รหัสโครงการ SUT7-719-54-12-54

รายงานการวิจัย

ชุดโครงการวิจัย

การพัฒนาแหล่งเกลือหินสำหรับกักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรม

(Industrial Wastes Storage in Rock Salt)

โครงการวิจัยย่อย

การทดสอบประสิทธิภาพการอุดของซีเมนต์เชิงกลศาสตร์ในหลุมเจาะของเกลือหิน

(Mechanical Performance of Cement Borehole Seals in Rock Salt)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ SUT7-719-54-12-54

รายงานการวิจัย

ชุดโครงการวิจัย

การพัฒนาแหล่งเกลือหินสำหรับกักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรม

(Industrial Wastes Storage in Rock Salt)

โครงการวิจัยย่อย

การทดสอบประสิทธิภาพการอุดของซีเมนต์เชิงกลศาสตร์ในหลุมเจาะของเกลือหิน

(Mechanical Performance of Cement Borehole Seals in Rock Salt)

คณะผู้วิจัย

ผู้อำนวยการชุดโครงการวิจัย
รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เฟื่องขจร
สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

หัวหน้าโครงการวิจัยย่อย
อาจารย์ ดร.ปรัชญา เทพณรงค์
สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2554

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มีนาคม 2554

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ 2554 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากทีมงานหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีในการทดสอบและ นางสาวกัลญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

ธันวาคม 2554

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพเชิงกลศาสตร์ของปูนซีเมนต์เพื่อนำมาใช้อุดในชั้นเกลือหินที่ถูกขุดเจาะเป็นโพรงหรืออุโมงค์สำหรับเป็นแหล่งทิ้งกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรม ผลการทดสอบที่ได้สามารถช่วยในการออกแบบซีเมนต์สำหรับการอุดรอยแตกเพื่อให้มีผลกระทบจากการรั่วไหลในชั้นเกลือหินให้น้อยที่สุด การทดสอบกำลังแรงเฉือนสูงสุดระหว่างซีเมนต์อุดและรอยแตกในเกลือหินประกอบด้วย การทดสอบ Push-out และการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct shear test) โดยเตรียมตัวอย่างเกลือหินเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร จากเกลือหินชุดมหาสารคาม ซีเมนต์สำหรับอุดได้ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดทนเค็มที่มีขายในท้องตลาด โดยหล่อให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ยาว 25 มิลลิเมตร สำหรับการทดสอบ Push-out และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สำหรับการทดสอบกำลังเฉือนโดยตรง รอยแตกที่ใช้ทดสอบแบ่งเป็น 2 ชนิด คือรอยแตกแบบตัดเรียบและรอยแตกแบบขรุขระ เพื่อศึกษาผลกระทบด้านความขรุขระของรอยแตกในเกลือหิน ตัวอย่างซีเมนต์ถูกบ่มเป็นเวลา 3 วัน ก่อนการทดสอบ ผลการทดสอบตามเกณฑ์ของคูลอมป์พบว่าค่าแรงเสียดทานยึดติดระหว่างซีเมนต์และเกลือหินมีค่าเท่ากับ 70 และ 69 องศา สำหรับรอยแตกแบบขรุขระและรอยแตกแบบตัดเรียบตามลำดับ แรงยึดติดในรอยแตกระหว่างซีเมนต์และเกลือหินมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.3 เมกกะปาสคาล การทดสอบ Push-out ให้ค่าผลการทดสอบที่สูงกว่าผลที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง โดยมีค่าแรงเฉือนสูงสุดตามแรงกดในแนวแกน 6.74 – 11.23 MPa อันเป็นผลมาจากผลกระทบของค่าอัตราส่วนปัวซ์ซองที่จะเพิ่มความเค้นตั้งฉากที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของตัวอย่างซีเมนต์และเกลือหินในขณะที่ให้แรงกดตามแนวแกน จึงชี้ให้เห็นว่าผลที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงนั้นให้ค่าที่อยู่ในเชิงอนุรักษ์ที่มากกว่าสำหรับการทดสอบหาค่ากำลังเฉือนสูงสุดระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ที่ใช้ในการอุดหลุมเจาะ โดยซีเมนต์สำหรับอุดหลุมเจาะที่นำมาใช้ในการทดสอบครั้งนี้สามารถให้ประสิทธิภาพเชิงกลศาสตร์เป็นไปตามที่ต้องการ

Abstract

The objective of this study is to experimentally determine the mechanical performance of cement grout for the industrial waste repository in rock salt formation. The results are used to assist in the design of the cement seals in boreholes, fractures and dissolved channels to minimize the brine circulation and potential leakage along the main access (ramp) in the salt formation. Frictional shear strengths between cement grout and rock salt fracture have been experimentally determined by series of borehole push-out testing and direct shear testing. The salt specimens are prepared from the 100 mm diameter cores drilled from the Middle member of the Maha Sarakham formation. The cement grout is prepared from the commercial grade Portland cement mixed with chloride resistant agent. The cement slurry is casted in the 25 mm diameter borehole with a length of 25 mm for the push-out testing and on 100 mm diameter fracture surfaces for the direct shear testing. Two types of fractures have been tested, tension-induced fracture and saw cut surface, primarily to assess the effect of the fracture roughness. For all tests the cement is cured for 3 days prior to testing. According to the Coulomb criterion the friction angles at the cement-salt interface are 70 and 69 degrees for fracture and saw cut surfaces, respectively. The cohesion for the cement-salt fracture is averaged as 0.3 MPa. The push-out test results show significantly higher values of the frictional resistance at the interface than does the direct shear testing. The axial shear strength of the borehole cement seal is as high as 6.74 to 11.23 MPa. This is primarily due to the effect of the Poisson's ratio which increases the normal (radial) stress at the cement-salt interface while the axial load is applied. This implies that the direct shear test results may give an overly conservative estimate of the shearing resistance between the salt and cement seal. In general the tested cement grout has satisfied the mechanical performance requirement.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ..... ก
บทคัดย่อภาษาไทย ..... ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ค
สารบัญ ..... ง
สารบัญตาราง ..... ช
สารบัญรูปภาพ ..... ซ

บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย 1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย 2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย 2
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย 2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย 3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4
1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ 5

บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง 7
2.1 การอุดหลุมเจาะในชั้นหิน 7
2.2 ประเภทของการอุดหลุมเจาะ 7
2.3 จุดมุ่งหมายของการอุดหลุมเจาะ 8
2.3.1 การอุดหลุมเจาะแบบชั่วคราว 8
2.3.2 การอุดหลุมเจาะแบบถาวร 8
2.4 วัสดุที่ใช้ในการอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรม 8
2.4.1 วัสดุที่ใช้ในการอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม 8
2.4.2 วัสดุที่ใช้ในการอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรมน้ำบาดาล 12
2.4.3 วัสดุที่ใช้ในการอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรมการขุดเจาะใต้ดิน 13
2.4.4 วัสดุที่ใช้ในการอุดหลุมเจาะในการทิ้งกากนิวเคลียร์ 13

สารบัญ

หน้า

2.5 ข้อกำหนดสำหรับการอุดหลุมเจาะในประเทศไทย 13
2.5.1 การอุดกลบบ่อในอุตสาหกรรมน้ำบาดาล 13
2.5.2 การอุดกลบบ่อในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม 14
2.6 ข้อกำหนดสำหรับการอุดหลุมเจาะในประเทศสหรัฐอเมริกา 16
2.6.1 การอุดกลบบ่อในอุตสาหกรรมน้ำบาดาล 16
2.6.2 การอุดกลบบ่อในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม 18
2.7 การศึกษาและวิจัยในการอุดหลุมเจาะ 21

บทที่ 3 การจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหินและซีเมนต์ 29
3.1 การเตรียมตัวอย่างเกลือหิน 29
3.1.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง 29
3.1.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ Push-out 29
3.2 การเตรียมตัวอย่างซีเมนต์ 34

บทที่ 4 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของซีเมนต์ 45
4.1 วัตถุประสงค์ 45
4.2 การทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียว 45
4.3 การตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและค่าอัตราส่วนปัวซ์ซอง 47
4.4 การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน 50
4.5 การวัดค่าความหนืดของซีเมนต์ผสมน้ำเกลือ 50

บทที่ 5 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง 57
5.1 วัตถุประสงค์ 57
5.2 อุปกรณ์ทดสอบแรงเฉือนโดยตรงของรอยแตกแบบสามแหวน 57
5.3 การทดสอบแรงเฉือนโดยตรงของรอยแตกแบบสามแหวน 57

สารบัญ

หน้า

บทที่ 6 การทดสอบแรงเฉือนแบบ Push-out 81
6.1 วัตถุประสงค์ 81
6.2 อุปกรณ์ทดสอบกำลังเฉือนแบบ Push-out 81
6.3 ผลการทดสอบกำลังเฉือนแบบ Push-out 83

บทที่ 7 บทสรุป 103

บรรณานุกรม 105

ประวัตินักวิจัย 111

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

3.1 ความลึกและขนาดของตัวอย่างเกลือหินผิวเรียบ (Saw-cut surface) สำหรับการทดสอบแรงเฉือน 31
3.2 ความลึกและขนาดของตัวอย่างเกลือหินผิวขรุขระ (Tension induces fracture) สำหรับการทดสอบแรงเฉือน 31
3.3 ความลึกและขนาดของตัวอย่างเกลือหินสำหรับการทดสอบ push-out 33
3.4 ขนาดของตัวอย่างแท่งซีเมนต์สำหรับการทดสอบแรงกดในแกนเดียว 39
3.5 ขนาดของตัวอย่างแท่งซีเมนต์สำหรับการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและค่าอัตราส่วนปัวซอง 39
3.6 ขนาดของตัวอย่างแท่งซีเมนต์สำหรับการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน40
4.1 ผลการทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียวของซีเมนต์ผสมน้ำเกลือตามมาตรฐาน ASTM D7012 48
4.2 ผลการตรวจวัดหาค่าสัมประสิทธิความยืดหยุ่นและค่าอัตราส่วนปัวซ์ซองตามมาตรฐาน ASTM D7012 49
4.3 ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนของซีเมนต์ผสมน้ำเกลือตามมาตรฐาน ASTM 3967 52
4.4 ผลการทดสอบความหนืด ASTM D2196 55
5.1 สรุปผลการทดสอบแรงเฉือนระหว่างซีเมนต์ผสมน้ำเกลือและเกลือหินผิวเรียบ 62
5.2 สรุปผลการทดสอบแรงเฉือนระหว่างซีเมนต์ผสมน้ำเกลือและเกลือหินผิวขรุขระ 66
5.3 ผลการทดสอบแรงเฉือนระหว่างซีเมนต์ผสมน้ำเกลือและเกลือหินผิวเรียบ 66
5.4 ผลการทดสอบแรงเฉือนระหว่างซีเมนต์ผสมน้ำเกลือและเกลือหินเรียบแบบไม่ยึดติด 70
5.5 ผลการทดสอบแรงเฉือนระหว่างซีเมนต์ผสมน้ำเกลือและเกลือหินผิวขรุขระ 73
6.1 สรุปผลการทดสอบกำลังเฉือนแบบ Push-out 86
6.2 ผลการทดสอบกำลังเฉือนแบบ Push-out 87

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
3.1	การตัดตัวอย่างเกลือหินให้มีขนาดตามต้องการ (ตัดแบบแห้ง)	30
3.2	ตัวอย่างเกลือหินบางชิ้นที่สร้างรอยแตกแบบเรียบมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว หนา 2 นิ้ว	30
3.3	ตัวอย่างเกลือหินที่สร้างรอยแตกแบบขรุขระขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว หนา 2 นิ้ว	30
3.4	การเจาะตัวอย่างเกลือหินเพื่อสร้างรูขนาด 1 นิ้ว สำหรับการทดสอบ Push-out	32
3.5	ตัวอย่างเกลือหินที่เจาะรูสำหรับการทดสอบ Push-out	32
3.6	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน ประเภท IP (Type IP) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 5	35
3.7	แบบหล่อตัวอย่างทำด้วยท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว	38
3.8	การตัดแต่งผิวหน้าให้เรียบตามมาตรฐานสำหรับการทดสอบแต่ละชนิด	38
3.9	แบบหล่อทำจากท่อ PVC ขนาด 4 นิ้ว สำหรับตัวอย่างการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง	41
3.10	ตัวอย่างเกลือหินที่หล่อด้วยซีเมนต์สำหรับการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง	41
3.11	ตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือบนรอยแตกแบบเรียบ	42
3.12	ตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือบนรอยแตกแบบขรุขระ	42
3.13	ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ Push-out	43
4.1	ตัวอย่างแท่งซีเมนต์ผสมน้ำเกลือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว และ L/D = 2.5 หลังจากทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียวและวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น	46
4.2	ตัวอย่างแท่งซีเมนต์ผสมน้ำเกลือ อายุ 7 วัน หลังจากทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียว	46
4.3	การตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและค่าอัตราส่วนปัวซ์ซองด้วยการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทั้ง 2 แกน	49

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.4 การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนกับตัวอย่างแท่งซีเมนต์ผสมน้ำเกลืออายุ 1 วัน ที่ถูกกดในแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง 51

4.5 ตัวอย่างแท่งซีเมนต์ผสมน้ำเกลืออายุ 1 วัน ถูกกดในแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง จนกระทั่งแตกตามแนวแกน 51

4.6 ตัวอย่างแท่งซีเมนต์ผสมน้ำเกลืออายุ 1 วัน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว และ L/D = 0.5 หลังจากถูกทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน 54

4.7 เครื่องทดสอบความหนืด Brookfield® viscometer model RV 54

5.1 ภาพตัดขวางของแท่งตัวอย่างในการส่งผ่านความเค้นตั้งฉากลงบนตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ 58

5.2 แสดงขั้นตอนการติดตั้งแท่งหินตัวอย่างลงในเครื่องทดสอบกำลังเฉือน 58

5.3 อุปกรณ์ที่ทำการติดตั้งเครื่องมือพร้อมทำการทดสอบ 59

5.4 ตัวอย่างหินหลังการทดสอบแรงเฉือนระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือแบบผิวเรียบ 63

5.5 ตัวอย่างหินหลังการทดสอบแรงเฉือนระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือแบบผิวเรียบ 64

5.6 ตัวอย่างหินหลังการทดสอบแรงเฉือนระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือแบบขรุขระ 65

5.7 ผลการทดสอบแรงเฉือนระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือแบบผิวเรียบ โดยความเค้นเฉือนแสดงในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัว 75

5.8 ความสัมพันธ์ระว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของความเค้นตั้งฉาก จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือแบบผิวเรียบ 76

5.9 ผลการทดสอบแรงเฉือนระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือแบบผิวเรียบ (ไม่ยึดติด) โดยความเค้นเฉือนแสดงในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัว 77

5.10 ความสัมพันธ์ระว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของความเค้นตั้งฉาก จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือแบบผิวเรียบ (ไม่ยึดติด) 78

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

5.11 ผลการทดสอบแรงเฉือนระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือแบบขรุขระ โดยความเค้นเฉือนแสดงในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัว 79

5.12 ความสัมพันธ์ระว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของความเค้นตั้งฉาก จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือแบบขรุขระ 80

6.1 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบ Push-out 82

6.2 แสดงการติดตั้งเครื่องมือทดสอบ Push-out 84

6.3 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนตัว 84

6.4 ผลการทดสอบ Push-out ระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือในการอุดหลุมเจาะของตัวอย่าง KB-09-02-PO-02-T 94

6.5 ผลการทดสอบ Push-out ระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือในการอุดหลุมเจาะของตัวอย่าง KB-09-02-PO-02-B 95

6.6 ผลการทดสอบ Push-out ระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือในการอุดหลุมเจาะของตัวอย่าง KB-09-02-PO-03-T 96

6.7 ผลการทดสอบ Push-out ระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือในการอุดหลุมเจาะของตัวอย่าง KB-09-02-PO-03-B 97

6.8 ผลการทดสอบ Push-out ระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือในการอุดหลุมเจาะของตัวอย่าง KB-09-02-PO-04-T 98

6.9 ผลการทดสอบ Push-out ระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือในการอุดหลุมเจาะ ของตัวอย่าง KB-09-02-PO-04-B 99

6.10 ผลการทดสอบ Push-out ระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือในการอุดหลุมเจาะของตัวอย่าง KB-09-02-PO-05-T 100

6.11 ผลการทดสอบ Push-out ระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือในการอุดหลุมเจาะของตัวอย่าง KB-09-02-PO-05-B 101

6.12 ตัวอย่างเกลือหินหลังการทดสอบ Push-out 101

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

องค์ความรู้ทางด้านการอุดหลุมเจาะในชั้นหินได้พัฒนาขึ้นเมื่อประมาณ 20 ปีที่แล้ว กลุ่มนักวิจัยที่ศึกษาความรู้นี้อย่างจริงจังและต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบันคือ Prof. J.J.K. Daemen และคณะ (Daemen et al., 1983, 1984, 1986) ถึงแม้การอุดหลุมเจาะในชั้นหินได้มีการดำเนินการมาก่อนหน้านี้แล้วหลายสิบปี แต่ความสำคัญขององค์ความรู้นี้เพิ่งได้ถูกเล็งเห็นเมื่อเริ่มมีแนวคิดที่จะนำเอากากนิวเคลียร์และของเสียทางเคมีไปทิ้งในชั้นหินที่อยู่ในระดับลึก ซึ่งหลังจากทิ้งแล้วจะต้องมีการออกแบบและก่อสร้างการอุดหลุมหรืออุโมงค์เหล่านี้เพื่อป้องกันไม่ให้มีการรั่วซึมออกมาสู่ระบบน้ำบาดาล ดังนั้นขบวนการและวัสดุที่ใช้ในการอุดจึงมีความสำคัญมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเชิงกลศาสตร์ ชลศาสตร์ และเคมี

ในช่วง 20 ปีที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการอุดหลุมเจาะทั้งในห้องปฏิบัติการและในภาคสนาม ซึ่งส่วนใหญ่จะเน้นไปที่คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการอุดและผลกระทบในประเด็นต่างๆ ที่อาจจะทำให้การอุดไม่เป็นไปตามเป้าหมายที่วางไว้ ยกตัวอย่างเช่น Akgun and Daemen (1994) ได้ศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการต้านแรงเฉือนของซีเมนต์ที่ใช้อุดหลุมเจาะ Daemen and Fuenkajorn (1996) ได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการออกแบบในการอุดหลุมเจาะและอุโมงค์ในชั้นหิน และ Fuenkajorn and Daemen (1996, 1997) ได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการออกแบบวัสดุที่ใช้ในการอุดเหมืองใต้ดิน ประเด็นทางด้านวิชาการที่ต้องนำมาพิจารณาในการอุดโพรงใต้ดินที่ใช้ในการกักเก็บกากนิวเคลียร์ได้สรุปไว้โดย Fuenkajorn (1996) ผลกระทบและปัจจัยต่างๆ ทางด้านวิศวกรรมธรณีและอุทกธรณีที่มีต่อพฤติกรรมของวัสดุที่ใช้ในการอุดได้ศึกษาในห้องปฏิบัติการและในภาคสนามโดย Fuenkajorn and Daemen (1984, 1986, 1987, 1988, 1991, 1992) ในปี ค.ศ. 1996 Prof. Daemen และ Fuenkajorn ได้ร่างหนังสือเพื่อรวบรวมข้อมูลและหลักการทางวิชาการทั้งหมด (Fuenkajorn and Daemen, 1996) เพื่อให้องค์ความรู้นี้แพร่หลายออกไปในวงกว้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในยุโรปและอเมริกา และเพื่อให้วิศวกรและนักวิทยาศาสตร์ในแขนงที่เกี่ยวข้องได้นำเอาองค์ความรู้นี้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

การที่จะอุดหลุมเจาะได้อย่างมีประสิทธิภาพและสัมฤทธิ์ผลจะต้องคำนึงถึงองค์ความรู้หลัก 3 ประการ คือ เสถียรภาพเชิงกลศาสตร์ ประสิทธิภาพต่อการต้านทานความซึมผ่าน และเสถียรภาพทางเคมีในระยะยาว การอุดหลุมเจาะในชั้นหินในอดีตและปัจจุบันส่วนใหญ่มไม่ได้คำนึงถึงองค์ประกอบพื้นฐานเหล่านี้อย่างครอบคลุมจึงทำให้เกิดการรั่วซึมและไม่สัมฤทธิ์ผลดังที่ตั้งจุดประสงค์ไว้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ 1) ศึกษาศักยภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อนำมาประยุกต์ใช้อุดหลุมเจาะในชั้นเกลือหินที่ถูกขุดเจาะเป็นโพรงหรืออุโมงค์สำหรับเป็นแหล่งทิ้งกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมที่ไม่สามารถบำบัดหรือนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และ 2) ออกแบบและเลือกสรรวัสดุที่เหมาะสม รวมทั้งค้นหาวิธีการเฉพาะสำหรับการอุดหลุมเจาะในชั้นเกลือหิน

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1) ศึกษาประสิทธิภาพการอุดด้วยปูนซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการอุดหลุมเจาะในชั้นเกลือหินสำหรับกักเก็บกากของเสียในภาคอุตสาหกรรม
2) ทดสอบกำลังยึดติดสูงสุดด้วยการเตรียมตัวอย่างเป็นรูปทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 6 นิ้ว พร้อมเจาะรูเพื่อติดตั้งแท่งซีเมนต์
3) ทดสอบการเคลื่อนไหลภายใต้แรงเฉือนด้วยการใช้ตัวอย่างเกลือหินที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดไม่น้อยกว่า 4×4 ตารางนิ้ว
4) ความเค้นตั้งฉาก (normal stress) ที่ให้แก่ตัวอย่างหินมีค่าสูงสุดไม่เกิน 1,000 psi และต่ำสุดไม่น้อยกว่า 50 psi
5) การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของปูนซีเมนต์จะทำตามมาตรฐาน ASTM
6) ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ASTM C150)
7) งานวิจัยนี้ไม่รวมไปถึงการอุดหลุมเจาะที่อุณหภูมิสูง และการอุดอุโมงค์หรือเหมืองใต้ดิน
8) การผสมและระยะเวลาการบ่มตัวของปูนซีเมนต์จะดำเนินการตามมาตรฐาน API และมาตรฐาน ASTM

1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

การอุดหลุมเจาะ (borehole sealing) ในชั้นหินสามารถประยุกต์ใช้ในงานด้านวิศวกรรมธรณี เทคโนโลยีน้ำบาดาล เทคโนโลยีปิโตรเลียม วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และวิศวกรรมเหมืองแร่ ซึ่งหลุมเจาะในที่นี้หมายถึง หลุมเจาะสำรวจหรือหลุมเจาะเพื่อผลิตทางด้านน้ำบาดาล เหมืองแร่ น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ฯลฯ ซึ่งวิธีการอุดหลุมเจาะจำพวกนี้ในขณะที่กำลังดำเนินการอยู่หรือหลังจากเลิกใช้งานแล้วยังไม่เป็นระบบและไม่ถูกต้องตามหลักวิชาการ ทำให้เกิดการรั่วซึมหรือปนเปื้อนในชั้นน้ำบาดาล ถึงแม้ว่าเทคโนโลยีทางด้านการอุดหลุมเจาะจะมีมานานแล้วโดยเฉพาะในชั้นดินและต่อมาได้พัฒนามาใช้ในชั้นหินแต่ก็ไม่ได้หมายความว่าหลุมเจาะที่ถูกอุดไปแล้วจะมีสภาพคงทนยาวนานทัดเทียมเท่ากับหินข้างเคียงที่มี

อยู่ตามธรรมชาติ การอุดหลุมเจาะที่เลิกใช้งานแล้วและหลุมเจาะที่กำลังใช้งานอยู่ทั้งในและต่างประเทศพบว่ามากกว่าร้อยละ 30 เกิดการรั่วซึมและบางหลุมถึงขั้นใช้งานไม่ได้เลย ดังนั้นการศึกษาประสิทธิภาพของซีเมนต์ในการอุดหลุมเจาะในชั้นเกลือหินจึงเป็นสิ่งสำคัญประการแรกที่ควรนำมาพิจารณาในการออกแบบโพรงกักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรม

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์พื้นฐานของปูนซีเมนต์เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการเลือกใช้ปูนซีเมนต์ในการอุดหลุมเจาะ และได้ทดสอบประสิทธิภาพในการอุดด้วยการนำแท่งตัวอย่างเกลือหินมาเจาะทะลุก่อนอัดซีเมนต์เข้าไปในรูเจาะ การทดสอบกำลังยึดติดสูงสุดระหว่างซีเมนต์และเกลือหินได้ดำเนินการทดสอบทั้งในรูปแบบของการรับแรงผลักสูงสุด (push-out test) และทดสอบการเคลื่อนไหลภายใต้แรงเฉือนระหว่างซีเมนต์และเกลือหินภายใต้สภาวะค่าความเค้นตั้งฉากต่างๆ ตามกาลเวลา

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจะรวมไปถึงทฤษฎีและขั้นตอนต่างๆ ที่ใช้ในการอุดหลุมเจาะในชั้นหิน การเลือกใช้วัสดุสำหรับอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรม รวมไปถึงข้อกำหนดสำหรับการอุดหลุมเจาะ และการศึกษาวิจัยการอุดหลุมเจาะในอดีตที่ดำเนินการมาแล้วทั้งในและต่างประเทศ ผลการทบทวนวรรณกรรมวิจัยทั้งหมดรวมทั้งรายการเอกสารอ้างอิงจะถูกสรุปไว้ในรายงานวิจัยฉบับนี้

ขั้นตอนที่ 2 การจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหิน

ตัวอย่างเกลือหินได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เกลือพิมาย จำกัด ถูกจัดเตรียมให้ได้รูปร่างและขนาดที่ต้องการทดสอบตามมาตรฐาน สำหรับการทดสอบกำลังยึดติดสูงสุดได้เตรียมตัวอย่างเป็นรูปทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 4 นิ้ว พร้อมเจาะรูเพื่อติดตั้งแท่งซีเมนต์ ส่วนการทดสอบการเคลื่อนไหลภายใต้แรงเฉือนระหว่างเกลือหินกับซีเมนต์ได้ใช้ตัวอย่างเกลือหินที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดไม่น้อยกว่า 4×4 ตารางนิ้ว จำนวน 4 ตัวอย่าง

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบในห้องปฏิบัติการแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติพื้นฐานของซีเมนต์ และการทดสอบกำลังยึดติดในการอุดหลุมเจาะระหว่างซีเมนต์และเกลือหิน

การทดสอบโดยใช้แท่งซีเมนต์ประกอบด้วยการทดสอบหากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวและการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลด้วยการใช้แท่งซีเมนต์ทรงกระบอกที่ถูกบ่ม 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM การทดสอบกำลังยึดติดสูงสุดระหว่างซีเมนต์และเกลือหินได้ดำเนินการทดสอบทั้งในรูปแบบของการรับแรงผลักสูงสุด (ทดสอบ 4 ตัวอย่าง) และทดสอบการเคลื่อนไหลภายใต้แรงเฉือนระหว่างซีเมนต์และเกลือหินภายใต้สภาวะค่าความเค้นตั้งฉากที่ผันแปรอย่างน้อย 3 ค่า แต่ละความเค้นตั้งฉากได้ใช้ตัวอย่างหินในการทดสอบรวม 4 ตัวอย่าง (รวมทั้งสิ้น 8 ตัวอย่าง)

ขั้นตอนที่ 4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการได้ถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ทางด้านประสิทธิภาพของซีเมนต์ที่จะให้กำลังสูงสุดในการอุดหลุมเจาะ และวิเคราะห์การเคลื่อนไหลระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ ซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาเป็นกฎเกณฑ์ในขั้นต่อไป

ขั้นตอนที่ 5 การพัฒนากฎเกณฑ์การเคลื่อนไหลในรอยเฉือน

จากผลการทดสอบการเคลื่อนไหลของเกลือหินภายใต้แรงเฉือนตามกาลเวลา สามารถพัฒนาเป็นกฎเกณฑ์สำหรับการเคลื่อนไหล เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการคาดคะเนการเคลื่อนตัวของเกลือหินที่อยู่ภายใต้สภาวะจริงแบบแรงเฉือนได้

ขั้นตอนที่ 6 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิด ขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุปได้นำเสนอโดยละเอียดในรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ เพื่อที่จะส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ และตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลงานวิจัยที่เสนอมานี้มีประโยชน์อย่างมากกับงานด้านธรณีวิทยา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมแหล่งน้ำ และวิศวกรรมธรณี ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

1) ตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารระดับนานาชาติ
2) เผยแพร่องค์ความรู้ให้กับหน่วยงานที่เกี่ยวทั้งภาครัฐและเอกชน
3) สร้างนักวิจัยระดับ postdoctoral อย่างน้อย 1 คน
4) สร้างนักวิจัยระดับ postgraduate อย่างน้อย 1 คน

1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยที่เสนอมานี้จะมีประโยชน์อย่างมากและโดยตรงกับหลายหน่วยงาน ทั้งภาครัฐและเอกชน สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ และวิศวกรรมธรณี รวมไปถึงหน่วยงานที่ทำงานเกี่ยวข้องกับการก่อสร้างในชั้นหิน เช่น การสร้างเขื่อน การสร้างอุโมงค์ เหมืองแร่บนดินและใต้ดิน หน่วยงานเหล่านี้ได้แก่

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

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็นหลายประเด็น ประกอบด้วย การอุดหลุมเจาะในชั้นหิน ประเภทของการอุดหลุมเจาะ จุดมุ่งหมายในการอุดหลุมเจาะ วัสดุที่ใช้ในการอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรม ข้อกำหนดสำหรับการอุดหลุมเจาะในประเทศไทย ข้อกำหนดสำหรับการอุดหลุมเจาะในประเทศสหรัฐอเมริกา และการศึกษาวิจัยในการอุดหลุมเจาะ

2.1 การอุดหลุมเจาะในชั้นหิน

หลุมเจาะในชั้นหินเป็นหลุมที่เจาะขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์หลายประเภท Smith (1990) แบ่งหลุมเจาะตามวัตถุประสงค์ในการเจาะออกเป็น 9 ประเภท คือ 1) หลุมเจาะในภาคอุตสาหกรรมที่สามารถประยุกต์ใช้ได้อย่างหลากหลาย 2) หลุมเจาะสำหรับทิ้งของเสีย 3) หลุมเจาะสำหรับผลิตน้ำมันและก๊าซธรรมชาติ 4) หลุมเจาะสำหรับระบายน้ำในเหมือง 5) หลุมเจาะสำหรับการทดสอบ 6) หลุมเจาะสำหรับตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือน 7) หลุมเจาะที่ใช้สำหรับการสำรวจ 8) หลุมเจาะในการทำเหมืองแบบละลาย และ 9) หลุมเจาะที่ใช้ตรวจวัดคุณสมบัติทางกายภาพของชั้นหิน

2.2 ประเภทของการอุดหลุมเจาะ

การอุดหลุมเจาะในชั้นหินในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ สามารถจำแนกตามวัตถุประสงค์ที่ทำการอุด โดย Gray and Gray (1992) ได้จำแนกการอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ 1) การอุดแบบถาวร (permanent) 2) การอุดแบบชั่วคราว (temporary) 3) การอุดแบบกึ่งถาวร (semi–permanent) Smith (1994) แบ่งประเภทของการอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรมน้ำบาดาลออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ 1) การอุดแบบชั่วคราว (temporary sealing) 2) การอุดในหลุมเจาะที่ใช้งานอยู่ (sealing actively used borehole) และ 3) การอุดแบบถาวร (sealing for permanent) Fuenkajorn and Daemen (1996) แบ่งประเภทของการอุดหลุมเจาะในชั้นหินในอุตสาหกรรมทุกประเภทออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ 1) การอุดหลุมเจาะที่ยังมีการใช้งานอยู่ (sealing actively used boreholes) 2) การอุดหลุมเจาะที่เลิกใช้งานแล้ว (sealing unused boreholes)

2.3 จุดมุ่งหมายของการอุดหลุมเจาะ

จุดมุ่งหมายของการอุดหลุมเจาะสามารถจำแนกตามลักษณะการใช้งานเป็น 2 แบบ คือ การอุดหลุมเจาะแบบชั่วคราว และการอุดหลุมเจาะแบบถาวร

2.3.1 การอุดหลุมเจาะแบบชั่วคราว เป็นการอุดหลุมเจาะที่ยังมีการใช้งานอยู่ โดยอุดบริเวณช่องระหว่างท่อกรุ (casing) กับชั้นหินข้างเคียง หรือเป็นการอุดหลุมเจาะที่จะนำมาใช้ในอนาคต วัตถุประสงค์ในการอุดหลุมเจาะแบบชั่วคราว (Smith, 1990) คือ

1) ป้องกันท่อกรุจากการถูกกัดกร่อน
2) ป้องกันการพังทลายของท่อกรุในระดับลึก เนื่องจากแรงดันด้านข้าง
3) ป้องกันการพังทลายของหลุมเจาะจากแรงดันด้านข้าง
4) ป้องกันการสูญเสียน้ำโคลนในการเจาะบริเวณที่เกิด Lost circulation

2.3.2 การอุดหลุมเจาะแบบถาวร เป็นการอุดหลุมเจาะที่เลิกใช้แล้ว ซึ่งประเด็นหลักที่ต้องคำนึงถึงในการอุดหลุมเจาะประเภทนี้ก็คือสิ่งแวดล้อม ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการอุดหลุมเจาะแบบถาวร (Smith, 1993; McGinty and Calvert, 1991; Tyler, 1991; Nye, 1991) คือ

1) ป้องกันการปนเปื้อนของชั้นน้ำบาดาลจากแหล่งปนเปื้อนผิวดินและแหล่งปนเปื้อนที่กักเก็บไว้ใต้ดิน
2) ป้องกันการลดลงของแรงดันน้ำใต้ดิน
3) ป้องกันการปนเปื้อนของชั้นน้ำบาดาลจากชั้นน้ำเสีย
4) ป้องกันภัยเนื่องจากคนหรือสัตว์พลัดตกลงไปในหลุมเจาะ

2.4 วัสดุที่ใช้ในการอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรม

การอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ มีปัจจัยสำคัญที่จะทำให้การอุดบรรลุตามจุดมุ่งหมาย คือการเลือกใช้วัสดุสำหรับอุดหลุมเจาะ ซึ่งมีหลายชนิดให้เลือกใช้ขึ้นอยู่กับจุดมุ่งหมายในการอุดหลุมเจาะและปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องรวมไปถึงด้านเศรษฐศาสตร์ รายละเอียดเกี่ยวกับวัสดุสำหรับอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม อุตสาหกรรมน้ำบาดาล อุตสาหกรรมเหมืองแร่และการทิ้งขยะนิวเคลียร์ ได้อธิบายไว้ดังนี้

2.4.1 วัสดุที่ใช้ในการอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม

อุตสาหกรรมปิโตรเลียมเป็นอุตสาหกรรมประเภทหนึ่งที่มีการวิจัยและพัฒนาวัสดุสำหรับอุดหลุมเจาะเพื่อให้ได้มาซึ่งวัสดุที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุดอย่างต่อเนื่อง วัสดุอุดหลุมเจาะที่ใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมสามารถสรุปโดยสังเขปได้ดังนี้

1) น้ำโคลน (drilling fluid) น้ำโคลนเป็นวัสดุอุดที่หาได้ง่ายและมีราคาถูก มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับอุดบริเวณที่ไม่สามารถทำให้แห้งได้ (ไม่สามารถใช้ซีเมนต์ได้) แต่การอุดด้วยน้ำโคลนต้องมีซีเมนต์อุดปิดบริเวณหัวและท้าย (Smith, 1993)

2) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (portland cement) เป็นวัสดุอุดที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย ราคาไม่แพง และมีคุณสมบัติที่เหมาะสมทั้งทางด้านกลศาสตร์และชลศาสตร์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 5 ประเภท จากการแบ่งโดยสมาคมทดสอบวัสดุอเมริกัน (American society for testing and materials, C150, standard for portland cement) และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ 8 ประเภท จากการแบ่งประเภทโดย American petroleum institute (API) (Smith, 1993) สมาคมทดสอบวัสดุอเมริกัน (ASTM) แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไป ออกเป็น 5 ประเภท (Neville, 1981) ประกอบด้วย

ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดธรรมดาใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป เช่น ทำผิวถนน สะพาน ท่อระบายน้ำ ปูนซีเมนต์ชนิดนี้มีข้อเสียคือไม่ทนต่อสารที่เป็นด่าง

ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลงชนิดให้ความร้อนและทนด่างได้ปานกลาง เหมาะสำหรับงานก่อสร้างเขื่อนคอนกรีต กำแพงดินหนาๆ และงานสร้างตอม่อขนาดใหญ่ในบริเวณที่อากาศร้อนจัด

ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดแข็งเร็วหรือซุปเปอร์ซีเมนต์ เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังสูงในระยะแรก มีเนื้อผงละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดธรรมดา เกิดรอยร้าวได้ง่ายกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดธรรมดา เหมาะสำหรับงานที่ต้องการถอดไม้แบบเร็ว เช่น เสาเข็มคอนกรีต ถนน พื้นและคานที่ต้องถอดแบบเร็ว

ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ เป็นปูนซีเมนต์ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่นขณะแข็งตัว เหมาะสำหรับงานก่อสร้างใหญ่ๆ โดยเฉพาะงานก่อสร้างเขื่อน

ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตได้สูง เหมาะสำหรับใช้กันโครงสร้างที่อยู่ในที่มีการกระทำของซัลเฟตรุนแรง เช่น น้ำหรือดินที่มีความเป็นด่างสูง แต่ปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะแข็งตัวช้ากว่าประเภทที่ 1

สำหรับงานทางด้านอุตสาหกรรมปิโตรเลียม (API) ได้แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จากความเหมาะสมของการใช้งานในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมออกเป็น 8 ประเภท (Smith, 1990) ประกอบด้วย

Class A เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดธรรมดา ใช้อุดหลุมเจาะที่มีความลึกไม่เกิน 6,000 ฟุต (1,830 เมตร) มีคุณสมบัติเหมือนกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานสมาคมวัสดุอเมริกัน

Class B เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ทนซัลเฟตได้ปานกลางถึงสูง ใช้อุดหลุมเจาะที่มีความลึกไม่เกิน 6,000 ฟุต (1,830 เมตร) มีคุณสมบัติเหมือนกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2 ตามมาตรฐานสมาคมวัสดุอเมริกัน

Class C เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ให้กำลังสูงในระยะแรก สามารถใช้ได้ทั้งกับสภาวะที่ไม่มีซัลเฟต มีปริมาณซัลเฟตปานกลางหรือมีปริมาณซัลเฟตสูง และใช้อุดหลุมเจาะที่มีความลึกไม่เกิน 6,000 ฟุต (1,830 เมตร) มีคุณสมบัติเหมือนกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ตามมาตรฐานสมาคมวัสดุอเมริกัน

Class D เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้อุดหลุมเจาะที่มีความลึก 6,000–10,000 ฟุต (3,050–4,270 เมตร) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันที่สูง และสามารถใช้ได้กับสภาวะที่มีปริมาณซัลเฟตปานกลางหรือสูง

Class E เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้อุดหลุมเจาะที่มีความลึก 10,000–14,000 ฟุต (1,830–3,050 เมตร) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันที่ค่อนข้างสูง และสามารถใช้ได้กับสภาวะที่มีปริมาณซัลเฟตปานกลางหรือสูง

Class F เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้อุดหลุมเจาะที่มีความลึก 10,000–16,000 ฟุต (1,830–4,880 เมตร) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันที่สูงมาก และสามารถใช้ได้กับสภาวะที่มีปริมาณซัลเฟต ปานกลางหรือสูง

Class G และ Class H เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้อุดหลุมเจาะที่มีความลึกไม่เกิน 8,000 ฟุต (2,424 เมตร) สามารถผสมสารที่เป็นตัวเร่งหรือสารที่เป็นตัวหน่วงนอกเหนือจากแคลเซียมซัลเฟตหรือน้ำ เพื่อให้สามารถใช้ในการอุดหลุมเจาะได้ครอบคลุมตลอดทั้งความลึกของหลุมเจาะและในขั้นตอนการผลิต ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Class G และ Class H จะมีการผสมหินละลายจากเตาหลอมหรือภูเขาไฟลงไปด้วย สามารถใช้ได้กับสภาวะที่มีปริมาณซัลเฟตปานกลางหรือสูง

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้เป็นวัสดุในการอุดหลุมเจาะจะอยู่ในรูปของปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำสะอาด ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำสะอาดและผสมสารที่เป็นตัวเร่งหรือตัวหน่วง ปูนซีเมนต์ผสมทรายและคอนกรีต (Smith, 1993)

ปูนซีเมนต์ผสมน้ำสะอาด (neat cement) โดยทั่วไปจะมีอัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ คือ ปูนซีเมนต์ 1 ถุง (94 ปอนด์) ต่อน้ำ 5–6 แกลลอน

ปูนซีเมนต์ผสมน้ำสะอาดและผสมสารที่เป็นตัวเร่งหรือสารที่เป็นตัวหน่วง สารที่เป็นตัวเร่งผสมลงไปเพื่อเพิ่มกำลังในระยะแรกและลดระยะเวลาการก่อตัว สารที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งที่ใช้โดยทั่วไปได้แก่ แคลเซียมคลอไรด์ โดยผสมลงไป 2–4% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ส่วนสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวหน่วงใช้ผสมลงไปในซีเมนต์เพื่อลดน้ำหนักของซีเมนต์ และเพื่อควบคุมการสูญหายไปของซีเมนต์ในชั้นหินที่มีการรั่วไหลของน้ำโคลน โดยทั่วไปแล้วสารที่เป็นตัวหน่วงจะผสมเฉพาะในซีเมนต์ที่จะใช้อุดในหลุมเจาะแบบชั่วคราวเท่านั้น จะไม่ใช้ผสมในปูนซีเมนต์ที่จะนำไปใช้อุดหลุมเจาะแบบถาวร

ปูนซีเมนต์ผสมทราย (sand cement) โดยทั่วไปจะใช้ทราย 20–40% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ผสมกับปูนซีเมนต์ 1 ถุง (94 ปอนด์) และน้ำประมาณ 7 แกลลอน

คอนกรีต (concrete) เป็นวัสดุผสมระหว่างปูนซีเมนต์กับหินคลุกหรือกรวด ใช้สำหรับอุดในหลุมเจาะที่มีขนาดใหญ่ คอนกรีตที่นิยมใช้สำหรับอุตสาหกรรมปิโตรเลียมจะประกอบด้วยปูนซีเมนต์ 5 ถุง (94 ปอนด์) ผสมกับหินคลุกหรือกรวดที่มีขนาดสม่ำเสมอ 3/8 นิ้ว ปริมาตร 1 ลูกบาศก์หลา

3) ปูนซีเมนต์ชนิดพิเศษ ที่ใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม (Economides et al., 1998) ประกอบด้วย

(1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานา (portland pozzolana cement) เป็นปูนซีเมนต์ชนิดที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาผสมกับสารจำพวกปอซโซลานิก (pozzolanic) โดยผสมลงไป 15–50% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ดังนั้นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานาจึงมีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป มีคุณสมบัติที่ขยายตัวน้อย มีความทึบน้ำสูง และให้ความร้อนในการรวมตัวกับน้ำต่ำเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา

(2) Ultrafine cement เป็นปูนซีเมนต์ที่มีขนาดเม็ดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ultrafine cement มีขนาดเม็ดเฉลี่ย 2 ไมโครเมตร แต่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีขนาดเม็ดเฉลี่ย 50–100 ไมโครเมตร ultrafine cement เป็นวัสดุที่เหมาะสำหรับอุดหลุมเจาะแบบชั่วคราวเนื่องจากมีมวลเบาและให้

กำลังสูงในระยะแรก ส่วน ultrafine cement เหมาะสำหรับอุดในบริเวณที่มีรอยแตกขนาดเล็กเนื่องจากขนาดเม็ดที่เล็กสามารถแทรกเข้าไปอุดรอยแตกได้ง่าย

(3) Epoxy cement เป็นซีเมนต์ชนิดพิเศษ สามารถใช้ได้ดีในสภาวะที่เป็นกรด ซึ่งซีเมนต์ทั่วไปจะแข็งตัวช้าในสภาวะที่เป็นกรด จึงทำให้ Epoxy cement มีราคาแพงกว่าซีเมนต์ทั่วไป

2.4.2 วัสดุที่ใช้ในการอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรมน้ำบาดาล

อุตสาหกรรมน้ำบาดาลเป็นอีกอุตสาหกรรมหนึ่งที่ใช้วัสดุในการอุดหลุมเจาะหลากหลายประเภท โดย Smith (1993) แนะนำให้ใช้นีทซีเมนต์ (neat cement) ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ผสมกับทราย ปูนซีเมนต์ผสมกับเบนทอไนต์ คอนกรีต และเบนทอไนต์แบบเม็ด ส่วน Mcginty and Calvert (1991) แนะนำให้ใช้ยิปซัมซีเมนต์ (gypsum cement) ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ คอนกรีต ปูนซีเมนต์น้ำน้อย และปูนซีเมนต์แบบต้องอัด (regulated fill-up cement) Nye (1991) แนะนำให้ใช้ปูนซีเมนต์ คอนกรีต และน้ำโคลน

วัสดุที่ใช้อุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรมน้ำบาดาลตามกฎหมายของสหรัฐอเมริกาตามที่แนะนำโดย Smith (1993) ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ผสมทราย ปูนซีเมนต์ผสมเบนทอไนต์ คอนกรีต และเบนทอไนต์แบบเม็ด ซึ่งสามารถสรุปโดยสังเขปได้ดังนี้

1) ปูนซีเมนต์ หมายถึงการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับน้ำ โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 1 ถุงต่อน้ำ 5-6 แกลลอน

2) ปูนซีเมนต์ผสมกับทราย ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับน้ำและทราย โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 1 ถุงต่อน้ำ 5-6 แกลลอน อัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1 ต่อ 2

3) ปูนซีเมนต์ผสมกับเบนทอไนต์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับน้ำและเบนทอไนต์ โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 1 ถุงต่อน้ำ 5-6 แกลลอน ผสมกับเบนทอไนต์ 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ปริมาณของเบนทอไนต์ที่ใช้ผสมสามารถผสมได้ถึง 8 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าเพิ่มปริมาณเบนทอไนต์จะต้องเพิ่มปริมาณน้ำด้วย ในอัตราส่วนเพิ่มน้ำ 1 แกลลอนต่อเบนทอไนต์ 2 เปอร์เซ็นต์

4) คอนกรีต ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับน้ำและหินคลุก โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 1 ถุงต่อน้ำ 5-6 แกลลอน อัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ต่อหินคลุกเท่ากับ 1 ต่อ 2

5) เบนทอไนต์แบบเม็ด ถ้าใช้วิธีการเทจากปากหลุมเจาะจะสามารถใช้ได้ในระดับความลึกไม่เกิน 10 ฟุต

2.4.3 วัสดุที่ใช้ในการอุดหลุมเจาะในอุตสาหกรรมการขุดเจาะใต้ดิน

วัสดุที่ใช้ในอุตสาหกรรมการขุดเจาะใต้ดินทั่วไปคือคอนกรีต เช่น การอุดปล่องและช่องเหมืองแร่ การอุดอุโมงค์รถไฟ แบบชั่วคราว ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ (Auld, 1996)

1) คอนกรีตที่ใช้อุดปล่องแร่ มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ 400 กิโลกรัม ทราย 770 กิโลกรัม และหินคลุกมวลหยาบ 1050 กิโลกรัม

2) คอนกรีตที่ใช้ในการอุดอุโมงค์รถไฟแบบชั่วคราวมีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ 500 กิโลกรัม ทราย 595 กิโลกรัม และหินคลุกมวลหยาบ 1,150 กิโลกรัม

2.4.4 วัสดุที่ใช้ในการอุดหลุมเจาะในการทิ้งกากนิวเคลียร์

การเลือกใช้วัสดุสำหรับอุดหลุมเจาะในการทิ้งกากนิวเคลียร์ควรพิจารณาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ เชิงชลศาสตร์ และเชิงเคมี ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่ง วัสดุที่ใช้สำหรับอุดหลุมเจาะในการทิ้งกากนิวเคลียร์ ประกอบด้วย

1) เบนทอไนต์อัดตัว เป็นวัสดุชนิดแรกๆ ที่ใช้อุดหลุมเจาะสำหรับทิ้งกากนิวเคลียร์ เนื่องจากเบนทอไนต์เป็นวัสดุที่มีค่าความซึมผ่านต่ำและมีคุณสมบัติทั้งทางด้านกายภาพและเคมีที่ใกล้เคียงกับหินทุกชนิดและมีคุณสมบัติด้านการบวมตัวซึ่งให้ความเค้นในแนวรัศมีสูงถึง 2.6 MPa เบนทอไนต์ที่ใช้ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของเบนทอไนต์อัดตัว โดยการผสมเบนทอไนต์กับน้ำสะอาดหรือน้ำเค็มในอัตราส่วนที่เหมาะสม เบนทอไนต์อัดตัวนี้จะมีคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์และชลศาสตร์เพียงพอที่จะทำให้การอุดมีประสิทธิภาพสูงสุด (Ranet al., 1997; Fuenkajorn and Daemen, 1987)

2) ปูนซีเมนต์ เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติครบทั้งในเชิงกลศาสตร์ เชิงชลศาสตร์ และเชิงเคมี เนื่องจากซีเมนต์มีความแข็งและมีการบวมตัวซึ่งให้ความเค้นในแนวรัศมีประมาณ 4 MPa (Fuenkajorn and Daemen, 1987)

2.5 ข้อกำหนดสำหรับการอุดหลุมเจาะในประเทศไทย

2.5.1 การอุดกลบบ่อในอุตสาหกรรมน้ำบาดาล

การอุดกลบบ่อน้ำบาดาลที่เลิกใช้แล้ว ตาม พ.ร.บ. น้ำบาดาล พ.ศ. 2520 กำหนดให้ใช้ดินเหนียวบริสุทธิ์หรือซีเมนต์เป็นวัสดุในการอุดกลบเท่านั้น

การอุดกลบบ่อด้วยดินเหนียว ใช้ดินเหนียวบริสุทธิ์จากสวนหรือท้องนา นวดให้เข้ากันแล้วปั้นเป็นลูกกลมๆ ขนาดประมาณลูกปิงปอง ผึ่งแดดให้แห้งหรือหมาด แล้วใส่ลงในบ่ออย่างต่อเนื่องตลอดเวลา เพื่อป้องกันการติดค้างบางช่วงของบ่อ แต่ถ้าหากมีการติดค้างของดินเหนียวในบ่อ ห้ามใช้ท่อหรือวัสดุอื่นใดกระทุ้งหรือแหย่ลงไปในบ่อ ให้ใช้น้ำจืดสะอาดกรอกลงไปเป็นจังหวะๆ และต่อเนื่อง จนกว่าลูกดินที่ติดค้างอยู่จะหลุดออกจากกันและเลื่อนลงสู่ก้นบ่อ ใน

การนำลูกดินใส่บ่อนี้จะต้องตวงด้วยภาชนะที่ทราบปริมาตรแน่นอนและจดบันทึกไว้ เพื่อตรวจสอบว่าปริมาณดินเหนียวที่ใส่ลงไปนั้นเต็มปริมาตรภายในของบ่อ

การอุดกลบบ่อด้วยซีเมนต์ ให้ผสมซีเมนต์ด้วยเครื่องผสมซีเมนต์ในอัตราส่วนน้ำ 30 ลิตร ต่อซีเมนต์ 1 ถุง (50 กก.) อัดซีเมนต์ลงในบ่อด้วยเครื่องสูบอัดซีเมนต์ที่สามารถอัดซีเมนต์ได้ภายใต้ความดันไม่น้อยกว่า 50 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ในอัตราไม่น้อยกว่า 50 แกลลอนต่อนาที การอัดซีเมนต์ให้อัดผ่านทางท่อที่ต่อลงไปจนเกือบสุดความลึกของบ่อ และอัดเป็นช่วงๆ ช่วงละประมาณ 30 เมตร จนกระทั่งซีเมนต์เต็มบ่อ หากมีการยุบตัวของซีเมนต์ให้เติมซีเมนต์ลงไปอีกจนกว่าซีเมนต์จะหยุดการยุบตัว

2.5.2 การอุดกลบบ่อในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม

ข้อกำหนดเกี่ยวกับการอุดกลบบ่อในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมในประเทศไทยได้บรรจุไว้ในกฎกระทรวงฉบับที่ 5 (พ.ศ. 2514) แก้ไขเพิ่มเติมโดยกฎกระทรวงฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2524) โดยข้อกำหนดเกี่ยวกับการสละหลุมบรรจุอยู่ในกฎกระทรวงข้อที่ 39 และข้อกำหนดเกี่ยวกับการปฏิบัติหลังจากละทิ้งหรือสิ้นสุดการปฏิบัติงานบรรจุอยู่ในกฎกระทรวงข้อที่ 40

กฎกระทรวงข้อที่ 39 กำหนดว่า ก่อนดำเนินการสละหลุมผลิต ผู้รับสัมปทานต้องแจ้งเหตุผลและวิธีการที่จะสละหลุมผลิตเป็นหนังสือให้อธิบดีพิจารณา เมื่อได้รับอนุมัติแล้วจึงจะดำเนินการสละหลุมผลิตได้ กฎกระทรวงข้อที่ 40 กำหนดว่า เมื่อเสร็จสิ้นการปฏิบัติงานในที่ใดหรือเมื่อสัมปทานสิ้นอายุ หรือถูกเพิกถอน ผู้รับสัมปทานหรือผู้ซึ่งสัมปทานสิ้นอายุหรือถูกเพิกถอนต้องปฏิบัติดังนี้

ก) ทำพื้นดินและพื้นน้ำให้กลับมีสภาพเหมือนเดิมเท่าที่สามารถจะกระทำได้

ข) ทำกำแพงหรือรั้วล้อมรอบขุม หลุม ร่อง และบ่อที่ผู้รับสัมปทานขุดไว้และยังใช้ประโยชน์อยู่เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดอันตรายแก่บุคคลหรือสัตว์

ค) ถมขุม หลุม ร่องและบ่อที่ผู้รับสัมปทานขุดไว้แต่ไม่ใช้ประโยชน์ต่อไป ให้กลับมีสภาพเหมือนเดิมเท่าที่สามารถจะกระทำได้ เว้นแต่อธิบดีจะสั่งเป็นอย่างอื่นหรือผู้รับสัมปทานตกลงกับเจ้าของหรือผู้ครอบครองที่ดินนั้นแล้ว

ง) รื้อถอนฐานคอนกรีต โครงก่อสร้างและอาคารที่อยู่อาศัย นำเครื่องจักร อุปกรณ์ และวัสดุอื่นใดที่ไม่ใช้ประโยชน์ต่อไปแล้วออกจากบริเวณหลุมสำรวจหรือหลุมผลิตและเผาเศษปิโตรเลียมในบริเวณนั้นให้หมด ทั้งนี้เว้นแต่อธิบดีจะสั่งเป็นอย่างอื่น

จ) ขนย้ายหรือทำลายสิ่งที่กีดขวาง รบกวนหรือเป็นอันตรายต่อการคมนาคม การประมงหรือทรัพย์สินของแผ่นดินหรือบุคคลอื่น เว้นแต่อธิบดีจะสั่งเป็นอย่างอื่น

โดยที่ผู้รับสัมปทานหรือผู้ซึ่งสัมปทานสิ้นอายุหรือถูกเพิกถอนจะต้องกระทำการตามข้อกำหนดให้แล้วเสร็จภายในสามเดือน นับแต่วันที่เสร็จสิ้นการปฏิบัติงานหรือวันที่สัมปทานสิ้นอายุหรือถูกเพิกถอนแล้วแต่กรณี

ในส่วนกฎกระทรวงข้อที่ 40 ข้อย่อยที่ ค) เกี่ยวกับการถมขุม หลุม ร่องและบ่อที่ผู้รับสัมปทานขุดไว้แต่ไม่ใช้ประโยชน์ต่อไป ได้กำหนดรายละเอียดเกี่ยวกับการใช้วัสดุและวิธีการในอุดกลบบ่อไว้ดังนี้

ก) ในกรณีที่หลุมเจาะเป็นหลุมเปลือย การอุดชั้นน้ำ ชั้นน้ำมันหรือชั้นก๊าซธรรมชาติเพื่อป้องกันการรั่วซึมและป้องกันการปนเปื้อน ให้ใช้ซีเมนต์อุดตั้งแต่ที่ระดับต่ำกว่าชั้นน้ำชั้น น้ำมันหรือชั้นก๊าซธรรมชาติเป็นระยะอย่างน้อย 50 เมตร อุดขึ้นมาจนถึงระดับที่อยู่เหนือชั้นน้ำเป็นระยะอย่างน้อย 50 เมตร

ข) การอุดบริเวณรอยต่อระหว่างปลายท่อกรุ (Casing shoe) กับหลุมเปลือย สามารถเลือกวิธีการอุดได้ 2 วิธี คือ
   - ใช้ซีเมนต์อุดตั้งแต่ที่ระดับต่ำกว่ารอยต่อเป็นระยะอย่างน้อย 50 เมตร อุดขึ้นมาจนถึงระดับที่อยู่เหนือรอยต่อเป็นระยะอย่างน้อย 50 เมตร
   - ใช้ลูกยาง (Mechanical Plug) อุดที่ปลายท่อกรุแล้วใช้ซีเมนต์ที่มีความหนาอย่างน้อย 20 เมตร อุดปิดทับบนลูกยาง

ค) การอุดปิดส่วนที่เป็น Squeezed cement ในท่อกรุ สามารถเลือกวิธีการอุดได้ 2 วิธี คือ
   - ใช้ลูกยางอุดเหนือส่วนที่เป็น Squeezed cement ทุกส่วนในท่อกรุ
   - ใช้ซีเมนต์อุดตั้งแต่ที่ระดับต่ำกว่าส่วนที่เป็น Squeezed cement เป็นระยะอย่างน้อย 50 เมตร อุดขึ้นมาจนถึงระดับที่อยู่เหนือส่วนที่เป็น Squeezed cement เป็นระยะอย่างน้อย 50 เมตร
   - ใช้ซีเมนต์อุดลักษณะเดียวกันในทุกส่วนที่เป็น Squeezed cement ในท่อกรุ

ง) การอุดบริเวณรอยต่อระหว่างท่อกรุกับท่อกรุ ใช้ลูกยางอุดส่วนที่เป็นช่องว่างลักษณะวงแหวน (ท่อกรุท่อนที่อยู่ด้านบนมีขนาดใหญ่กว่า) แล้วใช้ซีเมนต์อุดตั้งแต่ที่ระดับต่ำกว่ารอยต่อเป็นระยะอย่างน้อย 50 เมตร อุดขึ้นมาจนถึงระดับที่อยู่เหนือรอยต่อเป็นระยะอย่างน้อย 50 เมตร

จ) การอุดในช่องว่างระหว่างท่อกรุโดยท่อกรุท่อนที่อยู่ข้างในมีส่วนที่เป็น Squeezed cement ให้อุดในช่องว่างระหว่างท่อกรุด้วยซีเมนต์ โดยอุดตั้งแต่ที่ระดับต่ำกว่าส่วนที่เป็น Squeezed cement เป็นระยะอย่างน้อย 50 เมตร อุดขึ้นมาจนถึงระดับที่อยู่เหนือส่วนที่เป็น Squeezed cement เป็นระยะอย่างน้อย 50 เมตร

ฉ) การอุดปิดปากหลุม แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

- กรณีที่หลุมเจาะอยู่บนบก ให้อุดด้วยซีเมนต์มีความหนาไม่น้อยกว่า 200 เมตร อุดขึ้นมาจนถึงระดับปากหลุม
- กรณีที่หลุมเจาะอยู่ในทะเล ให้อุดด้วยซีเมนต์มีความหนาไม่น้อยกว่า 200 เมตร อุดขึ้นมาต่ำกว่าระดับปากหลุมไม่เกิน 50 เมตร

2.6 ข้อกำหนดสำหรับการอุดหลุมเจาะในประเทศสหรัฐอเมริกา

6.2.1 การอุดกลบบ่อในอุตสาหกรรมน้ำบาดาล

ข้อกำหนดและข้อแนะนำในการอุดกลบบ่อน้ำบาดาลที่เลิกใช้แล้วหรือการอุดหลุมเจาะแบบถาวร ที่ใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกาแนะนำโดย National American Water Works Association (National AWWA) ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึง 2 ส่วน คือ ข้อกำหนดและข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการอุดแบบถาวรในหลุมเจาะทดสอบ (test holes) หลุมเจาะที่ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ (uncomplete wells) และหลุมเจาะที่เลิกใช้แล้ว (complete wells) (ANSI/AWWA June 24, 1981) (Smith, 1993) ข้อกำหนดในการอุดกลบบ่อแบบถาวรเป็นข้อปฏิบัติที่เจ้าของบ่อจะต้องปฏิบัติตามเมื่อไม่ใช้ประโยชน์จากบ่อนั้นๆ ข้อกำหนดประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ 1) ข้อกำหนดทั่วไป 2) ข้อกำหนดเกี่ยวกับการอุดกลบ และ 3) ข้อกำหนดเกี่ยวกับการบันทึกรายงานวิธีการอุดกลบ โดยแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

1) ข้อกำหนดทั่วไปกำหนดไว้ว่า หลุมเจาะทดสอบ หลุมเจาะที่ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ และบ่อน้ำบาดาลที่เลิกใช้แล้วจะต้องทำการอุดกลบ เพื่อ

- ป้องกันอันตรายต่อชีวิตคนและสัตว์ที่อาจพลัดตกลงไปในหลุมหรือบ่อ
- ป้องกันการปนเปื้อนของน้ำบาดาล
- รักษาแรงดันน้ำในชั้นน้ำบาดาล
- ป้องกันการผสมกันระหว่างชั้นน้ำบาดาลกับชั้นน้ำเสีย

และการอุดกลบบ่อจะต้องให้มีสภาพใกล้เคียงกับลักษณะทางธรณีวิทยาเดิมก่อนทำการเจาะให้ใกล้เคียงที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้

2) ข้อกำหนดในการอุดกลบบ่อ ให้ปฏิบัติดังนี้

- ขนย้ายอุปกรณ์ที่ติดค้างอยู่ในบ่อออกให้หมด
- ในกรณีที่ไม่สามารถถอนหรือดึงอุปกรณ์ที่อยู่ในบ่อออกมาได้ให้ตัดให้เหลือชิ้นส่วนติดค้างให้น้อยที่สุด

- วัสดุที่ใช้อุดคือ ซีเมนต์คอนกรีตหรือดินเหนียว ส่วนวิธีการอุดให้อุดจากก้นบ่อขึ้นมาข้างบน

3) ข้อกำหนดเกี่ยวกับการบันทึกรายงานวิธีการอุดกลบ ในส่วนของรายงานจะต้องบันทึกอย่างละเอียดครบถ้วนให้สมบูรณ์ที่สุด สามารถใช้อ้างอิงได้ในอนาคตและจะต้องส่งมอบให้กับหน่วยงานของรัฐหรือหน่วยงานท้องถิ่นที่รับผิดชอบ เพื่อแสดงว่าได้มีการอุดกลบบ่ออย่างถูกต้องและสมบูรณ์เป็นที่เรียบร้อยแล้ว โดยรายละเอียดของรายงานประกอบด้วย

- ความลึกของตำแหน่งที่มีการอุด
- ปริมาณของวัสดุที่ใช้อุด
- ระดับน้ำบาดาล
- การเขียนรายงานจะต้องบันทึกทุกกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงหรือแก้ไขวิธีการในการอุดกลบ

ข้อเสนอแนะในการอุดกลบบ่อบาดาลที่มีชั้นหินในน้ำ (aquifer) ชนิดต่างๆ จะให้คำแนะนำเกี่ยวกับวัสดุและวิธีการในการอุดบ่อบาดาลที่มีชั้นหินให้น้ำที่แตกต่างกัน 5 ชนิด ประกอบด้วย 1) บ่อบาดาลที่มีชั้นหินให้น้ำเป็นชั้นกรวดทราย 2) บ่อบาดาลที่มีชั้นหินให้น้ำเป็นชั้นหินที่มีรอยแตก 3) บ่อบาดาลที่มีชั้นหินให้น้ำเป็นชั้นหินที่ไม่มีรอยแตก 4) บ่อบาดาลที่มีชั้นหินให้น้ำหลายๆ ชั้น 5) บ่อบาดาลที่เป็นบ่อน้ำพุ โดยแต่ละชนิดมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) บ่อบาดาลที่มีชั้นหินให้น้ำเป็นชั้นกรวดทราย (wells in unconsolidated formations) โดยทั่วไปแล้วชั้นน้ำกรวดทรายจะเป็นชั้นน้ำที่อยู่ใกล้ผิวดินไม่มีชั้นดินหรือชั้นหินอื่นปิดทับ ระดับน้ำที่อยู่ในชั้นน้ำชนิดนี้ก็คือระดับน้ำบาดาลที่วัดได้จากปากบ่อ วัสดุที่สามารถใช้อุดในชั้นนี้ได้คือ คอนกรีต ซีเมนต์ ดินเหนียว หรือดินเหนียวและทราย แต่ถ้าชั้นกรวดทรายนี้เป็นชั้นกรวดขนาดใหญ่และมีบ่อที่สูบน้ำจากชั้นนี้ขึ้นไปใช้อยู่ใกล้กับบ่อที่จะอุด การเลือกใช้วัสดุต้องใช้วัสดุที่ไม่มีผลกระทบต่อบ่อที่มีการใช้น้ำ วัสดุที่แนะนำคือ คอนกรีต หรือกรวดทรายสะอาดที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว ถ้าเลือกใช้ซีเมนต์จะต้องหยุดการสูบน้ำจากบ่อระยะหนึ่งจนกว่าซีเมนต์ที่อุดจะแข็งตัว ในส่วนบนสุดของบ่อจนถึงระดับผิวดินวัสดุที่สามารถใช้อุดได้คือ ดินเหนียว คอนกรีต หรือซีเมนต์ สำหรับบ่อที่มีขนาดใหญ่ดินเหนียวเป็นวัสดุที่เหมาะสมที่สุด ในกรณีที่มีการบรรจุกรวดรอบบ่อกรอง (gravel-packed) ที่ระดับความลึกไม่เกิน 20–30 ฟุต (6.1–9.1 เมตร) เพื่อให้การอุดมีประสิทธิภาพสูงสุดอาจต้องนำกรวดและท่อกรองออกก่อนทำการอุด

2) บ่อบาดาลที่มีชั้นหินให้น้ำเป็นชั้นหินที่มีรอยแตก (wells in creviced formations) ส่วนใหญ่แล้วชั้นหินที่มีรอยแตกจะวางตัวอยู่ใต้ชั้นดิน วัสดุที่เหมาะสมสำหรับอุดในชั้นนี้คือ ซีเมนต์ หรือคอนกรีต ไม่แนะนำให้ใช้ดินเหนียวหรือทราย เพราะน้ำสามารถไหลพาเอาดินเหนียว

หรือทรายเข้าไปอยู่ในรอยแตกได้ หรืออาจจะใช้ก้อนหินที่มีขนาดใหญ่ (coarse stone) อุดแทรกสลับกับคอนกรีตเพื่อให้น้ำสามารถไหลผ่านไปสู่หลุมผลิตได้

3) บ่อบาดาลที่มีชั้นหินให้น้ำเป็นชั้นหินที่ไม่มีรอยแตก (wells in uncreviced formations) ชั้นหินให้น้ำที่ไม่มีรอยแตกส่วนใหญ่แล้วจะเป็นชั้นหินแข็ง เช่น หินทราย วัสดุที่แนะนำให้ใช้อุดในชั้นนี้คือดินเหนียว ซึ่งสามารถอุดได้โดยไม่ต้องสูบน้ำออกจากบ่อ ส่วนบนของบ่อจนถึงผิวดินแนะนำให้อุดด้วยซีเมนต์ คอนกรีต หรือดินเหนียว แต่ถ้ามีบ่อที่มีการผลิตอยู่ใกล้กับบ่อที่จะอุดในชั้นนี้ให้อุดด้วยทรายที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว (Smith, 1993)

4) บ่อบาดาลที่มีชั้นหินให้น้ำหลายๆ ชั้น (multiple aquifer wells) การอุดในบ่อน้ำบาดาลประเภทนี้ก็เพื่อป้องกันการไหลเข้าไปปนกันของชั้นน้ำแต่ละชั้น วัสดุที่ใช้อุดคือ ซีเมนต์ คอนกรีต หรือทราย สำหรับกรณีที่แรงดันน้ำไม่มากให้ใช้ทรายอุดแทรกสลับกับซีเมนต์หรือคอนกรีต แต่ถ้าแรงดันน้ำมากให้ใช้วิธีการอุดเหมือนกับการอุดในบ่อน้ำพุ ในกรณีที่ใช้คอนกรีตหรือลูกยางในการอุดให้อุดในชั้นที่ไม่ใช่ชั้นน้ำที่มีการผลิต หรือถ้าไม่ทราบว่าชั้นน้ำใดเป็นชั้นน้ำที่มีการผลิตให้อุดในชั้นที่ไม่ใช่ชั้นน้ำที่แทรกสลับระหว่างชั้นน้ำ

5) บ่อน้ำบาดาลพุ (wells with artesion flow) การอุดในบ่อน้ำบาดาลพุไม่สามารถอุดด้วยซีเมนต์หรือคอนกรีตได้ วัสดุที่สามารถอุดเพื่อปิดกั้นเหนือชั้นน้ำพุเพื่อไม่ให้น้ำดันขึ้นมาคือ หินคลุกขนาดใหญ่ (ไม่เกิน 1/3 ของขนาดบ่อ) ฝอยตะกั่ว (lead wool) ผงเหล็ก (steel shavings) ลูกยาง (a well packer) ท่อนไม้ ตะกั่วหล่อ (cast-lead plug) หรือแท่งคอนกรีตที่หล่อสำเร็จแต่ต้องเป็นแท่งที่มีความยาวกว่าขนาดของบ่อหลายเท่า เพื่อไม่ให้เกิดการเอียง

6.2.2 การอุดกลบบ่อในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม

ข้อกำหนดสำหรับการอุดหลุมเจาะที่เลิกใช้แล้วในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมของประเทศสหรัฐอเมริกาประกอบด้วย ข้อกำหนดทั่วไปเกี่ยวกับการละทิ้งหลุมเจาะ ข้อกำหนดเกี่ยวกับการขออนุญาตละทิ้งหลุมเจาะ และข้อกำหนดเกี่ยวกับวัสดุและวิธีการอุดหลุมเจาะ โดยแต่ละข้อกำหนดมีรายละเอียดดังนี้

1) ข้อกำหนดทั่วไปเกี่ยวกับการละทิ้งหลุมเจาะ (general requirements) หลุมเจาะทุกหลุมที่จะละทิ้งต้องแน่ใจว่าลึกลงไปไม่อยู่ในบริเวณไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon zone) ไม่มีชั้นน้ำจืด ไม่มีผลกระทบกับผู้ใช้ในบริเวณใกล้เคียง (outer Continental Shelf, OCS) และจะต้องมีการป้องกันของเหลวในชั้นหินไหลเข้าไปในบ่อหรือปนเปื้อนกับน้ำทะเล หลุมเจาะที่มีการใช้ไม่นานหรือหมดประโยชน์จะต้องทำการอุด แต่ถ้าการอุดหลุมเจาะเหล่านั้นมีผลต่อหลุมผลิตที่อยู่ข้างเคียงจะต้องได้รับการรับรองจากผู้เชี่ยวชาญว่าไม่มีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมเสียก่อนจึงจะงดเว้นการอุดกลบหลุม

2) ข้อกำหนดเกี่ยวกับการขออนุญาตละทิ้งหลุมเจาะ (approvals) เจ้าของหลุมจะต้องไม่ละทิ้งหรือทำการอุดหลุมเจาะโดยปราศจากผู้เชี่ยวชาญ และเจ้าของหลุมเจาะจะต้องส่งแบบรายงานการอุดกลบ MMS–332 from (Notice of Intent/ Report of Well Abandonment) ซึ่งจะต้องส่งรายงานหลังจากอุดเสร็จภายใน 30 วัน โดยปฏิบัติดังนี้

ก) แบบรายงานการอุดกลบต้องมีข้อมูลที่ประกอบด้วย ข้อมูลการเจาะ (well log) ข้อมูลการทดสอบ (test data) คำอธิบายรายละเอียด (description) และแผนงานที่ซึ่งประกอบด้วยความลึกของหลุมเจาะ ชนิด ตำแหน่ง ความยาวของวัสดุอุด (plugs) แผนการทำ Mudding การผสมซีเมนต์ การเจาะท่อกรุ การทดสอบ การดึงก้านเจาะและปัญหาที่พบ

ข) แบบรายงานขั้นต่อไปจะประกอบด้วยคำอธิบายของวิธีอุดหลุมเจาะที่สมบูรณ์ ซึ่งประกอบด้วยประเภทของวัสดุที่ใช้ ปริมาณของวัสดุที่ใช้อุด และวิธีการตัดก้านเจาะ ดึงก้านเจาะ ขนาดของก้านเจาะ ความลึกของก้านเจาะ และจำนวนของก้านเจาะที่ดึงออกมา

3) ข้อกำหนดเกี่ยวกับวัสดุและวิธีการอุดหลุมเจาะ (permanent abandonment)

ก) การอุดเพื่อปิดชั้นน้ำมัน ก๊าซ ชั้นน้ำสะอาดที่อยู่ในหลุมเปลือย ให้ใช้ซีเมนต์อุดขึ้นมาด้านบนและอุดลงไปด้านล่างชั้นน้ำมัน ก๊าซ ชั้นน้ำสะอาด เป็นระยะอย่างน้อย 100 ฟุต ซึ่งจะช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการปนเปื้อนของสิ่งเจือปน และการอุดจะต้องได้รับคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญในพื้นที่

ข) การอุดเพื่อปิดหลุมเปลือยที่อยู่ต่อจากท่อกรุ ต้องอุดบริเวณรอยต่อระหว่างปลายท่อกรุกับหลุมเปลือย ให้ใช้ซีเมนต์อุดขึ้นมาด้านบนและอุดลงไปด้านล่างรอยต่อเป็นระยะอย่างน้อย 100 ฟุต ถ้าไม่สามารถอุดตามวิธีที่กล่าวมาให้เลือกอุดด้วย 2 วิธี คือ

- อุดด้วยการใช้อุปกรณ์ปิดกั้นซีเมนต์ (cement retainer) และซีเมนต์ อุปกรณ์ปิดกั้นซีเมนต์จะทำหน้าที่ควบคุมแรงดันย้อนกลับให้ติดตั้งที่ระยะห่างจากปลายด้านล่างของท่อกรุไม่น้อยกว่า 50 ฟุต และไม่เกิน 100 ฟุต สำหรับซีเมนต์ให้อุดลงไปถึงที่ระดับต่ำกว่าท่อกรุอย่างน้อย 100 ฟุต และอุดขึ้นมาด้านบนอุปกรณ์ปิดกั้นซีเมนต์เป็นระยะอย่างน้อย 650 ฟุต
- ถ้าหลุมเปลือยที่อยู่ใต้ท่อกรุเคยมีหรือคาดว่าจะมีชั้นหินที่ทำให้เกิดการสูญเสียการไหล (lost circulation) ให้อุดด้วยการติดตั้งลูกยาง (Bridge plug) ห่างจากปลายท่อกรุขึ้นมาด้านบนเป็นระยะ 150 ฟุต แล้วใช้ซีเมนต์อุดปิดทับบนลูกยางโดยซีเมนต์ต้องยาวอย่างน้อย 50 ฟุต

ค) การอุดเพื่อปิดชั้นที่มีการกรุ (isolating perforated intervals) ให้ใช้ซีเมนต์อุดขึ้นมาด้านบนและอุดลงไปด้านล่างชั้นที่มีการกรุเป็นระยะอย่างน้อย 100 ฟุต ถ้าไม่สามารถอุดตามวิธีที่กล่าวมาให้เลือกอุดด้วยวิธีการต่อไปนี้

- อุดด้วยการใช้อุปกรณ์ปิดกั้นซีเมนต์ (cement retainer) และซีเมนต์ อุปกรณ์ปิดกั้นซีเมนต์จะทำหน้าที่ควบคุมแรงดันย้อนกลับให้ติดตั้งที่ระยะห่างจากปลายด้านล่างของท่อกรุไม่น้อยกว่า 50 ฟุต และไม่เกิน 100 ฟุต สำหรับซีเมนต์ให้อุดลงไปถึงระดับต่ำกว่าชั้นที่มีการกรุอย่างน้อย 100 ฟุต และอุดขึ้นมาด้านบนอุปกรณ์ปิดกั้นซีเมนต์เป็นระยะอย่างน้อย 50 ฟุต
- อุดด้วยการติดตั้งลูกยางห่างจากปลายท่อกรุขึ้นมาด้านบนเป็นระยะ 150 ฟุต แล้วใช้ซีเมนต์อุดปิดทับบนลูกยางและซีเมนต์ต้องยาวอย่างน้อย 50 ฟุต
- อุดด้วยซีเมนต์ โดยเริ่มอุด (ระดับต่ำสุดของซีเมนต์) ที่ระยะห่างจากชั้นที่มีการกรุขึ้นมาด้านบน 100 ฟุต ความยาวของซีเมนต์จะต้องไม่น้อยกว่า 200 ฟุต

ง) การอุดในบริเวณที่มีเศษชิ้นส่วนของท่อกรุที่เกิดจากการตัดหรือการรื้อถอนติดค้างอยู่ ให้อุดโดยวิธีใดวิธีหนึ่ง คือ

- กรณีที่มีท่อกรุ 2 ท่อน ถ้าเศษชิ้นส่วนทั้งหมดเป็นของท่อกรุที่อยู่ข้างในให้ใช้ซีเมนต์อุดขึ้นมาด้านบนและอุดลงไปด้านล่างเศษชิ้นส่วนท่อกรุเป็นระยะอย่างน้อย 100 ฟุต ถ้าไม่สามารถอุดตามวิธีที่กล่าวมาให้เลือกอุดด้วย 2 วิธี คือ อุดด้วยการใช้อุปกรณ์ปิดกั้นซีเมนต์หรือลูกยางติดตั้งห่างจากเศษชิ้นส่วนท่อกรุขึ้นมาด้านบนเป็นระยะ 50 ฟุต แล้วใช้ซีเมนต์อุดปิดทับบนอุปกรณ์ปิดกั้นซีเมนต์หรือลูกยาง โดยซีเมนต์ต้องยาวอย่างน้อย 50 ฟุต และอุดด้วยซีเมนต์โดยเริ่มอุด (ระดับต่ำสุดของซีเมนต์) ที่ระยะห่างจากเศษชิ้นส่วนท่อกรุขึ้นมาด้านบน 100 ฟุต ความยาวของซีเมนต์จะต้องไม่น้อยกว่า 200 ฟุต
- กรณีที่เศษชิ้นส่วนท่อกรุเป็นของท่อกรุท่อนล่างซึ่งมีขนาดเล็กกว่าท่อกรุท่อนบน (เหมือนกับเศษชิ้นส่วนท่อกรุอยู่ในหลุมเปลือยที่ต่อจากท่อกรุ) การอุดสามารถเลือกอุดได้ 2 วิธี คือ อุดปิดเฉพาะเศษชิ้นส่วนท่อกรุและอุดปิดหลุมเปลือยที่มีเศษชิ้นส่วนท่อกรุอยู่ข้างใน ซึ่งสามารถทำตามวิธีการที่กล่าวไว้ในข้อ (ก) และ (ข)

จ) การอุดช่องว่าง (annular space) ที่อยู่ในหลุมเปลือยจะต้องอุดด้วยซีเมนต์ที่มีความยาวไม่น้อยกว่า 200 ฟุต

ฉ) การอุดบริเวณปากหลุม ต้องอุดด้วยซีเมนต์ที่มีความยาวไม่น้อยกว่า 150 ฟุต ในท่อกรุที่มีขนาดเล็กที่สุด โดยระดับบนสุดของแท่งซีเมนต์จะต้องอยู่ที่ระดับ mud line หรือต่ำกว่าไม่เกิน 150 ฟุต

ช) การทดสอบการติดตั้งและตำแหน่งของวัสดุที่อุด สามารถตรวจสอบโดย
- ทดสอบด้วยการใช้ท่อที่มีน้ำหนักไม่ต่ำกว่า 15,000 ปอนด์ กระแทกบนซีเมนต์ ที่ติดตั้งอยู่บนอุปกรณ์ปิดกั้นซีเมนต์หรือลูกยาง
- ทดสอบโดยใช้แรงดันที่มีค่าความดันไม่ต่ำกว่า 1,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ในการทดสอบจะต้องให้ความดันไม่เกิน 10% ในระยะเวลา 15 นาที

ซ) ของเหลวที่ค้างอยู่ในหลุมเจาะ ชั้นที่ไม่ถูกอุดหรือช่องว่างที่อยู่ระหว่างซีเมนต์แต่ละช่วงที่ยังมีของเหลวค้างอยู่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณของเหลวจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แรงดันที่เกิดจากของเหลวที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลเสียต่อการอุดทำให้ประสิทธิภาพในการอุดลดลง

ฌ) การจัดการเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่อยู่ในหลุมเจาะ อุปกรณ์ที่อยู่ในหลุมเจาะหรือสิ่งกีดขวางทุกชนิด จะต้องขนย้ายมาไว้ที่ระดับต่ำกว่า mud line อย่างน้อย 15 ฟุต หรือตามที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ สำหรับหลุมเจาะที่อยู่ในทะเลการจัดการเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่อยู่ในหลุมเจาะให้ทำตามที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ

ญ) ข้อกำหนดสำหรับหลุมเจาะที่อยู่ในพื้นที่ที่เย็นจัด (permafrost area) ของเหลวที่ค้างอยู่ในหลุมที่อยู่ติดกับชั้นที่น้ำกลายเป็นน้ำแข็งจะมีจุดเยือกแข็งต่ำกว่าอุณหภูมิของชั้นที่น้ำกลายเป็นน้ำแข็งซึ่งจะช่วยยับยั้งการเกิดสนิม ซีเมนต์ที่ใช้อุดชั้นที่น้ำกลายเป็นน้ำแข็งจะต้องออกแบบให้แข็งตัวก่อนที่จะกลายเป็นน้ำแข็งและจะต้องให้ความร้อนต่ำเมื่อเกิดกระบวนการ Hydration

2.7 การศึกษาและวิจัยในการอุดหลุมเจาะ

การอุดหลุมเจาะในชั้นหินได้ถูกพัฒนาขึ้นเมื่อ 20 ปีที่ผ่านมา ผู้ที่ทำการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีด้านนี้อย่างจริงจังคือ Prof. Jaak J.K. Daemen และคณะ (Fuenkajorn and Daemen, 1996) งานวิจัยเหล่านี้ส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ชลศาสตร์ และทางด้านเคมีของวัสดุในการอุด งานวิจัยบางส่วนที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหินตั้งปี ค.ศ. 1996 จนถึงปัจจุบันได้ทำการศึกษาและสรุปไว้ดังนี้

Fuenkajorn and Daemen (1987) ศึกษาความสัมพันธ์เชิงกลศาสตร์ของซีเมนต์และเบนทอไนต์กับชั้นหิน โดยนำตัวอย่างการอุดหลุมเจาะซีเมนต์และเบนทอไนต์อัดตัวมาทดสอบ Piping test เพื่อศึกษาและหาค่าความเค้นเนื่องจากการขยายของซีเมนต์และการบวมตัวของเบนทอไนต์ การศึกษาความเค้นเนื่องจากการบวมตัวของเบนทอไนต์อัดตัว ได้ทำการทดสอบ 2 รูปแบบ คือในระบบปิดซึ่งไม่มีการไหลเข้า–ออกของน้ำ และระบบเปิดที่ปล่อยให้น้ำไหลผ่านตัวอย่าง การศึกษาความเค้นเนื่องจากการขยายตัวของซีเมนต์ ทดสอบโดยการอุดซีเมนต์ในท่อเหล็กที่มีความหนาต่างกัน

ผลการทดสอบปรากฏว่าเบนทอไนต์ที่ทดสอบในระบบปิดไม่เกิดความเค้นเนื่องจากการบวมตัว แต่เบนทอไนต์ที่ทดสอบในระบบเปิดเกิดการบวมตัวและสามารถวัดค่าความเค้นในแนวแกนและแนวรัศมีได้ 7.5 MPa และ 2.6 MPa ส่วนการทดสอบหาค่าความเค้นเนื่องจากการขยายตัวของซีเมนต์พบว่า ความเค้นในแนวรัศมีที่เกิดจากการขยายตัวของซีเมนต์ในท่อที่หนากว่าวัดได้ 4.7 MPa และความเค้นในแนวรัศมีในท่อที่บางวัดได้ 2.7 MPa

ผลการทดสอบระบุว่าการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นหินด้วยเบนทอไนต์ควรอุดใต้ระดับน้ำบาดาลจึงจะมีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์เพียงพอ และการอุดหลุมเจาะด้วยซีเมนต์ควรอุดในชั้นหินแข็งเนื่องจากจะทำให้มีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์สูงกว่าการอุดในชั้นหินที่มีความอ่อน

Akgun (1996) ศึกษาคุณสมบัติเกี่ยวกับความแข็งของแท่งซีเมนต์ขนาดต่างๆ ที่จะใช้อุด สามารถแยกออกได้เป็น 2 กรณี คือ 1) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเกี่ยวกับความแข็งกับรัศมีของแท่งซีเมนต์ และ 2) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติความแข็งกับอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อรัศมีของแท่งซีเมนต์ มีการเตรียมซีเมนต์ด้วยการ Dowell–schlumberger คือ ใช้ Self–stress II Cement grout ผสมตามมาตรฐานสถาบันปิโตรเลียมสหรัฐอเมริกา (API Standard No. RP–10 B (1996)) ตัวอย่างหินเป็นหินทัฟฟ์รูปทรงกระบอกที่เจาะรูตรงกลางตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลางมีรัศมี 6.4, 13, 25 และ 51 mm รัศมีภายนอกมีค่าระหว่าง 38 ถึง 94 mm และความยาวมีค่าระหว่าง 102–178 mm ซีเมนต์ที่อุดในรูทดสอบในตัวอย่างหินมีค่าความยาวต่อรัศมีเท่ากับ 2.0, 4.0 และ 8.0 และซีเมนต์ที่อุดจะถูกบ่มไว้ในน้ำ 8 วัน ก่อนนำมาทดสอบ การทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบ push–out test ค่าแรงกระทำ (Load) เริ่มต้นที่ 4450 N และเพิ่มแรงกระทำครั้งละ 4450 N ทุกๆ 5 นาที จนกระทั่งซีเมนต์เกิดการแตก (fail) จากนั้นบันทึกค่า แรงกระทำและการเปลี่ยนแปลงความยาวทั้งด้านบนและด้านล่างของแท่งซีเมนต์ทุกๆ 30 วินาที จนกว่าตัวอย่างจะแตก

จากการทดสอบคุณสมบัติเกี่ยวกับความแข็งของซีเมนต์ที่ศึกษา คือ ความแข็งในแนวแกน (axial strength) ความเสียดทานระหว่างซีเมนต์กับหิน (bond strength) และความแข็งเฉือนสูงสุด (peak shear strength) ผลการทดสอบปรากฏว่าคุณสมบัติเกี่ยวกับความแข็งทั้ง 3 ตัวอย่างมีค่าสูงสุดในตัวอย่างหินที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อรัศมีของแท่งซีเมนต์เท่ากับ 8.0 ผลจากการทดสอบระบุว่าการออกแบบการอุดหลุมเจาะแบบถาวรด้วยซีเมนต์ควรออกแบบให้อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อรัศมีของแท่งซีเมนต์มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 8.0 เพื่อให้ซีเมนต์มีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์เพียงพอ

Ouyang and Daemen (1996) ทดสอบการอุดหลุมเจาะในชั้นหินโดยใช้เบนทอไนต์และวัสดุผสมระหว่างเบนทอไนต์กับหินย่อยของหินทัฟฟ์ (crushed tuff) ด้วยการนำตัวอย่างการอุดทั้งหมดมาทดสอบความซึมด้วยวิธี constant head, standard falling head และ modified falling head ใช้ตัวอย่างการอุดทั้งหมด 14 ตัวอย่าง การทดสอบมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาค่าความซึมผ่านของเบนทอไนต์ที่เกี่ยวข้องกับ 3 ปัจจัย คือ 1) คุณสมบัติทางด้านเคมีของน้ำที่ใช้ผสมกับเบนทอไนต์และน้ำที่ใช้ในการทดสอบ 2) ขนาดของตัวอย่าง และ 3) การทดสอบแบบ High injection pressure flow test ผลการทดสอบปรากฏว่าค่าความซึมผ่านของตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่อใช้น้ำที่มีสารละลายโซเดียมไพโรฟอสเฟตในการผสมกับเบนทอไนต์และในการทดสอบขนาดของตัวอย่างไม่มีผลทำให้ค่าความซึมผ่านของเบนทอไนต์เพิ่มขึ้นหรือลดลง และค่าความซึมผ่านของตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มแรงดันของน้ำจากการทดสอบแบบ High injection pressure flow test

การทดสอบการอุดหลุมเจาะด้วยวัสดุผสมระหว่างเบนทอไนต์กับหินย่อยของหินทัฟฟ์ ได้ใช้ตัวอย่างการอุดทั้งหมด 5 ตัวอย่าง ใช้เบนทอไนต์ปริมาณ 15–25% และ 35% โดยน้ำหนัก และหินย่อยของหินทัฟฟ์ที่มีความคละและค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอแตกต่างกัน 5 ชนิด การทดสอบเพื่อหาค่าความซึมผ่านของตัวอย่างประกอบด้วย การทดสอบการไหลผ่านตามแนวยาว (longitudinal flow tests) การทดสอบหาค่าความซึมผ่านในหลายแกน polyaxial permeability tests) การทดสอบหาค่าความซึมผ่านที่มีอุณหภูมิสูง (high–temperature permeability tests) และการทดสอบ Piping tests

ผลการทดสอบการไหลผ่านตามแนวยาวแสดงให้เห็นว่าการใช้หินย่อยที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอสูงผสมกับเบนทอไนต์จะทำให้ได้ค่าความซึมผ่านต่ำ และค่าความซึมผ่านจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเบนทอไนต์ในการผสม ผลการทดสอบหาค่าความซึมผ่านในหลายแกนพบว่าค่าความซึมผ่านในแนวนอนสูงกว่าความซึมผ่านในแนวตั้ง และความแตกต่างระหว่างค่าความซึมผ่านในแนวนอนและในแนวตั้งจะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเบนทอไนต์ ผลการทดสอบหาค่าความซึมผ่านที่มีอุณหภูมิสูงพบว่าค่าความซึมผ่านของตัวอย่างที่อุณหภูมิ 35°C มีค่าสูงที่สุด

และที่อุณหภูมิสูงถึง 60°C พบว่าค่าความซึมผ่านของตัวอย่างที่ใช้เบนทอไนต์ผสม 25% มีค่าลดลง 10% และค่าความซึมผ่านของตัวอย่างที่ใช้เบนทอไนต์ผสม 35% มีค่าลดลง 50% เมื่อเทียบกับการวัดที่อุณหภูมิ 21°C ผลการทดสอบ Piping tests พบว่าค่าความซึมผ่านในแนวตั้งมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการปล่อยให้ไหลผ่านโดยไม่ปิดรูด้านล่างและน้ำที่ไหลออกจากรูที่อยู่ด้านข้างมีปริมาณน้อยกว่า 2% ของปริมาณน้ำที่ไหลออกมาด้านล่างของตัวอย่าง

ผลการทดสอบระบุว่าการออกแบบการอุดหลุมเจาะโดยใช้เบนทอไนต์สามารถทำให้ค่าความซึมผ่านลดลงได้ด้วยการใช้น้ำที่มีสารละลายโซเดียมไพโรฟอสเฟตผสมกับเบนทอไนต์หรือใช้เบนทอไนต์อุดในหลุมเจาะที่น้ำบาดาลมีส่วนผสมของสารละลายโซเดียมไพโรฟอสเฟต แต่การอุดเบนทอไนต์ในน้ำที่มีสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะทำให้ค่าความซึมผ่านเพิ่มขึ้น ส่วนการอุดหลุมเจาะด้วยวัสดุผสมระหว่างเบนทอไนต์กับหินย่อยของหินทัฟฟ์ควรใช้ปริมาณของเบนทอไนต์ไม่น้อยกว่า 25% โดยน้ำหนัก เศษหินย่อยหรือวัสดุเม็ดหยาบที่ใช้ผสมควรจะมีความคละกันดี (well-graded) ใช้น้ำในการผสม 23.5% และในการอัดตัว (compaction) ของวัสดุผสมควรให้เป็นไปตาม Standard proctor compaction หรือสูงกว่ามาตรฐาน

South and Fuenkajorn (1996) ทดลองการใช้ซีเมนต์ในการอุดหลุมเจาะ โดยศึกษาและเปรียบเทียบอัตราการไหลผ่านเนื้อหินกับซีเมนต์ที่อุด รวมทั้งศึกษา Tension Zone ในบริเวณรอยต่อระหว่างแท่งซีเมนต์กับชั้นหิน และศึกษาการอุดหลุมเจาะที่ความลึกต่างๆ กัน โดยจำลองแรงดันทั้งในแนวแกนและด้านข้างที่แตกต่างกัน ด้วยตัวอย่างหินที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 cm ยาว 30 cm ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มแรกจะถูกเจาะรูบริเวณเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.54 cm ตรงกลางส่วนหัวและส่วนท้ายเป็นความยาว 1/3 ของความยาวตัวอย่างหิน และตัวอย่างหินกลุ่มที่ 2 จะถูกเจาะรูที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.54 cm ตรงกลางจนทะลุ (ลักษณะเป็นวงแหวน) แล้วอุดด้วยซีเมนต์มีความยาว 5 cm ที่ตรงกึ่งกลางของตัวอย่างหิน ตัวอย่างหินจะมีลักษณะเหมือนกลุ่มแรก แต่แตกต่างกันตรงวัสดุที่อุดอยู่ตรงกึ่งกลางซึ่งกลุ่มแรกเป็นเนื้อหินส่วนกลุ่มที่ 2 เป็นซีเมนต์ ตัวอย่างหินที่ใช้มี 5 ชนิด ประกอบด้วย หินแกรนิต 2 ตัวอย่าง หินบะซอลต์ 1 ตัวอย่าง และหินทัฟฟ์ 2 ตัวอย่าง ซีเมนต์ที่ใช้ในการอุดมีส่วนผสมประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ Class A ผสมกับน้ำที่ 50% โดยน้ำหนัก Dowell additive D53 10% สารเพิ่มการขยายตัวและ D65 1% ซีเมนต์ผสมตามมาตรฐานสถาบันปิโตรเลียมสหรัฐอเมริกา (American petroleum institute, 1986) ซีเมนต์ที่ผสมเสร็จมีค่าความหนาแน่น 1.88 กรัมต่อลูกบาศก์เซ็นติเมตร มีความแข็ง 26.2 MPa (บ่มที่ 43°C เป็นเวลา 14 วัน) และมีการขยายตัว 0.18% (หลัง 14 วัน) มีความเค้นในแนวรัศมีภายหลัง 25 วัน วัดได้ 4 MPa ค่าความซึมผ่าน 8.65×10^{-13} m/s การทดสอบการไหลผ่านจะทำโดยการใช้ Permeameter ด้วยการปล่อยน้ำจากปั๊มให้ไหลผ่านรูในแนวเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างหินจากหัวสู่ท้ายของตัวอย่างหินและเพื่อให้การทดสอบเป็นไปตามสภาวะที่การอุดอยู่ในระดับลึก 1000,

600 และ 300 เมตร จึงใส่แรงในแนวแกน (axial load) และความเค้นด้านข้าง (confining stress) ที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ ที่แรงในแนวแกน 23 MPa ใช้แรงดันด้านข้าง 20 MPa (1000 เมตร) ที่แรงในแนวแกน 15 MPa ใช้แรงดันด้านข้าง 13.5 MPa (600 เมตร) และที่แรงในแนวแกน 8.5 MPa ใช้แรงดันด้านข้าง 7.0 MPa (300 เมตร) และแรงดันน้ำที่ใช้ในแต่ละระดับความลึกคือ 10.7 และ 3.5 MPa

ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าอัตราการไหลผ่านแท่งซีเมนต์จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงในตัวอย่างที่มีค่าความซึมผ่านของแท่งซีเมนต์ต่อค่าความซึมผ่านของชั้นหินน้อยกว่า 1 วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม FREESUEF และค่าอัตราการไหลจะเพิ่มเป็นเส้นตรงในตัวอย่างที่มีค่าความซึมผ่านของแท่งซีเมนต์ต่อค่าความซึมผ่านของชั้นหินมากกว่า 100 และเมื่อวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Plane2d–FE พบว่า Tension zone จะไม่เพิ่มขึ้นถ้าความเค้นจากการขยายตัวของซีเมนต์น้อยกว่า 75% ของความเค้นในแนวสัมผัสที่กระทำต่อผนังของหลุมเจาะ (tangential stress) จากผลการทดสอบสามารถแนะนำเกี่ยวกับการออกแบบการอุดหลุมเจาะ ณ จุดใดๆ ได้ดังนี้

- Expansive cement เป็นวัสดุที่มีคุณภาพเพียงพอสามารถอุดในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความเค้นได้ดี
- ในชั้นหินแข็งควรใช้ซีเมนต์ในการอุด เนื่องจากการติดตั้งซีเมนต์ในหินแข็งจะให้พันธะทางชลศาสตร์บริเวณรอยต่อดีที่สุด
- ค่าความซึมผ่านของวัสดุที่อุดควรจะน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 เท่า ของค่าความซึมผ่าน ของชั้นหิน
- ควรใช้ซีเมนต์อุดตำแหน่งที่อยู่ใต้ระดับน้ำบาดาล เพราะในสภาวะที่แห้งซีเมนต์จะหดตัวและแตกจึงทำให้มีค่าความซึมผ่านสูงมาก
- การเลือกใช้ซีเมนต์หรือเบนทอไนต์ให้เหมาะสมกับแต่ละตำแหน่งในหลุมเจาะจะทำให้การอุดเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ กรณีการอุดด้วยเบนทอไนต์ควรอุดแทรกด้วยซีเมนต์เป็น Key seal

Agkun (1997) ทำการทดสอบ Push–out test เพื่อหาวัสดุที่เหมาะสมในเชิงกลศาสตร์สำหรับการอุดหลุมเจาะขนาดใหญ่ในชั้นเกลือหิน วัสดุที่ศึกษาและใช้ในการทดสอบเป็นซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติขยายตัวได้แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ Self–stress I cement และ Salt–bond II cememt โดย Self–stress I ได้จากการผสมกันของ Self–stress cement 659 กรัม กับน้ำเกลืออิ่มตัว (Nacl– saturated brine) 493 กรัม ส่วน Salt–bond II cement ได้จากการผสมกันของปูนซีเมนต์ Class H จำนวน 1000 กรัม น้ำเกลืออิ่มตัว 450 กรัม Liquid additive D604 จำนวน

64 กรัม และ Anti-foam agent (M45) จำนวน 4.4 กรัม ซีเมนต์ที่อุดในรูทดสอบของตัวอย่างเกลือหินรูปทรงกระบอกที่เจาะรูตรงกลางตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง

จากการทดสอบปรากฏว่าการอุดด้วย Self-stress cement ให้ค่าความเสียดทานระหว่างซีเมนต์กับหินเท่ากับ 2.2 MPa (22% ของค่าความเสียดทานระหว่างเนื้อเกลือหินกับเกลือหิน) และการอุดด้วย Salt-bond cement ให้ค่าความเสียดทานระหว่างซีเมนต์กับหินเท่ากับ 6.1 MPa (60% ของค่าความเสียดทานระหว่างเนื้อเกลือหินกับเกลือหิน) ผลการทดสอบระบุว่าการออกแบบการอุดหลุมเจาะในชั้นเกลือหินควรจะใช้ซีเมนต์ที่มีส่วนผสมตาม Salt-bond II cement เพื่อให้มีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์เพียงพอ

Ran et al. (1997) ศึกษาคุณสมบัติของเบนทอไนต์อัดตัวแบบเคลื่อนที่ (dynamic compaction) โดยศึกษาตัวอย่างเบนทอไนต์อัดตัวที่ใช้น้ำกลั่นในการผสม และตัวอย่างเบนทอไนต์อัดตัวที่ใช้น้ำเกลือในการผสม คุณสมบัติที่ศึกษาคือค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของเบนทอไนต์อัดตัวซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความซึมผ่าน ปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่สุด ผลกระทบของพลังงานในการอัดตัว น้ำหนักของลูกตุ้ม ความหนาของการอัดตัว และการผสมน้ำเกลือ เบนทอไนต์ที่ใช้ในการทดสอบ คือ โซเดียมเบนทอไนต์ มีความถ่วงจำเพาะ 2.79 มีค่าความหนาแน่นก้อน 1.23 Mg/m^3 มีค่าความชื้นอยู่ระหว่าง 8.7-10.5% มีความสามารถในการบวมตัวถึง 28 ml/g การอัดเบนทอไนต์แบบเคลื่อนที่ทำได้ด้วยการอัดเบนทอไนต์ 3-10 ชั้น และใช้ลูกตุ้มในการอัด 2 ถึง 8 ครั้ง หรือใช้แรงในการอัดตัวตั้งแต่ 5,400 ถึง 21,000 kN

ผลการทดสอบพบว่า เบนทอไนต์อัดตัวที่ใช้น้ำกลั่นในการผสมมีค่าความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1.74 Mg/m^3 ซึ่งมีปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 0-18% ส่วนเบนทอไนต์อัดตัวที่ใช้น้ำเกลือผสมมีค่าความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1.86 Mg/m^3 ซึ่งมีปริมาณความชื้นที่ 12% การเพิ่มพลังงานและลูกตุ้มในการอัดเบนทอไนต์จะทำให้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่สุดมีค่าลดลง ทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น

ผลการทดสอบระบุว่า การออกแบบการอุดหลุมเจาะด้วยเบนทอไนต์อัดตัวควรใช้น้ำเกลือในการผสมเบนทอไนต์ เนื่องจากให้ค่าความแน่นแห้งสูงกว่าการใช้น้ำกลั่นในการผสมซึ่งจะทำให้มีค่าความพรุนต่ำและมีค่าความซึมผ่านที่ต่ำกว่า

Akgun and Daemen (2000) ศึกษาอิทธิพลของปริมารการอุ้มตัวด้วยน้ำที่มีต่อความแข็งของซีเมนต์ที่สามารถขยายตัวได้ (expensive cement) ด้วยการทดสอบแบบ Push-out test ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การอิ่มตัวด้วยน้ำกับความแข็งของซีเมนต์ และรัศมีของตัวอย่างการอุดกับความแข็งของซีเมนต์ การเตรียมซีเมนต์ด้วยการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I หรือ II ผสมกับน้ำกลั่น 50% เติมสารที่ทำให้เกิดการขยายตัว (D53) 10% และสารที่ทำให้เกิดการกระจายตัว (D65) 1% โดยน้ำหนัก ตามมาตรฐานสถาบัน

ปิโตรเลียมสหรัฐอเมริกา (API) ตัวอย่างหินเป็นหินทัฟฟ์รูปทรงกระบอกที่เจาะรูตรงกลางตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลางมีรัศมี 6.35, 12.7, 25.4 และ 50.8 mm รัศมีภายนอกมีค่าระหว่าง 38.1 ถึง 93.66 mm ซีเมนต์ที่อุดในรูทดสอบของตัวอย่างหินมีค่าความยาวต่อรัศมีเท่ากับ 2.0 และซีเมนต์ที่อุดจะถูกบ่มไว้ในน้ำ 8 วัน ก่อนนำมาทดสอบ เปอร์เซ็นต์การอิ่มตัวด้วยน้ำของซีเมนต์มี 3 ระดับ คือ แห้ง เปอร์เซ็นต์การอิ่มตัวด้วยน้ำน้อย และเปอร์เซ็นต์การอิ่มตัวด้วยน้ำปานกลาง

จากการทดสอบพบว่าค่าความแข็งในแนวแกน ความเสียดทานระหว่างซีเมนต์กับหิน และความแข็งเฉือนสูงสุดในตัวอย่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปอร์เซ็นต์การอิ่มตัวด้วยน้ำของซีเมนต์เพิ่มขึ้นและรัศมีของตัวอย่างน้อยลง ผลจากการทดสอบระบุว่าการออกแบบการอุดหลุมเจาะแบบถาวรด้วยซีเมนต์ควรจะออกแบบให้อุดในตำแหน่งที่อยู่ใต้ระดับน้ำบาดาลเพื่อให้มีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์ที่เพียงพอ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3
การจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหินและซีเมนต์

เนื้อหาในบทนี้อธิบายขั้นตอน วิธีการ และข้อปฏิบัติในการจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหินและซีเมนต์เพื่อใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ

3.1 การเตรียมตัวอย่างเกลือหิน

ตัวอย่างเกลือหินทั้งหมดที่ใช้การทดสอบได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท เหมืองแร่อาเซียนโปแตซ จำกัด อ.บำเหน็จณรงค์ จ.ชัยภูมิ ซึ่งขุดเจาะมาจากเกลือชั้นกลาง (Middle salt) หลุมเจาะที่ KB-09 ในการเตรียมตัวอย่างเกลือหินสำหรับทดสอบในห้องปฏิบัติการมีวิธีการและขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct shear test)

นำแท่งตัวอย่างเกลือหินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว เข้าเครื่องตัด (Hack Sawing Machine) ให้ได้ขนาดรูปทรงกระบอกความหนา 4 นิ้ว ดังรูปที่ 3.1 โดยเลือกใช้วิธีการตัดแบบแห้งเพื่อไม่ให้ตัวอย่างเกลือหินเกิดการละลายอันเนื่องมาจากน้ำหรือของเหลวจากกระบวนการตัดแบบเปียก ตัวอย่างเกลือหินแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ (1) การจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหินสำหรับสร้างรอยแตกแบบเรียบ (Saw-cut surface) ดังรูปที่ 3.2 และ (2) การจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหินสำหรับสร้างรอยแตกแบบขรุขระ (Tension-induced fracture) ด้วยวิธีการให้แรงกด (Line load) บริเวณกึ่งกลางของความยาวแท่งเกลือหินทรงกระบอกดังแสดงในรูปที่ 3.3 ส่วนตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 แสดงความลึกและขนาดของเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ Push-out

นำแท่งตัวอย่างเกลือหินเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว เข้าเครื่องเจาะรูเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว (รูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5) แล้วนำไปตัดด้วยเครื่องตัดให้ได้ขนาดรูปทรงกระบอกความหนา 4 นิ้ว โดยขนาด ความหนาแน่น และความลึกของเกลือหินได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.3

รูปที่ 3.1 การตัดตัวอย่างเกลือหินให้มีขนาดตามต้องการ (ตัดแบบแห้ง)

รูปที่ 3.2 ตัวอย่างเกลือหินบางชิ้นที่สร้างรอยแตกแบบเรียบ (Saw-cut surface) มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว และความหนา 2 นิ้ว

รูปที่ 3.3 ตัวอย่างเกลือหินที่สร้างรอยแตกแบบขรุขระ (Tension-induced fracture) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว หนา 2 นิ้ว

ตารางที่ 3.1 ความลึกและขนาดของตัวอย่างเกลือหินผิวเรียบ (Saw-cut surface) สำหรับการทดสอบแรงเฉือน

Specimen No.	Depth (m)	Demeter (mm)	Top Length (mm)	Bottom Length (mm)	Cement Length (mm)	Density (g/cc)
KB-09-11-DS-01	170.00-170.11	99.57	51.53	52.39	53.25	2.15
KB-09-12-DS-02	168.70-168.81	100.34	51.87	51.58	54.21	2.16
KB-09-13-DS-03	168.00-168.11	101.29	52.33	52.65	53.23	2.15
KB-09-14-DS-04	169.70-169.81	101.35	53.43	52.65	52.14	2.14
KB-09-19-DS-09	176.00-176.11	101.21	53.14	52.21	52.32	2.15
KB-09-20-DS-10	176.21-176.31	101.32	51.14	52.22	52.36	2.15
KB-09-21-DS-11	177.00-177.11	101.12	52.32	53.10	53.21	2.14
KB-09-22-DS-12	177.15-177.25	101.24	51.05	52.10	52.41	2.15

ตารางที่ 3.2 ความลึกและขนาดของตัวอย่างเกลือหินผิวขรุขระ (Tension induces fracture) สำหรับการทดสอบแรงเฉือน

Specimen No.	Depth (m)	Demeter (mm)	Top Length (mm)	Bottom Length (mm)	Cement Length (mm)	Density (g/cc)
KB-09-15-DS-05	172.40-172.51	101.13	52.35	53.21	53.25	2.14
KB-09-16-DS-06	173.00-173.11	100.71	51.12	51.32	53.50	2.14
KB-09-17-DS-07	174.00-174.11	100.13	51.23	52.13	53.55	2.14
KB-09-18-DS-08	175.00-175.11	99.75	62.10	41.20	52.10	2.13

รูปที่ 3.4 การเจาะตัวอย่างเกลือหินเพื่อสร้างรูขนาด 1 นิ้ว สำหรับการทดสอบ Push–out

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 3.5 ตัวอย่างเกลือหินที่เจาะรูสำหรับการทดสอบ Push–out

ตารางที่ 3.3 ความลึกและขนาดของตัวอย่างเกลือหินสำหรับการทดสอบ push-out

Specimen No.	Depth (m)	Demeter (mm)	Length (mm)	Hole Diameter (mm)	Top Hole Length (mm)	Cement Plug Length (mm)	Density (g/cc)
KB-09-02-PO-02-T	171.90-172.00	102.35	101.86	25.00	20.00	40.26	2.19
KB-09-02-PO-02-B	171.80-171.90	101.68	101.72	24.92	20.00	27.62	2.19
KB-09-02-PO-03-T	172.30-172.40	101.00	104.12	24.24	19.12	42.04	2.21
KB-09-02-PO-03-B	172.20-172.30	101.48	102.46	25.00	23.64	33.32	2.21
KB-09-02-PO-04-T	172.70-172.80	101.38	102.96	25.90	20.88	35.34	2.18
KB-09-02-PO-04-B	172.60-172.70	101.82	100.72	24.32	21.74	25.66	2.18
KB-09-02-PO-05-T	173.60-173.70	99.40	102.66	24.38	19.32	37.06	2.20
KB-09-02-PO-05-B	173.50-173.60	99.42	101.18	25.00	20.70	23.48	2.20

3.2 การเตรียมตัวอย่างซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือปูนซีเมนต์ตราช้าง ชนิดทนน้ำเค็มและดินเค็ม (รูปที่ 3.6) ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดทุกภูมิภาคของประเทศไทยเป็นหลัก ด้วยเหตุผลเพื่อความสะดวกในการจัดหาวัสดุสำหรับการนำไปใช้งานจริงในโครงการที่ต้องการการอุดหลุมเจาะทั่วไปและมีราคาถูก โดยผสมเข้ากับน้ำเกลืออิ่มตัว (Saturated brine) ปูนซีเมนต์ที่เลือกใช้นี้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน (Portland–pozzolan cement) ประเภท IP (Type IP) มีส่วนผสมของสารปอซโซลานร้อยละ 15–40 โดยน้ำหนัก และมีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิก้า (Silica) หรือ ซิลิก้าและอลูมิน่า (Silica–alumina) มีคุณสมบัติในการยึดประสานเล็กน้อย แต่เมื่อบดเป็นผงละเอียดจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide) ที่อุณหภูมิปกติ เมื่อเกิดความชื้นจะเกิดเป็นสารประกอบซึ่งมีคุณสมบัติในการยึดประสาน เมื่อใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานจะส่งผลให้คุณสมบัติของคอนกรีตที่ได้เพิ่มความสามารถในการเข้าแบบได้ง่าย ลดการเยิ้มน้ำและลดการแยกตัว เพิ่มกำลังอัดที่ระยะปลาย เพิ่มความทึบน้ำ เพิ่มความคงทนต่อซัลเฟต ลดการหดตัว และลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อให้เหมาะกับโครงสร้างที่สัมผัสกับคลอไรด์และซัลเฟต เช่น บริเวณชายฝั่งทะเล บริเวณน้ำกร่อย และพื้นที่ดินเค็ม ส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 5 ทนซัลเฟตสูง ค่อนข้างหาซื้อได้ยากในท้องตลาด ต้องมีการสั่งผลิตเป็นพิเศษซึ่งการสั่งผลิตแต่ละครั้งต้องสั่งจากโรงงานเป็นจำนวนมากจึงเป็นสาเหตุหลักที่การวิจัยนี้เลือกใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานประเภททนน้ำเค็มแทน

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานชนิดทนน้ำเค็มมีส่วนประกอบตามเกณฑ์ (สูงสุด) กำหนดคุณสมบัติทางเคมีตามมาตรฐานของ ASTM C595 ดังนี้

- แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) 6.0%
- ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) 4.0%
- น้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ 5.0%

และเกณฑ์ (สูงสุด) กำหนดคุณสมบัติทางฟิสิกส์ตามมาตรฐานของ ASTM C595 ดังนี้

- การขยายตัว 0.8%
- การหดตัว 0.2%
- การก่อตัวระยะต้น 45 นาที
- การก่อตัวระยะปลาย 7 ชั่วโมง
- ปริมาตรอากาศในมอร์ต้าร์ 12%
- แรงอัดต่ำสุด อายุ 3 วัน 13.0 MPa

รูปที่ 3.6 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน (Portland–pozzolan cement) ประเภท IP (Type IP) (ซ้าย) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 5 (ขวา)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

- แรงอัดต่ำสุด อายุ 7 วัน 20.0 MPa
- แรงอัดต่ำสุด อายุ 28 วัน 25.0 MPa
- ความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างปูซีเมนต์กับน้ำ
  อายุ 7 วัน 290 กิโลจูล/กิโลกรัม
  อายุ 28 วัน 330 กิโลจูล/กิโลกรัม
- การขยายตัวของมอร์ตาร์ อายุ 14 วัน 0.020%
- การขยายตัวของมอร์ตาร์ อายุ 8 สัปดาห์ 0.060%
- ความทนต่อซัลเฟต (การขยายตัวที่ 180 วัน) 0.10%

ในงานวิจัยสำหรับการอุดหลุมเจาะได้ใช้ส่วนผสมดังต่อไปนี้ (Fuenkajorn and Daemen, 1996, South and Fuenkajorn, 1996 และ Akgun and Daemen, 2000)

- ปูนซีเมนต์ชนิดทนเค็ม (ตราช้าง) 700 กรัม
- Sika Interplast ZX (สารผสมเพิ่มเพื่อการขยายตัว) 3.5 กรัม
- Sika Plastocrete (สารผสมเพิ่มเพื่อลดฟองอากาศ) 20 กรัม
- น้ำเกลืออิ่มตัว (NaCl saturated brine) 385 กรัม

อุปกรณ์ที่ใช้ในการจัดเตรียมตัวอย่างประกอบด้วย

- เครื่องชั่งความละเอียด 0.01 กรัม
- เครื่องผสมซีเมนต์ (Model 6QT575 W) แบบปรับความเร็วรอบได้
- เครื่องวัดความหนืด Brookfield® viscometer รุ่น RV
- เครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล มีความละเอียด 0.1°C
- เหยือกพลาสติกสำหรับไว้เทซีเมนต์
- แบบหล่อทรงกระบอก (ท่อ PVC เส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว และ 4 นิ้ว)
- สายเข็มขัดแบบโลหะและแบบพลาสติกสำหรับงานรัดท่อ
- จุกยางปิดแบบหล่อ (Rubber stopper)
- ค้อนยาง

ในการเตรียมตัวอย่างซีเมนต์เพื่อการทดสอบแต่ละชนิดมีวิธีการและขั้นตอนการผสมดังต่อไปนี้

1) ชั่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และสารผสมเพิ่มเพื่อการขยายตัวตามสัดส่วนที่กำหนดไว้แล้วบรรจุลงในถุงพลาสติก จากนั้นทำการผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยวิธีการเขย่าหลายๆ ครั้ง

2) ชั่งน้ำเกลืออิ่มตัวและสารผสมเพิ่มเพื่อลดฟองอากาศตามสัดส่วนที่กำหนดลงในเครื่องผสมจากนั้นเปิดเครื่องด้วยความเร็วรอบไม่เกิน 275 รอบต่อนาที

3) เทส่วนผสมทั้งหมดในข้อ 1) ลงในเครื่องผสมทั้งหมด ใช้เวลาปั่นส่วนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันภายในเวลา 3 นาที

การเตรียมตัวอย่างแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

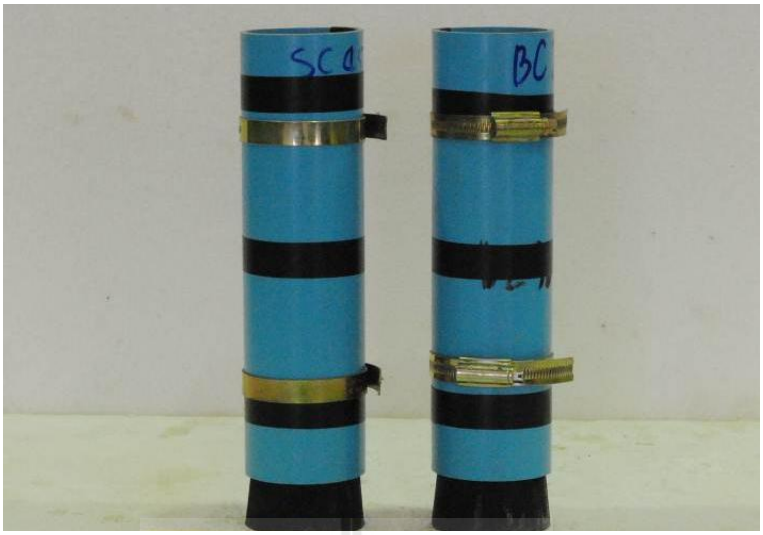
1) การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติพื้นฐานของซีเมนต์

ประกอบด้วยการทดสอบหากำลังแรงกดสูงสุดในแกนเดียว การตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น ค่าอัตราส่วนปัวซ์ซอง และการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน โดยทดสอบตามอายุของซีเมนต์ที่ 1, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ ขั้นตอนการผสมซีเมนต์เป็นไปตามสัดส่วนและวิธีการที่กล่าวมา โดยหลังจากผสมซีเมนต์จนเป็นเนื้อเดียวกันแล้วเทส่วนผสมทั้งหมดออกจากเครื่องผสมใส่ลงในเหยือกพลาสติกเพื่อใช้เทลงบนแบบหล่อทรงกระบอก ซึ่งทำจากท่อ PVC ปิดท้ายด้วยจุกยางขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว (รูปที่ 3.7) สำหรับการทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียวและแรงดึงแบบบราซิลเลียน และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว สำหรับการตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและค่าอัตราส่วนปัวซ์ซอง ตามลำดับ ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนครบตามอายุของซีเมนต์ที่ต้องการทดสอบ

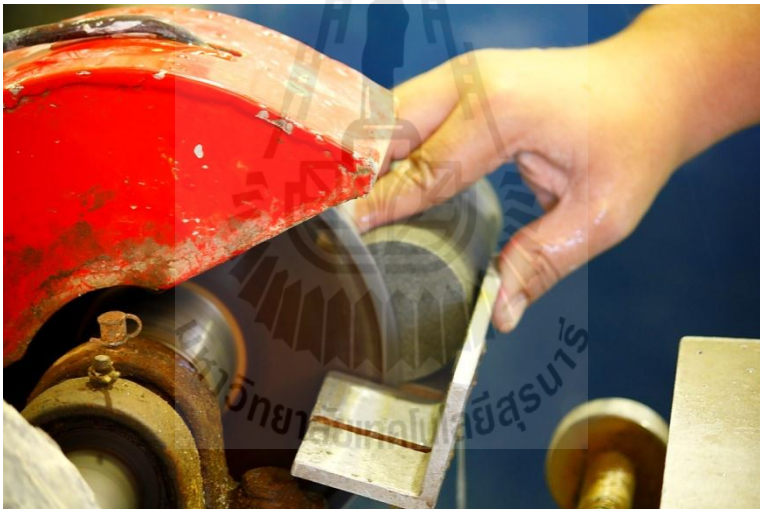
นำแท่งตัวอย่างซีเมนต์ที่ได้ตามอายุออกจากแบบแล้วนำไปตัดแต่งผิวหน้าให้เรียบและตัดความยาวให้ได้ขนาดตามต้องการตามมาตรฐานการทดสอบในแต่ละวิธีการทดสอบ (รูปที่ 3.8) โดยใช้อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (L/D ratio) เท่ากับ 2.5 สำหรับการทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียว การตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและค่าอัตราส่วนปัวซ์ซอง ส่วนอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 0.5 ใช้สำหรับทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน โดยรายละเอียดของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ทั้งหมดได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.4 ถึงตารางที่ 3.6

2) การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct shear test)

นำแท่งตัวอย่างเกลือหินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว หนา 2 นิ้ว ที่มีรอยแตกแบบเรียบ (Saw–cut surface) และรอยแตกแบบขรุขระ (Tension–induced fracture) มาใส่ลงในแบบหล่อที่ทำจากท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว (รูปที่ 3.9 และรูปที่ 3.10) รัดตัวอย่างให้แน่นด้วยเข็มขัดโลหะหรือพลาสติก โดยให้ตัวอย่างหินแยกห่างออกจากกัน 2 นิ้ว และต้องอยู่ในแนวรอยตัดหรือรอยแตกที่ตรงกันตามที่ทำเครื่องหมายระบุไว้ จากนั้นเทซีเมนต์ที่ผสมแล้วลงในแบบทันที (ระวังอย่าให้เกิดฟองอากาศ) ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องตามเวลาที่กำหนด รูปที่ 3.11 แสดงตัวอย่างรอยแตกแบบเรียบ และรูปที่ 3.12 แสดงตัวอย่างรอยแตกแบบขรุขระ



รูปที่ 3.7 แบบหล่อตัวอย่างทำด้วยท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว



รูปที่ 3.8 การตัดแต่งผิวหน้าให้เรียบตามมาตรฐานสำหรับการทดสอบแต่ละชนิด

ตารางที่ 3.4 ขนาดของตัวอย่างแท่งซีเมนต์สำหรับการทดสอบแรงกดในแกนเดียว

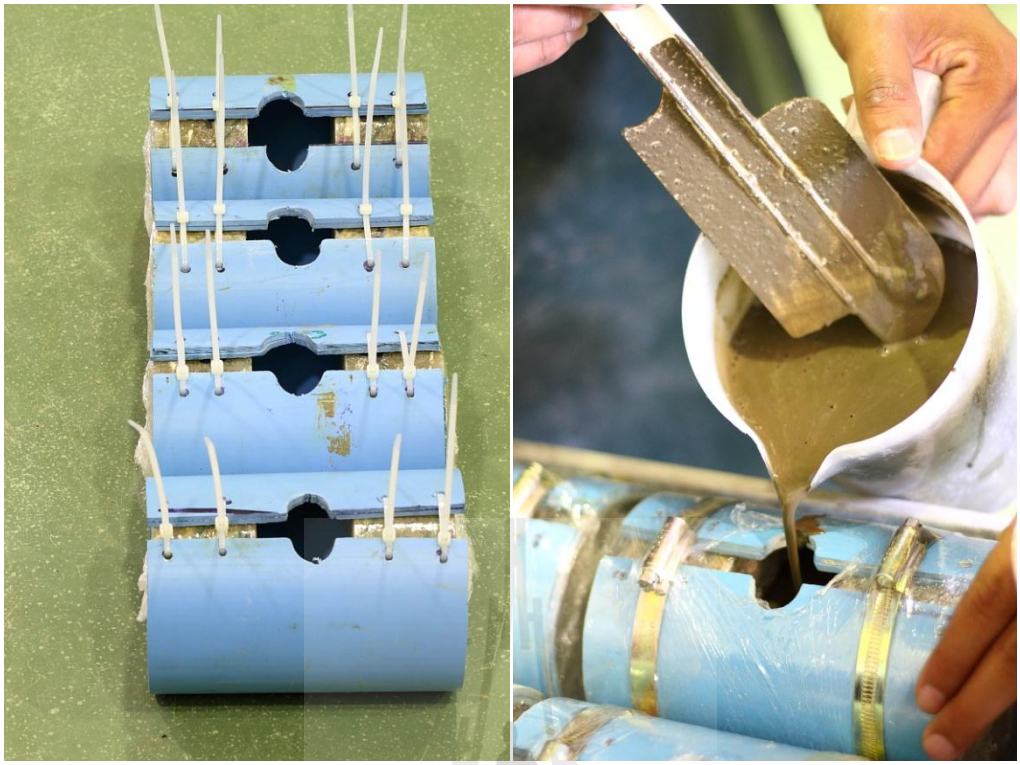
Cement Sample	Specimen Age (days)	Demeter (mm)	Length (mm)	L/D	Density (g/cc)
SC-01-UCS-01	1	56.5	134.5	2.38	1.84
SC-01-UCS-02		56.5	135.0	2.39	1.84
SC-01-UCS-03		56.5	135.0	2.39	1.84
SC-03-UCS-04	3	56.5	134.5	2.38	1.87
SC-03-UCS-05		56.5	135.0	2.39	1.88
SC-03-UCS-06		56.5	136.5	2.42	1.87
SC-07-UCS-07	7	56.5	135.0	2.39	1.71
SC-07-UCS-08		56.5	135.0	2.39	1.86
SC-07-UCS-09		56.5	135.0	2.39	1.86
SC-14-UCS-10	14	56.5	136.3	2.41	1.86
SC-14-UCS-11		56.5	136.4	2.41	1.86
SC-14-UCS-12		56.5	135.8	2.40	1.86
SC-21-UCS-13	21	56.5	135.0	2.39	1.82
SC-21-UCS-14		56.5	135.5	2.40	1.82
SC-21-UCS-15		56.5	136.0	2.41	1.82
SC-28-UCS-16	28	56.5	137.0	2.42	1.86
SC-28-UCS-17		56.5	130.0	2.30	1.84
SC-28-UCS-18		56.5	133.5	2.36	1.84

ตารางที่ 3.5 ขนาดของตัวอย่างแท่งซีเมนต์สำหรับการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและค่าอัตราส่วนปัวซอง

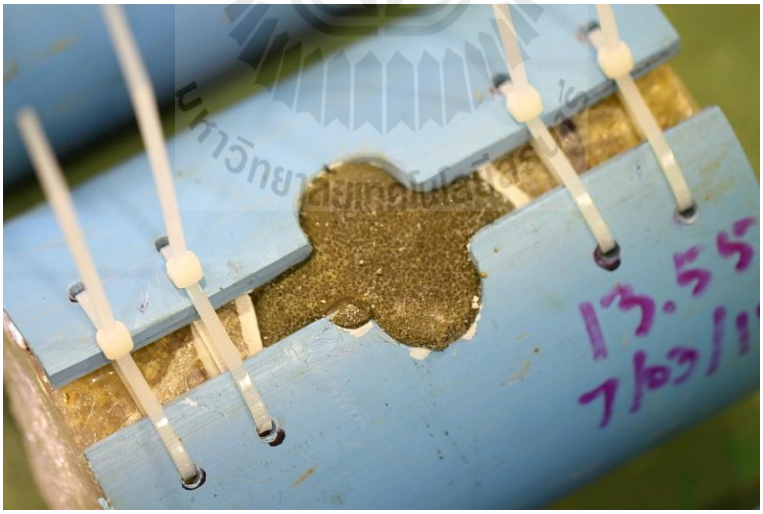
Cement Sample	Specimen Age (days)	Demeter (mm)	Length (mm)	L/D	Density (g/cc)
SC-03-UCSE-	3	106.7	254.0	2.38	1.74
SC-03-UCSE-		106.7	254.0	2.38	1.77
SC-03-UCSE-		106.7	254.0	2.38	1.81
SC-03-UCSE-		106.7	254.0	2.38	1.77
SC-03-UCSE-		106.7	254.0	2.38	1.75

ตารางที่ 3.6 ขนาดของตัวอย่างแท่งซีเมนต์สำหรับการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน

Cement Sample	Specimen Age (days)	Demeter (mm)	Length (mm)	L/D	Density (g/cc)
SC-01-BZ-01	1	56.50	28.00	0.50	1.83
SC-01-BZ-02		56.50	28.00	0.50	1.74
SC-01-BZ-03		56.50	27.50	0.49	1.89
SC-01-BZ-04		56.50	28.00	0.50	1.85
SC-01-BZ-05		56.50	28.00	0.50	1.80
SC-03-BZ-06	3	56.50	28.00	0.50	1.86
SC-03-BZ-07		56.50	28.00	0.50	1.83
SC-03-BZ-08		56.50	27.50	0.49	1.93
SC-03-BZ-09		56.50	27.50	0.49	1.89
SC-03-BZ-10		56.50	27.70	0.49	1.90
SC-07-BZ-11	7	56.50	28.00	0.50	1.72
SC-07-BZ-12		56.50	28.00	0.50	1.70
SC-07-BZ-13		56.50	28.00	0.50	1.70
SC-07-BZ-14		56.50	28.00	0.50	1.73
SC-07-BZ-15		56.50	28.00	0.50	1.73
SC-14-BZ-16	14	56.50	26.30	0.47	1.95
SC-14-BZ-17		56.50	27.30	0.48	1.87
SC-14-BZ-18		56.50	25.40	0.45	1.90
SC-14-BZ-19		56.50	25.40	0.45	1.89
SC-14-BZ-20		56.50	25.70	0.45	1.76
SC-21-BZ-21	21	56.50	29.00	0.51	1.89
SC-21-BZ-22		56.50	28.00	0.50	2.06
SC-21-BZ-23		56.50	30.00	0.53	1.64
SC-21-BZ-24		56.50	28.00	0.50	1.99
SC-21-BZ-25		56.50	28.00	0.50	1.83
SC-21-BZ-26	28	56.50	28.00	0.50	1.71
SC-21-BZ-27		56.50	27.50	0.49	1.65
SC-21-BZ-28		56.50	28.50	0.50	1.75
SC-21-BZ-29		56.50	28.50	0.50	1.80
SC-21-BZ-30		56.50	27.00	0.48	1.63



รูปที่ 3.9 แบบหล่อทำจากท่อ PVC ขนาด 4 นิ้ว สำหรับตัวอย่างการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างเกลือหินที่หล่อด้วยซีเมนต์สำหรับการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง

รูปที่ 3.11 ตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือบนรอยแตกแบบเรียบ

รูปที่ 3.12 ตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือบนรอยแตกแบบขรุขระ

3) การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ Push-out

นำแท่งตัวอย่างเกลือหินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว ที่เจาะรูเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว แล้วอุดด้วยแท่งโฟมที่ตัดให้ได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์ใหญ่กว่า 1 นิ้ว เล็กน้อยเพื่อให้ได้ระดับตามที่ต้องการ เทซีเมนต์ที่ผสมแล้ว (รูปที่ 3.13) ลงในรูที่เจาะทันทีตามระดับที่ต้องการและระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศ ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องตามเวลาที่กำหนด

รูปที่ 3.13 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ Push-out

บทที่ 4
การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของซีเมนต์

4.1 วัตถุประสงค์

เนื้อหาของบทนี้ได้อธิบายถึงขั้นตอน วิธีการ และข้อปฏิบัติของการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วยการทดสอบกำลังกดสูงสุดในแกนเดียว การตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น ค่าอัตราส่วนปัวซ์ซอง การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน และการวัดค่าความหนืดของตัวอย่างซีเมนต์ผสมน้ำเกลือ

4.2 การทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียว

การทดสอบแรงกดในแกนเดียว (Uniaxial compression test) มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความต้านแรงกดสูงสุดในแกนเดียวของแท่งตัวอย่าง การทดสอบได้ปฏิบัติตามข้อกำหนดมาตรฐานสากล ASTM D7012 และข้อแนะนำของ ISRM (Brown, 1981)

การทดสอบนี้ได้นำแท่งตัวอย่างหินมากดด้วยเครื่องกดตามแนวแกน โดยทุกตัวอย่างจะถูกกดด้วยอัตราเท่ากัน (Constant loading rate) ให้แตกภายในเวลา 5–10 นาที ด้วยเครื่อง SBEL PLT–75 ซึ่งมีความสามารถในการกดสูงสุด 75,000 ปอนด์ (รูปที่ 4.1)

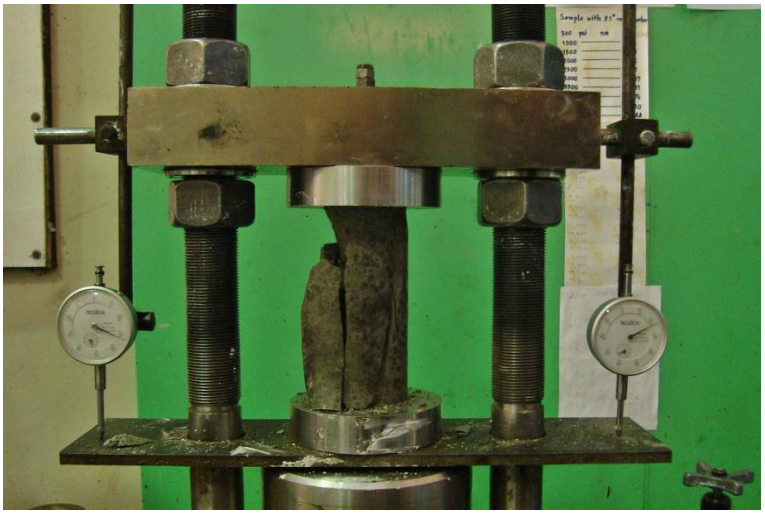
การทดสอบได้บันทึกค่าแรงกดและปริมาณการยุบตัวของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ผสมน้ำเกลืออย่างต่อเนื่อง พร้อมทั้งสังเกตลักษณะการร้าวและการแตกของแท่งตัวอย่าง (รูปที่ 4.2) ผลที่ได้นำเสนอในรูปแผนภูมิระหว่างค่าความเค้นและความเครียดเพื่อหาความสัมพันธ์เชิงเส้น ซึ่งการคำนวณจะเป็นไปตามสมการที่ (4.1) และ (4.2)

$$\sigma_{axial} = P/A \tag{4.1}$$

$$\varepsilon_{axial} = \Delta L/L \tag{4.2}$$

โดยที่ σ_{axial} คือความเค้นในแนวแกน P คือแรงกดในแนวแกน A คือพื้นที่หน้าตัดของแท่งตัวอย่างหิน ε_{axial} คือความเครียดในแนวแกน ΔL คือการเปลี่ยนแปลงความยาวของแท่งตัวอย่างหินในขณะที่ให้แรงกดสูงขึ้น และ L คือความยาวทั้งหมดของแท่งตัวอย่างหินก่อนการกด ถ้าค่าแรงกดในแนวแกนสูงสุดที่จุดวิบัติเท่ากับ P_f ค่าความเค้นสูงสุดในแกนเดียว σ_c (Uniaxial compressive strength) จะคำนวณได้จาก

$$\sigma_c = P_f / A \tag{4.3}$$



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างแท่งซีเมนต์ผสมน้ำเกลือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว และ L/D = 2.5 หลังจากทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียวและวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น

รูปที่ 4.2 ตัวอย่างแท่งซีเมนต์ผสมน้ำเกลือ อายุ 7 วัน หลังจากทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียว

ตารางที่ 4.1 สรุปผลการทดสอบแรงกดในแกนเดียวตามอายุของแท่งตัวอย่าง 1, 3, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่าเมื่ออายุของแท่งตัวอย่างมากขึ้นได้ส่งผลให้มีค่าแรงกดสูงสุดในแกนเดียวสูงขึ้นจาก 4.67, 12.83, 13.10, 14.63, 19.65 และ 24.02 MPa ตามลำดับ

4.3 การตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและค่าอัตราส่วนปัวซ์ซอง

ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (Young's modulus, E) สามารถคำนวณได้จาก

$$E = \frac{\Delta\sigma_{axial}}{\Delta\varepsilon_{axial}} \tag{4.4}$$

โดยที่ $\Delta\sigma_{axial}$ คือค่าความเค้นที่เปลี่ยนแปลงตามแนวแกน และ $\Delta\varepsilon_{axial}$ คือค่าความเครียดที่เปลี่ยนแปลงในแนวแกนที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของความเค้น โดยค่าทั้งสองจะวัดได้จากเส้นสัมผัสที่จุด 50% ของความเค้นกดสูงสุด

ค่าอัตราส่วนของปัวซ์ซอง (Poisson's Ratio, ν) สามารถคำนวณได้จาก

$$\nu = \frac{-\varepsilon_{lateral}}{\varepsilon_{axial}} \tag{4.5}$$

โดยที่ $\varepsilon_{lateral} = \Delta D/D$ (ΔD คือเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างหินที่เปลี่ยนแปลง และ D คือเส้นผ่าศูนย์กลางเดิมของตัวอย่างหิน) $\varepsilon_{lateral}$ และ ε_{axial} ได้จากการวัดที่จุด 50% ของค่าความเค้นสูงสุด ผลการทดสอบพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออายุของแท่งตัวอย่างมากขึ้น จาก 1, 3, 7, 14, 21 และ 28 วัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 0.17, 0.31, 0.35, 0.35, 0.42 และ 0.44 GPa ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.2 เป็นผลจากการตรวจวัดแท่งซีเมนต์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว ซึ่งได้ทำการตรวจวัดหาค่าอัตราส่วนปัวซ์ซองของแท่งตัวอย่างอายุ 3 วัน รูปที่ 4.3 แสดงการติดตั้งตัวอย่างหินพร้อมมาตรวัดการเคลื่อนตัว (Dial Gages) ในแนวแกนและแนวตั้งฉากกับแกนของแรงกด

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียวของซีเมนต์ผสมน้ำเกลือตามมาตรฐาน ASTM D7012

Cement Sample	Specimen Age (days)	Demeter (mm)	Length (mm)	L/D	Density (g/cc)	UCS (MPa)	Average (MPa)	Elastic Modulus (GPa)	Average (GPa)
SC-01-UCS-01	1	56.5	134.5	2.38	1.84	4.8	4.67	0.14	0.17
SC-01-UCS-02		56.5	135.0	2.39	1.84	4.4		0.17	
SC-01-UCS-03		56.5	135.0	2.39	1.84	4.8		0.19	
SC-03-UCS-04	3	56.5	134.5	2.38	1.87	13.6	12.83	0.33	0.31
SC-03-UCS-05		56.5	135.0	2.39	1.88	11.8		0.34	
SC-03-UCS-06		56.5	136.5	2.42	1.87	13.1		0.25	
SC-07-UCS-07	7	56.5	135.0	2.39	1.71	10.0	13.10	0.26	0.33
SC-07-UCS-08		56.5	135.0	2.39	1.86	14.4		0.43	
SC-07-UCS-09		56.5	135.0	2.39	1.86	14.9		0.30	
SC-14-UCS-10	14	56.5	136.3	2.41	1.86	16.4	14.63	0.44	0.35
SC-14-UCS-11		56.5	136.4	2.41	1.86	15.3		0.30	
SC-14-UCS-12		56.5	135.8	2.40	1.86	12.2		0.30	
SC-21-UCS-13	21	56.5	135.0	2.39	1.82	19.7	19.65	0.43	0.42
SC-21-UCS-14		56.5	135.5	2.40	1.82	17.5		0.46	
SC-21-UCS-15		56.5	136.0	2.41	1.82	21.8		0.38	
SC-28-UCS-16	28	56.5	137.0	2.42	1.86	21.8	24.02	0.42	0.44
SC-28-UCS-17		56.5	130.0	2.30	1.84	26.2		0.46	
SC-28-UCS-18		56.5	133.5	2.36	1.84	24.0		0.43	

ตารางที่ 4.2 ผลการตรวจวัดหาค่าสัมประสิทธิความยืดหยุ่นและค่าอัตราส่วนปัวซ์ซองตามมาตรฐาน ASTM D7012

Cement Sample	Specimen Age (days)	Demeter (mm)	Length (mm)	L/D	Density (g/cc)	Elastic Modulus (GPa)	Poisson's ratio
SC-03-UCSE-01	3	106.7	254.0	2.38	1.74	0.31	0.33
SC-03-UCSE-02		106.7	254.0	2.38	1.77	0.42	0.23
SC-03-UCSE-03		106.7	254.0	2.38	1.81	0.23	0.31
SC-03-UCSE-04		106.7	254.0	2.38	1.77	0.24	0.39
SC-03-UCSE-05		106.7	254.0	2.38	1.75	0.29	0.28

รูปที่ 4.3 การตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและค่าอัตราส่วนปัวซ์ซองด้วยการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทั้ง 2 แกน

4.4 การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน

การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนมีจุดประสงค์เพื่อหาแรงดึงสูงสุดของแท่งตัวอย่างหิน วิธีการเตรียมได้ปฏิบัติตามมาตรฐานสากล ASTM D3967 และข้อแนะนำของ ISRM (Brown, 1981) วิธีการทดสอบได้ใช้เครื่องกดทดสอบรุ่น SBEL PLT-75 โดยทำการกดในแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง (รูปที่ 4.4) ด้วยอัตราการกดคงที่เท่ากับ 0.5 MPa/s และกดจนกระทั่งตัวอย่างซีเมนต์ผสมน้ำเกลือแตกและแยกออกจากกัน (รูปที่ 4.5) ค่าแรงกดสูงสุดที่ได้นำมาคำนวณเป็นค่าแรงดึงแบบบราซิลเลียน ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการ (ASTM D3967)

$$\sigma_B = 2\ P_f\ /\ \pi DL \qquad (3.5)$$

โดยที่ σ_B คือแรงดึงแบบบราซิลเลียน P_f คือแรงกดสูงสุดที่จุดวิบัติ D คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตัวอย่างหิน และ L คือความหนาของตัวอย่างหิน ตารางที่ 4.3 สรุปผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนตามอายุของแท่งตัวอย่าง 1, 3, 7, 14, 21 และ 28 วัน โดยให้ผลการทดสอบคือ 2.17, 2.26, 2.17, 1.78, 2.36 และ 2.06 MPa ตามลำดับ รูปที่ 4.6 แสดงตัวอย่างการแตกของซีเมนต์ผสมน้ำเกลืออายุ 1 วัน ทั้ง 5 ตัวอย่าง

4.5 การวัดค่าความหนืดของซีเมนต์ผสมน้ำเกลือ

การทดสอบความหนืดมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าความหนืด (Viscosity) และค่าความหนาแน่น (slurry density) ของส่วนผสมซีเมนต์และน้ำเกลืออิ่มตัว การทดสอบความหนืดได้ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D2196 โดยมีขั้นตอนดังนี้

1) เทส่วนผสมซีเมนต์ลงในถ้วยตวงปริมาตร 500 cm^2 บันทึกค่าอุณหภูมิและชั่งน้ำหนักของส่วนผสมเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าความหนาแน่นและค่าความถ่วงจำเพาะ

2) ปรับเข็มทดสอบ RV1 ถึง RV7 ให้เหมาะสมกับความหนืด แล้วติดตั้งเข็มทดสอบกับเครื่องทดสอบความหนืด แล้ววางถ้วยส่วนผสมใต้เครื่องทดสอบ (รูปที่ 4.7)

3) ปรับระยะเข็มทดสอบลงในส่วนผสม โดยให้ก้านปรับระดับสัมผัสกับก้นถ้วยส่วนผสมพอดี แล้วเปิดสวิซต์เครื่องทดสอบ โดยเริ่มที่ความเร็วรอบต่ำ รอประมาณ 60 วินาที เพื่อให้เข็มหมุนได้อย่างคงที่ จากนั้นทำการบันทึกหมายเลขเข็มทดสอบและค่าความเร็วรอบในหน่วย rpm

4) ทดสอบซ้ำด้วยความเร็วรอบเท่าเดิมประมาณ 3-5 ค่า เพื่อหาค่าเฉลี่ยความหนืด พร้อมทั้งสังเกตลักษณะความหนืดของตัวอย่างซีเมนต์ที่ผสม

5) คำนวณค่าความหนืดในหน่วย centipoises (MPa·s) จากค่าความเร็วรอบคูณกับตัวคูณของเข็มทดสอบที่ใช้

ผลที่ได้จากการทดสอบ 5 ตัวอย่างได้แสดงไว้ดังตารางที่ 4.4

รูปที่ 4.4 การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนกับตัวอย่างแท่งซีเมนต์ผสมน้ำเกลืออายุ 1 วัน ที่ถูกกดในแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง

รูปที่ 4.5 ตัวอย่างแท่งซีเมนต์ผสมน้ำเกลืออายุ 1 วัน ถูกกดในแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง จนกระทั่งแตกตามแนวแกน

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนของซีเมนต์ผสมน้ำเกลือตามมาตรฐาน ASTM 3967

Cement Sample	Specimen Age (days)	Demeter (mm)	Length (mm)	L/D	Density (g/cc)	Brazilian Tensile Strength (MPa)	Average (MPa)
SC-01-BZ-01	1	56.50	28.00	0.50	1.83	2.01	2.17
SC-01-BZ-02		56.50	28.00	0.50	1.74	2.42	
SC-01-BZ-03		56.50	27.50	0.49	1.89	2.01	
SC-01-BZ-04		56.50	28.00	0.50	1.85	2.01	
SC-01-BZ-05		56.50	28.00	0.50	1.80	2.42	
SC-03-BZ-06	3	56.50	28.00	0.50	1.86	2.01	2.26
SC-03-BZ-07		56.50	28.00	0.50	1.83	2.21	
SC-03-BZ-08		56.50	27.50	0.49	1.93	2.46	
SC-03-BZ-09		56.50	27.50	0.49	1.89	2.26	
SC-03-BZ-10		56.50	27.70	0.49	1.90	2.38	
SC-07-BZ-11	7	56.50	28.00	0.50	1.72	2.01	2.17
SC-07-BZ-12		56.50	28.00	0.50	1.70	2.42	
SC-07-BZ-13		56.50	28.00	0.50	1.70	2.01	
SC-07-BZ-14		56.50	28.00	0.50	1.73	2.01	
SC-07-BZ-15		56.50	28.00	0.50	1.73	2.42	
SC-14-BZ-16	14	56.50	26.30	0.47	1.95	1.72	1.78
SC-14-BZ-17		56.50	27.30	0.48	1.87	1.86	
SC-14-BZ-18		56.50	25.40	0.45	1.90	1.55	
SC-14-BZ-19		56.50	25.40	0.45	1.89	2.00	
SC-14-BZ-20		56.50	25.70	0.45	1.76	1.76	

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนของซีเมนต์ผสมน้ำเกลือตามมาตรฐาน ASTM 3967 (ต่อ)

Cement Sample	Specimen Age (days)	Demeter (mm)	Length (mm)	L/D	Density (g/cc)	Brazilian Tensile Strength (MPa)	Average (MPa)
SC-21-BZ-21	21	56.50	29.00	0.51	1.89	1.94	2.36
SC-21-BZ-22		56.50	28.00	0.50	2.06	2.42	
SC-21-BZ-23		56.50	30.00	0.53	1.64	2.63	
SC-21-BZ-24		56.50	28.00	0.50	1.99	2.01	
SC-21-BZ-25		56.50	28.00	0.50	1.83	2.82	
SC-21-BZ-26	28	56.50	28.00	0.50	1.71	2.21	2.06
SC-21-BZ-27		56.50	27.50	0.49	1.65	2.05	
SC-21-BZ-28		56.50	28.50	0.50	1.75	1.98	
SC-21-BZ-29		56.50	28.50	0.50	1.80	2.18	
SC-21-BZ-30		56.50	27.00	0.48	1.63	1.88	

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 4.6 ตัวอย่างแท่งซีเมนต์ผสมน้ำเกลืออายุ 1 วัน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว และ L/D = 0.5 หลังจากถูกทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน

รูปที่ 4.7 เครื่องทดสอบความหนืด Brookfield® viscometer model RV

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบความหนืด ASTM D2196

Sample No.	Temperature (°C)		Cement Slurry	Dynamic Viscosity	Kinematic Viscosity
	Room	Slurry			
SC-01	31.0	28.0	17,580	1.65	0.73
SC-02	30.1	28.0	17,610	1.60	0.72
SC-03	30.4	27.4	17,580	1.82	0.82
SC-04	29.5	27.5	17,580	1.71	0.78
SC-05	30.2	27.8	17,580	1.81	0.80
Average				**1.72**	**0.77**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5
การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง

5.1 วัตถุประสงค์

เนื้อหาในบทนี้อธิบายขั้นตอน วิธีการ และข้อปฏิบัติในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงระหว่างซีเมนต์ผสมน้ำเกลือและตัวอย่างเกลือหิน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ รอยแตกแบบเรียบ (Saw-cut surface) และรอยแตกแบบขรุขระ (Tension-induced fracture) โดยขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทั้งหมดได้กล่าวไว้แล้วอย่างละเอียดในบทที่ 3

5.2 อุปกรณ์ทดสอบแรงเฉือนโดยตรงของรอยแตกแบบสามแหวน

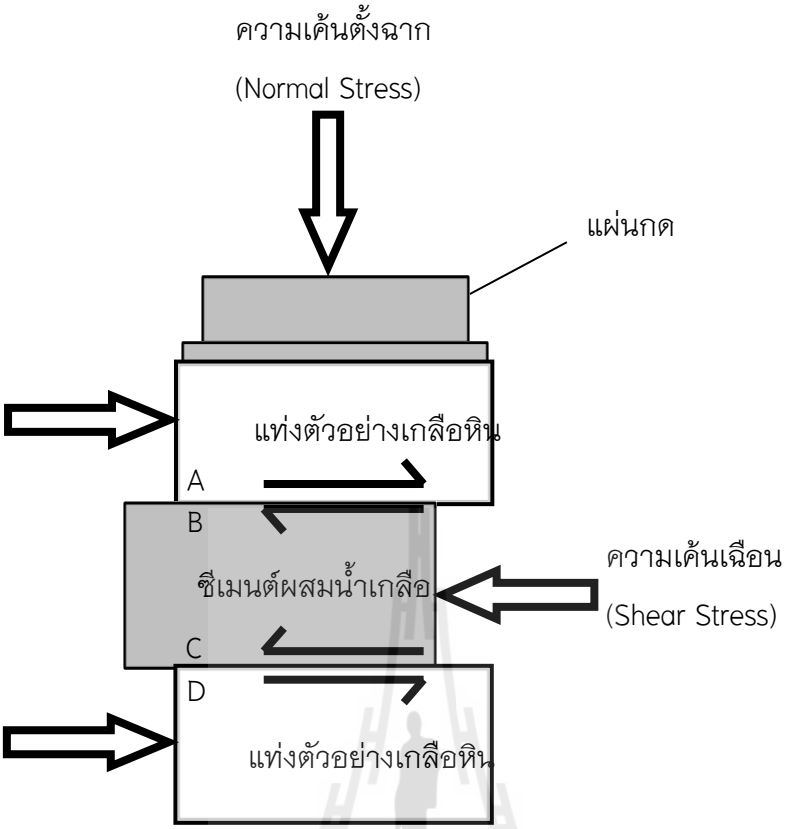
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของส่วนผสมระหว่างผิวรอยแตกของเกลือหินและแท่งตัวอย่างซีเมนต์ผสมน้ำเกลือประกอบด้วย 2 ส่วน ดังนี้

1) วงแหวนสำหรับยึดจับตัวอย่างทดสอบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 10 เซนติเมตร สำหรับยึดตัวอย่างแท่งซีเมนต์ชั้นกลางตามแบบภาพตัดขวางดังรูปที่ 5.1 โดยมีระนาบการเฉือนเกิดขึ้น 2 ระนาบ คือ ระนาบด้านบน (ระนาบ A-B) และระนาบด้านล่าง (ระนาบ C-D) รูปที่ 5.2 แสดงการติดตั้งตัวอย่างลงในเครื่องทดสอบ

2) ชุดอุปกรณ์สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน ประกอบด้วยชุดให้แรงเฉือนซึ่งมีเสาค้ำยันพร้อมกับแม่แรงไฮดรอลิคในแนวดิ่งยึดติดอยู่กับคานด้านบนและฐานล่าง ที่ด้านบนของตัวอย่างจะมีแผ่นกดที่ใช้สำหรับส่งผ่านความเค้นตั้งฉาก (Normal Stress) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ไปยังตัวอย่างเกลือหินที่ต้องการทดสอบ โดยมีแม่แรงไฮดรอลิคในแนวระนาบซึ่งยึดกับเสาค้ำยัน ฐานรองด้านหน้า และฐานรองด้านหลังเพื่อให้แรงในแนวตั้งฉากและแรงเฉือนกับตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ โดยวงแหวนกลางจะถูกเฉือนด้วยแม่แรงไฮดรอลิคในแนวระนาบ รูปที่ 5.3 แสดงอุปกรณ์ที่ทำการติดตั้งเครื่องมือพร้อมทำการทดสอบ

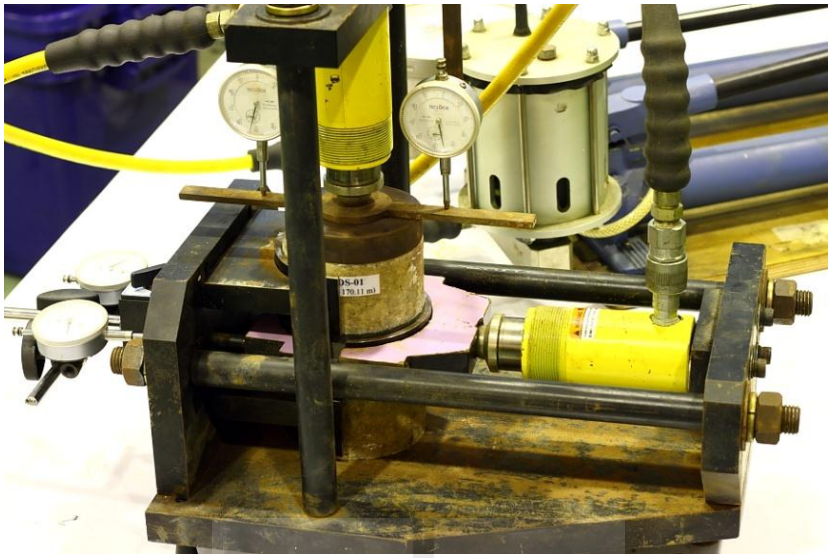
5.3 การทดสอบแรงเฉือนโดยตรงของรอยแตกแบบสามแหวน

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของรอยแตก มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าความเค้นเฉือนสูงสุด (Peak shear strength) และค่าความเค้นเฉือนคงค้าง (Residual shear strength) ระหว่างผิวรอยแตกของเกลือหินและแท่งตัวอย่างซีเมนต์ผสมน้ำเกลือ การทดสอบนี้ใช้ตัวอย่างรอยแตก 2 ลักษณะ คือ รอยแตกแบบเรียบ และรอยแตกแบบขรุขระ จากการกดให้แตกด้วยเครื่อง SBEL PLT-75 โดยให้แรงที่กดมีลักษณะเป็นแนวยาว (Line load) ตามแนวที่ต้องการสร้างผิวรอยแตกจนกระทั่งตัวอย่างเกลือหินแตกออกจากกัน



รูปที่ 5.1 ภาพตัดขวางของแท่งตัวอย่างในการส่งผ่านความเค้นตั้งฉากลงบนตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ ซึ่งวงแหวนกลางจะถูกเฉือนด้วยความเค้นเฉือน โดยมีระนาบการเฉือนเกิดขึ้น 2 ระนาบ คือ ระนาบด้านบน (ระนาบ A–B) และระนาบด้านล่าง (ระนาบ C–D)

รูปที่ 5.2 แสดงขั้นตอนการติดตั้งแท่งหินตัวอย่างลงในเครื่องทดสอบกำลังเฉือน



รูปที่ 5.3 อุปกรณ์ที่ทำการติดตั้งเครื่องมือพร้อมทำการทดสอบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนเพื่อหาค่าความเค้นเฉือนสูงสุดและค่าความเค้นเฉือนคงค้างจะทำการทดสอบเพื่อหากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของผิวรอยแตกเรียบที่มีแรงกดตั้งฉากกับระนาบรับแรงเฉือนผันแปรอยู่ระหว่าง 0.45 MPa ถึง 11.1 MPa การทดสอบจะกระทำที่อุณหภูมิปกติ และปฏิบัติตามข้อกำหนดมาตรฐานสากล ASTM D5607 และข้อแนะนำของ ISRM (Brown, 1981)

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนเพื่อหาค่ากำลังเฉือนสูงสุดระหว่างผิวรอยแตกของเกลือหินและแท่งตัวอย่างซีเมนต์ผสมน้ำเกลือมีขั้นตอนดังนี้

1) ประกอบชุดอุปกรณ์ทั้ง 2 ส่วนข้างต้นเข้าด้วยกันพร้อมติดตั้งตัวอย่างที่ต้องการทดสอบเข้ากับชุดอุปกรณ์สำหรับการทดสอบกำลังเฉือนดังรูปที่ 5.3
2) ติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งด้านบนของกระบอกเพื่อวัดระยะการยุบตัวและติดตั้งในแนวระนาบเพื่อวัดระยะการเคลื่อนตัวตามแนวแรงเฉือน
3) ให้ความเค้นตั้งฉากด้วยแม่แรงไฮดรอลิคกระทำในแนวตั้งฉากกับตัวอย่าง โดยผันแปรความเค้นตั้งฉากที่ 0.45, 0.51, 0.57, 0.64, 0.70, 0.76, 0.89 และ 1.02 MPa ในแต่ละตัวอย่าง ทำการจดบันทึกค่าการเคลื่อนตัวและรักษาความเค้นตั้งฉากให้คงที่
4) ให้ความเค้นเฉือนด้วยแม่แรงไฮดรอลิคในแนวระนาบ ทำการอ่านค่าการเคลื่อนตัวในแนวระนาบและจดบันทึกค่าไปพร้อมกันอย่างต่อเนื่องจนถึงจุดที่เกิดความเค้นเฉือนสูงสุด (Peak shear strength) บันทึกค่าเพื่อนำไปคำนวณหาค่าความเค้นยึดติด (Cohesion) และค่ามุมเสียดทานภายใน (Friction angle) จากนั้นให้ความเค้นเฉือนอย่างต่อเนื่องเพื่อหาความต้านแรงเฉือนคงเหลือ (Residual Shear Strength) ซึ่งแรงเฉือนสูงสุดจะเกิดขึ้นทันทีหลังมีการเคลื่อนตัวของรอยแตก เมื่อความต้านแรงเฉือนมีแนวโน้มลดลงแล้วจึงหยุดทำการทดสอบ การทดสอบนี้ตัวอย่างหินแต่ละชุดจะทำการทดสอบเพียงเที่ยวเดียวเท่านั้นเนื่องจากผิวรอยแตกของตัวอย่างหินจะแตกออกหลังจากการทดสอบ

กำลังรับแรงเฉือนสูงสุดและกำลังรับแรงเฉือนคงค้างสามารถคำนวณได้จากค่าแรงเฉือนสูงสุดหรือค่าแรงเฉือนคงค้างหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของผิวสัมผัสดังนี้

$$\tau_P = F_P/2A \qquad (5.1)$$

$$\tau_R = F_R/2A \qquad (5.2)$$

โดยที่ τ_P คือความเค้นเฉือนสูงสุด F_P คือแรงเฉือนสูงสุดที่กระทำกับผิวรอยแตก A คือพื้นที่หน้าตัดรับแรงเฉือนของตัวอย่างหิน τ_R คือความเค้นเฉือนคงค้าง และ F_R คือ แรงเฉือนคงค้างกระทำกับผิวรอยแตกหลังจากผิวรอยแตกรับแรงเฉือนสูงสุดตามกฎแรงเสียดทานของ Coulomb ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$\tau = \sigma_n \tan \phi_P + c_P \quad (5.3)$$

และ $$\tau = \sigma_n \tan \phi_R \quad (5.4)$$

โดยที่ c_P คือแรงยึดติดสุดยอด (Peak cohesion) ϕ_P คือมุมเสียดทานสำหรับความเค้นเฉือนสุดยอด (Peak friction angle) และ ϕ_R คือมุมเสียดทานสำหรับความเค้นเฉือนคงเหลือ (Residual friction angle)

ผลการทดสอบระหว่างซีเมนต์ผสมน้ำเกลือและเกลือหินผิวเรียบแสดงไว้ในตารางที่ 5.1 ซึ่งให้ผลทดสอบค่าความเค้นเฉือนสูงสุดเท่ากับ 1.46, 1.59, 1.82 1.78, 2.23, 2.55, 2.61 และ 2.87 MPa ตามลำดับตามการแปรผันของค่าความเค้นตั้งฉากในการทดสอบแต่ละตัวอย่าง และมีค่าความเค้นเฉือนคงค้างเท่ากับ 0.89, 1.02, 1.21, 1.27, 1.40, 1.53, 1.85 และ 1.91 ตามลำดับ สำหรับตัวอย่างเกลือหินอีกชุดที่ถูกจัดเตรียมแบบไม่มีแรงยึดติดกันระหว่างผิวสัมผัสของเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือให้ค่าความเค้นเฉือนคงค้างเท่ากับ 0.16, 0.32, 0.57, 0.89, 1.08, 1.27 และ 1.59 ตามลำดับ รูปที่ 5.4 และรูปที่ 5.5 แสดงตัวอย่างหินหลังการทดสอบแรงเฉือนระหว่างเกลือหินผิวเรียบและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือ รูปที่ 5.6 แสดงตัวอย่างหลังการทดสอบแบบผิวขรุขระ โดยผลการทดสอบในลักษณะนี้ได้แสดงโดยละเอียดในตารางที่ 5.2 ถึงตารางที่ 5.5

รูปที่ 5.7 ถึงรูปที่ 5.12 แสดงผลความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวตามแนวแรงเฉือนระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือ และความสัมพันธ์ระว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของความเค้นตั้งฉากของตัวอย่างแบบผิวเรียบ แบบผิวเรียบไม่ยึดติด และแบบผิวขรุขระ ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 สรุปผลการทดสอบแรงเฉือนระหว่างซีเมนต์ผสมน้ำเกลือและเกลือหินผิวเรียบ

Specimen No.	Depth (m)	Cement Age (days)	Normal Load (MPa)	Peak Shear Strength (MPa)	Residual Shear Strength (MPa)
KB-09-11-DS-01	170.00-170.11	7	0.45	1.46	0.89
KB-09-12-DS-02	168.70-168.81		0.51	1.59	1.02
KB-09-13-DS-03	168.00-168.11		0.57	1.82	1.21
KB-09-14-DS-04	169.70-169.81		0.64	1.78	1.27
KB-09-19-DS-09	176.00-176.11		0.70	2.23	1.40
KB-09-20-DS-10	176.21-176.31		0.76	2.55	1.53
KB-09-21-DS-11	177.00-177.11		0.89	2.61	1.85
KB-09-22-DS-12	177.15-177.25		1.02	2.87	1.91
KB-09-22-DS-13	178.40-178.51	7 (unbonding surface)	0.19	-	0.16
KB-09-22-DS-14	178.00-178.11		0.32	-	0.32
KB-09-22-DS-15	179.00-179.11		0.48	-	0.57
KB-09-22-DS-16	173.00-173.11		0.64	-	0.89
KB-09-22-DS-17	173.40-173.51		0.80	-	1.08
KB-09-22-DS-18	173.60-173.61		0.96	-	1.27
KB-09-22-DS-19	173.70-173.71		1.11	-	1.59

รูปที่ 5.4 ตัวอย่างหินหลังการทดสอบแรงเฉือนระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือแบบผิวเรียบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 5.5 ตัวอย่างหินหลังการทดสอบแรงเฉือนระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือแบบผิวเรียบ

รูปที่ 5.6 ตัวอย่างหินหลังการทดสอบแรงเฉือนระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือแบบขรุขระ

ตารางที่ 5.2 สรุปผลการทดสอบแรงเฉือนระหว่างซีเมนต์ผสมน้ำเกลือและเกลือหินผิวขรุขระ

Specimen No.	Depth (m)	Cement Age (days)	Normal Load (MPa)	Peak Shear Strength (MPa)	Residual Shear Strength (MPa)
KB-09-15-DS-05	172.40-172.51	7	0.45	1.66	0.89
KB-09-16-DS-06	173.00-173.11		0.57	1.91	1.21
KB-09-17-DS-07	174.00-174.11		0.70	2.23	1.4
KB-09-18-DS-08	175.00-175.11		0.89	2.87	1.85

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบแรงเฉือนระหว่างซีเมนต์ผสมน้ำเกลือและเกลือหินผิวเรียบ

Specimen No.							
KB-09-11-DS-01		KB-09-12-DS-02		KB-09-13-DS-03		KB-09-14-DS-04	
Normal Load = 0.45 MPa		Normal Load = 0.51 MPa		Normal Load = 0.57 MPa		Normal Load = 0.64 MPa	
Shear Stress (MPa)	Shear Displacement (mm)	Shear Stress (MPa)	Shear Displacement (mm)	Shear Stress (MPa)	Shear Displacement (mm)	Shear Stress (MPa)	Shear Displacement (mm)
0.00	0.0	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00
0.19	0.50	1.27	1.5	0.13	0.10	0.10	0.10
0.25	0.60	1.59	1.7	0.19	0.20	0.11	0.20
0.29	0.70	1.72	1.9	0.22	0.30	0.13	0.30
0.32	0.80	1.27	2.1	0.25	0.40	0.14	0.40
0.41	0.90	1.21	2.3	0.32	0.50	0.16	0.50
0.54	1.00	1.02	2.5	0.35	0.60	0.18	0.60
0.83	1.40	1.02	2.7	0.41	0.70	0.20	0.70
0.89	1.50	1.02	2.9	0.48	0.80	0.24	0.80
0.96	1.60	1.02	3.3	0.67	0.90	0.27	0.90

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบแรงเฉือนระหว่างซีเมนต์ผสมน้ำเกลือและเกลือหินผิวเรียบ (ต่อ)

Specimen No.							
KB-09-11-DS-01		KB-09-12-DS-02		KB-09-13-DS-03		KB-09-14-DS-04	
Normal Load = 0.45 MPa		Normal Load = 0.51 MPa		Normal Load = 0.57 MPa		Normal Load = 0.64 MPa	
Shear Stress (MPa)	Shear Displacement (mm)	Shear Stress (MPa)	Shear Displacement (mm)	Shear Stress (MPa)	Shear Displacement (mm)	Shear Stress (MPa)	Shear Displacement (mm)
1.02	1.70	1.02	3.7	0.92	1.00	0.40	1.00
1.08	1.80	1.02	4.5	1.08	1.10	0.57	1.10
1.11	1.90			1.21	1.20	1.08	1.60
1.11	2.00			1.40	1.30	1.62	2.00
1.15	2.10			1.46	1.40	1.78	2.20
1.21	2.20			1.50	1.50	1.40	2.40
1.27	2.30			1.53	1.60	1.34	2.60
1.34	2.40			1.62	1.70	1.27	2.90
1.46	2.50			1.66	1.80	1.27	3.40
1.46	2.60			1.69	1.90	1.27	3.90
1.34	2.70			1.72	2.00	1.27	4.40
1.21	2.80			1.74	2.10		
1.02	2.90			1.75	2.20		
1.02	3.00			1.78	2.30		
0.96	3.10			1.82	2.40		
0.89	3.20			1.82	2.50		
0.89	3.30			1.82	2.60		
0.89	3.40			1.59	2.70		
0.89	3.50			1.46	2.80		
0.89	3.60			1.27	2.90		
0.89	3.70			1.21	3.00		

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบแรงเฉือนระหว่างซีเมนต์ผสมน้ำเกลือและเกลือหินผิวเรียบ (ต่อ)

Specimen No.							
KB-09-11-DS-01		KB-09-12-DS-02		KB-09-13-DS-03		KB-09-14-DS-04	
Normal Load = 0.45 MPa		Normal Load = 0.51 MPa		Normal Load = 0.57 MPa		Normal Load = 0.64 MPa	
Shear Stress (MPa)	Shear Displacement (mm)	Shear Stress (MPa)	Shear Displacement (mm)	Shear Stress (MPa)	Shear Displacement (mm)	Shear Stress (MPa)	Shear Displacement (mm)
				1.21	3.10		
				1.21	3.20		
				1.21	3.30		
				1.21	3.40		
				1.21	3.50		
				1.21	3.80		
				1.21	4.20		
0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.10	0.05	0.11	0.10	0.13	0.10	0.13	0.10
0.13	0.10	0.16	0.20	0.22	0.15	0.14	0.20
0.13	0.15	0.25	0.30	0.32	0.20	0.18	0.30
0.13	0.20	0.45	0.40	0.45	0.25	0.23	0.40
0.16	0.25	0.57	0.50	0.64	0.30	0.30	0.50
0.16	0.30	0.76	0.60	0.76	0.35	0.43	0.60
0.19	0.35	0.96	0.70	0.96	0.40	0.76	0.70
0.25	0.50	1.34	0.80	1.05	0.45	1.02	0.80
0.35	0.55	1.85	0.90	1.15	0.50	1.08	0.90
0.54	0.60	2.04	1.00	1.27	0.55	1.46	1.00
0.76	0.70	2.36	1.10	1.37	0.60	1.85	1.10
1.15	0.80	2.55	1.20	1.53	0.65	2.10	1.20
1.53	0.90	1.91	1.30	1.56	0.70	2.48	1.30

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบแรงเฉือนระหว่างซีเมนต์ผสมน้ำเกลือและเกลือหินผิวเรียบ (ต่อ)

Specimen No.							
KB-09-11-DS-01		KB-09-12-DS-02		KB-09-13-DS-03		KB-09-14-DS-04	
Normal Load = 0.45 MPa		Normal Load = 0.51 MPa		Normal Load = 0.57 MPa		Normal Load = 0.64 MPa	
Shear Stress (MPa)	Shear Displacement (mm)	Shear Stress (MPa)	Shear Displacement (mm)	Shear Stress (MPa)	Shear Displacement (mm)	Shear Stress (MPa)	Shear Displacement (mm)
1.75	1.00	1.59	2.00	1.59	0.75	2.68	1.40
2.04	1.20	1.53	2.40	1.66	0.80	2.87	1.50
2.17	1.6	1.53	2.80	1.72	0.85	2.42	1.80
2.20	1.7	1.53	3.00	1.78	0.90	2.29	2.00
2.23	1.8	1.53	3.50	1.85	0.95	2.04	2.20
2.23	1.9	1.53	4.00	2.10	1.00	1.97	2.50
2.23	2.0	1.53	4.50	2.20	1.05	1.91	3.50
2.23	2.1			2.29	1.10	1.91	4.00
2.23	2.2			2.45	1.15	1.91	4.50
2.04	2.3			2.55	1.50	1.91	5.00
1.97	2.4			2.61	2.20	1.91	6.00
1.97	2.5			1.91	3.20		
1.85	2.6			1.85	3.70		
1.40	3.1			1.85	4.20		
1.40	3.6			1.85	4.70		
1.40	4.1			1.85	5.20		
1.40	4.6			1.85	5.70		
1.40	5.1			1.85	6.20		

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบแรงเฉือนระหว่างซีเมนต์ผสมน้ำเกลือและเกลือหินเรียบแบบไม่ยึดติด

Specimen No.							
KB-09-22-DS-13		KB-09-22-DS-14		KB-09-22-DS-15		KB-09-22-DS-16	
Normal Load = 0.19 MPa		**Normal Load = 0.32 MPa**		**Normal Load = 0.48 MPa**		**Normal Load = 0.64 MPa**	
Shear Stress (MPa)	Shear Displacement (mm)	Shear Stress (MPa)	Shear Displacement (mm)	Shear Stress (MPa)	Shear Displacement (mm)	Shear Stress (MPa)	Shear Displacement (mm)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.06	0.33	0.06	0.04	0.06	0.01	0.06	0.10
0.13	0.56	0.10	0.06	0.13	0.04	0.13	0.14
0.16	1.01	0.13	0.07	0.19	0.08	0.19	0.16
0.16	1.27	0.19	0.13	0.25	0.11	0.25	0.18
0.16	1.53	0.22	0.18	0.32	0.13	0.32	0.21
0.16	1.81	0.32	0.51	0.38	0.15	0.38	0.24
0.16	2.08	0.32	0.67	0.45	0.18	0.45	0.28
0.16	2.36	0.32	0.93	0.51	0.38	0.51	0.30
0.16	2.63	0.32	1.19	0.57	0.59	0.57	0.32
0.16	2.91	0.32	1.41	0.57	1.04	0.64	0.35
0.16	3.18	0.32	1.63	0.57	1.51	0.76	0.40
		0.32	1.85	0.57	1.78	0.89	0.72
		0.32	2.07	0.57	2.18	0.89	0.74
		0.32	2.29	0.57	2.54	0.89	0.75
		0.32	2.51	0.57	2.91	0.89	1.18
		0.32	2.73	0.57	3.28	0.89	1.51
				0.57	3.65	0.89	2.27
				0.57	4.01	0.89	3.03
						0.89	3.79

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบแรงเฉือนระหว่างซีเมนต์ผสมน้ำเกลือและเกลือหินเรียบแบบไม่ยึดติด (ต่อ)

Specimen No.					
KB-09-22-DS-17		KB-09-22-DS-18		KB-09-22-DS-19	
Normal Load = 0.80 MPa		**Normal Load = 0.96 MPa**		**Normal Load = 1.11 MPa**	
Shear Stress (MPa)	Shear Displacement (mm)	Shear Stress (MPa)	Shear Displacement (mm)	Shear Stress (MPa)	Shear Displacement (mm)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.06	0.00	0.06	0.09	0.06	0.01
0.13	0.03	0.13	0.13	0.13	0.07
0.19	0.07	0.19	0.14	0.19	0.10
0.25	0.11	0.25	0.16	0.25	0.13
0.32	0.13	0.32	0.18	0.32	0.15
0.38	0.16	0.38	0.19	0.38	0.16
0.45	0.19	0.45	0.21	0.45	0.18
0.51	0.20	0.51	0.22	0.51	0.20
0.57	0.23	0.57	0.23	0.57	0.21
0.64	0.25	0.64	0.24	0.64	0.23
0.70	0.28	0.70	0.25	0.70	0.25
0.76	0.32	0.76	0.27	0.76	0.26
0.83	0.42	0.83	0.28	0.83	0.27
0.89	0.57	0.89	0.30	0.89	0.28
0.96	0.74	0.96	0.31	0.96	0.30
1.02	0.99	1.02	0.33	1.02	0.32
1.08	1.80	1.08	0.35	1.08	0.36
1.08	2.12	1.15	0.37	1.40	0.95
1.08	2.42	1.21	0.40	1.46	1.58
1.08	2.84	1.27	0.72	1.53	2.39

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบแรงเฉือนระหว่างซีเมนต์ผสมน้ำเกลือและเกลือหินเรียบแบบไม่ยึดติด (ต่อ)

Specimen No.					
KB-09-22-DS-17		KB-09-22-DS-18		KB-09-22-DS-19	
Normal Load = 0.80 MPa		**Normal Load = 0.96 MPa**		**Normal Load = 1.11 MPa**	
Shear Stress (MPa)	Shear Displacement (mm)	Shear Stress (MPa)	Shear Displacement (mm)	Shear Stress (MPa)	Shear Displacement (mm)
1.08	3.26	1.27	0.89	1.59	2.86
1.08	3.68	1.27	1.37	1.59	3.23
1.08	4.10	1.27	1.99	1.59	3.85
1.08	4.52	1.27	2.61	1.59	4.60
1.08	4.94	1.27	3.23	1.59	5.50
		1.27	3.85		
		1.27	4.47		

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบแรงเฉือนระหว่างซีเมนต์ผสมน้ำเกลือและเกลือหินผิวขรุขระ

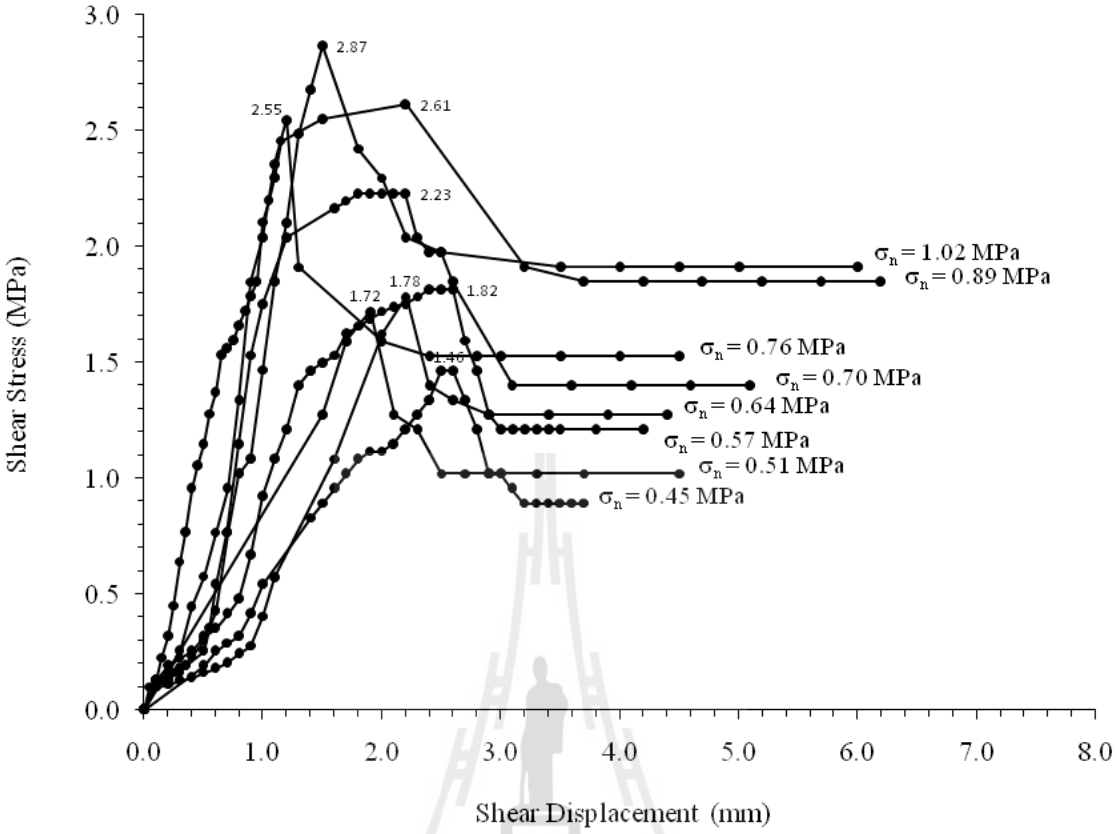
Specimen No.							
KB-09-15-DS-05		KB-09-16-DS-06		KB-09-17-DS-07		KB-09-18-DS-08	
Normal Load = 0.45 MPa		Normal Load = 0.57 MPa		Normal Load = 0.70 MPa		Normal Load = 0.89 MPa	
Shear Stress (MPa)	Shear Displacement (mm)	Shear Stress (MPa)	Shear Displacement (mm)	Shear Stress (MPa)	Shear Displacement (mm)	Shear Stress (MPa)	Shear Displacement (mm)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.19	0.10	0.13	0.10	0.10	0.10	0.13	0.10
0.25	0.20	0.19	0.20	0.13	0.20	0.22	0.15
0.29	0.30	0.22	0.30	0.13	0.30	0.32	0.20
0.32	0.40	0.25	0.40	0.13	0.40	0.45	0.25
0.41	0.50	0.32	0.50	0.16	0.50	0.64	0.30
0.54	0.60	0.35	0.60	0.16	0.60	0.76	0.35
0.83	0.70	0.41	0.70	0.19	0.70	0.96	0.40
1.02	0.80	0.48	0.80	0.25	0.80	1.05	0.45
1.05	0.90	0.67	0.90	0.35	0.90	1.15	0.50
1.11	1.00	0.92	1.00	0.54	1.00	1.27	0.55
1.15	1.10	1.02	1.10	0.76	1.10	1.37	0.60
1.21	1.20	1.15	1.20	1.15	1.20	1.53	0.65
1.27	1.30	1.27	1.30	1.53	1.30	1.56	0.70
1.40	1.40	1.46	1.40	1.75	1.40	1.59	0.75
1.46	1.50	1.59	1.50	2.04	1.50	1.66	0.80
1.66	1.60	1.78	1.60	2.17	1.60	1.72	0.85
1.21	1.70	1.85	1.70	2.20	1.70	1.78	0.90
1.08	1.80	1.91	1.80	2.23	1.80	1.85	0.95
1.02	1.90	1.59	1.90	2.10	1.90	2.10	1.00
1.02	2.00	1.46	2.00	1.97	2.00	2.20	1.05

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบแรงเฉือนระหว่างซีเมนต์ผสมน้ำเกลือและเกลือหินผิวขรุขระ (ต่อ)

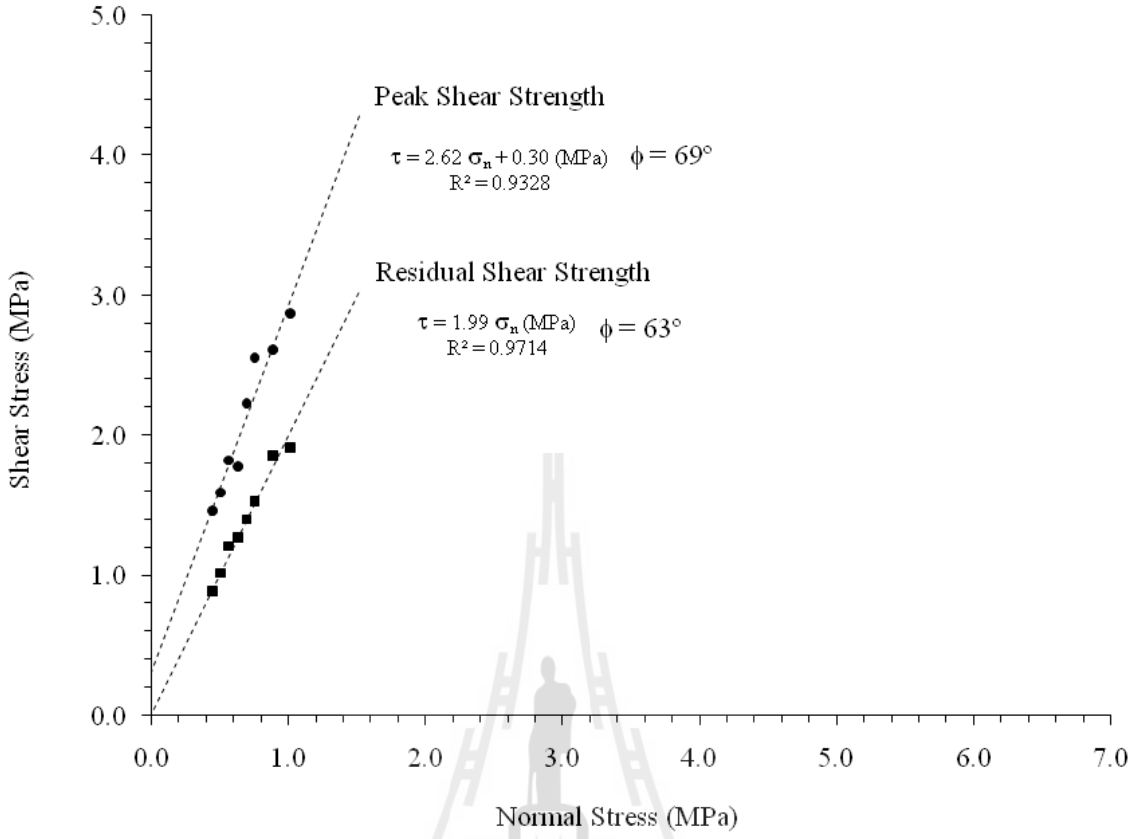
Specimen No.							
KB-09-15-DS-05		KB-09-16-DS-06		KB-09-17-DS-07		KB-09-18-DS-08	
Normal Load = 0.45 MPa		Normal Load = 0.57 MPa		Normal Load = 0.70 MPa		Normal Load = 0.89 MPa	
Shear Stress (MPa)	Shear Displacement (mm)	Shear Stress (MPa)	Shear Displacement (mm)	Shear Stress (MPa)	Shear Displacement (mm)	Shear Stress (MPa)	Shear Displacement (mm)
0.96	2.20	1.27	2.10	1.91	2.10	2.29	1.10
0.89	2.40	1.31	2.20	1.78	2.20	2.48	1.15
0.89	2.60	1.21	2.60	1.66	2.30	2.61	1.20
0.89	2.80	1.21	3.00	1.72	2.40	2.74	1.40
0.89	3.00	1.21	3.50	1.59	2.50	2.80	1.60
0.89	3.20	1.21	4.00	1.46	2.60	2.87	1.80
0.89	3.40	1.21	4.50	1.40	3.10	2.55	2.00
				1.40	3.60	2.23	2.40
				1.40	4.10	2.10	2.60
				1.40	4.60	1.97	2.80
				1.40	5.10	1.85	3.00
						1.85	3.40
						1.91	3.80
						1.85	4.20
						1.85	4.60
						1.85	5.00

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



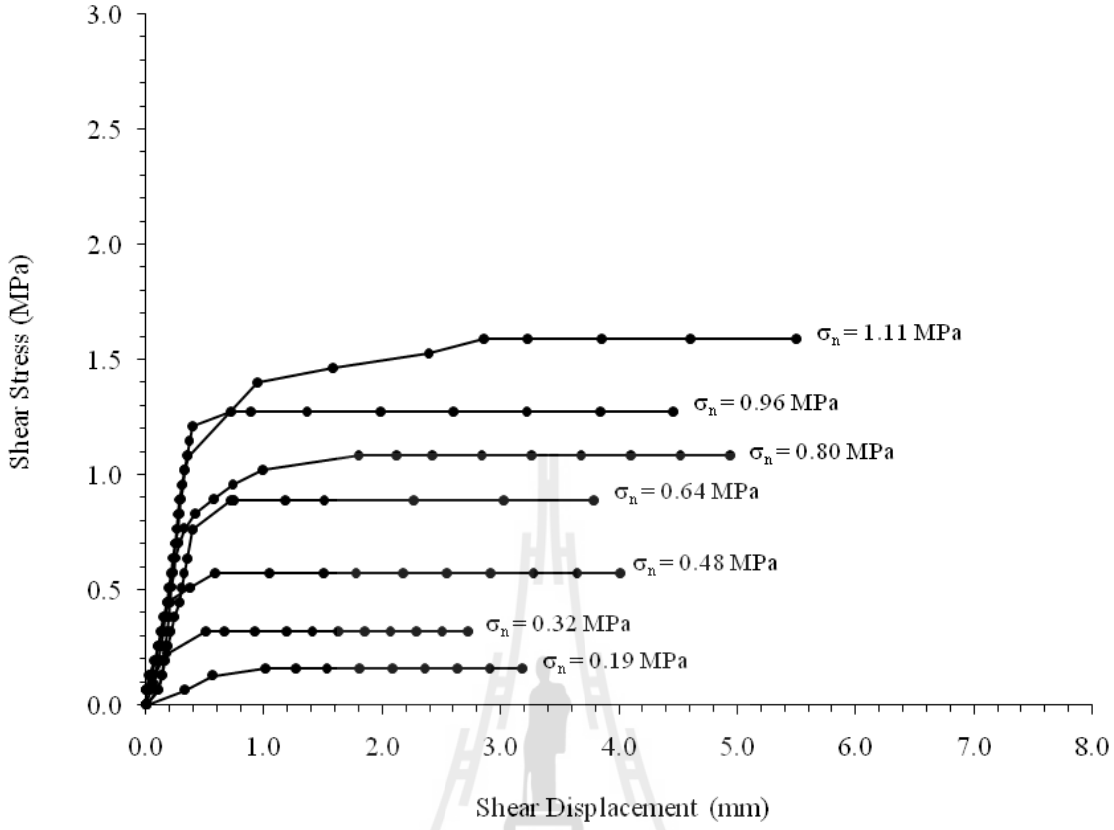
รูปที่ 5.7 ผลการทดสอบแรงเฉือนระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือแบบผิวเรียบ โดยความเค้นเฉือนแสดงในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



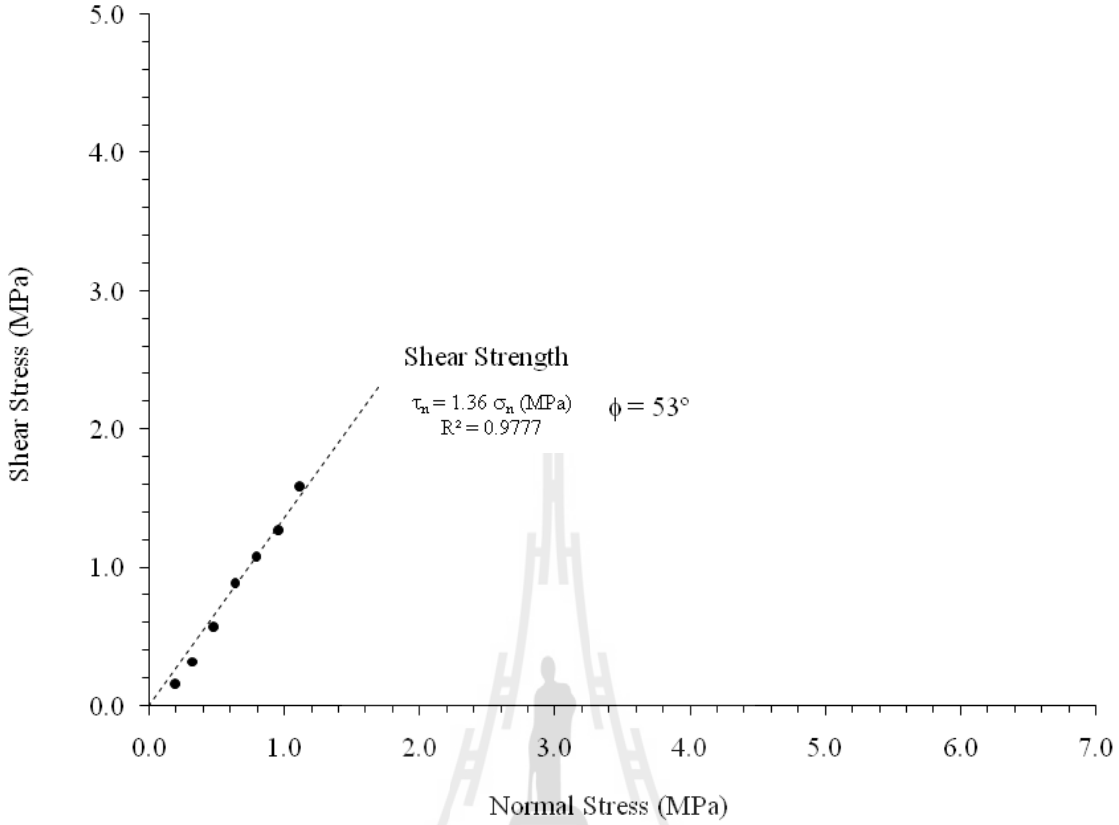
รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของความเค้นตั้งฉาก จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือแบบผิวเรียบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



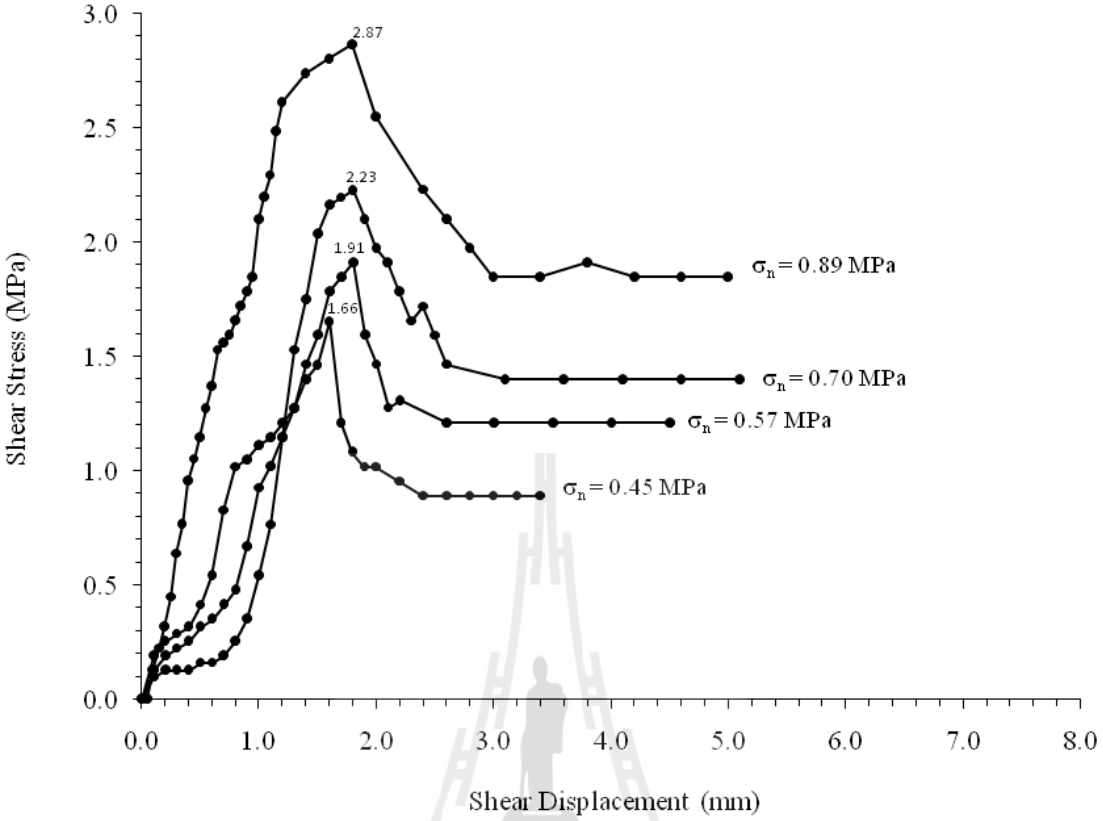
รูปที่ 5.9 ผลการทดสอบแรงเฉือนระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือแบบผิวเรียบ (ไม่ยึดติด) โดยความเค้นเฉือนแสดงในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



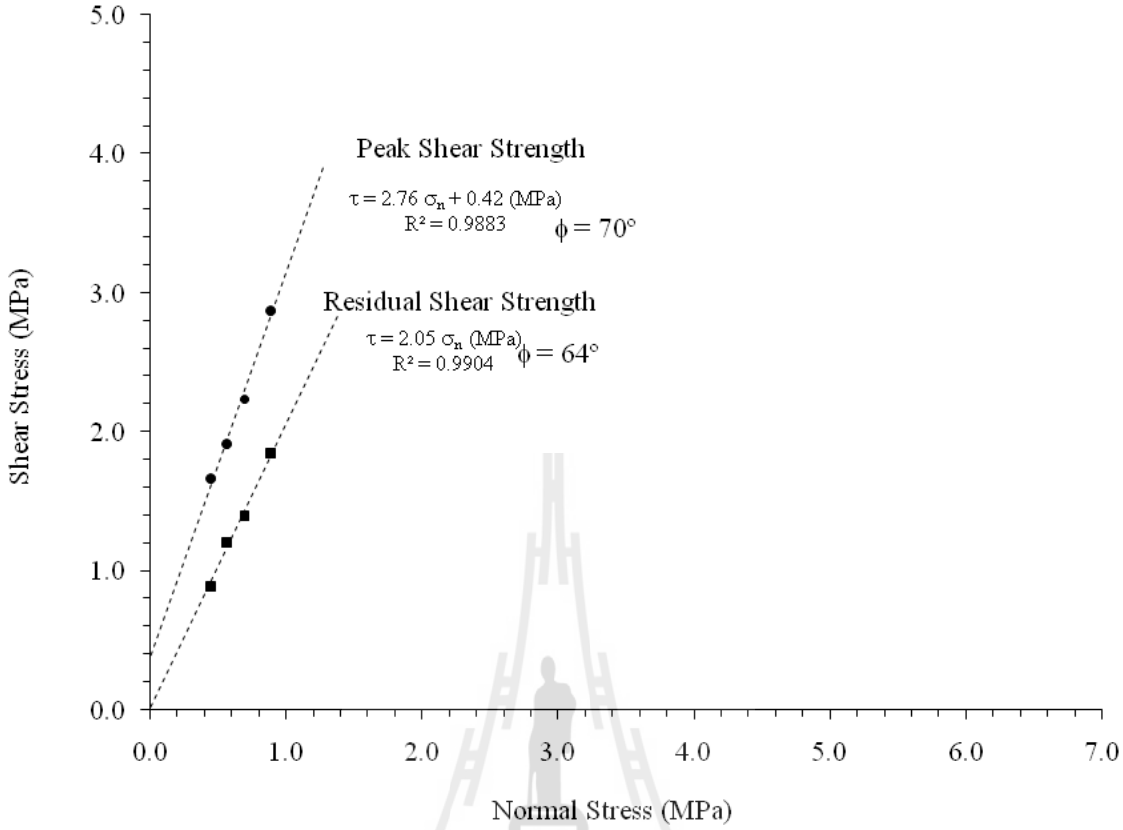
รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของความเค้นตั้งฉาก จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือแบบผิวเรียบ (ไม่ยึดติด)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 5.11 ผลการทดสอบแรงเฉือนระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือแบบขรุขระ โดยความเค้นเฉือนแสดงในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของความเค้นตั้งฉาก จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือแบบขรุขระ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 6
การทดสอบแรงเฉือนแบบ Push-out

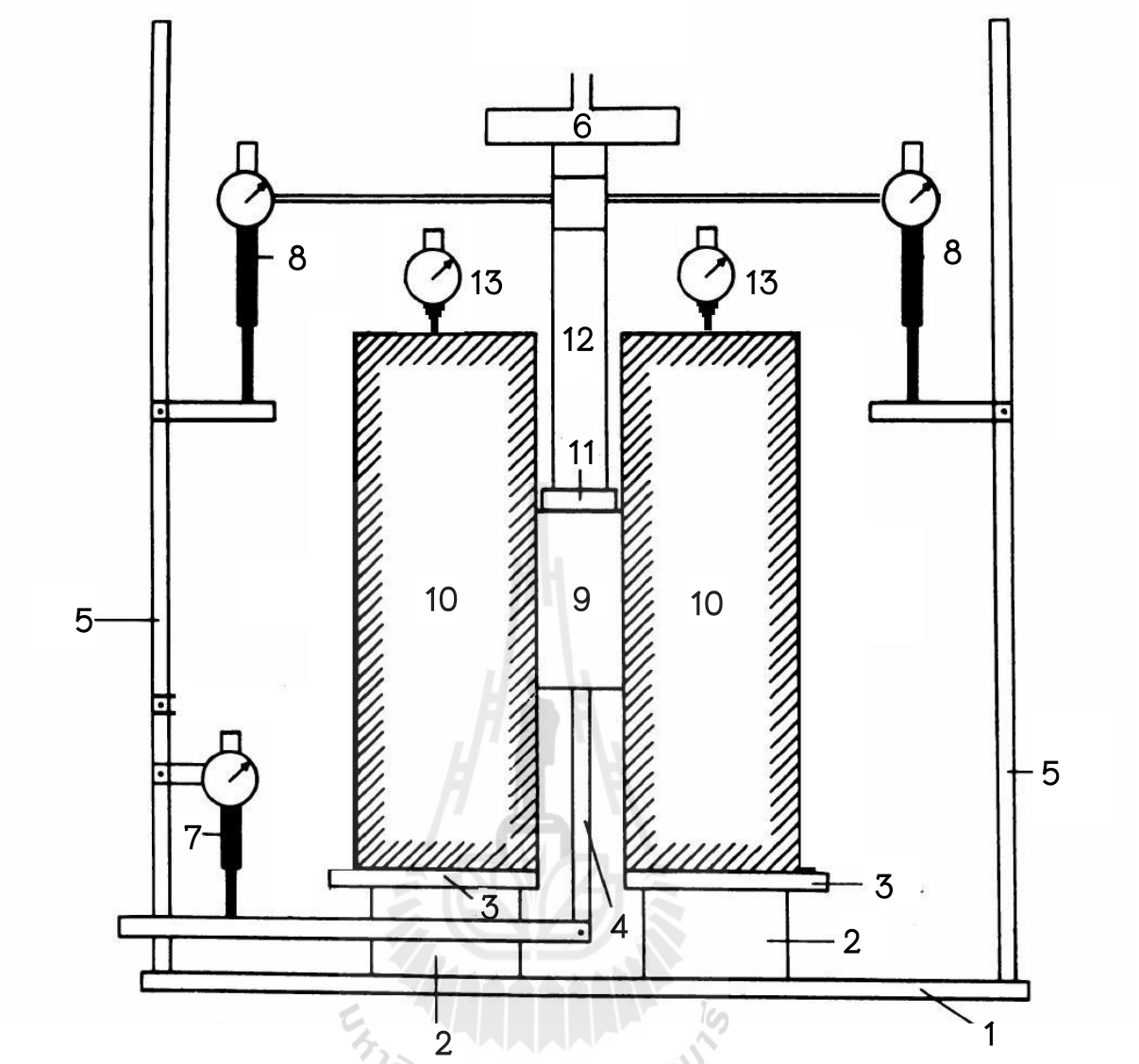
6.1 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของการทดสอบแรงเฉือนแบบ Push-out เพื่อหากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือที่จำลองการอุดในหลุมเจาะด้วยซีเมนต์ ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างได้กล่าวไว้แล้วอย่างละเอียดในบทที่ 3

6.2 อุปกรณ์ทดสอบกำลังเฉือนแบบ Push-out

ชุดอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ Push-out ในงานวิจัยนี้ได้ถูกดัดแปลงและปรับเปลี่ยนมาจากชุดอุปกรณ์ทดสอบแรงเฉือนโดยตรงของรอยแตกแบบสามแหวนที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในบทที่ 5 โดยทำการปรับเปลี่ยนให้เหลือเพียงการกดในแนวดิ่งเพียงแกนเดียว ด้วยการสร้างอุปกรณ์เสริมเพื่อใช้ในการทดสอบ Push-out เพิ่มดังรูปที่ 6.1 ที่แสดงถึงการติดตั้งอุปกรณ์และตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบ Push-out ประกอบด้วย

- แผ่นฐานโลหะ (หมายเลข 1)
- แผ่นฐานโลหะเจาะร่องตรงกลางสำหรับเป็นช่องใช้ตรวจวัดการเคลื่อนตัวของแท่งซีเมนต์ด้านล่าง (หมายเลข 2)
- แผ่นฐานโลหะสี่เหลี่ยม (หมายเลข 3)
- แขนต่อสำหรับวัดตรวจวัดการเคลื่อนตัวของแท่งซีเมนต์ด้านล่าง (หมายเลข 4)
- แท่งโครงโลหะสำหรับรับแรงในแนวดิ่ง (หมายเลข 5)
- แผ่นโลหะสำหรับให้แรงกด (หมายเลข 6)
- มาตรวัดการเคลื่อนตัวด้านบนและด้านล่างของแท่งซีเมนต์ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร (หมายเลข 7 และ 8)
- แท่งตัวอย่างซีเมนต์ที่อุดในเกลือหิน (หมายเลข 9)
- แท่งตัวอย่างเกลือหินรูปทรงกระบอกเจาะรูตรงกลาง (หมายเลข 10)
- แท่งโลหะทรงกระบอกขนาดเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งซีเมนต์ (หมายเลข 11)
- แท่งโลหะทรงกระบอกสำหรับให้แรงกดในแนวแกน (หมายเลข 12)
- มาตรวัดการเคลื่อนตัวด้านบนของแท่งตัวอย่างเกลือหินความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร (หมายเลข 13)



รูปที่ 6.1 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบ Push-out ประกอบด้วย 1) Steel plate 2) Steel plate with a slit 3) Square steel plate 4) Section for bottom displacement transfer 5) Vertical steel bar 6) Loading platen 7-8) Bottom and top dial gages 9) Cement plug 10) Rock salt sample 11) Steel cylinder 12) Axial bar และ 13) Vertical rock displacement gages (ปรับเปลี่ยนจาก Akun and Daemen, 1999)

รูปที่ 6.2 แสดงการติดตั้งตัวอย่างหินและอุปกรณ์การทดสอบที่พร้อมสำหรับการทดสอบแรงเฉือนแบบ Push–out

6.3 ผลการทดสอบกำลังเฉือนแบบ Push–out

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบ Push–out เพื่อหาค่ากำลังเฉือนสูงสุดระหว่างเกลือหินและแท่งตัวอย่างซีเมนต์ผสมน้ำเกลือที่อุดอยู่ในแท่งเกลือหินมีขั้นตอนดังนี้

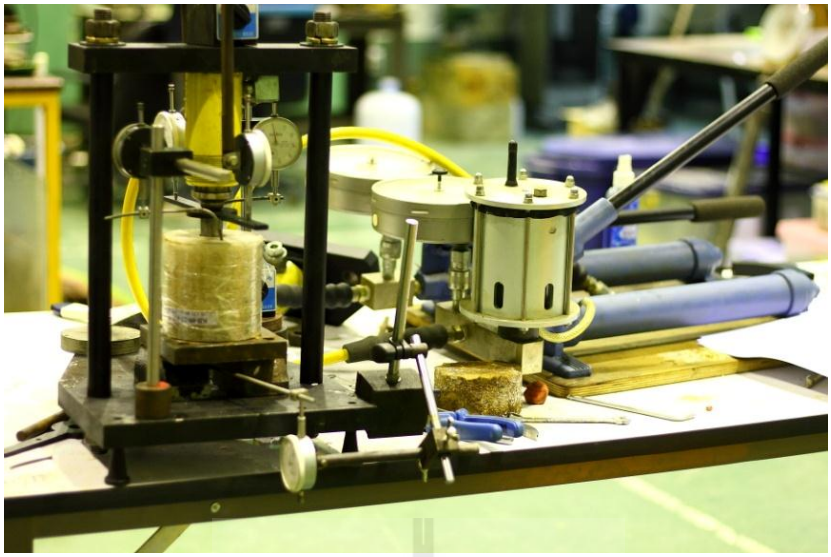
1) ประกอบชุดอุปกรณ์พร้อมติดตั้งตัวอย่างที่ต้องการทดสอบเข้ากับชุดอุปกรณ์สำหรับการทดสอบกำลังเฉือน โดยมีการให้แรงกดตามแนวดิ่งเพียงแกนเดียว ดังรูปที่ 6.3
2) ติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งอย่างน้อย 2 ตัว เพื่อตรวจวัดระยะการยุบตัวตามแรงกดในแนวดิ่งของกระบอกไฮดรอลิค
3) ติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งอย่างน้อย 2 ตัว เพื่อตรวจวัดระยะการยุบของผิวแท่งตัวอย่างเกลือหินด้านบน
4) ติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งอย่างน้อย 1 ตัว เพื่อตรวจวัดระยะการเคลื่อนตัวของแท่งซีเมนต์ด้านล่าง
5) ให้ความเค้นตามแนวแกนด้วยแม่แรงไฮดรอลิคแล้วทำการอ่านค่าการเคลื่อนตัวทั้ง 3 ตำแหน่งข้างต้นและจดบันทึกค่าไปพร้อมกัน อย่างต่อเนื่องจนถึงจุดที่เกิดความเค้นตามแนวแกนสูงสุด บันทึกค่าเพื่อนำไปคำนวณหาค่าการกระจายตัวของแรงเฉือนที่เกิดขึ้น จากนั้นทำการให้ความเค้นตามแนวแกนอย่างต่อเนื่องอีกสักระยะหนึ่ง

ความเค้นสูงสุดตามแนวแกนสามารถคำนวณได้จากค่าแรงกดตามแนวแกนหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของผิวสัมผัสระหว่างแท่งกดโลหะและแท่งซีเมนต์ที่ใช้อุด

$$\sigma_{ax} = F/(\pi r^2) \qquad (6.1)$$

โดยที่ F คือแรงกดสูงสุดตามแนวแกนที่จุดวิบัติ r คือรัศมีของแท่งซีเมนต์ที่ใช้อุด

ค่าการกระจายตัวของแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากการให้แรงกดตามแนวแบบ Push–out ในตัวอย่างระหว่างเกลือหินและแท่งซีเมนต์ที่อุดอยู่ในรูของแท่งเกลือหินสามารถคำนวณได้จากสมการ (Stormont and Deamen, 1983)



รูปที่ 6.2 แสดงการติดตั้งเครื่องมือทดสอบ Push-out

รูปที่ 6.3 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนตัว

$$\tau_{av} = F/\pi D_i L_c \quad (6.2)$$

โดยที่ F คือแรงกดสูงสุดตามแนวแกนที่จุดวิบัติ D_i คือเส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งซีเมนต์ที่ใช้อุด และ L_c คือความยาวของแท่งซีเมนต์และตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่ามีการกระจายตัวของแรงเฉือนอย่างคงที่ (Uniform shear stress)

ผลการทดสอบทั้ง 8 ตัวอย่าง ได้สรุปรวมผลไว้ในตารางที่ 6.1 และแสดงผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวอย่างละเอียดของแท่งซีเมนต์ทั้งด้านบน–ด้านล่าง และการยุบตัวของผิวตัวอย่างเกลือหินด้านบนดังแสดงในตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือมีค่าอยู่ระหว่าง 6.74–11.23 MPa ความเค้นในแนวแกนที่เกิดขึ้นสามารถแสดงในฟังก์ชันการเคลื่อนตัวของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ในตำแหน่งด้านบนและด้านล่างตามรูปที่ 6.4 ถึงรูปที่ 6.11 และแท่งเกลือหินตัวอย่างหลังการทดสอบแล้วแสดงดังรูปที่ 6.12

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 6.1 สรุปผลการทดสอบกำลังเฉือนแบบ Push-out

Specimen No.	Demeter D_o, (mm)	Length L, (mm)	Hole Diameter D_i, (mm)	Top Hole Length L_h, (mm)	Cement Plug Length L_c, (mm)	Axial Load at Failure F, (kN)	Axial Stress at Failure σ_{ax}, (MPa)	Shear Strength τ_{av}, (MPa)
KB-09-02-PO-02-T	102.35	101.86	25.00	20.00	30.26	16.0	32.61	6.74
KB-09-02-PO-02-B	101.68	101.72	24.92	20.00	27.62	18.0	36.92	8.33
KB-09-02-PO-03-T	101.00	104.12	24.24	19.12	32.04	21.0	45.53	8.61
KB-09-02-PO-03-B	101.48	102.46	25.00	23.64	33.32	25.0	50.96	9.56
KB-09-02-PO-04-T	101.38	102.96	25.90	20.88	35.34	26.0	49.37	9.05
KB-09-02-PO-04-B	101.82	100.72	24.32	21.74	25.66	22.0	47.38	11.23
KB-09-02-PO-05-T	99.40	102.66	24.38	19.32	37.06	20.0	42.86	7.05
KB-09-02-PO-05-B	99.42	101.18	25.00	20.70	23.48	15.0	30.57	8.14

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบกำลังเฉือนแบบ Push-out

Specimen No.							
KB-09-02-PO-02-T				KB-09-02-PO-02-B			
Applied Axial Stress (MPa)	Top Cement Plug Displace-ment (mm)	Bottom Cement Plug Displace ment (mm)	Vertical Rock Displace-ment (mm)	Applied Axial Stress (MPa)	Top Cement Plug Displace-ment (mm)	Bottom Cement Plug Displace-ment (mm)	Vertical Rock Displace-ment (mm)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.04	0.06	0.00	0.06	2.05	0.21	0.00	0.00
3.06	0.34	0.00	0.34	4.10	0.85	0.00	0.03
4.08	0.58	0.00	0.58	6.15	1.11	0.00	0.04
5.10	0.72	0.00	0.72	8.21	1.23	0.00	0.07
6.11	0.81	0.00	0.81	10.26	1.32	0.00	0.09
8.15	0.95	0.00	0.95	12.31	1.40	0.00	0.11
10.19	1.05	0.09	1.05	14.36	1.49	0.09	0.12
12.23	1.15	0.18	1.15	16.41	1.56	0.18	0.14
14.27	1.28	0.22	1.28	18.46	1.64	0.22	0.15
16.31	1.38	0.24	1.38	20.51	1.72	0.24	0.16
18.34	1.47	0.29	1.47	22.56	1.78	0.29	0.24
20.38	1.60	0.32	1.60	24.62	1.85	0.32	0.26
22.42	1.70	0.36	1.70	26.67	1.94	0.36	0.28
24.46	1.79	0.40	1.79	28.72	2.01	0.40	0.30
26.50	1.88	0.45	1.88	30.77	2.08	0.45	0.31
28.54	1.99	0.50	1.99	32.82	2.15	0.50	0.33
30.57	2.05	0.55	2.05	34.87	2.23	0.55	0.35
32.61	2.16	0.60	2.16	36.92	2.43	0.60	0.37
24.46	3.40	1.00	3.40	29.74	2.83	1.00	0.37
24.46	3.63	1.45	3.63	29.74	3.03	1.45	0.37
23.44	3.91	1.78	3.91	29.74	3.23	1.78	0.37

ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบกำลังเฉือนแบบ Push-out (ต่อ)

Specimen No.							
KB-09-02-PO-02-T				KB-09-02-PO-02-B			
Applied Axial Stress (MPa)	Top Cement Plug Displace-ment (mm)	Bottom Cement Plug Displace ment (mm)	Vertical Rock Displace-ment (mm)	Applied Axial Stress (MPa)	Top Cement Plug Displace-ment (mm)	Bottom Cement Plug Displace-ment (mm)	Vertical Rock Displace-ment (mm)
23.44	4.09	2.00	4.09	29.74	3.44	2.00	0.37
23.44	4.33	2.40	4.33	27.69	3.75	2.40	0.37
23.44	4.75	2.90	4.75	27.69	3.98	2.90	0.37
23.44	5.08	3.30	5.08	26.67	4.60	3.30	0.37
23.44	5.54	3.70	5.54	24.62	5.38	3.70	0.37
23.44	5.85	4.20	5.85	22.56	6.03	4.20	0.37
23.44	6.20	4.60	6.20	20.51	6.63	4.60	0.37
23.44	6.58	4.90	6.58	20.51	7.20	4.90	0.37
23.44	6.95	5.00	6.95	19.49	8.00	5.00	0.37
				16.41	8.85	5.47	0.37
				15.38	9.85	5.80	0.37
				14.36	10.48	6.20	0.37
				14.36	11.20	7.20	0.37
				14.36	12.00	7.80	0.37
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	N/A	0.00
2.17	0.21	0.00	0.00	2.04	0.14	N/A	0.00
4.34	0.66	0.00	0.00	4.08	0.84	N/A	0.00
6.50	1.25	0.00	0.00	6.11	1.14	N/A	0.00
8.67	1.44	0.00	0.01	8.15	1.28	N/A	0.01
10.84	1.58	0.00	0.02	10.19	1.43	N/A	0.03
13.01	1.69	0.00	0.04	12.23	1.53	N/A	0.04
15.18	1.79	0.00	0.05	14.27	1.63	N/A	0.05

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบกำลังเฉือนแบบ Push-out (ต่อ)

Specimen No.							
KB-09-02-PO-02-T				KB-09-02-PO-02-B			
Applied Axial Stress (MPa)	Top Cement Plug Displace-ment (mm)	Bottom Cement Plug Displace ment (mm)	Vertical Rock Displace-ment (mm)	Applied Axial Stress (MPa)	Top Cement Plug Displace-ment (mm)	Bottom Cement Plug Displace-ment (mm)	Vertical Rock Displace-ment (mm)
17.34	1.91	0.00	0.07	16.31	1.75	N/A	0.06
19.51	2.00	0.00	0.09	18.34	1.83	N/A	0.06
21.68	2.09	0.00	0.10	20.38	1.92	N/A	0.07
23.85	2.20	0.00	0.11	22.42	2.01	N/A	0.07
26.02	2.28	0.00	0.12	24.46	2.08	N/A	0.08
28.18	2.37	0.00	0.13	26.50	2.17	N/A	0.09
30.35	2.46	0.00	0.14	28.54	2.27	N/A	0.10
32.52	2.55	0.00	0.14	30.57	2.35	N/A	0.11
34.69	2.63	0.00	0.15	32.61	2.44	N/A	0.12
36.86	2.72	0.00	0.16	34.65	2.54	N/A	0.13
39.02	2.78	0.00	0.16	36.69	2.63	N/A	0.14
41.19	2.84	0.00	0.17	38.73	2.75	N/A	0.15
43.36	2.93	0.00	0.18	40.76	2.82	N/A	0.16
45.53	3.03	0.00	0.18	42.80	2.92	N/A	0.17
43.36	3.23	0.30	0.18	44.84	3.04	N/A	0.18
34.69	3.46	0.35	0.18	46.88	3.15	N/A	0.19
39.02	3.60	0.50	0.18	48.92	3.29	N/A	0.20
39.02	3.76	0.60	0.18	50.96	3.45	N/A	0.21
39.02	4.01	1.00	0.18				
39.02	4.29	1.20	0.18				
39.02	4.71	1.50	0.18				
39.02	5.42	2.10	0.18				

ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบกำลังเฉือนแบบ Push-out (ต่อ)

Specimen No.							
KB-09-02-PO-02-T				KB-09-02-PO-02-B			
Applied Axial Stress (MPa)	Top Cement Plug Displace-ment (mm)	Bottom Cement Plug Displace ment (mm)	Vertical Rock Displace-ment (mm)	Applied Axial Stress (MPa)	Top Cement Plug Displace-ment (mm)	Bottom Cement Plug Displace-ment (mm)	Vertical Rock Displace-ment (mm)
39.02	5.87	2.50	0.18				
37.94	6.70	3.20	0.18				
35.77	7.39	4.00	0.18				
34.69	7.81	4.10	0.18				
32.52	8.37	4.40	0.18				
32.52	9.04	5.00	0.18				
31.44	9.82	5.30	0.18				
30.35	10.43	-	0.18				
30.35	11.09	-	0.18				
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.90	0.26	0.00	0.00	2.15	0.15	0.00	0.00
3.80	0.85	0.00	0.00	4.31	0.61	0.00	0.01
5.70	1.07	0.00	0.01	6.46	0.82	0.00	0.05
7.60	1.25	0.00	0.04	8.62	0.98	0.00	0.07
9.50	1.38	0.00	0.06	10.77	1.13	0.00	0.13
11.39	1.49	0.00	0.08	12.92	1.25	0.00	0.17
13.29	1.61	0.15	0.10	15.08	1.35	0.00	0.21
15.19	1.71	0.20	0.12	17.23	1.45	0.00	0.22
17.09	1.79	0.25	0.13	19.38	1.53	0.00	0.26
18.99	1.88	0.30	0.14	21.54	1.62	0.15	0.28
20.89	1.97	0.35	0.15	23.69	1.69	0.15	0.30
22.79	2.06	0.40	0.16	25.85	1.76	0.15	0.32

ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบกำลังเฉือนแบบ Push-out (ต่อ)

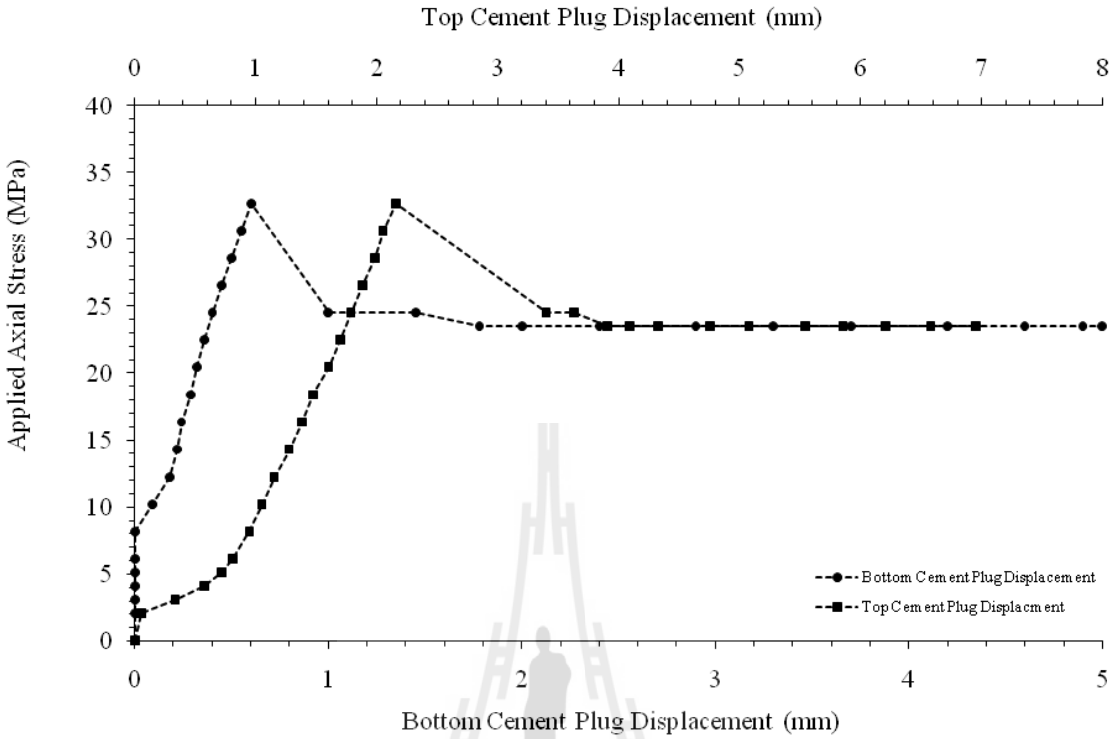
Specimen No.							
KB-09-02-PO-02-T				KB-09-02-PO-02-B			
Applied Axial Stress (MPa)	Top Cement Plug Displace-ment (mm)	Bottom Cement Plug Displace ment (mm)	Vertical Rock Displace-ment (mm)	Applied Axial Stress (MPa)	Top Cement Plug Displace-ment (mm)	Bottom Cement Plug Displace-ment (mm)	Vertical Rock Displace-ment (mm)
24.69	2.15	0.45	0.17	28.00	1.84	0.15	0.33
26.59	2.22	0.45	0.18	30.15	1.91	0.15	0.35
28.49	2.29	0.50	0.19	32.31	1.98	0.25	0.37
30.38	2.38	0.53	0.20	34.46	2.06	0.25	0.38
32.28	2.44	0.55	0.20	36.61	2.13	0.25	0.39
34.18	2.51	0.58	0.21	38.77	2.22	0.30	0.40
36.08	2.58	0.60	0.21	40.92	2.31	0.30	0.41
37.98	2.64	0.65	0.21	43.08	2.40	0.30	0.41
39.88	2.73	0.68	0.22	45.23	2.50	0.38	0.47
41.78	2.81	0.70	0.22	47.38	2.70	0.70	0.52
43.68	2.91	0.75	0.22	45.23	2.98	0.80	0.57
45.58	3.01	0.78	0.22	46.31	3.28	1.05	0.65
47.48	3.11	0.85	0.22	45.23	3.41	1.20	0.71
49.37	3.24	0.95	0.23	38.77	3.93	1.30	1.08
47.48	4.15	3.00	0.14	36.61	4.28	2.10	1.21
47.48	4.69	4.10	0.14	35.54	4.55	2.40	1.35
47.48	5.20	5.00	0.13	34.46	4.71	2.60	1.42
28.49	6.25	6.00	0.12	34.46	4.92	2.80	1.54
26.59	6.88	8.00	0.12	34.46	5.14	3.00	1.64
				34.46	5.33	3.40	1.76
				34.46	5.94	3.70	2.04
				34.46	6.37	4.40	2.30

ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบกำลังเฉือนแบบ Push-out (ต่อ)

Specimen No.							
KB-09-02-PO-02-T				KB-09-02-PO-02-B			
Applied Axial Stress (MPa)	Top Cement Plug Displace-ment (mm)	Bottom Cement Plug Displace ment (mm)	Vertical Rock Displace-ment (mm)	Applied Axial Stress (MPa)	Top Cement Plug Displace-ment (mm)	Bottom Cement Plug Displace-ment (mm)	Vertical Rock Displace-ment (mm)
				32.31	7.06	5.00	2.67
				30.15	7.55	5.50	2.89
				28.00	8.52	6.40	3.41
				25.85	9.21	7.20	3.74
				23.69	10.11	8.20	4.24
				17.23	10.95	9.30	4.77
				15.08	12.08	10.20	5.22
				11.85	12.98	10.50	5.61
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.14	0.13	0.00	0.00	2.04	0.38	0.00	0.01
4.29	0.48	0.00	0.00	4.08	0.90	0.00	0.06
6.43	0.89	0.00	0.02	6.11	1.19	0.05	0.13
8.57	0.97	0.00	0.02	8.15	1.36	0.05	0.19
10.72	1.08	0.00	0.03	10.19	1.52	0.15	0.24
12.86	1.16	0.00	0.06	12.23	1.69	0.15	0.30
15.00	1.23	0.00	0.06	14.27	1.80	0.30	0.34
17.15	1.30	0.00	0.06	16.31	1.92	0.30	0.37
19.29	1.36	0.00	0.07	18.34	2.03	0.30	0.41
21.43	1.41	0.00	0.09	20.38	2.13	0.30	0.44
23.58	1.47	0.00	0.10	22.42	2.23	0.45	0.47
25.72	1.52	0.00	0.11	24.46	2.31	0.45	0.49
27.86	1.57	0.00	0.11	26.50	2.43	0.45	0.52

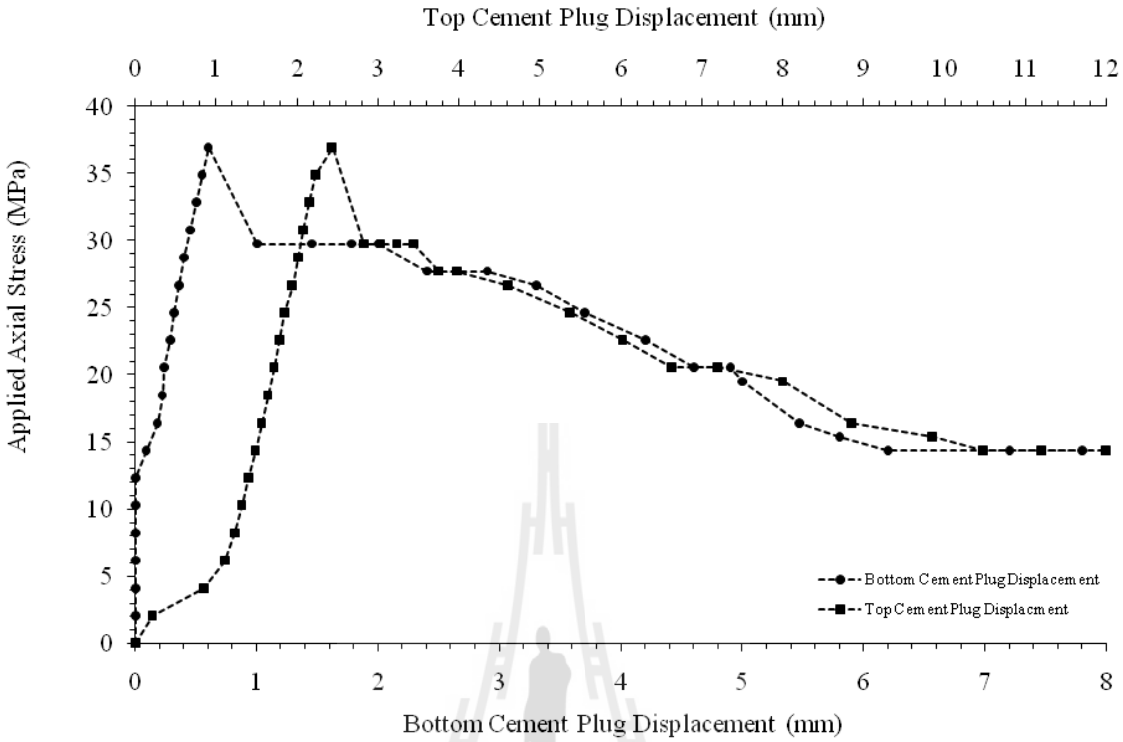
ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบกำลังเฉือนแบบ Push-out (ต่อ)

Specimen No.							
KB-09-02-PO-02-T				KB-09-02-PO-02-B			
Applied Axial Stress (MPa)	Top Cement Plug Displace-ment (mm)	Bottom Cement Plug Displace ment (mm)	Vertical Rock Displace-ment (mm)	Applied Axial Stress (MPa)	Top Cement Plug Displace-ment (mm)	Bottom Cement Plug Displace-ment (mm)	Vertical Rock Displace-ment (mm)
30.00	1.60	0.00	0.12	28.54	2.52	0.45	0.54
32.15	1.68	0.00	0.13	30.57	2.62	0.55	0.56
34.29	1.74	0.00	0.13	28.54	2.79	2.00	0.56
36.43	1.78	0.00	0.14	24.46	3.12	2.20	0.56
38.58	1.84	0.00	0.14	24.46	3.25	2.60	0.56
40.72	1.90	0.00	0.15	22.42	3.60	3.00	0.56
42.86	1.96	0.00	0.15	20.38	4.16	3.40	0.56
23.58	2.05	0.45	0.16	20.38	4.51	4.00	0.56
25.72	2.30	0.91	0.23	20.38	5.10	4.20	0.56
25.72	2.56	1.05	0.23	18.34	5.58	4.60	0.56
23.58	2.76	1.22	0.23	18.34	5.74	5.00	0.56
23.58	2.95	1.40	0.23	18.34	6.08	5.40	0.56
23.58	3.25	1.65	0.23	18.34	6.54	5.50	0.56
23.58	3.50	2.00	0.23	16.31	7.20	5.50	0.56
23.58	3.88	2.50	0.22	16.31	7.85	6.00	0.56
23.58	4.13	2.75	0.22	14.27	9.04	7.00	0.56
21.43	4.78	3.30	0.20				
21.43	5.15	3.70	0.19				
21.43	5.58	4.00	0.19				
19.29	5.93	4.25	0.18				
19.29	11.20	4.90	0.17				



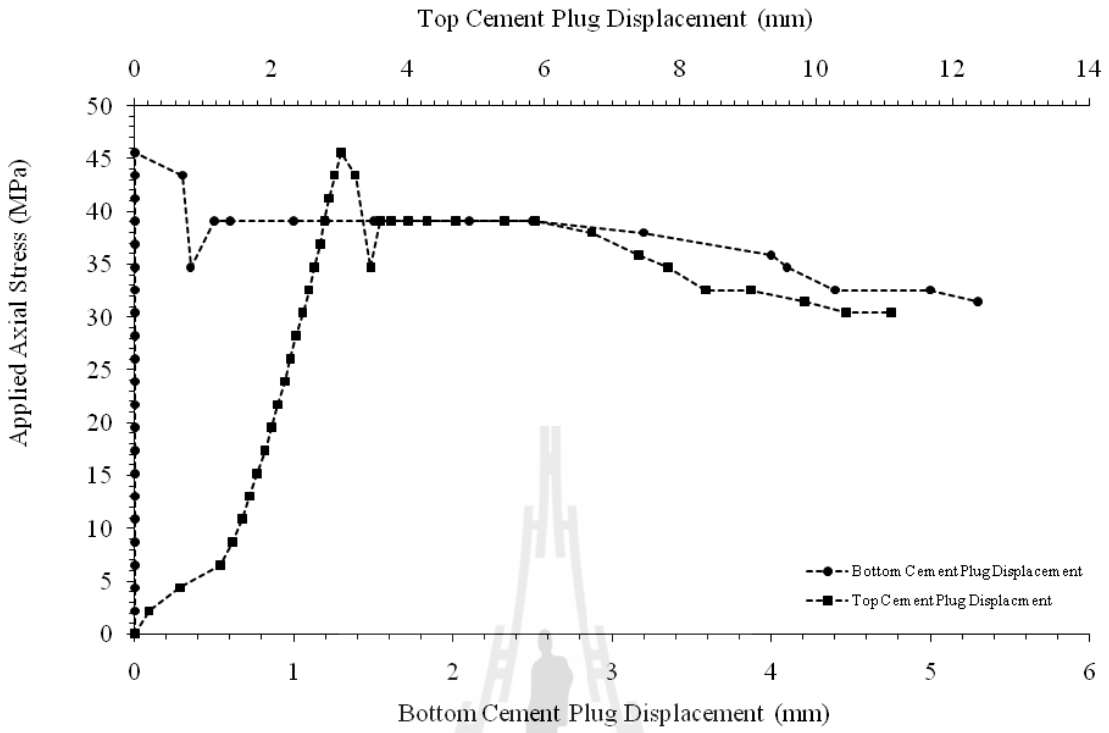
รูปที่ 6.4 ผลการทดสอบ Push-out ระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือในการอุดหลุมเจาะ โดยความเค้นในแนวแกนแสดงในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ในตำแหน่งด้านบน (Top) และด้านล่าง (Bottom) ของตัวอย่าง KB-09-02-PO-02-T

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



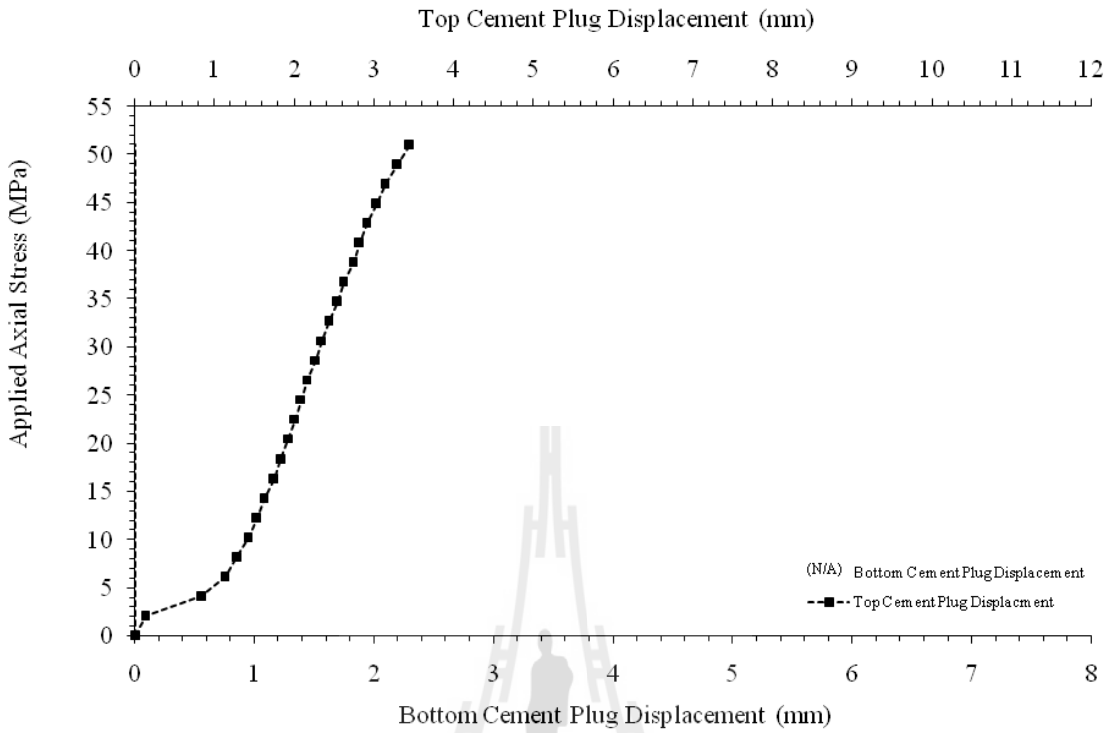
รูปที่ 6.5 ผลการทดสอบ Push-out ระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือในการอุดหลุมเจาะ โดยความเค้นในแนวแกนแสดงในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ในตำแหน่งด้านบน (Top) และด้านล่าง (Bottom) ของตัวอย่าง KB-09-02-PO-02-B

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



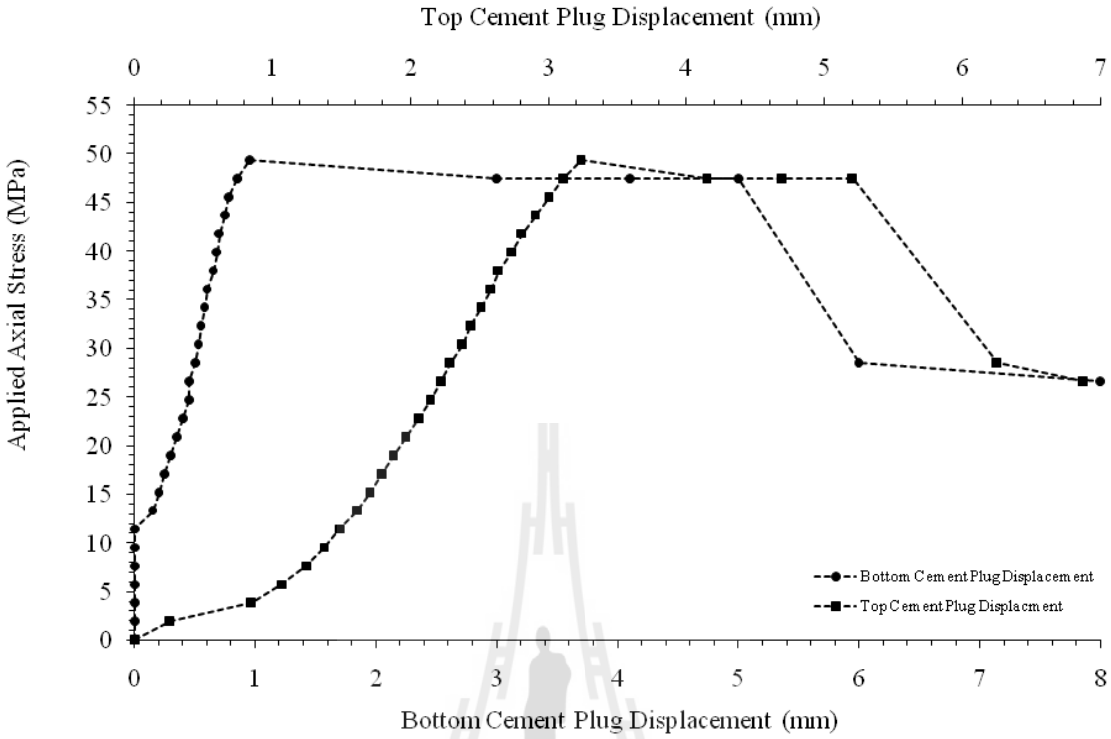
รูปที่ 6.6 ผลการทดสอบ Push-out ระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือในการอุดหลุมเจาะ โดยความเค้นในแนวแกนแสดงในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ในตำแหน่งด้านบน (Top) และด้านล่าง (Bottom) ของตัวอย่าง KB-09-02-PO-03-T

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



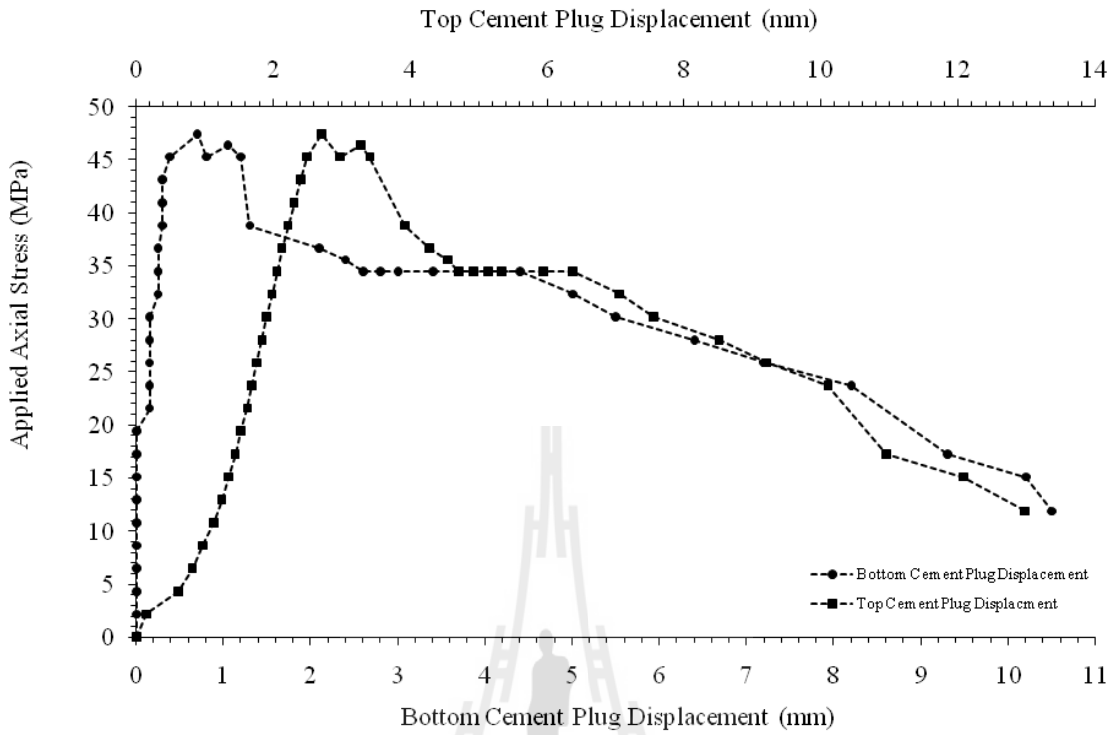
รูปที่ 6.7 ผลการทดสอบ Push-out ระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือในการอุดหลุมเจาะ โดยความเค้นในแนวแกนแสดงในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ในตำแหน่งด้านบน (Top) และด้านล่าง (Bottom) ของตัวอย่าง KB-09-02-PO-03-B

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



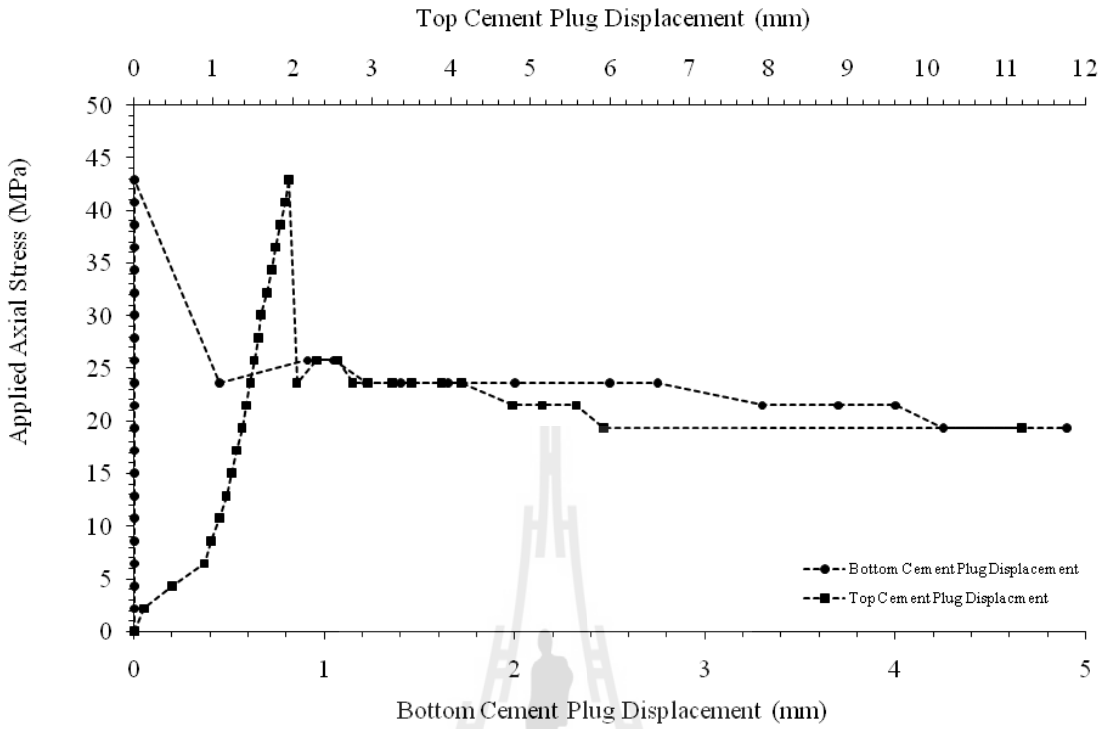
รูปที่ 6.8 ผลการทดสอบ Push-out ระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือในการอุดหลุมเจาะ โดยความเค้นในแนวแกนแสดงในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ในตำแหน่งด้านบน (Top) และด้านล่าง (Bottom) ของตัวอย่าง KB-09-02-PO-04-T

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



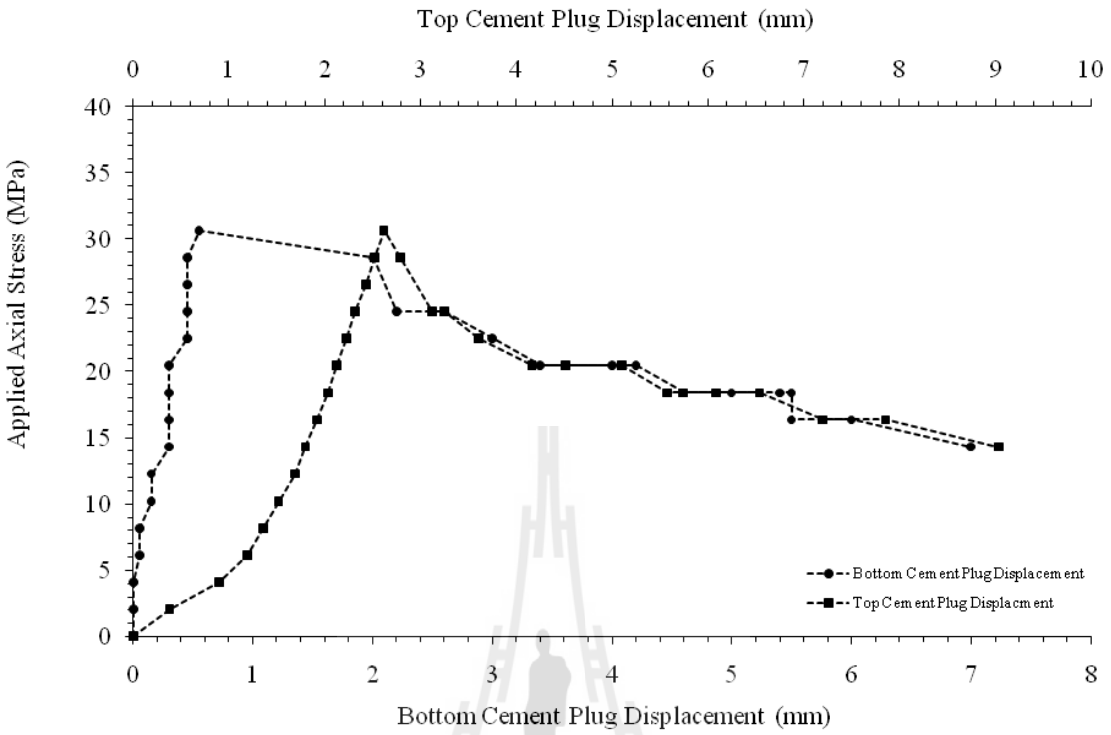
รูปที่ 6.9 ผลการทดสอบ Push-out ระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือในการอุดหลุมเจาะ โดยความเค้นในแนวแกนแสดงในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ในตำแหน่งด้านบน (Top) และด้านล่าง (Bottom) ของตัวอย่าง KB-09-02-PO-04-B

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 6.10 ผลการทดสอบ Push-out ระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือในการอุดหลุมเจาะ โดยความเค้นในแนวแกนแสดงในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ในตำแหน่งด้านบน (Top) และด้านล่าง (Bottom) ของตัวอย่าง KB-09-02-P0-05-T

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 6.11 ผลการทดสอบ Push-out ระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ผสมน้ำเกลือในการอุดหลุมเจาะ โดยความเค้นในแนวแกนแสดงในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ในตำแหน่งด้านบน (Top) และด้านล่าง (Bottom) ของตัวอย่าง KB-09-02-PO-05-B

รูปที่ 6.12 ตัวอย่างเกลือหินหลังการทดสอบ Push-out

บทที่ 7
บทสรุป

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพเชิงกลศาสตร์ของปูนซีเมนต์เพื่อนำมาใช้อุดในชั้นเกลือหินที่ถูกขุดเจาะเป็นโพรงหรืออุโมงค์สำหรับเป็นแหล่งทิ้งกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรม ผลการทดสอบที่ได้จะนำมาใช้ในการออกแบบซีเมนต์สำหรับการอุดรอยแตกเพื่อให้มีผลกระทบจากการรั่วไหลสำหรับชั้นเกลือหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยให้น้อยที่สุด โดยใช้ตัวอย่างเกลือหินแท่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว ที่ขุดเจาะมาจากเกลือชั้นกลาง (Middle salt) หลุมเจาะที่ KB-09 ที่ระดับความลึกระหว่าง 168-178 เมตร ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท เหมืองแร่อาเซียนโปแตช จำกัด อ.บำเหน็จณรงค์ จ.ชัยภูมิ

การเตรียมตัวอย่างเกลือหินแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ 1) สำหรับการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง ประกอบด้วยรอยแตกแบบเรียบ (Saw-cut surface) และรอยแตกแบบขรุขระ (Tension-induced fracture) และ 2) สำหรับการทดสอบแรงเฉือนแบบ Push-out โดยจัดเตรียมแท่งตัวอย่างเกลือหินทรงกระบอกที่เจาะรูตรงกลางขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว

การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานของซีเมนต์ ประกอบด้วยการทดสอบกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว การตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น ค่าอัตราส่วนปัวซ์ซอง และการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน ซึ่งทำการทดสอบตามอายุของซีเมนต์ที่ 1, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ปูนซีเมนต์ชนิดทนน้ำเค็มที่มีจำหน่ายอย่างแพร่หลายในท้องตลาดทุกภูมิภาคของประเทศไทย โดยผสมเข้ากับน้ำเกลืออิ่มตัวผสมด้วยสารเพิ่มการขยายตัวและสารลดฟองอากาศ

ผลการทดสอบแรงกดในแกนเดียว (Uniaxial compression test) มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความต้านแรงกดสูงสุดในแกนเดียวของแท่งตัวอย่าง การทดสอบได้ปฏิบัติตามข้อกำหนดมาตรฐานสากล ASTM D7012 และข้อแนะนำของ ISRM (Brown, 1981) ผลการทดสอบพบว่าเมื่ออายุของแท่งตัวอย่างมากขึ้น (1, 3, 7, 14, 21 และ 28 วัน) จะส่งผลให้มีค่าแรงกดสูงสุดในแกนเดียวสูงขึ้นจาก 4.67, 12.83, 13.10, 14.63, 19.65 และ 24.02 MPa ตามลำดับ เช่นเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่มีแนวโน้วสูงขึ้นเมื่ออายุของแท่งตัวอย่างมากขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 0.17, 0.31, 0.35, 0.35, 0.42 และ 0.44 GPa ตามลำดับ

การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน มีจุดประสงค์เพื่อหาแรงดึงสูงสุดของแท่งตัวอย่าง วิธีการเตรียมจะปฏิบัติตามมาตรฐานสากล ASTM D3967 และข้อแนะนำของ ISRM ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนคือ 2.17, 2.26, 2.17, 1.78, 2.36 และ 2.06 MPa ตามอายุของแท่งตัวอย่าง 1, 3, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ

การทดสอบความหนืดมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าความหนืด (Viscosity) ค่าความหนาแน่น (slurry density) ของส่วนผสมซีเมนต์และน้ำเกลืออิ่มตัว โดยปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D2196 ซึ่งได้ผลค่าเฉลี่ยของ Cement Slurry Density เท่ากับ 17,586 kg/m^3 Dynamic Viscosity เท่ากับ 1.72 MPa•s และ Kinematic Viscosity เท่ากับ 0.77x10^{-4} m^2/s

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงระหว่างซีเมนต์ผสมน้ำเกลือและตัวอย่างเกลือหินแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ รอยแตกแบบเรียบและรอยแตกแบบขรุขระ โดยตัวอย่างซีเมนต์ถูกเตรียมให้มีอายุ 3 วัน เพื่อการทดสอบ ซึ่งรอยแตกแบบเรียบให้ผลการทดสอบค่าความเค้นเฉือนสูงสุดเท่ากับ 1.46, 1.59, 1.82 1.78, 2.23, 2.55, 2.61 และ 2.87 MPa ตามการแปรผันของค่าความเค้นตั้งฉากในการทดสอบแต่ละตัวอย่าง มีค่าความเค้นเฉือนคงค้างเท่ากับ 0.89, 1.02, 1.21, 1.27, 1.40, 1.53, 1.85 และ 1.91 ตามลำดับ ส่วนรอยแตกแบบขรุขระมีค่าความเค้นเฉือนสูงสุดเท่ากับ 1.46, 1.91, 2.23 และ 2.87 MPa ค่าความเค้นเฉือนคงค้างเท่ากับ 0.89, 1.21, 1.40 และ 1.80 ตามการแปรผันของค่าความเค้นตั้งฉาก 0.45, 0.57, 0.70 และ 0.89 MPa ตามลำดับ

การศึกษาผลกระทบความขรุขระของรอยแตกในเกลือหิน จากผลการทดสอบที่ได้ตามเกณฑ์ของคูลอมป์พบว่าให้ค่าแรงเสียดทานยึดติดระหว่างซีเมนต์และเกลือหินเท่ากับ 70 และ 69 องศา สำหรับรอยแตกแบบขรุขระและรอยแตกแบบตัดเรียบตามลำดับ แรงยึดติดในรอยแตกระหว่างซีเมนต์และเกลือหินมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.3 เมกกะปาสคาล

การทดสอบ Push-out ให้ผลการทดสอบที่สูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง โดยมีค่าแรงเฉือนสูงสุดตามแรงกดในแนวแกน 6.74 – 11.23 MPa อันเป็นผลมาจากผลกระทบของค่าอัตราส่วนปัวซ์ซองที่จะเพิ่มขึ้นตามความเค้นตั้งฉากที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของตัวอย่างซีเมนต์และเกลือหินในขณะที่ให้แรงกดตามแนวแกน จึงชี้ให้เห็นว่าผลที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงนั้นให้ค่าที่อยู่ในเชิงอนุรักษ์ที่มากกว่าสำหรับการทดสอบหาค่ากำลังเฉือนสูงสุดระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ที่ใช้ในการอุดหลุมเจาะ ซีเมนต์สำหรับอุดหลุมเจาะที่นำมาใช้ในการทดสอบครั้งนี้สามารถให้ประสิทธิภาพเชิงกลศาสตร์เป็นไปตามที่ต้องการ

บรรณานุกรม

Akgun H. (1996) Strength parameters of cement borehole seals in rock, in: K. Fuenkajorn, J.J.K. Daemen (Eds.), Sealing of Boreholes and Underground Excavations in Rock, Chapman & Hall, London, pp. 28–39.

Akgun, H., Daemen, J.J.K., (1994) Performance assessment cement grout borehole plugs in basalt. Eng. Geol. 37,137–148.

Akgun, H. (1997) An assessment of borehole sealing in a salt environment. Environmental Geology. 31: 34–41.

Akgun, H. and Daemen, J.J.K. (2002) Influence of degree of saturation on the borehole sealing performance of an expansive cement grout. Cement and Concrete Research. 30(2): 281–289.

Akgun, H. and Daemen, J.J.K. (1994) Performanced assessment of cement grout borehole plugs in basalt. Engineering Geology, 37, 137–48.

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.

ASTM C150, Standard specification for Portland cement. In Annual Book of ASTM Standards (Vol. 04.01). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.

ASTM C595, Standard Specification for Blended Hydraulic Cements. In Annual Book of ASTM Standards (Vol. 04.01). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.

ASTM D2196, Standard Test Methods for Rheological Properties of Non–Newtonian Materials by Rotational (Brookfield type) Viscometer. In Annual Book of ASTM Standards (Vol. 06.01). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.

ASTM D3967. Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens. In Annual Book of ASTM Standards (Vol. 04.08). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.

ASTM D5607. Standard Test Method for Performing Laboratory Direct Shear Strength Tests of Rock Specimens Under Constant Normal Force. In Annual Book of ASTM Standards (Vol. 04.08). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.

ASTM D7012. Standard test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures, In Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08.

Brown, E. T. (1981). Rock Characterization Testing & Monitoring, ISRM Suggested Methods. New York: Pergamon Press.

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.

Economides, M.J., Watters, L.T. and Dunn-Norman, S. (1998) Petroleum well construction. Chichester : John Wiley & Sons.

Fuenkajorn, K. and Daemen J.J.K. (authors & editors) (1996) Sealing of Boreholes and Underground Excavations in Rock, Chapman & Hall, London, 322 pp.

Fuenkajorn, K. and Daemen, J.J.K. (1984) "Experimental Assessment of Borehole Wall Drilling Damage in Basaltic Rocks," Rock Mechanics in Productivity and Protection: Proceedings of the 25th U.S. Symposium, June 25-27, Northwestern University, Evanston, IL, pp. 774-783.

Fuenkajorn, K. and Daemen, J.J.K. (1986) "Rock-Cement Interface Effects on Borehole Plug Permeability," Waste Management'86: Proceedings of the Waste Management Symposium, March 2-6, Tucson, Arizona, Vol. 2 – High Level Waste, pp. 251-256.

Fuenkajorn, K. and Daemen, J.J.K. (1986) Experimental Assessment of Borehole Wall Drilling Damage in Basaltic Rocks, Technical Report, NUREG/CR-4641, published by Office of Nuclear Regulatory Research, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington D.C., 265 pp.

Fuenkajorn, K. and Daemen, J.J.K. (1986) Shape Effect on Ring Test Tensile Strength, Key to Energy Production: Proceedings of the 27th U.S. Symposium on Rock Mechanics, June 23-25, University of Alabama, Tuscaloosa, pp. 155-163.

Fuenkajorn, K. and Daemen, J.J.K. (1987) "Mechanical Interaction between Rock and Multi-component Shaft or Borehole Plugs," Rock Mechanics: Proceedings of the 28th U.S. Symposium, June 29 – July 1, University of Arizona, Tucson, pp. 165-172.

Fuenkajorn, K. and Daemen, J.J.K. (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," Proc. 2nd North American Rock Mech. Symposium, Montreal, Quebec, Canada, pp. 1447-1454.

Fuenkajorn, K. and J.J.K. Daemen, (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 J.J.K. Daemen, (1991) "Cement Borehole Plug Performance in Welded Tuff," *Rock Mechanics as a Multidisciplinary Science: Proceedings of the 32nd U.S. Symposium*, June 10-12, University of Oklahoma, Norman, pp. 723-732.

Fuenkajorn, K. and J.J.K. Daemen, (1992) "Borehole Sealing," *Compressed-Air Energy Storage: Proceedings of the 2nd International Conference*, Electric Power Research Institute, San Francisco, CA, July 7-9, pp. 5.1-5.21.

Fuenkajorn, K. and J.J.K. Daemen, (1997) "Mine Sealing: Design Guidelines and Considerations," *Tailings and Mine Waste'97*, Colorado State University, Fort Collins, January 13-17, pp. 59-68.

Fuenkajorn, K., (1996) "Overview of Research Effort on Sealing of Boreholes, Shafts and Ramps in Welded Tuff," *Proceedings of the Workshop on Rock Mechanics Issues in Repository Design and Performance Assessment*, Washington, DC., September 19–20.

Goodman, R.E. (1989) Introduction to rock mechanics. New York : John Wiley & Son.

Gray, T.A. and Gray, R.E. (1992) Mine closure, sealing, and abandonment. SME mining handbook. 1,2 : 659–674.

McGinty, J.E. and Calvert, D.G. (1991) Cementing off, plugging and redrilling. In National Ground Water Association (ed.). Well abandonment. Ohio : National Ground Water Association.

Neville, A.M. (1981) Properties of concrete. England : Longman Group Limited.

Nye, J.D. (1991) Abandoned wells : How one state deals with them. In National Ground Water Association (ed.). Well abandonment. Ohio : National Ground Water Association.

Ouyang, S., and Daemen, J. J. K. (1996). Performance of bentonite and bentonite/crushed rock borehole seals. In K. Fuenkajorn and J. J. K. Daemen (eds.). Sealing of boreholes and underground excavations in rock (pp. 65–95). London: Chapman & Hall.

Ran, C., Daemen, J.J.K., Schuhen, M.D. and Hansen, F.D. (1997) Dynamic compaction properties of bentonite. Rock Mech. & Min. Sci. 34(1–4).

Smith, D.K. (1990) Cementing. The united state of America : The society of petroleum engineers Inc.

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 Rock, Chapman & Hall, London, pp. 9–27.

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.

Tyler, G. (1991) "The Impact of Abandoned Wells on Ground Water Quality," In National Ground Water Association (ed.) Well Abandonment. Ohio: National Ground Water Association.

ประวัตินักวิจัย

อาจารย์ ดร.ปรัชญา เทพณรงค์ เกิดเมื่อวันที่ 14 กันยายน 2521 ที่จังหวัดกาญจนบุรี จบการศึกษาปริญญาเอกจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โปรแกรมวิชาวิศวกรรมธรณี ในปี พ.ศ. 2550 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำอยู่ที่สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา มีความชำนาญทางการทดสอบด้านกลศาสตร์หินในห้องปฏิบัติการและภาคสนาม การออกแบบและการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ เป็นนักวิจัยประจำหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณี และเป็นสมาชิกสามัญตลอดชีพของสมาคมธรณีวิทยาแห่งประเทศไทย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี