



รหัสโครงการ SUT7-719-59-24-30

รายงานการวิจัย

การกักเก็บพลังงานอากาศอัดสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า
ในช่องเหมืองเกลือและเหมืองโพแทชที่ทิ้งแล้ว

(Compressed-Air Energy Storage in
Abandoned Salt and Potash Mines)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-719-59-24-30

รายงานการวิจัย

การกักเก็บพลังงานอากาศอัดสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า
ในช่องเหมืองเกลือและเหมืองโพแทชที่ทิ้งแล้ว

(Compressed-Air Energy Storage in
Abandoned Salt and Potash Mines)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เฟื่องขจร

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2559-2560

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2560

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559-2560 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากทีมงานหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีในการทดสอบและ นางสาวกัลญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัยและ พิสูจน์อักษร ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

กันยายน 2560



บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย เพื่อประเมินความสามารถเชิงกลศาสตร์ของชั้นเกลือหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย สำหรับกักเก็บพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบอากาศอัด และศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเชิงเวลาของเสาค้ำยันในช่องเหมืองเกลือ ซึ่งวางแผนสำหรับการกักเก็บพลังงาน การทดสอบการให้แรงกดแบบวัฏจักรในสามแกนได้เตรียมตัวอย่างเกลือหินรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด $54 \times 54 \times 108$ มิลลิเมตร โดยจัดเตรียมเพื่อใช้ในการทดสอบความเค้นในแนวแกนคงที่ระหว่าง 30-70 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังรับแรงกดสูงสุด ภายใต้ความเค้นล้อมรอบระหว่าง 10-90 เปอร์เซ็นต์ ของความเค้นในภาคสนาม ทำการคำนวณที่ระดับความลึกเท่ากับ 250, 300, 350 และ 400 เมตร ซึ่งผันแปรอัตราการขุดเจาะแร่ (Extraction ratio) 30, 40 และ 58 เปอร์เซ็นต์ ในแต่ละการทดสอบได้ดำเนินการ 21 วัน (21 วัฏจักร) แบบจำลองของ Burgers ได้ถูกนำมาเทียบเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ความหนืดเชิงพลาสติก ผลการศึกษาระบุว่ามีแนวโน้มลดลงแบบเอกโพแนนเชียลเมื่อความเค้นแนวเฉือนรวมหกด้าน (τ_{oct}) เพิ่มขึ้น ได้นำแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์มาประเมินผลกระทบของการให้แรงแบบวัฏจักรต่อพฤติกรรมของเกลือหินและการทรุดตัวของผิวดินเหนือช่องเหมือง ซึ่งอยู่ภายใต้สภาวะการปล่อยและอัดอากาศ ผลระบುವ่าการทรุดตัวของผิวดินภายใต้การให้แรงแบบวัฏจักรสูงกว่าแบบสถิตประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ ค่าการทรุดตัวสูงสุดเท่ากับ 57 เซนติเมตร หลังจากดำเนินการขุดเจาะเป็นเวลา 50 ปี จากการศึกษาในครั้งนี้ระบุว่าการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ภายใต้การให้แรงกดแบบวัฏจักรให้ผลลัพธ์ในเชิงอนุรักษ์ของเสถียรภาพเสาค้ำยันมากกว่าการทดสอบภายใต้การให้แรงแบบสถิต

Abstract

The objective of this study is to evaluate the mechanical performance of the rock salt formations in the northeast of Thailand for use in the compressed-air energy storage. Triaxial cyclic loading test is performed to simulate the time-dependent deformation of salt pillars in abandoned salt mines planned for the energy storage. The salt specimens are rectangular shaped with nominal dimensions of $54 \times 54 \times 108 \text{ mm}^3$. The axial cyclic stresses vary from 30% to 70% of the salt strength with confining pressures vary from 10% to 90% of the in-situ stress. The calculations are made for the depths from 250, 300, 350 to 400 m. At each depth the extraction ratio ranges from 30, 40 to 58%. These selected ranges of testing stresses cover those likely occurred around the salt mines. All tests are performed up to 21 days (or 21 cycles). The calibration of the steady-state creep phase using the Burgers model can determine the visco-plastic coefficient under cyclic loading. The Burgers parameters exponentially decrease with increasing the applied octahedral shear stresses. The finite difference analyses (FLAC) are performed to demonstrate the impact of cyclic loading on the salt behavior and surface subsidence above the storage openings that are subjected to cycles of pressure injection and retrieval. The results show that the surface subsidence under cyclic loading is greater than that under static loading (about 40%). The maximum surface subsidence at 50 years after operation is about 57 cm. This suggests that the salt testing and simulations of the storage under triaxial cyclic would provide a more conservative assessment of salt pillars stability than those obtained from the static loading test.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	1
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 การเก็บพลังงานในรูปอากาศภายใต้แรงดันในชั้นหิน.....	7
2.1.1 การกักเก็บในชั้นหินตะกอนและหินแข็ง.....	9
2.1.2 การกักเก็บในชั้นเกลือหิน.....	10
2.2 คุณสมบัติของเกลือหิน.....	11
2.2.1 คุณสมบัติของเกลือหินเชิงกลศาสตร์.....	11
2.2.2 คุณสมบัติความซึมผ่านของเกลือหิน.....	12
2.2.3 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของเกลือหิน.....	14
2.3 การทดสอบแรงกดแบบวัฏจักร.....	16
2.3.1 การทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรกับหินตะกอน.....	17
2.3.2 การทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรกับเกลือหิน.....	18
2.4 โพรงกักเก็บชนิดต่างๆ ในต่างประเทศ.....	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การเก็บและการจัดเตรียมตัวอย่างหิน	25
3.1 วัตถุประสงค์.....	25
3.2 แหล่งที่มาของตัวอย่างเกลือหิน.....	25
3.3 การจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหิน.....	25
บทที่ 4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ	29
4.1 วัตถุประสงค์ของการทดสอบ.....	29
4.2 การเตรียมโครงทดสอบในสามแกนจริง.....	29
4.3 การทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรภายใต้ความเค้นกดในสามแกน.....	31
4.3.1 วิธีการทดสอบ.....	31
4.3.2 ผลการทดสอบ.....	34
บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ	35
5.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	35
5.2 การสอบเทียบตัวแปรเชิงเวลาของเกลือหิน.....	35
บทที่ 6 การคำนวณด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์	41
6.1 แบบจำลองโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	41
6.2 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	41
บทที่ 7 บทสรุป	45
7.1 สรุปและวิจารณ์ผล.....	45
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	46
บรรณานุกรม	47
ประวัตินักวิจัย	57

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ตำแหน่ง ความลึก ขนาด และคุณสมบัติของตัวอย่างเกลือหิน.....	27
5.1 ผลการสอบเทียบค่าคงที่จากแบบจำลองของ Burger.....	39
6.1 คุณสมบัติของเกลือหินในช่องเหมืองเกลือที่ใช้ในแบบจำลองคอมพิวเตอร์.....	43
6.2 ผลการจำลองเปรียบเทียบอัตราการทรุดตัวของผิวดินในช่องเหมืองเกลือที่มีรูปแบบ ตัวแปรสอบเทียบต่างกัน.....	44



สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 ความเค้นที่กระทำต่อเสาค้ำยันของช่องเหมืองที่ใช้กักเก็บอากาศอัดที่อยู่ภายใต้ความเค้นกดในสามแกนแบบขยาย.....	3
1.2 วิธีของความเค้นในการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรภายใต้ความเค้นกดในสามแกนแบบขยาย.....	5
2.1 ระบบการผันพลังงานแบบความดันคงที่ (Constant Pressure System) โครงการ Soyland Project มลรัฐ Illinois ประเทศสหรัฐอเมริกา.....	8
2.2 ระบบการผันพลังงานแบบปริมาตรคงที่ (Constant Volume System).....	9
3.1 แท่งเกลือหินที่ถูกตัดด้วยเลื่อยไฟฟ้าสำหรับการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรภายใต้ความเค้นกดในสามแกนแบบขยาย.....	26
3.2 ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรภายใต้ความเค้นกดในสามแกนแบบขยาย.....	26
4.1 โครงกดทดสอบในสามแกนจริง.....	30
4.2 องค์ประกอบของโครงกดทดสอบในสามแกนจริง.....	31
4.3 การจำลองความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงของการทดสอบ หลังจากเจาะช่องเหมืองระหว่างการอัดอากาศในช่องเหมือง และระหว่างการปล่อยอากาศออกจากช่องเหมือง.....	32
4.4 ลักษณะการให้แรงต่อตัวอย่างหินแบบวัฏจักรเป็นระยะเวลา 21 วัน.....	33
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเฉือนรวมทางด้านกับเวลาที่ระดับความลึกเท่ากับ 250 เมตร ภายใต้การผันแปรอัตราการขุดเจาะแร่เท่ากับ 58, 40 และ 30 เปอร์เซ็นต์.....	36
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเฉือนรวมทางด้านกับเวลาที่ระดับความลึกเท่ากับ 300 เมตร ภายใต้การผันแปรอัตราการขุดเจาะแร่เท่ากับ 58, 40 และ 30 เปอร์เซ็นต์.....	37
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเฉือนรวมทางด้านกับเวลาที่ระดับความลึกเท่ากับ 350 เมตร ภายใต้การผันแปรอัตราการขุดเจาะแร่เท่ากับ 58, 40 และ 30 เปอร์เซ็นต์.....	37
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเฉือนรวมทางด้านกับเวลาที่ระดับความลึกเท่ากับ 400 เมตร ภายใต้การผันแปรอัตราการขุดเจาะแร่เท่ากับ 58, 40 และ 30 เปอร์เซ็นต์.....	38
5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่จากแบบจำลองของ Burgers ในฟังก์ชันของความเค้นเฉือนรวมทางด้าน.....	40

สารบัญรูปรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.1 ตัวอย่างโครงข่ายแบบจำลองช่องเหมืองเกลือ ที่ระดับความลึก 150 เมตร ความกว้างและความสูงของห้องเท่ากับ 10 เมตร เสาค้ำยันมีความกว้าง 18 เมตร และมีแรงดันภายในช่องเหมืองเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ ของความเค้นในแนวตั้งที่หลังคา.....	42
6.2 อัตราการทรุดตัวของผิวดินในช่องเหมืองเกลือที่เวลา 50 ปี ของการจำลองโดยใช้ค่าสอบเทียบจากการทดสอบภายใต้แรงคงที่และการทดสอบการให้แรงแบบวัฏจักร.....	43



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

เทคโนโลยีอากาศอัดหรือ Compress air energy storage (CAES) เป็นเทคโนโลยีใช้ที่กันอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ สำหรับประเทศไทยผู้วิจัยได้ศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการนำเทคโนโลยีอากาศอัดมาใช้กับแหล่งเกลือหินในประเทศไทย ซึ่งได้ศึกษาอย่างครอบคลุม (กิตติเทพ, 2551) แต่ด้วยงบประมาณในการก่อสร้างค่อนข้างสูง ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดใหม่ที่จะอัดอากาศลงไปในช่วงเหมืองเกลือหินใต้ดินที่ไม่ได้มีการผลิตแล้ว ซึ่งการอัดอากาศลงไปในช่วงเหมืองเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้ามีข้อดีกว่าการอัดอากาศลงไปโรงเกลือใต้ดิน กล่าวคือ ต้นทุนที่ใช้ในการดำเนินการต่ำกว่ามาก เนื่องจากได้อาศัยช่วงเหมืองที่ดำเนินการก่อสร้างไว้เป็นที่เรียบร้อยแล้วจากภาคอุตสาหกรรมมาใช้ในการกักเก็บอากาศอัด ในขณะที่ปล่อยอากาศออกเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าสำหรับโรงเกลือจำเป็นต้องเหลือแรงดันไว้ข้างในโรงเกลือกักเก็บอย่างน้อย 20- 30 บาร์เซ็นต์ เพื่อป้องกันไม่ให้โรงเกิดการพังทลาย แต่สำหรับการกักเก็บในช่วงเหมืองนั้นสามารถปล่อยอากาศออกมาได้หมดไม่จำเป็นต้องเหลือทิ้งไว้ เนื่องจากช่วงเหมืองเดิมมีเสถียรภาพดีอยู่แล้ว ดังนั้นการมุ่งเน้นและศึกษาการกักเก็บอากาศอัดลงไปในช่วงเหมืองเก่าเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจึงเป็นประโยชน์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นการลดภาระค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน (ในที่นี้ได้แก่ พลังงานไฟฟ้า) ให้กับประเทศและมีส่วนช่วยผลักดันให้เทคโนโลยีนี้เกิดขึ้นจริง และสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดี เพราะในอนาคตอันใกล้จะมีเหมืองใต้ดินเกิดขึ้นอีกมากมาย ซึ่งสามารถรองรับเทคโนโลยีนี้ได้จริง ดังนั้นการทำให้ทุกภาคส่วนมีองค์ความรู้และมีความเข้าใจอย่างถ่องแท้จะสามารถดำเนินการและพัฒนาเทคโนโลยีอากาศอัดไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาผลกระทบการให้แรงกดแบบวัฏจักรภายใต้ความเค้นกดในสามแกนแบบขยาย ($\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3$) และผลกระทบของความถี่ในการให้แรงดันข้างเพื่อจำลองสภาวะการอัดและปล่อยอากาศที่อัตราต่างกัน
- 2) เพื่อประเมินศักยภาพของช่วงเหมืองในการรับแรงอัดและปล่อยเป็นวัฏจักรต่อความถี่เสถียรภาพของช่วงเหมืองรวมไปถึงประเมินการทรุดตัวของผิวดินภายหลังการใช้งานไปแล้ว 50 ปี

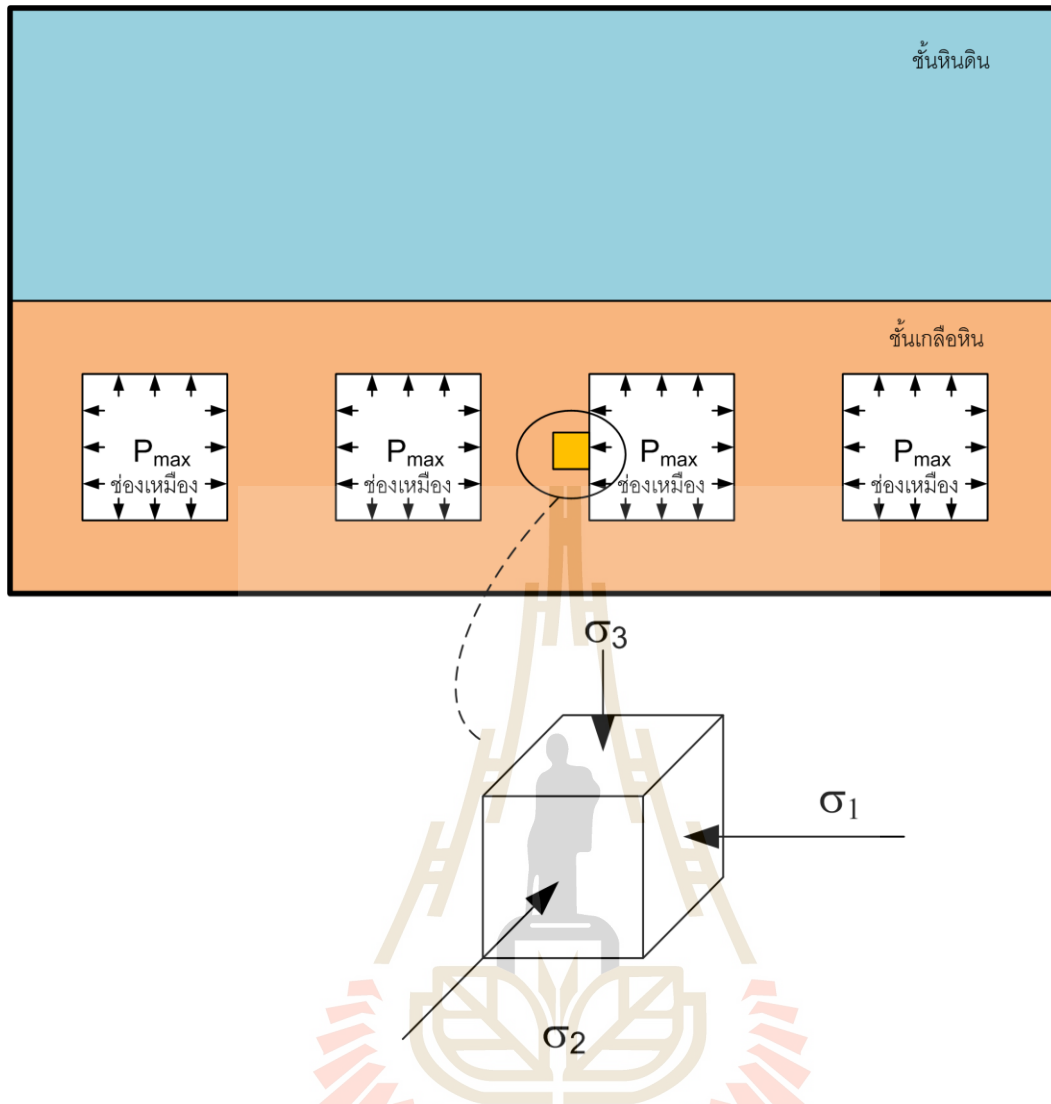
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการนำเทคโนโลยีอากาศอัดมาใช้ ทั้งในโรงเกลือและในช่วงเหมืองรวมไปถึงแนวคิด วิธีการดำเนินงาน และข้อได้เปรียบของการใช้เทคโนโลยีอากาศอัด

- 2) นำแท่งตัวอย่างเกลือหินที่ได้รับความอนุเคราะห์จากองค์กรต่างๆ หรือจากการเก็บในภาคสนามมาใช้ในการหาคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากโครงการนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้น ดังนั้น จะไม่มีการขุดเจาะหลุมใหม่ในภาคสนาม โดยตำแหน่งและความลึกของตัวอย่างหินที่นำมาศึกษาได้ถูกบันทึกเพื่อใช้ในการอ้างอิงในการศึกษาโดยละเอียดต่อไป
- 3) ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีอย่างน้อย 16 ตัวอย่าง ซึ่งได้มาจากหลุมเจาะในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย
- 4) ทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ของเกลือหินในห้องปฏิบัติการ เน้นที่การทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรภายใต้ความเค้นกดในสามแกนแบบขยาย ($\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3$) ผลการทดสอบคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องถูกนำเสนอและใช้ในการออกแบบช่องเหมืองเกลือหินสำหรับกักเก็บอากาศอัด และนำผลไปใช้ในการจำลองช่องเหมืองเพื่อประเมินผลกระทบจากการอัดอากาศต่อการทรุดตัวของผิวดินและความมีเสถียรภาพของช่องเหมือง
- 5) การทดสอบดำเนินการในห้องปฏิบัติการและอยู่ในสภาวะแห้ง
- 6) ศึกษาผลกระทบของการอัดอากาศเข้าไปในช่องเหมืองด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ เป็นการจำลองโดยใช้ลักษณะทางธรณีวิทยาจริงในพื้นที่ มีวัตถุประสงค์หลักคือสังเกตการณ์การทรุดตัวที่ระดับผิวดินในแบบจำลองเพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการอัดอากาศเข้าไปยังช่องเหมืองแบบวัฏจักร ศึกษาความเค้นและความเครียดที่อยู่บริเวณรอบช่องเหมืองในขณะปล่อยและอัดอากาศ

1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวคิดของโครงการวิจัย

ช่องเหมืองใต้ดินที่ดำเนินการผลิตเสร็จแล้วมักถูกพักหรือถูกทิ้งเอาไว้โดยไม่ได้ใช้ประโยชน์ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำเอาอากาศอัดลงไปกักเก็บในช่องเหมืองและปล่อยออกมาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าเมื่อต้องการใช้ ซึ่งปัจจัยสำคัญสำหรับเทคโนโลยีนี้คือ ความมีเสถียรภาพของช่องเหมืองที่ใช้กักเก็บอากาศอัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเสาค้ำยันหรือหลังคาของช่องเหมืองที่ต้องรับแรงดันของอากาศอัดที่ผันแปรตลอดเวลา ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อทรุดตัวของผิวดินหากเกิดการพังทลายของช่องเหมือง ดังนั้น การทดสอบที่จำเป็นและสำคัญเป็นอย่างยิ่งคือการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรภายใต้ความเค้นกดในสามแกนแบบขยาย ($\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3$) ตัวอย่างเกลือหินได้รับแรงกดในแนวแกนคงที่โดยแรงด้านข้างมีการผันแปรเป็นแบบวัฏจักร (รูปที่ 1.1) การทดสอบในลักษณะนี้สามารถนำไปเปรียบเทียบหรือสร้างเกณฑ์การแตกของเสาค้ำยันที่ระดับความลึก ความสูง หรือความกว้างของช่องเหมืองที่แตกต่างกันได้ นอกจากนี้ ได้อาศัยแบบจำลองคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของช่องเหมืองในระยะยาว โดยใช้ตัวแปรที่สอบเทียบได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อให้ผลวิจัยออกมาในเชิงประจักษ์ สำหรับการนำไปใช้จริง และเมื่อเสร็จสิ้นงานวิจัยแล้วองค์กรต่างๆ ทั้งภาครัฐและเอกชนสามารถนำผลงานวิจัยนี้เป็นบรรทัดฐานในการพัฒนาเทคโนโลยีการอัดในช่องเหมืองเก่าได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 1.1 ความเค้นที่กระทำต่อเสาค้ำยันของช่องเหมืองที่ใช้กักเก็บอากาศอัดที่อยู่ภายใต้ความเค้นกดในสามแกนแบบขยาย ($\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3$)

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับลักษณะธรณีวิทยา โครงสร้างของชั้นเปลือกหุ้มในประเทศไทย และเทคโนโลยีล่าสุดในต่างประเทศที่เกี่ยวข้องกับการกักเก็บอากาศอัดในช่องเหมืองเปลือกหุ้ม

ขั้นตอนที่ 2 การจัดเตรียมตัวอย่างหิน

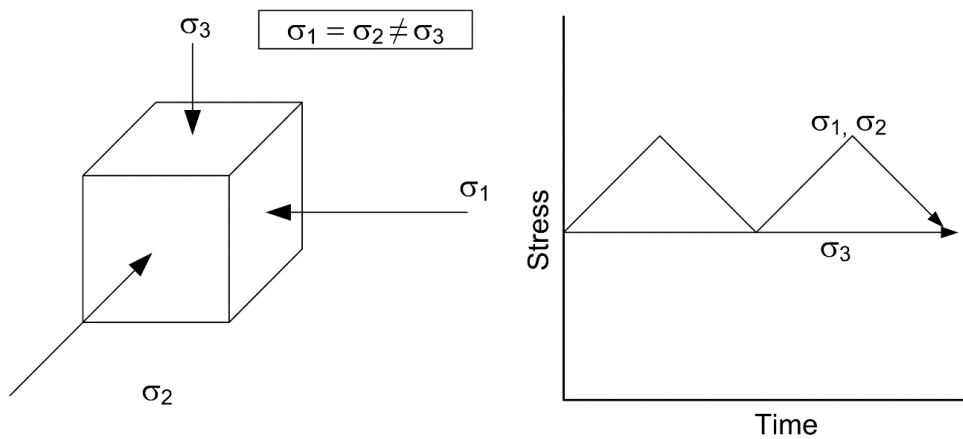
ในขั้นตอนนี้ได้นำตัวอย่างเกลือหินมาตัดและกลึงให้เป็นรูปแบบทรงสี่เหลี่ยมเพื่อใช้ในการทดสอบคุณสมบัติและพฤติกรรมที่เกี่ยวข้อง โดยได้ทำการบันทึกความลึกและตำแหน่งของตัวอย่างเกลือหินที่ได้ขุดเจาะมาจากชั้นเกลือหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย เพื่อวิเคราะห์ และเสนออยู่ในรายงานเพื่อให้ทราบถึงความแปรปรวนทางด้านพฤติกรรม และคุณสมบัติในชั้นเกลือหินของประเทศไทย

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

โครงการวิจัยนี้มีการทดสอบเพื่อหาความคงทนต่อแรงกดแบบวัฏจักรภายใต้ความเค้นกดในสามแกนแบบขยาย ($\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3$) ซึ่งเป็นการจำลองการรับแรงของเสา ค้ำยันที่เกิดขึ้นในขณะอัดอากาศและปล่อยอากาศที่กักเก็บในช่องเหมืองดังแสดงในรูปที่ 1.2 มีการผันแปรความเค้นล้อมรอบอย่างน้อย 4 ระดับ และผันแปรอัตราการให้แรงกดหรือความถี่ในการให้แรงกด 4 ระดับ การทดสอบนี้ทำให้ทราบถึง Fatigue strength ของเกลือหินภายใต้แรงกดสูงสุดและต่ำสุดที่แตกต่างกัน และผลกระทบจากความเค้นด้านข้างต่อการเคลื่อนไหลของเกลือหินรอบช่องเหมืองกักเก็บอากาศอัด การทดสอบนี้มีความคล้ายคลึงกับการทดสอบ Uniaxial และ Triaxial compressive strength test แต่แรงกดมีขนาดขึ้นลงอย่างมีระบบ ตัวอย่างหินที่ถูกทดสอบในกลุ่มนี้มีอย่างน้อย 16 ตัวอย่าง ผลที่ได้จากการทดสอบบ่งบอกถึงความสามารถสูงสุดของเกลือหินในการรับความเครียดที่เกิดขึ้นจากแรงกดที่ซ้ำซ้อนหรือแรงกดจากวัฏจักรนั่นเอง เพราะเกลือหินที่อยู่รอบช่องเหมืองกักเก็บอากาศอัดมีการรับแรงกดจากวัฏจักรที่เกิดจากการอัดอากาศเข้าไปในช่องเหมืองและการปล่อยอากาศอัดออกจากช่องเหมือง ผลที่ได้จากการทดสอบมีประโยชน์ในการสอบทานแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่สร้างขึ้น แบบจำลองนี้ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบช่องเหมืองสำหรับกักเก็บอากาศอัด ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดในหัวข้อต่อไป

ขั้นตอนที่ 4 การคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

ในการจำลองเพื่อศึกษาผลกระทบของการอัดอากาศเข้าไปในช่องเหมืองด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ เป็นการจำลองโดยใช้ลักษณะทางธรณีวิทยาจริงในพื้นที่ เพื่อให้ผลการจำลองมีความสมจริงมากที่สุด มีวัตถุประสงค์หลักคือสังเกตการณ์การทรุดตัวที่ระดับผิวดินในแบบจำลอง เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการอัดอากาศเข้าไปในช่องเหมืองแบบวัฏจักร และศึกษาความเค้น-ความเครียดที่อยู่บริเวณรอบช่องเหมืองในขณะปล่อยและอัดอากาศ ทั้งนี้ ผลของการจำลองสามารถพิสูจน์ได้ว่า การนำช่องเหมืองเก่ามาใช้กับเทคโนโลยีอากาศอัดจะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหรือเสถียรภาพของช่องเหมืองหรือไม่



รูปที่ 1.2 วิธีของความเค้นในการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรภายใต้ความเค้นกดในสามแกนแบบขยาย ($\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3$)

ขั้นตอนที่ 5 การถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่กลุ่มเป้าหมาย

แผนการการถ่ายทอดเทคโนโลยีนี้ คือ การนำข้อมูลไปเผยแพร่ในเว็บไซต์ของหน่วยวิจัย กลศาสตร์ธรณีเพื่อให้ผู้ที่สนใจทั่วไปสามารถสืบค้นได้ และนำผลงานวิจัยชิ้นนี้ลงตีพิมพ์ในวารสาร นานาชาติหรือนำเสนอในการประชุมวิชาการระดับชาติเพื่อเผยแพร่ความรู้ในวงกว้างต่อไป

ขั้นตอนที่ 6 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิดและขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุปจะ นำเสนอโดยละเอียดในรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ เพื่อที่จะส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้มีประโยชน์อย่างมากกับงานด้านวิศวกรรมธรณี และวิศวกรรมพลังงานซึ่ง เกี่ยวข้องกับพลังงานทางเลือก สามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

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

หน่วยงานที่ใช้ประโยชน์จากผลการวิจัย

ผลงานวิจัยที่เสนอมานี้มีประโยชน์อย่างมากกับงานด้านธรณีวิทยา วิศวกรรมธรณี และ วิศวกรรมพลังงาน ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

1.6.1 เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป

เพื่อเป็นองค์ความรู้ริเริ่มและสร้างสรรค์ในการออกแบบช่องเหมืองกักเก็บในชั้นเกลือหินที่ยังไม่เคยมีผู้ใดทำมาก่อน และเข้าใจพฤติกรรมออกแบบช่องเหมืองกักเก็บในชั้นเกลือหินจริงที่มีการผันแปรความเค้น การศึกษาดังกล่าวได้รวบรวมเอาองค์ความรู้ทางด้านกลศาสตร์หินมาใช้ในการศึกษาคุณสมบัติและพฤติกรรมของช่องเหมือง

1.6.2 บริการความรู้แก่ประชาชนและหน่วยงานราชการ

การให้ความรู้แก่หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เช่น กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ เพื่อให้ทราบถึงพฤติกรรมและประโยชน์ของเกลือหินในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีช่องเหมืองกักเก็บอากาศอัดในการบริการความรู้แก่ผู้ที่สนใจ

1.6.3 บริการความรู้แก่ภาคธุรกิจ

เป็นแหล่งข้อมูลและให้ความรู้แก่หน่วยงานในภาคธุรกิจ เช่น กลุ่มธุรกิจพลังงาน มีแนวทางหรือทางเลือกในการกักเก็บพลังงานในรูปแบบอากาศอัด

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กิจกรรมเบื้องต้นในงานวิจัยนี้คือ การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการเก็บพลังงานในรูปอากาศภายใต้แรงดันในชั้นเกลือหิน งานวิจัยเน้นไปที่ศักยภาพเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินที่ถูกประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยีนี้ องค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย (1) เทคโนโลยีการเก็บพลังงานในรูปอากาศภายใต้แรงดัน (2) คุณสมบัติของเกลือหิน (3) การทดสอบแรงกดแบบวัฏจักร และ (4) โพรงกักเก็บชนิดต่างๆ ในต่างประเทศ เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในงานวิจัยนี้

2.1 การเก็บพลังงานในรูปอากาศภายใต้แรงดันในชั้นหิน

การเก็บพลังงานไฟฟ้าในรูปของอากาศภายใต้แรงดัน (Compressed-Air Energy Storage) ในโพรงชั้นหิน มีแนวคิดเพื่อสะสมและเก็บพลังงานไฟฟ้าในขณะที่มีเหลือใช้ให้อยู่ในรูปของอากาศภายใต้แรงดัน และปล่อยพลังงานนี้ออกมาผลิตกระแสไฟฟ้าในเวลาที่ต้องการพลังงานไฟฟ้าขาดแคลน (Crotono, 2001) ในช่วงที่ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยจะมีพลังงานเหลือในระบบการจ่ายกระแสไฟฟ้า เทคโนโลยีการเก็บพลังงานนี้จะใช้พลังงานส่วนที่เหลือในการหมุนมอเตอร์อัดอากาศเก็บไว้ในโพรง เมื่อถึงตอนที่ความต้องการใช้กระแสไฟฟ้ามีมาก อากาศที่อัดไว้ก็จะถูกผันกลับมาเป็นกระแสไฟฟ้า การกักเก็บพลังงานในรูปอากาศภายใต้แรงดันเป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงเมื่อเปรียบเทียบกับ การสะสมและเก็บพลังงานในรูปแบบอื่น เช่น การเก็บพลังงานไฟฟ้าในรูปพลังงานน้ำแบบสูบกลับ เทคโนโลยีนี้มีใช้อย่างแพร่หลายในต่างประเทศ ทั้งในยุโรป เอเชีย และอเมริกา เพราะช่วยลดค่าใช้จ่าย และเพิ่มประสิทธิภาพของโรงผลิตกระแสไฟฟ้าให้สูงขึ้น

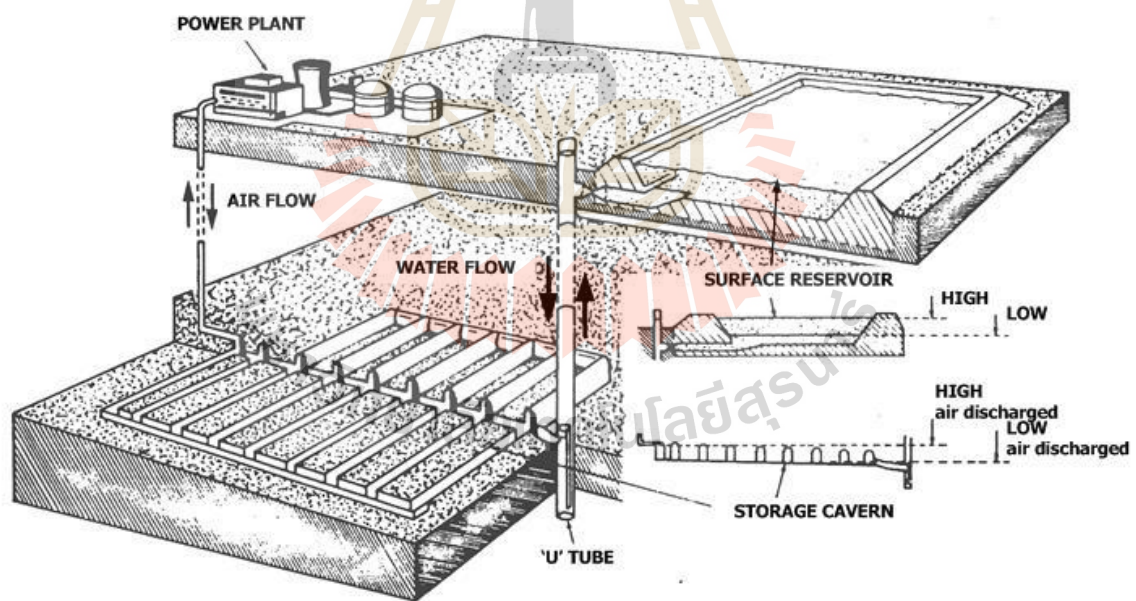
เทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานในรูปอากาศภายใต้แรงดันแห่งแรกเกิดขึ้นที่ประเทศเยอรมันนี ซึ่งก่อสร้างในปี 1978 มีชื่อว่า “The Huntorf Plant” (Crotono, 2001) มีกำลังการผลิต 290 เมกะวัตต์ มีโพรงใต้ดิน 2 โพรง มีปริมาตรรวมกันเท่ากับ 310,000 ลูกบาศก์เมตร ความลึกถึงหลังคาโพรงประมาณ 650 เมตร โพรงดังกล่าวอยู่ห่างกัน 220 เมตร วิธีการผันอากาศอัดให้เป็นกระแสไฟฟ้าเป็นแบบปริมาตรคงที่ อัดอากาศสู่อุโมงค์ด้วยอัตราประมาณ 108 กิโลกรัม/วินาที ความดันอากาศภายในโพรงสูงสุดขณะกักเก็บอากาศเท่ากับ 70 บาร์ และปล่อยอากาศออกด้วยอัตรา 417 กิโลกรัม/วินาที เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ความดันภายในโพรงจะลดต่ำลงมาเท่ากับ 20 บาร์ โดยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินการโพรงที่ได้รับการออกแบบมีเสถียรภาพดี เทคโนโลยีนี้ใช้ที่เมือง McIntosh มลรัฐ Alabama ประเทศสหรัฐอเมริกา ในปี ค.ศ.1991 ซึ่งมีกำลังการผลิตเท่ากับ 110 เมกะวัตต์

ในปัจจุบันเทคโนโลยีอากาศอัดภายใต้แรงดันในชั้นหินได้แบ่งวิธีการผันพลังงานไฟฟ้าที่กักเก็บในรูปอากาศอัดออกเป็น 2 วิธี คือ

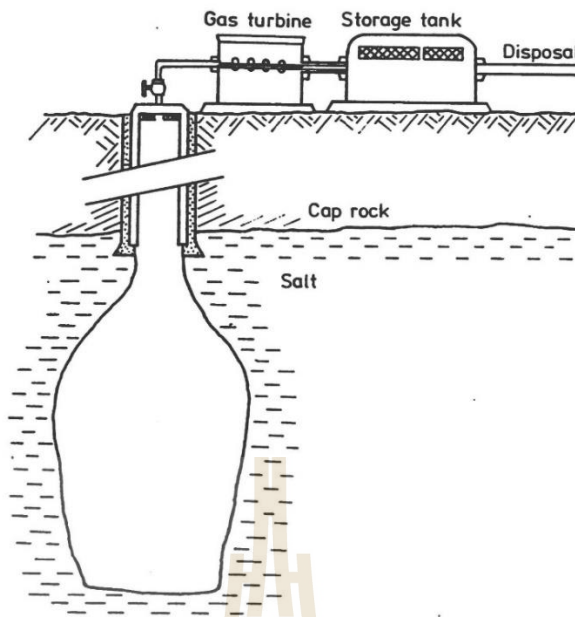
1) ความดันคงที่ (Constant Pressure System) วิธีนี้มีแนวคิดโดยให้น้ำจากอ่างเหนือโรงไหลดันเข้าไปแทนที่อากาศที่ถูกอัดเข้าไปตอนแรกให้ไหลออกมาผลิตกระแสไฟฟ้า หลังจากนั้นอากาศจะถูกอัดคืนเข้าไปในโรงอีกครั้งเมื่อมีกระแสไฟฟ้าเหลือในเวลากลางคืน น้ำที่อยู่ในโรงจะไหลคืนมายังอ่างเก็บน้ำเหนือโรง กระบวนการเช่นนี้มีลักษณะเป็นวัฏจักร วิธีนี้เหมาะสำหรับหินที่เป็นหินแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 2.1

2) ปริมาตรคงที่ (Constant Volume System) วิธีนี้มีแนวคิดให้มีการเปลี่ยนแปลงความดันในโรง โดยภายในโรงจะมีแต่อากาศอัดอย่างเดียว อากาศภายใต้แรงดันนี้จะถูกปล่อยออกมาผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งทำให้ความดันภายในโรงค่อยๆ ลดลงเมื่อถึงช่วงที่กระแสไฟฟ้าเหลือใช้ก็จะอัดอากาศกลับเข้าไปในโรงอีก ขบวนการนี้จะเป็นวัฏจักรอย่างต่อเนื่อง และเพื่อความมีเสถียรภาพของโรง ความดันจะถูกจำกัดไม่ให้ต่ำหรือสูงกว่าที่ออกแบบไว้ วิธีนี้จะเหมาะสมกับโรงในชั้นเกลือหินดังแสดงในรูปที่ 2.2

เทคโนโลยีการสะสมพลังงานไฟฟ้าในรูปอากาศภายใต้แรงดันในชั้นหินได้ถูกพัฒนาและดำเนินการในหลายประเทศโดยอาศัยชั้นหินต่างๆ ที่เหมาะสมในพื้นที่นั้นๆ เป็นตัวกักเก็บอากาศอัด ส่วนใหญ่จะเป็นหินที่อยู่ในกลุ่มของชั้นหินตะกอนและหินแข็งที่มีคุณสมบัติค่าความซึมผ่านต่ำ



รูปที่ 2.1 ระบบการผันพลังงานแบบความดันคงที่ (Constant Pressure System) โครงการ Soyland Project มลรัฐ Illinois ประเทศสหรัฐอเมริกา (Salter et al., 1984)



รูปที่ 2.2 ระบบการผันพลังงานแบบปริมาตรคงที่ (Constant Volume System) (Wolfgang, 1982)

2.1.1 การกักเก็บในชั้นหินตะกอนและหินแข็ง

ประเทศญี่ปุ่นได้มีการเก็บพลังงานในรูปอากาศภายใต้แรงดันในชั้นหินกรวดมน (Shidahara et al., 2000) และในชั้นหินปูน (Liang and Lindblon, 1999) ส่วนประเทศอังกฤษและสหรัฐอเมริกาได้ใช้ชั้นหินแข็งต่างๆ เพื่อเก็บพลังงานในรูปอากาศอัดเช่นเดียวกัน (McKay et al., 1989; Salter et al., 1984; Pincus, 1978., Morfeldt, 1975) มีนักวิจัยหลายท่าน ได้ศึกษาและวิเคราะห์ เพื่อที่จะออกแบบโรงในชั้นหินดังกล่าวอย่างละเอียด

Salter et al. (1984) ได้ศึกษาและออกแบบโรงสำหรับเก็บอากาศในชั้นหิน Dolomite ภายใต้ชื่อโครงการ “The Soyland CAES project” ในมลรัฐอินเดียนา ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยผันพลังงานในรูปอากาศภายใต้แรงดันให้เป็นกระแสไฟฟ้าด้วยวิธีความดันคงที่ โรงแปรงหินมีความจุเท่ากับ 245,000 ลูกบาศก์เมตร ที่ระดับความลึก 580 เมตร

McKey et al. (1989) ได้ศึกษาและออกแบบโรงสำหรับเก็บพลังงานในชั้นหิน Granitic Gneiss ภายใต้ชื่อโครงการ “The Bad Creek Project” ขนาดของโรงมีความกว้าง 23 เมตร ความยาว 132 เมตร และความสูง 50 เมตร มีความจุทั้งหมดเท่ากับ 1,518,000 ลูกบาศก์เมตร โดยโครงการนี้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 1,000 เมกะวัตต์ นอกจากนี้โครงการยังมีความเหมาะสมทั้งทางด้านเศรษฐศาสตร์และความปลอดภัยในการก่อสร้าง

Wittke et al. (1978) ได้ศึกษาและวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อออกแบบโรงในชั้นหินโคลนที่ Vianden โรงแปรงอยู่ที่ความลึก 500 เมตร ลักษณะโรงเป็นห้องๆ รูปทรงกระบอกรี มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 5.5 เมตร และยาว 5 กิโลเมตร วางตัวในแนวระนาบมีการสร้างอ่าง

เก็บน้ำอยู่เหนือโพรงเพื่อใช้ดันอากาศในโพรงให้เข้าสู่กระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าและช่วยค้ำยันโพรง ปริมาตรอากาศในโพรงเท่ากับ 100,000 ลูกบาศก์เมตร โพรงนี้ใช้ระบบการผันกระแสไฟฟ้าแบบความดันคงที่ที่ความดัน 50 บาร์ โครงการนี้มีกำลังการผลิตถึง 300 เมกะวัตต์ ในช่วงเวลา 4 ชั่วโมง

DeLong et al. (1989) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในโครงการเก็บพลังงานในรูปอากาศอัดที่บริเวณตอนบนด้านทิศตะวันตกของสหรัฐอเมริกา โดยพิจารณาความเหมาะสมในเชิงธรณีวิทยาของ แหล่งหิน และลักษณะความต้องการทางด้านพลังงานไฟฟ้าควบคู่กันไป ที่เมือง Norton มลรัฐ Ohio ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้มีการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นหินปูน ความจุของโพรงประมาณ 1,000,000 ลูกบาศก์เมตร โดยอาศัยน้ำที่เก็บไว้ในอ่างเหนือโพรงดันอากาศที่เก็บไว้ออกมาผลิตกระแสไฟฟ้า (Crotono, 2001)

2.1.2 การกักเก็บในชั้นเกลือหิน

การเก็บพลังงานในรูปอากาศอัดในชั้นเกลือหินหรือโดมเกลือหินเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย เพราะมีคุณสมบัติทางกลศาสตร์และกลศาสตร์ที่เหมาะสม ซึ่งผลงานของนักวิจัยหลายท่านได้ระบุว่าการกักเก็บอากาศอัดในชั้นเกลือหินจะให้ประสิทธิภาพดีกว่าในหินชนิดอื่นๆ Katz and Rady (1976), Chang et al. (1980) และ DeLong et al. (1989) ได้เสนอแนวคิดและสรุปการดำเนินงานของเทคโนโลยีนี้อย่างละเอียดในการออกแบบและวิเคราะห์ที่โพรงละลายในชั้นเกลือหินเพื่อใช้กักเก็บอากาศอัดในประเทศสหรัฐอเมริกาและเยอรมนี (Serata and Hiremath, 1989; Thoms and Gehle, 1982; Wittke et al., 1978; Fuenkajorn and Daemen, 1992; Fuenkajorn and Serata, 1992) มีนักวิจัยหลายท่านในหน่วยงานต่างๆ ได้ทำการศึกษาในเชิงกลศาสตร์และธรณีวิทยาในการใช้ชั้นเกลือหินและโดมเกลือหินในการก่อสร้างโพรงเพื่อเก็บอากาศอัด

Serata et al. (1989) ได้วิเคราะห์เสถียรภาพทางด้านธรณีกลศาสตร์ของโดมเกลือหินที่เมือง McIntosh ที่อยู่ทางตอนใต้ของมลรัฐอลาบามาเพื่อใช้เก็บอากาศอัด โดยใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์มาช่วยในการวิเคราะห์ โปรแกรมที่ใช้คือ REM ผลจากการวิเคราะห์ได้นำมาใช้ในการประเมินผลกระทบในระยะยาวของเกลือหินรอบโพรง นอกจากนี้การวิเคราะห์จะเน้นเรื่องการวิรูป การกระจายตัวของความเค้น อัตราการทรุดตัว และการยุบตัวของโพรง

หน่วยงานรัฐบาลในประเทศสหรัฐอเมริกาได้ทำการพัฒนาเทคโนโลยีนี้อย่างละเอียดและต่อเนื่องคือ Electric Power Research Institute (EPRI) ซึ่งได้ทำการวิจัยค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการเก็บพลังงานไฟฟ้าในรูปอากาศอัดในชั้นเกลือหินในหลายด้าน เช่น วิธีการออกแบบโพรง (EPRI, 1990; EPRI, 1992; EPRI, 1994) การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (EPRI, 1994; EPRI, 1997; EPRI, 2000) การประเมินทางด้านเศรษฐกิจ (EPRI, 1986; EPRI, 1999) และการใช้หินชนิดอื่นๆ ที่ไม่ใช่เกลือหิน (EPRI, 1990) เป็นต้น ผลงานวิจัยเหล่านี้ไม่ได้นำมาตีพิมพ์ต่อสาธารณชน เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่ถูกสงวนลิขสิทธิ์และมีผลประโยชน์ทางการค้า

2.2 คุณสมบัติของเกลือหิน

2.2.1 คุณสมบัติของเกลือหินเชิงกลศาสตร์

การศึกษาและวิจัยด้านกลศาสตร์เกลือหินมีจุดมุ่งหมายหลักเพื่อศึกษากลไกและพฤติกรรมของเกลือหินในระยะเวลายาว โดยอาศัยการทดสอบเชิงกลศาสตร์และความรู้พื้นฐานทางวิศวกรรมศาสตร์มาประยุกต์ใช้ เพื่อหาคุณสมบัติของเกลือหินและสร้างสมการหรือกฎเกณฑ์เชิงคณิตศาสตร์ในการประเมินและคาดคะเนพฤติกรรมของเกลือหินในสถานะชั้นหินที่มีแรงกด ความร้อน และความชื้น เป็นต้น คุณสมบัติของเกลือหินเชิงกลศาสตร์จึงเกี่ยวข้องกับค่าความเค้น ความเครียด อุณหภูมิ และเวลา คุณสมบัติเหล่านี้จะถูกกำหนดเป็นส่วนหนึ่งของสมการเชิงคณิตศาสตร์เพื่อให้สามารถอธิบายพฤติกรรมของเกลือหินในด้านต่างๆ ได้

ผู้วิจัยหลายท่านได้เสนอว่าเกลือหินมีคุณสมบัติเหมือนโลหะและเซรามิก (Munson and Wawersik, 1993; Chokski and Langdon, 1991) แต่แท้จริงแล้วเกลือหินจัดเป็นหินชนิดหนึ่งจำพวก Alkali halides และมีคุณสมบัติไม่เหมือนกับโลหะ เซรามิก และหินอื่นๆ Barber (1990) และ Aubertin et al. (1992, 1993, 1999) ได้ศึกษาคุณสมบัติของเกลือหินและสรุปว่า เกลือหินมีคุณสมบัติแบบกึ่งเปราะกึ่งเหนียวหรือมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น-พลาสติก กล่าวคือ เกลือหินจะมีพฤติกรรมทั้งแบบยืดหยุ่น แบบยืดหยุ่น-พลาสติก และแบบพลาสติก (Jeremic, 1994; Aubertin et al., 1992, 1993, 1999; Fokker, 1995, 1998)

พฤติกรรมเชิงยืดหยุ่น (Elastic behavior) ของเกลือหินส่วนใหญ่จะถูกพิจารณาในลักษณะความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงและมีการวิบัติแบบเปราะ ความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงสามารถสังเกตได้เมื่อมีแรงกดต่ำกว่าแรงกดอ่อนตัว ในช่วงความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นได้ โดยปกติแล้วเกลือหินมีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่ต่ำกว่าหินชนิดอื่นๆ

พฤติกรรมเชิงยืดหยุ่น-พลาสติก (Elastic and plastic behavior) ของเกลือหินจะเกิดขึ้นเมื่อแรงกดที่มากระทำต่อเกลือหินยังไม่เกินจุดอ่อนตัว เมื่อปล่อยแรงกดทำให้เกลือหินกลับสู่สภาพเดิมหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือเกลือหินมีการเปลี่ยนรูปไปชั่วขณะเท่านั้น แต่ในขณะที่เดียวกันเมื่อให้แรงกดต่อไปเกลือหินจะเข้าสู่ช่วงที่เป็นพลาสติก กล่าวคือความเค้นจะเลยจุดความเค้นอ่อนตัวไปแล้วนั่นเอง เมื่อลดแรงกด เกลือหินจะไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ ถ้าให้แรงกดต่อไปเกลือหินจะไม่สามารถทนแรงกดที่สะสมไว้ได้และในที่สุดเกลือหินก็จะเกิดการวิบัติ

พฤติกรรมเชิงพลาสติก (Plastic behavior) ของเกลือหินจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงรูปร่างถาวรจนกว่าแรงที่กระทำจะเกินจุดอ่อนตัว (Thorel and Ghoreychi, 1993; Fryne et al., 1996) ที่แรงกดสูงนี้ เกลือหินจะมีการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกไม่มีที่สิ้นสุดหากแรงกดที่กระทำยังคงเท่ากับแรงกดคงที่ เมื่อถึงขีดจำกัดของความเครียดค่าหนึ่งเกลือหินก็จะไม่สามารถทนรับแรงกดนี้ต่อไปได้และจะเกิดการวิบัติ

การวิรูปของเกลือหินที่ได้รับอุณหภูมิระดับสูง ทำให้เกิดการเปลี่ยนตำแหน่งของผลึกได้ง่าย เมื่อได้รับแรงกดก็จะเกิดแรงในแนวเฉือนทำให้เกิดการเคลื่อนไหลง่ายขึ้น ดังนั้นในเชิงกลศาสตร์แรงกดและความร้อนเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญในการศึกษาพฤติกรรมและกลไกการเคลื่อนไหลของเกลือหิน (Duesbery et al., 1991; Senseny et al., 1992; Carter et al., 1993) นอกจากนี้การวิรูปของเกลือหินยังมีความสัมพันธ์กับอัตราความเครียดแบบไม่ยืดหยุ่นและความเค้นแปรผัน (Spiers et al., 1990; Barber, 1990; Chokski and Langdon, 1991; Wolfenstine et al., 1991)

สำหรับการทดสอบเชิงกลศาสตร์มีการออกแบบวิธีการทดสอบให้สอดคล้องกับพฤติกรรมของเกลือหินและสภาวะธรรมชาติ เช่น การกำหนดอัตราความเค้นคงที่เพื่อประเมินพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง การกำหนดการยุบตัวคงที่เพื่อประเมินการผ่อนคลายความเค้น และการกำหนดให้แรงกดคงที่เพื่อประเมินการเคลื่อนไหลของเกลือหินตลอดระยะเวลาการทดสอบ โดยแต่ละการทดสอบมีอุณหภูมิที่แตกต่างกันไป เป็นต้น ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงกลไกการเคลื่อนไหลภายใต้สภาวะต่างๆ เช่น ในเชิงความสัมพันธ์ของอัตราความเค้น ความเครียด และอุณหภูมิของการเคลื่อนไหล (Steady creep state) ผลที่ได้นี้สามารถให้ค่าที่เป็นความสัมพันธ์เพียงหนึ่งเดียว ส่วนพฤติกรรมการเคลื่อนไหลในช่วงสั้น (Transient creep state) ผลที่ได้เน้นถึงการเคลื่อนไหลแบบไม่ยืดหยุ่น ซึ่งจะมีความสัมพันธ์หลายค่าหรือมีความแปรผันมากนั่นเอง

2.2.2 คุณสมบัติความซึมผ่านของเกลือหิน

การศึกษาศักยภาพในการกักเก็บของชั้นเกลือหินในต่างประเทศมีมากกว่า 30 ปี คณะผู้วิจัยในหลายสถาบันมีความเชื่อว่าชั้นเกลือหินมีคุณสมบัติเป็นหินกั้นน้ำ (Aquitard) หรือเป็นหินที่ปิดน้ำ (Impermeable rock) ในขณะนั้นจึงไม่มีการศึกษาหรืองานวิจัยใดๆ ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติการซึมผ่านของชั้นเกลือหินอย่างจริงจัง จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1990 Dr. John C. Stormont ได้ทำการตรวจวัดค่าความซึมผ่านของชั้นเกลือหินในเมืองเกลือที่มลรัฐนิวเม็กซิโก และพบว่าค่าความซึมผ่านของเกลือหินที่อยู่ไกลจากอุโมงค์หรือโพรงจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 10^{-22} ตารางเมตร (หรือประมาณ 10^{-9} ดาร์ซี) แต่เกลือหินที่อยู่ใกล้กับผนังอุโมงค์หรือโพรงอาจจะมีค่าสูงกว่า 10^{-18} ตารางเมตร (หรือสูงกว่า 10^{-5} ดาร์ซี) (Stormont, 1990) ต่อมา Stormont and Daemen (1992) และ Peach (1991) ได้ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการและได้ผลยืนยันว่าคุณสมบัติความซึมผ่านของเกลือหิน (Salt permeability) สามารถมีค่าสูงกว่าที่คาดการณ์ไว้มาก โดยเฉพาะเมื่อเกลือหินนั้นอยู่ภายใต้ความเค้นที่แตกต่างกันมากในแต่ละทิศทาง (Anisotropic stress) ความแตกต่างของความเค้นที่จุดๆ หนึ่งในเกลือหินถ้าสูงพอจะทำให้เกิดรอยแตกเล็กๆ ในเนื้อหิน (Micro-cracks) รอยแตกเล็กๆ นี้จะมีทิศทางค่อนข้างขนานกับทิศทางของความเค้นหลักสูงสุด (Major principal stress) และเมื่อรอยแตกเล็กๆ นี้พัฒนามากขึ้นจนเชื่อมต่อกันก็จะนำไปสู่ความซึมผ่านที่สูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งความซึมผ่านที่อยู่ในทิศทางที่ขนานกับทิศทางของความเค้นหลักสูงสุด นอกจากนั้นแล้วความสามารถในการซึมผ่านของอากาศหรือของเหลวในชั้นเกลือหินก็ยัง

ขึ้นกับขนาดและความแตกต่างของความเค้นหลักในสามทิศทางที่จุดนั้นๆ ดังนั้น ในบริเวณที่ใกล้กับผนังของโพรงหรืออุโมงค์ค่าความแตกต่างของความเค้นจะมีค่าสูงสุด และเกลือหินจะเกิดการวิรูปหรือเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบยืดหยุ่นและพลาสติกโดยขึ้นกับเวลา และเมื่อถึงจุดๆ หนึ่งถ้าค่าความแตกต่างของความเค้นยังลดลงไม่เพียงพอ เกลือหินก็จะเกิดการแตกร้าวขึ้น ซึ่งเป็นที่มาของความสามารถในการซึมผ่านที่สูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันเกลือหินที่อยู่ไกลจากผนังอุโมงค์หรือโพรงจะมีค่าความแตกต่างของความเค้นหลักน้อย เกลือหินในบริเวณนั้นจึงมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อยกว่า และอาจจะไม่มีการแตกร้าวเกิดขึ้น ทำให้เกลือหินที่อยู่ไกลจากผนังอุโมงค์ยังคงมีค่าความซึมผ่าน (Permeability) ต่ำเหมือนไม่มีผลกระทบของอุโมงค์เกิดขึ้น

ข้อสรุปโดยสังเขปเบื้องต้นนี้ได้รับการยืนยันโดย Fuenkajorn and Serata (1992) ซึ่งได้นำผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการมาสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และใช้วิธีคำนวณเชิงตัวเลข (Finite element analysis) และได้ผลสรุปว่าปัจจัยที่มีผลต่อคุณลักษณะและการกระจายตัวของค่าความซึมผ่านในชั้นเกลือหินที่อยู่รอบๆ โพรงหรืออุโมงค์ คือ (1) ความลึกของโพรงหรือค่าความเค้นในชั้นหินก่อนที่จะสร้างอุโมงค์ (2) เวลาหรืออายุของโพรง (3) รูปร่างของโพรง (4) คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของชั้นเกลือ (5) แรงดันข้างในโพรง และ (6) ระยะห่างจากผนังของโพรงที่ความลึกประมาณ 3000 ถึง 4500 ฟุต แนวโน้มที่จะเกิดการซึมผ่านรอบๆ โพรงจะมีมากเนื่องจากขนาดและการกระจายตัวของความเค้นอยู่ในระดับสูงพอที่จะทำให้เกิดการแตกร้าวรอบๆ โพรงแต่จะไม่สูงเกินไปจนกระทั่งทำให้เกลือหินเปลี่ยนรูปหรือวิรูปแบบพลาสติก โดยส่วนใหญ่แล้วค่าความซึมผ่านของเกลือหินรอบๆ โพรงจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุของโพรง และจะมีค่าสูงสุดที่อายุประมาณ 2-3 ปี หลังจากนั้นแล้วค่าความซึมผ่านจะมีค่าคงที่ ทรายใดที่ยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเค้นเกิดขึ้นใหม่ โพรงหรืออุโมงค์ที่มีรูปร่างทรงกลมจะไม่ทำให้ค่าความซึมผ่านรอบโพรงสูงขึ้นเท่าใดนัก แต่ถ้าโพรงมีลักษณะเป็นรูปทรงรียาวจะทำให้เกลือหินรอบๆ โพรงนั้นมีค่าความซึมผ่านสูงมาก เช่น ถ้าอัตราส่วนของความยาวต่อความกว้างของโพรงมีค่าเท่ากับ 3:1 ขึ้นไป ค่าความซึมผ่านสูงสุดของเกลือหินที่ติดอยู่กับโพรงอาจจะมีค่าถึง 10^{-8} ตารางเมตร หรือประมาณ 10^5 ดาร์ซี เป็นต้น โพรงที่มีแรงดันข้างในประมาณครึ่งหนึ่งของความเค้นในชั้นหินข้างนอกสามารถลดความซึมผ่านในชั้นเกลือหินรอบๆ โพรงได้พอสมควร เนื่องจากความดันในโพรงที่เหมาะสมสามารถลดความแตกต่างของค่าความเค้นหลักสูงสุดและความเค้นหลักต่ำสุดในเกลือหิน ซึ่งมีผลทำให้การพัฒนาของรอยแตกร้าวในเกลือหินลดลง โดยทั่วไปแล้วเกลือหินจะมีค่าความซึมผ่านสูงสุดที่บริเวณติดกับผนังของโพรงหรืออุโมงค์ พอลึกเข้าไปในชั้นหินจากผนังของโพรงเกลือหินจะมีค่าความซึมผ่านลดลงจนในที่สุดมีค่าเท่ากับค่าเดิม (ค่าที่ไม่มีผลกระทบต่ออุโมงค์) ซึ่งจะมีค่าประมาณ 10^{-9} ดาร์ซี โดยทั่วไปแล้วการกระจายตัวของความซึมผ่านที่เพิ่มขึ้นจะอยู่รอบโพรงที่ระยะห่างประมาณ 2-3 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของโพรง เนื่องจากความสามารถในการซึมผ่านเป็นตัวแปรสำคัญที่จะนำไปสู่ความสำเร็จและความมีประสิทธิภาพในการพัฒนาเทคโนโลยีการกักเก็บในชั้นเกลือหิน ดังนั้น ข้อสรุปที่ได้จาก Fuenkajorn and Serata (1992) จึงนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบขนาด รูปร่าง และ

ระยะห่างระหว่างโพรงที่ใช้ในการกักเก็บสารเคมีและก๊าซธรรมชาติในต่างประเทศ และนำมาใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์เสถียรภาพทางกลศาสตร์และพลศาสตร์ของเหมืองเกลือหินที่ใช้เทคโนโลยีการละลายเช่นกัน

2.2.3 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของเกลือหิน

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของเกลือหินมีอยู่หลายประการ ซึ่งจะสะท้อนให้เห็นในรูปของการเปลี่ยนรูปหรือการเคลื่อนไหล รวมทั้งยังทำให้ความต้านทานต่อแรงกดหรือแรงดึงมีค่าลดลง Franssen (1998) และ Fokker (1998) ได้อธิบายปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมการเคลื่อนไหลและความต้านทานของเกลือหินทั้งสถานะในชั้นเกลือหินและในห้องปฏิบัติการ ซึ่งรวมไปถึงขนาดผลึก แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึก การวิรูปตามเวลา อุณหภูมิ ความชื้น และสิ่งเจือปน เป็นต้น

ขนาดผลึกหรือขนาดเม็ดเกลือจะมีผลกระทบต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปร่างและการเคลื่อนไหลของเกลือหิน กล่าวคือ เมื่อเปรียบเทียบขนาดผลึกกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่าง 60 มิลลิเมตร พบว่าขนาดผลึกที่มีขนาดใหญ่จะมีโอกาสเกิดแนวแตก (Cleavage plane) และระนาบเลื่อน (Slip plane) ได้มากขึ้น (Aubertin, 1993; Billiotte, 1993; Aubertin, 1996) Franssen and Spiers (1990), Raj and Pharr (1992), Senseny et al. (1992) และ Wanten et al. (1993) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของผลึกและการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกของเกลือหินพบว่า ความต้านแรงเฉือนและการวิรูป (Shear strength and deformation) จะเกิดขึ้นตามแนวหรือทิศทางของผลึก ดังนั้นตัวอย่างเกลือหินที่มีขนาดเล็กเกินไปจะมีความต้านแรงกดที่ปรวนแปร ผลการทดสอบที่ได้จึงไม่สามารถเปรียบเทียบกับขนาดอื่นได้ ดังนั้น ASTM จึงได้ออกข้อกำหนดมาตรฐานสากลขึ้น (ASTM D2938, D2664 and D3967; Barber, 1990) เพื่อที่จะกำหนดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่าง ให้มีขนาดมาตรฐานและสามารถเทียบเคียงกันได้ กล่าวคือเส้นผ่าศูนย์กลางต้องมีขนาดมากกว่าสิบเท่าของขนาดผลึก

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของเกลือหินในด้านความต้านทานของเกลือหิน เกลือหินที่มีลักษณะเนื้อต่างกันจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกต่ำกว่าบริเวณที่เป็นเนื้อเดียวกัน จากลักษณะดังกล่าวนี้ Wanten et al. (1993) และ Allemandou and Dusseault (1993) ได้สังเกตพฤติกรรมเกลือหินจากการทดสอบแรงดึงแบบบราซิเลียนและการทดสอบแรงกดในแกนเดียวพบว่า ค่าความเค้นจะขึ้นกับแรงยึดเหนี่ยวภายในผลึกและรอยต่อระหว่างผลึกของเกลือหิน ความเปราะเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของเกลือหินที่แสดงถึงความสามารถในการยึดเหนี่ยวระหว่างผลึก เช่น การเตรียมตัวอย่างการตัดและการขัดตัวอย่างเกลือหินจะพบว่าในบริเวณขอบของตัวอย่างอาจเกิดการแตกได้ง่าย เนื่องจากเกลือหินมีความสามารถยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกค่อนข้างต่ำ

อัตราการกัดหรือความเร็วของการกัดที่กระทำต่อเกล็ดหินที่แตกต่างกันจะทำให้เกล็ดหินมีการวิรูปตามเวลาหรือเปลี่ยนแปลงรูปร่างและใช้เวลาในการวิรูปไม่เท่ากัน กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือการเคลื่อนไหลของเกล็ดหินที่เกิดขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาในสภาวะแรงกดที่แตกต่างกัน ภายใต้้อตราสูงเกล็ดหินจะมีพฤติกรรมแบบเปราะ แต่ภายใต้้อตราแรงกดที่ต่ำจะทำให้พฤติกรรมของเกล็ดหินเป็นแบบพลาสติกมากขึ้น เป็นผลให้มีจุดอ่อนตัวของความต้านแรงกดที่ต่ำ ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวได้ศึกษาโดย Aubertin (1993) Hardy (1993) และ Roberson (1995) พบว่าน้ำหนักกดทับในชั้นเกล็ดหินภายใต้ระยะเวลายาวแรงกดทับในเนื้อหินจะค่อยๆ ลดลง Hardy (1993) ได้ทำการทดสอบตัวอย่างเกล็ดหินด้วยแรงกด 10.3 เมกะปาสคาล และรักษาระดับการเปลี่ยนรูปไว้ในระยะเวลา 12 เดือน พบว่าความต้านแรงกดจะลดลงไปถึง 21 เปอร์เซ็นต์

ความร้อนหรืออุณหภูมิจะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนรูปของเกล็ดหินอย่างมาก คือทำให้ช่วงเวลาการเคลื่อนไหลยาวนานมากขึ้น และยังทำให้ความหนืดของเกล็ดหินเพิ่มขึ้นด้วย (Ghoreychi, 1996; Brock and Heilbron, 1998) การศึกษาที่เกี่ยวกับอุณหภูมิและความลึกของชั้นเกล็ดหินมีผู้วิจัยหลายท่านได้ศึกษาไว้แล้ว (Franssen and Spiers, 1990; Cristescu and Hunsche, 1991; Raj and Pharr, 1992; Senseny et al., 1992; Berest and Blum, 1992; Carter et al., 1993; Schneefub and Droste, 1996; Berest et al., 1998) การศึกษาดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังนี้ ระดับความลึกของชั้นหินที่เพิ่มขึ้นจะทำให้มีความร้อนสูง ความร้อนจะทำให้เกล็ดหินมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับพลาสติกมากยิ่งขึ้นและทำให้ความต้านแรงกดลดลง โดยปกติเกล็ดหินจะมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส แต่การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ตลอดระยะเวลาเพียง 8 ชั่วโมง ก็สามารถทำให้เกล็ดหินสูญเสียความต้านแรงกดไปได้ Cristescu (1989, 1994) และ Cristescu and Hunsche (1996) ได้แนะนำว่าการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ควรใช้อัตราการยุบตัวที่ต่ำกว่า 10^{-8} รอบ/วินาที และที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ควรใช้อัตราการยุบตัวต่ำกว่า 10^{-7} รอบ/วินาที เพราะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกล็ดหินเกิดการเคลื่อนไหลเร็วขึ้นทำให้มีการวิรูปได้ง่าย (Harmami et al., 1996)

ความชื้นจะทำให้คุณสมบัติเกล็ดหินเปลี่ยนไป กล่าวคือ ความต้านแรงกดของเกล็ดหินจะลดลง (Hunsche and Schulze, 1993; leCleac'h et al., 1996) เนื่องจากจากเกล็ดหินจะมีความไวต่อความชื้นในอากาศ ความชื้นจะทำปฏิกิริยาเคมีกับเกล็ดหินทำให้เกิดการละลายเกลือและมีน้ำเกลือเยิ้มขึ้นมา สำหรับการเตรียมตัวอย่างเกล็ดหินในห้องปฏิบัติการสามารถป้องกันความชื้นได้ด้วยนำตัวอย่างเกล็ดหินมาห่อหุ้มด้วยพลาสติกกันความชื้น นอกจากนี้แล้วความชื้นสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายเมื่อมีอุณหภูมิเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของความชื้นต่อความต้านแรงกดได้ศึกษาโดย Billiotte (1993) Bonte (1993) และ Adler et. al. (1993) ทำการทดสอบหาความต้านแรงกดกับตัวอย่างเกล็ดหินที่มีความชื้นสูงด้วยการนำตัวอย่างเกล็ดหินแช่ในน้ำเกลือ พบว่าเกล็ดหินจะมีความต้านแรงกดลดลง เกล็ดหินที่แห้งปกติจะมีกำลังต้านแรงกดเท่ากับ 30 เมกะปาสคาล และมีกำลังลดลงเพียง 1 เมกะปาสคาล เมื่อมีความชื้นในเกล็ดหินเท่ากับ 7 เปอร์เซ็นต์

สิ่งเจือปนหรือสิ่งสกปรกในเนื้อหินเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อความต้านแรงกดของเกลือหิน สิ่งเจือปนเหล่านี้เช่น Anhydrite และตะกอนอื่นๆ ที่มีการกระจายตัวในเกลือหิน ในบางกรณีจะไปลดความต้านแรงกดและทำให้เกลือหินมีพฤติกรรมการเคลื่อนไหลที่ต่างกันออกไป (Peach, 1993; Hunsche, et al., 1993; Hansen et al., 1987) สิ่งเจือปนในเกลือหินจะมีผลต่อพฤติกรรมการเคลื่อนไหลแม้จะมีจำนวนเพียงเล็กน้อยก็ตาม เพราะสิ่งเจือปนในเนื้อหินจะเป็นตัวที่กีดขวางแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกและการเคลื่อนไหลของเกลือหินทำให้เกิดการแปรผันในเชิงกลศาสตร์ โดยจะทำให้แรงกดมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอและไม่ต่อเนื่อง (Franssen and Spiers, 1990; Raj and Pharr, 1992; Senseny et al., 1992)

2.3 การทดสอบแรงกดแบบวัฏจักร

การทดสอบแรงกดแบบวัฏจักร (Cyclic loading test) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การทดสอบความล้า (Fatigue test) เป็นการทดสอบโดยให้แรงกดเพิ่มขึ้นและลดลงครั้งแล้วครั้งเล่า เพื่อศึกษาว่าวัสดุนั้นจะสามารถรับแรงที่เปลี่ยนแปลงขึ้นและลงได้มากี่รอบก่อนที่จะเกิดการวิบัติ ความหมายของแรงกดแบบวัฏจักรในเชิงการวิบัติ (Mode of failure) อาจกล่าวได้ว่าเป็นการทดสอบที่ให้แรงซ้ำๆ โดยที่แรงดังกล่าวนี้มีค่าน้อยกว่าความเค้นวิบัติที่ได้จากการทดสอบดึงหรืออัดให้วิบัติเพียงครั้งเดียว หรือเรียกว่า กำลังสถิต (Static strength) โดยที่แรงดังกล่าวเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดจุดเริ่มต้นของรอยแตกในวัสดุที่ทำการทดสอบ รอยแตกดังกล่าวจะพัฒนาเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเกิดการวิบัติ (Cruden, 1970) กลไกสำหรับการเกิดแรงกดแบบวัฏจักรนี้สามารถอธิบายได้อีกอย่างหนึ่งว่าเป็นลักษณะระดับของแรงที่แกว่งขึ้นลง ซึ่งทำให้เกิดการสะสมพลังงานเพิ่มขึ้น แต่อยู่ในระดับต่ำกว่าแรงต้านสูงสุดของวัสดุ นั้นๆ จนในที่สุดวัสดุหรือโครงสร้างทางวิศวกรรมนั้นเกิดการวิบัติ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ความล้า (Fatigue)

ผลกระทบของแรงกดแบบวัฏจักรสามารถทำให้โครงสร้างทางวิศวกรรมเกิดการวิบัติอยู่บ่อยครั้งไม่ว่าจะเป็นฐานรากเขื่อน ถนน สะพาน อุโมงค์ หรือแม้กระทั่งโพรงที่ใช้สำหรับเก็บอากาศในชั้นหินต่างๆ สาเหตุก็เนื่องมาจากการเกิดแผ่นดินไหว การจลาจล การระเบิด และการอัดอากาศเข้าออกเพื่อนำมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น หรือแม้แต่วัสดุทางวิศวกรรมโยธา เช่น เหล็ก คอนกรีต หรือดิน ก็ยังได้รับผลกระทบจากแรงแบบวัฏจักรเช่นกัน ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรที่ได้ทดสอบในหินเท่านั้น

จุดประสงค์ของการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรของเกลือหินคือ เพื่อที่จะทำความเข้าใจเกี่ยวกับอายุการใช้งานของโครงสร้างที่มีสถานะภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร และเพื่อใช้ในการออกแบบระบบการควบคุมอากาศอัด เนื่องจากโพรงเกลือหินอยู่ภายใต้แรงดันที่ไม่คงที่ โดยความดันจะสูงและต่ำอย่างเป็นระบบตามวัฏจักรการใช้งาน อายุการใช้งานจะแสดงให้เห็นในลักษณะจำนวนครั้งที่ถูกกระทำด้วยแรงดันขึ้นลงก่อนที่จะวิบัติ ซึ่งขึ้นกับลักษณะความดันที่มากระทำ (Pasaris, 1982)

โครงสร้างที่ทำจากเหล็ก เช่น เหล็ก สแตนเลส และอื่นๆ ที่มีแรงกระทำจากลมอาจเป็นสาเหตุของการวิบัติหรือเหล็กที่รับแรงบิดมีความจำเป็นที่จะต้องทำการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรเพื่อพิจารณาถึงอายุการใช้งาน ดังนั้น การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุอันเนื่องมาจากผลกระทบของแรงกดแบบวัฏจักรจึงมีความสำคัญเทียบเท่ากับศาสตร์แขนงอื่น

ผลการทดสอบความล้าเนื่องจากแรงกดแบบวัฏจักรส่วนใหญ่จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น กับความเครียด ความเค้นกับจำนวนรอบที่ทำให้เกิดการแตก (S-N curve) นอกจากนี้แล้วยังสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับเวลา เพื่ออธิบายผลของแรงกดแบบวัฏจักรที่ทำให้เกิดการเคลื่อนไหล หรือเรียกว่า “Creep-cyclic loading” ซึ่งลักษณะการเคลื่อนไหลที่ได้จากการทดสอบวิธีนี้มีความคล้ายคลึงกับการทดสอบการเคลื่อนไหลแบบสถิต เช่น การทดสอบการเคลื่อนไหลด้วยแรงกดในแกนเดียว (Akai and Ohnishi, 1983) และวิธีการทางคลื่นเสียงสะท้อน (Acoustic emission) ก็สามารถใช้ในการศึกษาการโก่งคดของวัสดุหรือโครงสร้างนั้นได้เช่นกัน

2.3.1 การทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรกับหินตะกอน

การศึกษาผลกระทบของแรงกดแบบวัฏจักรต่อคุณสมบัติของหินได้ดำเนินการมากกว่า 40 ปี โดยนักวิจัยในต่างประเทศหลายท่าน จุดประสงค์คือเพื่อที่จะนำผลไปใช้ในการออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมในหินที่มีสภาวะการรับแรงแบบวัฏจักร การทดสอบมีสองลักษณะคือ การทดสอบแรงกดในแกนเดียวแบบวัฏจักร (Uniaxial cyclic loading) และการทดสอบแรงกดสามแกนแบบวัฏจักร (Triaxial cyclic loading) ซึ่งได้มีการใช้เทคนิคทางการตรวจวัดด้วยคลื่นเสียงสะท้อนด้วย (Mogi, 1962; Burdine, 1963; Scholz, 1968; Hardy and Chugh, 1970; Saint-Leu and Sirieys, 1971; Attewell and Farmer, 1973; Haimson and Kim, 1972; Haimson, 1972,1973; Tharp, 1973, Kim, 1973, Khair, 1975; Fuenkajorn and Daeman, 1988) หินชนิดต่างๆ ที่ถูกทดสอบ เช่น หินปูน โดโลไมต์ หินแกรนิต หินทัฟฟ์ หินทราย หินอ่อน และหินดินดาน เป็นต้น ซึ่งสามารถสรุปได้โดยสังเขปดังนี้

Attewell and Farmer (1973) ทดสอบหินปูนโดโลไมต์ โดยพิจารณาขนาดของความเค้นสูงสุด-ต่ำสุดในแต่ละรอบ และความถี่ที่มีผลต่อลักษณะการวิบัติ ความถี่ในการทดสอบจะอยู่ระหว่าง 0.3 ถึง 20.0 เฮิรตซ์ ผลสรุประบุว่า การวิบัติของตัวอย่างหินเกิดจากพลังงานความเครียดสะสมในหินที่สูงจนถึงค่าพลังงานความเครียดวิกฤติ (Critical energy level equivalent) ที่ได้จากการทดสอบการให้แรงที่ไม่เป็นแบบวัฏจักร (Non-cyclic loading) คือการทดสอบแรงกดในแกนเดียว และยังพบว่าความถี่มีผลกระทบกับจำนวนรอบที่แตกของตัวอย่างหิน คือที่ความถี่สูงตัวอย่างหินจะวิบัติเมื่อจำนวนรอบที่ให้แรงมากกว่าความถี่ต่ำ และที่ความถี่สูงตัวอย่างจะวิบัติที่จำนวนรอบที่ให้แรงน้อยกว่าที่ความถี่ต่ำ

Akai and Ohnishi (1983) ทดสอบหินทัฟฟ์ (Tuff) ด้วยแรงกดแบบวัฏจักรโดยควบคุมให้มีการเพิ่มความเครียดอย่างคงที่ (ความถี่ 0.01 เฮิรตซ์) ค่าความเครียดถาวรในแต่ละวัฏจักรจะมากขึ้นตามลำดับ และเส้นกราฟความเค้นกับความเครียดจะมีความชันน้อยลงไปด้วย ซึ่งหมายถึงว่าค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของหินทัฟฟ์มีค่าลดลงเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น ตัวอย่างหินเกิดการวิบัติเมื่อความเครียดถาวรที่สะสมในแต่ละวัฏจักรมีค่าเท่ากับค่าความเครียดที่วิบัติจากการทดสอบแรงกดแบบสถิต ความถี่ที่ทดสอบมีผลต่อการวิบัติของหิน โดยหินจะวิบัติที่ความถี่สูงด้วยจำนวนรอบที่น้อยกว่าความถี่ต่ำ (เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของความเค้นสูงสุด-ต่ำสุดในแต่ละรอบเท่ากัน) ในหินแกรนิตนั้น Ishizuka and Abe (1990) ได้ทดสอบผลกระทบจากความถี่ ความชื้น ความดันล้อมรอบ จำนวนรอบของการแตกที่ทดสอบด้วยความถี่สูง ความชื้นต่ำ (แห้ง) และมีแรงดันล้อมรอบ จะมีค่ามากกว่าที่ทดสอบด้วยความถี่ต่ำ ความชื้นสูง (เปียก) และไม่มีแรงดันล้อมรอบตามลำดับ

Ray et al. (1999) ได้ทำการทดสอบหินทรายด้วยแรงกดแบบวัฏจักร โดยแต่ละรอบของการกดจะเพิ่มความเค้นไปที่ 95 เปอร์เซ็นต์ ของความเค้นสูงสุดในแกนเดียว และลดความเค้นให้อยู่ที่ระดับ 5 เปอร์เซ็นต์ ของความเค้นสูงสุดในแกนเดียว เมื่อทำการทดสอบครบ 10,000 รอบแล้ว แต่ตัวอย่างหินทรายก็ยังไม่เกิดการวิบัติ และได้ทำการทดสอบให้ความเค้นอยู่ในช่วง 30-60 เปอร์เซ็นต์ ของความเค้นสูงสุดในแกนเดียวแล้วลดแรงให้เหลือศูนย์ จำนวน 100 รอบ เท่ากันทุกตัวอย่าง จากนั้นกดตัวอย่างจนเกิดการวิบัติเพื่อหาค่าความต้านทานแรงกดของตัวอย่าง พบว่าความต้านทานแรงกดของตัวอย่างลดลงตามค่าความเค้นที่เพิ่มขึ้น (ที่ระดับความเค้นมาก) หลังจากมีการรับแรงแบบวัฏจักรไปแล้ว ช่วงหนึ่งค่าความต้านทานแรงกดจะลดลงมากเมื่อเทียบกับที่ค่าความเค้นต่ำ ในขณะที่เดียวกันขนาดของความเครียดวิบัติได้เพิ่มขึ้นตามค่าเปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงกด

2.3.2 การทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรกับเกลือหิน

Ma et al. (2013) ทดสอบแรงกดในสามแกนแบบวัฏจักรและแรงกดในสามแกนต่อเกลือหิน เพื่อใช้ออกแบบโครงสำหรับเก็บพลังงานในรูปอากาศภายใต้แรงดัน ความเค้นล้อมรอบที่ใช้เท่ากับ 7, 14 และ 21 เมกะปาสคาล และอัตราการให้ความเค้นในแนวแกนมีค่าคงเท่ากับ 0.05 เมกะปาสคาล/วินาที การทดสอบใช้ความถี่ 0.025, 0.05 และ 0.1 เฮิรตซ์ ตามลำดับ ค่าหน่วยแรงกดสูงสุดจะอยู่ระหว่าง 20-95 เปอร์เซ็นต์ ของความเค้นกดสูงสุดในแกนเดียว ผลการทดสอบพบว่าการยุบตัวในแกนจะลดลงแบบไม่เป็นเส้นตรงเมื่อความถี่มีค่าสูงขึ้น และมีค่าลดลงเมื่อความเค้นล้อมรอบมีค่าสูงขึ้น ค่าหน่วยแรงกดสูงสุดที่เหมาะสมจะอยู่ระหว่าง 80-89 เปอร์เซ็นต์ ของความเค้นกดสูงสุดในแกนเดียว

Fuenkajorn and Phueakphum (2009) ได้ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาผลกระทบของอัตราการกดแบบวัฏจักรของเกลือหินชุดมหาสารคาม ผลจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความแข็งของเกลือหินจะมีค่าลดลงเมื่อจำนวนของการกดมีค่าสูงขึ้น โดยนำเสนอในสมการแบบ Power และค่าความยืดหยุ่นของเกลือหินจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับวัฏจักรแรกๆ

Passaris (1982) ทดสอบผลกระทบแรงกดแบบวัฏจักรต่อเกลือหินเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบโพรงสำหรับเก็บพลังงานในรูปอากาศภายใต้แรงดัน การทดสอบได้ใช้ความถี่ต่ำ (0.1 เฮิรตซ์) และแบ่งเป็นสองลักษณะคือ 1) ในแต่ละวัฏจักรให้แรงขึ้นถึงหน่วยแรงที่กำหนด แล้วลดแรงลงจนกระทั่งเป็นศูนย์ เรียกว่า “Full unloading” ค่าหน่วยแรงกดสูงสุดจะอยู่ระหว่าง 60-80 เปอร์เซ็นต์ ของความเค้นกดสูงสุดในแกนเดียว ทำการทดสอบ 16 ตัวอย่าง โดยกำหนดขอบเขตของการทดสอบที่จำนวนรอบไม่เกิน 10,000 รอบ และ 2) ให้แรงถึงหน่วยแรงที่กำหนดแล้วลดหน่วยแรงลงบางส่วน เรียกว่า “Partial unloading” ค่าหน่วยแรงที่ใช้จะเลียนแบบค่าแรงดันที่ขึ้น-ลงภายในโพรงเกลือหิน ผลการทดสอบแสดงความสัมพันธ์ (S) กับจำนวนรอบที่กดจนแตก (N) ดังสมการ $S=1.91N^{-0.5}$ และสรุปว่าเกลือหินถูกทำให้อ่อนตัวได้ด้วยแรงกดแบบวัฏจักร และค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นจะลดลงตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นจากการทดสอบเกลือหินมีค่าพิถีความล้าจำกัด (Fatigue limit) อยู่ที่ 60 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังวิกฤติจากการทดสอบแรงกดในแกนเดียว และมีข้อแนะนำในการปล่อยอากาศออกจากโพรงไม่ควรให้ความดันภายในโพรงต่ำกว่า 55 เปอร์เซ็นต์ ของค่ากำลังเกลือหิน

Gehle and Thoms (1981) ศึกษาการเปลี่ยนรูปลักษณะทางคลื่นเสียง (Acoustic Emission, AE) เนื่องจากแรงกดแบบวัฏจักรในอุโมงค์เกลือหิน โดยได้ทำการเจาะหลุมขนาด 57 มิลลิเมตร ลึก 6.1 เมตร ที่ฐานของเสาในอุโมงค์ให้มีความลาดเอียง 45 องศา จากแนวระดับจำนวน 2 หลุม และอีก 1 หลุม ตรงกลางให้มีขนาด 64 มิลลิเมตร โดย 2 หลุมแรกจะใส่อุปกรณ์แปลสัญญาณทางคลื่นเสียง และหลุมตรงกลางจะมีอุปกรณ์สำหรับให้แรงแบบวัฏจักรคือ Hydraulic pressure ผลการทดสอบปรากฏว่าระบบสัญญาณ AE เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มแรงดันในหลุมเจาะ ซึ่งหมายถึงการเกิดรอยแตกขึ้น ผลสรุประบุว่าวิธีทางคลื่นเสียงสามารถตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเกลือหินอันเนื่องมาจากผลกระทบของแรงกดแบบวัฏจักรได้ และระบุว่าเมื่อรอยแตกเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบของการให้แรง

Thoms et al. (1980) ทดสอบแรงกดในสามแกนแบบวัฏจักร (Triaxial cyclic loading) ด้วยความถี่ต่ำ (24 รอบ/10 ชั่วโมง) ให้มีลักษณะของการเกิดแรงเหมือนโพรงเกลือหินที่ใช้ในการสะสมพลังงานในรูปอากาศภายใต้แรงดัน และยังคงศึกษาโดยใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ตัวอย่างที่ใช้มีขนาด 100 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร ซึ่งจะถูกกดในสามแกนด้วยแรง 34.5 เมกะปาสคาล จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขึ้นลงให้เป็นระบบ ซึ่งพบว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเป็นวัฏจักรที่มีผลทำให้เกลือหินเกิดการเคลื่อนไหล ได้ข้อสรุปว่าความถี่มีผลโดยตรงต่อพฤติกรรมเกลือหินในการรับแรงกดแบบวัฏจักร โดยความถี่ทำให้จำนวนรอบที่แตกของตัวอย่างมีค่าต่างกันแม้ลักษณะของแรงเหมือนกัน คือ การทดสอบด้วยความถี่สูงตัวอย่างเกลือหินจะวิบัติด้วยจำนวนรอบมากกว่าการทดสอบด้วยความถี่ต่ำ และที่ความเค้นสูงตัวอย่างเกลือหินจะวิบัติที่จำนวนรอบที่ให้แรงน้อยครั้งกว่าที่ความเค้นต่ำ

Thoms and Gehle (1982) ทดสอบเกลือหินในภาคสนามและห้องปฏิบัติการ โดยศึกษาผลกระทบจากแรงกดแบบวัฏจักรและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักรต่อเกลือหิน สภาวะการ

ทดสอบจำลองให้เหมือนกับสภาวะในโพรงอากาศที่ใช้เก็บพลังงานในรูปอากาศภายใต้แรงดัน การทดสอบได้ใช้ความแตกต่างของแรง (แรงสูงสุดขณะให้แรง และแรงต่ำสุดขณะผ่อนแรง) จึงทำให้การเคลื่อนไหลที่ได้จากการทดสอบผลกระทบแรงกดแบบวัฏจักรมีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบการเคลื่อนไหลแบบธรรมดา (ทดสอบการเคลื่อนไหลด้วยแรงกดในแกนเดียว) จึงได้ข้อสรุปว่าการเคลื่อนไหลของเกลื้อหินที่ทดสอบด้วยแรงกดแบบวัฏจักรขึ้นกับค่าความแตกต่างระหว่างแรงกดสูงสุดและแรงกดต่ำสุดในแต่ละวัฏจักร การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในโพรงก็ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนไหลของเกลื้อหินได้เช่นกัน และระบุว่า การก่อสร้างโพรงเกลื้อหินที่มีความลึกประมาณ 900 เมตร นั้น อุณหภูมิจะเป็นปัจจัยหลักที่จะทำให้เกลื้อหินเกิดการเคลื่อนไหล ควรมีการศึกษาผลกระทบจากอุณหภูมิด้วย

จากที่มีนักวิจัยหลายท่าน ได้ทดสอบหินทั้งในภาคสนามและในห้องปฏิบัติการ จะเห็นว่าหินมีการตอบสนองต่อแรงกดแบบวัฏจักรเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1) แรงกดแบบวัฏจักรขึ้นกับขนาดของแรงที่ขึ้น-ลง หรือเรียกว่า “Amplitude” (Haimson, 1978) ถ้าแรงที่ขึ้น-ลงแตกต่างกันไม่มากหินก็จะมีคามเครียดถาวรเกิดขึ้นน้อยกว่าแรงขึ้น-ลงที่ต่างกันมาก เมื่อความแตกต่างของแรงขึ้น-ลงสูง หินจะวิบัติด้วยจำนวนรอบน้อยกว่าที่ความแตกต่างของแรงขึ้น-ลงไม่มากนัก

2) ความถี่ (Frequency) ส่งผลต่อการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักร คือจำนวนรอบที่วิบัติจะเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น (Atterwell and Farmer, 1973; Cho et al., 1987; Thoms et al., 1980; Ishizuka and Abe, 1990)

3) ขนาดของผลึกมีผลต่อแรงกดแบบวัฏจักร หินที่เนื้อละเอียดจะมีความต้านทานมากกว่าหินที่มีผลึกใหญ่ กล่าวคือ หินที่มีผลึกเล็กจะให้จำนวนรอบของการวิบัติมากกว่าหินที่มีผลึกขนาดใหญ่ (Burdine, 1963)

4) สภาวะน้ำ (ทดสอบที่สภาวะแห้งและเปียก) และแรงดันล้อมรอบที่อยู่ในหิน โดย Ishizuka et al. (1990) ได้ทดสอบหินที่สภาวะเปียกและแห้งพบว่า ที่สภาวะเปียกการเคลื่อนไหลจะสูงกว่าที่สภาวะแห้ง นั้นหมายความว่าจำนวนรอบที่วิบัติของหินที่แห้งจะสูงกว่าหินที่เปียกภายใต้ลักษณะการให้แรงที่เหมือนกัน หากมีแรงดันล้อมรอบหินจะวิบัติที่จำนวนรอบมากกว่าในสภาวะที่ไม่มีแรงดันล้อมรอบ (Ishizuka and Abe, 1990)

5) ลักษณะของการเคลื่อนไหลของหินต่อแรงกดแบบวัฏจักรจะมีลักษณะเหมือนการทดสอบการเคลื่อนไหลแบบสถิต (การทดสอบแรงกดในแกนเดียว) ทั้งในช่วงเริ่มแรก ช่วงอัตราความเครียดเพิ่มขึ้นคงที่ และช่วงสุดท้ายที่มีการวิบัติ (Ishizuka and Abe, 1990)

2.4 โพรงกักเก็บชนิดต่างๆ ในต่างประเทศ

การศึกษาารูปแบบของโพรงกักเก็บชนิดต่างๆ ในต่างประเทศ มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานและเปรียบเทียบในการออกแบบโพรงกักเก็บเบื้องต้นสำหรับใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และเพื่อนำไปสู่การออกแบบรูปร่างของโพรงกักเก็บที่เหมาะสม และมีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์สูงสุดในแต่ละพื้นที่

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

ในปี 1991 ประเทศสหรัฐอเมริกาได้เริ่มนำเทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานในรูปแบบอากาศภายใต้แรงดันเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้ามาใช้เป็นครั้งแรก ซึ่งได้ดำเนินการในเมือง McIntosh ทางตอนใต้ของมลรัฐ Alabama โดยมีกำลังการผลิตเท่ากับ 110 เมกะวัตต์/1 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 เมกะปาสคาล และในการปล่อยอากาศเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้ากำหนดให้ความดันต่ำสุดที่ต้องเหลือน้ำไว้ในโพรงเท่ากับ 5.17 เมกะปาสคาล (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) ได้วิเคราะห์การยุบตัวของผิวดิน (Surface subsidence) จากการสร้างโพรงกักเก็บก๊าซที่เมือง Tersanne ประเทศฝรั่งเศส โดยใช้วิธีการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในสามมิติ (Three-dimensional finite element) ซึ่งโพรงที่สร้างมี 14 โพรงอยู่ที่ความลึกประมาณ 1,400 เมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 80 เมตร และความหนาของหลังคาโพรงเท่ากับ 150 เมตร แต่ละโพรงมีระยะห่างระหว่างโพรง 600 เมตร โดยปริมาตรของก๊าซทั้งหมดที่สามารถกักเก็บได้เท่ากับ 440×10^6 ลูกบาศก์เมตร ผลจากการวิเคราะห์ระบุว่าอัตราการทรุดตัวอยู่ที่ 1 เซนติเมตร/ปี

Vouille et al. (1996) ใช้ระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลขแบบไฟไนท์อีลิเมนต์ (Finite element method-VIPEF) เพื่อศึกษาเสถียรภาพของโพรงกักเก็บไฮโดรคาร์บอน ที่พัฒนามาจากโพรงกักเก็บเชื้อเพลิง (Fuel storage caverns) ที่ตั้งอยู่ในรัฐ Manosque ประเทศฝรั่งเศส เริ่มดำเนินการตั้งแต่ปี 1967 และเริ่มใช้งานในปี 1969 ซึ่งโพรงถูกสร้างในชั้นเกลือหินที่มีความลึกระหว่าง 400 ถึง 1,500 เมตร มีทั้งหมด 7 โพรง แต่ละโพรงมีความสูงประมาณ 400 เมตร สามารถบรรจุไฮโดรคาร์บอนได้ประมาณ 6.3×10^6 ลูกบาศก์เมตร ผลที่ได้ระบุว่าความดันสูงสุดที่สามารถกักเก็บได้มีค่าเท่ากับ 18 เมกะปาสคาล และความดันต่ำสุดที่เหลือค้างไว้มีค่าเท่ากับ 6 เมกะปาสคาล

Fuenkajorn (1997) ได้ออกแบบและวิเคราะห์โพรงสำหรับกักเก็บก๊าซธรรมชาติที่มลรัฐ Kansas ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยใช้ระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลขแบบไฟไนท์อีลิเมนต์ (Finite element method-GEO) ซึ่งโพรงสร้างอยู่ในชั้นเกลือ Hutchinson salt formation ด้วยวิธีการทำเหมืองเกลือแบบละลาย ความลึกของโพรงเท่ากับ 620 เมตร สูง 72 เมตร และมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 122 เมตร โดยที่หลังคาโพรงและพื้นโพรง (Salt floor) มีความหนาเท่ากับ 44 และ 25 เมตร ตามลำดับ ความดันสูงสุดของก๊าซที่สามารถอัดสู่อุณหภูมิโพรงกักเก็บได้มีค่า 12.14 เมกะปาสคาล และความดันต่ำสุดที่เหลือค้างไว้มีค่า 4.83 เมกะปาสคาล กำหนดอัตราการปล่อยก๊าซออกจากโพรงเท่ากับ 1.38 เมกะปาสคาล/วัน สำหรับโพรงที่มีความดันอยู่ระหว่าง 12.14 และ 7.30 เมกะปาสคาล และมีอัตราการปล่อยเท่ากับ 0.69 เมกะปาสคาล/วัน สำหรับโพรงที่มีความดันของโพรงต่ำกว่า 7.30 เมกะปาสคาล วัฏจักรของการอัดและปล่อยอากาศจะกระทำ 7 ครั้ง/ปี โดยโพรงนี้จะมีอายุการใช้งานจนถึง 50 ปี ต่อมาในปี 2000 Fuenkajorn (2000) ได้ใช้วิธีการคำนวณแบบเดียวกันในการออกแบบและวิเคราะห์โพรงกักเก็บสำหรับกักเก็บก๊าซธรรมชาติที่มลรัฐ Texas ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งโพรงถูกสร้างอยู่ในชั้นเกลือ Salado salt formation ด้วยวิธีการทำเหมืองเกลือแบบละลายเช่นเดียวกัน มีความลึก 640 เมตร สูง 137 เมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 61 เมตร มีความหนาของหลังคาโพรง และพื้นโพรงเท่ากับ 165 และ 63

เมตร ความดันสูงสุดของก๊าซที่สามารถอัดสู้อากาศอัดได้มีค่าเท่ากับ 11.72 เมกะปาสคาล และความดันต่ำสุดที่เหลือค้างไว้มีค่า 4.14 เมกะปาสคาล กำหนดให้มีอัตราการปล่อยก๊าซออกจากโรงงเท่ากับ 1.38 เมกะปาสคาล/วัน สำหรับโรงงที่มีความดันอยู่ระหว่าง 11.72 เมกะปาสคาล และ 8.34 เมกะปาสคาล และมีอัตราการปล่อยเท่ากับ 0.35 เมกะปาสคาล/วัน สำหรับโรงงที่มีความดันของโรงงต่ำกว่า 8.34 เมกะปาสคาล วัฏจักรของการอัดและปล่อยอากาศจะกระทำ 8 ครั้ง/ปี โดยโรงงนี้จะมีอายุการใช้งานถึง 50 ปี

Crotogino (2001) อธิบายโครงการการสร้างโรงงสำหรับกักเก็บพลังงานในรูปแบบอากาศภายใต้แรงดันเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าในประเทศเยอรมันนี ซึ่งเป็นประเทศแรกที่มีการพัฒนาเทคโนโลยีนี้ โดยเริ่มต้นขึ้นในปี 1978 ภายใต้ชื่อ “The Huntorf Plant” ซึ่งตั้งอยู่ในเมือง Huntorf มีกำลังการผลิตเท่ากับ 290 เมกะวัตต์ ใน 2 ชั่วโมง โรงงที่ใช้กักเก็บมีจำนวน 2 โรงง อยู่ที่ความลึก 650 เมตร สูง 150 เมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 เมตร และมีปริมาตรรวมกันเท่ากับ 310,000 ลูกบาศก์เมตร โรงงดังกล่าวอยู่ห่างกัน (Spacing) 220 เมตร วิธีการผันอากาศอัดให้เป็นกระแสไฟฟ้าเป็นแบบปริมาตรคงที่ อัดอากาศสู่อ่างด้วยอัตราประมาณ 108 กิโลกรัม/วินาที ความดันอากาศภายในโรงงสูงสุดขณะกักเก็บอากาศเท่ากับ 2 เมกะปาสคาล และปล่อยอากาศออกด้วยอัตรา 417 กิโลกรัม/วินาที เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ความดันภายในโรงงลดต่ำลงมาเท่ากับ 0.1 เมกะปาสคาล Arnold et al. (2002) ศึกษาทางด้านเศรษฐศาสตร์ในกรณีขยายขนาดโรงงกักเก็บก๊าซธรรมชาติในชั้นเกลือหินที่ตั้งอยู่ในเมือง Bernburg ประเทศเยอรมันนี ซึ่งดำเนินการแล้วเสร็จในปี 1970 มีโรงงกักเก็บทั้งหมด 27 โรงง ความลึกของโรงงอยู่ในช่วง 480 ถึง 680 เมตร สามารถบรรจุก๊าซธรรมชาติได้ตั้งแต่ 180×10^3 ถึง 520×10^3 ลูกบาศก์เมตร ความดันสูงสุดของก๊าซที่สามารถอัดสู่อ่างได้มีค่าเท่ากับ 10 เมกะปาสคาล และความดันต่ำสุดที่เหลือค้างไว้มีค่าตั้งแต่ 1.10 ถึง 2.10 เมกะปาสคาล การอัดและปล่อยก๊าซเข้า-ออกโรงงกำหนดให้มีอัตราเท่ากับ 500×10^3 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง และ $1,250 \times 10^3$ ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง ตามลำดับ

บทที่ 3

การจัดเตรียมตัวอย่างหิน

3.1 วัตถุประสงค์

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

3.2 แหล่งที่มาของตัวอย่างเกลือหิน

ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบได้รับความอนุเคราะห์มาจาก บริษัท เหมืองแร่โพแทชอาเซียน จำกัด อ.บำเหน็จณรงค์ จ.ชัยภูมิ โดยนำมาตัดให้มีผิวเรียบในห้องปฏิบัติการที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อให้ได้รูปร่างและขนาดที่ต้องการตามข้อกำหนดของการทดสอบ

3.3 การจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหิน

การจัดเตรียมตัวอย่างเริ่มจากการคัดเลือกตัวอย่างเกลือหินที่มีผิวสมบูรณ์ที่สุดใกล้เคียงกับข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM D4543 ซึ่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบไม่มีรอยแตกร้าวหรือรูพรุนที่เกิดจากการซารุดหรือละลายบนแท่งตัวอย่าง การตัดแท่งตัวอย่างได้ใช้เลื่อยไฟฟ้า (รูปที่ 3.1) เพื่อให้ได้รูปร่างและขนาดที่ต้องการ เมื่อตัดแท่งตัวอย่างเสร็จแล้วนำมาตรวจสอบความสมบูรณ์ และใช้พลาสติกหุ้มเพื่อป้องกันความชื้นและการละลายก่อนเริ่มการทดสอบ การทดสอบเน้นไปที่เกลือหิน เนื่องจากโพแทชมีความอ่อนไหวต่อความชื้นมากจึงไม่เหมาะกับการประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยีอากาศยาน ในการจัดเตรียมตัวอย่างให้มีรูปทรงกระบอกทำได้ยาก จึงจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหินให้เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม และเพื่อให้ใกล้เคียงกับรูปร่างจริงของเสาค้ำยันในช่องเหมือง โดยตัวอย่างมีขนาด $54 \times 54 \times 108$ มิลลิเมตร อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (Length-to-diameter ratio, $L/D=2.0$) เท่ากับ 2.0 โดยมีการเตรียมตัวอย่างทั้งสิ้น 12 ตัวอย่าง ความลึกและตำแหน่งของแท่งตัวอย่างเกลือหินที่ขุดเจาะมาจากชั้นเกลือหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยได้ถูกบันทึก วิเคราะห์ และเสนออยู่ในรายงาน เพื่อให้ทราบถึงความแปรปรวนทางด้านพฤติกรรมและคุณสมบัติในชั้นเกลือหินของประเทศไทย ด้วยการทดสอบการให้แรงกดแบบวัฏจักรภายใต้ความเค้นกดในสามแกนแบบขยาย (Triaxial cyclic loading test)



รูปที่ 3.1 แท่งเกลือหินที่ถูกตัดด้วยเลื่อยไฟฟ้าสำหรับการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรภายใต้ความเค้นกดในสามแกนแบบขยาย

รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างบางส่วนของแท่งเกลือหินที่จัดเตรียมไว้ สำหรับใช้ทดสอบการให้แรงกดแบบวัฏจักรภายใต้ความเค้นกดในสามแกนแบบขยาย โดยกำหนดให้ความเค้นในแนวแกนคงที่ในช่วง 30-70 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังรับแรงกดสูงสุด (σ_c) ของตัวอย่างเกลือหิน และผันแปรความเค้นล้อมรอบในช่วง 20-90 เปอร์เซ็นต์ ของความเค้นที่เกิดขึ้นจริงในภาคสนาม ผลที่ได้จากการทดสอบภายใต้ความเค้นที่ต่างกัน นำมาใช้ในการสอบเทียบค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปร่างของเกลือหินที่ขึ้นกับเวลา (Time dependent deformation) ความเป็นพลาสติก (Plastic) ความเหนียว (Ductile) ความหนืดเชิงยืดหยุ่น (Visco-elastic) และความหนืดเชิงพลาสติก (Visco-plastic) เป็นต้น

ตารางที่ 3.1 แสดงขนาดและจำนวนของตัวอย่างเกลือหินที่จัดเตรียมตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM สำหรับทดสอบการให้แรงกดแบบวัฏจักรภายใต้ความเค้นกดในสามแกนแบบขยาย



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรภายใต้ความเค้นกดในสามแกนแบบขยาย

ตารางที่ 3.1 ตำแหน่ง ความลึก ขนาด และคุณสมบัติของตัวอย่างเกลือหิน

ตัวอย่างหิน	เส้นผ่าศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความยาว (มิลลิเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)
1	54.5	108.9	557.5	2.20
2	55.3	109.1	578.2	2.21
3	54.1	108.1	544.0	2.19
4	53.7	107.3	547.0	2.25
5	54.9	109.8	556.2	2.14
6	54.6	108.5	560.5	2.21
7	54.6	108.4	553.5	2.18
8	54.5	107.2	550.5	2.20
9	54.5	107.1	545.0	2.18
10	54.3	108.1	545.8	2.18
11	54.7	107.9	547.1	2.16
12	54.8	107.5	545.3	2.15



บทที่ 4

การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

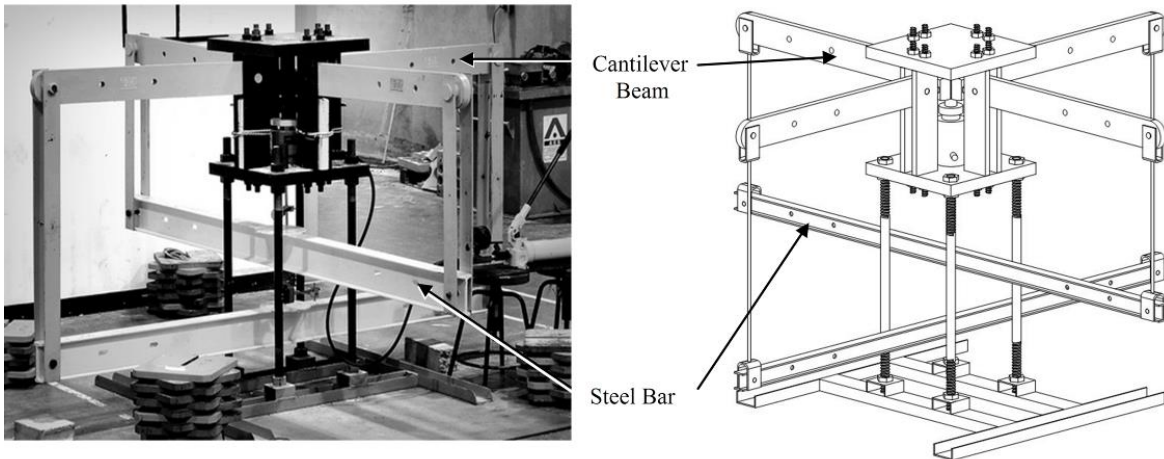
เนื้อหาในบทนี้ได้อธิบายถึงขั้นตอน วิธีการ และผลการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรภายใต้ความเค้นกดในสามแกน ($\sigma_1=\sigma_2\neq\sigma_3$) โดยผันแปรความเค้นล้อมรอบ 4 ระดับ คือ 5, 6, 7 และ 8 เมกะปาสคาล และอัตราการขูดเจาะแร่ (Extraction ratio) 3 ระดับ คือ 30, 40 และ 58 เปอร์เซ็นต์ ในการทดสอบได้ใช้ค่าความถี่ของการให้แรงเท่ากับ 1.5×10^{-5} เฮิร์ตซ์ ซึ่งค่าความถี่ที่ใช้เป็นค่าที่ใช้จริงในเทคโนโลยีอากาศอัด การจำลองสภาวะของเสาค้ำยันในการรับแรงแบบวัฏจักรภายใต้อากาศอัด ได้กำหนดความเค้นกดในแนวแกนที่กระทำต่อตัวอย่างเกลือหินอยู่ในช่วง 30 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวของเกลือหิน และความเค้นล้อมรอบมีค่าเท่ากับ 20 ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ของความเค้นที่เกิดขึ้นจริงในภาคสนาม (In-situ stress) ผลที่ได้สามารถนำมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเชิงเวลาและผลกระทบของการให้แรงแบบวัฏจักรต่อพฤติกรรมของเกลือหินภายใต้การผันแปรความถี่และอัตราการขูดเจาะแร่ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบช่องเหมืองเพื่อกักเก็บพลังงานภายใต้อากาศอัด

4.1 วัตถุประสงค์ของการทดสอบ

เพื่อศึกษาผลกระทบการให้แรงกดแบบวัฏจักรภายใต้ความเค้นกดในสามแกน ($\sigma_1=\sigma_2\neq\sigma_3$) สำหรับจำลองสภาวะการอัดและปล่อยอากาศในช่องเหมืองภายใต้การผันแปรความถี่และอัตราการขูดเจาะแร่ โดยนำผลที่ได้มาประเมินเสถียรภาพของเสาค้ำยันเมื่อได้รับแรงอัดและเมื่อมีการปล่อยแบบวัฏจักร รวมถึงประเมินการทรุดตัวของผิวดินภายหลังการกักเก็บอากาศแล้ว 50 ปี โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ข้อมูลที่ได้จากห้องปฏิบัติการถูกนำมาใช้ในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเสาค้ำยันในเหมืองเกลือที่ใกล้เคียงกับสภาวะจริงในภาคสนาม โดยผลที่ได้จากแบบจำลองทำให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของเสาค้ำยันภายใต้การรับแรงแบบวัฏจักรและสามารถนำมาใช้ออกแบบการกักเก็บอากาศในเหมืองเกลือ

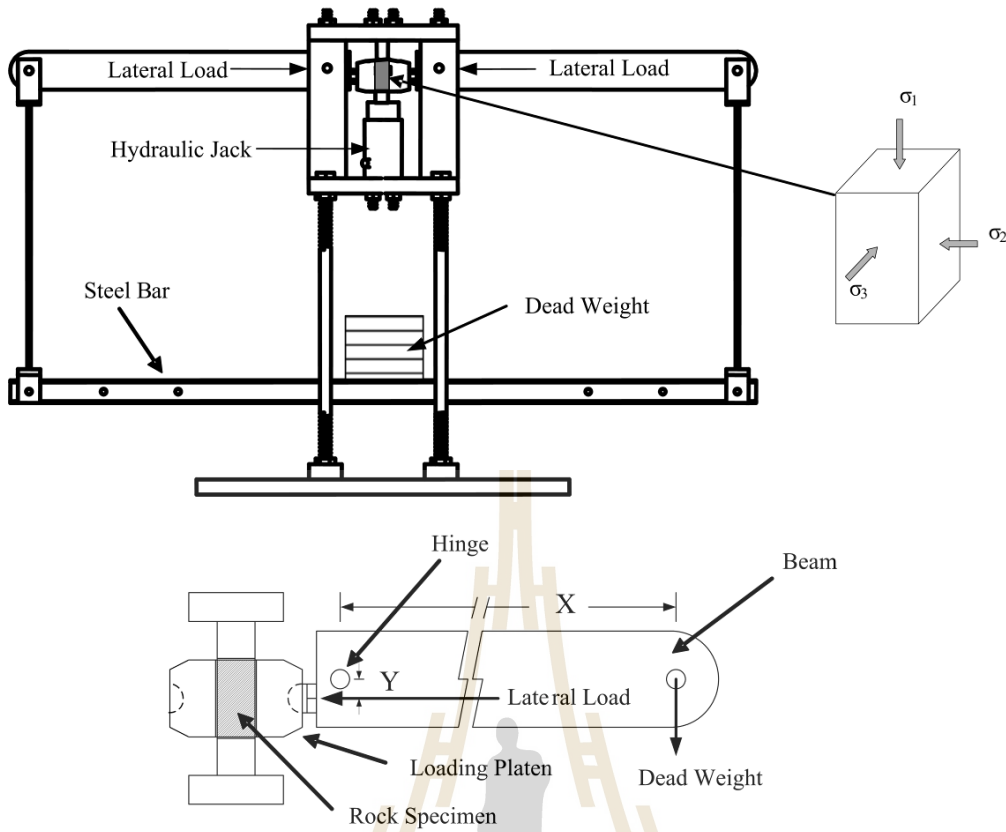
4.2 การเตรียมโครงกดทดสอบในสามแกนจริง

โครงกดทดสอบในสามแกนจริงมีปัจจัยพื้นฐานของการออกแบบ 3 ประการ คือ (1) เพื่อกำหนดค่าความเค้นล้อมรอบ (σ_2 และ σ_3) ให้คงที่ในขณะที่ทดสอบ (2) สามารถทดสอบตัวอย่างหินที่มีขนาดเท่ากับหรือใหญ่กว่าแท่งตัวอย่างหินที่ใช้ทดสอบแรงกดสูงสุดในสามแกนแบบดั้งเดิม และ (3) สามารถวัดค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกนได้โดยตรง รูปที่ 4.1 แสดงโครงกดทดสอบในสามแกนจริงที่มีอยู่แล้วจาก Walsri et al. (2009) ซึ่งได้นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ ค่าความเค้นล้อมรอบที่กระทำบน



รูปที่ 4.1 โครงกวดทดสอบในสามแกนจริง (Walsri, et al., 2009)

ตัวอย่างหินในแต่ละด้านจะได้รับแรงที่เกิดขึ้นจากแกนของคานทดสอบแรง ในส่วนล่างของคานรับตุ้มน้ำหนัก ได้ใช้เหล็กเส้นแขวนตุ้มน้ำหนักเชื่อมต่อระหว่างจุดปลายของคานทั้งสองข้างที่จุดกึ่งกลางของคานรับตุ้มน้ำหนัก เพื่อใช้ใส่ตุ้มน้ำหนักในการดึงแกนของคานทดสอบแรงทั้งสองข้างลงดังแสดงในรูปที่ 4.2 ที่จุดปลายด้านในของคานทดสอบแรงได้ใช้เพลลาเชื่อมต่อกับสายยึดคานทดสอบแรงที่อยู่ในแต่ละด้านของโครงกวดทดสอบ ในขณะที่ทำการทดสอบคานทดสอบแรงทุกข้างจะปรับให้อยู่ในแนวระนาบ ซึ่งจะส่งผลต่อแรงกดด้านข้างบนตัวอย่างหินที่จุดกึ่งกลางของโครงกวดทดสอบ และได้กำหนดระยะห่างของเหล็กเส้นแขวนตุ้มน้ำหนักที่ใช้แขวนคานรับตุ้มน้ำหนักจากจุดปลายด้านนอกถึงปลายด้านใน อัตราส่วนของแรงจะมีค่าเท่ากับ 12.3 ในทิศตะวันออก-ตะวันตก และ 11.5 เท่า ในทิศเหนือ-ใต้ ซึ่งได้ทำการสอบเทียบด้วย Electronic load cell อัตราส่วนของแรงที่ได้นี้จะนำมาใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแท่งตัวอย่างด้านข้างด้วยการวัดอัตราการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของแท่งเหล็กทั้งสองที่อยู่ข้างล่าง ส่วนแรงกระทำด้านข้าง (σ_2 และ σ_3) ได้ออกแบบให้สามารถให้ความเค้นมากกว่า 50 เมกะปาสกาล และปั๊มไฮดรอลิกเป็นอุปกรณ์ให้ความเค้นกระทำในแนวตั้ง (σ_1) สามารถให้ความเค้นสูงมากกว่า 100 เมกะปาสกาล โครงกวดทดสอบสามารถรองรับขนาดของตัวอย่างหินได้ตั้งแต่ $2.5 \times 2.5 \times 2.5$ ลูกบาศก์เซนติเมตร ถึง $10 \times 10 \times 20$ ลูกบาศก์เซนติเมตร การทดสอบกับแท่งตัวอย่างที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันต้องมีการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหัวกดทั้งสองข้างให้เหมาะสม



รูปที่ 4.2 องค์ประกอบของเครื่องทดสอบในสามแกนจริง

4.3 การทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรภายใต้ความเค้นกดในสามแกน

4.3.1 วิธีการทดสอบ

การทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรภายใต้ความเค้นกดในสามแกนมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเสาค้ำยันหลังจากรับแรงกดแบบวัฏจักรภายใต้สภาวะที่เกิดขึ้นจริงในกระบวนการอัดอากาศในเชิงเวลา (Time-dependent deformation) โดยค่าความเค้นที่กระทำต่อตัวอย่างในห้องปฏิบัติการได้คำนวณจากความเค้นที่เกิดขึ้นจริงในภาคสนาม โดยคำนึงถึงปัจจัยสองอย่าง คือ ระดับความลึกของช่องเหมืองและอัตราการขุดเจาะแร่ ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการผันแปรความลึกเท่ากับ 250, 300, 350 และ 400 เมตร และผันแปรอัตราการขุดเจาะแร่เท่ากับ 30, 40 และ 58 เปอร์เซ็นต์ ตัวตัวอย่างเกลือหินที่ใช้สำหรับการทดสอบมีรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด 54x54x108 มิลลิเมตร โดยใช้ระยะเวลาในการทดสอบ 21 วัน ภายใต้อุณหภูมิห้อง เมื่อนำตัวอย่างหินติดตั้งในเครื่องทดสอบแล้วในระยะเวลาแรกได้ให้แรงในสามทิศทางเท่ากัน (Hydrostatic) เพื่อให้อยู่ในสภาวะเปรียบเสมือนในภาคสนาม จนกระทั่งการเคลื่อนตัวของตัวอย่างเกลือหินหยุดนิ่ง หลังจากนั้นจึงเริ่มทำการทดสอบ โดยการทดสอบได้แบ่งออกเป็น 3 ช่วงคือ

1) การจำลองการเจาะช่องเหมือง

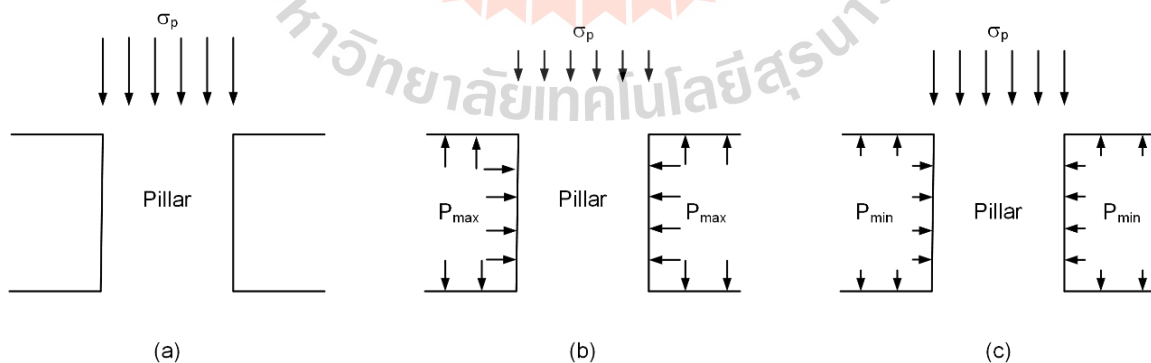
ช่วงแรกของการทดสอบได้ทำการจำลองความเค้นที่เกิดขึ้นหลังจากการขุดเจาะช่องเหมืองด้วยการลดค่าความเค้นล้อมรอบ (σ_1, σ_2) และเพิ่มค่าความเค้นในแนวแกน σ_3 (รูปที่ 4.3a) โดยค่าความเค้นในแนวแกนถูกกำหนดจากความลึกและอัตราการขุดเจาะแร่ ระหว่างการทดสอบได้ทำการบันทึกค่าการยุบตัวทั้งสามแกนอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องวัดแบบดิจิตอลที่มีความละเอียด 0.001 มิลลิเมตร เป็นระยะเวลา 5 วัน

2) การจำลองการอัดอากาศในช่องเหมือง

หลังจากจำลองสภาวะความเค้นในช่วงหลังการขุดเจาะช่องเหมืองแล้ว ในช่วงที่สองของการจำลองการอัดอากาศได้เริ่มทดสอบด้วยการเพิ่มค่าความเค้นล้อมรอบ (σ_1, σ_2) เท่ากับ 90 เปอร์เซ็นต์ ของความเค้นจริงในภาคสนาม (In-situ stress) ตามระดับความลึก แล้วทำการลดค่าความเค้นในแนวแกน เนื่องจากอากาศที่อัดเข้าไปในช่องเหมืองจะไปช่วยลดค่าความเค้นในแนวแกนของเสาค้ำยัน (รูปที่ 4.3b) โดยความเค้นดังกล่าวได้มาจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งการทดสอบในช่วงนี้ได้ใช้เวลาทั้งหมด 12 ชั่วโมง

3) การจำลองการปล่อยอากาศในช่องเหมือง

ในช่วงนี้ได้ทำการลดค่าความเค้นล้อมรอบ (σ_1, σ_2) และเพิ่มค่าความเค้นในแนวแกน σ_3 เพื่อจำลองสภาวะการปล่อยอากาศในช่องเหมือง (รูปที่ 4.3c) โดยลดค่าความเค้นล้อมรอบให้เหลือ 20 เปอร์เซ็นต์ ของความเค้นในภาคสนาม ส่งผลให้ค่าความเค้นในแนวแกนมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากอากาศที่ถูกปล่อยออกไปทำให้เสาค้ำยันแบกรับน้ำหนักมากขึ้น ซึ่งค่าความเค้นดังกล่าวได้มาจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ระหว่างการทดสอบได้บันทึกค่าการยุบตัวทั้งสามแกนจนกระทั่งครบ 12 ชั่วโมง



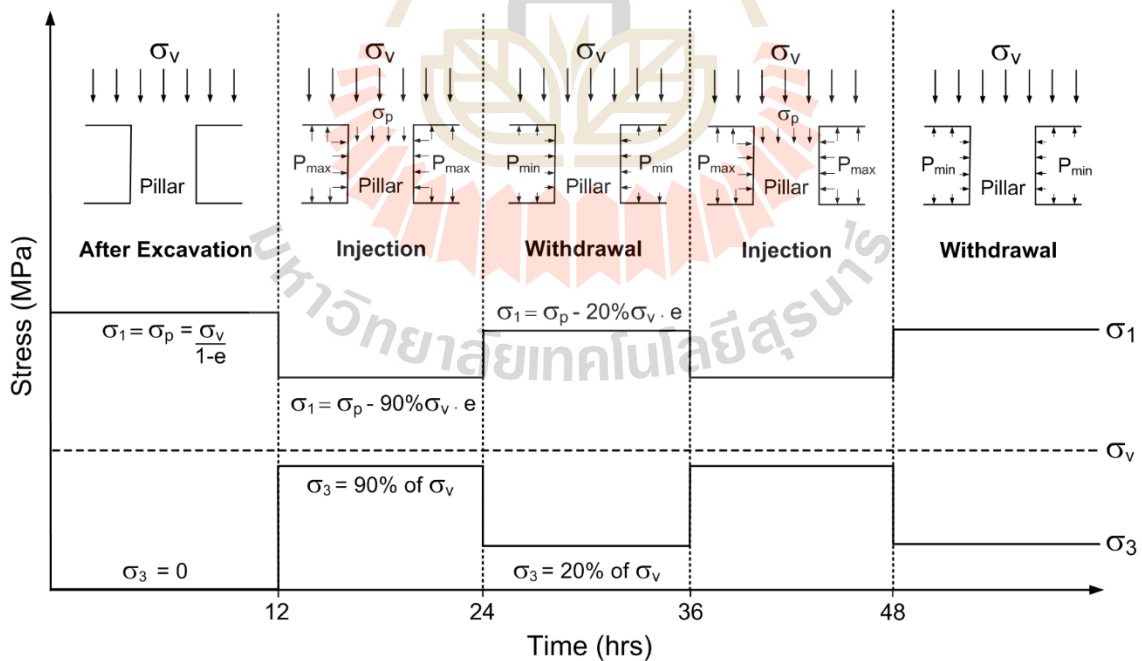
รูปที่ 4.3 การจำลองความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงของการทดสอบ (a) หลังจากเจาะช่องเหมือง (b) ระหว่างการอัดอากาศในช่องเหมือง ($P_{max}=90$ เปอร์เซ็นต์ ของความเค้นจริงในภาคสนาม) และ (c) ระหว่างการปล่อยอากาศออกจากช่องเหมือง ($P_{min}=20$ เปอร์เซ็นต์ ของความเค้นจริงในภาคสนาม)

การทดสอบในช่วงที่ 2 และ 3 ได้กระทำซ้ำเป็นวัฏจักรเปรียบเสมือนการอัดและปล่อยอากาศในห้องหม้อ โดยการทดสอบ 1 รอบ ใช้เวลาทั้งหมด 1 วัน ซึ่งการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทดสอบเป็นเวลาทั้งสิ้น 21 วัน (รูปที่ 4.4) งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบกับแท่งตัวอย่างเกลือหินทั้งหมด 12 ตัวอย่าง ผลการทดสอบได้นำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเฉือนรวมหกด้าน (τ_{oct}) ซึ่งเวลาในฟังก์ชันของความเค้นเฉือนหกด้าน (τ_{oct}) และความเค้นเฉลี่ย (σ_m) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\sigma_m = [\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3]/3 \quad (4.1)$$

$$\tau_{oct} = [1/3] \cdot [((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2)]^{1/2} \quad (4.2)$$

โดยที่ σ_m คือ ความเค้นเฉลี่ย
 τ_{oct} คือ ความเค้นเฉือนรวมหกด้าน
 σ_1, σ_2 คือ ความเค้นล้อมรอบ
 σ_3 คือ ความเค้นในแนวแกน



รูปที่ 4.4 ลักษณะการให้แรงต่อตัวอย่างหินแบบวัฏจักรเป็นระยะเวลา 21 วัน

4.3.2 ผลการทดสอบ

ความเครียดทั้งสามทิศทางที่ได้จากการตรวจวัดได้นำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเฉือนรวมหกด้าน (γ_{oct}) ในฟังก์ชันของความเค้นเฉือนรวมหกด้าน (τ_{oct}) ในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรระดับความลึกและอัตราการขุดเจาะแร่ ผลการทดสอบระบุว่าค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเชิงเวลาภายใต้ความเค้นกดคงที่ของเกลือหินสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ 1) เมื่อให้แรงกดในช่วงแรกอย่างทันทีทันใดทำให้ความเครียดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีค่าเท่ากับความเครียดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างยืดหยุ่น (Instantaneous strain) 2) ช่วงที่อัตราความเครียดเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient phase) และ 3) ช่วงที่อัตราความเครียดเปลี่ยนแปลงตามเวลาแบบคงที่ (Steady-state phase) ในช่วงนี้ทำให้เกิดความเครียดเชิงพลาสติกที่เปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Permanent strain) ซึ่งค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่กล่าวมาข้างต้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นเฉือนรวมหกด้าน (τ_{oct}) เพิ่มขึ้น

ผลที่ได้จากการทดสอบถูกนำไปสอบเทียบ (Calibrate) เพื่อหาค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับความหนืดเชิงยืดหยุ่นและเชิงพลาสติก (Visco-elastic และ Visco-plastic) ของเกลือหิน สมการเชิงคณิตศาสตร์ของ Jaeger and Cook (1979) ได้นำมาใช้หาพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเกลือหินที่ขึ้นกับเวลา จากความสัมพันธ์ของความเครียดในแนวเฉือนรวมหกด้าน (γ_{oct}) ในฟังก์ชันของความเค้นเฉือนหกด้าน (τ_{oct}) ดังสมการที่ 4.3 และ 4.4 ซึ่งการวิเคราะห์ผลได้นำเสนออย่างละเอียดในบทต่อไป

$$\gamma_{oct} = [1/3] \cdot [(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2]^{1/2} \quad (4.3)$$

$$\gamma_{oct} = \tau_{oct} / 2G \quad (4.4)$$

โดยที่	γ_{oct}	คือ ความเครียดเฉือนรวมหกด้าน
	G	คือ สัมประสิทธิ์ความแข็ง
	ϵ_1	คือ ความเครียดในแนวแกนหลักสูงสุด
	ϵ_2	คือ ความเครียดในแนวแกนหลักกลาง
	ϵ_3	คือ ความเครียดในแนวแกนหลักต่ำสุด

บทที่ 5

การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอการสอบเทียบตัวแปรเชิงเวลาของค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกนและในแนวรัศมีจากการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรภายใต้ความเค้นกดในสามแกน ($\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3$) โดยได้พิจารณารูปแบบของความเครียดเฉือนรวมหกด้าน (γ_{oct}) ในฟังก์ชันของความเค้นเฉือนรวมหกด้าน (τ_{oct})

5.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ผลที่ได้จากการทดสอบถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อใช้ในการหาพฤติกรรมของตัวอย่างเกลือหิน ภายใต้ความเค้นกดในสามแกนเชิงเวลา ผลดังกล่าวได้นำไปสอบเทียบ (Calibrate) เพื่อให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติการคืบ (Creep) ที่เกี่ยวข้องกับความหนืดเชิงยืดหยุ่น (Visco-elastic) และเชิงพลาสติก (Visco-plastic) ของเกลือหิน สมการเชิงคณิตศาสตร์ของ Jaeger and Cook (1979) ได้ถูกนำมาพัฒนาให้เป็นสมการความหนืดเชิงยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง (Linear visco-elastic) เพื่อใช้ในการสอบเทียบค่าคงที่บนพื้นฐานของแบบจำลองของ Burgers โดยใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ขั้นสูงในรูปแบบของ Laplace transformation ที่แสดงในรูปแบบความสัมพันธ์ของความเครียดในแนวเฉือน (γ_{oct}) ในฟังก์ชันของเวลา ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$\gamma_{oct}(t) = \tau_{oct} \left[\frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \left\{ 1 - \exp\left(\frac{t \cdot E_2}{\eta_2}\right) \right\} \right] \quad (5.1)$$

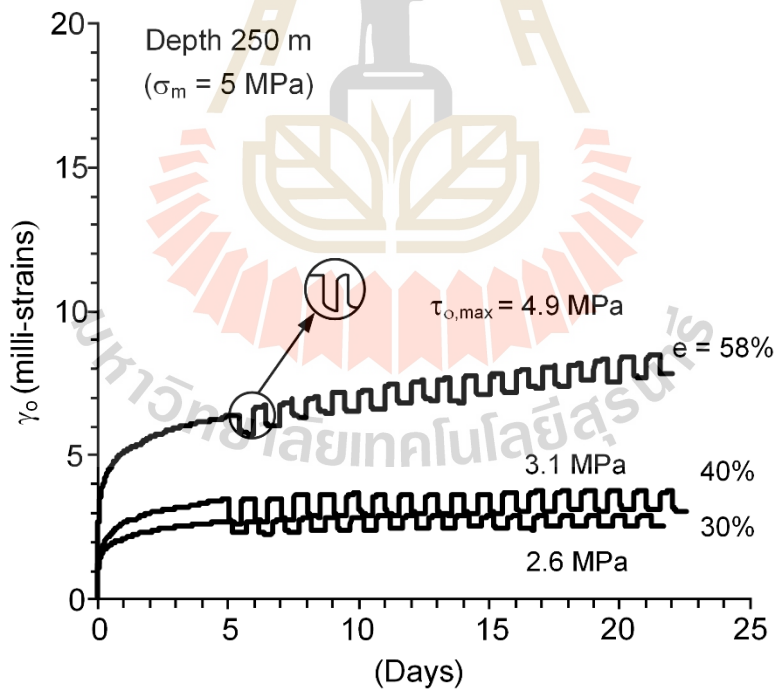
โดยที่

$\gamma_{oct}(t)$	คือ ความเครียดเฉือนรวมหกด้านเชิงเวลา
τ_{oct}	คือ ความเค้นเฉือนรวมหกด้าน
E_1	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น
E_2, η_2	คือ ค่าความหนืดเชิงยืดหยุ่น
η_1	คือ ค่าความหนืดเชิงพลาสติก
t	คือ เวลา

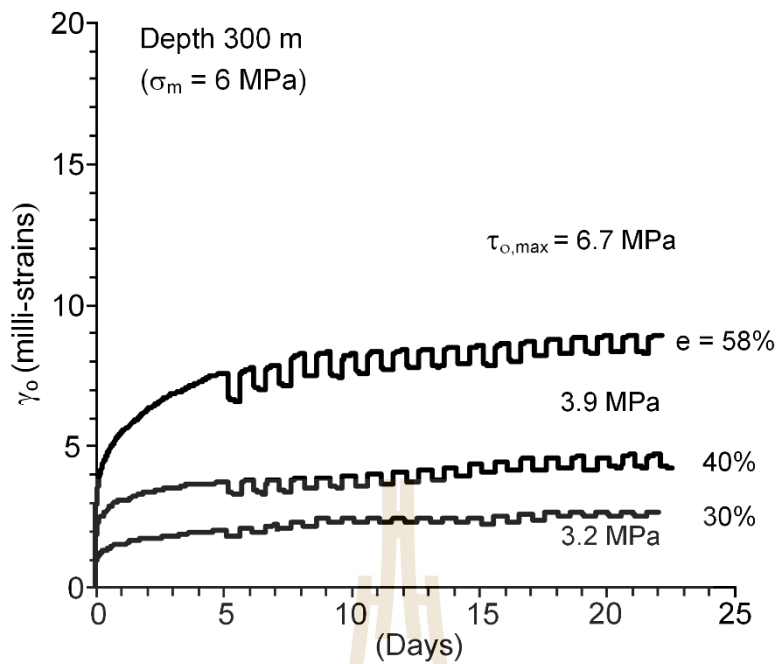
5.2 การสอบเทียบตัวแปรเชิงเวลาของเกลือหิน

ผลที่ได้จากการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรภายใต้ความเค้นกดในสามแกนภายใต้การผันแปรความลึกของช่องเหมืองและอัตราการขุดเจาะแร่ถูกนำมาสอบเทียบเพื่อหาค่าตัวแปรในสมการของ Burger เพื่ออธิบายพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในเชิงเวลาของเกลือหิน

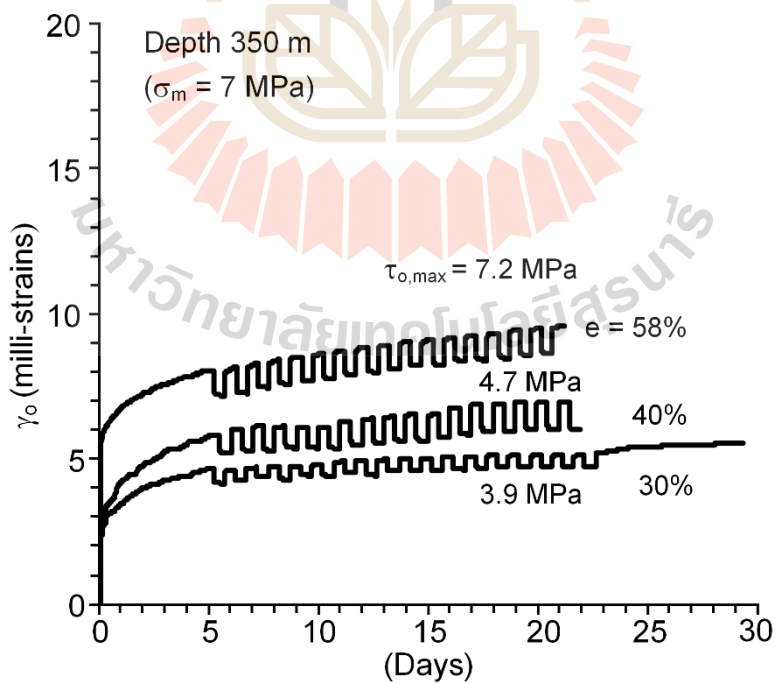
ผลการสอบเทียบความเครียดเฉือนรวมหกด้านที่ขึ้นกับเวลาในฟังก์ชันของความเค้นเฉือนรวมหกด้านแสดงดังรูปที่ 5.1 ถึงรูปที่ 5.4 ในตารางที่ 5.1 ได้สรุปผลการสอบเทียบค่าคงที่จากแบบจำลองของ Burgers ภายใต้การผันแปรความลึกของช่องเหมืองและอัตราการขุดเจาะแร่ รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของแบบจำลองของ Burgers ซึ่งประกอบด้วยค่าคงที่ E_1 , E_2 , η_1 และ η_2 ในฟังก์ชันของความเค้นเฉือนรวมหกด้าน โดยในงานวิจัยนี้ได้เน้นการศึกษาอัตราการเพิ่มขึ้นของความเครียดในตัวอย่างเกลือหิน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความเครียดภายใต้สภาวะการรับแรงแบบวัฏจักรของช่องเหมืองจะส่งผลต่อเสถียรภาพของเสาค้ำยันในระยะยาว ดังนั้นตัวแปรสำคัญที่ใช้ควบคุมอัตราการเพิ่มขึ้นของความเครียดคือ ตัวแปรความหนืดเชิงพลาสติก โดยผลการสอบเทียบระบุว่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E_1) และค่าความหนืดเชิงยืดหยุ่น (E_2 , η_2) จากการสอบเทียบมีค่าใกล้เคียงกัน โดยจะไม่ขึ้นกับความเค้นเฉือนรวมหกด้าน (τ_{oct}) ส่วนค่าความหนืดเชิงพลาสติก (η_1) มีแนวโน้มลดลงแบบเอกโพเนนเชียล ที่ระดับความลึกเดียวกันและที่อัตราการขุดเจาะแร่สูง ความหนืดเชิงพลาสติกจะมีค่าลดลง หรืออัตราการความเครียดในเชิงเวลาที่มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อความเค้นเฉือนรวมหกด้าน (τ_{oct}) มีค่าสูงขึ้น จะส่งผลให้เกิดอัตราการความเครียดเชิงเวลาเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเกิดจากผลกระทบของค่าความเค้นที่ได้รับเกินกว่าจุดเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Dilation)



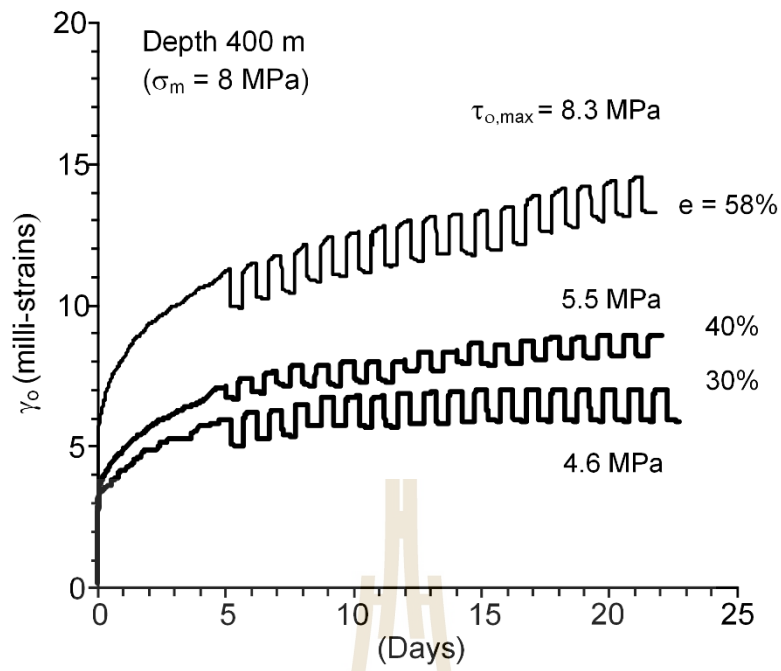
รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเฉือนรวมหกด้านกับเวลาที่ระดับความลึกเท่ากับ 250 เมตร ภายใต้การผันแปรอัตราการขุดเจาะแร่เท่ากับ 58, 40 และ 30 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเฉือนรวมหกด้านกับเวลาที่ระดับความลึกเท่ากับ 300 เมตร ภายใต้การผันแปรอัตราการขูดเจาะแร่เท่ากับ 58, 40 และ 30 เปอร์เซ็นต์



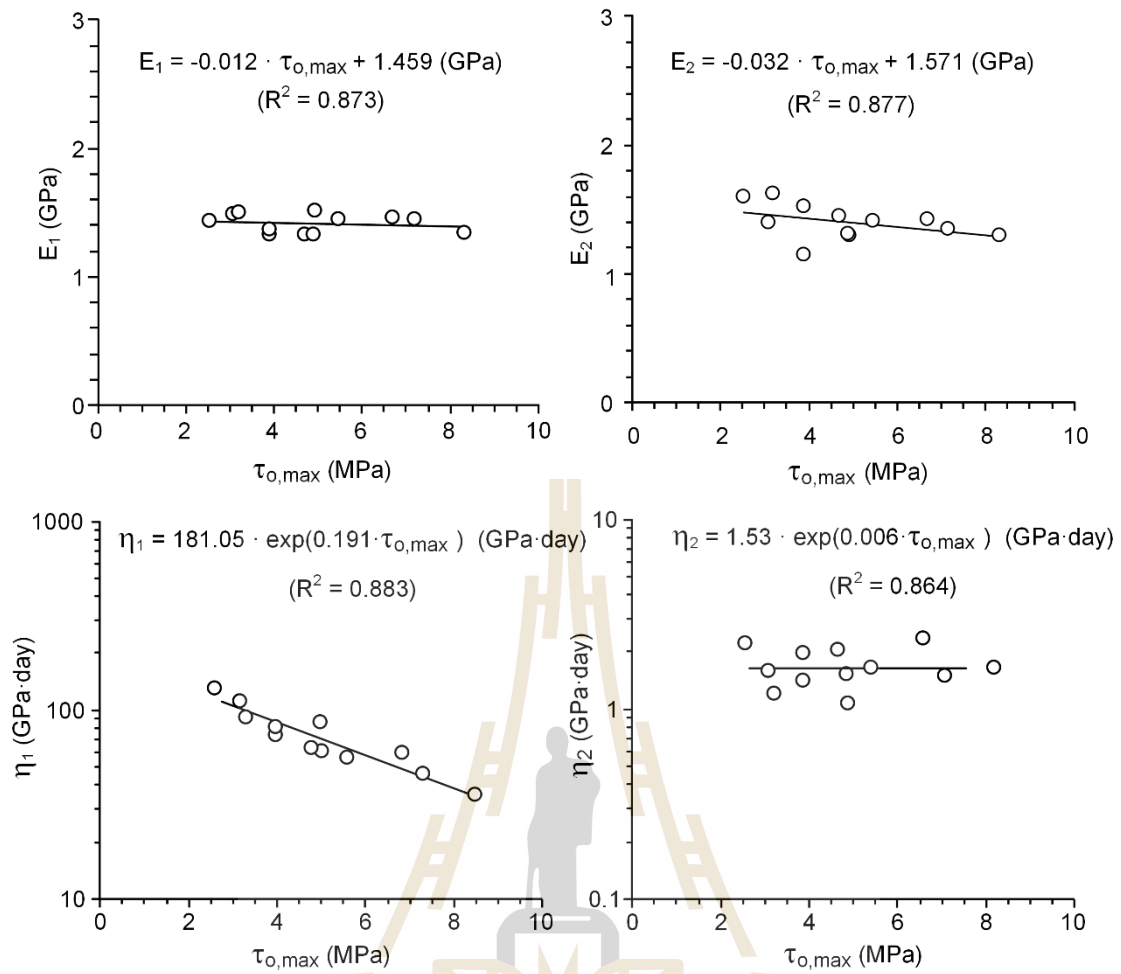
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเฉือนรวมหกด้านกับเวลาที่ระดับความลึกเท่ากับ 350 เมตร ภายใต้การผันแปรอัตราการขูดเจาะแร่เท่ากับ 58, 40 และ 30 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเฉือนรวมหกด้านกับเวลาที่ระดับความลึกเท่ากับ 400 เมตร ภายใต้การผันแปรอัตราการขูดเจาะแร่เท่ากับ 58, 40 และ 30 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 5.1 ผลการสอบเทียบค่าคงที่จากแบบจำลองของ Burger

ความลึก (เมตร)	Extraction Ratio (%)	P_{max} 90% of σ_v (MPa)	P_{min} (MPa)	σ_p (MPa)	τ_{oct} (MPa)	ค่าคงที่จากแบบจำลอง Burgers			
						E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	η_1 (GPa·Day)	η_2 (GPa·Day)
400	58	7.2	1.7	19.3	8.3	1.3	1.3	35.5	1.6
	40			13.3	5.5	1.5	1.7	55.4	1.6
	30			11.3	4.9	2.0	2.1	60.1	1.0
350	58	6.3	1.7	16.9	7.2	1.5	1.4	45.9	1.5
	40			11.7	4.7	1.3	1.5	62.9	2.0
	30			10.0	3.9	1.3	1.2	72.9	1.5
300	58	5.4	1.7	15.9	6.7	1.5	1.4	59.0	2.3
	40			10.0	3.9	1.3	1.9	81.0	0.9
	30			8.6	3.2	1.8	1.8	91.0	1.2
250	58	4.5	1.7	12.1	4.9	1.3	1.3	85.8	1.5
	40			8.3	3.1	1.5	2.2	110.1	1.5
	30			7.1	2.6	1.4	2.2	130.1	2.1



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่จากแบบจำลองของ Burgers (E_1 , E_2 , η_1 และ η_2) ในฟังก์ชันของความเค้นเฉือนรวมหกด้าน

บทที่ 6

การคำนวณด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์

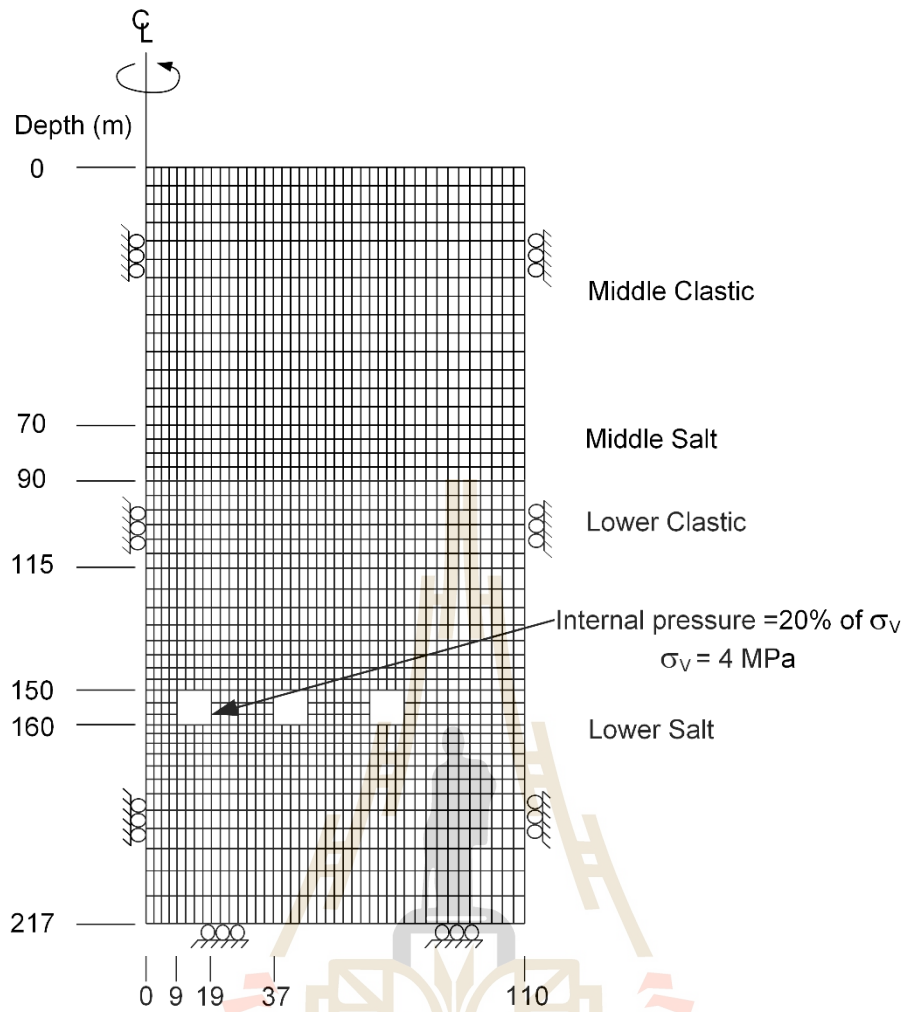
วัตถุประสงค์ของการศึกษาด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์คือ เพื่อประเมินการทรุดตัวของผิวดินในช่องเหมือง โดยใช้ค่าตัวแปรที่ได้จากการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรภายใต้ความเค้นกดในสามแกน และคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินในบริเวณนั้น เช่น ลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาในพื้นที่ ความลึกของช่องเหมือง และอัตราการขุดเจาะแร่ ในการจำลองได้ใช้ค่าตัวแปรจากการสอบเทียบด้วยแบบจำลองของ Burgers เพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างของการทรุดตัวของผิวดินในช่องเหมือง

6.1 แบบจำลองโปรแกรมคอมพิวเตอร์

โปรแกรม FLAC 4.0 (Finite difference code) ได้ถูกใช้เพื่อทำการวิเคราะห์การทรุดตัวของผิวดินในช่องเหมือง โดยทำการจำลองเพียงครึ่งเดียวของ Panel แบบแกนสมมาตร (Axis symmetry) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่ (Isothermal model) คุณสมบัติของเกลือหินที่ใช้ในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ได้กำหนดให้มีค่าเท่ากับผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองของ Burgers ตามที่นำเสนอในบทที่ 5 สำหรับคุณสมบัติด้านความแข็งในตารางที่ 6.1 ได้อ้างอิงผลการทดสอบของ Sriapai และคณะ (2012) รูปที่ 6.1 ที่แสดงโครงข่ายแบบจำลองของช่องเหมือง ซึ่งอ้างอิงจากข้อมูลหลุมเจาะของบริษัท ซอลทเวิร์คส จำกัด อำเภอขามทะเลสอ จังหวัดนครราชสีมา โดยกำหนดให้ช่องเหมืองมีขนาดห้องเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมมีความกว้างและความสูงตั้งแต่ 6-10 เมตร ซึ่งผันแปรตามอัตราการขุดเจาะแร่ และเสาค้ำยันมีความกว้าง 18 เมตร โดยผันแปรระดับความลึกตั้งแต่ 100, 150, 200, 250 จนถึง 300 เมตร ซึ่งในแต่ละระดับความลึกได้ผันแปรอัตราการขุดเจาะแร่เท่ากับ 30, 40 และ 58 เปอร์เซ็นต์

6.2 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

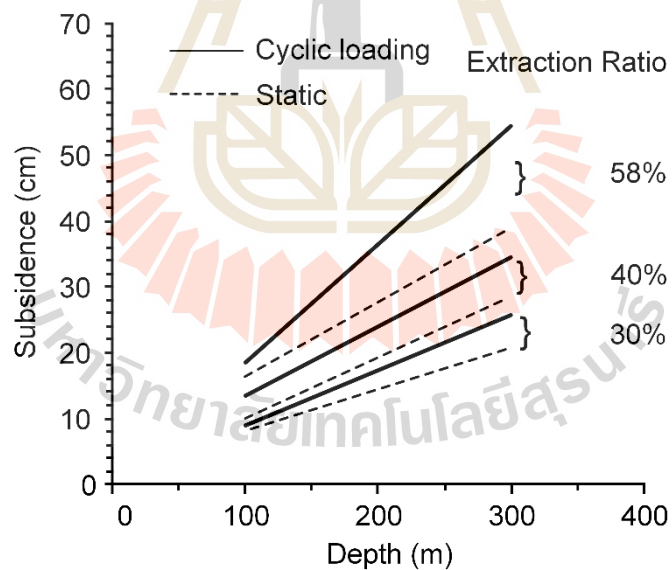
ผลที่ได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ในการคาดคะเนการทรุดตัวของผิวดินที่ระยะเวลา 50 ปี พบว่าอัตราการทรุดตัวของผิวดินเพิ่มขึ้นตามระดับความลึกและอัตราการขุดเจาะแร่แบบคงที่ในเชิงเส้นตรง (รูปที่ 6.2) และมีอัตราการทรุดตัวของผิวดินเพิ่มขึ้นประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ จากการจำลองด้วยการใช้ค่าสอบเทียบจากการทดสอบภายใต้แรงคงที่ ผลระบุว่า การทรุดตัวสูงสุดเท่ากับ 57 เซนติเมตร ที่ระดับความลึก 300 เมตร และอัตราการขุดเจาะแร่เท่ากับ 58 เปอร์เซ็นต์ ผลการจำลองเปรียบเทียบการทรุดตัวของผิวดินดังแสดงในตารางที่ 6.2 โดยแท้จริงแล้วการกักเก็บพลังงานในรูปแบบอากาศในช่องเหมืองจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับการทดสอบการให้แรงแบบวัฏจักรในสามแกน ซึ่งโดยทั่วไปจะพิจารณาค่าที่ได้จากการทดสอบภายใต้แรงคงที่ ดังนั้นผลที่ได้จากการออกแบบจึงยังไม่ถูกต้อง แต่เมื่อใช้ผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบการให้แรงแบบวัฏจักรมาออกแบบช่องเหมืองกักเก็บ ผลของการออกแบบย่อมมีความปลอดภัยมากกว่าการทดสอบภายใต้แรงคงที่



รูปที่ 6.1 ตัวอย่างโครงข่ายแบบจำลองช่องเหมืองเกลือ ที่ระดับความลึก 150 เมตร ความกว้างและความสูงของห้องเท่ากับ 10 เมตร เสาค้ำยันมีความกว้าง 18 เมตร และมีแรงดันภายในช่องเหมืองเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ ของความเค้นในแนวตั้งที่หลังคา (σ_v)

ตารางที่ 6.1 คุณสมบัติของเกลือหินในช่องเหมืองเกลือที่ใช้ในแบบจำลองคอมพิวเตอร์

คุณสมบัติของเกลือหิน	อุณหภูมิห้อง (30°C)	เอกสารอ้างอิง
Elastic Modulus, E (GPa)	24.52	Sriapai และคณะ 2012
Shear Modulus, G (GPa)	9.68	
Bulk Modulus, K (GPa)	28.20	
Friction angle, ϕ (Degrees)	45.0	
Cohesion, c (MPa)	8.41	
Poisson's ratio, ν	0.35	
Tensile strength (MPa)	6.9	
Density, ρ (g/cc)	2.1	
Internal pressure (MPa)	1.7	



รูปที่ 6.2 อัตราการทรุดตัวของผิวดินในช่องเหมืองเกลือที่เวลา 50 ปี ของการจำลองโดยใช้ค่าสอบเทียบจากการทดสอบภายใต้แรงคงที่และการทดสอบการให้แรงแบบวัฏจักร

ตารางที่ 6.2 ผลการจำลองเปรียบเทียบอัตราการทรุดตัวของผิวดินในช่องเหมืองเกลือที่มีรูปแบบตัวแปรสอบเทียบต่างกัน

ความลึก (เมตร)	อัตราการขุด เจาะแร่ (%)	การทรุดตัวเมื่อให้แรง แบบวัฏจักร (เซนติเมตร)	การทรุดตัวเมื่อให้แรงคงที่ (เซนติเมตร)
100	30	9.7	7.8
	40	12.3	8.6
	58	18.5	12.9
150	30	15.2	12.2
	40	20.1	16.0
	58	28.6	22.9
200	30	19.8	15.9
	40	24.3	19.4
	58	37.5	30.0
250	30	22.4	16.8
	40	28.7	21.5
	58	40.9	30.7
300	30	29.1	20.4
	40	34.3	24.0
	58	57.2	40.1

บทที่ 7

บทสรุป

7.1 สรุปและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบการให้แรงกดแบบวัฏจักรภายใต้ความเค้นกดในสามแกนเพื่อจำลองสภาวะการอัดและปล่อยอากาศ โดยผันแปรความเค้นล้อมรอบและอัตราการขูดเจาะแร่ (Extraction ratio) รวมไปถึงประเมินการทรุดตัวของผิวดินที่เวลา 50 ปี โดยจำลองสภาวะของเสาค้ำยันในการรับแรงแบบวัฏจักรภายใต้อากาศอัด ได้กำหนดความเค้นกดในแนวแกนที่กระทำต่อตัวอย่างเกลือหินอยู่ในช่วง 30-70 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวของเกลือหิน และความเค้นล้อมรอบมีค่าเท่ากับ 20 ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ของความเค้นที่เกิดขึ้นจริงในภาคสนาม (In-situ stress) โดยมีความเค้นล้อมรอบเท่ากับ 5, 6, 7 และ 8 เมกะปาสคาล และอัตราการขูดเจาะแร่ (Extraction ratio) เท่ากับ 30, 40 และ 58 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการทดสอบที่สภาวะเช่นนี้จะทำให้ได้ผลที่ใกล้เคียงกับสภาวะจริงในภาคสนาม โดยทดสอบที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) สมการเชิงคณิตศาสตร์ของ Jaeger and Cook (1979) ได้ถูกนำมาพัฒนาให้เป็นสมการความหนืดเชิงยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง (Linear visco-elastic) เพื่อใช้ในการสอบเทียบค่าคงที่บนพื้นฐานของแบบจำลองของ Burgers ผลการทดสอบระบุว่าค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E_1) และค่าความหนืดเชิงยืดหยุ่น (E_2, η_2) จากการสอบเทียบมีค่าใกล้เคียงกัน โดยจะไม่ขึ้นกับความเค้นแนวเฉือนรวมหกด้าน (τ_{oct}) ส่วนค่าความหนืดเชิงพลาสติก (η_1) มีแนวโน้มลดลงแบบเอกโพแนนเชียล ที่ระดับความลึกและที่อัตราการขูดเจาะแร่เพิ่มขึ้น หรืออัตราความเครียดในเชิงเวลามีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเกิดจากผลกระทบของค่าความเค้นที่ได้รับเกินกว่าจุดเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Dilation) ผลจากการทดสอบในรูปแบบต่างๆ ได้นำมาจำลองด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์เพื่อประเมินการทรุดตัวของผิวดิน พบว่าอัตราการทรุดตัวของผิวดินเพิ่มขึ้นตามระดับความลึกและอัตราการขูดเจาะแร่แบบคงที่ในเชิงเส้นตรง และมีอัตราการทรุดตัวของผิวดินเพิ่มขึ้นประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการจำลองโดยใช้ค่าสอบเทียบจากการทดสอบภายใต้แรงคงที่ ผลจากการจำลองได้นำมาใช้พิจารณาความลึกและอัตราการสกัดแร่ของช่องเหมืองที่เหมาะสมสำหรับกักเก็บอากาศอัด ซึ่งในการพิจารณาควรใช้ค่าที่ได้จากการทดสอบการให้แรงแบบวัฏจักรเพื่อให้ผลเป็นไปในเชิงอนุรักษ์

7.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทดสอบควรเพิ่มเวลาของการทดสอบให้นานขึ้น และผันแปรอุณหภูมิในการทดสอบ เนื่องจากในสภาวะจริงอากาศที่ถูกอัดทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ในการให้แรงแบบวัฏจักรควรจะมีหลายรูปแบบไม่จำเป็นต้องลดลงต่ำสุดหรือมีความถี่ในการให้แรงน้อยลง ส่วนสมการที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของเกลืออาจใช้สมการที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น เช่น Non-linear viscoplastic และควรทำการศึกษาเกี่ยวกับการให้แรงแบบวัฏจักรภายใต้อุณหภูมิต่ำด้วย รวมไปถึงการทดสอบการให้แรงดึงแบบวัฏจักรภายใต้การผันแปรอุณหภูมิ



บรรณานุกรม

- Adler, P. M., Zazovsky, A., Baranger, Ph. Bonte, G., Laurens, J. F., and Sureau, J. F., 1996, Hydrodynamic aspects of the inhibition of a salt wall by brine initially contained in a cavity, In Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, September 1993, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany, pp. 249-261.
- Akai, K. and Ohnishi, Y. (1983). Strength and deformation characteristics of soft sedimentary rock under repeated and creep loading. In International Congress on Rock Mechanics 5th, International Society for Rock Mechanics (pp. 121-124). Melbourne: Australia.
- 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.
- Atterwell, P. B. and Farmer, I. W. (1973). Fatigue behavior of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 10: 1-9.
- 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. I, 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. I, 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 basis-France), *Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt*, Ecloe 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*, Ecloe Polytechnique, Palaiseau, France, September 1993, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany, pp. 263-267.
- Brok, B., Zahid, M., and Passchier, C., 1998, Cataclastic solution creep of very soluble brittle salt as a rock analogue, *Earth and planetary science letters*, Volume 163, Number 1, p. 83.
- Burdine, N. T., 1963, Rock failure under dynamic loading conditions, *Society of Petroleum Engineers Journal*, pp. 1-8.
- Carter, N. L., Horseman, S. T., Russell, J. E. and Handin, J., 1993, Rheology of rocksalt, *Journal Structural Geology*, Vol. 15, No. 10, pp. 1257-1272.
- Crotogino, F., Mohmeyer, W. U., and Scharf, R., 2001, Huntorf CAES: More than 20 years of successful operation, Spring 2001 Meeting, Orlando, Florida, USA.
- Cruden, D.M (1970) The static fatigue of brittle rock under uniaxial compression. *Int. J.Rock. Mech. Min. Sci.* 11:67-73.
- 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.
- Chan, G. C., Thompson, P. A., Allen, R. A. and Loscutoff, W. V. (1980). Underground compressed air energy storage for electric utilities, *Subsurface*, June 1980, Vol. 2, pp. 579-585.
- Chokski, A. H. and Langdon, T. G., 1991, Characteristics of creep deformation in ceramics, *Materials Science and Technology*, Vol. 7, pp. 577-584.
- 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.
- DeLong, M. M., Nelson, C. R., and Petersen, D. L., 1989, Subsurface cavern system requirements for compressed air energy storage and associated uses, *Storage of Gases in Rock Caverns*, Nilsen & Olsen (eds.) 1989 Balkema, Rotterdam, ISBN 90 6191 896 0, pp. 33-36.
- EPRI. (1986). *Dynamic Operating Benefits of Energy Storage*. EPRI Report No.AP-4875, Palo Alto, CA, Electric Power Research Institute.
- EPRI. (1990a). *Compressed Air Storage for Electric Power Generation*. EPRI Report No.GS-6784, Palo Alto, CA, Electric Power Research Institute.
- EPRI. (1990b). *Compressed-Air Energy Storage using Hard-Rock Geology*. Palo Alto, CA, Electric Power Research Institute.
- EPRI. (1990c). *Rock Concern Linings for Compressed-Air Energy Storage*. Palo Alto, CA, Electric Power Research Institute.
- EPRI. (1992a). *Alabama Electric Cooperative (AEC) Builds First U.S. Compressed Air Energy Storage (CAES) Plant Using EPRI-Developed Low-Pressure Expander*. EPRI Report No.IN-101511, Palo Alto, CA, Electric Power Research Institute.
- EPRI. (1992b). *CAES goes on-line [Video recording]*. Palo Alto, CA, Electric Power Research Institute.
- EPRI. (1994a). *Compressed Air Handbook*. EPRI Report No. CR-104546, Palo Alto, CA, Electric Power Research Institute.
- EPRI. (1994b). *Comprehensive Analyses of Compressed-Air Cycles; CAES, CAES-ES, CRCAES/CRCASH-ES, and MRCAES/MRCASH-ES*. EPRI Report No.TR-103521, Palo Alto, CA, Electric Power Research Institute.
- EPRI. (1994c) *Development of Turbomachinery Trains for the CASHING, NGCASH, and IGCASH Cycle Applications*. EPRI Report No.TR-103348, Palo Alto, CA, Electric Power Research Institute.
- EPRI. (1994e). *Standard Compressed-Air Energy Storage Plant: Design and Cost*. Research Project No. TR-103209, Palo Alto, CA, Electric Power Research Institute.
- EPRI. (1997). *Energy Storage in a Restructured Electric Utility Industry: Report on EPRI Think Tanks I and II*. EPRI Report No.TR-108894, Palo Alto, CA, Electric Power Research Institute.

- EPRI. (1999). Conceptual Engineering and Cost Estimate for 100-MW and 20MW Nominal Capacity CASH Plants. EPRI Report No. TR-113360, Palo Alto, CA, Electric Power Research Institute.
- 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.
- Frayne, M. A., 1996, Four cases study in salt rock: Determination of material parameters for numerical modeling, In Proceedings Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Ecole Polytechnique, November 1993, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany, pp. 471-482.
- 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.
- Franssen, R. C. M. W., 1998, Mechanical anisotropy of synthetic polycrystalline rocksalt, In Proceeding of the Fourth Conference on the Mechanical Behavior of Salt, The Pennsylvania State University, June 17-18, 1996, Clausthal-Zellerfeld, Trans Tech Publications, Germany, pp. 63-75.
- Fuenkajorn, K. and Daemen, J. J. K. (1992a). Borehole Sealing, Compressed-Air Energy Storage Proceedings of the Second International Conference, Electric Power Research Institute, July 7-9, San Francisco, CA (pp. 5.1-5.21).
- Fuenkajorn, K. and Serata, S., 1992, Geohydrological integrity of CAES in rock salt, Present at the Second International Conference on Compressed-Air Energy Storage Electric Power Research Institute, July 7-9, 1992, San Francisco, CA.
- 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.
- Gehle, R. M. and Thoms, R. L., 1986, Tests of U.S. rock salt for long-term stability of CASE reservoirs. Richland, Wash: Pacific Northwest Laboratory.
- 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.

- Haimson, B. C. and Kim, C. M., 1972, Mechanical behavior of rock under cyclic fatigue, In Proceedings of the Thirteenth Symposium on Rock Mechanics, ASCE, pp.845-864.
- Haimson, B. C., 1972, Mechanical behavior of rock under cyclic fatigue, Annual Technical Report to the Bureau of Mines, Contract H0210004.
- 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. and Chugh, Y. P., 1970, Failure of geological materials under low-cycle fatigue, In Proceedings of the Sixth Canadian Symposium on Rock Mechanics, Montreal, pp. 33-47.
- 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.
- Hamami, M., Tijani, S. M., and Vouille, G., 1996, A methodology for the identification of rock salt behavior using multi-steps creep tests, In Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, November 1993, *Trans Tech Publications*, Clausthal, Germany, pp. 53-66.
- Ishizuka, Y. and Abe, T., 1990, Fatigue behaviour of granite under cyclic loading, *Static and Dynamics Considerations in Rock Engineering*, Brummer (eds.), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 6191 1453 2, pp. 139-146.

- 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.
- Katz, D. L. and Lady, E. R. (1976). *Compressed Air Storage*, Ann Arbor, Michigan: Ulrich;s Book.
- Kim, C. M., 1973, Fatigue failure of rock in cyclic uniaxial compression, Ph. D. Thesis, University of Wisconsin, Madison.
- LeCleac'h, J. M., Ghazali, A., Deveughele, H., and Brulhet, J, 1996, Experimental study of the role of humidity on the thermomechanical behavior of various halitic rocks, In Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, September 1993, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany, pp. 231-236.
- Ma et al. (2013), Experimental investigation of the mechanical properties of rock salt under triaxial cyclic loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Vol 62, 34-41.
- McKay, H. G., Steffens, R. E. and Curlin, B. W. (1989). Review of the design methodology for the Bad Creek underground powerhouse as it would apply to a hard rock cavern design for compressed air energy storage (CAES), In Nilsen & Olsen (eds.). *Storage of Gases in Rock Caverns* (ISBN 90 6191 896 0). Balkema, Rotterdam.
- Morfeltdt, C. O. and Lindblom, U., 1975, *Unline rock caverns for compressed air storage: a ecological, technical and economic study*, Washington: U. S. Energy Research and Development Administratin
- Mogi, K., 1962, Study of elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous materials and its relations to earthquake problem, *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, Vol. 40, pp. 125-173.
- Munson, D. E. and Wawersik, W. R., 1993, Constitutive modeling of salt behavior – State of the technology, In Proc. 7th Int. Cong. Rock Mech., ISRM, Aachen, pp. 1797-1810.

- Nguyen-Minh, D. E. and Quintanilha de Menezes, E., 1996, Incompressible numerical modeling for long term convergence evaluation of underground works in salt, In Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, September 1993, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany, pp. 523-531.
- Passaris, E. K. S. (1982). Fatigue characteristics of rock salt with reference to underground storage cavern. In Proceedings ISRM Symposium, May 26-28, 1982 (pp. 983-989). Aachen.
- Peach, C. J., 1996, Deformation, dilatancy 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.
- Peach, C. J., 1991, Influence of deformation on the fluid transport properties of salt rocks, Thesis, University of Utrecht, Holland.
- Pincus, H. J., 1980, Underground compressed air energy storage : rock mechanics and geology components, Annual report for F Y 1980 and final report for the project, Milwaukee, Wisconsin, University of Wisconsin, Milwaukee.
- Peach, C. J. and Spiers, C. J., 1996, Influence of crystal plastic deformation on dilatancy and permeability development in synthetic salt rock, *Tectonophysics*, Volume 256, Number 1-4, p. 101.
- 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.
- Ray, S. K, Sarkar, M., and Singh, T. N. (1999). Effect of cyclic loading and strain rate in the mechanical behavior of sandstone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science* 36:543-549.
- Saint-Leu, C. and Sirieys, P., 1971, La Fatigue des Roches, In Proceedings of International Symposium on Rock Fracture, Nancy.
- Salter, M. G., Macfarlane, I. M., Willett, D. C., and Byrne, R. J., 1984, Design aspects for an underground compressed air energy storage system in hard rock, *Design and Performance of Underground Excavations*, ISRM/BGS, Cambridge, pp.37-44.

- Shidahara, C. , Kaneko, K. , Nozaki, A. , Oyama, T. , and Nakagawa, K. , 2000, Geotechnical evaluation of a conglomerate for compressed air energy storage: The influence of the sedimentary cycle and filling mineral in the rock matrix, *Engineering Geology*. Vol. 56 No. 1-2, pp. 125-135.
- 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.
- Serata, 1992, Determination of failure-related coefficients for A-2 salt, Prepared for for Sifto Canada Inc. , Goderich, ON.
- Serata, S. and Fuenkajorn, K., 1991, Permeability studies in relation to stress state and cavern design, Phase I, Research Project Report, Contract 1-91, prepared for Solution Mining Research Institute by Serata Geomechanics, Inc. , Richmond, CA.
- Serata, S. and Fuenkajorn, K. , 1992a, Finite element program GEO for modeling brittle-ductile deterioration of earth structures. SMRI Paper, presented at the Solution Mining Research Institute, Fall Meeting, October 19-22, Houston, Texas, 24 pp.
- Serata, S. and Fuenkajorn, K. , 1992b, Formulation of a constitutive equation for salt, In Proc. Seventh International Symposium on Salt, April 6-9, Kyoto, Japan, Vol. 1, Amsterdam: Eisevier Science, pp. 483-488.
- Serata, S. , 1991, GEO/REM computer program for Sifto Canada's Goderich salt mine, Internal report prepared by Serata Geomechanics Inc., Goderich, ON, Canada.
- Serata, S. , Mehta, B. , and Hiremath, M. , 1989, Geomechanical stability analysis for CAES cavern operation, In Nilsen and Olsen (eds), *Storage of Gases in Rock Caverns*, Balkema, Rotterdam, pp. 129-135.
- 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.
- Stormont, J. C. and Daemen, J. J. K., 1992, Laboratory study of gas permeability changes in rock salt during deformation, SAND90-2638, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, January 1991, p. 40.

- Tharp, T. M., 1973, Behavior of three calcite rocks under tensile cyclic loading, M. S. Thesis, University of Wisconsin, Madison.
- Thoms, R. L. Nathany, M., and Gehle, R. (1980). Low-frequency cyclic loading effect in rock salt. In Proc. Int. Symp. Subsurface Space (Rockstore 80), Vol. 2 (pp. 755-761). Stockholm
- Thorel, L., Ghoreychi, M., Cosemza, Ph., and Chanchole, S., 1998, Rocksalt damage and failure under wet or dry conditions, In Proceedings of the Fourth Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Ecole Polytechnique, Montreal, June 1996, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany, pp. 189-202.
- Vouille, G., Bergues, J., Durup, J. G., and You, T., 1996, Study of the stability of caverns in rock salt created by solution mining proposal for a new design criterion, In Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, September 1993, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany, pp. 427-443.
- 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.
- Wittke, W., Pierau, B., and Schetelig, K., 1980, Planning of a compressed-air pumped-storage scheme at Vianden/Luxembourg, In Proc. Int. Symp. Subsurface Space (Rockstore 80), Stockholm, Vol. 2, pp. 367-376.
- 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

ศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เฟื่องขจร เกิดเมื่อวันที่ 16 กันยายน 2500 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร จบการศึกษาปริญญาเอกจาก University of Arizona ประเทศสหรัฐอเมริกา สาขาวิชา Geological Engineering เมื่อปี ค.ศ. 1988 และสำเร็จ Post-doctoral Fellows เมื่อปี ค.ศ. 1990 ที่ University of Arizona ปัจจุบันมีตำแหน่งเป็นประธานกรรมการบริษัท Rock Engineering International ประเทศสหรัฐอเมริกา และดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำอยู่ที่สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา มีความชำนาญพิเศษทางด้านกลศาสตร์หินในเชิงการทดลอง การออกแบบ และการวิเคราะห์โดยใช้คอมพิวเตอร์ ได้เคยทำการวิจัยเป็นหัวหน้าโครงการที่สำเร็จมาแล้วมากกว่า 20 โครงการ ทั้งในประเทศสหรัฐอเมริกาและประเทศไทย มีผลงานตีพิมพ์นานาชาติมากกว่า 50 บทความ ทั้งสารสาร นิตยสาร รายงานรัฐบาล และบทความการประชุมนานาชาติ เป็นผู้แต่งตำรา “Sealing of Boreholes and Underground Excavations in Rock” ที่ใช้อยู่ในหลายมหาวิทยาลัยในสหรัฐอเมริกา ดำรงตำแหน่งเป็นที่ปรึกษาทางวิชาการขององค์กรรัฐบาลและหลายบริษัทในประเทศสหรัฐอเมริกาและแคนาดา 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 UNISEACH จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นคณะกรรมการในการคัดเลือกข้อเสนอโครงการของ U.S. National Science Foundation และ Idaho State Board of Education และเป็นคณะกรรมการในการคัดเลือกบทความทางวิชาการของสำนักพิมพ์ Chapman & Hall ในประเทศอังกฤษ และ Elsevier Sciences Publishing Co., ในประเทศเนเธอร์แลนด์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี