รหัสโครงการ SUT7-719-57-18-53



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

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ SUT7-719-57-18-53



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

#### ผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ ดร.ปรัชญา เทพณรงค์ สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2557-2558 ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2558

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปี 2557 และ 2558 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ก็ด้วยความช่วยเหลือจาก นายซากีรีน ปัตตานี ในการ เป็นผู้ช่วยวิจัยและพิมพ์รายงานการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ผู้วิจัย

#### บทคัดย่อ

วัตถุประสงก์ของการศึกษานี้กือ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพเชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์ของ ปูนซีเมนต์เพื่อนำมาใช้อุดในชั้นเกลือหินในพึงก์ชันของเวลา ผลการทดสอบที่ได้สามารถช่วยในการ ออกแบบของซีเมนต์สำหรับการอุดรอยแตกในระยะยาวเพื่อให้มีผลกระทบจากการรั่วไหลในชั้น เกลือหินของเหมืองเกลือให้น้อยที่สุด ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของซีเมนต์ระบุว่าเมื่อเพิ่ม ระยะเวลาการบ่มตัว ค่าแรงกดสูงสุดในแกนเดียว ค่าสัมประสิทธิ์กวามยืดหยุ่น และค่าแรงดึงแบบ บราซิลเลียนของปูนซีเมนต์มีแนวโน้มสูงขึ้น ผลการทดสอบความซึมผ่านของซีเมนต์พบว่าเมื่อ ระยะเวลาการบ่มตัวเพิ่มขึ้น ค่าความซึมผ่านและค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านจะสดลง ผลการทดสอบ แรงเฉือนโดยตรงระยะสั้นพบว่าแรงเสียดทานยึดติดระหว่างซีเมนต์และเกลือหินมีก่าเท่ากับ 44 องศา และแรงยึดติดมีก่าเท่ากับ 2.12 เมกกะปาสกาล

การทดสอบ Push-out ระยะยาวถูกดำเนินการในแท่งซีเมนต์กับชุดความสัมพันธ์การบ่มตัว ระยะยาวที่ความเก้นเฉือนคงที่ บนพื้นฐานพฤติกรรมการเคลื่อนไหลของความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือน ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวแนวเฉือนและเวลาโดยระดับความเก้นเฉือนคงที่ต่างๆที่ 30 วัน รูปแบบ Hookean-Kelvin ถูกเลือกเพื่อหาค่าพฤติกรรมการเคลื่อนไหลของความหนืดเชิงยืดหยุ่น เฉือนระหว่างซีเมนต์และเกลือหิน พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของความยืดหยุ่นเฉือน (G<sub>1</sub>) ความหนืด เชิงยืดหยุ่นเฉือน (G<sub>2</sub>) และสัมประสิทธิ์ความหนืด (η<sub>1</sub>) พิจารณาในฟังก์ชันของอัตราส่วนเฉือนคงที่ (τ/τ<sub>n</sub>) ของแท่งซีเมนต์ในหลุมเจาะ พารามิเตอร์ของ G<sub>1</sub> เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อ (τ/τ<sub>n</sub>) เพิ่มขึ้น พารามิเตอร์ของ G<sub>2</sub> และ η, มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเฉือนคงที่กับความสัมพันธ์เชิงกำลัง การทดสอบแรงเฉือนโดยตรงระยะยาวแสดงรูปแบบพารามิเตอร์การเคลื่อนไหลเฉือน พารามิเตอร์ที่ เหมาะสมของ G<sub>1</sub>, G<sub>2</sub> และ η, เปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนความเก้นเฉือน (τ/τ<sub>p</sub>) ผลการกาดการณ์ เป็นไปตามข้อมูลจากผลการทดสอบเป็นอย่างดี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นรูปแบบการเคลื่อนไหลของ ความหนึดเชิงยืดหยุ่นแบบไม่เป็นเส้นตรง

#### 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<sub>1</sub>), visco-elastic shear modulus (G<sub>2</sub>) 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<sub>1</sub> increase slightly with the  $\tau/\tau_{av}$  increase. The parameters of G<sub>2</sub> 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<sub>1</sub>, G<sub>2</sub> 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

กิตติกร	รมประกาศ	ก
บทคัดย่	່ງອ	บ
Abstrac	ct	ก
สารบัญ	J	१
สารบัญ	มูตาราง	ณ
สารบัญ	มูภาพ	្ស
บทที่ 1	บทนำ	1
	1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	
	1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	
	1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของ โครงการวิจัย	
	1.5 วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง / เก็บข้อมูล	
	1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
	1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ <u></u>	
บทที่ 2	การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
	2.1 หินเกลือหินในภูมิภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย	
	2.2 คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของเกลือหิน	
	2.3 การอุคหลุมเจาะในเกลือหิน	
	2.4 กำลังยึดติดของการอุดซีเมนต์	
	2.5 กำลังแรงเฉื่อนในระยะยาว	
	2.6 คุณสมบัติทางชลศาสตร์ของเกลือหิน	
บทที่ 3	การจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหินและซีเมนต์	23
	3.1 การเตรียมตัวอย่างซีเมนต์	
	3.1.1 เครื่องมือ	
	3.1.2 วิธีการเตรียมแท่งตัวอย่างซีเมนต์ในหลุมเจาะ	

## สารบัญ (ต่อ)

	3.2 การเตรียมตัวอย่างเกลือหิน	31
บทที่ 4	การทดสอบในห้องปฏิบัติการ	35
	4.1 วัตถุประสงค์	35
	4.2 การทคสอบคุณสมบัติพื้นฐานของซีเมนต <u>์</u>	35
	4.2.1 การทดสอบก่ากวามหนืดและกวามหนาแน่นของส่วนผสมซีเมนต์	35
	4.2.2 การทคสอบแรงกคสูงสุดในแกนเดียว	37
	4.2.3 การทคสอบแรงคึงแบบบราซิลเลียน	37
	4.3 การทดสอบ Push-out	45
	4.4 การทคสอบกำลังรับแรงเฉือน โดยตรง	51
	4.5 การทดสอบค่าความซึมผ่าน	55
บทที่ 5	การสอบเทียบของพารามิเตอร์การเคลื่อนไหล	59
	5.1 วัตถุประสงค์	59
	5.2 รูปแบบการเคลื่อนไหลของความหนืดเชิงยึดหยุ่นเฉือน <u></u>	59
	5.3 พารามิเตอร์การเคลื่อนใหลของการทดสอบ Push-out	60
	5.4 พารามิเตอร์การเคลื่อนไหลของการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงระยะยาว	63
บทที่ 6	บทสรุป	67
บรรณา	นูกรม	71
ประวัติ	นักวิจัย	79

## สารบัญตาราง

ตารางที		หน้า
2.1	ส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ BCT-1F และ BCT-1FF (Gulick และคณะ, 1980; อ้างอิง จาก Roy และคณะ, 1985)	14
2.2	ส่วนประกอบผสมซีเมนต์ 5 ตัวอย่าง (Boa, 1978; อ้างอิงจาก Roy และคณะ, 1985)	1:
2.3	ส่วนประกอบของปูนซึเมนต์ 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; อ้างอิง จาก Roy และคณะ, 1985)	17
3.1	ส่วนประกอบของซึเมนต์ Salt-bond II (SBII และ SBIIH)	24
3.2	ขนาดของตัวอย่างซีเมนต์สำหรับการทดสอบแรงกดในแกนเดียวและสัมประสิทธิ์ความ	
	ยึดหยุ่น	24
3.3	ขนาดของตัวอย่างซึเมนต์สำหรับการทคสอบแรงคึงแบบบราซิลเลียน	26
3.4	ขนาดของตัวอย่างซีเมนต์สำหรับการทคสอบความซึมผ่านระยะยาว	28
3.5	ความลึกและขนาดของตัวอย่างเกลือหินและซีเมนต์สำหรับการทคสอบ push-out	31
3.6	ความลึกและขนาดของตัวอย่างเกลือหินสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง <u></u>	31
4.1	ค่าความหนืดและค่าความหนาแน่นของซีเมนต์ผสมน้ำเกลือ <u></u>	35
4.2	ผลการทคสอบแรงกคสูงสุคในแกนเคียว (σู) และสัมประสิทธิความยึคหยุ่น (E) ของ	
	Salt-bond II cement (SBII)	39
4.3	ผลการทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียว (σ.ู) และสัมประสิทธิความยึดหยุ่น (E) ของ	
	Salt-bond II cement (SBIIH)	40
4.4	ผลการทคสอบแรงคึ่งแบบบราซิลเลียน (σ <sub>в</sub> ) ของ Salt-bond II cement (SBII)	41
4.5	ผลการทคสอบแรงคึงแบบบราซิลเลียน (σ <sub>в</sub> ) ของ Salt-bond II cement (SBIIH)	42

## สารบัญตาราง (ต่อ)

## ตารางที่

#### หน้า

4.6	สรุปผลการทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียว ( $\sigma_c$ ) การตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ความ	
	ยึดหยุ่น (E) และการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน (σ <sub>в</sub> )	44
4.7	สรุปผลการทคสอบ Push-out	49
4.8	สรุปผลการทคสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงตามเกณฑ์ของ Coulomb	51
4.9	ความเก้นตั้งฉากและความเก้นเฉือนกงที่สำหรับการทคสอบกำลังรับแรงเฉือน โดยตรง	
	ระยะยาว	53
4.10	สรุปผลการทดสอบค่าความซึมผ่านของตัวอย่างซีเมนต <u>์</u>	56
5.1	การสอบเทียบพารามิเตอร์การเคลื่อนใหลงากผลการทดสอบ Push-out	59
5.2	ค่าพารามิเตอร์เชิงประจักษ์ของค่าความยืดหยุ่นเฉือน ความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือน และ	
	สัมประสิทธิ์ความหนืดกับอัตราส่วนความเค้นเฉือนคงที่	61
5.3	การสอบเทียบพารามิเตอร์การเกลื่อนใหลจากผลการกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงระยะ	
	ຢາວ	62
5.4	ค่าพารามิเตอร์เชิงประจักษ์ของค่าความยืดหยุ่นเฉือน ความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือน และ	
	สัมประสิทธิ์ความหนืดกับอัตราส่วนความเก้นเฉือน	62

# สารบัญรูปภาพ

รูปที		หน้
2.1	แผนที่แสดงสถานที่ของแอ่งโคราชและแอ่งสกลนคร อยู่บนที่ราบสูงโคราชภาค	
	ตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย (Tabakh และคณะ, 2002)	
2.2	การเปลี่ยนรูปที่ขึ้นกับระยะเวลาของวัสคุ (modified from Jeremic, 1994)	1
3.1	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนค์ปอซโซลานน้ำหนัก 50 กิโลกรัม ที่ใช้ในการศึกษา	2
3.2	แม่แบบพีวีซีใช้บ่มส่วนผสมปูนซีเมนต <u>์</u>	2
3.3	ตัวอย่างซีเมนต์สำหรับเตรียมการทคสอบคุณสมบัติพื้นฐานของซีเมนต <u>์</u>	2
3.4	กระบอกซีเมนต์ในแม่แบบพีวีซีสำหรับการทดสอบความซึมผ่าน	3
3.5	เจาะตัวอย่างเกลือหินขนาด 25 เซนติเมตร สำหรับการทคสอบ Push-out	3
3.6	ตัวอย่างเกลือหินสำหรับการทดสอบ push-out	3
3.7	การตัดแบบแห้งของแท่งเกลือหินด้วยเครื่องตัด	3
3.8	ตัวอย่างเกลือหินผสานกับซีเมนต์สำหรับการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง	3
4.1	เครื่อง Brookfield <sup>®</sup> viscometer model RV (ตามมาตรฐาน ASTM D2196)	3
4.2	การติดตั้งเครื่องมือการทดสอบแรงกดในแกนเดียว	3
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดในแกนเดียว (σָ) ในฟังก์ชันของการบ่มตัวตามเวลา	3
4.4	แสดงการติดตั้งเครื่องมือการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน	3
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงคึงแบบบราซิลเลียน (σ <sub>в</sub> ) ในฟังก์ชันของการบ่มตัวตามเวลา <sub>.</sub>	3
4.6	การติดตั้งเครื่องมือทคสอบ 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	4
4.7	การติดตั้งเครื่องมือทดสอบ Push-out	4
4.8	ผลการทคสอบ Push-out แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของ	
	การเกลื่อนตัวของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ด้านบนและด้านล่าง	4
4.9	ภาพตัดขวางของตัวอย่างหมายเลข SBIIH-04-07-PO-01 หลังจากเกินการพังของการ	
	ทคสอบ Push-out	4

#### ,

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.10	ผลการทคสอบ Push-out แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเกลื่อนตัวของแท่งตัวอย่าง	
	ซีเมนต์ด้านบน (δ <sub>τ</sub> ) ในฟังก์ชันของเวลา	48
4.11	แสดงการติดตั้งเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉื่อน โดยตรง (model EL-77-1030)	50
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวแนวเฉือน	51
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของความเค้นตั้งฉาก	51
4.14	แสดงการติดตั้งเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือน โดยตรงระยะยาว (model DR-44)	52
4.15	ผลการทคสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงระยะยาว แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการ	
	เคลื่อนตัวเฉือน (δ) ในฟังก์ชันของเวลา โดยความเค้นตั้งฉากคงที่ 1.86 เมกกะ	
	ปาสกาล	51
4.16	แสดงการติดตั้งเกรื่องมือทดสอบความซึมผ่านของซีเมนต์	55
4.17	ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (K) ของตัวอย่างซีเมนต์	55
4.18	ค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพ (k) ของตัวอย่างซึเมนต์	56
5.1	รูปแบบของ Hookean-Kelvin (Yang และ Cheng, 2011)	58
5.2	ผลการทคสอบ Push-out (จุค) และการสอบเทียบ (เส้น)	59
5.3	อิทธิพลของอัตราส่วนเฉือนคงที่ ( $ au/ au_{av}$ ) ต่อค่าความยืดหยุ่นเฉือน ( $G_{_1}$ ) ความหนืดเชิง	
	ยืดหยุ่นเฉือน (G2) และสัมประสิทธิ์ความหนืด ( $\eta_1$ )	60
5.4	ผลการทคสอบกำลังรับแรงเฉือน โคยตรงระยะยาว (จุค) และการสอบเทียบ (เส้น)	62
5.5	อิทธิพลของอัตราส่วนเฉือน (τ/τ <sub>p</sub> ) ต่อค่าความยึดหยุ่นเฉือน (G <sub>1</sub> ) ความหนืดเชิง	
	ยืดหยุ่นเฉือน (G₂) และสัมประสิทธิ์ความหนืด (η₁)	63

บทที่ 1 บทนำ

## 1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

องค์ความรู้ทางค้านการอุคหลุมเจาะในชั้นหินได้พัฒนาขึ้นอย่างจริงจังและต่อเนื่องเมื่อ ประมาณ 20 ปีที่แล้วในต่างประเทศจนถึงปัจจุบัน (Daemen et al., 1983, 1984, 1986) ความสำคัญ ขององค์ความรู้นี้ได้ถูกเล็งเห็นเมื่อเริ่มมีแนวคิคที่จะพัฒนานำเอากากนิวเคลียร์และของเสียทางเคมีไป ทิ้งในชั้นหินที่อยู่ในระดับลึกอย่างถาวร หลังจากทิ้งแล้วจะต้องมีการออกแบบและก่อสร้างการอุค หลุมหรืออุโมงค์ที่นำไปสู่ของเสียเหล่านี้ เพื่อป้องกันไม่ให้มีการรั่วซึมออกมาสู่ระบบน้ำบาดาล ดังนั้นขบวนการและวัสดุที่ใช้ในการอุคจึงมีความสำคัญมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเชิงกลศาสตร์ ชล ศาสตร์ และเคมี

ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยมีชั้นเกลือหินแพร่กระจายอยู่อย่างกว้างขวาง เกลือ หินจึงเป็นทรัพยากรที่สำคัญของประเทศไทยอย่างหนึ่งซึ่งบัจจุบันกำลังมีการพัฒนาหรือประยุกต์ใช้ ได้หลายด้าน อาทิ การทำเหมืองใต้ดินแร่โพแทชที่จังหวัดอุดรธานี และจังหวัดชัยภูมิ รวมถึงการทำ เหมืองละลายโพรงเกลือที่อำเภอพิมาย จังหวัดนกรราชสีมา นอกจากนี้ยังมีการผลิตเกลือสินเทาว์โดย วิธีสูบน้ำบาดาลที่มีความเก็มขึ้นมาสกัดหรือตากแห้ง และยังมีโครงการออกแบบไว้เป็นที่กักเก็บ พลังงานในรูปของอากาศภายใต้แรงดันในอนาคต การออกแบบเพื่อใช้เป็นที่กักเก็บของเสียจาก โรงงานอุตสาหกรรม และกากนิวเกลียร์ที่ได้มาจากโรงพยาบาลและห้องปฏิบัติการต่าง ๆ งานวิจัย เหล่านี้ได้ดำเนินการวิจัยอยู่ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีมาอย่างต่อเนื่อง (กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2543, 2544 และ 2548; วารสารนิวเกลียร์ปริทัศน์, 2543) ซึ่งการกักเก็บอย่างถาวรจำเป็นต้องมีการอุด หลุมเจาะได้อย่างมีประสิทธิภาพและสมฤทธิ์ผลจะต้องกำนึงถึงองก์กวามรู้หลัก คือ เสถียรภาพเชิงกล สาสตร์ ประสิทธิภาพต่อการด้านทานความซึมผ่าน และเสถียรภาพทางเกมี ในระยะยาว (Long-term) การอุดหลุมเจาะในชั้นหินในอดีตและปัจจุบันมิได้กำนึงถึงองก์ประกอบพื้นฐานเหล่านี้ครบถ้วน หรือ ทำการศึกษาพฤติกรรมต่าง ๆ เพียงระยะสั้น (Shot-term) ก่อนการออกแบบเท่านั้น ซึ่งอาจทำให้เกิด การรั่วซึมจนสร้างปัญหาต่อสภาพสิ่งแวดล้อมให้เป็นอันตรายได้

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

 ศึกษาพฤติกรรมตามกาลเวลาของการอุคซีเมนต์ในเกลือหินเพื่อนำมาประยุกต์ใช้อุคหลุม เจาะในชั้นเกลือหินที่ถูกขุดเจาะเป็นโพรงหรืออุโมงก์ในเหมือง และสำหรับเป็นแหล่งทิ้ง กากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมที่ไม่สามารถบำบัดหรือนำกลับมาใช้ใหม่ได้  สร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้คาดการณ์ก่ากำลังการยึดติด (Bond Strength) ระหว่างซีเมนต์และเกลือหินในฟังก์ชันของเวลาสำหรับการออกแบบระยะยาว

#### 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- การศึกษาพฤติกรรมตามกาลเวลาของการอุคซีเมนต์ในเกลือหินในห้องปฏิบัติการ เพื่อ นำไปประยุกต์ใช้ในการอุคหลุมเจาะในชั้นเกลือหินหรือโพรงเกลือหิน สำหรับเหมือง และกักเก็บกากของเสียในภาคอุตสาหกรรม
- การทดสอบ Push-out จะเตรียมตัวอย่างทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 100 มิลลิเมตร พร้อมเจาะรูเส้นผ่าศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 25 มิลลิเมตรเพื่อไว้ติดตั้งแท่งซีเมนต์
- การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน โดยตรงระหว่างซีเมนต์และเกลือหินทรงกระบอก เส้นผ่าสูนย์กลางไม่น้อยกว่า 100 มิลลิเมตร
- 4) การทคสอบขึ้นกับเวลา (Time-dependent tests) เป็นการทคสอบ Push-out และการ ทคสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง จะทคสอบไม่น้อยกว่า 30 วันในแต่ละการทคสอบ หรือจนกระทั่งซีเมนต์และเกลือหินแตกออกจากกัน
- 5) ใช้ปูนซีเมนต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน (Portland-pozzolan cement) ชนิดทน เก็ม ที่มีจำหน่ายอย่างแพร่หลายในทุกท้องถิ่นของประเทศไทย
- งานวิจัยนี้ไม่รวมไปถึงการอุดหลุมเจาะที่อุณหภูมิสูง การอุดอุโมงค์หรือเหมืองใต้ดิน
- 7) การผสมและระยะเวลาการบ่มตัวของปูนซีเมนต์จะทำตามมาตรฐาน API และมาตรฐาน ASTM

#### 1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

การอุดหฉุมเจาะ (Boreholes) ในชั้นหินสามารถประยุกต์ใช้ในงานด้านวิศวกรรมธรณี เทคโนโลยีน้ำบาดาล เทคโนโลยีปิโตรเลียม วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และวิศวกรรม เหมืองแร่ ซึ่งหฉุมเจาะในที่นี้หมายถึง หฉุมเจาะสำรวจหรือหฉุมเจาะเพื่อผลิตทางด้านน้ำบาดาล เหมืองแร่ น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ฯลฯ การอุดหฉุมเจาะจำพวกนี้ในขณะที่กำลังดำเนินการอยู่หรือ หลังจากเลิกใช้แล้วยังไม่เป็นระบบและถูกต้องตามหลักวิชาการ ทำให้เกิดการรั่วซึมหรือปนเปื้อนใน ชั้นน้ำบาดาล ถึงแม้ว่าเทคโนโลยีทางด้านการอุดหฉุมเจาะได้มีมานานแล้วก็ตามโดยเฉพาะในชั้นดิน และต่อมาได้พัฒนามาใช้ในชั้นหิน แต่ก็ไม่ได้หมายความว่าหฉุมเจาะที่ถูกอุดไปแล้วจะมีสภาพคงทน ยาวนานทัดเทียมเท่ากับหินข้างเคียงที่อยู่ตามธรรมชาติ การอุดหฉุมเจาะที่เลิกใช้งานแล้วและหฉุม เจาะที่กำลังใช้งานอยู่ทั้งในและต่างประเทศพบว่ามากกว่าร้อยละ 30 ของการรั่วซึมและบางหฉุมถึง ขั้นใช้งานไม่ได้เลย ดังนั้นการศึกษาประสิทธิภาพของซีเมนต์ในการอุดหฉุมเจาะในชั้นเลาะในชั้นเกลือหินจึง เป็นสิ่งสำคัญประการแรกที่ควรนำมาพิจารณาในการออกแบบโพรงกักเก็บของเสียจาก ภาคอุตสาหกรรม

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาพฤติกรรมตามกาลเวลาของการอุคซีเมนต์ในเกลือหินและจะสร้าง กวามสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายค่ากำลังการยึดติดระหว่างซีเมนต์และเกลือหินในฟังก์ชัน ของเวลา สำหรับใช้ในการออกแบบการอุคหลุมเจาะไม่ให้รั่วซึมในระยะยาวหรืออย่างถาวร และจะ ทดสอบประสิทธิภาพในการอุคโดยนำแท่งตัวอย่างเกลือหินมาเจาะทะลุจากนั้นจึงอัคซีเมนต์เข้าไป ในรูเจาะ การทดสอบกำลังยึดติดสูงสุดระหว่างซีเมนต์และเกลือหินจะดำเนินการทดสอบ Push-out และการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงระหว่างซีเมนต์และเกลือหินภายใต้สภาวะค่าความเก้นตั้ง ฉากต่างๆ ในฟังก์ชันของเวลา

#### 1.5 วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง / เก็บข้อมูล

การวิจัยแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้ ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การก้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งจะรวมไปถึง ทฤษฎีและขั้นตอนต่างๆ ที่ใช้ในการการอุคหลุมเจาะในชั้นหิน การเลือกใช้วัสคุในการอุคหลุมเจาะ ในอุตสาหกรรม และการศึกษาและวิจัยในการอุคหลุมเจาะในอคีตที่ดำเนินมาแล้วทั้งในและ ต่างประเทศ

#### ขั้นตอนที่ 2 การจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหินและซีเมนต์

ตัวอย่างเกลือหินจะถูกเก็บและเตรียมให้ได้รูปร่างตามขนาดที่ต้องการทดสอบตามมาตรฐาน สำหรับการทดสอบ Push-out จะเตรียมตัวอย่างเป็นรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 100 มิลลิเมตร พร้อมเจาะรูเส้นผ่าศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 25 มิลลิเมตรเพื่อไว้ติดตั้งแท่งซีเมนต์ และ สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงระหว่างซีเมนต์และเกลือหินทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 100 มิลลิเมตร

#### ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ การทคสอบเพื่อหาคุณสมบัติพื้นฐานของซีเมนต์ และการทคสอบ กำลังยึคติคตามกาลเวลาในการอุคหลุมเจาะระหว่างซีเมนต์และเกลือหิน

การทคสอบแท่งซีเมนต์ประกอบด้วยการทคสอบหาการทคสอบค่าความหนืดและความ หนาแน่นของส่วนผสมซีเมนต์ กำลังแรงกคสูงสุดในแกนเดียว การตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ความ ยึดหยุ่นและการทคสอบแรงคึงแบบบราซิลเลียนโดยใช้แท่งซีเมนต์ทรงกระบอกที่อายุ 1, 3, 7, 21, 28 และ 60 วัน และการทคสอบหาก่าความซึมผ่านโดยใช้แท่งซีเมนต์ทรงกระบอกที่อายุ 1, 3, 7, 21, 28, 35, 42, 60, 109, 136 และ 254 วัน ตามมาตรฐาน ASTM การทดสอบกำลังยึดติดสูงสุดระหว่างซีเมนต์และเกลือหินจะดำเนินการทดสอบทั้งใน รูปแบบของทดสอบ Push-out ระยะยาว และการทดสอบกำลังรับแรงเลือนโดยตรงระยะยาวระหว่าง ซีเมนต์และเกลือหินภายใต้สภาวะค่าความเค้นตั้งฉาก ในแต่ละการทดสอบขึ้นกับเวลา (Timedependent tests) ใช้เวลาทดสอบไม่น้อยกว่า 30 วันในแต่ละตัวอย่างหรือจนกระทั่งซีเมนต์และเกลือ หินแตกออกจากกัน

#### ขั้นตอนที่ 4 การพัฒนากฎเกณฑ์และการสอบเทียบการเคลื่อนใหลในรอยเฉือนตามกาลเวลา

จากผลการทดสอบการเคลื่อนไหลของเกลือหินภายใต้แรงเฉือนตามกาลเวลา จะสามารถ พัฒนาเป็นกฎเกณฑ์สำหรับการเคลื่อนไหล และสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายค่า กำลังการยึดติด (Bond Strength) ระหว่างซีเมนต์และเกลือหินตามกาลเวลา เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ใน การคาดคะเนการเคลื่อนตัวของเกลือหินที่อยู่ภายใต้สภาวะจริงแบบแรงเฉือนระยะยาวสำหรับการ ออกแบบระยะยาว (Long-term) ได้ ผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบจะถูกนำมาสอบเทียบ (Calibration) หาค่าคงที่ต่างๆของเกลือหินระยะยาว โดยใช้สมการเชิงคณิตศาสตร์ ประกอบกับการ ใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ IBM SPSS Statistics 19

#### ขั้นตอนที่ 5 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวกิด ขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุปได้ นำเสนอโดยละเอียดในรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ เพื่อที่จะส่งมอบเมื่อเสร็จโกรงการ และตีพิมพ์ ในวารสารระดับนานาชาติ

#### ขั้นตอนที่ 6 การถ่ายทอดเทคโนโลยี

แผนการการถ่ายทอดเทคโนโลยีนี้คือ การนำข้อมูลไปเผยแพร่ในเว็บไซต์ของหน่วยวิจัย กลศาสตร์ธรฉีเพื่อให้ผู้ที่สนใจทั่วไปสามารถสืบค้นได้ และนำผลงานวิจัยชิ้นนี้ลงตีพิมพ์ในวารสาร นานาชาติหรือนำเสนอในการประชุมวิชาการระดับชาติเพื่อเผยแพร่ความรู้ในวงกว้างต่อไป

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลงานวิจัยที่เสนอมานี้มีประโยชน์มากมายกับงานด้านธรณีวิทยา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และ วิศวกรรมธรณี ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

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

## 1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยที่เสนอมานี้จะมีประโยชน์อย่างมากและโดยตรงกับหลายหน่วยงานทั้งภาครัฐ และเอกชน สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ และวิศวกรรมธรณี รวมไปถึง หน่วยงานที่ทำงานเกี่ยวข้องกับการก่อสร้างในชั้นหิน การสร้างเงื่อน การสร้างอุโมงค์ เหมืองแร่บน ดินและใต้ดิน หน่วยงานเหล่านี้ได้แก่

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

## บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ เพื่อปรับปรุง ความเข้าใจของเกลือหินในประเทศไทย คุณสมบัติของเกลือหิน การอุดหลุมเจาะในชั้นเกลือหิน และ กำลังยึดติดระหว่างเกลือหินกับซีเมนต์ การทบทวนวรรณกรรมมีรายละเอียดดังนี้

#### 2.1 เกลือหินในภูมิภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

เกลือหินในประเทศไทยตั้งอยู่ในที่ราบสูงโคราช (รูปที่ 2.1) ที่ราบสูงโคราชครอบคลุมพื้นที่ 150,000 ตารางกิโลเมตรจาก 14° ถึง 19° ละติจูดเหนือและ 101° ถึง 106° ลองจิจูดตะวันออก ขอบ ภาคเหนือและภาคตะวันออกของที่ราบสูงอยู่ใกล้กับประเทศลาวและส่วนหนึ่งในภาคใต้ใกล้กับ ประเทศกัมพูชา (Utha-aroon, 1993)



รูปที่ 2.1 แผนที่แสดงสถานที่ของแอ่งโคราชและแอ่งสกลนคร อยู่บนที่ราบสูงโคราชภาค ตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย (Tabakh et al., 2002)

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

#### 2.2 คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของเกลือหิน

การเปลี่ยนรูปที่ขึ้นกับระยะเวลาที่อยู่ภายใต้แรงที่มากระทำหรือการเคลื่อนไหลเป็น กระบวนการที่หินสามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างต่อเนื่องโดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงความเด้น ้ความเครียดที่เกิดจากการเคลื่อนไหลซึ่งจะคืนตัวได้น้อยมากเมื่อมีการเอาแรงกดออกไป ดังนั้นเกลือ ้หินจะแสดงการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก การเกลื่อนไหลหรือการเปลี่ยนรูปตามเวลาภายใต้แรงกด ้คงที่ของหินปรากฏเป็น 3 ช่วง (รูปที่ 2.2) ซึ่งแสดงแบบจำลองคุณสมบัติของเกลือหินที่เปลี่ยนรูปตาม เวลาภายใต้แรงกดคงที่ คือ 1) ช่วงที่อัตราความเครียดเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient phase) 2) ช่วง ที่อัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาคงที่ (Steady-state phase) และ 3) ช่วงที่จะนำไปสู่การแตก (Tertiary phase) จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการแสดงให้เห็นว่าการลดแรงกดที่จุด L จะทำให้เกิด การลดลงของความเครียดอย่างรวดเร็วไปสู่จุด M จากนั้นจะลดลงไปที่ 0 ที่จุด N ระยะทาง LM คือ ความเค้น (ɛ) โดยไม่มีความเค้นถาวรคงอยู่เลย ถ้าลดความเครียดออกไปจนอยู่ใน steady-state phase ้จึงจะมีความเค้นถาวรเกิดขึ้นจากจุด stability point โครงสร้างเกลือจะเปลี่ยนแปลงรูปร่างหลังจาก แรงกคถูกถคลงซึ่งมีนัยสำคัญทางวิชาการ ความเครียดเป็นปัจจัยหลักใต้คิน เนื่องมาจากการทำเหมือง ้ไม่สามารถย้อนกลับมาแก้ไขได้ พฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลาของเกลือเมื่อเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้แรง กคุงที่จะเกิดปรากฏการณ์ visco-elastic และ visco-plastic ภายใต้เงื่อนใบเหล่านี้ strain criteria จะ ้ดีกว่า strength criteria ในการออกแบบ เนื่องจากการพังของเสาเกลือหินส่วนใหญ่เกิดขึ้นระหว่างการ เร่งหรือ tertiary phase of creep เนื่องมาจากแรงกดคงที่ขนาดของเสา visco-elastic และ visco-plastic rock ควรออกแบบโดยคาดคะเนความเครียดในระยะยาวเพื่อป้องกันการเร่งการเคลื่อนใหล (Fuenkajorn and Daemen, 1988; Dusseault and Fordham, 1993; Jeremic, 1994; Knowles et al., 1998)



ร**ูปที่ 2.2** การเปลี่ยนรูปที่ขึ้นกับระยะเวลาของวัสดุ (modified from Jeremic, 1994)

Samsri et al. (2010) คำนวณผลกระทบของความเครียดหลักที่ขึ้นอยู่กับเวลาของชั้นเกลือหิน ชุดมหาสารคาม เครื่อง polyaxial creep frameใช้ทดสอบตัวอย่างหินที่มีลักษณะลูกบาศก์ขนาด โดยทั่วไป 5.4×5.4×5.4 ลูกบาศก์เซนติเมตร การใช้แรงเฉือนหกด้าน ( $\tau_{ocl}$ ) จะเปลี่ยนแปลงจาก 5 เป็น 8, 11 และ 14 เมกกะปาสกาล โดยที่ความเค้นเฉลี่ย ( $\sigma_m$ ) จะคงที่ไว้ที่ 15 เมกกะปาสกาล 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 ( $\sigma_2$ ) อย่างไรก็ ตาม เส้นแนวโน้มจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ  $\tau_{oct}$  ขนาดของ  $\tau_{oct}$  เดียวกัน visco-elastic และ visco-plastic จะมี ค่าเพิ่มเมื่อ  $\sigma_2$  เพิ่มขึ้น ในการกดสอบแบบสามแกน  $\sigma_2 = \sigma_3$  เมื่อ  $\sigma_2 = \sigma_1$ 

Fuenkajorn และ Phueakphum (2010) ทำการทดสอบแรงกดแบบวัฎจักร (cyclic loading tests) ในเกลือหินมหาสารคาม ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังกดในแกนเดียวจะลดลงเมื่อทำ การเพิ่มรอบของการให้แรงกด สามารถแสดงได้จากสมการกำลังของมอดุลัสของสภาพยืดหยุ่น (elastic modulus) จะลดลงเล็กน้อยในช่วงรอบแรก ซึ่งจะเป็นอยู่แบบนั้นจนกระทั่งเกิดการแตก โดย ไม่เกี่ยวข้องกับแรงกดสูงสุด เส้นโค้ง Axial strain–time ถูกรวบรวมจากแรงกดสูงสุดของแต่ละรอบ แสดงถึงพฤติกรรมที่ไม่ขึ้นกับเวลาแบบเดียวกับการทดสอบการเคลื่อนไหลแบบให้แรงกดคงที่ใน steady-state creep phase ก่าสัมประสิทธิ์ visco-plastic ที่กำนวณจากการทดสอบแรงกดแบบวัฎจักร จะมีก่าต่ำกว่าการให้แรงกดแบบคงที่ ก่า visco-plasticity ของเกลือจะมีก่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของ loading frequency การทรุดตัวของผิวดินและการปิดถ้ำ ถูกจำลองโดยเทียบก่าพารามิเตอร์ซึ่ง loading test มีผลลัพธ์ดีกว่าการให้แรงกดแบบคงที่ 40% โดยประมาณ นั่นแสดงให้เห็นว่าก่าพารามิเตอร์ที่ ใค้มาจาก static loading creep test ในการประเมินความเสถียรระยะยาวของแหล่งกักเก็บในเกลือหิน ที่มีความคันภายในแปรปรวนอาจจะไม่เป็นไปตามทฤษฎีเคิม

#### 2.3 การอุดหลุมเจาะในเกลือหิน

การอุดหลุมเจาะในชั้นหินในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ สามารถจำแนกตามวัตถุประสงค์ที่ ทำการอุด โดย Gray and Gray (1992) ได้จำแนกการอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ออกเป็น 3 ประเภทได้แก่ 1) การอุดแบบถาวร (Permanent) 2) การอุดแบบชั่วคราว (Temporary) 3) การอุดแบบ กึ่งถาวร (Semi-permanent) Smith (1994) แบ่งประเภทของการอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรมน้ำบาดาล ออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ 1) การอุดแบบชั่วคราว (Temporary sealing) 2) การอุดในหลุมเจาะที่ใช้ งานอยู่ (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)

การอุคในหลุมเจาะที่ถูกใช้งานอยู่เกี่ยวข้องกับการอุคใน annular zone ระหว่างท่อกรุ ซึ่งการ อุคหลุมเปิดจะถูกใช้ต่อไปในอนาคต เหตุที่ต้องอุคหลุมเจาะที่ถูกใช้งานอยู่ไว้ป้องกันท่อกรุจากการผุ กร่อนเพื่อกันการ Blowout ด้วยการอุคเพื่อป้องกันท่อกรุจากแรงสั่นสะเทือนจากการเจาะในระดับลึก และป้องกันการเกิคโซนไหลเวียนหรือ thief zone (Economides, Watters and Dunn-Norman, 1998)

การอุคในหลุมที่ไม่ใช้งานแล้วเป็นอย่างของการอุคแบบถาวร ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นการอุคใน หลุมเจาะที่ถูกละทิ้งหรือบ่อน้ำ หน้าที่หลักของการอุคหลุมที่ไม่ใช้งานแล้ว คือการแยกโซนของก๊าซ หรือ ของไหล ซึ่งส่วนใหญ่จะเน้นในเรื่องการปกป้องทางสิ่งแวคล้อม (Daemen และ Fuenkajorn, 1996) เหตุในการอุคหลุมเจาะที่ไม่ใช้งานแล้วก็เพื่อกันการปนเปื้อนของน้ำใต้คินเพื่อป้องกัน poor aquifer จากการไหลใน water-bearing zone เพื่อรักษา aquifer yield และ artesian pressure และกำจัด ภัยพิบัติทางกายภาพใคๆ (Smith, 1993).

Fuenkajorn and Daemen (1987) ศึกษาความสัมพันธ์เชิงกลศาสตร์ของซีเมนต์และเบนโท ในต์กับชั้นหิน ศึกษาความเค้นเนื่องจากการบวมตัวของเบนโทในต์อัดตัว ได้ทำการทคสอบ 2 รูปแบบ คือ ในระบบปิดซึ่งไม่มีการไหลเข้า-ออกของน้ำและระบบเปิดที่ปล่อยให้น้ำไหลผ่านตัวอย่าง การศึกษาความเค้นเนื่องจากการขยายของซีเมนต์ ทคสอบโดยการอุคซีเมนต์ในท่อ PVC ที่มีความ หนาต่างกัน ผลการทคสอบปรากฏว่าเบนโทในต์ที่ทคสอบในระบบปิคไม่เกิดความเค้นเนื่องจากการ บวมตัว แต่เบนโทในต์ที่ทคสอบในระบบเปิดเกิดการบวมตัวและสามารถวัดก่าความเค้นในแนวแกน และแนวรัศมีได้ 7.5 เมกกะปาสกาล และ 2.6 เมกกะปาสกาล ส่วนการทคสอบหาก่าความเค้น เนื่องจากการขยายตัวของซีเมนต์พบว่า ความเค้นในแนวรัศมีเนื่องจากการขยายตัวของซีเมนต์ในท่อที่ หนากว่าวัดได้ 4.7 เมกกะปาสกาล และกวามเก้นในแนวรัศมีในท่อที่บางวัดได้ 2.7 เมกกะปาสกาล ผลการทดสอบระบุว่าการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหินด้วยเบนโทไนต์กวรอุดใต้ระดับน้ำ บาดาลจึงจะมีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์เพียงพอ และการอุดหลุมเจาะด้วยซีเมนต์กวรอุดในชั้นหินแข็ง เนื่องจากจะทำให้มีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์สูงกว่าการอุดในชั้นหินที่มีกวามอ่อน

#### 2.4 กำลังยึดติดของการอุดซีเมนต์

Akgun (1996) ทำการวิจัยกำลังยึดติดซีเมนต์ที่ใช้อุดในหิน วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ ศึกษาจากความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเกี่ยวกับความแข็งกับอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อรัศมี ของแท่งซีเมนต์ ค่าความแข็งในแนวแกน (Axial strength) กำลังยึดติดระหว่างซีเมนต์กับหิน (Bond strength) และความแข็งเฉือนสูงสุด (Peak shear strength) โดยทดสอบ push-out ของแท่งซีเมนต์ใน หลุมตัวอย่างหินทัฟฟ์ทรงกระบอกที่รัศมีและความยาวแท่งซีเมนต์แตกต่างกัน ผลการทดสอบปรากฏ ว่าคุณสมบัติเกี่ยวกับความแข็งทั้ง 3 ตัว มีค่าสูงที่สุดในตัวอย่างหินที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อ รัศมีของแท่งซีเมนต์ที่มีค่าเท่ากับ 8.0 ผลจากการทดสอบระบุว่าการออกแบบการอุดหลุมเจาะแบบ ถาวรด้วยซีเมนต์กวรจะออกแบบให้อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อรัศมีของแท่งซีเมนต์มีค่ามากกว่า หรือเท่ากับ 8.0 เพื่อให้ซีเมนต์มีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์เพียงพอ

Ouyang and Daemen (1996) ทดสอบการอุดหลุมเจาะในชั้นหินโดยใช้เบนโทในต์และวัสดุ ผสมระหว่างเบนโทในต์กับหินย่อยของหินทัฟฟ์ (Crushed tuff) การทดสอบการอุดหลุมเจาะด้วยเบน โทในต์ตัวอย่างการอุดทั้งหมดจะถูกทดสอบความซึมด้วยวิธี constant head, standard falling head และ modified falling head ใช้ตัวอย่างการอุดทั้งหมด 14 ตัวอย่าง การทดสอบมีวัตถุประสงค์เพื่อ สึกษาค่าความซึมผ่านของเบนโทในต์ที่เกี่ยวข้องกับ 3 ปัจจัย คือ 1) กุณสมบัติทางด้านเคมีของน้ำที่ใช้ ผสมกับเบนโทในต์และน้ำที่ใช้ในการทดสอบ 2) ขนาดของตัวอย่าง และ 3) การทดสอบแบบ High injection pressure flow test ผลการทดสอบปรากฏว่าค่าความซึมผ่านของตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่อใช้น้ำ ที่มีสารละลายโซเดียมไพโรฟอสเฟตในการผสมกับเบนโทในต์และในการทดสอบ ขนาดของ ดัวอย่างไม่มีผลทำให้ค่าความซึมผ่านของเบนโทในต์เพิ่มขึ้นหรือลดลง และค่าความซึมผ่านของ ด้วอย่างมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มแรงดันของน้ำจากการทดสอบแบบ High injection pressure flow test

South and Fuenkajorn (1996) ทดลองการใช้ซีเมนต์ในการอุดหลุมเจาะ โดยศึกษาและ เปรียบเทียบอัตราการใหลผ่านเนื้อหินกับซีเมนต์ที่อุด ศึกษา Tension Zone ในบริเวณรอยต่อระหว่าง แท่งซีเมนต์กับชั้นหิน และศึกษาการอุดหลุมเจาะที่ความลึกต่างๆ กัน โดยจำลองแรงดันทั้งใน แนวแกนและด้านข้างที่แตกต่างกัน ตัวอย่างหินมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร และยาว 30 เซนติเมตร ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มแรกจะถูกเจาะรูที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร ตรง กลางหัวท้ายเป็นความยาว 1/3 ของความยาวของตัวอย่างหินและตัวอย่างหินกลุ่มที่ 2 จะถูกเจาะรูที่มี เส้นผ่าศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร ตรงกลางจนทะลู (ลักษณะเป็นวงแหวน) แล้วอุดด้วยซีเมนต์มีความ ยาว 5 เซนติเมตร ที่ตรงกึ่งกลางของตัวอย่างหิน ตัวอย่างหินจะมีลักษณะเหมือนกลุ่มแรกแต่แตกต่าง ้กันตรงที่วัสดที่อุดอยู่ตรงกึ่งกลางซึ่งกลุ่มแรกเป็นเนื้อหินส่วนกลุ่มที่ 2 เป็นซีเมนต์ ตัวอย่างหินที่ใช้มี 5 ชนิด ที่แตกต่างกันประกอบด้วย หินแกรนิต 2 ตัวอย่าง หินบะซอล์ต 1 ตัวอย่าง และหินทัฟฟ์ 2 ้ตัวอย่าง ซีเมนต์ที่ใช้ในการอุดมีส่วนผสมประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ Class A ผสมกับน้ำที่ 50% โดย น้ำหนัก, Dowell additive D53 10% สารเพิ่มการขยายตัวและ D65 1% ซีเมนต์ผสมตามมาตรฐาน สถาบันปีโตรเลียมสหรัฐอเมริกา (American Petroleum Institute, 1986) ซีเมนต์ที่ผสมเสร็จมีค่าความ หนาแน่น 1.88 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีความแข็ง 26.2 เมกกะปาสกาล (บ่มที่ 43°C เป็นเวลา 14 วัน) และมีการขยายตัว 0.18 % (หลัง 14 วัน) มีความเค้นในแนวรัศมีภายหลัง 25 วัน วัคได้ 4 เมกกะ ปาสกาล ก่าความซึมผ่าน 8.65x10-13 เมตรต่อวินาที การทคสอบการใหลผ่านจะทำโดยการใช้ Permeameter ด้วยการปล่อยน้ำจากปั้มให้ใหลผ่านรูในแนวเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างหินจากหัวสู่ ท้ายของตัวอย่างหินและเพื่อให้การทคสอบเป็นไปตามสภาวะที่การอุคอยู่ในระคับลึก 1000, 600 และ 300 เมตร จึงใส่แรงในแนวแกน (axial load) และความเค้นค้านข้าง (confining stress) ที่แตกต่างกัน 3 ระคับ คือ ที่แรงในแนวแกน 23 เมกกะปาสกาล ใช้แรงคันค้านข้าง 20 เมกกะปาสกาล (1000 เมตร) ที่ ์ แรงในแนวแกน 15 เมกกะปาสกาล ใช้แรงคันค้านข้าง 13.5 เมกกะปาสกาล (600 เมตร) และที่แรงใน แนวแกน 8.5 เมกกะปาสคาล ใช้แรงคันค้านข้าง 7.0 เมกกะปาสคาล (300 เมตร) และแรงคันน้ำที่ใช้ ในแต่ละระดับความลึกคือ 10.7 และ 3.5 เมกกะปาสคาล ผลการทคสอบสามารถสรปได้ว่าอัตราการ ้ใหลผ่านแท่งซีเมนต์จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงในตัวอย่างที่มีก่ากวามซึมผ่านของแท่งซีเมนต์ต่อก่า ้ความซึมผ่านของชั้นหินน้อยกว่า 1 วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม FREESUEF และค่าอัตราการไหลจะ ้เพิ่มเป็นเส้นตรงในตัวอย่างที่มีก่ากวามซึมของแท่งซีเมนต์ต่อก่ากวามซึมผ่านของชั้นหินมากกว่า 100 และเมื่อวิเคราะห์ด้วย Program Plane2d-FE พบว่า Tension Zone จะไม่เพิ่มขึ้นถ้าความเค้นเนื่องจาก การขยายตัวของซีเมนต์น้อยกว่า 75% ของความเค้นในแนวสัมผัสที่กระทำต่อผนังของหลุมเจาะ (Tangential stress) ผลการทคสอบแนะนำเกี่ยวกับการออกแบบการอุคหลุมเจาะ ณ จุคใดๆ ว่า Expansive cement เป็นวัสดุที่มีคุณภาพเพียงพอสามารถอุดในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความเค้นได้ ้ดี ในชั้นหินแข็งควรใช้ซีเมนต์ในการอุด เนื่องจากการติดตั้งซีเมนต์ในหินแข็งจะให้พันธะทางชล ศาสตร์บริเวณรอยต่อที่ดีที่สุด ค่าความซึมผ่านของวัสดุที่อุดกวรจะน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 เท่า ของค่า ้ความซึมผ่านของชั้นหิน ควรใช้ซีเมนต์อุดตำแหน่งที่อยู่ใต้ระดับน้ำบาดาล เพราะในสภาวะที่แห้ง ซีเมนต์จะหดตัวและแตกจึงทำให้มีค่าความซึมผ่านสูงมาก การเลือกใช้ซีเมนต์หรือเบนโทในต์ให้ ้เหมาะสมกับแต่ละตำแหน่งในหลุมเจาะจะทำให้การอุดเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ กรณีการอุดด้วย

เบนโทในต์ควรอุดแทรกด้วยซีเมนต์เป็น Key seal

Agkun (1997) ทำการทดสอบ Push-out เพื่อหาวัสดุที่เหมาะสมในเชิงกลศาสตร์สำหรับการ อุดหลุมเจาะขนาดใหญ่ในชั้นเกลือหินด้วย วัสดุที่ศึกษาและใช้ในการทดสอบเป็นซีเมนต์ที่มี คุณสมบัติขยายตัวได้ที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ Self-stress I cement และ Salt-bond II cememt, Selfstress 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 ซีเมนต์ที่อุดในรู ทดสอบในตัวอย่างหินและเกลือหินที่ไม่เหลืออยู่มีก่าความยาวต่อรัศมีเท่ากับ 2.0 และซีเมนต์ที่อุดจะ ถูกบ่มไว้ในน้ำ 8 วัน ก่อนนำมาทดสอบ จากการทดสอบปรากฏว่าการอุดด้วย Self-stress cement ให้ ก่าความเสียดทานระหว่างซีเมนต์กับหินเท่ากับ 2.2 เมกกะปาสกาล (22% ของค่าความเสียดทาน ระหว่างเนื้อเกลือหินกับเกลือหิน) และการอุดด้วย Salt-bond cement ให้ก่าความเสียดทานระหว่าง ซีเมนต์กับหินเท่ากับ 6.1 เมกกะปาสกาล (60% ของก่าความเสียดทานระหว่างเนื้อเกลือหินกับเกลือ หิน) ผลการทดสอบระบุว่าการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นเกลือหินควรจะใช้ซีเมนต์ที่มี ส่วนผสมตาม Salt-bond II cement เพื่อให้มีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์เพียงพอ

Ran et al. (1997) ศึกษาคุณสมบัติของเบนโทในต์อัดตัวแบบเคลื่อนที่ (Dynamic compaction) โดยศึกษาดัวอย่างเบนโทในต์อัดตัวที่ใช้น้ำกลั่นในการผสม และตัวอย่างเบนโทในต์อัดตัวที่ใช้ น้ำเกลือในการผสม คุณสมบัติที่ศึกษากือก่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของเบนโทในต์อัดตัวซึ่งมี ความสัมพันธ์กับก่าความซึมผ่าน ปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่สุด ผลกระทบของพลังงานในการอัดตัว น้ำหนักของลูกตุ้ม ความหนาของการอัดตัวและการผสมน้ำเกลือ เบนโทในต์ที่ใช้ในการทดสอบ คือ โซเดียมเบนโทในต์ มีความถ่วงจำเพาะ 2.79 มีก่าความหนาแน่นก้อน 1.23 Mg/m ้มีก่าความชื้นอยู่ ระหว่าง 8.7-10.5% มีความสามารถในการบวมตัวถึง 28 ml/g การอัดเบนโทในต์แบบเคลื่อนที่ทำใดย การอัดเบนโทในต์ 3-10 ชั้น และใช้ลูกคุ้มในการอัด 2 ถึง 8 ครั้ง หรือใช้แรงในการอัดตัวตั้งแต่ 5,400 ถึง 21,000 กิโลนิวตัน ผลการทดสอบพบว่า เบนโทในต์อัดตัวที่ใช้น้ำกลั่นในการผสมมีก่าความ หนาแน่นแห้งเท่ากับ 1.74 Mg/m3 ซึ่งมีปริมาณกวามชื้นอยู่ระหว่าง 0-18% ส่วนเบนโทในต์อัดตัวที่ ใช้น้ำเกลือผสมมีก่าความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1.86 Mg/m ้ซึ่งมีปริมาณกวามชื้นที่ 12% และการเพิ่ม พลังงานและลูกคุ้มในการอัดเบนโทในต์จะทำให้ก่าปริมาณกวามชื้นที่เหมาะสมที่สุดมีก่าลดลง ทำ ให้ก่าความหนาแน่นแห้งมีก่าเพิ่มขึ้น ผลการทดสอบระบุว่า การออกแบบการอุดหลุมเจาะด้วยเบนโท ในต์อัดตัวกอรใช้น้ำเกลือในการผสมเบนโทในต์ เนื่องจากให้ก่าความแน่นแห้งสูงกว่าการใช้น้ำกลั่น ในก์อังตัวควรใช้น้ำเกลือในการผสมเบนโทในต์ เนื่องจากให้ก่าความแน่นแห้งสูงกว่าการใช้น้ำกลั่น

Akgun and Daemen (2002) ศึกษาอิทธิพลของเปอร์เซ็นต์การอิ่มตัวด้วยน้ำที่มีต่อความแข็ง ของซีเมนต์ที่สามารถขยายตัวได้ (Expensive cement) โดยการทดสอบแบบ Push-out Test ตัวแปรที่ ทำการศึกษาคือความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การอิ่มตัวด้วยน้ำกับความแข็งของซีเมนต์และรัศมี ของตัวอย่างการอุดกับความแข็งของซีเมนต์ การเตรียมซีเมนต์ด้วยการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ I หรือ II ผสมกับน้ำกลั่น 50 % เติมสารที่ทำให้เกิดการขยายตัว (D53) 10 % และ สารที่ทำ ให้เกิดการกระจายตัว (D65) 1% โดยน้ำหนัก ตามมาตรฐานสถาบันปีโตรเลียมสหรัฐอเมริกา (API) ด้วอย่างหินเป็นหินทัฟฟ์รูปทรงกระบอกที่เจาะรูตรงกลางตามแนวเส้นผ่าสูนย์กลางมีรัศมี 6.35, 12.7 25.4 และ 50.8 มิลลิเมตร รัศมีภายนอกมีค่าระหว่าง 38.1 ถึง 93.66 มิลลิเมตร ซีเมนต์ที่อุดในรูทดสอบ ในตัวอย่างหินมีค่าความยาวต่อรัศมีเท่ากับ 2.0 และซีเมนต์ที่อุดจะถูกบ่มไว้ในน้ำ 8 วัน ก่อนนำมา ทดสอบ เปอร์เซ็นต์การอิ่มตัวด้วยน้ำของซีเมนต์มี 3 ระดับ คือ แห้ง เปอร์เซ็นต์การอิ่มตัวด้วยน้ำน้อย และเปอร์เซ็นต์การอิ่มตัวด้วยน้ำปานกลาง จากการทดสอบพบว่าก่าความแข็งในแนวแกน ความเสียด ทานระหว่างซีเมนต์กับหินและกวามแข็งเฉือนสูงสุดในตัวอย่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปอร์เซ็นต์การ อิ่มตัวด้วยน้ำของซีเมนต์เพิ่มขึ้นและรัศมีของตัวอย่างน้อยลง ผลจากการทดสอบระบุว่าการออกแบบ การอุดหลุมเจาะแบบถาวรด้วยซีเมนต์กวรจะออกแบบให้อุดในตำแหน่งที่อยู่ใด้ระดับน้ำบาดาล เพื่อให้มีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์ที่เพียงพอ

Akgun and Daemen (2004) ได้ศึกษาการขยายตัวของวัสดุประสานในการปลั๊กหลุมเจาะใต้ ดิน ทำให้เกิดความเค้นตามแนวรัศมีบนผนังและเนื่องจากความเครียดในแนวแกนนำไปประยุกต์ใช้ กับการปลั๊กหลุมเจาะอันเนื่องมาจากการบวมตัวของวัสดุปลั๊กหลุม เนื่องจากแรงเครียดตามแนวแกน นั้นจะทำให้เกิดแรงดึงของรอยแตกในตัวหิน การลดหรือการกำจัดแรงดึงในหินจึงมีความสำคัญมาก ในการกักเก็บของเสีย ปัจจุบันมีทฤษฎีเกี่ยวกับการกระจายแรงตามแนวรัศมี และแรงดึงในระบบการ ปลั๊กหลุมเจาะเนื่องจาก combined axial อุณหภูมิ lateral load รวมทั้งการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าแรง ดึงเฉลี่ยในตัวหิน เกินกว่าแรงเริ่มต้นในการปลั๊กหลุม แสดงให้เห็นว่าแรงเริ่มต้นในการปลั๊กหลุมนั้น เสถียรพอต่อแรงดึงของรอยแตก แรงดึงของหินที่ถูกวัดในการศึกษานี้จะมีค่าต่ำเนื่องจากอยู่ใน สถานะที่ไม่มีความดันล้อมรอบ

การศึกษาภาคสนามในปี 1970 ในแคนซัส (Kansas) และนิวเม็กซิโก (New Mexico) ให้ ข้อมูลเกี่ยวกับการสูตรผสมปูนซีเมนต์ ในการออกแบบเพื่อใช้กับกลุ่มหิน evaporites เปรียบเทียบกับ ส่วนผสมซีเมนต์สำหรับรับแรงกคสูงสุดในแกนเดียว และกำลังยึดติคสูงสุด กำหนดส่วนผสมซีเมนต์ BCT-1F และ BCT-1FF (ตารางที่ 2.1) ทดลองให้ห้องปฏิบัติการ 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 และแรงกดสูงสุด ในแกนเดียวของตัวอย่าง BCT-1FF ช่วง 20.84-131.79 เมกกะปาสกาล และกำลังยึดติดสูงสุด 2.69-14.21 เมกกะปาสกาล (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

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

U.S Army Engineering ใด้ศึกษาซีเมนต์ (grouts) ที่เวลาสี่ปี กำหนดและทดสอบส่วนผสมที่ มีศักยภาพสำหรับการใช้งานที่Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) ที่ไซต์งาน ERDA-10 องค์ประกอบ 5 ตัวอย่างของส่วนผสมซีเมนต์เหล่านี้ถูกนำเสนอในตารางที่ 2.2 ผลการทดสอบแรงกดสูงสุดในแกน เดียวอย่างบ่มเป็นเวลา 28 อุณหภูมิ 53 องศาเซลเซียส ช่วง 34.9-61.96 เมกกะปาสกาล กำลังยึดติด ต่ำสุดกือ BP-521-25 MP เป็น 1.73 เมกะปาสกาล และกำลังยึดติดสูงสุดกือ BPN-FA-BS-SP-P-1 (Type III) เป็น 5.97 เมกะปาสกาล (Roy et al., 1985)

ส่วนประกอบ (Ib/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

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

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

ปูนซีเมนต์สูตร 83-03, 83-05 และ 83-06 ส่วนผสม 83-03 เป็นส่วนผสมเกลือที่เกี่ยวข้องกับ สูตร BCT-1F ส่วนผสม 83-03 และ 83-05 เป็นสูตรสำหรับใช้ในส่วนประกอบของ halite และ เกลือ ส่วนผสม 83-06 เป็นสูตร salt-free สำหรับใช้ในแอนไฮไดรต์ (anhydrite) องค์ประกอบของส่วนผสม เสนอในตารางที่ 2.4 กำลังกดสูงสุดในแกนเดียวของ 83-03, 83-05 และ 83-06 คือ 22.07-97.00 เมกกะ ปาสกาล 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 กำลังกดใน แกนเดียวสูงสุดของ 82-02, 82-03 และ 82-14 คือ 11.8-64.4 เมกกะปาสกาล 74.9-128.2 เมกกะ ปาสกาล และ 28.7-60.7 เมกกะปาสกาล ตามลำดับ

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

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

ส่วนประกอบ	ត្តូ៣១			
(% น้ำหนักรวม )	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 2.4 ส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ 83-03, 83-05 และ 83-06 (Wakeley and Roy 1985)

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

ส่วนประกอบ			
(% น้ำหนักรวม )	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-µm 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) ศึกษาการทดสอบกำลังแรงเฉือนสูงสุดระหว่างซีเมนต์อุดและรอยแตกใน เกลือหินประกอบด้วย การทดสอบ Push-out และการทดสอบแรงเฉือน โดยตรง โดยเรียมตัวอย่าง เกลือหินเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร จากเกลือหินชุดมหาสารคามภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ ประเทศไทย ใช้ส่วนผสมซีเมนต์ คือ ปูนซีเมนต์ชนิดทนเก็ม 700 กรัม น้ำเกลืออิ่มตัว (NaCl saturated brine) 385 กรับ สารผสมเพิ่มเพื่อลดฟองอากาศ (Sika Plastocrete) 20 กรับ และสารผสมเพิ่มเพื่อการ ขยายตัว (Sika Interplast ZX) 3.5 กรัม ในการทดสอบ Push-out และการทดสอบแรงเลือน โดยตรง ้ตัวอย่างซีเมนต์ถูกบ่มเป็นเวลา 3 วัน ก่อนการทคสอบ ผลการทคสอบตามเกณฑ์ของคูลอมป์พบว่า ้ ค่าแรงเสียคทานยึคติคระหว่างซีเมนต์และเกลือหินมีค่าเท่ากับ 70 และ 69 องศา สำหรับรอยแตกแบบ ้งรุงระและรอยแตกแบบตัดเรียบตามลำดับ แรงยึดติดในรอยแตกระหว่างซีเมนต์และเกลือหินมี ้ ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.42 เมกกะปาสคาล การทดสอบ Push-out ให้ค่าผลการทดสอบที่สูงสุดตามแรงกดใน . แนวแกน 7.05–11.23 เมกกะปาสคาล อันเป็นผลมาจากผลกระทบของค่าอัตราส่วนปัวซ์ซองที่จะเพิ่ม ้ความเด้นตั้งฉากที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของตัวอย่างซีเมนต์และเกลือหินในขณะที่ให้แรงกดตาม แนวแกน จึงชี้ให้เห็นว่าผลที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงนั้นให้ก่าที่อยู่ให้เชิงอนุรักษ์ที่ มากกว่าสำหรับการทดสอบหาค่ากำลังเฉือนสูงสุดระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ที่ใช้ในการอุดหลุม ้เจาะ โดยซีเมนต์สำหรับอุคหลุมเจาะที่นำมาใช้ในการทดสอบครั้งนี้สามารถให้ประสิทธิภาพเชิงกล ศาสตร์เป็นไปตามที่ต้องการ

Samaiklang and Fuenkajorn (2013) ศึกษาประสิทธิภาพเชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์ชอง เกรคซีเมนต์เชิงพาณิชย์ที่เกร้าท์ในรอยแตกของหิน ผลที่ได้มาเปรียบเทียบในเทอมของกำลังกคสูงสุด กำลังดึงสูงสุด กำลังยึดติดสูงสุดและ push-out สูงสุด ในรอยแตกของหิน ส่วนผสมซีเมนต์ทั้งหมด ประกอบด้วยอัตราส่วนของน้ำกับซีเมนต์ที่ 0.60 กำลังกคสูงสุดหลังจากบ่มตัว 28 วันเป็น 25.77±2.54 เมกกะปาสกาล และกำลังดึงสูงสุดเป็น 2.80±0.27 เมกกะปาสกาล การทดสอบกำลังยึดติดสูงสุดและ push-out สูงสุดแสดงให้เห็นว่า กำลังยึดติดระหว่างซีเมนต์เกร้าท์กับรอยแตกของหินทรายชุดภู กระดึงในช่วง 1.03 ถึง 2.53 เมกกะปาสกาล และpush-out สูงสุดในช่วง 4.06 ถึง 5.55 เมกกะปาสกาล

Tepnarong and Deethouw (2014) ศึกษาประสิทธิภาพตะกอนประปา (sludge) ที่ผสมกับ ซีเมนต์สำหรับอุดหลุมเจาะในเกลือหิน ใช้ส่วนผสมปูนซีเมนต์ชนิดทนเค็มผสมกับตะกอนประปา 700 กรัม น้ำเกลืออิ่มตัว 700 กรัม สารผสมเพิ่มเพื่อลดฟองอากาศ 20 กรัม และสารผสมเพิ่มเพื่อการ ขยายตัว 3.5 กรัม เพื่อการเลือกอัตราส่วนของตะกอนประปาผสมกับซีเมนต์ (S:C) ที่เหมาะสมที่สุด สำหรับอุดในเกลือหิน เพื่อการเลือกอัตราส่วนผสมของตะกอนประปากับซีเมนต์ (S:C) ที่เหมาะสม ที่สุดสำหรับอุดในเกลือหิน เพื่อการเลือกอัตราส่วนผสมของตะกอนประปากับซีเมนต์ (S:C) ที่เหมาะสม กี่สุดสำหรับอุดในเกลือหิน กำลังกดสูงสุดหลังจากบ่มตัว 28 วันเป็น 9.58±0.52 เมกกะปาสกาลจาก อัตราส่วน S:C = 5:10 กำลังดึงสูงสุดเป็น 1.99±0.14 เมกกะปาสกาล การทดสอบกำลังยึดติดสูงสุด เป็น 7.49 เมกกะปาสกาล

#### 2.5 กำลังแรงเฉือนในระยะยาว

Dieterich (1972) ทำการทดสอบกำลังรับเฉือนโดยตรงในหินเกรย์แวก หินแกรนิต หินควอร์ต -ไซต์ และหินทราย โดยความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาของการสัมผัสหยุดนิ่ง (stationary contact) และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตของช่องว่างและร่องปิดในรอยแตกหิน ตัวอย่างถูกตัดเป็น บล็อกหน้าตักเรียบและขนานกับผิวการใหลของความขรุขระ แรงเสียดทานสถิตในตอนท้ายของ ช่วงเวลาวัคโดยการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของแรงเฉือนจนกระทั่งบล็อกเคลื่อนที่ช่วงเวลาระหว่าง 1 วินาทีและ 24 ชั่วโมงและความเค้นในแนวตั้งฉากระหว่าง 2 และ 85 เมกกะปาสกาล ผลการศึกษา พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานสถิตของรอยแตกจะไม่ขึ้นกับเวลาสำหรับหน้ารอยแตก สะอาดของผิวขรุขระ ในขณะที่รอยแตกกับร่องปิดแสดงพฤติกรรมขึ้นกับเวลา (time-dependent) ที่ สูง แรงเสียดทานสถิตเพิ่มขึ้นกับเวลาที่บล็อกติดกันกงอยู่ในการสัมผัสหยุดนิ่ง

Lajtai and Gadi (1989) ศึกษาขึ้นกับเวลาเกี่ยวกับแรงเสียดทานในแนวราบ ทำการทดสอบ กำลังรับเฉือน โดยตรงบนระนาบผิวเรียบบล็อกหิน Lac du Bonnet granite โดยความเค้นใน แนวตั้งฉากอยู่ในช่วง 0.2-8 เมกกะปาสกาล แรงเสียดทานในการทดสอบเพิ่มขึ้นทั้งการเคลื่อนที่และ เวลา การเพิ่มขึ้นของแรงเสียดทานแรกเริ่มของผิวเรียบในระหว่างการเคลื่อนที่เฉือนอย่างต่อเนื่องเกิด จากความสึกหรอ จากผลการวิจัย โดย Dieterich (1972) ส่วนใหญ่ความคืบ (Creep) เป็นชั่วคราวใน รอยแตกหินภายใต้เงื่อนไขเฉือนสะสมในร่องปิด

Amadei and Curran (1982) ได้ศึกษาความคืบเคลื่อนที่ (creep displacement) ในความไม่ ต่อเนื่องเป็นฟังก์ชั่นความเค้นตั้งฉากและความเก้นเฉือนของการแตกภายใต้ความเก้นตั้งฉากคงที่ การ เคลื่อนไหล (Creep defomation) คาดว่าจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเก้นเฉือนเพิ่มขึ้น และสำหรับความเก้น เฉือนคงที่ จะลดลงเมื่อความเก้นตั้งฉากเพิ่มขึ้น

Yang and Cheng (2011) ศึกษาการเคลื่อนใหลของความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือนของ หินดินดานที่สี่ระดับความเก้นเฉือนต่างกัน พารามิเตอร์ของรูปแบบการเคลื่อนใหลเฉือนแบบ เส้นตรง (Stationary shear creep model) มีอิทธิพลต่อเวลา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความหนืดเชิงยืดหยุ่น เฉือน (G<sub>2</sub>) ของหินลดลง แต่สัมประสิทธิ์ความหนืด (ŋ<sub>1</sub>) เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น รูปแบบการเคลื่อน ใหลของความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือนแบบไม่เป็นเส้นตรง (Non-stationary visco-elastic shear creep model) เพื่ออธิบายพฤติกรรมการเคลื่อนใหลของความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือนของหินโดยยืนยัน ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ของการการเคลื่อนใหลแบบเส้นตรง G<sub>2</sub>, ŋ<sub>1</sub> และเวลา รูปแบบ การเคลื่อนใหลของความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือนแบบไม่เป็นเส้นตรงเทียบกับข้อมูลการทดสอบได้ก่า ดีกว่ารูปแบบการเคลื่อนใหลเฉือนแบบเส้นตรง แต่ไม่ดีมากในการคาดการณ์พฤติกรรมการเคลื่อน ใหลในระยะยาว Saptono et al. (2012) ได้ทำการวิจัยกุณสมบัติกำลับรับแรงเฉือนสูงสุดของหินตัวอย่างที่อยู่ บนชั้นถ่านหินเช่นหินทรายที่ได้จากเหมืองถ่านหิน Tutupan ใน South Kalimantan, อินโดนีเซีย การ วิจัยรวมถึงการทดสอบการเคลื่อนไหลเฉือนโดยใช้รูปแบบการเคลื่อนไหล Generalized Kelvin ของ ตัวอย่างหินทรายขนาด 15 x 15 cm และ 25 x 25 cm ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลับ รับแรงเฉือนสูงสุดระยะยาวของหินทรายมีก่าต่ำกว่ากำลับรับแรงเฉือนสูงสุดระยะสั้น นอกจากนี้ยัง พบว่ารูปแบบการเคลื่อนไหล Generalized Kelvin เหมาะกับการเกลื่อนไหลของหินตัวอย่าง

#### 2.6 คุณสมบัติทางชลศาสตร์ของเกลือหิน

Stormont (1990) ตรวจวัดค่าความซึมผ่านของเกลือหินที่อยู่ใกลจากอุโมงก์หรือโพรงจะมีค่า อยู่ที่ประมาณ 10<sup>-22</sup> m<sup>2</sup> (หรือประมาณ 10<sup>-9</sup> darcy) แต่เกลือหินที่อยู่ใกล้กับผนังอุโมงค์หรือโพรง อาจจะมีค่าสูงกว่า 10<sup>-18</sup> m<sup>2</sup> (หรือประมาณ 10<sup>-5</sup> darcy) ต่อมา Stormont และ Daemen (1991) และ Peach (1991) ได้ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการและ ได้ผลยืนยันว่าคุณสมบัติความซึมผ่านของ เกลือหิน (Salt permeability) สามารถมีค่าสูงกว่าที่คาดไว้มาก โดยเฉพาะเมื่อเกลือหินนั้นอยู่ภายใต้ ้ความเก้นที่แตกต่างกันมากในแต่ละทิศทาง (Anisotropic stress) ความแตกต่างของความเก้นที่จุดๆ หนึ่งในเกลือหินถ้าสูงพอจะทำให้เกิครอยแตกร้าวเล็กๆในเนื้อหิน (Micro-cracks) รอยแตกร้าวนี้จะมี ทิศทางค่อนข้างขนานกับทิศทางของความเค้นหลักสูงสุด (Major principal stress) และเมื่อรอย ้แตกร้าวนี้พัฒนามากขึ้นจนต่อเชื่อมกันก็จะนำไปสู่ความซึมผ่านที่สูงขึ้น โคยเฉพาะอย่างยิ่งความซึม ้ผ่านที่อยู่ในทิศทางที่ขนานกับทิศทางของความเค้นหลักสูงสุด นอกจากนั้นแล้วความสามารถในการ ซึมผ่านของอากาศหรือของเหลวในชั้นเกลือหินก็ยังขึ้นกับขนาดและความแตกต่างของความเค้นหลัก ในสามทิศทางที่จดนั้นๆ ดังนั้นในบริเวณที่ใกล้กับผนังของโพรงหรืออโมงค์ค่าความแตกต่างของ ้ความเก้นจะมีก่าสูงสุด และเกลือหินจะเกิดการวิรูปหรือเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบยืดหยุ่นและพลาสติก ้โดยขึ้นกับเวลา และเมื่อถึงจุดๆหนึ่งถ้าค่าความแตกต่างของความเค้นยังลคลงไม่เพียงพอเกลือหินก็ ้จะเกิดการแตกร้าวขึ้น ซึ่งจะเป็นที่มาของความสามารถในการซึมผ่านที่สูงขึ้น ในขณะเดียวกันเกลือ ้หินที่อยู่ไกลจากผนังอุโมงค์หรือโพรงจะมีค่าความแตกต่างของความเค้นหลักน้อย ดังนั้นเกลือหินใน ้บริเวณนั้นจึงมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อยกว่า และอาจจะไม่มีการแตกร้าวเกิดขึ้นทำให้เกลือหินที่อยู่ ้ใกลจากผนังอุโมงค์ยังคงมีค่าความซึมผ่านต่ำเหมือนไม่มีผลกระทบของอุโมงค์เกิดขึ้น

Brodsky et al. (1998) ศึกษาค่าความซึมผ่านของเกลือหินโดยใช้เกลือหินย่อยที่มีความ หนาแน่น 0.85 ถึง 0.90 g/cc ผลที่ได้คือค่าความซึมผ่านจะต่ำกว่าตัวอย่างหินแข็งซึ่งมีค่าเท่ากับ 10<sup>-15</sup> ถึง 10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup> ถึงแม้เกลือหินจะมีความสามารถในการซึมผ่านต่ำมาก แต่ความซึมผ่านจะสามารถเพิ่มขึ้น ได้เพิ่มขึ้นได้เนื่องจากความเสียหายจากกลศาสตร์ เช่น การเกิดรอยแตกขณะเจาะโพรง เป็นต้น Dale และ Hurtodo (1998) ได้ทำการตรวจวัดค่าความซึมผ่านบริเวณรอบๆ โพรงเกลือพบว่ามีรอยแตก เกิดขึ้นในระยะรัศมีโพรงน้อยกว่า 3 เมตร และค่าความซึมผ่านก็มีน้อยมากมีค่าประมาณ 1x10<sup>-21</sup> m<sup>2</sup> เท่านั้น

Wong et al. (2011) ได้ตรวจวัดก่ากวามซึมผ่านของวัสดุซีเมนต์โดยใช้พื้นที่รูพรุนและเส้น รอบรูปจากภาพ SEM ผลที่ได้คือก่ากวามซึมผ่านช่วงตั้งแต่ 3x10<sup>-18</sup> m<sup>2</sup> ถึง 5.8x10<sup>-16</sup> m<sup>2</sup> Samaiklang และ Fuenkajorn (2013) ได้ทดสอบในห้องปฏิบัติการกวามซึมผ่านของเกร้าท์ซีเมนต์โดยการผสม อัตราส่วนน้ำกับซีเมนต์ที่ 0.60 นำแบบหล่อที่เตรียมไว้ในการทดสอบก่ากวามซึมผ่านมาทดสอบด้วย วิธีการอัดแรงคันด้วยน้ำ ผลที่ได้อยู่ในช่วงตั้งแต่ 10<sup>-16</sup> ถึง 10<sup>-14</sup> m<sup>2</sup> และลดลงตามเวลา

## บทที่ 3 การจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหินและซีเมนต์

เนื้อหาในบทนี้ได้อธิบายขั้นตอน วิธีการ และข้อปฏิบัติในการจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหินและ ซีเมนต์ที่ใช้สำหรับทดสอบในห้องปฏิบัติการ

#### 3.1 การเตรียมตัวอย่างซีเมนต์

การเตรียมส่วนผสมของแท่งซีเมนต์สำหรับอุคในหลุมเจาะและการทคสอบเฉือนโดยตรง ใน การศึกษานี้ได้ดำเนินการตาม API ฉบับที่ 10 (American Petroleum Institute, 1986; Akgun and Daemen, 1997) ซีเมนต์ผสมด้วยน้ำเกลืออิ่มตัว (NaCl) ซึ่งมีสองประเภทของส่วนผสมซีเมนต์คือ Salt-bond II ผสมกันน้ำเกลือต่ำ (SBII) และ Salt-bond II ผสมกันน้ำเกลือสูง (SBIIH) ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน (Portland-pozzolan cement) ประเภท IP (Type IP) ผสมกับน้ำเกลืออิ่มตัว สารผสมเพิ่มเพื่อการขยายตัว และสารผสมเพิ่มเพื่อลด ฟองอากาศ น้ำเกลือเตรียมไว้โดยเกลือหินสะอาดละลายในน้ำกลั่น

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนค์ปอซโซลานถูกเลือกไว้เนื่องจากความต้องการน้ำเกลือต่ำ คงทนต่อ ซัลเฟตและใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง (รูปที่ 3.1) สารผสมเพื่อการขยายตัว และสารผสมเพื่อลดฟองอากาศในซีเมนต์และช่วยการควบคุมน้ำหนักและปริมาตรของซีเมนต์ น้ำหนักของส่วนประกอบของซีเมนต์ดังตารางที่ 3.1



**รูปที่ 3.1** ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนค์ปอซโซลานน้ำหนัก 50 กิโลกรัม ที่ใช้ในการศึกษา

#### 3.1.1 เครื่องมือ

เครื่องมือในการเตรียมตัวอย่างประกอบด้วย

- ถุงพลาสติกสำหรับตักและตวง
- 2) ตาชั่งคิจิตอล (ชั่งสูงสุค 2,000 กรัม)
- เครื่องผสมซีเมนต์ (ความจุสูงสุด 5,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร ปรับความเร็วรอบ ได้ 10 ช่วง)
- 4) แบบหล่อพีวีซี จุกยางปิด และกาวซิลิโคน
- 5) กรวยและหลอดพลาสติก
- 6) เครื่องวัดอุณหภูมิดิจิตอล (Temp gun)

#### 3.1.2 วิธีการเตรียมแท่งตัวอย่างซีเมนต์ในหลุมเจาะ

- 1) เตรียมส่วนผสมซีเมนต์อุณหภูมิห้อง (28° ถึง 34°C) และความชื้นห้องไม่ต่ำกว่า 50%
- เตรียมน้ำเกลืออิ่มตัวโดยเกลือบริสุทธิ์ในน้ำกลั่นลงไปในถังน้ำ ปล่อยให้น้ำเกลือ
  อิ่มตัวหนึ่งวันด้วยความถ่วงจำเพาะที่ 1.18 และอุณหภูมิ 32°C
- 3) เทน้ำเกลืออิ่มตัว สารผสมเพิ่มเพื่อการขยายตัว และสารผสมเพิ่มเพื่อลด ฟองอากาศผสมในภาชนะเครื่องผสมซีเมนต์ ตามด้วยเทซีเมนต์ลงไปไม่เกิน 15 วินาที (โดยความเร็วรอบช่วงที่ 2) หลังจากนั้นเพิ่มความเร็วรอบเป็นช่วงที่ 6 เป็น เวลา 3 นาที
- ส) ติดตั้งจุกยางปิดที่หลุมเจาะที่ระดับ 25 มิลลิเมตรตามที่ต้องการ เทสารผสม ซีเมนต์ลงบนจุกยางให้เร็วที่สุด (ไม่เกิน 30 วินาที)
- 5) เทสารผสมซีเมนต์ผ่านช่องกรวยและหลอดพลาสติก ให้จมลงข้างล่างของหลอด พลาสติก พร้อมยกกรวยและหลอดพลาสติกให้ระดับสูงขึ้น ลดความปั้นป่วน มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ในระหว่างการเท หยุดเทเมื่อระดับความสูงแท่งซีเมนต์ ที่ 30 มิลลิเมตรตามที่ต้องการ
- 6) บ่มแท่งตัวอย่างซีเมนต์เป็นเวลา 7 วัน ที่ความคันและอุณหภูมิห้องก่อนที่จะเริ่ม การทดสอบ
- สนข้างบนแท่นตัวอย่างซีเมนต์ให้เรียบ

เทและบ่มส่วนผสมซีเมนต์ในแบบหล่อพีวีซีเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 มิลลิเมตร สำหรับ การทดสอบกุณสมบัติพื้นฐานของซีเมนต์ (รูป 3.2) และแบบหล่อพีวีซีเส้นผ่าศูนย์กลาง 100มิลลิเมตร สำหรับการทดสอบกวามซึมผ่าน ซึ่งระบุไว้ในตารางที่ 3.2 ถึง 3.4 รูปที่ 3.3 และ 3.4 แสดงตัวอย่าง บางส่วนที่เตรียมไว้สำหรับการทดสอบกุณสมบัติพื้นฐานของซีเมนต์ และการทดสอบกวามซึมผ่าน

a a	-! d		
ตารางท 3.1	สวนบระกอบของซเมนต	Salt-bond II (S	BII และ SBIIH)

ส่วนประกอบ (กรัม)	SBII	SBIIH
ซีเมนต์ปอร์ตแลนค์ปอซโซลาน, ประเภท IP	1000	1000
น้ำเกลืออิ่มตัว	450	670
สารผสมเพื่อการขยายตัว	10	10
สารผสมเพื่อลดฟองอากาศ	10	10

**ตารางที่ 3.2** ขนาดของตัวอย่างซีเมนต์สำหรับการทดสอบแรงกดในแกนเดียวและสัมประสิทธิ์ความ ยืดหยุ่น

Cement Sample No.	Curing time (days)	Diameter (mm)	Length (mm)	L/D	Density (g/cm <sup>3</sup> )
SBII-02-01-UCS-01		54.06	135.49	2.51	1.70
SBII-02-01-UCS-02	1	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		53.82	136.32	2.53	1.76
SBII-02-03-UCS-02	3	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		53.55	135.05	2.52	1.76
SBII-02-14-UCS-02	14	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		54.19	133.67	2.47	1.74
SBII-02-21-UCS-02	21	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		53.93	134.32	2.49	1.79
SBII-02-28-UCS-02	28	53.85	134.25	2.49	1.72
SBII-02-28-UCS-03		53.82	133.79	2.49	1.72

ยัคหยุน (ตอ)					
Cement Sample No.	Curing time	Diameter	Length	L/D	Density
	(uays)	(11111)	(mm)		(g/cm )
SBII-02-60-UCS-01	-	54.19	135.23	2.50	1.76
SBII-02-60-UCS-02	60	54.23	134.43	2.48	1.76
SBII-02-60-UCS-03		54.17	133.85	2.47	1.74
SBIIH-02-01-UCS-01		53.53	133.47	2.49	1.73
SBIIH-02-01-UCS-02	1	54.03	133.64	2.47	1.72
SBIIH-02-01-UCS-03		53.38	133.84	2.51	1.73
SBIIH-02-03-UCS-01		54.09	135.03	2.50	1.73
SBIIH-02-03-UCS-02	3	54.05	135.01	2.50	1.73
SBIIH-02-03-UCS-03	-	53.95	134.85	2.50	1.71
SBIIH-02-07-UCS-01	_	53.97	134.55	2.49	1.72
SBIIH-02-07-UCS-02	7	53.80	134.31	2.50	1.73
SBIIH-02-07-UCS-03		53.93	135.21	2.51	1.73
SBIIH-02-14-UCS-01		53.55	135.51	2.53	1.73
SBIIH-02-14-UCS-02	14	53.82	136.47	2.54	1.72
SBIIH-02-14-UCS-03		53.61	135.82	2.53	1.72
SBIIH-02-21-UCS-01		53.81	134.89	2.51	1.72
SBIIH-02-21-UCS-02	21	54.33	134.13	2.47	1.71
SBIIH-02-21-UCS-03		53.53	134.20	2.51	1.75
SBIIH-02-28-UCS-01		53.61	134.11	2.50	1.73
SBIIH-02-28-UCS-02	28	53.73	133.99	2.49	1.74
SBIIH-02-28-UCS-03		54.63	135.03	2.47	1.73
SBIIH-02-60-UCS-01		54.16	135.91	2.51	1.69
SBIIH-02-60-UCS-02	60	53.91	135.19	2.51	1.71
SBIIH-02-60-UCS-03		54.11	133.71	2.47	1.70

ตารางที่ 3.2 ขนาดของตัวอย่างซีเมนต์สำหรับการทดสอบแรงกดในแกนเดียวและสัมประสิทธิ์ความ ยืดหยุ่น (ต่อ)

Cement Sample No.	Curing time	Diameter (mm)	Length (mm)	L/D	Density (g/cm <sup>3</sup> )
SBII-02-01-BZ-01	(uu,))	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	- 1	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		53.83	26.34	0.49	1.74
SBII-02-03-BZ-02	3	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		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	7	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		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	14	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		53.43	28.51	0.53	1.78
SBII-02-21-BZ-02	21	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	20	53.54	28.81	0.54	1.75
SBII-02-28-BZ-02	28	53.49	27.02	0.51	1.76

ตารางที่ 3.3 ขนาดของตัวอย่างซีเมนต์สำหรับการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน
	Curing time	Diameter	Length		Density
Cement Sample No.	(days)	(mm)	(mm)	L/D	(g/cm <sup>3</sup> )
SBII-02-28-BZ-03		53.41	27.02	0.51	1.76
SBII-02-28-BZ-04	28	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		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	60	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
SBIIH-02-01-BZ-01		53.54	27.31	0.51	1.76
SBIIH-02-01-BZ-02		53.75	28.23	0.53	1.76
SBIIH-02-01-BZ-03	1	54.15	26.38	0.49	1.75
SBIIH-02-01-BZ-04		53.61	26.80	0.50	1.76
SBIIH-02-01-BZ-05		53.51	27.03	0.51	1.75
SBIIH-02-03-BZ-01		54.19	28.30	0.52	1.76
SBIIH-02-03-BZ-02		54.23	27.33	0.50	1.72
SBIIH-02-03-BZ-03	3	54.15	28.40	0.52	1.71
SBIIH-02-03-BZ-04		54.12	25.89	0.48	1.72
SBIIH-02-03-BZ-05		54.31	27.13	0.50	1.69
SBIIH-02-07-BZ-01		53.93	26.61	0.49	1.72
SBIIH-02-07-BZ-02		53.56	27.39	0.51	1.72
SBIIH-02-07-BZ-03	7	54.43	27.31	0.50	1.72
SBIIH-02-07-BZ-04		53.93	28.30	0.52	1.71
SBIIH-02-07-BZ-05		53.72	26.21	0.49	1.73
SBIIH-02-14-BZ-01		53.71	27.41	0.51	1.74
SBIIH-02-14-BZ-02	1.4	53.31	27.11	0.51	1.79
SBIIH-02-14-BZ-03		53.32	26.78	0.50	1.77
SBIIH-02-14-BZ-04		53.55	27.53	0.51	1.76

ตารางที่ 3.3 ขนาดของตัวอย่างซีเมนต์สำหรับการทดสอบแรงคึงแบบบราซิลเลียน (ต่อ)

Cement Sample No.	Curing time (days)	Diameter (mm)	Length (mm)	L/D	Density (g/cm <sup>3</sup> )
SBIIH-02-14-BZ-05	14	53.75	26.89	0.50	1.75
SBIIH-02-21-BZ-01		53.81	27.63	0.51	1.76
SBIIH-02-21-BZ-02		54.38	27.33	0.50	1.71
SBIIH-02-21-BZ-03	21	53.85	27.43	0.51	1.72
SBIIH-02-21-BZ-04		54.13	28.19	0.52	1.68
SBIIH-02-21-BZ-05		54.21	27.81	0.51	1.69
SBIIH-02-28-BZ-01		53.65	26.55	0.49	1.69
SBIIH-02-28-BZ-02		53.63	28.77	0.54	1.71
SBIIH-02-28-BZ-03	28	53.55	27.19	0.51	1.74
SBIIH-02-28-BZ-04		53.71	27.82	0.52	1.68
SBIIH-02-28-BZ-05		53.53	28.21	0.53	1.72
SBIIH-02-60-BZ-01		54.11	27.61	0.51	1.70
SBIIH-02-60-BZ-02		54.14	27.73	0.51	1.74
SBIIH-02-60-BZ-03	60	54.20	28.11	0.52	1.72
SBIIH-02-60-BZ-04		54.14	28.31	0.52	1.75
SBIIH-02-60-BZ-05		54.04	27.22	0.50	1.71

ตารางที่ 3.3 ขนาดของตัวอย่างซีเมนต์สำหรับการทดสอบแรงคึงแบบบราซิลเลียน (ต่อ)

# ตารางที่ 3.4 ขนาดของตัวอย่างซีเมนต์สำหรับการทดสอบความซึมผ่านระยะยาว

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
SBIIH-04-P	98.13	100.42	1.02	1.74



รูปที่ 3.2 แม่แบบพีวีซีใช้บ่มส่วนผสมปูนซีเมนต์



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างซีเมนต์สำหรับเตรียมการทคสอบคุณสมบัติพื้นฐานของซีเมนต์



รูปที่ 3.4 กระบอกซีเมนต์ในแม่แบบพีวีซีสำหรับการทดสอบความซึมผ่าน

## 3.2 การเตรียมตัวอย่างเกลือหิน

แท่งตัวอย่างเกลือหินเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ใด้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท เหมืองแร่อาเซียนโปแตซ จำกัด อ.บำเหน็จณรงค์ จ.ชัยภูมิ ซึ่งขุดเจาะมาจากเกลือชั้นกลาง (Middle salt) ที่ความลึก 70 ถึง 130 เมตร ของแอ่งโคราช การศึกษาคุณสมบัติทางศิลาวิทยาของแท่งตัวอย่างมี ดังนี้ ผลึกเกลือใสไม่มีสีค่อนข้างสะอาด การยึดเกาะระหว่างผลึกมีการยึดเกาะกันได้ดี พบผลึกเกลือสี เหลืองเข้มที่ระดับความลึกเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบผลึกเกลือสีขาวขุ่นมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ประมาณ 0.1-0.3 เซนติเมตร โดยปริมาณของผลึกเกลือสีขาวขุ่นและแอนไฮไดรต์จะมีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อความลึกเพิ่มขึ้น พบผลึกเกลือสีเหลืองสลับอยู่กับผลึกเกลือสีเทาเข้มและแอนไฮไดรต์โดยแอนไฮ ไดรต์มีขนาดตั้งแต่ 2-5 เซนติเมตร พบแร่ข้างเกียงกือซิลไวต์และคาร์นัลไลต์

การเตรียมตัวอย่างมีการปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D4543 ตัวอย่างที่เตรียมไว้สำหรับการ ทดสอบแรงเฉือนโดยตรงและการทดสอบ push-out มีความยาว 100 มิลลิเมตร ระบุไว้ในตารางที่ 3.5 และ 3.6 ตัวอย่างทรงกระบอกทดสอบ push-out โดยเจาะเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร หลุมตั้งฉาก กับพื้นผิวตัวอย่างด้านล่าง (รูปที่ 3.5 และ 3.6) รอยแตกแบบเรียบ (saw cut surface) สำหรับทดสอบ แรงเฉือนโดยตรง (รูปที่ 3.7 และ 3.8) หลังจากเตรียมตัวอย่างทำการติดหมายเลขและห่อด้วยด้วยฟิล์ม พลาสติก

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)
SBIIH-04-07-PO-01	116.150-116.250	98.42	100.39	25.81	28.71
SBIIH-04-07-PO-02	121.140-121.241	100.21	100.53	25.68	32.67
SBIIH-04-07-PO-03	73.950-74.054	100.01	104.02	25.22	28.90
SBIIH-04-07-PO-04	73.700-73.801	100.18	101.27	25.63	29.11
SBIIH-04-07-PO-05	73.550-73.650	100.25	100.07	26.35	30.17
SBIIH-04-07-PO-06	119.000-119.102	102.33	101.23	26.23	28.55

ตารางที่ 3.5 ความลึกและขนาดของตัวอย่างเกลือหินและซีเมนต์สำหรับการทดสอบ push-out

ตารางที่ 3.6 ความลึกและขนาดของตัวอย่างเกลือหินสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน โดยตรง

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



ร**ูปที่ 3.5** เจาะตัวอย่างเกลือหินขนาด 25 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบ Push-out



ร**ูปที่ 3.6** ตัวอย่างเกลือหินสำหรับการทคสอบ push-out



รูปที่ 3.7 การตัดแบบแห้งของแท่งเกลือหินด้วยเครื่องตัด



ร**ูปที่ 3.8** ด้วอย่างเกลือหินผสานกับซีเมนต์สำหรับการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง

# บทที่ 4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

# 4.1 วัตถุประสงค์

เนื้อหาในบทนี้ได้อธิบายขั้นตอน วิธีการ และข้อปฏิบัติของการทคสอบในห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วย การทคสอบคุณสมบัติพื้นฐานของซีเมนต์ การทคสอบ Push-out การทคสอบแรงเฉือน โดยตรง และการทคสอบก่าความซึมผ่านของซีเมนต์

# 4.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของซีเมนต์

การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของซีเมนต์ประกอบด้วย การทดสอบค่าความหนืดและความ หนาแน่นของส่วนผสมซีเมนต์ การทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียว (σ) การตรวจวัดค่า สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E) และการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน (σ<sub>B</sub>)

### 4.2.1 การทดสอบค่าความหนืดและความหนาแน่นของส่วนผสมซีเมนต์

การเตรียมส่วนผสมซีเมนต์และน้ำเกลืออิ่มตัวได้ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM

# (C938) โดยมีวิธรการผสมในห้องปฏิบัติการดังนี้

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

การทดสอบหาค่าความหนาแน่นได้ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM หมายเลข D854 และค่าความหนืดได้ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM หมายเลข D2196 วัดค่าด้วยเครื่อง Brookfield<sup>®</sup> viscometer model RV (รูปที่ 4.1) ผลการทดสอบให้ค่าความหนืดทั้งแบบเชิงพลศาสตร์ (Dynamic viscosity) และเชิงจลนศาสตร์ Kinematic viscosity ความหนาแน่น (Slurry density) โดยที่น้ำหนัก ของส่วนผสมซีเมนต์จะตรวจวัดหลังจากผสมเสร็จในช่วงเวลาที่การกำหนด ตารางที่ 4.1 แสดงผล การทดสอบก่าความหนืดและความหนาแน่นของของส่วนผสมซีเมนต์ทั้ง 10 ตัวอย่าง



รูปที่ 4.1 เกรื่องมือ Brookfield<sup>®</sup> viscometer model RV (ตามมาตรฐาน ASTM D2196)

	Tempera	ture (°C)	Slurry	Dynamic	Kinematic
Specimen type	Room	Slurry	density (g/cm <sup>3</sup> )	viscosity (Pa.s)	viscosity (10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> /s)
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
Av	verage		1.99±0.01	34.55±2.33	17.32±1.22
SBIIH-01	32.5	32.0	1.75	4.90	2.80
SBIIH-02	32.5	32.0	1.75	4.85	2.78
SBIIH-03	32.5	32.0	1.74	4.10	2.36
SBIIH-04	34.0	32.5	1.75	4.78	2.74
SBIIH-05	34.0	32.0	1.77	4.00	2.26
Av	verage		1.75±0.01	4.53±0.44	2.59±0.26

ตารางที่ 4.1 ค่าความหนืดและค่าความหนาแน่นของซีเมนต์ผสมน้ำเกลืออิ่มตัว

#### 4.2.2 การทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียว

การเตรียมตัวอย่างซีเมนต์ในการทคสอบได้ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D7012, C938 และ C39 ตัวอย่างซีเมนต์ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 มิลลิเมตร ด้วยอัตราส่วนความ ยาวกับเส้นผ่าศูนย์กลาง (L/D) อยู่ระหว่าง 2.5 ถึง 3.0 ทำการบ่มตัวอย่างซีเมนต์ในแบบหล่อพีวีซีเป็น เวลา 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วัน การทคสอบโดยให้อัตราการกคกงที่ 0.1-0.5 MPa/s กคให้ตัวอย่าง ซีเมนต์แตก ตรวจวัดการเคลื่อนตัวในแกนด้วยการติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัว (รูปที่ 4.2)

ผลจากการทคสอบแรงกคสูงสุดในแกนเดียวและการตรวจวัคก่าสัมประสิทธิ์ความ ยืดหยุ่นแสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.3 รูปที่ 4.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดในแกนเดียว ในฟังก์ชันของการบ่มตัวตามเวลา ผลการทคสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อการบ่มตัวตามเวลาเพิ่มขึ้น ก่าแรงกดสูงสุดในแกนเดียวและก่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น

### 4.2.3 การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน

การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนมีจุดประสงค์เพื่อหาแรงดึงสูงสุดของตัวอย่าง ซีเมนต์ ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM หมายเลข D3967 และข้อแนะนำของ ISRM (Brown, 1981) ตัวอย่างซีเมนต์ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 มิลลิเมตร ด้วยอัตราส่วนความยาวกับ เส้นผ่าศูนย์กลาง (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)

ผลจากการทคสอบการทคสอบแรงคึงแบบบราซิลเลียนแสคงในตารางที่ 4.4 และ 4.5 รูปที่ 4.5 แสคงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงคึงแบบบราซิลเลียนในฟังก์ชันของการบ่มตัวตาม เวลา ผลการทคสอบแสคงให้เห็นว่าเมื่อการบ่มตัวตามเวลาเพิ่มขึ้นค่าแรงคึงแบบบราซิลเลียนเพิ่มขึ้น ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานการทคสอบคุณสมบัติพื้นฐานของซีเมนต์ ทั้งหมดแสคงในตารางที่ 4.6

37



รูปที่ 4.2 การติดตั้งเครื่องมือการทดสอบแรงกดในแกนเดียว



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดในแกนเดียว (σ.) ในฟังก์ชันของการบ่มตัวตามเวลา



รูปที่ 4.4 การติดตั้งเครื่องมือการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน



ร**ูปที่ 4.5** ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงแบบบราซิลเลียน (σ<sub>в</sub>) ในฟังก์ชันของการบ่มตัวตามเวลา

ตารางที่ 4.2 ผลการทคสอบแรงกคสูงสุดในแกนเดียว (σ<sub>c</sub>) และสัมประสิทธิความยึดหยุ่น (E) ของ

Specimen type	Curing time (days)	L/D	Density (g/cm <sup>3</sup> )	σ <sub>c</sub> (MPa)		E (GPa)	
SBII-02-01-UCS-01		2.51	1.70	4.36	1.2.5	1.26	1.00
SBII-02-01-UCS-02	1	2.50	1.70	4.37	4.36	1.18	1.20
SBII-02-01-UCS-03		2.51	1.71	4.37	±0.01	1.17	±0.05
SBII-02-03-UCS-01		2.53	1.76	16.48	15.25	2.60	2.50
SBII-02-03-UCS-02	3	2.51	1.77	14.29	15.35	2.65	2.59
SBII-02-03-UCS-03		2.51	1.74	15.28	±1.10	2.53	±0.06
SBII-02-07-UCS-01		2.51	1.74	22.91	21.52	3.03	2.70
SBII-02-07-UCS-02	7	2.50	1.75	19.79	21.52	2.42	2.70 ±0.30
SBII-02-07-UCS-03		2.51	1.78	21.85	±1.59	2.65	
SBII-02-14-UCS-01		2.52	1.76	19.98		1.79	1.92
SBII-02-14-UCS-02	14	2.52	1.74	20.81	22.03	1.90	
SBII-02-14-UCS-03		2.52	1.74	25.29	±2.83	2.06	±0.14
SBII-02-21-UCS-01		2.47	1.74	27.10	22.22	2.24	1 70
SBII-02-21-UCS-02	21	2.52	1.77	18.62	22.23	1.34	1.70
SBII-02-21-UCS-03		2.51	1.77	20.98	±4.38	1.52	±0.47
SBII-02-28-UCS-01		2.49	1.79	27.36	22 (7	2.47	2.02
SBII-02-28-UCS-02	28	2.49	1.72	20.85	22.67	1.71	2.02
SBII-02-28-UCS-03		2.49	1.72	19.78	±4.10	1.88	±0.40
SBII-02-60-UCS-01		2.50	1.76	19.51	21.69	1.83	1.07
SBII-02-60-UCS-02	60	2.48	1.76	23.81	21.68	2.18	1.8/
SBII-02-60-UCS-03		2.47	1.74	21.70	±1.90	1.60	±0.29

Salt-bond II cement (SBII)

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียว (σ.) และสัมประสิทธิความยึดหยุ่น (E) ของ

Specimen type	Curing time (days)	L/D	Density (g/cm <sup>3</sup> )	σ <sub>c</sub> (MPa)		(G	E Pa)
SBIIH-02-01-UCS-01		2.49	1.73	3.33	2.22	0.84	0.02
SBIIH-02-01-UCS-02	1	2.47	1.72	3.27	3.32	1.03	0.92
SBIIH-02-01-UCS-03		2.51	1.73	3.35	±0.04	0.88	±0.10
SBIIH-02-03-UCS-01		2.50	1.73	8.70	0.45	1.21	1.22
SBIIH-02-03-UCS-02	3	2.50	1.73	10.89	9.45	1.53	1.32
SBIIH-02-03-UCS-03		2.50	1.71	8.75	±1.25	1.20	±0.19
SBIIH-02-07-UCS-01		2.49	1.72	14.21	14.04	2.26	1.05
SBIIH-02-07-UCS-02	7	2.50	1.73	12.10	$\pm 14.24$ $\pm 2.16$	2.12	1.25
SBIIH-02-07-UCS-03		2.51	1.73	16.42		2.36	±0.12
SBIIH-02-14-UCS-01		2.53	1.73	19.98	10.40	1.95	1.64
SBIIH-02-14-UCS-02	14	2.54	1.72	19.78	18.42	1.87	1.04
SBIIH-02-14-UCS-03		2.53	1.72	15.51	±2.53	1.05	±0.51
SBIIH-02-21-UCS-01		2.51	1.72	17.59	10.64	1.28	1.20
SBIIH-02-21-UCS-02	21	2.47	1.71	18.33	18.64	1.30	1.29
SBIIH-02-21-UCS-03		2.51	1.75	20.00	±1.23	1.29	±0.01
SBIIH-02-28-UCS-01		2.50	1.73	24.36	20.00	2.44	1 70
SBIIH-02-28-UCS-02	28	2.49	1.74	18.75	20.06	1.35	1.79
SBIIH-02-28-UCS-03		2.47	1.73	17.07	±3.82	1.58	±0.38
SBIIH-02-60-UCS-01		2.51	1.69	19.53	20.24	1.91	1.07
SBIIH-02-60-UCS-02	60	2.51	1.71	24.09	20.34	2.23	1.8/
SBIHI-02-60-UCS-03		2.47	1.70	17.40	±3.42	1.47	±0.38

Salt-bond II cement (SBIIH)

Succimentance	Curing time	L	Density		σ <sub>в</sub>
Specimen type	(days)	L/D	(g/cm <sup>3</sup> )	(N	/IPa)
SBII-02-01-BZ-01		0.48	1.67	0.89	
SBII-02-01-BZ-02		0.49	1.69	0.89	
SBII-02-01-BZ-03	1	0.50	1.71	0.77	0.83±0.07
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		0.49	1.74	2.02	
SBII-02-03-BZ-02		0.49	1.76	1.89	
SBII-02-03-BZ-03	3	0.48	1.74	2.17	2.04±0.10
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		0.51	1.71	2.33	
SBII-02-07-BZ-02		0.49	1.71	2.56	l
SBII-02-07-BZ-03	7	0.52	1.72	2.00	2.30±0.22
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		0.50	1.73	2.94	
SBII-02-14-BZ-02		0.52	1.82	2.55	
SBII-02-14-BZ-03	14	0.53	1.79	2.47	2.54±0.26
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		0.53	1.78	3.13	
SBII-02-21-BZ-02		0.52	1.74	2.54	
SBII-02-21-BZ-03	21	0.50	1.71	2.83	3.02±0.34
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	2.0(+0.22
SBII-02-28-BZ-02	28	0.51	1.76	2.86	3.06±0.33

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน ( $\sigma_{\rm B}$ ) ของ Salt-bond II cement (SBII)

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

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน ( $\sigma_{\rm B}$ ) ของ Salt-bond II cement (SBII) (ต่อ)

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน ( $\sigma_{\rm\scriptscriptstyle B}$ ) ของ Salt-bond II cement (SBIIH)

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

Specimen type	Curing time	L/D	Density		σ
	(days)		(g/cm)	(N	1Pa)
SBIIH-02-14-BZ-01		0.51	1.74	2.05	
SBIIH-02-14-BZ-02		0.51	1.79	1.98	
SBIIH-02-14-BZ-03	14	0.50	1.77	1.78	1.88±0.13
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		0.51	1.76	2.35	
SBIIH-02-21-BZ-02		0.50	1.71	2.14	
SBIIH-02-21-BZ-03	21	0.51	1.72	2.80	2.36±0.28
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		0.49	1.69	2.90	
SBIIH-02-28-BZ-02		0.54	1.71	2.68	
SBIIH-02-28-BZ-03	28	0.51	1.74	3.17	2.89±0.19
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		0.51	1.70	2.98	
SBIIH-02-60-BZ-02		0.51	1.74	2.86	
SBIIH-02-60-BZ-03	60	0.52	1.72	2.51	2.75±0.18
SBIIH-02-60-BZ-04		0.52	1.75	2.70	
SBIIH-02-60-BZ-05		0.50	1.71	2.70	

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบแรงคึงแบบบราซิลเลียน ( $\sigma_{\rm B}$ ) ของ Salt-bond II cement (SBIIH) (ต่อ)

Specimen	σ <sub>c</sub> (MPa)		E (0	GPa)	σ <sub>B</sub> (MPa)				
(days)	SBII	SBIIH	SBII	SBIIH	SBII	SBIIH			
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			

ตารางที่ 4.6 สรุปผลการทคสอบแรงกคสูงสุดในแกนเดียว (σ.) การตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ความ ยืดหย่น (E) และการทคสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน (σ.)

#### 4.3 การทดสอบ Push-out

วัตถุประสงค์ของการทคสอบ Push-out เพื่อหากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดและการเปลี่ยนรูป ระยะยาว (long-term deformation) ของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ที่อุดหลุมเจาะ ในเกลือหินสำหรับการ ทคสอบ Push-out จะบ่มแท่งตัวอย่างซีเมนต์เป็นเวลา 7 วัน ดังรูปที่ 4.6 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์และ ตัวอย่างหินที่ใช้ในการทคสอบ แท่งโลหะทรงกระบอกสำหรับให้แรงในแนวแกนของแท่งตัวอย่าง ซีเมนต์ การตรวจวัดการเกลื่อนตัวด้านบนและด้านล่างของแท่งตัวอย่างซีเมนต์โดยการติดตั้งมาตรวัด การเกลื่อนตัว ให้ความเค้นตามแกนด้วยแม่แรงไฮครอลิกแล้วทำการอ่านก่าการเกลื่อนตัวและความ เก้นและจดบันทึกก่าไปพร้อมกัน มาตรวัดการเกลื่อนตัวมีความละเอียดที่ 0.025 มิลลิเมตรและแม่ แรงไฮครอลิกมีมีกำลังสูงสุดที่ 50 กิโลนิวตันและความละเอียดที่ 0.5 กิโลนิวตัน

รูปที่ 4.7 แสดงการติดตั้งสำหรับการทดสอบ Push-out เกลือหินทรงกระบอกที่อุดด้วยแท่ง ตัวอย่างซีเมนต์ในแม่แบบพีวีซีให้อยู่กลางแผ่นฐานโลหะสีเหลี่ยม แท่งโลหะทรงกระบอกขนาดเล็ก สำหรับให้แรงกดในแกนบนแท่งซีเมนต์ การทดสอบโดยให้อัตราการกดกงที่ที่ 0.1MPa/s อ่านก่าการ เกลื่อนตัวด้านบนและด้านล่างของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ ทำการบันทึกทุกๆ 10 วินาทีจนกระทั่งซีเมนต์ และเกลือหินแตกออกจากกัน

ค่าการกระจายตัวของแรงเฉือนสูงสุด ( $au_{av}$ ) ที่เกิดขึ้นจากการให้แรงกดในการทดสอบ Pushout ในตัวอย่างระหว่างเกลือหินและแท่งซีเมนต์ที่อุดอยู่ในหลุมของแท่งเกลือหินสามารถคำนวณได้ จากสมการ (Stormont และ Daeman, 1983):

$$\tau_{av} = F / \pi D_i L_c \tag{4.1}$$

โดยที่ F คือแรงกคสูงสุดตามแนวแกนที่จุดวิบัติ D, คือเส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ที่ใช้ อุด และ L, คือความยาวของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ ผลการทดสอบได้สรุปในตารางที่ 4.7

รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเก้นเฉือนในพึงก์ชันของการเคลื่อนตัวของแท่ง ตัวอย่างซีเมนต์ด้านบนและด้านล่าง การเคลื่อนตัวด้านล่างจะน้อยกว่าเกลื่อนตัวด้านบนก่อนที่จะเกิด การวิบัติ เมื่อแท่งตัวอย่างซีเมนต์มีการเลื่อนความแตกต่างระหว่างการเกลื่อนตัวด้านบนและด้านล่าง ลดลงมากอาจเป็นเพราะการกลายความเก้นที่เกินจากเลื่อนยาวตามหน้าสัมผัส กำลังรับแรงเฉือน สูงสุดที่เกิดระหว่างเกลือหินและแท่งตัวอย่างซีเมนต์มีก่าเท่ากับ 5.05 เมกกะปาสกาล ส่วนรูปที่ 4.9 แสดงตัวอย่างหมายเลข SBIIH-04-07-PO-01 ทำการตัดในแนวแกนหลังจากวิบัติ กวามหนาของ ซีเมนต์ที่เหลือที่ผนังหลุมเจาะบนแท่งตัวอย่างซีเมนต์และการขาดจากกันชี้ให้เห็นว่าเป็นการยึด เหนี่ยวที่ดี

การทดสอบ Push-out ของแท่งตัวอย่างซีเมนต์กับความสัมพันธ์ระหว่างเวลาบ่มตัวและความ เค้นเฉือนคงที่ รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ค้านบน (δ<sub>τ</sub>) ในฟังก์ชันของเวลาที่ความเค้นเฉือนคงที่ต่างๆ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความยืดหยุ่น ชั่วขณะและการเคลื่อนตัวค้านบนกาคว่าจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้น



ร**ูปที่ 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.



ร**ูปที่ 4.7** การติดตั้งเครื่องมือทดสอบ Push-out



รูปที่ 4.8 ผลการทคสอบ Push-out แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเก้นเฉือนในฟังก์ชันของการ เกลื่อนตัวของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ด้านบนและด้านล่าง



ร**ูปที่ 4.9** แสดงภาพตัดขวางของตัวอย่างหมายเลข SBIIH-04-07-PO-01 หลังจากเกินการพังของการ ทดสอบ Push-out



ร**ูปที่ 4.10** ผลการทคสอบ Push-out แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของแท่งตัวอย่าง ซีเมนต์ด้านบน (δ<sub>τ</sub>) ในฟังก์ชันของเวลา

	τ (MPa)	I	2.90	4.17	4.48	3.35	4.26
	τ <sub>ax</sub> (MPa)	5.05		-	-	L	ı
	σ (MPa)	I	14.74	19.11	20.35	15.34	18.55
	σ <sub>ax</sub> (MPa)	22.48	ı	ı	ı	I	ı
	(KN) P	I	7.64	9.55	10.50	8.37	10.02
	F (kN)	11.77	I	I	I	I	ı
	L <sub>c</sub> (mm)	28.71	32.67	28.90	29.11	30.17	28.55
	L <sub>h</sub> (mm)	20.90	18.86	22.02	19.50	19.50	19.78
	D <sub>i</sub> (mm)	25.81	25.68	25.22	25.63	26.35	26.23
ut	(ww) T	100.39	100.53	104.02	101.27	100.07	102.33
101 Push-c	D, (mm)	98.42	100.21	100.01	100.18	100.25	101.23
ตารางที่ 4.7 สรุปผลการทคเ	Specimen No.	SBIIH-04-07-PO-01	SBIIH-04-07-PO-02	SBIIH-04-07-PO-03	SBIIH-04-07-PO-04	SBIIH-04-07-PO-05	SBIIH-04-07-PO-06

O)	
H	
1	
91	
Гщ	
at	
ac	
ö	
Ц	
11	
16	
X	
$\mathbf{A}$	
11	
LT_	
Γ,	
Ę.	
ಹ	
ų,	
୍	
H	
ഇ	
l,	
Р	
It	
er	
ň	
eı	
Ū	
പ്	
<u> </u>	
th	
50	
n n	
୍ୟ	
Ţ	
le	
0	
Ξ	
d	
jo`	
Г	
11	
يبكر	
Ъ,	
$r, L_{h}$	
er, L	
eter, $L_{\rm h}$	
meter, L <sub>1</sub>	
ameter, L <sub>1</sub>	
Diameter, L <sub>1</sub>	
Diameter, L <sub>1</sub>	
le Diameter, $L_{\rm h}$	
ole Diameter, L <sub>i</sub>	
Hole Diameter, L <sub>1</sub>	
= Hole Diameter, L <sub>1</sub>	
$r_{i} = Hole Diameter, L_{i}$	
$D_i = Hole Diameter, L_h$	
$n, D_i = Hole Diameter, L_p$	
th, $D_i = Hole Diameter, L_{i}$	
igth, $D_i = Hole Diameter, L_i$	
ength, $D_i = Hole Diameter, L_i$	
Length, $D_i = Hole Diameter, L_i$	
t Length, $D_i = Hole Diameter, L_i$	
alt Length, $D_i = Hole Diameter, L_{t}$	
Salt Length, $D_i = Hole Diameter, L_i$	
k Salt Length, $D_i = Hole Diameter, L_i$	
hck Salt Length, $D_i = Hole Diameter, L_i$	
$cock$ Salt Length, $D_i = Hole$ Diameter, $L_i$	
Rock Salt Length, $D_i = Hole Diameter, L_i$	
= Rock Salt Length, $D_i$ = Hole Diameter, $L_i$	
$L = Rock Salt Length, D_i = Hole Diameter, L_i$	
, L = Rock Salt Length, $D_i = Hole Diameter, L_i$	
ar, L = Rock Salt Length, $D_i = Hole Diameter, L_i$	
ter, $L = Rock$ Salt Length, $D_i = Hole$ Diameter, $L_i$	
neter, $L = Rock$ Salt Length, $D_i = Hole Diameter, L_i$	
umeter, $L = Rock$ Salt Length, $D_i = Hole$ Diameter, $L_i$	
hiameter, $L = Rock$ Salt Length, $D_i = Hole$ Diameter, $L_i$	
Diameter, $L = Rock$ Salt Length, $D_i = Hole$ Diameter, $L_i$	
It Diameter, $L = Rock$ Salt Length, $D_i = Hole$ Diameter, $L_i$	
alt Diameter, $L = Rock$ Salt Length, $D_i = Hole$ Diameter, $L_i$	
Salt Diameter, $L = Rock$ Salt Length, $D_i = Hole$ Diameter, $L_i$	
k Salt Diameter, $L = Rock$ Salt Length, $D_i = Hole$ Diameter, $L_i$	
ock Salt Diameter, $L = Rock Salt Length, D_i = Hole Diameter, L_i$	
Rock Salt Diameter, $L = Rock$ Salt Length, $D_i = Hole$ Diameter, $L_i$	
$\cdot$ Rock Salt Diameter, L = Rock Salt Length, $D_i$ = Hole Diameter, $L_i$	
= Rock Salt Diameter, $L = Rock Salt Length$ , $D_i = Hole Diameter$ , $L_i$	
$D_0 = Rock Salt Diameter, L = Rock Salt Length, D_i = Hole Diameter, L_i$	

## 4.4 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง

กำลังรับแรงเฉือนระหว่างผิวรอยแตกของเกลือหินและแท่งตัวอย่างซีเมนต์โดยการทคสอบ กำลังรับแรงเฉือนโดยตรง ขั้นตอนการทดสอบมีความคล้ายกลึงกับการปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM หมายเลข D5607 ส่วนผสมซีเมนต์หล่อในรอยแตกแบบเรียบ (saw cut surface) ของเกลือหินมี เส้นผ่าสูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร และบ่มเป็นเวลา 7 วัน ทคสอบด้วยเครื่องแรงเฉือนโดยตรงรุ่น EL-77-1030 ที่สามารถให้กำลังสูงสุด 50 กิโลนิวตัน การติดตั้งเครื่องมือในห้องปฏิบัติการสำหรับการ ทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงแสดงในรูปที่ 4.11 การทคสอบจะต้องรักษาความเก้นแนวตั้งฉาก ให้กงที่ในระหว่างการทดสอบ โดยการผันแปรความเก้นตั้งฉาก (Normal stress) ที่ 0.62, 1.26, 1.89, 2.52 และ 3.14 เมกกะปาสกาล ให้แรงเฉือนอย่างต่อเนื่องและอ่านก่าทุกๆ 2 มิลลิเมตร สำหรับการ เคลื่อนตัวแนวเฉือน

คำนวณก่ากวามเก้นเฉือนสุดยอด (Peak shear strength) และกวามเก้นเฉือนกงเหลือ (Residual shear strength) ตามกวามสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างกวามเก้นเฉือนและกวามเก้นตั้งฉาก ตามเกณฑ์ของ Coulomb ได้มุมเสียดทานสำหรับกวามเก้นเฉือนสุดยอด (Peak friction angle) และมุม เสียดทานสำหรับกวามเก้นเฉือนกงเหลือ (Residual friction angle) ที่ผิวสัมผัสของเกลือหินและแท่ง ตัวอย่างซีเมนต์กือ 44 และ 42 องศา ตามลำดับ ก่ากวามเก้นยึกติด (Cohesion) ของกวามเก้นเฉือนสุด ยอก กือ 2.12 เมกกะปาสกาล (รูปที่ 4.12 และ 4.13)



รูปที่ 4.11 การติดตั้งเกรื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเถือนโดยตรง (model EL-77-1030)



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการเกลื่อนตัวแนวเฉือน



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเก้นเถือนในพึงก์ชันของความเก้นตั้งถาก

Specimen type	σ <sub>n</sub> (MPa)	τ <sub>p</sub> (MPa)	с <sub>р</sub> (MPa)	φ <sub>p</sub> (degrees)	τ <sub>r</sub> (MPa)	φ <sub>r</sub> (degrees)
SBIIH-04-07-DS-01	0.62	2.50			0.69	
SBIIH-04-07-DS-02	1.26	3.52			1.26	
SBIIH-04-07-DS-03	1.89	4.03	2.12	44	1.70	42
SBIIH-04-07-DS-04	2.52	4.41			2.14	
SBIIH-04-07-DS-05	3.14	5.03			2.83	

ตารางที่ 4.8 สรุปผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน โดยตรงตามเกณฑ์ของ Coulomb

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงระยะยาวของผิวสัมผัสของเกลือหินและแท่งตัวอย่าง ซีเมนต์กับความสัมพันธ์ระหว่างเวลาบ่มตัวกับความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือนคงที่โดยใช้เครื่อง แรงเฉือนโดยตรงรุ่น SBEL DR-44 (รูปที่ 4.14) โดยให้ความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือนคงที่ สำหรับการทดสอบระยะยาว ค่าเฉลี่ยการเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉาก (Normal stiffness, k<sub>a</sub>) และการ เกลื่อนตัวในแนวเฉือน (Shear stiffness, k<sub>a</sub>) คือ 8.42±3.00 GPa/m และ 9.86±2.93 GPa/m ตามลำคับ ดังแสดงในตารางที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวเฉือนในฟังก์ชันความเค้นเฉือนคงที่ มายใต้ความเก้นตั้งฉากคงที่ ผลการทดสอบความเค้นเฉือนในระยะยาวพบว่าการเคลื่อนไหลเพิ่มขึ้น เมื่อความเก้นเดื่งฉากคงที่ 1.86 เมกกะปาสกาล



รูปที่ 4.14 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเถือน โดยตรงระยะยาว (SBEL model DR-44)



ร**ูปที่ 4.15** ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงระยะยาว แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อน ตัวเฉือน (δ<sub>s</sub>) ในฟังก์ชันของเวลา โดยความเค้นตั้งฉากคงที่ 1.86 เมกกะปาสคาล

ตารางที่ 4.9	ความเค้นตั้งฉากและค	วามเค้นเฉือนค	งที่สำหรับการท	คสอบกำลังรับแร	งเฉือน โดยตรง
	<b>ວະຍະຍາ</b> ວ				

	Constant normal	Constant shear	k <sub>n</sub>	k <sub>s</sub>
Specimen type	stress,	stress,		
	σ <sub>n</sub> (MPa)	τ (MPa)	(GPa/m)	(GPa/m)
SBIIH-04-07-DS-06		1.13	7.67	6.60
SBIIH-04-07-DS-07		1.67	12.24	11.25
SBIIH-04-07-DS-08	1.86	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
	8.42±3.00	9.86±2.93		

### 4.5 การทดสอบค่าความซึมผ่าน

การทดสอบค่าความซึมผ่านของวัสดุตัวอย่างซึเมนต์เพื่ออธิบายในเทอมของความซึมผ่านเชิง กายภาพ (Intrinsic permeability, k) โดยอัดแรงดันน้ำในการวัดอัตราการใหลของน้ำในแบบหล่อ ซึเมนต์ ทำการจดบันทึกค่าอัตราการใหลเพื่อนำไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน ซึ่งแสดงการ ติดตั้งเครื่องมือทดสอบความซึมผ่านของซึเมนต์ดังรูปที่ 4.16 การใหลของน้ำจะไปในทิศทางตามยาว ตามระบบทดสอบที่อธิบายโดยกฎของ Darcy's ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (Coefficient of permeability, K) สามารถคำนวนได้จากสมการ (Indraratna and Ranjith, 2001)

$$K = Q / Ai \tag{4.2}$$

โดยที่ Q คืออัตราการ ไหล (m³/s) A คือพื้นที่หน้าตัดของการ ไหล (m²) และ i คือลาดชลศาสตร์ (Hydraulic gradient) ค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$k = K\mu/\gamma \tag{4.3}$$

โดยที่ K คือสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (m/s) μ คือความหนืดจลน์ของน้ำเกลือ (Pa·s) และ γ คือความ หนาแน่นของน้ำเกลือ

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

ค่าสัมประสิทธิ์กวามซึมผ่าน (K) และค่ากวามซึมผ่านเชิงกายภาพ (k) ของตัวอย่างซีเมนต์ใน ฟังก์ชันของการบ่มตัวตามเวลาดังแสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18 สรุปผลการทดสอบค่ากวามซึมผ่าน ในตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาบ่มตัวเพิ่มขึ้นก่ากวามซึมผ่านเชิงกายภาพของ ตัวอย่างซีเมนต์ลดลง



รูปที่ 4.16 แสดงการติดตั้งเครื่องมือทดสอบกวามซึมผ่านของซีเมนต์



ร**ูปที่ 4.17** ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (K) ของตัวอย่างซีเมนต์



ร**ูปที่ 4.18** ค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพ (k) ของตัวอย่างซึเมนต์

a	1		a '	é	' a' d
ຕາ <u>ຮາ</u> .າທ / 10	สราโแลการทดส	หาดกา	าาเหล่าเยาาเจ	ເລ.າຕາລະ	ເວ.ງຫຍໍເງເງເຫ
YI I J IN II 4.10	- ГГЭ П КАРП ГГЭ И КГРІ	0111111	INTNNIN	JONNIJOU	וא או נפאנד ערו ל

Curing time	Coefficient of	Coefficient of permeability, Intrinsic permeabi			
(days)	K (r	n/s)	k (m <sup>2</sup> )		
(uuys)	SBII	SBIIH	SBII	SBIIH	
1	$2.10 \times 10^{-4}$	6.91x10 <sup>-5</sup>	$2.15 \times 10^{-11}$	$7.10 \times 10^{-12}$	
3	$1.57 \times 10^{-4}$	$7.86 \mathrm{x10}^{-6}$	$1.61 \times 10^{-11}$	$8.06 \times 10^{-13}$	
7	$2.54 \times 10^{-5}$	$7.83 \times 10^{-7}$	$2.61 \times 10^{-12}$	$8.04 \mathrm{x10}^{-14}$	
14	1.79x10 <sup>-5</sup>	$4.09 \mathrm{x} 10^{-7}$	$1.84 \times 10^{-12}$	$4.20 \mathrm{x10}^{-14}$	
21	1.33x10 <sup>-5</sup>	$2.15 \times 10^{-7}$	$1.37 \times 10^{-12}$	$2.20 \times 10^{-14}$	
28	1.18x10 <sup>-5</sup>	$2.09 \times 10^{-7}$	$1.21 \times 10^{-12}$	$2.15 \times 10^{-14}$	
35	$1.10 \times 10^{-5}$	$2.01 \times 10^{-7}$	$1.13 \times 10^{-12}$	$2.06 \times 10^{-14}$	
42	9.67x10 <sup>-6</sup>	$1.50 \times 10^{-7}$	$9.93 \times 10^{-13}$	$1.54 \mathrm{x10}^{-14}$	
60	6.22x10 <sup>-6</sup>	$1.37 \times 10^{-7}$	$6.39 \times 10^{-13}$	$1.40 \mathrm{x} 10^{-14}$	
109	1.19x10 <sup>-6</sup>	$1.09 \times 10^{-7}$	$1.22 \times 10^{-13}$	$1.12 \mathrm{x10}^{-14}$	
136	$1.04 \times 10^{-6}$	$4.95 \times 10^{-8}$	$1.07 \times 10^{-13}$	$5.08 \times 10^{-15}$	
254	$1.00 \times 10^{-6}$	4.81x10 <sup>-8</sup>	$1.03 \times 10^{-13}$	$4.94 \times 10^{-15}$	

# บทที่ 5 การสอบเทียบของพารามิเตอร์การเคลื่อนไหล

### 5.1 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ในบทนี้เพื่อการสอบเทียบผลการเคลื่อนตัวและพารามิเตอร์การเคลื่อนไหลตาม กวามเก้นเฉือน การวิเคราะห์การเคลื่อนไหล ในความเก้นเฉือนได้เสนอสมการ โดยใช้โปรแกรม IBM SPSS Statistics 19 (Wendai, 2000) เพื่อกำหนดค่าความยืดหยุ่นเฉือน (G<sub>1</sub>) ความหนืดเชิงยืดหยุ่น เฉือน (G<sub>2</sub>) และสัมประสิทธิ์กวามหนืด (η<sub>1</sub>) จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่ตรวจวัดในเทอม ของความเก้นเฉือนของตัวอย่างซีเมนต์ในหลุมเจาะและความต้านทานแรงเฉือนระหว่างซีเมนต์และ เกลือหินในฟังก์ชันของเวลา

# 5.2 รูปแบบการเคลื่อนใหลของความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือน

พฤติกรรมการเคลื่อนไหลของความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือนทั้งความเค้นเฉือนของตัวอย่าง ซีเมนต์ในหลุมเจาะและความด้านทานแรงเฉือนระหว่างซีเมนต์และเกลือหิน พฤติกรรมส่วนของ ความยืดหยุ่น (Hookean body) และส่วนของความหนืด (Newton body) และทั้งสองส่วนสามารถ เชื่อมต่อกันในรูปแบบของ Maxwell และขนานกันในรูปแบบของ Kelvin

ในรูปแบบของ Kelvin เป็นรูปแบบของความหนืดเชิงยึดหยุ่นร่วมกับพฤติกรรมเชิงยึดหยุ่น ของพฤติกรรมความหนืด โดยเชื่อมต่อขนานกันกับชุดพฤติกรรมเชิงยึดหยุ่น (Hookean) ในการวิจัยนี้ ได้เลือกใช้รูปแบบของ Hookean-Kelvin (รูปที่ 5.1) เพื่อกำหนดพฤติกรรมความหนืดเชิงยืดหยุ่น เฉือนระหว่างซีเมนต์ยึดติดกับเกลือหิน สมการการเกลื่อนใหลรูปแบบของ Hookean-Kelvin ภายใต้ การกวบกุมความเก้นเฉือนกงที่ (τ) คือ

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

โดยที่ δ คือการเกลื่อนตัวในแนวเฉือน t คือเวลา G<sub>1</sub> คือกวามยึดหยุ่นเฉือน G<sub>2</sub> คือกวามหนืดเชิง ยึดหยุ่นเฉือน และ η<sub>1</sub> คือสัมประสิทธิ์กวามหนืดระหว่างซีเมนต์และเกลือหิน (Yang and Cheng, 2011; Saptono et al., 2012) พารามิเตอร์การเคลื่อนใหลของรูปแบบ Hookean-Kelvin กำหนดโดยวิธีการต่อไปนี้ ค่า กวามยืดหยุ่นเฉือน G<sub>1</sub> ได้จาก G<sub>1</sub> = τ/δ<sub>0</sub> โดยที่ δ<sub>0</sub> คือการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนชั่วขณะของแต่ละ กวามเค้นเฉือนคงที่ หลังจากได้ค่าพารามิเตอร์ G<sub>1</sub> พารามิเตอร์การเคลื่อนไหล G<sub>2</sub> และ η<sub>1</sub> สามารถ วิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยการใช้โปรแกรม SPSS เมื่อสามารถระบุค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R<sup>2</sup>) ที่ยอมรับได้ตามเกณฑ์การวิเคราะห์



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

# 5.3 พารามิเตอร์การเคลื่อนใหลของการทดสอบ Push-out

การทดสอบ Push-out คำเนินการของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ในความสัมพันธ์ระหว่างการ เคลื่อนตัวของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ด้านบน (δ<sub>T</sub>) ในฟังก์ชันของเวลาที่ความเก้นเฉือนคงที่ต่างๆใน ระยะยาว สำหรับการทดสอบ Push-out ในระยะสั้น ค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุด (τ<sub>a</sub>) ของแท่งตัวอย่าง ซีเมนต์ในหลุมเจาะมีค่าเท่ากับ 5.05 เมกกะปาสกาล ดังนั้นจึงเลือกระดับความเก้นเฉือนคงที่ (τ) ที่ 0.29, 3.35, 4.17, 4.26 และ4.48 เมกกะปาสกาล ตามลำดับเพื่อใช้ในการตรวจสอบพฤติกรรมการ เคลื่อนใหลของกวามหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือนระหว่างแท่งตัวอย่างซีเมนต์และเกลือหิน ความสัมพันธ์ ระหว่างการเกลือนตัวและเวลากับหลากหลายระดับความเก้นเฉือนคงที่ใช้เวลา 30 วัน

รูปที่ 5.2 แสดงผลการทคสอบการเคลื่อนใหลในแนวเฉือนระหว่างแท่งตัวอย่างซีเมนต์และ เกลือหินกับการผันแปรความเก้นเฉือนกงที่ ผลการทคสอบแสดงให้เห็นว่าการเกลื่อนตัวของแท่ง ตัวอย่างซีเมนต์ด้านบนเพิ่มขึ้นเมื่อความเก้นเฉือนเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถแสดงโดยสมการการเกลื่อนไหล ของรูปแบบ Hookean-Kelvin



ร**ูปที่ 5.2** ผลการทดสอบ Push-out (จุด) และการสอบเทียบ (เส้น)

$\delta_T = \frac{\tau}{G_1} + \frac{\tau}{G_2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_1}t\right) \right] (\text{mm})$								
τ	$\tau/\tau_{\rm av}$	G <sub>1</sub>	G <sub>2</sub>	$\eta_1$	R <sup>2</sup>			
(MPa)		(MPa·mm <sup>-1</sup> )	(MPa·mm <sup>-1</sup> )	(MPa·Days·mm <sup>-1</sup> )				
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)								

ตารางที่ 5.1 การสอบเทียบพารามิเตอร์การเคลื่อนใหลงากผลการทคสอบ Push-out

ตามรูปที่ 5.2 และสมการที่ 5.1 พารามิเตอร์การเคลื่อนใหลของรูปแบบ Hookean-Kelvin สามารถกำหนดค่าของกวามยืดหยุ่นเฉือนระหว่างซีเมนต์และเกลือหิน (G<sub>1</sub>) จากอัตราส่วนระหว่าง กวามเก้นเฉือนกงที่และการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนชั่วขณะ (τ/δ<sub>0</sub>) หลังจากได้ก่าพารามิเตอร์ G<sub>1</sub> ทำ การกำหนดก่า G<sub>2</sub> และ η, โดยการใช้โปรแกรม SPSS ผ่านการทวนของสมการที่ 5.1 ในตารางที่ 5.1 ระบุรูปแบบพารามิเตอร์การเกลื่อนไหลทั้ง 5 ระดับกวามเก้นเฉือนที่เวลา 30 วัน และก่าสูงสุดของ R<sup>2</sup> พารามิเตอร์ระหว่างซีเมนต์และเกลือหินที่เหมาะสมของกวามยืดหยุ่นเฉือน (G<sub>1</sub>) กวามหนืด เชิงยืดหยุ่นเฉือน (G<sub>2</sub>) และสัมประสิทธิ์กวามหนืด (η,) พิจารณาในฟังก์ชันของอัตราส่วนเฉือนกงที่ (τ/τ<sub>a</sub>) โดยที่ τ กือกวามเก้นกงที่ และ τ<sub>av</sub> กือกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ในหลุม เจาะ รูปที่ 5.3 แสดงก่าพารามิเตอร์เชิงประจักษ์ ก่า G<sub>1</sub> เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อ τ/τ<sub>av</sub> เพิ่มขึ้น ก่าพารามิเตอร์ ของ G<sub>2</sub> และ η, มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเฉือนคงที่กับความสัมพันธ์เชิงกำลัง โดยการนำ ก่าพารามิเตอร์และความสัมพันธ์กับความเก้นเฉือนคงที่ที่แสดงในตารางที่ 5.1 ชุดของสมการใน ตารางที่ 5.2 สามารถใช้กาดการณ์พฤติกรรมความหนืดเชิงยืดหยุ่นที่ระดับกวามเก้นเฉือนต่างๆ



ร**ูปที่ 5.3** อิทธิพลของอัตราส่วนเฉือนคงที่ (τ/τ<sub>a</sub>,) ต่อค่าความยืดหยุ่นเฉือน (G<sub>1</sub>) ความหนืดเชิง ยืดหยุ่นเฉือน (G₂) และสัมประสิทธิ์ความหนืด (η₁)

Empirical equations	Empirical parameters		
$C = \gamma \left[ \frac{\tau}{\tau} \right] + \kappa (MP_{2},mm^{-1})$	χ	κ	$\mathbf{R}^2$
$\begin{bmatrix} \sigma_1 - \chi & [\tau_{av}] \end{bmatrix} + K \text{ (NII a limit )}$	0.382 1.016		0.992
$\left[ \tau \right]^{\beta} \left[ \tau \right]^{\beta}$	α	β	$\mathbf{R}^2$
$G_2 = \alpha \cdot \left[\frac{\tau_{av}}{\tau_{av}}\right]$ (MPa·mm)	0.206	-3.775	0.946
$\eta_1 = \lambda \cdot \left[\frac{\tau}{\tau_{av}}\right]^{\omega} (\text{MPa·Days·mm}^{-1})$	λ	ω	$\mathbf{R}^2$
	2.114	-2.336	0.746

ตารางที่ 5.2 ค่าพารามิเตอร์เชิงประจักษ์ของค่าความยืดหยุ่นเฉือน ความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือน และ สัมประสิทธิ์ความหนืดกับอัตราส่วนความเค้นเฉือนคงที่ระหว่างซีเมนต์และเกลือหิน

## 5.4 พารามิเตอร์การเคลื่อนใหลของการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงระยะยาว

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงระยะยาวของผิวสัมผัสระหว่างซีเมนต์และเกลือหินใน ดวามสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน (δ) ในฟังก์ชันของเวลาที่ความเค้นเฉือนคงที่ต่างๆ โดยให้ความเก้นตั้งฉากคงที่ที่ 1.86 เมกกะปาสกาล และสอดกล้องกับความเค้นเฉือนสุดยอด (τ) ที่ 3.92 เมกกะปาสกาล ตามสมการกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงในบทที่ 4 ดังนั้นทั้ง 4 ระดับความเค้นที่ 0.55, 1.13, 1.67 และ 2.26 เมกกะปาสกาล ใช้ในการตรวจสอบพฤติกรรมการเคลื่อนไหลของความ หนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือนของผิวสัมผัสระหว่างซีเมนต์และเกลือหิน และนำมาประยุกต์ใช้ให้สอดกล้อง กับระดับความเก้น ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในฟังก์ชั่นของเวลาที่เวลา 30 วัน

รูปที่ 5.4 แสดงผลการทคสอบการเคลื่อนใหลในแนวเฉือนของตัวอย่างกับการผันแปรความ เค้นเฉือน ผลการทคสอบแสดงให้เห็นว่าผิวสัมผัสระหว่างซีเมนต์เปลี่ยนรูปทันทีที่ความเค้นตั้งฉาก กงที่ ในระยะยาวการเปลี่ยนรูปในแนวเฉือนของตัวอย่างยังเพิ่มขึ้นทีละขั้น แต่อัตราการเฉือนค่อยๆ ลดลง

ตารางที่ 5.3 แสดงพารามิเตอร์ในรูปแบบการเกลื่อนไหลเฉือนระหว่างซีเมนต์และเกลือหิน ของทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงระยะยาว อัตราส่วนของกวามเก้นเฉือนกงที่ (τ) กับกวามเก้น เฉือนสุดยอด (τ<sub>p</sub>) ซึ่งเรียกว่าอัตราส่วนกวามเก้นเฉือน (τ/τ<sub>p</sub>) พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกวาม ยึดหยุ่นเฉือน (G<sub>1</sub>) กวามหนืดเชิงยึดหยุ่นเฉือน (G<sub>2</sub>) และสัมประสิทธิ์กวามหนืด (η<sub>1</sub>) กับอัตราส่วน กวามเก้นเฉือน (τ/τ<sub>p</sub>) ก่าพารามิเตอร์เชิงประจักษ์ของกวามยึดหยุ่นเฉือน กวามหนืดเชิงยึดหยุ่นเฉือน และสัมประสิทธิ์กวามหนืดเปลี่ยนแปลงโดยการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนกวามเก้นเฉือน เมื่ออัตราส่วน กวามเก้นเฉือนเพิ่มขึ้นก่ากวามยึดหยุ่นเฉือน กวามหนืดเชิงยึดหยุ่นเฉือน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (รูปที่ 5.5) ตารางที่ 5.4 แสดงชุดของสมการที่สามารถใช้กาดการณ์พฤติกรรม กวามหนืดเชิงยืดหยุ่นที่ระดับกวามเก้นเฉือนต่างๆ



ร**ูปที่ 5.4** ผลการทคสอบกำลังรับแรงเฉือนโคยตรงระยะยาว (จุค) และการสอบเทียบ (เส้น)

ตารางที่ 5.3 การสอบเทียบพารามิเตอร์การเกลื่อนไหลจากผลการกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงระยะยาว ระหว่างซีเมนต์และเกลือหิน

$\delta_s = \frac{\tau}{G_1} + \frac{\tau}{G_2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_1}t\right) \right] (\text{mm})$								
τ (MPa)	$\tau/\tau_p$	G <sub>1</sub> (MPa·mm <sup>-1</sup> )	G₂ (MPa·mm <sup>-1</sup> )	η <sub>1</sub> (MPa·Days·mm <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>			
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	*Constant normal stress, $\sigma_n = 1.86$ MPa							
*t (Days)								


- ร**ูปที่ 5.5** อิทธิพลของอัตราส่วนเฉือน (τ/τ<sub>p</sub>) ต่อค่าความยืดหยุ่นเฉือน (G<sub>1</sub>) ความหนืดเชิงยืดหยุ่น เฉือน (G<sub>2</sub>) และสัมประสิทธิ์ความหนืด (η<sub>1</sub>) ระหว่างซีเมนต์และเกลือหิน
- ตารางที่ 5.4 ค่าพารามิเตอร์เชิงประจักษ์ของค่าความยึดหยุ่นเฉือน ความหนืดเชิงยึดหยุ่นเฉือน และ สัมประสิทธิ์ความหนืดกับอัตราส่วนความเก้นเฉือน ระหว่างซีเมนต์และเกลือหิน

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

## บทที่ 6 บทสรุป

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้ คือ 1) ศึกษาพฤติกรรมตามกาลเวลาของการอุคซีเมนต์ใน เกลือหินเพื่อนำมาประยุกต์ใช้อุคหลุมเจาะในชั้นเกลือหินที่ถูกขุดเจาะเป็นโพรงหรืออุโมงค์ในเหมือง และสำหรับเป็นแหล่งทิ้งกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมที่ไม่สามารถบำบัคหรือนำกลับมาใช้ใหม่ ได้ และ 2) สร้างกวามสัมพันธ์ทางกณิตศาสตร์เพื่อใช้กาดการณ์ก่ากำลังการยึดติด (Bond Strength) ระหว่างซีเมนต์และเกลือหินในฟังก์ชันของเวลาสำหรับการออกแบบระยะยาว

ผลการทดสอบกำลังรับแรงเลือนสูงสุดในระยะยาวของการอุดซีเมนต์ในเกลือหินสำหรับ การทดสอบ Push-out และการทดสอบกำลังรับแรงเลือน โดยตรงสามารถช่วยในการออกแบบซีเมนต์ สำหรับการอุดรอยแตกในระยะยาวเพื่อให้มีผลกระทบจากการรั่วไหลในชั้นเกลือหินของเหมืองเกลือ ให้น้อยที่สุด ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในงานวิจัยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ซึ่งขุดเจาะมา จากเกลือหินชั้นกลางของหินชุดมหาสารกาม การเตรียมส่วนผสมซีเมนต์สำหรับอุดในหลุมเจาะใช้ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซ โซลานผสมกับน้ำเกลืออิ่มตัว สารผสมเพิ่มเพื่อการขยายตัว และสารผสม เพิ่มเพื่อลดฟองอากาศ ซึ่งดำเนินการทดสอบเป็นสองประเภทของส่วนผสมซีเมนต์ก็อ 1) Salt-bond II ผสมกันน้ำเกลือต่ำ (SBII) และ 2) Salt-bond II ผสมกันน้ำเกลือสูง (SBIIH) เพื่อทดสอบหา ประสิทธิภาพเชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์ของปูนซีเมนต์ที่นำมาใช้อุดในชั้นเกลือหิน ที่มีความ เหมาะสม โดยให้ก่าความหนืดต่ำสุดและก่าความซึมผ่านต่ำสุดของส่วนผสมซีเมนต์ จากผลการ ทดสอบระบุว่าการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นเกลือหินกวรจะใช้ซีเมนต์ที่มีส่วนผสมตาม SBIIH เพื่อให้มีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์ที่เพียงพอ

ผลการทคสอบคุณสมบัติพื้นฐานของซีเมนต์ SBIIH แสดงให้เห็นว่าเมื่อบ่มตัวตามเวลา เพิ่มขึ้นค่าแรงกคสูงสุดในแกนเดียว สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น และแรงดึงแบบบราซิลเลียนของ ด้วอย่างซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าแรงกคสูงสุดในแกนเดียว สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น และแรงดึงแบบ บราซิลเลียนหลังจากบ่มตัว 60 วัน คือ 20.34±3.42 เมกกะปาสกาล, 1.87±0.38 จิกะปาสกาล และ 2.75±0.18 เมกกะปาสกาล ตามลำคับ ค่าความหนืดพลวัตร (Dynamics viscosity) และความหนืดเชิง จลน์ (Kinematic viscosity) ของส่วนผสมซีเมนต์คือ 4.53 Pa·s และ 2.59x10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s ตามลำคับ และ ความหนาแน่นเท่ากับ 1.75 g/cc

การทดสอบค่าความซึมผ่านระยะยาวของวัสดุตัวอย่างซีเมนต์โดยการตรวจวัดอัตราการใหล ของน้ำที่ระดับความสูงลดลงตามเวลาบ่มตัวที่ 1, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 60, 109, 136 และ 254 วัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาการบ่มตัวเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (K) และค่า ความซึมผ่านเชิงกายภาพ (k) ลดลง ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านและค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพคือ 4.81x10<sup>-8</sup> m²/s และ 4.95x10<sup>-15</sup> m² ตามลำคับ

การทดสอบ Push-out และกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงเพื่อหาก่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของ ด้วอย่างซีเมนต์ในหลุมเจาะ หล่อซีเมนต์ในหลุมเจาะเส้นผ่าสูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร กวามยาว 30 มิลลิเมตร สำหรับการทดสอบ Push-out และตัดเกลือหินให้มีรอยแตกแบบเรียบขนาด เส้นผ่าสูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง ทำการบ่มตัวอย่าง ซีเมนต์ 7 ที่ใช้ในการทดสอบ ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงในระยะสั้นพบว่าแรงเสียด ทานยึดติดระหว่างซีเมนต์และเกลือหินได้ก่ามุมเสียดทานเท่ากับ 44 องศา และก่าความเก้นยึดติด เท่ากับ 2.12 เมกกะปาสกาล ก่าเฉลี่ยการเกลื่อนตัวในแนวตั้งฉากและการเกลื่อนตัวในแนวเฉือนกือ 8.42±3.00 GPa/m และ 9.86±2.93 GPa/m ผลการทดสอบ Push-out ในระยะสั้นให้ก่าสูงกว่าผลที่ได้ จากการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง โดยมีก่าแรงเฉือนสูงสุดตามแรงกดในแนวแกนเท่ากับ 5.05 เมกกะ ปาสกาล อันเป็นผลมาจากผลกระทบของก่าอัตราส่วนปีวซ์ซองที่จะเพิ่มความเก้นตั้งฉากที่เกิดขึ้น ระหว่างผิวสัมผัสของตัวอย่างซีเมนต์และเกลือหินในขณะที่ให้เริงกดตามแนวแกน จึงชี้ให้เห็นว่าผล ที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงนั้นให้ก่าที่อยู่ให้เชิงอนุรักษ์ที่มากกว่าสำหรับการทดสอบหา ก่ากำลังเฉือนสูงสุดระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ที่ใช้ในการอุดหลุมเจาะ

การทดสอบ Push-out ระยะยาวถูกดำเนินการในแท่งตัวอย่างซีเมนต์กับชุดความสัมพันธ์การ บ่มตัวในระยะยาวที่ความเก้นเฉือนคงที่ ผลการทดสอบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของ แท่งตัวอย่างซีเมนต์ด้านบนในพึงก์ชันของเวลาที่ความเก้นเฉือนคงที่ต่าง ๆ และความยืดหยุ่นชั่วขณะ บนพื้นฐานพฤติกรรมการเคลื่อนใหลของความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือนของแรงยึดติดระหว่างซีเมนต์ และเกลือหินด้วยความเก้นเฉือนกงที่ โดยผันแปร 5 ระดับที่ 0.29, 3.35, 4.17, 4.26 และ4.48 เมกกะ ปาสกาลตามลำดับ ผลการทดสอบสามารถหาพฤติกรรมการเคลื่อนใหลของความหนืดเชิงยืดหยุ่น เฉือนระหว่างแท่งตัวอย่างซีเมนต์และเกลือหินโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวแนวเฉือน และเวลาโดยระดับความเก้นเฉือนกงที่ต่าง ๆ ที่ 30 วัน

รูปแบบ Hookean-Kelvin ถูกเลือกเพื่อหาค่าพฤติกรรมการเคลื่อนไหลของความหนืดเชิง ยึดหยุ่นเฉือนระหว่างแท่งตัวอย่างซีเมนต์และเกลือหิน (Yang และ Cheng, 2011; Saptono และคณะ, 2012) โดยใช้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของความยึดหยุ่นเฉือน (G<sub>1</sub>) ความหนืดเชิงยึดหยุ่นเฉือน (G<sub>2</sub>) และสัมประสิทธิ์ความหนืด (η<sub>1</sub>) พิจารณาในฟังก์ชันของอัตราส่วนเฉือนคงที่ (τ/τ<sub>av</sub>) ของซีเมนต์อุด ในหลุมเจาะ ค่า G<sub>1</sub> เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อ τ/τ<sub>av</sub> เพิ่มขึ้น ค่าพารามิเตอร์ของ G<sub>2</sub> และ η<sub>1</sub> มีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเฉือนคงที่กับความสัมพันธ์เชิงยกกำลัง

ผลการทคสอบกำลังรับแรงเฉือนโคยตรงระยะยาวแสดงรูปแบบพารามิเตอร์ของพฤติกรรม การเคลื่อนไหลในแนวเฉือนสำหรับการทคสอบกำลังรับแรงเฉือนโคยตรงระยะยาว พารามิเตอร์ที่ เหมาะสมของความยืดหยุ่นเฉือน (G<sub>1</sub>) ความหนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือน (G<sub>2</sub>) และสัมประสิทธิ์ความหนืด (η<sub>1</sub>) กับอัตราส่วนความเค้นเฉือน (τ/τ<sub>p</sub>) ค่าพารามิเตอร์เชิงประจักษ์ของความยืดหยุ่นเฉือน ความ หนืดเชิงยืดหยุ่นเฉือน และสัมประสิทธิ์ความหนืดเปลี่ยนแปลงโดยการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนความ เค้นเฉือน เมื่ออัตราส่วนความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้นค่า G<sub>1</sub>, G<sub>2</sub> และ η<sub>1</sub> มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ผลการกาดการณ์ เป็นไปตามข้อมูลจากผลการทดสอบเป็นอย่างดี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นรูปแบบการเคลื่อนไหลของ กวามหนืดเชิงยืดหยุ่นแบบไม่เป็นเส้นตรง

## บรรณานุกรม

- กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2543, การวิเคราะห์และออกแบบโพรงที่เกิดจากการผลิตเกลือโดยใช้วิธีละลาย ในชั้นหินเกลือที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย รหัสโครงการ SUT7-719-43-12-46 มหาวิทยาลัย-เทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา, 82 หน้า
- กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2543, การศึกษาเกี่ยวกับการทิ้งของเสียในหินเกลือในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ของประเทศไทย โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข รหัสโครงการ SUT7-719-42-12-16 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา, 44 หน้า
- กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2544, การก้นกว้าทางทฤษฎีและปฏิบัติเพื่อหากวามสัมพันธ์ระหว่างดัชนีจุดกด ของหินกับกวามด้านแรงกดและแรงดึงของหิน, มหาวิทยาลัยเทกโนโลยีสุรนารี, นกรราชสีมา
- กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2544, การร่างคู่มือการทำเหมืองเกลือแบบละลายสำหรับผู้ประกอบการขนาด กลางและขนาดเล็ก ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย รหัสโครงการ SUT7-719-43-12-59 มหาวิทยาลัย-เทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา, 130 หน้า
- กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2548, การประเมินคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินจากลักษณะทางศิลา วิทยา รหัสโครงการ SUT-719-47-24-18, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 130 หน้า
- กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2548, การหาสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของหินด้วยการทดสอบจุดกดแบบ ปรับเปลี่ยน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา
- วารสารนิวเคลียร์ปริทัศน์, 2543, สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ, กระทรวงวิทยาศาสตร์และ สิ่งแวคล้อม, 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 Preformance. 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 Multicomponent 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, Albuquergue, 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 aroud 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 Ultraiectina 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 Unversity, 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 Unversity, 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 Materrial, ONWI-324. Prepared by the Materials Research Laboratory, The Pennsylvania State Unversity, 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). Machanical 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-Statinary and Nonlinier Visco-Elastic Shear Creep Model for Shale. International Journal Rock Mechanics & Mining Sciences, Volume 48, Issue 6,1011-1020.

## ประวัตินักวิจัย

อาจารย์ คร.ปรัชญา เทพณรงค์ เกิดเมื่อวันที่ 14 กันยายน 2521 ที่จังหวัดกาญจนบุรี จบ การศึกษาระดับปริญญาเอกจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โปรแกรมวิชาวิศวกรรมธรณี ในปี พ.ศ. 2550 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำอยู่ที่สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชา วิศวกรรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา มีความชำนาญทางการ ทคสอบด้านกลศาสตร์หินในห้องปฏิบัติการและภาคสนาม การออกแบบและการวิเคราะห์โดยใช้ แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ เป็นนักวิจัยประจำหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณี เป็นสมาชิกสามัญตลอคชีพ ของสมาคมธรณีวิทยาแห่งประเทศไทย และเป็นสมาชิกสมาคมกลศาสตร์หินนานาชาติ (International Society of Rock Mechanics, ISRM)