



รหัสโครงการ SUT7-719-56-24-32

รายงานการวิจัย

การศึกษาพฤติกรรมเชิงเวลาของเกลือหิน
ภายใต้วัฏจักรการให้แรงและอุณหภูมิ

(Time-dependent behavior of rock salt
under cycles of Mechanical and thermal loadings)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-719-56-24-32

รายงานการวิจัย

การศึกษาพฤติกรรมเชิงเวลาของเกลือหิน
ภายใต้วัฏจักรการให้แรงและอุณหภูมิ

(Time-dependent behavior of rock salt
under cycles of Mechanical and thermal loadings)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เพ็องขจร

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2556-2557

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

สิงหาคม 2557

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556-2557 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากทีมงานหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีในการทดสอบและ นางสาวกัลญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

สิงหาคม 2557



บทคัดย่อ

การทดสอบการคืบในแกนเดียวและการทดสอบการให้แรงแบบวัฏจักร ดำเนินการเพื่อประเมินผลกระทบของการให้แรงและอุณหภูมิแบบวัฏจักรของพฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลาของเกลือหินซุคตมหาสารคาม ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้มีรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร โดยตัวอย่างถูกให้แรงด้วยอุปกรณ์ให้น้ำหนักกดทับแบบคงที่ แรงกดในแนวแกนมีการสอบเทียบล่วงหน้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์ไฮลด์เซลล์เพื่อให้ความเค้นที่กดบนตัวอย่างถูกต้อง โดยความเค้นกดคงที่ที่ให้กับตัวอย่างเกลือหินมีขนาด 6.5, 9.6, 13.0 และ 16.0 เมกะปาสคาล หลังจากให้แรงแบบคงที่เป็นระยะเวลา 21 วัน ตัวอย่างจะถูกผันแปรแรงกดจาก 1 เมกะปาสคาล และกลับไปค่าเริ่มต้นของแต่ละชุดการทดสอบ ซึ่งรอบของการผันแปรแรงกดคือ 24 ชั่วโมง ตัวอย่างจะถูกผันแปรแรงกดในแนวแกนเป็นระยะเวลา 21 วัน อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบมีการผันแปรตามสภาวะความเค้นที่ 30°C และ 100°C (273 และ 303 เคลวิน) ภายใต้การให้แรงกดคงที่ค่าความเครียดในช่วงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดหรือการเคลื่อนไหลต่อช่วงเวลาคงที่ได้แสดงในรูปของความเครียดเหนือหกด้านในเชิงเวลา ซึ่งสามารถอธิบายได้ดีที่สุดด้วยสมการเอ็กซีโพเนนเชียลที่สามารถอธิบายพฤติกรรมความหนืดเชิงพลาสติกของเกลือหินได้ทั้งการทดสอบการให้แรงแบบคงที่และการให้แรงแบบวัฏจักร การทดสอบการให้แรงสลับอุณหภูมิจะให้ค่าความเครียดสูงกว่าการทดสอบการให้แรงแบบคงที่ในทุกความเค้นกด

ผลการสอบเทียบตัวแปรความหนืดเชิงพลาสติกได้นำมาใช้ในการจำลองการยุบตัวเชิงเวลาของโพรงกักเก็บด้วยโปรแกรม FLAC2D การยุบตัวของโพรงภายใต้สภาวะการให้แรงแบบวัฏจักรมีค่าประมาณ 13.2% ซึ่งมากกว่าที่สภาวะการให้แรงคงที่ที่อุณหภูมิห้อง และมีค่าประมาณ 17% ที่ 100°C ค่าการยุบตัวสูงสุดสำหรับสภาวะการให้แรงสลับอุณหภูมิมียุบตัวประมาณ 8.9% ของเส้นผ่าศูนย์กลางโพรง แสดงให้เห็นว่าทั้งการทดสอบและการจำลองด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ของโพรงกักเก็บภายใต้สภาวะการให้แรงสลับอุณหภูมิจะให้ผลการประเมินการยุบตัวของโพรงที่เป็นไปในเชิงอนุรักษ์ ในทางปฏิบัติแล้วค่าตัวแปรความหนืดเชิงพลาสติกควรมีการปรับขึ้นประมาณ 15% สำหรับผลการทดสอบการคืบแบบทั่วไปเพื่อให้การออกแบบเป็นไปในเชิงอนุรักษ์

Abstract

Uniaxial creep and cyclic loading tests have been performed to assess the influence of loading cycles and temperatures on the time-dependent behavior of the Maha Sarakham salt. The salt specimens are cylindrical shaped with 100 millimeters in diameter. They are axially loaded using dead weight loading device. The axial load is pre-calibrated with an electronic load cell to obtain an equivalent axial stress on the specimen. The constant axial stresses applied by consolidation load frames are 6.5, 9.6, 13.0 and 16.0 MPa (about 20% to 50% of the uniaxial compressive strength). After static loading for 21 days the applied stresses are alternated from 1 MPa to the maximum selected stresses. Each cycle takes 24 hours. The salt specimens are under the alternated loads for 21 days. The temperatures have been changed for each stresses condition from 30°C (300 K) to 100°C (373 K). Under static load the steady-state creep strains presented in terms of the octahedral shear strain with time can be best described by exponential creep law. The calibration of the steady-state creep phase using exponential model can the visco-plastic behavior of salt for both static and cyclic loading results. The stress and temperature cycles induce a higher creep strain than the static loading for all applied stress levels.

The visco-plastic parameters (η_1) calibrated from the test results are used in the simulations of the creep deformation of compress-air storage caverns by using FLAC2D. The cavern closure under cyclic loading is about 13.2% more than that under static loading at room temperature and about 17% at 100°C. The maximum closure for stress and temperature cycles is about 8.9% of a cavern diameter. This suggests that salt testing and simulation of the storage caverns under both stress and temperature cycles will provide a conservative assessment of the cavern closure. For a simple practice, the visco-elastic parameters should be adjusted by about 15% for the conventional test results for conservative design.

สารบัญ

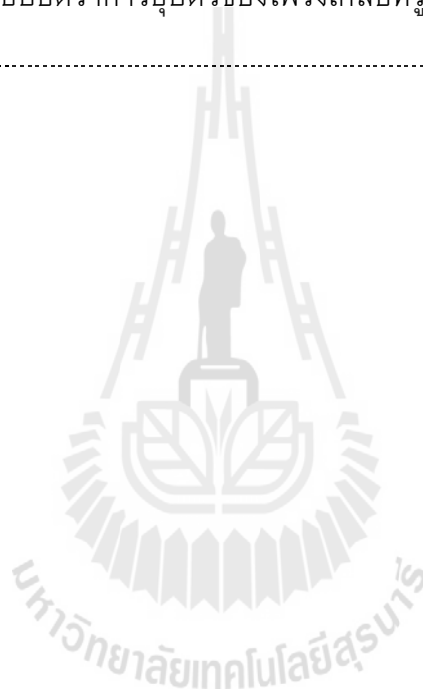
	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวคิดของโครงการวิจัย.....	3
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของเกลื้อหิน.....	7
2.2 ปัจจัยอื่นๆ.....	10
2.3 โพรงกักเก็บชนิดต่างๆ ในต่างประเทศ.....	11
บทที่ 3 การเตรียมตัวอย่างหิน.....	15
3.1 วัตถุประสงค์.....	15
3.2 แหล่งที่มาของตัวอย่างเกลื้อหิน.....	15
3.3 การเตรียมตัวอย่างเกลื้อหิน.....	15

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ	19
4.1 วัตถุประสงค์ของการทดสอบ.....	19
4.2 การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียว.....	19
4.2.1 การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวภายใต้อุณหภูมิห้อง (30°C)....	19
4.2.2 การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวภายใต้อุณหภูมิสูง (100°C)....	20
4.3 การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวแบบวัฏจักร.....	24
4.4 การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวแบบให้แรงสลับอุณหภูมิ.....	24
4.5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดสอบ.....	28
บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ	29
5.1 สมการแบบเอ็กโพเนนเชียล (Exponential).....	29
5.2 การสอบเทียบตัวแปรเชิงเวลาของเกลียวหิน.....	32
บทที่ 6 การคำนวณด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์	39
6.1 แบบจำลองโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	39
6.2 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	41
บทที่ 7 สรุปและวิจารณ์ผล	43
7.1 สรุปและวิจารณ์ผล.....	43
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	44
บรรณานุกรม	45
ประวัตินักวิจัย	49

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ตำแหน่งความลึก ขนาด และคุณสมบัติของตัวอย่างเกล็ดหิน.....	17
5.1 ผลการสอบเทียบค่าตัวแปรด้วยโปรแกรม SPSS.....	32
5.2 ผลการสอบเทียบค่าตัวแปรด้วยสมการของ Goodman (1989).....	35
6.1 คุณสมบัติของเกล็ดหินรอบโพรงเกล็ดที่ใช้ในแบบจำลองคอมพิวเตอร์.....	41
6.2 ผลการจำลองเปรียบเทียบอัตราการยุบตัวของโพรงเกล็ดที่รูปแบบตัวแปรสอบเทียบ ต่างๆ.....	42



สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
3.1	16
3.2	16
4.1	20
4.2	21
4.3	22
4.4	23
4.5	25
4.6	25
4.7	26
4.8	27
5.1	31
5.2	31

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเทียบกับเวลาที่สภาวะความเค้นเฉือนหกด้านต่างกันภายใต้สภาวะการให้แรงสลับอลูมิเนียม.....	32
5.4 การสอบเทียบค่าตัวแปรของพฤติกรรมการณ์เปลี่ยนรูปร่างเชิงเวลาของตัวอย่างเกลือหินที่อุณหภูมิ 30°C ในช่วงที่อัตราความเครียดหรือการเคลื่อนไหลเปลี่ยนแปลงคงที่ (Steady-state phase) ทั้งแบบให้แรงคงที่ (Static loading) และการให้แรงแบบวัฏจักร (Cyclic loading) โดยมีค่า R ² เท่ากับ 0.971 และ 0.975 ตามลำดับ.....	33
5.5 การสอบเทียบค่าตัวแปรของพฤติกรรมการณ์เปลี่ยนรูปร่างเชิงเวลาของตัวอย่างเกลือหินที่อุณหภูมิ 100°C ในช่วงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดหรือการเคลื่อนไหลต่อช่วงเวลาคงที่ (Steady-state phase) ทั้งแบบให้แรงคงที่และการให้แรงแบบวัฏจักรโดยมีค่า R ² เท่ากับ 0.971 และ 0.975 ตามลำดับ.....	33
5.6 การสอบเทียบค่าตัวแปรของพฤติกรรมการณ์เปลี่ยนรูปร่างเชิงเวลาของตัวอย่างเกลือหินในช่วงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดหรือการเคลื่อนไหลต่อช่วงเวลาคงที่ (Steady-state phase) ในกรณีให้แรงสลับอลูมิเนียมโดยมีค่า R ² เท่ากับ 0.990....	34
5.7 องค์ประกอบแบบจำลองของ Burgers ในวงเล็บแสดงค่าตัวแปรเปรียบเทียบกับ Goodman (1989).....	35
5.8 การสอบเทียบค่าตัวแปรเพื่อหาค่าเฉลี่ยของค่าความหนืดเชิงพลาสติกโดยใช้สมการที่ (5.9) สำหรับสอบเทียบการทดสอบทั้งแบบให้แรงคงที่และการให้แรงแบบวัฏจักรภายใต้อุณหภูมิห้อง.....	36
5.9 การสอบเทียบค่าตัวแปรเพื่อหาค่าเฉลี่ยของค่าความหนืดเชิงพลาสติกโดยใช้สมการที่ (5.9) สำหรับสอบเทียบการทดสอบทั้งแบบให้แรงคงที่และการให้แรงแบบวัฏจักรภายใต้อุณหภูมิ 100°C.....	36
5.10 การสอบเทียบค่าตัวแปรเพื่อหาค่าเฉลี่ยของค่าความหนืดเชิงพลาสติกโดยใช้สมการที่ (5.9) สำหรับการสอบเทียบการทดสอบแบบให้แรงสลับอลูมิเนียม.....	37
6.1 โครงข่ายแบบจำลองโพรงเกลือที่สร้างจากโปรแกรม FLAC 4.0 โดยมีความลึกของหลังคาโพรงเท่ากับ 500 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลางของโพรงเท่ากับ 50 เมตร และมีแรงดันภายในโพรงเท่ากับ 30 เปอร์เซนต์ ของความเค้นในแนวตั้งที่หลังคาโพรง (σ_v) โดยจุด A และจุด B เป็นจุดที่นำมาคำนวณอัตราการยุบตัวของโพรง.....	40

สารบัญญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.2	
อัตราการยุบตัวของโพรงเกลือเปรียบเทียบที่ระยะเวลา 10 ปี ของการจำลองโดยใช้ค่าสอบเทียบจากการทดสอบการคืบแบบให้แรงคงที่ การทดสอบการให้แรงแบบวัฏจักร และการทดสอบการให้แรงสลับอุณหภูมิ.....	42



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

เทคโนโลยีการกักเก็บในโพรงเกลือสำหรับอากาศอัด ก๊าซธรรมชาติ หรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาประเทศให้มีความทัดเทียมกับอารยประเทศทั้งทางด้านเทคโนโลยีสะอาดและการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อม รวมไปถึงเทคโนโลยีที่สามารถช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากภาวะโลกร้อน (Global warming) อันเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดภาวะแปรปรวนของสภาพอากาศที่รุนแรงซึ่งเกิดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณสูง ปัจจุบันประเทศที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุดเป็นอันดับ 1 คือ ประเทศจีน (2552) มีปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปีสูงถึง 7,031,916 เมตริกตัน โดยคิดเป็นอัตราส่วนของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมด 23.33% รองลงมาคือประเทศสหรัฐอเมริกา 5,461,014 เมตริกตัน/ปี คิดเป็น 18.11% และประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศที่เล็กกว่าประเทศจีนและสหรัฐอเมริกามาก แต่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สูงถึง 285,733 เมตริกตัน/ปี จัดอยู่ในอันดับที่ 22 โดยคิดเป็น 0.95% ของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมด (ที่มา : http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_carbon_dioxide_emissions) ด้วยสาเหตุข้างต้นทำให้เทคโนโลยีการกักเก็บในโพรงเกลือกลายเป็นสิ่งสำคัญที่จะช่วยผลักดันให้ประเทศไทยเข้าสู่การเป็นผู้นำทางด้านเทคโนโลยีการกักเก็บและเป็นส่วนหนึ่งในการผลักดันให้เกิดความร่วมมือที่จะเป็นประโยชน์ต่อการลดผลกระทบที่เกิดจากภาวะโลกร้อน

การได้มาซึ่งองค์ความรู้และเทคโนโลยีดังกล่าวจำเป็นต้องมีการศึกษาความเหมาะสมของแหล่งเกลือหินในประเทศไทยรวมถึงคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของชั้นเกลือหิน และเพื่อให้สามารถจำลองโพรงเกลือในสภาวะกักเก็บได้ใกล้เคียงกับในภาคสนาม ผู้วิจัยจึงได้คิดค้นวิธีการทดสอบแบบใหม่โดยทำการทดสอบการคืบในแกนเดียวที่มีการผันแปรอุณหภูมิ กล่าวคือเมื่อตัวอย่างเกลือหินมีอุณหภูมิสูงขึ้น แรงกดที่ให้กับตัวอย่างจะมีค่าต่ำ (ประมาณ 20% ของค่าความแข็งของเกลือหิน) และถ้าตัวอย่างเกลือหินมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ได้ทำการเพิ่มแรงกดกับตัวอย่าง (50% ของค่าความแข็งของเกลือหิน) และทดสอบต่อเนื่องเป็นเวลา 30 วัน โดย 1 วัฏจักร ได้ใช้เวลา 24 ชั่วโมง กล่าวคือ อุณหภูมิสูง แรงกดต่ำ 12 ชั่วโมง และอุณหภูมิต่ำ แรงกดสูงอีก 12 ชั่วโมง ด้วยสภาวะเช่นนี้จะส่งผลให้ค่าที่ได้จากการทดสอบมีความใกล้เคียงกับเกลือหินรอบโพรงที่สภาวะกักเก็บ และสามารถนำไปใช้ในการออกแบบโพรงกักเก็บได้อย่างถูกต้องแม่นยำ และเป็นรูปธรรมมากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือเพื่อศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และแรงกดแบบวัฏจักรต่อการคืบของเกลือหินโดยทำการทดสอบการคืบในแกนเดียว ในการทดสอบจะจำลองวัฏจักรของโพรงที่สภาวะกักเก็บโดยเริ่มต้นด้วยการให้อุณหภูมิกับตัวอย่างและให้แรงกดต่ำสุดที่ 20% ของความแข็งของตัวอย่างเกลือหิน จากนั้นจะลดอุณหภูมิลงและให้แรงกดสูงสุดที่ 50% ของความแข็งของตัวอย่างเกลือหิน ซึ่งในแต่ละรอบของการเปลี่ยนอุณหภูมิและแรงกดจะใช้เวลา 12 ชั่วโมง โดยการทดสอบที่สภาวะเช่นนี้จะทำให้ได้ผลที่ใกล้เคียงกับสภาวะจริงในภาคสนาม และเพื่อศึกษาเสถียรภาพของโพรงเกลือในสภาวะกักเก็บโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขซึ่งโปรแกรมที่ใช้ คือ FLAC 4.0 โดยนำข้อมูลที่ได้จากห้องปฏิบัติการมาใช้ในแบบจำลองเพื่อจำลองการเปลี่ยนรูปร่างของโพรงเกลือให้ใกล้เคียงกับสภาวะจริงในภาคสนาม ทั้งนี้ผลจากการจำลองยังทำให้เกิดความเข้าใจพฤติกรรมของเกลือหินที่อยู่รอบโพรงกักเก็บและสามารถนำผลที่ได้มาใช้ในการออกแบบโพรงเกลือสำหรับกักเก็บอากาศอัด ก๊าซธรรมชาติ หรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) ศึกษาการคืบในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือหินแบบวัฏจักรเชิงกลศาสตร์และอุณหภูมิ-ศาสตร์ต่อเนื่องเป็นเวลา 30 วัน
- 2) ทดสอบแท่งตัวอย่างเกลือหินรูปทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 2-4 นิ้ว จำนวน 10 ตัวอย่าง
- 3) ทดสอบการคืบในแกนเดียวโดยผันแปรแรงกดตั้งฉากที่ 20-50% ของค่าความแข็งของหินภายใต้อุณหภูมิห้อง (25°C) และอุณหภูมิสูง (100°C)
- 4) ทดสอบการให้แรงแบบวัฏจักรที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูงที่คงที่โดยผันแปรแรงกดตั้งฉาก 20-50% ของค่าความแข็งของหิน
- 5) การให้แรงกดแบบวัฏจักรกับตัวอย่างจะคงที่ที่แรงกดสูงสุดประมาณ 50% ของความแข็งของตัวอย่างเกลือหินและที่แรงกดต่ำสุดประมาณ 20% ของความแข็งของตัวอย่างเกลือหิน และการให้อุณหภูมิแบบวัฏจักรผันแปรอุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 110°C และต่ำสุดไม่น้อยกว่า 25°C ซึ่งการทดสอบจะดำเนินการผันแปรแรงกดและอุณหภูมิพร้อมกัน
- 6) ในการศึกษาวิจัยนี้ไม่มีการสำรวจในภาคสนาม

1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

โพรงเกลือที่สภาวะกักเก็บแท้จริงแล้วจะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งอุณหภูมิและค่าความเค้น การทดสอบที่ใช้อยู่ในปัจจุบันไม่มีการผันแปรอุณหภูมิในระหว่างการทดสอบ ส่งผลให้ค่าที่ได้ไม่ใช่ค่าที่แท้จริงที่เกิดขึ้นรอบโพรงเกลือในสภาวะกักเก็บ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้คิดค้นวิธีการทดสอบแบบใหม่โดยทำการทดสอบการคืบในแกนเดียวที่มีการผันแปรอุณหภูมิด้วย กล่าวคือ เมื่อตัวอย่างเกลือหินมีอุณหภูมิสูงขึ้น แรงกดที่ให้กับตัวอย่างจะมีค่าต่ำ (20% ของค่าความแข็งของเกลือหิน) และถ้าตัวอย่างเกลือหินมีอุณหภูมิต่ำ (อุณหภูมิต่ำ) จะทำการเพิ่มแรงกดกับตัวอย่าง (50% ของค่าความแข็งของเกลือหิน) ทำการทดสอบต่อเนื่องเป็นเวลา 30 วัน โดย 1 วัฏจักรใช้เวลา 24 ชั่วโมง กล่าวคือ อุณหภูมิสูง แรงกดต่ำ 12 ชั่วโมง และอุณหภูมิต่ำ แรงกดสูงอีก 12 ชั่วโมง และยังทำการทดสอบเปรียบเทียบกับสภาวะปกติที่อุณหภูมิคงที่และแรงกดคงที่ในระดับที่ต่างกัน เพื่อให้เข้าใจถึงผลกระทบที่เกิดจากการผันแปรอุณหภูมิ นอกจากนี้ยังไม่เคยมีนักวิจัยท่านใดเคยวิเคราะห์พฤติกรรมของเกลือหินลักษณะเช่นนี้มาก่อน ซึ่งในสภาวะเช่นนี้จะส่งผลให้ค่าที่ได้จากการทดสอบมีความใกล้เคียงกับโพรงที่สภาวะกักเก็บ และสามารถนำไปใช้ในการออกแบบโพรงกักเก็บได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ และเป็นรูปธรรมมากยิ่งขึ้น

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาและค้นคว้างานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตเกี่ยวกับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ส่งผลต่อตัวอย่างเกลือหิน รวมไปถึงพฤติกรรมเชิงเวลาที่มีอุณหภูมิและความเค้นผันแปรตลอดเวลาซึ่งใกล้เคียงกับโพรงเกลือในสภาวะกักเก็บ

ขั้นตอนที่ 2 การจัดเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบ

ในขั้นตอนนี้จะนำตัวอย่างเกลือหินมาตัดและกลึงให้อยู่ในรูปแบบที่กำหนดเพื่อใช้ในการทดสอบคุณสมบัติและพฤติกรรมที่เกี่ยวข้อง โดยตัวอย่างเกลือหินมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2-4 นิ้ว และเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เหมืองแร่โพแทช อาเซียน จำกัด (มหาชน) จังหวัดชัยภูมิ ความลึกและตำแหน่งของตัวอย่างเกลือหินได้มาจากชั้นเกลือหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยซึ่งถูกบันทึก วิเคราะห์ และเสนออยู่ในรายงานเพื่อให้ทราบถึงความแปรปรวนทางด้านพฤติกรรมและคุณสมบัติในชั้นเกลือหินของประเทศไทย

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

โครงการวิจัยนี้ได้ดำเนินการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาคุณสมบัติเชิงความร้อนพื้นฐานของเกลือหิน รวมไปถึงสภาพการนำความร้อน (Thermal conductivity) สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อน (Thermal expansion) และความร้อนจำเพาะ (Specific heat) ของตัวอย่างเกลือหิน การทดสอบหาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของตัวอย่างเกลือหินจะแบ่งเป็น 5 ชุดการทดสอบดังนี้

- 1) การทดสอบหาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์โดยทำการทดสอบการคืบในแกนเดียว (Uniaxial creep test) โดยให้แรงกดคงที่ที่กับตัวอย่างและผันแปรระหว่าง 20-50% ของค่าความแข็งของตัวอย่างเกลือหิน 1 ชุดการทดสอบ
- 2) การทดสอบการคืบในแกนเดียวโดยให้แรงกดคงที่ที่กับตัวอย่างและผันแปรระหว่าง 20-50% ที่อุณหภูมิสูง (100°C) 1 ชุดการทดสอบ
- 3) การทดสอบการให้แรงแบบวัฏจักร (Cyclic loading test) ที่อุณหภูมิต่ำ 1 ชุดการทดสอบ
- 4) การทดสอบการให้แรงแบบวัฏจักร (Cyclic loading test) ที่อุณหภูมิสูง 1 ชุดการทดสอบ
- 5) การทดสอบโดยการให้แรงและการให้ความร้อนแบบวัฏจักรที่อุณหภูมิสูง แรงกดต่ำ 12 ชั่วโมง และอุณหภูมิต่ำ แรงกดสูงอีก 12 ชั่วโมง ใน 1 ตัวอย่าง รวมชุดการทดสอบทั้งสิ้น 5 ชุดการทดสอบ

โดยแต่ละชุดการทดสอบได้ใช้ตัวอย่างเกลือหินไม่น้อยกว่า 3 ตัวอย่าง รวมทั้งสิ้นไม่น้อยกว่า 10 ตัวอย่าง ในขณะที่ทำการทดสอบได้ตรวจวัดการหดตัวในแนวแกนของตัวอย่างโดยใช้ Dial gauge และใช้เลเซอร์สแกนสำหรับตรวจวัดการบวมตัวของตัวอย่างขณะทดสอบทุกๆ ชุดของการทดสอบ สำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิสูงจะใช้ Heating tape เป็นอุปกรณ์สำหรับให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง การตรวจวัดในแต่ละชุดการทดสอบคาดว่าจะใช้เวลาไม่เกิน 21-30 วัน

ขั้นตอนที่ 4 การสร้างสมการความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์

สมการเชิงคณิตศาสตร์ได้ถูกสร้างขึ้นด้วยความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนรูปร่างและอุณหภูมิของตัวอย่างเกลือหินที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างในแนวแกน รวมไปถึงค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น อัตราส่วนปัวซองส์ ความเค้น และความเครียดในตัวอย่างเกลือหินเชิงเวลา ผลที่ได้จากการทดสอบสามารถนำไปสอบเทียบ (Calibrate) เพื่อหาค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับความหนืดเชิงยืดหยุ่นและเชิงพลาสติก (Visco-

elastic และ Visco-plastic) ภายใต้อุณหภูมิ ซึ่งจะนำไปใช้ในแบบจำลองคอมพิวเตอร์เพื่อ คำนวณหาอัตราการยุบตัวของโพรงเกลือ ทั้งนี้องค์ความรู้ใหม่ที่เกิดขึ้นจากความสัมพันธ์ของ อัตราการยุบตัวที่เกิดจากการนำค่าตัวแปรที่ได้จากการสอบเทียบด้วยสมการเชิงคณิตศาสตร์ ของแต่ละรูปแบบการทดสอบทำให้สามารถเข้าใจถึงพฤติกรรมของโพรงเกลือที่เกิดขึ้นได้อย่าง ถูกต้อง

ขั้นตอนที่ 5 การจำลองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ได้นำมาใช้คำนวณความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้น รอบโพรงในชั้นเกลือหินในขณะที่โพรงได้รับผลกระทบจากแรงดันอากาศที่เก็บอยู่และอุณหภูมิที่ ผันแปรตลอดระยะเวลาการกักเก็บ จากนั้นนำผลที่ได้มาคำนวณด้วยโปรแกรม FLAC 4.0 (Itasca, 1992) ซึ่งเป็นโปรแกรม Finite difference ที่สามารถคำนวณความเค้นและความเครียดของวัตถุใน สองมิติ และสามารถคาดคะเนพฤติกรรมของวัตถุนั้นในอนาคต นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณ พฤติกรรมของวัสดุเชิงเวลาและสามารถผันแปรอุณหภูมิได้ตามที่ต้องการ ผลที่ได้จากการ คำนวณจะนำมาวิเคราะห์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเกลือหินที่เกิดขึ้นบริเวณโดยรอบโพรงกักเก็บ เพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมเชิงเวลาต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปได้ดียิ่งขึ้นทำให้สามารถนำไป ประยุกต์ใช้ได้จริงอย่างมีรูปแบบและเป็นรูปธรรม

ขั้นตอนที่ 6 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิดและขั้นตอนโดยละเอียด รวมถึงการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุปได้นำเสนอโดยละเอียดในรายงานฉบับสมบูรณ์ เพื่อที่จะส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ

ขั้นตอนที่ 7 การถ่ายทอดเทคโนโลยี

แผนการถ่ายทอดเทคโนโลยีนี้ คือ การนำข้อมูลไปเผยแพร่ในเว็บไซต์ของหน่วยวิจัย กลศาสตร์ธรณีเพื่อให้ผู้ที่สนใจทั่วไปสามารถสืบค้นได้ และนำผลงานวิจัยขึ้นนี้ลงตีพิมพ์ใน วารสารนานาชาติหรือนำเสนอในการประชุมวิชาการระดับชาติเพื่อเผยแพร่ความรู้ในวงกว้าง ต่อไป

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยที่เสนอมานี้มีประโยชน์อย่างมากกับงานด้านวิศวกรรมธรณีและวิศวกรรม โยธาที่เกี่ยวข้องกับกลศาสตร์หินรวมถึงองค์การที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาพลังงานและพลังงาน ทดแทน ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

1) เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป

เพื่อเป็นองค์ความรู้ริเริ่มและสร้างสรรค์ในการออกแบบโพรงกักเก็บในชั้นเกลือหินที่ยังไม่เคยมีผู้ใดทำมาก่อน และเข้าใจพฤติกรรมโพรงกักเก็บในสภาวะจริงที่มีการผันแปรความเค็มและอุณหภูมิ การศึกษาดังกล่าวได้รวบรวมเอาองค์ความรู้ทางด้านกลศาสตร์หินมาใช้ในการศึกษาคุณสมบัติและพฤติกรรมของโพรงกักเก็บในสภาวะจริง

2) บริการความรู้แก่ประชาชนและหน่วยงานราชการ

การให้ความรู้แก่หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เช่น กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ เพื่อให้ทราบถึงพฤติกรรมและประโยชน์ของเกลือหินในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีโพรงกักเก็บก๊าซธรรมชาติ ในการบริการความรู้แก่ผู้ที่สนใจ

3) บริการความรู้แก่ภาคธุรกิจ

เป็นแหล่งข้อมูลและให้ความรู้แก่หน่วยงานในภาคธุรกิจ เช่น กลุ่มธุรกิจปิโตรเลียมขั้นต้นและก๊าซธรรมชาติของ PTT มีแนวทางหรือทางเลือกในการกักเก็บก๊าซธรรมชาติ และสามารถกำหนดพื้นที่เป้าหมายสำหรับโครงการการขยายท่อก๊าซสูงภูมิภาคในอนาคต มีความชัดเจนด้านความเป็นไปได้ที่จะใช้โพรงเกลือในการกักเก็บก๊าซธรรมชาติ ทำให้กระบวนการผลิตใช้ต้นทุนต่ำลง และใส่ใจในเรื่องประสิทธิภาพในการผลิตของบริษัทมากยิ่งขึ้น สำหรับโรงงานไฟฟ้าที่อาศัยพลังงานจากถ่านหินที่จะหันมาใช้ก๊าซธรรมชาติจะช่วยลดปัญหาด้านมลภาวะสู่สิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่ง ซึ่งจะส่งผลให้เศรษฐกิจของประเทศชาติดีขึ้น

4) เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต

กลุ่มธุรกิจปิโตรเลียมสามารถกักเก็บก๊าซธรรมชาติได้ปริมาณสูงในพื้นที่จำกัด และหากมีการกระจายพื้นที่บริการก๊าซธรรมชาติไปสู่ส่วนภูมิภาคมากขึ้นจะทำให้โรงงานต่างๆ ที่อาศัยพลังงานอื่น เช่น น้ำมันหรือถ่านหิน หันมาใช้พลังงานที่ได้จากก๊าซธรรมชาติมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้ในปัจจุบันเนื่องด้วยสภาวะของราคาน้ำมันที่สูง จึงทำให้มีการนำพลังงานก๊าซธรรมชาติมาใช้มากขึ้น ทำให้มีความต้องการในตลาดสูง การนำเทคโนโลยีโพรงกักเก็บมาใช้ จึงเป็นทางเลือกที่มีความเป็นไปได้เป็นอย่างดี

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินและปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของเกลือหินเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในงานวิจัยนี้

2.1 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน

Fuenkajorn and Daemen (1988) ได้ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินในห้องปฏิบัติการและสรุปว่า พฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินจะค่อนข้างซับซ้อนและขึ้นกับเวลา เมื่อเกลือหินมีแรงเข้ามากระทำ พฤติกรรมที่ตอบสนองต่อแรงนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 4 พฤติกรรม ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วจะเกิดขึ้นพร้อมๆ กันคือ 1) พฤติกรรมแบบยืดหยุ่น (Elastic behavior หรือ Instantaneous responses) ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นโดยฉับพลันและไม่ขึ้นกับเวลา 2) พฤติกรรมแบบหนืดเชิงยืดหยุ่น (Visco-elastic behavior) เป็นพฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลา ซึ่งเกลือหินจะเปลี่ยนรูปตามเวลาภายใต้แรงที่มากกระทำ แต่เกลือหินก็จะสามารถคืนตัวเป็นรูปร่างได้เมื่อนำแรงนั้นออกไป 3) พฤติกรรมแบบหนืดเชิงพลาสติก (Visco-plastic behavior) เป็นการเปลี่ยนรูปของเกลือหินอย่างถาวรและขึ้นกับเวลา ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อแรงที่มากกระทำสูงเกินขอบเขตของจุดอ่อนตัวของเกลือหิน และ 4) พฤติกรรมการวิบัติ (Creep failure behavior) การวิบัติหรือการแตกของเกลือหินจะขึ้นกับเวลาซึ่งเป็นผลมาจากการพัฒนาของรอยแตกและรอยร้าวเล็กๆ (Micro-cracks) ที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนในที่สุดเกลือหินก็จะแตก ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นเมื่อเกลือหินอยู่ภายใต้แรงที่มากกระทำที่สูงมาก คือสูงเกินขอบเขตของกำลังอัดสูงสุดหรือเรียกว่า Creep strength

ปัจจัยและสภาวะแวดล้อมที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของเกลือหินมีอยู่หลายประการ ซึ่งจะสะท้อนให้เห็นในรูปของการเปลี่ยนรูปหรือการเคลื่อนไหล (Creep) รวมทั้งยังทำให้ความต้านทานต่อแรงกดหรือแรงดึงมีค่าลดลง Franssen (1998) และ Fokker (1998) ได้อธิบายปัจจัยที่มีผลกระทบต่อเคลื่อนไหลและความต้านทานของเกลือหินทั้งสภาวะในชั้นเกลือหินและในห้องปฏิบัติการ รวมไปถึงขนาดผลึก แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึก การเปลี่ยนรูปตามเวลา อุณหภูมิ ความชื้น และสิ่งเจือปน เป็นต้น

ขนาดผลึกหรือขนาดเม็ดเกลือจะมีผลกระทบต่อเปลี่ยนรูปร่างและการเคลื่อนไหลของเกลือหิน กล่าวคือ เมื่อเปรียบเทียบขนาดผลึกกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างขนาด 60 mm พบว่าขนาดผลึกที่มีขนาดใหญ่จะมีโอกาสเกิดการเคลื่อนตามแนวแตก (Cleavage

plane) และตามระนาบเลื่อน (Slip plane) ได้มากขึ้น (Aubertin, 1993; Billiotte et al., 1996; Aubertin, 1996) กลุ่มนักวิจัยหลายกลุ่มได้แก่ Franssen and Spiers (1990) Raj and Pharr (1992) Senseny et al. (1992) และ Wanten et al. (1996) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของผลึก และการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกของเกลือหินพบว่าความต้านแรงเฉือนและการเปลี่ยนรูป (Shear strength and deformation) จะเกิดขึ้นตามแนวหรือทิศทางของผลึก ดังนั้น ตัวอย่างเกลือหินที่มีขนาดเล็กเกินไปจะมีความต้านแรงกดที่ปรวนแปร ผลการทดสอบที่ได้จึงไม่สามารถเปรียบเทียบกับขนาดอื่นได้ ดังนั้น ASTM จึงได้ออกข้อกำหนดมาตรฐานสากลขึ้น (ASTM D2938 and D3967; Barber, 1990) เพื่อที่จะกำหนดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างให้มีขนาดมาตรฐานและสามารถเทียบเคียงกันได้ กล่าวคือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต้องมีมากกว่าสิบเท่าของขนาดผลึก

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของเกลือหินในด้านความต้านทานของเกลือหิน เกลือหินที่มีลักษณะเนื้อต่างกันจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกต่ำกว่าบริเวณที่เป็นเนื้อเดียวกัน ลักษณะดังกล่าวนี้ Wanten et al. (1996) และ Allemandou and Dusseault (1993) ได้สังเกตพฤติกรรมเกลือหินจากการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนและการทดสอบแรงกดในแกนเดียวพบว่า ค่าความเค้นจะขึ้นกับแรงยึดเหนี่ยวภายในผลึกและรอยต่อระหว่างผลึกของเกลือหิน ความเปราะเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของเกลือหินที่แสดงถึงความสามารถในการยึดเหนี่ยวระหว่างผลึก สังเกตได้จากขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง การตัดและการขัดตัวอย่างเกลือหิน จะพบว่าบริเวณขอบของตัวอย่างเกิดการแตกได้ง่าย แสดงว่าเกลือหินมีความสามารถยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกค่อนข้างต่ำ

อัตราการกดหรือความเร็วของการกดที่กระทำต่อเกลือหินที่แตกต่างกันจะทำให้เกลือหินมีการเปลี่ยนรูปตามเวลาไม่เท่ากัน กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ การเคลื่อนไหลของเกลือหินที่เกิดขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาในสภาวะแรงกดที่แตกต่างกัน ภายใต้อัตรากดสูงเกลือหินจะมีพฤติกรรมแบบเปราะ แต่ภายใต้อัตราแรงกดที่ต่ำจะทำให้พฤติกรรมของเกลือหินเป็นแบบพลาสติกมากขึ้น เป็นผลให้มีจุดอ่อนตัวของความต้านแรงกดที่ต่ำ ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวได้ศึกษาโดย Aubertin et al. (1993) และ Hardy (1996) พบว่าน้ำหนักกดทับในชั้นเกลือหินภายใต้ระยะเวลาานแรงกดทับในเนื้อหินจะค่อยๆ ลดลง โดย Hardy (1996) ได้ทำการทดสอบตัวอย่างเกลือหินด้วยแรงกด 10.3 MPa และรักษาระดับการเปลี่ยนรูปไว้ในระยะเวลา 12 เดือน พบว่าความต้านแรงกดจะลดลงไปถึง 21%

ความร้อนหรืออุณหภูมิจะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนรูปของเกลือหินอย่างมาก และยังทำให้ช่วงเวลาการเคลื่อนไหลยาวนานมากขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้ความหนืดของเกลือหินเพิ่มขึ้นด้วย (Ghoreychi and Berest, 1990; Broek and Heilbron, 1998) การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ

กับความลึกในชั้นหินมีผู้วิจัยหลายท่านได้ศึกษาไว้แล้ว (Franssen and Spiers, 1990; Cristescu and Hunsche, 1996; Raj and Pharr, 1992; Senseny et al., 1993; Berest and Blum, 1992; Carter et al., 1993; Schneefub and Droste, 1996; Berest et al., 1998) การศึกษาดังกล่าวสามารถสรุปได้โดยสังเขปคือ ระดับความลึกของชั้นหินที่เพิ่มขึ้นจะทำให้มีความร้อนสูง ความร้อนจะทำให้เกลือหินมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับพลาสติกมากยิ่งขึ้นและทำให้ความต้านแรงกดลดลง โดยปกติเกลือหินจะมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 800°C แต่การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600°C ตลอดระยะเวลาเพียง 8 ชั่วโมง ก็สามารถทำให้เกลือหินสูญเสียความต้านแรงกดไปได้ การทดสอบในห้องปฏิบัติการเกี่ยวกับอุณหภูมิ Cristescu (1994a, b) และ Cristescu and Hunsche (1996) ได้แนะนำว่าการทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C ควรใช้อัตราการยุบตัวที่ต่ำกว่า 10^{-8} s^{-1} และที่อุณหภูมิ 200°C ควรใช้อัตราการยุบตัวต่ำกว่า 10^{-7} s^{-1} เพราะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกลือหินเกิดการเคลื่อนไหลเร็วขึ้น ซึ่งจะทำให้เกลือหินมีการเปลี่ยนรูปได้ง่าย (Hamami et al., 1996)

ความชื้นจะทำให้คุณสมบัติเกลือหินเปลี่ยนไป กล่าวคือ ความต้านแรงกดของเกลือหินจะลดลง (Hunsche and Schulze, 1996) เนื่องจากเกลือหินจะมีความไวต่อความชื้นในอากาศ ความชื้นจะทำปฏิกิริยาเคมีกับเกลือหินทำให้เกิดการละลายและมีน้ำเกลือเยิ้มออกมา สำหรับการเตรียมตัวอย่างเกลือหินในห้องปฏิบัติการสามารถป้องกันความชื้นได้โดยนำตัวอย่างเกลือหินมาห่อหุ้มด้วยพลาสติกกันความชื้น นอกจากนี้แล้วความชื้นสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายเมื่อมีอุณหภูมิเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อิทธิพลของความชื้นต่อความต้านแรงกดได้ศึกษาโดย Billiotte et al. (1996) และ Bonte (1996) ซึ่งทำการทดสอบหาความต้านแรงกดกับตัวอย่างเกลือหินที่มีความชื้นสูง ด้วยการนำตัวอย่างเกลือหินแช่ในน้ำเกลือพบว่า เกลือหินจะมีความต้านแรงกดลดลง เกลือหินที่แห้งปกติจะมีกำลังต้านแรงกดเท่ากับ 30 MPa และมีกำลังลดลงเพียง 1 MPa เมื่อมีความชื้นในเกลือหินเท่ากับ 7%

สิ่งเจือปนหรือสิ่งสกปรกในเนื้อหินเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อความต้านแรงกดของเกลือหิน สิ่งเจือปนเหล่านี้ได้แก่ Anhydrite และตะกอนอื่นๆ ที่มีการกระจายตัวในเกลือหิน ในบางกรณีจะไปลดความต้านแรงกดและทำให้เกลือหินมีพฤติกรรมการเคลื่อนไหลที่ต่างกันออกไป (Peach, 1996; Hunsche, et al., 1996; Hansen et al., 1987) สิ่งเจือปนในเกลือหินจะมีผลต่อพฤติกรรมการเคลื่อนไหลแม้จะมีจำนวนเพียงเล็กน้อยก็ตาม เพราะสิ่งเจือปนในเนื้อหินจะเป็นตัวที่กีดขวางแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกและการเคลื่อนไหลของเกลือหิน สิ่งเจือปนทำให้เกิดการแปรผันในเชิงกลศาสตร์โดยจะทำให้แรงกดมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอและไม่ต่อเนื่องกัน (Franssen and Spiers, 1990; Raj and Pharr, 1992; Senseny et al., 1992)

2.2 ปัจจัยอื่นๆ

Fuenkajorn and Phueakphum (2009) ได้ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาผลกระทบของอัตราการกดแบบวัฏจักรของเกลือหินชุดมหาสารคาม ผลลัพธ์จากการทดสอบแสดงให้เห็นค่าความแข็งของเกลือหินจะมีค่าลดลงเมื่อจำนวนของการกดมีค่าสูงขึ้น โดยนำเสนอในสมการแบบ Power และค่าความยืดหยุ่นของเกลือหินจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับวัฏจักรแรกๆ

Sriapai and Fuenkajorn (2010) ได้ทำการทดสอบกำลังการกดในสามแกนจริงของเกลือหินเพื่อคาดคะเนเกณฑ์การแตกในสามมิติ ตัวอย่างเกลือหินมีขนาด $5.4 \times 5.4 \times 10.8 \text{ cm}^3$ และใช้โครงกดทดสอบในสามแกนในการทดสอบ โดยให้ค่าความเค้นหลักกลางคงที่ผันแปรตั้งแต่ 0 ถึง 80 MPa และค่าความเค้นหลักต่ำสุดคงที่ผันแปรตั้งแต่ 0 ถึง 28 MPa ในขณะที่ความเค้นหลักสูงสุดจะถูกกวดจนกระทั่งหินแตก เกณฑ์การแตกของ Coulomb มีค่ามุมเสียดทานเท่ากับ 50 องศา และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 5 MPa ผลกระทบของความเค้นหลักกลางของเกลือหินสามารถอธิบายได้ด้วยเกณฑ์การแตกของ Modified Wiebols and Cook ส่วนเกณฑ์การแตกของ Mogi จะสามารถทำนายการแตกของเกลือหินได้ดีเฉพาะความเค้นหลักต่ำสุด ส่วนเกณฑ์การแตกของ Modified Lade สามารถทำนายการแตกของเกลือหินได้สูงกว่าผลการทดสอบในทุกระดับของความเค้นหลักต่ำสุด เกณฑ์การแตกของ Coulomb และเกณฑ์การแตกของ Hoek and Brown ไม่สามารถอธิบายความแข็งของเกลือหินได้ เนื่องจากทั้งสองกฎเกณฑ์ไม่มีการพิจารณาผลกระทบของความเค้นหลักกลาง ทั้ง Circumscribed และ Inscribed ของเกณฑ์การแตก Drucker-Prager สามารถทำนายผลการทดสอบได้ดีต่ำกว่าความเค้นหลักสูงสุดในทุกสภาวะของความเค้น

Sriapai et al. (2010) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอัตราการกดของเกลือหินภายใต้การทดสอบการกดในแกนเดียวและสามแกนของตัวอย่างเกลือหินขนาด $5.4 \times 5.4 \times 5.4 \text{ cm}^3$ โดยใช้โครงกดทดสอบ (Polyaxial Frame) และกำหนดค่าความเค้นหลักต่ำสุดเท่ากับ 0, 3, 7, 12, 20 และ 28 MPa ในขณะที่อัตราการกดในแนวแกนผันแปรตั้งแต่ 0.001, 0.01, 0.1, 1 และ 10 MPa/s ผลที่ได้พบว่าค่าความแข็งของเกลือหินจะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กโพเนนเชียลเชิงซ้อน และยังทำการสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความเครียดและความเค้นเฉือน ซึ่งสมการดังกล่าวสามารถอธิบายค่าความแข็งของเกลือหินได้ดีในระยะยาว

2.3 โพรงกักเก็บชนิดต่างๆ ในต่างประเทศ

การทบทวนรูปแบบของโพรงกักเก็บชนิดต่างๆ ในต่างประเทศ มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานและเปรียบเทียบในการออกแบบโพรงกักเก็บเบื้องต้นสำหรับการคำนวณและวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ และเพื่อนำไปสู่การออกแบบรูปร่างของโพรงกักเก็บที่เหมาะสมและมีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์สูงสุดในแต่ละพื้นที่

Katz and Lady (1976) อธิบายตัวอย่างของแหล่งกักเก็บก๊าซธรรมชาติ (Natural gas) ในชั้นเกลือหินที่มลรัฐ Michigan และมลรัฐ Mississippi ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยโพรงกักเก็บที่มลรัฐ Michigan ใช้สำหรับกักเก็บก๊าซ Propane ซึ่งถูกสร้างด้วยวิธีการทำเหมืองเกลือแบบละลาย (Solution mining) อยู่ที่ระดับความลึก 637 เมตร มีความสูงของโพรง 43 เมตร และมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 67 เมตร สามารถบรรจุก๊าซ Propane ได้ประมาณ 9.7×10^6 ลูกบาศก์เมตร ในขั้นตอนของการปฏิบัติสำหรับการกักเก็บจะกำหนดให้ความดันสูงสุดที่ไม่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของโพรงมีค่าเท่ากับ 7.58 MPa และความดันต่ำสุดที่หลีกเลี่ยงไว้เพื่อป้องกันการยุบตัวของโพรงจากความเค้นในชั้นเกลือหินรอบข้างโพรงมีค่าเท่ากับ 1.03 MPa ในการปล่อยก๊าซออกจากโพรงกักเก็บเพื่อนำมาใช้งานจะกำหนดให้มีอัตราการปล่อยเท่ากับ 0.59×10^6 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ส่วนโพรงกักเก็บที่มลรัฐ Mississippi ใช้สำหรับกักเก็บก๊าซธรรมชาติ โดยโพรงถูกสร้างอยู่ในชั้นเกลือ Golf coast salt dome ด้วยวิธีการทำเหมืองเกลือแบบละลายเช่นเดียวกับที่มลรัฐ Michigan มีจำนวน 2 โพรง ซึ่งอยู่ที่ระดับความลึก 1,737 และ 2,042 เมตร แต่ละโพรงมีความสูงประมาณ 305 เมตร และมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 30 เมตร ปริมาตรของก๊าซที่สามารถบรรจุได้รวมทั้ง 2 โพรง ประมาณ 8.20×10^6 ลูกบาศก์เมตร ในขั้นตอนของการปฏิบัติสำหรับการกักเก็บจะกำหนดให้ความดันสูงสุดมีค่า 27.23 MPa และความดันต่ำสุดที่หลีกเลี่ยงไว้มีค่า 8.79 MPa ในการปล่อยก๊าซออกจากโพรงกักเก็บเพื่อนำมาใช้งานมีอัตราการปล่อยเท่ากับ 8.50×10^6 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน

ในปี 1991 ประเทศสหรัฐอเมริกาได้เริ่มนำเทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานในรูปแบบอากาศภายใต้แรงดันเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้ามาใช้เป็นครั้งแรก ซึ่งได้ดำเนินการในเมือง McIntosh ทางตอนใต้ของมลรัฐ Alabama โดยมีกำลังการผลิตเท่ากับ 110 MW ใน 9 ชั่วโมง โพรงกักเก็บถูกสร้างอยู่ในโดมเกลือ McIntosh salt dome ด้วยวิธีการทำเหมืองเกลือแบบละลาย มีความลึกของหลังคาโพรงเท่ากับ 457 เมตร สูง 305 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 70 เมตร และมีความหนาของหลังคาโพรง (Salt roof) เท่ากับ 290 เมตร ถูกสร้างขึ้น 2 โพรง โดยแต่ละโพรงมีปริมาตรเท่ากับ 0.5×10^6 ลูกบาศก์เมตร วิธีการผันอากาศให้เป็นกระแสไฟฟ้าจะเป็นแบบปริมาตรคงที่ (Constant volume system) ในการอัดอากาศเข้าสู่โพรงกำหนดให้ความดันสูงสุดเท่ากับ 7.93 MPa และในการปล่อยอากาศเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้ากำหนดให้ความดันต่ำสุดที่ต้องหลีกเลี่ยงไว้ในโพรงเท่ากับ 5.17 MPa (Serata et al., 1989; Serata and Mehta, 1993)

Jeremic (1994) อธิบายการพัฒนาเทคโนโลยีการกักเก็บขยะสารเคมี (Chemical waste) ในโพรงเกลือหินที่ประเทศเนเธอร์แลนด์ ซึ่งโพรงถูกสร้างในชั้นเกลือหินด้วยวิธีการทำเหมืองเกลือแบบละลาย ตั้งอยู่ในเมือง Hengelo โดยโพรงอยู่ที่ความลึก 286 เมตร สูง 114 เมตร และมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 120 เมตร สามารถกักเก็บขยะสารเคมีได้ประมาณ 0.2×10^6 ลูกบาศก์เมตร ในรูปของเหลว ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ยิปซัม และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ Nguyen et al. (1996) วิเคราะห์การยุบตัวของผิวดิน (Surface subsidence) จากการสร้างโพรงกักเก็บก๊าซที่เมือง Tersanne ประเทศฝรั่งเศส โดยใช้วิธีการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในสามมิติ (Three-dimensional finite element) ซึ่งโพรงที่สร้างมี 14 โพรง อยู่ที่ความลึกประมาณ 1,400 เมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 80 เมตร และความหนาของหลังคาโพรงเท่ากับ 150 เมตร แต่ละโพรงมีระยะห่างระหว่างโพรง 600 เมตร โดยปริมาตรของก๊าซทั้งหมดที่สามารถกักเก็บได้เท่ากับ 440×10^6 ลูกบาศก์เมตร ผลจากการวิเคราะห์ระบุว่าอัตราการทรุดตัวอยู่ที่ 1 เซนติเมตร ต่อปี

Vouille et al. (1996) ใช้ระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลขแบบไฟไนท์อีลิเมนต์ (Finite element method-VIPEF) ศึกษาเสถียรภาพของโพรงกักเก็บไฮโดรคาร์บอน ที่พัฒนามาจากโพรงกักเก็บเชื้อเพลิง (Fuel storage caverns) ที่ตั้งอยู่ในรัฐ Manosque ประเทศฝรั่งเศส เริ่มดำเนินการตั้งแต่ปี 1967 และเริ่มใช้งานในปี 1969 ซึ่งโพรงถูกสร้างในชั้นเกลือหินที่มีความลึกระหว่าง 400 ถึง 1,500 เมตร มีทั้งหมด 7 โพรง แต่ละโพรงมีความสูงประมาณ 400 เมตร สามารถบรรจุไฮโดรคาร์บอนได้ทั้งหมดประมาณ 6.3×10^6 ลูกบาศก์เมตร ผลที่ได้ระบุว่าความดันสูงสุดที่สามารถกักเก็บได้มีค่าเท่ากับ 18 MPa และความดันต่ำสุดที่เหลือค้างไว้มีค่าเท่ากับ 6 MPa Fuenkajorn (1997) ได้ออกแบบและวิเคราะห์โพรงกักเก็บสำหรับกักเก็บก๊าซธรรมชาติที่มลรัฐ Kansas ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยใช้ระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลขแบบไฟไนท์อีลิเมนต์ (Finite element method-GEO) ซึ่งโพรงถูกสร้างอยู่ในชั้นเกลือ Hutchinson salt formation ด้วยวิธีการทำเหมืองเกลือแบบละลาย ความลึกของโพรงเท่ากับ 620 เมตร สูง 72 เมตร และมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 122 เมตร โดยที่หลังคาโพรงและพื้นโพรง (Salt floor) มีความหนาเท่ากับ 44 และ 25 เมตร ตามลำดับ ความดันสูงสุดของก๊าซที่สามารถอัดสู่โพรงกักเก็บได้มีค่า 12.14 MPa และความดันต่ำสุดที่เหลือค้างไว้มีค่า 4.83 MPa ให้มีอัตราการปล่อยก๊าซออกจากโพรงเท่ากับ 1.38 MPa ต่อวัน สำหรับโพรงที่มีความดันอยู่ระหว่าง 12.14 และ 7.30 MPa มีอัตราการปล่อยเท่ากับ 0.69 MPa ต่อวัน สำหรับโพรงที่มีความดันของโพรงต่ำกว่า 7.30 MPa วัฏจักรของการอัดและปล่อยอากาศจะกระทำ 7 ครั้งต่อปี โดยโพรงนี้จะมีอายุการใช้งานถึง 50 ปี ต่อมาในปี 2000 Fuenkajorn (2000) ได้ใช้วิธีการคำนวณแบบเดียวกันในการออกแบบและวิเคราะห์โพรงกักเก็บสำหรับกักเก็บก๊าซธรรมชาติที่มลรัฐ Texas ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งโพรงถูกสร้างอยู่ในชั้นเกลือ

Salado salt formation ด้วยวิธีการทำเหมืองเกลือแบบละลายเช่นเดียวกัน มีความลึก 640 เมตร สูง 137 เมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 61 เมตร มีความหนาของหลังคาโพรงและพื้นโพรงเท่ากับ 165 และ 63 เมตร ความดันสูงสุดของก๊าซที่สามารถอัดสู่โพรงกักเก็บได้มีค่าเท่ากับ 11.72 MPa และ ความดันต่ำสุดที่เหลือค้างไว้มีค่า 4.14 MPa การปล่อยก๊าซออกจากโพรงกำหนดให้มีอัตราการ ปล่อยเท่ากับ 1.38 MPa ต่อวัน สำหรับโพรงที่มีความดันของโพรงอยู่ระหว่าง 11.72 MPa และ 8.34 MPa และมีอัตราการปล่อยเท่ากับ 0.35 MPa ต่อวัน สำหรับโพรงที่มีความดันของโพรงต่ำกว่า 8.34 MPa วัฏจักรของการอัดและปล่อยอากาศจะกระทำ 8 ครั้งต่อปี โดยโพรงนี้จะมีอายุการใช้งานถึง 50 ปี

Crotogino (2001) ได้อธิบายโครงการสร้างโพรงสำหรับกักเก็บพลังงานในรูปแบบ อากาศภายใต้แรงดันเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าในประเทศเยอรมัน ซึ่งเป็นประเทศแรกที่มีการพัฒนา เทคโนโลยีนี้ โดยเริ่มต้นขึ้นในปี 1978 ภายใต้ชื่อว่า “The Huntorf Plant” ตั้งอยู่ในเมือง Huntorf มี กำลังการผลิตเท่ากับ 290 MW ใน 2 ชั่วโมง โพรงที่ใช้กักเก็บมีจำนวน 2 โพรง อยู่ที่ความลึก 650 เมตร สูง 150 เมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 เมตร และมีปริมาตรรวมกันเท่ากับ 310,000 ลูกบาศก์เมตร โพรงดังกล่าวอยู่ห่างกัน (Spacing) 220 เมตร วิธีการผันอากาศอัดให้เป็น กระแสไฟฟ้าจะเป็นแบบปริมาตรคงที่ การอัดอากาศสู่โพรงจะอัดด้วยอัตราประมาณ 108 kg/s ความดันอากาศภายในโพรงสูงสุดขณะกักเก็บอากาศเท่ากับ 2 MPa และปล่อยอากาศออกด้วย อัตรา 417 kg/s เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ความดันภายในโพรงจะลดต่ำลงมาเท่ากับ 0.1 MPa Arnold et al. (2002) ศึกษาทางด้านเศรษฐศาสตร์ในกรณีขยายขนาดโพรงกักเก็บก๊าซธรรมชาติในชั้น เกลือหิน ซึ่งตั้งอยู่ที่เมือง Bernburg ประเทศเยอรมัน ดำเนินการแล้วเสร็จในปี 1970 มีโพรงกัก เก็บทั้งหมด 27 โพรง โดยความลึกของโพรงอยู่ในช่วง 480 ถึง 680 เมตร สามารถบรรจุก๊าซ ธรรมชาติได้ตั้งแต่ 180×10^3 ถึง 520×10^3 ลูกบาศก์เมตร ความดันสูงสุดของก๊าซที่สามารถอัดสู่ โพรงกักเก็บได้มีค่าเท่ากับ 10 MPa และความดันต่ำสุดที่เหลือค้างไว้มีค่าตั้งแต่ 1.10 ถึง 2.10 MPa การอัดและปล่อยก๊าซเข้า-ออกโพรงกำหนดให้มีอัตราเท่ากับ 500×10^3 ลูกบาศก์เมตรต่อ ชั่วโมง และ $1,250 \times 10^3$ ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ

ข้อมูลดังกล่าวที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเชิงวิศวกรรมได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.2 ซึ่ง พบว่าความลึกของโพรงกักเก็บ (วัดถึงหลังคาโพรง) จะมีค่าตั้งแต่ 400 เมตร ถึง 2,042 เมตร สูง 43 ถึง 610 เมตร และมีเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 30 เมตร ถึง 122 เมตร

บทที่ 3

การจัดเตรียมตัวอย่างหิน

3.1 วัตถุประสงค์

เนื้อหาในบทนี้อธิบายขั้นตอนและวิธีการในการจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหินเพื่อใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ข้อกำหนดมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM) แหล่งที่มาของตัวอย่างเกลือหิน รวมถึงขนาด รูปร่าง และจำนวนของตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบ

3.2 แหล่งที่มาของตัวอย่างเกลือหิน

ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบได้รับความอนุเคราะห์มาจากหน่วยงานต่างๆ เช่น บริษัท เกลือพิมาย จำกัด จ.นครราชสีมา และ บริษัท เหมืองแร่โพแทชอาเซียน จำกัด อ.บำเหน็จณรงค์ จ.ชัยภูมิ โดยนำมาตัดให้ผิวเรียบในห้องปฏิบัติการที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อให้ได้รูปร่างและขนาดที่ต้องการตามข้อกำหนดของการทดสอบ

3.3 การจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหิน

การจัดเตรียมตัวอย่างเริ่มจากการคัดเลือกแท่งตัวอย่างเกลือหินที่มีผิวสมบูรณ์ที่สุด ใกล้เคียงกับข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM D4543 ซึ่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบจะต้องไม่มีรอยแตก ร้าว หรือรูพรุนที่เกิดจากการซึมน้ำหรือละลายบนแท่งตัวอย่าง การตัดแท่งตัวอย่างได้ใช้เลื่อยไฟฟ้า (รูปที่ 3.1) เพื่อให้ได้รูปร่างและขนาดที่ต้องการตามข้อกำหนดของการทดสอบ เมื่อตัดแท่งตัวอย่างเสร็จแล้วได้นำมาตรวจสอบความสมบูรณ์ แต่ละตัวอย่างได้ใช้พลาสติกหุ้มอีกชั้นหนึ่งเพื่อป้องกันความชื้นและการละลายก่อนเริ่มการทดสอบ ตัวอย่างเกลือหินที่นำมาตัดเรียบร้อยแล้วจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ยาว 25 เซนติเมตร ($L/D = 2.5$) โดยมีการเตรียมตัวอย่างทั้งสิ้น 10 ตัวอย่าง ความลึกและตำแหน่งของแท่งตัวอย่างเกลือหินที่ขุดเจาะมาจากชั้นเกลือหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยซึ่งได้ถูกบันทึก วิเคราะห์ และเสนออยู่ในรายงานเพื่อให้ทราบถึงความแปรปรวนทางด้านพฤติกรรมและคุณสมบัติในชั้นเกลือหินของประเทศไทย โดยใช้การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียว (Uniaxial creep test) ภายใต้การแปรผันอุณหภูมิและความเค้นแรงกดในแกนเดียว (σ_c) รวมไปถึงการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวแบบวัฏจักร



รูปที่ 3.1 แท่งเกลือหินที่ถูกตัดด้วยเลื่อยไฟฟ้าสำหรับการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียว

รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างบางส่วนของแท่งเกลือหินรูปทรงกระบอกที่จัดเตรียมไว้สำหรับใช้ทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวและทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวแบบวัฏจักร โดยกำหนดให้ความเค้นในแนวแกนคงที่ในช่วง 20% ถึง 50% ของกำลังรับแรงกดสูงสุด (σ_c) ของตัวอย่างเกลือหิน ผลที่ได้จากการทดสอบภายใต้ความเค้นที่ต่างกันจะนำมาใช้ในการสอบเทียบค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปร่างของเกลือหินที่ขึ้นกับเวลา (Time dependent deformation) ความเป็นพลาสติก (Plastic) ความเหนียว (Ductile) ความหนืดเชิงยืดหยุ่น (Visco-elastic) และ ความหนืดเชิงพลาสติก (Visco-plastic) เป็นต้น



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียว

ตารางที่ 3.1 แสดงขนาดและจำนวนของตัวอย่างเกลือหินที่จัดเตรียมตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM สำหรับการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวและการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวแบบวัฏจักร

ตารางที่ 3.1 ตำแหน่งความลึก ขนาด และคุณสมบัติของตัวอย่างเกลือหิน

Specimen (mm)	Depth (m)	Diameter (mm)	Length (mm)	weight (g)	Density (g/cc)
1	101.24-101.496	100.73	256.45	4,510	2.21
2	121.30-121.548	101.6	248.33	4,400	2.18
3	90.45-90.704	100.99	254.28	4,500	2.21
4	85.12-85.374	99.75	254.77	4,400	2.21
5	82.53-82.785	100.56	255.31	4,600	2.27
6	80.23-80.485	101.32	255.17	4,600	2.23
7	88.28-88.523	100.8	242.92	4,250	2.19
8	67.64-67.89	100.55	254	4,500	2.23
9	131.00-131.251	100.52	251.3	4,600	2.31
10	87.00-87.258	101.12	252.8	4,700	2.31

บทที่ 4

การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

เนื้อหาในบทนี้ได้อธิบายถึงขั้นตอน วิธีการ และผลการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียว (Uniaxial creep test) แบบให้แรงคงที่และการให้แรงแบบวัฏจักรภายใต้อุณหภูมิที่ 30°C และ 100°C ซึ่งในการทดสอบได้ทำการให้ความเค้นกดในแนวแกนคงที่กับตัวอย่างเกลือหินอยู่ในช่วง 20% ถึง 50% ของกำลังรับแรงกดสูงสุดของเกลือหิน (6.5 ถึง 16 MPa) ผลที่ได้สามารถนำมาวิเคราะห์การเปลี่ยนรูปร่างเชิงเวลาและผลกระทบของการให้แรงแบบวัฏจักรของเกลือหินภายใต้อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบโพรงกักเก็บก๊าซธรรมชาติ

4.1 วัตถุประสงค์ของการทดสอบ

เพื่อศึกษาการเปลี่ยนรูปร่างเชิงเวลาของเกลือหินภายใต้อุณหภูมิห้อง (30°C) และอุณหภูมิสูง (100°C) รวมไปถึงผลกระทบของการให้แรงแบบวัฏจักร

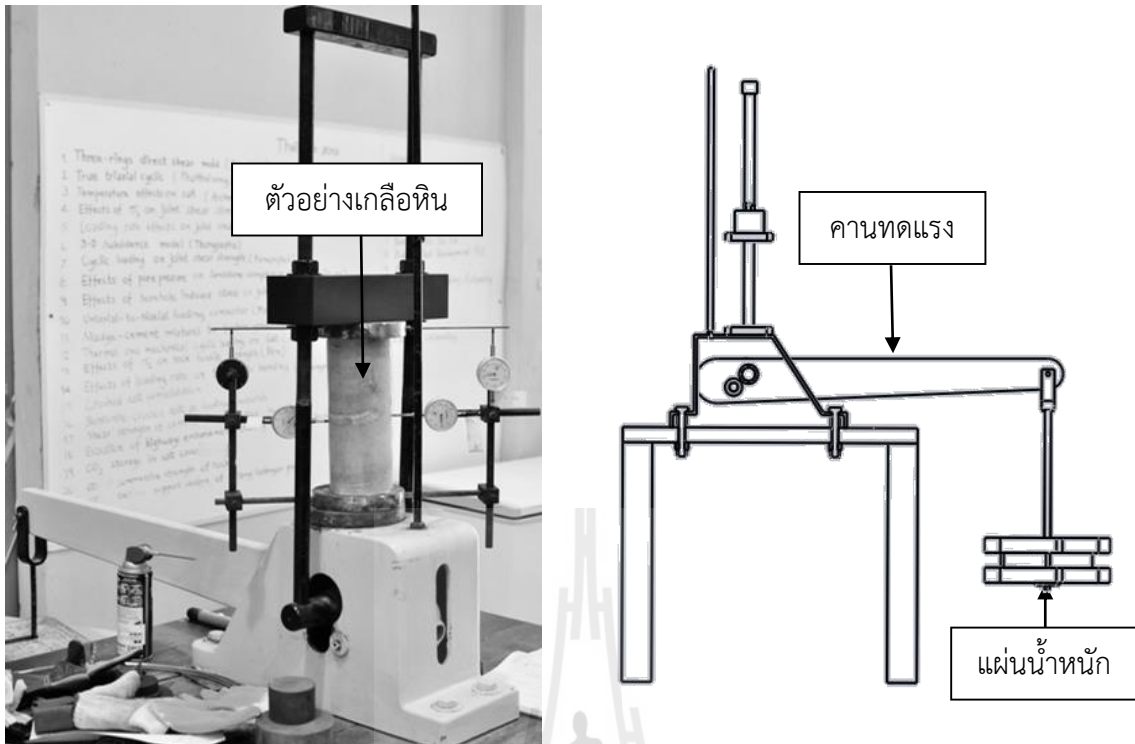
4.2 การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียว

ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้สำหรับทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวมีรูปร่าง กระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร และมีความยาว 250 มิลลิเมตร (มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (L/D ratio) ของตัวอย่างเกลือหินระหว่าง 2.0 ถึง 2.5) โดยมีระยะเวลาในการทดสอบ 21 วันต่อ 1 ตัวอย่าง การติดตั้งตัวอย่างเกลือหินเพื่อทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

4.2.1 การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวภายใต้อุณหภูมิห้อง (30°C)

1) นำตัวอย่างเกลือหินที่ชั่งน้ำหนัก วัดขนาด และจัดบันทึกเรียบร้อยแล้ว มาติดแผ่น Neoprene ทั้งหัวและท้ายของตัวอย่างเกลือหิน พร้อมพันแผ่นแรพพลาสติกกันความชื้น

2) ทำการติดตั้งตัวอย่างเกลือหิน บนเครื่องทดสอบการอัดตัวในแกนเดียว (Consolidation loading frame) พร้อมติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัวในแนวแกนและแนวด้านข้างตามรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างเกลือหินขณะทำการทดสอบภายในเครื่องทดสอบการเคลื่อนไหล
ในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือหินในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 30°C

3) ทำการใส่แผ่นเหล็กให้เท่ากับจำนวนที่ได้จากการสอบเทียบในแต่ละช่วงของความเค้นหรือแรงในแนวแกนที่ทำการแปรผันคือ 20% ถึง 50% ของกำลังรับแรงกดในแกนเดียว (σ_c) ของเกลือหิน (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 การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวภายใต้อุณหภูมิสูง (100°C)

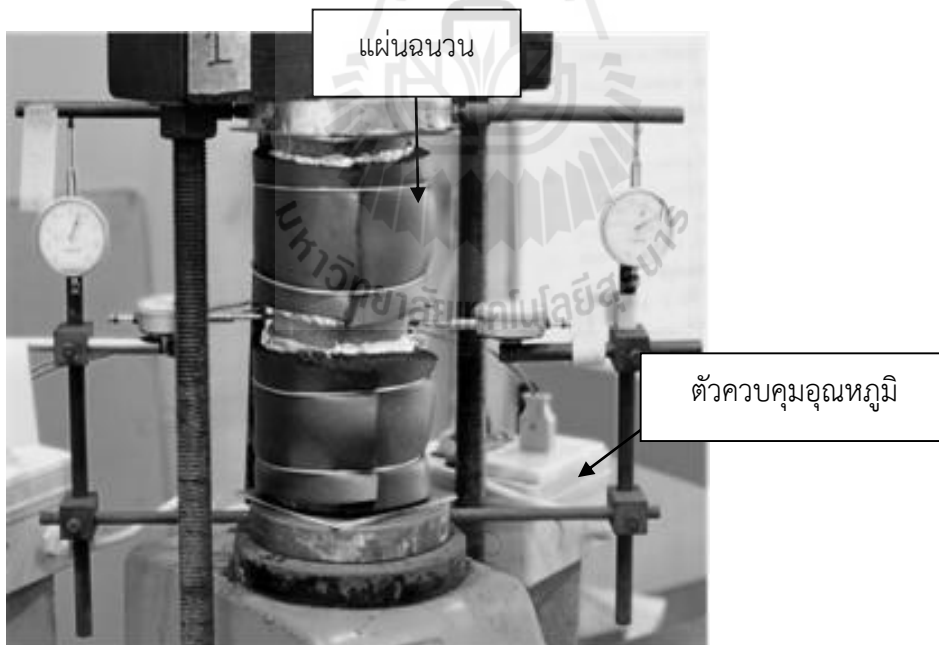
1) นำตัวอย่างเกลือหินที่ซังน้ำหนัก วัดขนาด และจดบันทึกเรียบร้อยแล้ว มาติดแผ่น Neoprene ทั้งหัวและท้ายของตัวอย่างเกลือหิน พร้อมพันแผ่นแรพพลาสติกกันความชื้น (ลักษณะเดียวกันกับการทดสอบที่อุณหภูมิต่ำ)

2) ทำการติดตั้งเทปให้ความร้อน (Heating tape) โดยการพันรอบตัวอย่างหินพร้อมติดตั้งเครื่องควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้ได้อุณหภูมิที่ต้องการและพันฉนวนกันความร้อนรอบตัวอย่าง การติดตั้งตัวอย่างเกลือหินและมาตรวัดการเคลื่อนตัวได้ทำในลักษณะเดียวกับการทดสอบที่ อุณหภูมิห้อง ลักษณะการติดตั้งตัวอย่างเกลือหินบนเครื่องอัดตัวในแกนเดียวภายใต้อุณหภูมิสูง พร้อมระบบให้ความร้อนและฉนวนพันรอบตัวอย่างได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.2

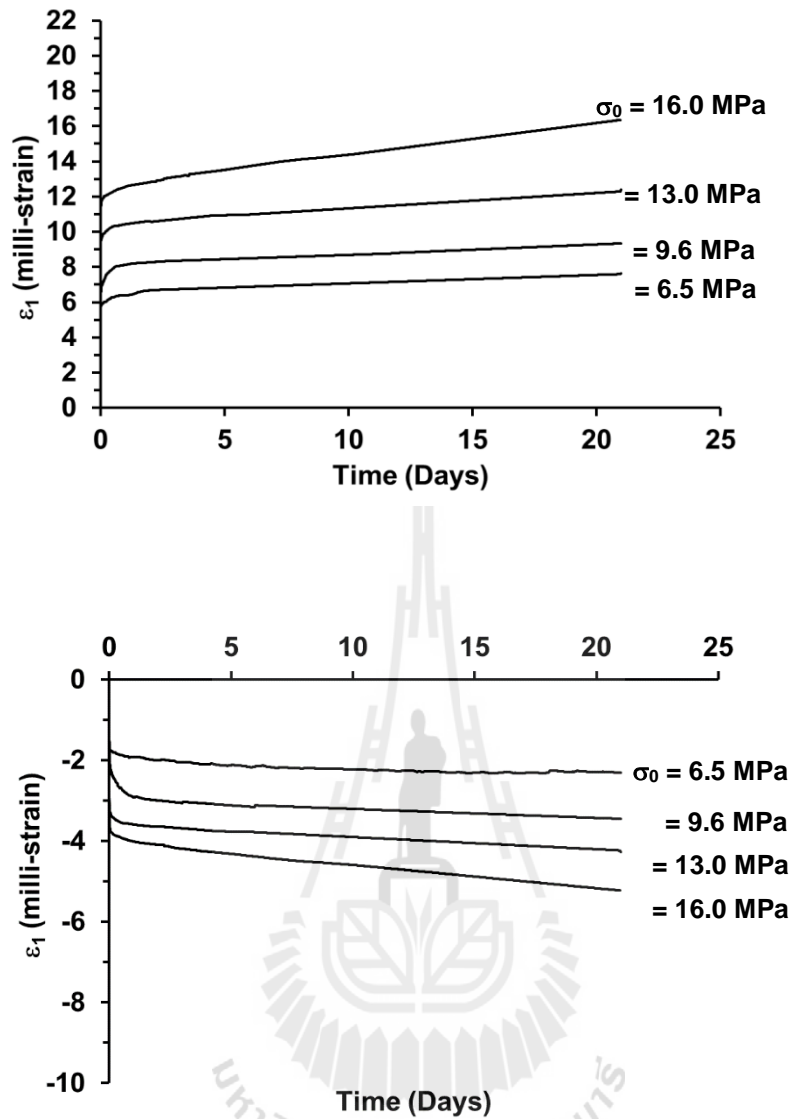
3) เมื่อทำการติดตั้งตัวอย่างเกลือหินและมาตรวัดการเคลื่อนตัวเสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงทำการเปิดระบบให้ความร้อนจากนั้นปล่อยให้เย็นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนทำการทดสอบ

4) เมื่อครบเวลาที่กำหนดจึงเริ่มทยอยใส่แผ่นเหล็กจนครบตามจำนวน ซึ่งระหว่างใส่ แผ่นเหล็กแต่ละแผ่นต้องมีการอ่านบันทึกค่าการเคลื่อนตัวพร้อมจับเวลา สำหรับการอ่านและ บันทึกค่ากระทำเช่นเดียวกับการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง

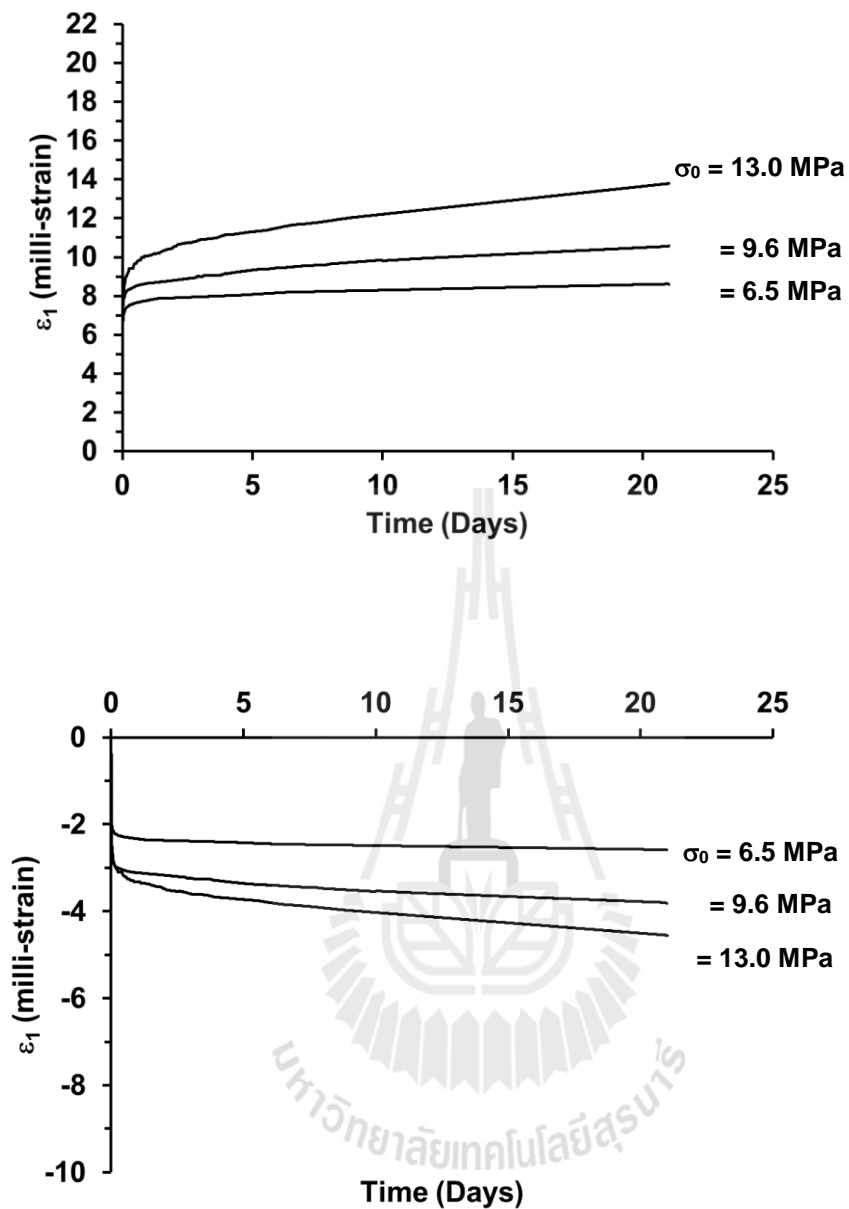
ผลการทดสอบสามารถแสดงอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวใน แนวแกนและในแนวรัศมีที่ขึ้นกับเวลาที่อุณหภูมิ 30°C และ 100°C ตามลำดับ ภายใต้ความเค้น กดในแกนเดียวที่ 6.5, 9.6, 13.0 และ 16 MPa หรือที่ 20%, 30%, 40% และ 50% ของกำลังรับ แรงกดสูงสุดในแกนเดียว (σ_c) ของตัวอย่างเกลือหินดังแสดงในรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างเกลือหินขณะทำการทดสอบภายในเครื่องทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียว ของตัวอย่างเกลือหินในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 100°C



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



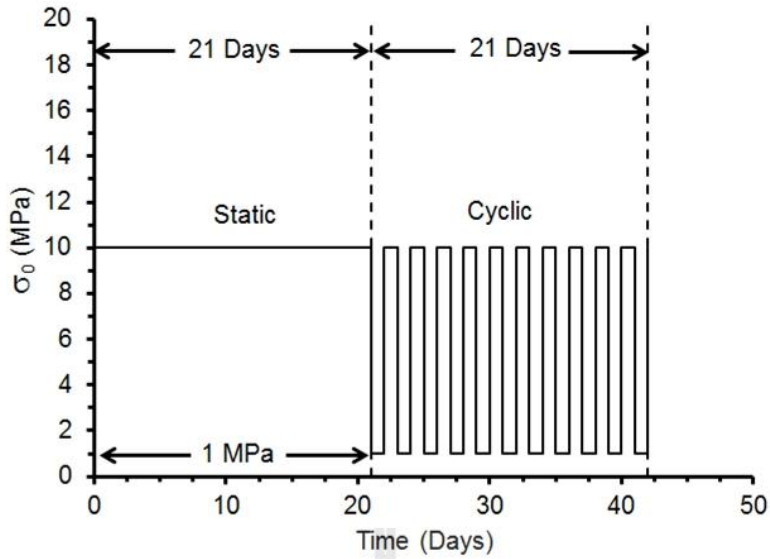
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างเกลือหินในแนวแกนและในแนวรัศมีเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิ 100°C ภายใต้ความเค้นกดในแกนเดียวที่ 6.5, 9.6 และ 13.0 MPa หรือคิดเป็น 20%, 30% และ 40% ของกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว (σ_c) ของเกลือหิน

4.3 การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวแบบวัฏจักร

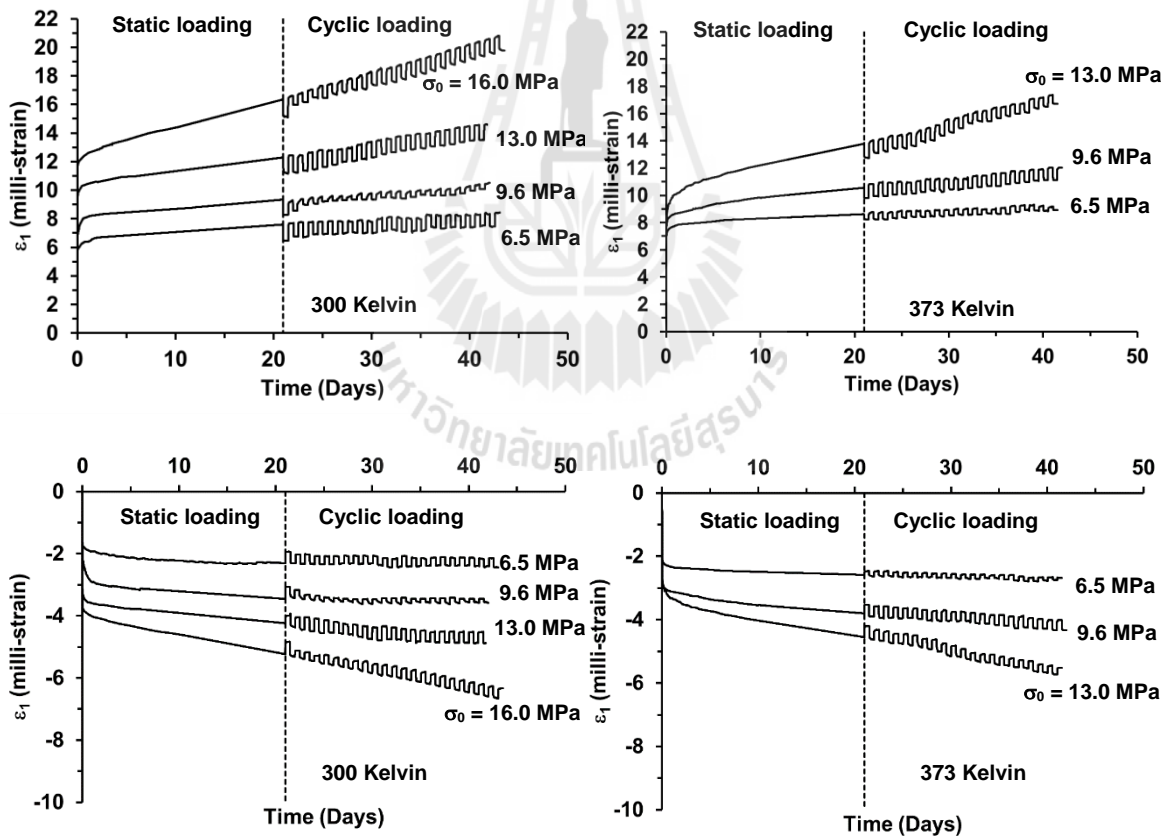
ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้สำหรับทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวแบบวัฏจักรได้ใช้ตัวอย่างเดียวกันกับการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียว โดยทดสอบต่อเนื่องจาก 21 วัน ไปจนถึง 42 วัน ซึ่งการทดสอบกระทำโดยลดความเค้นในแนวแกนให้เหลือเพียง 1 MPa ของทุกๆ การผันแปรความเค้นโดยใช้ระยะเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นจึงให้แรงเพื่อกลับไปสู่สถานะของความเค้นเริ่มต้นของแต่ละกรณีอีก 12 ชั่วโมง จนครบ 21 วัน (รูปที่ 4.5) โดยทำการทดสอบทั้งอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูง ผลการทดสอบการให้แรงแบบวัฏจักรซึ่งอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดในแนวแกน (ϵ_1) และเวลาของทั้งสองอุณหภูมิได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.6

4.4 การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวแบบให้แรงสลับอุณหภูมิ

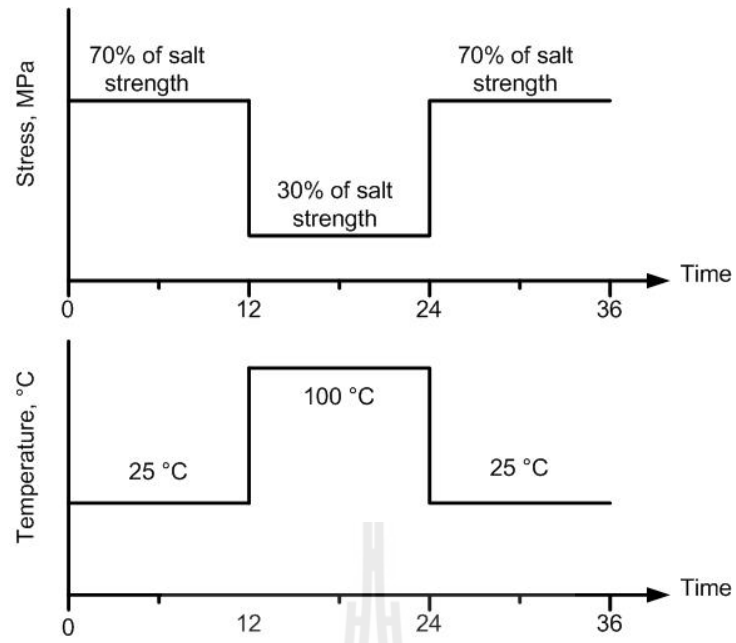
การทดสอบที่สภาวะนี้เกิดขึ้นเนื่องจากในโพรงเกลือที่สภาวะกักเก็บเมื่อทำการปล่อยก๊าซธรรมชาติจะทำให้ความเค้นที่อยู่รอบโพรงเกลือมีค่าสูงในขณะที่อุณหภูมิจะมีค่าลดลงในทางตรงกันข้ามเมื่ออัดก๊าซธรรมชาติเข้าไปในโพรงกักเก็บ ความเค้นที่อยู่รอบโพรงเกลือจะมีค่าต่ำในขณะที่อุณหภูมิจะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น การทดสอบในห้องปฏิบัติการจึงเริ่มต้นด้วยการให้แรงคงที่ภายใต้ความเค้นกดในแกนเดียวที่ 6.5, 9.6, 13.0 และ 16 MPa เป็นระยะเวลา 21 วัน จากนั้นจึงปรับอุณหภูมิไปที่ 100°C และลดความเค้นในแนวแกนให้เหลือเพียง 1 MPa ของทุกๆ การผันแปรความเค้นโดยใช้ระยะเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นจึงปิดระบบให้ความร้อนและให้แรงเพื่อกลับไปสู่สถานะของความเค้นเริ่มต้นของแต่ละกรณีอีก 12 ชั่วโมง จนครบ 42 วัน รูปที่ 4.7 แสดงแผนภูมิการให้แรงสลับอุณหภูมิ ผลการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวแบบให้แรงสลับอุณหภูมิซึ่งอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดในแนวแกน (ϵ_1) และเวลาของทั้งสองอุณหภูมิได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.8



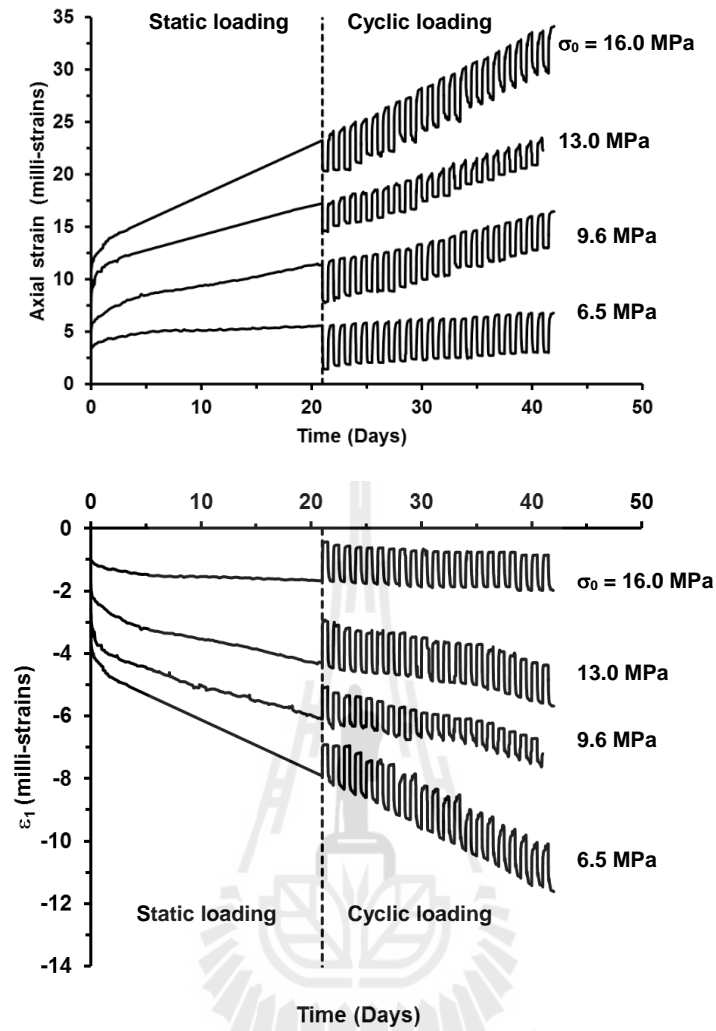
รูปที่ 4.5 ลักษณะการให้แรงกับตัวอย่างแบบวัฏจักร 21 วัน



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวแกนและความเครียดในแนวระนาบเชิงเวลา และสถานะการให้แรงแบบวัฏจักรโดยผันแปรความเค้นในแนวแกนที่ 6.5, 9.6, 13 และ 16 MPa ภายใต้อุณหภูมิที่ 30°C และ 100°C (300 และ 373°K)



รูปที่ 4.7 แผนภูมิแสดงลักษณะการให้แรงสลับอุณหภูมิโดยที่ความเค้นสูงจะมีอุณหภูมิต่ำ (30°C) และที่ความเค้นต่ำจะมีอุณหภูมิสูง (100°C)



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวแกนและความเครียดในแนวระนาบเชิงเวลาและสภาวะการให้แรงสลับอุณหภูมิโดยผันแปรความเค้นในแนวแกนที่ 6.5, 9.6, 13 และ 16 MPa ภายใต้อุณหภูมิที่ 30°C และ 100°C (300 และ 373°K)

4.5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวทำให้สามารถสังเกตเห็นถึงพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเชิงเวลาหรือความเครียดที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างเกลือหิน ทั้งความเครียดในแนวแกนและในแนวรัศมีที่มีการผันแปรอุณหภูมิตั้งแต่ 30°C ถึง 100°C พฤติกรรมการเคลื่อนไหลเชิงเวลาของทุกตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสำหรับงานวิจัยนี้สามารถสังเกตเห็นการเคลื่อนไหลในช่วงที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดเชิงเวลา (Transient creep phase) และช่วงที่มีการเปลี่ยนอัตราความเครียดในช่วงเวลาดังที่ (Steady-state creep phase) อย่างชัดเจนที่ความเค้นในแนวแกนระดับต่างๆ ผลการทดสอบระบุว่าค่าการคืบหรือการเคลื่อนไหลในแนวแกนและในแนวรัศมีของตัวอย่างเกลือหินที่อุณหภูมิห้อง (30°C) มีค่าต่ำกว่าที่อุณหภูมิสูง (100°C) ในแต่ละระดับความเค้นดังแสดงในรูปที่ 4.6

ผลการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียว ค่าความเครียดที่เกิดจากการยุบตัวหรือการเคลื่อนไหลของตัวอย่างเกลือหินที่อุณหภูมิห้องจะมีค่าเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 16% และมีค่าเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 18% ที่อุณหภูมิ 100°C เมื่อตัวอย่างเกลือหินมีการให้แรงแบบวัฏจักร ผลการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวแบบให้แรงสลับอุณหภูมิจะให้ค่าความเครียดในแนวแกนและความเครียดในแนวระนาบเชิงเวลาสูงกว่าการทดสอบอื่นๆ และเมื่อตัวอย่างเกลือหินมีการให้แรงแบบวัฏจักรค่าความเครียดที่เกิดจากการยุบตัวหรือการเคลื่อนไหลของตัวอย่างเกลือหินจะมีค่าเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 19.5%



บทที่ 5

การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอการสอบเทียบตัวแปรเชิงเวลาจากการทดสอบการเคลื่อนไหล โดยให้ความเค้นคงในแนวแกนคงที่ที่ระดับต่างๆ ซึ่งมีการผันแปรอุณหภูมิตั้งแต่ 30°C ถึง 100°C ผลที่ได้คือ สมการที่ใช้ในการสอบเทียบค่าตัวแปรเชิงเวลาที่สร้างขึ้นโดยอาศัยค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกนและในแนวรัศมีเชิงเวลา ซึ่งทั้งสองค่าได้นำมาคำนวณให้อยู่ในรูปของของความเครียดเฉือน (γ_{oct}) ที่สัมพันธ์กับค่าความเค้นในแนวแกนโดยพิจารณาในรูปของความเค้นเฉือนรวมทางด้าน (τ_{oct}) นอกจากนี้ยังได้นำค่าสัมประสิทธิ์เฉือน (G) และอุณหภูมิ (T) มาพิจารณาร่วมด้วย

5.1 สมการแบบเอ็กโพเนนเชียล (Exponential)

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

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

โดย ε คือ ค่าความเครียดภายใต้แรงกดคงที่ทั้งหมด ε_c^e คือ ค่าความเครียดเชิงยืดหยุ่นภายใต้แรงกดคงที่และ ε_c^c คือ ค่าความเครียดเชิงเวลาภายใต้แรงกดคงที่ ซึ่งค่าความเครียดเชิงยืดหยุ่นภายใต้แรงกดสามารถคำนวณได้จากค่าความเค้นกดต่อค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นดังสมการ (Jaeger et al, 2007)

$$\varepsilon_c^e = \frac{\sigma_c}{E} \quad (5.2)$$

โดย σ คือ ค่าความเค้นคงที่ ε_c^c คือ ค่าความเครียดเชิงความยืดหยุ่นภายใต้แรงกดคงที่ และ E คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นภายใต้แรงกด จากสมการของ Exponential laws ซึ่งประกอบด้วย ความเครียด ความเค้น อุณหภูมิ เวลาที่ผันแปร และค่าคงที่ต่างๆ สามารถอธิบายพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในเชิงเวลาของหินในแต่ละช่วงเวลาหรือช่วงการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของหิน (Senseny, 1983; Yang et al., 1999) ดังสมการ

$$\varepsilon_c^c = \alpha \cdot \sigma_c^\beta \cdot t^k \cdot \exp\left(\frac{-\lambda}{T}\right) \quad (5.3)$$

อัตราความเครียดเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (Transient phase) เมื่อ ε^c คือ ความเครียด σ คือ ความเค้นในแนวแกน t คือ เวลา T คือ อุณหภูมิ (องศาเคลวิน) และ $K', \beta, \gamma, \alpha, A', B, C, B', m, n, \lambda$ คือ ค่าคงที่ (Creep parameter) นำสมการ (5.2) ถึงสมการ (5.3) มาแทนค่าในสมการ (5.1) จะได้ความสัมพันธ์รวมดังสมการ

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E} + \alpha \cdot \sigma_c^\beta \cdot t^\kappa \cdot \exp\left(\frac{-\lambda}{T}\right) \quad (5.4)$$

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

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

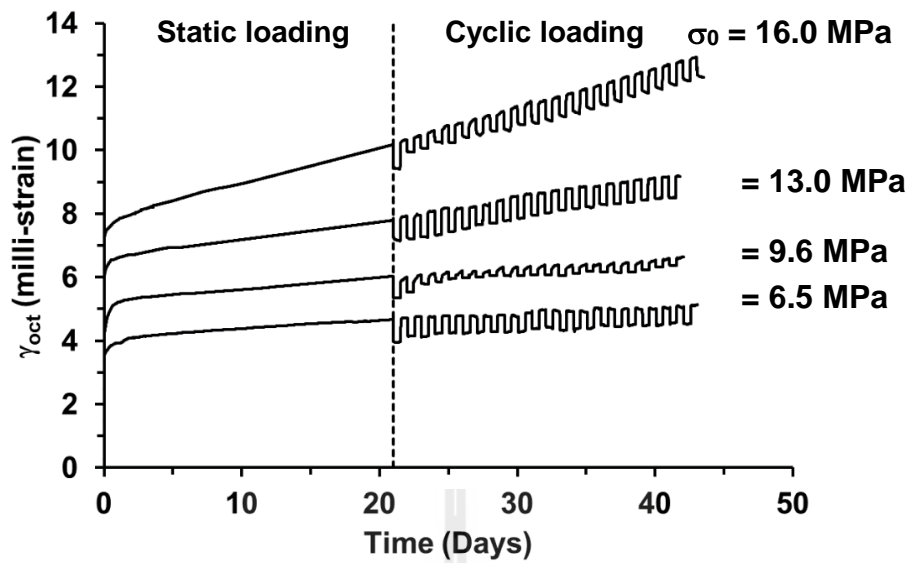
จากสมการ (5.5) สามารถคำนวณผลการทดสอบให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเฉือน (γ_{oct}) กับเวลาซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 5.1 ถึงรูปที่ 5.3 จากความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเฉือนรวมหกด้าน (τ_{oct}) และความเครียดเฉือนดังกล่าวได้ถูกดัดแปลงเพื่อให้เข้ากับสมการของ Exponential laws ผลที่ได้คือสมการสำหรับคำนวณพฤติกรรมของหินที่อัตราความเครียดหรือการเคลื่อนไหลเปลี่ยนแปลงเชิงเวลาดังสมการ

$$\gamma_{oct} = \frac{\tau_{oct}}{2G} + \alpha \cdot \tau_{oct}^\beta \cdot t^\kappa \cdot \exp(-\lambda/T) \quad (5.6)$$

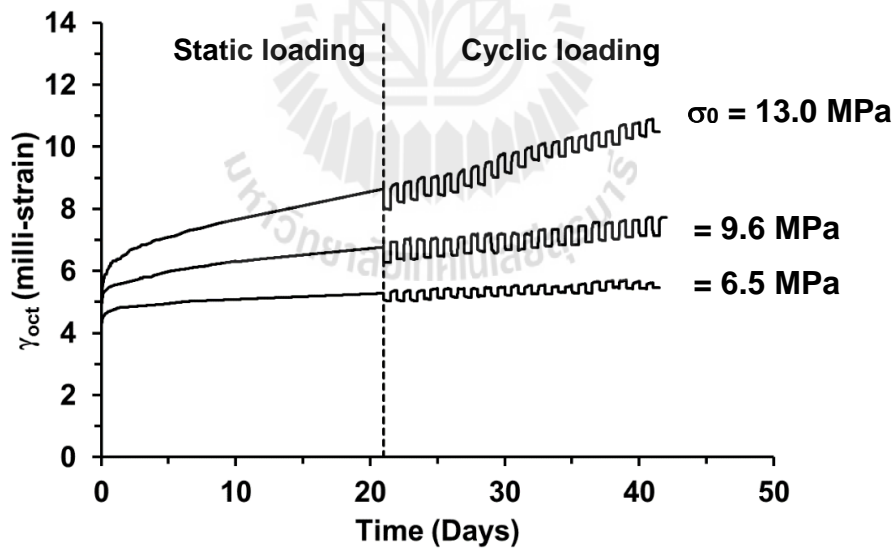
โดยที่ γ_{oct} คือ ความเครียดเฉือน τ_{oct} คือ ความเค้นเฉือนรวมหกด้าน t คือ เวลา T คือ อุณหภูมิ (องศาเคลวิน) α, β, κ และ λ คือ ค่าคงที่หรือตัวแปรที่ต้องการสอบเทียบ และ G คือ ค่าสัมประสิทธิ์เฉือน (Shear modulus) ที่อยู่ในเทอมของอุณหภูมิดังสมการ (Sriapai et al., 2012)

$$G = AT + B \quad (5.7)$$

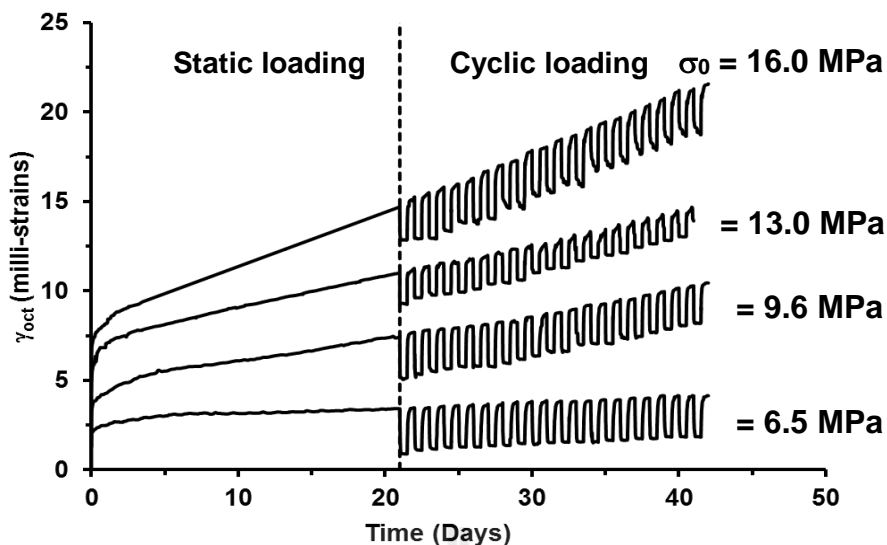
เมื่อ A เท่ากับ -21.5×10^{-3} , B เท่ากับ 16.20, T เท่ากับอุณหภูมิในหน่วยองศาเคลวิน และ G คือ ค่าสัมประสิทธิ์เฉือนในหน่วย GPa



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเฉือนกับเวลาที่สภาวะความเค้นเฉือนหกด้านต่างกันภายใต้อุณหภูมิห้อง (30°C)



รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเฉือนกับเวลาที่สภาวะความเค้นเฉือนหกด้านต่างกันภายใต้อุณหภูมิสูง (100°C)



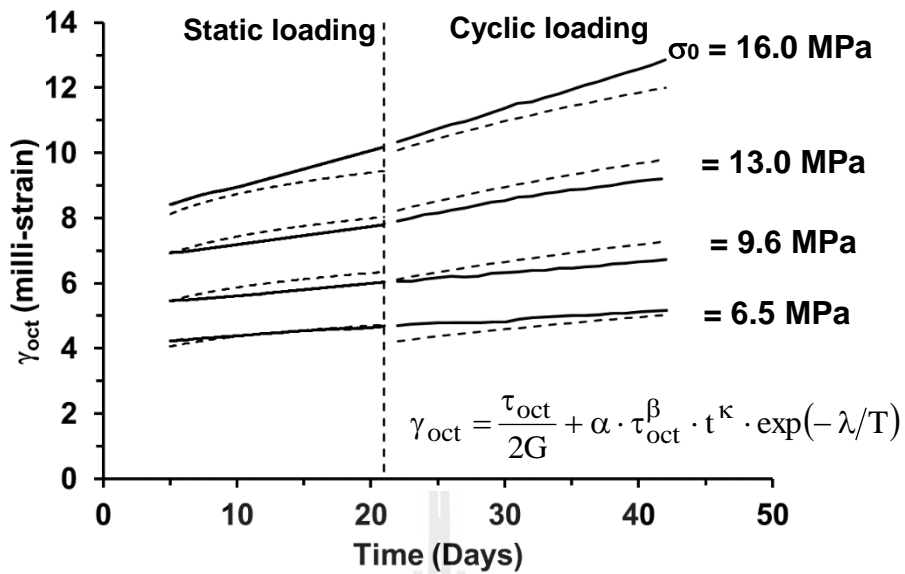
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเฉือนกับเวลาที่สภาวะความเค้นเฉือนหกด้านต่างกันภายใต้สภาวะการให้แรงสลับอุณหภูมิ

5.2 การสอบเทียบตัวแปรเชิงเวลาของเกลือหิน

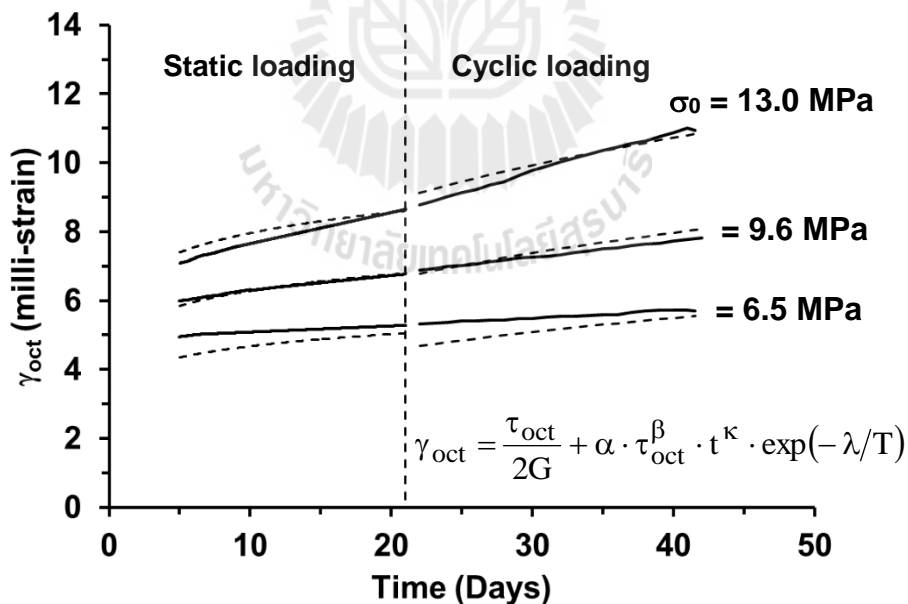
ผลที่ได้จากการทดสอบการเปลี่ยนรูปร่างเชิงเวลาหรือการเคลื่อนไหลในแกนเดียว ภายใต้ความเค้นกดในแกนเดียวที่ 6.5, 9.6, 13.0 และ 16.0 MPa เมื่อนำมาสอบเทียบค่าตัวแปรที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในเชิงเวลาของหิน เพื่อนำค่าตัวแปรไปใช้ในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยการสอบเทียบค่าตัวแปรได้ใช้โปรแกรมเชิงสถิติ (SPSS) (Wendai, L., 2000) สำหรับผลการทดสอบการให้แรงสลับอุณหภูมิจะใช้ค่าสูงสุดในแต่ละวัฏจักร มาสอบเทียบตัวแปรซึ่งเป็นจุดที่ทำให้เกิดอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดสูงสุด ผลการทดสอบเทียบค่าตัวแปรที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในเชิงเวลาของเกลือหินได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.1 ส่วนรูปที่ 5.4 ถึงรูปที่ 5.6 แสดงผลการคาดคะเนโดยใช้โปรแกรม SPSS เทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 5.1 ผลการสอบเทียบค่าตัวแปรด้วยโปรแกรม SPSS

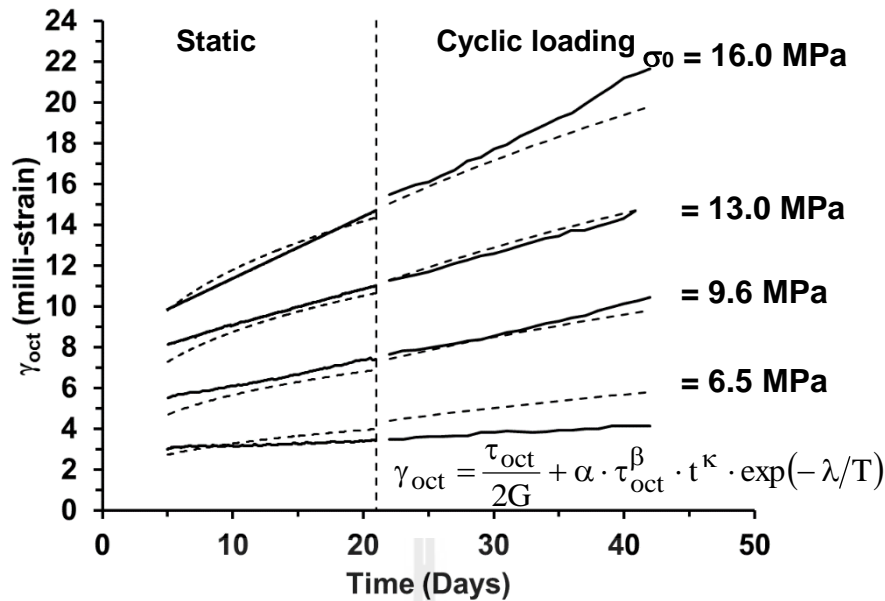
Creep parameters	Static loading	Cyclic loading	Both cyclic stress and temperature
α	2.010	1.026	0.659
β	0.781	0.981	1.383
κ	0.105	0.269	0.426
λ	105.066	158.387	294.706
R^2	0.971	0.975	0.990



รูปที่ 5.4 การสอบเทียบค่าตัวแปรของพฤติกรรมกรเปลี่ยนรูปร่างเชิงเวลาของตัวอย่างเกลือหิน ที่อุณหภูมิ 30°C ในช่วงที่อัตราความเครียดหรือการเคลื่อนไหลเปลี่ยนแปลงคงที่ (Steady-state phase) ทั้งแบบให้แรงคงที่ (Static loading) และการให้แรงแบบวัฏจักร (Cyclic loading) โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.971 และ 0.975 ตามลำดับ



รูปที่ 5.5 การสอบเทียบค่าตัวแปรของพฤติกรรมกรเปลี่ยนรูปร่างเชิงเวลาของตัวอย่างเกลือหิน ที่อุณหภูมิ 100°C ในช่วงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดหรือการเคลื่อนไหลต่อ ช่วงเวลาคงที่ (Steady-state phase) ทั้งแบบให้แรงคงที่และการให้แรงแบบวัฏจักร โดยมี ค่า R^2 เท่ากับ 0.971 และ 0.975 ตามลำดับ

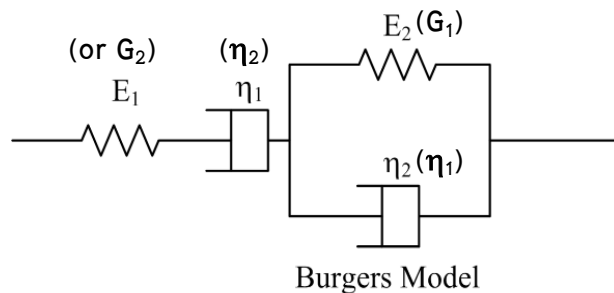


รูปที่ 5.6 การสอบเทียบค่าตัวแปรของพฤติกรรมกรเปลี่ยนรูปร่างเชิงเวลาของตัวอย่างเกลือหิน ในช่วงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดหรือการเคลื่อนไหลต่อช่วงเวลาดังที่ (Steady-state phase) ในกรณีให้แรงสลับอุณหภูมิโดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.990

การสอบเทียบตัวแปรอีกรูปแบบหนึ่งโดยใช้สมการของ Burgers ซึ่งสมการนี้สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมของเกลือหินเชิงเวลาได้โดยมีตัวแปรความหนืดเชิงยืดหยุ่น (Visco-elastic: E_2 และ η_2) และเชิงพลาสติก (Visco-plastic: η_1) ของเกลือหิน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เน้นการศึกษาอัตราการเพิ่มขึ้นของความเครียดของตัวอย่างเกลือหินอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความเครียดที่สภาวะมีแรงกระทำคงที่ หรือการเปลี่ยนแปลงความเค้นรอบโพรงกักเก็บที่ส่งผลต่อความมีเสถียรภาพของโพรงกักเก็บในระยะยาว โดยเฉพาะอย่างยิ่งโพรงเกลือที่ใช้สำหรับกักเก็บก๊าซธรรมชาติที่มีทั้งสภาวะความดันในโพรงคงที่ในช่วงที่มีระดับกักเก็บก๊าซธรรมชาติสูงสุดและมีการเปลี่ยนแปลงความดันในโพรงตลอดเวลาหรือขึ้นกับอัตราการปล่อยก๊าซออกมาใช้งาน ดังนั้น ตัวแปรสำคัญที่ใช้ควบคุมอัตราการเพิ่มขึ้นของความเครียด คือตัวแปรความหนืดเชิงพลาสติก สำหรับการสอบเทียบค่าตัวแปรดังกล่าวได้ใช้สมการของ Burgers ดังนี้ (Goodman, 1989)

$$\varepsilon(t) = \frac{2\sigma_1}{9K} + \frac{\sigma_1}{3G_2} + \frac{\sigma_1}{3G_1} - \frac{\sigma_1}{3G_1} e^{-\left(\frac{G_1 t}{\eta_1}\right)} + \frac{\sigma_1}{3\eta_2} \cdot t \quad (5.8)$$

โดยที่ G_1 และ G_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์เฉือน K คือ ค่าค่าสัมประสิทธิ์ก้อน (Bulk modulus) และ η_1 และ η_2 คือ ความหนืดเชิงยืดหยุ่นและเชิงพลาสติก (ในสมการของ Goodman, 1989 ให้ η_1 คือ ความหนืดเชิงยืดหยุ่น และ η_2 คือ ความหนืดเชิงพลาสติก) รูปที่ 5.7 แสดงองค์ประกอบแบบจำลองของ Burgers ซึ่งประกอบด้วยค่าคงที่ E_1 , E_2 , η_1 และ η_2



รูปที่ 5.7 องค์ประกอบแบบจำลองของ Burgers ในวงเล็บแสดงค่าตัวแปรเปรียบเทียบกับ Goodman (1989)

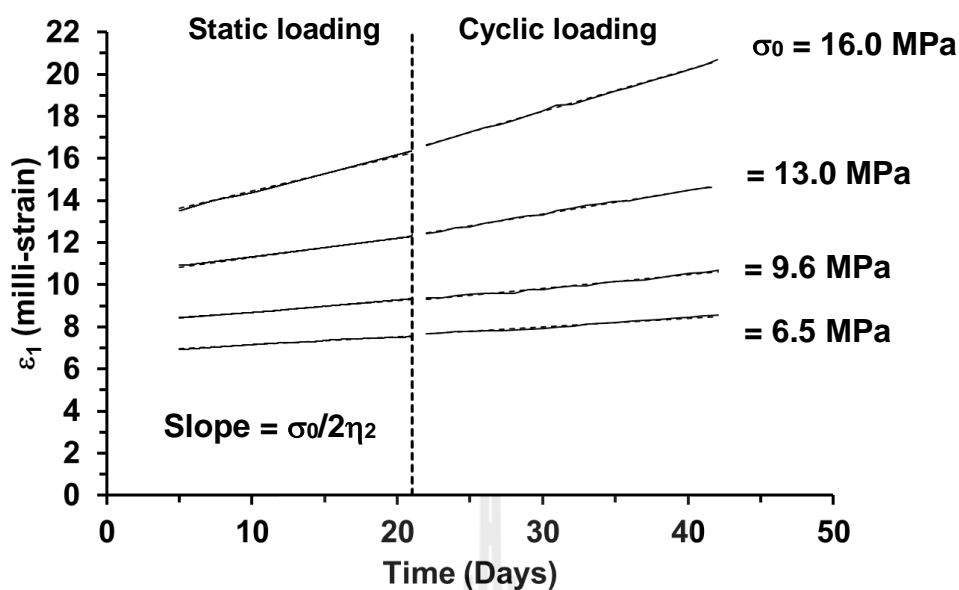
จากสมการของ Goodman สามารถหาค่าความชันของกราฟได้ดังสมการ

$$\frac{\sigma}{3\eta_2} \quad (5.9)$$

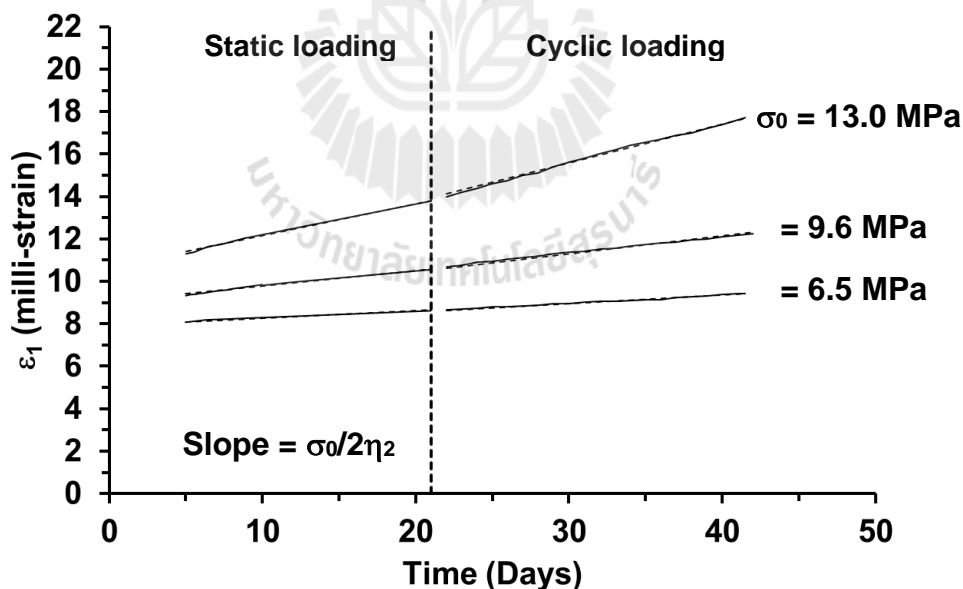
ผลการทดสอบเทียบค่าความหนืดเชิงพลาสติกที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดของเกลือหินได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.2 ส่วนรูปที่ 5.8 ถึงรูปที่ 5.10 แสดงผลการคำนวณโดยใช้สมการที่ (5.9) ผลที่ได้ระบุว่าที่สภาวะการให้แรงสลับอุณหภูมินั้นจะให้ค่าความหนืดเชิงพลาสติกต่ำที่สุด ผลลัพธ์นี้จะนำไปใช้ในการจำลองด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ (FLAC 4.0) เพื่อประเมินอัตราการยุบตัวของโพรงกักเก็บในชั้นเกลือหินซึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 6

ตารางที่ 5.2 ผลการสอบเทียบค่าตัวแปรด้วยสมการของ Goodman (1989)

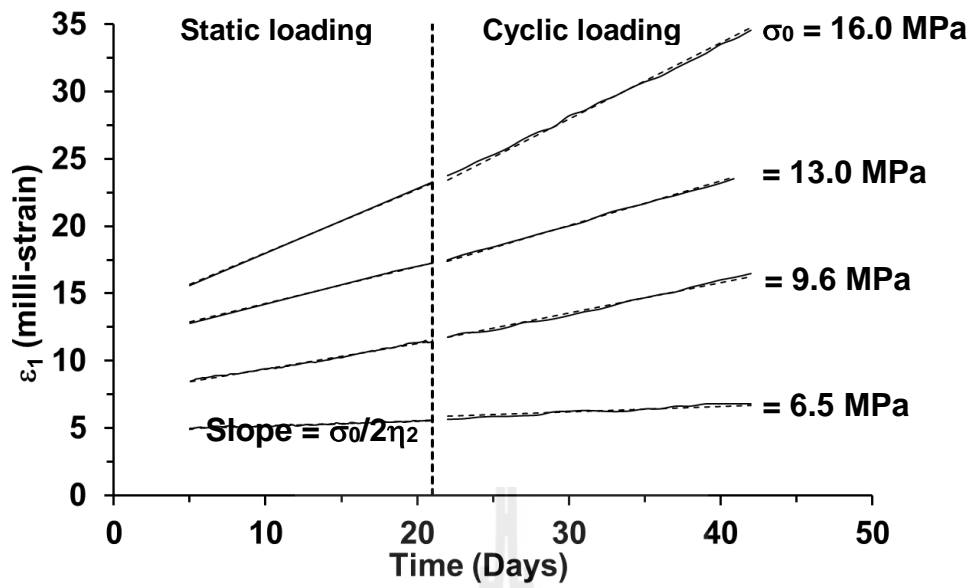
สภาวะการให้แรง	อุณหภูมิ (Kelvin)	ค่าสัมประสิทธิ์เฉือน, G_1 (GPa)	ค่าสัมประสิทธิ์เฉือน, G_2 (GPa)	ค่าความหนืดเชิงพลาสติก, η_1 (GPa.day)	ค่าความหนืดเชิงพลาสติก, η_2 (GPa.day)
Static loading	300	1.606	0.411	1.881	48.64
	373	1.110	0.423	0.647	44.15
Cyclic loading	300	1.595	0.410	2.131	41.92
	373	1.081	0.448	0.556	36.60
Both cyclic stress and temperature	330↔ 373	0.484	1.458	0.470	22.63



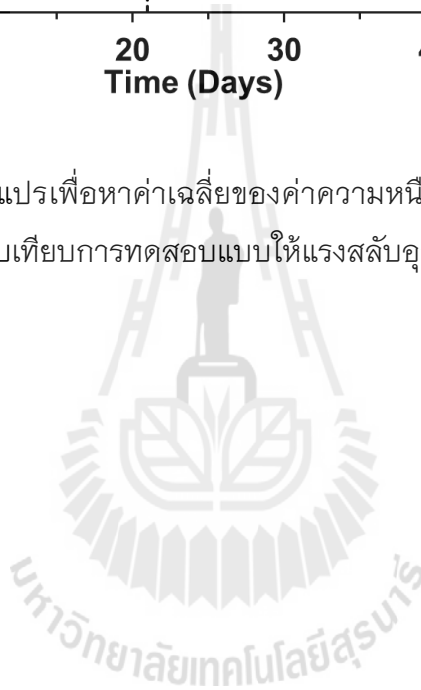
รูปที่ 5.8 การสอบเทียบค่าตัวแปรเพื่อหาค่าเฉลี่ยของค่าความหนืดเชิงพลาสติกโดยใช้สมการที่ (5.9) สำหรับสอบเทียบการทดสอบทั้งแบบให้แรงคงที่และการให้แรงแบบวัฏจักรภายใต้ อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 5.9 การสอบเทียบค่าตัวแปรเพื่อหาค่าเฉลี่ยของค่าความหนืดเชิงพลาสติกโดยใช้สมการที่ (5.9) สำหรับสอบเทียบการทดสอบทั้งแบบให้แรงคงที่และการให้แรงแบบวัฏจักรภายใต้ อุณหภูมิ 100°C



รูปที่ 5.10 การสอบเทียบค่าตัวแปรเพื่อหาค่าเฉลี่ยของค่าความหนืดเชิงพลาสติกโดยใช้สมการที่ (5.9) สำหรับการสอบเทียบการทดสอบแบบให้แรงสลับอุณหภูมิ



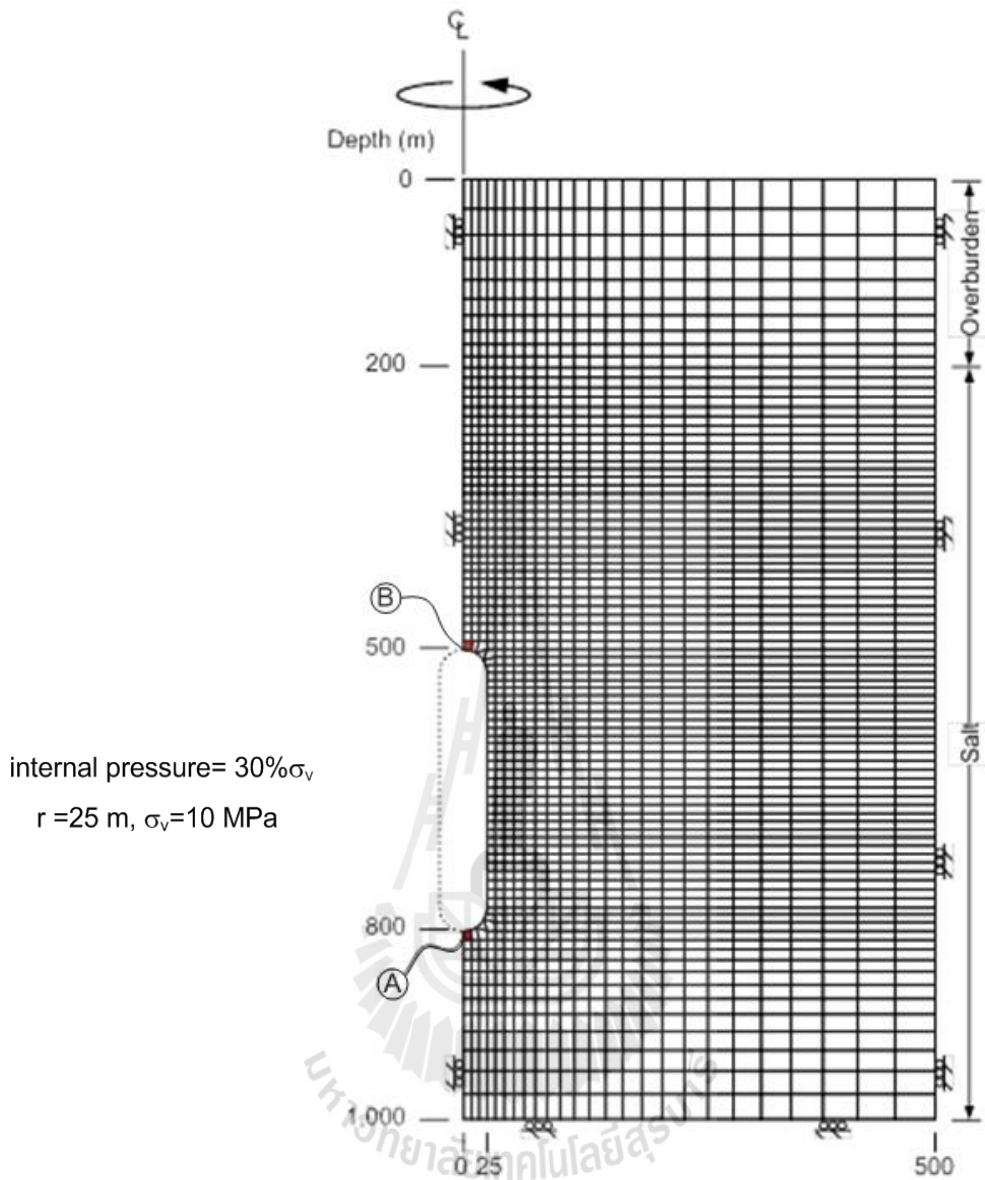
บทที่ 6

การคำนวณด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์

วัตถุประสงค์ของการศึกษาด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ เพื่อสาธิตการประเมินการยุบตัวของโพรงเกลือที่มีการใช้ค่าตัวแปรที่ได้จากผลการทดสอบในที่นี่คือ การทดสอบการให้แรงแบบคงที่ การทดสอบการให้แรงแบบวัฏจักร และการทดสอบการให้แรงสลับอุณหภูมิ โดยอาศัยค่าตัวแปรที่ได้จากการสอบเทียบด้วยสมการของ Goodman เพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างของการยุบตัวของโพรงเกลือเมื่อใช้ตัวแปรที่ต่างกัน

6.1 แบบจำลองโปรแกรมคอมพิวเตอร์

งานวิจัยนี้ได้้นำโปรแกรม FLAC 4.0 (Finite difference code) มาใช้ในการวิเคราะห์การยุบตัวของโพรงเกลือดังรูปที่ 6.1 โดยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์กำหนดให้การคำนวณเป็นแบบแกนสมมาตร (Axis symmetry) ที่กำหนดให้อุณหภูมิคงที่ทั้งแบบจำลอง (Isothermal model) ซึ่งรูปแบบสมการที่ใช้ในการคำนวณการยุบตัวเป็นสมการของ Burger โดยรูปร่างและลักษณะทางธรณีวิทยาที่ใช้ในการจำลองโพรงเกลือได้ใช้ข้อมูลจริงจากการออกแบบโพรงที่อำเภอโกสุมพิสัย จังหวัดมหาสารคาม จากรายงานโครงการวิจัยเรื่องการประเมินศักยภาพทางด้านกลศาสตร์ของชั้นเกลือหินเพื่อใช้เก็บพลังงานไฟฟ้าในรูปอากาศภายใต้แรงดัน (กิตติเทพ, 2551) โพรงเกลือมีรูปร่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 เมตร สูง 300 เมตร และมีความลึกของหลังกาโพรง 500 เมตร ได้ใช้ค่าปัจจัยหรือค่าตัวแปรจากการสอบเทียบด้วยสมการของ Goodman ที่ได้ในบทที่ 5 (ตารางที่ 5.2) ในการจำลอง ซึ่งคุณสมบัติต่างๆ ของโพรงเกลือที่ใช้ในการจำลองได้แสดงไว้ในตารางที่ 6.1 คุณสมบัติของโพรงเกลือสำหรับใช้จำลองในกรณีที่ใช้ค่าตัวแปรของการทดสอบการให้แรงสลับอุณหภูมิได้เลือกใช้คุณสมบัติของเกลือหินที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากจุดที่สอบเทียบเป็นจุดสูงสุดที่อุณหภูมิห้อง



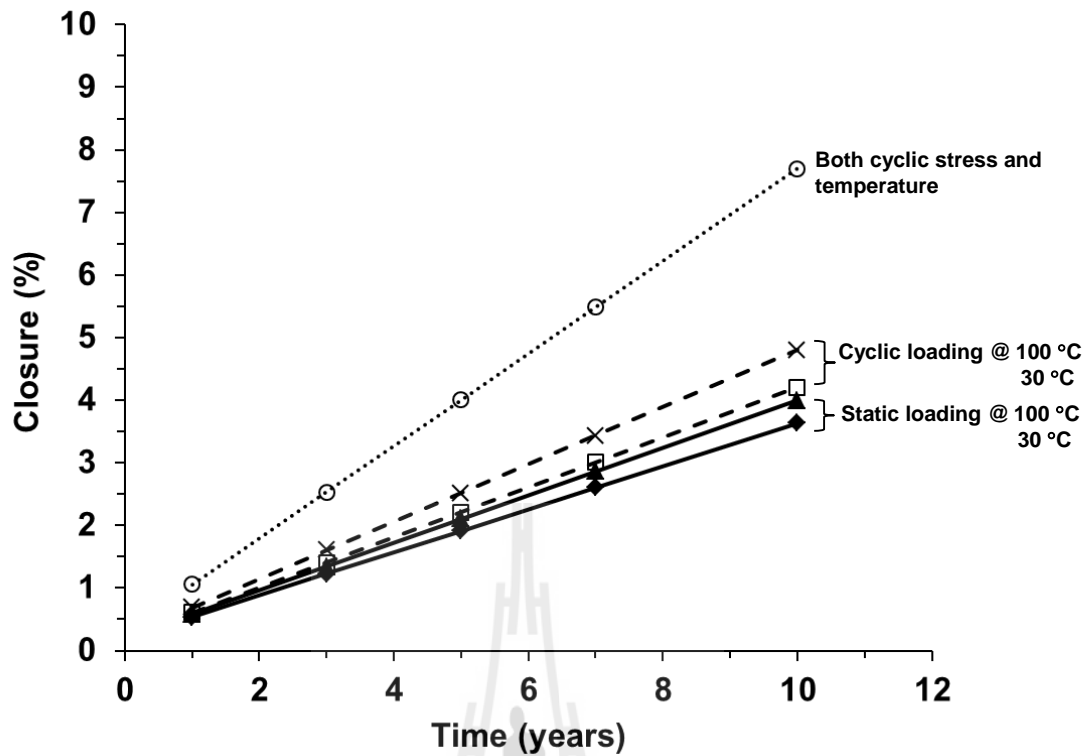
รูปที่ 6.1 โครงข่ายแบบจำลองโพรงเกลือที่สร้างจากโปรแกรม FLAC 4.0 โดยมีความลึกของหลังคาโพรงเท่ากับ 500 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลางของโพรงเท่ากับ 50 เมตร และมีแรงดันภายในโพรงเท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์ ของความเค้นในแนวตั้งที่หลังคาโพรง (σ_v) โดยจุด A เป็นจุดที่นำมาคำนวณอัตราการยุบตัวของโพรง

ตารางที่ 6.1 คุณสมบัติของเกลือหินรอบโพรงเกลือที่ใช้ในแบบจำลองคอมพิวเตอร์

คุณสมบัติของเกลือหิน	อุณหภูมิสูง (100°C)	อุณหภูมิต่ำ (30°C)	เอกสารอ้างอิง
Elastic Modulus, E (GPa)	20.0	24.52	Sriapai et al., 2012
Shear Modulus, G (GPa)	7.5	9.68	
Bulk Modulus, K (GPa)	25.3	28.20	
Friction angle, ϕ (Degrees)	42.0	45.0	
Cohesion, c (MPa)	8.0	8.41	
Poisson's ratio, ν	0.37	0.35	
Tensile strength (MPa)	6.0	6.9	
Density, ρ (g/cc)	2.1	2.1	
Internal pressure (MPa)	3.0	3.0	

6.2 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ผลที่ได้จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์บ่งชี้ว่าโพรงเกลือเมื่อใช้ค่าความหนืดเชิงพลาสติกที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการของ Goodman ภายใต้อุณหภูมิต่ำ (30°C) มีการยุบตัวต่ำกว่าโพรงเกลือที่อยู่ภายใต้อุณหภูมิสูง (100°C) ที่ระยะเวลา 1 ปี ภายใต้การจำลองที่ใช้ค่าสอบเทียบจากการทดสอบเดียวกัน ซึ่งอุณหภูมิส่งผลให้เกิดการยุบตัวเพิ่มขึ้นคิดเป็น 9.2% ที่การจำลองโดยใช้ค่าสอบเทียบจากการทดสอบการให้แรงคงที่ และมีการยุบตัวเพิ่มขึ้นคิดเป็น 13% ที่การจำลองโดยใช้ค่าสอบเทียบจากการทดสอบการให้แรงแบบวัฏจักร และมีการยุบตัวเพิ่มขึ้นคิดเป็น 52% ที่การจำลองโดยใช้ค่าสอบเทียบจากการทดสอบการให้แรงสลับอุณหภูมิ โดยที่การยุบตัวสูงสุดดังกล่าวมีการยุบตัวลงเมื่อเทียบกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของโพรงคิดเป็น 8.9% ของเส้นผ่าศูนย์กลางโพรงเกลือ รูปที่ 6.2 แสดงผลการจำลองเปรียบเทียบการยุบตัวของโพรงเกลือที่ใช้ตัวแปรและคุณสมบัติที่ต่างกัน นอกจากนี้ผลจากการจำลองโดยใช้ค่าสอบเทียบจากการทดสอบการให้แรงแบบวัฏจักรเทียบกับการจำลองโดยใช้ค่าสอบเทียบจากการทดสอบการให้แรงคงที่พบว่าอัตราการยุบตัวสูงกว่าประมาณ 13.2% ที่อุณหภูมิต่ำ 30°C (คิดเป็น 5% ของเส้นผ่าศูนย์กลางโพรง) และมีอัตราการยุบตัวสูงกว่าประมาณ 17% ที่อุณหภูมิ 100°C (คิดเป็น 5.8% ของเส้นผ่าศูนย์กลางโพรง) ผลการจำลองเปรียบเทียบอัตราการยุบตัวของโพรงเกลือได้แสดงไว้ในตารางที่ 6.2 แท้จริงแล้วโพรงกักเก็บก๊าซธรรมชาติจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับการทดสอบการให้แรงแบบวัฏจักร ซึ่งโดยทั่วไปมักจะนำค่าที่ได้มาจากการทดสอบการคืบแบบให้แรงกวดคงที่ ดังนั้นผลที่ได้จากการออกแบบจึงยังไม่ถูกต้องแต่เมื่อใช้ผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบการให้แรงแบบวัฏจักรหรือการทดสอบการให้แรงสลับอุณหภูมิมาออกแบบโพรงกักเก็บ จะมีความปลอดภัยมากกว่า



รูปที่ 6.2 อัตราการยุบตัวของโพรงเกลือเปรียบเทียบที่ระยะเวลา 10 ปี ของการจำลอง โดยใช้ค่าสอบเทียบจากการทดสอบการคืบแบบให้แรงคงที่ การทดสอบการให้แรงแบบวัฏจักร และการทดสอบการให้แรงสลับอุณหภูมิ

ตารางที่ 6.2 ผลการจำลองเปรียบเทียบอัตราการยุบตัวของโพรงเกลือที่รูปแบบตัวแปรสอบเทียบต่างๆ

รูปแบบตัวแปรสอบเทียบ	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการยุบตัว (%) ในปีที่ 10
การให้แรงกดคงที่	30°C	4.6
	100°C	5.0
การให้แรงแบบวัฏจักร	30°C	5.2
	100°C	5.8
การให้แรงสลับอุณหภูมิ	30°C ↔ 100°C	8.9

บทที่ 7

บทสรุป

7.1 สรุปและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและแรงกดแบบวัฏจักรต่อการคืบของเกลือหิน โดยทำการทดสอบการคืบในแกนเดียวซึ่งการทดสอบที่สถานะเช่นนี้จะทำให้ได้ผลที่ใกล้เคียงกับสภาวะจริงในภาคสนาม การให้แรงกดตามแนวแกนคงที่มีค่าเท่ากับ 6.5, 9.6, 13.0 และ 16.0 MPa โดยทดสอบที่ช่วงอุณหภูมิห้อง (30°C) และอุณหภูมิสูง (100°C) สำหรับการทดสอบภายใต้อุณหภูมิสูงได้ใช้เทปให้ความร้อนพันรอบตัวอย่างขณะทดสอบ ผลการทดสอบระบุว่าอุณหภูมิส่งผลให้ตัวอย่างเกลือหินมีการยวบตัวสูงขึ้น ซึ่งสามารถนำมาสร้างความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ด้วยสมการในรูปแบบของ Exponential creep law ที่อยู่ภายใต้การผันแปรอุณหภูมิ นอกจากนี้ผลการทดสอบการให้แรงแบบวัฏจักรยังให้ผลการยวบตัวที่สูงกว่าการเพิ่มอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว แต่ค่าการยวบตัวสูงสุดของตัวอย่างเกิดจากการทดสอบการให้แรงสลับอุณหภูมิ ผลจากการทดสอบในรูปแบบต่างๆ ได้นำไปจำลองด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์หลังจากการสอบเทียบตัวแปรด้วยสมการของ Goodman ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบเป็นอย่างดี กล่าวคือ โพรงเกลือที่อยู่ภายใต้อุณหภูมิสูงจะมีการยวบตัวที่สูงขึ้นคิดเป็น 9.2% ในรูปแบบการจำลองโดยใช้ค่าสอบเทียบจากการทดสอบการให้แรงคงที่ และมีการยวบตัวเพิ่มขึ้นคิดเป็น 13% ที่การจำลองโดยใช้ค่าสอบเทียบจากการทดสอบการให้แรงแบบวัฏจักร และมีการยวบตัวเพิ่มขึ้นคิดเป็น 52% ที่การจำลองโดยใช้ค่าสอบเทียบจากการทดสอบการให้แรงสลับอุณหภูมิ ซึ่งการยวบตัวสูงสุดดังกล่าวมีการยวบตัวลงเมื่อเทียบกับขนาดของโพรงคิดเป็น 8.9% ของความสูงโพรงเกลือ นอกจากนี้ผลการจำลองโดยใช้ค่าสอบเทียบจากการทดสอบการให้แรงแบบวัฏจักรเทียบกับการจำลองโดยใช้ค่าสอบเทียบจากการทดสอบการให้แรงคงที่พบว่าอัตราการยวบตัวสูงกว่าประมาณ 13.2% ที่อุณหภูมิห้อง (30°C คิดเป็น 5% ของเส้นผ่านศูนย์กลางโพรง) และมีอัตราการยวบตัวสูงกว่าประมาณ 17% ที่อุณหภูมิสูง (100°C คิดเป็น 5.8% ของเส้นผ่านศูนย์กลางโพรง)

ทั้งนี้ผลจากการจำลองยังทำให้เกิดความเข้าใจพฤติกรรมของเกลือหินที่อยู่รอบโพรงกักเก็บ และสามารถนำผลที่ได้มาใช้ในการออกแบบโพรงเกลือสำหรับกักเก็บ ไม่ว่าจะเป็นอากาศอัด ก๊าซธรรมชาติ หรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งในการออกแบบโพรงกักเก็บควรใช้ค่าที่ได้จากการทดสอบการให้แรงแบบวัฏจักรหรือการทดสอบการให้แรงสลับอุณหภูมิ หรือใช้การทดสอบการให้แรงกดคงที่แบบปกติแต่ควรที่จะเพิ่มอัตราการยวบตัวไปอีกอย่างน้อย 15% เพื่อให้ผลการออกแบบเป็นไปในเชิงอนุรักษ์

7.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทดสอบควรใช้ตัวอย่างที่ใหญ่ขึ้นและควรเพิ่มเวลาของการทดสอบให้นานขึ้น และควรจะผันแปรอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่กว้างขึ้นกว่าเดิมเพื่อให้ครอบคลุมทุกกรณี ในการให้แรงแบบวัฏจักรควรจะมีหลายรูปแบบไม่จำเป็นต้องลงมาต่ำสุดหรือมีความถี่ในการให้แรงน้อยลง ส่วนสมการที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของเกลือหินอาจให้สมการที่ซับซ้อนขึ้น เช่น Non-linear viscoplastic และควรทำการศึกษาเกี่ยวกับการให้แรงแบบวัฏจักรภายใต้อุณหภูมิต่ำด้วย รวมไปถึงการทดสอบการให้แรงดึงแบบวัฏจักรภายใต้การผันแปรอุณหภูมิ



บรรณานุกรม

- Allemandou, X. and Dusseault, M. B., 1996, Procedures for cyclic creep testing of salt rock, results and discussions, *Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt*, Ecole Polytechnique, November 1993, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany, pp. 207-218.
- 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.
- Aubertin, M., Gill, D. E. and Ladanyi, B., 1993, Modelling the transient inelastic flow of rock salt, *Proceedings of Seventh Symposium on Salt*, Kyoto, Japan, April 1992, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Vol. 1, pp. 93-104.
- Barber, D. J., 1990, Regimes of plastic deformation processes and microstructure; An overview, *Deformation Processes in Minerals, Ceramics and Rocks*, Unwin Hyman, pp. 138-178.
- Berest, P. and Blum, P. A., 1993, In situ test in salt cavern, *Proceedings of Seventh Symposium on Salt*, Kyoto, Japan, April 1992, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Vol. 1, pp. 353-362.
- Berest, P., Brouard, B. and Durup, G., 1998, Behavior of sealed solution-mined caverns, *Proceedings of the Fourth Conference on the Mechanical Behavior of Salt*, Ecole Polytechnique, Montreal, June 1996, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany, pp. 511-524.
- Billiotte, J., LeGuen, C., Deveughele, M., and Brulhet, J., 1996, On laboratory measurements of porosity and permeability of salt rocks (Bressa basin-France), *Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt*, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, September 1993, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany, pp. 221-230.
- Bonte, G., 1996, Mechanical aspects of the inhibition of a salt wall by brine initially contained in a cavity, *Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt*, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, September 1993, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany, pp. 263-267.
- Carter, N. L., Horseman, S. T., Russell, J. E. and Handin, J., 1993, Rheology of rock salt, *Journal Structural Geology*, Vol. 15, No. 10, pp. 1257-1272.

- 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.
- Cristescu, N., 1994a, A procedure to determine nonassociated constitutive equations for geomaterials, *Int. J. Plasticity*, Vol. 10, pp. 103–131.
- Cristescu, N., 1994b, *Visco–Plastic Behaviour of Geomaterials*, Springer Verlag, Vienna, pp. 103–207.
- Fokker, P. A., 1998, The micro–mechanics of creep in rocksalt, Proceedings of the Fourth Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Ecole Polytechnique, Montreal, June 1996, *Trans Tech Publications*, Clausthal–Zellerfeld, Germany, pp. 49–61.
- Franssen, R. C. M. W. and Spiers, C. J., 1990, Deformation of polycrystalline salt in compression and in shear at 250–350°C, Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics, *Geological Society Special Publication No. 45*, pp. 201–213.
- Fuenkajorn, K. and Daemen, J.J.K. (1988). Borehole closure in salt. *Technical report NUREC/CR-5243*, prepared for the U. S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D. C.
- Fuenkajorn, K. and Phueakphum, D. (2010). Effects of cyclic loading on mechanical properties of Maha Sarakham salt. *Engineering Geology*. 112 (1–4) 43–52.
- Ghoreychi, M. and Berest, P., 1990, Thermomechanical modelling of radioactive waste disposal in salt formations, In *10th Conf. Struct. Mech. in Reactor Techn. (SMIRT)*, California.
- Hansen, F. D., Senseny, P. E., Pfeifle, T. W. and Vogt, T. J., 1987, Influence of impurities on creep of salt from the Palo Duro Basin, *Proceedings of the 29th U.S. Symposium on Rock Mechanics*, University of Minnesota, Minneapolis, A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 199–206.
- Hardy, H. R. Jr., 1996, Application of the Kaiser effect for the evaluation of in–situ stress in salt, *Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Rock Salt*, Ecole Polytechnique, November 1993, *Trans Tech Publications*, Clausthal, Germany, pp. 85–100.

- Hunsche, U. E. and Schulze, O., 1996, Effect of humidity and confining pressure on creep of rock salt, *Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt*, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, September 1993, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany, pp. 237-248.
- Hunsche, U. E., Mingerzahn, G. and Schulze, O., 1996, The influence of textural parameters and mineralogical composition on the creep behavior of salt, *Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt*, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, September 1993, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany, pp. 143-151.
- 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.
- Jeremic, M. L., 1994, *Rock Mechanics in Salt Mining*, A. A. Balkema, Rotherdam, the Netherlands, 532 pp.
- Peach, C. J., 1996, Deformation, dilatency and permeability developed in halite/anhydrite composition, *Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt*, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, September 1993, *Trans Tech Publications*, Clausthal-Zellerfeld, Germany, pp. 153-166.
- Raj, S. V. and Pharr, G. M., 1992, Effect of temperature on the formation of creep substructure in sodium chloride single crystal, *American Ceramic Society*, Vol.75, No.2, pp. 347-352.
- Schneefub, J. and Droste, J, 1996, Thermomechanical effects in backfilled drifts, *Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt*, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, September 14-16, 1993, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Federal Republic of Germany, pp. 373-380.
- Senseny, P. E., Hansen, F. D., Russell, J. E., Carter, N. L. and Handin, J. W., 1992, *Mechanical behaviour of rock salt: phenomenology and micromechanisms*, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 29, No.4, pp. 363-378.

- Sriapai, T. and Fuenkajorn, K., 2010, Polyaxial Strengths of Maha Sarakham Salt. In *Proceeding of 6th Asian Rock Mechanics Symposium*, October 23–27, New Delhi, India.
- Wanten, P. H., Spiers, C. J. and Peach, C. J., 1996, Deformation of NaCl single crystals at $0.27T_m < T < 0.44T_m$, *Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt*, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, September 1993, Trans Tech Publications, Clausthal–Zellerfeld, Germany, pp. 117–128.
- Yang, C., Daemen, J.J.K., and Yin, J.H. 1999. Experimental investigation of creep behavior of salt rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 1999, Vol.36, pp. 233–242.



ประวัตินักวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. กิตติเทพ เฟื่องขจร เกิดเมื่อวันที่ 16 กันยายน 2500 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร จบการศึกษาปริญญาเอกจาก 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” ที่ใช้อยู่ในหลายมหาวิทยาลัยในสหรัฐอเมริกา 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