

รหัสโครงการ SUT7-719-60-24-48



## รายงานการวิจัย

ประสิทธิภาพของซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบเพื่ออุดหลุมเจาะในมวลหิน  
(Performance of Rice Husk Ash-mixed  
Cement Borehole Seals in Rock Mass)



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



## รายงานการวิจัย

ประสิทธิภาพของซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบเพื่ออุดหลุมเจาะในมวลหิน  
(Performance of Rice Husk Ash-mixed  
Cement Borehole Seals in Rock Mass)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรัชญา เทพนรงค์

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2560-2561

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

สิงหาคม 2564

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปี 2560 และ 2561 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ดีโดยมี นางสาวมธุรส นิลโงง เป็นผู้ช่วยวิจัยประจำโครงการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุนมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ผู้วิจัย



## บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษาเพื่อประเมินประสิทธิภาพเชิงกลศาสตร์และพลศาสตร์ของซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ (RHA) เพื่ออุดรอยแตกในหิน ส่วนผสมวัสดุอุดเตรียมจากซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบโดยมีอัตราส่วนของเถ้าแกลบต่อซีเมนต์ (RHA:C) เท่ากับ 1:10, 3:10, 5:10 และ 10:10 โดยน้ำหนัก ด้วยปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ (W:C) เท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบประสิทธิภาพของซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบถูกเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของซีเมนต์สำหรับอุดที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบ (0:10) ผลการทดสอบพบว่าค่าความหนืดเฉลี่ยของซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของเถ้าแกลบที่เพิ่มขึ้น ผลการทดสอบสมบัติทางกลศาสตร์พื้นฐานพบว่าเมื่อมีระยะเวลาบ่มตัวเพิ่มขึ้นทำให้ค่ารับกำลังกดสูงสุดในแกนเดียว ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิล และค่ากำลังยึดติดสูงสุดของตัวอย่างแท่งซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบสำหรับอุดสูงขึ้น ที่อัตราส่วนเถ้าแกลบต่อซีเมนต์เท่ากับ 5:10 เวลาบ่ม 28 วันให้ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นสูงสุด ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด และค่าแรงยึดติดสูงสุด เท่ากับ 16.11, 2,160, 1.70 และ 2.48 เมกะปาสคาล ตามลำดับ นอกจากนี้ที่อัตราส่วนผสมนี้ยังให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนระหว่างวัสดุอุดและรอยแตกของหินสูงสุดในการทดสอบค่ารับกำลังแรงเฉือนสูงสุดที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน และยังคงแสดงความซึมผ่านและค่าความหนืดต่ำอีกด้วย ดังนั้นเป็นไปได้ว่าซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่อัตราส่วน 5:10 มีศักยภาพที่เหมาะสมในการเป็นวัสดุอุดในรอยแตกได้



## Abstract

The objective of this study is to assess the mechanical and hydraulic performances of rice husk ash (RHA)-mixed with the Portland cement for grouting in rock fractures. The mixtures of grouting materials are prepared from RHA-mixed cement. The RHA-cement ratios (RHA:C) are 1:10, 3:10, 5:10 and 10:10 with water-cement ratio of 1:1 by weight. As a result, performance of the RHA-cement mixtures are compared with grouting cement (0:10). The results indicate that the average viscosity of RHA-mixed cement tends to increase as the RHA-mixed cement ratio increases. The basic mechanical properties test results indicate that when the curing time increases the uniaxial compressive strength, elastic modulus, Brazilian tensile strength, and bond strength of RHA-mixed cement grout increases. The specimens with RHA-cement ratio of 5:10 after 28 days curing time provide the highest compressive strength, elastic modulus, tensile strength, and bond strength of 16.11, 2,160, 1.70 and 2.48 MPa, respectively. In addition, this mixtures ratio represents the highest shear strength between grouting material and rock fractures in direct shear test after 7 days curing time and gives the low permeability and slurry viscosity. Thus, the 5:10 ratio of RHA:C probably has the good potential to be the suitable ratio that will be used as grouting materials.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
Abstract.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 แผนการถ่ายทอดเทคโนโลยีหรือผลการวิจัยสู่กลุ่มเป้าหมาย.....	4
1.7 วิธีการดำเนินงานวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง.....	4
<b>บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>6</b>
2.1 การประยุกต์ใช้ซีเมนต์ผสมเถ้าแกלב.....	6
2.2 วัสดุอุดรอยแตกในหิน.....	9
2.3 กำลังยึดติดของการอุดซีเมนต์ในมวลหิน.....	11
2.4 ความซึมผ่านของวัสดุอุดรอยแตกในหิน.....	13
<b>บทที่ 3 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ.....</b>	<b>15</b>
3.1 เถ้าแกלב.....	15
3.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	15
3.3 ตัวอย่างหิน.....	20
3.3.1 ตัวอย่างหินทรายสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนและ การทดสอบการซึมผ่าน.....	20
3.3.2 ตัวอย่างหินทรายสำหรับการทดสอบกำลังยึดติดสูงสุด.....	20

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 4 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของส่วนผสม</b> .....	27
4.1 การจัดเตรียมส่วนผสม .....	27
4.2 วิธีการทดสอบส่วนผสม.....	30
4.3 ผลการทดสอบส่วนผสม.....	33
<b>บทที่ 5 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของส่วนผสม</b> .....	37
5.1 การทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว.....	37
5.2 การทดสอบกำลังรับแรงแบบบราซิล.....	45
5.3 การทดสอบกำลังเฉือนโดยตรง.....	53
5.4 การทดสอบกำลังยึดติดสูงสุดแบบ Push-out .....	59
<b>บทที่ 6 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของส่วนผสม</b> .....	67
6.1 การทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสม.....	67
6.2 การทดสอบความซึมผ่านของรอยแตกในหิน.....	71
6.3 การทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมในรอยแตกหิน.....	75
<b>บทที่ 7 อภิปรายและสรุปผลการศึกษา</b> .....	79
7.1 อภิปรายผลการศึกษา.....	79
7.2 สรุปผลการศึกษา.....	80
7.3 ข้อเสนอแนะในการนำไปประยุกต์ใช้.....	81
<b>บรรณานุกรม</b> .....	82
<b>ภาคผนวก</b>	
<b>ภาคผนวก ก บทควมในการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการระดับนานาชาติ</b> .....	ก-1
<b>ประวัตินักวิจัย</b>	

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของตัวอย่างเถ้าแกลบ (Habeb and Mahmud, 2010; Antiohos et al., 2014; Korotkova et al., 2016).....	7
2.2 ค่ากำลังรับแรงกดของตัวอย่างซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ (Dabai et al., 2009).....	8
3.1 ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ, เถ้าลอย, ดินตะกอบประปา, ดินเบนทอไนต์ และซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (Chiangmai, 2016; Wetchasat, 2013).....	16
3.2 คุณสมบัติทางวิศวกรรมและความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบ.....	17
3.3 ขนาดของตัวอย่างหินทรายหมวดหินพระวิหาร สำหรับการสร้างรอยแตกโดยกดตัวอย่างหินในแนวเส้น (Line load) ในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง.....	22
3.4 ขนาดของตัวอย่างหินทรายหมวดหินพระวิหาร สำหรับการสร้างรอยแตกโดยกดตัวอย่างหินในแนวเส้น (Line load) ในการทดสอบการซึมผ่านในรอยแตกหิน.....	23
3.5 ขนาดของตัวอย่างหินทรายหมวดหินพระวิหาร สำหรับการทดสอบกำลังยึดติดสูงสุดแบบ Push-out.....	24
4.1 สัดส่วนของส่วนผสมในปริมาตร 1,000 cc.....	32
4.2 ผลการทดสอบความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะของส่วนผสม.....	33
4.3 ผลการทดสอบความหนืดของส่วนผสม.....	34
5.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวและสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของตัวอย่างแท่งซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบอายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ.....	40
5.2 ค่ากำลังแรงกดสูงสุดในแกนเดียว ( $\sigma_c$ ) และ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E) ของแต่ละส่วนผสม.....	43
5.3 ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเฉียงของตัวอย่างแท่งซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบอายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ.....	46
5.4 สรุปผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิลของตัวอย่างส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ.....	51
5.5 ผลการทดสอบกำลังเฉือนโดยตรงของส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบอายุ 7 วัน.....	56
5.6 ผลการทดสอบกำลังเฉือนเมื่อเทียบกับกฎการแตกของ Coulomb.....	59
5.7 ผลการทดสอบแท่งตัวอย่างซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบด้วยการทดสอบกำลังรับกำลังยึดติดสูงสุดแบบ Push-out.....	62
5.8 สรุปผลการทดสอบกำลังยึดติดส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ.....	65



## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.1 ผลการทดสอบค่าความชื้นผ่านของส่วนผสมที่ระยะเวลาบ่ม 3, 7, 14, 28, และ 60 วัน....	71
6.2 ผลการทดสอบค่าความชื้นผ่านของรอยแตกในหิน.....	74
6.3 ขนาดตัวอย่างหินสำหรับทดสอบความชื้นผ่านของส่วนผสมในรอยแตกของหินที่มีการเปิดเผยอ.....	77
6.4 ผลการทดสอบความชื้นผ่านของส่วนผสมในรอยแตกของหินที่มีการเปิดเผยอ.....	78



## สารบัญญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
3.1 การกระจายอนุภาคของเถ้าลอยและเบนทอไนต์ที่ทดสอบในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับผลการทดสอบเถ้าลอย, ดินตะกอบประปา, ดินเบนทอไนต์ และซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่1 (Chiangmai, 2016; Wetchasat, 2013).....	17
3.2 เครื่องปั่นส่วนผสมที่มีความเร็วไม่เกิน 275 รอบต่อนาที (รุ่น 6QT 575W).....	18
3.3 แบบหล่อตัวอย่างส่วนผสมทำด้วย PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 54 มิลลิเมตร.....	19
3.4 การตัดแต่งแท่งตัวอย่างให้ได้ขนาดตามมาตรฐานการทดสอบ.....	19
3.5 ตัดตัวอย่างหินทรายเพื่อทดสอบกำลังรับแรงเฉือนและการทดสอบการซึมผ่านในรอยแตกหิน.....	21
3.6 ตัวอย่างหินทรายเพื่อทดสอบกำลังยึดติดสูงสุดแบบ Push-out.....	21
4.1 เถ้าแกลบสำหรับใช้ในการทดสอบ.....	28
4.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 สำหรับใช้ในการทดสอบ.....	28
4.3 เครื่องชั่งแบบดิจิตอลรับน้ำหนักได้สูงสุด 2,200 กรัม มีค่าความละเอียด $\pm 0.01$ กรัม.....	29
4.4 เครื่องปั่นส่วนผสมที่มีความเร็วไม่เกิน 275 รอบต่อนาที (รุ่น 6QT 575W).....	29
4.5 เครื่องวัดความหนืด Brookfield® viscometer รุ่น DV2T.....	30
4.6 การทดสอบหาค่าความหนืดและค่าความหนาแน่นของส่วนผสม ด้วยเครื่องวัดความหนืด Brookfield® viscometer DV2T 150 VA 50/60 Hz.....	32
4.7 ค่า Kinetic viscosity ของส่วนผสมในอัตราส่วนที่ต่างกัน (*Chiangmai, 2016 และ **Wetchasat, 2013).....	35
5.1 การเตรียมแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอกให้มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 2.5.....	38
5.2 การทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวของส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ.....	39
5.3 แท่งตัวอย่างส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบก่อน (a) และหลังการทดสอบ (b).....	39
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวของส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบกับระยะเวลาบ่มน้ำของตัวอย่าง.....	44
5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบกับระยะเวลาการบ่มน้ำของตัวอย่าง.....	44
5.6 ตัวอย่างแท่งซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิลเลียน.....	45
5.7 โครงกดทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิลขณะติดตั้งและทำการทดสอบ.....	52

## สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงดึงแบบบราซิชกับระยะเวลาการบ่มน้ำของตัวอย่างส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ.....	52
5.9 ตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังเฉือนโดยตรงของส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ.....	53
5.10 เครื่องมือทดสอบกำลังเฉือน (a) และรูปขณะทดสอบ (b) (Boonyord and Tepnarong, 2018).....	54
5.11 ตัวอย่างสำหรับรับทดสอบกำลังเฉือนก่อน (a) และหลังการทดสอบ (b).....	56
5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวแนวเฉือนของตัวอย่างส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่อัตราส่วน RHA:C เท่ากับ 0:10.....	57
5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวแนวเฉือนของตัวอย่างส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่อัตราส่วน RHA:C เท่ากับ 1:10.....	57
5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวแนวเฉือนของตัวอย่างส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่อัตราส่วน RHA:C เท่ากับ 3:10.....	58
5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวแนวเฉือนของตัวอย่างส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่อัตราส่วน RHA:C เท่ากับ 5:10.....	58
5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวแนวเฉือนของตัวอย่างส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่อัตราส่วน RHA:C เท่ากับ 10:10.....	59
5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉือนในฟังก์ชันของความเค้นในแนวตั้งฉาก.....	60
5.18 แบบแผนภาพจำลองเครื่องมือทดสอบกำลังยึดติดแบบ Push-out (Stormont and Deamen, 1983).....	61
5.19 โครงกทดสอบกำลังรับแรงยึดติดแบบ Push-out.....	61
5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังยึดติดกับระยะเวลาการบ่มน้ำของส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ.....	66
5.21 ภาพตัดขวางตัวอย่างหลังการทดสอบของตัวอย่างหินทราย.....	66
6.1 แผนภูมิชุดอุปกรณ์ทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (Chiangmai and Tepnarong, 2016).....	69
6.2 แบบหล่อตัวอย่าง PVC เส้นผ่านศูนย์กลาง 98 มิลลิเมตร พร้อมฝาปิดที่ติดตั้งหมุดยึดท่อแรงดันสูง สำหรับทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสม.....	69

## สารบัญรูปร่าง (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
6.3	แบบจำลองการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบและการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบความชื้นผ่านของส่วนผสม.....	70
6.4	ผลการทดสอบความชื้นผ่านของส่วนผสมที่เวลาบ่มต่างกัน.....	71
6.5	ตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหารรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ที่มีพื้นที่ของรอยแตกขนาด 10x10 ตารางเซนติเมตร ถูกจัดเตรียมเพื่อการทดสอบความชื้นผ่าน.....	73
6.6	ตัวอย่างหินทรายในขณะทดสอบความชื้นผ่านของรอยแตกภายใต้ความเค้นกด.....	73
6.7	ผลการทดสอบค่าความชื้นผ่าน (K) ของรอยแตกในหิน.....	75
6.8	แผนภูมิแสดงลักษณะการทดสอบความชื้นผ่านของรอยแตกที่มีการเปิดเผยภายใต้ความเค้นกด.....	76
6.9	ตัวอย่างหินทรายชุดกระดูกะดิงที่ใช้ทดสอบความชื้นผ่านของรอยแตกที่มีการเปิดเผยภายใต้ความเค้นกด.....	76

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ข้าวเป็นผลิตผลทางการเกษตรที่สำคัญมาก เป็นอาหารหลักสำหรับประชากรมากกว่าครึ่งหนึ่งของโลก ประเทศไทยเป็นหนึ่งในประเทศผู้ส่งออกข้าวรายใหญ่ของโลก ข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวได้เมื่อนำมาผ่านกระบวนการสีจะได้เมล็ดข้าวกับเปลือกข้าวหรือแกลบ โดยแกลบจะมีน้ำหนักประมาณร้อยละ 22.5-25.2 ของข้าวเปลือก และสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงอย่างแพร่หลาย โดยที่แกลบมีค่าความร้อนเฉลี่ยประมาณ 3,880 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม และเหลือให้ขี้เถ้าออกมาประมาณร้อยละ 17.4 (บุญรักษ์ กาญจนวรรณิชย์, 2556)

ประเทศไทยมีกำลังการผลิตข้าวปีละประมาณ 25 ล้านตัน ในปีหนึ่งๆ ประเทศไทยได้แกลบจากการสีข้าวมากกว่า 5 ล้านตัน และได้เถ้าแกลบจากการเผาเป็นเชื้อเพลิง (Rice Husk Ash, RHA) จำนวนมากกว่า 1 ล้านตัน หลายกลุ่มนักวิจัยพบว่าพบว่ามีซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 70 ถึง 90 และเถ้าแกลบมีความพรุนมาก น้ำหนักเบา มีพื้นที่ผิวมาก มีสมบัติดูดซับดี อีกทั้งมีสมบัติเป็นฉนวนด้วย จึงสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมซีเมนต์และคอนกรีตได้ เพื่อใช้ทดแทนปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ และใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตความแข็งแรงสูง (Xu et al., 2012) การศึกษาครั้งนี้จึงเกิดมีแนวคิดที่จะศึกษาและพัฒนาศักยภาพของเถ้าแกลบมาใช้เป็นส่วนผสมวัสดุอุดหลุมเจาะหรือรอยแตกในหิน (Sealing or Grouting Material) สำหรับนำไปใช้ในการปฏิบัติงานในภาคอุตสาหกรรมก่อสร้างโครงการทางวิศวกรรมธรณีที่อยู่ในมวลหิน โดยจะใช้ทดแทนวัสดุเดิมที่ใช้ตามมาตรฐานสากลเพื่อลดค่าความซึมผ่านของรอยแตก หรือเพื่อหลุมอุดเจาะในมวลหินบริเวณรอบ ๆ โครงสร้างทางวิศวกรรม เช่น การปิดหลุมเจาะน้ำบาดาลหรือหลุมเจาะปิโตรเลียมที่เลิกใช้งานแล้ว การใช้ซีเมนต์ยึดติดระหว่างท่อกรู (Casing) กับผนังหลุมเจาะ การเกร้าท่อโม่งค์ที่อยู่ใต้ระดับน้ำบาดาลและฐานรากของเขื่อนที่ตั้งอยู่บนมวลหินที่มีรอยแตก การป้องกันการรุกรานของน้ำเค็มเข้าสู่ชั้นน้ำบาดาลบริเวณชายฝั่งทะเล เป็นต้น อีกทั้งยังช่วยลดการใช้วัสดุที่ผลิตจากทรัพยากรธรรมชาติและยังเป็นการลดวัสดุเหลือทิ้งที่ระบายออกสู่สิ่งแวดล้อมจากการเผาไหม้เถ้าแกลบอย่างยั่งยืน

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อศึกษาศักยภาพเชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์ของซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมด้านการอุดรอยแตกในหิน

### 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) ศึกษาด้านกลศาสตร์และชลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการของซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้ที่ถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงจากภาคอุตสาหกรรม เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการอุดหลุมเจาะและรอยแตกในมวลหิน
- 2) ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ASTM C150-19) เป็นส่วนผสม
- 3) อัตราส่วนของเถ้าแกลบต่อซีเมนต์ (RHA:C) เท่ากับ 1:10, 3:10, 5:10 และ 10:10 โดยน้ำหนัก ด้วยปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ (W:C) เท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก
- 4) ขนาดของเม็ดตะกอนเถ้าแกลบที่นำมาใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 0.075 มิลลิเมตร (ผ่าน Sieve No. 200)
- 5) ใช้ตัวอย่างหินทรายที่ใช้ในการทดสอบ มาจากหมวดหินพระวิหาร กลุ่มหินโคราช
- 6) รอยแตกที่ใช้ในการทดสอบเป็นรอยแตกภายใต้แรงดึง (Tension-induced fracture) ที่ถูกจำลองขึ้นภายในห้องปฏิบัติการ
- 7) การผสมและระยะเวลาการบ่มตัวของซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบจะทำตามมาตรฐาน ASTM
- 8) การทดสอบหาค่าความซึมผ่านของส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบจะใช้แบบแรงดันคงที่ (Constant head flow test)
- 9) การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบกับส่วนผสมซีเมนต์สำหรับอุดที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบเพื่อใช้ประเมินศักยภาพของวัสดุอุดเท่านั้น

### 1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

การอุดหลุมเจาะและรอยแตกในหินสำหรับงานทางด้านวิศวกรรมธรณีมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อเพิ่มกำลังการยึดติดในหลุมเจาะและลดค่าความซึมผ่านของรอยแตกในมวลหิน ประสิทธิภาพในการลดค่าความซึมผ่านขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้อุด ซึ่งปัจจุบันได้มีงานวิจัยต่าง ๆ ที่ศึกษาเกี่ยวกับวัสดุที่ใช้ผสมซีเมนต์เพื่อลดค่าความซึมผ่านในรอยแตก อาทิ ดินเหนียว ดินเบนทอนไนต์ เถ้าลอย ดินตะกอนประปะ และบางวัสดุยังสามารถเพิ่มกำลังยึดติดได้อีกด้วย ในงานวิจัยนี้ได้เลือกเถ้าแกลบเนื่องจากการรายงานจากหลายงานวิจัยแล้วว่าเมื่อผสมเถ้าแกลบกับซีเมนต์จะทำให้การไหลตัวได้ดี สะดวกในการใช้ในหลุมเจาะลดการเยิ้ม (Bleeding) และแนวโน้มการแยกตัวของซีเมนต์ เกิดความร้อนต่ำเนื่องจากมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำ สามารถเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีต เพิ่มความทนทานของคอนกรีต และเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนและทนการกัดกร่อนของซัลเฟตได้ดี ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จะเน้นที่อัตราส่วนระหว่างเถ้าแกลบและซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับใช้อุดแตกในหิน โดยอัตราส่วนต่าง ๆ ระหว่างเถ้าแกลบและซีเมนต์ (RHA:C) ที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุอุด จะนำมาทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานเชิงวิศวกรรมในห้องปฏิบัติการโดยจะเน้นไปที่การทดสอบความเค้นตั้งฉากในหลุมเจาะ แล้วทำ

การวัดค่าความซึมผ่านของวัสดุอุด โดยค่าความซึมผ่านที่ได้จากทุกอัตราส่วนของส่วนผสมจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าความซึมผ่านที่ใช้วัสดุอุดแบบมาตรฐาน ผลที่ได้จากการทดสอบจะนำมาประเมินหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเถ้าแกลบและซีเมนต์

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถทราบถึงศักยภาพเชิงกลศาสตร์และพลศาสตร์ของส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมธรณีด้านการอุดรอยแตกในมวลหิน
- 2) ลดต้นทุนการใช้วัสดุเดิมในการอุดรอยแตกในมวลหินและยังสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับเถ้าแกลบที่เหลือทิ้งจากการเผาไหม้ในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าและลดของเสียที่จะระบายออกสู่สิ่งแวดล้อม
- 3) ผลงานวิจัยที่ได้สามารถนำวัสดุที่ทิ้งจากกระบวนการเผาไหม้ของเถ้าแกลบที่ถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรมกลับมาใช้เพื่อช่วยลดต้นทุนการใช้วัสดุสำหรับงานอุดในมวลหิน และสามารถเพิ่มมูลค่าของเถ้าแกลบและสร้างรายได้ให้กับภาคเกษตรกรรมของประเทศไทย
- 4) ผลงานวิจัยจะสามารถประยุกต์ใช้ในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น หลุมเจาะน้ำบาดาลเพื่อไม่ให้เกิดการปนเปื้อนของชั้นน้ำบาดาล การอุดรอยแตกในมวลหินรอบบ่อเหมืองเพื่อลดความซึมผ่านของน้ำเข้าสู่ชุมชน หรือใช้ตามแนวชายฝั่งเพื่อป้องกันการรุกตัวของเค็ม และยังรวมถึงการใช้เพื่อเพิ่มความตึบน้ำและลดการรั่วซึมของน้ำตามแนวใต้สันเขื่อนเพื่อให้สามารถเก็บกักน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยที่เสนอมานี้จะมีประโยชน์อย่างมากและโดยตรงกับหลายหน่วยงาน ทั้งภาครัฐและเอกชน สถาบันการศึกษา รวมไปถึงหน่วยงานที่ทำงานเกี่ยวข้องกับการก่อสร้างในมวลหิน เช่น การสร้างเขื่อน การสร้างอุโมงค์ เหมืองแร่บนดินและใต้ดิน และการขุดหลุมเจาะในชั้นหิน หน่วยงานเหล่านี้ได้แก่

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

## 1.6 แผนการถ่ายทอดเทคโนโลยีหรือผลการวิจัยสู่กลุ่มเป้าหมาย

องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้จะนำไปเผยแพร่ในรูปแบบของบทความในการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการระดับนานาชาติ

## 1.7 วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง

การวิจัยแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

### ขั้นตอนที่ 1 ทบทวนและศึกษาวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทบทวน ค้นคว้า และศึกษาวรรณกรรม รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจะรวมไปถึงทฤษฎีและกฎต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษา เถ้าแกลบ ความชื้นผ่านในมวลหิน การอุดหลุมเจาะในชั้นหิน วัสดุและการอุดรอยแตกเพื่อการลดความชื้นผ่านของรอยแตกในหิน และกำลังยึดติดของการอุดซีเมนต์ในมวลหิน ผลการวิจัยที่ดำเนินการมาแล้วทั้งในและต่างประเทศ ผลการทบทวนวรรณกรรมวิจัยทั้งหมดรวมทั้งรายการเอกสารอ้างอิงจะถูกสรุปไว้ในรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

### ขั้นตอนที่ 2 การเก็บและจัดเตรียมวัสดุและตัวอย่างหิน

วัสดุหลักที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ 1) เถ้าแกลบที่ถูกคัดขนาดไม่เกิน 0.075 มิลลิเมตร เถ้าแกลบที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นวัสดุเหลือจากการเผาแกลบเป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าชีวมวลของ บริษัท เอ.ที. ไปโอพาวเวอร์ จำกัด 2) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพื่อใช้ผสมกับเถ้าแกลบ และ 3) ตัวอย่างหินทรายที่มีรอยแตก ทั้งนี้ตัวอย่างหินทรายสำหรับการทดสอบกำลังเฉือนของส่วนผสม กำหนดให้มีขนาด 100x100x160 มิลลิเมตร และตัวอย่างหินทรายสำหรับการทดสอบกำลังยึดติดของส่วนผสม มีขนาด 100x100x130 มิลลิเมตร ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้หินทราย ซึ่งมักเป็นหินพื้นฐานที่พบบ่อยในงานทางด้านวิศวกรรมธรณี

### ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

#### 1) การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของส่วนผสม

จะมีการทดสอบหาค่าคุณสมบัติด้านกายภาพของส่วนผสม เช่น ความหนาแน่น (Density) ความหนืด (Viscosity) ของส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ และซีเมนต์สำหรับใช้เป็นวัสดุอุดที่ไม่ผสมแกลบ เพื่อศึกษาหาส่วนผสมที่เหมาะสม และเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติพื้นฐานด้านกายภาพ ผลที่ได้จะนำมาเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาที่ดำเนินอยู่ทั้งในและต่างประเทศเพื่อหาความคล้ายคลึงและความแตกต่างต่อไป



## 2) ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของส่วนผสม

การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของส่วนผสม ประกอบด้วย 1) การทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว (Uniaxial compressive strength test) 2) การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิล (Brazilian tensile strength test) 3) การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (Direct shear strength test) และ 4) การทดสอบกำลังยึดติด (Push-out test) ของส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ และซีเมนต์สำหรับใช้เป็นวัสดุอุดที่ไม่ผสมเถ้า โดยใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM ผลที่ได้จะระบุถึงผลกระทบของปริมาณเถ้าแกลบที่ผสมลงในซีเมนต์ต่อค่าความแข็งแรงของวัสดุผสมเมื่อแข็งตัวแล้วตามระยะเวลาการบ่มตัวที่ 3, 7, 14, 28 และ 60 วันตามลำดับ

## 3) ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของส่วนผสม

การทดสอบเชิงกลศาสตร์ของส่วนผสม ได้แก่การทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสม เพื่อหาค่าความซึมผ่านของน้ำที่สามารถไหลผ่านส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ และซีเมนต์สำหรับใช้เป็นวัสดุอุดที่ไม่ผสมเถ้า ผลการทดสอบดังกล่าวก่อนจะเป็นปัจจัยสำคัญที่ใช้เลือกสัดส่วนของส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุอุดรอยแตกในหินที่

## ขั้นตอนที่ 4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบและเปรียบเทียบผล

ผลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบในอัตราส่วนผสมของระดับต่าง ๆ กัน จะนำมาเปรียบเทียบความสามารถในการเป็นวัสดุอุดกับส่วนผสมซีเมนต์ที่ใช้เป็นวัสดุอุดพื้นฐาน และจะทำการวิเคราะห์ความเหมือนและความแตกต่างเพื่อหาแนวทางปรับปรุงต่อไป

## ขั้นตอนที่ 5 การถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่กลุ่มเป้าหมาย

องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้จะนำไปเผยแพร่ในรูปแบบของบทความในการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการระดับนานาชาติ

## ขั้นตอนที่ 6 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิด ขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุปจะนำเสนอโดยละเอียดในรายงานฉบับสมบูรณ์ เพื่อที่จะส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ

## บทที่ 2

### การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในหัวข้อนี้สรุปผลที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรมวิจัยเบื้องต้นที่เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ วัสดุอุดรอยแตกในหิน กำลังยึดติดของการอุดซีเมนต์ในมวลหินและความซึมผ่านของวัสดุอุดรอยแตกในหิน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 2.1 การประยุกต์ใช้ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ

เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash, RHA) ได้ถูกวิจัยเพื่อใช้เป็นวัสดุผสมในคอนกรีตเมื่อประมาณ 40 ปีที่แล้วและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน เถ้าแกลบสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic Reactivity) จึงเป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่นำมาพัฒนาทำเป็นวัสดุปอซโซลานิกได้ จนกระทั่งในปัจจุบันมีการค้นคว้าเพื่อปรับปรุงเพิ่มประสิทธิภาพและนำไปใช้ในอุตสาหกรรมซีเมนต์มากขึ้น (Zhang and Malhotra, 1996) จากองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ (ตารางที่ 2.1) พบว่าเถ้าแกลบมี  $\text{SiO}_2$  สูงมากถึงประมาณร้อยละ 90 ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์ของโซเดียม โปรแตสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก ฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์ มีค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการเผา (Loss On Ignition, LOI) ซึ่งตามปกติมี LOI อยู่ประมาณร้อยละ 5 แกลบเมื่อได้รับความร้อนให้อุณหภูมิสูงขึ้นจนเกิดการเผาไหม้และถ้ามีอากาศพอจะกลายเป็นเถ้าสีขาวและมีซิลิกาสูง (บุญรักษ์ กาญจนวรรณิชย์, 2556; Habeeb and Mahmud, 2010; Antiohos et al., 2014; Korotkova et al., 2016)

บุรฉัตร ฉัตรวีระ และ วิชกร วงศ์คำจันทร์ (2554) ได้ศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียด ผลการทดสอบพบว่าเถ้าแกลบละเอียดมีการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกสูง และสามารถใช้เป็นวัสดุในคอนกรีตได้ ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียดน้อยกว่าคอนกรีตแบบธรรมดา

Zhang and Malhotra (1996) พบว่าเถ้าแกลบสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก และยังสามารถใช้เป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์ในงานคอนกรีตคุณภาพสูงได้ โดยได้ศึกษากำลังรับแรงกดของซีเมนต์ซึ่งแทนที่ด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 10 มีค่ากำลังรับแรงกดเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 80 เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตคุณภาพสูง

Dabai et al. (2009) ศึกษา กำลังรับแรงกด ระยะเวลาการก่อตัว และส่วนประกอบทางเคมีของซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ ผลการศึกษาส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบพบว่าประกอบด้วยซิลิกาในปริมาณสูงร้อยละ 68.12 สำหรับผลการทดสอบการก่อตัวพบว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบลดลง เมื่อระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพลสเพิ่มขึ้น เป็นผลเนื่องมาจากปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำที่ให้ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ออกมา ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดแสดงในตัวอย่างซีเมนต์ซึ่งถูกแทนที่ด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 10 ทั้งนี้ค่ากำลังรับแรงกดของซีเมนต์มีแนวโน้มลดลงเมื่อ

ปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 2.2) ค่ากำลังรับแรงกดของตัวอย่างนี้ยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการก่อดัว และค่ากำลังกดสูงสุดแสดงที่ระยะเวลาการก่อดัวเท่ากับ 28 วัน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการกักเก็บน้ำในโครงสร้างของส่วนผสม

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของตัวอย่างเถ้าแกลบ (Habeb and Mahmud, 2010; Antiohos et al., 2014 and Korotkova et al., 2016)

Chemical compositions	Weight % of the chemical compositions of rice husk ash		
	Habeb and Mahmud (2010)	Antiohos et al. (2014)	Korotkova et al. (2016)
SiO <sub>2</sub>	88.32	93.15	93.40
K <sub>2</sub> O	2.91	1.63	1.40
Na <sub>2</sub> O	0.12	160.00 (ppm)	0.10
CaO	0.67	0.89	0.31
MgO	0.44	0.40	0.35
Fe <sub>2</sub> O	0.67	0.18 (ppm)	0.06
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0.51	0.80
SO <sub>3</sub>	-	0.10	-
Cl	-	410.00 (ppm)	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.46	0.13	0.05
LOI	5.81	5.61	-

ตารางที่ 2.2 ค่ากำลังรับแรงกดของตัวอย่างซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ (Dabai et al., 2009)

Amount of Cement (%)	Amount of RHA (%)	Design Strength (N/mm <sup>2</sup> )				
		1 Day	3 Days	7 Days	14 Day	28 Days
100	0	16.00	25.70	28.00	32.30	41.00
90	10	12.60	14.20	22.10	28.50	36.30
80	20	6.70	10.40	18.60	24.30	30.20
70	30	4.20	8.60	16.30	22.40	24.00
60	40	2.00	6.20	14.40	18.20	20.30
50	50	0.90	4.10	9.20	11.50	14.00

Habeeb and Mahmud (2010) ศึกษาคุณสมบัติของเถ้าแกลบและการประยุกต์ใช้เพื่อเป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์ ผลการศึกษาคุณสมบัติของเถ้าแกลบใช้เตาถลุงเฟอร์โรซีเมนต์ นอกจากนี้ยังศึกษาผลกระทบของขนาดและพื้นที่ผิวของเถ้าแกลบจากกระบวนการบด จากนั้นศึกษาจำนวนร้อยละของ amorphous silica ในส่วนประกอบทางเคมีและขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบที่มีผลต่อการทำงานของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ พร้อมทั้งศึกษาความหนาแน่น ปริมาณการเป็นสารลดน้ำพิเศษในคอนกรีต และค่ากำลังรับแรงกดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ ผลการศึกษาพบว่าพื้นที่ผิวของเถ้าแกลบไม่ใช่ปัจจัยหลักที่ส่งผลกับคุณสมบัติของเถ้าแกลบในคอนกรีต แต่เป็นรูปร่างและรูพรุนขนาดเล็กในโครงสร้างเถ้าแกลบที่ส่งผลคุณสมบัติของเถ้าแกลบในคอนกรีต การเพิ่มปริมาณของเถ้าแกลบในคอนกรีตส่งผลต่อความต้องการน้ำของคอนกรีต ปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบที่ดีที่สุด เท่ากับร้อยละ 10 ถึง 20 โดยไม่ส่งผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงกด การเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบละเอียดจะเป็นการเพิ่มกำลังรับแรงกดให้คอนกรีตได้มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าแกลบขนาดหยาบกว่า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การควบคุมปริมาณของซีเมนต์ในส่วนผสม

Rashid et al (2010) ศึกษาความทนทานของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบ พบว่าความทนทานของซีเมนต์มอร์ตาร์แตกต่างกันไปตามปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ ตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 20 ที่ระยะเวลาบ่ม 90 วัน จะแสดงค่ากำลังรับแรงสูงถึง 3,860 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) สำหรับผลการทดสอบความทนทาน ตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 25 และร้อยละ 30 สามารถผ่านการทดสอบจำนวน 20 รอบได้

Chatveera and Kongsab (2011) ศึกษาความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำ พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำจะมีการหดตัวแบบแห้งและเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั่นสูงกว่าคอนกรีตปกติ โดยที่การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบที่ร้อยละ 20 มีค่ามากกว่าร้อยละ 40 และการเกิดของปฏิกิริยาคาร์บอนชั่นจะแปรผันตามอัตราส่วนผลรวมของซิลิโคนไดออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และไอรอนออกไซด์ต่อแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ )/CaO อย่างไรก็ตามการหดตัวแบบออโตจีเนียสและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากสารละลายกรดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำจะมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตปกติ

Hwang et al. (2011) ศึกษาผลกระทบของเถ้าแกลบต่อกำลังรับแรงและคุณสมบัติความทนทานของคอนกรีต คุณสมบัติที่ทำการศึกษาได้แก่ กำลังรับแรงกด ความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต และการทดสอบคอนกรีตโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิค สำหรับการทดสอบกำลังรับผู้ทดสอบได้เปรียบเทียบกับกำลังรับแรงระหว่างตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบและไม่ผสม ผลการศึกษาแสดงค่ากำลังรับแรงของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบร้อยละ 20 มีค่าเทียบเท่ากับค่ากำลังรับแรงของคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าแกลบ ที่ระยะบ่ม 56 และ 91 วัน ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อของผสม (Water-to-Binder Ratio) เท่ากับ 0.23 ถึง 0.47 หลังจากระยะบ่มน้ำ 91 วัน การต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าแกลบทุก

ตัวอย่างจะมีค่าสูงกว่า 20 กิโลโกรัม-เซนติเมตร และมีคุณสมบัติทางคลื่นอัลตราโซนิคมากกว่า 3,660 เมตรต่อวินาที ประสิทธิภาพของกำลังรับแรงของซีเมนต์ในคอนกรีตผสมเถ้าแกลบมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าแกลบมาก โดยมีค่ากำลังรับแรงอยู่ในช่วง 47 ถึง 66 เมกกะปาสคาล (MPa)

## 2.2 วัสดุอุดรอยแตกในหิน

การอุดรอยแตกของหินโดยวิธีการเกร้าท์ (Grouting) เป็นที่นิยมมากในงานทางงานวิศวกรรมสมัยใหม่ เพื่อเป็นวิธีการปรับปรุงคุณภาพของดินหรือหินโดยการอัดฉีดของเหลวหรือสารละลายเข้าไปในช่องว่าง รอยแตก หรือโพรงของดินหรือหินที่ต้องการปรับปรุง มีวัตถุประสงค์เพื่อลดค่าความซึมผ่าน เพิ่มกำลังรับแรงและเพิ่มความทนทาน หรือคงสภาพลักษณะของดินหรือหินนั้นไว้ วัสดุที่นำมาใช้สำหรับอุดรอยแตกจะแตกต่างกันไปตามจุดประสงค์และลักษณะของดินหรือหินที่ต้องการอุดรอยแตก โดยทั่วไปมักใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เป็นวัสดุอุดรอยแตก ทั้งในรูปแบบของซีเมนต์ผสมน้ำ ซีเมนต์ผสมน้ำ และทราย ซีเมนต์ผสมน้ำและสารเติมแต่ง ซีเมนต์ผสมน้ำ ทราย และสารเติมแต่ง ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของซีเมนต์อุดรอยแตกที่สำคัญได้แก่ อัตราส่วนระหว่าง น้ำต่อซีเมนต์ (W/C ratio หรือ W:C) องค์ประกอบทางเคมี ขนาดอนุภาคของซีเมนต์ สารเติมแต่งที่ใช้ผสมกับวัสดุอุด ความเร็วในการผสม เวลาในการผสม ประสิทธิภาพของวัสดุผสม และอุณหภูมิของวัสดุอุดรอยแตก (Anagnostopoulos, 2006)

การอุดรอยแตกด้วยซีเมนต์เป็นวิธีการที่นิยมใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของมวลหิน โดยทั่วไปซีเมนต์สำหรับอุดรอยแตกจะมีส่วนประกอบซีเมนต์กับน้ำ สำหรับงานด้านเทคโนโลยีคอนกรีตจะใช้เกณฑ์อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ โดยน้ำหนักตัวอย่างเช่น W/C=0.5 หมายถึง ซีเมนต์ 0.5 กิโลกรัมต่อน้ำ 1.0 กิโลกรัม (Deere, 1982)

Rahmani (2004) เสนอว่าการอุดรอยแตกเป็นการเพิ่มความแข็งแรง ลดการเคลื่อนตัว และลดค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านทั้งของดินและมวลหินแตก เนื่องจากความสำคัญทางวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ในการคาดการณ์ผลกระทบของการอุดรอยแตกนั้นมีความน่าสนใจ ซึ่งมีวิธีการต่างๆ มากมายที่นำมาใช้ประเมินหาปริมาณผลกระทบของการอุดรอยแตก หนึ่งในนั้นคือการประเมินด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข วิธีนี้สามารถจำลองการกระจายตัวของการอุดรอยแตกและผลกระทบที่เกิดขึ้นบนรอยแตกได้ มีการศึกษาด้วยวิธีเชิงตัวเลขไม่มากนักที่สามารถแสดงให้เห็นถึงการแทรกซึมของการอุดรอยแตกผ่านรอยแตกของหินได้ เนื่องจากความซับซ้อนของแบบจำลอง การศึกษาจึงใช้สมมติฐานอย่างง่ายหรือทำการลดขนาดของรอยแตกให้น้อยลง ทำให้ผลของแบบจำลองเกิดความไม่สมจริง ในการศึกษานี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อลดสมมติฐานที่ไม่สมจริงออกและพัฒนาแบบจำลองให้มีความสมจริงมากขึ้น เพราะในความเป็นจริงการอุดรอยแตกจะอยู่ในสถานะของของไหลแบบบิงแฮมพลาสติก (Bingham plastic fluid) แต่หลายๆ แบบจำลองมักไม่ให้ความสนใจเท่าที่ควรอันเนื่องมาจากความซับซ้อน เช่นเดียวกัน รอยแตกของหินแท้จริงแล้วมีความขรุขระและมีการเปิดเผยที่แปรผัน

แตกต่างกัน บางแบบจำลองได้กำหนดให้การแตกเป็นระนาบที่ขนานกันและมีการเปิดเผยของที่ ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการใช้สมการและลดระยะเวลาในการประมวลผลจึงแทนที่แบบจำลองในสองมิติด้วยแบบจำลองท่อในหนึ่งมิติที่มีคุณสมบัติเทียบเท่ากัน แบบจำลองแสดงให้เห็นถึงการแทรกซึมของการอุดในรอยแตกที่ใช้ระยะเวลาสั้น ผลการศึกษาแบบจำลองสามารถใช้ทำนายลักษณะการแทรกซึมจากการอุดรอยแตกและวัสดุการอุดรอยแตกที่แตกต่างกันได้

Warner (2004) กล่าวว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์นิยมใช้เป็นวัสดุอุดรอยแตกอย่างหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วยส่วนผสมพวกวัสดุแคลคาเรียส (Calcareous materials) เช่น หินปูน หินชอล์ก หรือเศษเปลือกหอย และวัสดุอาร์จิลลาเซียส (Argillaceous materials) เช่น ดินเหนียวหรือหินดินดาน โดยสัดส่วนที่เหมาะสมของส่วนผสมดังกล่าวจะถูกผสม บดจนเป็นผง และเผาในเตาเผาแบบหมุนที่อุณหภูมิ 1,430 ถึง 1,650 องศาเซลเซียส หลังจากการเผาจะได้วัสดุผลผลิตที่ได้เรียกว่า ปูนเม็ด (Clinker) และถูกบดเป็นผงเมื่ออุณหภูมิเย็นลง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไวต่อปฏิกิริยาเคมีเมื่อรวมตัวกับน้ำ เรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนมีผลต่อการผลิตความร้อนและอัตราการแข็งตัวของซีเมนต์

Samaiklang and Fuenkajorn (2013) ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์ของซีเมนต์ในรอยแตกของหิน โดยทำการศึกษาซีเมนต์จาก 5 ผู้ผลิตรายใหญ่ของประเทศไทย ผลการวิจัยพบว่าค่าความหนืดของซีเมนต์เหลวมีค่าระหว่าง 0.6-0.8 ปาสคาลวินาที ค่ากำลังกดของซีเมนต์หลังจากการบ่ม 28 วันคือ  $25.77 \pm 2.54$  เมกกะปาสคาล ซีเมนต์ที่มีค่ากำลังกดสูงที่สุดคือซีเมนต์จากบริษัทปูนซีเมนต์ไทย มีค่าเท่ากับ  $27.64 \pm 2.67$  เมกกะปาสคาล ซีเมนต์ที่มีค่ากำลังกดสูงสุดที่สุดคือซีเมนต์จากบริษัทเซเม็กซ์ไทยแลนด์ มีค่าเท่ากับ  $2.95 \pm 0.10$  เมกกะปาสคาล กำลังยึดติดเฉลี่ยของซีเมนต์จากทั้ง 5 ผู้ผลิตมีค่าเท่ากับ  $1.90 \pm 0.42$  เมกกะปาสคาล โดยซีเมนต์ที่ให้กำลังยึดติดสูงสุดคือซีเมนต์จากบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง การตรวจวัดความซึมผ่านพบว่าเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของซีเมนต์จะลดลง

Wetchasat (2013) ประเมินศักยภาพของดินตะกอนประปานครหลวงผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อใช้ลดความซึมผ่านของน้ำในรอยแตกของหินทราย โดยคัดเลือกสัดส่วนของดินตะกอนประปานครหลวงที่ผสมกับปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมจากค่าความหนืดของส่วนผสมเหลวที่น้อยที่สุดแต่ให้ค่ากำลังกดในแกนเดียวที่เหมาะสม ผลการศึกษพบว่าสัดส่วนที่เหมาะสมของดินตะกอนประปานครหลวงต่อซีเมนต์ (S:C) เท่ากับ 1:10 3:10 5:10 และเบนทอนไนต์ต่อซีเมนต์ (B:C) เท่ากับ 1:10 2:10 3:10 ใช้ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 เนื่องจากให้ค่าความหนืดของส่วนผสมเหลวไม่เกิน 5 ปาสคาลต่อวินาทีและให้ค่ากำลังกดสูงสุด สัดส่วนของ S:C เท่ากับ 3:10 จะให้ค่ากำลังกดเท่ากับ 1.22 เมกกะปาสคาล และค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 224 เมกกะปาสคาล ซึ่งต่ำกว่าค่าจาก B:C เล็กน้อย ค่ากำลังเฉือนระหว่างผิวรอยแตกกับส่วนผสมทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกันคืออยู่ในช่วง 0.22 ถึง 0.90 เมกกะปาสคาล ภายใต้ความเค้นตั้งฉากจาก 0.25 ถึง 1.25 เมกกะปาสคาล ค่าความซึมผ่านของทุกส่วนผสมจะลดลงในเชิงเวลาซึ่งให้ค่าอยู่

ในช่วง  $10^{-17}$  ถึง  $10^{-15}$  m<sup>2</sup> สัดส่วนของ S:C เท่ากับ 5:10 ให้ค่าความซึมผ่านต่ำสุด และของส่วนผสมที่อยู่ในรอยแตกมีระยะเวลาการเปิดเผยเท่ากับ 0.2 1.0 และ 2.0 เซนติเมตร มีค่าใกล้เคียงกันในช่วง  $10^{-16}$  ถึง  $10^{-14}$  m<sup>2</sup>

Chiangmai and Tepnarong (2016) ศึกษาประสิทธิภาพเชิงกลศาสตร์ของเถ้าลอยผสมปูนซีเมนต์เพื่อใช้เป็นวัสดุอุดหลุมเจาะในมวลหิน ผลการศึกษาระบุว่าค่าความหนืดของส่วนผสมเถ้าลอยผสมปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น และเมื่อระยะเวลาบ่มตัวอย่างเพิ่มขึ้น ค่าความซึมผ่านของส่วนผสมมีค่าลดลง ส่วนผสมที่สัดส่วนเถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 5:10 แสดงค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว เท่ากับ 10.45 เมกกะปาสคาล ที่ระยะเวลาบ่มตัวอย่างเท่ากับ 28 วัน และแสดงค่ากำลังยึดติดเฉลี่ยระหว่างส่วนผสมกับตัวอย่างหินทรายสูงสุด เท่ากับ 2.58 เมกกะปาสคาล ที่ระยะเวลาบ่มตัวอย่างเท่ากับ 3 วัน ทั้งนี้ที่อัตราส่วนดังกล่าวยังแสดงค่าความซึมผ่านของน้ำในส่วนผสมที่ต่ำที่สุด กล่าวได้ว่าส่วนผสมเถ้าลอยผสมปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อซีเมนต์เท่ากับ 5:10 มีคุณสมบัติเทียบเท่าปูนซีเมนต์ที่ใช้สำหรับเป็นวัสดุอุดหลุมเจาะในมวลหิน สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์สำหรับเป็นวัสดุอุดหลุมเจาะในมวลหินได้

### 2.3 กำลังยึดติดของการอุดซีเมนต์ในมวลหิน

Akgun (1996) ทำการวิจัยกำลังยึดติดซีเมนต์ที่ใช้อุดในหิน วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือศึกษาจากความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเกี่ยวกับความแข็งแรงกับอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อรัศมีของแท่งซีเมนต์ ค่าความแข็งแรงในแนวแกน (Axial strength) กำลังยึดติดระหว่างซีเมนต์กับหิน (Bond strength) และความแข็งแรงเฉือนสูงสุด (Peak shear strength) โดยทดสอบ push-out ของแท่งซีเมนต์ในหลุมตัวอย่างหินที่พิมพ์ทรงกระบอกที่รัศมีและความยาวแท่งซีเมนต์แตกต่างกัน ผลการทดสอบปรากฏว่าคุณสมบัติเกี่ยวกับความแข็งแรงทั้ง 3 ตัวแปรที่มีค่าสูงสุดในตัวอย่างหินที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อรัศมีของแท่งซีเมนต์ที่มีค่าเท่ากับ 8.0 ผลจากการทดสอบบ่งชี้ว่าการออกแบบการอุดหลุมเจาะแบบถาวรด้วยซีเมนต์ควรจะออกแบบให้อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อรัศมีของแท่งซีเมนต์มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 8.0 เพื่อให้ซีเมนต์มีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์เพียงพอ

Ouyang and Daemen (1996) ทดสอบการอุดหลุมเจาะในชั้นหินโดยใช้เบนโทไนต์และวัสดุผสมระหว่างเบนโทไนต์กับหินย่อยของหินที่ฟุ้ง (Crushed tuff) การทดสอบการอุดหลุมเจาะด้วยเบนโทไนต์ตัวอย่างการอุดทั้งหมดจะถูกทดสอบความซึมด้วยวิธี Constant head, Standard falling head และ Modified falling head ใช้ตัวอย่างการอุดทั้งหมด 14 ตัวอย่าง การทดสอบมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาค่าความซึมผ่านของเบนโทไนต์ที่เกี่ยวข้องกับ 3 ปัจจัย คือ 1) คุณสมบัติทางด้านเคมีของน้ำที่ใช้ผสมกับเบนโทไนต์และน้ำที่ใช้ในการทดสอบ 2) ขนาดของตัวอย่าง และ 3) การทดสอบแบบ High injection pressure flow test ผลการทดสอบปรากฏว่าค่าความซึมผ่านของตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่อใช้น้ำที่มีสารละลายโซเดียมไพโรฟอสเฟตในการผสมกับเบนโทไนต์และในการทดสอบ ขนาดของตัวอย่าง

ไม่มีผลทำให้ค่าความซึมผ่านของเบนโทไนต์เพิ่มขึ้นหรือลดลง และค่าความซึมผ่านของตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มแรงดันของน้ำจากการทดสอบแบบ High injection pressure flow test

Akgun and Daemen (2002) ศึกษาอิทธิพลของเปอร์เซ็นต์การอิมตัวด้วยน้ำที่มีต่อความแข็งของซีเมนต์ที่สามารถขยายตัวได้ (Expensive cement) โดยการทดสอบแบบ Push-out Test ตัวอย่างที่ทำการศึกษาคือความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การอิมตัวด้วยน้ำกับความแข็งของซีเมนต์และรัศมีของตัวอย่างการอัดกับความแข็งของซีเมนต์ การเตรียมซีเมนต์ด้วยการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I หรือ II ผสมกับน้ำกลั่น 50 % เติมน้ำที่ทำให้เกิดการขยายตัว (D53) 10 % และ สารที่ทำให้เกิดการกระจายตัว (D65) 1% โดยน้ำหนัก ตามมาตรฐานสถาบันปิโตรเลียมสหรัฐอเมริกา (API) ตัวอย่างหินเป็นหินที่ฟรูปทรงกระบอกที่เจาะรูตรงกลางตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลางมีรัศมี 6.35 12.7 25.4 และ 50.8 มิลลิเมตรตามลำดับ รัศมีภายนอกมีค่าระหว่าง 38.1 ถึง 93.66 มิลลิเมตร ซีเมนต์ที่อัดในรูทดสอบในตัวอย่างหินมีค่าความยาวต่อรัศมีเท่ากับ 2.0 และซีเมนต์ที่อัดจะถูกบ่มไว้ในน้ำ 8 วัน ก่อนนำมาทดสอบ เปอร์เซ็นต์การอิมตัวด้วยน้ำของซีเมนต์มี 3 ระดับ คือ แห้ง เปอร์เซ็นต์การอิมตัวด้วยน้ำน้อย และเปอร์เซ็นต์การอิมตัวด้วยน้ำปานกลาง จากการทดสอบพบว่าค่าความแข็งในแนวแกนความเสียหายระหว่างซีเมนต์กับหินและความแข็งเฉือนสูงสุดในตัวอย่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปอร์เซ็นต์การอิมตัวด้วยน้ำของซีเมนต์เพิ่มขึ้นและรัศมีของตัวอย่างน้อยลง ผลจากการทดสอบระบุว่า การออกแบบการอัดหลุมเจาะแบบถาวรด้วยซีเมนต์ควรออกแบบให้อุดในตำแหน่งที่อยู่ใต้ระดับน้ำบาดาลเพื่อให้มีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์ที่เพียงพอ

Tepnarong (2012) ศึกษาการทดสอบกำลังแรงเฉือนสูงสุดระหว่างซีเมนต์อุดรอยแตกในเกลื่อหินประกอบด้วย การทดสอบ Push-out และการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง โดยเตรียมตัวอย่างเกลื่อหินเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร จากเกลื่อหินชุดมหาสารคามภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ใช้ส่วนผสมซีเมนต์ คือ ปูนซีเมนต์ชนิดทนเค็ม 700 กรัม น้ำเกลื่ออิมตัว (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 ผลการทดสอบตามเกณฑ์ของคู่มือพบว่า ค่าแรงเสียหายยึดติระหว่างซีเมนต์และเกลื่อหินมีค่าเท่ากับ 70 และ 69 องศา สำหรับรอยแตกแบบขรุขระและรอยแตกแบบตัดเรียบตามลำดับ แรงยึดติในรอยแตกระหว่างซีเมนต์และเกลื่อหินมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.42 เมกกะปาสคาล การทดสอบ Push-out ให้ค่าผลการทดสอบที่สูงสุดตามแรงกดในแนวแกน 7.05–11.23 เมกกะปาสคาล อันเป็นผลมาจากผลกระทบของค่าอัตราส่วนปิวซ์ของที่จะเพิ่มความเค้นตั้งฉากที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของตัวอย่างซีเมนต์และเกลื่อหินในขณะที่ให้แรงกดตามแนวแกน จึงชี้ให้เห็นว่าผลที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงนั้นให้ค่าที่อยู่ในเชิงอนุรักษ์ที่มากกว่า สำหรับการทดสอบหาค่ากำลังเฉือนสูงสุดระหว่างเกลื่อหินและซีเมนต์ที่ใช้ในการอุดหลุมเจาะ โดย



ซีเมนต์สำหรับอุดหลุมเจาะที่นำมาใช้ในการทดสอบครั้งนี้สามารถให้ประสิทธิภาพเชิงกลศาสตร์เป็นไปตามที่ต้องการ

Pattani and Tepnarong (2015) ได้ศึกษากำลัγγืดติดของการอุดซีเมนต์ในเกลือหินที่ขึ้นกับเวลาเพื่อทดสอบประสิทธิภาพเชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์ของปูนซีเมนต์เพื่อนำมาใช้จุดในชั้นเกลือหินในฟังก์ชันของเวลา ผลการทดสอบความซึมผ่านของซีเมนต์พบว่าเมื่อระยะเวลาการบ่มตัวเพิ่มขึ้น ค่าความซึมผ่านและค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านจะลดลง ผลการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงระยะสั้นพบว่าแรงเสียดทานยึดติดระหว่างซีเมนต์และเกลือหินมีค่าเท่ากับ 44 องศา และแรงยึดติดมีค่าเท่ากับ 2.12 เมกะปาสคาล การทดสอบ Push-out ระยะยาวถูกดำเนินการในแท่งซีเมนต์กับชุดความสัมพันธ์การบ่มตัวระยะยาวที่ความเค้นเฉือนคงที่ บนพื้นฐานพฤติกรรมกลศาสตร์ของคาน้ำหนัγγืดค้ำยัดหยุ่นเฉือน ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวแนวเฉือนและเวลาโดยระดับความเค้นเฉือนคงที่ต่าง ๆ ที่ 30 วัน รูปแบบ Hookean-Kelvin ถูกเลือกเพื่อหาค่าพฤติกรรมกลศาสตร์ของคาน้ำหนัγγืดค้ำยัดหยุ่นเฉือน ได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของความยืดหยุ่นเฉือน ความหนัγγืดค้ำยัดหยุ่นเฉือนและสัมประสิทธิ์ความหนัγγืด คผลการคาดการณ์เป็นไปตามข้อมูลจากผลการทดสอบเป็นอย่างดี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นรูปแบบการเคลื่อนตัวของคาน้ำหนัγγืดค้ำยัดหยุ่นแบบไม่เป็นเส้นตรง

#### 2.4 ความซึมผ่านของวัสดุอุดรอยแตกในหิน

ความซึมผ่านเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของของไหล (เช่น น้ำ น้ำ+ก๊าซ น้ำ+ก๊าซ+น้ำมัน) ในการไหลผ่านวัสดุที่มีรูพรุนและรอยแตก หินที่มีเนื้อเป็นผลึกของไหลจะสามารถไหลผ่านเนื้อหินได้น้อยกว่าการไหลผ่านรอยแตก เนื่องจากจำนวนรูพรุนที่ต่อกันและขนาดของรูพรุนในหินแข็งโดยทั่วไปมีน้อย (Gale, 1975; Iwai, 1976; Raven and Gale, 1985) นอกจากนี้ค่าความซึมผ่านยังมีผลต่อพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของหินและต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของเสถียรภาพโครงสร้างวิศวกรรมในหิน ของไหลในตัวอย่งหินสามารถไหลผ่านเนื้อหินและช่องว่างที่ต่อกันหรือทั้งสองแบบ ค่าความซึมผ่านสามารถแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ 1) ความซึมผ่านของเนื้อหิน 2) ความซึมผ่านของรอยแตก และ 3) ความซึมผ่านของทั้งเนื้อหินและรอยแตก ปัจจัยหลักที่ควบคุมการไหลและค่าความซึมผ่านในรอยแตก คือ ความขรุขระของผิวรอยแตก ความเปิดเผย ทิศทางการวางตัว ความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือน และพฤติกรรมด้านการรับน้ำหนัก (Indraratna and Ranjith, 2001)

Butron et al. (2010) ได้นำเสนอแนวคิดใหม่ในการอุดรอยแตกก่อนการขุดเจาะอุโมงค์ เพื่อป้องกันการหยุดและลดปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่อุโมงค์รถไฟ โดยใช้สารละลายซิลิกาในการอุดรอยแตกของหลังคาอุโมงค์ ส่วนรอยแตกของผนังอุโมงค์จะใช้ปูนซีเมนต์ในการอุด สำหรับขั้นตอนการออกแบบการอุดรอยแตกนี้จะใช้วิธีการที่มีแบบแผนด้วยการกำหนดค่าตัวแปรสำหรับการออกแบบก่อนเริ่มลงมือทำการสำรวจ นอกจากนี้การทดสอบความดันของน้ำและความดันปริมาตร รวมไปถึงการจดบันทึกเวลาได้ถูกนำมาใช้ในการประเมินผลด้วย ซึ่งผลการศึกษาพบว่าการออกแบบประสบความสำเร็จ ผลรวมของ

ค่าอัตราการไหลของน้ำลดลงจาก  $4.9 \times 10^{-8}$  ตารางเมตรต่อวินาที ถึงขีดจำกัดของการวัด ( $1.6 \times 10^{-8}$  ตารางเมตรต่อวินาที) และการหยุดของน้ำลดลงแปดจุดจากหลังคา การปรับปรุงลักษณะรอยแตกของหินให้ดีขึ้นแสดงให้เห็นว่ารอยแตกด้านที่ได้รับการอุดด้วยซีเมนต์มีความสัมพันธ์กับระยะเวลาในการไหลของน้ำ และประสิทธิภาพของการอุดรอยแตกนี้จะขึ้นอยู่กับขนาด ขอบเขต และความใหญ่ของระบบการไหลของน้ำในมวลหิน

Fransson (2001) เสนอว่าการอุดรอยแตกในหินสำหรับการขุดเจาะอุโมงค์ได้ถูกอุดรอยแตกทั้งก่อนและหลังทำการขุดเจาะ หลุมอัดวัสดุจะถูกเจาะที่ผนังของอุโมงค์ซึ่งมีความเค้นต่ำและรอยแตกสามารถเปิดเผยได้ง่าย นอกจากนี้ยังมีการใช้ข้อมูลจากการทดสอบทางชลศาสตร์และลักษณะวิธีการอุดเพื่อระบุแนวโน้มการอุดรอยแตกที่เปิดเผย มีการประเมินความแข็งแรงของรอยแตกและผลกระทบจากประสิทธิภาพของวัสดุอุด ซึ่งผลของการใช้ข้อมูลทางด้านชลศาสตร์และลักษณะวิธีการอุดเพื่อการประเมินดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ามีความสอดคล้องกับข้อมูลในภาคสนามทั้งคุณสมบัติและผลกระทบจากการเปลี่ยนรูปร่างของรอยแตกที่เกิดจากการฉีดวัสดุอุดเข้าไปในหลุมเจาะผนังอุโมงค์ที่มีความเค้นต่ำและสามารถฉีดอัดวัสดุอุดได้ง่าย

Picandet et al. (2011) ศึกษาความซึมผ่านของน้ำปูนชั้นซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งในการทำความเข้าใจพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์ของวัสดุที่มีส่วนผสมซีเมนต์ อย่างไรก็ตามการวัดความซึมผ่านของน้ำปูนชั้นยากต่อการประเมินเนื่องจากเนื้อปูนที่มีความพรุนจึงไม่แข็งแรงและมีแนวโน้มต่อการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน วิธีการวัดสองรูปแบบตามลักษณะความสูงของตัวอย่างขนาด 70 และ 20 มิลลิเมตร วิธีแรกเป็นการวัดความซึมผ่านน้ำโดยวัดการไหลซึมและการอัดตัวคายน้ำไปพร้อมกัน วิธีที่สองใช้อุปกรณ์วัด Oedometer โดยควบคุมการเคลื่อนที่และแรงดันน้ำในโพรงซึ่งจะทำให้สามารถวัดค่าความซึมผ่านของค่าอัตราส่วนช่องว่างได้อย่างถูกต้อง การเปรียบเทียบแบบจำลองทางทฤษฎีจะยืนยันว่าความซึมผ่านน้ำและอัตราส่วนช่องว่างมีความสัมพันธ์กันและถูกสร้างสมการขึ้น ผลการทดสอบตัวอย่างที่มีสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์  $W/C=0.3$  และ  $0.4$  โดยใช้ความดัน 30 กิโลปาสกาล มีค่าความเหนียวนำชลศาสตร์  $K=0.32 \times 10^{-7}$  และ  $0.32 \times 10^{-6}$  เมตรต่อวินาที

## บทที่ 3

### วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

เนื้อหาในบทนี้อธิบายคุณลักษณะพื้นฐานของวัสดุที่นำมาทดสอบในงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบด้วย  
เถ้าแกลบ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และตัวอย่างหินทราย

#### 3.1 เถ้าแกลบ

ตัวอย่างเถ้าแกลบที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นวัสดุเหลือจากการเผาแกลบเป็นเชื้อเพลิงใน  
โรงไฟฟ้าชีวมวลของ บริษัท เอ.ที. ไปโอพาวเวอร์ จำกัด ผลการศึกษาส่วนประกอบทางเคมีของเถ้า  
แกลบด้วยวิธี X-ray fluorescence (XRF) จากรายงานโดยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติแสดง  
ในตารางที่ 3.1 และแสดงส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอย (Fly ash) (Chiangmai, 2016) ดินเบนทอ  
ไนต์ (Bentonite) ดินตะกอนประปา (Sludge) (Wetchasat, 2013) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์  
ประเภทที่ 1 เพื่อเปรียบเทียบส่วนประกอบทางเคมีกับเถ้าแกลบที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

คุณสมบัติทางกายภาพพื้นฐานประการหนึ่งของเถ้าแกลบทั่วไปคือการกระจายตัวของอนุภาค ใน  
งานวิจัยนี้จึงได้ทดสอบตัวอย่างเถ้าแกลบด้วยตะแกรงร่อน (Sieve analysis) และด้วยวิธีไฮโดมิเตอร์  
(Hydrometer analysis) ซึ่งวิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM (D4221-11) จึงได้เปรียบเทียบกับ  
ผลการทดสอบกับเถ้าลอย (Chiangmai, 2016) ดินเบนทอไนต์, ดินตะกอนประปา (Wetchasat,  
2013) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (Samaiklang and Fuenkajorn, 2013) แสดงผลการ  
กระจายตัวในรูปที่ 3.1 และการทดสอบค่าขีดจำกัดของ (Atterberg limits) เป็นดัชนีทางด้านวิศวกรรม  
ปฐพีเพื่อบ่งบอกคุณลักษณะทางวิศวกรรม ตัวอย่างเถ้าแกลบได้ถูกทดสอบเพื่อหาค่าดัชนีเหล่านี้โดยใช้  
วิธีทดสอบมาตรฐาน ASTM (D4318-17) ดังผลสรุปในตารางที่ 3.2 ซึ่งสามารถจำแนกตามเกณฑ์ของ  
Unified Soil Classification System (ASTM D2487-17) อยู่ในประเภทดินOH (Organic clay)

#### 3.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

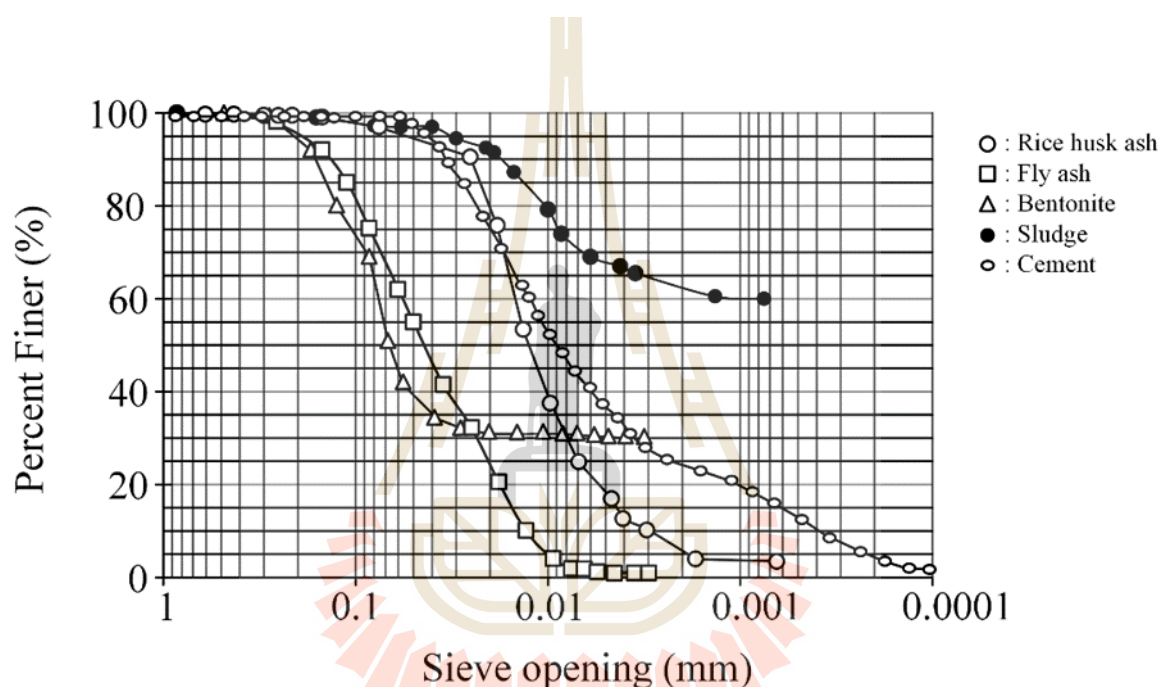
ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน  
ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.15 เล่ม 1-2547 และมาตรฐาน ASTM (C150-19) งานวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์  
อินทรีย์เพชร ของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด ซึ่งหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาด มีราคาถูก โดยมี  
วัตถุประสงค์เพื่อให้ผลงานวิจัยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างแพร่หลาย ปูนซีเมนต์ควรเป็นปูนใหม่  
(อายุผลิตไม่เกิน 30 วัน) เนื่องจากปูนไม่รวมตัวจับกันเป็นก้อน ระหว่างรอการทดสอบได้เก็บรักษาในกล่อง  
พลาสติกที่ปิดฝาสนิทเพื่อป้องกันความชื้น

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ เถ้าลอย ดินตะกอนประปา ดินเบนทอนต์ และซีเมนต์  
ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (Chiangmai, 2016; Wetchasat, 2013)

Compositions	% Weight				
	RHA	Fly ash	Sludge	Bentonite	Cement
	A.T. biopower	Chiangmai (2016)	Wetchasat (2013)		Samaiklang and Fuenkajom (2013)
SiO <sub>2</sub>	94.46	40.72	52.57	61.93	18.70
K <sub>2</sub> O	2.26	1.77	1.55	0.44	-
Na <sub>2</sub> O	0.04	-	0.22	1.63	-
CaO	0.89	16.52	0.79	1.27	-
TiO <sub>2</sub>	-	0.50	0.79	0.19	-
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	0.02	-	-
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0.02	0.02	-	-
MnO <sub>2</sub>	-	0.14	-	-	-
MgO	0.36	-	0.96	2.44	1.61
Fe <sub>2</sub> O	0.21	-	-	-	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	14.40	6.33	4.45	2.93
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.87	-	0.34	0.05	-
MnO	-	-	0.22	0.02	-
CuO	-	-	0.01	0.01	-
SO <sub>3</sub>	0.14	7.48	0.55	1.27	2.76
Cl	0.32	-	0.07	-	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.26	18.33	23.47	19.85	4.71
ZnO	0.02	0.03	-	-	-
As <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0.04	-	-	-
ZrO <sub>2</sub>	-	0.03	0.03	0.03	-
Br	<0.01	-	-	-	-
Rb <sub>2</sub> O	0.01	0.03	0.01	-	-
BaO	-	-	0.01	0.03	-
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	<0.01	0.01	-
SrO	0.01	-	0.01	0.03	-
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0.01	-	<0.01	0.01	-
Ir <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0.015	-	-	-
CeO <sub>2</sub>	-	-	-	0.04	-
LOI (Loss on ignition)	5.62	-	12.20	6.29	4.66

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางวิศวกรรมและความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบ

Atterberg's limits	RHA (% weight)
Liquid limit	71.64
Plastic limit	71.60
Plasticity index	0.04
Specific gravity ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.96



รูปที่ 3.1 การกระจายอนุภาคของเถ้าลอยและเบนทอนิต์ที่ทดสอบในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับผลการทดสอบเถ้าลอย ดินตะกอบประปา ดินเบนทอนิต์ และซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (Chiangmai, 2016; Wetchasat, 2013)

ปูนซีเมนต์อินทรีย์เพชร บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด มีคุณสมบัติการขยายตัว (Autoclave expansion) เท่ากับร้อยละ 0.0016 มีระยะเวลาการก่อตัวด้วยวิธี Gillmore Method (ASTM C266-20) มีระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายที่ 118 นาที และ 215 นาที ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ 7 วัน และ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 37 และ 45 เมกะปาสกาล ตามลำดับ ปริมาณอากาศในมอร์ตาร์ (Air content) เท่ากับร้อยละ 10 ตารางที่ 3.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ซึ่งเป็นชนิดเดียวกันกับที่ใช้ในงานวิจัยนี้

สัดส่วนของส่วนประกอบซีเมนต์เหลวประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 และเถ้า  
 แกลบ โดยมีอัตราส่วนของเถ้าแกลบต่อซีเมนต์ (RHA:C) เท่ากับ 1:10, 3:10, 5:10 และ 10:10 โดย  
 น้ำหนัก ด้วยปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ (W:C) เท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบประสิทธิภาพของ  
 ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบถูกเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของซีเมนต์สำหรับอุดที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบ  
 (RHA:C = 0:10) หลังจากชั่งน้ำหนักปูนได้ตามอัตราส่วนดังกล่าว จากนั้นทำการผสมส่วนผสมในเครื่อง  
 ปั่นผสมที่มีความเร็วไม่เกิน 275 รอบต่อนาที (รูปที่ 3.2) ปั่นเป็นเวลา 3 นาทีให้ส่วนผสมเข้ากัน จากนั้น  
 นำส่วนผสมที่ได้ไปทดสอบหาค่าความหนาแน่นและความหนืด ก่อนนำไปทดสอบเชิงกลศาสตร์และเชิง  
 ชลศาสตร์ต่อไป

การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวและการทดสอบกำลังรับแรง  
 ดึงแบบบราซิล มีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเช่นเดียวกันคือ หลังจากที่ผสมส่วนผสมซีเมนต์และเถ้า  
 แกลบโดยเครื่องปั่นแล้ว จะทำการหล่อตัวอย่างในแบบหล่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 54  
 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.3) และบ่มในน้ำภายใต้อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3, 7, 14 และ 28 วันก่อนการทดสอบ  
 จากนั้นนำแท่งตัวอย่างมาตัดแต่งให้ได้ขนาดตามมาตรฐานการทดสอบ (รูปที่ 3.4) สำหรับการทดสอบ  
 กำลังรับแรงกดในแกนเดียว ตัวอย่างต้องมีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D ratio)  
 เท่ากับ 2.0-2.5 และการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิล ตัวอย่างต้องมีอัตราส่วนความยาวต่อเส้น  
 ผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.5



รูปที่ 3.2 เครื่องปั่นส่วนผสมที่มีความเร็วไม่เกิน 275 รอบต่อนาที (รุ่น 6QT 575W)



รูปที่ 3.3 แบบหล่อตัวอย่างส่วนผสมทำด้วย PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 54 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.4 การตัดแต่งแท่งตัวอย่างให้ได้ขนาดตามมาตรฐานการทดสอบ

### 3.3 ตัวอย่างหิน

ตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบนี้คือหินทรายหมวดหินพระวิหารของกลุ่มหินโคราช จากแหล่งหินทรายอำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา มีอายุช่วงจูแรสสิกตอนกลางถึงตอนปลาย มีกำลังรับแรงกดในแกนเดียวและค่าความยืดหยุ่นเท่ากับ 71.3 เมกกะปาสคาล และ 13.9 จิกกะปาสคาล ตามลำดับ เป็นหินที่มีความซึมผ่านต่ำมีความเป็นเนื้อเดียวกัน และสามารถจัดเตรียมรอยแตกได้ง่าย มีผลึกควอตซ์เม็ดละเอียดที่มีเนื้อและความหนาแน่นสูง พวกมันมีการวางตัวและการจัดเรียงมุมที่ดี หินนี้ประกอบไปด้วยผลึกควอตซ์ 75% (0.1-0.5 mm) เฟลด์สปาร์ 15% (0.2-0.5 mm) ไมกา 7% (0.1-0.5 mm) และเศษหิน 3% (0.1-1 mm)

โดยรอยแตกที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการสามารถทำได้โดยกดตัวอย่างหินในแนวเส้น (Line load) จนถึงจุดวิบัติ ตัวอย่างหินรูปลูกบาศก์จะขาดออกจากกันภายใต้แรงดึงที่ตั้งฉากกับทิศทางของแรงกดในแนวเส้น การแตกออกจากกันนี้ทำให้เกิดรอยแตกภายใต้แรงดึง (Tension-induced fracture) ในตัวอย่างหิน การจัดเตรียมแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม คือ กลุ่มของตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนและการทดสอบการซึมผ่าน (รูปที่ 3.5) และกลุ่มที่ใช้ทดสอบกำลังยึดติดสูงสุด (รูปที่ 3.6)

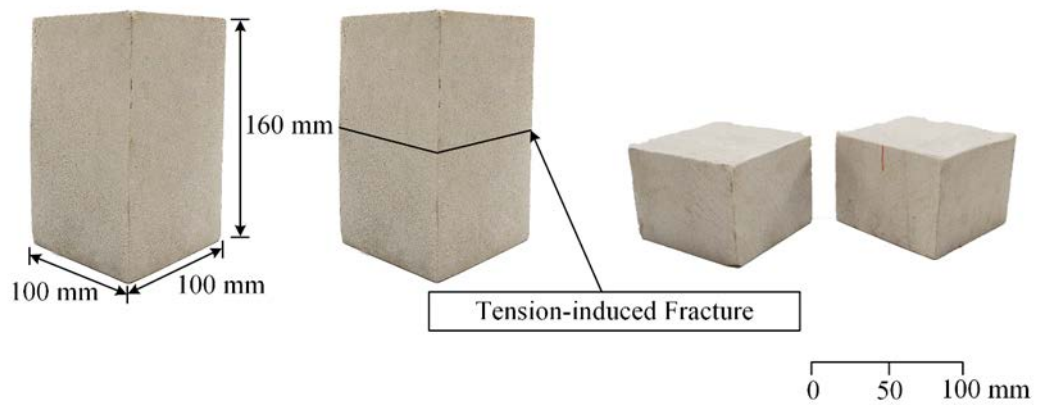
#### 3.3.1 ตัวอย่างหินทรายสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนและการทดสอบการซึมผ่าน

ตัวอย่างหินทรายสำหรับการทดสอบนี้จะถูกเตรียมให้อยู่ในรูปทรงสี่เหลี่ยม (กว้าง×ยาว×สูง) ขนาด 100×100×160 มิลลิเมตร และถูกทำให้มีรอยแตกกึ่งกลางตัวอย่าง รอยแตกมีพื้นที่ 100×100 ตารางมิลลิเมตร ในการทดสอบนี้ใช้ตัวอย่าง 15 ตัวอย่าง (ตารางที่ 3.3) ทดสอบภายใต้ความเค้นกด 0.5-1.5 เมกกะปาสคาล และใช้ตัวอย่าง 18 ตัวอย่างสำหรับการทดสอบการซึมผ่านในรอยแตกหินภายใต้ความเค้นกด 0.25-1.0 เมกกะปาสคาล (ตารางที่ 3.4)

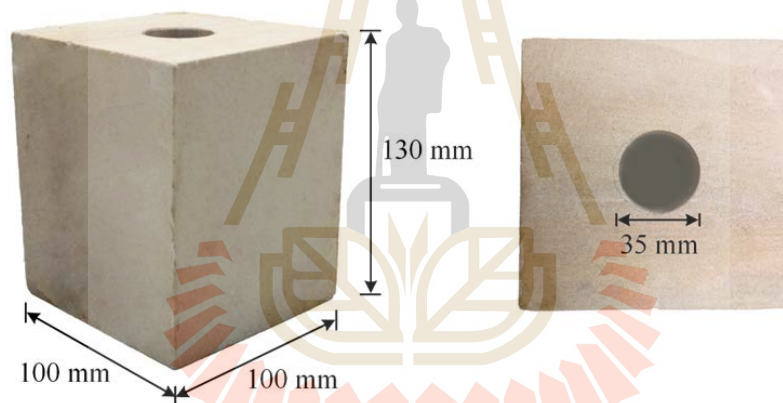
#### 3.3.2 ตัวอย่างหินทรายสำหรับการทดสอบกำลังยึดติดสูงสุด

ตัวอย่างหินทรายสำหรับการทดสอบนี้จะถูกเตรียมให้อยู่ในรูปทรงสี่เหลี่ยม (กว้าง×ยาว×สูง) ขนาด 110×110×130 มิลลิเมตร และทำการเจาะรูตรงกลางของตัวอย่างหินทรายโดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร ในการทดสอบนี้ใช้ตัวอย่าง 60 ตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังยึดติดสูงสุด (ตารางที่ 3.5)





รูปที่ 3.5 ตัวอย่างหินทรายเพื่อทดสอบกำลังรับแรงเหวี่ยงและการทดสอบการซึมผ่านในรอยแตกหิน



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างหินทรายเพื่อทดสอบกำลังยึดติดสูงสุดแบบ Push-out

ตารางที่ 3.3 ขนาดของตัวอย่างหินทรายหมวดหินพระวิหาร สำหรับการสร้างรอยแตกโดยกดตัวอย่างหินในแนวเส้น (Line load) ในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง

Specimen no.	Width (mm)	Length (mm)	Height (mm)	Weight (g)	Density (g/cc)
PW-DS-01	117.2	101.2	162.3	4388.9	2.28
PW-DS-02	113.3	107.2	165.4	4700.8	2.34
PW-DS-03	103.4	111.5	166.2	4407.1	2.30
PW-DS-04	110.5	115.6	160.4	4671.5	2.28
PW-DS-05	111.2	107.2	161.2	4362.0	2.27
PW-DS-06	113.2	106.6	165.2	4624.8	2.32
PW-DS-07	109.4	109.1	166.6	4553.5	2.29
PW-DS-08	102.5	113.1	162.1	4228.1	2.25
PW-DS-09	118.2	102.4	167.8	4854.0	2.39
PW-DS-10	115.1	107.1	165.5	4712.7	2.31
PW-DS-11	117.0	107.3	165.3	5001.2	2.41
PW-DS-12	106.0	113.2	164.2	4590.7	2.33
PW-DS-13	107.3	115.4	160.0	4556.7	2.30
PW-DS-14	115.1	117.3	162.2	4992.9	2.28
PW-DS-15	104.2	111.1	163.2	4288.7	2.27

ตารางที่ 3.4 ขนาดของตัวอย่างหินทรายหมวดหินพระวิหาร สำหรับการสร้างรอยแตกโดยกด  
ตัวอย่างหินในแนวเส้น (Line load) ในการทดสอบการซึมผ่านในรอยแตกหิน

Specimen no.	Width (mm)	Length (mm)	Height (mm)	Weight (g)	Density (g/cc)
PW-PM-01	117.2	101.2	162.3	4,523.7	2.35
PW-PM-02	113.3	107.2	165.4	4,761.1	2.37
PW-PM-03	103.4	111.5	166.2	4,483.8	2.34
PW-PM-04	110.5	115.6	160.4	4,876.4	2.38
PW-PM-05	110.2	110.2	166.5	4,751.7	2.35
PW-PM-06	111.2	112.5	164.0	4,862.4	2.37
PW-PM-07	112.2	112.3	163.2	4,894.1	2.38
PW-PM-08	110.0	110.2	160.2	4,621.8	2.38
PW-PM-09	109.8	110.2	162.3	4,673.9	2.38
PW-PM-10	112.2	111.2	162.2	4,856.9	2.40
PW-PM-11	114.1	112.2	160.3	4,904.7	2.39
PW-PM-12	112.2	112.3	161.2	4,834.1	2.38
PW-PM-13	109.9	110.2	164.3	4,676.1	2.35
PW-PM-14	110.1	110.1	160.2	4,544.2	2.34
PW-PM-15	110.2	110.2	164.3	4,688.9	2.35

ตารางที่ 3.5 ขนาดของตัวอย่างหินทรายหมวดหินพระวิหาร สำหรับการทดสอบกำลังยึดติดสูงสุด  
แบบ Push-out

Specimen no.	Width (mm)	Length (mm)	Height (mm)	Weight (g)	Density (g/cc)
PW-CP-03-01	100.5	100.2	130.5	3,088.2	2.35
PW-CP-03-02	100.8	100.2	130.2	3,077.2	2.34
PW-CP-03-03	100.6	100.5	130.0	3,101.8	2.36
PW-CP-07-01	100.5	100.4	130.2	3,153.0	2.40
PW-CP-07-02	100.2	100.5	130.2	3,081.1	2.35
PW-CP-07-03	100.2	100.6	130.4	3,062.7	2.33
PW-CP-14-01	100.5	100.4	130.5	3,068.1	2.33
PW-CP-14-02	100.5	100.2	130.4	3,072.8	2.34
PW-CP-14-03	101.2	101.3	132.0	3,180.0	2.35
PW-CP-28-01	100.8	100.7	132.4	3,212.0	2.39
PW-CP-28-02	100.9	100.9	131.5	3,132.7	2.34
PW-CP-28-03	100.5	101.2	132.1	3,170.7	2.36
PW-RP-10-03-01	101.0	101.2	130.5	3,174.6	2.38
PW-RP-10-03-02	101.2	101.4	130.2	3,206.6	2.40
PW-RP-10-03-03	100.2	101.2	130.2	3,221.5	2.44
PW-RP-10-07-01	100.5	101.5	130.1	3,238.3	2.44
PW-RP-10-07-02	100.4	101.4	131.5	3,280.1	2.45
PW-RP-10-07-03	101.2	102.2	131.2	3,270.6	2.41
PW-RP-10-14-01	100.2	101.2	131.2	3,193.0	2.40
PW-RP-10-14-02	100.3	101.3	131.2	3,252.7	2.44
PW-RP-10-14-03	100.2	101.2	132.1	3,281.9	2.45
PW-RP-10-28-01	100.2	101.2	132.0	3,279.4	2.45
PW-RP-10-28-02	101.5	102.5	131.0	3,257.8	2.39
PW-RP-10-28-03	101.6	102.6	131.2	3,282.9	2.40

ตารางที่ 3.5 สรุปรูปขนาดของตัวอย่างหินทรายหมวดหินพระวิหารรอยแตกสำหรับการทดสอบกำลังยึด  
 ตัดสูงสุด (Push-out test) (ต่อ)

Specimen no.	Width (mm)	Length (mm)	Height (mm)	Weight (g)	Density (g/cc)
PW-RP-30-03-01	101.5	100.5	131.4	3,284.1	2.45
PW-RP-30-03-02	101.4	100.4	131.4	3,290.9	2.46
PW-RP-30-03-03	101.3	100.3	131.2	3,252.7	2.44
PW-RP-30-07-01	101.8	100.8	132.2	3,269.6	2.41
PW-RP-30-07-02	101.6	100.6	130.5	2,827.9	2.12
PW-RP-30-07-03	102.1	101.1	129.8	3,269.6	2.44
PW-RP-30-14-01	101.8	100.8	135.6	3,395.4	2.44
PW-RP-30-14-02	101.5	100.5	132.2	3,290.6	2.44
PW-RP-30-14-03	101.2	100.2	132.5	3,224.7	2.40
PW-RP-30-28-01	101.9	100.9	134.2	3,311.8	2.40
PW-RP-30-28-02	101.4	100.4	135.2	3,317.3	2.41
PW-RP-30-28-03	101.3	100.3	132.5	3,311.9	2.46
PW-RP-50-03-01	100.2	101.2	134.4	3,352.7	2.46
PW-RP-50-03-02	100.3	101.3	134.2	3,327.1	2.44
PW-RP-50-03-03	101.1	102.1	133.3	3,357.7	2.44
PW-RP-50-07-01	102.2	103.2	132.2	3,402.9	2.44
PW-RP-50-07-02	105.3	106.4	130.2	3,572.4	2.45
PW-RP-50-07-03	100.3	101.3	130.5	3,235.4	2.44
PW-RP-50-14-01	100.1	101.1	130.5	3,222.5	2.44
PW-RP-50-14-02	100.5	101.5	130.8	3,269.1	2.45
PW-RP-50-14-03	100.8	101.8	131.5	3,319.7	2.46
PW-RP-50-28-01	100.0	101.0	132.2	3,257.9	2.44
PW-RP-50-28-02	100.2	101.2	132.5	3,238.1	2.41
PW-RP-50-28-03	101.1	102.1	133.2	3,313.9	2.41

ตารางที่ 3.5 สรุปขนาดของตัวอย่างหินทรายหมวดหินพระวิหารรอยแตกสำหรับการทดสอบกำลังยึด  
ตีดสูงสุด (Push-out test) (ต่อ)

Specimen no.	Width (mm)	Length (mm)	Height (mm)	Weight (g)	Density (g/cc)
PW-RP-100-03-01	101.0	102.0	131.0	3,293.3	2.44
PW-RP-100-03-02	103.5	104.5	130.2	3,437.2	2.44
PW-RP-100-03-03	100.4	101.4	130.5	3,241.8	2.44
PW-RP-100-07-01	100.1	101.1	133.2	3,316.1	2.46
PW-RP-100-07-02	100.2	101.2	130.5	3,189.2	2.41
PW-RP-100-07-03	101.2	102.2	131.5	3,291.7	2.42
PW-RP-100-14-01	101.1	102.1	132.4	3,362.4	2.46
PW-RP-100-14-02	100.5	101.5	132.4	3,295.6	2.44
PW-RP-100-14-03	100.4	101.4	135.5	3,366.0	2.44
PW-RP-100-28-01	100.3	101.3	132.0	3,272.6	2.44
PW-RP-100-28-02	99.9	100.9	128.4	3,170.9	2.45
PW-RP-100-28-03	100.2	101.2	130.5	3,228.9	2.44



## บทที่ 4

### การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของส่วนผสม

วัตถุประสงค์ของการศึกษาในบทนี้เพื่อทดสอบหาค่าความหนืด (Viscosity) และความหนาแน่น (Density) ของส่วนผสมในขณะที่ยังไม่แข็งตัว (Slurry) และซีเมนต์สำหรับใช้เป็นวัสดุอุดที่ไม่ผสมเถ้าแกลบ เป็นคุณสมบัติพื้นฐานและสามารถนำมาใช้เป็นดัชนีเปรียบเทียบความสามารถในการไหล และความเป็นของเหลวของส่วนผสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมที่เกี่ยวข้อง ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวสามารถนำมาใช้ประกอบในการคัดเลือกสัดส่วนของวัสดุที่เหมาะสม

#### 4.1 การจัดเตรียมส่วนผสม

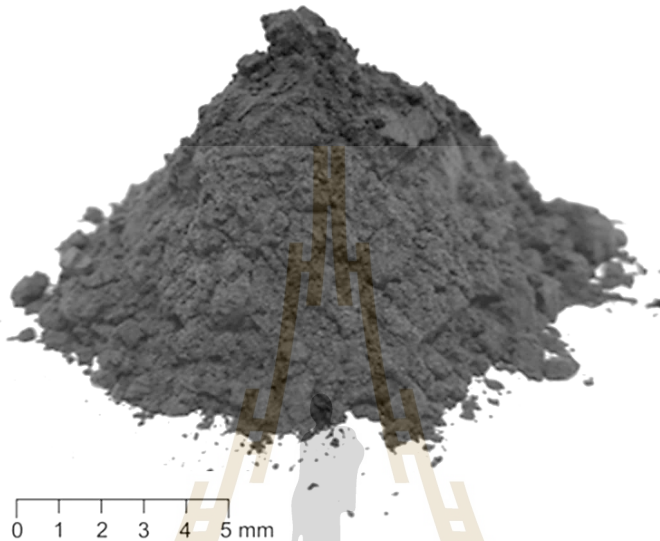
การทดสอบหาค่าความหนืดและความหนาแน่นของส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ สามารถอธิบายความสามารถในการอัดฉีดของวัสดุอุดได้ การตรวจวัดค่าความหนืดจะเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM (D2196-20) วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการจัดเตรียมส่วนผสมประกอบด้วย

- 1) เถ้าแกลบ (รูปที่ 4.1)
- 2) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (รูปที่ 4.2)
- 3) น้ำสะอาดสำหรับผสม (ใช้สำหรับน้ำดื่ม)
- 4) เครื่องชั่งแบบดิจิทัล ใช้น้ำหนักได้สูงสุด 2,200 กรัม มีค่าความละเอียด  $\pm 0.01$  กรัม (รูปที่ 4.3)
- 5) เครื่องผสม (รุ่น 6 QT 575 W) ขนาดกำลังไฟฟ้า 575 W แบบปรับความเร็วรอบได้ 6 ค่า มีความจุ (ขั้นต่ำ-สูงสุด) 500 – 5,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร (รูปที่ 4.4)
- 6) เครื่องวัดความหนืด Brookfield® viscometer (รุ่น DV2T ขนาดกำลังไฟฟ้า 150 VA 50/60 Hz) (รูปที่ 4.5)

งานวิจัยนี้ได้กำหนดสัญลักษณ์ตัวย่อของวัสดุและส่วนผสมเพื่อความสะดวกในการนำเสนอ ดังนี้

- 1) เถ้าแกลบ (Rice husk ash) สัญลักษณ์ย่อ RHA
- 2) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Cement) สัญลักษณ์ย่อ C
- 3) น้ำ (Water) สัญลักษณ์ย่อ W
- 4) เถ้าลอย (Fly ash) สัญลักษณ์ย่อ F
- 5) ดินเบนทอไนต์ (Bentonite) สัญลักษณ์ย่อ B
- 6) ดินตะกอนประปา (Sludge) สัญลักษณ์ย่อ S
- 7) สัดส่วนของส่วนผสมเถ้าแกลบต่อซีเมนต์ สัญลักษณ์ย่อ RHA:C

- 8) สัดส่วนของส่วนผสมเถ้าลอยต่อซีเมนต์ สัญลักษณ์ย่อ F:C
- 9) สัดส่วนของส่วนผสมดินเบนทอนไนต์ต่อซีเมนต์ สัญลักษณ์ย่อ B:C
- 10) สัดส่วนของส่วนผสมดินตะกอนประปาต่อซีเมนต์ สัญลักษณ์ย่อ S:C
- 11) สัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (Water-cement ratio) สัญลักษณ์ย่อ W:C



รูปที่ 4.1 เถ้าแกลบสำหรับการทดสอบ



รูปที่ 4.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 สำหรับการทดสอบ





รูปที่ 4.3 เครื่องชั่งแบบดิจิตอลรับน้ำหนักได้สูงสุด 2,200 กรัม มีค่าความละเอียด  $\pm 0.01$  กรัม



รูปที่ 4.4 เครื่องปั่นส่วนผสมที่มีความเร็วไม่เกิน 275 รอบต่อนาที (รุ่น 6QT 575W)



รูปที่ 4.5 เครื่องวัดความหนืด Brookfield® viscometer รุ่น DV2T

#### 4.2 วิธีการทดสอบส่วนผสม

การทดสอบเบื้องต้นมีวัตถุประสงค์เพื่อคัดเลือกสัดส่วนของส่วนผสมที่เหมาะสมโดยใช้เกณฑ์ความหนืดดังนี้ สัดส่วนของ RHA:C มีค่าตั้งแต่ 1:10, 3:10, 5:10 และ 10:10 โดยน้ำหนัก ด้วยปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ (W:C) เท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบจะถูกเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของซีเมนต์สำหรับอุดที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบ (0:10) การเตรียมวัสดุอุดเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM (C938-16) โดยสัดส่วนของส่วนผสมได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ขั้นตอนการผสมมีดังนี้

- 1) ชั่งวัสดุตามสัดส่วนที่กำหนดไว้ แล้วบรรจุลงในถุงพลาสติกและเขย่าให้ส่วนผสมเข้ากัน
- 2) เทน้ำและส่วนผสมตามขั้นตอนที่ 1 ลงในเครื่องผสมพร้อมเปิดเครื่องด้วยความเร็วรอบไม่เกิน 275 รอบต่อนาที ควรเทให้หมดในคราวเดียวกัน หากมีการเพิ่มเติมวัสดุควรเทให้เสร็จภายในเวลา 2 นาที และเริ่มจับเวลาตั้งแต่เริ่มเทส่วนผสมลงในน้ำ บันทึกรูปร่างของวัสดุที่วัดได้
- 3) ปั่นส่วนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันภายในเวลา 3 นาที ที่ 275 รอบต่อนาที แล้วปิดเครื่องผสม
- 4) นำส่วนผสมที่ได้ไปทดสอบหาค่าความหนาแน่นและความหนืด ด้วยเครื่องวัดความหนืด Brookfield® viscometer รุ่น DV2T ตามมาตรฐาน ASTM (D2196-20) จากนั้นเทส่วนผสมลงปิกเกอร์ โดยให้ปริมาตรของส่วนผสมเท่ากับ 500 cc พอดี

- 5) ชั่งน้ำหนักของบีกเกอร์ที่มีส่วนผสมอยู่ โดยใช้เครื่องชั่งแบบดิจิทัลที่มีความละเอียดถึง  $\pm 0.01$  กรัม หักถ่วงน้ำหนักของบีกเกอร์ออกจากผลที่ได้ แล้วคำนวณด้วยสัดส่วนของปริมาตรของส่วนผสม (500 cc) ผลลัพธ์คือค่าความหนาแน่นของส่วนผสม
- 6) ค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity, SG) ของส่วนผสมสามารถคำนวณได้โดยสมการ

$$SG = \rho_{\text{slurry}} / \rho_w \quad (4.1)$$

โดยที่  $\rho_{\text{slurry}}$  คือความหนาแน่นของส่วนผสมเหลว และ  $\rho_w$  คือความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิในขณะทำการตรวจวัด

การทดสอบความหนืดจะทำทันทีหลังจากที่มีการชั่งน้ำหนักของส่วนผสมเหลวในบีกเกอร์ที่มีปริมาตร 500 cc (รูปที่ 4.6) ดังนี้

- 1) ที่เครื่องทดสอบความหนืดของ Brookfield เลือกเข็มทดสอบ RV1 ถึง RV7 ที่เหมาะสมกับความหนืด (ความหนืดต่ำใช้เข็ม RV1 และความหนืดสูงใช้เข็ม RV7)
- 2) ติดตั้งเข็มทดสอบกับเครื่องทดสอบความหนืด และวางบีกเกอร์ส่วนผสมใต้เครื่องทดสอบ
- 3) ปรับระยะเข็มทดสอบลงในส่วนผสมเหลว โดยให้ระยะผิวบนของส่วนผสมอยู่ที่รอย Mark ของเข็ม
- 4) เปิดสวิชเครื่องทดสอบโดยเริ่มที่ความเร็วรอบต่ำ รอบประมาณ 60 วินาที เพื่อให้เข็มหมุนคงที่ จากนั้นบันทึกหมายเลขเข็มทดสอบและค่าความเร็วรอบในหน่วย rpm (รอบต่อนาที)
- 5) ทดสอบซ้ำด้วยความเร็วรอบอื่นประมาณ 3-5 ค่า เพื่อหาค่าเฉลี่ยความหนืด พร้อมทั้งสังเกตลักษณะความหนืดของตัวอย่าง
- 6) คำนวณค่าความหนืดในหน่วย centipoise (cP)

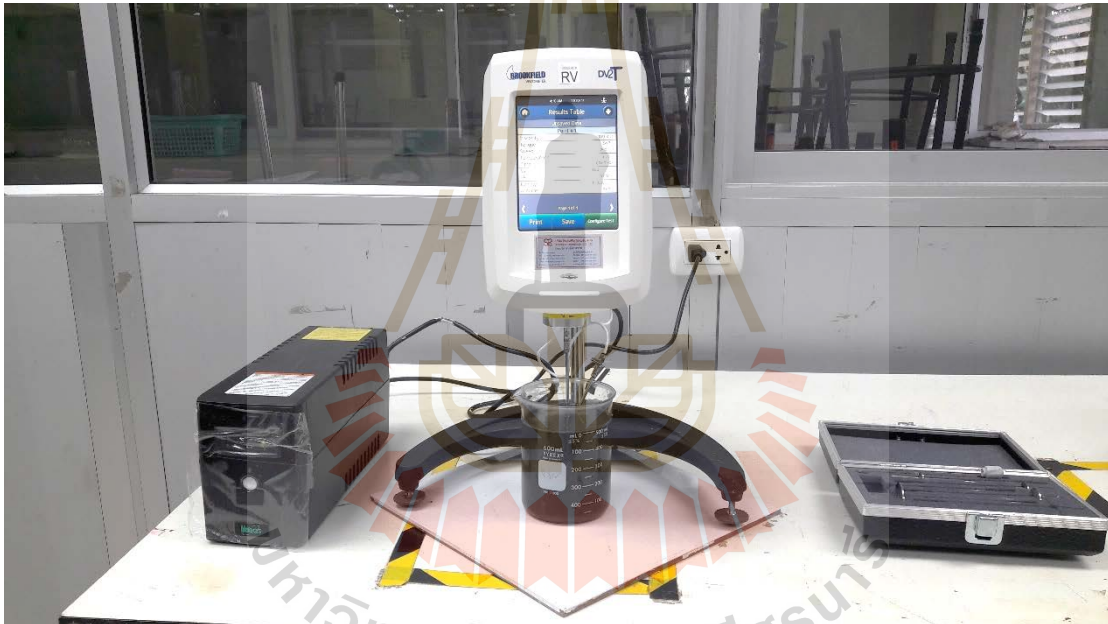
ค่าที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบความหนืด Brookfield จะอยู่ในหน่วย centipoise (cP) หรือมีค่าเท่ากับ millipascal second (mPa·s) ซึ่งหน่วยดังกล่าวจะเป็นค่าความหนืดเชิง dynamic ที่สามารถแปลงมาเป็นค่าความหนืดเชิง kinetic ได้จากสมการ

$$\mu = \rho \cdot \nu \quad (4.2)$$

โดยที่  $\mu$  คือ dynamic viscosity  $\nu$  คือ kinetic viscosity และ  $\rho$  คือ ค่าความหนาแน่นของของเหลว

ตารางที่ 4.1 สัดส่วนของส่วนผสมในปริมาตร 1,000 cc

Binder	Sample No.	RHA:C	W:C	Weight (g)		
				RHA	Cement	Water
Cement	RCW-00	0:10	10:10	0.00	500.00	500.00
RHA	RCW-10	1:10	10:10	47.62	476.20	476.20
	RCW-30	3:10	10:10	130.44	434.78	434.78
	RCW-50	5:10	10:10	200.00	400.00	400.00
	RCW-100	10:10	10:10	333.33	333.33	333.33



รูปที่ 4.6 การทดสอบหาค่าความหนืดและค่าความหนาแน่นของส่วนผสม ด้วยเครื่องวัดความหนืด Brookfield® viscometer DV2T 150 VA 50/60 Hz.

### 4.3 ผลการทดสอบส่วนผสม

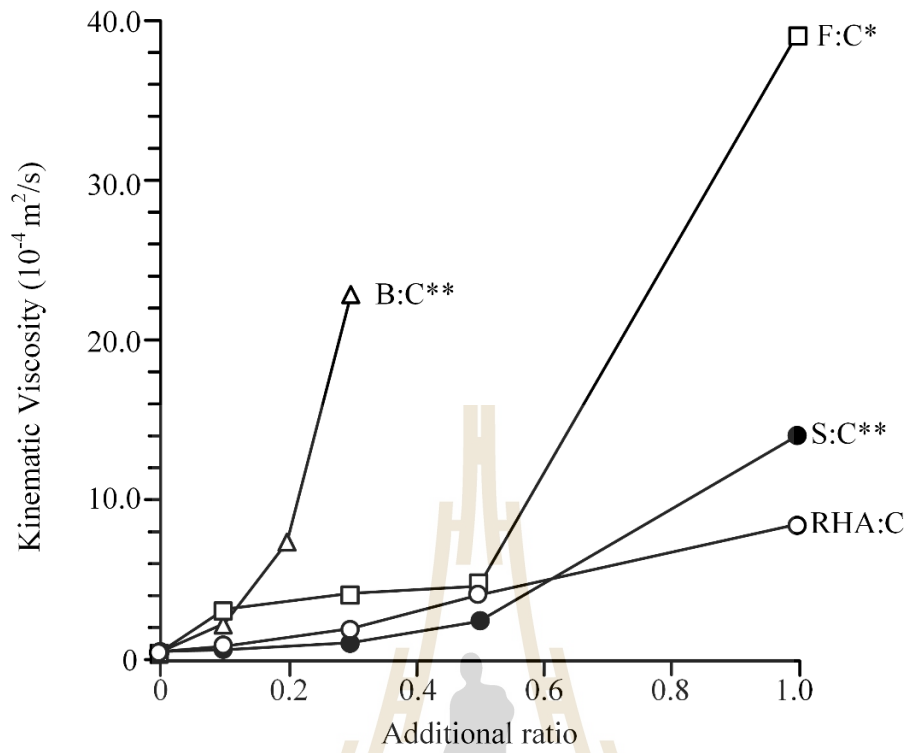
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบความหนาแน่นและค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity, SG) ของส่วนผสมในสัดส่วนที่ต่างกัน ผลการทดสอบความหนืดของส่วนผสมได้แสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.7 โดยผลการทดสอบได้ถูกเปรียบเทียบกับส่วนผสมของเถ้าลอย ดินเบนทอไนต์ และดินตะกอนประปา จากการศึกษาของ Chiangmai (2016) และ Wetchasat (2013)

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะของส่วนผสม

Binder	Sample No.	RHA:C F:C B:C	W:C	Slurry Temperature (°C)	Slurry Density (g/cc)	Specific Gravity
Cement	RCW-00	0:10	10:10	27.00	1.47	1.47
RHA	RCW-10	1:10	10:10	27.90	1.49	1.49
	RCW-30	3:10	10:10	27.70	1.50	1.51
	RCW-50	5:10	10:10	28.20	1.58	1.58
	RCW-100	10:10	10:10	28.50	1.75	1.76
Fly ash (Chiangmai, 2016)	FC-10	1:10	10:10	28.40	1.54	1.55
	FC-30	3:10	10:10	27.50	1.59	1.60
	FC-50	5:10	10:10	27.00	1.66	1.67
	FC-100	10:10	10:10	26.40	1.75	1.75
Bentonite (Wetchasat, 2013)	BC-10	1:10	10:10	28.20	1.41	1.42
	BC-20	2:10	10:10	27.90	1.45	1.46
	BC-30	3:10	10:10	29.40	1.51	1.52
Sludge (Wetchasat, 2013)	SC-10	1:10	10:10	28.60	1.47	1.47
	SC-30	3:10	10:10	30.20	1.48	1.49
	SC-50	5:10	10:10	30.30	1.59	1.60
	SC-100	10:10	10:10	30.60	1.86	1.87

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบความหนืดของส่วนผสม

Binder	RHA:C F:C B:C S:C	W:C	Slurry Temperature (°C)	Slurry Density (g/cc)	Dynamic Viscosity (mPa·s)	Kinematic Viscosity (10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s)
Cement	0:10	10:10	27.00	1.47	64.80	0.441
RHA	1:10	10:10	27.90	1.49	110.20	0.741
	3:10	10:10	27.70	1.50	277.00	1.847
	5:10	10:10	28.20	1.58	631.00	4.001
	10:10	10:10	28.50	1.75	1,472.00	8.418
Fly ash (Chiangmai, 2016)	1:10	10:10	28.40	1.54	477.40	3.101
	3:10	10:10	27.50	1.59	651.90	4.094
	5:10	10:10	27.00	1.66	763.60	4.593
	10:10	10:10	26.40	1.75	6,807.50	38.974
Bentonite (Wetchasat, 2013)	1:10	10:10	28.20	1.41	308.79	2.189
	2:10	10:10	27.90	1.45	1,059.95	7.310
	3:10	10:10	29.40	1.51	3,454.88	22.817
Sludge (Wetchasat, 2013)	1:10	10:10	28.60	1.47	82.32	0.561
	3:10	10:10	30.20	1.48	156.88	1.057
	5:10	10:10	30.30	1.59	375.24	2.361
	10:10	10:10	30.60	1.86	2,598.42	13.965



รูปที่ 4.7 ค่า Kinetic viscosity ของส่วนผสมในอัตราส่วนที่ต่างกัน (\*Chiangmai, 2016 และ \*\*Wetchasat, 2013)

## บทที่ 5

### การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของส่วนผสม

เนื้อหาในบทนี้อธิบายวิธีและผลการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดในแบบบราซิล ค่ากำลังเฉือน และค่ากำลังยึดติดสูงสุดของส่วนผสม โดยสัดส่วนของส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบจะเป็นไปตามตารางที่ 4.1 ในบทที่ 4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบจะถูกเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของซีเมนต์สำหรับอุดที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบ (0:10) การจัดเตรียมตัวอย่างและการทดสอบจะทำตามมาตรฐาน ASTM (D7012-14) ASTM (D3967-19) ASTM (D5607-16) และคำแนะนำของ ISRM (Brown, 1981)

#### 5.1 การทดสอบกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว

การทดสอบกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว (Uniaxial compressive strength test) มีวัตถุประสงค์การทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว (Uniaxial Compressive Strength,  $\sigma_c$ ) และ ตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (Elastic Modulus, E) ของส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ โดยขั้นตอนการทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D7012-14 การเตรียมตัวอย่างแท่งตัวอย่างซีเมนต์ในการทดสอบได้ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D7012-14, C938-16 และ C39-21 อัตราส่วนระหว่างเถ้าแกลบและซีเมนต์ (RHA:C) เท่ากับ 1:10, 3:10, 5:10 และ 10:10 โดยน้ำหนัก ด้วยปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ (W:C) เท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก ส่วนผสมถูกเตรียมและเทลงในแบบหล่อที่ทำจากท่อ PVC เส้นผ่านศูนย์กลาง 54 มิลลิเมตร แล้วทำการบ่มตัวอย่างด้วยการนำไปแช่ในน้ำเป็นเวลา 3, 7, 14, และ 28 วัน จากนั้นจึงนำตัวอย่างมาตัดผิวหน้าให้เรียบเพื่อให้ได้อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 2.5 (รูปที่ 5.1) ตามที่ต้องการ ตัวอย่างในการทดสอบถูกทดสอบที่อัตราความเค้นกด 1 เมกะปาสกาลต่อวินาที (รูปที่ 5.2) ในขณะเดียวกันได้มีการตรวจวัดการเปลี่ยนรูปร่างในแนวแกนและแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง ด้วยมาตรวัดที่มีความละเอียด  $\pm 0.01$  มิลลิเมตร จนกระทั่งตัวอย่างที่ใช้ทดสอบเกิดการวิบัติ ผลการทดสอบสามารถนำมาคำนวณค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว ( $\sigma_c$ ) ได้จากสมการ

$$\sigma_c = P_f/A \quad (5.1)$$

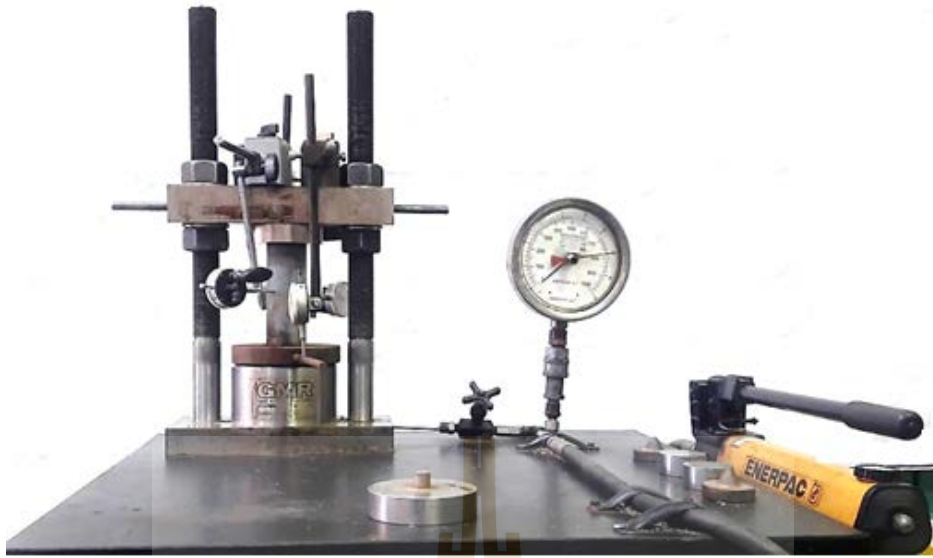
โดยที่  $\sigma_c$  คือค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว  $P_f$  คือ แรงกดสูงสุดที่จุดวิบัติ และ A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างที่ทดสอบ



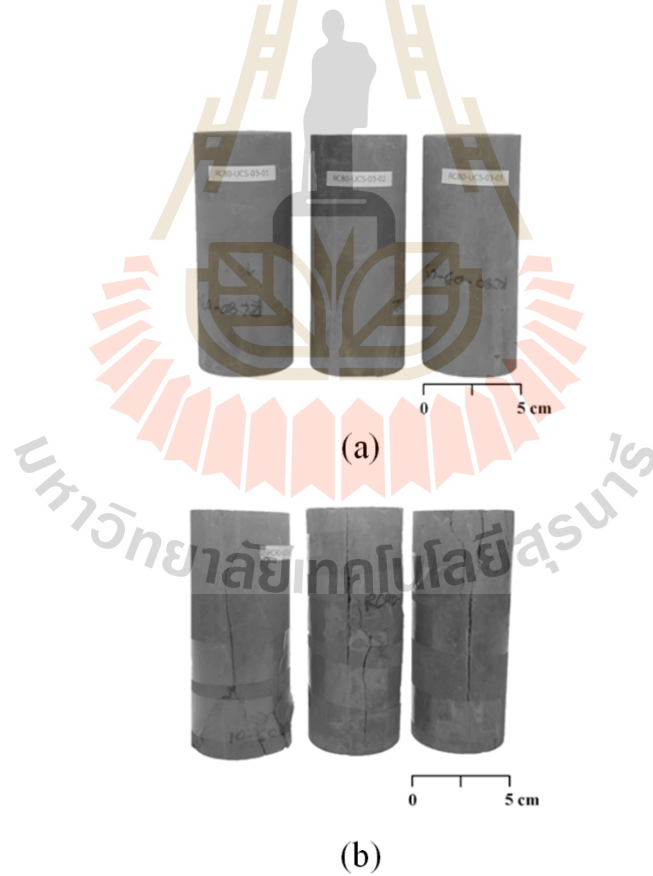
ขนาดแท่งตัวอย่างซีเมนต์ที่ผันแปรส่วนผสมต่าง ๆ พร้อมผลจากการทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียวและการตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น ได้ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแสดงดังตารางที่ 5.1 และ 5.2 ในรูปที่ 5.3 แสดงตัวอย่างบางส่วนจากการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวของส่วนผสมเถ้าแกลบ ทั้งก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบ พร้อมแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวและค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นตามระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง ในรูปที่ 5.4 และ 5.5 โดยส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่อัตราส่วนเถ้าแกลบต่อซีเมนต์ เท่ากับ 5:10 แสดงค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวอยู่ที่ 16.11 เมกะปาสกาล และให้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นสูงสุด เท่ากับ 2.16 จิกะปาสกาล ที่ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน



รูปที่ 5.1 การเตรียมแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอกให้มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 2.5



รูปที่ 5.2 การทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวของส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ



รูปที่ 5.3 แท่งตัวอย่างส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบก่อน (a) และหลังการทดสอบ (b)

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวและสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของตัวอย่างแท่งซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบอายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ

Types	Sample no.	Curing Time (days)	L (mm)	D (mm)	L/D	W (g)	$\rho$ (g/cc)	$\sigma_c$ (MPa)	E (GPa)
Cement (0:10)	C-03-1	3	139.40	55.80	2.50	512.3	1.50	6.50	1.23
	C-03-2		140.20	56.00	2.50	401.8	1.46	6.50	1.22
	C-03-3		140.00	56.00	2.50	502.0	1.46	6.87	1.19
	C-07-1	7	140.00	56.00	2.50	502.8	1.46	7.51	1.26
	C-07-2		139.50	56.00	2.49	510.5	1.49	7.52	1.24
	C-07-3		138.70	56.00	2.48	509.4	1.49	7.70	1.28
	C-14-1	14	141.00	56.00	2.52	521.6	1.50	8.12	1.29
	C-14-2		140.30	55.90	2.51	502.6	1.46	8.15	1.29
	C-14-3		140.70	55.80	2.52	512.0	1.49	8.11	1.27
	C-28-1	28	139.00	56.60	2.46	463.0	1.32	9.94	1.34
	C-28-2		140.30	56.00	2.51	478.0	1.38	9.95	1.34
	C-28-3		139.70	56.00	2.49	443.0	1.29	9.91	1.40
RHA (RHA:C=1:10)	R10-03-1	3	140.50	55.00	2.55	596.7	1.79	6.94	1.17
	R10-03-2		138.00	54.60	2.53	578.2	1.79	6.83	1.33
	R10-03-3		139.15	54.50	2.56	588.9	1.81	7.07	1.26
	R10-07-1	7	138.50	55.30	2.50	544.7	1.64	7.91	1.36
	R10-07-2		138.70	55.40	2.50	554.6	1.66	8.09	1.30
	R10-07-3		139.00	55.20	2.52	543.9	1.64	8.36	1.35
	R10-14-1	14	138.00	54.00	2.56	525.3	1.66	10.92	1.60
	R10-14-2		139.20	56.29	2.47	558.5	1.61	9.24	1.46
	R10-14-3		138.00	55.00	2.51	526.0	1.60	10.52	1.56
	R10-28-1	28	137.00	55.80	2.46	515.7	1.54	11.65	1.41
	R10-28-2		137.70	56.40	2.44	550.7	1.60	10.01	1.74
	R10-28-3		138.40	54.20	2.55	515.2	1.61	11.49	1.66

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวและสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของตัวอย่างแท่งซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบลอายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ (ต่อ)

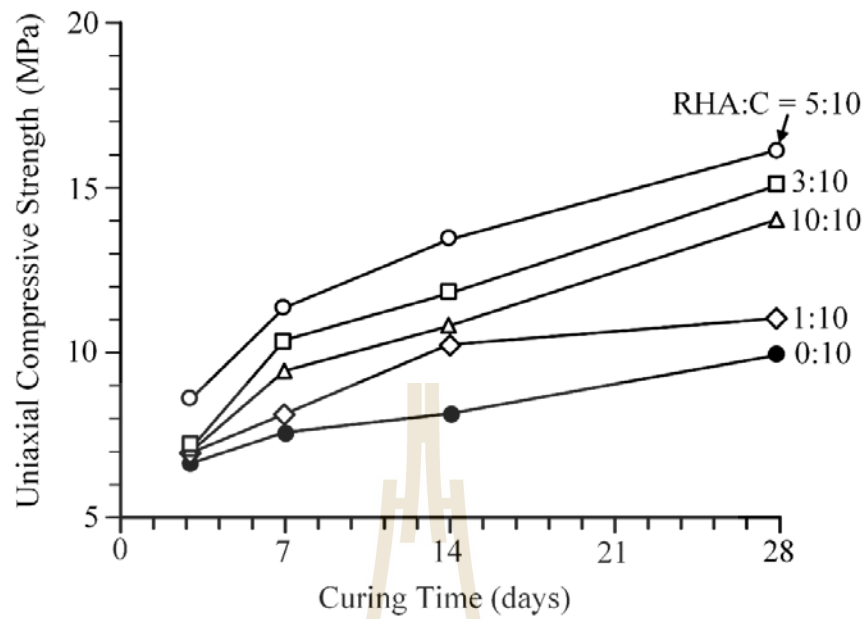
Types	Sample no.	Curing Time (days)	L (mm)	D (mm)	L/D	W (g)	$\rho$ (g/cc)	$\sigma_c$ (MPa)	E (GPa)
RHA (RHA:C= 3:10)	R30-03-1	3	138.00	56.00	2.46	590.4	1.74	6.90	1.40
	R30-03-2		138.00	56.02	2.46	587.0	1.73	7.20	1.42
	R30-03-3		138.00	54.75	2.52	590.4	1.82	7.22	1.38
	R30-07-1	7	138.20	55.40	2.49	543.2	1.63	10.16	1.38
	R30-07-2		138.32	55.10	2.51	532.8	1.62	10.48	1.48
	R30-07-3		138.00	54.60	2.53	543.9	1.68	10.46	1.49
	R30-14-1	14	140.40	56.00	2.51	550.0	1.59	11.37	1.63
	R30-14-2		139.60	55.80	2.50	558.9	1.64	12.27	1.70
	R30-14-3		139.70	55.00	2.54	554.3	1.67	11.68	1.68
	R30-28-1	28	138.40	55.60	2.49	522.4	1.55	14.42	2.00
	R30-28-2		137.30	54.40	2.52	517.7	1.62	15.49	2.64
	R30-28-3		138.00	55.50	2.49	554.8	1.66	15.29	1.67
RHA (RHA:C= 5:10)	R50-03-1	3	139.50	56.80	2.46	601.2	1.70	8.49	1.56
	R50-03-2		140.00	55.30	2.53	554.1	1.65	8.74	1.68
	R50-03-3		138.00	56.27	2.45	527.8	1.54	8.65	1.64
	R50-07-1	7	137.21	56.00	2.45	568.8	1.68	10.96	1.54
	R50-07-2		138.85	56.00	2.48	572.3	1.67	11.37	1.56
	R50-07-3		139.00	55.00	2.53	531.1	1.61	11.79	1.67
	R50-14-1	14	140.00	54.00	2.59	522.3	1.63	13.32	2.06
	R50-14-2		144.00	55.00	2.62	520.9	1.52	13.48	1.81
	R50-14-3		142.00	55.00	2.58	512.0	1.52	13.92	1.71
	R50-28-1	28	138.00	55.70	2.48	534.5	1.59	15.39	1.91
	R50-28-2		137.00	56.00	2.45	537.0	1.59	16.58	2.31
	R50-28-3		138.00	55.80	2.47	511.9	1.52	16.36	2.26

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวและสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของตัวอย่างแท่งซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบอายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ (ต่อ)

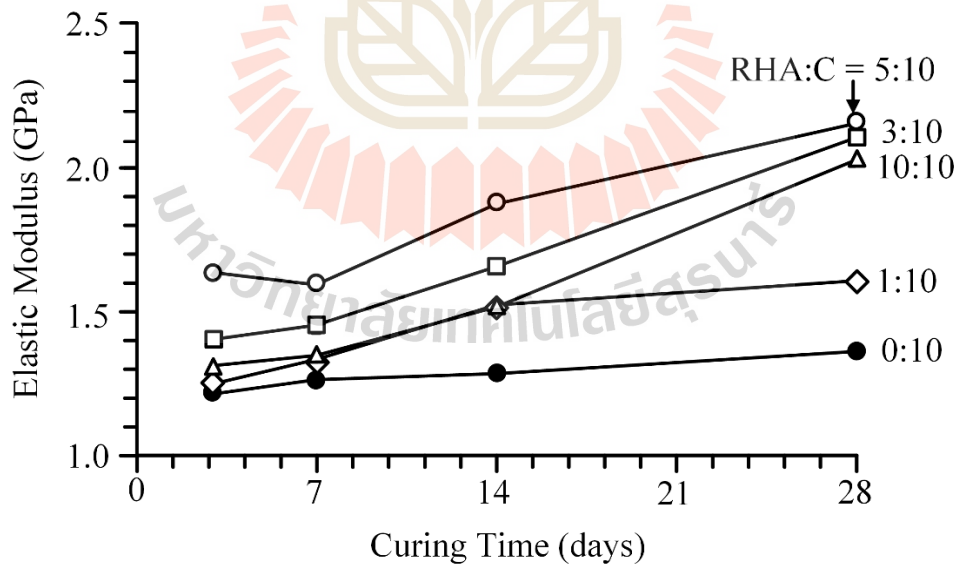
Types	Sample no.	Curing Time (days)	L (mm)	D (mm)	L/D	W (g)	$\rho$ (g/cc)	$\sigma_c$ (MPa)	E (GPa)
RHA (RHA:C= 10:10)	R100-03-1	3	139.86	56.50	2.48	566.3	1.62	6.98	1.30
	R100-03-2		138.00	56.00	2.46	562.0	1.65	7.11	1.32
	R100-03-3		138.40	54.80	2.53	554.0	1.70	7.00	1.30
	R100-07-1	7	138.00	55.70	2.48	548.0	1.63	9.44	1.31
	R100-07-2		137.50	54.90	2.50	541.6	1.66	9.29	1.35
	R100-07-3		138.30	55.30	2.50	542.2	1.63	9.58	1.39
	R100-14-1	14	139.00	56.30	2.47	533.7	1.54	11.25	1.70
	R100-14-2		141.00	55.40	2.56	506.0	1.51	10.42	1.42
	R100-14-3		138.25	55.00	2.51	509.0	1.55	10.73	1.38
	R100-28-1	28	137.00	55.00	2.49	517.9	1.59	14.31	1.52
	R100-28-2		138.40	55.40	2.50	532.6	1.60	13.90	2.54
	R100-28-3		138.00	55.00	2.51	513.2	1.57	13.78	2.03

ตารางที่ 5.2 ค่ากำลังแรงกดสูงสุดในแกนเดียว ( $\sigma_c$ ) และ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E) ของแต่ละส่วนผสม

Types	Curing Time (days)	Number of Samples	$\sigma_c$ (MPa)	E (GPa)
Cement (0:10)	3	3	$6.62 \pm 0.17$	$1.21 \pm 0.02$
	7	3	$7.58 \pm 0.09$	$1.26 \pm 0.02$
	14	3	$8.13 \pm 0.02$	$1.28 \pm 0.01$
	28	3	$9.93 \pm 0.02$	$1.36 \pm 0.03$
RHA (RHA:C=1:10)	3	3	$6.95 \pm 0.10$	$1.25 \pm 0.07$
	7	3	$8.12 \pm 0.18$	$1.34 \pm 0.03$
	14	3	$10.23 \pm 0.72$	$1.54 \pm 0.06$
	28	3	$11.05 \pm 0.74$	$1.60 \pm 0.14$
RHA (RHA:C=3:10)	3	3	$7.11 \pm 0.15$	$1.40 \pm 0.02$
	7	3	$10.37 \pm 0.15$	$1.45 \pm 0.05$
	14	3	$11.77 \pm 0.37$	$1.67 \pm 0.03$
	28	3	$15.07 \pm 0.46$	$2.10 \pm 0.40$
RHA (RHA:C=5:10)	3	3	$8.63 \pm 0.10$	$1.63 \pm 0.05$
	7	3	$11.37 \pm 0.34$	$1.59 \pm 0.06$
	14	3	$13.43 \pm 0.36$	$1.86 \pm 0.15$
	28	3	$16.11 \pm 0.52$	$2.16 \pm 0.18$
RHA (RHA:C=10:10)	3	3	$7.03 \pm 0.06$	$1.31 \pm 0.01$
	7	3	$9.44 \pm 0.12$	$1.35 \pm 0.03$
	14	3	$10.80 \pm 0.34$	$1.50 \pm 0.14$
	28	3	$14.00 \pm 0.23$	$2.03 \pm 0.42$



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวของส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกบลับกับระยะเวลาบ่มน้ำของตัวอย่าง



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกบลับกับระยะเวลาการบ่มน้ำของตัวอย่าง

## 5.2 การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิล

การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิลเลียน (Brazilian tensile strength test) มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด (Brazilian tensile strength,  $\sigma_B$ ) ของตัวอย่างแท่งซีเมนต์ในแต่ละส่วนผสม วิธีการทดสอบและการคำนวณผลเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D3967-19 และการแนะนำของ ISRM (Brown, 1981)

ตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 54 มิลลิเมตร แล้วทำการบ่มตัวอย่างด้วยการนำไปแช่ในน้ำเป็นเวลา 3, 7, 14 และ 28 วันก่อนการทดสอบ จากนั้นจึงนำตัวอย่างมาตัดผิวหน้าให้เรียบเพื่อให้ได้อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 0.5 รูปที่ 5.6 ตัวอย่างในการทดสอบถูกกดทดสอบที่อัตรา 0.1-0.5 เมกะปาสกาลต่อวินาที รูปที่ 5.7 แสดงการจัดเตรียมอุปกรณ์ทดสอบ ซึ่งจะดำเนินการจนกระทั่งตัวอย่างที่ใช้ทดสอบเกิดการวิบัติ ค่ากำลังรับแรงดึงแบบบราซิลสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\sigma_B = 2P_f / \pi Dt \quad (5.2)$$

เมื่อ  $\sigma_B$  คือ ค่ากำลังรับแรงดึงแบบบราซิล  $P_f$  คือ แรงกดที่จุดแตก  $D$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่าง และ  $t$  (หรือ  $L$ ) คือ ความหนาของตัวอย่าง ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดของส่วนผสมทั้งหมดแสดงไว้ในตารางที่ 5.3

ผลการทดสอบและค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดของส่วนผสมทั้งหมดแสดงไว้ในตารางที่ ตารางที่ 5.3 และสรุปไว้ในตารางที่ 5.4 ตามลำดับ โดยรูปที่ 5.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงดึงแบบบราซิลกับระยะเวลาการบ่มน้ำของตัวอย่างส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ โดยส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่อัตราส่วนเถ้าแกลบต่อซีเมนต์ เท่ากับ 5:10 แสดงค่ากำลังรับแรงดึงแบบบราซิลสูงสุด ที่ 1.70 เมกะปาสกาล ที่ระยะเวลาการบ่มน้ำที่ 28 วัน ทั้งนี้ค่ากำลังรับแรงดึงแบบบราซิลจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มน้ำของตัวอย่าง



รูปที่ 5.6 ตัวอย่างแท่งซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิลเลียน



ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนของตัวอย่างแท่งซีเมนต์ผสมเถ้ากลบอายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ

Types	Sample no.	Curing Time (days)	L (mm)	D (mm)	L/D	W (g)	$\rho$ (g/cc)	$\sigma_B$ (MPa)
Cement (0:10)	CB-03-01	3	27.00	56.00	0.48	99.70	1.50	1.05
	CB-03-02		25.10	56.00	0.45	92.69	1.50	0.91
	CB-03-03		26.50	56.00	0.47	98.51	1.51	0.86
	CB-03-04		27.02	56.00	0.48	100.44	1.51	0.84
	CB-03-05		24.32	56.00	0.43	89.81	1.50	0.94
	CB-07-01	7	28.04	56.14	0.50	102.67	1.48	1.02
	CB-07-02		26.71	56.14	0.48	97.80	1.48	1.49
	CB-07-03		29.30	56.14	0.52	107.29	1.48	1.16
	CB-07-04		27.43	56.16	0.49	101.19	1.49	1.04
	CB-07-05		26.50	56.16	0.47	97.10	1.48	1.29
	CB-14-01	14	28.05	55.50	0.50	99.02	1.46	1.43
	CB-14-02		27.84	55.50	0.50	98.28	1.46	1.65
	CB-14-03		28.06	55.50	0.50	99.74	1.47	1.45
	CB-14-04		28.11	55.50	0.51	99.92	1.47	1.43
	CB-14-05		28.04	55.50	0.51	98.99	1.46	1.43
	CB-28-01	28	29.21	56.00	0.52	99.23	1.38	1.56
	CB-28-02		28.06	56.00	0.50	96.02	1.39	1.62
	CB-28-03		27.20	56.00	0.49	93.07	1.39	1.46
	CB-28-04		29.14	56.00	0.52	99.00	1.38	1.57
	CB-28-05		29.50	56.00	0.53	100.22	1.38	1.54

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนของตัวอย่างแท่งซีเมนต์ผสมเถ้ากลบอายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ (ต่อ)

Types	Sample no.	Curing Time (days)	L (mm)	D (mm)	L/D	W (g)	$\rho$ (g/cc)	$\sigma_B$ (MPa)
RHA (RHA:C= 1:10)	RB10-03-01	3	27.04	56.00	0.48	119.82	1.80	1.26
	RB10-03-02		27.80	56.00	0.50	123.87	1.81	1.02
	RB10-03-03		26.80	56.00	0.48	118.76	1.80	1.06
	RB10-03-04		27.50	56.00	0.49	121.86	1.80	1.03
	RB10-03-05		28.00	56.00	0.50	123.38	1.79	0.81
	RB10-07-01	7	27.04	55.30	0.49	109.05	1.68	1.28
	RB10-07-02		27.50	55.30	0.50	112.23	1.70	1.36
	RB10-07-03		26.44	55.30	0.48	106.63	1.68	1.09
	RB10-07-04		26.81	55.30	0.48	106.84	1.66	1.29
	RB10-07-05		27.20	55.30	0.49	109.04	1.67	1.16
	RB10-14-01	14	26.51	55.00	0.48	103.87	1.65	1.53
	RB10-14-02		26.40	55.00	0.48	100.93	1.61	1.42
	RB10-14-03		26.03	55.00	0.47	99.52	1.61	1.56
	RB10-14-04		27.14	55.00	0.49	104.40	1.62	1.50
	RB10-14-05		27.50	55.00	0.50	104.48	1.60	1.47
	RB10-28-01	28	26.02	56.00	0.46	101.21	1.58	1.64
	RB10-28-02		26.80	55.50	0.48	103.04	1.59	1.50
	RB10-28-03		27.40	55.50	0.49	106.00	1.60	1.47
	RB10-28-04		26.40	55.50	0.48	101.50	1.59	1.74
	RB10-28-05		26.10	55.50	0.47	100.34	1.59	1.65

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนของตัวอย่างแท่งซีเมนต์ผสมเถ้ากลบอายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ (ต่อ)

Types	Sample no.	Curing Time (days)	L (mm)	D (mm)	L/D	W (g)	$\rho$ (g/cc)	$\sigma_B$ (MPa)
RHA (RHA:C=3:10)	RB30-03-01	3	27.60	56.00	0.49	118.90	1.75	1.24
	RB30-03-02		27.70	56.00	0.49	120.02	1.76	1.03
	RB30-03-03		27.50	56.00	0.49	119.83	1.77	1.45
	RB30-03-04		27.70	56.00	0.49	120.70	1.77	1.09
	RB30-03-05		28.00	56.00	0.50	122.69	1.78	1.08
	RB30-07-01	7	27.10	55.40	0.49	110.34	1.69	1.48
	RB30-07-02		27.04	55.40	0.49	110.10	1.69	1.28
	RB30-07-03		27.81	55.40	0.50	112.56	1.68	1.45
	RB30-07-04		27.63	55.40	0.50	112.50	1.69	1.35
	RB30-07-05		27.50	55.40	0.50	112.63	1.70	1.46
	RB30-14-01	14	28.50	56.80	0.50	119.10	1.65	1.57
	RB30-14-02		28.04	57.00	0.49	118.00	1.65	1.60
	RB30-14-03		27.70	56.00	0.49	112.51	1.65	1.54
	RB30-14-04		27.72	56.50	0.49	114.62	1.65	1.53
	RB30-14-05		27.40	56.50	0.48	113.98	1.66	1.54
	RB30-28-01	28	25.80	54.50	0.47	97.45	1.62	1.81
	RB30-28-02		27.50	55.60	0.49	108.11	1.62	1.56
	RB30-28-03		26.60	56.00	0.48	106.74	1.63	1.71
	RB30-28-04		26.50	56.00	0.47	105.03	1.61	1.61
	RB30-28-05		26.10	56.00	0.47	104.09	1.62	1.52

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนของตัวอย่างแท่งซีเมนต์ผสมเถ้ากลบอายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ (ต่อ)

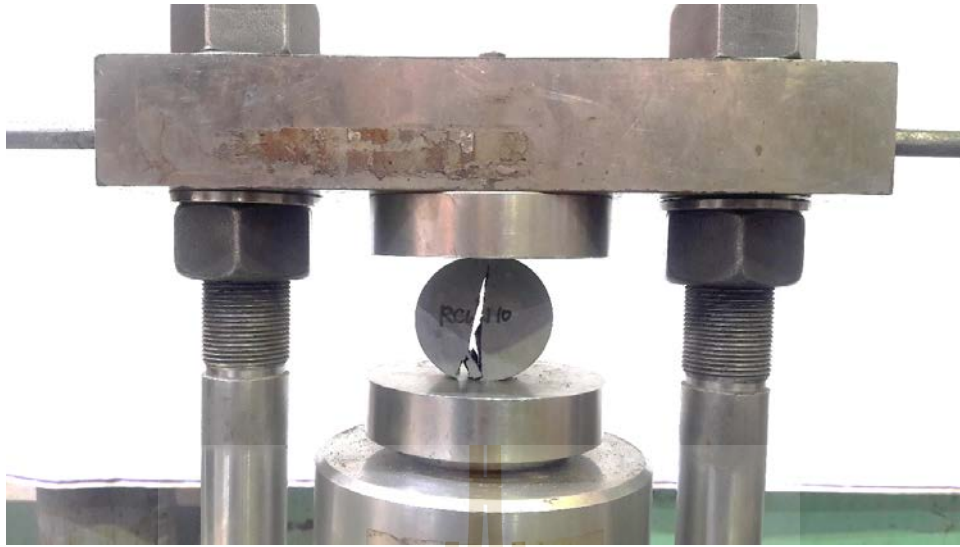
Types	Sample no.	Curing Time (days)	L (mm)	D (mm)	L/D	W (g)	$\rho$ (g/cc)	$\sigma_B$ (MPa)
RHA (RHA:C=5:10)	RB50-03-01	3	25.80	56.00	0.46	111.78	1.76	1.32
	RB50-03-02		26.30	56.00	0.47	113.95	1.76	1.08
	RB50-03-03		27.50	56.00	0.49	119.15	1.76	1.24
	RB50-03-04		26.10	56.00	0.47	112.44	1.75	1.31
	RB50-03-05		27.80	56.00	0.50	121.82	1.78	1.23
	RB50-07-01	7	27.04	56.00	0.48	112.50	1.69	1.47
	RB50-07-02		26.12	56.00	0.46	108.67	1.69	1.53
	RB50-07-03		27.80	56.00	0.50	114.97	1.68	1.53
	RB50-07-04		27.50	56.00	0.49	114.41	1.69	1.45
	RB50-07-05		28.32	56.00	0.50	117.82	1.69	1.42
	RB50-14-01	14	27.31	54.40	0.50	98.34	1.55	1.71
	RB50-14-02		26.14	56.30	0.46	101.47	1.56	1.74
	RB50-14-03		27.30	54.40	0.50	98.94	1.56	1.71
	RB50-14-04		27.05	56.00	0.48	104.55	1.57	1.58
	RB50-14-05		27.10	56.00	0.48	103.41	1.55	1.68
	RB50-28-01	28	27.00	54.70	0.49	98.30	1.55	1.72
	RB50-28-02		28.03	56.30	0.50	107.41	1.54	1.62
	RB50-28-03		27.40	56.30	0.49	105.67	1.55	1.65
	RB50-28-04		26.07	56.30	0.46	99.90	1.54	1.74
	RB50-28-05		25.70	56.30	0.46	97.84	1.53	1.76

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนของตัวอย่างแท่งซีเมนต์ผสมเถ้ากลบอายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ (ต่อ)

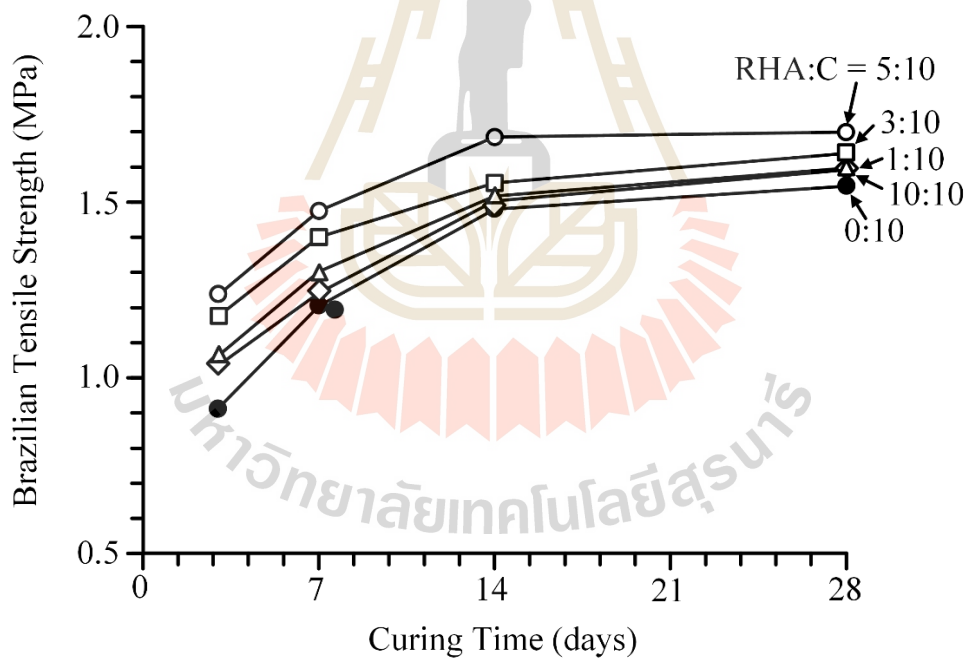
Types	Sample no.	Curing Time (days)	L (mm)	D (mm)	L/D	W (g)	$\rho$ (g/cc)	$\sigma_B$ (MPa)
RHA (RHA:C= 10:10)	RB100-03-01	3	29.50	56.00	0.53	123.46	1.70	0.96
	RB100-03-02		29.20	56.00	0.52	122.20	1.70	1.07
	RB100-03-03		29.80	56.00	0.53	124.71	1.70	0.86
	RB100-03-04		29.50	56.40	0.52	125.96	1.71	1.05
	RB100-03-05		27.50	56.40	0.49	116.74	1.70	1.33
	RB100-07-01	7	28.60	55.80	0.51	116.04	1.66	1.30
	RB100-07-02		28.21	55.80	0.51	114.46	1.66	1.31
	RB100-07-03		28.80	55.80	0.52	116.15	1.65	1.19
	RB100-07-04		29.14	55.80	0.52	118.94	1.67	1.38
	RB100-07-05		28.50	55.80	0.51	115.64	1.66	1.30
	RB100-14-01	14	26.52	55.70	0.48	100.11	1.55	1.62
	RB100-14-02		27.42	56.30	0.49	105.75	1.55	1.55
	RB100-14-03		26.04	55.70	0.47	98.93	1.56	1.54
	RB100-14-04		29.30	56.30	0.52	113.00	1.55	1.45
	RB100-14-05		29.03	56.30	0.52	111.24	1.54	1.46
	RB100-28-01	28	28.50	56.60	0.50	110.37	1.54	1.48
	RB100-28-02		27.60	54.00	0.51	97.29	1.54	1.60
	RB100-28-03		26.80	54.00	0.50	95.09	1.55	1.76
	RB100-28-04		27.90	54.00	0.52	98.35	1.54	1.48
	RB100-28-05		28.10	54.00	0.52	99.06	1.54	1.68

ตารางที่ 5.4 สรุปผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซึลของตัวอย่างส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกล

Types	Curing Time (days)	Number of Samples	$\sigma_B$ (MPa)
Cement (0:10)	3	5	$0.92 \pm 0.07$
	7	5	$1.20 \pm 0.17$
	14	5	$1.48 \pm 0.09$
	28	5	$1.55 \pm 0.05$
RHA (RHA:C=1:10)	3	5	$1.04 \pm 0.14$
	7	5	$1.24 \pm 0.10$
	14	5	$1.50 \pm 0.05$
	28	5	$1.60 \pm 0.10$
RHA (RHA:C=3:10)	3	5	$1.18 \pm 0.15$
	7	5	$1.40 \pm 0.08$
	14	5	$1.56 \pm 0.03$
	28	5	$1.64 \pm 0.11$
RHA (RHA:C=5:10)	3	5	$1.24 \pm 0.09$
	7	5	$1.48 \pm 0.04$
	14	5	$1.68 \pm 0.06$
	28	5	$1.70 \pm 0.05$
RHA (RHA:C=10:10)	3	5	$1.05 \pm 0.16$
	7	5	$1.30 \pm 0.06$
	14	5	$1.52 \pm 0.06$
	28	5	$1.60 \pm 0.11$



รูปที่ 5.7 โครงกวดทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิลขณะติดตั้งและทำการทดสอบ

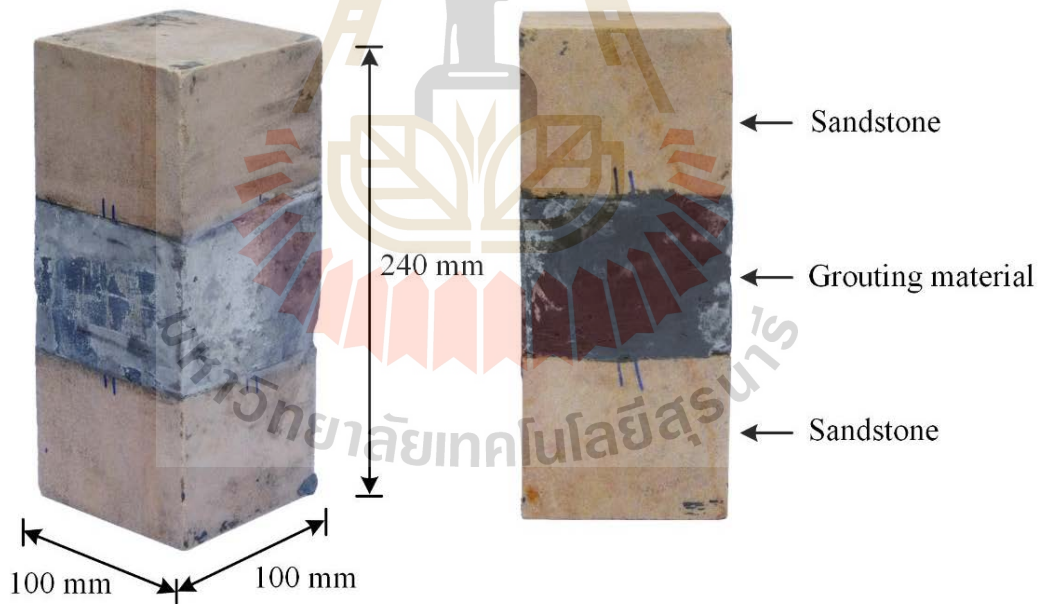


รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงดึงแบบบราซิลกับระยะเวลาการบ่มน้ำของตัวอย่าง ส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ

### 5.3 การทดสอบกำลังเฉือนโดยตรง

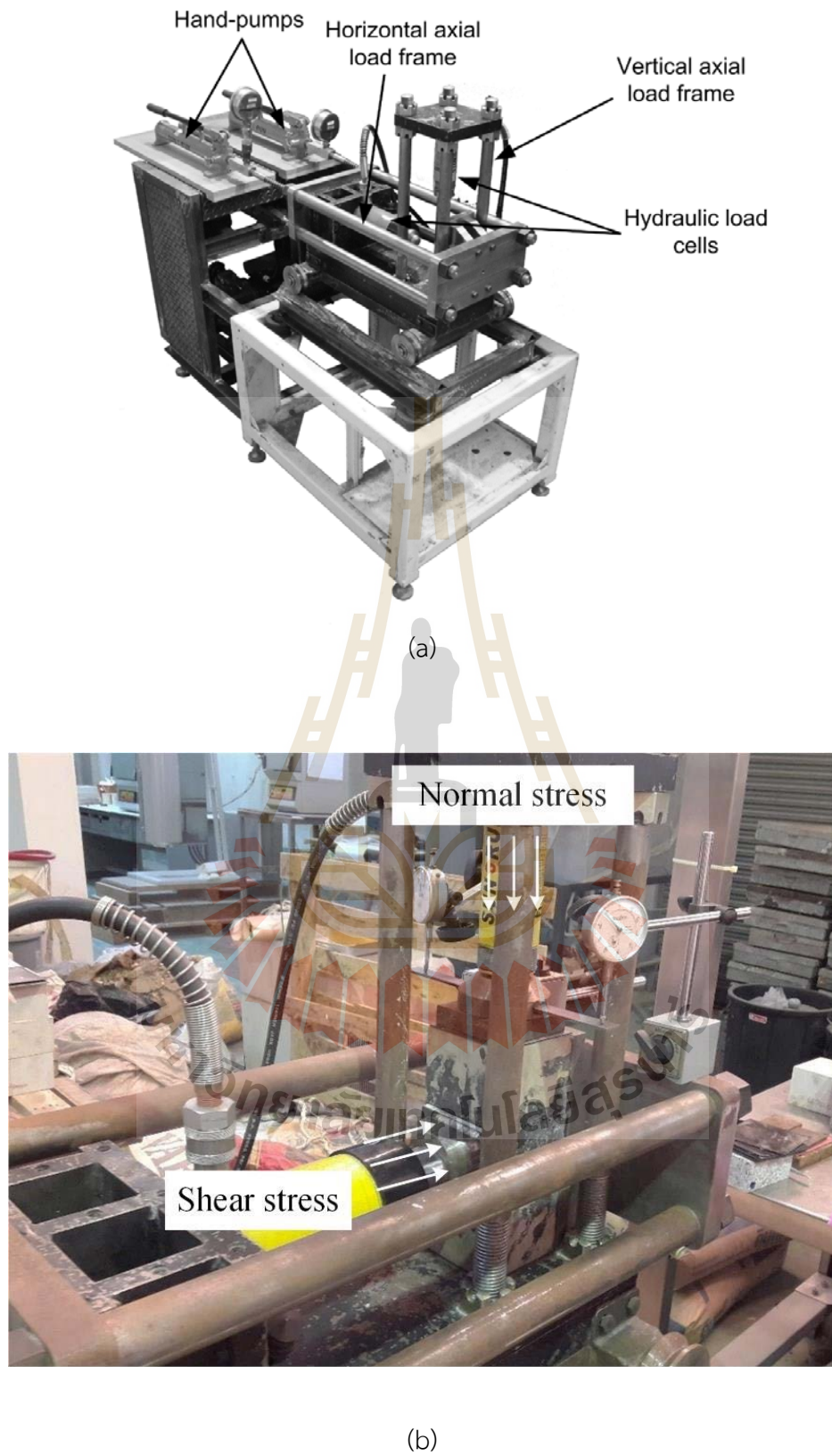
การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง (Direct shear strength test) มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบหาลักษณะแรงเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างผิวของตัวอย่างแท่งซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบกับผิวของรอยแตกของหิน (Fracture shear strength) วิธีการทดสอบและการคำนวณผลเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D5607-16 และการแนะนำของ ISRM (Brown, 1981)

ส่วนผสมได้ถูกเตรียมตามสัดส่วนเดียวกับการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว โดยส่วนผสมจะถูกเตรียมให้อยู่ระหว่างตัวอย่างหินทรายที่มีขนาด 100x100x160 มิลลิเมตรที่ถูกทำให้มีรอยแตกกึ่งกลาง ตัวอย่างการทดสอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.9 แล้วทำการบ่มตัวอย่างด้วยการนำไปแช่ในน้ำเป็นเวลา 7 วัน ก่อนนำมาทดสอบ ตัวอย่างในการทดสอบได้ใช้ความเค้นในแนวตั้งฉาก 3 ระดับตั้งแต่ 0.5, 1.0 และ 1.5 เมกะปาสกาล ด้วยเครื่องมือทดสอบกำลังเฉือนตาม Boonyord (2017) และ Boonyord and Tepnarong (2018) สามารถให้กำลังสูงสุด 100 กิโลนิวตัน รูปที่ 5.10 แสดงการจัดเตรียมอุปกรณ์ทดสอบ ซึ่งจะดำเนินการจนกระทั่งตัวอย่างที่ใช้ทดสอบเกิดการวิบัติ



รูปที่ 5.9 ตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังเฉือนโดยตรงของส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ





รูปที่ 5.10 เครื่องมือทดสอบกำลังเฉือน (a) และรูปขณะทดสอบ (b) (Boonyord and Tepnarong, 2018)

ระหว่างการทดสอบจะมีการบันทึกค่ากำลังเฉือนและปริมาณการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนอย่างต่อเนื่อง พร้อมทั้งสังเกตลักษณะการวิบัติของตัวอย่าง ผลการทดสอบได้นำเสนอในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นในแนวตั้งและแนวเฉือนซึ่งเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นจากสมการที่ ดังนี้

$$\tau = F/2A \quad (5.3)$$

$$\sigma_n = P/A \quad (5.4)$$

โดยที่  $\tau$  คือค่าความเค้นเฉือน (Shear stress)  $F$  คือ แรงเฉือน (Sheared force)  $A$  คือพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง  $\sigma_n$  คือความเค้นในแนวตั้งฉาก (Normal stress) และ  $P$  คือแรงกดในแนวแกน (Normal load)

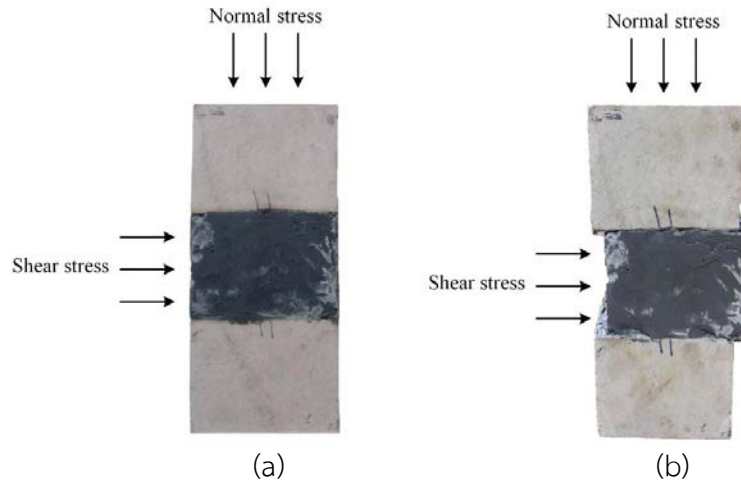
เมื่อนำกฎการแตกของ Coulomb มาประยุกต์ใช้ สามารถแสดงผลการทดสอบในเชิงเกณฑ์การแตกระหว่างผิวของส่วนผสมและผิวรอยแตกในหินได้ดังสมการ

$$\tau = c_p + \sigma \tan \phi_p \quad (5.5)$$

โดยที่  $\tau$  คือค่าความเค้นเฉือน  $c_p$  คือความเค้นยึดติด (Cohesion)  $\sigma$  คือความเค้นในแนวตั้งฉาก และ  $\phi_p$  คือค่ามุมเสียดทาน

ตัวอย่างทั้งก่อนและหลังการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 5.11 ตารางที่ 5.5 แสดงผลการทดสอบกำลังเฉือนของส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ ทั้งนี้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉือนกับระยะการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนของส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบในอัตราส่วนต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.12 ถึง 5.16 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉือนในฟังก์ชันของความเค้นในแนวตั้งฉากแสดงไว้ในรูปที่ 5.17

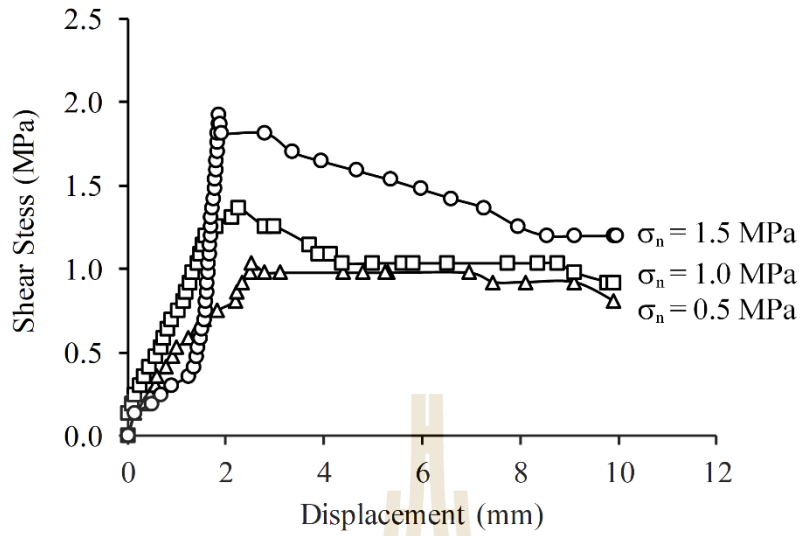
การคำนวณค่าความเค้นเฉือนสุดยอด (Peak shear strength) ตามความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างความเค้นเฉือนและความเค้นตั้งฉาก ตามเกณฑ์ของ Coulomb ได้มุมเสียดทานสำหรับความเค้นเฉือนสุดยอด (Peak friction angle) ตารางที่ 5.6 แสดงผลการคำนวณพารามิเตอร์ความเค้นเฉือนตามกฎของ Coulomb



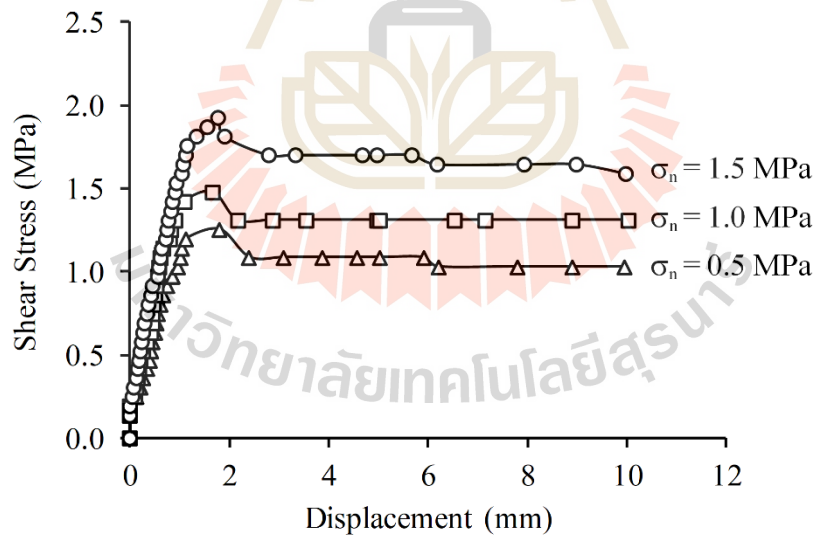
รูปที่ 5.11 ตัวอย่างสำหรับห้รับทดสอบกำลังเฉือนก่อน (a) และหลังการทดสอบ (b)

ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบกำลังเฉือนโดยตรงของส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบอายุ 7 วัน

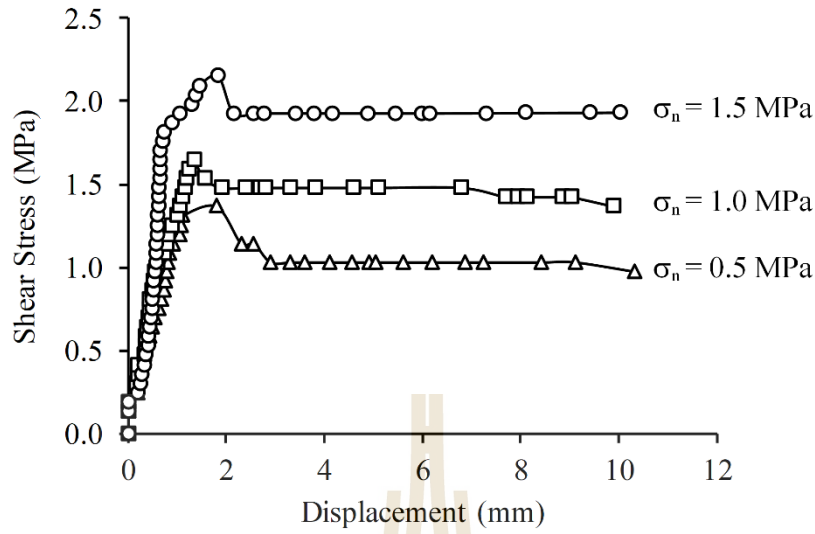
Specimen no.	Width (mm)	Length (mm)	Height (mm)	Density (g/cc)	Grouting Material Thickness (mm)	RHA:C	Normal Stress (MPa)	Peak Shear Strength (MPa)
PW-DS-01	117.2	101.2	162.3	2.28	60.5	0:10	0.5	1.03
PW-DS-02	113.3	107.2	165.4	2.34	60.2	0:10	1.0	1.37
PW-DS-03	103.4	111.5	166.2	2.30	60.5	0:10	1.5	1.92
PW-DS-04	110.5	115.6	160.4	2.28	60.3	1:10	0.5	1.25
PW-DS-05	111.2	107.2	161.2	2.27	60.2	1:10	1.0	1.48
PW-DS-06	113.2	106.6	165.2	2.32	60.4	1:10	1.5	1.93
PW-DS-07	109.4	109.1	166.6	2.29	60.4	3:10	0.5	1.37
PW-DS-08	102.5	113.1	162.1	2.25	60.5	3:10	1.0	1.65
PW-DS-09	118.2	102.4	167.8	2.39	60.5	3:10	1.5	2.15
PW-DS-10	115.1	107.1	165.5	2.31	60.2	5:10	0.5	1.53
PW-DS-11	117.0	107.3	165.3	2.41	60.2	5:10	1.0	1.81
PW-DS-12	106.0	113.2	164.2	2.33	60.4	5:10	1.5	2.37
PW-DS-13	107.3	115.4	160.0	2.30	60.4	10:10	0.5	1.31
PW-DS-14	115.1	117.3	162.2	2.28	60.0	10:10	1.0	1.59
PW-DS-15	104.2	111.1	163.2	2.27	60.1	10:10	1.5	2.09



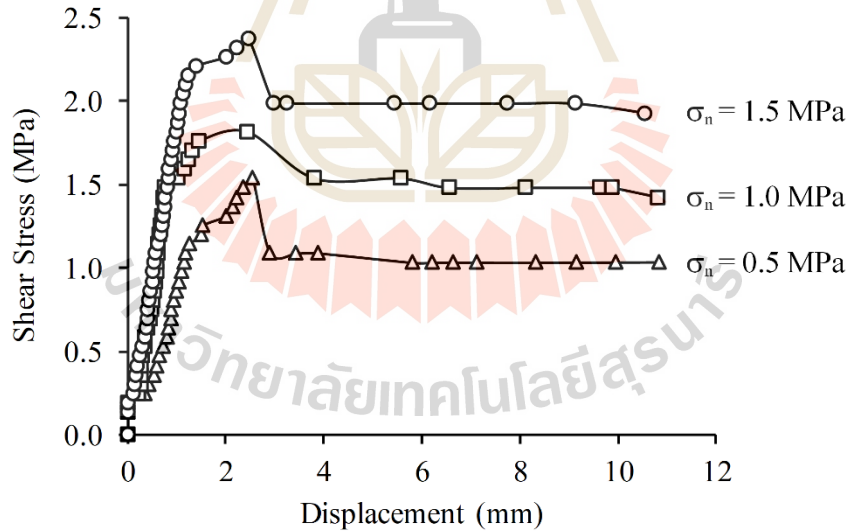
รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวแนวเฉือนของตัวอย่างซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่อัตราส่วน RHA:C เท่ากับ 0:10



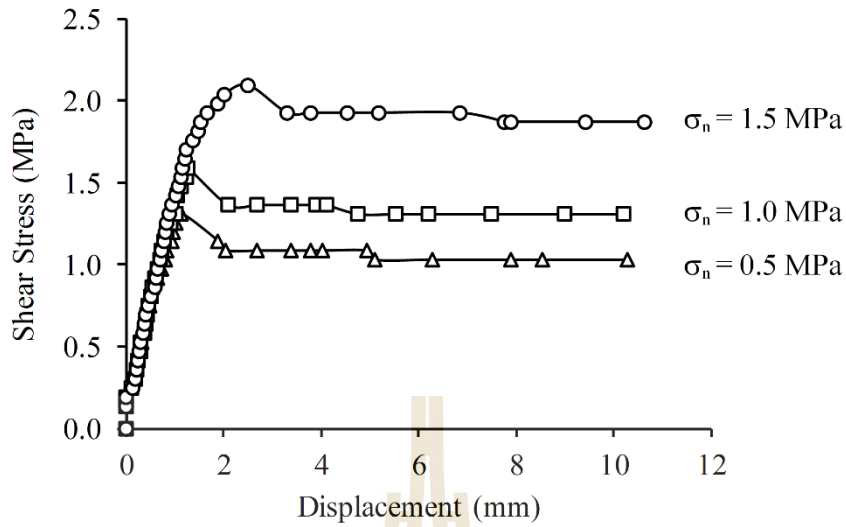
รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวแนวเฉือนของตัวอย่างซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่อัตราส่วน RHA:C เท่ากับ 1:10



รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวแนวเฉือนของตัวอย่างซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่อัตราส่วน RHA:C เท่ากับ 3:10



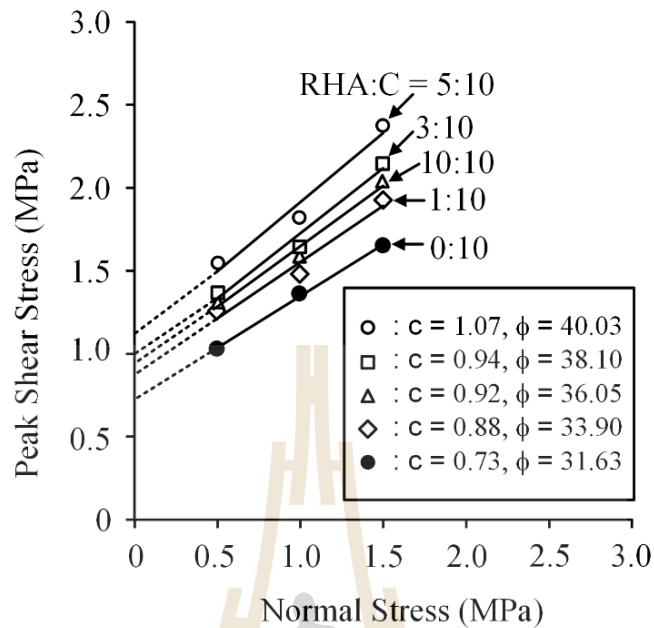
รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวแนวเฉือนของตัวอย่างส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่อัตราส่วน RHA:C เท่ากับ 5:10



รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวแนวเฉือนของตัวอย่าง ส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่อัตราส่วน RHA:C เท่ากับ 10:10

ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบกำลังเฉือนเมื่อเทียบกับกฎการแตกของ Coulomb

Types	$c_p$ (MPa)	$\tan \phi_p$	$\phi_p$ (degrees)	$R^2$
Cement = 0:10	0.73	0.62	31.63	0.99
RHA:C = 1:10	0.88	0.67	33.90	0.96
RHA:C = 3:10	0.94	0.78	38.10	0.97
RHA:C = 5:10	1.07	0.84	40.03	0.96
RHA:C = 10:10	0.92	0.73	36.05	0.98



รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉือนในฟังก์ชันของความเค้นในแนวตั้งฉาก

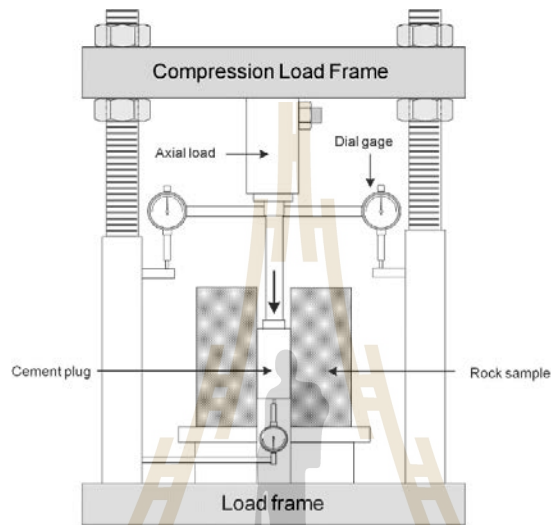
#### 5.4 การทดสอบกำลังยึดติดสูงสุดแบบ Push-out

การทดสอบกำลังยึดติดสูงสุดแบบ Push-out มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุด หรือค่ากำลังแรงยึดหน่วง (bond strength,  $\tau_{av}$ ) (Tepnarong and Deethouw, 2014) ที่เกิดขึ้นระหว่างหินตัวอย่างและซีเมนต์ผสมเถ้าแกลที่ใช้อำลองการอุดในหลุมเจาะด้วยซีเมนต์ในตัวอย่างหินทรายที่ใช้ในการทดสอบเป็นบล็อกสี่เหลี่ยมขนาด (กว้างxยาวxสูง) 110x110x130 มิลลิเมตร และได้ทำการเจาะรูตรงกลางของตัวอย่างหินทรายโดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร สำหรับใส่วัสดุส่วนผสมเพื่อทดสอบแล้วทำการบ่มตัวอย่างด้วยการนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 3, 7, 14, และ 28 วัน ตัวอย่างในการทดสอบถูกทดสอบที่อัตรา 0.1-0.5 เมกะปาสกาลต่อวินาที จะดำเนินการจนกระทั่งตัวอย่างที่ใช้ทดสอบเกิดการวิบัติ ภาพจำลองการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 5.18 และแสดงการจัดเตรียมอุปกรณ์ทดสอบในรูปที่ 5.19

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

$$\tau_{av} = F/\pi D_i L_c \quad (5.6)$$

โดยที่  $F$  คือ แรงกดสูงสุดตามแนวแกนที่จุดวิบัติ  $D_c$  คือ เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของแท่งซีเมนต์ที่ใช้จุด และ  $L_c$  คือความยาวของแท่งซีเมนต์ และต้องอยู่สมมติฐานมีการกระจายตัวของแรงเฉือนอย่างคงที่ (Uniform shear stress) และสรุปผลการทดสอบดังตารางที่ 5.8 ผลการทดสอบแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังยึดติดกับระยะเวลาในการบ่มน้ำของตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 5.20 และแสดงรูปตัวอย่างหลังการทดสอบดังรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.18 แบบแผนภาพจำลองเครื่องมือทดสอบกำลังยึดติดแบบ Push-out (Stormont and Deamen, 1983)



รูปที่ 5.19 โครงกดทดสอบกำลังรับแรงยึดติดแบบ Push-out



ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบแท่งตัวอย่างซีเมนต์ผสมเถ้ากลบด้วยการทดสอบกำลังรับกำลังยึดติด  
สูงสุดแบบ Push-out

Specimen no.	RHA:C	Density (g/cc)	Curing Time (days)	$L_c$ (mm)	$D_i$ (mm)	$L_c/D_i$	$\tau_{av}$ (MPa)
PW-CP-03-01	0:10	2.35	3	35.50	33.57	1.06	0.80
PW-CP-03-02	0:10	2.34	3	35.40	34.00	1.04	0.79
PW-CP-03-03	0:10	2.36	3	35.50	35.68	0.99	0.88
PW-CP-07-01	0:10	2.40	7	35.09	34.15	1.03	0.93
PW-CP-07-02	0:10	2.35	7	35.09	33.59	1.04	0.88
PW-CP-07-03	0:10	2.33	7	35.36	34.84	1.01	0.90
PW-CP-14-01	0:10	2.33	14	35.74	33.64	1.06	1.26
PW-CP-14-02	0:10	2.34	14	35.74	33.95	1.05	1.18
PW-CP-14-03	0:10	2.35	14	35.11	33.04	1.06	1.30
PW-CP-28-01	0:10	2.39	28	35.16	33.45	1.05	1.56
PW-CP-28-02	0:10	2.34	28	35.76	33.55	1.07	1.59
PW-CP-28-03	0:10	2.36	28	35.11	33.81	1.04	1.61
PW-RP-10-03-01	1:10	2.38	3	35.24	34.08	1.03	0.86
PW-RP-10-03-02	1:10	2.40	3	35.04	34.95	1.00	0.91
PW-RP-10-03-03	1:10	2.44	3	35.78	34.02	1.05	0.85
PW-RP-10-07-01	1:10	2.44	7	37.58	35.11	1.07	0.84
PW-RP-10-07-02	1:10	2.45	7	36.75	34.71	1.06	1.06
PW-RP-10-07-03	1:10	2.41	7	36.47	34.36	1.06	1.08
PW-RP-10-14-01	1:10	2.40	14	37.14	35.43	1.05	1.27
PW-RP-10-14-02	1:10	2.44	14	37.40	35.25	1.06	1.33
PW-RP-10-14-03	1:10	2.45	14	37.80	35.51	1.06	1.42
PW-RP-10-28-01	1:10	2.45	28	38.14	35.71	1.07	1.64
PW-RP-10-28-02	1:10	2.39	28	38.15	35.08	1.09	1.67
PW-RP-10-28-03	1:10	2.40	28	38.70	35.31	1.10	1.64

$D_i$  = Hole Diameter and  $L_c$  = Cement Plug Length

ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบแท่งตัวอย่างซีเมนต์ผสมเถ้ากลบด้วยการทดสอบกำลังรับกำลังยึดติด  
สูงสุดแบบ Push-out (ต่อ)

Specimen no.	RHA:C	Density (g/cc)	Curing Time (days)	$L_c$ (mm)	$D_i$ (mm)	$L_c/D_i$	$\tau_{av}$ (MPa)
PW-RP-30-03-01	3:10	2.45	3	37.25	35.11	1.06	1.03
PW-RP-30-03-02	3:10	2.46	3	37.28	35.34	1.05	1.09
PW-RP-30-03-03	3:10	2.44	3	37.84	35.74	1.06	1.00
PW-RP-30-07-01	3:10	2.41	7	37.20	35.14	1.06	1.52
PW-RP-30-07-02	3:10	2.12	7	37.19	35.09	1.06	1.59
PW-RP-30-07-03	3:10	2.44	7	37.45	34.90	1.07	1.58
PW-RP-30-14-01	3:10	2.44	14	37.86	35.56	1.07	1.77
PW-RP-30-14-02	3:10	2.44	14	38.14	35.74	1.07	1.81
PW-RP-30-14-03	3:10	2.40	14	38.11	35.36	1.08	1.77
PW-RP-30-28-01	3:10	2.40	28	38.43	35.47	1.08	1.98
PW-RP-30-28-02	3:10	2.41	28	38.62	35.18	1.10	2.05
PW-RP-30-28-03	3:10	2.46	28	38.26	35.52	1.08	2.11
PW-RP-50-03-01	5:10	2.46	3	38.14	35.75	1.07	1.11
PW-RP-50-03-02	5:10	2.44	3	38.08	35.45	1.07	1.12
PW-RP-50-03-03	5:10	2.44	3	38.85	35.91	1.08	1.14
PW-RP-50-07-01	5:10	2.44	7	37.84	35.08	1.08	2.16
PW-RP-50-07-02	5:10	2.45	7	37.57	35.05	1.07	2.18
PW-RP-50-07-03	5:10	2.44	7	37.65	35.19	1.07	2.23
PW-RP-50-14-01	5:10	2.44	14	37.71	35.14	1.07	2.28
PW-RP-50-14-02	5:10	2.45	14	38.54	35.54	1.08	2.21
PW-RP-50-14-03	5:10	2.46	14	38.11	35.11	1.09	2.26
PW-RP-50-28-01	5:10	2.44	28	38.86	35.57	1.09	2.36
PW-RP-50-28-02	5:10	2.41	28	38.79	35.32	1.10	2.44
PW-RP-50-28-03	5:10	2.41	28	37.89	35.74	1.06	2.64

$D_i$  = Hole Diameter and  $L_c$  = Cement Plug Length

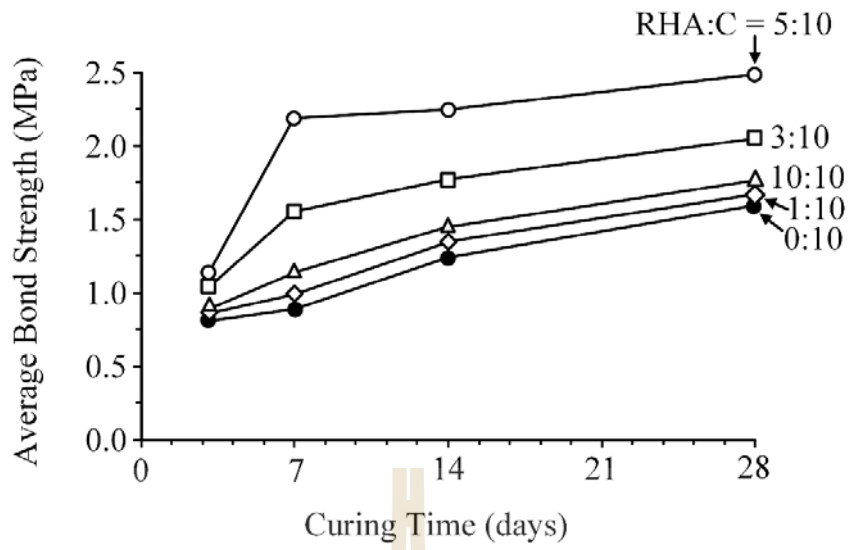
ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบแท่งตัวอย่างซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบด้วยการทดสอบกำลังรับกำลังยึดติด  
สูงสุดแบบ Push-out (ต่อ)

Specimen no.	RHA:C	Density (g/cc)	Curing Time (days)	$L_c$ (mm)	$D_i$ (mm)	$L_c/D_i$	$\tau_{av}$ (MPa)
PW-RP-100-03-01	10:10	2.44	3	37.81	35.84	1.05	0.94
PW-RP-100-03-02	10:10	2.44	3	38.28	35.96	1.06	0.92
PW-RP-100-03-03	10:10	2.44	3	39.42	35.94	1.10	0.84
PW-RP-100-07-01	10:10	2.46	7	39.12	35.48	1.10	1.20
PW-RP-100-07-02	10:10	2.41	7	36.52	34.81	1.05	1.13
PW-RP-100-07-03	10:10	2.42	7	36.14	34.70	1.04	1.08
PW-RP-100-14-01	10:10	2.46	14	38.14	35.43	1.08	1.41
PW-RP-100-14-02	10:10	2.44	14	37.82	35.10	1.08	1.38
PW-RP-100-14-03	10:10	2.44	14	37.86	35.36	1.07	1.55
PW-RP-100-28-01	10:10	2.44	28	38.71	35.44	1.09	1.74
PW-RP-100-28-02	10:10	2.45	28	38.31	35.52	1.08	1.75
PW-RP-100-28-03	10:10	2.44	28	38.48	35.00	1.10	1.77

$D_i$  = Hole Diameter and  $L_c$  = Cement Plug Length

ตารางที่ 5.8 สรุปผลการทดสอบกำลังยึดติดส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ

Types	Curing Time (days)	Number of Samples	$\tau_{av}$ (MPa)
Cement (0:10)	3	3	$0.82 \pm 0.04$
	7	3	$0.90 \pm 0.02$
	14	3	$1.25 \pm 0.05$
	28	3	$1.59 \pm 0.02$
RHA (RHA:C=1:10)	3	3	$0.87 \pm 0.03$
	7	3	$0.99 \pm 0.11$
	14	3	$1.34 \pm 0.06$
	28	3	$1.65 \pm 0.01$
RHA (RHA:C=3:10)	3	3	$1.04 \pm 0.04$
	7	3	$1.56 \pm 0.03$
	14	3	$1.78 \pm 0.02$
	28	3	$2.05 \pm 0.05$
RHA (RHA:C=5:10)	3	3	$1.12 \pm 0.01$
	7	3	$2.19 \pm 0.03$
	14	3	$2.25 \pm 0.03$
	28	3	$2.48 \pm 0.12$
RHA (RHA:C=10:10)	3	3	$0.90 \pm 0.04$
	7	3	$1.14 \pm 0.05$
	14	3	$1.45 \pm 0.07$
	28	3	$1.75 \pm 0.01$



รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังยึดติดกับระยะเวลาการป้อนน้ำของส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ



รูปที่ 5.21 ภาพตัดขวางตัวอย่างหลังการทดสอบของตัวอย่างหินทราย

## บทที่ 6

### การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของส่วนผสม

เนื้อหาในบทนี้อธิบายวิธีการและการทดสอบความซึมผ่านในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ตัวอย่างส่วนผสมระหว่างแก้วแกลบกับซีเมนต์ที่สัดส่วนต่างกัน และเทียบกับผลการทดสอบที่ได้จากส่วนผสมซีเมนต์ที่ไม่ผสมแก้วแกลบที่ใช้เป็นวัสดุทั่วไปในการอุดรอยแตก เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงกลศาสตร์ของส่วนผสม ค่าความซึมผ่านของส่วนผสมที่ใช้ทำวัสดุอุดเป็นปัจจัยสำคัญในการแสดงความสามารถการลดความซึมผ่านของน้ำในรอยแตกของหิน

การทดสอบความซึมผ่านแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยประกอบด้วย 1) การทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสม 2) การทดสอบความซึมผ่านของรอยแตกในหิน และ 3) การทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมในรอยแตกตัวอย่างหิน โดยการทดสอบใช้ตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหารที่มีลักษณะเหมือนกัน แต่มีการทดสอบรอยแตกที่มีระยะเปิดแยกต่างกัน และภายใต้ความเค้นกดบนรอยแตกที่ต่างกัน

#### 6.1 การทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสม

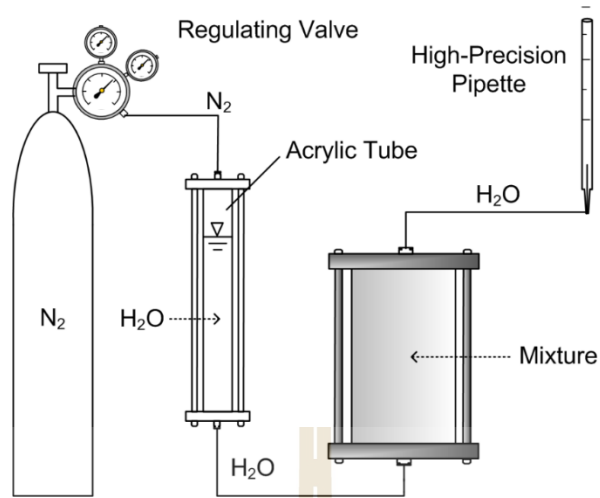
การทดสอบค่าความซึมผ่านของวัสดุตัวอย่างผสมซีเมนต์มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อใช้อธิบายลักษณะของความซึมผ่านเชิงกายภาพ (Intrinsic permeability,  $k$ ) โดยอัดแรงดันน้ำในการวัดอัตราการไหลของน้ำในแบบหล่อซีเมนต์ผสม ทำการจดบันทึกค่าอัตราการไหลเพื่อนำไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน ซึ่งแสดงการติดตั้งเครื่องมือทดสอบความซึมผ่านของซีเมนต์ดังรูปที่ 6.1 การไหลของน้ำจะไปในทิศทางตามยาวตามระบบทดสอบที่อธิบายโดยกฎของ Darcy's ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (Coefficient of permeability,  $K$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการ (Indraratna and Ranjith, 2001)

$$K = Q/Ai \quad (6.1)$$

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

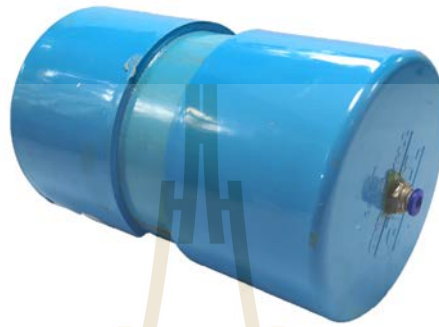
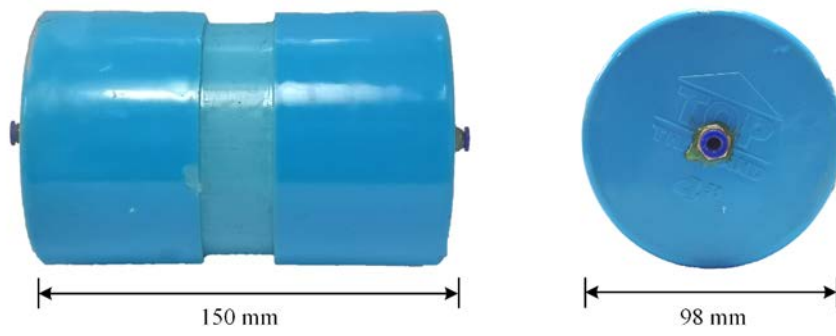
$$k = K\mu/\gamma_w \quad (6.2)$$

โดยที่  $\mu$  คือ ความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิ  $25^\circ C$  ( $Pa \cdot s$ ) และ  $\gamma_w$  คือความหนาแน่นโดยมวลของน้ำ



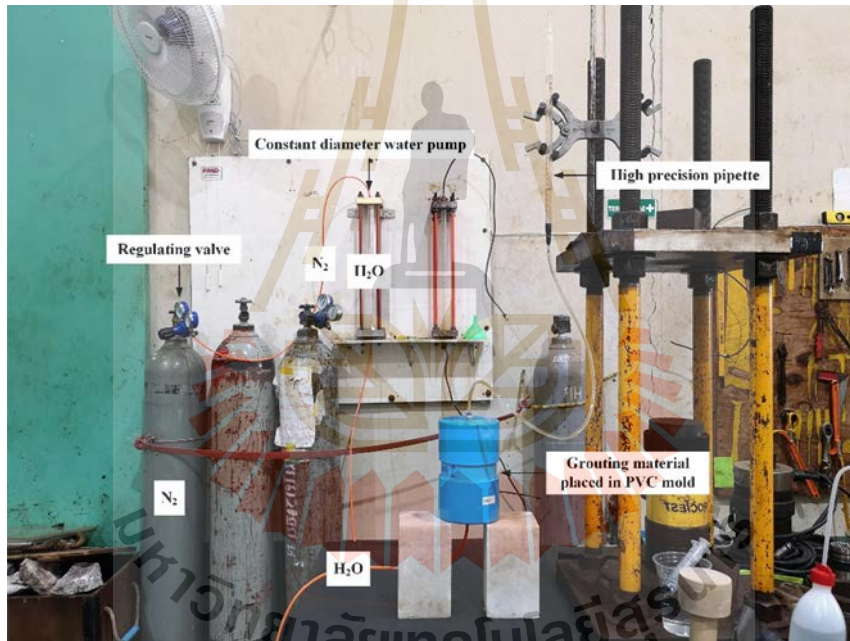
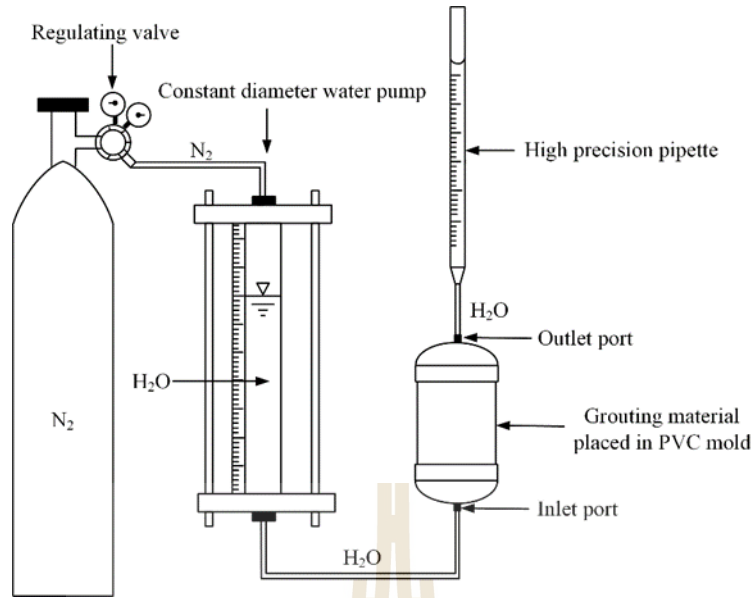
รูปที่ 6.1 แผนภูมิชุดอุปกรณ์ทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (Chiangmai and Tepnarong, 2016)

ตัวอย่างส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบนี้ประกอบด้วยเถ้าแกลบลอยและซีเมนต์ ที่อัตราส่วนระหว่างเถ้าแกลบและซีเมนต์ (RHA:C) เท่ากับ 1:10, 3:10, 5:10 และ 10:10 โดยน้ำหนัก ด้วยปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ (W:C) เท่ากับ 1:1 และเปรียบเทียบกับส่วนผสมซีเมนต์ที่ใช้สำหรับอุดรอยแตก 0:10 โดยน้ำหนัก ด้วยปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ (W:C) เท่ากับ 1:1 วิธีการผสมได้ทำตามมาตรฐาน ASTM (C938-16) ส่วนผสมหลังจากจัดเตรียมแล้วได้ถูกหล่อลงในท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 98 มิลลิเมตร สูง 150 มิลลิเมตร และปิดปลายบนล่างของแบบหล่อด้วยฝาท่อ PVC ที่ติดตั้งหมุดยึดท่อแรงดันสูง เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.25 นิ้วไว้ตรงกึ่งกลางฝา (รูปที่ 6.2) ในการทดสอบนี้จะมีการหาค่าความซึมผ่านในช่วงเวลาของการบ่มที่ต่างกัน คือ 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน ก่อนการทดสอบปลายด้านล่างจะต่อเข้ากับปั้มน้ำ และปลายด้านบนจะต่อเข้ากับหลอดวัดปริมาตรน้ำปิเปตต์ดังแสดงในรูปที่ 6.3 ในขณะทดสอบ จะทำการอัดน้ำที่อยู่ในปั้มน้ำเข้าไปในแบบหล่อ PVC ด้วยความดันคงที่เท่ากับ 10 psi แรงดันนี้ได้มาจากความดันของก๊าซไนโตรเจน ซึ่งสามารถปรับและควบคุมแรงดันได้โดยใช้วาล์วปรับความดันที่ส่วนบนของถังก๊าซไนโตรเจน ก่อนทำการตรวจวัดจะปล่อยให้แรงดันน้ำไหลผ่านตัวอย่างส่วนผสมเพื่อไล่ฟองอากาศออกให้หมดเสียก่อน การตรวจวัดความซึมผ่านสามารถทำได้โดยจับเวลาการไหลของน้ำในเชิงปริมาตรที่หลอดวัดปริมาตรน้ำปิเปตต์และความซึมผ่านของตัวอย่างส่วนผสมสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6.1 และสมการที่ 6.2



รูปที่ 6.2 แบบหล่อตัวอย่าง PVC เส้นผ่านศูนย์กลาง 98 มิลลิเมตร พร้อมฝาปิดที่ติดตั้งหมุดยึดท่อแรงดันสูง สำหรับทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสม



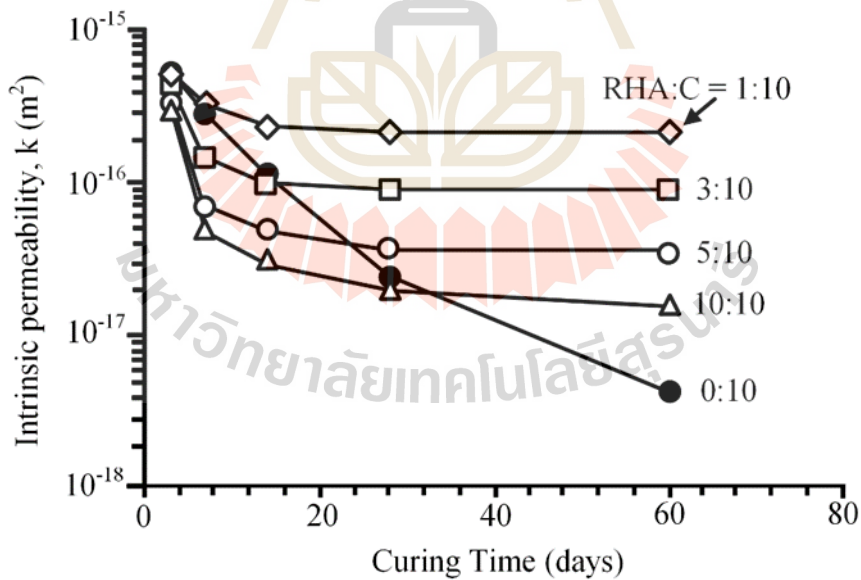


รูปที่ 6.3 แบบจำลองการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบและการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสม

ผลการทดสอบความซึมของส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ ที่ระยะเวลาบ่มเท่ากับ 3, 7, 14, 28, และ 60 วัน ได้สรุปไว้ในตารางที่ 6.1 และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความซึมผ่านของส่วนผสมกับระยะเวลาบ่มน้ำไว้ในรูปที่ 6.4

ตารางที่ 6.1 ผลการทดสอบค่าความซึมผ่านของส่วนผสมที่ระยะเวลาบ่ม 3, 7, 14, 28, และ 60 วัน

Curing Time (days)	Intrinsic Permeability ( $\times 10^{-18} \text{ m}^2$ )				
	Cement	RHA:C			
		0:10	1:10	3:10	5:10
3	511.99	482.00	407.00	321.80	295.16
7	271.27	315.80	139.93	68.02	50.00
14	108.20	226.00	95.00	48.00	30.92
28	24.57	210.00	86.00	36.58	20.30
60	4.42	206.49	85.77	34.24	15.54



รูปที่ 6.4 ผลการทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมที่เวลาบ่มต่างกัน

## 6.2 การทดสอบความซึมผ่านของรอยแตกในหิน

การทดสอบความซึมผ่านของรอยแตกในหิน (Permeability of rock fractures) มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าความซึมผ่านของรอยแตกในหินภายใต้ความเค้นกดที่ตั้งฉากกับรอยแตกในระดับต่าง ๆ กัน คือ 1, 2, 3 และ 4 MPa รอยแตกที่ถูกทำขึ้นในห้องปฏิบัติการมีขนาดประมาณ  $10 \times 10$  เซนติเมตร และวางตัวอยู่ที่จุดกึ่งกลางของตัวอย่างหินรูปลูกบาศก์ขนาดประมาณ  $10 \times 10 \times 16$  เซนติเมตร (รูปที่ 6.5) ตัวอย่างหินส่วนบนถูกเจาะเป็นรูกลม มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร อยู่ที่จุดกึ่งกลางเพื่อใช้เป็นทางส่งแรงดันน้ำเข้าสู่รอยแตก ในการคำนวณจะสมมติให้น้ำไหลจากจุดกลางของรอยแตกออกไปในแนวรัศมีทุกทิศทางถึงขอบนอกของตัวอย่างหิน

การทดสอบเริ่มจากติดตั้งตัวอย่างหินลงในเครื่องทดสอบ (รูปที่ 6.6) ตัวอย่างหินมีแผ่นเหล็กที่ใส่แรงกดด้านบนและด้านล่าง แรงกดได้มาจากแม่แรงและปั๊มไฮดรอลิกที่ติดอยู่กับเครื่องทดสอบ ดังนั้นผิวของรอยแตกจะรับความเค้นกดในแนวตั้งฉากในขณะที่ทำการทดสอบความซึมผ่าน แผ่นเหล็กด้านบนจะมีรูที่จุดกึ่งกลางที่ตรงกับรูที่เจาะไว้ที่ส่วนบนของตัวอย่างหิน รูที่แผ่นเหล็กจะถูกต่อเข้ากับปั๊มน้ำและถังก๊าซไนโตรเจนที่มีวาล์วรับแรงดันให้คงที่ที่ระดับที่ต่างกัน เมื่อเปิดวาล์วถังก๊าซไนโตรเจนจะดันน้ำเข้าสู่รอยแตกในตัวอย่างหิน จะใช้แรงดันน้ำคงที่ในขณะที่ทดสอบ ซึ่งอยู่ในช่วง 10 ถึง 40 psi โดยทดสอบเริ่มจากความเค้นกดในรอยแตกจาก 1, 2, 3 ถึง 4 MPa ตามลำดับ ในแต่ละระดับความเค้นกดบนรอยแตก ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (hydraulic conductivity, K) คำนวณได้จาก (Indraratna and Ranjith, 2001)

$$K = \gamma_w e_h^2 / 12\mu \quad (6.3)$$

และ

$$k = e_h^2 / 12 \quad (6.4)$$

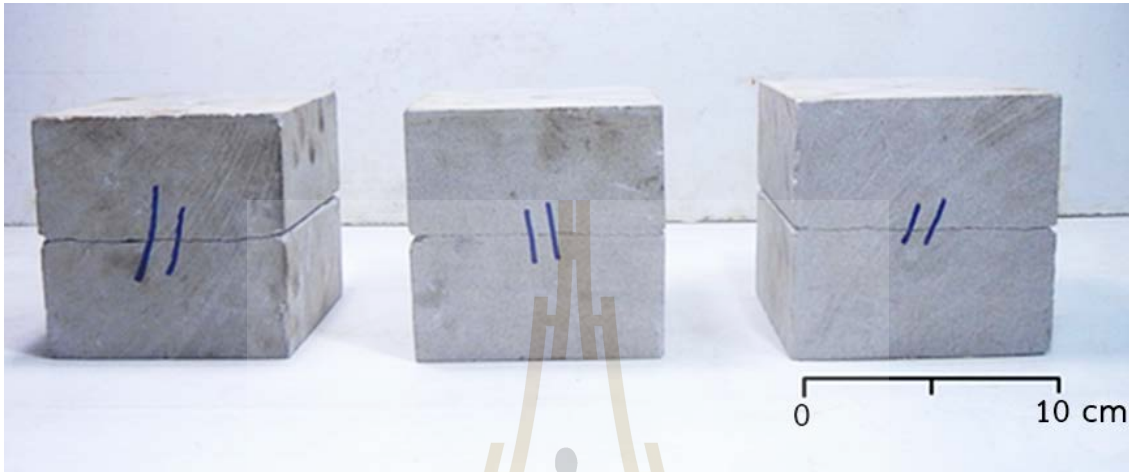
และ

$$e_h = \{[(6\mu q) / (\pi \Delta P)] \ln (r/r_0)\}^{1/3} \quad (6.5)$$

โดยที่  $k$  คือความซึมผ่านเชิงกายภาพ (Intrinsic permeability)  $e_h$  คือระยะเปิดเฉยเชิงไฮดรอลิกของรอยแตก  $\gamma_w$  คือ ความหนาแน่นโดยมวลของน้ำ  $\mu$  คือ ความหนืดเชิงพลศาสตร์ (Dynamic viscosity)  $r_0$  คือ รัศมีของรูที่จุดกึ่งกลางของตัวอย่างรอยแตก  $r$  คือระยะจากจุดกึ่งกลางของรอยแตกถึงขอบนอก  $q$  คือ อัตราไหลเชิงปริมาตรที่วัดได้จากการทดสอบ และ  $\Delta P$  คือค่าความดันของน้ำที่อัดเข้าไปที่รูกลางของตัวอย่างหิน

ตารางที่ 6.2 สรุปผลการทดสอบและการคำนวณทั้งหมดด้วยการนำค่าการเปิดเฉยเชิงไฮดรอลิก ( $e_h$ ) ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน ( $K$ ) และค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพ ( $k$ ) มาลงจุดในฟังก์ชันของ

ความเค้นกดบนรอยแตก รูปที่ 6.7 แสดงผลที่ได้ระบุว่า ความซึมผ่านของรอยแตกในหินทั้ง 3 ตัวอย่าง สอดคล้องกัน คือค่าความซึมผ่านของรอยแตกจะลดลงเมื่อค่าความเค้นกดบนรอยแตกมีค่าเพิ่มขึ้น ผล การทดสอบสามารถสรุปได้ว่า ถ้ารอยแตกในหินอยู่ประชิดกัน (close fracture) ระยะเปิดเผยและ ความซึมผ่านของรอยแตกจะมีค่าน้อยมาก

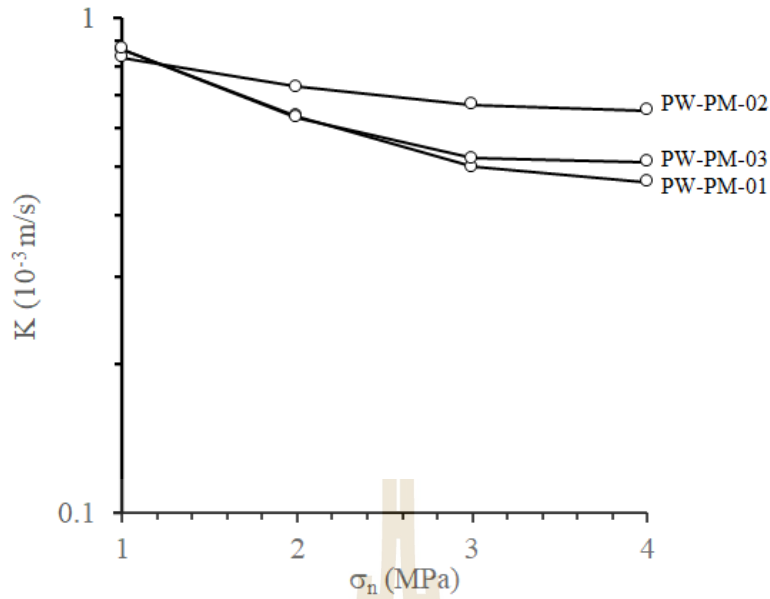


รูปที่ 6.5 ตัวอย่างหินทรายชุดพระวิหารรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ที่มีพื้นที่ของรอยแตกขนาด 10×10 ตารางเซนติเมตร ถูกจัดเตรียมเพื่อการทดสอบความซึมผ่าน



รูปที่ 6.6 ตัวอย่างหินทรายในขณะทดสอบความซึมผ่านของรอยแตกภายใต้ความเค้นกด  
 ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบค่าความซึมผ่านของรอยแตกในหิน

Sample No.	Width (mm)	Length (mm)	Height (mm)	Density (g/cc)	Normal stress (MPa)	$e_h$ ( $\mu\text{m}$ )	K ( $10^{-3}$ m/s)	k ( $10^{-9}$ m <sup>2</sup> )
PW-PM-01	117.2	101.2	162.3	2.35	1.0	33.184	0.863	0.091
					2.0	24.409	0.634	0.067
					3.0	19.096	0.496	0.052
					4.0	17.941	0.466	0.049
PW-PM-02	113.3	107.2	165.4	2.37	1.0	31.994	0.831	0.087
					2.0	27.990	0.727	0.077
					3.0	25.680	0.667	0.070
					4.0	25.064	0.651	0.069
PW-PM-03	103.4	111.5	166.2	2.34	1.0	33.341	0.866	0.091
					2.0	24.217	0.629	0.066
					3.0	16.170	0.420	0.044
					4.0	18.172	0.472	0.050



รูปที่ 6.7 ผลการทดสอบค่าความซึมผ่าน (K) ของรอยแตกในหิน

### 6.3 การทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมในรอยแตกหิน

การทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมในรอยแตกหิน (Permeability of grouting materials in rock fractures) มีวัตถุประสงค์ของการทดสอบเพื่อหาค่าความซึมผ่านของส่วนผสมแก่เกลบในรอยแตกหินทราย โดยจะทำการทดสอบความซึมผ่านทั้ง 4 สัดส่วนที่ได้คัดสรรมาจากผลการทดสอบในบทที่ 4 ภายใต้ความเค้นกดที่ตั้งฉากกับรอยแตกในระดับต่างๆ กัน คือ 0.25, 0.5, 0.75 และ 1.0 MPa ลักษณะของตัวอย่างหิน รอยแตก และวิธีการทดสอบจะเหมือนกับวิธีที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 6.2 การทดสอบนี้ได้ใช้ตัวอย่างหินทั้งหมด 15 ตัวอย่าง รูปที่ 6.8 แสดงแผนภูมิลักษณะการทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมในรอยแตก ตัวอย่างส่วนผสมได้ถูกอัดลงในรอยแตกที่มีการเปิดแยก 0.2, 1.0 และ 2.0 เซนติเมตร (รูปที่ 6.9) และใช้เวลาบ่ม 7 วัน ก่อนทำการทดสอบความซึมผ่าน

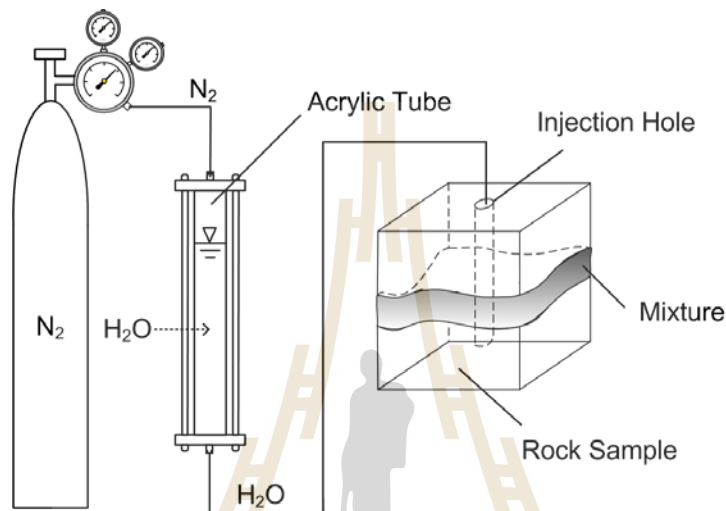
ตัวอย่างหินทั้ง 15 ตัวอย่างจะใช้แรงดันน้ำคงที่ในขณะที่ทดสอบ ซึ่งอยู่ในช่วง 10 ถึง 40 psi โดยการทดสอบเริ่มจากความเค้นกดส่วนผสมในรอยแตกจาก 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.00 MPa ในแต่ละระดับความเค้นกดบนส่วนผสมในรอยแตก ค่าความซึมผ่านของส่วนผสมในรอยแตกสามารถคำนวณได้จากสมการ (Indraratna and Ranjith, 2001)

$$K = Q \ln(2mL/D)/2\pi LH_c \quad (6.6)$$

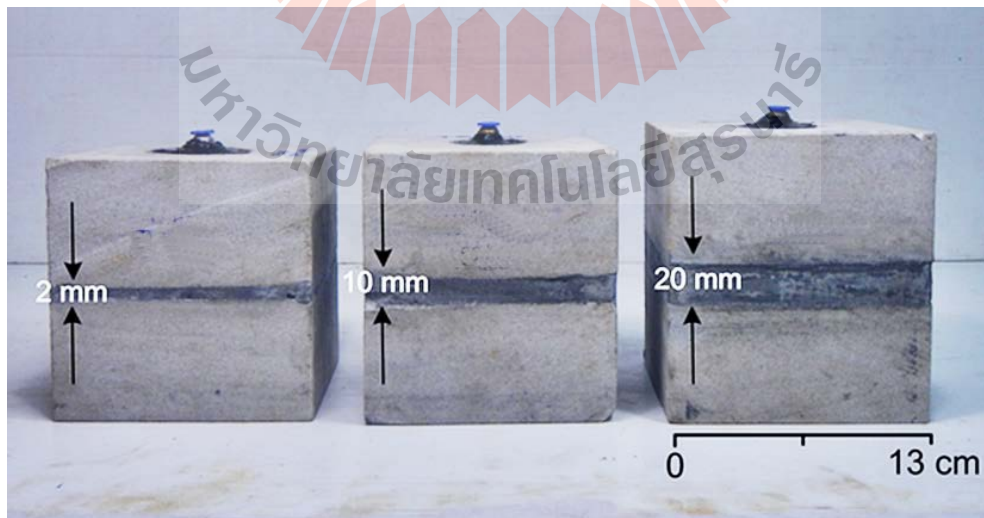
และ

$$k = K\mu/\gamma_w \quad (6.7)$$

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



รูปที่ 6.8 แผนภูมิแสดงลักษณะการทดสอบความซึมผ่านของรอยแตกที่มีการเปิดเผยภายใต้ความเค้นกด



รูปที่ 6.9 ตัวอย่างหินทรายชุดภูกระดึงที่ใช้ทดสอบความซึมผ่านของรอยแตกที่มีการเปิดเผยภายใต้ความเค้นกด

ตารางที่ 6.3 และ 6.4 สรุปขนาดตัวอย่างหิน ผลการทดสอบ และการคำนวณทั้งหมด โดยค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (K) และค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพ (k) ของส่วนผสมในรอยแตกหินทั้ง 15 ตัวอย่าง มีค่าสอดคล้องกับผลที่ทดสอบได้ในบทที่ 5 และงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Wetchasat, 2013; Chiangmai and Tepnarong, 2016)

**ตารางที่ 6.3** ขนาดตัวอย่างหินสำหรับทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมในรอยแตกของหินที่มีการเปิดเผย

Sample No.	Width (mm)	Length (mm)	Height (mm)	Density (g/cc)	RHA:C	Grouting Material Thickness (Aperture, mm)
PW-PM-04	110.5	115.6	160.4	2.38	0:10	2
PW-PM-05	110.2	110.2	166.5	2.35	0:10	10
PW-PM-06	111.2	112.5	164.0	2.37	0:10	20
PW-PM-07	112.2	112.3	163.2	2.38	1:10	2
PW-PM-08	110.0	110.2	160.2	2.38	1:10	10
PW-PM-09	109.8	110.2	162.3	2.38	1:10	20
PW-PM-10	112.2	111.2	162.2	2.40	3:10	2
PW-PM-11	114.1	112.2	160.3	2.39	3:10	10
PW-PM-12	112.2	112.3	161.2	2.38	3:10	20
PW-PM-13	109.9	110.2	164.3	2.35	5:10	2
PW-PM-14	110.1	110.1	160.2	2.34	5:10	10
PW-PM-15	110.2	110.2	164.3	2.35	5:10	20
PW-PM-16	113.1	110.1	163.2	2.35	10:10	2
PW-PM-17	110.2	110.2	162.2	2.35	10:10	10
PW-PM-18	110.5	110.3	162.3	2.36	10:10	20



ตารางที่ 6.4 ผลการทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมในรอยแตกของหินที่มีการเปิดเผย

Binder	Normal stress (MPa)	Aperture = 2 mm			Aperture = 10 mm			Aperture = 20 mm		
		$e_h$ ( $\mu\text{m}$ )	K ( $10^{-9}$ m/s)	k ( $10^{-15}$ m <sup>2</sup> )	$e_h$ ( $\mu\text{m}$ )	K ( $10^{-9}$ m/s)	k ( $10^{-15}$ m <sup>2</sup> )	$e_h$ ( $\mu\text{m}$ )	K ( $10^{-9}$ m/s)	k ( $10^{-15}$ m <sup>2</sup> )
RHA:C = 0:10 (pure cement)	0.25	0.313	200.211	20.656	0.313	200.211	20.656	0.355	261.172	26.945
	0.50	0.305	189.855	19.590	0.305	189.855	19.590	0.332	240.555	24.820
	0.75	0.289	174.789	18.035	0.289	174.789	18.035	0.324	222.953	21.441
	1.00	0.281	164.352	16.957	0.281	164.352	16.957	0.293	158.484	19.668
RHA:C = 1:10	0.25	0.172	59.848	6.176	0.172	59.848	6.176	0.227	106.293	10.969
	0.50	0.145	43.184	4.457	0.145	43.184	4.457	0.195	80.184	8.273
	0.75	0.125	33.270	3.434	0.125	33.270	3.434	0.180	65.762	6.785
	1.00	0.105	22.895	2.363	0.105	22.895	2.363	0.176	64.375	6.641
RHA:C = 3:10	0.25	0.133	35.867	3.699	0.133	35.867	3.699	0.102	20.773	2.145
	0.50	0.102	20.699	2.137	0.102	20.699	2.137	0.094	17.648	1.820
	0.75	0.090	16.145	1.664	0.090	16.145	1.664	0.086	14.938	1.543
	1.00	0.082	13.512	1.395	0.082	13.512	1.395	0.086	14.742	1.520
RHA:C = 5:10	0.25	0.082	29.129	2.418	0.082	28.895	2.418	0.082	28.898	2.355
	0.50	0.066	19.719	1.586	0.066	19.719	1.586	0.066	19.477	1.585
	0.75	0.051	13.703	1.078	0.051	13.703	1.078	0.051	14.875	1.074
	1.00	0.043	11.371	0.801	0.043	11.371	0.801	0.043	11.324	0.801
RHA:C = 10:10	0.25	0.066	17.934	1.850	0.066	17.934	1.850	0.051	10.387	1.072
	0.50	0.051	10.350	1.068	0.051	10.350	1.068	0.047	8.824	0.910
	0.75	0.045	8.072	0.832	0.045	8.072	0.832	0.043	7.469	0.771
	1.00	0.041	6.756	0.697	0.041	6.756	0.697	0.043	7.371	0.760

## บทที่ 7

### อภิปรายและสรุปผลการศึกษา

#### 7.1 อภิปรายผลการศึกษา

การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์ของส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่ใช้เป็นวัสดุอุดรอยแตกในหิน โดยได้กำหนดส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบนี้ประกอบด้วยเถ้าแกลบและซีเมนต์ ที่อัตราส่วนระหว่างเถ้าแกลบต่อซีเมนต์ (RHA:C) เท่ากับ 1:10, 3:10, 5:10 และ 10:10 โดยน้ำหนัก ด้วยปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ (W:C) เท่ากับ 1:1 และเปรียบเทียบกับส่วนผสมซีเมนต์ที่ใช้สำหรับอุดรอยแตก 0:10 โดยน้ำหนัก ด้วยปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ (W:C) เท่ากับ 1:1

ผลการทดสอบความหนืดของส่วนผสมที่ยังไม่แข็งตัวเป็นคุณสมบัติพื้นฐานและสามารถนำมาใช้เป็นดัชนีเปรียบเทียบความสามารถในการไหลของวัสดุอุด ซึ่งการทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM (D2196-20) ผลการศึกษาพบว่าค่าความหนืดของส่วนผสมมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วน RHA:C เพิ่มขึ้น แต่ที่อัตราส่วน RHA:C เท่ากับ 10:10 ด้วยอัตรา W:C เท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก พบว่าส่วนผสมดังกล่าวมีลักษณะเนื้อข้นเหนียว เกาะตัวกันแน่น และหมดสภาพความเป็นของเหลว ทั้งนี้เกิดจากเถ้าแกลบมีความสามารถดูดซึมน้ำได้ดี ดังนั้นส่วนผสมที่อัตราส่วนดังกล่าวจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุอุดรอยแตกในหิน

ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของส่วนผสม จะอภิปรายในรูปของผลการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว กำลังรับแรงดึงแบบบราซิล กำลังเฉือนโดยตรง และกำลังยึดติดแบบ Push-out ของส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ โดยผลการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวตามมาตรฐาน ASTM D7012-14 แสดงถึงค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวและค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของส่วนผสมตัวอย่างสำหรับการทดสอบผ่านการบ่มน้ำที่ระยะเวลา 3, 7, 14 และ 28 วันก่อนการทดสอบ ผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวของส่วนผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มน้ำ และส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่อัตราส่วน RHA:C เท่ากับ 5:10 โดยน้ำหนัก จะแสดงค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียวและค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 16.11 เมกะปาสคาล และ 2.16 จิกกะปาสคาล ตามลำดับ ในระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน ทั้งนี้ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวของส่วนผสมดังกล่าว มีค่ามากกว่าค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวของส่วนผสมซีเมนต์อย่างเดียว (RHA:C = 0:10) ที่ใช้สำหรับเป็นวัสดุอุดในรอยแตก

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิลตามมาตรฐาน ASTM D3967-19 ซึ่งเป็นกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสม โดยตัวอย่างสำหรับการทดสอบผ่านการบ่มน้ำที่ระยะเวลา 3, 7, 14 และ 28 วันก่อนการทดสอบ ผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังรับแรงดึงแบบบราซิลของส่วนผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มน้ำ และส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่อัตราส่วน RHA:C เท่ากับ 5:10 โดย

น้ำหนัก จะแสดงค่ากำลังรับแรงดึงแบบบราซิลสูงสุด อยู่ที่ประมาณ 1.70 เมกะปาสคาล ในระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน เช่นเดียวกับการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว

การทดสอบกำลังเฉือนโดยตรงของส่วนผสมได้ทดสอบตามขั้นตอนมาตรฐานการทดสอบ ASTM D5607-16 เป็นการทดสอบกำลังเฉือนระหว่างส่วนผสมและรอยแตกของหินที่ระยะเวลาบ่มน้ำเท่ากับ 7 วัน การทดสอบด้วยความเค้นในแนวตั้งฉาก 3 ระดับ ได้แก่ 0.5, 1.0 และ 1.5 เมกะปาสคาล ผลการทดสอบเมื่อเปรียบเทียบกับกฎการแตกของ Coulomb พบว่าผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่อัตราส่วน RHA:C เท่ากับ 5:10 โดยน้ำหนัก แสดงค่ากำลังเฉือนระหว่างส่วนผสมและรอยแตกของหินสูงสุด ความเค้นยึดติด และค่ามุมเสียดทาน เท่ากับ 2.37, 1.07 เมกะปาสคาล และ 40 องศา ตามลำดับ

ผลการทดสอบกำลังยึดติดแบบ Push-out ของส่วนผสม เป็นการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังยึดติดของส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบในตัวอย่างหินทราย ตัวอย่างสำหรับการทดสอบผ่านการบ่มน้ำที่ระยะเวลา 3, 7, 14 และ 28 วันก่อนการทดสอบ ค่ากำลังยึดติดของส่วนผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มน้ำที่เพิ่มขึ้น ผลการทดสอบพบว่าส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่อัตราส่วน RHA:C เท่ากับ 5:10 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน ให้ค่ากำลังยึดติดสูงสุดเท่ากับ 2.48 เมกะปาสคาล

ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของส่วนผสมอภิปรายในรูปของความซึมผ่าน (Permeability) ของส่วนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่ระยะเวลาบ่มน้ำเท่ากับ 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน ผลการทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมระบุว่าค่าความซึมผ่านของทุกส่วนผสมจะลดลงในเชิงเวลา หลังจากถูกบ่มมาแล้วส่วนผสมทุกสัดส่วนของเถ้าแกลบจะมีค่าความซึมทางกายภาพ (k) ผ่านพื้นแปรอยู่ในช่วง  $10^{-18}$  ถึง  $10^{-16}$  เมตร<sup>2</sup> ส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่อัตราส่วน RHA:C เท่ากับ 10:10 โดยน้ำหนัก แสดงค่าความซึมผ่านต่ำที่สุด ผลการทดสอบความซึมผ่านของรอยแตกประชิดพบว่าที่ภายใต้ความเค้นตั้งฉากที่พื้นแปรจาก 1 ถึง 4 เมกะปาสคาล มีค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (K) อยู่ในช่วง  $0.4 \times 10^{-3}$  ถึง  $0.8 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที ผลการทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมที่อยู่ในรอยแตกมีระยะการเปิดเผยเท่ากับ 2, 10 และ 20 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์ความซึม (K) ผ่านใกล้เคียงกันคือประมาณ  $10^{-8}$  ถึง  $10^{-6}$  เมตรต่อวินาที

## 7.2 สรุปผลการศึกษา

คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และกลศาสตร์ของส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ สามารถประเมินประสิทธิภาพการนำไปใช้เป็นวัสดุอุดรอยแตกในหิน โดยอภิปรายจากผลการทดสอบ ส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่อัตราส่วน เถ้าแกลบต่อซีเมนต์ (RHA:C) เท่ากับ 5:10 แสดงค่าคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์สูงสุด ได้แก่ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว, ค่าสัมประสิทธิ์ความยึดหยุ่น, ค่ากำลังรับแรงดึงแบบบราซิล และค่ากำลังยึดติดของส่วนผสมกับรอยแตกของหิน ภายใต้ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน และให้ค่ากำลังเฉือนสูงสุด ภายใต้ระยะเวลาบ่มน้ำ 7 วัน ซึ่งคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของส่วนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบมีค่ามากกว่าคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ใช้เป็นวัสดุทั่วไปในงานอุดรอยแตก

ในหิน ที่ส่วนผสมอัตราส่วน 10:10 แสดงค่าความซึมผ่านของส่วนผสมน้อยที่สุด แต่ส่วนผสมดังกล่าวในสถานะของเหลวมีความหนืดสูง เหนียว เกาะตัวกันแน่น จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุอุดรอยแตกในหิน ทั้งนี้ส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่อัตราส่วน 5:10 มีผลการทดสอบที่น่าสนใจ กล่าวคือเป็นอัตราส่วนที่ให้ค่าคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์สูงสุด และยังคงแสดงค่าคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ใกล้เคียงกับอัตราส่วน 10:10 จากผลการทดสอบเป็นไปได้ว่าส่วนผสมซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่อัตราส่วน RHA:C เท่ากับ 5:10 สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุอุดรอยแตกในหินได้

### 7.3 ข้อเสนอแนะในการนำไปประยุกต์ใช้

เนื่องจากการศึกษาประสิทธิภาพเชิงกลศาสตร์และผลศาสตร์ของซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบเพื่ออุดรอยแตกในหินยังมีข้อจำกัดขอบเขตในการศึกษา ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ในระยะเวลาเพิ่มขึ้นและควรมีการศึกษาเปรียบเทียบกับเถ้าแกลบชนิดอื่น ๆ และเพื่อให้การทดสอบคุณสมบัติทางกลศาสตร์สมบูรณ์ ควรทำการทดสอบค่าความซึมผ่านของส่วนผสมในรอยแตกของหินหลากหลายชนิด ซึ่งถือเป็นการจำลองการใช้งานที่ใกล้เคียงกับสภาพจริงมากที่สุด ทั้งนี้ผลการทดสอบในงานวิจัยนี้จะนำไปเปรียบเทียบและวิเคราะห์โดยละเอียดทางกลศาสตร์และผลศาสตร์เพื่อใช้ในการออกแบบทางวิศวกรรม และเพื่อให้ได้มาซึ่งสัดส่วนของส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุอุดรอยแตกในมวลหินต่อไป

## บรรณานุกรม

- บุรฉัตร ฉัตรวีระ และ วัชรกร วงศ์คำจันทร์ (2554). พฤติกรรมทางกลของคอนกรีตผสมเถ้าแกบลบละเอียด. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 24 ฉบับที่ 3 กันยายน-ธันวาคม หน้า 327-342
- บุญรักษ์ กาญจนวรวณิชย์ (2556), สารานุกรม : เถ้าแกบลบ ของเหลือสารพัดประโยชน์, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC). [ออนไลน์] เข้าถึงจาก <https://www.mtec.or.th/index.php/2013-05-29-09-06-21/2013-05-29-09-39-49/865>
- 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**. London, England: Chapman & Hall.
- 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.
- Anagnostopoulos, C.A. 2006. Physical and Mechanical Properties of Injected Sand with Latex Superplasticized Grouts. **Geotechnical Testing Journal**. 29: 1-7.
- Antiohos, S. K., Papadakis, V. G., and Tsimas, S. (2014). Rice husk ash (RHA) effectiveness in cement and concrete as a function of reactive silica and fineness. **Cement and Concrete Research**. 60-61: 20-27.
- ASTM C39-21. 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 C150-19. Standard Specification for Portland Cement. **Annual Book of ASTM Standards**. 04.01 American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM C266-20. Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic-Cement Paste by Gillmore Needles. **Annual Book of ASTM Standards**. 04.01 American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM C938-16. Standard Practice for Proportioning Grout Mixtures for Preplaced-Aggregate Concrete. In **Annual Book of ASTM Standards**. 04.16, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM D2196-20. Standard Test Methods for Rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational Viscometer. In **Annual Book of ASTM Standards**. 04.18, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.

- ASTM D2487-17. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). In **Annual Book of ASTM Standards**. 04.08, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM D3967-19. Standard Test Methods for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens. In **Annual Book of ASTM Standards**. 04.08, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM D4221-11. Standard Test Method for Dispersive Characteristics of Clay Soil by Double Hydrometer. **Annual Book of ASTM Standards**. 04.08, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM D4318-17. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. In **Annual Book of ASTM Standards**. 04.08, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM D5607-16. Standard Test Method for Performing Laboratory Direct Shear Strength Tests of Rock Specimens Under Constant Normal Force. **Annual Book of ASTM Standards**. 04.08 American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM D7012-14. Standard Test Methods 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.
- Boonyord, K. (2017). **Effect of earthquake vibration on shear strength of sandstone fractures**. M.E. thesis, Suranaree University of Technology.
- Boonyord, K and Tepnarong, P. (2018). Effect of Earthquake Vibration on Shear Strength of Sandstone Fractures. **Proceedings of the 12th South East ASEAN Technical University Consortium Symposium**, 12-13 March, Yogyakarta, Indonesia.
- Brown, E.T. (1981). Rock Characterization testing and monitoring: ISRM Suggested methods. The Commission on Rock Testing Methods, **International Society for Rock Mechanics**. Pergamon Press, New York, 211 pp.
- Butron, C., Gustafson, G., Fransson, A., and Funehag, J. (2010). Drip sealing of tunnels in hard rock: A new concept for the design and evaluation of permeation grouting. **Tunneling and Underground Space Technology**. 25: 114-121.
- Chatveera, B. and Kongsub, T. (2011). Durability of concretes containing black RHA from rice mill. **KMUTT Research and Development Journal**. 25 (4): 373-389

- Chiangmai, M. and Tepnarong, P. (2016). Performance Assessment of Fly Ash-mixed Cement Borehole Plugs in Sandstone. In **Proceedings of the ISRM 9<sup>th</sup> Asian Rock Mechanics Symposium**. Bali. Indonesia. 18-20 October 2016.
- Chiangmai, M. (2016). **Experimental assessment of mechanical and hydraulic performance of fly ash-mixed cement grouts in rock fractures**. M.E. thesis, Suranaree University of Technology.
- Dabai, M. U., Muhammad, C., Bagudo, B. U., and Musa, A. (2009). Studies on the effect of Rice Husk Ash as Cement Admixture. **Nigerian Journal of Basic and Applied Science**. 17(2): 252-256.
- Deere, D. U. (1982). Cement-Bentonite Grouting for Dams. In **Proceedings of Grouting in Geotechnical Engineering Conference** (pp 279-300). ASCE. New Orleans.
- Fransson, A. (2001). Characterization of a fractured rock mass for a grouting field Test. **Tunneling and Underground Space Technology**. 16: 331-339.
- 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.
- Habeeb G. and Mahmud H. (2010). Study on Properties of Rice Husk Ash and Its Use as Cement Replacement Material. **Materials Research**. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia. 13(2): 185-190
- Hwang, C. L., Bui, L. A. T., Chen, C. T. (2011). Effect of rice husk ash on the strength and durability characteristics of concrete. **Construction and Building Materials**. 25(9): 3768-3772
- Indraratna, B. and Ranjith, P. (2001). **Hydromechanical Aspects and Unsaturated Flow in Joints Rock**. Lisse: A. A. Balkema.
- Iwai, K. (1976). **Fundamental Studies of Fluid Flow Through a Single Fracture**. Ph.D. thesis, University of California, Berkeley.
- Korotkova, T. G., Ksandopulo, S. J., Donenko, A. P., Bushumov, S. A., and Danilchenko, A. S. (2016). Physical Properties and Chemical composition of the Rice Huak and Dust. **Oriental Journal of Chemistry**. 6(32): 3213 – 3219
- 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. In **Proceeding of ISRM VietRock International Workshop**. Hanoi, Vietnam. 12-13 March 2015.
- Picandet, V., Rengeard, D., Perrot, A. and Lecompte, T. (2011). Permeability measurement of fresh cement paste, **Cement and Concrete Research**, 3(41): 330-338
- Rahmani, H. (2004). **Estimation of grout distribution in a fractured rock by numerical modeling**. M.S. thesis, University of Tehran.
- Rashid, B., Molla, K. A., and Ahmed, T. U. (2010). Durability of Mortar in Presence of Rice Husk Ash. **World Academy of Science, Engineering and Technology**. 43: 736-739
- 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 and Geomechanics Abstracts**. 22(4): 251-261.
- Samaiklang, W. and Fuenkajorn, K., 2013, Mechanical and hydraulic performance of cement grouts from 5 suppliers in Thailand. In **Proceedings of the 11<sup>th</sup> Interconference on Mining, Materials and Petroleum Engineering ASEAN Forum on Clean Coal Technology** (pp.333-342). Chiang Mai, Thailand. 11-13 November 2013.
- 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.



- Warner, J. (2004). **Practical Handbook of Grouting: Soil, Rock, and Structures**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Wetchasat, K. (2013). **Performance assessment of sludge-mixed cement grout in rock fractures**. Ph.D. thesis, Suranaree University of Technology.
- Xu, W., Lo, T. Y., and Memon, S. A. (2012). Micro structure and reactivity of rich husk ash. **Constr. Build. Mater.** 29: 541–547.
- Zhang, M. and Malhotra, V. (1996). High-Performance Concrete Incorporating Rice Husk Ash as a Supplementary Cementing Material. **ACI Material Journal** 93(6): 629-636.



ภาคผนวก ก

บทความในการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการระดับนานาชาติ  
The International Conference of Science, Engineering &  
Technology-ICSET 2019  
2-3 April 2019, Village Hotel Changi, Singapore

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# MECHANICAL PERFORMANCES OF RICE HUSK ASH-MIXED CEMENT GROUTING IN ROCK FRACTURES

Mathurot Ninkhong, Prachya Tepnarong

School of Geotechnology, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,  
Nakhon Ratchasima, Thailand.

mni89@outlook.co.th, prachya@sut.ac.th

**Abstract**— The purpose of this paper is to assess the mechanical performances of rice husk ash (RHA)-mixed with the Portland cement for grouting material in rock fractures. The mixtures of grouting materials are prepared from RHA and ordinary Portland cement. The RHA-cement ratios are 1:10, 3:10, 5:10, and 10:10 with water-cement ratio of 1:1 by weight under curing times of 3, 7, 14, and 28 days. The tested rock specimens are sandstone and the rock fractures are artificially made in the laboratory. This research determines the suitable RHA-cement ratio that will be used as grouting materials in rock fractures. The results indicate that the average viscosity of RHA-mixed cement tends to increase as RHA-mixed cement ratio increases. The RHA-cement ratio as 5:10 that clearly showed the highest compressive strength, elastic modulus and tensile strength after 28 days curing time. In addition, this mixtures ratio represents the highest shear strength between grouting material and rock fractures in direct shear and push-out testing after 7 days curing time. Hence, this ratio probably has potential to be the suitable ratio that will be used as grouting materials and can be applied in grouting or sealing in rock fractures for the mining industry, dam foundation and rock embankments.

**Index Terms**— rice husk ash, mechanical properties, grouting material, sandstone

## I. INTRODUCTION

Thailand is one of the biggest rice exporters. Farmer harvest paddy then puts them through a milling process. After that, they will get rice grains and husk. The weight of husk is about 22.5-25.2% of paddy. It has been found beneficial to burn the rice husk in kilns to make various things. The advantages of rice husk, one way is to use as fuel in a biomass power plant, it gives heat of combustion at around 3,880 kcal/kg. After burning the rice husk can produce ash about 17.4% that is the rice husk ash (RHA) [1]. Many researchers are confirmed that the RHA is efficient as a pozzolanic material. It contains Silica ( $\text{SiO}_2$ ) as the main element about 70-90% and the loss on ignition (LOI) was relatively high (5.81%) [2]-[3]. Furthermore, the RHA is light, riddled, a lot of surface area, good absorption and insulation. So, the RHA was brought to use in cement and concrete industrial which can replace Portland cement [4]. Several papers have been published on the performance of RHA as the pozzolanic material. However,

only limited information is available on the mechanical performances of RHA for cement grout. Hence, it was led to the concept of this study is the mechanical performance of RHA-mixed cement grout material in rock fractures to apply in the field of geological engineering. This will use replace the previous material as a state in an international standard to reduce permeability in the fractured rock mass.

## II. GROUTING MATERIAL PREPARATION

The grouting materials used in this study consists of the RHA with particle sizes less than 75  $\mu\text{m}$  and ordinary Portland cement type I. The RHA is collected from biomass power plant of A.T. Biopower Co., Ltd. The chemical compositions of the RHA 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 I. The particle size distribution of RHA obtains from test procedure follow the ASTM D6913 and D7928-17 [5]-[6] standard practice and the results are showed in Fig. 1. The results show the particle size distributions of the RHA used here and the comparison with fly ash, bentonite and water treatment sludge [7]-[9]. The mixing ratios of the RHA-cement (RHA:C) are set to 1:10, 3:10, 5:10 and 10:10 with water-cement (W:C) ratio of 1:1 by weight. The pure cement is used for comparing with the RHA mixed cement test result. The ratio of pure cement is 0:10 with water-cement (W:C) ratio of 1:1 by weight. The grouting preparation follows the ASTM C938-16 [10] standard practice. The mixtures are placed in the 54 mm PVC mold. They are cured under water at ambient temperature for 3, 7, 14, and 28 days before testing. The viscosity grouts are preferred for injectability of grouting materials. The flow of grout slurry is measured by determining its viscosity and density. The viscosity of slurry is measured as follow the ASTM D2196-18e1 [11] standard practice, by using a Brookfield® viscometer. The density test follows the ASTM D854-14 [12] standard practice. The results of viscosity and density of grout slurry are shown in Fig. 2 and Table II. The dynamics viscosity of cement slurries tends to increase as the mixed cement ratios increase.

Proceedings of Research for a 47th International Conference, ICSET-2019

Table I Chemical compositions of RHA

Chemical compositions	Weight %	Chemical compositions	Weight %
SiO <sub>2</sub>	94.43	Cl	0.32
K <sub>2</sub> O	2.26	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.26
Na <sub>2</sub> O	0.04	ZnO	0.02
CaO	0.89	Br	< 0.01
MgO	0.36	Rb <sub>2</sub> O	0.01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.21	SrO	0.01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.87	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 0.01
SO <sub>3</sub>	0.14	LOI	5.62

Table II Results of grout slurry density tests

Binder	RHA:C or F:C or S:C	W:C	Slurry Temperature (°C)	Slurry Wight (g)	Slurry Density (g/cc)	
Cement	0:10	10:10	27.0	737.72	1.47	
	RHA	1:10	10:10	27.9	743.50	1.49
		3:10	10:10	27.7	749.87	1.50
		5:10	10:10	28.2	788.48	1.58
Fly ash	10:10	10:10	28.5	874.29	1.75	
	1:10	10:10	28.4	769.75	1.54	
	3:10	10:10	27.5	769.13	1.59	
	5:10	10:10	27.0	831.26	1.66	
Bentonite	10:10	10:10	26.4	873.33	1.75	
	1:10	10:10	28.2	705.40	1.41	
	2:10	10:10	27.9	725.00	1.45	
	3:10	10:10	29.4	757.10	1.51	
Sludge	1:10	10:10	28.6	733.50	1.47	
	3:10	10:10	30.2	742.00	1.48	
	5:10	10:10	30.3	794.50	1.59	
	10:10	10:10	30.6	930.30	1.86	

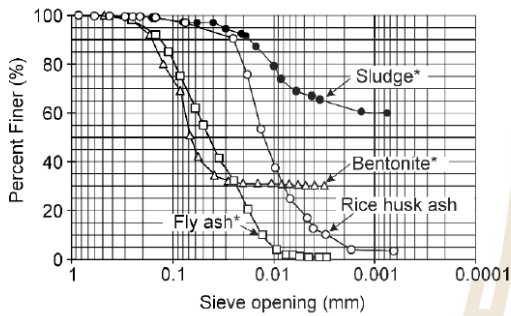


Fig.1 Particle size distribution of RHA

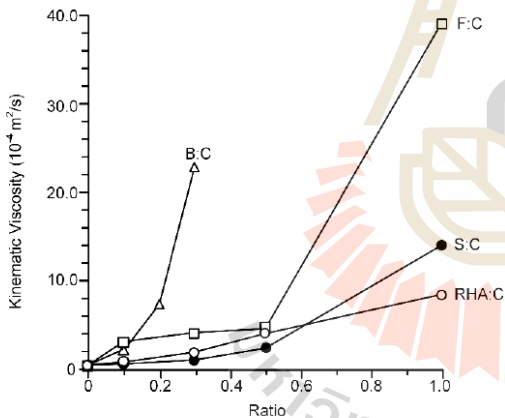


Fig.2 Kinematic viscosity of grout slurry

III. SANDSTONE SPECIMENS

The sandstone block samples are collected from Pakchong district, Nakhon Ratchasima province. The rock belongs to Phra Wihan Formation of the Khorat Group. The age of sandstone is between Upper and Middle Jurassic. The petrographic properties of the tested specimens are as follows. The color is white with 75% Quartz (0.1-0.5 mm), 15% feldspar (0.2-0.5 mm), 7% mica (0.1-0.5 mm), and 3% lithic fragment (0.1-1 mm). Average uniaxial compressive strength and elastic modulus are 71.3 MPa and 13.9 GPa, respectively.

IV. MECHANICAL TESTING METHODS

A. Uniaxial compressive strength test

The uniaxial compressive strength (UCS) test procedure follows, as much as practical, the ASTM D7012-14 and C39 [13]-[14] standards practice. The compressive strengths of the mixtures are measured from cylindrical specimens with a diameter of 54 mm and L/D ratio as 2.5. The strength measurements are made after 3, 7, 14, and 28 days of curing. During test, the axial and lateral deformations are monitored as in Fig.3. The failure load is recorded. Table III, Fig. 4 and Fig. 5 show the results of uniaxial compressive strengths ( $\sigma_c$ ) and elastic modulus (E) test as a function of curing time, respectively. At 28 days of curing time shows the highest compressive strength and elastic modulus of RHA-mixed cement are 16.11 MPa and 2.16 GPa. The compressive strength results of RHA-mixed cement are more than the pure cement that used as common for grouting material in rock fractures.

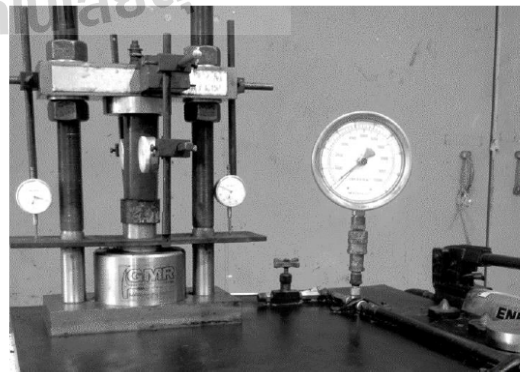


Fig.3 Uniaxial compressive strength test setup

Proceedings of Researchfora 47th International Conference, ICSET-2019

Table III Results of uniaxial compressive strengths and elastic modulus test

Binder	Curing Time (days)	Ratio	W:C	$\sigma_c$ (MPa)	E (GPa)
Cement	3	0:10	10:10	6.62	1.22
	7	0:10	10:10	7.58	1.26
	14	0:10	10:10	8.13	1.28
	28	0:10	10:10	9.93	1.36
RHA:C	3	1:10	10:10	6.95	1.25
		3:10	10:10	7.11	1.40
		5:10	10:10	8.62	1.63
	7	10:10	10:10	7.03	1.31
		1:10	10:10	8.12	1.33
		3:10	10:10	10.37	1.45
	14	5:10	10:10	11.37	1.59
		10:10	10:10	9.44	1.35
		1:10	10:10	10.23	1.52
	28	3:10	10:10	11.77	1.66
		5:10	10:10	13.43	1.88
		10:10	10:10	10.80	1.52
28	1:10	10:10	11.05	1.60	
	3:10	10:10	15.07	2.10	
	5:10	10:10	16.11	2.16	
		10:10	14.00	2.03	

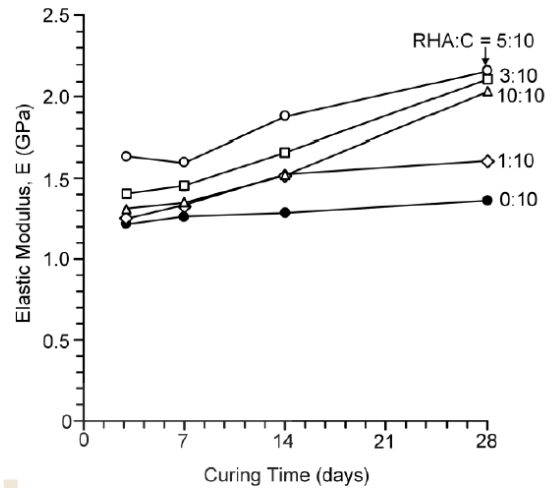


Fig.5 Elastic modulus (E) as a function of curing times

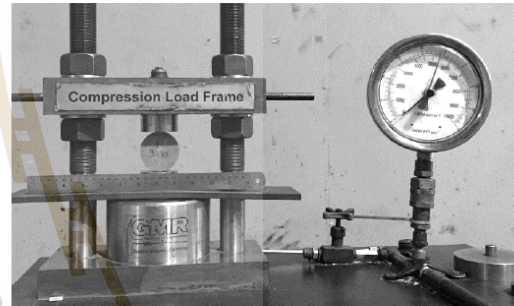


Fig.6 Brazilian tension test setup

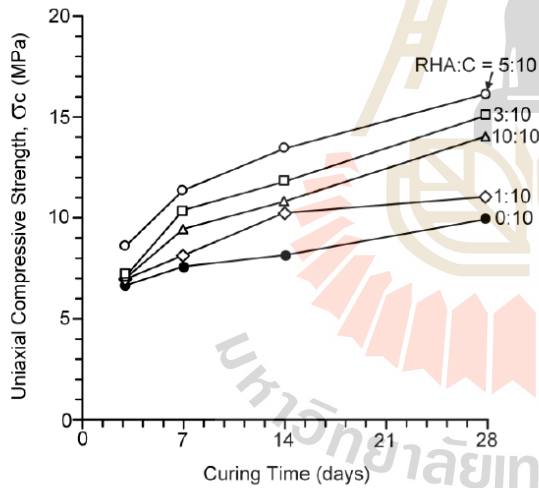


Fig.4 Uniaxial compressive strength ( $\sigma_c$ ) as a function of curing times

Table IV Results of Brazilian tensile strength test

Curing Time (days)	Tensile strength (MPa)				
	Cement 0:10	1:10	3:10	5:10	10:10
3	0.92	1.04	1.18	1.24	1.06
7	1.20	1.24	1.40	1.48	1.30
14	1.48	1.50	1.56	1.69	1.52
28	1.55	1.60	1.64	1.70	1.60

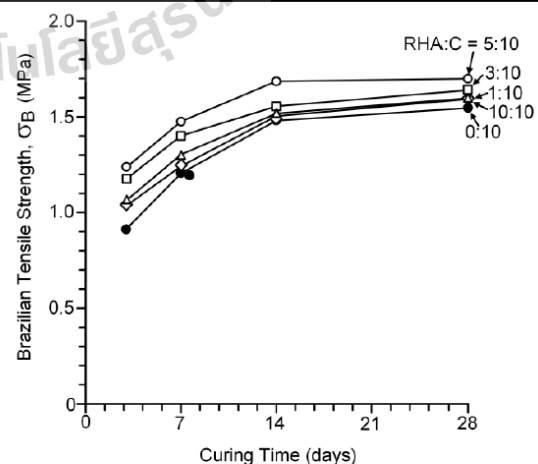


Fig. 7. Brazilian tensile strength ( $\sigma_B$ ) as a function of curing times

B. Brazilian tensile strength test

The Brazilian tension test determines the indirect tensile strength of the grouting materials. The test procedure follows the ASTM D3967-16 [15] standard practice and the ISRM suggested methods in Fig.6. The samples are 54 mm diameters with L/D ratio as 0.5. The mixture proportions in this test are same with the compressive test. The results are given in Table IV and Fig.7. The highest Brazilian tensile strength ( $\sigma_B$ ) is show at the 5:10 of RHA-cement ratio with 28 days of curing times as equal to 1.70 MPa.

C. Direct shear test

The objective of this test is to determine the direct shear strength of grouting material in rock fractures. The test method and calculation follow as much as practical the ASTM D5607-16 [16] standard practice. The direct shear tests are performed with the normal stresses of 0.5, 1.0, and 1.5 MPa. The mixture proportions in this test are same with the compressive strength test. The test is carried out at the ages of 7 days curing.

The shear strengths ( $\tau$ ) are calculated by the equations:

$$\tau = P/A \tag{1}$$

where  $P$  is the maximum shear force, and  $A$  is the contact area between both specimens. The shear strengths are summarized in Table V. The shear parameters calibrated from the direct shear test using Coulomb's criteria. (Table VI and Fig.8) and can be expressed by:

$$\tau = C_p + \sigma \tan \phi_p \tag{2}$$

where  $\tau$  and  $\sigma$  are the shear stress and normal stress,  $\phi_p$  is the angle of internal friction, and  $C_p$  is cohesion.

Table V Results of direct shear test

Normal Stress (MPa)	Peak shear strength (MPa)				
	Cement	RHA:C 0:10	RHA:C 1:10	RHA:C 3:10	RHA:C 5:10
0.5	1.03	1.25	1.37	1.53	1.31
1.0	1.37	1.48	1.65	1.81	1.59
1.5	1.65	1.93	2.15	2.37	2.04

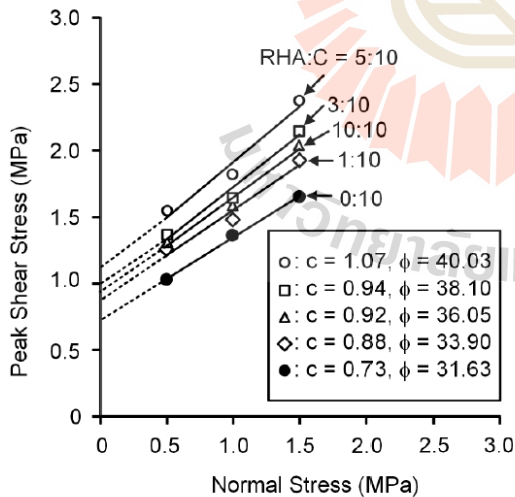


Fig. 8 The shear strength of grouting materials as a function of normal stresses

Table VI The shear parameters calibrated from direct shear test using Coulomb's criteria

Mixtures	$C_p$ (MPa)	$\tan \phi_p$	$\phi_p$ (degree)	$R^2$
Cement	0.73	0.62	31.63	0.99
R:C = 1:10	0.88	0.67	33.90	0.96
R:C = 3:10	0.94	0.78	38.10	0.97
R:C = 5:10	1.07	0.84	40.03	0.96
R:C = 10:10	0.92	0.73	36.05	0.98

D. Push-out test

The objective of this test is to determine the axial mechanical strength of borehole plug in sandstone specimen through push-out test. The borehole plug is prepared from the grouting material in the same ratio as the previous tests. The size of rock specimens are 110 mm x 110 mm x 130 mm and all specimens are drilled as perpendicular to the bottom sample surfaces. The curing period for all push-out tests is 7 days. Fig.9 and 10 show the push-out test set up. A cylindrical steel rod applied an axial load to a borehole 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 load and top plug displacements are recorded manually at 10 seconds intervals until the sample failed.

The bond strength or the average shear stress ( $\tau_{av}$ ) distribution induced by push-out test loading along the sandstone and cement plug interface can be calculated by the following equation [17]:

$$\tau_{av} = F/D_i L \pi \tag{3}$$

where  $F$  is the failure load,  $D_i$  is the plug diameter and  $L$  is the plug length. The dimensions of the sandstone specimen and the bond strength of borehole plugs are summarized in Table VII. Fig.11 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. 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 highest bond strength is obtained from 5:10 ratio of RHA-cement is equal to 2.19 MPa.

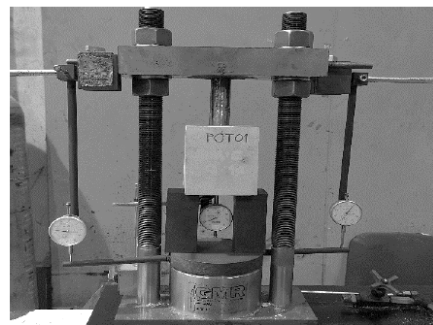


Fig. 9 Push-out test set up

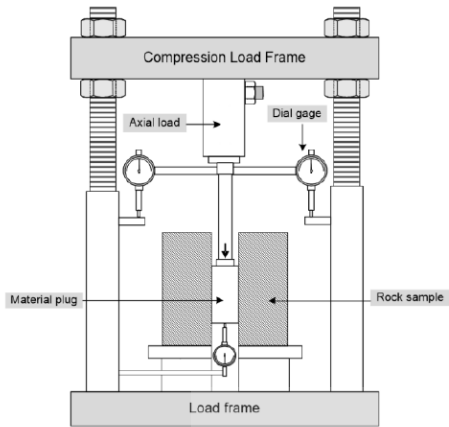


Fig. 10 The schematic drawing of the push-out test

Table VII Dimensions of sandstone specimens used for push-out tests, the axial strength ( $\sigma_{ax}$ ) and average shear strength ( $\tau_{av}$ )

Specimens No.	POT-R1	POT-R3	POT-R5	POT-R10
Ratio (RHA:C)	1:10	3:10	5:10	10:10
D <sub>i</sub> (mm)	33.50	34.00	35.00	33.75
L (mm)	35.00	36.30	37.40	35.40
F (kN)	1.75	2.50	9.00	2.00
$\sigma_{ax}$ (MPa)	1.96	2.75	9.35	2.24
$\tau_{av}$ (MPa)	0.48	0.64	2.19	0.53

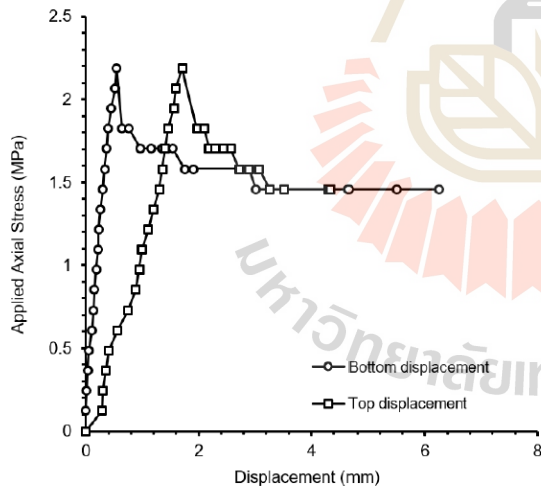


Fig.11 Applied axial stress vs. top and bottom axial borehole plug displacement for push-out test (specimen no. POT-R5)

V. DISCUSSIONS, CONCLUSIONS AND FUTURE STUDY NEEDS

The mechanical properties of grouting material as prepared by RHA-mixed with cement are obtained from the uniaxial compressive strength, Brazilian tensile strength, direct shear strength and push-out tests. The

results indicate that after 28 days clearly showed the highest compressive strength, elastic modulus and tensile strength as 16.11 MPa, 2.16 GPa and 1.70 MPa respectively. The highest shear strength between grouting material and rock fractures from the direct shear test after 7 days curing time is 2.37 MPa with the normal stress equal 1.50 MPa. The push-out test results perform the axial mechanical strength of grouting materials as borehole plug in sandstone specimen. The highest result equal to 2.19 MPa after 7 days curing time. The mixtures ratio that clearly presents the highest results of mechanical testing is 5:10 ratio of RHA-cement with water-cement ratio of 1:1 by weight. Hence, this ratio probably has potential to be the suitable ratio that will be used as grouting materials and can be applied in grouting or sealing in rock fractures for the mining industry, dam foundation and rock embankments.

This study made no attempt to predict the relation between bond strength of RHA-mixed cement sealing and curing period. The Push-out tests should be performed on plugs with a variety of relatively long curing times.

VI. ACKNOWLEDGMENT

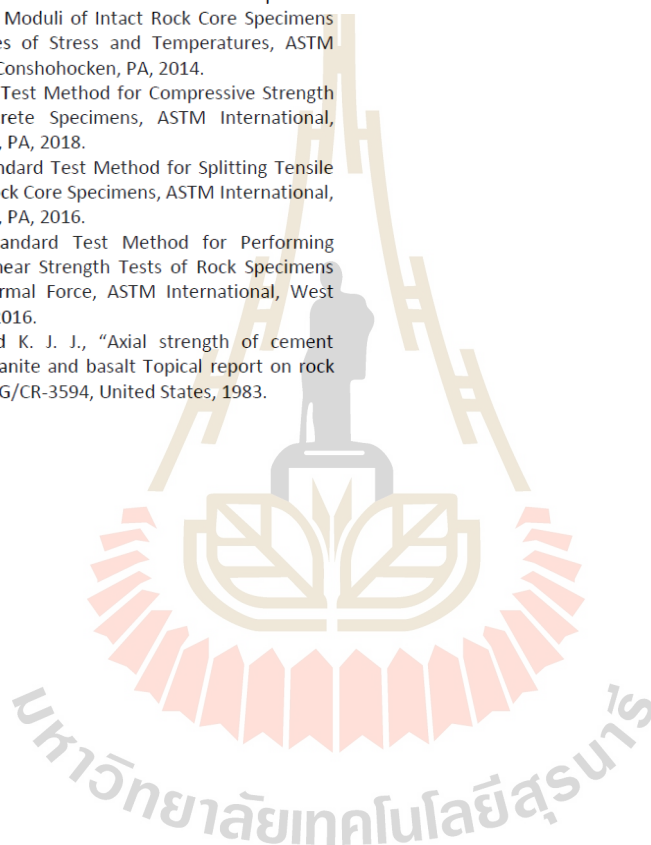
This research is supported by Suranaree University of Technology and by Higher Education Research Promotion and National Research University of Thailand, Office of the Higher Education Commission. Permission to publish this paper is gratefully acknowledged.

REFERENCES

- [1] B. Karnjanaworavanich, "Knowledge: Rice Husk Ash", National Metal and Materials Technology Center (MTEC), Bangkok, 2013.
- [2] G. A. Habeeb, and H. B. Mahmud, "Study on Properties of Rice Husk Ash and Its Use as Cement Replacement Material", Materials Research-ibero-american Journal of Materials - MATER RES-IBERO-AM J MATER, vol. 13, no. 2, pp. 185-190, 2010.
- [3] G. T. Korotkova, J. S. Ksandopulo, P. A. Donenko, A. S. Bushumov, and S. A. Danilchenko, "Physical Properties and Chemical Composition of the Rice Husk and Dust", Orient J Chem, vol. 32, no.6, pp. 3213-3219, 2016.
- [4] W. Xu, T.Y. Lo, and S.A. Memon, "Microstructure and reactivity of rich husk ash", Constr. Build. Mater., vol. 29, pp. 541-547, 2012.
- [5] ASTM D6913 Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [6] ASTM D7928-17 Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [7] K. Wetchasat, and K. Fuenkajorn, "Mechanical and Hydraulic Performance of Sludge Mixed Cement Grout in Rock Fractures", Proc. of 7th Asian Rock Mechanics Symposium, Seoul, Korea, pp. 1477-1485, 15-19 October. 2012.
- [8] P. Tepnarong, and P. Deethouw, "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.

Proceedings of Researchfora 47th International Conference, ICSET-2019

- [9] M. Chiangmai, and P. Tepnarong, "Performance Assessment of Fly Ash-mixed Cement Borehole Plugs in Sandstone", Proceedings of the 9th Asian Rock Mechanics Symposium, Bali, Indonesia, 18-20 October 2016.
- [10] ASTM C938-16 Standard Practice for Proportioning Grout Mixtures for Preplaced-Aggregate Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- [11] ASTM D2196-18e1 Standard Test Methods for Rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational Viscometer (Brookfield type), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
- [12] ASTM D854-14 Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [13] ASTM D7012-14 Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [14] ASTM C39 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
- [15] ASTM D3967-16 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- [16] ASTM D5607-16 Standard Test Method for Performing Laboratory Direct Shear Strength Tests of Rock Specimens Under Constant Normal Force, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- [17] C. J. Stormont, and K. J. J., "Axial strength of cement borehole plugs in granite and basalt Topical report on rock mass sealing," NUREG/CR-3594, United States, 1983.





## ประวัตินักวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรัชญา เทพนรงค์ เกิดเมื่อวันที่ 14 กันยายน 2521 ที่จังหวัดกาญจนบุรี จบการศึกษาระดับปริญญาเอกจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โปรแกรมวิชาวิศวกรรมธรณี ในปี พ.ศ. 2550 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และอาจารย์ประจำอยู่ที่สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา มีความชำนาญทางการทดสอบด้านกลศาสตร์หินในห้องปฏิบัติการและภาคสนาม การออกแบบและการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ เป็นนักวิจัยประจำหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณี เป็นสมาชิกสามัญตลอดชีพของสมาคมธรณีวิทยาแห่งประเทศไทย (GST) สมาชิกสามัญตลอดชีพสภาวิชาชีพวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สชวท.) ภาควิชาวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.) และเป็นสมาชิกสมาคมกลศาสตร์หินนานาชาติ (International Society of Rock Mechanics, ISRM)

