



รหัสโครงการ SUT7-719-54-12-52

## รายงานการวิจัย

### ชุดโครงการวิจัย

การพัฒนาแหล่งเกลือหินสำหรับกักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรม  
(Industrial Wastes Storage in Rock Salt)

### โครงการวิจัยย่อย

การศึกษาคักยภาพเชิงกลศาสตร์ของชั้นเกลือหินชุดมหาสารคาม  
ภายใต้สภาวะกักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรม  
(Mechanical Performance of Maha Sarakham Salt  
for Industrial Waste Storage)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-719-54-12-52

## รายงานการวิจัย

### ชุดโครงการวิจัย

การพัฒนาแหล่งเกลือหินสำหรับกักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรม

(Industrial Wastes Storage in Rock Salt)

### โครงการวิจัยย่อย

การศึกษาศักยภาพเชิงกลศาสตร์ของชั้นเกลือหินชุดมหาสารคาม

ภายใต้สภาวะกักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรม

(Mechanical Performance of Maha Sarakham Salt

for Industrial Waste Storage)

คณะผู้วิจัย

#### ผู้อำนวยการชุดโครงการวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เฟื่องขจร

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

#### หัวหน้าโครงการวิจัยย่อย

รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เฟื่องขจร

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2554

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มิถุนายน 2554

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ 2554 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากทีมงานหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีในการทดสอบและ นางสาวกัลญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

มิถุนายน 2554



## บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือ เพื่อพัฒนาเกณฑ์การแตกในหลายแกนของเกลื่อหินภายใต้การผันแปรของอุณหภูมิและความดันล้อมรอบ ความสามารถในการคาดคะเนการแตกของเกณฑ์ที่พัฒนาขึ้นถูกพิสูจน์โดยการเทียบกับผลการทดสอบกำลังกดในแกนเดียวและในสามแกน และกำลังดึงแบบบราซิลของตัวอย่างเกลื่อหินภายใต้อุณหภูมิที่ผันแปรจาก 273, 298, 404 ถึง 467 Kelvin (0-191 องศาเซลเซียส) การทดสอบกำลังกดได้ใช้ตัวอย่างเกลื่อหินรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ  $5.4 \times 5.4 \times 5.4$  ลูกบาศก์เซนติเมตร การทดสอบกำลังดึงแบบบราซิลได้ใช้ตัวอย่างเกลื่อหินที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 มิลลิเมตร มีความหนาเท่ากับ 24 มิลลิเมตร ผลการศึกษาระบุว่าค่ากำลังกดและกำลังดึงของเกลื่อหินจะลดลงเป็นเชิงเส้นตรงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แนวคิดทางด้านพลังงานความเครียดได้นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อพิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิต่อความเค้นและความเครียดที่จุดแตก และต่อคุณสมบัติความยืดหยุ่นของเกลื่อหิน โดยสมมติว่าเกลื่อหินมีคุณสมบัติเชิงเส้นตรงก่อนเกิดการวิบัติ พลังงานความเครียดเบี่ยงเบน ( $W_d$ ) ที่จุดแตกสามารถคำนวณในฟังก์ชันของพลังงานความเครียดเฉลี่ย ( $W_m$ ) ดังนั้นเกณฑ์การแตกในหลายแกนของเกลื่อหินภายใต้การผันแปรความดันล้อมรอบและอุณหภูมิได้พิจารณาผลกระทบของพลังงานความร้อน โดยใส่ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยความยืดหยุ่นและอุณหภูมิเข้าไปในความสัมพันธ์ระหว่าง  $W_d$  และ  $W_m$  เกณฑ์การแตกของพลังงานความเครียดที่พัฒนาขึ้นนี้สอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการทดสอบกำลังกดและกำลังดึงของเกลื่อหินที่อุณหภูมิต่างระดับกัน เกณฑ์การแตกที่เสนอขึ้นเป็นประโยชน์ในการหาเสถียรภาพเชิงอนุรักษ์ของโพรงเกลื่อที่ใช้กักเก็บอากาศอัดและก๊าซธรรมชาติ ที่ซึ่งชั้นเกลื่อหินที่อยู่ล้อมรอบจะมีการผันแปรอุณหภูมิอย่างมากในระหว่างการอัดและการปล่อยอากาศ หรือก๊าซธรรมชาติออกจากโพรง

## Abstract

The objective of this study is to develop a multi-axial strength criterion for rock salt under various temperatures and confining pressures. The predictability of the proposed criterion is verified by the results of uniaxial and triaxial compressive strength and Brazilian tensile strength tests on rock salt specimens subject to nominal temperatures ranging from 273, 298, 404 to 467 Kelvin (0–194 Celsius). For the compression testing the salt cores are dry-cut to obtain cubical shaped specimens with nominal dimensions of 5.4×5.4×5.4 cm<sup>3</sup>. The Brazilian test specimens are 48 mm diameter circular disks with a thickness of 24 mm. The results indicate that the compressive and tensile strengths of salt decrease linearly with increasing temperature. In order to consider the temperature dependency of the failure stress and strain and elastic properties the strain energy density concept is applied. Assuming that the salt is linearly elastic before failure, the distortional strain energy ( $W_d$ ) at failure can be calculated as a function of mean strain energy,  $W_m$ . The single multi-axial strength criterion for salt under various confining pressures and temperatures implicitly considers the effect of the thermal energy by incorporating the empirical equations between the elastic parameters and temperature into the  $W_d - W_m$  relation. The strain energy criterion agrees well with the strength results from different temperature levels. The proposed criterion is useful and practical for a conservative determination of the stability of compressed-air or gas storage caverns where the surrounding salt is subject to fluctuation of temperatures during product injection and withdrawal periods.

## สารบัญ

|  | หน้า      |
|--|-----------|
| กิตติกรรมประกาศ.....   | ก         |
| บทคัดย่อภาษาไทย.....   | ข         |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....  | ค         |
| สารบัญ.....  | ง         |
| สารบัญตาราง.....   | ช         |
| สารบัญรูปภาพ.....  | ซ         |
| <b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>                                       | <b>1</b>  |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....                | 1         |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....                           | 2         |
| 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....                                 | 2         |
| 1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....       | 2         |
| 1.5 วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง / เก็บตัวอย่าง..... | 3         |
| 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                             | 6         |
| 1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....                  | 6         |
| <b>บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>         | <b>7</b>  |
| 2.1 คุณสมบัตินของเกลือหิน.....                                 | 7         |
| 2.1.1 คุณสมบัตินของเกลือหินเชิงกลศาสตร์.....                   | 7         |
| 2.1.1 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของเกลือหิน.....            | 8         |
| <b>บทที่ 3 การเตรียมตัวอย่างเกลือหิน.....</b>                  | <b>11</b> |
| 3.1 วัตถุประสงค์.....  | 11        |
| 3.2 การเตรียมตัวอย่างเกลือหิน.....                             | 11        |

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| <b>บทที่ 4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ</b> .....   | 19   |
| 4.1 วัตถุประสงค์.....   | 19   |
| 4.2 โครงกทดสอบในสามแกนจริง.....   | 19   |
| 4.3 วิธีการทดสอบการกดในแกนเดียวและสามแกน.....   | 22   |
| 4.4 การคำนวณผล.....   | 23   |
| 4.4.1 การคำนวณหาค่าความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ย.....                            | 23   |
| 4.4.2 การคำนวณหาค่าความเค้นยึดติด.....  | 23   |
| 4.4.3 การคำนวณหาค่าคุณสมบัติความยืดหยุ่น.....   | 23   |
| 4.4.4 การคำนวณหาค่าพลังงานความเครียด.....   | 24   |
| 4.5 การทดสอบแรงดึงแบบบราซิล.....  | 24   |
| <b>บทที่ 5 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ</b> .....                                       | 27   |
| 5.1 วัตถุประสงค์.....   | 27   |
| 5.2 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....   | 27   |
| 5.2.1 ผลการทดสอบกำลังกดสูงสุดในแกนเดียวและสามแกน.....                                 | 27   |
| 5.2.2 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิล.....                                 | 31   |
| <b>บทที่ 6 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ 33</b>  |      |
| 6.1 วัตถุประสงค์.....   | 33   |
| 6.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อความแข็งและความยืดหยุ่นของเกลือหิน.....                      | 33   |
| 6.3 การพัฒนาเกณฑ์การแตกของเกลือหิน.....   | 39   |
| <b>บทที่ 7 การวิเคราะห์เสถียรภาพของโพรงเกลือด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (FLAC 4.0)</b> | 43   |
| 7.1 วัตถุประสงค์.....   | 43   |
| 7.2 การกำหนดตัวแปรในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์.....                                       | 43   |
| 7.3 เสถียรภาพของโพรงกักเก็บกากของเสียภายใต้อุณหภูมิ.....                              | 45   |
| 7.4 เสถียรภาพของห้อง (อุโมงค์) กักเก็บกากของเสียในชั้นเกลือหิน.....                   | 50   |

## สารบัญ (ต่อ)

|                      | หน้า |
|----------------------|------|
| บทที่ 8 บทสรุป.....  | 53   |
| บรรณานุกรม.....      | 55   |
| ประวัตินักวิจัย..... | 63   |





## สารบัญตาราง

| ตารางที่   | หน้า |
|--|------|
| 3.1 ความลึกและขนาดของตัวอย่างเกลือหินในการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน.....   | 14   |
| 3.2 ความลึกและขนาดของตัวอย่างเกลือหินในการทดสอบกำลังกดในสามแกน.....  | 16   |
| 5.1 ผลการทดสอบกำลังกดในแกนเดียวภายใต้อุณหภูมิ.....   | 28   |
| 5.2 ผลการทดสอบการกดในสามแกนภายใต้อุณหภูมิ.....   | 29   |
| 5.3 ผลการทดสอบกำลังดึงสูงสุดแบบบราซิลภายใต้อุณหภูมิ.....   | 32   |
| 6.1 ค่าคุณสมบัติความยืดหยุ่นและพลังงานความเครียดของเกลือหินที่จุดแตก.....  | 34   |
| 7.1 คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และอุณหพลศาสตร์ของวัสดุที่ใช้ในแบบจำลอง.....  | 44   |
| 7.2 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณและผลการคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัย<br>ที่ตำแหน่งต่างๆ สำหรับโพรงกักเก็บกากของเสีย.....                | 49   |
| 7.3 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ และผลการคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัย<br>ที่ตำแหน่งต่างๆ ของห้องหรืออุโมงค์สำหรับกักเก็บกากของเสีย..... | 52   |



## สารบัญรูปภาพ

| รูปที่ | หน้า |
|--------|------|
| 1.1    | 4    |
| 3.1    | 12   |
| 3.2    | 12   |
| 3.3    | 13   |
| 4.1    | 20   |
| 4.2    | 20   |
| 4.3    | 21   |
| 5.1    | 28   |
| 5.2    | 30   |
| 5.3    | 32   |
| 6.1    | 35   |
| 6.2    | 36   |
| 6.3    | 37   |
| 6.4    | 38   |
| 6.5    | 40   |
| 7.1    | 46   |
| 7.2    | 46   |
| 7.3    | 47   |
| 7.4    | 48   |
| 7.5    | 49   |
| 7.6    | 51   |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

อุณหภูมิจจะมีผลกระทบต่อความแข็งและความยืดหยุ่นของหิน (Vostseen and Schellschmidt, 2003; Shimada, 2000; Okatov et. al, 2003) ผลงานวิจัยในอดีต ระบุว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความแข็งและความยืดหยุ่นของหินจะลดลง สำหรับเกลือหินงานวิจัยส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของอุณหภูมิจะเน้นไปที่การเปลี่ยนแปลงรูปร่างในเชิงเวลา (creep) โดยผลจากการศึกษาได้นำมาประยุกต์ใช้ในการประเมินเสถียรภาพระยะยาวของชั้นเกลือหินที่อยู่รอบโพรงหรืออุโมงค์ ที่ใช้กักเก็บกากนิวเคลียร์ ได้มีการพัฒนาสมการที่ซับซ้อนมากมายเพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมของเกลือหินภายใต้อุณหภูมิและแรงกด สมการดังกล่าวมีค่าตัวแปรและค่าคงที่มากมายที่ไม่สามารถกำหนดได้โดยง่ายส่วนใหญ่จำเป็นต้องมีผลการทดสอบที่ซับซ้อนเข้ามาประกอบ ดังนั้นสมการเหล่านี้จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมเหมือนแร่ทั่วไป นอกจากนี้การศึกษาด้านทฤษฎีและในห้องปฏิบัติการสำหรับผลกระทบของอุณหภูมิต่อความแข็งของเกลือหินมีน้อยมาก ในขณะที่ผลการศึกษาดังกล่าวเป็นที่ต้องการเพื่อใช้วิเคราะห์เสถียรภาพและออกแบบโพรงหรืออุโมงค์ในชั้นเกลือหินที่ใช้กักเก็บกากธรรมชาติ พลังงานอากาศอัด และของเสียจากภาคอุตสาหกรรม ประเด็นสำคัญอีกประการหนึ่ง คือ การทดสอบแรงกดในสามแกน (Triaxial Compression Test – Elliott, 1983; Brook, 1983) ของแท่งตัวอย่างหินรูปทรงกระบอก จะมีข้อจำกัดที่สำคัญประการหนึ่งของวิธีการทดสอบนี้ กล่าวคือ ค่าความเค้นในแกนหลักกลาง (Intermediate principal stress,  $\sigma_2$ ) และค่าความเค้นในแกนหลักรอง (Minimum principal stress,  $\sigma_3$ ) จะมีค่าเท่ากันในระหว่างการทดสอบ โดยปกติแล้วสภาวะของความเค้นที่เกิดขึ้นจริงในภาคสนามจะมีค่าไม่เท่ากัน นอกจากนี้ค่าความเค้นในแกนหลักทั้งสามทิศทางไม่จำเป็นต้องเท่ากัน คือ  $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$  เรียกว่า ความเค้นกดในสามแกนจริง ดังนั้นผลที่ตรวจวัดได้ เช่น ค่าความเค้นกดสูงสุด ค่ามุมเสียดทานภายในค่าความเค้นยึดเหนี่ยว และค่าความยืดหยุ่นจะแตกต่างจากคุณสมบัติที่แท้จริงของมวลหินในภาคสนามอย่างชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับหินที่มีความแข็งน้อยและหินที่มีคุณสมบัติขึ้นกับเวลา เช่น เกลือหิน หินโคลน หินดินดาน เป็นต้น นอกจากนี้ผลกระทบที่เกิดจากค่าความเค้นในแกนหลักกลางที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้หินมีความแข็งมากขึ้นด้วย (Walsri, 2009)

กฎเกณฑ์การแตกที่ใช้สำหรับคำนวณค่าความเค้นในสามมิติและพิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิมีน้อยมาก อีกทั้งกฎเกณฑ์การแตกในสามมิติที่ใช้อยู่ในปัจจุบันสำหรับเกลือหินเองยังไม่เพียงพอ เนื่องจากกฎเกณฑ์ต่างๆ ที่สร้างขึ้นยังอยู่ในรูปแบบที่ไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงทั้งการออกแบบและการวิเคราะห์โครงสร้างทางธรณีวิทยา

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ 1) ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาผลกระทบของอุณหภูมิและของความเค้นหลักกลาง ( $\sigma_2$ ) ต่อความแข็งแรงของเกลือหิน 2) พัฒนাসมการจากผลการทดสอบเพื่อใช้เป็นเกณฑ์การแตกของเกลือหินภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน และ 3) สาธิตการประยุกต์ใช้ผลที่ได้จากการทดสอบและการวิเคราะห์โดยการจำลองโพรงและอุโมงค์ในชั้นเกลือหินภายใต้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรม

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการได้มาจากชุดหินมหาสารคาม
- 2) ทดสอบความแข็งแรงของหินแบบดั้งเดิม ( $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$ ) และแบบหลายแกน ( $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ )
- 3) ทำการทดสอบตัวอย่างเกลือหินขนาด  $5.4 \times 5.4 \times 5.4 \text{ cm}^3$  มากกว่า 30 ตัวอย่าง
- 4) ดำเนินการทดสอบภายใต้อุณหภูมิที่ผันแปรระหว่าง 0–200 องศาเซลเซียส
- 5) ดำเนินการทดสอบภายใต้สภาวะแห้ง
- 6) ไม่มีการทดสอบในภาคสนาม
- 7) ตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติ และนำเสนอในการประชุมวิชาการระดับชาติ

## 1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

ความมีเสถียรภาพทางด้านกลศาสตร์ของเกลือหินเป็นสิ่งสำคัญที่สุดประการหนึ่งสำหรับการออกแบบและก่อสร้างโพรงในชั้นเกลือหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือเพื่อกักเก็บกากของเสียที่ไม่สามารถบำบัดหรือนำกลับมาใช้ใหม่ได้จากภาคอุตสาหกรรม การคาดคะเนหรือการประเมินเสถียรภาพของเกลือหินจะทำได้อย่างถูกต้องหากการคำนวณด้วยวิธีเดียวคือ การใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งวิธีการนี้เป็นที่ยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลายในต่างประเทศเพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้องแม่นยำ สิ่งสำคัญที่สุดคือคุณสมบัติและพฤติกรรมของเกลือหินที่ถูกนำมาใช้ในการคำนวณทางคอมพิวเตอร์จะต้องมีความถูกต้องและใกล้เคียงสอดคล้องกับคุณสมบัติจริงของชั้นเกลือหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ดังนั้นการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อให้ได้มาซึ่งผลการทดสอบของคุณสมบัติเหล่านี้จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการดำเนินการควบคู่กันไป

เพื่อให้ได้มาซึ่งผลการทดสอบที่มีความถูกต้องและใกล้เคียงสอดคล้องกับคุณสมบัติจริงของชั้นเกลือหิน การทดสอบในห้องปฏิบัติการจึงจำเป็นต้องจำลองคุณลักษณะของความเค้นให้สมจริง กล่าวคือ ในสภาวะแท้จริงของเกลือหินที่อยู่ตามธรรมชาติจะอยู่ภายใต้สภาวะความเค้นไม่เท่ากันทุกทิศทาง (Anisotropic) และอยู่ภายใต้อุณหภูมิสูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทดสอบหาคุณสมบัติกำลังรับแรงกดสูงสุดของเกลือหินในสามแกนจริง หรือ  $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$  และทดสอบคุณสมบัติกำลังรับแรงกดสูงสุดภายใต้อุณหภูมิสูงด้วย ผลการทดสอบที่ได้จากการวิจัยนี้จะสามารถสร้างความสัมพันธ์ของค่าความเค้นของเกลือหินในแต่ละทิศทางที่สอดคล้องกับสภาวะที่แท้จริงได้

## 1.5 วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง / เก็บข้อมูล

การวิจัยแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

### ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

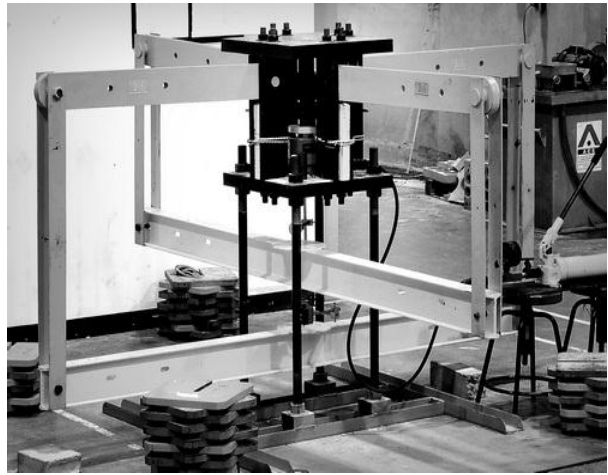
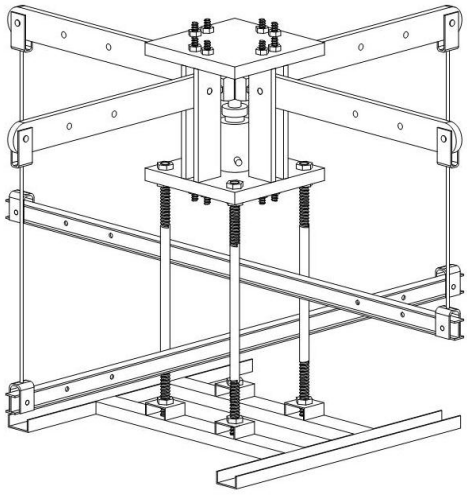
การค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ออกเป็น 2 ประเด็นหลัก ซึ่งประกอบด้วย การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน รวมไปถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของเกลือหิน

### ขั้นตอนที่ 2 การจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหิน

ได้มีการจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหินเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด  $5.4 \times 5.4 \times 5.4 \text{ cm}^3$  โดยจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 กลุ่ม คือ 1) การทดสอบค่าความแข็งของเกลือหินในหลายแกน (Poly-axial strength test) 2) การทดสอบค่าความแข็งของเกลือหินภายใต้อุณหภูมิ โดยจะผันแปรอุณหภูมิระหว่าง 0-200 องศาเซลเซียส ตัวอย่างเกลือหินจะถูกนำมาทดสอบไม่น้อยกว่า 30 ตัวอย่าง รูปที่ 1.1 แสดงโครงกวดทดสอบในสามแกนจริงที่จะใช้ในการทดสอบ

### ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบหาค่าความแข็งในสามแกนจริงของเกลือหิน

ในขั้นตอนนี้ได้ทำการทดสอบหาค่าความแข็งในสามแกนจริงของเกลือหินโดยใช้โครงกวดทดสอบในสามแกนจริง (Poly-axial load frame) โดยผันแปรค่าความเค้นหลักกรอบ ( $\sigma_3$ ) ระหว่าง 0-24 MPa และผันแปรค่าความเค้นหลักกลาง ( $\sigma_2$ ) ระหว่าง 0-80 MPa



รูปที่ 1.1 โครงกดทดสอบในสามแกนจริง



#### ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบหาค่าความแข็งในสามแกนของเกลือหินภายใต้ อุณหภูมิสูง

ในขั้นตอนนี้ได้ทำการทดสอบหาค่าความแข็งในสามแกนจริงของเกลือหินโดยใช้โครง  
กวดทดสอบในสามแกนจริง (Polyaxial load frame) ตัวอย่างเกลือหินจะถูกเตรียมเป็นรูปทรง  
สี่เหลี่ยมขนาด  $5.4 \times 5.4 \times 5.4 \text{ cm}^3$  และได้ผันแปรอุณหภูมิระหว่าง 0-200 องศาเซลเซียส เพื่อ  
ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อความแข็งของเกลือหิน

#### ขั้นตอนที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

นำผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการไปสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ โดย  
การอธิบายค่าความแข็งของหินในสามแกนได้เลือกใช้สมการเชิงคณิตศาสตร์ซึ่งจะนำไปสู่การ  
พัฒนาเกณฑ์การแตกของเกลือหินต่อไป

#### ขั้นตอนที่ 6 การออกแบบและวิเคราะห์โพรงและอุโมงค์เบื้องต้นโดยใช้ แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

ผลที่ได้จากการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ได้ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อการออกแบบ  
เบื้องต้นเกี่ยวกับรูปร่าง ขนาด ความลึก และแผนผังของโพรงกักเก็บกากของเสียในชั้นเกลือหิน  
แนวคิดในการออกแบบมี 2 รูปแบบ คือ

- 1) โพรงกักเก็บกากของเสียจะถูกสร้างขึ้นโดยการละลาย (Solution Mining Cavern)
- 2) ห้องกักเก็บกากของเสียที่ถูกสร้างขึ้นโดยการทำเหมืองแร่ใต้ดิน (Underground Excavation)

ในสองรูปแบบนี้ การวิเคราะห์จะมุ่งไปถึงเสถียรภาพของเกลือหินที่อยู่รอบๆ โพรง  
หรือห้องที่ใช้กักเก็บกากของเสีย

ค่าของความมีเสถียรภาพจะใช้เป็นตัวกำหนดการออกแบบขนาด รูปร่าง ความลึก  
และระยะห่างระหว่างโพรงหรือห้อง รูปแบบที่มีเสถียรภาพสูงที่สุดจะถูกนำเสนอเป็นส่วนหนึ่ง  
ของผลการวิจัยในครั้งนี้ แต่ถ้าผลของการวิจัยพบว่า ไม่ว่าจะรูปร่างหรือขนาดของโพรงแบบใดที่ถูก  
ขุดขึ้นจะไม่สามารถทำให้เกิดเสถียรภาพรอบๆ โพรงได้ ในกรณีนี้ผลของการวิจัยก็จะถูกสรุปว่า  
ชั้นเกลือหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือไม่เหมาะสมที่จะใช้กักเก็บกากของเสียจาก  
ภาคอุตสาหกรรม

## ขั้นตอนที่ 7 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิด ขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุป ได้นำเสนอโดยละเอียดในรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ เพื่อที่จะส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ และตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ

### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลงานวิจัยที่เสนอมานี้มีประโยชน์มากมายกับงานด้านธรณีวิทยา วิศวกรรม สิ่งแวดล้อม และวิศวกรรมธรณี ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

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

### 1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยที่เสนอมานี้จะมีประโยชน์อย่างมากและโดยตรงกับหลายหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชน สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ และวิศวกรรมธรณี รวมถึงไปถึงหน่วยงานที่ทำงานเกี่ยวข้องกับการก่อสร้างในชั้นหิน เช่น การสร้างเขื่อน การสร้างอุโมงค์ เหมืองแร่บนดินและใต้ดิน หน่วยงานเหล่านี้ได้แก่

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



## บทที่ 2

### การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 2 ประเด็นหลัก ประกอบด้วย การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน และปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของเกลือหิน รวมไปถึงผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่าความแข็งของเกลือหิน

#### 2.1 คุณสมบัติของเกลือหิน

##### 2.1.1 คุณสมบัติของเกลือหินเชิงกลศาสตร์

การศึกษาและวิจัยด้านกลศาสตร์เกลือหินมีจุดมุ่งหมายหลักเพื่อศึกษากลไกและพฤติกรรมของเกลือหินในระยะเวลายาว โดยอาศัยการทดสอบเชิงกลศาสตร์และความรู้พื้นฐานทางวิศวกรรมศาสตร์มาประยุกต์ใช้ เพื่อหาคุณสมบัติของเกลือหินและสร้างสมการหรือกฎเกณฑ์เชิงคณิตศาสตร์ในการประเมินและคาดคะเนพฤติกรรมของเกลือหินในสภาวะชั้นหินที่มีแรงกด ความร้อน และความชื้น เป็นต้น คุณสมบัติของเกลือหินเชิงกลศาสตร์จึงเกี่ยวข้องกับค่าความเค้น ความเครียด อุณหภูมิ และเวลา คุณสมบัติเหล่านี้จะถูกกำหนดเป็นส่วนหนึ่งของสมการเชิงคณิตศาสตร์เพื่อให้สามารถอธิบายพฤติกรรมของเกลือหินในด้านต่างๆ ได้ครอบคลุม

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

พฤติกรรมเชิงยืดหยุ่น (Elastic behavior) ของเกลือหินจะถูกพิจารณาในลักษณะของความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงและมีการวิบัติแบบเปราะ ความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงสามารถสังเกตได้เมื่อมีแรงกดต่ำกว่าแรงกดอ่อนตัว ในช่วงของความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงจะสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นได้ตามปกติโดยเกลือหินจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่ต่ำกว่าหินชนิดอื่นๆ

พฤติกรรมเชิงยืดหยุ่น-พลาสติก (Elastic and plastic behavior) ของเกลือหินจะเกิดขึ้นเมื่อแรงกดที่มากกระทำต่อเกลือหินยังไม่เกินจุดอ่อนตัว เมื่อปล่อยแรงกดจะทำให้เกลือหินกลับสู่สภาพเดิม หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือเกลือหินมีการเปลี่ยนรูปไปชั่วคราวเท่านั้น แต่เมื่อให้แรงกดต่อไปเกลือหินจะเข้าสู่ช่วงที่เป็นพลาสติก กล่าวคือ ความเค้นจะเลยจุดความเค้นอ่อนตัวไป แล้วนั่นเอง เมื่อลดแรงกดเกลือหินจะไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ ถ้าให้แรงกดต่อไปเกลือหินจะไม่สามารถทนแรงกดที่สะสมไว้ได้และในที่สุดก็จะเกิดการวิบัติ

พฤติกรรมเชิงพลาสติก (Plastic behavior) ของเกลือหินจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรจนกว่าแรงที่กระทำจะเกินจุดอ่อนตัว (Thorel and Ghoreychi, 1996; Fryne et al., 1996) ที่แรงกดสูงเช่นนี้เกลือหินจะมีการวิรูปไปเรื่อยๆ อย่างไม่มีที่สิ้นสุดหากแรงกดที่กระทำยังคงเท่ากับแรงกดคงที่ เมื่อถึงขีดจำกัดของความเครียดค่าหนึ่งเกลือหินก็จะไม่สามารถทนรับแรงกดนี้ต่อไปได้และจะเกิดการวิบัติ

การเปลี่ยนแปลงรูปของเกลือหินที่ได้รับอุณหภูมิระดับสูงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของผลึกได้ง่าย เมื่อได้รับแรงกดก็จะเกิดแรงในแนวเฉือนทำให้เกิดการเคลื่อนไหลง่ายขึ้น ดังนั้นในเชิงกลศาสตร์แรงกดและความร้อนจะเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญในการศึกษาพฤติกรรมกรรมและกลไกการเคลื่อนไหลของเกลือหิน (Duesbery et al., 1991; Senseny et al., 1992; Carter et al., 1993) นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงรูปของเกลือหินจะมีความสัมพันธ์กับอัตราความเครียดแบบไม่ยืดหยุ่นและความเค้นแปรผัน (Spiers et al., 1990; Barber, 1990; Chokski and Langdon, 1991; Wolfenstine et al., 1991)

### 2.1.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของเกลือหิน

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของเกลือหินมีหลายประการ ซึ่งจะสะท้อนให้เห็นในรูปของการเปลี่ยนรูปหรือการเคลื่อนไหล รวมทั้งยังทำให้ความต้านทานต่อแรงกดหรือแรงดึงมีค่าลดลง Franssen (1998) และ Fokker (1998) ได้อธิบายปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การเคลื่อนไหลและความต้านทานของเกลือหินทั้งสถานะในชั้นเกลือหินและในห้องปฏิบัติการ ซึ่งรวมไปถึงขนาดของผลึก แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึก การเปลี่ยนรูปตามเวลา อุณหภูมิ ความชื้น และสิ่งเจือปน เป็นต้น

#### ผลกระทบของอุณหภูมิ

ความร้อนหรืออุณหภูมิจะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนรูปของเกลือหินอย่างมาก และทำให้ช่วงเวลาการเคลื่อนไหลยาวนานมากขึ้นและยังทำให้ความเหนียวของเกลือหินเพิ่มขึ้นด้วยการศึกษาที่เกี่ยวกับอุณหภูมิและความลึกในชั้นหินได้มีผู้วิจัยหลายท่านศึกษาไว้แล้ว (Franssen

and Spiers, 1990; Cristescu and Hunsche, 1991; Raj and Pharr, 1992; Senseny et al., 1992; Berest and Blum, 1993; Carter et al., 1993; Schneefub and Droste, 1996; Berest, Brouard and Durup, 1998) การศึกษาดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังนี้ ระดับความลึกของชั้นหินที่เพิ่มขึ้นจะทำให้มีความร้อนสูง ความร้อนจะทำให้เกลือหินมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับพลาสติกมากยิ่งขึ้นและทำให้ความต้านแรงกดลดลง โดยปกติเกลือหินมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส แต่การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ตลอดระยะเวลาเพียง 8 ชั่วโมง ก็สามารถทำให้เกลือหินสูญเสียความต้านแรงกดไปได้ Cristescu (1994) และ Cristescu and Hunsche (1996) ได้แนะนำว่าการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ควรใช้อัตราการยวบตัวที่ต่ำกว่า  $10^{-8} \text{ s}^{-1}$  และที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ควรใช้อัตราการยวบตัวต่ำกว่า  $10^{-7} \text{ s}^{-1}$  เพราะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกลือหินเกิดการเคลื่อนไหลเร็วขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดการวิรูปได้ง่าย (Harmami et al., 1996)

### ปัจจัยอื่น

ขนาดผลึกหรือขนาดเม็ดเกลือจะมีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนรูปร่างและการเคลื่อนไหลของเกลือหิน กล่าวคือ เมื่อเปรียบเทียบขนาดผลึกกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่าง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 mm พบว่าผลึกที่มีขนาดใหญ่จะมีโอกาสเกิดแนวแตก (Cleavage plane) และระนาบเลื่อน (Slip plane) ได้มากขึ้น (Aubertin et al., 1993; Billiotte et al., 1996; Aubertin, 1996) โดย Franssen and Spiers (1990) Raj and Pharr (1992) Senseny et al. (1992) และ Wanten, et al. (1993) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของผลึกและการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกของเกลือหินพบว่าความต้านแรงเฉือนและการเปลี่ยนแปลงรูป (Shear strength and deformation) จะเกิดขึ้นตามแนวหรือทิศทางของผลึก ดังนั้นตัวอย่างเกลือหินที่มีขนาดเล็กเกินไปจะมีความต้านแรงกดที่แปรปรวน ผลการทดสอบที่ได้จึงไม่สามารถเปรียบเทียบกับขนาดอื่นได้ ดังนั้น ASTM จึงได้ออกข้อกำหนดมาตรฐานสากลขึ้น (ASTM D 2938, D 2664 and D 3967; Barber, 1990) เพื่อที่จะกำหนดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่าง ให้มีขนาดมาตรฐาน และสามารถเทียบเคียงกันได้ กล่าวคือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต้องมากกว่าสิบเท่าของขนาดผลึก

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของเกลือหินในด้านความต้านทานของเกลือหิน เกลือหินที่มีลักษณะเนื้อต่างกันจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกต่ำกว่าบริเวณที่เป็นเนื้อเดียวกัน ลักษณะดังกล่าวนี้ Wanten et al. (1996) และ Allemandou and Dusseault (1996) ได้สังเกตพฤติกรรมเกลือหินจากการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนและการทดสอบแรงกดในแกนเดียวพบว่า ค่าความเค้นจะขึ้นกับแรงยึดเหนี่ยวภายในผลึกและรอยต่อระหว่างผลึกของเกลือหิน ความเปราะเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของเกลือหินที่แสดงถึง

ความสามารถในการยึดเหนี่ยวระหว่างผลึก ยกตัวอย่างเช่น ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง เมื่อมีการตัดและการขัดตัวอย่างเกลือหินจะพบว่าบริเวณขอบของตัวอย่างอาจเกิดการแตกได้ง่าย นั่นเป็นเพราะว่าเกลือหินมีความสามารถในการยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกค่อนข้างต่ำ

อัตราแรงกดที่กระทำต่อเกลือหินที่แตกต่างกันจะทำให้เกลือหินมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างตามกาลเวลา ซึ่งเวลาในการเปลี่ยนรูปจะไม่เท่ากัน กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือการเคลื่อนไหลของเกลือหินที่เกิดขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาในสภาวะแรงกดที่แตกต่างกัน ภายใต้ อัตราการสูงเกลือหินจะมีพฤติกรรมแบบเปราะ แต่ภายใต้อัตราแรงกดที่ต่ำจะทำให้พฤติกรรมของเกลือหินเป็นแบบพลาสติกมากขึ้น เป็นผลให้มีจุดอ่อนตัวของความต้านแรงกดที่ต่ำ ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวได้ศึกษาโดย Aubertin et al. (1993) Hardy (1996) และ Roberson (1995) พบว่าน้ำหนักกดทับในชั้นเกลือหินภายใต้ระยะเวลาานจะค่อยๆ ลดลง โดย Hardy (1996) ได้ทำการทดสอบตัวอย่างเกลือหินด้วยแรงกด 10.3 MPa และรักษาระดับการเปลี่ยนรูปไว้ในระยะเวลา 12 เดือน พบว่าความต้านแรงกดจะลดลงไปถึง 21%

ความชื้นจะทำให้คุณสมบัติของเกลือหินเปลี่ยนไป กล่าวคือ ความต้านแรงกดของเกลือหินจะลดลง (Hunsche and Schulze, 1996; Cleach et al., 1996) เนื่องจากเกลือหินมีความไวต่อความชื้นในอากาศ ความชื้นจะทำปฏิกิริยาเคมีกับเกลือหินทำให้เกิดการละลายเกลือและมีน้ำเกลือเยิ้มออกมา สำหรับการเตรียมตัวอย่างเกลือหินในห้องปฏิบัติการสามารถป้องกันความชื้นได้ด้วยการห่อหุ้มด้วยพลาสติกกันความชื้น นอกจากนี้แล้วความชื้นสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายเมื่อมีอุณหภูมิเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา Billiotte (1993) Bonte (1993) และ Adler et al. (1993) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของความชื้นต่อความต้านแรงกดด้วยการทดสอบกับตัวอย่างเกลือหินที่มีความชื้นสูงโดยการนำตัวอย่างเกลือหินแช่ในน้ำเกลือ พบว่าเกลือจะมีความต้านแรงกดลดลง (เกลือหินที่แห้งปกติจะมีกำลัง 30 MPa) โดยลดเหลือเพียง 1 MPa เมื่อมีความชื้นในเกลือหินเพียง 7%

สิ่งเจือปนหรือสิ่งสกปรกในเนื้อหินเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อความต้านแรงกดของเกลือหิน เช่น Anhydrite และตะกอนอื่นๆ ที่มีการกระจายตัวในเกลือหิน ในบางกรณีจะไปลดความต้านแรงกดและทำให้เกลือหินมีพฤติกรรมการเคลื่อนไหลที่ต่างกันออกไป (Peach, 1993; Hunsche et al., 1996; Hansen et al., 1987) สิ่งเจือปนในเกลือหินจะมีผลต่อพฤติกรรมการเคลื่อนไหลแม้จะมีจำนวนเพียงเล็กน้อยก็ตาม เพราะสิ่งเจือปนในเนื้อหินจะเป็นตัวกีดขวางแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกและการเคลื่อนไหลของเกลือหิน สิ่งเจือปนทำให้เกิดการแปรผันในเชิงกลศาสตร์โดยจะทำให้แรงกดมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอและไม่ต่อเนื่องกัน (Franssen and Spiers, 1990; Raj and Pharr, 1992; Senseny et al., 1992)

## บทที่ 3

### การจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหิน

#### 3.1 วัตถุประสงค์

เนื้อหาในบทนี้ได้อธิบายขั้นตอน วิธีการ และข้อปฏิบัติในการจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหินเพื่อใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ

#### 3.2 การเตรียมตัวอย่างเกลือหิน

ตัวอย่างเกลือหินทั้งหมดที่ใช้การทดสอบได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท เหมืองแร่ อาเซียนโปแตช จำกัด อ.บ้านหินจระเข้ จ.ชัยภูมิ ซึ่งขุดเจาะมาจากเกลือชั้นกลาง (Middle salt) ในการเตรียมตัวอย่างเกลือหินสำหรับทดสอบในห้องปฏิบัติการมีวิธีการและขั้นตอนดังต่อไปนี้

##### 1) การตัดตัวอย่างเกลือหิน

นำแท่งตัวอย่างเกลือหินมาเข้าเครื่องตัด (Hack Sawing Machine) ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งกรรมวิธีการตัดได้ดำเนินการตัดแบบแห้ง แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ (1) การจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหินสำหรับการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน ตามมาตรฐาน ASTM D3967 ให้มีรูปร่างแผ่นกลมโดยมีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 48 mm และความหนาขนาด 24 mm ดังรูปที่ 3.2 (2) การจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหินสำหรับการทดสอบแรงกดในสามแกนให้มีรูปร่างทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด  $5.4 \times 5.4 \times 5.4 \text{ cm}^3$  ดังรูปที่ 3.3 และตารางที่ 3.1 ถึงตารางที่ 3.2 แสดงความลึกและขนาดของเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบ

##### 2) การเพิ่มและลดอุณหภูมิของตัวอย่างเกลือหิน

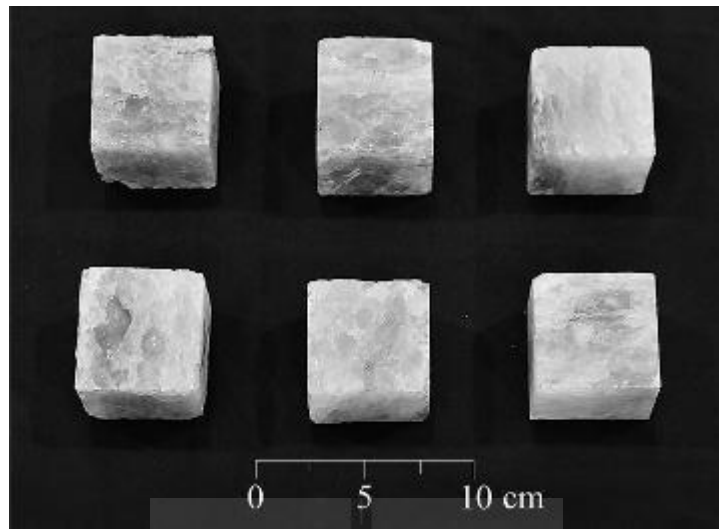
เนื่องจากในงานวิจัยนี้จะมีการทดสอบโดยพิจารณาถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงกดของเกลือหิน ดังนั้นกรรมวิธีการเพิ่มอุณหภูมิของตัวอย่างเกลือหินสามารถทำได้ด้วยการนำแท่งตัวอย่างเกลือหินเข้าตู้อบ (Tefal Model 572325) และนำเข้าเครื่องทำความเย็นเพื่อลดอุณหภูมิ ในการเพิ่มและลดอุณหภูมินั้นได้นำตัวอย่างเกลือหินและหัวกดให้แรงทั้งสามทิศทางการปรับอุณหภูมิเป็นระยะเวลาทั้งสิ้น 24 ชั่วโมงก่อนการทดสอบ



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างเกลือหินถูกตัดแต่งให้มีขนาด  $5.4 \times 5.4 \times 5.4 \text{ cm}^3$



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างเกลือหินบางส่วนที่ได้เตรียมไว้สำหรับการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนตามมาตรฐาน ASTM D3967



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างเกล็ดหินขนาด  $5.4 \times 5.4 \times 5.4 \text{ cm}^3$  บางส่วนที่ได้เตรียมไว้สำหรับการทดสอบกำลังกดในสามแกน



ตารางที่ 3.1 ความลึกและขนาดของตัวอย่างเกลือหินในการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน

| Specimen no. | Depth (m)     | Diameter (mm) | Height (mm) | Density (g/cc) |
|--------------|---------------|---------------|-------------|----------------|
| BZ-1         | 250.45-250.48 | 47.7          | 27.0        | 2.05           |
| BZ-2         | 250.52-250.55 | 47.8          | 24.3        | 2.12           |
| BZ-3         | 250.70-250.73 | 47.5          | 25.3        | 2.10           |
| BZ-4         | 250.73-240.75 | 47.5          | 24.5        | 2.17           |
| BZ-5         | 252.00-252.03 | 47.8          | 24.3        | 2.10           |
| BZ-6         | 252.03-252.05 | 47.8          | 24.6        | 2.10           |
| BZ-7         | 252.05-252.08 | 47.8          | 24.7        | 2.08           |
| BZ-8         | 252.08-252.10 | 47.8          | 25.2        | 2.17           |
| BZ-9         | 251.38-251.40 | 47.5          | 25.4        | 2.04           |
| BZ-10        | 251.35-251.38 | 47.5          | 24.3        | 2.28           |
| BZ-11        | 251.32-251.35 | 47.5          | 24.4        | 2.00           |
| BZ-12        | 251.30-252.32 | 47.5          | 24.5        | 2.23           |
| BZ-13        | 252.40-252.43 | 47.7          | 24.6        | 2.14           |
| BZ-14        | 252.43-252.45 | 47.7          | 25.3        | 2.10           |
| BZ-15        | 252.45-252.48 | 47.3          | 24.4        | 2.01           |
| BZ-16        | 251.57-251.60 | 47.4          | 25.4        | 2.13           |
| BZ-17        | 251.55-251.57 | 47.4          | 25.2        | 2.14           |
| BZ-18        | 251.53-251.55 | 47.4          | 25.5        | 2.09           |
| BZ-19        | 250.38-250.40 | 47.6          | 25.1        | 2.10           |
| BZ-20        | 250.35-250.38 | 47.6          | 26.6        | 2.02           |
| BZ-21        | 254.82-254.85 | 47.5          | 23.8        | 2.10           |
| BZ-22        | 253.12-253.14 | 47.8          | 23.6        | 2.13           |
| BZ-23        | 253.14-253.17 | 47.5          | 23.5        | 2.03           |
| BZ-24        | 253.17-253.19 | 47.5          | 23.9        | 2.08           |
| BZ-25        | 253.19-253.22 | 47.3          | 23.8        | 2.13           |
| BZ-26        | 253.22-253.24 | 47.5          | 24.3        | 2.11           |
| BZ-27        | 247.12-247.14 | 47.6          | 23.4        | 2.09           |



**ตารางที่ 3.1** ความลึกและขนาดของตัวอย่างเกลือหินในการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน  
(ต่อ)

| Specimen no. | Depth (m)     | Diameter (mm) | Height (mm) | Density (g/cc) |
|--------------|---------------|---------------|-------------|----------------|
| BZ-28        | 247.14-247.17 | 47.4          | 23.7        | 2.12           |
| BZ-29        | 247.17-247.19 | 47.5          | 24.0        | 2.10           |
| BZ-30        | 247.19-247.21 | 47.4          | 23.9        | 2.10           |
| BZ-31        | 247.21-247.24 | 47.5          | 24.4        | 1.99           |
| BZ-32        | 247.24-247.27 | 47.5          | 24.5        | 2.19           |
| BZ-33        | 247.27-247.30 | 47.6          | 24.6        | 2.17           |
| BZ-34        | 247.30-247.33 | 47.4          | 25.3        | 2.11           |
| BZ-35        | 247.33-247.35 | 47.5          | 24.4        | 2.17           |
| BZ-36        | 247.35-247.37 | 47.6          | 25.3        | 2.13           |
| BZ-37        | 247.38-247.40 | 47.4          | 24.5        | 2.05           |
| BZ-38        | 247.40-247.42 | 47.5          | 24.3        | 2.10           |
| BZ-39        | 247.42-247.45 | 47.6          | 24.6        | 1.93           |
| BZ-40        | 247.45-247.48 | 47.4          | 24.7        | 2.07           |

ตารางที่ 3.2 ความลึกและขนาดของตัวอย่างเกลือในการทดสอบกำลังกดในสามแกน

| Specimen no. | Depth (m)     | Diameter (mm) | Width (mm) | Height (mm) | Density (g/cc) |
|--------------|---------------|---------------|------------|-------------|----------------|
| 41           | 171.45-171.50 | 52.1          | 54.3       | 53.0        | 2.20           |
| 42           | 172.85-172.90 | 56.2          | 57.4       | 55.1        | 2.13           |
| 43           | 173.20-172.25 | 53.9          | 52.7       | 53.3        | 2.24           |
| 44           | 173.30-173.35 | 55.0          | 55.3       | 56.7        | 2.17           |
| 45           | 173.35-173.40 | 54.0          | 55.1       | 53.3        | 2.18           |
| 46           | 172.65-172.70 | 57.5          | 55.1       | 56.4        | 2.19           |
| 47           | 173.15-173.20 | 53.3          | 54.5       | 52.8        | 2.26           |
| 48           | 172.20-172.25 | 54.7          | 51.2       | 57.1        | 2.20           |
| 49           | 172.78-172.83 | 56.0          | 54.9       | 57.3        | 2.18           |
| 50           | 172.72-172.77 | 55.7          | 56.1       | 56.3        | 2.19           |
| 51           | 171.50-171.55 | 55.0          | 54.5       | 56.4        | 2.17           |
| 52           | 171.15-170.20 | 53.8          | 54.5       | 56.7        | 2.20           |
| 53           | 172.40-172.45 | 54.4          | 53.5       | 57.0        | 2.16           |
| 54           | 173.50-173.55 | 53.4          | 54.3       | 53.8        | 2.22           |
| 55           | 172.75-171.80 | 51.5          | 55.0       | 53.7        | 2.17           |
| 56           | 172.45-172.50 | 54.3          | 55.6       | 56.3        | 2.19           |
| 57           | 171.50-171.85 | 54.1          | 54.3       | 54.5        | 2.18           |
| 58           | 75.60-75.70   | 55.5          | 55.3       | 54.4        | 2.19           |
| 59           | 75.70-75.76   | 55.4          | 54.4       | 56.4        | 2.03           |
| 60           | 75.78-75.86   | 54.7          | 54.7       | 57.1        | 2.05           |
| 61           | 79.10-79.15   | 54.9          | 57.5       | 55.0        | 1.97           |
| 62           | 79.15-79.20   | 54.0          | 56.6       | 57.4        | 2.03           |
| 63           | 79.20-79.25   | 56.0          | 56.1       | 58.1        | 1.98           |
| 64           | 79.25-79.30   | 57.3          | 55.4       | 58.0        | 1.96           |
| 65           | 79.30-79.35   | 56.6          | 54.8       | 54.5        | 2.00           |
| 66           | 79.35-79.40   | 54.0          | 54.7       | 56.6        | 2.10           |
| 67           | 74.10-74.15   | 57.0          | 55.7       | 60.0        | 1.96           |
| 68           | 74.15-74.20   | 56.0          | 56.2       | 59.5        | 1.97           |
| 69           | 74.20-74.25   | 54.2          | 55.6       | 57.8        | 2.06           |
| 70           | 74.25-74.30   | 55.3          | 57.1       | 58.0        | 1.97           |

ตารางที่ 3.2 ความลึกและขนาดของตัวอย่างเกลือในการทดสอบกำลังกดในสามแกน (ต่อ)

| Specimen no. | Depth (m)   | Diameter (mm) | Width (mm) | Height (mm) | Density (g/cc) |
|--------------|-------------|---------------|------------|-------------|----------------|
| 71           | 70.30-70.35 | 54.5          | 56.4       | 56.0        | 2.02           |
| 72           | 80.00-80.05 | 56.9          | 56.1       | 56.0        | 1.95           |
| 73           | 88.10-88.15 | 57.1          | 53.5       | 54.5        | 2.03           |
| 74           | 88.15-88.20 | 54.9          | 54.5       | 56.7        | 2.08           |
| 75           | 88.20-88.25 | 56.1          | 56.7       | 56.4        | 1.95           |
| 76           | 88.25-88.30 | 55.7          | 56.2       | 53.9        | 1.98           |
| 77           | 88.30-88.35 | 54.0          | 54.3       | 54.2        | 2.12           |
| 78           | 88.35-88.40 | 55.4          | 55.1       | 49.0        | 2.03           |
| 79           | 88.40-88.45 | 56.8          | 55.9       | 51.6        | 1.96           |
| 80           | 88.45-88.50 | 55.0          | 55.3       | 54.9        | 2.04           |
| 81           | 80.10-80.15 | 53.7          | 54.2       | 55.1        | 2.13           |
| 82           | 80.20-80.25 | 54.0          | 56.5       | 54.5        | 2.04           |
| 83           | 79.10-79.20 | 54.5          | 55.2       | 56.0        | 2.06           |
| 84           | 79.20-79.25 | 54.0          | 54.6       | 54.4        | 2.11           |
| 85           | 79.25-79.30 | 55.6          | 55.6       | 56.6        | 2.01           |
| 86           | 77.20-77.25 | 53.7          | 53.9       | 57.1        | 2.15           |
| 87           | 77.25-77.30 | 53.8          | 53.1       | 55.5        | 2.17           |
| 88           | 77.30-77.35 | 56.1          | 56.5       | 55.5        | 1.96           |
| 89           | 77.35-77.40 | 55.2          | 55.5       | 54.1        | 2.03           |
| 90           | 77.40-77.45 | 53.4          | 54.6       | 57.5        | 2.13           |
| 91           | 77.45-77.50 | 54.3          | 53.8       | 54.1        | 2.13           |
| 92           | 77.50-77.55 | 54.3          | 53.4       | 51.4        | 2.14           |
| 93           | 80.20-80.25 | 54.3          | 53.4       | 53.5        | 2.14           |
| 94           | 80.25-80.30 | 53.6          | 53.0       | 56.3        | 2.19           |
| 95           | 78.40-78.45 | 57.8          | 54.0       | 54.8        | 1.99           |
| 96           | 78.45-78.50 | 54.5          | 55.0       | 55.2        | 2.07           |
| 97           | 78.50-78.55 | 54.5          | 57.0       | 56.0        | 2.00           |
| 98           | 78.50-78.60 | 54.8          | 51.2       | 51.8        | 2.21           |
| 99           | 78.60-78.65 | 54.0          | 52.0       | 55.4        | 2.21           |
| 100          | 78.65-78.70 | 54.8          | 53.0       | 52.0        | 2.14           |

## บทที่ 4

### การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

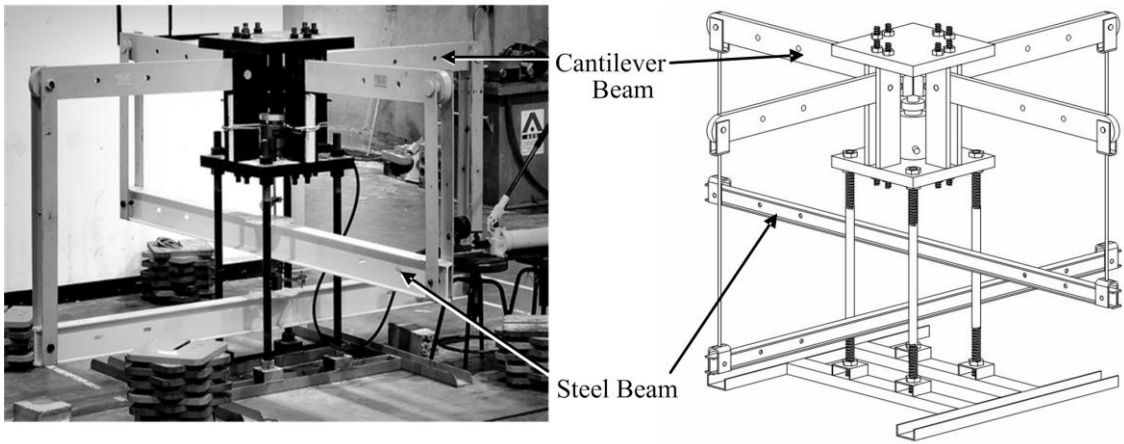
#### 4.1 วัตถุประสงค์

เนื้อหาในบทนี้ได้อธิบายถึงขั้นตอน วิธีการ และข้อปฏิบัติในการทดสอบกำลังกดและกำลังดึงสูงสุดภายใต้คุณสมบัติห้องและสมการในการคำนวณผลการสอบ ซึ่งการทดสอบนี้เป็น การจำลองลักษณะความเค้นของหินในสามทิศทางภายใต้คุณสมบัติ โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ ในภาคสนาม เช่น การออกแบบโพรงอากาศสำหรับกักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรม และ การทำเหมืองใต้ดินของบริษัทเกลือหิน ที่มีสภาวะความเค้นในสามทิศทางไม่เท่ากัน

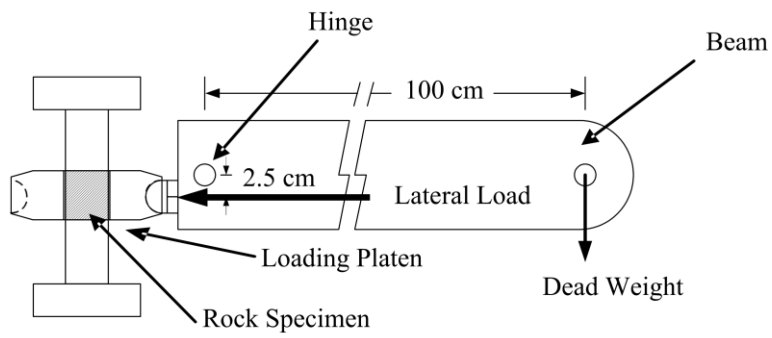
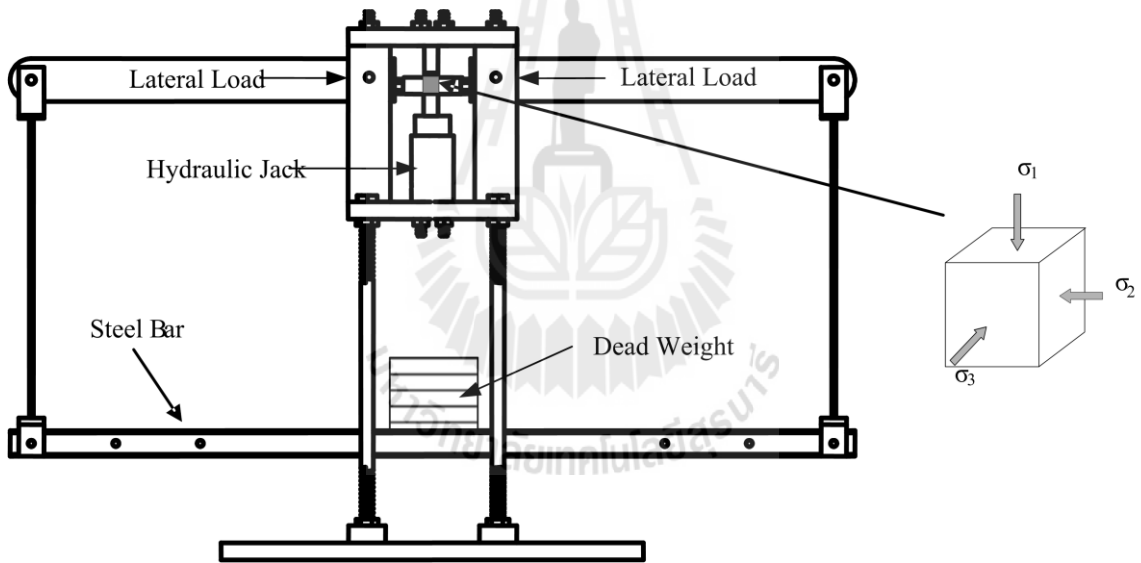
#### 4.2 โครงกทดสอบในสามแกนจริง

โครงกทดสอบในสามแกนจริงมีปัจจัยพื้นฐานของการออกแบบ 3 ประการ คือ 1) เพื่อกำหนดค่าความเค้นด้านข้าง ( $\sigma_2$  และ  $\sigma_3$ ) ให้คงที่ในขณะที่ทำการทดสอบ 2) สามารถทดสอบ ตัวอย่างหินที่มีขนาดเท่ากับหรือใหญ่กว่าแท่งตัวอย่างหินที่ใช้ทดสอบแรงกดสูงสุดในสามแกน แบบดั้งเดิม และ 3) สามารถวัดค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกนหลักได้โดยตรง

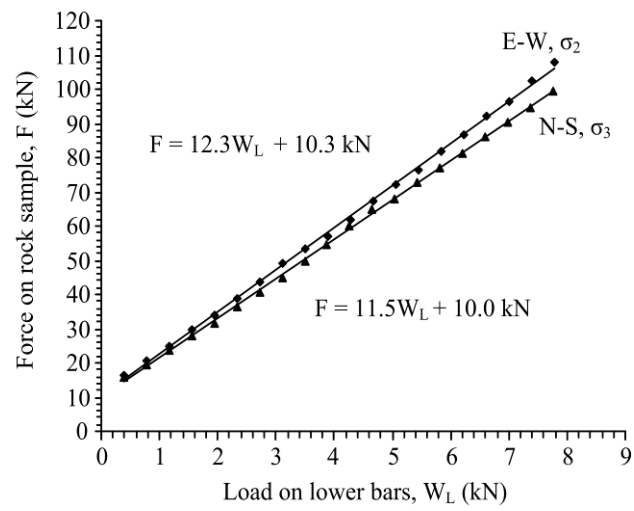
รูปที่ 4.1 แสดงโครงกทดสอบในสามแกนจริงที่มีอยู่แล้วจาก Walsri et al. (2009) ซึ่งได้ถูกประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อทดสอบค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวและในสามแกน ซึ่งค่า ความเค้นด้านข้างที่กระทำบนตัวอย่างหินในแต่ละด้านจะได้รับแรงที่เกิดขึ้นจากแขนของคานทอด แรง ในส่วนล่างของคานรับตุน้ำหนักจะใช้เหล็กเส้นแขวนตุน้ำหนักเชื่อมต่อระหว่างจุดปลาย ของคานทั้งสองข้างที่จุดกึ่งกลางของคานรับตุน้ำหนักเพื่อใช้ใส่ตุน้ำหนักในการดึงแขนของ คานทอดแรงทั้งสองข้างลงดังแสดงในรูปที่ 4.2 ที่จุดปลายด้านในของคานทอดแรงจะใช้เพลา เชื่อมต่อกับสายยึดคานทอดแรงที่อยู่ในแต่ละด้านของโครงกทดสอบ ในขณะที่ทำการทดสอบ คานทอดแรงทุกข้างจะปรับให้อยู่ในแนวระนาบซึ่งจะส่งผลต่อแรงกดด้านข้างบนตัวอย่างหินที่จุด กึ่งกลางของโครงกทดสอบ และได้กำหนดระยะห่างของเหล็กเส้นแขวนตุน้ำหนักที่ใช้แขวน คานรับตุน้ำหนักจากจุดปลายด้านนอกถึงปลายด้านใน อัตราส่วนของแรงจะมีค่าเท่ากับ 12.3 ในทิศตะวันออก-ตะวันตก และ 11.5 เท่าในทิศเหนือ-ใต้ (รูปที่ 4.3) ซึ่งได้ทำการสอบเทียบโดย Electronic load cell อัตราส่วนของแรงที่ได้นี้จะนำมาใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ของแท่งตัวอย่างด้านข้างด้วยการวัดอัตราการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของแท่งเหล็กทั้งสองที่อยู่ ข้างล่าง ส่วนแรงกระทำด้านข้าง ( $\sigma_2$  และ  $\sigma_3$ ) ได้ออกแบบให้สามารถให้ความเค้นมากกว่า 50 MPa และปั๊มไฮดรอลิคเป็นอุปกรณ์ให้ความเค้นกระทำในแนวตั้ง ( $\sigma_1$ ) สามารถให้ความเค้นสูง มากกว่า 100 MPa โครงกทดสอบสามารถรองรับขนาดของตัวอย่างหินได้ตั้งแต่  $2.5 \times 2.5 \times 2.5$  cm<sup>3</sup> ถึง  $10 \times 10 \times 20$  cm<sup>3</sup> การทดสอบกับแท่งตัวอย่างที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันจะต้องมี การปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหัวกดทั้งสองข้างให้เหมาะสม



รูปที่ 4.1 โครงทดสอบในสามแกนจริง



รูปที่ 4.2 องค์ประกอบของโครงทดสอบในสามแกนจริง



รูปที่ 4.3 การสอบเทียบอัตราส่วนของแรงโดย Electronic load cell อัตราส่วนนี้  
นำไปใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแท่งตัวอย่างหินด้านข้าง



### 4.3 วิธีการทดสอบการกดในแกนเดียวและสามแกน

วิธีการทดสอบแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ

1) **การปรับอุณหภูมิของหินก่อนการทดสอบ** ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงกดภายใต้อุณหภูมิสูงจะต้องนำไปเข้าตู้อบเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้อยู่ที่ 100°C และ 200°C ส่วนตัวอย่างเกลือหินสำหรับทดสอบที่อุณหภูมิต่ำ จะต้องนำไปเข้าเครื่องทำความเย็นเพื่อลดอุณหภูมิให้อยู่ที่ 0°C ทั้งการเพิ่มและลดอุณหภูมินั้นได้นำตัวอย่างเกลือหินและห้วกดให้แรงทั้งสามทิศทางมาทำการปรับอุณหภูมิเป็นระยะเวลาทั้งสิ้น 24 ชั่วโมง ก่อนการทดสอบ

2) **วิธีติดตั้งตัวอย่างหินในโครงกดทดสอบ** หลังจากที้นำตัวอย่างเกลือหินออกจากตู้อบ หรือเครื่องทำความเย็นแล้วเวลาในการติดตั้งเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่ง ถ้าใช้เวลาในการติดตั้งการทดสอบมากจะส่งผลให้ตัวอย่างเกลือหินคายความร้อนออกไปมากทำให้เกลือหินเย็นลงหรือร้อนขึ้น (ในกรณีที่เราออกจากเครื่องทำความเย็น) ผลการทดสอบที่ได้จะไม่เป็นไปตามเกณฑ์ที่ต้องการ ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการติดตั้งไม่ควรเกิน 1 นาที นับจากนำตัวอย่างหินออกจากตู้อบหรือเครื่องทำความเย็น

การติดตั้งตัวอย่างเกลือหินเพื่อทดสอบกำลังรับแรงกดสูงสุดมีวิธีการและขั้นตอนดังต่อไปนี้

- (1) นำตัวอย่างหินออกจากตู้อบหรือเครื่องทำความเย็นและเตรียมผู้ช่วยเพื่อยกคานทั้ง 4 ด้าน
- (2) จากนั้นยกคานในแนว E-W ขึ้นเพื่อสอดตัวอย่างเกลือหินเข้าไปในแท่นกดทดสอบแล้วปล่อยคานลงให้แท่นกดทดสอบชนกับตัวอย่างเกลือหินสำหรับเป็นตัวแทนของความเค้นหลักกลาง ( $\sigma_2$ ) จากนั้นยกคานด้าน N-S ขึ้นใส่แท่นกดทดสอบแล้วปล่อยคานลงให้แท่นกดทดสอบชนกับตัวอย่างเกลือหินสำหรับเป็นตัวแทนของความเค้นหลักรอง ( $\sigma_3$ )
- (3) นำห้วกดให้แรงด้านล่างและด้านบนของตัวอย่างเกลือหินเพื่อให้แรงกดในแนวแกน ( $\sigma_1$ )
- (4) ประกอบคานด้านล่างทั้งสองแกนสำหรับใส่น้ำหนักกดทับ (แผ่นเหล็กตันรูปสี่เหลี่ยม) เพื่อส่งผ่านแรงทั้งความเค้นหลักกลาง ( $\sigma_2$ ) และความเค้นหลักรอง ( $\sigma_3$ ) จากนั้นให้เพิ่มแผ่นน้ำหนักตามการทดสอบที่ได้ออกแบบไว้
- (5) กดตัวอย่างเกลือหินด้วยปั๊มไฮดรอลิคจนกระทั่งหินแตก

3) การทดสอบและการตรวจวัด ในระหว่างการทดสอบจะทำการตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหินในแต่ละแนวแกนโดยจะติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัว (Dial Gauge) ในแนวแกนและความเค้นด้านข้างทั้ง 2 แกน และได้ทำการตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวระหว่างการทดสอบ ในขณะที่ตัวอย่างเกลือหินถูกกดเพิ่มขึ้นด้วยปั๊มไฮดรอลิคจนกระทั่งหินแตก

#### 4.4 การคำนวณผล

##### 4.4.1 การคำนวณหาค่าความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ย

การคำนวณผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะประกอบด้วย การหาค่าความเค้นเฉือนในสามมิติ ( $\tau_{oct}$ ) และความเค้นเฉลี่ย ( $\sigma_m$ ) ของเกลือหินในแต่ละอุณหภูมิ ซึ่งสามารถหาได้จาก (Jaeger et al., 2007) คือ

$$\tau_{oct} = (1/3)[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]^{1/2} \quad (4.1)$$

$$\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3 \quad (4.2)$$

##### 4.4.2 การคำนวณหาค่าความเค้นยึดติด

การคำนวณหาค่าความเค้นยึดติด ( $c$ ) และค่ามุมเสียดทาน ( $\phi$ ) ของเกลือหินในแต่ละอุณหภูมิโดยใช้สมการ (Jaeger et al., 2007)

$$\sigma_1 = \sigma_c + \sigma_3 \tan^2 [(\pi/4) + (\phi/2)] \quad (4.3)$$

$$\sigma_1 = 2c \tan [(\pi/4) + (\phi/2)] \quad (4.4)$$

โดยที่  $c$  คือความเค้นยึดติด  $\phi$  คือมุมเสียดทาน  $\sigma_c$  คือความเค้นสูงสุดในแกนเดียว และ  $\sigma_3$  คือความเค้นหลักต่ำสุด ซึ่งในการคำนวณหาค่าความเค้นยึดติดและค่ามุมเสียดทานได้ทำการคำนวณในช่วงที่  $\sigma_3 = 0-10$  MPa โดยพฤติกรรมการแตกของเกลือหินมีลักษณะเป็นเส้นตรง

##### 4.4.3 การคำนวณหาค่าคุณสมบัติความยืดหยุ่น

การคำนวณหาค่าคุณสมบัติความยืดหยุ่นสำหรับความเค้นในสามมิติเป็นความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างความเค้น-ความเครียด โดย Jaeger and Cook (1979) ซึ่งความสัมพันธ์นี้สามารถเขียนได้ดังสมการ



$$G = (1/2) (\tau_{oct,e}/\gamma_{oct,e}) \quad (4.5)$$

$$3\sigma_{m,e} = (3\lambda + 2G) \Delta \quad (4.6)$$

$$E = 2G (1+\nu) \quad (4.7)$$

$$\nu = \lambda / 2(\lambda + G) \quad (4.8)$$

โดยที่  $G$  คือสัมประสิทธิ์ความแข็ง  $E$  คือสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น  $\lambda$  คือค่าคงที่ของ Lamé  $\nu$  คืออัตราส่วนของ Poisson  $\tau_{oct,e}$  คือความเค้นเฉือน  $\gamma_{oct,e}$  คือความเครียดเฉือน  $\sigma_{m,e}$  คือความเค้นเฉลี่ย และ  $\Delta$  คือความเครียดเชิงปริมาตร ที่ระดับ 40% ของความเค้นสูงสุด

#### 4.4.4 การคำนวณหาค่าพลังงานความเครียด

การคำนวณหาค่าพลังงานความเครียดสำหรับการทดสอบในงานวิจัยนี้เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-เครียดในสามมิติ ซึ่งสามารถแสดงในรูปแบบสมการได้ดังนี้

$$W_m = (3/2) \sigma_m \varepsilon_m = \sigma_m^2 / 2K \quad (4.9)$$

$$W_d = (3/2) \tau_{oct} \gamma_{oct} = (3/4G) \tau_{oct}^2 \quad (4.10)$$

โดยที่  $W_m$ ,  $W_d$ ,  $\tau_{oct}$ ,  $\gamma_{oct}$ ,  $\sigma_m$  และ  $\varepsilon_m$  คือพลังงานความเครียดเฉลี่ย พลังงานความเครียดเบี่ยงเบน ความเค้นเฉือน ความเครียดเฉือน ความเค้นเฉลี่ย และความเครียดเฉลี่ยที่จุดแตกของหินตามลำดับ

#### 4.5 การทดสอบแรงดึงแบบบราซิล

การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ

1) การปรับอุณหภูมิของหินก่อนการทดสอบ ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดึงภายใต้อุณหภูมิสูงจะต้องนำไปเข้าตู้อบเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้อยู่ที่ 100°C และ 200°C ส่วนตัวอย่างเกลือหินสำหรับทดสอบที่อุณหภูมิต่ำ จะต้องนำไปเข้าเครื่องทำความ

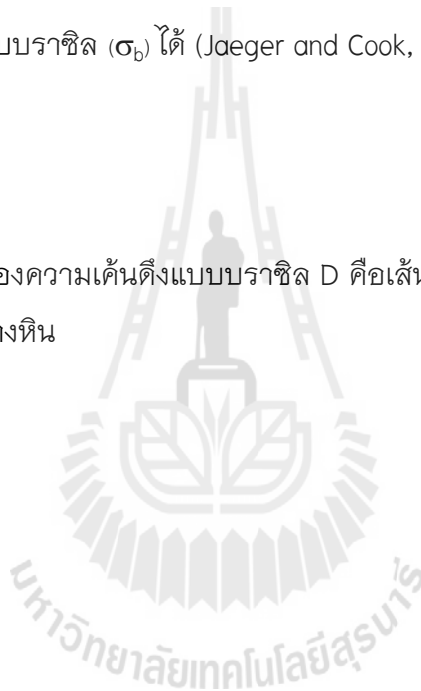
เย็นเพื่อลดอุณหภูมิให้อยู่ที่ 0°C ทั้งการเพิ่มและลดอุณหภูมินั้นได้นำตัวอย่างเกลือหินและหัวกดให้แรงมาทำการปรับอุณหภูมิเป็นระยะเวลาทั้งสิ้น 24 ชั่วโมง ก่อนการทดสอบ

2) **วิธีทดสอบแรงดึงแบบบราซิล** การทดสอบค่าแรงดึงแบบบราซิลได้ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3967 คือ ตัวอย่างหินจะถูกกดตามแนวของเส้นผ่าศูนย์กลางด้วยอัตราความเร็วประมาณ 0.5-1.0 MPa/s จนกระทั่งหินแตก และทำการจดบันทึกผลการทดสอบ

3) **การคำนวณผลการทดสอบ** จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะนำมาคำนวณหาค่าแรงดึงสูงสุดแบบบราซิล ( $\sigma_b$ ) ได้ (Jaeger and Cook, 1979) ดังนี้

$$\sigma_b = 2P/\pi DL \quad (4.11)$$

โดยที่ P คือแรงกดที่จุดวัดของความเค้นดึงแบบบราซิล D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างหิน L คือความยาวของตัวอย่างหิน



## บทที่ 5

### ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

#### 5.1 วัตถุประสงค์

เนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการซึ่งประกอบด้วย ค่าความเค้นสูงสุดในแกนเดียวและในสามแกน และค่าความเค้นดึงสูงสุดแบบบราซิล การทดสอบได้ใช้โครงทดสอบในสามแกนจริง (Polyaxial load frame) เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อความแข็งแรงของเกลือบดที่ได้อธิบายในบทที่ 4

#### 5.2 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ผลการทดสอบแบ่งเป็น 2 ชุด คือ 1) การทดสอบกำลังกดสูงสุดในแกนเดียวและในสามแกนและ 2) การทดสอบกำลังดึงสูงสุดแบบบราซิล ผลลัพธ์ที่ได้แสดงค่าความแข็งแรงของเกลือบดภายใต้อุณหภูมิต่างๆ และค่าคุณสมบัติความยืดหยุ่นซึ่งได้จากการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างระหว่างการทดสอบของหินในแต่ละแนวแกนของการกดด้วย

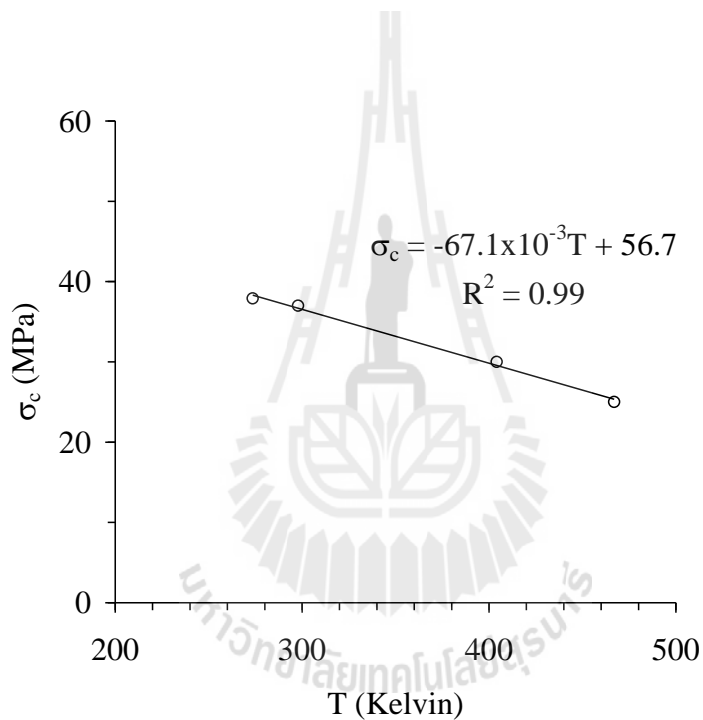
##### 5.2.1 ผลการทดสอบกำลังกดสูงสุดในแกนเดียวและสามแกน

การทดสอบค่ากำลังกดในแกนเดียว ( $\sigma_c$ ) ได้ทำการทดสอบภายใต้อุณหภูมิ 4, 21, 121 และ 182 องศาเซลเซียส หรือ 277, 298, 394 และ 455 องศาเคลวิน ตารางที่ 5.1 เสนอผลการทดสอบกำลังกดในแกนเดียวภายใต้อุณหภูมิ และได้แสดงค่าความหนาแน่น ค่าอุณหภูมิของตัวอย่างหิน และค่าความแข็งแรงของหิน รูปที่ 5.1 แสดงความเค้นสูงสุดในแกนเดียวในฟังก์ชันของอุณหภูมิ ผลที่ได้ระบุว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเกลือบดจะอ่อนตัวลงซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการเชิงเส้นตรง

การทดสอบค่ากำลังกดในสามแกนภายใต้อุณหภูมิ 0.6 24.8, 131.1 และ 194.0 องศาเซลเซียส หรือ 273.6, 297.8, 404.1 และ 467.0 องศาเคลวิน ซึ่งเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างในอุณหภูมิเดียวกัน การทดสอบได้ใช้ความดันล้อมรอบที่ผันแปรจาก 3 MPa ถึง 30 MPa ตารางที่ 5.2 เสนอผลการทดสอบ รูปที่ 5.2 แสดงความเค้นหลักสูงสุดในฟังก์ชันของความเค้นหลักต่ำสุดภายใต้อุณหภูมิ ผลการทดสอบระบุว่าเกลือบดจะอ่อนตัวภายใต้อุณหภูมิที่สูงขึ้นและสามารถอธิบายด้วยสมการเชิงเส้นตรงเช่นกันดังแสดงในรูปที่ 5.2

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบกำลังกดในแกนเดียวภายใต้อุณหภูมิ

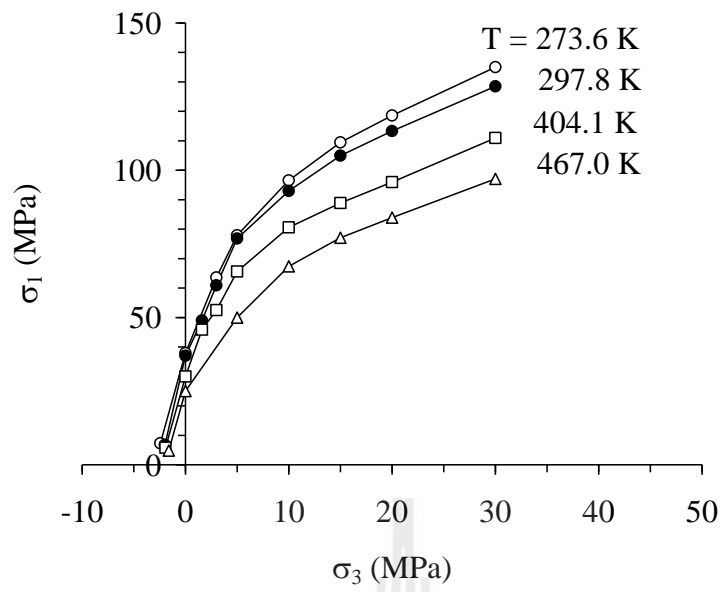
| Specimen no. | $\rho$<br>(g/cc) | Temperature<br>(Kelvin) | $\sigma_c$<br>(MPa) |
|--------------|------------------|-------------------------|---------------------|
| UCS 45-47    | $2.21 \pm 0.06$  | $277.0 \pm 2.3$         | $37.9 \pm 3.0$      |
| UCS 81,87,90 | $2.14 \pm 0.02$  | $298.0 \pm 0.6$         | $37.0 \pm 2.5$      |
| UCS 51-53    | $2.17 \pm 0.02$  | $394.0 \pm 4.7$         | $30.0 \pm 3.5$      |
| USC 74       | 2.08             | 455.5                   | 25                  |



รูปที่ 5.1 ความเค้นหลักสูงสุดในแกนเดียวในฟังก์ชันของอุณหภูมิ

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบการกัดในสามแกนภายใต้อุณหภูมิ

| Specimen no. | $T_{avg}$ Kelvin | $T_{avg}$ Kelvin (Celsius) | Failure stresses |                  |
|--------------|------------------|----------------------------|------------------|------------------|
|              |                  |                            | $\sigma_1$ (MPa) | $\sigma_3$ (MPa) |
| TX-86        | 273.6            | $273.6 \pm 0.4$<br>(0.6)   | 63.6             | 3.0              |
| TX-59        | 274.2            |                            | 77.9             | 5.0              |
| TX-85        | 273.4            |                            | 96.6             | 10.0             |
| TX-55        | 273.2            |                            | 109.5            | 15.0             |
| TX-30        | 273.4            |                            | 118.6            | 20.0             |
| TX-76        | 274.1            |                            | 135.0            | 30.0             |
| TX-84        | 297.9            | $297.8 \pm 0.3$<br>(24.8)  | 49.0             | 1.6              |
| TX-39        | 298.0            |                            | 60.9             | 3.0              |
| TX-67        | 297.5            |                            | 76.8             | 5.0              |
| TX-88        | 298.1            |                            | 93.0             | 10.0             |
| TX-58        | 298.6            |                            | 105.0            | 15.0             |
| TX-50        | 297.6            |                            | 113.3            | 20.0             |
| TX-77        | 297.7            |                            | 128.5            | 30.0             |
| TX-89        | 402.9            | $404.1 \pm 1.7$<br>(131.0) | 45.9             | 1.6              |
| TX-48        | 404.0            |                            | 52.5             | 3.0              |
| TX-44        | 406.0            |                            | 65.6             | 5.0              |
| TX-54        | 405.5            |                            | 80.6             | 10.0             |
| TX-28        | 406.7            |                            | 88.9             | 15.0             |
| TX-29        | 403.7            |                            | 96.0             | 20.0             |
| TX-83        | 401.0            |                            | 111.0            | 30.0             |
| TX-73        | 464.9            |                            | 50.0             | 5.0              |
| TX-75        | 467.1            | $467.0 \pm 2.4$<br>(194.0) | 67.4             | 10.0             |
| TX-69        | 467.7            |                            | 77.1             | 15.0             |
| TX-82        | 471.2            |                            | 83.9             | 20.0             |
| TX-71        | 468.8            |                            | 97.1             | 30.0             |



รูปที่ 5.2 ความเค้นสูงสุดในฟังก์ชันของความเค้นหลักต่ำสุดภายใต้อุณหภูมิ

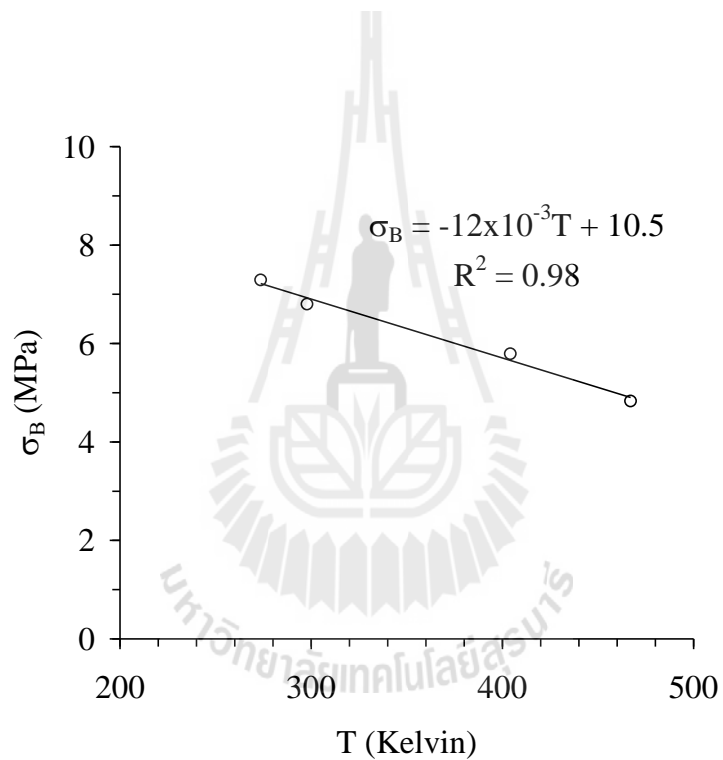
### 5.2.2 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิล

การทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิล ( $\sigma_B$ ) ได้ทำการทดสอบเกลือหิน ภายใต้อุณหภูมิ 1, 24.5, 120.7 และ 191.7 องศาเซลเซียส หรือ 274.0, 297.5, 393.7 และ 464.7 องศาเคลวิน ซึ่งเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างในอุณหภูมิเดียวกัน ตารางที่ 5.3 เสนอผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิล รูปที่ 5.3 แสดงค่าความเค้นดึงสูงสุดแบบบราซิลในฟังก์ชันของอุณหภูมิ ซึ่งระบุชัดเจนว่าค่ากำลังดึงสูงสุดของเกลือหินจะลดลง ถ้าอุณหภูมิของตัวอย่างสูงขึ้นและสามารถอธิบายได้ด้วยสมการเชิงเส้นตรง ผลการทดสอบ กำลังกดและกำลังดึงภายใต้อุณหภูมิที่ผันแปรจะนำมาวิเคราะห์และสร้างสมการเชิงคณิตศาสตร์ เพื่อพัฒนาเกณฑ์การแตกของเกลือหินในบทต่อไป



ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบกำลังดึงสูงสุดแบบบราซิลภายใต้อุณหภูมิ

| Specimen no. | $\rho$<br>(g/cc) | Temperature<br>(Kelvin) | $\sigma_B$<br>(MPa) |
|--------------|------------------|-------------------------|---------------------|
| BZ 1-10      | $2.12 \pm 0.01$  | $274.0 \pm 3.1$         | $7.3 \pm 0.51$      |
| BZ 11-20     | $2.10 \pm 0.05$  | $297.5 \pm 0.8$         | $6.0 \pm 0.60$      |
| BZ 21-30     | $2.21 \pm 0.04$  | $393.7 \pm 5.1$         | $5.8 \pm 0.84$      |
| BZ 31-40     | $2.09 \pm 0.04$  | $464.7 \pm 4.5$         | $4.8 \pm 0.42$      |



รูปที่ 5.3 ความเค้นดึงสูงสุดแบบบราซิลในฟังก์ชันของอุณหภูมิ



## บทที่ 6

### การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

#### 6.1 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของการทดสอบเพื่อพัฒนาเกณฑ์การแตกของตัวอย่างเกลือหินภายใต้การผันแปรของอุณหภูมิและความดันล้อมรอบโดยอาศัยแนวคิดของการกักเก็บพลังงาน ความเครียดในตัวอย่างเกลือหินก่อนเกิดการวิบัติ ซึ่งพลังงานความเครียดนี้จะพิจารณาทั้งพลังงานกล (ความเค้นที่ให้กับตัวอย่างเกลือหิน) และพลังงานความร้อน

#### 6.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อความแข็งและความยืดหยุ่นของเกลือหิน

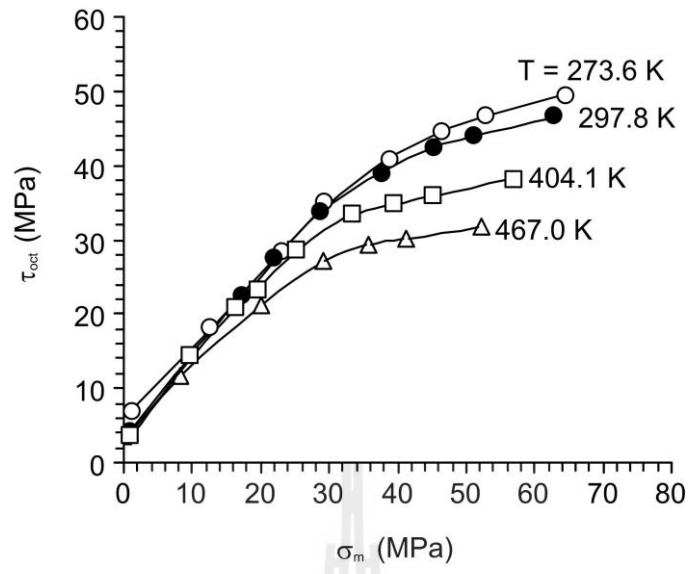
ตารางที่ 6.1 เสนอผลการทดสอบในรูปของความเค้นเฉือนในสามมิติ ความเค้นเฉื่อย ปัจจัยความยืดหยุ่น พลังงานความเครียดเบี่ยงเบน และพลังงานความเครียดเฉื่อย ซึ่งค่าทั้งหมดนี้สามารถคำนวณจากค่าความเค้นและความเครียดที่จุดวิบัติสำหรับแต่ละตัวอย่างเกลือหิน รูปที่ 6.1 แสดงความเค้นเฉือนในสามมิติในฟังก์ชันของความเครียดเฉื่อย ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความเค้นเฉือนในสามมิติที่สามารถทำให้เกลือหินเกิดการวิบัติจะมีค่าลดลง นอกจากนี้แผนภูมิในรูปที่ 6.1 ยังแสดงถึงความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเส้นตรงระหว่างความเค้นเฉือนและความเค้นเฉื่อย ผลการทดสอบสามารถแสดงในแผนภูมิความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของความเค้นในแนวตั้งในสองมิติได้ดังแสดงในรูปที่ 6.2 ซึ่งแผนภูมินี้สามารถนำมาคำนวณค่าความเค้นยึดติด (Cohesion) และค่ามุมเสียดทานภายใน (Friction angle) ซึ่งผลที่ได้ระบุว่าทั้งค่าความเค้นยึดติดและค่ามุมเสียดทานภายในจะมีค่าลดลงเป็นเชิงเส้นตรงเมื่ออุณหภูมิของตัวอย่างเกลือหินเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 6.3

จากผลการทดสอบในบทที่ 5 สามารถคำนวณปัจจัยความยืดหยุ่นจากความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดในสามแกนโดยสมมติให้ตัวอย่างเกลือหินมีคุณสมบัติยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง รูปที่ 6.4 แสดงผลการคำนวณดังกล่าว ซึ่งระบุว่าค่าปัจจัยความยืดหยุ่นจะมีค่าลดลงเป็นเชิงเส้นตรงเมื่ออุณหภูมิของตัวอย่างเกลือหินมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าปัจจัยความยืดหยุ่นเหล่านี้ได้แก่สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E) สัมประสิทธิ์ความแข็ง (G) สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นแบบก้อน (K) และค่าอัตราส่วนของปัวร์ซอง ( $\nu$ )

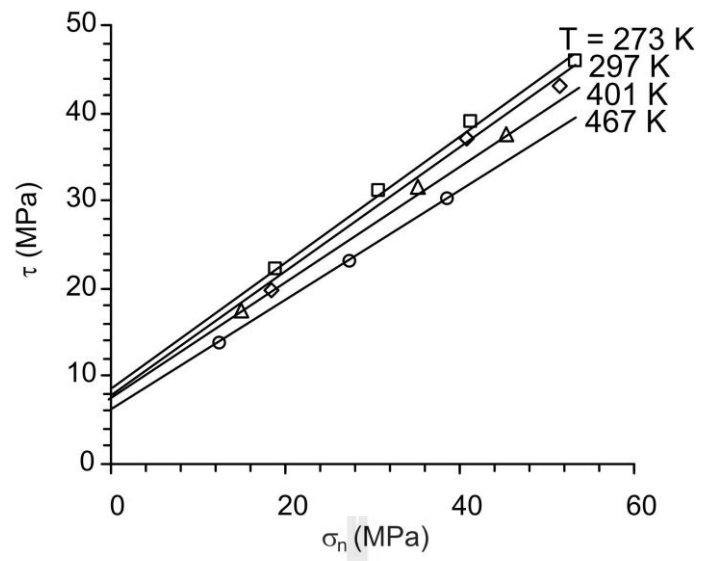
ความเค้นและความเครียดเฉือนที่จุดวิบัติและสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นดังกล่าวข้างต้นที่สัมพันธ์กับการผันแปรของอุณหภูมิจะนำมาใช้ในการสร้างเกณฑ์การแตกของเกลือหิน

ตารางที่ 6.1 ค่าคุณสมบัติความยืดหยุ่นและพลังงานความเครียดของเกลือหินที่จุดแตก

| $T_{avg}$<br>(Kelvin) | $\sigma_m$<br>(MPa) | $\tau_{oct}$<br>(MPa) | E<br>(GPa) | $\nu$     | G<br>(GPa) | K<br>(GPa) | $W_d$<br>(MPa) | $W_m$<br>(MPa) |
|-----------------------|---------------------|-----------------------|------------|-----------|------------|------------|----------------|----------------|
| 274                   | 23.2                | 28.6                  | 27.1       | 0.38      | 9.8        | 37.6       | -              | -              |
|                       | 29.3                | 34.4                  | 29.1       | 0.42      | 10.2       | 60.6       | -              | -              |
|                       | 38.9                | 40.8                  | 28.7       | 0.32      | 10.9       | 26.6       | 893.6          | 700.0          |
|                       | 46.5                | 44.5                  | 29.1       | 0.34      | 10.9       | 30.3       | 1368.6         | 1000.0         |
|                       | 52.9                | 46.5                  | 27.1       | 0.37      | 9.9        | 34.7       | 1725.2         | 1300.0         |
|                       | 65.0                | 49.5                  | 29.5       | 0.35      | 10.9       | 32.8       | 2242.2         | 1600.0         |
|                       | Mean±SD             |                       | 28.4±0.9   | 0.36±0.04 | 10.4±0.4   | 37.1±3.2   |                |                |
| 298                   | 17.4                | 22.3                  | 21.0       | -         | -          | -          | -              | -              |
|                       | 22.3                | 27.3                  | 27.0       | 0.35      | 10.0       | 30.0       | -              | -              |
|                       | 28.9                | 33.8                  | 26.8       | 0.36      | 9.9        | 31.9       | 935.6          | 600.0          |
|                       | 37.7                | 39.1                  | 27.5       | 0.31      | 10.5       | 24.1       | 1158.5         | 750.0          |
|                       | 45.0                | 42.4                  | 24.0       | 0.34      | 9.0        | 24.2       | 1458.0         | 970.0          |
|                       | 51.1                | 44.0                  | 21.5       | 0.34      | 8.0        | 22.4       | 1944.0         | 1150.0         |
|                       | 62.8                | 46.4                  | 26.4       | 0.37      | 9.6        | 33.8       | 2292.0         | 1500.0         |
| Mean ± SD             |                     | 25.5±2.1              | 0.34±0.02  | 9.5±0.8   | 27.8±4.8   | -          | -              |                |
| 404                   | 16.4                | 20.9                  | 18.7       | -         | -          | -          | -              | -              |
|                       | 19.5                | 23.3                  | 20.1       | 0.36      | 7.4        | 23.9       | -              | -              |
|                       | 25.2                | 28.6                  | 22.3       | 0.42      | 8.1        | 31.0       | 940.4          | 413.5          |
|                       | 33.5                | 33.3                  | 19.8       | 0.41      | 7.0        | 36.7       | 1479.6         | 800.0          |
|                       | 39.6                | 34.8                  | 17.5       | 0.30      | 6.6        | 17.2       | 1779.4         | 979.3          |
|                       | 45.3                | 35.8                  | 20.9       | 0.32      | 7.9        | 19.4       | 2100.0         | 1100.0         |
|                       | 57.0                | 38.2                  | 21.1       | 0.35      | 7.8        | 23.4       | 2300.0         | 1300.0         |
| Mean ± SD             |                     | 20.0±1.5              | 0.37±0.05  | 7.5±0.5   | 25.3±7.3   | -          | -              |                |
| 467                   | 20.0                | 21.2                  | 17.5       | 0.36      | 6.4        | 20.8       | 935.6          | 350.0          |
|                       | 29.1                | 27.1                  | 16.2       | 0.34      | 6.0        | 16.9       | 1158.5         | 400.0          |
|                       | 35.7                | 29.3                  | 18.5       | 0.40      | 6.6        | 30.8       | 1458.0         | 650.0          |
|                       | 41.3                | 30.1                  | 20.0       | 0.36      | 7.4        | 23.8       | 1944.0         | 955.0          |
|                       | 52.4                | 31.6                  | 17.3       | 0.34      | 6.5        | 18.0       | 2292.0         | 1132.0         |
|                       | Mean ± SD           |                       | 18.1±1.4   | 0.36±0.02 | 6.6±0.47   | 22.1±5.58  | -              | -              |

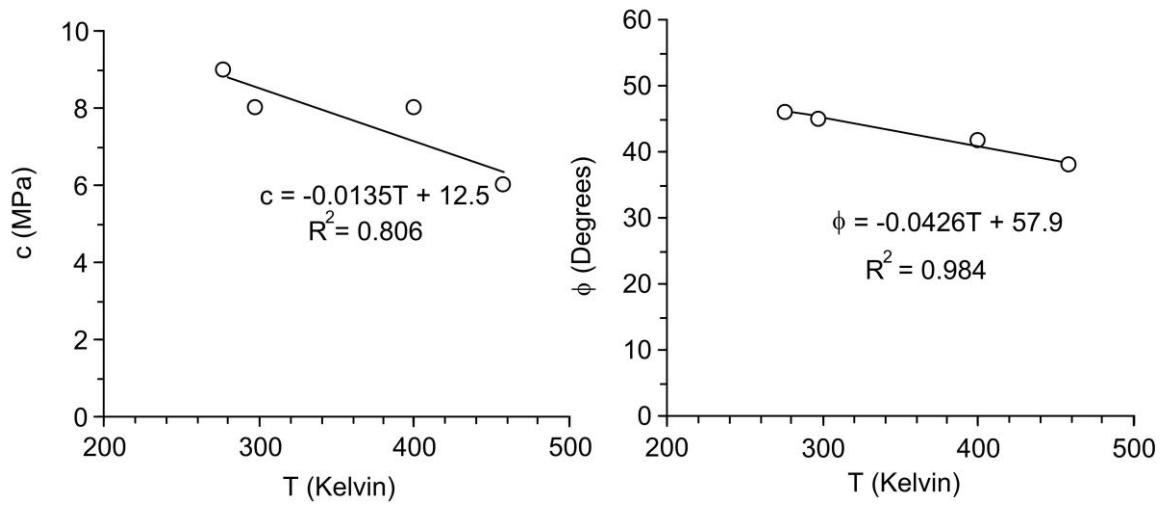


รูปที่ 6.1 ความเค้นเฉือนในสามมิติในฟังก์ชันของความเค้นเฉลี่ย

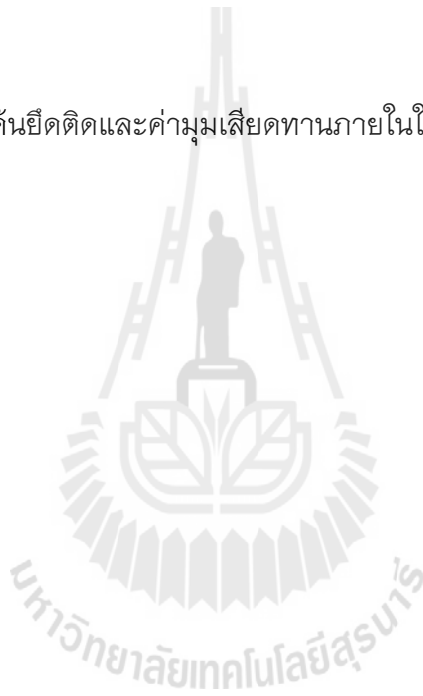


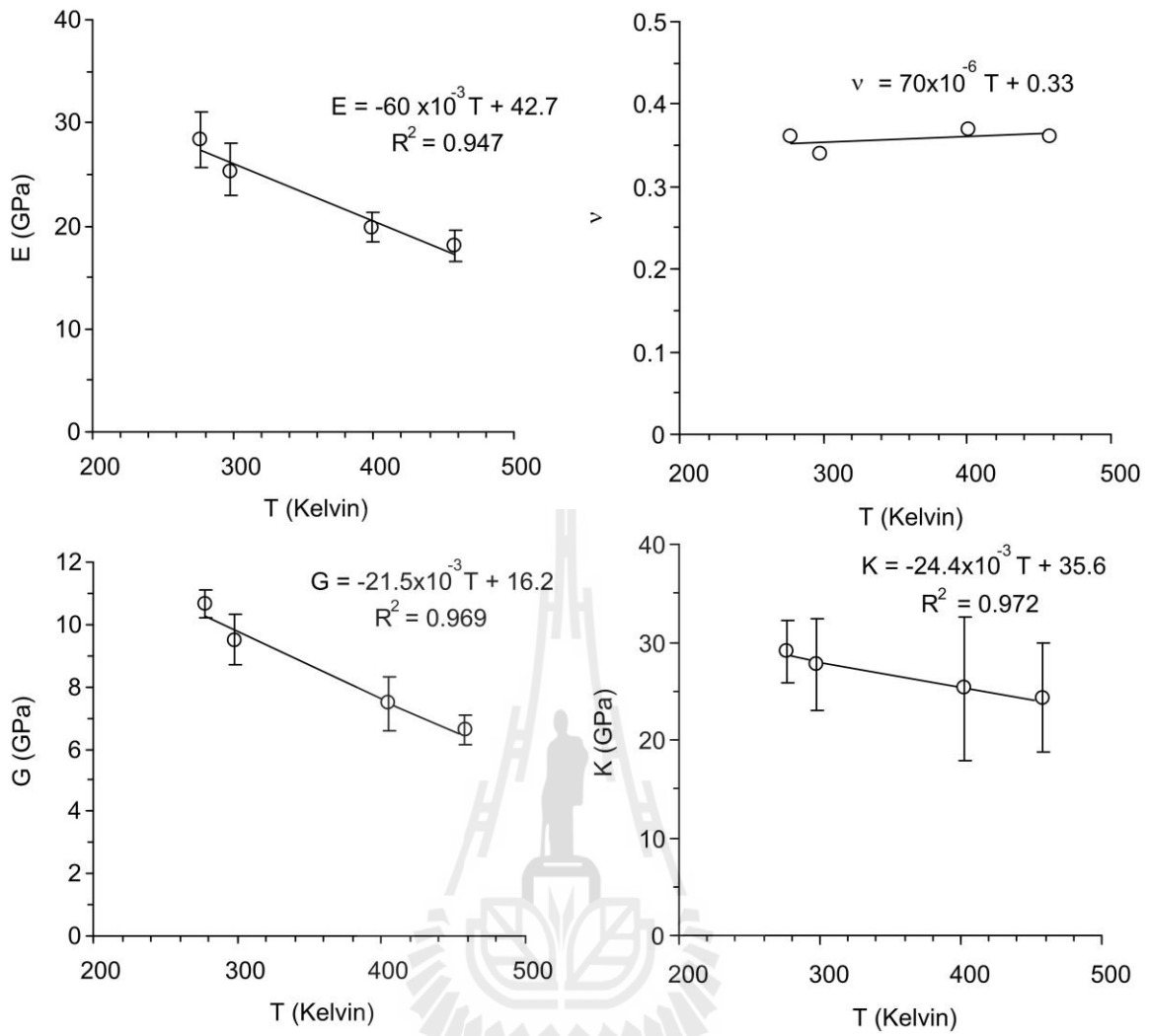
รูปที่ 6.2 ความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของความเค้นตั้งฉาก





รูปที่ 6.3 ค่าความเค้นยึดติดและค่ามุมเสียดทานภายในในฟังก์ชันของอุณหภูมิ





รูปที่ 6.4 ปัจจัยความยืดหยุ่นในฟังก์ชันของอุณหภูมิ

### 6.3 การพัฒนาเกณฑ์การแตกของเกลือหิน

กฎของพลังงานความเครียดได้นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้เพื่ออธิบายความแข็งแรงและการเปลี่ยนรูปร่างของตัวอย่างเกลือหินภายใต้อุณหภูมิที่ผันแปร โดยจะสมมติว่าภายใต้พลังงานความเครียดเฉลี่ยระดับหนึ่ง พลังงานความเครียดเบี่ยงเบนจะมีค่าคงที่ ผลจากการคำนวณเชิงสถิติระบุว่าพลังงานความเครียดเบี่ยงเบน ( $W_d$ ) จะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตรงกับพลังงานความเครียดเฉลี่ย ( $W_m$ ) ดังสมการ

$$W_d = A \cdot W_m + B$$

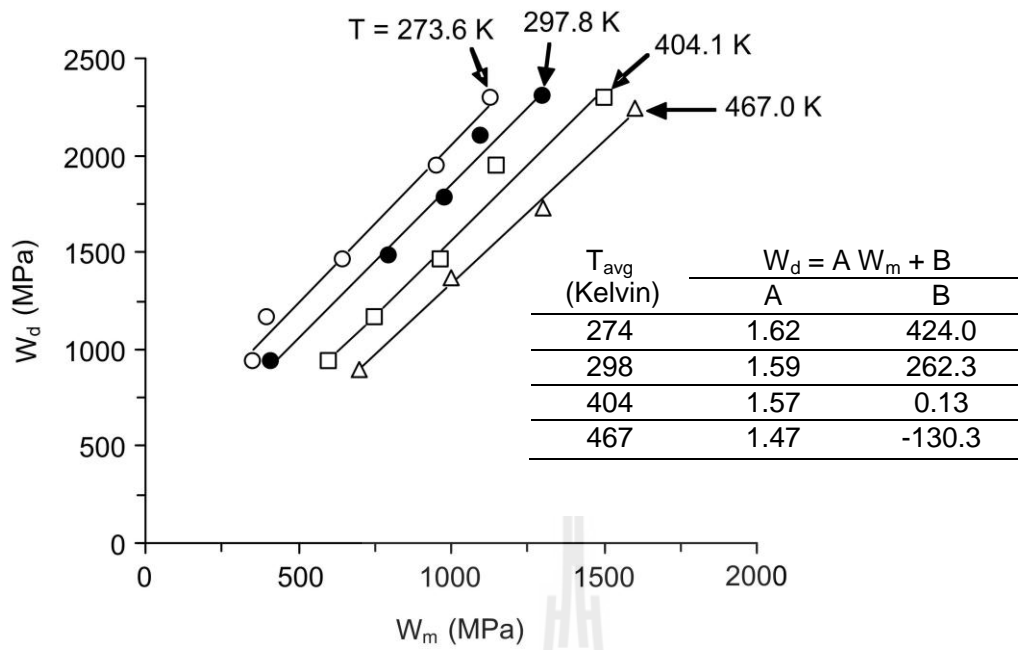
ค่าคงที่ A และ B จะขึ้นกับความแข็งแรงและความเครียดยึดติดของเกลือหินในแต่ละอุณหภูมิ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการวิเคราะห์เชิงสถิติของผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 6.5 เป็นที่น่าสนใจว่าความสัมพันธ์ระหว่าง  $W_d$  และ  $W_m$  มีความคล้ายคลึงกันในประเด็นของอัตราการเพิ่มของค่า  $W_d$  ต่อค่า  $W_m$  (ความชัน) ที่พลังงานความเครียดเฉลี่ยระดับหนึ่ง อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าพลังงานความเครียดเบี่ยงเบนมีค่าลดลง ความแตกต่างของเส้นพลังงานความเครียดในแต่ละอุณหภูมิสะท้อนให้เห็นถึงความแตกต่างของพลังงานความร้อนของตัวอย่างเกลือหินนั่นเอง

ถ้าสมมติให้เกลือหินมีคุณสมบัติยึดหยุ่นเชิงเส้นตรงก่อนเกิดการวิบัติค่า  $W_d$  และ  $W_m$  สามารถคำนวณจากผลการทดสอบในแต่ละตัวอย่างหินได้ และสามารถแสดงดังสมการ

$$W_d = \frac{3}{4} \left( \frac{\tau_{oct}^2}{G} \right) \quad (6.1)$$

$$W_m = \left( \frac{\sigma_m^2}{2K} \right) \quad (6.2)$$

โดยที่คุณสมบัติเชิงยึดหยุ่น  $G$  และ  $K$  สามารถคำนวณในฟังก์ชันของอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบได้ ดังนั้น ความแข็งแรงของเกลือหินในรูปของพลังงานความเครียดเบี่ยงเบนจึงสามารถนำมาสัมพันธ์กับระดับอุณหภูมิที่ต่างกันได้ จากผลการทดสอบสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงยึดหยุ่นต่างๆ กับการผันแปรของอุณหภูมิได้ ซึ่งสามารถแสดงดังสมการ



รูปที่ 6.5 พลังงานความเครียดเบี่ยงเบนในฟังก์ชันของพลังงานความเครียดเฉลี่ย



$$E = -0.06T + 42.7 \quad (6.3)$$

$$G = -0.0215T + 16.2 \quad (6.4)$$

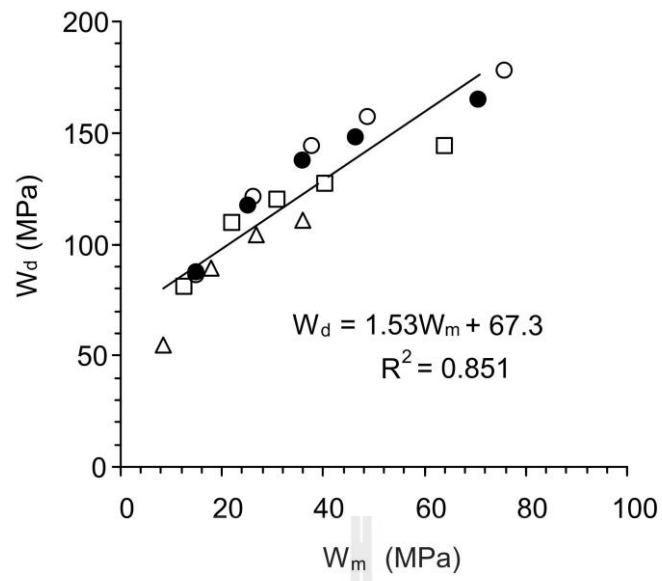
$$K = -0.0254T + 35.6 \quad (6.5)$$

$$v = (7 \times 10^{-6})T + 0.33 \quad (6.6)$$

โดยการแทนค่าสมการ (6.3) ถึงสมการ (6.6) ลงในสมการ (6.1) และ (6.2) ค่าพลังงานความเครียดเบี่ยงเบนที่จุดวิบัติควรจะคำนึงถึงผลกระทบของอุณหภูมิของตัวอย่างเกลือหินเพื่อให้อยู่ในเกณฑ์การแตก หลังจากการแทนค่าดังกล่าวข้างต้นค่าพลังงานความเครียดเบี่ยงเบนที่ได้อรวมทั้งผลกระทบของอุณหภูมิและความดันรอบๆ สามารถแสดงอยู่ในสมการเดียวคือ

$$W_d = A_{Th} \cdot W_m + B_{Th} \quad (6.7)$$

โดยที่ค่า  $A_{Th}$  และ  $B_{Th}$  เป็นค่าคงที่ที่ขึ้นกับความแข็งและการตอบสนองต่ออุณหภูมิที่ผันแปรของเกลือหิน สำหรับเกลือหินชุดมหาสารคาม ค่า  $A_{Th} = 1.53$  และค่า  $B_{Th} = 63.7$  MPa เมื่อนำสมการดังกล่าวมาเทียบเคียงกับผลการทดสอบจะมีความสอดคล้องเป็นอย่างดี โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของความสัมพันธ์  $R_2 = 0.851$  ดังแสดงในรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.6 พลังงานความเครียดเบี่ยงเบนในฟังก์ชันของพลังงานความเครียดเฉลี่ย ที่ได้รวมผลกระทบของอุณหภูมิไว้แล้ว

## บทที่ 7

### การวิเคราะห์เสถียรภาพของโพรงในเกลือหิน ด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (FLAC 4.0)

#### 7.1 วัตถุประสงค์

การคำนวณโดยใช้คอมพิวเตอร์จะนำมาวิเคราะห์เพื่อการออกแบบเบื้องต้นเกี่ยวกับรูปร่าง ขนาด ความลึก แพนผังของโพรง และอุโมงค์กักเก็บกากของเสียในชั้นเกลือหิน แนวคิดในการออกแบบมี 2 ลักษณะ คือ โพรงกักเก็บกากของเสียที่ถูกสร้างขึ้นโดยการละลาย (Solution Mining Cavern) และห้องกักเก็บกากของเสียที่ถูกสร้างขึ้นโดยการขุดเจาะใต้ดิน (Underground Excavation) การวิเคราะห์มุ่งประเด็นที่เสถียรภาพของเกลือหินที่อยู่รอบโพรงหรือห้องที่ใช้กักเก็บกากของเสียภายใต้อุณหภูมิสูงถึง 110°C

#### 7.2 การกำหนดตัวแปรในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

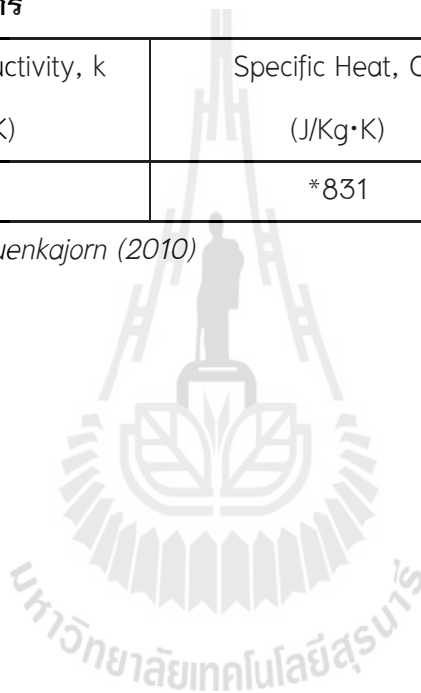
ตัวแปรที่ส่งผลต่อความเสถียรภาพของการออกแบบโพรงและอุโมงค์ ได้แก่ ขนาดรูปร่าง ความลึก และระยะห่างระหว่างโพรงหรืออุโมงค์ เพื่อให้ได้รูปร่างโพรงหรืออุโมงค์ที่มีเสถียรภาพและปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับกักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมจึงจำเป็นต้องมีความลึกระดับหนึ่งเพื่อป้องกันการรั่วไหลของกากของเสียสู่สิ่งแวดล้อมหรือชั้นน้ำบาดาลบริเวณใกล้เคียง ดังนั้น ขนาดและรูปร่างของโพรงเกลือที่ใช้ในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ FLAC 4.0 (Itasca, 1994) สำหรับงานวิจัยนี้จะกำหนดให้โพรงเป็นรูปทรงกระบอกและอยู่ที่ระดับความลึก 500 เมตร จากผิวดิน มีรัศมี 25 เมตร และมีความสูงวัดจากหลังคาโพรงถึงพื้นโพรงเท่ากับ 200 เมตร (รูปร่างและความลึกนี้ได้มาจากการศึกษาเทคโนโลยีอากาศอัดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย) ผิวดินปิดทับด้วยชั้นดินมีความหนา 50 เมตร คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินที่ใช้ในแบบจำลองได้มาจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ความหนาแน่น ( $\gamma$ ) ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น ( $E$ ) อัตราส่วนปัวร์ซอง ( $\nu$ ) ค่ามุมเสียดทาน ( $\phi$ ) และค่าความเค้นยึดติด ( $c$ ) และคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของชั้นดินปิดทับอ้างอิงจากฐานข้อมูลที่มีในโปรแกรม FLAC 4.0 ทางด้านคุณสมบัติเชิงอุณหพลศาสตร์ของเกลือหินอ้างอิงจาก Phueakphum and Fuenkajorn (2010) และ Durham (1981) ภายในโพรงมีแรงดันที่เกิดจากอากาศ (Air pressure) ประมาณ 10% ของความเค้นที่หลังคาโพรง (ค่าความเค้นของหลังคาโพรงที่ 500 เมตร เท่ากับ 10.3 MPa) ซึ่งคุณสมบัติต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้นได้แสดงอยู่ในตารางที่ 7.1 และโครงข่ายแบบจำลองที่ใช้เป็นตัวแทนเชิงกายภาพของโพรงที่สภาวะจริงในภาคสนาม

ตารางที่ 7.1 คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และอุณหพลศาสตร์ของวัสดุที่ใช้ในแบบจำลอง

| คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์     |  |  |                              |   |                              |
|---------------------------|--|--|------------------------------|---|------------------------------|
| ชนิดของวัสดุ              | ความหนาแน่น<br>$\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> ) | ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น<br>E (GPa) | อัตราส่วนปัวซอง<br>( $\nu$ ) | ค่ามุมเสียดทาน<br>$\phi$ (Degrees)      | ค่าความเค้นยึดติด<br>c (MPa) |
| Soil                      | 2,100  | 0.4                                    | 0.25                         | 35                                      | 0.001                        |
| Rock Salt                 | 2,100  | 18.0                                   | 0.37                         | 50                                      | 2.0                          |
| คุณสมบัติเชิงอุณหพลศาสตร์ |  |  |                              |   |                              |
| ชนิดหิน                   | Thermal conductivity, k<br>(W/m·K)           | Specific Heat, Cp<br>(J/Kg·K)          |                              | Thermal expansion<br>(K <sup>-1</sup> ) |                              |
| Rock Salt                 | *5.8   | *831                                   |                              | **4.5×10 <sup>-5</sup>                  |                              |

\* จาก Phueakphum and Fuenkajorn (2010)

\*\* จาก Durham (1981)



แสดงดังรูปที่ 7.1 โดยที่การจำลองนี้จะเป็นการจำลองแบบ Axisymmetry และไม่พิจารณาคุณสมบัติของเกลือหินในเชิงเวลา แต่จะพิจารณาแบบความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง (Linearly Elastic Behavior) และความแข็ง (Strength) นอกจากนี้ผลกระทบที่เกิดจากอุณหภูมิจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับโพรงที่ไม่มีอุณหภูมิเพื่อแสดงถึงผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อโพรงกักเก็บ

ในกรณีของห้องหรือช่องเหมืองจะออกแบบจำลองให้ห้อง (อุโมงค์) มีความลึก 500 เมตร มีความสูงของโพรง 10 เมตร และกว้าง 10 เมตร ระยะห่างระหว่างห้องคือ 10 เมตร คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และอุณหพลศาสตร์ของเกลือหินที่ใช้ในแบบจำลองจะเหมือนกับการจำลองโพรงกักเก็บ รูปที่ 7.2 แสดงโครงข่ายของแบบจำลองและคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และอุณหพลศาสตร์ของเกลือหิน และในการจำลองจะทำการเปรียบเทียบห้องหรืออุโมงค์ที่มีอุณหภูมิสูงกับห้องหรืออุโมงค์ที่มีอุณหภูมิลดเพื่อแสดงถึงผลกระทบของอุณหภูมิ

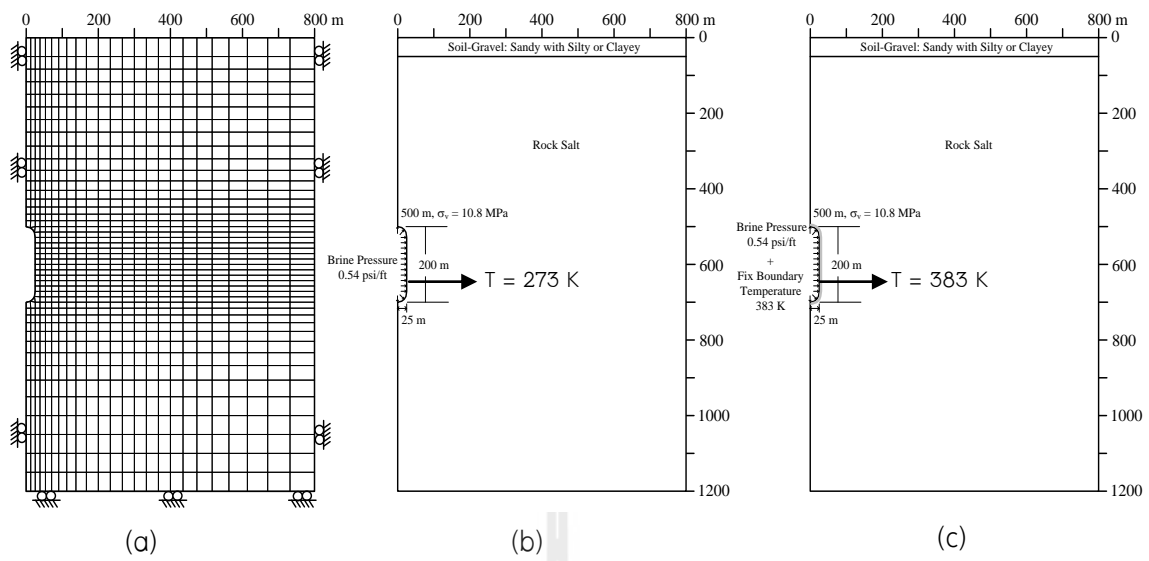
### 7.3 เสถียรภาพของโพรงกักเก็บกากของเสียภายใต้อุณหภูมิ

การวิเคราะห์ความเสถียรภาพของโพรงกักเก็บของเสียในงานวิจัยนี้จะใช้หลักเกณฑ์ของค่าพลังงานความเครียดเฉลี่ย ( $W_m$ ) ที่สัมพันธ์กับค่าพลังงานความเครียดเบี่ยงเบน ( $W_d$ ) ที่พัฒนาขึ้นมาในบทที่ 4 เพื่อคำนวณหาค่าปัจจัยความปลอดภัย ผลในเบื้องต้นที่ได้จากโปรแกรม FLAC 4.0 ด้วยการเปรียบเทียบค่าความเค้นในแกนหลัก ค่าความเค้นในแกนหลักรอง และค่าความเค้นเฉือนนั้นผลที่ได้บ่งชี้ว่าเมื่อโพรงมีอุณหภูมิสูงขึ้นค่าความเค้นที่อยู่รอบๆ โพรงจะมีค่าสูงขึ้น (รูปที่ 7.3) เมื่อเทียบกับแบบจำลองที่ไม่มีผลกระทบของอุณหภูมิ (รูปที่ 7.4) โดยเฉพาะค่าความเค้นเฉือนที่ส่งผลต่อความเสถียรภาพของโพรงกักเก็บและเมื่อนำมาคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยจากหลักเกณฑ์ของค่าพลังงานความเครียดเฉลี่ย ( $W_m$ ) ที่สัมพันธ์กับค่าพลังงานความเครียดเบี่ยงเบน ( $W_d$ ) ในแต่ละจุดของโพรง ได้แก่ บริเวณหลังคาโพรง (Cavern roof) ผนังโพรง (Cavern wall) และพื้นโพรง (Cavern floor) ดังรูปที่ 7.5 ผลที่ได้ระบุว่าเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิของแบบจำลองที่บริเวณรอบๆ โพรงกักเก็บจะส่งผลให้ปัจจัยความปลอดภัยต่ำมีค่ากว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ไม่มีผลกระทบจากอุณหภูมิ (ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ และผลการคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยแสดงในตารางที่ 7.2) โดยที่ค่าปัจจัยความปลอดภัยคำนวณได้จากสมการ

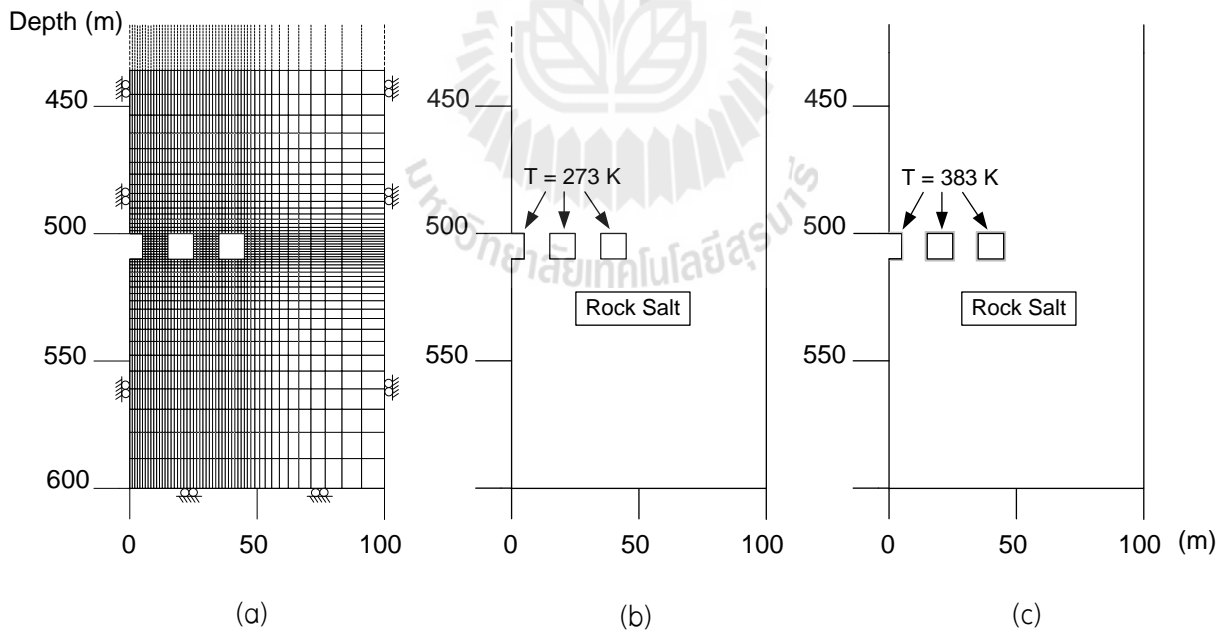
$$F.S. = W_{d,cri}/W_{d,model}$$

โดยที่  $W_{d,cri}$  คือ พลังงานความเครียดที่เกลือหินรับได้ (บทที่ 4)

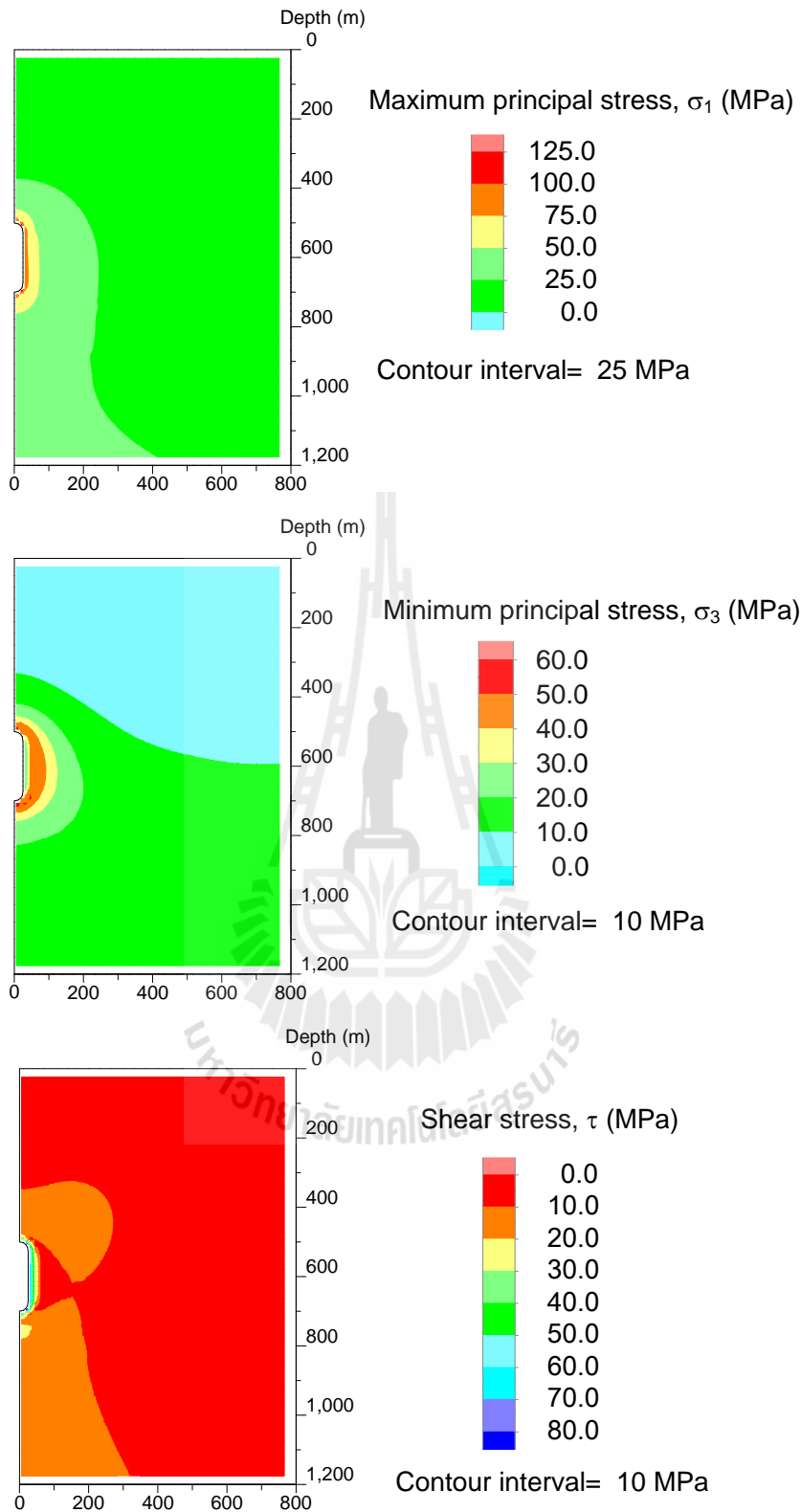
$W_{d,model}$  คือ พลังงานความเครียดที่คำนวณได้ที่จุดต่างๆ รอบโพรงหรือห้องกักเก็บกากของเสีย



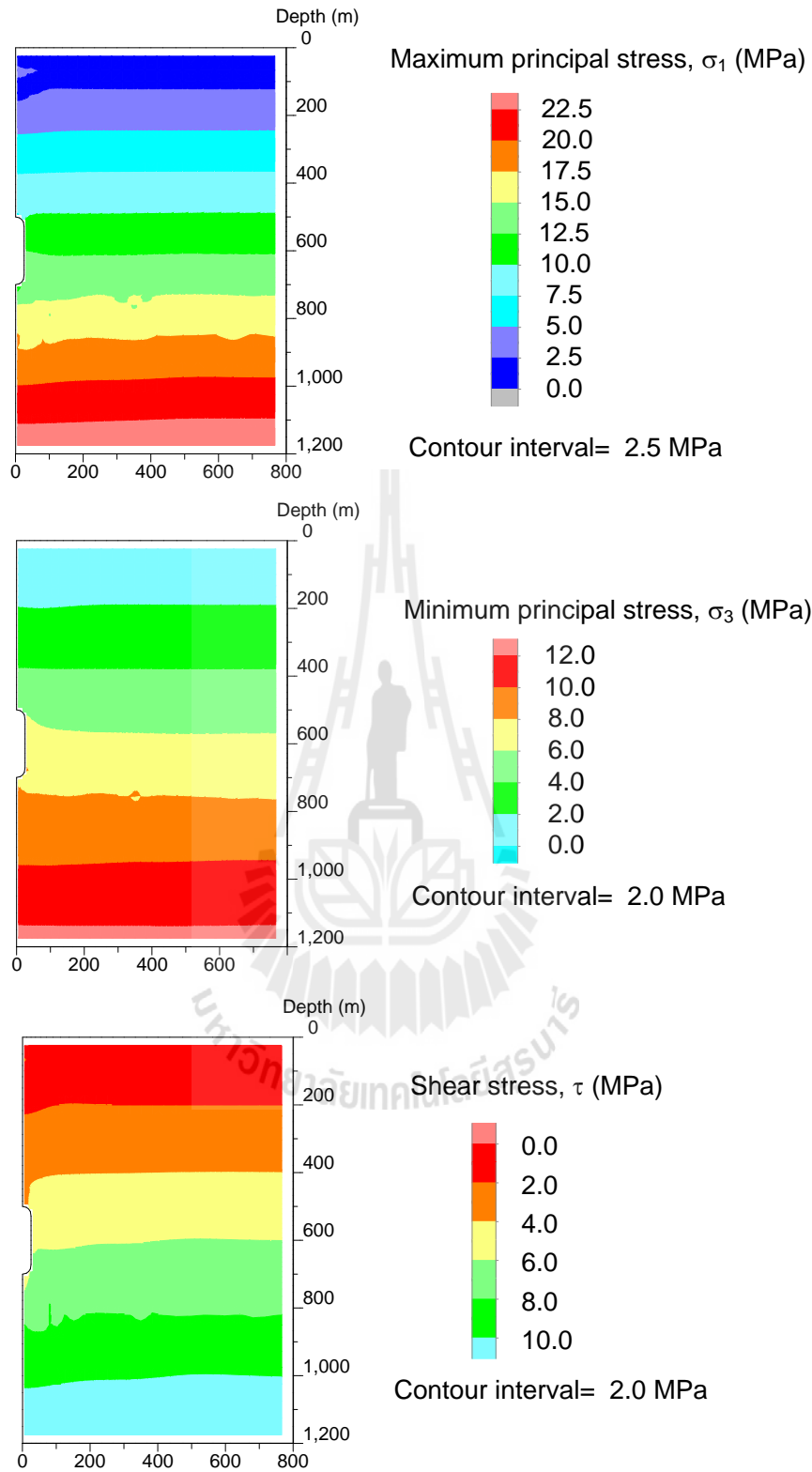
รูปที่ 7.1 โครงข่ายแบบจำลองของโพรงกักเก็บ (a) ตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองที่ไม่มีผลกระทบของอุณหภูมิ (b) และแบบจำลองที่มีผลกระทบของอุณหภูมিবริเวณรอบๆ โพรงกักเก็บ (c)



รูปที่ 7.2 โครงข่ายแบบจำลองของห้องหรืออุโมงค์ (a) รูปร่างแบบจำลองที่ไม่มีผลกระทบของอุณหภูมิ (b) และรูปร่างแบบจำลองที่มีผลกระทบของอุณหภูมিবริเวณรอบๆ อุโมงค์ (c)

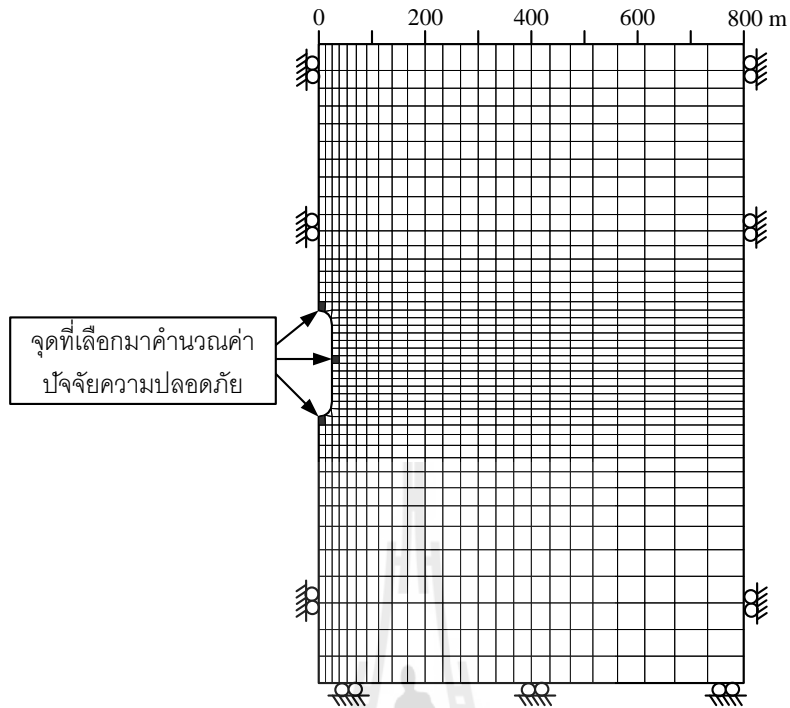


รูปที่ 7.3 ความเค้นในแกนหลัก (a) ความเค้นในแกนหลักรอง (b) ความเค้นเฉือน (c) ภายใต้ อุณหภูมิ 383 K (110°C)



รูปที่ 7.4 ความเค้นในแกนหลัก (a) ความเค้นในแกนหลักทรง (b) ความเค้นเฉือน (c) ที่ไม่มีผลกระทบจากอุณหภูมิ





รูปที่ 7.5 จุดที่เลือกเพื่อคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยที่บริเวณหลังคาโพรง ผนังโพรง และพื้นโพรง

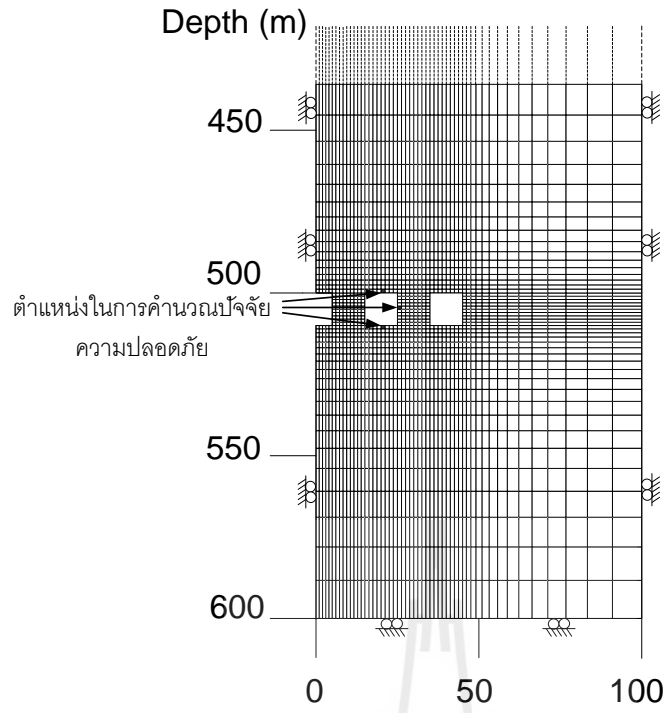
ตารางที่ 7.2 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณและผลการคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยที่ตำแหน่งต่างๆ สำหรับโพรงกักเก็บกากของเสีย

| ตำแหน่ง | $\sigma_m$<br>(MPa) | $\tau_{oct}$<br>(MPa) | $\epsilon_m$<br>(millistrain) | $\gamma_{oct}$ | $W_{d,model}$<br>(MPa) | $W_{d,cri}$ (MPa) |       | F.S. |       |
|---------|---------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------|------------------------|-------------------|-------|------|-------|
|         |                     |                       |                               |                |                        | 25°C              | 110°C | 25°C | 110°C |
| Roof    | 82.84               | 16.41                 | 2.06                          | 2.011          | 49.5                   | 669.4             | 402.1 | 13.5 | 8.1   |
| Wall    | 71.69               | 35.10                 | 2.72                          | 141.674        | 141.7                  | 727.7             | 459.7 | 5.1  | 3.2   |
| floor   | 86.56               | 16.12                 | 2.05                          | 2.032          | 49.1                   | 685.6             | 418.1 | 13.9 | 8.5   |

#### 7.4 เสถียรภาพของห้อง (อุโมงค์) กักเก็บกากของเสียในชั้นเกลือหิน

การวิเคราะห์ความมีเสถียรภาพของห้องหรืออุโมงค์สำหรับกักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมในงานวิจัยนี้จะใช้หลักเกณฑ์เดียวกันกับการวิเคราะห์ความมีเสถียรภาพของโพรงกักเก็บ คือ ค่าพลังงานความเครียดเฉลี่ย ( $W_m$ ) ที่สัมพันธ์กับค่าพลังงานความเครียดเบี่ยงเบน ( $W_d$ ) ที่พัฒนาขึ้นมาในบทที่ 4 เพื่อคำนวณหาค่าปัจจัยความปลอดภัย สำหรับการจำลองห้องหรืออุโมงค์นั้นจะกำหนดให้ความกว้างของโพรงเท่ากับความสูงของห้อง คือ 10 เมตร และมีเสาค้ำยันกว้าง 10 เมตร ผลที่ได้จากโปรแกรม FLAC 4.0 ด้วยเปรียบเทียบค่าความเค้นในแกนหลัก ค่าความเค้นในแกนหลักรอง และค่าความเค้นเฉือนนั้นผลที่ได้บ่งชี้ว่าเมื่อห้องหรืออุโมงค์มีอุณหภูมิสูงขึ้นค่าความเค้นที่อยู่รอบๆ โพรงจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับแบบจำลองที่ไม่มีผลกระทบของอุณหภูมิ การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยจากหลักเกณฑ์ของค่าพลังงานความเครียดเฉลี่ย ( $W_m$ ) ที่สัมพันธ์กับค่าพลังงานความเครียดเบี่ยงเบน ( $W_d$ ) จะทำในแต่ละจุดของโพรง ได้แก่ บริเวณหลังคาโพรง ผนังโพรง และพื้นโพรงดังรูปที่ 7.6 โดยผลการคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยรวมไปถึงตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณแสดงอยู่ในตาราง 7.3





รูปที่ 7.6 จุดที่เลือกเพื่อคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยที่บริเวณหลังคาห้อง ผนังห้อง และพื้นห้อง



ตารางที่ 7.3 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ และผลการคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยที่ตำแหน่งต่างๆ ของห้องหรืออุโมงค์สำหรับกักเก็บกากของเสีย

| ตำแหน่ง | $\sigma_m$<br>(MPa) | $\tau_{oct}$<br>(MPa) | $\epsilon_m$<br>(milistrain) | $\gamma_{oct}$ | $W_{d,model}$<br>(MPa) | $W_{d,cri}$ (MPa) |        | F.S. |       |
|---------|---------------------|-----------------------|------------------------------|----------------|------------------------|-------------------|--------|------|-------|
|         |                     |                       |                              |                |                        | 25°C              | 110°C  | 25°C | 110°C |
| Roof    | 7.43                | 4.81                  | 22.13                        | 37.47          | 270.57                 | 654.43            | 387.33 | 2.42 | 1.43  |
| Wall    | 3.00                | 2.45                  | 15.31                        | 23.20          | 85.24                  | 371.53            | 108.00 | 4.36 | 1.26  |
| floor   | 5.63                | 3.62                  | 17.03                        | 30.73          | 166.73                 | 491.14            | 226.09 | 2.95 | 1.36  |



## บทที่ 8

### บทสรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิของตัวอย่างเกลือหินต่อคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์เพื่อนำผลที่ได้มาพัฒนาเกณฑ์การแตกของเกลือหินภายใต้อุณหภูมิและความดันล้อมรอบ ตัวอย่างเกลือหินรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด  $5.4 \times 5.4 \times 5.4$  ลูกบาศก์เซนติเมตร ถูกจัดเตรียมขึ้นจากเกลือหินชุดมหาสารคามเพื่อใช้ทดสอบค่ากำลังกดในแกนเดียวและในสามแกนโดยอาศัยโครงกวดทดสอบในสามแกน (Polyaxial load frame) โดยผันแปรความดันล้อมรอบจาก 0, 3, 5, 10, 15, 20 ถึง 30 MPa และผันแปรอุณหภูมิจาก 273, 298, 404 ถึง 467 Kelvin ผลงานวิจัยระบุว่าค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและความเค้นกดสูงสุดของเกลือหินจะลดลงถ้าอุณหภูมิของตัวอย่างเพิ่มขึ้น และพบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างความแข็งและความยืดหยุ่นเชิงอุณหภูมิ เกณฑ์การแตกที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้อาศัยแนวคิดเกี่ยวกับพลังงานความเครียดสูงสุดที่เกลือหินจะรับได้ก่อนเกิดการวิบัติ พลังงานความเครียดดังกล่าวจะรวมพลังงานกลและพลังงานความร้อนเข้าด้วยกัน ในการพิจารณาปัจจัยทั้งสองนี้ ค่าพลังงานความเครียดเบี่ยงเบนและพลังงานความเครียดเฉลี่ยได้ถูกคำนวณขึ้นจากแต่ละตัวอย่างที่ทดสอบ เมื่อนำพลังงานทั้งสองรูปแบบมาลงจุดในแผนภูมิพบว่าในแต่ละระดับอุณหภูมิค่าพลังงานความเครียดเบี่ยงเบนจะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตรงกับค่าพลังงานความเครียดเฉลี่ย โดยอัตราการเพิ่มขึ้นนี้จะมีลักษณะคล้ายคลึงกันสำหรับชุดการทดสอบในอุณหภูมิที่ต่างกันทั้งสี่ระดับที่ทดสอบในงานวิจัยนี้ เพื่อที่จะรวมเกณฑ์การแตกทั้งสี่ระดับอุณหภูมิเข้าด้วยกันเป็นเกณฑ์เดียว ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติความยืดหยุ่นและอุณหภูมิได้ถูกพัฒนาขึ้นในเชิงตัวเลขและนำมาแทนค่าในความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความเครียดเบี่ยงเบนและพลังงานความเครียดเฉลี่ย ผลลัพธ์ที่ได้คือเกณฑ์การแตกของเกลือหินเพียงชุดเดียวที่สามารถใช้คาดคะเนความเค้นสูงสุดภายใต้การผันแปรอุณหภูมิและความดันล้อมรอบ เกณฑ์การแตกนี้สอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการคาดคะเนเสถียรภาพและปัจจัยความปลอดภัยของเกลือหินที่อยู่รอบโพรงกักเก็บพลังงานอากาศอัดและก๊าซธรรมชาติ ซึ่งเกลือหินในภาคสนามดังกล่าวจะอยู่ภายใต้การผันแปรอุณหภูมิและความดันล้อมรอบในขณะที่มีการอัดและปล่อยอากาศหรือก๊าซออกจากโพรงเกลือ

## บรรณานุกรม

- Adhikary, S. (2010). **Temperature effect on the rock salt instant strength characteristics**. M. D. Thesis, Delft University of Technology.
- Allemandou, X. and Dusseault, M. B. (1996). Procedures for cyclic creep testing of salt rock, results and discussions. In **Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 207–218). Clausthal–Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Araujo, R. G. S. , Sousa, J. L. A. O., and Bloch, M. (1997). Experimental investigation on the influence of temperature on the mechanical properties of reservoir rocks. **Int. J. Rock Mech. Min. sci.** 34(3–4): 298–313.
- ASTM D2664. Standard test method for triaxial compressive strength of undrained rock core specimens without pore pressure measurements. In **Annual Book of ASTM Standards** (Vol. 04.08). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D2938. Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens. In **Annual Book of ASTM Standards** (Vol. 04.08). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D3967. Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens. In **Annual Book of ASTM Standards** (Vol. 04.08). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- Aubertin, M. (1996). On the physical origin and modeling of kinematics and isotropic hardening of salt. In **Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 1–18). Clausthal, Germany: Trans Tech Publications.
- Aubertin, M., Gill, D. E., and Ladanyi, B. (1993). Modelling the transient inelastic flow of rock salt. In **Proceedings of the 7<sup>th</sup> Symposium on Salt** (pp. 93–104). Kyoto, Japan.

- 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**. 36: 660–674.
- Aubertin, M., Sgaoula, J. and Gill, D. E. (1993). Constitutive modeling of rock salt: Basic considerations for semi-brittle behavior. In **Proceedings of the Fourth International Symposium on Plasticity and It's Current Applications** (pp. 92). Baltimore.
- Aubertin, M., Sgaoula, J., and Gill, D. E. (1993a). A damage model for rock salt: Application to tertiary creep. In **Proceedings of the 7<sup>th</sup> Symposium on Salt** (pp. 117–125). Kyoto, Japan.
- Aubertin, M., Sgaoula, J., and Gill, D. E. (1993b). Constitutive modeling of rock salt: Basic considerations for semi-brittle behavior. In **Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Symposium on Plasticity and It's Current Applications** (pp. 92 (1–4)). Baltimore.
- 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. In **Proceedings of the 7<sup>th</sup> Symposium on Salt** (pp. 353–362). Kyoto, Japan.
- Berest, P., Brouard, B., and Durup, G. (1998). Behavior of sealed solution-mined caverns. In **Proceedings of the 4<sup>th</sup> Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 511–524). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Billiotte, J., Guen, L. C., Deveughele, M., and Brulhet, J. (1996). On laboratory measurements of porosity and permeability of salt rocks (Bressa basis-France). Mechanical Behavior of Salt III. In **Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 221–230). The Pennsylvania State University: Trans Tech Publications.
- Billiotte, J., LeGuen, C., Deveughele, M., and Brulhet, J. (1996). On laboratory measurements of porosity and permeability of salt rocks (Bressa basis-France). In **Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 221–230). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.

- Bonte, G. (1996). Mechanical aspects of the inhibition of a salt wall by brine initially contained in a cavity. In **Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 263–267). Clausthal–Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Carter, N. L., Horseman, S. T., Russell, J. E., and Handin, J. (1993). Rheology of rocksalt. **Journal Structural Geology**. 15: 1257–1272.
- Chokski, A. H. and Langdon, T. G. (1991). Characteristics of creep deformation in ceramics. **Materials Science and Technology**. 7: 577–584.
- Chu, M. S. and Chang, N. Y. (1981). Uniaxial creep of oil shale under elevated temperatures. In **Proceedings of the 21<sup>st</sup> US Symposium on Rock Mechanics**(pp. 28–30). Rolla: Missouri.
- Cleach, J. M. L., Ghazali, A., Deveughele, H., and Brulhet, J. (1996). Experimental study of the role of humidity on the thermomechanical behavior of various halitic rocks. In **Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 231–236). Clausthal–Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Closmann, P. J. and Bradley, W. B. (1979). The effect of temperature on tensile and compressive strengths and young's modulus of oil shale. **SPE Journal**. 19(5): 301–312.
- Cristescu, N. (1994a). A procedure to determine nonassociated constitutive equations for geomaterials. **Int. J. Plasticity**. 10: 103–131.
- Cristescu, N. (1994b). *Visco-Plastic Behaviour of Geomaterials*. **Springer Verlag**. pp. 103–207.
- Cristescu, N. and Hunsche, U. (1996). A comprehensive constitutive equation for rock salt–determination and application. In **Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 191–205). Clausthal–Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Duddeck, H. W. and Nipp, H. K. (1983). Time and temperature dependent stress and displacement fields for salt domes. In **Proceedings of the 23<sup>rd</sup> Symposium on Rock Mechanics**(pp. P596–603). Publ New York: AIME.



- Durham, W. B. and Abey, A. E. (1982). Effect of pressure and temperature on the thermal properties of a salt and a quartz monzonite. In **Proceedings of the 22<sup>nd</sup> US. Symposium on Rock Mechanics**. Cambridge Mass: MIT.
- Dusterloh, U. and Lux, K. H. (2010). Some geomechanical aspects of compressed air energy storage (caes) in salt caverns. In **Proceedings of Solution mining research institute fall 2010 technical conference**. Germany: Leipzig.
- Dwivedi, R. D., Goel, R. K., Prasad, V. V. R., and Sinha, A. (2008). Thermo-mechanical properties of indian and other granites. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.** 45: 303–315.
- 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. In **Proceedings of the 4<sup>th</sup> Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 49–61). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Franssen, R. C. M. W. (1998). Mechanical anisotropy of synthetic polycrystalline rock salt. In **Proceedings of the 4<sup>th</sup> Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 63–75). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- 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 pp. 201–213.
- Ghoreychi, M. and Berest, P. (1990). Thermomechanical modelling of radioactive waste disposal in salt formations. In **10<sup>th</sup> Conf. Struct. Mech. in Reactor Techn. (SMIRT)**, California.
- Hamami, M., Tijani, S. M., and Vouille, G. (1996), A methodology for the identification of rock salt behavior using multi-step creep tests. In **Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 53–66). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Hanchen, M., Bruckner, S., and Steinfeld, A. (2011). High-temperature thermal storage using a packed bed of rocks – heat transfer analysis and experimental validation. **Applied Thermal Engineering**. 31(10): 1798–1806.

- Hansen, F. D. and Carter, N. L. (1981). Creep of rock salt at elevated temperature. In **Proceedings of the 21<sup>st</sup> US Symposium on Rock Mechanics**.(pp. P217–226). Rolla: Missouri.
- 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. In **Proceedings of the 29<sup>th</sup> U.S. Symposium on Rock Mechanics** (pp. 199–206). University of Minnesota, Minneapolis, A. A. Balkema, Rotterdam.
- Hardy, H. R. and Chugh, Y. P. (1970). Failure of geological materials under low-cycle fatigue. In **Proceedings of the 6<sup>th</sup> Canadian Symposium on Rock Mechanics** (pp. 33–47). Montreal.
- Hardy, H. R. Jr. (1996). Application of the Kaiser effect for the evaluation of in-situ stress in salt. In **Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Conference on the Mechanical Behavior of Rock Salt** (pp. 85–100). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Hardy, H. R. Jr. (1998). Strength and acoustic emission in salt under tensile loading. In **Proceedings of the 4<sup>th</sup> Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 143–162). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Heins, R. W. and Friz, T.O. (1967). The effect of low temperature on the some physical properties of rock. **Drilling and rock mechanics conference**. Texas, USA.
- Hunsche, U. and Albrecht, H. (1990). Results of true triaxial strength tests on rock salt. **Engineering Fracture Mechanics**. 35(4–5): 867–877.
- Hunsche, U. and Schulze, O. (2003). The dilatancy concept – a basis for the modelling of couple t–m–h–processes in rock salt. In **Proceedings of European commission CLUSTER conference on the impact of EDZ on the performance of radioactive waste geological repositories**. Luxembourg.
- Hunsche, U. E. (1993). Failure behavior of rock salt around underground cavities. In **Proceedings of the 7<sup>th</sup> Symposium on Salt** (pp. 59–65). Amsterdam.
- Hunsche, U. E. and Schulze, O. (1996). Effect of humidity and confining pressure on creep of rock salt. In **Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 237–248). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Hunsche, U. E., Mingerzahn, G., and Schulze, O. (1996). The influence of textural

- parameters and mineralogical composition on the creep behavior of salt. In **Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 143–151). Clausthal–Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Jaeger, J. C. and Cook, N. G. W. (1979). **Fundamentals of Rock Mechanics**. London: Chapman and Hall.
- Jaeger, J. C., Cook, N. G. W., and Zimmerman, R. W., (2007). **Fundamentals of Rock Mechanics**. Fourth Edition, Blackwell Publishing, Oxford.
- Jeremic, M. L. (1994). **Rock Mechanics in Salt Mining**. A. A. Balkema, Rotherdam, the Netherlands, p 532.
- King, M. S. and Can, J. (1980). Thermal conductivity measurements on saturated rocks at permafrost temperatures. **Earth Sciences**. 16: P73–79.
- Liang, W. G., Xu, S. G., and Zhao, Y. S. (2006). Experimental study of temperature effects on physical and mechanical characteristics of salt rock. **Rock mechanics and rock engineering**. 39(5): 469–482.
- Munson, D. E. and Wawersik, W. R. (1991). Constitutive modeling of salt behavior–State of the technology. In **Proceedings of the 7<sup>th</sup> Int. Cong. Rock Mech.** (pp. 1797–1810). ISRM Aachen.
- Munson, D. E., and Wawersik, W. R. (1993). Constitutive modeling of salt behavior – State of the technolog. In **Proceedings of the Seventh International Congression of the Rock Mechanics** (vol. 3, pp. 1797–1810). A.A. Balkema.
- Munson, D. E., Chan, K. S., and Fossum, A. F. (1999). Fracture and healing of rock salt related to salt caverns. **Solution Mining Research Institute** (pp. 21). Las Vegas.
- 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. In **Proceedings of the 35<sup>th</sup> U S Symp. Rock Mech.** (pp.491–496).
- Okatov, R. P., Nizametdinov, F. K., Tsai, B. N., and Bondarenko, T. T. (2003). Time and temperature factors in construction of rock strength criteria. **Journal of mining science**. 39(2): 139–142.

- 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. In **Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 153–166). Clausthal–Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Peach, C. J. (1996). Deformation, dilatancy and permeability development in halite/anhydrite composites. In **Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 153–166). Clausthal–Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- 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**. 75: 347–352.
- Schneefub, J. and Droste, J. (1996). Thermomechanical effects in backfilled drifts. In **Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 373–380). Clausthal–Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- 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. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.** 29: 363–378.
- Shimada, M. and Liu, J. (2000). Temperature dependence of strength of rock under high confining pressure. **Annals of Disas.** 43B-1: 75–84.
- 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 rocksalt by pressure solution. **Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics**, Geological Society Special Publication (pp. 215–227).
- Staupendahl, G., Gessler, K., and Wallner, M. (1985). Condensed presentation of experimental results about the stress and temperature dependent strength and strain behaviour of salt rocks (in German). In **Rock Mechanics: Caverns and Pressure Shafts**.(vol. 3, pp. 1115–1119). Rotterdam: A. A. Balkema.
- Takarli, M., and Prince–Agbodjan, W. (2008). Temperature effect on physical properties and mechanical behavior of granite: experimental investigation of material damage. **Journal of ASTM international**. 5(3):1–13.

- Thorel, L. and Ghoreychi, M., 1996, Rock salt damage–Experimental results and interpretation. In **Proceedings 3<sup>rd</sup> Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 175–189). Clausthal–Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Vosteen, H. and Schellschmidt, R. (2003). Influence of temperature on thermal conductivity, thermal capacity and thermal diffusivity for different types of rock. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C.** 28(9–11): 499–509.
- Walsri, C., Poonprakon, P., Thosuwat R., and Fuenkajorn, K. (2009). Compressive and tensile strengths of sandstones under true triaxial stresses. In **Proceeding 2<sup>nd</sup> 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  $0.27T_m < T < 0.44T_m$ . In **Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 117–128). Clausthal–Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- 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: 891–900.
- Wolfenstine, J., Ruano, O. A., Wadsworth, J., and Sherby, O. D. (1991). Harper–Dorn creep in single crystalline NaCl. **Scripta Metall. Mat.** 25: 2065–2070.

## 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