



รหัสโครงการ SUT7-719-60-12-05

รายงานการวิจัย

การเกิดและการประสานตัวของรอยแตก
ในเกลือหินภายใต้การกดในสามแกน

(Inducing and Healing of Rock Salt
Fractures under Triaxial Compression)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-719-60-12-05

รายงานการวิจัย

การเกิดและการประสานตัวของรอยแตก
ในเกลือหินภายใต้การกดในสามแกน

(Inducing and Healing of Rock Salt
Fractures under Triaxial Compression)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เดโช เผือกภูมิ

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2560

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากทีมงานหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีในการทดสอบและ นางสาวกัลญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัย และพิสุจน์ อักษร ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

กันยายน 2560



บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ในการศึกษานี้ เพื่อประเมินประสิทธิภาพการประสานตัวของรอยแตกในเกลื้อหินภายใต้การผันแปรความเค้นกดล้อมรอบจาก 3, 5, 7, 10, 15 ถึง 20 เมกะปาสคาล เป็นระยะเวลา 21 วัน การทดสอบเพื่อหาค่าความซึมผ่านของรอยแตกได้ตรวจวัดตลอดระยะเวลา 21 วัน เพื่อประเมินการปิดตัวของรอยแตกภายใต้ความเค้นกดล้อมรอบต่างๆ การให้แรงกดแบบเส้นบนรอยแตกเดิมได้ดำเนินการเพื่อประเมินคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของรอยแตกหลังจากการทดสอบการเชื่อมประสาน ผลการทดสอบระบุว่าประสิทธิภาพการประสานตัวของรอยแตกมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเค้นกดล้อมรอบสูงขึ้น ค่าความซึมผ่านและการเปิดเผยของรอยแตกมีค่าลดลงในเชิงเวลา เมื่อความเค้นกดล้อมรอบสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าความซึมผ่านและการเปิดเผยลดลงแบบเอ็กโพเนนเชียล รอยแตกที่เกิดจากแรงดึงสามารถประกบกันได้สนิทเหมือนก่อนการเกิดรอยแตก ซึ่งเกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออนบนผิวรอยแตกของเกลื้อหินและเกิดการประสานตัวใหม่ สำหรับรอยแตกผิวเรียบที่มีและไม่มีรอยร้าวเกลื้อหินรอยแตกจะไม่เกิดการประสานตัวหลังจากการทดสอบการเชื่อมประสาน ค่าความซึมผ่านของรอยแตกมีค่าคงที่ในเชิงเวลา เมื่อความเค้นกดล้อมรอบสูงขึ้นค่าความซึมผ่านจะมีค่าลดลงอย่างเท่ากันในเชิงเวลา เนื่องจากผลึกเกลื้อหินทั้งสองด้านของระนาบแนวรอยแตกไม่สามารถแลกเปลี่ยนประจุไอออนกันได้ดังเดิม จึงไม่เกิดการเชื่อมประสานของผลึกเกลื้อหิน ผลการศึกษาสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพการประสานตัวของรอยแตกบริเวณรอบหลุมเจาะในชั้นเกลื้อหินหลังจากทำการขุดเจาะและมีการอุดด้วยวัสดุถมกลับ



Abstract

The objective of this study is to assess the healing effectiveness of fractures in rock salt. The effort involves healing tests performed under confining pressures varying from 3, 5, 7, 10, 15 to 20 MPa up to 21 days. Gas flow permeability test is carried out daily throughout 21 days to assess the fracture closure under confining pressures. Line load testing on the healed fractures is performed to assess the mechanical performance of the fractures after healing. The results indicate that the healing effectiveness increases with the confining stresses. The fracture permeability decreases with time and the applied stresses. The fracture healing is due to the exchange of the ions on the two matching fracture surfaces. The smooth saw-cut fractures can not be healed under the confining stresses and test duration used here. Incorporation of brine between the smooth fractures will not improve the healing effectiveness. The findings can be used to assess the healing effectiveness of the fractures around the boreholes under external pressures after backfill or seal has been installed.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	1
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 คุณสมบัติความเข้มข้นของเกลือหิน.....	5
2.2 การประสานตัวของรอยแตกในเกลือหิน.....	6
บทที่ 3 การเตรียมตัวอย่างการทดสอบ.....	13
3.1 วัตถุประสงค์.....	13
3.2 การเตรียมตัวอย่างหินสำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	13
บทที่ 4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	19
4.1 วัตถุประสงค์.....	19
4.2 วิธีการทดสอบ.....	19
4.3 ผลการทดสอบ.....	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การพัฒนาสมการเชิงคณิตศาสตร์.....	27
5.1 วัตถุประสงค์.....	27
5.2 การสร้างสมการเชิงคณิตศาสตร์.....	29
5.2.1 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการประสานตัวของรอยแตกและความเค้น กดล้อมรอบ.....	27
5.2.2 สมการความสัมพันธ์ของความซึมผ่านบนรอยแตกของเกลือหินในฟังก์ชัน ของเวลา.....	28
5.2.3 สมการความสัมพันธ์การเปิดเผยของรอยแตกในเกลือหินในฟังก์ชันของ เวลา.....	30
บทที่ 6 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	33
6.1 วัตถุประสงค์.....	33
6.2 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	33
6.3 ผลการคาดคะเนคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์รอบหลุมเจาะ.....	38
บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต.....	41
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	41
7.2 วิจารณ์ผลการวิจัย.....	41
7.3 ข้อเสนอแนะ.....	42
บรรณานุกรม.....	43
ประวัตินักวิจัย.....	45

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ตารางแสดงขนาดของตัวอย่างสำหรับทดสอบการประสานตัวภายใต้สภาวะความเค้น ล้อมรอบ.....	14
4.1 ประสิทธิภาพการประสานตัวของรอยแตกที่เกิดจากแรงดึงภายใต้ความเค้นกดล้อมรอบ ต่างๆ.....	22
5.1 ค่าคงที่เชิงประจักษ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยของสมการประสิทธิภาพ การประสานตัวบนรอยแตกของเกลือหิน.....	28
5.2 ค่าคงที่เชิงประจักษ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยของสมการความซึมผ่านบนรอยแตก ของเกลือหินภายใต้การผันแปรความเค้นกดล้อมรอบ.....	29
5.3 ค่าคงที่เชิงประจักษ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยของสมการการเปิดเผยอของรอยแตก ในเกลือหินภายใต้การผันแปรความเค้นกดล้อมรอบ.....	31
6.1 คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินที่ใช้ในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	34
6.2 ค่าความซึมผ่านและระยะเปิดเผยอหลังจากมีการถมกลับที่เวลา 1 ปี 2 เดือน.....	39
6.3 ค่าความซึมผ่านและระยะเปิดเผยอหลังจากมีการถมกลับที่เวลา 1 ปี 4 เดือน.....	39
6.4 ค่าความซึมผ่านและระยะเปิดเผยอหลังจากมีการถมกลับที่เวลา 1 ปี 6 เดือน.....	39

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การทดสอบการประสานตัวของรอยแตกในเกลือหินโดยให้แรงแบบคงที่ในแนวแกน.....	9
2.2 การทดสอบการประสานตัวของรอยแตกในเกลือหินโดยให้แรงแบบคงที่ในแนวรัศมีแบบผิวขรุขระและแบบผิวเรียบ.....	10
2.3 รอยแตกผิวขรุขระสำหรับการทดสอบการให้แรงแบบคงที่ในแนวรัศมี และตัวอย่างหลังการทดสอบการให้แรงแบบคงที่ในแนวรัศมี.....	10
3.1 ตัวอย่างเกลือหินทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 50×50×100 มิลลิเมตร.....	14
3.2 รอยแตกแบบตั้งและรอยแตกแบบเรียบ.....	15
3.3 การเตรียมตัวอย่างที่มีรอยแตกแบบผิวเรียบด้วยการใช้เครื่องตัด.....	15
3.4 ตัวอย่างที่มีรอยแตกแบบตั้งด้วยการให้แรงในแนวเส้น.....	16
3.5 ตัวอย่างที่มีการให้แก๊สผ่านทางท่อไปยังรอยแตก.....	17
4.1 เครื่องให้แรงแบบสามแกนจริง.....	21
4.2 ประสิทธิภาพการประสานตัวของเกลือหินภายใต้การผันแปรความเค้นกดล้อมรอบ.....	23
4.3 อัตราการไหลของรอยแตกที่เกิดจากแรงดึงในฟังก์ชันของเวลา.....	23
4.4 ความซึมผ่านของรอยแตกที่เกิดจากแรงดึงในฟังก์ชันของเวลา.....	24
4.5 อัตราของการไหลของรอยแตกแบบเรียบในฟังก์ชันของเวลา.....	24
4.6 การซึมผ่านของรอยแตกแบบเรียบในฟังก์ชันของเวลา.....	25
5.1 ผลการสอบเทียบของประสิทธิภาพการประสานตัวบนรอยแตกของเกลือหินภายใต้การผันแปรความเค้นกดล้อมรอบ.....	28
5.2 ผลการสอบเทียบความซึมผ่านบนรอยแตกของเกลือหินในฟังก์ชันของเวลาภายใต้การผันแปรความเค้นกดล้อมรอบ.....	20
5.3 ผลการสอบเทียบการเปิดเผยของรอยแตกในเกลือหินในฟังก์ชันของเวลาภายใต้การผันแปรความเค้นกดล้อมรอบ.....	31
6.1 โครงข่ายแบบจำลองช่องเหมือนในชั้นเกลือหิน.....	34
6.2 โครงข่ายแบบจำลองช่องเหมือนในชั้นเกลือหินที่มีการใส่วัสดุถมกลับ.....	35
6.3 ค่าความเค้นหลักในแนวแกน (σ_v) บริเวณรอบหลุมเจาะที่ระดับความลึก 150 เมตร.....	35
6.4 ค่าความเค้นหลักในแนวแกน (σ_v) บริเวณรอบหลุมเจาะที่ระดับความลึก 200 เมตร.....	36
6.5 ค่าความเค้นหลักในแนวแกน (σ_v) บริเวณรอบหลุมเจาะที่ระดับความลึก 250 เมตร.....	36

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
6.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉลี่ยรอบหลุมเจาะกับเวลาที่ระดับความลึก 150 เมตร.....	37
6.7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉลี่ยรอบหลุมเจาะกับเวลาที่ระดับความลึก 200 เมตร.....	37
6.8	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉลี่ยรอบหลุมเจาะกับเวลาที่ระดับความลึก 250 เมตร.....	38



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

การทำเหมืองใต้ดินย่อมต้องออกแบบให้เสาค้ำยันและหลังคาช่องเหมืองมีเสถียรภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณเสาค้ำยันที่ทำหน้าที่รับน้ำหนักของชั้นหินปิดทับที่อยู่ด้านบน แท้จริงแล้วถึงแม้ได้มีการออกแบบให้เสาค้ำยันมีประสิทธิภาพมากเท่าใดก็ตามย่อมมีรอยแตกหรือรอยร้าวเกิดขึ้นเสมอ โดยเฉพาะบริเวณผิวด้านนอกของเสาค้ำยัน จึงส่งผลให้เกิดการสูญเสียศักยภาพของระบบไหลเวียนอากาศภายในช่องเหมือง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการประยุกต์ใช้ช่องเหมืองสำหรับกักเก็บพลังงานอากาศอัด หลังจากที่ได้ใส่วัสดุถมกลับเพื่อปิดช่องอากาศแล้วอาจทำให้เกิดปัญหาการรั่วซึมของอากาศตามรอยแตกหรือรอยร้าวได้เมื่ออยู่ในสภาวะกักเก็บ ดังนั้น การศึกษาการเกิดรอยแตกและการประสานตัวกลับของรอยแตกในเกลือหินจึงเป็นเรื่องจำเป็น ทั้งนี้เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการประเมินศักยภาพการกักเก็บอากาศในช่องเหมือง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) จำลองรอยแตกของตัวอย่างเกลือหินภายใต้การทดสอบกำลังกดในสามแกน (Triaxial compression test)
- 2) ศึกษาค่าความซึมผ่าน (Permeability) ในแนวแกนของรอยแตกที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะความเค้นล้อมรอบในสามทิศทาง
- 3) ศึกษาการประสานตัวของรอยแตกในเชิงเวลาโดยอาศัยค่าความซึมผ่านเป็นดัชนีบ่งบอก
- 4) พัฒนาศมการความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ของค่าความซึมผ่านของรอยแตกของเกลือหินต่อค่าความเค้นในแนวเฉือนรวมหกด้าน

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) ตัวอย่างเกลือหินที่นำมาทดสอบค่าความซึมผ่านภายใต้การกดในสามแกนได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เหมืองแร่โปแตชอาเซียน จำกัด (มหาชน) อำเภอป่าหน่วจังหวัดชัยภูมิ
- 2) การทดสอบกำลังกดในสามแกนใช้ตัวอย่างเกลือหินไม่น้อยกว่า 10 ตัวอย่าง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) เท่ากับ 54 มิลลิเมตร และอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 2

- 3) การทดสอบกำลังกดในสามแกนได้กระทำภายใต้ความเค้นล้อมรอบคงที่เท่ากับ 1, 3, 5, 7 และ 9 เมกะปาสคาล
- 4) เครื่องมือตรวจวัดค่าความซึมผ่านของรอยแตกในเกลือหินมีความละเอียดเท่ากับ 0.01 ลิตร ต่อนาที
- 5) ผลงานวิจัยได้นำไปเผยแพร่องค์ความรู้ในรูปของบทความในการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ และวารสารทางวิชาการในระดับนานาชาติ

1.4. ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

การศึกษานี้ได้ทำการทดสอบกำลังกดในสามแกนของเกลือหินเพื่อจำลองรอยแตกของผิวภายนอกของเสาค้ำยันในเมืองเกลือหินใต้ดินภายใต้สภาวะความเค้นล้อมรอบในสามแกน วิธีการทดสอบสามารถทำได้โดยให้ความเค้นกดแก่ตัวอย่างเกลือหินเท่ากันทุกทิศทาง หลังจากนั้นจึงเพิ่มความเค้นกดในแนวแกนแกตัวอย่างเกลือหินอย่างต่อเนื่องจนเกิดการวิบัติ แล้วจึงลดความเค้นในแนวแกนให้มีค่าเท่ากับความเค้นล้อมรอบอีกครั้ง ขณะทดสอบได้ตรวจวัดค่าความซึมผ่านด้วยการวัดอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 21 วัน ซึ่งคาดว่าหลังจากเกลือหินได้รับความเค้นกดเท่ากันทุกทิศทางอีกครั้งได้เกิดการประสานตัวของรอยแตก และส่งผลให้ค่าความซึมผ่านลดลง ซึ่งขึ้นอยู่กับความเค้นกดล้อมรอบและเวลา โดยการทดสอบได้ทำการหาค่าความเค้นล้อมรอบที่เหมาะสมที่ได้สามารถทำให้เกลือหินเกิดการแตกและสามารถประสานตัวกลับดังเดิมได้ ในความเป็นจริงแล้วเมื่อความเค้นล้อมรอบต่ำเกลือหินอาจเกิดการแตกและอาจไม่สามารถประสานตัวกลับได้ดังเดิม หรือที่ระดับความเค้นล้อมรอบสูงเกลือหินอาจได้ไม่แตก (อาจเกิดการเปลี่ยนรูปร่างเชิงพลาสติกเท่านั้น) แต่อาจเกิดการประสานตัวได้ดี

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศึกษาและค้นคว้าวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับความซึมผ่านของของเหลว และการประสานตัวของรอยแตกที่เกิดขึ้นในเกลือหิน รวมถึงผลกระทบของความเค้นล้อมรอบต่อค่าความซึมผ่านและการประสานตัวของเกลือหิน

ขั้นตอนที่ 2 การเก็บและจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหิน

ตัวอย่างเกลือหินได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เหมืองแร่โปแตชอาเซียน จำกัด (มหาชน) อำเภอบำเหน็จณรงค์ จังหวัดชัยภูมิ นำมาจัดเตรียมให้เป็นรูปทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง (D) เท่ากับ 54 มิลลิเมตร และมีขนาดความยาวต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 2.0 ตาม

มาตรฐาน ASTM D7012-10 จำนวนไม่น้อยกว่า 10 ตัวอย่าง โดยระหว่างการจัดเตรียมตัวอย่างได้มีการจดบันทึกระดับความลึกของแท่งตัวอย่างที่นำมาทดสอบ

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบหาค่าความซึมผ่านของรอยแตกในเกลือหินภายใต้การกดในสามแกน

ในขั้นตอนนี้ได้ทำการจำลองรอยแตกของตัวอย่างเกลือหินภายใต้การทดสอบกำลังกดในสามแกน โดยการทดสอบได้ผันแปรความเค้นล้อมรอบเท่ากับ 1, 3, 5, 7 และ 9 เมกะปาสคาล วิธีการทดสอบสามารถทำได้ด้วยการให้ความเค้นกดแก่ตัวอย่างเกลือหินเท่ากันทุกทิศทางเพื่อให้เกลือหินอยู่ในสภาวะความเค้นล้อมรอบสถิต (Hydrostatic) พร้อมทั้งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนตัวในแนวแกนและอุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน (Gas flow meter) หลังจากนั้นจึงเพิ่มความเค้นกดในแนวแกนแก่ตัวอย่างเกลือหินอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราการกดเท่ากับ 0.1 เมกะปาสคาลต่อวินาที จนกระทั่งตัวอย่างเกลือหินเกิดการเปลี่ยนรูปร่างและเกิดการวิบัติ ในขณะที่ทดสอบได้ตรวจวัดอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนในรอยแตกอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเครื่องมือตรวจวัดค่าความซึมผ่านสามารถวัดได้ละเอียดถึง 0.01 ลิตรต่อนาที เมื่อเกลือหินเกิดการวิบัติได้ลดความเค้นกดในแนวแกนให้มีค่าเท่ากับความเค้นล้อมรอบเริ่มต้นอีกครั้ง และตรวจวัดค่าความซึมผ่านต่อเนื่องอีก 21 วัน เพื่อศึกษาพฤติกรรมการประสานตัวของรอยแตก

ขั้นตอนที่ 4 การวิเคราะห์ผลและสร้างสมการความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์

นำผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการมาคำนวณค่าความซึมผ่านด้วยการใช้กฎของดาร์ซี (Darcy's law) จากนั้นนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความซึมผ่านต่อค่าความเค้นในแนวเฉือนรวมหกด้านที่ผันแปรในเชิงเวลา และหาค่าความเค้นล้อมรอบที่เหมาะสมที่ทำให้เกลือหินเกิดการแตกและสามารถกลับมาประสานตัวได้อีกครั้ง

ขั้นตอนที่ 5 สาธิตการออกแบบโพรงกักเก็บและช่องเหมือง

นำผลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการมาใช้ในการสาธิตการประเมินศักยภาพของเสาค้ำยันในเหมืองเกลือใต้ดินในสภาวะก่อนและหลังการประสานตัวของรอยแตกด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยอาศัยข้อมูลลักษณะทางธรณีวิทยา และความลึกของช่องเหมืองในประเทศไทยมาใช้ในการออกแบบ เพื่อเป็นแนวทางในการประเมินศักยภาพการกักเก็บพลังงานอากาศอัดหรือก๊าซธรรมชาติได้อย่างเป็นรูปธรรม

ขั้นตอนที่ 6 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิด ขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุปได้นำเสนอโดยละเอียดในรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ เพื่อที่ได้ส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ และตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้เป็นประโยชน์อย่างมากกับงานด้านวิศวกรรมธรณีและวิศวกรรมเหมืองแร่ เพื่อให้เข้าใจถึงผลกระทบจากการรั่วไหลของอากาศที่ใช้หมุนเวียนภายในเหมืองตามรอยแตกหรือรอยร้าวที่เกิดขึ้นบริเวณเสาค้ำยัน หรือประเมินศักยภาพของช่องเหมืองเมื่อได้นำไปใช้ประโยชน์เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานในรูปแบบพลังงานอากาศอัด และยังสามารถช่วยเสริมสร้างความรู้และความเข้าใจให้กับบุคลากรที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินการดังกล่าว ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

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

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กิจกรรมเบื้องต้นในงานวิจัยนี้คือการทบทวนวรรณกรรมวิจัย โดยได้ทำการค้นคว้า ศึกษา และสรุปบทความ รวมถึงข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการเชื่อมประสานของรอยแตกในเกลือหิน ภายใต้ความเค้นล้อมรอบในสามทิศทาง และค่าความซึมผ่าน เพื่อให้เข้าใจถึงกระบวนการและองค์ประกอบสำคัญที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดการเชื่อมประสานของรอยแตก รวมไปถึงหลักการหรือวิธีการคำนวณ และการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้ประเมินหรือคาดคะเนความสามารถในการเชื่อมประสานของรอยแตกในเกลือหิน

2.1 คุณสมบัติความซึมผ่านของเกลือหิน

Stormont (1988) ทำการตรวจวัดค่าความซึมผ่านของชั้นเกลือหินในเหมืองเกลือที่มลรัฐนิวเม็กซิโก พบว่าค่าความซึมผ่านของเกลือหินที่อยู่ไกลจากอุโมงค์มีค่าประมาณ 10^{-22} ตารางเมตร (หรือประมาณ 10^{-9} ดาร์ซี) แต่เกลือหินที่อยู่ใกล้กับผนังอุโมงค์มีค่าสูงกว่าเท่ากับ 10^{-18} ตารางเมตร (หรือสูงกว่า 10^{-5} ดาร์ซี)

Peach (1991) และ Stormont and Daemen (1992) ทำการทดสอบอัตราความซึมผ่านของเกลือหินบริเวณใกล้กับผนังอุโมงค์ในห้องปฏิบัติการและได้ผลยืนยันว่าคุณสมบัติความซึมผ่านของเกลือหิน (Salt permeability) มีค่าสูงกว่าที่คาดไว้มาก โดยเฉพาะเมื่อเกลือหินนั้นอยู่ภายใต้ความเค้นที่แตกต่างกันมากในแต่ละทิศทาง (Anisotropic stress) ส่งผลทำให้เกิดรอยแตกเล็กๆ ในเนื้อหิน (Micro-cracks) รอยแตกเล็กๆ นี้จะมีทิศทางค่อนข้างขนานกับทิศทางของความเค้นหลักสูงสุด (Major principal stress) และเมื่อรอยแตกเล็กๆ นี้พัฒนามากขึ้นจนเชื่อมต่อกันก็จะนำไปสู่การซึมผ่านที่สูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการซึมผ่านที่อยู่ในทิศทางที่ขนานกับทิศทางของความเค้นหลักสูงสุด นอกจากนี้ความสามารถในการซึมผ่านของอากาศหรือของเหลวในชั้นเกลือหินยังขึ้นกับขนาดและความแตกต่างของความเค้นหลักในสามทิศทางที่จุดนั้นๆ อีกด้วย ดังนั้นในบริเวณที่ใกล้กับผนังของโพรงหรืออุโมงค์ ความแตกต่างของความเค้นจะมีค่าสูงสุด และเกลือหินจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบยืดหยุ่นและพลาสติกในเชิงเวลา และเมื่อถึงจุดๆ หนึ่งถ้าความแตกต่างของความเค้นลดลงไม่มากพอเกลือหินก็จะเกิดการแตกร้าขึ้นทำให้เกิดความซึมผ่านสูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันเกลือหินที่อยู่ไกลจากผนังอุโมงค์หรือโพรงจะมีค่าความแตกต่างของความเค้นหลักน้อย เกลือหินในบริเวณนั้นจึงมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อยกว่าและอาจจะไม่มีการแตกร้าเกิดขึ้น ทำให้เกลือหินที่อยู่ไกลจากผนังอุโมงค์ยังคงมีค่าความซึมผ่าน (Permeability) ต่ำ เปรียบเสมือนไม่ได้รับผลกระทบจากการขุดเจาะอุโมงค์ ข้อสรุปโดยสังเขปเบื้องต้นนี้ได้ถูกยืนยันโดย Fuenkajorn and Serata (1992) ซึ่งได้นำผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

มาสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และใช้วิธีคำนวณเชิงตัวเลข (Finite element analysis) ได้ผลสรุปว่าปัจจัยที่มีผลต่อคุณลักษณะและการกระจายตัวของค่าความซึมผ่านในชั้นเกลือหินที่อยู่รอบๆ โพรงหรืออูโมงค์ คือ (1) ความลึกของโพรงหรือค่าความเค้นในชั้นหินก่อนที่จะสร้างอูโมงค์ (2) เวลาหรืออายุของโพรง (3) รูปร่างของโพรง (4) คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของชั้นเกลือ (5) แรงดันด้านข้างภายในโพรง และ (6) ระยะห่างจากผนังของโพรง โดยที่ความลึกประมาณ 3,000–4,500 ฟุต แนวโน้มการเกิดความซึมผ่านรอบๆ โพรงจะมีมาก เนื่องจากขนาดและการกระจายตัวของความเค้นอยู่ในระดับสูงพอที่จะทำให้เกิดการแตกร้าวรอบๆ โพรง แต่จะไม่สูงเกินไปจนกระทั่งทำให้เกลือหินเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก โดยส่วนใหญ่แล้วค่าความซึมผ่านของเกลือหินรอบๆ โพรงจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุของโพรง และจะมีค่าสูงสุดที่อายุประมาณ 2-3 ปี หลังจากนั้นค่าความซึมผ่านจะมีค่าคงที่ที่ราบไต่ที่ยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเค้นใหม่ โพรงหรืออูโมงค์ที่มีรูปร่างทรงกลมจะไม่ทำให้ค่าความซึมผ่านรอบโพรงสูงขึ้นเท่าใดนัก แต่ถ้าโพรงมีลักษณะเป็นรูปทรงรียาวจะทำให้เกลือหินรอบๆ โพรงนั้นมีค่าความซึมผ่านสูงมาก เช่น ถ้าอัตราส่วนของความยาวต่อความกว้างของโพรงมีค่าเท่ากับ 3:1 ขึ้นไป ค่าความซึมผ่านสูงสุดของเกลือหินที่ติดอยู่กับโพรงอาจจะมีค่าถึง 10^{-8} ตารางเมตร หรือประมาณ 10^{-5} ดาร์ซี เป็นต้น โพรงที่มีแรงดันข้างในประมาณครึ่งหนึ่งของความเค้นในชั้นหินข้างนอกสามารถลด ความซึมผ่านในชั้นเกลือหินรอบๆ โพรงได้พอสมควร เนื่องจากความดันในโพรงที่เหมาะสมสามารถลดความแตกต่างของค่าความเค้นหลักสูงสุดและความเค้นหลักต่ำสุดในเกลือหิน ซึ่งมีผลทำให้การพัฒนาของรอยแตกร้าวในเกลือหินลดลง โดยทั่วไปแล้วเกลือหินจะมีค่าความซึมผ่านสูงสุดที่บริเวณติดกับผนังของโพรงหรืออูโมงค์ ลึกเข้าไปในชั้นหินจากผนังของโพรง เกลือหินจะมีค่าความซึมผ่านลดลงจนในที่สุดมีค่าเท่ากับค่าเดิม (ค่าที่ไม่มีผลกระทบบกับอูโมงค์) ซึ่งจะมีค่าประมาณ 10^{-9} ดาร์ซี โดยทั่วไปแล้วการกระจายตัวของความซึมผ่านที่เพิ่มขึ้นจะอยู่รอบโพรงที่ระยะห่างประมาณ 2-3 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของโพรง เนื่องจากความสามารถในความซึมผ่านเป็นตัวแปรสำคัญที่จะนำไปสู่ความสำเร็จและความมีประสิทธิภาพในการพัฒนาเทคโนโลยีการกักเก็บในชั้นเกลือหิน ดังนั้น ข้อสรุปที่ได้จาก Fuenkajorn and Serata (1992) นี้ จึงได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบขนาด รูปร่าง และระยะห่างระหว่างโพรงที่ใช้ในการกักเก็บ สารเคมีและก๊าซธรรมชาติในต่างประเทศ และนำมาใช้กับการออกแบบและวิเคราะห์เสถียรภาพทางกลศาสตร์ และชลศาสตร์ของเหมืองเกลือหินที่ใช้เทคโนโลยีการละลายเช่นกัน

2.2 การประสานตัวของรอยแตกในเกลือหิน

การประสานตัวของรอยแตกของวัสดุเป็นกลไกของการปิดและเชื่อมตัวกันของรอยแตก โดยกระบวนการนี้จะไม่รวมไปถึงการเชื่อมติดของรอยแตกจากการตกตะกอนของสารภายในรอยแตกนั้น การประสานตัวของรอยแตกขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น เวลา แรงที่มากกระทำ อุณหภูมิ ความชื้นและลักษณะของรอยแตก เป็นต้น (Renard, 1999) การเชื่อมประสานต้องอาศัยกลไกหลัก 2 ประการ คือ การเลื่อนปิดชิดกันของรอยแตก (Fracture closure) โดยการอาศัยแรงกดอัดเพื่อให้

ระนาบรอยแตกติดกัน และการประสานตัวจากกระบวนการทางเคมีและทางกายภาพ (Fracture healing) ซึ่งวัสดุจะต้องอาศัยระยะเวลาในการเชื่อมประสาน (Chan et al., 1995, 1996, 1998, 2000; Miao et al., 1995; Munson et al., 1999) การสังเกตพฤติกรรมของการประสานตัวของรอยแตกกระทำไต่ยากมากเพราะการประสานตัวจะเกิดขึ้นในระดับผลึก (มีขนาดตั้งแต่ 10^{-6} ถึง 10^{-3} เมตร) อย่างไรก็ตามการประสานตัวของรอยแตกสามารถตรวจสอบได้จากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron microscope) เพื่อตรวจหาการประสานตัวของรอยแตก (Hickman and Evans, 1987) การเชื่อมประสานของรอยแตกจะส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินที่มีรอยแตกดีขึ้น เช่น ค่าความต้านทานแรงกดสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ของความยืดหยุ่น (E) เพิ่มขึ้น และยังทำให้ความสามารถในการซึมผ่านของหินลดลง หรือบริเวณรอยแตกนั้นมีค่าความซึมผ่านลดลง

ในระยะเวลา 10 ปี ที่ผ่านมามีผู้วิจัยในต่างประเทศได้ศึกษาเกี่ยวกับการประสานตัวของรอยแตกรวมทั้งปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการประสานตัวของรอยแตกของเกลือหิน วิธีการทดสอบได้ดำเนินการทั้งในภาคสนามและในห้องปฏิบัติการ โดยในภาคสนามได้มีการศึกษาและสำรวจโพรงละลายและบริเวณรอยเลื่อนของเกลือหินที่อยู่รอบโพรง ในห้องปฏิบัติการได้มีการทดสอบตัวอย่างเกลือหินและการสร้างสมการการเคลื่อนไหลของเกลือหินจากกระบวนการประสานตัวของรอยแตก (Miao et al., 1995; Chan et al., 1995, 1998; Munson et al., 1999)

Brodsky and Munson (1994) ได้ศึกษาการประสานตัวของรอยแตกในเกลือหิน ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงการ Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) ภายใต้ความดันสถิต (Hydrostatic compression) ที่ 0.5 เมกะปาสคาล โดยบรรจุตัวอย่างหินรูปทรงกระบอกไว้ในหม้อแรงดัน (Hoek cell) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แล้วกดในแนวแกนให้เกิดการยุบตัวเล็กน้อย จากนั้นได้มีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของระบบไปที่ 20, 46 และ 70 องศาเซลเซียส ในแต่ละตัวอย่างตามลำดับ เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ แล้วให้แรงกดด้วยอัตราความเครียดอัด (Strain rate) เท่ากับ 1×10^{-6} วินาที⁻¹ ในการทดสอบนี้ได้ใช้คลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic wave velocity) เสริมในการทดสอบและข้อมูลที่ได้นำมาเป็นข้อมูลพื้นฐานเปรียบเทียบกับแบบจำลอง MDCF ที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการประเมินค่าการประสานตัวของรอยแตกแบบ Anisotropy ของเกลือหิน

Allemandou and Dusseault (1993) ศึกษาการประสานตัวของรอยแตกด้วยการให้ความเค้นกดในสามแกนที่ความดันสถิต 2 เมกะปาสคาล และความเค้นกดในแนวแกนคงที่ โดยใช้ตัวอย่างเกลือหินรูปทรงกระบอกภายใต้อุณหภูมิคงที่ แล้วทิ้งไว้ในช่วงเวลาสั้น (ไม่กี่ชั่วโมง) หลังจากนั้นค่อยๆ เพิ่มระดับความเค้นในแนวแกนไปที่ 10, 15, 20 และ 25 เมกะปาสคาล ตามลำดับ พบว่าหินจะมีการประสานตัวและมีปริมาณช่องว่างลดลง โดยประเมินจากการขีดหรือปิดกันของรอยแตกจากภาพถ่าย CAT-scan

Maio et al. (1995) ศึกษาการเชื่อมประสานตัวของเกลือหินบด (Crushed salt) ในสถานะที่มีน้ำอยู่ปริมาณน้อย ซึ่งสรุปได้ว่าหลังจากมีการประสานตัวเกิดขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่น (Density) ความเครียดหลังช่วงยืดหยุ่น (Inelastic strain) ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (Young's Modulus) และความต้านทานแรงกด (Strength) ของเกลือหินบดเพิ่มขึ้นตามเวลา

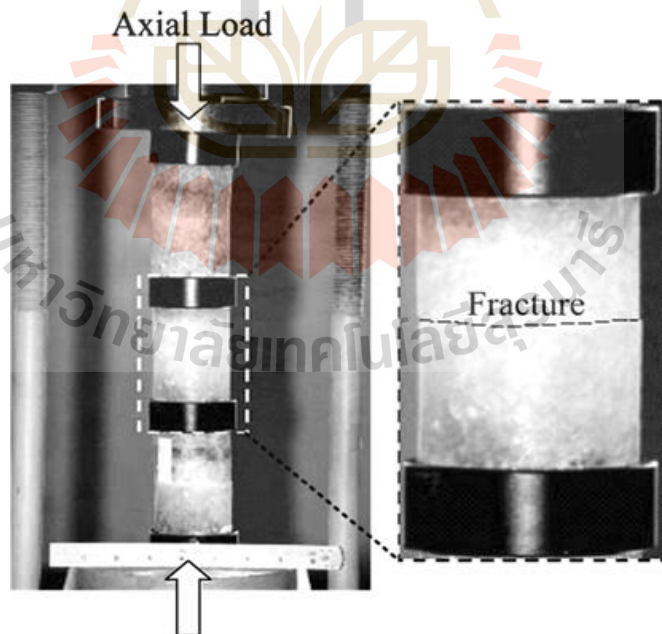
Munson et al. (1999) ได้พัฒนาแบบจำลองชื่อ MDCF (Multimechanism Deformation Coupled Fracture Model) จากแบบจำลองเก่าชื่อ SUVIC-D ซึ่งเดิมมีฟังก์ชันของการเคลื่อนไหล (Creep function) ต่อมา มีการเพิ่มฟังก์ชันเกี่ยวกับการประสานตัวของรอยแตก (Healing rate function) เข้าไปด้วย และได้มีการเก็บข้อมูลภาคสนามที่บริเวณอุโมงค์เก่าด้วยวิธีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของคลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic wave) และได้ประเมินออกมาเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นจากการยุบตัวของโพรง ในขณะที่เดียวกันได้สังเกตการระบายของน้ำออกจากอุโมงค์ ทั้งสองการทดสอบนี้ได้ไปใช้ประเมินการขยายขอบเขตของความเสียหายรอบๆ โพรง และเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่สร้างขึ้นในรูปแบบของการเคลื่อนไหลที่เกิดขึ้น ผลการเปรียบเทียบให้ค่าที่ใกล้เคียงกันและยังใช้เปรียบเทียบกับผลของขอบเขตที่ใหญ่ขึ้นได้ และสรุปเพิ่มเติมว่าความเสียหายจะเป็นฟังก์ชันของความลึก และจะมีค่ามากที่บริเวณส่วนล่างสุดของโพรง ซึ่งขึ้นกับความไม่บริสุทธิ์ของเนื้อเกลือหินเอง หากมีมากก็จะส่งผลกระทบมาก และในขณะเดียวกัน Chan et al. (1995, 1996) ได้ศึกษาและใช้แบบจำลองนี้ และสรุปผลไปในลักษณะแนวทางเดียวกัน

Phueakphum (2003) ได้ทำการทดสอบการประสานตัวของรอยแตก และการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรในห้องปฏิบัติการด้วยการใช้ตัวอย่างเกลือหินจากแอ่งสกลนคร ผลการทดสอบสรุปได้ว่าตัวอย่างเกลือหินจากแอ่งสกลนครที่นำมาใช้ในการทดสอบมีค่ากำลังดึงและกำลังต้านแรงกดอยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับเกลือหินจากแหล่งอื่นในต่างประเทศ ผลจากการทดสอบการประสานตัวของรอยแตกในตัวอย่างเกลือหินบ่งชี้ว่า รอยแตกในเกลือหินสามารถประสานตัวกลับเป็นหินแข็งได้ และพบว่าการกำลังดึงของรอยแตกหลังจากการประสานตัวได้เพิ่มขึ้นถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังดึงที่ได้จากการทดสอบเกลือหินในสถานะความดันล้อมรอบสูงสุดเท่ากับ 1,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ในระยะเวลาประมาณ 100 ชั่วโมง ผลจากการทดสอบด้วยแรงกดแบบวัฏจักรพบว่า การลดลงของกำลังรับแรงกด (S) จะแปรผกผันกับจำนวนรอบ (N) ที่ตัวอย่างหินวิบัติ โดยมีความสัมพันธ์ $S=33.6 N^{-0.08}$ และค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของตัวอย่างเกลือหินจะลดลงเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้นโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 20 ถึง 30 กิโลกะปาสกาล

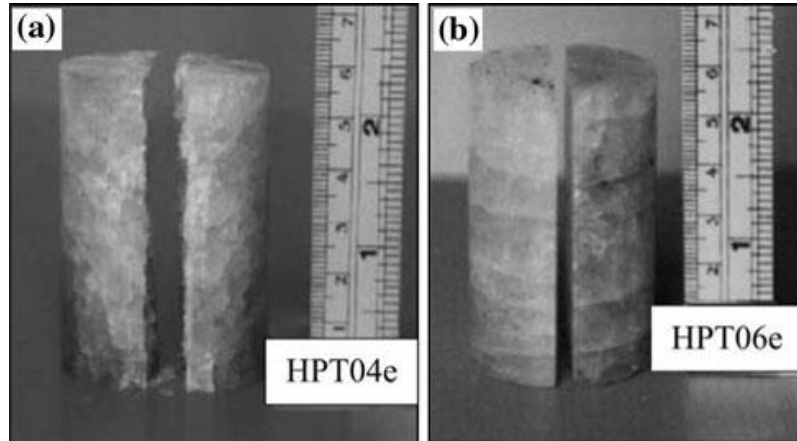
Chan et al. (2001) ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับรอยแตกขนาดเล็กในเกลือหินที่สามารถประสานตัวได้อีกครั้ง เมื่อมีความดันล้อมรอบและอุณหภูมิที่เพียงพอ โดยทำการศึกษาด้วยวิธีการวิบัติอย่างต่อเนื่องทางกลศาสตร์ ซึ่งได้พิจารณาตัวแปรในแบบจำลองควบคุมไปกับการอธิบายการคืบและการวิบัติ โดยแบบจำลองได้รับการประเมินมาจากผลการทดสอบเกลือหินจาก Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) ซึ่งผลจากแบบจำลองและผลจากการทดสอบเป็นที่น่าพอใจมาก นอกจากนี้การวิเคราะห์ข้อมูล

จากการทดสอบได้แสดงถึงการประสานตัวที่ไม่เท่ากันทุกทิศทางของเกลือหิน โดยส่วนใหญ่การประสานตัวที่ไม่เท่ากันทุกทิศทางสามารถสร้างแบบจำลองเชื่อมกับ Equivalent stress, Kinetic equation และ Evolution equation ได้อย่างเหมาะสม

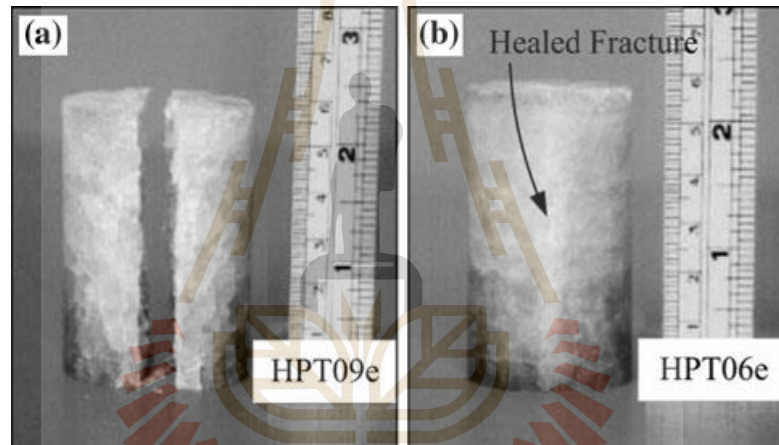
Fuenkajorn and Phueakphum (2011) ทำการทดสอบการประสานตัวของรอยแตกในเกลือหินในห้องปฏิบัติการของรอยแตก 2 ชนิด คือ รอยแตกผิวขรุขระ และรอยแตกผิวเรียบ ภายใต้แรงกดแบบคงที่ในแนวแกน (รูปที่ 2.1) และแรงกดแบบคงที่ในแนวรัศมี (รูปที่ 2.2) ทั้งแบบแห้งและเปียก โดยการทดสอบแต่ละก้อนใช้เวลา 30 วัน หลังจากนั้นจึงนำมาทดสอบการให้แรงแบบจุด (Point Load Testing) (รูปที่ 2.3) เพื่อนำค่าที่ได้จากการทดสอบไปหาค่าสัมประสิทธิ์การประสานตัว ผลการทดสอบการให้แรงแบบคงที่ในแนวแกนระบุว่า สัมประสิทธิ์การประสานตัวบางค่ามีค่ามากกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ อาจเป็นเพราะช่องว่างหรือรอยแตกมีการอัดตัวระหว่างการทดสอบทำให้ความแข็งแรงของรอยแตกมีค่าเกินกว่าค่าความแข็งแรงของหินเกลือ ส่วนผลการทดสอบการให้แรงในแนวรัศมีระบุว่า ค่าความซึมผ่านในรอยแตกจะมีค่าลดลงเมื่อการให้แรงในแนวรัศมีและระยะเวลาเพิ่มขึ้น ซึ่งมากกว่า 4 ระดับ (Order) ที่แรงคงที่เท่ากับ 20 เมกะปาสคาล ในช่วงระยะเวลาสั้น ซึ่งการลดลงของค่าความซึมผ่านอาจเป็นผลมาจากรอยแตกปิดกันสนิทมากขึ้น ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการประสานตัวของรอยแตกในเกลือหินนั้น ได้แก่ ความบริสุทธิ์ของรอยแตก ขนาดและระยะเวลาของการให้แรงแก่รอยแตก และถ้ามีสิ่งสกปรกเจือปนจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การประสานตัวลดลง



รูปที่ 2.1 การทดสอบการประสานตัวของรอยแตกในเกลือหินโดยให้แรงแบบคงที่ในแนวแกน (Fuenkajorn and Phueakphum, 2011)



รูปที่ 2.2 การทดสอบการประสานตัวของรอยแตกในเกลือหินโดยให้แรงแบบคงที่ในแนวรัศมีแบบผิวขรุขระ (a) และแบบผิวเรียบ (b) (Fuenkajorn and Phueakphum, 2011)



รูปที่ 2.3 รอยแตกผิวขรุขระสำหรับการทดสอบการให้แรงแบบคงที่ในแนวรัศมี (a) และตัวอย่างหลังการทดสอบการให้แรงแบบคงที่ในแนวรัศมี (b) (Fuenkajorn and Phueakphum, 2011)

Zeifler (1976) ได้เสนอสมการในการหาค่าความซึมผ่าน (K_j) ของรอยแตกของเกลือหิน โดยที่รอยแตกนั้นเป็นรอยแตกที่มีผิวขนานกัน (Parallel fracture) และการไหลของของไหลเป็นแบบราบเรียบ (Laminar flow) คือ

$$K_j = (\gamma e^2 / 12\mu) \quad (1)$$

โดยที่ e คือ ระยะเปิดหรือขนาดของรอยแตกขนาน (Parallel plate aperture)
 γ และ μ คือ ค่า Unit weight และ Viscosity ของของเหลวหรือก๊าซที่ไหลผ่านรอยแตก

ในเชิงวิศวกรรมธรณี รอยแตกในหิน (Fractures) มีหลายขนาด ตั้งแต่รอยแตกในฟลิกร์ที่มีขนาดเล็กไปจนถึงรอยเลื่อน (Fault) ของชั้นหินซึ่งเป็นรอยแตกที่มีขนาดใหญ่มาก และรวมไปถึงรอยเลื่อนระหว่างทวีป เป็นต้น รอยแตกที่เกิดขึ้นในหินมีสาเหตุมาจากหลายปัจจัย ในกระบวนการทางธรรมชาติรอยแตกเกิดมาจากการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลกรวมทั้งรอยแตกที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การละลายโพรงหรือการขุดเจาะอุโมงค์ในชั้นหิน รอยแตกที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และเชิงกายภาพของหินเปลี่ยนแปลงไป ความต้านทานแรงเฉือนและความต้านทานแรงดึงลดลง และในทางตรงกันข้ามค่าความซึมผ่านของหินอาจจะเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอาจก่อให้เกิดความเสียหายทางด้านเสถียรภาพของโครงสร้างต่างๆ ในชั้นหิน ด้วยปัญหาดังที่กล่าวมานี้การประสานตัวของรอยแตกจึงมีความสำคัญในเชิงธรณีวิทยา เพราะการประสานตัวของรอยแตกเป็นกระบวนการที่ควบคุมการไหลของของเหลวในชั้นเปลือกโลก (Renard, 1999) เช่น รอยแตกในชั้นเกลือหินที่มีความสามารถในการประสานตัวเองได้ ส่งผลให้บริเวณรอยแตกนั้นมีความซึมผ่านลดลง

Munson et al. (1999) ได้พัฒนาแบบจำลองชื่อ MDCF (Multimechanism Deformation Coupled Fracture Model) จากแบบจำลองเก่าชื่อ SUVIC-D ซึ่งเดิมมีฟังก์ชันของการเคลื่อนไหล (Creep function) ต่อมาได้มีการเพิ่มฟังก์ชันเกี่ยวกับการประสานตัวของรอยแตก (Healing rate function) เข้าไปด้วย ได้มีการเก็บข้อมูลภาคสนามที่บริเวณอุโมงค์เก่า โดยวัดการเปลี่ยนแปลงความเร็วของคลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic wave) และได้ประเมินออกมาเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นจากการยุบตัวของโพรง ในขณะที่เดียวกันก็ได้สังเกตการระบายของน้ำออกจากอุโมงค์ ทั้งสองการทดสอบนี้นำไปใช้ประเมินการขยายขอบเขตของความเสียหายรอบๆ โพรง และเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่สร้างขึ้นในรูปแบบของความเคลื่อนไหลที่เกิดขึ้น ผลการเปรียบเทียบให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน และยังใช้เปรียบเทียบกับผลของขอบเขตที่ใหญ่ขึ้นได้ และสรุปเพิ่มเติมว่า ความเสียหายจะเป็นฟังก์ชันของความลึก และจะมีค่ามากที่บริเวณส่วนล่างสุดของโพรง ซึ่งขึ้นกับความไม่บริสุทธิ์ของเนื้อเกลือหิน หากมีมากก็จะส่งผลกระทบต่อมาก และในขณะเดียวกัน Chan et al. (1995, 1996) ได้ศึกษาและใช้แบบจำลองนี้ และสรุปผลไปในทางเดียวกัน

บทที่ 3

การจัดเตรียมตัวอย่างการทดสอบ

3.1 วัตถุประสงค์

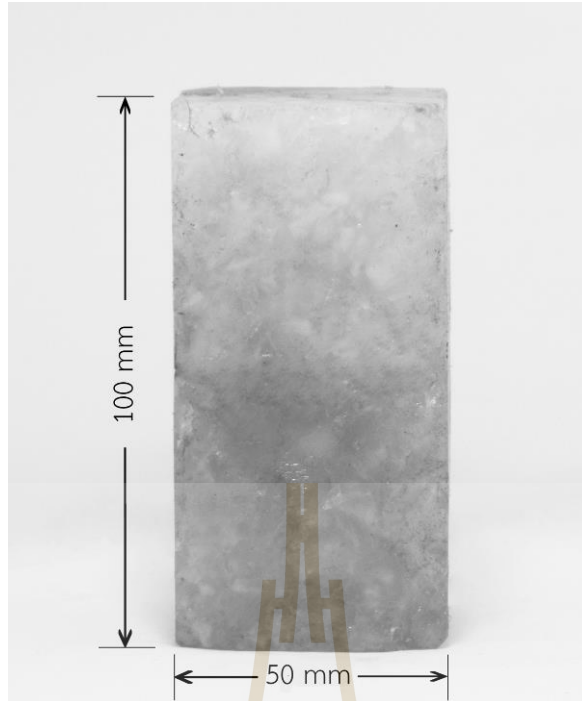
เนื้อหาในบทนี้อธิบายถึงขั้นตอน และวิธีการจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหินสำหรับใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ

3.2 การเตรียมตัวอย่างหินสำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้สำหรับการทดสอบเป็นเกลือหินชั้นกลางและชั้นล่างของชุดหินมหาสารคามในแอ่งโคราช ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ซึ่งทำการเก็บตัวอย่างมาจากบริษัท เหมืองแร่โปแตชอาเซียน จำกัด (มหาชน) อำเภอบำเหน็จณรงค์ จังหวัดชัยภูมิ

เนื่องจากตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ทดสอบการเชื่อมประสานภายใต้ความเค้นล้อมรอบตามข้อเสนอโครงการมีรูปร่างกระบอก แต่ตัวอย่างหินรูปร่างกระบอกที่ได้จากการขุดเจาะในภาคสนามมีความยาวไม่เพียงพอต่อการนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการตามมาตรฐาน ASTM D2938 (L/D<2) จึงจำเป็นต้องทดสอบกับตัวอย่างหินรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 50×50×100 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.1) แทน โดยเกลือหินมีความถ่วงจำเพาะเฉลี่ยเท่ากับ 2.04 ± 0.02 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (ตารางที่ 3.1) และได้ทำการจำลองรอยแตกเป็นสองชนิด (รูปที่ 3.2) คือ รอยแตกแบบเรียบ ที่จำลองขึ้นมาจากการตัดด้วยเลื่อย (รูปที่ 3.3) และรอยแตกที่เกิดจากแรงดึง โดยจำลองขึ้นมาจากการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบเส้น (Line load test) (รูปที่ 3.4) ซึ่งการจำลองรอยแตกสามารถทำได้ด้วยการให้แรงกดแบบเส้นตั้งฉากไปตามความสูงของแท่งตัวอย่างรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า หลังจากการจำลองรอยแตกจะทำการเจาะรูที่ตัวอย่างให้แก๊สไหลผ่านไปยังรอยแตกเพื่อวัดความซึมผ่านของรอยแตก (รูปที่ 3.5)

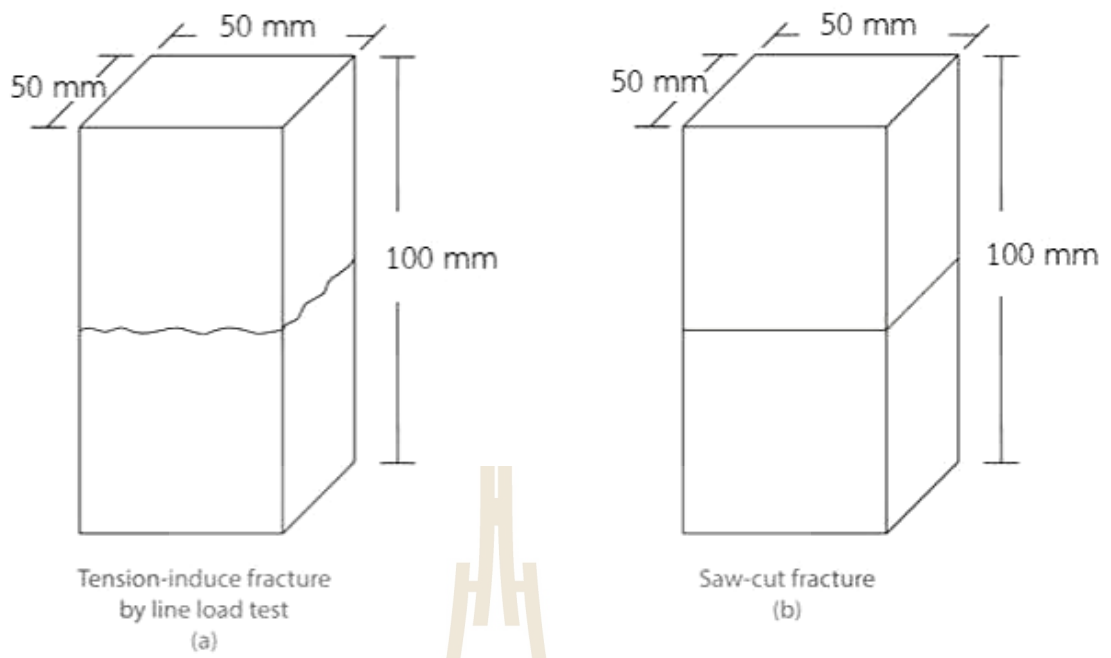
การทดสอบการเชื่อมประสานของรอยแตกได้ทำการทดสอบที่ภายใต้ความเค้นล้อมรอบ 3, 5, 7, 9, 10, 15 และ 20 เมกะปาสคาล โดยระดับความเค้นล้อมรอบดังกล่าวจะแตกต่างจากข้อเสนอโครงการวิจัยที่ได้เสนอไว้ 5 ระดับคือ 1, 3, 5, 7 และ 9 เมกะปาสคาล ทั้งนี้ เพื่อให้ผลการทดสอบมีความครอบคลุมและสามารถวิเคราะห์ผลได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างเกลื่อหินทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 50×50×100 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงขนาดของตัวอย่างสำหรับทดสอบการประสานตัวภายใต้สภาวะความเค้นล้อมรอบ

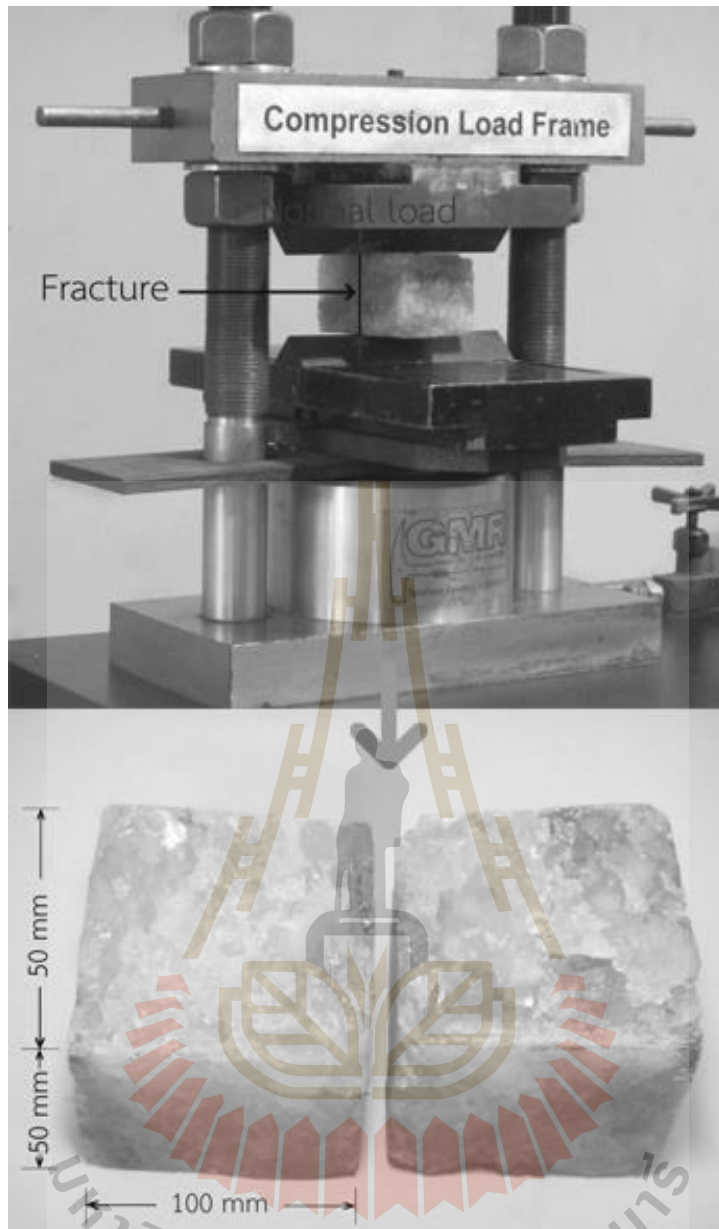
หมายเลข ตัวอย่าง	พื้นที่ที่ (ตร.ม.ม.)	ความสูง (ม.ม.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	ความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม.)
HTF-01	50.2× 50.8	100.50	256.538	547	2.132
HTF-02	49.9×50.5	99.58	249.446	520	2.085
HTF-03	49.7×49.6	97.92	241.152	491.5	2.038
HTF-04	50.5×50.1	103.2	260.067	523	2.011
HTF-05	50.1×50.7	101.4	259.105	525	2.018
HTF-06	49.8×50.6	99.89	257.68	503.5	2.038
HSF-01	50.3×50.1	103.1	259.299	545	2.102
HTF-02B	49.5×49.9	100.2	248.499	517	2.080
HSF-03	50.7×50.3	100.8	256.047	551	2.152
HSF-04B	50×50.1	100.2	251.252	562	2.237
เฉลี่ย					2.072 ± 0.02



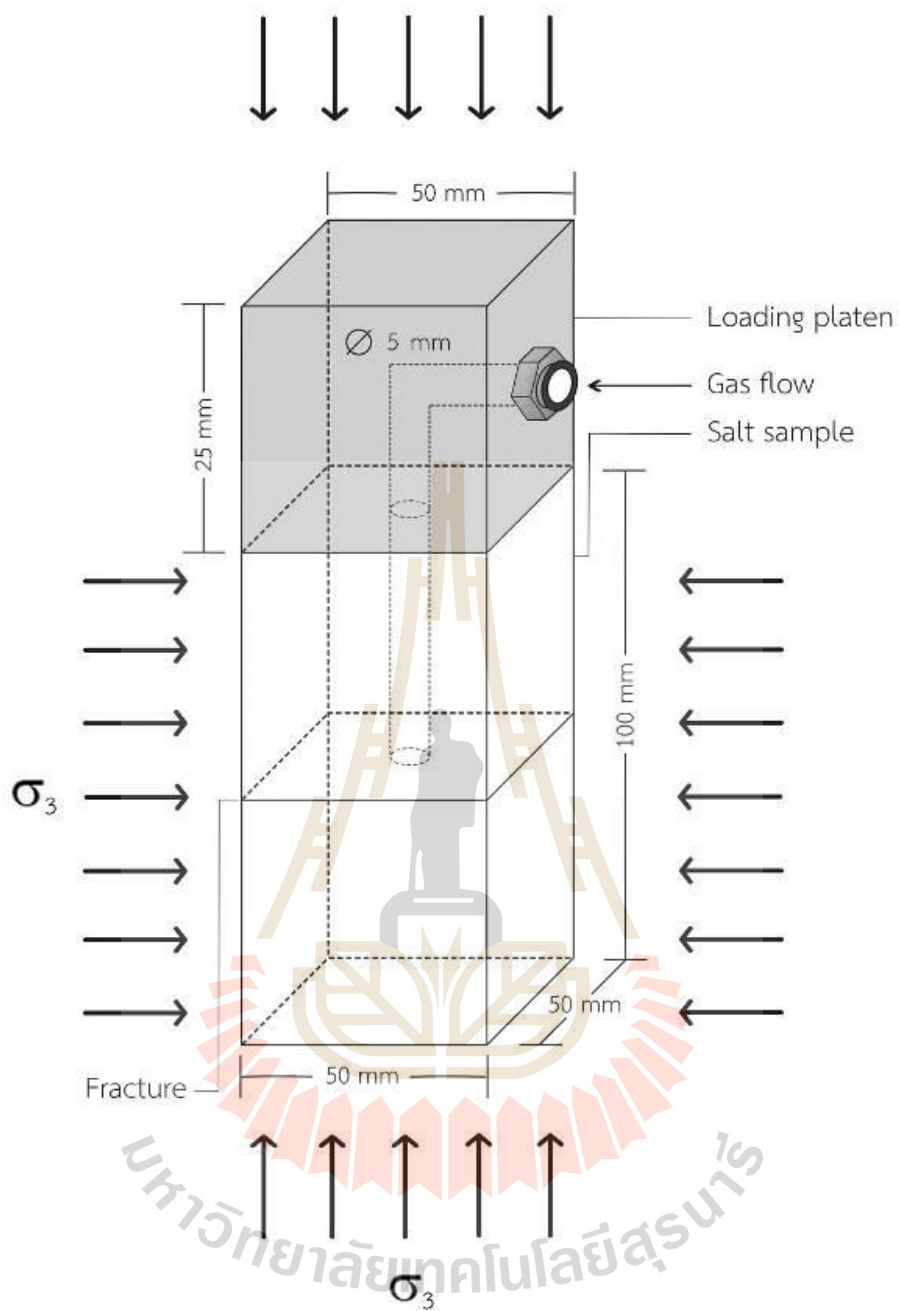
รูปที่ 3.2 รอยแตกแบบดิ่ง (a) และรอยแตกแบบเรียบ (b)



รูปที่ 3.3 การเตรียมตัวอย่างที่มีรอยแตกแบบผิวเรียบด้วยการใช้เครื่องตัด



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างที่มีรอยแตกแบบตั้งด้วยการให้แรงในแนวเส้น



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างที่มีการให้แก๊สผ่านทางท่อไปยังรอยแตก

บทที่ 4

การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

4.1 วัตถุประสงค์

เนื้อหาในบทนี้ได้อธิบายขั้นตอนการทดสอบการเชื่อมประสานของรอยแตกที่เกิดจากแรงดึงและรอยแตกที่ตัดด้วยเลื่อยภายใต้การผันแปรความเค้นกดล้อมรอบ ค่าที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่ออธิบายความสามารถในการเชื่อมประสานของรอยแตกในเกลื้อหินที่เกิดขึ้นเมื่อทำการขุดเจาะผ่านชั้นเกลื้อในเชิงเวลาที่ระดับความลึกต่างๆ

4.2 วิธีการทดสอบ

การทดสอบได้ศึกษาผลกระทบของความเค้นกดล้อมรอบและลักษณะของรอยแตกต่อค่าความซึมผ่านในเชิงเวลา ซึ่งปัจจัยดังกล่าวมีความสำคัญต่อการเชื่อมประสานของรอยแตกในเกลื้อหิน การศึกษานี้จะไม่นำปัจจัยหรืออิทธิพลอื่นๆ เช่น แร่องค์ประกอบหินและอุณหภูมิมาพิจารณาถึงประสิทธิภาพการเชื่อมประสานของรอยแตก ก่อนทำการทดสอบได้ทำการวัดระยะเปิดเผยของรอยแตกดังกล่าวเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณต่อไป การทดสอบใช้ระยะเวลาทั้งหมด 21 วัน ภายใต้อุณหภูมิห้อง ระหว่างการทดสอบได้ตรวจวัดค่าความซึมผ่านของรอยแตกทุกๆ 1 ชั่วโมง ตลอดระยะเวลาการทดสอบ

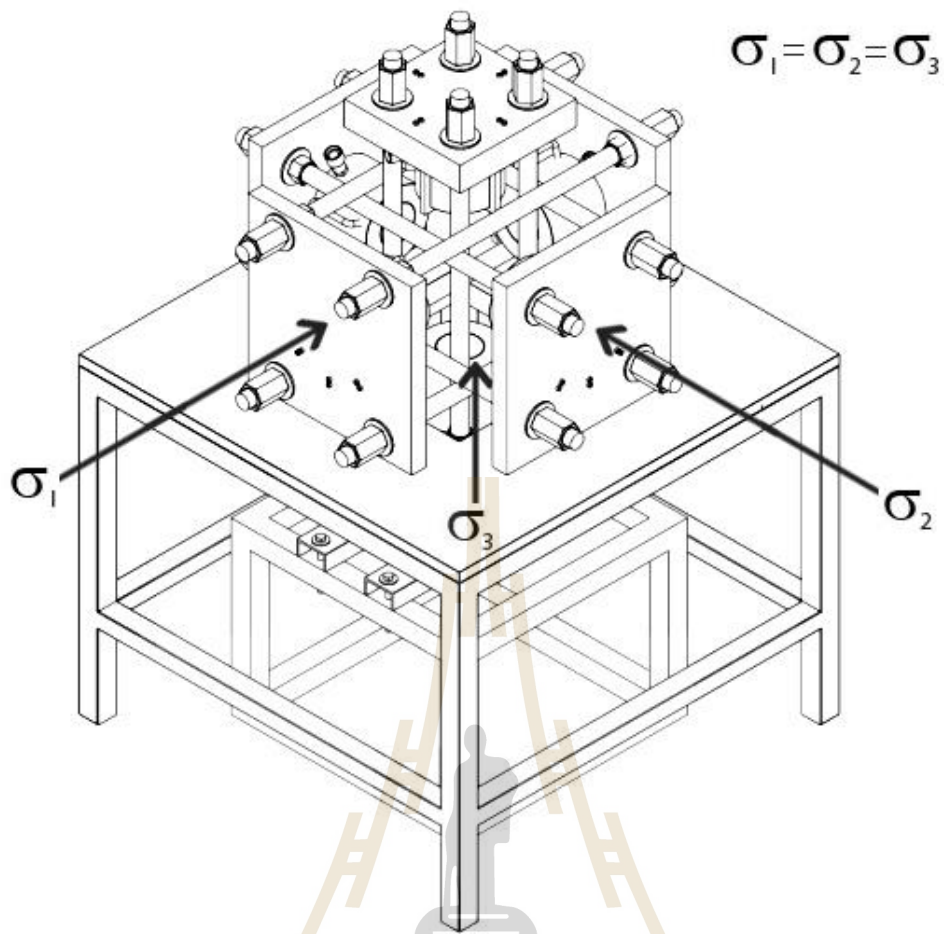
โครงกทดสอบในสามแกน (True triaxial loading device) (รูปที่ 4.1) ดำเนินการเพื่อให้ความเค้นกดล้อมรอบทั้ง 3 ทิศทางแก่ตัวอย่างเกลื้อหินด้วยการใช้ปั๊มไฮดรอลิก (Fuenkajorn and Kenkhunthod, 2010) แบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ชุด คือ ชุดการทดสอบที่ 1: ศึกษาการเชื่อมประสานบนรอยแตกที่เกิดจากแรงดึงภายใต้การผันแปรความเค้นกดล้อมรอบจาก 3, 5, 7, 10, 15 ถึง 20 เมกะปาสคาล ชุดการทดสอบที่ 2: ศึกษาการเชื่อมประสานของรอยแตกแบบเรียบที่ใช้เลื่อยตัดภายใต้การผันแปรความเค้นกดล้อมรอบที่ 10 และ 20 เมกะปาสคาล และชุดการทดสอบที่ 3: ศึกษาการเชื่อมประสานของรอยแตกแบบเรียบที่ใช้เลื่อยตัดและมีการหยดน้ำเกลื้อบนรอยแตกก่อนนำไปทดสอบการเชื่อมประสานภายใต้ความเค้นกดล้อมรอบเท่ากับ 10 และ 20 เมกะปาสคาล ระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 21 วัน หลังจากทดสอบการเชื่อมประสานตัวของเกลื้อหินได้นำตัวอย่างไปทดสอบการให้แรงกดแบบเส้นบนรอยแตกเดิมอีกครั้ง เพื่อตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของรอยแตกหลังจากได้รับความเค้นกดล้อมรอบที่ระดับต่างๆ

4.3 ผลการทดสอบ

ชุดการทดสอบที่ 1: ประสิทธิภาพการประสานตัวของรอยแตกที่เกิดจากแรงดึงภายใต้ความเค้นกดล้อมรอบดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ผลการทดสอบระบุว่าเมื่อทำการเพิ่มความเค้นกดล้อมรอบ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการประสานตัวของรอยแตกสูงขึ้น เนื่องจากผลึกเกลือหินทั้งสองด้านสามารถประกบกันตามแนวผลึกได้เหมือนก่อนการทำให้แยกออกจากกัน ระหว่างการทดสอบรอยแตกในเกลือหินจะปิดสนิทจึงเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนของเกลือหิน ทำให้เกิดการประสานตัวใหม่ ในเชิงเวลา ทั้งนี้ระหว่างการทดสอบได้ทำการตรวจวัดอัตราการความเร็วของการไหลและความซึมผ่านของรอยแตกดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ผลระบุว่าอัตราการความเร็วของการไหลและความซึมผ่านของรอยแตกมีค่าลดลงในเชิงเวลา เมื่อความเค้นกดล้อมรอบมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราความเร็วและความซึมผ่านมีค่าลดลงเนื่องจากรอยต่อของเกลือหินเกิดการประสานตัว

ชุดการทดสอบที่ 2: รูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงอัตราการความเร็วของการไหลและความซึมผ่านของรอยแตกในฟังก์ชันของเวลา ผลการทดสอบระบุว่าอัตราการความเร็วของการไหลและความซึมผ่านของรอยแตกมีค่าคงที่ในเชิงเวลา เมื่อความเค้นกดล้อมรอบเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 20 เมกะปาสคาล ค่าดังกล่าวมีค่าลดลงอย่างเท่ากันเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น หลังจากครบกำหนดเวลา 21 วัน พบว่ารอยแตกของเกลือหินไม่เกิดการเชื่อมประสานตัว เนื่องจากผลึกเกลือหินทั้งสองด้านของระนาบแนวแตกไม่สามารถประกบกันได้ดั้งเดิมและไม่เกิดการแลกเปลี่ยนไอออน (ตารางที่ 4.1)

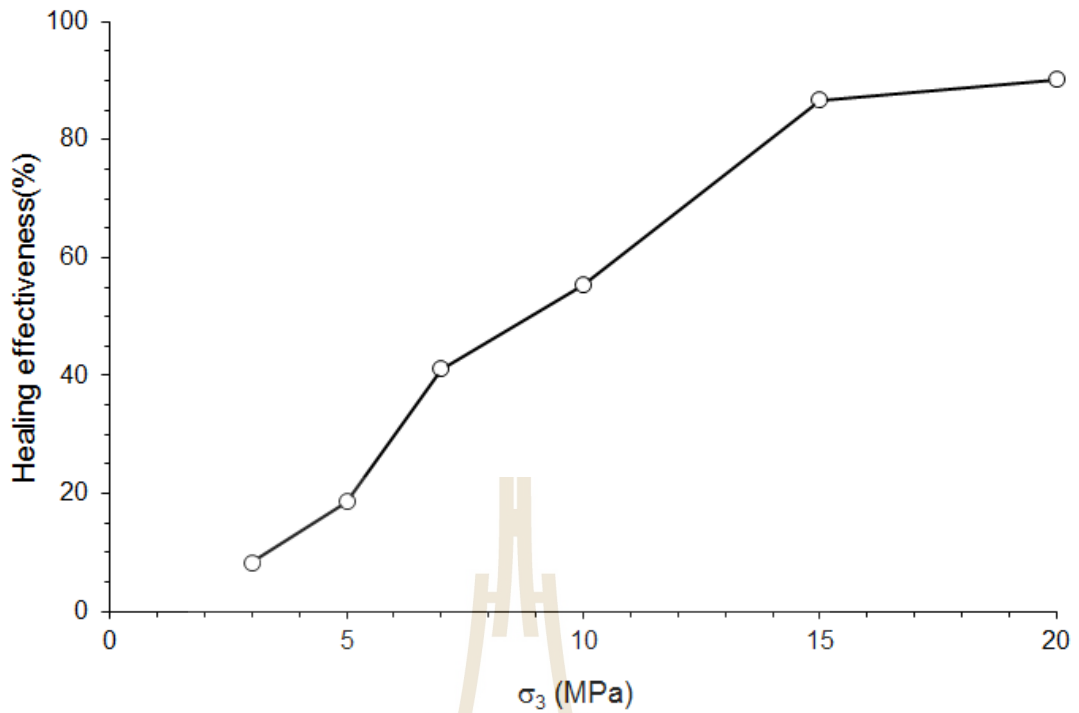
ชุดการทดสอบที่ 3: ผลการทดสอบระบุว่าเมื่อครบกำหนด 21 วัน รอยแตกของเกลือหินไม่เกิดการประสานตัวถึงจะมีการหยดน้ำเกลือบนรอยแตกแล้วก็ตาม เนื่องจากผลึกเกลือหินทั้งสองด้านของระนาบแนวแตกไม่สามารถประกบกันได้ดั้งเดิม จึงไม่เกิดการเชื่อมประสานของผลึกเกลือ (ตารางที่ 4.1)



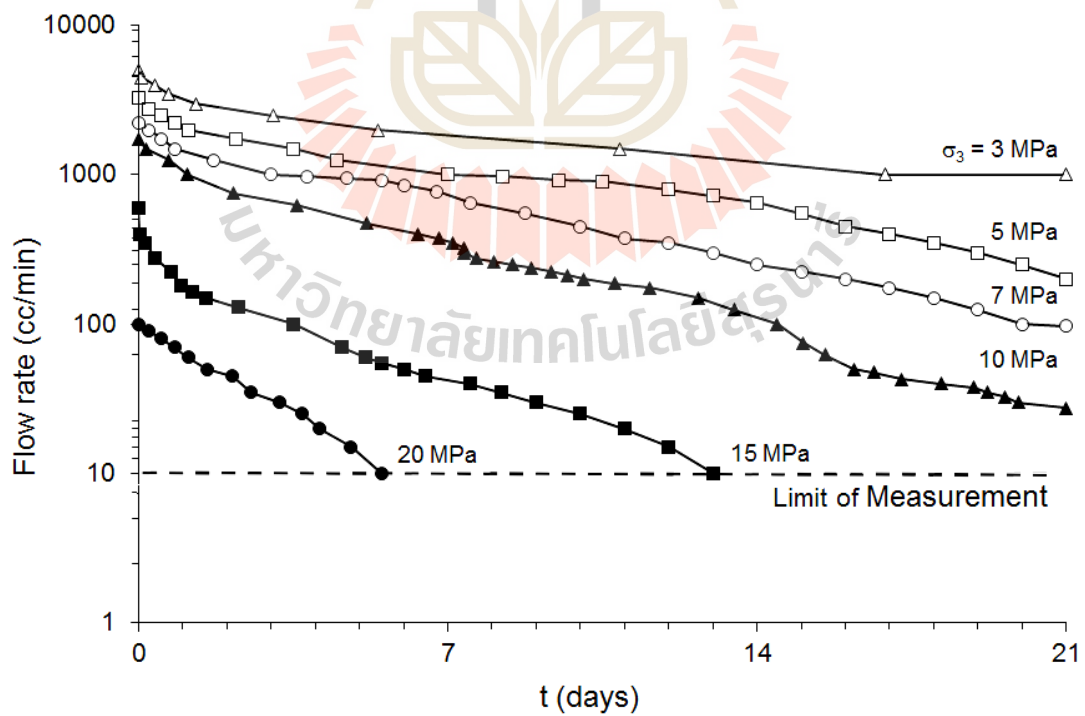
รูปที่ 4.1 เครื่องให้แรงแบบสามแกนจริง (Komenthammasopon, 2014)

ตารางที่ 4.1 ประสิทธิภาพการประสานตัวของรอยแตกที่เกิดจากแรงดึงภายใต้ความเค้นกดล้อมรอบ
ต่างๆ

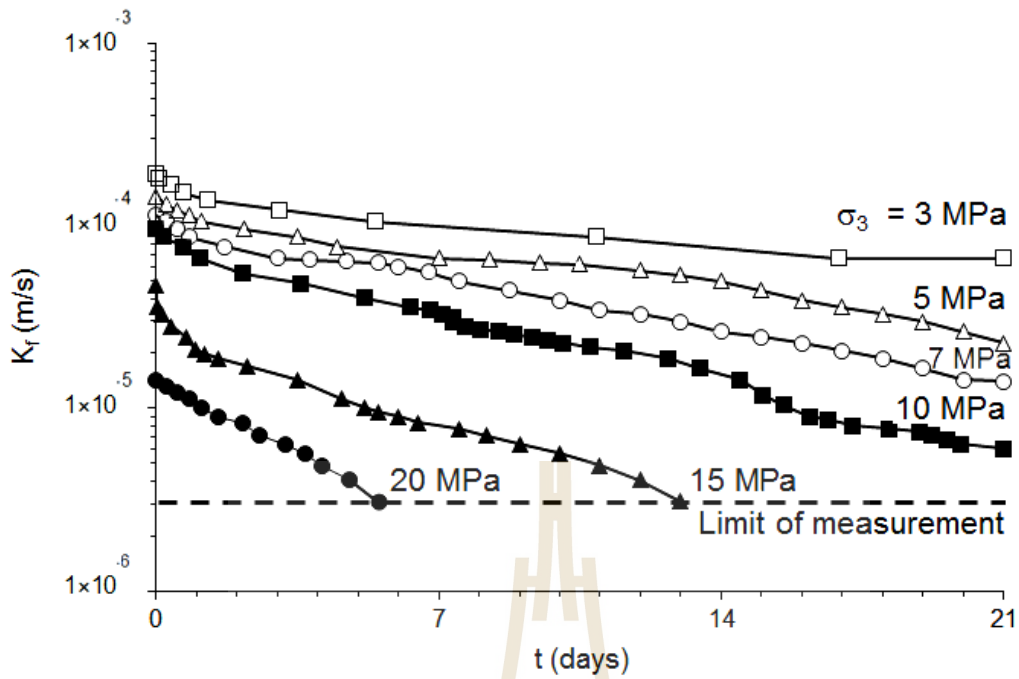
หมายเลข ตัวอย่าง	ชุดการ ทดสอบ	ความ เค้นกด ล้อมรอบ (เมกะ ปาสคาล)	ค่ากำลังรับแรงดึง		ประสิทธิภาพ การประสานตัวของ รอยแตกในเกลือหิน $H_e = [\sigma_H / \sigma_B] \cdot 100$ (%)
			เกลือหินก่อนการ ประสานตัวของ รอยแตก, σ_B (เมกะปาสคาล)	เกลือหินหลังการ ประสานตัวของ รอยแตก, σ_H (เมกะปาสคาล)	
HTF-01	1	3	1.93	0.16	8.33
HTF-02		5	1.99	0.37	18.62
HTF-03		7	2.08	0.85	41.09
HTF-04		10	2.26	1.25	55.36
HTF-05		15	1.85	1.61	86.69
HTF-06		20	2.05	1.85	90.20
HSF-01	2	10	1.87	0.00	0.00
HSF-02		10	1.96	0.00	0.00
HSF-03B	3	20	2.11	0.00	0.00
HSF-04B		20	1.92	0.00	0.00



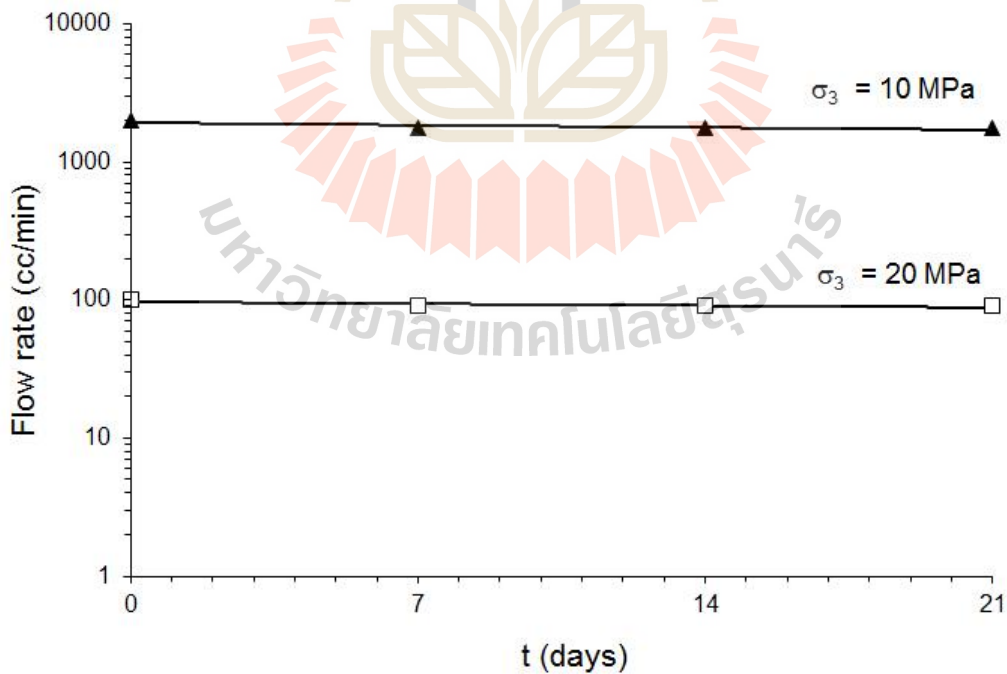
รูปที่ 4.2 ประสิทธิภาพการประสานตัวของเกลื้อหินภายใต้การผันแปรความเค้นกดล้อมรอบ



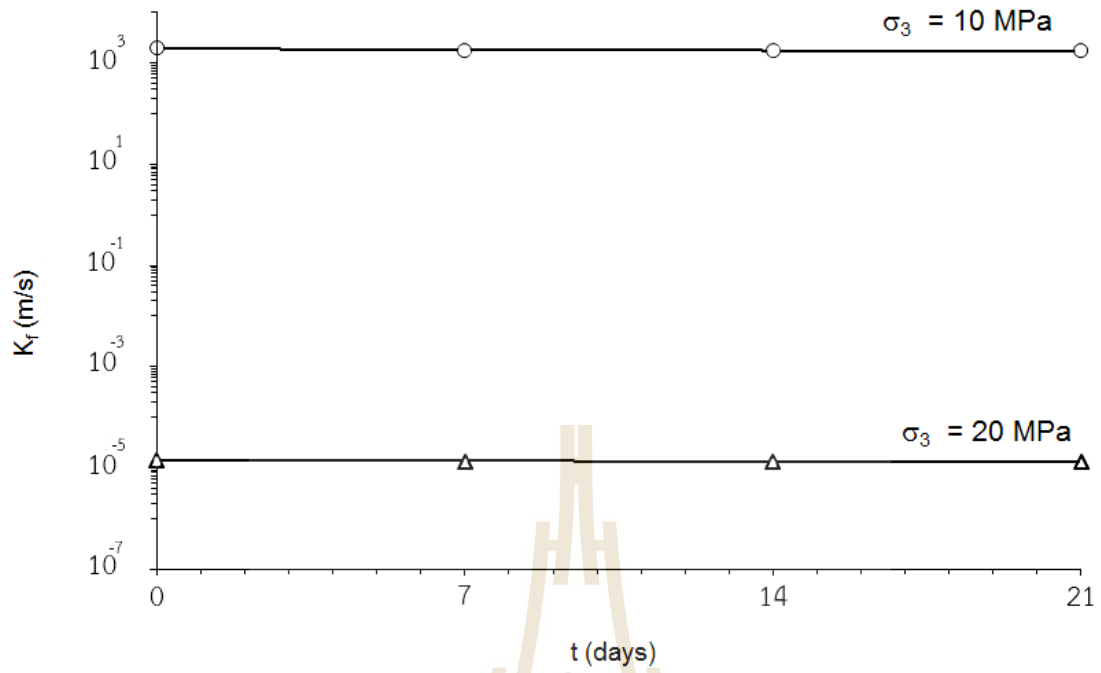
รูปที่ 4.3 อัตราการไหลของรอยแตกที่เกิดจากแรงดึงในฟังก์ชันของเวลา



รูปที่ 4.4 ความซึมผ่านของรอยแตกที่เกิดจากแรงดิ่งในฟังก์ชันของเวลา



รูปที่ 4.5 อัตราของการไหลของรอยแตกแบบเรียบในฟังก์ชันของเวลา



รูปที่ 4.6 การซึมผ่านของรอยแตกแบบเรียบในฟังก์ชันของเวลา

บทที่ 5

การพัฒนาสมการเชิงคณิตศาสตร์

5.1 วัตถุประสงค์

เนื้อหาในบทนี้อธิบายความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ระหว่างความสามารถในการเชื่อมประสาน ค่าความซึมผ่าน และการลดลงของการเปิดเผยขอรอยแตกในฟังก์ชันของความเค้นกดล้อมรอบ และเวลา ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เหล่านี้สามารถใช้คาดคะเนคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ขอรอยแตกหลังจากการเชื่อมประสานที่ระยะเวลาและความเค้นกดล้อมรอบระดับต่างๆ ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการในบทที่ 4 ได้นำมาสอบเทียบเพื่อหาสมการที่เหมาะสมเพื่ออธิบายคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินภายใต้เงื่อนไขต่างๆ

5.2 การสร้างสมการเชิงคณิตศาสตร์

ความเค้นกดที่กระทำบนรอยแตกของเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบการเชื่อมประสานจะถูกกำหนดไม่ให้เกิดจุดยืดหยุ่นของเกลือหินซึ่งมีค่าประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังรับแรงกดในแกนเดียวของเกลือหิน การวิเคราะห์ผลการทดสอบเพื่อสร้างความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ของค่าความสามารถในการเชื่อมประสาน ค่าความซึมผ่าน และการลดลงของการเปิดเผยขอรอยแตกในเชิงเวลาได้ใช้โปรแกรมสถิติ IBM SPSS Statistics 19 (Wendai, 2000) เพื่อกำหนดค่าคงที่เชิงประจักษ์ของสมการ

5.2.1 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการประสานตัวของรอยแตกและความเค้นกดล้อมรอบ

สมการเชิงประจักษ์ที่ใช้คาดคะเนความสามารถในการเชื่อมประสานขอรอยแตกที่เกิดจาก แรงดึงในฟังก์ชันของความเค้นกดล้อมรอบสามารถคำนวณได้จากสมการ

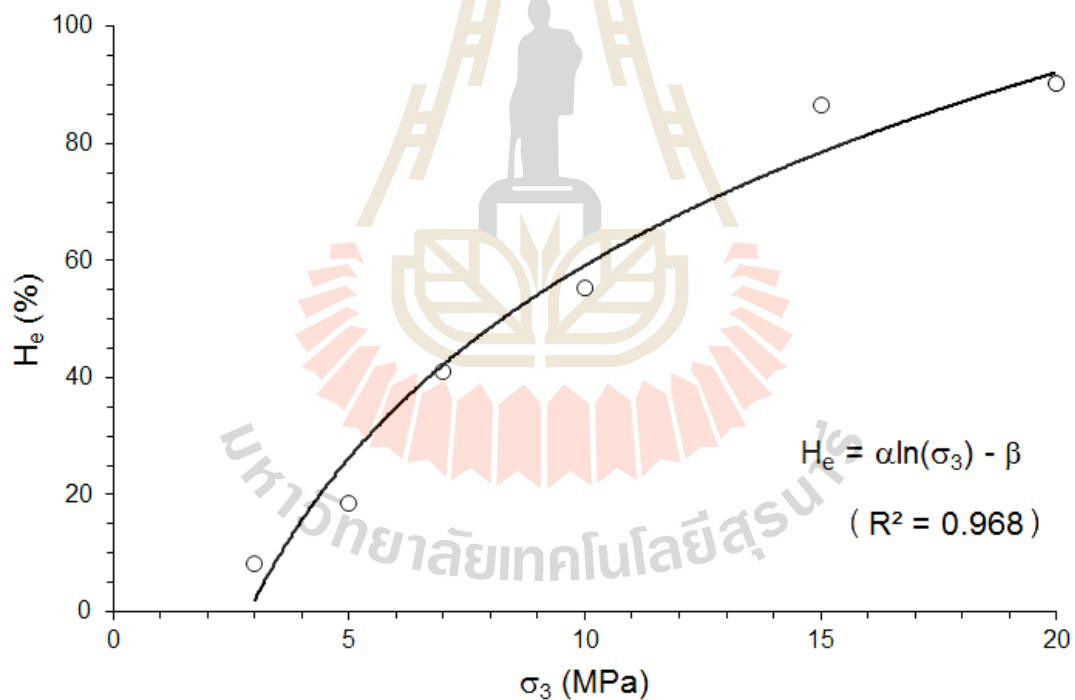
$$H_e = \alpha \ln(\sigma_3) - \beta \quad (5.1)$$

โดยที่ H_e คือ ความสามารถในการเชื่อมประสานของเกลือหิน (เปอร์เซ็นต์)
 σ_3 คือ ความเค้นกดล้อมรอบ (เมกะปาสคาล)
 α, β คือ ค่าคงที่เชิงประจักษ์

สำหรับเกลือหินชุดมหาสารคาม ค่าคงที่เชิงประจักษ์ในสมการ 5.1 สามารถหาได้จากการวิเคราะห์การถดถอยที่ความเค้นกดล้อมรอบเท่ากับ 3, 5, 7, 10, 15 และ 20 เมกะปาสคาล ด้วยการใช้โปรแกรมสถิติ ค่าคงที่ α , β ได้แสดงในตารางที่ 5.1 โดยกำหนดค่าสหสัมพันธ์ (R^2) ของสมการเท่ากับ 0.968 รูปที่ 5.1 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการประสานตัวในฟังก์ชันของเวลา จุดวงกลมคือค่าที่ได้จากการทดสอบ และเส้นคือค่าที่ได้จากสมการที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าคงที่เชิงประจักษ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยของสมการประสิทธิภาพการประสานตัวบนรอยแตกของเกลือหิน

ตัวแปร	ค่าพารามิเตอร์	ค่าสหสัมพันธ์
α	47.544	0.968
β	50.273	



รูปที่ 5.1 ผลการสอบเทียบของประสิทธิภาพการประสานตัวบนรอยแตกของเกลือหินภายใต้การผันแปรความเค้นกดล้อมรอบ 1

5.2.2 สมการความสัมพันธ์ของความชื้นผ่านบนรอยแตกของเกลือหินในฟังก์ชันของเวลา

สมการเชิงประจักษ์ที่ใช้อธิบายการลดลงของค่าความชื้นผ่านของรอยแตกในฟังก์ชันของความเค้นกดล้อมรอบและเวลาสามารถอธิบายได้ด้วยสมการเอ็กโพเนนเชียลดังสมการ

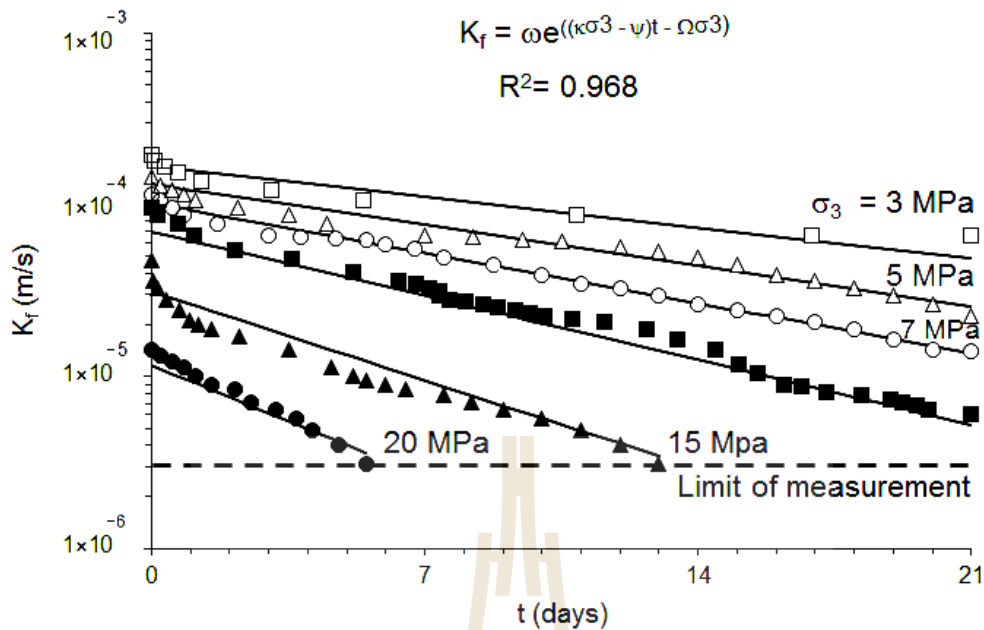
$$K_f = \omega e^{-(\kappa \sigma_3 - \psi)t - \Omega \sigma_3} \quad (5.2)$$

โดยที่ K_f คือ ความชื้นผ่านของรอยแตกในเกลือหิน
 σ_3 คือ ความเค้นกดล้อมรอบ (เมกะปาสคาล)
 t คือระยะเวลาในการทดสอบ (วัน)
 $\omega, \kappa, \psi, \Omega$ คือ ค่าคงที่เชิงประจักษ์

ซึ่งค่าคงที่ดังกล่าวสามารถหาได้จากการวิเคราะห์การถดถอยที่ σ_3 เท่ากับ 3, 5, 7, 10, 15 และ 20 เมกะปาสคาล ตารางที่ 5.2 ได้ค่าสหสัมพันธ์ (R^2) ของสมการเท่ากับ 0.968 รูปที่ 5.2 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการกับผลที่ได้จากการสอบเทียบสมการที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ค่าคงที่เชิงประจักษ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยของสมการความชื้นผ่านบนรอยแตกของเกลือหินภายใต้การผันแปรความเค้นกดล้อมรอบ

ตัวแปร	ค่าพารามิเตอร์	ค่าสหสัมพันธ์
ω	2.481×10^{-4}	0.968
κ	-0.009	
ψ	0.032	
Ω	0.126	



รูปที่ 5.2 ผลการสอบเทียบความซึมผ่านบนรอยแตกของเกลือหินในฟังก์ชันของเวลาภายใต้การผันแปรความเค้นกดล้อมรอบ

5.2.3 สมการความสัมพันธ์การเปิดเผยของรอยแตกในเกลือหินในฟังก์ชันของเวลา

สมการเชิงประจักษ์ที่นำเสนอที่นี่สามารถใช้คาดคะเนการลดลงของรอยแตกเปิดเผยที่เป็นฟังก์ชันเวลาภายใต้การผันแปรความเค้นกดล้อมรอบต่างๆ ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการเอ็กซ์โพเนนเชียลดังสมการ

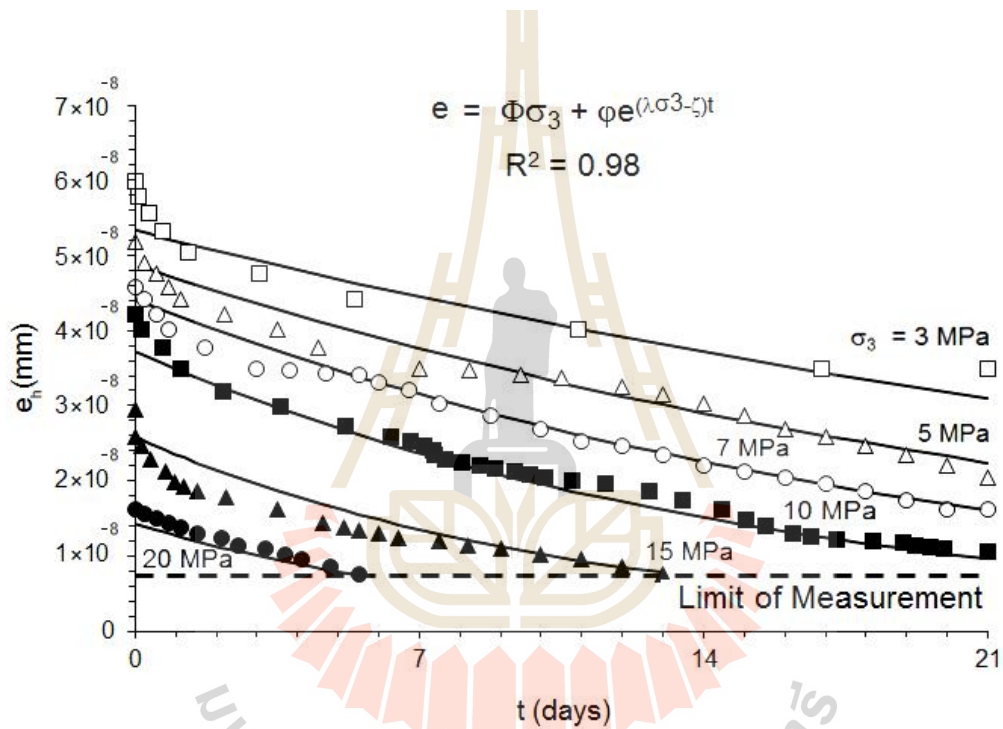
$$e_n = (\Phi \sigma_3 + \varphi) e^{(\lambda \sigma_3 - \zeta)t} \quad (5.3)$$

โดยที่ e_n คือ ระยะรอยแตกเปิดเผยในเกลือหิน
 σ_3 คือ ความเค้นกดล้อมรอบที่เท่ากันทุกทิศทาง (เมกะปาสคาล)
 t คือ ระยะเวลาในการทดสอบ (วัน)
 $\Phi, \varphi, \lambda, \zeta$ คือค่าคงที่เชิงประจักษ์

ตารางที่ 5.3 ได้ค่าสหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.980 รูปที่ 5.3 แสดงการสอบเทียบผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการและผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ค่าคงที่เชิงประจักษ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยของสมการการเปิดเผยอของรอยแตกในเกลือหินภายใต้การผันแปรความเค้นกดล้อมรอบ

ตัวแปร	ค่าพารามิเตอร์	ค่าสัมพัทธ์
Φ	-2.292×10^{-9}	0.980
φ	6.02×10^{-8}	
λ	-0.005	
ζ	0.009	



รูปที่ 5.3 ผลการสอบเทียบการเปิดเผยอของรอยแตกในเกลือหินในฟังก์ชันของเวลาภายใต้การผันแปรความเค้นกดล้อมรอบ

บทที่ 6

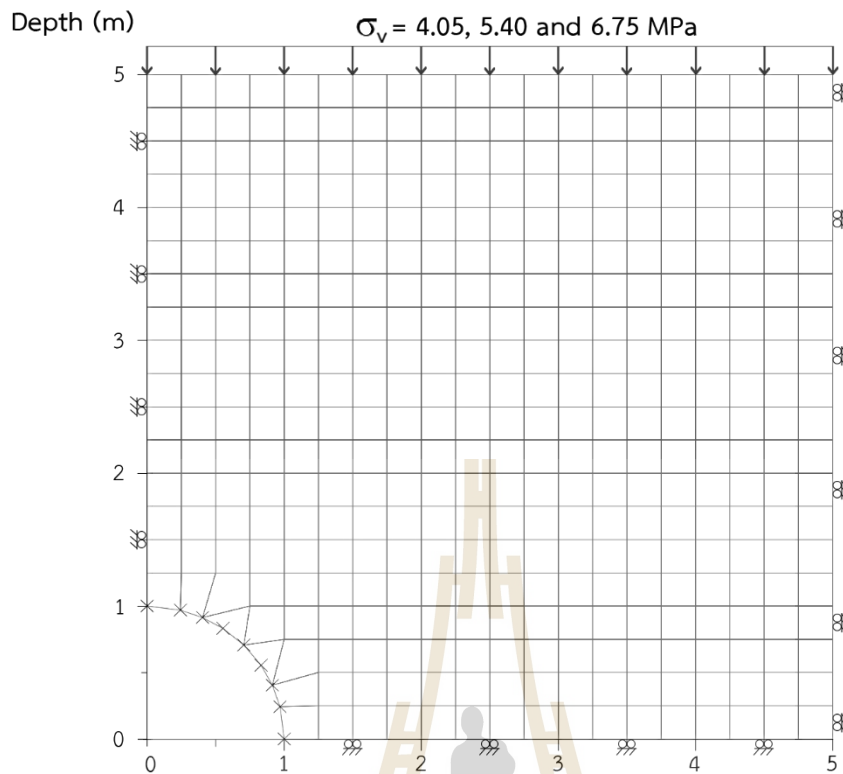
แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

6.1 วัตถุประสงค์

การจำลองหลุมเจาะ (Borehole) ในชั้นเกลือหินได้นำโปรแกรม FLAC 7.0 (Finite difference method) มาใช้ในการจำลอง เพื่อประเมินความเค้นเฉื่อยรอบหลุมเจาะก่อนและหลังการประสานตัวของรอยแตก เพื่อเป็นแนวทางในการประเมินเสถียรภาพบริเวณรอบหลุมเจาะในชั้นเกลือหินหลังจากทำการขุดเจาะและมีการถมกลับของวัสดุถมกลับแล้ว

6.2 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

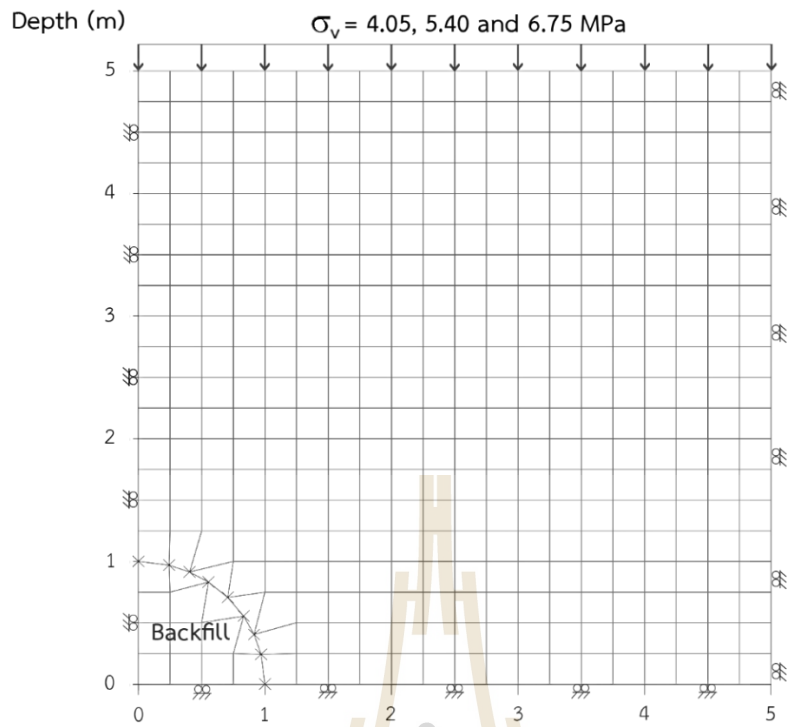
การจำลองหลุมเจาะในชั้นเกลือหินด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ได้ดำเนินการภายใต้การผันแปรระดับความลึกเท่ากับ 150, 200 และ 250 เมตร โดยกำหนดให้ความกว้างของหลุมเจาะเท่ากับ 1 เมตร มวลหินปิดทับเหนือบริเวณเสาค้ำยันถูกจำลองด้วยการให้แรงกระจายแบบสม่ำเสมอผันแปรจาก 4.05, 5.40 ถึง 6.75 เมกะปาสคาล ซึ่งมีค่าสัมพันธ์กับระดับความลึกที่กำหนด รูปที่ 6.1 แสดงโครงข่ายแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ค่าคุณสมบัติของเกลือหินมาจาก Sriapai et al. (2013) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 6.1 ด้วยการนำโปรแกรม FLAC 7.0 มาใช้ในการคำนวณหาค่าความเค้นเฉื่อยที่เกิดขึ้นบริเวณรอบหลุมเจาะหลังการใส่วัสดุถมกลับ (รูปที่ 6.2) โดยระยะเวลาในการถมกลับของวัสดุถมกลับหลังจากการขุดเจาะผันแปรจาก 1 ปี 2 เดือน, 1 ปี 4 เดือน และ 1 ปี 6 เดือน โดยโปรแกรมดังกล่าวสามารถคำนวณค่าความเค้นในแกนหลัก (σ_1) และค่าความเค้นในแกนรอง (σ_2) ดังแสดงในรูปที่ 6.3, 6.4 และ 6.5 ที่ระดับความลึกเท่ากับ 150, 200 และ 250 เมตร ตามลำดับ ผลจากการจำลองสามารถนำมาคำนวณค่าความเค้นเฉื่อยได้ดังแสดงในรูปที่ 6.6, 6.7 และ 6.8 ค่าความเค้นเฉื่อยได้นำมาใช้ในการประเมินการลดลงของค่าความซึมผ่านและระยะเวลาเปิดเผยรอยแตกในเกลือหินที่เกิดขึ้นภายหลังจากการใส่วัสดุถมกลับ ซึ่งสามารถคาดคะเนได้ด้วยการนำค่าดังกล่าวไปแทนค่าในสมการที่นำเสนอในบทที่ 5



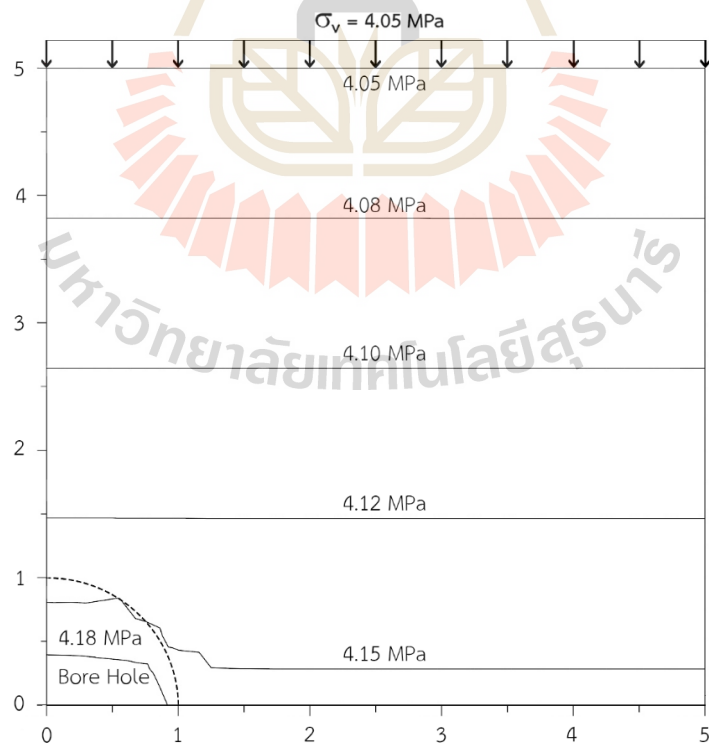
รูปที่ 6.1 โครงข่ายแบบจำลองช่องเหมืองในชั้นเกลือหิน

ตารางที่ 6.1 คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินที่ใช้ในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (Sriapai et. al, 2013)

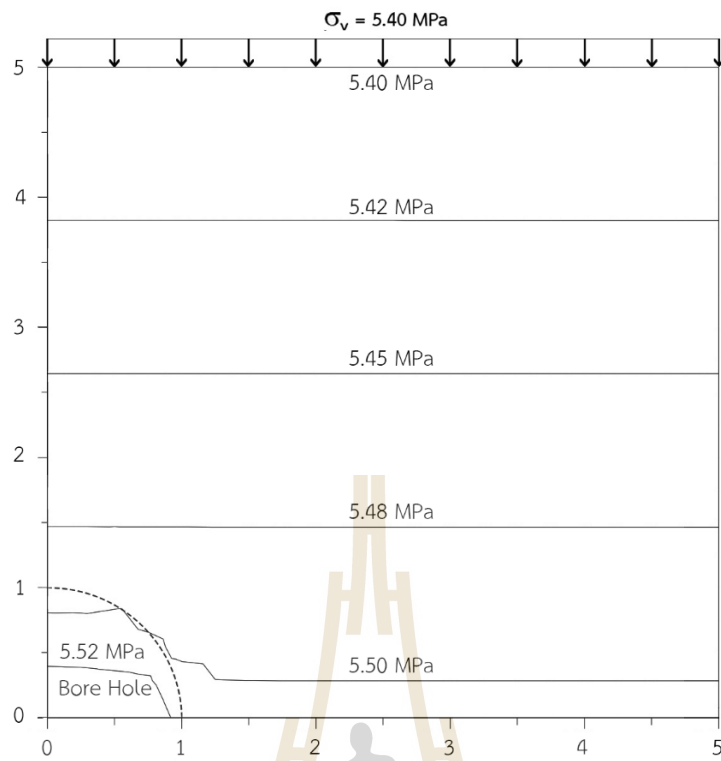
ตัวแปร	ค่าตัวแปร
โมดูลัสของความยืดหยุ่น, E_1 (เมกะปาสคาล)	22,000
โมดูลัสของแรงบีบ, K (เมกะปาสคาล)	35,000
โมดูลัสของแรงเฉือน, G (เมกะปาสคาล)	7,500
อัตราส่วนของปัวซอง, ν	0.35
ความหนาแน่น, γ (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	2,160
ค่าการกระดก δ	31
มุมเสียดทาน ϕ (องศา)	62
แรงดึง σ_c (เมกะปาสคาล)	2
ความหนืด η (ตารางเซนติเมตร/วินาที)	3.1×10^{16}



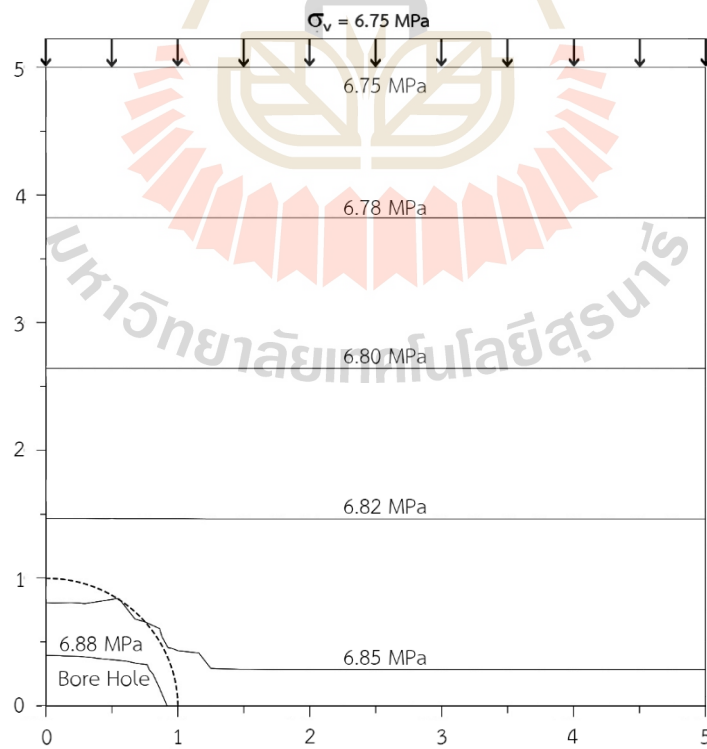
รูปที่ 6.2 โครงข่ายแบบจำลองช่องเหมืองในชั้นเกลือหินที่มีการใส่วัสดุถมกลับ



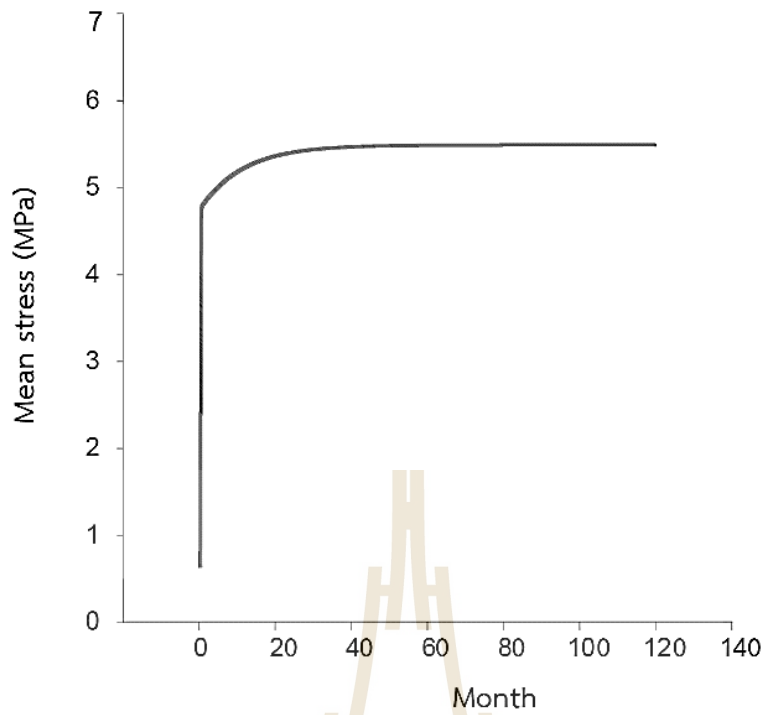
รูปที่ 6.3 ค่าความเค้นหลักในแนวแกน (σ_v) บริเวณรอบหลุมเจาะที่ระดับความลึก 150 เมตร



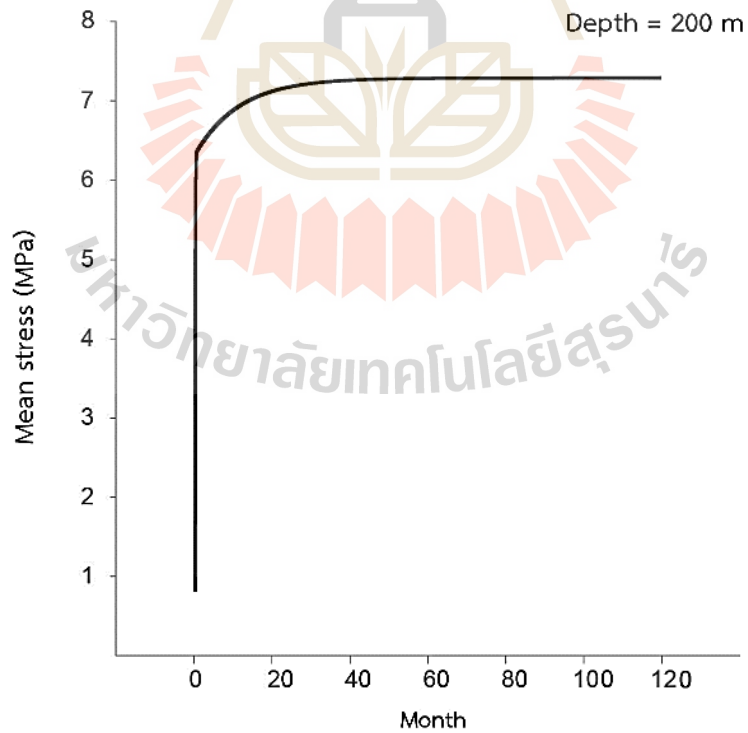
รูปที่ 6.4 ค่าความเค้นหลักในแนวแกน (σ_v) บริเวณรอบหลุมเจาะที่ระดับความลึก 200 เมตร



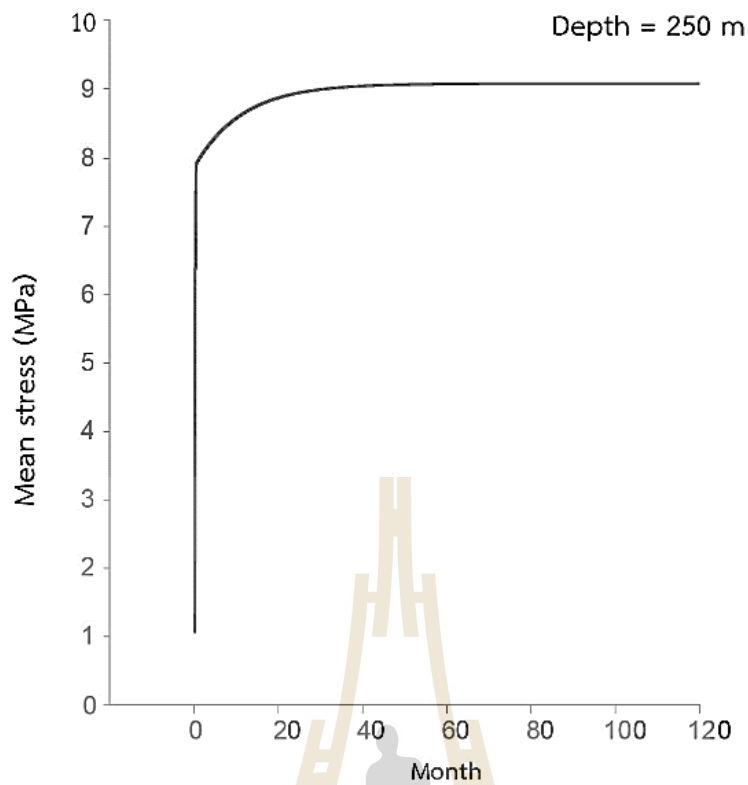
รูปที่ 6.5 ค่าความเค้นหลักในแนวแกน (σ_v) บริเวณรอบหลุมเจาะที่ระดับความลึก 250 เมตร



รูปที่ 6.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉลี่ยรอบหลุมเจาะกับเวลาที่ระดับความลึก 150 เมตร



รูปที่ 6.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉลี่ยรอบหลุมเจาะกับเวลาที่ระดับความลึก 200 เมตร



รูปที่ 6.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉลี่ยรอบหลุมเจาะกับเวลาที่ระดับความลึก 250 เมตร

6.3 ผลการคาดคะเนคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์รอบหลุมเจาะ

ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อหาค่าความเค้นเฉลี่ยที่เกิดขึ้นบริเวณรอบหลุมเจาะระบุว่า เมื่อระดับความลึกเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความเค้นเฉลี่ยรอบหลุมเจาะมีค่าสูงขึ้นดังรูปที่ 6.6, 6.7 และ 6.8 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นจากประมาณ 4.18 ถึง 6.88 ตามลำดับ เมื่อนำค่าความเค้นเฉลี่ยที่เกิดขึ้นบริเวณรอบหลุมเจาะแทนในสมการที่ 5.2 และ 5.3 เพื่อหาค่าความซึมผ่านบนรอยแตกของเกลือหินและค่าระยะเวลาการเปิดเผยของรอยแตกหลังจากทำการถมกลับด้วยวัสดุถมกลับ ณ เวลาต่างๆ ที่ทำการผันแปร พบว่า เมื่อความลึกเพิ่มขึ้นและระยะเวลาหลังจากการถมกลับของวัสดุเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความซึมผ่านของรอยแตกและระยะเวลาการเปิดเผยมีค่าลดลงในเชิงเวลาดังแสดงในตารางที่ 6.2 ถึงตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.2 ค่าความซึมผ่านและระยะเปิดเผยหลังจากมีการถมกลับที่เวลา 1 ปี 2 เดือน

ตัวแปร	150 เมตร	200 เมตร	250 เมตร
ความซึมผ่านของรอยแตก, K_f (เมตร/วินาที)	2.63×10^{-17}	1.25×10^{-19}	5.94×10^{-22}
รอยแตกเปิดเผย, e_n (มิลลิเมตร)	6.69×10^{-14}	2.72×10^{-15}	1.10×10^{-16}

ตารางที่ 6.3 ค่าความซึมผ่านและระยะเปิดเผยหลังจากมีการถมกลับที่เวลา 1 ปี 4 เดือน

ตัวแปร	150 เมตร	200 เมตร	250 เมตร
ความซึมผ่านของรอยแตก, K_f (เมตร/วินาที)	3.98×10^{-19}	9.01×10^{-22}	2.04×10^{-24}
รอยแตกเปิดเผย, e_n (มิลลิเมตร)	9.68×10^{-15}	2.51×10^{-16}	6.46×10^{-18}

ตารางที่ 6.4 ค่าความซึมผ่านและระยะเปิดเผยหลังจากมีการถมกลับที่เวลา 1 ปี 6 เดือน

ตัวแปร	150 เมตร	200 เมตร	250 เมตร
ความซึมผ่านของรอยแตก, K_f (เมตร/วินาที)	6.01×10^{-21}	6.50×10^{-24}	7.02×10^{-27}
รอยแตกเปิดเผย, e_n (มิลลิเมตร)	1.40×10^{-15}	2.31×10^{-17}	3.81×10^{-19}

บทที่ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

เนื้อหาในบทนี้อธิบายประเด็นที่เกี่ยวข้องกับความน่าเชื่อถือของแผนงานในการทดสอบ และความเหมาะสมของผลการทดสอบ การทดสอบที่ได้จากการศึกษาได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยของผู้อื่นภายใต้การทดสอบที่ใกล้เคียงกัน

7.1 สรุปผลการวิจัย

รอยแตกของเกลือหินที่ถูกทำให้แยกออกด้วยแรงดึง ได้นำมาทดสอบการเชื่อมประสาน ภายใต้ความเค้นกดล้อมรอบตามสภาวะเงื่อนไขของเวลาและความเค้นกดล้อมรอบ ผลการทดสอบระบุว่า ความซึมผ่านมีค่าลดลงตามเวลาและระดับความเค้นกดล้อมรอบที่เพิ่มขึ้น หลังจากทดสอบการเชื่อมประสานตัวของเกลือหินภายใต้ความเค้นกดล้อมรอบต่างๆ เป็นเวลา 21 วัน ตัวอย่างหินถูกนำมาทดสอบแบบเส้นบนรอยแตกเดิมอีกครั้ง พบว่าอัตราการรับแรงดึงแบบเส้นมีค่าสูงขึ้นหรือเทียบเท่ากับเกลือหินเดิมก่อนการทดสอบความซึมผ่าน และพบว่ารอยแตกเปิดเผยมีค่าลดลงเมื่อทำการเพิ่มความเค้นกดล้อมรอบที่ใช้ในการเชื่อมประสาน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบที่ดำเนินการโดย Fuenkajorn and Phueakphum (2011)

การทดสอบการเชื่อมประสานของรอยแตกที่เกิดจากการตัดด้วยเลื่อย โดยกำหนดให้ความเค้นกดล้อมรอบที่ระดับ 10 และ 20 เมกะปาสคาล สามารถสรุปได้ว่ารอยแตกที่เกิดจากการตัดด้วยเลื่อยไม่มีการเชื่อมประสานของรอยแตกหลังจากการทดสอบเป็นเวลา 21 วัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบของเกลือหินที่ดำเนินการทดสอบโดย Fuenkajorn and Phueakphum (2011) และสำหรับผลการทดสอบการเชื่อมประสานของรอยแตกที่เกิดจากการตัดด้วยเลื่อยและหยดน้ำเกลือบนรอยแตก ภายใต้ความเค้นกดล้อมรอบที่ระดับ 10 และ 20 เมกะปาสคาล สามารถสรุปได้ว่ารอยแตกไม่มีการเชื่อมประสานกันเหมือนกับการทดสอบชุดที่ II

การจำลองทางคอมพิวเตอร์สามารถอธิบายได้ว่าที่บริเวณรอบๆ หลุมเจาะหลังมีการถล่มกลับของวัสดุถล่มกลับ เมื่อระดับความลึกเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้มีค่าความเค้นเฉื่อยสูงขึ้น จึงทำให้ค่าความซึมผ่านและระยะเวลาเปิดเผยของรอยแตกในเกลือหินมีค่าลดลงในเชิงเวลา

7.2 วิจารณ์ผลการวิจัย

การทดสอบชุดที่ I การเชื่อมประสานของรอยแตกในเกลือหินขึ้นอยู่กับต้นกำเนิดของรอยแตก ถ้าวรอยแตกเกิดจากการแยกออกจากกันหรือการแยกออกของผลึกเกลือ (รอยแตกที่เกิดจากการทำให้แยกออกจากกันด้วยแรงดึง) รอยแตกสามารถเกิดการเชื่อมประสานได้แม้จะอยู่ภายใต้สภาวะ

ความเค้นกดล้อมรอบต่ำ ซึ่งหมายความว่า การเชื่อมประสานมักจะเกิดขึ้นถ้าผลึกเกลือหินทั้งสองด้านของระนาบแนวแตกประกบกันเหมือนก่อนการทำให้แยกออกจากกันด้วยแรงดึง ความสามารถในการซึมผ่านของรอยแตกในเกลือหินมีค่าลดลงในเชิงเวลาเนื่องจากสองปัจจัยหลักคือ (1) การปิดตัวของรอยแตกแบบกายภาพ โดยเมื่อมีการให้แรงความเค้นกดล้อมรอบที่สูงขึ้นทำให้รอยแตกปิดสนิทกันมากขึ้น ส่งผลให้ความซึมผ่านมีค่าลดลงในช่วงระยะเวลาเริ่มต้น (2) การปิดตัวของแนวแตกแบบเคมีเมื่อรอยแตกปิดเข้ามาใกล้จนระนาบรอยแตกเดิมประกบกันจะทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออน เกิดการตกผลึกใหม่ เป็นเหตุผลที่ว่าทำไมความซึมผ่านในช่วงระยะกลางถึงท้ายการทดสอบยังมีค่าที่ลดลงในเชิงเวลา

การทดสอบชุดที่ II การทดสอบนี้สามารถอธิบายได้ว่ารอยแตกที่เกิดจากการตัดด้วยเลื่อยจะไม่เกิดการเชื่อมประสานภายใต้สภาวะความเค้นกดล้อมรอบต่างๆ ซึ่งอาจอยู่ได้สมมติฐานที่ว่า การเชื่อมประสานของรอยแตกที่ไม่ได้เกิดจากการแยกกันของระนาบแนวแตกของเกลือหิน ไม่สามารถทำให้เกิดการประสานตัวเนื่องจากระนาบของแนวแตกไม่สามารถประกบกันคืนได้ดังเดิม เนื่องจากถูกใบเลื่อยตัดออกไป ความซึมผ่านมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความเค้นกดล้อมรอบแก่ตัวอย่างซึ่งเป็นการปิดตัวแบบกายภาพ แต่การปิดตัวของรอยแตกแบบเคมีไม่เกิดขึ้นเนื่องจากรอยแตกในเกลือหินไม่สามารถประกบกันคืนได้ดังเดิม จึงไม่เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนและตกผลึกใหม่

การทดสอบชุดที่ III การทดสอบนี้สามารถอธิบายได้ว่ารอยแตกที่เกิดจากการตัดด้วยเลื่อยที่มีการหยดน้ำเกลือบนรอยแตกจะไม่เกิดการเชื่อมประสานเกิดขึ้นภายใต้สภาวะการทดสอบต่างๆ ในการทดสอบนี้ ซึ่งอาจอยู่ได้สมมติฐานเดียวกับการทดสอบชุดที่ 2 ที่ว่าการเชื่อมประสานของรอยแตกที่ไม่ได้เกิดจากการแยกกันของระนาบแนวแตกของเกลือหินไม่สามารถทำให้เกิดการประสานตัว เนื่องจากระนาบของแนวแตกไม่สามารถประกบกันคืนได้ดังเดิม

7.3 ข้อเสนอแนะ

ความไม่แน่นอนและความบกพร่องของการตรวจสอบงานวิจัยและผลที่กล่าวมาข้างต้นจะนำไปสู่ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาต่อไปนี้

- ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบในการวิจัยมีขนาดเล็ก ควรมีการทดสอบบนตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่เพื่อยืนยันผลการวิจัย
- ควรจะมีการประเมินผลกระทบของการให้แรงในแต่ละทิศทางที่ต่างกัน
- ควรจะมีการประเมินผลกระทบของความชื้นต่อการประสานตัวของรอยแตกในเกลือหิน

บรรณานุกรม

- Allemandou, X. and Dusseault, M.B. (1993). Healing processes and transient creep of salt rock, Anagnostopoulos, A. (eds.), **Geotechnical Engineering of Hard Soils - Soft Rocks**, Vol. 1-3, A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, USA, pp. 1581-1590.
- Brodsky, N.S. and Munson, D.E. (1994). Thermomechanical damage recovery parameters for rock salt from WIPP, *Rock Mechanics: Models and Measurements, Challenges from Industry*, In **Proceedings of the 1st North American Rock Mechanics Symposium** (pp.731-740). University of Texas at Austin, Austin, June 1994, A. A. Balkema, Rotterdam.
- Chan, K.S., Bodner, S.R., Fossum, A.F., and Munder, D.E. (1995). Constitutive representative of damage healing in WIPP salt. In **Proceedings of the 35th U.S. Symposium, on Rock Mechanics** (pp. 485-490). A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- Chan, K.S., Bodner, S.R., Fossum, A.F., and Munson, D.E. (1996a). Inelastic flow behavior of argillaceous salt. **International Journal of Damage Mechanics**. 5: 292-314.
- Chan, K.S., Munson, D.E., Bodner, S.R., and Fossum, A.F. (1996). Cleavage and creep fracture of rock salt. **Acta Materialia**. 44: 3553-3565.
- Chan, K.S., Munson, D.E., Fossum, A.F., and Bodner, S.R. (1998). A Constitutive model for representing coupled creep, fracture and healing in rock salt. In **Proceedings of the Fourth Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 211-234). The Pennsylvania State University, June 17-18, 1996, Clausthal-Zellerfeld, Trans Tech Publications, Germany.
- Fuenkajorn, K. and Kenkhunthod, N. (2010). Influence of loading rate on deformability and compressive strength of three Thai sandstones. **Geotechnical and Geological Engineering**, 28(5), 707-715.
- Fuenkajorn, K. and Serata, S., 1992, Geohydrological integrity of CAES in rock salt, Present at the Second International Conference on Compressed-Air Energy Storage Electric Power Research Institute, July 7-9, 1992, San Francisco, CA.
- Itasca, 2011, **F.L.A.C. 7.0**: User Manual, Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, MN, USA.

- Miao, S., Wang, M.L., and Schreyer H.L. (1995). Constitutive Models for healing of materials with application to compaction of crushed rock salt. **Journal of engineering mechanics, ASCE.** 10 (121), pp. 1122-1129.
- Munson, D.E., Chan, K.S. and Fossum, A.F. (1999). Fracture and healing of rock salt related to salt caverns. **Meeting paper, April 14-16, 1999. Solution Mining Research Institute, Las Vegas, 21 p.**
- Peach, C.J. (1991). Influence of deformation on the fluid transport properties of salt rocks. **Thesis, University of Utrecht, Holland.**
- Phueakphum, D. (2003). Assessment of mechanical performance of rock salt formations for nuclear waste repository in northeastern Thailand, **M.S. thesis, Suranaree University of Technology, Thailand.**
- Renard, F. (1999). Pressure solution and crack healing and sealing, Geology related to nuclear waste disposal. **Institute of Geology and Department of Physics.** Roztez, Norway: Czech Republic. 32 p.
- Sriapai, T., Walsri, C., and Fuenkajorn, K. (2013). True-triaxial compressive strength of Maha Sarakh m salt. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,** a61, 256-265.
- Stormont, J.C. (1990). Discontinuous behavior near excavations in a bedded salt formation. **International Journal of Mining and Geological Engineering.** 8: 35-36.
- Stormont, J.C., Daemen J.J.K., and Desai, C.S. (1992). Prediction of dilation and permeability changes in rock salt, **International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics.** 16(8): 545-569.
- Wendai, L. (2000). Regression analysis, linear regression and probity regression in 13 chapters. **SPSS for windows: statistical analysis. Publishing House of Electronics Industry.** Beijing.

ประวัตินักวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เดโช เผือกภูมิ เกิดเมื่อวันที่ 7 มิถุนายน 2520 ที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี จบการศึกษาปริญญาเอกจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในสาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี ในปี พ.ศ. 2552 หลังจากจบการศึกษาระดับปริญญาเอกได้ทำงานในตำแหน่งนักวิจัย สังกัดหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปัจจุบันมีตำแหน่งเป็นอาจารย์ประจำอยู่ที่สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา มีความชำนาญพิเศษทางด้านกลศาสตร์ของหินในเชิงการทดลอง การออกแบบและการวิเคราะห์โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขทั้งงานที่เกี่ยวข้องกับเหมืองบนผิวดินและเหมืองใต้ดิน อีกทั้งมีความสนใจในการการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุเพื่อใช้ในการอุดช่องเหมืองและงานในการבודอัดเพื่องานทางด้านวิศวกรรมธรณี มีสิ่งตีพิมพ์ระดับชาติและนานาชาติมากกว่า 20 บทความ ทั้งวารสาร นิตยสาร และบทความการประชุมระดับชาติและนานาชาติ เป็นผู้แต่งตำรา “ธรณีเทคนิค (Geotechniques)” ที่ใช้ในการเรียนการสอนระดับปริญญาตรี

