



รหัสโครงการ SUT7-719-55-24-32

รายงานการวิจัย

การประเมินศักยภาพของชั้นเกลือหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
ของประเทศไทยสำหรับกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

(Performance Assessment of Rock Salt Formation in the Northeast
of Thailand for CO₂ Storage)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-719-55-24-32

รายงานการวิจัย

การประเมินศักยภาพของชั้นเกลือหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
ของประเทศไทยสำหรับกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

(Performance Assessment of Rock Salt Formation in the Northeast
of Thailand for CO₂ Storage)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เฟื่องขจร

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 และ 2556

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

สิงหาคม 2556

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 และ 2556 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากทีมงานหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีในการทดสอบและ นางสาวกัญญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

สิงหาคม 2556

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อหาผลกระทบของอุณหภูมิต่ำกับการเปลี่ยนรูปร่างเชิงเวลาของเกลือหินชุดมหาสารคามด้วยการทดสอบความคืบในแกนเดียว โดยจัดเตรียมแท่งตัวอย่างเกลือหินให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ยาว 25 เซนติเมตร ใช้โครงกดทดสอบในการให้แรงกดในแนวแกนบนตัวอย่างเกลือหิน โดยปรับให้มีขนาด 6.5, 9.6, 13.0, 14.8 และ 16.0 MPa หรือประมาณร้อยละ 20 ถึงร้อยละ 50 ของกำลังกดของหิน อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบมีค่าคงที่ที่ 273 และ 303 เคลวิน วิธีการทดสอบและการคำนวณเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM การเปลี่ยนรูปร่างของแท่งตัวอย่างเกลือหินในแนวแกนและด้านข้างถูกตรวจวัดอย่างต่อเนื่องเพื่อใช้คำนวณค่าความเครียด โดยแต่ละตัวอย่างหินใช้เวลาทดสอบ 21 วัน การเปลี่ยนรูปร่างเชิงเวลาของตัวอย่างเกลือหินได้ใช้สมการเอ็กซ์โพเนนเชียลในการคำนวณ ซึ่งจะคำนวณในรูปแบบของความเครียดเหนือหกด้านในเชิงเวลา ผลการทดสอบระบุว่าความเครียดปฏิกิริยาและทุติยภูมิมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลงจาก 303 เคลวิน ไปที่ 273 เคลวิน ค่าปัจจัยของความคืบที่คำนวณได้จากผลการทดสอบภายใต้ทั้ง 2 อุณหภูมิ ถูกใช้ในการจำลองการเปลี่ยนรูปร่างของโพรงเกลือที่ใช้กักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ผลการจำลองระบุว่าการกระจายตัวของความเค้นที่อยู่รอบโพรงกักเก็บภายใต้อุณหภูมิต่ำและภายใต้อุณหภูมิห้องมีค่าใกล้เคียงกัน การหดตัวในแนวรัศมีของโพรงกักเก็บภายใต้อุณหภูมิต่ำจะมีค่าน้อยกว่าโพรงที่อยู่ภายใต้อุณหภูมิห้องประมาณร้อยละ 10 ซึ่งผลดังกล่าวชี้แนะว่าการทดสอบเกลือหิน และการจำลองสถานะการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้อุณหภูมิต่ำจะให้ผลค่าการหดตัวในเชิงอนุรักษ์

Abstract

Uniaxial creep tests have been performed to assess the effect of low temperatures on the time-dependent deformation of the Maha Sarakham rock salt. The salt cores are prepared to have nominal dimensions of 10 cm in diameter and 25 cm in length. The constant axial stresses applied by consolidation load frames are 6.5, 9.6, 13.0, 14.8 and 16.0 MPa (about 20% to 50% of the uniaxial compressive strength). The testing temperatures are maintained constant at 273 and 303 K. The tests methods and calculation follow the ASTM standard practices. The axial and lateral deformations are monitored and used to calculate the strains. The test duration is 21 days. The exponential creep law is used to describe the time-dependent deformations of the salt specimens, in terms of the octahedral shear strains as a function of time. The results indicate that both transient and steady-state creep deformations decrease when the temperature decreases from 303 to 273 K. The creep parameters calibrated from the test results under both temperatures are used in the simulations of the creep deformation of CO₂ storage caverns. The simulations are made under isothermal condition. The stress distributions around the storage caverns under the two temperatures are similar. The radial closure for the cavern under low temperature is about 10% less than that under room temperature. This suggests that salt testing and simulation of the CO₂ storage caverns under room temperature will provide a conservative assessment of the cavern closure.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	4
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	5
1.6 ผลสำเร็จของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ.....	8
1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	8
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.1 การกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	9
2.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเชิงเวลาของเกลือหิน.....	12
บทที่ 3 การจัดเตรียมตัวอย่าง.....	15
3.1 วัตถุประสงค์.....	15
3.2 แหล่งที่มาของตัวอย่างเกลือหิน.....	15

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ	17
4.1 วัตถุประสงค์ของการทดสอบ.....	17
4.2 การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียว.....	17
4.2.1 การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวภายใต้อุณหภูมิห้อง (30°C)....	17
4.2.2 การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวภายใต้อุณหภูมิต่ำ (0°C).....	18
4.3 สรุปและวิจารณ์ผลการทดสอบ.....	21
บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ	23
5.1 สมการแบบเอ็กโพเนนเชียล.....	23
5.2 การสอบเทียบตัวแปรเชิงเวลาของเกลือหิน.....	26
บทที่ 6 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และระเบียบวิธีเชิงตัวเลข	29
6.1 การคำนวณด้วยสมการ.....	29
6.2 แบบจำลองโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	32
6.3 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	33
บทที่ 7 บทสรุป	37
7.1 สรุปและวิจารณ์ผล.....	37
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	37
บรรณานุกรม	39
ประวัตินักวิจัย	43

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ตำแหน่งความลึก ขนาด และคุณสมบัติของตัวอย่างเกลือหิน.....	16
5.1 ผลการสอบเทียบค่าตัวแปรด้วยโปรแกรม SPSS.....	26
6.1 คุณสมบัติของเกลือหินที่ใช้ในการคำนวณตามสมการ (6.4).....	31
6.2 ค่าคุณสมบัติของเกลือหินรอบโพรงเกลือที่ใช้ในแบบจำลองคอมพิวเตอร์.....	33

สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่	หน้า
1.1	4
1.2	7
2.1	9
2.2	10
2.3	
2.4	12
3.1	16
4.1	18
4.2	19
4.3	20
4.4	20
4.5	21
4.6	22
4.7	22

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเทียบกับเวลาที่สภาวะความเค้นเฉือนหกด้านต่างกันในภายใต้อุณหภูมิต่ำ (0°C).....	25
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเทียบกับเวลาที่สภาวะความเค้นเฉือนหกด้านต่างกันในภายใต้อุณหภูมิห้อง (30°C).....	25
5.3 การสอบเทียบค่าตัวแปรของพฤติกรรมเปลี่ยนรูปร่างเชิงเวลาของตัวอย่างเกลือหิน ในช่วงที่อัตราความเครียดหรือการเคลื่อนไหลเปลี่ยนแปลงเชิงเวลา (Transient phase) โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.967.....	27
5.4 การสอบเทียบค่าตัวแปรของพฤติกรรมเปลี่ยนรูปร่างเชิงเวลาของตัวอย่างเกลือหินในช่วงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดหรือการเคลื่อนไหลต่อช่วงเวลาดังที่ (Steady-state phase) โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.964.....	27
6.1 ผลการคำนวณการเปลี่ยนรูปร่างของโพรงเกลือซึ่งอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวรัศมีกับเวลาในหน่วยปี.....	31
6.2 โครงข่ายแบบจำลองโพรงเกลือที่สร้างจากโปรแกรม FLAC 4.0 โดยมีความลึกของหลังคาโพรงเท่ากับ 500 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลางของโพรงเท่ากับ 50 เมตร และมีแรงดันภายในโพรงเท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์ ของความเค้นในแนวตั้งที่หลังคาโพรง (σ_v)..	32
6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการยุบตัวของโพรงเกลือกับระยะเวลาที่ 1 ปี และ 15 ปี.....	34
6.4 การกระจายตัวของความเค้นรอบโพรงเกลือจากการจำลองด้วยโปรแกรม FLAC 4.0 ภายใต้อุณหภูมิต่ำ (0°C).....	35
6.5 การกระจายตัวของความเค้นรอบโพรงเกลือจากการจำลองด้วยโปรแกรม FLAC 4.0 ภายใต้อุณหภูมิห้อง (30°C).....	35

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ปรากฏการณ์โลกร้อน (Global Warming) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นทั่วโลก ก่อให้เกิดผลกระทบ เช่น ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1°C ถึง 2°C น้ำแข็งขั้วโลกละลาย ระดับน้ำทะเลสูงขึ้น ฤดูกาลเปลี่ยนแปลง เกิดความแปรปรวนของสภาพอากาศที่รุนแรงและบ่อยครั้ง การสูญพันธุ์ของสิ่งมีชีวิต และการเพิ่มขึ้นของพายุไต้ฝุ่น เป็นต้น สาเหตุหลักประการหนึ่งของสภาวะโลกร้อนคือ การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณสูงขึ้น โดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่มาจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล โรงงานอุตสาหกรรม การเผาขยะมูลฝอย และของเสียจากปศุสัตว์

การลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมจากภาคอุตสาหกรรม อาจทำได้ด้วยการอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เก็บไว้ในโพรงเกลือหิน นักวิจัยในประเทศแคนาดาได้ศึกษาศักยภาพของโพรงเกลือที่ระดับความลึกมากกว่า 1,000 ฟุต เพื่อใช้กักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยออกแบบให้โพรงเป็นรูปทรงกลมรีมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 เมตร มีปริมาตร 500,000 ลูกบาศก์เมตร สามารถกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 0.5–1.0 ล้านตัน (Shi and Durucan, 2005) สาเหตุที่นักวิจัยเหล่านี้ได้เลือกชั้นเกลือหินเพื่อสร้างโพรงเกลือสำหรับกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพราะมีความเหมาะสมในหลายประการคือ เกลือหินมีความซึมผ่านต่ำมาก (น้อยกว่า 10^{-9} m^2) จึงไม่ทำให้เกิดการรั่วไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่กักเก็บไว้สู่สิ่งแวดล้อมภายนอก ประกอบกับผนังโพรงเป็นเกลือหินมีคุณสมบัติที่สามารถเชื่อมประสานรอยแตกและรอยร้าวที่เกิดขึ้นเองได้ และการกักเก็บในลักษณะเช่นนี้สามารถนำเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้ประโยชน์ได้ในอนาคต ตลอดระยะเวลาที่กักเก็บอยู่สามารถตรวจสอบว่ามีการรั่วไหลหรือไม่ด้วยการวัดค่าความดันที่บริเวณปากท่อเหนือโพรงเกลือได้อย่างสม่ำเสมอ หากพบว่าการรั่วไหลสามารถป้องกันและแก้ไขปัญหาได้อย่างทันที่ (Dusseault et al, 2001)

ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยมีชั้นเกลือหินอยู่ 2 แห่ง ได้แก่ แห่งสกลนครและแห่งโคราช ดังนั้นเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดจากการใช้แหล่งทรัพยากรเกลือหินและลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศ การสร้างโพรงเกลือในชั้นเกลือหินสำหรับกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงเป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับประเทศไทย โพรงเกลือสำหรับเทคโนโลยีกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในต่างประเทศได้มีการออกแบบในเชิงขนาด รูปร่าง และการวางตัวของโพรง ซึ่งผลการออกแบบขึ้นกับลักษณะทางธรณีวิทยา โครงสร้าง (ความลึกและความหนาของชั้นเกลือหิน) และคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน

(ความแข็งของเกลือบิ้นและการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง) ปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบข้างต้น ในแต่ละพื้นที่จะมีความแตกต่างกันออกไป ดังนั้นการนำเอาเทคโนโลยีนี้มาประยุกต์ใช้ในประเทศไทย จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาคุณสมบัติของเกลือบิ้นด้วยการทดสอบเชิงกลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการ และศึกษาลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างอย่างละเอียด เพื่อให้การออกแบบโพรงเกลือบิ้นมีความเหมาะสมและมีเสถียรภาพในระยะยาว สามารถนำไปใช้ได้จริงอย่างเป็นรูปธรรม

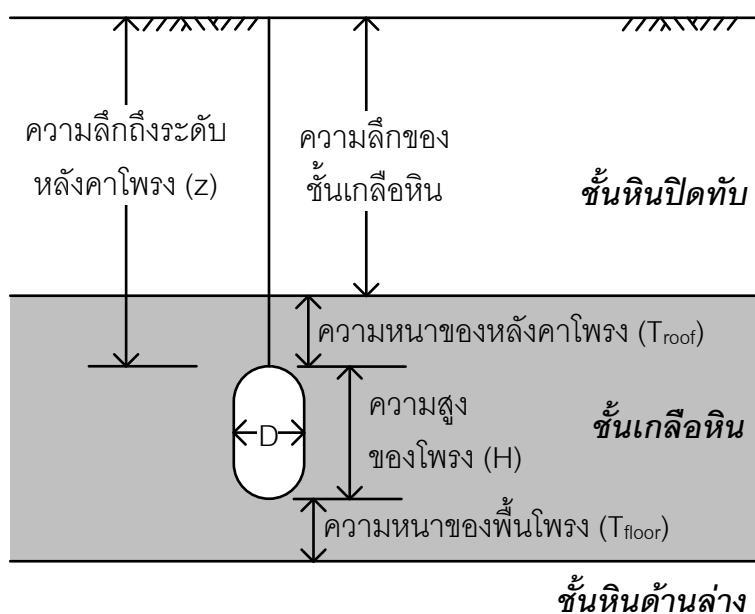
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) ศึกษาการเคลื่อนไหลในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือบิ้นในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 0°C ถึง 30°C (ซึ่งสัมพันธ์กับช่วงอุณหภูมิที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีสถานะเป็นของเหลวในสภาวะกักเก็บ) เพื่อศึกษาคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างเกลือบิ้นที่ขึ้นกับเวลา (Time dependent) โดยพิจารณาผลกระทบจากอุณหภูมির่วมด้วย
- 2) สอบเทียบค่าตัวแปรจากสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (การหดและขยายตัว) ของเกลือบิ้นในเชิงเวลา โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป เช่น SPSS ค่าที่ได้จะนำไปใช้กำหนดคุณสมบัติของเกลือบิ้นในขั้นตอนการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข
- 3) เปรียบเทียบผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และพฤติกรรมของเกลือบิ้นในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิห้องและภายใต้สภาวะการกักเก็บ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ศึกษาและประมวลข้อมูลทางด้านธรณีวิทยาและธรณีวิทยาโครงสร้างของชั้นเกลือบิ้นในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยที่เหมาะสมกับการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งโพรงดังกล่าวสามารถอยู่ที่ระดับตื้นได้ ดังนั้นในการศึกษาธรณีวิทยาจะเน้นที่โครงสร้างทางธรณีวิทยาในระดับตื้น
- 2) แหล่งตัวอย่างเกลือบิ้นที่ใช้ในการทดสอบได้รับความอนุเคราะห์มาจากองค์กรต่างๆ เช่น บริษัท เกลือบิ้นมาย จำกัด บริษัท เหมือนแรไปแทชอาเซีย จำกัด และกรมทรัพยากรธรณี เพื่อนำมาจัดเตรียมสำหรับการหาคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากโครงการนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้น ดังนั้นจะไม่มีการขุดเจาะหลุมใหม่ในภาคสนาม ตำแหน่งและความลึกของตัวอย่างหินที่นำมาศึกษาจะถูกบันทึกเพื่อใช้ในการอ้างอิงในการศึกษาโดยละเอียดต่อไป

- 3) อุณหภูมิภายในโพรงจะมีค่าต่ำโดยผันแปรในช่วง 0°C ถึง 30°C ซึ่งสัมพันธ์กับช่วงอุณหภูมิที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีสถานะเป็นของเหลวภายใต้ความดันประมาณ 10 MPa ซึ่งเป็นระดับความดันภายในโพรงที่เกิดขึ้นเมื่อมีการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปของเหลวภายใต้แรงดันที่ 80% ของความเค้นบริเวณหลังคาโพรง เมื่อหลังคาโพรงอยู่ที่ระดับความลึกประมาณ 500 เมตร
- 4) ทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือหินในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 0°C ถึง 30°C ซึ่งสัมพันธ์กับช่วงอุณหภูมิที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีสถานะเป็นของเหลวในสภาวะกักเก็บ เพื่อศึกษาคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างเกลือหินที่ขึ้นกับเวลา โดยพิจารณาผลกระทบจากอุณหภูมิร่วมด้วย
- 5) สอบเทียบค่าตัวแปรจากสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (การหดและขยายตัว) ของเกลือหินในเชิงเวลา โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป เช่น SPSS ค่าที่ได้จะนำไปใช้กำหนดคุณสมบัติของเกลือหินในขั้นตอนการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข
- 6) ออกแบบโพรงเกลือเบื้องต้นโดยใช้ฐานข้อมูลการออกแบบในต่างประเทศที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีนี้ การกำหนดรูปร่างของโพรงเกลือให้เป็นรูปทรงกระบอกที่มีส่วนบนและส่วนล่างเป็นรูปครึ่งทรงกลม และกำหนดระดับความลึกของหลังคาโพรง (Z) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (D) ความสูง (H) ความหนาของหลังคาโพรง (T_{roof}) ความหนาของพื้นโพรง (T_{floor}) และอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างโพรงกับเส้นผ่าศูนย์กลางโพรง (Spacing-to-Diameter Ratio) ค่าที่กำหนดนี้จะนำไปจำลองโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข รูปที่ 1.1 แสดงตัวแปรที่ต้องพิจารณาในการออกแบบโพรงเกลือเพื่อให้มีความปลอดภัยและมีเสถียรภาพในระยะยาว
- 7) การศึกษาและวิเคราะห์เสถียรภาพของโพรงเกลือที่ได้ออกแบบไว้ในเบื้องต้นด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่มีอยู่ ได้แก่ โปรแกรม GEO และโปรแกรม FLAC2D เวอร์ชัน 4.0 โปรแกรมทั้งสองนี้มีสมการควบคุมที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุในเชิงเวลาได้
- 8) ผลงานวิจัยนี้จะนำไปเผยแพร่องค์ความรู้ในรูปของบทความวิชาการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ และวารสารทางวิชาการในระดับนานาชาติ



รูปที่ 1.1 ตัวแปรในการออกแบบโพรงเกลือเพื่อใช้กักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เหลว

1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

ประเด็นสำคัญประการหนึ่งที่จะระบุถึงความเป็นไปได้หรือศักยภาพของชั้นเกลือหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย สำหรับการขุดเจาะโพรงเพื่อกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปของเหลว คือพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินที่อยู่รอบโพรงกักเก็บภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความเค้นที่เสมือนจริงในระหว่างการบรรจุและกักเก็บ เพื่อให้ได้พฤติกรรมของเกลือหินภายใต้สภาวะดังกล่าว งานวิจัยนี้จะมีการทดสอบเพื่อหาความแข็งแรงและการเปลี่ยนรูปร่างเชิงยืดหยุ่นและเชิงเวลา (Creep) ภายใต้ความเค้นสูงและใช้อุณหภูมิต่ำใกล้ศูนย์องศาเซลเซียส โดยจะมีการลดอุณหภูมิของแท่งตัวอย่างเกลือหินรูปทรงกระบอกด้วยการใช้น้ำแข็งแห้ง สำหรับการทดสอบหาค่ากำลังกดจะใช้เวลาค่อนข้างสั้น แต่จะมีการวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในขณะที่เพิ่มแรงกดจนถึงจุดวิบัติ สำหรับการทดสอบการเปลี่ยนรูปร่างในเชิงเวลา แท่งตัวอย่างเกลือหินจะถูกบรรจุอยู่ในภาชนะที่มีน้ำแข็งแห้งล้อมรอบเพื่อให้อุณหภูมิที่ทดสอบมีค่าคงที่ตลอดระยะเวลาทดสอบ การเปลี่ยนรูปร่างจะมีการตรวจวัดในเชิงเวลาโดยละเอียดโดยจะใช้เวลาทดสอบ 21 วัน มีการทดสอบที่ระดับอุณหภูมิต่างกันระหว่าง 0°C ถึง 30°C ผลที่ได้จากการทดสอบภายใต้อุณหภูมิต่ำได้นำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากอุณหภูมิห้อง (30°C) ซึ่งผู้วิจัยได้เคยทดสอบมาก่อนหน้านี้แล้วหลายครั้ง (Fuenkajorn and Phueakphum, 2010) ซึ่งความแตกต่างของผลจะระบุถึงความอ่อนไหวของคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ทดสอบ

ผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการจะนำมาสอบเทียบคุณสมบัติค่าคงที่ (ความยืดหยุ่น อัตราส่วน บัวซอง ค่าความเหน็ดเชิงยืดหยุ่น ค่าความเหน็ดเชิงพลาสติก ฯลฯ) ของตัวอย่างเกล็ดหิน โดยใช้โปรแกรมทางสถิติขั้นสูง (SPSS) จากนั้นนำค่าที่สอบเทียบได้มาใส่ในโปรแกรม FLAC เพื่อจำลองเสถียรภาพของพฤติกรรมและเสถียรภาพของโพรงเกล็ดที่บรรจุก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่อุณหภูมิต่ำ และมีการผันแปรขนาด รูปร่าง และความลึกของโพรงกักเก็บ เนื่องจากโปรแกรม FLAC เป็นระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลขขั้นสูง สามารถพิจารณาค่าความเค้น ความเครียด และอุณหภูมิในเชิงเวลาได้ ดังนั้นผลที่ได้จากชุดการจำลองดังกล่าวจึงสามารถนำมาใช้ประเมินเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์ของ โพรงกักเก็บในชั้นเกล็ดหินและสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบโพรงกักเก็บเบื้องต้นในแต่ละพื้นที่ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยได้อีกด้วย

ผลการทดสอบเชิงกลศาสตร์ของเกล็ดหินที่อุณหภูมิต่ำนับว่าเป็นองค์ความรู้ใหม่ที่ไม่เคยมีผู้ใดทำมาก่อนแม้แต่ในต่างประเทศ ดังนั้นคุณสมบัติค่าคงที่ที่สอบเทียบได้จึงมีประโยชน์ต่อวงวิชาการในวงกว้าง นอกจากนี้การจำลองพฤติกรรมของเกล็ดหินรอบโพรงกักเก็บที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้องก็ยังไม่เคยมีผู้ใดทำมาก่อน

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับการจัดการก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในแง่มุมที่หลากหลาย รวมไปถึงปัญหาก๊าซเรือนกระจก ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในประเทศไทย รูปแบบการจัดการก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันทั้งในและต่างประเทศ การออกแบบและวิเคราะห์เสถียรภาพของโพรงเกล็ดเพื่อใช้กักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ธรณีวิทยาหินเกี่ยวกับความหนาและความลึกและคุณสมบัติด้านกลศาสตร์ของหินเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในงานวิจัยนี้

ขั้นตอนที่ 2 การจัดเตรียมตัวอย่างเกล็ดหิน

ในขั้นตอนนี้ได้นำตัวอย่างเกล็ดหินที่ได้รับความอนุเคราะห์จากหน่วยงานต่างๆ มาตัดและกึ่งให้อยู่ในรูปแบบเพื่อใช้ในการทดลองคุณสมบัติและพฤติกรรมที่เกี่ยวข้อง (ASTM D4543) ตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ($L/D = 2.5$) จำนวน 9 ตัวอย่าง ความลึกและตำแหน่งของแท่งตัวอย่างเกล็ดหินที่ได้ขุดเจาะมาจากชั้นเกล็ดหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยได้ถูกบันทึก วิเคราะห์ และเสนออยู่ในรายงานนี้เพื่อให้ทราบถึงความแปรปรวนทางด้านพฤติกรรมและคุณสมบัติในชั้นเกล็ดหินของประเทศไทย

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

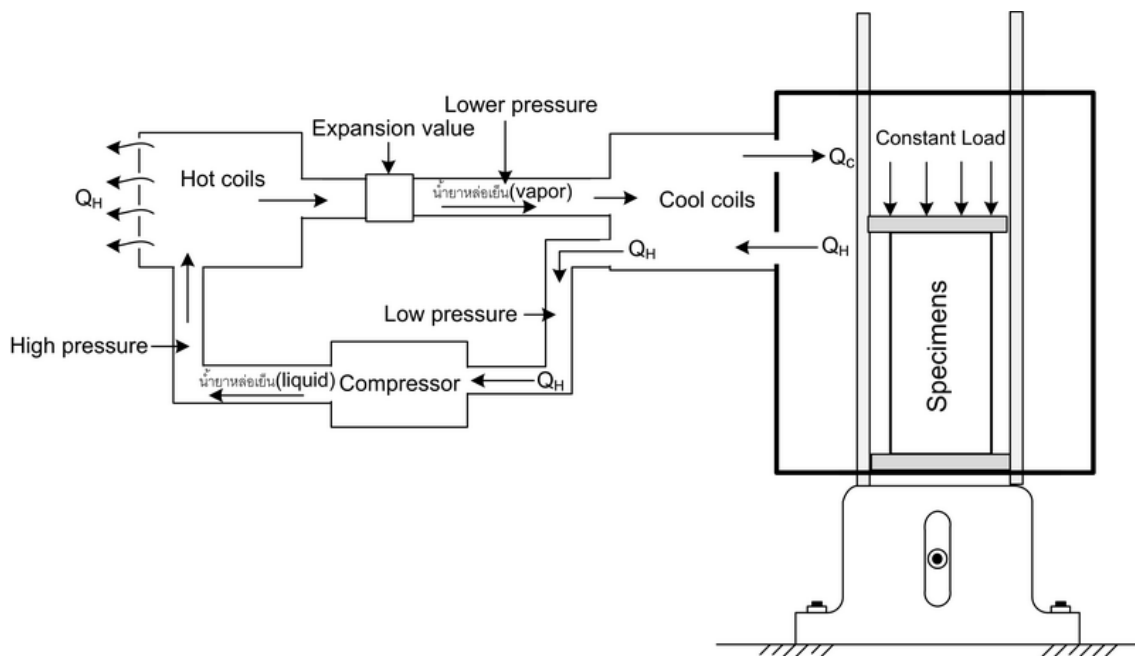
การทดสอบการเคลื่อนไหล (การคืบ) ในแกนเดียว มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้มาซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ความเครียด และเวลา ในการทดสอบได้มีการผันแปรอุณหภูมิระหว่าง 0°C ถึง 30°C (สามารถปรับอุณหภูมิได้โดยทำการติดตั้งระบบทำความเย็นครอบเครื่องที่ใช้ทดสอบ ซึ่งระบบการทำงานได้แสดงในรูปที่ 1.2) ใช้ตัวอย่างเกลือหินอย่างน้อย 9 ตัวอย่าง โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 2 ระดับ และภายใต้ความเค้นกดในแกนเดียวในช่วง 20 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงกดในแกนเดียว (σ_c) ผลที่ได้จากการทดสอบภายใต้ความเค้นที่ต่างกันจะนำมาใช้ในการสอบเทียบค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปร่างของหินที่ขึ้นกับเวลา (Time dependent deformation) ค่าคงที่เหล่านี้ คือ ความเป็นพลาสติก (Plastic) ความเหนียว (Ductile) ความหนืดเชิงยืดหยุ่น (Visco-elastic) และความหนืดเชิงพลาสติก (Visco-plastic) เป็นต้น ตัวอย่างหินอย่างน้อย 5 ตัวอย่าง ได้ถูกนำมาใช้ในการทดสอบภายใต้ขนาดของความเค้นกดคงที่ในระดับที่ต่างกัน โดยเส้นความสัมพันธ์ ความเครียด และเวลาจากการทดสอบเหล่านี้ได้นำมาใช้ในการสอบเทียบดังกล่าวข้างต้น

ขั้นตอนที่ 4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบและสอบเทียบค่าตัวแปร

ผลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติหินในขั้นตอนที่ 3 ได้ถูกนำมาสอบเทียบค่าตัวแปรที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในเชิงเวลาของหินสำหรับแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS ในการสอบเทียบค่าตัวแปร และได้ทำการตรวจสอบความสอดคล้องและความเป็นเหตุเป็นผลของผลการทดสอบในขั้นตอนนี้ ถ้าพบว่าผลที่ได้มีความขัดแย้งกันก็จะมี การทดสอบเพิ่มเติม

ขั้นตอนที่ 5 การออกแบบโพรงเกลือและการศึกษาด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

ในขั้นตอนนี้ได้ศึกษาครอบคลุมถึงการกำหนดพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับการสร้างโพรงเกลือเพื่อใช้กับเทคโนโลยีการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และการออกแบบโพรงเกลือเบื้องต้น โดยการกำหนดรูปร่างของโพรงเกลือให้เป็นรูปทรงกลมรีในแนวตั้ง มีส่วนบนและส่วนล่างเป็นรูปครึ่งทรงกลม มีการออกแบบระดับความลึกของหลังคาโพรง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ความสูง ความหนาของหลังคาโพรง ความหนาของพื้นโพรง และอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างโพรงกับเส้นผ่าศูนย์กลางโพรง ขนาดความลึกของโพรงเมื่อมีการอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในโพรงด้วยความดันสูงสุดประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ของความเค้นบริเวณหลังคาโพรง



รูปที่ 1.2 อุปกรณ์ทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวภายใต้อุณหภูมิต่ำ

รูปแบบที่กำหนดได้ถูกนำมาวิเคราะห์เสถียรภาพและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ในแบบจำลองได้มีการคำนวณความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นรอบโพรงในชั้นเกลือหินในขณะที่โพรงกำลังกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เหลว จำนวนของแบบจำลองจะขึ้นกับจำนวนของพื้นที่หรือจำนวนของธรณีวิทยาโครงสร้างต่างๆ ที่เหมาะสมกับเทคโนโลยีการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เหลว โดยนำโปรแกรม FLAC version 4.0 (Itasca, 2006) มาใช้ในการคำนวณ ซึ่ง FLAC 4.0 นี้จัดเป็นโปรแกรมวิเคราะห์แบบ Finite different analysis ซึ่งสามารถคำนวณความเค้นและความเครียดของวัตถุในสองมิติ และสามารถคาดคะเนพฤติกรรมของวัตถุในอนาคต โปรแกรมนี้ได้ถูกเขียนขึ้นโดยมีโครงสร้างทางด้านคณิตศาสตร์เพื่อจำลองคุณสมบัติของวัตถุแบบ Elasticity, Visco-elasticity, Visco-plasticity, Brittle และ Ductile การคำนวณจะมีเวลาเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ ผลที่ได้จากการคำนวณได้นำมาวิเคราะห์เพื่อเลือกสรรขนาดและรูปร่างของโพรงที่เหมาะสมในแต่ละพื้นที่

ขั้นตอนที่ 6 การถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่กลุ่มเป้าหมาย

ผลงานวิจัยจะนำไปเผยแพร่องค์ความรู้ในรูปแบบของบทความในการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ และวารสารทางวิชาการในระดับนานาชาติ เช่น Environment International (JIF = 2.856), Energy Conversion & Management (JIF = 1.244) และ Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (JIF = 0.673) เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 7 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิดและขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุปได้นำเสนอโดยละเอียดในรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์นี้ เพื่อที่จะส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

ผลงานวิจัยที่เสนอมานี้มีประโยชน์อย่างมากกับงานด้านธรณีวิทยา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และวิศวกรรมธรณี ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

- 1) ดิพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารระดับนานาชาติ
- 2) เผยแพร่องค์ความรู้ให้กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั้งภาครัฐและเอกชน

1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

องค์ความรู้ที่เกี่ยวกับผลกระทบของอุณหภูมิต่ำต่อการเปลี่ยนรูปร่างของเกลือหิน เป็นงานวิจัยประยุกต์ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อโครงสร้างพื้นฐานในการพัฒนาประเทศที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแก้ไขปัญหาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศ มีประโยชน์อย่างยิ่งในการออกแบบและประเมินเสถียรภาพของโพรงเกลือที่อยู่ภายใต้สภาวะกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หน่วยงานที่จะได้รับประโยชน์ประกอบด้วย

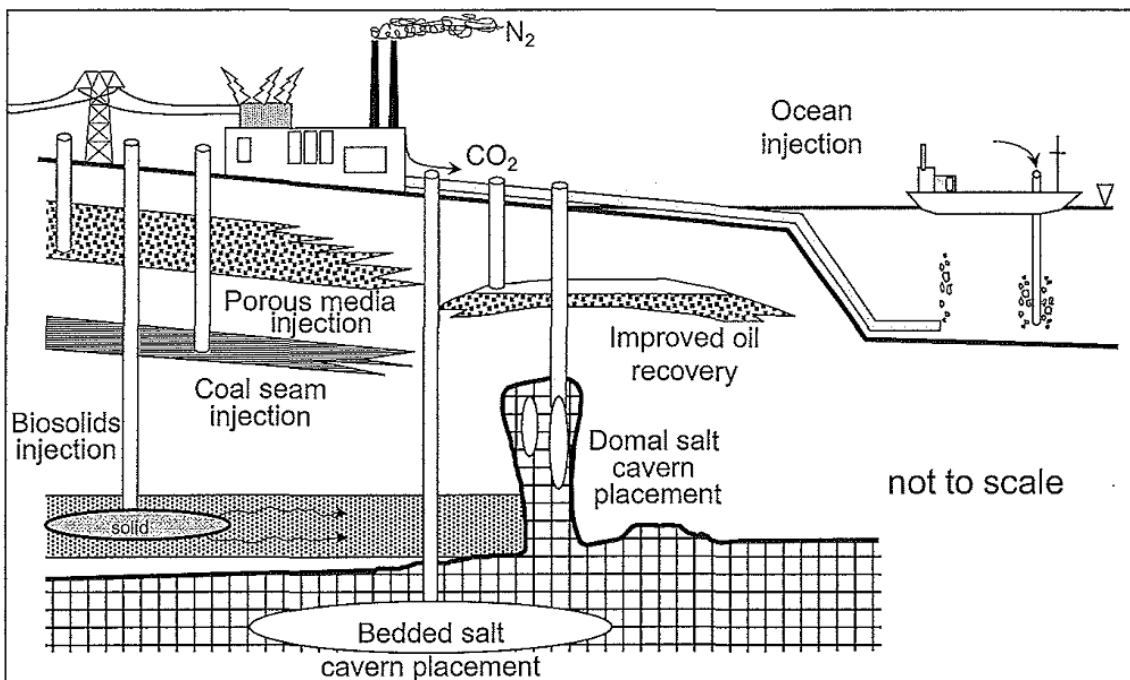
- กระทรวงพลังงาน
- กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
- กระทรวงอุตสาหกรรม
- กรมทรัพยากรธรณี
- กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่
- บริษัทเอกชนที่เกี่ยวข้องกับงานวิศวกรรมธรณี
- สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ และวิศวกรรมธรณี

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

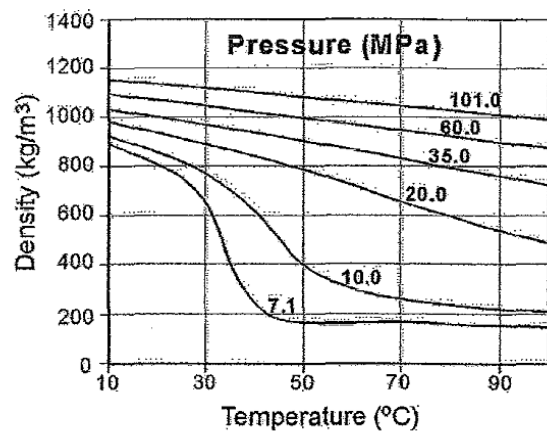
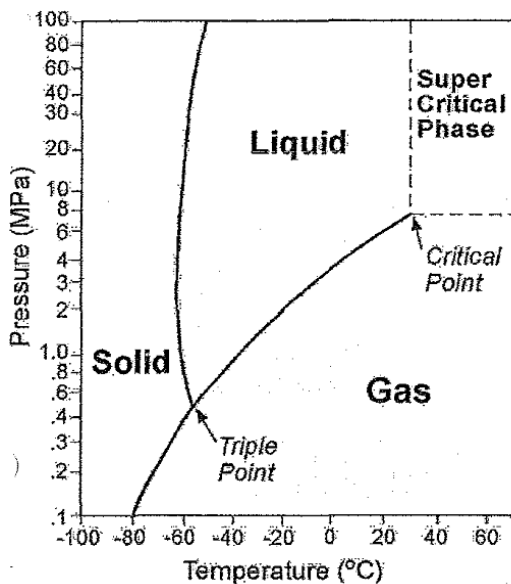
การกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นโครงสร้างทางธรณีวิทยา (รูปที่ 2.1) เป็นอีกวิธีการหนึ่งสำหรับการจัดการกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่จะปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศ โดยที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อาจจะอยู่ในรูปของก๊าซ ของเหลว หรือของเหลวเหนือจุดวิกฤติ (Supercritical state) ซึ่งมีการกักเก็บในแหล่งโครงสร้างทางธรณีวิทยาดังต่อไปนี้ 1) กักเก็บไว้ในแหล่งน้ำมันดิบเก่า 2)อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นถ่านหินเพื่อให้ได้ก๊าซมีเทน 3) กักเก็บในชั้นน้ำบาดาลหรือชั้นน้ำบาดาลเค็มที่มีชั้นหินที่บอยุด้านบนและด้านล่าง 4) การกักเก็บในโครงสร้างชั้นหินใต้มหาสมุทร และ 5) การกักเก็บไว้ในโพรงเกลือที่เป็นโดมเกลือหรือชั้นเกลือ (Bachu et al., 1994; Bergman et al., 1997; Freund and Ormerod, 1997; Hitchon et al. 1999; Dusseault et al., 2001; Shi and Durucan, 2005; and Maul et al., 2007)



รูปที่ 2.1 การกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นโครงสร้างธรณีวิทยา (Bachu, 2001)

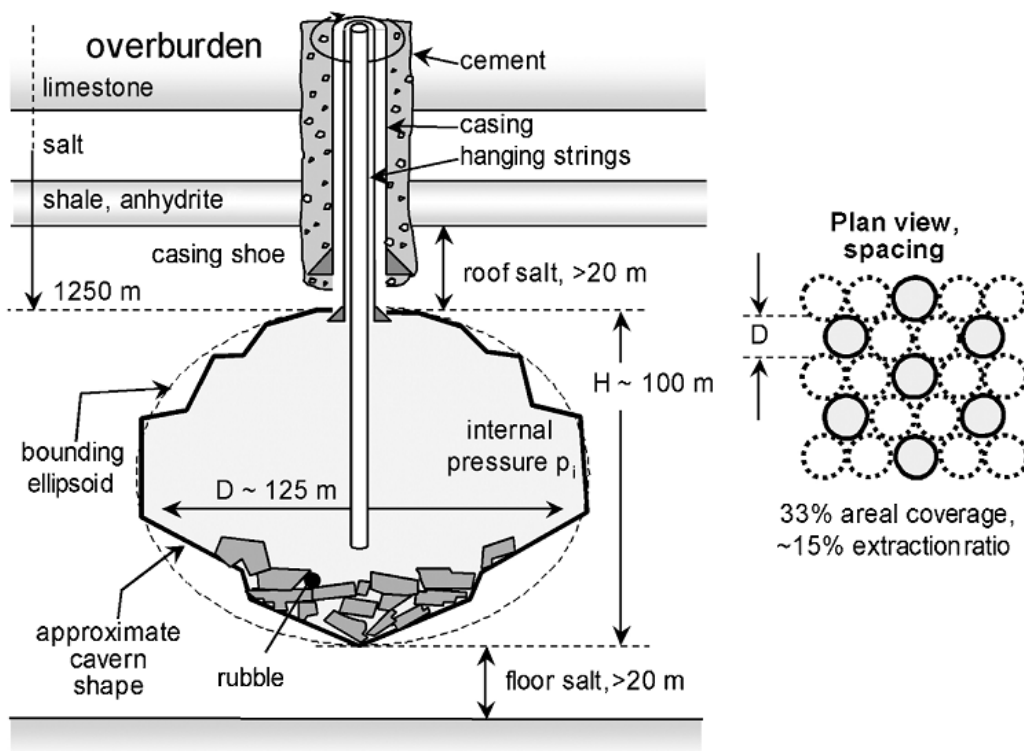
การใช้โพรงเกลือในการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์มีความเหมาะสมในหลายประการคือ เกลือหินมีค่าความซึมผ่านต่ำมาก (น้อยกว่า 10^{-9} m²) จึงไม่ทำให้เกิดการรั่วไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่กักเก็บไว้สู่สิ่งแวดล้อมภายนอก โดยส่วนใหญ่จะเก็บไว้ในรูปของของเหลวซึ่งอยู่ภายใต้สภาวะที่มีแรงดันสูงและอุณหภูมิต่ำ (รูปที่ 2.2) ประกอบกับผนังโพรงเป็นเกลือหิน มีคุณสมบัติที่สามารถเชื่อมประสานรอยแตกและรอยร้าวที่เกิดขึ้นเอง และการกักเก็บในลักษณะเช่นนี้ยังสามารถนำเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้ประโยชน์ได้ในอนาคต ตลอดระยะเวลาที่กักเก็บอยู่สามารถตรวจสอบว่ามีการรั่วไหลด้วยการอ่านค่าความดันที่บริเวณปากท่อเหนือโพรงเกลือได้อย่างสม่ำเสมอ หากพบว่ามี การรั่วไหลก็จะสามารถป้องกันและแก้ไข ปัญหาได้อย่างทันท่วงที (Dusseault et al, 2001)

การออกแบบโพรงเกลือมีจุดประสงค์หลักเพื่อให้โพรงเกลือมีความมั่นคงแข็งแรง มีเสถียรภาพ ไม่เกิดการวิบัติหรือมีการรั่วไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก ตัวแปรในการออกแบบประกอบด้วยความลึกของระดับหลังคาโพรง ขนาด (ความสูงและเส้นผ่าศูนย์กลาง) รูปร่างของโพรง ความหนาของเกลือหินที่เกลือทิ้งไว้เป็นหลังคาโพรง (Salt roof) และพื้นโพรง (Salt floor) รวมทั้งการวางตัวของโพรงเกลือ (ระยะห่างจากโพรงเกลือข้างเคียง) การออกแบบข้างต้นนี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน และลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างของแหล่งเกลือหิน



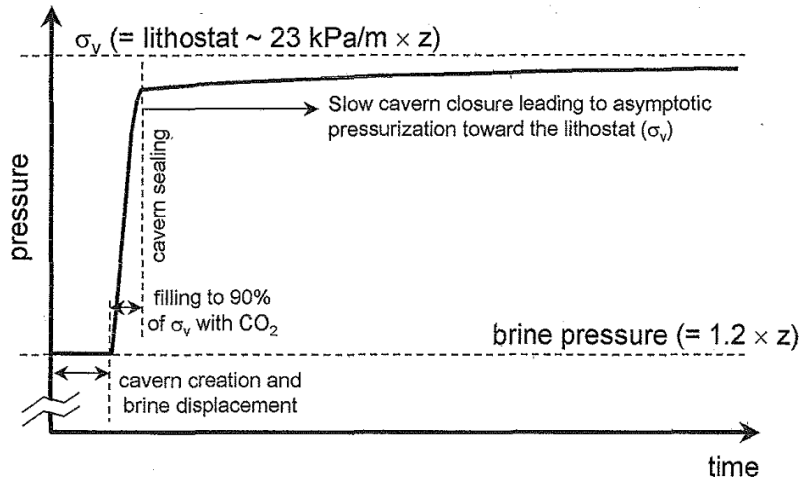
รูปที่ 2.2 คุณสมบัติภายใต้ความดันและอุณหภูมิ (ซ้าย) และความหนาแน่นของก๊าซคาร์บอน-ไดออกไซด์ (ขวา) (Dusseault et al., 2001)

Dusseault et al. (2001) ได้ศึกษาศักยภาพของโพรงเกลือสำหรับกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในเมือง Alberta ประเทศแคนาดา คณะผู้วิจัยได้ออกแบบโพรงเกลือเป็นรูปทรงรี มีความสูงของโพรงประมาณ 100 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลางโพรงประมาณ 125 เมตร โดยให้หลังคาโพรงอยู่ที่ระดับความลึก 1,250 เมตร ทั้งนี้ได้กำหนดความหนาของเกลือหินบริเวณส่วนบนของโพรงเกลือต้องมากกว่า 20 เมตร และความหนาบริเวณส่วนล่างของโพรงเกลือต้องมากกว่า 20 เมตร รูปที่ 2.3 แสดงการออกแบบโพรงสำหรับใช้กักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เมือง Alberta ประเทศแคนาดา



รูปที่ 2.3 การออกแบบโพรงเกลือสำหรับใช้เป็นที่กักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Dusseault et al., 2001)

ความดันภายในโพรงเกลือมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา (รูปที่ 2.4) เริ่มตั้งแต่มีการละลายโพรงเกลือแล้วเสร็จ ความดันจะเกิดจากน้ำเกลือที่อยู่ภายในโพรง (มีค่าประมาณ $1.2 \text{ kPa/m} \times \text{ความลึก}$) หลังจากอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เหลวเข้าไปในโพรงเพื่อแทนที่น้ำเกลือ ความดันจะเปลี่ยนไป โดยมีค่าประมาณ 90% ของความดันในแนวตั้งที่ระดับหลังคาโพรง และเมื่อมีการปิดบ่อด้วยการอุดซีเมนต์หรือวัสดุอื่นที่มีความเหมาะสม ความดันภายในโพรงเกลืออาจมีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้เนื่องจากปัจจัย 5 ประการ (Berest et al., 2000) ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.4 ความดันภายในโพรงเกลือตั้งแต่มีการละลายโพรงเสรีจลัน ต่อมา มีการบรรจุก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เหลว และมีการปิดโพรงเกลือ (Dusseault et al., 2001)

- 1) การเคลื่อนไหลของเกลือหินรอบอุโมงค์ (Salt creep)
- 2) การขยายตัวจากความร้อน (Thermal expansion) ของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวในโพรง เนื่องจากที่ระดับความลึกเพิ่มขึ้น 1 กิโลเมตร อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้น 20–30°C (Buchu and Burwash, 1991)
- 3) การแพร่กระจาย (Transport) ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เหลวออกจากโพรงเกลือสู่ชั้นหินข้างเคียงที่มีความพรุน (Porous strata)
- 4) การรั่วไหล (Leakage) ผ่านส่วนต่างๆ ของหลุมเจาะ
- 5) การละลายเพิ่ม (Addition dissolution) ของเกลือหินที่เป็นผนังโพรง จากการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เหลวกับเกลือหินแล้วเกิดการตกผลึก (Precipitation) ของเกลือภายในโพรง ซึ่งมีปัจจัยเสริมจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงและเกิดการกวนของก๊าซเหลวในโพรงเกลือ

2.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนรูปร่างเชิงเวลาของเกลือหิน

Fuenkajorn and Phueakphum (2009) ได้ศึกษาผลกระทบของการให้แรงเชิงกลแบบวัฏจักรต่อคุณสมบัติของเกลือหิน เช่น กำลังรับแรงกด ความยืดหยุ่น และคุณสมบัติที่ขึ้นกับเวลา ของตัวอย่างเกลือหินจากชั้นเกลือชุดมหาสารคาม ซึ่งได้ดำเนินการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว กำลังรับแรงกดในสามแกน การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวในระยะเวลายสั้นและระยะยาว และการทดสอบการให้แรงแบบวัฏจักรในแกนเดียว จากผลการทดสอบพบว่า กำลังรับแรงกดเป็น 34.7 ± 2.2 MPa ค่าความยืดหยุ่น 25.2 ± 1.9 GPa ค่าปัวซองเป็น 0.37 ± 0.11

ได้สรุปว่าความแข็งแรงหรือกำลังรับแรงกดของเกลือหินมีค่าน้อยลงเมื่อจำนวนวัฏจักรการให้แรงเพิ่มมากขึ้น ค่าความยืดหยุ่นของเกลือหินจะลดลงในช่วงแรกของการให้แรงแบบวัฏจักรและมีแนวโน้มจะคงที่จนเกิดการวิบัติ

Charpentier (1984) ได้ศึกษาพฤติกรรมที่ขึ้นต่อเวลาของเกลือหินภายใต้การผันอุณหภูมิ โดยเครื่องทดสอบที่ได้พัฒนาเพื่อทดสอบการคืบโดยเฉพาะ ซึ่งได้ทดสอบที่การคืบในแกนเดียวโดยทดสอบที่อุณหภูมิ 20°C, 100°C และ 200°C ใช้ตัวอย่างเกลือหินรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร ความยาว 16 เซนติเมตร และจากผลการทดสอบได้ข้อสรุปว่า เมื่อความเค้นสูงขึ้นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเกลือจะเพิ่มขึ้นหรืออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น ภายใต้อุณหภูมิเช่นเดียวกันเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราความเครียดจะเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมามีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเกลือหิน

Pudewills et al. (1995) ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของอุณหภูมิหรือความร้อนต่อการเปลี่ยนรูปร่างที่ขึ้นกับเวลา ได้ข้อสรุปว่าอุณหภูมิหรือความร้อนมีผลต่อการเปลี่ยนรูปร่างของเกลือหินเนื่องจากการเพิ่มขึ้นแบบคุณสมบัติพลาสติกของเกลือหินในระยะยาว

Cristescu and Hunsche (1996) ได้ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่ออัตราความเครียด พบว่าที่อุณหภูมิ 100°C และ 200°C จะมีอัตราความเครียดเป็น 10^{-8} s^{-1} และ 10^{-7} s^{-1} ตามลำดับ จึงได้ผลสรุปว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราความเครียดหรือการเปลี่ยนรูปร่างเพิ่มขึ้น

Bachu and Dusseault (2005) ได้เสนอลักษณะพฤติกรรมของเกลือหิน Alderta basin ในประเทศแคนาดา เพื่อเป็นฐานข้อมูลสำหรับการออกแบบโพรงเกลือที่ใช้ในการกักเก็บของเหลว ที่ชั้นเกลือมีความลึกมากกว่า 2,000 เมตร ชั้นเกลือมีความหนาตั้งแต่หลายสิบเมตร จนถึงร้อยเมตร มีค่าความเค้นจากแรงกดทับในแนวตั้งอยู่ในช่วง 10 ถึง 50 MPa ซึ่งมีการผันแปรความเค้นตามความลึกเป็น 24 ถึง 25 kPa/m และมีอุณหภูมิแปรผันในช่วง 20°C ถึง 70°C

Durham et al. (2008) ได้ศึกษาพฤติกรรมของเกลือหินที่อยู่ใต้อุณหภูมิที่กักเก็บของเหลวเย็น โดยทำการทดสอบการคืบบนตัวอย่างเกลือหินจาก Waste Isolation Pilot Project, New Mexico และ Avery Island (Gulf of Mexico) ซึ่งแปรผันช่วงอุณหภูมิในการทดสอบเป็น 100 K ถึง 300 K ได้ข้อสรุปว่าในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างเกลือหินภายใต้ความเค้นสูงและอุณหภูมิต่ำจะอยู่ในช่วงเขตเหนียว

บทที่ 3

การจัดเตรียมตัวอย่างหิน

3.1 วัตถุประสงค์

ในขั้นตอนการจัดเตรียมตัวอย่าง ตัวอย่างจะถูกตัดและกลึงให้อยู่ในรูปแบบสำหรับใช้ในการทดสอบคุณสมบัติและพฤติกรรมที่เกี่ยวข้อง (ASTM D4543) จะมีการเตรียมตัวอย่างทั้งสิ้น 9 ตัวอย่าง ความลึกและตำแหน่งของแท่งตัวอย่างเกลื่อหินที่ขุดเจาะมาจากชั้นเกลื่อหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยจะถูกบันทึก วิเคราะห์ และเสนออยู่ในรายงาน (ตารางที่ 3.1) เพื่อให้ทราบถึงความแปรปรวนทางด้านพฤติกรรมและคุณสมบัติในชั้นเกลื่อหินของประเทศไทย โดยใช้การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียว (Uniaxial creep test) ภายใต้การแปรผันอุณหภูมิและความเค้นแรงกดในแกนเดียว (σ_c)

3.2 แหล่งที่มาของตัวอย่างเกลื่อหิน

ตัวอย่างเกลื่อหินที่ใช้ในการทดสอบได้รับความอนุเคราะห์มาจากหน่วยงานต่างๆ เช่น บริษัท เกลื่อพิมาย จำกัด และ บริษัท เหมืองแร่โปแตชอาเซียน จำกัด อ. บำเหน็จณรงค์ โดยนำตัวอย่างเกลื่อหินมาตัดและกลึงให้เป็นรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ยาว 25 เซนติเมตร ($L/D = 2.5$) ตัวอย่างเกลื่อหินรูปทรงกระบอกที่จัดเตรียมไว้ (รูปที่ 3.1) สำหรับใช้ทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวโดยกำหนดให้ความเค้นในแนวแกนคงที่ในช่วง 20 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังรับแรงกดสูงสุด (σ_c) ของตัวอย่างเกลื่อหิน ผลที่ได้จากการทดสอบภายใต้ความเค้นที่ต่างกันจะนำมาใช้ในการสอบเทียบค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปร่างของเกลื่อหินที่ขึ้นกับเวลา (Time dependent deformation) ความเป็นพลาสติก (Plastic) ความเหนียว (Ductile) ความหนืดเชิงยืดหยุ่น (Visco-elastic) และความหนืดเชิงพลาสติก (Visco-plastic) เป็นต้น

ตารางที่ 3.1 ตำแหน่งความลึก ขนาด และคุณสมบัติของตัวอย่างเกลือหิน

Sample No.	Depth (m)	Diameter (cm)	Length (cm)	L/D	Weight (g)	Density (g/cc)
1	70.56-70.85	10.06	25.09	2.49	4450.2	2.23
2	70.86-71.11	10.03	25.23	2.51	4450.6	2.23
3	71.16-71.40	10.10	25.42	2.51	4410.5	2.16
4	75.65-75.91	10.07	25.64	2.54	4425.8	2.16
5	76.00-76.26	10.05	25.53	2.54	4465.9	2.20
6	76.27-76.53	10.06	25.01	2.49	4470.6	2.24
7	77.23-77.49	10.03	25.45	2.53	4455.9	2.21
8	78.01-77.76	10.04	25.24	2.51	4412.5	2.23
9	79.52-79.78	10.05	25.66	2.55	4499.5	2.21



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างเกลือหินบางชิ้นที่ใช้ในการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียว

บทที่ 4

การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

เนื้อหาในบทนี้ได้อธิบายถึงขั้นตอน วิธีการ และผลการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียว (Uniaxial creep test) ภายใต้อุณหภูมิที่ผันแปรระหว่าง 0°C ถึง 30°C ซึ่งในการทดสอบได้ทำการให้ความเค้นกดในแนวแกนคงที่กับตัวอย่างเกลือหินอยู่ในช่วง 20 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังรับแรงกดสูงสุดของเกลือหิน (มีค่าเท่ากับ 6.5 ถึง 16 MPa) ผลที่ได้สามารถนำมาวิเคราะห์การเปลี่ยนรูปร่างเชิงเวลาของเกลือหินภายใต้อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิห้องสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

4.1 วัตถุประสงค์ของการทดสอบ

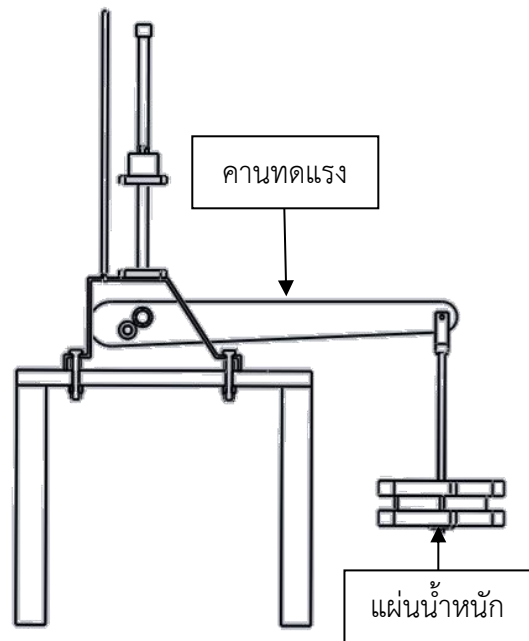
เพื่อศึกษาการเปลี่ยนรูปร่างเชิงเวลาของเกลือหินภายใต้อุณหภูมิต่ำ (0°C) และอุณหภูมิห้อง (30°C)

4.2 การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียว

ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้สำหรับการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวมีรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร และมีความยาว 250 มิลลิเมตร (มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (L/D ratio) ของตัวอย่างเกลือหิน 2.0–2.5) โดยมีระยะเวลาในการทดสอบ 21 วันต่อ 1 ตัวอย่าง การติดตั้งตัวอย่างเกลือหินเพื่อทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

4.2.1 การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวภายใต้อุณหภูมิห้อง (30°C)

- นำตัวอย่างเกลือหินที่ชั่งน้ำหนัก วัดขนาด และจดบันทึกเรียบร้อยแล้ว มาติดแผ่น Neoprene ทั้งหัวและท้ายของตัวอย่างเกลือหิน พร้อมพันแผ่นแรพพลาสติกกันความชื้น
- ทำการติดตั้งตัวอย่างเกลือหิน บนเครื่องทดสอบการอัดตัวในแกนเดียว (Consolidation loading frame) พร้อมติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัวในแนวแกนและแนวด้านข้างตามรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างเกลือหินขณะทำการทดสอบภายในเครื่องทดสอบการเคลื่อนไหล
ในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือหินในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 30°C

3) ทำการใส่แผ่นเหล็กให้เท่ากับจำนวนที่ได้จากการสอบเทียบในแต่ละช่วงของความเค้นหรือแรงในแนวแกนที่ทำการแปรผันคือ 20 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังรับแรงกดในแกนเดียว (σ_c) ของเกลือหิน (มีค่าเท่ากับ 6.5 ถึง 16 MPa) โดยทยอยใส่แผ่นเหล็กจนครบตามจำนวน ในระหว่างใส่แผ่นเหล็กแต่ละแผ่นต้องมีการอ่านและบันทึกค่าการเคลื่อนตัวจากมาตรวัดพร้อมจับเวลา

4) ทำการจดบันทึกค่าทุก 5 นาที ใน 1 ชั่วโมงแรก จากนั้นจึงเปลี่ยนช่วงการบันทึกเป็นทุก 10 นาที ในชั่วโมงที่ 2 และจดบันทึกทุก 30 นาที ในชั่วโมงที่ 3 จนครบตามระยะเวลาของการทดสอบเป็นเวลา 21 วัน

4.2.2 การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวภายใต้อุณหภูมิต่ำ (0°C)

1) นำตัวอย่างเกลือหินที่ชั่งน้ำหนัก วัดขนาด และจดบันทึกเรียบร้อยแล้ว มาติดแผ่น Neoprene ทั้งหัวและท้ายของตัวอย่างเกลือหิน พร้อมพันแผ่นแรพพลาสติกกันความชื้น (ลักษณะเดียวกันกับการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง)

2) ทำการติดตั้งระบบทำความเย็นครบเครื่องทดสอบการอัดตัวในแกนเดียวที่ใช้ในการทดสอบภายใต้อุณหภูมิต่ำ การติดตั้งตัวอย่างเกลือบหินและมาตรวัดการเคลื่อนตัวได้ทำในลักษณะเดียวกับการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ส่วนการติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์เพื่อวัดอุณหภูมิภายในระบบและลักษณะการติดตั้งตัวอย่างเกลือบหินบนเครื่องอัดตัวในแกนเดียวภายในระบบทำความเย็นได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.2

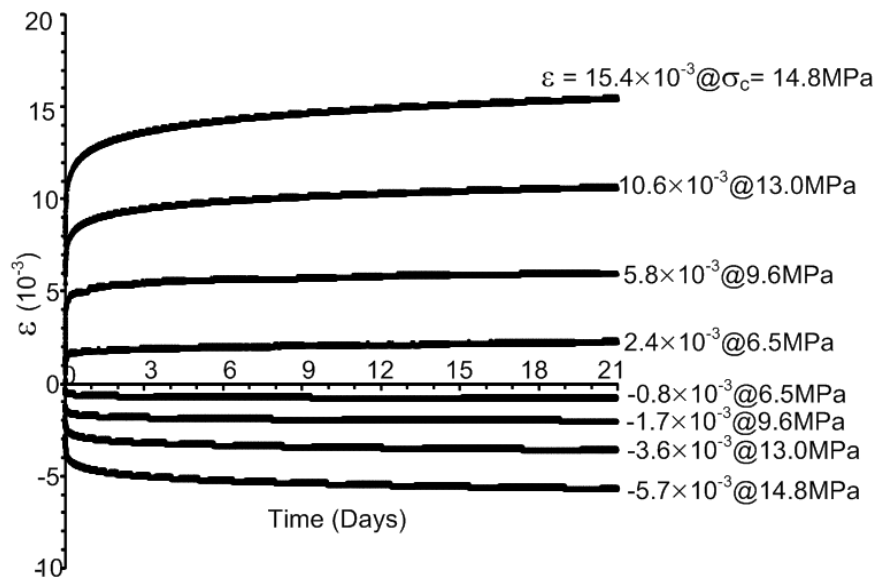
3) เมื่อทำการติดตั้งตัวอย่างเกลือบหินและมาตรวัดการเคลื่อนตัวเสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงทำการเปิดระบบทำความเย็นโดยใช้เวลา 3 ชั่วโมง ในการทำให้เครื่องทำความเย็นปรับอุณหภูมิไปที่ -5°C จากนั้นปล่อยให้ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนทำการทดสอบ

4) เมื่อครบเวลาที่กำหนดจึงเริ่มทยอยใส่แผ่นเหล็กจนครบตามจำนวน ซึ่งระหว่างใส่แผ่นเหล็กแต่ละแผ่นต้องมีการอ่านบันทึกค่าการเคลื่อนตัวพร้อมจับเวลา สำหรับการอ่านและบันทึกค่ากระทำเช่นเดียวกับการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง

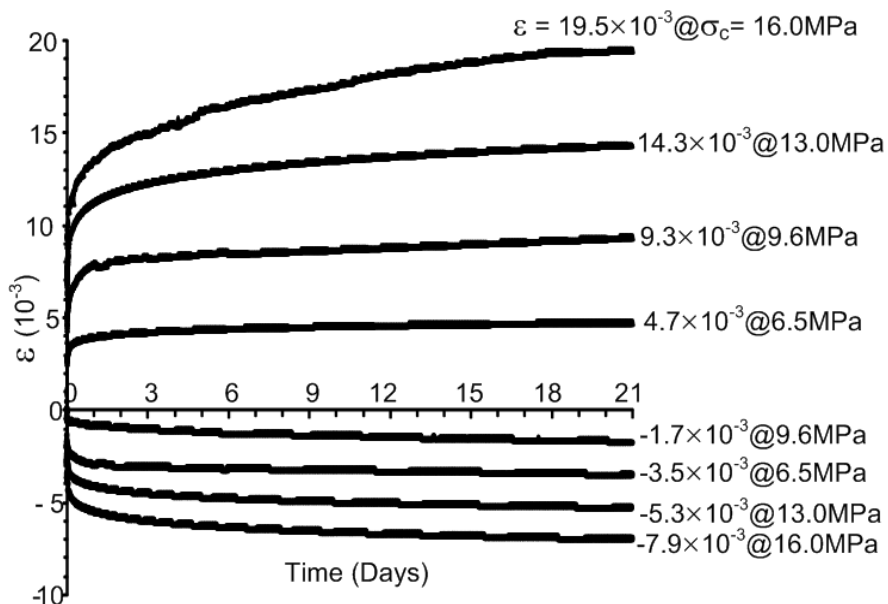
ผลการทดสอบสามารถแสดงอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวแกนและในแนวรัศมีที่ขึ้นกับเวลาที่อุณหภูมิ 0°C และ 30°C ตามลำดับ ภายใต้ความเค้นกดในแกนเดียวที่ 6.5, 9.6, 13.0, 14.8 และ 16 MPa หรือที่ 20, 30, 40, 45 และ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว (σ_c) ของตัวอย่างเกลือบหินดังแสดงในรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างเกลือบหินขณะทำการทดสอบภายในเครื่องทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือบหินในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 0°C



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างเกลือหินในแนวแกนและในแนวรัศมีเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิ 0°C ภายใต้ความเค้นกดในแกนเดียวที่ 6.5, 9.6, 13.0 และ 14.8 MPa หรือคิดเป็น 20, 30, 40 และ 45 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว (σ_c) ของเกลือหิน

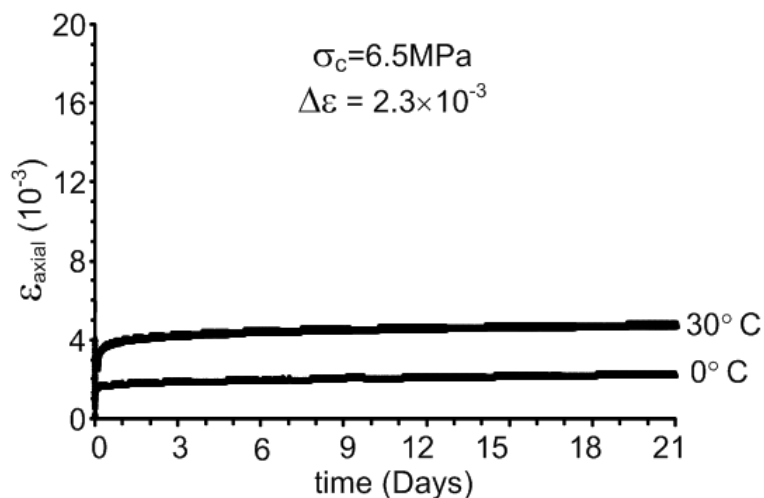


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างเกลือหินในแนวแกนและในแนวรัศมีเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความเค้นกดในแกนเดียวที่ 6.5, 9.6, 13.0 และ 16.0 MPa หรือคิดเป็น 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว (σ_c) ของเกลือหิน

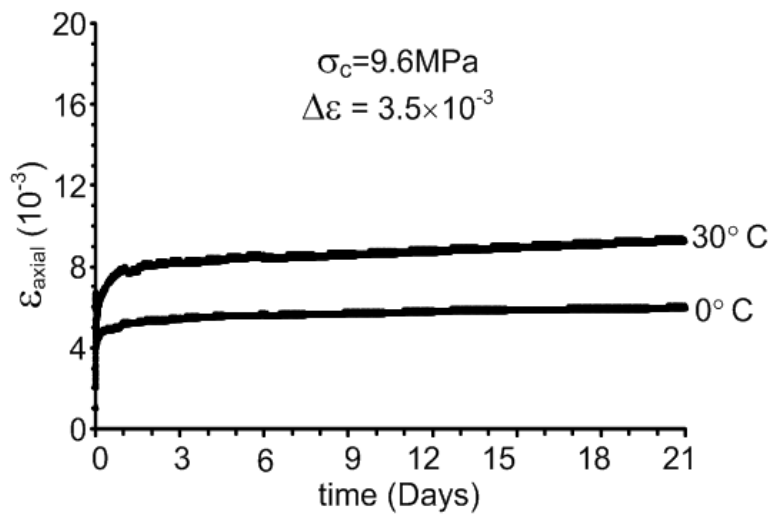
4.3 สรุปและวิจารณ์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวทำให้สามารถสังเกตเห็นถึงพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเชิงเวลาหรือความเครียดที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างเกลือหิน ทั้งความเครียดในแนวแกนและในแนวรัศมีที่มีการผันแปรอุณหภูมิตั้งแต่ 0°C ถึง 30°C พฤติกรรมของการเคลื่อนไหลเชิงเวลาของทุกตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสำหรับงานวิจัยนี้สามารถสังเกตเห็นการเคลื่อนไหลในช่วงที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดเชิงเวลา (Transient creep phase) และช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดในช่วงเวลาดังที่ (Steady-state creep phase) อย่างชัดเจนที่ความเค้นในแนวแกนระดับต่างๆ ผลการทดสอบระบุว่าค่าการคืบหรือการเคลื่อนไหลในแนวแกนและในแนวรัศมีของตัวอย่างเกลือหินที่อุณหภูมิห้อง (0°C) มีค่าต่ำกว่าที่อุณหภูมิห้อง (30°C) ในแต่ละระดับความเค้นดังแสดงในรูปที่ 4.5 ถึงรูปที่ 4.7

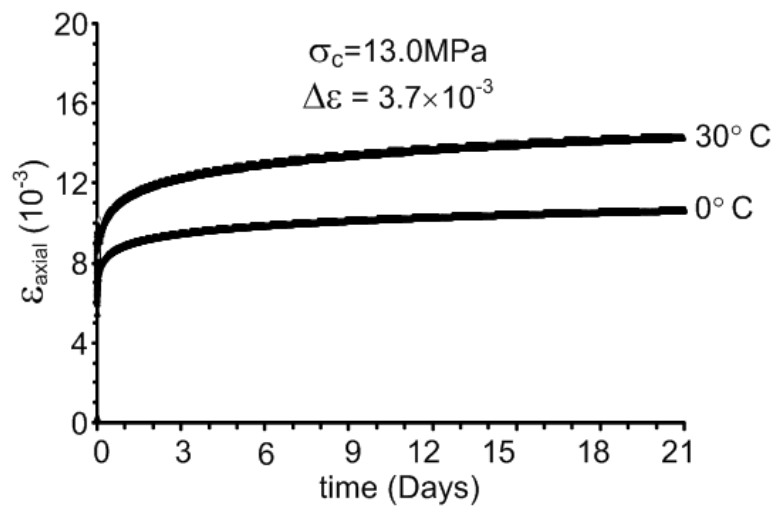
ค่าความเครียดที่เกิดจากการยุบตัวหรือการเคลื่อนไหลของตัวอย่างเกลือหินที่อุณหภูมิห้องจะมีค่าลดลงโดยเฉลี่ย 38 เปอร์เซ็นต์ เมื่อตัวอย่างเกลือหินมีอุณหภูมิ 0°C โดยค่าความเครียดในแนวแกนจะลดลงมากกว่าที่ความเค้นกดต่ำ (คิดเป็น 49 เปอร์เซ็นต์ ที่ระดับความเค้นกดคงที่เท่ากับ 6.5 MPa) และมีค่าความเครียดในแนวแกนลดลงน้อยกว่าที่ความเค้นกดสูง (คิดเป็น 26 เปอร์เซ็นต์ ที่ระดับความเค้นกดคงที่เท่ากับ 6.5 MPa) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งอุณหภูมิไม่มีผลหรือส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อค่าการคืบหรือการเคลื่อนไหลเมื่อตัวอย่างเกลือหินอยู่ในสภาวะความเค้นกดในแนวแกนที่มีค่าสูง



รูปที่ 4.5 ความแตกต่างของความเครียดที่สภาวะความเค้นในแนวแกน 6.5 MPa ที่อุณหภูมิ 0°C และ 30°C



รูปที่ 4.6 ความแตกต่างของความเครียดที่สภาวะความเค้นในแนวแกน 9.6 MPa ที่อุณหภูมิ 0°C และ 30°C



รูปที่ 4.7 ความแตกต่างของความเครียดที่สภาวะความเค้นในแนวแกน 13.0 MPa ที่อุณหภูมิ 0°C และ 30°C

บทที่ 5

การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

เนื้อหาในบทนี้ นำเสนอการสอบเทียบตัวแปรเชิงเวลาจากการทดสอบการเคลื่อนไหวน โดยให้ความสำคัญในแนวแกนคงที่ที่ระดับต่างๆ ซึ่งมีการผันแปรอุณหภูมิตั้งแต่ 0°C ถึง 30°C ผลที่ได้คือ สมการที่ใช้ในการสอบเทียบค่าตัวแปรเชิงเวลาที่สร้างขึ้นโดยอาศัยค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกนและในแนวรัศมีเชิงเวลา ซึ่งทั้งสองค่าได้นำมาคำนวณให้อยู่ในรูปของของความเครียดเฉือน (γ_{oct}) ที่สัมพันธ์กับค่าความเค้นในแนวแกนโดยพิจารณาในรูปของความเค้นเฉือนรวมทางด้าน (τ_{oct}) นอกจากนี้ยังได้นำค่าสัมประสิทธิ์เฉือน (G) และอุณหภูมิ (T) มาพิจารณาร่วมด้วย

5.1 สมการแบบเอ็กโพเนนเชียล

ความเครียดภายใต้แรงกดคงที่ทั้งหมดบนตัวอย่างเกลือหิน ถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ความเครียดเชิงยืดหยุ่น (สมการเชิงเส้นตรงและสามารถคืนรูปได้) และความเครียดเชิงเวลา (ขึ้นกับเวลาและไม่สามารถคืนรูปได้) ดังสมการ

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^c \quad (5.1)$$

โดย ε คือค่าความเครียดภายใต้แรงกดคงที่ทั้งหมด ε^e คือค่าความเครียดเชิงยืดหยุ่นภายใต้แรงกดคงที่และ ε^c คือค่าความเครียดเชิงเวลาภายใต้แรงกดคงที่ซึ่งค่าความเครียดเชิงยืดหยุ่นภายใต้แรงกดสามารถคำนวณได้จากค่าความเค้นกดต่อค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นดังสมการ (Jaeger et al, 2007)

$$\varepsilon^e = \frac{\sigma}{E} \quad (5.2)$$

โดย σ คือค่าความเค้นคงที่ ε^e คือค่าความเครียดเชิงความยืดหยุ่นภายใต้แรงกดคงที่ และ E คือค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นภายใต้แรงกด จากสมการของ Exponential laws ซึ่งประกอบด้วย ความเครียด ความเค้น อุณหภูมิ เวลาที่ผันแปร และค่าคงที่ต่างๆ สามารถอธิบายพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในเชิงเวลาของหินในแต่ละช่วงเวลาหรือช่วงการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของหิน (Senseny, 1983)

$$\varepsilon^c = \varepsilon(t) = B' \sigma^m t^n \exp(-\lambda/T) \quad (5.3)$$

อัตราความเครียดเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (Transient phase) เมื่อ ε^c คือความเครียด σ คือความเค้นในแนวแกน t คือเวลา T คืออุณหภูมิ (องศาเคลวิน) และ $K', \beta, \gamma, \alpha, A', B, C, B', m, n, \lambda$ คือค่าคงที่ (Creep parameter) นำสมการ (5.2) ถึงสมการ (5.3) มาแทนค่าในสมการ (5.1) จะได้ความสัมพันธ์รวมดังสมการ

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + B'\sigma^m t^n \exp(-\lambda/T) \quad (5.4)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนรวมหกด้าน (τ_{oct}) กับความเครียดเฉือน (γ_{oct}) (Jaeger et al., 2007) ดังสมการ (5.5)

$$\gamma_{oct} = 1/3[(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2]^{1/2} \quad (5.5)$$

ซึ่งได้แสดงไว้ดังรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2 จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนรวมหกด้าน (τ_{oct}) กับความเครียดเฉือน (γ_{oct}) ดังกล่าวได้ถูกดัดแปลงเพื่อให้เข้ากับสมการของ Exponential laws ผลที่ได้คือสมการสำหรับคำนวณพฤติกรรมของหินในช่วงที่ 1 ซึ่งเป็นช่วงที่อัตราความเครียดหรือการเคลื่อนไหลเปลี่ยนแปลงเชิงเวลา (Transient phase) และช่วงที่ 2 เป็นช่วงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดหรือการเคลื่อนไหลต่อช่วงเวลาคงที่ (Steady-state phase)

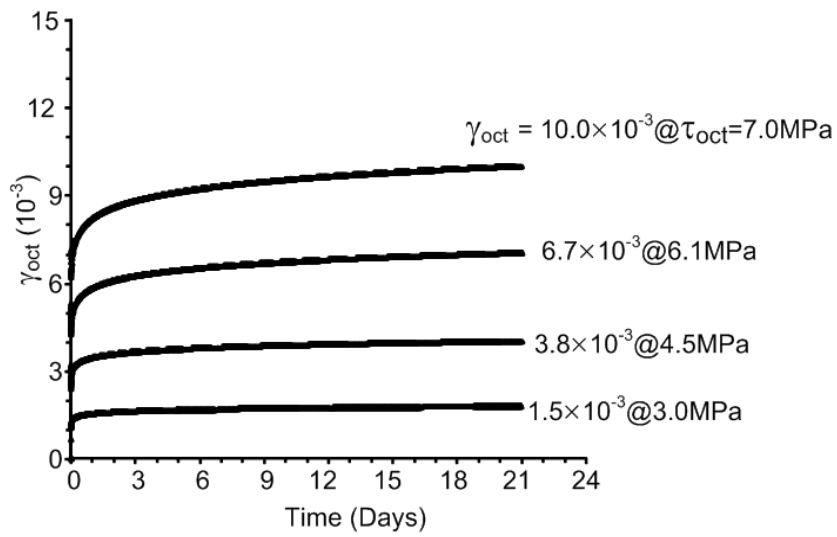
$$\gamma_{oct}(t) = \frac{\tau_{oct}}{G} + \alpha\tau_{oct}^\beta t^\gamma \exp\left(\frac{-\lambda}{T}\right) \quad \text{ช่วง Transient creep} \quad (5.6)$$

$$\dot{\gamma}_{oct}(t) = \kappa\tau_{oct}^\beta t^{\gamma-1} \exp\left(\frac{-\lambda}{T}\right) \quad \text{ช่วง Steady-state creep} \quad (5.7)$$

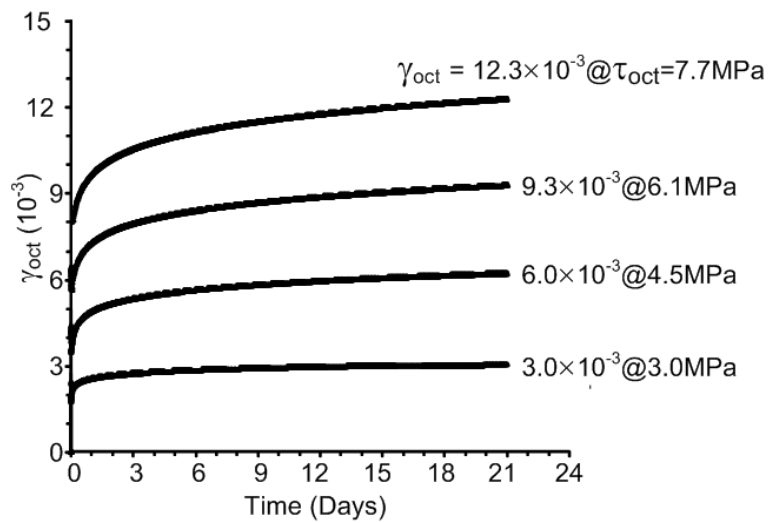
โดยที่ γ_{oct} คือความเครียดเฉือน $\dot{\gamma}_{oct}$ คืออัตราความเครียดเฉือน τ_{oct} คือความเค้นเฉือนรวมหกด้าน t คือเวลา T คืออุณหภูมิ (องศาเคลวิน) $\alpha, \kappa, \beta, \gamma$ และ λ คือค่าคงที่หรือตัวแปรที่ต้องการสอบเทียบ และ G คือค่าสัมประสิทธิ์เฉือน (Shear modulus) ที่อยู่ในเทอมของอุณหภูมิดังสมการ (Sriapai et al., 2012)

$$G = AT+B \quad (5.8)$$

เมื่อ $A = -21.5 \times 10^{-3}$, $B = 16.20$, $T =$ อุณหภูมิในหน่วยองศาเคลวิน และ G คือค่าสัมประสิทธิ์เฉือนในหน่วย GPa



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเฉือนกับเวลาที่สภาวะความเค้นเฉือนหกด้านต่างกันภายใต้อุณหภูมิต่ำ (0°C)



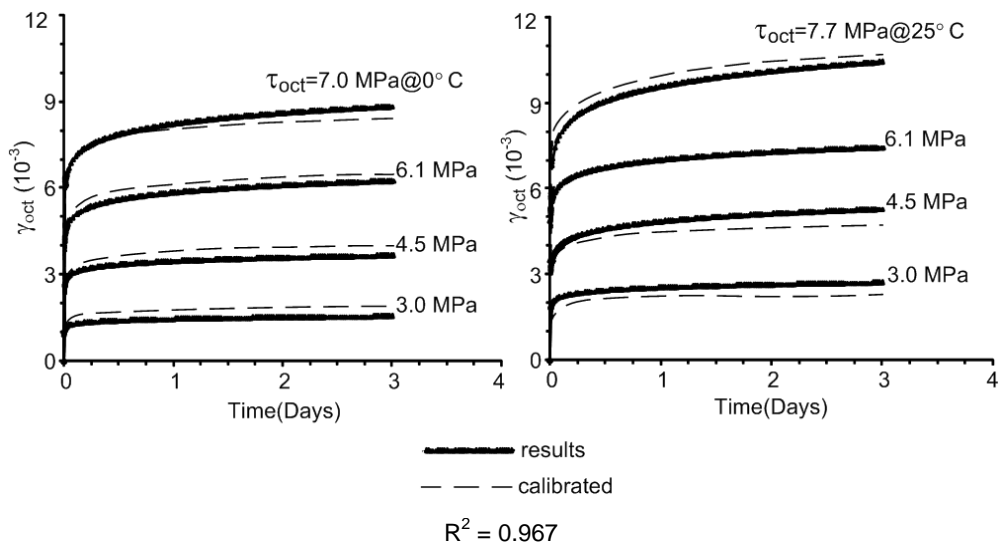
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเฉือนกับเวลาที่สภาวะความเค้นเฉือนหกด้านต่างกันภายใต้อุณหภูมิห้อง (30°C)

5.2 การสอบเทียบตัวแปรเชิงเวลาของเกลือหิน

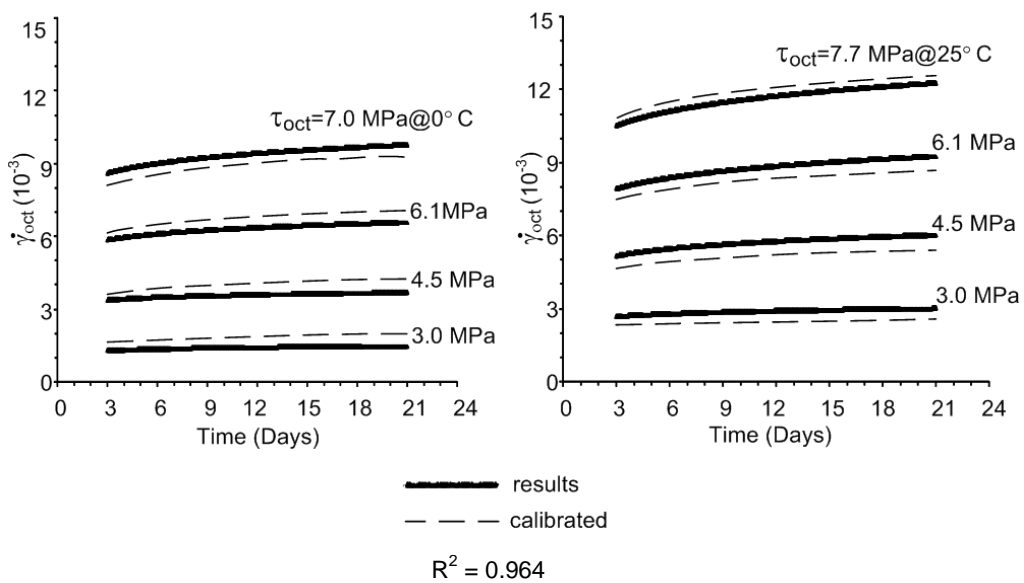
ผลที่ได้จากการทดสอบการเปลี่ยนรูปร่างเชิงเวลาหรือการเคลื่อนไหลในแกนเดียว ภายใต้ความเค้นกดในแกนเดียวที่ 6.5, 9.6, 13.0, 14.8 และ 16.0 MPa เมื่อนำมาสอบเทียบ ค่าตัวแปรที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในเชิงเวลาของหิน เพื่อนำค่าตัวแปรไปใช้ในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยการสอบเทียบค่าตัวแปรได้ใช้โปรแกรมเชิงสถิติ (SPSS) (Wendai, L., 2000) ผลการทดสอบเทียบค่าตัวแปรที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในเชิงเวลาของเกลือหินได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.1 ในรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4 แสดงผลการ คาดคะเนโดยใช้โปรแกรม SPSS เทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการในช่วง Transient และ Steady-state

ตารางที่ 5.1 ผลการสอบเทียบค่าตัวแปรด้วยโปรแกรม SPSS

Creep parameters	Transient creep	Steady-state creep
α	1.238	-
κ	-	1.890
β	1.581	1.620
γ	0.063	0.072
λ	347.267	493.468
A	-21.5×10^{-3}	-
B	16.200	-
R^2	0.967	0.964



รูปที่ 5.3 การสอบเทียบค่าตัวแปรของพฤติกรรมกรเปลี่ยนรูปร่างเชิงเวลาของตัวอย่างเกลือหิน ในช่วงที่อัตราความเครียดหรือการเคลื่อนไหลเปลี่ยนแปลงเชิงเวลา (Transient phase) โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.967



รูปที่ 5.4 การสอบเทียบค่าตัวแปรของพฤติกรรมกรเปลี่ยนรูปร่างเชิงเวลาของตัวอย่างเกลือหิน ในช่วงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดหรือการเคลื่อนไหลต่อช่วงเวลาดังที่ (Steady-state phase) โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.964

บทที่ 6

แบบจำลองทางคอมพิวเตอรืและระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

วัตถุประสงค์ของการศึกษาด้วยแบบจำลองโพรงเกลื้อประกอบด้วย 2 วิธี คือการคำนวณโดยใช้สมการการวิเคราะห์การกระจายตัวของความเค้นและการเคลื่อนตัวของหินรอบรูกลมทรงกระบอกในแผ่นหินที่ไม่มีขอบเขตภายใต้สภาวะความหนืดแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง (Circular hole in infinite plate of linear viscoelastic material) (Obert and Duvall, 1967) และการจำลองโปรแกรมทางคอมพิวเตอรื เพื่อตรวจสอบและประเมินเสถียรภาพของโพรงเกลื้อภายใต้อุณหภูมิที่สภาวะกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

6.1 การคำนวณด้วยสมการ

การคำนวณการเปลี่ยนรูปร่างของโพรงเกลื้อภายใต้อุณหภูมิโดยนำค่าตัวแปรที่ได้จากการสอบเทียบตัวแปรมาใช้ในการคำนวณจากสมการการวิเคราะห์การกระจายตัวของความเค้นและการเคลื่อนตัวของหินรอบรูกลมทรงกระบอกในแผ่นหินที่ไม่มีขอบเขตภายใต้สภาวะความหนืดแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง (Circular hole in infinite plate of linear viscoelastic material) (Obert and Duvall, 1967) ซึ่งได้อธิบายเกี่ยวกับการรวมความเครียดในแนวรัศมีประกอบด้วย 2 ส่วน คือความเครียดเชิงยืดหยุ่น (สมการเชิงเส้นตรงและสามารถคืนรูปได้) และความเครียดเชิงเวลา (ขึ้นกับเวลาและไม่สามารถคืนรูปได้)

$$\epsilon_r = \epsilon_r^e + \epsilon_r^c \quad (6.1)$$

เมื่อ ϵ_r คือความเครียดในแนวรัศมีรวม ϵ_r^e คือความเครียดในแนวรัศมีเชิงยืดหยุ่น ϵ_r^c คือความเครียดในแนวรัศมีเชิงเวลา ซึ่งความเครียดในแนวรัศมีเชิงยืดหยุ่น (ϵ_r^e) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\epsilon_r^e = \frac{1}{E} \left\{ (1 - \nu^2) \sigma_r - \nu(1 + \nu) \sigma_\theta \right\} \quad (6.2)$$

โดยสมการแบบเอ็กโพเนนเชียลที่ได้อธิบายเกี่ยวกับพฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลาและอุณหภูมิของความเครียดในแนวรัศมีดังสมการ

$$\epsilon_r^c = \frac{3}{2} \alpha (\sigma^*)^{(\beta-1)} t^\gamma \exp\left(\frac{-\lambda}{T}\right) \cdot S_r \quad (6.3)$$

เมื่อนำสมการ (6.2) ถึง (6.3) แทนในสมการ (6.1) จะได้สมการสำหรับวิเคราะห์การกระจายตัวของความเค้นและการเคลื่อนตัวของหินรอบรูกลมทรงกระบอกในแผ่นหินที่ไม่มีขอบเขตภายใต้สภาวะความหนืดแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง (Circular hole in infinite plate of linear viscoelastic material) ในฟังก์ชันของ Exponential laws และผลกระทบบของอุณหภูมิตั้งสมการ

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} \left\{ (1 - \nu^2) \sigma_r - \nu(1 + \nu) \sigma_\theta \right\} + \frac{3}{2} \alpha (\sigma^*)^{(\beta-1)} t^\gamma \exp\left(\frac{-\lambda}{T}\right) \cdot S_r \quad (6.4)$$

โดยที่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะมีค่าตั้งสมการต่อไปนี้

$$\sigma^* = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ (\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z + \sigma_r)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6.5)$$

$$S_r = \sigma_r - (\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z)/3 \quad (6.6)$$

$$\sigma_r = P_o \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) + \frac{P_i R^2}{r^2} \quad (6.7)$$

$$\sigma_r = P_o \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) - \frac{P_i R^2}{r^2} \quad (6.8)$$

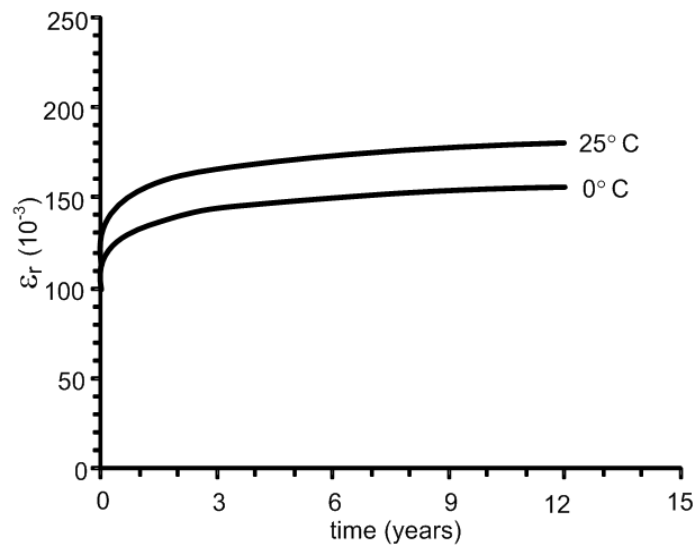
$$\sigma_z = \nu(\sigma_r + \sigma_\theta) \quad (6.9)$$

เมื่อ ε_r คือความเครียดในแนวรัศมี E คือค่าสัมประสิทธิ์ยืดหยุ่น ν คืออัตราส่วนปัวซอง σ_r คือความเค้นในแนวรัศมี (Radial stress) σ_θ คือความเค้นในแนวสัมผัส (Tangential stress) σ^* คือความเค้นเทียบเท่า (Equivalent stress) S_r คือความเค้นเบี่ยงเบนในแนวรัศมี (Deviatoric radial stresses) α , β , γ และ λ คือค่าคงที่หรือพารามิเตอร์การคืบ P_i คือแรงดันภายในโพรง P_o คือแรงดันภายนอกโพรง r คือรัศมีของโพรง ($r=R$) โดยคำนวณที่ความลึก 500 เมตร โดยคุณสมบัติของโพรงเกลือที่ใช้คำนวณแสดงดังตารางที่ 6.1 และผลการคำนวณการเปลี่ยนรูปร่างของโพรงเกลือได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 คุณสมบัติของเกลือหินที่ใช้ในการคำนวณตามสมการ (6.4)

Rock salt properties	
Elastic modulus (E)*	21.5 GPa
Poisson's ratio (ν)*	0.4
Internal pressure (P_i)	3 MPa
External pressure (P_o)	20 MPa
Cavern radius (R)	25 m

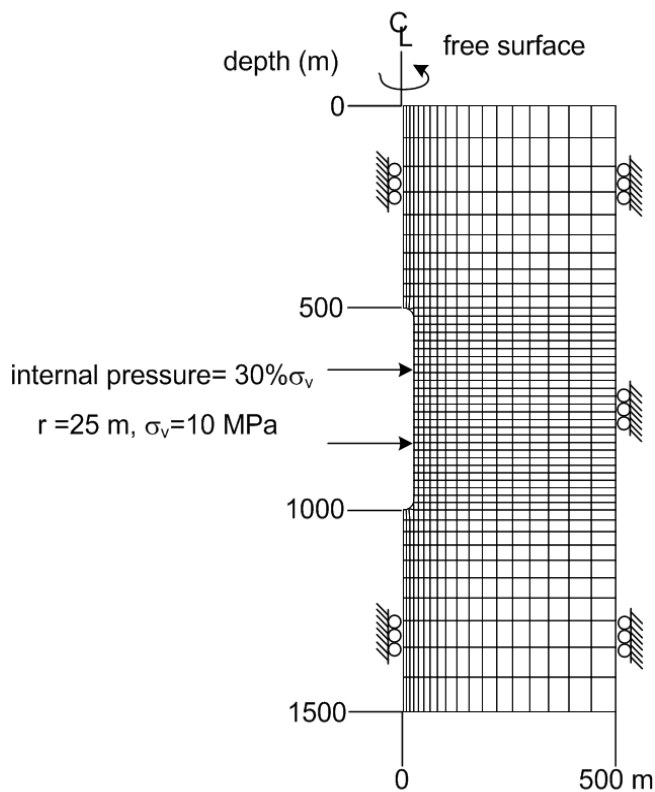
* ค่าที่ได้จากงานวิจัยของ Phueakphum & Fuenkajorn (2010)



รูปที่ 6.1 ผลการคำนวณการเปลี่ยนรูปร่างของโพรงเกลือซึ่งอยู่ในรูปของความลัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวรัศมีกับเวลาในหน่วยปี

6.2 แบบจำลองโปรแกรมคอมพิวเตอร์

งานวิจัยนี้ได้นำโปรแกรม FLAC 4.0 (Finite difference code) มาใช้ในการวิเคราะห์การยุบตัวของโพรงเกลือดังรูปที่ 6.2 โดยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์กำหนดให้การคำนวณเป็นแบบแกนสมมาตร (Axis symmetry) โดยกำหนดให้อุณหภูมิคงที่ทั้งแบบจำลอง (Isothermal model) ซึ่งรูปแบบสมการที่ใช้ในการคำนวณการยุบตัวเป็นแบบยกกำลัง (Power model) ในการจำลองโพรงเกลือรูปทรงระบอบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 เมตร ที่ความลึก 500–1000 เมตร โดยใช้ค่าปัจจัยหรือค่าตัวแปรจากการสอบเทียบที่ได้ในบทที่ 5 ส่วนค่าคุณสมบัติของโพรงเกลือที่ใช้ในโปรแกรม FLAC ได้แสดงไว้ในตารางที่ 6.2



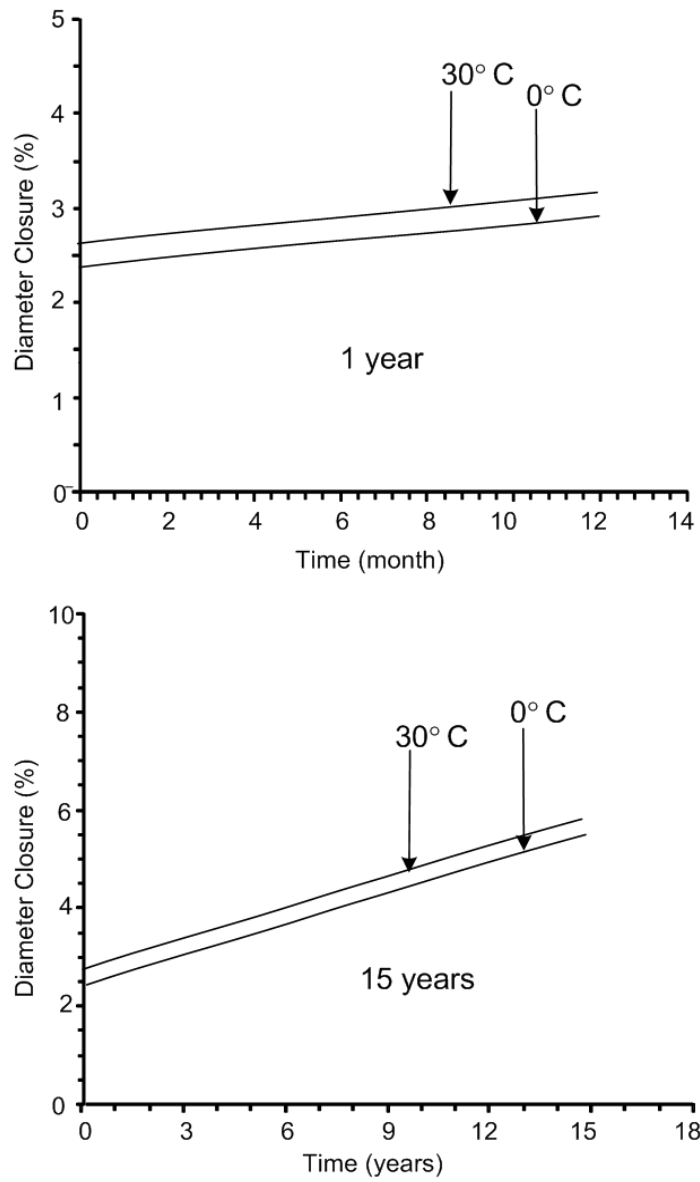
รูปที่ 6.2 โครงข่ายแบบจำลองโพรงเกลือที่สร้างจากโปรแกรม FLAC 4.0 โดยมีความลึกของหลังกาโพรงเท่ากับ 500 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลางของโพรงเท่ากับ 50 เมตร และมีแรงดันภายในโพรงเท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์ ของความเค้นในแนวตั้งที่หลังกาโพรง (σ_v)

ตารางที่ 6.2 ค่าคุณสมบัติของเกลือหินรอบโพรงเกลือที่ใช้ในแบบจำลองคอมพิวเตอร์

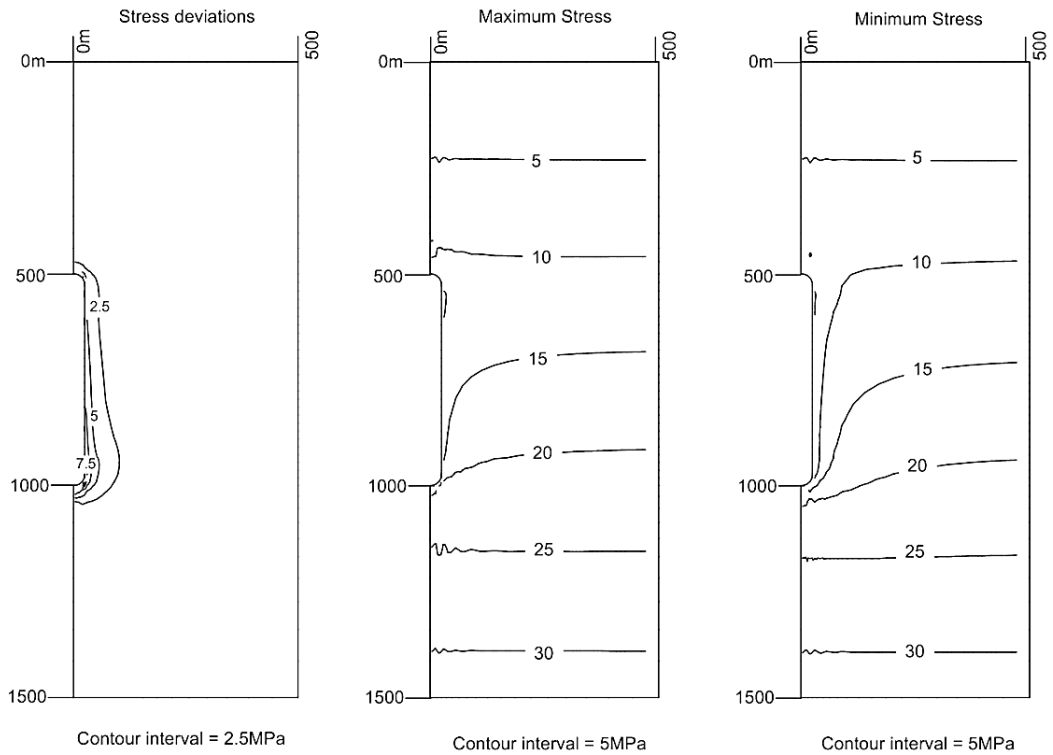
Salts property	Low tem. (0°C)	Room tem. (30°C)	Reference
Elastic Modulus, E (GPa)	26.32	24.52	Sriapai et al., 2012
Shear Modulus, G (GPa)	10.33	9.68	
Bulk Modulus, K (GPa)	28.93	28.20	
Friction angle, ϕ (Degrees)	46.27	44.99	
Cohesion, c (MPa)	8.81	8.41	
Poisson's ratio, ν	0.35	0.35	
Tensile strength (MPa)	1.5	1.5	Phueakphum and Fuenkajorn (2010)
Thermal conductivity, k (W/m·K)	5.8	5.8	Phueakphum and Fuenkajorn (2011)
Specific heat, C (MJ/m ³)	1.83	1.83	
Thermal expansion (K ⁻¹)	40	40	
Density, ρ (g/cc)	2.2	2.2	
Internal pressure (MPa)	3	3	

6.3 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

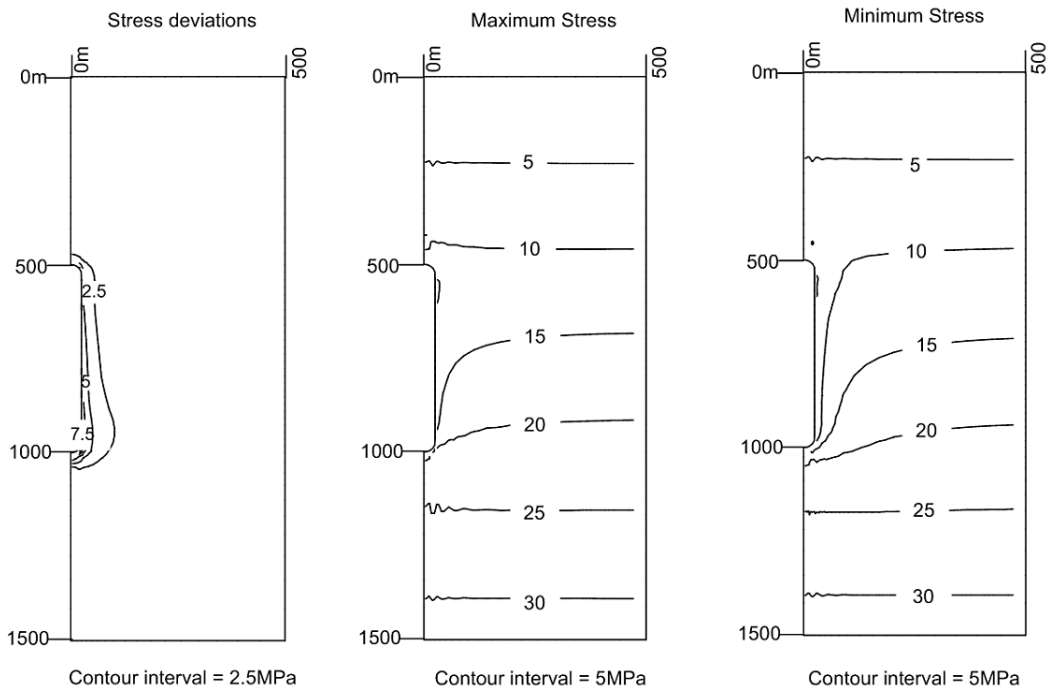
ผลที่ได้จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์บ่งชี้ว่าโพรงเกลือภายใต้อุณหภูมิห้อง (30°C) มีการยุบตัวสูงกว่าโพรงเกลือที่อยู่ภายใต้อุณหภูมิต่ำ (0°C) ที่ระยะเวลา 1 ปี และ 15 ปี ดังแสดงในรูปที่ 6.3 และควมมีเสถียรภาพของโพรงเกลือที่อุณหภูมิต่ำมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิล้อม สำหรับ การกระจายตัวของความเค้นภายใต้อุณหภูมิต่างสองมีความคล้ายคลึงกันดังแสดงในรูปที่ 6.4 ถึงรูปที่ 6.5 ผลจากการคำนวณการยุบตัวของโพรงเกลือด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ให้ผลที่สอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับผลการคำนวณด้วยสมการเชิงคณิตศาสตร์ (สมการที่ 6.4) กล่าวคือ เมื่อโพรงเกลืออยู่ภายใต้อุณหภูมิต่ำจะทำให้การเคลื่อนตัวของเกลือหินที่อยู่โดยรอบมีค่าน้อย ส่งผลให้โพรงเกลือทั้งหมดมีการยุบตัวน้อย เช่นเดียวกันในขณะที่โพรงเกลืออยู่ภายใต้ อุณหภูมิห้องจะให้ค่าการยุบตัวที่มากกว่า ซึ่งแท้จริงแล้วโพรงก็กักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มักจะเก็บในรูปของเหลวที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าค่าที่ใช้ในการทดสอบสำหรับงานวิจัยนี้ ดังนั้นควมมีเสถียรภาพของโพรงที่สภาวะกักเก็บจริงในภาคสนามย่อมมีความปลอดภัยมากกว่าเมื่อนำคุณสมบัติของเกลือหินที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการและค่าตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากการ สอบเทียบไปใช้ในการออกแบบเสถียรภาพของโพรงที่สภาวะกักเก็บจริงในภาคสนามย่อมมีความ ปลอดภัยมากกว่าเมื่อนำคุณสมบัติของเกลือหินที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการและค่าตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากการสอบเทียบไปใช้ในการออกแบบ



รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการยุบตัวของโพรงเกลือกับระยะเวลาที่ 1 ปี และ 15 ปี



รูปที่ 6.4 การกระจายตัวของความเค้นรอบโพรงเกลือจากการจำลองด้วยโปรแกรม FLAC 4.0 ภายใต้อุณหภูมิต่ำ (0°C)



รูปที่ 6.5 การกระจายตัวของความเค้นรอบโพรงเกลือจากการจำลองด้วยโปรแกรม FLAC 4.0 ภายใต้อุณหภูมิห้อง (30°C)

บทที่ 7

บทสรุป

7.1 สรุปและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการคาดคะเนการเปลี่ยนรูปร่างที่ขึ้นกับเวลาของเกลือหินชุดมหาสารคามภายใต้อุณหภูมิคงที่ต่างๆ ด้วยการให้แรงกดตามแนวแกนคงที่ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.5, 9.6, 13.0, 14.8 และ 16.0 MPa โดยทดสอบที่ช่วงอุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิห้องคือ 0°C และ 30°C สำหรับการทดสอบภายใต้อุณหภูมิต่ำได้ทำการทดสอบในเครื่องทำความเย็น การเคลื่อนไหลที่เกิดขึ้นในเกลือหินที่ขึ้นกับเวลาประกอบด้วยช่วงของการเปลี่ยนแปลงความเครียดเชิงเส้นตรงและช่วงของอัตราความเครียดที่เปลี่ยนแปลงขึ้นกับเวลา จากสมการในรูปแบบของ Exponential creep law ถูกใช้อธิบายการเปลี่ยนรูปร่างเชิงเวลาหรือพฤติกรรมของตัวอย่างเกลือหินภายใต้การผันแปรอุณหภูมิ ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าการเปลี่ยนรูปร่างของเกลือหินจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ในช่วงแรกของการเปลี่ยนรูปร่าง (Transient) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาและมีแนวโน้มที่จะคงที่ในช่วงที่สองคือช่วงการเปลี่ยนรูปร่างคงที่ (Steady-state) การเปลี่ยนรูปร่างของเกลือหินภายใต้อุณหภูมิต่ำจะน้อยกว่าภายใต้อุณหภูมิห้องประมาณร้อยละ 10

ผลการคำนวณด้วยสมการการวิเคราะห์การกระจายตัวของความเค้นและการเคลื่อนตัวของหินรอบรูกลมทรงกระบอกในแผ่นหินที่ไม่มีขอบเขตภายใต้สภาวะความหนืดแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง (สมการที่ 6.4) และผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ใช้ค่าปัจจัยที่สอบเทียบจากการทดสอบการคืบในแนวแกนเดียว เพื่อประเมินการยุบตัวของโพรงกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้การผันแปรอุณหภูมิ ผลคำนวณจากทั้งสองวิธีมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี กล่าวคือ การยุบตัวของโพรงกักเก็บภายใต้อุณหภูมิห้องมีค่าสูงกว่าการยุบตัวของโพรงกักเก็บภายใต้อุณหภูมิต่ำ ซึ่งบอกเป็นนัยว่าการประเมินเสถียรภาพของโพรงกักเก็บโดยใช้ผลการทดสอบภายใต้อุณหภูมิห้องจะให้ผลอยู่ในเชิงอนุรักษ์

7.2 ข้อเสนอแนะ

เพื่อแสดงให้เห็นผลกระทบของอุณหภูมิที่ชัดเจนขึ้น ในการทดสอบควรมีขนาดตัวอย่างที่ใหญ่ขึ้นและควรเพิ่มเวลาของการทดสอบให้นานขึ้น โดยทดสอบภายใต้อุณหภูมิที่กว้างขึ้นอาจจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นหรือต่ำลง ส่วนสมการที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของเกลืออาจให้สมการที่ซับซ้อนขึ้น เช่น Non-linear viscoplastic และ Burger's laws และควรทำการศึกษาเกี่ยวกับการให้แรงแบบวัฏจักรภายใต้อุณหภูมิต่ำ

บรรณานุกรม

- ASTM D4543-85, 1998, Standard practice for preparing rock core specimens and determining dimensional and shape tolerances, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.08.
- Bachu, B. and Dusseault, M.B., (2005). Underground injection of carbon dioxide in salt beds. *Developments in Water Science*, Volume 52, Pages 637-648.
- Bachu, S. (2001). Geological sequestration of anthropogenic carbon dioxide: applicability and current issues. In *Geological Perspectives of Global Climate Change* (Gerhard, L., W. E. Harrison and B.M. Hanson, eds.), American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology # 47, AAPG, Tulsa, OK, pp. 285-304.
- Bachu, S., Gunter, W.D., and Perkins, E.H. (1994). Aquifer disposal of CO₂: hydrodynamic and mineral trapping. *Energy Conversion & Management* 35: 269-279.
- Berest, P., Brouard, B.L., and Durup, J.G., (2000). Shut-in pressure tests: Case studies. Proceedings 2000 SMRI Fall Meeting.
- Bergman, P.D., Winter, E.M., and Chen, Z.Y. (1997). Disposal of power plant CO₂ in depleted oil and gas reservoirs in Texas. *Energy Conversion & Management* 38(SS): S211-S216.
- Buchu, S., and Burwash, R.A., (1991). Regional-scale analysis of the geothermal regime in the Western Canada Sedimentary Basin. *Geothermics*, Volume 20, pp. 387-407.
- Charpentier, J-P (1984). Creep of salt at elevated temperature. In Proceedings of the 2nd Conference on The Mechanical Behavior of salt (pp. 131-158). Hanover, Germany; Federal Institute for Geosciences and Natural Resource.
- Cristescu, N. and Hunsche, U., 1996, A comprehensive constitutive equation for rock salt-determination and application, Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, September 1993, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany, pp. 191-205.
- Durham, W.B., Olgaard, D.L., Urai, J.L. & Schoenherr, J. 2008. Creep of rocksalt at low temperatures. In the conference of 42nd U.S. Rock Mechanics Symposium (USRMS) June 29 - July 2, 2008. San Francisco, CA. pp. 387-394.

- Dusseault, M.B., Bachu, S., and Davidson, B.C., (2001). Carbon dioxide sequestration potential in salt solution caverns in Alberta, Canada. Proceedings 2001 SMRI Fall Meeting.
- Freund, P. and Ormerod, W.G. (1997). Progress toward storage of carbon dioxide. *Energy Conversion & Management* 38: 199–204.
- Fuenkajorn, K. and Phueakphum, D. (2010). Effects of cyclic loading on mechanical properties of Maha Sarakham salt. *Engineering Geology* 112 (1–4): 43–52.
- Hitchon, B., Gunter, W.D., Gentzis, T. and Bailey, R.T. (1999). Sedimentary basin sand greenhouse gases: a serendipitous association. *Energy Conversion & Management* 40: 825–843.
- Itasca (1992). User Manual for FLAC–Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 4.0. Itasca Consulting Group Inc. Minneapolis, Minnesota.
- Jaeger, J. C., Cook, N. G. W., and Zimmerman, R.W., (2007). Fundamentals of Rock Mechanics. Fourth Edition, Blackwell Publishing, Oxford.
- Maul, P.R., Metcalfe, R., Pearce, J., Savage, D. and West, J.M. (2007). Performance assessments for the geological storage of carbon dioxide: Learning from the radioactive waste disposal experience. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, pp. 444–455.
- Obert, L. and W.I. Duvall (1967) *Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock*. John Wiley & Sons, New York, 650 pp.
- Phueakphum, D. and Fuenkajorn, K. (2010a) A rock fills based solar thermal energy storage system for housing. *Science Asian*, Volume 36, pp. 237–243 (DOI: 10.2306/scienceasian1513–1874.2010.36.237).
- Phueakphum, D. and Fuenkajorn, K. (2010b) Physical model simulation of solar thermal energy storage in basaltic rock fills. *Research and Development Journal of the Engineering Institute of Thailand*, vol. 21, No. 3, pp. 33–48.
- Phueakphum, D. and Fuenkajorn, K. (2011a) Brazilian tensile strength tests under axial compression. The 9th Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineering Conference, January 13–14, 2011, Bangkok, Thailand.

- Phueakphum, D. and Fuenkajorn, K. (2011b) Laboratory test model for solar energy storage in rock fills. Proceedings of the Third Thailand Symposium on Rock Mechanics, March 10–11, 2011, Char-Am Beach, Thailand, Published by Geomechanics Research Unit, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, pp. 89–100.
- Pudewills, A., Muller-Hoeppe, N. and Papp, R. (1995). Thermal and thermomechanical analyses for disposal in drifts of a repository in rock salt. *Nuclear Technology*. 1:79–88.
- Senseny, P.E. 1983. Review of constitutive laws used to describe the creep of salt. Battelle Memorial Institute. Columbus.
- Shi, J.Q. and Durucan, S. (2005). CO₂ Storage in Caverns and Mines. *Oil & Gas Science and Technology* 60 (3): 569–571.
- Sriapai, T., Samsri, P. and Fuenkajorn, K. (2011). Influence of loading rate on compressive strength of rock salt. In proceedings of the Third Thailand Symposium on Rock Mechanics (pp. 117–124). Thailand.
- Wendai, L. 2000. Regression analysis, liner regression and probit regression In 13 chapters. SPSS for Windows: statistical analysis. Publishing House of Electronics Industry Beijing.

ประวัตินักวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. กิตติเทพ เฟื่องขจร เกิดเมื่อวันที่ 16 กันยายน 2500 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร จบการศึกษาระดับปริญญาเอกจาก University of Arizona ที่ประเทศสหรัฐอเมริกา สาขาวิชา Geological Engineering ในปี ค.ศ. 1988 และสำเร็จ Post-doctoral Fellows ในปี ค.ศ. 1990 ที่ University of Arizona ปัจจุบันมีตำแหน่งเป็นประธานกรรมการบริษัท Rock Engineering International ประเทศสหรัฐอเมริกา และดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำอยู่ที่สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา มีความชำนาญพิเศษทางด้านกลศาสตร์ของหินในเชิงการทดลอง การออกแบบ และการวิเคราะห์โดยใช้คอมพิวเตอร์ ได้เคยทำการวิจัยเป็นหัวหน้าโครงการที่สำเร็จมาแล้วมากกว่า 10 โครงการทั้งในสหรัฐอเมริกาและประเทศไทย มีสิ่งตีพิมพ์นานาชาติมากกว่า 50 บทความ ทั้งวารสาร นิตยสาร รายงานรัฐบาล และบทความการประชุมนานาชาติ เป็นผู้แต่งตำรา “Sealing of Boreholes and Underground Excavations in Rock” ที่ใช้ในหลายมหาวิทยาลัยในสหรัฐอเมริกา ดำรงตำแหน่งเป็นที่ปรึกษาทางวิชาการขององค์การรัฐบาลและหลายบริษัทในประเทศสหรัฐอเมริกา และแคนาดา เช่น U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. Department of Energy, Dow Chemical Co., Southwest Research Institute, UNOCAL, Phelps Dodge Co. และ Amoco Oil Co. เป็นวิศวกรที่ปรึกษาของ UNISEARCH จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นคณะกรรมการในการคัดเลือกข้อเสนอโครงการของ U.S. National Science Foundation และ Idaho State Board of Education และเป็นคณะกรรมการในการคัดเลือกบทความทางวิชาการของสำนักพิมพ์ Chapman & Hall ในประเทศอังกฤษ และ Elsevier Sciences Publishing Co. ในประเทศเนเธอร์แลนด์