

รหัสโครงการ SUT7-719-58-24-52



รายงานการวิจัย

การศึกษาคักยภาพของส่วนผสมเถ้าลอยกับซีเมนต์เพื่ออุดรอยแตกในหิน
(Performance Assessment of Fly Ash-mixed Cement Grout
in Rock Fractures)



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การศึกษาศักยภาพของส่วนผสมเถ้าลอยกับซีเมนต์เพื่ออุดรอยแตกในหิน
(Performance Assessment of Fly Ash-mixed Cement Grout
in Rock Fractures)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรัชญา เทพนรงค์

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2558-2559

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปี 2558 และ 2559 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ดีโดยมี นายมณฑล เชียงใหม่ เป็นผู้ช่วยวิจัยประจำโครงการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ผู้วิจัย



บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้เพื่อประเมินศักยภาพของเถ้าลอยกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 เพื่อใช้ลดความชื้นผ่านของน้ำในรอยแตกของหินทราย ซึ่งรอยแตกถูกจำลองขึ้นโดยแรงกดในแนวเส้นขนต้วอย่างหินทรายชุดภูกระดึงเพื่อให้หินแตกออกจากกันด้วยแรงดึง เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะถูกนำมาทดสอบคุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงเคมี การหาค่าความหนืดที่น้อยสุดของส่วนผสมที่ให้ค่ากำลังที่เหมาะสม สัดส่วนของเถ้าลอยต่อซีเมนต์และน้ำ (F:C:W) ที่ใช้ในการศึกษาเท่ากับ 1:10:10, 3:10:10, และ 5:10:10 และสัดส่วนเบนทอนไนต์ต่อซีเมนต์และน้ำ (B:C:W) เท่ากับ 1:10:10, 2:10:10, และ 3:10:10 โดยน้ำหนัก ซึ่งส่วนผสมดังกล่าวให้ค่าความหนืดของส่วนผสมเหลวไม่ต่ำกว่า 5 ปาสคาล·วินาที และที่สัดส่วน F:C:W ที่ 5:10:10 ให้ค่ากำลังกดสูงสุด ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น ค่าแรงดึงสูงสุด ค่าแรงยึดหน่วงสูงสุด และค่าแรงเฉือนสูงสุดเท่ากับ 10.45, 1360, 1.91, 2.23, และ 3.05 เมกะปาสคาลตามลำดับ ซึ่งมีค่ากำลังสูงกว่าสัดส่วน B:C:W ค่าความชื้นผ่านของทุกส่วนผสมจะลดลงในเชิงเวลาซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 10^{-9} ถึง 10^{-7} เมตรต่อวินาที และที่สัดส่วนของ F:C:W ที่ 5:10:10 จะให้ค่าความชื้นผ่านต่ำที่สุด ในส่วนผสมรอยแตกที่มีระยะการเปิดเผยเท่ากับ 2, 10, และ 20 มิลลิเมตร จะให้ค่าความชื้นผ่านใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 10^{-8} ถึง 10^{-5} เมตรต่อวินาที

Abstract

The objective of this study is to assess the performance of fly ash mixed with the commercial grade Portland cement type I for use in reducing permeability of fractured rock in sandstone. The fractures are artificially made in Phu Kradung sandstone by applying a line load. The fly ash used in this study was obtained from the Mae Moh power plant. The physical and chemical properties of the fly ash are examined. This research emphasizes on determining the mixture that provides minimum slurry viscosity and appropriate strength. The mixing ratios for fly ash:cement:water (F:C:W) are 1:10:10, 3:10:10, 5:10:10 and bentonite:cement:water (B:C:W) are 1:10:10, 2:10:10, 3:10:10 by weight. These proportions yield the lowest slurry viscosity of 5 Pa·s. For F:C:W = 5:10:10, the compressive strength, elastic modulus, tensile strength, bond strength, and shear strength are 10.45, 1360, 1.91, 2.23, and 3.05 MPa, respectively. They are slightly higher than from those of bentonite mixed with cement. The permeability of grouting materials is from 10^{-9} to 10^{-7} m/s and decrease with curing time, the F:C:W = 5:10:10 gives the lowest permeability. The permeability of grouting fractures with apertures of 2, 10 and 20 mm range from 10^{-8} to 10^{-5} m/s.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
Abstract.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	5
1.8 แผนการถ่ายทอดเทคโนโลยีหรือผลการวิจัยสู่กลุ่มเป้าหมาย.....	6
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 ถ้าวลอยจากกระบวนการเผาไหม้ถ่านหิน.....	7
2.2 ความชื้นผ่านในมวลหินและรอยแตกในหิน.....	8
2.2.1 ความชื้นผ่านของเนื้อหิน.....	9
2.2.2 ความชื้นผ่านของรอยแตก.....	9
2.3 การอุดหลุมเจาะในชั้นหิน.....	10
2.4 วัสดุและการอุดรอยแตกเพื่อลดการซึมผ่านในรอยแตกของหิน.....	11
2.5 กำลังยึดติดของการอุดซีเมนต์ในมวลหิน.....	11
บทที่ 3 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบและการจัดเตรียมตัวอย่างส่วนผสมซีเมนต์.....	15
3.1 ตัวอย่างถ้าวลอย.....	15
3.2 ตัวอย่างดินเบนทอไนต์.....	17

สารบัญ

	หน้า
3.3 ตัวอย่างปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์.....	19
3.4 ตัวอย่างหินทราย.....	20
3.5 การจัดเตรียมส่วนผสม.....	21
3.6 การวิเคราะห์ส่วนผสมด้วยการทดสอบความหนืดและความหนาแน่น.....	26
บทที่ 4 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของส่วนผสมซีเมนต์.....	31
4.1 วัตถุประสงค์ของการทดสอบ	31
4.2 การจัดเตรียมแท่งตัวอย่างซีเมนต์ทรงกระบอก.....	31
4.3 การทดสอบกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว.....	31
4.4 การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิลเลียน.....	37
4.5 การทดสอบกำลังรับแรงยึดหน่วงแบบ Push-out.....	41
4.6 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง.....	45
บทที่ 5 การทดสอบคุณสมบัติความซึมผ่าน.....	51
5.1 การทดสอบความซึมผ่านในห้องปฏิบัติการ.....	51
5.2 การทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสม.....	52
5.2.1 การจัดเตรียมส่วนผสม.....	52
5.2.2 ขั้นตอนการทดสอบความซึมผ่านในห้องปฏิบัติการ.....	53
5.2.3 ผลการทดสอบ.....	54
5.3 การทดสอบความซึมผ่านของรอยแตกในหิน.....	55
5.3.1 วัตถุประสงค์การทดสอบ.....	55
5.3.2 ขั้นตอนการทดสอบความซึมผ่านในห้องปฏิบัติการ.....	55
5.3.3 ผลการทดสอบ.....	57
5.4 การทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมในรอยแตก.....	59
5.4.1 วัตถุประสงค์การทดสอบ.....	59
5.4.2 ขั้นตอนการทดสอบความซึมผ่านในห้องปฏิบัติการ.....	61
5.4.3 ผลการทดสอบ.....	61
บทที่ 6 บทสรุป.....	68

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม.....	69
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก บทความในการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการระดับนานาชาติ.....	ก-1
ประวัตินักวิจัย	



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากถ่านหินชนิดต่าง ๆ (Nimjaroen, 2013).....	8
3.1 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของตัวอย่างเถ้าลอย ดินเบนทอไนท์ และดินตะกอนประปา.....	18
3.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางสารประกอบเคมีของตัวอย่างเถ้าลอยและดินเบนทอไนท์....	18
3.3 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 (Ali et al., 2008).....	19
3.4 ผลการทดสอบความหนาแน่นของส่วนผสมต่อปริมาตรรวม 500 cc.....	27
3.5 ผลการทดสอบความหนืด (viscosity).....	28
4.1 ขนาดของแท่งตัวอย่างซีเมนต์อายุ 3 วัน สำหรับการทดสอบแรงกดในแกนเดียว และสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น.....	33
4.2 ค่ากำลังแรงกดสูงสุดในแกนเดียว (σ_c) ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E) และค่าอัตราส่วนปัวซอง (ν) ของแต่ละส่วนผสม.....	35
4.3 ขนาดของแท่งตัวอย่างซีเมนต์อายุ 3 วัน สำหรับการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน.....	38
4.4 ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน (σ_b) ของส่วนผสมซีเมนต์ ส่วนผสมเถ้าลอย และส่วนผสมดินเบนทอไนท์.....	40
4.5 ขนาดของหินทรายและแท่งตัวอย่างซีเมนต์อายุ 3 วัน สำหรับการทดสอบการทดสอบกำลังรับแรงยึดหน่วงแบบ Push-out.....	42
4.6 ค่ากำลังแรงยึดหน่วงสูงสุด (Bond strength) ของส่วนผสมเถ้าลอย.....	44
4.7 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างส่วนผสม.....	49
4.8 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงเมื่อเทียบกับกฎการแตกของ Coulomb.....	49
5.1 ผลการทดสอบหาค่าความซึมผ่านของส่วนผสมที่ระยะการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน.....	54
5.2 ผลการทดสอบค่าความซึมผ่านของรอยแตกในหิน 3 ตัวอย่าง.....	57
5.3 ผลการทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมในรอยแตกของหินที่มีการเปิดเผย 2 mm.....	63
5.4 ผลการทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมในรอยแตกของหินที่มีการเปิดเผย 10 mm....	64
5.5 ผลการทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมในรอยแตกของหินที่มีการเปิดเผย 20 mm....	66

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
3.1 ตัวอย่างเก้าอี้ลอยจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง.....	16
3.2 ตัวอย่างเก้าอี้ลอยบรรจุในถังเพื่อรักษาความชื้นก่อนการทดสอบ.....	16
3.3 ผลเปรียบเทียบการกระจายอนุภาคของเม็ดตะกอนเก้าอี้ลอย เบนทอไนต์ และดินตะกอนประปา.....	17
3.4 ตัวอย่างหินทรายหมวดหินภูกระดึง รูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 13x13x13 เซนติเมตร (บน) และรูปตัวอย่างเพื่อทดสอบกำลังเฉือนมีขนาด 5.4x5.4x10.8 เซนติเมตร (ล่าง).....	20
3.5 ตัวอย่างเก้าอี้ลอยจากแม่เมาะที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	21
3.6 ตัวอย่างดินเบนทอไนต์บรรจุขนาด 25 kg ที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	22
3.7 ตัวอย่างปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ปอซโซลานบรรจุขนาด 50 kg ที่ใช้ในการศึกษา.....	22
3.8 เครื่องชั่งไฟฟ้า Capacity 2,100 g และ Readability 0.01 g.....	22
3.9 เครื่องผสมพร้อมใบกวนสำหรับกวนส่วนผสมให้เข้ากันโดยใช้ ความเร็วไม่เกิน 275 รอบต่อนาที (รุ่น 6QT 575W).....	23
3.10 เครื่องทดสอบความหนืด (Brookfield Viscometer).....	23
3.11 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด (รุ่น TAITAN T350C) วัดได้ -50 ถึง 350 องศาเซลเซียส....	23
3.12 ตัวอย่างวัสดุที่ถูกจัดเตรียมสำหรับการผสมที่ซึ่งน้ำหนักตามสัดส่วนแล้วแยกใส่บีกเกอร์ (a) ซีเมนต์และน้ำ (b) เก้าอี้ลอย ซีเมนต์ และน้ำ และ (c) ดินเบนทอไนต์ ซีเมนต์ และน้ำ..	22
3.13 การทดสอบความหนืดของส่วนผสมด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer.....	22
3.14 ค่า Kinetic viscosity ของส่วนผสมดินเบนทอไนต์กับซีเมนต์ (B:C) ดินตะกอนประปา กับซีเมนต์ (S:C) และเก้าอี้ลอยกับซีเมนต์ (F:C).....	29
4.1 เครื่องทดสอบค่ารับกำลังรับแรงกดในแกนเดียว ASTM D7012.....	32
4.2 ตัวอย่างบางส่วนจากการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวของส่วนผสมเก้าอี้ลอย.....	33
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวกับระยะเวลาการบ่มน้ำ ของแต่ละอัตราส่วน F:C:W.....	36
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นกับระยะเวลาการบ่มน้ำ ของแต่ละอัตราส่วน F:C:W.....	36
4.5 ตัวอย่างแท่งซีเมนต์ผสมเก้าอี้ลอยสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิลเลียน.....	37
4.6 การติดตั้งเครื่องมือการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน ASTM D3967.....	39
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงกับเวลาการบ่มน้ำของอัตราส่วนของ F:C:W.....	40

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8	โครงการทดสอบกำลังรับแรงยึดหน่วงแบบ Push-out..... 41
4.9	ตัวอย่างหินทรายที่ใช้ในการทดสอบ (บน) ภาพตัวอย่างก่อนการเจาะทดสอบ (ล่าง) ภาพตัดขวางตัวอย่างหลังการทดสอบ..... 43
4.10	ผลการทดสอบ Push-out โดยความเค้นในแนวแกนแสดงในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ในตำแหน่งด้านบน (Top) และด้านล่าง (Bottom) ของตัวอย่าง PK-01-PO-01..... 44
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงยึดหน่วงกับเวลาการบ่มน้ำอัดราส่วนของ F:C:W..... 45
4.12	ตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของส่วนผสมแก้ลอย..... 46
4.13	เครื่องทดสอบกำลังรับแรงเฉือนขณะติดตั้งและทำการทดสอบ ASTM D5607..... 46
4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวแนวเฉือนของตัวอย่าง F:C:W = 0:10:10..... 47
4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวแนวเฉือนของตัวอย่าง F:C:W = 1:10:10..... 47
4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวแนวเฉือนของตัวอย่าง F:C:W = 3:10:10..... 48
4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวแนวเฉือนของตัวอย่าง F:C:W = 5:10:10..... 48
4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเฉือนสูงสุดกับความเค้นในแนวตั้งฉากของส่วนผสมแก้ลอย.... 50
5.1	แผนภูมิชุดอุปกรณ์การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน..... 52
5.2	ท่อทดสอบ PVC เส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้วที่ใช้เป็นแบบหล่อส่วนผสมสำหรับการทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสม..... 52
5.3	ท่อทรงกระบอก PVC สำหรับใช้เป็นอุปกรณ์ทดสอบความซึมผ่าน..... 53
5.4	ชุดอุปกรณ์และการจัดเตรียมการทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมภายใต้ความดันคงที่.. 53
5.5	ผลการทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมที่เวลาบ่มต่างกัน..... 54
5.6	ตัวอย่างหินทรายชุดภูกระดึงรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ที่มีพื้นที่ของรอยแตกขนาด 13x13 ตารางเซนติเมตร ถูกจัดเตรียมเพื่อการทดสอบความซึมผ่าน..... 56
5.7	ตัวอย่างหินทรายในขณะทดสอบความซึมผ่านของรอยแตกภายใต้ความเค้นกด..... 56
5.8	ผลการทดสอบค่าความซึมผ่านของรอยแตกในหิน..... 58

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.9 ตัวอย่างหินทรายชุดภูกระดึงที่ใช้ทดสอบความซึมผ่านของรอยแตกที่มีการเปิดเผยอภายใต้ความเค้นกด.....	59
5.10 แผนภูมิแสดงลักษณะการทดสอบความซึมผ่านของรอยแตกที่มีการเปิดเผยอภายใต้ความเค้นกด.....	64
5.11 การจัดเตรียมชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมในรอยแตกที่เปิดเผยอภายใต้ความเค้นกด.....	64
5.12 ผลการทดสอบค่าความซึมผ่านของส่วนผสมในรอยแตกของหินที่มี การเปิดเผยอ 2 mm.....	65
5.13 ผลการทดสอบค่าความซึมผ่านของส่วนผสมในรอยแตกของหินที่มี การเปิดเผยอ 10 mm.....	66
5.14 ผลการทดสอบค่าความซึมผ่านของส่วนผสมในรอยแตกของหินที่มี การเปิดเผยอ 20 mm.....	67

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ปัจจุบันข้อมูลจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ ใช้ถ่านหินลิกไนต์จากเหมืองแม่เมาะเป็นเชื้อเพลิง การเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์จะได้เถ้าลอยลิกไนต์ออกมาประมาณวันละ 10,000 ตัน ซึ่งในจำนวนนี้จะเป็นเถ้าลอย (Fly Ash) ประมาณ 6,000 ตัน (Cheerarot and Jaturapitakkul, 2004) เป็นต้นมาประเทศไทยได้เริ่มนำเถ้าลอยมาใช้งานอย่างจริงจังโดยได้มีการศึกษาพร้อมปรับปรุงคุณภาพและคุณสมบัติเพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์แทนการเสียพื้นที่ขนาดใหญ่ในการฝังกลบเถ้าลอย จากหลายงานวิจัยส่งผลให้สามารถนำเถ้าลอยไปใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ เช่น ใช้เป็นส่วนผสมของซีเมนต์เพื่องานเทคอนกรีต สร้างเขื่อน อีกทั้ง ผสมซีเมนต์เพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตกระเบื้องมุงหลังคา ท่อสำเร็จรูป พื้นสำเร็จรูป ท่อบำบัดน้ำเสีย อิฐตัวหนอน ใช้เป็นฐานในการทำถนน และงานอื่นๆอีกหลายประเภท เป็นต้น แต่ก็ยังคงเหลือเถ้าลอยที่ไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์อีกจำนวนมาก จึงมีแนวคิดที่ศึกษาถึงความเป็นไปได้ที่จะนำเถ้าลอยมาใช้เป็นส่วนผสมวัสดุอุดรอยแตกในหิน (Grouting Material) ซึ่งมักเป็นปัญหาที่มักประสบอยู่เสมอในระหว่างการปฏิบัติงานในภาคอุตสาหกรรมก่อสร้างโครงการทางวิศวกรรมธรณีที่อยู่ในหิน โดยจะใช้ทดแทนวัสดุเดิมที่ใช้อย่างแพร่หลายอย่างดินเบนทอนไนด์ เพื่อลดค่าความซึมผ่านของรอยแตกในมวลหินบริเวณรอบ ๆ โครงสร้างทางวิศวกรรม เช่น อุโมงค์ที่อยู่ใต้ระดับน้ำบาดาล ฐานรากของเขื่อนที่ตั้งอยู่บนมวลหินที่มีรอยแตกและป้องกันการรุกรานของน้ำเค็มเข้าสู่ชั้นน้ำบาดาลบริเวณชายฝั่งทะเล เป็นต้น อีกทั้งยังช่วยลดการใช้วัสดุที่ผลิตจากทรัพยากรธรรมชาติและยังเป็นการลดวัสดุเหลือทิ้งที่ระบายออกสู่สิ่งแวดล้อมจากการเผาไหม้ถ่านหินในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อทำการศึกษาศักยภาพของเถ้าลอยผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานวิศวกรรมธรณีด้านการอุดรอยแตกในมวลหิน เช่น หลุมเจาะหรือใต้แนวสันเขื่อนเพื่อเพิ่มความทึบและลดการรั่วซึมของน้ำ ใช้อุดรอยแตกในมวลหินรอบบ่อเหมืองเพื่อลดความซึมผ่านของน้ำเข้าสู่หน้าเหมือง หรือใช้ตามแนวชายฝั่งเพื่อป้องกันการรุกรานของเค็ม และเพื่อเป็นการนำวัสดุที่เหลือใช้จากกระบวนการเผาไหม้ของถ่านหินกลับมาใช้ได้อย่างเป็นประโยชน์และยั่งยืน อย่างเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนการใช้วัสดุในงานอุดรอยแตก

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) ความชื้นผ่านในห้องปฏิบัติการของซีเมนต์ผสมเถ้าลอยที่ได้จากกระบวนการการผลิตกระแสไฟฟ้าจากถ่านหิน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการอุดรอยแตกในมวลหิน
- 2) การทดสอบหาค่าความชื้นผ่านของซีเมนต์ผสมเถ้าลอยในรอยแตกด้วยการให้แรงดันน้ำแบบคงที่ (Constant Head Test)
- 3) ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ASTM C150) เป็นส่วนผสม
- 4) ขนาดของเม็ดตะกอนเถ้าลอยที่นำมาใช้มีเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 0.075 มิลลิเมตร (Sieve No. 200)
- 5) อัตราส่วนของเถ้าลอยที่ใช้ในการผสมกับปูนซีเมนต์มีอัตราส่วนร้อยละ 10, 30, และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
- 6) ใช้ตัวอย่างหินทราย (หมวดหินภูกระดึง) ที่มีพื้นที่รอยแตกไม่น้อยกว่า 15x15 เซนติเมตร ในการทดสอบ
- 7) รอยแตกที่ใช้ในการทดสอบจะใช้รอยแตกจริงตามธรรมชาติหรือถูกจำลองขึ้นภายในห้องปฏิบัติการ
- 8) การผสมและระยะเวลาการบ่มตัวของเถ้าลอยกับปูนซีเมนต์จะทำตามมาตรฐาน ASTM
- 9) ส่วนผสมที่ใช้เป็นวัสดุจะถูกทดสอบคุณสมบัติด้านกายภาพและคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์
- 10) เปรียบเทียบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยกับส่วนผสมที่ใช้ดินเบนทอไนต์ เพื่อประเมินศักยภาพของวัสดุอุด

1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

การอุดรอยแตกในหินสำหรับงานทางด้านวิศวกรรมธรณีมีวัตถุประสงค์หลักของการอุดรอยแตกเพื่อลดค่าความชื้นผ่านของรอยแตกในชั้นหิน ประสิทธิภาพในการลดค่าความชื้นผ่านขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้อุด ซึ่งปัจจุบันได้มีงานวิจัยต่างๆ มากมายที่ศึกษาเกี่ยวกับวัสดุที่ใช้ผสมซีเมนต์เพื่อลดค่าความชื้นผ่านในรอยแตก อาทิเช่น ดินเหนียว ดินเบนทอไนต์ ดินตะกอนประปา เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกเถ้าลอยเนื่องจากการรายงานจากหลายงานวิจัยแล้วว่า 1) เมื่อผสมเถ้าลอยกับซีเมนต์จะให้การไหลตัวได้ดี เนื่องจากเม็ดของเถ้าลอยมีลักษณะกลม 2) เกิดความร้อนต่ำเนื่องจาก เถ้าลอยจะทำปฏิกิริยาหลังซีเมนต์ 3) ลดปัญหาการแตกร้าวได้ดี 4) สามารถเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุมากกว่า 28 วัน 5) เพิ่มความทนทานของคอนกรีต เนื่องจากใช้น้ำน้อยลงและปฏิกิริยาของเถ้าลอยทำให้ช่องว่างในเนื้อคอนกรีตลดลง 6) เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนและทนการกัดกร่อนของซัลเฟตได้ดี เนื่องจากปฏิกิริยาของเถ้าลอยจะลด Ca(OH)_2 ซึ่งทนการกัดกร่อนได้น้อย 7) ลดการหดตัว และ 8) ลดอัตราการซึมผ่านของน้ำได้ดี ดังนั้น ในการศึกษาจะเน้นที่อัตราส่วนระหว่างเถ้าลอยและซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับใช้อุดรอยแตกในหินหลาย ๆ ชนิด

อัตราส่วนต่างๆ ระหว่างแก้วลอยและซีเมนต์ที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุอุด จะนำมาทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานเชิงวิศวกรรมในห้องปฏิบัติการโดยจะเน้นไปที่การวัดค่าความซึมผ่านของวัสดุอุด โดยค่าความซึมผ่านที่ได้จากทุกอัตราส่วนของส่วนผสมจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าความซึมผ่านในรอยแตกของหินที่ไม่มีวัสดุอุด การไหลผ่านเนื้อวัสดุอุดจะสมมติให้หินเป็น Porous Media คือเป็นวัสดุพรุน โดยนำกฎการไหลของดาร์ซี (Darcy's Law) มาประยุกต์ใช้ ผลที่ได้จากการทดสอบจะนำมาประเมินหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างแก้วลอยและซีเมนต์

ในการศึกษาครั้งนี้จะเน้นไปที่การทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อประเมินหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของแก้วลอยต่อการซึมผ่านของน้ำในรอยแตกในหิน โดยมีปัจจัยและตัวแปรคืออัตราส่วนระหว่างแก้วลอยและซีเมนต์ ความเค้นที่ตั้งฉากกับรอยแตก และอัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของรอยแตกและของวัสดุ

1.5 วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง / เก็บข้อมูล

การวิจัยแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทบทวนและศึกษาวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทบทวน ค้นคว้า และศึกษาวรรณกรรม รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้อง (บางส่วนได้สรุปมาในข้อเสนอโครงการนี้แล้ว) ซึ่งจะรวมไปถึงทฤษฎีและกฎต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณการเคลื่อนตัวของของไหลในรอยแตกของหิน คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการอุดรอยแตก ลักษณะของรอยแตกในหิน ผลกระทบของความเค้นต่อความดันของของไหลและต่อพฤติกรรมของรอยแตกในหิน ผลการวิจัยที่ดำเนินการมาแล้วทั้งในและต่างประเทศ ผลการทบทวนวรรณกรรมวิจัยทั้งหมดรวมทั้งรายการเอกสารอ้างอิงจะถูกสรุปไว้ในรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ขั้นตอนที่ 2 การเก็บและจัดเตรียมวัสดุและตัวอย่างหิน

วัสดุหลักที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ 1) แก้วลอยที่ถูกคัดขนาดไม่เกิน 0.075 มิลลิเมตร 2) ดินเบนทอนไนต์ที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรมเพื่อใช้เทียบเคียงคุณสมบัติและศักยภาพ 3) ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อใช้ผสมกับแก้วลอย และ 4) หินที่มีรอยแตก โดยมีพื้นที่ของรอยแตกไม่ต่ำกว่า 15×15 เซนติเมตร ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้หินทราย (หมวดหินภูกระดึง) ซึ่งมักเป็นหินพื้นฐานที่พบบ่อยในงานทางด้านวิศวกรรมธรณี โดยจะใช้ชุดของส่วนผสมไม่ต่ำกว่า 3 ส่วนผสม ภายใต้ความเค้นกด 3 ระดับ และศึกษาการซึมผ่านที่อัตราส่วนผสมต่างๆ แก้วลอยจะเก็บตัวอย่างจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

1) การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของส่วนผสม

จะมีการทดสอบหาค่าคุณสมบัติด้านกายภาพของส่วนผสม เช่น ความหนาแน่น (Density) ความหนืด (Viscosity) ของส่วนผสมเถ้าลอยกับซีเมนต์ และส่วนผสมของดินเบนโทไนต์กับซีเมนต์ โดยที่จะมีการผันแปรเชิงน้ำหนักของเถ้าลอยและดินเบนโทไนต์จากร้อยละ 10 ถึง 50 เพื่อศึกษาหาส่วนผสมที่เหมาะสม และเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติพื้นฐานด้านกายภาพ ผลที่ได้จะนำมาเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาที่ดำเนินอยู่ทั้งในและต่างประเทศเพื่อหาความคล้ายคลึงและความแตกต่างต่อไป

2) ทดสอบกำลังรับแรงเชิงกลศาสตร์

การทดสอบหาค่ากำลังกดในแกนเดียว ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น ค่ากำลังรับแรงดึง ค่ากำลังรับแรงยึดเหนี่ยว และค่ากำลังรับแรงเฉือน ของส่วนผสมเถ้าลอยกับซีเมนต์ และส่วนผสมดินเบนโทไนต์กับซีเมนต์ โดยใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM ผลที่ได้จะระบุถึงผลกระทบของปริมาณเถ้าลอยที่ผสมลงในซีเมนต์ต่อค่าความแข็งของวัสดุผสมเมื่อแข็งตัวแล้วตามระยะเวลาการบ่มตัวที่ 3, 7, 14, 21 และ 28 วันตามลำดับ

3) ทดสอบความซึมผ่านของรอยแตกในหิน

ก่อนที่จะทำการรอดด้วยส่วนผสมของเถ้าลอยกับซีเมนต์ลงในระหว่างรอยแตกของหินจะต้องมีการตรวจวัดความซึมผ่านของรอยแตกในตัวอย่างหินที่ปราศจากวัสดุอุดเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการเปรียบเทียบขีดความสามารถของส่วนผสมต่างๆ ในงานวิจัยนี้ รูปที่ 1 แสดงการตรวจวัดโดยสังเขป โดยค่าความซึมผ่านในตัวอย่างหินจะถูกวัดภายใต้ความเค้นตั้งฉากอย่างน้อย 3 ระดับ (จาก 1 ถึง 4 MPa) ซึ่งผลจากการตรวจวัดนี้จะบ่งบอกถึงค่าความเค้นกดหรือความลึกที่มีผลกระทบต่อค่าความซึมผ่านของรอยแตกในหิน

4) ทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมในรอยแตก

การทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมจะมีรูปแบบคล้ายคลึงกับการทดสอบที่ 3 โดยจะเริ่มทดสอบหลังจากที่อัดส่วนผสมในขณะที่เป็นของเหลวลงในรอยแตกด้วยปั๊มภายใต้แรงดัน การอัดส่วนผสมและการทดสอบค่าความซึมผ่านนี้จะดำเนินการในขณะที่รอยแตกนั้นอยู่ภายใต้ความเค้นกดในระดับต่างๆ กันตามระยะเวลาที่กำหนดตามมาตรฐานสากล

ขั้นตอนที่ 4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบและเปรียบเทียบผล

ผลที่ได้จากการตรวจวัดค่าความซึมผ่านของส่วนผสมเถ้าลอยและซีเมนต์ และส่วนผสมดินเบนโทไนต์กับซีเมนต์ในอัตราส่วนผสมของระดับต่างๆ กัน จะนำมาเปรียบเทียบความสามารถของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยกับส่วนผสมที่ใช้ดินเบนโทไนต์ และจะทำการวิเคราะห์ความเหมือนและความแตกต่างเพื่อหาแนวทางปรับปรุงต่อไป

ขั้นตอนที่ 5 การถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่กลุ่มเป้าหมาย

ผลงานวิจัยจะนำไปเผยแพร่องค์ความรู้ในรูปของบทความในการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการและวารสารทางวิชาการในระดับนานาชาติ

ขั้นตอนที่ 6 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิด ขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุปจะนำเสนอโดยละเอียดในรายงานฉบับสมบูรณ์ เพื่อที่จะส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลงานวิจัยที่เสนอนี้มีประโยชน์มากมายกับงานด้านธรณีวิทยา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และวิศวกรรมธรณี ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

- 1) สามารถทราบถึงศักยภาพของส่วนผสมเถ้าลอยผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมธรณีด้านการอุดรอยแตกในมวลหิน
- 2) ลดต้นทุนการใช้วัสดุเดิมในการอุดรอยแตกในมวลหินและยังสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับเถ้าลอยที่เหลือทิ้งจากการเผาไหม้ในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าและลดของเสียที่จะระบายออกสู่สิ่งแวดล้อม
- 3) สร้างองค์ความรู้ที่เป็นประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรม วิศวกรรมที่เกี่ยวข้อง และสิ่งแวดล้อมซึ่งจะเผยแพร่ในรูปแบบของการตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารระดับนานาชาติและจะเผยแพร่องค์ความรู้ให้กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั้งภาครัฐและเอกชน

1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยที่เสนอนี้จะมีประโยชน์อย่างมากและโดยตรงกับหลายหน่วยงาน ทั้งภาครัฐและเอกชน สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ และวิศวกรรมธรณี รวมไปถึงหน่วยงานที่ทำงานเกี่ยวข้องกับการก่อสร้างในชั้นหิน เช่น การสร้างเขื่อน การสร้างอุโมงค์ เหมืองแร่บนดินและใต้ดิน หน่วยงานเหล่านี้ได้แก่

- 1) กรมทรัพยากรน้ำ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
- 2) กองธรณีเทคนิค กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
- 3) สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
- 4) กองธรณีเทคนิค กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน
- 5) สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ วิศวกรรมธรณี วิศวกรรมโยธา และวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
- 6) บริษัทเอกชนที่ออกแบบและก่อสร้างเขื่อน อุโมงค์ และความลาดชันในมวลหิน
- 7) กระทรวงพลังงาน

- 8) บริษัทสำรวจและขุดเจาะน้ำมันในประเทศไทย
- 9) องค์การบริหารส่วนตำบล และองค์การบริหารส่วนจังหวัด

1.8 แผนการถ่ายทอดเทคโนโลยีหรือผลการวิจัยสู่กลุ่มเป้าหมาย

องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้จะนำไปเผยแพร่ในรูปแบบของบทความในการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการระดับนานาชาติ



บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในหัวข้อนี้สรุปผลที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรมวิจัยเบื้องต้นที่เกี่ยวกับเถ้าลอยจากกระบวนการเผาไหม้ถ่านหิน ความชื้นผ่านในมวลหินและรอยแตกในหิน การอุดหลุมเจาะในชั้นหิน วัสดุการอุดรอยแตกเพื่อลดการซึมผ่านในรอยแตกของหิน และกำลังยึดติดของการอุดซีเมนต์ในมวลหิน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1 เถ้าลอยจากกระบวนการเผาไหม้ถ่านหิน

เถ้าลอย (Fly Ash หรือ Pulverized Fuel Ash) ได้จากการเผาถ่านหินและถูกดักจับโดยเครื่องจับฝุ่นระบบไฟฟ้าสถิตย์ มีลักษณะเป็นฝุ่นละเอียดสีเทาปนน้ำตาล ประกอบด้วยออกไซด์ของโลหะหลายชนิด คุณภาพของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับคุณภาพของถ่านหิน (Anthracite, Bituminous, Sub-bituminous, Lignite) ในเมืองไทยจะเป็นถ่านหินคุณภาพต่ำคือ Lignite ทำให้เถ้าลอยที่ได้มีคุณภาพต่ำ แหล่งเถ้าลอยที่สำคัญของเมืองไทยอยู่ที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งใช้ถ่านหิน Lignite (บางส่วนเป็น Sub-bituminous) ในการต้มน้ำเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า จากกระบวนการเผาไหม้ทำให้ได้เถ้าลอยประมาณ 3 ล้านตันต่อปี เป็นเถ้าลอยที่มีคุณภาพค่อนข้างต่ำ ซึ่งมีปริมาณมากและราคาถูกจึงจำเป็นต้องใช้พื้นที่ขนาดใหญ่มากในการฝังกลบ (Cheerarat and Jaturapitakkul, 2004; Nimjaroen, 2013)

มาตรฐานของเถ้าลอย ตาม ASTM C 618 แบ่งออกเป็น 3 ชั้น คือ N, F, C ตามคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ Class N จะมีคุณภาพดีที่สุดในชั้น และ Class C มีคุณภาพต่ำที่สุดในชั้น ซึ่ง Fly Ash จากแม่เมาะจะอยู่ในชั้นคุณภาพ F ถึง C ในตารางที่ 2.1 แสดงถึงตัวอย่างองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากถ่านหินชนิดต่าง ๆ

เมื่อเถ้าลอยสัมผัสกับน้ำภายใต้อุณหภูมิปกติ จะเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้มีคุณสมบัติเชื่อมประสานได้อย่างดี จึงมีแนวคิดที่จะใช้เถ้าลอยในอุตสาหกรรมซีเมนต์มากกว่าในงานชนิดอื่นด้วยเหตุผลหลัก คือ 1) เถ้าลอยมีออกไซด์ของธาตุซิลิกา อลูมินา และเหล็ก ซึ่งออกไซด์ของธาตุเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีและทำให้คอนกรีตสามารถรับกำลังอัดได้มากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อใช้เถ้าลอยที่มีคุณภาพดีและในปริมาณที่เหมาะสม และ 2) เถ้าลอยมีอนุภาคที่ค่อนข้างเล็กและส่วนใหญ่เป็นเม็ดกลมเมื่อผสมในคอนกรีต เถ้าลอยจะเข้าไปอุดช่องว่างเล็กๆ ระหว่างปูนซีเมนต์และหินหรือทรายทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นขึ้น และลักษณะทรงกลมของเถ้าลอยนี้จะช่วยให้คอนกรีตมีการไหลลื่นได้ดีขึ้นทำเทคอนกรีตลงในแบบทำได้สะดวกและง่ายขึ้น นอกจากนี้คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยยังสามารถผสมได้ง่ายและลดพลังงานในการผสม เนื่องจากรูปร่างที่กลมและผิวสัมผัสที่ลื่นของเถ้าลอยทำให้แรงเสียด

ทานระหว่างอนุภาคต่ำลง และยิ่งข้อดีหลายประการได้แก่ เพิ่มความสามารถในการถ่ายเทได้ เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนของคอนกรีต ลดผลกระทบจากการแยกตัว ลดความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ลดการหดตัว ลดอัตราการซึมน้ำผ่านคอนกรีต และที่สำคัญคือเพิ่มกำลังรับแรงกดและดึงของคอนกรีต เมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น แต่ทั้งนี้การใช้เถ้าลอยก็มีจุดด้อยในด้านอัตราการพัฒนากำลังรับแรงกดของคอนกรีตต่ำลงในช่วงอายุต้น (แต่จะมีค่ากำลังสูงกว่าเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น) ลดความต้านทานต่อสภาพการแข็งตัวและละลายของน้ำสลับกันไปและทำให้ต้องใช้สารเพิ่มฟองอากาศมากขึ้นเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีปริมาณฟองอากาศตรงตามที่ต้องการในระดับเดียวกับคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าลอยผสมอยู่

คุณสมบัติทางกายภาพเถ้าลอยที่บดละเอียดผ่านการเผาไหม้จะสันดาปและหลอมละลายเมื่อเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง อนุภาคของเถ้าลอยมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน จนถึง 200 ไมครอน โดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 15-30 ไมครอน ความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยจากแม่เมาะอยู่ที่ 2.2-2.7 องค์ประกอบทางเคมีเถ้าลอยมีองค์ประกอบหลักทางเคมีเป็นออกไซด์ของธาตุซิลิกา (SiO_2), อลูมินา (Al_2O_3) และเหล็ก (Fe_2O_3) จากการศึกษาพบว่าการใช้เถ้าลอยจากแหล่งแม่เมาะที่มีซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) ระหว่างร้อยละ 29.2 ถึง 43.1 และมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ระหว่างร้อยละ 8.1 ถึง 23.4 ซึ่งมีความแตกต่างทางด้านเคมีพอสมควรแต่ให้ผลการทดสอบกำลังอัดไม่แตกต่างกันมากนัก

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากถ่านหินชนิดต่าง ๆ (Nimjaroen, 2013)

Components	Anthracite	Bituminous	Subbituminous	Lignite
SiO_2 (%)	80-90	20-60	40-60	15-45
Al_2O_3 (%)	0-5	5-35	20-30	20-25
Fe_2O_3 (%)	0-3	10-40	4-10	4-15
CaO (%)	0-1	1-10	5-30	15-40
SO_3 (%)	0-1	0-5	2-7	5-10
LOI* (%)	0-2	0-15	0-3	0-5

*LOI = Loss of ignition

2.2 ความซึมผ่านในมวลหินและรอยแตกในหิน

ความซึมผ่านเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของของไหล (เช่น น้ำ, น้ำ+ก๊าซ, น้ำ+ก๊าซ+น้ำมัน) ในการไหลผ่านวัสดุที่มีรูพรุนและรอยแตก โดยค่าความซึมผ่านรวมของมวลหินสามารถแทนด้วยสมการ

$$k = k_f + k_m \quad (2.1)$$

โดย k คือ ความซึมผ่านรวมของมวลหิน k_f คือ ความซึมผ่านของแต่ละรอยแตก และ k_m คือ ความซึมผ่านของเนื้อหิน หินที่มีเนื้อเป็นผลึกของไหลจะสามารถไหลผ่านเนื้อหินได้น้อยกว่าการไหลผ่านรอยแตก เนื่องจากจำนวนรูพรุนที่ต่อกันและขนาดของรูพรุนในหินแข็งโดยทั่วไปมีน้อย (Gale, 1975; Iwai, 1976; Raven and Gale, 1985) ค่าความซึมผ่านยังมีผลต่อพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของหินและต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของเสถียรภาพโครงสร้างวิศวกรรมในหิน ของไหลในตัวอย่างหินสามารถไหลผ่านเนื้อหินและช่องว่างที่ต่อกันหรือทั้งสองแบบ ค่าความซึมผ่านสามารถแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ 1) ความซึมผ่านของเนื้อหิน 2) ความซึมผ่านของรอยแตก และ 3) ความซึมผ่านของทั้งเนื้อหินและรอยแตก (ผลรวมของ 1 และ 2)

2.2.1 ความซึมผ่านของเนื้อหิน

ค่าความซึมผ่านของเนื้อหิน (k_m) รูปทรงกระบอกสามารถคำนวณจาก Darcy's law ได้ดังนี้

$$k_m = \frac{4q\mu}{\pi D^2 (dp/dx)} \quad (2.2)$$

โดย q คือ อัตราการเคลื่อนที่ของของไหลผ่านตัวอย่างหิน dp/dx คือ Pressure Gradient ตามความยาว (dx) ของตัวอย่างหิน μ คือ ความหนืดของของไหล และ D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างหิน

2.2.2 ความซึมผ่านของรอยแตก

ปัจจัยหลักที่ควบคุมการไหลและค่าความซึมผ่านในรอยแตก คือ ความขรุขระของผิวรอยแตก ความเปิดเผย ทิศทางการวางตัว ความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือน และพฤติกรรมด้านการรับน้ำหนัก (Indraratna and Ranjith, 2001; Ranjith and Viete, 2011; Barton et al., 1985) สมการการหาค่าความซึมผ่านในรอยแตกจะเปลี่ยนไปตามปัจจัยที่มาเกี่ยวข้องคือ

$$k = \frac{e^2}{12} \quad (2.3)$$

โดย k คือ ความซึมผ่านของรอยแตกเดี่ยว และ e คือ ความเปิดเผยของแนวแตกที่จะขึ้นอยู่กับความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือนที่มากกระทำบนแนวแตก สมมติให้เนื้อหินมีคุณสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง (Isotropic) และมีความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง ตาม Hooke's law ความสัมพันธ์ของความเปิดเผยและความเค้นจะเป็นดังนี้

$$e = e_0 \pm \delta e \quad (2.4)$$

โดย e_0 คือ ความเปิดเผยเริ่มต้นของแนวแตก และ δe คือ ความเปลี่ยนแปลงของความเปิดเผยที่เกิดจากความเค้นที่มากระทำต่อแนวแตก ในกลศาสตร์หิน Jaeger and Cook (1979) ได้เสนอสมการหาค่าความเปลี่ยนแปลงทั่วไป (δe_n) ดังนี้

$$\delta e_n = \frac{1}{K_n} [\sigma_z \cos \beta + \sigma_h \sin \beta] \quad (2.5)$$

โดย K_n คือ ความแกร่งตั้งฉากของรอยแตก σ_z คือ ความเค้นในแกนตั้ง σ_h คือ ความเค้นในแกนนอน และ β คือ มุมการวางตัวของรอยแตก

2.3 การอุดหลุมเจาะในชั้นหิน

การอุดหลุมเจาะในชั้นหินในอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ สามารถจำแนกตามวัตถุประสงค์ที่ทำการอุด โดยได้จำแนกการอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ออกเป็น 3 ประเภทได้แก่ (Gray, 1992)

- 1) การอุดแบบถาวร
- 2) การอุดแบบชั่วคราว
- 3) การอุดแบบกึ่งถาวร

Fuenkajorn และ Daemen (1996) แบ่งประเภทของการอุดหลุมเจาะในชั้นหินในอุตสาหกรรมทุกประเภทออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

- 1) การอุดในหลุมเจาะที่ยังมีการใช้งานอยู่ (Sealing actively used boreholes)
- 2) การอุดหลุมเจาะที่เลิกใช้แล้ว (Sealing unused boreholes)

การอุดในหลุมเจาะที่ถูกใช้งานอยู่เกี่ยวข้องกับการอุดใน annular zone ระหว่างท่อกรุ ซึ่งการอุดหลุมเปิดจะถูกใช้ต่อไปในอนาคต เหตุที่ต้องอุดหลุมเจาะที่ถูกใช้งานอยู่ไว้ป้องกันท่อกรุจากการผุกร่อนเพื่อป้องกันการ Blowout ด้วยการอุดเพื่อป้องกันท่อกรุจากแรงสั่นสะเทือนจากการเจาะในระดับลึก และป้องกันการเกิดโซนไหลเวียน (Economides, et al., 1998)

การอุดในหลุมที่ไม่ใช้งานแล้วเป็นตัวอย่างของการอุดแบบถาวร ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นการอุดในหลุมเจาะที่ถูกละทิ้งหรือบ่อน้ำ หน้าที่หลักของการอุดหลุมที่ไม่ใช้งานแล้ว คือการแยกโซนของก๊าซ หรือของไหล ซึ่งส่วนใหญ่จะเน้นในเรื่องการปกป้องทางสิ่งแวดล้อม (Fuenkajorn and Daemen, 1996) เหตุในการอุดหลุมเจาะที่ไม่ใช้งานแล้วก็เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของน้ำใต้ดินเพื่อป้องกัน poor aquifer จากการไหลใน water-bearing zone เพื่อรักษา aquifer yield และ artesian pressure และกำจัดภัยพิบัติทางกายภาพใด ๆ (Smith, 1993)

2.4 วัสดุและการอุดรอยแตกเพื่อลดการซึมผ่านในรอยแตกของหิน

การศึกษาของ Baik et al. (2007) ยืนยันว่าเบนโทไนด์ที่ได้รับการบดอัดถือว่าเป็นวัสดุที่มีศักยภาพในการช่วยลดความเป็นกรดและต่างสำหรับกระบวนการป้องกันการรั่วไหลของของเสียใต้ดิน จำพวกสารที่มีระดับกัมมันตภาพรังสีสูง การพังทลายของอนุภาคเบนโทไนด์ที่เกิดจากการไหลของน้ำใต้ดินบริเวณรอยต่อของเบนโทไนด์ที่ได้รับการบดอัดภายใต้รอยแตกของหินแกรนิตได้ถูกศึกษาทดลองภายใต้สภาวะธรณีวิทยาทางเคมีที่แตกต่างกันไป ผลการทดลองพบว่าอนุภาคเบนโทไนด์อาจจะกักร่อนออกมาจากสารลดความเป็นกรดและต่างในเบนโทไนด์ที่ได้รับการบดอัด โดยเป็นผลมาจากการไหลของน้ำบาดาลซึ่งขึ้นอยู่กับเวลาในการสัมผัส อัตราการไหลของน้ำบาดาลและค่าตัวแปรเกี่ยวกับธรณีวิทยาทางเคมีของน้ำใต้ดิน เช่น ความเป็นกรดต่างและความเข้มข้นของไอออน ถึงแม้ว่าการแทรกตัวของเบนโทไนด์เข้าไปในรอยแตกของหินจะเป็นตัวช่วยลดการกักร่อนรอยแตกของหินจากน้ำใต้ดินก็ตาม แต่การเกิดการประสานกันของเบนโทไนด์ก็ยังถือว่าเป็นกระบวนการหลักในการชะล้างการพังทลายของอนุภาคเบนโทไนด์ ซึ่งจากการทดลองพบว่าการพังทลายของอนุภาคเบนโทไนด์ได้รับผลกระทบอย่างมากจากความเข้มข้นของไอออนของน้ำใต้ดิน การพังทลายของอนุภาคเบนโทไนด์จากการไหลของน้ำใต้ดินไม่ได้ทำให้ประสิทธิภาพทางกายภาพ และการทำงานของสารลดความเป็นกรดและต่างในเบนโทไนด์ที่ได้รับการบดอัดนี้ลดลง

Rahmani (2004) สรุปไว้ว่าการอุดรอยแตกถูกนำมาใช้เพื่อเป็นการเพิ่มความแข็งแรงมากกว่า 25 ปีที่ผ่านมา สามารถลดการเคลื่อนตัว และลดค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านทั้งของดินและมวลหินแตก เนื่องจากความสำคัญทางวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ในการคาดการณ์ผลกระทบของการอุดรอยแตกนั้น มีความน่าสนใจ ซึ่งมีวิธีการต่าง ๆ มากมายที่นำมาใช้ประเมินปริมาณของผลกระทบของการอุดรอยแตก หนึ่งในนั้นคือการประเมินด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข วิธีนี้สามารถจำลองการกระจายตัวของการอุดรอยแตกและผลกระทบที่เกิดขึ้นบนรอยแตกได้มีการศึกษาด้วยวิธีเชิงตัวเลขจำนวนน้อยที่สามารถแสดงให้เห็นถึงการแทรกซึมของการอุดรอยแตกผ่านรอยแตกของหินได้ ผลการศึกษาแบบจำลองสามารถใช้ทำนายลักษณะการแทรกซึมของการอุดรอยแตกสำหรับสภาวะของรอยแตกและวัสดุการอุดรอยแตกที่แตกต่างกันได้

2.5 กำลังยึดติดของการอุดซีเมนต์ในมวลหิน

Akgun (1996) ทำการวิจัยกำลังยึดติดซีเมนต์ที่ใช้อุดในหิน วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือศึกษาจากความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเกี่ยวกับความแข็งแรงกับอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อรัศมีของแท่งซีเมนต์ ค่าความแข็งแรงในแนวแกน (Axial strength) กำลังยึดติดระหว่างซีเมนต์กับหิน (Bond strength) และความแข็งแรงเฉือนสูงสุด (Peak shear strength) โดยทดสอบ push-out ของแท่งซีเมนต์ในหลุมตัวอย่างหินที่พื้ทรงกระบอกที่รัศมีและความยาวแท่งซีเมนต์แตกต่างกัน ผลการทดสอบปรากฏว่าคุณสมบัติเกี่ยวกับความแข็งแรงทั้ง 3 ตัว มีค่าสูงที่สุดในตัวอย่างหินที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อรัศมี

ของแท่งซีเมนต์ที่มีค่าเท่ากับ 8.0 ผลจากการทดสอบระบุว่า การออกแบบการอัดหลุมเจาะแบบถาวรด้วยซีเมนต์ควรจะออกแบบให้อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อรัศมีของแท่งซีเมนต์มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 8.0 เพื่อให้ซีเมนต์มีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์เพียงพอ

Ouyang and Daemen (1996) ทดสอบการอัดหลุมเจาะในชั้นหินโดยใช้เบนโทไนต์และวัสดุผสมระหว่างเบนโทไนต์กับหินย่อยของหินทัฟฟ์ (Crushed tuff) การทดสอบการอัดหลุมเจาะด้วยเบนโทไนต์ตัวอย่างการอัดทั้งหมดจะถูกทดสอบความซึมด้วยวิธี constant head, standard falling head และ modified falling head ใช้ตัวอย่างการอัดทั้งหมด 14 ตัวอย่าง การทดสอบมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาค่าความซึมผ่านของเบนโทไนต์ที่เกี่ยวข้องกับ 3 ปัจจัย คือ 1) คุณสมบัติทางด้านเคมีของน้ำที่ใช้ผสมกับเบนโทไนต์และน้ำที่ใช้ในการทดสอบ 2) ขนาดของตัวอย่าง และ 3) การทดสอบแบบ High injection pressure flow test ผลการทดสอบปรากฏว่าค่าความซึมผ่านของตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่อใช้น้ำที่มีสารละลายโซเดียมไพโรฟอสเฟตในการผสมกับเบนโทไนต์และในการทดสอบ ขนาดของตัวอย่างไม่มีผลทำให้ค่าความซึมผ่านของเบนโทไนต์เพิ่มขึ้นหรือลดลง และค่าความซึมผ่านของตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มแรงดันของน้ำจากการทดสอบแบบ High injection pressure flow test

Ran et al. (1997) ศึกษาคุณสมบัติของเบนโทไนต์อัดตัวแบบเคลื่อนที่ (Dynamic compaction) โดยศึกษาตัวอย่างเบนโทไนต์อัดตัวที่ใช้น้ำกลั่นในการผสม และตัวอย่างเบนโทไนต์อัดตัวที่ใช้น้ำเกลือในการผสม คุณสมบัติที่ศึกษาคือค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของเบนโทไนต์อัดตัวซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความซึมผ่าน ปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่สุด ผลกระทบของพลังงานในการอัดตัว น้ำหนักของลูกตุ้ม ความหนาของการอัดตัวและการผสมน้ำเกลือ เบนโทไนต์ที่ใช้ในการทดสอบ คือ โซเดียมเบนโทไนต์ มีความถ่วงจำเพาะ 2.79 มีค่าความหนาแน่นก้อน 1.23 Mg/m³ มีค่าความชื้นอยู่ระหว่าง 8.7-10.5% มีความสามารถในการบวมตัวถึง 28 ml/g การอัดเบนโทไนต์แบบเคลื่อนที่ทำการอัดเบนโทไนต์ 3-10 ชั้น และใช้ลูกตุ้มในการอัด 2 ถึง 8 ครั้ง หรือใช้แรงในการอัดตัวตั้งแต่ 5,400 ถึง 21,000 กิโลนิวตัน ผลการทดสอบพบว่า เบนโทไนต์อัดตัวที่ใช้น้ำกลั่นในการผสมมีค่าความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1.74 Mg/m³ ซึ่งมีปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 0-18% ส่วนเบนโทไนต์อัดตัวที่ใช้น้ำเกลือผสมมีค่าความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1.86 Mg/m³ ซึ่งมีปริมาณความชื้นที่ 12% และการเพิ่มพลังงานและลูกตุ้มในการอัดเบนโทไนต์จะทำให้ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่สุดมีค่าลดลง ทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น ผลการทดสอบระบุว่า การออกแบบการอัดหลุมเจาะด้วยเบนโทไนต์อัดตัวควรใช้น้ำเกลือในการผสมเบนโทไนต์ เนื่องจากให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงกว่าการใช้น้ำกลั่นในการผสมซึ่งจะทำให้มีค่าความพรุนต่ำและมีค่าความซึมผ่านที่ต่ำกว่า

Akgun and Daemen (2002) ศึกษาอิทธิพลของเปอร์เซ็นต์การอัดตัวด้วยน้ำที่มีต่อความแข็งของซีเมนต์ที่สามารถขยายตัวได้ (Expensive cement) โดยการทดสอบแบบ Push-out Test ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การอัดตัวด้วยน้ำกับความแข็งของซีเมนต์และรัศมีของตัวอย่างการอัดกับความแข็งของซีเมนต์ การเตรียมซีเมนต์ด้วยการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ประเภทที่ I หรือ II ผสมกับน้ำกลั่น 50 % เติมสารที่ทำให้เกิดการขยายตัว (D53) 10 % และ สารที่ทำให้เกิดการกระจายตัว (D65) 1% โดยน้ำหนัก ตามมาตรฐานสถาบันปิโตรเลียมสหรัฐอเมริกา (API) ตัวอย่างหินเป็นหินที่ฟรูปทรงกระบอกที่เจาะรูตรงกลางตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลางมีรัศมี 6.35 12.7 25.4 และ 50.8 มิลลิเมตร รัศมีภายนอกมีค่าระหว่าง 38.1 ถึง 93.66 มิลลิเมตร ซีเมนต์ที่อัดในรูปทดสอบในตัวอย่างหินมีค่าความยาวต่อรัศมีเท่ากับ 2.0 และซีเมนต์ที่อัดจะถูกบ่มไว้ในน้ำ 8 วัน ก่อนนำมาทดสอบ เปอร์เซ็นต์การอัดตัวด้วยน้ำของซีเมนต์มี 3 ระดับ คือ แห้ง เปอร์เซ็นต์การอัดตัวด้วยน้ำน้อย และเปอร์เซ็นต์การอัดตัวด้วยน้ำปานกลาง จากการทดสอบพบว่าค่าความแข็งในแนวแกน ความเสียหายระหว่างซีเมนต์กับหินและความแข็งเฉือนสูงสุดในตัวอย่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปอร์เซ็นต์การอัดตัวด้วยน้ำของซีเมนต์เพิ่มขึ้นและรัศมีของตัวอย่างน้อยลง ผลจากการทดสอบระบุว่าการออกแบบการอุดหลุมเจาะแบบถาวรด้วยซีเมนต์ควรจะต้องออกแบบให้อุดในตำแหน่งที่อยู่ใต้ระดับน้ำบาดาลเพื่อให้มีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์ที่เพียงพอ

Akgun and Daemen (2004) ได้ศึกษาการขยายตัวของวัสดุประสานในการอุดหลุมเจาะใต้ดินทำให้เกิดความเค้นตามแนวรัศมีบนผนังและเนื่องจากความเครียดในแนวแกนนำไปประยุกต์ใช้กับการปลั๊กหลุมเจาะอันเนื่องมาจากการบวมตัวของวัสดุอุดหลุม เนื่องจากแรงเครียดตามแนวแกนนั้นจะทำให้เกิดแรงดึงของรอยแตกในตัวหิน การลดหรือการกำจัดแรงดึงในหินจึงมีความสำคัญมากในการกักเก็บของเสีย ปัจจุบันมีทฤษฎีเกี่ยวกับการกระจายแรงตามแนวรัศมี และแรงดึงในระบบการปลั๊กหลุมเจาะเนื่องจาก combined axial อุณหภูมิ lateral load รวมทั้งการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าแรงดึงเฉลี่ยในตัวหิน เกินกว่าแรงเริ่มต้นในการอุดหลุม แสดงให้เห็นว่าแรงเริ่มต้นในการปลั๊กหลุมนั้นเสถียรพอต่อแรงดึงของรอยแตก แรงดึงของหินที่ถูกวัดในการศึกษานี้จะมีค่าต่ำเนื่องจากอยู่ในสถานะที่ไม่มี ความดันล้อมรอบ

Tepnarong (2012) ศึกษาการทดสอบกำลังแรงเฉือนสูงสุดระหว่างซีเมนต์อัดและรอยแตกในเกลื่อหินประกอบด้วย การทดสอบ Push-out และการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง โดยเรียงตัวอย่างเกลื่อหินเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร จากเกลื่อหินชุดมหาสารคามภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ใช้ส่วนผสมซีเมนต์ คือ ปูนซีเมนต์ชนิดทนเค็ม 700 กรัม น้ำเกลื่ออิ่มตัว (NaCl saturated brine) 385 กรัม สารผสมเพิ่มเพื่อลดฟองอากาศ (Sika Plastocrete) 20 กรัม และสารผสมเพิ่มเพื่อการขยายตัว (Sika Interplast ZX) 3.5 กรัม ในการทดสอบ Push-out และการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง ตัวอย่างซีเมนต์ถูกบ่มเป็นเวลา 3 วัน ก่อนการทดสอบ ผลการทดสอบตามเกณฑ์ของคู่มือพบว่าค่าแรงเสียหายยึดติดระหว่างซีเมนต์และเกลื่อหินมีค่าเท่ากับ 70 และ 69 อกศา สำหรับรอยแตกแบบขรุขระและรอยแตกแบบตัดเรียบตามลำดับ แรงยึดติดในรอยแตกระหว่างซีเมนต์และเกลื่อหินมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.42 เมกกะปาสคาล การทดสอบ Push-out ให้ค่าผลการทดสอบที่สูงสุดตามแรงกดในแนวแกน 7.05–11.23 เมกกะปาสคาล อันเป็นผลมาจากผลกระทบของค่าอัตราส่วนปิวซ์ของที่จะเพิ่มความเค้นตึงฉากที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของตัวอย่างซีเมนต์และเกลื่อหินในขณะที่ให้แรงกดตาม

แนวแกน จึงชี้ให้เห็นว่าผลที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงนั้นให้ค่าที่อยู่ให้เชิงอนุรักษ์ที่มากกว่า สำหรับการทดสอบหาค่ากำลังเฉือนสูงสุดระหว่างเกลื้อหินและซีเมนต์ที่ใช้ในการอุดหลุมเจาะ โดยซีเมนต์สำหรับอุดหลุมเจาะที่นำมาใช้ในการทดสอบครั้งนี้สามารถให้ประสิทธิภาพเชิงกลศาสตร์เป็นไปตามที่ต้องการ

Samaiklang and Fuenkajorn (2013) ศึกษาประสิทธิภาพเชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์ของเกรตซีเมนต์เชิงพาณิชย์ที่เกรดที่ในรอยแตกของหิน ผลที่ได้มาเปรียบเทียบในเทอมของกำลังกดสูงสุด กำลังดึงสูงสุด กำลังยึดติดสูงสุดและ push-out สูงสุด ในรอยแตกของหิน ส่วนผสมซีเมนต์ทั้งหมดประกอบด้วยอัตราส่วนของน้ำกับซีเมนต์ที่ 0.60 กำลังกดสูงสุดหลังจากบ่มตัว 28 วันเป็น 25.77 ± 2.54 เมกกะปาสคาล และกำลังดึงสูงสุดเป็น 2.80 ± 0.27 เมกกะปาสคาล การทดสอบกำลังยึดติดสูงสุดและ push-out สูงสุดแสดงให้เห็นว่า กำลังยึดติดระหว่างซีเมนต์เกรดที่กับรอยแตกของหินทรายชุดภูกระดึง ในช่วง 1.03 ถึง 2.53 เมกกะปาสคาล และ push-out สูงสุดในช่วง 4.06 ถึง 5.55 เมกกะปาสคาล

Tepnarong and Deethouw (2014) ศึกษาประสิทธิภาพตะกอนประปา (sludge) ที่ผสมกับซีเมนต์สำหรับอุดหลุมเจาะในเกลื้อหิน ใช้ส่วนผสมปูนซีเมนต์ชนิดทนเค็มผสมกับตะกอนประปา 700 กรัม น้ำเกลื้ออิมตัว 700 กรัม สารผสมเพิ่มเพื่อลดฟองอากาศ 20 กรัม และสารผสมเพิ่มเพื่อการขยายตัว 3.5 กรัม เพื่อการเลือกอัตราส่วนของตะกอนประปาผสมกับซีเมนต์ (S:C) ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอุดในเกลื้อหิน เพื่อการเลือกอัตราส่วนผสมของตะกอนประปากับซีเมนต์ (S:C) ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอุดในเกลื้อหิน กำลังกดสูงสุดหลังจากบ่มตัว 28 วันเป็น 9.58 ± 0.52 เมกกะปาสคาลจากอัตราส่วน S:C = 5:10 กำลังดึงสูงสุดเป็น 1.99 ± 0.14 เมกกะปาสคาล การทดสอบกำลังยึดติดสูงสุดเป็น 7.49 เมกกะปาสคาล

Pattani and Tepnarong (2015) ได้ศึกษากำลังยึดติดของการอุดซีเมนต์ในเกลื้อหินที่ขึ้นกับเวลาเพื่อทดสอบประสิทธิภาพเชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์ของปูนซีเมนต์เพื่อนำมาใช้อุดในชั้นเกลื้อหินในฟังก์ชันของเวลา ผลการทดสอบความซึมผ่านของซีเมนต์พบว่าเมื่อระยะเวลาการบ่มตัวเพิ่มขึ้น ค่าความซึมผ่านและค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านจะลดลง ผลการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงระยะสั้นพบว่าแรงเสียดทานยึดติดระหว่างซีเมนต์และเกลื้อหินมีค่าเท่ากับ 44 องศา และแรงยึดติดมีค่าเท่ากับ 2.12 เมกกะปาสคาล การทดสอบ Push-out ระยะยาวถูกดำเนินการในแท่งซีเมนต์กับชุดความสัมพันธ์การบ่มตัวระยะยาวที่ความเค้นเฉือนคงที่ บนพื้นฐานพฤติกรรมการเคลื่อนไหลของความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือน ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวแนวเฉือนและเวลาโดยระดับความเค้นเฉือนคงที่ต่าง ๆ ที่ 30 วัน รูปแบบ Hookean-Kelvin ถูกเลือกเพื่อหาค่าพฤติกรรมการเคลื่อนไหลของความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือน ได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของความยืดหยุ่นเฉือน ความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือนและสัมประสิทธิ์ความหนืด ผลการคาดการณ์เป็นไปตามข้อมูลจากผลการทดสอบเป็นอย่างดี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นรูปแบบการเคลื่อนไหลของความหนืดเชิงยืดหยุ่นแบบไม่เป็นเส้นตรง

บทที่ 3

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบและการวิเคราะห์ส่วนผสม

เนื้อหาในบทนี้อธิบายคุณลักษณะพื้นฐานของวัสดุที่นำมาทดสอบในงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบด้วย ถ้ำลอย (Fly Ash) ดินเบนทอนไนต์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และตัวอย่างหินทราย และรวมไปถึงการจัดเตรียมส่วนผสมต่าง ๆ สำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของส่วนผสมในบทถัดไป

3.1 ตัวอย่างถ้ำลอย

ตัวอย่างถ้ำลอย (Fly Ash หรือ Pulverized Fuel Ash) ที่ใช้ทดสอบในการวิจัยได้รับมาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะจังหวัดลำปางการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โดยการเผาถ่านหินและดักจับโดยเครื่องจับฝุ่นระบบไฟฟ้าสถิตย์ ถ้ำลอยมีลักษณะเป็นฝุ่นละเอียดสีเทาปนน้ำตาล ประกอบด้วยออกไซด์ของโลหะหลายชนิด คุณภาพของของถ้ำลอยขึ้นอยู่กับคุณภาพของถ่านหิน (Anthracite, Bituminous, Sub-bituminous, Lignite) ในเมืองไทยจะเป็นถ่านหินคุณภาพต่ำคือ Lignite ทำให้ถ้ำลอยที่ได้มีคุณภาพต่ำ ซึ่งใช้ถ่านหิน Lignite (บางส่วนเป็น Sub-bituminous) ที่ได้นำมาใช้ในการทดสอบ (รูปที่ 3.1 และ 3.2) ถ้ำลอยลิกไนต์มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน ซึ่งสารนี้เป็นวัสดุที่มีซิลิกา และอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้วสารปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าสารปอซโซลานมีความละเอียดมากๆ และมีน้ำเพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติยึดประสานถ้ำลอยลิกไนต์โดยทั่วไปแล้วจะมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์

ลักษณะทั่วไปเป็นรูปทรงกลม มีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จนถึง 150 ไมโครเมตร ความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 2.00-2.60 องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ ซิลิกา (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) อัตราส่วนของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดจะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ, สภาพแวดล้อมขณะเผา และชนิดของถ่านหินที่ใช้เผา มาตรฐาน ASTM C 618 (Specification for Fly ash and Raw or Calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete) ได้จัดแยกประเภทของถ้ำลอยไว้ 2 ชนิดคือ Class F และ Class C โดย Class F มีปริมาณ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่า 70% โดยน้ำหนัก และ Class C มีปริมาณ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ระหว่าง 50-70% โดยน้ำหนัก เนื่องจากถ่านหินเป็นวัสดุธรรมชาติย่อมมีเนื้อที่ไม่สม่ำเสมอ การที่ถ้ำลอยจากแหล่งเดียวกันพบว่าเป็น Class C และ Class F เป็นเรื่องที่เป็นปกติ แม้ว่าจะเป็น Class C หรือ Class F ต่างก็มียุทธภาพเพียงพอที่จะนำไปใช้ในงานคอนกรีตได้ทั้งสิ้นและจากการที่ได้มีการควบคุมคุณภาพให้มีปริมาณ CaO และ SO_3 ของถ่านหินให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมตั้งแต่ปี พ.ศ. 2533 เป็นต้นมา ทำให้ถ้ำลอยลิกไนต์ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีองค์ประกอบทางเคมีอยู่ในเกณฑ์ของมาตรฐาน ASTM C 618 เป็น Class C (Chindaprasirta et. al., 2005, Nimjaroen, 2013; Bhatta et. al., 2018)

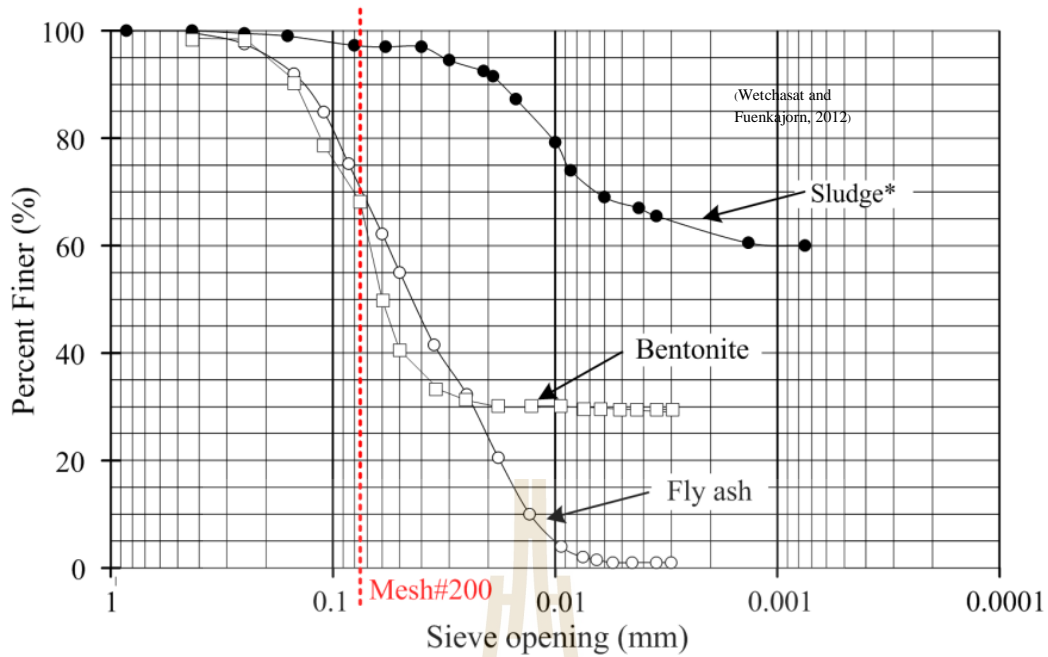


รูปที่ 3.1 ตัวอย่างเถ้าลอยจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างเถ้าลอยบรรจุในถังเพื่อรักษาความชื้นก่อนการทดสอบ

คุณสมบัติทางกายภาพพื้นฐานประการหนึ่งของเถ้าลอยทั่วไปคือการกระจายตัวของอนุภาค เม็ดดินหรือเม็ดตะกอน งานวิจัยนี้จึงได้ทดสอบและวิเคราะห์ตัวอย่างเถ้าลอยด้วยตะแกรงร่อน (Sieve analysis) และด้วยวิธีไฮโดมิเตอร์ (Hydrometer analysis) ซึ่งวิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D422 และได้เปรียบเทียบกับผลการทดสอบกับดินตะกอนประปา (Wetchasat and Fuenkajorn, 2012) แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของอนุภาคที่ทดสอบอยู่ในช่วง 0.001-0.3 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.3) และการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของเถ้าลอยโดยเป็นไปตามวิธีตามมาตรฐาน ASTM D854 แสดงผลเถ้าลอยมีค่าความถ่วงจำเพาะเฉลี่ยเท่ากับ 2.67



รูปที่ 3.3 ผลเปรียบเทียบการกระจายอนุภาคของเม็ดตะกอนเถ้าลอย เบนทอนต์ และดินตะกอนประปา

การทดสอบหาขีดความชื้นเหลวของดิน (Atterberg's limits) ซึ่งเป็นดัชนีทางด้านวิศวกรรมปฐพีเพื่อบ่งบอกคุณลักษณะทางวิศวกรรม ตัวอย่างเถ้าลอยและเบนทอนต์ได้ถูกทดสอบเปรียบเทียบเพื่อหาค่าดัชนีนี้โดยใช้วิธีทดสอบตามเกณฑ์มาตรฐานของ ASTM D4318 ได้ผลสรุปในตารางที่ 3.1 ซึ่งสามารถจำแนกตัวอย่างเถ้าลอยตามเกณฑ์ของ Unified Soil Classification System (ASTM D2487-11) อยู่ในประเภทดิน ML (Inorganic silt)

ตัวอย่างเถ้าลอยถูกนำมาทดสอบเพื่อหาค่าองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธี X-Ray Fluorescent (XRF) ตามมาตรฐาน ASTM C114 ดังผลการทดสอบในตารางที่ 3.2

ปัจจุบันเถ้าลอยนำมาใช้เป็นสารผสมในคอนกรีตผสมเสร็จสำหรับงานก่อสร้าง และเป็นวัสดุพิเศษเสริมปูนซีเมนต์ในการผลิตวัสดุก่อสร้าง เช่น กระเบื้องมุงหลังคา เสาค้ำ ท่อ พื้นสำเร็จรูป และนำไปใช้ในงานถมกลับ (Backfill) งานอุดรอยแตก (Grouting) งานก่อสร้างถนน งานสร้างเขื่อน เป็นต้น

3.2 ตัวอย่างดินเบนทอนต์

ดินเบนทอนต์เป็นวัสดุทางวิศวกรรมที่ได้นำมาประยุกต์ใช้ในการอุดรอยแตกในมวลหิน โดยผสมกับซีเมนต์เพื่อให้เกาะตัวกันและไม่ไหลไปตามแรงดันน้ำในขณะที่ยังอยู่ในรอยแตก ดินเบนทอนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นดินเบนทอนต์จากบริษัท Thai Nippon chemical industry ประเทศไทย ซึ่งสามารถจัดหาซื้อได้ง่ายแพร่หลายในประเทศไทย ตารางที่ 3.1 และ 3.2 แสดงคุณสมบัติทางวิศวกรรมและทางเคมีของดินเบนทอนต์ที่ใช้ทดสอบในการศึกษาครั้งนี้

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของตัวอย่างเถ้าลอย ดินเบนทอไนท์ และดินตะกอนประปะปา

Atterberg's Limits	Mae Moh Fly Ash (%)	Bentonite (%)		Sludge (%)
		SUT*	US	SUT*
Liquid limit	21	55	69	357
Plastic limit	17	22	42	44
Plasticity index	4	23	28	313
Specific gravity	2.67	2.56	-	2.50

SUT* = Suranaree University of Technology Laboratory (Wetchasat and Fuenkajorn, 2012)

US = Castelbaum and Shackelford (2009)

ตารางที่ 3.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางสารประกอบเคมีของตัวอย่างเถ้าลอยและดินเบนทอไนท์

Oxide	Concentration (% weight)			
	Fly ash		Bentonite	
	SUT	Ping, et al.,	Wetchasat and	ACC
Al ₂ O ₃	18.33	36.08	19.85	19.8
SiO ₂	40.72	47.75	61.93	61.3
SO ₃	7.48	0.60	1.27	-
Fe ₂ O ₃	14.40	5.36	4.45	3.9
CaO	16.52	5.72	1.27	0.6
K ₂ O	1.77	1.14	0.44	0.4
TiO ₂	0.50	1.22	0.19	0.1
Cr ₂ O ₃	0.02	-	-	-
MnO ₂	0.14	0.07	-	-
ZnO	0.03	-	-	-
As ₂ O ₅	0.04	-	-	-
Rb ₂ O	0.03	-	-	-
ZrO ₂	0.03	-	0.03	-
Na ₂ O	-	0.66	1.63	2.2
MgO	-	1.02	2.44	1.3
P ₂ O ₅	-	0.15	0.05	-
MnO	-	-	0.02	-
CuO	-	-	0.01	-
SrO	-	-	0.03	-
Y ₂ O ₃	-	-	0.01	-
Ir ₂ O ₃	0.015	-	-	-
BaO	-	-	0.03	-
CeO ₂	-	-	0.04	-
LOI. at 1,025 °C	-	-	6.29	-
Total	100	-	100	-

Note: ACC = American Colloid Company Technical Data

3.3 ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เลือกมาใช้ในการศึกษาเป็นส่วนผสมตามมาตรฐาน ASTM C150 คือ ปูนซีเมนต์ตราอินทรีแดงของ บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด ซึ่งหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ผลงานศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างแพร่หลาย ปูนซีเมนต์ควรเลือกใช้เป็นปูนใหม่ โดยที่เนื้อปูนไม่รวมตัวจับกันเป็นก้อน ระหว่างรอกการทดสอบมีการเก็บรักษาในถังพลาสติกที่ปิดฝาสนิทเพื่อป้องกันความชื้นเพื่อลดผลกระทบของคุณภาพปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ตราอินทรีแดงของ บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด มีคุณสมบัติตามมาตรฐานที่มีการขยายตัว (Autoclave expansion) เท่ากับ 0.001 เปอร์เซ็นต์ มีระยะเวลาการก่อตัวด้วยวิธี Gillmore Method มีระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายที่ 145 นาที และ 245 นาที ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ 1, 7 และ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 0.6, 13 และ 15.5 เมกะปาสกาล ตามลำดับ ปริมาณอากาศในมอร์ตาร์ (air content) เท่ากับ 15.5 เปอร์เซ็นต์ ค่าการอุ้มน้ำ (Water retention) เท่ากับ 78.5 เปอร์เซ็นต์ ตารางที่ 3.3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ซึ่งเป็นชนิดเดียวกันกับที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (Ali et al., 2008)

ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 (Ali et al., 2008)

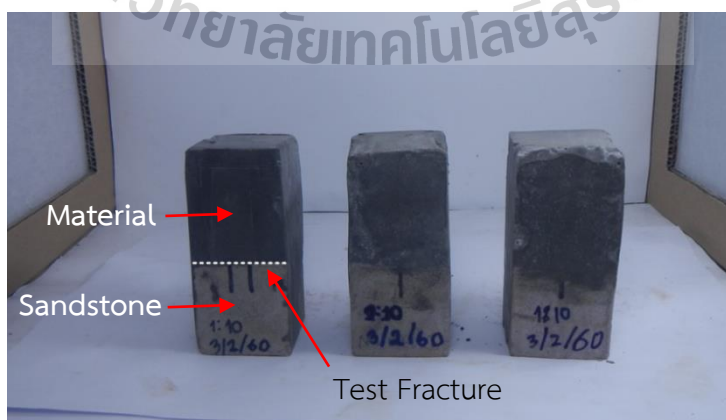
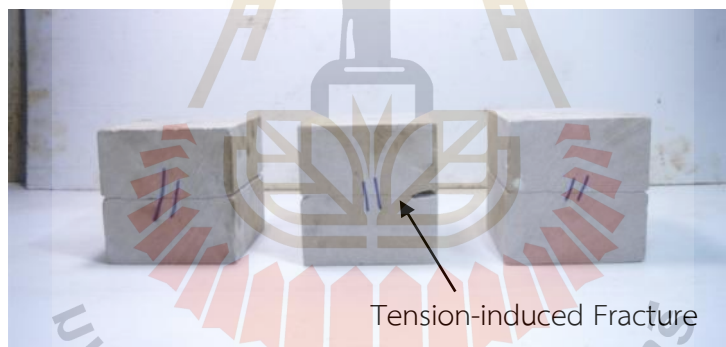
องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละ
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO ₂)	20.58
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al ₂ O ₃)	5.71
ไอรอนออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	2.94
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	64.76
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	0.87
โพแทสเซียมออกไซด์ (K ₂ O)	0.67
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃)	2.63
โซเดียมออกไซด์ (Na ₂ O)	0.14
ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂)	0.29
ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (P ₂ O ₅)	0.06
ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักจากการเผาไหม้, LOI	0.96

3.4 ตัวอย่างหินทราย

ตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบนี้คือ หินทรายหมวดหินภูกระดึง กลุ่มหินโคราช ซึ่งเป็นหินที่มีความซึมน้ำต่ำมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง และสามารถจัดเตรียมรอยแตกได้ง่าย การจัดเตรียมแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม คือ 1) กลุ่มของตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบความซึมน้ำของรอยแตก และ 2) กลุ่มที่ใช้ทดสอบความสามารถในการลดค่าความซึมน้ำของส่วนผสมระหว่างซีเมนต์กับเถ้าลอยที่บรรจุอยู่ในรอยแตก

ในกลุ่มแรกจัดเตรียมตัวอย่างหินเป็นรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 13.0x13.0x13.0 เซนติเมตร จำนวน 20 ตัวอย่าง ส่วนในกลุ่มที่สองตัวอย่างหินที่ถูกจัดเตรียมเพื่อทดสอบค่ากำลังเฉือนสูงสุดที่ผิวรอยต่อระหว่างส่วนผสมที่ผิวสัมผัสในรอยแตกเป็นรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 5.4x5.4x10.8 เซนติเมตร จำนวน 12 ตัวอย่าง

รอยแตกที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการสามารถทำได้โดยกดตัวอย่างหินในแนวเส้น (line load) จนถึงจุดวิบัติ ตัวอย่างหินทั้งรูปลูกบาศก์และรูปแท่งทรงกระบอกจะขาดออกจากกันภายใต้แรงดึงที่ตั้งฉากกับทิศทางของแรงกดในแนวเส้น การแยกออกจากกันนี้ทำให้เกิดรอยแตกภายใต้แรงดึง (tension-induced fracture) ในตัวอย่างหิน รูปที่ 3.4 แสดงตัวอย่างหินบางตัวอย่างที่ถูกจัดเตรียมให้มีรอยแตก



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างหินทรายชุดหินภูกระดึง รูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 13x13x13 เซนติเมตร (บน) และรูปตัวอย่างเพื่อทดสอบกำลังเฉือนมีขนาด 5.4x5.4x10.8 เซนติเมตร (ล่าง)

3.5 การจัดเตรียมส่วนผสม

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการจัดเตรียมส่วนผสมประกอบด้วย

- 1) เถ้าลอย (รูปที่ 3.5)
- 2) ดินเบนทอไนต์ (รูปที่ 3.6)
- 3) ซีเมนต์ (รูปที่ 3.7)
- 4) น้ำบริสุทธิ์สำหรับผสม (น้ำดื่มแบบบรรจุถังของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี)
- 5) เครื่องชั่งแบบดิจิทัล ใช้น้ำหนักได้สูงสุด 2,100 g มีค่าความละเอียด ± 0.01 g (รูปที่ 3.8)
- 6) เครื่องผสม (รุ่น 6 QT 575W) แบบปรับความเร็วรอบได้ 6 ค่า มีความจุ (ขั้นต่ำ-สูงสุด) 500 - 5,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร (รูปที่ 3.9)
- 7) เครื่องวัดความหนืด Brookfield® viscometer (รุ่น RV ขนาดกำลังไฟฟ้า 203 W 50 Hz) (รูปที่ 3.10)
- 8) เครื่องวัดอุณหภูมิแบบเลเซอร์ (รุ่น TAITAN T350C) มีช่วงการวัดระหว่าง -50 ถึง 350° C (รูปที่ 3.11)

งานวิจัยนี้ได้กำหนดสัญลักษณ์ตัวของวัสดุและส่วนผสมเพื่อความสะดวกในการนำเสนอ ดังนี้

- 1) เถ้าลอย (Fly ash) สัญลักษณ์ย่อ F
- 2) ดินเบนทอไนต์ (Bentonite) สัญลักษณ์ย่อ B
- 3) ซีเมนต์ (Cement) สัญลักษณ์ย่อ C
- 4) น้ำบริสุทธิ์ (Distilled water) สัญลักษณ์ย่อ W
- 5) สัดส่วนของส่วนผสมเถ้าลอยต่อซีเมนต์ต่อน้ำ สัญลักษณ์ย่อ F:C:W
- 6) สัดส่วนของส่วนผสมดินเบนทอไนต์ต่อซีเมนต์ต่อน้ำ สัญลักษณ์ย่อ B:C:W
- 7) สัดส่วนของส่วนผสมดินตะกอนประปาต่อซีเมนต์ต่อน้ำ สัญลักษณ์ย่อ S:C:W
- 8) สัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (water-cement ratio) สัญลักษณ์ย่อ W:C



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างเถ้าลอยจากแม่เมาะที่ใช้ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างดินเบนทอไนต์บรรจุถุงขนาด 25 kg ที่ใช้ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ปอซโซลานบรรจุถุงขนาด 50 kg ที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 3.8 เครื่องชั่งไฟฟ้า Capacity 2,100 g และ Readability 0.01 g



รูปที่ 3.9 เครื่องผสมพร้อมใบกวนสำหรับกวนส่วนผสมให้เข้ากันโดยใช้ความเร็วไม่เกิน 275 รอบต่อนาที (รุ่น 6QT 575W)



รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบความหนืด (Brookfield Viscometer)



รูปที่ 3.11 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด (รุ่น TAITAN T350C) วัดได้ -50 ถึง 350 องศาเซลเซียส การทดสอบเบื้องต้นมีวัตถุประสงค์เพื่อคัดเลือกสัดส่วนของส่วนผสมที่เหมาะสมโดยใช้เกณฑ์ความหนืดและกำลังกวดสูงสุดดังนี้ สัดส่วนของ F:C:W และ B:C:W มีค่าตั้งแต่

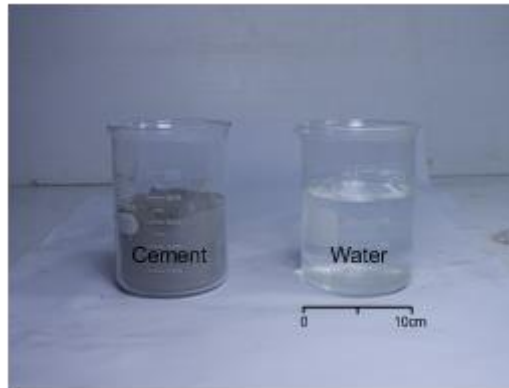
- 0:10:10
- 1:10:10
- 2:10:10
- 3:10:10
- 5:10:10
- 6:10:10
- 7:10:10
- 8:10:10
- 9:10:10
- 10:10:10
- 15:10:10
- 20:10:10

โดยมีขั้นตอนการผสม มีดังนี้

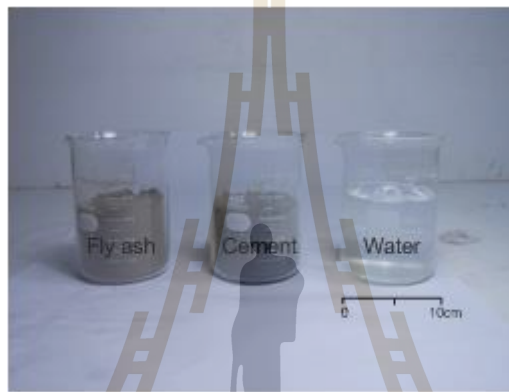
- 1) ชั่งวัสดุทั้งสี่ชนิดตามสัดส่วนที่กำหนดไว้ แล้วบรรจุลงในบีกเกอร์แยกตามชนิด (รูปที่ 3.12)
- 2) เทน้ำในบีกเกอร์ที่ชั่งน้ำหนักแล้วเทลงในเครื่องผสมพร้อมเปิดเครื่องด้วยความเร็วรอบไม่เกิน 275 รอบต่อนาที
- 3) เทวัสดุที่ผสมแล้วในข้อ 2) ลงในเครื่องผสมให้หมดในคราวเดียวกัน หากมีการเพิ่มเติมวัสดุ ควรเทให้เสร็จภายในเวลา 2 นาที และเริ่มจับเวลาตั้งแต่เริ่มเทส่วนผสมลงในน้ำ บันทึกรูปร่างของอุณหภูมิต่อเวลาที่วัดได้
- 4) ปั่นส่วนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันภายในเวลา 3 นาที ที่ 275 รอบต่อนาที แล้วปิดเครื่องผสม

- 5) นำส่วนผสมที่ได้ไปทดสอบหาค่าความหนาแน่นและความหนืด ก่อนนำไปทดสอบเชิงกลศาสตร์และเชิงพลศาสตร์

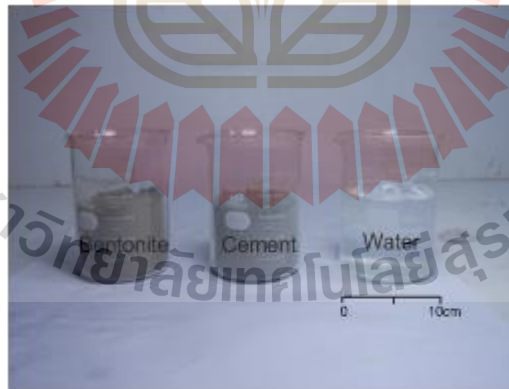




(a)



(b)



(c)

รูปที่ 3.12 ตัวอย่างวัสดุที่ถูกจัดเตรียมสำหรับการผสมที่ซึ่งน้ำหนักตามสัดส่วนแล้วแยกใส่ปิ๊กเกอร์
 (a) ซีเมนต์และน้ำ (b) แก้วลอย ซีเมนต์ และน้ำ และ (c) ดินเบนทอนไนต์ ซีเมนต์ และน้ำ

3.6 การวิเคราะห์ส่วนผสมด้วยการทดสอบความหนืดและความหนาแน่น

ความหนืด (viscosity) และความหนาแน่น (density) ของส่วนผสมในขณะที่ยังไม่แข็งตัว (slurry) เป็นคุณสมบัติพื้นฐานและสามารถนำมาใช้เป็นดัชนีเปรียบเทียบความสามารถในการไหล และความเป็นของเหลวของส่วนผสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมที่เกี่ยวข้อง ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวสามารถนำมาใช้ประกอบในการคัดเลือกสัดส่วนของวัสดุที่เหมาะสมว่าควรเป็นเท่าใด

ในการศึกษานี้ วิธีการหาค่าความหนาแน่นและความหนืดของส่วนผสมได้ใช้วิธีตามมาตรฐานการหาค่าความหนาแน่นสามารถทำได้โดย

- 1) เทส่วนผสมซีเมนต์ลงในบีกเกอร์ปริมาตร 500 cm³
- 2) ชั่งน้ำหนักของส่วนผสมซีเมนต์ในบีกเกอร์และบันทึกผล (ความละเอียด ±0.01 g.)
- 3) คำนวณหาค่าความหนาแน่นและค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity, SG)
ค่าความถ่วงจำเพาะของส่วนผสมสามารถคำนวณได้โดย $SG = \rho_{slurry} / \rho_w$ โดยที่ ρ_{slurry} คือความหนาแน่นของส่วนผสมเหลว และ ρ_w คือความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิในขณะทำการตรวจวัด
- 4) ติดตั้งบีกเกอร์ของส่วนผสมซีเมนต์ในเครื่องทดสอบความหนืด Brookfield เลือกเข็มทดสอบ RV1 ถึง RV7 ที่เหมาะสมกับความหนืด (รูปที่ 3.13)
- 5) ติดตั้งเข็มทดสอบกับเครื่องทดสอบความหนืด และวางบีกเกอร์ส่วนผสมใส่เครื่องทดสอบ พร้อมปรับระยะเข็มทดสอบลงในส่วนผสมเหลว โดยให้ก้านปรับระดับสัมผัสกับก้นบีกเกอร์พอดี
- 6) เปิดเครื่องทดสอบโดยเริ่มที่ความเร็วรอบต่ำ รอบประมาณ 60 วินาที เพื่อให้เข็มหมุนคงที่ จากนั้นบันทึกหมายเลขเข็มทดสอบและค่าความเร็วรอบในหน่วย rpm (รอบต่อนาที)
- 7) วัดค่าความหนืดของส่วนผสมซีเมนต์และบันทึกผล โดยทดสอบซ้ำด้วยความเร็วรอบอื่นประมาณ 3-5 ค่า เพื่อหาค่าเฉลี่ยความหนืด พร้อมทั้งสังเกตลักษณะความหนืดของตัวอย่าง แล้วคำนวณค่าความหนืดในหน่วย centipoise (cP) จากค่าความเร็วรอบคูณกับค่าดัชนีตัวคูณของเข็มทดสอบ
- 8) ค่าที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบความหนืด Brookfield จะอยู่ในหน่วย centipoise (cP) หรือมีค่าเท่ากับ millipascal second (mPa·s) ซึ่งหน่วยดังกล่าวจะเป็นค่าความหนืดเชิง dynamic ที่สามารถแปลงมาเป็นค่าความหนืดเชิง kinetic ได้จาก $\mu = \rho \cdot \nu$ โดยที่ μ คือ dynamic viscosity ν คือ kinetic viscosity และ ρ คือ ค่าความหนาแน่นของของเหลว

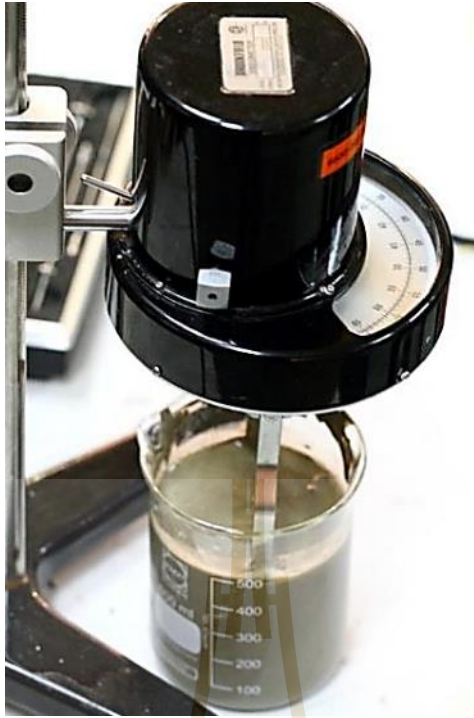
การทดสอบหาค่าความหนาแน่นได้ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D854 และค่าความหนืดได้ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D2196 วัดค่าด้วยเครื่อง Brookfield® viscometer model RV ผลการทดสอบให้ค่าความหนืดทั้งแบบเชิงพลศาสตร์ (Dynamic viscosity) และเชิงจลนศาสตร์ Kinematic viscosity ความหนาแน่น (Slurry density) โดยที่น้ำหนักของส่วนผสมซีเมนต์จะตรวจวัดหลังจากผสมเสร็จในช่วงเวลาที่กำหนด ตารางที่ 3.4 และ 3.4 แสดงผลการทดสอบค่าความหนืดและความหนาแน่นของของส่วนผสมซีเมนต์ทุกส่วนผสม

ตารางที่ 3.4 ผลการทดสอบความหนาแน่นของส่วนผสมต่อปริมาตรรวม 500 cc

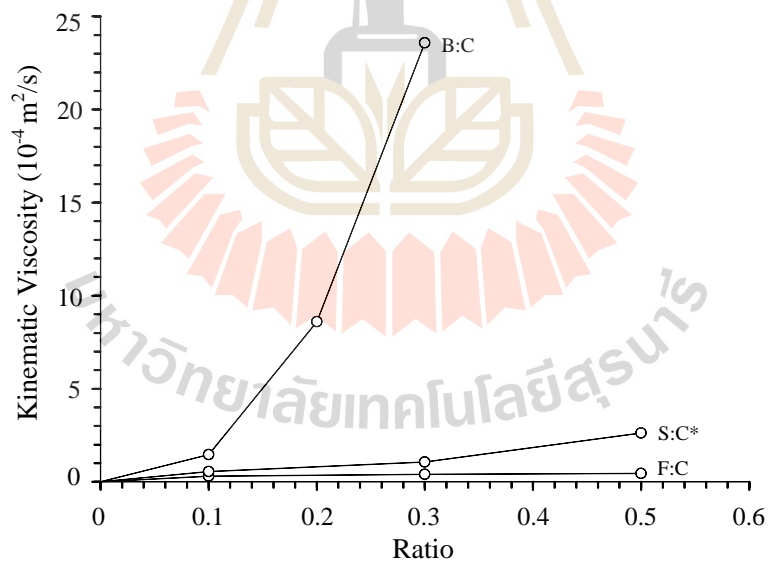
Binder	F:C:W or B:C:W	Slurry Temperature $T_{\text{Slurry}} (^{\circ}\text{C})$	Slurry Weight, W_{Slurry}	Slurry Density, ρ_{Slurry}	Water Density, ρ_{Water}	Specific Gravity, SG
Cement	0:10:10	26.5	729.21	1.46	0.996	1.47
Fly ash	1:10:10	28.4	769.75	1.54	0.996	1.55
	3:10:10	27.5	796.13	1.59	0.996	1.60
	5:10:10	27.0	831.26	1.66	0.996	1.67
	6:10:10	26.6	838.82	1.68	0.997	1.69
	7:10:10	26.5	849.41	1.70	0.996	1.71
	8:10:10	26.5	855.50	1.71	0.997	1.72
	9:10:10	26.2	869.01	1.74	0.997	1.75
	10:10:1	26.4	873.33	1.75	0.997	1.76
	15:10:1	26.4	888.83	1.78	0.997	1.79
	20:10:1	26.3	901.30	1.80	0.997	1.81
Bentonite	1:10:10	27.0	761.90	1.52	0.996	1.53
	2:10:10	28.0	820.21	1.64	0.996	1.65
	3:10:10	28.0	824.31	1.65	0.996	1.65
Sludge (Wetchasat, 2013)	1:10:10	28.6	733.51	1.47	0.996	1.47
	3:10:10	30.2	742.02	1.48	0.996	1.49
	5:10:10	30.3	794.50	1.59	0.996	1.60

ตารางที่ 3.5 ผลการทดสอบความหนืด (viscosity)

Binder	F:C:W or B:C:W	Temperature (°C)			ρ_{Slurry} (g/cc)	Dynamic Viscosity (Pa·s)	Kinematic Viscosity ($10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)
		Air	Water	Slurry			
Cement	0:10:10	27.3	26.5	26.5	1.46	3.39	0.23
Fly ash	1:10:10	28.5	28.0	28.4	1.54	4.73	0.31
	3:10:10	27.7	27.5	27.5	1.59	6.51	0.41
	5:10:10	27.7	27.8	27.0	1.66	7.60	0.46
	6:10:10	26.5	26.4	26.6	1.68	11.00	0.66
	7:10:10	26.4	26.5	26.5	1.70	20.00	1.18
	8:10:10	26.5	26.6	26.5	1.71	29.00	1.70
	9:10:10	26.3	26.5	26.2	1.74	56.00	3.22
	10:10:10	26.5	26.4	26.4	1.75	68.00	3.89
	15:10:10	26.4	26.4	26.4	1.78	122.00	6.86
	20:10:10	26.4	26.3	26.3	1.80	292.00	16.22
Bentonite	1:10:10	27.1	27.5	27.0	1.52	22.25	1.46
	2:10:10	27.5	27.5	28.0	1.64	141.00	8.60
	3:10:10	28.0	27.5	28.0	1.65	389.00	23.58
Sludge (Wetchasat, 2013)	1:10:10	31.3	27.5	28.6	1.47	8.17	0.56
	3:10:10	32.3	27.5	30.2	1.48	15.75	1.06
	5:10:10	31.5	27.5	30.3	1.59	41.72	2.63



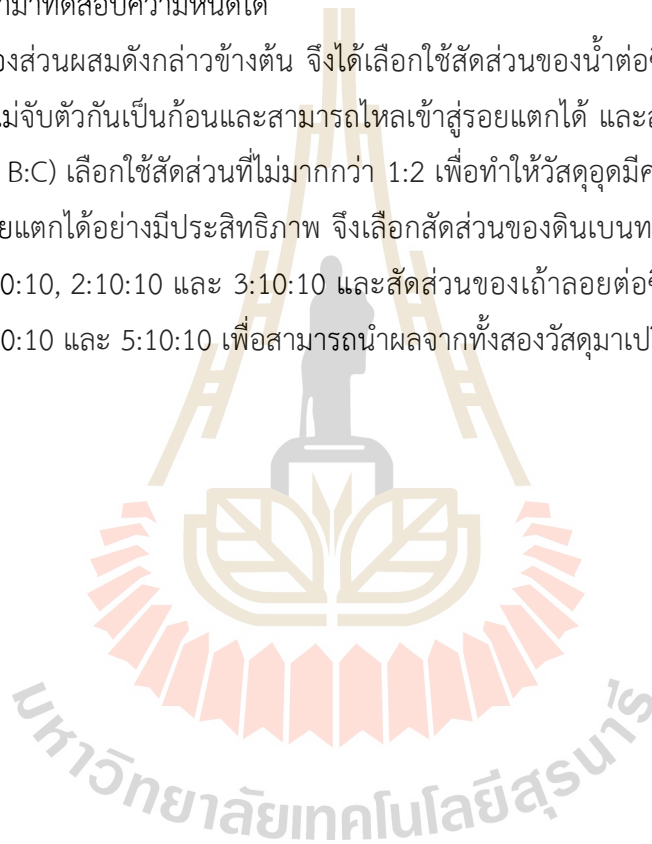
รูปที่ 3.13 การทดสอบความหนืดของส่วนผสมด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer



รูปที่ 3.14 ค่า Kinetic viscosity ของส่วนผสมดินเบนทอไนต์กับซีเมนต์ (B:C) ดินตะกอนประปากับซีเมนต์ (S:C) และเถ้าลอยกับซีเมนต์ (F:C)

จากตารางที่ 3.5 แสดงผลการทดสอบความหนืดของส่วนผสมในสัดส่วนที่ต่างกัน ผลกระทบของการผันแปรปริมาณซีเมนต์และปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 3.14 ซึ่งระบุว่าเมื่อสัดส่วนส่วนผสมเพิ่มขึ้นจะมีความหนืดเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อ B:C หรือ F:C มากกว่า 0.5 นอกจากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำจะทำให้ความหนืดของส่วนผสมมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกันทั้งส่วนผสมที่ใช้กับเบนทอไนต์และที่ใช้กับเถ้าลอย สำหรับส่วนผสมที่ใช้ดินเบนทอไนต์ สัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ควรไม่ต่ำกว่า 1:1 เนื่องจากจะทำให้ส่วนผสมข้นเหนียว เกาะตัวกันแน่น และหมดสภาพความเป็นของเหลว ทั้งนี้เกิดจากดินเบนทอไนต์มีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้มากและจับตัวกันเป็นก้อน ในขณะที่ส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยสามารถเพิ่มและลดปริมาณของน้ำได้ในสัดส่วนที่มากกว่า อีกทั้งยังคงตัวเป็นของเหลวที่สามารถนำมาทดสอบความหนืดได้

จากสัดส่วนของส่วนผสมดังกล่าวข้างต้น จึงได้เลือกใช้สัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (W:C) เท่ากับ 1:1 เพื่อให้ส่วนผสมไม่จับตัวกันเป็นก้อนและสามารถไหลเข้าสู่รอยแตกได้ และส่วนผสมของวัสดุผสมต่อซีเมนต์ (F:C และ B:C) เลือกใช้สัดส่วนที่ไม่มากกว่า 1:2 เพื่อให้วัสดุผสมมีความหนืดไม่สูงและสามารถไหลเข้าสู่รอยแตกได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงเลือกสัดส่วนของดินเบนทอไนต์ต่อซีเมนต์ต่อน้ำ (B:C:W) เท่ากับ 1:10:10, 2:10:10 และ 3:10:10 และสัดส่วนของเถ้าลอยต่อซีเมนต์ต่อน้ำ (F:C:W) เท่ากับ 1:10:10, 3:10:10 และ 5:10:10 เพื่อสามารถนำผลจากทั้งสองวัสดุมาเปรียบเทียบกันได้ในการทดสอบต่อไป



บทที่ 4

การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของส่วนผสมซีเมนต์

4.1 วัตถุประสงค์ของการทดสอบ

วัตถุประสงค์ของเนื้อหาในบทนี้คือการอธิบายขั้นตอน วิธีการ และข้อปฏิบัติเพื่อหาผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของส่วนผสมซีเมนต์ทั้งหมดที่ได้คัดสรรมาจากการทดสอบเบื้องต้นในบทที่ผ่านมา โดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการประกอบไปด้วย 1) การทดสอบกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว 2) การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิลเลียน 3) การทดสอบกำลังรับแรงยึดหยุ่นแบบ Push-out และ 4) การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง โดยที่การทดสอบจะทำตามมาตรฐาน ASTM และคำแนะนำของ ISRM (Brown, 1981)

4.2 การจัดเตรียมแท่งตัวอย่างซีเมนต์ทรงกระบอก

วิธีการจัดเตรียมแท่งตัวอย่างทรงกระบอกสำหรับส่วนผสมตัวอย่างแก้าลอยกับตัวอย่างซีเมนต์และตัวอย่างดินเบนทอไนต์กับซีเมนต์จะใช้หลักเกณฑ์เดียวกันกับวิธีเตรียมตัวอย่างที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 ในการทดสอบได้ใช้อัตราส่วนของตัวอย่างแก้าลอยต่อตัวอย่างซีเมนต์ต่อน้ำ (F:C:W) โดยน้ำหนักคือ 1:10:10, 3:10:10 และ 5:10:10 สำหรับอัตราส่วนของตัวอย่างดินเบนทอไนต์ต่อตัวอย่างซีเมนต์ต่อน้ำ (B:C:W) โดยน้ำหนักคือ 1:10:10, 2:10:10 และ 3:10:10 เนื่องจากการใช้ส่วนผสมของตัวอย่างเบนทอไนต์ต่อซีเมนต์ต่อน้ำในสัดส่วนที่มากกว่า 3:10:10 ไม่สามารถผสมออกมาเป็นของเหลวได้เพราะเบนทอไนต์มีคุณสมบัติที่ดูดซับน้ำได้มาก ซึ่งวิธีการผสมจะดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C938 ดังได้อธิบายไว้ในบทที่ 3

4.3 การทดสอบกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว

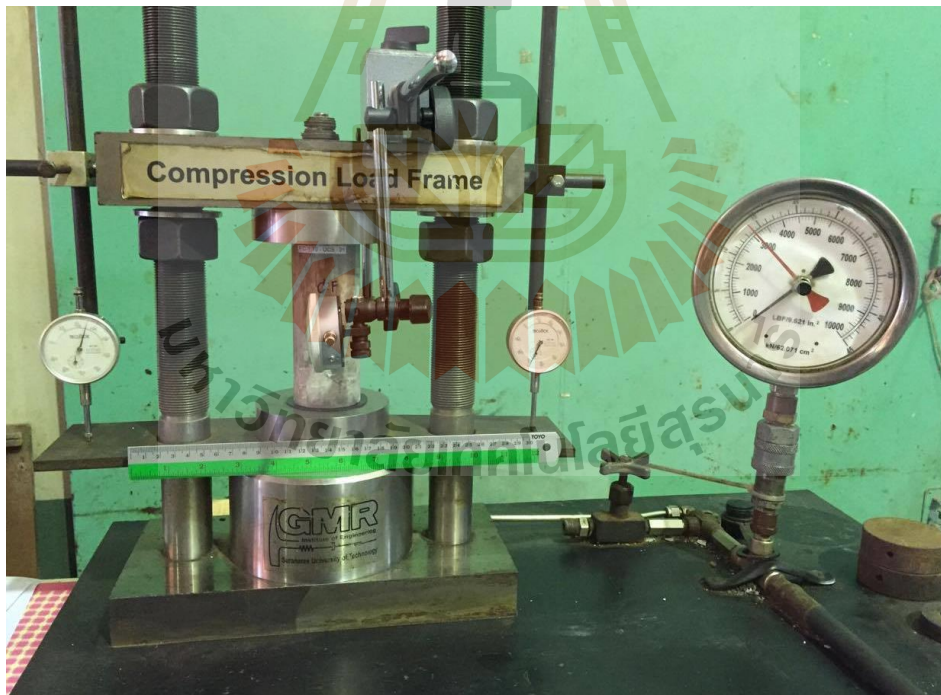
การทดสอบกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว (Uniaxial compressive strength test) มีวัตถุประสงค์การทดสอบเพื่อหา 1) ค่ากำลังแรงกดสูงสุดในแกนเดียว (Uniaxial Compressive Strength, σ_c) 2) ตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (Elastic Modulus, E) และ 3) ค่าอัตราส่วนปริมาตรของ (Poisson' ratio, ν) ของแท่งตัวอย่างที่ทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างซีเมนต์ในการทดสอบได้ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D7012, C938 และ C39 ส่วนผสมหลังจากที่ถูกจัดเตรียมจะถูกเทลงในแบบหล่อที่ทำจากท่อ PVC เส้นผ่าศูนย์กลาง 54 มิลลิเมตร แล้วทำการบ่มตัวอย่างด้วยการนำไปแช่ในน้ำเป็นเวลา 3, 7, 14, และ 28 วัน จากนั้นจึงนำตัวอย่างมาตัดผิวหน้าให้เรียบเพื่อให้ได้อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 2.5 ดังแสดงในตัวอย่างของขนาดแท่งตัวอย่างซีเมนต์อายุ 3 วัน ที่ผันแปรส่วนผสมต่าง ๆ ในตารางที่ 4.1

การทดสอบโดยให้อัตราการกดคงที่ระหว่าง 0.1-0.5 MPa/s กดให้ตัวอย่างซีเมนต์แตก พร้อมตรวจวัดการเคลื่อนตัวในแกนและแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง ด้วยการติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัว (รูปที่ 4.1) ด้วยมาตรวัดที่มีความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ดำเนินการจนกระทั่งตัวอย่างที่ใช้ทดสอบเกิดการวิบัติ

ผลจากการทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียว การตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น และค่าอัตราส่วนปัวซอง ได้ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแสดงดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2 แสดงตัวอย่างบางส่วนจากการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวของส่วนผสมเถ้าลอย ทั้งก่อนการทดสอบ และหลังการทดสอบ

รูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ารับกำลังแรงกดในแกนเดียวและค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นในฟังก์ชันของการบ่มตัวตามเวลาตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะเวลาของการบ่มตัวตามเวลาเพิ่มขึ้นค่าแรงกดสูงสุดในแกนเดียวและค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่ากำลังกดสูงสุดของส่วนผสมที่ใช้ดินเบนทอไนต์และเถ้าลอยมีค่าใกล้เคียงกันมากและแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยส่วนผสมเถ้าลอยมีค่ากำลังกดสูงสุดเท่ากับ 10.45 MPa และค่าความยืดหยุ่นเท่ากับ 1.36 GPa ที่ระยะเวลาการบ่มตัว 28 วัน



รูปที่ 4.1 เครื่องทดสอบค่ารับกำลังรับแรงกดในแกนเดียว ASTM D7012



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างบางส่วนจากการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวของส่วนผสมแก้ลอย (ซ้าย) ก่อนการทดสอบ (ขวา) หลังการทดสอบ

ตารางที่ 4.1 ขนาดของแท่งตัวอย่างซีเมนต์อายุ 3 วัน สำหรับการทดสอบแรงกดในแกนเดียวและสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น

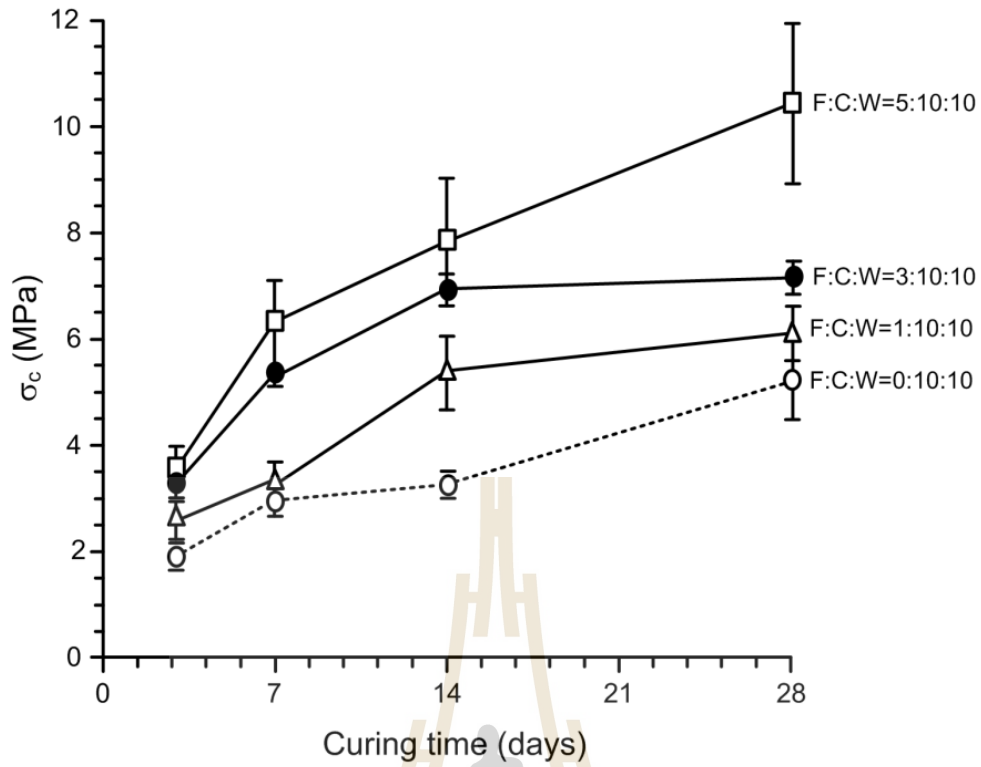
Types	Sample no.	Length, L (mm)	Diameter, D (mm)	L/D	Weight, W (g)	Density, ρ (g/cc)
B:C:W = 0:10:10	C-0-01	135.60	54.00	2.51	483.62	1.56
	C-0-02	128.10	54.65	2.34	475.60	1.58
	C-0-03	135.25	54.15	2.50	492.02	1.58
	C-0-04	135.50	54.00	2.51	483.44	1.56
	C-0-05	136.85	53.80	2.54	496.22	1.59
B:C:W = 1:10:10	BC-1-01	136.35	54.25	2.51	501.10	1.59
	BC-1-02	139.30	55.80	2.50	556.92	1.63
	BC-1-03	141.70	56.00	2.53	562.33	1.61
	BC-1-04	137.00	53.80	2.55	501.92	1.61
	BC-1-05	136.50	54.00	2.53	497.84	1.59
B:C:W = 2:10:10	BC-2-01	134.90	53.50	2.52	479.41	1.58
	BC-2-02	136.10	53.80	2.53	494.23	1.60
	BC-2-03	135.20	54.00	2.50	491.22	1.59
	BC-2-04	140.90	55.60	2.53	552.94	1.62
	BC-2-05	135.00	54.00	2.50	480.83	1.56
B:C:W = 3:10:10	BC-3-01	142.10	55.70	2.55	563.32	1.63
	BC-3-02	144.00	56.30	2.56	567.94	1.58
	BC-3-03	136.00	53.60	2.54	496.02	1.62
	BC-3-04	136.35	53.60	2.54	492.75	1.60
	BC-3-05	136.00	54.80	2.48	502.50	1.57

ตารางที่ 4.1 ขนาดของแท่งตัวอย่างซีเมนต์อายุ 3 วัน สำหรับการทดสอบแรงกดในแกนเดียวและสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (ต่อ)

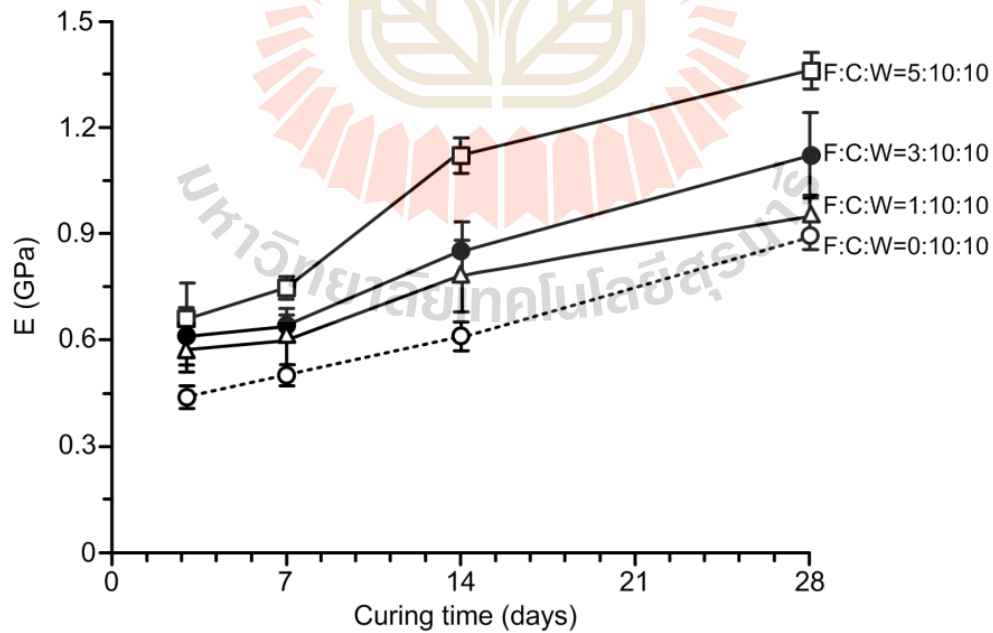
Types	Sample no.	Length, L (mm)	Diameter, D (mm)	L/D	Weight, W (g)	Density, ρ (g/cc)
F:C:W = 1:10:10	FC-1-01	135.70	53.40	2.54	513.22	1.69
	FC-1-02	137.70	56.60	2.43	561.74	1.62
	FC-1-03	140.25	56.00	2.50	571.20	1.65
	FC-1-04	127.10	56.25	2.26	510.94	1.62
	FC-1-05	139.40	57.00	2.45	559.50	1.57
F:C:W = 3:10:10	FC-3-01	140.50	56.60	2.48	589.72	1.67
	FC-3-02	140.25	56.35	2.49	581.81	1.66
	FC-3-03	137.63	53.90	2.55	515.30	1.64
	FC-3-04	141.60	56.60	2.50	580.44	1.63
	FC-3-05	135.50	56.35	2.40	559.00	1.65
F:C:W = 5:10:10	FC-5-01	138.00	53.70	2.57	503.22	1.61
	FC-5-02	140.75	56.60	2.49	564.25	1.59
	FC-5-03	140.75	56.25	2.50	566.11	1.62
	FC-5-04	139.60	56.40	2.48	559.00	1.60
	FC-5-05	141.60	56.00	2.53	562.41	1.61

ตารางที่ 4.2 ค่ากำลังแรงกดสูงสุดในแกนเดียว (σ_c) ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E) และค่าอัตราส่วนปัวซอง (ν) ของแต่ละส่วนผสม

Types	Curing Time (days)	F:C:W or B:C:W	σ_c (MPa)	E (GPa)	ν
Fly ash	3	1:10:10	2.62 ± 0.19	0.57 ± 0.02	0.13 ± 0.02
		3:10:10	3.28 ± 0.34	0.61 ± 0.08	0.14 ± 0.01
		5:10:10	3.33 ± 0.25	0.66 ± 0.10	0.17 ± 0.00
	7	1:10:10	3.27 ± 0.40	0.60 ± 0.07	0.22 ± 0.04
		3:10:10	5.35 ± 0.23	0.64 ± 0.05	0.16 ± 0.03
		5:10:10	6.33 ± 0.77	0.75 ± 0.03	0.10 ± 0.03
	14	1:10:10	5.36 ± 0.69	0.78 ± 0.10	0.14 ± 0.03
		3:10:10	6.93 ± 0.30	0.85 ± 0.08	0.12 ± 0.02
		5:10:10	7.83 ± 1.19	1.12 ± 0.05	0.17 ± 0.02
	28	1:10:10	6.10 ± 1.01	0.95 ± 0.06	0.09 ± 0.02
		3:10:10	7.16 ± 0.31	1.12 ± 0.12	0.21 ± 0.04
		5:10:10	10.45 ± 1.48	1.36 ± 0.05	0.12 ± 0.03
Bentonite	3	1:10:10	3.08 ± 0.41	0.58 ± 0.04	0.08 ± 0.01
		2:10:10	3.64 ± 0.18	0.58 ± 0.04	0.09 ± 0.03
		3:10:10	3.22 ± 0.40	0.48 ± 0.15	0.14 ± 0.02
	7	1:10:10	3.75 ± 0.38	0.78 ± 0.02	0.15 ± 0.06
		2:10:10	4.08 ± 0.12	0.64 ± 0.10	0.14 ± 0.03
		3:10:10	3.81 ± 0.36	0.58 ± 0.03	0.17 ± 0.02
	14	1:10:10	5.03 ± 0.23	0.88 ± 0.11	0.15 ± 0.06
		2:10:10	5.27 ± 0.28	0.79 ± 0.13	0.20 ± 0.03
		3:10:10	4.58 ± 0.30	0.67 ± 0.10	0.08 ± 0.02
	28	1:10:10	5.27 ± 0.62	1.07 ± 0.07	0.15 ± 0.05
		2:10:10	5.89 ± 0.26	0.81 ± 0.06	0.21 ± 0.04
		3:10:10	5.52 ± 0.86	0.77 ± 0.02	0.16 ± 0.02
Pure Cement	3	0:10:10	1.91 ± 0.23	0.44 ± 0.03	0.16 ± 0.04
	7	0:10:10	2.99 ± 0.38	0.50 ± 0.03	0.15 ± 0.03
	14	0:10:10	3.27 ± 0.24	0.61 ± 0.04	0.12 ± 0.03
	28	0:10:10	5.21 ± 0.71	0.71 ± 0.05	0.15 ± 0.03



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวกับระยะเวลาการบ่มน้ำของแต่ละอัตราส่วน F:C:W



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นกับระยะเวลาการบ่มน้ำของแต่ละอัตราส่วน F:C:W

4.4 การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิลเลียน

การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิลเลียน (Brazilian tensile strength test) มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด (Brazilian tensile strength, σ_B) ของตัวอย่างแท่งซีเมนต์ในแต่ละส่วนผสม วิธีการทดสอบและการคำนวณผลเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D3967 และการแนะนำของ ISRM (Brown, 1981)

แท่งตัวอย่างซีเมนต์ทรงกระบอกขนาดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 54 มิลลิเมตร แล้วทำการบ่มตัวอย่างด้วยการนำไปแช่ในน้ำเป็นเวลา 3, 7, 14, และ 28 วัน จากนั้นจึงนำตัวอย่างมาตัดผิวหน้าให้เรียบเพื่อให้ได้อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 0.5 ตามที่ต้องการ ตัวอย่างแท่งซีเมนต์ผสมเถ้าลอยก่อนการทดสอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.3 แสดงขนาดของแท่งตัวอย่างซีเมนต์อายุ 3 วัน

แท่งตัวอย่างถูกกดทดสอบที่อัตราการคงที่ระหว่าง 0.1-0.5 MPa/s รูปที่ 4.6 แสดงการจัดเตรียมอุปกรณ์ทดสอบ ซึ่งจะดำเนินการจนกระทั่งตัวอย่างที่ใช้ทดสอบเกิดการวิบัติตามมาตรฐานการทดสอบ

ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดของส่วนผสมทั้งหมดแสดงไว้ในตารางที่ 4.4 ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่ากำลังกดสูงสุดของส่วนผสมที่ใช้ดินเบนทอนต์และเถ้าลอยมีค่าใกล้เคียงกันมากและมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงแบบบราซิลเลียนในฟังก์ชันของการบ่มตัวอย่างตามเวลา ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการบ่มตัวอย่างตามเวลาเพิ่มขึ้นค่าแรงดึงแบบบราซิลเลียนเพิ่มขึ้น โดยส่วนผสมเถ้าลอยมีค่ากำลังรับสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 1.91 MPa ที่ระยะเวลาการบ่มน้ำที่ 28 วัน



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างแท่งซีเมนต์ผสมเถ้าลอยสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิลเลียน

ตารางที่ 4.3 ขนาดของแท่งตัวอย่างซีเมนต์อายุ 3 วัน สำหรับการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน

Types	Sample no.	Length, L (mm)	Diameter, D (mm)	L/D	Weight, W (g)	Density, ρ (g/cc)
B:C:W = 0:10:10	C-01	26.70	53.00	0.50	94.00	1.60
	C-02	26.85	54.25	0.49	97.10	1.56
	C-03	27.40	53.30	0.51	99.00	1.62
	C-04	27.35	56.60	0.48	100.10	1.45
	C-05	26.85	53.50	0.50	97.90	1.62
B:C:W = 1:10:10	BC-1-01	27.70	53.70	0.52	102.10	1.63
	BC-1-02	28.00	53.70	0.52	97.30	1.53
	BC-1-03	27.40	53.90	0.51	104.90	1.68
	BC-1-04	28.20	53.80	0.52	105.20	1.64
	BC-1-05	27.90	54.00	0.52	100.10	1.57
B:C:W = 2:10:10	BC-2-01	27.80	53.80	0.52	98.00	1.55
	BC-2-02	27.80	53.70	0.52	97.70	1.55
	BC-2-03	28.10	54.00	0.52	100.10	1.56
	BC-2-04	27.00	54.00	0.50	96.20	1.56
	BC-2-05	28.80	53.80	0.54	102.20	1.56
B:C:W = 3:10:10	BC-3-01	27.70	53.70	0.52	98.40	1.57
	BC-3-02	26.80	53.50	0.50	95.60	1.59
	BC-3-03	28.00	53.50	0.52	100.00	1.59
	BC-3-04	28.10	53.30	0.53	101.20	1.61
	BC-3-05	27.8	53.80	0.52	99.70	1.58

ตารางที่ 4.3 ขนาดของแท่งตัวอย่างซีเมนต์อายุ 3 วัน สำหรับการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน (ต่อ)

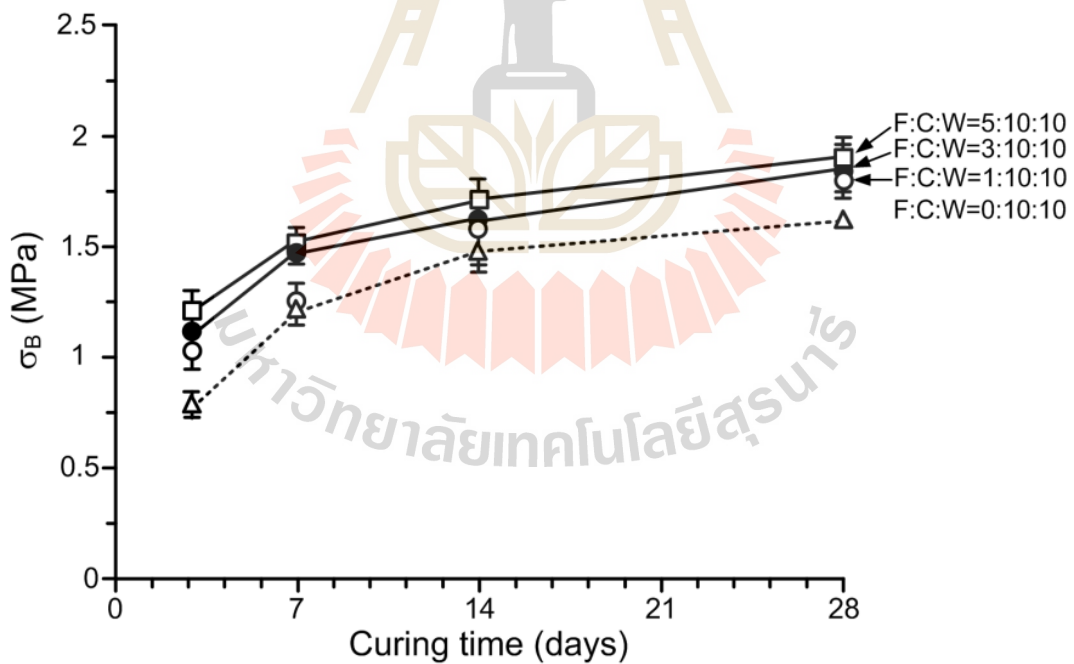
Types	Sample no.	Length, L (mm)	Diameter, D (mm)	L/D	Weight, W (g)	Density, ρ (g/cc)
F:C:W = 1:10:10	FC-1-01	28.00	54.50	0.51	96.20	1.47
	FC-1-02	27.20	54.00	0.50	98.30	1.58
	FC-1-03	27.40	54.30	0.50	102.60	1.62
	FC-1-04	26.60	54.40	0.49	101.80	1.65
	FC-1-05	27.50	53.30	0.52	100.90	1.64
F:C:W = 3:10:10	FC-3-01	27.60	54.40	0.51	104.10	1.62
	FC-3-02	27.20	54.20	0.50	104.60	1.67
	FC-3-03	27.10	54.30	0.50	101.10	1.61
	FC-3-04	27.20	53.70	0.51	106.10	1.72
	FC-3-05	27.00	54.00	0.50	96.30	1.56
F:C:W = 5:10:10	FC-5-01	27.80	54.00	0.51	101.60	1.60
	FC-5-02	28.60	54.00	0.53	104.30	1.59
	FC-5-03	28.10	53.80	0.52	100.50	1.57
	FC-5-04	27.80	53.90	0.52	100.50	1.58
	FC-5-05	28.30	54.00	0.52	102.70	1.58



รูปที่ 4.6 การติดตั้งเครื่องมือการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน ASTM D3967

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน (σ_B) ของส่วนผสมซีเมนต์ ส่วนผสมเถ้าลอย และ ส่วนผสมดินเบนทอไนต์

Types	F:C:W or B:C:W	Brazilian tensile strength (σ_B , MPa)			
		Curing Time (days)			
		3	7	14	28
Pure Cement	0:10:10	0.79 ± 0.14	1.21 ± 0.26	1.47 ± 0.14	1.51 ± 0.12
Fly ash	1:10:10	1.03 ± 0.24	1.23 ± 0.23	1.52 ± 0.07	1.81 ± 0.09
	3:10:10	1.12 ± 0.17	1.49 ± 0.12	1.63 ± 0.11	1.85 ± 0.32
	5:10:10	1.22 ± 0.09	1.52 ± 0.10	1.72 ± 0.05	1.91 ± 0.01
Bentonite	1:10:10	1.36 ± 0.13	1.37 ± 0.15	1.39 ± 0.21	1.44 ± 0.05
	2:10:10	1.04 ± 0.12	1.12 ± 0.04	1.12 ± 0.14	1.14 ± 0.06
	3:10:10	1.00 ± 0.11	1.02 ± 0.02	1.05 ± 0.14	1.08 ± 0.21

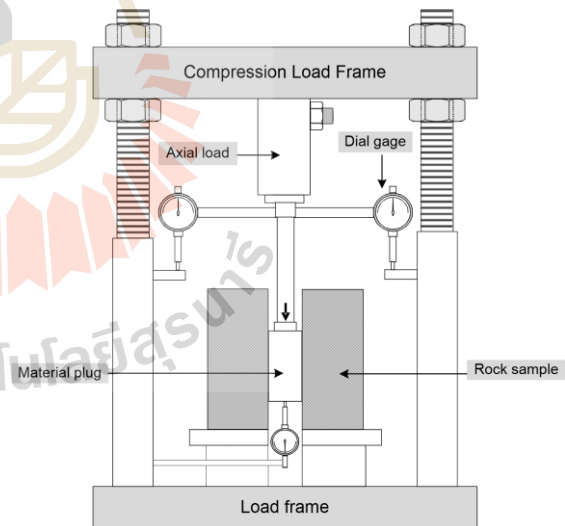


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงกับเวลาการบ่มน้ำของอัตราส่วนของ F:C:W

4.5 การทดสอบกำลังรับแรงยึดหน่วงแบบ Push-out

การทดสอบกำลังรับแรงยึดหน่วงแบบ Push-out มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดหรือค่ากำลังรับแรงยึดหน่วง (bond strength) ที่เกิดขึ้นระหว่างหินตัวอย่างและซีเมนต์ผสมเก่าลอยที่ใช้จำลองการอุดในหลุมเจาะด้วยซีเมนต์ ตัวอย่างหินทรายที่ใช้ในการทดสอบเป็นบล็อกสี่เหลี่ยมขนาด $130 \times 130 \times 130$ มิลลิเมตร (ตารางที่ 4.5) และได้ทำการเจาะรูตรงกลางของตัวอย่างหินทรายโดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 มิลลิเมตร สำหรับใส่วัสดุส่วนผสมเพื่อทดสอบแล้วทำการเทส่วนผสมและบ่มตัวอย่างด้วยการนำไปแช่ในน้ำเป็นเวลา 3, 7, 14, และ 28 วัน

รูปที่ 4.8 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์และตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบ แท่งโลหะทรงกระบอกสำหรับให้แรงในแนวแกนของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ การตรวจวัดการเคลื่อนตัวด้านบนและด้านล่างของแท่งตัวอย่างซีเมนต์โดยการติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัว ให้ความแม่นยำตามแกนด้วยแม่แรงไฮดรอลิกแล้วทำการอ่านค่าการเคลื่อนตัวและความเค้นและจดบันทึกค่าไปพร้อมกัน มาตรวัดการเคลื่อนตัวมีความละเอียดที่ 0.01 มิลลิเมตรและแม่แรงไฮดรอลิกมีกำลังสูงสุดที่ 50 กิโลนิวตันและความละเอียดที่ 0.5 กิโลนิวตัน โดยการทดสอบโดยให้อัตราการกดคงที่ที่ 0.1 MPa/s อ่านค่าการเคลื่อนตัวด้านบนและด้านล่างของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ ทำการบันทึกทุกๆ 10 วินาที จะดำเนินการจนกระทั่งตัวอย่างที่ใช้ทดสอบเกิดการวิบัติ



รูปที่ 4.8 โครงทดสอบกำลังรับแรงยึดหน่วงแบบ Push-out ขณะติดตั้งและทดสอบ (ซ้าย) แบบแผนภาพจำลองเครื่องมือทดสอบ (ขวา) (Stormont and Deamen, 1983)

ตารางที่ 4.5 ขนาดของหินทรายและแท่งตัวอย่างซีเมนต์อายุ 3 วัน สำหรับการทดสอบการทดสอบ
กำลังรับแรงยึดหน่วงแบบ Push-out

Types	Sample no.	Sandstone specimen (mm)	L_c (mm)	D_i (mm)	L_c/D_i	Weight, W (g)	Density, ρ (g/cc)
F:C:W = 0:10:10	C-01	130×131×130	85.00	45.00	1.89	210.89	1.56
	C-02	129×131×130	85.00	45.00	1.89	212.24	1.57
	C-03	130×130×131	90.00	45.00	2.00	229.02	1.60
	C-04	132×131×129	90.00	45.00	2.00	229.02	1.60
	C-05	130×130×129	87.00	45.00	1.93	221.39	1.60
F:C:W = 1:10:10	FC-1-01	129×129×131	95.00	45.00	2.11	243.26	1.61
	FC-1-02	131×131×130	90.00	45.00	2.00	226.16	1.58
	FC-1-03	130×130×130	90.00	45.00	2.00	227.59	1.59
	FC-1-04	129×131×130	90.00	45.00	2.00	230.45	1.61
	FC-1-05	129×129×131	90.00	45.00	2.00	230.45	1.61
F:C:W = 3:10:10	FC-3-01	131×129×130	95.00	45.00	2.00	244.77	1.62
	FC-3-02	130×131×131	90.00	45.00	2.00	231.88	1.62
	FC-3-03	130×130×131	90.00	45.00	2.00	231.88	1.62
	FC-3-04	131×131×131	90.00	45.00	2.00	233.32	1.63
	FC-3-05	129×129×130	90.00	45.00	2.00	229.02	1.60
F:C:W = 5:10:10	FC-5-01	131×131×129	85.00	45.00	1.89	213.59	1.58
	FC-5-02	130×130×131	85.00	45.00	1.89	212.24	1.57
	FC-5-03	130×131×130	87.00	45.00	1.93	221.39	1.60
	FC-5-04	131×131×130	90.00	45.00	2.00	231.88	1.62
	FC-5-05	130×129×129	90.00	45.00	2.00	229.02	1.60

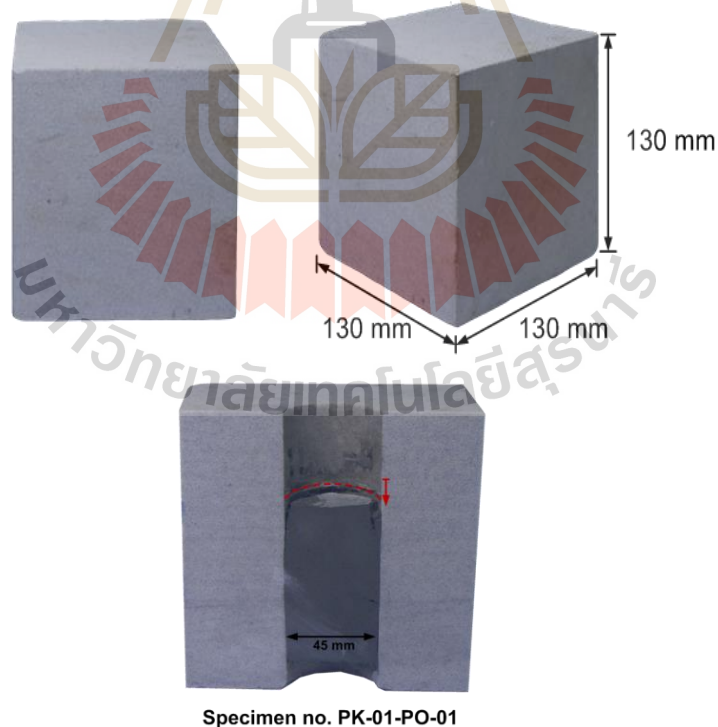
D_i = Hole Diameter and L_c = Cement Plug Length

ค่าการกระจายตัวของแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากการให้แรงกดตามแนวแบบ Push-out ในตัวอย่างระหว่างหินทรายตัวอย่างและแท่งซีเมนต์ที่อยู่ภายในรูของหินตัวอย่างสามารถคำนวณได้จากสมการ (Stormont and Deamen, 1983)

$$\tau_{av} = F/\pi D_i L_c \quad (4.1)$$

โดยที่ F คือ แรงกดสูงสุดตามแนวแกนที่จุดวิบัติ D_i คือ เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของแท่งซีเมนต์ที่ใช้ชุด และ L_c คือความยาวของแท่งซีเมนต์ และต้องอยู่สมมติฐานมีการกระจายตัวของแรงเฉือนอย่างคงที่ (Uniform shear stress)

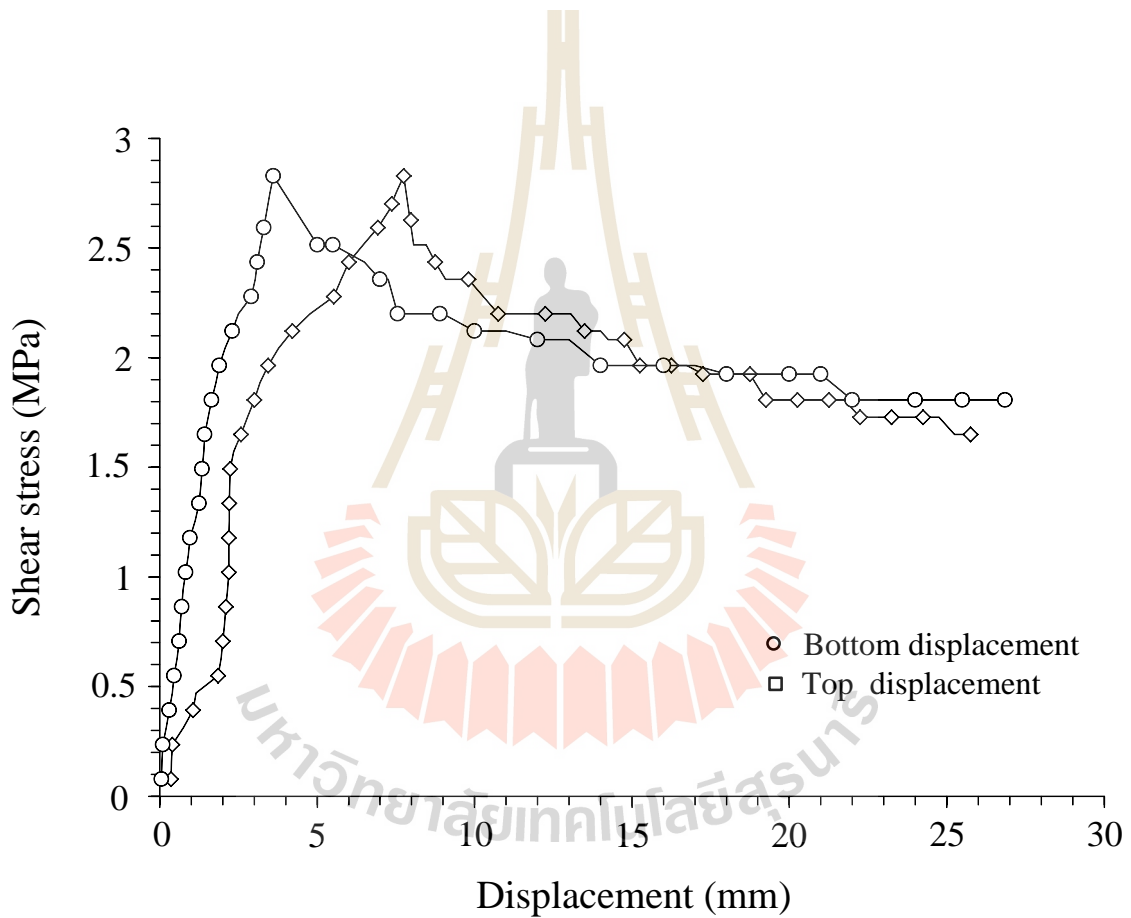
รูปที่ 4.9 แสดงตัวอย่างหินทรายได้ถูกทำการตัดในแนวแกนหลังจากวิบัติ ความหนาของซีเมนต์ที่เหลือที่ผนังหลุมเจาะบนแท่งตัวอย่างซีเมนต์และการขาดจากกันชี้ให้เห็นว่าเป็นการยึดเหนี่ยวที่ดี ความเค้นในแนวแกนที่เกิดขึ้นสามารถแสดงในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ในตำแหน่งด้านบนและด้านล่างของแท่งตัวอย่างตามในรูปที่ 4.10 โดยที่ค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยว (bond strength) ของส่วนผสมแก้าลอยได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.6 ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวส่วนผสมแก้าลอยที่ 28 วัน มีค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวสูงที่สุด (รูปที่ 4.11)



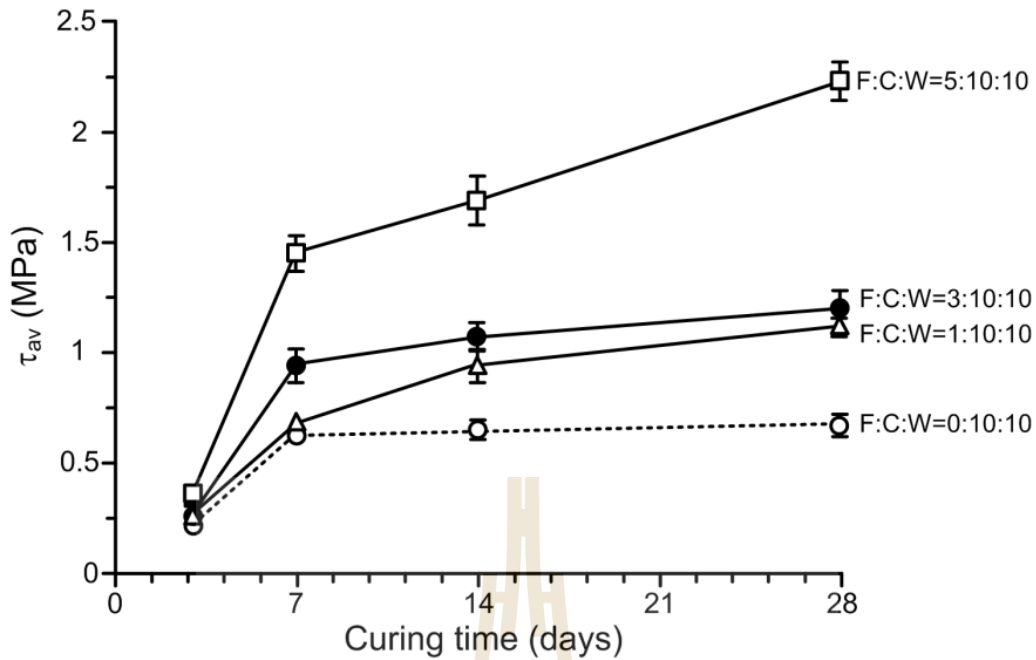
รูปที่ 4.9 ตัวอย่างหินทรายที่ใช้ในการทดสอบ (บน) ภาพตัวอย่างก่อนการเจาะทดสอบ (ล่าง) ภาพตัดขวางตัวอย่างหลังการทดสอบ

ตารางที่ 4.6 ค่ากำลังแรงยึดหน่วงสูงสุด (Bond strength) ของส่วนผสมเถ้าลอย

Curing Time (days)	Average shear strength (MPa)			
	F:C:W			
	0:10:10	1:10:10	3:10:10	5:10:10
3	0.22	0.25	0.26	0.36
7	0.63	0.67	0.94	1.45
14	0.65	0.94	1.07	1.69
28	0.67	1.12	1.20	2.23



รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบ Push-out โดยความเค้นในแนวแกนแสดงในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ในตำแหน่งด้านบน (Top) และด้านล่าง (Bottom) ของตัวอย่าง PK-01-PO-01



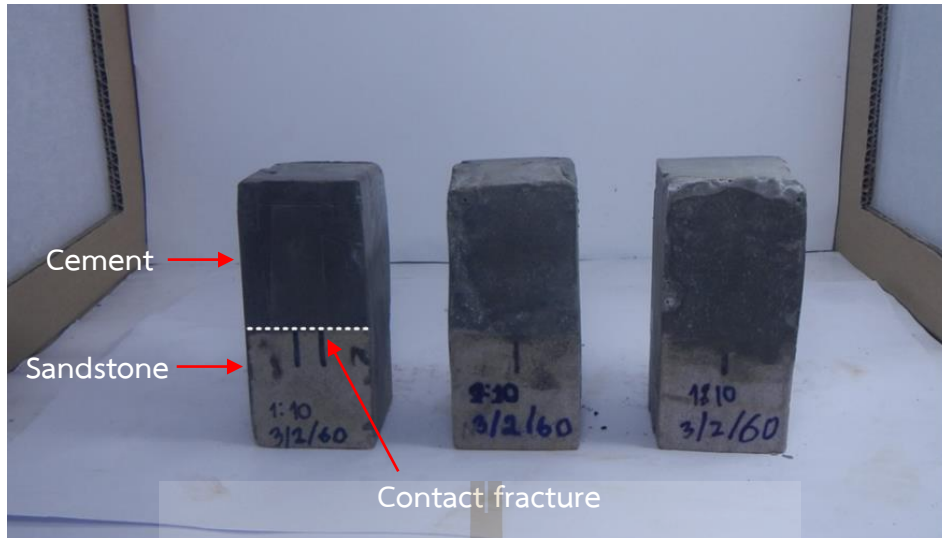
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแรงยึดเหนี่ยวกับเวลาการบ่มน้ำอัตรส่วนของ F:C:W

4.6 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง

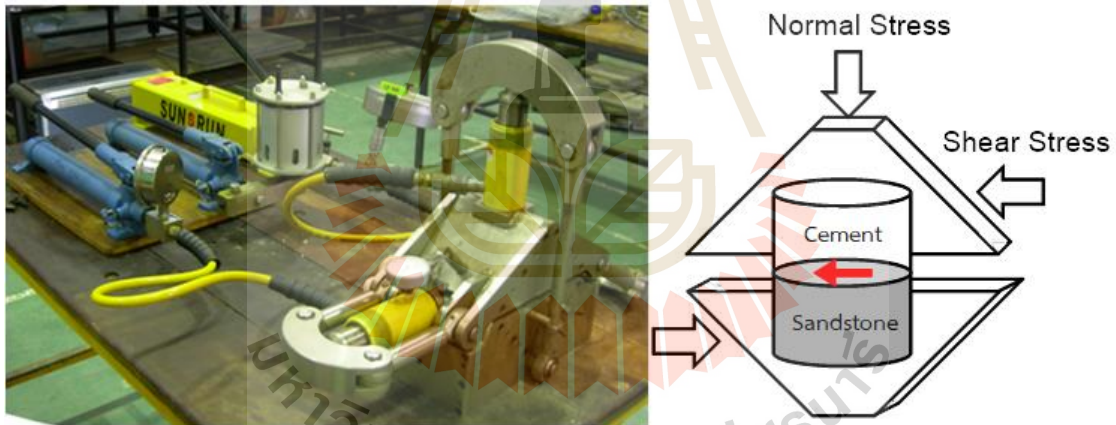
การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง (Direct shear strength test) มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบหาลำกำลังแรงเฉือนสูงสุด (Fracture shear strength) ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างผิวของตัวอย่างแท่งซีเมนต์ผสมเถ้าลอยกับผิวของรอยแตกของหิน วิธีการทดสอบและการคำนวณผลเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D5607 และการแนะนำของ ISRM (Brown, 1981)

การเตรียมตัวอย่างการทดสอบ ใช้ส่วนผสมซีเมนต์เพลิงในแบบหล่อซึ่งทำด้วยบล็อกพลาสติกมีขนาด 54x54 มิลลิเมตร ที่ถูกประกบบล็อกด้วยตัวอย่างหินทรายที่มีขนาด 54x54 มิลลิเมตร (รูปที่ 4.12) แล้วทำการบ่มตัวอย่างด้วยการนำไปแช่ในน้ำเป็นเวลา 7 วัน ก่อนนำมาทดสอบ

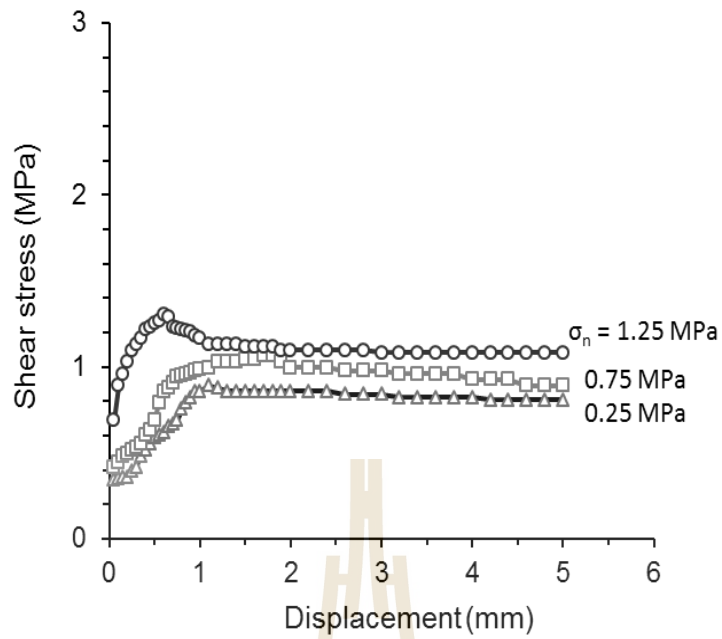
ตัวอย่างในการทดสอบใช้ความเค้นในแนวตั้งฉาก (Normal stress) 3 ระดับตั้งแต่ 0.25, 0.75, ถึง 1.25 MPa ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงเฉือนโดยตรงในห้องปฏิบัติการ รุ่น EL-77-1030 ที่สามารถให้กำลังสูงสุด 50 กิโลนิวตัน การติดตั้งเครื่องมือสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงแสดงในรูปที่ 4.13 ให้แรงเฉือนอย่างต่อเนื่องและอ่านค่าทุกๆ 2 มิลลิเมตร สำหรับการเคลื่อนตัวแนวเฉือน โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวแนวเฉือนของตัวอย่างแสดงในรูปที่ 4.14 ถึง 4.17



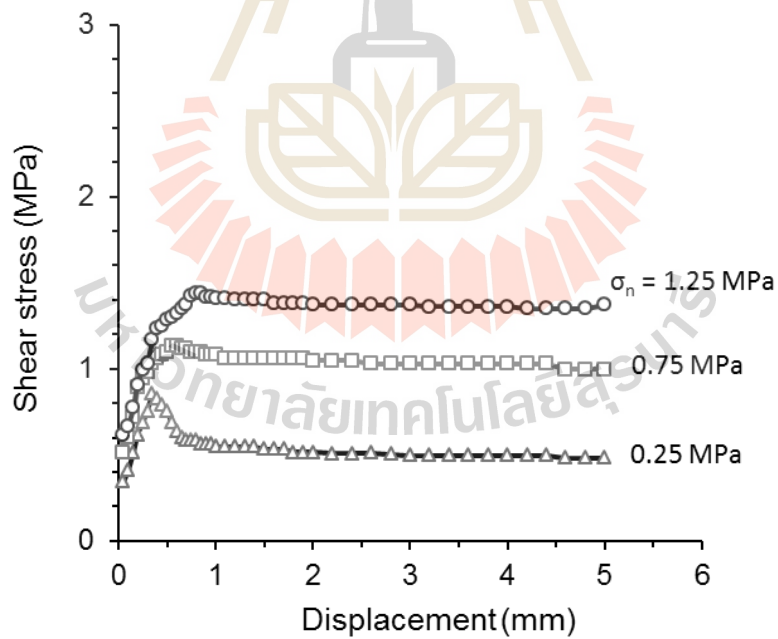
รูปที่ 4.12 ตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของส่วนผสมแก้ลอย



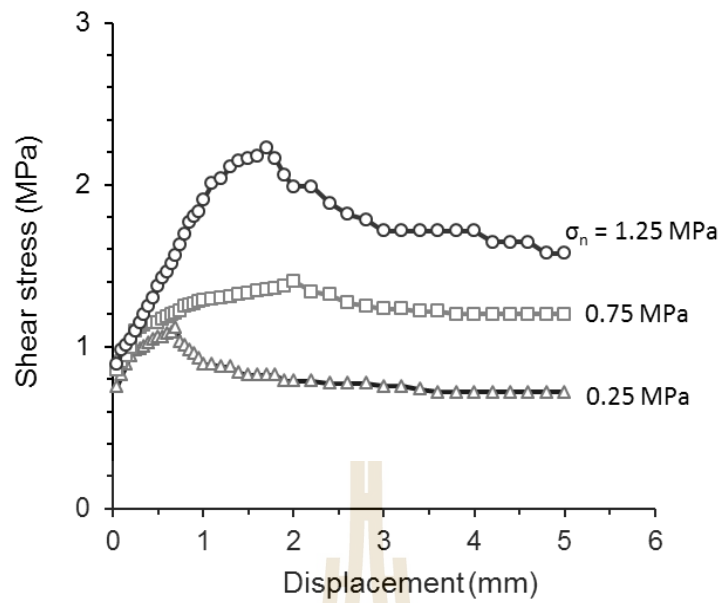
รูปที่ 4.13 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงเฉือนขณะติดตั้งและทำการทดสอบ ASTM D5607



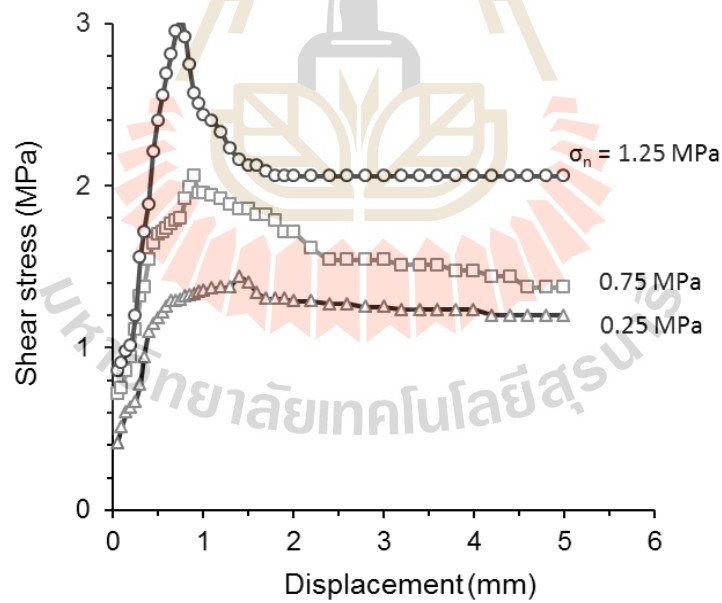
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวแนวเฉือนของตัวอย่าง
F:C:W = 0:10:10



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวแนวเฉือนของตัวอย่าง
F:C:W = 1:10:10



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวแนวเฉือนของตัวอย่าง
F:C:W = 3:10:10



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวแนวเฉือนของตัวอย่าง
F:C:W = 5:10:10

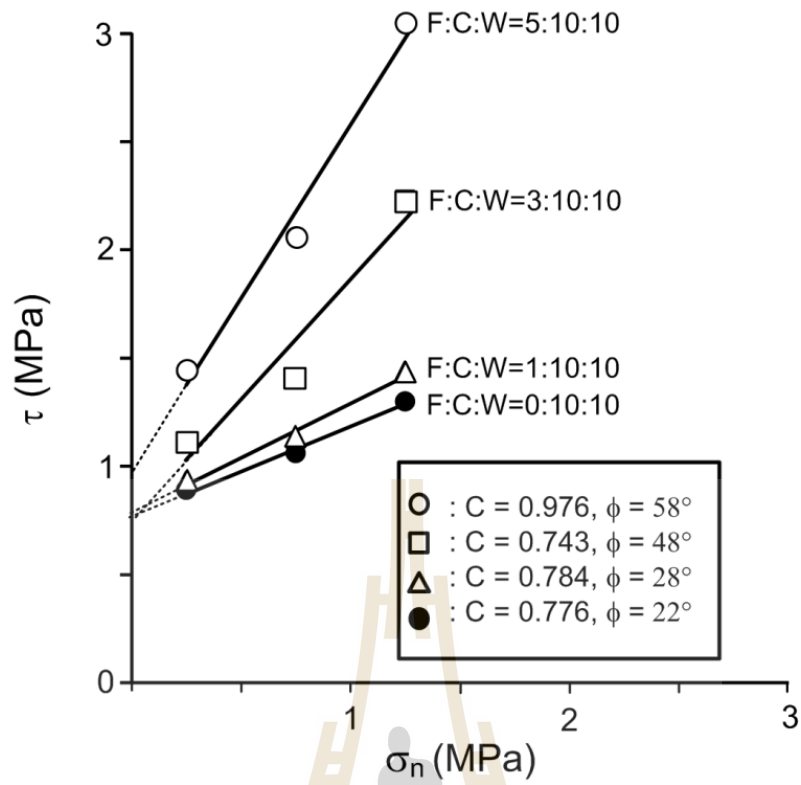
การคำนวณค่าความเค้นเฉือนสุดยอด (Peak shear strength) และความเค้นเฉือนคงเหลือ (Residual shear strength) ตามความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างความเค้นเฉือนและความเค้นตั้งฉาก ตามเกณฑ์ของ Coulomb ได้มุมเสียดทานสำหรับความเค้นเฉือนสุดยอด (Peak friction angle) และมุมเสียดทานสำหรับความเค้นเฉือนคงเหลือ (Residual friction angle) ที่ผิวสัมผัสของตัวอย่างหินทรายและแท่งตัวอย่างซีเมนต์ผสมเถ้าลอยดังแสดงในตารางที่ 4.7 และ 4.8 ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่ากำลังแรงเฉือนของส่วนผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วน 5:10:10 มีค่าแรงเฉือน ค่าความเค้นยึดติด และค่ามุมเสียดทานสูงสุด และรูปที่ 4.18 แสดงกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉือนสูงสุดในฟังก์ชันของความเค้นในแนวตั้งฉากของส่วนผสมเถ้าลอย

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบค่ากำลังเฉือนของตัวอย่างส่วนผสม

Normal Stress (MPa)	Peak Shear Stress (MPa)						
	F:C:W				B:C:W (Wetchasat, 2013)		
	0:10:10	1:10:10	3:10:10	5:10:10	1:10:10	2:10:10	3:10:10
0.25	0.89	0.93	1.11	1.44	0.37	0.22	0.25
0.75	1.06	1.13	1.41	2.06	0.65	0.43	0.47
1.25	1.30	1.44	2.23	3.05	0.85	0.63	0.67

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงเมื่อเทียบกับกฎการแตกของ Coulomb

Types	Ratio	c_p (MPa)	ϕ_p (degrees)	$\tan\phi_p$	R^2
F:C:W	0:10:10	0.78	22.30	0.41	0.99
	1:10:10	0.78	27.00	0.51	0.99
	3:10:10	0.74	48.20	1.12	0.93
	5:10:10	0.98	58.20	1.61	0.98
B:C:W (Wetchasat, 2013)	1:10:10	0.31	23.00	0.42	0.97
	2:10:10	0.12	22.30	0.41	0.99
	3:10:10	0.14	23.30	0.43	0.99



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเฉือนสูงสุดกับความเค้นในแนวตั้งฉากของส่วนผสมเถ้าลอย

บทที่ 5

การทดสอบคุณสมบัติความซึมผ่าน

5.1 การทดสอบความซึมผ่านในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบค่าความซึมผ่านของวัสดุตัวอย่างผสมซีเมนต์มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อใช้อธิบายลักษณะของความซึมผ่านเชิงกายภาพ (Intrinsic permeability, k) โดยอัดแรงดันน้ำในการวัดอัตราการไหลของน้ำในแบบหล่อซีเมนต์ผสม ทำการจดบันทึกค่าอัตราการไหลเพื่อนำไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน ซึ่งแสดงการติดตั้งเครื่องมือทดสอบความซึมผ่านของซีเมนต์ดังรูปที่ 5.1 การไหลของน้ำจะไปในทิศทางตามยาวตามระบบทดสอบที่อธิบายโดยกฎของ Darcy's ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (Coefficient of permeability, K) สามารถคำนวณได้จากสมการ (Indraratna and Ranjith, 2001)

$$K = Q/Ai \quad (5.1)$$

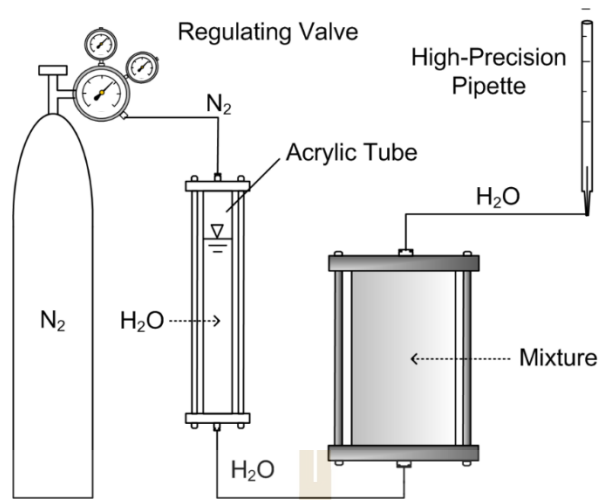
โดยที่ Q คือ อัตราการไหล (m^3/s) A คือ พื้นที่หน้าตัดของการไหล (m^2) และ i คือ ความลาดชันไฮดรอลิก (Hydraulic gradient) โดย ค่าความซึมผ่านทางกายภาพ (intrinsic permeability, k) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$k = K\mu/\gamma_w \quad (5.2)$$

โดยที่ μ คือ ความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิ $25^\circ C$ (Pa·s) และ γ_w คือความหนาแน่นโดยมวลของน้ำ

ความซึมผ่านของส่วนผสมเป็นปัจจัยหลักที่จะนำมาคัดเลือกสัดส่วนของวัสดุที่เหมาะสม เนื้อหาในบทนี้อธิบายวิธีและการทดสอบความซึมผ่านในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ตัวอย่างส่วนผสมระหว่างเถ้าลอยกับซีเมนต์ที่สัดส่วนต่างกัน และเทียบกับผลการทดสอบที่ได้จากส่วนผสมระหว่างดินเบนทอนไนด์กับซีเมนต์

การทดสอบความซึมผ่านแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม การทดสอบประกอบด้วย 1) การทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสม 2) การทดสอบความซึมผ่านของรอยแตกในหิน และ 3) การทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมในรอยแตกหิน โดยการทดสอบใช้ตัวอย่างหินทรายชุดภูกระดึงที่มีลักษณะเหมือนกัน แต่มีการทดสอบรอยแตกที่มีระยะเปิดเผยต่างกัน และภายใต้ความเค้นกดบนรอยแตกที่ต่างกัน



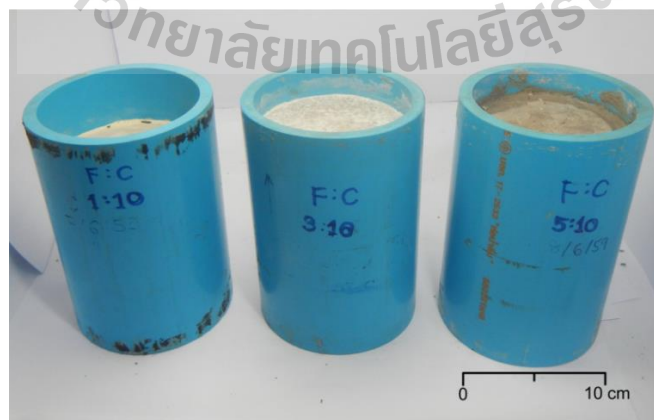
รูปที่ 5.1 แผนภูมิชุดอุปกรณ์การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน

5.2 การทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสม

5.2.1 การจัดเตรียมส่วนผสม

ตัวอย่างส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบนี้ประกอบด้วยเถ้าลอยต่อซีเมนต์ต่อน้ำ (F:C:W) ที่อัตราส่วน 1:10:10, 3:10:10 และ 5:10:10 และเปรียบเทียบกับดินเบนทอไนต์ต่อซีเมนต์ต่อน้ำ (B:C:W) ที่อัตราส่วน 1:10:10, 2:10:10 และ 3:10:10 (Wetchasat, 2013) โดยน้ำหนัก ซึ่งส่วนผสมดังกล่าวได้ถูกคัดเลือกมาจากผลการทดสอบในบทที่ 4

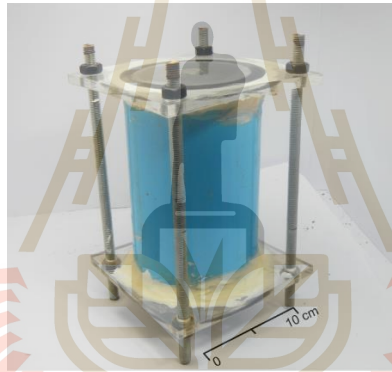
ส่วนผสมหลังจากจัดเตรียมแล้วได้ถูกหล่อลงในท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 6 นิ้ว (รูปที่ 5.2) วิธีการผสมได้ทำตามมาตรฐาน ASTM C938 ในการทดสอบนี้จะมีการหาค่าความซึมผ่านในช่วงเวลาของการบ่มที่ต่างกัน คือ 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน



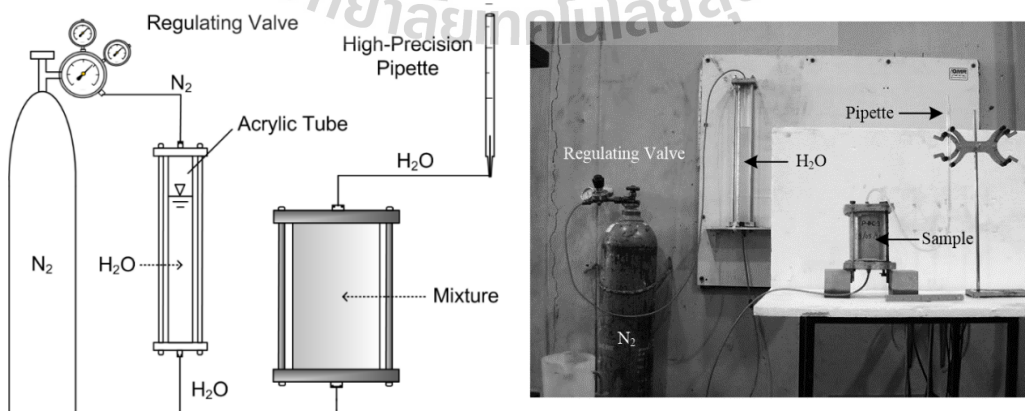
รูปที่ 5.2 ท่อทดสอบ PVC เส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้วที่ใช้เป็นแบบหล่อส่วนผสมสำหรับการทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสม

5.2.2 ขั้นตอนการทดสอบความซึมผ่านในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบเริ่มจากการติดตั้งแผ่นอะคริลิกความหนา 1.5 cm ที่ปลายบนและล่างของแบบหล่อ PVC แผ่นอะคริลิกทั้ง 2 ถูกยึดให้แน่นติดกับขอบบนและล่างของแบบหล่อด้วยเสายึด 4 เสายึด ดังแสดงในรูปที่ 5.3 ที่จุดกึ่งกลางของแผ่นอะคริลิกมีรูที่ต่อกับหมุดยึดท่อแรงดันสูงเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.25 นิ้ว ก่อนการทดสอบแผ่นด้านล่างจะต่อเข้ากับปั้มน้ำ และแผ่นด้านบนจะต่อเข้ากับหลอดวัดปริมาตรน้ำปิเปตต์ ดังแสดงในรูปที่ 5.4 ในขณะที่ทดสอบจะทำการอัดน้ำที่อยู่ใ้มน้ำเข้าไปในแบบหล่อ PVC ด้วยความดันคงที่เท่ากับ 10 psi แรงดันนี้ได้มาจากความดันของก๊าซไนโตรเจน ซึ่งสามารถปรับและควบคุมแรงดันได้โดยใช้วาล์วปรับความดันที่ส่วนบนของถังก๊าซไนโตรเจน ก่อนทำการตรวจวัดจะปล่อยให้แรงดันน้ำไหลผ่านตัวอย่างส่วนผสมเพื่อไล่ฟองอากาศออกให้หมดเสียก่อน การตรวจวัดความซึมผ่านสามารถทำได้โดยจับเวลาการไหลของน้ำในเชิงปริมาตรที่หลอดวัดปริมาตรน้ำปิเปตต์ ความซึมผ่านของตัวอย่างส่วนผสมสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.1) และสมการที่ (5.2)



รูปที่ 5.3 ท่อทรงกระบอก PVC สำหรับใช้เป็นอุปกรณ์ทดสอบความซึมผ่าน



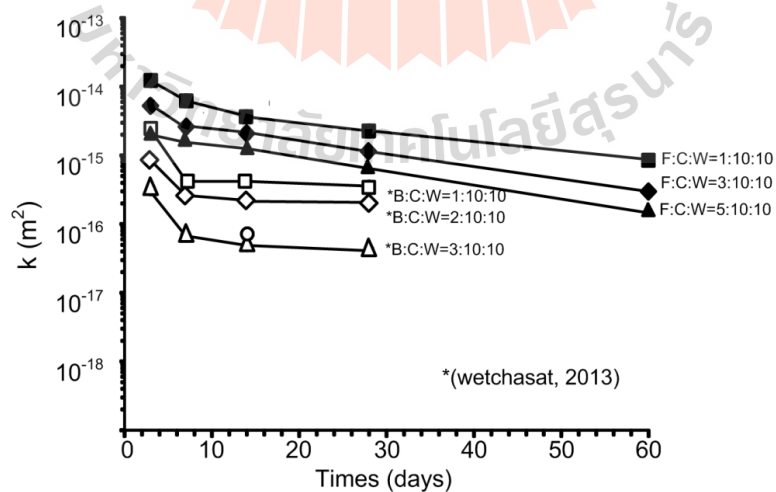
รูปที่ 5.4 ชุดอุปกรณ์และการจัดเตรียมการทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมภายใต้ความดันคงที่

5.2.3 ผลการทดสอบ

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดสอบของค่าความซึมผ่านทางกายภาพสำหรับส่วนผสมทุกสัดส่วน รูปที่ 5.5 แสดงผลการทดสอบส่วนผสมของเถ้าลอยต่อซีเมนต์ต่อน้ำ และส่วนผสมดินเบนทอไนต์ต่อซีเมนต์ต่อน้ำ (Wetchasat, 2013) ซึ่งได้นำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบระบุว่า ค่าความซึมผ่านของทุกส่วนผสมจะลดลงในเวลาที่เพิ่มขึ้น จากนั้นค่าความซึมผ่านจะมีค่าค่อนข้างคงที่หลังจากบ่มได้ 28 ถึง 60 วัน หลังจากถูกบ่มมาแล้วส่วนผสมทุกสัดส่วนจะมีค่าความซึมผ่านอยู่ในช่วง 10^{-16} ถึง 10^{-14} m² ส่วนผสมระหว่างเถ้าลอยต่อซีเมนต์ต่อน้ำที่อัตราส่วน 5:10:10 จะให้ค่าความซึมผ่านต่ำสุด

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบหาค่าความซึมผ่านของส่วนผสมที่ระยะการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน

Curing Time (days)	Intrinsic Permeability ($\times 10^{-18}$ m ²)						
	F:C:W			B:C:W (Wetchasat, 2013)			
	1:10:10	3:10:10	5:10:10	0:10:10	1:10:10	2:10:10	3:10:10
3	12196.7	5272.9	2046.6	8930.0	2,370.0	868.0	317.0
7	6305.4	2608.0	1653.0	965.0	431.0	265.0	67.6
14	3687.0	2090.9	1225.9	74.1	414.0	228.0	49.0
28	2311.0	997.9	754.7	0.441	356.0	208.0	41.3
60	329.3	154.2	100.6	-	-	-	-



รูปที่ 5.5 ผลการทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมที่เวลาบ่มต่างกัน

5.3 การทดสอบความซึมผ่านของรอยแตกในหิน

5.3.1 วัตถุประสงค์การทดสอบ

การทดสอบความซึมผ่านของรอยแตกในหิน (Permeability of rock fractures) มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าความซึมผ่านของรอยแตกในหินทรายชุดภูกระดึงภายใต้ความเค้นกดที่ตั้งฉากกับรอยแตกในระดับต่างๆ กัน คือ 1, 2, 3 และ 4 MPa รอยแตกที่ถูกทำขึ้นในห้องปฏิบัติการมีพื้นที่ 13×13 ตารางเซนติเมตร และวางตัวอยู่ที่จุดกึ่งกลางของตัวอย่างหินรูปลูกบาศก์ขนาด $13 \times 13 \times 13$ ลูกบาศก์เซนติเมตร (รูปที่ 5.6) ตัวอย่างหินส่วนบนถูกเจาะเป็นรูกลม มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร อยู่ที่จุดกึ่งกลางเพื่อใช้เป็นทางส่งแรงดันน้ำเข้าสู่รอยแตก ในการคำนวณจะสมมติให้น้ำไหลจากจุดกลางของรอยแตกออกไปในแนวรัศมีทุกทิศทางถึงขอบนอกของตัวอย่างหิน

5.3.2 ขั้นตอนการทดสอบความซึมผ่านในห้องปฏิบัติการ

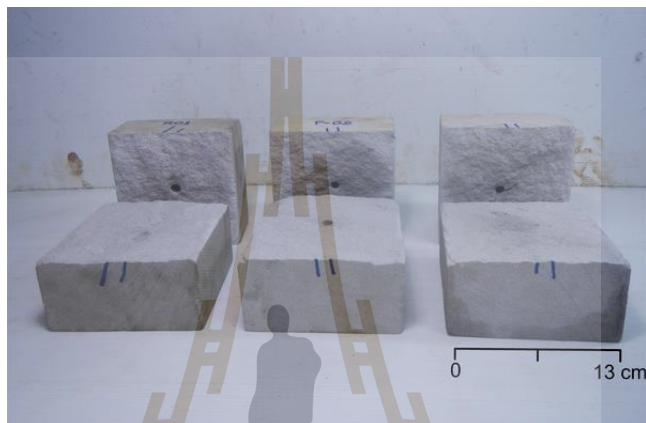
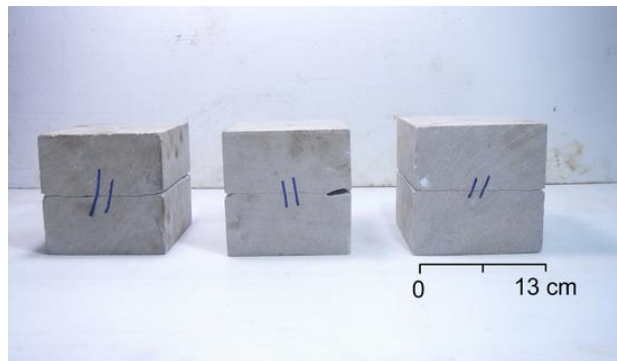
การทดสอบเริ่มจากติดตั้งตัวอย่างหินลงในโครงกดทดสอบ (รูปที่ 5.7) ตัวอย่างหินมีแผ่นเหล็กที่ให้แรงกดด้านบนและด้านล่าง แรงกดได้มาจากแม่แรงและปั๊มไฮดรอลิกที่ติดอยู่กับโครงกดทดสอบ ดังนั้นผิวของรอยแตกจะรับความเค้นกดในแนวตั้งฉากในขณะที่ทำการทดสอบความซึมผ่าน แผ่นเหล็กด้านบนจะมีรูที่จุดกึ่งกลางที่ตรงกับรูที่เจาะไว้ที่ส่วนบนของตัวอย่างหิน รูที่แผ่นเหล็กจะถูกต่อเข้ากับปั๊มน้ำและถังก๊าซไนโตรเจนที่มีวาล์วปรับแรงดันให้คงที่ที่ระดับที่ต่างกัน เมื่อเปิดวาล์วถังก๊าซไนโตรเจนจะดันน้ำเข้าสู่รอยแตกในตัวอย่างหิน ตัวอย่างหินทั้ง 3 ตัวอย่างจะใช้แรงดันน้ำคงที่ในขณะที่ทดสอบ ซึ่งอยู่ในช่วง 10 ถึง 40 psi โดยทดสอบเริ่มจากความเค้นกดในรอยแตกจาก 1, 2, 3, ถึง 4 MPa ในแต่ละระดับความเค้นกดบนรอยแตก ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (hydraulic conductivity, K) คำนวณได้จาก (Indraratna and Ranjith, 2001)

$$K = \gamma_w e_h^2 / 12\mu \quad (5.3)$$

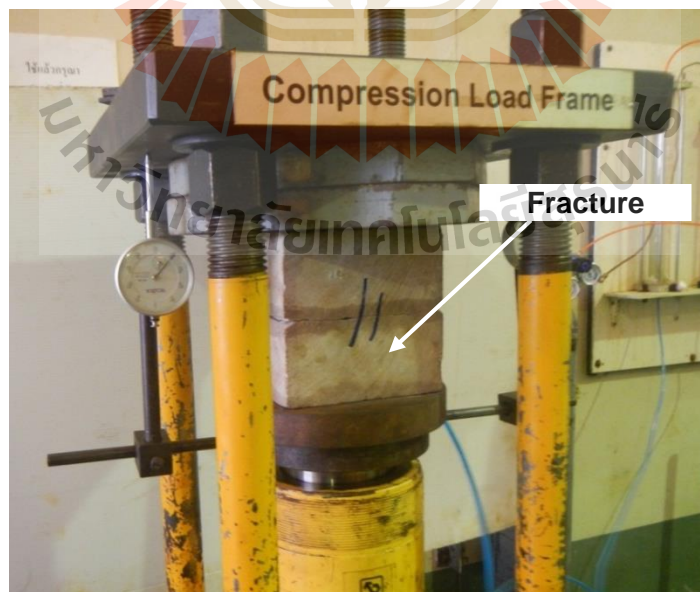
$$k = e_h^2 / 12 \quad (5.4)$$

$$e_h = \{[(6\mu q) / (\pi \Delta P)] \ln (r/r_0)\}^{1/3} \quad (5.5)$$

โดยที่ k คือความซึมผ่านเชิงกายภาพ (intrinsic permeability) e_h คือระยะเปิดเฉยเชิงไฮดรอลิกของรอยแตก γ_w คือความหนาแน่นโดยมวลของน้ำ μ คือความหนืดเชิงพลศาสตร์ (dynamic viscosity) r_0 คือรัศมีของรูที่จุดกึ่งกลางของตัวอย่างรอยแตก r คือระยะจากจุดกึ่งกลางของรอยแตกถึงขอบนอก q คืออัตราไหลเชิงปริมาตรที่วัดได้จากการทดสอบ และ ΔP คือค่าความดันของน้ำที่อัดเข้าไปที่รูกลางของตัวอย่างหิน



รูปที่ 5.6 ตัวอย่างหินทรายชุดภูกระดึงรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ที่มีพื้นที่ของรอยแตกขนาด 13×13 ตารางเซนติเมตร ถูกจัดเตรียมเพื่อการทดสอบความซึมผ่าน



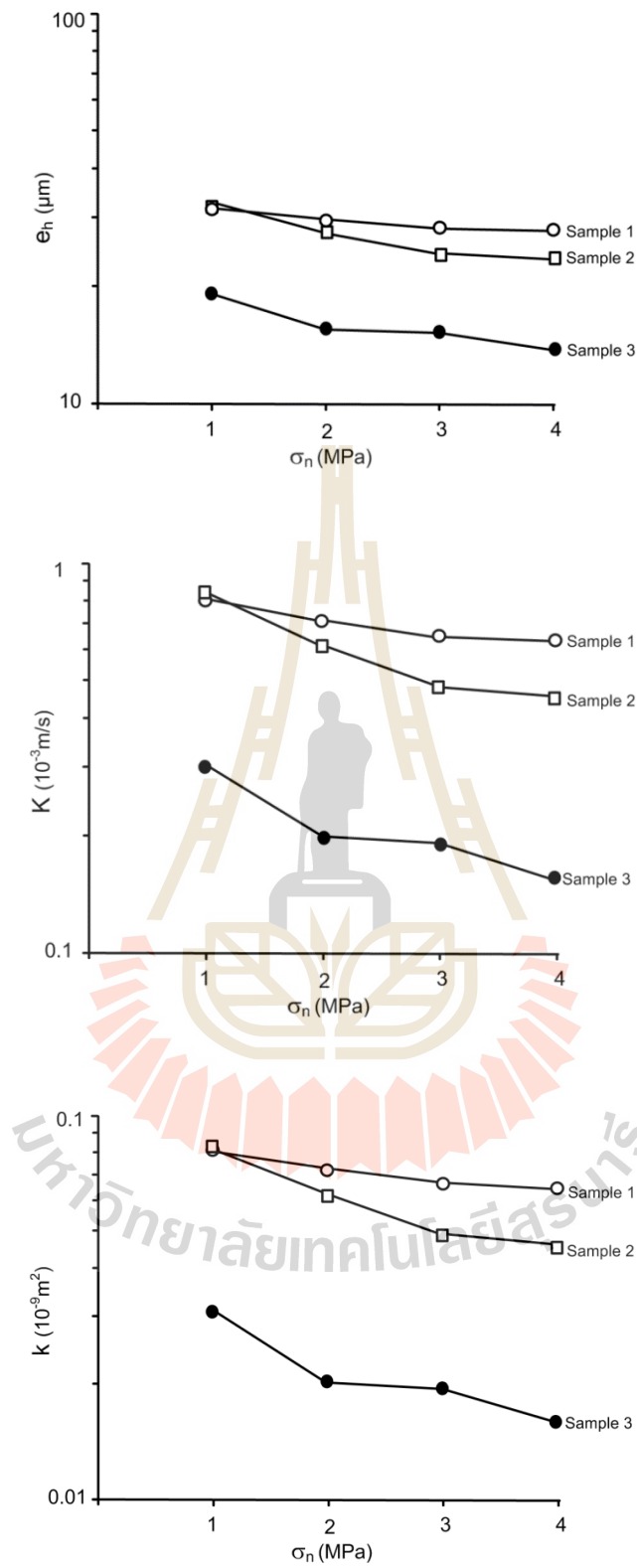
รูปที่ 5.7 ตัวอย่างหินทรายในขณะทดสอบความซึมผ่านของรอยแตกภายใต้ความเค้นกด

5.3.3 ผลการทดสอบ

ตารางที่ 5.2 สรุปผลการทดสอบและการคำนวณทั้งหมดด้วยการนำค่าการเปิดเผยอเชิงไฮดรอลิก (e_h) ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (K) และค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพ (k) มาสร้างควมัมพันธ์ในฟังก์ชันของความเค้นกดบนรอยแตก (รูปที่ 5.8) ซึ่งผลที่ได้ระบุว่าความซึมผ่านของรอยแตกในหินทั้ง 3 ตัวอย่างสอดคล้องกัน คือค่าความซึมผ่านของรอยแตกจะลดลงเมื่อค่าความเค้นกดบนรอยแตกมีค่าเพิ่มขึ้น ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า ถักรอยแตกในหินอยู่ประชิดกัน (close fracture) ระยะเปิดเผยอและความซึมผ่านของรอยแตกจะมีค่าน้อยมาก ซึ่งให้ค่าน้อยกว่าวัสดุอุดที่ศึกษา ซึ่งจะไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างทางวิศวกรรม ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้วัสดุอุดมาลดความซึมผ่านของรอยแตกนี้

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบค่าความซึมผ่านของรอยแตกในหิน 3 ตัวอย่าง

Sample No.	Normal stress (MPa)	e_h (μm)	K (10^{-3} m/s)	k (10^{-9} m^2)
1	1	32.217±2.63	0.838±0.01	0.087±0.08
	2	27.613±3.49	0.616±0.02	0.064±0.04
	3	24.428±2.76	0.482±0.00	0.050±0.12
	4	23.646±2.25	0.452±0.01	0.047±0.03
2	1	31.609±3.49	0.807±0.00	0.083±0.05
	2	29.564±4.38	0.706±0.01	0.073±0.06
	3	28.331±1.23	0.648±0.02	0.067±0.11
	4	27.963±2.29	0.632±0.01	0.065±0.23
3	1	19.306±3.35	0.301±0.03	0.031±0.08
	2	15.626±0.85	0.197±0.02	0.020±0.09
	3	15.323±3.23	0.190±0.04	0.020±0.05
	4	13.849±4.60	0.155±0.04	0.016±0.17

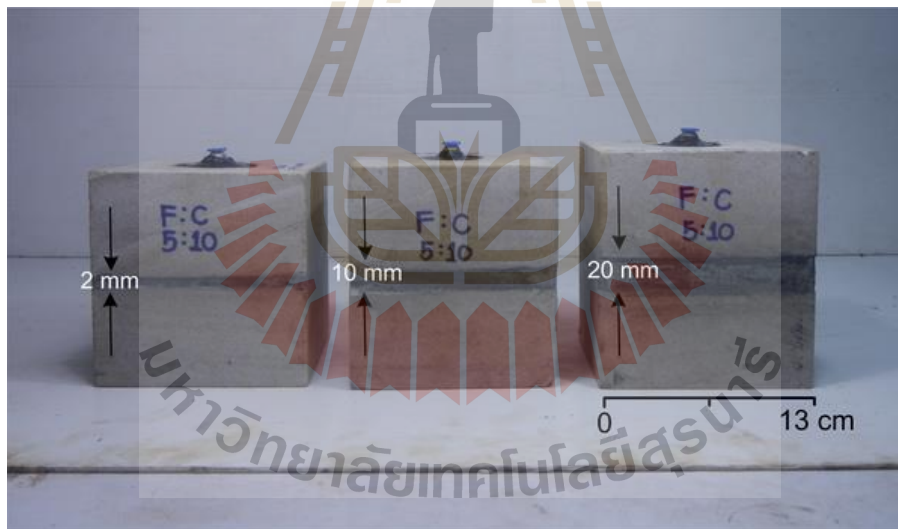


รูปที่ 5.8 ผลการทดสอบค่าความซึมผ่านของรอยแตกในหิน

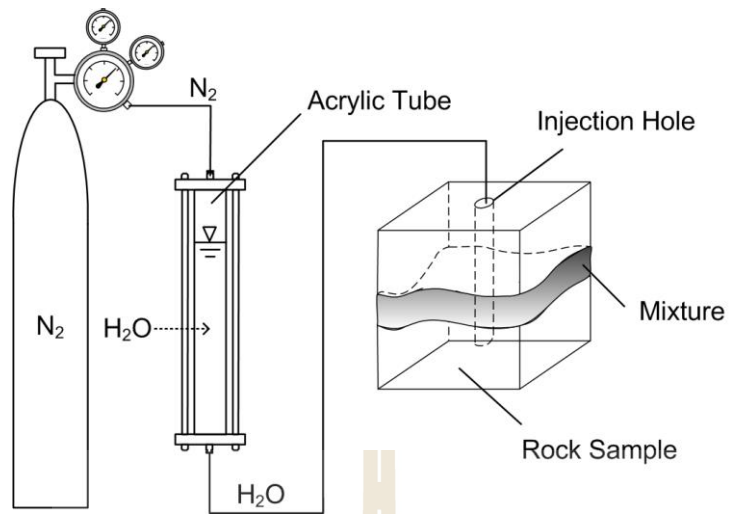
5.4 การทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมในรอยแตกหิน

5.4.1 วัตถุประสงค์การทดสอบ

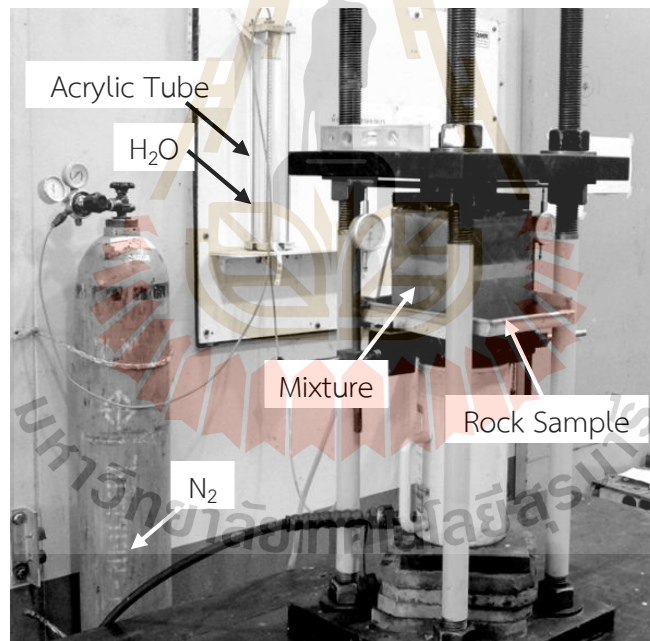
การทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมในรอยแตกหิน (Permeability of grouting materials in rock fractures) มีวัตถุประสงค์ของการทดสอบเพื่อหาค่าความซึมผ่านของส่วนผสมแก้าลอยในรอยแตกหินทรายชุดภูกระดึง โดยจะทำการทดสอบความซึมผ่านทั้ง 4 สัดส่วนที่ได้คัดสรรมาจากการทดสอบในบทที่ 4 ภายใต้ความเค้นกดที่ตั้งฉากกับรอยแตกในระดับต่างๆ กัน คือ 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, และ 1.25 MPa ลักษณะของตัวอย่างหิน รอยแตก และวิธีการทดสอบจะเหมือนกับวิธีที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 5.3 การทดสอบนี้ได้ใช้ตัวอย่างหินทั้งหมด 12 ตัวอย่าง (รูปที่ 5.9) รูปที่ 5.10 แสดงแผนภูมิลักษณะการทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมในรอยแตก รูปที่ 5.11 แสดงการจัดเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมในรอยแตกที่เปิดเผยภายใต้ความเค้นกด ตัวอย่างส่วนผสมได้ถูกอัดลงในรอยแตกที่มีการเปิดเผย 0.2, 1.0 และ 2.0 เซนติเมตร และใช้เวลาบ่ม 7 วัน ก่อนทำการทดสอบความซึมผ่าน



รูปที่ 5.9 ตัวอย่างหินทรายชุดภูกระดึงที่ใช้ทดสอบความซึมผ่านของรอยแตกที่มีการเปิดเผยภายใต้ความเค้นกด



รูปที่ 5.10 แผนภูมิแสดงลักษณะการทดสอบความซึมผ่านของรอยแตกที่มีการเปิดเผยภายใต้ความเค้นกด



รูปที่ 5.11 การจัดเตรียมชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมในรอยแตกที่เปิดเผยภายใต้ความเค้นกด

5.4.2 ขั้นตอนการทดสอบความซึมผ่านในห้องปฏิบัติการ

ตัวอย่างหินทั้ง 12 ตัวอย่างจะใช้แรงดันน้ำคงที่ในขณะที่ทดสอบ ซึ่งอยู่ในช่วง 10 ถึง 40 psi โดยการทดสอบเริ่มจากความเค้นกดส่วนผสมในรอยแตกจาก 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, และ 1.25 MPa ในแต่ละระดับความเค้นกดบนส่วนผสมในรอยแตก ค่าความซึมผ่านของส่วนผสมในรอยแตกสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$K = Q \ln(2mL/D)/2\pi LH_c \quad (5.6)$$

$$k = K\mu/\gamma_w \quad (5.7)$$

โดยที่ Q คืออัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำที่ไหลผ่านส่วนผสมหลังจากหักลบค่าของน้ำที่ไหลผ่านรอยต่อระหว่างส่วนผสมกับผิวหินแล้ว K คือสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านส่วนผสม (hydraulic conductivity) m คือรากที่สองของสัดส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านในแนวนอนรอยแตกกับแนวตั้งฉากรอยแตก กรณีนี้มีค่าคงที่เท่ากับ 1 ส่วน L คือความหนาของส่วนผสมในรอยแตก (0.2, 1.0 และ 2.0 เซนติเมตร) D คือเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะที่จุดกึ่งกลางของตัวอย่าง H_c คือแรงดันเมื่อเทียบกับความสูงของน้ำ ซึ่งมีค่าคงที่ k คือความซึมผ่านเชิงกายภาพของส่วนผสม (Indraratna and Ranjith, 2001)

5.4.3 ผลการทดสอบ

ตารางที่ 5.3 ถึง 5.5 สรุปผลการทดสอบและการคำนวณทั้งหมด โดยค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (K) และค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพ (k) ของส่วนผสมในรอยแตกหินทั้ง 12 ตัวอย่าง (รูปที่ 5.12 ถึง 5.14) มีค่าสอดคล้องกับผลที่ทดสอบได้ในหัวข้อที่ 5.2 นอกจากนี้ส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยกับซีเมนต์ และเปรียบเทียบกับดินเบนทอไนต์กับซีเมนต์ (Wetchasat, 2013) ซึ่งหมายถึงว่าภายใต้การผสมในสัดส่วนที่เหมาะสม ที่ส่วนผสมดินเบนทอไนต์จะมีศักยภาพเชิงกลศาสตร์ที่ดีใกล้เคียงกันกับส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอย

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมในรอยแตกของหินที่มีการเปิดเผย 2 mm

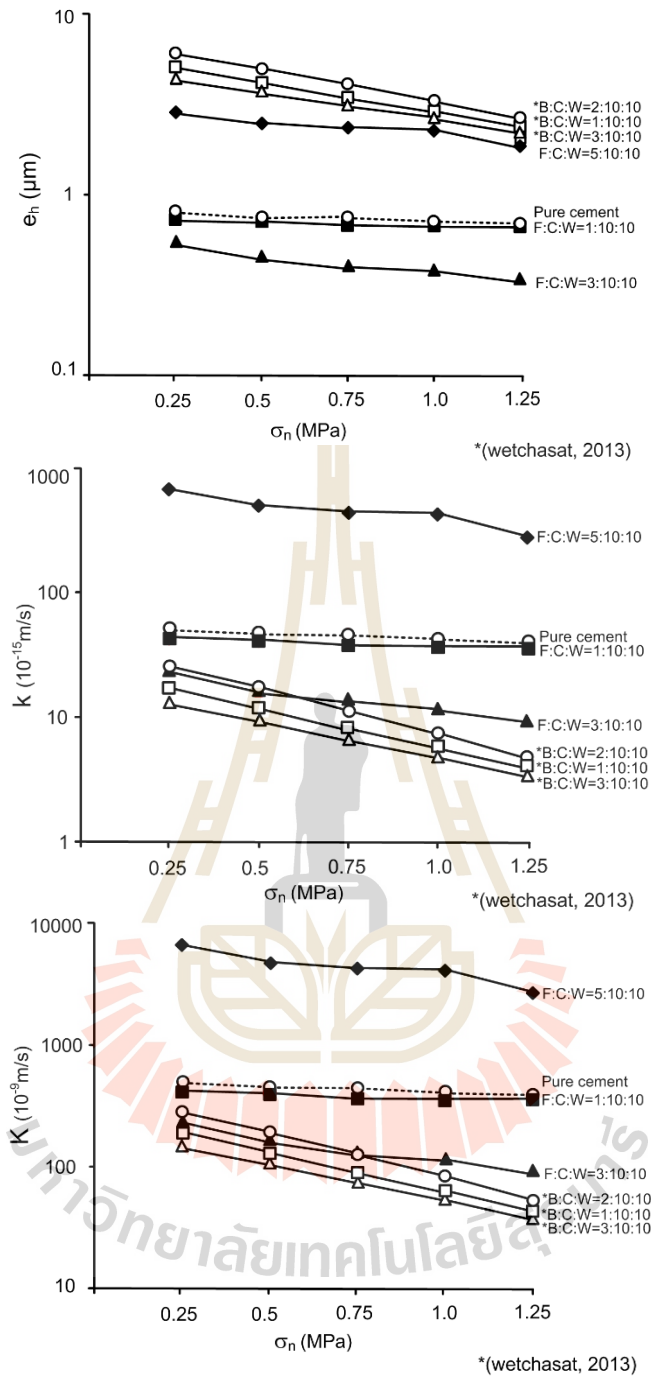
Binder	Normal stress (MPa)	e_h (μm)	K (10^{-9} m/s)	k (10^{-15} m ²)
F:C:W = 0:10:10	0.25	0.77±0.01	484.73±1.60	50.01±0.70
	0.50	0.74±0.00	447.23±2.28	46.14±0.61
	0.75	0.74±0.01	436.82±2.70	45.07±0.76
	1.00	0.71±0.02	401.79±2.27	41.46±0.39
	1.25	0.69±0.01	379.46±1.74	39.15±1.52
F:C:W = 1:10:10	0.25	0.72±0.01	422.10±2.05	43.55±0.32
	0.50	0.71±0.00	401.79±0.15	41.46±0.39
	0.75	0.67±0.10	362.97±1.44	37.45±0.39
	1.00	0.67±0.00	361.22±0.86	37.27±0.19
	1.25	0.67±0.01	359.49±3.18	37.09±0.77
F:C:W = 3:10:10	0.25	0.53±0.01	227.68±0.23	23.49±1.07
	0.50	0.44±0.01	155.88±2.04	16.08±0.65
	0.75	0.39±0.01	123.58±3.13	12.75±1.59
	1.00	0.37±0.01	111.31±0.93	11.48±0.36
	1.25	0.33±0.01	87.88±0.48	9.07±0.75
F:C:W = 5:10:10	0.25	2.84±0.28	6533.38±5.93	674.09±2.05
	0.50	2.45±0.21	4847.35±3.07	500.13±7.68
	0.75	2.31±0.14	4293.36±3.99	442.98±0.72
	1.00	2.27±0.17	4174.10±2.05	430.67±1.89
	1.25	1.84±0.06	2732.14±3.64	281.89±2.20

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมในรอยแตกของหินที่มีการเปิดเผย 10 mm

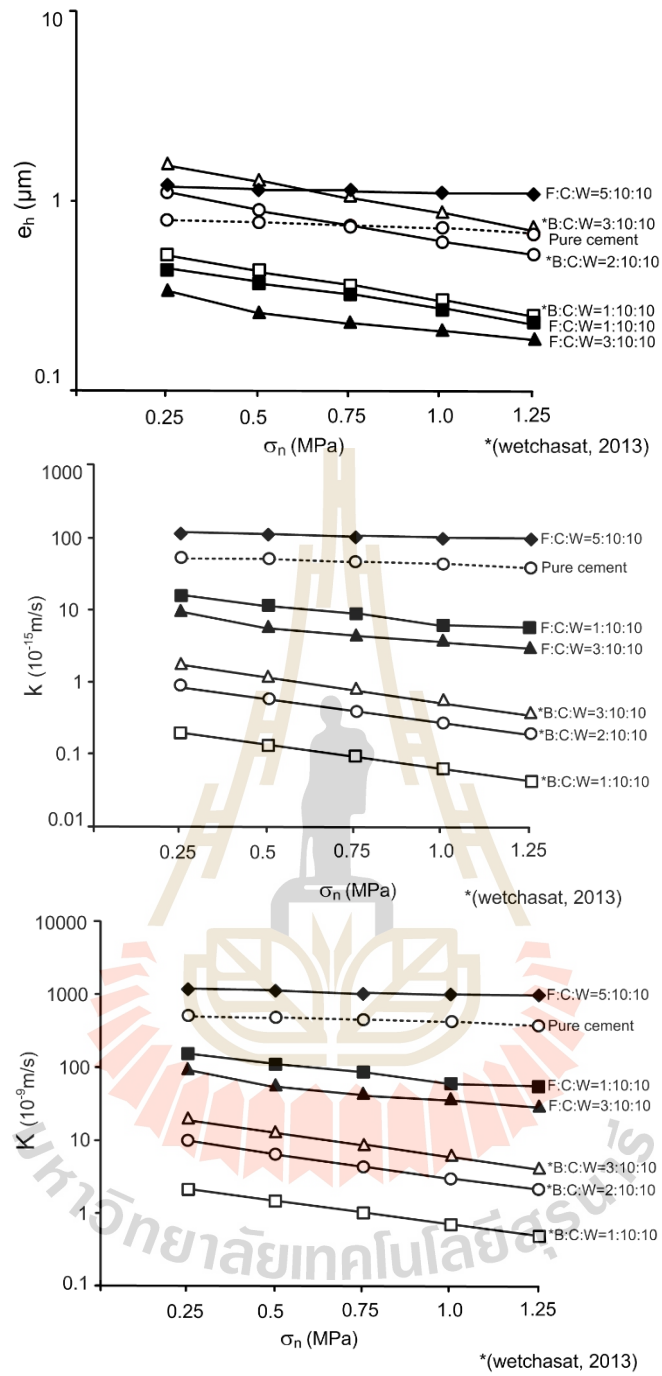
Binder	Normal stress (MPa)	e_h (μm)	K (10^{-9} m/s)	k (10^{-15} m ²)
F:C:W = 0:10:10	0.25	0.80±0.01	512.54±1.80	52.88±1.50
	0.50	0.78±0.00	486.03±1.39	50.15±1.31
	0.75	0.74±0.01	447.46±2.44	46.17±0.83
	1.00	0.72±0.02	420.74±1.60	43.41±2.41
	1.25	0.67±0.02	366.10±2.90	37.77±0.51
F:C:W = 1:10:10	0.25	0.44±0.02	153.21±1.27	15.81±0.14
	0.50	0.37±0.01	110.55±0.32	11.41±0.42
	0.75	0.32±0.02	85.17±0.59	8.79±0.15
	1.00	0.27±0.01	58.61±2.55	6.05±0.74
	1.25	0.24±0.01	54.74±1.58	5.65±0.81
F:C:W = 3:10:10	0.25	0.34±0.01	91.82±0.83	9.47±0.37
	0.50	0.26±0.02	52.99±1.42	5.47±0.38
	0.75	0.23±0.02	41.33±2.59	4.26±0.17
	1.00	0.21±0.01	34.59±1.83	3.57±0.26
	1.25	0.18±0.00	27.64±0.26	2.85±0.46
F:C:W = 5:10:10	0.25	1.21±0.18	1174.57±1.72	121.19±0.57
	0.50	1.17±0.24	1105.48±3.90	114.06±2.79
	0.75	1.13±0.21	1025.08±3.59	105.76±2.66
	1.00	1.11±0.21	989.11±1.50	102.05±1.45
	1.25	1.09±0.21	955.59±6.07	98.59±4.31

ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมในรอยแตกของหินที่มีการเปิดเผย 20 mm

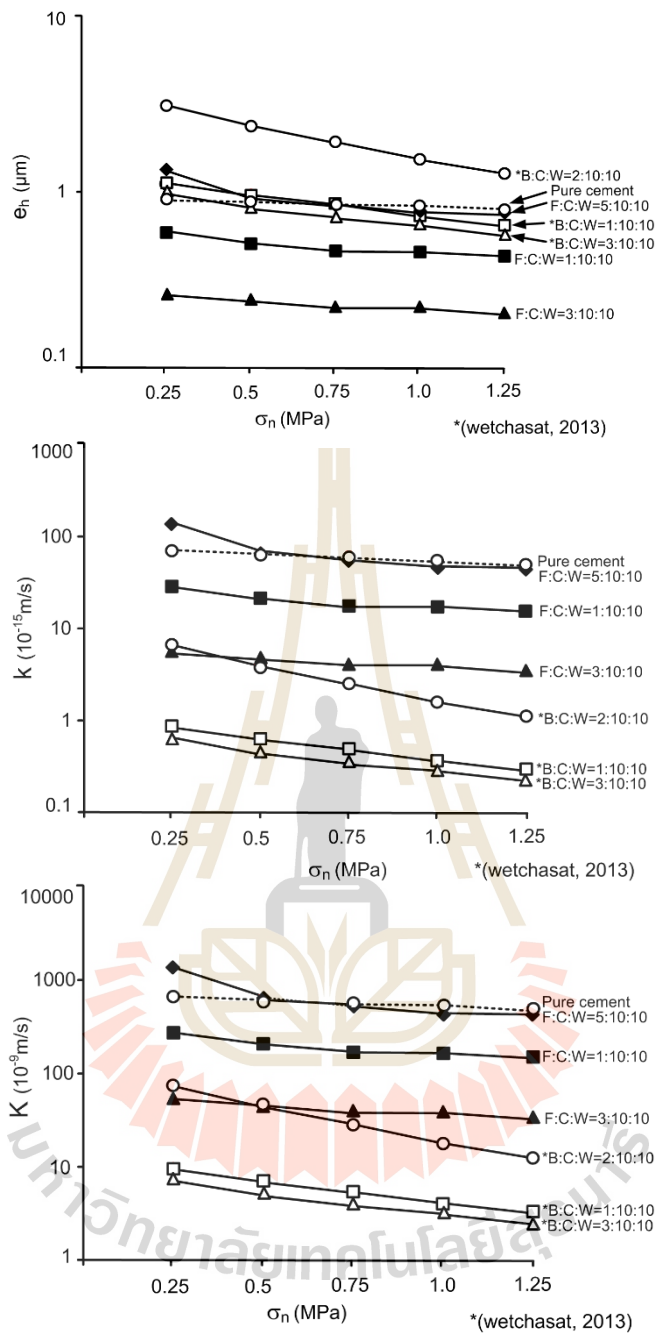
Binder	Normal stress (MPa)	e_h (μm)	K (10^{-9} m/s)	k (10^{-15} m ²)
F:C:W = 0:10:10	0.25	0.91±0.01	668.60±1.84	68.98±1.43
	0.50	0.85±0.00	615.82±2.90	63.54±1.03
	0.75	0.83±0.01	570.76±3.00	54.89±0.08
	1.00	0.75±0.01	405.72±2.23	50.35±0.09
	1.25	0.72±0.01	377.57±3.94	46.43±1.22
F:C:W = 1:10:10	0.25	0.58±0.01	272.11±0.07	28.08±0.65
	0.50	0.50±0.01	205.27±0.90	21.18±0.58
	0.75	0.46±0.01	168.35±1.66	17.37±0.09
	1.00	0.45±0.01	164.80±1.27	17.00±0.71
	1.25	0.43±0.00	148.11±2.20	15.28±0.20
F:C:W = 3:10:10	0.25	0.26±0.00	53.18±1.28	5.49±0.11
	0.50	0.24±0.00	45.18±1.29	4.66±0.10
	0.75	0.22±0.00	38.24±2.29	3.95±0.07
	1.00	0.22±0.01	37.74±1.23	3.89±0.10
	1.25	0.20±0.01	32.23±0.54	3.33±0.08
F:C:W = 5:10:10	0.25	1.31±0.20	1376.53±1.08	142.03±4.22
	0.50	0.91±0.23	778.60±1.84	95.78±2.82
	0.75	0.87±0.20	655.30±7.63	68.98±0.81
	1.00	0.81±0.23	458.84±9.79	56.15±2.72
	1.25	0.75±0.17	398.8±5.67	49.27±0.66



รูปที่ 5.12 ผลการทดสอบค่าความซึมผ่านของส่วนผสมในรอยแตกของหินที่มีการเปิดเผย 2 mm



รูปที่ 5.13 ผลการทดสอบค่าความซึมผ่านของส่วนผสมในรอยแตกของหินที่มีการเปิดเผย 10 mm



รูปที่ 5.14 ผลการทดสอบค่าความซึมผ่านของส่วนผสมในรอยแตกของหินที่มีการเปิดเผย 20 mm

บทที่ 6

บทสรุป

กิจกรรมการทดสอบและวิเคราะห์ผลของงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการตามแผนงานที่ได้เสนอไว้ในข้อเสนอโครงการศึกษาวิจัยทุกประการ ซึ่งสามารถสรุปโดยสังเขปได้ดังนี้ คณะผู้วิจัยสามารถกำหนดชนิดของวัสดุอุดที่นำมาใช้ในการศึกษาประกอบด้วย แก้วลอยถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะลำปาง ปูนซีเมนต์ทรานกอนิตรีย์จากบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด และดินเบนทอไนต์ของบริษัท Thai Nippon Chemical industry, ประเทศไทย นอกจากนี้ยังได้มีการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของวัสดุดังกล่าวเพื่อใช้ในการอ้างอิงและเปรียบเทียบในการศึกษาวิจัยในอนาคต

ในเบื้องต้นได้มีการทดลองใช้สัดส่วนที่หลากหลายสำหรับส่วนผสมระหว่างแก้วลอย ซีเมนต์ และน้ำ และระหว่างดินเบนทอไนต์ ซีเมนต์ และน้ำ เพื่อให้ได้มาซึ่งสัดส่วนที่เหมาะสมและสามารถนำมาประยุกต์ใช้อุดรอยแตกในหิน กล่าวคือ จะต้องมีความสัมพันธ์เชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์อยู่ในเกณฑ์ดีและมีความหนืดที่เหมาะสม ในขั้นตอนนี้ได้มีการคัดเลือกสัดส่วน F:C:W เท่ากับ 1:10:10, 3:10:10, และ 5:10:10 และสัดส่วน B:C:W เท่ากับ 1:10:10, 2:10:10 และ 3:10:10 โดยน้ำหนัก เนื่องจากจะให้ค่ากำลังกดสูงกว่า 2 เมกะปาสกาล ในขณะที่มีความหนืดของส่วนผสมเหลวไม่ควรต่ำกว่า 5 ปาสกาล วินาที ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลศาสตร์ระบุว่าส่วนผสมแก้วลอยกับซีเมนต์ต่อน้ำที่อัตราส่วน 5:10:10 จะให้ค่ากำลังกด, ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น, ค่าแรงดึง, ค่าแรงยึดหน่วง, และค่าแรงเฉือน เท่ากับ 10.45, 1360, 1.91, 2.23, และ 3.05 เมกะปาสกาล

ผลการทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมระบุว่าค่าความซึมผ่านของทุกส่วนผสมจะลดลงในเชิงเวลา หลังจากถูกบ่มมาแล้วส่วนผสมทุกสัดส่วนของแก้วลอยจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านผันแปรอยู่ในช่วง 10^{-9} ถึง 10^{-7} เมตรต่อวินาที ส่วนผสมระหว่างแก้วลอยต่อซีเมนต์ต่อน้ำที่อัตราส่วน 5:10:10 จะให้ค่าความซึมผ่านต่ำสุด

ผลการทดสอบความซึมผ่านของรอยแตกประดิษฐ์ระบุว่าที่ภายใต้ความเค้นตั้งฉากที่ผันแปรจาก 1 ถึง 4 เมกะปาสกาล มีค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านอยู่ในช่วง 10^{-4} ถึง 10^{-3} เมตรต่อวินาที ผลการทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมที่อยู่ในรอยแตกมีระยะการเปิดเผยเท่ากับ 2, 10 และ 20 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านใกล้เคียงกันคือประมาณ 10^{-8} ถึง 10^{-5} เมตรต่อวินาที

ผลการทดสอบในงานวิจัยนี้จะนำไปเปรียบเทียบและวิเคราะห์โดยละเอียดทางกลศาสตร์และชลศาสตร์เพื่อใช้ในการออกแบบทางวิศวกรรม และเพื่อให้ได้มาซึ่งสัดส่วนของส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุอุดรอยแตกในมวลหินต่อไป

บรรณานุกรม

- Akgun H. (1996). Strength parameters of cement borehole seals in rock, in: K. Fuenkajorn, J. J. K. Daemen (Eds.), **Sealing of Boreholes and Underground Excavations in Rock**, Chapman & Hall, London, pp. 28–39.
- Akgun, H. and Daemen, J.J.K. (2002). Influence of degree of saturation on the borehole sealing performance of an expansive cement grout. **Cement and Concrete Research**. 30(2): 281-289.
- Akgun, H. and Daemen, J.J.K. (1994). Performance assessment of cement grout borehole plugs in basalt. **Engineering Geology**, 37, 137-48.
- Ali, M., Khan, I and Hossain M. (2008). Chemical Analysis of Ordinary Portland Cement of Bangladesh. **Chemical Engineering Research Bulletin**. 12: 7-10.
- ASTM C114-11b. Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement. **Annual Book of ASTM Standards**, 04.01, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM C150/C150M-09. Standard Specification for Portland Cement. **Annual Book of ASTM Standards**. 04. 01. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM C39/C39M-10. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. **Annual Book of ASTM Standards**, 04.01, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM C618-19. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. **Annual Book of ASTM Standards**. 04.01. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM C938-10, Standard Practice for Proportioning Grout Mixtures for Preplaced-Aggregate Concrete. **Annual Book of ASTM Standards**. 04.02, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM D2196-10. Standard Test Methods for Rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational (Brookfield type) Viscometer. **In Annual Book of ASTM Standards**. 06.01, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.

- ASTM D2487- 11. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System) . **Annual Book of ASTM Standards**, 04.08, American Society for Testing and Materials, Philadelphia
- ASTM D3967-08. Standard test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens. **Annual Book of ASTM Standards**. 04.08, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM D422-07. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. **Annual Book of ASTM Standards**, 04.08, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM D4318-10. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. **Annual Book of ASTM Standards**, 04.08, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM D5607-95. Standard test method for performing laboratory direct shear strength test of rock specimens under constant normal force. **Annual Book of ASTM Standards**. 04.08, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM D7012-10. 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**. 04.09, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM D854-10. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. **Annual Book of ASTM Standards**. 04.08, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- Baik, M. H., Cho, W. J., and Hahn, P. S. (2007). Erosion of bentonite particles at the interface of a compacted bentonite and a fractured granite. **Engineering Geology**. 91: 229-239
- Bates, R., and Jackson, J. A. (eds.). (1980). Glossary of Geology (2nd ed.). Falls Church, Va.: American Geological Institute.
- Barton, N., Bandis, S. and Bakhtar, K. (1985). Strength, Deformation and Conductivity Coupling of Rock Joints. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstract**, 22(3): 121-140.

- Bhatta, A., Priyadarshinia S., Acharath, A., Abria, A., Sattlera, M. and Techapaphawitc, S. (2019) Physical, chemical, and geotechnical properties of coal fly ash: A global review. **Case Studies in Construction Materials**. Vol 11 e00263
- 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.
- Castelbaum, D. and Shackelford, C. D. (2009). Hydraulic Conductivity of Bentonite Slurry Mixed Sands. **Geotechnical and Geoenvironmental Engineering** 135(12): 1941-1956.
- Cheerarot, R. and Jaturapitakkul, C. (2004). A Study of Disposed Fly Ash from Landfill to Replace Portland cement. *Waste Management*, Vol. 24 (7), 2004, pp. 701-709.
- Chindaprasirta, P., Jaturapitakkulb, C., and Sinsirib, T. (2005) Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. **Cement and Concrete Composites**, Volume 27, Issue 4, April 2005, Pages 425-428
- Economides, M. J. , Watters, L. T. and Dunn-Norman, S. (1998) **Petroleum well construction**. Chichester : John Wiley & Sons.
- Fuenkajorn, K. and Daemen J.J.K. (authors & editors) (1996) **Sealing of Boreholes and Underground Excavations in Rock**, Chapman & Hall, London, 322 pp.
- Gale, G. E. (1975). **A Numerical, Field and Laboratory Study of Fluid Flow in Rocks with Deformable Fractures**. Ph.D. thesis, University of California, Berkeley.
- Garvin, S. L. and Hayles, C. S. (1999). The chemical compatibility of cement-bentonite cut-off wall material. **Construction and Building Materials**. 13: 329-341.
- Gray, T.A. and Gray, R.E. (1992) Mine closure, sealing, and abandonment. **SME mining handbook**. 1,2 : 659-674.
- 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.
- 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.
- Kashir, M., and Yanful, E. K. (2000). Compatibility of Slurry Wall Backfill Soils With Acid Mine Drainage. **Advances in Environmental Research** 4: 251-268.

- Nimjaroen, C (2013). **Porous glass from coal fly ash preparation, characterization and its adsorption study.** Ph.D. Thesis. Suranaree University of Technology
- Ouyang, S., and Daemen, J. J. K. (1996). Performance of bentonite and bentonite/crushed rock borehole seals. In K. Fuenkajorn and J. J. K. Daemen (eds.). **Sealing of boreholes and underground excavations in rock** (pp. 65-95). London: Chapman & Hall.
- Pattani, S. and Tepnarong, P. (2015). Experimental Assessment of Mechanical and Hydraulic Performance of Cement Sealing in Rock Salt, **Proceeding of Vietrock2015 an ISRM specialized conference.** Hanoi, Vietnam 12-13, March 2015.
- Ping, H., Zhang, X., Peng, X., Wu, J., Chen, N. and Ren, J (2015) Enhancement using external magnetic field on mercury capture by fly ash. **Fuel** Volume 162, 15 December 2015, Pages 211-214
- Rahmani, H. (2004). **Estimation of grout distribution in a fractured rock by numerical modeling.** A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of master of applied science in the faculty of graduate studies (Civil Engineering), University of Tehran.
- Rahmani, H. (2004). **Estimation of grout distribution in a fractured rock by numerical modeling.** A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of master of applied science in the faculty of graduate studies (Civil Engineering), University of Tehran.
- Ran, C., Daemen, J.J.K., Schuhen, M.D. and Hansen, F.D. (1997) Dynamic compaction properties of bentonite. **Rock Mech. & Min. Sci.** 34(1-4).
- Ranjith, P. G. and Viete, D. R. (2011). Applicability of the 'cubic law' for non-Darcian fracture flow. **Petroleum Science and Engineering.** In Press, Accepted Manuscript, Available online 7 August 2011.
- Raven, K. G., and Gale, J. E. (1985). Water Flow in a Natural Rock Fracture as a Function of Stress and Sample Size. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts.** 22(4): 251-261.
- Samaiklang, W. and Fuenkajorn, K. (2013). Mechanical and hydraulic performance of cement grouts from 5 suppliers in Thailand. **Proceeding of Thailand Rock Mechanics 2013,** Fuenkajorn & Phien-wej (eds), pp. 333-342.

- Smith, D.K. (1993) **Handbook on Plugging and Abandonment**. Oklahoma: Penn Well Publishing Company.
- Stormont, J.C. and Daemen, J.J.K. (1983). Axial Strength of Cement Borehole Plugs in Granite and Basalt. NUREG/CR-3594, **Topical Report on Rock Mass Sealing**, prepare for Division of Health, Siting and Waste Management, Office of Nuclear Regulatory Research, U.S. Nuclear Regulatory Commission, by the Department of Mining and Geological Engineering, University of Arizona, Tucson.
- Tepnarong, P. and Deethouw, P., 2014, Mechanical and Hydraulic Performance of Sludge-mixed Cement Borehole Plugs in Rock Salt, **Proc. of 8th Asian Rock Mechanics Symposium**, Sapporo, Japan, 14-16 October 2014.
- Tepnarong, P., 2012, Bond Strength of Cement Sealing in Maha Sarakham Salt, **Proc. of 7th Asian Rock Mechanics Symposium**, Seoul, Korea, 15-19 October 2012, 584-593.
- Wetchasat, K. and Fuenkajorn, K., (2012). Mechanical and Hydraulic Performance of Sludge Mixed Cement Grout in Rock Fractures, **Proc. of 7th Asian Rock Mechanics Symposium**, Seoul, Korea, 15-19 October 2012, 1477-1485.
- Wetchasat, K., (2013). **Performance of assessment of sludge-mixed cement grout in rock fracture**. Ph.D. Thesis. Suranaree University of Technology
- Witherspoon, P. A., Wang, J. S. Y., Iwai, K., and Gale, J. E. (1980). Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture. **Water Resour. Res.** 16(6): 1016-1024.

ภาคผนวก ก

บทความในการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการระดับนานาชาติ

9th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS9)

18-20 October 2016, Bali, Indonesia

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Performance Assessment of Fly Ash-mixed Cement Borehole Plugs in Sandstone

Monton Chiangmai* and Prachya Tepnarong

School of Geotechnology, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand
*monton_chiangmai@hotmail.com (corresponding author's E-mail)

Abstract

The objective of this study is to experimentally assess the performance of fly ash-mixed cement grouts for sealing boreholes in sandstone. The cement grout is prepared from the commercial grade Portland cement mixed with fly ash from Mae Moh power plant. The results are used in the design of borehole seal in sandstone to minimize the permeability in rock mass. The sandstone specimens are prepared from Phu Kradung formation. The results indicate that the viscosity of grout slurry tends to increase as the fly ash-mixed cement ratio increases. The permeability of the fly ash-mixed cement grouting materials measured from the longitudinal flow test with constant head decreases with curing time at 3, 7 and 14 days. The results indicate that when the curing time increases the intrinsic permeability (k) of cement grout decreases. The fly ash-mixed cement mixtures have the mechanical and hydraulic properties equivalent to those of the commercial grade Portland cement mixtures which indicates that the fly ash can be used as a substituted material to mix with cement for sandstone sealing purpose. The compressive strength after 28 day curing times is 10.45 ± 1.48 MPa. The highest compressive strength is from the fly ash-mixed cement ratio of 5:10. When the curing increases. Similarities and discrepancies of the grouting performance in terms of mechanical and hydraulic properties are compared.

Keywords: Fly Ash, Borehole Plugs, Push-out Test, Sandstone

1. Introduction

The increasing amount of the fly ash from burning process of lignite coal for uses to generate the electricity at Mae Moh mine has collected for a permanent solution to dispose of the fly ash at the Electricity Generating Authority of the Mae Moh power plant. Report indicates that the plant produces fly ash with the maximum capacity of 6,000 tons/day (Cheerarot and Jaturapitakkul, 2004). Since 1997, many researchers have been studied and developed the quality and property of the fly ash for reduction of the landfill problem. These solutions are mixing the fly ash with the cement for use in dam, foundation, and construction materials (cement roofs, tiles and waste water pipes). One of the solutions is to apply the fly ash to minimizing groundwater circulation in rock fractures. Groundwater in rock mass is one of the key factors governing the mechanical stability of slope embankments, underground mines, tunnels, and dam foundation. A common solution practiced internationally in the construction industry is to use bentonite mixed with cement as a grouting material to reduce permeability in fractured rock mass (Baik et al., 2007). Knowledge and experimental evidences about the permeability of the fly ash-mixed cement in fractured rock have never been addressed. The objective of this study is to assess the performance of fly ash mixed with the commercial grade Portland cement for reducing permeability in sandstone borehole plug in laboratory and to compare the results with those of bentonite-mixed cement in terms of the mechanics and hydraulic performance.

2. Grout Preparation

The fly ash is collected from the Mae Moh power plant Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT) and is performed by mixing cement with fly ash with particle size less than 0.0075 mm. Fly ash is tested to determine the Atterberg's limits, specific gravity, and particle size distribution. The equipment and test procedure follow the ASTM standards (D422, D854). The average liquid limit, plastic limit and plasticity index are 20.71%, 16.92% and 3.79%, respectively (Table 1). The average specific gravity is 2.67.

Fig. 1 shows the particle size distributions of the fly ash used here and the comparison with water treatment sludge (Wetchasat and Fuenkajorn, 2012; Tepnarong and Deethouw, 2014). All grouts are prepared by mixing at the water-to-fly ash-mixed cement ratio of 1:1. The cement slurry mixtures are

Table 1 Atterberg's limits and specific gravity of fly ash and bentonite

Atterberg Limits	Fly Ash (% weight)	Bentonite (% weight)
Liquid limit	20.71	399.70
Plastic limit	16.92	20.01
Plasticity index	3.79	379.69
Specific gravity	2.67	2.61

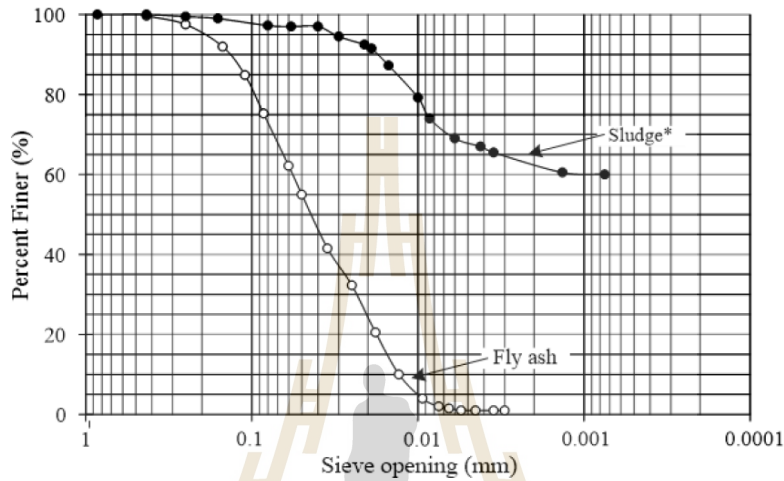


Fig. 1. Grain size distribution of fly ash and water treatment sludge

poured and cured in 54 mm diameter PVC mold for the mechanical characterization test. Molds are cured under atmospheric pressure at room temperature (28 to 30°C). Over 200 specimens are prepared for testing.

3. Basic Mechanical Characterization of Grouting Materials

The basic mechanical properties of the mixtures are determined to select the appropriate proportions of fly ash-to-cement ratios (F:C). The F:C of 0:10, 1:10, 3:10, and 5:10 by weight are prepared with water-cement ratios (W:C) of 1:1. The bentonite-mixes cement ratio (B:C) are 0:10, 1:10, 2:10, and 3:10 by weight with W:C of 1:1. Characterization testing provides the uniaxial compressive strength (σ_c), Young's modulus (E), and the viscosity and slurry density of cement grout. The 54 mm diameter cylindrical fly ash-mixed cement and bentonite-mixed cement specimens with length to diameter ratios between 2.5 and 3.0 are prepared by curing cement pastes in PVC molds for 3, 7, 14 and 28 days. (ASTM C192).

The uniaxial compressive strength test procedure follows, as much as practical, the ASTM standards (D7012 and C39). During test, the axial and lateral deformations are monitored (Fig. 2). The failure load is recorded. All of the specimens experienced splitting failure. Fig. 3 and Table 2 shows the average compressive strengths and elastic modulus as function of curing time.

Viscosity measurement follows, as much as practical, ASTM D2196. Fig. 4 shows results of viscosity with grouting material-mixed cement ratios of 1:10, 2:10, 3:10, and 5:10, respectively. The viscosity is measured with Brookfield® viscometer. The dynamics viscosity of cement slurries tends to increase as the mixed cement ratios increase.

The chemical composition of the material is determined based on X-ray fluorescence (XRF) spectrometer (reported from Nation Metal and Materials Technology Center, National Science and Technology Development Agency database) as shown in Table 3.

4. Sandstone Specimens

The 130×130×130 mm³ of sandstone block samples are collected from Pakchong district, Nakhon Ratchasima province. The rock belongs to Phu Kradung Formation of the Khorat Group. The age

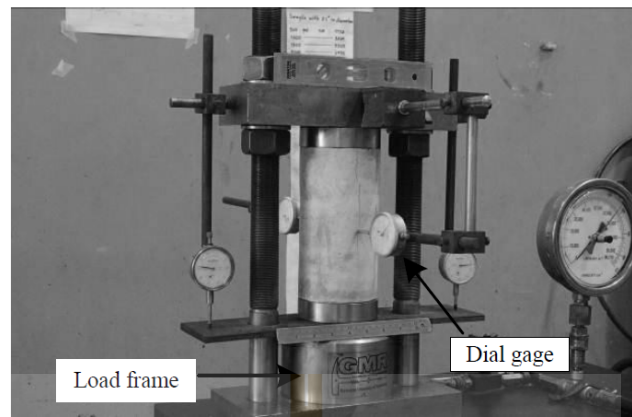


Fig. 2. Uniaxial compressive strength test setup (ASTM D7012 and C39)

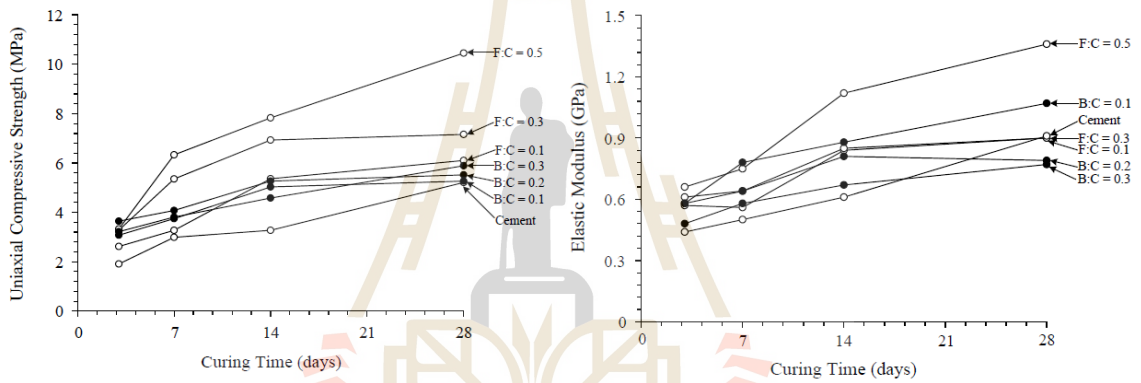


Fig. 3. Uniaxial compressive strength and elastic modulus of grouting materials as a function of curing time

Table 2 Mechanical properties of grouting materials

Types	Ratio	Curing Time (days)							
		Uniaxial Compressive Strength (MPa)				Elastic Modulus (GPa)			
		3	7	14	28	3	7	14	28
Cement	0:10	1.91 ± 0.23	2.99 ± 0.38	3.27 ± 0.24	5.21 ± 0.71	0.44 ± 0.03	0.50 ± 0.23	0.61 ± 0.04	0.91 ± 0.19
	1:10	3.08 ± 0.41	3.75 ± 0.38	5.03 ± 0.23	5.27 ± 0.62	0.58 ± 0.04	0.78 ± 0.02	0.88 ± 0.11	1.07 ± 0.17
B:C	2:10	3.64 ± 0.18	4.08 ± 0.12	5.27 ± 0.28	5.52 ± 0.26	0.58 ± 0.04	0.64 ± 0.10	0.81 ± 0.13	0.79 ± 0.16
	3:10	3.22 ± 0.40	3.81 ± 0.36	4.58 ± 0.30	5.89 ± 0.86	0.48 ± 0.15	0.58 ± 0.03	0.67 ± 0.10	0.77 ± 0.02
F:C	1:10	2.62 ± 0.19	3.27 ± 0.40	5.36 ± 0.69	6.10 ± 1.01	0.57 ± 0.02	0.56 ± 0.07	0.84 ± 0.10	0.90 ± 0.24
	3:10	3.28 ± 0.34	5.35 ± 0.23	6.93 ± 0.30	7.16 ± 0.31	0.61 ± 0.08	0.64 ± 0.05	0.85 ± 0.85	0.90 ± 0.12
	5:10	3.33 ± 0.25	6.33 ± 0.77	7.83 ± 1.19	10.45 ± 1.48	0.66 ± 0.10	0.75 ± 0.03	1.12 ± 0.05	1.36 ± 0.52

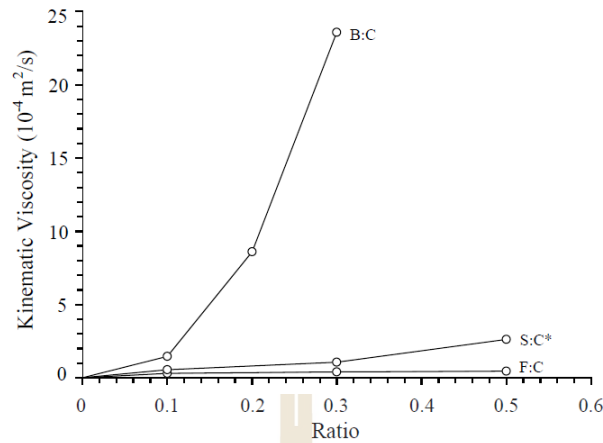


Fig. 4. Kinematic viscosity of fly ash-mixed cement slurry (F:C), bentonite-mixed cement slurry (B:C) and sludge-mixed cement slurry (S:C)

Table 3 The chemical compositions of the material using by X-ray fluorescence (XRF) spectrometer

Oxide	Concentration (% weight)		Oxide	Concentration (% weight)	
	Fly Ash	Bentonite		Fly Ash	Bentonite
Al ₂ O ₃	18.33	19.85	ZrO ₂	0.03	0.03
SiO ₂	40.72	61.93	Ir ₂ O ₃	0.015	-
SO ₃	7.48	1.27	Na ₂ O	-	1.63
K ₂ O	1.77	0.44	MgO	N/D	2.44
CaO	16.52	1.27	P ₂ O ₅	-	0.05
TiO ₂	0.50	0.19	MnO	-	0.02
Cr ₂ O ₃	0.02	N/D	CuO	-	0.01
MnO ₂	0.14	-	SrO	N/D	0.03
Fe ₂ O ₃	14.40	4.45	Y ₂ O ₃	-	0.01
ZnO	0.03	-	BaO	-	0.03
As ₂ O ₅	0.04	-	CeO ₂	-	0.04
Rb ₂ O	0.03	N/D	LOI. At 1.025 °C	-	6.29

of sandstone is between Upper and Middle Jurassic. The petrographic properties of the tested specimens are as follows. The color is medium to dark green with 70% Lithic fragment (0.1-0.3 mm), 18% quartz (0.1-0.5 mm), 7% mica (0.1-0.5 mm), 3% feldspar (0.1-0.5 mm), and 2% other (0.1-0.8 mm). Average uniaxial compressive strength is 63.49 ± 3.87 MPa.

5. Push-out Test

The objective of this test is to determine the axial mechanical strength of borehole plugs in sandstone specimen through push-out tests. The rock specimens are drilled with 45 mm diameter hole perpendicular to the bottom sample surfaces. The curing period for all push-out tests is 3 days with F:C of 5:10. Fig. 5 shows the push-out test setup. A cylindrical steel rod applied an axial load to a cement plug. The top and bottom displacement of the borehole plug are measured with dial gages with a resolution of 0.025 mm. A loading frame with a hydraulic cylinder applies the load. The machine has a capacity of 50 kN with a resolution of 0.5 kN. The specimens are loaded under constant stress.

The bond strength or the average shear stress (τ_{av}) distribution induced by push-out test loading along the sandstone/cement plug interface can be calculated by Stormont and Daeman, 1983 and Tepnarong, 2012. The dimensions of the sandstone specimen and the bond strength of cement plugs are summarized in Table 4.

Fig. 6 plots the applied axial stress as a function of the top and bottom plug displacements. The bottom plug displacements are small as compared to the top axial displacements prior to bond failure.

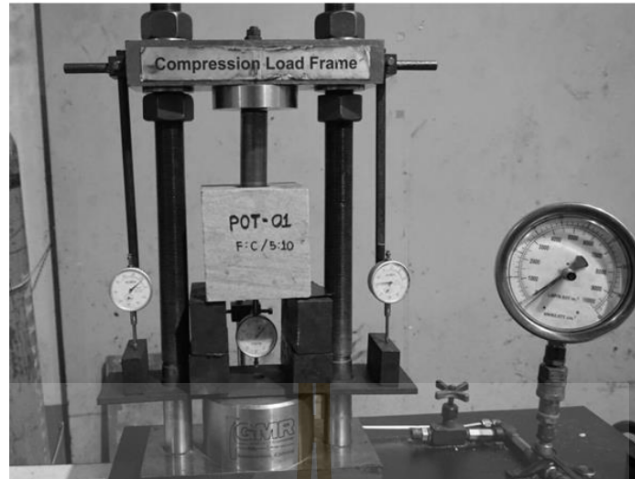


Fig. 5. Push-out test setup

Table 4 Dimensions of Phu Kradung sandstone specimens used for push-out tests, the axial strength (σ_{ax}) and the average shear strength (τ_{av})

Specimens No.	Block Sample (mm ³)	D _i (mm)	L (mm)	F (kN)	σ_{ax} (MPa)	τ_{av} (MPa)
PK-01-PO-01	130×130×130	45.00	90.20	36.0	22.64	2.83
PK-02-PO-02	130×130×130	45.20	90.30	32.0	20.12	2.52
PK-03-PO-03	130×130×130	45.30	90.45	31.0	19.50	2.44
PK-04-PO-04	130×130×130	44.80	89.90	32.0	20.12	2.52
PK-05-PO-05	130×130×130	45.15	90.00	33.0	20.75	2.60
Average					20.63	2.58
					± 1.21	± 0.15

where F is the failure load, D_i is the plug diameter and L is the plug length.

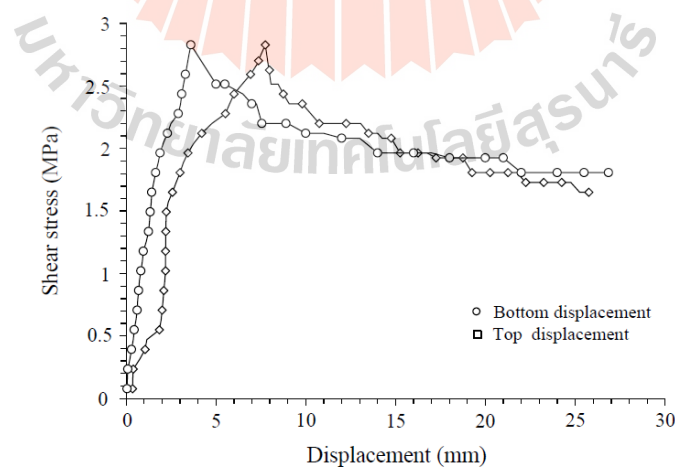


Fig. 6. Applied axial stress vs. top and bottom axial cement plug displacement for push-out test (specimen no. PK-01-PO-01)

Upon plug slip, the difference between the top and bottom plug displacements decrease most probably due to stress relief caused by slip along the interface. The average bond strength is 2.58 ± 0.15 MPa.

6. Permeability Testing of Fly Ash-mixed Cement Grout

The permeability of grouting materials is determined in terms of the intrinsic permeability (k). The constant head flow test is conducted to measure the longitudinal permeability of the grout. Test pressure and specimen configuration are measured and used to calculate the coefficient of permeability. The permeability of the system considered herein is measured using a constant head apparatus as shown in Fig.7. The flow in longitudinal direction of a tested system is described by Darcy’s law (Indraratna and Ranjith, 2001). The cylinder specimen is 100 mm in diameter and 100 mm long. The permeability of the test system is measured and recorded at 3, 7, and 14 days of curing period. The results indicate that when the curing time increases the intrinsic permeability of cement grout decreases. The intrinsic permeability of fly ash-mixed cement grouts as a function of curing time are shown in Fig. 8.

7. Discussions and Conclusions

The fly ash-mixed cement grouts are prepared from the commercial grade Portland cement mixed with fly ash from Mae Moh power plant, EGAT, have been tested to determine the mechanical and hydraulic performance. This study aims to determine the appropriate slurry viscosity and strength of the fly ash-mixed cement grouting. The results lead to the selection of the most suitable ratio of fly ash-mixed cement for grouting in rock fracture. The results indicate that the suitable mixing ratios for F:C are 1:10, 3:10 and 5:10, with water-cement ratio of 1:1 by weight.

Five Phu Kradung sandstone specimens are plugged within cement cylinder for the push-out tests. Average interface shear strengths is 2.58 ± 0.15 MPa with a F:C ratio of 5:10. Samples showing high axial strength generally lead to high bond strength. The bottom plug displacements are smaller compared to the top axial displacements prior to bond failure. Upon plug slip, the difference between the top and bottom plug displacements mostly decreases, most probably due to stress relief caused by slip along the interface.

The permeability of the fly ash-mixed cement grouting materials measured from the longitudinal flow test with constant head decreases with curing time at 3, 7, and 14 days. The results indicate that when the curing time increases the intrinsic permeability of cement grout decreases. The mixture with the F:C of 5:10 by weight gives the lowest permeability. The F:C mixtures have the mechanical and hydraulic properties equivalent to those of the commercial grade Portland cement mixtures which indicates that the fly ash can be used as a substituted material to mix with cement for sandstone grouting purpose.

This study made no attempt to predict the relation between bond strength of cement plug and cement curing period. Push-out tests should be performed on cement plugs with a variety of F:C ratio and relatively long curing times.

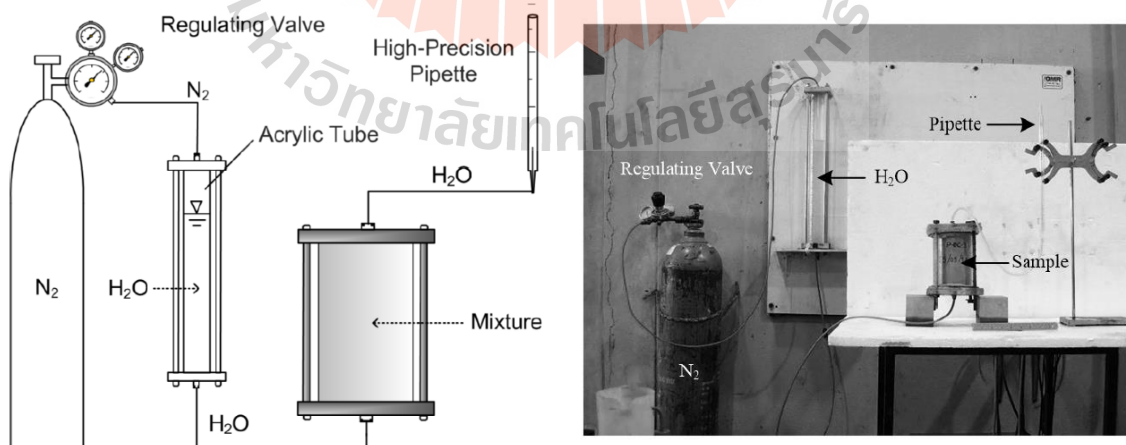


Fig. 7. Diagram of laboratory arrangement and constant head flow test apparatus used for permeability testing of grouting materials

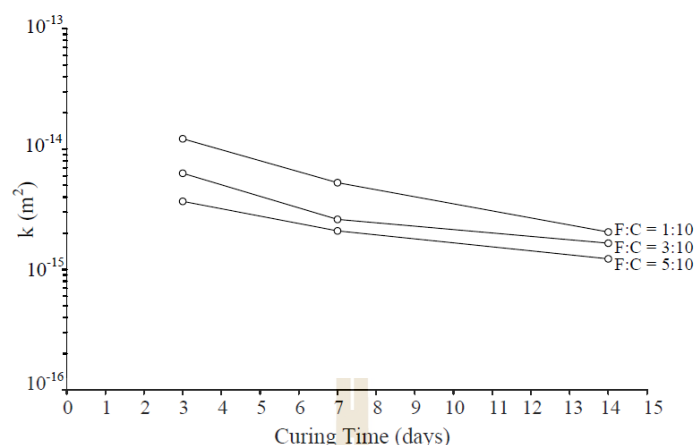


Fig. 8. Intrinsic permeability of fly ash-mixed cement as a function of curing time

Acknowledgements

This research is supported by Suranaree University of Technology and by Higher Education Research Promotion and National Research University of Thailand, Office of the Higher Education Commission. Permission to publish this paper is gratefully acknowledged. We would like to thank The Electricity Generating Authority of the Mae Moh power plant of Thailand for donating fly ash used in this study.

References

- ASTM C39, 2010, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, *Annual Book of ASTM Standards 04.01*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM D2196, 2010, Standard Test Methods for Rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational (Brookfield type) Viscometer, *Annual Book of ASTM Standard, 06.01*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM D422, 2007, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, *Annual Book of ASTM Standards 04.08*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM D7012, 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 Standard 04.09*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM D854, 2010, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, *Annual Book of ASTM Standards 04.08*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- Baik, M.H., Cho, W.J. and Hahn, P.S., 2007, Erosion of bentonite particles at the interface of a compacted bentonite and a fractured granite, *Eng. Geol.*, 91, pp 229-239.
- Cheerarat, R. and Jaturapitakkul, C., 2004, A study of disposed fly ash from landfill to replace Portland cement, *Waste Management J.*, 24, pp 701-709.
- Indraratna, B. and Ranjith, P., 2001, *Hydromechanical Aspects and Unsaturated Flow in Joints Rock*, Lisse: A. A. Balkema.
- Stormont, J.C. and Daeman, J.J.K., 1983, Axial Strength of Cement Borehole Plugs in Granite and Basalt, *Tech. Rep. NUREG/CR-3594*, U.S. Nuclear Regulatory Commission, by the Department of Mining and Geological Engineering, University of Arizona, Tucson.
- Tepnarong, P., 2012, Bond Strength of Cement Sealing in Maha Sarakham Salt, *Proc. of 7th Asian Rock Mechanics Symposium*, Seoul, Korea, 15-19 October 2012, 584-593.
- Tepnarong, P. and Deethouw, P., 2014, Mechanical and Hydraulic Performance of Sludge-mixed Cement Borehole Plugs in Rock Salt, *Proc. of 8th Asian Rock Mechanics Symposium*, Sapporo, Japan, 14-16 October 2014.
- Wetchasat, K. and Fuenkajorn, K., 2012, Mechanical and Hydraulic Performance of Sludge Mixed Cement Grout in Rock Fractures, *Proc. of 7th Asian Rock Mechanics Symposium*, Seoul, Korea, 15-19 October 2012, 1477-1485.

Prachya Tepnarong

From: ARMS9 Paper Committee <papercommittee@arms9.com>
Sent: 11 สิงหาคม 2559 7:56
To: Prachya Tepnarong; มณฑล เชียงใหม่
Subject: Acceptance of 202 ARMS9 Paper Presentation
Attachments: ARMS9_Oral Session Template.ppt; HOW TO PREPARE POWER POINT PRESENTATION.pdf

Dear Author,

Congratulation, your paper (**#202**) has been accepted as **ORAL PRESENTATION** (Guidelines and Presentation Template Attached). **Please confirm if you accept this paper presentation.**

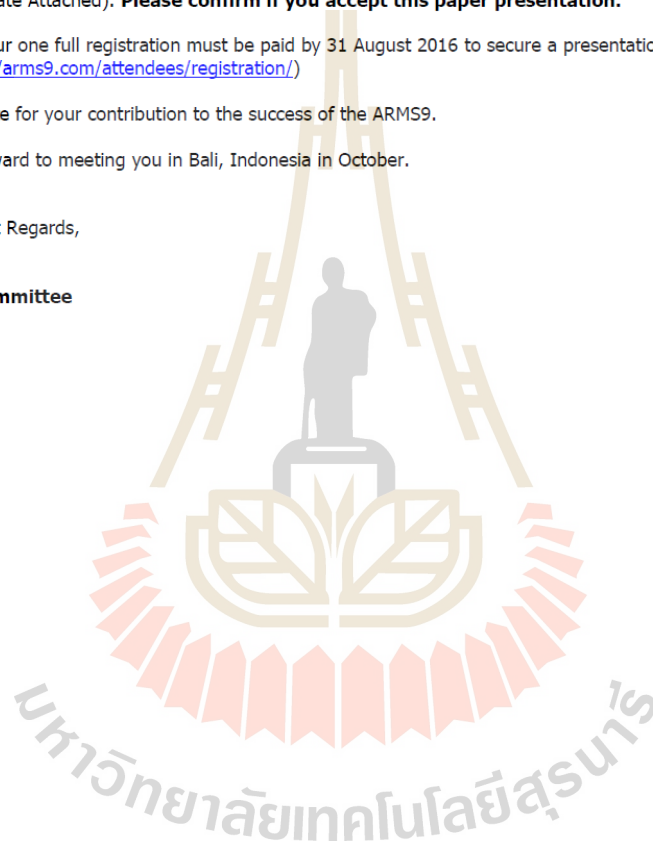
Please complete your one full registration must be paid by 31 August 2016 to secure a presentation time and a paper in the proceedings. (<http://arms9.com/attendees/registration/>)

We highly appreciate for your contribution to the success of the ARMS9.

We are looking forward to meeting you in Bali, Indonesia in October.

Thank you and Best Regards,

ARMS9 Paper Committee



ประวัตินักวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรัชญา เทพนรงค์ เกิดเมื่อวันที่ 14 กันยายน 2521 ที่จังหวัดกาญจนบุรี จบการศึกษาระดับปริญญาเอกจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โปรแกรมวิชาวิศวกรรมธรณี ในปี พ.ศ. 2550 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำอยู่ที่สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา มีความชำนาญทางการทดสอบด้านกลศาสตร์หินในห้องปฏิบัติการและภาคสนาม การออกแบบและการวิเคราะห์ที่ใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ เป็นนักวิจัยประจำหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณี เป็นสมาชิกสามัญตลอดชีพของสมาคมธรณีวิทยาแห่งประเทศไทย และเป็นสมาชิกสมาคมกลศาสตร์หินนานาชาติ (International Society of Rock Mechanics, ISRM)

