

รหัสโครงการ SUT7-719-57-18-53



## รายงานการวิจัย

# การทดสอบกำลังยึดติดในระยะยาวของการอุดซีเมนต์ในเกลือหิน Long-term Bond Strength Testing of Cement Sealing in Rock Salt



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ SUT7-719-57-18-53



## รายงานการวิจัย

# การทดสอบกำลังยึดติดในระยะยาวของการอุดซีเมนต์ในเกลือหิน Long-term Bond Strength Testing of Cement Sealing in Rock Salt

ผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ดร.ปรัชญา เทพนรงค์

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2557-2558

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2558

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปี 2557 และ 2558 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ก็ด้วยความช่วยเหลือจาก นายชากีริน ปัตตานี ในการเป็นผู้ช่วยวิจัยและพิมพ์รายงานการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ผู้วิจัย



## บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพเชิงกลศาสตร์และพลศาสตร์ของปูนซีเมนต์เพื่อนำมาใช้จุดในชั้นเกลือหินในฟังก์ชันของเวลา ผลการทดสอบที่ได้สามารถช่วยในการออกแบบของซีเมนต์สำหรับการอุดรอยแตกในระยะยาวเพื่อให้มีผลกระทบจากการร้าวไหลในชั้นเกลือหินของเหมืองเกลือให้น้อยที่สุด ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของซีเมนต์ระบุว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาการบ่มตัว ค่าแรงกดสูงสุดในแกนเดียว ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น และค่าแรงดึงแบบบราซิลเลียนของปูนซีเมนต์มีแนวโน้มสูงขึ้น ผลการทดสอบความซึมผ่านของซีเมนต์พบว่าเมื่อระยะเวลาการบ่มตัวเพิ่มขึ้น ค่าความซึมผ่านและค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านจะลดลง ผลการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงระยะสั้นพบว่าแรงเฉือนคานยึดติดระหว่างซีเมนต์และเกลือหินมีค่าเท่ากับ 44 องศา และแรงยึดติดมีค่าเท่ากับ 2.12 เมกกะปาสกาล

การทดสอบ Push-out ระยะยาวถูกดำเนินการในแท่งซีเมนต์กับชุดความสัมพันธการบ่มตัวระยะยาวที่ความเค้นเฉือนคงที่ บนพื้นฐานพฤติกรรมเคลื่อนไหลของความหนืดเชิงยืดหยุ่น ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวแนวเฉือนและเวลาโดยระดับความเค้นเฉือนคงที่ต่างๆที่ 30 วัน รูปแบบ Hookean-Kelvin ถูกเลือกเพื่อหาค่าพฤติกรรมเคลื่อนไหลของความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือนระหว่างซีเมนต์และเกลือหิน พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของความยืดหยุ่นเฉือน ( $G_1$ ) ความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือน ( $G_2$ ) และสัมประสิทธิ์ความหนืด ( $\eta_1$ ) พิจารณาในฟังก์ชันของอัตราส่วนเฉือนคงที่ ( $\tau/\tau_{av}$ ) ของแท่งซีเมนต์ในหลุมเจาะ พารามิเตอร์ของ  $G_1$  เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อ ( $\tau/\tau_{av}$ ) เพิ่มขึ้น พารามิเตอร์ของ  $G_2$  และ  $\eta_1$  มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเฉือนคงที่กับความสัมพันธ์เชิงกำลัง การทดสอบแรงเฉือนโดยตรงระยะยาวแสดงรูปแบบพารามิเตอร์การเคลื่อนไหลเฉือน พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ  $G_1$ ,  $G_2$  และ  $\eta_1$  เปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนความเค้นเฉือน ( $\tau/\tau_p$ ) ผลการคาดการณ์เป็นไปตามข้อมูลจากการทดสอบเป็นอย่างดี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นรูปแบบการเคลื่อนไหลของความหนืดเชิงยืดหยุ่นแบบไม่เป็นเส้นตรง

## Abstract

The objectives of this study are to determine the mechanical and hydraulic performance of cement sealing in rock salt as a function of times. The results are used to assist in a long-term design of the cement seals in fracture and dissolved channels to minimize a brine circulation and potential leakage along a main access of a salt mine. The basic mechanical properties test results indicate that when the curing time increases the uniaxial compressive strength, elastic modulus and Brazilian tensile strength of cement grout increases. The results of constant head flow test indicate that when the curing time increases the coefficient of permeability (K) and the intrinsic permeability (k) of cement grout decreases. The short-term direct shear tests results indicate the frictional resistance at cement-salt interface with the friction angle of 44 degrees and cohesion of 2.12 MPa.

The long-term push-out tests are performed on cement plugs with a series of relatively long curing time with the constant shear stress. Base on the visco-elastic shear creep behavior results, the relation between shear displacement and time are obtained with a various constant shear stress levels with 30 days. The Hookean-Kelvin model is chosen to determine the visco-elastic shear creep behavior at cement-salt interface. The fitting parameters of elastic shear modulus ( $G_1$ ), visco-elastic shear modulus ( $G_2$ ) and viscous coefficient ( $\eta_1$ ) are determined as function of the applied constant shear ratio ( $\tau/\tau_{av}$ ) of borehole cement plug. The empirical parameters,  $G_1$  increase slightly with the  $\tau/\tau_{av}$  increase. The parameters of  $G_2$  and  $\eta_1$  tend to decrease in term of increasing applied constant shear ratio with a power relation. The long-term direct shear test results show the shear creep model parameters. The fitting empirical parameters of  $G_1$ ,  $G_2$  and  $\eta_1$  change with the increase in the shear stress ratio ( $\tau/\tau_p$ ). The predicted curve agree well with the experiment data, which shows the reasonability of nonlinear visco-elastic shear creep model.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
Abstract.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง / เก็บข้อมูล.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	5
<b>บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	<b>7</b>
2.1 หินเกลือหินในภูมิภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย.....	7
2.2 คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของเกลือหิน.....	8
2.3 การอุดหลุมเจาะในเกลือหิน.....	10
2.4 กำลังยึดติดของการอุดซีเมนต์.....	11
2.5 กำลังแรงเฉือนในระยะยาว.....	19
2.6 คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของเกลือหิน.....	20
<b>บทที่ 3 การเตรียมตัวอย่างเกลือหินและซีเมนต์</b> .....	<b>23</b>
3.1 การเตรียมตัวอย่างซีเมนต์.....	23
3.1.1 เครื่องมือ.....	24
3.1.2 วิธีการเตรียมแท่งตัวอย่างซีเมนต์ในหลุมเจาะ.....	24

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 การเตรียมตัวอย่างเกลือหิน.....	31
<b>บทที่ 4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....</b>	<b>35</b>
4.1 วัตถุประสงค์.....	35
4.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของซีเมนต์.....	35
4.2.1 การทดสอบค่าความหนืดและความหนาแน่นของส่วนผสมซีเมนต์.....	35
4.2.2 การทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดี่ยว.....	37
4.2.3 การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน.....	37
4.3 การทดสอบ Push-out.....	45
4.4 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน โดยตรง.....	51
4.5 การทดสอบค่าความซึมผ่าน.....	55
<b>บทที่ 5 การสอบเทียบของพารามิเตอร์การเคลื่อนไหล.....</b>	<b>59</b>
5.1 วัตถุประสงค์.....	59
5.2 รูปแบบการเคลื่อนไหลของความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือน.....	59
5.3 พารามิเตอร์การเคลื่อนไหลของการทดสอบ Push-out.....	60
5.4 พารามิเตอร์การเคลื่อนไหลของการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงระยะยาว.....	63
<b>บทที่ 6 บทสรุป.....</b>	<b>67</b>
<b>บรรณานุกรม.....</b>	<b>71</b>
<b>ประวัตินักวิจัย.....</b>	<b>79</b>

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ BCT-1F และ BCT-1FF (Gulick และคณะ, 1980; อ้างอิงจาก Roy และคณะ, 1985).....	14
2.2 ส่วนประกอบผสมซีเมนต์ 5 ตัวอย่าง (Boa, 1978; อ้างอิงจาก Roy และคณะ, 1985).....	15
2.3 ส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ 80-081 (PSU/WES) (Roy และคณะ, 1982; อ้างอิงจาก Roy และคณะ, 1985).....	16
2.4 ส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ 83-03, 83-05 และ 83-06 (Wakeley และ Roy 1985).....	16
2.5 ส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ 82-02, 82-03 และ 82-14 (Roy และคณะ, 1983; อ้างอิงจาก Roy และคณะ, 1985).....	17
3.1 ส่วนประกอบของซีเมนต์ Salt-bond II (SBII และ SBIIH).....	24
3.2 ขนาดของตัวอย่างซีเมนต์สำหรับการทดสอบแรงกดในแกนเดียวและสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น.....	24
3.3 ขนาดของตัวอย่างซีเมนต์สำหรับการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน.....	26
3.4 ขนาดของตัวอย่างซีเมนต์สำหรับการทดสอบความซึมผ่านระยะยาว.....	28
3.5 ความลึกและขนาดของตัวอย่างเกลือหินและซีเมนต์สำหรับการทดสอบ push-out.....	31
3.6 ความลึกและขนาดของตัวอย่างเกลือหินสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง.....	31
4.1 ค่าความหนืดและค่าความหนาแน่นของซีเมนต์ผสมน้ำเกลือ.....	35
4.2 ผลการทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียว ( $\sigma_c$ ) และสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E) ของ Salt-bond II cement (SBII).....	39
4.3 ผลการทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียว ( $\sigma_c$ ) และสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E) ของ Salt-bond II cement (SBIIH).....	40
4.4 ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน ( $\sigma_B$ ) ของ Salt-bond II cement (SBII).....	41
4.5 ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน ( $\sigma_B$ ) ของ Salt-bond II cement (SBIIH).....	42



## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า	
4.6	สรุปผลการทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียว ( $\sigma_c$ ) การตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E) และการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน ( $\sigma_B$ ).....	44
4.7	สรุปผลการทดสอบ Push-out.....	49
4.8	สรุปผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน โดยตรงตามเกณฑ์ของ Coulomb.....	51
4.9	ความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือนคงที่สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน โดยตรงระยะยาว.....	53
4.10	สรุปผลการทดสอบค่าความซึมผ่านของตัวอย่างซีเมนต์.....	56
5.1	การสอบเทียบพารามิเตอร์การเคลื่อน ไหลจากผลการทดสอบ Push-out.....	59
5.2	ค่าพารามิเตอร์เชิงประจักษ์ของค่าความยืดหยุ่นเฉือน ความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือน และสัมประสิทธิ์ความหนืดกับอัตราส่วนความเค้นเฉือนคงที่.....	61
5.3	การสอบเทียบพารามิเตอร์การเคลื่อน ไหลจากผลการกำลังรับแรงเฉือน โดยตรงระยะยาว.....	62
5.4	ค่าพารามิเตอร์เชิงประจักษ์ของค่าความยืดหยุ่นเฉือน ความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือน และสัมประสิทธิ์ความหนืดกับอัตราส่วนความเค้นเฉือน.....	62

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า	
2.1	แผนที่แสดงสถานที่ของแอ่งโคราชและแอ่งสกลนคร อยู่บนที่ราบสูงโคราชภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย (Tabakh และคณะ, 2002).....	6
2.2	การเปลี่ยนรูปที่ขึ้นกับระยะเวลาของวัสดุ (modified from Jeremic, 1994).....	10
3.1	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานน้ำหนัก 50 กิโลกรัม ที่ใช้ในการศึกษา.....	22
3.2	แม่แบบพีวีซีใช้บ่มส่วนผสมปูนซีเมนต์.....	29
3.3	ตัวอย่างซีเมนต์สำหรับเตรียมการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของซีเมนต์.....	29
3.4	กระบอกซีเมนต์ในแม่แบบพีวีซีสำหรับการทดสอบความซึมผ่าน.....	30
3.5	เจาะตัวอย่างเกลือหินขนาด 25 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบ Push-out.....	32
3.6	ตัวอย่างเกลือหินสำหรับการทดสอบ push-out.....	32
3.7	การตัดแบบแห้งของแท่งเกลือหินด้วยเครื่องตัด.....	33
3.8	ตัวอย่างเกลือหินผสมกับซีเมนต์สำหรับการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง.....	33
4.1	เครื่อง Brookfield® viscometer model RV (ตามมาตรฐาน ASTM D2196).....	35
4.2	การติดตั้งเครื่องมือการทดสอบแรงกดในแกนเดียว.....	37
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดในแกนเดียว ( $\sigma_c$ ) ในฟังก์ชันของการบ่มตัวตามเวลา.....	37
4.4	แสดงการติดตั้งเครื่องมือการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน.....	38
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงแบบบราซิลเลียน ( $\sigma_b$ ) ในฟังก์ชันของการบ่มตัวตามเวลา.....	38
4.6	การติดตั้งเครื่องมือทดสอบ Push-out ประกอบด้วย 1) Loading frame; 2) Hydraulic cylinder; 3) Steel plate with a slit; 4) Square steel plate; 5) Axial bar and steel cylinder; 6) Square steel plate frame; 7) Rock salt sample; 8) Cement grout plug; 9) PVC mold; 10, 11) และ 12) Dial gages.....	46
4.7	การติดตั้งเครื่องมือทดสอบ Push-out.....	46
4.8	ผลการทดสอบ Push-out แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ด้านบนและด้านล่าง.....	47
4.9	ภาพตัดขวางของตัวอย่างหมายเลข SBIH-04-07-PO-01 หลังจากเกิดการพังของการทดสอบ Push-out.....	48

## สารบัญรูปรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ผลการทดสอบ Push-out แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ด้านบน ( $\delta_T$ ) ในฟังก์ชันของเวลา.....	48
4.11 แสดงการติดตั้งเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง (model EL-77-1030).....	50
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวแนวเฉือน.....	51
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของความเค้นตั้งฉาก.....	51
4.14 แสดงการติดตั้งเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงระยะยาว (model DR-44)...	52
4.15 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงระยะยาว แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวเฉือน ( $\delta_s$ ) ในฟังก์ชันของเวลา โดยความเค้นตั้งฉากคงที่ 1.86 เมกกะปาสกาล.....	51
4.16 แสดงการติดตั้งเครื่องมือทดสอบความซึมผ่านของซีเมนต์.....	55
4.17 ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (K) ของตัวอย่างซีเมนต์.....	55
4.18 ค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพ (k) ของตัวอย่างซีเมนต์.....	56
5.1 รูปแบบของ Hookean-Kelvin (Yang และ Cheng, 2011).....	58
5.2 ผลการทดสอบ Push-out (จุด) และการสอบเทียบ (เส้น).....	59
5.3 อิทธิพลของอัตราส่วนเฉือนคงที่ ( $\tau/\tau_{av}$ ) ต่อค่าความยืดหยุ่นเฉือน ( $G_1$ ) ความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือน ( $G_2$ ) และสัมประสิทธิ์ความหนืด ( $\eta_1$ ).....	60
5.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงระยะยาว (จุด) และการสอบเทียบ (เส้น).....	62
5.5 อิทธิพลของอัตราส่วนเฉือน ( $\tau/\tau_p$ ) ต่อค่าความยืดหยุ่นเฉือน ( $G_1$ ) ความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือน ( $G_2$ ) และสัมประสิทธิ์ความหนืด ( $\eta_1$ ).....	63

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

องค์ความรู้ทางการดูแลสุขภาพเจาะในชั้นหินได้พัฒนาขึ้นอย่างจริงจังและต่อเนื่องเมื่อประมาณ 20 ปีที่แล้วในต่างประเทศจนถึงปัจจุบัน (Daemen et al., 1983, 1984, 1986) ความสำคัญขององค์ความรู้นี้ได้ถูกสังเกตเห็นเมื่อเริ่มมีแนวคิดที่จะพัฒนานำเอากากนิวเคลียร์และของเสียทางเคมีไปทิ้งในชั้นหินที่อยู่ในระดับลึกอย่างถาวร หลังจากทิ้งแล้วจะต้องมีการออกแบบและก่อสร้างการดูแลสุขภาพหรือโมงก์ที่นำไปสู่ของเสียเหล่านี้ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการรั่วซึมออกมาสู่ระบบน้ำบาดาล ดังนั้นขบวนการและวัสดุที่ใช้ในการอุดจึงมีความสำคัญมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเชิงกลศาสตร์ ชลศาสตร์ และเคมี

ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยมีชั้นเกลือหินแพร่กระจายอย่างกว้างขวาง เกลือหินจึงเป็นทรัพยากรที่สำคัญของประเทศไทยอย่างหนึ่งซึ่งปัจจุบันกำลังมีการพัฒนาหรือประยุกต์ใช้ได้หลายด้าน อาทิ การทำเหมืองใต้ดินแร่โพแทชที่จังหวัดอุดรธานี และจังหวัดชัยภูมิ รวมถึงการทำเหมืองละลายโพรงเกลือที่อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา นอกจากนี้ยังมีการผลิตเกลือสินเธาว์โดยวิธีสูบน้ำบาดาลที่มีความเค็มขึ้นมาสกัดหรือตากแห้ง และยังมีโครงการออกแบบไว้เป็นที่กักเก็บพลังงานในรูปของอากาศภายใต้แรงดันในอนาคต การออกแบบเพื่อใช้เป็นที่กักเก็บของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และกากนิวเคลียร์ที่ได้มาจากโรงพยาบาลและห้องปฏิบัติการต่าง ๆ งานวิจัยเหล่านี้ได้ดำเนินการวิจัยอยู่ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีอย่างต่อเนื่อง (กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2543, 2544 และ 2548; วารสารนิวเคลียร์ปริทัศน์, 2543) ซึ่งการกักเก็บอย่างถาวรจำเป็นต้องมีการดูแลสุขภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพและสัมฤทธิ์ผลจะต้องคำนึงถึงองค์ความรู้หลัก คือ เสถียรภาพเชิงกลศาสตร์ ประสิทธิภาพต่อการต้านทานความซึมผ่าน และเสถียรภาพทางเคมี ในระยะยาว (Long-term) การดูแลสุขภาพในชั้นหินในอดีตและปัจจุบันมิได้คำนึงถึงองค์ประกอบพื้นฐานเหล่านี้ครบถ้วน หรือทำการศึกษาพฤติกรรมต่าง ๆ เพียงระยะสั้น (Shot-term) ก่อนการออกแบบเท่านั้น ซึ่งอาจทำให้เกิดการรั่วซึมจนสร้างปัญหาต่อสภาพสิ่งแวดล้อมให้เป็นอันตรายได้

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) ศึกษาพฤติกรรมตามกาลเวลาของการอุดซีเมนต์ในเกลือหินเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ดูแลสุขภาพเจาะในชั้นเกลือหินที่ถูกขุดเจาะเป็นโพรงหรืออุโมงค์ในเหมือง และสำหรับเป็นแหล่งทิ้งกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมที่ไม่สามารถบำบัดหรือนำกลับมาใช้ใหม่ได้

- 2) สร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้คาดการณ์ค่ากำลังการยึดติด (Bond Strength) ระหว่างซีเมนต์และเกลือหินในฟังก์ชันของเวลาสำหรับการออกแบบระยะยาว

### 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) การศึกษาพฤติกรรมตามกาลเวลาของการอุดซีเมนต์ในเกลือหินในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการอุดหลุมเจาะในชั้นเกลือหินหรือโพรงเกลือหิน สำหรับเหมืองและกักเก็บกากของเสียในภาคอุตสาหกรรม
- 2) การทดสอบ Push-out จะเตรียมตัวอย่างทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 100 มิลลิเมตร พร้อมเจาะรูเส้นผ่าศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 25 มิลลิเมตรเพื่อไว้ติดตั้งแท่งซีเมนต์
- 3) การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน โดยตรงระหว่างซีเมนต์และเกลือหินทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 100 มิลลิเมตร
- 4) การทดสอบขึ้นกับเวลา (Time-dependent tests) เป็นการทดสอบ Push-out และการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง จะทดสอบไม่น้อยกว่า 30 วันในแต่ละการทดสอบหรือจนกระทั่งซีเมนต์และเกลือหินแตกออกจากกัน
- 5) ใช้ปูนซีเมนต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน (Portland-pozzolan cement) ชนิดทนเค็ม ที่มีจำหน่ายอย่างแพร่หลายในทุกท้องถิ่นของประเทศไทย
- 6) งานวิจัยนี้ไม่รวมไปถึงการอุดหลุมเจาะที่อุณหภูมิสูง การอุดอุโมงค์หรือเหมืองใต้ดิน
- 7) การผสมและระยะเวลาการบ่มตัวของปูนซีเมนต์จะทำตามมาตรฐาน API และมาตรฐาน ASTM

### 1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

การอุดหลุมเจาะ (Boreholes) ในชั้นหินสามารถประยุกต์ใช้ในงานด้านวิศวกรรมธรณีเทคโนโลยีน้ำบาดาล เทคโนโลยีปิโตรเลียม วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และวิศวกรรมเหมืองแร่ ซึ่งหลุมเจาะในที่นี้หมายถึง หลุมเจาะสำรวจหรือหลุมเจาะเพื่อผลิตทางด้านน้ำบาดาลเหมืองแร่ น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ฯลฯ การอุดหลุมเจาะจำพวกนี้ในขณะที่กำลังดำเนินการอยู่หรือหลังจากเลิกใช้แล้วยังไม่เป็นระบบและถูกต้องตามหลักวิชาการ ทำให้เกิดการรั่วซึมหรือปนเปื้อนในชั้นน้ำบาดาล ถึงแม้ว่าเทคโนโลยีทางการอุดหลุมเจาะได้มีมานานแล้วก็ตามโดยเฉพาะในชั้นดินและต่อมาได้พัฒนามาใช้ในชั้นหิน แต่ก็ไม่ได้หมายความว่าหลุมเจาะที่ถูกอุดไปแล้วจะมีสภาพทนยาวนานทัดเทียมเท่ากับหินข้างเคียงที่อยู่ตามธรรมชาติ การอุดหลุมเจาะที่เลิกใช้งานแล้วและหลุมเจาะที่กำลังใช้งานอยู่ทั้งในและต่างประเทศพบว่ามากกว่าร้อยละ 30 ของการรั่วซึมและบางหลุมถึงขั้นใช้งานไม่ได้เลย ดังนั้นการศึกษาประสิทธิภาพของซีเมนต์ในการอุดหลุมเจาะในชั้นเกลือหินจึง

เป็นสิ่งสำคัญประการแรกที่ควรนำมาพิจารณาในการออกแบบโครงกักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรม

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาพฤติกรรมตามกาลเวลาของการอัดซีเมนต์ในเกลือหินและจะสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายค่ากำลังการยึดติดระหว่างซีเมนต์และเกลือหินในฟังก์ชันของเวลา สำหรับใช้ในการออกแบบการอัดหลุมเจาะไม่ให้รั่วซึมในระยะยาวหรืออย่างถาวร และจะทดสอบประสิทธิภาพในการอุดโดยนำแท่งตัวอย่างเกลือหินมาเจาะทะลุจากนั้นจึงอัดซีเมนต์เข้าไปในรูเจาะ การทดสอบกำลังยึดติดสูงสุดระหว่างซีเมนต์และเกลือหินจะดำเนินการทดสอบ Push-out และการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน โดยตรงระหว่างซีเมนต์และเกลือหินภายใต้สภาวะค่าความเค้นตึงจากต่างๆ ในฟังก์ชันของเวลา

### 1.5 วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง / เก็บข้อมูล

การวิจัยแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

#### ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งจะรวมไปถึง ทฤษฎีและขั้นตอนต่างๆ ที่ใช้ในการการอัดหลุมเจาะในชั้นหิน การเลือกใช้วัสดุในการอัดหลุมเจาะในอุตสาหกรรม และการศึกษาและวิจัยในการอัดหลุมเจาะในอดีตที่ดำเนินการมาแล้วทั้งในและต่างประเทศ

#### ขั้นตอนที่ 2 การจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหินและซีเมนต์

ตัวอย่างเกลือหินจะถูกเก็บและเตรียมให้ได้รูปร่างตามขนาดที่ต้องการทดสอบตามมาตรฐานสำหรับการทดสอบ Push-out จะเตรียมตัวอย่างเป็นรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 100 มิลลิเมตร พร้อมเจาะรูเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 25 มิลลิเมตรเพื่อไว้ติดตั้งแท่งซีเมนต์ และสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน โดยตรงระหว่างซีเมนต์และเกลือหินทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 100 มิลลิเมตร

#### ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติพื้นฐานของซีเมนต์ และการทดสอบกำลังยึดติดตามกาลเวลาในการอัดหลุมเจาะระหว่างซีเมนต์และเกลือหิน

การทดสอบแท่งซีเมนต์ประกอบด้วยทดสอบหาการทดสอบค่าความหนืดและความหนาแน่นของส่วนผสมซีเมนต์ กำลังแรงกดสูงสุดในแกนเดียว การตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน โดยใช้แท่งซีเมนต์ทรงกระบอกที่อายุ 1, 3, 7, 21, 28 และ 60 วัน และการทดสอบหาค่าความซึมผ่าน โดยใช้แท่งซีเมนต์ทรงกระบอกที่อายุ 1, 3, 7, 21, 28, 35, 42, 60, 109, 136 และ 254 วัน ตามมาตรฐาน ASTM

การทดสอบกำลังยึดติดสูงสุดระหว่างซีเมนต์และเกลือหินจะดำเนินการทดสอบทั้งในรูปแบบของทดสอบ Push-out ระยะยาว และการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงระยะยาวระหว่างซีเมนต์และเกลือหินภายใต้สภาวะค่าความเค้นตั้งฉาก ในแต่ละการทดสอบขึ้นกับเวลา (Time-dependent tests) ใช้เวลาทดสอบไม่น้อยกว่า 30 วันในแต่ละตัวอย่างหรือจนกระทั่งซีเมนต์และเกลือหินแตกออกจากกัน

#### ขั้นตอนที่ 4 การพัฒนากฎเกณฑ์และการสอบเทียบการเคลื่อนไหลในรอยเลื่อนตามกาลเวลา

จากผลการทดสอบการเคลื่อนไหลของเกลือหินภายใต้แรงเฉือนตามกาลเวลา จะสามารถพัฒนาเป็นกฎเกณฑ์สำหรับการเคลื่อนไหล และสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายค่ากำลังการยึดติด (Bond Strength) ระหว่างซีเมนต์และเกลือหินตามกาลเวลา เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการคาดคะเนการเคลื่อนตัวของเกลือหินที่อยู่ภายใต้สภาวะจริงแบบแรงเฉือนระยะยาวสำหรับการออกแบบระยะยาว (Long-term) ได้ ผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบจะถูกนำมาสอบเทียบ (Calibration) หาค่าคงที่ต่างๆของเกลือหินระยะยาว โดยใช้สมการเชิงคณิตศาสตร์ ประกอบกับการใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ IBM SPSS Statistics 19

#### ขั้นตอนที่ 5 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิด ขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุปได้นำเสนอโดยละเอียดในรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ เพื่อที่จะส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ และตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ

#### ขั้นตอนที่ 6 การถ่ายทอดเทคโนโลยี

แผนการการถ่ายทอดเทคโนโลยีนี้คือ การนำข้อมูลไปเผยแพร่ในเว็บไซต์ของหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีเพื่อให้ผู้ที่สนใจทั่วไปสามารถสืบค้นได้ และนำผลงานวิจัยขึ้นนิตพิมพ์ในวารสารนานาชาติหรือนำเสนอในการประชุมวิชาการระดับชาติเพื่อเผยแพร่ความรู้ในวงกว้างต่อไป

### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลงานวิจัยที่เสนอมานี้มีประโยชน์มากมายกับงานด้านธรณีวิทยา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และวิศวกรรมธรณี ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

- 1) ตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารระดับนานาชาติ
- 2) เผยแพร่องค์ความรู้ให้กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั้งภาครัฐและเอกชน
- 3) สร้างนักวิจัยระดับ Postgraduate อย่างน้อย 1 คน

## 1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยที่เสนอมานี้จะมีประโยชน์อย่างมากและโดยตรงกับหลายหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชน สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ และวิศวกรรมธรณี รวมไปถึงหน่วยงานที่ทำงานเกี่ยวข้องกับการก่อสร้างในชั้นหิน การสร้างเขื่อน การสร้างอุโมงค์ เหมืองแร่บนดินและใต้ดิน หน่วยงานเหล่านี้ได้แก่

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



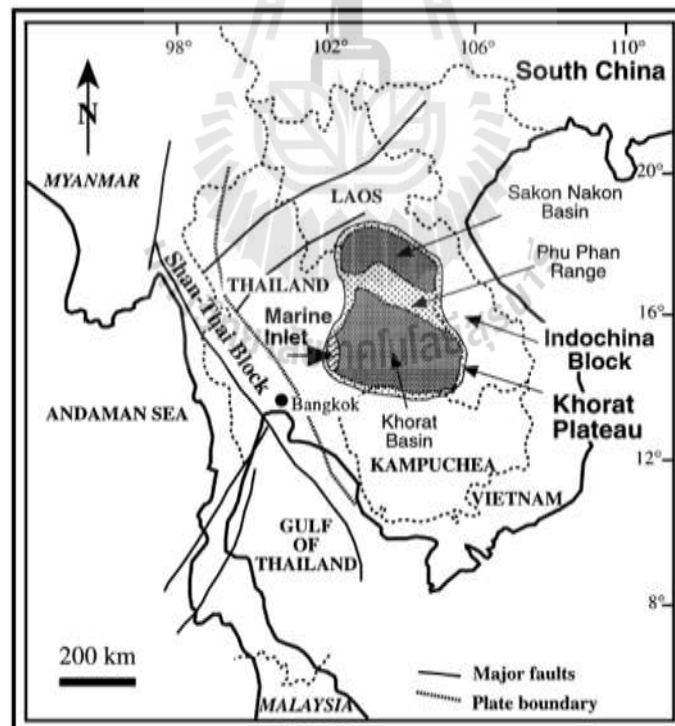
## บทที่ 2

### การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ เพื่อปรับปรุงความเข้าใจของเปลือกหินในประเทศไทย คุณสมบัติของเปลือกหิน การอุดหลุมเจาะในชั้นเปลือกหิน และกำลังยึดติดระหว่างเปลือกหินกับซีเมนต์ การทบทวนวรรณกรรมมีรายละเอียดดังนี้

#### 2.1 เปลือกหินในภูมิภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

เปลือกหินในประเทศไทยตั้งอยู่ในที่ราบสูงโคราช (รูปที่ 2.1) ที่ราบสูงโคราชครอบคลุมพื้นที่ 150,000 ตารางกิโลเมตรจาก 14° ถึง 19° ละติจูดเหนือและ 101° ถึง 106° ลองจิจูดตะวันออก ขอบภาคเหนือและภาคตะวันออกของที่ราบสูงอยู่ใกล้กับประเทศลาวและส่วนหนึ่งในภาคใต้ใกล้กับประเทศกัมพูชา (Utha-aroon, 1993)

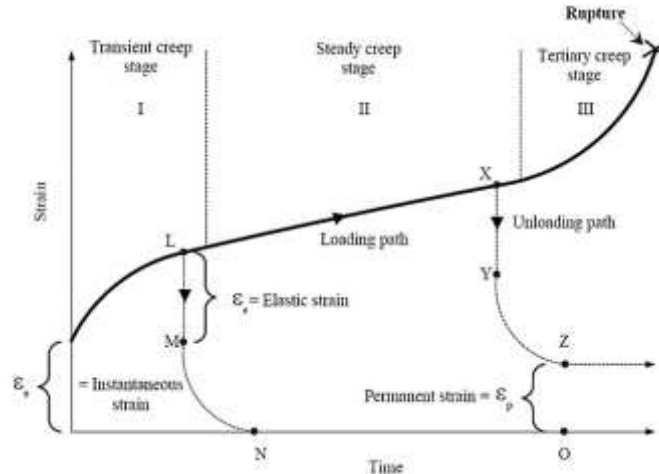


รูปที่ 2.1 แผนที่แสดงสถานที่ของแอ่งโคราชและแอ่งสกลนคร อยู่บนที่ราบสูงโคราชภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย (Tabakh et al., 2002)

เกลือหินแบ่งออกเป็น 2 แอ่ง คือ แอ่งสกลนครและแอ่งโคราช แอ่งสกลนครในภาคเหนือมีพื้นที่ประมาณ 17,000 ตารางกิโลเมตร ครอบคลุมพื้นที่จังหวัดหนองคาย อุดรธานี สกลนคร นครพนม และมุกดาหาร ขยายไปยังบางส่วนของประเทศลาว แอ่งโคราชในภาคใต้ซึ่งมีพื้นที่ประมาณ 33,000 ตารางกิโลเมตร ครอบคลุมพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา ชัยภูมิ ขอนแก่น มหาสารคาม ร้อยเอ็ด กาฬสินธุ์ ยโสธร และทางเหนือของจังหวัดอุบลราชธานี บุรีรัมย์ สุรินทร์ และศรีสะเกษ (Suwanich, 1986)

## 2.2 คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของเกลือหิน

การเปลี่ยนรูปที่ขึ้นกับระยะเวลาที่อยู่ภายใต้แรงที่มากระทำหรือการเคลื่อนไหลเป็นกระบวนการที่หินสามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างต่อเนื่องโดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงความเค้น ความเครียดที่เกิดจากการเคลื่อนไหลซึ่งจะคืนตัวได้น้อยมากเมื่อมีการเอาแรงกดออกไป ดังนั้นเกลือหินจะแสดงการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก การเคลื่อนไหลหรือการเปลี่ยนรูปตามเวลาภายใต้แรงกดคงที่ของหินปรากฏเป็น 3 ช่วง (รูปที่ 2.2) ซึ่งแสดงแบบจำลองคุณสมบัติของเกลือหินที่เปลี่ยนรูปตามเวลาภายใต้แรงกดคงที่ คือ 1) ช่วงที่อัตราความเครียดเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient phase) 2) ช่วงที่อัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาคงที่ (Steady-state phase) และ 3) ช่วงที่จะนำไปสู่การแตก (Tertiary phase) จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการแสดงให้เห็นว่าการลดแรงกดที่จุด L จะทำให้เกิดการลดลงของความเครียดอย่างรวดเร็วไปสู่จุด M จากนั้นจะลดลงไปที่ 0 ที่จุด N ระยะทาง LM คือความเค้น ( $\epsilon_0$ ) โดยไม่มีความเค้นถาวรคงอยู่เลย ถ้าลดความเครียดออกไปจนอยู่ใน steady-state phase จึงจะมีความเค้นถาวรเกิดขึ้นจากจุด stability point โครงสร้างเกลือจะเปลี่ยนแปลงรูปร่างหลังจากแรงกดถูกลดลงซึ่งมีนัยสำคัญทางวิชาการ ความเครียดเป็นปัจจัยหลักใต้ดิน เนื่องมาจากการทำเหมืองไม่สามารถย้อนกลับมาแก้ไขได้ พฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลาของเกลือเมื่อเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้แรงกดคงที่จะเกิดปรากฏการณ์ visco-elastic และ visco-plastic ภายใต้เงื่อนไข strain criteria จะดีกว่า strength criteria ในการออกแบบ เนื่องจากการพังของเสาเกลือหินส่วนใหญ่เกิดขึ้นระหว่างการเร่งหรือ tertiary phase of creep เนื่องมาจากแรงกดคงที่ขนาดของเสา visco-elastic และ visco-plastic rock ควรออกแบบโดยคาดคะเนความเครียดในระยะยาวเพื่อป้องกันการเร่งการเคลื่อนไหล (Fuenkajorn and Daemen, 1988; Dusseault and Fordham, 1993; Jeremic, 1994; Knowles et al., 1998)



รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนรูปที่ขึ้นกับระยะเวลาของวัสดุ (modified from Jeremic, 1994)

Samsri et al. (2010) คำนวณผลกระทบของความเครียดหลักที่ขึ้นอยู่กับเวลาของชั้นเกลือหิน ชุดมหาสารคาม เครื่อง polyaxial creep frame ใช้ทดสอบตัวอย่างหินที่มีลักษณะลูกบาศก์ขนาด โดยทั่วไป  $5.4 \times 5.4 \times 5.4$  ลูกบาศก์เซนติเมตร การใช้แรงเฉือนหกด้าน ( $\tau_{oct}$ ) จะเปลี่ยนแปลงจาก 5 เป็น 8, 11 และ 14 เมกะปาสกาล โดยที่ความเค้นเฉลี่ย ( $\sigma_m$ ) จะคงที่ไว้ที่ 15 เมกะปาสกาล ทุกๆตัวอย่าง โดยให้แรงกดแนวสามแกน ( $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$ ) ไปจนถึงแรงกดแบบ polyaxial ( $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$  และ  $\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3$ ) ใน Burgers model ถูกนำมาใช้ในการอธิบายถึง elastic, visco-elastic (transient) และ visco-plastic (steady-state) ของพฤติกรรมของเกลือหิน การเปลี่ยนแปลงของรูปร่างตัวอย่างจะถูกตรวจสอบตาม แนวแกนสามแกนไปตลอดเวลา 21 วัน Regression analyses บน octahedral shear strain-time curves แสดงให้เห็นว่า elastic modulus ของเกลือ เป็นอิสระต่อ intermediate principal stress ( $\sigma_2$ ) อย่างไรก็ตาม เส้นแนวโน้มจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ  $\tau_{oct}$  ขนาดของ  $\tau_{oct}$  เดียวกัน visco-elastic และ visco-plastic จะมีค่าเพิ่มเมื่อ  $\sigma_2$  เพิ่มขึ้น ในการทดสอบแบบสามแกน  $\sigma_2 = \sigma_3$  เมื่อ  $\sigma_2 = \sigma_1$

Fuenkajorn และ Phueakphum (2010) ทำการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักร (cyclic loading tests) ในเกลือหินมหาสารคาม ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังกดในแกนเดียวจะลดลงเมื่อทำการเพิ่มรอบของการให้แรงกด สามารถแสดงได้จากสมการกำลังของมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (elastic modulus) จะลดลงเล็กน้อยในช่วงรอบแรก ซึ่งจะเป็นอยู่แบบนั้นจนกระทั่งเกิดการแตก โดยไม่เกี่ยวข้องกับแรงกดสูงสุด เส้นโค้ง Axial strain-time ถูกรวบรวมจากแรงกดสูงสุดของแต่ละรอบ แสดงถึงพฤติกรรมที่ไม่ขึ้นกับเวลาแบบเดียวกับการทดสอบการเคลื่อนไหลแบบให้แรงกดคงที่ใน steady-state creep phase ค่าสัมประสิทธิ์ visco-plastic ที่คำนวณจากการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักร จะมีค่าต่ำกว่าการให้แรงกดแบบคงที่ ค่า visco-plasticity ของเกลือจะมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของ loading frequency การทรุดตัวของผิวดินและการปิดถ้ำ ถูกจำลองโดยเทียบค่าพารามิเตอร์ซึ่ง loading test มีผลลัพธ์ดีกว่าการให้แรงกดแบบคงที่ 40% โดยประมาณ นั่นแสดงให้เห็นว่าค่าพารามิเตอร์ที่

ได้มาจาก static loading creep test ในการประเมินความเสถียรระยะยาวของแหล่งกักเก็บในเกลือหินที่มีความดันภายในแปรปรวนอาจจะไม่เป็นไปตามทฤษฎีเดิม

### 2.3 การอุดหลุมเจาะในเกลือหิน

การอุดหลุมเจาะในชั้นหินในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ สามารถจำแนกตามวัตถุประสงค์ที่ทำการอุด โดย Gray and Gray (1992) ได้จำแนกการอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ 1) การอุดแบบถาวร (Permanent) 2) การอุดแบบชั่วคราว (Temporary) 3) การอุดแบบกึ่งถาวร (Semi-permanent) Smith (1994) แบ่งประเภทของการอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรมน้ำบาดาลออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ 1) การอุดแบบชั่วคราว (Temporary sealing) 2) การอุดในหลุมเจาะที่ใช้งานอยู่ (Sealing actively used borehole) และ 3) การอุดแบบถาวร (Sealing for permanent) Fuenkajorn and Daemen (1996) แบ่งประเภทของการอุดหลุมเจาะในชั้นหินในอุตสาหกรรมทุกประเภทออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ 1) การอุดในหลุมเจาะที่ยังมีการใช้งานอยู่ (Sealing actively used boreholes) และ 2) การอุดหลุมเจาะที่เลิกใช้แล้ว (Sealing unused boreholes)

การอุดในหลุมเจาะที่ถูกใช้งานอยู่เกี่ยวข้องกับการอุดใน annular zone ระหว่างท่อกรุ ซึ่งการอุดหลุมเปิดจะถูกใช้ต่อไปในอนาคต เหตุที่ต้องอุดหลุมเจาะที่ถูกใช้งานอยู่ไว้ป้องกันท่อกรุจากการผุกร่อนเพื่อป้องกันการ Blowout ด้วยการอุดเพื่อป้องกันท่อกรุจากแรงสั่นสะเทือนจากการเจาะในระดับลึก และป้องกันการเกิด โซนไหลเวียนหรือ thief zone (Economides, Watters and Dunn-Norman, 1998)

การอุดในหลุมที่ไม่ใช้งานแล้วเป็นอย่างของการอุดแบบถาวร ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นการอุดในหลุมเจาะที่ถูกละทิ้งหรือบ่อน้ำ หน้าที่หลักของการอุดหลุมที่ไม่ใช้งานแล้ว คือการแยกโซนของก๊าซหรือ ของไหล ซึ่งส่วนใหญ่จะเน้นในเรื่องการปกป้องทางสิ่งแวดล้อม (Daemen และ Fuenkajorn, 1996) เหตุในการอุดหลุมเจาะที่ไม่ใช้งานแล้วก็เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของน้ำใต้ดินเพื่อป้องกัน poor aquifer จากการไหลใน water-bearing zone เพื่อรักษา aquifer yield และ artesian pressure และกำจัดภัยพิบัติทางกายภาพใดๆ (Smith, 1993).

Fuenkajorn and Daemen (1987) ศึกษาความสัมพันธ์เชิงกลศาสตร์ของซีเมนต์และเบนโทไนต์กับชั้นหิน ศึกษาความเค้นเนื่องจากการบวมตัวของเบนโทไนต์อัดตัว ได้ทำการทดสอบ 2 รูปแบบ คือ ในระบบปิดซึ่งไม่มีการไหลเข้า-ออกของน้ำและระบบเปิดที่ปล่อยให้ให้น้ำไหลผ่านตัวอย่าง การศึกษาความเค้นเนื่องจากการขยายของซีเมนต์ ทดสอบโดยการอุดซีเมนต์ในท่อ PVC ที่มีความหนาต่างกัน ผลการทดสอบปรากฏว่าเบนโทไนต์ที่ทดสอบในระบบปิดไม่เกิดความเค้นเนื่องจากการบวมตัว แต่เบนโทไนต์ที่ทดสอบในระบบเปิดเกิดการบวมตัวและสามารถวัดค่าความเค้นในแนวแกนและแนวรัศมีได้ 7.5 เมกกะปาสคาล และ 2.6 เมกกะปาสคาล ส่วนการทดสอบหาค่าความเค้นเนื่องจากการขยายตัวของซีเมนต์พบว่า ความเค้นในแนวรัศมีเนื่องจากการขยายตัวของซีเมนต์ในท่อที่

หนากว่าวัดได้ 4.7 เมกะปาสคาล และความเค้นในแนวรัศมีในท่อที่บางวัดได้ 2.7 เมกะปาสคาล ผลการทดสอบระบุว่า การออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหินด้วยเบนโทไนต์ควรอุดได้ระดับน้ำบาดาลจึงจะมีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์เพียงพอ และการอุดหลุมเจาะด้วยซีเมนต์ควรอุดในชั้นหินแข็ง เนื่องจากจะทำให้มีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์สูงกว่าการอุดในชั้นหินที่มีความอ่อน

#### 2.4 กำลังยึดติดของการอุดซีเมนต์

Akgun (1996) ทำการวิจัยกำลังยึดติดซีเมนต์ที่ใช้อุดในหิน วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ ศึกษาจากความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเกี่ยวกับความแข็งแรงกับอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อรัศมีของแท่งซีเมนต์ ค่าความแข็งแรงในแนวแกน (Axial strength) กำลังยึดติดระหว่างซีเมนต์กับหิน (Bond strength) และความแข็งแรงเฉือนสูงสุด (Peak shear strength) โดยทดสอบ push-out ของแท่งซีเมนต์ในหลุมตัวอย่างหินทัฟไฟท์ทรงกระบอกที่รัศมีและความยาวแท่งซีเมนต์แตกต่างกัน ผลการทดสอบปรากฏว่าคุณสมบัติเกี่ยวกับความแข็งแรงทั้ง 3 ตัว มีค่าสูงที่สุดในตัวอย่างหินที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อรัศมีของแท่งซีเมนต์ที่มีค่าเท่ากับ 8.0 ผลจากการทดสอบระบุว่า การออกแบบการอุดหลุมเจาะแบบถาวรด้วยซีเมนต์ควรออกแบบให้อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อรัศมีของแท่งซีเมนต์มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 8.0 เพื่อให้ซีเมนต์มีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์เพียงพอ

Ouyang and Daemen (1996) ทดสอบการอุดหลุมเจาะในชั้นหินโดยใช้เบนโทไนต์และวัสดุผสมระหว่างเบนโทไนต์กับหินย่อยของหินทัฟไฟท์ (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 ขนาดของตัวอย่างไม่มีผลทำให้ค่าความซึมผ่านของเบนโทไนต์เพิ่มขึ้นหรือลดลง และค่าความซึมผ่านของตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มแรงดันของน้ำจากการทดสอบแบบ High injection pressure flow test

South and Fuenkajorn (1996) ทดลองการใช้ซีเมนต์ในการอุดหลุมเจาะ โดยศึกษาและเปรียบเทียบอัตราการไหลผ่านเนื้อหินกับซีเมนต์ที่อุด ศึกษา Tension Zone ในบริเวณรอยต่อระหว่างแท่งซีเมนต์กับชั้นหิน และศึกษาการอุดหลุมเจาะที่ความลึกต่างๆ กัน โดยจำลองแรงดันทั้งในแนวแกนและด้านข้างที่แตกต่างกัน ตัวอย่างหินมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร และยาว 30 เซนติเมตร ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มแรกจะถูกเจาะรูที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร ตรงกลางหัวท้ายเป็นความยาว 1/3 ของความยาวของตัวอย่างหินและตัวอย่างหินกลุ่มที่ 2 จะถูกเจาะรูที่มี

เส้นผ่าศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร ตรงกลางจนทะลุ (ลักษณะเป็นวงแหวน) แล้วอุดด้วยซีเมนต์มีความยาว 5 เซนติเมตร ที่ตรงกึ่งกลางของตัวอย่างหิน ตัวอย่างหินจะมีลักษณะเหมือนกลุ่มแรกแต่แตกต่างกันตรงที่วัสดุที่อุดอยู่ตรงกึ่งกลางซึ่งกลุ่มแรกเป็นเนื้อหินส่วนกลุ่มที่ 2 เป็นซีเมนต์ ตัวอย่างหินที่ใช้มี 5 ชนิด ที่แตกต่างกันประกอบด้วย หินแกรนิต 2 ตัวอย่าง หินบะซอลต์ 1 ตัวอย่าง และหินทัฟไฟ 2 ตัวอย่าง ซีเมนต์ที่ใช้ในการอุดมีส่วนผสมประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ Class A ผสมกับน้ำที่ 50% โดยน้ำหนัก, Dowell additive D53 10% สารเพิ่มการขยายตัวและ D65 1% ซีเมนต์ผสมตามมาตรฐานสถาบันปิโตรเลียมสหรัฐอเมริกา (American Petroleum Institute, 1986) ซีเมนต์ที่ผสมเสร็จมีค่าความหนาแน่น 1.88 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีความแข็ง 26.2 เมกกะปาสคาล (บ่มที่ 43°C เป็นเวลา 14 วัน) และมีการขยายตัว 0.18 % (หลัง 14 วัน) มีความเค้นในแนวรัศมีภายหลัง 25 วัน วัดได้ 4 เมกกะปาสคาล ค่าความซึมผ่าน  $8.65 \times 10^{-13}$  เมตรต่อวินาที การทดสอบการไหลผ่านจะทำโดยการใส่ Permeameter ด้วยการปล่อยน้ำจากปั๊มให้ไหลผ่านรูในแนวเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างหินจากหัวคู่มือของตัวอย่างหินและเพื่อให้การทดสอบเป็นไปตามสภาวะที่การอุดอยู่ในระดับลึก 1000, 600 และ 300 เมตร จึงใส่แรงในแนวแกน (axial load) และความเค้นด้านข้าง (confining stress) ที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ ที่แรงในแนวแกน 23 เมกกะปาสคาล ใช้แรงดันด้านข้าง 20 เมกกะปาสคาล (1000 เมตร) ที่แรงในแนวแกน 15 เมกกะปาสคาล ใช้แรงดันด้านข้าง 13.5 เมกกะปาสคาล (600 เมตร) และที่แรงในแนวแกน 8.5 เมกกะปาสคาล ใช้แรงดันด้านข้าง 7.0 เมกกะปาสคาล (300 เมตร) และแรงดันน้ำที่ใช้ในแต่ละระดับความลึกคือ 10.7 และ 3.5 เมกกะปาสคาล ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าอัตราการไหลผ่านแท่งซีเมนต์จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงในตัวอย่างที่มีค่าความซึมผ่านของแท่งซีเมนต์ต่อค่าความซึมผ่านของชั้นหินน้อยกว่า 1 วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม FREESUEF และค่าอัตราการไหลจะเพิ่มเป็นเส้นตรงในตัวอย่างที่มีค่าความซึมของแท่งซีเมนต์ต่อค่าความซึมผ่านของชั้นหินมากกว่า 100 และเมื่อวิเคราะห์ด้วย Program Plane2d-FE พบว่า Tension Zone จะไม่เพิ่มขึ้นถ้าความเค้นเนื่องจากการขยายตัวของซีเมนต์น้อยกว่า 75% ของความเค้นในแนวสัมผัสที่กระทำต่อผนังของหลุมเจาะ (Tangential stress) ผลการทดสอบแนะนำเกี่ยวกับการออกแบบการอุดหลุมเจาะ ณ จุดใดๆ ว่า Expansive cement เป็นวัสดุที่มีคุณภาพเพียงพอสามารถอุดในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความเค้นได้ดี ในชั้นหินแข็งควรใช้ซีเมนต์ในการอุด เนื่องจากการติดตั้งซีเมนต์ในหินแข็งจะให้พันธะทางกลศาสตร์บริเวณรอยต่อที่ดีที่สุด ค่าความซึมผ่านของวัสดุที่อุดควรจะน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 เท่า ของค่าความซึมผ่านของชั้นหิน ควรใช้ซีเมนต์อุดตำแหน่งที่อยู่ใต้ระดับน้ำบาดาล เพราะในสภาวะที่แท่งซีเมนต์จะหดตัวและแตกจึงทำให้มีค่าความซึมผ่านสูงมาก การเลือกใช้ซีเมนต์หรือเบนโทไนต์ให้เหมาะสมกับแต่ละตำแหน่งในหลุมเจาะจะทำให้การอุดเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ กรณีการอุดด้วยเบนโทไนต์ควรอุดแทรกด้วยซีเมนต์เป็น Key seal

Agkun (1997) ทำการทดสอบ Push-out เพื่อหาวัสดุที่เหมาะสมในเชิงกลศาสตร์สำหรับการอุดหลุมเจาะขนาดใหญ่ในชั้นเกลือหินด้วย วัสดุที่ศึกษาและใช้ในการทดสอบเป็นซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติขยายตัวได้ที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ Self-stress I cement และ Salt-bond II cement, Self-stress I ได้จากการผสมกันของ Self-stress cement 659 กรัม กับน้ำเกลืออิ่มตัว (NaCl- saturated brine) 493 กรัม ส่วน Salt-bond II cement ได้จากการผสมกันของปูนซีเมนต์ Class H จำนวน 1000 กรัม น้ำเกลืออิ่มตัว 450 กรัม Liquid additive D604 จำนวน 64 กรัม และ Anti-foam agent (M45) จำนวน 4.4 กรัม ตัวอย่างเกลือหินรูปทรงกระบอกที่เจาะรูตรงกลางตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง ซีเมนต์ที่อุดในรูทดสอบในตัวอย่างหินและเกลือหินที่ไม่เหลืออยู่มีค่าความยาวต่อรัศมีเท่ากับ 2.0 และซีเมนต์ที่อุดจะถูกบ่มไว้ในน้ำ 8 วัน ก่อนนำมาทดสอบ จากการทดสอบปรากฏว่าการอุดด้วย Self-stress cement ให้ค่าความเสียหายระหว่างซีเมนต์กับหินเท่ากับ 2.2 เมกะปาสกาล (22% ของค่าความเสียหายระหว่างเนื้อเกลือหินกับเกลือหิน) และการอุดด้วย Salt-bond cement ให้ค่าความเสียหายระหว่างซีเมนต์กับหินเท่ากับ 6.1 เมกะปาสกาล (60% ของค่าความเสียหายระหว่างเนื้อเกลือหินกับเกลือหิน) ผลการทดสอบระบุว่า การออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นเกลือหินควรจะใช้ซีเมนต์ที่มีส่วนผสมตาม Salt-bond II cement เพื่อให้มีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์เพียงพอ

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

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

ทำการศึกษาคือความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การอิมตัวด้วยน้ำกับความแข็งของซีเมนต์และรัศมีของตัวอย่างการอัดกับความแข็งของซีเมนต์ การเตรียมซีเมนต์ด้วยการใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ I หรือ II ผสมกับน้ำกลั่น 50 % เติมน้ำที่ทำให้เกิดการขยายตัว (D53) 10 % และ สารที่ทำให้เกิดการกระจายตัว (D65) 1% โดยน้ำหนัก ตามมาตรฐานสถาบันปิโตรเลียมสหรัฐอเมริกา (API) ตัวอย่างหินเป็นหินที่ฟุ้งรูปทรงกระบอกที่เจาะรูตรงกลางตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลางมีรัศมี 6.35, 12.7 25.4 และ 50.8 มิลลิเมตร รัศมีภายนอกมีค่าระหว่าง 38.1 ถึง 93.66 มิลลิเมตร ซีเมนต์ที่อุดในรูทดสอบในตัวอย่างหินมีค่าความยาวต่อรัศมีเท่ากับ 2.0 และซีเมนต์ที่อุดจะถูกบ่มไว้ในน้ำ 8 วัน ก่อนนำมาทดสอบ เปอร์เซ็นต์การอิมตัวด้วยน้ำของซีเมนต์มี 3 ระดับ คือ แห้ง เปอร์เซ็นต์การอิมตัวด้วยน้ำน้อย และเปอร์เซ็นต์การอิมตัวด้วยน้ำปานกลาง จากการทดสอบพบว่าค่าความแข็งในแนวแกน ความเสียหายระหว่างซีเมนต์กับหินและความแข็งเฉือนสูงสุดในตัวอย่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปอร์เซ็นต์การอิมตัวด้วยน้ำของซีเมนต์เพิ่มขึ้นและรัศมีของตัวอย่างน้อยลง ผลจากการทดสอบระบุว่าการออกแบบการอัดหลุมเจาะแบบถาวรด้วยซีเมนต์ควรออกแบบให้อุดในตำแหน่งที่อยู่ใต้ระดับน้ำบาดาล เพื่อให้มีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์ที่เพียงพอ

Akgun and Daemen (2004) ได้ศึกษาการขยายตัวของวัสดุประสานในการปลั๊กหลุมเจาะใต้ดิน ทำให้เกิดความเค้นตามแนวรัศมีบนผนังและเนื่องจากความเครียดในแนวแกนนำไปประยุกต์ใช้กับการปลั๊กหลุมเจาะอันเนื่องมาจากการบวมตัวของวัสดุปลั๊กหลุม เนื่องจากแรงเครียดตามแนวแกนนั้นจะทำให้เกิดแรงดึงของรอยแตกในตัวหิน การลดหรือการกำจัดแรงดึงในหินจึงมีความสำคัญมากในการกักเก็บของเสีย ปัจจุบันมีทฤษฎีเกี่ยวกับการกระจายแรงตามแนวรัศมี และแรงดึงในระบบการปลั๊กหลุมเจาะเนื่องจาก combined axial อุณหภูมิ lateral load รวมทั้งการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าแรงดึงเฉลี่ยในตัวหิน เกินกว่าแรงเริ่มต้นในการปลั๊กหลุม แสดงให้เห็นว่าแรงเริ่มต้นในการปลั๊กหลุมนั้นเสถียรพอต่อแรงดึงของรอยแตก แรงดึงของหินที่ถูกวัดในการศึกษานี้จะมีค่าต่ำเนื่องจากอยู่ในสถานะที่ไม่มีมีความดันล้อมรอบ

การศึกษากาสนามในปี 1970 ในแคนซัส (Kansas) และนิวเม็กซิโก (New Mexico) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับการสูตรผสมปูนซีเมนต์ ในการออกแบบเพื่อใช้กับกลุ่มหิน evaporites เปรียบเทียบกับส่วนผสมซีเมนต์สำหรับรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว และกำลังยึดติดสูงสุด กำหนดส่วนผสมซีเมนต์ BCT-1F และ BCT-1FF (ตารางที่ 2.1) ทดลองในห้องปฏิบัติการ ทดสอบโดย U.S Army Engineering Waterways Experiment Station (WES), Dowell, The Pennsylvania State University (PSU) และ Oak Ridge National Laboratory (ORNL) ผลการทดลองแรงกดสูงสุดในแกนเดียวของตัวอย่าง BCT-1F ช่วง 23.25-79.05 เมกกะปาสกาล และกำลังยึดติดสูงสุด 2.48-7.15 เมกกะปาสกาล และแรงกดสูงสุดในแกนเดียวของตัวอย่าง BCT-1FF ช่วง 20.84-131.79 เมกกะปาสกาล และกำลังยึดติดสูงสุด 2.69-14.21 เมกกะปาสกาล (Roy et al., 1985)



ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ BCT-1F และ BCT-1FF (Gulick et al., 1980; อ้างอิงจาก Roy et al., 1985)

ส่วนผสม (น้ำหนัก %)	BCT-1F	BCT-1FF
ซีเมนต์ Class H	50.10	52.20
สารเพิ่มการขยายตัว (Expansive additive)	6.70	7.00
Flyash (high lime)	16.90	17.60
เกลือ (NaCl)	6.50	-
Dispersant	0.20	0.20
Defoamer	0.02	0.02
น้ำ	19.50	23.00

U.S Army Engineering ได้ศึกษาซีเมนต์ (grouts) ที่เวลาสี่ปี กำหนดและทดสอบส่วนผสมที่มีศักยภาพสำหรับการใช้งานที่ Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) ที่ไซต์งาน ERDA-10 องค์ประกอบ 5 ตัวอย่างของส่วนผสมซีเมนต์เหล่านี้ถูกนำเสนอในตารางที่ 2.2 ผลการทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียวอย่างบ่มเป็นเวลา 28 อุณหภูมิ 53 องศาเซลเซียส ช่วง 34.9-61.96 เมกะปาสคาล กำลังยึดติดต่ำสุดคือ BP-521-25 MP เป็น 1.73 เมกะปาสคาล และกำลังยึดติดสูงสุดคือ BPN-FA-BS-SP-P-1 (Type III) เป็น 5.97 เมกะปาสคาล (Roy et al., 1985)

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบผสมซีเมนต์ 5 ตัวอย่าง (Boa, 1978 อ้างอิงจาก Roy et al., 1985)

ส่วนประกอบ (lb/ft <sup>3</sup> )	BP-521-25 MP	BPN-FA-SP-P	BPN-CS-FA-1	BPN-FA-BS-SP-P-1	BPN-FA-BS-SP-P-1 (Type III)
ซีเมนต์ ChemComp	43.54	61.12	62.02	55.21	-
ซีเมนต์ ChemStress	9.00	-	9.00	-	-
ซีเมนต์ Type III	-	-	-	-	55.21
Fly ash	12.40	20.56	16.76	18.58	18.58
เกลือ	-	-	-	11.43	11.43
TUFA	9.84	-	-	-	-
Melment L-10	2.10	1.63	1.72	1.48	1.48
Plastiment (oz/ft <sup>3</sup> )	2.76	2.60	3.02	2.94	2.94
น้ำ	36.14	34.31	32.66	31.73	31.73

ปูนซีเมนต์ 80-081 (เรียกว่าส่วนผสม PSU / WES) ส่วนผสมอยู่กึ่งกลางระหว่าง BCT-1F และ BCT-1FF องค์ประกอบของส่วนผสมในตารางที่ 2.3 กำลังกวดในแกนเดียวสูงสุดของตัวอย่าง 80-081 เป็น 43.2-107.7 เมกกะปาสกาล

ปูนซีเมนต์สูตร 83-03, 83-05 และ 83-06 ส่วนผสม 83-03 เป็นส่วนผสมเกลือที่เกี่ยวข้องกับสูตร BCT-1F ส่วนผสม 83-03 และ 83-05 เป็นสูตรสำหรับใช้ในส่วนประกอบของ halite และ เกลือ ส่วนผสม 83-06 เป็นสูตร salt-free สำหรับใช้ในแอนไฮไดรต์ (anhydrite) องค์ประกอบของส่วนผสมเสนอในตารางที่ 2.4 กำลังกวดสูงสุดในแกนเดียวของ 83-03, 83-05 และ 83-06 คือ 22.07-97.00 เมกกะปาสกาล 32.30-53.10 เมกกะปาสกาล และ 53.50-113.90 เมกกะปาสกาล ตามลำดับ การทดสอบ push-out bond strength ของ 83-06 คือ 1.02-3.33 เมกกะปาสกาล

ปูนซีเมนต์สูตร 82-02, 82-03 และ 82-14 องค์ประกอบของสูตรในตารางที่ 2.5 กำลังกวดในแกนเดียวสูงสุดของ 82-02, 82-03 และ 82-14 คือ 11.8-64.4 เมกกะปาสกาล 74.9-128.2 เมกกะปาสกาล และ 28.7-60.7 เมกกะปาสกาล ตามลำดับ

ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ 80-081 (PSU/WES) (Roy et al., 1982, 1985)

ส่วนประกอบ	มวล (กรัม)
ซีเมนต์ Class H	68.00
Fly ash	22.90
Expansive additive	8.34
เกลือ (NaCl)	4.05
Water reducer	1.10 มิลลิลิตร
Defoaming agent	0.02
น้ำกลั่น (Freshly boiled deionized water)	27.40

ตารางที่ 2.4 ส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ 83-03, 83-05 และ 83-06 (Wakeley and Roy 1985)

ส่วนประกอบ (% น้ำหนักรวม)	สูตร		
	83-03	83-05	83-06
ซีเมนต์ Class H	20.14	28.93	30.66
Class C fly ash	6.78	9.72	10.30
SiO <sub>2</sub> flour	-	5.97	6.29
CaSO <sub>4</sub> additive	2.46	3.41	3.62
เกลือ NaCl	2.64	5.17	-
Plasticizer, Melment	0.98	-	-
Melgran 0	-	0.06	1.01
Defoamer	0.07	0.10	1.01
Deionized water	8.17	16.84	16.39
ทราย	58.75	29.80	31.62

ตารางที่ 2.5 ส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ 82-02, 82-03 และ 82-14 (Roy et al., 1983, 1985)

ส่วนประกอบ (% น้ำหนักรวม)	สูตร		
	82-02	82-030	82-14
ซีเมนต์ Class H	49.02	60.21	53.78
High lime fly ash	12.27	19.36	13.44
Gypseal	-	8.25	-
Low lime fly ash	12.25	-	13.44
Ohio fume	8.17	6.04	8.96
5- $\mu$ m Quartz	-	6.13	-
C 109 sand	89.87	-	98.59
เกลือ NaCl	-	-	10.37
CaCl <sub>2</sub>	18.30	-	-
D-65	0.82	1.42	0.90
D-47	0.30	0.02	-
Citric acid	0.20	-	-
น้ำ	23.00	25.88	25.21

Tepnarong (2012) ศึกษาการทดสอบกำลังแรงเฉือนสูงสุดระหว่างซีเมนต์อุดและรอยแตกในเกลื้อหินประกอบด้วย การทดสอบ Push-out และการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง โดยเตรียมตัวอย่างเกลื้อหินเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร จากเกลื้อหินชุดมหาสารคามภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ใช้ส่วนผสมซีเมนต์ คือ ปูนซีเมนต์ชนิดทนเค็ม 700 กรัม น้ำเกลืออิ่มตัว (NaCl saturated brine) 385 กรัม สารผสมเพิ่มเพื่อลดฟองอากาศ (Sika Plastocrete) 20 กรัม และสารผสมเพิ่มเพื่อการขยายตัว (Sika Interplast ZX) 3.5 กรัม ในการทดสอบ Push-out และการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงตัวอย่างซีเมนต์ถูกบ่มเป็นเวลา 3 วัน ก่อนการทดสอบ ผลการทดสอบตามเกณฑ์ของคู่มือพบว่าค่าแรงเสียดทานยึดติดระหว่างซีเมนต์และเกลื้อหินมีค่าเท่ากับ 70 และ 69 องศา สำหรับรอยแตกแบบขรุขระและรอยแตกแบบตัดเรียบตามลำดับ แรงยึดติดในรอยแตกระหว่างซีเมนต์และเกลื้อหินมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.42 เมกกะปาสคาล การทดสอบ Push-out ให้ค่าผลการทดสอบที่สูงสุดตามแรงกดในแนวแกน 7.05–11.23 เมกกะปาสคาล อันเป็นผลมาจากผลกระทบของค่าอัตราส่วนบิวซ์ซงที่จะเพิ่มความเค้นตั้งฉากที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของตัวอย่างซีเมนต์และเกลื้อหินในขณะที่ให้แรงกดตามแนวแกน จึงชี้ให้เห็นว่าผลที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือน โดยตรงนั้นให้ค่าที่อยู่ให้เชิงอนุรักษ์ที่มากกว่าสำหรับการทดสอบหาค่ากำลังแรงเฉือนสูงสุดระหว่างเกลื้อหินและซีเมนต์ที่ใช้ในการอุดหลุมเจาะ โดยซีเมนต์สำหรับอุดหลุมเจาะที่นำมาใช้ในการทดสอบครั้งนี้สามารถให้ประสิทธิภาพเชิงกลศาสตร์เป็นไปตามที่ต้องการ

Samaiklang and Fuenkajorn (2013) ศึกษาประสิทธิภาพเชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์ของเกรดซีเมนต์เชิงพาณิชย์ที่เกร้าท์ในรอยแตกของหิน ผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับในเทอมของกำลังกดสูงสุด กำลังดึงสูงสุด กำลังยึดติดสูงสุดและ push-out สูงสุด ในรอยแตกของหิน ส่วนผสมซีเมนต์ทั้งหมดประกอบด้วยอัตราส่วนของน้ำกับซีเมนต์ที่ 0.60 กำลังกดสูงสุดหลังจากบ่มตัว 28 วันเป็น  $25.77 \pm 2.54$  เมกกะปาสคาล และกำลังดึงสูงสุดเป็น  $2.80 \pm 0.27$  เมกกะปาสคาล การทดสอบกำลังยึดติดสูงสุดและ push-out สูงสุดแสดงให้เห็นว่า กำลังยึดติดระหว่างซีเมนต์เกร้าท์กับรอยแตกของหินทรายชุดภูกระดึงในช่วง 1.03 ถึง 2.53 เมกกะปาสคาล และ push-out สูงสุดในช่วง 4.06 ถึง 5.55 เมกกะปาสคาล

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

## 2.5 กำลังแรงเฉือนในระยะยาว

Dieterich (1972) ทำการทดสอบกำลังรับเฉือนโดยตรงในหินแกรนิต หินควอร์ตไซต์ และหินทราย โดยความสัมผัสระหว่างช่วงเวลาของการสัมผัสหยุดนิ่ง (stationary contact) และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตของช่องว่างและร่องปิดในรอยแตกหิน ตัวอย่างถูกตัดเป็นบล็อกหน้าตัดเรียบและขนานกับผิวการไหลของความขรุขระ แรงเสียดทานสถิตในตอนท้ายของช่วงเวลาวัดโดยการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของแรงเฉือนจนกระทั่งบล็อกเคลื่อนที่ช่วงเวลาระหว่าง 1 วินาทีและ 24 ชั่วโมงและความเค้นในแนวตั้งฉากระหว่าง 2 และ 85 เมกะปาสกาล ผลการศึกษาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานสถิตของรอยแตกจะไม่ขึ้นกับเวลาสำหรับหน้ารอยแตกสะอาดของผิวขรุขระ ในขณะที่รอยแตกกับร่องปิดแสดงพฤติกรรมขึ้นกับเวลา (time-dependent) ที่สูง แรงเสียดทานสถิตเพิ่มขึ้นกับเวลาที่บล็อกติดกันคงอยู่ในการสัมผัสหยุดนิ่ง

Lajtai and Gadi (1989) ศึกษาขึ้นกับเวลาเกี่ยวกับแรงเสียดทานในแนวราบ ทำการทดสอบกำลังรับเฉือน โดยตรงบนระนาบผิวเรียบบล็อกหิน Lac du Bonnet granite โดยความเค้นในแนวตั้งฉากอยู่ในช่วง 0.2-8 เมกะปาสกาล แรงเสียดทานในการทดสอบเพิ่มขึ้นทั้งการเคลื่อนที่และเวลา การเพิ่มขึ้นของแรงเสียดทานแรกเริ่มของผิวเรียบในระหว่างการเคลื่อนที่เฉือนอย่างต่อเนื่องเกิดจากความสึกหรอ จากผลการวิจัยโดย Dieterich (1972) ส่วนใหญ่ความคืบ (Creep) เป็นชั่วคราวในรอยแตกหินภายใต้เงื่อนไขเฉือนสะสมในร่องปิด

Amadei and Curran (1982) ได้ศึกษาความคืบเคลื่อนที่ (creep displacement) ในความไม่ต่อเนื่องเป็นฟังก์ชันความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือนของการแตกภายใต้ความเค้นตั้งฉากคงที่ การเคลื่อนที่ไหล (Creep deformation) คาดว่าจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้น และสำหรับความเค้นเฉือนคงที่ จะลดลงเมื่อความเค้นตั้งฉากเพิ่มขึ้น

Yang and Cheng (2011) ศึกษาการเคลื่อนที่ไหลของความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือนของหินดินดานที่สี่ระดับความเค้นเฉือนต่างกัน พารามิเตอร์ของรูปแบบการเคลื่อนที่ไหลเฉือนแบบเส้นตรง (Stationary shear creep model) มีอิทธิพลต่อเวลา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือน ( $G_2$ ) ของหินลดลง แต่สัมประสิทธิ์ความหนืด ( $\eta_1$ ) เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น รูปแบบการเคลื่อนที่ไหลของความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือนแบบไม่เป็นเส้นตรง (Non-stationary visco-elastic shear creep model) เพื่ออธิบายพฤติกรรมเคลื่อนที่ไหลของความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือนของหิน โดยยืนยันความสัมผัสระหว่างค่าพารามิเตอร์ของการเคลื่อนที่ไหลแบบเส้นตรง  $G_2$ ,  $\eta_1$  และเวลา รูปแบบการเคลื่อนที่ไหลของความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือนแบบไม่เป็นเส้นตรงเทียบกับข้อมูลการทดสอบได้ค่าดีกว่ารูปแบบการเคลื่อนที่ไหลเฉือนแบบเส้นตรง แต่ไม่ดีมากในการคาดการณ์พฤติกรรมเคลื่อนที่ไหลในระยะยาว

Saptono et al. (2012) ได้ทำการวิจัยคุณสมบัติกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของหินตัวอย่างที่อยู่บนชั้นถ่านหินเช่นหินทรายที่ได้จากเหมืองถ่านหิน Tutupan ใน South Kalimantan, อินโดนีเซีย การวิจัยรวมถึงการทดสอบการเคลื่อนไหลเฉือนโดยใช้รูปแบบการเคลื่อนไหล Generalized Kelvin ของตัวอย่างหินทรายขนาด 15 x 15 cm และ 25 x 25 cm ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดระยะยาวของหินทรายมีค่าต่ำกว่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดระยะสั้น นอกจากนี้ยังพบว่ารูปแบบการเคลื่อนไหล Generalized Kelvin เหมาะกับการเคลื่อนไหลของหินตัวอย่าง

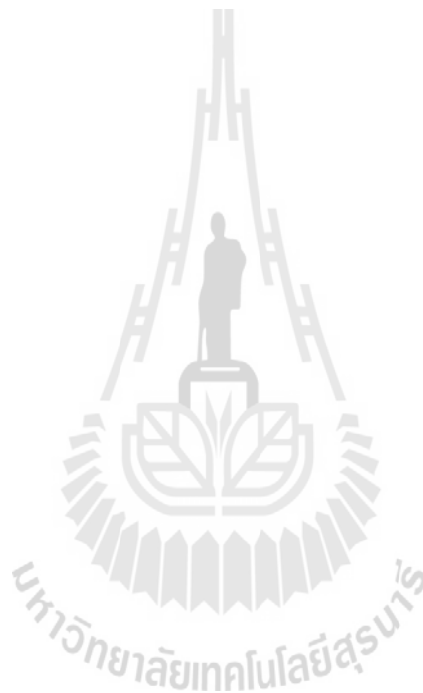
## 2.6 คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของเกลือหิน

Stormont (1990) ตรวจสอบค่าความซึมผ่านของเกลือหินที่อยู่ไกลจากอุโมงค์หรือโพรงจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ  $10^{-22}$  m<sup>2</sup> (หรือประมาณ  $10^{-9}$  darcy) แต่เกลือหินที่อยู่ใกล้กับผนังอุโมงค์หรือโพรงอาจจะมีค่าสูงกว่า  $10^{-18}$  m<sup>2</sup> (หรือประมาณ  $10^{-5}$  darcy) ต่อมา Stormont และ Daemen (1991) และ Peach (1991) ได้ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการและได้ผลยืนยันว่าคุณสมบัติความซึมผ่านของเกลือหิน (Salt permeability) สามารถมีค่าสูงกว่าที่คาดไว้มาก โดยเฉพาะเมื่อเกลือหินนั้นอยู่ภายใต้ความเค้นที่แตกต่างกันมากในแต่ละทิศทาง (Anisotropic stress) ความแตกต่างของความเค้นที่จุดๆ หนึ่งในการเกลือหินถ้าสูงพอจะทำให้เกิดรอยแตกเล็กๆ ในเนื้อหิน (Micro-cracks) รอยแตกเล็กๆ นี้จะมีทิศทางค่อนข้างขนานกับทิศทางของความเค้นหลักสูงสุด (Major principal stress) และเมื่อรอยแตกเล็กๆ นี้พัฒนามากขึ้นจนต่อเชื่อมกันก็จะนำไปสู่ความซึมผ่านที่สูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งความซึมผ่านที่อยู่ในทิศทางที่ขนานกับทิศทางของความเค้นหลักสูงสุด นอกจากนั้นแล้วความสามารถในการซึมผ่านของอากาศหรือของเหลวในชั้นเกลือหินก็ยังขึ้นกับขนาดและความแตกต่างของความเค้นหลักในสามทิศทางที่จุดนั้นๆ ดังนั้นในบริเวณที่ใกล้กับผนังของโพรงหรืออุโมงค์ค่าความแตกต่างของความเค้นจะมีค่าสูงสุด และเกลือหินจะเกิดการวิรูปหรือเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบยืดหยุ่นและพลาสติกโดยขึ้นกับเวลา และเมื่อถึงจุดๆ หนึ่งถ้าค่าความแตกต่างของความเค้นยังลดลงไม่เพียงพอเกลือหินก็จะเกิดการแตกร้าวขึ้น ซึ่งจะเป็นที่มาของความสามารถในการซึมผ่านที่สูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันเกลือหินที่อยู่ไกลจากผนังอุโมงค์หรือโพรงจะมีค่าความแตกต่างของความเค้นหลักน้อย ดังนั้นเกลือหินในบริเวณนั้นจึงมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อยกว่า และอาจจะไม่มีการแตกร้าวเกิดขึ้นทำให้เกลือหินที่อยู่ไกลจากผนังอุโมงค์ยังคงมีค่าความซึมผ่านต่ำเหมือน ไม่มีผลกระทบของอุโมงค์เกิดขึ้น

Brodsky et al. (1998) ศึกษาค่าความซึมผ่านของเกลือหิน โดยใช้เกลือหินย่อยที่มีความหนาแน่น 0.85 ถึง 0.90 g/cc ผลที่ได้คือค่าความซึมผ่านจะต่ำกว่าตัวอย่างหินแข็งซึ่งมีค่าเท่ากับ  $10^{-15}$  ถึง  $10^{-12}$  m<sup>2</sup> ถึงแม้เกลือหินจะมีความสามารถในการซึมผ่านต่ำมาก แต่ความซึมผ่านจะสามารถเพิ่มขึ้นได้เพิ่มขึ้นได้เนื่องจากความเสียหายจากกลศาสตร์ เช่น การเกิดรอยแตกขณะเจาะโพรง เป็นต้น Dale และ Hurtodo (1998) ได้ทำการตรวจวัดค่าความซึมผ่านบริเวณรอบๆ โพรงเกลือพบว่ามีการแตก

เกิดขึ้นในระยะรัศมีโพรงน้อยกว่า 3 เมตร และค่าความซึมผ่านก็มีน้อยมากมีค่าประมาณ  $1 \times 10^{-21} \text{ m}^2$  เท่านั้น

Wong et al. (2011) ได้ตรวจวัดค่าความซึมผ่านของวัสดุซีเมนต์โดยใช้พื้นที่รูพรุนและเส้นรอบรูปจากภาพ SEM ผลที่ได้คือค่าความซึมผ่านช่วงตั้งแต่  $3 \times 10^{-18} \text{ m}^2$  ถึง  $5.8 \times 10^{-16} \text{ m}^2$  Samaiklang และ Fuenkajorn (2013) ได้ทดสอบในห้องปฏิบัติการความซึมผ่านของเกร้าท์ซีเมนต์โดยการผสมอัตราส่วนน้ำกับซีเมนต์ที่ 0.60 นำแบบหล่อที่เตรียมไว้ในการทดสอบค่าความซึมผ่านมาทดสอบด้วยวิธีการอัดแรงดันด้วยน้ำ ผลที่ได้อยู่ในช่วงตั้งแต่  $10^{-16}$  ถึง  $10^{-14} \text{ m}^2$  และลดลงตามเวลา



## บทที่ 3

### การจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหินและซีเมนต์

เนื้อหาในบทนี้ได้อธิบายขั้นตอน วิธีการ และข้อปฏิบัติในการจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหินและซีเมนต์ที่ใช้สำหรับทดสอบในห้องปฏิบัติการ

#### 3.1 การเตรียมตัวอย่างซีเมนต์

การเตรียมส่วนผสมของแท่งซีเมนต์สำหรับอบในหลุมเจาะและการทดสอบเนื้องานโดยตรง ในการศึกษานี้ได้ดำเนินการตาม API ฉบับที่ 10 (American Petroleum Institute, 1986; Akgun and Daemen, 1997) ซีเมนต์ผสมด้วยน้ำเกลืออิ่มตัว (NaCl) ซึ่งมีสองประเภทของส่วนผสมซีเมนต์คือ Salt-bond II ผสมกับน้ำเกลือต่ำ (SBII) และ Salt-bond II ผสมกับน้ำเกลือสูง (SBIH) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ปอซโซลาน (Portland-pozzolan cement) ประเภท IP (Type IP) ผสมกับน้ำเกลืออิ่มตัว สารผสมเพิ่มเพื่อการขยายตัว และสารผสมเพิ่มเพื่อลดฟองอากาศ น้ำเกลือเตรียมไว้โดยเกลือหินสะอาดละลายในน้ำกลั่น

ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ปอซโซลานถูกเลือกไว้เนื่องจากความต้องการน้ำเกลือต่ำ คงทนต่อซัลเฟตและใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง (รูปที่ 3.1) สารผสมเพิ่มเพื่อการขยายตัว และสารผสมเพื่อลดฟองอากาศในซีเมนต์และช่วยการควบคุมน้ำหนักและปริมาตรของซีเมนต์ น้ำหนักของส่วนประกอบของซีเมนต์ดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ปอซโซลานน้ำหนัก 50 กิโลกรัม ที่ใช้ในการศึกษา



### 3.1.1 เครื่องมือ

เครื่องมือในการเตรียมตัวอย่างประกอบด้วย

- 1) ถังพลาสติกสำหรับตักและตวง
- 2) ตาชั่งดิจิตอล (ชั่งสูงสุด 2,000 กรัม)
- 3) เครื่องผสมซีเมนต์ (ความจุสูงสุด 5,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร ปรับความเร็วรอบได้ 10 ช่วง)
- 4) แบบหล่อพีวีซี จุกยางปิด และกาวซิลิโคน
- 5) กรวยและหลอดพลาสติก
- 6) เครื่องวัดอุณหภูมิดิจิตอล (Temp gun)

### 3.1.2 วิธีการเตรียมแท่งตัวอย่างซีเมนต์ในหลุมเจาะ

- 1) เตรียมส่วนผสมซีเมนต์อุณหภูมิห้อง (28° ถึง 34°C) และความชื้นห้องไม่ต่ำกว่า 50%
- 2) เตรียมน้ำเกลืออิ่มตัวโดยเกลือบริสุทธิ์ในน้ำกลั่นลงไปจนถึงน้ำ ปล่อยให้ น้ำเกลืออิ่มตัวหนึ่งวันด้วยความถ่วงจำเพาะที่ 1.18 และอุณหภูมิ 32°C
- 3) เทน้ำเกลืออิ่มตัว สารผสมเพิ่มเพื่อการขยายตัว และสารผสมเพิ่มเพื่อลดฟองอากาศผสมในภาชนะเครื่องผสมซีเมนต์ ตามด้วยเทซีเมนต์ลงไปไม่เกิน 15 วินาที (โดยความเร็วรอบช่วงที่ 2) หลังจากนั้นเพิ่มความเร็วรอบเป็นช่วงที่ 6 เป็นเวลา 3 นาที
- 4) ติดตั้งจุกยางปิดที่หลุมเจาะที่ระดับ 25 มิลลิเมตรตามที่ต้องการ เทสารผสมซีเมนต์ลงบนจุกยางให้เร็วที่สุด (ไม่เกิน 30 วินาที)
- 5) เทสารผสมซีเมนต์ผ่านช่องกรวยและหลอดพลาสติก ให้จมลงข้างล่างของหลอดพลาสติก พร้อมยกกรวยและหลอดพลาสติกให้ระดับสูงขึ้น ลดความปั่นป่วนมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ในระหว่างการเท หยุดเทเมื่อระดับความสูงแท่งซีเมนต์ที่ 30 มิลลิเมตรตามที่ต้องการ
- 6) บ่มแท่งตัวอย่างซีเมนต์เป็นเวลา 7 วัน ที่ความดันและอุณหภูมิห้องก่อนที่จะเริ่มการทดสอบ
- 7) ผ่นข้างบนแท่งตัวอย่างซีเมนต์ให้เรียบ

เทและบ่มส่วนผสมซีเมนต์ในแบบหล่อพีวีซีเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 มิลลิเมตร สำหรับการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของซีเมนต์ (รูป 3.2) และแบบหล่อพีวีซีเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สำหรับการทดสอบความซึมผ่าน ซึ่งระบุไว้ในตารางที่ 3.2 ถึง 3.4 รูปที่ 3.3 และ 3.4 แสดงตัวอย่างบางส่วนที่เตรียมไว้สำหรับการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของซีเมนต์ และการทดสอบความซึมผ่าน

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของซีเมนต์ Salt-bond II (SBII และ SBIII)

ส่วนประกอบ (กรัม)	SBII	SBIII
ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอชโซลาน, ประเภท IP	1000	1000
น้ำเกลืออิ่มตัว	450	670
สารผสมเพื่อการขยายตัว	10	10
สารผสมเพื่อลดฟองอากาศ	10	10

ตารางที่ 3.2 ขนาดของตัวอย่างซีเมนต์สำหรับการทดสอบแรงกดในแกนเดียวและสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น

Cement Sample No.	Curing time (days)	Diameter (mm)	Length (mm)	L/D	Density (g/cm <sup>3</sup> )
SBII-02-01-UCS-01	1	54.06	135.49	2.51	1.70
SBII-02-01-UCS-02		53.99	135.00	2.50	1.70
SBII-02-01-UCS-03		53.99	135.58	2.51	1.71
SBII-02-03-UCS-01	3	53.82	136.32	2.53	1.76
SBII-02-03-UCS-02		53.81	135.16	2.51	1.77
SBII-02-03-UCS-03		54.01	135.55	2.51	1.74
SBII-02-07-UCS-01	7	54.02	135.36	2.51	1.74
SBII-02-07-UCS-02		53.81	134.66	2.50	1.75
SBII-02-07-UCS-03		53.97	135.56	2.51	1.78
SBII-02-14-UCS-01	14	53.55	135.05	2.52	1.76
SBII-02-14-UCS-02		53.91	135.75	2.52	1.74
SBII-02-14-UCS-03		53.81	135.46	2.52	1.74
SBII-02-21-UCS-01	21	54.19	133.67	2.47	1.74
SBII-02-21-UCS-02		53.91	135.67	2.52	1.77
SBII-02-21-UCS-03		53.69	134.77	2.51	1.77
SBII-02-28-UCS-01	28	53.93	134.32	2.49	1.79
SBII-02-28-UCS-02		53.85	134.25	2.49	1.72
SBII-02-28-UCS-03		53.82	133.79	2.49	1.72

ตารางที่ 3.2 ขนาดของตัวอย่างซีเมนต์สำหรับการทดสอบแรงกดในแกนเดียวและสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (ต่อ)

Cement Sample No.	Curing time (days)	Diameter (mm)	Length (mm)	L/D	Density (g/cm <sup>3</sup> )
SBII-02-60-UCS-01	60	54.19	135.23	2.50	1.76
SBII-02-60-UCS-02		54.23	134.43	2.48	1.76
SBII-02-60-UCS-03		54.17	133.85	2.47	1.74
SBIH-02-01-UCS-01	1	53.53	133.47	2.49	1.73
SBIH-02-01-UCS-02		54.03	133.64	2.47	1.72
SBIH-02-01-UCS-03		53.38	133.84	2.51	1.73
SBIH-02-03-UCS-01	3	54.09	135.03	2.50	1.73
SBIH-02-03-UCS-02		54.05	135.01	2.50	1.73
SBIH-02-03-UCS-03		53.95	134.85	2.50	1.71
SBIH-02-07-UCS-01	7	53.97	134.55	2.49	1.72
SBIH-02-07-UCS-02		53.80	134.31	2.50	1.73
SBIH-02-07-UCS-03		53.93	135.21	2.51	1.73
SBIH-02-14-UCS-01	14	53.55	135.51	2.53	1.73
SBIH-02-14-UCS-02		53.82	136.47	2.54	1.72
SBIH-02-14-UCS-03		53.61	135.82	2.53	1.72
SBIH-02-21-UCS-01	21	53.81	134.89	2.51	1.72
SBIH-02-21-UCS-02		54.33	134.13	2.47	1.71
SBIH-02-21-UCS-03		53.53	134.20	2.51	1.75
SBIH-02-28-UCS-01	28	53.61	134.11	2.50	1.73
SBIH-02-28-UCS-02		53.73	133.99	2.49	1.74
SBIH-02-28-UCS-03		54.63	135.03	2.47	1.73
SBIH-02-60-UCS-01	60	54.16	135.91	2.51	1.69
SBIH-02-60-UCS-02		53.91	135.19	2.51	1.71
SBIH-02-60-UCS-03		54.11	133.71	2.47	1.70

ตารางที่ 3.3 ขนาดของตัวอย่างซีเมนต์สำหรับการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน

Cement Sample No.	Curing time (days)	Diameter (mm)	Length (mm)	L/D	Density (g/cm <sup>3</sup> )
SBII-02-01-BZ-01	1	54.21	26.29	0.48	1.67
SBII-02-01-BZ-02		54.05	26.34	0.49	1.69
SBII-02-01-BZ-03		53.96	26.83	0.50	1.71
SBII-02-01-BZ-04		54.22	27.59	0.51	1.70
SBII-02-01-BZ-05		54.09	27.21	0.50	1.68
SBII-02-03-BZ-01	3	53.83	26.34	0.49	1.74
SBII-02-03-BZ-02		53.89	26.50	0.49	1.76
SBII-02-03-BZ-03		54.10	25.79	0.48	1.74
SBII-02-03-BZ-04		54.31	25.83	0.48	1.73
SBII-02-03-BZ-05		53.57	25.77	0.48	1.76
SBII-02-07-BZ-01	7	53.99	27.80	0.51	1.71
SBII-02-07-BZ-02		53.90	26.49	0.49	1.71
SBII-02-07-BZ-03		53.91	28.05	0.52	1.72
SBII-02-07-BZ-04		53.81	26.85	0.50	1.70
SBII-02-07-BZ-05		53.82	27.06	0.50	1.75
SBII-02-14-BZ-01	14	53.93	27.13	0.50	1.73
SBII-02-14-BZ-02		53.71	27.92	0.52	1.82
SBII-02-14-BZ-03		53.98	28.63	0.53	1.79
SBII-02-14-BZ-04		53.93	27.51	0.51	1.78
SBII-02-14-BZ-05		53.91	28.21	0.52	1.79
SBII-02-21-BZ-01	21	53.43	28.51	0.53	1.78
SBII-02-21-BZ-02		53.91	27.83	0.52	1.74
SBII-02-21-BZ-03		53.84	27.16	0.50	1.71
SBII-02-21-BZ-04		54.04	28.61	0.53	1.75
SBII-02-21-BZ-05		53.94	27.61	0.51	1.71
SBII-02-28-BZ-01	28	53.54	28.81	0.54	1.75
SBII-02-28-BZ-02		53.49	27.02	0.51	1.76

ตารางที่ 3.3 ขนาดของตัวอย่างซีเมนต์สำหรับการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน (ต่อ)

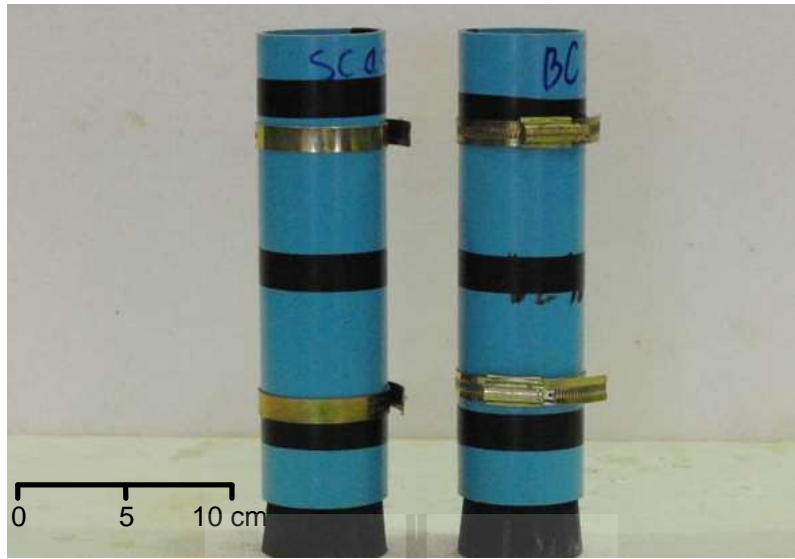
Cement Sample No.	Curing time (days)	Diameter (mm)	Length (mm)	L/D	Density (g/cm <sup>3</sup> )
SBII-02-28-BZ-03	28	53.41	27.02	0.51	1.76
SBII-02-28-BZ-04		53.55	26.57	0.50	1.73
SBII-02-28-BZ-05		53.61	27.59	0.51	1.74
SBII-02-60-BZ-01	60	54.11	28.71	0.53	1.75
SBII-02-60-BZ-02		54.00	27.35	0.51	1.76
SBII-02-60-BZ-03		54.02	27.62	0.51	1.76
SBII-02-60-BZ-04		54.11	27.45	0.51	1.73
SBII-02-60-BZ-05		54.05	28.80	0.53	1.75
SBIII-02-01-BZ-01	1	53.54	27.31	0.51	1.76
SBIII-02-01-BZ-02		53.75	28.23	0.53	1.76
SBIII-02-01-BZ-03		54.15	26.38	0.49	1.75
SBIII-02-01-BZ-04		53.61	26.80	0.50	1.76
SBIII-02-01-BZ-05		53.51	27.03	0.51	1.75
SBIII-02-03-BZ-01	3	54.19	28.30	0.52	1.76
SBIII-02-03-BZ-02		54.23	27.33	0.50	1.72
SBIII-02-03-BZ-03		54.15	28.40	0.52	1.71
SBIII-02-03-BZ-04		54.12	25.89	0.48	1.72
SBIII-02-03-BZ-05		54.31	27.13	0.50	1.69
SBIII-02-07-BZ-01	7	53.93	26.61	0.49	1.72
SBIII-02-07-BZ-02		53.56	27.39	0.51	1.72
SBIII-02-07-BZ-03		54.43	27.31	0.50	1.72
SBIII-02-07-BZ-04		53.93	28.30	0.52	1.71
SBIII-02-07-BZ-05		53.72	26.21	0.49	1.73
SBIII-02-14-BZ-01	14	53.71	27.41	0.51	1.74
SBIII-02-14-BZ-02		53.31	27.11	0.51	1.79
SBIII-02-14-BZ-03		53.32	26.78	0.50	1.77
SBIII-02-14-BZ-04		53.55	27.53	0.51	1.76

ตารางที่ 3.3 ขนาดของตัวอย่างซีเมนต์สำหรับการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน (ต่อ)

Cement Sample No.	Curing time (days)	Diameter (mm)	Length (mm)	L/D	Density (g/cm <sup>3</sup> )
SBIIIH-02-14-BZ-05	14	53.75	26.89	0.50	1.75
SBIIIH-02-21-BZ-01	21	53.81	27.63	0.51	1.76
SBIIIH-02-21-BZ-02		54.38	27.33	0.50	1.71
SBIIIH-02-21-BZ-03		53.85	27.43	0.51	1.72
SBIIIH-02-21-BZ-04		54.13	28.19	0.52	1.68
SBIIIH-02-21-BZ-05		54.21	27.81	0.51	1.69
SBIIIH-02-28-BZ-01		28	53.65	26.55	0.49
SBIIIH-02-28-BZ-02	53.63		28.77	0.54	1.71
SBIIIH-02-28-BZ-03	53.55		27.19	0.51	1.74
SBIIIH-02-28-BZ-04	53.71		27.82	0.52	1.68
SBIIIH-02-28-BZ-05	53.53		28.21	0.53	1.72
SBIIIH-02-60-BZ-01	60		54.11	27.61	0.51
SBIIIH-02-60-BZ-02		54.14	27.73	0.51	1.74
SBIIIH-02-60-BZ-03		54.20	28.11	0.52	1.72
SBIIIH-02-60-BZ-04		54.14	28.31	0.52	1.75
SBIIIH-02-60-BZ-05		54.04	27.22	0.50	1.71

ตารางที่ 3.4 ขนาดของตัวอย่างซีเมนต์สำหรับการทดสอบความชื้นผ่านระยะยาว

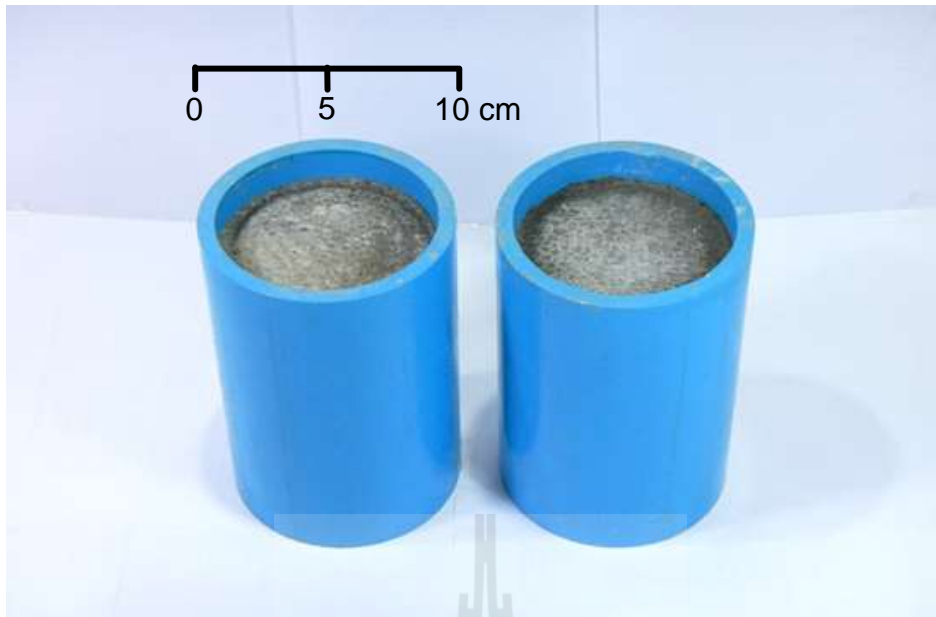
Cement Sample No.	Diameter (mm)	Length (mm)	L/D	Density (g/cm <sup>3</sup> )
SBII-04-P	98.16	104.79	1.07	1.76
SBIIIH-04-P	98.13	100.42	1.02	1.74



รูปที่ 3.2 แม่แบบพีวีซีใช้พิมพ์ส่วนผสมปูนซีเมนต์



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างซีเมนต์สำหรับเตรียมการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของซีเมนต์



รูปที่ 3.4 กระบอกลีเมนต์ในแม่แบบพีวีซีสำหรับการทดสอบความซึมผ่าน

### 3.2 การเตรียมตัวอย่างเกลือหิน

แท่งตัวอย่างเกลือหินเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัทเหมืองแร่อาเซียน โปแตช จำกัด อ.บ้านหินจันรงค์ จ.ชัยภูมิ ซึ่งจุดเจาะมาจากเกลือชั้นกลาง (Middle salt) ที่ความลึก 70 ถึง 130 เมตร ของแอ่งโคราช การศึกษาคุณสมบัติทางศิลาวิทยาของแท่งตัวอย่างมีดังนี้ ผลึกเกลือใสไม่มีสีค่อนข้างสะอาด การยึดเกาะระหว่างผลึกมีการยึดเกาะกันได้ดี พบผลึกเกลือสีเหลืองเข้มที่ระดับความลึกเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบผลึกเกลือสีขาวขุ่นมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.1-0.3 เซนติเมตร โดยปริมาณของผลึกเกลือสีขาวขุ่นและแอนไฮไดรต์จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น พบผลึกเกลือสีเหลืองสลับอยู่กับผลึกเกลือสีเทาเข้มและแอนไฮไดรต์โดยแอนไฮไดรต์มีขนาดตั้งแต่ 2-5 เซนติเมตร พบแร่ข้างเคียงคือซิลิไต์และคาร์เนลไลต์

การเตรียมตัวอย่างมีการปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D4543 ตัวอย่างที่เตรียมไว้สำหรับการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงและการทดสอบ push-out มีความยาว 100 มิลลิเมตร ระบุไว้ในตารางที่ 3.5 และ 3.6 ตัวอย่างทรงกระบอกลทดสอบ push-out โดยเจาะเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร หลุมตั้งฉากกับพื้นผิวตัวอย่างด้านล่าง (รูปที่ 3.5 และ 3.6) รอยแตกแบบเรียบ (saw cut surface) สำหรับทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (รูปที่ 3.7 และ 3.8) หลังจากเตรียมตัวอย่างทำการติดหมายเลขและห่อด้วยฟิล์มพลาสติก



ตารางที่ 3.5 ความลึกและขนาดของตัวอย่างเกลือหินและซีเมนต์สำหรับการทดสอบ push-out

Specimen No.	Depth (m)	Rock salt		Cement plugs	
		D <sub>o</sub> (mm)	L (mm)	D <sub>i</sub> (mm)	L <sub>c</sub> (mm)
SBIH-04-07-PO-01	116.150-116.250	98.42	100.39	25.81	28.71
SBIH-04-07-PO-02	121.140-121.241	100.21	100.53	25.68	32.67
SBIH-04-07-PO-03	73.950-74.054	100.01	104.02	25.22	28.90
SBIH-04-07-PO-04	73.700-73.801	100.18	101.27	25.63	29.11
SBIH-04-07-PO-05	73.550-73.650	100.25	100.07	26.35	30.17
SBIH-04-07-PO-06	119.000-119.102	102.33	101.23	26.23	28.55

ตารางที่ 3.6 ความลึกและขนาดของตัวอย่างเกลือหินสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง

Specimen No.	Depth (m)	Diameter (mm)	Length (mm)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
SBIH-04-07-DS-01	83.038-83.078	100.97	40.12	2.05
SBIH-04-07-DS-02	121.000-121.037	100.60	37.28	2.07
SBIH-04-07-DS-03	121.037-121.079	100.49	42.10	2.07
SBIH-04-07-DS-04	121.079-121.120	100.49	41.36	2.06
SBIH-04-07-DS-05	121.120-121.160	100.61	41.14	2.06
SBIH-04-07-DS-06	129.590-129.659	100.29	69.00	2.05
SBIH-04-07-DS-07	116.000-116.071	100.73	70.55	2.18
SBIH-04-07-DS-08	71.940-72.005	100.10	64.51	2.19
SBIH-04-07-DS-09	73.630-73.700	100.13	69.80	2.16
SBIH-04-07-DS-10	77.040-77.110	101.17	70.21	2.18



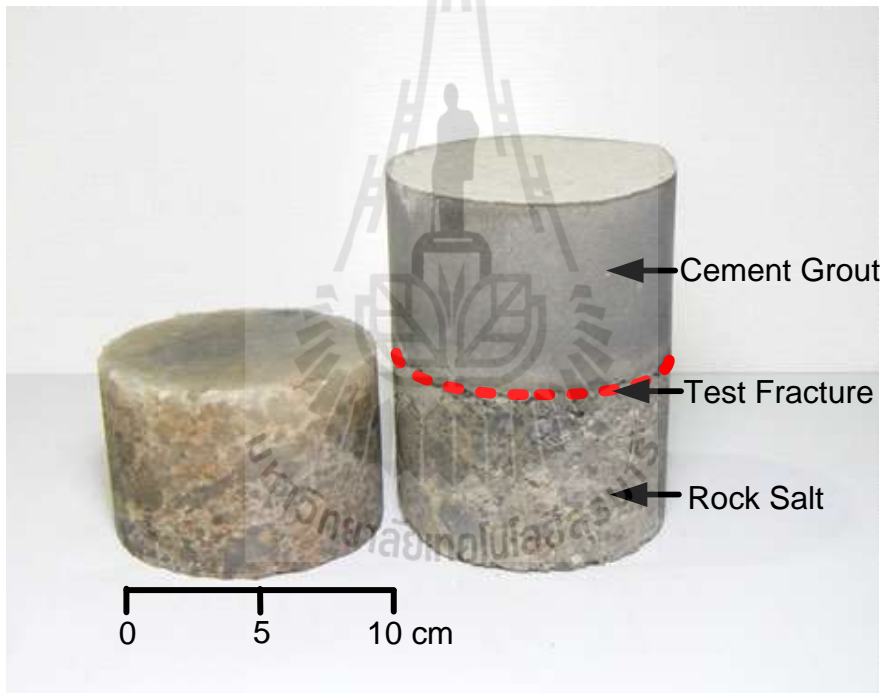
รูปที่ 3.5 เจาะตัวอย่างเกลือหินขนาด 25 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบ Push-out



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างเกลือหินสำหรับการทดสอบ push-out



รูปที่ 3.7 การตัดแบบแห้งของแท่งเกลือหินด้วยเครื่องตัด



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างเกลือหินผสมกับซีเมนต์สำหรับการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง

## บทที่ 4

### การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

#### 4.1 วัตถุประสงค์

เนื้อหาในบทนี้ได้อธิบายขั้นตอน วิธีการ และข้อปฏิบัติของการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วย การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของซีเมนต์ การทดสอบ Push-out การทดสอบแรงเฉือนโดยตรง และการทดสอบค่าความซึมผ่านของซีเมนต์

#### 4.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของซีเมนต์

การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของซีเมนต์ประกอบด้วย การทดสอบค่าความหนืดและความหนาแน่นของส่วนผสมซีเมนต์ การทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียว ( $\sigma_c$ ) การตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E) และการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน ( $\sigma_b$ )

##### 4.2.1 การทดสอบค่าความหนืดและความหนาแน่นของส่วนผสมซีเมนต์

การเตรียมส่วนผสมซีเมนต์และน้ำเกลืออิ่มตัวได้ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM (C938) โดยมีวิธีการผสมในห้องปฏิบัติการดังนี้

- 1) เทส่วนผสมซีเมนต์ลงในบีกเกอร์ปริมาตร 500 cm<sup>3</sup>
- 2) ชั่งน้ำหนักของส่วนผสมซีเมนต์ในบีกเกอร์และบันทึกผล
- 3) คำนวณหาค่าความหนาแน่นและค่าความถ่วงจำเพาะ
- 4) ติดตั้งบีกเกอร์ของส่วนผสมซีเมนต์ในเครื่องทดสอบความหนืด
- 5) วัดค่าความหนืดของส่วนผสมซีเมนต์และบันทึกผล

การทดสอบหาค่าความหนาแน่นได้ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM หมายเลข D854 และค่าความหนืดได้ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM หมายเลข D2196 วัดค่าด้วยเครื่อง Brookfield® viscometer model RV (รูปที่ 4.1) ผลการทดสอบให้ค่าความหนืดทั้งแบบเชิงพลศาสตร์ (Dynamic viscosity) และเชิงจลนศาสตร์ Kinematic viscosity ความหนาแน่น (Slurry density) โดยที่น้ำหนักของส่วนผสมซีเมนต์จะตรวจวัดหลังจากผสมเสร็จในช่วงเวลาที่กำหนด ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบค่าความหนืดและความหนาแน่นของของส่วนผสมซีเมนต์ทั้ง 10 ตัวอย่าง



รูปที่ 4.1 เครื่องมือ Brookfield® viscometer model RV (ตามมาตรฐาน ASTM D2196)

ตารางที่ 4.1 ค่าความหนืดและค่าความหนาแน่นของซีเมนต์ผสมน้ำเกลืออิมตัว

Specimen type	Temperature (°C)		Slurry density (g/cm <sup>3</sup> )	Dynamic viscosity (Pa.s)	Kinematic viscosity (10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> /s)
	Room	Slurry			
SBII-01	32.5	32.0	2.00	32.50	16.22
SBII-02	32.0	31.0	2.01	35.00	17.43
SBII-03	32.5	32.0	2.00	35.00	17.53
SBII-04	33.0	32.5	1.98	38.00	19.20
SBII-05	33.0	32.5	1.99	32.25	16.24
<b>Average</b>			<b>1.99±0.01</b>	<b>34.55±2.33</b>	<b>17.32±1.22</b>
SBIH-01	32.5	32.0	1.75	4.90	2.80
SBIH-02	32.5	32.0	1.75	4.85	2.78
SBIH-03	32.5	32.0	1.74	4.10	2.36
SBIH-04	34.0	32.5	1.75	4.78	2.74
SBIH-05	34.0	32.0	1.77	4.00	2.26
<b>Average</b>			<b>1.75±0.01</b>	<b>4.53±0.44</b>	<b>2.59±0.26</b>

#### 4.2.2 การทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียว

การเตรียมตัวอย่างซีเมนต์ในการทดสอบได้ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D7012, C938 และ C39 ตัวอย่างซีเมนต์ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 มิลลิเมตร ด้วยอัตราส่วนความยาวกับเส้นผ่าศูนย์กลาง (L/D) อยู่ระหว่าง 2.5 ถึง 3.0 ทำการบ่มตัวอย่างซีเมนต์ในแบบหล่อพีวีซีเป็นเวลา 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วัน การทดสอบโดยให้อัตราการกดคงที่ 0.1-0.5 MPa/s กดให้ตัวอย่างซีเมนต์แตก ตรวจสอบวัดการเคลื่อนตัวในแกนด้วยการติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัว (รูปที่ 4.2)

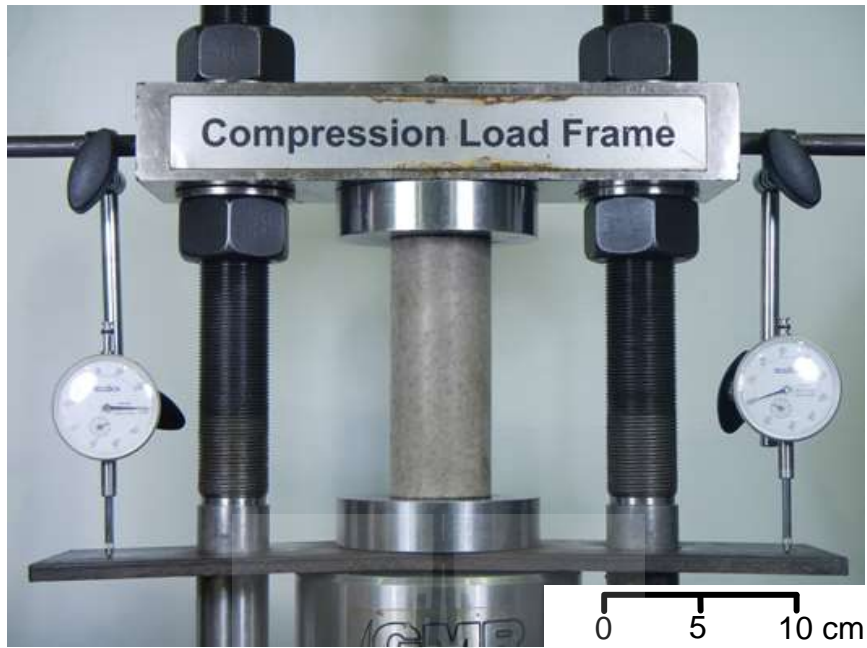
ผลจากการทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียวและการตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นแสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.3 รูปที่ 4.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดในแกนเดียวในฟังก์ชันของการบ่มตัวอย่างตามเวลา ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อการบ่มตัวอย่างตามเวลาเพิ่มขึ้น ค่าแรงกดสูงสุดในแกนเดียวและค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น

#### 4.2.3 การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน

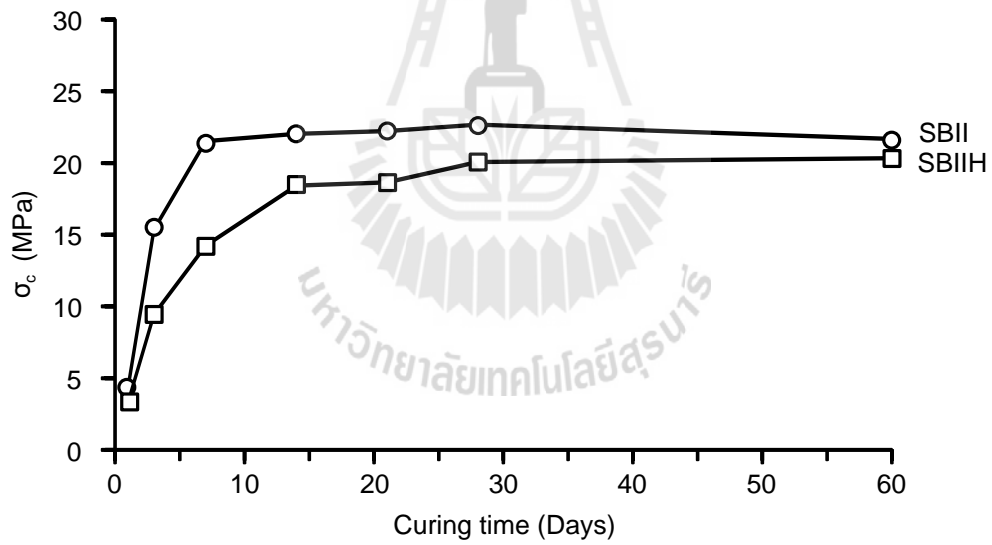
การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนมีจุดประสงค์เพื่อหาแรงดึงสูงสุดของตัวอย่างซีเมนต์ ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM หมายเลข D3967 และข้อเสนอแนะของ ISRM (Brown, 1981) ตัวอย่างซีเมนต์ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 มิลลิเมตร ด้วยอัตราส่วนความยาวกับเส้นผ่าศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 0.5 ทำการบ่มตัวอย่างซีเมนต์ในแม่แบบพีวีซีเป็นเวลา 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วัน การทดสอบโดยให้อัตราการกดคงที่ 0.1-0.5 MPa/s กดให้ตัวอย่างซีเมนต์แตก (รูปที่ 4.4)

ผลจากการทดสอบการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนแสดงในตารางที่ 4.4 และ 4.5 รูปที่ 4.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงแบบบราซิลเลียนในฟังก์ชันของการบ่มตัวอย่างตามเวลา ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อการบ่มตัวอย่างตามเวลาเพิ่มขึ้นค่าแรงดึงแบบบราซิลเลียนเพิ่มขึ้น

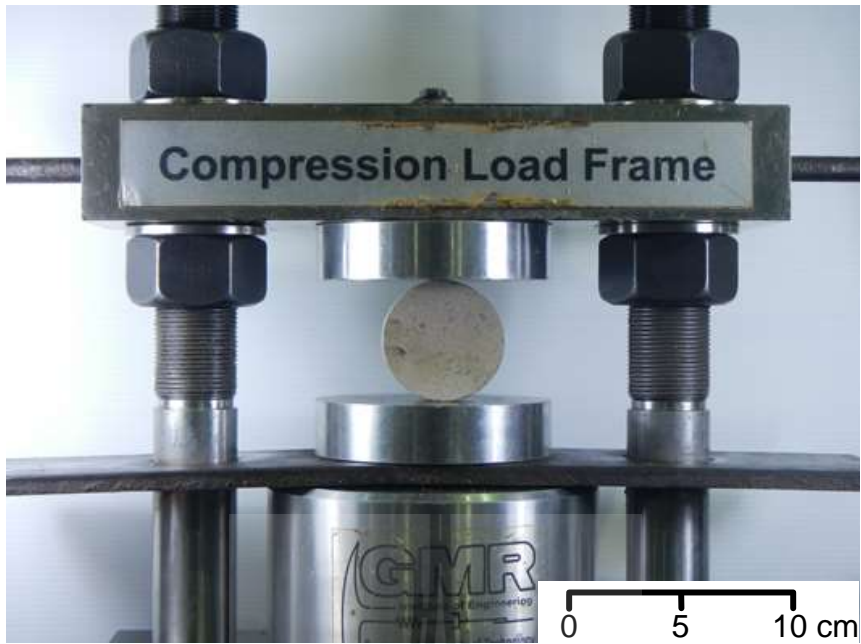
ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของซีเมนต์ทั้งหมดแสดงในตารางที่ 4.6



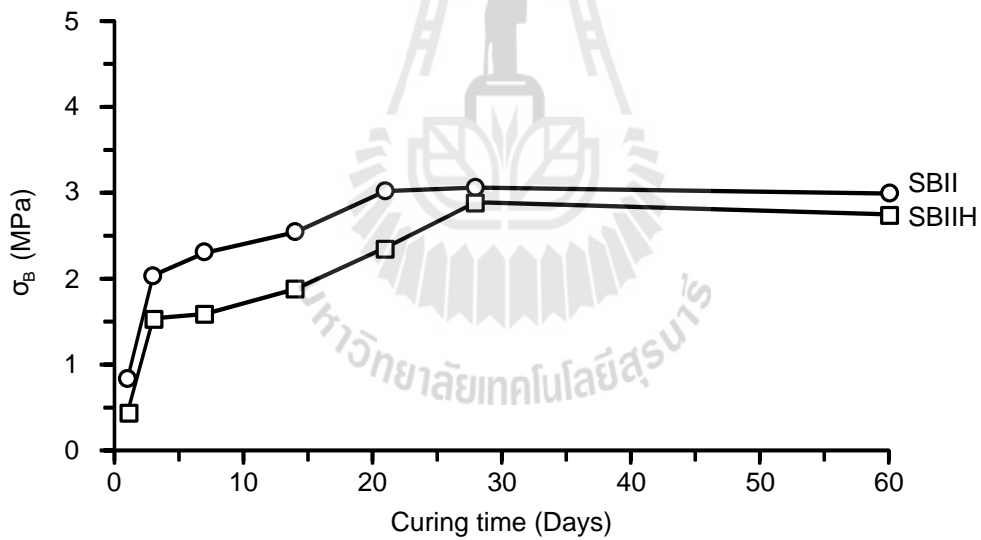
รูปที่ 4.2 การติดตั้งเครื่องมือการทดสอบแรงกดในแกนเดียว



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดในแกนเดียว ( $\sigma_c$ ) ในฟังก์ชันของการบ่มตัวตามเวลา



รูปที่ 4.4 การติดตั้งเครื่องมือการทดสอบแรงดิ่งแบบบราซิลเลียน



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดิ่งแบบบราซิลเลียน ( $\sigma_B$ ) ในฟังก์ชันของการบ่มตัวตามเวลา



ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียว ( $\sigma_c$ ) และสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E) ของ Salt-bond II cement (SBII)

Specimen type	Curing time (days)	L/D	Density (g/cm <sup>3</sup> )	$\sigma_c$ (MPa)		E (GPa)	
SBII-02-01-UCS-01	1	2.51	1.70	4.36	4.36 $\pm 0.01$	1.26	1.20 $\pm 0.05$
SBII-02-01-UCS-02		2.50	1.70	4.37		1.18	
SBII-02-01-UCS-03		2.51	1.71	4.37		1.17	
SBII-02-03-UCS-01	3	2.53	1.76	16.48	15.35 $\pm 1.10$	2.60	2.59 $\pm 0.06$
SBII-02-03-UCS-02		2.51	1.77	14.29		2.65	
SBII-02-03-UCS-03		2.51	1.74	15.28		2.53	
SBII-02-07-UCS-01	7	2.51	1.74	22.91	21.52 $\pm 1.59$	3.03	2.70 $\pm 0.30$
SBII-02-07-UCS-02		2.50	1.75	19.79		2.42	
SBII-02-07-UCS-03		2.51	1.78	21.85		2.65	
SBII-02-14-UCS-01	14	2.52	1.76	19.98	22.03 $\pm 2.85$	1.79	1.92 $\pm 0.14$
SBII-02-14-UCS-02		2.52	1.74	20.81		1.90	
SBII-02-14-UCS-03		2.52	1.74	25.29		2.06	
SBII-02-21-UCS-01	21	2.47	1.74	27.10	22.23 $\pm 4.38$	2.24	1.70 $\pm 0.47$
SBII-02-21-UCS-02		2.52	1.77	18.62		1.34	
SBII-02-21-UCS-03		2.51	1.77	20.98		1.52	
SBII-02-28-UCS-01	28	2.49	1.79	27.36	22.67 $\pm 4.10$	2.47	2.02 $\pm 0.40$
SBII-02-28-UCS-02		2.49	1.72	20.85		1.71	
SBII-02-28-UCS-03		2.49	1.72	19.78		1.88	
SBII-02-60-UCS-01	60	2.50	1.76	19.51	21.68 $\pm 1.90$	1.83	1.87 $\pm 0.29$
SBII-02-60-UCS-02		2.48	1.76	23.81		2.18	
SBII-02-60-UCS-03		2.47	1.74	21.70		1.60	

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียว ( $\sigma_c$ ) และสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E) ของ Salt-bond II cement (SBIH)

Specimen type	Curing time (days)	L/D	Density ( $\text{g/cm}^3$ )	$\sigma_c$ (MPa)		E (GPa)	
SBIH-02-01-UCS-01	1	2.49	1.73	3.33	3.32 $\pm 0.04$	0.84	0.92 $\pm 0.10$
SBIH-02-01-UCS-02		2.47	1.72	3.27		1.03	
SBIH-02-01-UCS-03		2.51	1.73	3.35		0.88	
SBIH-02-03-UCS-01	3	2.50	1.73	8.70	9.45 $\pm 1.25$	1.21	1.32 $\pm 0.19$
SBIH-02-03-UCS-02		2.50	1.73	10.89		1.53	
SBIH-02-03-UCS-03		2.50	1.71	8.75		1.20	
SBIH-02-07-UCS-01	7	2.49	1.72	14.21	14.24 $\pm 2.16$	2.26	1.25 $\pm 0.12$
SBIH-02-07-UCS-02		2.50	1.73	12.10		2.12	
SBIH-02-07-UCS-03		2.51	1.73	16.42		2.36	
SBIH-02-14-UCS-01	14	2.53	1.73	19.98	18.42 $\pm 2.53$	1.95	1.64 $\pm 0.51$
SBIH-02-14-UCS-02		2.54	1.72	19.78		1.87	
SBIH-02-14-UCS-03		2.53	1.72	15.51		1.05	
SBIH-02-21-UCS-01	21	2.51	1.72	17.59	18.64 $\pm 1.23$	1.28	1.29 $\pm 0.01$
SBIH-02-21-UCS-02		2.47	1.71	18.33		1.30	
SBIH-02-21-UCS-03		2.51	1.75	20.00		1.29	
SBIH-02-28-UCS-01	28	2.50	1.73	24.36	20.06 $\pm 3.82$	2.44	1.79 $\pm 0.58$
SBIH-02-28-UCS-02		2.49	1.74	18.75		1.35	
SBIH-02-28-UCS-03		2.47	1.73	17.07		1.58	
SBIH-02-60-UCS-01	60	2.51	1.69	19.53	20.34 $\pm 3.42$	1.91	1.87 $\pm 0.38$
SBIH-02-60-UCS-02		2.51	1.71	24.09		2.23	
SBIHI-02-60-UCS-03		2.47	1.70	17.40		1.47	

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน ( $\sigma_B$ ) ของ Salt-bond II cement (SBII)

Specimen type	Curing time (days)	L/D	Density (g/cm <sup>3</sup> )	$\sigma_B$ (MPa)	
SBII-02-01-BZ-01	1	0.48	1.67	0.89	0.83±0.07
SBII-02-01-BZ-02		0.49	1.69	0.89	
SBII-02-01-BZ-03		0.50	1.71	0.77	
SBII-02-01-BZ-04		0.51	1.70	0.85	
SBII-02-01-BZ-05		0.50	1.68	0.76	
SBII-02-03-BZ-01	3	0.49	1.74	2.02	2.04±0.10
SBII-02-03-BZ-02		0.49	1.76	1.89	
SBII-02-03-BZ-03		0.48	1.74	2.17	
SBII-02-03-BZ-04		0.48	1.73	2.04	
SBII-02-03-BZ-05		0.48	1.76	2.07	
SBII-02-07-BZ-01	7	0.51	1.71	2.33	2.30±0.22
SBII-02-07-BZ-02		0.49	1.71	2.56	
SBII-02-07-BZ-03		0.52	1.72	2.00	
SBII-02-07-BZ-04		0.50	1.70	2.42	
SBII-02-07-BZ-05		0.50	1.75	2.18	
SBII-02-14-BZ-01	14	0.50	1.73	2.94	2.54±0.26
SBII-02-14-BZ-02		0.52	1.82	2.55	
SBII-02-14-BZ-03		0.53	1.79	2.47	
SBII-02-14-BZ-04		0.51	1.78	2.57	
SBII-02-14-BZ-05		0.52	1.79	2.20	
SBII-02-21-BZ-01	21	0.53	1.78	3.13	3.02±0.34
SBII-02-21-BZ-02		0.52	1.74	2.54	
SBII-02-21-BZ-03		0.50	1.71	2.83	
SBII-02-21-BZ-04		0.53	1.75	3.19	
SBII-02-21-BZ-05		0.51	1.71	3.42	
SBII-02-28-BZ-01	28	0.54	1.75	2.68	3.06±0.33
SBII-02-28-BZ-02		0.51	1.76	2.86	

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน ( $\sigma_B$ ) ของ Salt-bond II cement (SBII) (ต่อ)

Specimen type	Curing time (days)	L/D	Density (g/cm <sup>3</sup> )	$\sigma_B$ (MPa)	
SBII-02-28-BZ-03	28	0.51	1.76	3.53	
SBII-02-28-BZ-04		0.50	1.73	3.02	
SBII-02-28-BZ-05		0.51	1.74	3.23	
SBII-02-60-BZ-01	60	0.53	1.75	2.87	2.99±0.17
SBII-02-60-BZ-02		0.51	1.76	2.80	
SBII-02-60-BZ-03		0.51	1.76	3.09	
SBII-02-60-BZ-04		0.51	1.73	3.21	
SBII-02-60-BZ-05		0.53	1.75	2.96	

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน ( $\sigma_B$ ) ของ Salt-bond II cement (SBIIH)

Specimen type	Curing time (days)	L/D	Density (g/cm <sup>3</sup> )	$\sigma_B$ (MPa)	
SBIIH-02-01-BZ-01	1	0.51	1.76	0.44	0.44±0.01
SBIIH-02-01-BZ-02		0.53	1.76	0.42	
SBIIH-02-01-BZ-03		0.49	1.75	0.45	
SBIIH-02-01-BZ-04		0.50	1.76	0.44	
SBIIH-02-01-BZ-05		0.51	1.75	0.44	
SBIIH-02-03-BZ-01	3	0.52	1.76	1.56	1.54±0.06
SBIIH-02-03-BZ-02		0.50	1.72	1.61	
SBIIH-02-03-BZ-03		0.52	1.71	1.45	
SBIIH-02-03-BZ-04		0.48	1.72	1.59	
SBIIH-02-03-BZ-05		0.50	1.69	1.51	
SBIIH-02-07-BZ-01	7	0.49	1.72	1.55	1.59±0.08
SBIIH-02-07-BZ-02		0.51	1.72	1.63	
SBIIH-02-07-BZ-03		0.50	1.72	1.50	
SBIIH-02-07-BZ-04		0.52	1.71	1.56	
SBIIH-02-07-BZ-05		0.49	1.73	1.70	

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน ( $\sigma_B$ ) ของ Salt-bond II cement (SBIIH) (ต่อ)

Specimen type	Curing time (days)	L/D	Density (g/cm <sup>3</sup> )	$\sigma_B$ (MPa)	
SBIIH-02-14-BZ-01	14	0.51	1.74	2.05	1.88±0.13
SBIIH-02-14-BZ-02		0.51	1.79	1.98	
SBIIH-02-14-BZ-03		0.50	1.77	1.78	
SBIIH-02-14-BZ-04		0.51	1.76	1.83	
SBIIH-02-14-BZ-05		0.50	1.75	1.76	
SBIIH-02-21-BZ-01	21	0.51	1.76	2.35	2.36±0.28
SBIIH-02-21-BZ-02		0.50	1.71	2.14	
SBIIH-02-21-BZ-03		0.51	1.72	2.80	
SBIIH-02-21-BZ-04		0.52	1.68	2.09	
SBIIH-02-21-BZ-05		0.51	1.69	2.43	
SBIIH-02-28-BZ-01	28	0.49	1.69	2.90	2.89±0.19
SBIIH-02-28-BZ-02		0.54	1.71	2.68	
SBIIH-02-28-BZ-03		0.51	1.74	3.17	
SBIIH-02-28-BZ-04		0.52	1.68	2.77	
SBIIH-02-28-BZ-05		0.53	1.72	2.95	
SBIIH-02-60-BZ-01	60	0.51	1.70	2.98	2.75±0.18
SBIIH-02-60-BZ-02		0.51	1.74	2.86	
SBIIH-02-60-BZ-03		0.52	1.72	2.51	
SBIIH-02-60-BZ-04		0.52	1.75	2.70	
SBIIH-02-60-BZ-05		0.50	1.71	2.70	

ตารางที่ 4.6 สรุปผลการทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียว ( $\sigma_c$ ) การตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E) และการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน ( $\sigma_B$ )

Specimen (days)	$\sigma_c$ (MPa)		E (GPa)		$\sigma_B$ (MPa)	
	SBIH	SBIH	SBIH	SBIH	SBIH	SBIH
1	4.36±0.01	3.32±0.04	1.20±0.05	0.92±0.10	0.83±0.07	0.44±0.01
3	15.35±1.10	9.45±1.25	2.59±0.06	1.32±0.19	2.04±0.10	1.54±0.06
7	21.52±1.59	14.24±2.16	2.70±0.30	1.25±0.12	2.30±0.22	1.59±0.08
14	22.03±2.85	18.42±2.53	1.92±0.14	1.64±0.51	2.54±0.26	1.88±0.13
21	22.23±4.38	18.64±1.23	1.70±0.47	1.29±0.01	3.02±0.34	2.36±0.28
28	22.67±4.10	20.06±3.82	2.02±0.40	1.79±0.58	3.06±0.33	2.89±0.19
60	21.68±1.90	20.34±3.42	1.87±0.29	1.87±0.38	2.99±0.17	2.75±0.18

### 4.3 การทดสอบ Push-out

วัตถุประสงค์ของการทดสอบ Push-out เพื่อหาค่ารับแรงเฉือนสูงสุดและการเปลี่ยนรูประยะยาว (long-term deformation) ของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ที่อุดหลุมเจาะในเกลื่อหินสำหรับการทดสอบ Push-out จะบ่มแท่งตัวอย่างซีเมนต์เป็นเวลา 7 วัน ดังรูปที่ 4.6 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์และตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบ แท่งโลหะทรงกระบอกสำหรับให้แรงในแนวแกนของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ การตรวจวัดการเคลื่อนตัวด้านบนและด้านล่างของแท่งตัวอย่างซีเมนต์โดยการติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัว ให้ความเค้นตามแกนด้วยแม่แรงไฮดรอลิกแล้วทำการอ่านค่าการเคลื่อนตัวและความเค้นและจดบันทึกค่าไปพร้อมกัน มาตรวัดการเคลื่อนตัวมีความละเอียดที่ 0.025 มิลลิเมตรและแม่แรงไฮดรอลิกมีมีกำลังสูงสุดที่ 50 กิโลนิวตันและความละเอียดที่ 0.5 กิโลนิวตัน

รูปที่ 4.7 แสดงการติดตั้งสำหรับการทดสอบ Push-out เกลื่อหินทรงกระบอกที่อุดด้วยแท่งตัวอย่างซีเมนต์ในแม่แบบพีวีซีให้อยู่กลางแผ่นฐานโลหะสี่เหลี่ยม แท่งโลหะทรงกระบอกขนาดเล็กสำหรับให้แรงกดในแกนบนแท่งซีเมนต์ การทดสอบโดยให้อัตราการกดคงที่ที่ 0.1MPa/s อ่านค่าการเคลื่อนตัวด้านบนและด้านล่างของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ ทำการบันทึกทุกๆ 10 วินาทีจนกระทั่งซีเมนต์และเกลื่อหินแตกออกจากกัน

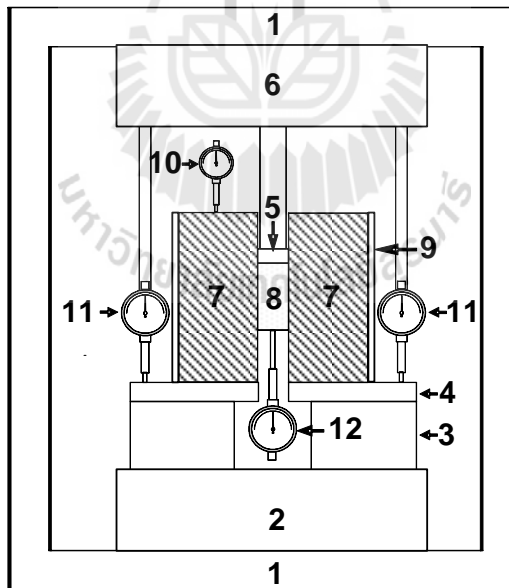
ค่าการกระจายตัวของแรงเฉือนสูงสุด ( $\tau_{av}$ ) ที่เกิดขึ้นจากการให้แรงกดในการทดสอบ Push-out ในตัวอย่างระหว่างเกลื่อหินและแท่งซีเมนต์ที่อุดอยู่ในหลุมของแท่งเกลื่อหินสามารถคำนวณได้จากสมการ (Stormont และ Daeman, 1983):

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

โดยที่  $F$  คือแรงกดสูงสุดตามแนวแกนที่จุดวิบัติ  $D_1$  คือเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ที่ใช้  
 อด และ  $L_c$  คือความยาวของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ ผลการทดสอบได้สรุปในตารางที่ 4.7

รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวของแท่ง  
 ตัวอย่างซีเมนต์ด้านบนและด้านล่าง การเคลื่อนตัวด้านล่างจะน้อยกว่าเคลื่อนตัวด้านบนก่อนที่จะเกิด  
 การวิบัติ เมื่อแท่งตัวอย่างซีเมนต์มีการเลื่อนความแตกต่างระหว่างการเคลื่อนตัวด้านบนและด้านล่าง  
 ลดลงมากอาจเป็นเพราะการคลายความเค้นที่เกินจากเลื่อนยาวตามหน้าสัมผัส กำลังรับแรงเฉือน  
 สูงสุดที่เกิดระหว่างเกลือหินและแท่งตัวอย่างซีเมนต์มีค่าเท่ากับ 5.05 เมกะปาสกาล ส่วนรูปที่ 4.9  
 แสดงตัวอย่างหมายเลข SBIH-04-07-PO-01 ทำการตัดในแนวแกนหลังจากวิบัติ ความหนาของ  
 ซีเมนต์ที่เหลือที่ผนังหลุมเจาะบนแท่งตัวอย่างซีเมนต์และการขาดจากกันชี้ให้เห็นว่าเป็นการยึด  
 เหนียวที่ดี

การทดสอบ Push-out ของแท่งตัวอย่างซีเมนต์กับความสัมพันธ์ระหว่างเวลาบ่มตัวและความ  
 เกล็นเฉือนที่ รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ด้านบน  
 ( $\delta_T$ ) ในฟังก์ชันของเวลาที่ความเค้นเฉือนคงที่ต่างๆ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความยืดหยุ่น  
 ชั่วขณะและการเคลื่อนตัวด้านบนคาดว่าจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้น



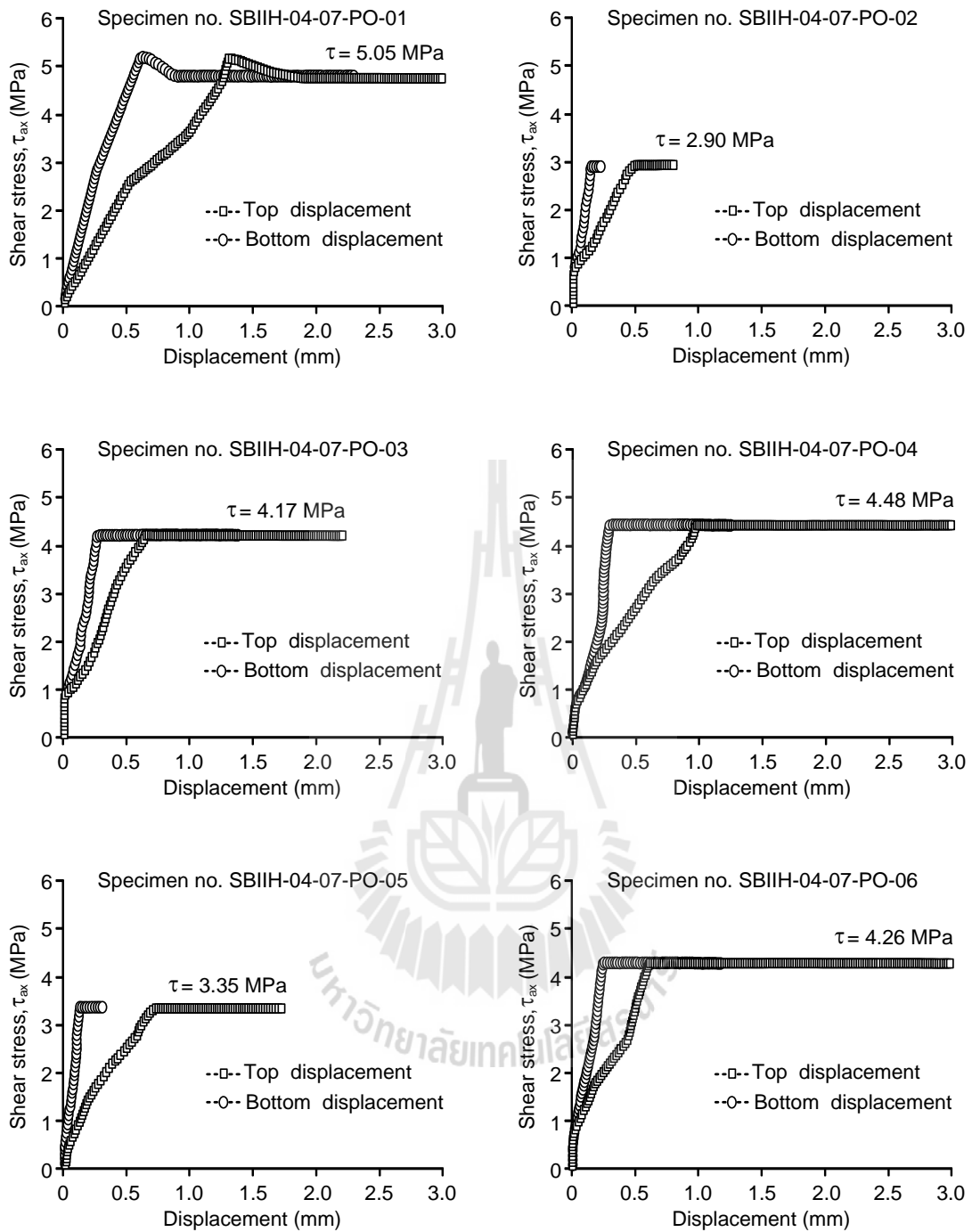
รูปที่ 4.6 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบ Push-out ประกอบด้วย 1) Loading frame; 2) Hydraulic cylinder; 3) Steel plate with a slit; 4) Square steel plate; 5) Axial bar and steel cylinder; 6) Square steel plate frame; 7) Rock salt sample; 8) Cement grout plug; 9) PVC mold; 10, 11) และ 12) Dial gages.



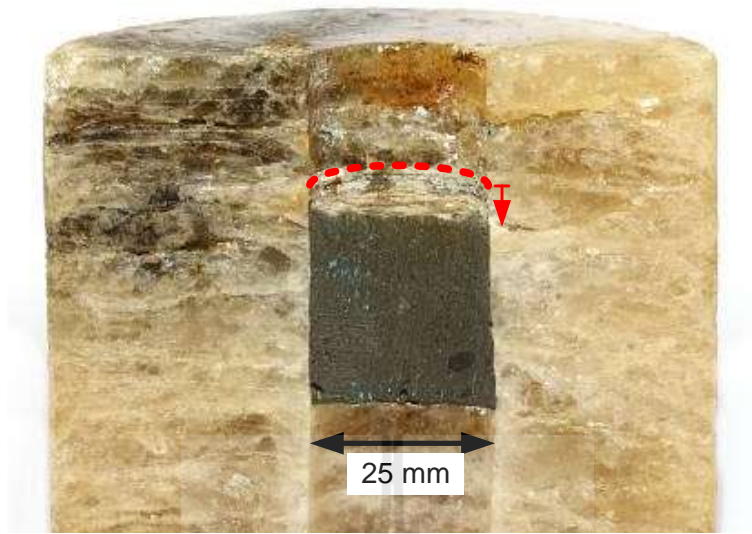
รูปที่ 4.7 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบ Push-out



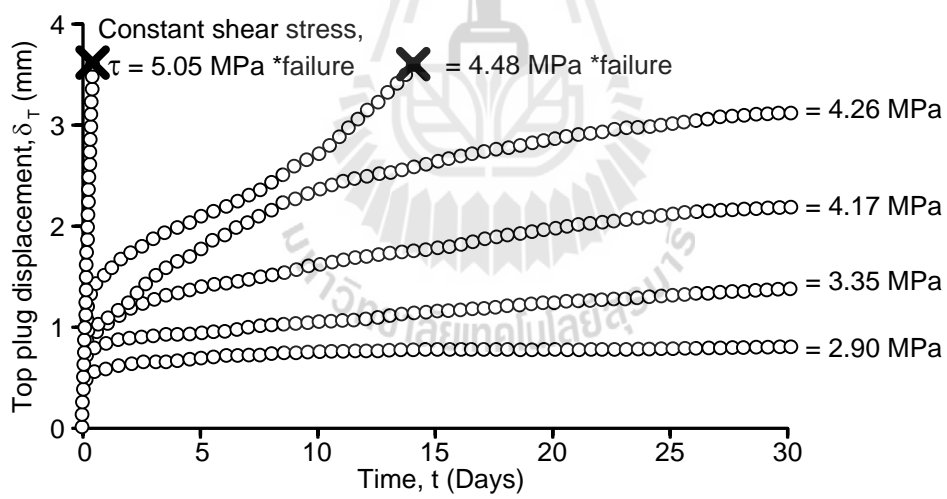




รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบ Push-out แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ด้านบนและด้านล่าง



รูปที่ 4.9 แสดงภาพตัดขวางของตัวอย่างหมายเลข SBIH-04-07-PO-01 หลังจากเกิดการพังของการทดสอบ Push-out



รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบ Push-out แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ด้านบน ( $\delta_T$ ) ในฟังก์ชันของเวลา

ตารางที่ 4.7 สรุปผลการทดสอบ Push-out

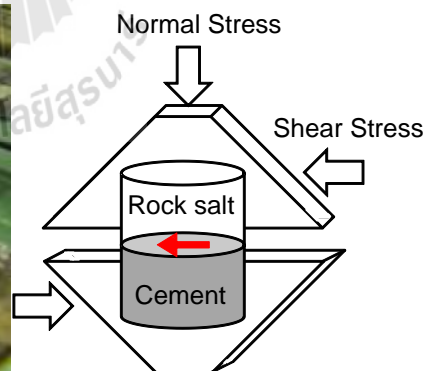
Specimen No.	$D_o$ (mm)	L (mm)	$D_i$ (mm)	$L_h$ (mm)	$L_c$ (mm)	F (kN)	P (kN)	$\sigma_{ax}$ (MPa)	$\sigma$ (MPa)	$\tau_{ax}$ (MPa)	$\tau$ (MPa)
SBPH-04-07-PO-01	98.42	100.39	25.81	20.90	28.71	11.77	-	22.48	-	5.05	-
SBPH-04-07-PO-02	100.21	100.53	25.68	18.86	32.67	-	7.64	-	14.74	-	2.90
SBPH-04-07-PO-03	100.01	104.02	25.22	22.02	28.90	-	9.55	-	19.11	-	4.17
SBPH-04-07-PO-04	100.18	101.27	25.63	19.50	29.11	-	10.50	-	20.35	-	4.48
SBPH-04-07-PO-05	100.25	100.07	26.35	19.50	30.17	-	8.37	-	15.34	-	3.35
SBPH-04-07-PO-06	101.23	102.33	26.23	19.78	28.55	-	10.02	-	18.55	-	4.26

$D_o$  = Rock Salt Diameter, L = Rock Salt Length,  $D_i$  = Hole Diameter,  $L_h$  = Top Hole Length,  $L_c$  = Cement Plug Length, F = Axial Load at Failure,

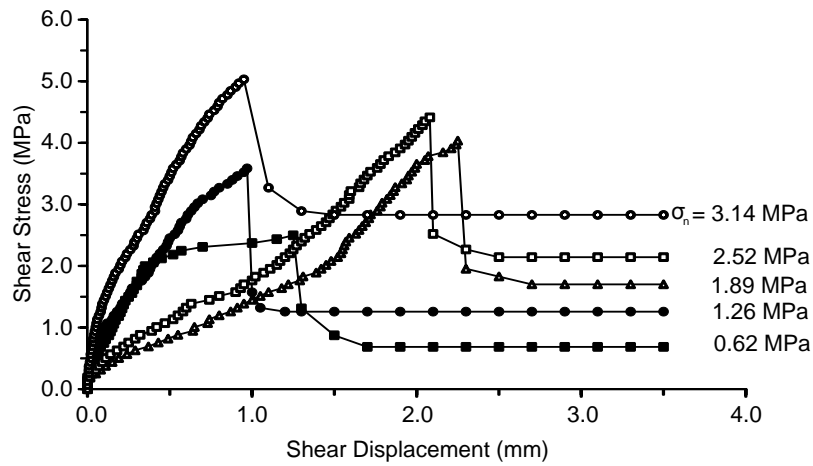
#### 4.4 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง

กำลังรับแรงเฉือนระหว่างผิวยรอยแตกของเกลือหินและแท่งตัวอย่างซีเมนต์โดยการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน โดยตรง ขั้นตอนการทดสอบมีความคล้ายคลึงกับการปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM หมายเลข D5607 ส่วนผสมซีเมนต์หล่อในรอยแตกแบบเรียบ (saw cut surface) ของเกลือหินมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร และบ่มเป็นเวลา 7 วัน ทดสอบด้วยเครื่องแรงเฉือนโดยตรงรุ่น EL-77-1030 ที่สามารถให้กำลังสูงสุด 50 กิโลนิวตัน การติดตั้งเครื่องมือในห้องปฏิบัติการสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงแสดงในรูปที่ 4.11 การทดสอบจะต้องรักษาความเค้นแนวตั้งฉากให้คงที่ในระหว่างการทดสอบ โดยการผันแปรความเค้นตั้งฉาก (Normal stress) ที่ 0.62, 1.26, 1.89, 2.52 และ 3.14 เมกะปาสคาล ให้แรงเฉือนอย่างต่อเนื่องและอ่านค่าทุกๆ 2 มิลลิเมตร สำหรับการเคลื่อนตัวแนวเฉือน

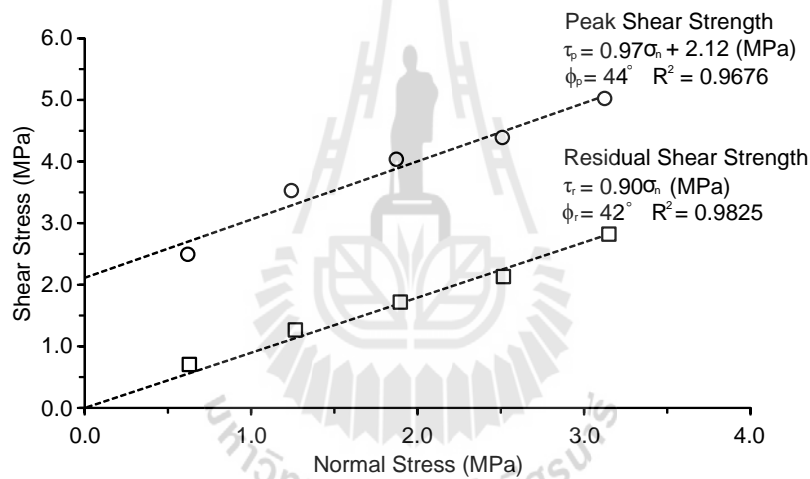
คำนวณค่าความเค้นเฉือนสูงสุด (Peak shear strength) และความเค้นเฉือนคงเหลือ (Residual shear strength) ตามความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างความเค้นเฉือนและความเค้นตั้งฉาก ตามเกณฑ์ของ Coulomb ได้มุมเสียดทานสำหรับความเค้นเฉือนสูงสุด (Peak friction angle) และมุมเสียดทานสำหรับความเค้นเฉือนคงเหลือ (Residual friction angle) ที่ผิวสัมผัสของเกลือหินและแท่งตัวอย่างซีเมนต์คือ 44 และ 42 องศา ตามลำดับ ค่าความเค้นยึดติด (Cohesion) ของความเค้นเฉือนสูงสุด คือ 2.12 เมกะปาสคาล (รูปที่ 4.12 และ 4.13)



รูปที่ 4.11 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือน โดยตรง (model EL-77-1030)



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวแนวเฉือน



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของความเค้นตั้งฉาก

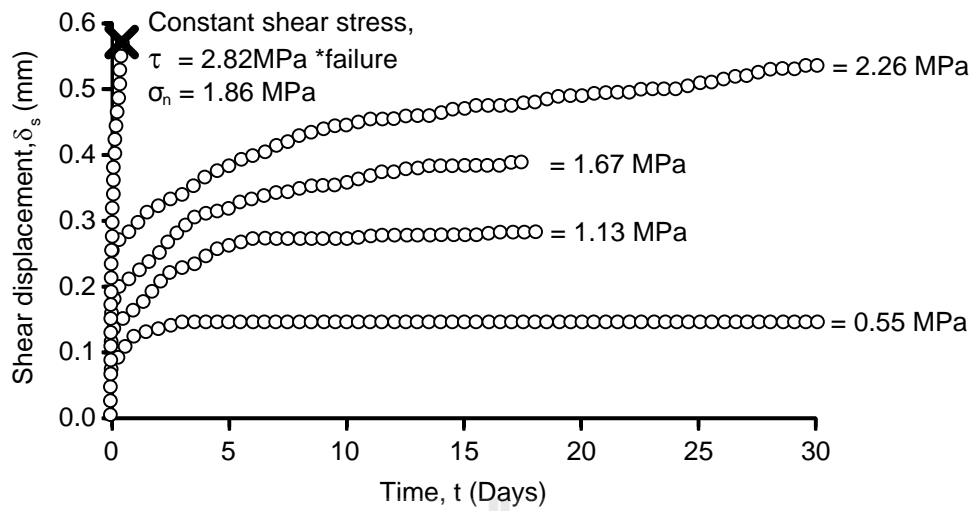
ตารางที่ 4.8 สรุปผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงตามเกณฑ์ของ Coulomb

Specimen type	$\sigma_n$ (MPa)	$\tau_p$ (MPa)	$c_p$ (MPa)	$\phi_p$ (degrees)	$\tau_r$ (MPa)	$\phi_r$ (degrees)
SBIH-04-07-DS-01	0.62	2.50	2.12	44	0.69	42
SBIH-04-07-DS-02	1.26	3.52			1.26	
SBIH-04-07-DS-03	1.89	4.03			1.70	
SBIH-04-07-DS-04	2.52	4.41			2.14	
SBIH-04-07-DS-05	3.14	5.03			2.83	

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน โดยตรงระยะยาวของผิวสัมผัสของเกลือหินและแท่งตัวอย่างซีเมนต์กับความสัมพันธ์ระหว่างเวลาบ่มตัวกับความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือนคงที่โดยใช้เครื่องแรงเฉือนโดยตรงรุ่น SBEL DR-44 (รูปที่ 4.14) โดยให้ความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือนคงที่สำหรับการทดสอบระยะยาว ค่าเฉลี่ยการเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉาก (Normal stiffness,  $k_n$ ) และการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน (Shear stiffness,  $k_s$ ) คือ  $8.42 \pm 3.00$  GPa/m และ  $9.86 \pm 2.93$  GPa/m ตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวเฉือนในฟังก์ชันความเค้นเฉือนคงที่ภายใต้ความเค้นตั้งฉากคงที่ ผลการทดสอบความเค้นเฉือนในระยะยาวพบว่าการเคลื่อนไหลเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้น รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวเฉือนในฟังก์ชันของเวลา โดยความเค้นตั้งฉากคงที่ 1.86 เมกะปาสกาล



รูปที่ 4.14 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงระยะยาว (SBEL model DR-44)



รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงระยะยาว แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวเฉือน ( $\delta_s$ ) ในฟังก์ชันของเวลา โดยความเค้นตั้งฉากคงที่ 1.86 เมกกะปาสคาล

ตารางที่ 4.9 ความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือนคงที่สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงระยะยาว

Specimen type	Constant normal stress, $\sigma_n$ (MPa)	Constant shear stress, $\tau$ (MPa)	$k_n$ (GPa/m)	$k_s$ (GPa/m)
SBIIH-04-07-DS-06	1.86	1.13	7.67	6.60
SBIIH-04-07-DS-07		1.67	12.24	11.25
SBIIH-04-07-DS-08		2.26	10.27	12.17
SBIIH-04-07-DS-09		2.82	7.61	6.77
SBIIH-04-07-DS-10		0.55	4.33	12.50
Average			8.42±3.00	9.86±2.93

#### 4.5 การทดสอบค่าความซึมผ่าน

การทดสอบค่าความซึมผ่านของวัสดุตัวอย่างซีเมนต์เพื่ออธิบายในเทอมของความซึมผ่านเชิงกายภาพ (Intrinsic permeability,  $k$ ) โดยอัดแรงค้ำน้ำในการวัดอัตราการไหลของน้ำในแบบหล่อซีเมนต์ ทำการจดบันทึกค่าอัตราการไหลเพื่อนำไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน ซึ่งแสดงการติดตั้งเครื่องมือทดสอบความซึมผ่านของซีเมนต์ดังรูปที่ 4.16 การไหลของน้ำจะไปในทิศทางตามยาวตามระบบทดสอบที่อธิบายโดยกฎของ Darcy's ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (Coefficient of permeability,  $K$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการ (Indraratna and Ranjith, 2001)

$$K = Q / Ai \quad (4.2)$$

โดยที่  $Q$  คืออัตราการไหล ( $m^3/s$ )  $A$  คือพื้นที่หน้าตัดของการไหล ( $m^2$ ) และ  $i$  คือลาดชันศาสตร์ (Hydraulic gradient) ค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพสามารถคำนวณได้จากสมการ

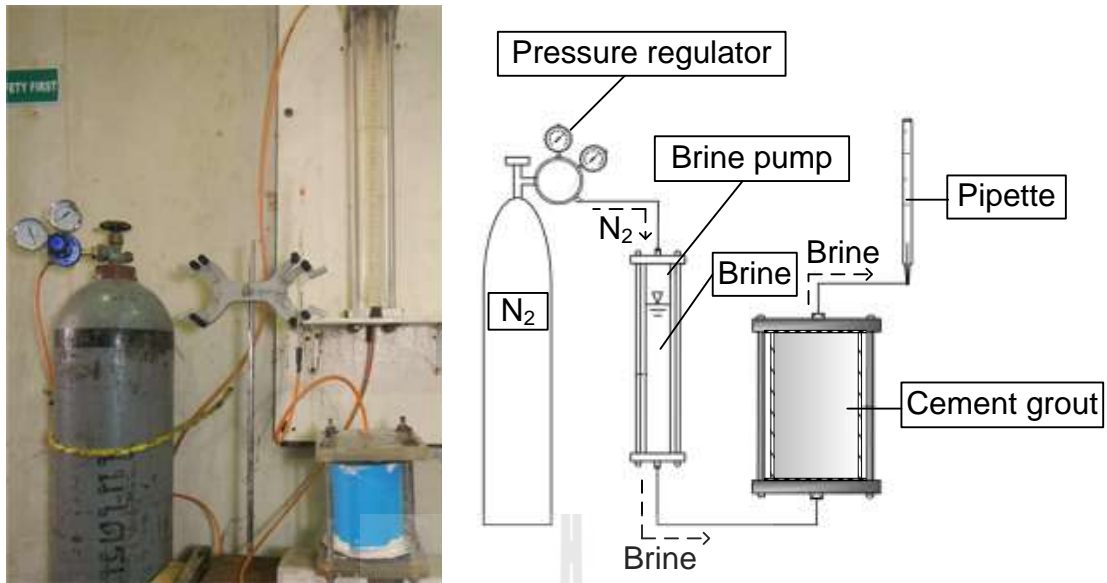
$$k = K\mu / \gamma \quad (4.3)$$

โดยที่  $K$  คือสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน ( $m/s$ )  $\mu$  คือความหนืดจลน์ของน้ำเกลือ ( $Pa \cdot s$ ) และ  $\gamma$  คือความหนาแน่นของน้ำเกลือ

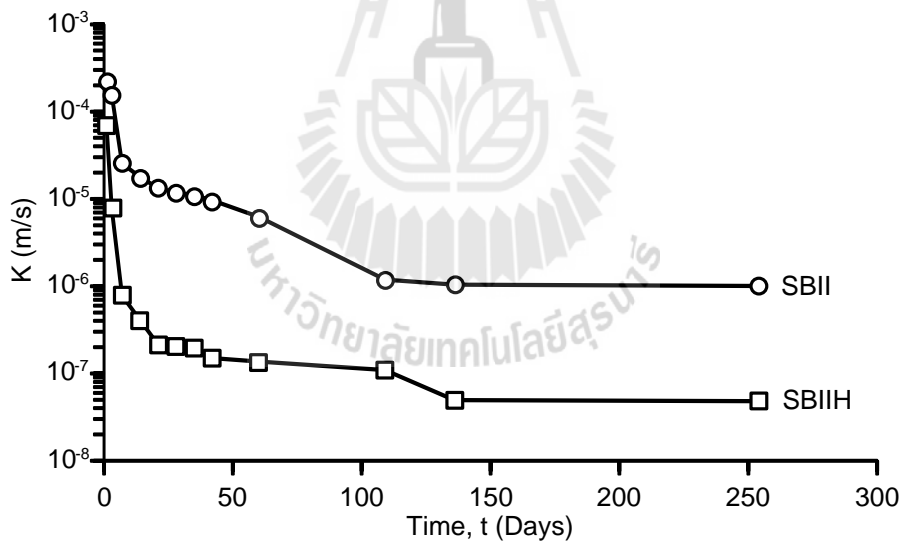
ตัวอย่างซีเมนต์ทรงกระบอกในแบบหล่อพีวีซีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร แล้วทำการบ่มด้วยการแช่น้ำเกลือ เมื่อครบระยะเวลาในการบ่มตามที่กำหนดทำการติดตั้งกับอุปกรณ์สำหรับทดสอบค่าความซึมผ่าน ทำการตรวจวัดและจดบันทึกค่าที่ 1, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 60, 109, 136 และ 254 วันตามเวลาการบ่มตัว

ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน ( $K$ ) และค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพ ( $k$ ) ของตัวอย่างซีเมนต์ในฟังก์ชันของการบ่มตัวตามเวลาดังแสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18 สรุปผลการทดสอบค่าความซึมผ่านในตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาบ่มตัวเพิ่มขึ้นค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพของตัวอย่างซีเมนต์ลดลง

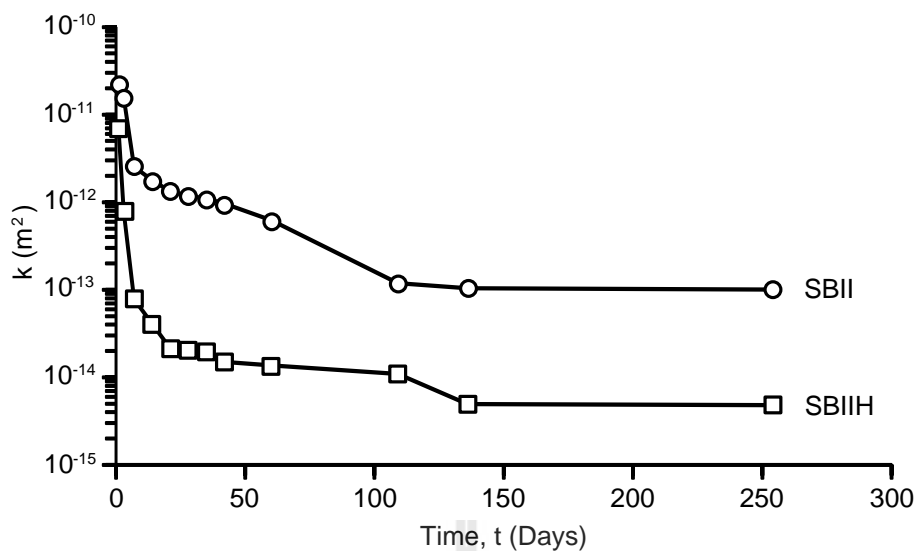




รูปที่ 4.16 แสดงการติดตั้งเครื่องมือทดสอบความซึมผ่านของซีเมนต์



รูปที่ 4.17 ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (K) ของตัวอย่างซีเมนต์



รูปที่ 4.18 ค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพ ( $k$ ) ของตัวอย่างซีเมนต์

ตารางที่ 4.10 สรุปผลการทดสอบค่าความซึมผ่านของตัวอย่างซีเมนต์

Curing time (days)	Coefficient of permeability, K (m/s)		Intrinsic permeability, k (m <sup>2</sup> )	
	SBII	SBIIH	SBII	SBIIH
1	$2.10 \times 10^{-4}$	$6.91 \times 10^{-5}$	$2.15 \times 10^{-11}$	$7.10 \times 10^{-12}$
3	$1.57 \times 10^{-4}$	$7.86 \times 10^{-6}$	$1.61 \times 10^{-11}$	$8.06 \times 10^{-13}$
7	$2.54 \times 10^{-5}$	$7.83 \times 10^{-7}$	$2.61 \times 10^{-12}$	$8.04 \times 10^{-14}$
14	$1.79 \times 10^{-5}$	$4.09 \times 10^{-7}$	$1.84 \times 10^{-12}$	$4.20 \times 10^{-14}$
21	$1.33 \times 10^{-5}$	$2.15 \times 10^{-7}$	$1.37 \times 10^{-12}$	$2.20 \times 10^{-14}$
28	$1.18 \times 10^{-5}$	$2.09 \times 10^{-7}$	$1.21 \times 10^{-12}$	$2.15 \times 10^{-14}$
35	$1.10 \times 10^{-5}$	$2.01 \times 10^{-7}$	$1.13 \times 10^{-12}$	$2.06 \times 10^{-14}$
42	$9.67 \times 10^{-6}$	$1.50 \times 10^{-7}$	$9.93 \times 10^{-13}$	$1.54 \times 10^{-14}$
60	$6.22 \times 10^{-6}$	$1.37 \times 10^{-7}$	$6.39 \times 10^{-13}$	$1.40 \times 10^{-14}$
109	$1.19 \times 10^{-6}$	$1.09 \times 10^{-7}$	$1.22 \times 10^{-13}$	$1.12 \times 10^{-14}$
136	$1.04 \times 10^{-6}$	$4.95 \times 10^{-8}$	$1.07 \times 10^{-13}$	$5.08 \times 10^{-15}$
254	$1.00 \times 10^{-6}$	$4.81 \times 10^{-8}$	$1.03 \times 10^{-13}$	$4.94 \times 10^{-15}$

## บทที่ 5

### การสอบเทียบของพารามิเตอร์การเคลื่อนไหล

#### 5.1 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ในบทนี้เพื่อการสอบเทียบผลการเคลื่อนตัวและพารามิเตอร์การเคลื่อนไหลตามความเค้นเฉือน การวิเคราะห์การเคลื่อนไหลในความเค้นเฉือนได้เสนอสมการโดยใช้โปรแกรม IBM SPSS Statistics 19 (Wendai, 2000) เพื่อกำหนดค่าความยืดหยุ่นเฉือน ( $G_1$ ) ความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือน ( $G_2$ ) และสัมประสิทธิ์ความหนืด ( $\eta_1$ ) จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่ตรวจวัดในเทอมของความเค้นเฉือนของตัวอย่างซีเมนต์ในหลุมเจาะและความต้านทานแรงเฉือนระหว่างซีเมนต์และเกลือหินในฟังก์ชันของเวลา

#### 5.2 รูปแบบการเคลื่อนไหลของความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือน

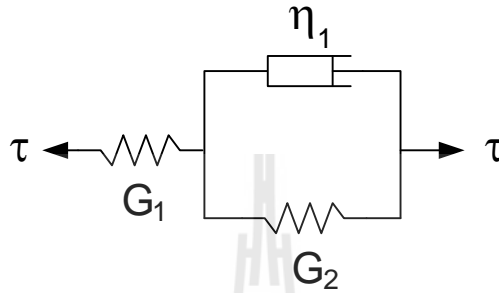
พฤติกรรมการเคลื่อนไหลของความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือนทั้งความเค้นเฉือนของตัวอย่างซีเมนต์ในหลุมเจาะและความต้านทานแรงเฉือนระหว่างซีเมนต์และเกลือหิน พฤติกรรมส่วนของความยืดหยุ่น (Hookean body) และส่วนของความหนืด (Newton body) และทั้งสองส่วนสามารถเชื่อมต่อกันในรูปแบบของ Maxwell และขนานกันในรูปแบบของ Kelvin

ในรูปแบบของ Kelvin เป็นรูปแบบของความหนืดเชิงยืดหยุ่นร่วมกับพฤติกรรมเชิงยืดหยุ่นของพฤติกรรมความหนืด โดยเชื่อมต่อกันกับชุดพฤติกรรมเชิงยืดหยุ่น (Hookean) ในการวิจัยนี้ได้เลือกใช้รูปแบบของ Hookean-Kelvin (รูปที่ 5.1) เพื่อกำหนดพฤติกรรมความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือนระหว่างซีเมนต์ยึดติดกับเกลือหิน สมการการเคลื่อนไหลรูปแบบของ Hookean-Kelvin ภายใต้การควบคุมความเค้นเฉือนคงที่ ( $\tau$ ) คือ

$$\delta = \frac{\tau}{G_1} + \frac{\tau}{G_2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_1} t\right) \right] \quad (5.1)$$

โดยที่  $\delta$  คือการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน  $t$  คือเวลา  $G_1$  คือความยืดหยุ่นเฉือน  $G_2$  คือความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือน และ  $\eta_1$  คือสัมประสิทธิ์ความหนืดระหว่างซีเมนต์และเกลือหิน (Yang and Cheng, 2011; Saptono et al., 2012)

พารามิเตอร์การเคลื่อนไหลของรูปแบบ Hookean-Kelvin กำหนดโดยวิธีการต่อไปนี้ ค่าความยืดหยุ่น  $G_1$  ได้จาก  $G_1 = \tau/\delta_0$  โดยที่  $\delta_0$  คือการเคลื่อนตัวในแนวเหนือชันของแต่ละความเค้นเฉือนคงที่ หลังจากได้ค่าพารามิเตอร์  $G_1$  พารามิเตอร์การเคลื่อนไหล  $G_2$  และ  $\eta_1$  สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้โปรแกรม SPSS เมื่อสามารถระบุค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ที่ยอมรับได้ตามเกณฑ์การวิเคราะห์

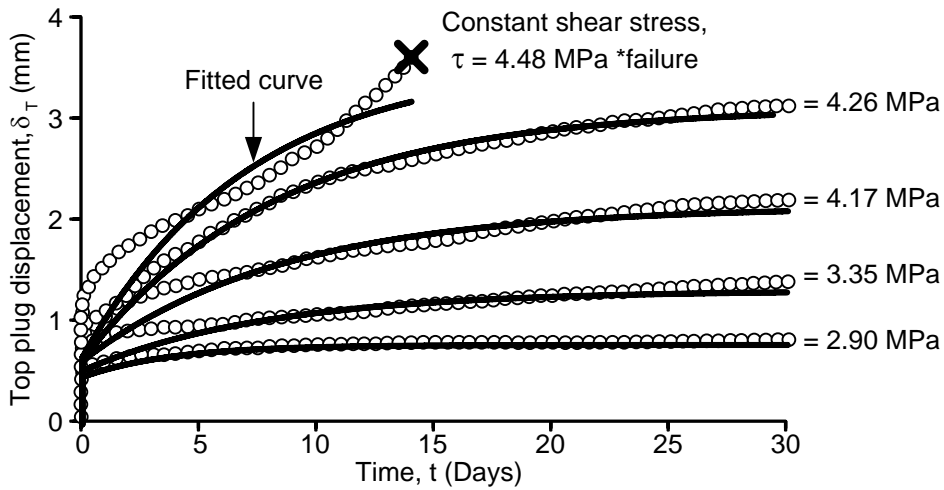


รูปที่ 5.1 รูปแบบของ Hookean-Kelvin (Yang and Cheng, 2011)

### 5.3 พารามิเตอร์การเคลื่อนไหลของการทดสอบ Push-out

การทดสอบ Push-out ดำเนินการของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ในความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ด้านบน ( $\delta_T$ ) ในฟังก์ชันของเวลาที่ความเค้นเฉือนคงที่ต่างๆ ในระยะยาว สำหรับการทดสอบ Push-out ในระยะสั้น ค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุด ( $\tau_{av}$ ) ของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ในหลุมเจาะมีค่าเท่ากับ 5.05 เมกกะปาสกาล ดังนั้นจึงเลือกระดับความเค้นเฉือนคงที่ ( $\tau$ ) ที่ 0.29, 3.35, 4.17, 4.26 และ 4.48 เมกกะปาสกาล ตามลำดับเพื่อใช้ในการตรวจสอบพฤติกรรม การเคลื่อนไหลของความหนืดเชิงยืดหยุ่นระหว่างแท่งตัวอย่างซีเมนต์และเกลียว ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวและเวลากับหลากหลายระดับความเค้นเฉือนคงที่ใช้เวลา 30 วัน

รูปที่ 5.2 แสดงผลการทดสอบการเคลื่อนไหลในแนวเหนือชันระหว่างแท่งตัวอย่างซีเมนต์และเกลียวกับการผันแปรความเค้นเฉือนคงที่ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนตัวของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ด้านบนเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถแสดงโดยสมการการเคลื่อนไหลของรูปแบบ Hookean-Kelvin



รูปที่ 5.2 ผลการทดสอบ Push-out (จุด) และการสอบเทียบ (เส้น)

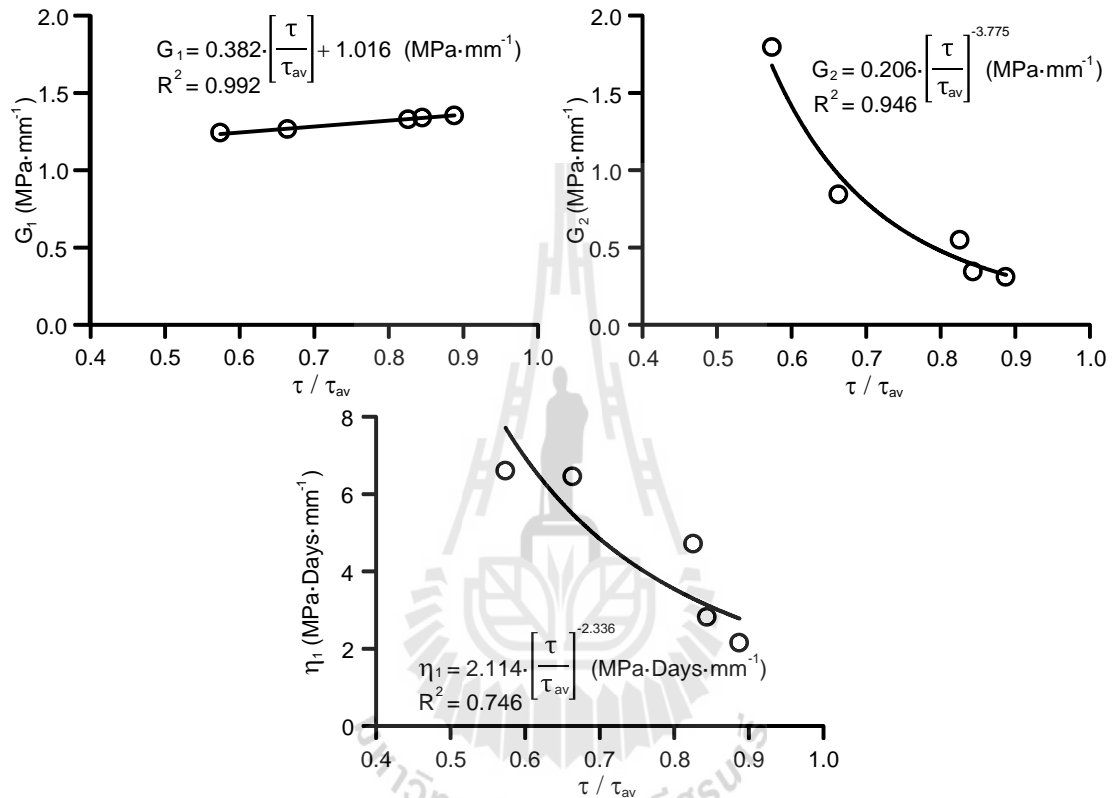
ตารางที่ 5.1 การสอบเทียบพารามิเตอร์การเคลื่อนไหล์จากผลการทดสอบ Push-out

$\delta_T = \frac{\tau}{G_1} + \frac{\tau}{G_2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_1} t\right) \right] \text{ (mm)}$					
$\tau$ (MPa)	$\tau/\tau_{av}$	$G_1$ (MPa·mm <sup>-1</sup> )	$G_2$ (MPa·mm <sup>-1</sup> )	$\eta_1$ (MPa·Days·mm <sup>-1</sup> )	$R^2$
2.90	0.57	6.257	9.181	34.470	0.935
3.35	0.66	6.382	4.272	33.272	0.804
4.17	0.83	6.699	2.760	23.611	0.918
4.26	0.84	6.777	1.725	14.103	0.985
4.48	0.89	6.849	1.546	10.830	0.860
*t (Days)					

ตามรูปที่ 5.2 และสมการที่ 5.1 พารามิเตอร์การเคลื่อนไหล์ของรูปแบบ Hookean-Kelvin สามารถกำหนดค่าของความยืดหยุ่นเฉือนระหว่างซีเมนต์และเกลือหิน ( $G_1$ ) จากอัตราส่วนระหว่างความเค้นเฉือนคงที่และการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนชั่วขณะ ( $\tau/\delta_0$ ) หลังจากได้ค่าพารามิเตอร์  $G_1$  ทำการกำหนดค่า  $G_2$  และ  $\eta_1$  โดยการใช้โปรแกรม SPSS ผ่านการทวนของสมการที่ 5.1 ในตารางที่ 5.1 ระบุรูปแบบพารามิเตอร์การเคลื่อนไหล์ทั้ง 5 ระดับความเค้นเฉือนที่เวลา 30 วัน และค่าสูงสุดของ  $R^2$

พารามิเตอร์ระหว่างซีเมนต์และเกลือหินที่เหมาะสมของความยืดหยุ่นเฉือน ( $G_1$ ) ความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือน ( $G_2$ ) และสัมประสิทธิ์ความหนืด ( $\eta_1$ ) พิจารณาในฟังก์ชันของอัตราส่วนเฉือนคงที่ ( $\tau/\tau_{av}$ ) โดยที่  $\tau$  คือความเค้นคงที่ และ  $\tau_{av}$  คือกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ในหลุม

เจาะ รูปที่ 5.3 แสดงค่าพารามิเตอร์เชิงประจักษ์ ค่า  $G_1$  เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อ  $\tau/\tau_{av}$  เพิ่มขึ้น ค่าพารามิเตอร์ของ  $G_2$  และ  $\eta_1$  มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเฉือนคงที่กับความสัมพันธ์เชิงกำลัง โดยการนำค่าพารามิเตอร์และความสัมพันธ์กับความเค้นเฉือนคงที่ที่แสดงในตารางที่ 5.1 ชุดของสมการในตารางที่ 5.2 สามารถใช้คาดการณ์พฤติกรรมความหนืดเชิงยืดหยุ่นที่ระดับความเค้นเฉือนต่างๆ



รูปที่ 5.3 อิทธิพลของอัตราส่วนเฉือนคงที่ ( $\tau/\tau_{av}$ ) ต่อค่าความยืดหยุ่นเฉือน ( $G_1$ ) ความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือน ( $G_2$ ) และสัมประสิทธิ์ความหนืด ( $\eta_1$ )

ตารางที่ 5.2 ค่าพารามิเตอร์เชิงประจักษ์ของค่าความยืดหยุ่นเฉือน ความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือน และสัมประสิทธิ์ความหนืดกับอัตราส่วนความเค้นเฉือนคงที่ระหว่างซีเมนต์และเกลือหิน

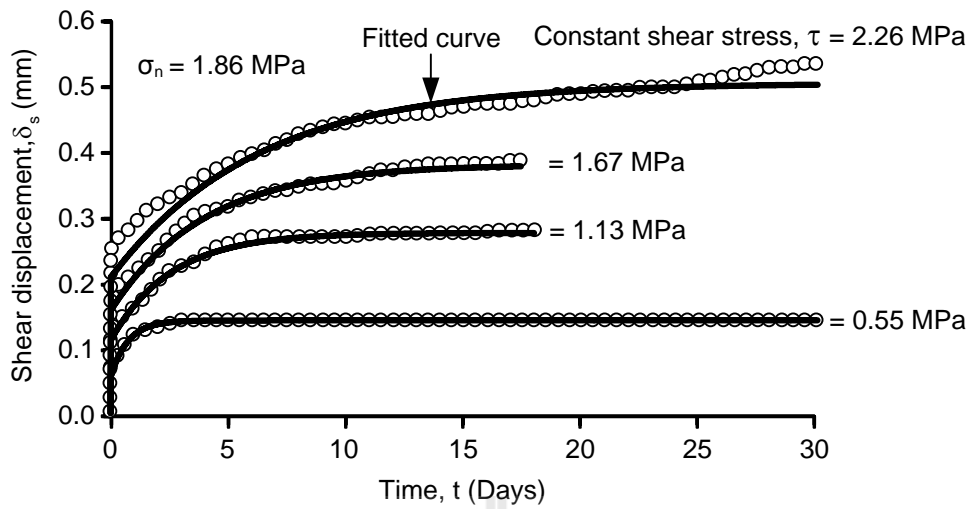
Empirical equations	Empirical parameters		
$G_1 = \chi \cdot \left[ \frac{\tau}{\tau_{av}} \right] + \kappa$ (MPa·mm <sup>-1</sup> )	$\chi$	$\kappa$	$R^2$
	0.382	1.016	0.992
$G_2 = \alpha \cdot \left[ \frac{\tau}{\tau_{av}} \right]^\beta$ (MPa·mm <sup>-1</sup> )	$\alpha$	$\beta$	$R^2$
	0.206	-3.775	0.946
$\eta_1 = \lambda \cdot \left[ \frac{\tau}{\tau_{av}} \right]^\omega$ (MPa·Days·mm <sup>-1</sup> )	$\lambda$	$\omega$	$R^2$
	2.114	-2.336	0.746

#### 5.4 พารามิเตอร์การเคลื่อนไหลของการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงระยะยาว

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงระยะยาวของผิวสัมผัสระหว่างซีเมนต์และเกลือหินในความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน ( $\delta_s$ ) ในฟังก์ชันของเวลาที่ความเค้นเฉือนคงที่ต่างๆ โดยให้ความเค้นตั้งฉากคงที่ที่ 1.86 เมกกะปาสคาล และสอดคล้องกับความเค้นเฉือนสูงสุด ( $\tau_p$ ) ที่ 3.92 เมกกะปาสคาล ตามสมการกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงในบทที่ 4 ดังนั้นทั้ง 4 ระดับความเค้นที่ 0.55, 1.13, 1.67 และ 2.26 เมกกะปาสคาล ใช้ในการตรวจสอบพฤติกรรมเคลื่อนไหลของความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือนของผิวสัมผัสระหว่างซีเมนต์และเกลือหิน และนำมาประยุกต์ใช้ให้สอดคล้องกับระดับความเค้น ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในฟังก์ชันของเวลาที่เวลา 30 วัน

รูปที่ 5.4 แสดงผลการทดสอบการเคลื่อนไหลในแนวเฉือนของตัวอย่างกับการผันแปรความเค้นเฉือน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าผิวสัมผัสระหว่างซีเมนต์เปลี่ยนรูปทันทีที่ความเค้นตั้งฉากคงที่ ในระยะยาวการเปลี่ยนรูปในแนวเฉือนของตัวอย่างยังเพิ่มขึ้นทีละชั้น แต่อัตราการเฉือนค่อยๆ ลดลง

ตารางที่ 5.3 แสดงพารามิเตอร์ในรูปแบบการเคลื่อนไหลเฉือนระหว่างซีเมนต์และเกลือหินของทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงระยะยาว อัตราส่วนของความเค้นเฉือนคงที่ ( $\tau$ ) กับความเค้นเฉือนสูงสุด ( $\tau_p$ ) ซึ่งเรียกว่าอัตราส่วนความเค้นเฉือน ( $\tau/\tau_p$ ) พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของความยืดหยุ่นเฉือน ( $G_1$ ) ความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือน ( $G_2$ ) และสัมประสิทธิ์ความหนืด ( $\eta_1$ ) กับอัตราส่วนความเค้นเฉือน ( $\tau/\tau_p$ ) ค่าพารามิเตอร์เชิงประจักษ์ของความยืดหยุ่นเฉือน ความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือน และสัมประสิทธิ์ความหนืดเปลี่ยนแปลง โดยการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนความเค้นเฉือน เมื่ออัตราส่วนความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้นค่าความยืดหยุ่นเฉือน ความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือน และสัมประสิทธิ์ความหนืดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (รูปที่ 5.5) ตารางที่ 5.4 แสดงชุดของสมการที่สามารถใช้คาดการณ์พฤติกรรมความหนืดเชิงยืดหยุ่นที่ระดับความเค้นเฉือนต่างๆ

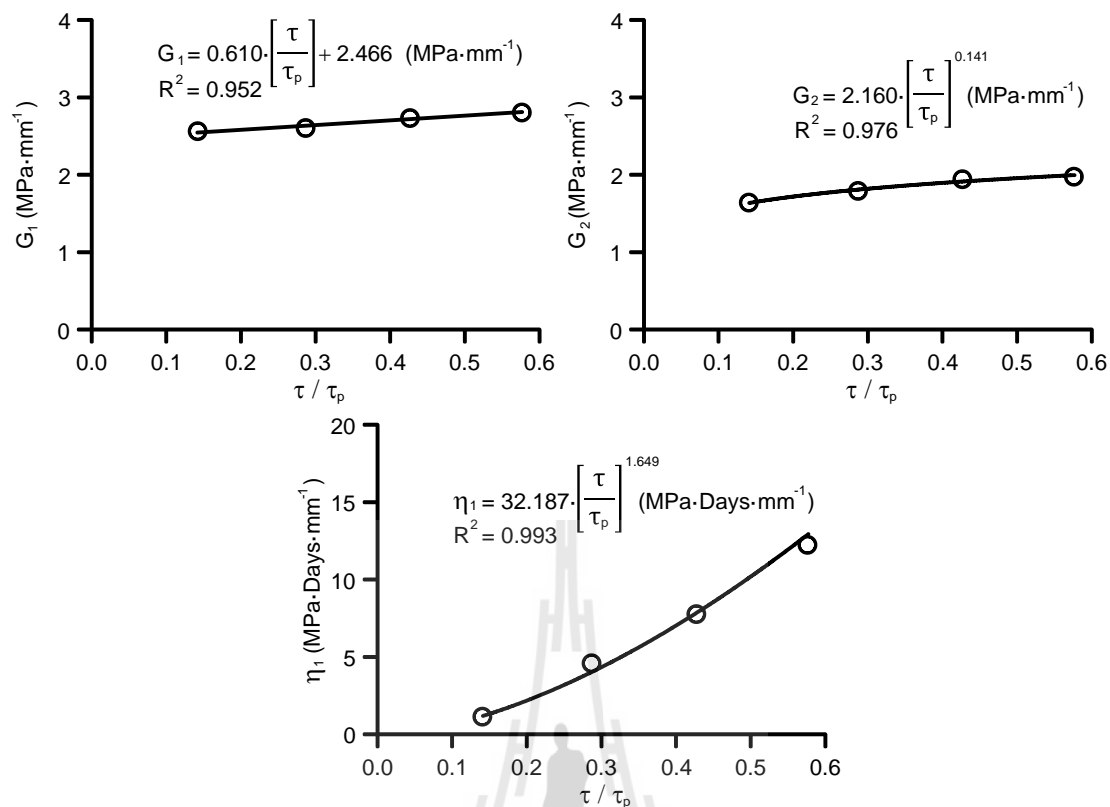


รูปที่ 5.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงระยะยาว (จุด) และการสอบเทียบ (เส้น)

ตารางที่ 5.3 การสอบเทียบพารามิเตอร์การเคลื่อนไหวนอกจากผลการกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงระยะยาวระหว่างซีเมนต์และเกลือหิน

$\delta_s = \frac{\tau}{G_1} + \frac{\tau}{G_2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_1} t\right) \right] \text{ (mm)}$					
$\tau$ (MPa)	$\tau/\tau_p$	$G_1$ (MPa·mm <sup>-1</sup> )	$G_2$ (MPa·mm <sup>-1</sup> )	$\eta_1$ (MPa·Days·mm <sup>-1</sup> )	$R^2$
0.55	0.14	10.061	6.510	4.792	0.991
1.13	0.29	10.237	6.924	17.735	0.982
1.67	0.43	10.804	7.572	30.052	0.986
2.26	0.58	11.029	7.681	47.361	0.955
*Constant normal stress, $\sigma_n = 1.86$ MPa					
*t (Days)					





รูปที่ 5.5 อิทธิพลของอัตราส่วนเฉือน ( $\tau/\tau_p$ ) ต่อค่าความยืดหยุ่นเฉือน ( $G_1$ ) ความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือน ( $G_2$ ) และสัมประสิทธิ์ความหนืด ( $\eta_1$ ) ระหว่างซีเมนต์และเกลือหิน

ตารางที่ 5.4 ค่าพารามิเตอร์เชิงประจักษ์ของค่าความยืดหยุ่นเฉือน ความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือน และสัมประสิทธิ์ความหนืดกับอัตราส่วนความเค้นเฉือน ระหว่างซีเมนต์และเกลือหิน

Empirical equations	Empirical parameters		
$G_1 = \chi \cdot \left[ \frac{\tau}{\tau_p} \right] + \kappa$ (MPa·mm <sup>-1</sup> )	$\chi$	$\kappa$	$R^2$
	0.382	1.016	0.992
$G_2 = \alpha \cdot \left[ \frac{\tau}{\tau_p} \right]^\beta$ (MPa·mm <sup>-1</sup> )	$\alpha$	$\beta$	$R^2$
	0.206	-3.775	0.946
$\eta_1 = \lambda \cdot \left[ \frac{\tau}{\tau_p} \right]^\omega$ (MPa·Days·mm <sup>-1</sup> )	$\lambda$	$\omega$	$R^2$
	2.114	-2.336	0.746

## บทที่ 6

### บทสรุป

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้ คือ 1) ศึกษาพฤติกรรมตามกาลเวลาของการอุดซีเมนต์ในเกลือหินเพื่อนำมาประยุกต์ใช้อุดหลุมเจาะในชั้นเกลือหินที่ถูกเจาะเป็นโพรงหรืออุโมงค์ในเมืองและสำหรับเป็นแหล่งทิ้งกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมที่ไม่สามารถบำบัดหรือนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และ 2) สร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้คาดการณ์ค่ากำลังการยึดติด (Bond Strength) ระหว่างซีเมนต์และเกลือหินในฟังก์ชันของเวลาสำหรับการออกแบบระยะยาว

ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดในระยะยาวของการอุดซีเมนต์ในเกลือหินสำหรับการทดสอบ Push-out และการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน โดยตรงสามารถช่วยในการออกแบบซีเมนต์สำหรับการอุดรอยแตกในระยะยาวเพื่อให้มีผลกระทบจากการรั่วไหลในชั้นเกลือหินของเหมืองเกลือให้น้อยที่สุด ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในงานวิจัยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ซึ่งเจาะมาจากเกลือหินชั้นกลางของหินชุดมหาสารคาม การเตรียมส่วนผสมซีเมนต์สำหรับอุดในหลุมเจาะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานผสมกับน้ำเกลืออิมตัว สารผสมเพิ่มเพื่อการขยายตัว และสารผสมเพิ่มเพื่อลดฟองอากาศ ซึ่งดำเนินการทดสอบเป็นสองประเภทของส่วนผสมซีเมนต์คือ 1) Salt-bond II ผสมกับน้ำเกลือต่ำ (SBII) และ 2) Salt-bond II ผสมกับน้ำเกลือสูง (SBIII) เพื่อทดสอบหาประสิทธิภาพเชิงกลศาสตร์และพลศาสตร์ของปูนซีเมนต์ที่นำมาใช้อุดในชั้นเกลือหิน ที่มีความเหมาะสมโดยให้ค่าความหนืดต่ำสุดและค่าความซึมผ่านต่ำสุดของส่วนผสมซีเมนต์ จากผลการทดสอบระบุว่า การออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นเกลือหินควรจะใช้ซีเมนต์ที่มีส่วนผสมตาม SBIII เพื่อให้มีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์และพลศาสตร์ที่เพียงพอ

ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของซีเมนต์ SBIII แสดงให้เห็นว่าเมื่อบ่มตัวตามเวลาเพิ่มขึ้นค่าแรงกดสูงสุดในแกนเดียว สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น และแรงดึงแบบบราซิลเลียนของตัวอย่างซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าแรงกดสูงสุดในแกนเดียว สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น และแรงดึงแบบบราซิลเลียนหลังจากบ่มตัว 60 วัน คือ  $20.34 \pm 3.42$  เมกะปาสกาล,  $1.87 \pm 0.38$  จิกะปาสกาล และ  $2.75 \pm 0.18$  เมกะปาสกาล ตามลำดับ ค่าความหนืดพลวัต (Dynamics viscosity) และความหนืดเชิงจลน์ (Kinematic viscosity) ของส่วนผสมซีเมนต์คือ  $4.53 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  และ  $2.59 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  ตามลำดับ และความหนาแน่นเท่ากับ  $1.75 \text{ g/cc}$

การทดสอบค่าความซึมผ่านระยะยาวของวัสดุตัวอย่างซีเมนต์โดยการตรวจวัดอัตราการไหลของน้ำที่ระดับความสูงลดลงตามเวลาบ่มตัวที่ 1, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 60, 109, 136 และ 254 วัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาการบ่มตัวเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (K) และค่า

ความซึมผ่านเชิงกายภาพ ( $k$ ) ลดลง ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านและค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพคือ  $4.81 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  และ  $4.95 \times 10^{-15} \text{ m}^2$  ตามลำดับ

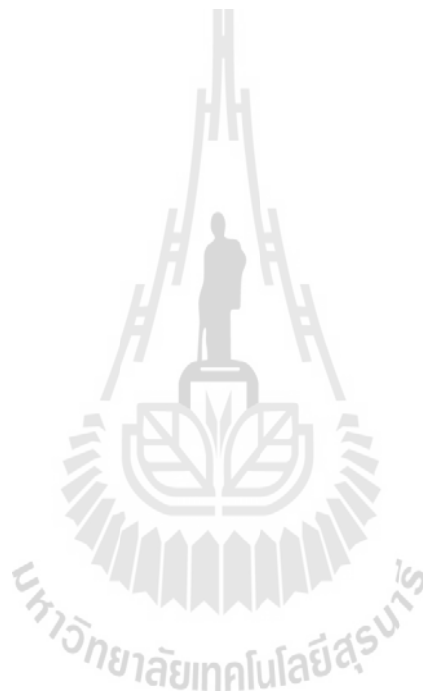
การทดสอบ Push-out และกำลังรับแรงเฉือน โดยตรงเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของตัวอย่างซีเมนต์ในหลุมเจาะ หล่อซีเมนต์ในหลุมเจาะเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ความยาว 30 มิลลิเมตร สำหรับการทดสอบ Push-out และตัดเกลื่อหินให้มีรอยแตกแบบเรียบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง ทำการบ่มตัวอย่างซีเมนต์ 7 ที่ใช้ในการทดสอบ ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงในระยะสั้นพบว่าแรงเสียดทานยึดติระหว่างซีเมนต์และเกลื่อหินได้ค่ามูเสียดทานเท่ากับ 44 องศา และค่าความเค้นยึดติดเท่ากับ 2.12 เมกะปาสคาล ค่าเฉลี่ยการเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉากและการเคลื่อนตัวในแนวเอียงคือ  $8.42 \pm 3.00 \text{ GPa/m}$  และ  $9.86 \pm 2.93 \text{ GPa/m}$  ผลการทดสอบ Push-out ในระยะสั้นให้ค่าสูงกว่าผลที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง โดยมีค่าแรงเฉือนสูงสุดตามแรงกดในแนวแกนเท่ากับ 5.05 เมกะปาสคาล อันเป็นผลมาจากผลกระทบของค่าอัตราส่วนปัวซองที่จะเพิ่มความเค้นตั้งฉากที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของตัวอย่างซีเมนต์และเกลื่อหินในขณะที่ให้แรงกดตามแนวแกน จึงชี้ให้เห็นว่าผลที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงนั้นให้ค่าที่อยู่ให้เชิงอนุรักษ์ที่มากกว่าสำหรับการทดสอบหาค่ากำลังเฉือนสูงสุดระหว่างเกลื่อหินและซีเมนต์ที่ใช้ในการอุดหลุมเจาะ

การทดสอบ Push-out ระยะยาวถูกดำเนินการในแท่งตัวอย่างซีเมนต์กับชุดความสัมพันธ์การบ่มตัวในระยะยาวที่ความเค้นเฉือนคงที่ ผลการทดสอบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ด้านบนในฟังก์ชันของเวลาที่ความเค้นเฉือนคงที่ต่าง ๆ และความยืดหยุ่นชั่วขณะบนพื้นฐานพฤติกรรมเคลื่อนไหลของความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือนของแรงยึดติระหว่างซีเมนต์และเกลื่อหินด้วยความเค้นเฉือนคงที่ โดยผันแปร 5 ระดับที่ 0.29, 3.35, 4.17, 4.26 และ 4.48 เมกะปาสคาลตามลำดับ ผลการทดสอบสามารถหาพฤติกรรมเคลื่อนไหลของความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือนระหว่างแท่งตัวอย่างซีเมนต์และเกลื่อหินโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวแนวเอียงและเวลาโดยระดับความเค้นเฉือนคงที่ต่าง ๆ ที่ 30 วัน

รูปแบบ Hookean-Kelvin ถูกเลือกเพื่อหาค่าพฤติกรรมเคลื่อนไหลของความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือนระหว่างแท่งตัวอย่างซีเมนต์และเกลื่อหิน (Yang และ Cheng, 2011; Saptono และคณะ, 2012) โดยใช้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของความยืดหยุ่นเฉือน ( $G_1$ ) ความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือน ( $G_2$ ) และสัมประสิทธิ์ความหนืด ( $\eta_1$ ) พิจารณาในฟังก์ชันของอัตราส่วนเฉือนคงที่ ( $\tau/\tau_{av}$ ) ของซีเมนต์อุดในหลุมเจาะ ค่า  $G_1$  เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อ  $\tau/\tau_{av}$  เพิ่มขึ้น ค่าพารามิเตอร์ของ  $G_2$  และ  $\eta_1$  มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเฉือนคงที่กับความสัมพันธ์เชิงยกกำลัง

ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงระยะยาวแสดงรูปแบบพารามิเตอร์ของพฤติกรรมเคลื่อนไหลในแนวเอียงสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงระยะยาว พารามิเตอร์ที่

เหมาะสมของความยืดหยุ่นเฉือน ( $G_1$ ) ความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือน ( $G_2$ ) และสัมประสิทธิ์ความหนืด ( $\eta_1$ ) กับอัตราส่วนความเค้นเฉือน ( $\tau/\tau_p$ ) ค่าพารามิเตอร์เชิงประจักษ์ของความยืดหยุ่นเฉือน ความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือน และสัมประสิทธิ์ความหนืดเปลี่ยนแปลงโดยการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนความเค้นเฉือน เมื่ออัตราส่วนความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้นค่า  $G_1$ ,  $G_2$  และ  $\eta_1$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ผลการคาดการณ์เป็นไปตามข้อมูลจากผลการทดสอบเป็นอย่างดี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นรูปแบบการเคลื่อนไหลของความหนืดเชิงยืดหยุ่นแบบไม่เป็นเส้นตรง



## บรรณานุกรม

- กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2543, การวิเคราะห์และออกแบบโพรงที่เกิดจากการผลิตเกลือโดยใช้วิธีละลายในชั้นหินเกลือที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย รหัสโครงการ SUT7-719-43-12-46 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา, 82 หน้า
- กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2543, การศึกษาเกี่ยวกับการทิ้งของเสียในหินเกลือในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข รหัสโครงการ SUT7-719-42-12-16 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา, 44 หน้า
- กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2544, การค้นคว้าทางทฤษฎีและปฏิบัติเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีจุดกดของหินกับความต้านแรงกดและแรงดึงของหิน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา
- กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2544, การร่างคู่มือการทำเหมืองเกลือแบบละลายสำหรับผู้ประกอบการขนาดกลางและขนาดเล็ก ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย รหัสโครงการ SUT7-719-43-12-59 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา, 130 หน้า
- กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2548, การประเมินคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินจากลักษณะทางศิลาวิทยา รหัสโครงการ SUT-719-47-24-18, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 130 หน้า
- กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2548, การหาสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของหินด้วยการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา
- วารสารนิเวศลิษฐ์ปริทัศน์, 2543, สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ, กระทรวงวิทยาศาสตร์และสิ่งแวดล้อม, ปีที่ 15, ฉบับที่ 1, มกราคม-มีนาคม.
- Akgun, H. (1996). Strength parameters of cement borehole seals in rock. **Sealing of Boreholes and Underground Excavations in Rock**. Chapman & Hall, London pp. 28–39.
- Akgun, H. (1997). An assessment of borehole sealing in a salt environment. **Environmental Geology**. 31: 34-41.
- Akgun, H. and Daemen, J.J.K. (1997). Analytical and experimental assessment of mechanical borehole sealing performance in rock. **Engineering Geology** 47(3): 233-241.
- Akgun, H. and Daemen, J.J.K. (2002). Influence of degree of saturation on the borehole sealing performance of an expansive cement grout. **Cement and Concrete Research** 30(2): 281-289.

- Akgun, H. and Daemen, J.J.K. (2004). Stability of expansive cement grout borehole seals emplaced in the vicinity of underground radioactive waste repositories. **Environmental Geology** 45:1167-1171.
- Amadei, B., and Curran, J.H. (1982). Creep behaviour of rock joints. In: Underground rock engineering: **13th Canadian Rock Mechanics Symposium**. Transactions of the Canadian Institute of Mining and Metallurgy, 22, pp. 146–150.
- American Petroleum Institute. (1986). Specifications for Materials and Testing for Well Cements. **3<sup>rd</sup> Edition American Petroleum Institute**, Production Department, Dallas, TX.
- ASTM C39-10. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. **Annual Book of ASTM Standards** (Vol. 04.01). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C938-10. Standard Practice for Proportioning Grout Mixtures for Preplaced-Aggregate Concrete. In **Annual Book of ASTM Standards** (Vol. 04.02). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D2196-10. Standard Test Methods for Rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational (Brookfield type) Viscometer. **Annual Book of ASTM Standards** (Vol. 06.01). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D3967-08. Standard test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens. **Annual Book of ASTM Standards** (Vol. 04.08). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D4543-85. Standard Test Method for Preparing Rock Core Specimens and Determining Dimensional and Shape Tolerances. **Annual Book of ASTM Standard**. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D5607-08. Standard Test Method for Performing Laboratory Direct Shear Strength Tests of Rock Specimens Under Constant Normal Force. **Annual Book of ASTM Standards** (Vol. 04.08). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D7012-10. Standard test Method for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures. **Annual Book of ASTM Standards** (Vol. 04.09). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.

- ASTM D854-10. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. **Annual Book of ASTM Standards** (Vol. 04.08). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- Boa, J.A., Jr., (1978). Borehole Plugging Program (Waste Disposal): Initial Investigations and Preliminary Data. Miscellaneous Paper C-78-1, Report 1, SAND 77-7005, prepared by **U.S. Army Laboratories**, Albuquerque, NM.
- Brodsky, N. S., F. D. Hansen, and T. W. Pfeifle. (1998). Properties of dynamically compacted WIPP Salt. In **Proceedings of the Fourth Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 303-316), Clausthal-Zellerfeld, Germany, Trans Tech Publications.
- Brown, E.T. (editor). (1981). Rock Characterization testing and Monitoring: ISRM Suggested methods. The Commission on Rock Testing Methods, **International Society for Rock Mechanics**, Pergamon Press, Now York, pp. 211.
- Daemen, J. J. K., et al. (1984). Rock mass sealing. In **Annual Report No. NUREG/CR-4174**. Washington DC: US Nuclear Regulatory Commission.
- Daemen, J.J.K. and Fuenkajorn, K. (1996). Design of Boreholes Seals-Processes, Criteria and Considerations. **Sealing of Boreholes and Underground Excavations in Rock**, Chapman & Hall, London, pp. 267-279.
- Daemen, J.J.K., Greer, W.B. and Fuenkajorn, K. (1986). Experimental Assessment of Borehole Plug Performance. **US Nuclear Regulatory Commission Rep. NURG/CR-4642**, Washington, DC.
- Daemen, J.J.K., South, D.L. and Greer, W.B. (1983). Rock Mass Sealing. Annual Report June 1983 - May 1984. **US Nuclear Regulatory Commission Rep. NURG/CR-3473**, Washington, DC.
- Dale, T. and Hurtodo, L, D. (1998). WIPP air-intake shaft disturbed-rock zone study. In **Proceedings of the Fourth Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 525-535), Clausthal-Zellerfeld, Germany, Trans Tech Publications.
- Dieterich, J.H. (1972). Time-dependent friction in rocks. **Journal of Geophysical Research**, 77, pp. 3690-3697.
- Dusseault, M.B. and Fordham, C.J. (1993). Time-dependent behavior of rocks. Comprehensive Rock Engineering Principles, Practice and Project: **Rock Testing and Site Characterization** (Vol. 3, pp. 119-149). London,

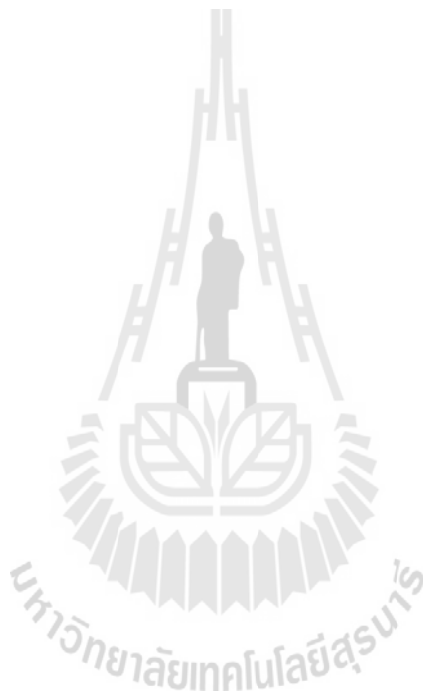
- Economides, M.J., Watters, L.T. and Dunn-Norman, S. (1998). **Petroleum well construction**. Chichester: John Wiley & Sons.
- Fuenkajorn, K. and Daemen, J.J.K. (1987). Mechanical Interaction between Rock and Multi-component Shaft or Borehole Plugs. **Rock Mechanics: Proceedings of the 28th U.S. Symposium**, June 29-July 1, University of Arizona, Tucson, pp. 165-172.
- Fuenkajorn, K. and Daemen, J.J.K. (1988). Borehole Closure in Salt. **Key Questions in Rock Mechanics: Proceedings of the 29th U.S. Symposium**, June 13-15, University of Minnesota, Minneapolis, pp. 191-198.
- Fuenkajorn, K. and Daemen, J.J.K. (1996). Design Guideline for Mine Sealing. **The 1996 Arizona Conference**, Tucson, Arizona, December 8-9.
- Fuenkajorn, K. and Daemen, J.J.K. (1996). Sealing of Boreholes in Rock-An Overview. **2nd North American Rock Mechanics**, Symposium, Montreal, Quebec, Canada, pp. 1447-1454.
- Fuenkajorn, K. and Phueakphum, D. (2010). Effects of cyclic loading on mechanical properties of Maha Sarakham salt. **Engineering Geology** 112: 43-52.
- Gray, T.A. and Gray, R.E. (1992). Mine closure, sealing, and abandonment. **SME mining handbook**. 1, 2: 659-674.
- Gulick, C.W., Jr., J.A. Boa, Jr., and A.D. Buck, 1980. Bell Canyon Test (BCT) Cement Grout Development Report. SAND 80-1928, **Sandia National Laboratories**, Albuquerque, NM.
- Indraratna, B. and Ranjith, P. (2001). **Hydromechanical Aspects and Unsaturated Flow in Joints Rock**. Lisse: A. A. Balkema.
- Jeremic, M. L. (1994). **Rock mechanics in salt mining** (530 pp.). Rotherdam: A. A. Balkema.
- Knowles, M. K., Borns, D., Fredrich, J., Holcomb, D., Price, R. and Zeuch, D. (1998). Testing the disturbed zone around a rigid inclusion in salt. In **Proceedings of the Fourth Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 175-188). Clausthal, Germany: Trans Tech Publications.
- Lajtai, E.Z., and Gadi, A.M. (1989). Friction on a granite to granite interface. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 22, pp 25-49.
- Mechanics Symposium**, Sapporo, Japan, 14-16 October 2014.
- Ouyang, S., and Daemen, J.J.K. (1996). Performance of bentonite and bentonite/crushed rock borehole seals. **Sealing of Boreholes and Underground Excavations in Rock**, Chapman & Hall, London pp. 65-95.



- Peach, C.J. (1991). Influence of deformation on the fluid transport properties of salt rock. **Geological Ultralectina** No. 77, Nederlands. Pergamon.
- Ran, C., Daemen, J.J.K., Schuhen, M.D. and Hansen, F.D. (1997). Dynamic compaction properties of bentonite. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences** 34(1-4). **Rock**, Chapman & Hall, London, pp. 9-27.
- Roy, D.M., M.W. Grutzeck and L.D. Wakeley, (1983). Selection and Durability of Seal Materials for a Bedded Salt Repository: Preliminary Studies, ONWI-479. Prepared by the **Materials Research Laboratory**, The Pennsylvania State University, and Structures Laboratory, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, for the office of Nuclear Waste Isolation, Battelle Memorial Institute, Columbus, OH.
- Roy, D.M., M.W. Grutzeck and L.D. Wakeley, (1985). Salt Repository Seal Materials: A Synopsis of Early Cementitious Materials Development, BMI/ONWI-536. Prepared by the **Materials Research Laboratory**, The Pennsylvania State University, and Structures Laboratory, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, for the office of Nuclear Waste Isolation, Battelle Memorial Institute, Columbus, OH.
- Roy, D.M., M.W. Grutzeck, K. Mather, and A.D. Buck, (1982). PSU/WES Interlaboratory Study of an Experimental Cementitious Repository Seal Material, ONWI-324. Prepared by the **Materials Research Laboratory**, The Pennsylvania State University, and Structures Laboratory, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, for the office of Nuclear Waste Isolation, Battelle Memorial Institute, Columbus, OH.
- Samaiklang, W. and Fuenkajorn, K. (2013). Mechanical and hydraulic performance of cement grouts from 5 suppliers in Thailand. **Rock Mechanics, Fuenkajorn & Phien-wej (eds)**, pp. 333-342.
- Samsri, P., Sriapai, T., Walsri, C. and Fuenkajorn, K. (2010). Polyaxial creep testing of rock salt. In **Proceedings of the Third Thailand Symposium on Rock**.
- Saptono, S., Kramadibrata, S., Sulistianto, B. and Priyadi (2012) Study on Long Term Strength Characteristic of Sandstone, Tutupan Coal Mine, South Kalimantan, Indonesia. **Proc. of 7<sup>th</sup> Asian Rock Mechanics Symposium**, Seoul, Korea, 15-19 October 2012, 1305-1310.
- Smith, D.K. (1993). **Handbook on Plugging and Abandonment**. Oklahoma: Penn Well Publishing Company.

- Smith, S.A. (1994). **Well & borehole sealing**. Ohio: Ground water publishing co.
- South, D.L. and Fuenkajorn, K. (1996). Laboratory Performance of Cement Boreholes Seals.
- Sealing of Boreholes and Underground Excavations in**
- Stormont, J.C. (1990). Discontinuous behavior near excavations in a bedded salt formation. **Int. Jour. Mining and Geological Eng.** 8:35-36.
- 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.
- Stormont, J.C. and Daemen, J.J.K. (1991). **Laboratory study of gas permeability changes in rock salt during deformation**. SAND90-2638 (p. 40), Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.
- Suwanich, P. (1986). Potash and Rock Salt in Thailand: Nonmetallic Minerals Bulletin No.2. **Economic Geology Division**, Department of Mineral Resources, Bangkok, Thailand.
- Tabakh, M.E., Utha-Aroon, C., Warren, J.K. and Schreiber, B.C. (2002). Origin of dolomites in the Cretaceous Maha Sarakham evaporates of the Khorat Plateau, northeast Thailand. **Sedimentary Geology**, 157: 235–252.
- Tepnarong, P. (2012). Bond strength of cement sealing in Maha Sarakham salt. **Proc. of 7<sup>th</sup> Asian Rock Mechanics Symposium**, Seoul, Korea, 15-19 October 2012, 584-593.
- Tepnarong, P. and Deethouw, P. (2014). Mechanical and Hydraulic Performance of Sludge-mixed Cement Borehole Plugs in Rock Salt. **Proc. of 8<sup>th</sup> Asian Rock**
- Utha-aroon, C. (1993). Continental origin of the Maha Sarakham evaporites, Northeastern Thailand. **Journal of Southeast Asian Earth Sciences**, 1993, Great Britain, Vol. 8(1-4), pp. 193-203.
- Wakeley, L.D. and D.M. Roy, (1985). Cementitious Mixtures for Sealing Evaporite and Clastic Rocks in a Radioactive-Waste Repository. Miscellaneous Paper SL-85-16, prepared by the Structures Laboratory, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, and by the **Materials Research Laboratory**, The Pennsylvania State University, for the office of Nuclear Waste Isolation, Battelle Memorial Institute, Columbus, OH, and for Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.

- Wendai, L. (2000). Regression analysis, linear regression and probit regression in 13 chapters. **SPSS for Windows: statistical analysis**, Publishing House of Electronic Industry, Beijing.
- Wong, H.S., Zimmerman, R.W. and Buenfeld, N.R. (2011). Estimating the permeability of cement pastes and mortars using image analysis and effective medium theory. **Cement and Concrete Research** **42**, pp. 476-483.
- Yang, S.Q., Cheng, L. (2011) Non-Stationary and Nonlinear Visco-Elastic Shear Creep Model for Shale. **International Journal Rock Mechanics & Mining Sciences**, Volume 48, Issue 6, 1011-1020.



## ประวัตินักวิจัย

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

