายขนาดของรูพรุนและการซึมผ่านของน้ำจะถูกนำมาพิจารณาสำหรับการแข่งขันตัวของซีเมนต์ที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ จนถึง 120 วัน และมีการตรวจสอบความทนทานของซีเมนต์ที่มีส่วนผสมของซีเมนต์ลอยอย่างรอบคอบในแง่ของการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพภายหลังจากการสัมผัสเกลือของกรดกำมะถันและวัฏจักรของการเปียก-แห้ง

Owaidat et al. (1999) ทำการศึกษาและดำเนินโครงการภายใต้การควบคุมของ The U.S. Army Corps of Engineers เพื่อสร้างกำแพงที่บ้น้ำสำหรับป้องกันการพังทลายของสันเขื่อน (Levee) ของแม่น้ำอเมริกันริเวอร์ ในเมืองซาคราเมนโต รัฐแคลิฟอร์เนีย เพื่อป้องกันอันตรายต่อประชาชนและที่อยู่อาศัยในช่วงฤดูน้ำหลาก เนื่องจากในฤดูที่มีน้ำมากสันเขื่อนมักเกิดการพังทลายจากการอุ้มน้ำที่มากเกินไปจนขีดจำกัด ส่งผลให้เกิดน้ำท่วมสร้างความเสียหายให้กับประชาชนที่อาศัยอยู่บริเวณใกล้เคียง เพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าวทางคณะผู้ทำการศึกษาจึงได้ออกแบบโครงสร้างสำหรับลดผลกระทบที่เกิดขึ้นในรูปของกำแพงที่บ้น้ำ ซึ่งมีส่วนผสมของดินซีเมนต์ และเบนทอไนต์ หรือ Soil-Cement-Bentonite slurry wall (SCB) เหตุผลเนื่องจาก SB แบบธรรมดา มีค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับขนาดของโครงการที่มีแรงดันด้านข้างจากปริมาณน้ำที่มากในฤดูน้ำหลาก ส่วน Cement-Bentonite แม้จะรับแรงเฉือนได้ดีแต่ก็มีราคาสูงเมื่อต้องนำมาใช้กับโครงการขนาดใหญ่ เพราะระยะทางในการสร้างกำแพงที่บ้น้ำมีความยาวหลายกิโลเมตร หลังจากการเลือกส่วนผสมที่เหมาะสม โครงการได้ใช้เวลาประมาณสองเดือนในการก่อสร้างกำแพงที่บ้น้ำ ผลของการทดสอบหลังจากทำการสร้างกำแพงที่บ้น้ำจาก SCB ซึ่งมีความลึกของกำแพงประมาณ 80 ฟุต พบว่า เมื่อปล่อยให้กำแพงตัวอย่างจับตัวกัน 28 วัน แล้วทำการทดสอบ พบว่าค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียวมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 15 psi และมีค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านเท่ากับ 5×10^{-7} cm/s ซึ่งได้ผลเป็นที่น่าพอใจ

Kashir and Yanful (2000) ได้ศึกษาในห้องปฏิบัติการเกี่ยวกับการป้องกันความชื้นผ่านของสารพิษที่มาจากบ่อทิ้งกากแร่พบว่า หากใช้กำแพงทึบน้ำที่เป็นส่วนผสมระหว่างดินและเบนทอไนต์แบบทั่วไปเป็นวิธีที่ไม่เหมาะสมสำหรับกรณีดังกล่าว เนื่องจากภายในโครงสร้างของกำแพงทึบน้ำที่ทำมาจากดินและเบนทอไนต์ มีปริมาณของช่องว่างที่มากเกินไป ทำให้เกิดการรั่วไหลของกรดที่มาจากกากแร่ หรือเรียกว่า Acid Mine Drainage (AMD) ซึ่งในการทดลองนี้ได้ นำดินตะกอนประปามาผสมกับเบนทอไนต์ 6% โดยน้ำหนักมาทดสอบความชื้นผ่าน จากนั้นได้ทดสอบความชื้นผ่านด้วยวิธีใหม่ด้วยการเพิ่มแร่จำพวกคาร์บอเนตเข้าไปในส่วนผสม และแบ่งการทดสอบเป็นสองวิธีคือ Carbonate-rich หรือในที่นี้เรียกว่า Brescia backfill และ Carbonate-free หรือ Heath steele backfill โดยวิธีแบบ Brescia backfill ได้ใส่คาร์บอเนตลงไป ปริมาณ 32% เป็นวิธีที่ให้ผลดีที่สุด สามารถยับยั้งความชื้นผ่านของกรดที่มาจากกากแร่ได้ดีและยังช่วยลดค่าความเป็นกรดได้จนอยู่ในระดับที่น่าพอใจ จากการวัดค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นผ่านมีค่าเท่ากับ 1×10^{-9} cm/s ส่วนวิธีแบบ Heath Steele backfill ไม่ได้เติมคาร์บอเนตแต่มีส่วนผสมของ clay mineral ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นผ่านเท่ากับ 3×10^{-8} cm/s และสามารถยับยั้งการเกิดความเป็นกรดได้ แต่สิ่งที่แตกต่างจากวิธีการแรกคือไม่สามารถทำให้ความเป็นกรดของบ่อเหมืองมีค่า pH ที่เป็นกลางได้

Ryan and Day (2002) ได้ศึกษาการทำกำแพงทึบน้ำเพื่อป้องกันการไหลในแนวระนาบของน้ำใต้ดินโดยนำเอาซีเมนต์ ดิน และเบนทอไนต์มาผสมเข้าด้วยกัน เรียกว่า Soil-Cement-Bentonite slurry wall (SCB) แทนวิธีการทำกำแพงทึบน้ำแบบทั่วไป ซึ่งใช้ส่วนผสมจากดินกับเบนทอไนต์ หรือเรียกว่า Soil-Bentonite slurry wall (SB) เนื่องจากในบางสภาวะกำแพงทึบน้ำอาจรับน้ำหนักกดทับจากแรงกระทำภายนอก โดยเฉพาะน้ำหนักของฐานรากที่มากเกินกำลังของดินและเบนทอไนต์จะทนรับได้ แต่เมื่อนำซีเมนต์มาผสมกับดินและเบนทอไนต์ส่งผลให้กำแพงทึบน้ำสามารถรับแรงได้มากขึ้น นอกจากนั้นค่าความชื้นผ่านของ SCB ยังมีค่าน้อยกว่า SB ซึ่งถือเป็นสิ่งที่ดี คือมีค่าเท่ากับ 5×10^{-7} cm/s จากค่ามาตรฐานที่ไม่มากกว่า 1×10^{-6} cm/s และสามารถรับแรงในช่วง 15–300 psi ได้

Rahmani (2004) กล่าวว่าเป็นเวลากว่า 20 ปี ที่การอุดรอยแตกถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ลดการเคลื่อนตัว และลดค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นผ่าน ทั้งของดินและมวลหิน เนื่องจากการคาดการณ์ผลกระทบของการอุดรอยแตกนั้นมีความสำคัญอย่างยิ่งในงานทางวิศวกรรม ซึ่งมีวิธีการมากมายที่นำมาใช้ประเมินผลกระทบของการอุดรอยแตก หนึ่งในนั้นคือการประเมินด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข แต่วิธีนี้สามารถจำลองการกระจายตัวของ การอุดรอยแตกและผลกระทบที่เกิดขึ้นบนรอยแตกได้ค่อนข้างจำกัด เนื่องจากความซับซ้อนของแบบจำลองมีการจำลองด้วยวิธีเชิงตัวเลขน้อยมากที่จะสามารถแสดงให้เห็นถึงการแทรกซึมของ

การอุดรอยแตกในหินได้อย่างครอบคลุม การศึกษาเหล่านี้ใช้เพียงสมมุติฐานอย่างง่ายหรือทำการลดขนาดของรอยแตกให้น้อยลงทำให้ผลของแบบจำลองเกิดความไม่สมจริง ในการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดสมมุติฐานที่ไม่สมจริง และพัฒนาแบบจำลองให้มีความสมจริงมากขึ้น เพราะในความเป็นจริงวัสดุที่ใช้อุดรอยแตกนั้นอยู่ในสถานะของไหลแบบบิงแสม แต่หลายๆแบบจำลองมักไม่ให้ความสนใจเท่าที่ควรอันเนื่องมาจากความซับซ้อนในการคำนวณ และเช่นเดียวกัน รอยแตกของหินในธรรมชาติแท้จริงมีความซับซ้อนและการเปิดเผยที่แปรผันแตกต่างกันไป บางแบบจำลองได้กำหนดให้การแตกเป็นระนาบที่ขนานกันและมีการเปิดเผยคงที่ เพื่อความสะดวกในการใช้สมการและลดระยะเวลาในการคำนวณ แบบจำลองเหล่านี้จึงลดรูปการคำนวณด้วยการแทนที่การไหลแบบสองมิติด้วยแบบจำลองการไหลในหนึ่งมิติที่มีคุณสมบัติเทียบเท่ากัน โดยที่การศึกษานี้ยังได้แสดงให้เห็นถึงการแทรกซึมของการอุดรอยแตกในเชิงเวลา จึงทำให้แบบจำลองสามารถใช้ทำนายลักษณะการแทรกซึมของการอุดสำหรับทุกสภาวะของรอยแตกและวัสดุอุดที่แตกต่างกันไปได้

Butron et al. (2010) ได้นำเสนอแนวคิดใหม่ในการอุดรอยแตกก่อนการขุดเจาะอุโมงค์ เพื่อป้องกันการหดและลดปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่อุโมงค์รถไฟ โดยใช้สารละลายซิลิกาในการอุดรอยแตกที่หลังคาอุโมงค์ ส่วนรอยแตกที่ผนังอุโมงค์จะใช้ปูนซีเมนต์ในการอุด สำหรับขั้นตอนการออกแบบการอุดรอยแตกนี้จะใช้วิธีการที่มีแบบแผนด้วยการกำหนดค่าตัวแปรสำหรับการออกแบบก่อนเริ่มลงมือทำการสำรวจ นอกจากนี้การทดสอบความดันของน้ำและความดันปริมาตร รวมไปถึงการจับบันทึกเวลาได้ถูกนำมาใช้ในการประเมินผลด้วย ซึ่งผลการศึกษาพบว่าการออกแบบประสบความสำเร็จ ผลรวมของค่าอัตราการไหลของน้ำลดลงจาก $4.9 \times 10^{-08} \text{ m}^2/\text{s}$ เป็น $1.6 \times 10^{-08} \text{ m}^2/\text{s}$ และการหยุดของน้ำแปดจุดจากหลังคาถาลดลง การปรับปรุงลักษณะรอยแตกของหินให้ดีขึ้นแสดงให้เห็นว่ารอยแตกด้านที่มีการอุดด้วยซีเมนต์มีอัตราการไหลของน้ำลดลงและประสิทธิภาพของการอุดรอยแตกนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดขอบเขตความใหญ่ของระบบการไหลของน้ำในมวลหินทั้งระบบด้วย

บทที่ 3

การจัดเตรียมตัวอย่าง

3.1 วัตถุประสงค์

เนื้อหาในบทนี้ได้อธิบายขั้นตอน วิธีการ และข้อปฏิบัติในการจัดเตรียมตัวอย่างซีเมนต์ และตัวอย่างหินทรายชุดฎกกระดิ่งที่ใช้สำหรับทดสอบในห้องปฏิบัติการ

3.2 การเตรียมตัวอย่างซีเมนต์

3.2.1 ซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบ

ซีเมนต์ทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15 เล่ม 1-2547 และมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา ASTM C150 TYPE I ได้จัดซื้อจาก บริษัท ผู้ผลิตและจัดจำหน่ายซีเมนต์ชั้นนำของประเทศ (ตารางที่ 3.1) แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) ปูนซีเมนต์ตราช้าง จัดซื้อจาก บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน)
- 2) ปูนซีเมนต์ตราอินทรีเพชร จัดซื้อจาก บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)
- 3) ปูนซีเมนต์ตราดอกบัวแดง จัดซื้อจาก บริษัท ปูนซีเมนต์เอเชีย จำกัด (มหาชน)
- 4) ปูนซีเมนต์ตราทีพีไอ (สีแดง) จัดซื้อจาก บริษัท ทีพีไอ โพลีน จำกัด (มหาชน)
- 5) ปูนซีเมนต์ตราลูกโลกน้ำเงิน จัดซื้อจาก บริษัท เซเม็กซ์ (ประเทศไทย) จำกัด

เพื่อให้ผลงานวิจัยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างแพร่หลาย ปูนซีเมนต์ที่ใช้จึงเป็นปูนใหม่ (ผลิตไม่เกิน 30 วัน) เนื้อปูนไม่รวมตัวจับกันเป็นก้อน ระหว่างรอการทดสอบได้เก็บรักษาในกล่องพลาสติกที่ปิดฝาสนิทเพื่อป้องกันความชื้น

3.2.2 การผสมและเตรียมซีเมนต์เหลว

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการจัดเตรียมส่วนผสมประกอบด้วย

- 1) ซีเมนต์
- 2) น้ำบริสุทธิ์สำหรับผสม ได้ใช้น้ำดื่มตรา มทส. ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (รูปที่ 3.1)
- 3) เครื่องชั่งแบบดิจิตอล ใช้น้ำหนักได้สูงสุด 2,000 กรัม มีค่าความละเอียด ± 0.01 กรัม (รูปที่ 3.2)

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 1-2547 และมาตรฐาน ASTM C150

ลำดับ ที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด				
		ประเภท 1	ประเภท 2	ประเภท 3	ประเภท 4	ประเภท 5
1	ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO ₂) ร้อยละ ไม่น้อยกว่า		20.0			
2	อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al ₂ O ₃) ร้อยละ ไม่มากกว่า		6.0			
3	ไอรอน (III) ออกไซด์ (Fe ₂ O ₃) ร้อยละ ไม่มากกว่า		6.0		6.5	
4	แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ร้อยละ ไม่มากกว่า	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
5	ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃) ร้อยละ ไม่มากกว่า					
	5.1 เมื่อมีไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (3CaO.Al ₂ O ₃) ร้อยละ 8 หรือน้อยกว่า	3.0	3.0	3.5	2.3	2.3
	5.2 เมื่อมีไตรแคลเซียมอะลูมิเนต มากกว่าร้อยละ 8	3.5		4.5		
6	น้ำหนักที่สูญเสียจากการเผา ร้อยละ ไม่มากกว่า	3.0	3.0	3.0	2.5	3.0
7	กากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง ร้อยละ ไม่มากกว่า	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
8	ไตรแคลเซียมซิลิเกต (3CaO.SiO ₂) ร้อยละ ไม่มากกว่า				35.0	
9	ไดแคลเซียมซิลิเกต (2CaO.SiO ₂) ร้อยละ ไม่มากกว่า				40.0	
10	ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ร้อยละ ไม่มากกว่า		8.0	15.0	7.0	5.0
11	เทตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์บวกสองเท่าของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต [4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃ + 2(3CaO.Al ₂ O ₃)] หรือสารละลายของแข็งของเทตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์บวกไดแคลเซียมเฟอร์ไรต์ (4CaO.Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃ + 2CaOFe ₂ O ₃) แล้วแต่กรณี ร้อยละ ไม่มากกว่า					25.0



รูปที่ 3.1 น้ำบริสุทธิ์ที่บรรจุถึงขนาด 20 ลิตร ที่ใช้ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 3.2 เครื่องชั่งไฟฟ้าแบบดิจิตอล

- 4) เครื่องผสม (รุ่น 6QT 575 W) ขนาดกำลังไฟฟ้า 575 วัตต์ แบบปรับความเร็วรอบได้ 6 ค่า มีความจุ (ขั้นต่ำ-สูงสุด) 500–5,000 cm³ (รูปที่ 3.3)
- 5) เครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล (รุ่น HIP C0905019480) มีค่าความละเอียด $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ (รูปที่ 3.4)

งานวิจัยนี้ได้กำหนดสัญลักษณ์ตัวอย่างของวัสดุและส่วนผสมเพื่อความสะดวกในการนำเสนอ ดังนี้

- 1) ปูนซีเมนต์ตราดอกบัวแดง สัญลักษณ์ย่อ ACC
- 2) ปูนซีเมนต์ตราลูกโลกน้ำเงิน สัญลักษณ์ย่อ CEMEX
- 3) ปูนซีเมนต์ตราอินทรีเพชร สัญลักษณ์ย่อ SCCC
- 4) ปูนซีเมนต์ตราช้าง สัญลักษณ์ย่อ SCG
- 5) ปูนซีเมนต์ตราทีพีไอ (สีแดง) สัญลักษณ์ย่อ TPI
- 6) น้ำบริสุทธิ์ (distilled water) สัญลักษณ์ย่อ W
- 7) อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (Water–cement ratio) สัญลักษณ์ย่อ W:C

สำหรับการทดสอบเบื้องต้นเพื่อเปรียบเทียบและคัดเลือกซีเมนต์ที่เหมาะสมโดยใช้เกณฑ์ความหนืด ความหนาแน่น กำลังกดสูงสุด กำลังยึดติด และค่าความซึมผ่านของซีเมนต์แต่ละชนิดด้วยการคงที่อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (water–cement ratio) W:C ที่ 6:10 โดยมีขั้นตอนการผสม ดังนี้

- 1) ชั่งน้ำหนักปูนซีเมนต์จากทั้ง 5 ผู้ผลิต แล้วบรรจุลงในถุงพลาสติกแยกตามผู้ผลิต พร้อมมัดปากถุงให้แน่น (รูปที่ 3.5)
- 2) เทน้ำในถุงที่ชั่งน้ำหนักแล้วลงในเครื่องผสมพร้อมเปิดเครื่องด้วยความเร็ว 275 รอบต่อนาที หากปรับความเร็วมากเกินไปจะทำให้ น้ำจะกระฉอกออกจากตัวเครื่อง
- 3) เทวัสดุในข้อ 1) ลงในเครื่องผสมให้หมดในคราวเดียวกัน (ไม่ควรใช้เวลาเกิน 2 นาที) และเริ่มจับเวลาตั้งแต่เริ่มเทส่วนผสมลงในน้ำ บันทึกรูปร่างของวัสดุที่วัดได้
- 4) บันส่วนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันภายในเวลา 3 นาที ที่ 275 รอบต่อนาที แล้วปิดเครื่องผสม
- 5) นำส่วนผสมที่ได้ไปทดสอบหาค่าความหนาแน่นและความหนืด ก่อนนำไปทดสอบเชิงกลศาสตร์และเชิงพลศาสตร์
- 6) ทำเช่นนี้กับปูนซีเมนต์ที่เหลือจนครบทั้ง 5 บริษัทผู้ผลิต



รูปที่ 3.3 เครื่องผสมพร้อมใบกวน (รุ่น 6QT 575W) สำหรับกวนส่วนผสมให้เข้ากัน



รูปที่ 3.4 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล (รุ่น HIP C0905019480)



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างซีเมนต์และน้ำสะอาดที่ถูกจัดเตรียมสำหรับการผสมและชั่งน้ำหนักตามสัดส่วนการผสม

3.2.3 การเตรียมแท่งซีเมนต์เพสต์

อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการจัดเตรียมแท่งตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ประกอบด้วย

- 1) ท่อ PVC เส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 54 mm ยาว 200 mm
- 2) จุกยางสำหรับท่อ PVC เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 54 mm
- 3) เครื่องตัดตัวอย่าง (รุ่น 51 ZE-LG3-570A Tile Cutter) มีความเร็ว 2,950 รอบต่อนาที สามารถตัดตัวอย่างที่มีความหนาสูงสุด 55 mm

การจัดเตรียมแท่งซีเมนต์เพสต์เพื่อใช้ในการทดสอบหลังจากที่ได้ทำการผสมซีเมนต์ตามส่วนผสมและขั้นตอนการเตรียมซีเมนต์เหลวแล้ว โดยทำการหล่อซีเมนต์เหลวเข้าแบบหล่อที่จัดเตรียมไว้ ปล่อยให้ซีเมนต์แข็งตัวด้วยการบ่มตัวอย่างซีเมนต์ในน้ำสะอาดภายใต้อุณหภูมิห้อง

3.2.4 การเตรียมซีเมนต์เพสต์เพื่อใช้ทดสอบความชื้นผ่าน

อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการจัดเตรียมตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ประกอบด้วย

- 1) ท่อ PVC เส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 100 mm ยาว 150 mm
- 2) จุกยางสำหรับท่อ PVC เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 100 mm
- 3) เสาสกรูเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 90 mm ยาว 250 mm
- 4) แผ่นอะคริลิกหนา 10 mm กว้าง 165 mm ยาว 165 mm

การจัดเตรียมตัวอย่างซีเมนต์เพสต์เพื่อใช้ในการทดสอบความชื้นผ่านในเนื้อซีเมนต์ หลังจากที่ได้ทำการผสมซีเมนต์ตามส่วนผสมและขั้นตอนการเตรียมซีเมนต์เหลวแล้ว ได้นำส่วนผสมซีเมนต์เหลวหล่อลงในแบบท่อ PVC ที่มีความยาวของตัวอย่างซีเมนต์ภายในแบบหล่อเท่ากับ 100 mm แล้วทำการประกบแบบหล่อซีเมนต์เข้ากับแผ่นอะคริลิกแล้วยึดด้วยเสาสกรูเหล็กให้แน่น (รูปที่ 3.6) ปล่อยให้ซีเมนต์แข็งตัวด้วยการบ่มตัวอย่างซีเมนต์ในน้ำสะอาดภายใต้อุณหภูมิห้อง

3.3 ตัวอย่างหินทรายภูกระดึง

ตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบนี้คือหินทรายชุดภูกระดึง ซึ่งเป็นหินที่มีความชื้นผ่านต่ำ มีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง และสามารถจัดเตรียมรอยแตกได้ง่าย การจัดเตรียมหินทรายชุดภูกระดึงเพื่อใช้ในการทดสอบค่ากำลังยึดติดสูงสุดที่ผิวรอยต่อระหว่างซีเมนต์กับรอยแตกของหินมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 mm ยาว 100 mm ประมาณ 30 ตัวอย่าง

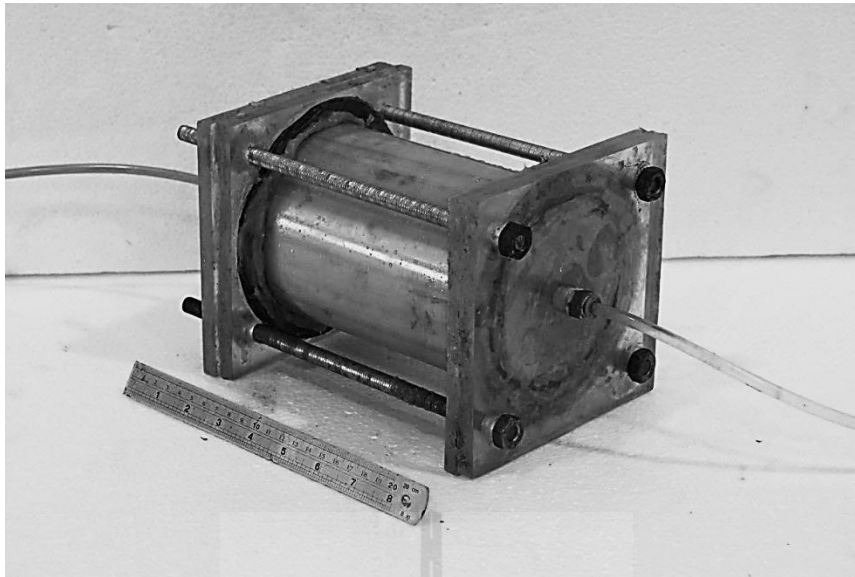
รอยแตกที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการสามารถทำได้ด้วยการกดตัวอย่างหินในแนวเส้น (Line load) จนถึงจุดวิบัติ ตัวอย่างหินรูปทรงระบอบจะขาดออกจากกันภายใต้แรงดึงที่ตั้งฉากกับทิศทางของแรงกดในแนวเส้น การขาดออกจากกันนี้ทำให้เกิดรอยแตกภายใต้แรงดึง (Tension-induced fracture) รูปที่ 3.7 แสดงตัวอย่างหินบางชิ้นที่ถูกจัดเตรียมให้มีรอยแตก

3.4 ตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่หล่อติดกับหินทรายชุดภูกระดึง

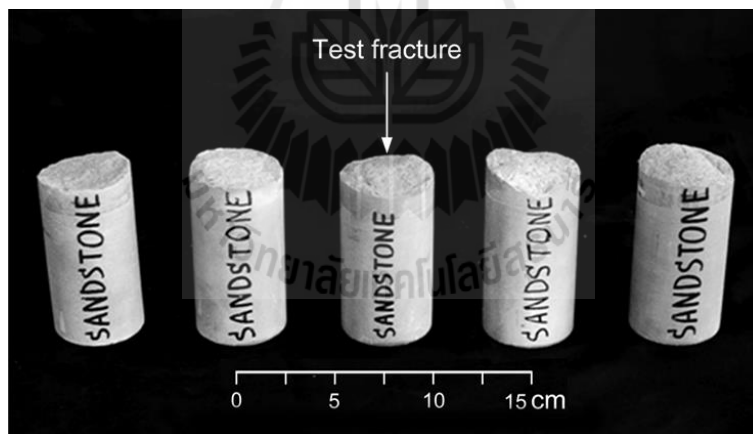
อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการจัดเตรียมตัวอย่างประกอบด้วย

- 1) ท่อ PVC เส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 54 mm ยาว 200 mm
- 2) เช็มซ์รัดท่อ PVC เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 54 mm
- 3) เครื่องตัดตัวอย่าง (รุ่น 51 ZE-LG3-570A Tile Cutter) มีความเร็ว 2,950 รอบต่อนาที สามารถตัดตัวอย่างที่มีความหนาสูงสุด 55 mm

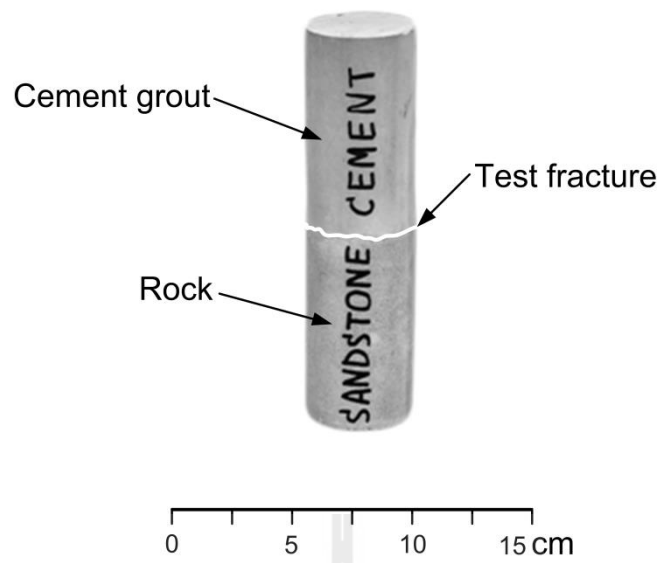
การจัดเตรียมตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่หล่อติดกับหินทรายชุดภูกระดึงเพื่อใช้ทดสอบแรงดึงออกแบบสี่จุด ดำเนินการโดยผสมซีเมนต์ตามส่วนผสมและขั้นตอนการเตรียมซีเมนต์เหลวแล้วเทส่วนผสมซีเมนต์เหลวลงในแบบท่อ PVC ที่สวมอยู่บนตัวอย่างหินทรายชุดภูกระดึงที่มีรอยแตกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 mm ยาว 100 mm แล้วรัดท่อ PVC บริเวณที่สวมอยู่กับหินให้แน่นด้วยเช็มซ์รัดท่อ ปล่อยให้ซีเมนต์แข็งตัวด้วยการบ่มในน้ำสะอาดภายใต้อุณหภูมิห้อง ทำเช่นนี้จนครบ 30 ตัวอย่าง รูปที่ 3.8 แสดงตัวอย่างแบบหล่อซีเมนต์ติดกับหินทรายที่ถูกจัดเตรียมให้มีรอยแตก



รูปที่ 3.6 แผ่นประกบที่ปลายทั้งสองด้านของท่อ PVC ทรงกระบอก ออกแบบเพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ทดสอบความซึมผ่าน



รูปที่ 3.7 แท่งตัวอย่างหินบางชิ้นที่ถูกจัดเตรียมให้มีรอยแตก



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างแบบหล่อซีเมนต์ติดกับหินทรายที่ถูกจัดเตรียมให้มีรอยแตก



บทที่ 4

การทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์เหลว

คุณสมบัติด้านการไหลเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของซีเมนต์เหลว เพื่อให้วัสดุเกราทสามารถแทรกไปตามรอยแตกของโครงสร้างได้ดี การทดสอบในบทนี้เป็นการทดสอบคุณสมบัติด้านการไหลของซีเมนต์เหลวจาก 5 ผู้ผลิต เพื่อหาค่าความหนืดและความหนาแน่น และนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกัน

4.1 วิธีการทดสอบ

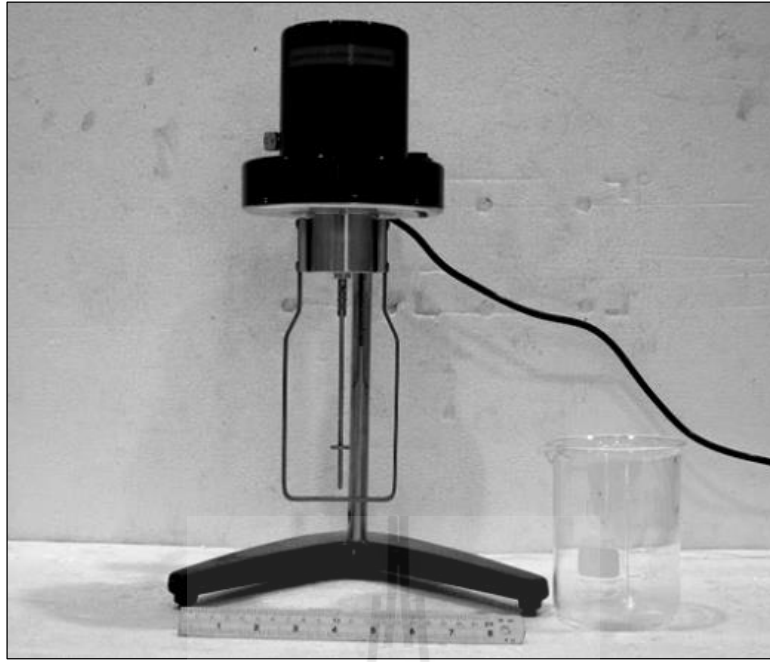
วัสดุเกราทที่ใช้ทดสอบทั้งหมดจะมีอัตราส่วนระหว่างน้ำกับซีเมนต์เท่ากับ 0.6 และดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM (C938) โดยใช้เครื่อง Hobart mixer ในการผสมส่วนประกอบให้เข้ากัน โดยมีขั้นตอนดังนี้

- 1) นำซีเมนต์และน้ำผสมกันในบีกเกอร์ปริมาตร 500 ml
- 2) ชั่งน้ำหนักซีเมนต์เหลวพร้อมบีกเกอร์และบันทึกค่า
- 3) คำนวณความหนาแน่นของซีเมนต์เหลว (ความหนาแน่น = น้ำหนักซีเมนต์เหลว/ปริมาตรของซีเมนต์เหลว)
- 4) นำซีเมนต์เหลวที่บรรจุในบีกเกอร์ติดตั้งเข้ากับเครื่องวัดความหนืด (Viscometer)
- 5) วัดความหนืดของซีเมนต์เหลวด้วยเครื่องวัดความหนืดและบันทึกค่า
- 6) ทำเช่นนี้จนครบทั้ง 5 ผู้ผลิต

การทดสอบหาความหนาแน่นนี้ได้ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM (D854) และการทดสอบเพื่อหาความหนืดดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM (D2196) วิธีการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.3

4.2 ผลการทดสอบ

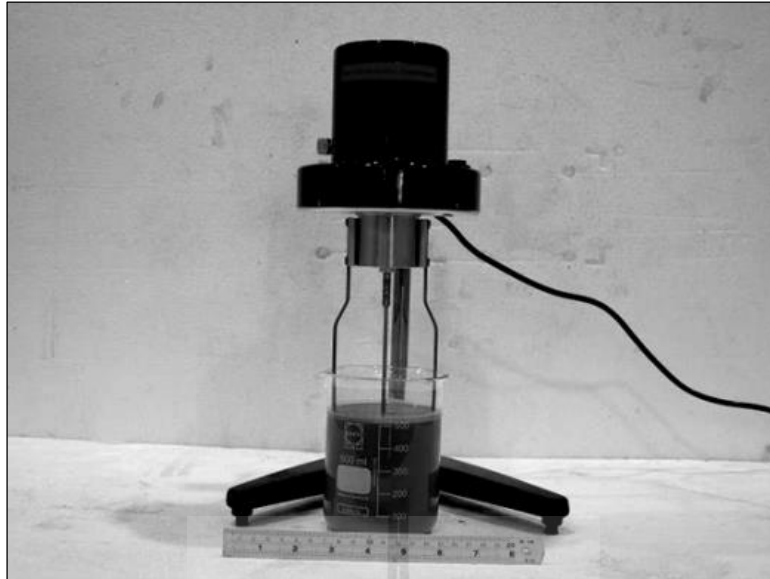
ผลจากการทดสอบประกอบด้วย ความหนาแน่น ความถ่วงจำเพาะ และความหนืดพลวัต (Dynamic viscosity) จากการทดสอบพบว่าปูนซีเมนต์ CEMEX มีค่าความหนืดพลวัตต่ำที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 เครื่องวัดความหนืดและบีกเกอร์ขนาด 500 ml



รูปที่ 4.2 ซีเมนต์เหลวที่ถูกบรรจุไว้ในบีกเกอร์ปริมาตร 500 ml



รูปที่ 4.3 การหาความหนืดของซีเมนต์เหลวด้วยเครื่องวัดความหนืด

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์เหลวในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.6

Supplier	Temperature (Celsius)	Slurry Density (g/cc)	Specific Gravity	Dynamic Viscosity (Pa·s)
ACC	31.5	1.68	1.69	0.805
CEMEX	31.2	1.68	1.69	0.693
SCG	30.8	1.71	1.71	0.843
SCCC	31.6	1.72	1.72	0.825
TPI	31.2	1.73	1.73	0.725

บทที่ 5

การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติของซีเมนต์เกรดที่

การทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์เกรดที่ประกอบด้วย การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ ค่ากำลังยึดติด และค่าความซึมผ่านของซีเมนต์จาก 5 บริษัทผู้ผลิต ส่วนผสมและระยะเวลาการบ่มปูนซีเมนต์ได้ดำเนินการตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตและตามมาตรฐาน ASTM ประกอบด้วย การทดสอบดังต่อไปนี้

5.1 การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์

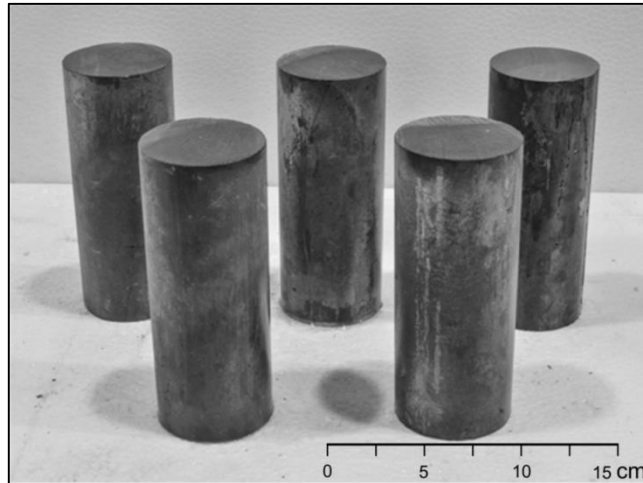
การทดสอบเชิงกลศาสตร์เป็นการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติของซีเมนต์เกรดที่ประกอบด้วย การทดสอบหาค่ากำลังกดในแกนเดียว ค่ากำลังกดในสามแกน และค่ากำลังดึงแบบบราซิล โดยทดสอบตามระยะเวลาการบ่มซีเมนต์ที่ 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ

5.1.1 การทดสอบหาค่ากำลังกดในแกนเดียว

เป็นการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังกดในแกนเดียวของตัวอย่างซีเมนต์ ซึ่งดำเนินการบนตัวอย่างซีเมนต์ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 mm ยาว 135 mm ตามมาตรฐาน ASTM (C39) และ ISRM (Brown, 1981) การหล่อแท่งตัวอย่างกระทำในท่อ PVC ดังรูปที่ 5.1 ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงในตารางที่ 5.1 และสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังกดในแกนเดียวในฟังก์ชันของระยะเวลาการบ่มซีเมนต์ดังแสดงในรูปที่ 5.2 ถึงรูปที่ 5.7 จากผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังกดในแกนเดียวภายหลังการบ่มซีเมนต์ 28 วัน มีค่าเฉลี่ยประมาณ 25.77 MPa และปูนซีเมนต์ที่มีค่ากำลังกดในแกนเดียวสูงสุดคือปูนซีเมนต์ของ SCG

5.1.2 การทดสอบหาค่ากำลังดึงแบบบราซิล

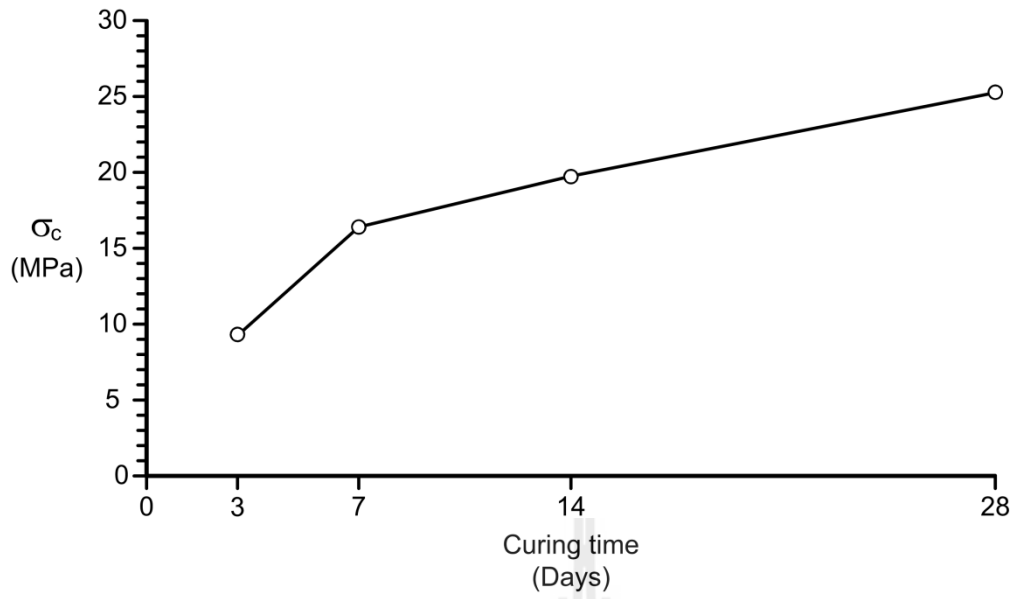
การทดสอบหาค่ากำลังดึงด้วยวิธีนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังดึงทางอ้อม มีการทดสอบตัวอย่างจำนวน 100 ก้อน (ผู้ผลิตละ 20 ก้อน) ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM (D3967) และมาตรฐาน ISRM (Brown, 1981) แท่งตัวอย่างมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 mm และอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางมีค่าเท่ากับ 0.5 รูปที่ 5.8 แสดงตัวอย่างบางส่วนที่ใช้ในการทดสอบนี้ ผลจากการทดสอบสรุปไว้ในตารางที่ 5.2 และสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดึงแบบบราซิลในฟังก์ชันของระยะเวลาบ่มซีเมนต์ดังรูปที่ 5.9 ถึงรูปที่ 5.14



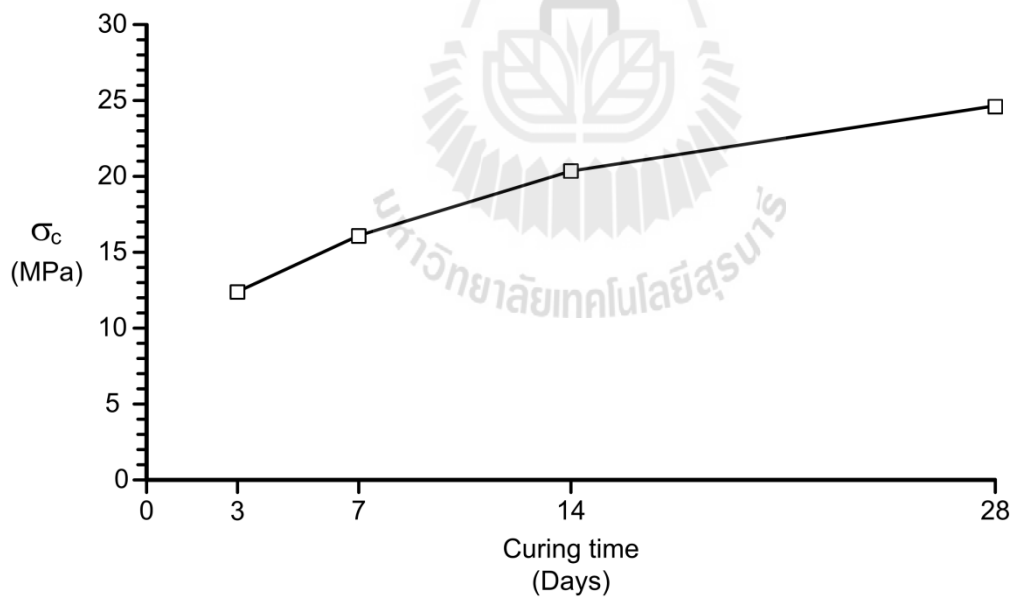
รูปที่ 5.1 ตัวอย่างซีเมนต์สำหรับใช้ทดสอบหาค่ากำลังกดในแกนเดียว

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบค่ากำลังกดในแกนเดียวของปูนซีเมนต์จาก 5 บริษัทผู้ผลิต

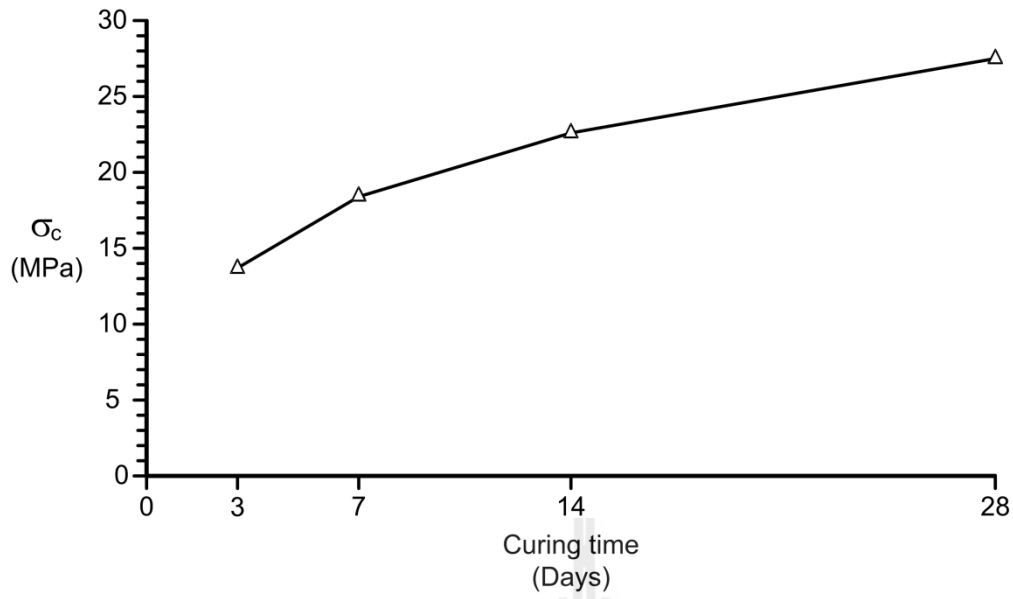
Suppliers	Uniaxial Compressive Strength, σ_c (MPa)			
	3 days	7 days	14 days	28 days
ACC	09.32 ± 0.63	16.40 ± 1.59	19.72 ± 1.87	25.28 ± 2.30
CEMEX	12.38 ± 0.68	16.07 ± 1.97	20.35 ± 2.09	24.59 ± 2.60
SCG	13.82 ± 0.97	18.58 ± 1.36	22.75 ± 1.81	27.64 ± 2.67
SCCC	14.74 ± 0.95	19.05 ± 1.78	23.11 ± 2.36	25.72 ± 2.76
TPI	09.80 ± 0.78	15.92 ± 1.89	21.86 ± 2.45	25.62 ± 2.68



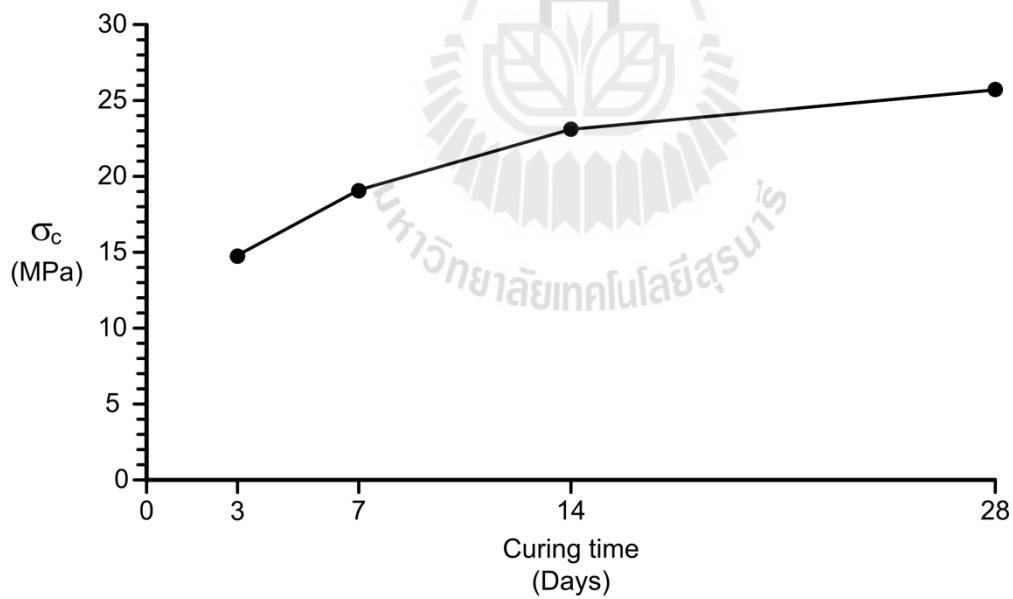
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังกดในแกนเดียว (σ_c) กับระยะเวลาการบ่มซีเมนต์ของปูนซีเมนต์จาก ACC



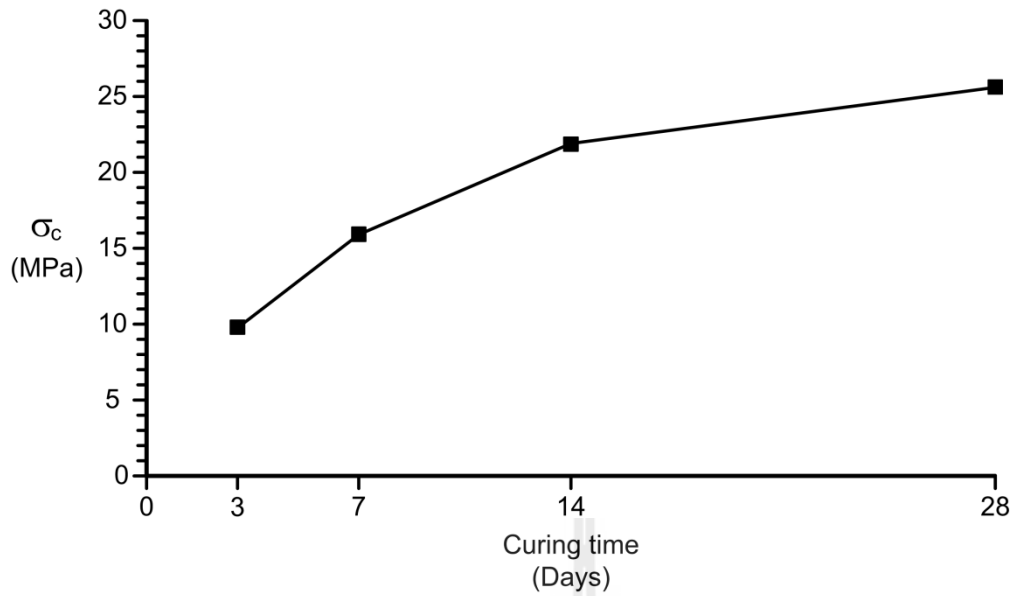
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังกดในแกนเดียว (σ_c) กับระยะเวลาการบ่มซีเมนต์ของปูนซีเมนต์จาก CEMEX



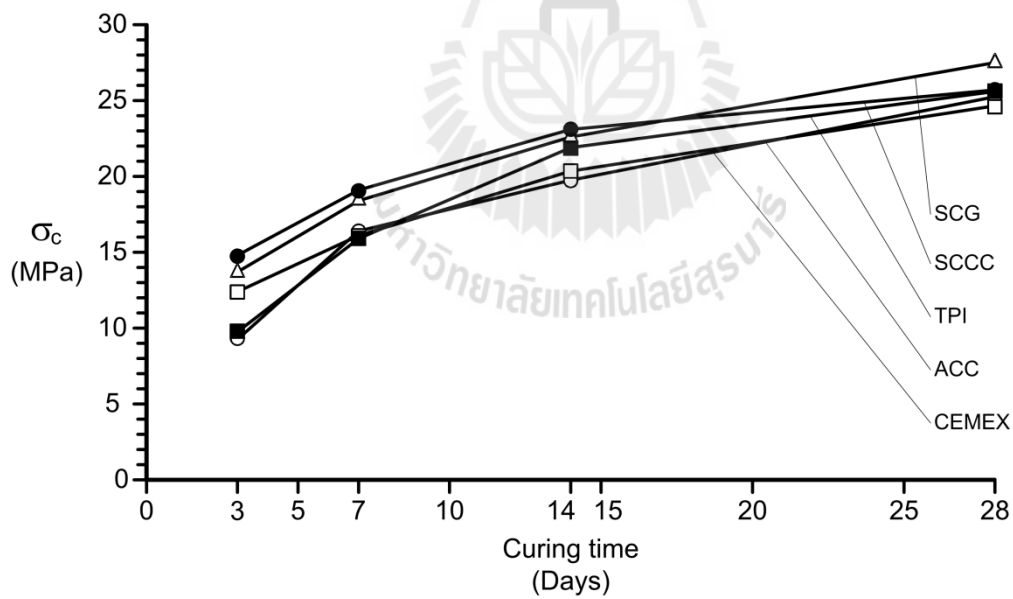
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังกดในแกนเดียว (σ_c) กับระยะเวลาการบ่มซีเมนต์ของปูนซีเมนต์จาก SCG



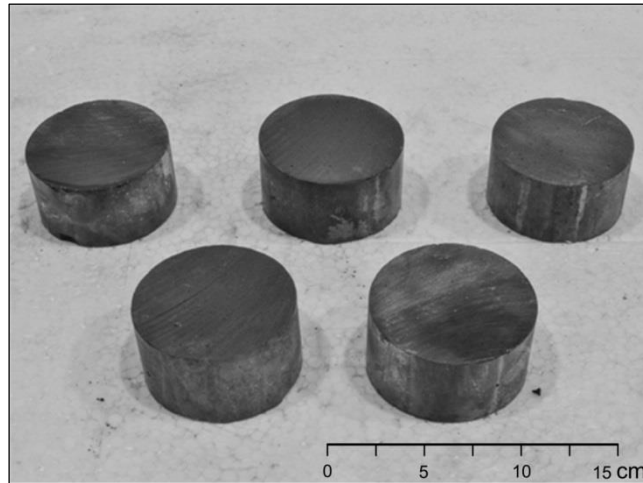
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังกดในแกนเดียว (σ_c) กับระยะเวลาการบ่มซีเมนต์ของปูนซีเมนต์จาก SCCC



รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังกดในแกนเดียว (σ_c) กับระยะเวลาการบ่มซีเมนต์ของปูนซีเมนต์จาก TPI



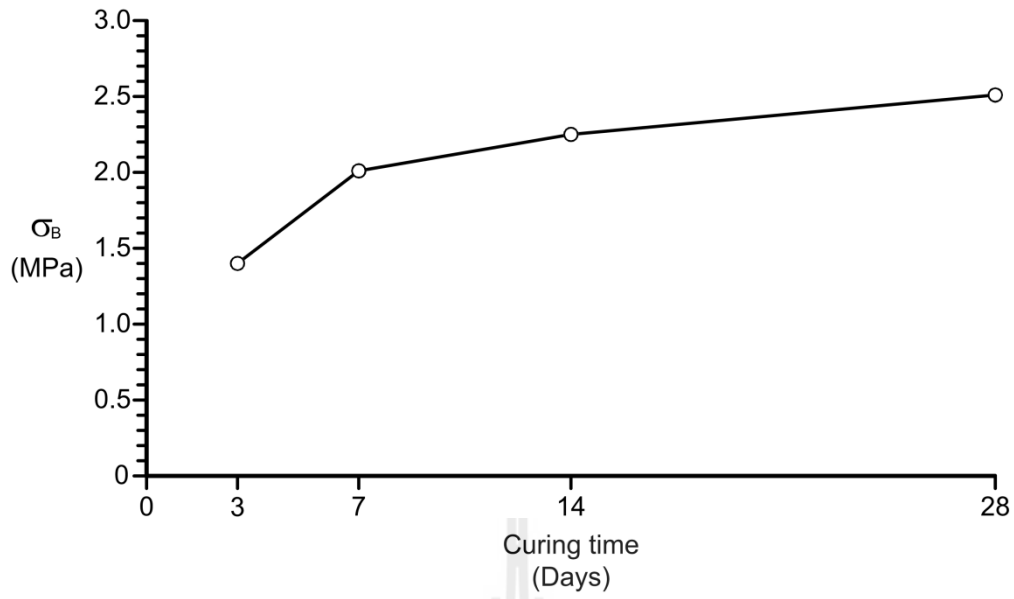
รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังกดในแกนเดียว (σ_c) กับระยะเวลาการบ่มซีเมนต์ของปูนซีเมนต์จาก 5 บริษัทผู้ผลิต



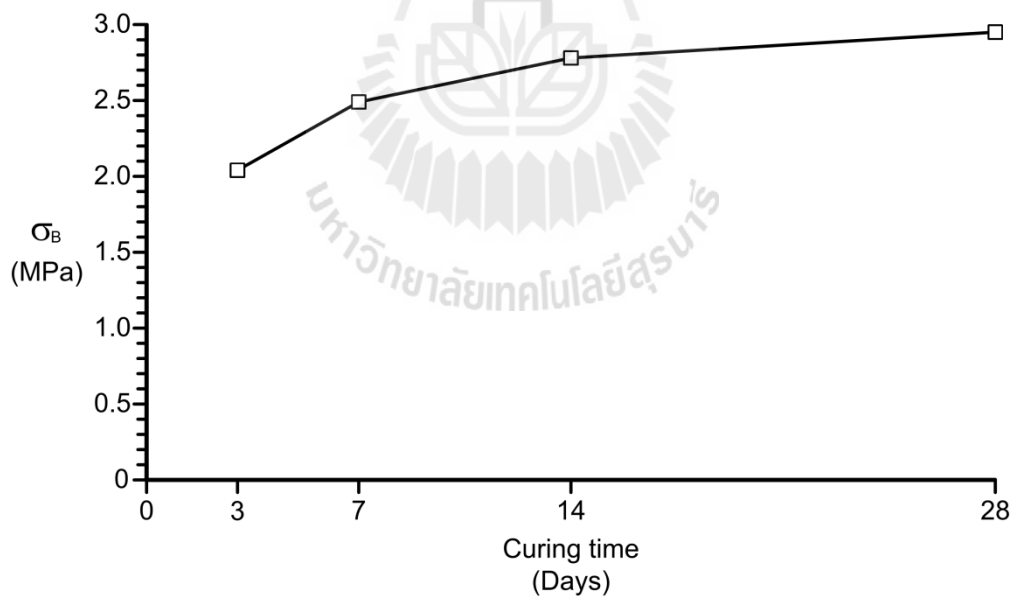
รูปที่ 5.8 ตัวอย่างบางส่วนของซีเมนต์เกรดรท์ ที่ใช้ในการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังดึงแบบบราซิล

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบค่ากำลังดึงแบบบราซิลของปูนซีเมนต์จาก 5 บริษัทผู้ผลิต

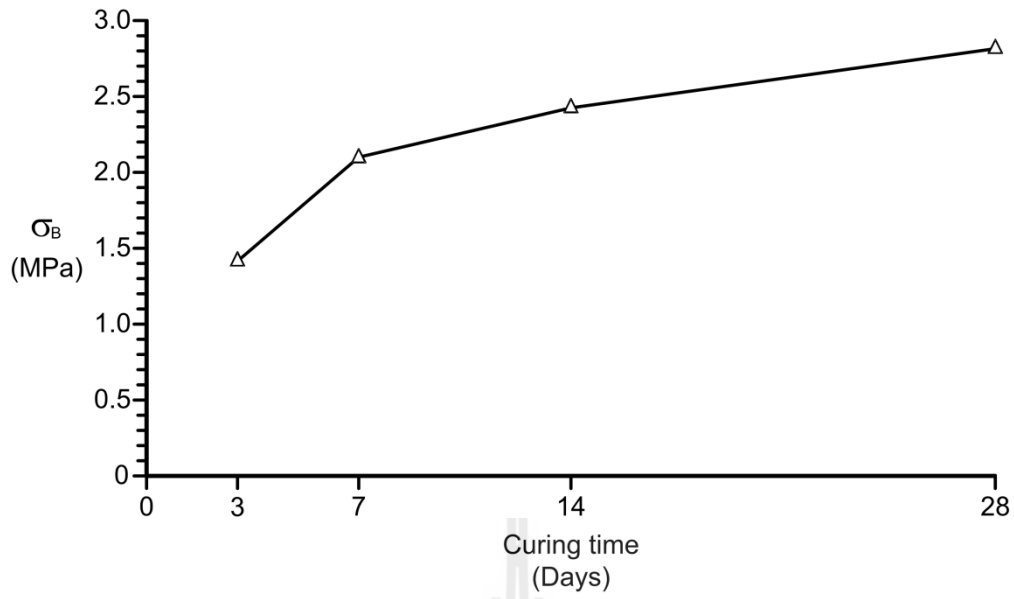
Supplier	Brazilian tensile strength, σ_B (MPa)			
	3 days	7 days	14 days	28 days
ACC	1.40 ± 0.08	2.01 ± 0.14	2.25 ± 0.21	2.51 ± 0.32
CEMEX	2.04 ± 0.08	2.49 ± 0.16	2.78 ± 0.19	2.95 ± 0.24
SCG	1.43 ± 0.08	2.11 ± 0.15	2.44 ± 0.18	2.83 ± 0.30
SCCC	2.30 ± 0.07	2.52 ± 0.15	2.69 ± 0.19	2.87 ± 0.29
TPI	1.78 ± 0.08	2.29 ± 0.14	2.57 ± 0.19	2.80 ± 0.23



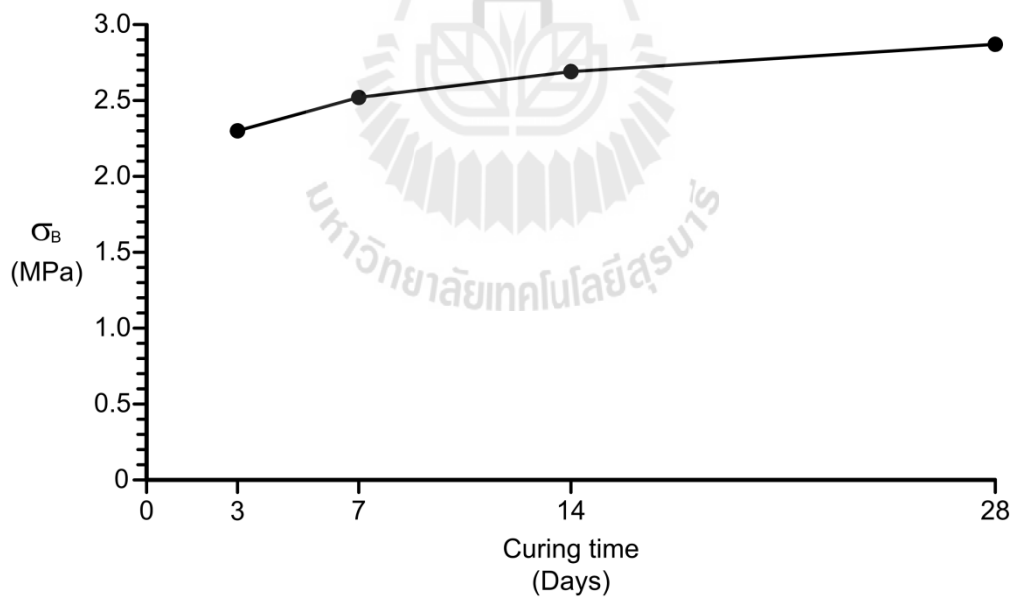
รูปที่ 5.9 ผลการทดสอบค่ากำลังดึงแบบบราซิล (σ_B) ของซีเมนต์จาก ACC ในฟังก์ชันของระยะเวลาการบ่มซีเมนต์



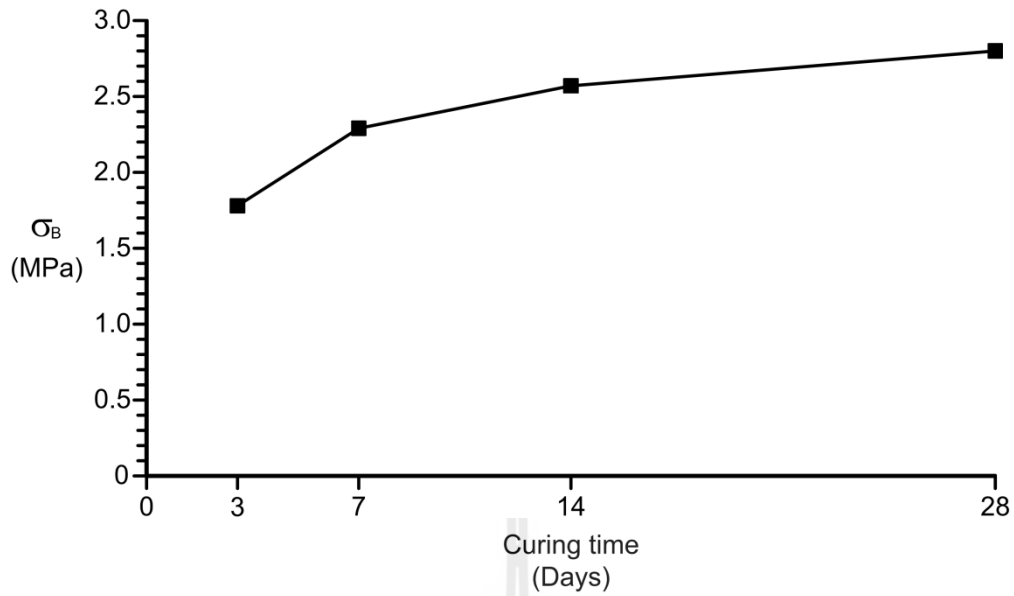
รูปที่ 5.10 ผลการทดสอบค่ากำลังดึงแบบบราซิล (σ_B) ของซีเมนต์จาก CEMEX ในฟังก์ชันของระยะเวลาการบ่มซีเมนต์



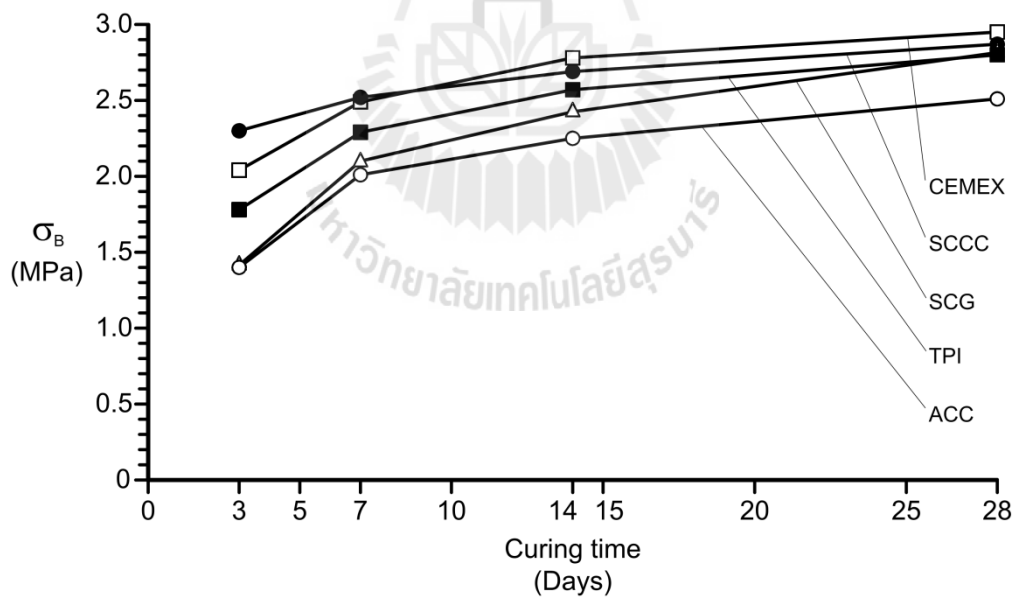
รูปที่ 5.11 ผลการทดสอบค่ากำลังดึงแบบบราซึล (σ_B) ของซีเมนต์จาก SCG ในฟังก์ชันของระยะเวลาการบ่มซีเมนต์



รูปที่ 5.12 ผลการทดสอบค่ากำลังดึงแบบบราซึล (σ_B) ของซีเมนต์จาก SCCC ในฟังก์ชันของระยะเวลาการบ่มซีเมนต์



รูปที่ 5.13 ผลการทดสอบค่ากำลังดึงแบบบราซึล (σ_B) ของซีเมนต์จาก TPI ในฟังก์ชันของระยะเวลาการบ่มซีเมนต์



รูปที่ 5.14 ผลการทดสอบค่ากำลังดึงแบบบราซึล (σ_B) ของซีเมนต์จาก 5 บริษัทผู้ผลิต ในฟังก์ชันของระยะเวลาการบ่มซีเมนต์

5.1.3 การทดสอบหาค่ากำลังกดในสามแกน

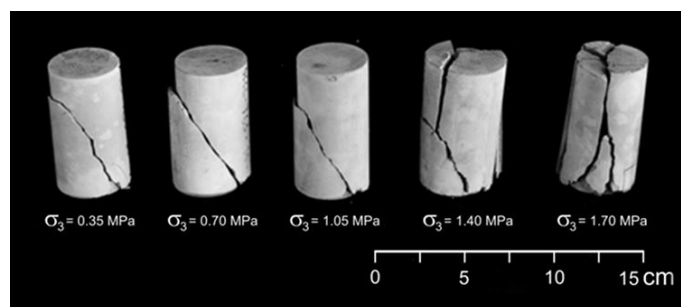
จุดประสงค์ของการทดสอบนี้เพื่อหาคุณสมบัติของซีเมนต์ ประกอบด้วย ค่ากำลังกดในสามแกน ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น ค่าอัตราส่วนปัวซอง ค่าความเค้นยึดติด และค่ามุมเสียดทานของตัวอย่างซีเมนต์ภายใต้สภาวะความเค้นล้อมรอบภายหลังจากบ่มซีเมนต์แล้ว 28 วัน การเตรียมตัวอย่างดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM (D7012-04) และ ISRM (Brown, 1981) (รูปที่ 5.15) ในการทดสอบกำหนดให้ใช้ค่าความเค้นรอง (σ_3) ที่ 0.35, 0.70, 1.05, 1.40 และ 1.75 MPa ตามลำดับ ค่าความเค้นหลักจะถูกเพิ่มขึ้นด้วยอัตราคงที่ที่ 0.1 ถึง 0.5 MPa/s จนกว่าจะเกิดการวิบัติ รูปที่ 5.16 แสดงตัวอย่างซีเมนต์ภายหลังจากการทดสอบ ผลการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 5.3 และรูปที่ 5.17 ถึงรูปที่ 5.21 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนและค่าความเค้นตั้งฉากในรูปของวงกลมมอร์ ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (5.1)$$

- เมื่อ
- τ คือ ความเค้นเฉือน
 - C คือ ค่าความเค้นยึดติด
 - σ_n คือ ความเค้นตั้งฉาก
 - ϕ คือ มุมเสียดทานของตัวอย่างซีเมนต์



รูปที่ 5.15 ตัวอย่างบางส่วนของซีเมนต์เกรดที่ใช้ในการทดสอบหาค่ากำลังกดในสามแกน



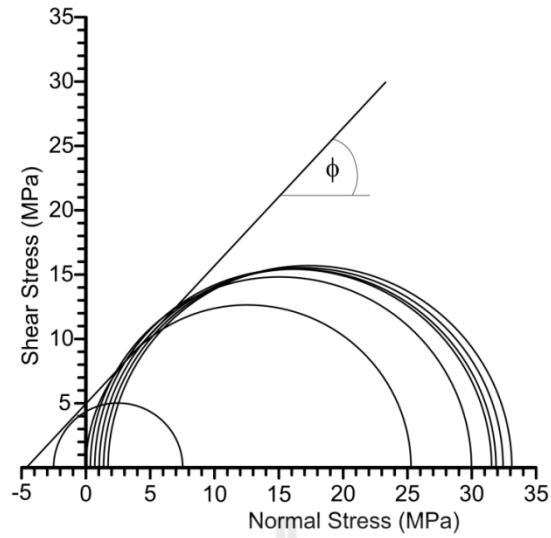
รูปที่ 5.16 ตัวอย่างบางส่วนหลังการทดสอบค่ากำลังกดในสามแกน ที่ความดันปิดล้อม (σ_3) ต่างกันตั้งแต่ 0.35 MPa ถึง 1.70 MPa

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบค่ากำลังกดในสามแกน

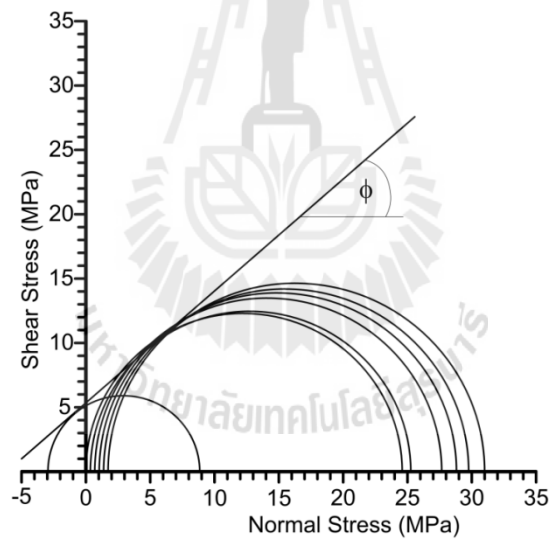
Supplier	Specimen No.	Diameter (mm)	Length (mm)	Density (g/cc)	Confining Pressure, σ_3 (MPa)	Axial Stress, σ_1 (MPa)	
ACC	TCS-28-1	54.10	105.00	1.83	0.35	29.98	
	TCS-28-2	53.80	107.00	1.83	0.70	31.54	
	TCS-28-3	53.70	106.56	1.81	1.05	31.89	
	TCS-28-4	53.34	104.12	1.82	1.40	32.44	
	TCS-28-5	53.54	104.48	1.83	1.70	33.11	
	Cohesion, c (MPa)					4.96	
	Friction Angles, ϕ (degrees)					47	
CEMEX	TCS-28-1	53.64	109.70	1.80	0.35	25.26	
	TCS-28-2	53.62	108.98	1.81	0.70	27.66	
	TCS-28-3	53.60	108.00	1.81	1.05	28.81	
	TCS-28-4	53.84	109.06	1.80	1.40	29.76	
	TCS-28-5	53.74	109.12	1.80	1.70	31.00	
	Cohesion, c (MPa)					5.38	
	Friction Angles, ϕ (degrees)					41	
SCG	TCS-28-1	54.32	110.00	1.82	0.35	26.62	
	TCS-28-2	54.00	109.62	1.81	0.70	26.97	
	TCS-28-3	54.00	108.00	1.82	1.05	27.49	
	TCS-28-4	53.50	110.00	1.82	1.40	28.18	
	TCS-28-5	53.14	109.90	1.82	1.70	28.91	
	Cohesion, c (MPa)					5.42	
	Friction Angles, ϕ (degrees)					40	

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบค่ากำลังกดในสามแกน (ต่อ)

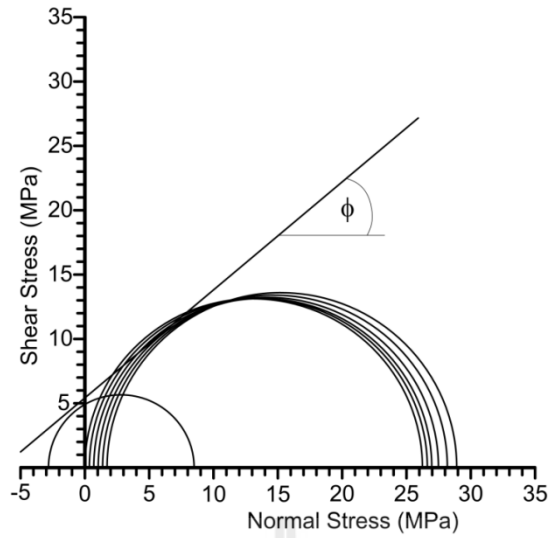
Supplier	Specimen No.	Diameter (mm)	Length (mm)	Density (g/cc)	Confining Pressure, σ_3 (MPa)	Axial Stress, σ_1 (MPa)	
SCCC	TCS-28-2	54.00	111.08	1.81	0.35	28.38	
	TCS-28-2	54.00	111.00	1.81	0.70	29.47	
	TCS-28-3	53.90	109.38	1.82	1.05	31.77	
	TCS-28-4	54.14	111.00	1.81	1.40	32.58	
	TCS-28-5	54.00	110.40	1.81	1.70	33.84	
	Cohesion, c (MPa)					5.34	
	Friction Angles, ϕ (degrees)					44	
TPI	TCS-28-1	54.00	108.00	1.82	0.35	25.87	
	TCS-28-2	53.00	108.30	1.82	0.70	26.06	
	TCS-28-3	53.00	108.00	1.83	1.05	26.2	
	TCS-28-4	53.84	108.72	1.82	1.40	27.45	
	TCS-28-5	53.00	108.64	1.81	1.70	29.46	
	Cohesion, c (MPa)					3.72	
	Friction Angles, ϕ (degrees)					40	



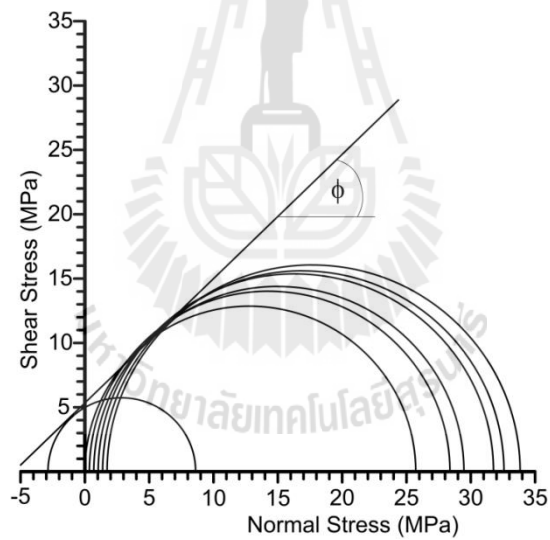
รูปที่ 5.17 ผลการทดสอบค่ากำลังกดในสามแกนของปูนซีเมนต์จาก ACC ในรูปของวงกลมมอร์



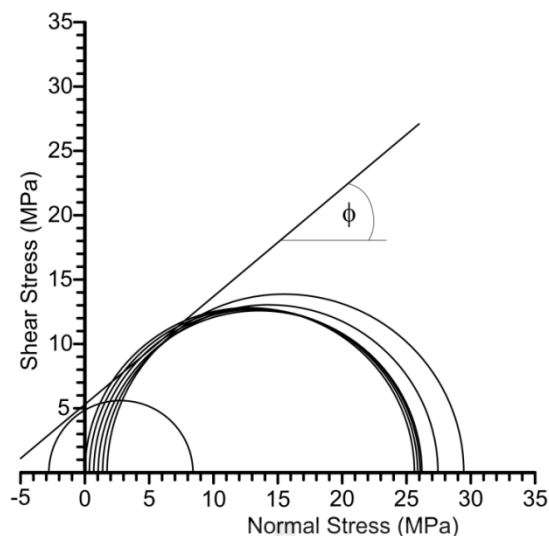
รูปที่ 5.18 ผลการทดสอบค่ากำลังกดในสามแกนของปูนซีเมนต์จาก CEMEX ในรูปของวงกลมมอร์



รูปที่ 5.19 ผลการทดสอบค่ากำลังกดในสามแกนของปูนซีเมนต์จาก SCG ในรูปของวงกลมมอร์



รูปที่ 5.20 ผลการทดสอบค่ากำลังกดในสามแกนของปูนซีเมนต์จาก SCCC ในรูปของวงกลมมอร์



รูปที่ 5.21 ผลการทดสอบค่ากำลังกดในสามแกนของปูนซีเมนต์จาก TPI ในรูปของวงกลมมอร์

ค่าความเค้นยึดติดและมุมเสียดทานเฉลี่ยหลังจากบ่มซีเมนต์ 28 วัน คือ 4.96 ± 0.72 MPa และ 42° ตามลำดับ ซีเมนต์ที่มีค่าความเค้นยึดติดสูงสุดคือซีเมนต์ของ SCG มีค่าเท่ากับ 5.42 MPa ส่วนซีเมนต์ที่มีค่ามุมเสียดทานมากที่สุดคือซีเมนต์ของ ACC มีค่าเท่ากับ 47°

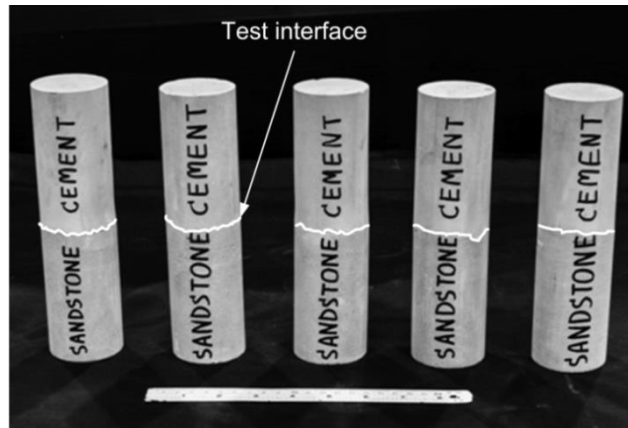
5.2 การทดสอบค่ากำลังยึดติด

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังยึดติดของปูนซีเมนต์ 2 วิธีการคือ การทดสอบแรงดัดงอแบบสี่จุด และการทดสอบ Push out ซึ่งทำการทดสอบหลังจากบ่มซีเมนต์แล้ว 28 วัน ผลที่ได้จากทั้งสองวิธีจะถูกนำมาเปรียบเทียบในขั้นตอนต่อไป

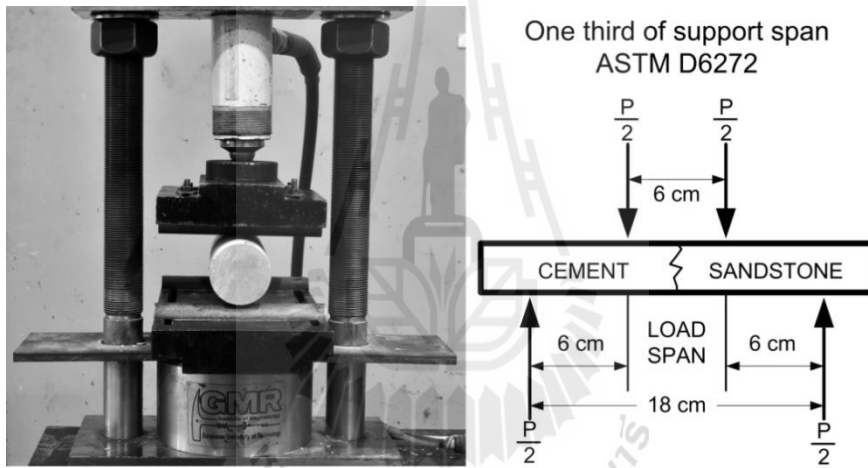
5.2.1 การทดสอบแรงดัดงอแบบสี่จุด

การทดสอบแรงดัดงอแบบสี่จุด (Four point bending test) มีจุดประสงค์เพื่อหาค่ากำลังยึดติดระหว่างซีเมนต์กับรอยแตกของหินที่อายุการบ่มตัวของซีเมนต์ 28 วัน (ในน้ำสะอาด) ชุดการทดสอบแรงดัดงอแบบสี่จุดได้ดำเนินการบนตัวอย่างหินที่หล่อติดกับซีเมนต์รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 mm ความยาวตัวอย่างหิน 100 mm และความยาวของซีเมนต์ที่หล่อติด 100 mm (รูปที่ 5.22) โดยดำเนินการทดสอบแรงดัดงอแบบสี่จุดตามมาตรฐาน ASTM D6272-10 ด้วยอุปกรณ์ทดสอบแรงดัดงอ ดังรูปที่ 5.23 ค่ากำลังยึดติดสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\sigma = 16PL/3\pi D \quad (5.2)$$



รูปที่ 5.22 ตัวอย่างบางส่วนจากการทดสอบแรงดัดงอแบบสี่จุด ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 mm ยาว 200 mm



รูปที่ 5.23 ชุดอุปกรณ์ทดสอบแรงดัดงอแบบสี่จุด

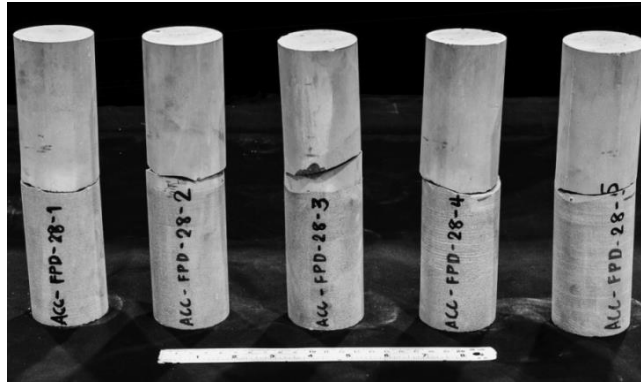
เมื่อ

P คือ แรงกดในแนวแกน

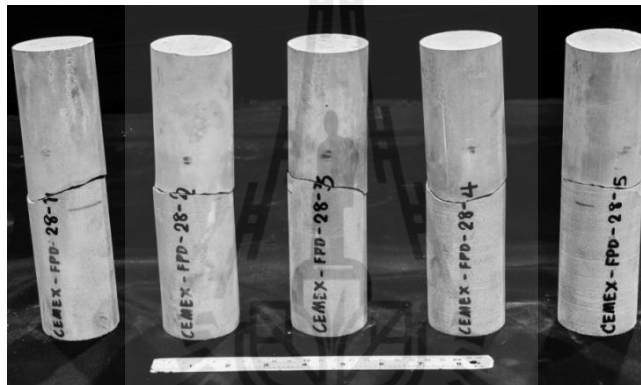
L คือ ระยะห่างระหว่างจุดรองรับที่ปลายทั้งสองด้าน (Support span)

D คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่าง

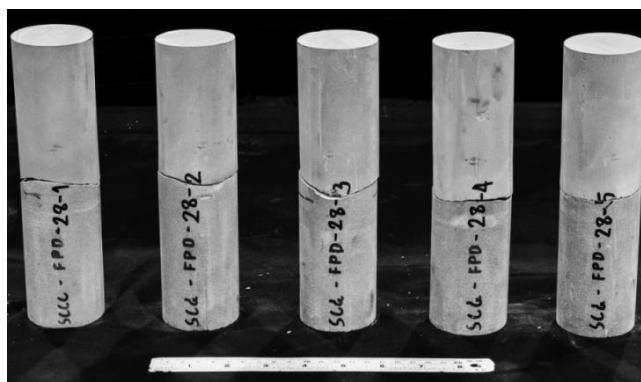
จากการทดสอบพบว่าค่ากำลังยึดติดเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 1.90 ± 0.42 MPa ซึ่งต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของปูนซีเมนต์โดยทั่วไปเล็กน้อย ปูนซีเมนต์ที่มีค่ากำลังยึดติดสูงสุดได้แก่ปูนซีเมนต์จาก SCCC มีค่ากำลังยึดติดเท่ากับ 2.53 ± 0.58 MPa ผลจากการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 5.24 ถึงรูปที่ 5.28



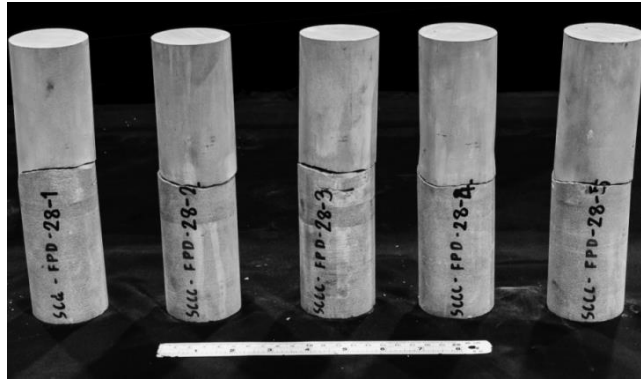
รูปที่ 5.24 ผลการทดสอบแรงดัดของแบบสี่จุดของปูนซีเมนต์จาก ACC



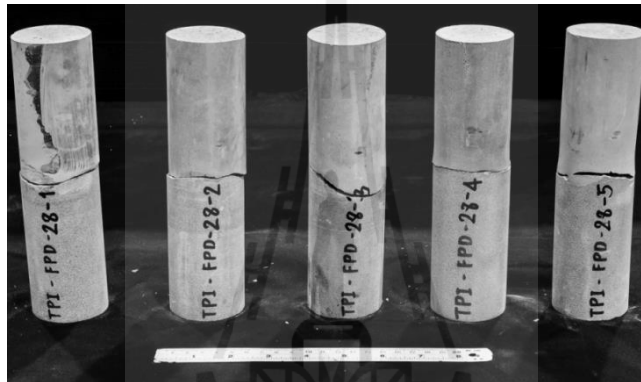
รูปที่ 5.25 ผลการทดสอบแรงดัดของแบบสี่จุดของปูนซีเมนต์จาก CEMEX



รูปที่ 5.26 ผลการทดสอบแรงดัดของแบบสี่จุดของปูนซีเมนต์จาก SCG



รูปที่ 5.27 ผลการทดสอบแรงดัดงอแบบสี่จุดของปูนซีเมนต์จาก SCCC



รูปที่ 5.28 ผลการทดสอบแรงดัดงอแบบสี่จุดของปูนซีเมนต์จาก TPI

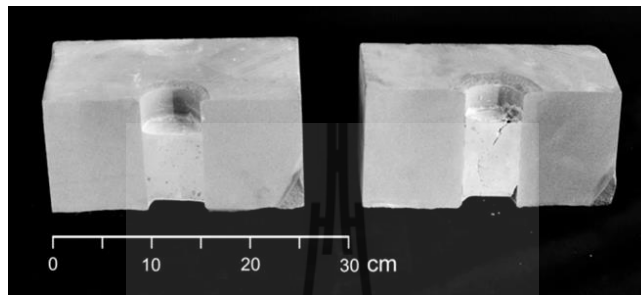
5.2.2 การทดสอบ Push out

การทดสอบ Push out เป็นการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังยึดติดของปูนซีเมนต์ในหลุมเจาะที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 35 mm ยาว 70 mm โดยการหล่อปูนซีเมนต์ลงไปหลุมเจาะซึ่งเป็นเนื้อหิน (หินทรายชุดภูกระดึง) จากนั้นกดด้วยแรงกดในแนวแกนด้วยอัตราคงที่ที่ 0.1 ถึง 0.5 MPa/s จนกว่าจะวิบัติ ค่ากำลังยึดติดสามารถคำนวณได้จากสมการ

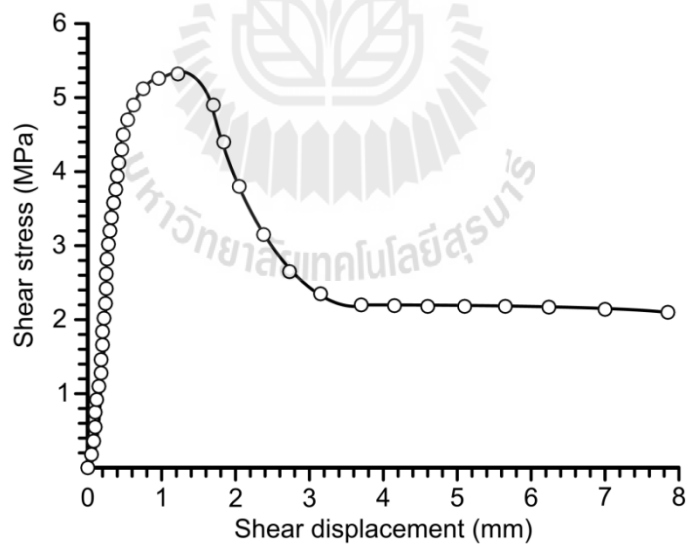
$$\sigma = P/\pi DL \quad (5.3)$$

- เมื่อ
- P คือ แรงกดในแนวแกน
 - D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของหลุมเจาะ
 - L คือ ความยาวของซีเมนต์

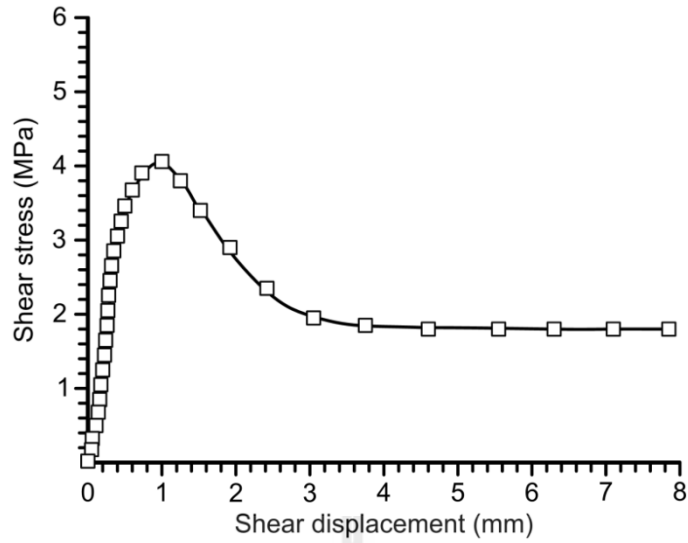
จากการทดสอบพบว่าค่าเฉลี่ยของกำลังยึดติดคือ 4.90 MPa ซึ่งสูงกว่าค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบแรงดึงดงแบบสี่จุด ค่ากำลังยึดติดสูงสุดได้จากปูนซีเมนต์ของ SCCC มีค่าเท่ากับ 5.55 MPa รูปที่ 5.29 แสดงตัวอย่างหลังจากการทดสอบ และรูปที่ 5.30 ถึงรูปที่ 5.34 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการขจัด ผลเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบแรงดึงดงแบบสี่จุดกับการทดสอบ Push out แสดงไว้ในตารางที่ 5.4



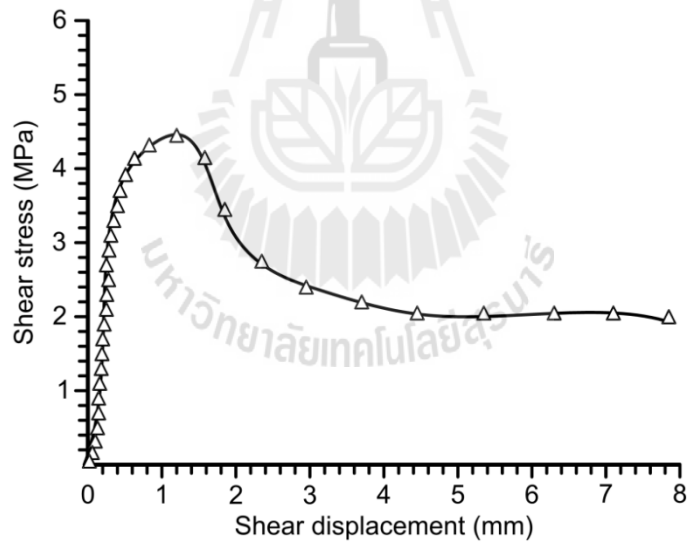
รูปที่ 5.29 ตัวอย่างภายหลังจากการทดสอบ Push out



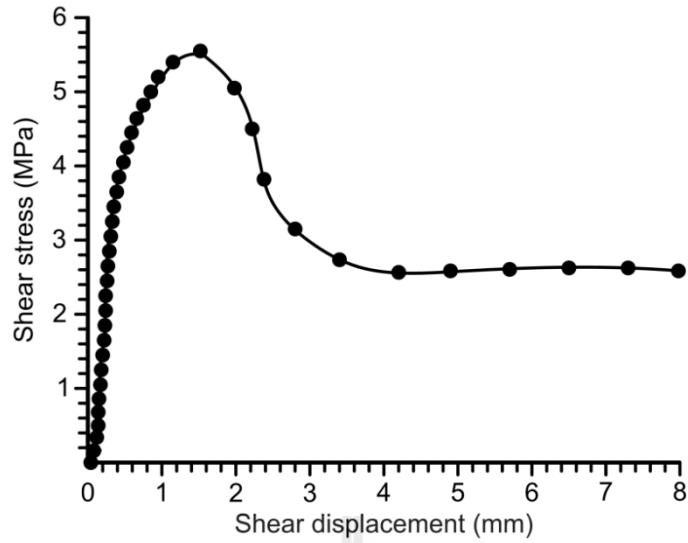
รูปที่ 5.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการขจัดที่ได้จากการทดสอบ Push out ของปูนซีเมนต์จาก ACC



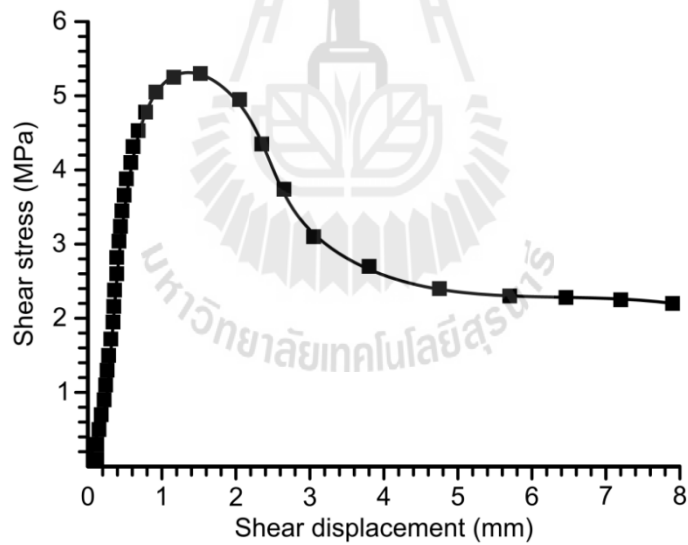
รูปที่ 5.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการขจัดที่ได้จากการทดสอบ Push out ของปูนซีเมนต์จาก CEMEX



รูปที่ 5.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการขจัดที่ได้จากการทดสอบ Push out ของปูนซีเมนต์จาก SCG



รูปที่ 5.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการขจัดที่ได้จากการทดสอบ Push out ของปูนซีเมนต์จาก SCCC



รูปที่ 5.34 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการขจัดที่ได้จากการทดสอบ Push out ของปูนซีเมนต์จาก TPI

ตารางที่ 5.4 สรุปผลการทดสอบแรงดัดงอแบบสี่จุด และการทดสอบ Push out หลังจากปรมซีเมนต์ 28 วัน

Supplier	Bond strength (MPa)	Push out strength (MPa)
ACC	1.03	5.33
CEMEX	2.46	4.06
SCG	2.07	4.45
SCCC	2.53	5.55
TPI	1.34	5.28

5.3 การทดสอบหาค่าคุณสมบัติความซึมผ่าน

การทดสอบคุณสมบัติความซึมผ่านของซีเมนต์เกราทที่ใช้ชุดในรอยแตกของหินด้วยการทดสอบความซึมผ่านโดยให้แรงดันน้ำแบบคงที่ (Constant head test) ที่ความดัน 20 psi ด้วยชุดอุปกรณ์ทดสอบดังแสดงในรูปที่ 5.34 เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของซีเมนต์จาก 5 บริษัทผู้ผลิต และทำการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านที่ระยะเวลาการปรมตัวของซีเมนต์ 3, 7, 14 และ 28 วัน (ในน้ำสะอาด) สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (K) ได้จากสมการ

$$K = Q/Ai \quad (5.4)$$

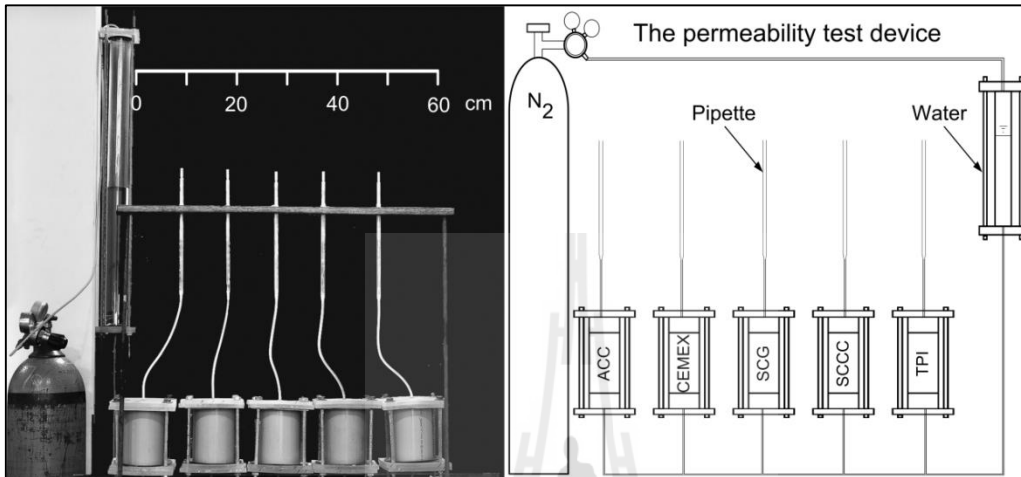
เมื่อ Q คือ อัตราการไหล
A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ
i คือ ลาดระดับน้ำ (Hydraulic gradient)

ค่า Intrinsic permeability (k) สามารถคำนวณได้จากสมการ

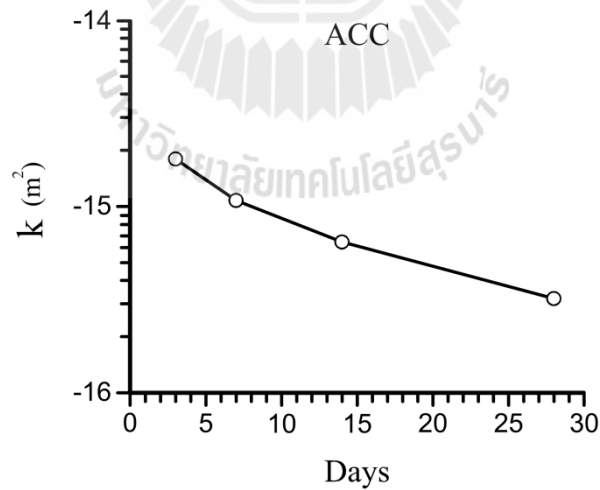
$$k = K\mu/\gamma_w \quad (5.5)$$

เมื่อ K คือ สัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน
 μ คือ ความหนืดพลวัตของน้ำที่อุณหภูมิ 20°C (1.005×10^{-3} N.s/m²)
 γ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิ 20°C (9,789 N/m³)

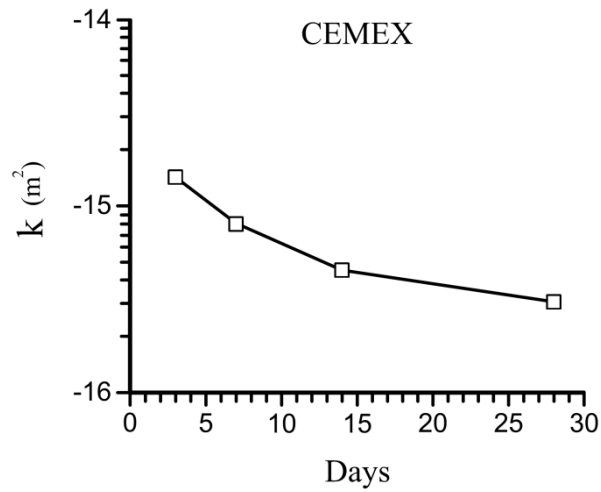
ตัวอย่างทดสอบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 cm ที่ได้จากการหล่อในกระบอกร PVC เมื่อป่มเป็นเวลา 3 วัน จึงถูกนำมาทดสอบโดยติดตั้งเข้ากับชุดอุปกรณ์ทดสอบแรงดันน้ำแบบคงที่ (รูปที่ 5.35) และผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.36 ถึงรูปที่ 5.40



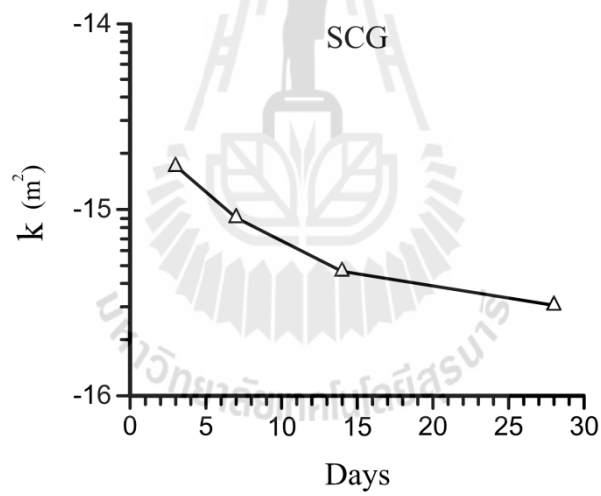
รูปที่ 5.35 ชุดอุปกรณ์ทดสอบแรงดันน้ำแบบคงที่



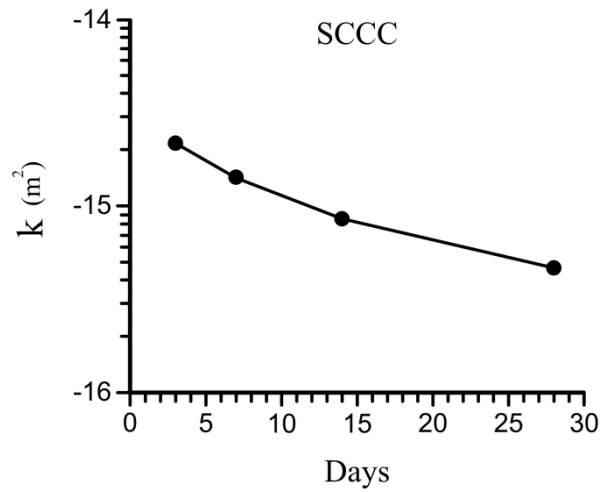
รูปที่ 5.36 ค่า Intrinsic permeability (k) ของปูนซีเมนต์จาก ACC ในฟังก์ชันของระยะเวลาป่มตัวของซีเมนต์



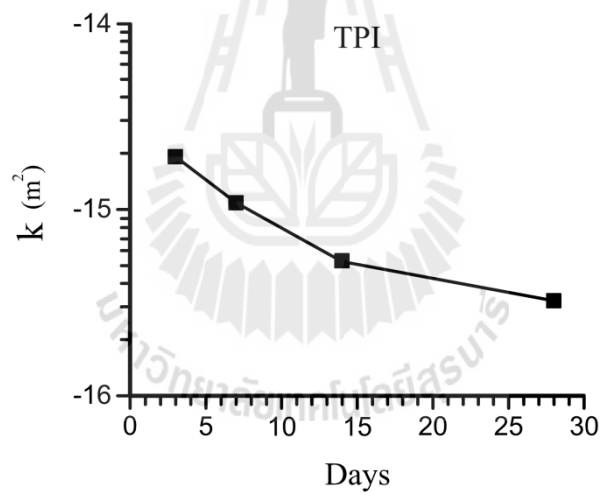
รูปที่ 5.37 ค่า Intrinsic permeability (k) ของปูนซีเมนต์จาก CEMEX ในฟังก์ชันของระยะเวลาบ่มตัวของซีเมนต์



รูปที่ 5.38 ค่า Intrinsic permeability (k) ของปูนซีเมนต์จาก SCG ในฟังก์ชันของระยะเวลาบ่มตัวของซีเมนต์



รูปที่ 5.39 ค่า Intrinsic permeability (k) ของปูนซีเมนต์จาก SCCC ในฟังก์ชันของระยะเวลาป่มตัวของซีเมนต์



รูปที่ 5.40 ค่า Intrinsic permeability (k) ของปูนซีเมนต์จาก TPI ในฟังก์ชันของระยะเวลาป่มตัวของซีเมนต์

บทที่ 6

สรุปผลการทดสอบ

6.1 สรุปผลการทดสอบ

การทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จาก 5 บริษัทผู้ผลิตชั้นนำ ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน ASTM C150 type 1 ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทั้งทางกลศาสตร์และชลศาสตร์ โดยมีเป้าหมายเพื่อหาปูนซีเมนต์ที่มีความเหมาะสมในการนำไปใช้เป็นวัสดุอุดรอยแตกในมวลหินที่จะต้องมีความหนืดต่ำและสามารถรับแรงกระทำได้ดี จากการทดสอบพบว่าปูนซีเมนต์จาก CEMEX มีค่าความหนืดน้อยที่สุดเท่ากับ 0.693 Pa.s ปูนซีเมนต์ที่มีค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดคือปูนซีเมนต์จาก SCG มีค่าเท่ากับ 27.64 ± 2.67 MPa และมีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 3.86 GPa ภายหลังจากระยะเวลาการบ่มซีเมนต์แล้ว 28 วัน การทดสอบแรงดัดงอแบบสี่จุดและการทดสอบ Push out สามารถหาค่ากำลังยึดติดอยู่ในช่วง 1.03 MPa ถึง 2.53 MPa และ 4.06 MPa ถึง 5.55 MPa ตามลำดับ ค่าความซึมผ่านของซีเมนต์ทั้งหมดอยู่ในช่วง 10^{-16} m² ถึง 10^{-14} m² และลดลงเรื่อยๆ ตามระยะเวลาของการบ่มซีเมนต์ โดยปูนซีเมนต์จาก CEMEX มีค่าความซึมผ่านน้อยที่สุดคือ 3.02×10^{-16}

อย่างไรก็ตามปูนซีเมนต์ที่นำมาทดสอบต่างมีข้อดีที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการใช้งาน โดยสรุปคือปูนซีเมนต์จาก CEMEX มีค่าความหนืดต่ำที่สุดและมีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำที่สุด ปูนซีเมนต์จาก SCG มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดและมีค่าความซึมผ่านต่ำสุด (แต่มีความหนืดค่อนข้างสูง) ปูนซีเมนต์จาก SCCC มีค่ากำลังยึดติดสูงสุด ส่วนปูนซีเมนต์อื่นๆ ที่เหลือมีคุณสมบัติแบบปูนซีเมนต์ทั่วไป

6.2 ข้อเสนอแนะ

ผลการทดสอบซีเมนต์จาก 5 บริษัทผู้ผลิตพบว่า ค่าคุณสมบัติต่างๆ ที่ได้ยังไม่แตกต่างจากคุณสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ทั่วไปนัก ควรมีการทดสอบเพิ่มขึ้นดังนี้

- 1) ควรมีการทดสอบกับหินต่างชนิดกันที่มีขนาด Grain ใหญ่ขึ้นและมีค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระที่แตกต่างกัน
- 2) ควรหาความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบของรอยแตก (Fracture roughness) กับค่ากำลังยึดติดของรอยแตกทั้งก่อนและหลังการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน

- 3) ควรหาค่าความชื้นผ่านของรอยแตกในขณะให้แรงแรงเฉือนที่ความเค้นตั้งฉาก
ต่างๆ
- 4) อาจจะใช้ความดันชลศาสตร์ในระดับที่แตกต่างกัน หรืออาจใช้ความดันแก๊สใน
การทดสอบ



บรรณานุกรม

- Akgün, H. and Daemen, J.K. (2000). Influence of degree of saturation on the borehole sealing performance of an expansive cement grout, **Cement and Concrete Research**, 30(2): 281–289.
- Anagnostopoulos, C.A. 2006. Physical and Mechanical Properties of Injected Sand with Latex Superplasticized Grouts. **Geotechnical Testing Journal**. 29: 1–7.
- ASTM Standard C150–11. 2011. Standard Specification for Portland Cement. **Annual Book of ASTM Standards**, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM Standard C192–07. 2007. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. **Annual Book of ASTM Standards**, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM Standard C39–10. 2010. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. **Annual Book of ASTM Standards**, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM Standard C938–10. 2010. Standard Practice for Proportioning Grout Mixtures for Preplaced-Aggregate Concrete. **Annual Book of ASTM Standards**, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM Standard D2196–10. 2010. Standard Test Methods for Rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational (Brookfield type) Viscometer. **Annual Book of ASTM Standards**, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM Standard D3967. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens. **Annual Book of ASTM Standards**, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM Standard D6272–10. 2010. Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four-Point Bending. **Annual Book of ASTM Standards**, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

- ASTM Standard D7012–10. 2010. Standard Test Method for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures. **Annual Book of ASTM Standards**, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM Standard D854–10. 2010. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. **Annual Book of ASTM Standards**, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- Brown, E.T. (editor) (1981). Rock Characterization testing and monitoring: ISRM Suggested methods. The Commission on Rock Testing Methods, **International Society for Rock Mechanics**, Pergamon Press, New York, 211 pp.
- Butron, C., Gustafson, G., Fransson, A., and Funehag, J. (2010). Drip sealing of tunnels in hard rock: A new concept for the design and evaluation of permeation grouting. **Tunnelling and Underground Space Technology**. 25: 114–121.
- Christensen, B.J., Mason, T.O., Jennings, H.M. (1996). Comparison of measured and calculated permeability for hardened cement pastes, **Cement and Concrete Research**, 26(9): 1325–1334.
- Duval, R. and Kadri, E.H. (1998). Influence of Silica Fume on the Workability and the Compressive Strength of High-Performance Concretes, **Cement and Concrete Research**, 28(4): 533–547.
- Emoto, T., Thomas A., Bier. (2007). Rheological behavior as influenced by plasticizers and hydration kinetics, **Cement and Concrete Research**, 37(5): 647–654.
- Fransson, A. (2001). Characterisation of a fractured rock mass for a grouting field Test. **Tunnelling and Underground Space Technology**. 16: 331–339.
- Frantzis, P. and Baggott, R. (1997). Rheological characteristics of retarded magnesia phosphate cement, **Cement and Concrete Research**, 27(8): 1155–1166.
- Halamickova, P. and Rachel. (1995). Water permeability and chloride ion diffusion in Portland cement mortars: Relationship to sand content and critical pore diameter, **Cement and Concrete Research**, 25(4): 790–802.
- Huang, W. H. (1997). Properties of cement–fly ash grout admixed with bentonite, silica fume, or organic fiber. **Cement and Concrete Research**. 27(3): 395–406.

- Huang, Z., Chen, M., Chen, X. (2003). A developed technology for wet-ground fine cement slurry with its applications, **Cement and Concrete Research**, 33(5): 729–732.
- Indraratna, B., and Ranjith, P. (2001). **Hydromechanical Aspects and Unsaturated Flow in Joints Rock**. Lisse: A. A. Balkema.
- Jaeger, J. C., and Cook, N. G. W. (1979). **Fundamentals of Rock Mechanics** (3rd ed.). London: Chapman & Hall.
- Jarny, S., Roussel, N., Rodts, S., (2005). Rheological behavior of cement pastes from MRI velocimetry, **Cement and Concrete Research**, 35(10): 1873–1881.
- Kashir, M., and Yanful, E. K. (2000). Compatibility of Slurry Wall Backfill Soils With Acid Mine Drainage. **Advances in Environmental Research** 4: 251–268.
- Kim, T. K. (1998). Experimentally induced pulmonary arterial occlusion with detachable balloon in pigs: Thin-section CT findings, **Academic Radiology**, 5(12): 822–831.
- Letourneur, J., Nonveiller, E. (1991), Grouting theory and practice (1989) Elsevier, Amsterdam 250., **Engineering Geology**, 31(3): 374.
- Mesbah, H.A., Yahia, A., Khayat, K.H. (2011). Electrical conductivity method to assess static stability of self-consolidating concrete, **Cement and Concrete Research**, 41(5): 451–458.
- Nehdi, M. (2000). Why some carbonate fillers cause rapid increases of viscosity in dispersed cement-based materials, **Cement and Concrete Research**, 30(10): 1663–1669.
- Nelson, R. (1975). **Fracture Permeability in Porous Reservoirs: Experimental and Field Approach**. Ph.D. dissertation, Department of Geology, Texas A&M University.
- Park, C.K., Noh, M.H., Park, T.H. (2005). Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures, **Cement and Concrete Research**, 35(5): 842–849.
- Schwartzentruber, L.D., Roy, R.L., Cordin, J. (2006). Rheological behavior of fresh cement pastes formulated from a Self-Compacting Concrete (SCC), **Cement and Concrete Research**, 36(7): 1203–1213.

- Seidel, J.P. and Haberfield, C.M. (2002). A theoretical model for rock joints subjected to constant normal stiffness direct shear, **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 39(5): 539–553.
- Shannag, M. J. (2002). High–performance cementitious grouts for structural repair, **Cement and Concrete Research**, 32(5): 803–808
- Siqueira, C.E. and Tango. (1998). An extrapolation method for compressive strength prediction of hydraulic cement products, **Cement and Concrete Research**, 28(7): 969–983.
- Valenza II, J.J., and Thomas, J.J. (2012). Permeability and elastic modulus of cement paste as a function of curing temperature, **Cement and Concrete Research**, 42(2): 440–446.
- Varol, A. and Dalgıç, S. (2006). Grouting applications in the Istanbul metro, Turkey, **Tunneling and Underground Space Technology**, 21(6): 602–612.
- Wong, H.S., Zimmerman, R.W., Buenfeld, N.R., (2012). Estimating the permeability of cement pastes and mortars using image analysis and effective medium theory, **Cement and Concrete Research**, 42(2): 476–483.
- Yesilnacar, M.I. (2003). Grouting applications in the Sanliurfa tunnels of GAP, Turkey, **Tunnelling and Underground Space Technology**, 18(4): 321–330.
- Zou, W. (1996). Synthesis and NMR assignment of two repeating units (decasaccharide) of the type III group B Streptococcus capsular polysaccharide and its ¹³C–labeled and N–propionyl substituted sialic acid analogues, **Carbohydrate Research**, 295: 209–228.

ประวัตินักวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. กิตติเทพ เฟื่องขจร เกิดเมื่อวันที่ 16 กันยายน 2500 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร จบการศึกษาปริญญาเอกจาก University of Arizona ที่ประเทศสหรัฐอเมริกา สาขาวิชา Geological Engineering ในปี ค.ศ. 1988 และสำเร็จ Post-doctoral Fellows ในปี ค.ศ. 1990 ที่ University of Arizona ปัจจุบันมีตำแหน่งเป็นประธานกรรมการบริษัท Rock Engineering International ประเทศสหรัฐอเมริกา และดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำอยู่ที่สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา มีความชำนาญพิเศษทางด้านกลศาสตร์ของหินในเชิงการทดลอง การออกแบบและการวิเคราะห์โดยใช้คอมพิวเตอร์ ได้เคยทำการวิจัยเป็นหัวหน้าโครงการที่สำเร็จมาแล้วมากกว่า 10 โครงการทั้งในสหรัฐอเมริกาและประเทศไทย มีสิ่งตีพิมพ์นานาชาติมากกว่า 50 บทความ ทั้งวารสาร นิตยสาร รายงานรัฐบาล และบทความการประชุมนานาชาติ เป็นผู้แต่งตำรา “Sealing of Boreholes and Underground Excavations in Rock” ที่ใช้อยู่ในหลายมหาวิทยาลัยในสหรัฐอเมริกา ดำรงตำแหน่งเป็นที่ปรึกษาทางวิชาการขององค์การรัฐบาลและหลายบริษัทในประเทศสหรัฐอเมริกา และแคนาดา เช่น U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. Department of Energy, Dow Chemical Co., Southwest Research Institute, UNOCAL, Phelps Dodge Co. และ Amoco Oil Co. เป็นวิศวกรที่ปรึกษาของ UNISEARCH จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นคณะกรรมการในการคัดเลือกข้อเสนอโครงการของ U.S. National Science Foundation และ Idaho State Board of Education และเป็นคณะกรรมการในการคัดเลือกบทความทางวิชาการของสำนักพิมพ์ Chapman & Hall ในประเทศอังกฤษ และ Elsevier Sciences Publishing Co. ในประเทศเนเธอร์แลนด์