



รหัสโครงการ SUT7-719-55-12-62

รายงานการวิจัย

ชุดโครงการวิจัย

การพัฒนาแหล่งเกลือหินสำหรับกักเก็บของเสีย

จากภาคอุตสาหกรรมในระยะยาว

(Long-Term Storage of Industrial Wastes in Rock Salt)

โครงการวิจัยย่อย

การศึกษาดัชนีภาพเชิงกลศาสตร์ของชั้นเกลือหินชุดมหาสารคามภายใต้

สภาวะอุณหภูมิสูงสำหรับกักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรม

(Mechanical Performance of Maha Sarakham Salt

for Industrial Waste Storage under High Temperatures)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-719-55-12-62

รายงานการวิจัย

ชุดโครงการวิจัย

การพัฒนาแหล่งเกลือหินสำหรับกักเก็บของเสีย

จากภาคอุตสาหกรรมในระยะยาว

(Long-Term Storage of Industrial Wastes in Rock Salt)

โครงการวิจัยย่อย

การศึกษาศักยภาพเชิงกลศาสตร์ของชั้นเกลือหินชุดมหาสารคามภายใต้สภาวะ

อุณหภูมิสูงสำหรับกักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรม

(Mechanical Performance of Maha Sarakham Salt

for Industrial Waste Storage under High Temperatures)

คณะผู้วิจัย

ผู้อำนวยการชุดโครงการวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เฟื่องขจร

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

หัวหน้าโครงการวิจัยย่อย

รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เฟื่องขจร

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2555

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มีนาคม 2556

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากทีมงานหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีในการทดสอบและ นางสาวกัลญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

มีนาคม 2556



บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือ เพื่อประเมินกำลังกดและการเปลี่ยนรูปร่างภายใต้แรงดึงของเกลื่อหินชุกุมมหาสารคาม โดยทำการทดสอบกำลังดึงแบบวงแหวนของตัวอย่างเกลื่อหินที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร หนา 38 มิลลิเมตร และมีเส้นผ่าศูนย์กลางของรูตรงกลางเท่ากับ 31.5 มิลลิเมตร ความเครียดดึงที่จุดแตกถูกตรวจวัดอย่างต่อเนื่องขณะทดสอบ แรงตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลางที่ใช้สอดคล้องกับความเค้นดึงที่อัตรา 0.00003, 0.0003, 0.003, 0.03 และ 0.3 MPa/s แต่ละตัวอย่างมีอุณหภูมิคงที่ ในแต่ละอัตรากดมีการผันแปรอุณหภูมิจาก 269–375 เคลวิน (0–100°C) ผลการทดสอบระบุว่าค่ากำลังดึงของเกลื่อหินจะเพิ่มขึ้นถ้าอัตราการกดเพิ่มขึ้น และจะลดลงถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งการผันแปรดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยสมการยกกำลังความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ซึ่งสรุปได้ว่าความเครียดภายใต้กำลังดึงประกอบด้วยความเครียดเชิงยืดหยุ่นและความเครียดที่ผันแปรตามเวลา ซึ่งสมการเอ็กโปเนนเชียลสามารถอธิบายการเปลี่ยนรูปร่างภายใต้แรงดึงของเกลื่อหินได้ และยังสามารถคาดคะเนได้ว่าภายใต้ความดันล้อมรอบต่ำ (ดังที่ใช้ในการศึกษานี้) ผลกระทบจากการเปลี่ยนรูปร่างแบบสม่ำเสมอภายใต้แรงดึงจะมีน้อย ซึ่งในข้อสรุปนี้สามารถยืนยันได้จากการตรวจสอบผิวของรอยแตก ปรากฏว่ารอยแตกส่วนใหญ่เกิดที่รอยต่อของผลึกเกลื่อและมีการแตกของผลึกน้อยมาก ความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ดังกล่าวข้างต้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการประเมินเสถียรภาพระยะยาวของหลังคาเหมืองเกลื่อหรือโพรงกักเก็บในชั้นเกลื่อภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

Abstract

The objective of this study is to experimentally assess the time-dependent tensile strength and deformability of rock salt obtained from the Maha Sarakham formation. The ring tension tests are performed on salt specimens with diameter of 100 mm and thickness of 38 mm. The center hole has a nominal diameter of 31.5 mm. The tensile strain induced at the crack initiation point is monitored until failure occurs. A diameter load is applied under various rates which are equivalent to the tensile stresses at the crack initiation point of 0.00003, 0.0003, 0.003, 0.03 and 0.3 MPa/s. The testing temperature is maintained constant for each specimen. They are varied from 269 to 375 Kelvin for each loading rate. The results indicate that the tensile strength increases with increasing loading rate, and decreases with increasing temperatures, which can be best described by a power equation. The stress-strain curves suggest that the tensile strains consist of the instantaneous (elastic) strain and the transient creep strain. The exponential law can describe the time-dependent tensile deformation of the salt. It is postulated that under low confinement (as used in this study) the effect of the steady-state creep strain induced under tension is small. This is supported by the post-test examination that the splitting tensile cracks are largely induced along the boundaries of salt grains (crystals). The failure of the salt grains on the crack surfaces is rarely observed. The mathematical relations developed for the salt tensile strength and time-dependent deformation can be used to assess the long-term stability of the salt roof for the mine openings or storage caverns under various temperatures.

สารบัญ

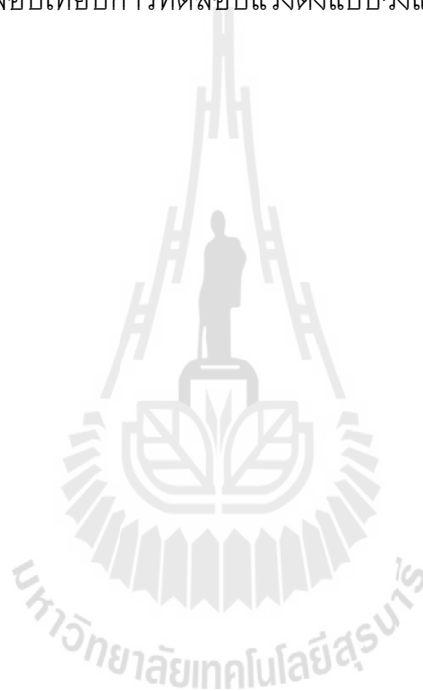
	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน หรือกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	4
บทที่ 2 การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 คุณสมบัติของเกลือหินเชิงกลศาสตร์.....	7
2.2 การทดสอบแรงดึงที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน.....	8
2.3 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของเกลือหิน.....	10
2.4 ปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง.....	11
บทที่ 3 การจัดเตรียมตัวอย่างหิน.....	15
3.1 ที่มาของตัวอย่างเกลือหิน.....	15
3.2 การตัดตัวอย่างเกลือหิน.....	15
3.3 การปรับคุณสมบัติของตัวอย่างเกลือหิน.....	15
บทที่ 4 การจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	19
4.1 แบบจำลองการกระจายตัวของความเค้นดึงและความเค้นกด.....	19
4.2 ผลการจำลองการกระจายตัวของความเค้นดึงและความเค้นกด.....	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ	25
5.1 การทดสอบหาค่ากำลังดึงภายใต้อุณหภูมิ 0°C (270 Kelvin).....	25
5.2 การทดสอบหาค่ากำลังดึงภายใต้อุณหภูมิห้อง (30°C หรือ 303 Kelvin).....	28
5.3 การทดสอบหาค่ากำลังดึงภายใต้อุณหภูมิ 75°C และ 100°C (348 Kelvin และ 375 Kelvin).....	29
บทที่ 6 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ	33
6.1 ผลการทดสอบกำลังดึงของเกลือหินภายใต้อุณหภูมิ.....	33
6.2 ความเครียดที่จุดแตกภายใต้อุณหภูมิ.....	33
บทที่ 7 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ	39
7.1 เกณฑ์การแตกของตัวอย่างเกลือหินภายใต้การผันแปรของอุณหภูมิและ อัตราการให้แรงกด.....	39
7.2 การสอบเทียบตัวแปรเชิงเวลาของเกลือหิน.....	40
บทที่ 8 สรุปผลการวิจัย	45
8.1 สรุปและวิจารณ์ผล.....	45
8.2 ข้อเสนอแนะ.....	46
บรรณานุกรม	47
ประวัตินักวิจัย	53

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ความลึกและขนาดของตัวอย่างเกลือหินในการทดสอบแรงดึงแบบวงแหวน.....	18
4.1 คุณสมบัติของตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในสมการและแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	23
6.1 ผลการทดสอบกำลังดึงของเกลือหินภายใต้อุณหภูมิ 0°C ถึง 100°C (270 ถึง 375 Kelvin).....	34
7.1 ค่าตัวแปรที่ได้จากการสอบเทียบการทดสอบแรงดึงแบบวงแหวน.....	42



สารบัญญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
3.1	16
3.2	16
3.3	16
3.4	16
4.1	20
4.2	20
4.3	21
4.4	22
4.5	22
5.1	26
5.2	26
5.3	27
5.4	29
6.1	35
6.2	36
6.3	37
7.1	40
7.2	43

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ผลกระทบของความเค้นดึงที่เกิดขึ้นบริเวณหลังคาอุโมงค์ถือเป็นประเด็นสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความมีเสถียรภาพของช่องเหมืองโดยเฉพาะอย่างยิ่งความเค้นดึงที่เกิดขึ้นรอบโพรงกักเก็บในเชิงเวลา ซึ่งส่วนใหญ่แล้วการทดสอบในห้องปฏิบัติการเป็นการทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบของความเค้นกด เช่นการทดสอบแรงกดในแกนเดียว การทดสอบแรงกดในสามแกน และการทดสอบในสามแกนจริง รวมไปถึงการทดสอบคุณสมบัติการคืบของตัวอย่างหินที่มีคุณสมบัติเชิงพลาสติก ซึ่งล้วนแล้วแต่พิจารณาในเชิงของความเค้นกดทั้งสิ้น แท้จริงแล้วผลกระทบที่เกิดจากความเค้นดึงนั้นมีมากกว่าความเค้นกดหลายเท่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณหลังคาอุโมงค์หรือช่องเหมืองซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพโดยรวมของเหมืองทั้งหมด นอกจากนี้ อุณหภูมิยังเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อค่าความเค้นของหิน เนื่องจากในสภาวะกักเก็บเช่นโพรงเกลือละลายสำหรับกักเก็บกากของเสีย เกลือหินจะอยู่ในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ซึ่งในงานวิจัยนี้ทดสอบหาความแข็งของเกลือหินภายใต้อุณหภูมิสูงแล้วนำมาสร้างกฎเกณฑ์การแตกที่มีอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้อง

กฎเกณฑ์การแตกที่ใช้สำหรับคำนวณค่าความเค้นในสามมิติได้นั้นมีน้อยมาก โดยเฉพาะค่าความเค้นดึง อีกทั้งกฎเกณฑ์การแตกในสามมิติที่ใช้อยู่ในปัจจุบันสำหรับเกลือหินเองยังไม่เพียงพอ เนื่องจากกฎเกณฑ์ต่างๆ ที่สร้างขึ้นยังอยู่ในรูปแบบที่ไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงทั้งด้านการออกแบบและการวิเคราะห์โครงสร้างทางธรณีวิทยา

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการวิจัยครั้งนี้ คือ การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดึงของเกลือหินภายใต้อุณหภูมิระหว่าง 25-200°C เพื่อคาดคะเนเกณฑ์การแตกที่สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ได้อย่างมีประสิทธิภาพในการออกแบบและหาเสถียรภาพของโพรงกักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมในชั้นเกลือหิน การศึกษาค่ากำลังดึงของเกลือหินเชิงเวลาภายใต้อุณหภูมิ 25-200°C เพื่อประเมินเสถียรภาพของโพรงหรือช่องเหมืองในชั้นเกลือหินในระยะยาว และเพื่อศึกษาพฤติกรรมการคืบภายใต้แรงดึงที่เกิดขึ้นบริเวณหลังคาโพรง

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการได้มาจากชุดหินมหาสารคาม
- 2) ทำการทดสอบตัวอย่างเกลือหินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร หน้า 1-2 เซนติเมตร มากกว่า 20 ตัวอย่าง
- 3) การให้แรงสำหรับการทดสอบกำลังดึงเชิงเวลาได้ใช้แผ่นน้ำหนักกดทับบนตัวอย่าง
- 4) การทดสอบได้ดำเนินการภายใต้อุณหภูมิที่ผันแปรระหว่าง 25-200°C
- 5) การทดสอบได้ดำเนินการภายใต้สภาวะแห้ง
- 6) ไม่มีการทดสอบในภาคสนาม
- 7) มีการตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติ และนำเสนอในการประชุมวิชาการระดับชาติ

1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน หรือกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

ความมีเสถียรภาพทางด้านกลศาสตร์ของเกลือหินเป็นสิ่งสำคัญที่สุดประการหนึ่งสำหรับการออกแบบและก่อสร้างโพรงในชั้นเกลือหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือเพื่อกักเก็บกากของเสียที่ไม่สามารถบำบัดหรือนำกลับมาใช้ใหม่ได้จากภาคอุตสาหกรรม การคาดคะเนหรือการประเมินเสถียรภาพของเกลือหินนี้ทำได้อย่างถูกต้องถูกหลักวิชาการด้วยวิธีเดียวคือ การใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งวิธีการนี้เป็นที่ยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ เพื่อให้ได้ผลที่แม่นยำและถูกต้อง การคำนวณในคอมพิวเตอร์ด้วยสมการหลายร้อยสมการที่เกี่ยวข้อง หรือลักษณะทางเรขาคณิตของแบบจำลองจะต้องเหมาะสมและถูกต้องตามหลักกายภาพ และสิ่งสำคัญที่สุดอย่างหนึ่งคือคุณสมบัติและพฤติกรรมของเกลือหินที่ถูกนำมาใช้ในการคำนวณทางคอมพิวเตอร์จะต้องมีความถูกต้องและใกล้เคียงสอดคล้องกับคุณสมบัติจริงของชั้นเกลือหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ดังนั้นการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อให้ได้มาซึ่งผลการทดสอบของคุณสมบัติเหล่านี้จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการดำเนินการควบคู่กันไป

การทดสอบเพื่อหาค่ากำลังดึงของตัวอย่างเกลือหินมีความจำเป็น เนื่องจากบริเวณหลังคาโพรง อุโมงค์ หรือช่องเหมืองนั้นจะได้รับความเค้นที่เป็นความเค้นดึงที่เกิดขึ้นในภาคสนาม นอกจากนี้ผลกระทบที่เกิดจากความเค้นดึงยังคงมีอยู่ต่อไปในระยะยาว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทดสอบเพื่อหาค่ากำลังดึงเชิงเวลาด้วย ในสภาวะจริงในภาคสนามเกลือหินจะอยู่ภายใต้อุณหภูมิสูงและเพื่อให้ผลการทดสอบเป็นไปอย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพจึงต้องศึกษาผลกระทบของความเค้นดึงรวมถึงความเค้นดึงเชิงเวลาเพื่อที่จะสามารถประเมินค่าความเค้นดึงที่เกิดขึ้นจริงและสามารถออกแบบอุโมงค์หรือโพรงเกลือได้อย่างถูกต้อง

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ได้แบ่งการค้นคว้าและศึกษาออกเป็น 2 ประเด็นหลัก ประกอบด้วยการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน และปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของเกลือหิน

ขั้นตอนที่ 2 การเก็บและเตรียมตัวอย่างเกลือหิน

ตัวอย่างเกลือหินได้ถูกจัดเตรียมเป็นแผ่นกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร มีความหนา 2 เซนติเมตร โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 กลุ่ม คือ 1) การทดสอบค่ากำลังดึงของเกลือหินภายใต้อุณหภูมิ และ 2) การทดสอบการแอ่นตัวของเกลือหินเชิงเวลาภายใต้อุณหภูมิ โดยผันแปรอุณหภูมิระหว่าง 25–200°C ตัวอย่างเกลือหินได้รับการทดสอบไม่น้อยกว่า 20 ตัวอย่าง

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบหาค่ากำลังดึงของเกลือหินภายใต้อุณหภูมิ

ในขั้นตอนนี้ได้ทำการทดสอบหาค่าความแข็งแรงในสามแกนจริงของเกลือหินโดยใช้เครื่องทดสอบในแกนเดียวด้วยการใช้หัวกดรูปวงแหวนทั้งด้านบนและด้านล่าง โดยให้น้ำหนักกดทับบนตัวอย่างหินจนกระทั่งหินแตก ตัวอย่างเกลือหินได้ถูกเตรียมเป็นแผ่นกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร มีความหนา 20 มิลลิเมตร จำนวนไม่น้อยกว่า 20 ตัวอย่าง โดยผันแปรอุณหภูมิระหว่าง 25–200°C

ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบหาค่ากำลังดึงของเกลือหินเชิงเวลาภายใต้อุณหภูมิ

ในขั้นตอนนี้ได้ทำการทดสอบหาค่ากำลังดึงของเกลือหินเชิงเวลาภายใต้อุณหภูมิโดยใช้เครื่องทดสอบในแกนเดียวด้วยการใช้หัวกดรูปวงแหวนทั้งด้านบนและด้านล่าง และให้น้ำหนักกดทับไม่เกิน 70% ของค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดของตัวอย่างเกลือหิน ตัวอย่างเกลือหินได้ถูกเตรียมเป็นแผ่นกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร มีความหนา 20 มิลลิเมตร จำนวนไม่น้อยกว่า 9 ตัวอย่าง และจะผันแปรอุณหภูมิระหว่าง 25–200°C เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อความแข็งแรงของเกลือหิน

ขั้นตอนที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการได้นำมาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ โดยการอธิบายค่าความเค้นดึงของตัวอย่างเกลือหินที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิและสร้างกฎเกณฑ์ใหม่ ของค่ากำลังดึงสูงสุดที่ขึ้นกับอุณหภูมิ รวมไปถึงผลกระทบของความเค้นดึงในระยะยาวที่สามารถ เกิดขึ้นได้ที่บริเวณหลังคาอุโมงค์ ซึ่งความสัมพันธ์นี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบหลังคาโพรง หรืออุโมงค์สำหรับใช้เป็นแหล่งกักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมได้

ขั้นตอนที่ 6 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิด ขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุป ได้นำเสนอโดยละเอียดในรายงานฉบับสมบูรณ์นี้ เพื่อที่จะส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ และตีพิมพ์ ในวารสารระดับนานาชาติ

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

ผลงานวิจัยที่เสนอมานี้มีประโยชน์อย่างมากกับงานด้านธรณีวิทยา วิศวกรรม- สิ่งแวดล้อม และวิศวกรรมธรณี ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังนี้

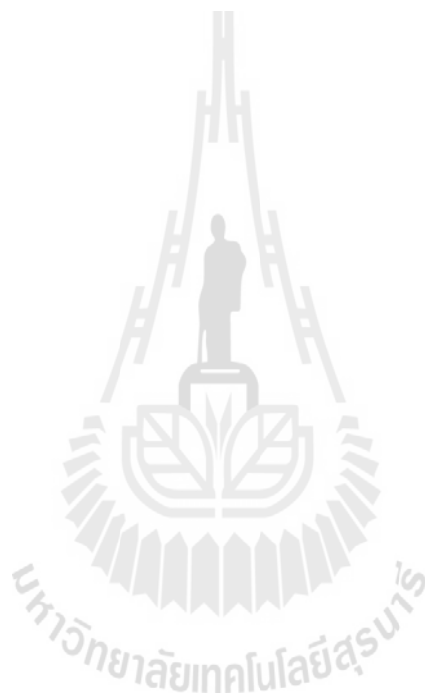
- 1) ตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารระดับนานาชาติ
- 2) เผยแพร่องค์ความรู้ให้กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั้งภาครัฐ และเอกชน
- 3) สร้างนักวิจัยระดับ postdoctoral อย่างน้อย 1 คน
- 4) สร้างนักวิจัยระดับ postgraduate อย่างน้อย 1 คน

หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยที่เสนอมานี้จะมีประโยชน์อย่างมากและโดยตรงกับหลายหน่วยงานทั้ง ภาครัฐและเอกชน สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ และวิศวกรรมธรณี รวมไปถึงหน่วยงานที่ทำงานเกี่ยวข้องกับการก่อสร้างในชั้นหิน เช่น การสร้างเขื่อน การสร้าง อุโมงค์ เหมืองแร่บนดินและใต้ดิน หน่วยงานเหล่านี้ได้แก่

- 1) กรมทรัพยากรน้ำ
- 2) กองธรณีเทคนิค กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและ สิ่งแวดล้อม
- 3) สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา กรมชลประทาน กระทรวงเกษตร และสหกรณ์

- 4) กองธรณีเทคนิค กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน
- 5) สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ และวิศวกรรมธรณี
- 6) บริษัทเอกชนที่ออกแบบและก่อสร้างอุโมงค์ และความลาดชันในมวลหิน
- 7) กระทรวงพลังงาน
- 8) บริษัทสำรวจและขุดเจาะน้ำมันในประเทศไทย
- 9) องค์การบริหารส่วนตำบล และองค์การบริหารส่วนจังหวัด



บทที่ 2

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 4 หัวข้อหลัก ประกอบด้วย การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน การศึกษาการทดสอบแรงดึงที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของเกลือหิน และปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง รวมไปถึงผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่าความแข็งของเกลือหิน

2.1 คุณสมบัติของเกลือหินเชิงกลศาสตร์

การศึกษาและวิจัยด้านกลศาสตร์เกลือหินมีจุดมุ่งหมายหลักเพื่อศึกษากลไกและพฤติกรรมของเกลือหินในระยะเวลายาว โดยอาศัยการทดสอบเชิงกลศาสตร์และความรู้พื้นฐานทางวิศวกรรมศาสตร์เข้ามาประยุกต์ใช้ เพื่อหาคุณสมบัติของเกลือหินและสร้างสมการหรือกฎเกณฑ์เชิงคณิตศาสตร์ในการประเมินและคาดคะเนพฤติกรรมของเกลือหินในสภาวะชั้นหินที่มีแรงกด ความร้อน และความชื้น เป็นต้น คุณสมบัติของเกลือหินเชิงกลศาสตร์จึงเกี่ยวข้องกับค่าความเค้น ความเครียด อุณหภูมิ และเวลา คุณสมบัติเหล่านี้จะถูกกำหนดเป็นส่วนหนึ่งของสมการคณิตศาสตร์เพื่อให้สามารถอธิบายพฤติกรรมของเกลือหินในด้านต่างๆ ได้ครอบคลุม

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

พฤติกรรมเชิงยืดหยุ่น (Elastic behavior) ของเกลือหินจะถูกพิจารณาในลักษณะความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงและมีการวิบัติแบบเปราะ ความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงสามารถสังเกตได้เมื่อมีแรงกดต่ำกว่าแรงกดอ่อนตัว ในช่วงความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงจะสามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นได้ ปกติแล้วเกลือหินจะมีสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่ต่ำกว่าหินอื่นๆ

พฤติกรรมเชิงยืดหยุ่น-พลาสติก (Elastic and plastic behavior) ของเกลือหินจะเกิดขึ้นเมื่อแรงกดที่มากกระทำต่อเกลือหินยังไม่เกินจุดอ่อนตัว เมื่อปล่อยแรงกดจะทำให้เกลือหินกลับสู่สภาพเดิม หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือเกลือหินมีการเปลี่ยนรูปไปชั่วขณะเท่านั้น แต่ในขณะเดียวกันเมื่อให้แรงกดต่อไปเกลือหินจะเข้าสู่ช่วงที่เป็นพลาสติก กล่าวคือ มีความเค้นสูงกว่าจุดความเค้นอ่อนตัวไปแล้วนั่นเอง เมื่อลดแรงกดเกลือหินจะไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ ถ้าให้แรงกดต่อไปเกลือหินจะไม่สามารถทนแรงกดที่สะสมไว้ได้และในที่สุดเกลือหินก็จะวิบัติ

พฤติกรรมเชิงพลาสติก (Plastic behavior) ของเกลือหินจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรจนกว่าแรงที่กระทำจะเกินจุดอ่อนตัว (Thorel and Ghoreychi, 1996) ที่แรงกดสูงเช่นนี้เกลือหินจะมีการวิรูปไปเรื่อยๆ ไม่มีที่สิ้นสุดหากแรงกดที่กระทำยังคงเท่ากับแรงกดคงที่ เมื่อถึงขีดจำกัดของความเครียดค่าหนึ่งเกลือหินก็จะไม่สามารถทนรับแรงกดนี้ต่อไปได้และจะวิบัติ

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

2.2 การทดสอบแรงดึงที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

Fuankajorn and Daeman (1986) ได้ศึกษาเกี่ยวกับกำลังดึงแบบวงแหวนบนตัวอย่างหินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 229 มิลลิเมตร โดยมีขนาดรูตรงกลางของตัวอย่างหินที่แตกต่างกัน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดึงแบบวงแหวนและอัตราส่วนระหว่างรัศมีตัวอย่างหินต่อรัศมีรูเจาะ จากการศึกษพบว่าค่ากำลังดึงแบบวงแหวนมีค่าลดลงเมื่อรัศมีตัวอย่างหินต่อรัศมีรูเจาะมีค่าลดลง โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณสามารถคำนวณและคาดคะเนค่ากำลังดึงแบบวงแหวนที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของขนาดรูเจาะ และสามารถประเมินค่าอัตราส่วนระหว่างรัศมีตัวอย่างหินต่อรัศมีรูเจาะสูงสุดของวัสดุที่จะใช้ในการทดสอบ

การทดสอบกำลังดึงแบบกดสี่จุด (Four-point bending test) มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความเค้นดึงสูงสุดของหิน (Goodman, 1989) ผลที่ได้จากการทดสอบจะมีประโยชน์ในการประเมินเสถียรภาพหลังคาของเหมืองใต้ดินหรืออุโมงค์ที่ขุดเจาะอยู่ในชั้นหินตะกอนที่มีชั้นหินอยู่ในแนวระนาบ ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นในตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงแบบกดสี่จุดจะคล้ายคลึงกับการกระจายตัวของความเค้นในชั้นหินที่ประกอบเป็นหลังคาอุโมงค์ ค่า

ความเค้นดึงสูงสุดแบบกดสี่จุด (T) นี้บ้างตำราเรียกว่าเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการแตก (Modulus of rupture) เป็นที่น่าสังเกตประการหนึ่งว่าค่าความเค้นดึงสูงสุดแบบกดสี่จุดของหินชนิดหนึ่งจะมีค่าสูงกว่าค่าความเค้นดึงสูงสุดที่ได้จากการทดสอบแบบบราซิลเสมอ ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเค้นในแนวแตกของหิน (Stress gradient)

การทดสอบกำลังดึงแบบปรับเปลี่ยน หรือ Modified Tension Test (MTT) ที่นำเสนอโดย Blümel (2000) ในการประชุม EUROCK 2000 เป็นวิธีการทดสอบแบบใหม่เพื่อหาค่ากำลังดึงของหิน โดยตัวอย่างหินมีลักษณะเป็นทรงกระบอกซึ่งมีรูปทรงเรขาคณิตแบบพิเศษที่ทำให้เกิดความเค้นดึงไปในทิศทางเดียวกันในแง่ตัวอย่าง โดยวิธีการทดสอบได้ยึดถือตามมาตรฐานของเครื่องมือทดสอบความเค้นกดสูงสุดในแกนเดียวมาใช้ ซึ่งจากการประเมินผลลัพธ์ด้วยวิธี Modified Tension Test พบว่าเป็นวิธีที่ง่ายแต่เมื่อทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่าไม่มีการให้ค่ากำลังดึงโดยตรงของตัวอย่างหินหรือคอนกรีตที่แท้จริง ตัวอย่างหินที่นำมาทดสอบมีลักษณะทรงกระบอกที่มีการเจาะแหว่งตัวอย่างด้านบนและด้านล่างให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางต่างกัน จากนั้นให้แรงกดที่วงในด้านบน และให้แรงกดแบบวงแหวนที่ด้านล่างโดยใช้เครื่องกดทดสอบทั่วไป ซึ่งการแตกแบบดึงเกิดขึ้นในพื้นที่ระหว่างรอยเจาะที่ครอบกันอยู่ โดยวิธีนี้ให้ค่ากำลังดึงสูงสุดของหิน ซึ่งคำนวณมาจากแรงกดสูงสุดและพื้นที่หน้าตัดระหว่างรอยเจาะรูปวงแหวน โดยขึ้นกับรัศมีวงนอกและรัศมีวงในของแหว่งตัวอย่างที่เจาะครอบด้านบนและด้านล่าง

การทดสอบกำลังดึงแบบบราซิล (Brazilian tensile test) มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อหาค่ากำลังดึงสูงสุดของหินที่จุดวิบัติ (Brazilian tensile strength) การทดสอบเช่นนี้ถูกพิจารณาว่าเป็นการทดสอบความเค้นดึงสูงสุดของหินโดยอ้อม แต่ก็นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เพราะสามารถทดสอบได้ง่าย ตัวอย่างหินมีรูปร่างเป็นแผ่นกลม ISRM กำหนดว่าตัวอย่างหินควรมีเส้นผ่าศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 54 มิลลิเมตร และมีความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 0.50 ซึ่งมาตรฐาน ASTM กำหนดให้ตัวอย่างหินมีเส้นผ่าศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 49 มิลลิเมตร และมี L/D อยู่ระหว่าง 0.50-0.75 โดยใช้ตัวอย่างหินมากกว่า 10 ชิ้น สำหรับหินแต่ละชนิด วิธีการทดสอบคือ ทำการกดตัวอย่างหินตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลางด้วยอัตราประมาณ 0.5-1.0 MPa/s โดยให้ตัวอย่างหินสัมผัสกับแท่นกดของเครื่องกดเป็นแนวเส้น (เป็นลักษณะของการกดในแนวเส้น) แรงกดทำให้เกิดความเค้นดึงในแนวที่ตั้งฉากกับทิศทางของการกด ความเค้นดึงนี้มีค่าสูงสุดที่จุดกึ่งกลางของวงกลม และที่จุดนี้มีความเค้นกดยุติในแนวเส้นผ่าศูนย์กลางของการกดที่ตั้งฉากกับความเค้นดึง และมีขนาดเป็น 3 เท่าของความเค้นดึงที่เกิดขึ้น การวิเคราะห์ความเค้นสำหรับตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลอยู่ในสมมติฐานของความเค้นระนาบ (Plane stress) ดังนั้น ความเค้นที่ตั้งฉากอยู่กับแผ่นวงกลมจึงมีค่าเป็นศูนย์

2.3 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของเกลือหิน

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

ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนรูปร่างเชิงเวลาของเกลือหิน

Liang et al (2006) ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของอุณหภูมิต่อลักษณะเชิงกายภาพและเชิงกลของเกลือหิน ได้ข้อสรุปว่าระยะเวลาการเคลื่อนตัวในแนวตั้งและค่ากดอัดในแกนเดียวจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าความยืดหยุ่นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าความเร็วคลื่นอัตราไซนิกจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น สำหรับที่อุณหภูมิสูงเกลือหินจะมีความเหนียวมากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ค่าความเค้นยึดติดและค่ามุมเสียดทานจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและค่ากำลังเฉือนสูงสุดจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

Fuenkajorn and Phueakphum (2009) ได้ศึกษาผลกระทบของการให้แรงเชิงกลแบบวัฏจักรต่อคุณสมบัติของเกลือหิน เช่น กำลังรับแรงกด ความยืดหยุ่น และคุณสมบัติที่ขึ้นกับเวลา ของตัวอย่างเกลือหินจากชั้นเกลือซุดมหาสารคาม ซึ่งได้ดำเนินการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว กำลังรับแรงกดในสามแกน การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวในระยะเวลาสั้นและระยะยาว และการทดสอบการให้แรงแบบวัฏจักรในแกนเดียว จากผลการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงกดเท่ากับ 34.7 ± 2.2 MPa ค่าความยืดหยุ่นเท่ากับ 25.2 ± 1.9 GPa ค่าบัพของเท่ากับ 0.37 ± 0.11 ได้ข้อสรุปว่าความแข็งแรงหรือกำลังรับแรงกดของเกลือหินมีค่าน้อยลงเมื่อจำนวนวัฏจักรการให้แรงเพิ่มมากขึ้น ค่าความยืดหยุ่นของเกลือหินจะลดลงในช่วงแรกของการให้แรงแบบวัฏจักรและมีแนวโน้มคงที่จนเกิดการวิบัติ

ความร้อนหรืออุณหภูมิมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนรูปของเกลือหินอย่างมาก และทำให้ช่วงเวลาการเคลื่อนไหลยาวนานมากขึ้นและยังทำให้ความหนืดของเกลือหินเพิ่มขึ้นด้วยการศึกษาที่เกี่ยวกับอุณหภูมิและความลึกในชั้นหินได้มีผู้วิจัยหลายท่านศึกษาไว้แล้ว (Franssen and Spiers, 1990; Cristescu and Hunsche, 1996; 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 ระดับความลึกของชั้นหินที่เพิ่มขึ้นจะทำให้มีความร้อนสูงขึ้น ความร้อนจะทำให้เกลือหินมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับพลาสติกมากยิ่งขึ้น

และทำให้ความต้านแรงกดลดลง โดยปกติเกลือหินมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส แต่การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ตลอดระยะเวลาเพียง 8 ชั่วโมง ก็สามารถทำให้เกลือหินสูญเสียความต้านแรงกดไปได้ Cristescu (1994) และ Cristescu and Hunsche (1996) ได้แนะนำว่าการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ควรใช้อัตราการยุบตัวที่ต่ำกว่า 10^{-8} s^{-1} และที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ควรใช้อัตราการยุบตัวต่ำกว่า 10^{-7} s^{-1} เพราะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกลือหินเกิดการเคลื่อนไหลเร็วขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดการวิรูปได้ง่าย (Harmami et al., 1996)

Pudewills et al (1995) ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของอุณหภูมิหรือความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ขึ้นกับเวลา ได้ข้อสรุปว่าอุณหภูมิหรือความร้อนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเกลือหินเนื่องจากการเพิ่มขึ้นแบบคุณสมบัติพลาสติกของเกลือหินในระยะยาว

Charpentier (1984) ได้ศึกษาพฤติกรรมที่ขึ้นต่อเวลาของเกลือหินภายใต้การผันแปรอุณหภูมิ ด้วยเครื่องทดสอบที่ได้พัฒนาเพื่อทดสอบการคืบโดยเฉพาะ ซึ่งได้ทดสอบการคืบในแกนเดียวที่อุณหภูมิ 20°C, 100°C และ 200°C ใช้ตัวอย่างเกลือหินรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร ความยาว 16 เซนติเมตร และจากผลการทดสอบได้ข้อสรุปว่าเมื่อความเค้นสูงขึ้นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเกลือหินจะเพิ่มขึ้น (หรืออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น) ภายใต้อุณหภูมิเช่นเดียวกันเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราความเครียดจะเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิมิมีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเกลือหิน

2.4 ปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

ขนาดผลึกหรือขนาดเม็ดเกลือมีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและการเคลื่อนไหลของเกลือหิน กล่าวคือ เมื่อเปรียบเทียบขนาดผลึกกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร 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. (1996) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของผลึกและการเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติกของเกลือหินพบว่า ความต้านแรงเฉือนและการเปลี่ยนแปลงรูป (Shear strength and deformation) จะเกิดขึ้นตามแนวหรือทิศทางของผลึก ดังนั้นตัวอย่างเกลือหินที่มีขนาดเล็กเกินไป จะมีความต้านแรงกดที่แปรปรวน ผลการทดสอบที่ได้จึงไม่สามารถเปรียบเทียบกับขนาดอื่นได้ ดังนั้น ASTM จึงได้ออกข้อกำหนดมาตรฐานสากลขึ้น (ASTM D 2938, D 2664 and D 3967; Barber, 1990) เพื่อที่จะกำหนดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างให้มีขนาดมาตรฐานและสามารถเทียบเคียงกันได้ กล่าวคือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต้องมากกว่าสิบเท่าของขนาดผลึก

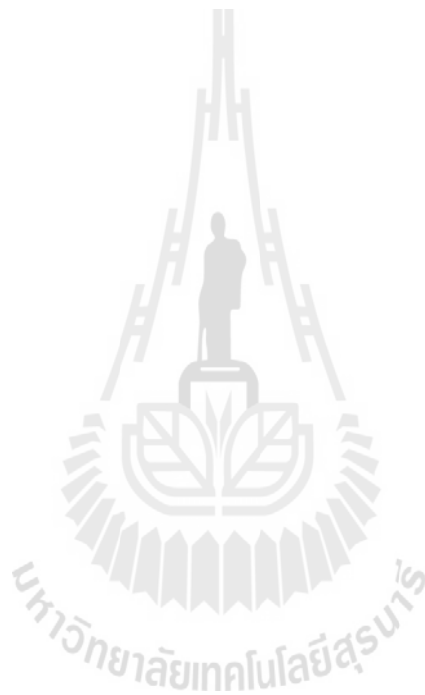
แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของเกลือหินในด้านความต้านทานของเกลือหิน โดยเกลือหินที่มีลักษณะเนื้อต่างกันจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกต่ำกว่าบริเวณที่เป็นเนื้อเดียวกัน ลักษณะดังกล่าวนี้ Wanten et al. (1996) และ Allemandou and Dusseault (1996) ได้สังเกตพฤติกรรมเกลือหินจากการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนและการทดสอบแรงกดในแกนเดียวพบว่า ค่าความเค้นจะขึ้นกับแรงยึดเหนี่ยวภายในผลึกและรอยต่อระหว่างผลึกของเกลือหิน ความเปราะเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของเกลือหินที่แสดงถึงความสามารถในการยึดเหนี่ยวระหว่างผลึก ยกตัวอย่างเช่น ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง เมื่อมีการตัดและการขัดตัวอย่างเกลือหินจะพบว่าบริเวณขอบของตัวอย่างอาจเกิดการแตกได้ง่าย นั่นเป็นเพราะว่าเกลือหินมีความสามารถในการยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกค่อนข้างต่ำ

อัตราแรงกดที่กระทำต่อเกลือหินที่แตกต่างกันจะทำให้เกลือหินมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างตามกาลเวลา ซึ่งเวลาในการเปลี่ยนรูปจะไม่เท่ากัน กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือการเคลื่อนไหลของเกลือหินที่เกิดขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาในสภาวะแรงกดที่แตกต่างกัน ภายใต้อัตรากดสูงเกลือหินจะมีพฤติกรรมแบบเปราะ แต่ภายใต้อัตราแรงกดที่ต่ำจะทำให้พฤติกรรมของเกลือหินเป็นแบบพลาสติกมากขึ้น เป็นผลให้มีจุดอ่อนตัวของความต้านแรงกดต่ำ ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวได้ศึกษาโดย Aubertin et al. (1993) และ Hardy (1996) พบว่าน้ำหนักกดทับในชั้นเกลือหินภายใต้ระยะเวลาานจะค่อยๆ ลดลง โดย Hardy (1996) ได้ทำการทดสอบตัวอย่างเกลือหินด้วยแรงกด 10.3 MPa และรักษาระดับการเปลี่ยนรูปไว้ในระยะเวลา 12 เดือน พบว่าความต้านแรงกดลดลงไปถึง 21%

ความชื้นจะทำให้คุณสมบัติของเกลือหินเปลี่ยนไป กล่าวคือ ความต้านแรงกดของเกลือหินจะลดลง (Hunsche and Schulze, 1996; Cleach et al., 1996) เนื่องจากเกลือหินมีความไวต่อความชื้นในอากาศ ความชื้นจะทำปฏิกิริยาเคมีกับเกลือหินทำให้เกิดการละลายและมีน้ำเกลือเยิ้มออกมา สำหรับการเตรียมตัวอย่างเกลือหินในห้องปฏิบัติการสามารถป้องกันความชื้นได้โดยการห่อหุ้มด้วยพลาสติกกันความชื้น นอกจากนี้ความชื้นยังสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายเมื่อมีอุณหภูมิเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา Billiotte (1996) และ Bonte (1996) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของความชื้นต่อความต้านแรงกดด้วยการทดสอบกับตัวอย่างเกลือหินที่มีความชื้นสูงโดยการนำตัวอย่างเกลือหินแช่ในน้ำเกลือ พบว่าเกลือจะมีความต้านแรงกดลดลง (เกลือหินที่แห้งปกติจะมีกำลัง 30 MPa) โดยลดเหลือเพียง 1 MPa เมื่อมีความชื้นในเกลือหินเพียง 7%

สิ่งเจือปนหรือสิ่งสกปรกในเนื้อหินเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อความต้านแรงกดของเกลือหิน เช่น Anhydrite และตะกอนอื่นๆ ที่มีการกระจายตัวในเกลือหิน ในบางกรณีจะไปลดความต้านแรงกดและทำให้เกลือหินมีพฤติกรรมการเคลื่อนไหลที่ต่างกันอย่างไป (Peach, 1996; Hunsche et al., 1996; Hansen et al., 1987) สิ่งเจือปนในเกลือหินมีผลต่อ

พฤติกรรมของการเคลื่อนไหลแม้จะมีจำนวนเพียงเล็กน้อยก็ตาม เพราะสิ่งเจือปนในเนื้อหินจะเป็นตัวกีดขวางแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกและการเคลื่อนไหลของเกลือหิน สิ่งเจือปนทำให้เกิดการแปรผันในเชิงกลศาสตร์โดยจะทำให้แรงกดมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอและไม่ต่อเนื่องกัน (Franssen and Spiers, 1990; Raj and Pharr, 1992; Senseny et al., 1992)



บทที่ 3

การจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหิน

เนื้อหาในบทนี้ได้อธิบายขั้นตอน วิธีการ และข้อปฏิบัติในการจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหินเพื่อใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งรวมไปถึงการตัดและการปรับอุณหภูมิของตัวอย่างเกลือหินในขณะทดสอบ

3.1 ที่มาของตัวอย่างเกลือหิน

ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เหมืองแร่ อาเซียนไปแตซ จำกัด อ.บ้านหินจระเข้ จ.ชัยภูมิ ซึ่งคัดสรรแท่งเกลือหินจากหลุมเจาะในเกลือชั้นกลาง (Middle salt) การเตรียมตัวอย่างเกลือหินสำหรับทดสอบในห้องปฏิบัติการมีวิธีการและขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.2 การตัดตัวอย่างเกลือหิน

นำแท่งตัวอย่างเกลือหินมาตัดเป็นรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร (รูปที่ 3.1) มีความหนา 3.8 เซนติเมตร ด้วยเครื่องตัดเหล็ก (Hack sawing machine) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 จากนั้นนำตัวอย่างเกลือหินมาเจาะรูตรงกลางแท่งตัวอย่างด้วยเครื่องเจาะแบบตั้งพื้น (Tirawatiger 16 speed) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยที่เส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะเท่ากับ 3.15 เซนติเมตร ตัวอย่างเกลือหินที่เตรียมขึ้นทั้งหมดนี้ใช้สำหรับการทดสอบหาค่ากำลังดึงแบบวงแหวนภายใต้อุณหภูมิระหว่าง 0–100°C รูปที่ 3.4 แสดงตัวอย่างเกลือหินบางส่วนที่ใช้ในการทดสอบและได้ทำการบันทึกค่าความลึกและขนาดของตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งความลึกและขนาดของตัวอย่างดังกล่าวได้แสดงในตารางที่ 3.1

3.3 การปรับอุณหภูมิของตัวอย่างเกลือหิน

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบโดยพิจารณาถึงผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อค่ากำลังดึงของเกลือหิน วิธีการเพิ่มอุณหภูมิของตัวอย่างเกลือหินสามารถทำได้ด้วยการนำอุปกรณ์ให้ความร้อนประกอบติดเข้ากับตัวอย่างเกลือหิน แล้วหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนเพื่อให้ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้สำหรับการทดสอบมีอุณหภูมิเท่ากับ 75°C และ 100°C สำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิต่ำสามารถทำได้ด้วยการนำตัวอย่างเกลือหินไปทำการลดอุณหภูมิด้วยเครื่องทำความเย็นเพื่อให้ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้สำหรับการทดสอบมีอุณหภูมิเท่ากับ 0°C เมื่อปรับอุณหภูมิของตัวอย่างเกลือหินได้ตามที่กำหนดจึงได้ทำการปล่อยทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำตัวอย่างเกลือหินไปติดตั้งบนโครงทดสอบเพื่อทำการทดสอบต่อไป



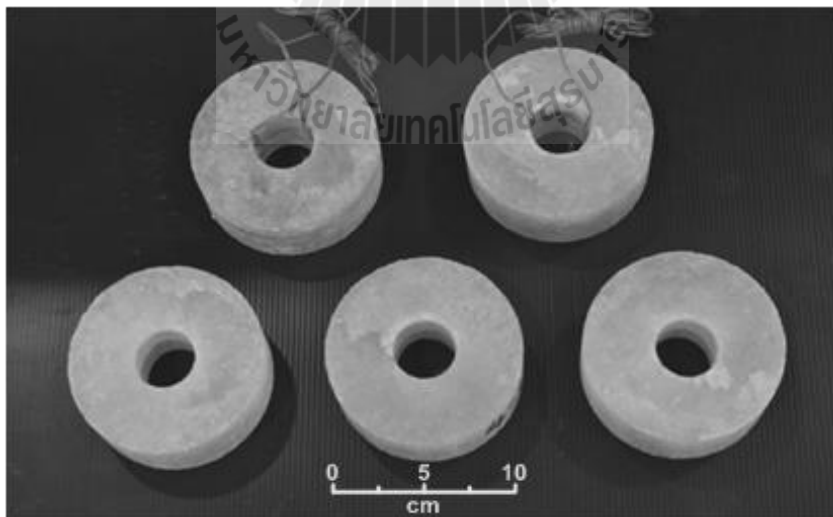
รูปที่ 3.1 แท่งตัวอย่างเกลื่อหินมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างเกลื่อหินถูกตัดแห้งให้มีความหนา 3.8 เซนติเมตร



รูปที่ 3.3 การเจาะรูตัวอย่างเกลือหินให้มีขนาด 3.15 เซนติเมตร โดยใช้เครื่องเจาะแบบตั้งพื้น



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างเกลือหินบางส่วนที่จัดเตรียมสำหรับการทดสอบกำลังดึงแบบวงแหวน

ตารางที่ 3.1 ความลึกและขนาดของตัวอย่างเกลือหินในการทดสอบแรงดึงแบบวงแหวน

Sample No.	Depth (m)	Disk diameter (mm)	Hole diameter (mm)	Thickness (mm)	ρ (g/cc)
5-05	123.006-123.045	101.09	31.92	38.85	2.21
1-09	82.870-82.909	100.22	32.59	39.02	2.25
6-02	122.850-122.889	100.31	31.76	38.47	2.29
1-11	82.947-82.986	100.88	32.30	39.42	2.21
1-08	82.831-82.870	101.20	32.21	38.70	2.15
4-02	71.033-71.071	100.68	32.05	38.75	2.19
4-04	71.111-71.150	101.00	31.65	38.60	2.13
4-03	71.071-71.111	100.68	31.60	40.13	2.09
4-05	71.150-71.189	100.48	31.77	38.75	2.17
4-10	70.678-70.716	100.50	31.56	38.23	2.17
5-01	73.440-73.480	100.26	31.91	40.33	2.20
6-05	122.729-122.768	100.6	32.07	39.21	2.21
7-01	72.680-72.719	100.59	32.30	38.60	2.22
7-04	72.799-72.838	100.50	32.10	39.40	2.09
1-14	82.599-82.637	101.00	32.10	37.70	2.29
5-06	122.969-123.006	100.93	31.92	36.59	2.21
7-03	72.760-72.799	100.36	31.76	38.93	2.13
1-10	82.909-82.947	100.70	32.10	38.10	2.10
1-07	82.871-82.831	101.12	32.02	39.50	2.14
3-01	77.042-77.082	101.18	32.16	40.23	2.14

บทที่ 4

แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

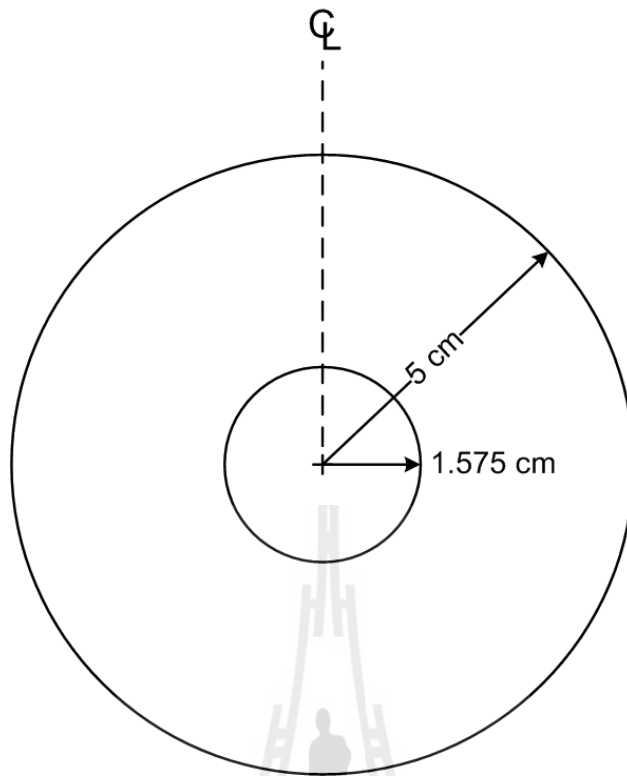
วัตถุประสงค์ของการศึกษาดังกล่าวด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ คือ เพื่อตรวจสอบค่าความเค้นดึงที่เกิดขึ้นบนตัวอย่างเกลือหิน และค่ากำลังดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณจุดแตกที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการกำลังดึงแบบวงแหวน

4.1 แบบจำลองการกระจายตัวของความเค้นดึงและความเค้นกด

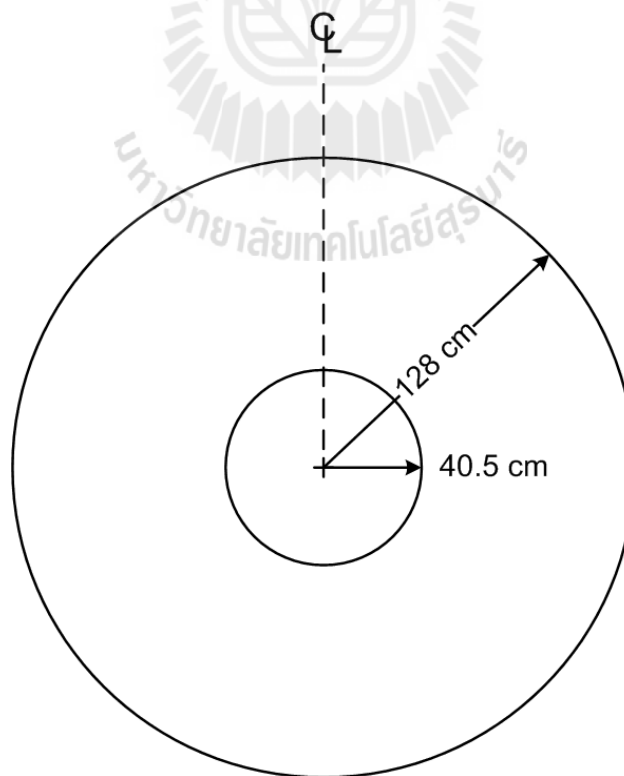
โปรแกรม FLAC 4.0 (Finite difference code) ได้นำมาใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของความเค้นดึงและความเค้นกดที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกดตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างเกลือหิน รูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างเกลือหินและรูเจาะที่ใช้ในการทดสอบ โดยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์กำหนดให้การคำนวณเป็นแบบระนาบความเค้น (Plane stress) โดยให้ตัวอย่างมีความหนาหนึ่งหน่วย การทดสอบนี้จึงได้ทำการปรับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างเกลือหินและรูเจาะที่ใช้ในแบบจำลองให้มีอัตราส่วนเท่ากับขนาดตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 จากนั้นได้ทำการสร้างโครงข่ายแบบจำลองโดยอยู่ภายใต้สมมติฐานของระนาบสมมาตร (Symmetry plane) ดังนั้นแบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นตัวแทนของตัวอย่างเกลือหินจึงมีเพียงหนึ่งในสี่ของตัวอย่างเกลือหินจริง สำหรับโครงข่ายแบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์การกระจายตัวของความเค้นดึงและความเค้นกดที่บริเวณขอบด้านในจะมีขนาดเล็กกว่าบริเวณขอบด้านนอก และกำหนดให้มีแรงกดกระทำในแนวแกนเท่ากับ 1 นิวตัน ดังแสดงในรูปที่ 4.3

วัตถุประสงค์หลักของการจำลองคือเพื่อตรวจสอบว่า

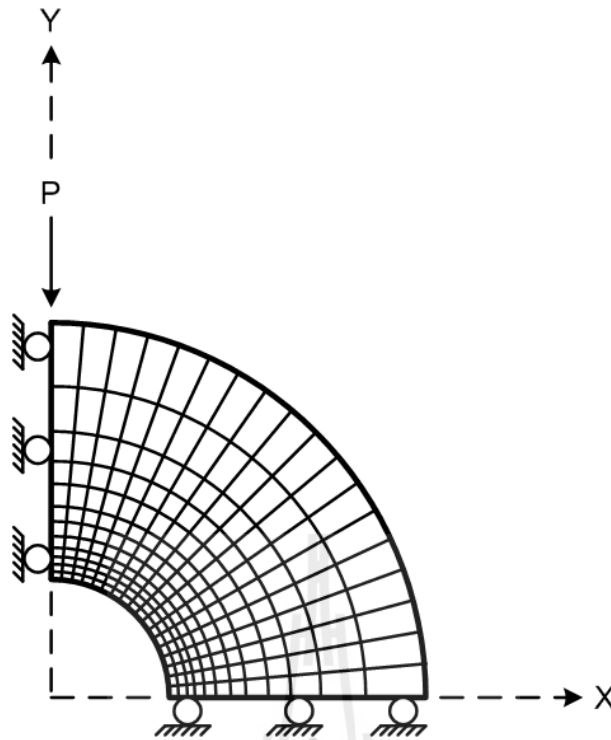
- 1) ตัวอย่างเกลือหินจะแตกภายใต้ความเค้นดึงที่บริเวณจุดกึ่งกลางขอบด้านในหรือไม่
- 2) มีผลกระทบจากความเค้นกดเกิดขึ้นที่บริเวณขอบด้านในของตัวอย่างเกลือหินหรือไม่
- 3) ค่าความเค้นดึงที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และจากการคำนวณด้วยสมการแรงดึงแบบวงแหวนมีค่าใกล้เคียงกันหรือไม่



รูปที่ 4.1 รูปร่างและขนาดของตัวอย่างเกล็ดหินที่ใช้ในการทดสอบ



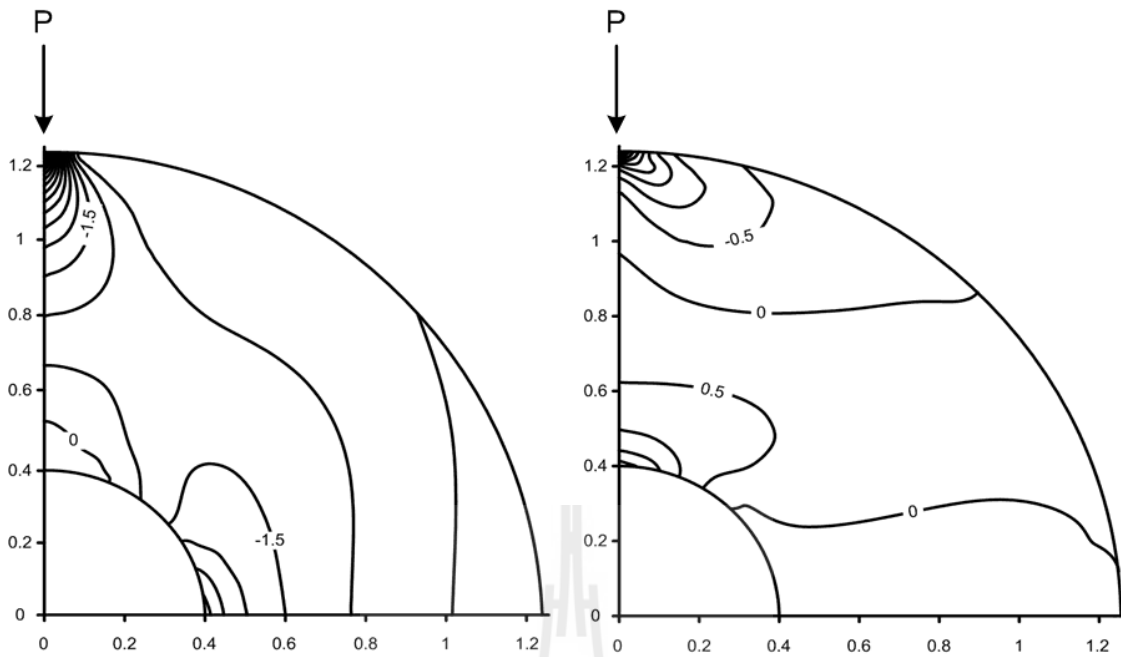
รูปที่ 4.2 รูปร่างและขนาดของตัวอย่างเกล็ดหินที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม FLAC 4.0



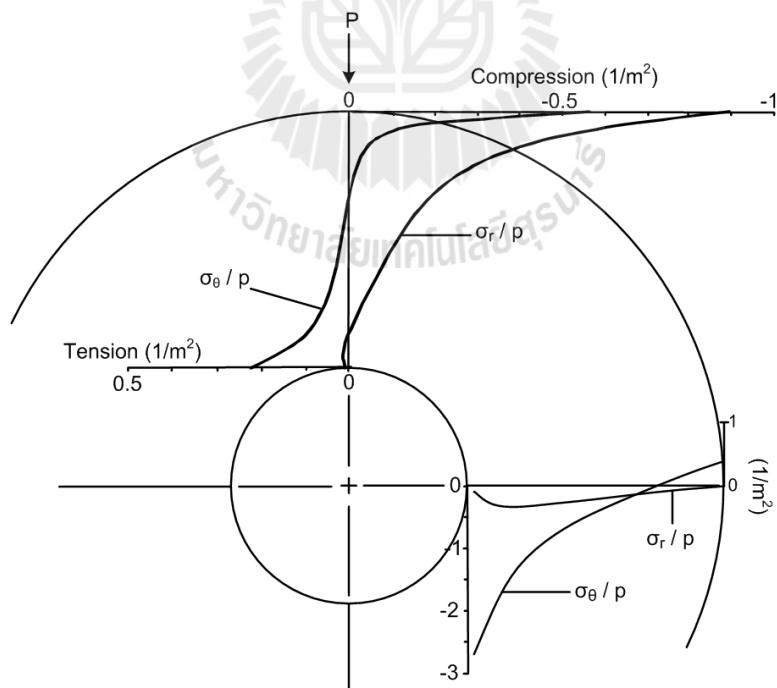
รูปที่ 4.3 โครงข่ายแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม FLAC 4.0

4.2 ผลการจำลองการกระจายตัวของความเค้นดึงและความเค้นกด

ผลที่ได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์บ่งชี้ว่าความเค้นดึงจะเกิดขึ้นที่บริเวณจุดกึ่งกลางขอบด้านในและตามแนวแรงกดของตัวอย่างเกลือหินดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยกำหนดให้ค่าความเค้นดึงและค่าความเค้นกดมีค่าเป็นบวกและลบตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.5 ผลการทดสอบดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า ตัวอย่างเกลือหินจะแตกภายใต้ความเค้นดึงที่บริเวณขอบด้านในโดยไม่มีผลกระทบจากความเค้นกดที่เกิดขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่าความเค้นดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณจุดแตกที่คำนวณด้วยสมการแรงดึงแบบวงแหวนและที่ได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ พบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการแรงดึงแบบวงแหวนมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยค่ากำลังดึงสูงสุดและคุณสมบัติของตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในสมการคำนวณและที่ใช้ในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1



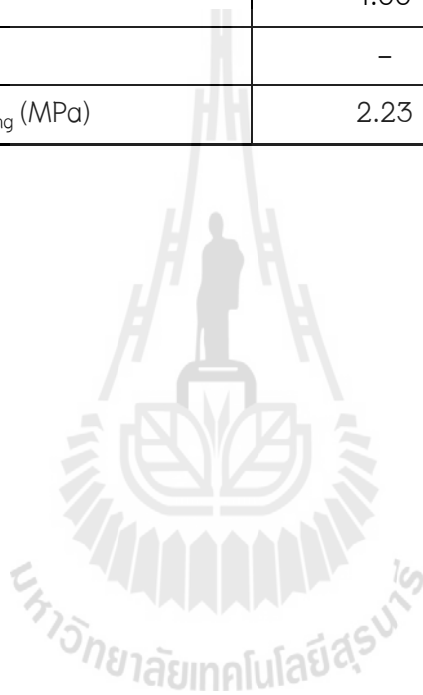
รูปที่ 4.4 เส้นความชันแสดงความเค้นดึง (ซ้าย) และความเค้นกด (ขวา) ที่เกิดขึ้นในตัวอย่างเกลื่อหินรูปวงแหวน



รูปที่ 4.5 การกระจายตัวของความเค้นสัมผัส (σ_{θ}/P) และความเค้นตามแนวรัศมี (σ_r/P) ที่เกิดขึ้นจากการให้แรงกดตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลางที่ได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในสมการและแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

คุณสมบัติของตัวอย่างเกลือหิน	FLAC	Equation
ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น, E (GPa)	20.00	-
อัตราส่วนปัวร์ซอง, ν	0.40	-
แรงกด, (N)	1.00	1.00
เส้นผ่าศูนย์กลางตัวอย่างเกลือหิน, (m)	2.56	2.56
เส้นผ่าศูนย์กลางรูเจาะ, (m)	0.81	0.81
ความหนา, (m)	1.00	1.00
K_F	-	9.77
ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด, σ_{Ring} (MPa)	2.23	2.43



บทที่ 5

การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

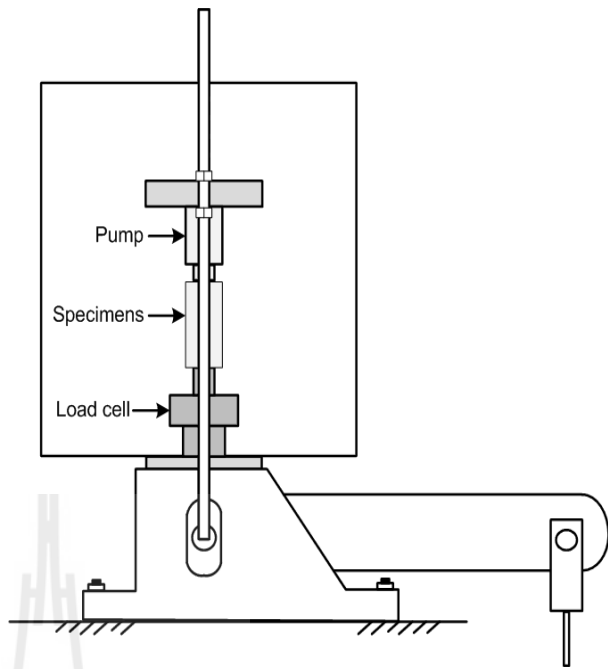
เนื้อหาในบทนี้อธิบายขั้นตอน วิธีการ และข้อปฏิบัติในการทดสอบหาค่ากำลังดึงแบบวงแหวนของตัวอย่างเกลือหินภายใต้อุณหภูมิระหว่าง 0–100°C (270–375 Kelvin) และเสนอสมการที่ใช้ในการคำนวณผลการทดสอบ ซึ่งการทดสอบนี้เป็นการจำลองลักษณะแรงดึงของเกลือหินภายใต้อุณหภูมิ โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานภาคสนาม เช่น การออกแบบและหาเสถียรภาพของโพรงในชั้นเกลือหินสำหรับกักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรม การทำเหมืองเกลือหินที่มีสภาวะการคืบภายใต้แรงดึงที่เกิดขึ้นบริเวณหลังคาโพรง และการประเมินเสถียรภาพของโพรงหรือช่องเหมืองในชั้นเกลือหินในระยะยาว

วิธีการทดสอบหาค่ากำลังดึงของเกลือหินภายใต้อุณหภูมิระหว่าง 0–100°C (270–375 Kelvin) มีดังต่อไปนี้

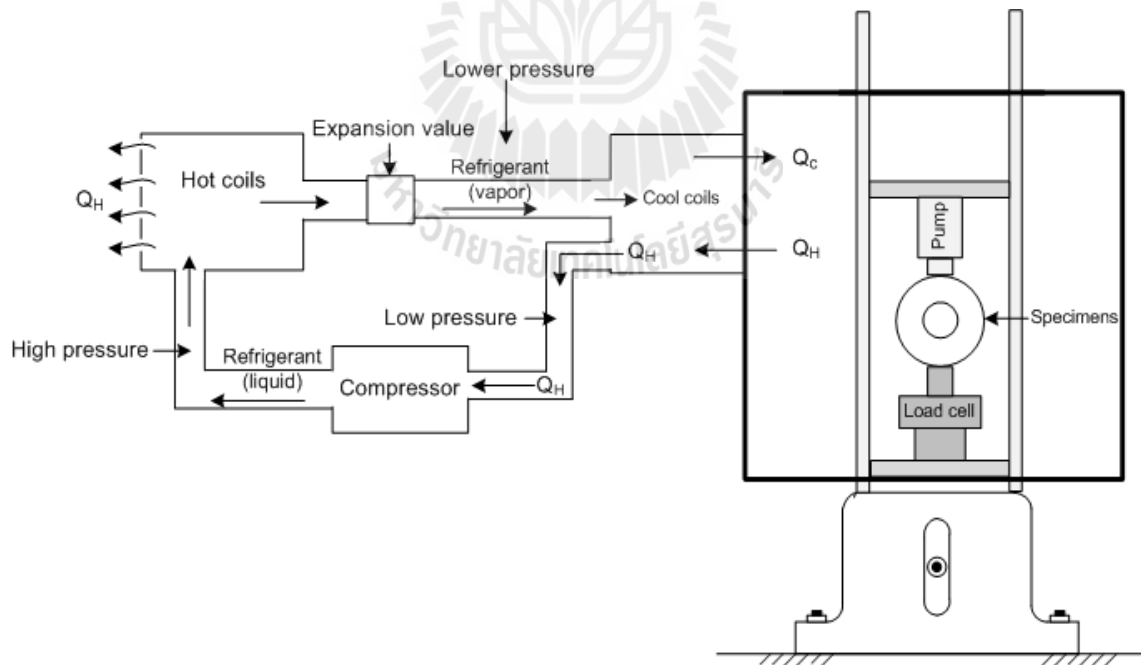
5.1 การทดสอบหาค่ากำลังดึงภายใต้อุณหภูมิ 0°C (270 Kelvin)

1) การปรับอุณหภูมิของเกลือหินก่อนการทดสอบ ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้สำหรับการทดสอบค่ากำลังดึงภายใต้อุณหภูมิต่ำ ได้หุ้มด้วยแลปเพื่อป้องกันความชื้นก่อนทำการปรับอุณหภูมิ จากนั้นนำตัวอย่างเกลือหินไปปรับอุณหภูมิด้วยการแช่ในเครื่องทำความเย็น ซึ่งสามารถปรับอุณหภูมิได้ต่ำสุดที่ -5°C (รูปที่ 5.1) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อให้เครื่องทำความเย็นปรับอุณหภูมิ จากนั้นปล่อยให้เย็นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำตัวอย่างเกลือหินไปติดตั้งบนโครงทดสอบเพื่อทำการทดสอบ โดยรูปที่ 5.2 แสดงระบบการทำงานของเครื่องทำความเย็น

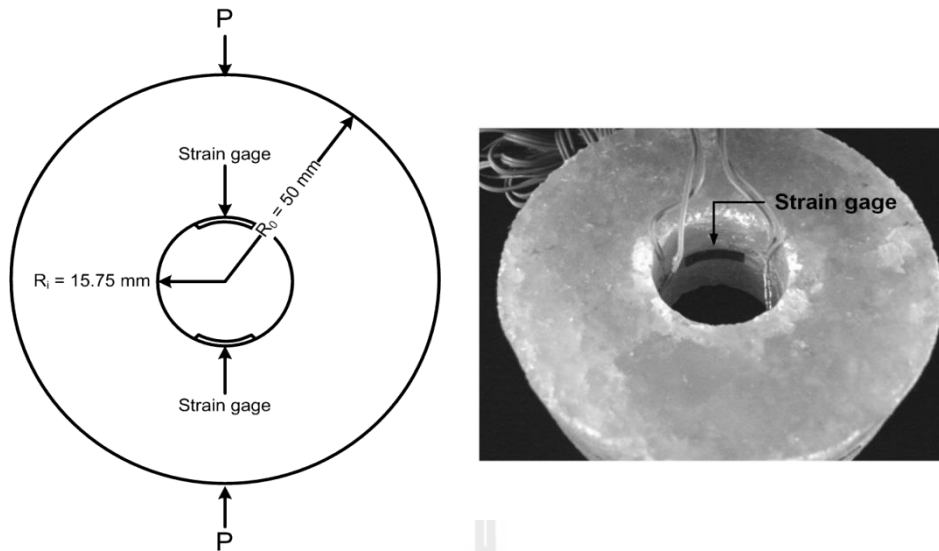
2) การติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัวบนตัวอย่างเกลือหินภายใต้อุณหภูมิ 0°C (270 Kelvin) มาตรวัดการเคลื่อนตัว (Strain gage) ที่ใช้ในการติดตั้งบนตัวอย่างเกลือหินที่อุณหภูมิ 0°C มีความยาว 1 เซนติเมตร มีค่าปัจจัยของมาตรวัดเท่ากับ $2.12 \pm 1\%$ และเหมาะสมสำหรับอุณหภูมิระหว่าง 0–30°C มาตรวัดการเคลื่อนตัวได้ติดตั้งอยู่ที่ผนังรูด้านในทั้งด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างเกลือหินซึ่งตั้งฉากกับแรงกดที่ให้บนตัวอย่างเกลือหิน โดยใช้กาวทริบอนด์ 1786อี ที่มีส่วนผสมสำคัญคือ ETHYL 2-CYANOACRYLATE 85% W/W ซึ่งต้องใช้ระยะเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวกาวประสานกันและยึดติดกับมาตรวัดการเคลื่อนตัวกับตัวอย่างเกลือหินก่อนนำมาทดสอบดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.1 เครื่องทำความเย็นที่ติดตั้งรอบโครงกวดในแกนเดียวเพื่อเตรียมการทดสอบค่ากำลังดึง ภายใต้อุณหภูมิ 0°C



รูปที่ 5.2 ระบบการทำงานของเครื่องทำความเย็น



รูปที่ 5.3 การติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัว (Strain gage) บนตัวอย่างเกลื่อหิน

3) วิธีติดตั้งตัวอย่างเกลื่อหินในโครงทดสอบ หลังจากทำการปรับอุณหภูมิของตัวอย่างเกลื่อหินตามข้อ 1) แล้ว ให้ทำการติดตั้งเครื่องอ่านค่าอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic load cell) และปั๊มไฮดรอลิกในเครื่องทำความเย็น โดยปั๊มไฮดรอลิกที่ใช้ในการทดสอบได้ทำการสอบเทียบค่าในขณะที่ปั๊มไฮดรอลิกอยู่ภายใต้อุณหภูมิต่ำ เวลาในการติดตั้งตัวอย่างเกลื่อหินในเครื่องทำความเย็นเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากระหว่างการติดตั้งต้องเปิดฝาเครื่องทำความเย็น ทำให้ตัวอย่างเกลื่อหินดึงความร้อนเข้าไป ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการติดตั้งตัวอย่างเกลื่อหินจะต้องไม่เกิน 1 นาที นับจากเปิดฝาเครื่องทำความเย็น จากนั้นปล่อยให้เครื่องทำความเย็นปรับอุณหภูมิเป็นเวลา 30 นาที ก่อนทำการทดสอบ

4) วิธีทดสอบแรงดึงแบบวงแหวน สำหรับการทดสอบค่าแรงดึงแบบวงแหวน ตัวอย่างเกลื่อหินจะถูกกดตามแนวของเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่าง โดยผันแปรอัตราการให้แรง 0.3, 0.03, 0.003, 0.0003 และ 0.00003 MPa/s จนกระทั่งเกลื่อหินแตกซึ่งเทียบเท่ากับค่ากำลังดึงที่จุดแตก และทำการจดบันทึกผลการทดสอบ

5) การทดสอบและการตรวจวัด ในระหว่างการทดสอบหาค่ากำลังดึงได้ทำการตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวที่ผนังด้านในของตัวอย่างเกลื่อหิน ด้วยการติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัวที่ผนังด้านในซึ่งตั้งฉากกับแรงกดที่ให้บนตัวอย่างเกลื่อหิน และทำการตรวจวัดการเพิ่มของน้ำหนักกดทับด้วยการใช้เครื่องอ่านค่าอิเล็กทรอนิกส์ในขณะที่ตัวอย่างเกลื่อหินถูกกดเพิ่มขึ้นด้วยปั๊มไฮดรอลิกจนกระทั่งตัวอย่างเกลื่อหินแตก

6) **การคำนวณผลการทดสอบ** ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการได้นำมาคำนวณหาค่ากำลังดึงสูงสุดแบบวงแหวน (σ_{Ring}) จาก (Jaeger and Cook, 1979)

$$\sigma_{\text{Ring}} = (2P_f K_F) / (\pi Dt) \quad (5.1)$$

$$K_F = 6 + 38r^{-2} \text{ สำหรับ } 1.0 > r > 0.1 \quad (5.2)$$

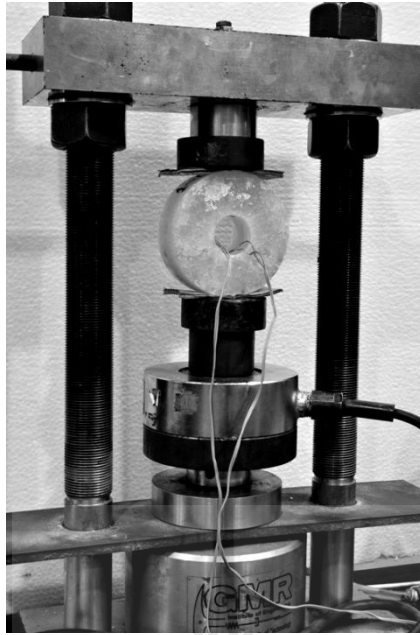
โดยที่ P_f คือแรงกดที่จุดวิบัติของความเค้นดึงแบบวงแหวน K_F คือ ปัจจัยความเข้มข้นของความเค้นที่ขอบด้านในของรูเจาะ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างหิน t คือความหนาของตัวอย่างหิน

5.2 การทดสอบหาค่ากำลังดึงภายใต้อุณหภูมิห้อง (30°C หรือ 303 Kelvin)

1) **การปรับอุณหภูมิของเกล็ดหินก่อนการทดสอบ** ตัวอย่างเกล็ดหินที่ใช้สำหรับการทดสอบค่ากำลังดึงภายใต้อุณหภูมิห้อง ไม่จำเป็นต้องทำการหุ้มด้วยพลาสติก ดังเช่น กรณีการทดสอบที่อุณหภูมิต่ำ และสามารถนำตัวอย่างเกล็ดหินไปติดตั้งที่เครื่องทดสอบในแกนเดียวได้ทันทีโดยไม่ต้องทำการปรับอุณหภูมิ

2) **การติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัวของตัวอย่างเกล็ดหินภายใต้อุณหภูมิ 30°C** การติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัวของตัวอย่างเกล็ดหินที่อุณหภูมิ 30°C เหมือนกับการติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัวของตัวอย่างเกล็ดหินที่อุณหภูมิ 0°C ทุกประการ

3) **วิธีการติดตั้งตัวอย่างเกล็ดหินในเครื่องทดสอบ** หลังจากทำการตัดและเจาะเพื่อให้ได้ขนาดตัวอย่างเกล็ดหินและรูเจาะตามที่ต้องการให้นำตัวอย่างเกล็ดหินติดตั้งที่เครื่องทดสอบในแกนเดียวดังรูปที่ 5.4 โดยมีเครื่องอ่านค่าอิเล็กทรอนิกส์และปั๊มไฮดรอลิกสำหรับการอ่านค่ากำลังกดและให้แรงกดบนตัวอย่างเกล็ดหินตามลำดับ เวลาที่ใช้ในการติดตั้งตัวอย่างเกล็ดหินไม่มีผลกระทบต่อผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 30°C (อุณหภูมิห้อง) สำหรับขั้นตอนที่ 4, 5 และ 6 ปฏิบัติตามการทดสอบหาค่ากำลังดึงที่ 0°C

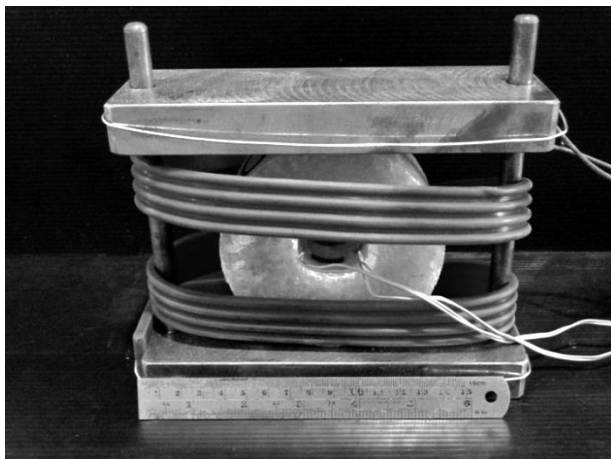


รูปที่ 5.4 การติดตั้งตัวอย่างเกลือบหินสำหรับการทดสอบหาค่ากำลังดึงภายใต้อุณหภูมิ 30°C ในเครื่องทดสอบโมแกนเดี่ยว

5.3 การทดสอบหาค่ากำลังดึงภายใต้อุณหภูมิ 75°C และ 100°C (348 Kelvin และ 375 Kelvin)

1) การปรับอุณหภูมิของเกลือบหินก่อนการทดสอบ ตัวอย่างเกลือบหินที่ใช้สำหรับการทดสอบหาค่ากำลังดึงภายใต้อุณหภูมิ 75°C และ 100°C ต้องทำการปรับอุณหภูมิด้วยการนำแผ่นให้ความร้อนมาพันกับแท่งตัวอย่าง (รูปที่ 5.5) หุ้มด้วยฉนวนหุ้มความร้อนและเครื่องให้ความร้อน (รูปที่ 5.6) เพื่อปรับอุณหภูมิให้อยู่ที่ 75°C และ 100°C โดยตัวอย่างเกลือบหินได้นำมาปรับอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนการทดสอบ

2) การติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัวบนตัวอย่างเกลือบหินภายใต้อุณหภูมิสูง มาตรวัดการเคลื่อนตัวที่ใช้มีความยาว 0.6 เซนติเมตร มีค่าปัจจัยของมาตรวัดเท่ากับ $2.01 \pm 1\%$ เหมาะสำหรับอุณหภูมิ 30–100°C มาตรวัดการเคลื่อนตัวถูกติดตั้งอยู่ที่ผนังรูด้านในทั้งด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างเกลือบหินซึ่งตั้งฉากกับแรงกดที่ให้บนตัวอย่างเกลือบหิน โดยกาวที่ใช้เหมาะสำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิสูง หลังจากติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัวเสร็จสิ้น ต้องทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนทำการทดสอบ เพื่อให้ตัวกาวมีการยึดติดที่ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 5.5 ตัวอย่างเกล็ือหินที่ถูกพันด้วยแผ่นให้ความร้อน (Heating tape)



รูปที่ 5.6 ตัวอย่างเกล็ือหินที่ถูกหุ้มด้วยฉนวนหุ้มความร้อนและติดตั้งกับอุปกรณ์ปรับอุณหภูมิ

3) **วิธีการติดตั้งตัวอย่างเกล็ือหินในโครงกวดทดสอบ** หลังจากทำการเพิ่มอุณหภูมิกับตัวอย่างเกล็ือหินแล้ว ให้ยกชุดเครื่องกวดแรงดึงไปติดตั้งกับเครื่องกวดในแกนเดียว โดยมีเครื่องอ่านค่าอิเล็กทรอนิกส์และปั๊มไฮดรอลิกสำหรับการอ่านค่ากำลังกวดและให้แรงกวดบนตัวอย่างเกล็ือหินตามลำดับ ด้านบนของเครื่องอ่านค่าอิเล็กทรอนิกส์ได้ติดตั้งฉนวนกันความร้อนเพื่อป้องกันการแพร่กระจายความร้อน เวลาในการติดตั้งการทดสอบที่อุณหภูมิสูงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากต้องปิดระบบการให้ความร้อน ถ้าใช้เวลาในการติดตั้งมากจะทำให้ตัวอย่างเกล็ือหินคายความร้อนออกไป (เกล็ือหินเย็นตัวลง) ส่งผลให้ผลการทดสอบที่ได้ไม่เป็นไปตามเกณฑ์ที่ต้องการ ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการติดตั้งตัวอย่างเกล็ือหินกับเครื่องกวดทดสอบในแกนเดียวจะต้องไม่เกิน 1 นาที นับจากปิดระบบให้ความร้อน หลังจากติดตั้งตัวอย่างเกล็ือหินบนเครื่องทดสอบในแกนเดียวแล้วเสร็จ จากนั้นเปิดระบบให้ความร้อนเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ตัวอย่างเกล็ือหินทำการปรับอุณหภูมิก่อนทำการทดสอบ สำหรับขั้นตอนที่ 4, 5 และ 6 ปฏิบัติตามการทดสอบหาค่ากำลังดึงที่ 0°C

ในการทดสอบแต่ละอุณหภูมิมีการผันแปรอัตราการให้แรงกด 5 อัตรา คือ 0.3, 0.03, 0.003, 0.0003 และ 0.00003 MPa/s โดยแต่ละอัตราการให้แรงกดใช้ตัวอย่างเกลือหินจำนวน 3 ตัวอย่าง ดังนั้นแต่ละอุณหภูมิจึงใช้จำนวนตัวอย่างเกลือหิน 15 ตัวอย่าง สำหรับการทดสอบค่ากำลังดึงมีการผันแปรอุณหภูมิ 4 ระดับ คือ 0, 30, 75 และ 100°C (273, 303, 348 และ 375 Kelvin) ดังนั้น ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบค่ากำลังดึงภายใต้อุณหภูมิจึงมีจำนวนทั้งสิ้น 60 ตัวอย่าง



บทที่ 6

ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ คือ ค่ากำลังดึงของเกลือหิน ภายใต้อุณหภูมิ ด้วยการใช้อุปกรณ์ทดสอบในแกนเดียว (Point load/uniaxial tester) เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและการผันแปรอัตราการให้แรงกดต่อค่ากำลังดึงของเกลือหินดังได้อธิบายในบทที่ 4

ผลการทดสอบกำลังดึงของเกลือหินในห้องปฏิบัติการภายใต้อุณหภูมิสามารถแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดึงของเกลือหินภายใต้อุณหภูมิและอัตราการให้แรงกดที่แตกต่างกัน และการตรวจวัดความเครียดที่จุดแตกบนตัวอย่างเกลือหิน

6.1 ผลการทดสอบกำลังดึงของเกลือหินภายใต้อุณหภูมิ

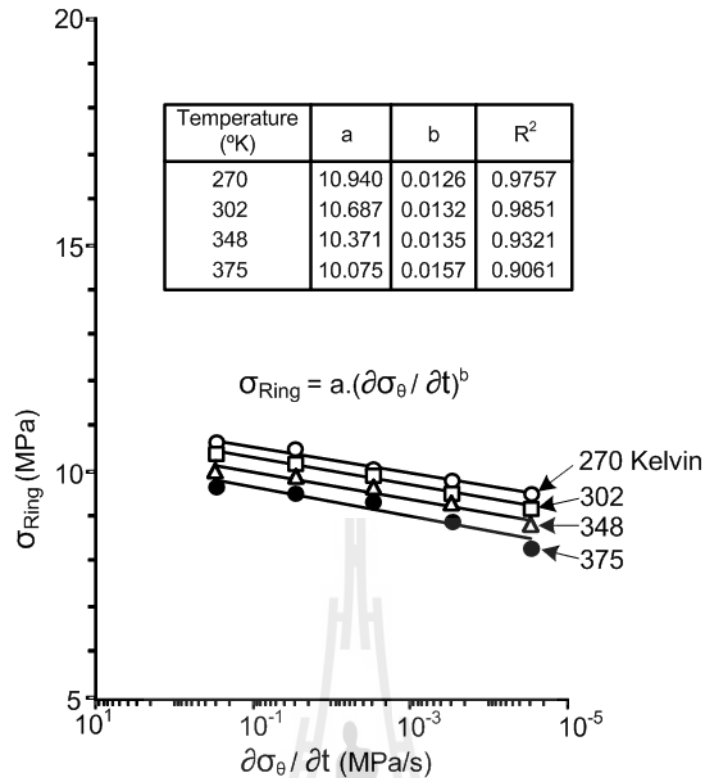
สำหรับการทดสอบกำลังดึงของเกลือหิน เพื่อหาผลกระทบของอุณหภูมิต่อกำลังดึงที่เกิดขึ้นบนตัวอย่างเกลือหินด้วยการทดสอบภายใต้อุณหภูมิ 0, 30, 75 และ 100°C ซึ่งมีอัตราการให้แรงกดเท่ากับ 0.3 ถึง 0.00003 MPa/s ดังตารางที่ 6.1 ซึ่งแสดงผลการทดสอบกำลังดึงสูงสุดที่ผันแปรตามอุณหภูมิ อัตราการให้แรงกด และความหนาแน่นของตัวอย่างเกลือหิน โดยผลที่ได้จากการทดสอบดังกล่าวได้นำมาสร้างความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ระหว่างค่ากำลังดึงสูงสุดกับอัตราการให้แรงกดในแต่ละอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 6.1 ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวระบุชัดเจนว่าค่ากำลังดึงสูงสุดของตัวอย่างเกลือหินจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจาก 0, 30, 75 และ 100°C (270, 302, 348 และ 375 Kelvin) และค่ากำลังดึงสูงสุดของตัวอย่างเกลือหินจะลดลงเมื่อมีการผันแปรอัตราการให้แรงกดลดลงจาก 0.3 ถึง 0.00003 MPa/s ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของค่ากำลังดึงสูงสุดที่ผันแปรอัตราการให้แรงกดภายใต้อุณหภูมิต่างกันเป็นไปตามสมการยกกำลังดังแสดงในรูปที่ 6.1

6.2 ความเครียดที่จุดแตกภายใต้อุณหภูมิ

การทดสอบข้างต้นได้มีการตรวจวัดค่าความเครียดที่จุดแตกของตัวอย่างเกลือหินด้วย เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปของตัวอย่างเกลือหินที่เกิดขึ้นภายใต้แรงดึง โดยมีการผันแปรอุณหภูมิตั้งแต่ 0, 30, 75 ถึง 100°C (270, 302, 348 และ 375 Kelvin) ที่อัตราการให้แรงกดตั้งแต่ 0.3 ถึง 0.00003 MPa/s ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดดังกล่าวได้นำมาสร้าง

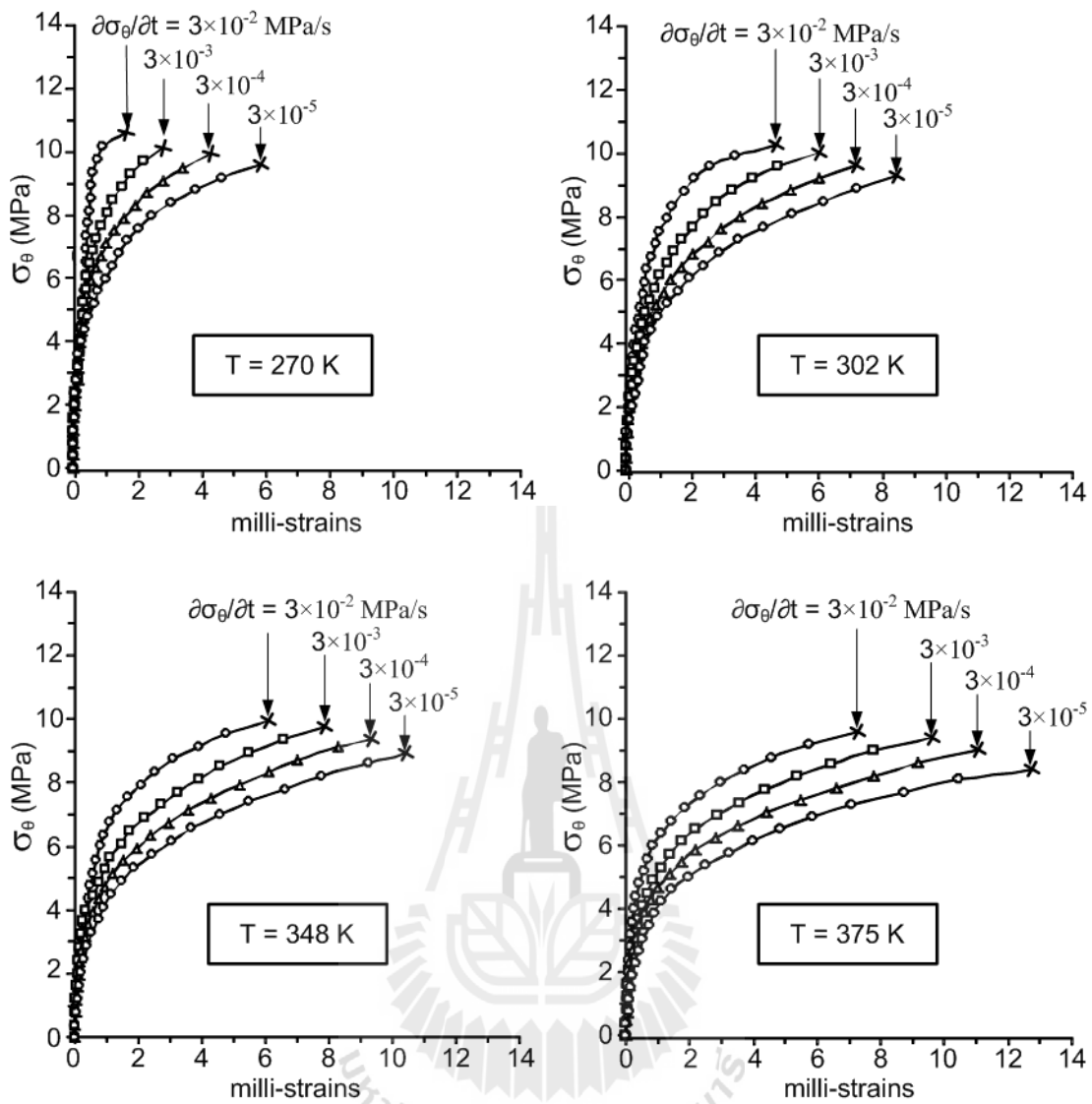
ตารางที่ 6.1 ผลการทดสอบกำลังดึงของเกลือหินภายใต้อุณหภูมิ 0°C ถึง 100°C (270 ถึง 375 Kelvin)

Sample No.	Temperature (Kelvin)	Stress rates at the crack initiation point, (MPa/s)	ρ (g/cc)	Ring tensile strength, σ_{Ring} (MPa)
5-05	270±1.29	0.3	2.21	10.72
1-09		0.03	2.25	10.59
6-02		0.003	2.29	10.10
1-11		0.0003	2.21	9.89
1-08		0.00003	2.15	9.60
4-02	302±0.46	0.3	2.19	10.45
4-04		0.03	2.13	10.23
4-03		0.003	2.09	9.98
4-05		0.0003	2.17	9.60
4-10		0.00003	2.17	9.28
5-01	346±2.09	0.3	2.20	10.07
6-05		0.03	2.21	9.94
7-01		0.003	2.22	9.75
7-04		0.0003	2.09	9.35
1-14		0.00003	2.29	8.88
5-06	376±1.76	0.3	2.21	9.72
7-03		0.03	2.13	9.58
1-10		0.003	2.10	9.39
1-07		0.0003	2.14	8.98
3-01		0.00003	2.14	8.38

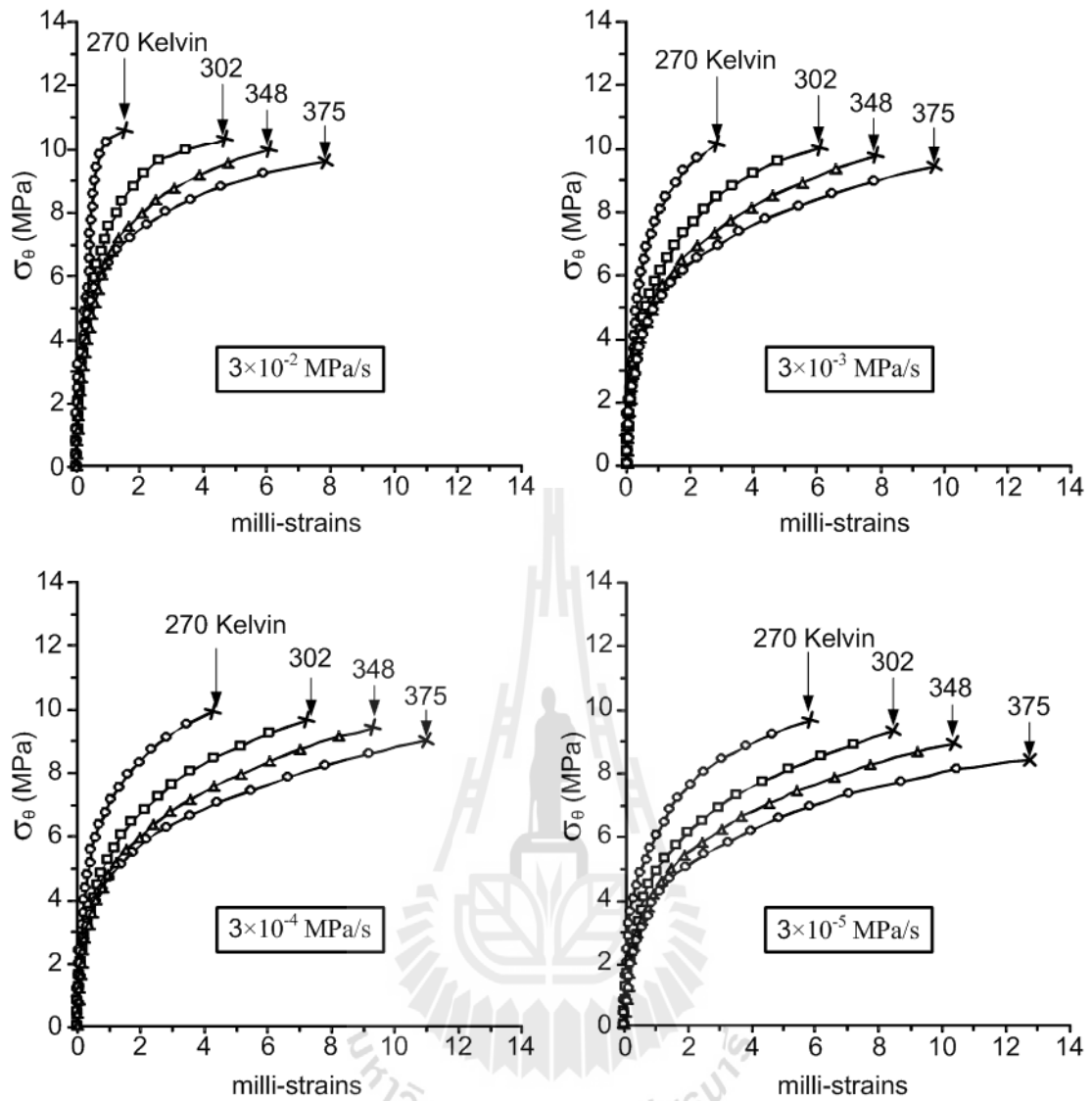


รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด (σ_{Ring}) กับการผันแปรอัตราการให้แรงกด ($\partial\sigma/\partial t$) ในแต่ละอุณหภูมิ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นดึงและความเครียดดึงที่จุดแตกของตัวอย่างเกลือหิน จากความสัมพันธ์ดังกล่าวพบว่า ค่าความเค้นดึงของตัวอย่างเกลือหินมีค่าลดลงเมื่ออัตราการให้แรงกดลดลงจาก 0.03 ถึง 0.00003 MPa/s และความเครียดดึงที่จุดแตกของตัวอย่างเกลือหินจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราการให้แรงกดลดลงจาก 0.03 ถึง 0.00003 MPa/s ดังแสดงในรูปที่ 6.2 และเมื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นดึงและความเครียดดึงที่จุดแตกในแต่ละอัตราการให้แรงกดที่ผันแปรตามอุณหภูมิสามารถระบุได้ว่า ความเค้นดึงของตัวอย่างเกลือหินมีค่าลดลง และความเครียดดึงที่จุดแตกมีค่าสูงขึ้นจากการลดลงของอัตราการให้แรงกดตั้งแต่ 0.03 ถึง 0.00003 MPa/s เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6.3 สำหรับการทดสอบค่าความเค้นดึงของตัวอย่างเกลือหินที่อัตราการให้แรงกดเท่ากับ 0.3 MPa/s ไม่สามารถทำการตรวจวัดความเครียดดึงที่จุดแตกได้ เนื่องจากมีอัตราการเพิ่มแรงกดที่เร็วมาก โดยสามารถทำการตรวจวัดได้เพียงค่าความเค้นดึงของตัวอย่างเกลือหินเท่านั้น



รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นดึงและความเครียดดึงที่จุดแตกที่อุณหภูมิ 0°C ถึง 100°C (270 ถึง 375 Kelvin) โดยผันแปรอัตราการให้แรงจาก 0.03 ถึง 0.00003 MPa/s



รูปที่ 6.3 ค่าความเค้นดึงและความเครียดดึงที่จุดแตกระหว่างอุณหภูมิ 0°C ถึง 100°C (270 ถึง 375 Kelvin)

บทที่ 7

การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

เนื้อหาในบทนี้เสนอการพัฒนาเกณฑ์การแตกของตัวอย่างเกลือหินภายใต้การผันแปรของอุณหภูมิและอัตราการให้แรงกด รวมไปถึงการสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เพื่อคาดคะเนผลกระทบของกำลังดึงในระยะยาวที่เกิดขึ้นบริเวณหลังคาโพรงหรืออุโมงค์ในมวลเกลือหิน

7.1 เกณฑ์การแตกของตัวอย่างเกลือหินภายใต้การผันแปรของอุณหภูมิและอัตราการให้แรงกด

จากผลการทดสอบค่ากำลังดึงแบบวงแหวนในบทที่ 6 ได้นำค่าคงที่ a และค่าคงที่ b ที่ได้จากการสอบเทียบด้วยสมการยกกำลังมาสร้างความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 7.1 โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ a และ b กับอุณหภูมิ แสดงให้เห็นว่าค่าคงที่ a ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยใช้สมการแบบเส้นตรง ดังสมการ (7.1) และค่าคงที่ b เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยใช้สมการแบบเอ็กโปเนนเชียลดังสมการ (7.2) ตามลำดับ

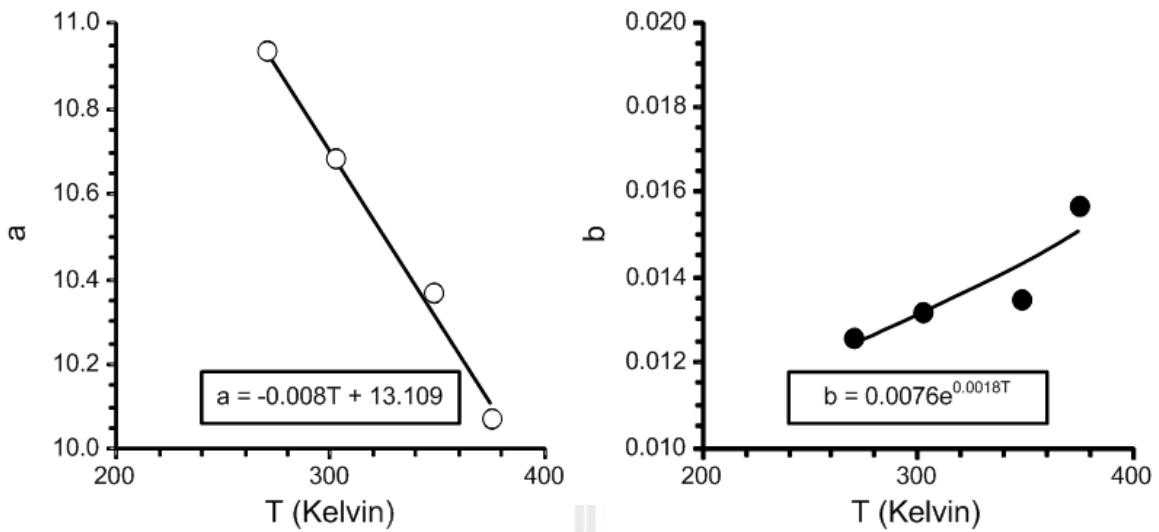
$$a = -0.008T + 13.109 \quad (7.1)$$

$$b = 0.0076 \cdot \exp(0.0018T) \quad (7.2)$$

โดย a และ b คือค่าคงที่ที่ได้จากการสอบเทียบ และ T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ (Kelvin) จากสมการแรงดึงแบบวงแหวนที่ได้จากการสอบเทียบในบทที่ 6 ดังสมการ

$$\sigma_{\text{Ring}} = a \cdot \left(\frac{\partial \sigma_{\theta}}{\partial t} \right)^b \quad (7.3)$$

โดย $\frac{\partial \sigma_{\theta}}{\partial t}$ คือ อัตราการให้แรงกดคงที่ (MPa/s) เมื่อนำสมการ (7.1) และ (7.2) แทนค่าในสมการ (7.3) จะได้สมการ



รูปที่ 7.1 ความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ระหว่างค่าคงที่ a และ b กับอุณหภูมิ (T)

$$\sigma_{\text{Ring}} = (-0.008T + 13.109) \cdot \left(\frac{\partial \sigma}{\partial t} \right) (0.0076 \cdot \exp(0.0018T)) \quad (7.4)$$

โดยสมการ (7.4) สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการคาดคะเนกำลังดึงที่เกิดขึ้นในเกลื่อหินชุดมหาสารคาม ซึ่งพิจารณาทั้งอัตราการให้แรงกดที่อยู่ในช่วง 0.3 ถึง 0.00003 MPa/s และอุณหภูมิในช่วง 270 ถึง 375 เคลวิน ทั้งนี้สมการดังกล่าวสามารถคำนวณกำลังดึงที่เกิดขึ้นในชั้นเกลื่อหินชุดมหาสารคามในช่วงอัตราการกดและอุณหภูมิในช่วงที่ใช้ทดสอบเท่านั้น ซึ่งควรตระหนักและพึงระวังถึงการประยุกต์ใช้สมการดังกล่าวที่อัตราการกดหรืออุณหภูมิใดๆ

7.2 การสอบเทียบตัวแปรเชิงเวลาของเกลื่อหิน

ความเครียดภายใต้แรงดึงทั้งหมดบริเวณจุดที่เริ่มเกิดรอยแตกบนตัวอย่างเกลื่อหินถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ความเครียดเชิงความยืดหยุ่นภายใต้แรงดึง (สมการเชิงเส้นตรงและสามารถคืนรูปได้) และความเครียดเชิงเวลาภายใต้แรงดึง (ขึ้นกับเวลาและไม่สามารถคืนรูปได้) ดังสมการ

$$\varepsilon_t = \varepsilon_t^e + \varepsilon_t^c \quad (7.5)$$

โดย ε_t คือค่าความเครียดภายใต้แรงดึงทั้งหมด ε_t^e คือค่าความเครียดเชิงความยืดหยุ่นภายใต้แรงดึง และ ε_t^c คือค่าความเครียดเชิงเวลาภายใต้แรงดึง ซึ่งค่าความเครียดเชิงความยืดหยุ่นภายใต้แรงดึง สามารถคำนวณได้จากค่าความเค้นดึงต่อค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น ดังสมการ (Jaeger et al, 2007)

$$\varepsilon_t^e = \frac{\sigma_t}{E} \quad (7.6)$$

โดย σ_t คือค่าความเค้นดึง ε_t^e คือค่าความเครียดเชิงความยืดหยุ่นภายใต้แรงดึง และ E คือค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นภายใต้แรงดึง สำหรับการคำนวณอัตราความเค้นดึงที่เวลาใดๆสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\sigma_t = \frac{d\sigma_t}{dt} \cdot t \quad (7.7)$$

หรือ
$$\sigma_t = \sigma_R \cdot t \quad (7.8)$$

โดย σ_R คืออัตราความเค้นดึงที่ (MPa/s) และ t คือเวลา (วินาที) โดยสมมติให้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของเกลือหินแปรผันตรงกับอุณหภูมิ (Archeeploha & Fuenkajorn, 2012)

$$E = -\psi \cdot T + E_0 \quad (7.9)$$

โดย E_0 คือค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นภายใต้แรงดึงที่ 0 องศาเซลเซียส ψ คือค่าคงที่เชิงประจักษ์ และ T คืออุณหภูมิในหน่วยเซลเซียส ซึ่งกฎของเอ็กโพเนนเชียลได้นำมาประยุกต์ใช้สำหรับอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเชิงเวลาของเกลือหิน โดยเชื่อมความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด ความเค้น และอุณหภูมิ กฎของเอ็กโพเนนเชียลได้นำมาอธิบายเกี่ยวกับพฤติกรรมการคืบของเกลือหินในฟังก์ชันของความเค้นดึงที่และอุณหภูมิคงที่ในฟังก์ชันของเวลา (Senseny, 1983)

$$\varepsilon_t^c = \alpha \cdot \sigma_R^\beta \cdot t^{(\beta+k)} \cdot \exp\left(\frac{-\lambda}{T}\right) \quad (7.10)$$

โดย α คือความเค้นคงที่ β คือตัวแทนความเค้น k คือตัวแทนเวลา λ คือค่าคงที่ และ T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ (อุณหภูมิขณะทำการทดสอบ)

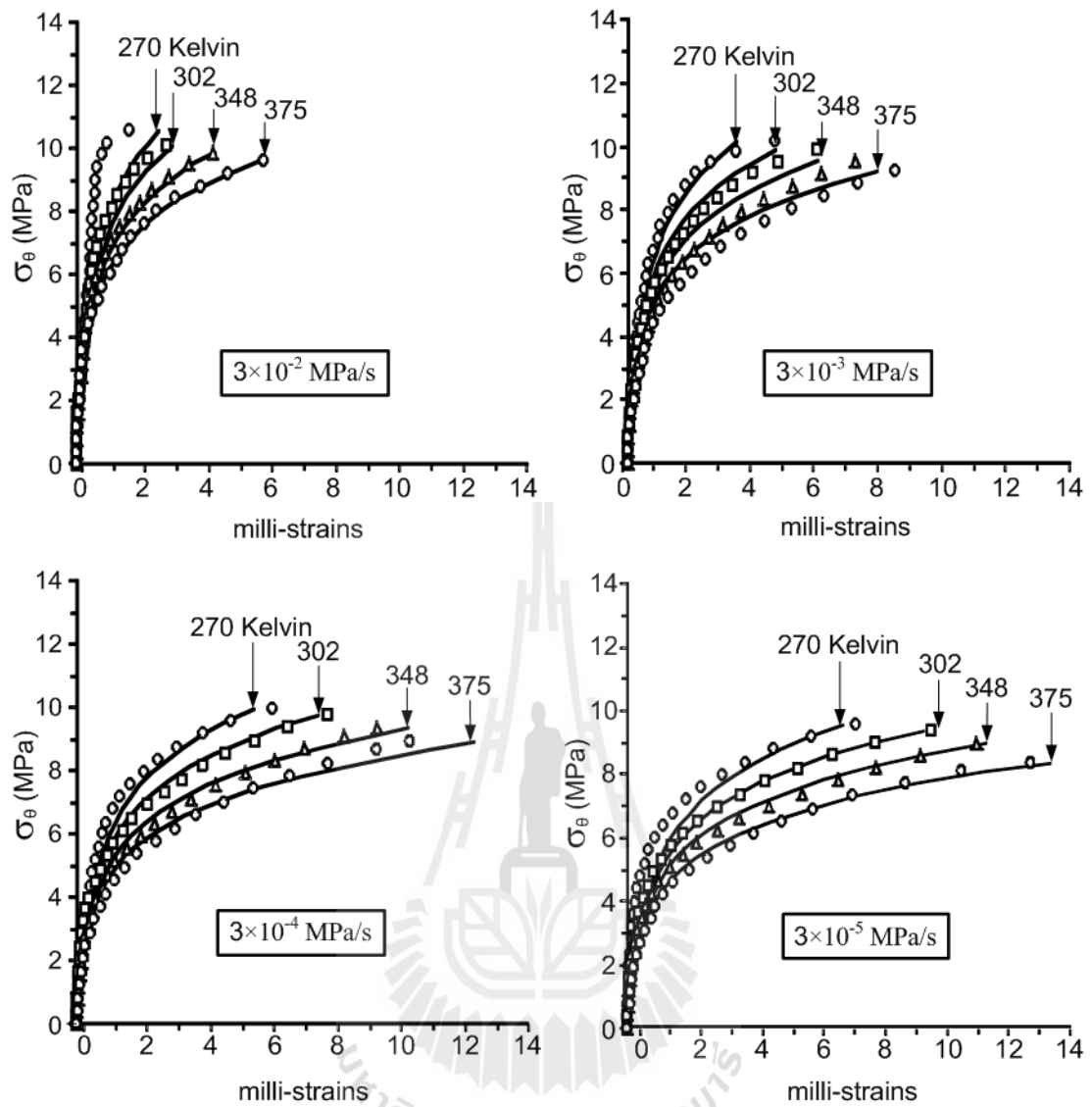
นำสมการ (7.6) ถึงสมการ (7.10) มาแทนค่าในสมการ (7.5) จะได้ความสัมพันธ์รวมดังสมการ

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma_R \cdot t}{-\psi \cdot T + E_0} + \alpha \cdot \sigma_R^\beta \cdot t^{(\beta + \kappa)} \cdot \exp\left(\frac{-\lambda}{T}\right) \quad (7.11)$$

สำหรับสมการ (7.11) ได้นำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม IBM SPSS Statistics 19 (SPSS) เพื่อใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและตัวแปรของความคืบ โดยตัวแปรที่ได้จากการคาดคะเนย้อนกลับของสมการซึ่งวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS ได้แสดงไว้ในตารางที่ 7.1 จากนั้นทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นดึงและความเครียดที่จุดแตกระหว่างข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการและข้อมูลที่ได้จากการคาดคะเนย้อนกลับของสมการดังแสดงในรูปที่ 7.2 ซึ่งผลที่ได้ระบุชัดเจนว่าสมการ (7.11) สามารถนำไปใช้เพื่อคาดคะเนการเสียรูปจากแรงดึงของเกลือหินภายใต้อุณหภูมิคงที่ต่างๆ ได้เป็นอย่างดี

ตารางที่ 7.1 ค่าตัวแปรที่ได้จากการสอบเทียบการทดสอบแรงดึงแบบวงแหวน

Parameters	Values	R ²
ψ	-0.060	0.978
E_0	30.129	
α	0.002	
β	4.656	
κ	4.870	
λ	1459.391	



รูปที่ 7.2 การเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลการทดสอบ (จุด) และการสอบเทียบ (เส้นทึบ)

บทที่ 8

สรุปผลการวิจัย

8.1 สรุปและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการคาดคะเนการเปลี่ยนรูปร่างและการแตกภายใต้แรงดึงที่ขึ้นกับเวลาของเกลือหินชุดมหาสารคามภายใต้อุณหภูมิคงที่ต่างๆ ด้วยการให้แรงตามแนวของเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างรูปวงแหวน และผันแปรอัตราการให้แรงกดซึ่งมีค่าเทียบเท่ากับแรงดึงที่จุดแตกเริ่มต้นจาก 0.00003, 0.0003, 0.003, 0.03 ถึง 0.3 MPa/s สำหรับการทดสอบค่ากำลังดึงภายใต้อุณหภูมิต่ำ ได้นำตัวอย่างเกลือหินไปปรับอุณหภูมิและทำการทดสอบในเครื่องทำความเย็น สำหรับการทดสอบค่ากำลังดึงภายใต้อุณหภูมิสูง ได้ทำการปรับอุณหภูมิตัวอย่างเกลือหินด้วยการนำแผ่นให้ความร้อนมาพันกับแท่งตัวอย่าง จากนั้นหุ้มด้วยฉนวนหุ้มความร้อนและเครื่องให้ความร้อนเพื่อปรับอุณหภูมิให้อยู่ที่ 75°C และ 100°C การเคลื่อนไหลที่เกิดขึ้นในเกลือหินที่ขึ้นกับเวลาประกอบด้วย ช่วงของการเปลี่ยนแปลงความเครียดเชิงเส้นตรงและช่วงของอัตราความเครียดที่เปลี่ยนแปลงขึ้นกับเวลา รอยแตกที่เกิดขึ้นจากแรงดึงส่วนใหญ่เกิดจากการหลุดแยกของรอยต่อระหว่างผลึกของแร่มากกว่าการเลื่อนภายในผลึกของแร่ ค่ากำลังดึงสูงสุดของเกลือหินมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของตัวอย่างเกลือหินสูงขึ้น และค่ากำลังดึงสูงสุดของเกลือหินมีค่าลดลงเมื่อมีอัตราการให้แรงกดลดลง ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของค่ากำลังดึงสูงสุดที่ผันแปรอัตราการให้แรงภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกันเป็นสมการยกกำลังค่ากำลังดึงของเกลือหินมีค่าลดลงตามอัตราการให้แรงกดจาก 0.03 ถึง 0.00003 MPa/s และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 0, 29, 75 ถึง 100°C และความเครียดที่จุดแตกจะสูงขึ้นตามอัตราการให้แรงกดจาก 0.03 ถึง 0.00003 MPa/s และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 0, 29, 75 ถึง 100°C ผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เปรียบเทียบกับค่ากำลังดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณจุดแตก ระบุว่าค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการแรงดึงแบบวงแหวนและค่ากำลังดึงสูงสุดที่ได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์มีค่าใกล้เคียงกัน

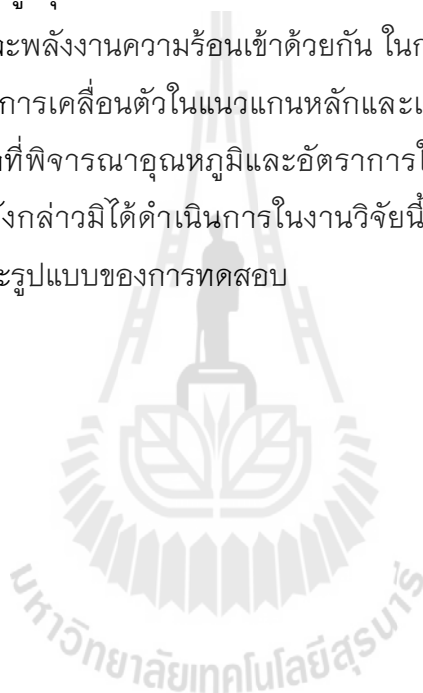
สมการเอ็กโพเนนเชียลได้นำมาประยุกต์ใช้สำหรับอธิบายพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปร่าง (ยืดตัว) เชิงเวลาของเกลือหิน โดยเชื่อมความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด ความเค้น และอุณหภูมิ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับคาดคะเนการเสียรูปจากแรงดึงที่ขึ้นกับเวลาของเกลือหินภายใต้อุณหภูมิคงที่ต่างๆ

การทดสอบแรงดึงแบบวงแหวนของเกลือหินมีลักษณะคล้ายกับแรงดึงที่เกิดขึ้นบริเวณหลังคาอุโมงค์หรือโพรงในมวลเกลือหิน ซึ่งแรงที่เกิดจากด้านบนเมื่อมากระทำที่บริเวณหลังคาจะมีลักษณะเป็นแรงดึง ดังนั้นการทดสอบแบบวงแหวนแรงดึงจึงมีความเหมาะสมและ

ถูกต้องมากกว่าการทดสอบแรงดึงแบบบราซิล ข้อจำกัดสำหรับการประยุกต์ใช้สมการที่พัฒนาได้ คือ การศึกษาผลกระทบของการกักเก็บในระยะยาว เพราะการศึกษาการเปลี่ยนรูปร่างและค่ากำลังดึงของเกลือหินได้ทำการศึกษาอยู่ในช่วงของการเปลี่ยนแปลงเชิงความเครียดของเส้นตรงและช่วงอัตราความเครียดเปลี่ยนแปลงที่ขึ้นกับเวลาเท่านั้น

8.2 ข้อเสนอแนะ

เพื่อที่จะพัฒนาเกณฑ์การแตกสำหรับตัวอย่างเกลือหินที่อยู่ภายใต้อุณหภูมิและอัตราการกดที่แตกต่างกัน ดังนั้นในการวิเคราะห์หรือพัฒนาสมการดังกล่าวควรจะอาศัยแนวคิดเกี่ยวกับพลังงานความเครียดสูงสุดที่เกลือหินจะรับได้ก่อนเกิดการวิบัติ พลังงานความเครียดดังกล่าวจะรวมพลังงานกลและพลังงานความร้อนเข้าด้วยกัน ในการพิจารณาปัจจัยทั้งสองนี้การทดสอบควรมีการตรวจวัดการเคลื่อนตัวในแนวแกนหลักและแนวแกนรอง เพื่อที่จะสามารถคำนวณพลังงานความเครียดที่พิจารณาอุณหภูมิและอัตราการให้แรงกดที่เกิดขึ้นบนตัวอย่างเกลือหิน ซึ่งการตรวจวัดดังกล่าวมิได้ดำเนินการในงานวิจัยนี้ เนื่องจากมีข้อจำกัดเกี่ยวกับเครื่องมือในห้องปฏิบัติการและรูปแบบของการทดสอบ



บรรณานุกรม

- Allemandou, X. and Dusseault, M. B. (1996). Procedures for cyclic creep testing of salt rock, results and discussions. In *Proceedings of the 3rd Conference on the Mechanical Behavior of Salt*. Clausthal-Zellerfeld, Trans Tech Publications, pp. 207–218.
- Archeeploha, S. and Fuenkajorn, K. 2012. Thermal effects on strength and deformability of Maha Sarakham salt. In *Proceedings of the Second Southern Hemisphere Symposium SHIRMS 2012*. May 15–17, Sun City, Pilansberg, South Africa, pp. 47–61.
- ASTM D2664. Standard test method for triaxial compressive strength of undrained rock core specimens without pore pressure measurements. In *Annual Book of ASTM Standards*. 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*. Philadelphia, American Society for Testing and Materials.
- ASTM D3967–08. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens. In *Annual Book of ASTM Standards*. West Conshohocken, 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 3rd Conference on the Mechanical Behavior of Salt*. Clausthal, Germany, Trans Tech Publications, pp. 1–18.
- Aubertin, M., Gill, D. E. and Ladanyi, B. (1993). Modelling the transient inelastic flow of rock salt. In *Proceedings of the 7th Symposium on Salt*. Kyoto, Japan, pp. 93–104.
- Aubertin, M., Julien, M. R., Servant, S. and Gill, D. E. (1999). A rate-dependent model for the ductile behavior of salt rocks. *Canadian Geotechnical Journal* 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 4th International Symposium on Plasticity and Its Current Applications*. Baltimore, pp. 92.
- Aubertin, M., Sgaoula, J. and Gill, D. E. (1993a). A damage model for rock salt: Application to tertiary creep. In *Proceedings of the 7th Symposium on Salt*. Kyoto, Japan, pp. 117–125.

- Aubertin, M., Sgaoula, J., and Gill, D. E. (1993b). Constitutive modeling of rock salt: Basic considerations for semi-brittle behavior. In *Proceedings of the 4th International Symposium on Plasticity and It's Current Applications*. Baltimore, pp. 92.
- Barber, D. J. (1990). Regimes of plastic deformation processes and microstructure; An overview, In *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 7th Symposium on Salt*. Kyoto, Japan, pp. 353–362.
- Berest, P., Brouard, B. and Durup, G. (1998). Behavior of sealed solution-mined caverns. In *Proceedings of the 4th Conference on the Mechanical Behavior of Salt*. Clausthal-Zellerfeld, Trans Tech Publications, pp. 511–524.
- Billiotte, J., Guen, L. C., Deveughele, M. and Brulhet, J. (1996). On laboratory measurements of porosity and permeability of salt rocks (Bressa basis-France). In *Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt*. Clausthal-Zellerfeld, Trans Tech Publications, pp. 221–230.
- Blümel, M. 2000. Improved procedures for laboratory rock testing. Proc. In *EUROCK 2000 Symposium*. Aachen, Essen, pp.573–578.
- Bonte, G. (1996). Mechanical aspects of the inhibition of a salt wall by brine initially contained in a cavity. In *Proceedings of the 3rd Conference on the Mechanical Behavior of Salt*. Clausthal-Zellerfeld, Trans Tech Publications, pp. 263–267.
- Carter, N. L., Horseman, S. T., Russell, J. E. and Handin, J. (1993). Rheology of rocksalt. *Journal Structural Geology* 15: 1257–1272.
- Charpentier, J-P. 1984. Creep of rock salt elevated temperature. In *Proceeding of the second conference on the Mechanics Behavior of salt*. Clausthal, Germany, pp. 131–136.
- Chokski, A. H. and Langdon, T. G. (1991). Characteristics of creep deformation in ceramics. *Materials Science and Technology* 7: 577–584.
- 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*. Clausthal-Zellerfeld, Trans Tech Publications, pp. 231–236.

- Cristescu, N. (1994a). A procedure to determine nonassociated constitutive equations for geomaterials. *International Journal of 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 3rd Conference on the Mechanical Behavior of Salt*. Clausthal–Zellerfeld, Trans Tech Publications, pp. 191–205.
- 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 rocksalt. In *Proceedings of the 4th Conference on the Mechanical Behavior of Salt*. Clausthal–Zellerfeld, Trans Tech Publications, pp. 49–61.
- Franssen, R. C. M. W. (1998). Mechanical anisotropy of synthetic polycrystalline rock salt. In *Proceedings of the 4th Conference on the Mechanical Behavior of Salt*. Clausthal–Zellerfeld, Trans Tech Publications, pp. 63–75.
- 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.
- Fuenkajorn, K. and Daemen, J. J. K. (1986). Shape effect on ring test tensile strength: Key to Energy Production. In *Proceedings of the Twenty–Seventh U.S. Symposium on Rock Mechanics*. Tuscaloosa, University of Alabama, pp. 155–163.
- Fuenkajorn, K. and Phueakphum, D. 2009. Effects of cyclic loading on mechanical properties of Maha Sarakham salt. In *Proceeding second Thailand Symposium, Rock Mechanics*, 12–13 March 2009. Chonburi, Thailand, pp 107–120.
- Goodman, R.E. 1989. *Introduction to Rock Mechanics*. New York, John Wiley & Sons.
- 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*. Clausthal–Zellerfeld, Trans Tech Publications, pp. 53–66.

- 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 29th U.S. Symposium on Rock Mechanics*. University of Minnesota, Minneapolis, A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 199–206.
- Hardy, H. R. Jr. (1996). Application of the Kaiser effect for the evaluation of in-situ stress in salt. In *Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Rock Salt*. Ecole Polytechnique, November 1993, Trans Tech Publications, Clausthal, Germany, pp. 85–100.
- Hunsche, U. E. and Schulze, O. (1996). Effect of humidity and confining pressure on creep of rock salt. In *Proceedings of the 3rd Conference on the Mechanical Behavior of Salt*. Clausthal-Zellerfeld, Trans Tech Publications, pp. 237–248.
- Hunsche, U. E., Mingerzahn, G. and Schulze, O. (1996). The influence of textural parameters and mineralogical composition on the creep behavior of salt. In *Proceedings of the 3rd Conference on the Mechanical Behavior of Salt*. Clausthal-Zellerfeld, Trans Tech Publications, pp. 143–151.
- ISRM. (1978). Suggested methods for determining tensile strength of rock materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts* 15: 99–103.
- Itasca. (1992). *User Manual for FLAC–Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 4.0*. Itasca Consulting Group Inc. Minneapolis, Minnesota.
- Jaeger, J. C. and Cook, N. G. W. (1979). *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, Oxford, Blackwell Publishing.
- Jeremic, K. L. (1994). *Rock Mechanics in Salt Mining*. Rotterdam, A. A. Balkema, 532 pp.
- 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. (1993). Constitutive modeling of salt behavior – State of the technolog. In *Proceedings of the Seventh International Congress of the Rock Mechanics*, pp 1797–1810.

- 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*. Clausthal-Zellerfeld, Trans Tech Publications, pp. 153–166.
- Pudewills, A., Muller-Hoeppe, N. and Papp, R. (1995). Thermal and thermo-mechanical analyses for disposal in drifts of a repository in rock salt. *Nuclear Technology* 1: 79–88.
- 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 3rd Conference on the Mechanical Behavior of Salt*. Clausthal-Zellerfeld, Trans Tech Publications, pp. 373–380.
- Senseny, P. E., Hansen, F. D., Russell, J. E., Carter, N. L. and Handin, J. W. (1992). Mechanical behaviour of rock salt: phenomenology and micromechanisms. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 29: 363–378.
- Senseny, P.E. (1983). *Review of Constitutive Laws used to Describe the Creep of Salt*. Battelle Memorial Institute, Columbus.
- 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.
- Thorel, L. and Ghoreychi, M. (1996). Rock salt damage – Experimental results and interpretation, In *Proceedings Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt*. Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, September 1993, Trans Tech Publications, Clausthal, Germany, pp. 175–189.
- 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 Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt*. Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, September 1993, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany, pp. 117–128.
- Wolfenstine, J., Ruano, O. A., Wadsworth, J. and Sherby, O. D. (1991). Harper-Dorm creep in single crystalline NaCl. *Scripta Metall. Mater* 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