



รหัสโครงการ SUT7-719-54-24-30

รายงานการวิจัย

การประเมินศักยภาพทางด้านกลศาสตร์ของชั้นเกลือหินเพื่อใช้
กักเก็บก๊าซธรรมชาติในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

(Assessment of Mechanical Performance of Rock Salt Formation
for Natural Gas Storage in Northeastern Thailand)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-719-54-24-30

รายงานการวิจัย

การประเมินศักยภาพทางด้านกลศาสตร์ของชั้นเกลือหินเพื่อใช้
กักเก็บก๊าซธรรมชาติในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

(Assessment of Mechanical Performance of Rock Salt Formation
for Natural Gas Storage in Northeastern Thailand)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เฟื่องขจร

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2554 และ 2555

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มิถุนายน 2555

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2554 และ 2555 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากทีมงานหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีในการทดสอบและ นางสาวกัญญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

มิถุนายน 2555



บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ กำหนดรูปร่าง ขนาด และความลึกของโพรงละลายที่อยู่ในชั้นเกลือ ที่เหมาะสมสำหรับเทคโนโลยีกักเก็บก๊าซธรรมชาติในเกลือหินชั้นล่างของชุดหินมหาสารคามในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย โดยโพรงกักเก็บที่ออกแบบจะต้องมีเสถียรภาพในระยะยาว (มากกว่า 50 ปี) และมีการสร้างแผนที่ศักยภาพสำหรับโพรงละลายเกลือที่ใช้กักเก็บก๊าซธรรมชาติ โดยในแผนที่จะสัมพันธ์กับขนาดและความลึกของโพรงที่เหมาะสม

การทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาผลกระทบของแรงกดแบบวัฏจักรต่อพฤติกรรมเชิงเวลาของเกลือหินภายใต้ความเค้นล้อมรอบ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความเค้นกดจะมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับการเปลี่ยนแปลงความเค้นในเกลือหินรอบโพรงเกลือที่ใช้กักเก็บก๊าซธรรมชาติ โดยให้แรงกดเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างเป็นระบบ มีความเค้นเฉลี่ย (σ_m) คงที่ 3 ระดับ คือ 10, 15 และ 20 MPa ในแต่ละการทดสอบความเค้นเฉลี่ยได้มีการผันแปรความเค้นเฉือน (τ_{oct}) จาก 5.0, 8.0, 11.0 ถึง 14.0 MPa การทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรที่มีความเค้นล้อมรอบได้ถูกแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ การทดสอบในสามแกน ($\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$) และการทดสอบในสามแกนจริง ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$) ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบถูกนำไปสอบเทียบเพื่อให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติความเหน็ดแข็งยืดหยุ่นและเชิงพลาสติกของเกลือหิน

ผลจากการวิเคราะห์ได้ข้อสรุปว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E_1) ที่วัดได้จากการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรในสามแกนและในสามแกนจริงเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบการคืบในสามแกนและในสามแกนจริงมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีพฤติกรรมที่ไม่ขึ้นกับการให้แรงกดแบบวัฏจักรและความเค้นหลักกลาง (σ_2) ค่าความเหน็ดแข็งยืดหยุ่น (E_2 , η_2) ที่ได้จากการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรในสามแกนและในสามแกนจริงเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบการคืบในสามแกนและในสามแกนจริงมีค่าใกล้เคียงกัน ความเหน็ดเชิงพลาสติก (η_1) ที่ได้จากการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรมีค่าต่ำกว่าที่ได้จากการทดสอบการคืบประมาณ 10 เท่า และค่าที่ได้จากสภาวะความเค้นในสามแกนจะมีค่าต่ำกว่าสภาวะความเค้นในสามแกนจริง ซึ่งหมายความว่า การกดแบบวัฏจักรจะส่งผลให้เกลือหินเปลี่ยนรูปร่างในเชิงเวลาได้มากกว่าการกดแบบสถิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเปลี่ยนแปลงในสภาวะคงตัว

แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (FLAC) ได้นำมาใช้ในการจำลองโพรงเกลือ โดยหลังคาโพรงเกลืออยู่ที่ระดับความลึก 500 เมตร มีรัศมีของโพรงเท่ากับ 25 เมตร และโพรงมีความสูง 300 เมตร ซึ่งเป็นรูปร่างที่ใหญ่ที่สุด การจำลองได้ใช้ค่าคงที่จากแบบจำลองของ Burgers ที่ได้จากการสอบเทียบ ผลที่ได้จากการสอบเทียบจากการทดสอบทั้งสองรูปแบบ โดย

ผลการจำลองโพรงกักเก็บในระยะ 50 ปี มีเสถียรภาพดีมากและมีการยุบตัวของโพรงกักเก็บน้อยมาก ผลที่ได้สรุปได้ว่าการนำคุณสมบัติที่ได้จากการทดสอบการคืบในสามแกนมาออกแบบโพรงกักเก็บจะไม่เป็นไปในเชิงอนุรักษ์

การสร้างแผนที่ศักยภาพสำหรับการสร้างโพรงกักเก็บโดยพิจารณาความลึกและความหนาของเกลือชั้นล่าง โดยใช้ความลึกของเกลือชั้นล่างซึ่งกระจายตัวทั้งในแอ่งโคราชและแอ่งสกลนคร จากนั้นทำการสร้างภาพตัดขวางเพื่อหาตำแหน่งที่สามารถสร้างโพรงกักเก็บในชั้นเกลือหินทั้ง 2 แอ่ง ในการศึกษาี้แนะนำให้ใช้โพรงที่มีความสูงมากที่สุด 300 เมตร และต่ำสุด 260 เมตร โดยมีหลังคาโพรงอยู่ที่ระดับความลึก 500 เมตร ซึ่งโพรงที่สภาวะความเค้นนี้มีค่าสูงพอที่จะไม่ทำให้หลังคาโพรงเกิดการพังทลายและสามารถกักเก็บก๊าซธรรมชาติได้โดยอ้างอิงจากโพรงกักเก็บที่ใช้ในต่างประเทศ จากการศึกษาี้พบว่าพื้นที่ที่เหมาะสมในการสร้างโพรงกักเก็บก๊าซธรรมชาติ คือ เกลือชั้นล่างของแอ่งโคราช ในเขตอำเภอบรบือ จังหวัดมหาสารคาม และในเขตอำเภอเมืองสรวง จังหวัดร้อยเอ็ด



Abstract

The objectives of this study are to experimentally assess the mechanical performance of the Maha Sarakham salt for natural gas storage caverns, to propose a preliminary design for the cavern configurations, and to identify the area suitable for the cavern development. The effort involves performing cyclic loading tests under triaxial and polyaxial stress states on salt, performing computer simulations (using FLAC) to determine the safe maximum and minimum storage pressures, and reviewing the structural geology of the Khorat and Sakon Nakhon basins to determine the suitable sites for the storage caverns. The triaxial and polyaxial cyclic loading tests use the mean stresses of 10, 15 and 20 MPa while the octahedral shear stresses vary from 5, 8, 11 and 14 MPa. The specimen deformations are monitored along the three principal axes for up to 1200 cycles. The Burgers model is used to describe the elastic, visco-elastic (transient) and visco-plastic (steady-state) behavior of the salt. Regression analyses on the octahedral shear strain – time curves suggest that the salt elastic and visco-elastic parameters tend to be independent of the cyclic loads. In the steady-state creep phase, the visco-plastic parameter calibrated from the true triaxial cyclic loading test is about an order of magnitude lower than those under true triaxial static loading. The Burgers parameters calibrated from the two loading configurations are used to predict the cavern closure using FLAC. The numerical results suggest that simulation of the storage cavern under cyclic pressurizations using the parameters from the conventional triaxial creep test may not give conservative results. The storage caverns are designed to be upright cylindrical caverns with 50 meters in diameter and 260 to 300 meters in height. They should have semi-spherical shape roof and floor. The depth of the cavern top (casing shoe) should be at 500 m. Some areas in the Maha Sarakham province are recommended where the depth and thickness of the Lower salt unit are suitable to host the natural gas storage caverns.

สารบัญ

| | หน้า |
|--|----------|
| กิตติกรรมประกาศ..... | ก |
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ข |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | ง |
| สารบัญ..... | จ |
| สารบัญตาราง..... | ช |
| สารบัญรูปภาพ..... | ณ |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย..... | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย..... | 2 |
| 1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย..... | 4 |
| 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย..... | 5 |
| 1.6 ผลสำเร็จของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ..... | 6 |
| บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 9 |
| 2.1 ก๊าซธรรมชาติ..... | 9 |
| 2.2 การขนส่งก๊าซธรรมชาติ..... | 10 |
| 2.3 การกักเก็บก๊าซธรรมชาติ..... | 11 |
| 2.4 คุณสมบัติของแก๊สอิน..... | 11 |
| 2.4.1 คุณสมบัติของแก๊สอินเชิงกลศาสตร์..... | 11 |
| 2.4.2 คุณสมบัติความชื้นผ่านของแก๊สอิน..... | 13 |
| 2.4.3 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของแก๊สอิน..... | 15 |
| 2.5 การทดสอบแก๊สอินเชิงกลศาสตร์..... | 17 |
| 2.5.1 การทดสอบแรงกดในแกนเดียว..... | 18 |
| 2.5.2 การทดสอบแรงกดในสามแกน..... | 19 |
| 2.5.3 การทดสอบแรงกดแบบวัฏจักร..... | 20 |
| 2.5.4 การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียว..... | 23 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|-----------|
| 2.5.5 การทดสอบการเคลื่อนไหลในสามแกน..... | 23 |
| 2.5.6 การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน..... | 24 |
| 2.5.7 การทดสอบความซึมผ่าน..... | 25 |
| 2.5.8 การทดสอบโดยใช้เทคนิคการวัดคลื่นเสียง..... | 26 |
| 2.5.9 การประสานตัวของรอยแตก..... | 26 |
| 2.5.10 ผลกระทบของวิธีความเค้น..... | 28 |
| 2.6 เทคโนโลยีโพรงเกลือแบบละลาย..... | 32 |
| 2.6.1 การพัฒนาโพรงเกลือแบบละลายที่ปฏิบัติอยู่ในปัจจุบัน..... | 32 |
| 2.6.2 ระเบียบวิธีการออกแบบโพรงเกลือแบบละลาย..... | 35 |
| 2.6.3 โพรงกักเก็บชนิดต่างๆ ในต่างประเทศ..... | 37 |
| 2.6.4 เหมืองเกลือแบบละลายในประเทศไทย..... | 40 |
| บทที่ 3 การเตรียมตัวอย่างเกลือหินและการศึกษาธรณีวิทยาของเกลือหิน | |
| ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ..... | 43 |
| 3.1 แหล่งที่มาของตัวอย่างเกลือหิน..... | 43 |
| 3.2 การจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหิน..... | 43 |
| 3.3 การศึกษาพื้นที่ธรณีวิทยาของเกลือหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ..... | 46 |
| 3.3.1 การประมวลผลข้อมูลหลุมเจาะเพื่อประกอบธรณีวิทยาโครงสร้าง ของชั้นเกลือหิน..... | 47 |
| 3.3.2 การศึกษาข้อมูลในภาคสนาม..... | 51 |
| 3.3.3 การจำแนกความน่าเชื่อถือของการประมวลผลทางด้านธรณีวิทยา..... | 52 |
| 3.3.4 การเปรียบเทียบผลการแปลข้อมูลหลุมเจาะ..... | 53 |
| 3.3.5 การศึกษาความหนาของแต่ละชั้นหิน..... | 53 |
| 3.3.6 การประเมินความลึกของหมวดหินโคกกรวด..... | 58 |
| 3.3.7 การประเมินความลึกของเกลือชั้นล่าง..... | 60 |
| 3.3.8 การประเมินความหนาของเกลือชั้นล่าง..... | 60 |
| 3.3.9 สรุปผลการศึกษา..... | 65 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ..... | 67 |
| 4.1 การเตรียมโครงกตทดสอบในสามแกนจริง..... | 67 |
| 4.2 การทดสอบแรงกตแบบวัฏจักรที่มีความเค้นล้อมรอบ..... | 69 |
| 4.2.1 วิธีการทดสอบ..... | 69 |
| 4.2.2 ผลการทดสอบ..... | 71 |
| บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงกตแบบวัฏจักรที่มีความเค้นล้อมรอบ..... | 81 |
| บทที่ 6 การวิเคราะห์โพรงกักเก็บด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์..... | 85 |
| 6.1 คุณลักษณะของแบบจำลอง..... | 85 |
| 6.2 ผลการจำลอง..... | 87 |
| บทที่ 7 การสร้างแผนที่ศักยภาพสำหรับโพรงละลายเพื่อกักเก็บก๊าซธรรมชาติ..... | 97 |
| 7.1 ขั้นตอนการสร้างแผนที่ศักยภาพ..... | 97 |
| บทที่ 8 การวิจารณ์และสรุปผลงานวิจัย..... | 103 |
| บรรณานุกรม..... | 107 |
| ประวัตินักวิจัย..... | 125 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 3.1 ขนาดของตัวอย่างเกลือหินที่จัดเตรียมตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM สำหรับทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรที่มีความเค้นล้อมรอบ..... | 44 |
| 3.2 ความหนาของชั้นหินจากหลุมเจาะในแอ่งสกลนครที่พบชั้นเกลือครบ 3 ชั้น..... | 54 |
| 3.3 ความหนาของชั้นหินจากหลุมเจาะในแอ่งสกลนครที่พบชั้นเกลือ 2 ชั้น..... | 54 |
| 3.4 ความหนาของชั้นหินจากหลุมเจาะในแอ่งสกลนครที่พบชั้นเกลือ 1 ชั้น..... | 54 |
| 3.5 ความหนาของชั้นหินจากหลุมเจาะในแอ่งโคราชที่พบชั้นเกลือครบ 3 ชั้น..... | 55 |
| 3.6 ความหนาของชั้นหินจากหลุมเจาะในแอ่งโคราชที่พบชั้นเกลือ 2 ชั้น..... | 55 |
| 3.7 ความหนาของชั้นหินจากหลุมเจาะในแอ่งโคราชที่พบชั้นเกลือ 2 ชั้น..... | 56 |
| 3.8 ความหนาของชั้นหินจากหลุมเจาะในแอ่งโคราชที่พบชั้นเกลือ 1 ชั้น..... | 56 |
| 3.9 ความหนาของชั้นหินจากหลุมเจาะในแอ่งโคราชที่พบชั้นเกลือ 1 ชั้น..... | 57 |
| 4.1 คุณลักษณะของความเค้นบนตัวอย่างเกลือหินจากการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักร..... | 73 |
| 5.1 สรุปผลการสอบเทียบค่าคงที่จากการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรที่มีความเค้นล้อมรอบ..... | 83 |
| 6.1 คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินที่ใช้ในการวิเคราะห์โพรงกักเก็บด้วยแบบจำลอง | 87 |

สารบัญรูปภาพ

| รูปที่ | หน้า |
|--------|------|
| 3.1 | 44 |
| 3.2 | 46 |
| 3.3 | 59 |
| 3.4 | 61 |
| 3.5 | 62 |
| 3.6 | 63 |
| 3.7 | 64 |
| 3.8 | 66 |
| 4.1 | 68 |
| 4.2 | 68 |
| 4.3 | 69 |
| 4.4 | 71 |
| 4.5 | 72 |
| 4.6 | 74 |
| 4.7 | 75 |

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.8 ผลการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรในสภาวะสามแกนจริง ($\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$) ที่ความเค้นเฉลี่ยเท่ากับ 15 MPa ความเครียดในแนวแกน (ϵ_1) และในแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง (ϵ_2, ϵ_3) แสดงในฟังก์ชันของเวลา โดยมีค่าความเค้น τ_{oct} และ $[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]$ ในระดับต่างกัน..... | 76 |
| 4.9 ผลการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรในสภาวะสามแกนจริง ($\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$) ที่ความเค้นเฉลี่ยเท่ากับ 20 MPa ความเครียดในแนวแกน (ϵ_1) และในแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง (ϵ_2, ϵ_3) แสดงในฟังก์ชันของเวลา โดยมีค่าความเค้น τ_{oct} และ $[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]$ ในระดับต่างกัน..... | 77 |
| 4.10 ความสัมพันธ์ความเครียดในแนวเฉือนเชิงสามมิติ (γ_{oct}) ในฟังก์ชันของเวลาภายใต้สภาวะความเค้นกดในสามแกนและความเค้นเฉลี่ยเท่ากับ 15 MPa..... | 78 |
| 4.11 ความสัมพันธ์ความเครียดในแนวเฉือนเชิงสามมิติ (γ_{oct}) ในฟังก์ชันของเวลาภายใต้สภาวะความเค้นกดในสามแกนจริงและความเค้นเฉลี่ยเท่ากับ 10 MPa..... | 78 |
| 4.12 ความสัมพันธ์ความเครียดในแนวเฉือนเชิงสามมิติ (γ_{oct}) ในฟังก์ชันของเวลาภายใต้สภาวะความเค้นกดในสามแกนจริงและความเค้นเฉลี่ยเท่ากับ 15 MPa..... | 79 |
| 4.13 ความสัมพันธ์ความเครียดในแนวเฉือนเชิงสามมิติ (γ_{oct}) ในฟังก์ชันของเวลาภายใต้สภาวะความเค้นกดในสามแกนจริงและความเค้นเฉลี่ยเท่ากับ 20 MPa..... | 79 |
| 5.1 องค์ประกอบแบบจำลองของ Burgers..... | 82 |
| 5.2 ชุดค่าคงที่จากการสอบเทียบด้วยแบบจำลองของ Burgers แสดงในฟังก์ชันค่าปัจจัยของ Lode..... | 84 |
| 6.1 โครงข่ายแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (FLAC) ที่สร้างขึ้นเพื่อจำลองโพรงในชั้นเกลือหิน 86 | |
| 6.2 อัตราการยุบตัวของเกลือหินรอบโพรงที่สภาวะความเค้นต่างกัน ร้อยละของอัตราการยุบตัวแสดงในฟังก์ชันของเวลา..... | 88 |
| 6.3 เส้นระดับค่าความเค้นหลักสูงสุด ของสภาวะแรงกดแบบวัฏจักรในสามแกน แรงกดแบบวัฏจักรในสามแกนจริง และแรงกดแบบคงที่ในสามแกนที่สภาวะความดันภายในโพรงกักเก็บเท่ากับ 20%..... | 89 |

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 6.4 เส้นระดับค่าความเค้นหลักต่ำสุดของสภาวะแรงกดแบบวัฏจักรในสามแกน แรงกดแบบวัฏจักรในสามแกนจริง และแรงกดแบบคงที่ในสามแกนที่สภาวะความดันภายในโพรงกักเก็บเท่ากับ 20%..... | 90 |
| 6.5 เส้นระดับค่าความเค้นเฉือนของสภาวะแรงกดแบบวัฏจักรในสามแกน แรงกดแบบวัฏจักรในสามแกนจริง และแรงกดแบบคงที่ในสามแกนที่สภาวะความดันภายในโพรงกักเก็บเท่ากับ 20%..... | 91 |
| 6.6 เส้นระดับค่าความเค้นหลักสูงสุดของสภาวะแรงกดแบบวัฏจักรในสามแกน แรงกดแบบวัฏจักรในสามแกนจริง และแรงกดแบบคงที่ในสามแกนที่สภาวะความดันภายในโพรงกักเก็บเท่ากับ 90%..... | 92 |
| 6.7 เส้นระดับค่าความเค้นหลักต่ำสุดของสภาวะแรงกดแบบวัฏจักรในสามแกน แรงกดแบบวัฏจักรในสามแกนจริง และแรงกดแบบคงที่ในสามแกนที่สภาวะความดันภายในโพรงกักเก็บเท่ากับ 90%..... | 93 |
| 6.8 เส้นระดับค่าความเค้นเฉือนของสภาวะแรงกดแบบวัฏจักรในสามแกน แรงกดแบบวัฏจักรในสามแกนจริง และแรงกดแบบคงที่ในสามแกนที่สภาวะความดันภายในโพรงกักเก็บเท่ากับ 90%..... | 94 |
| 6.9 เส้นระดับค่าความเครียดเฉือนจากการใช้คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินที่ได้จากการสอบเทียบการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรในสามแกน การทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรในสามแกนจริง และการทดสอบการคืบในสามแกน (ดั้งเดิม) ที่สภาวะความดันภายในโพรงกักเก็บเท่ากับ 20%..... | 95 |
| 7.1 ภาพตัดขวางแสดงตำแหน่งที่สามารถสร้างโพรงกักเก็บได้..... | 99 |
| 7.2 แผนที่ศักยภาพพื้นที่ที่เหมาะสมในการก่อสร้างโพรงกักเก็บในแอ่งโคราช..... | 100 |
| 7.3 ภาพขยายแผนที่ศักยภาพในแอ่งโคราชบริเวณ อำเภอเมือง จังหวัดร้อยเอ็ด..... | 101 |
| 7.4 ภาพขยายแผนที่ศักยภาพในแอ่งโคราชบริเวณ อำเภอบรบือ จังหวัดมหาสารคาม..... | 102 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

สภาวะวิกฤติราคาเชื้อเพลิงที่พุ่งสูงขึ้นในปัจจุบันมีแนวโน้มผลักดันให้ผู้บริโภคหันมาใช้ก๊าซธรรมชาติมากขึ้น กลุ่มธุรกิจปิโตรเลียมขั้นต้นและก๊าซธรรมชาติของการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย (ปตท.) คาดว่าปีนี้ความต้องการใช้ก๊าซฯ เฉลี่ยอยู่ที่ 3.5 พันล้านลูกบาศก์ฟุตต่อวัน ซึ่งเพิ่มขึ้นจากปีที่แล้วประมาณ 10% เป็นการเติบโตตามภาคอุตสาหกรรม และการขยายขีดความสามารถของท่อส่งก๊าซธรรมชาติ (หนังสือพิมพ์ มติชน วันพุธที่ 29 ตุลาคม 2551) นอกจากนี้กลุ่มธุรกิจปิโตรเลียมยังมีนโยบายที่จะขยายโครงการท่อส่งก๊าซไปยังพื้นที่ภาคเหนือตอนล่าง (ถึงจังหวัดนครสวรรค์) และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (ถึงจังหวัดนครราชสีมา) อีกด้วย

ก๊าซธรรมชาติที่เป็นก๊าซแห้ง เช่น มีเทน (Methane) และอีเทน (Ethane) มีสถานะเป็นก๊าซที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ ดังนั้นจึงมักใช้วิธีการขนส่งทางท่อส่งก๊าซ วิธีนี้จะส่งก๊าซได้ปริมาณมาก หากจะขนส่งทางเรือหรือทางระบบขนส่งอื่นจะต้องทำให้ก๊าซธรรมชาติ มีอุณหภูมิลดต่ำกว่า -160 องศาเซลเซียส ซึ่งก๊าซธรรมชาติจะกลายเป็นของเหลว เรียกว่า ก๊าซธรรมชาติเหลวหรือแอลเอ็นจี (Liquefied natural gas - LNG) ก๊าซธรรมชาติเหลว จะถูกบรรจุในถังอลูมิเนียมที่เย็นจัด วิธีการนี้เป็นวิธีที่ต้องใช้เงินลงทุนสูง ส่วนก๊าซธรรมชาติที่เป็นก๊าซชื้นจะประกอบด้วยโพรเพน (Propane) และบิวเทน (Butane) ประมาณ 4-8% สามารถทำให้เป็นของเหลวได้เช่นกัน ด้วยวิธีการใช้ความดันประมาณ 120 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่อุณหภูมิต่ำปกติ และขนส่งผ่านท่อก๊าซ หรือระบบขนส่งอื่น บริษัท ปตท. ได้สร้างระบบท่อส่งก๊าซธรรมชาติจากแหล่งต่างๆ ได้แก่ แหล่งเอราวัณ กะพง ปลายทอง ปลาแดง สตูล และบรรพต เป็นระยะทางกว่า 454 กิโลเมตร มาขึ้นฝั่งที่จังหวัดระยอง และถูกส่งผ่านท่อไปยังลูกค้าเพื่อใช้ประโยชน์ เช่น โรงไฟฟ้าใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า โรงงานเซรามิค โรงงานสุกัณฑ์ โรงงานเหล็ก โรงงานทองแดง และโรงงานปิโตรเคมี ทั้งนี้รัฐบาลยังมีนโยบายชัดเจนที่จะสนับสนุนการนำก๊าซธรรมชาติมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วย

ประเด็นที่สำคัญประการหนึ่งของการขนส่งก๊าซธรรมชาติคือ การกักเก็บก๊าซธรรมชาติที่ปลายทางก่อนที่จะส่งไปยังจุดบริการต่างๆ หรือแม้แต่ผู้ใช้ประโยชน์จากก๊าซธรรมชาติเองก็ตาม จะต้องสร้างแหล่งกักเก็บในพื้นที่ของตนเอง การกักเก็บก๊าซธรรมชาติมีหลายวิธีได้แก่ (1) การกักเก็บ ไว้ในถังโลหะที่ทนแรงดันสูง (Gas Storage Tank) เพื่อคงสภาพก๊าซธรรมชาติให้มีสถานะเป็นของเหลว ข้อจำกัดของการกักเก็บด้วยวิธีนี้คือ สามารถกักเก็บได้ปริมาณน้อย ค่าใช้จ่ายในการลงทุนสร้างระบบกักเก็บสูง (2) การกักเก็บในชั้นน้ำบาดาล (Aquifer) และ (3) กักเก็บไว้ในโพรงละลายในชั้นเกลือหินที่อยู่ระดับลึก ซึ่งต่างประเทศ เช่น

อเมริกา แคนาดา นิยมกักเก็บก๊าซธรรมชาติไว้ในโพรงเกลือหิน เนื่องจากเทคโนโลยีนี้มีความคุ้มค่าในการลงทุนค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับการกักเก็บในถังโลหะ ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหากมีการออกแบบและการควบคุมที่เหมาะสม แต่ในประเทศไทยมักกักเก็บก๊าซในถังโลหะ ซึ่งจะต้องใช้ถังจำนวนมาก และต้องมีพื้นที่กว้างขวางพอที่จะเป็นแนวกันพื้นที่กักเก็บออกจากชุมชน เพื่อป้องกันผลกระทบที่จะตามมา ทางเลือกอีกประการหนึ่งสำหรับการกักเก็บก๊าซธรรมชาติในประเทศไทย คือ การกักเก็บในโพรงเกลือในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ทั้งนี้จะต้องมีการกำหนดลักษณะ รูปร่างและความลึกของโพรงให้เหมาะสม และมีการประเมินเสถียรภาพของโพรงเกลือเพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและชุมชน ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาและออกแบบโพรงละลายเกลือเพื่อกักเก็บก๊าซธรรมชาติ โดยจะมีการเสนอผลการวิจัยเป็นแผนที่พื้นที่ศักยภาพที่สามารถสร้างโพรงละลายเกลือเพื่อเทคโนโลยีนี้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) กำหนดรูปร่าง ขนาด และความลึกของโพรงละลายที่อยู่ในชั้นเกลือ และระยะห่างระหว่างโพรงละลายแต่ละโพรงที่เหมาะสมสำหรับเทคโนโลยีกักเก็บก๊าซธรรมชาติ ซึ่งโพรงละลายที่ออกแบบจะต้องมีเสถียรภาพในระยะยาว (มากกว่า 50 ปี) และไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและชุมชนโดยรอบ
- 2) สร้างคู่มือในการออกแบบโพรงละลายเกลือเพื่อใช้กักเก็บก๊าซธรรมชาติ รวมทั้งสร้างเกณฑ์ในการออกแบบและควบคุมรูปแบบการดำเนินการตลอดอายุการใช้งานของโพรงเกลือ เช่น ค่าความดันสูงสุดและความดันต่ำสุดภายในโพรง อัตราการอัดก๊าซเข้าไปในโพรงเกลือและอัตราการดึงก๊าซออกจากโพรงเกลือ การทดสอบเสถียรภาพของโพรงในช่วงอายุการใช้งาน
- 3) สร้างแผนที่ศักยภาพสำหรับโพรงละลายเกลือที่ใช้กักเก็บก๊าซธรรมชาติ โดยในแผนที่จะบอกถึงขนาดและความลึกของโพรงที่เหมาะสม

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) ศึกษาและประมวลข้อมูลทางด้านธรณีวิทยาและธรณีวิทยาโครงสร้างของชั้นเกลือหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย เพื่อกำหนดพื้นที่ (ตำบลหรืออำเภอ) ที่สัมพันธ์กับชั้นเกลือหินที่เหมาะสมในเชิงความลึกและความหนาเพื่อละลายโพรงกักเก็บก๊าซธรรมชาติ ฐานข้อมูลเหล่านี้จะรวมไปถึงข้อมูลหลุมเจาะและข้อมูลธรณีฟิสิกส์ที่ได้ถูกเปิดเผยหรือตีพิมพ์โดยหน่วยงานของรัฐและบริษัทเอกชน รวมทั้งข้อมูลที่ผู้วิจัยได้รวบรวมและวิเคราะห์ไว้แล้ว

- 2) ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการทดสอบและพฤติกรรมของเกลือหินในแง่มุมที่หลากหลาย เช่น ความแข็ง ความยืดหยุ่น การเปลี่ยนแปลงรูปร่างในเชิงเวลา และศึกษาระเบียบวิธีการออกแบบโพรงละลายเกลือมีอยู่เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับโพรงกักเก็บก๊าซธรรมชาติ
- 3) เก็บแท่งตัวอย่างของเกลือหิน ซึ่งอาจจะได้รับความอนุเคราะห์มาจากองค์กรต่างๆ เพื่อนำมาใช้ในการหาคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากโครงการนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้น ดังนั้นจะไม่มี การขุดเจาะหลุมใหม่ในภาคสนาม ตำแหน่งและความลึกของตัวอย่างหินที่นำมาศึกษาจะถูกบันทึกเพื่อใช้ในการอ้างอิงในการศึกษาโดยละเอียดต่อไป
- 4) ทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ของเกลือหินในห้องปฏิบัติการ รวมไปถึงการทดสอบกำลังรับแรงกดในสามแกนจริง (True-triaxial compression test) การทดสอบด้วยแรงกดแบบวัฏจักร (Cyclic loading test) ภายใต้ความดันล้อมรอบ และการทดสอบการเคลื่อนไหลของเกลือหิน (Creep test) ภายใต้อุณหภูมิสูง (110 องศาเซลเซียส) ผลการทดสอบคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องจะถูกนำเสนอและใช้ในการออกแบบโพรงเกลือหินสำหรับกักเก็บก๊าซธรรมชาติ
- 5) ดำเนินการและวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Finite element analysis or Finite difference analysis) เพื่อช่วยกำหนดรูปร่าง ขนาด และความลึกของโพรงที่เหมาะสม โดยมีการนำโปรแกรม GEO หรือ FLAC (version 4.0) มาใช้เพื่อประเมินเสถียรภาพและการทรุดตัว การคำนวณจะอาศัยผลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการในการประเมินศักยภาพทางด้านกลศาสตร์ของเกลือหินรอบโพรงที่ใช้กักเก็บก๊าซธรรมชาติ และคาดคะเนถึงพฤติกรรมของเกลือหินในช่วง 50 ปีข้างหน้า
- 6) วิเคราะห์และออกแบบเพื่อกำหนดรูปแบบเบื้องต้น (ขนาด รูปร่าง ความลึก) ของโพรงที่ใช้กักเก็บก๊าซธรรมชาติในแต่ละพื้นที่ที่เหมาะสม รวมทั้งสร้างแผนที่บริเวณพื้นที่ที่มีศักยภาพสำหรับละลายโพรงเกลือเพื่อใช้กักเก็บก๊าซธรรมชาติในอนาคต
- 7) ศึกษาคุณลักษณะแรงดันของก๊าซธรรมชาติในโพรงที่เหมาะสมในเชิงปฏิบัติ มีความปลอดภัย และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด (มีการทรุดตัวของพื้นดินน้อยที่สุด) คุณลักษณะของแรงดันอากาศนี้จะรวมไปถึงแรงดันสูงสุด แรงดันต่ำสุด อัตราการกักเก็บ อัตราการปล่อยอากาศออกมา และรอบของการปล่อยและการอัดในช่วงวัน เดือน หรือปี
- 8) ร่วมจัดประชุมทางวิชาการและนำเสนอผลการศึกษาเพื่อเผยแพร่เทคโนโลยีแก่นักวิชาการที่เกี่ยวข้อง

1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

เทคโนโลยีการกักเก็บก๊าซธรรมชาติในโพรงเกลือไม่ได้เป็นเทคโนโลยีใหม่ หากแต่มีการดำเนินการในต่างประเทศมาแล้วนานกว่า 20 ปี แนวคิดนี้จะใช้โพรงเกลือที่ออกแบบเพื่อกักเก็บก๊าซธรรมชาติภายใต้แรงดันสูงสุดที่ปลอดภัยและไม่มีกรั่วไหลของก๊าซธรรมชาติ เมื่อปล่อยก๊าซธรรมชาติออกมาจะเหลือแรงดันต่ำสุดภายในโพรงเกลือที่ช่วยค้ำยันผนังโพรงไม่ให้เกิดการพังทลายหรือเกิดการแตกร้าว ซึ่งอาจเป็นสาเหตุการรั่วไหลของก๊าซธรรมชาติสู่ชั้นหินกัลไลเคียงหรือสู่โพรงกักเก็บกัลไลเคียง กล่าวคือจำเป็นต้องมีการคำนวณเชิงกลศาสตร์ธรณี โดยพิจารณาความแข็ง ความยืดหยุ่น และความหนืดของเกลือหินเฉพาะพื้นที่ ในที่นี้คือชั้นเกลือหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

ปัจจัยสำคัญสำหรับเทคโนโลยีนี้ คือ เสถียรภาพของโพรงเกลือ (เสถียรภาพด้านกลศาสตร์และด้านชลศาสตร์) กล่าวคือ โพรงกักเก็บก๊าซธรรมชาติจะต้องมีความมั่นคงแข็งแรงทนต่อน้ำหนักกดทับด้านบนได้โดยไม่เกิดการทรุดตัว หากเกิดการพังทลายของโพรงจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และไม่มีการรั่วไหลของก๊าซธรรมชาติที่กักเก็บไว้สู่ชั้นหินข้างเคียงหรือโพรงเกลือข้างเคียง ในการออกแบบต้องกำหนด รูปร่าง ขนาด และความลึกของโพรงให้เหมาะสมกับลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างในแต่ละพื้นที่ และอาศัยกระบวนการควบคุมการใช้งานอย่างเหมาะสม ในที่นี้ได้แก่การกำหนดค่าความดันสูงสุดและต่ำสุดภายในโพรงเกลือให้เหมาะสม ในการศึกษาจะต้องมีการใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์เสถียรภาพของโพรงเกลือในระยะยาว (มากกว่า 50 ปี) ประกอบกับคุณสมบัติของเกลือหินที่ได้ทดสอบและมีการสอบเทียบค่าตัวแปรที่จำเป็นสำหรับแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ดังนั้น สิ่งจำเป็นในการทำงานวิจัยรูปแบบนี้คือ ต้องอาศัยความแม่นยำในการแปรธรณีวิทยาโครงสร้าง การทดสอบที่ถูกต้องเป็นไปตามมาตรฐาน การเลือกใช้แบบจำลองที่เหมาะสม การสอบเทียบค่าตัวแปรที่แม่นยำและถูกต้อง

ผู้วิจัยมีความเชี่ยวชาญด้านการออกแบบโพรงละลายเกลือสำหรับกักเก็บก๊าซธรรมชาติ น้ำมันดิบ หรือแม้แต่โพรงสำหรับเทคโนโลยีอากาศอัด (Compressed-air Energy Storage) ก็ตาม และได้รับความไว้วางใจจากบริษัทต่างประเทศให้ช่วยวิเคราะห์และออกแบบโพรงกักเก็บก๊าซธรรมชาติ เช่น Mississippi Hub, Tuz Gulu, Joy Station, Arcadia และ Canatxx จากประสบการณ์ที่มีอยู่ผนวกกับการได้มาซึ่งข้อมูลทางธรณีวิทยาโครงสร้างที่ถูกต้องแม่นยำ และการทดสอบที่เป็นไปตามมาตรฐานที่ดำเนินการในห้องปฏิบัติการ ผู้วิจัยมีความมั่นใจเป็นอย่างยิ่งว่าจะสามารถสร้างแผนที่บริเวณพื้นที่ที่มีศักยภาพสำหรับสร้างโพรงละลายในชั้นเกลือได้อย่างสมบูรณ์ที่สุด

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การทบทวนวรรณกรรมวิจัย

เอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบคุณสมบัติและพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินได้ถูกค้นคว้าและทบทวน รวมถึงเอกสารการประชุม วารสาร และรายงานวิชาการผลที่ได้ได้สรุปไว้ในบทถัดไป

ขั้นตอนที่ 2 การเก็บและจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหิน

บริษัท เกลือพิมาย จำกัด ได้ให้ความอนุเคราะห์แท่งตัวอย่างเกลือหินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว ยาว 4 เมตร จากนั้นนำมาตัดและฝนให้มีขนาด $54 \times 54 \times 54 \text{ mm}^3$ อย่างน้อย 30 ตัวอย่าง เพื่อใช้ในการทดสอบ

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

โครงการวิจัยนี้มีการทดสอบเพื่อหาความคงทนภายใต้แรงกดแบบวัฏจักร (Cyclic loading test) ที่มีความเค้นล้อมรอบ การทดสอบจะคล้ายคลึงกับ Uniaxial compressive strength test และ Triaxial compressive strength test แต่แรงกดจะมีขนาดขึ้นลงอย่างมีระบบ ตัวอย่างหินที่ถูกทดสอบในกลุ่มนี้มีอย่างน้อย 10 ตัวอย่าง ผลที่ได้จากการทดสอบบ่งบอกถึงความสามารถสูงสุดของเกลือหินในการรับความเครียดที่เกิดขึ้นจากแรงกดที่ซ้ำซ้อน หรือแรงกดจากวัฏจักรนั่นเอง เพราะเกลือหินที่อยู่รอบโพรง จะต้องรับแรงกดจากวัฏจักรที่เกิดจากการอัดก๊าซธรรมชาติเข้าไปในโพรงและการปล่อยก๊าซธรรมชาติออกจากโพรง ผลที่ได้จากการทดสอบจะมีประโยชน์ในการสอบทานแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่สร้างขึ้น แบบจำลองนี้จะใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบโพรงกักเก็บอากาศอัด ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดในหัวข้อต่อไป

ขั้นตอนที่ 4 การคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์นำมาใช้คำนวณความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นรอบโพรงในชั้นเกลือหินในขณะที่โพรงได้รับผลกระทบจากแรงดันอากาศที่เก็บอยู่ จำนวนของแบบจำลองจะขึ้นกับจำนวนของพื้นที่ หรือจำนวนของธรณีวิทยาโครงสร้างต่างๆ ที่เหมาะสมกับเทคโนโลยีอัดอากาศอัด โปรแกรม FLAC (version 4.0) จะนำมาใช้ในการคำนวณ โปรแกรมนี้เป็นโปรแกรม Finite element ที่สามารถคำนวณความเค้นและความเครียดของวัตถุในสองมิติ และสามารถคาดคะเนพฤติกรรมของวัตถุนั้นไปในอนาคต โปรแกรมนี้ได้ถูกเขียนขึ้นโดยมีโครงสร้าง

ทางด้านคณิตศาสตร์เพื่อจำลองคุณสมบัติของวัสดุแบบ Elasticity, Visco-elasticity, Visco-plasticity, Brittle และ Ductile การคำนวณจะมีเวลาเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ ผลที่ได้จากการคำนวณจะนำมาวิเคราะห์เพื่อเลือกสรรขนาดและรูปร่างของโพรงที่เหมาะสมในแต่ละพื้นที่

ขั้นตอนที่ 5 การสร้างแผนที่ศักยภาพสำหรับโพรงละลายเพื่อกักเก็บ ก๊าซธรรมชาติ

เมื่อได้ลักษณะของโพรงละลายเกลือที่เหมาะสมสำหรับกักเก็บก๊าซธรรมชาติแล้ว จึงนำข้อมูลนี้มากำหนดพื้นที่ที่มีศักยภาพสำหรับละลายโพรงในชั้นเกลือ ซึ่งเปรียบเทียบในเชิงความหนาและความลึกที่เหมาะสม

ขั้นตอนที่ 6 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิดและขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุปได้นำเสนอโดยละเอียดในรายงานฉบับสมบูรณ์ เพื่อที่ส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ

ขั้นตอนที่ 7 การถ่ายทอดเทคโนโลยี

แผนการการถ่ายทอดเทคโนโลยีนี้ คือ การนำข้อมูลไปเผยแพร่ในเว็บไซต์ของหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีเพื่อให้ผู้ที่สนใจทั่วไปสามารถสืบค้นได้ และนำผลงานวิจัยชิ้นนี้ลงตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติหรือนำเสนอในการประชุมวิชาการระดับชาติเพื่อเผยแพร่ความรู้ในวงกว้างต่อไป

1.6 ผลสำเร็จของงานวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ

ผลงานวิจัยที่เสนอมานี้มีประโยชน์กับงานด้านธรณีวิทยา วิศวกรรมธรณี และวิศวกรรมพลังงาน ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

1.6.1 เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป

เพื่อเป็นองค์ความรู้เริ่มและสร้างสรรค์ในการออกแบบโพรงละลายในชั้นเกลือหิน เข้าใจพฤติกรรมของเกลือหินในสภาวะที่มีความเค็มผันแปรและอยู่ภายใต้อุณหภูมิสูง และมีความเข้าใจเกี่ยวกับการทรุดตัวของผิวดินมากขึ้น การศึกษาดังกล่าวได้รวบรวมองค์ความรู้ทางด้านกลศาสตร์หินเพื่อใช้ในการระบุรูปร่าง ขนาด และความลึกของโพรงเกลือ

1.6.2 บริการความรู้แก่ประชาชนและหน่วยงานราชการ

การให้ความรู้แก่หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เช่น กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ ทราบถึงกระบวนการออกแบบโครงข่ายเกลือเพื่อเทคโนโลยีการกักเก็บก๊าซธรรมชาติ มีความเข้าใจเกี่ยวกับการกักเก็บก๊าซในโพรงเกลือมากยิ่งขึ้น ทราบถึงวิธีดำเนินการในการกักเก็บก๊าซธรรมชาติไว้ในโพรงเกลือ และยังเข้าใจกรรมวิธีการตรวจวัดเสถียรภาพของโพรงเกลือตลอดอายุการใช้งานของโพรงเกลือ

1.6.3 บริการความรู้แก่ภาคธุรกิจ

เป็นแหล่งข้อมูลและให้ความรู้แก่หน่วยงานภาคธุรกิจ เช่น กลุ่มธุรกิจปิโตรเลียมขั้นต้นและก๊าซธรรมชาติ ของ PTT มีแนวทางหรือทางเลือกในการกักเก็บก๊าซธรรมชาติ และสามารถกำหนดพื้นที่เป้าหมายสำหรับโครงการขายท่อก๊าซสู่ภูมิภาคในอนาคต มีความชัดเจนด้านความเป็นไปได้ที่จะใช้โพรงเกลือในการกักเก็บก๊าซธรรมชาติ

1.6.4 เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต

กลุ่มธุรกิจปิโตรเลียมสามารถกักเก็บก๊าซธรรมชาติได้ปริมาณสูงในพื้นที่จำกัด และหากมีการกระจายพื้นที่บริการก๊าซธรรมชาติไปสู่ส่วนภูมิภาคมากขึ้นจะทำให้โรงงานต่างๆ ที่อาศัยพลังงานอื่น เช่น น้ำมัน หันมาใช้พลังงานที่ได้จากก๊าซธรรมชาติมากยิ่งขึ้น ทำให้กระบวนการผลิตใช้ต้นทุนที่ต่ำลง และใส่ใจในเรื่องประสิทธิภาพในการผลิตของบริษัทมากยิ่งขึ้น โรงงานไฟฟ้าที่อาศัยพลังงานจากถ่านหิน จะหันมาใช้ก๊าซธรรมชาติ เป็นการลดปัญหาด้านมลภาวะสู่สิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่ง ซึ่งจะส่งผลให้เศรษฐกิจของประเทศชาติดีขึ้น

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ก๊าซธรรมชาติ

ก๊าซธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ก่อกำเนิดและสะสมตัวอยู่ใต้ผิวโลกมีหลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับโครงสร้างโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบ บางแหล่งประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอนจำพวกมีเทนอย่างเดียว บางแหล่งประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอนผสมกันหลายชนิด ได้แก่ มีเทน อีเทน โพรเพน บิวเทน เพนเทน เฮกซ์เซน และอื่นๆ สัดส่วนขององค์ประกอบเหล่านี้ขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมของก๊าซแต่ละแหล่งที่พบ ก๊าซธรรมชาติบางแหล่งมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบถึง 70% และอาจมีสารอื่นๆ ปนอยู่บ้าง เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ก๊าซไข่เน่า) ก๊าซไนโตรเจน และน้ำ ถ้าก๊าซธรรมชาติมีสารไฮโดรคาร์บอนที่เป็นมีเทนเกือบทั้งหมดเรียกว่า "ก๊าซแห้ง" แต่ถ้ามีสารไฮโดรคาร์บอนจำพวกก๊าซโพรเพน ก๊าซบิวเทน หรือไฮโดรคาร์บอนเหลว เช่น เพนเทน เฮกซ์เซน หรือก๊าซไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ ประกอบอยู่ในปริมาณพอสมควรเรียกว่า "ก๊าซชื้น" ซึ่งถ้าจะเปรียบเทียบกับอากาศก็คืออากาศแห้งซึ่งจะมีไอน้ำน้อยมาก และอากาศชื้นที่มีไอน้ำปนอยู่สูงนั่นเอง

เนื่องจากก๊าซธรรมชาติประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอนหลายชนิด ดังนั้นกระบวนการแยกไม่ใช้เพื่อใช้ประโยชน์สำหรับเป็นเชื้อเพลิงเท่านั้น แต่ยังมีวัตถุประสงค์เพื่อการใช้ประโยชน์อย่างอื่นด้วย ก๊าซมีเทนใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรม เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตปุ๋ย และอัดใส่ถังใช้เป็นเชื้อเพลิงรถโดยสาร เอ็นจีวี (Natural gas for vehicles – NGV) อีเทนและโพรเพนใช้เป็นวัตถุดิบในโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (Liquefied petroleum gas – LPG) ซึ่งประกอบด้วยโพรเพนและบิวเทน ใช้เป็นเชื้อเพลิงหุงต้ม เชื้อเพลิงสำหรับรถและอุตสาหกรรม แก๊สไฮโดรคาร์บอนเหลว (Natural gas liquid – NGL) ส่งเข้าโรงกลั่นเพื่อกลั่นเป็นน้ำมันเบนซิน ก๊าซธรรมชาติที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรมจะใช้สำหรับเตาเผา หม้อต้มน้ำ และเครื่องจักรไอน้ำ ส่วนก๊าซธรรมชาติที่ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมปิโตรเคมีก็เพื่อผลิตปุ๋ย พลาสติก เส้นใยสังเคราะห์ ยางสังเคราะห์ และยากำจัดวัชพืช โรงแยกก๊าซธรรมชาติของ ปตท. ที่ จ.ระยอง จะแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาด้วย ซึ่ง ปตท. ได้ร่วมกับบริษัท ลิควิด คาร์บอนิก (ประเทศไทย) สร้างโรงงานเพื่อส่งเสริมการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมหล่อโลหะ เชื่อมโลหะ น้ำยาดับเพลิง น้ำอัดลม เบียร์ ถนอมอาหาร และทำฟนเทียม

2.2 การขนส่งก๊าซธรรมชาติ

ก๊าซแห้ง เช่น มีเทนและอีเทน มีสถานะเป็นก๊าซที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ ดังนั้นการขนส่งจึงมักใช้วิธีการขนส่งทางท่อ โดยก๊าซปริมาณมากสามารถทำให้เย็นถึง -160°C กลายเป็นของเหลวเรียกว่า ก๊าซธรรมชาติเหลวหรือแอลเอ็นจี (Liquefied natural gas - LNG) ใช้วิธีการขนส่งทางเรือ โดยการเก็บในถังอลูมิเนียมเย็นจัด แต่วิธีการนี้เป็นวิธีที่ต้องใช้เงินลงทุนสูง ส่วนก๊าซอื่นซึ่งประกอบด้วยโพรเพนและบิวเทนประมาณ 4-8% สามารถทำเป็นของเหลวได้เช่นกัน ด้วยวิธีการใช้ความดันประมาณ 120 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่อุณหภูมิปกติ การแยกก๊าซแอลพีจี (LPG) เป็นสิ่งทำได้ง่ายและอาจจะแยกได้ที่แหล่งผลิตบนบก เช่น ที่ลานกระบือหรือแหล่งน้ำมันดิบสิริกิติ์ เป็นต้น เมื่อแยกออกมาแล้วก๊าซแอลพีจีจะถูกเก็บไว้ในถังรอการขนส่งทั้งทางรถและทางเรือ ในการผลิตก๊าซธรรมชาติจะได้ส่วนที่เป็นของเหลว ณ อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ ซึ่งเรียกว่า ก๊าซธรรมชาติเหลวเหมือนกัน หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า คอนเดนเสท (condensate) โดยจะถูกแยกออกมาที่ปากหลุมและใช้วิธีการขนส่งทางเรือ หลังจากบริษัท ยูโนแคลได้ค้นพบก๊าซธรรมชาติในพื้นที่สัมปทานในอ่าวไทย และพิสูจน์ว่ามีปริมาณมากพอในเชิงพาณิชย์แล้ว จึงเป็นหน้าที่ของ ปตท. ที่จะพัฒนาและนำก๊าซมาใช้ประโยชน์ต่อไป ปตท. ได้วางท่อก๊าซจากแหล่งต่างๆ ได้แก่ แหล่งเอราวัณ กะพง ปลาทอง ปลาแดง สตูล และบรรพต เป็นระยะทางยาว 454 กิโลเมตร มาขึ้นฝั่งที่จังหวัดระยอง ท่อก๊าซนี้มีขนาด 34 นิ้ว ในปี พ.ศ. 2539 ปตท. ได้สร้างท่อคู่ขนานจากแหล่งเอราวัณขึ้นฝั่งที่เดียวกัน ทำให้สามารถรับก๊าซธรรมชาติเพิ่มขึ้นจากเดิมอีกหนึ่งเท่าตัว ปัจจุบันประเทศไทยได้ผลิตก๊าซธรรมชาติขึ้นมาใช้คิดเป็นประมาณ 17% ของพลังงานที่ใช้ทั้งหมด จากมาบตาพุด จ.ระยอง ก๊าซได้ถูกส่งผ่านท่อไปยังลูกค้าเพื่อใช้ประโยชน์ต่างๆ กัน ท่อบกท่อแรกเป็นท่อตรงไปยังโรงไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่บางปะกงและที่โรงจักรพระนครใต้ ท่อนี้มีระยะทางยาว 167 กิโลเมตร ท่อย่อยในทะเลที่สร้างเสร็จเมื่อไม่นานมานี้คือ ท่อจากแหล่งก๊าซบงกชไปยังแท่นผลิตเอราวัณ และท่อจากเอราวัณไปยัง อ.ชนอม จ.นครศรีธรรมราช เมื่อท่อส่วนนี้เสร็จ ปตท. ก็สามารถส่งก๊าซไปยังโรงไฟฟ้าที่ชนอมได้ด้วย ปตท. ยังได้ต่อท่อจากแหล่งก๊าซน้ำพอง จ.ขอนแก่น ไปยังโรงไฟฟ้าน้ำพองใกล้ๆ กัน ซึ่งก๊าซธรรมชาติสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนเชื้อเพลิงอื่นๆ ได้ด้วย จึงมีการต่อท่อจากบางปะกงไปยังโรงงานปูนซีเมนต์ที่แก่งคอยและท่าหลวง จ.สระบุรี ท่อนี้ยาวเป็นระยะทาง 180 กิโลเมตร นอกจากนี้ยังมีการต่อท่อไปยังโรงงานเซรามิค โรงงานสุษัณห์ โรงงานเหล็ก โรงงานทองแดง และโรงงานปิโตรเคมี ซึ่งรัฐบาลมีนโยบายชัดเจนที่จะสนับสนุนการนำก๊าซธรรมชาติมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าอีกทางหนึ่ง (ที่มา: ความสำคัญของก๊าซธรรมชาติ, รอบรู้เรื่องปิโตรเลียม, สถาบันปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย)

2.3 การกักเก็บก๊าซธรรมชาติ

การกักเก็บก๊าซธรรมชาติโดยทั่วไปมี 3 วิธี ขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน คือ 1) การกักเก็บไว้ในถังโลหะที่ทนแรงดันสูง 2) การกักเก็บในชั้นน้ำบาดาล และ 3) การกักเก็บไว้ในโพรงหินที่มีความซึมผ่านต่ำมาก เช่น โพรงละลายในเกลือหิน การกักเก็บจะมุ่งประเด็นไปที่ค่าความเค้นต่ำสุดและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณฐานค้ำยันท่อ (Casing Shoe) ซึ่งมีความประมาณ 20% และ 90% ของความเค้นในภาคสนาม และยังมีการพิจารณาการใช้งานของโพรงเกลือด้วยการดึงเอาก๊าซธรรมชาติที่กักเก็บออกมาใช้ อาจจะมีค่าถึงเป็นทุก 1 เดือน หรืออาจจะยืดยาวเป็นรอบปีก็ได้ นอกจากนี้ยังมีความสนใจในประเด็นเกี่ยวกับอัตราการดึงเอาก๊าซจากโพรงออกมาใช้ด้วย เนื่องจากอัตราการดึงออกจากโพรงจะมีผลกระทบต่อความเค้นรอบโพรงเกลือด้วย หากมีการลดความดันอย่างรวดเร็วเกลือหินจะมีการปรับสภาพไม่ทันทำให้เกิดการแตกหรือวิบัติของเกลือหินรอบโพรงได้ (Phueakphum and Fuenkajorn, 2009; Staudtmeister and Rokahr, 1997)

2.4 คุณสมบัติของเกลือหิน

การศึกษาและวิจัยคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินมีจุดมุ่งหมายหลักเพื่อศึกษากลไกและพฤติกรรมของเกลือหินที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยอาศัยการทดสอบเชิงกลศาสตร์และความรู้พื้นฐานทางวิศวกรรมศาสตร์มาประยุกต์ใช้ในการหาคุณสมบัติของเกลือหินและสร้างสมการหรือกฎเกณฑ์เชิงคณิตศาสตร์ในการประเมินและคาดคะเนพฤติกรรมของเกลือหินในสถานะชั้นหินที่มีแรงกด ความร้อน และความชื้น เป็นต้น คุณสมบัติของเกลือหินเชิงกลศาสตร์จึงเกี่ยวข้องกับค่าความเค้น ความเครียด อุณหภูมิ และเวลา คุณสมบัติเหล่านี้จะถูกกำหนดเป็นส่วนหนึ่งของสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อให้สามารถอธิบายพฤติกรรมของเกลือหินในด้านต่างๆ ได้อย่างครอบคลุม

2.4.1 คุณสมบัติของเกลือหินเชิงกลศาสตร์

นักวิจัยบางกลุ่มได้เสนอว่าเกลือหินมีคุณสมบัติเหมือนโลหะและเซรามิก (Munson and Wawersik, 1991; Chokski and Langdon, 1991) แต่แท้จริงแล้วเกลือหินจัดเป็นหินชนิดหนึ่งจำพวก Alkali halides มีคุณสมบัติไม่เหมือนกับโลหะ เซรามิก และหินอื่นๆ โดย Barber (1990) และ Aubertin et al. (1992, 1993, 1999) ได้ศึกษาคุณสมบัติของเกลือหินและสรุปว่าเกลือหินมีคุณสมบัติแบบกิ่งเปราะกิ่งเหนียว หรือมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น-พลาสติก กล่าวคือ เกลือหินจะมีพฤติกรรมทั้งแบบยืดหยุ่น แบบยืดหยุ่น-พลาสติก และแบบพลาสติก (Jeremic, 1994; Aubertin et al., 1992, 1993, 1999; Fokker, 1995, 1998) ผลจากการศึกษาโดยนักวิจัยกลุ่มนี้สามารถสรุปโดยสังเขปได้ดังนี้

พฤติกรรมเชิงยืดหยุ่น (Elastic behavior) ของเกลือหินส่วนใหญ่จะถูกพิจารณาในลักษณะความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงและมีการวิบัติแบบเปราะ ความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงสามารถสังเกตได้เมื่อมีแรงกดต่ำกว่าแรงกดอ่อนตัว (Yield stress) ในช่วงความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงจะสามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นได้ ซึ่งปกติแล้วเกลือหินจะมีสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่ค่อนข้างต่ำ

พฤติกรรมเชิงยืดหยุ่น-พลาสติก (Elastic and plastic behavior) ของเกลือหินจะเกิดขึ้นเมื่อแรงกดที่กระทำต่อเกลือหินยังไม่เกินจุดอ่อนตัว เมื่อปล่อยแรงกดจะทำให้เกลือหินกลับสู่สภาพเดิม หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือเกลือหินมีการเปลี่ยนรูปไปชั่วคราวเท่านั้น แต่ในขณะเดียวกันเมื่อให้แรงกดต่อไปเกลือหินจะเข้าสู่ช่วงที่เป็นพลาสติก กล่าวคือความเค้นได้เลยจุดความเค้นอ่อนตัวไปแล้วนั่นเอง เมื่อลดแรงกดเกลือหินจะไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ ถ้าให้แรงกดต่อไปเกลือหินจะไม่สามารถทนแรงกดที่สะสมไว้ได้และในที่สุดเกลือหินก็จะวิบัติ

พฤติกรรมเชิงพลาสติก (Plastic behavior) เกลือหินจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรจนกว่าแรงที่กระทำจะเกินจุดอ่อนตัว (Thorel and Ghoreychi, 1996; Fryne et al., 1996) ที่แรงกดสูงเช่นนี้เกลือหินจะมีการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกไม่มีที่สิ้นสุดหากแรงกดที่กระทำยังคงเท่ากับแรงกดคงที่ เมื่อถึงขีดจำกัดของความเครียดค่าหนึ่งเกลือหินก็จะไม่สามารถทนรับแรงกดนี้ต่อไปได้และจะวิบัติ

การเปลี่ยนรูปของเกลือหินที่ได้รับอุณหภูมิระดับสูงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนตำแหน่งของผลึกได้ง่าย เมื่อได้รับแรงกดก็จะเกิดแรงในแนวเฉือนทำให้เกิดการเคลื่อนไหลง่ายยิ่งขึ้น ดังนั้นในเชิงกลศาสตร์ แรงกดและความร้อนจะเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญในการศึกษาพฤติกรรมกรรมและกลไกการเคลื่อนไหลของเกลือหิน (Senseny et al., 1992; Carter et al., 1993) นอกจากนี้การเปลี่ยนรูปของเกลือหินจะมีความสัมพันธ์กับอัตราความเครียดแบบไม่ยืดหยุ่นและความเค้นผันแปรด้วย (Spiers et al., 1990; Barber, 1990; Chokski and Langdon, 1991; Wolfenstine et al., 1991)

สำหรับการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์จะมีการออกแบบวิธีการทดสอบให้สอดคล้องกับพฤติกรรมของเกลือหินและสภาวะธรรมชาติ เช่น การกำหนดอัตราความเค้นคงที่เพื่อประเมินพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง การกำหนดการยุบตัวคงที่เพื่อประเมินการผ่อนคลายความเค้น และการกำหนดให้แรงกดคงที่เพื่อประเมินการเคลื่อนไหลของเกลือหินตลอดระยะเวลาการทดสอบ โดยแต่ละการทดสอบจะมีอุณหภูมิที่แตกต่างกันไป เป็นต้น ในที่สุดจะได้ผลการทดสอบที่แสดงให้เห็นกลไกการเคลื่อนไหลภายใต้สภาวะต่างๆ เช่น ในเชิงความสัมพันธ์ของอัตราความเค้น - ความเครียด - อุณหภูมิของการเคลื่อนไหล (Steady creep state) ผลที่ได้นี้จะให้ค่าที่เป็นความสัมพันธ์เพียงหนึ่งเดียวเท่านั้น ส่วนพฤติกรรมการเคลื่อนไหลในช่วงสั้น (Transient creep state) ผลที่ได้จะเน้นถึงการเคลื่อนไหลแบบไม่ยืดหยุ่นซึ่งจะมีความสัมพันธ์หลายค่าหรือมีการแปรผันมากนั่นเอง

Fuenkajorn and Daemen (1988) ได้ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินในห้องปฏิบัติการและสรุปว่า พฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินค่อนข้างซับซ้อนและขึ้นกับเวลา เมื่อเกลือหินมีแรงเข้ามากระทำ พฤติกรรมที่ตอบสนองต่อแรงนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 4 พฤติกรรม ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วจะเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน คือ 1) พฤติกรรมแบบยืดหยุ่น (Elastic behavior หรือ Instantaneous responses) ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นโดยฉับพลันและไม่ขึ้นกับเวลา 2) พฤติกรรมแบบหนืดเชิงยืดหยุ่น (Visco-elastic behavior) เป็นพฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลา ซึ่งเกลือหินจะเปลี่ยนรูปตามเวลาภายใต้แรงที่มากระทำ แต่เกลือหินก็จะสามารถคืนตัวเป็นรูปร่างได้เมื่อแรงนั้นหมดไป 3) พฤติกรรมแบบหนืดเชิงพลาสติก (Visco-plastic behavior) เป็นการเปลี่ยนรูปของเกลือหินอย่างถาวรและขึ้นกับเวลา ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อแรงที่มากระทำสูงเกินขอบเขตของจุดอ่อนตัวของเกลือหิน และ 4) พฤติกรรมการวิบัติ (Creep failure behavior) การวิบัติหรือการแตกของเกลือหินจะขึ้นกับเวลาซึ่งเป็นผลมาจากการพัฒนาของรอยแตกและรอยร้าวเล็กๆ (Micro-cracks) ที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนเกลือหินแตก ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นเมื่อเกลือหินอยู่ภายใต้แรงที่มากระทำที่สูงมาก คือสูงเกินขอบเขตของกำลังอัดสูงสุดหรือเรียกว่า Creep strength

พฤติกรรมทั้งหมดดังกล่าวข้างต้นสามารถเกิดขึ้นพร้อมๆ กันได้ ขึ้นกับขนาดของแรงที่มากระทำ และขึ้นกับสภาวะแวดล้อมที่เกลือหินวางตัวอยู่ ด้วยเหตุนี้ในเชิงคณิตศาสตร์ การศึกษาพฤติกรรมของเกลือหินจึงต้องอาศัยสมการควบคุม (Governing equations) ที่ซับซ้อนหลายสมการเข้ามาประกอบกัน

2.4.2 คุณสมบัติความซึมผ่านของเกลือหิน

การศึกษาดัชนีภาพการกักเก็บของชั้นเกลือหินในต่างประเทศมีมากกว่า 30 ปี ซึ่งแต่เดิมคณะผู้วิจัยหลายสถาบันมีความเชื่อว่าชั้นเกลือหินมีคุณสมบัติเป็นหินกั้นน้ำ (Aquitard) หรือเป็นหินที่บดน้ำ (Impermeable rock) ในขณะนั้นจึงไม่มีการศึกษาหรือมีงานวิจัยใดๆ ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติการซึมผ่านของชั้นเกลือหินอย่างจริงจัง จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1988 Dr. John C. Stormont ได้ทำการตรวจวัดค่าความซึมผ่านของชั้นเกลือหินในเมืองเกลือที่มลรัฐนิวเม็กซิโก และพบว่าค่าความซึมผ่านของเกลือหินที่อยู่ไกลจากอุโมงค์มีค่าอยู่ที่ประมาณ 10^{-22} m^2 (ประมาณ 10^{-9} darcy) แต่เกลือหินที่อยู่ใกล้กับผนังอุโมงค์มีค่าสูงกว่า 10^{-18} m^2 (สูงกว่า 10^{-5} darcy) (Stormont, 1990) ต่อมา Peach (1991) และ Stormont and Daemen (1992) ได้ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการและได้ผลยืนยันว่าคุณสมบัติความซึมผ่านของเกลือหิน (Salt permeability) สามารถมีค่าสูงกว่าที่คาดไว้มาก โดยเฉพาะเมื่อเกลือหินนั้นอยู่ภายใต้ความเค้นที่แตกต่างกันมากในแต่ละทิศทาง (Anisotropic stress) ความแตกต่างของความเค้นที่จุดๆ หนึ่ง

เกลือหินถ้าสูงพอจะทำให้เกิดรอยแตกร้าวเล็กๆ ในเนื้อหิน (Micro-cracks) รอยแตกร้าวนี้จะมีทิศทางค่อนข้างขนานกับทิศทางของความเค้นหลักสูงสุด (Major principal stress) และเมื่อรอยแตกร้าวนี้พัฒนามากขึ้นจนเชื่อมต่อกันก็จะนำไปสู่ความซึมผ่านที่สูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งความซึมผ่านที่อยู่ในทิศทางที่ขนานกับทิศทางของความเค้นหลักสูงสุด นอกจากนั้นความสามารถในการซึมผ่านของอากาศหรือของเหลวในชั้นเกลือหินก็ยังขึ้นกับขนาดและความแตกต่างของความเค้นหลักในสามทิศทางที่จุดนั้นๆ ดังนั้นในบริเวณที่ใกล้กับผนังของโพรงหรืออุโมงค์ค่าความแตกต่างของความเค้นจะมีค่าสูงสุด และเกลือหินจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบยืดหยุ่นและพลาสติกโดยขึ้นกับเวลา และเมื่อถึงจุดๆ หนึ่งถ้าค่าความแตกต่างของความเค้นยังลดลงไม่เพียงพอเกลือหินก็จะเกิดการแตกร้าวขึ้น ซึ่งเป็นที่มาของความสามารถในการซึมผ่านที่สูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันเกลือหินที่อยู่ไกลจากผนังอุโมงค์หรือโพรงจะมีค่าความแตกต่างของความเค้นหลักน้อย ดังนั้น 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) ระยะห่างจากผนังสำหรับโพรงที่ความลึกประมาณ 3000-4500 ฟุต แนวโน้มที่จะเกิดการซึมผ่านรอบๆ โพรงจะมากเนื่องจากขนาดและการกระจายตัวของความเค้นอยู่ในระดับสูงพอที่จะทำให้เกิดการแตกร้าวรอบๆ โพรง แต่จะไม่สูงเกินไปจนกระทั่งสามารถทำให้เกลือหินเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกโดยส่วนใหญ่แล้วค่าความซึมผ่านของเกลือหินรอบๆ โพรงจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุของโพรง และจะมีค่าสูงสุดที่อายุประมาณ 2-3 ปี หลังจากนั้นแล้วค่าความซึมผ่านจะมีค่าคงที่ที่ราบใดที่ยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงของความเค้นเกิดขึ้นใหม่ โพรงหรืออุโมงค์ที่มีรูปร่างทรงกลมจะไม่ทำให้ค่าความซึมผ่านรอบโพรงสูงขึ้นเท่าใดนัก แต่ถ้าโพรงมีลักษณะเป็นรูปทรงรียาวจะทำให้เกลือหินรอบๆ โพรงมีค่าความซึมผ่านสูงมาก เช่น ถ้าอัตราส่วนของความยาวต่อความกว้างของโพรงมีค่าเท่ากับ 3:1 ขึ้นไป ค่าความซึมผ่านสูงสุดของเกลือหินที่ติดอยู่กับโพรงอาจจะมีค่าถึง 10^{-8} m^2 หรือประมาณ 10^5 Darcy เป็นต้น โพรงที่มีแรงดันข้างในประมาณครึ่งหนึ่งของความเค้นในชั้นหินข้างนอกสามารถลดความซึมผ่านในชั้นเกลือหินรอบๆ โพรงได้พอสมควร เนื่องจากความดันในโพรงที่เหมาะสมสามารถลดความแตกต่างของค่าความเค้นหลักสูงสุดและความเค้นหลักต่ำสุด

ในเกลือหิน ซึ่งมีผลทำให้การพัฒนาของรอยแตกกว้างในเกลือหินลดลง โดยทั่วไปแล้วเกลือหินจะมีค่าความซึมผ่านสูงสุดที่บริเวณติดกับผนังของโพรงหรืออุโมงค์ลึกเข้าไปในชั้นหินจากผนังของโพรง เกลือหินจะมีค่าความซึมผ่านลดลงจนในที่สุดมีค่าเท่ากับค่าเดิม (ค่าที่ไม่มีผลกระทบต่ออุโมงค์ ประมาณ 10^{-9} Darcy) โดยทั่วไปการกระจายตัวของความซึมผ่านที่เพิ่มขึ้นจะอยู่รอบโพรงที่ระยะห่างประมาณ 2-3 เท่า ของเส้นผ่าศูนย์กลางของโพรง เนื่องจากความสามารถในการซึมผ่านเป็นตัวแปรสำคัญที่จะนำไปสู่ความสำเร็จและความมีประสิทธิภาพในการพัฒนาเทคโนโลยีการกักเก็บในชั้นเกลือหิน ดังนั้น ข้อสรุปที่ได้จาก Fuenkajorn and Serata (1992) จึงได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบขนาด รูปร่าง และระยะห่างระหว่างโพรงที่ใช้ในการกักเก็บสารเคมีและก๊าซธรรมชาติในต่างประเทศ และนำมาใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์เสถียรภาพทางกลศาสตร์และทางชลศาสตร์ของเหมืองเกลือหินที่ใช้เทคโนโลยีการละลายเช่นกัน

2.4.3 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน

ปัจจัยและสภาวะแวดล้อมที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของเกลือหินมีอยู่หลายประการ ซึ่งจะสะท้อนให้เห็นการเปลี่ยนรูปหรือการเคลื่อนไหล (Creep) รวมทั้งยังทำให้ความต้านทานต่อแรงกดหรือแรงดึงมีค่าลดลง Franssen (1998) และ Fokker (1998) ได้อธิบายปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การเคลื่อนไหลและความต้านทานของเกลือหินทั้งสภาวะในชั้นเกลือหินและในห้องปฏิบัติการ ซึ่งรวมไปถึงขนาดผลึก แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึก การเปลี่ยนรูปตามเวลา อุณหภูมิ ความชื้น และสิ่งเจือปน เป็นต้น

ขนาดผลึกหรือขนาดเม็ดเกลือจะมีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนรูปร่างและการเคลื่อนไหลของเกลือหิน กล่าวคือ เมื่อเปรียบเทียบขนาดผลึกกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างขนาด 60 mm พบว่าขนาดผลึกที่มีขนาดใหญ่จะมีโอกาสเกิดการเคลื่อนตามแนวแตก (Cleavage plane) และตามระนาบเลื่อน (Slip plane) ได้มากขึ้น (Aubertin, 1993; Billiotte et al., 1996; Aubertin, 1996) กลุ่มนักวิจัยหลายกลุ่มได้แก่ Franssen and Spiers (1990) Raj and Pharr (1992) Senseny et al. (1992) และ Wanten et al. (1996) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของผลึกและการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกของเกลือหินพบว่าความต้านแรงเฉือนและการเปลี่ยนรูป (Shear strength and deformation) จะเกิดขึ้นตามแนวหรือทิศทางของผลึก ดังนั้นตัวอย่างเกลือหินที่มีขนาดเล็กเกินไปจะมีความต้านแรงกดที่ปรวนแปร ผลการทดสอบที่ได้จึงไม่สามารถเปรียบเทียบขนาดอื่นได้ ดังนั้น ASTM จึงได้ออกข้อกำหนดมาตรฐานสากลขึ้น (ASTM D2938 and D3967; Barber, 1990) เพื่อที่จะกำหนดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างให้มีขนาดมาตรฐานและสามารถเทียบเคียงกันได้ กล่าวคือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต้องมีขนาดมากกว่าสิบเท่าของขนาดผลึก

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

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

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

ความชื้นจะทำให้คุณสมบัติเกลือหินเปลี่ยนไป กล่าวคือ ความต้านแรงกดของเกลือหินลดลง (Hunsche and Schulze, 1996) เนื่องจากเกลือหินจะมีความไวต่อความชื้นในอากาศ ความชื้นจะทำปฏิกิริยาเคมีกับเกลือหินทำให้เกิดการละลายเกลือและมีน้ำเกลือเยิ้มขึ้นมา สำหรับการเตรียมตัวอย่างเกลือหินในห้องปฏิบัติการสามารถป้องกันความชื้นได้ด้วยการนำตัวอย่างเกลือหินมาห่อหุ้มด้วยพลาสติกกันความชื้น นอกจากนี้แล้วความชื้นสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายเมื่อมีอุณหภูมิเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อิทธิพลของความชื้นต่อความต้านแรงกดได้ศึกษาโดย Billiotte et al. (1996) และ Bonte (1996) ซึ่งทำการทดสอบหาความต้านแรงกดกับตัวอย่างเกลือหินที่มีความชื้นสูง ด้วยการนำตัวอย่างเกลือหินแช่ในน้ำเกลือพบว่า เกลือหินมีความต้านแรงกดลดลง เกลือหินที่แห้งปกติจะมีกำลังต้านแรงกดเท่ากับ 30 MPa และมีกำลังลดลงเพียง 1 MPa เมื่อมีความชื้นในเกลือหินเท่ากับ 7%

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

2.5 การทดสอบเกลือหินเชิงกลศาสตร์

เกลือหินมีพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ที่แตกต่างจากหินชนิดอื่นๆ โดยพฤติกรรมของเกลือหินจะขึ้นกับเวลา คือสามารถเปลี่ยนรูปในเชิงพลาสติกภายใต้แรงที่มากกระทำ ดังนั้นการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินจึงมีผู้วิจัยหลายท่านได้ออกแบบและพัฒนาการทดสอบขึ้นมาเพื่อให้ได้คุณสมบัติตรงตามความต้องการและมีวิธีการทดสอบที่ใกล้เคียงกับสภาวะจริงในชั้นเกลือหิน วิธีการทดสอบเบื้องต้นที่มีผู้วิจัยหลายท่านได้ทำมาแล้ว เช่น การทดสอบแรงกดในแกนเดียว (Uniaxial compressive strength test) การทดสอบแรงกดในแกนเดียวแบบวัฏจักร (Uniaxial cyclic loading test) การทดสอบแรงกดในสามแกน (Triaxial strength test) การทดสอบแรงกดในสามแกนแบบวัฏจักร (Triaxial cyclic loading test) การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียว (Uniaxial creep test) การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวแบบขั้นบันได (Muiti-Steps uniaxial creep test) การทดสอบการเคลื่อนไหลในสามแกน (Triaxial creep test) การทดสอบการเคลื่อนไหลในสามแกนแบบขั้นบันได (Muiti-steps triaxial creep test) การทดสอบแรงดึง (Tensile strength test) การทดสอบความซึมผ่าน (Permeability) การวัดคลื่นเสียง (Acoustic emission) การประสานตัวของรอยแตก (Healing fracture) เป็นต้น

2.5.1 การทดสอบแรงกดในแกนเดียว

การทดสอบแรงกดในแกนเดียว (Uniaxial compressive strength test) เป็นวิธีเบื้องต้นที่ใช้ศึกษาหาค่าความต้านแรงกดสูงสุดในเกลือหิน โดยการให้แรงกดในแกนเดียวผ่านแท่งทรงกระบอกของเกลือหินจนกระทั่งหินแตกด้วยแรงกดสูงสุด แรงกดสูงสุดที่ได้จะมีการแปรผันตามการควบคุมอัตราแรงกดและอัตราการการยุบตัว Hansen et al. (1984) ทำการทดสอบแรงกดในแกนเดียวของเกลือหิน 10 แหล่ง ในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยใช้ตัวอย่างเกลือหินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50–100 มิลลิเมตร ประกอบด้วย เกลือหินจาก Richton, Weeks Island, Vacherie, Permian, Avery Island, Jefferson Island, Lyons, Cote Blanche, New Mexico และ Paradox ซึ่งแต่ละแหล่งมีค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียว คือ 13.3, 13.9, 15.3, 22.1, 24.0, 25.2, 25.2, 26.0 และ 33.3 MPa ตามลำดับ และ Fuenkajorn and Daemen (1988) ได้ทำการทดสอบแรงกดในแกนเดียวของเกลือหินจากแหล่ง Permian Basin New Mexico โดยทำการทดสอบภายใต้อัตราการกดที่หลากหลาย คือมีค่าระหว่าง 3–190 MPa/min และพบว่าค่ากำลังรับความต้านแรงกดของเกลือหินโดยเฉลี่ยมีค่า 18.44 MPa นอกจากนี้ Wanten et al. (1993) ได้ทดสอบแรงกดในแกนเดียวแบบอัตราควบคุมการยุบตัวหรืออัตราความเครียดมีค่าตั้งแต่ 10^{-4} ถึง 10^{-7} s^{-1} บนผลึกเกลือหินในช่วงอุณหภูมิแปรผันตั้งแต่ 20 ถึง 200°C ผลที่ได้คือจะเกิดการเคลื่อนไหลของผลึกเกลืออย่างต่อเนื่อง และค่าความต้านแรงกดสูงสุดจากผลการทดสอบแรงกดในแกนเดียวจะมีค่าอยู่ระหว่าง 15 ถึง 30 MPa

Boontongloan (2000) ได้ทำการทดสอบแรงกดในแกนเดียวแบบควบคุมอัตราแรงกด โดยการให้แรงกดตัวอย่างเกลือหินที่เก็บจากแอ่งสกลนครในพื้นที่จังหวัดอุดรธานีให้วิบัติภายใน 5 ถึง 10 นาที สรุปผลที่ได้คือเกลือหินชั้นบนมีค่าเฉลี่ยความต้านแรงกดในแกนเดียวประมาณ 18.5 MPa เกลือหินชั้นกลางมีค่าเฉลี่ยความต้านแรงกดในแกนเดียวประมาณ 26 MPa ค่าสัมประสิทธิ์ยืดหยุ่นแบบเส้นสัมผัสและแบบเส้นตัดที่ 50% ของความต้านทานสูงสุดเท่ากับ 5.6 GPa และ 9.9 GPa ตามลำดับ และเกลือหินชั้นล่างมีค่าเฉลี่ยความต้านแรงกดในแกนเดียวเท่ากับ 25 MPa ค่าสัมประสิทธิ์ยืดหยุ่นแบบเส้นสัมผัสและแบบเส้นตัดที่ 50% ของความต้านทานสูงสุดเท่ากับ 6.4 GPa และ 11.4 GPa ตามลำดับ และอัตราส่วน Poisson's ratio เท่ากับ 0.35 และ 0.42 ตามลำดับ ในปี ค.ศ. 2002 Wetchasat (2002) ทำการทดสอบแรงกดในแกนเดียวแบบหลายอัตราแรงกดโดยใช้ตัวอย่างจากหลุมเจาะของพื้นที่จังหวัดอุดรธานี ที่อัตราแรงกด 0.01 0.05 0.1 0.5 และ 1.0 MPa/sec ผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังรับแรงต้านการกดของเกลือหินมีความสอดคล้องกันคือ เกลือชั้นกลางและเกลือชั้นล่างมีค่าเท่ากับ 23.0 และ 31.1 MPa ตามลำดับ Devries et al. (2002) ทำการทดสอบและรวบรวมข้อมูลผลการทดสอบแรงกดในแกนเดียวของเกลือหินจากแหล่ง Petal, McIntosh Dome โดยใช้ตัวอย่างจากหลุมเจาะ Bay

gas Well No. 2, Napoleonville, McIntosh, Spindletop และ Barbers Hill ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียว คือ 14.9, 17.1, 21.2, 18.7, 22.5, และ 25.1 MPa ตามลำดับ ในปีต่อมา Phueakphum (2003) ได้ทำการทดสอบจากแหล่งเดียวกันอีกโดยทำการทดสอบเฉพาะเกลือชั้นกลางจากแอ่งสกลนครด้วยอัตราแรงกดที่ 0.1 MPa ซึ่งผลการทดสอบมีค่าเท่ากับ 30.2 MPa ค่าความเคียดสูงสุดของการแตกมีค่าระหว่าง 0.017–0.035 และได้มีผู้วิจัยที่ทำการทดสอบเกลือหินจากแหล่งจังหวัดอุดรธานีเพิ่มเติมอีกและมีผลการทดสอบที่ใกล้เคียงกัน (Fuenkajorn and Jandakaew, 2003; Fuenkajorn et al., 2003)

2.5.2 การทดสอบแรงกดในสามแกน

การทดสอบแรงกดในสามแกนเป็นการศึกษาหาค่าความต้านแรงกดสูงสุดในเกลือหิน โดยการให้ความดันล้อมรอบผิวด้านข้างตัวอย่างเกลือหินและให้แรงกดในแกนของตัวอย่างเกลือหินจนกระทั่งหินแตกด้วยแรงกดสูงสุด ASTM D2664 อธิบายวิธีการทดสอบชนิดนี้สำหรับหินทั่วไป ซึ่งวิธีนี้ได้นำมาประยุกต์ใช้ในการทดสอบเกลือหิน โดยผลที่ได้จะแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของความเค้นหลักกับความดันล้อมรอบ ซึ่งความดันล้อมรอบนี้จะทำให้คงที่สำหรับแต่ละตัวอย่างในขณะที่ทำการเพิ่มความเค้นกดในแนวแกน ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถนำมาสร้างกฎการแตกของตัวอย่างเกลือหิน ซึ่งในขั้นพื้นฐานกฎของการแตกอาจจะใช้ในรูปแบบของ Coulomb criterion ซึ่งมีค่าคงที่ที่สำคัญคือ ความเค้นยึดเหนี่ยว (ความเค้นยึดติด) และมุมเสียดทานภายใน

Hansen et al. (1984) ทดสอบแรงกดในสามแกนของตัวอย่างเกลือหินจาก 10 แหล่งในประเทศสหรัฐอเมริกาได้แก่ เกลือหินจาก S. E. New Mexico (ที่ความลึก 1,900 ฟุต) S.E. New Mexico (ที่ความลึก 2,700 ฟุต) Lyons, Permian, Paradox, Jefferson Island, Week's Island, Cote Blanche, Avery Island, Richton และ Vacherie ผลการทดสอบระบุว่าค่าความเค้นยึดเหนี่ยวของเกลือหิน (Cohesion compressive strength, C) มีค่าตั้งแต่ 2.07 MPa ถึง 4.68 MPa และมีมุมเสียดทานภายในของการแตก (Internal friction angle, ϕ) ระหว่าง 55° และ 64.6° จากการทดสอบแรงกดในสามแกนแบบมีอัตราการยวบตัวคงที่ (Constant strain rate) ระหว่าง 2.25×10^{-5} ถึง $2.08 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ภายใต้ความดันล้อมรอบตั้งแต่ 1.54 MPa ถึง 8.18 MPa ของเกลือหินที่ Salado ประเทศสหรัฐอเมริกาโดย Fuenkajorn and Daemen (1988) ผลที่ได้ระบุว่าเกลือหินมีพฤติกรรมแบบเปราะ (Strain softening) เมื่อทดสอบที่อัตราการยวบตัวคงที่สูง และเมื่อทดสอบที่อัตราการยวบตัวคงที่ต่ำจะมีพฤติกรรมแบบเหนียว (Strain hardening) ปริมาตรของตัวอย่างเกลือหินจะลดลงในช่วงเริ่มต้นของการให้แรงกด และจะเพิ่มขึ้นในช่วงระยะสั้นก่อนที่ตัวอย่างจะเกิดการวิบัติ (Failure) Therol and Ghoreychi (1996) ได้ทดสอบแรงกดในสามแกน

ของเกลียวหินและวัดการเปลี่ยนแปลงความเครียดเชิงปริมาตรพบว่า จุดเริ่มของการแตกในตัวอย่างเกลียวหินเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความโค้งในกราฟความเครียดเชิงปริมาตร ซึ่งจุดนี้จะเกิดการบวมตัวและมีรอยแตกเล็กๆ เกิดขึ้น ในปี ค.ศ. 2002 Wetchasat (2002) ได้ทดสอบแรงกดในสามแกนของตัวอย่างเกลียวหินจากแอ่งสกลนคร จังหวัดอุดรธานี สามารถหาค่าแรงยึดเหนี่ยวของเกลียวหินได้เท่ากับ 8 MPa และมุมเสียดทานการแตกได้เท่ากับ 49° สามารถสร้างความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงที่ลากสัมพันธ์กับผิววงกลมของ Mohr สำหรับเกลียวหินที่ทดสอบคือ $\tau = 8 + \sigma \tan 49^{\circ}$ MPa

2.5.3 การทดสอบแรงกดแบบวัฏจักร

การทดสอบแรงกดแบบวัฏจักร (Cyclic loading test) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการทดสอบความล้า (Fatigue test) เป็นการทดสอบโดยให้แรงกดเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างต่อเนื่องเพื่อศึกษาว่าวัตถุนั้นจะสามารถรับแรงที่เปลี่ยนแปลงขึ้นและลงได้มากที่สุดที่รอบก่อนที่จะเกิดการวิบัติ ความหมายของแรงกดแบบวัฏจักรในเชิงการวิบัติ (Mode of failure) อาจกล่าวได้ว่าเป็นการทดสอบที่ให้แรงซ้ำๆ โดยที่แรงดังกล่าวนี้มีค่าน้อยกว่าค่าความเค้นวิบัติที่ได้จากการทดสอบแรงดึงหรือแรงอัดให้วิบัติเพียงครั้งเดียว หรือเรียกว่า กำลังสถิต (Static strength) โดยที่แรงดังกล่าวเป็นสาเหตุทำให้เกิดจุดเริ่มต้นของรอยแตกในวัตถุที่ทำการทดสอบ รอยแตกดังกล่าวจะพัฒนาเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเกิดการวิบัติ กลไกสำหรับการเกิดแรงกดแบบวัฏจักรนี้สามารถอธิบายได้อีกอย่างหนึ่งว่าเป็นลักษณะระดับของแรงที่แกว่งขึ้นลง ซึ่งทำให้เกิดการสะสมพลังงานเพิ่มขึ้น แต่อยู่ในระดับต่ำกว่าแรงต้านสูงสุดของวัสดุนั้นๆ จนในที่สุดวัสดุหรือโครงสร้างทางวิศวกรรมนั้นเกิดการวิบัติ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ความล้า (Fatigue)

ผลการทดสอบความล้าเนื่องจากแรงกดแบบวัฏจักรส่วนใหญ่จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด และความเค้นกับจำนวนรอบที่ทำให้เกิดการแตก (S-N curve) นอกจากนี้ยังสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับเวลา เพื่ออธิบายผลของแรงกดแบบวัฏจักรที่ทำให้เกิดการเคลื่อนไหล หรือเรียกว่า “Creep-cyclic loading” ซึ่งลักษณะการเคลื่อนไหลที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีนี้มีความคล้ายคลึงกับการทดสอบการเคลื่อนไหลแบบสถิต (Phueakphum, 2003) เช่น การทดสอบการเคลื่อนไหลด้วยแรงกดในแกนเดียว และวิธีการทางคลื่นเสียงสะท้อน (Acoustic emission) ก็สามารถใช้ในการศึกษาการเคลื่อนไหลภายในวัสดุหรือโครงสร้างนั้นได้เช่นกัน

การทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรเป็นการเพิ่มแรงกดและลดแรงกดอย่างเป็นระบบ ซึ่งสามารถทำการทดสอบได้ทั้งในแกนเดียวและในสามแกน การทดสอบดังกล่าวเรียกว่า การทดสอบแรงกดในแกนเดียวแบบวัฏจักรและการทดสอบแรงกดในสามแกนแบบวัฏจักร

ตามลำดับ การให้แรงกดและลดแรงกดอย่างเป็นระบบนี้จะทำให้เกิดความล้า (Fatigue) ส่งผลให้ความต้านแรงกดสูงสุดมีค่าลดลง (Mogi, 1962; Burdine, 1963; Hardy and Chugh, 1970; Saint-Leu and Sirieys, 1971; Haimson and Kim, 1972; Attewell and Farmer, 1973; Tharp, 1973; Kim, 1973; Fuenkajorn and Daeman, 1988) ผลการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรสามารถอธิบายได้ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ความเครียด และจำนวนรอบของวัฏจักร ความสัมพันธ์นี้จะแสดงให้เห็นถึงการสะสมตัวของความล้าด้วยจำนวนรอบและความต้านแรงกดสูงสุดที่มีค่าลดลง นอกจากนี้แล้วยังสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับเวลาเพื่ออธิบายผลของแรงกดแบบวัฏจักรที่ทำให้เกิดการเคลื่อนไหลได้ (Creep-cyclic loading)

Thoms and Gehle (1982) ทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรทั้งในห้องปฏิบัติการและภาคสนามเพื่อจำลองผลกระทบของโพรงอากาศอัดภายใต้แรงดันต่อพฤติกรรมของเกลือหินรอบโพรง ที่อยู่ภายใต้สภาวะการรับแรงแบบวัฏจักรเป็นเวลานาน โดยทำการทดสอบตัวอย่างเกลือหินจากหลายแหล่ง เช่น Jefferson Island, Bryan's Mound, Choctaw, West Hackbery, Red Lake และ Huntorf การทดสอบในห้องปฏิบัติการประกอบด้วยสามกลุ่มการทดสอบ คือ การทดสอบแรงกดในสามแกน การทดสอบแรงดึงแบบสามแกน (Extension triaxial) และการทดสอบแรงกดในแกนเดียว โดยแต่ละการทดสอบจะทำภายใต้สามสภาวะ คือ การทดสอบแบบเคลื่อนไหล การทดสอบแบบวัฏจักร และการทดสอบแบบวัฏจักรร่วมกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ นอกจากนี้ยังมีการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนและการทดสอบความซึมผ่านของตัวอย่างร่วมด้วย ตัวอย่างที่ถูกนำมาใช้ในการทดสอบในสามแกนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10.2 เซนติเมตร โดยให้ความดันล้อมรอบสูงสุด 34.5 MPa ส่วนการทดสอบในที่ (In-situ test) ได้ทำการทดสอบ ณ เหมือน Jefferson Island และเหมือน Cote Blanche Salt Mine โดยทำการเจาะหลุมในแนวตั้งบริเวณพื้นเหมือง (Mine floor) และทำการทดสอบให้แรงแบบวัฏจักร โดยมีการจำลองให้มีสภาวะคล้ายกับการอัดอากาศในโพรงที่เกิดขึ้นจริง การทดสอบแกนเดียวแบบวัฏจักรของ Avery Island Dome ด้วยความถี่ 0.001 Hz ค่าแรงกดสูงสุดและลดลงต่ำสุดคือ 15.7 MPa และ 8.1 MPa ตามลำดับโดยใช้เวลาประมาณ 120 ชั่วโมง ผลการทดสอบได้นำมาแสดงความสัมพันธ์ในรูปของความเครียดกับเวลาพบว่า กราฟแสดงลักษณะคล้ายพฤติกรรมแบบเคลื่อนไหลโดยมีค่าความเครียดสูงสุดประมาณ 3.2% สำหรับผลการทดสอบสามแกนแบบแรงดึงภายใต้สามสภาวะ คือ สภาวะให้แรงคงที่โดยให้ความเค้นในแนวแกนเท่ากับ 24.13 MPa ความดันด้านข้างเท่ากับ 10.34 MPa สภาวะที่ให้แรงแบบวัฏจักรคือให้ความเค้นในแนวแกนสูงสุดเท่ากับ 24.13 MPa ลดลงที่ 20.68 MPa ความดันด้านข้างสูงสุดเท่ากับ 10.34 MPa ลดลงที่ 6.89 MPa และสภาวะสุดท้ายให้แรงแบบวัฏจักรร่วมกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก 22°C ถึง 54°C โดยใช้เวลาการทดสอบทั้งหมด 1,100 ชั่วโมง ผลการทดสอบแสดงในรูปของกราฟ

พบว่าค่าความเครียดในสภาวะแรกมีค่าประมาณ 12.5% และมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง หลังจากนั้นค่าความเครียดได้มีอัตราสูงขึ้นอย่างฉับพลันเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในสภาวะสุดท้าย ผลการทดสอบในที่สำหรับเหมือง Cote Blanche Salt Mine พบว่าการให้แรงแบบวัฏจักรในระยะยาวมีลักษณะคล้ายพฤติกรรมแบบคลื่นโพล โดยมีความสัมพันธ์ที่แรงเฉือน (G) เท่ากับ 24-30 GPa เป็นที่น่าสังเกตว่าการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรของผลงานวิจัยนี้โดยเฉพาะในห้องปฏิบัติการ ค่าความต่างของความเค้นระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด (Amplitude) มีค่าน้อย ทำให้ผลการจำลองพฤติกรรมของเกลือหินอาจไม่เป็นไปในเชิงอนุรักษ์ แต่การทดสอบด้วยความถี่ 0.001 Hz ถือว่าเป็นค่าที่ต่ำ ซึ่งจะเป็นการจำลองลักษณะการอัดอากาศเข้าและออกโพรงต่อพฤติกรรมของเกลือรอบโพรงได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง และในปี 1986 Gehle and Thoms ได้ศึกษาการเปลี่ยนรูปลักษณะทางคลื่นเสียง (Acoustic Emission, AE) เนื่องจากแรงกดแบบวัฏจักรในอุโมงค์เกลือหิน โดยได้ทำการเจาะหลุมขนาด 57 มิลลิเมตร ลึก 6.1 เมตร ที่ฐานของเสาในอุโมงค์มีความลาดเอียง 45 องศา จากแนวระดับจำนวน 2 หลุม และอีก 1 หลุม ตรงกลางให้มีขนาด 64 มิลลิเมตร โดย 2 หลุมแรกจะใส่อุปกรณ์แปลงสัญญาณทางคลื่นเสียง และหลุมตรงกลางจะมีอุปกรณ์สำหรับให้แรงแบบวัฏจักรคือ Hydraulic pressure ผลการทดสอบปรากฏว่าระบบสัญญาณ AE เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มแรงดันในหลุมเจาะ ซึ่งหมายความว่าเกิดการรอยแตกขึ้น ผลสรุประบุว่าวิธีทางคลื่นเสียงสามารถตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเกลือหินอันเนื่องมาจากผลกระทบของแรงกดแบบวัฏจักรได้ และระบุว่ามีการรอยแตกเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบการให้แรง

นักวิจัยหลายท่าน ได้ทดสอบหินทั้งในภาคสนามและในห้องปฏิบัติการพบว่าหินมีการตอบสนองต่อแรงกดแบบวัฏจักรเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) แรงกดแบบวัฏจักรจะขึ้นกับปัจจัยด้านขนาดของแรงที่ขึ้น-ลง หรือเรียกว่า "Amplitude" ถ้าแรงที่ขึ้น-ลงแตกต่างกันไม่มากหินก็จะมีค่าความเครียดการเกิดขึ้นน้อยกว่าที่แรงขึ้น-ลงต่างกันมาก ทำให้ที่ความแตกต่างของแรงขึ้น-ลงสูงหินจะแตกด้วยจำนวนรอบน้อยกว่าที่ความแตกต่างของแรงขึ้น-ลงไม่มากนัก
- 2) ความถี่ (Frequency) ส่งผลต่อการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักร คือจำนวนรอบที่แตกจะเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น (Atterwell and Farmer, 1973)
- 3) ขนาดของผลึกมีผลต่อแรงกดแบบวัฏจักร หินที่เนื้อละเอียดจะมีความต้านทานมากกว่าหินที่มีผลึกใหญ่ คือหินที่มีผลึกเล็กจะให้จำนวนรอบที่แตกมากกว่าหินที่มีผลึกขนาดใหญ่ (Burdine, 1963)

- 4) สภาวะน้ำ (ทดสอบที่สภาวะแห้งและเปียก) และแรงดันล้อมรอบที่อยู่ในหินจากการทดสอบหินที่สภาวะเปียกและแห้งพบว่า ที่สภาวะเปียกการเคลื่อนไหลจะสูงกว่าสภาวะแห้ง นั่นหมายความว่าจำนวนรอบที่แตกของหินที่แห้งจะสูงกว่าหินที่เปียกภายใต้ลักษณะการให้แรงที่เหมือนกัน หากมีแรงดันล้อมรอบหินจะวิบัติที่จำนวนรอบมากกว่าในสภาวะที่ไม่มีแรงดันล้อมรอบ
- 5) ลักษณะของการเคลื่อนไหลของหินต่อแรงกดแบบวัฏจักรจะมีลักษณะเหมือนการทดสอบการเคลื่อนไหลแบบสถิต (การทดสอบแรงกดในแกนเดียว) ทั้งในช่วงเริ่มแรก ช่วงอัตราความเครียดเพิ่มขึ้นคงที่ และช่วงสุดท้ายที่มีการวิบัติ

2.5.4 การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียว

การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวกับเกลือหินมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเกลือหินที่ขึ้นกับเวลา วิธีการทดสอบโดยให้แรงกดคงที่ในแนวแกนตลอดระยะเวลาการทดสอบ ผลที่ได้จะแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวแกนกับเวลา สามารถแบ่งพฤติกรรมของเกลือหินได้เป็นสามช่วง คือ การเคลื่อนไหลช่วงสั้นหรือช่วงแรก (Transient or preliminary creep stage) การเคลื่อนไหลช่วงคงที่หรือช่วงที่สอง (Steady or secondary creep stage) และการเคลื่อนไหลช่วงสุดท้าย (Tertiary creep stage) นอกจากนี้ยังพบว่าเกลือหินจากแหล่งเดียวกันแต่อยู่คนละชั้นกันอาจมีคุณสมบัติแตกต่างกัน มีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการวิจัยการเคลื่อนไหลในแกนเดียวกับเกลือหิน และให้ผลการทดสอบที่สอดคล้องกัน (Fuenkajorn and Daemen, 1988; Allemandou and Dusseault, 1996; Hunsche and Schulze, 1996; Pudewills and Hornberger, 1996; Chen et al., 1997) นอกจากนี้ Hunsche et al. (1996) ได้ทำการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวที่อุณหภูมิแปรผันระหว่าง 22 ถึง 630°C พบว่าเกลือหินมีความอ่อนตัวมากขึ้นและมีพฤติกรรมในเชิงพลาสติกถ้าทดสอบที่อุณหภูมิสูงขึ้น การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวเป็นที่นิยมมากโดยเฉพาะสำหรับเกลือหิน ในปี ค.ศ. 1993 ASTM ได้ตั้งมาตรฐานการทดสอบขึ้น คือ ASTM D4341 และ ASTM D4405 สำหรับหินแข็งและหินอ่อนตามลำดับ

2.5.5 การทดสอบการเคลื่อนไหลในสามแกน

การทดสอบการเคลื่อนไหลในสามแกนมีลักษณะคล้ายกับการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียว แตกต่างกันตรงที่การทดสอบนี้จะมีความใกล้เคียงกับค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในชั้นหินมากกว่า โดยการให้แรงกดล้อมรอบกับตัวอย่างเกลือหิน Ong et al. (1998) ทำการศึกษาเกลือโพแทชจาก Patience Lake Member ในสหรัฐอเมริกา โดยศึกษาการเคลื่อนไหลในระยะ

ยาวด้วยการทดสอบการเคลื่อนไหลในสามแกนระยะยาว Hamami et al. (1996) ศึกษาการทดสอบการเคลื่อนไหลในสามแกนโดยให้ความแตกต่างความเค้นที่ระดับต่ำ และปรับเปลี่ยนอุณหภูมิจาก 20°C ถึง 90°C พบว่าที่สภาวะอุณหภูมิสูง การยุบของเกล็ดหินมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิต่ำ

จากการทดสอบการเคลื่อนไหลทั้งสองวิธีที่ใช้ศึกษาตัวอย่างเกล็ดหินข้างต้น ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการทดสอบแบบขั้นบันไดได้ด้วย (Hamami et al., 1993; Allemandou and Dusseault, 1993) กล่าวคือ การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวแบบขั้นบันไดเป็นการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวแต่จะมีการให้แรงกดคงที่ไปถึงค่าหนึ่ง จากนั้นรักษาค่าแรงกดไว้เพื่อให้เกิดการเคลื่อนไหลในระยะเวลาหนึ่งแล้วเพิ่มแรงไปอีกระดับอย่างเป็นระบบ หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการทดสอบการเคลื่อนไหลด้วยแรงกดต่างกันโดยใช้ตัวอย่างเกล็ดหินเพียงตัวอย่างเดียว การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวแบบขั้นบันไดเป็นการลดตัวอย่างเกล็ดหินที่ใช้ในการทดสอบในแต่ละระดับหรือขั้นของความเค้น และจะให้ผลการทดสอบออกมาต่างกับการทดสอบแบบปกติที่ค่าความเค้นเดียวต่อตัวอย่างเดียว (Fuenkajorn and Daemen, 1998)

การทดสอบการเคลื่อนไหลในสามแกนแบบขั้นบันได ได้มีการศึกษาโดย Hamami et al. (1993) โดยมีการทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียว แตกต่างกันตรงที่การทดสอบการเคลื่อนไหลในสามแกนแบบขั้นบันไดจะมีการให้แรงกดล้อมรอบตัวอย่างเกล็ดหิน การวิเคราะห์ผลการทดสอบการเคลื่อนไหลในสามแกนแบบขั้นบันไดโดยใช้สมการยกกำลัง (Power law) สรุปว่าสมการยกกำลังไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมของเกล็ดหินได้ดีพอ หรืออีกนัยหนึ่งคือเกล็ดหินมีผลกระทบจากแรงที่มากกระทำในอดีต (ผลกระทบของวิถึความเค้น) ทำให้มีพฤติกรรมต่างกันไป ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า Memory Effect ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดในหัวข้อต่อไป

2.5.6 การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน

การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน (ASTM D3967) สำหรับเกล็ดหินมีผู้วิจัยหลายท่านทำการทดสอบ (Hunsen et al., 1984; Khan et al., 1988; Senseny et al., 1992; Fuenkajorn and Daemen, 1988) โดยให้แรงกดในแนวเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างเกล็ดหินทรงระบอบอกด้วยอัตราแรงกด 0.057 ถึง 0.342 MPa/s จนกระทั่งตัวอย่างเกล็ดหินแตกในแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง ค่าแรงกด สูงสุดที่ได้จะนำไปคำนวณค่าความต้านแรงดึงซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.3 ถึง 1.6 MPa และยังพบว่าอัตรา การกดที่เร็วเกินไปจะทำให้ค่ากำลังรับแรงดึงต่ำ Hunsche (1993) ศึกษาเกี่ยวกับอัตราการให้แรงกดที่เหมาะสมของการทดสอบแรงดึงพบว่าควรใช้อัตราแรงกด

ระหว่าง 0.017 ถึง 0.248 MPa/s อัตรา แรงกดนี้จะไม่ส่งผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงดึงของเกลือหิน ต่อมา Pfeifle et al. (1998) ได้ศึกษา การทดสอบแรงดึงโดยใช้ตัวอย่างเกลือหินทรงกระบอกขนาด $L/D = 0.5$ ให้แรงกดในแนว เส้นผ่าศูนย์กลางด้วยอัตราการยวบตัวประมาณ 2.5×10^{-5} mm/s และ Hardy (1998) ได้ทำการทดสอบแรงดึงตัวอย่างเกลือหินที่มีขนาดผลึกละเอียด (Fine-grained) ด้วยการทดสอบ 3 วิธี คือ 1) การดึงทางตรง (Direct-pull test) 2) การดึงทางอ้อมด้วยวิธีบราซิลเลียน (Brazilian test) และ 3) การดึง ทางอ้อมด้วยวิธีแรงกดวงแหวน ความเค้น (Hoop-stress loading test) ทั้งนี้ยังได้วัดคุณลักษณะทางคลื่นเสียงไว้ด้วย โดยใช้อัตราแรงกด 0.003 ถึง 0.059 MPa/s ค่ากำลังรับแรงดึงทั้งสามวิธีมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.63 MPa, 3.97 MPa และ 0.68 MPa ตามลำดับ Fuenkajorn and Daemen (1988) ทำการทดสอบ Brazilian test โดยใช้เกลือหินจาก Salado Formation และสรุปว่าการผันแปรความต้านแรงดึงของตัวอย่างเกลือหินที่วัดได้เป็นผลมาจากคุณลักษณะการแตกของตัวอย่างเกลือหิน ถ้ารอยแตกผ่านกลางผลึกเกลือเป็นส่วนใหญ่ค่าแรงดึงที่ได้จะค่อนข้างสูง แต่ถ้ารอยแตกผ่านรอยต่อระหว่างผลึก (Crystal boundaries) ค่าแรงดึงที่วัดได้จะมีค่าต่ำกว่า

2.5.7 การทดสอบความซึมผ่าน

การทดสอบความซึมผ่านในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีผู้วิจัยทำการทดสอบทั้งในห้องปฏิบัติการและในภาคสนามเพื่อศึกษาคุณสมบัติความซึมผ่าน (Permeability) ของเกลือหิน สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการได้ใช้แก๊สและน้ำเกลืออัดด้วยความดันให้ไหลผ่านเกลือหินทั้งที่เป็นแท่งตัวอย่างเกลือหินและเกลือหินย่อยที่นำมาบดอัดเป็นก้อน ค่าความซึมผ่านเกลือหินจะขึ้นกับปริมาณรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นในเนื้อหินและปริมาณช่องว่างในเกลือหิน จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าค่าความซึมผ่านเกลือหินจะต่ำมาก โดยจะอยู่ในช่วงประมาณ 10^{-21} ถึง 10^{-20} m² (Peach, 1991; Stormont et al., 1991; Billiotte et al., 1993) สำหรับตัวอย่างหินที่ได้รับการบดอัดจะมีค่าความซึมผ่านขึ้นกับปริมาณการบดอัดและความหนาแน่นของเกลือหินย่อย จากการศึกษาของ Brodsky et al. (1995) โดยใช้เกลือหินย่อยที่มีความหนาแน่น 0.85 ถึง 0.90 g/cc ผลที่ได้คือค่าความซึมผ่านจะต่ำกว่าตัวอย่างหินแข็งซึ่งมีค่าเท่ากับ 10^{-15} ถึง 10^{-12} m² ถึงแม้เกลือหินจะมีความสามารถในการซึมผ่านต่ำมาก แต่ความซึมผ่านจะสามารถเพิ่มขึ้นได้เนื่องจากความเสียหายทางกลศาสตร์ เช่น การเกิดรอยแตกขณะเจาะโพรง เป็นต้น Dale and Hurtodo (1998) ได้ทำการตรวจวัดค่าความซึมผ่านบริเวณรอบๆ โพรงเกลือพบว่ามีการเกิดขึ้นในระยะรัศมีโพรงน้อยกว่า 3 เมตร และค่าความซึมผ่านก็มีน้อยมาก คือมีค่าประมาณ 1×10^{-21} m² เท่านั้น

2.5.8 การทดสอบโดยใช้เทคนิคการวัดคลื่นเสียง

การวัดคลื่นเสียงเป็นเทคนิคที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของเกลือหินมีการประยุกต์ใช้ทั้งในห้องปฏิบัติการและในภาคสนาม การประยุกต์ใช้คลื่นเสียงในห้องปฏิบัติการกับการทดสอบเกลือหินและเกลือโพแทชจะวัดคลื่นเสียงไปพร้อมๆ กับการยุบตัวของตัวอย่างเกลือหินที่ทดสอบแรงกดในแกนเดียว (Stead and Szczepanik, 1991; Mlakar et al., 1993) ในการทดสอบการเคลื่อนไหล Stead et al. (1996) ได้ใช้คลื่นเสียงกับตัวอย่างเกลือหินและโพแทชเพื่อวัดความเร็วของคลื่นปฐมภูมิ (P-wave) และคลื่นทุติยภูมิ (S-wave) ได้เท่ากับ 4.5 และ 2.5 km/s ตามลำดับ ต่อมา Hardy (1998) ได้ทดสอบหาความต้านแรงดึงโดยใช้คลื่นเสียงวัดควบคุมไปด้วยขณะทำการทดสอบและได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านแรงดึงของเกลือหินกับคุณลักษณะของคลื่นเสียง พบว่าคุณลักษณะของคลื่นเสียงจะลดลงที่ประมาณ 40% ของความต้านแรงดึง และจุดก่อนการวิบัติสามารถคาดคะเนด้วยคุณลักษณะทางคลื่นเสียงที่ประมาณ 90% ของความต้านแรงดึง เทคนิคนี้ยังนำไปหาค่าความเค้นในชั้นเกลือหินและโพแทช (Hardy, 1998) Reeves and Stead (1991) ได้ประยุกต์ใช้คลื่นเสียงในการทำแผนที่โครงสร้างธรณีวิทยาของชั้นเกลือหินและการหาความเสียหายที่เกิดขึ้นภายในโพรงหรืออุโมงค์ Borns and Stormont (1989) ได้ใช้วิธีการหักเหของคลื่นเสียงในการวิเคราะห์หารอยแตกของเสา ค้ำยันในเหมืองเกลือหินของโครงการ WIPP ในประเทศสหรัฐอเมริกาได้ประยุกต์ใช้คลื่นเสียงในการวิเคราะห์เชิงสามมิติเพื่อหารอยแตกและการไหลของน้ำใต้ดินในการออกแบบเหมืองเกลือโพแทช นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้ในหลุมเจาะด้วย (Munson et al., 1995)

2.5.9 การประสานตัวของรอยแตก

การประสานตัวของรอยแตกของวัสดุเป็นกลไกของการปิดและเชื่อมต่อกันของรอยแตก โดยกระบวนการนี้จะไม่รวมไปถึงการเชื่อมติดของรอยแตกจากการตกตะกอนของสสารภายในรอยแตกนั้น การประสานตัวของรอยแตกขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น เวลา แรงที่มากระทำ อุณหภูมิ ความชื้นและลักษณะของรอยแตก เป็นต้น (Renard, 1999) การเชื่อมประสานต้องอาศัยกลไกหลัก 2 ประการ คือ การเลื่อนปิดชิดกันของรอยแตก (Fracture Closure) โดยการอาศัยแรงกดอัดเพื่อให้ระนาบรอยแตกติดกัน และการประสานตัวจากกระบวนการทางด้านเคมีและทางด้านกายภาพ (Fracture Healing) ซึ่งวัสดุจะต้องอาศัยระยะเวลาในการเชื่อมประสาน (Chan et al., 1995, 1996, 1998, 2000; Miao et al., 1995; Munson et al., 1999) การสังเกตพฤติกรรมของการประสานตัวของรอยแตกกระทำได้ยากมากเพราะการประสานตัวจะเกิดขึ้นในระดับผลึก (มีขนาดตั้งแต่ 10^{-6} ถึง 10^{-3} m) อย่างไรก็ตามการประสานตัวของรอยแตกสามารถตรวจสอบได้จากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron microscope) เพื่อตรวจหาการ

ประสานตัวของรอยแตก (Hickman and Evans, 1987) การเชื่อมประสานของรอยแตกจะส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินที่มีรอยแตกดีขึ้น เช่น ค่าความต้านทานแรงกดสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ของความยืดหยุ่น (E) เพิ่มขึ้น และยังทำให้ความสามารถในการซึมผ่านของหินลดลง บริเวณรอยแตกมีค่าความซึมผ่านลดลง

ในระยะเวลา 10 ปีที่ผ่านมา มีผู้วิจัยในต่างประเทศได้ศึกษาเกี่ยวกับการประสานตัวของรอยแตกรวมทั้งปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการประสานตัวของรอยแตกของเกลือหิน วิธีการทดสอบได้ดำเนินการทั้งในภาคสนามและในห้องปฏิบัติการ โดยในภาคสนามได้มีการศึกษาและสำรวจโพรงละลายและบริเวณรอยเลื่อนของเกลือหินที่อยู่รอบโพรง ในห้องปฏิบัติการมีการทดสอบกับตัวอย่างเกลือหิน และมีการสร้างสมการการเคลื่อนไหลของเกลือหินขึ้นจากกระบวนการประสานตัวของรอยแตก (Miao et al., 1995; Chan et al., 1995, 1998; Munson et al., 1999)

Brodsky and Munson (1994) ได้ศึกษาการประสานตัวของรอยแตกในเกลือหิน ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงการ Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) ภายใต้ความดันสถิต (Hydrostatic compression) ที่ 0.5 MPa โดยบรรจุตัวอย่างหินรูปทรงกระบอกไว้ในหม้อแรงดัน (Hoek cell) ที่อุณหภูมิ 25°C แล้วกดในแนวแกนให้เกิดการยุบตัวเล็กน้อย จากนั้นได้มีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของระบบไปที่ 20° (46° และ 70°C ในแต่ละตัวอย่างตามลำดับเพื่อศึกษาผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิ) และให้แรงกดด้วยอัตราความเครียด (Strain rate) $1 \times 10^{-6} \text{ sec}^{-1}$ ในการทดสอบนี้ได้ใช้คลื่นอุลตรา-โซนิค (Ultrasonic wave velocity) เสริมในการทดสอบด้วย และข้อมูลที่ได้จะนำมาเป็นข้อมูลพื้นฐานเปรียบเทียบกับแบบจำลอง MDCF ที่ได้สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการประเมินค่าการประสานตัวของรอยแตกแบบ Anisotropy ของเกลือหิน

Allemandou and Dusseault (1993) ศึกษาการประสานตัวของรอยแตกโดยการให้ความดันในสามแกนที่ความดันสถิต 2 MPa และความดันในแนวแกนคงที่ โดยใช้ตัวอย่างเกลือหินรูปทรงกระบอกภายใต้อุณหภูมิคงที่ ที่วางไว้ในช่วงเวลาสั้น (ไม่กี่ชั่วโมง) หลังจากนั้นค่อยๆ เพิ่มระดับความดันในแนวแกนไปที่ 10, 15, 20 และ 25 MPa ตามลำดับ พบว่าหินมีการประสานตัวและปริมาณช่องว่างลดลง โดยประเมินจากการขีดและปิดกันของรอยแตกจากภาพถ่าย CAT-scan. Maio et al. (1995) ศึกษาการเชื่อมประสานตัวของเกลือหินบด (Crushed salt) ในสภาวะที่มีน้ำอยู่ปริมาณน้อยและได้ผลสรุปว่า หลังจากมีการประสานตัวเกิดขึ้นจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่น (Density) ความเครียดหลังช่วงยืดหยุ่น (Inelastic strain) ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (Young's Modulus) และความต้านทานแรงกด (Strength) ของเกลือหินบดเพิ่มขึ้นตามเวลา Munson et al. (1999) ได้พัฒนาแบบจำลองชื่อ MDCF (Multimechanism Deformation Coupled Fracture Model) จากแบบจำลองเก่าชื่อ SUVIC-D ซึ่งเดิมมีฟังก์ชันของการเคลื่อนไหล (Creep function) ต่อมา มีการเพิ่มฟังก์ชันเกี่ยวกับการประสานตัวของรอยแตก (Healing rate

function) เข้าไปด้วย ได้มีการเก็บข้อมูลภาคสนามที่บริเวณอุโมงค์เก่าโดยวัดการเปลี่ยนแปลงความเร็วของคลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic wave) และได้ประเมินออกมาเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเนื่องจากการยุบตัวของโพรง ในขณะเดียวกันก็ทำการสังเกตการระบายของน้ำออกจากอุโมงค์ ทั้งสองการทดสอบนี้นำไปใช้ประเมินการขยายขอบเขตของความเสียหายรอบๆ โพรง และเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่สร้างขึ้นในรูปแบบของการเคลื่อนไหลที่เกิดขึ้น ผลการเปรียบเทียบให้ค่าที่ใกล้เคียงกันและยังใช้เปรียบเทียบกับผลของขอบเขตที่ใหญ่ขึ้นได้ และสรุปเพิ่มเติมว่าความเสียหายจะเป็นฟังก์ชันของความลึกมีค่ามากที่บริเวณส่วนล่างสุดของโพรง ซึ่งขึ้นกับความไม่บริสุทธิ์ของเนื้อเกลือหินเอง หากมีมากก็จะส่งผลกระทบมากด้วย ในขณะเดียวกัน Chan et al. (1995, 1996) ได้ศึกษาและใช้แบบจำลองนี้ และสรุปผลในลักษณะแนวทางเดียวกัน

2.5.10 ผลกระทบของวิถีความเค้น

การวิเคราะห์พฤติกรรมทางกลศาสตร์ของหินสามารถอธิบายได้สองหลักการประกอบด้วย การใช้ทฤษฎีความยืดหยุ่น (Elastic theory) และการใช้ทฤษฎีความไม่ยืดหยุ่น (Inelastic theory) แต่อย่างไรก็ตามทฤษฎีความยืดหยุ่นจะนำมาใช้อธิบายพฤติกรรมและการวิเคราะห์ความเค้น และความเครียดของหินมากกว่าทฤษฎีความไม่ยืดหยุ่นเพราะง่ายสำหรับการวิเคราะห์ โดยมีข้อสมมติฐานว่าหินมีพฤติกรรมยืดหยุ่นแบบเส้นตรงและข้อสมมติฐานนี้ได้นำไปสู่การไม่พิจารณาผลกระทบด้านทิศทางและลำดับการให้แรง (Chen and Zhang, 1991) ทฤษฎีนี้เองส่งผลให้การวิเคราะห์ทางกลศาสตร์หินโดยส่วนใหญ่ตั้งอยู่บนสมมติฐานของการไม่เกิดผลกระทบจากความแตกต่างของวิถีความเค้น แต่ในความเป็นจริงหินบางชนิดและบางกรณีอาจจะไม่สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีความยืดหยุ่น เช่น กลุ่มเกลือหิน เป็นต้น

เกลือหินถือว่าเป็นวัสดุที่มีความสำคัญต่องานทางด้านวิศวกรรมธรณี เช่น การกักเก็บกากนิวเคลียร์ การกักเก็บผลผลิตของอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและเหมืองเกลือ เป็นต้น และเนื่องจากพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของหินชนิดนี้ค่อนข้างซับซ้อน ทฤษฎีความไม่ยืดหยุ่นเมื่อถูกนำมาใช้กับเกลือหินจึงมีความเหมาะสมมากกว่าทฤษฎีความยืดหยุ่น เนื่องจากเกลือหินจะแสดงพฤติกรรมทั้งช่วงยืดหยุ่นและช่วงความเป็นพลาสติก จากผลสรุปของ Chen and Zhang (1991) และ Shames and Cozzarelli (1997) อธิบายว่าวัสดุในช่วงความเป็นพลาสติกจะมีพฤติกรรมที่ขึ้นกับวิถีความเค้น ดังนั้นในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างวิศวกรรมในชั้นเกลือหินจึงควรมีการพิจารณาผลกระทบของวิถีความเค้นร่วมด้วย

พฤติกรรมความไม่ยืดหยุ่นของวัสดุที่สำคัญพฤติกรรมหนึ่งเรียกว่า พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปแบบเหนียว (Strain hardening หรือ Ductile) ในช่วงพฤติกรรมนี้ได้มีนักวิจัยหลายท่าน

ที่ทำการวิจัยโดยมุ่งเน้นการศึกษารายละเอียดของผิวการคราก (Yield surface) การสร้างผิวการครากใหม่ เกิดขึ้นได้จากการเพิ่มความเค้นจากผิวการครากเดิม โดยผิวการครากใหม่นี้เรียกว่า Subsequent yield surface หรือ Loading surface โดยที่ Loading surface จะเปลี่ยนตามทิศทางการยุบแบบพลาสติก ดังนั้นความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดในช่วงพฤติกรรม การเปลี่ยนรูปแบบเหนียวจะขึ้นกับทางเดินของความเค้น (Chen and Zhang, 1991; Khan and Huang, 1995)

นอกจากนี้ Chen and Zhang (1991) ได้กล่าวถึงทฤษฎีที่นำมาอธิบายการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกไว้สองทฤษฎี ทฤษฎีแรก คือ Deformational theory ทฤษฎีนี้ตั้งอยู่บนสมมติฐานของการไม่เกิดผลกระทบจากความแตกต่างของวิถีความเค้น เนื่องจากการหาผลรวมของความเครียดและความเครียดในช่วงความเป็นพลาสติกจะเป็นค่าเดียว เปรียบเสมือนว่าความเครียดพลาสติกเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยตัวอย่างความสัมพันธ์ของผลรวมความเครียดเป็นดังสมการ

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p$$

โดยที่ผลรวมของความเครียด (ε_{ij}) จะมีค่าเท่ากับความเครียดเชิงยืดหยุ่น (ε_{ij}^e) รวมกับ ความเครียดเชิงพลาสติก (ε_{ij}^p) ซึ่งความเครียดเชิงพลาสติกนี้จะสัมพันธ์กับความเค้นประสิทธิผล (Effective stress)

ทฤษฎีที่สองคือ Incremental theory ซึ่งจะอธิบายผลรวมของความเครียดในรูปของอนุพันธ์ของความเครียดเชิงยืดหยุ่น ($d\varepsilon_{ij}^e$) รวมกับอนุพันธ์ของความเครียดเชิงพลาสติก ($d\varepsilon_{ij}^p$) ซึ่งอนุพันธ์ของความเครียดเชิงพลาสติกนี้จะสัมพันธ์กับฟังก์ชันค่าการเปลี่ยนรูปในอดีต (Deformation history) ความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านี้สามารถแสดงได้ดังนี้

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p$$

ดังนั้นการหาผลรวมของความเครียดต้องทำการอินทิเกรตตลอดทางเดินของความเค้น สำหรับทฤษฎี Incremental theory สามารถแยกออกเป็นหลักการย่อยได้สามหลักการ คือ 1) บรรทัดฐานการให้แรง (Loading criterion) 2) Flow rule และ 3) กฎการแข็งตัว (Hardening rule) Khan and Huang (1995) ได้อธิบายรายละเอียดของกฎการทำให้แข็งโดยเฉพาะกฎการทำให้แข็งแบบไอโซโทรปิก (Isotropic hardening rule) สัมพันธ์กับ Total plastic work โดยสรุปว่า ปริมาณของพฤติกรรมทำให้แข็งด้วยความเครียดที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับ Total plastic work เท่านั้นซึ่งจะไม่ขึ้นกับลักษณะทางเดินของความเค้น

จากข้อสรุปที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรมข้างต้นสามารถกล่าวได้ว่า การวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นในช่วงความเป็นพลาสติกของวัสดุ เช่น เหล็กกล้า มีความจำเป็นที่จะนำผลกระทบของวิถีความเค้นมาพิจารณาพร้อมกับปัจจัยอื่นด้วย

การทดสอบที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลกระทบของความแตกต่างด้านวิถีความเค้นแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ 1) หินและวัสดุทางวิศวกรรมทั่วไป และ 2) หินในกลุ่มเหล็กกล้า

ปี ค.ศ. 1967 Jaeger ทำการทดสอบตัวอย่างหินชนิดเปราะโดยทำการศึกษาผลกระทบของวิถีความเค้นต่อพฤติกรรมการแตกของหินพบว่า รอยแตกจะแตกตามแนวแรงของความเค้นหลักมากที่สุด ในขณะที่ความเค้นหลักน้อยที่สุดและความเค้นหลักระดับกลางคงที่ Jaeger สรุปว่า มีความเป็นไปได้ว่ารอยแตกที่เกิดขึ้นกับหินอาจจะขึ้นกับความแตกต่างด้านทางเดินของความเค้นด้วย Swanson and Brown (1971) ทำการศึกษาผลกระทบของวิถีความเค้นต่อรอยแตกของหินหลายชนิด ผลการทดสอบระบุว่าค่ากำลังรับแรงสูงสุดของหินทุกชนิดที่ทำการศึกษาจะไม่ขึ้นกับความแตกต่างของวิถีความเค้น ซึ่งในปีต่อมา Crouch (1972) ก็ยืนยันผลการทดสอบดังกล่าวโดยใช้หินนอไรท์ (Norite) ภายใต้แรงกดสามแกนแบบขึ้นบันได (Quasi-static triaxial compression) ผลการทดลองสรุปว่าค่ากำลังรับแรงอัดของหินไม่ขึ้นกับวิถีความเค้น Guangzhi et al. (1988) ใช้หินทรายและหินปูนในการทดสอบหาผลกระทบของวิถีความเค้นต่อกำลังรับแรงของเครื่องมือให้แรงกด โดยให้แรงสามแกนแบบเป็นจริง (True triaxial test) ถูกนำมาใช้โดยมีทิศทางของวิถีความเค้นในสามรูปแบบ ผลการทดสอบพบว่าค่าความแตกต่างของตัวแปรจากสมการที่สร้างขึ้นมีค่าแตกต่างกันตามวิถีความเค้นทั้งสามรูปแบบ Korshunov et al. (1996) ศึกษาผลกระทบของวิถีความเค้นต่อค่าตัวแปรทางอุณหพลศาสตร์ของ Titanium alloy VT9 พบว่าค่าตัวแปรจะเปลี่ยนแปลงตามทิศทางที่เปลี่ยนไปของวิถีความเค้น Bylia et al. (1997) ทำการทดสอบต่อ Titanium alloy เช่นกัน แต่ศึกษาผลกระทบของวิถีความเค้นต่อเนื้อของโครงสร้างทางจุลภาค (microstructure textures) และตัวแปรของโครงสร้างทางจุลภาค (microstructure parameters) ซึ่งค่าดังกล่าวจะเปลี่ยนแปลงตามวิถีความเค้น Inoue et al. (1998) ศึกษาหาผลกระทบของวิถีความเค้นต่อพฤติกรรมของแก้ว โดยทำการทดสอบที่ให้วิถีความเค้นต่างกันจากแรงดึงและแรงบิดแบบวัฏจักร ผลการทดสอบพบว่าวิถีความเค้นที่ต่างกันจะไม่มีผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงแบบวัฏจักร (Fatigue strength) ของแก้ว Lee et al. (1999) ศึกษาหาผลกระทบของวิถีความเค้นต่อพฤติกรรมของหินทราย โดยทำการทดสอบภายใต้ Hollow cylinder triaxial tests ความแตกต่างของวิถีความเค้นจะใช้มุมระหว่างค่าสูงสุดของความเค้นหลักที่โปรเจกต์ลงบน Octahedral plane (θ) ผลจากการทดสอบพบว่ารูปร่างของผิวการวิบัติ (Failure surface) จะขึ้นกับค่าของมุมที่เปลี่ยนไป

Wawersik and Hannum (1980) ทำการทดสอบแกนกดสามแกนแบบดั้งเดิม (Conventional triaxial tests) กับเกลือหิน โดยกำหนดวิธีความเค้นที่ต่างกันสามรูปแบบ ประกอบด้วย การให้ความเค้นด้านข้างคงที่ การให้ความเค้นเฉื่อยคงที่ และการให้ความเค้นในแนวแกนคงที่ ซึ่งการทดสอบทั้งหมดจะอยู่ภายใต้ความเค้นกดสามแกนแบบขั้นบันได ผลการทดสอบพบว่าทั้งค่าความเครียดหลักน้อยที่สุดและความเครียดหลักมากที่สุดมีค่ามากที่สุดภายใต้การทดสอบตามวิธีความเค้นแบบให้ความเค้นด้านข้างคงที่ และมีค่าน้อยที่สุดตามวิธีความเค้นแบบให้ความเค้นในแนวแกนคงที่ จากผลการทดสอบดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าความแตกต่างของวิธีความเค้นมีผลต่อพฤติกรรมของเกลือหิน

Lux and Rokahr (1981) ทำการเปรียบเทียบผลจากการทดสอบสามแกนแบบดั้งเดิมกับการทดสอบสามแกนแบบแรงดึง (Extension triaxial tests) ผลจากการทดสอบสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ผลการทดสอบในช่วงระยะสั้นและระยะยาว สำหรับช่วงการทดสอบระยะสั้นค่ากำลังรับแรงของเกลือหินจะขึ้นกับสถานะของความเค้นและความเค้นเฉื่อย ในส่วนของผลการทดสอบระยะยาวพบว่าค่าการยุบตัวของเกลือหินอันเนื่องมาจากการคืบ (Creep) ของการทดสอบสามแกนแบบแรงดึงจะให้ค่าน้อยกว่าการทดสอบแรงกดสามแกนแบบดั้งเดิม นอกจากนี้งานวิจัยยังพบว่าการวิบัติของตัวอย่างเกลือหินภายใต้การทดสอบสามแกนแบบแรงดึงมีลักษณะคล้ายกับการวิบัติในภาคนามรอบโพรงเกลือ Hunsche and Albrecht (1990) ทำการศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นสถิต (Hydrostatic stress) อุณหภูมิ ค่ากำลังรับแรงคงค้าง (Residual strength) และวิธีความเค้น โดยทำการทดสอบกับเกลือหินภายใต้แรงกดสามแกนแบบให้แรงเป็นจริง ผลจากการทดสอบพบว่าค่าตัวแปรสัมพันธ์โหลด (Lode parameter) ที่ถูกใช้วัดเป็นตัวกลางการเปรียบเทียบได้ให้ผลต่างๆ กันจากการทดสอบวิธีความเค้นที่ต่างกัน ซึ่งตัวแปรสัมพันธ์โหลดดังกล่าวเป็นค่าตัวแปรที่บ่งบอกความสามารถของกำลังรับแรงของวัสดุ ดังนั้นจากผลการทดสอบดังกล่าวจึงสามารถกล่าวได้ว่าค่ากำลังรับแรงของเกลือหินขึ้นกับวิธีความเค้น Allemandou and Dusseault (1993) ทำการทดสอบเกลือหินด้วยวิธีการคืบแบบวัฏจักรภายใต้แรงกดสามแกน (Triaxial cyclic creep test) จุดประสงค์ของการทดสอบได้มุ่งเน้นไปที่ผลกระทบของวิธีความเค้น Octahedral stress และ Deveriatoric stress ที่มีต่อพฤติกรรมการคืบของเกลือหิน ในส่วนของผลกระทบของวิธีความเค้นได้ใช้การทดสอบสามแกนแบบดั้งเดิมและสามแกนแบบลดแรงดันด้านข้าง (Radial - unloading triaxial test) พบว่าการทดสอบสามแกนแบบดั้งเดิมจะให้ค่าการยุบตัวมากกว่าวิธีลดแรงดันด้านข้าง แต่ค่ากำลังรับแรงที่ตำแหน่งความเครียดสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกัน Aubertin et al. (1999) และ Yahya et al. (2000) ทำการทดสอบแบบอัตราความเครียด โดยเกลือหินจะถูกกระทำภายใต้แรงสามแกนแบบดั้งเดิม และแบบลดแรงดันด้านข้าง (Reduced triaxial extension) ซึ่งแรงกดดังกล่าวจะทำให้

แรงดันด้านข้างค่อนข้างสูง โดยจะพิจารณาให้เกลือหินมีพฤติกรรมความเป็นพลาสติกสูง (Fully plastic) จากผลการทดสอบพบว่าความแตกต่างของวิถีความเค้นมีผลกระทบต่อพฤติกรรม การให้แรงแบบวัฏจักรของเกลือหิน เมื่อผลการทดสอบแสดงในกราฟของ Deveriatoric stress กับ ความเครียดในแนวแกน ผลจากการทดสอบทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า วิถีความเค้นจะมีอิทธิพล ต่อวัสดุที่มีพฤติกรรมเป็นแบบพลาสติก เช่น มีผลต่อกำลังรับแรงอัด ค่าความเครียด ค่าการ ยืดตัว เป็นต้น ในทางกลับกันผลของการทดสอบต่อวัสดุที่มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น ค่าความ แตกต่างของวิถีความเค้นยังสรุปไม่ได้แน่นอน นอกจากนี้ความแตกต่างของวิถีความเค้นยัง นำไปใช้ได้หลายจุดประสงค์ เช่น การสร้างผิวการคราก และการอธิบายแบบจำลอง เป็นต้น อย่างไรก็ตามยังไม่ปรากฏเอกสารอ้างอิงฉบับใดที่จะทำการศึกษาผลกระทบของวิถีความเค้นต่อ การประเมินคุณสมบัติของหิน ถึงแม้ว่าคุณสมบัติของหินจะมีความสำคัญอย่างมากในการ พิจารณาการออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมธรณี โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับหินที่มีความ ซับซ้อนทางพฤติกรรมกลศาสตร์อย่างเช่นเกลือหิน ทั้งนี้เป็นที่เชื่อกันว่าผลกระทบของวิถีความ เค้นถึงแม้จะมีอยู่จริงในเกลือหินแต่อาจจะมีค่าที่แตกต่างน้อยมากเมื่อเทียบกับการวิเคราะห์แบบ ไม่คำนึงถึงวิถีความเค้น

2.6 เทคโนโลยีโพรงเกลือแบบละลาย

วัตถุประสงค์ของหัวข้อนี้คือ เพื่อศึกษาการพัฒนาของโพรงเกลือแบบละลาย ระเบียบวิธีการออกแบบโพรงเกลือแบบละลาย การทำเหมืองเกลือแบบละลายในประเทศไทย และการพัฒนาเทคโนโลยีโพรงกักเก็บชนิดต่างๆ ในต่างประเทศ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการ สร้างและออกแบบโพรงกักเก็บอากาศอัดที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้

2.6.1 การพัฒนาโพรงเกลือแบบละลายที่ปฏิบัติอยู่ในปัจจุบัน

เทคโนโลยีการทำเหมืองเกลือแบบละลายเป็นวิธีการนำแร่ เช่น เกลือโพแทช (Potash) และเกลือโทรนา (Trona) มาจากใต้ดินด้วยการทำให้เกิดโพรงในชั้นเกลือหินและโพรง นั้นจะต้องมีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์ที่เหมาะสม การออกแบบโพรงจะมีผลต่อเสถียรภาพของ โพรงเกลือโดยตรง Dreyer (1984) ได้ศึกษาวิจัยพบว่าเสถียรภาพของโพรงละลายเกลือจะขึ้นกับ รูปร่างและตัวแปรโครงสร้างทางธรณีวิทยา เช่น ความหนาของหลังคาและพื้นโพรง (Cavern roof and cavern floor) และระยะห่างระหว่างโพรง (Cavern pillars) Rodomski (1981) ได้เสนอ การประเมินเสถียรภาพของโพรงจากความหนาของหลังคาและพื้นโพรง รวมถึงระยะห่าง ระหว่างโพรงโดยให้ความสัมพันธ์กับระดับความลึกของโพรงจากผิวดิน ผลที่ได้สรุปว่าการเพิ่ม ระดับความลึกของโพรงจะต้องมีการเพิ่มความหนาของหลังคาและพื้นโพรง รวมทั้งระยะห่าง

ระหว่างโพรงที่เป็นสัดส่วนต่อกัน ต่อมา Popovic et al. (1983) ได้เสนอวิธีการประเมินระยะห่างระหว่างโพรงที่เหมาะสม โดยหาจากตัวแปรพื้นฐาน 3 ตัว คือ 1) การประเมินจากค่าความต้านทานแรงกดของเกลือหิน โดยกำหนดให้ค่าความต้านทานแรงกดมีค่าลดลงประมาณ 65% ก่อนที่จะนำมาใช้ในการออกแบบ 2) อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างโพรงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางโพรงกับความลึกพื้นโพรงที่เหมาะสม และ 3) ค่าตัวคูณประกอบชดเชย (Salt recover factor) นอกจากนี้การออกแบบโพรงเพื่อการกักเก็บก๊าซธรรมชาติโดย Istvan and Querio (1983) ได้แนะนำข้อพิจารณาสำหรับการออกแบบระยะห่างระหว่างโพรงและความหนาของพื้นโพรงไว้ว่า ควรจะมีความสัมพันธ์กับขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางโพรงและค่าความต้านทานแรงกดของเกลือหิน Rokahr and Staudtmeister (1996) ได้พัฒนาการออกแบบความหนาของหลังคาโพรงโดยกำหนดให้มีความสัมพันธ์กับความลึกโพรงในระดับต้น การวิเคราะห์จะให้ความสำคัญกับค่าสัมประสิทธิ์ความดันด้านข้าง (Lateral pressure coefficient) ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการออกแบบ

หลักการในการทำเหมืองเกลือโดยทั่วไปจะเน้นถึงวิธีการละลายโพรงเกลือ และวิธีการควบคุมรูปร่างของโพรงละลายเกลือ (Jeremic, 1994) เหมืองละลายเกลือแบบเก่าจะไม่มี การควบคุมการละลายโพรงและรูปแบบโพรงจึงก่อให้เกิดความเสียหายตามมา เช่น ปัญหาน้ำบาดาลเค็มและปัญหาผิวดินทรุดเนื่องจากโครงสร้างของชั้นหินที่ไม่มีเสถียรภาพ ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากการละลายโพรงเกลือแบบผิดวิธีหรือแบบไม่เหมาะสม

การละลายโพรงเกลือในทางวิศวกรรมศาสตร์จะมุ่งเน้นไปที่วิธีการผลิตเกลือและ เทคโนโลยีการละลายเกลือเพื่อควบคุมเหมืองละลายเกลือให้ได้รูปแบบตามที่ต้องการไว้ วิธีการผลิตเกลือชั้นพื้นฐานจะแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ วิธีหลุมเจาะเดี่ยว และวิธีหลุมเจาะคู่ ในการทำเหมืองละลายเกลือด้วยวิธีหลุมเจาะเดี่ยวจะเกี่ยวข้องกับหลุมเจาะขนาดใหญ่ที่เจาะเข้าถึงชั้นเกลือหินโดยใช้ท่อเหล็ก (Casing) เป็นผนังป้องกันหลุมพังจนถึงหลังคาโพรง หลุมเจาะเดี่ยวจะมีการผลิตน้ำเกลือด้วยวิธีดูดกลับขึ้นไปพร้อมกับการฉีดน้ำจืดเพื่อละลายเกลือ วิธีนี้เหมาะสำหรับชั้นเกลือหินที่สะสมตัวอยู่ในระดับลึก

ส่วนวิธีหลุมเจาะคู่ สามารถทำได้ด้วยการเจาะหลุมคู่ไปพร้อมกันในชั้นเกลือหินโดยมีระยะห่างระหว่างหลุมเจาะตั้งแต่ 10 ถึง 100 เมตร โดยกำหนดให้หลุมเจาะหนึ่งเป็นหลุมเจาะผลิต (สูบน้ำเกลือ) อีกหลุมเจาะหนึ่งเป็นหลุมเจาะอัดฉีดน้ำจืด (ละลายเกลือ) การละลายเกลือภายในแต่ละหลุมจะเหมือนกับวิธีหลุมเจาะเดี่ยว หลังจากได้ละลายโพรงทั้งสองแล้วก็จะอัดฉีดน้ำจืดด้วยแรงดันสูงเพื่อให้ผนังโพรงแตกหรือเกิดช่องทางไหลของน้ำเกลือระหว่างโพรงทั้งสอง ซึ่งจะทำให้อัตราการไหลเพิ่มขึ้น ผลก็คือน้ำเกลือที่ผลิตได้มีปริมาณเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามโพรงที่ใหญ่เกินไปอาจทำให้เกิดการถล่มของหลังคาโพรง ซึ่งจะมีความเสี่ยงมากกว่าโพรงเดี่ยว

เทคโนโลยีการละลายเกลือจะดำเนินการหลังจากเจาะหลุมแล้ว โดยจะมีการละลายเกลือหินจากใต้ดินแล้วนำน้ำเกลือขึ้นมาสูผิวดิน เทคโนโลยีการละลายเกลือที่นิยมปฏิบัติมี 2 ระบบ (Jeremic, 1994) คือ

1) **ระบบฉีดน้ำแบบผ้นกลับ** คือการอัดฉีดน้ำจืดเข้าไปละลายบริเวณชั้นบนของโพรง (ใกล้หลังคาโพรง) ซึ่งจะอยู่ระหว่างท่อชั้นผนังหลุมเจาะและท่อคูดน้ำเกลือ วิธีการนี้อาจเรียกว่าวิธีการอัดฉีดส่วนบน (Top injection method) โดยน้ำจืดที่อัดฉีดจะละลายเกลือ (น้ำเกลือ) ไหลลงสู่โพรงเกลือด้านล่างแล้วจึงไหลสู่ท่อคูดน้ำเกลือกลับขึ้นไปบนผิวดินเพื่อเข้าสู่กระบวนการแยกเกลือต่อไป สำหรับการควบคุมหลังคาโพรงจะใช้ของเหลวที่ไม่ทำปฏิกิริยาหรือการละลายเกลือเข้ามาหนุน (ป้องกัน) บริเวณหลังคาโพรง เช่น น้ำมันดีเซล

2) **ระบบฉีดน้ำแบบปกติ** เป็นการอัดฉีดน้ำจืดเข้าไปละลายบริเวณด้านล่างของโพรง (พื้นโพรง) ด้วยการใช้อูดน้ำเกลือเปลี่ยนเป็นท่อฉีดน้ำเกลือแล้วละลายเกลือจากด้านล่างโพรงเกลือขึ้นไป น้ำเกลือที่ได้จากท่อฉีดน้ำเกลือนี้จะไหลขึ้นส่วนบนของโพรงด้วยท่อคูดที่อยู่บริเวณด้านบนของโพรงเกลือ วิธีการนี้อาจเรียกว่าวิธีการอัดฉีดส่วนล่าง (Bottom injection method)

การควบคุมรูปร่างของโพรงละลายเกลือโดยใช้เทคนิคของ Trump ซึ่งเริ่มนำมาประยุกต์ใช้ในปี ค.ศ. 1933 และได้พัฒนาให้ดีขึ้นเรื่อยมา Nigbor (1982) ได้อธิบายว่าวิธีของ Trump เป็นวิธีการใช้สารป้องกันการละลายโพรงในชั้นเกลือหินบริเวณหลังคาโพรง อีกทั้งยังช่วยในการเพิ่มขนาดโพรงและควบคุมรูปร่างของโพรงด้วย ถ้าปราศจากสารป้องกันการละลายในส่วนบนสุดของโพรงเกลือหรือหลังคาโพรงก็จะถูกละลายและทำให้โพรงเกลือพังได้ ผลที่ตามมาคือจะได้หลังคาโพรงที่กว้างผิดปกติและจะได้ปริมาณน้ำเกลือที่น้อยกว่าที่ออกแบบไว้ ส่วนสารป้องกันการละลายอาจใช้น้ำมัน ก๊าซ หรือไฮโดรคาร์บอน ซึ่งจะช่วยให้การละลายและการควบคุมรูปร่างของโพรงดีขึ้น ปี ค.ศ. 1960 สถาบันวิจัยเหมืองละลาย (Solution Mining Research Institute) ได้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับกลศาสตร์ของการละลายเกลือประกอบกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาตัวแปรที่ส่งผลต่อรูปร่างของโพรงเกลือ Saberian and VonSchonfeldt (1973) ได้สร้างแบบจำลองของการละลายโดยใช้สมมติฐานที่ว่า “อัตราการละลายเกลือจะเป็นสัดส่วนของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำเกลือ (Brine concentration gradient) และกำหนดให้การไหลเป็นแบบราบเรียบ (Laminar flow) แบบจำลองลักษณะนี้ได้พัฒนาให้มีหลายรูปแบบโดยใช้ร่วมกับวิธีการละลายแบบหลุมเจาะเดี่ยว ซึ่งพบว่าอัตราการละลายเกลือที่

เหมาะสมเป็นปัจจัยหนึ่งที่จะช่วยควบคุมรูปร่างของโพรง ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาและประยุกต์วิธีนี้เพื่อใช้กับระบบหลุมรวมเพื่อเพิ่มอัตราการผลิตเกลือ แต่วิธีการละลายแบบหลุมเจาะเดี่ยวจะเหมาะกับการพัฒนางานวิจัยทางด้านการกักเก็บน้ำมันดิบ ก๊าซธรรมชาติ และการทิ้งของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

เสถียรภาพของโพรงในชั้นเกลือหินและการทรุดตัวของแผ่นดินอาจจะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การสร้างโพรงละลายเกลือที่ก่อปัญหามากที่สุด คือ ปัญหาผิวดินทรุด (Surface subsidence) ที่อยู่เหนือโพรง มีรายงานการวิจัยที่เกี่ยวกับการศึกษาการทรุดตัวของผิวดินเนื่องจากการทำเหมืองเกลืออยู่บ้าง Peck (1961) ได้ทำการประเมินและวัดปริมาณการทรุดตัวของผิวดินเหนือโพรงพบว่า ผลจากการละลายโพรงที่ไม่มีการควบคุมรูปร่างจะทำให้โพรงมีรูปร่างไม่แน่นอนและก่อให้เกิดการทรุดตัวของแผ่นดินเป็นบริเวณกว้างเหนือโพรง ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Terzaghi (1969) ที่ได้ศึกษาหลุมยุบเหนือโพรงละลายที่เมือง Winsor มลรัฐ Ontario ประเทศสหรัฐอเมริกา ดังนั้นถ้าไม่มีการควบคุมรูปร่างของโพรงเกลือและความกว้างของหลังคาโพรงก็อาจเกิดการถล่มลงมาได้ ผลสืบเนื่องคือจะทำให้เกิดผิวดินทรุดเป็นบริเวณกว้าง การตรวจสอบการเคลื่อนตัวของชั้นเกลือหินรอบโพรงและหินเหนือโพรงจึงเป็นสิ่งจำเป็น จึงต้องมีการควบคุมและตรวจสอบรูปร่างของโพรงเกลืออยู่เสมอ เพื่อให้รู้ถึงปริมาณและขอบเขตที่อาจจะเปลี่ยนแปลงไปในขณะที่ทำการละลายและใช้งาน วิธีที่ใช้ตรวจสอบมีหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมและน่าเชื่อถือที่สุดคือการใช้คลื่นโซนาร์ (Nigbor, 1982)

2.6.2 ระเบียบวิธีการออกแบบโพรงเกลือแบบละลาย

Bieniawski and Bieniawski (1994) ได้เสนอหลักการและระเบียบวิธีการออกแบบโพรงที่เกิดขึ้นจากการละลายในชั้นเกลือหิน ซึ่งได้ประยุกต์มาจากระเบียบวิธีการออกแบบในวิศวกรรมหินที่เสนอโดย Bieniawski (1992) ระเบียบวิธีการออกแบบโพรงละลายในชั้นเกลือหินได้นำไปสู่การนำเสนอขั้นตอนการออกแบบที่มี 10 ขั้นตอน และทุกขั้นตอน จะอยู่ภายใต้หลักการของการออกแบบ 6 ประการ ขั้นตอนการออกแบบประกอบด้วย

ขั้นตอนที่ 1 นิยามของปัญหา (Statement of the Problem) ซึ่งจะมีการกำหนดจุดประสงค์ในเชิงความสามารถ (Performance Objectives) ของโครงสร้างวิศวกรรม

ขั้นตอนที่ 2 ความต้องการในหน้าที่และข้อจำกัด (Functional Requirements and Constraints) ซึ่งจะมีการกำหนดตัวแปรและประเด็นต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ

ขั้นตอนที่ 3 การเก็บข้อมูล (Collection of Information) ซึ่งในที่นี้จะครอบคลุมการเก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องและที่มีอยู่ทั้งหมดเพื่อนำมาใช้ในการออกแบบ ข้อมูลเหล่านี้เช่นคุณลักษณะของพื้นที่ในเชิงธรณีวิทยา คุณสมบัติของเกลือหินและหินข้างเคียง ความเค็มในภาคสนาม ลักษณะน้ำบาดาล และความดันที่ใช้ในโพรงเกลือ

ขั้นตอนที่ 4 การสร้างแนวคิดเบื้องต้น (Concept Formulation) ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับ การกำหนดองค์ประกอบต่างๆ ที่จะนำมาซึ่งการแก้ปัญหาหรือนำไปสู่การตอบสนองของความต้องการในเชิงหน้าที่ภายใต้ข้อจำกัดในการออกแบบ

ขั้นตอนที่ 5 การวิเคราะห์องค์ประกอบของคำตอบ (Analysis of Solution Components) ซึ่งวิธีที่จะนำมาใช้อาจจะมาจาก 3 กลุ่มวิธีหลัก คือ 1) วิธีที่พัฒนามาจากทฤษฎีทางด้านกลศาสตร์ ซึ่งรวมไปถึงสูตรต่างๆ และการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข 2) วิธีที่นำผลการตรวจวัดในภาคสนามมาใช้ และ 3) วิธีที่นำความสัมพันธ์เชิง Empirical มาใช้ ซึ่งวิธีนี้อาศัยกรณีศึกษาและประสบการณ์เป็นหลัก

ขั้นตอนที่ 6 การสังเคราะห์และการกำหนดรายละเอียดสำหรับคำตอบในการออกแบบ (Synthesis and Specifications for Alternative Solutions) เป็นขั้นตอนที่กำหนดครูปรางขนาด และตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับโพรงเกลือที่ออกแบบขึ้น

ขั้นตอนที่ 7 การประเมิน (Evaluation) เป็นขั้นตอนในการประเมินความสามารถของโครงสร้างและระบบที่ออกแบบ โดยจะมีการพิจารณาปัจจัยทางด้านเศรษฐศาสตร์และทรัพยากรในท้องถิ่นร่วมด้วย

ขั้นตอนที่ 8 การหาจุดสมดุลที่เหมาะสม (Optimization) เป็นขั้นตอนที่เปรียบเทียบผลการประเมินในขั้นตอนที่ 7 สำหรับคำตอบของการออกแบบที่เหมาะสมที่สุด

ขั้นตอนที่ 9 การแนะนำ (Recommendation) เกี่ยวข้องกับการนำเสนอผลงานทั้งในรูปแบบของรายงาน แผนผัง แบบจำลอง และการบรรยาย

ขั้นตอนที่ 10 ขั้นตอนนี้จะต้องดำเนินการภายใต้หลัก 6 ประการ คือ

- 1) ความชัดเจนของจุดประสงค์และความต้องการเชิงหน้าที่
- 2) การลดผลกระทบที่เกิดจากการแปรปรวนทางด้านธรณีวิทยา
- 3) ความเรียบง่ายขององค์ประกอบในการออกแบบ
- 4) การใช้เทคโนโลยีล่าสุดและประสบการณ์
- 5) การหาจุดสมดุลที่เหมาะสม
- 6) ความเป็นไปได้ในการก่อสร้าง

Bieniawski and Bieniawski (1994) กล่าวว่า ในอดีตการออกแบบโพรงละลายในชั้นเกลือหินวิศวกรจะใช้เพียงประสบการณ์และผลจากการศึกษาเท่านั้น โดยมิได้ดำเนินการในขบวนการออกแบบอย่างเป็นระบบ ส่งผลให้ผลของการออกแบบไม่ได้คำนึงถึงคุณสมบัติเชิงธรณีวิทยาและเชิงวิศวกรรมอย่างอื่นที่โพรงนั้นตั้งอยู่ เหตุผลที่วิศวกรไม่ได้ออกแบบโพรงละลายในชั้นเกลืออย่างเป็นระบบ และไม่ใช้ระเบียบวิธีการออกแบบอย่างมีหลักการเกิดขึ้นจาก 3 เหตุผลคือ

- 1) วิศวกรขาดความเข้าใจในความจำเป็นและปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ
- 2) วิศวกรไม่ได้ตระหนักถึงหลักการในการออกแบบ
- 3) วิศวกรไม่มีความรู้ทางด้านวิชาการ (ทฤษฎี) ที่เพียงพอ

ดังนั้นการออกแบบอย่างเป็นระบบ (Structured Process) โดยใช้ระเบียบวิธีการออกแบบและหลักการ รวมถึงการใช้ประสบการณ์ (Heuristics) ในขั้นตอนที่เหมาะสมจึงเป็นแนวทางที่วิศวกรพึงใช้เพื่อให้มั่นใจว่าผลของการออกแบบจะถูกต้องและลดความผิดพลาดให้น้อยที่สุด

2.6.3 โพรงกักเก็บชนิดต่างๆ ในต่างประเทศ

การทบทวนรูปแบบของโพรงกักเก็บชนิดต่างๆ ในต่างประเทศ มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานและเปรียบเทียบในการออกแบบโพรงกักเก็บเบื้องต้นสำหรับการคำนวณและวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ เพื่อนำไปสู่การออกแบบรูปร่างของโพรงกักเก็บที่เหมาะสม และมีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์สูงสุดในแต่ละพื้นที่

Katz and Lady (1976) อธิบายตัวอย่างของแหล่งกักเก็บก๊าซธรรมชาติ (Natural gas) ในชั้นเกลือหินที่มลรัฐ Michigan และมลรัฐ Mississippi ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยโพรงกักเก็บที่มลรัฐ Michigan ใช้สำหรับกักเก็บก๊าซ Propane ซึ่งถูกสร้างด้วยวิธีการทำเหมืองเกลือแบบ

ละลาย (Solution mining) อยู่ที่ระดับลึก 637 เมตร ความสูงของโพรงเท่ากับ 43 เมตร และมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 67 เมตร สามารถบรรจุก๊าซ Propane ได้ประมาณ 9.7×10^6 ลูกบาศก์เมตร ในขั้นตอนของการปฏิบัติสำหรับการกักเก็บจะกำหนดให้ความดันสูงสุดที่ไม่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของโพรงมีค่าเท่ากับ 7.58 MPa และความดันต่ำสุดที่เหลือน้ำไว้เพื่อป้องกันการยุบตัวของโพรงจากความเค็มในชั้นเกลือหิรรอบข้างโพรงมีค่าเท่ากับ 1.03 MPa ในการปล่อยก๊าซออกจากโพรงกักเก็บเพื่อนำมาใช้งานจะกำหนดให้อัตราการปล่อยเท่ากับ 0.59×10^6 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ส่วนโพรงกักเก็บที่มลรัฐ Mississippi ใช้สำหรับกักเก็บก๊าซธรรมชาติ โดยโพรงถูกสร้างอยู่ในชั้นเกลือ Golf coast salt dome ด้วยวิธีการทำเหมืองเกลือแบบละลาย เช่นเดียวกับที่มลรัฐ Michigan มีจำนวน 2 โพรง ซึ่งอยู่ที่ระดับลึก 1,737 และ 2,042 เมตร แต่โพรงมีความสูงประมาณ 305 เมตร และมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 30 เมตร ปริมาตรของก๊าซที่สามารถบรรจุได้รวมทั้ง 2 โพรงประมาณ 8.20×10^6 ลูกบาศก์เมตร ในขั้นตอนของการปฏิบัติสำหรับการกักเก็บจะกำหนดให้ความดันสูงสุดมีค่า 27.23 MPa และความดันต่ำสุดที่เหลือน้ำไว้มีค่า 8.79 MPa ในการปล่อยก๊าซออกจากโพรงกักเก็บเพื่อนำมาใช้งานมีอัตราการปล่อยเท่ากับ 8.50×10^6 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน

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

Jeremic (1994) อธิบายการพัฒนาเทคโนโลยีการกักเก็บขยะสารเคมี (Chemical waste) ในโพรงเกลือหินที่ประเทศเนเธอร์แลนด์ ซึ่งโพรงถูกสร้างในชั้นเกลือหินด้วยวิธีการทำเหมืองเกลือแบบละลาย ตั้งอยู่ในเมือง Hengelo โดยโพรงอยู่ที่ความลึก 286 เมตร สูง 114 เมตร และมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 120 เมตร สามารถกักเก็บขยะสารเคมีได้ประมาณ 0.2×10^6 ลูกบาศก์เมตร ในรูปของเหลว ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ยิปซัม และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ Nguyen et al. (1996) วิเคราะห์การยุบตัวของผิวดิน (Surface subsidence) จากการสร้างโพรงกักเก็บก๊าซที่เมือง Tersanne

ประเทศฝรั่งเศส โดยใช้วิธีการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในสามมิติ (Three-dimensional finite element) ซึ่งโรงแปรงที่สร้างมี 14 โรงแปรงอยู่ที่ความลึกประมาณ 1,400 เมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 80 เมตร และความหนาของหลังคาโรงแปรงเท่ากับ 150 เมตร แต่ละโรงแปรงมีระยะห่างระหว่างโรงแปรง 600 เมตร โดยปริมาตรของก๊าซทั้งหมดที่สามารถกักเก็บได้เท่ากับ 440×10^6 ลูกบาศก์เมตร ผลจากการวิเคราะห์ระบุว่าอัตราการทรุดตัวของอยู่ที่ 1 เซนติเมตร ต่อปี

Vouille et al. (1996) ใช้ระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลขแบบไฟไนท์อีลิเมนต์ (Finite element method-VIPLEF) ศึกษาเสถียรภาพของโรงแปรงกักเก็บไฮโดรคาร์บอน ที่พัฒนามาจากโรงแปรงกักเก็บเชื้อเพลิง (Fuel storage caverns) ที่ตั้งอยู่ในรัฐ Manosque ประเทศฝรั่งเศส เริ่มดำเนินการตั้งแต่ปี ค.ศ. 1967 และเริ่มใช้งานในปี ค.ศ. 1969 ซึ่งโรงแปรงถูกสร้างในชั้นเกลือหินมีความลึกระหว่าง 400 ถึง 1,500 เมตร มีทั้งหมด 7 โรงแปรง แต่ละโรงแปรงมีความสูงประมาณ 400 เมตร สามารถบรรจุไฮโดรคาร์บอนได้ทั้งหมดประมาณ 6.3×10^6 ลูกบาศก์เมตร ผลที่ได้ระบุว่าความดันสูงสุดที่สามารถกักเก็บได้มีค่าเท่ากับ 18 MPa และความดันต่ำสุดที่เหลือค้างไว้มีค่าเท่ากับ 6 MPa Fuenkajorn (1997) ได้ออกแบบและวิเคราะห์โรงแปรงสำหรับกักเก็บก๊าซธรรมชาติที่มลรัฐ Kansas ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยใช้ระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลขแบบไฟไนท์อีลิเมนต์ (Finite element method-GEO) ซึ่งโรงแปรงถูกสร้างอยู่ในชั้นเกลือ Hutchinson salt formation ด้วยวิธีการทำเหมืองเกลือแบบละลาย ความลึกของโรงแปรงเท่ากับ 620 เมตร สูง 72 เมตร และมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 122 เมตร โดยที่หลังคาโรงแปรงและพื้นโรงแปรง (Salt floor) มีความหนาเท่ากับ 44 และ 25 เมตร ตามลำดับ ความดันสูงสุดของก๊าซที่สามารถอัดสูโรงแปรงกักเก็บได้มีค่า 12.14 MPa และความดันต่ำสุดที่เหลือค้างไว้มีค่า 4.83 MPa กำหนดอัตราการปล่อยก๊าซออกจากโรงแปรงเท่ากับ 1.38 MPa ต่อวัน สำหรับโรงแปรงที่มีความดันอยู่ระหว่าง 12.14 และ 7.30 MPa และมีอัตราการปล่อยเท่ากับ 0.69 MPa ต่อวัน สำหรับโรงแปรงที่มีความดันของโรงแปรงต่ำกว่า 7.30 MPa วัฏจักรของการอัดและการปล่อยอากาศจะกระทำ 7 ครั้งต่อปี โดยโรงแปรงนี้จะมีอายุการใช้งานถึง 50 ปี ต่อมาในปี ค.ศ. 2000 Fuenkajorn (2000) ได้ใช้วิธีการคำนวณแบบเดียวกันในการออกแบบและวิเคราะห์โรงแปรงกักเก็บสำหรับกักเก็บก๊าซธรรมชาติที่มลรัฐ Texas ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งโรงแปรงถูกสร้างอยู่ในชั้นเกลือ Salado salt formation ด้วยวิธีการทำเหมืองเกลือแบบละลายเช่นเดียวกัน มีความลึก 640 เมตร สูง 137 เมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 61 เมตร และความหนาของหลังคาโรงแปรงและพื้นโรงแปรงเท่ากับ 165 และ 63 เมตร ความดันสูงสุดของก๊าซที่สามารถอัดสูโรงแปรงกักเก็บได้มีค่าเท่ากับ 11.72 MPa และความดันต่ำสุดที่เหลือค้างไว้มีค่า 4.14 MPa การปล่อยก๊าซออกจากโรงแปรงกำหนดให้มีอัตราเท่ากับ 1.38 MPa ต่อวัน สำหรับโรงแปรงที่มีความดันของโรงแปรงอยู่ระหว่าง 11.72 MPa และ 8.34 MPa และมีอัตราการปล่อยเท่ากับ 0.35 MPa ต่อวัน สำหรับโรงแปรงที่มีความดันของโรงแปรงต่ำกว่า 8.34 MPa วัฏจักรของการอัดและปล่อยอากาศจะกระทำ 8 ครั้งต่อปี โดยโรงแปรงนี้จะมีอายุการใช้งานถึง 50 ปี

Crotogino (2001) อธิบายโครงการสร้างโรงไฟฟ้าสำหรับกักเก็บพลังงานในรูปอากาศภายใต้แรงดันเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าในประเทศเยอรมันนี ซึ่งเป็นประเทศแรกที่มีการพัฒนาเทคโนโลยีนี้ โดยเริ่มต้นในปี ค.ศ. 1978 ภายใต้ชื่อว่า “The Huntorf Plant” ซึ่งตั้งอยู่ในเมือง Huntorf มีกำลังการผลิตเท่ากับ 290 MW ใน 2 ชั่วโมง โรงที่ใช้กักเก็บมีจำนวน 2 โรง อยู่ที่ความลึก 650 เมตร สูง 150 เมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 เมตร และมีปริมาตรรวมกันเท่ากับ 310,000 ลูกบาศก์เมตร โรงที่ตั้งกล่าวอยู่ห่างกัน (Spacing) 220 เมตร วิธีการผันอากาศอัดให้เป็นกระแสไฟฟ้าจะเป็นแบบปริมาตรคงที่ การอัดอากาศสู่โรงจะอัดด้วยอัตราประมาณ 108 kg/s ความดันอากาศภายในโรงสูงสุดขณะกักเก็บอากาศเท่ากับ 2 MPa และปล่อยอากาศออกด้วยอัตรา 417 kg/s เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ความดันภายในโรงจะลดต่ำลงมาเท่ากับ 0.1 MPa Arnold et al. (2002) ศึกษาทางด้านเศรษฐศาสตร์ในกรณีขยายขนาดโรงกักเก็บก๊าซธรรมชาติในชั้นเกลือหิน ตั้งอยู่ที่เมือง Bernburg ประเทศเยอรมัน ซึ่งดำเนินการแล้วเสร็จในปี ค.ศ. 1970 มีโรงกักเก็บทั้งหมด 27 โรง ความลึกของโรงอยู่ในช่วง 480 ถึง 680 เมตร สามารถบรรจุก๊าซธรรมชาติได้ตั้งแต่ 180×10^3 ถึง 520×10^3 ลูกบาศก์เมตร ความดันสูงสุดของก๊าซที่สามารถอัดสู่โรงกักเก็บได้มีค่าเท่ากับ 10 MPa และความดันต่ำสุดที่เหลือค้างไว้มีค่าตั้งแต่ 1.10 ถึง 2.10 MPa การอัดและปล่อยก๊าซเข้า-ออกโรงกำหนดให้มีอัตราเท่ากับ 500×10^3 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และ $1,250 \times 10^3$ ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ

ข้อมูลดังกล่าวที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเชิงวิศวกรรมได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.2 ซึ่งพบว่าความลึกของโรงกักเก็บ (วัดถึงหลังคาโรง) จะมีค่าตั้งแต่ 400 เมตร ถึง 2,042 เมตร สูง 43 ถึง 610 เมตร และมีเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 30 เมตร ถึง 122 เมตร

2.6.4 เหมืองเกลือแบบละลายในประเทศไทย

กรณีตัวอย่างการทำเหมืองเกลือแบบละลายในประเทศไทย เช่น เหมืองละลายเกลือของบริษัท เหมืองเกลือพิมาย จำกัด อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา (สมหวัง วิทยานิพนธ์ และนิรันดร์ ยิงมหิศรานนท์, 2533; กรมทรัพยากรธรณี, 2533; Gronefeld et al., 1993) มีวิธีการทำหลุมเจาะเดี่ยวหลายระดับ (Multi-stage with oil blanket) มีการวางท่อหลายระดับโดยใช้เทคโนโลยีจากประเทศเยอรมันนี มีการลงทุนค่อนข้างสูง (มากกว่า 500 ล้านบาท) ระบบสูบได้พัฒนาการสูบน้ำเกลือเพื่อป้องกันการเกิดแผ่นดินยุบด้วยการอัดน้ำมันลงไปโรง น้ำมันจะลอยตัวอยู่ข้างบนเป็นเพดานโรงซึ่งสามารถป้องกันการกัดเซาะละลายชั้นเกลือขึ้นด้านบน เนื่องจากเกลือจะไม่ถูกละลายด้วยน้ำมันจึงสามารถควบคุมโรงให้อยู่ในระดับลึกได้ และยังใช้เครื่องมือตรวจสอบลักษณะของโรง ซึ่งถ้าพบว่าขนาดของโรงใหญ่มากเกินไปจะปิดบ่อนั้นเสีย บริษัท เหมืองพิมาย จำกัด ได้ผลิตเกลือหินที่ชั้นล่างระดับ 200-280 เมตร จากการ

ออกแบบด้วยวิธีคำนวณทางคณิตศาสตร์ชั้นสูง ขนาดโพรง 6 แสนลูกบาศก์เมตร (3 แสนตัน) สูง 45 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 80 เมตร โพรงรูปทรงกระบอกกันแหลม ระยะห่างระหว่างบ่อผลิต 120 เมตร จะได้ผนังโพรงชั้นต่ำ 40 เมตร จำนวนบ่อผลิต 10 บ่อต่อหนึ่งร้อยไร่

เหมืองละลายเกลือของ บริษัท สหศรีชัยเคมีคอลส์ จำกัด ตำบลโตนด อำเภอโนนสูง จังหวัดนครราชสีมา (กรมทรัพยากรธรณี, 2533) ได้ใช้วิธีการทำหลุมเจาะเดี่ยวแบบเพดานโพรงระดับเดียว (Single stage with oil blanket) การใช้น้ำมันทำให้สะดวกในการติดตั้งและการผลิต ต้นทุนในการติดตั้งแต่ละบ่อเพียง 5 แสนบาท โดยสามารถว่าจ้างบริษัทเจาะสำรวจภายในประเทศทำได้ ขณะทำการผลิตไม่จำเป็นต้องว่าจ้างรถปั้นจั่นมายกระดับท่อเพื่อปรับเพดานโพรงใหม่ดังเช่นในกรณีที่เป็นแบบเพดานโพรงหลายระดับ แต่มีข้อเสียคือรูปร่างโพรงเกลือจะค่อนข้างพอมสูงอัตราส่วนการขุดแร่จะต่ำกว่าแบบเพดานโพรงหลายระดับ จำนวนบ่อผลิตจะมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังการผลิตเท่ากัน การใช้น้ำมันดีเซลในการปกคลุมเพดานโพรงไม่ว่าจะเป็นแบบระดับเดียวหรือหลายระดับเป็นวิธีที่ดีที่สุดที่สามารถควบคุมรูปร่างโพรงและป้องกันการละลายเจาะทะลุขอบบนชั้นเกลือได้ บริษัท สหศรีชัยเคมีคอลส์ จำกัด ได้ผลิตเกลือหินที่ชั้นกลางระดับ 80-185 เมตร ขนาดโพรง 2 แสนลูกบาศก์เมตร (หนึ่งแสนตัน) ที่ความสูง 60 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลางโพรงเท่ากับ 65 เมตร (ทรงกระบอก) และ 112 เมตร (ทรงกรวย) ระยะห่างระหว่างบ่อผลิตชั้นต่ำ 100 เมตร นั่นคือขนาดเสาค้ำยัน (ผนังโพรงเกลือ) ชั้นต่ำเท่ากับ 35 เมตร จำนวนบ่อผลิต 20 บ่อต่อหนึ่งร้อยไร่

Fuenkajorn (2002) ได้เสนอคู่มือหรือแนวทางการออกแบบโพรงเกลือแบบละลายในชั้นเกลือหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย แนวทางนี้เป็นผลมาจากการศึกษาชั้นเกลือหินในพื้นที่ต่างๆ มีการทดสอบเชิงกลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการและมีการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ผู้วิจัยได้คัดสรรลักษณะความหนาและความลึกของชั้นเกลือหินที่ต่างกัน 5 ลักษณะจาก 5 พื้นที่ตัวแทนในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และได้สรุปว่าใน 5 พื้นที่นี้โพรงเดี่ยวควรจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 80 เมตร สูง 60 เมตร และมีระยะห่างระหว่างโพรงไม่น้อยกว่า 240 เมตร ซึ่งวางตัวอยู่ในผังสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square Pattern) ส่วนความหนาของชั้นเกลือหินระหว่างหลังคาโพรงถึงชั้นหินข้างบนที่ไม่ใช่เกลือหินจะแตกต่างกันไปตามพื้นที่หรือความลึกของชั้นเกลือหินที่จะละลาย อย่างไรก็ตามความหนาของหลังคาเกลือหินนี้ไม่ควรน้อยกว่า 200 เมตร ด้วยการออกแบบนี้การทรุดตัวของผิวดินจะมีค่าประมาณ 10 เซนติเมตร ในช่วง 50 ปีหลังจากการทำเหมือง โดยในโพรงจะต้องมีน้ำเกลือขังอยู่ถึงระดับผิวดินตลอดเวลา

บทที่ 3

การเตรียมตัวอย่างเกลือหินและการศึกษาธรณีวิทยา ของเกลือหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

เนื้อหาในบทนี้อธิบายขั้นตอนและวิธีการในการจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหินเพื่อใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ข้อกำหนดมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM) แหล่งที่มาของตัวอย่างเกลือหินรวมถึงขนาด รูปร่าง และจำนวนของตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านธรณีวิทยาเพื่อประเมินการกระจายตัวของชั้นเกลือหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือในเชิงความหนา ความลึก และการแพร่กระจายในพื้นที่

3.1 แหล่งที่มาของตัวอย่างเกลือหิน

ตัวอย่างเกลือหินทั้งหมดถูกคัดเลือกมาจากแท่งตัวอย่างซึ่งได้ขุดเจาะจากเกลือชั้นกลาง (Middle salt) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท เกลือพิมาย จำกัด โดยนำมาตัดและฝนให้ผิวเรียบที่ห้องปฏิบัติการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อให้ได้รูปร่างและขนาดที่ต้องการตามข้อกำหนดของการทดสอบ

3.2 การจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหิน

การจัดเตรียมตัวอย่างเริ่มจากการคัดเลือกแท่งตัวอย่างเกลือหินที่มีผิวสมบูรณ์ที่สุดใกล้เคียงกับข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM D4543 ซึ่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบจะต้องไม่มีรอยแตก ร้าว หรือรูพรุนที่เกิดจากการชำรุดหรือละลายบนแท่งตัวอย่าง การตัดแท่งตัวอย่างได้ใช้เลื่อยไฟฟ้า (รูปที่ 3.1) เพื่อให้ได้รูปร่างและขนาดที่ต้องการตามข้อกำหนดของการทดสอบ เมื่อตัดแท่งตัวอย่างเสร็จแล้วจะนำมาตรวจสอบความสมบูรณ์ ถ้าพบว่าหน้าตัดของตัวอย่างไม่ได้ฉากหรือมีรอยแตกมากเกินไปจะนำไปตัดใหม่อีกครั้งจนได้แท่งตัวอย่างที่สมบูรณ์ โดยแต่ละตัวอย่างได้ใช้ปากกาลีซชนิดติดถาวรเขียนหมายเลขกำกับและใช้พลาสติกหุ้มอีกชั้นหนึ่งเพื่อป้องกันความชื้นและการละลาย ตัวอย่างเกลือหินที่นำมาตัดเรียบร้อยแล้วจะมีขนาด $54 \times 54 \times 54 \text{ mm}^3$ อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (Length-to-diameter ratio, L/D) เท่ากับ 1.0 สำหรับการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรที่มีความเค้นล้อมรอบมากกว่า 30 ตัวอย่าง ตารางที่ 3.1 แสดงขนาดและจำนวนของตัวอย่างเกลือหินที่จัดเตรียมตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM สำหรับการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรที่มีความเค้นล้อมรอบ รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างบางส่วนของแท่งเกลือหินที่เตรียมไว้สำหรับการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรที่มีความเค้นล้อมรอบ



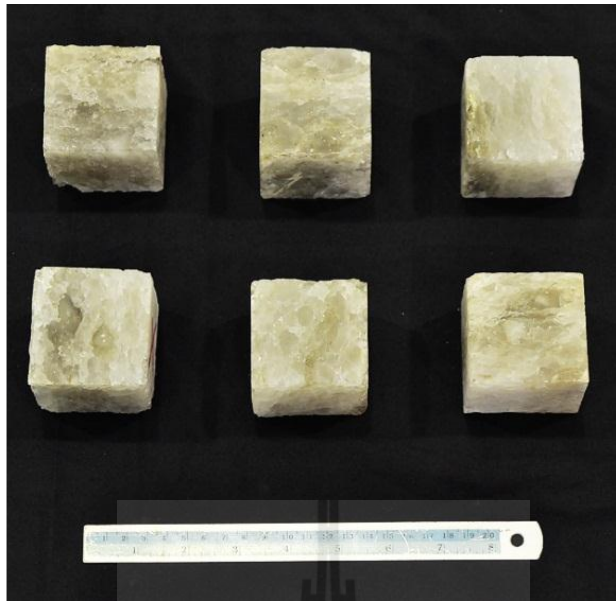
รูปที่ 3.1 แท่งเกลือหินที่ถูกตัดด้วยเลื่อยไฟฟ้าสำหรับการทดสอบกำลังกดสูงสุดและการคืบในสามแกนจริง

ตารางที่ 3.1 ขนาดของตัวอย่างเกลือหินที่จัดเตรียมตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM สำหรับทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรที่มีความเค้นล้อมรอบ

| Specimen (mm) | Depth (m) | Width (mm) | Length (mm) | Height (mm) | weight (g) | Density (g/cc) |
|---------------|---------------|------------|-------------|-------------|------------|----------------|
| MS-PCL-05 | 161.16-160.22 | 57.2 | 56.7 | 57.0 | 408.5 | 2.21 |
| MS-PCL-08 | 234.51-234.57 | 57.9 | 58.8 | 58.0 | 433.3 | 2.20 |
| MS-PCL-16 | 140.13-140.19 | 54.6 | 54.8 | 55.8 | 391.5 | 2.34 |
| MS-PCL-19 | 207.45-207.51 | 56.6 | 55.0 | 55.5 | 396.2 | 2.29 |
| MS-PCL-27 | 234.39-234.45 | 55.0 | 54.6 | 55.8 | 376.8 | 2.24 |
| MS-PCL-30 | 160.10-160.16 | 55.7 | 56.3 | 58.0 | 402.2 | 2.21 |
| MS-PCL-11 | 103.89-103.95 | 56.9 | 55.2 | 57.4 | 382.4 | 2.12 |
| MS-PCL-22 | 227.26-207.33 | 55.3 | 55.0 | 55.5 | 385.8 | 2.29 |
| MS-PCL-04 | 204.40-204.46 | 56.8 | 57.8 | 57.0 | 406.6 | 2.17 |
| MS-PCL-10 | 274.35-274.41 | 57.0 | 56.9 | 57.5 | 408.3 | 2.19 |
| MS-PCL-15 | 104.07-104.13 | 55.0 | 56.8 | 56.8 | 372.8 | 2.10 |
| MS-PCL-21 | 103.18-103.24 | 55.4 | 54.3 | 55.0 | 377.8 | 2.28 |

ตารางที่ 3.1 ขนาดของตัวอย่างเกลือหินที่จัดเตรียมตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM สำหรับทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรที่มีความเค้นล้อมรอบ (ต่อ)

| Specimen (mm) | Depth (m) | Width (mm) | Length (mm) | Height (mm) | weight (g) | Density (g/cc) |
|------------------|---------------|---------------|----------------|----------------|---------------|-------------------|
| MS-PCL-26 | 144.32-144.38 | 55.3 | 56.6 | 55.5 | 378.7 | 2.18 |
| MS-PCL-02 | 159.98-160.04 | 56.3 | 57.8 | 55.0 | 387.6 | 2.18 |
| MS-PCL-13 | 234.57-234.63 | 55.8 | 55.0 | 55.2 | 395.0 | 2.33 |
| MS-PCL-24 | 204.59-204.65 | 54.3 | 55.1 | 55.3 | 380.2 | 2.30 |
| MS-PCL-06 | 274.53-274.59 | 55.9 | 56.7 | 57.9 | 392.4 | 2.14 |
| MS-PCL-07 | 159.92-159.98 | 57.2 | 57.2 | 57.5 | 416.0 | 2.21 |
| MS-PCL-17 | 159.86-159.92 | 56.3 | 54.0 | 55.2 | 394.2 | 2.35 |
| MS-PCL-18 | 274.29-274.35 | 56.2 | 56.8 | 54.9 | 394.2 | 2.25 |
| MS-PCL-28 | 234.27-234.33 | 55.1 | 56.0 | 55.5 | 381.4 | 2.23 |
| MS-PCL-29 | 159.8-159.74 | 55.8 | 57.2 | 57.9 | 395.9 | 2.14 |
| MS-PCL-03 | 160.22-160.28 | 56.9 | 57.3 | 56.7 | 402.1 | 2.18 |
| MS-PCL-14 | 202.87-202.93 | 55.3 | 56.0 | 55.2 | 394.6 | 2.31 |
| MS-PCL-25 | 160.10-160.16 | 55.7 | 56.9 | 58.0 | 402.2 | 2.19 |
| MS-PCL-09 | 234.69-234.75 | 56.9 | 58.0 | 57.2 | 406.3 | 2.16 |
| MS-PCL-20 | 234.94-235.0 | 55.8 | 56.4 | 54.2 | 397.3 | 2.33 |
| MS-PCL-01 | 160.04-160.10 | 55.3 | 57.9 | 57.3 | 410.1 | 2.24 |
| MS-PCL-12 | 144.20-144.26 | 56.1 | 55.3 | 55.0 | 397.7 | 2.33 |
| MS-PCL-23 | 234.45-234.51 | 57.2 | 55.9 | 55.4 | 402.7 | 2.27 |



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างบางส่วนของแต่ละตัวอย่างเกลือบหินที่ได้ทำการเตรียมไว้สำหรับทำการทดสอบหาความคงทน ภายใต้แรงกดแบบวัฏจักร (Cyclic loading test) ที่มีความเค้นล้อมรอบโดยมีขนาด 54x54x54 mm

3.3 การศึกษาพื้นที่ธรณีวิทยาของเกลือบหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

การศึกษาพื้นที่ธรณีวิทยาของเกลือบหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านธรณีวิทยาในการประเมินการกระจายตัวของชั้นเกลือบหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือในเชิงความหนา ความลึก และการแพร่กระจายในพื้นที่ ผลที่ได้จะช่วยในการประเมินศักยภาพของชั้นเกลือบหินที่เหมาะสมในการก่อสร้างโครงเพื่อกักเก็บพลังงานไฟฟ้าในรูปอากาศอัดภายใต้ความดัน โดยข้อมูลที่น่ามาใช้ประกอบด้วย

- 1) ข้อมูลหลุมเจาะของกรมทรัพยากรธรณี จำนวน 194 หลุม (Japakasetr and Suwanich, 1982, 1984)
- 2) ข้อมูลแผนที่ธรณีวิทยาประเทศไทย มาตราส่วน 1:500,000 (กรมทรัพยากรธรณี, 1983)
- 3) ข้อมูลแผนที่ภูมิประเทศมาตราส่วน 1:50,000 (กรมแผนที่ทหาร, 2512)
- 4) ภาพตัดขวางแสดงธรณีวิทยาในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (Wongsawat et al., 1992)
- 5) ภาพตัดขวางทางธรณีวิทยาในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (นเรศ สัตยารักษ์ และ ทรงภพ พลจันทร์, 2533)

- 6) แผนที่ศักยภาพแหล่งแร่ประเทศไทย มาตราส่วน 1:2,500,000 (กรมทรัพยากรธรณี, 2540)
- 7) แผนที่ธรณีวิทยาประเทศสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว มาตราส่วน 1:1,000,000 (Department of Geology and Mines (DGM), 1990)

ข้อมูลทั้งหมดจะนำมาศึกษาและวิเคราะห์โดยมีขั้นตอนการศึกษา ดังนี้ 1) การประมวลผลข้อมูลหลุมเจาะเพื่อประกอบธรณีวิทยาโครงสร้างของชั้นเกลือหิน 2) การศึกษาข้อมูลในภาคสนาม 3) การจำแนกความน่าเชื่อถือของการประมวลผลทางด้านธรณีวิทยา 4) การเปรียบเทียบผลการแปลข้อมูลหลุมเจาะ 5) การศึกษาความหนาของแต่ละชั้นหิน 6) การประเมินความลึกของหมวดหินโคกกรวด 7) การประเมินความลึกของเกลือชั้นล่าง 8) การประเมินความหนาของเกลือชั้นล่าง และ 9) สรุปผลการศึกษา

3.3.1 การประมวลผลข้อมูลหลุมเจาะเพื่อประกอบธรณีวิทยาโครงสร้างของชั้นเกลือหิน

การศึกษาในส่วนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประมวลผลข้อมูลหลุมเจาะโพแทชและเกลือหินในประเทศไทย โดยประโยชน์ของการรวบรวมและศึกษาในส่วนนี้เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการจำแนกชั้นหินและสร้างเส้นชั้นความหนาและความลึกของชั้นเกลือ การศึกษาการใช้ข้อมูลจากผลงานวิจัยของ Japakasetr and Suwanich (1982) ร่วมกับข้อมูลหลุมเจาะโพแทชและเกลือหินพื้นที่บ่าเหนือจตุรรงค์ (Japakasetr and Suwanich, 1984) รวมทั้งสิ้น 194 หลุม ซึ่งตำแหน่งของหลุมเจาะเหล่านี้แสดงไว้ในภาคผนวก ก รูปที่ ก-1 และรูปที่ ก-2 โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 รวบรวมและศึกษาข้อมูลหลุมเจาะจากรายงานหลุมเจาะโพแทชและเกลือหินในประเทศไทย (Suwanich, 1986) ซึ่งได้ทำการจำแนกชุดหินในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือตามลักษณะทางธรณีวิทยาไว้แล้ว อย่างไรก็ตามเพื่อจุดประสงค์เฉพาะในการนำมาวิเคราะห์และออกแบบโพรงกักเก็บอากาศอัด โครงการวิจัยนี้จึงได้จัดระบบการจำแนกชุดหินขึ้นมาใหม่ในเชิงวิศวกรรมธรณีโดยแบ่งเป็น 11 ชั้น สามารถเรียงลำดับจากบนลงล่างได้ดังนี้

1) **ดินชั้นบน (Top soil)** คือชั้นดินและชั้นตะกอนทั้งหมดที่ปกคลุมอยู่บนผิวดินเทียบเคียงได้กับชั้นดินและชั้นตะกอนที่ปกคลุมอยู่บนชั้นหินของ Suwanich (1986)

2) **ชั้นหินตะกอนที่ปิดทับเกลือชั้นบน (Sedimentary rocks above Upper Salt)** รวมไปถึงชั้นหินตะกอนต่างๆ ครอบคลุมหมวดหินภูทอก (Phutok Formation) และหมวดหินภูเขาทอง (Phu Khao Thong Formation) ที่ปิดทับอยู่บนเกลือชั้นบน เทียบเคียงได้กับคลาสติคชั้นบนซึ่งเป็นชั้นที่วางตัวขนานอยู่บนเกลือชั้นบนสุดของหมวดหินมหาสารคาม (Maha Sarakham Formation) ของ Suwanich (1986)

3) **เกลือชั้นบน (Upper Salt)** คือเกลือที่อยู่ชั้นบนสุด และวางตัวอยู่ด้านล่างชั้นหินตะกอนที่ปิดทับเกลือชั้นบนในข้อที่ 2 เทียบเคียงได้กับชั้นเกลือที่วางตัวอยู่บนสุดระหว่างคลาสติคชั้นบนและคลาสติคชั้นกลางของ Suwanich (1986)

4) **คลาสติคชั้นกลาง (Middle Clastic)** คือชั้นตะกอนหรือหินตะกอนที่อยู่ระหว่างเกลือชั้นกลางและเกลือชั้นบน เทียบเคียงได้กับชั้นหินที่วางตัวอยู่บนเกลือชั้นกลางและอยู่ใต้เกลือชั้นบนของ Suwanich (1986)

5) **ส่วนบนของเกลือชั้นกลาง (Upper part of Middle Salt)** คือเกลือชั้นกลางที่อยู่ส่วนบนของชั้นแอนไฮไดรต์ที่แทรกอยู่ในเกลือชั้นกลาง และเรียกรวมแอนไฮไดรต์ชั้นกลางที่อยู่ด้านบน (Middle anhydrite) ว่าเป็นส่วนบนของเกลือชั้นกลาง เทียบเคียงได้กับ Upper sequence เกลือชั้นกลางของ Suwanich (1986)

6) **ชั้นแอนไฮไดรต์ในเกลือชั้นกลาง (Anhydrite in Middle Salt)** คือ ชั้นของแอนไฮไดรต์ที่แทรกอยู่ในเกลือชั้นกลาง เทียบเคียงได้กับชั้นของแอนไฮไดรต์ใน Middle sequence เกลือชั้นกลางของ Suwanich (1986)

7) **ส่วนล่างของเกลือชั้นกลาง (Lower part of Middle Salt)** คือเกลือชั้นกลางที่อยู่ถัดลงมาจากชั้นของแอนไฮไดรต์ที่แทรกอยู่ในเกลือชั้นกลางโดยจะอยู่ใต้คลาสติคชั้นกลาง (ถ้ามี) และอยู่บนคลาสติคชั้นล่าง เทียบเคียงได้กับ Lower sequence เกลือชั้นกลางของ Suwanich (1986)

8) **คลาสติคชั้นล่าง (Lower Clastic)** คือชั้นตะกอนหรือหินตะกอนที่ปิดทับอยู่บนเกลือชั้นล่าง (Lower Salt) และตามลำดับจะอยู่ใต้เกลือชั้นกลางหรือชั้นแอนไฮไดรต์ในเกลือชั้นกลาง (ถ้ามี) เทียบเคียงได้กับชั้นหินที่วางตัวอยู่ใต้เกลือชั้นกลาง และอยู่บนเกลือชั้นล่างของ Suwanich (1986)

9) **เกลือชั้นล่างและโพแทช (Salt and potash in Lower Salt)** คือเกลือชั้นล่างและชั้นของโพแทช ซึ่งชั้นนี้อาจจะมีหรือไม่มีแร่โพแทชก็ได้ แต่จะต้องเป็นชั้นที่อยู่ใต้คลาสติกชั้นล่าง (ถ้ามี) เทียบเคียงได้กับชั้นเกลือที่อยู่ล่างสุดของหมวดหินมหาสารคาม รวมไปถึงชั้นโพแทชและแมกนีเซียมที่อยู่ระหว่างคลาสติกชั้นล่างและอยู่เหนือ Basal anhydrite ของ Suwanich (1986) ซึ่งการจำแนกในที่นี้เกลือชั้นล่างจะรวมไปถึงโดมเกลือรูปหมอน เกลือที่เป็นชั้นระนาบและโดมเกลือที่ดันทะลุชั้นหินหรือทะลุเกลือชั้นบนขึ้นมา

10) **ชั้นแอนไฮไดรต์ในเกลือชั้นล่าง (Anhydrite in Lower Salt)** คือชั้นแอนไฮไดรต์ที่อยู่ใต้ชั้นของเกลือชั้นล่างและอยู่ติดกับหมวดหินโคกกรวด เทียบเคียงได้กับชั้น Basal anhydrite ของ Suwanich (1986)

11) **ชั้นหินทรายและหินทรายแป้ง (Sandstone / Siltstone)** คือชั้นของหมวดหินโคกกรวด (Khok Kruat Formation) เทียบเคียงได้กับหมวดหินโคกกรวดซึ่งรองรับหมวดหินมหาสารคามและอยู่ใต้ Basal anhydrite ตามคำจำกัดความของ Suwanich (1986)

การจำแนกชั้นหินข้างต้นนี้มิได้มีจุดประสงค์ที่จะตั้งมาตรฐานชั้นหินใหม่แต่อย่างใด แต่เป็นเพียงการจัดลำดับเพื่อกำหนดชื่อชั้นหินเพื่อใช้เฉพาะในงานวิจัยนี้และเพื่อให้แน่ใจว่าการแปลความจากข้อมูลหลุมเจาะในการศึกษานี้ถูกต้องและสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น โดยจะมีการศึกษาความหนาและความลึกของแต่ละชั้นเกลือเพื่อเชื่อมรอยต่อ (Contact) ระหว่างชั้นหินแต่ละชั้นและนำมาตรวจสอบด้วยข้อมูลทางด้านธรณีฟิสิกส์ที่ได้ตีพิมพ์แล้วโดยผู้วิจัยอื่น ในงานวิจัยนี้จะรวมชั้นหินทั้งหมดที่อยู่เหนือเกลือชั้นบนให้เป็น “ชั้นหินตะกอนที่ปิดทับเกลือชั้นบน” โดยจะไม่มีการแยกว่าเป็นชั้นของหมวดหินภูเขาทอง หมวดหินภูทอกหรือชั้นอื่นๆ ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงพื้นที่ที่มีปัญหาสำหรับชั้นหินเหล่านี้ อนึ่งชั้นหินเหล่านี้ก็จะไม่มีส่วนเกี่ยวข้องในเชิงวิศวกรรมกับชั้นเกลือหินที่อยู่ระดับลึก ซึ่งเป็นที่สนใจในการศึกษาของโครงการนี้

ขั้นตอนที่ 2 สร้างลำดับชั้นหินโดยใช้ข้อมูลที่ได้มาจากหลุมเจาะทั้งหมดในขั้นตอนที่ 1 ซึ่งขั้นตอนนี้ได้ใช้โปรแกรม Autocad เพื่อแสดงให้เห็นถึงลำดับของชั้นหินในแต่ละหลุมเจาะเพื่อนำมาเปรียบเทียบและตรวจสอบความถูกต้องของลำดับชั้นหินที่จำแนกว่ามีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่เคยมีผู้ทำการศึกษามาก่อนหรือไม่ เพื่อจะได้ทำการวิเคราะห์และแก้ไขต่อไป

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดเทียบตำแหน่งของแต่ละชั้นหินตามความสูงจากระดับน้ำทะเล (Elevation) ให้เป็นระดับความลึก (Depth) จากผิวดิน ซึ่งมีหน่วยเป็นเมตรเพื่อนำมาวิเคราะห์ในการออกแบบโครงกักเก็บเบื้องต้น

ขั้นตอนที่ 4 นำข้อมูลชั้นหินในแต่ละหลุมเจาะที่ตรวจสอบแล้วป้อนลงในระบบดิจิทัล (Excel files) เพื่อกำหนดรอยต่อของชั้นหินและกำหนดตำแหน่งที่ตั้งของหลุมเจาะ (พิกัดทางภูมิศาสตร์) ลงบนแผนที่ โดยข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่ระบบประกอบด้วย หมายเลขหลุมเจาะ พิกัดทางภูมิศาสตร์ ตำแหน่งที่ตั้ง ระดับของปากหลุมเหนือระดับน้ำทะเล ความหนาของชั้นหิน และส่วนบนสุดของชั้นหินในแต่ละชั้น

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลหลุมเจาะในระบบดิจิทัลโดยเทียบกับการจำแนกในขั้นตอนที่ 1

ขั้นตอนที่ 6 หาเส้นระดับของแต่ละชั้นเกลือหิน โดยดำเนินการเชื่อมรอยต่อของชั้นหินระหว่างหลุมเจาะ ซึ่งจะทำการเชื่อมผิวรอยต่อของชั้นหินเพียง 8 ชั้นเท่านั้นเพื่อความเป็นไปได้เชิงคณิตศาสตร์สำหรับการเตรียมข้อมูลลงโปรแกรม ArcView กล่าวคือรวมเกลือชั้นกลางเข้าด้วยกันเป็นชั้นเดียว และรวมเกลือชั้นล่างและโพแทชกับชั้นแอนไฮไดรต์ในเกลือชั้นล่างเป็นชั้นเดียวกัน โดยชั้นหินที่ใช้สำหรับการสร้างความสัมพันธ์ในเชิง 3 มิติ ประกอบด้วย

- 1) ดินชั้นบน (Top soil)
- 2) ชั้นหินตะกอนที่ปิดทับเกลือชั้นบน (Sedimentary Rocks above Upper Salt)
- 3) เกลือชั้นบน (Upper Salt)
- 4) คลาสติกชั้นกลาง (Middle Clastic)
- 5) เกลือชั้นกลาง (Middle Salt)
- 6) คลาสติกชั้นล่าง (Lower Clastic)
- 7) เกลือชั้นล่างและโพแทช (Lower Salt and Potash)
- 8) ชั้นหินทรายและหินทรายแป้ง (Sandstone/Siltstone)

ในขั้นตอนนี้จะนำข้อมูลจากแหล่งอื่นเข้ามาประกอบเพื่อช่วยในการแปลลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้างของชั้นเกลือหิน ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ประกอบด้วย

- 1) ข้อมูลหลุมเจาะของกรมทรัพยากรธรณี จำนวน 194 หลุม (Japakasetr and Suwanich, 1982, 1984)
- 2) ข้อมูลแผนที่ธรณีวิทยาประเทศไทย มาตรฐาน 1:500,000 (กรมทรัพยากรธรณี, 1983)
- 3) ข้อมูลแผนที่ภูมิประเทศมาตรฐาน 1:50,000 (กรมแผนที่ทหาร, 2512)

- 4) ภาพตัดขวางแสดงธรณีวิทยาในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (Wongsawat et al., 1992)
- 5) ภาพตัดขวางทางธรณีวิทยาในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (นเรศ สัตยารักษ์ และ ทรงภพ พลจันทร์, 2533)
- 6) แผนที่ศักยภาพแหล่งแร่ประเทศไทย มาตรฐาน 1:2,500,000 (กรมทรัพยากรธรณี, 2540)
- 7) แผนที่ธรณีวิทยาประเทศสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว มาตรฐาน 1:1,000,000 (Department of Geology and Mines (DGM), 1990)

ขั้นตอนที่ 7 สร้างเส้นชั้นความหนาของแต่ละชั้นเกลือหิน ขั้นตอนนี้สามารถทำในเชิงคณิตศาสตร์ได้โดยคำนวณผลต่างระหว่างเส้นระดับของผิวบนและผิวล่างของแต่ละชั้นเกลือหิน แล้วนำผลที่ได้มาลงจุดเพื่อสร้างเส้นชั้นความหนา ซึ่งผลที่ได้จากขั้นตอนสุดท้ายนี้จะนำมาประกอบในการประเมินศักยภาพของชั้นเกลือหินที่เหมาะสมเพื่อใช้กักเก็บก๊าซธรรมชาติในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

3.3.2 การศึกษาข้อมูลในภาคสนาม

การศึกษาข้อมูลในภาคสนามมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและรวบรวมข้อมูลทางด้านธรณีวิทยาและเกลือหินของภาคตะวันออกเฉียงเหนือจากหน่วยงานและบริษัทเอกชนที่เกี่ยวข้อง รวมถึงการเยี่ยมชมตัวอย่างเกลือหินและการทำเหมืองเกลือในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

กิจกรรมในการออกสำรวจและเก็บข้อมูลในภาคสนามที่ได้ดำเนินการสามารถจำแนกเป็น 2 ประเภท คือ 1) การรวบรวมข้อมูลในเชิงธรณีวิทยาเกลือหิน ซึ่งเป็นเอกสารและรายงานต่างๆ ที่ได้รับความอนุเคราะห์จากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เอกสารเหล่านี้ได้นำมาศึกษาเพื่อประกอบการวิจัยในครั้งนี้ โดยผลจากการศึกษาได้เสนอไว้ในบทที่ 2 และ 2) การตรวจสอบแท่งตัวอย่างเกลือหินจากแหล่งต่างๆ ซึ่งผลการศึกษาแท่งตัวอย่างเกลือหินที่โรงกักเก็บตัวอย่างของกองน้ำบาดาล จังหวัดขอนแก่น พบว่าแท่งตัวอย่างเกลือหินความยาวทั้งหมดกว่า 2,000 เมตร จากหลุมเจาะหมายเลข K-55, K-78, K-89 และ KB-25 ที่ศึกษาพบว่าลักษณะของเกลือหินที่มีความคล้ายคลึงกับเกลือหินที่ได้จาก บริษัท เอเชีย แปซิฟิค โปแตช คอร์ปอเรชั่น จำกัด จังหวัดอุดรธานี ทั้งในเชิงลักษณะทางกายภาพและในเชิงแร่วิทยา ซึ่งสามารถสรุปโดยสังเขปคือขนาดของผลึก (Grain size) เฉลี่ย 0.5–1.5 เซนติเมตร ส่วนใหญ่เกลือหินมีสีใสถึงสีดวัน สิ่งเจือปนหลักที่สำคัญคือแร่แอนไฮไดรต์และแร่ดิน จากการศึกษาด้วยตาเปล่าพบว่า ปริมาณแร่แอนไฮไดรต์ที่เจือปนอยู่ส่วนใหญ่จะน้อยกว่า 5% ส่วนปริมาณแร่ดินจะอยู่อย่างกระจายทั่วทั้งแท่งเกลือหินที่ศึกษาส่วนใหญ่จะไม่พบแร่ดิน แต่ในบางจุดอาจมีแร่ดินสูงถึงร้อยละ 20 ในเชิงปริมาณ

3.3.3 การจำแนกความน่าเชื่อถือของการประมวลผลทางด้านธรณีวิทยา

หลุมเจาะที่นำข้อมูลมาศึกษาในโครงการนี้มีการกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอในบางพื้นที่ เช่น บริเวณอำเภอบำเหน็จณรงค์จะมีหลุมเจาะอยู่อย่างหนาแน่น แต่ในพื้นที่ส่วนใหญ่ โดยเฉพาะบริเวณกลางแอ่งโคราชมีหลุมเจาะอยู่น้อยและมีระยะห่างของบางหลุมเจาะมากกว่า 10 กิโลเมตร ดังนั้น การนำข้อมูลเหล่านี้มาประเมินความหนาและความลึกของเกลือชั้นล่างทั่วทั้งแอ่งจึงต้องมีการจำแนกความน่าเชื่อถือของผลการศึกษาในเชิงพื้นที่ การจำแนกนี้จะอาศัยหลักการทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับการประเมินปริมาณความลึกและการกระจายตัวของแหล่งแร่ที่ใช้กันอยู่ในภาคอุตสาหกรรมทั่วไป ซึ่งจะใช้หลักการเดียวกันดังเช่นที่นำเสนอโดย Peters (1978) คือ ทำการจำแนกความน่าเชื่อถือของการประมวลผลในเชิงพื้นที่ออกเป็น 3 ระดับ โดยใช้เกณฑ์จากวิธีและขบวนการที่ได้มาซึ่งข้อมูล ณ ตำแหน่งนั้นๆ เพื่อให้การแปลความหมายถูกต้องที่สุด ในงานวิจัยนี้จะใช้คำศัพท์เดิมที่ใช้ระบุในแต่ละระดับของการจำแนกดังต่อไปนี้

1) **ระดับที่มีความน่าเชื่อถือสูงสุดเรียกว่า Measured** ผลของการศึกษาในเชิงความหนาและความลึกของเกลือชั้นล่างที่จะจัดอยู่ในระดับนี้ต้องอยู่ในจุดที่มีข้อมูลทางด้านกายภาพที่ตรวจวัดได้และมองเห็นได้ (จาก Core ที่ได้จากหลุมเจาะนั้น) ดังนั้น ข้อมูลที่ได้จากตำแหน่งของหลุมเจาะทั้งหมดไม่ว่าจะหนาเท่าใด (หรืออยู่ในกลุ่มใด) จะถูกจัดอยู่ในระดับนี้ กล่าวคือ ตำแหน่งของหลุมเจาะจะถูกเรียกว่าเป็น A_m , B_m , C_m หรือ D_m ขึ้นกับความหนาของเกลือชั้นล่าง โดยที่ m เป็นตัวย่อของ Measured

2) **ระดับที่มีความน่าเชื่อถือรองลงมาเรียกว่า Indicated** พื้นที่ที่จัดอยู่ในระดับนี้ ข้อมูลที่ประมวลได้ส่วนหนึ่งจะมาจากการตรวจวัดที่แท้จริง (เช่น Core ที่ได้จากหลุมเจาะ) ข้อมูลอีกส่วนหนึ่งอาจจะมาจากการศึกษาธรณีฟิสิกส์ หรือการแปลโดยใช้หลักการและกฎเกณฑ์ทางด้านธรณีวิทยาโครงสร้างและธรณีวิทยาหินตะกอน ดังนั้น พื้นที่บางแห่งที่อยู่บริเวณหลุมเจาะหรือระหว่างหลุมเจาะที่ใกล้เคียงกันจะถูกจำแนกความน่าเชื่อถืออยู่ในระดับนี้ตามความหนาของเกลือชั้นล่างในแต่ละกลุ่ม ซึ่งมีการจำแนกย่อยลงไปคือ A_{Ind} , B_{Ind} , C_{Ind} หรือ D_{Ind} โดยที่ Ind เป็นตัวย่อของ Indicated

3) **ระดับที่มีความน่าเชื่อถือของข้อมูลน้อยที่สุดเรียกว่า Inferred** ซึ่งพื้นที่ที่ถูกจัดอยู่ในระดับนี้จะเป็นพื้นที่ที่ได้จากการประมวลผลโดยใช้หลักการและกฎเกณฑ์ทางด้านธรณีวิทยาเท่านั้น โดยไม่มีข้อมูลหลุมเจาะหรือข้อมูลทางด้านธรณีฟิสิกส์มาช่วยสนับสนุน ดังนั้น แต่ละกลุ่มความหนาของชั้นเกลือหินจะมีการจำแนกเป็น A_{Inf} , B_{Inf} , C_{Inf} หรือ D_{Inf} โดยที่ Inf เป็นตัวย่อของ Inferred

3.3.4 การเปรียบเทียบผลการแปลข้อมูลหลุมเจาะ

วัตถุประสงค์ของการศึกษาหัวข้อนี้คือเพื่อเปรียบเทียบผลการแปลข้อมูลหลุมเจาะที่ดำเนินการในงานวิจัยนี้กับผลการแปลข้อมูลหลุมเจาะของ Suwanich (1986) ผลจากการเปรียบเทียบพบว่ามากกว่าร้อยละ 95 ของการแปลข้อมูลลักษณะทางธรณีวิทยามีความสอดคล้องกับผลการแปลของ Suwanich (1986) และมีเพียง 4 หลุมเจาะเท่านั้นที่ผลการแปลมีความแตกต่างกันในเรื่องความหนาของชั้นคลาสติกคือ หลุมเจาะหมายเลข K-021, K-081, K-114 และ K-115 เนื่องจากข้อมูลหลุมเจาะโพแทชและเกลือหินของ Japakasetr and Suwanich (1982) ได้รวมความหนาของชั้นคลาสติกชั้นบนและคลาสติกชั้นกลางไว้ด้วยกัน แต่ Suwanich (1986) ได้ใช้หลักการทางแร่วิทยาเข้ามาจำแนกความหนาของชั้นคลาสติกทั้งสองชั้นทำให้ข้อมูลมีความเหมาะสมยิ่งขึ้น ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงปรับปรุงผลการแปลของหลุมเจาะทั้ง 4 หลุมนี้ให้สอดคล้องกับผลการแปลของ Suwanich (1986) เพื่อให้ผลการแปลปราศจากความขัดแย้ง

จากผลการศึกษาดังกล่าวพบว่าลักษณะทางแร่วิทยาของเกลือหินที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ส่วนใหญ่จะพบเกลือหินที่ไม่มีสีและค่อนข้างสะอาดอยู่ส่วนบนของแต่ละชั้นและจะมีการเปลี่ยนแปลงของสีและส่วนประกอบ เช่น แอนไฮไดรต์ ผลึกเกลือสีน้ำตาล และผลึกเกลือสีขาว ชุน โดยจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามความลึกของแต่ละชั้น

3.3.5 การศึกษาความหนาของแต่ละชั้นหิน

การศึกษาคความหนาของชั้นหินจากผลการจำแนกในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อนำผลจากการศึกษามาเปรียบเทียบกับผลการแปลความจากข้อมูลหลุมเจาะของ Suwanich (1986) และนำผลมาประเมินความเหมาะสมของการสร้างโพรงกักเก็บก๊าซธรรมชาติในเบื้องต้น โดยทำการศึกษาในพื้นที่ อ.บ้านหินจรรย์ จ.ชัยภูมิ อ.คง อ.จักราช จ.นครราชสีมา อ.เมือง จ.ขอนแก่น และพื้นที่ อ.นาเชือก จ.มหาสารคาม การศึกษาในส่วนนี้ทำให้สามารถทราบถึงความหนาของเกลือแต่ละชั้นที่ยืนยันได้จากข้อมูลหลุมเจาะ คือพิจารณาเฉพาะจุดที่มีหลุมเจาะเท่านั้น ผลที่ได้สามารถนำมาคัดเลือกชั้นเกลือที่เหมาะสมในการออกแบบโพรงกักเก็บ โดยความหนาของเกลือหินในแต่ละแอ่งที่ศึกษาในโครงการดังแสดงในตารางที่ 3.2 ถึงตารางที่ 3.9

เกลือชั้นบน เป็นชั้นที่มีเกลือหินบางที่สุดโดยจะมีความหนาไม่เกิน 65 เมตร ในแอ่งสกลนครและไม่เกิน 60 เมตร ในแอ่งโคราช ความหนาของชั้นนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Suwanich (1986) ซึ่งได้ให้ความหนาของเกลือชั้นบนประมาณ 65 เมตร โดยระดับความลึกของเกลือชั้นบน (วัดจากผิวบนของชั้นหิน) อยู่ที่ความลึกประมาณ 40 เมตร

ตารางที่ 3.2 ความหนาของชั้นดินจากหลุมเจาะในแอ่งสกลนครที่พบชั้นเกลือครบ 3 ชั้น ประกอบด้วยหลุมเจาะหมายเลข K-002, K-003 และ K-005

| ความหนาของชั้นดิน (เมตร) | | | | | | |
|--------------------------|-------------------|-----------------|-------------------|------------------|------------------|-----------------|
| Top soil | Upper Clastic | Upper Salt | Middle Clastic | Middle Salt | Lower Clastic | Lower Salt |
| 6.1-10.67 | 151.02- 274.01 | 23.21- 64.76 | 20.88- 51 | 69.39- 105.98 | 28.32- 45.18 | 63.94- 93.64 |

ตารางที่ 3.3 ความหนาของชั้นดินจากหลุมเจาะในแอ่งสกลนครที่พบชั้นเกลือ 2 ชั้น ประกอบด้วยหลุมเจาะหมายเลข K-006, K-007, K-009, K-043, K-044, K-046, K-048, K-055, K-081, K-085 และ K-086

| ความหนาของชั้นดิน (เมตร) | | | | | | |
|--------------------------|------------------|---------------|-------------------|-----------------|------------------|------------------|
| Top soil | Upper Clastic | Upper Salt | Middle Clastic | Middle Salt | Lower Clastic | Lower Salt |
| 1.52-53.94 | 62.4- 578.21 | - | 8.54- 174.65 | 1.53- 112.41 | 8.68- 67.27 | 64.01- 437.08 |

ตารางที่ 3.4 ความหนาของชั้นดินจากหลุมเจาะในแอ่งสกลนครที่พบชั้นเกลือ 1 ชั้น ประกอบด้วยหลุมเจาะหมายเลข K-001, K-004, K-008, K-045 และ K-083

| ความหนาของชั้นดิน (เมตร) | | | | | | |
|--------------------------|------------------|---------------|-------------------|----------------|------------------|------------------|
| Top soil | Upper Clastic | Upper Salt | Middle Clastic | Middle Salt | Lower Clastic | Lower Salt |
| 24.68- 57.91 | - | - | 11.89- 22.55 | - | 18.74- 74.37 | 74.23- 396.85 |

ตารางที่ 3.5 ความหนาของชั้นดินจากหลุมเจาะในแอ่งโคราชที่พบชั้นเกลือครบ 3 ชั้น

ประกอบด้วยหลุมเจาะหมายเลข RS-1.2, RS-1.4, RS-1.5, RS-2.0, RS-2.1, RS-2.4, RS-2.11, RS-2.14, RS-2.17, RS-2.18, PQ-1, PQ-4, KB-9, KB-10, KB-11, KB-15, KB-16, KB-17, KB-18, KB-19, KB-20, KB-21, KB-24, KB-25, KB-30, KB-31, KB-34, KB-35, K-021, K-025, K-036, K-040, K-041, K-056, K-076, K-079 และ K-095

| ความหนาของชั้นดิน (เมตร) | | | | | | |
|--------------------------|------------------|---------------|-------------------|----------------|------------------|---------------|
| Top soil | Upper Clastic | Upper Salt | Middle Clastic | Middle Salt | Lower Clastic | Lower Salt |
| 0-18.36 | 23.47- | 0.91- | 8.97- | 3.45- | 0- | 5.25- |
| | 316.08 | 52.78 | 83.72 | 121.73 | 61.35 | 167.34 |

ตารางที่ 3.6 ความหนาของชั้นดินจากหลุมเจาะในแอ่งโคราชที่พบชั้นเกลือ 2 ชั้น (Upper Salt และ Middle Salt) ประกอบด้วยหลุมเจาะหมายเลข K-062, K-090 และ K-096

| ความหนาของชั้นดิน (เมตร) | | | | | | |
|--------------------------|------------------|---------------|-------------------|----------------|------------------|---------------|
| Top soil | Upper Clastic | Upper Salt | Middle Clastic | Middle Salt | Lower Clastic | Lower Salt |
| 2-34 | 256.37- | 25.3- | 23.9- | 16.04- | 0- | - |
| | 650 | 60.06 | 30.2 | 56.99 | 16.53 | |

ตารางที่ 3.7 ความหนาของชั้นหินจากหลุมเจาะในแอ่งโคราชที่พบชั้นเกลือ 2 ชั้น (Middle Salt และ Lower Salt) ประกอบด้วยหลุมเจาะหมายเลข RS-1.1, RS-1.6, RS-2.2, RS-2.3, RS-2.6, RS-2.7, RS-2.10, RS-2.12, RS-2.13, RS-2.15, RS-2.19, RS-2.22, RS-2.23, PQ-3, PQ-5, PQ-6, PQ-9, KB-1, KB-2, KB-3, KB-4, KB-5, KB-6, KB-7, KB-8, KB-12, KB-14, KB-22, KB-23, KB-26, KB-27, KB-28, KB-29, KB-32, KB-33, K-010, K-014, K-017, K-018, K-022, K-024, K-030, K-034, K-042, K-053, K-059, K-068, K-072, K-075, K-078, K-084, K-087, K-092, K-093, K-098, K-100, K-102, K-104, K-107, K-108, K-114, K-115, K-117 และ K-118

| ความหนาของชั้นหิน (เมตร) | | | | | | |
|--------------------------|------------------|---------------|-------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| Top soil | Upper Clastic | Upper Salt | Middle Clastic | Middle Salt | Lower Clastic | Lower Salt |
| 0-140.21 | 0- 222.15 | - | 0- 117.04 | 0.17- 171.95 | 0- 185.05 | 1.37- 521.06 |

ตารางที่ 3.8 ความหนาของชั้นหินจากหลุมเจาะในแอ่งโคราชที่พบชั้นเกลือ 1 ชั้น (Middle Salt) ประกอบด้วยหลุมเจาะหมายเลข K-069, K-071, K-082 และ K-099

| ความหนาของชั้นหิน (เมตร) | | | | | | |
|--------------------------|------------------|---------------|-------------------|------------------|------------------|---------------|
| Top soil | Upper Clastic | Upper Salt | Middle Clastic | Middle Salt | Lower Clastic | Lower Salt |
| 2.56- 30.48 | 0- 5.54 | - | 0- 41.15 | 45.41- 316.33 | 0- 417.8 | - |

ตารางที่ 3.9 ความหนาของชั้นหินจากหลุมเจาะในแอ่งโคราชที่พบชั้นเกลือ 1 ชั้น (Lower Salt) ประกอบด้วยหลุมเจาะหมายเลข RS-1.3, RS-2.5, RS-2.8, RS-2.9, RS-2.16, RS-2.20, RS-2.21, PQ-2, PQ-7, PQ-11, KB-13, K-011, K-012, K-013, K-015, K-016, K-019, K-020, K-023, K-026, K-027, K-028, K-029, K-031, K-033, K-037, K-047, K-049, K-050, K-051, K-052, K-054, K-057, K-058, K-060, K-061, K-063, K-064, K-066, K-070, K-073, K-077, K-080, K-089, K-091, K-094, K-097, K-101, K-103, K-105, K-106, K-109, K-110, K-111, K-112, K-113 และ K-116

| ความหนาของชั้นหิน (เมตร) | | | | | | |
|--------------------------|------------------|---------------|-------------------|----------------|------------------|---------------|
| Top soil | Upper Clastic | Upper Salt | Middle Clastic | Middle Salt | Lower Clastic | Lower Salt |
| 0-167.64 | 0-687.02 | - | 0-84.21 | - | 0-132.89 | 4.37-1,080 |

เกลือชั้นกลาง ในแอ่งสกลนครมีความหนาไม่เกิน 112 เมตร และในแอ่งโคราชมีความหนาไม่เกิน 233 เมตร โดยมีระดับความลึกอยู่ที่ประมาณ 120 เมตร เนื่องจาก Suwanich (1986) ได้ทำการแปลความจากข้อมูลหลุมเจาะเฉพาะใน 5 พื้นที่ข้างต้นที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งไม่ครอบคลุมทั้ง 194 หลุมที่กระจายตัวอยู่ทั่วทั้งภาคตะวันออกเฉียงเหนือ แต่ในการศึกษาครั้งนี้ คณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาทุกหลุมเจาะ และหลุมเจาะที่มีชั้นแอนไฮโดรต์อยู่ด้านบนของเกลือชั้นกลางจะรวมเรียกว่าเป็นเกลือชั้นกลาง ทำให้ความหนาของเกลือหินที่ได้มีความแตกต่างจากรายงานของ Suwanich (1986) ซึ่งในรายงานจะแยกชั้นแอนไฮโดรต์ที่อยู่ด้านบนของเกลือชั้นกลางเป็นอีกชั้นหนึ่งเพื่อจุดประสงค์ในการวิเคราะห์และออกแบบ

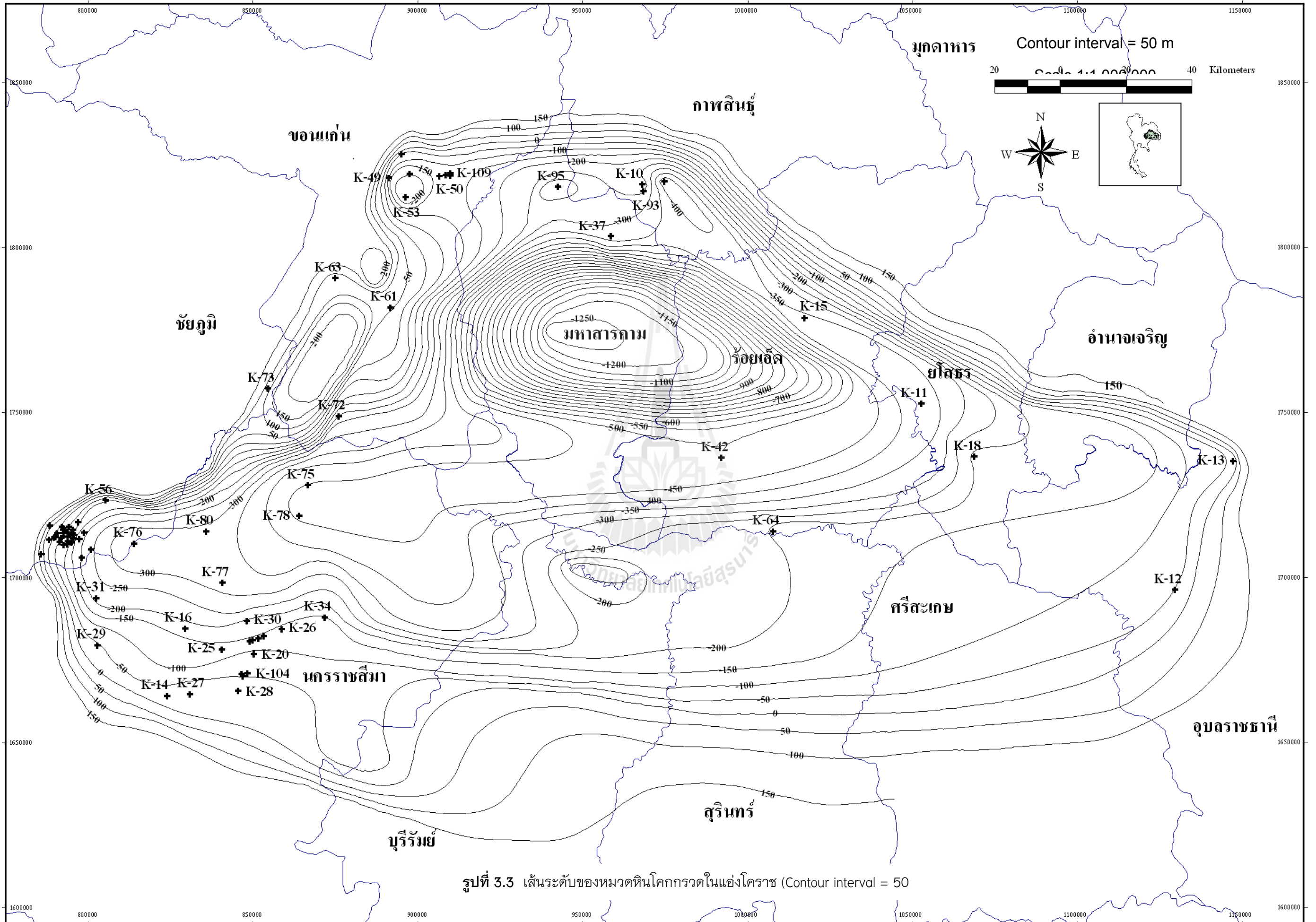
เกลือชั้นล่าง (รวมชั้นโพแทช) เป็นชั้นที่มีเกลือหินหนาที่สุดโดยในแอ่งสกลนครมีความหนา 63-437 เมตร และในแอ่งโคราชมีความหนาตั้งแต่ 4-1,080 เมตร โดยความลึกของเกลือชั้นล่างอยู่ที่ระดับประมาณ 200 เมตร สอดคล้องกับ Suwanich (1986) ซึ่งได้ให้ความหนาของเกลือชั้นล่างใน 5 พื้นที่ข้างต้นประมาณ 350 เมตร แต่เนื่องจากการแปลความไม่ครอบคลุมข้อมูลของหลุมเจาะทั้งหมดที่มี ดังนั้นในบางพื้นที่ที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาจึงมีความหนาที่แตกต่างกัน

การศึกษาและประมวลข้อมูลทางด้านหลุมเจาะและชั้นหินในแอ่งโคราช พบว่ามีหลุมเจาะที่ไม่พบชั้นเกลือเนื่องจากความหนาของชั้นตะกอนที่ปิดทับมีความหนามาก หรือชั้นเกลืออาจอยู่ในระดับลึกทำให้ไม่สามารถระบุได้ ซึ่งประกอบด้วยหลุมเจาะหมายเลข PQ-8, PQ-10, K-032, K-035, K-038, K-039, K-065, K-067, K-074 และ K-088

ชั้นเกลือหินที่เหมาะสมในเชิงวิศวกรรมสำหรับโพรงกักเก็บก๊าซธรรมชาติสามารถกำหนดโดยการพิจารณาจากความหนาของแต่ละชั้นเกลือหินดังสรุปข้างต้น จากข้อมูลการออกแบบโพรงกักเก็บที่เคยมีการพัฒนาแล้วในต่างประเทศ และจากประสบการณ์ของผู้วิจัยที่ได้ศึกษาและออกแบบโพรงกักเก็บมาแล้วในต่างประเทศ สามารถสรุปเกณฑ์เบื้องต้นได้ว่าความหนาของชั้นเกลือหินที่มีความเหมาะสมควรมากกว่า 250 เมตร และความลึกของชั้นเกลือหินจะต้องมากพอที่จะสามารถบรรจุโพรงโดยที่หลังคาโพรงไม่ควรต่ำกว่า 400 เมตร จากข้อมูลหลุมเจาะจำนวน 194 หลุม ซึ่งได้จำแนกความหนาของชั้นเกลือหินไว้ในตารางที่ 3.2 ถึงตารางที่ 3.9 พบว่ามีเพียงเกลือชั้นล่างเพียงชั้นเดียวที่มีความเหมาะสมในเชิงความหนาและความลึกสำหรับโพรงกักเก็บก๊าซธรรมชาติ ซึ่งเกลือชั้นล่างที่เหมาะสมนี้จะรวมไปถึงโดมเกลือรูปหมอนเกลือที่เป็นชั้นระนาบ และโดมเกลือที่ดันทะลุชั้นหินหรือทะลุเกลือชั้นบนขึ้นมา

3.3.6 การประเมินความลึกของหมวดหินโคกกรวด

การประเมินความลึกของหมวดหินโคกกรวดในแอ่งโคราชและแอ่งสกลนครได้ใช้ข้อมูลจากหลุมเจาะของกรมทรัพยากรธรณีที่พบหมวดหินโคกกรวด และใช้ผลการศึกษานเรนศ สัตยารักษ์ ทรงภพ พลจันทร์ (2533) และ Wongsawat et al. (1992) เข้ามาประกอบ โดยบริเวณที่ไม่มีข้อมูลหลุมเจาะที่พบหมวดหินโคกกรวดจะใช้ข้อมูลจากภาพถ่ายทางอากาศของ Wongsawat et al. (1992) เพื่อทำการกำหนดความลึกของหมวดหินโคกกรวด ร่วมกับข้อมูลจากแผนที่ธรณีวิทยาของประเทศสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาวซึ่งมีพื้นที่ติดกับประเทศไทย (Department of Geology and Mines (DGM), 1990) ในบริเวณที่เป็นโดมเกลือซึ่งไม่พบหมวดหินโคกกรวดจะกำหนดความลึกจากการนำความหนาของเกลือชั้นล่างในหลุมเจาะใกล้เคียงมาบวกกับความหนาของเกลือชั้นล่างที่มีอยู่แล้ว ส่วนในบริเวณใกล้เคียงแอ่งและไม่พบหมวดหินโคกกรวดจะกำหนดความลึกด้วยการบวกความหนาของเกลือชั้นล่างที่มีอยู่ด้วยความหนาเฉลี่ยของเกลือชั้นล่างจากหลุมเจาะที่พบเกลือทั้งสามชั้นในแอ่งโคราชซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 86.3 เมตร เส้นระดับของหมวดหินโคกกรวดในแอ่งโคราชแสดงในรูปที่ 3.3 พบว่าผิวบนของหมวดหินโคกกรวดมีลักษณะเป็นแอ่งกระทะ แต่ภายในแอ่งไม่ราบเรียบ โดยมีจุดลึกที่สุดอยู่ที่ระดับต่ำกว่า 1,250 เมตร ใต้ระดับน้ำทะเล ซึ่งพบอยู่บริเวณกลางแอ่งในเขตอำเภอบรบือ อำเภอเมืองมหาสารคาม และอำเภอนาโพธิ์ จังหวัดมหาสารคาม และจุดสูงสุดอยู่ที่ระดับ 150-250 เมตร จากระดับน้ำทะเล พบอยู่บริเวณขอบแอ่งและปรากฏเป็นหินโผล่ในแผนที่ธรณีวิทยา



รูปที่ 3.3 เส้นระดับของหมวดหินโคกกรวดในแอ่งโคราช (Contour interval = 50)

เส้นระดับของหมวดหินโคกกรวดในแอ่งสกลนครมีลักษณะเป็นแอ่งกระทะ (รูปที่ 3.4) โดยมีจุดที่ลึกที่สุดต่ำกว่า 650 เมตร ใต้ระดับน้ำทะเล พบบริเวณกลางแอ่งในเขตอำเภอวานรนิวาส จังหวัดสกลนคร และจุดสูงสุดอยู่ที่ 100-150 เมตร จากระดับน้ำทะเล พบอยู่บริเวณขอบแอ่งตอนล่างและปรากฏเป็นหินโผล่ในแผนที่ธรณีวิทยา

3.3.7 การประเมินความลึกของเกลือชั้นล่าง

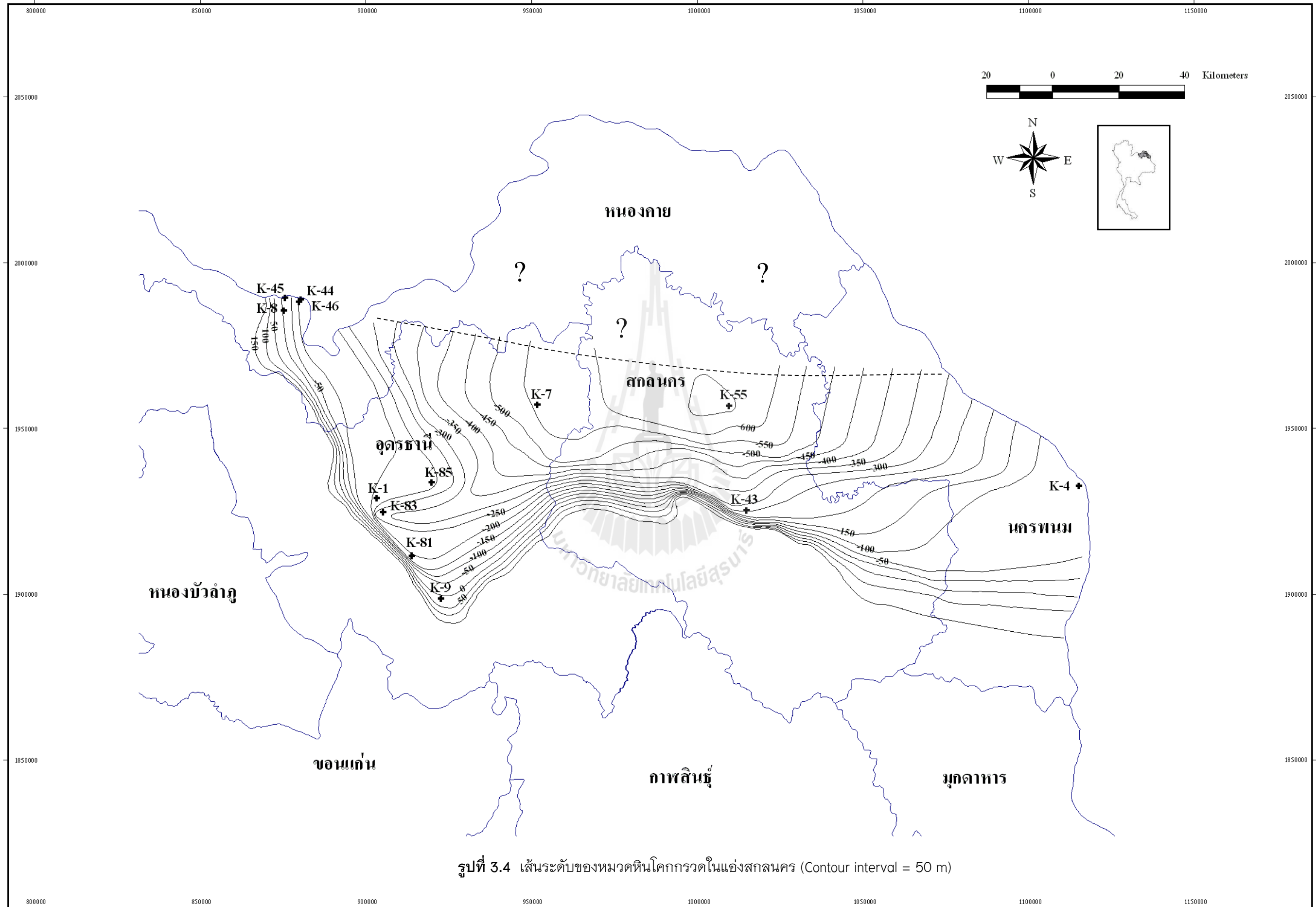
การประเมินความลึกของเกลือชั้นล่างเป็นการศึกษาต่อเนื่องจากการประเมินความลึกของหมวดหินโคกกรวดเพื่อศึกษาการกระจายตัวของชั้นเกลือหิน โดยผลที่ได้จะนำมาใช้ในการประเมินศักยภาพของชั้นเกลือหินที่มีความเหมาะสมสำหรับโพรงกักเก็บ

เส้นระดับของเกลือชั้นล่างในแอ่งโคราชแสดงในรูปที่ 3.5 พบว่าผิวบนของเกลือชั้นล่างมีลักษณะไม่ราบเรียบ มีจุดที่ลึกที่สุดอยู่ต่ำกว่า 700 เมตร ใต้ระดับน้ำทะเล ซึ่งอยู่ตอนกลางของแอ่งโคราชในเขตอำเภอบรบือ จังหวัดมหาสารคาม และจุดสูงสุดอยู่ที่ 100 เมตร สูงกว่าระดับน้ำทะเล บริเวณขอบด้านทิศตะวันตกของแอ่งในเขตอำเภอมัญจาคีรี จังหวัดขอนแก่น อำเภอคอนสวรรค์ อำเภอเมือง และอำเภอจัตุรัส จังหวัดชัยภูมิ

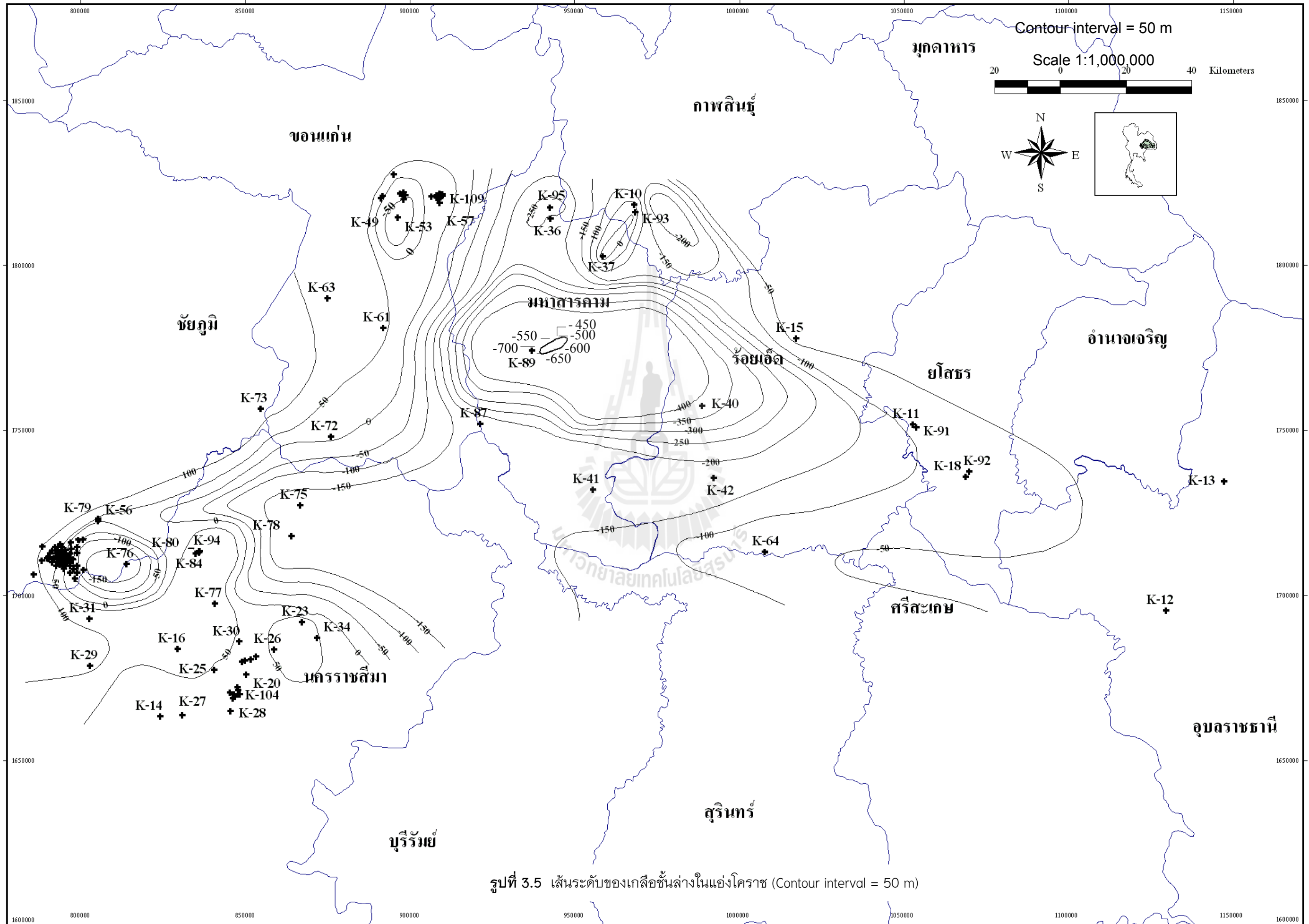
รูปที่ 3.6 แสดงเส้นระดับของเกลือชั้นล่างในแอ่งสกลนคร โดยบริเวณขอบทางด้านทิศตะวันออกจะใช้ข้อมูลร่วมกับลักษณะทางธรณีวิทยาในแผนที่ธรณีวิทยาของประเทศสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว พบว่าเกลือชั้นล่างมีจุดที่ลึกที่สุดต่ำกว่า 500 เมตร ใต้ระดับน้ำทะเล อยู่ในเขตอำเภอบ้านดุง จังหวัดอุดรธานี และบริเวณใกล้เคียงพบโดมเกลือหินซึ่งเป็นจุดที่สูงที่สุดอยู่ที่ 50 เมตร สูงกว่าระดับน้ำทะเล

3.3.8 การประเมินความหนาของเกลือชั้นล่าง

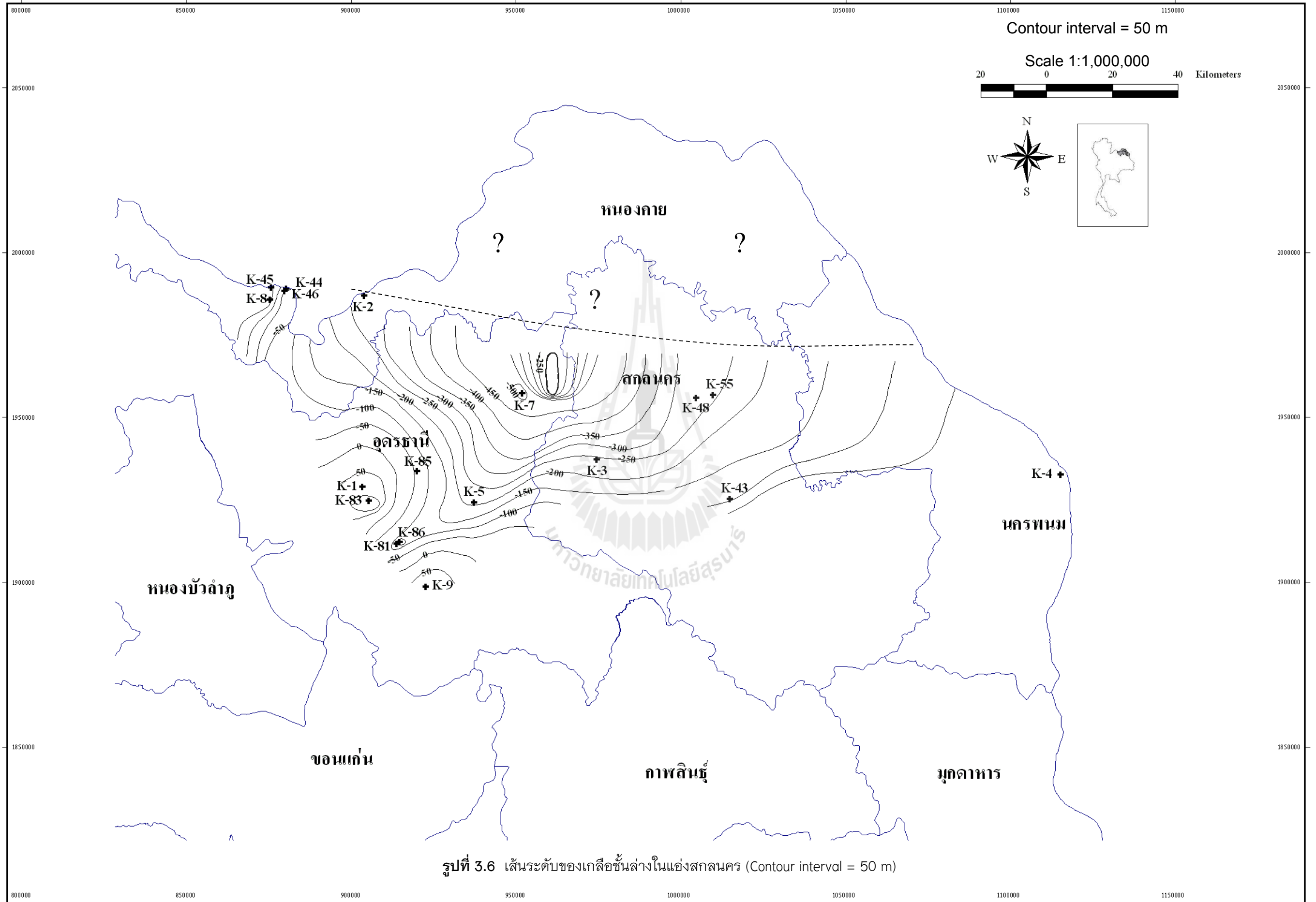
การประเมินความหนาของเกลือชั้นล่างเป็นการศึกษาต่อเนื่องจากการประเมินความลึกของหมวดหินโคกกรวดและเกลือชั้นล่าง การคำนวณผลต่างระหว่างเส้นระดับจะได้เป็นความหนาของเกลือชั้นล่าง ผลการสร้างเส้นชั้นความหนาของเกลือชั้นล่างในแอ่งโคราชแสดงในรูปที่ 3.7 พบว่าบริเวณที่มีความหนาของเกลือชั้นล่างมากที่สุดจะอยู่บริเวณโดมเกลือซึ่งอยู่ตอนกลางของแอ่งโคราชและใกล้กับหลุมเจาะหมายเลข K-89 โดยมีความหนามากกว่า 1,000 เมตร ในเขตอำเภอบรบือ จังหวัดมหาสารคาม และเกลือชั้นล่างที่มีความหนาน้อยที่สุดอยู่ทางด้านทิศตะวันตกในเขตอำเภอมัญจาคีรี จังหวัดขอนแก่น อำเภอคอนสวรรค์ จังหวัดชัยภูมิ โดยมีความหนาน้อยกว่า 50 เมตร



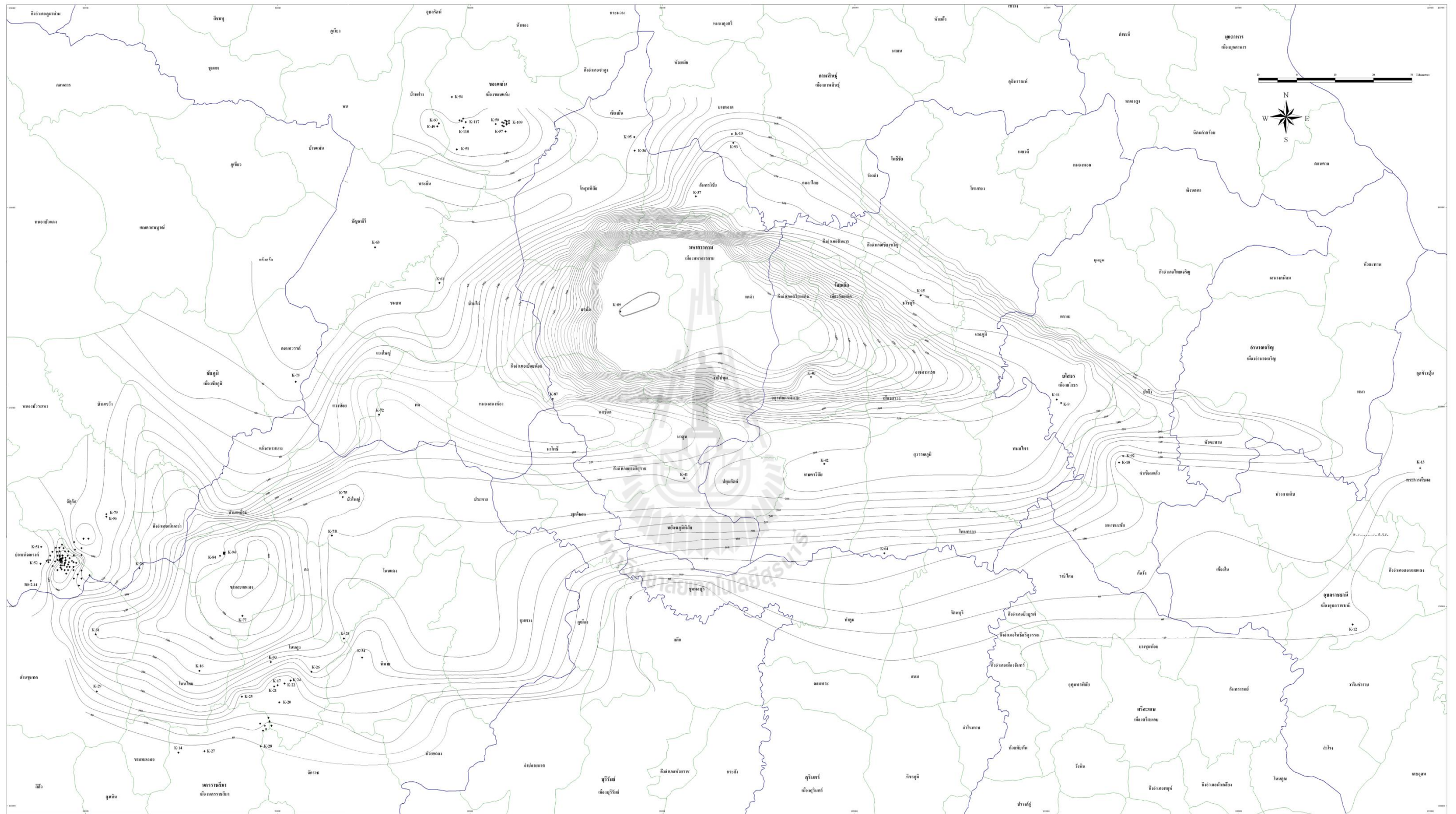
รูปที่ 3.4 เส้นระดับของหมวดหินโคกกรวดในแอ่งสกลนคร (Contour interval = 50 m)



รูปที่ 3.5 เส้นระดับของเกลือชั้นล่างในแอ่งโคราช (Contour interval = 50 m)



รูปที่ 3.6 เส้นระดับของเกลือชั้นล่างในแอ่งสกนนคร (Contour interval = 50 m)



รูปที่ 3.7 ดัชนีแผนที่แสดงเส้นชั้นความหนาของเปลือกชั้นล่างในแอ่งโคราช (Contour interval = 20 m)

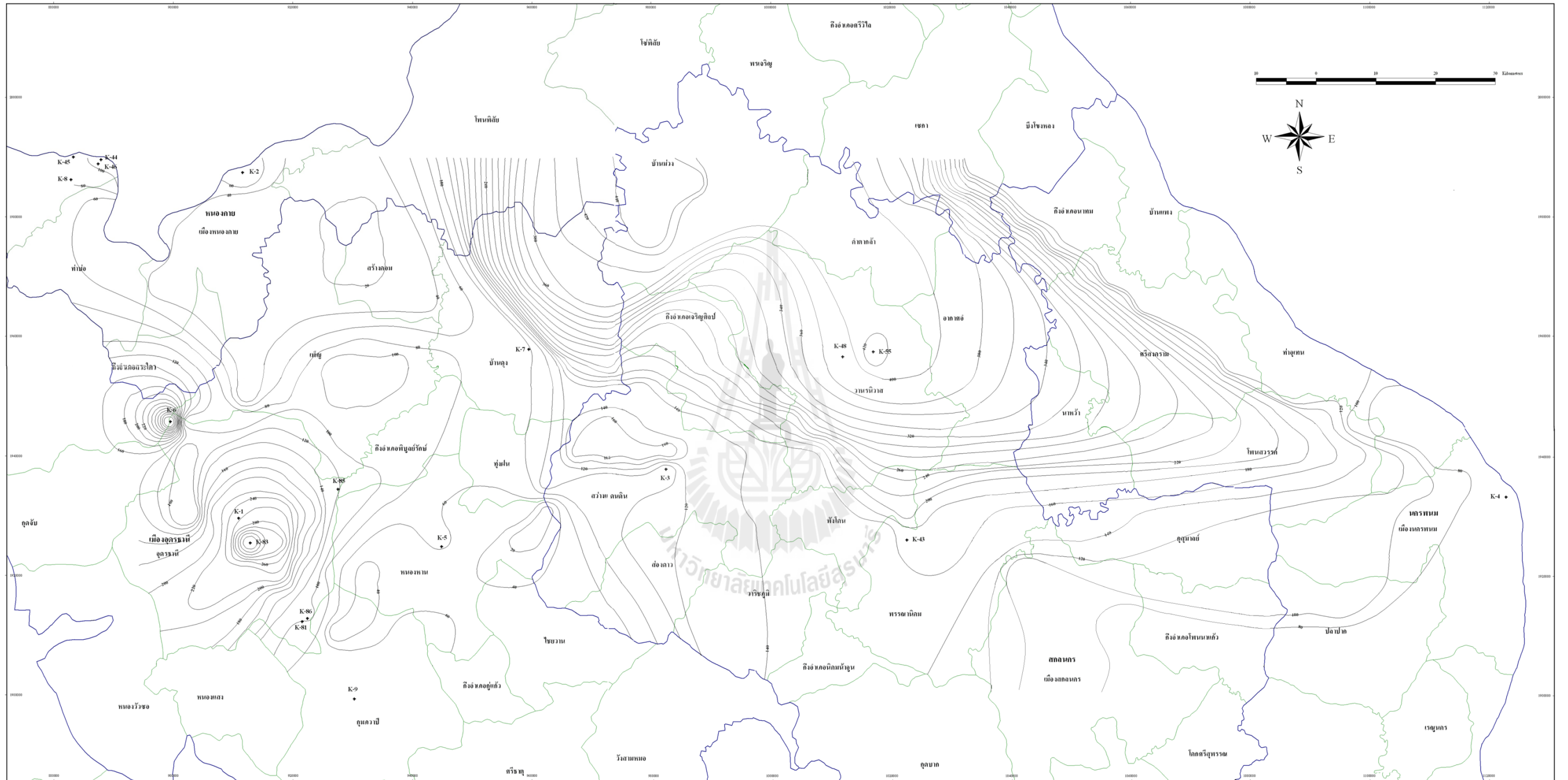
รูปที่ 3.8 แสดงเส้นชั้นความหนาของเกลือชั้นล่างในแอ่งสกลนคร ซึ่งพบว่าความหนาของเกลือชั้นล่างมีค่ามากที่สุดประมาณ 420 เมตร ซึ่งอยู่ในเขตอำเภอบ้านม่วง และอำเภอดงเจริญ จังหวัดสกลนคร บริเวณที่มีความหนาน้อยที่สุดอยู่ทางด้านทิศตะวันตกของพื้นที่ บริเวณอำเภอสร้างคอม และอำเภอเพ็ญ จังหวัดอุดรธานี มีความหนาน้อยกว่า 20 เมตร

3.3.9 สรุปผลการศึกษา

การศึกษารณีวิทยาของเกลือหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือได้อาศัยข้อมูลที่ถูกตีพิมพ์แล้วในลักษณะต่างๆ ซึ่งรวมไปถึงแผนที่ ภาพตัดขวาง รายงานการประชุม และรายงานข้อมูลหลุมเจาะ ผลที่ได้สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) ผลการศึกษาความหนาของชั้นเกลือหินจากข้อมูลหลุมเจาะทั้งแอ่งโคราชและแอ่งสกลนครระบุว่า เกลือชั้นบนและเกลือชั้นกลางมีความหนาไม่เพียงพอสำหรับการก่อสร้างโพรงเพื่อใช้กักเก็บก๊าซธรรมชาติ โดยข้อสรุปนี้ได้อาศัยเกณฑ์เปรียบเทียบขนาดของโพรงและความหนาของชั้นเกลือที่ใช้อยู่ในต่างประเทศ ดังนั้นจึงมีเพียงเกลือชั้นล่างเท่านั้นที่มีความหนาเพียงพอและจะนำมาใช้ในการออกแบบโพรงสำหรับกักเก็บก๊าซธรรมชาติของประเทศไทยต่อไป
- 2) ผลการศึกษาข้อมูลในภาคสนามส่งผลให้คณะผู้วิจัยมีความเข้าใจมากขึ้นเกี่ยวกับลักษณะเกลือหิน การทำเหมืองเกลือแบบละลาย และการดำเนินงานขององค์กรต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งคณะผู้วิจัยได้นำผลมาใช้ประโยชน์ทั้งทางตรงและทางอ้อมในงานวิจัยนี้

การนำเกณฑ์เพื่อใช้จำแนกความน่าเชื่อถือของข้อมูลด้านธรณีวิทยาที่เกี่ยวกับความหนาและความลึกของเกลือชั้นล่างมาใช้จะช่วยแก้ปัญหาเกี่ยวกับความไม่เพียงพอและการกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอของหลุมเจาะในพื้นที่ กล่าวคือ จุดที่มีข้อมูลหลุมเจาะที่เจาะทะลุเกลือหินชั้นล่างจะถูกจำแนกเป็น Measured จุดที่มีข้อมูลหลุมเจาะถึงเกลือหินชั้นล่างแต่ไม่ทะลุจะถูกจำแนกเป็น Indicated และจุดที่ไม่มีข้อมูลหลุมเจาะแต่ความหนาและความลึกของเกลือชั้นล่างได้ประมวลจากข้อมูลใกล้เคียงโดยอาศัยหลักการและกฎเกณฑ์ทางธรณีวิทยาจะถูกจำแนกเป็น Inferred



รูปที่ 3.8 ดัชนีแผนที่แสดงเส้นชั้นความหนาของเกลี้อันล่างแอ่งสกลนคร (Contour interval = 20 m)

บทที่ 4

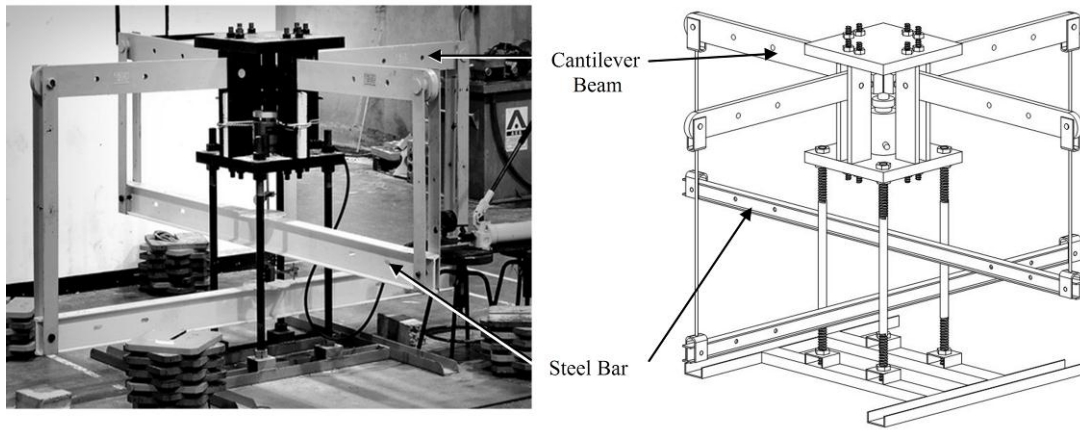
การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

เนื้อหาในบทนี้ได้บรรยายถึงคุณลักษณะของโครงกวดทดสอบในสามแกนจริง (Polyaxial Load Frame) วิธีการทดสอบ และผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการคือแรงกดแบบวัฏจักร (Cyclic loading test) ที่มีความเค้นล้อมรอบ โดยงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM Standards

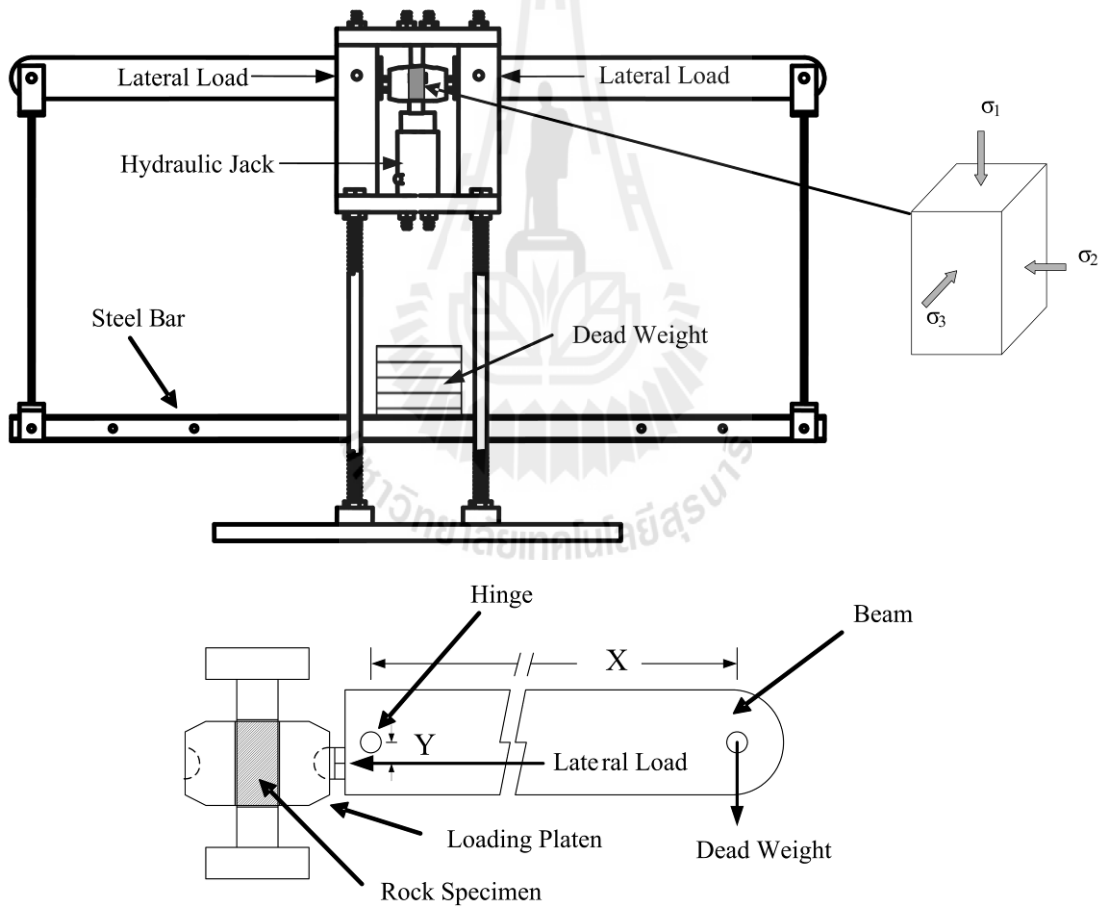
4.1 การเตรียมโครงกวดทดสอบในสามแกนจริง

โครงกวดทดสอบในสามแกนจริงมีปัจจัยพื้นฐานของการออกแบบ 2 ประการ คือ 1) สามารถทดสอบตัวอย่างหินที่มีขนาดเท่ากับหรือใหญ่กว่าแท่งตัวอย่างหินที่ใช้ทดสอบแรงกดสูงสุดในสามแกนแบบดั้งเดิม และ 2) สามารถวัดค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกนหลักได้โดยตรง

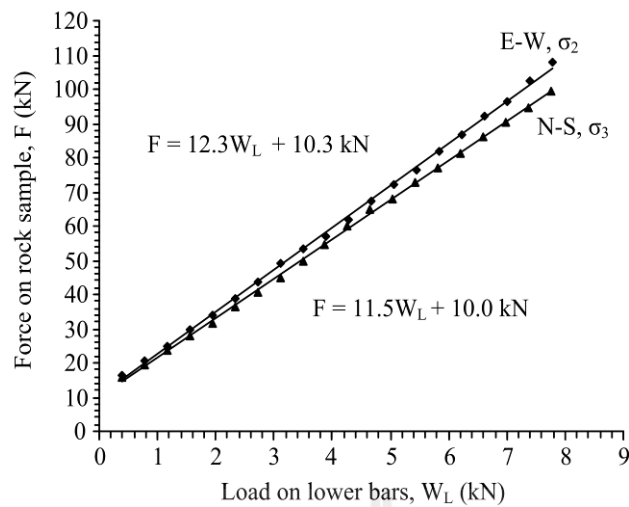
รูปที่ 4.1 แสดงโครงกวดทดสอบในสามแกนจริงที่มีอยู่แล้วจาก Walsri et al. (2009) ซึ่งได้ถูกประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งค่าความเค้นด้านข้างที่กระทำบนตัวอย่างหินในแต่ละด้านจะได้รับแรงที่เกิดขึ้นจากแกนของคานทอดแรง ในส่วนล่างของคานรับตุ่มน้ำหนักจะใช้เหล็กเส้นแขวนตุ่มน้ำหนักเชื่อมต่อระหว่างจุดปลายของคานทั้งสองข้างที่จุดกึ่งกลางของคานรับตุ่มน้ำหนักเพื่อใช้ใส่ตุ่มน้ำหนักในการดึงแกนของคานทอดแรงทั้งสองข้างลงดังแสดงในรูปที่ 4.2 ที่จุดปลายด้านในของคานทอดแรงจะใช้เพลาเชื่อมต่อกับเสายึดคานทอดแรงที่อยู่ในแต่ละด้านของโครงกวดทดสอบ ในขณะที่ทำการทดสอบคานทอดแรงทุกข้างจะถูกปรับให้อยู่ในแนวระนาบ ซึ่งจะส่งผลต่อแรงกดด้านข้างบนตัวอย่างหินที่จุดกึ่งกลางของโครงกวดทดสอบ และได้กำหนดระยะห่างของเหล็กเส้นแขวนตุ่มน้ำหนักที่ใช้แขวนคานรับตุ่มน้ำหนักจากจุดปลายด้านนอกถึงปลายด้านใน อัตราส่วนของแรงจะมีค่าเท่ากับ 12.3 ในทิศตะวันออก-ตะวันตกและ 11.5 เท่าในทิศเหนือ-ใต้ (รูปที่ 4.3) ซึ่งได้ทำการสอบเทียบโดย Electronic load cell อัตราส่วนของแรงที่ได้นี้จะนำมาใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแท่งตัวอย่างด้านข้างด้วยการวัดอัตราการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของแท่งเหล็กทั้งสองที่อยู่ข้างล่าง ส่วนแรงกระทำด้านข้าง (σ_2 และ σ_3) ได้ออกแบบให้สามารถให้ความเค้นมากกว่า 50 MPa และปั๊มไฮดรอลิกเป็นอุปกรณ์ให้ความเค้นกระทำในแนวตั้ง (σ_1) สามารถให้ความเค้นสูงมากกว่า 100 MPa โครงกวดทดสอบสามารถรองรับขนาดของตัวอย่างหินได้ตั้งแต่ $2.5 \times 2.5 \times 2.5 \text{ cm}^3$ ถึง $10 \times 10 \times 20 \text{ cm}^3$ การทดสอบกับแท่งตัวอย่างที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันจะต้องมีการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหัวกดทั้งสองข้างให้เหมาะสม



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



รูปที่ 4.2 องค์ประกอบของโครงกวดทดสอบในสามแกนจริง



รูปที่ 4.3 การสอบเทียบอัตราส่วนของแรงโดย Electronic load cell อัตราส่วนนี้นำไปใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแท่งตัวอย่างหินด้านข้าง

4.2 การทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรที่มีความเค้นล้อมรอบ

4.2.1 วิธีการทดสอบ

การทดสอบแรงกดแบบวัฏจักร (Cyclic loading test) ที่มีความเค้นล้อมรอบมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของแรงกดแบบวัฏจักรต่อพฤติกรรมเชิงเวลา (Time-dependent deformation) ของเกลือหินภายใต้ความเค้นล้อมรอบ การเปลี่ยนแปลงความเค้นกดจะมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับการเปลี่ยนแปลงความเค้นในเกลือหินรอบโพรงเกลือที่ใช้กักเก็บก๊าซธรรมชาติ โดยใช้โครงทดสอบแบบหลายแกน (Polyaxial frame) ในการกดได้มีการให้แรงกดเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างเป็นระบบโดยมีความเค้นเฉลี่ยคงที่ (σ_m) 3 ระดับ คือ 10, 15 และ 20 MPa ในแต่ละการทดสอบความเค้นเฉลี่ยได้มีการผันแปรความเค้นเฉือน (τ_{oct}) จาก 5.0, 8.0, 11.0 ถึง 14.0 MPa การทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรที่มีความเค้นล้อมรอบได้ถูกแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ การทดสอบในสามแกน ($\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$) ที่ความเค้นหลักกลางเท่ากับความเค้นหลักต่ำสุด และการทดสอบในสามแกนจริง ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$) ที่ความเค้นหลักทั้งสามแกนไม่เท่ากันโดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ในขณะที่ทดสอบได้วัดการเปลี่ยนแปลงขนาดของตัวอย่างหินทุกทิศทางเพื่อนำมาคำนวณความเครียดที่เกิดขึ้นในตัวอย่างหิน ผลการทดสอบจะแสดงในรูปความสัมพันธ์ของความเครียดที่เกิดขึ้นในสามแกน ($\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$) โดยแผนภูมิที่ได้จะนำไปคำนวณหรือสอบเทียบค่าคงที่ที่อธิบายพฤติกรรมของหินในเชิงเวลา ซึ่งค่าความเค้นเฉลี่ย (σ_m) และค่าความเค้นในแนวเฉือนในสามมิติ (τ_{oct}) สามารถคำนวณได้จากสมการ

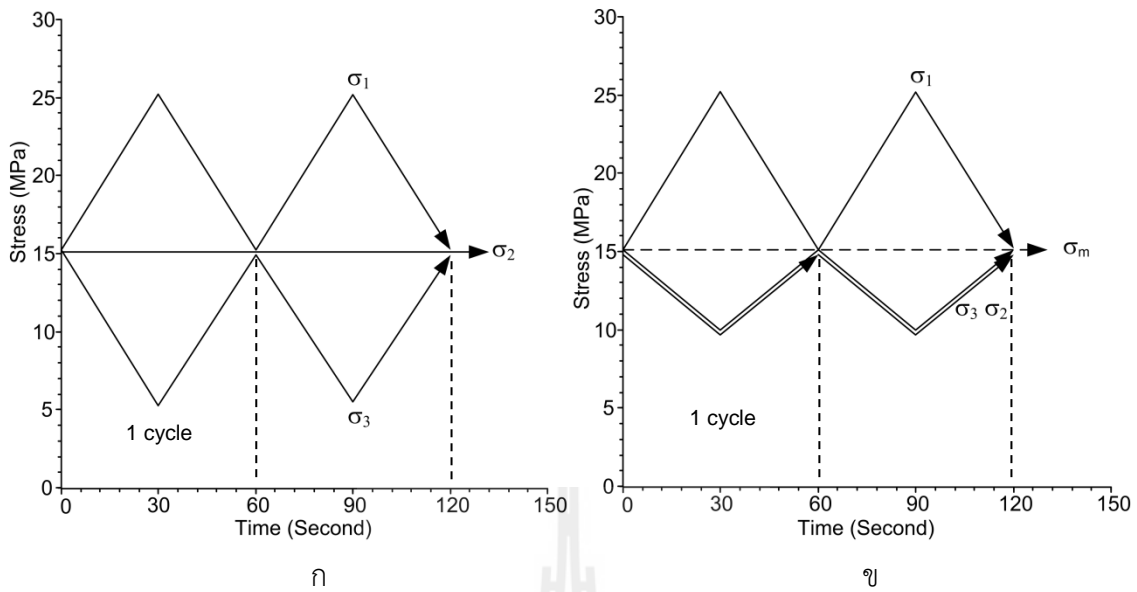
$$\sigma_m = [\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3]/3 \quad (4.1)$$

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

โดยที่ σ_m คือ ความเค้นเฉลี่ย
 τ_{oct} คือ ความเค้นในแนวเฉือน
 σ_1 คือ ความเค้นหลักสูงสุด
 σ_2 คือ ความเค้นหลักกลาง
 σ_3 คือ ความเค้นหลักรอง

การทดสอบตัวอย่างเกลือหินในสามแกนจริง ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$) เริ่มจากการให้แรงกดในสามทิศทางเท่ากัน (Hydrostatic) ซึ่งมีความเค้นเฉลี่ยตามที่ระบุไว้ข้างต้น เพื่อให้ตัวอย่างเกลือหินเข้าสู่สภาวะความเค้นที่เหมือนกับในภาคสนามและทิ้งตัวอย่างไว้ที่ระดับความเค้นนี้เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นลดค่าความเค้นแกนหลักต่ำสุด (σ_3) ในขณะเดียวกันก็ทำการเพิ่มความเค้นหลักสูงสุด (σ_1) โดยความเค้นหลักกลาง (σ_2) คงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับความเค้นเฉลี่ย การเพิ่มความเค้นหลักสูงสุดและการลดความเค้นหลักต่ำสุดจะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ความเค้นเฉลี่ยต้องคงที่ และทำการวัดค่าการเปลี่ยนรูปร่างทั้งสามแกนที่เกิดขึ้น จากนั้นลดค่าความเค้นหลักสูงสุดและเพิ่มค่าความเค้นหลักต่ำสุดให้กลับสู่สภาวะความเค้นสามทิศทางเท่ากันในเวลาที่กำหนดเรียกว่าการทดสอบหนึ่งวัฏจักร โดยที่การทดสอบจะดำเนินการอย่างต่อเนื่อง 1,200 วัฏจักร เป็นเวลา 20 ชั่วโมงต่อหนึ่งตัวอย่าง รูปที่ 4.4ก แสดงการเปลี่ยนแปลงความเค้นหลักทั้งสามแกนบนตัวอย่างเกลือหินขณะที่มีการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรที่ $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$

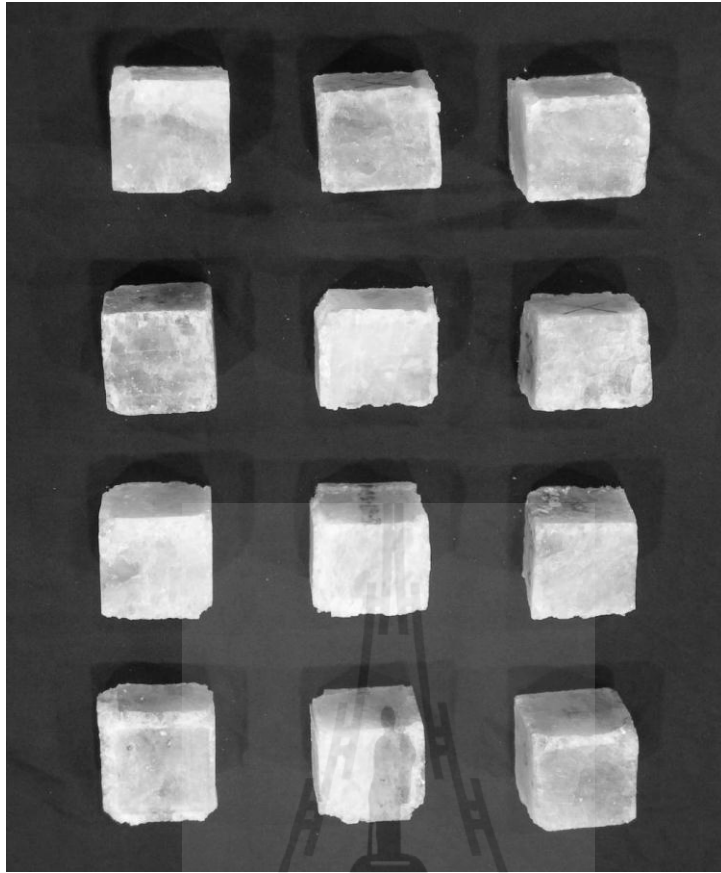
การทดสอบตัวอย่างเกลือหินในสามแกน ($\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$) เริ่มจากการให้แรงกดในสามทิศทางเท่ากันเพื่อให้ตัวอย่างเกลือหินเข้าสู่สภาวะความเค้นเหมือนกับในภาคสนาม จากนั้นลดค่าความเค้นแกนหลักต่ำสุด (σ_3) และค่าความเค้นแกนหลักกลาง (σ_2) ซึ่งการลดลงของความเค้นทั้งสองนี้จะต้องรักษาให้มีความเค้นเท่ากัน ในขณะเดียวกันก็ทำการเพิ่มความเค้นหลักสูงสุด (σ_1) และทำการวัดค่าการเปลี่ยนรูปร่างทั้งสามแกนที่เกิดขึ้น จากนั้นลดค่าความเค้นหลักสูงสุดและเพิ่มค่าความเค้นหลักต่ำสุดให้กลับมาสู่สภาวะความเค้นสามทิศทางเท่ากันในเวลาที่กำหนดเรียกว่าการทดสอบหนึ่งวัฏจักร ทำการทดสอบอย่างต่อเนื่อง 1,200 วัฏจักร เป็นเวลา 20 ชั่วโมงต่อหนึ่งตัวอย่าง รูปที่ 4.4ข แสดงการเปลี่ยนแปลงความเค้นหลักทั้งสามแกน จากการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรที่ $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$



รูปที่ 4.4 วิธีความเค้นในฟังก์ชันของเวลาจากการทดสอบภายใต้ความเค้นเฉลี่ย 15 MPa (ก) วิธีความเค้นในฟังก์ชันของเวลาจากการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรในสามแกนจริงและ (ข) จากการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรในสามแกน

4.2.2 ผลการทดสอบ

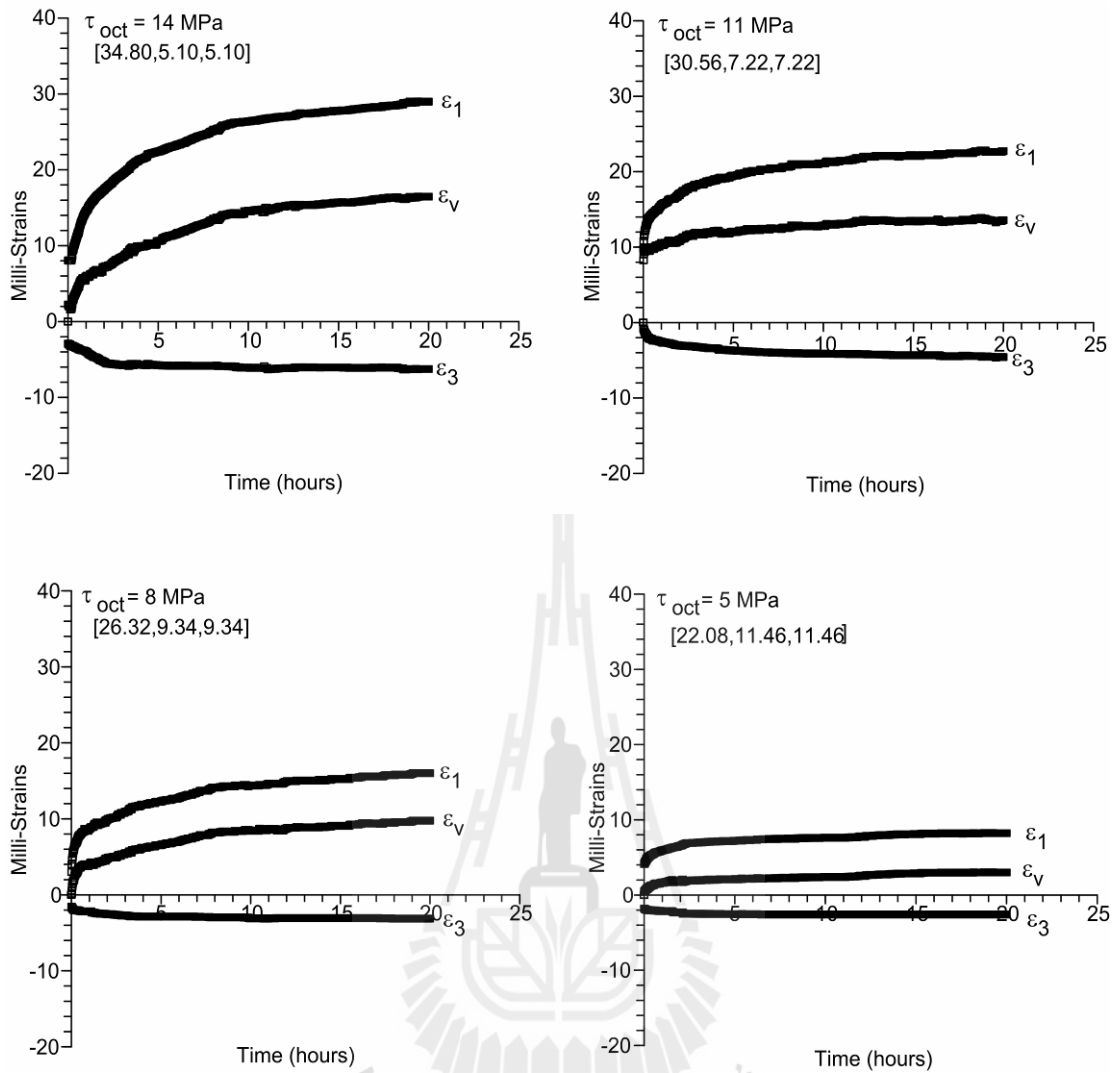
รูปที่ 4.5 แสดงแท่งตัวอย่างเกลือหินบางส่วนหลังจากการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรที่มีความเค้นล้อมรอบ ซึ่งตัวอย่างเกลือหินบางส่วนเกิดการยุบตัวและมีรอยแตกเล็กน้อยตัดผ่านตามแนวของผลึก ตารางที่ 4.1 สรุปค่าคุณลักษณะของความเค้นบนตัวอย่างเกลือหินภายใต้การทดสอบแรงกดแบบวัฏจักร ค่าของความเครียดทั้งสามทิศทางที่ได้ทำการตรวจวัดในเชิงเวลาของการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรได้นำมาสร้างความสัมพันธ์ความเครียดแกนหลักสูงสุด (ϵ_1) ความเครียดแกนหลักกลาง (ϵ_2) และความเครียดแกนหลักต่ำสุด (ϵ_3) ในฟังก์ชันของเวลา โดยค่าความเค้น τ_{oct} และ $[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]$ อยู่ในระดับที่ต่างกันดังรูปที่ 4.6 ถึงรูปที่ 4.13 จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนรูปตามเวลาภายใต้แรงกดคงที่ของเกลือหินปรากฏเป็น 3 ช่วง คือ 1) เมื่อให้แรงกดในช่วงแรกอย่างทันทีทันใด จะทำให้ความเครียดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีค่าเท่ากับความเครียดที่ได้จากการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น (Instantaneous strain) 2) ช่วงที่อัตราความเครียดเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient phase) และ 3) ช่วงที่อัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาคงที่ (Steady-state phase) เมื่อนำเอาความเค้นเพิ่มเข้าไปในช่วงอัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาคงที่ (Steady-state phase) จะทำให้เกิดความเครียดเชิงพลาสติกที่ได้จากการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Permanent strain) จากผลการทดสอบยังสามารถระบุได้ว่าเมื่อความเค้นเฉือนบนตัวอย่างเพิ่มขึ้นความเครียดเฉือนที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นด้วย



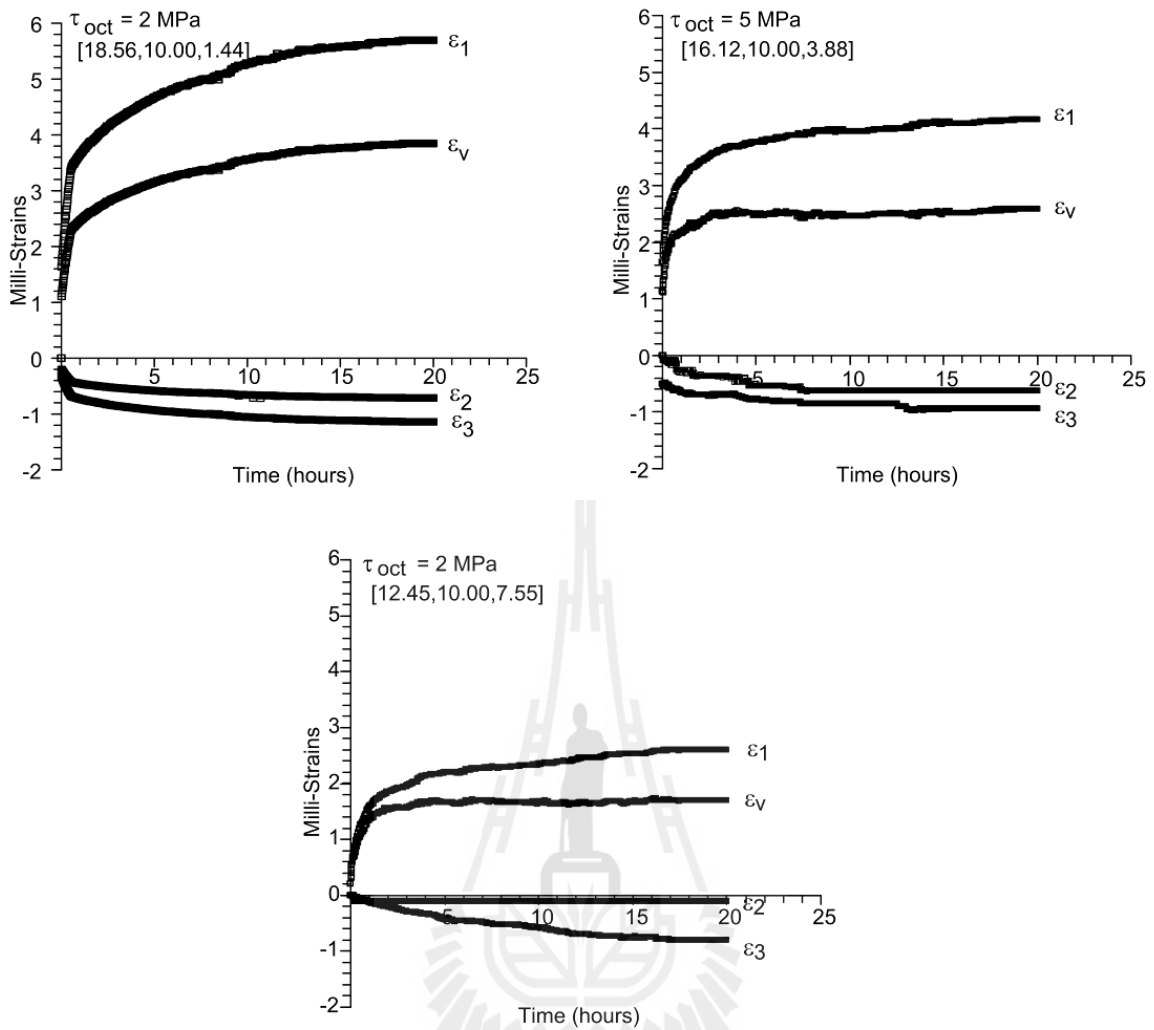
รูปที่ 4.5 ตัวอย่างเกล็ดหินบางส่วนหลังจากการทดสอบแรงกดแบบวงจักรที่มีความดันล้อมรอบ

ตารางที่ 4.1 คุณลักษณะของความเค้นบนตัวอย่างเกลือหินจากการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักร

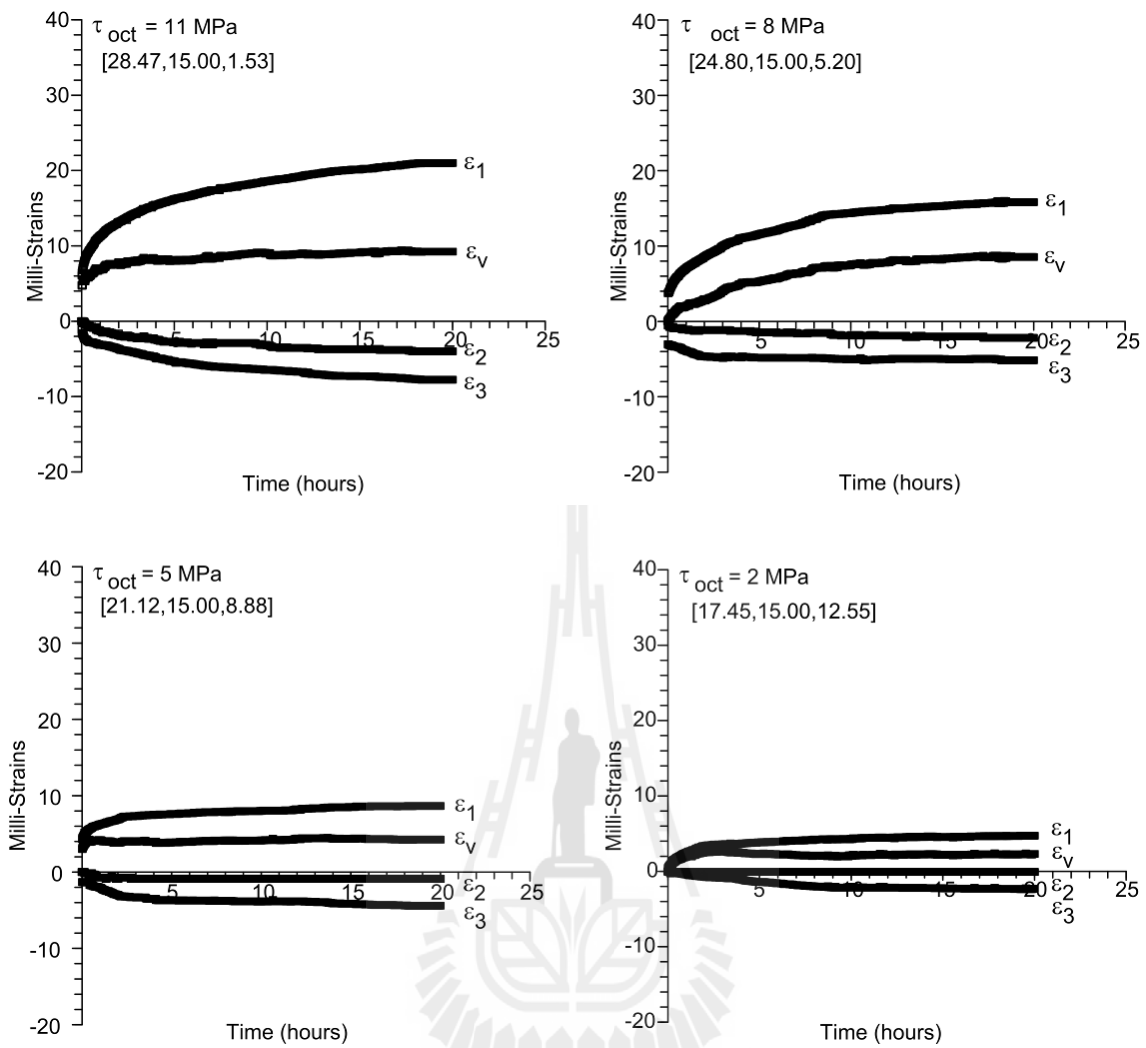
| Test conditions $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ | σ_1 (MPa) | σ_2 (MPa) | σ_3 (MPa) | τ_{oct} (MPa) |
|---|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|
| $\sigma_m = 20 \text{ MPa}$ $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ | 37.2 | 20 | 2.8 | 14.0 |
| | 33.5 | | 6.5 | 11.0 |
| | 29.8 | | 10.2 | 8.0 |
| | 26.2 | | 13.8 | 5.0 |
| $\sigma_m = 15 \text{ MPa}$ $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ | 28.5 | 15 | 1.5 | 11.0 |
| | 24.8 | | 5.2 | 8.0 |
| | 21.2 | | 8.8 | 5.0 |
| | 17.5 | | 12.5 | 2.0 |
| $\sigma_m = 10 \text{ MPa}$ $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ | 18.6 | 10 | 1.4 | 7.0 |
| | 16.1 | | 3.88 | 5.0 |
| | 12.4 | | 7.55 | 2.0 |
| $\sigma_m = 15 \text{ MPa}$ $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$ | 34.8 | 5.1 | 5.1 | 14.0 |
| | 30.5 | 7.2 | 7.2 | 11.0 |
| | 26.3 | 9.3 | 9.3 | 8.0 |
| | 22.1 | 11.4 | 11.4 | 5.0 |



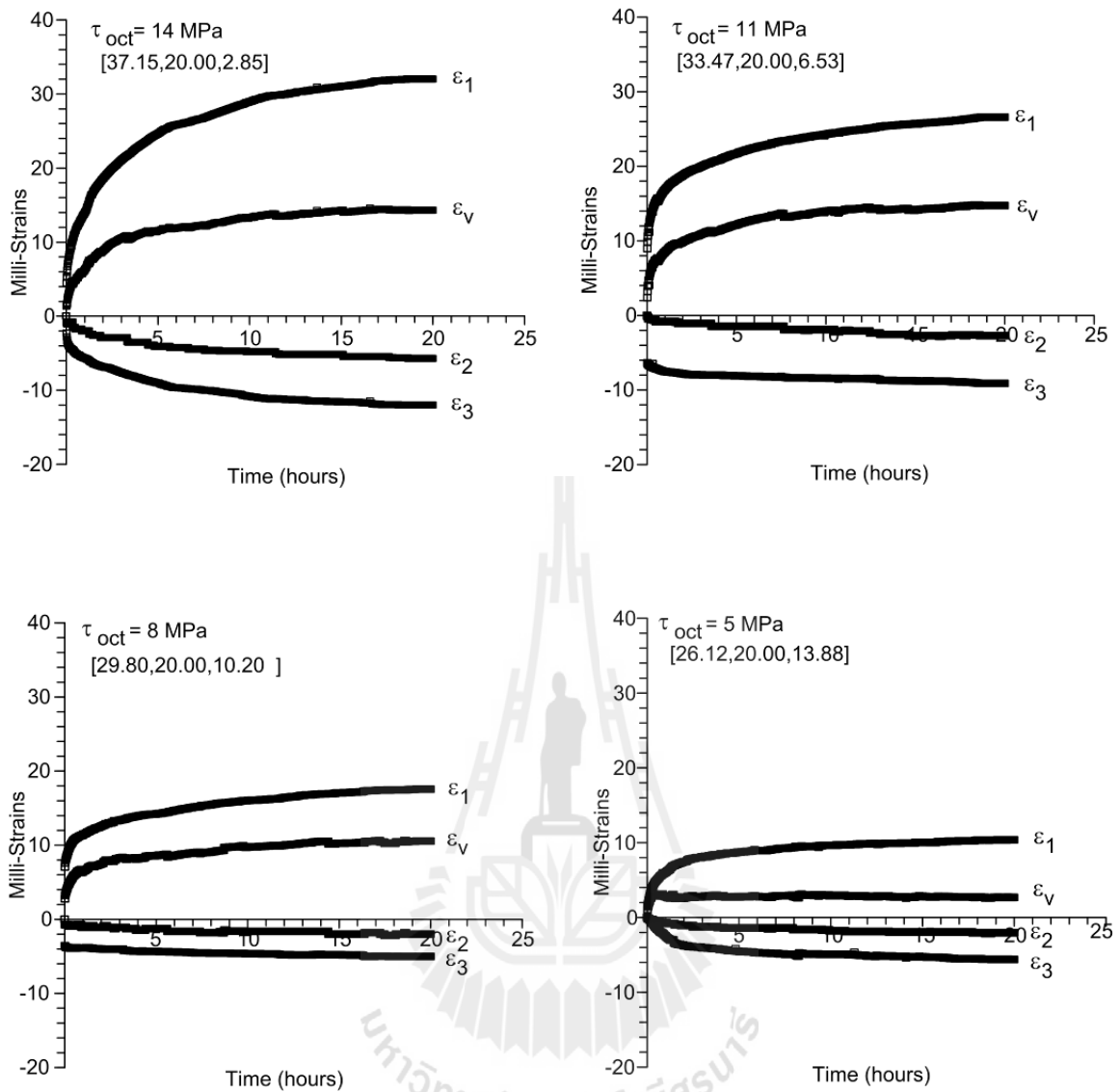
รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรในสถานะสามแกน ($\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$) ความเค้นเครียดในแนวแกน (ϵ_1) และในแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง (ϵ_2, ϵ_3) แสดงในฟังก์ชันของเวลา โดยมีค่าความเค้น τ_{oct} และ $[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]$ ในระดับต่างกัน



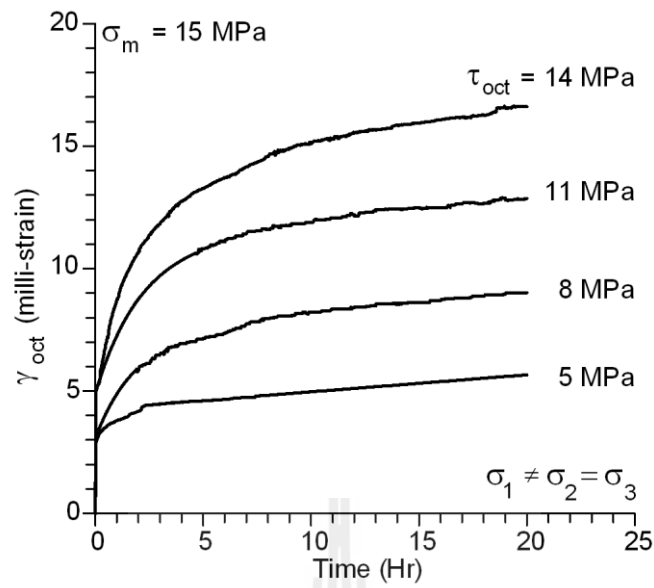
รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบแรงกดแบบวิภูจักรในสถานะสามแกนจริง ($\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$) ที่ความเค้นเฉื่อยเท่ากับ 10 MPa ความเครียดในแนวแกน (ϵ_1) และในแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง (ϵ_2, ϵ_3) แสดงในฟังก์ชันของเวลา โดยมีค่าความเค้น τ_{oct} และ $[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]$ ในระดับต่างกัน



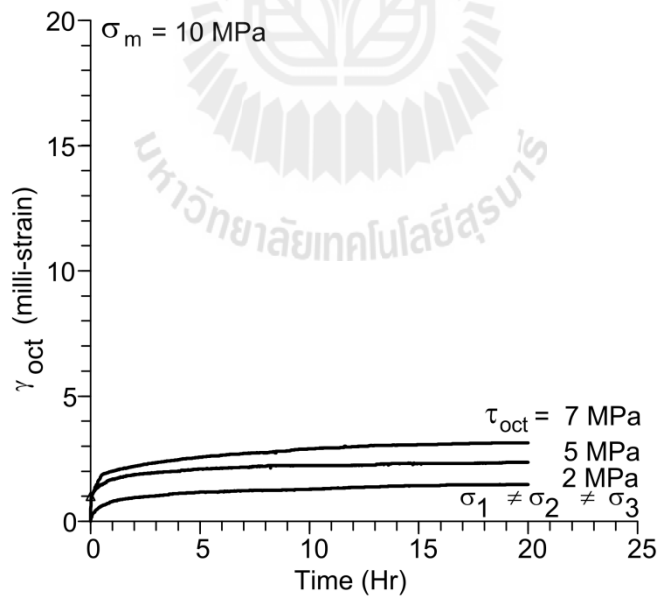
รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบแรงกดแบบวงจักรในสภาวะสามแกนจริง ($\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$) ที่ความเค้นเฉื่อยเท่ากับ 15 MPa ความเค้นในแนวแกน (ϵ_1) และในแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง (ϵ_2 , ϵ_3) แสดงในฟังก์ชันของเวลา โดยมีค่าความเค้น τ_{oct} และ $[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]$ ในระดับต่างกัน



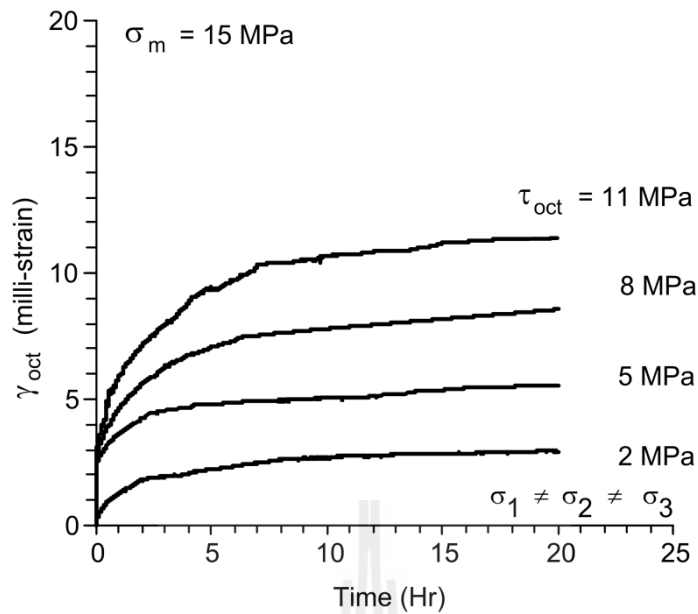
รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรในสถานะสามแกนจริง ($\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$) ที่ความเค้นเฉื่อยเท่ากับ 20 MPa ความเค้นดัดในแนวแกน (ϵ_1) และในแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง (ϵ_2 , ϵ_3) แสดงในฟังก์ชันของเวลา โดยมีค่าความเค้น τ_{oct} และ $[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]$ ในระดับต่างกัน



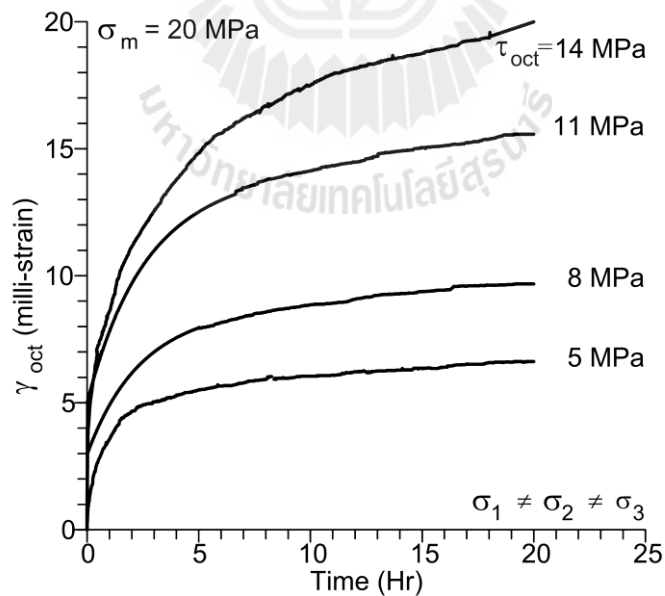
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ความเครียดในแนวเฉือนเชิงสามมิติ (γ_{oct}) ในฟังก์ชันของเวลาภายใต้สภาวะความเค้นกดในสามแกนและความเค้นเฉี่ยเท่ากับ 15 MPa



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ความเครียดในแนวเฉือนเชิงสามมิติ (γ_{oct}) ในฟังก์ชันของเวลาภายใต้สภาวะความเค้นกดในสามแกนจริงและความเค้นเฉี่ยเท่ากับ 10 MPa



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ความเครียดในแนวเฉือนเชิงสามมิติ (γ_{oct}) ในฟังก์ชันของเวลาภายใต้สภาวะความเค้นกดในสามแกนจริงและความเค้นเฉื่อยเท่ากับ 15 MPa



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ความเครียดในแนวเฉือนเชิงสามมิติ (γ_{oct}) ในฟังก์ชันของเวลาภายใต้สภาวะความเค้นกดในสามแกนจริงและความเค้นเฉื่อยเท่ากับ 20 MPa

บทที่ 5

การวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรที่มีความเค้นล้อมรอบ

พฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปร่างในเชิงเวลา (Creep) ของเกลือหินภายใต้ความเค้นกดในสามแกนที่มีค่าไม่เท่ากัน ได้ถูกนำมาวิเคราะห์โดยใช้ความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ขั้นสูงของ Jaeger and Cook (1979) ซึ่งอยู่บนพื้นฐานแบบจำลองของ Burgers รายละเอียดและขั้นตอนของการวิเคราะห์ได้เสนอดังต่อไปนี้

การสอบเทียบผลการทดสอบ

ผลที่ได้จากการทดสอบถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อใช้ในการหาพฤติกรรมของตัวอย่างเกลือหินภายใต้การให้ความเค้นในสามแกนจริงที่ขึ้นกับเวลา ผลลัพธ์ที่ได้จะนำไปสอบเทียบ (Calibrate) เพื่อให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติการเปลี่ยนรูปร่างเชิงเวลา (Creep) ที่เกี่ยวข้องกับความหนืดเชิงยืดหยุ่น (Visco-elastic) และเชิงพลาสติก (Visco-plastic) ของเกลือหิน สมการเชิงคณิตศาสตร์ของ Jaeger and Cook (1979) ได้ถูกนำมาพัฒนาให้เป็นสมการความหนืดเชิงยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง (Linear visco-elastic) เพื่อใช้ในการสอบเทียบค่าคงที่ให้อยู่บนพื้นฐานแบบจำลองของ Burgers โดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ขั้นสูงในรูปแบบ Laplace transformation ทำให้ได้สมการความหนืดเชิงยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ในรูปของความเครียดในแนวเฉือน (γ_{oct}) ในฟังก์ชันของเวลาดังสมการ

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

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

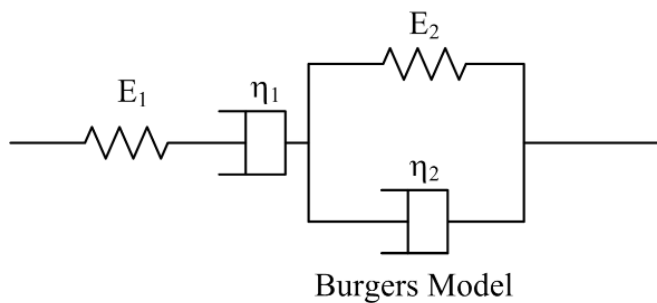
ค่าปัจจัยของ Lode, μ ใช้อธิบายสภาวะของความเค้นที่ให้กับตัวอย่างจากสภาวะความเค้นกดในสามแกนถึงสภาวะความเค้นกดในสามแกนจริง โดยค่าปัจจัยของ Lode สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\mu = - \left[\frac{2\sigma_2 - \sigma_3 - \sigma_1}{\sigma_1 - \sigma_3} \right] \quad (5.2)$$

โดยที่ σ_1 คือ ความเค้นหลักสูงสุด
 σ_2 คือ ความเค้นหลักกลาง
 σ_3 คือ ความเค้นหลักต่ำสุด

รูปที่ 5.1 แสดงองค์ประกอบแบบจำลองของ Burgers ซึ่งประกอบด้วยค่าคงที่ E_1 , E_2 , η_1 และ η_2 ตารางที่ 5.1 สรุปผลที่ได้จากการสอบเทียบค่าคงที่จากแบบจำลองของ Burgers การทดสอบแรงกดแบบวิญจักรที่มีความเค้นล้อมรอบ ตารางดังกล่าวได้แสดงรูปแบบของการทดสอบ ค่าความเค้นในแนวเฉือน ค่าคงที่ของ Burgers และค่าปัจจัยของ Lode รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ของชุดค่าคงที่จากการสอบเทียบด้วยแบบจำลองของ Burgers ในฟังก์ชันค่าปัจจัยของ Lode

ผลจากการสอบเทียบระบุว่าค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E_1) ที่วัดได้จากการทดสอบแรงกดแบบวิญจักรในสามแกนและในสามแกนจริงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบการคืบในสามแกนและในสามแกนจริงมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีพฤติกรรมที่ไม่ขึ้นกับการให้แรงกดแบบวิญจักรและความเค้นหลักกลาง (σ_2) ค่าความหนืดเชิงยืดหยุ่น (E_2 , η_2) ที่ได้รับการทดสอบแรงกดแบบวิญจักรในสามแกนและในสามแกนจริงเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบการคืบในสามแกนและในสามแกนจริงมีค่าใกล้เคียงกัน ความหนืดเชิงพลาสติก (η_1) ที่ได้รับการทดสอบแรงกดแบบวิญจักรมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบการคืบประมาณ 10 เท่า และค่าที่ได้จากสภาวะความเค้นในสามแกนจะมีค่าต่ำกว่าสภาวะความเค้นในสามแกนจริง ซึ่งหมายความว่า การกดแบบวิญจักรจะส่งผลให้เกลือหินเปลี่ยนรูปร่างในเชิงเวลาได้มากกว่าการกดแบบสถิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเปลี่ยนแปลงในสภาวะ steady-state

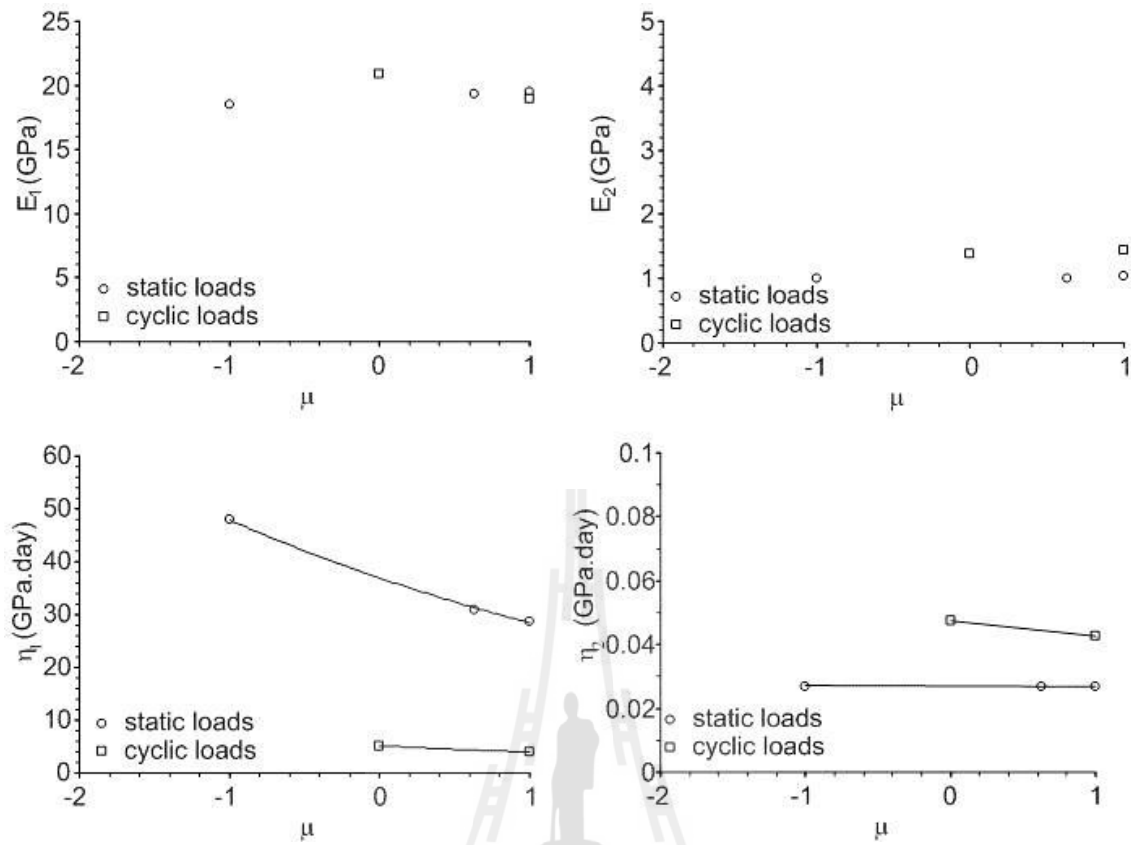


รูปที่ 5.1 องค์ประกอบแบบจำลองของ Burgers

ตารางที่ 5.1 สรุปผลการสอบเทียบค่าคงที่จากการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรที่มีความดัน
ล้อมรอบ

| Test conditions $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ | τ_{oct} (MPa) | E_1 (GPa) | E_2 (GPa) | η_1 (GPa.day) | η_2 (GPa.day) | μ |
|---|-----------------------|----------------|----------------|-----------------------|-----------------------|-------|
| $\sigma_m = 20$ MPa | 14.0 | 20.1 | 1.35 | 1.69 | 0.050 | 0 |
| | 11.0 | 21.2 | 1.10 | 2.99 | 0.035 | 0 |
| | 8.0 | 22.1 | 1.30 | 2.69 | 0.050 | 0 |
| | 5.0 | 18.9 | 1.05 | 2.49 | 0.040 | 0 |
| $\sigma_m = 15$ MPa | 21.3 | 21.3 | 1.80 | 4.90 | 0.050 | 0 |
| | 20.4 | 20.4 | 1.40 | 5.20 | 0.055 | 0 |
| | 21.5 | 21.5 | 1.15 | 5.26 | 0.045 | 0 |
| | 20.2 | 20.2 | 1.20 | 5.50 | 0.040 | 0 |
| $\sigma_m = 10$ MPa | 7.0 | 19.1 | 4.00 | 3.50 | 0.040 | 0 |
| | 5.0 | 20.6 | 3.50 | 2.70 | 0.040 | 0 |
| | 2.0 | 20.2 | 2.50 | 2.00 | 0.050 | 0 |

| Test conditions $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$ | τ_{oct} (MPa) | E_1 (GPa) | E_2 (GPa) | η_1 (GPa.day) | η_2 (GPa.day) | μ |
|--|-----------------------|----------------|----------------|-----------------------|-----------------------|-------|
| $\sigma_m = 15$ MPa | 14.0 | 20.2 | 1.50 | 4.40 | 0.050 | 1 |
| | 11.0 | 17.4 | 1.30 | 4.30 | 0.050 | 1 |
| | 8.0 | 18.5 | 1.50 | 3.78 | 0.040 | 1 |
| | 5.0 | 19.7 | 1.45 | 3.30 | 0.030 | 1 |



รูปที่ 5.2 ชุดค่าคงที่จากการสอบเทียบด้วยแบบจำลองของ Burgers แสดงในฟังก์ชันค่าปัจจัยของ Lode

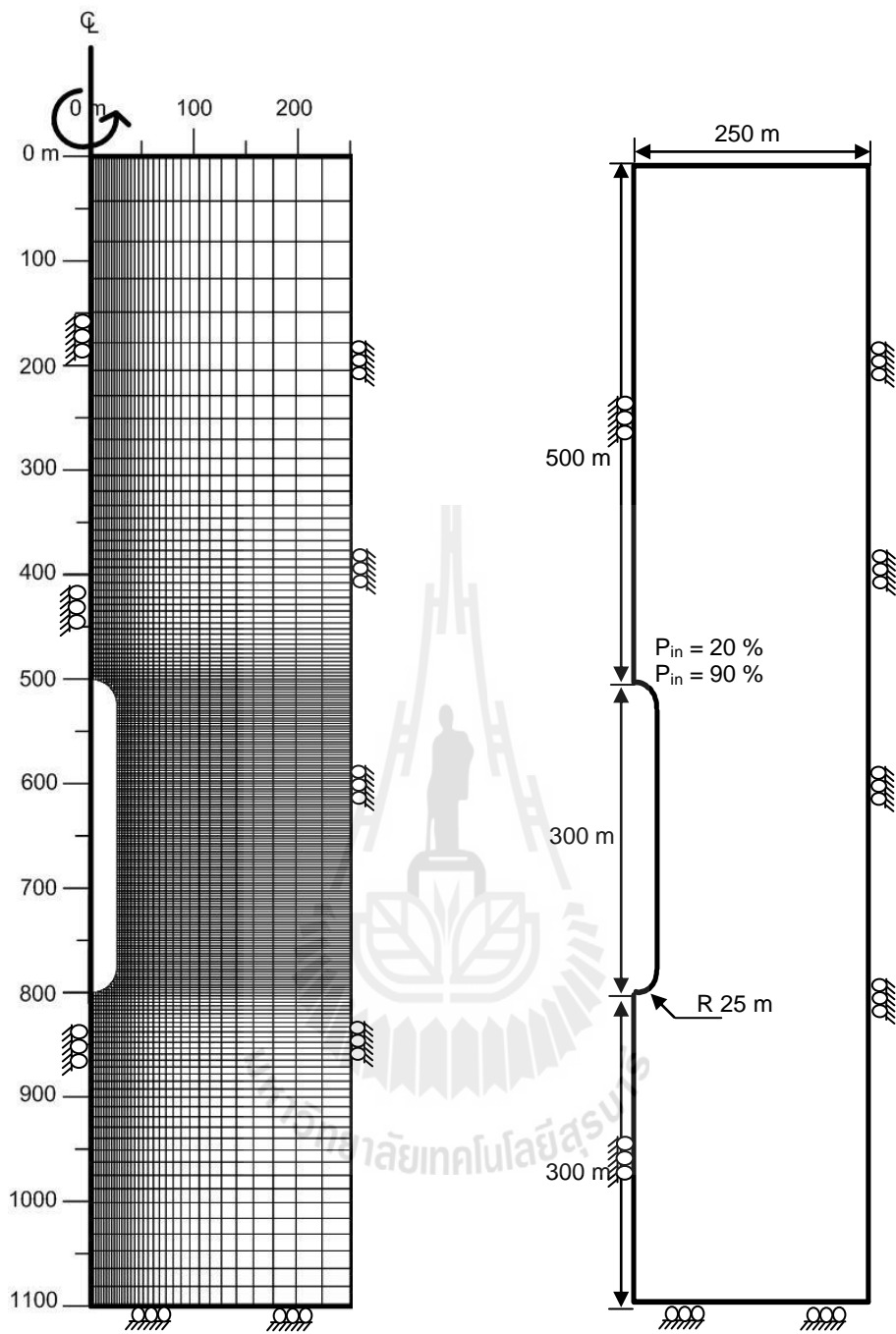
บทที่ 6

การวิเคราะห์โพรงกักเก็บด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

จุดประสงค์ของการจำลองโพรงกักเก็บคือ เพื่อศึกษาพฤติกรรมและเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์ของชั้นเกลือหินที่อยู่รอบโพรงกักเก็บแรงดัน ซึ่งรวมไปถึงการคำนวณหาการหดตัวของโพรง ความเค้นเฉือน และความเครียดเฉือน รวมทั้งความเค้นและความเครียดสูงสุด ที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมและเสถียรภาพของโพรงในช่วงดำเนินการด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (FLAC 4.0)

6.1 คุณสมบัติของแบบจำลอง

โปรแกรม FLAC (Finite Difference) ได้นำมาใช้ในการจำลองโพรงกักเก็บในชั้นเกลือหิน โดยการสร้างแบบจำลองได้มีการจำลองลักษณะของโพรงเกลือเป็นแนวสมมาตร (Axis-symmetry planes) คือ สมมาตรในแนวตั้งตามแกนของโพรง ดังนั้น การจำลองความเค้นและความเครียดจึงทำเพียงแค่ 1/2 ของโพรงเกลือทั้งหมด ที่ตำแหน่งแกนกลางของโพรงซึ่งจะกำหนดเป็นขอบเขตทางด้านซ้ายและกำหนดไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ด้านข้าง ขอบเขตทางด้านขวามีระยะห่างจากแกนกลางของโพรงเท่ากับ 250 เมตร (10 เท่าของรัศมีโพรง) และกำหนดไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ด้านข้าง ส่วนขอบเขตด้านล่างจะถูกกำหนดไม่ให้เกิดเคลื่อนที่ในแนวตั้ง และขอบเขตด้านบนจะปล่อยให้มีการยุบตัวอย่างอิสระ ซึ่งหลังคาโพรงเกลืออยู่ที่ระดับความลึก 500 เมตร โดยมีรัศมีของโพรง 25 เมตร โพรงสูง 300 เมตร และมีช่อง (Element) ที่บริเวณหลังคาโพรงเท่ากับ 18 ช่อง บริเวณผนังโพรง 100 ช่อง และบริเวณพื้นโพรง 18 ช่อง ดังแสดงในรูปที่ 6.1 สภาวะความเค้นที่แท้จริงในภาคสนาม (In-situ stress) ได้ถูกนำมาใช้สำหรับการให้ความเค้นที่ระดับความลึก 500 เมตร ซึ่งมีค่าความเค้นเท่ากับ 10.3 MPa และได้จำลองความเค้นภายในโพรง (Internal pressure) ให้มีค่าเท่ากับ 20% และ 90% ของความเค้นที่หลังคาโพรง โดยจำลองโพรงที่ความสูง 300 เมตร เพียงรูปร่างเดียวซึ่งเป็นรูปร่างที่ใหญ่ที่สุด เพราะถ้าโพรงขนาดใหญ่ที่สุดมีเสถียรภาพดี โพรงขนาดเล็กก็จะมีเสถียรภาพดีตามไปด้วย และจะสมมุติให้เกลือหินอยู่ที่ผิวดินเนื่องจากเป็นกรณีที่เลวร้ายที่สุด การจำลองจะใช้คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินที่ได้จากการสอบเทียบ 3 รูปแบบ คือ การทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรในสามแกน การทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรในสามแกนจริง และการทดสอบการคืบในสามแกน (ดั้งเดิม) ดังแสดงในตารางที่ 6.1



รูปที่ 6.1 โครงข่ายแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (FLAC) ที่สร้างขึ้นเพื่อจำลองโพรงในชั้นเกลือหิน

ตารางที่ 6.1 คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินที่ใช้ในการวิเคราะห์โพรงกักเก็บด้วย
แบบจำลอง

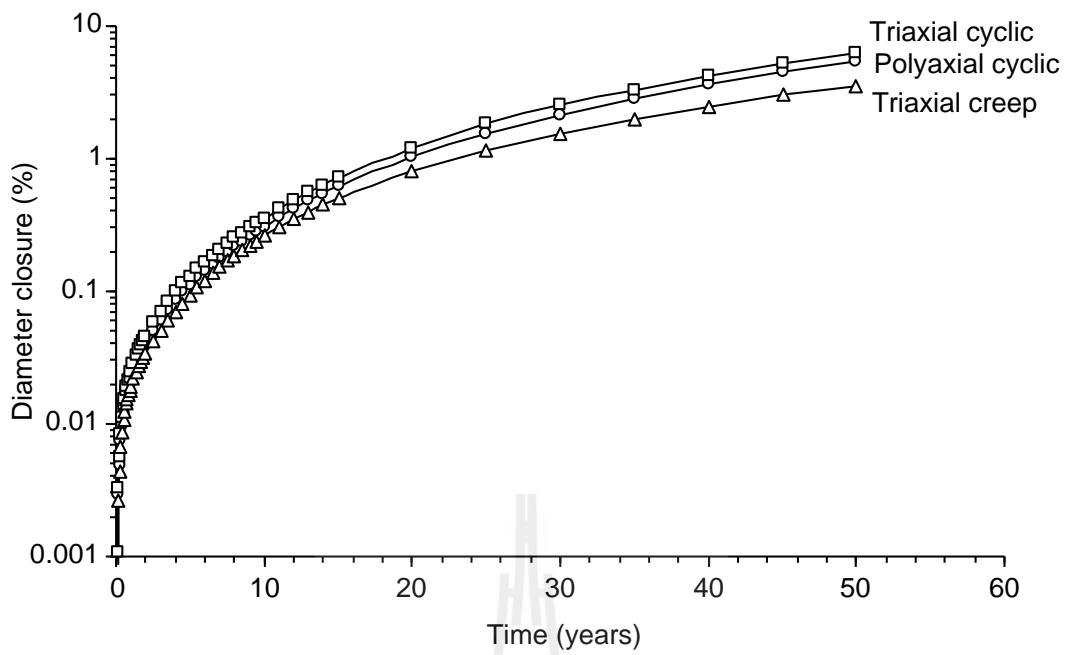
| Parameters | 1* | 2* | 3* |
|---|-------|-------|-------|
| Elastic modulus, E (GPa) | 21.5 | 21.5 | 21.5 |
| Possion' ratio, ν | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| Friction angle, ϕ (Degrees) | 50.0 | 50.0 | 50.0 |
| Cohesion, c (MPa) | 5.0 | 5.0 | 5.0 |
| Density, ρ (g/cc) | 2.2 | 2.2 | 2.2 |
| Internal pressures (MPa) | 3.0 | 3.0 | 3.0 |
| Spring constant in visco-elastic phase, E_2 (GPa) | 1.43 | 1.38 | 1.03 |
| Visco-plastic coefficient in steady-state phase, η_1 (GPa.Day) | 3.94 | 5.21 | 28.75 |
| Visco-elastic coefficient in transient phase, η_2 (GPa.Day). | 0.042 | 0.047 | 0.026 |

1* = triaxial cyclic loading tests 2* = true triaxial cyclic loading tests

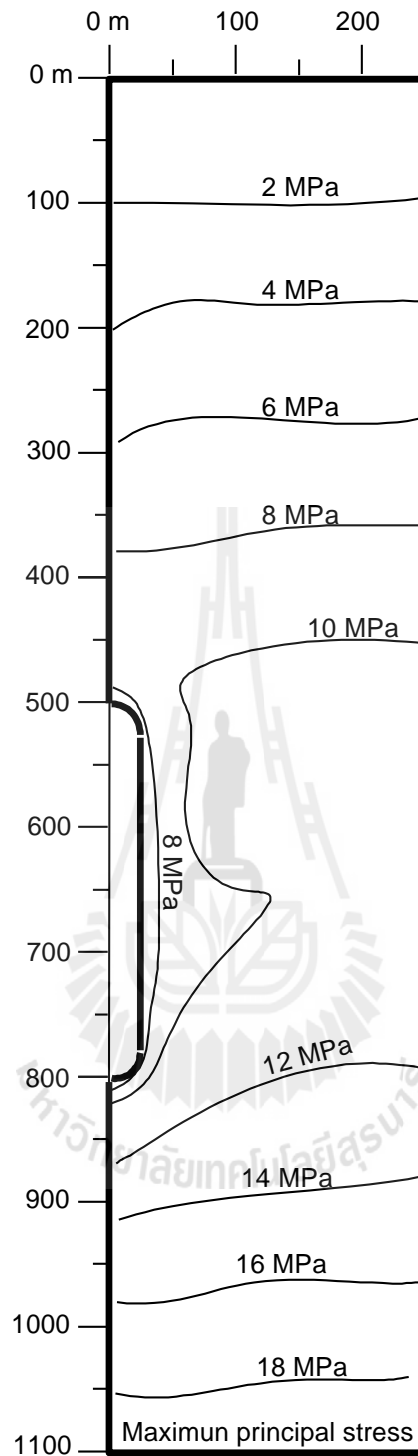
3* = triaxial creep tests

6.2 ผลการจำลอง

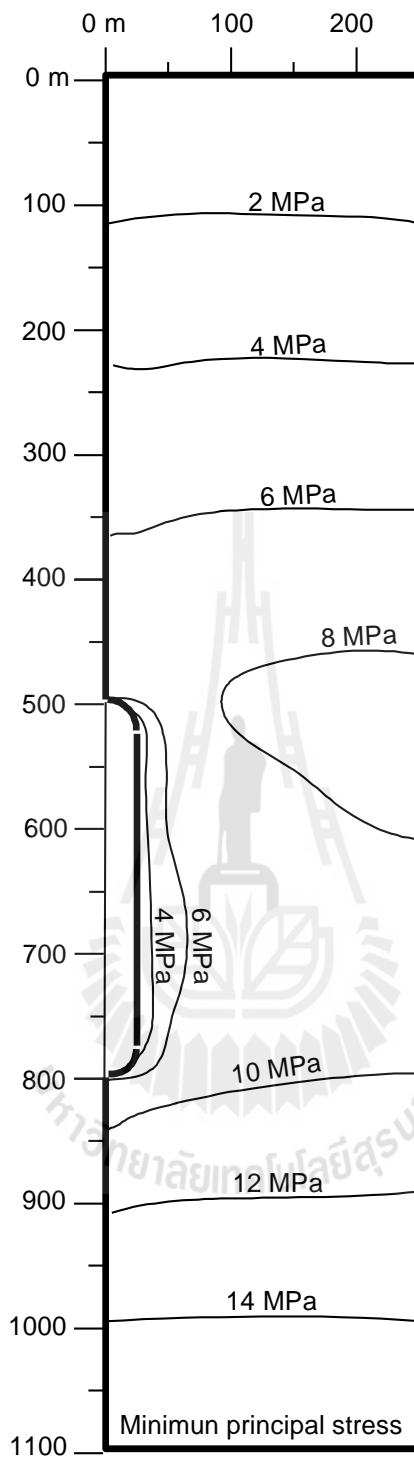
ผลการคำนวณในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์จะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาเสถียรภาพของโพรงกักเก็บในระยะ 50 ปี ค่าที่นำมาพิจารณาประกอบด้วยค่าการหดตัวของโพรงกักเก็บที่เปลี่ยนแปลงตามกาลเวลา ค่าความเค้นและความเครียดเฉือน รวมทั้งค่าความเค้นและความเครียดหลักที่มีผลกระทบต่อโพรงตลอดระยะเวลา 50 ปี ผลที่ได้จากการคำนวณระบุว่าการหดตัวของโพรงกักเก็บที่ได้คำนวณในช่วงเวลา 50 ปี ของอายุการกักเก็บมีค่าค่อนข้างน้อย ดังแสดงในรูปที่ 6.2 และเกลือหินรอบโพรงมีเสถียรภาพทางกลศาสตร์สูง ซึ่งสามารถสังเกตได้จากอัตราการเคลื่อนตัวที่มีค่าเป็นศูนย์หลังจาก 2 ปีแรกของการกักเก็บ การจำลองที่ความดันภายในคงที่เท่ากับ 20% และ 90% ของความเค้นในชั้นหินที่หลังคาโพรงมีจุดประสงค์เพื่อพิสูจน์ว่าโพรงที่ออกแบบไว้ทั้งหมดสามารถคงเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์ได้นานถึง 50 ปี ถึงแม้ว่าจะอยู่ภายใต้ความดันภายในต่ำสุด (20%) โดยรูปที่ 6.3 ถึงรูปที่ 6.5 แสดง ความเค้นหลักสูงสุด ความเค้นหลักต่ำสุด และความเค้นเฉือนที่สภาวะความดันภายในโพรงกักเก็บต่ำสุดเท่ากับ 20% รูปที่ 6.6 ถึงรูปที่ 6.8 แสดงความเค้นหลักสูงสุด ความเค้นหลักต่ำสุด และความเค้นเฉือนที่สภาวะความดันภายในโพรงกักเก็บสูงสุดเท่ากับ 90% ผลจากการใช้คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือ



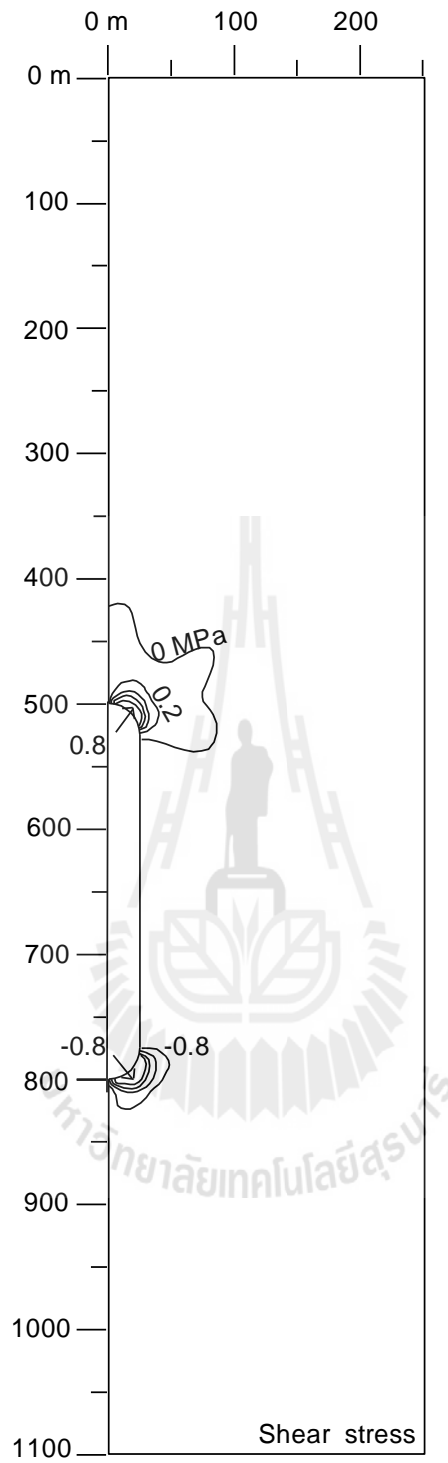
รูปที่ 6.2 อัตราการยุบตัวของเกลือหินรอบโพรงที่สภาวะความเค้นต่างกัน ร้อยละของอัตราการยุบตัวแสดงในฟังก์ชันของเวลา



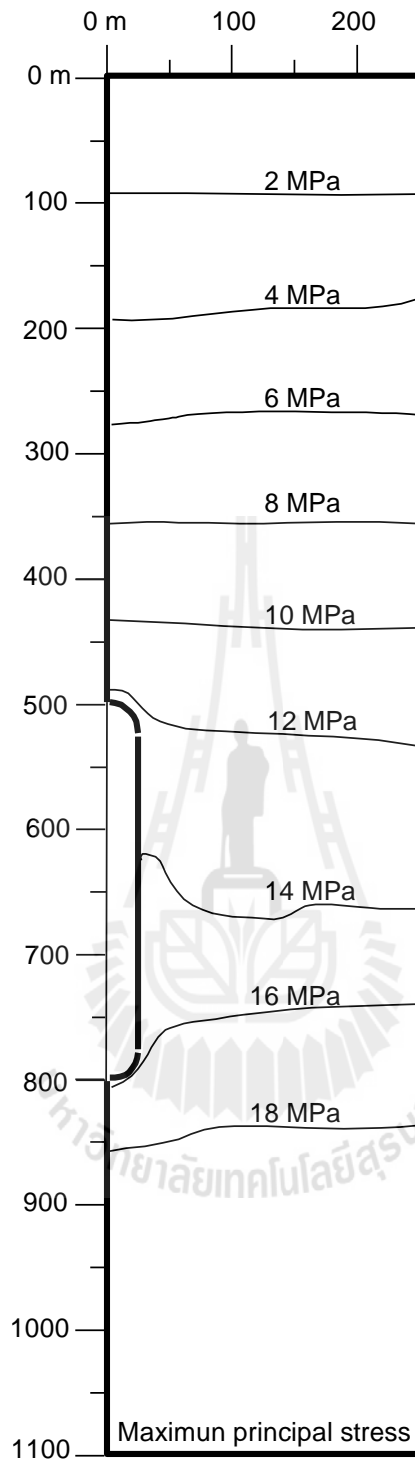
รูปที่ 6.3 เส้นระดับค่าความเค้นหลักสูงสุด ของสภาวะแรงกดแบบวิฎจักรในสามแกน แรงกดแบบวิฎจักรในสามแกนจริง และแรงกดแบบคงที่ในสามแกนที่สภาวะ ความดันภายในโพรงกักเก็บเท่ากับ 20%



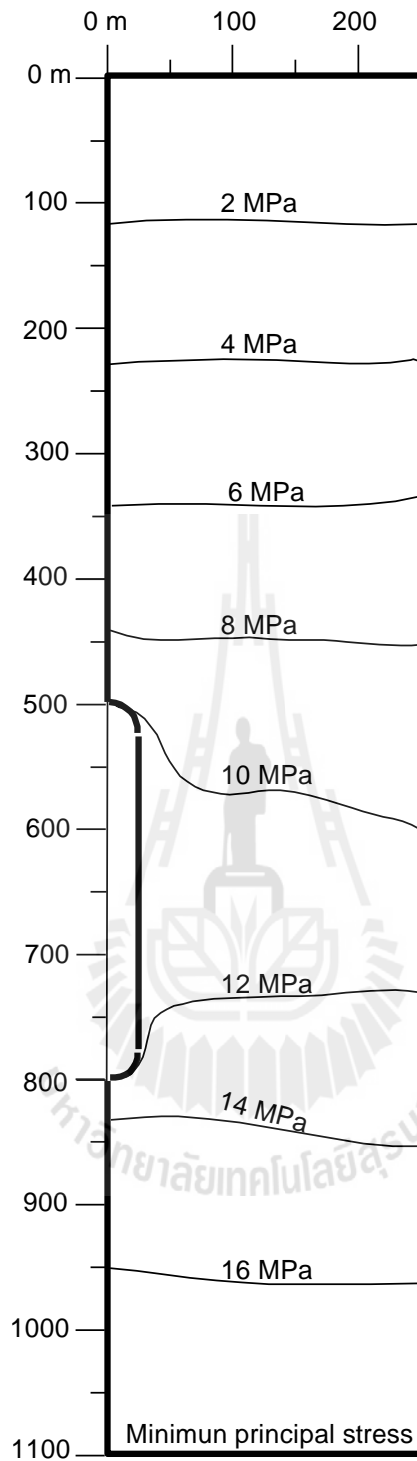
รูปที่ 6.4 เส้นระดับค่าความเค้นหลักต่ำสุดของสภาวะแรงกดแบบวิฎจักรในสามแกน แรงกดแบบวิฎจักรในสามแกนจริง และแรงกดแบบคงที่ในสามแกนที่สภาวะความดันภายในโพรงกักเก็บเท่ากับ 20%



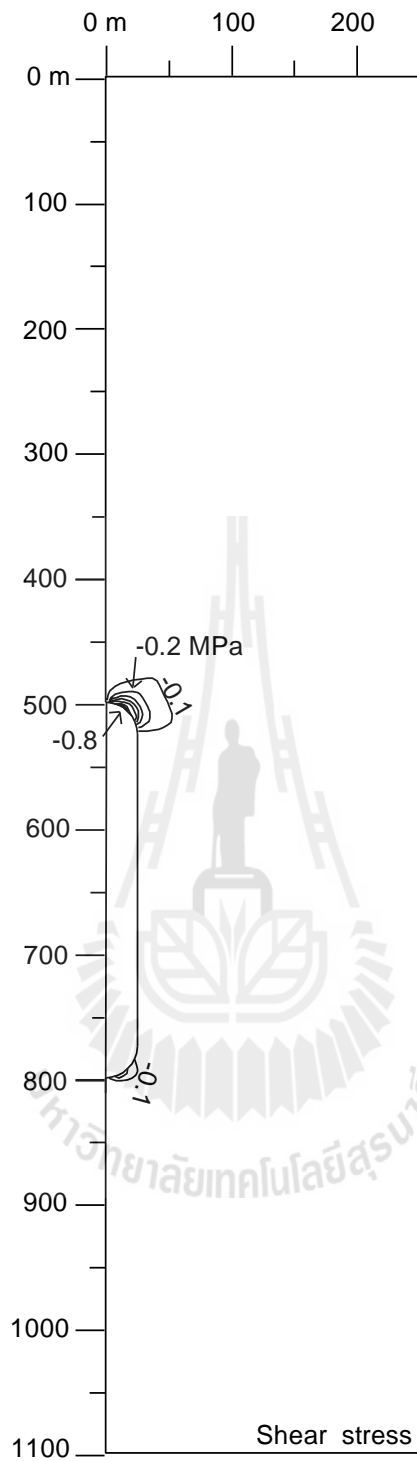
รูปที่ 6.5 เส้นระดับค่าความเค้นเฉือนของสภาวะแรงกดแบบวิถุจักรในสามแกน แรงกดแบบวิถุจักรในสามแกนจริง และแรงกดแบบคงที่ในสามแกนที่ สภาวะความดันภายในโพรงกักเก็บเท่ากับ 20%



รูปที่ 6.6 เส้นระดับค่าความเค้นหลักสูงสุดของสภาวะแรงกดแบบวิฎจักรในสามแกน แรงกดแบบวิฎจักรในสามแกนจริง และแรงกดแบบคงที่ในสามแกนที่สภาวะความดันภายในโพรงกักเก็บเท่ากับ 90%

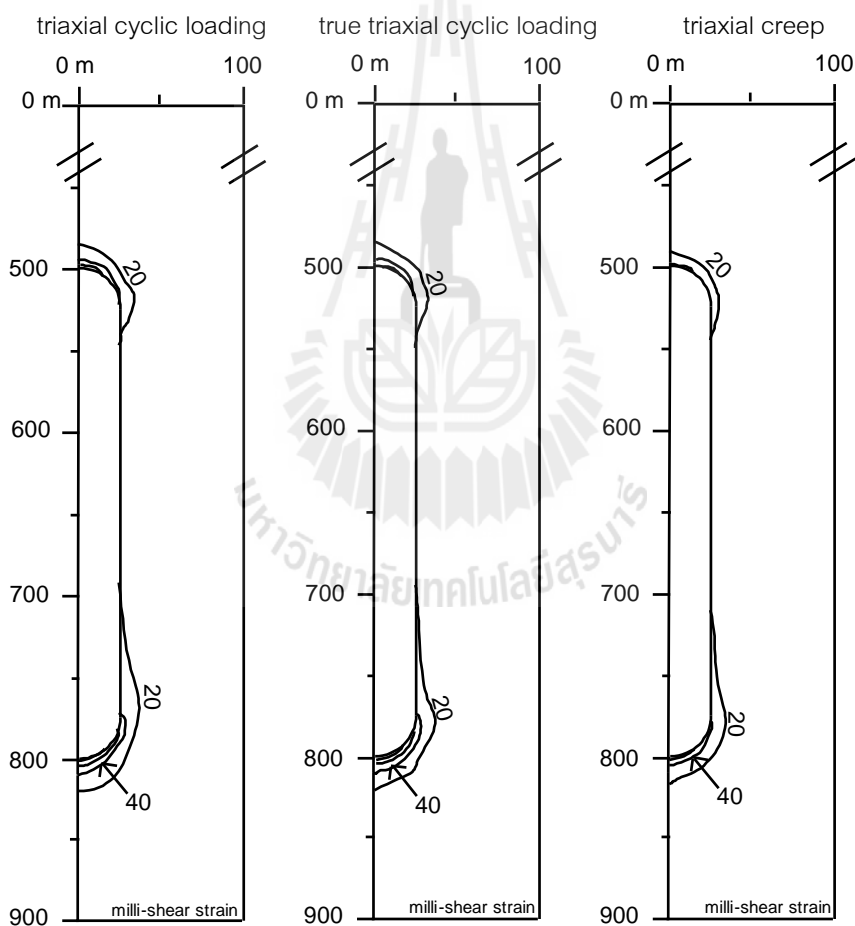


รูปที่ 6.7 เส้นระดับค่าความเค้นหลักต่ำสุดของสภาวะแรงกดแบบวิญจักร์ในสามแกน แรงกดแบบวิญจักร์ในสามแกนจริง และแรงกดแบบคงที่ในสามแกนที่สภาวะความดันภายในโพรงกักเก็บเท่ากับ 90%



รูปที่ 6.8 เส้นระดับค่าความเค้นเฉือนของสภาวะแรงกดแบบวิฎจักรในสามแกน แรงกดแบบวิฎจักรในสามแกนจริง และแรงกดแบบคงที่ในสามแกนที่ สภาวะความดันภายในโพรงกักเก็บเท่ากับ 90%

หินที่ได้จากการสอบเทียบจากการทดสอบ 3 รูปแบบ คือ การทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรในสามแกนจริง การทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรในสามแกน และการทดสอบการคืบในสามแกน (ดั้งเดิม) บ่งบอกว่าค่าคุณสมบัติที่ได้จากการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรในสามแกนจริงให้ค่าร้อยละการหดตัวของโพรงกักเก็บมากที่สุด และค่าคุณสมบัติที่ได้จากการทดสอบการคืบในสามแกนให้ค่าร้อยละการหดตัวของโพรงกักเก็บต่ำที่สุดดังแสดงในรูปที่ 6.2 หรือสังเกตได้จากค่าคุณสมบัติที่ได้จากการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรในสามแกนจริงให้ค่าความเครียดเฉือนมากที่สุด และค่าคุณสมบัติที่ได้จากการทดสอบการคืบในสามแกนให้ค่าความเครียดเฉือนต่ำที่สุดดังแสดงในรูปที่ 6.9 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการใช้คุณสมบัติที่ได้จากการทดสอบการคืบในสามแกนมาทำการออกแบบโพรงกักเก็บจะไม่อยู่ในเชิงอนุรักษ์



รูปที่ 6.9 เส้นระดับค่าความเครียดเฉือนจากการใช้คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินที่ได้จากการสอบเทียบการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรในสามแกน การทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรในสามแกนจริง และการทดสอบการคืบในสามแกน (ดั้งเดิม) จากซ้ายไปขวา ที่สภาวะความดันภายในโพรงกักเก็บเท่ากับ 20%

บทที่ 7

การสร้างแผนที่ศักยภาพสำหรับโพรงละลายเพื่อกักเก็บก๊าซธรรมชาติ

เนื้อหาในบทนี้เสนอวิธีการจัดทำแผนที่ศักยภาพสำหรับโพรงละลายเพื่อกักเก็บก๊าซธรรมชาติของพื้นที่ในแอ่งโคราชและแอ่งสกลนคร

7.1 ขั้นตอนการสร้างแผนที่ศักยภาพ

ขั้นตอนการสร้างแผนที่ศักยภาพประกอบด้วย 5 ขั้นตอน คือ 1) สร้างเส้นระดับของหมวดหินโดกกรวด 2) สร้างเส้นระดับของเกลือชั้นล่าง 3) คำนวณความหนาและความลึกของเกลือชั้นล่าง 4) ประเมินความลึกและความหนาของเกลือชั้นล่างเพื่อทำการออกแบบโพรงกักเก็บที่เหมาะสม 5) สร้างแผนที่ศักยภาพสำหรับโพรงละลายเพื่อกักเก็บก๊าซธรรมชาติหลังจากพิจารณาประสิทธิภาพของทั้งแอ่งโคราชและแอ่งสกลนคร ข้อมูลที่นำมาใช้ในการศึกษาประกอบด้วย

- 1) ข้อมูลหลุมเจาะของกรมทรัพยากรธรณี จำนวน 194 หลุม (Japakasetr and Suwanich, 1982, 1984)
- 2) ข้อมูลแผนที่ธรณีวิทยาประเทศไทย มาตราส่วน 1:500,000 (กรมทรัพยากรธรณี, 1983)
- 3) ข้อมูลแผนที่ภูมิประเทศ มาตราส่วน 1:50,000 (กรมแผนที่ทหาร, 2512)
- 4) ภาพตัดขวางแสดงธรณีวิทยาในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (Wongsawat et al., 1992)
- 5) ภาพตัดขวางทางธรณีวิทยาในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (นเรศ สัตยารักษ์ และทรงภพ พลจันทร์, 2533)
- 6) แผนที่ศักยภาพแหล่งแร่ประเทศไทย มาตราส่วน 1:2,500,000 (กรมทรัพยากรธรณี 2540)
- 7) แผนที่ธรณีวิทยาประเทศสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว มาตราส่วน 1:1,000,000 (Department of Geology and Mines (DGM), 1990)

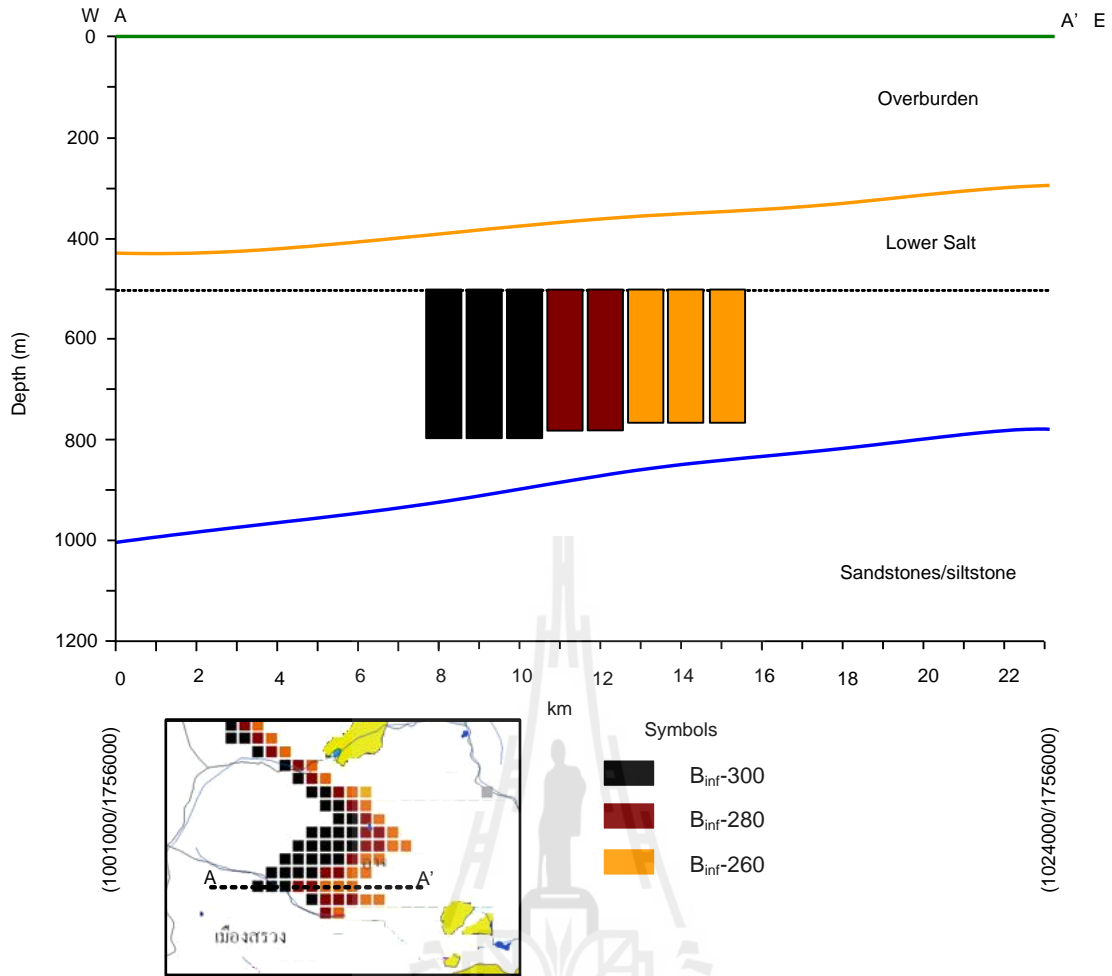
ขั้นตอนที่ 1 สร้างเส้นระดับของหมวดหินโคกกรวด จากการรวบรวมและศึกษาข้อมูลทางธรณีวิทยาเพื่อประเมินการกระจายตัวของหมวดหินโคกกรวด (รายละเอียดได้อธิบายไว้ในบทที่ 3)

ขั้นตอนที่ 2 สร้างเส้นระดับของเกลือชั้นล่าง จากการรวบรวมและศึกษาข้อมูลทางธรณีวิทยาเพื่อประเมินการกระจายตัวของเกลือชั้นล่าง (รายละเอียดได้อธิบายไว้ในบทที่ 3)

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณความลึกและความหนาของเกลือชั้นล่าง โดยความลึกของเกลือชั้นล่างสามารถคำนวณได้จากผลต่างของเส้นระดับที่บริเวณพื้นผิวจากแผนที่ภูมิประเทศมาตราส่วน 1:50,000 (กรมแผนที่ทหาร, 2512) กับเส้นระดับของเกลือชั้นล่าง สำหรับความหนาของเกลือชั้นล่างคำนวณจากผลต่างระหว่างเส้นระดับของหมวดหินโคกกรวดและเกลือชั้นล่าง ซึ่งผลที่ได้จะแสดงถึงการกระจายตัวของเกลือชั้นล่างทั้งในแง่โคราชและแอ่งสกลนคร

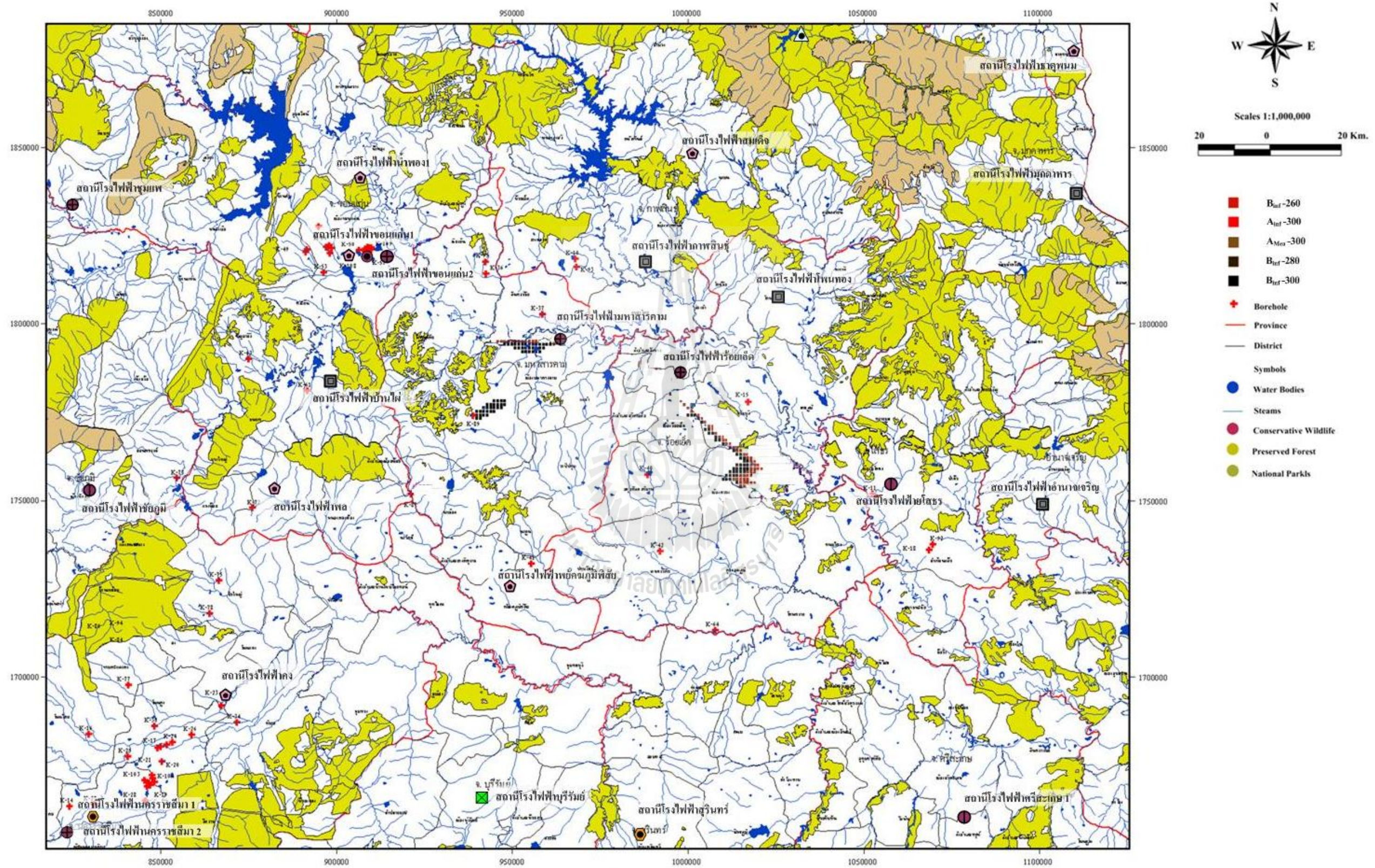
ขั้นตอนที่ 4 ประเมินความลึกและความหนาของเกลือชั้นล่างสำหรับนำมาวิเคราะห์ในการออกแบบโรงแก้กักเก็บ ซึ่งแสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 6 จากนั้นทำการสร้างภาพตัดขวาง โดยมีความละเอียดทุก 1 ตารางกิโลเมตร เพื่อหาตำแหน่งที่สามารถสร้างโรงแก้กักเก็บได้ในชั้นเกลือหินทั้ง 2 แอ่ง ผลที่ได้จะบ่งบอกตำแหน่ง ขนาด รูปร่าง และความลึกของโรงแก้ที่มีความเหมาะสมสำหรับกักเก็บก๊าซธรรมชาติ ตัวอย่างของภาพตัดขวางจากแนวตะวันออก-ตะวันตก (พิกัด 1001000/1756000 ถึง 1024000/1756000) ได้แสดงไว้ในรูปที่ 7.1 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงขอบเขตของลักษณะธรณีวิทยาเกลือหินชั้นล่างในเชิงความลึกและความหนาที่สามารถและไม่สามารถออกแบบโรงแก้กักเก็บได้ ในการศึกษาี้ แนะนำให้ใช้โรงแก้ที่มีความสูงมากที่สุดที่ 300 เมตร และต่ำสุดที่ 260 เมตร โดยที่โรงแก้จะมีหลังคาโรงแก้ที่อยู่ระดับความลึก 500 เมตร จึงจะมีความเค้นในเกลือหินที่หลังคาโรงแก้สูงพอที่จะกักเก็บก๊าซธรรมชาติได้ (อ้างอิงจากโรงแก้กักเก็บที่ใช้ในต่างประเทศ)

ขั้นตอนที่ 5 การสร้างแผนที่ศักยภาพ ได้นำข้อมูลในขั้นตอนที่ 3 และ 4 ใส่ในโปรแกรม Arcview เพื่อสร้างแผนที่ศักยภาพสำหรับโรงแก้กักเก็บก๊าซธรรมชาติในมาตราส่วน 1:1,000,000 และมาตราส่วน 1:250,000

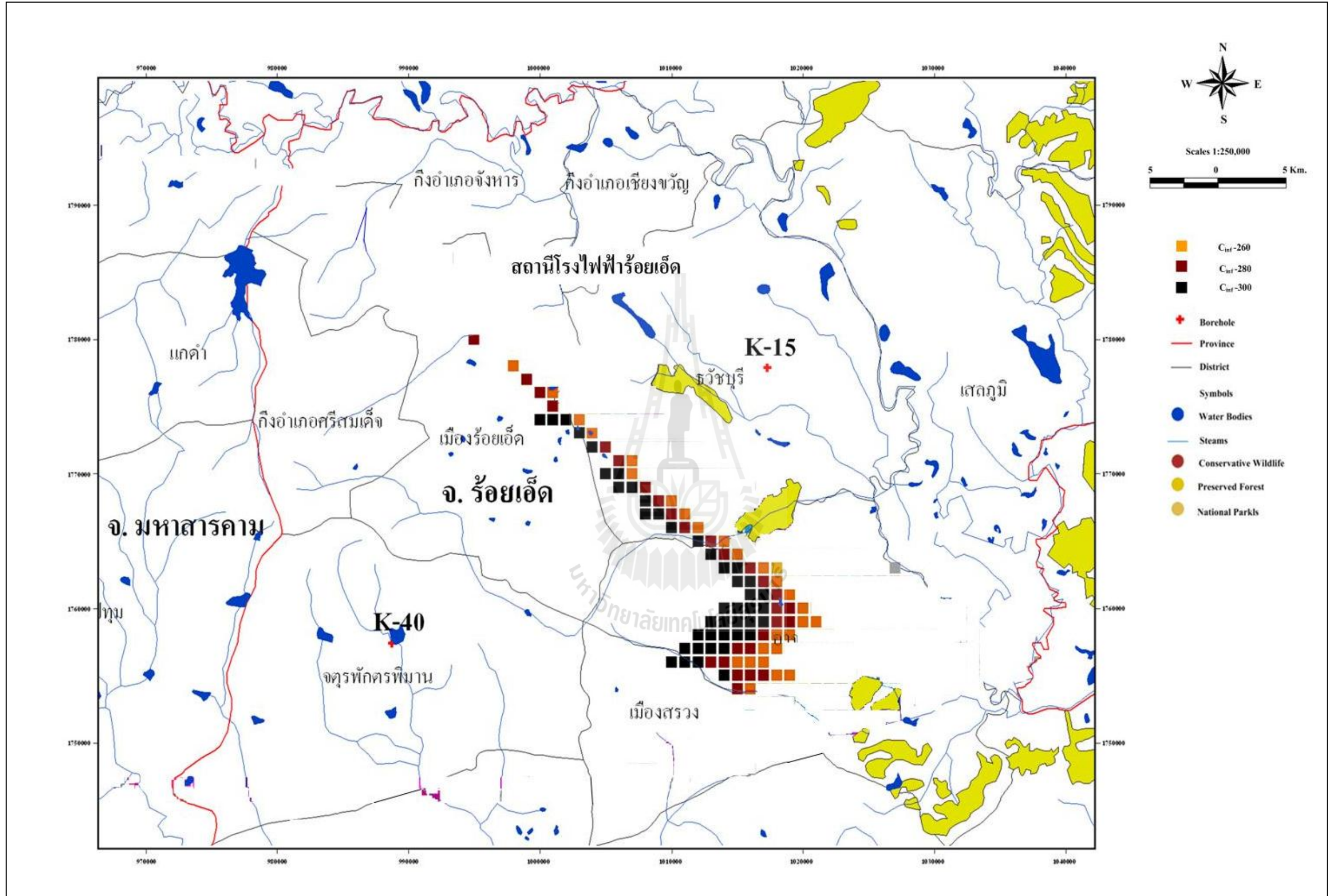


รูปที่ 7.1 ภาพตัดขวางแสดงตำแหน่งที่สามารถสร้างโพรงกักเก็บได้
(พิกัด 1001000/1756000 ถึง 1024000/1756000)

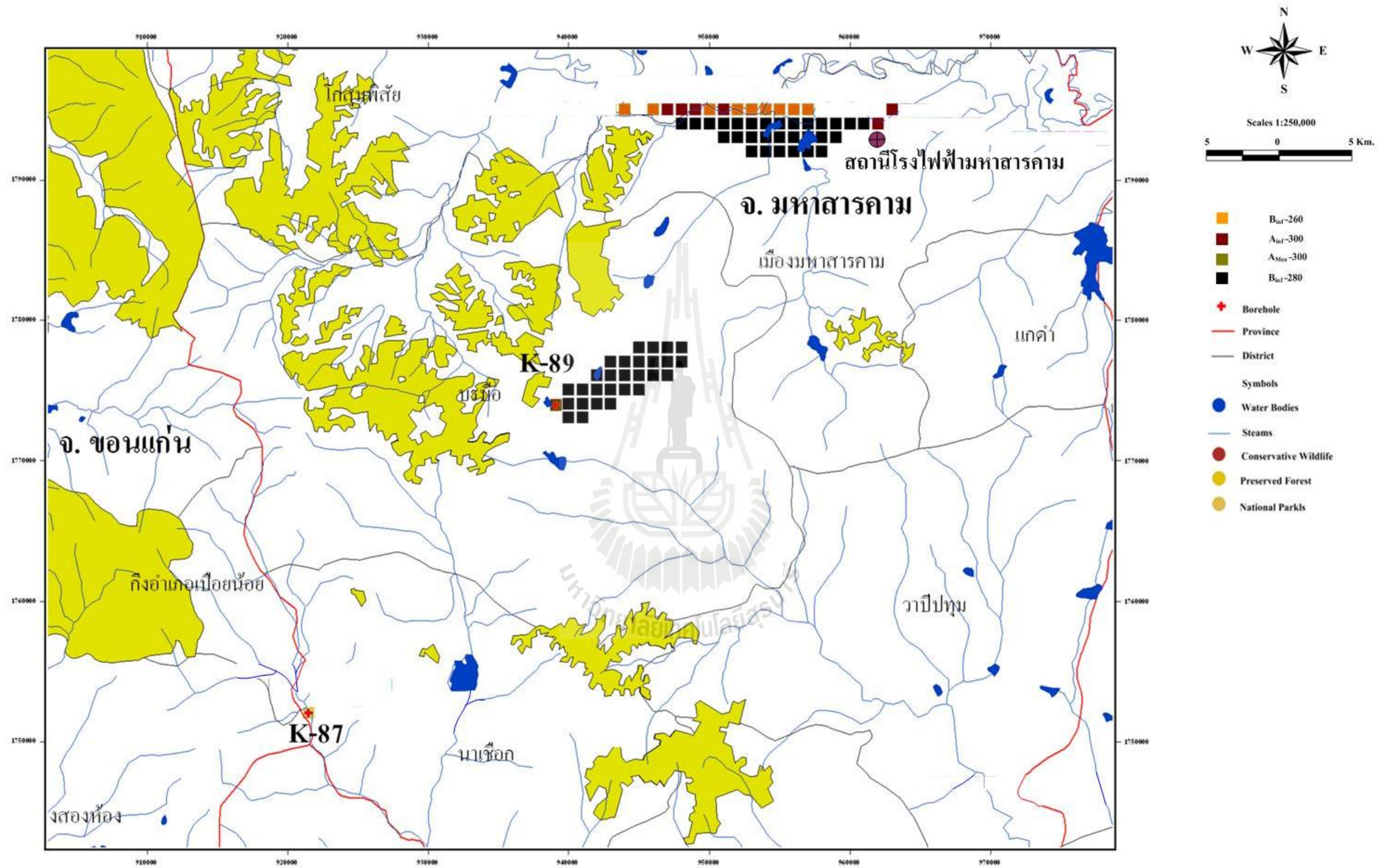
จากภาพตัดขวางแบบจำลองได้นำมาสร้างแผนที่ศักยภาพเพื่อให้ง่ายต่อการนำเสนอและนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ต่อไป แผนที่ศักยภาพที่พิจารณาประสิทธิภาพของทุกองค์ประกอบแล้วในแอ่งโคราชได้แสดงไว้ในรูปที่ 7.2 มาตรฐาน 1:1,000,000 โดยแสดงพื้นที่ที่เหมาะสมในการก่อสร้างโพรงกักเก็บของแอ่งโคราชมีความละเอียดถึง 1x1 ตารางกิโลเมตร และใช้สีบ่งบอกถึงขนาดโพรงกักเก็บ รูปที่ 7.3 และรูปที่ 7.4 แสดงภาพขยายของแผนที่ศักยภาพดังกล่าวในมาตรฐาน 1:250,000 ซึ่งพบว่าพื้นที่บริเวณโดมเกลือของแอ่งโคราชในเขตอำเภอบรบือ จังหวัดมหาสารคามและในเขตอำเภอเมืองสรวง จังหวัดร้อยเอ็ด มีความเหมาะสมในการสร้างโพรงกักเก็บก๊าซธรรมชาติ สำหรับแอ่งสกลนครไม่สามารถสร้างโพรงกักเก็บก๊าซธรรมชาติได้เนื่องจากชั้นเกลือหินมีความหนาไม่เพียงพอที่จะสร้างโพรงกักเก็บ



รูปที่ 7.2 แผนที่ศักยภาพพื้นที่ที่เหมาะสมในการก่อสร้างโรงกักเก็บในแอ่งโคราช มาตรฐาน 1:1,000,000



รูปที่ 7.3 ภาพขยายแผนที่ศักยภาพในแอ่งโคราชบริเวณ อำเภอเมือง จังหวัดร้อยเอ็ด ในมาตราส่วน 1: 250,000



รูปที่ 7.4 ภาพขยายแผนที่ศักยภาพในแอ่งโคราชบริเวณ อำเภอบรบือ จังหวัดมหาสารคาม ในมาตราส่วน 1: 250,000

บทที่ 8

การวิจารณ์และสรุปผลงานวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ กำหนดรูปร่าง ขนาด และความลึกของโพรงละลายที่อยู่ในชั้นเกลือ ที่เหมาะสมสำหรับเทคโนโลยีกักเก็บก๊าซธรรมชาติในเกลือหินชั้นล่างของชุดหินมหาสารคามในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย โดยโพรงกักเก็บที่ออกแบบจะต้องมีเสถียรภาพในระยะยาว (มากกว่า 50 ปี) และมีการสร้างแผนที่ศักยภาพสำหรับโพรงละลายเกลือที่ใช้กักเก็บก๊าซธรรมชาติ โดยในแผนที่จะสัมพันธ์กับขนาดและความลึกของโพรงที่เหมาะสม

จากผลการศึกษาและทบทวนข้อมูลหลุมเจาะที่ได้จากกรมทรัพยากรธรณีระบุว่าในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยมีชั้นเกลือหินอยู่ 3 ชั้น คือ เกลือชั้นบน เกลือชั้นกลาง และเกลือชั้นล่าง โดยเกลือทั้ง 3 ชั้น นี้ปรากฏอยู่ในแอ่งโคราชและแอ่งสกลนคร เมื่อศึกษาในเชิงความหนาของเกลือทั้ง 3 ชั้น และเทียบกับเทคโนโลยีการกักเก็บก๊าซธรรมชาติที่ดำเนินการอยู่ในต่างประเทศสามารถสรุปได้ว่า มีเพียงเกลือชั้นล่างในแอ่งโคราชเพียงชั้นเดียวที่มีความเหมาะสมทั้งในเชิงความหนาและความลึกสำหรับการสร้างโพรงกักเก็บก๊าซธรรมชาติ ซึ่งเกลือชั้นล่างจะรวมไปถึงชั้นเกลือแผ่นระนาบ โดมเกลือรูปหมอน และโดมเกลือที่ทะลุขึ้นหินที่วางตัวอยู่ข้างบนขึ้นมา

การทดสอบในห้องปฏิบัติการได้ทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรที่มีความเค้นล้ามรอบ มีวัตถุประสงค์เพื่อหาพฤติกรรมของตัวอย่างเกลือหินโดยการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักร (Cyclic loading test) ที่มีความเค้นล้ามรอบเพื่อศึกษาผลกระทบของแรงกดแบบวัฏจักรต่อพฤติกรรมเชิงเวลา (Time-dependent deformation) ของเกลือหินภายใต้ความเค้นล้ามรอบ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความเค้นกดจะมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับการเปลี่ยนแปลงความเค้นในเกลือหินรอบโพรงเกลือที่ใช้กักเก็บก๊าซธรรมชาติ ในการทดสอบได้ใช้โครงทดสอบแบบหลายแกน (Polyaxial Frame) โดยให้แรงกดเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างเป็นระบบ มีความเค้นเฉลี่ย (σ_m) คงที่ 3 ระดับ คือ 10, 15 และ 20 MPa ในแต่ละการทดสอบความเค้นเฉลี่ยได้มีการผันแปรความเค้นเฉือน (τ_{oct}) จาก 5.0, 8.0, 11.0 ถึง 14.0 MPa การทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรที่มีความเค้นล้ามรอบได้ถูกแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ การทดสอบในสามแกน ($\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$) ที่ความเค้นหลักกลางเท่ากับความเค้นหลักต่ำสุด และการทดสอบในสามแกนจริง ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$) เพื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบการคืบในสามแกน (แบบดั้งเดิม) ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบถูกนำไปสอบเทียบ (Calibrate) เพื่อให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติการคืบ (Creep) ที่เกี่ยวข้องกับความหนืดเชิงยืดหยุ่น (Visco-elastic) และเชิงพลาสติก (Visco-plastic) ของเกลือหิน โดยใช้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนของ

Jaeger and Cook (1979) ที่ถูกนำมาพัฒนาให้เป็นสมการความหนืดเชิงยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง (Linear visco-elastic) ซึ่งอยู่ในแบบจำลองของ Burgers

ผลจากการวิเคราะห์ที่ได้ข้อสรุปว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E_1) ที่วัดได้จากการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรในสามแกนและในสามแกนจริงเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบการคืบในสามแกนและในสามแกนจริงมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีพฤติกรรมที่ไม่ขึ้นกับการให้แรงกดแบบวัฏจักรและความเค้นหลักกลาง (σ_2) ค่าความหนืดเชิงยืดหยุ่น (E_2 , η_2) ที่ได้จากการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรในสามแกนและในสามแกนจริงเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบการคืบในสามแกนและในสามแกนจริงมีค่าใกล้เคียงกัน ความหนืดเชิงพลาสติก (η_1) ที่ได้จากการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรมีค่าต่ำกว่าที่ได้จากการทดสอบการคืบประมาณ 10 เท่า และค่าที่ได้จากสภาวะความเค้นในสามแกนจะมีค่าต่ำกว่าสภาวะความเค้นในสามแกนจริง ซึ่งหมายความว่า การกดแบบวัฏจักรจะส่งผลให้เกลือหินเปลี่ยนรูปร่างในเชิงเวลาได้มากกว่าการกดแบบสถิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเปลี่ยนแปลงในสภาวะคงตัว (steady-state)

แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (FLAC Code) ได้นำมาใช้ในการจำลองโพรงเกลือ โดยลักษณะของโพรงเกลือที่ใช้ในการจำลองเป็นแบบสมมาตรในแนวแกน (Axis-symmetry) คือมีแนวตั้งตามแกนของโพรง จึงจำลองเพียงแค่ 1/2 ของโพรงเกลือทั้งหมด ซึ่งหลังคาโพรงเกลืออยู่ที่ระดับความลึก 500 เมตร มีรัศมีของโพรงเท่ากับ 25 เมตร และโพรงมีความสูง 300 เมตร ซึ่งเป็นรูปร่างที่ใหญ่ที่สุด การจำลองได้ใช้ค่าคงที่จากแบบจำลองของ Burgers ที่ได้จากการสอบเทียบ ผลที่ได้จากการสอบเทียบจากการทดสอบทั้ง 3 รูปแบบ คือ การทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรในสามแกน การทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรในสามแกนจริง และการทดสอบการคืบในสามแกน โดยผลการจำลองโพรงกักเก็บในระยะ 50 ปี มีเสถียรภาพดีมากและมีการยุบตัวของโพรงกักเก็บน้อยมาก (ร้อยละ 6.27 ของเส้นผ่าศูนย์กลางโพรงกักเก็บ) และจากการจำลองโพรงกักเก็บระบุว่าค่าคุณสมบัติที่ได้จากการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรในสามแกนจริงให้ค่าร้อยละการหดตัวของโพรงกักเก็บมากที่สุด (ร้อยละ 6.27 ของเส้นผ่าศูนย์กลางโพรงกักเก็บ) และค่าคุณสมบัติที่ได้จากการทดสอบการคืบในสามแกนให้ค่าร้อยละการหดตัวของโพรงกักเก็บต่ำที่สุด (ร้อยละ 3.51 ของเส้นผ่าศูนย์กลางโพรงกักเก็บ) จะเห็นได้ว่าการนำคุณสมบัติที่ได้จากการทดสอบการคืบในสามแกนมาออกแบบโพรงกักเก็บจะไม่เป็นไปในเชิงอนุรักษ์

การสร้างแผนที่ศักยภาพสำหรับการสร้างโพรงกักเก็บโดยพิจารณาความลึกและความหนาของเกลือชั้นล่าง โดยใช้ความลึกของเกลือชั้นล่างซึ่งกระจายตัวทั้งในแอ่งโคราชและแอ่งสกลนคร จากนั้นทำการสร้างภาพตัดขวางเพื่อหาตำแหน่งที่สามารถสร้างโพรงกักเก็บในชั้นเกลือหินทั้ง 2 แอ่ง ผลที่ได้บ่งบอกถึงตำแหน่ง ขนาด รูปร่าง และความลึกของโพรงที่มีความเหมาะสมสำหรับกักเก็บก๊าซธรรมชาติ ในการศึกษาี้แนะนำให้ใช้โพรงที่มีความสูงมากที่สุด

300 เมตร และต่ำสุด 260 เมตร โดยมีหลังคาโพรงอยู่ที่ระดับความลึก 500 เมตร ซึ่งโพรงที่
สภาวะความเค้นนี้มีค่าสูงพอที่จะไม่ทำให้หลังคาโพรงเกิดการพังทลายและสามารถกักเก็บก๊าซ
ธรรมชาติได้โดยอ้างอิงจากโพรงกักเก็บที่ใช้ในต่างประเทศ จากการศึกษาพบว่าพื้นที่ที่
เหมาะสมในการสร้างโพรงกักเก็บก๊าซธรรมชาติ คือ เกลือชั้นล่างของแอ่งโคราช ในเขต
อำเภอบรบือ จังหวัดมหาสารคาม และในเขตอำเภอเมืองสรวง จังหวัดร้อยเอ็ด



บรรณานุกรม

- กรมทรัพยากรธรณี, 1983, แผนที่ธรณีวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มาตราส่วน 1:500,000, กรมทรัพยากรธรณี, กรุงเทพมหานคร.
- กรมทรัพยากรธรณี, 1983, แผนที่ธรณีวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มาตราส่วน 1:500,000, กรมทรัพยากรธรณี, กรุงเทพมหานคร.
- กรมทรัพยากรธรณี, 2533, การทำเหมืองละลายแร่เกลือหินของ บริษัท สหครีชีย-เคมิกคอลส์ จำกัด, กรุงเทพมหานคร, กรมทรัพยากรธรณี, กองการเหมืองแร่, กรุงเทพมหานคร, 10 หน้า.
- กรมทรัพยากรธรณี, 2540, แผนที่ศักยภาพแหล่งแร่ประเทศไทย มาตราส่วน 1:2,500,000, กรมทรัพยากรธรณี, กรุงเทพมหานคร.
- กรมทรัพยากรธรณี, 2541, การศึกษาชั้นเกลือหินบริเวณโครงการชลประทานลุ่มน้ำท่าตอนล่าง จังหวัดนครพนม กรมทรัพยากรธรณี, กรุงเทพมหานคร, 158 หน้า.
- กรมทรัพยากรธรณี, โครงการทำเหมืองแร่โปแตชของอาเซียน อำเภอบำเหน็จณรงค์ จังหวัดชัยภูมิ ประเทศไทย, กองเทคโนโลยีการทำเหมืองใต้ดิน, กรุงเทพมหานคร, 28 หน้า.
- กรมแผนที่ทหาร, 2512, แผนที่ภูมิประเทศ มาตราส่วน 1:50,000 ระวังแผนที่หมายเลข 5238, 5239, 5240, 5337, 5338, 5339, 5340, 5437, 5438, 5439, 5440, 5441, 5442, 5443, 5444, 5537, 5538, 5539, 5540, 5541, 5542, 5543, 5637, 5638, 5639, 5640, 5641, 5642, 5643, 5737, 5738, 5739, 5740, 5741, 5742, 5743, 5837, 5838, 5839, 5840, 5841, 5842, 5843, 5844, 5937, 5938, 5939, 5940, 5941, 5942, 6037, 6038, 6039, 6040, 6041, 6137, 6138, 6139 และ 6140.
- กองควบคุมระบบและปฏิบัติการภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, 2545, รายงานประจำปี 2545, กองควบคุมระบบและปฏิบัติการภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดขอนแก่น, 44 หน้า.
- การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2543, อัตราค่าไฟฟ้า, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, กรุงเทพมหานคร, 4 หน้า.
- กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2545, การทดสอบคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ของชั้นเกลือหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือเพื่อใช้กักเก็บพลังงานไฟฟ้าในรูปของอากาศภายใต้แรงดัน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 358 หน้า.
- นเรศ สัตยารักษ์ และทรงภพ พลจันทร์, 2533, เกลือหินใต้ที่ราบสูงโคราช, การประชุมวิชาการกรมทรัพยากรธรณี ประจำปี 2533, 16-17 สิงหาคม 2533, เรื่อง การจัดการทรัพยากรธรณี, กองเชื้อเพลิงธรรมชาติ, กรมทรัพยากรธรณี, กรุงเทพมหานคร, หน้า 1-14.

- นเรศ สัตยารักษ์ และทรงภพ พลจันทร์, 2533, เกลือหินใต้ที่ราบสูงโคราช, การประชุมวิชาการกรมทรัพยากรธรณี ประจำปี 2533 16-17 สิงหาคม 2533 เรื่อง การจัดการทรัพยากรธรณี, กองเชื้อเพลิงธรรมชาติ, กรมทรัพยากรธรณี, กรุงเทพมหานคร, หน้า 1-14.
- นเรศ สัตยารักษ์, สมเกียรติ จันทร์มหา, เจตต์ จุลวงษ์, ปกรณ์ สุวานิช และธวัช จาปะเกษตรร์, 2530, อิทธิพลของชั้นเกลือหินที่มีต่อน้ำใต้ดินในภาคอีสาน, การประชุมวิชาการเรื่องธรณีวิทยากับการพัฒนาอีสานเขียว, สมาคมธรณีวิทยาแห่งประเทศไทย, กรุงเทพมหานคร, หน้า 37-75.
- ปกรณ์ สุวานิช, 2521, แร่โปแตชภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย. เอกสารเศรษฐศาสตร์วิทยา เล่มที่ 22, กองเศรษฐศาสตร์วิทยา กรมทรัพยากรธรณี, กรุงเทพมหานคร, 24 หน้า.
- พิทักษ์ รัตนจารุรักษ์, 2533, อิทธิพลของชั้นเกลือหินต่อสภาพดินเค็มในภาคอีสาน, การประชุมวิชาการกรมทรัพยากรธรณี ประจำปี 2533 16-17 สิงหาคม 2533 เรื่อง การจัดการทรัพยากรธรณี, กองเชื้อเพลิงธรรมชาติ, กรมทรัพยากรธรณี, กรุงเทพมหานคร, หน้า 15-25.
- เพียงดา สาดร์รักษ์, วินิจ ยังมี, สุรัชย์ สมผดุง, รุ่งเรือง เลิศศิริวรกุล, อภิชาติ บุตรพิเศษ, ประดิษฐ์ นูแล และ ถนัด สร้อยชา, 2545, การศึกษาวิเคราะห์และประเมินเทคนิคการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์เพื่อศึกษาตรวจสอบโพรงเกลือใต้ผิวดินได้อย่างรวดเร็ว มีประสิทธิภาพ และประหยัด, ภาควิชาเทคโนโลยีธรณี คณะเทคโนโลยีมหาวิทาลัยขอนแก่น, จังหวัดขอนแก่น, 198 หน้า.
- ไพรัตน์ เจริญกิจ, 2544, แนวคิดการจัดการทรัพยากรเกลือหินภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย, การประชุมวิชาการด้านเหมืองแร่ โลหะการและปิโตรเลียมครั้งที่ 6 ระหว่างวันที่ 24-26 ตุลาคม 2544, กรุงเทพมหานคร, หน้า 1-5.
- สมเกียรติ จันทร์มหา, 2530, หน้าตาโดมเกลือใต้ที่ราบสูงโคราช, การประชุมวิชาการกรมทรัพยากรธรณี ครั้งที่ 4 13-14 สิงหาคม 2530, สำนักงานเลขานุการกรม, กรมทรัพยากรธรณี, กรุงเทพมหานคร, หน้า 301-317.
- สมชัย วงศ์สวัสดิ์ และสุนทร ปัญญาสุธารส, 2533, ศักยภาพและกลยุทธ์ การพัฒนาน้ำบาดาลแอ่งโคราช, การประชุมวิชาการกรมทรัพยากรธรณี ประจำปี 2533 16-17 สิงหาคม 2533 เรื่อง การจัดการทรัพยากรธรณี, กองเชื้อเพลิงธรรมชาติ, กรมทรัพยากรธรณี, กรุงเทพมหานคร, หน้า 39-58.

สมหวัง วิทยานิพนธ์ และ นิรันดร์ ยิ่งมหิตราภรณ์, 2533, การทำเหมืองละลายแร่เกลือหินของ บริษัทไทยสาขาซีเคมีกันท์ จำกัด, กรมทรัพยากรธรณี, กรุงเทพมหานคร, 19 หน้า.

Aceves, S. M., Berry, G. D., and Rambach, G. D., 1998, Insulated pressure vessels for hydrogen storage on vehicles, *International Journal of Hydrogen Energy*, Elsevier Science, Vol. 23, pp. 583–591.

Allemandou, X. and Dusseault, M. B., 1993, Healing processes and transient creep of salt rock, Anagnostopoulos, A. (eds.), *Geotechnical Engineering of Hard Soils – Soft Rocks*, Vol. 1–3, A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, USA, pp. 1581–1590.

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.

Arnold, C., Lischka, J., Heinrich, C., Schreiner, W. and Lux, K. H., 2002, Postleaching of caverns at natural gas storage Bernburg Germany, Saxony–Anhalt, Fall 2002 Meeting, Bad Ischi, Austria, Solution Mining Research Institute, California, pp. 1–14.

ASTM D2664–95, 1998, Standard test method for triaxial compressive strength of untrained rock core specimens without pore pressure measurements, *In Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.08.

ASTM D2938–95, 1998, Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.08.

ASTM D3148–96, 1998, Standard test method for Elastic Moduli of intact rock core specimens in uniaxial compression, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.08.

ASTM D3967–95, 1998, Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.08.

ASTM D4341–93, 1998, Standard test method for creep of cylindrical hard rock core specimens in uniaxial compression, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.08.

ASTM D4405–93, 1998, Standard test method for creep of cylindrical soft rock core specimens in uniaxial compressions, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.08.

- 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, Vol. 10, pp. 1–9.
- Aubertin, M., Gill, D. E. and Ladanyi, B. (1992). *Modeling the transient inelastic flow of rock salt*. In the Seventh Symposium on Salt (vol. 1, pp. 93–104). Elsevier Science Pub.
- 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.
- Aubertin, M., Julien, M. R., Servant, S. and Gill, D. E., 1999, A rate-dependent model for the ductile behavior of salt rocks, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 36, No.4, Canada, pp. 660–674
- Aubertin, M., Sgaoula, J. and Gill, D. E., 1993a, A damage model for rock salt: Application to tertiary creep, Proceedings of the Seventh Symposium on Salt, Kyoto, Japan, April 1992, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Vol. I, pp. 117–125.
- Aubertin, M., Sgaoula, J. and Gill, D. E., 1993b, Constitutive modeling of rock salt: Basic considerations for semi-brittle behavior, Proceedings of the Fourth International Symposium on Plasticity and Its Current Applications, Baltimore, pp. 92 (1–4).
- Aubertin, M., Sgaoula, J., Servant, S., Julien, M. R., Gill, D. E. and Ladanyi, B., 1998, An up-to-date version of SUVIC–D for modeling the behavior of salt, Proceedings of the Fourth Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Ecole Polytechnique, June 1996, Trans Tech Publications, Clausthal–Zellerfeld, Germany, pp. 205–220.
- 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.
- Bieniawski, P. W. and Bieniawski, Z. T., 1994, Design principles and methodology applied to solution mined salt caverns, Presented at the 1994 Spring Meeting in Houston, Texas, April 24-27, 1994.
- Bieniawski, Z.T., 1992, Design Methodology in Rock Engineering, A.A. Balkema, Rotterdam.
- 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, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, September 1993, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany, pp. 221-230.
- Bonte, G., 1996, Mechanical aspects of the inhibition of a salt wall by brine initially contained in a cavity, Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, September 1993, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany, pp. 263-267.
- Boontongloan, C., 2000, Engineering properties of the evaporitic and clastic rocks of Maha Sarakam Formation, Sakon Nakhon evaporite basin, M.S. thesis, Asian Institute of Technology, Thailand.
- Borns, D. J. and Stormont, J. C., 1989, Delineation of the disturbed rock zone surrounding excavation in salt, Proc. 30th U. S. Rock Mechanics Symp., Morgantown 1989, pp. 353-360.
- Brodsky, N. S. and Munson, D. E., 1994, Thermomechanical damage recovery parameters for rock salt from WIPP, Rock Mechanics: Models and Measurements, Challenges from Industry, Proceedings of the 1st North American Rock Mechanics Symposium, University of Texas at Austin, Austin, June 1994, A. A. Balkema, Rotterdam, pp.731-740.
- Brodsky, N. S., Zeuch, D. H. and Holcomb, D. J., 1995, Consolidation and permeability of crushed WIPP salt in hydrostatic and triaxial compression, Proceedings of the 35th U. S. Symposium on Rock Mechanics, Rono, June 1995, A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 497-502.

- Broek, W. M. G. T. and Heilbron, H. C. 1998, Influence of salt behavior on the retrievability of radioactive waste, Proceedings of the Fourth Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Ecole Polytechnique, Montreal, June 1996, Clausthal, Germany, Trans Tech Publications, pp. 561–572.
- Burdine, N. T., 1963, Rock failure under dynamic loading conditions, Society of Petroleum Engineers Journal, pp. 1–8.
- Bylia, O.I., Vasin, R. A., Ermachenko, A. G., Karavaeva, M. V. and Muravlev, A. V., 1997, The influence of simple and complex loading on structure change in two-phase titanium alloy, Scripta Metall 36: pp. 949–954.
- Carter, N. L., Horseman, S. T., Russell, J. E. and Handin, J., 1993, Rheology of rock salt, Journal Structural Geology, Vol. 15, No. 10, pp. 1257–1272.
- Chan, K. S., Bodner, S. R. and Munson, D. E., 1998, Recovery and healing of damage in WIPP salt, International Journal of Damage Mechanics, Vol. 7, No. 1, pp. 143–166.
- Chan, K. S., Bodner, S. R., Fossum, A. F. and Munder, D. E., 1995, Constitutive representative of damage healing in WIPP salt, Proceedings of the 35th U.S. Symposium, on Rock Mechanics, A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp. 485–490.
- Chen, W. F. and Zhang, H., 1991, Structural plasticity, theory, problems and CAE software, New York–Berlin: Springer.
- Chen, Z., Wang, M. L. and Lu, T., 1997, Study of Tertiary Creep of Rock Salt, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 123, No. 1, p. 77.
- Chen, Z., Wang, M. L., Lu, T. and Chen, Z., 1996, A micro- and macro-mechanical investigation of mechanisms for the WIPP rock salt, Radioactive Waste Management and Environmental Restoration, Vol. 20, No. 2/3, p. 73.
- 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. and Hunsche, U., 1996, A comprehensive constitutive equation for rock salt-determination and application, Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, September 1993, Trans Tech Publications, Clausthal–Zellerfeld, Germany, pp. 191–205.

- Cristescu, N., 1994a, A procedure to determine nonassociated constitutive equations for geomaterials, *Int. J. Plasticity*, Vol. 10, pp. 103–131.
- Cristescu, N., 1994b, *Visco-Plastic Behaviour of Geomaterials*, Springer Verlag, Vienna, pp. 103–207.
- Crotogino, F., Mohmeyer, W. U. and Scharf, R., 2001, Huntorf CAES: More than 20 years of successful operation, Spring 2001 Meeting, Orlando, Florida, USA.
- Crouch, S. L., 1972, A note on post-failure stress-strain path dependence in Norite, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Vol. 9: pp. 197–204.
- Dale, T. and Hurtodo, L. D., 1998, WIPP air-intake shaft disturbed-rock zone study, *Proceedings of the Fourth Conference on the Mechanical Behavior of Salt*, Ecole Polytechnique, Montreal, June 1996, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany, pp. 525–535.
- Department of Geology and Mines (DGM), Ministry of Industry and Handicraft., 1990, *Geological and Mineral Occurrence Map* scale 1:1,000,000, Vientiane, Lao.
- DeVries, K. L., K.D. Mellegard and G. D. Callahan, 2002, Salt damage criterion proof-of-concept research, Topical report, DE-FC26-00NT41026, prepared for the U.S. Department of Energy, Pennsylvania.
- Dreyer, W. E., 1984, Crude oil storage in a system of salt caverns, *Proceedings of First Conference on the Mechanical Behavior of Rock Salt*, Pennsylvania State University-Pennsylvania, November 9–11, 1981, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany. pp. 629–660.
- Fokker, P. A., 1995, The behavior of salt and salt caverns, Ph.D. Thesis, Delft University of Technology.
- Fokker, P. A., 1998, The micro-mechanics of creep in rock salt, *Proceedings of the Fourth Conference on the Mechanical Behavior of Salt*, Ecole Polytechnique, Montreal, June 1996, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany, pp. 49–61.
- Franssen, R. C. M. W. and Spiers, C. J., 1990, Deformation of polycrystalline salt in compression and in shear at 250–350°C, *Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics*, Geological Society Special Publication No. 45, pp. 201–213.

- Franssen, R. C. M. W., 1998, Mechanical anisotropy of synthetic polycrystalline rock salt, Proceedings 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.
- Frayne, M. A., 1996, Four cases study in salt rock: Determination of material parameters for numerical modeling, *Proceedings Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt*, Ecole Polytechnique, November 1993, Trans Tech Publications, Clausthal–Zellerfeld, Germany, pp. 471–482.
- Fuenkajorn, K. and Daemen, J. J. K. (author & editors), 1996, Sealing of Boreholes and Underground Excavations in Rock, Chapman & Hall, London, 322 pp.
- 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 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 Daemen, J. J. K., 1992b, Drilling–Induced Fractures in Borehole Walls, *Journal of Petroleum Technology*, Society of Petroleum of Engineers, February, Vol.44, No. 2, pp. 210–216.
- Fuenkajorn, K. and Daemen, J. J. K., 1996, Sealing of borehole in rock—an overview, Proc. 2nd North American Rock Mech, Symposium, Montreal, Quebec, Canada, pp.1447–1454.
- Fuenkajorn, K. and Jandakaew, M., 2003, Compressed–air energy storage in salt dome at Borabu district, Thailand: Geotechnical Aspects, Proceedings of the 38th Symposium on Engineering Geology and Geotechnical Engineering, University of Reno, Nevada, March 19–21, pp. 377–391.
- Fuenkajorn, K. and Jandakaew, M., 2003, Compressed–air energy storage in salt dome at Borabu district, Thailand: Geotechnical Aspects, *Proceedings of the 38th Symposium on Engineering Geology and Geotechnical Engineering*, University of Reno, Nevada, March 19–21, pp. 377–391.

- Fuenkajorn, K. and Stormont, J. C., 1997, Geomechanics and geohydrological issues in mine sealing, Presentation at the SME Annual Meeting, February 24–27, 1997, Denver, Colorado.
- Fuenkajorn, K., 1997, Design and Analysis of Gas Storage Caverns in Hutchinson Salt Formation, Kiowa County, Kansas, Using Time–dependent Finite Element Method, prepared for International Gas Consulting, Inc., 69 pp.
- Fuenkajorn, K., 2000, Design and Analysis of The Keystone Gas Storage Project Salado Salt Formation, Winkler County, Texas, Using A Time–dependent Finite Element Method, prepared for Unocal Corporation Sugar Land and International Gas Consulting, Inc., 58 pp.
- Fuenkajorn, K., 2002, Design guideline for salt solution mining in Thailand, Research and Development journal of the Engineering Institute of Thailand, Vol. 13, No. 1, pp. 1–8.
- Fuenkajorn, K., and Serata, S., 1992a, Finite Element Model to Predict Permeability Increase around Salt Cavern, SMRI Paper, presented at the Solution Mining Research Institute, Fall Meeting, Houston, Texas, October 19–22, 34 pp.
- Fuenkajorn, K., and Serata, S., 1992b, Geohydrological integrity of CAES in rock salt, Second International Conference on Compressed–Air Energy Storage Electric Power Research Institute, July 7–9, 1992, San Francisco, CA, pp. 4.1–4.21.
- Fuenkajorn, K., and Serata, S., 1994, Dilation–induced permeability increase around caverns in rock salt, Proceeding 1st North American Rock Mechanics Symposium, University of Texas at Austin, June 1–3, pp. 648–656.
- Fuenkajorn, K., Phueakphum, D. and Jandakaew, M., 2003, Healing of rock salt fractures: Proceedings of the 38th Symposium on Engineering Geology and Geotechnical Engineering, University of Nevada, Reno, March 19–21, pp. 393–408.
- Fuenkajorn, K. and Serata, S., 1993, Numerical simulation of strain–softening and dilation of rock salt, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 30(7), pp. 1303–1306.
- 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.
- Gronefeld, P., Yoshida, Y., Koder, M. and Bunpapong, T., 1993, Four Years of Brine Production by Solution Mining: The Pimai Project in Thailand, *Seventh Symposium on Salt*, Vol. I 315–320 (1993), Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.
- Guangzhi, Y., He, L. and Xuefn, X., 1988, The effect of the stress path on strength of rock, In Proceeding the Twenty-ninth U.S. Symposium on Rock Mechanics, Rotterdam: A. A. Balkema, pp. 95–101.
- Haimson, B. C. and Kim, C. M., 1972, Mechanical behavior of rock under cyclic fatigue, Proceedings of the Thirteenth Symposium on Rock Mechanics, ASCE, pp.845–864.
- Hamami, M., Tijani, S. M. and Vouille, G., 1996, A methodology for the identification of rock salt behavior using multi-steps creep tests, 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.
- Hansen, F. D., Mellegard, K. D. and Senseny, P. E., 1984, Elasticity and strength of ten natural rock salts, Mechanical Behavior of Salt I, Proceedings of the First Conference on the Mechanical Behavior of Salt, The Pennsylvania State University, November 9–11, 1981, Clausthal–Zellerfeld, Federal Republic of Germany, Trans Tech Publications, pp. 71–83.
- 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, 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.

- Hardy, H. R. Jr., 1998, Strength and acoustic emission in salt under tensile loading, Proceedings of the Fourth Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Ecole Polytechnique, Montreal, June 1996, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany, pp. 143-162.
- Hickman, S. H. and Evans, B., 1987, Influence of geometry upon crack healing rate in calcite, *Physics Chemistry Minerals*, Vol.15, Springer-Verlag, pp.91-102.
- Hunsche, U. E. and Albrecht, H., 1990, Results of true triaxial strength tests on rock salt, *Engineering Fracture mechanics*. 35: pp. 867-877.
- 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., 1993, Failure behavior of rock salt around underground cavities, Seventh Symposium on Salt, Vol. 1, Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V., pp. 59-65.
- 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.
- Inoue, A., Kawakami, H. and Fujii, T., 1998, The effect of loading path on mechanical responses of a glass fabric composite at low cyclic fatigue under tension/torsion biaxial loading, In American Society for Composite (ASC) the Thirteenth Annual technical conference, Maryland.
- Istvan, J.A. and Querio, C.W., 1983, Storage of natural gas in salt caverns, In Proc. of 6th Int. Symp. on Salt, The Salt Institute, Virginia, Vol. 2, pp. 183-190.
- Itasca (1992). *User Manual for FLAC-Fast Lagrangian Analysis of Continua*, Version 4.0. Itasca Consulting Group Inc. Minneapolis, Minnesota.
- Jaeger, J. C. and Cook, N. G. W., 1979, *Fundamental of Rock Mechanics* (3rd Edition), Chapman and Hall, London, 593 p.

- Japakasetr, T. and Suwanich, P., 1982, *Potash and Rock Salt in Thailand Appendix A : Nonmetallic Minerals Bulletin No.2*, Economic Geology Division, Department of Mineral Resources, Bangkok, Thailand, pp. A1–A252.
- Japakasetr, T. and Suwanich, P., 1984, *Potash and Rock Salt in Thailand Appendix C Core log of Bamnet Narong Area : Nonmetallic Minerals Bulletin No.2*, Economic Geology Division, Department of Mineral Resources, Bangkok, Thailand.
- Jeremic, M. L., 1994, *Rock Mechanics in Salt Mining*, A. A. Balkema, Rotherdam, the Netherlands, 532 pp.
- Jeremic, M. L., 1994, *Rock Mechanics in Salt Mining*, A. A. Balkema, Rotherdam, the Netherlands, 532 p.
- Katz, D. L. V. and Lady, E. R., 1976, *Compressed Air Storage For Electric Power Generation*, Richland, Washington Dept. of Energy, Pacific Northwest.
- Khan, A. S. and Huang, S, 1995, *Continuum theory of plasticity*, New York: Wiley.
- Khan, I. A., Mahtab, M. A., and Yegulalp, T. M., 1988, Predicting strength of salt from point load tests, *Proceedings of the Second Conference on the Mechanical Behavior of Salt*, Federal Institute of Geosciences and Natural Resources, Hannover, September 1984, Trans Tech Publications, Clausthal, Germany, pp. 211–222.
- Kim, C. M., 1973, *Fatigue failure of rock in cyclic uniaxial compression*, Ph. D. Thesis, University of Wisconsin, Madison.
- Korshunov, A. A., Enikeev, F. U., Mazurski, M. I., Salishchev, G. V., Dmitriev, O. V., Muravlev, A. V. Chistyakov, P. V., 1996, Grain–Structure refinement in titanium alloy under different loading schedules, *Journal of Material Sciences*. 31: pp. 4635–4639.
- Lee, D. H., Juang, C. H., Chen, J. W., Lin, H. M. and Shieh, W. H., 1999, Stress paths and mechanical behavior of a sandstone in hollow cylinder tests, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 36: pp. 857 – 870.
- Lux, K. H. and Rokahr, R., 1981, Laboratory investigations and theoretical statements as a basis for the design of cavern in rock salt formation, *Proceedings the First Conference on the Mechanics Behavior of Salt*, Clausthal–Zellerfeld, Germany: Trans Tech Publications, pp. 169–179.

- Miao, S., Wang, M. L., and Schreyer H. L., 1995, Constitutive Models for healing of materials with application to compaction of crushed rock salt, *Journal of engineering mechanics*, ASCE., Vol. 10, No. 121, pp. 1122–1129.
- Mlakar, V., Hassani, F. P. and Momayez, M., 1993, Crack development and acoustic emission in potash rock, *Int. Jour. Rock Mech. and Mining Sciences*, Vol. 30, pp. 305–320.
- 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., 1991, Constitutive modeling of salt behavior – State of the technology, *Proc. 7th Int. Cong. Rock Mech., ISRM, Aachen*, pp. 1797–1810.
- Munson, D. E., Chan, K. S. and Fossum, A. F., 1999, Fracture and healing of rock salt related to salt caverns, Meeting paper, April 14–16, 1999. *Solution Mining Research Institute, Las Vegas*, 21 pp.
- Munson, D. J., Holcomb, D. J., De Vries, K. L., Brodsky, N. S. and Chan, K. S., 1995, Correlation of theoretical calculations and experimental measurements of damage around salt, *Proc. 35th U. S. Symp. Rock Mech.*, pp.491–496.
- Nguyen–Minh, D. E. and Quintanilha de Menezes, E., 1996, Incompressible numerical modeling for long term convergence evaluation of underground works in 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. 523–531.
- Nguyen–Minh, D. E., Braham, S. and Durup, J. G., 1996, Modeling subsidence of the Tersanne underground gas storage field, *Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt*, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, September 1993, *Trans Tech Publications, Clausthal–Zellerfeld, Germany*, pp. 405–416.
- Nigbor, M. T., 1982, State of the art of solution mining for salt, potash and soda ash, *Solution Mining Research Institute, Research projects report no. 82–0002–SMRI*.

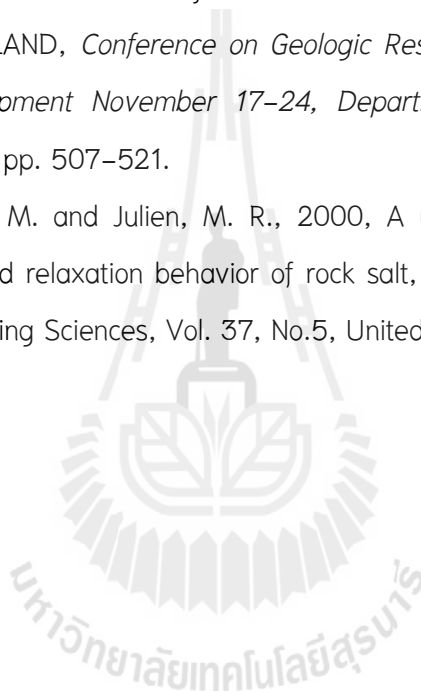
- Ong, V., Unrau, J., Jones, J., Coode, A. and Mackintosh, D., 1998, Triaxial creep testing of Saskatchewan potash samples, Proceedings of the Fourth Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Ecole Polytechnique, Montreal, June 1996, Trans Tech Publications, Clausthal–Zellerfeld, Germany, pp. 469–480.
- Peach, C. J., 1991, Influence of deformation on the fluid transport properties of salt rocks, Thesis, University of Utrecht, Holland.
- 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.
- Peck, R.B., 1961, Memorandum concerning subsidence and sinkhole formation above brine fields, July 7, Unpublished, Available from Solution Mining Research Institute, 812 Muriel ST., Woodstock IL, 11 pp.
- Pfeifle, T. W., Vogt, T. J., and Brekken, G. A., 1998, Correlation analysis of dome salt characteristics, Proceedings of the Fourth Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Ecole Polytechnique, Montreal, June 1996, Trans Tech Publications, Clausthal–Zellerfeld, Germany, pp. 87–100.
- Phueakphum, D. and Fuenkajorn, K. (2009). Effects of cyclic loading on mechanical properties of Maha Sarakham salt, In **Proceedings of the Second Thailand Symposium on Rock Mechanics (ThaiRock 2009)**, Jomtien Palm Beach Hotel & Resort, Chonburi, 12–13 March 2009, pp. 107 – 120.
- Phueakphum, D., 2003, Compressed–Air Energy Storage in Rock Salt of The Maha Sarakham Formation, M.S. thesis, Suranaree University of Technology, Thailand.
- Popovic, R. et al., 1983, Dimension of seal pillars and interchamber pillars in solution mining, Almanac for Mining and Geology, Tuzla, former Yugoslavia, pp. 16–27.
- Pudewills. A. and Hornberger, K, 1996, A Unified Viscoplastic Model for 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. 45–52.

- 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.
- Reeves, M. J. and Stead, D., 1991, SALTDATA: A graphical database for the physical properties of rocks associated with mining of potash and salt, Proceedings of the 32nd U. S. Rock Mechanics Symposium on Mechanics as a Multi-Disciplinary Science, Oklahoma, pp. 169–177.
- Renard, F., 1999, Pressure solution and crack healing and sealing, Geology related to nuclear waste disposal, Institute of Geology and Department of Physics. Roztez, Norway: Czech Republic. 32pp.
- Rodonski, A., 1981, Exploitation of the salt deposits by borehole solution mining, Gornictwo 8, pp. 38–49.
- Rogers, C.F.G. and Cohen, H., 2001, Gas Turbine Theory, Pearson Education Limited, UK, 442 pp.
- Rokahr, R. and Staudtmeister, K., 1996, The assessment of the stability of a cavern field in bedded salt with the help of the New Hannover dimensioning concept, Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, September 1993, Trans Tech Publications, Clausthal–Zellerfeld, Germany, pp. 533–544.
- Saberian, A. and Von Schonfeldt, H.A., 1973, Connective mixing of water with brine around the periphery of a vertical tube, Fourth Symposium on salt, V. 2, Northern Ohio Geol. Soc., pp. 195–202.
- Saint–Leu, C. and Sirieys, P., 1971, La Fatigue des Roches, Proceedings of International Symposium on Rock Fracture, Nancy.
- 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, S. and Mehta, B., 1993, Design and stability of salt cavern for compressed air energy storage (CAES), Seventh Symposium on Salt, Vol. 1, Elsevier Amsterdam, pp. 395–403.
- 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.
- Shames, I. H. and Cozzarelli, F. A., 1997, Elastic and Inelastic Stress Analysis. (Revised printing), USA: Taylor & Francis.
- Spiers, C. J., Schutjens, P. M. T. M., Brzesowsky, R. H., Peach, C. J., Liezenbrg, J. L. and Zwart, H. J., 1990, Experimental determination of constitutive parameters governing creep of rock salt by pressure solution, Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics, Geological Society Special Publication No. 45, pp. 215–227.
- Staudtmeister, K. and Rokahr R.B., 1997, Rock mechanical design of storage caverns for natural gas in rock salt mass, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Volume 34, Issues 3–4, April–June 1997, Pages 300.e1–300.e13
- Stead, D. and Szczepanik, Z., 1991, Time dependent acoustic emission studies on potash, Proceedings 32nd U. S. Rock Mech. Symp., Oklahoma, pp.471–479.
- Stormont, J. C. and Daemen, J. J. K., 1991, Laboratory study of gas permeability changes in rock salt during deformation, SAND90–2638, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, January 1991, p. 40.
- Stormont, J. C. and Fuenkajorn, K., 1994, Dilation–induced permeability changes in rock salt, Proc. 8th International Conf. Computer Methods and Advances in Geomechanics, Morgantown, West Virginia, May 22–28, pp. 1296–1273.
- Stormont, J. C., Daemen J. J. K. and Desai, C. S., 1992, Prediction of dilation and permeability changes in rock salt, International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 16, No. 8, pp. 545–569.
- Stormont, J. C., Howard, C. L. and Daemen, J. J. K., 1991a, Changes in rock salt permeability due to nearby excavation, Rock Mechanics as a Multidisciplinary Science, A. A. Balkema, pp. 899–907.

- Stormont, J. C., Howard, C. L. and Daemen, J. J. K., 1991b, In situ measurements of rock salt permeability change due to nearby excavation, SAND 90-3134, Sandi National Laboratories, Albuquerque.
- Suwanich P., 1986, *Potash and Rock Salt in Thailand : Nonmetallic Minerals Bulletin No.2*, Economic Geology Division, Department of Mineral Resources, Bangkok, Thailand.
- Swanson, S. R. and Brown, W. S., 1971, An observation of loading path independence of fracture in rock, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 8: pp. 277 – 281.
- Terzaghi, R.D., 1969, Brinefield subsidence at windsor, Ontario, Third Symposium on salt, V. 2, Northern Ohio Geol. Soc., pp. 298–307.
- Tharp, T. M., 1973, Behavior of three calcite rocks under tensile cyclic loading, M. S. Thesis, University of Wisconsin, Madison.
- Thoms, R. L. and R. M. Gehle, 1982, Experimental study of rocksalt for compressed air energy storage, *Rock Mechanics Cavern and Pressure Shafts*, A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 991–1002.
- Thorel, L. and Ghoreychi, M., 1996, Rock salt damage – Experimental results and interpretation, *Proceedings Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt*, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, September 1993, Trans Tech Publications, Clausthal, Germany, pp. 175–189.
- 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, *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.
- Walsri, C., Poonprakon, P., Thosuwat R. and Fuenkajorn, K. (2009). *Compressive and tensile strengths of sandstones under true triaxial stresses*. In *Proceeding 2nd Thailand Symposium on Rock Mechanics*. Chonburi, Thailand. 2: 199–218.
- 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.

- Wawersik, W. R. and Hannum, D. W., 1980, Mechanical behavior of New Mexico rock salt in triaxial compression up to 200°C, *Journal of Geophysical Research*, 85: pp. 891–900.
- Wetchasat, K., 2002, Assessment of mechanical performance of rock salt formations for nuclear waste repository in northeastern Thailand, M.S. thesis, Suranaree University of Technology, Thailand.
- Wolfenstine, J., Ruano, O. A., Wadsworth, J., and Sherby, O. D., 1991, Harper–Dorn creep in single crystalline NaCl, *Scripta Metall. Mat.*, 25, pp. 2065–2070.
- Wongsawat, S., Dhanesvanich, O. and Panjasutaros, S., 1992, Groundwater resources of Northeastern THAILAND, *Conference on Geologic Resources of Thailand: Potential for Future Development November 17–24, Department of Mineral Resources, Bangkok, Thailand*, pp. 507–521.
- Yahya, O. M. L., Aubertin, M. and Julien, M. R., 2000, A unified representation of the plasticity, creep and relaxation behavior of rock salt, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 37, No.5, United Kingdom, pp. 787–800.



ประวัตินักวิจัย

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