



รหัสโครงการ SUT7-719-59-24-40

## รายงานการวิจัย

การศึกษาการประสานตัวของรอยแตกในชั้นเกลือหินเพื่อลดผลกระทบ  
ของการรั่วซึมในเหมืองเกลือและเหมืองโพแทช

(Study of Fracture Healing in Rock Salt as Applied to  
Leakage Minimization in Salt and Potash Mines)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-719-59-24-40

## รายงานการวิจัย

การศึกษาการประสานตัวของรอยแตกในชั้นเกลือหินเพื่อลดผลกระทบ  
ของการรั่วซึมในเหมืองเกลือและเหมืองโพแทช

(Study of Fracture Healing in Rock Salt as Applied to  
Leakage Minimization in Salt and Potash Mines)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เดโช เผือกภูมิ

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

ศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เฟื่องขจร

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2559-2560

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2560

## กิตติกรรมประกาศ

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

ผู้วิจัย

กันยายน 2560



## บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ เพื่อศึกษาความสามารถในการเชื่อมประสานของรอยแตกของเกลือหินที่ได้รับผลกระทบจากสภาวะความเค้น ชนิดของรอยแตก เวลา และอุณหภูมิ ในการศึกษานี้ได้ทดสอบการเชื่อมประสานของรอยแตกภายใต้ความเค้นกดตั้งฉากจาก 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 MPa เป็นระยะเวลา 56 วัน และภายใต้ความเค้นล้อมรอบที่เท่ากันทุกทิศทางเท่ากับ 5 และ 10 MPa เป็นระยะเวลา 0, 6, 12, 24, 72, 120 และ 168 ชั่วโมง อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบสำหรับการเชื่อมประสานภายใต้ความเค้นตั้งฉากคือ 25, 70, 150 และ 200°C และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบการเชื่อมประสานภายใต้ความเค้นล้อมรอบที่เท่ากันทุกทิศทางคือที่อุณหภูมิห้อง และ 200°C คลื่นอัลตราโซนิคได้ถูกตรวจวัดบนรอยแตกภายใต้ความเค้นกดตั้งฉากทุก 7 วัน จนถึง 56 วัน การทดสอบกำลังรับแรงกดแบบจุดกดได้ถูกกระทำบนรอยแตกหลังการเชื่อมประสานภายใต้ความเค้นกดตั้งฉาก และการทดสอบกำลังรับแรงกดแบบเส้นได้ถูกกระทำบนรอยแตกภายใต้ความเค้นล้อมรอบ เพื่อทำการประเมินประสิทธิภาพการเชื่อมประสานของรอยแตกในเกลือหิน ผลการศึกษาระบุว่ารอยแตกจากการแยกของผลึกหรือรอยแตกจากการตัดด้วยเลื่อยยังคงแยกออกจากกันโดยที่ไม่มี การเชื่อมประสานแต่อย่างใด โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าผิวรอยแตกเต็มไปด้วยสิ่งเจือปนต่างๆ สำหรับรอยแตกแบบการทำให้แยกออกด้วยแรงดึงจะมีความสามารถในการเชื่อมประสานเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นและเวลาเพิ่มขึ้น ความเร็วคลื่นบนตัวอย่างเกลือหินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 7 วันแรกของการทดสอบ และเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น สำหรับการเชื่อมประสานภายใต้ความเค้นล้อมรอบที่เท่ากันทุกทิศทาง ผลการศึกษาระบุว่าความสามารถในการเชื่อมประสานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการเชื่อมประสานและความเค้นล้อมรอบเพิ่มขึ้น และอุณหภูมิทำให้ความสามารถในการเชื่อมประสานเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

## Abstract

The objective of this study is to assess the healing effectiveness of rock salt fractures as affected by the stress conditions, fracture types, times and temperatures. The effort involves healing tests under constant axial stresses from 0.5, 1.0, 1.5 and 2.0 MPa within 56 days and hydrostatic stresses from 5 and 10 MPa within 0, 6, 12, 24, 72, 120 and 168 hours. The temperatures are varied from 25, 70, 150 and 200°C for healing under uniaxial stresses and are ambient and 200°C for healing under hydrostatic stresses tests. The ultra-sonic wave is monitored on healed fractures under axial stresses for every 7 days throughout 56 days. The point load tests on the healed fractures under axial stresses and line load tests on healed fracture under hydrostatic stresses are performed to assess the mechanical performance of the fractures after healing. The results indicate that the fractures formed by separation of inter-crystalline boundaries or saw-cut fractures remain separable with no healing. In particular, if the fracture surface is coated with any inclusions, healing will not occur. For tension-induced fracture, the healing effectiveness increases with increasing stresses and time. The wave velocity of the rock salt increases rapidly during the first 7 days, and after that the P-wave slightly increases steadily with time. For healing under hydrostatic stresses, the results indicate that healing effectiveness tends to increase with increasing healing time and hydrostatic stresses. Temperatures slightly increase the healing effectiveness.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	4
1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	4
<b>บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>7</b>
2.1 การเชื่อมประสานของรอยแตกในเกลือหิน.....	7
2.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการประสานตัวของรอยแตก.....	10
<b>บทที่ 3 การเตรียมตัวอย่างหิน.....</b>	<b>13</b>
<b>บทที่ 4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....</b>	<b>19</b>
4.1 วัตถุประสงค์.....	19
4.2 วิธีการทดสอบ.....	19
4.2.1 การเชื่อมประสานภายใต้ความเค้นกดตั้งฉาก.....	19
4.2.2 การเชื่อมประสานภายใต้ความเค้นล้อมรอบที่เท่ากันทุกทิศทาง.....	23

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลการทดสอบ.....	26
4.3.1 ผลการทดสอบการเชื่อมประสานภายใต้ความเค้นกดตั้งฉาก.....	26
4.3.2 ผลการทดสอบความเร็วคลื่น.....	28
4.3.3 ผลการทดสอบการเชื่อมประสานภายใต้ความเค้นล้อมรอบที่เท่ากัน ทุกทิศทาง.....	33
4.4 วิเคราะห์และสรุปผล.....	36
<b>บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....</b>	<b>37</b>
5.1 วัตถุประสงค์.....	37
5.2 การพัฒนาเกณฑ์ความสามารถในการเชื่อมประสาน.....	37
5.2.1 เกณฑ์การเชื่อมประสานภายใต้ความเค้นกดตั้งฉาก.....	37
5.2.2 เกณฑ์การเชื่อมประสานภายใต้ความเค้นล้อมรอบที่เท่ากันทุกทิศทาง.....	38
5.3 การประยุกต์ใช้ (Application).....	40
<b>บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต.....</b>	<b>45</b>
6.1 วิเคราะห์ผลการวิจัย.....	45
6.2 สรุปผลการวิจัย.....	46
<b>บรรณานุกรม.....</b>	<b>49</b>
<b>ประวัตินักวิจัย.....</b>	<b>53</b>

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	ตัวอย่างเกลือหินทรงกระบอกสำหรับทดสอบการเชื่อมประสานของรอยแตกภายใต้ความเค้นกดตั้งฉากที่อุณหภูมิห้อง.....	17
3.2	ตัวอย่างเกลือหินทรงกระบอกสำหรับทดสอบการเชื่อมประสานของรอยแตกภายใต้ความเค้นกดตั้งฉากที่อุณหภูมิ 70, 150 และ 200°C.....	18
3.3	ตัวอย่างเกลือหินรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับทดสอบการเชื่อมประสานของรอยแตกภายใต้ความเค้นล้อมรอบที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 200°C.....	18
4.1	ปัจจัยสำหรับทดสอบการเชื่อมประสานของรอยแตกในเกลือหิน.....	20
4.2	ผลการทดสอบความสามารถในการเชื่อมประสานของตัวอย่างเกลือหินภายใต้อุณหภูมิห้อง.....	27
4.3	ผลการทดสอบความสามารถในการเชื่อมประสานของตัวอย่างเกลือหินภายใต้อุณหภูมิสูง...	27
4.4	ผลการทดสอบความเร็วคลื่นบนตัวอย่างเกลือหินภายหลังจากทดสอบการเชื่อมประสานภายใต้อุณหภูมิสูง.....	31
4.5	ผลการทดสอบความสามารถในการเชื่อมประสานภายใต้ความเค้นกดที่เท่ากันทุกทิศทาง...	34





## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การทดสอบการประสานตัวของรอยแตกในเกลือหินด้วยการให้แรงแบบคงที่ในแนวแกน.....	8
2.2 การทดสอบการประสานตัวของรอยแตกในเกลือหินด้วยการให้แรงแบบคงที่ในแนวรัศมีแบบผิวขรุขระและแบบผิวเรียบ.....	8
2.3 รอยแตกผิวขรุขระสำหรับการทดสอบการให้แรงแบบคงที่ในแนวรัศมีและตัวอย่างหลังการทดสอบการให้แรงแบบคงที่ในแนวรัศมี.....	9
2.4 ค่าความเค้นเริ่มต้นในแนวนอนในฟังก์ชันของค่าสถานะเสถียรของรอยแตก.....	11
2.5 ความเร็วของคลื่นในฟังก์ชันของเวลาของเกลือหินที่อุณหภูมิ 50 และ 70°C ภายใต้ความชื้นคงที่.....	12
3.1 ลักษณะของรอยแตกเรียบและรอยแตกขรุขระ.....	14
3.2 รอยแตกเรียบจากการตัดด้วยเลื่อย.....	14
3.3 รอยแตกขรุขระจากการทดสอบกำลังรับแรงกดแบบจุด.....	15
3.4 ตัวอย่างหินรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	15
3.5 การจำลองรอยแตกขรุขระด้วยการให้แรงกดแบบเส้นขนานไปตามความยาวของแท่งตัวอย่างรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	16
4.1 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบการเชื่อมประสานภายใต้ความเค้นกดตั้งฉากที่อุณหภูมิห้อง.....	21
4.2 อุปกรณ์ให้ความร้อนสำหรับเพิ่มอุณหภูมิแก่ตัวอย่างเกลือหินระหว่างการทดสอบ.....	22
4.3 การพันสายเทปให้ความร้อนและฉนวนกันความร้อนรอบตัวอย่างเกลือหินเพื่อรักษาอุณหภูมิให้คงที่ตลอดระยะเวลาการทดสอบ.....	22
4.4 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบการเชื่อมประสานภายใต้ความเค้นกดตั้งฉากที่อุณหภูมิสูง.....	23
4.5 โครงกดทดสอบในสามแกน.....	24
4.6 ขดลวดให้ความร้อนที่ถูกติดตั้งลงบนแผ่นเหล็ก.....	23
4.7 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบการเชื่อมประสานภายใต้อุณหภูมิสูงที่โครงกดทดสอบในสามแกน	25
4.8 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ.....	26
4.9 การทดสอบกำลังรับแรงกดแบบจุดบนตัวอย่างรอยแตกภายหลังทดสอบการเชื่อมประสาน.	27
4.10 ความสามารถในการเชื่อมประสานของรอยแตกแบบตั้งภายใต้อุณหภูมิห้อง.....	29
4.11 ความสามารถในการเชื่อมประสานของรอยแตกแบบตั้งภายใต้อุณหภูมิสูง.....	29
4.12 การตรวจวัดความเร็วคลื่นบนตัวอย่างเกลือหินด้วยคลื่นอัลตราโซนิค.....	30

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 ความเร็วคลื่นปฐมภูมิในฟังก์ชันของเวลาบนตัวอย่างเกลือหินภายหลังทดสอบการประสาน ตัวอย่างได้ความเค้นกดตั้งฉากเท่ากับ 0.5 MPa ที่อุณหภูมิสูง.....	32
4.14 ความเร็วคลื่นปฐมภูมิในฟังก์ชันของเวลาบนตัวอย่างเกลือหินภายหลังทดสอบการประสาน ตัวอย่างได้ความเค้นกดตั้งฉากเท่ากับ 0.5-2 MPa ที่อุณหภูมิห้อง.....	32
4.15 ความสามารถในการเชื่อมประสานในฟังก์ชันของเวลาบนตัวอย่างตัวอย่างเกลือหินภายหลัง ทดสอบการประสานตัวอย่างได้ความเค้นล้อมรอบเท่ากับ 5 และ 10 MPa ที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิสูง.....	35
4.16 ความสามารถในการเชื่อมประสานในฟังก์ชันของอุณหภูมิบนตัวอย่างตัวอย่างเกลือหิน ภายหลังทดสอบการประสานตัวอย่างได้ความเค้นล้อมรอบเท่ากับ 5 และ 10 MPa ที่ อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูง.....	35
5.1 ความสามารถในการเชื่อมประสานของรอยแตกขรุขระภายใต้ความเค้นกดตั้งฉากในฟังก์ชัน ของเวลา.....	37
5.2 ความสามารถในการเชื่อมประสานของรอยแตกขรุขระภายใต้ความเค้นล้อมรอบที่ อุณหภูมิห้องในฟังก์ชันของเวลา.....	39
5.3 ความสามารถในการเชื่อมประสานของรอยแตกขรุขระภายใต้ความเค้นล้อมรอบที่ อุณหภูมิสูงในฟังก์ชันของเวลา.....	40
5.4 ความเค้นรอบโพรงเกลือและรอยแตกที่เกิดขึ้นในสภาวะความดันต่ำสุด.....	41
5.5 ความสามารถในการเชื่อมประสานของรอยแตกภายใต้ความเค้นกดในแนวตั้งฉากในฟังก์ชัน ของการผันแปร $r/a$ .....	43
5.6 ความสามารถในการเชื่อมประสานของรอยแตกภายใต้ความเค้นล้อมรอบที่เท่ากันทุก ทิศทางในฟังก์ชันของการผันแปร $r/a$ .....	43

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัญหาที่วิศวกรต้องเผชิญอยู่เสมอในการก่อสร้างโครงสร้างทางวิศวกรรมที่อยู่ใต้ดิน โดยเฉพาะการขุดเจาะในชั้นเกลือหินเพื่อการทำเหมืองเกลือและเหมืองโปแตสใต้ดิน ได้แก่ รอยแตกหรือรอยร้าวที่อยู่ในชั้นเกลือหินที่เกิดขึ้นจากการขุดเจาะหรือการพังทลาย ซึ่งรอยแตกดังกล่าวอาจส่งผลให้เกิดความไม่มีเสถียรภาพและการรั่วซึมของน้ำบาดาลเข้าสู่ช่องเหมืองในขณะดำเนินการและหลังจากการทำเหมืองสิ้นสุดลง

การประสานตัวของรอยแตกมีความสำคัญในเชิงธรณีวิทยา เพราะการประสานตัวของรอยแตกเป็นกระบวนการที่ควบคุมการไหลของของเหลวในชั้นเปลือกโลก โดยความเสียหายหรือการแตกหักในชั้นเกลือหินสามารถประสานตัวเป็นปกติได้ทั้งในสภาวะ Hydrostatic และ Non-hydrostatic เมื่อรอยแตกเริ่มปิด ความสามารถในการซึมผ่านจะลดลงได้หลายระดับตามขนาดของรอยแตก (Renard, 1999) รอยแตกในชั้นเกลือหินที่มีความสามารถประสานตัวเองได้ส่งผลให้บริเวณรอยแตกมีค่าความซึมผ่านลดลง ซึ่งเป็นอีกหนึ่งในข้อได้เปรียบของเกลือหินที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นชั้นหินกักเก็บ เช่น สารเคมีที่เป็นอันตราย ก๊าซธรรมชาติ และอากาศอัดสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น

ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษารายละเอียดของการประสานตัวของรอยแตกในเกลือหินภายใต้อุณหภูมิในระดับต่างๆ กัน เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของการทดสอบเกี่ยวกับสถานะของความเค้น ชนิดของรอยแตกของเกลือหิน อุณหภูมิ และเวลา เพื่อที่จะสามารถนำไปประเมินเพื่อหาวิธีป้องกันการไหลเข้าของน้ำบาดาลหรือสารเคมี ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมบริเวณโดยรอบ และสร้างความเสียหายให้กับอุตสาหกรรมเหมืองแร่โดยเฉพาะเหมืองเกลือและเหมืองโปแตสใต้ดิน

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารายละเอียดของการประสานตัวของรอยแตกของเกลือหินในห้องปฏิบัติการ โดยมีปัจจัยในการศึกษาคือความเค้นกดที่ตั้งฉากกับรอยแตก ความเค้นล้อมรอบอุณหภูมิ และเวลาเป็นตัวแปรสำคัญประการหนึ่งที่มีผลกระทบต่อกระบวนการประสานตัวของรอยแตก ซึ่งความสามารถในการประสานตัวของรอยแตกของเกลือหินจะประเมินจากค่าดัชนีจุดกด (Point load strength index test) บนรอยแตกที่เกิดการประสานตัวแล้ว และความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกที่ส่งผ่านรอยแตกของเกลือหินภายหลังทดสอบการประสานตัว

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเป็นเกลือหินจากภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm
- 2) การทดสอบการเชื่อมประสานตัวของรอยแตกของตัวอย่างหินได้ดำเนินการในสภาวะแห้ง โดยใช้น้ำหนักกดทับและความเค้นล้อมรอบบนตัวอย่างหินสำหรับการทดสอบการเชื่อมประสาน
- 3) การพิจารณารอยแตกในหินพิจารณาเฉพาะ (1) รอยแตกผิวเรียบ และ (2) รอยแตกผิวขรุขระ
- 4) ในการทดสอบกำลังการประสานตัวมีการศึกษาภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 4 ระดับ คือ อุณหภูมิห้องที่ 28-30°C, 70°C, 150°C และ 200°C เพื่อเสริมความเข้าใจที่เกี่ยวกับผลกระทบของอุณหภูมิ

### 1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและระยะเวลาที่นานขึ้นในการประสานตัวของรอยแตกในเกลือหินอาจมีผลทำให้การประสานตัวของรอยแตกมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้โครงสร้างทางวิศวกรรมใต้ดินที่อยู่ในชั้นเกลือหินมีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากการประสานตัวของรอยแตกในเกลือหินภายใต้อุณหภูมิสูง และศึกษาความสามารถในการซึมผ่านของเกลือหิน เพื่อจำลองสภาวะให้ใกล้เคียงกับธรรมชาติ การศึกษาได้แบ่งออกเป็นสองประเภทคือ 1) การศึกษากการประสานตัวของรอยแตกในแนวแกนภายใต้อุณหภูมิสูง โดยการศึกษาได้ทำการจำลองรอยแตกออกเป็นสองชนิด คือ (1) รอยแตกเรียบจากการตัดด้วยเลื่อย (saw cut surface) และ (2) รอยแตกขรุขระจากการทดสอบกำลังรับแรงกดแบบจุดและแบบเส้น (tension-induce fracture) เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการประสานตัวของรอยแตกภายใต้อุณหภูมิสูงในรอยแตกที่แตกต่างกัน โดยในการศึกษาได้ทำการให้แรงกดในแนวแกนคงที่เท่ากับ 0.5, 1, 1.5 และ 2 MPa กับแท่งตัวอย่างเกลือหิน ซึ่งทำการผันแปรอุณหภูมิ 4 ระดับ คือ อุณหภูมิห้อง 70°C, 150°C และ 200°C เพื่อศึกษากการประสานตัวของรอยแตกของเกลือหินเป็นเวลา 56 วัน โดยได้ทำการวัดความเร็วคลื่นในเนื้อหิน (pulse velocity measurement – ASTM D2845) ทุกๆ 7 วัน เพื่อที่จะสามารถคำนวณหาความยืดหยุ่นของหิน เมื่อครบ 56 วัน ได้ทำการทดสอบความสามารถในการประสานตัวของรอยแตกโดยใช้ดัชนีจุดกด (point load strength index -  $I_p$ ) เป็นตัวเปรียบเทียบความสามารถในการเชื่อมประสานของเกลือหิน 2) การศึกษากความสามารถในการซึมผ่านของเกลือหิน เป็นการทดสอบแบบให้ความเค้นและอุณหภูมิล้อมรอบตัวอย่างในทิศทางตั้งฉากกับแนวแกน (confining pressure) ซึ่งในการทดสอบได้ทำการผันแปรความเค้นล้อมรอบ 2 ระดับ คือ 5 และ 10 MPa โดยใช้ระยะเวลา 0.25, 0.5, 1, 2, 3, 5 และ 7 วัน

ในการวิจัยนี้ผู้วิจัยได้มุ่งเน้นศึกษาปัจจัยทางด้านเวลา อุณหภูมิ ความเค้น และความบริสุทธิ์ของเกลือหินที่ส่งผลต่อการประสานตัวของรอยแตกในเกลือหินภายใต้อุณหภูมิสูง และศึกษาความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการประสานตัว เพื่อนำไปใช้สร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ในการประเมินความสามารถในการประสานตัวของรอยแตกในเกลือหิน

## 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

### ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของอุณหภูมิต่อการประสานตัวของเกลือหิน การศึกษาผลกระทบอัตราการให้แรงต่อการประสานตัวของเกลือหิน และการเปลี่ยนแปลงเวลาในการทดสอบการประสานตัวของรอยแตกของเกลือหินที่สภาวะแห้ง

### ขั้นตอนที่ 2 การจัดเตรียมตัวอย่างหิน

ตัวอย่างหินที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้จัดเตรียมเป็นรูปทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm สูง 72 mm สำหรับการทดสอบการประสานตัวของเกลือหินภายใต้ความเค้นกดในแนวตั้งฉากที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูง โดยแบ่งเป็นรอยแตกเรียบจากการตัดด้วยเลื่อยและรอยแตกขรุขระจากการกดแบบจุด ตัวอย่างเกลือหินรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาด 44×44×88 mm (รูปที่ 3.4) ใช้สำหรับทดสอบการเชื่อมประสานภายใต้ความเค้นล้อมรอบที่เท่ากันทุกทิศทางที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูง โดยมีการจำลองรอยแตกขรุขระจากการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบเส้นขนานไปตามความยาวของแท่งตัวอย่าง

### ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ 1) การทดสอบการประสานตัวของรอยแตกที่มีปัจจัยจากอุณหภูมิและเวลา ภายใต้ความเค้นกดตั้งฉากในแนวแกน โดยใช้ตัวอย่างเกลือหินรูปทรงกระบอกที่มีรอยแตกเรียบและรอยแตกขรุขระที่ตั้งฉากกับแนวแกน การทดสอบจะมีการผันแปรอุณหภูมิ 4 ระดับ คือ อุณหภูมิห้อง 70°C, 150°C และ 200°C เป็นระยะเวลาตั้งแต่ 7, 14, 28 ถึง 56 วัน และ 2) การทดสอบการประสานตัวของรอยแตกภายใต้ความเค้นล้อมรอบที่เท่ากันทุกทิศทาง โดยใช้ตัวอย่างเกลือหินรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีรอยแตกขรุขระที่ขนานกับแนวแกน การทดสอบจะมีการผันแปรอุณหภูมิ 2 ระดับ คือ อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 200°C เป็นระยะเวลาตั้งแต่ 0.5, 6, 12, 48, 72, 120 ถึง 168 ชั่วโมง โดยจะมีการวัดความเร็วคลื่น (P-wave) ก่อนและหลังการทำรอยแตก

#### ขั้นตอนที่ 4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

นำผลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติหินในขั้นตอนที่ 3 มาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการประสานตัวของรอยแตกกับปัจจัยด้านเวลาและอุณหภูมิที่ผันแปร ด้วยการทดสอบดัชนีจุดกดและการวัดค่าความเร็วคลื่น (P-wave และ S-wave) ก่อนและหลังมีรอยแตก

#### ขั้นตอนที่ 5 การถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่กลุ่มเป้าหมาย

ผลงานวิจัยได้นำไปเผยแพร่องค์ความรู้ในรูปของบทความในการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการและวารสารทางวิชาการในระดับนานาชาติ

#### ขั้นตอนที่ 6 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิด ขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุปได้นำเสนอโดยละเอียดในรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ เพื่อที่จะส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ

### 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

งานวิจัยนี้มีประโยชน์อย่างมากกับงานด้านวิศวกรรมธรณี และวิศวกรรมฐานรากที่เกี่ยวข้องกับการเกิดแผ่นดินไหว ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

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

### 1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยที่เสนอมานี้มีประโยชน์อย่างมากและโดยตรงกับหลายหน่วยงาน ทั้งภาครัฐและเอกชน รวมไปถึงสถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ วิศวกรรมธรณี และวิศวกรรมโยธา ได้แก่

- 1) หน่วยงานในภาครัฐ ประกอบด้วยหน่วยงานที่ทำงานเกี่ยวกับการก่อสร้างในชั้นหิน เช่น การสร้างเขื่อน การสร้างอุโมงค์ เหมืองแร่บนดินและใต้ดิน ถนน ทางรถไฟ สะพานและตึกขนาดใหญ่ที่มีฐานรากอยู่ในหิน หน่วยงานเหล่านี้ คือ กรมทรัพยากรธรณี กรมชลประทาน การไฟฟ้าฝ่ายผลิต เป็นต้น
- 2) หน่วยงานในภาคเอกชน ประกอบด้วย บริษัทที่ประกอบการทางด้านการก่อสร้างในชั้นหิน เช่น บริษัทที่ปรึกษา บริษัทผู้รับเหมา บริษัทผู้ออกแบบและบริษัทที่ให้บริการด้านการทดสอบคุณสมบัติของหิน

3) สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ วิศวกรรมธรณี และวิศวกรรมโยธา สามารถนำข้อเสนอทางด้านทฤษฎีใหม่นี้ไปใช้ได้โดยตรง โดยนำไปทำการศึกษาต่อ หรือทำการปรับปรุงเพื่อให้มีความแม่นยำและถูกต้องมากขึ้น หรือนำไปประยุกต์ให้มีข้อจำกัดของทฤษฎีน้อยลง



## บทที่ 2

### การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

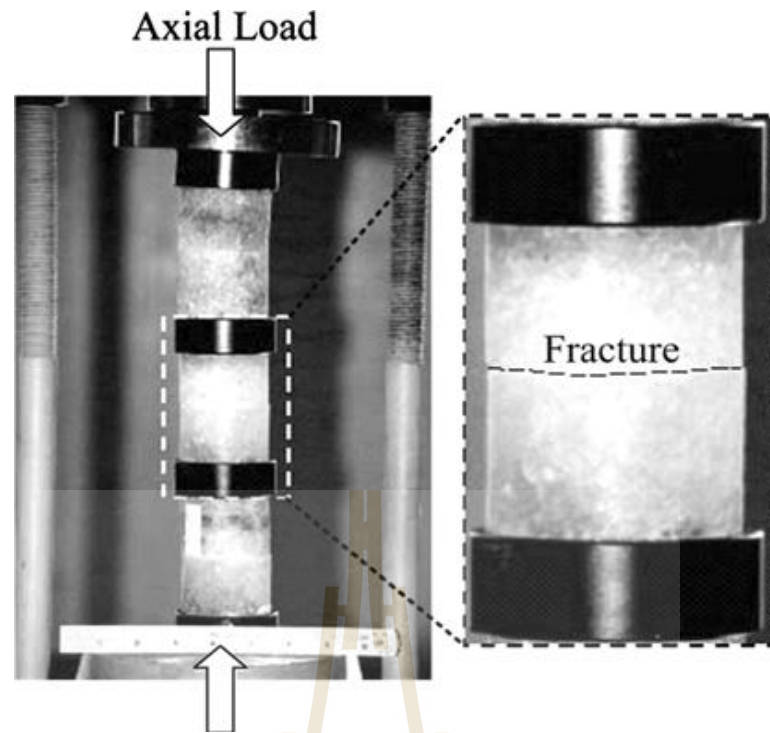
กิจกรรมเบื้องต้นในงานวิจัยนี้คือการทบทวนวรรณกรรมวิจัย โดยได้ทำการค้นคว้า ศึกษา และสรุปบทความที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมประสานของรอยแตกในเกลือหินภายใต้การผันแปรความเค้น อุณหภูมิ และเวลา เพื่อให้เข้าใจถึงกระบวนการและองค์ประกอบสำคัญที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดการเชื่อมประสานของรอยแตก รวมไปถึงหลักการหรือวิธีการคำนวณและการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้ในการประเมินหรือคาดคะเนความสามารถในการเชื่อมประสานของรอยแตกในเกลือหิน

#### 2.1 การเชื่อมประสานของรอยแตกในเกลือหิน

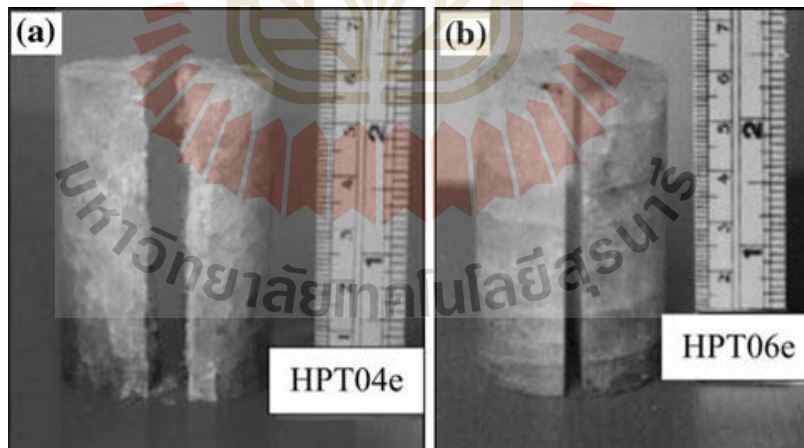
Chan และคณะ (2001) ได้ศึกษาเกี่ยวกับรอยแตกขนาดเล็กในเกลือหินที่สามารถประสานตัวได้อีกครั้งภายใต้ความเค้นล้อมรอบและอุณหภูมิที่เพียงพอ โดยทำการศึกษาดังกล่าวด้วยวิธีการฟังอย่างต่อเนื่องทางกลศาสตร์ มีการพิจารณาตัวแปรในแบบจำลองควบคู่กับการอธิบายลักษณะการคืบและการแตก แบบจำลองดังกล่าวได้รับการประเมินมาจากผลการทดสอบตัวอย่างเกลือหินของ Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) ซึ่งผลจากแบบจำลองและผลการทดสอบถือว่าเป็นที่น่าพอใจมาก นอกจากนี้ การวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบได้แสดงให้เห็นถึงการประสานตัวที่ไม่เท่ากันทุกทิศทางของเกลือหิน โดยส่วนใหญ่การประสานตัวที่ไม่เท่ากันทุกทิศทางสามารถสร้างแบบจำลองเชื่อมกับ Equivalent stress, Kinetic equation และ Evolution equation ได้อย่างเหมาะสม

Fuenkajorn และ Phueakphum (2011) ได้ทำการทดสอบการประสานตัวของรอยแตกของตัวอย่างเกลือหินภายใต้แรงกดแบบคงที่ในแนวแกน (รูปที่ 2.1) และแรงกดแบบคงที่ในแนวรัศมี (รูปที่ 2.2) ทั้งแบบแห้งและเปียกเป็นระยะเวลา 30 วัน ในห้องปฏิบัติการ โดยรอยแตกแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ รอยแตกผิวขรุขระและรอยแตกผิวเรียบ หลังจากนั้นจึงนำมาทดสอบการให้แรงแบบจุด (point load testing) เพื่อนำค่าที่ได้จากการทดสอบไปหาค่าสัมประสิทธิ์การประสานตัว ผลการทดสอบการให้แรงแบบคงที่ในแนวแกนระบุว่า สัมประสิทธิ์การประสานตัวบางค่ามีค่ามากกว่า 100% ทั้งนี้อาจเป็นเพราะช่องว่างหรือรอยแตกมีการอัดตัวระหว่างการทดสอบ ทำให้ความแข็งของรอยแตกดังกล่าวมีค่าเกินค่าความแข็งของตัวอย่างเกลือหิน ส่วนผลการทดสอบการให้แรงในแนวรัศมีระบุว่าค่าความซึมผ่านในรอยแตกจะมีค่าลดลงเมื่อมีการให้แรงในแนวรัศมีด้วยระยะเวลาที่มากขึ้น ซึ่งมีค่ามากกว่า 4 ระดับ (Order) ภายใต้แรงคงที่เท่ากับ 20 MPa ในช่วงระยะเวลาสั้น ซึ่งการลดลงของค่าความซึมผ่านอาจเป็นผลมาจากรอยแตกปิดกันสนิทมากขึ้น (รูปที่ 2.3) โดยปัจจัยที่มีผลต่อการประสานตัวของรอยแตกในเกลือหิน ได้แก่ ความบริสุทธิ์ของรอยแตก ขนาดและระยะเวลาการให้แรงแก่รอยแตก และการเจือปนของสิ่งสกปรกในเกลือหินที่อาจทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การประสานตัวลดลง

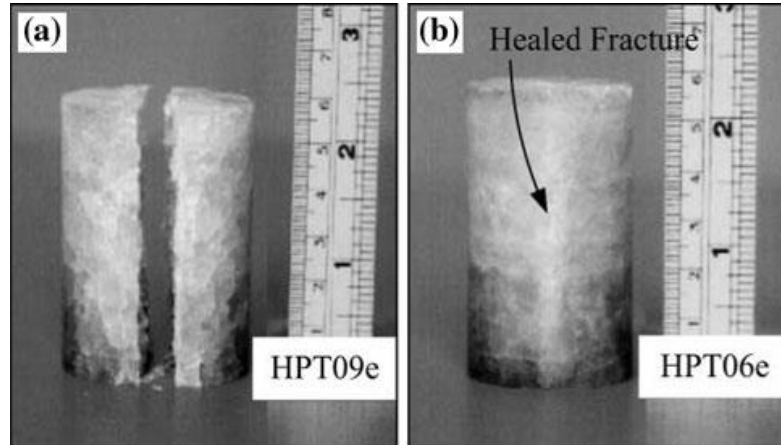




รูปที่ 2.1 การทดสอบการประสานตัวของรอยแตกในเกลือหินด้วยการให้แรงแบบคงที่ในแนวแกน (Fuenkajorn และ Phueakphum, 2011)



รูปที่ 2.2 การทดสอบการประสานตัวของรอยแตกในเกลือหินด้วยการให้แรงแบบคงที่ในแนวรัศมีแบบ ผิวขรุขระ (a) และแบบผิวเรียบ (b) (Fuenkajorn และ Phueakphum, 2011)



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

Allemandou และ Dusseault (1993) ได้ศึกษาการประสานตัวของรอยแตกในเกลือหินรูปทรงกระบอกภายใต้ความเค้นล้อมรอบคงที่เท่ากับ 2 MPa โดยทำการให้แรงในแนวแกนผันแปร 4 อัตราคือ 10, 15, 20 และ 25 MPa และดำเนินการภายใต้อุณหภูมิคงที่ จากนั้นทำการประเมินผลเพื่อหาระยะปิดและการประสานตัวของรอยแตกจาก CAT-สแกน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเชื่อมประสานตัวของรอยแตกจะเกิดขึ้นและช่องว่างจะลดลงในขณะที่มีการเพิ่มขึ้นของระดับความเครียด

Zeigler (1976) ได้เสนอสมการ (2.1) ในการหาค่าความซึมผ่าน ( $K_j$ ) ของรอยแตกของเกลือหิน โดยที่รอยแตกนั้นเป็นรอยแตกที่มีผิวขนานกัน (parallel fracture) และการไหลของของไหลเป็นแบบราบเรียบ (laminar flow) คือ

$$K_j = (\gamma/12\mu) \cdot e \quad (2.1)$$

โดยที่  $e$  คือ ระยะเปิดหรือขนาดของรอยแตกขนาน (Parallel plate aperture)  
 $\gamma$  คือ ค่าน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตร และ  
 $\mu$  คือ ความหนืดของของเหลวหรือแก๊สที่ไหลผ่านรอยแตก

ในเชิงวิศวกรรมธรณี รอยแตกในหิน (fractures) มีได้หลายรูปแบบและหลายขนาด ตั้งแต่รอยแตกในผิเล็กที่มีขนาดเล็กไปจนถึงรอยเลื่อน (fault) ของชั้นหินซึ่งเป็นรอยแตกที่มีขนาดใหญ่มาก รวมไปถึงรอยเลื่อนระหว่างทวีป เป็นต้น รอยแตกที่เกิดขึ้นในหินมีสาเหตุมาจากหลายปัจจัย โดยในกระบวนการทางธรรมชาติ รอยแตกเกิดจากการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลกรวมทั้งรอยแตกที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การละลายโพรงหรือการขุดเจาะอุโมงค์ในชั้นหิน รอยแตกที่เกิดขึ้นโดยทั่วไป

จะส่งผลกระทบต่อต่างๆ เช่น คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และเชิงกายภาพของหินเปลี่ยนแปลงไป ความต้านทานแรงเฉือนและความต้านทานแรงดึงลดลง และในทางตรงกันข้ามค่าความซึมผ่านของหินอาจจะเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอาจจะก่อให้เกิดความเสียหายทางด้านเสถียรภาพของโครงสร้างต่างๆ ในชั้นหิน จากปัญหาดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าการประสานตัวของรอยแตกมีความสำคัญในเชิงธรณีวิทยา กล่าวคือ เป็นกระบวนการที่ควบคุมการไหลของของเหลวในชั้นเปลือกโลก (Renard, 1999) เช่น รอยแตกในชั้นเกลือหินที่มีความสามารถประสานตัวเองได้ ส่งผลให้บริเวณรอยแตกนั้นมีค่าความซึมผ่านลดลง

Miao และคณะ (1995) ศึกษาการเชื่อมประสานตัวของเกลือหินบดในสถานะที่มีน้ำน้อยมาก ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าหลังจากเกิดการเชื่อมประสาน ส่งผลให้ความหนาแน่น ความเครียดยืดหยุ่นสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น และกำลังรับแรงของเกลือหินบดมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา

Munson และคณะ (1999) ได้พัฒนาแบบจำลองชื่อ MDCF (Multimechanism Deformation Coupled Fracture Model) จากแบบจำลองเก่าชื่อ SUVIC-D ซึ่งเดิมมีฟังก์ชันของการเคลื่อนไหล (Creep function) ต่อมามีการเพิ่มฟังก์ชันเกี่ยวกับการประสานตัวของรอยแตก (Healing rate function) เข้าไปด้วย ได้มีการเก็บข้อมูลภาคสนามที่บริเวณอุโมงค์เก่า โดยวัดการเปลี่ยนแปลงความเร็วของคลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic wave) และได้ประเมินออกมาเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเนื่องจากการยุบตัวของโพรง ในขณะเดียวกันก็ทำการสังเกตการระบายของน้ำออกจากอุโมงค์ ทั้งสองการทดสอบนี้นำไปใช้ประเมินการขยายขอบเขตของความเสียหายรอบๆ โพรง และเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่สร้างขึ้นในรูปแบบของความเคลื่อนไหลที่เกิดขึ้น ผลการเปรียบเทียบให้ค่าที่ใกล้เคียงกันและยังใช้เปรียบเทียบกับผลของขอบเขตที่ใหญ่ขึ้นได้ และสามารถสรุปเพิ่มเติมได้ว่าความเสียหายจะเป็นฟังก์ชันของความลึก และจะมีค่ามากที่บริเวณส่วนล่างสุดของโพรง ซึ่งขึ้นกับความไม่บริสุทธิ์ของเนื้อเกลือหินเอง หากมีความไม่บริสุทธิ์มากก็จะส่งผลกระทบมาก ในขณะเดียวกัน Chan และคณะ (1998) ได้ศึกษาและใช้แบบจำลองนี้เช่นกัน โดยได้สรุปผลไปในลักษณะแนวทางเดียวกัน

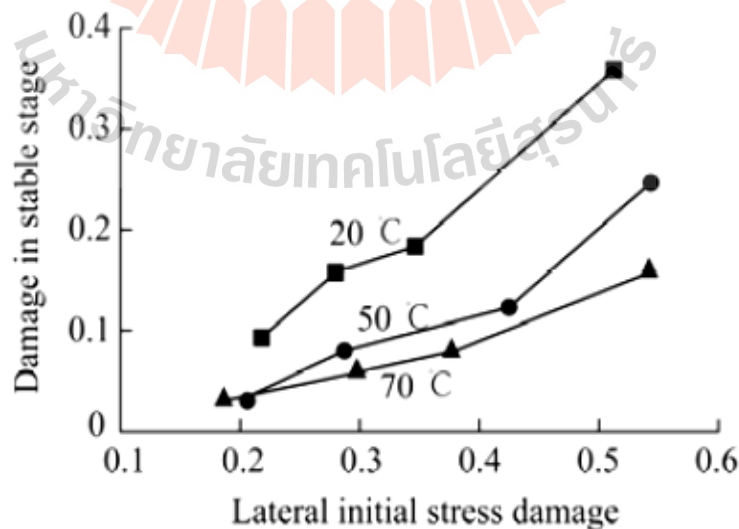
## 2.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการประสานตัวของรอยแตก

Brodsky และ Munson (1994) ศึกษาการประสานตัวของรอยแตกในเกลือหิน ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงการ Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) ภายใต้ความดันสถิต (Hydrostatic compression) เท่ากับ 0.5 MPa โดยบรรจุตัวอย่างหินรูปทรงกระบอกไว้ในหม้อแรงดัน (Hoek cell) ที่อุณหภูมิ 25°C แล้วกดในแนวแกนให้เกิดการยุบตัวเล็กน้อย จากนั้นได้มีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของระบบไปที่ 20°C (46 และ 70°C ในแต่ละตัวอย่างตามลำดับเพื่อศึกษาผลกระทบจากอุณหภูมิ) และให้แรงกดด้วยอัตราความเครียดอัด (strain rate)  $1 \times 10^{-6} \text{ sec}^{-1}$  ในการทดสอบนี้ได้ใช้คลื่นอัลตราโซนิก (ultrasonic wave velocity) เสริมในการทดสอบ และข้อมูลที่ได้จะนำมาเป็นข้อมูลพื้นฐาน

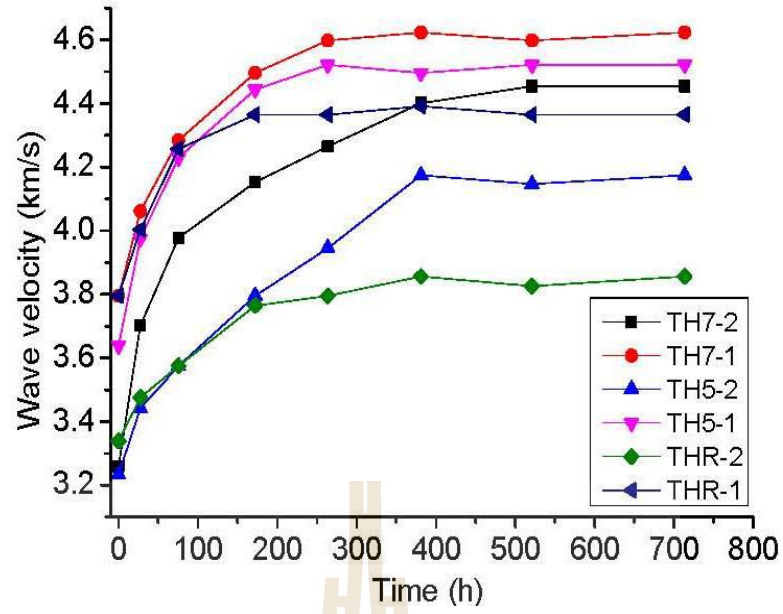
เปรียบเทียบกับแบบจำลอง MDCF ที่ได้สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการประเมินค่าการประสานตัวของรอยแตกแบบ Anisotropy ของเกลือหิน

Jiang และคณะ (2013) ทำการศึกษาความสามารถในการเชื่อมประสานของเกลือหินหลังจากได้รับความเค้นภายในห้องปฏิบัติการ โดยการทดสอบได้นำเอาเทคโนโลยีอัลตราโซนิกมาใช้ในการตรวจวัดความแปรปรวนของความเร็วในเกลือหิน และดำเนินการทดสอบภายใต้อุณหภูมิต่างๆ คือ 20°C, 50°C และ 70°C จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น รอยแตกสามารถประสานตัวได้มากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นนั้นสามารถเร่งการแพร่ของอนุภาคในเกลือหินและส่งเสริมให้เกิดกระบวนการตกผลึกซ้ำอีกครั้ง

Chen และคณะ (2013) ศึกษาคุณสมบัติการประสานตัวของเกลือหินที่มีรอยแตกภายใต้สภาวะการประสานตัวที่แตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้ได้นำเอาเทคโนโลยีอัลตราโซนิกมาตรวจวัดการผันแปรของความเร็วคลื่นตามยาวของเกลือหินที่มีรอยแตกในขณะที่เกิดกระบวนการคืนสภาพภายใต้สภาวะการประสานตัวที่แตกต่างกัน ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อการประสานตัวของเกลือหินที่มีรอยแตกได้แก่ ความเค้นคงค้างที่ทำให้เกิดรอยแตกเริ่มต้น อุณหภูมิ และความชื้น เป็นต้น ผลการทดสอบพบว่าค่าความเร็วของคลื่นในเกลือหินที่มีรอยแตกมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 200 ชั่วโมงแรกของการทดสอบ และยังคงเพิ่มขึ้นไปจนถึงสภาวะคงที่หลังจากผ่านไป 600 ชั่วโมง (รูปที่ 2.5) ซึ่งการประสานตัวของเกลือหินที่มีรอยแตกอยู่ภายใต้ความเค้นสูง อย่างไรก็ตาม น้ำเป็นอีกปัจจัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเกลือหิน การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้เกิดการประสานตัวของรอยแตกในเกลือหินมากขึ้นหากไม่มีปัจจัยของน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง เนื่องจากน้ำจะเป็นตัวขัดขวางกระบวนการประสานตัวเมื่ออยู่ในสภาวะไอน้ำ



รูปที่ 2.4 ค่าความเค้นเริ่มต้นในแนวอนในฟังก์ชันของค่าสถานะเสถียรของรอยแตก (Jiang และคณะ, 2013)



รูปที่ 2.5 ความเร็วของคลื่นในฟังก์ชันของเวลาของเกลือหินที่อุณหภูมิ 50°C และ 70°C ภายใต้ความชื้นคงที่ (Chen และคณะ 2013)



### บทที่ 3

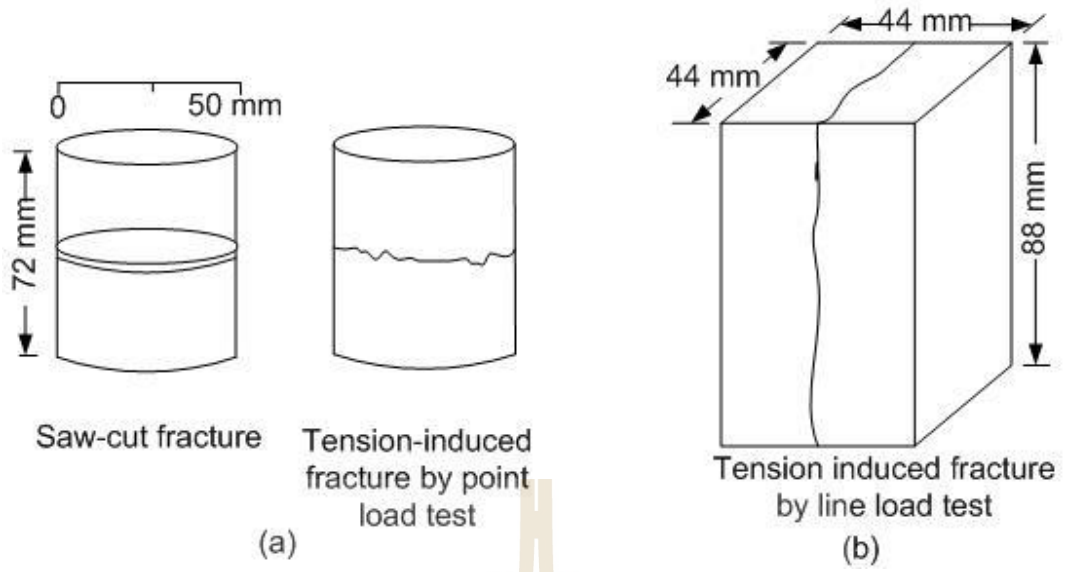
#### การจัดเตรียมตัวอย่างหิน

ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบนี้เป็นเกลือหินชั้นกลางและชั้นล่างของหินชุดมหาสารคามในแอ่งโคราชทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ซึ่งขุดเจาะโดยบริษัท สยามทรัพย์มณี จำกัด ในพื้นที่ UTM 47P 0821065/1687136 อำเภอโนนไทย จังหวัดนครราชสีมา มีความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ  $2.13 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$

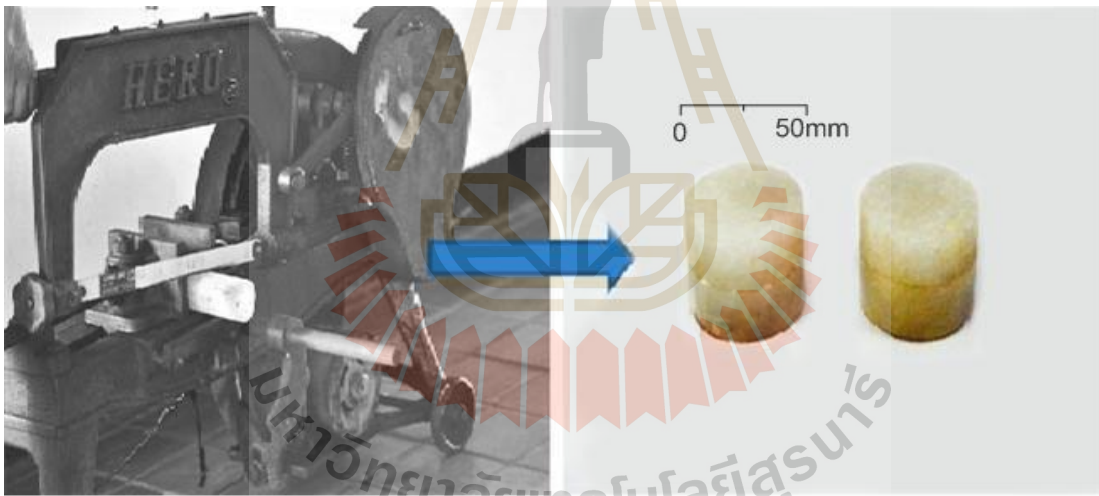
รูปทรงของตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ (รูปที่ 3.1) คือ (1) ตัวอย่างเกลือหินรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 mm สูง 72 mm สำหรับทดสอบการเชื่อมประสานภายใต้ความเค้นกดตั้งฉาก โดยมีการจำลองรอยแตกออกเป็น 2 ชนิด คือ รอยแตกเรียบจากการตัดด้วยเลื่อย (รูปที่ 3.2) และรอยแตกขรุขระจากการทดสอบกำลังรับแรงกดแบบจุด (point load strength index test) (รูปที่ 3.3) ซึ่งเป็นรอยแตกที่ตั้งฉากกับแนวแกน และ (2) ตัวอย่างเกลือหินรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 44×44×88 mm (รูปที่ 3.4) สำหรับทดสอบการเชื่อมประสานภายใต้ความเค้นล้อมรอบที่เท่ากันทุกทิศทาง โดยมีการจำลองรอยแตกจากการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบเส้น (Line load test) ขนานไปตามความยาวของแท่งตัวอย่าง (รูปที่ 3.5)

สำหรับการหาอัตราส่วนร้อยละของสิ่งเจือปนทำได้ด้วยการเปรียบเทียบปริมาณของสิ่งเจือปนกับพื้นที่ทั้งหมดของรอยแตก โดยสิ่งเจือปนได้นับรวมวัสดุหรือแร่ทั้งหมดที่ไม่ใช่โซเดียมคลอไรด์

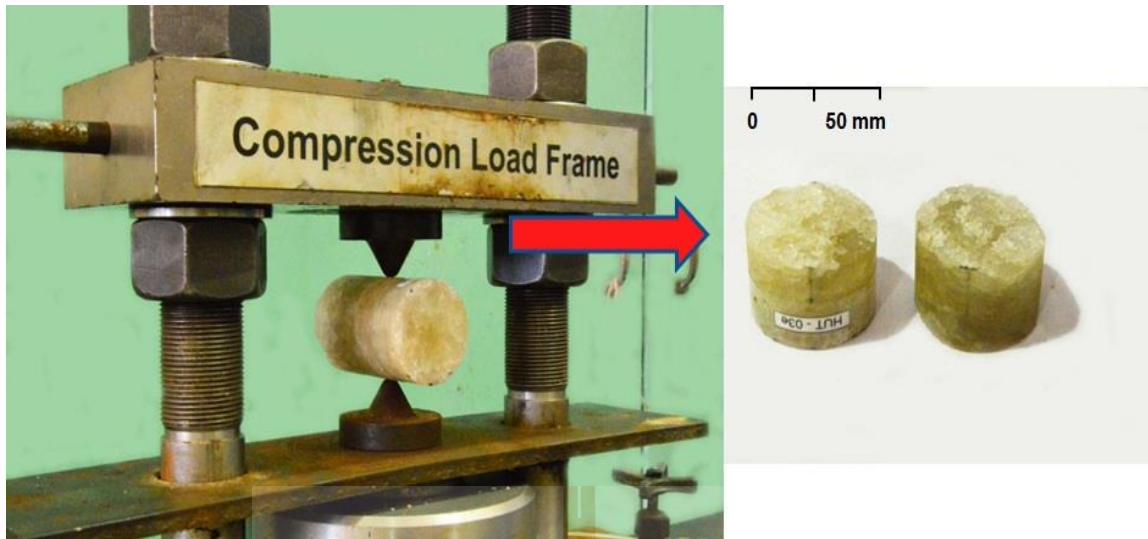
ตารางที่ 3.1 และ 3.2 แสดงขนาดของตัวอย่างเกลือหินทรงกระบอกสำหรับทดสอบการเชื่อมประสานภายใต้ความเค้นกดตั้งฉากที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิสูงคือ 70°C, 150°C และ 200°C ตามลำดับ ตารางที่ 3.3 แสดงขนาดของตัวอย่างเกลือหินรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับทดสอบการเชื่อมประสานภายใต้ความเค้นล้อมรอบที่เท่ากันทุกทิศทางที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 200°C โดยเตรียมตัวอย่างและวิธีการทดสอบได้ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D2938-79 (1979), ASTM D3967-81 (1981), ASTM D4543-85 (1985) และ ASTM D5731-95 (1995)



รูปที่ 3.1 ลักษณะของรอยแตกเรียบและรอยแตกขรุขระ



รูปที่ 3.2 รอยแตกเรียบจากการตัดด้วยเลื่อย

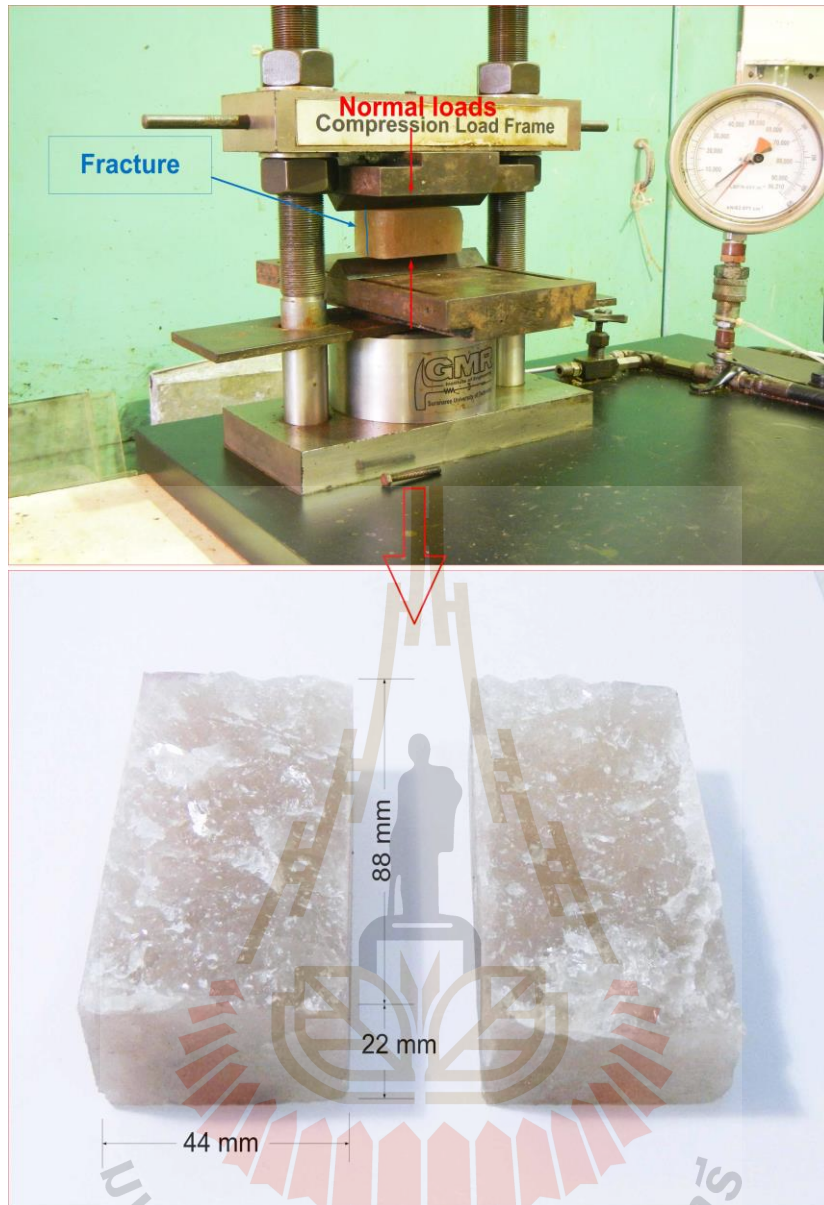


รูปที่ 3.3 รอยแตกขรุขระจากการทดสอบกำลังรับแรงกดแบบจุด



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างหินรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า





รูปที่ 3.5 การจำลองรอยแตกขรุขระด้วยการให้แรงกดแบบเส้นขนานไปตามความยาวของแท่งตัวอย่างรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างเกลือหินทรงกระบอกสำหรับทดสอบการเชื่อมประสานของรอยแตกภายใต้ความ  
เค้นกดตั้งฉากที่อุณหภูมิห้อง

Specimen No.	Inclusion (%)	Depth (m)	Diameter (mm)	Height (mm)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
HUT-01e	1	380.25 - 380.45	47.50	72.60	2.15
HUT-10e	5	380.30 - 380.38	47.48	70.95	2.12
HUT-11e	5	375.10 - 375.35	47.44	71.00	2.14
HUT-12e	10	321.00 - 321.20	47.50	70.10	2.14
HUT-13e	15	325.01 - 325.25	47.46	70.60	2.13
HUT-14e	10	325.25 - 325.50	47.52	72.60	2.09
HUT-15e	10	325.50 - 325.80	47.40	72.60	2.14
HUT-16e	5	321.20 - 321.70	47.36	72.60	2.11
HUT-19e	10	313.50 - 313.80	47.46	72.00	2.14
HUT-20e	10	313.50 - 313.80	47.54	72.60	2.16
HUT-21e	5	325.66 - 325.80	47.46	71.00	2.14
HUT-22e	5	276.05 - 276.30	47.50	71.00	2.14
Average				2.13 ± 0.02	

ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างเกลือหินทรงกระบอกสำหรับทดสอบการเชื่อมประสานของรอยแตกภายใต้ความ  
เค้นกดตั้งฉากที่อุณหภูมิ 70°C, 150°C และ 200°C

Specimen No.	Inclusion (%)	Depth (m)	Diameter (mm)	Height (mm)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
HUT-09e	15	321.20 - 321.70	47.50	70.10	2.14
HUT-08e	5	321.00 - 321.20	47.46	70.60	2.13
HUT-05e	10	325.25 - 325.50	47.52	72.60	2.09
HUT-06e	10	313.50 - 313.90	47.40	72.00	2.14
HUT-07e	5	313.50 - 313.90	47.36	72.00	2.11
HUT-17e	15	313.50 - 313.90	47.46	72.00	2.09
Average				2.13 ± 0.02	

ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างเกลือหินรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับทดสอบการเชื่อมประสานของรอยแตก  
ภายใต้ความเค้นล้อมรอบที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 200°C

Specimen No.	Inclusion (%)	Depth (m)	Area (mm <sup>2</sup> )	Height (mm)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
HCT-01e	5	325.66 - 325.80	44×44	88	2.14
HCT-02e	5	276.05 - 276.30	44×44	88	2.14
Average				2.14	

## บทที่ 4

### การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

#### 4.1 วัตถุประสงค์

เนื้อหาในบทนี้ได้อธิบายถึงวิธีการและผลการทดสอบการเชื่อมประสานของรอยแตกภายใต้ความเค้นดัดตั้งฉากและความเค้นล้อมรอบที่เท่ากันทุกทิศทางของรอยแตกแบบขรุขระและแบบเรียบ การทดสอบได้พิจารณาถึงผลกระทบของเวลา อุณหภูมิ และระดับความเค้นต่อความสามารถในการเชื่อมประสาน นอกจากนี้สิ่งเจือปนบนบนผิวรอยแตกของตัวอย่างเกลือหินได้ถูกนำมาพิจารณาร่วมด้วย

#### 4.2 วิธีการทดสอบ

การทดสอบได้พิจารณาถึงผลกระทบของเวลา ความเค้น ลักษณะของรอยแตก สิ่งเจือปนในเกลือหิน และอุณหภูมิที่มีผลต่อการเชื่อมประสานของรอยแตกในเกลือหิน อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้ไม่ได้พิจารณาถึงปัจจัยอื่นที่อาจมีผลกระทบ เช่น แร่ประกอบอื่นในเกลือหินและความชื้นบนรอยแตก การตรวจสอบการเชื่อมประสานของรอยแตกในเกลือหินสามารถทำได้ด้วยการตรวจวัดความเร็วคลื่น (P-wave) ที่ส่งผ่านรอยเปิดเผยด้วยเครื่องอัลตราโซนิก และตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ด้วยการทดสอบแรงกดแบบจุดกดบนรอยแตกของตัวอย่างเกลือหินรูปทรงกระบอก และแบบเส้นบนรอยแตกของตัวอย่างเกลือหินรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าหลังจากที่ได้ทดสอบการเชื่อมประสานภายใต้สภาวะต่างๆ ที่กำหนดแล้ว

การศึกษานี้ได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ชุดการทดสอบ คือ (1) การทดสอบการเชื่อมประสานภายใต้ความเค้นดัดตั้งฉาก และ (2) การทดสอบการเชื่อมประสานภายใต้ความเค้นล้อมรอบที่เท่ากันทุกทิศทาง โดยชนิดของรอยแตกที่ใช้ในการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ (1) รอยแตกขรุขระที่เกิดจากแรงดึง และ (2) รอยแตกเรียบที่เกิดจากการตัดด้วยเลื่อย ตารางที่ 4.1 แสดงรูปแบบการทดสอบการเชื่อมประสานของรอยแตกในตัวอย่างเกลือหินภายใต้สภาวะต่างๆ

##### 4.2.1 การเชื่อมประสานภายใต้ความเค้นดัดตั้งฉาก

แผ่นเหล็กที่มีน้ำหนักคงที่ถูกนำมาวางทับด้านบนของตัวอย่างเกลือหินเพื่อเพิ่มความเค้นดัดตั้งฉากลงบนรอยแตกของเกลือหิน (รอยแตกขรุขระและรอยแตกเรียบ) ตามระยะเวลาที่กำหนดจากนั้นนำตัวอย่างหินดังกล่าวมาทำการทดสอบต่อ โดยแบ่งออกเป็น 3 ชุดการทดสอบ ตามลักษณะของการทดสอบที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 4.1) โดยชุดการทดสอบทั้งหมดได้ดำเนินการภายใต้สภาวะแห้งและใช้ตัวอย่างเกลือหินรูปทรงกระบอก

ตารางที่ 4.1 ปัจจัยสำหรับทดสอบการเชื่อมประสานของรอยแตกในเกลือหิน

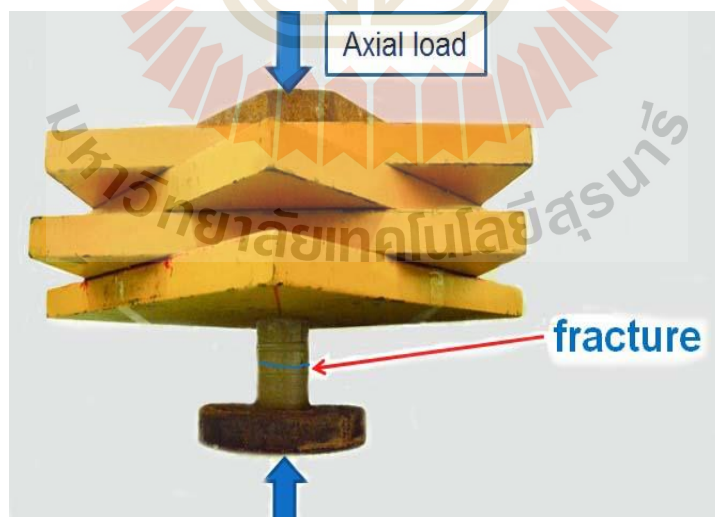
Loading condition	Specimen shape	Fracture type	Stress level	Time	Temperature (°C)
Uniaxial stress ( $\sigma_1 > 0$ (normal to fracture) and $\sigma_2=\sigma_3=0$ )	Cylindrical shaped specimen	Saw-cut fracture	0.5 and 2.0 MPa	0, 7, 28, and 56 days	Ambient temperature and 200°C
		Tension-induced fracture by point loading	0.5, 1.0, 1.5 and 2.0 MPa	0, 7, 28, and 56 days	Ambient temperature
		Tension-induced fracture by point loading	0.5, 1.0, 1.5 and 2.0 MPa	56 days	25, 70, 150, and 200°C
Hydrostatics stresses ( $\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3 > 0$ )	Rectangular shaped specimen	Tension-induced fracture by line loading	5 MPa	0, 6, 12, 24, 48, 72, 120 and 168 hours	Ambient temperature
			10 MPa	0, 6, 12, 24, 48, 72, 120 and 168 hours	Ambient temperature
		Tension-induced fracture by line loading	5 MPa	0, 6, 12, 24, 48, 72, 120 and 168 hours	200°C
			10 MPa	0, 6, 12, 24, 48, 72, 120 and 168 hours	200°C

**ชุดการทดสอบที่ 1:** ทดสอบการเชื่อมประสานของรอยแตกเรียบด้วยการเพิ่มความเค้นกดตั้งฉากเท่ากับ 0.5 และ 2.0 MPa ลงบนตัวอย่างหินตามระยะเวลาที่กำหนดคือ 0, 7, 28 และ 56 วัน ภายใต้อุณหภูมิห้องและผันแปรอุณหภูมิจนถึง 200°C

**ชุดการทดสอบที่ 2:** ทดสอบการเชื่อมประสานของรอยแตกขรุขระที่เกิดจากการกดแบบจุด โดยทำการทดสอบภายใต้ความเค้นกดตั้งฉากเท่ากับ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 MPa ตามระยะเวลาที่กำหนดคือ 0, 7, 28 และ 56 วัน ที่อุณหภูมิห้อง (รูปที่ 4.1) จากนั้นทำการตรวจวัดความเร็วของคลื่นปฐมภูมิ (P-wave) ผ่านรอยแตกดังกล่าวทุก 7 วัน จนครบ 56 วัน

**ชุดการทดสอบที่ 3:** ทดสอบการเชื่อมประสานของรอยแตกขรุขระที่เกิดจากการกดแบบจุดด้วยการทดสอบภายใต้ความเค้นกดตั้งฉากเท่ากับ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 MPa ตามระยะเวลาที่กำหนดคือ 0, 7, 28 และ 56 วัน ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูงคือ 70°C, 150°C และ 200°C จากนั้นทำการตรวจวัดความเร็วของคลื่นปฐมภูมิผ่านรอยแตกดังกล่าวทุก 7 วัน จนครบ 56 วัน

อุปกรณ์ให้ความร้อนถูกนำมาใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิแก่ตัวอย่างเกลื่อหินระหว่างการทดสอบ (รูปที่ 4.2) ซึ่งตัวอย่างเกลื่อหินจะถูกพันด้วยสายเทปให้ความร้อนและฉนวนกันความร้อนในระหว่างการทดสอบ (รูปที่ 4.3) เพื่อควบคุมอุณหภูมิให้คงที่จนกระทั่งสิ้นสุดการทดสอบ นอกจากนี้ได้ใช้เครื่องปรับอุณหภูมิในการควบคุมอุณหภูมิตัวอย่างหินให้มีค่าคงที่ตามที่กำหนดไว้ (รูปที่ 4.4)



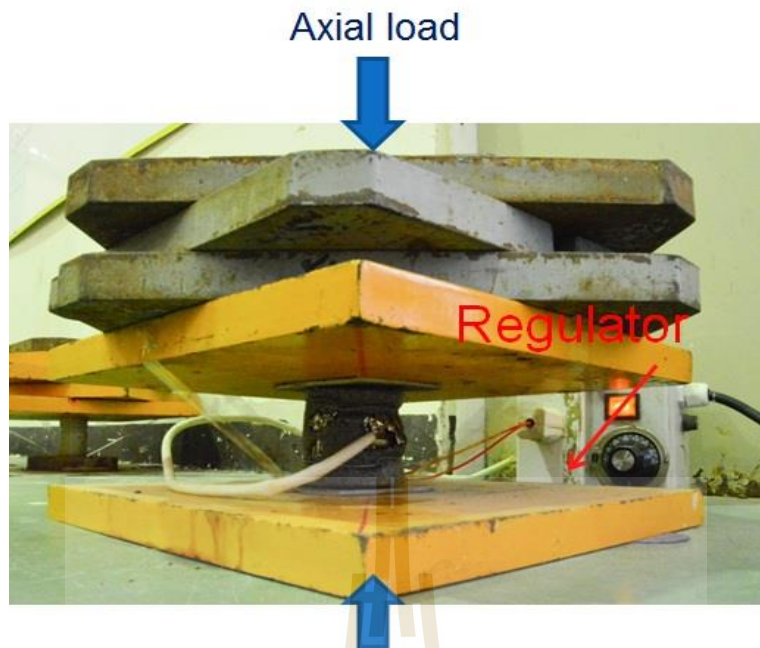
**รูปที่ 4.1** การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบการเชื่อมประสานภายใต้ความเค้นกดตั้งฉากที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4.2 อุปกรณ์ให้ความร้อนสำหรับเพิ่มอุณหภูมิแก๊สตัวอย่างเกลือหินระหว่างการทดสอบ



รูปที่ 4.3 การพันสายเทปให้ความร้อนและฉนวนกันความร้อนรอบตัวอย่างเกลือหินเพื่อรักษาอุณหภูมิให้คงที่ตลอดระยะเวลาการทดสอบ



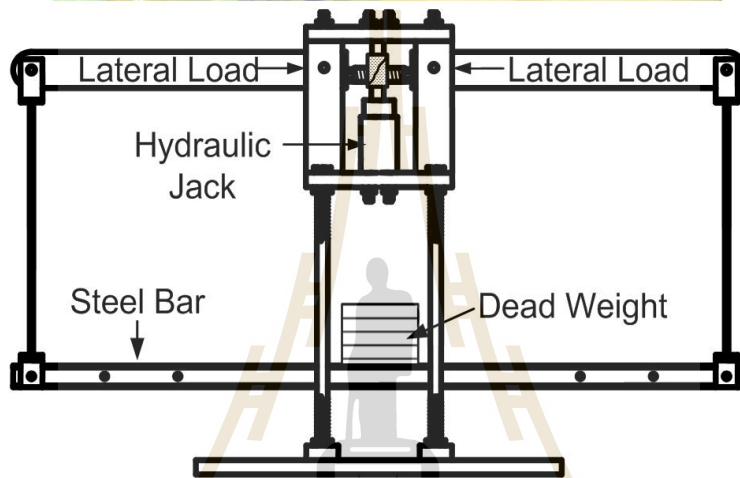
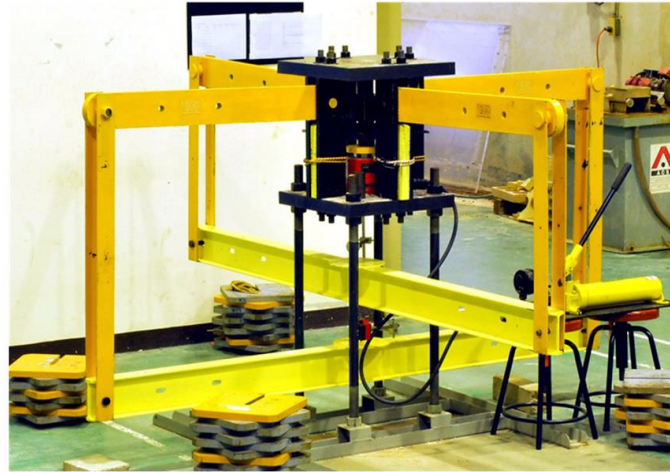
รูปที่ 4.4 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบการเชื่อมประสานภายใต้ความเค้นกดตั้งฉากที่อุณหภูมิสูง

#### 4.2.2 การเชื่อมประสานภายใต้ความเค้นล้อมรอบที่เท่ากันทุกทิศทาง

โครงกดทดสอบในสามแกน (polyaxial load frame) (รูปที่ 4.5) ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความเค้นล้อมรอบที่เท่ากันทุกทิศทางแก่ตัวอย่างหิน (Fuenkajorn และ Kenkhunthod, 2010) แผ่นเหล็กที่มีน้ำหนักคงที่ถูกลงบนคานเหล็กสองคานด้านล่างเพื่อจำลองขนาดของความเค้นด้านข้าง (confining pressures,  $\sigma_2 = \sigma_3$ ) ที่ถูกส่งผ่านไปยังตัวอย่างหิน และทำการเพิ่มความเค้นกดตามแนวแกน ( $\sigma_1$ ) ไปพร้อมๆ กันจนกระทั่งตัวอย่างหินอยู่ภายใต้สภาวะความเค้นกดที่เท่ากันทุกทิศทาง ในการศึกษานี้ได้กำหนดค่าความเค้นกดล้อมรอบเท่ากับ 5 และ 10 MPa โดยแบ่งออกเป็น 2 ชุดการทดสอบ ตามลักษณะของการทดสอบที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 4.1) โดยชุดการทดสอบทั้งหมดได้ดำเนินการภายใต้สภาวะแห้งและใช้ตัวอย่างเกลือหินรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการจำลองรอยแตกขรุขระด้วยการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบเส้น

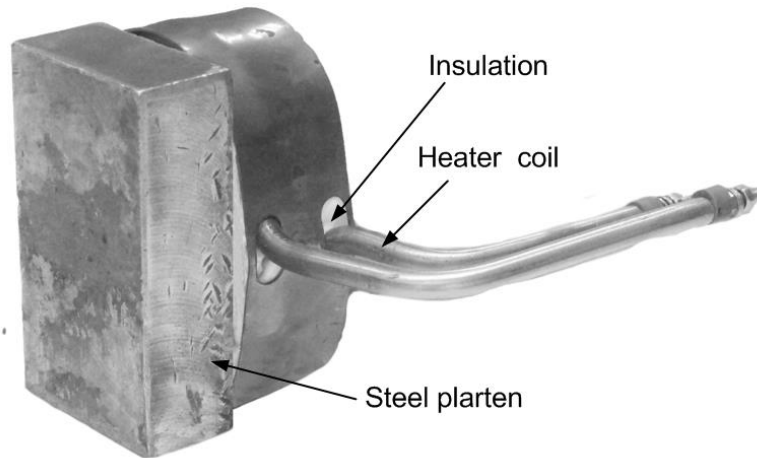
**ชุดการทดสอบที่ 1:** ทดสอบการเชื่อมประสานของรอยแตกขรุขระภายใต้ความเค้นล้อมรอบที่เท่ากันทุกทิศทางด้วยการทดสอบภายใต้ความเค้นล้อมรอบเท่ากับ 5 และ 10 MPa ตามระยะเวลาที่กำหนดคือ 0.5, 6, 12, 48, 72, 120 และ 168 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง โดยตัวอย่างหินจะได้รับแรงกดล้อมรอบคงที่เท่ากับ 5 MPa เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำตัวอย่างหินดังกล่าวมาทำการทดสอบแรงดึงทางอ้อมเพื่อหาค่าแรงกดสูงสุดที่ทำให้เกิดการพัง เพื่อประเมินประสิทธิภาพเชิงกลศาสตร์ของรอยแตกหลังจากการเชื่อมประสาน จากนั้นนำตัวอย่างหินก้อนเดิมมาทดสอบการเชื่อมประสานที่ระยะเวลา 6, 12, 48, 72, 120 และ 168 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดจึงทำการเพิ่มความเค้นล้อมรอบเป็น 10 MPa ภายใต้ระยะเวลาเดียวกัน



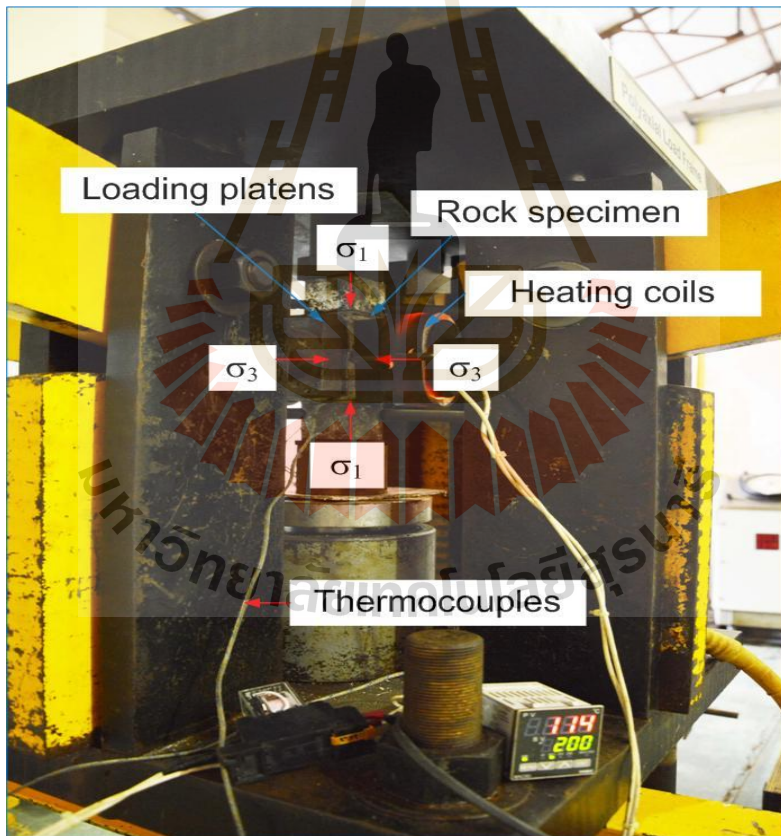


รูปที่ 4.5 โครงทดสอบในสามแกน (Fuenkajorn และ Kenkhunthod, 2010)

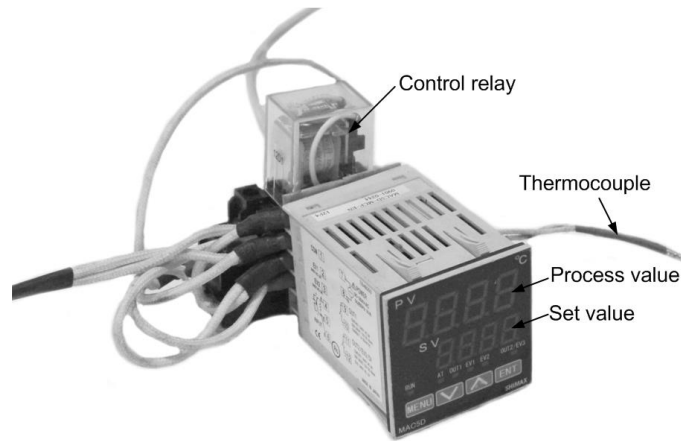
**ชุดการทดสอบที่ 2:** ทดสอบการเชื่อมประสานของรอยแตกขรุขระภายใต้ความเค้นล้อมรอบที่เท่ากันทุกทิศทางด้วยการทดสอบภายใต้ความเค้นล้อมรอบเท่ากับ 5 และ 10 MPa ตามระยะเวลาที่กำหนดคือ 0.5, 6, 12, 48, 72, 120 และ 168 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 200°C โดยมีอุปกรณ์ให้ความร้อนแบบไฟฟ้าที่ถูกติดตั้งลงบนแผ่นเหล็ก (รูปที่ 4.6) ทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวจะมีเส้นลวด Nichrome (โลหะผสมระหว่างนิกเกิลกับโครเมียม) เป็นตัวส่งผ่านความร้อนให้แก่ตัวอย่างหินทั้งสี่ด้าน (รูปที่ 4.7) และมีเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (รูปที่ 4.8) ทำหน้าที่ตรวจจับอุณหภูมิของระบบให้คงที่ตลอดการทดสอบ การให้ความร้อนกับตัวอย่างหินจะดำเนินการภายใต้แรงกดล้อมรอบคงที่เท่ากับ 5 MPa เป็นเวลา 30 นาที และนำตัวอย่างหินดังกล่าวมาทำการทดสอบแรงดึงทางอ้อมเพื่อหาค่าแรงกดสูงสุด จากนั้นนำตัวอย่างหินก้อนเดิมมาทดสอบการเชื่อมประสานที่ระยะเวลา 6, 12, 48, 72, 120 และ 168 ชั่วโมง ภายใต้อุณหภูมิ 200°C เมื่อครบกำหนดจึงทำการเพิ่มความเค้นล้อมรอบเป็น 10 MPa ภายใต้ระยะเวลาเดียวกัน



รูปที่ 4.6 ขดลวดให้ความร้อนที่ถูกติดตั้งลงบนแผ่นเหล็ก



รูปที่ 4.7 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบการเชื่อมประสานภายใต้อุณหภูมิสูงที่โครงกดทดสอบในสามแกน



รูปที่ 4.8 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ

### 4.3 ผลการทดสอบ

#### 4.3.1 ผลการทดสอบการเชื่อมประสานภายใต้ความเค้นกดตั้งฉาก

ผลการทดสอบกำลังรับแรงกดแบบจุดบนรอยแตกภายหลังการทดสอบการเชื่อมประสาน (รูปที่ 4.9) ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงกดแบบจุดบนตัวอย่างเกลือหินที่ไม่มีรอยแตก เพื่อหาความสามารถในการเชื่อมประสานของรอยแตกภายใต้สภาวะต่างๆ ค่ากำลังรับแรงกดของรอยแตกหลังจากการเชื่อมประสาน ( $I_h$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$I_h = P_f / D_e^2 \quad (4.1)$$

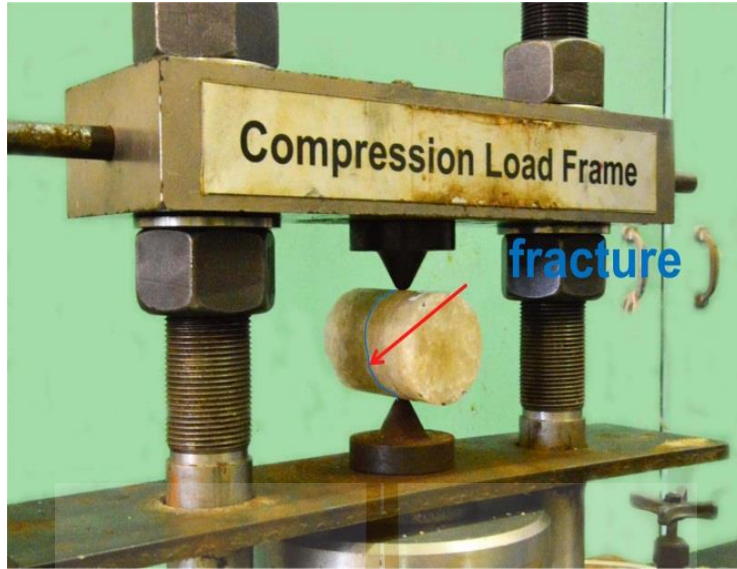
โดยที่  $I_h$  คือ ค่ากำลังรับแรงกดของรอยแตกหลังจากการเชื่อมประสาน  
 $P_f$  คือ จุดวิบัติในการรับแรงกด และ  
 $D_e$  คือ ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางเทียบเท่า (Equivalent diameter) สำหรับตัวอย่างหินรูปทรงกระบอกที่นำมากัดในแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง

ความสามารถในการเชื่อมประสาน ( $H_e$ ) ของแต่ละรอยแตก สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$H_e = (I_h / I_s) \times 100 \% \quad (4.2)$$

โดยที่  $I_s$  คือ กำลังรับแรงกดแบบจุดของเกลือหินที่ยังไม่มีรอยแตก

ตารางที่ 4.2 และ 4.3 แสดงผลการทดสอบความสามารถในการเชื่อมประสานของรอยแตกที่ตรวจวัดจากตัวอย่างเกลือหินหลังทดสอบการเชื่อมประสานภายใต้อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูงตามลำดับ



รูปที่ 4.9 การทดสอบกำลังรับแรงกดแบบจุดบนตัวอย่างรอยแตกภายหลังจากทดสอบการเชื่อมประสาน

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบความสามารถในการเชื่อมประสานของตัวอย่างเกลือหินภายใต้ อุณหภูมิห้อง

Specimen no.	Inclusion (%)	Healing Time (days)	Axial loading (MPa)	Point load strength index		Healing effectiveness $H_e$ (%)
				Intact salt $I_s$ (kPa)	Healed Fracture $I_h$ (kPa)	
HUT-10e	5	56	0.5	8.86	3.98	45.00
HUT-12e	10		1.0	9.97	5.54	55.55
HUT-13e	15		1.5	11.03	6.62	60.00
HUT-01e	1		2.0	8.20	5.54	67.57
HUT-14e	10	28	0.5	8.79	2.20	25.00
HUT-15e	10		1.0	8.79	3.10	35.00
HUT-16e	5		1.5	8.42	3.55	42.11
HUT-11e	5		2.0	8.42	4.21	50.00
HUT-19e	10	7	0.5	8.86	0.44	5.00
HUT-20e	10		1.0	9.31	0.89	9.52
HUT-21e	5		1.5	8.42	1.33	15.79
HUT-22e	5		2.0	8.86	6.20	17.50

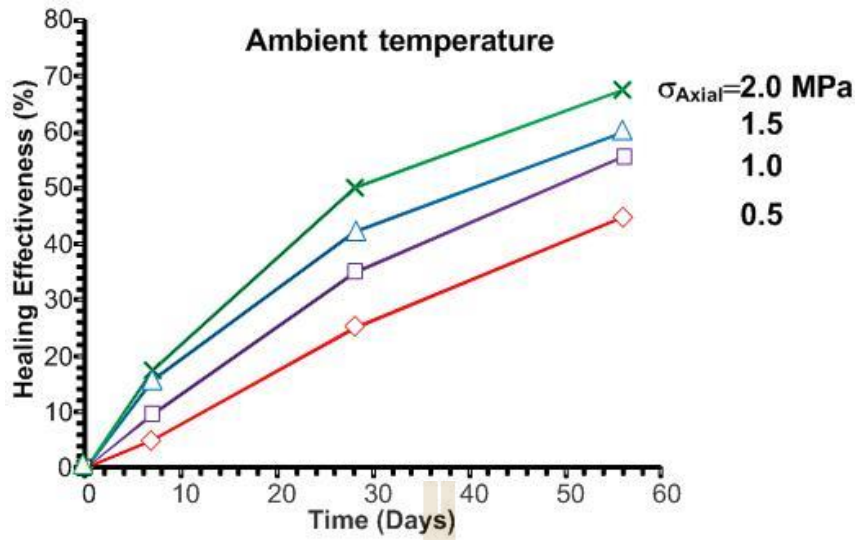
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบความสามารถในการเชื่อมประสานของตัวอย่างเกลือหินภายใต้อุณหภูมิสูง

Specimen no.	Inclusion (%)	Healing Time (days)	Temp. (°C)	Axial loading (MPa)	Point load strength index		Healing effectiveness $H_e$ (%)
					Intact salt $I_s$ (kPa)	Healed fracture $I_h$ (kPa)	
HUT-10e	5	56	Ambient	0.5	8.86	3.98	45.00
HUT-09e	15	56	70	0.5	10.17	5.31	52.17
HUT-08e	5	56	150	0.5	9.31	5.32	57.14
HUT-05e	10	56	200	0.5	8.13	4.83	59.46
HUT-01e	1	56	Ambient	2.0	8.20	5.54	67.57
HUT-06e	10	56	70	2.0	8.42	5.32	63.16
HUT-07e	5	56	150	2.0	9.31	6.21	66.67
HUT-17e	15	56	200	2.0	8.86	6.21	70.00

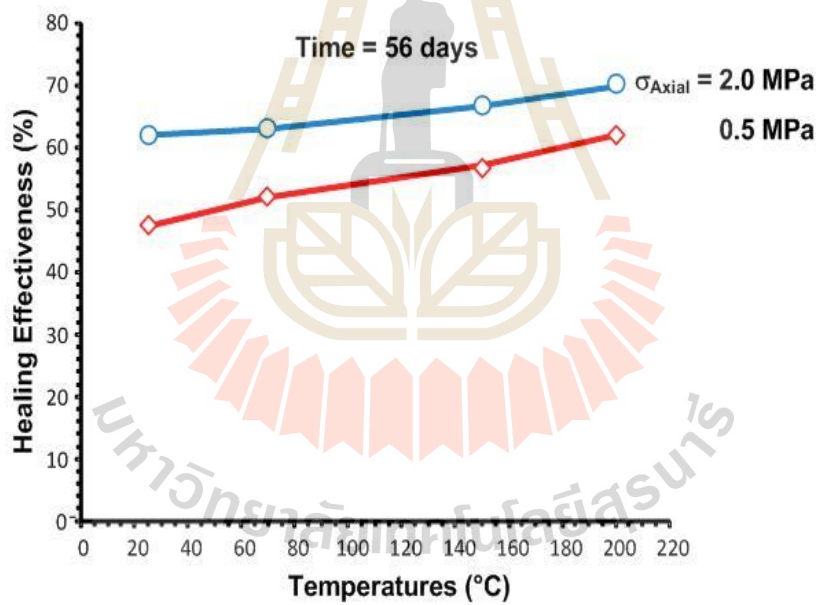
ผลการทดสอบระบุว่าความสามารถในการเชื่อมประสานของรอยแตกขรุขระมีแนวโน้มลดลงเมื่อสิ่งเจือปนในตัวอย่างหินเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม สำหรับการทดสอบแบบรอยแตกเรียบพบว่ารอยแตกดังกล่าวยังคงแยกออกจากกันโดยที่ไม่มีการเชื่อมประสาน ความสามารถในการเชื่อมประสานของรอยแตกขรุขระจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการเชื่อมประสานและความเค้นกดตั้งฉากมีค่าเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.10) ผลการทดสอบการเชื่อมประสานของรอยแตกภายใต้ความเค้นกดตั้งฉาก (รูปที่ 4.11) ที่อุณหภูมิสูงแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิมีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อความสามารถในการเชื่อมประสาน

#### 4.3.2 ผลการทดสอบความเร็วคลื่น

ผลการตรวจวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิก (คลื่นปฐมภูมิ) ที่ส่งผ่านรอยเปิดเผยของตัวอย่างเกลือหินหลังทดสอบการเชื่อมประสานทุกๆ 7 วัน จนครบระยะเวลา 56 วัน (รูปที่ 4.12) ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับความเร็วของคลื่นผ่านตัวอย่างเกลือหินที่ไม่มีรอยแตก ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบความเร็วคลื่น โดยจะเห็นได้ว่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 7 วันแรกของการทดสอบ หลังจากนั้นความเร็วคลื่นจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับเวลา (รูปที่ 4.13 และ 4.14) จากผลการทดสอบดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า รอยแตกบางส่วนมีการปิดตัวลงหรือเกิดการเชื่อมประสาน และบางส่วนของรอยแตกไม่สามารถเชื่อมประสานกันได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Chen et al. (2013) ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและค่าอัตราส่วนปัวซองสามารถคำนวณได้จากสมการ (Pulse velocity measurement – ASTM D2845-08, 2008)



รูปที่ 4.10 ความสามารถในการเชื่อมประสานของรอยแตกแบบดิ่งภายใต้อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4.11 ความสามารถในการเชื่อมประสานของรอยแตกแบบดิ่งภายใต้อุณหภูมิสูง



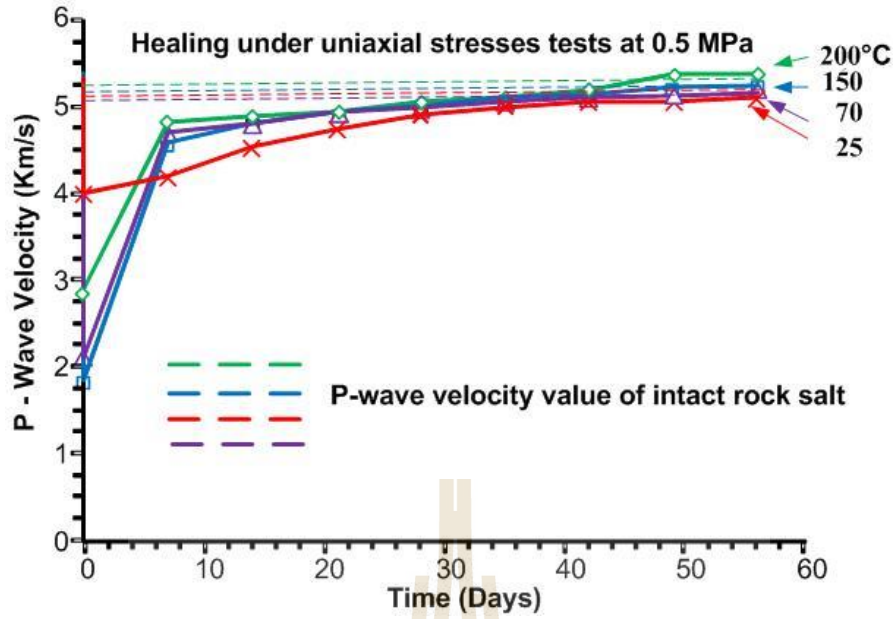
รูปที่ 4.12 การตรวจวัดความเร็วคลื่นบนตัวอย่างเกลือหินด้วยคลื่นอัลตราโซนิก



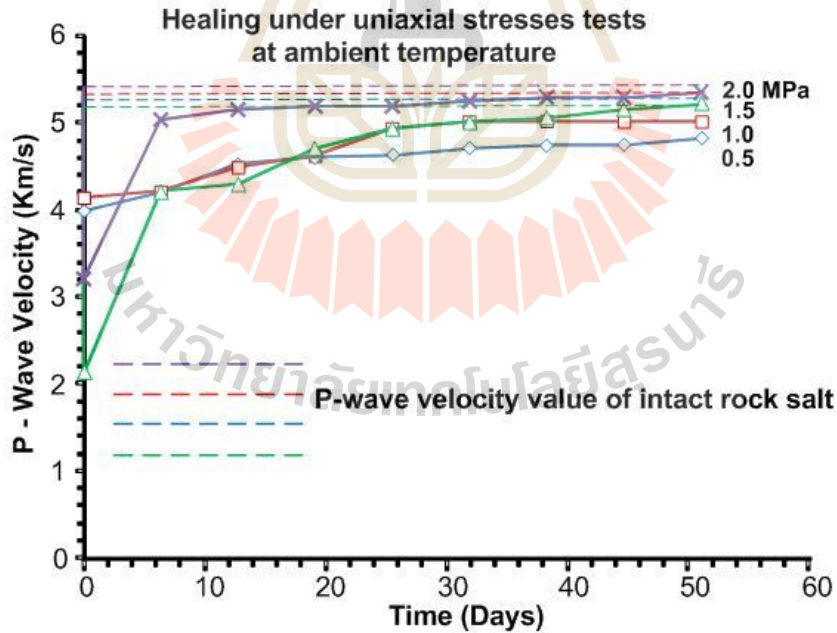
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบความเร็วคลื่นบนตัวอย่างเกลือหินภายหลังทดสอบการเชื่อมประสาน  
ภายใต้อุณหภูมิสูง

Specimen no.	Inclusion (%)	Time (days)	Axial loading (MPa)	Wave velocity tests		Elastic modulus (GPa)
				P-wave (km/s)	S-wave (km/s)	
HUT-19e	10	7	0.5	3.92	2.10	24.06
HUT-20e	10	7	1.0	3.2	1.64	14.93
HUT-21e	5	7	1.5	3.87	2.12	24.27
HUT-22e	5	7	2.0	3.75	2.10	23.55
HUT-14e	10	28	0.5	4.59	2.42	32.16
HUT-15e	10	28	1.0	5.11	2.6	37.63
HUT-16e	5	28	1.5	4.82	2.55	35.66
HUT-11e	5	28	2.0	4.82	2.55	35.66
HUT-01e	1	56	2.0	5.35	2.7	40.70
HUT-10e	5	56	0.5	4.82	2.68	38.87
HUT-12e	10	56	1.0	5.01	2.54	36.64
HUT-13e	15	56	1.5	5.21	2.72	41.37
HUT-09e	15	56	0.5	5.15	2.68	40.40
HUT-08e	5	56	0.5	5.24	2.75	42.40
HUT-05e	10	56	0.5	5.37	2.72	41.84
HUT-06e	10	56	2.0	5.29	2.74	41.52
HUT-07e	5	56	2.0	5.30	2.72	41.05
HUT-17e	15	56	2.0	5.30	2.74	41.55





รูปที่ 4.13 ความเร็วคลื่นปฐมภูมิในฟังก์ชันของเวลาบนตัวอย่างเกลือหินภายหลังทดสอบการประสานตัวภายใต้ความเค้นกดตั้งฉากเท่ากับ 0.5 MPa ที่อุณหภูมิสูง



รูปที่ 4.14 ความเร็วคลื่นปฐมภูมิในฟังก์ชันของเวลาบนตัวอย่างเกลือหินภายหลังทดสอบการประสานตัวภายใต้ความเค้นกดตั้งฉากเท่ากับ 0.5-2 MPa ที่อุณหภูมิห้อง

$$v_d = \frac{(v_p^2/v_s^2) - 2}{2[(v_p^2/v_s^2) - 1]} \quad (4.3)$$

$$E_d = 2(1 + v_d) \cdot \rho v_s^2 \quad (4.4)$$

โดยที่	$v_d$	คือ อัตราส่วนปัวซอง
	$v_p$	คือ ความเร็วของคลื่นปฐมภูมิ
	$v_s$	คือ ความเร็วของคลื่นทุติยภูมิ
	$E_d$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น และ
	$\rho$	คือ ความหนาแน่นของตัวอย่างหิน

#### 4.3.3 ผลการทดสอบการเชื่อมประสานภายใต้ความเค้นล้อมรอบที่เท่ากันทุกทิศทาง

การทดสอบแรงดึงทางอ้อม (ให้แรงกดแบบเส้น) บนรอยแตกหลังทดสอบการเชื่อมประสาน จะทำให้สามารถประเมินประสิทธิภาพเชิงกลศาสตร์ของรอยแตกได้ ความสามารถในการเชื่อมประสาน ( $H_e$ ) ของแต่ละรอยแตกสามารถคำนวณได้จากสมการ

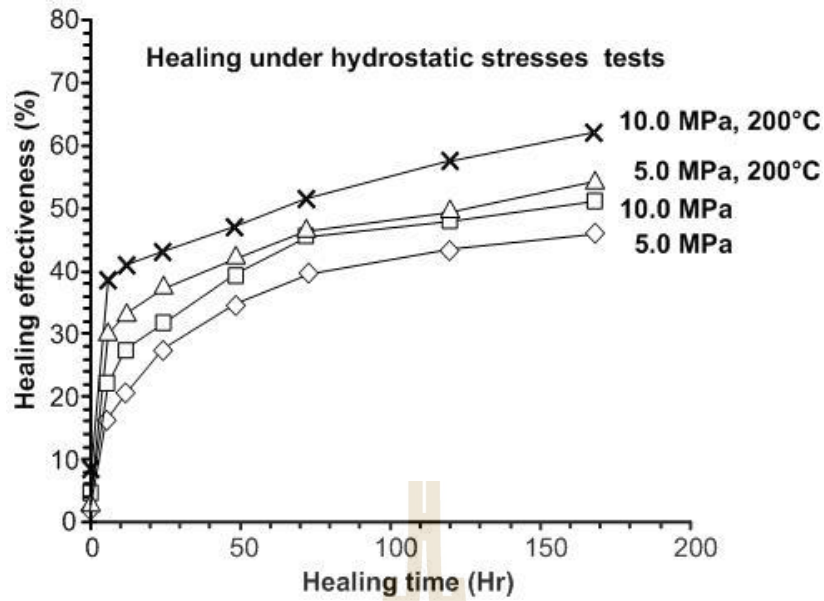
$$H_e = (P_h/P_i) \times 100\% \quad (4.5)$$

โดยที่	$P_h$	คือ กำลังรับแรงกดของบนตัวอย่างหินหลังจากการเชื่อมประสานที่จุดความวิบัติ และ
	$P_i$	คือ กำลังรับแรงกดของบนตัวอย่างหินที่ไม่มีรอยแตก

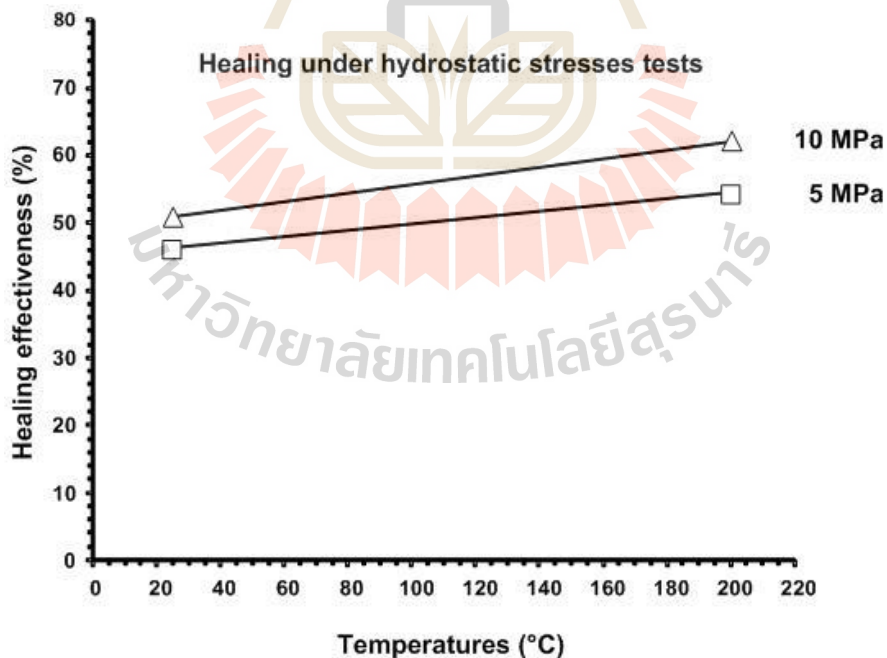
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความสามารถในการเชื่อมประสานของรอยแตกภายใต้ความเค้นล้อมรอบที่เท่ากันทุกทิศทาง รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการเชื่อมประสาน และเวลาจากการทดสอบการเชื่อมประสานภายใต้ความเค้นล้อมรอบเท่ากับ 5 และ 10 MPa บนรอยแตกขรุขระที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 200°C ผลการทดสอบระบุว่าความสามารถในการเชื่อมประสาน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาในการเชื่อมประสานและความเค้นล้อมรอบ โดยอุณหภูมิ มีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อความสามารถในการเชื่อมประสานของตัวอย่างเกลือหิน (รูปที่ 4.16)

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบความสามารถในการเชื่อมประสานภายใต้ความเค้นกดที่เท่ากันทุกทิศทาง

Specimen no.	Healing time (hrs)	Temp. (°C)	Confining pressure (MPa)	Intact rock failure $P_i$ (kN)	After healing failure $P_h$ (kN)	Healing effectiveness $H_e$ (%)
HCT-01e	0	Ambient	5	5.50	0.10	1.82
	6	Ambient	5	5.50	0.90	16.36
	12	Ambient	5	5.50	1.15	20.91
	24	Ambient	5	5.50	1.50	27.27
	48	Ambient	5	5.50	1.90	34.55
	72	Ambient	5	5.50	2.20	40.00
	120	Ambient	5	5.50	2.40	43.64
	168	Ambient	5	5.50	2.55	46.36
	0	200	5	5.50	0.25	4.55
	6	200	5	5.50	1.20	21.82
	12	200	5	5.50	1.50	27.27
	24	200	5	5.50	1.75	31.82
	48	200	5	5.50	2.15	39.09
	72	200	5	5.50	2.50	45.45
	120	200	5	5.50	2.65	48.18
	168	200	5	5.50	2.80	50.91
HCT-02e	0	Ambient	10	6.60	0.20	3.03
	6	Ambient	10	6.60	2.00	30.30
	12	Ambient	10	6.60	2.20	33.33
	24	Ambient	10	6.60	2.50	37.88
	48	Ambient	10	6.60	2.80	42.42
	72	Ambient	10	6.60	3.10	46.97
	120	Ambient	10	6.60	3.30	50.00
	168	Ambient	10	6.60	3.60	54.55
	6	200	10	6.60	2.55	38.64
	12	200	10	6.60	2.70	40.91
	24	200	10	6.60	2.85	43.18
	48	200	10	6.60	3.10	46.97
	72	200	10	6.60	3.40	51.52
	120	200	10	6.60	3.80	57.58
	168	200	10	6.60	4.10	62.12



รูปที่ 4.15 ความสามารถในการเชื่อมประสานในฟังก์ชันของเวลาบนตัวอย่างตัวอย่างเกลือหินภายหลังจากทดสอบการประสานตัวอย่างได้ความเค้นล้อมรอบเท่ากับ 5 และ 10 MPa ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูง



รูปที่ 4.16 ความสามารถในการเชื่อมประสานในฟังก์ชันของอุณหภูมิบนตัวอย่างตัวอย่างเกลือหินภายหลังจากทดสอบการประสานตัวอย่างได้ความเค้นล้อมรอบเท่ากับ 5 และ 10 MPa ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูง

#### 4.4 วิเคราะห์และสรุปผล

จากผลการทดสอบข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ความสามารถในการเชื่อมประสานของรอยแตกในเกลือหินมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีสิ่งเจือปนบนผิวรอยแตกเพิ่มมากขึ้น โดยความสามารถในการเชื่อมประสานของรอยแตกแบบขรุขระจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของเวลาและค่าความเค้นกด อุณหภูมิมีผลต่อการเชื่อมประสานของรอยแตกเพียงเล็กน้อย สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมีค่าอยู่ระหว่าง 14-43 MPa และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นกดและเวลาในการเชื่อมประสานเพิ่มขึ้น สำหรับอัตราส่วนปัวซองมีค่าอยู่ระหว่าง 0.28 กับ 0.35 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาในการเชื่อมประสานเพิ่มขึ้น โดยความสามารถในการเชื่อมประสานจากการทดสอบภายใต้สภาวะความเค้นล้อมรอบที่เท่ากันทุกทิศทาง จะมีค่าสูงกว่าภายใต้สภาวะความเค้นกดตั้งฉาก



## บทที่ 5

### การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

#### 5.1 วัตถุประสงค์

เนื้อหาในบทนี้ได้อธิบายถึงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างความสามารถในการเชื่อมประสานของรอยแตก ความเค้นกด เวลา และอุณหภูมิ โดยใช้โปรแกรมสถิติ IBM SPSS Statistics 19 (Wendai, 2000) ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของสมการ เพื่อใช้ในการคาดคะเนคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของรอยแตกหลังการทดสอบการเชื่อมประสานของรอยแตกในเกลื่อหิน

#### 5.2 การพัฒนาเกณฑ์ความสามารถในการเชื่อมประสาน

##### 5.2.1 เกณฑ์การเชื่อมประสานภายใต้ความเค้นกดตั้งฉาก

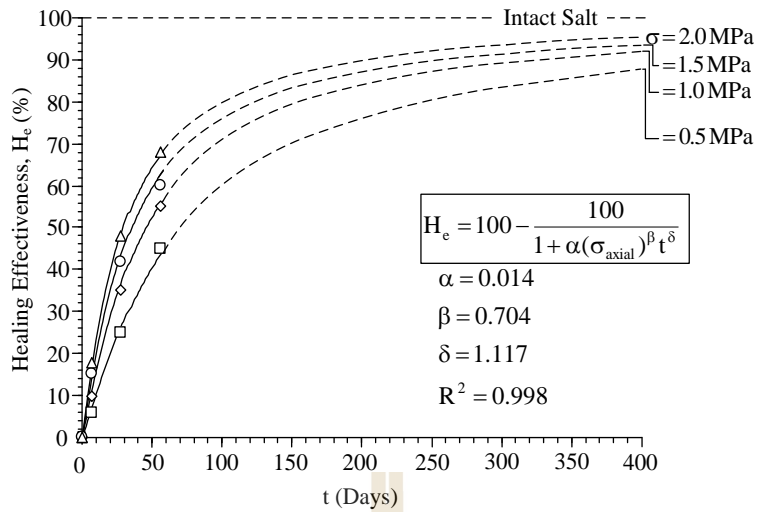
การคาดคะเนความสามารถในการเชื่อมประสานของรอยแตกขรุขระที่เกิดจากการแยกออกจากกันด้วยแรงดึงของตัวอย่างเกลื่อหินที่สัมพันธ์กับความเค้นกดตั้งฉากและเวลาภายใต้อุณหภูมิห้อง แสดงดังสมการ

$$H_e = 100 - [100 / (1 + \alpha \sigma_{axial}^{\beta} t^{\delta})] \quad (\%) \quad (5.1)$$

โดยที่  $H_e$  คือ ความสามารถในการเชื่อมประสานของเกลื่อหิน  
 $\sigma_{axial}$  คือ ความเค้นกดตั้งฉาก  
 $t$  คือ ระยะเวลาในการเชื่อมประสาน และ  
 $\alpha, \beta, \delta$  คือ ค่าคงที่เชิงประจักษ์

โดยสมการดังกล่าวเหมาะสำหรับเกลื่อหินที่อยู่ภายใต้สภาวะความเค้นกดตั้งฉากต่ำ (น้อยกว่า 10% ของกำลังรับแรงกดสูงสุดของเกลื่อหิน) และอุณหภูมิควรอยู่ในช่วงระหว่าง 15 ถึง 35°C

สำหรับเกลื่อหินที่ใช้ในการทดสอบค่าคงที่เชิงประจักษ์ในสมการ 5.1 สามารถคำนวณได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงถดถอย โดยกำหนดให้  $\sigma_{axial} = 0.5, 1.0, 1.5$  และ  $2.0$  MPa และ  $t = 0, 7, 28$  และ  $56$  วัน การทดสอบดำเนินการภายใต้อุณหภูมิห้อง ค่าคงที่เชิงประจักษ์สามารถคำนวณได้ดังนี้  $\alpha = 0.014, \beta = 0.704$  และ  $\delta = 1.117$  ซึ่งมีค่าความแม่นยำระหว่างสมการทางคณิตศาสตร์และผลการทดสอบเท่ากับ 0.998 (รูปที่ 5.1)



รูปที่ 5.1 ความสามารถในการเชื่อมประสานของรอยแตกขรุขระภายใต้ความเค้นกดตั้งฉากในฟังก์ชันของเวลา

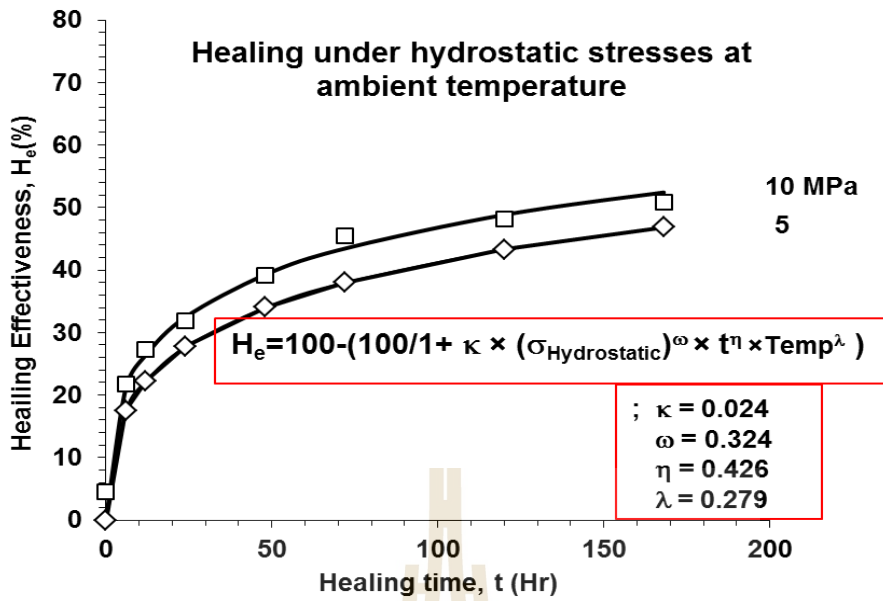
5.2.2 เกณฑ์การเชื่อมประสานภายใต้ความเค้นล้อมรอบที่เท่ากันทุกทิศทาง

การคาดคะเนความสามารถในการเชื่อมประสานของรอยแตกขรุขระที่เกิดจากการแยกออกจากกันด้วยแรงดึงของตัวอย่างเกลือหินที่สัมพันธ์กับความเค้นล้อมรอบที่เท่ากันทุกทิศทางและเวลาภายใต้อุณหภูมิห้อง แสดงดังสมการ

$$H_e = 100 - [100 / (1 + \kappa \sigma_{\text{Hydrostatic}}^{\omega} t^{\eta \lambda})] \quad (5.2)$$

- โดยที่  $H_e$  คือ ความสามารถในการเชื่อมประสาน
- $\sigma_{\text{Hydrostatic}}$  คือ ความเค้นล้อมรอบที่เท่ากันทุกทิศทาง
- $T$  คือ อุณหภูมิ
- $\kappa, \omega, \eta, \lambda$  คือ ค่าคงที่เชิงประจักษ์

โดยสมการดังกล่าวเหมาะสำหรับเกลือหินที่อยู่ภายใต้สภาวะความเค้นล้อมรอบที่เท่ากันทุกทิศทาง (น้อยกว่า 30% และมากกว่า 5% ของกำลังรับแรงกดสูงสุดของเกลือหิน) สมการนี้จะมีค่าน่าเชื่อถือสูงเมื่อระยะเวลาในการเชื่อมประสานอยู่ระหว่าง 1 ถึง 170 ชั่วโมง และอุณหภูมิควรอยู่ในช่วงระหว่าง 15 ถึง 35°C สำหรับเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบค่าคงที่เชิงประจักษ์ในสมการ 5.2 สามารถคำนวณได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงถดถอย โดยกำหนดให้  $\sigma_{\text{Hydrostatic}} = 5$  และ 10 MPa และ  $t = 0, 6, 12, 24, 48, 72, 120$  และ 168 ชั่วโมง การทดสอบดำเนินการภายใต้อุณหภูมิห้อง ค่าคงที่เชิงประจักษ์สามารถคำนวณได้ดังนี้  $\kappa = 0.024, \omega = 0.324, \eta = 0.426$  และ  $\lambda = 0.279$  ซึ่งมีค่าความแม่นยำระหว่างสมการทางคณิตศาสตร์และผลการทดสอบเท่ากับ 0.988 (รูปที่ 5.2)



รูปที่ 5.2 ความสามารถในการเชื่อมประสานของรอยแตกขรุขระภายใต้ความเค้นล้อมรอบที่อุณหภูมิห้องในฟังก์ชันของเวลา

สำหรับการคาดคะเนความสามารถในการเชื่อมประสานของรอยแตกขรุขระที่เกิดจากการแยกออกจากกันด้วยแรงดึงของตัวอย่างเกลือหินที่สัมพันธ์กับความเค้นล้อมรอบที่เท่ากันทุกทิศทางและเวลา ภายใต้อุณหภูมิสูง (200°C) แสดงดังสมการ

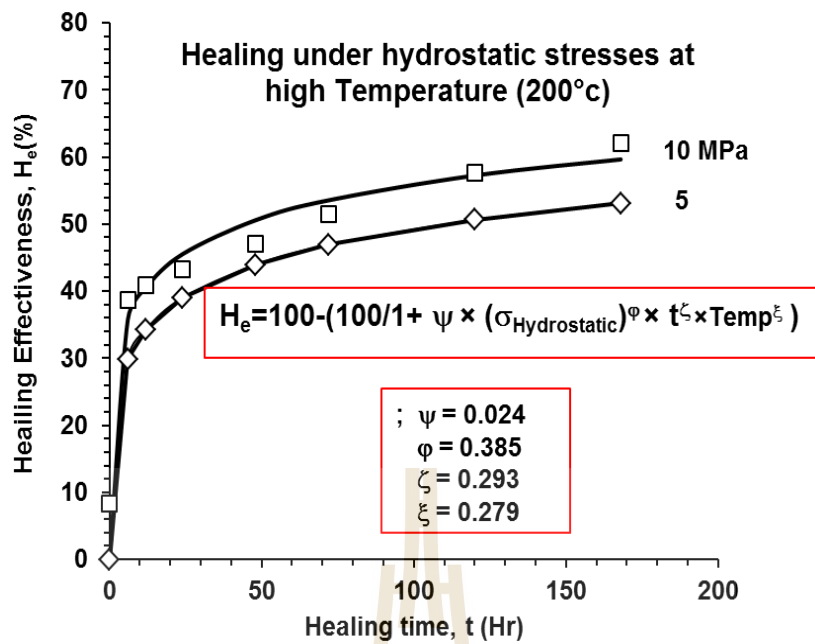
$$H_e = 100 - \left[ \frac{100}{1 + \psi \sigma_{\text{Hydrostatic}}^\varphi t^\zeta T^\xi} \right] \quad (\%) \quad (5.3)$$

โดยที่  $H_e$  คือ ความสามารถในการเชื่อมประสาน  
 $\psi, \varphi, \zeta, \xi$  คือ ค่าคงที่เชิงประจักษ์

โดยสมการดังกล่าวเหมาะสำหรับเกลือหินที่อยู่ภายใต้สภาวะความเค้นล้อมรอบที่เท่ากันทุกทิศทาง (น้อยกว่า 30% และมากกว่า 5% ของกำลังรับแรงกดสูงสุดของเกลือหิน) สมการนี้จะมีแนวโน้มเชื่อถือสูงเมื่อระยะเวลาในการเชื่อมประสานอยู่ระหว่าง 1 ถึง 170 ชั่วโมง และอุณหภูมิควรอยู่ในช่วง 200°C

สำหรับเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบค่าคงที่เชิงประจักษ์ในสมการ 5.3 สามารถคำนวณได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงถดถอย โดยกำหนดให้  $\sigma_{\text{Hydrostatic}} = 5$  และ 10 MPa และ  $t = 0, 6, 12, 24, 48, 72, 120$  และ 168 ชั่วโมง การทดสอบดำเนินการภายใต้อุณหภูมิ 200°C ค่าคงที่เชิงประจักษ์สามารถคำนวณได้ดังนี้  $\psi = 0.024, \varphi = 0.385, \zeta = 0.293$  และ  $\xi = 0.279$  ซึ่งมีค่าความแม่นยำระหว่างสมการทางคณิตศาสตร์และผลการทดสอบเท่ากับ 0.969 (รูปที่ 5.3)





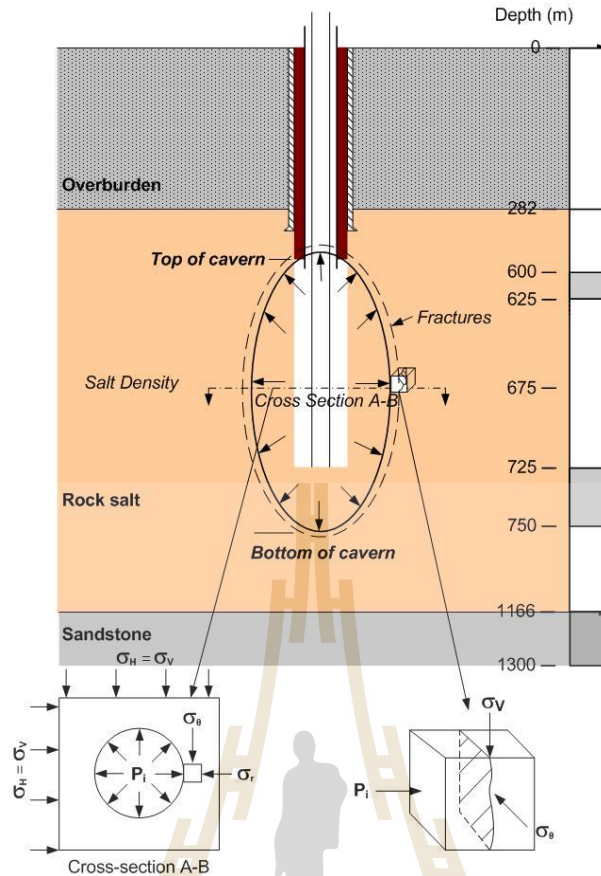
รูปที่ 5.3 ความสามารถในการเชื่อมประสานของรอยแตกขรุขระภายใต้ความเค้นล้อมรอบที่อุณหภูมิสูงในฟังก์ชันของเวลา

### 5.3 การประยุกต์ใช้ (Application)

สมการที่นำเสนอไว้ในข้างต้นสามารถใช้ในการคาดคะเนความสามารถในการเชื่อมประสานของรอยแตกรอบโรงอัดอากาศ (Compressed-air energy storage - CAES) ในชั้นเกลือหิน โดยกำหนดให้โรงรูปทรงกระบอกที่มีด้านบนและด้านล่างเป็นรูปครึ่งวงกลมมีรัศมีเท่ากับ 50 m และความสูงเท่ากับ 150 m หลังคาโรงอยู่ที่ระดับความลึก 600 m โดยความดันในการอัดอากาศภายในโรงมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 20% และมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 90% ของความเค้นที่หลังคาโรง ความหนาแน่นของชั้นหินปิดทับและเกลือหินเท่ากับ 0.025 และ 0.0021 MPa/m ตามลำดับ (Phueakphum, 2003) รูปที่ 5.4 แสดงความเค้นรอบโรงเกลือและรอยแตกที่เกิดขึ้นในสภาวะความดันต่ำสุดที่โรงไม่เกิดการพัง ในการศึกษานี้ได้จำลองออกเป็น 2 กรณี คือ

**กรณีศึกษาที่ 1:** กำหนดให้โรงอยู่ภายใต้สภาวะความเค้นล้อมรอบที่เท่ากันทุกทิศทาง ความเค้นในแนวตั้ง ( $\sigma_v = \sigma_n$ ) ความเค้นในแนวสัมผัส ( $\sigma_\theta$ ) และความเค้นในแนวรัศมี ( $\sigma_r$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ (Brady and Brown, 2006)

$$\sigma_v = \sum (\rho gh) \text{ MPa} \quad (5.4)$$



รูปที่ 5.4 ความเค้นรอบโพรงเกลือและรอยแตกที่เกิดขึ้นในสภาวะความดันต่ำสุด

$$\sigma_\theta = \frac{P_1 + P_2}{2} \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{P_1 - P_2}{2} \left( 1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cdot \cos 2\theta - P_i \left( \frac{a^2}{r^2} \right) \quad \text{MPa} \quad (5.5)$$

$$\sigma_r = \frac{P_1 + P_2}{2} \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{P_1 - P_2}{2} \left( 1 - \frac{4a^4}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cdot \cos 2\theta + P_i \left( \frac{a^2}{r^2} \right) \quad \text{MPa} \quad (5.6)$$

- โดยที่
- $H_e$  คือ ความสามารถในการเชื่อมประสาน
  - $\rho$  คือ ความหนาแน่นของหิน
  - $h$  คือ ความลึก
  - $P_1$  คือ ความเค้นในแนวตั้ง
  - $P_2$  คือ ความเค้นในแนวนอน
  - $r$  คือ ระยะห่างจากจุดกึ่งกลางโพรงถึงตำแหน่งที่พิจารณา
  - $a$  คือ รัศมีของโพรง
  - $\theta$  คือ มุมระหว่าง  $P_1$  และ  $r$  และ
  - $P_i$  คือ ความดันภายในโพรง

จากสมการที่ 5.5 และ 5.6 สามารถคำนวณความเค้นที่ขอบโพรง ( $r=a$ ) ภายใต้สภาวะความเค้นล้อมรอบที่เท่ากันทุกทิศทาง ( $P_1 = P_2 = P$ ) จากสมการต่อไปนี้

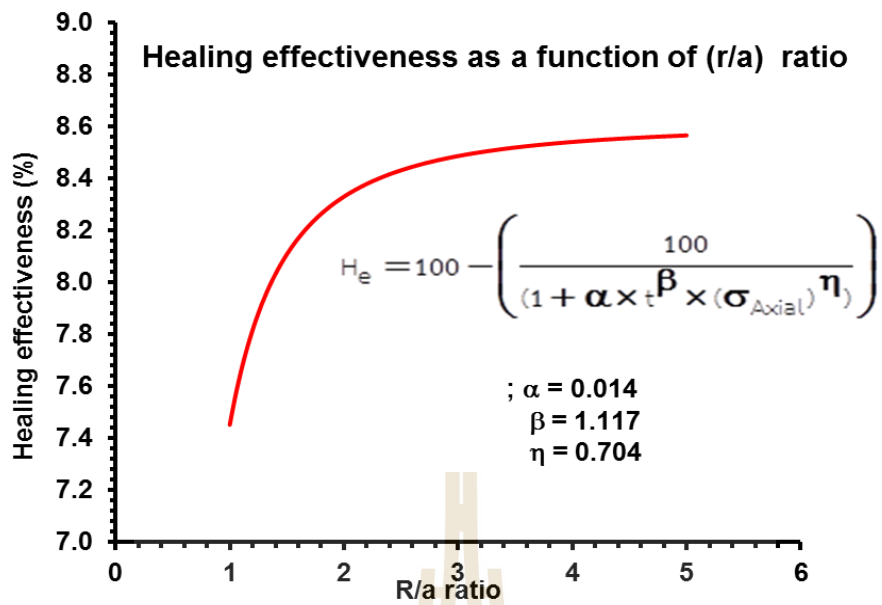
$$\sigma_{\theta} = 2P - P_i \quad \text{MPa} \quad (5.7)$$

$$\sigma_r = P_i \quad \text{MPa} \quad (5.8)$$

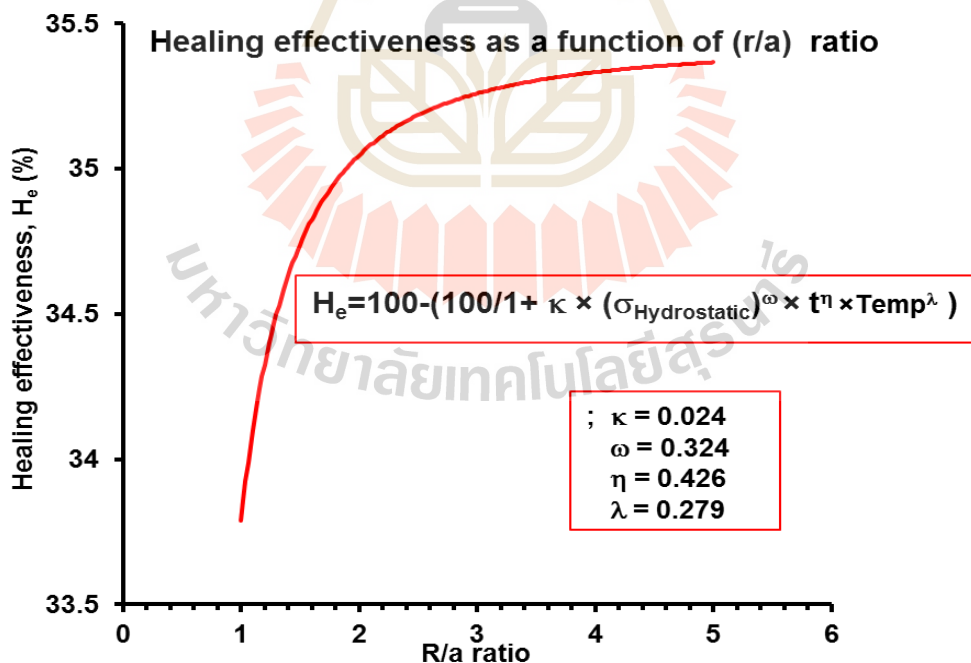
จากการคำนวณพบว่า ความเค้นในแนวตั้งที่กึ่งกลางโพรง (ระดับความลึก 675 m) มีค่าเท่ากับ 15.3 MPa ความเค้นที่หลังคาโพรง (ระดับความลึก 600 m) มีค่าเท่ากับ 13.7 MPa โดยภายใต้สภาวะความดันสูงสุด (90% ของความเค้นเริ่มต้นที่หลังคาโพรง) ความดันภายในโพรงมีค่าประมาณ 12.4 MPa และความเค้นล้อมรอบเท่ากับ 15.0 MPa จากสมการ 5.4 และ 5.5 ความเค้นในแนวสัมผัสและความเค้นในแนวรัศมี มีค่าเท่ากับ 17.6 และ 12.4 MPa ตามลำดับ ดังนั้น  $\sigma_1 = \sigma_{\theta} = 17.6$  MPa,  $\sigma_2 = \sigma_r = 15.3$  MPa และ  $\sigma_3 = \sigma_r = 12.4$  MPa โดยความเค้นมีค่าประมาณ 15.0 MPa ที่กึ่งกลางโพรง และหากโพรงอยู่ภายใต้สภาวะความเค้นล้อมรอบที่เท่ากันทุกทิศทางที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วัน การฟื้นฟูคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของรอยแตกหลังการเชื่อมประสานจะมีค่าประมาณ 35% (สมการ 5.2) เมื่อเทียบกับตัวอย่างเกลือหินที่ไม่มีรอยแตก

อย่างไรก็ตาม หากโพรงอยู่ภายใต้สภาวะความเค้นกดตั้งฉากที่อุณหภูมิห้องจะพบว่าการฟื้นฟูคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของรอยแตกหลังการเชื่อมประสานจะมีค่าประมาณ 8% (สมการที่ 5.1) เมื่อเทียบกับตัวอย่างเกลือหินที่ไม่มีรอยแตก ผลการคำนวณดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการเชื่อมประสานภายใต้ความเค้นล้อมรอบที่เท่ากันทุกทิศทางจะมีค่ามากกว่าภายใต้ความเค้นกดตั้งฉากเพียงอย่างเดียว ซึ่งในสภาวะจริงเกลือหินจะอยู่ทั้งภายใต้สภาวะความเค้นล้อมรอบที่เท่ากันทุกทิศทางและความเค้นกดตั้งฉาก จึงสามารถสรุปได้ว่าความสามารถในการเชื่อมประสานของรอยแตกในชั้นเกลือหินจะมีค่าน้อยกว่า 8% และไม่เกิน 41% ที่อุณหภูมิห้อง

**กรณีศึกษาที่ 2:** กำหนดให้โพรงอยู่ภายใต้สภาวะความเค้นล้อมรอบที่เท่ากันทุกทิศทาง ความเค้นในแนวตั้ง ความเค้นในแนวสัมผัส และความเค้นในแนวรัศมี สามารถคำนวณได้เช่นเดียวกับกรณีศึกษาที่ 1 โดยในกรณีนี้ได้ทำการผันแปรอัตราส่วน  $r/a$  ขึ้นที่ละ 0.1 จนถึง 5 รูปที่ 5.5 และ 5.6 แสดงความสามารถในการเชื่อมประสานของรอยแตกตามการผันแปรอัตราส่วน  $r/a$  ผลการคำนวณระบุว่าความสามารถในการเชื่อมประสานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วบริเวณขอบโพรง ( $r/a=1-2$ ) และจะเริ่มคงที่ไปจนถึงอัตราส่วน  $r/a=5$  หรืออาจกล่าวได้ว่าที่ระยะไกลออกไปจากขอบโพรงจะส่งผลให้ความสามารถในการเชื่อมประสานเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 5.5 ความสามารถในการเชื่อมประสานของรอยแตกภายใต้ความเค้นกดในแนวตั้งฉากในฟังก์ชันของการผันแปร r/a



รูปที่ 5.6 ความสามารถในการเชื่อมประสานของรอยแตกภายใต้ความเค้นล้อมรอบที่เท่ากันทุกทิศทางในฟังก์ชันของการผันแปร r/a

จากผลการคำนวณที่มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ จึงสามารถสรุปได้ว่าสมการเชิงประจักษ์ที่ได้นำเสนอไว้ข้างต้นมีความน่าเชื่อถือและเหมาะสมสำหรับใช้คาดคะเนการเชื่อมประสานของรอยแตกของเกลื้อหินภายใต้ความเค้นและการเปลี่ยนแปลงของเวลา อย่างไรก็ตามสมการดังกล่าวไม่เหมาะสมสำหรับใช้คาดคะเนการเชื่อมประสานภายในช่วงระยะเวลาอันสั้น (น้อยกว่า 7 วัน สำหรับการเชื่อมประสานภายใต้ความเค้นกดตั้งฉาก) จาก CAES Technology แสดงให้เห็นว่ารอยแตกเกิดการเชื่อมประสานขึ้นมากกว่า 8% ภายใต้สภาวะจริงในภาคสนาม อย่างไรก็ตามค่าความเค้นที่กระทำบนรอยแตกจะต้องไม่เกินค่าความยืดหยุ่นของเกลื้อหิน (ประมาณ 30% ของกำลังรับแรงกดในแกนเดียวของเกลื้อหินที่ไม่มีรอยแตก) ทั้งนี้เนื่องจากหากความเค้นที่กระทำบนรอยแตกมีค่ามากเกินไปอาจทำให้เกิดรอยแตกขนาดเล็กขึ้นในเกลื้อหินได้



## บทที่ 6

### บทสรุปและข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

#### 6.1 วิเคราะห์ผลการวิจัย

ผลการทดสอบพบว่ารอยแตกเรียบที่เกิดจากการตัดด้วยเลื่อยไม่มีการเชื่อมประสานเกิดขึ้นภายใต้สภาวะต่างๆ ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถในการเชื่อมประสานของรอยแตกขึ้นกับความบริสุทธิ์ของผลึกเกล็ดหินบนผิวหน้าของรอยแตก ซึ่งเห็นได้จากขนาดของแนวแตกบนผลึกเกล็ดหินมีความบริสุทธิ์มากกว่าผลึกที่อยู่บริเวณรอยแตกเรียบ อย่างไรก็ตาม พื้นผิวที่เกิดจากการจำลองรอยแตกเหล่านี้ อาจเกิดการปนเปื้อนในระหว่างกระบวนการเตรียมตัวอย่างได้ ความไม่บริสุทธิ์เหล่านี้ อาจเคลือบผิวรอยแตกอยู่จึงทำให้ไม่เกิดการเชื่อมประสานขึ้น ในการทดสอบได้มีการใช้อุณหภูมิเพื่อช่วยให้เกิดการเชื่อมประสานมากขึ้น แต่จากผลการทดสอบพบว่า การเชื่อมประสานของรอยแตกเรียบก็ยังไม่เกิดขึ้นภายใต้อุณหภูมิสูง (70°C, 150°C และ 200°C) อาจเนื่องมาจากการเชื่อมประสานของรอยแตกเรียบ อาจต้องใช้ความเค้นกด (มากกว่า 10% และไม่ควรมากเกิน 30% ของกำลังรับแรงกดในแกนเดียวของเกล็ดหิน) และเวลาที่มากขึ้น เพื่อให้ขอบเขตของผลึกรอยแตกระหว่างผิวของรอยแตกเรียบปิดลง และเพื่อเพิ่มความเป็นไปได้ในการเชื่อมประสานขึ้น การเชื่อมประสานจึงเกิดขึ้นได้ยากในรอยแตกที่เกิดจากการแบ่งแยกขอบเขตระหว่างผลึก โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากรอยแตกดังกล่าวถูกเคลือบด้วยความไม่บริสุทธิ์ต่างๆ

สำหรับรอยแตกขรุขระที่เกิดจากการแยกออกจากกัน หรือการแยกออกของผลึกเกล็ด (รอยแตกที่เกิดจากการทำให้แยกออกจากกันด้วยแรงดึง) จะสามารถเกิดการเชื่อมประสานได้ภายใต้สภาวะความเค้นกดต่ำในช่วงระยะเวลาเพียงสั้นๆ อาจกล่าวได้ว่าการเชื่อมประสานมักจะเกิดขึ้นเมื่อผลึกเกล็ดหินทั้งสองด้านของระนาบรอยแตกมีการประสานกันพอดีในตำแหน่งก่อนที่จะมีการจำลองรอยแตก

ผลการทดสอบยังไม่สามารถระบุได้อย่างชัดเจนว่าภายใต้อุณหภูมิสูงจะสามารถเกิดการเชื่อมประสานของรอยแตกได้มากกว่าภายใต้อุณหภูมิต่ำหรือไม่ โดยเห็นได้จากอุณหภูมิมีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อความสามารถในการเชื่อมประสานเมื่อเทียบกับผลกระทบจากความเค้นและเวลา เนื่องจากอุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดการสูญเสียความชื้นที่จำเป็นสำหรับกระบวนการเชื่อมประสาน

อย่างไรก็ตาม จากการทดสอบพบว่า การประสานตัวของรอยแตกขรุขระในเกล็ดหินภายใต้สภาวะเงื่อนไขของเวลา อุณหภูมิ และความเค้นไม่สามารถประสานตัวจนมีสภาพดั้งเดิมก่อนมีการจำลองรอยแตกได้ (Initial state) ซึ่งสังเกตได้จากค่าความเร็วของคลื่นปฐมภูมิ (P-wave) ผ่านตัวอย่างเกล็ดหินที่มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาในการเชื่อมประสานผ่านไป 7 วัน และเริ่มช้าลงหลังการทดสอบผ่านไป 7 วัน กระทั่งความเร็วคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 21 วัน ปรากฏการณ์นี้บ่งชี้ว่า บางส่วนของรอยแตกมีการเชื่อมประสานหรือตกผลึกใหม่ ในขณะที่บางส่วนไม่เกิดเชื่อมประสาน ซึ่งการเพิ่มขึ้นอย่าง

รวดเร็วของความเร็วคลื่นใน 7 วันแรกหลังการทดสอบ แสดงถึงการปิดลงของรอยแตกหรือการเชื่อมประสานขนาดเล็กที่เกิดขึ้นได้ในเวลาสั้นๆ นั่นเอง

การกำหนดค่าความเค้นที่กระทำบนรอยแตกจึงขึ้นอยู่กับค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวของเกลียวหิน กล่าวคือ ค่าความเค้นกดตั้งฉากสูงสุดที่ใช้ในการทดสอบได้จำกัดอยู่ที่ 2 MPa หรือประมาณ 5% ของความเค้นกดสูงสุด ทั้งนี้เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดรอยแตกใหม่บนตัวอย่างเกลียวหิน สำหรับการทดสอบภายใต้ความเค้นล้อมรอบที่เท่ากันทุกทิศทาง ตัวอย่างการทดสอบสามารถรับความเค้นกดได้สูงถึง 10 MPa ดังนั้นการเชื่อมประสานของรอยแตกภายใต้ความเค้นล้อมรอบที่เท่ากันทุกทิศทางจึงมีประสิทธิภาพมากกว่าการเชื่อมประสานภายใต้ความเค้นกดตั้งฉาก

## 6.2 สรุปผลการวิจัย

ผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการและการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1) การทดสอบการเชื่อมประสานของรอยแตกเรียบภายใต้ความเค้นกดตั้งฉากที่อุณหภูมิห้องและภายใต้อุณหภูมิ 200°C ระบุว่ารอยแตกไม่มีการเชื่อมประสานเกิดขึ้น สำหรับการทดสอบการเชื่อมประสานของรอยแตกขรุขระภายใต้ความเค้นและอุณหภูมิคงที่ในระหว่างการทดสอบ พบว่าความสามารถในการเชื่อมประสานเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเค้นกดคงที่และเวลาที่ใช้ในการทดสอบ และมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของสิ่งเจือปนบนรอยแตก ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Fuenkajorn และ Phueakphum (2011) อย่างไรก็ตาม จากการทดสอบการเชื่อมประสานภายใต้อุณหภูมิสูง พบว่าอุณหภูมิมิมีผลกระทบน้อยมากต่อความสามารถในการเชื่อมประสาน ซึ่งแตกต่างจากผลการทดสอบของ Chen และคณะ (2013) ที่ระบุว่าอุณหภูมิมิมีผลกระทบอย่างมากต่อความสามารถในการเชื่อมประสาน ทั้งนี้อาจเนื่องจากผู้วิจัยได้ทำการทดสอบบนตัวอย่างหินที่เป็นรอยแตกขนาดเล็ก แต่การทดสอบนี้กระทำบนตัวอย่างหินที่มีรอยแตกขนาดใหญ่

2) ค่าความยืดหยุ่นของเกลียวหินส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับ การเพิ่มขึ้นของความเค้นกดและเวลาที่ใช้ในการเชื่อมประสาน โดยความยืดหยุ่นของเกลียวหินมีค่าระหว่าง 14 ถึง 43 GPa อัตราส่วนปัวซองมีค่าระหว่าง 0.28 กับ 0.35 ซึ่งส่วนใหญ่มีแนวโน้มขึ้นอยู่กับเวลา ความเค้น และอุณหภูมิ

3) ความเร็วคลื่นปฐมภูมิของเกลียวหินเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 7 วันแรกของการทดสอบ หลังจากนั้นจึงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับเวลาที่เพิ่มขึ้น จากผลการทดสอบสามารถบ่งชี้ได้ว่าบางส่วนของรอยแตกของเกลียวหินมีการปิดลงหรือเกิดการเชื่อมประสาน แต่บางส่วนก็ไม่มี การเชื่อมประสานเกิดขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Chen และคณะ (2013) และ Jiang และคณะ (2013) โดยอุณหภูมิสูงแทบจะไม่มีผลต่อการเกิดกระบวนการตกผลึกในช่วง 7 วันแรกของการทดสอบ

4) ผลการทดสอบการเชื่อมประสานภายใต้ความเค้นล้อมรอบที่เท่ากันทุกทิศทางภายใต้ อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 200°C ระบุว่าความสามารถในการเชื่อมประสานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อ ระยะเวลาในการเชื่อมประสานและความเค้นมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ ผลกระทบของอุณหภูมิมิมีผลต่อการเชื่อม ประสานน้อยมาก โดยการเชื่อมประสานจะมีประสิทธิภาพมาก ถ้าผลึกของเกลือหินบนผิวทั้งสองด้าน ประบกลับไปยังตำแหน่งเดิมก่อนที่จะมีการจำลองรอยแตก

อย่างไรก็ตาม ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบนี้มีขนาดเล็กเกินไป จึงควรมีการ ทดสอบบนตัวอย่างหินที่มีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้ในการทดสอบควรจะมีการประเมินผลกระทบจาก ความชื้นที่มีผลต่อการประสานตัวของรอยแตกด้วย





## บรรณานุกรม

- Allemandou, X. and Dusseault, M.B. (1993). Healing processes and transient creep of salt rock. In Anagnostopoulos, A. (eds.). **Geotechnical Engineering of Hard Soils–Soft Rocks**. Rotterdam, Brookfield, USA: A. A. Balkema. 1-3: 1581-1590.
- ASTM D2845-08 (2008). **Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock**. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM D2938-79. (1979). **Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens**. Annual book of ASTM standards (Vol. 40.08). Philadelphia: American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM D3967-81. (1981). **Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens**. Annual book of ASTM standards (Vol. 40.08). Philadelphia: American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM D4543-85. (1985). **Standard practice for preparing rock core specimens and determining dimensional and shape tolerances**. Annual book of ASTM standards (Vol. 40.08). Philadelphia: American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM D5731-95. (1995). **Standard test method for determination of the point load strength index of rock**. Annual book of ASTM standards (Vol. 40.08). Philadelphia: American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- Brady, B.G.H. and Brown, E.T. (2006). **Rock mechanics for underground mining**. (3<sup>rd</sup> edition). Springer, Netherlands. pp. 626.
- 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 1<sup>st</sup> North American Rock Mechanics Symposium**. University of Texas, Austin, June 1994, A. A. Balkema, Rotterdam. pp. 731-740.

- Chan, K.S., Bodner, S.R. and Munson, D.E. (2001). Recovery and healing of damage in WIPP salt. **International Journal of Damage Mechanics**. 10: 347-375.
- 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 **Proceeding of the Fourth Conference on the Mechanical Behavior of salt**. The Pennsylvania State University, June 17-18, 1996, Clausthal-Zellerfeld-Zellerfeld, Germany: Trans Tech Publications. pp. 211-234.
- Chen, J., Ren, S., Yang, C., Jiang, D. and Li, L. (2013). Self-healing characteristics of damage rock salt under different healing conditions. **Materials**. 6: 3438-3450.
- Fuenkajorn, K. and Kenkhunthod, N. (2010). Influence of loading rate on deformability and compressive strength of three Thai sandstones. **Geotechnical and Geological Engineering**. 28: 707-715.
- Fuenkajorn, K. and Phueakphum, D. (2011). Laboratory assessment of healing of fracture in rock salt. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**. 70: 665-672.
- Jiang, D.Y., Li, Q.X., Chen, J., Ren, S. and Yang, C.H. (2013). Self-recovery ability of stress-damaged salt rock experiment. **Journal of Coal Science & Engineering**. pp. 63-68.
- 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): 1122-1129.
- Munson, D.E., Chan, K.S. and Fossum A.F. (1999). **Fracture and healing of rock salt related to salt caverns**. SMRI Report, Spring Meeting. April 14-16, Las Vegas, Nevada. Solution Mining Research Institute, Encinitas, CA.
- Phueakphum, D. (2003). **Compressed-air energy storage in rock salt of the Maha Sarakham formation**. M.S. Thesis. Suranaree University of Technology, Thailand. pp. 153.
- Renard, F. (1999). **Pressure solution and crack healing and sealing**. Institute of Geology and Department of Physics. Charles University, Prague; Summer school on: Geology related to nuclear waste disposal. July 5-11. Roztez, Czech Republic. University of Oslo, Norway.

- Wendai, L. (2000). **Regression analysis, linear regression and probit regression in 13 chapter**. SPSS for Windows: statistical analysis, Publishing House of Electronics Industry, Beijing.
- Zeigler, T.W. (1976). **Determination of rock mass permeability**. Technical Report S-76-2, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.



## ประวัตินักวิจัย

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

