



รหัสโครงการ SUT7-719-59-24-33

## รายงานการวิจัย

การทดสอบเกลือหินบดภายใต้การอัดตัวระยะยาวเพื่อใช้เป็นวัสดุถมกลับ  
ในเหมืองเกลือและเหมืองโพแทชใต้ดิน เพื่อลดการทรุดตัวของผิวดิน  
และกำจัดกองเกลือบนผิวดิน

(Experimental Assessment of Long-Term Consolidation of Crushed  
Salt for Backfilled Material in Salt and Potash Mines to Minimize  
Surface Subsidence and Salt Waste Elimination)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-719-59-24-33

## รายงานการวิจัย

การทดสอบเกลือหินบดภายใต้การอัดตัวระยะยาวเพื่อใช้เป็นวัสดุถมกลับ  
ในเหมืองเกลือและเหมืองโพแทชใต้ดิน เพื่อลดการทรุดตัวของผิวดิน  
และกำจัดกองเกลือบนผิวดิน

(Experimental Assessment of Long-Term Consolidation of Crushed  
Salt for Backfilled Material in Salt and Potash Mines to Minimize  
Surface Subsidence and Salt Waste Elimination)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เฟื่องขจร  
สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2559-2560

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2560

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559-2560 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จจุลวงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากทีมงานหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีในการทดสอบและ นางสาวกัลญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัยและพิสูจน์อักษร ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

กันยายน 2560



## บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษาคือ เพื่อศึกษาผลกระทบของความเค้นกดและระยะเวลาต่อคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินบดด้วยวิธีการทดสอบการอัดตัวในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างเกลือหินบดมีขนาดคละกันระหว่าง 0.075 ถึง 4.75 mm โดยนำเกลือหินบดผสมกับน้ำเกลืออิ่มตัว 5% โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบภายใต้ความเค้นกด 4 ระดับ คือ 2.5, 5, 7.5 และ 10 MPa ระยะเวลาในการอัดตัวผันแปรตั้งแต่ 30, 90 และ 180 วัน ผลการทดสอบระบุว่าค่าความหนาแน่น ค่ากำลังรับแรงกด และค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเค้นกดและระยะเวลาของการอัดตัว อัตราส่วนปัวซองของสมีค่าลดลงเมื่อความเค้นกดและระยะเวลาในการอัดตัวเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของเกลือหินบดที่ใช้ถมกลับในเหมืองเกลือและเหมืองโพแทชได้ประเมินด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ผลการวิเคราะห์ระบุว่าเกลือหินบดมีประสิทธิภาพในการลดการทรุดตัวของผิวดินมากขึ้นเมื่อถมกลับในช่องเหมืองที่มีความสูงมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเหมืองโพแทช เนื่องจากเหมืองโพแทชมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเสาค้ำยันมากกว่าในเหมืองเกลือ ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการได้นำมาคำนวณหาค่าพลังงานความเครียดเฉลี่ยที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบการอัดตัว และนำไปสร้างความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์กับค่าคุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลศาสตร์ สมการดังกล่าวถูกนำมาใช้เพื่อคาดคะเนคุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินบดที่ถมกลับในหลุมเจาะภายใต้การผันแปรความเค้นในภาคสนาม ผลการคำนวณระบุว่าค่าคุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินบดขึ้นกับปัจจัยสำคัญ คือ ความลึก และระยะเวลาที่ถมกลับด้วยเกลือหินบดหลังจากการขุดเจาะ

## Abstract

Consolidation tests have been performed to determine the mechanical properties of crushed salt as affected by applied stresses and consolidation period. The crushed salt with particle sizes ranging from 0.075 to 4.76 mm mixed with 5% saturated brine are consolidated under axial stresses ranging from 2.5 to 10 MPa. The densities, uniaxial compressive strengths and elastic moduli measured after consolidation for 3 to 180 days increase with the applied stresses and duration. The effectiveness of the crushed salt backfill is assessed by performing numerical simulations of the openings in salt and potash mines. The results indicate that the effectiveness for subsidence reduction increases as the pillar height increases, particularly for the potash pillars that yield plastic deformation greater than that of the salt pillars. The crushed salt properties are calculated as a function of mean strain energy required during consolidation. The relations are used to predict the crushed salt properties installed in exploratory boreholes under various external pressures. The opening depth and the time at which the crushed salt backfill is installed are significant factors controlling its long-term density, strength and stiffness.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ซ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	3
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
<b>บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>7</b>
2.1 การทดสอบการอัดตัว.....	7
2.2 การทดสอบการบดอัด.....	11
2.3 รูปแบบสมการเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการอัดตัวของเกลื้อหินบด.....	14
2.4 ผลกระทบของขนาดเม็ดเกลื้อ.....	19
<b>บทที่ 3 การเก็บและการจัดเตรียมตัวอย่างหิน.....</b>	<b>21</b>
3.1 วัตถุประสงค์.....	21
3.2 การประดิษฐ์กระบอกสำหรับการทดสอบการอัดตัว.....	21
3.3 ตัวอย่างเกลื้อหินบด.....	21
3.4 การเตรียมตัวอย่างเกลื้อหินบดสำหรับการทดสอบการอัดตัว.....	25
3.5 การหาปริมาณน้ำเกลื้ออิมมัตว์ที่เหมาะสม.....	25

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....</b>	<b>27</b>
4.1 วัตถุประสงค์.....	27
4.2 การทดสอบการอัดตัว.....	27
4.2.1 วิธีการทดสอบ.....	27
4.2.2 ผลการทดสอบการอัดตัว.....	27
4.2.3 กลไกการยุบตัวของเกลือหินบด.....	29
4.2.4 เกณฑ์การแตกบนพื้นฐานของพลังงานความเครียด.....	30
4.3 การทดสอบเพื่อหาค่าความซึมผ่าน.....	31
4.4 การทดสอบกำลังกดในแกนเดียว.....	34
4.4.1 วิธีการทดสอบกำลังกดในแกนเดียว.....	34
4.4.2 ผลการทดสอบกำลังกดในแกนเดียว.....	37
4.4.3 การสร้างสมการเชิงคณิตศาสตร์.....	40
4.4.4 ค่าความเค้นเฉือนในสามมิติ.....	42
4.5 การทดสอบเพื่อหาค่าความเค้นเฉือน.....	42
4.5.1 วิธีการทดสอบ.....	42
4.5.2 ผลการทดสอบ.....	43
<b>บทที่ 5 การศึกษาประสิทธิภาพของเกลือหินบดหลังจากถมกลับในช่องเหมืองเกลือ และเหมืองโพแทช.....</b>	<b>47</b>
5.1 วัตถุประสงค์.....	47
5.2 การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	47
5.3 คุณสมบัติของชั้นหินที่ใช้ในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	47
5.4 ขอบเขตการศึกษา.....	50
5.5.1 การทรุดตัวของผิวดิน.....	50
5.5.2 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหลังคาและเสาค้ำยัน.....	55
5.5.3 ค่าปัจจัยความปลอดภัยของเกลือหินบด.....	62

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 6 การสร้างสมการเชิงคณิตศาสตร์.....</b>	<b>65</b>
6.1 วัตถุประสงค์.....	65
6.2 คุณสมบัติของเกลื่อนหินบดในฟังก์ชันของค่าพลังงานความเครียดเฉลี่ย.....	65
6.2.1 ความหนาแน่นของเกลื่อนหินบด.....	65
6.2.2 ความพรุนของเกลื่อนหินบด.....	67
6.2.3 ความแข็งของเกลื่อนหินบด.....	67
6.2.4 สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของเกลื่อนหินบด.....	68
<b>บทที่ 7 การคาดคะเนคุณสมบัติของเกลื่อนหินบดหลังจากถมกลับในหลุมเจาะ.....</b>	<b>71</b>
7.1 วัตถุประสงค์.....	71
7.2 ค่าพลังงานความเครียดเฉลี่ยที่เกิดขึ้นบริเวณรอบหลุมเจาะ.....	71
7.3 การคาดคะเนคุณสมบัติของเกลื่อนหินบดหลังจากถมกลับในหลุมเจาะ.....	75
<b>บทที่ 8 สรุปและวิจารณ์ผล.....</b>	<b>81</b>
8.1 สรุปผล.....	81
8.2 การวิเคราะห์ผล.....	82
<b>บรรณานุกรม.....</b>	<b>85</b>
<b>ประวัตินักวิจัย.....</b>	<b>91</b>



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลการทดสอบเชิงกลศาสตร์ของเกลื่อนินบดที่อัดตัวแล้ว.....	8
3.1 ส่วนประกอบเชิงเคมีของเกลื่อนินบดที่ใช้ในการทดสอบ.....	23
3.2 การจำแนกลักษณะรูปร่างของเม็ดเกลื่อนินบดโดยใช้เกณฑ์ของ Powers (1982).....	24
4.1 คุณสมบัติเชิงกายภาพของเกลื่อนินบดหลังการทดสอบการอัดตัว.....	29
4.2 ค่าความเค้นและค่าความเครียดเฉลี่ย และค่าพลังงานความเครียดเฉลี่ยที่ใช้ในการอัดตัว ของเกลื่อนินบด.....	32
4.3 ขนาดและน้ำหนักของตัวอย่างเกลื่อนินบดที่ใช้ในการทดสอบกำลังกดในแกนเดียว.....	35
4.4 คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของแท่งตัวอย่างเกลื่อนินบด.....	39
5.1 คุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลศาสตร์ของชั้นหินที่ใช้ในแบบจำลอง.....	49
5.2 คุณสมบัติการคืบของเกลื่อนินและโพแทช.....	50
5.3 ค่าปัจจัยความปลอดภัยของเกลื่อนินบดที่ถูกกลมกลับในเหมืองเกลื่อนินและเหมืองโพแทช.....	64
7.1 คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และการคืบของเกลื่อนินและโพแทช.....	73

## สารบัญญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยืดหยุ่นโมดูลัสกับระยะเวลาในการอัดตัวของตัวอย่าง เกลื่อหินบดที่มีปริมาณน้ำเกลื่อผสมเท่ากับ 3.17% โดยน้ำหนัก.....	9
2.2 อัตราการเคลื่อนตัวในแนวตั้งและในแนวนอน.....	10
2.3 ค่าความหนาแน่นของเกลื่อหินบด.....	10
2.4 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับวัดค่าความซึมผ่านของตัวอย่างโดยวิธีการใช้แก๊สและ การใช้น้ำเกลื่อ.....	11
2.5 ค่าการบดอัดในฟังก์ชันของปริมาณน้ำและการคละขนาดของเม็ดเกลื่อ.....	13
2.6 เปรียบเทียบค่าความซึมผ่านในฟังก์ชันของค่าความหนาแน่นแห้งระหว่างผลการทดสอบ และการคาดคะเนย้อนกลับของเกลื่อหินบด.....	13
2.7 ความเครียดเฉื่อยและการไหลของน้ำเกลื่อในฟังก์ชันของเวลา.....	14
2.8 ค่าความซึมผ่านภายในของเกลื่อหินบดที่ถูกถมกลับใน Shaft.....	16
2.9 ค่าความหนาแน่นของเกลื่อหินบดที่ถูกถมกลับใน Shaft.....	16
2.10 ค่าความหนาแน่นของเกลื่อหินบดที่ถูกถมกลับใน Shaft.....	18
3.1 ท่อทรงกระบอกที่ใช้ในการทดสอบการอัดตัว.....	22
3.2 แห้งเกลื่อหินที่ได้จากหลุมเจาะถูกนำมาบดด้วยเครื่องบดหิน.....	22
3.3 เกลื่อหินบดคละขนาดกันระหว่าง 0.075 ถึง 4.75 mm.....	23
3.4 ตัวอย่างลักษณะทางกายภาพของเม็ดเกลื่อที่ใช้ในการทดสอบ.....	24
3.5 การเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบการอัดตัว.....	25
3.6 ผลการทดสอบการอัดตัวเพื่อหาปริมาณน้ำเกลื่ออิ่มตัวที่เหมาะสม.....	26
4.1 การทดสอบการอัดตัวของตัวอย่างเกลื่อหินบด.....	28
4.2 ค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกนและค่าความหนาแน่นในฟังก์ชันของระยะเวลาในการอัดตัว....	28
4.3 รูปแบบกลไกการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเกลื่อหินบด.....	30
4.4 ค่าพลังงานความเครียดเฉื่อยในฟังก์ชันของระยะเวลาในการอัดตัวและความเค้นกด.....	32
4.5 การทดสอบเพื่อหาค่าความซึมผ่าน.....	33
4.6 ค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพในฟังก์ชันของระยะเวลาในการอัดตัวและความเค้นกด.....	34
4.7 การทดสอบกำลังกดในแกนเดียว.....	35
4.8 ความหนาแน่นของตัวอย่างเกลื่อหินบดหลังการทดสอบการอัดตัว.....	38

## สารบัญญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของตัวอย่างเกลือหินบดภายใต้การผันแปรความเค้นกดและระยะเวลาในการอัดตัว.....	38
4.10 ตัวอย่างเกลือหินบดหลังการทดสอบกำลังกดในแกนเดียว.....	39
4.11 ค่ากำลังกดในแกนเดียว ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น และค่าอัตราส่วนปัวซองส์ในฟังก์ชันของระยะเวลาในการอัดตัวและความเค้นกดที่ใช้ในการอัดตัว.....	40
4.12 การคาดคะเนค่ากำลังกดในแกนเดียว ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น และค่าอัตราส่วนปัวซองส์ในฟังก์ชันของระยะเวลาในการอัดตัวและความเค้นกดที่ใช้ในการอัดตัว.....	41
4.13 ความเค้นเฉือนในสามมิติในฟังก์ชันของความเครียดเฉือนในสามมิติภายใต้การผันแปรระยะเวลาในการอัดตัวและความเค้นกดที่ใช้ในการอัดตัว.....	43
4.14 การทดสอบเพื่อหาค่าความเค้นเฉือนของเกลือหินผิวเรียบ (a) ค่าความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของค่าการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน (b) ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดในฟังก์ชันของความเค้นกดคงที่ในแนวแกน.....	44
4.15 การทดสอบเพื่อหาค่าความเค้นเฉือนของเกลือหินบด (a) ค่าความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของค่าการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน (b) ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดในฟังก์ชันของความเค้นกดคงที่ในแนวแกน.....	44
5.1 ลำดับชั้นหินที่ใช้กับแบบจำลองในเมืองเกลือ.....	48
5.2 ลำดับชั้นหินที่ใช้กับแบบจำลองในเมืองโพแทช.....	48
5.3 ตัวอย่างแบบจำลองในเมืองเกลือที่ระดับความลึก 150, 200 และ 250 m.....	51
5.4 ตัวอย่างแบบจำลองในเมืองโพแทชที่ระดับความลึก 150, 200 และ 250 m.....	52
5.5 การทรุดตัวของผิวดินที่ได้รับผลกระทบจากการขุดเจาะที่ระดับความลึก 250 m ของห้องสูง 12 m ในเมืองเกลือและเมืองโพแทช.....	53
5.6 การลดลงจากการทรุดตัวของผิวดินหลังจากถมกลับเกลือหินบดที่ผ่านการอัดตัวที่ความเค้นกดเท่ากับ 2.5, 5, 7.5 และ 10 MPa ในเมืองเกลือและเมืองโพแทช.....	54
5.7 การลดลงจากการทรุดตัวของผิวดินหลังจากถมกลับเกลือหินบดที่ระยะเวลาเท่ากับ 6, 12 และ 24 เดือน หลังการขุดเจาะในเมืองเกลือและเมืองโพแทช.....	54
5.8 การทรุดตัวสูงสุดหลังจากการขุดเจาะเป็นระยะเวลา 10 ปี ภายใต้การผันแปรความลึกและความสูงของห้องในเมืองเกลือและเมืองโพแทช.....	56

## สารบัญญรูปภพ

รูปที่	หน้า
5.9 ค่ำอัตรภกรทรุดตัวในฟังก์ชันของเวลาหลังจกขุดเจอะเหมืองสำหรับทั้งกรณีที่มีการถมกลับและไม่มีการถมกลับเกลือหินบดในเหมืองเกลือและเหมืองโพแทช.....	57
5.10 การเคลื่อนตัวของหลังค้ำในเหมืองเกลือและเหมืองโพแทช.....	58
5.11 การเคลื่อนตัวของพื้นห้องในเหมืองเกลือและเหมืองโพแทช.....	59
5.12 การยุบตัวในแนวตั้งของช่องเหมืองในเหมืองเกลือและเหมืองโพแทช.....	60
5.13 การบวมตัวของเสาค้ำยันในเหมืองเกลือและเหมืองโพแทช.....	61
5.14 การยุบตัวของเสาค้ำยันในเหมืองเกลือและเหมืองโพแทช.....	62
5.15 ค่ำความค้ำเนื่อนในสามมิติของเกลือหินบดที่เกิดขึ้นในเหมืองเกลือและเหมืองโพแทช.....	63
6.1 ความหนาแน่นของเกลือหินบดในฟังก์ชันของพลังงานความเครียดเฉลี่ย.....	66
6.2 ความพรุนของเกลือหินบดในฟังก์ชันของพลังงานความเครียดเฉลี่ย.....	68
6.3 ความแข็งของเกลือหินบดในฟังก์ชันของพลังงานความเครียดเฉลี่ย.....	69
6.4 สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของเกลือหินบดในฟังก์ชันของพลังงานความเครียดเฉลี่ย.....	70
7.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ำพลังงานความเครียดเฉลี่ยในฟังก์ชันของเวลาหลังจกการขุดเจอะในเหมืองเกลือ.....	74
7.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ำพลังงานความเครียดเฉลี่ยในฟังก์ชันของเวลาหลังจกการขุดเจอะในเหมืองโพแทช.....	74
7.3 ค่ำพลังงานที่เหลืออยู่ในฟังก์ชันของเวลาหลังจกมีการถมกลับในหลุมเจอะเกลือ.....	76
7.4 ค่ำพลังงานที่เหลืออยู่ในฟังก์ชันของเวลาหลังจกมีการถมกลับในหลุมเจอะโพแทช.....	76
7.5 ค่ำความหนาแน่นของเกลือหินบดในฟังก์ชันของเวลาหลังจกมีการถมกลับในหลุมเจอะเกลือและหลุมเจอะโพแทช.....	77
7.6 ค่ำความพรุนของเกลือหินบดในฟังก์ชันของเวลาหลังจกมีการถมกลับในหลุมเจอะเกลือและหลุมเจอะโพแทช.....	78
7.7 ค่ำความแข็งของเกลือหินบดในฟังก์ชันของเวลาหลังจกมีการถมกลับในหลุมเจอะเกลือและหลุมเจอะโพแทช.....	79
7.8 ค่ำสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของเกลือหินบดในฟังก์ชันของเวลาหลังจกมีการถมกลับในหลุมเจอะเกลือและหลุมเจอะโพแทช.....	80

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

อุตสาหกรรมเหมืองเกลือและเหมืองโปแตซใต้ดินอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหลายประการ โดย 2 ประการหลัก ที่มีผลกระทบมากที่สุด ได้แก่ ผลกระทบที่เกิดจากการทรุดตัวของผิวดิน และเศษหางแร่ที่เป็นกองเกลือบนผิวดินอันเกิดจากกระบวนการทำเหมือง เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่า การทรุดตัวของผิวดินจะส่งผลกระทบต่อสิ่งปลูกสร้าง อาทิ บ้านเรือน ถนน ทางรถไฟ ท่อส่งน้ำ และพื้นที่เกษตรกรรม ซึ่งรวมไปถึงแหล่งน้ำบนผิวดินและใต้ดิน ส่วนกองหางแร่หรือเศษกองเกลือบนผิวดินจะมีลักษณะเป็นเกลือหินที่ถูกบดทำให้เกิดฝุ่นละอองเกลือ อีกทั้งยังเกิดการละลายของกองเกลือที่ส่งผลให้เกิดความเค็มต่อชั้นดิน พื้นที่เกษตรกรรม และลำธารที่อยู่โดยรอบ ผู้ประกอบการเหมืองสามารถลดผลกระทบการทรุดตัวและปริมาณกองเกลือบนผิวดิน ด้วยการนำมาใช้เป็นวัสดุถมกลับในช่องเหมืองที่ขุดเจาะแล้ว จึงจะนับว่าเป็นการบริหารจัดการการทำเหมืองแร่ใต้ดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาโดย กิตติเทพ เฟื่องขจร (2554, 2556) พบว่า เกลือหินบดสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุถมกลับในช่องเหมืองเพื่อลดปริมาณการทรุดตัวของผิวดินหลังเสร็จสิ้นการทำเหมือง โดยในต่างประเทศเองก็ได้มีการผสมเกลือหินบดเข้าไปในวัสดุถมกลับด้วย ถึงแม้จะไม่ได้ใช้เกลือหินบดทั้งหมดก็ตาม ดังนั้น หากจะพิจารณาการถมกลับในช่องเหมืองด้วยเกลือหินบดเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอ จึงต้องมีการทดสอบคุณสมบัติของเกลือหินบดภายใต้การอัดตัวระยะยาว โดยตัวแปรด้านระยะเวลาเป็นปัจจัยสำคัญที่ระบุถึงคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และเชิงพลศาสตร์ของเกลือหินบด ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมาใช้เวลาในการทดสอบการอัดตัวไม่นานเท่าที่ควร (15 วัน) แต่จะมุ่งเน้นไปที่ผลกระทบของอุณหภูมิ

ดังนั้น การวิจัยเพื่อศึกษาคุณสมบัติของเกลือหินบดให้ละเอียดใน 5 ประเด็น ประกอบด้วย 1) ระยะเวลาที่เหมาะสมในการอัดตัวของเกลือหินบด 2) พฤติกรรมเชิงกลศาสตร์และเชิงพลศาสตร์ของเกลือหินบดภายใต้ความเค้นอัดตัวที่ไม่คงที่เชิงเวลา 3) การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นและปริมาตรช่องว่างเมื่อเกลือหินบดถูกกดอัดด้วยความเค้นที่ระดับต่างกัน 4) การเปลี่ยนแปลงค่าความซึมผ่านของเกลือหินบดในสภาวะที่ทดสอบ และ 5) สร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อประเมินศักยภาพของเกลือหินบดเมื่อนำไปถมกลับในช่องเหมือง จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งการเข้าใจถึงรายละเอียดข้างต้นเป็นสิ่งสำคัญที่จะใช้เป็นข้อมูลสำหรับนำไปประเมินถึงความเหมาะสมและความปลอดภัยในระยะยาว และสามารถนำเอาเทคโนโลยีนี้มาใช้เป็นรูปธรรมเพื่อลดและป้องกันปัญหาการทรุดตัวของผิวดินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และเชิงพลศาสตร์ของตัวอย่างเกลือหินบดโดยการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวและการทดสอบการอัดตัวภายใต้การผันแปรความเค้นกด (Axial stress) และระยะเวลาในการทดสอบ เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นผ่าน ค่าปริมาตรช่องว่าง ค่าความเครียดในแนวแกน ค่าความแข็ง ค่าความยืดหยุ่นโมดูลัส และค่าอัตราส่วนปัวซองส์ของเกลือหินบด
- 2) สร้างสมการทางคณิตศาสตร์จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Empirical relationship) เพื่ออธิบายพฤติกรรมของการอัดตัว และพฤติกรรมทางกลศาสตร์ (การลดลงของช่องว่าง (e) อัตราการเกิดความเครียด ( $\epsilon_{axial}$ ) ความหนาแน่น ( $\rho$ ) ความแข็ง ( $\sigma_c$ ) และการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (E), (V) ที่สัมพันธ์กับความเค้น ( $\sigma_{axial}$ ) และเวลา (t)
- 3) สร้างสมการทางคณิตศาสตร์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ พลศาสตร์ และกายภาพของเกลือหินบดที่สัมพันธ์กับความเค้น ( $\sigma_{axial}$ ) และเวลา (t) เพื่อใช้คาดคะเนในระยะยาว
- 4) สร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อประเมินศักยภาพของเกลือหินบด โดยอาศัยลักษณะทางธรณีวิทยา ความลึก และรูปร่างของช่องเหมืองที่มีกนนิยมใช้ในประเทศไทย

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) ตัวอย่างเกลือหินจะถูกบดด้วยเครื่องบดหินเพื่อให้มีขนาดเม็ดคละขนาดกัน โดยมีขนาดตั้งแต่ 0.075 ถึง 4.75 mm (เป็นขนาดที่สอดคล้องกับเศษเกลือหินที่ได้จากการทำเหมือง)
- 2) ตัวอย่างเกลือหินจะนำมาผสมกับน้ำเกลือเข้มข้นเพื่อทดสอบหาค่าความชื้นที่เหมาะสมโดยมีการผันแปรระดับความชื้น (Brine content) 3 ระดับ คือ 5%, 10% และ 15% โดยน้ำหนัก
- 3) การทดสอบการอัดตัวจะทำการทดสอบในแท่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 mm ยาว 200 mm
- 4) การทดสอบดำเนินการโดยให้ความเค้นกดแก่ตัวอย่างเกลือหินบดในกระบอกทดสอบทั้งหมด 5 อัตรา คือ 2.5, 5, 7.5 และ 10 MPa เป็นระยะเวลาเท่ากับ 3, 5, 7, 10, 15, 30, 90 และ 180 วัน
- 5) การทดสอบคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์จะดำเนินการโดยวัดอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนผ่านตัวอย่างเกลือหินบดและนำมาคำนวณค่าความชื้นผ่านที่ลดลงตามเวลาที่ทดสอบ
- 6) สร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม FLAC 4.0 (Itasca, 1992)
- 7) การทดสอบดำเนินการภายใต้อุณหภูมิห้อง
- 8) ผลงานวิจัยจะนำไปเผยแพร่องค์ความรู้ในรูปของบทความในการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ และวารสารทางวิชาการในระดับนานาชาติ

#### 1.4. ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

เกลือหินบดเป็นวัสดุถมกลับในช่องเหมืองที่สามารถเข้ากับชั้นเกลือหินบริเวณโครงสร้างทางวิศวกรรมในช่องเหมืองเดิมได้เป็นอย่างดีทั้งในเชิงเคมีและเชิงกายภาพ (Heemann et al., 1999; Case and Kelsall, 1987; Stormont and Finley, 1996) ซึ่งดีกว่าการใช้เบนโทไนต์หรือซีเมนต์ ในเชิงกลศาสตร์เกลือหินบดสามารถอัดตัวทำให้ค่าความพรุนและค่าความซึมผ่านลดลงจากเดิม เมื่อระยะเวลาผ่านไป ชั้นเกลือหินบดจะค่อยๆ กลับมาเป็นวัสดุที่เทียบเคียงได้กับเกลือหินเดิม (Heemann et al., 1999) แต่คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์พบว่า พฤติกรรมของเกลือหินบดยังขึ้นกับค่าความเค้นกดและการทรุดตัวเชิงเวลา ซึ่งอาจทำให้เกิดการทรุดตัวของชั้นเกลือหินบริเวณนั้นได้ และจากผลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ระยะเวลาในการอัดตัวมีผลต่อค่าความแข็งของเกลือหินบด ซึ่งระยะเวลาที่ใช้ในการอัดตัวในงานวิจัยดังกล่าวค่อนข้างรวดเร็ว จึงทำให้ไม่สามารถสรุปได้ว่าระยะเวลาที่ใช้ในการอัดตัวของเกลือหินบดมากเพียงพอที่จะทำให้เกลือหินบดมีค่าความแข็งสูงสุด ดังนั้นการทดสอบในห้องปฏิบัติการแท้จริงแล้วเพื่อศึกษาพฤติกรรมของเกลือหินบดในสภาวะใกล้เคียงกับสภาวะจริงในช่องเหมืองใต้ดินที่มีความเค้นกดและระยะเวลาที่แตกต่างกันโดยเน้นการอัดตัวที่ใช้ระยะเวลานานขึ้น โดยจะพิจารณาทั้งด้านกลศาสตร์และชลศาสตร์ การทดสอบประกอบด้วย การทดสอบการอัดตัว (Consolidation testing) และการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว (Uniaxial compressive strength testing) ภายใต้การผันแปรความเค้นกดและระยะเวลา ผลการทดสอบที่ได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบการถมกลับของเกลือหินบดอย่างถูกวิธีและไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

แนวคิดในงานวิจัยนี้คือการนำตัวอย่างเกลือหินจากหลุมเจาะสำรวจและเหมืองเกลือใต้ดินของภาคเอกชนไปบดด้วยเครื่องบดหิน (Crushing machine) ให้ได้ขนาดเม็ดเกลือคละกันตั้งแต่ 0.075 ถึง 4.75 mm โดยขนาดเม็ดดังกล่าวมีความเหมาะสมและคล้ายคลึงกับขนาดเม็ดที่ได้จากกระบวนการขุดเจาะจากช่องเหมือง หลังจากนั้นจึงนำไปผสมกับน้ำเกลือเข้มข้นในปริมาณที่แตกต่างกันและนำมาอัดด้วยพลังงานที่เท่ากันเพื่อหาปริมาณน้ำเกลือที่เหมาะสมที่ให้ค่าความหนาแน่นสูงสุดสำหรับใช้ในการเตรียมตัวอย่าง การทดสอบการอัดตัวได้มีการผันแปรความเค้นกดและระยะเวลาในการทดสอบ โดยระหว่างการทดสอบจะมีการตรวจวัดค่าความซึมผ่านทุกๆ 6 ชั่วโมง เมื่อครบระยะเวลาจะนำตัวอย่างไปประเมินคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ (การทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว) และนำค่าที่ได้จากการทดสอบทั้ง 2 การทดสอบมาสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ กลศาสตร์ และคุณสมบัติเชิงกายภาพของเกลือหินบดที่สัมพันธ์กับความเค้น ( $\sigma_{axial}$ ) และเวลา (t) จากนั้นนำผลจากห้องปฏิบัติการมาพิสูจน์ศักยภาพของเกลือหินบดในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยพิจารณาศักยภาพของเกลือหินบดในการช่วยลดการทรุดตัวของผิวดิน และการบวมตัวของเสาค้ำยัน ผลสำเร็จของการวิจัยนี้คือ สามารถระบุได้ว่าปัจจัยใดที่มีผลต่อคุณสมบัติของเกลือหินบดมากที่สุด และสามารถจัดเตรียมเกลือหินบดให้มีคุณสมบัติที่ดีที่สุดสำหรับเป็นวัสดุถมกลับเพื่อนำไปใช้งานได้อย่างเป็นรูปธรรม

## 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยแบ่งออกเป็น 8 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

### ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และเชิงพลศาสตร์ของเกลือหินบดที่นำมาใช้เป็นวัสดุถมกลับในเหมืองเกลือใต้ดินภายใต้การผันแปรความเค้นกดและระยะเวลาในด้านของค่าความหนาแน่น ค่าความชื้นผ่าน ค่าการเคลื่อนตัว ค่าความแข็ง และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเกลือหินบด

### ขั้นตอนที่ 2 การเก็บและจัดเตรียมตัวอย่างหิน

ตัวอย่างเกลือหินบดที่ใช้ในการวิจัยนี้คือเกลือหินจากหมวดหินมหาสารคาม การเตรียมตัวอย่างดำเนินการโดยนำแท่งเกลือหินที่ได้จากหลุมเจาะไปบดด้วยเครื่องบดหินให้มีขนาดคละกั้นระหว่าง 0.075 ถึง 4.75 mm โดยจะมีการผันแปรความชื้นของตัวอย่างเกลือหินบด 3 ระดับ คือ 5%, 10% และ 15% สำหรับหาปริมาณน้ำเกลือที่เหมาะสมที่ให้ค่าความหนาแน่นสูงสุดเพื่อใช้ในการทดสอบ

### ขั้นตอนที่ 3 การประดิษฐ์กระบอกลำหรับทดสอบการอัดตัว

กระบอกลำหรับใช้บรรจุและทดสอบการอัดตัวของตัวอย่างเกลือหินบดจะต้องทำจากสแตนเลสเพื่อป้องกันการฟุกร้อนหรือเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยากับเกลือ โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของกระบอกลำหรับเท่ากับ 54 mm ยาว 200 mm และหนา 10 mm ซึ่งขนาดดังกล่าวเป็นขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวหลังจากกระบวนการทดสอบการอัดตัวได้เสร็จสิ้น ส่วนด้านหัวและท้ายของกระบอกลำหรับทดสอบจะมีกระบอกลำหรับปิดทำหน้าที่ยึดรับแรงกดให้กับตัวอย่างเกลือหินบดซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 53 mm และมีรูไว้สำหรับระบายน้ำเกลือออกจากตัวอย่าง

### ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบในห้องปฏิบัติการมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของตัวอย่างเกลือหินบดเชิงกลศาสตร์และเชิงพลศาสตร์ ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 การทดสอบ คือ

1) การทดสอบการอัดตัว ดำเนินการหลังจากการเตรียมตัวอย่างเกลือหินบดใส่ในกระบอกลำหรับทดสอบแล้ว โดยการทดสอบได้ให้แรงความเค้นกดจากด้านบนกระบอกลำหรับด้วยปั๊มไฮดรอลิคผ่านกระบอกลำหรับปิดด้านบนผันแปรจาก 2.5, 5, 7.5, และ 10 MPa ภายใต้อุณหภูมิห้อง และทำการผันแปรระยะเวลาในการทดสอบเท่ากับ 3, 5, 7, 10, 15, 30, 90 และ 180 วัน ระหว่างการทดสอบได้ตรวจวัดการเคลื่อนตัวใน



แนวแกนด้วยมาตรวัดการเคลื่อนตัว เพื่อนำค่าที่วัดได้ไปใช้ในการคำนวณค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกน ( $\epsilon_{axial}$ ) ค่าความหนาแน่น ( $\rho$ ) และค่าการลดลงของช่องว่าง ( $e$ ) ระหว่างการทดสอบได้ทำการตรวจวัดค่าความชื้นผ่านทุกๆ 6 ชั่วโมง โดยวัดจากค่าการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ระดับ 10 lbs/in<sup>2</sup> เมื่อทำการทดสอบเสร็จสิ้นจึงนำเกลือหินบดในถังกระบอกออกเพื่อนำมาตัดให้มีขนาดที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดี่ยวต่อไป

2) การทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดี่ยว ดำเนินการหลังจากทำการทดสอบการอัดตัวเสร็จสิ้นตามระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งการทดสอบนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติเพื่อหาค่าความแข็งของหินที่จะสามารถรับแรงได้จริง โดยการทดสอบจะใช้อัตราการให้แรงกดเท่ากับ 0.5 ถึง 1 MPa/s จนกระทั่งเกลือหินบดเกิดการแตก ระหว่างการทดสอบได้ทำการวัดค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งและการเคลื่อนตัวในแนวนอนเพื่อนำค่าดังกล่าวไปหาค่าความยืดหยุ่นโมดูลัสและค่าอัตราส่วนปัวซองส์

#### **ขั้นตอนที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบและสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์**

นำผลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติเกลือหินบดในขั้นตอนที่ 4 มาวิเคราะห์สร้างความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัว ความหนาแน่น การลดลงของช่องว่าง ความแข็งของหิน ความยืดหยุ่นโมดูลัส และอัตราส่วนปัวซองส์ในเชิงเวลาและความเค้นกดที่ระดับต่างๆ ว่าค่าที่ได้มีความสัมพันธ์กันอย่างไร จากนั้นจึงทำการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ ชลศาสตร์ และคุณสมบัติเชิงกายภาพของเกลือหินบดที่สัมพันธ์กับความเค้น ( $\sigma_{axial}$ ) และเวลา ( $t$ )

#### **ขั้นตอนที่ 6 การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์**

นำข้อมูลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการมาสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้ลักษณะทางธรณีวิทยาจากข้อมูลจริง เพื่อประเมินศักยภาพของเกลือหินบดเมื่อนำไปถมกลับในช่องเหมืองและทำการเปรียบเทียบการทรุดตัวของผิวดินระหว่างช่องเหมืองที่ไม่มีการถมกลับและช่องเหมืองที่มีการถมกลับของเกลือหินบด

#### **ขั้นตอนที่ 7 การถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่กลุ่มเป้าหมาย**

ผลงานวิจัยจะนำไปเผยแพร่องค์ความรู้ในรูปแบบของบทความในการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการและวารสารทางวิชาการในระดับนานาชาติ

#### **ขั้นตอนที่ 8 การสรุปผลและเขียนรายงาน**

แนวคิด ขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุปจะนำเสนอโดยละเอียดในรายงานฉบับสมบูรณ์ เพื่อส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้มีประโยชน์อย่างมากกับงานด้านวิศวกรรมธรณี วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และ วิศวกรรมเหมืองแร่ที่เกี่ยวข้องกับการปิดและการฟื้นฟูเหมืองหลังจากเสร็จสิ้นการทำเหมืองแร่ใต้ดินเพื่อ ป้องกันการทรุดตัวของผิวดินจากการทำเหมืองใต้ดิน ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

- 1) ตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารระดับนานาชาติ
- 2) เผยแพร่องค์ความรู้ให้กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั้งภาครัฐและเอกชน
- 3) สร้างนักวิจัยระดับดุษฎีบัณฑิต อย่างน้อย 1 คน

### หน่วยงานที่ใช้ประโยชน์จากผลการวิจัย

ผลการวิจัยที่เสนอมานี้จะมีประโยชน์อย่างมากและโดยตรงกับหลายหน่วยงานที่มีส่วน เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์และออกแบบการทำเหมืองใต้ดิน ได้แก่

- 1) กองธรณีเทคนิค กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
- 2) กองธรณีเทคนิค กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน
- 3) สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมเหมืองแร่ และ วิศวกรรมธรณี

## บทที่ 2

### การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เกลือหินบดสำหรับเป็นวัสดุถมกลับหรือเป็นวัสดุอุดในเหมืองเกลือใต้ดินยังมีการศึกษาค่อนข้างน้อยทั้งในประเทศและต่างประเทศ ซึ่งส่วนใหญ่การศึกษาในต่างประเทศได้เน้นการศึกษาเกี่ยวกับเทคโนโลยีการกักเก็บหรือการทิ้งกากของเสียอันตรายที่ไม่สามารถบำบัดได้จากภาคอุตสาหกรรมไว้ในเหมืองเกลือใต้ดิน (Compaction) (Case and Kelsall, 1987; Korthaus, 2002; Brodsky et al., 1996; Olivella and Gens, 2002; Ran and Daemen, 1995) ในงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาการอัดตัวของเกลือหินบดที่ได้รับผลกระทบจากปัจจัยภายนอก อาทิ ความชื้น ความเค้นกดบนตัวอย่าง และระยะเวลาในการอัดตัว

#### 2.1 การทดสอบการอัดตัว (Consolidation test)

Case and Kelsall (1987) ศึกษาศักยภาพของเกลือหินบดสำหรับใช้เป็นวัสดุถมกลับ (Backfill) และวัสดุอุด (Seal material) ด้วยการทดสอบการอัดตัว (Consolidation test) ของเกลือหินบดในห้องปฏิบัติการ จุดประสงค์ของการศึกษาเพื่อให้เข้าใจถึงกระบวนการการอัดตัวของตัวอย่างว่ามีผลต่อค่าความชื้นผ่าน ความพรุน และอัตราการเกิดความเครียดอย่างไร ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้มาจากโครงการทิ้งกากนิวเคลียร์ Waste Isolation Pilot Plant และที่เหมือง Avery Island mine การทดสอบใช้ระยะเวลา 1 ถึง 2 เดือน เม็ดเกลือมีขนาดตั้งแต่ 1 ถึง 20 mm มีค่าความพรุนเริ่มต้นระหว่าง 26% ถึง 36% ตัวอย่างที่จัดเตรียมมีความชื้นเท่ากับ 0% และ 2% โดยน้ำหนัก ค่าความชื้นผ่านเริ่มต้นที่วัดได้มีค่าระหว่าง 103 ถึง 105 md การทดสอบดำเนินการภายใต้อุณหภูมิห้อง โดยให้ความดันล้อมรอบแกตัวอย่างระหว่าง 0.34 ถึง 17 MPa การทดสอบนี้มุ่งเน้นไปที่ผลกระทบจากความชื้นต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นผ่าน ความพรุน และอัตราการเกิดความเครียดเชิงปริมาตรของตัวอย่าง ผลการทดสอบระบุว่าตัวอย่างที่มีค่าความชื้น 2% เมื่อเวลาผ่านไปหนึ่งเดือนค่าความชื้นผ่านได้ลดลงเหลือ  $10^{-5}$  md และค่าความพรุนลดลงเหลือ 5% อัตราการอัดตัวของตัวอย่างที่มีความชื้น 2% จะมีค่ามากกว่าตัวอย่างแห้ง และอัตราการเกิดความเครียดเชิงปริมาตรเปลี่ยนแปลงจาก  $10^{-8}$  เป็น  $10^{-6} \text{ s}^{-1}$  ซึ่งไม่มีแนวโน้มเข้าสู่ช่วงการเกิดอัตราความเครียดคงที่ (Steady state) ในช่วง 2 เดือน ที่ทำการทดสอบ

Butcher (1991) ทดสอบคุณสมบัติของวัสดุถมกลับ 2 ชนิด คือ เกลือหินบริสุทธิ์ และเกลือหินผสมกับเบนทอไนต์ (เกลือ 70% เบนทอไนต์ 30% โดยน้ำหนัก) เพื่อใช้ในโครงการ Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) ซึ่งเป็นโครงการทิ้งกากนิวเคลียร์ในเหมืองเกลือใต้ดินที่ประเทศตุรกี ตัวอย่างทั้งสองชนิดถูกทดสอบกักอัดจนกระทั่งได้ค่าความชื้นผ่านต่ำกว่า  $10^{-18} \text{ m}^2$  ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของรัฐบาล สามารถสรุปได้ว่าเกลือหินบดผสมเบนทอไนต์จะมีประสิทธิภาพดีกว่าเกลือหินบดเพียงอย่างเดียว การผสมเบนทอไนต์ในเกลือหินบดมีข้อดี คือ เบนทอไนต์มีความสามารถในการดูดซับน้ำเกลือและสารกัมมันตภาพรังสีได้ดีกว่า

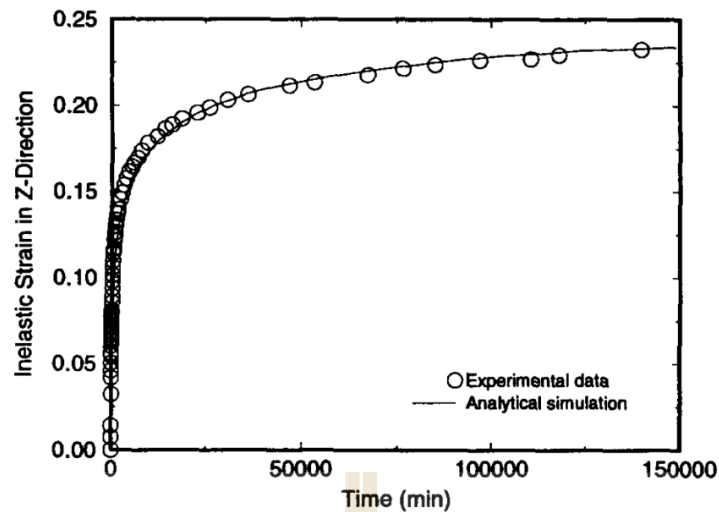
Somtong et al. (2013) ศึกษาและทดสอบการอัดตัวของเกลือหินบดขนาด 0.075 ถึง 4.76 mm โดยผันแปรความเค้นแนวแกนที่ 2.5, 5, 7.5 และ 10 MPa และผันแปรระยะเวลาการอัดตัวที่ 3, 5, 7, 10, 15 วัน ระหว่างการทดสอบได้วัดค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกน และวัดค่าความซึมผ่านโดยวัดอัตราการไหลด้วยก๊าซไนโตรเจน หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว ผลการทดสอบระบุว่า ค่าความซึมผ่านมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาและค่าความเค้นในการอัดตัวเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นและค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาและความเค้นในการอัดตัวเพิ่มขึ้น และค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียรมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นในการอัดตัวเพิ่มขึ้น

Pfeifle (1991) ทำการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือหินบดที่ผันแปรปริมาณน้ำเกลือ 3 ระดับ คือ 5.24%, 5.30% และ 9.97% โดยน้ำหนัก เป็นระยะเวลา 167 วัน ผลการทดสอบระบุว่าค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียรมีค่าระหว่าง 0.5 ถึง 8.1 MPa และผลการทดสอบดังกล่าวได้นำมาสร้างความสัมพันธ์กับค่าปริมาณน้ำเกลือที่ผันแปรด้วย แต่ในการทดสอบครั้งนี้ยังไม่สามารถนำมาสร้างความสัมพันธ์กับระยะเวลาของการอัดตัวได้ ซึ่งเป็นสิ่งที่ควรจะมีการศึกษาเพิ่มเติมเป็นอย่างมาก

Miao et al. (1995) ทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินบดในห้องปฏิบัติการ โดยก่อนการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ได้ทำการทดสอบการอัดตัวของเกลือหินบดก่อน ซึ่งปริมาณน้ำเกลือที่ใช้ผสมกับเกลือหินบดมีค่าประมาณ 3% โดยน้ำหนัก ทดสอบภายใต้แรงดันเท่ากับ 15 MPa และผันแปรระยะเวลาในการอัดตัวตั้งแต่ 1 นาที ถึง 97 วัน เมื่อตัวอย่างทดสอบการอัดตัวเสร็จสิ้นตัวอย่างจะถูกนำออกมาจากเบ้ากดทดสอบและนำไปทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียวต่อไป ผลการทดสอบระบุว่าค่าความยืดหยุ่นโมดูลัสและค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียรมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการอัดตัวเพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.1 โดยการเพิ่มขึ้นของค่าความยืดหยุ่นโมดูลัสนี้สามารถบ่งบอกได้ว่าการเกิดขึ้นของกระบวนการการประสานตัวระหว่างเม็ดเกลือ ซึ่งค่าความพรุนจะมีค่าลดลงและมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกเพิ่มมากขึ้น หรืออาจเรียกว่าเกิดการ Recrystallization ของเกลือหินบดนั่นเอง

ตารางที่ 2.1 ผลการทดสอบเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินบดที่อัดตัวแล้ว (Miao et al., 1995)

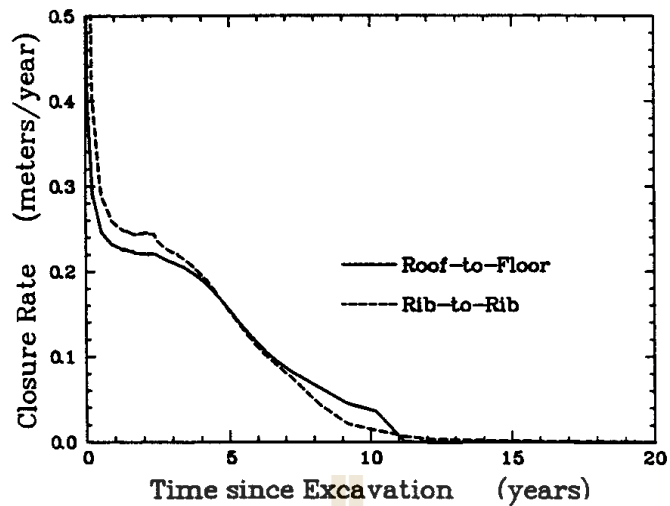
	ตัวอย่างที่					
	1	2	3	4	5	6
เวลาในการอัดตัว (นาที)	1	4,030	7,030	14,700	21,300	140,000
ความสูงเริ่มต้นของตัวอย่าง (mm)	122	122	122	122	117	122
ความสูงช่วงกลางของตัวอย่าง (mm)	106	106	107	105	104	106
ความสูงสุดท้ายของตัวอย่าง (mm)	103	88.7	87.1	85.1	83.3	81.3
น้ำหนักตัวอย่าง (g)	341	344	346	340	337	341
ปริมาณน้ำเกลือ (โดยน้ำหนัก) (%)	2.97	3.01	3.23	2.60	2.93	3.17
ค่าเฉลี่ยค่าความยืดหยุ่นโมดูลัส (MPa)	2,741	5,960	7,430	7,630	8,380	9,640
ค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียว (MPa)	0.61	17.0	23.7	25.5	27.1	28.4



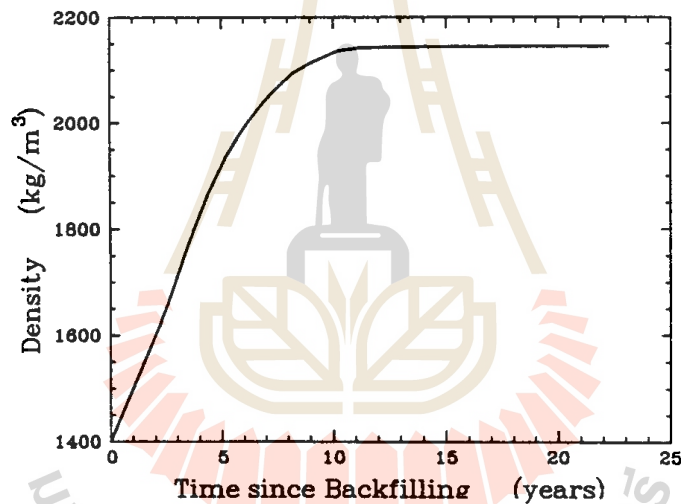
รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยืดหยุ่นโมดูลัสกับระยะเวลาในการอัดตัวของตัวอย่างเกลือหินบดที่มีปริมาณน้ำเกลือผสมเท่ากับ 3.17% โดยน้ำหนัก (Miao et al., 1995)

Kelsall et al. (1984) ศึกษาคุณสมบัติการอัดตัวของเกลือหินบดและการเชื่อมประสานระหว่างรอยแตก และทำการเปรียบเทียบอัตราการอัดตัวของเกลือหินบดในหลุมเจาะโดยใช้คุณสมบัติเกลือหินบดของ Ratigan and Wagner (1978) และ Holcomb and Hannum (1982) มาพิจารณาผลการเปรียบเทียบระบุว่าเมื่อใช้คุณสมบัติที่ได้จาก Ratigan and Wagner (1978) ในการคำนวณอัตราการอัดตัวของเกลือหินบดพบว่า ค่าความพรุนของเกลือหินบดมีค่าใกล้เคียงกับค่าความพรุนของเกลือหินภายใน 100 ปี หลังจากการถมกลับในหลุมเจาะ ซึ่งในทางตรงกันข้ามเมื่อใช้คุณสมบัติที่ได้จาก Holcomb and Hannum (1982) ค่าความพรุนของเกลือหินบดจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าความพรุนของเกลือหินเมื่อเวลาผ่านไปหลายพันปี โดยความแตกต่างระหว่างผลการคำนวณนี้อาจเป็นเพราะว่าอัตราการคืบของเกลือหินโดยรอบที่กระทำต่อเกลือหินบดและคุณสมบัติของเกลือหินบดเอง หรืออาจกล่าวได้ว่าถ้าหากเกลือหินมีอัตราการคืบมากก็จะส่งผลให้มีแรงกระทำต่อเกลือหินบดมาก จึงทำให้ความพรุนของเกลือหินบดมีค่าใกล้เคียงกับเกลือหินได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้จากการศึกษายังสามารถสรุปได้ว่าการประสานตัวของรอยแตกของเกลือหินบดจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายใน 10 ถึง 100 ปี

Van Sambeek (1992) ศึกษาพฤติกรรมของเกลือหินบดที่ถูกถมกลับในช่องเหมืองด้วยโปรแกรม SPECTROM-32 โดยช่องเหมืองที่จำลองมีขนาดความกว้างเท่ากับ 42 m สูง 4 m และเสาค้ำยันมีขนาด 63 m และมีค่า Extraction ratio เท่ากับ 40% จำลองภายใต้สภาวะความเค้นเท่ากับ 20 MPa ผลการจำลองระบุว่าเมื่อถมกลับเกลือหินบดไปยังช่องเหมืองที่เวลา 2.2 ปี หลังจากการขุดเจาะส่งผลให้อัตราการปิดของช่องเหมือง (Roof-to-floor) มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดดังแสดงในรูปที่ 2.2 และค่าความหนาแน่นของเกลือหินบดมีค่าเท่ากับเกลือหินโดยรอบหลังจากถมกลับแล้วประมาณ 10 ปี ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 อัตราการเคลื่อนตัวในแนวตั้งและในแนวนอน (Van Sambeek, 1992)



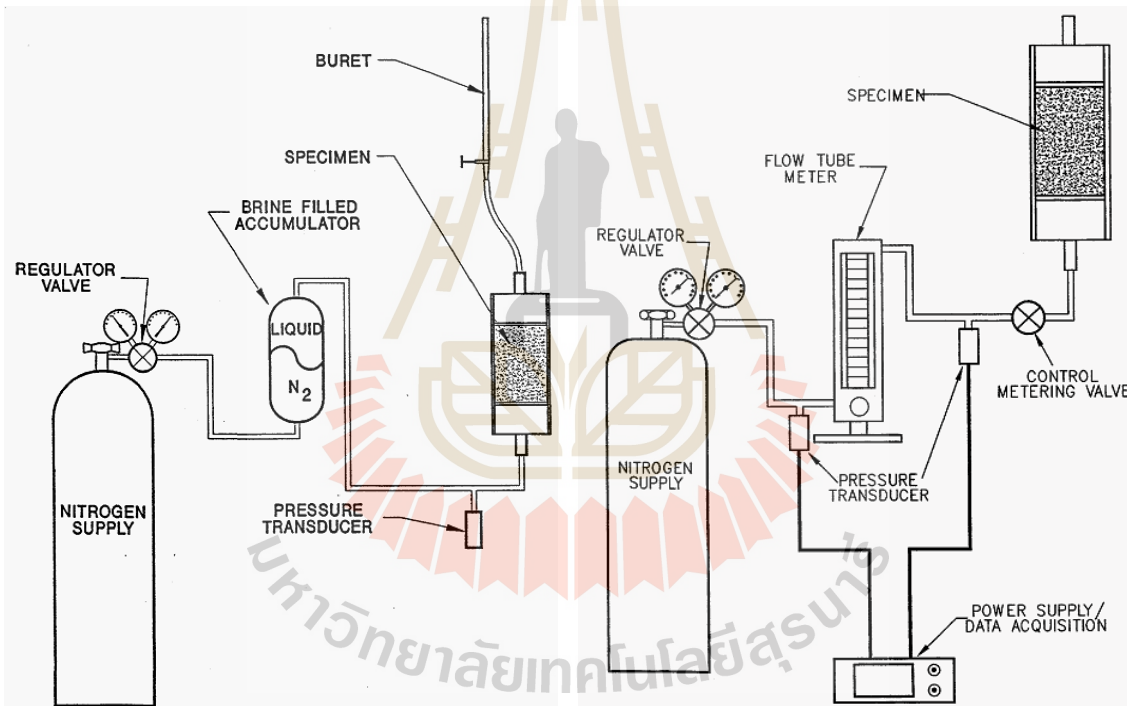
รูปที่ 2.3 ค่าความหนาแน่นของเกลือหินบด (Van Sambeek, 1992)

Hwang et al. (1993) ศึกษาการประสานตัวของรอยต่อระหว่างเม็ดเกลือโดยใช้ Environmental scanning electron microscope (ESEM) เพื่อศึกษากระบวนการอัดตัวของเกลือหินบดที่จะใช้เป็นวัสดุถมกลับ โดยการศึกษาดังกล่าวได้ศึกษาผลกระทบของความเค็มและความชื้นต่อกระบวนการอัดตัวหรือการประสานตัวด้วย ผลการสังเกตพบว่าน้ำที่เกาะบริเวณผิวของเม็ดเกลือเป็นตัวการหลักที่ก่อให้เกิดการประสานตัวระหว่างเม็ดเกลือ กล่าวคือ น้ำดังกล่าวจะเป็นตัวการสำคัญที่ก่อให้เกิดการเลื่อน หมุน หรือการเสียดสีบริเวณรอยต่อของเม็ดเกลือ ทำให้เพิ่มผิวสัมผัสระหว่างเม็ดเกลือมากยิ่งขึ้น และนอกจากนี้ปริมาณน้ำที่เกาะจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของการประสานตัว

## 2.2 การทดสอบการบดอัด (Compaction test)

Mellegard et al. (1999) ได้ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และค่าความซึมผ่านของตัวอย่างเกลือหินบดหลังจากทำการบดอัดด้วยการใช้ตุ้มน้ำหนักกระแทกเพื่อหาความหนาแน่นของตัวอย่างที่ขึ้นกับพลังงานที่ใช้ในการบดอัด จากนั้นนำตัวอย่างไปทดสอบด้วยอัตราความเครียดคงที่และวัดค่าความซึมผ่านของตัวอย่างด้วยแก๊สและน้ำเกลือเข้มข้น (รูปที่ 2.4)

นอกจากนี้ยังทดสอบการอัดตัวภายใต้แรงกดในสามแกนเพื่อศึกษาพฤติกรรมในเชิงเวลาด้วย ผลดังกล่าวได้นำไปสอบเทียบหาค่าตัวแปรในสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีผู้พัฒนาไว้แล้ว จากการศึกษาพบว่าการบดอัดยิ่งใช้ระยะตกของตุ้มน้ำหนักมาก (พลังงานสูง) จะทำให้ได้ความหนาแน่นของตัวอย่างสูง โดยค่าความซึมผ่านจะมีค่าลดลงเมื่อความหนาแน่นของเกลือหินบดเพิ่มขึ้น ซึ่งหมายความว่าช่องว่างลดลงและมีการเชื่อมต่อกันของช่องว่างน้อยลง



(ก) การวัดค่าความซึมผ่านโดยใช้แก๊ส

(ข) การวัดค่าความซึมผ่านโดยใช้น้ำเกลือ

รูปที่ 2.4 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับวัดค่าความซึมผ่านของตัวอย่างโดยวิธีการใช้แก๊ส (ก) และการใช้น้ำเกลือ (ข) (Mellegard et al., 1999)

Ran and Daemen (1995) ศึกษาผลกระทบของขนาด การคละขนาดของเกลือหิน และ ความชื้นต่อความสามารถในการบดอัด (Compaction) ในการศึกษาได้เสนอสมการเพื่อใช้คำนวณความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density) เมื่อมีส่วนผสมระหว่างเกลือเม็ดเล็กและเกลือเม็ดใหญ่ ผลเบื้องต้นระบุว่า การบดอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคและพลังงานการบดอัดสูงขึ้น มีการผันแปรการคละขนาดของเม็ดเกลือและมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำสูงสุดถึง 5% และการบดอัดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นต่อไปเรื่อยๆ (รูปที่ 2.5)

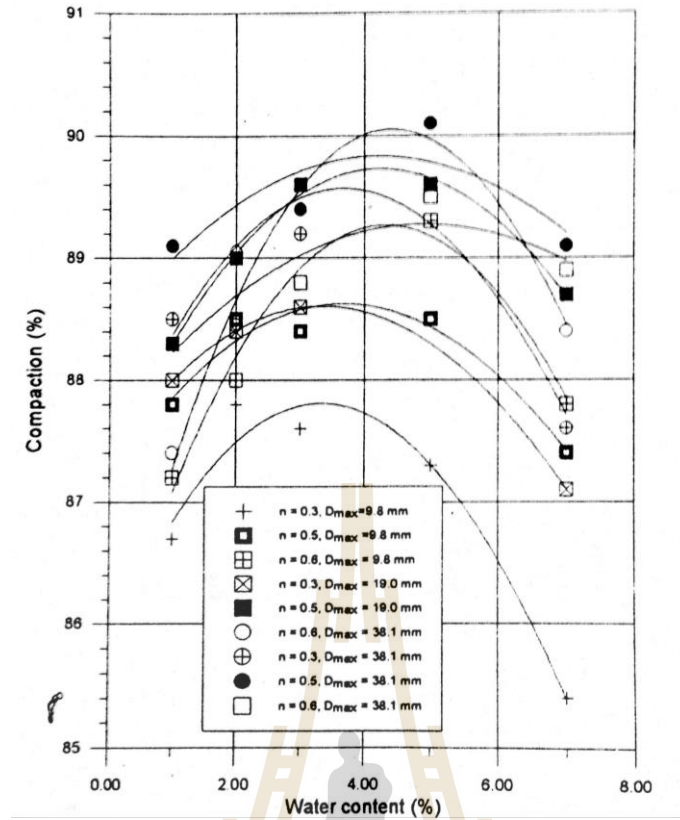
Loken and Statham (1997) ได้นำเสนอการใช้เกลือหินบดเป็นวัสดุอุดของเสียโครงการ Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) ในเม็กซิโก โดยลักษณะโดยทั่วไปของเกลือหินบดจะต้องมีความหนาแน่นประมาณ 90% ของความหนาแน่นสมบูรณ์ของเกลือหินดั้งเดิม ซึ่งเกลือหินบดจะมีพฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลา เมื่อเวลาผ่านไปค่าความซึมผ่านของเกลือหินบดจะมีค่าลดลงจากตอนเริ่มต้น ส่งผลทำให้มีประสิทธิภาพในระยะยาวเหมาะสำหรับใช้เป็นวัสดุอุด โดยได้นำรูปแบบโครงสร้างและรูปแบบการไหลของของเหลวมาประเมินการอัดตัวของเกลือหินบดในฟังก์ชันของความลึก เวลา และความพรุน ผลการทดสอบระบุว่าค่าความซึมผ่านมีค่าลดลงเมื่อค่าความหนาแน่นของเกลือหินบดมีค่าเพิ่มขึ้น (รูปที่ 2.6) นอกจากนี้ค่าความหนาแน่นยังมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการอัดตัวเพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความซึมผ่านและค่าความหนาแน่นสามารถอธิบายได้ด้วยสมการเชิงเส้นตรงดังสมการที่ 2.1 โดยผลระบุว่าค่าความซึมผ่านมีค่าลดลงถึง  $3.3 \times 10^{-20} \text{ m}^2$  ใน 100 ปี ซึ่งสามารถยอมรับได้ในระยะยาว

$$\log(k) = mp + b \quad (2.1)$$

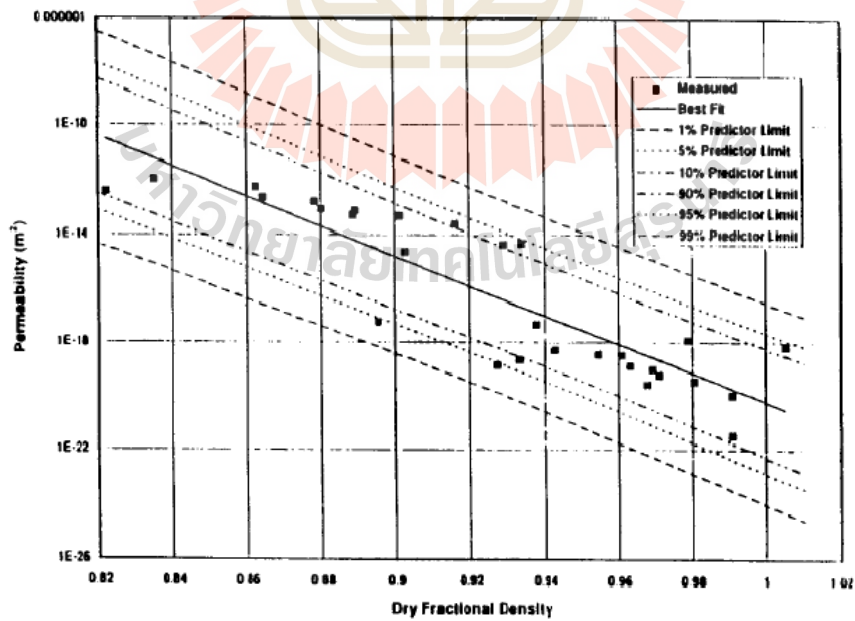
โดยที่ k คือ ค่าความซึมผ่าน ( $\text{m}^2$ )  
 p คือ ค่าความหนาแน่นขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของหินดั้งเดิม ( $2,160 \text{ kg/ m}^3$ )  
 m และ b คือ ค่าคงที่

Hansen and Mellegard (1999) ศึกษาการบดอัดเกลือหินบดแบบไดนามิกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 mm และยาว 200 mm วัสดุในการทดสอบมีความชื้นเท่ากับ 1.6% โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบระบุว่าค่าความซึมผ่านมีค่าลดลงเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น รูปที่ 2.7 แสดงความเครียดเฉลี่ยและการไหลของน้ำเกลือในฟังก์ชันของเวลา

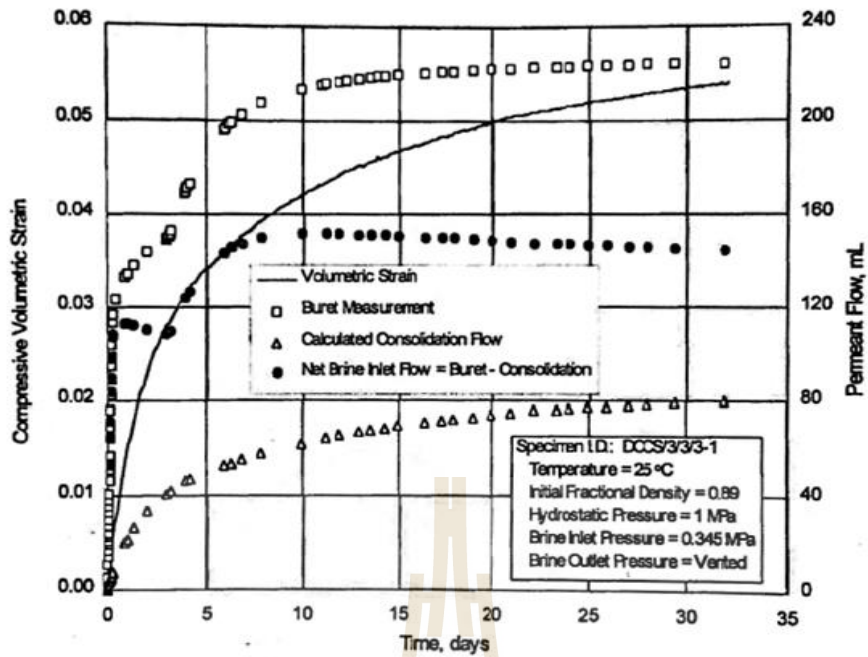




รูปที่ 2.5 ค่าการบดอัดในฟังก์ชันของปริมาณน้ำและการคละขนาดของเม็ดเกลือ (Ran and Daemen, 1995)



รูปที่ 2.6 เปรียบเทียบค่าความซึมผ่านในฟังก์ชันของค่าความหนาแน่นแห้งระหว่างผลการทดสอบและการคาดคะเนย้อนกลับของเกลือหินบด (Loken and Statham, 1997)



รูปที่ 2.7 ความเครียดเฉลี่ยและการไหลของน้ำเกลือในฟังก์ชันของเวลา (Hansen and Mellegard, 1999)

### 2.3 รูปแบบสมการเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการอัดตัวของเกลือหินบด (Constitutive models)

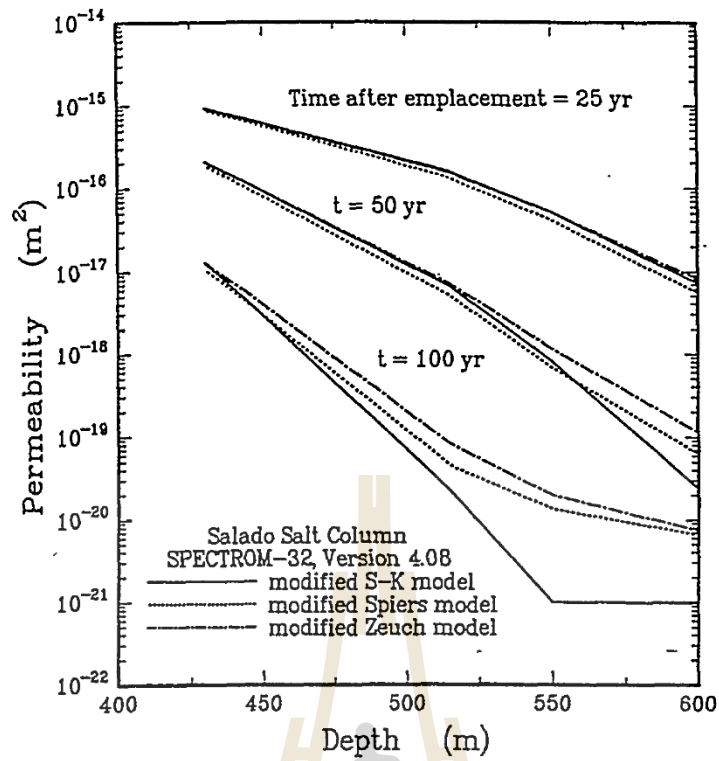
รูปแบบสมการเชิงคณิตศาสตร์ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่ออธิบายพฤติกรรมการอัดตัวของเกลือหินบดในช่องเหมืองเกลืออย่างมากมาย สมการเหล่านี้ถูกสร้างขึ้นโดยอาศัยข้อมูลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีด้วยกันหลากหลายรูปแบบ อาทิ สมการรูปแบบ Viscoelasticity (Munson and DeVries, 1991), Elastic viscoplasticity (Van Sambeek, 1992), Hot-pressing (Zeuch et al., 1985), Pressure solution (Spiers and Brzesowsky, 1993), Healing mechanics (Wang et al., 1994; Miao et al., 1995) และสมการรูปแบบ Empirical models (Sjaardema and Krieg, 1987)

Callahan et al. (1996) ศึกษาพฤติกรรมของเกลือหินบดหลังจากใส่ลงไปในช่วงเปิดในเหมืองใต้ดิน (Shaft) โดยใช้โปรแกรม SPECTROM-32 ซึ่งโมเดลที่ใช้ในโปรแกรมสำหรับอธิบายพฤติกรรมของเกลือหินบดถูกเลือกมาทั้งหมด 3 โมเดล คือ 1) Sjaardema and Krieg empirical model (Sjaardema and Krieg, 1987) 2) Zeuch's isostatic hot-pressing model (Zeuch, 1990) และ 3) Spiers' pressure solution model (Spiers and Brzesowsky, 1993) โดยโมเดลทั้ง 3 รูปแบบ ได้ถูกพัฒนาให้อยู่ในรูป 3 มิติ และค่าตัวแปรทั้ง 3 โมเดล ถูกสอบเทียบมาจากการทดสอบการอัดตัวของเกลือหินบดแบบ Hydrostatic และแบบ Shear จากห้องปฏิบัติการ ผลการรันโปรแกรมระบุว่าค่าความซึมผ่านภายในเกลือหินบดมีค่าลดลงเมื่อความลึกและระยะเวลาเพิ่มขึ้น โดยโมเดลของ

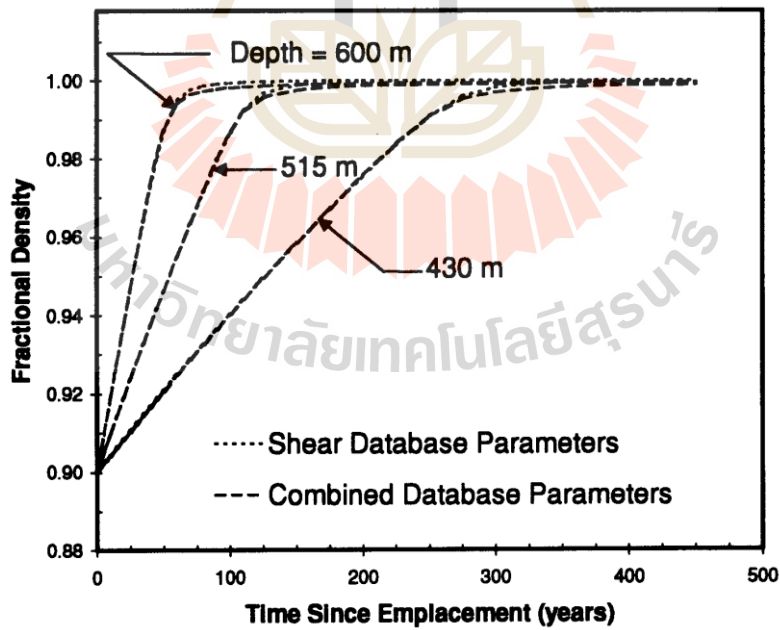
Sjaardema and Krieg (1987) ให้ค่าความซึมผ่านต่ำกว่า 2 โมเดล และมีค่าเทียบเท่ากับเกลื่อนหิน โดยรอบหลังจากถมกลับในช่องเหมืองเป็นระยะเวลา 100 ปี ที่ระดับความลึกตั้งแต่ 550 m ขึ้นไปดังแสดงในรูปที่ 2.8

Callahan et al. (1998) พัฒนาสมการเชิงคณิตศาสตร์เพื่อใช้อธิบายการอัดตัวของเกลื่อนหินบดในช่องเหมือง สมการที่ถูกพัฒนาขึ้นได้ทำการรวมสมการที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของ Dislocation creep และ Grain boundary diffusional pressure solutioning ไว้ในสมการเดียว โดยในส่วนของ Dislocation creep ได้ใช้สมการของ Munson et al. (1989) มาใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบคืบของเกลื่อนหิน และในส่วนของ Grain boundary diffusional pressure solutioning ได้ใช้สมการของ Spiers and Brzesowsky (1993) โดยสมการดังกล่าวได้ถูกนำมาสอบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาค่าตัวแปรสำหรับนำไปใช้ในการรันโปรแกรมต่อไป โดยผลการทดสอบที่นำมาสอบเทียบ ได้แก่ ผลการทดสอบการอัดตัวของเกลื่อนหินบดแบบ Hydrostatic และแบบ Shear ซึ่งในการสอบเทียบจะแยกออกเป็น 2 กลุ่ม คือ 1) การสอบเทียบรวมทั้ง 2 การทดสอบพร้อมกัน ซึ่งจะทำให้ได้ค่าตัวแปร 1 ชุด ที่สามารถอธิบายได้ทั้งการอัดตัวของเกลื่อนหินบดแบบ Hydrostatic และแบบ Shear และ 2) ทำการสอบเทียบโดยใช้เพียงผลการทดสอบการอัดตัวของเกลื่อนหินบดแบบ Shear เท่านั้น จึงส่งผลให้ได้ค่าตัวแปรอีก 1 ชุด ผลการสอบเทียบแสดงให้เห็นว่าค่าตัวแปรเชิงคณิตศาสตร์ที่ได้จากการสอบเทียบจากทั้ง 2 ชุดข้อมูลมีค่าใกล้เคียงกัน โดยจากการศึกษาก่อนหน้านี้สมการที่ใช้จะให้ค่าตัวแปรจากการสอบเทียบไม่เท่ากัน ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าสมการที่ถูกพัฒนาขึ้นสามารถใช้ได้ดีกว่าสมการที่เคยใช้มาก่อนหน้านี้

Callahan and Hansen (2002) ทำการรันโปรแกรม SPECTROM-32 เพื่อคาดคะเนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบคืบของเกลื่อนหินและการอัดตัวของเกลื่อนหินบดที่ถมกลับช่องเปิดในเหมืองเกลื่อน (Shaft) โดยการศึกษาได้สมมติให้ช่องเปิดดังกล่าวมีการถมกลับของเกลื่อนหินบดในปีที่ 50 หลังจากการขุดเจาะ โดยมีค่า Fractional density เท่ากับ 90% และทำการประเมินที่ระดับความลึกเท่ากับ 430 ถึง 600 m ในการรันโปรแกรมจะใช้ค่าตัวแปรที่ทำการสอบเทียบจากห้องปฏิบัติการ 2 ชุด คือ 1) ตัวแปรที่ได้จากการสอบเทียบกับผลการทดสอบการอัดตัวของเกลื่อนหินบดแบบ Hydrostatic และแบบ Shear 2) ตัวแปรที่ได้จากการสอบเทียบกับผลการทดสอบการอัดตัวของเกลื่อนหินบดแบบ Shear อย่างเดียว รูปที่ 2.9 แสดงผลการรันโปรแกรมเพื่อศึกษาพฤติกรรมของเกลื่อนหินบดใน Shaft ทั้งหมด 6 ตำแหน่ง ผลระบุว่าที่ระดับความลึก 600, 515 และ 430 m เกลื่อนหินบดจะมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ ความหนาแน่นของเกลื่อนหินโดยรอบในปีที่ 60, 110 และ 240 หลังจากทำการถมกลับ ผลการรันโปรแกรมโดยใช้ค่าตัวแปรจากการทดสอบการอัดตัวของเกลื่อนหินบดแบบ Shear เพียงอย่างเดียวจะให้ค่าความหนาแน่นเข้าใกล้เกลื่อนหินโดยรอบเร็วกว่าการใช้ค่าตัวแปรที่ได้จากการสอบเทียบรวมทั้ง 2 การทดสอบ



รูปที่ 2.8 ค่าความซึมผ่านภายในของเกลือหินบดที่ถูกถมกลับใน Shaft (Callahan et al., 1996)



รูปที่ 2.9 ค่าความหนาแน่นของเกลือหินบดที่ถูกถมกลับใน Shaft (Callahan and Hansen, 2002)

Korthaus (1998) ทดสอบการอัดตัวของเกลือหินบดในสภาวะแห้งโดยให้ความเค้นแบบสามแกนจริง เพื่อตรวจวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนตัวอย่างตามระยะเวลาที่ทำการทดสอบ จากนั้นนำผลไปสอบเทียบเพื่อหาค่าตัวแปรในสมการเชิงคณิตศาสตร์แบบยืดหยุ่นเชิงพลาสติก (Viscoplastic constitutive law) ในการทดสอบตัวอย่างจะอยู่ภายใต้ความเค้นในช่วง 2 ถึง 20 MPa มีค่าความพรุณเริ่มต้นประมาณ 0.25 และ 0.037 อุณหภูมิที่ทดสอบอยู่ในช่วง 21.5 ถึง 150 °C และมีการอัดตัวบนตัวอย่างด้วยอัตราความเครียดเท่ากับ  $10^{-9}$  และ  $5 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$  ผลการทดสอบพบว่าทั้งค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดเชิงปริมาตรและความเครียดเบี่ยงเบน (Deviatoric deformation rate) ในเชิงเวลาที่ได้จากการทดสอบทั้งแบบที่มีความเค้นเท่ากันทุกทิศทาง (Hydrostatic) และแบบที่มีความเค้นเฉือนสามารถอธิบายได้ด้วยสมการเชิงคณิตศาสตร์

Pudewills and Krauss (1999) ศึกษาพฤติกรรมทางอุณหกลศาสตร์ (Thermomechanical) ของเกลือหินบดด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของโปรแกรม ADINA เกลือหินบดถูกสมมติให้วัสดุมีพฤติกรรมยืดหยุ่นแบบพลาสติก (Viscoplastic) โดยแสดงในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งมีการพิจารณาทั้งอัตราการเกิดความเครียดเชิงปริมาตร (Volumetric strain) และอัตราการเกิดความเครียดเบี่ยงเบน (Deviatoric strain rate) บนตัวอย่างภายใต้สภาวะที่มีความเค้นเท่ากันทุกทิศทาง (Hydrostatic stress) และสภาวะที่เกิดความเค้นเฉือน สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้นี้เสนอโดย Hein (1991) ดังต่อไปนี้

$$\dot{\epsilon}_{ij} = A \cdot \exp^{-Q/RT} \cdot (h_1 \cdot p^2 + h_1 \cdot q^2)^n \cdot \left( \frac{1}{3} h_1 \cdot p \cdot I + h_2 S_{ij} \right) \quad (2.2)$$

$$h_1 = \frac{a}{\left[ \left( \frac{\eta_0}{\eta} \right)^c - 1 \right] / \eta_0^c + d} \quad (2.3)$$

$$h_2(\eta) = b \cdot h_1(\eta) + 1 \quad (2.4)$$

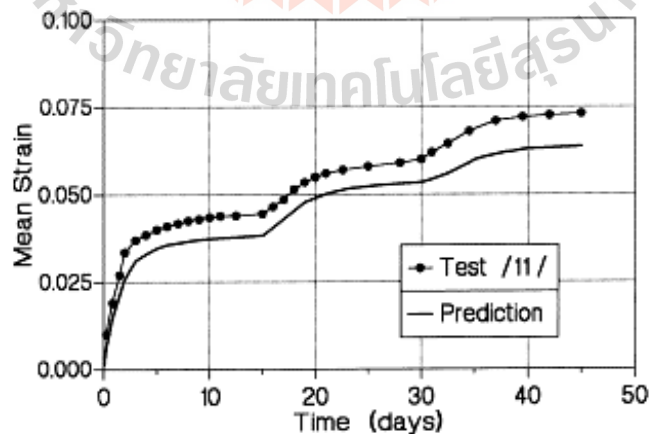
โดยที่	$\dot{\epsilon}_{ij}$	คือ	ความเครียดหลักที่เกิดขึ้น
	$\eta$	คือ	ความพรุณ
	$\eta_0$	คือ	ความพรุณเริ่มต้น
	T	คือ	อุณหภูมิสัมบูรณ์
	p	คือ	ค่าความเค้นตั้งฉากเฉลี่ย
	I	คือ	หน่วย Tensor ของเมตริก
	Q	คือ	พลังงานกระตุ้น

R	คือ ค่าคงที่ของแก๊ส
q	คือ ค่าความไม่ผันแปรของความเค้น
$S_{ij}$	คือ Tensor ของความเค้นเบี่ยงเบน
A, a, b, c, d, m, n	คือ ค่าคงที่ของสมการ
Q/R	คือ ค่าคงที่เท่ากับ $6520 \text{ K}^{-1}$

จากการทดสอบการอัดตัว (Odometer test) ด้วยอัตราการเกิดความเครียด  $6.9 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$  ให้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และผลการจำลองการอัดตัวแบบเพิ่มความเค้นเป็น 3 ระดับ ระดับละ 15 วัน โดยการเทียบค่าความเครียดเฉลี่ยและค่าความพรุนที่เปลี่ยนไป ผลที่ได้จากการจำลองและการทดสอบพบที่มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี โดยผลการจำลองจะให้ค่าที่ต่ำกว่าเล็กน้อย (รูปที่ 2.10)

Wagner et al. (1990) นำเสนอการคำนวณเชิงตัวเลขของพฤติกรรมเกลื่อนหินบดที่ผสมกับเบนทอนิต์เพื่อใช้เป็นวัสดุอุดในเหมืองเกลือและศึกษาพฤติกรรมการคืบของบริเวณรอบๆ เกลื่อนหิน โดยใช้แบบจำลองการอัดตัวของวัสดุถมกลับที่ถูกพัฒนาด้วยโปรแกรม SPECTROM-32 finite element ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวประกอบด้วยความยืดหยุ่นไม่เชิงเส้น (Nonlinear elastic) และพารามิเตอร์ของการคืบ โดยตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การพัฒนาสมการความคืบของการอัดตัวจะใช้โปรแกรม SPECTROM-32 ในการพิจารณา โดยทั่วไปจะมีรูปแบบการใช้งานที่เฉพาะเจาะจงของสมการความสัมพันธ์ตรงกับข้อมูลที่ได้จากห้องปฏิบัติการ ตัวแปรที่ได้รับการสันนิษฐานคือค่าเฉลี่ยปริมาณความเครียดที่ไม่ยืดหยุ่น ( $\epsilon_{eq1}^c$ ) และค่าเฉลี่ยความเครียดเฉือนที่ไม่ยืดหยุ่น ( $\epsilon_{eq2}^c$ )



รูปที่ 2.10 การเปรียบเทียบความเครียดเฉลี่ยระหว่างผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการกับการคาดคะเนเชิงตัวเลข (Pudewills and Krauss, 1999)

$$\epsilon_{ij}^c = \epsilon_{eq1}^c \frac{\partial \sigma_{eq1}^f}{\partial \sigma_{ij}} + \epsilon_{eq2}^c \frac{\partial \sigma_{eq2}^f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (2.5)$$

$$\epsilon_{eq1}^c = \epsilon_v^c(\sigma_m) \quad (2.6)$$

$$\epsilon_v^c = \frac{(1 + \epsilon_{vv}^c)^2}{\rho_0} B_0 \left[ 1 - e^{-B_1 \sigma_m} \right] e^{\frac{A \rho_0}{1 + \epsilon_{vv}^c}} \quad (2.7)$$

โดยที่	$\epsilon_v = \epsilon_{kk}$	คือ	ความเครียดเชิงปริมาตรโดยรวม
	$\epsilon_v^c = \epsilon_{kk}^c$	คือ	ความเครียดแบบคืบเชิงปริมาตร
	$\sigma_m = \epsilon_{kk}/3$	คือ	ความเค้นเฉลี่ย
	$\rho_0 = 8$	คือ	ความหนาแน่นเริ่มต้น
	$B_0, B_1, A$	คือ	ค่าคงที่ของวัสดุ

ผลการวิเคราะห์โดย SPECTROM-32 เมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ Sandia national laboratories ด้วยโปรแกรม SANCHO finite element มีความคล้ายคลึงกันพอสมควร แม้จะมีความแตกต่างของรูปแบบ ส่วนประกอบ และวิธีการการสร้างแบบจำลอง โดยผลเหล่านี้จะให้ค่าประมาณของการอัดตัวของวัสดุที่ขึ้นกับเวลา และแนวโน้มโดยรวมของการอัดตัวของวัสดุทดสอบสามารถใช้ประเมินความชื้นผ่านของสารกัมมันตรังสีในวัสดุทดสอบ

## 2.4 ผลกระทบของขนาดเม็ดเกลือ

อัตราการอัดตัวของเกลือหินบดมักจะขึ้นกับแรงที่กระทำและขนาดของเม็ดเกลือด้วย โดยทั่วไปแล้วอัตราการอัดตัวจะมีอัตราสูงขึ้นเมื่อมีแรงกระทำมากขึ้นและจะมีค่าลดลงเมื่อเม็ดเกลือมีขนาดใหญ่ขึ้น (Shor et al., 1981)

Wang et al. (1994) ได้ทำการศึกษาระบวนการอัดตัวของเกลือหินบดในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างที่นำมาใช้ในการศึกษามีขนาดแตกต่างกันสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วงขนาด โดยขนาดเม็ดใหญ่สุดของแต่ละช่วงมีค่าเท่ากับ 4.76, 2.36 และ 1.18 mm ผลการทดสอบระบุว่าอัตราการอัดตัวของเกลือหินบดมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อขนาดเม็ดเกลือมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งข้อสรุปดังกล่าวมีความขัดแย้งกับผลการทดสอบของ Ouyang and Daemen (1989) พวกเขาพบว่าตัวอย่างที่มีขนาดเม็ดเกลือที่ใหญ่จะมีการอัดตัวของเม็ดเกลือเร็วกว่าตัวอย่างที่มีขนาดเม็ดเกลือเล็ก นอกจากนี้รูปร่างของเม็ดเกลือยังมีผลต่อการอัดตัวอีกด้วย เนื่องจากลักษณะของเม็ดเกลือจะส่งผลโดยตรงต่อค่าความพรุนเริ่มต้นและผิวสัมผัสแรง

ระหว่างเม็ดเกลือ (Korthaus, 1998) โดยผลกระทบดังกล่าวถูกอธิบายไว้โดย Guises et al. (2009) โดยพบว่าหากเม็ดเกลือมีลักษณะกลมมน (Spherical particles) ก็จะสามารถอัดตัวได้ดีกว่าเม็ดเกลือที่มีลักษณะเหลี่ยม (Elliptical shape) นอกจากนี้หากแรงเสียดทานระหว่างเม็ดเกลือมีค่าสูงก็จะส่งผลให้การอัดตัวมีประสิทธิภาพลดลงเช่นกัน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเม็ดเกลือที่มีลักษณะเหลี่ยมจะมีค่าแรงเสียดทานสูง (Koener, 1968; Alshibli and Alsaleh, 2004)

สำหรับวิธีการจำแนกลักษณะเม็ดตะกอนโดยทั่วไปเกี่ยวกับลักษณะความกลมมน และลักษณะของพื้นผิวเม็ดตะกอนใน 2 มิติ สามารถจำแนกจากการใช้ Chart ของ Powers (1982) และ Krumbein and Sloss (1963) โดยทั้ง 2 วิธี นี้จะแปลผลออกมาเป็นดัชนีตัวเลขซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและสะดวกในการประเมินและได้รับความนิยมน้อยกว่าหลาย

Jia et al. (2009) ใช้โปรแกรม PFC2D เพื่อจำลองการอัดตัวของตัวอย่างดินและหินย่อยภายใต้การบดอัด โดยตัวอย่างที่จำลองจะถูกสมมติให้มีขนาดคละที่แตกต่างกันไป ในการจำลองได้วิเคราะห์หาค่าความพรุน และความหนาแน่นแห้งของดินและหินที่ผสมกัน โดยจะนำกราฟไปเทียบกับผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และมีการดูลักษณะการเคลื่อนตัวของอนุภาคเกลือขณะที่มีการจำลองการบดอัดด้วย จากการศึกษาด้วยแบบจำลองในการนำดินผสมกับหินย่อยพบว่ามีความสมบัติที่ดีสำหรับนำไปใช้กับงานถมทาง การผสมหินย่อยกับดินจะทำให้การบดอัดดีกว่าใช้ดินเม็ดเล็กเพียงอย่างเดียว



## บทที่ 3

### การเก็บและการจัดเตรียมตัวอย่างหิน

#### 3.1 วัตถุประสงค์

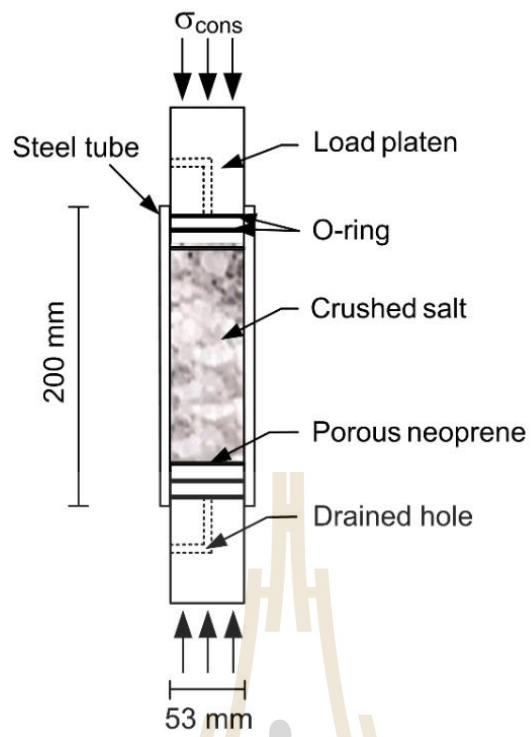
เนื้อหาในบทนี้อธิบายถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ ขั้นตอน หรือวิธีการการจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหินบดเพื่อใช้ในการทดสอบการอัดตัวในห้องปฏิบัติการ

#### 3.2 การประดิษฐ์กระบอกลำหรับการทดสอบการอัดตัว

กระบอกลำหรับใช้บรรจุและทดสอบการอัดตัวของตัวอย่างเกลือหินบดในการศึกษานี้ทำมาจากสแตนเลสเพื่อป้องกันการผุกร่อนหรือเสื่อมสภาพเนื่องจากการทำปฏิกิริยากับเกลือ ท่อทรงกระบอก (รูปที่ 3.1) มีส่วนประกอบทั้งหมด 2 ส่วน คือ 1) ท่อสแตนเลสกลวงเพื่อใช้บรรจุเกลือหินบด มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 mm ยาว 200 mm และหนา 10 mm โดยขนาดดังกล่าวเป็นขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวหลังจากกระบวนการทดสอบการอัดตัวได้เสร็จสิ้น และ 2) แท่งสแตนเลสตัน 2 แท่ง เพื่อใช้ปิดบริเวณหัวท้ายของท่อสแตนเลสกลวง ทำหน้าที่ให้แรงกดแก่ตัวอย่าง โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 53 mm และยาว 100 mm และบริเวณตรงกลางแท่งมีรูเจาะผ่านขนาด 10 mm เพื่อเป็นรูระบายน้ำและใช้สำหรับการทดสอบเพื่อหาค่าความซึมผ่านของตัวอย่างเกลือหินบด

#### 3.3 ตัวอย่างเกลือหินบด

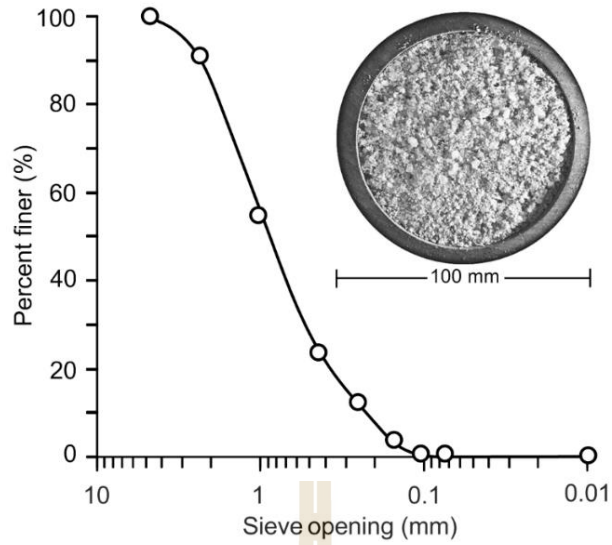
ตัวอย่างเกลือหินบดที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือเกลือหินจากหมวดหินชุดมหาสารคาม การเตรียมตัวอย่างดำเนินการโดยนำแท่งเกลือหินที่ได้จากหลุมเจาะไปบดด้วยเครื่องบดหินดังแสดงในรูปที่ 3.2 หลังจากนั้นจึงทำการร่อนบนตะแกรงให้มีขนาดคละกันระหว่าง 0.075 ถึง 4.75 mm (รูปที่ 3.3) ซึ่งตัวอย่างเกลือหินบดที่ใช้ในการทดสอบได้นำไปวิเคราะห์เพื่อหาองค์ประกอบทางเคมี โดยผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.1 นอกจากนี้ยังได้นำไปวิเคราะห์ลักษณะเชิงรูปร่างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Olympus BX51M) เพื่อศึกษาลักษณะเชิงกายภาพของเม็ดเกลือ ในการวิเคราะห์ได้แบ่งขนาดของเม็ดเกลือออกเป็น 5 กลุ่ม คือ 4.75-2.37, 2.36-1.1, 1.0-0.43, 0.42-0.15 และ <0.15 mm (รูปที่ 3.4) โดยแต่ละช่วงขนาดได้ทำการสุ่มมาวิเคราะห์อย่างละ 20 ตัวอย่าง ในการวิเคราะห์ได้ใช้เกณฑ์ของ Powers (1982) ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าลักษณะผิวของเม็ดเกลือค่อนข้างขรุขระ (Angular – Sub-angular) ในช่วงขนาด 4.75 ถึง 1.1 mm เม็ดเกลือมีลักษณะค่อนข้างกลมและเมื่อเม็ดเกลือมีขนาดเล็กกว่า 1.0 mm จะมีรูปร่างผลึกเป็นสี่เหลี่ยมและแสดงแนวการแตกของผลึก (Cleavage) ชัดเจนมากขึ้น (ตารางที่ 3.2) ซึ่งผลการวิเคราะห์ดังกล่าวมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ของ Ouyang and Daemen (1989)



รูปที่ 3.1 ท่อทรงกระบอกที่ใช้ในการทดสอบการอัดตัว



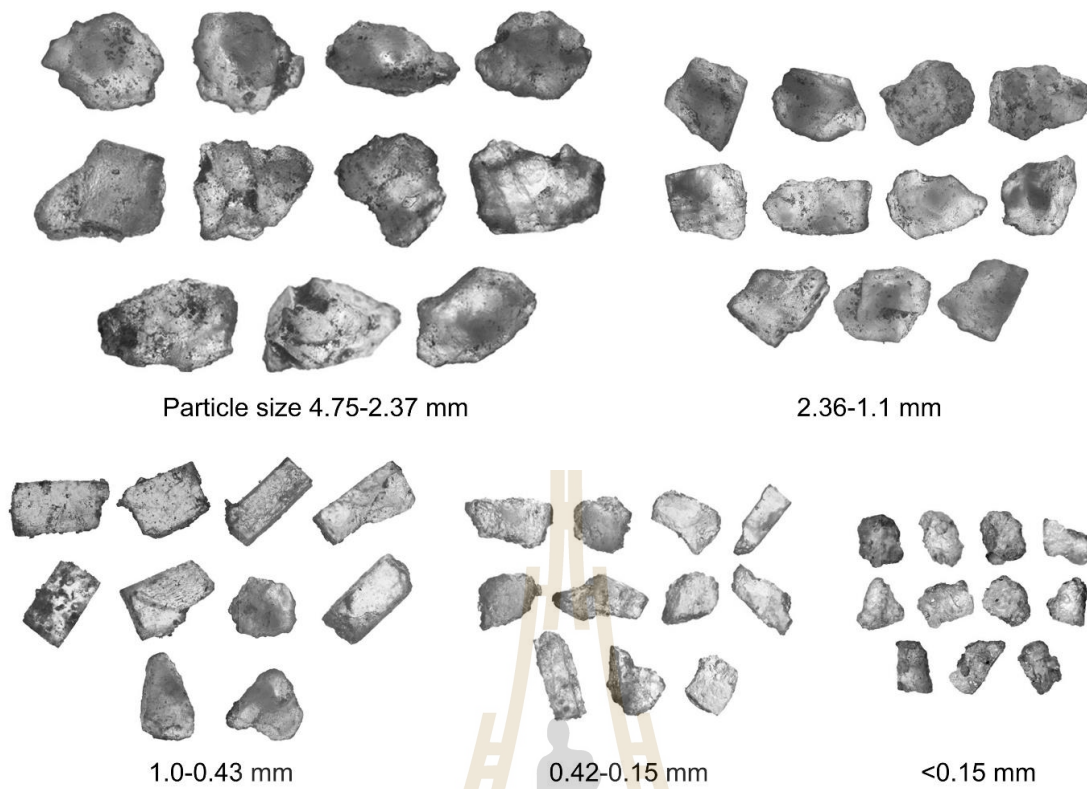
รูปที่ 3.2 แ่งเกลือหินที่ได้จากหุ้มน้จระกู่ก่นำมบดด้วยเครื่องบดหิน



รูปที่ 3.3 เกลือหินบดละเอียดขนาดกันระหว่าง 0.075 ถึง 4.75 mm

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบเชิงเคมีของเกลือหินบดที่ใช้ในการทดสอบ

สารประกอบออกไซด์	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
Na <sub>2</sub> O	20.70
MgO	4.39
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	N/D
SiO <sub>2</sub>	0.03
SO <sub>3</sub>	0.05
Cl <sub>2</sub> O	68.03
K <sub>2</sub> O	6.40
CaO	0.26
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	N/D
Br <sub>2</sub> O	0.16
SrO	N/D
รวมทั้งหมด	100



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างลักษณะทางกายภาพของเม็ดเกลือที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 3.2 การจำแนกลักษณะรูปร่างของเม็ดเกลือโดยใช้เกณฑ์ของ Powers (1982)

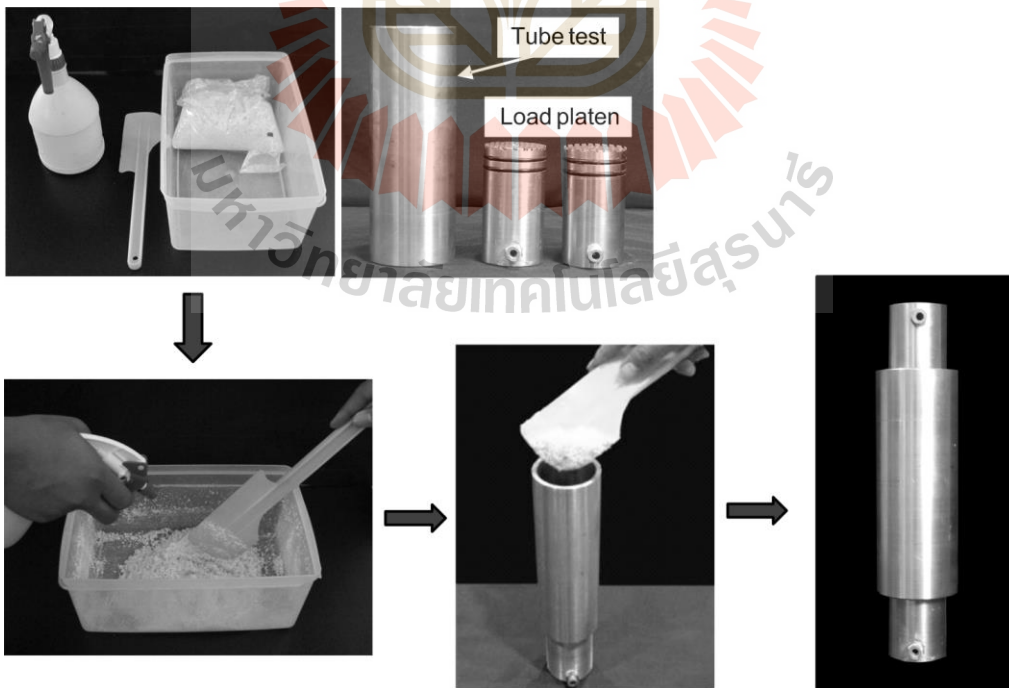
ขนาดเม็ดเกลือ (mm)	Roundness	Classification	Sphericity	Classification
4.75-2.37	1.5-2.5	Angular – Sub-angular	4.5	Spherical
2.36-1.1	1.5-2.5	Angular – Sub-angular	4.5	Spherical
1.0-0.43	1.5-2.5	Angular – Sub-angular	-2.5	Sub-spherical
0.42-0.15	1.5-2.5	Angular – Sub-angular	-2.5	Sub-spherical
<0.15	1.5-2.5	Angular – Sub-angular	-2.5	Sub-spherical

### 3.4 การเตรียมตัวอย่างเกลือหินบดสำหรับการทดสอบการอัดตัว

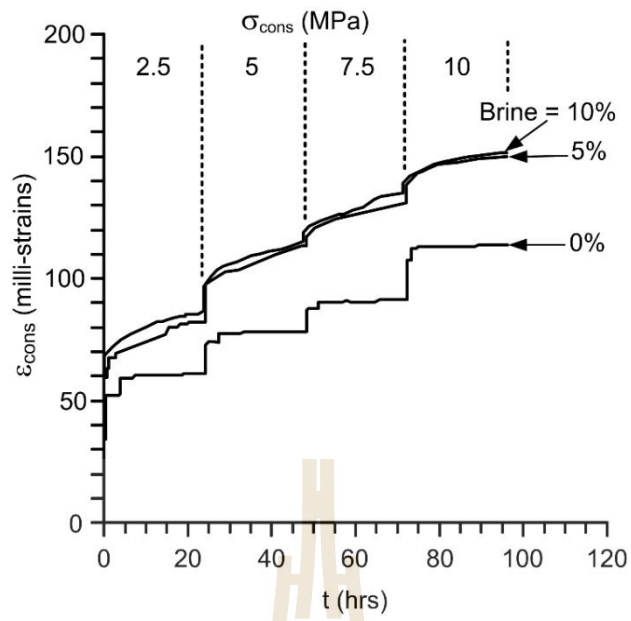
การเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบการอัดตัว สามารถทำได้ด้วยการนำเกลือหินบดที่ผ่านการคละขนาดแล้วผสมกับน้ำเกลืออิ่มตัวตามปริมาณที่เหมาะสมด้วยวิธีการฉีดให้ทั่วควบคู่กับการคนให้เข้ากัน เมื่อส่วนผสมเข้ากันดีแล้วจึงทำการเทส่วนผสมลงในท่อสแตนเลสกลวงที่เตรียมไว้ตั้งแสดงในรูปที่ 3.5 โดยระยะหวั่นท้ายของแท่งสแตนเลสตันที่ปิดบริเวณด้านบนและด้านล่างกำหนดให้เท่ากับ 30 mm

### 3.5 การหาปริมาณน้ำเกลืออิ่มตัวที่เหมาะสม

ปริมาณน้ำเกลือที่เหมาะสมที่จะให้ค่าความหนาแน่นสูงสุดของตัวอย่างสามารถหาได้จาก การผันแปรปริมาณน้ำเกลืออิ่มตัวต่อน้ำหนักของเกลือหินบด 3 ระดับ คือ 0%, 5% และ 10% จากนั้น นำตัวอย่างส่วนผสมข้างต้นมาทดสอบการอัดตัวเป็นระยะเวลา 100 ชั่วโมง โดยให้แรงเพิ่มขึ้นทีละ 2.5 MPa ทุกๆ 20 ชั่วโมง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าที่ระดับความชื้น 5% และ 10% ให้ค่าความเครียดในแนวแกนค่อนข้างใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 3.6 หรือสามารถบอกเป็นนัยว่าหากมีปริมาณน้ำเกลือมากกว่า 5% ขึ้นไป ผลการอัดตัวของเกลือหินบดจะมีค่าเท่าเดิมเนื่องจากปริมาณน้ำเกลือที่เกินกว่า 5% จะถูกระบายออกทางรูระบายน้ำ ซึ่งไม่ได้ช่วยให้การอัดตัวของตัวอย่างส่วนผสมดียิ่งขึ้น ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าปริมาณน้ำเกลือที่เหมาะสมที่นำมาผสมกับเกลือหินบดในการทดสอบครั้งนี้มีค่าเท่ากับ 5% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 3.5 การเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบการอัดตัว



รูปที่ 3.6 ผลการทดสอบการอัดตัวเพื่อหาปริมาณน้ำเกลืออิมมัตว์ที่เหมาะสม



## บทที่ 4

### การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

#### 4.1 วัตถุประสงค์

การทดสอบในห้องปฏิบัติการมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของตัวอย่างเกลือหินบดที่สภาวะคล้ายจริงในภาคสนาม กล่าวคือ เกลือหินบดที่เป็นเศษหางแร่จากการทำเหมืองเกลือ หรือเหมืองโพแทชจะถูกถมกลับไปยังช่องเหมืองใต้ดินและในหลุมเจาะสำรวจเพื่อลดการทรุดตัวของผิวดินบริเวณด้านบน ซึ่งเมื่อเกลือหินบดเหล่านี้ได้รับแรงกดจากมวลหินโดยรอบจะส่งผลให้อยู่ภายใต้สภาวะการอัดตัวในระยะยาว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาพฤติกรรมของเกลือหินบดในห้องปฏิบัติการเพื่อใช้คาดคะเนพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในภาคสนาม โดยแบ่งเป็น 4 การทดสอบ คือ การทดสอบการอัดตัวเชิงเวลาเพื่อศึกษาพฤติกรรมเชิงกายภาพ การทดสอบเพื่อหาค่าความซึมผ่าน การทดสอบกำลังกดในแกนเดียวเพื่อศึกษาพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินบด และการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังเฉือนสูงสุดของตัวอย่างเกลือหินและตัวอย่างเกลือหินบด

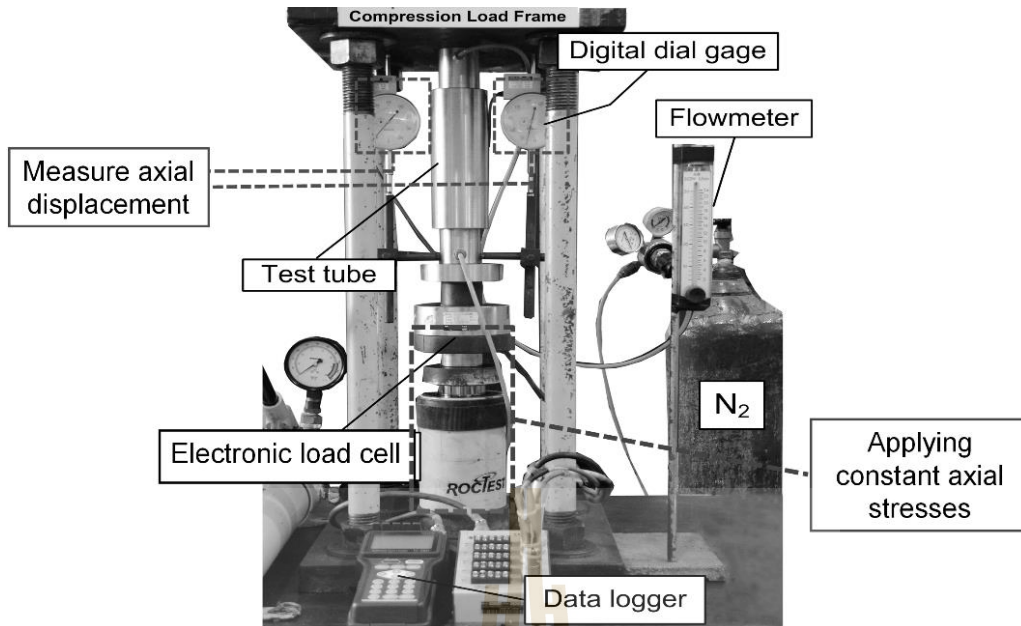
#### 4.2 การทดสอบการอัดตัว

##### 4.2.1 วิธีการทดสอบ

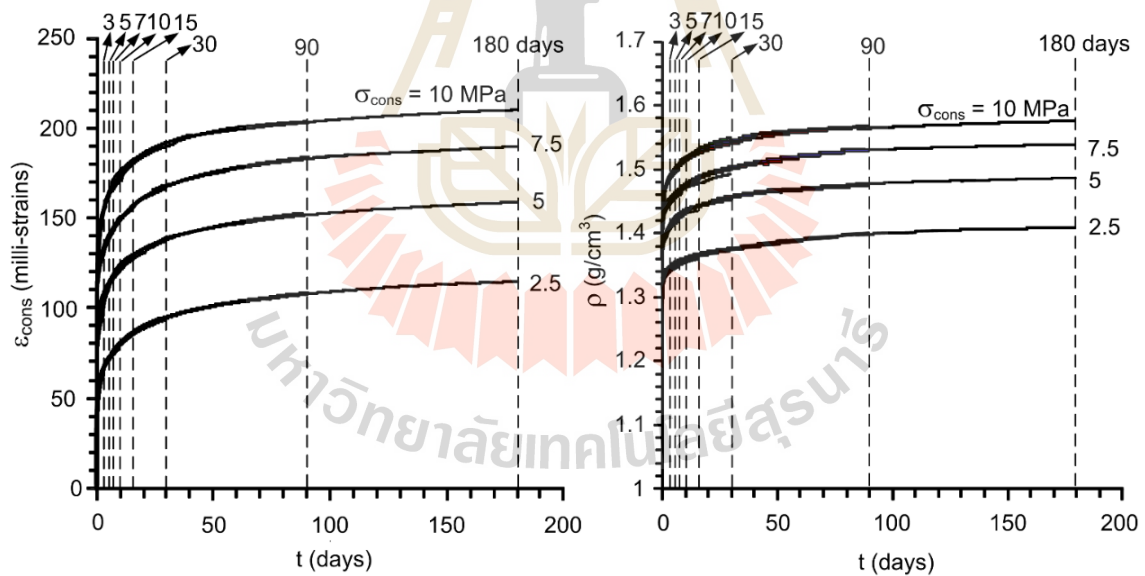
การทดสอบการอัดตัวได้ดำเนินการหลังจากเตรียมตัวอย่างเกลือหินบดใส่ในกระบอกทดสอบเรียบร้อยแล้วตั้งขั้นตอนที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ซึ่งการทดสอบได้ให้ความเค้นกด ( $\sigma_{\text{cons}}$ ) ด้วยปั๊มไฮดรอลิกผ่านทางกระบอกปิดด้านบนผ่านแปรงจาก 2.5, 5, 7.5 และ 10 MPa ภายใต้อุณหภูมิห้องดังรูปที่ 4.1 และทำการผันแปรระยะเวลาในการอัดตัว ( $t$ ) เท่ากับ 3, 5, 7, 10, 15, 30, 90 และ 180 วัน ระหว่างการทดสอบได้ตรวจวัดการเคลื่อนตัวในแนวแกนด้วยมาตรวัดการเคลื่อนตัวเพื่อนำค่าที่วัดได้ไปใช้ในการคำนวณการเคลื่อนตัวในแนวแกน ( $\epsilon_{\text{axial}}$ ) และค่าความหนาแน่น ( $\rho$ )

##### 4.2.2 ผลการทดสอบการอัดตัว

รูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ของค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกน ( $\epsilon_{\text{axial}}$ ) และค่าความหนาแน่น ( $\rho$ ) ในฟังก์ชันของระยะเวลาในการอัดตัว ( $t$ ) ผลการทดสอบระบุว่าค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกนและค่าความหนาแน่นมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเค้นกด ( $\sigma_{\text{cons}}$ ) สูงขึ้น อัตราการเคลื่อนตัวในแนวแกนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการให้ความเค้นกดและมีค่าลดลงในเชิงเวลานอกจากนี้ยังพบว่าหลังจากระยะเวลา 30 วัน ของการอัดตัว อัตราการเคลื่อนตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจนกระทั่งครบกำหนดระยะเวลาของการทดสอบ ผลการทดสอบดังกล่าวสอดคล้องกับข้อสรุปของ Case et al. (1987) ซึ่งพบว่าการเคลื่อนตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเชิงเวลาตลอดการทดสอบเป็นระยะเวลา 2 เดือน



รูปที่ 4.1 การทดสอบการหดตัวของตัวอย่างเกลื่อหินบด



รูปที่ 4.2 ค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกน ( $\epsilon_{\text{axial}}$ ) และค่าความหนาแน่น ( $\rho$ ) ในฟังก์ชันของระยะเวลาในการอัดตัว ( $t$ )



ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติเชิงกายภาพของเกลือหินบดหลังการทดสอบการอัดตัว

$\sigma_{\text{cons}}$ (MPa)	ตัวแปร	ระยะเวลาในการอัดตัว (วัน)							
		3	5	7	10	15	30	90	180
2.5	$\epsilon_{\text{axial}}$ (milli-strains)	62.10	69.00	69.03	75.90	82.69	95.99	108.90	115.22
	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.33	1.34	1.34	1.35	1.36	1.38	1.40	1.41
5	$\epsilon_{\text{axial}}$ (milli-strains)	108.90	115.22	115.22	121.45	127.59	139.63	151.33	162.72
	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.40	1.41	1.41	1.42	1.43	1.45	1.47	1.49
7.5	$\epsilon_{\text{axial}}$ (milli-strains)	133.65	139.63	145.52	151.33	157.07	164.30	184.61	189.91
	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.44	1.45	1.46	1.47	1.48	1.49	1.53	1.54
10	$\epsilon_{\text{axial}}$ (milli-strains)	157.07	162.72	168.31	173.81	184.61	195.14	205.39	210.42
	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.48	1.49	1.50	1.51	1.53	1.55	1.57	1.58

#### 4.2.3 กลไกการยุบตัวของเกลือหินบด

กลไกการยุบตัวของเม็ดดินโดยทั่วไป ได้แก่ การเปลี่ยนทิศทางการวางตัวของเม็ดดินอันเนื่องมาจากความเค้นกด การแตกของเม็ดดินแล้วเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเม็ดดินเอง และการอัดตัวของเม็ดดิน (De Boer, 1997) อย่างไรก็ตามการอัดตัวของเม็ดดินที่กล่าวมาแล้วข้างต้นไม่สามารถนำมาอธิบายกลไกการอัดตัวของเม็ดเกลือได้ เนื่องจากเกลือหินบดมีคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในเชิงเวลา (Viscous material) โดยการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเกลือหินบดในการศึกษาครั้งนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบทันทีทันใด (Instantaneous deformation) และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างตามเวลา (Transient deformation) (รูปที่ 4.3) ซึ่งกลไกที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในช่วง Instantaneous คือ การจัดเรียงตัวใหม่ของเม็ดเกลือซึ่งเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดหลังจากให้ความเค้นกดแก่ตัวอย่าง (Hwang et al., 1993; Callahan et al., 1996) โดยปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ คือ น้ำเกลือที่ใช้ผสมในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดังรูปที่ 3.6 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการเคลื่อนตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำเกลือเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับข้อสรุปของ Shor et al. (1981) ที่ได้สรุปไว้ว่าการอัดตัวของเกลือหินบดจะมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อมีน้ำเกลือเข้ามาช่วยด้วย และสอดคล้องกับข้อสรุปของ Hwang et al. (1993) ที่พบว่าน้ำเป็นตัวการสำคัญที่มีผลต่อการอัดตัวของเกลือหินบด เนื่องจากน้ำช่วยทำให้เกิดการเคลื่อนที่และการ

จัดเรียงตัวใหม่ของเม็ดเกลือ ส่งผลให้พื้นที่รอยต่อระหว่างเม็ดเกลือเพิ่มขึ้น และสำหรับกลไกการยุบตัวในช่วง Transient ประกอบด้วย การแตกของเม็ดเกลือและการเคลื่อนที่ระหว่างเม็ดเกลือ รวมถึงเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเชิงเวลาของเม็ดเกลือ โดยการยุบตัวในช่วงนี้มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยดังแสดงในรูปที่ 4.3

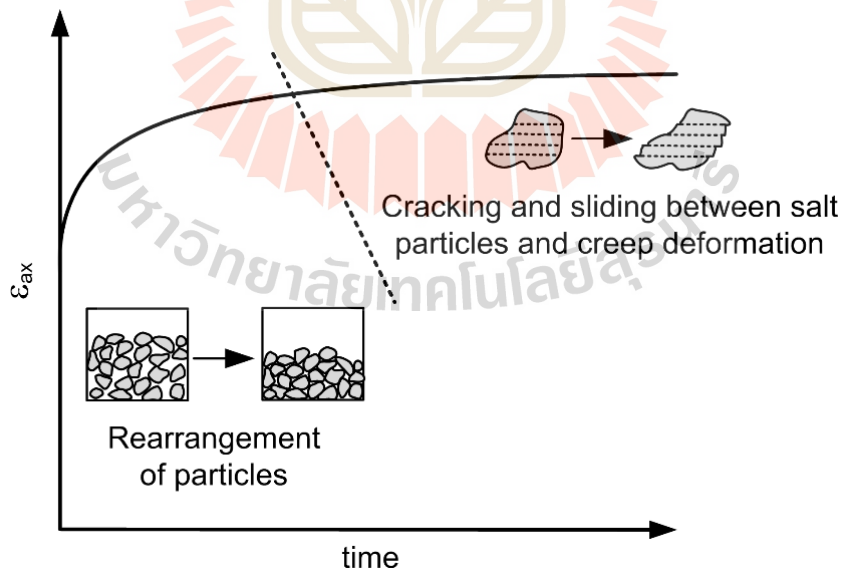
#### 4.2.4 เกณฑ์การแตกบนพื้นฐานของพลังงานความเครียด

เกณฑ์การแตกบนพื้นฐานของพลังงานความเครียดถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการหาค่าพลังงานที่ใช้ในการอัดตัวของเกลือหินบดภายใต้ความเค้นกดและระยะเวลาต่างๆ ด้วยข้อสมมุติฐานที่ว่าเกลือหินบดสามารถอัดตัวได้ภายใต้พลังงานความเครียดเฉลี่ย ( $W_m$ ) ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถหาได้จากค่าความเค้นเฉลี่ยและค่าความเครียดเฉลี่ยดังสมการ (Jaeger et al., 2007)

$$W_m = (3/2) \cdot \sigma_m \cdot \epsilon_m \quad (4.1)$$

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

$$\epsilon_m = (\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3) / 3 \quad (4.3)$$



รูปที่ 4.3 รูปแบบกลไกการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเกลือหินบด

ค่าความเค้นหลักต่ำสุด ( $\sigma_2$  และ  $\sigma_3$ ) ของตัวอย่างเกลือหินบดสามารถหาได้จากฟังก์ชันของระยะเวลาในการอัดตัวบนพื้นฐานของสภาวะความเครียดในหนึ่งแกน (Uniaxial strain condition) กล่าวคือภายใต้สมมุติฐานไม่มีความเค้นหลักต่ำสุดเกิดขึ้นในทอสมแดนเลสระหว่างทดสอบการอัดตัวซึ่งค่าความเครียดในแนวแกนที่ได้จากการตรวจวัดแสดงให้เห็นถึงค่าความเครียดเชิงปริมาตร

$$\sigma_2 = \sigma_3 = [v / (1-v)]\sigma_1 \quad (4.4)$$

โดยที่  $v$  คือ ค่าอัตราส่วนปัวซองส์

$\sigma_1$  คือ ค่าความเค้นกดในแนวแกน

ค่าความเค้นและค่าความเครียดเฉลี่ย และค่าพลังงานความเครียดเฉลี่ยได้ถูกรวบรวมไว้ในตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณระบุว่าเมื่อค่าความเค้นกดและระยะเวลาในการอัดตัวเพิ่มขึ้น ค่าพลังงานความเครียดเฉลี่ยจะมีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.4

### 4.3 การทดสอบเพื่อหาค่าความซึมผ่าน

ขณะทำการทดสอบการอัดตัวได้ตรวจวัดค่าความซึมผ่านทุกๆ 6 ชั่วโมง จนกระทั่งเครื่องมือตรวจวัดไม่สามารถอ่านค่าได้ ซึ่งวิธีการติดตั้งเครื่องมือสามารถทำได้ด้วยการต่อสายยางทนแรงดันจากเบ้ากดด้านบนเข้ากับเครื่องวัดอัตราการไหล (Flow meter) และต่อเบ้ากดทดสอบด้านล่างเข้ากับวาล์วควบคุมแรงดันจากถังแก๊สไนโตรเจนด้วยสายยางทนแรงดันชนิดและขนาดเดียวกันดังรูปที่ 4.5 ซึ่งการวัดค่าการไหลของก๊าซไนโตรเจนได้ใช้แรงดันที่ระดับ 10 lbs/in<sup>2</sup> ขณะทดสอบได้ทำการอ่านค่าอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ผ่านตัวอย่างเกลือหินบดจากเครื่องวัดอัตราการไหลเพื่อนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของตัวอย่างเกลือหินบดในเชิงเวลา

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.5 ถึงสมการที่ 4.7 โดยคำนวณหาค่าความสูงที่ต่างกัน ( $\Delta h$ ) เพื่อนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านดังสมการ

$$\Delta h = \Delta P / \gamma_f \quad (4.5)$$

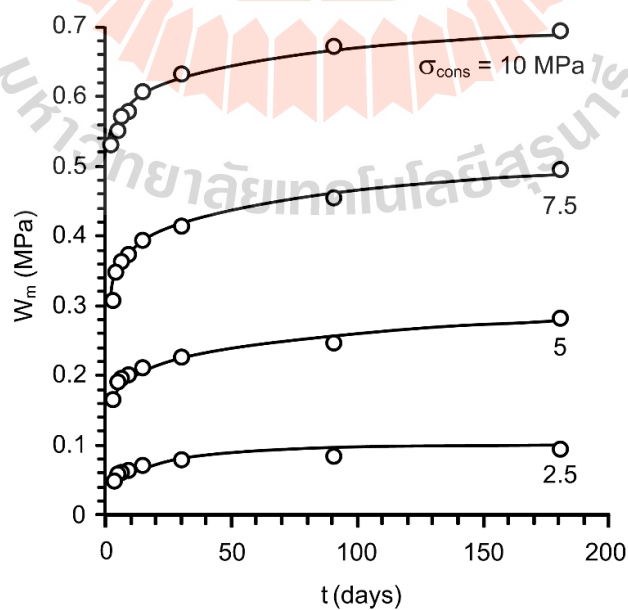
โดยที่  $\Delta h$  คือ ระดับความสูงที่ต่างกัน (m)

$\Delta P$  คือ ความดันที่ต่างกันของจุดต้นและจุดปลาย (kPa)

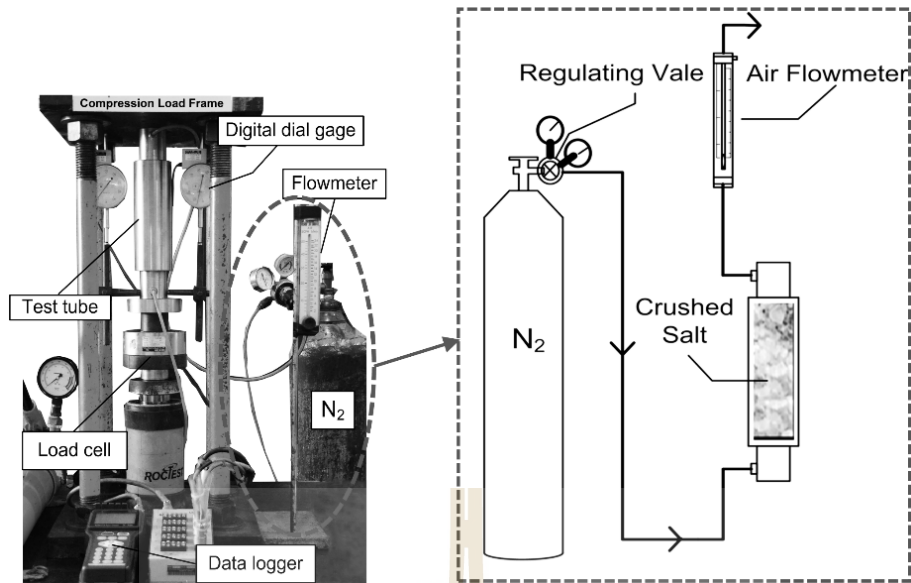
$\gamma_f$  คือ น้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรของก๊าซไนโตรเจน (kN/m<sup>3</sup>)

ตารางที่ 4.2 ค่าความเค้นและค่าความเครียดเฉลี่ย และค่าพลังงานความเครียดเฉลี่ยที่ใช้ในการอัดตัวของเกลือหินบด

$\sigma_{\text{cons}}$ (MPa)	ตัวแปร	ระยะเวลาในการอัดตัว (วัน)							
		3	5	7	10	15	30	90	180
2.5	$\sigma_m$ (MPa)	N/A	1.85	1.81	1.81	1.81	1.77	1.73	1.69
	$\epsilon_m$ ( $10^{-3}$ )	N/A	23.33	25.00	26.67	29.33	31.67	35.00	38.33
	$W_m$ (MPa)	N/A	0.058	0.062	0.066	0.073	0.079	0.067	0.095
5	$\sigma_m$ (MPa)	3.54	3.46	3.46	3.46	3.38	3.31	3.24	3.16
	$\epsilon_m$ ( $10^{-3}$ )	33.33	38.00	39.33	40.33	42.67	46.00	50.00	56.67
	$W_m$ (MPa)	0.165	0.188	0.195	0.200	0.212	0.228	0.248	0.281
7.5	$\sigma_m$ (MPa)	5.03	4.97	4.96	4.90	4.85	4.75	4.64	4.63
	$\epsilon_m$ ( $10^{-3}$ )	41.67	47.33	49.00	50.33	53.33	56.00	61.33	66.67
	$W_m$ (MPa)	0.310	0.352	0.365	0.374	0.397	0.417	0.456	0.496
10	$\sigma_m$ (MPa)	6.33	6.33	6.19	6.19	6.19	6.12	6.06	5.99
	$\epsilon_m$ ( $10^{-3}$ )	53.33	55.67	57.33	58.33	61.33	63.33	67.67	70.00
	$W_m$ (MPa)	0.530	0.553	0.569	0.579	0.609	0.629	0.672	0.695



รูปที่ 4.4 ค่าพลังงานความเครียดเฉลี่ยในฟังก์ชันของระยะเวลาในการอัดตัวและความเค้นกด



รูปที่ 4.5 การทดสอบเพื่อหาค่าความซึมผ่าน

การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (Hydraulic conductivity) สามารถคำนวณได้จากการแทนค่าอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่อ่านได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลด้วยสมการ (Indrarata and Ranjith, 2001)

$$Q = KA (\Delta h/L) \quad (4.6)$$

โดยที่

- K คือ สัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (m/s)
- Q คือ อัตราการไหล ( $m^3/s$ )
- L คือ ระยะทางของความซึมผ่าน (m)
- A คือ พื้นที่หน้าตัดของการไหล ( $m^2$ )
- $\Delta h$  คือ ระดับความสูงที่ต่างกันของจุดต้นและจุดปลาย (m)

ทำการแทนค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านที่ได้จากสมการ 4.6 เพื่อหาค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพ (k) ดังสมการ

$$k = K\mu / \gamma_f \quad (4.7)$$

โดยที่

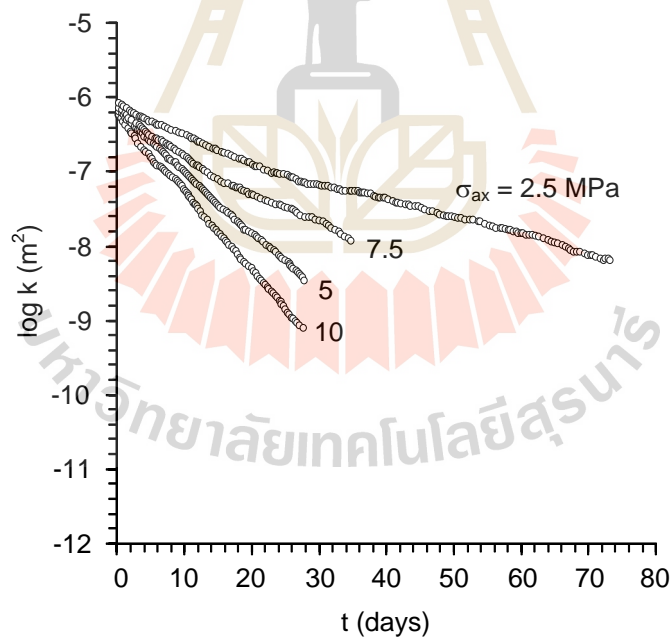
- k คือ ความซึมผ่านเชิงกายภาพ ( $m^2$ )
- $\mu$  คือ ความหนืดจลน์ (Pa·s)

ผลการทดสอบระบุว่าค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเค้นกดและระยะเวลาในการอัดตัวมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.6 และเมื่อทำการทดสอบเสร็จสิ้นจึงนำเกลือหินบดออกจากแท่งกระบอกเพื่อนำมาตัดให้มีขนาดที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบกำลังกดในแกนเดียวต่อไป

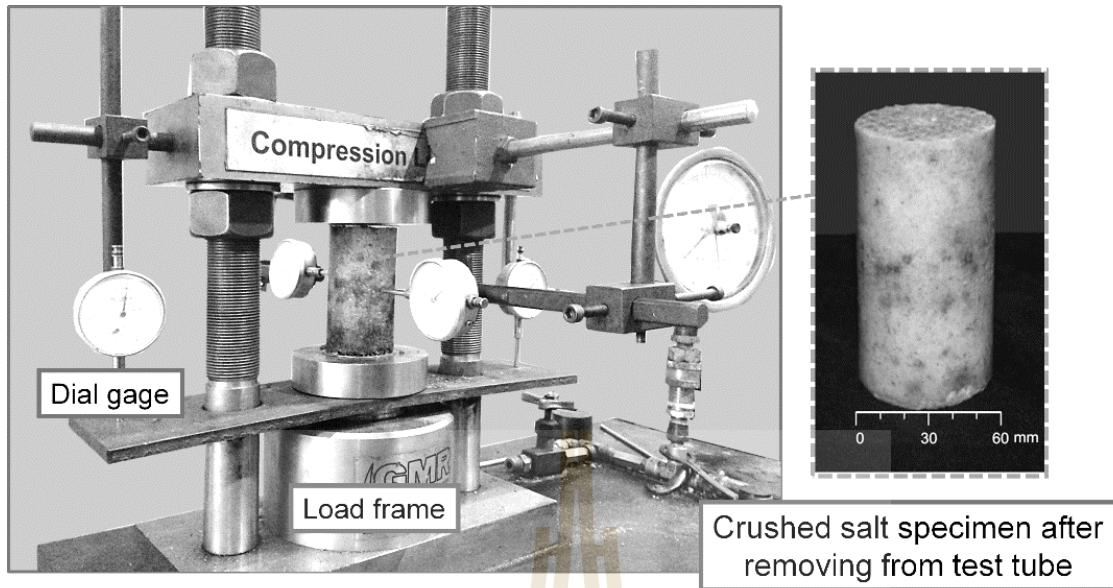
#### 4.4 การทดสอบกำลังกดในแกนเดียว

##### 4.4.1 วิธีการทดสอบกำลังกดในแกนเดียว

วัตถุประสงค์ของการทดสอบกำลังกดในแกนเดียว คือ เพื่อหาค่าความเค้นสูงสุด ( $\sigma_c$ ) และค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ( $E, \nu$ ) ของเกลือหินบดหลังจากทำการทดสอบการอัดตัวเสร็จตามระยะเวลาที่กำหนด โดยการทดสอบได้ใช้อัตราการให้แรงกดเท่ากับ 0.5 ถึง 1 MPa/s จนกระทั่งเกลือหินบดเกิดการแตก (รูปที่ 4.7) ระหว่างการทดสอบได้ทำการวัดค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งและการเคลื่อนตัวในแนวนอนเพื่อนำค่าดังกล่าวไปหาค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น ( $E$ ) และค่าอัตราส่วนปัวซองส์ ( $\nu$ ) และทำการวิเคราะห์รูปแบบการแตกของตัวอย่างหินด้วย วิธีการทดสอบได้ดำเนินการตามมาตรฐานของ ASTM D2938-95 ตารางที่ 4.3 แสดงขนาดและน้ำหนักของตัวอย่างเกลือหินบดที่ใช้ในการทดสอบกำลังกดในแกนเดียว



รูปที่ 4.6 ค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพในฟังก์ชันของระยะเวลาในการอัดตัวและความเค้นกด



รูปที่ 4.7 การทดสอบกำลังกดในแกนเดียว

ตารางที่ 4.3 ขนาดและน้ำหนักของตัวอย่างเกลือหินบดที่ใช้ในการทดสอบกำลังกดในแกนเดียว

$\sigma_{\text{cons}}$ (MPa)	ระยะเวลา (วัน)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (cm)	ความยาว (cm)	น้ำหนัก (g)	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
2.5	3	5.4	12.95	398.1	1.34
	5	5.4	12.90	398.1	1.35
	7	5.4	12.86	398.8	1.35
	10	5.4	12.83	399.4	1.36
	15	5.4	12.71	399.4	1.37
	30	5.4	12.59	398.7	1.38
	90	5.4	12.38	399.2	1.41
	180	5.4	12.26	399.7	1.42

ตารางที่ 4.3 ขนาดและน้ำหนักของตัวอย่างเกลือหินบดที่ใช้ในการทดสอบกำลังกดในแกนเดียว (ต่อ)

$\sigma_{\text{cons}}$ (MPa)	ระยะเวลา (วัน)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (cm)	ความยาว (cm)	น้ำหนัก (g)	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
5	3	5.4	12.41	399.6	1.41
	5	5.4	12.27	398.5	1.42
	7	5.4	12.28	399.2	1.42
	10	5.4	12.20	399.9	1.43
	15	5.4	12.12	399.4	1.44
	30	5.4	11.95	399.5	1.46
	90	5.4	11.74	398.5	1.48
	180	5.4	11.68	399.2	1.49
7.5	3	5.4	12.00	398.7	1.45
	5	5.4	11.89	398.9	1.46
	7	5.4	11.89	399.7	1.47
	10	5.4	11.79	398.5	1.48
	15	5.4	11.73	399.6	1.49
	30	5.4	11.58	399.8	1.51
	90	5.4	11.35	399.9	1.54
	180	5.4	11.27	399.8	1.55
10	3	5.4	11.65	399.5	1.50
	5	5.4	11.60	399.5	1.50
	7	5.4	11.53	399.4	1.51
10	10	5.4	11.43	399.9	1.53
	15	5.4	11.34	399.3	1.54
	30	5.4	11.21	399.9	1.56
	90	5.4	11.05	400.0	1.58
	180	5.4	11.02	400.0	1.58

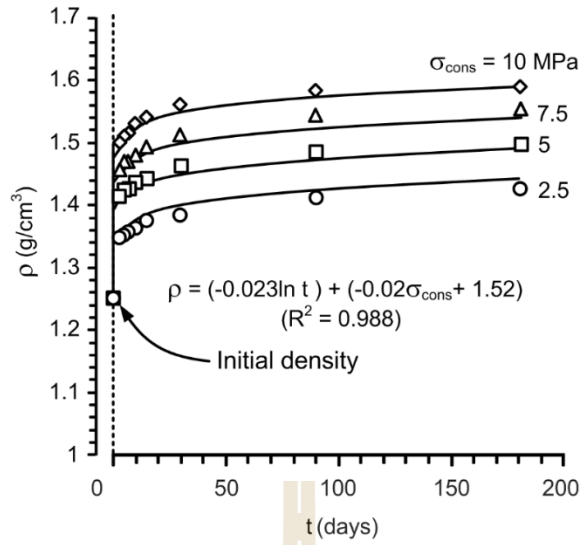


#### 4.4.2 ผลการทดสอบกำลังกดในแกนเดียว

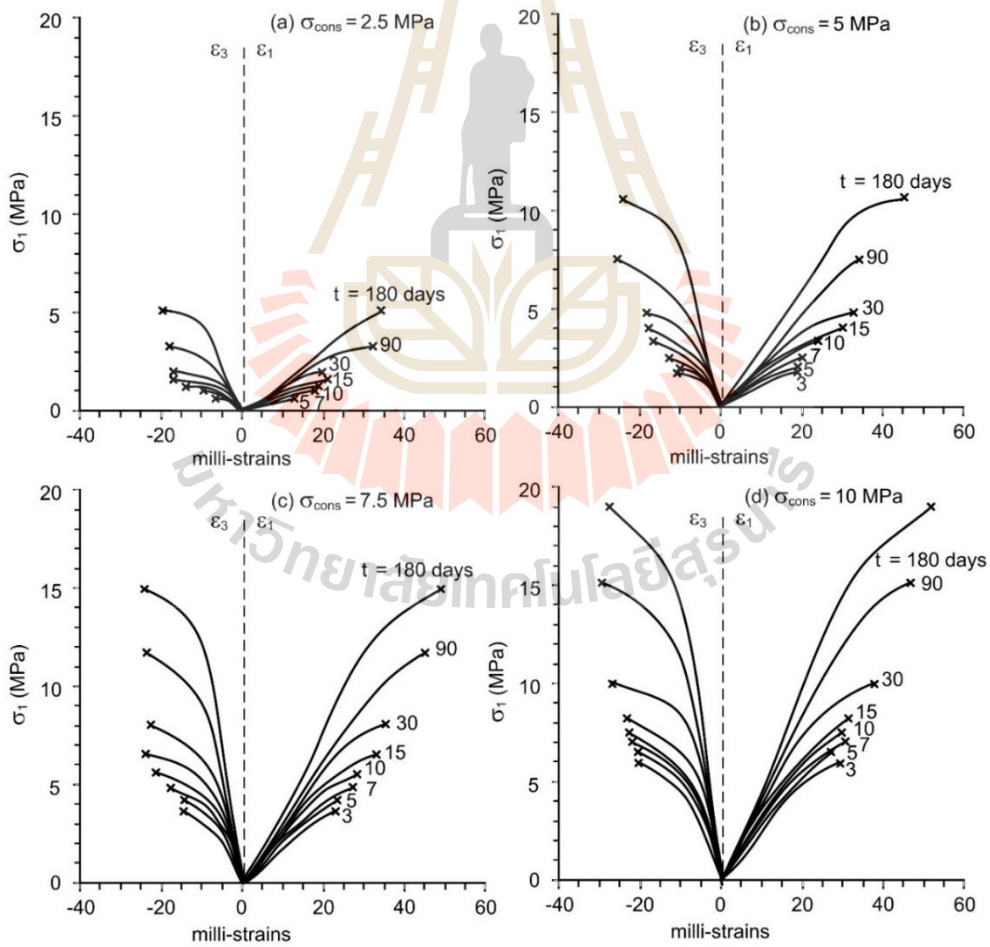
ความหนาแน่นของเกลือหินบดหลังการทดสอบการอัดตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นกดที่ใช้ในการอัดตัวเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.3) ค่าดังกล่าวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายใน 3 วันแรกของการทดสอบ ที่ความเค้นกดเดียวกันอัตราการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นมีค่าลดลงและเข้าสู่ค่าคงที่เมื่อระยะเวลาในการอัดตัวเท่ากับ 15 วัน และมีแนวโน้มผันแปรตามความเค้นกดที่ใช้ในการอัดตัวมากกว่าค่าระยะเวลาในการอัดตัว โดยการเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นสามารถอธิบายได้ด้วยสมการในรูปที่ 4.8

รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของตัวอย่างเกลือหินบดภายใต้การผันแปรความเค้นกดและระยะเวลาในการอัดตัว ผลการทดสอบระบุว่าภายใต้ระยะเวลาในการอัดตัวนานจะส่งผลให้ค่ากำลังกดในแกนเดียวสูงขึ้น โดยระยะเวลาในการอัดตัวมีผลต่อค่ากำลังกดในแกนเดียวมากขึ้นเมื่อความเค้นกดที่ใช้ในการอัดตัวสูงขึ้น นอกจากนี้ผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าเกลือหินบดที่นำมาทดสอบการอัดตัวภายใต้ความเค้นกดเท่ากับ 10 MPa เป็นระยะเวลา 180 วัน มีค่ากำลังกดในแกนเดียวสูงถึง 20 MPa ซึ่งคิดเป็น 74% ของค่ากำลังกดในแกนเดียวของเกลือหิน (Intact rock salt) ที่ได้จาก Sriapai et al. (2012) รูปที่ 4.10 แสดงตัวอย่างเกลือหินบดหลังการทดสอบกำลังกดในแกนเดียว จากการสังเกตชี้ให้เห็นว่าเกลือหินบดที่อัดตัวภายใต้ความเค้นกดต่ำและระยะเวลาในการอัดตัวน้อยจะเกิดการแตกของหินแบบบวมออกบริเวณด้านข้าง (Bulging failure) ส่วนเกลือหินบดที่อัดตัวภายใต้ความเค้นกดสูงเป็นระยะเวลานานจะเกิดการแตกของหินแบบแยกออกจากกันตามแนวยาวที่ขนานกับแรงกดและการแตกแบบเฉือน

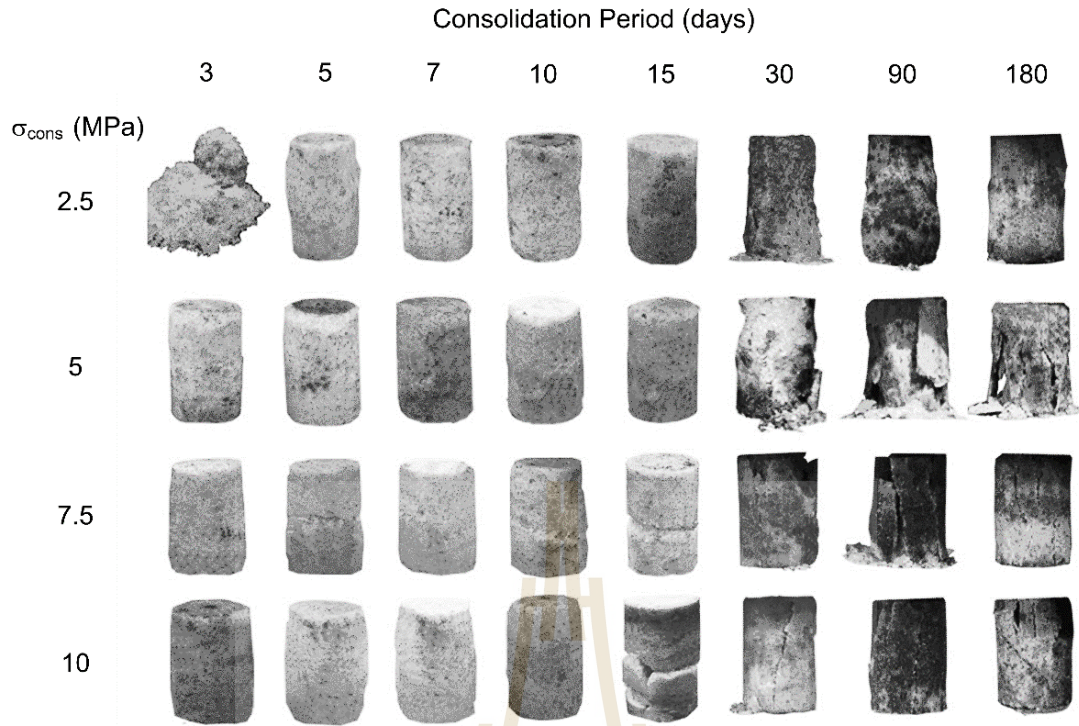
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของแท่งตัวอย่างเกลือหินบด ผลการทดสอบระบุว่ากำลังกดในแกนเดียวและสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมีค่าสูงขึ้น และอัตราส่วนปัวซองส์มีค่าต่ำลงเมื่อตัวอย่างผ่านการอัดตัวที่ความเค้นกดสูงเป็นระยะเวลานาน ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Wang et al. (1994) และ Miao et al. (1995) ซึ่งได้ทำการทดสอบการอัดตัวในแกนเดียวและการบดอัดของตัวอย่างเกลือหิน ผลการทดสอบระบุว่าภายใต้ความเค้นกด 15 MPa กำลังกดในแกนเดียวและสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมีค่าสูงถึง 28.4 MPa และ 9.46 GPa หลังจากทำการอัดตัวเป็นระยะเวลา 97 วัน รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังกดในแกนเดียว ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น และค่าอัตราส่วนปัวซองส์ในฟังก์ชันของระยะเวลาในการอัดตัวและความเค้นกดที่ใช้ในการอัดตัว ผลการทดสอบระบุว่าเกลือหินบดมีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น มีค่าความแข็งมากขึ้น และสามารถบดอัดได้น้อยลงเมื่อระยะเวลาในการอัดตัวและความเค้นกดมากขึ้น โดยลักษณะดังกล่าวอาจเกิดจากกระบวนการ Recrystallization ของน้ำเกลือ การจัดเรียงตัวใหม่ และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเม็ดเกลือ



รูปที่ 4.8 ความหนาแน่นของตัวอย่างเกลือหินบดหลังการทดสอบการอัดตัว



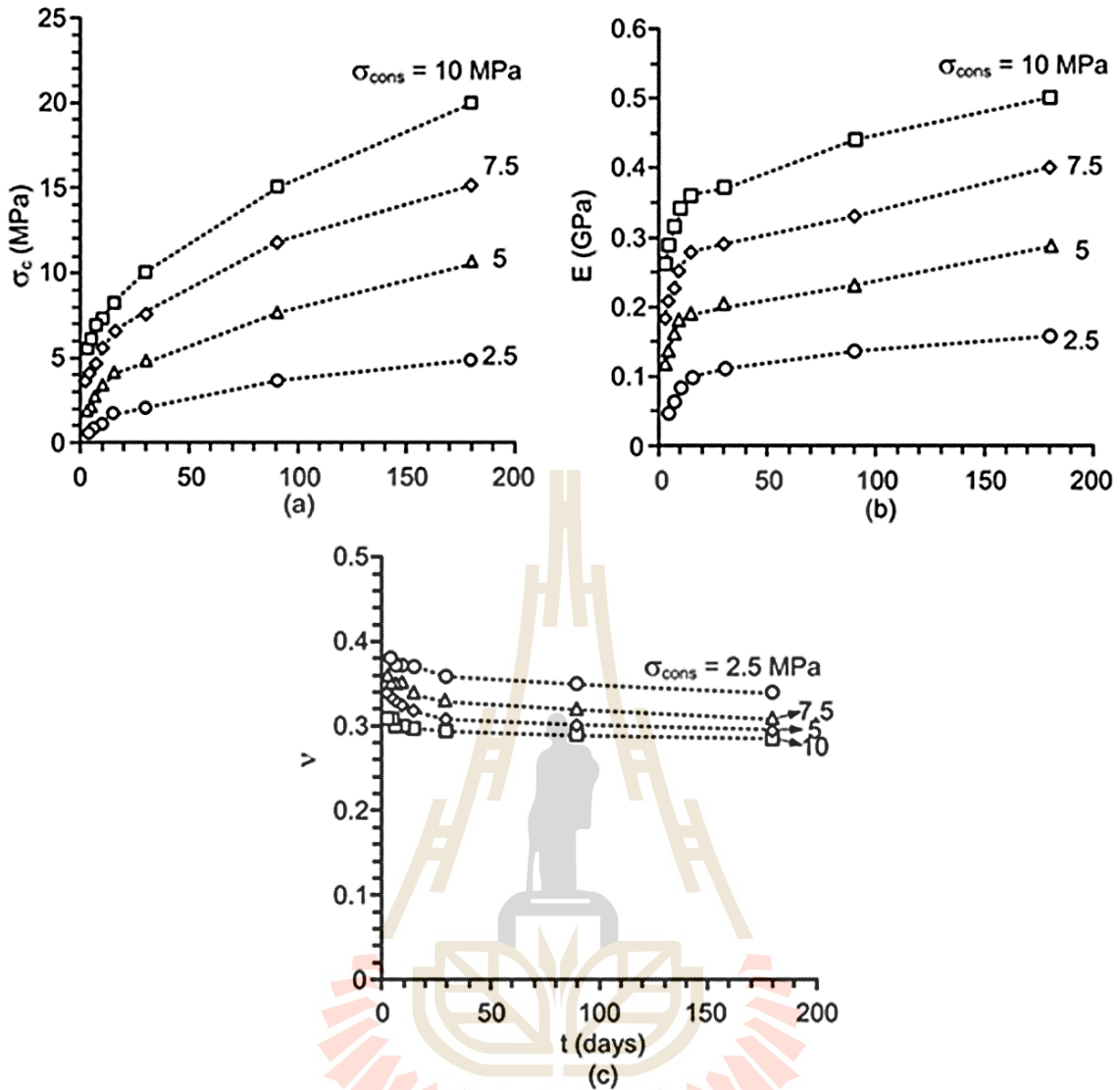
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของตัวอย่างเกลือหินบดภายใต้การผันแปรความเค้นกดและระยะเวลาในการอัดตัว



รูปที่ 4.10 ตัวอย่างเกล็ดหินบดหลังการทดสอบกำลังกดในแกนเดียว

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของแท่งตัวอย่างเกล็ดหินบด

$\sigma_{\text{cons}}$ (MPa)	ตัวแปร	ระยะเวลาในการอัดตัว (วัน)							
		3	5	7	10	15	30	90	180
2.5	$\sigma_c$ (MPa)	N/A	0.52	1.03	1.22	1.62	1.98	3.23	5.10
	E (MPa)	N/A	62.0	74.1	82.0	100.3	110.9	139.9	160.0
	$\nu$	N/A	0.38	0.37	0.37	0.37	0.36	0.35	0.34
5	$\sigma_c$ (MPa)	2.01	2.03	2.60	3.34	4.14	4.82	7.38	10.51
	E (MPa)	121.0	142.2	160.2	172.2	180.1	199.9	230.2	280.1
	$\nu$	0.36	0.35	0.35	0.35	0.34	0.33	0.32	0.31
7.5	$\sigma_c$ (MPa)	3.78	4.15	4.82	5.50	6.48	7.28	11.71	15.06
	E (MPa)	189.3	213.2	229.4	250.0	260.0	291.0	331.9	400.1
	$\nu$	0.34	0.34	0.33	0.33	0.32	0.31	0.30	0.30
10	$\sigma_c$ (MPa)	6.20	6.52	7.10	7.51	8.21	10.00	15.07	19.02
	E (MPa)	271.0	299.9	321.0	340.9	361.2	370.1	438.9	500.0
	$\nu$	0.31	0.31	0.30	0.30	0.30	0.29	0.29	0.28



รูปที่ 4.11 ค่ากำลังกดในแกนเดียว ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น และค่าอัตราส่วนปัวซองของสโในฟังก์ชันของระยะเวลาในการอัดตัวและความเค้นกดที่ใช้ในการอัดตัว

#### 4.4.3 การสร้างสมการเชิงคณิตศาสตร์

ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ถูกนำมาสร้างสมการเชิงคณิตศาสตร์เพื่อใช้คาดคะเนคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ในฟังก์ชันของความเค้นกดและระยะเวลาในการอัดตัว โดยค่าตัวแปรที่ใช้ในสมการที่สร้างขึ้นสามารถหาได้จากโปรแกรม IBM SPSS Statistics 19 (Wendai, 2000) โดยสมการที่สร้างขึ้นได้นำมาหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เทียบกับผลการทดสอบเพื่อใช้บ่งบอกถึงความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของสมการ ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังกดในแกนเดียว ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น และค่าอัตราส่วนปัวซองของสโในฟังก์ชันของระยะเวลาในการอัดตัวและความเค้นกดสามารถอธิบายได้ด้วยสมการเอกซ์โพเนนเชียลและสมการลอการิทึมดังนี้

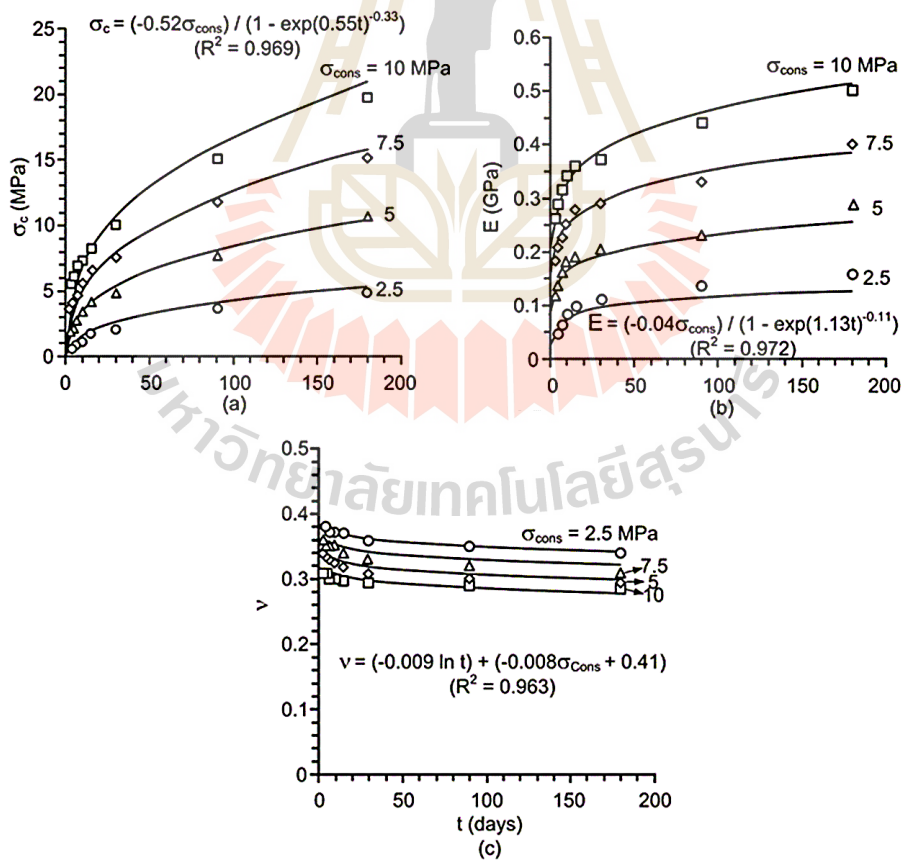
$$\sigma_c = (\alpha \sigma_{\text{cons}}) / (1 - \exp(\beta t)^{\chi}) \quad (4.8)$$

$$E = (\delta \sigma_{\text{cons}}) / (1 - \exp(\eta t)^{\phi}) \quad (4.9)$$

$$v = (\kappa \ln t) + (\lambda \sigma_{\text{cons}} + \iota) \quad (4.10)$$

โดยที่  $\sigma_c$  คือ ค่ากำลังกดในแกนเดียวของเกลือหินบดที่อัดตัวแล้ว  
 $E$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น  
 $v$  คือ ค่าอัตราส่วนปัวซองของสี  
 $\alpha, \beta, \chi, \delta, \eta, \phi, \kappa, \lambda$ , และ  
 $\iota$  คือ ค่าตัวแปรเชิงคณิตศาสตร์

ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.12 โดยสมการทั้งหมดมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) > 0.9



รูปที่ 4.12 การคาดคะเนค่ากำลังกดในแกนเดียว ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น และค่าอัตราส่วนปัวซองของสีในฟังก์ชันของระยะเวลาในการอัดตัวและความเค้นกดที่ใช้ในการอัดตัว

#### 4.4.4 ค่าความเค้นเฉือนในสามมิติ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของความเค้นสูงสุดในสามมิติโดยแสดงในรูปแบบของความเค้นเฉือนในสามมิติกับความเครียดเฉือนในสามมิติสามารถหาได้จากสมการดังนี้ (Jaeger et al., 2007)

$$\tau_{\text{oct}} = (1/3) [2 (\sigma_1 - \sigma_3)^2]^{1/2} \quad (4.11)$$

$$\gamma_{\text{oct}} = (1/3) [(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2]^{1/2} \quad (4.12)$$

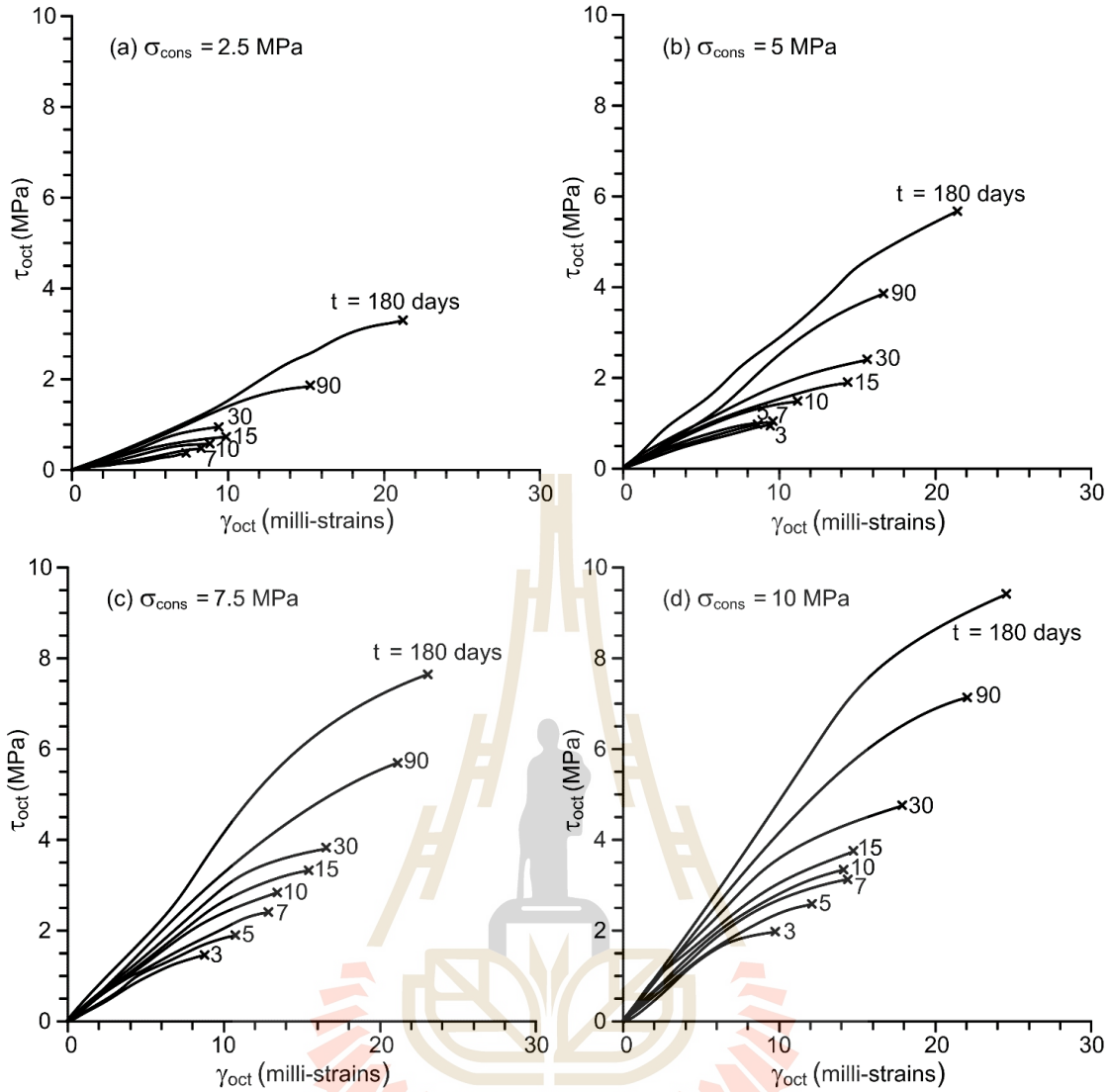
โดยที่	$\sigma_1$	คือ ความเค้นกดสูงสุด
	$\sigma_3$	คือ ความเค้นกดต่ำสุด
	$\epsilon_1,$	คือ ความเครียดในแนวความเค้นสูงสุด
	$\epsilon_2$ และ $\epsilon_3$	คือ ความเครียดในแนวความเค้นต่ำสุด

รูปที่ 4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนในสามมิติกับความเครียดเฉือนในสามมิติ แสดงให้เห็นว่ากราฟความสัมพันธ์มีความเป็นเส้นโค้งมากขึ้นเมื่อระยะเวลาในการอัดตัวสูงขึ้น และที่ความเค้นกดในการอัดตัวสูงจะส่งผลให้ความเค้นเฉือนในสามมิติมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่ความเครียดเฉือนในสามมิติมีค่าลดลงที่จุดแตก

### 4.5 การทดสอบเพื่อหาค่าความเค้นเฉือน (Direct shear test)

#### 4.5.1 วิธีการทดสอบ

วิธีการทดสอบและการคำนวณเพื่อหาค่าความเค้นเฉือนได้ดำเนินการตามมาตรฐานของ ASTM D5607-08 ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบมีทั้งหมด 2 ตัวอย่าง คือ ตัวอย่างเกลือหินและตัวอย่างเกลือหินบด ความเค้นกดคงที่ในแนวแกนตั้งแปรตั้งแต่ 0.5, 1, 1.5 และ 2 MPa สำหรับเกลือหิน และ 0.04, 0.08, 0.1 และ 0.15 MPa สำหรับเกลือหินบด การทดสอบได้ให้แรงในแนวเฉือนด้วยปั๊มไฮดรอลิคจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการเคลื่อนที่ไปจากจุดเริ่มต้น 5 mm ขณะทดสอบได้ทำการจดบันทึกค่าความเค้นเฉือนและค่าการเคลื่อนตัว หลังจากการทดสอบเสร็จจึงสืบค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่ได้จากการทดสอบได้นำมาหาค่าความเค้นยึดติด (c) และค่ามุมเสียดทาน ( $\phi$ )



รูปที่ 4.13 ความเค้นเฉือนในสามมิติในฟังก์ชันของความเครียดเฉือนในสามมิติภายใต้การผันแปรระยะเวลาในการอัดตัวและความเค้นกดที่ใช้ในการอัดตัว

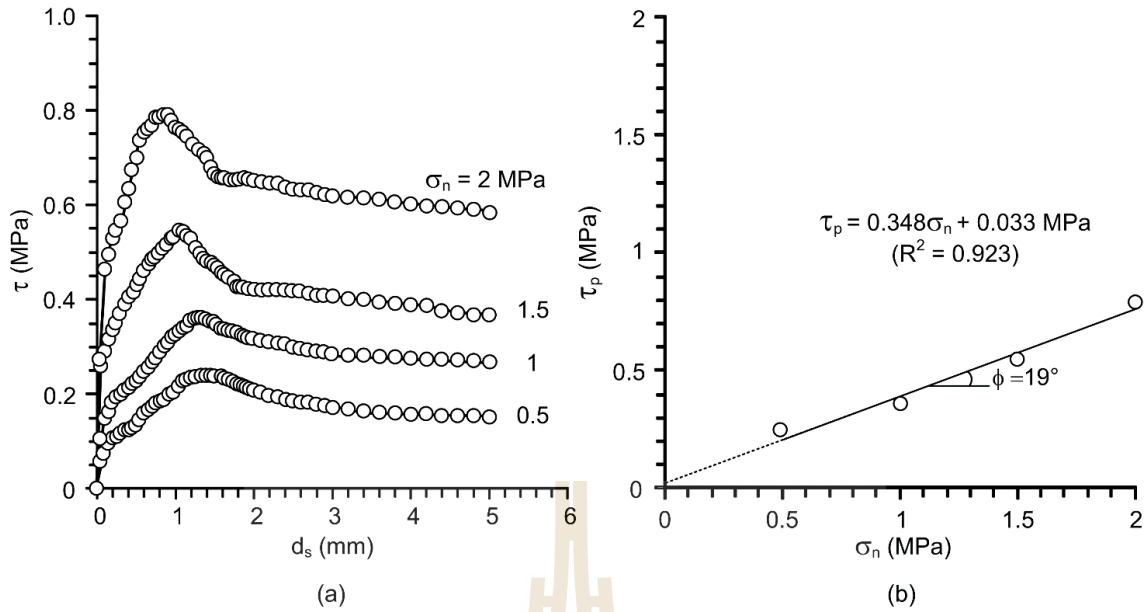
#### 4.5.2 ผลการทดสอบ

รูปที่ 4.14 และ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของค่าการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนสำหรับเกลือหินบดและเกลือหิน ค่าความเค้นเฉือนสามารถหาได้จากสมการ

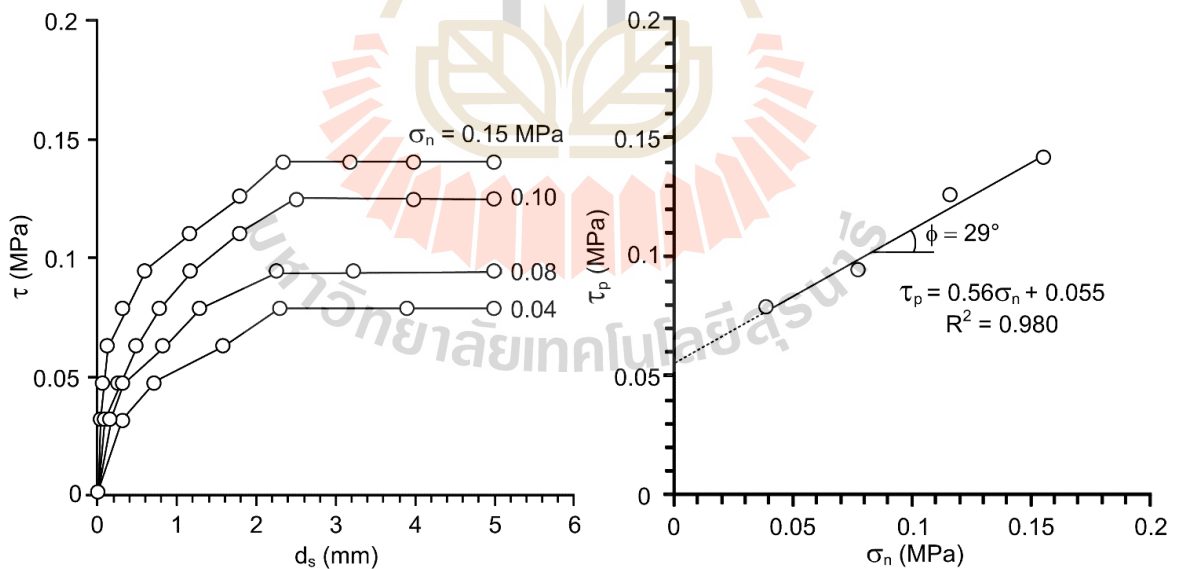
$$\tau_p = c_p + \sigma_n \tan \phi_p \quad \text{สำหรับที่จุด Peak} \quad (4.13)$$

โดยที่

- $\sigma_n$  = ความเค้นกดคงที่ในแนวแกน
- $c_p$  = ความเค้นยึดติดที่จุด Peak
- $\phi_p$  = ค่ามุมเสียดทานที่จุด Peak



รูปที่ 4.14 การทดสอบเพื่อหาค่าความเค้นเฉือนของเกลือหินผิวเรียบ (a) ค่าความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน (b) ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดในฟังก์ชันของความเค้นกดคงที่ในแนวแกน



รูปที่ 4.15 การทดสอบเพื่อหาค่าความเค้นเฉือนของเกลือหินบด (a) ค่าความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน (b) ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดในฟังก์ชันของความเค้นกดคงที่ในแนวแกน



ผลการทดสอบระบุว่าความเค้นเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความเค้นกดคงที่ในแนวแกนสูง เกลือหินและเกลือหินบดมีค่าความเค้นยึดติดเท่ากับ 0.033 และ 0.055 MPa และมีค่ามุมเสียดทานเท่ากับ  $19^{\circ}$  และ  $29^{\circ}$  ตามลำดับ ค่าความเค้นยึดติดและค่ามุมเสียดทานที่ได้จะถูกนำไปใช้ในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของเกลือหินบดที่สามารถลดการทรุดตัวของผิวดินในเหมืองเกลือและเหมืองโพแทชได้มากน้อยเพียงใด



## บทที่ 5

### การศึกษาประสิทธิภาพของเกลือหินบด หลังจากถมกลับในช่องเหมืองเกลือและเหมืองโพแทช

#### 5.1 วัตถุประสงค์

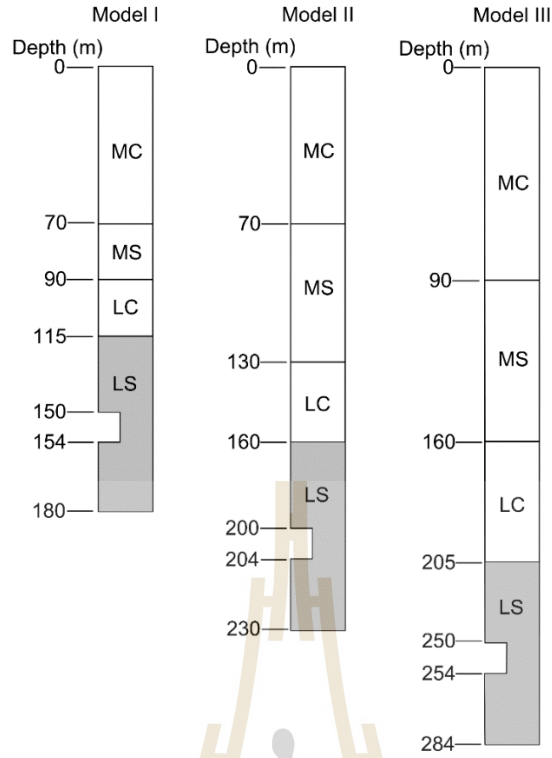
ในการศึกษาได้นำแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์มาใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพของเกลือหินบดหลังจากถมกลับในช่องเหมืองเกลือและเหมืองโพแทช โดยคุณสมบัติของเกลือหินบดที่ใช้ในแบบจำลองอยู่ในสถานะที่ถูกอัดตัวแล้วในระดับหนึ่งหรือเรียกว่า Pre-consolidated crushed salt โดยนำโปรแกรม FLAC มาใช้ในการจำลองเพื่อหาค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเชิงเวลาของช่องเหมืองใต้ดินทั้งก่อนและหลังการถมกลับด้วยเกลือหินบด ค่าการทรุดตัวของผิวดินภายใต้การผันแปรคุณสมบัติของเกลือหินบดที่ถูกบดอัดในสถานะความเค้นและที่ระยะเวลาต่างๆ ได้ถูกนำมาเป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพของการลดการทรุดตัวของผิวดิน

#### 5.2 การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

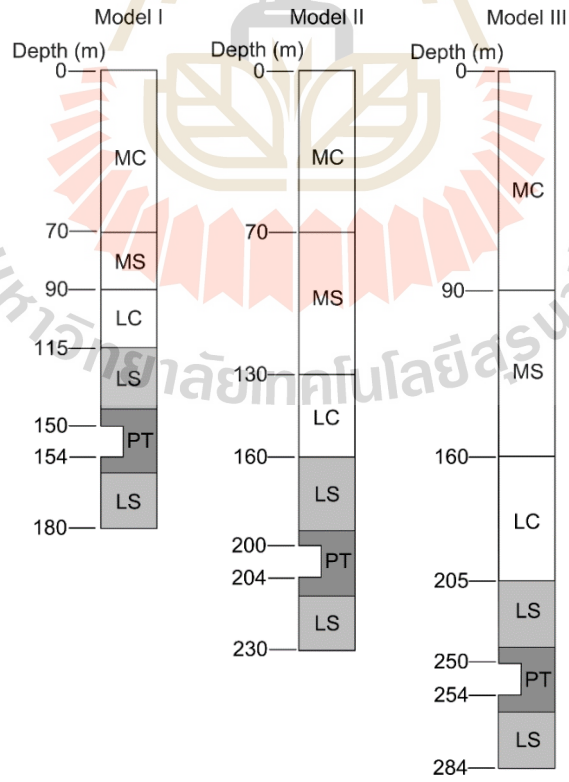
โปรแกรม FLAC (Itasca, 1992) ถูกนำมาใช้ในการจำลองช่องเหมืองแบบห้องสลับเสาค้ำยันภายใต้ Plane strain condition ลำดับชั้นหินที่ใช้ในแบบจำลองเป็นลำดับชั้นหินจากอำเภอลำทะลุ จังหวัดนครราชสีมา ได้จำลองทั้งในเหมืองเกลือและเหมืองโพแทชดังแสดงในรูปที่ 5.1 และ 5.2 เพื่อให้ผลการจำลองมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นพื้นที่ของแบบจำลองที่สร้างขึ้นได้แบ่งออกเป็นช่องๆ คล้ายกับตาข่ายมากกว่า 3,000 ช่อง เพื่อให้คอมพิวเตอร์คำนวณได้ละเอียดขึ้น โดยช่องตาข่ายบริเวณใกล้กับช่องเหมืองมีขนาดประมาณ  $0.35 \times 0.35 \text{ m}^2$  เนื่องจากความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นบริเวณดังกล่าวค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงต้องมีขนาดตาข่ายที่เล็กกว่าบริเวณอื่นของแบบจำลอง นอกจากนี้ขอบเขตฝั่งขวาและฝั่งซ้ายของแบบจำลองถูกยึดไม่ให้มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน x และในขณะเดียวกันขอบเขตบริเวณด้านล่างถูกยึดไม่ให้มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน y ส่วนขอบเขตบริเวณด้านบนของแบบจำลองปล่อยให้มีการเคลื่อนที่ตัวได้ทั้งในแนวแกน x และในแนวแกน y

#### 5.3 คุณสมบัติของชั้นหินที่ใช้ในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

ตารางที่ 5.1 ได้รวบรวมค่าคุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลศาสตร์ของชั้นหินที่ใช้ในแบบจำลอง ได้แก่ ชั้นเกลือหินและชั้นโพแทช ในการศึกษาได้จำลองชั้นโพแทชที่มีปริมาณคาร์บอนิล (C%) เท่ากับ 40% ซึ่งเป็นปริมาณที่พบได้ทั่วไปในเหมืองโพแทช สำหรับคุณสมบัติของชั้นหินปิดทับบริเวณด้านบนของชั้นเกลือหินและชั้นโพแทชได้สมมุติให้เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติแบบยืดหยุ่น (Elastic material) และสำหรับชั้นเกลือหินและชั้นโพแทชได้จำลองให้อยู่ภายใต้สมมุติฐานที่ว่าเป็นวัสดุแบบ Burger material เนื่องจากสมการ Burger ได้ถูกติดตั้งไว้ในโปรแกรมแล้ว โดย Findley et al. (1989) และ Jaeger et al. (2007) ได้เสนอสมการสำหรับแบบจำลอง Burger คือ



รูปที่ 5.1 ลำดับชั้นหินที่ใช้กับแบบจำลองในเมืองเกลีอ



รูปที่ 5.2 ลำดับชั้นหินที่ใช้กับแบบจำลองในเมืองโพแทช

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลศาสตร์ของชั้นหินที่ใช้ในแบบจำลอง (Sriapai et al., 2012; Crosby, 2007; Luangthip et al., 2016)

คุณสมบัติ	ชนิดหิน				
	หินตะกอน ชั้นกลาง	เกลือชั้น กลาง	หินตะกอน ชั้นล่าง	เกลือชั้นล่าง	
				เกลือหิน	โพแทช (C <sub>%</sub> =40)
ความหนาแน่น, ρ (kg/m <sup>3</sup> )	2,490	2,140	2,180	2,160	1,824
ค่าสัมประสิทธิ์ก้อน, K (GPa)	3.52	2.22	0.54	19.89	11.36
ค่าสัมประสิทธิ์เฉือน, G (GPa)	1.44	1.67	0.25	6.66	2.65
ความเค้นยึดติด, c (MPa)	3.5	0.5	0.88	4.82	2.86
มุมเสียดทาน, φ (Degrees)	25	50	15	45	45
ความเค้นดึงสูงสุด, σ <sub>t</sub> (MPa)	0.83	1.00	0.83	1.88	0.81

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

โดยที่	τ <sub>oct</sub>	คือ	ความเค้นเฉือนในสามมิติ
	t	คือ	เวลา มีหน่วยเป็น วัน
	E <sub>1</sub>	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นตัวที่ 1
	E <sub>2</sub>	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นตัวที่ 2
	η <sub>1</sub>	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดตัวที่ 1
	η <sub>2</sub>	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดตัวที่ 2

ค่าตัวแปรเหล่านี้ได้รับจากการสอบเทียบค่าจากการทดสอบการคืบที่มีการผันแปรความเค้นกดคงที่ต่อตัวอย่างหิน เนื่องจากในการศึกษาครั้งนี้ไม่มีการทดสอบการคืบของตัวอย่างเกลือหินและโพแทช ดังนั้นค่าที่นำมาใช้ในแบบจำลองจึงนำมาจาก Wilalak and Fuenkajorn (2016) ซึ่งได้ทำการทดสอบการคืบในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือหินและตัวอย่างโพแทชแบบเดียวกันกับเกลือหินบดที่ได้ศึกษาในครั้งนี้ โดยตัวแปรเหล่านี้ได้ถูกรวบรวมไว้ในตารางที่ 5.2 คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินบดที่ทำการอัดตัวอย่างได้ความเค้นกด 2.5, 5, 7.5 และ 10 MPa เป็นระยะเวลา 15, 60 และ 180 วัน ซึ่งค่าคุณสมบัติต่างๆ ได้นำมาจากตารางที่ 4.1 และ 4.4

ตารางที่ 5.2 คุณสมบัติการคืบของเกลือหินและโพแทช (Wilalak and Fuenkajorn, 2016; Luangthip et al., 2016)

คุณสมบัติ	ชนิดหิน	
	เกลือหิน	โพแทช ( $C_0 = 40$ )
ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นตัวที่ 1, $E_1$ (GPa)	2.48	0.95
ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นตัวที่ 2, $E_2$ (GPa)	2.22	1.12
ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดตัวที่ 1, $\eta_1$ (GPa.day)	45.16	9.88
ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดตัวที่ 2, $\eta_2$ (GPa.day)	1.29	0.42

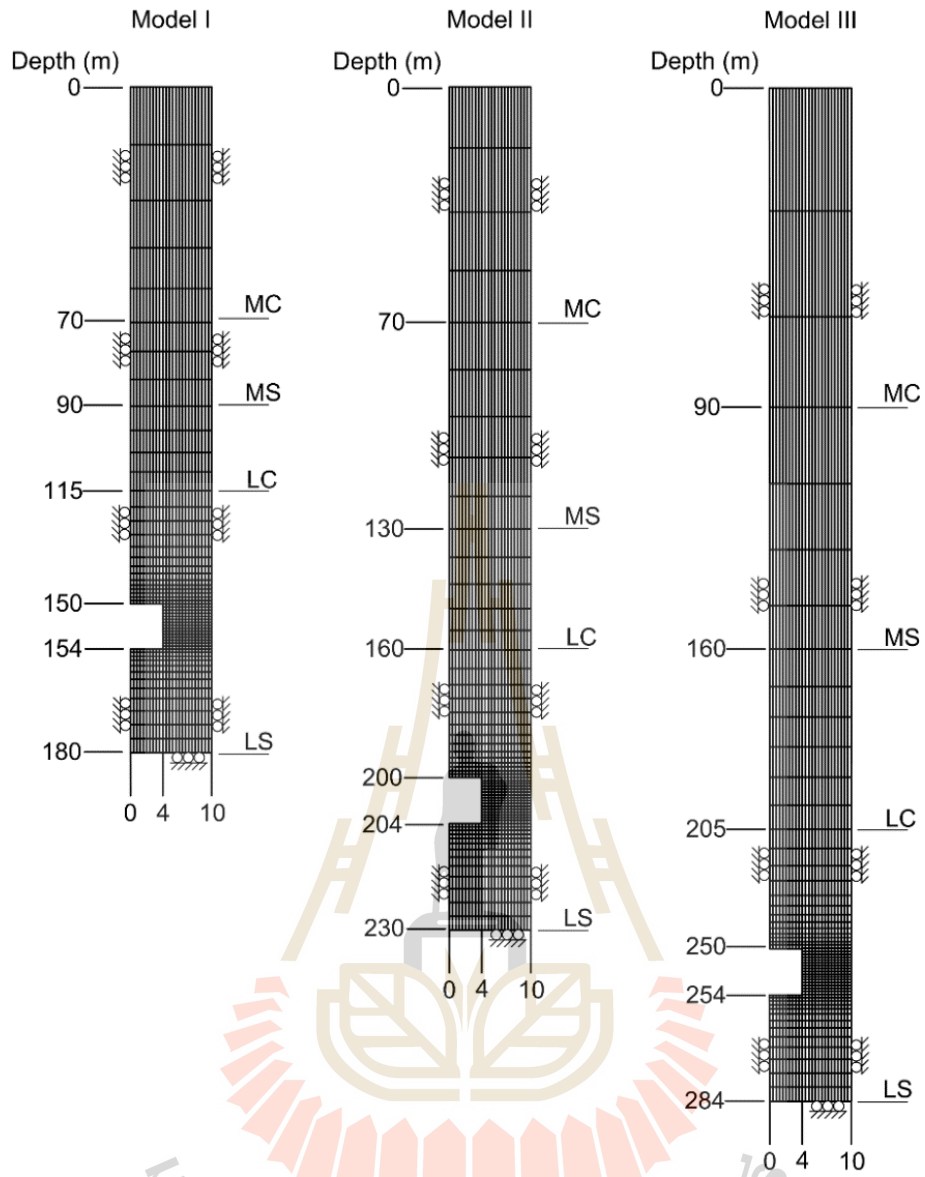
#### 5.4 ขอบเขตการศึกษา

การจำลองห้องสลักเสาค้ำยันในแบบจำลองได้ทำการกำหนดค่าความกว้างของห้องและเสาค้ำยันที่ 8 และ 12 m ทำการผันแปรความสูงของเสาค้ำยันที่ 4, 8 และ 12 m และจำลองช่องเปิดเหมือนใต้ดินที่ระดับความลึก (D) เท่ากับ 150, 200 และ 250 m ระยะเวลาของการถล่มกลับเกลือหินบดผันแปรจาก 6, 12 ถึง 24 เดือน หลังจากการขุดเจาะ การใส่วัสดุถล่มกลับในช่องเหมือนในแบบจำลองต้องเหลือช่องว่างระหว่างหลังคากับเกลือหินบดไว้ประมาณ 30 cm เนื่องจากในความเป็นจริงไม่สามารถถล่มกลับได้เต็มช่องเหมือน ในการศึกษาได้ทำการยกตัวอย่างการคาดคะเนการทรุดตัวของผิวดินและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของช่องเหมือนที่ระยะเวลา 10 ปี หลังจากการขุดเจาะ รูปที่ 5.3 และ 5.4 แสดงตัวอย่างของแบบจำลองในเหมือนเกลือและเหมือนโพแทชที่ระดับความลึกเท่ากับ 150, 200 และ 250 m ของชั้นหินที่อำเภอขามทะเลสอ จังหวัดนครราชสีมา

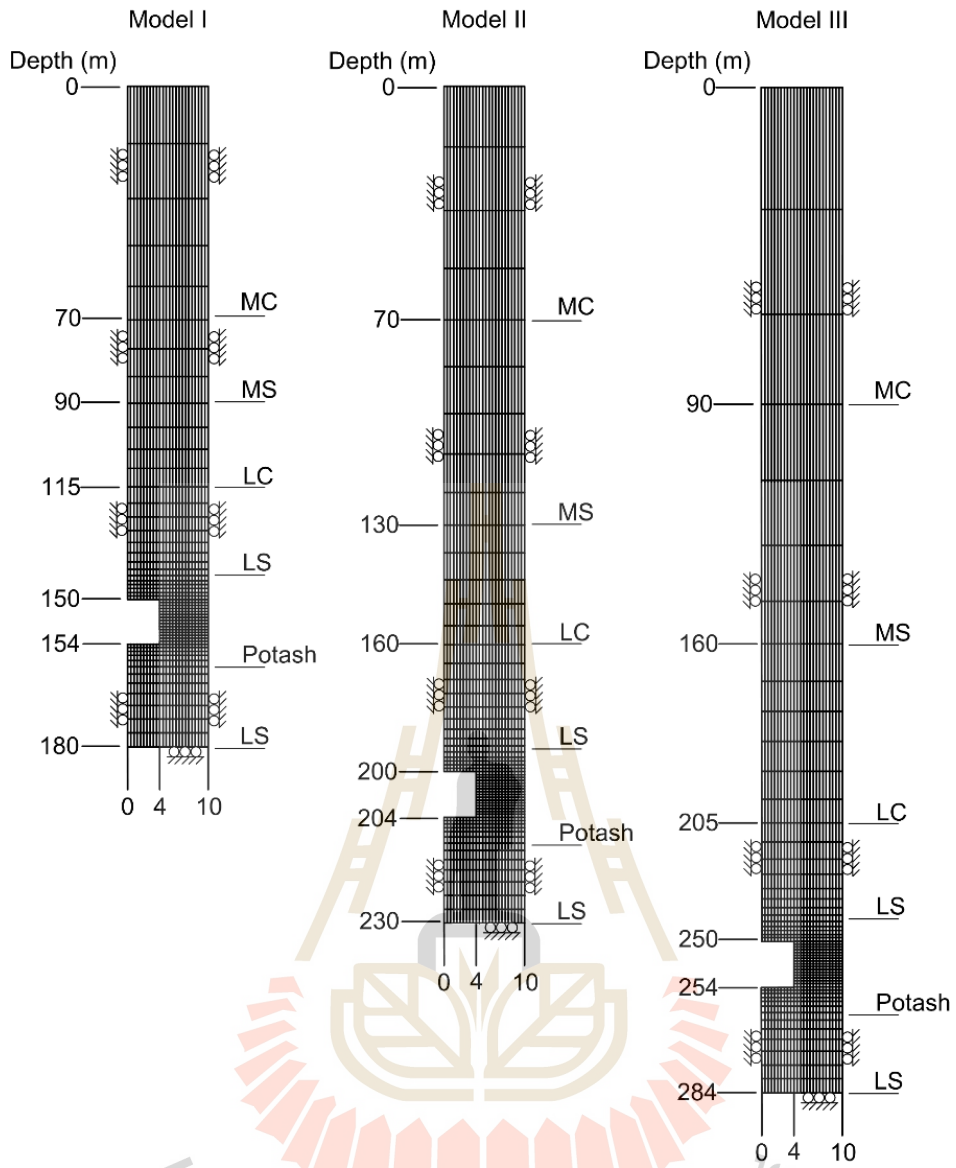
#### 5.5 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์

##### 5.5.1 การทรุดตัวของผิวดิน

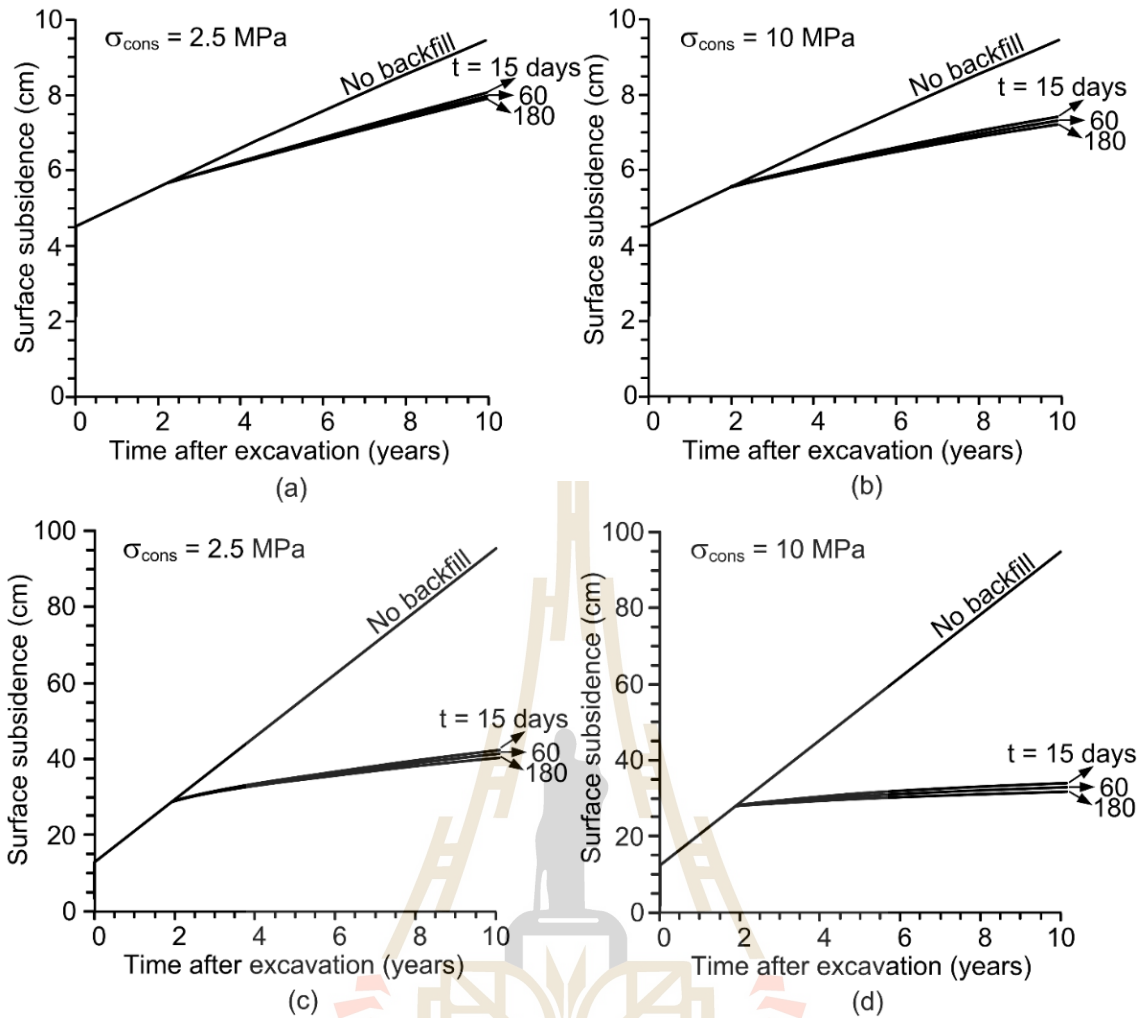
รูปที่ 5.5 แสดงตัวอย่างค่าการทรุดตัวของผิวดินที่ได้รับผลกระทบจากการขุดเจาะที่ระดับความลึก 250 m ของห้องสูง 12 m ผลการจำลองระบุว่าในกรณีที่ไม่มีการถล่มกลับของเกลือหินบดในช่องเหมือนใต้ดินค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในเหมือนเกลือมีค่าเท่ากับ 10 cm และในเหมือนโพแทชมีค่าเท่ากับ 100 cm หลังจากขุดเจาะไปแล้วเป็นระยะเวลา 10 ปี และเมื่อมีการถล่มกลับด้วยเกลือหินบดที่ระยะเวลา 2 ปี หลังจากการขุดเจาะ ประสิทธิภาพของเกลือหินบดที่ถล่มกลับในช่องเหมือนโพแทชสามารถลดการทรุดตัวของผิวดินได้มากกว่าในเหมือนเกลือ เกลือหินบดที่ถูกอัดตัวด้วยความเค้นกดเท่ากับ 10 MPa สามารถลดการทรุดตัวของผิวดินได้มากกว่าเกลือหินบดที่ถูกอัดตัวด้วยความเค้นกดเท่ากับ 2.5 MPa เพียงเล็กน้อย สำหรับระยะเวลาที่ใช้ในการอัดตัวของเกลือหินบดก่อนนำมาใช้เป็นวัสดุถล่มกลับ (15, 30 และ 180 วัน) ไม่สามารถแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างได้ชัดเจน



รูปที่ 5.3 ตัวอย่างแบบจำลองในเหมืองเกลือที่ระดับความลึก 150, 200 และ 250 m



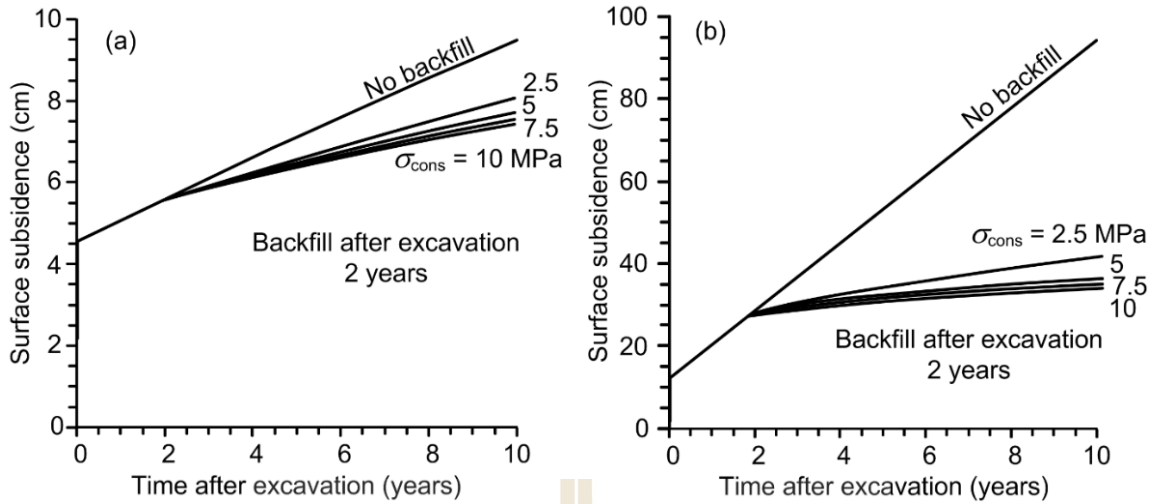
รูปที่ 5.4 ตัวอย่างแบบจำลองในเหมืองโพแทชที่ระดับความลึก 150, 200 และ 250 m



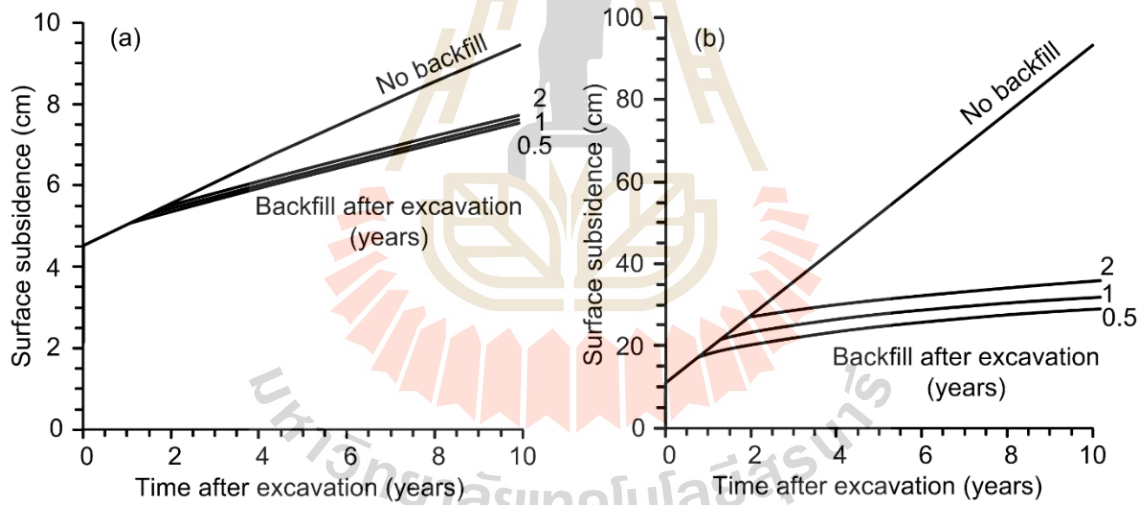
รูปที่ 5.5 การทรุดตัวของผิวดินที่ได้รับผลกระทบจากการขุดเจาะที่ระดับความลึก 250 m ของห้องสูง 12 m ในเหมืองเกลือ (a, b) และเหมืองโพแทช (c, d)

รูปที่ 5.6 แสดงการลดลงจากการทรุดตัวของผิวดินหลังจากถมกลับด้วยเกลือหินบดที่ผ่านการอัดตัวที่ความเค้นกดเท่ากับ 2.5, 5, 7.5 และ 10 MPa จากกราฟแสดงให้เห็นว่าช่องเหมืองที่มีการถมกลับของเกลือหินบดที่ผ่านการอัดตัวภายใต้ความเค้นกดเท่ากับ 5, 7.5 และ 10 MPa สามารถลดการทรุดตัวของผิวดินได้ใกล้เคียงกัน และสำหรับผลกระทบของระยะเวลาในการใส่วัสดุถมกลับได้แสดงในรูปที่ 5.7 ผลการจำลองชี้ให้เห็นว่าผลกระทบของระยะเวลาในการถมกลับมีผลมากในเหมืองโพแทช แต่อย่างไรก็ตามสำหรับความแตกต่างดังกล่าวยังถือว่าไม่มีผลกระทบค่อนข้างน้อย





รูปที่ 5.6 การลดลงจากการทรุดตัวของผิวดินหลังจากถมกลับเกลื่อนหินบดที่ผ่านการอัดตัวที่ความเค้นกวดเท่ากับ 2.5, 5, 7.5 และ 10 MPa ในเหมืองเกลือ (a) และเหมืองโพแทช (b)

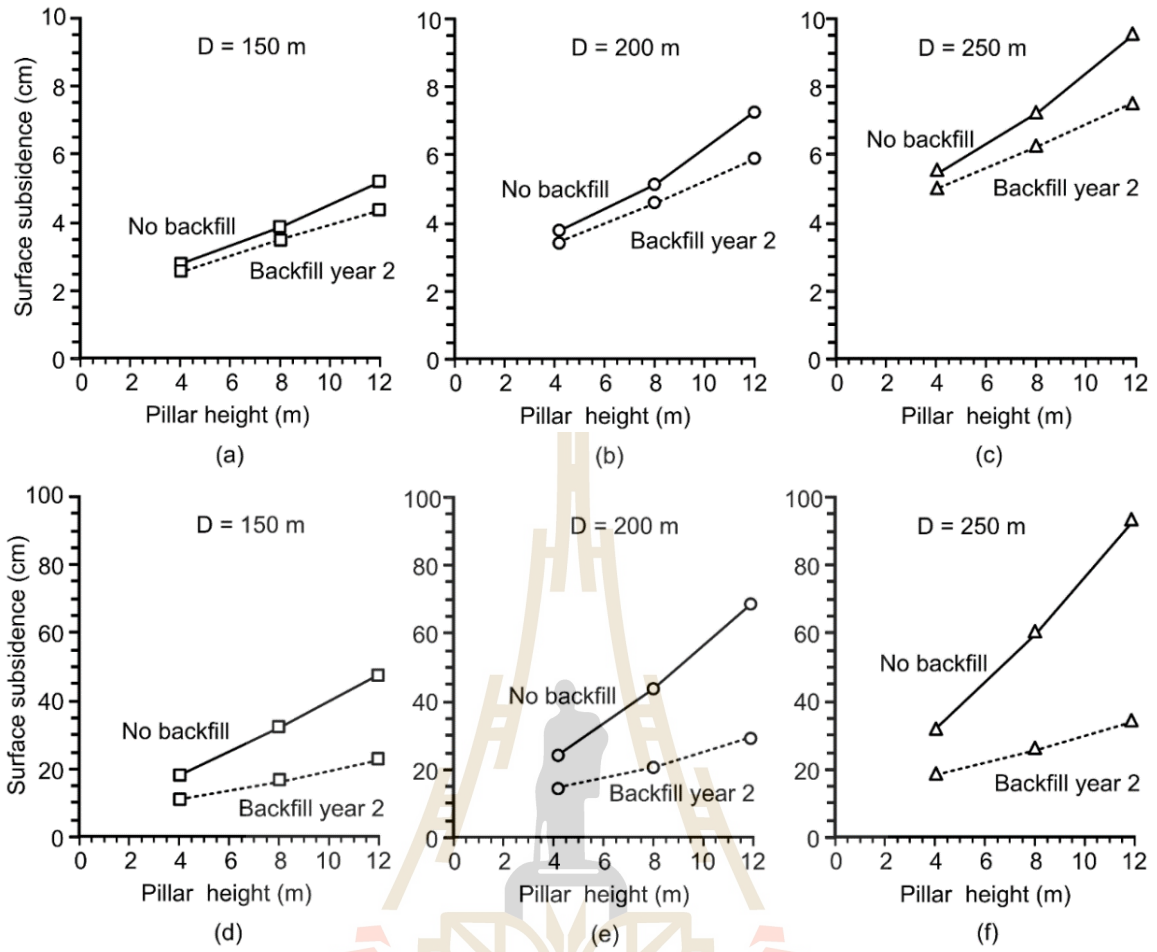


รูปที่ 5.7 การลดลงจากการทรุดตัวของผิวดินหลังจากถมกลับเกลื่อนหินบดที่ระยะเวลาเท่ากับ 6, 12 และ 24 เดือน หลังการขุดเจาะ ในเหมืองเกลือ (a) และเหมืองโพแทช (b)

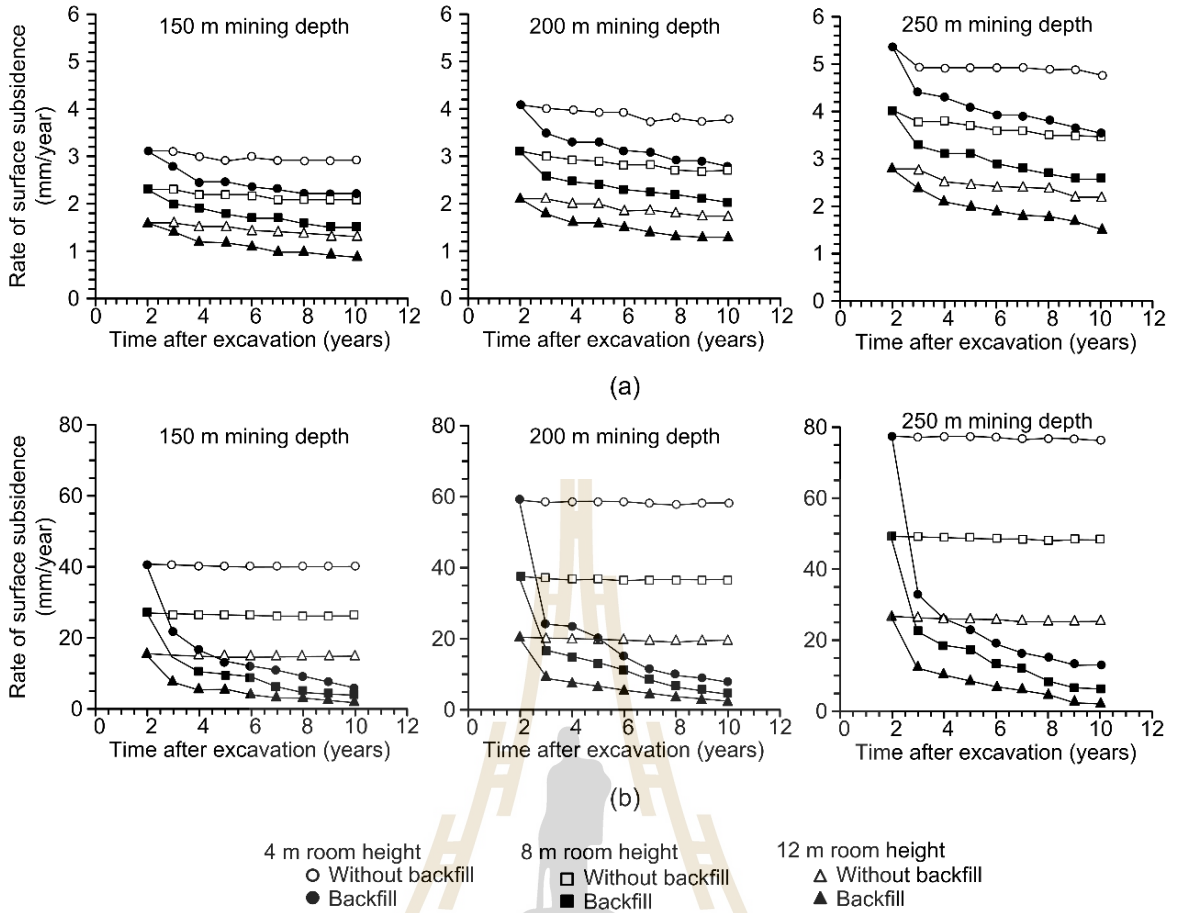
รูปที่ 5.8 แสดงค่าการทรุดตัวสูงสุดหลังจากขุดเจาะเป็นระยะเวลา 10 ปี ภายใต้การผันแปรความลึกและความสูงของห้อง คุณสมบัติของเกลือหินบดที่นำมาจำลองเพื่อศึกษาผลกระทบดังกล่าวข้างต้นได้คัดเลือกเกลือหินบดที่ถูกอัดตัวภายใต้ความเค้นกดเท่ากับ 5 MPa เป็นระยะเวลา 15 วัน และถูกถมกลับไปยังช่องเหมืองที่เวลา 2 ปี หลังจากการขุดเจาะ เนื่องจากข้อสรุปก่อนหน้านี้สามารถบอกได้ว่าคุณสมบัติของเกลือหินบดที่ถูกเลือกมาน่าจะเป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุด ผลการจำลองระบุว่าค่าการทรุดตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความลึกของช่องเหมืองและความสูงของห้องมีค่าเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของวัสดุที่ใช้ในแบบจำลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของห้องเพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าการทรุดตัวมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 9.1, 12.9 และ 21.1% สำหรับเหมืองเกลือ และเท่ากับ 44.4, 54.7 และ 60.9% สำหรับเหมืองโพแทช ที่ความลึกเท่ากับ 250 m และที่ความสูงของห้องเท่ากับ 4, 8 และ 12 m รูปที่ 5.9 แสดงค่าอัตราการทรุดตัวในฟังก์ชันของเวลาหลังจากขุดเจาะเหมืองสำหรับทั้งกรณีที่มีการถมกลับและไม่มีการถมกลับเกลือหินบด ผลการคำนวณระบุว่ากรณีที่ไม่มีการถมกลับของเกลือหินบด อัตราการทรุดตัวในเหมืองเกลือมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยหลังจากการขุดเจาะ ขณะที่ในเหมืองโพแทชมีอัตราการทรุดตัวคงที่ตลอดระยะเวลา 10 ปี หลังจากการขุดเจาะ และเมื่อมีการถมกลับของเกลือหินบด จากรูปแสดงให้เห็นว่าอัตราการทรุดตัวในเหมืองเกลือและเหมืองโพแทชมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเหมืองโพแทช

### 5.5.2 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหลังคาและเสาค้ำยัน

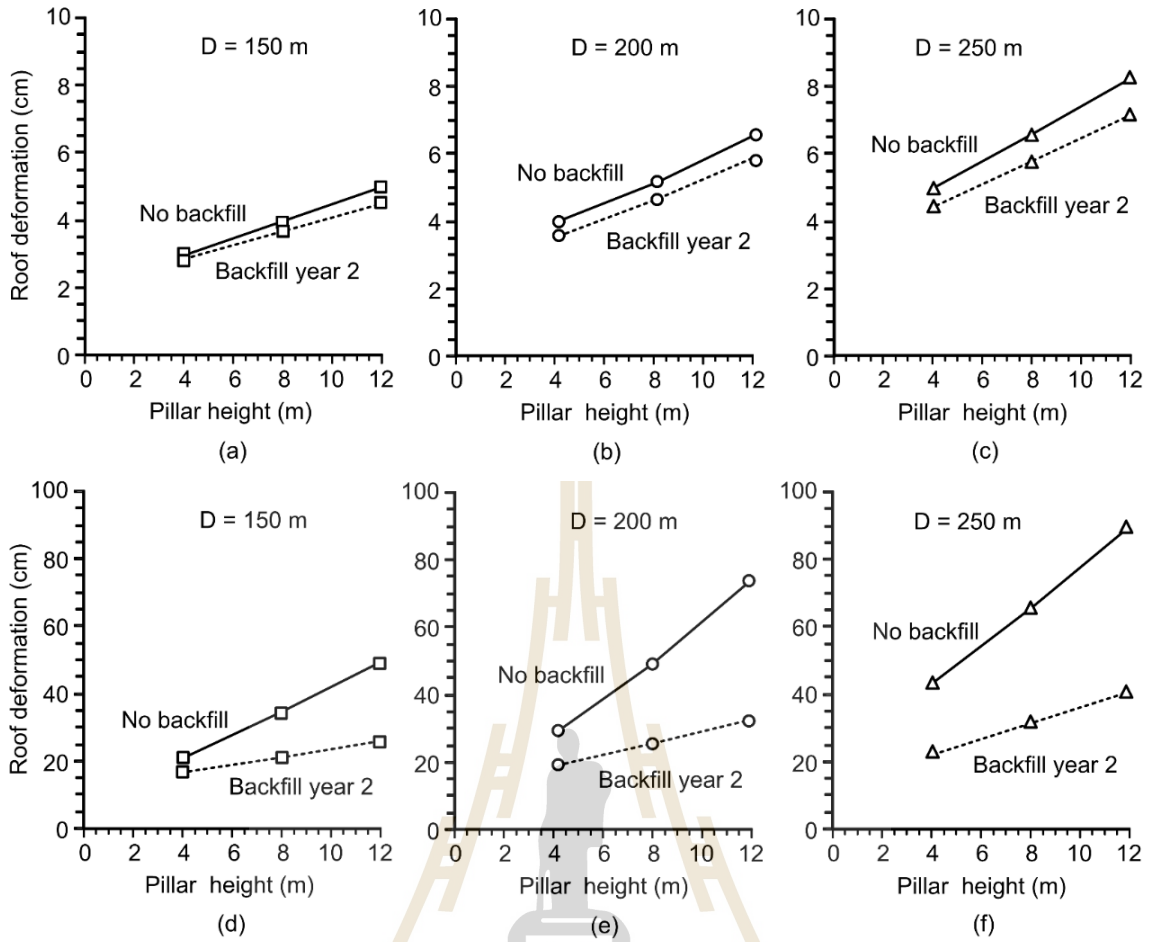
การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหลังคา พื้นห้อง และเสาค้ำยัน หลังจากการขุดเจาะเป็นเวลา 10 ปี ได้ถูกตรวจวัดจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งกรณีศึกษาในครั้งนี้ได้เลือกคุณสมบัติของเกลือหินบดที่ถูกอัดตัวภายใต้ความเค้นกดเท่ากับ 5 MPa เป็นระยะเวลา 15 วัน มาใช้เป็นวัสดุถมกลับ โดยได้ทำการถมกลับในปีที่ 2 หลังจากการขุดเจาะ ผลการจำลองระบุว่าค่าการเคลื่อนตัวของหลังคามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของเสาค้ำยันและความลึกของช่องเหมืองมีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5.10 หลังจากเกลือหินบดถูกถมกลับเข้าไปในช่องเหมืองเกลือ การเคลื่อนตัวของหลังคามีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยสำหรับทุกกรณี เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากช่องเหมืองโพแทช รูปที่ 5.11 แสดงค่าการเคลื่อนตัวของพื้นห้องในเหมืองเกลือและเหมืองโพแทช ผลระบุว่าค่าการถมกลับของเกลือหินบดสามารถลดการเคลื่อนตัวของพื้นช่องเหมืองได้ถึง 40% ในเหมืองเกลือ และ 70% ในเหมืองโพแทช ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวในแนวตั้งของช่องเหมืองในฟังก์ชันของความลึกและความสูงของเสาค้ำยันได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.12 ส่วนรูปที่ 5.13 และ 5.14 แสดงค่าการยุบตัวของเสาค้ำยัน ผลการตรวจวัดระบุว่าประสิทธิภาพของเกลือหินบดที่ถูกถมกลับในเหมืองโพแทชมีประสิทธิภาพมากกว่าในเหมืองเกลือ เมื่อความลึกของช่องเหมืองและความสูงของเสาค้ำยันเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้การลดลงของการเคลื่อนตัวของเสาค้ำยันเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าคุณสมบัติของหินในภาคสนามเป็นตัวการสำคัญที่จะบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของเกลือหินบด ซึ่งถ้าหากหินบริเวณดังกล่าวมีค่าการคืบเชิงเวลาน้อยอาจจะไม่จำเป็นต้องใส่วัสดุถมกลับ เนื่องจากวัสดุถมกลับจะมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อหินบริเวณโดยรอบมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเชิงเวลามากขึ้น



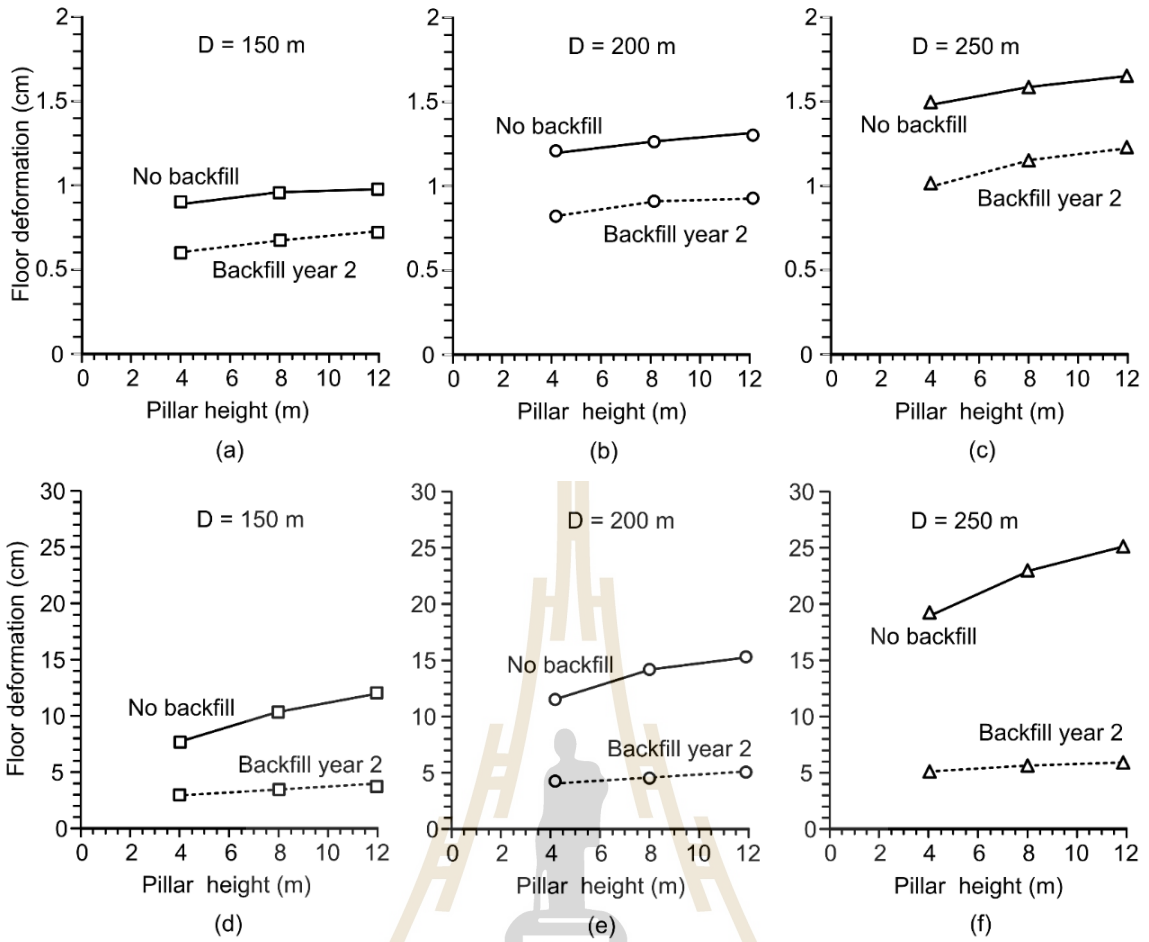
รูปที่ 5.8 การทรุดตัวสูงสุดหลังจากการขุดเจาะเป็นระยะเวลา 10 ปี ภายใต้การผันแปรความลึกและความสูงของห้องในเหมืองเกลือ (a, b, c) และเหมืองโพแทช (d, e, f)



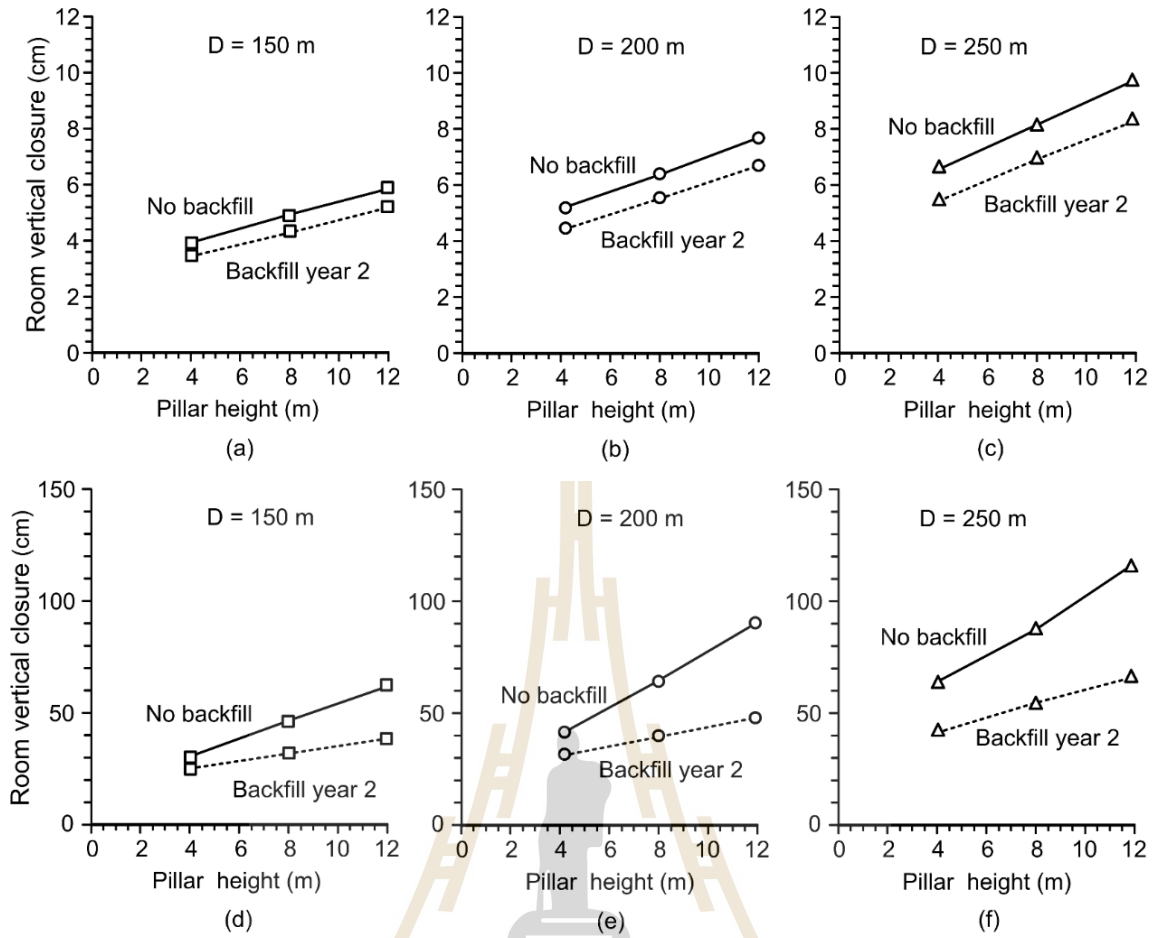
รูปที่ 5.9 ค่าอัตราการทรุดตัวในฟังก์ชันของเวลาหลังจากขุดเจาะเหมืองสำหรับทั้งกรณีที่มีการถมกลับ และไม่มีการถมกลับเกลือหินบดในเหมืองเกลือ (a) และเหมืองโพแทช (b)



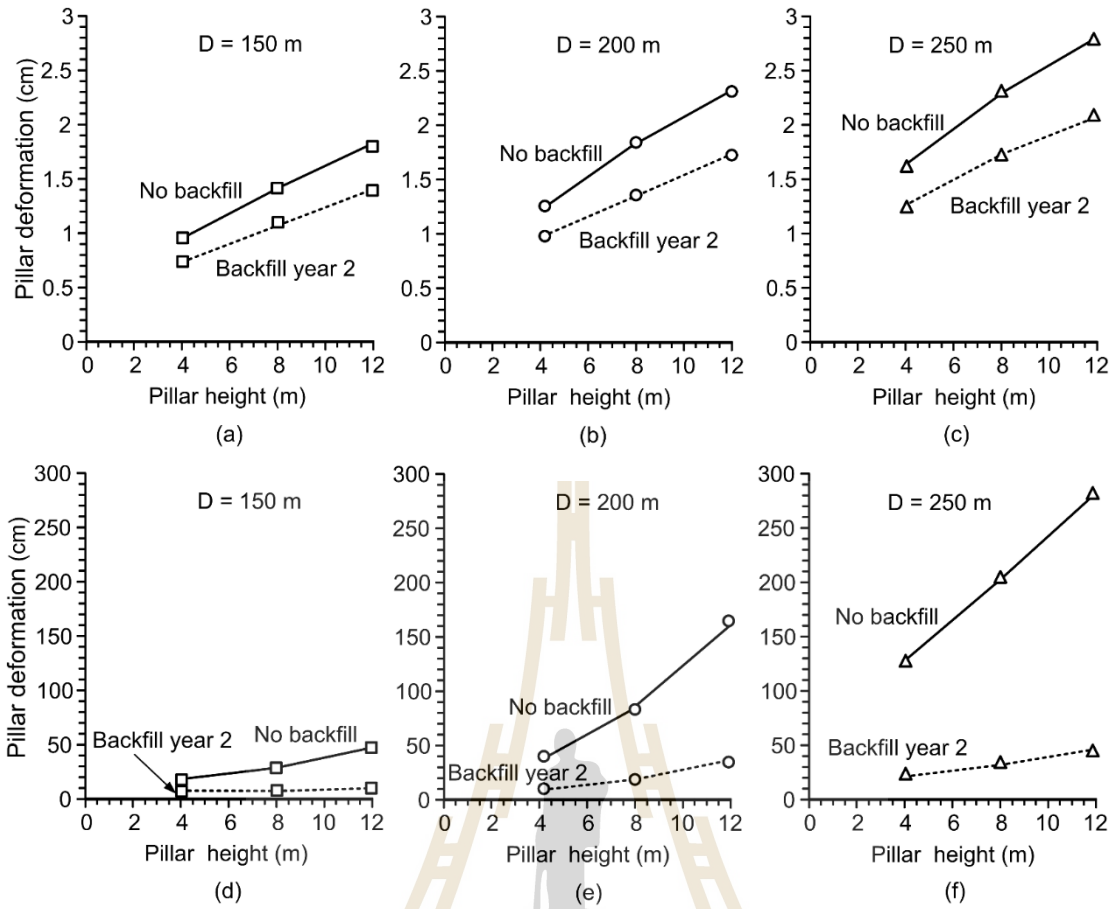
รูปที่ 5.10 การเคลื่อนตัวของหลังคาในเหมืองเกลือ (a, b, c) และเหมืองโพแทช (d, e, f)



รูปที่ 5.11 การเคลื่อนตัวของพื้นห้องในเหมืองเกลือ (a, b, c) และเหมืองโพแทช (d, e, f)

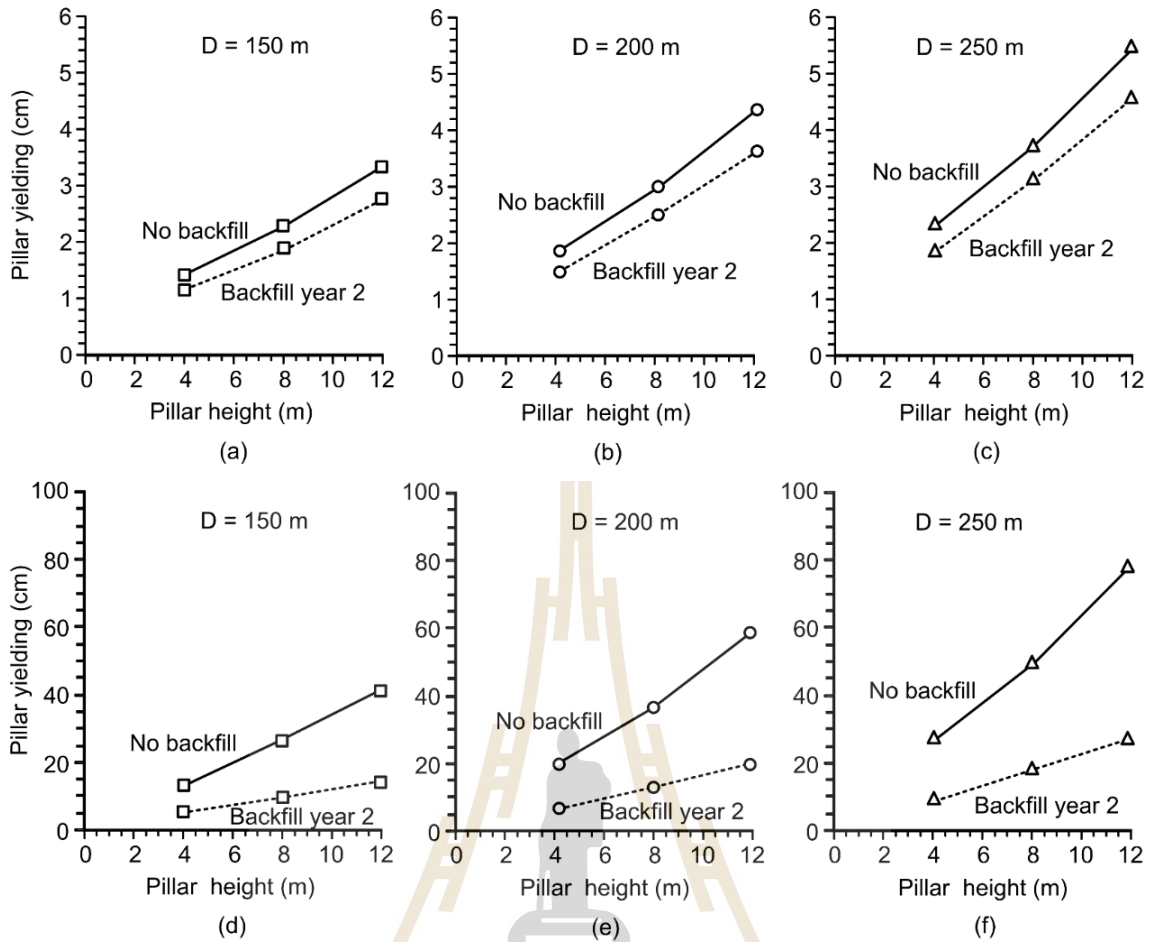


รูปที่ 5.12 การยุบตัวในแนวตั้งของช่องเหมืองในเหมืองเกลือ (a, b, c) และเหมืองโพแทช (d, e, f)



รูปที่ 5.13 การบวมตัวของเสาค้ำยันในเหมืองเกลือ (a, b, c) และเหมืองโพแทช (d, e, f)





รูปที่ 5.14 การยุบตัวของเสาค้ำยันในเหมืองเกลือ (a, b, c) และเหมืองโพแทช (d, e, f)

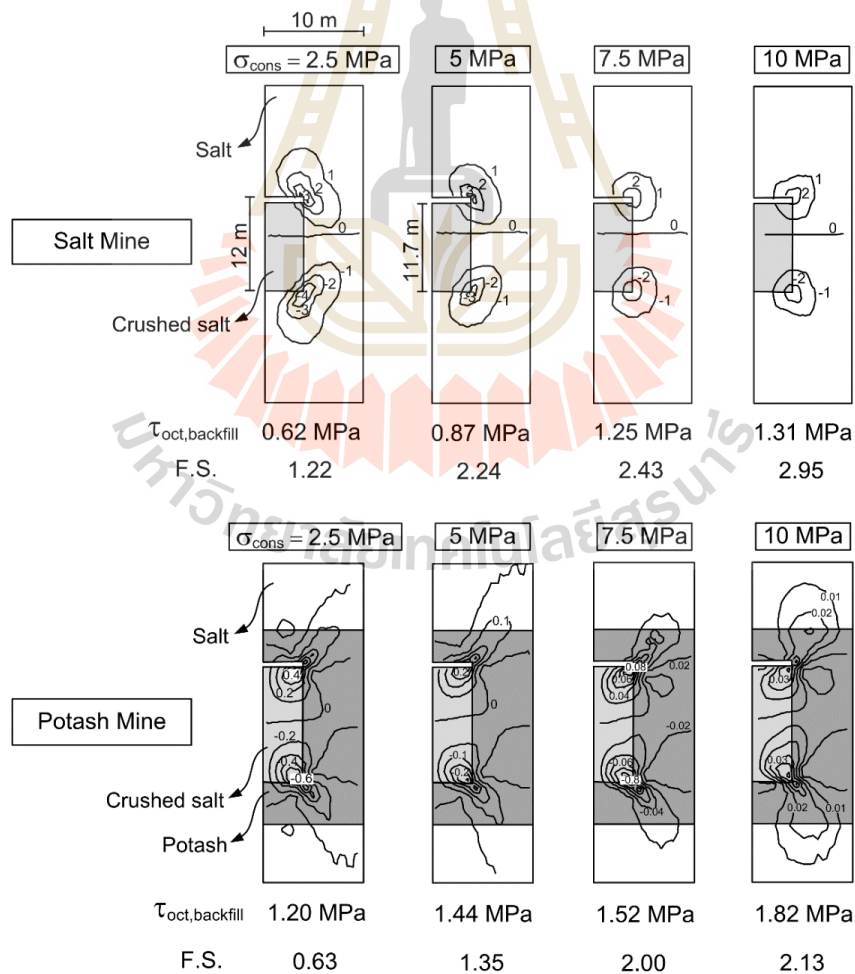
### 5.5.3 ค่าปัจจัยความปลอดภัยของเกลือหินบด

ค่าความเค้นเฉือนในสามมิติที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการถูกนำมาใช้เพื่อหาค่าปัจจัยความปลอดภัย (FS) ของเกลือหินบดหลังจากถมกลับในเหมืองใต้ดิน ซึ่งได้ทำการยกตัวอย่างเหมืองที่ระดับความลึก 250 m ความสูงของห้อง 12 m และถมกลับเกลือหินบดที่ถูกอัดตัวภายใต้ความเค้นกดเท่ากับ 2.5, 5, 7.5 และ 10 MPa เป็นระยะเวลา 15 วัน ในปี 2 หลังจากการขุดเจาะ ค่าความเค้นหลักสูงสุดและค่าความเค้นหลักต่ำสุดที่ได้จากแบบจำลองถูกนำมาหาค่าความเค้นเฉือนในสามมิติที่อาจเกิดขึ้นจริงในภาคสนามและนำมาหาค่าปัจจัยความปลอดภัยตั้งสมการ

$$FS = \tau_{oct} / \tau_{oct,backfill} \quad (5.2)$$

โดยที่  $\tau_{oct}$  คือ ค่าความเค้นเฉือนในสามมิติที่จุดแตกของเกลือหินบดที่ได้จากห้องปฏิบัติการ  
 $\tau_{oct,backfill}$  คือ ค่าความเค้นเฉือนในสามมิติที่ได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

ค่าความเค้นเฉือนในสามมิติที่เกิดขึ้นในบริเวณเกลือหินบดที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.15 ผลการคำนวณระบุว่าความเค้นเฉือนในสามมิตีมีค่าสูงที่สุดในบริเวณมุมด้านบนของหลังกาและบริเวณมุมด้านล่างของพื้นห้อง ตารางที่ 5.3 แสดงผลการคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยของเกลือหินบดทั้งในเหมืองเกลือและเหมืองโพแทช ผลการคำนวณระบุว่าเกลือหินบดที่ถมกลับในเหมืองโพแทชมีค่าปัจจัยความปลอดภัยน้อยกว่าในเหมืองเกลือ ค่าปัจจัยความปลอดภัยของเกลือหินบดในเหมืองเกลือมีค่ามากกว่า 1.0 ทุกกรณี แสดงว่าไม่เกิดการพังหลังจากมีการถมกลับด้วยเกลือหินบด แต่สำหรับเกลือหินบดที่ถมกลับในเหมืองโพแทชมีค่าปัจจัยความปลอดภัยมากกว่า 1.0 เพียง 3 กรณี คือ เกลือหินบดที่ถูกอัดตัวภายใต้ความเค้นกดที่ 5, 7.5 และ 10 MPa ก่อนนำไปถมกลับในช่องเหมือง ส่วนเกลือหินบดที่ถูกอัดตัวภายใต้ความเค้นกดเท่ากับ 2.5 MPa มีค่าปัจจัยความปลอดภัยน้อยกว่า 1.0 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าหากจะมีการถมกลับเกลือหินบดในเหมืองโพแทช เกลือหินบดควรมีการอัดตัวภายใต้ความเค้นกดอย่างน้อย 5 MPa เป็นเวลา 15 วัน ก่อนการถมกลับ



รูปที่ 5.15 ค่าความเค้นเฉือนในสามมิติของเกลือหินบดที่เกิดขึ้นในเหมืองเกลือและเหมืองโพแทช

ตารางที่ 5.3 ค่าปัจจัยความปลอดภัยของเกลื่อหินบดที่ถูกถมกลับในเหมืองเกลือและเหมืองโพแทช

เหมือง	$\sigma_{\text{cons}}$	ผลจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์				$\tau_{\text{oct}}$ (MPa)	FS
		$\sigma_{1,\text{backfill}}$ (MPa)	$\sigma_{2,\text{backfill}}$ (MPa)	$\sigma_{3,\text{backfill}}$ (MPa)	$\tau_{\text{oct,backfill}}$ (MPa)		
เกลือหิน	2.5	4.40	3.90	2.90	0.62	0.76	1.22
	5	5.70	5.00	3.60	0.87	1.95	2.24
	7.5	6.50	5.60	3.50	1.26	3.05	2.43
	10	7.16	6.28	4.04	1.31	3.87	2.95
โพแทช	2.5	9.85	9.40	7.10	1.20	0.76	0.63
	5	9.80	9.50	6.60	1.44	1.95	1.35
	7.5	9.75	9.50	6.40	1.52	3.05	2.00
	10	9.74	9.57	5.80	1.82	3.87	2.13

## บทที่ 6

### การสร้างสมการเชิงคณิตศาสตร์

#### 6.1 วัตถุประสงค์

คุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินบดที่ได้จากบทที่ 4 ได้นำมาสร้างสมการความสัมพันธ์ในฟังก์ชันของค่าพลังงานความเครียดเฉลี่ยและระยะเวลาในการอัดตัว โดยนำโปรแกรม SPSS มาใช้เพื่อหาค่าตัวแปรเชิงคณิตศาสตร์ สมการที่ได้จะถูกนำไปใช้คาดคะเนคุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินบดที่ถูกถมกลับไปยังหลุมเจาะในภาคสนามในบทต่อไป

#### 6.2 คุณสมบัติของเกลือหินบดในฟังก์ชันของค่าพลังงานความเครียดเฉลี่ย

การศึกษานี้ได้พยายามสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าคุณสมบัติของเกลือหินบดกับค่าพลังงานความเครียดเฉลี่ยระหว่างการอัดตัว โดยกลไกที่ทำให้คุณสมบัติของเกลือหินบดเกิดการเปลี่ยนแปลงประกอบด้วย 2 กระบวนการหลัก คือ กระบวนการการอัดตัว และกระบวนการ Recrystallization (Callahan et al., 1998) โดยกลไกที่ทำให้เกิดการลดลงของปริมาณช่องว่างในกระบวนการการอัดตัว คือ การจัดเรียงตัวใหม่ของเม็ดเกลือ การแตกและการเคลื่อนที่ระหว่างผิวสัมผัสของเม็ดเกลือหลังจากที่ได้รับพลังงานความเครียดเฉลี่ย ซึ่งลักษณะดังกล่าวเกิดขึ้นในช่วง Instantaneous และ Transient deformation ส่วนกลไกที่เกิดขึ้นในกระบวนการ Recrystallization ประกอบด้วย กระบวนการ Recrystallization และกระบวนการการเชื่อมประสานของเม็ดเกลือหิน (Hwang et al., 1993; Hansen, 1997) โดยกลไกที่เกิดขึ้นในช่วง Recrystallization ไม่ทำให้ปริมาตรของเกลือหินบดลดน้อยลง แต่จะทำให้เกลือหินบดมีค่าความแข็งมากขึ้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น

##### 6.2.1 ความหนาแน่นของเกลือหินบด

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของเกลือหินบดสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

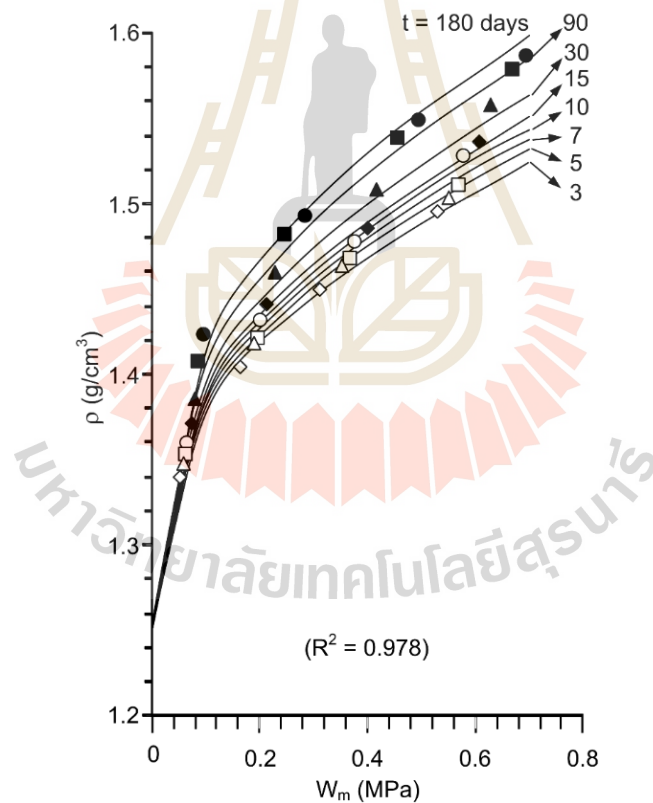
$$\rho = \rho_{\text{initial}} + \Delta\rho_{\text{cons}} \quad (6.1)$$

โดยที่  $\rho_{\text{initial}}$  คือ ค่าความหนาแน่นเริ่มต้นของเกลือหินบดก่อนได้รับพลังงานความเครียดเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ  $1.247 \text{ g/cm}^3$   
 $\Delta\rho_{\text{cons}}$  คือ ค่าความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากได้รับพลังงานความเครียดเฉลี่ยในเชิงเวลา

การวิเคราะห์ผลการทดสอบเชิงตัวเลขได้ใช้โปรแกรม SPSS (Wendai, 2000) ในการวิเคราะห์ ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\Delta\rho_{\text{cons}}$  ในฟังก์ชันพลังงานความเครียดเฉลี่ยในเชิงเวลาได้ดังสมการ

$$\Delta\rho_{\text{cons}} = 0.044 \cdot W_m^{0.391} \cdot t^{0.059} \quad (\text{g/cm}^3) \quad (6.2)$$

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ได้จากการสอบเทียบระหว่างผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการกับผลที่ได้จากการคาดคะเนด้วยสมการข้างต้นมีค่ามากกว่า 0.9 รูปที่ 6.1 เปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการกับผลที่ได้จากการคาดคะเนด้วยสมการ ซึ่งสามารถบอกได้ว่าความหนาแน่นของเกลือหินบดไม่ขึ้นกับกระบวนการ Recrystallization และกระบวนการการเชื่อมประสานของเม็ดเกลือหิน เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของเกลือหินบดได้



รูปที่ 6.1 ความหนาแน่นของเกลือหินบดในฟังก์ชันของพลังงานความเครียดเฉลี่ย

### 6.2.2 ความพรุนของเกลือหินบด

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นการลดลงของค่าความพรุนของเกลือหินบด ( $n$ ) ระหว่างการอัดตัวสามารถหาได้จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบเชิงตัวเลข ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$n = n_{\text{initial}} - \Delta n_{\text{cons}} \quad (6.3)$$

โดยที่  $n_{\text{initial}}$  คือ ค่าความพรุนเริ่มต้นของเกลือหินบดก่อนได้รับพลังงานความเครียดเฉลี่ย มีค่าเท่ากับ 42%  
 $\Delta n_{\text{cons}}$  คือ ค่าความพรุนที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากได้รับพลังงานความเครียดเฉลี่ยในเชิงเวลา

ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการยกกำลัง

$$\Delta n_{\text{cons}} = 480.203 \cdot W_m^{0.411} \cdot t^{0.070} \quad (\%) \quad (6.4)$$

กราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 6.2 ระบุว่าพลังงานความเครียดเฉลี่ยที่กระทำต่อเกลือหินบด ส่งผลทำให้ค่าความพรุนของเกลือหินบดลดลง และค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของค่าดังกล่าวในเชิงเวลา

### 6.2.3 ความแข็งของเกลือหินบด

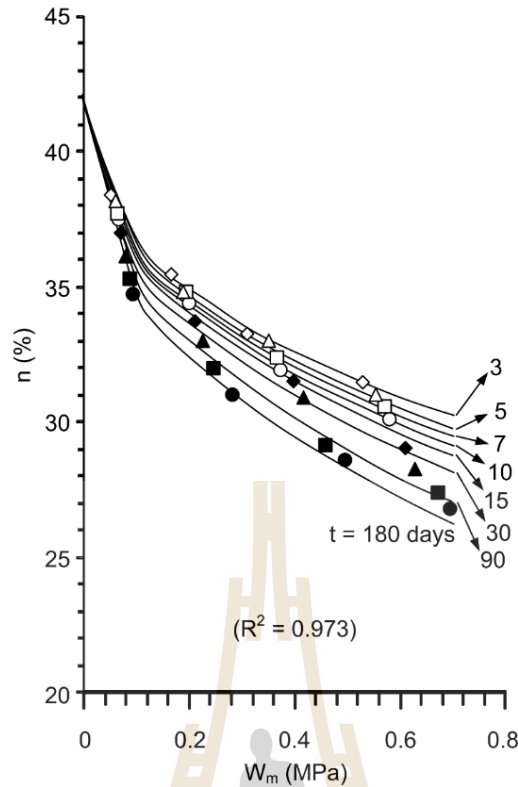
ค่าความแข็งของเกลือหินบดถูกควบคุมด้วย 2 กระบวนการ คือกระบวนการการอัดตัว และกระบวนการ Recrystallization โดยรูปแบบสมการที่ใช้อธิบายความแข็งที่เกิดจาก 2 กระบวนการ คือ

$$\sigma_c = \Delta \sigma_{c,\text{cons}} + \Delta \sigma_{c,\text{rec}} \quad (6.5)$$

$$\Delta \sigma_{c,\text{cons}} = 6.873 \cdot W_m^{0.799} \cdot t^{0.220} \quad (\text{MPa}) \quad (6.6)$$

$$\Delta \sigma_{c,\text{rec}} = 0.009 \cdot t \cdot \exp(W_m) \quad (\text{MPa}) \quad (6.7)$$

โดยที่  $\Delta \sigma_{c,\text{cons}}$  คือ ค่าความแข็งที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับพลังงานความเครียดเฉลี่ย  
 $\Delta \sigma_{c,\text{rec}}$  คือ ค่าความแข็งที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากได้รับพลังงานความเครียดเฉลี่ยในเชิงเวลา



รูปที่ 6.2 ความพรุนของเกล็ดหินบดในฟังก์ชันของพลังงานความเครียดเฉลี่ย

ค่าตัวเลขที่อยู่ในสมการที่นำเสนอข้างต้นได้มาจากการวิเคราะห์ผลการทดสอบเชิงตัวเลขด้วยการใช้โปรแกรม SPSS รูปที่ 6.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการกับผลที่ได้จากการคาดคะเนด้วยสมการ จะเห็นได้ว่าที่พลังงานความเครียดเฉลี่ยเท่ากับ 0 ค่าความแข็งของเกล็ดหินบดสามารถเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาได้ เนื่องจากกระบวนการ Recrystallization และกระบวนการการเชื่อมประสานของเม็ดเกล็ดหิน

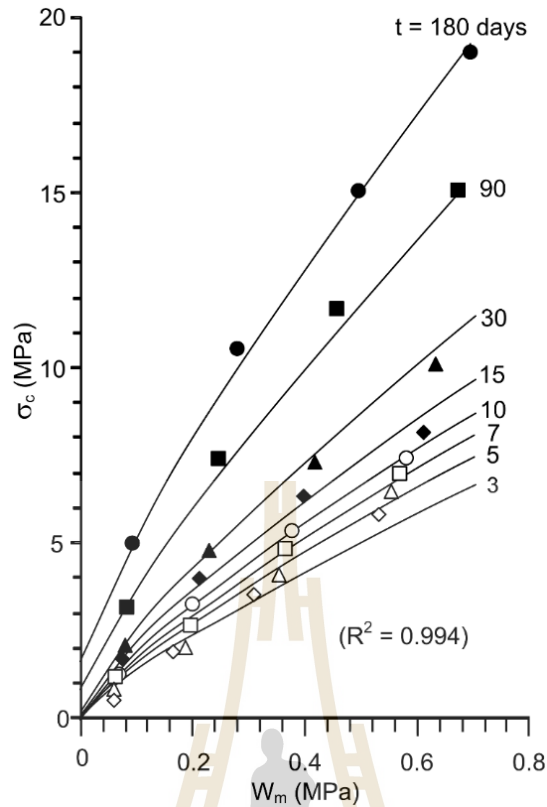
#### 6.2.4 สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของเกล็ดหินบด

ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของเกล็ดหินบดถูกควบคุมด้วย 2 กระบวนการ คือ กระบวนการการอัดตัว และกระบวนการ Recrystallization ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$E = \Delta E_{\text{cons}} + \Delta E_{\text{rec}} \quad (6.8)$$

$$\Delta E_{\text{cons}} = 0.399 \cdot W_m^{0.658} \cdot t^{0.061} \quad (\text{MPa}) \quad (6.9)$$

$$\Delta E_{\text{rec}} = 0.0002 \cdot t \cdot \exp(W_m) \quad (\text{MPa}) \quad (6.10)$$

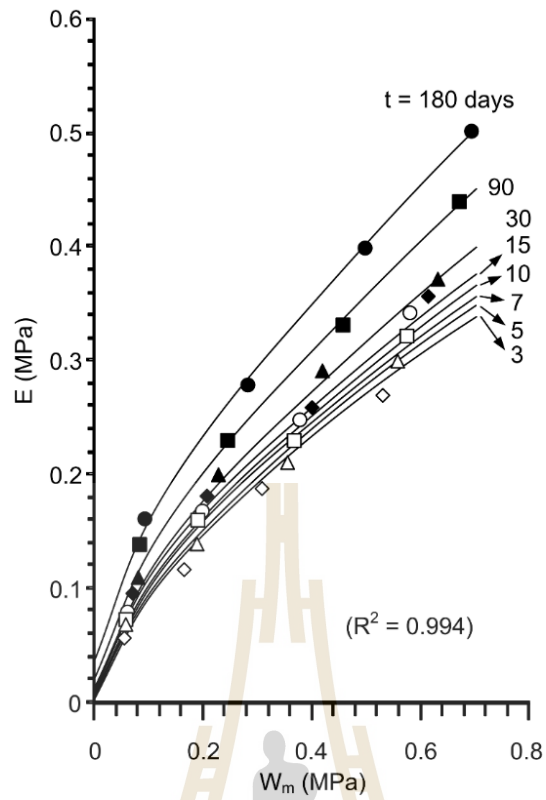


รูปที่ 6.3 ความแข็งแรงของเกลื่อหินบดในฟังก์ชันของพลังงานความเครียดเฉลี่ย

โดยที่  $\Delta E_{\text{cons}}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับพลังงานความเครียดเฉลี่ย  
 $\Delta E_{\text{rec}}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากได้รับพลังงานความเครียดเฉลี่ยในเชิงเวลา

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ได้จากการสอบเทียบผลการทดสอบกับสมการข้างต้นมีค่ามากกว่า 0.9 รูปที่ 6.4 แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นในฟังก์ชันของเวลา ถึงแม้จะไม่มีพลังงานความเครียดเฉลี่ยกระทำต่อเกลื่อหินบด





รูปที่ 6.4 สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของเกลือหินบดในฟังก์ชันของพลังงานความเครียดเฉลี่ย

## บทที่ 7

### การคาดคะเนคุณสมบัติของเกลือหินบดหลังจากถมกลับในหลุมเจาะ

#### 7.1 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของการศึกษา คือ เพื่อคาดคะเนคุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินบดหลังจากถมกลับในหลุมเจาะ (Borehole และ Shaft) การเคลื่อนตัวของหินบริเวณรอบหลุมเจาะที่เกิดขึ้นในเชิงเวลาถูกนำมาคำนวณหาค่าพลังงานความเครียดเฉลี่ยที่ถูกปล่อยออกมาจากหลุมเจาะ โดยคุณสมบัติของเกลือหินบดจะถูกคาดคะเนภายใต้การผันแปรระดับความลึกและระยะเวลาของการถมกลับ

#### 7.2 ค่าพลังงานความเครียดเฉลี่ยที่เกิดขึ้นบริเวณรอบหลุมเจาะ

ค่าพลังงานความเครียดเฉลี่ยที่ปลดปล่อยออกมาจากบริเวณรอบหลุมเจาะในชั้นเกลือหินและชั้นโพแทชภายใต้สภาวะความเค้นเท่ากันทุกทิศทางได้ถูกคำนวณเพื่อนำมาคาดคะเนคุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินบด ซึ่งค่าพลังงานความเครียดเฉลี่ยสามารถหาได้จากค่าความเค้นและค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบริเวณรอบๆ หลุมเจาะดังสมการ

$$W_{m,s} = (3/2) \cdot [(\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z)/3] \cdot [(\epsilon_r + \epsilon_\theta + \epsilon_z)/3] \quad (7.1)$$

โดยที่  $\sigma_r, \sigma_\theta$  และ  $\sigma_z$  คือ ค่าความเค้นในแนวรัศมี ความเค้นในแนวสัมผัส และความเค้นในแนวเฉือน  
 $\epsilon_r, \epsilon_\theta$  และ  $\epsilon_z$  คือ ค่าความเครียดในแนวรัศมี ความเครียดในแนวสัมผัส และความเครียดในแนวเฉือน

ภายใต้ Plane strain condition ค่าความเค้นในแนวรัศมีและความเค้นในแนวสัมผัสสามารถคำนวณได้จาก Kirsch's solution ดังสมการดังต่อไปนี้ (Jaeger et al., 2007)

$$\sigma_r = [1 - (a^2/r^2)] \cdot P_0 \quad (7.2)$$

$$\sigma_\theta = [1 + (a^2/r^2)] \cdot P_0 \quad (7.3)$$

- โดยที่  $P_0$  คือ ค่าความเค้นในภาคสนาม มีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึก  
 $a$  คือ ค่ารัศมีของหลุมเจาะ  
 $r$  คือ ค่าระยะทางในแนวรัศมีจากจุดศูนย์กลางของหลุมเจาะถึงจุดที่ต้องการ

สำหรับค่าความเค้นในแนวเฉือนสามารถหาได้จากสมการ

$$\sigma_z = \nu (\sigma_r + \sigma_\theta) \quad (7.4)$$

ค่าความเครียดในแนวรัศมี ความเครียดในแนวสัมผัส และความเครียดในแนวเฉือนที่บริเวณขอบหลุมเจาะสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

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

$$\epsilon_z = \epsilon_\theta = 0 \quad (7.6)$$

- โดยที่  $\epsilon_r^e$  คือ ค่าความเครียดในแนวรัศมีในช่วงความยืดหยุ่น  
 $\epsilon_r^c$  คือ ค่าความเครียดในแนวรัศมีในช่วงการคืบ

ค่าความเครียดในแนวรัศมีในช่วงความยืดหยุ่นสามารถคำนวณได้จากสมการ (Jaeger et al., 2007)

$$\epsilon_r^e = \frac{1}{E} \left\{ (1-\nu^2)\sigma_r - \nu(1+\nu)\sigma_\theta \right\} \quad (7.7)$$

Nair and Boreisi (1970) และ Fuenkajorn and Daemen (1988) ได้เสนอสมการสำหรับการคำนวณค่าความเครียดในแนวรัศมีในช่วงการคืบบนพื้นฐานของสมการยกกำลัง (Potential law) และบนพื้นฐานของ Associated flow rule ดังสมการ

$$\epsilon_r^c = \frac{3}{2} k (\sigma^*)^{(\beta-1)} \cdot S_r (t_1^y - t_0^y) \quad (7.8)$$

- โดยที่  $k, \beta$  และ  $\gamma$  คือ ค่าตัวแปรเชิงคณิตศาสตร์  
 $S_r$  คือ ค่าความเบี่ยงเบนของความเค้นในแนวรัศมี (Stress deviation)  
 $\sigma^*$  คือ ค่าความเค้นประสิทธิผล (Effective stress)

บนพื้นฐานของ Mises flow rule ค่าความเค้นประสิทธิผลสามารถหาได้จากสมการ

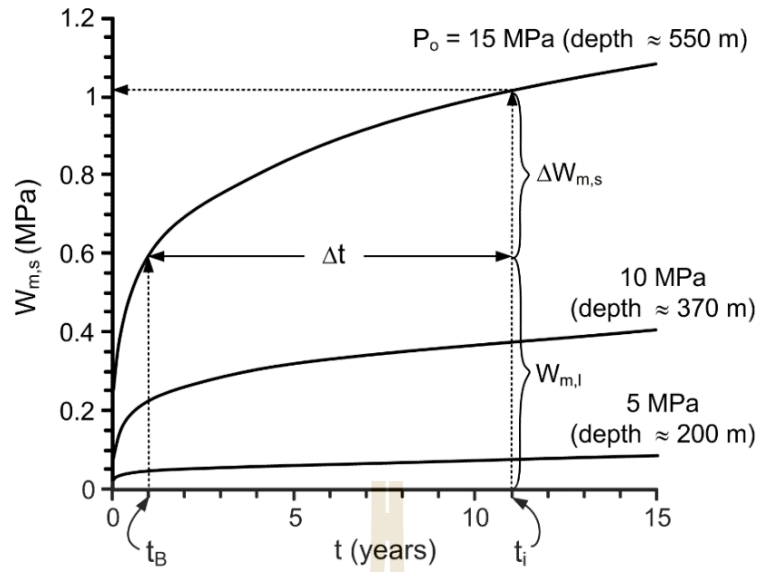
$$\sigma^* = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ (\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 \right\}^{1/2} \quad (7.9)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ 7.2 ถึงสมการที่ 7.9 ในสมการที่ 7.1 จะได้ค่าพลังงานความเครียดเฉลี่ยที่ถูกปลดปล่อยจากหลุมเจาะในชั้นเกลือหินและชั้นโพแทช

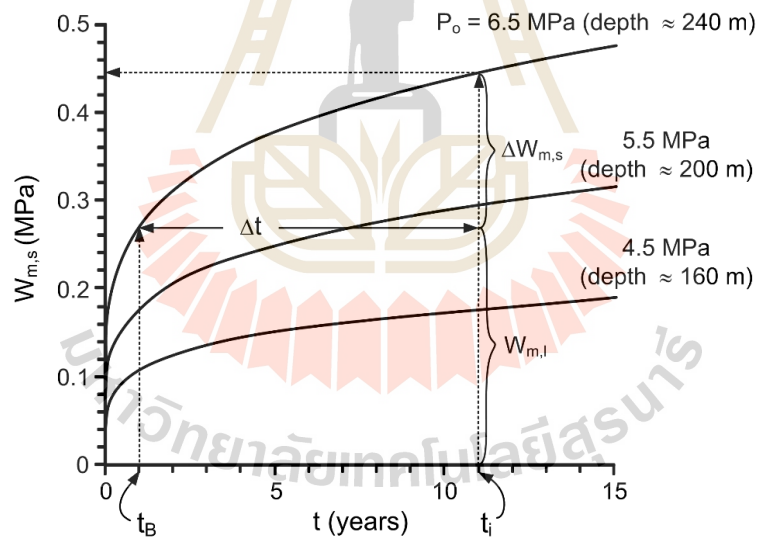
ในขั้นตอนต่อไปได้แสดงตัวอย่างการใช้แนวคิดของพลังงานความเครียดเฉลี่ยมาประยุกต์ใช้เพื่อหาค่าคุณสมบัติของเกลือหินบดหลังจากถกกลับในหลุมเจาะ โดยนำข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และการคืบของเกลือหินและโพแทช ( $C_{\%}=40$ ) มาจาก Luangthip et al. (2016) และ Wilalak and Fuenkajorn (2016) เพื่อนำมาแทนค่าในสมการข้างต้น (ตารางที่ 7.1) ค่าพลังงานความเครียดเฉลี่ยถูกคำนวณที่บริเวณขอบของหลุมเจาะภายใต้การผันแปรความเค้นในภาคสนามเท่ากับ 5, 10 และ 15 MPa (200, 370 และ 550 m) สำหรับหลุมเจาะในเกลือหิน และเท่ากับ 4.5, 5.5 และ 6.5 MPa (160, 200 และ 240 m) สำหรับหลุมเจาะในโพแทช รูปที่ 7.1 และ 7.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานความเครียดเฉลี่ยในฟังก์ชันของเวลาหลังจากการขุดเจาะของเหมืองเกลือและเหมืองโพแทช ผลการคำนวณระบุว่าพลังงานความเครียดเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากการขุดเจาะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปีแรกของการขุดเจาะ และหลังจากนั้นจะมีอัตราการปลดปล่อยพลังงานลดลง ดังนั้นจึงสังเกตได้ว่าระยะเวลาในการถกกลับของเกลือหินบดเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากเพราะเป็นตัวบ่งบอกถึงพลังงานที่เหลืออยู่ที่จะกระทำต่อเกลือหินบด

ตารางที่ 7.1 คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และการคืบของเกลือหินและโพแทช ( $C_{\%} = 40$ )

ตัวแปร	เกลือหิน	โพแทช ( $C_{\%} = 40$ )
E (GPa)	16.89	7.30
$\nu$	0.27	0.32
$\kappa$ (1/MPa · day)	0.0003	0.001
$\beta$	1.43	1.459
$\gamma$	0.218	0.213



รูปที่ 7.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานความเครียดเฉลี่ยในฟังก์ชันของเวลาหลังจากการขุดเจาะในเหมืองเกลือ



รูปที่ 7.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานความเครียดเฉลี่ยในฟังก์ชันของเวลาหลังจากการขุดเจาะในเหมืองโพแทช

### 7.3 การคาดคะเนคุณสมบัติของเกลือหินบดหลังจากถมกลับในหลุมเจาะ

ในขั้นตอนแรกต้องทำการหาค่าพลังงานที่เหลืออยู่จากหลุมเจาะที่จะใช้เป็นพลังงานกระทำต่อเกลือหินบด ( $\Delta W_{m,s}$ ) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$\Delta W_{m,s} = W_{m,s} - W_{m,l} \quad (7.10)$$

โดยที่  $W_{m,s}$  คือ พลังงานความเครียดเฉลี่ยทั้งหมดที่ปลดปล่อยมาจากหลุมเจาะหลังจากการขุดเจาะจนกระทั่งถึงเวลาใดๆ โดยไม่มีการถมกลับของวัสดุขุด

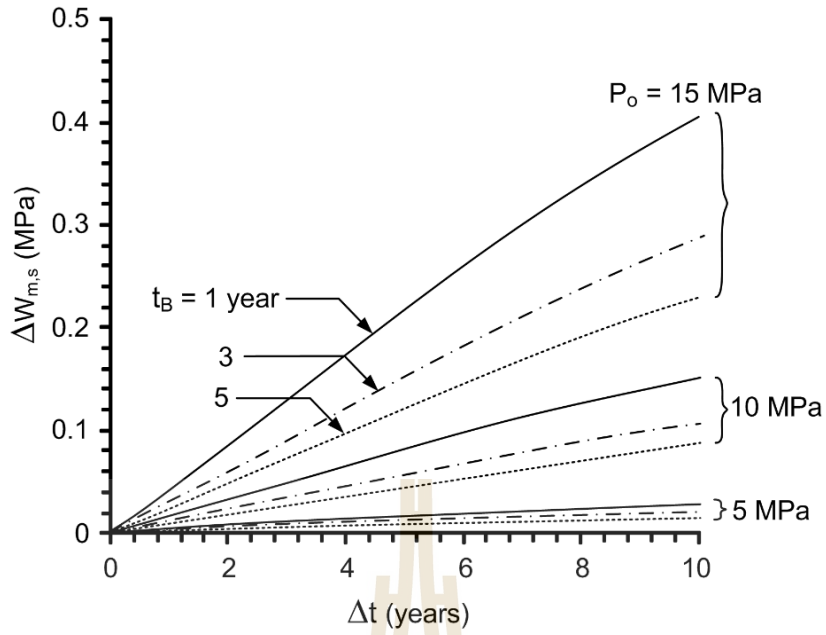
$W_{m,l}$  คือ พลังงานความเครียดเฉลี่ยที่สูญหายไปก่อนมีการถมกลับของเกลือหินบดไปยังหลุมเจาะ

ตัวแปรของระยะเวลาที่เกลือหินบดถมกลับไปยังช่องเหมืองได้ถูกกำหนดเป็น  $t_B$  ในรูปที่ 7.1 และ 7.2 ดังนั้นระยะเวลาของเกลือหินบดที่ถูกอัดตัวในหลุมเจาะสามารถหาได้จาก

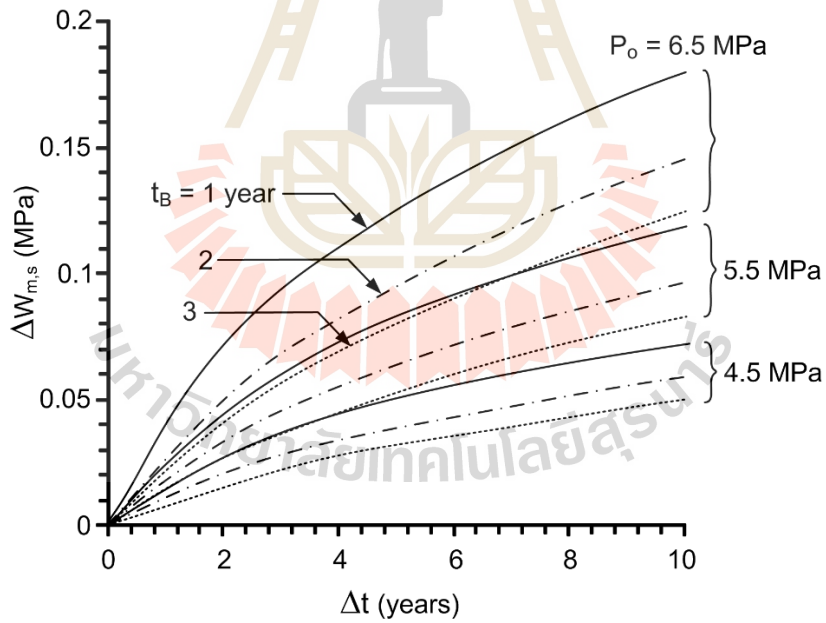
$$\Delta t = t_i - t_B \quad (7.11)$$

โดยระยะเวลาของการถมกลับในเหมืองเกลือได้ผันแปรตั้งแต่ 1, 3 และ 5 ปี และสำหรับเหมืองโพแทชได้ผันแปรตั้งแต่ 1, 2 และ 3 ปี หลังจากการขุดเจาะ โดยการศึกษาได้ทำการคาดคะเนคุณสมบัติของเกลือหินบดที่ระยะเวลา 10 ปี หลังจากการถมกลับ จากสมการที่ 7.10 ค่า  $\Delta W_{m,s}$  สามารถคำนวณได้ในฟังก์ชันของ  $\Delta t$  ดังแสดงในรูปที่ 7.3 และ 7.4 ผลการคำนวณระบุว่า  $\Delta W_{m,s}$  มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการเคลื่อนตัวของหลุมเจาะ  $t_B$  มีผลกระทบอย่างมากเมื่อ  $P_0$  สูง

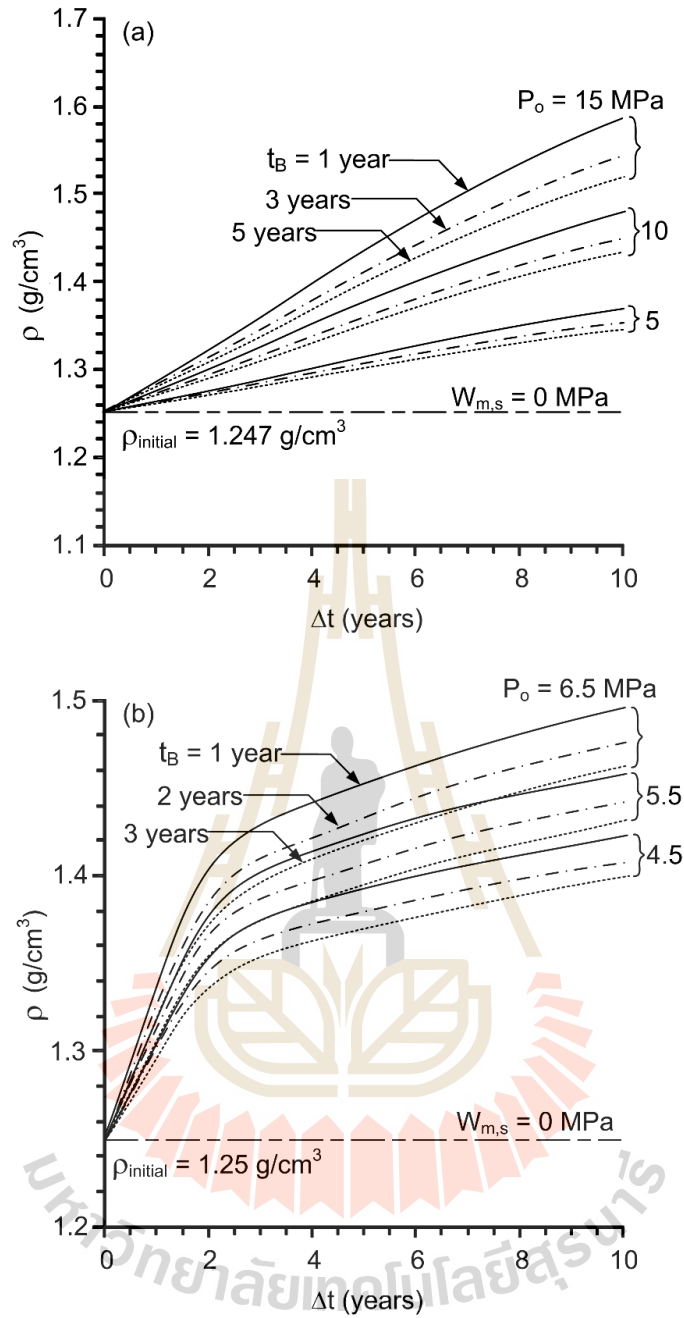
เมื่อทำการแทนค่า  $\Delta W_{m,s}$  และ  $\Delta t$  จากรูปที่ 7.3 และ 7.4 ในค่า  $W_m$  และ  $t$  ในสมการที่ 6.1 ถึง 6.10 ค่าความหนาแน่น ค่าความพรุน ค่าความแข็ง และค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นสามารถคาดคะเนได้ดังแสดงในรูปที่ 7.5 ถึง 7.8 ตัวอย่างการคำนวณได้ทำการคาดคะเนคุณสมบัติของเกลือหินบดเป็นระยะเวลา 10 ปี หลังจากการถมกลับ ผลการคาดคะเนระบุว่าความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น (รูปที่ 7.5) และความพรุนมีค่าลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น (รูปที่ 7.6) ถ้าหากไม่มีพลังงานความเครียดเฉลี่ยกระทำต่อเกลือหินบด ค่าความหนาแน่นและค่าความพรุนของเกลือหินบดจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ค่าความแข็งและค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นในภาคสนามและระยะเวลาเพิ่มขึ้น (รูปที่ 7.7 และ 7.8) เกลือหินบดสามารถแข็งขึ้นและมีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นถึงแม้ว่าจะไม่มีพลังงานความเครียดเฉลี่ยมากระทำอันเป็นผลเนื่องมาจากกระบวนการ Recrystallization โดย  $t_B$  ต่อค่าความแข็งและค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นจะมีผลกระทบมากขึ้นเมื่อความเค้นในภาคสนามเพิ่มขึ้น



รูปที่ 7.3 ค่าพลังงานที่เหลืออยู่ ( $\Delta W_m$ ) ในฟังก์ชันของเวลาหลังจากมีการถมกลับในหลุมเจาะเกลือ

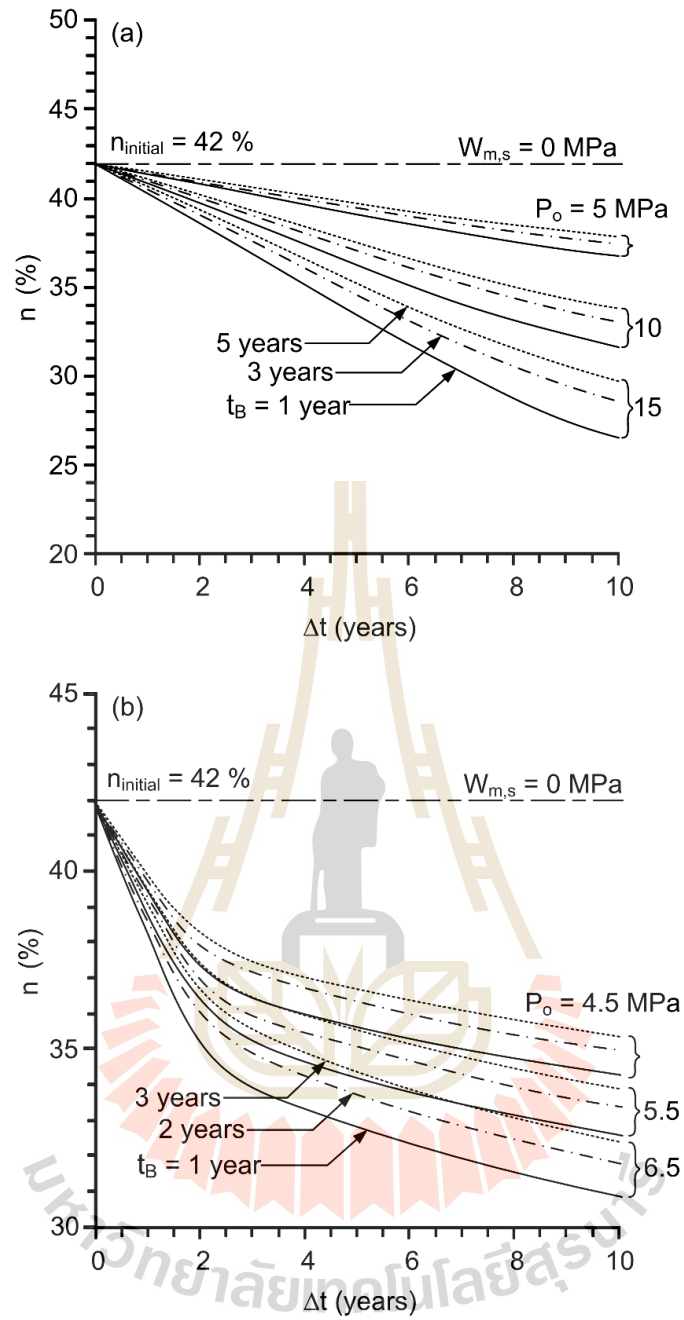


รูปที่ 7.4 ค่าพลังงานที่เหลืออยู่ ( $\Delta W_m$ ) ในฟังก์ชันของเวลาหลังจากมีการถมกลับในหลุมเจาะโพแทช

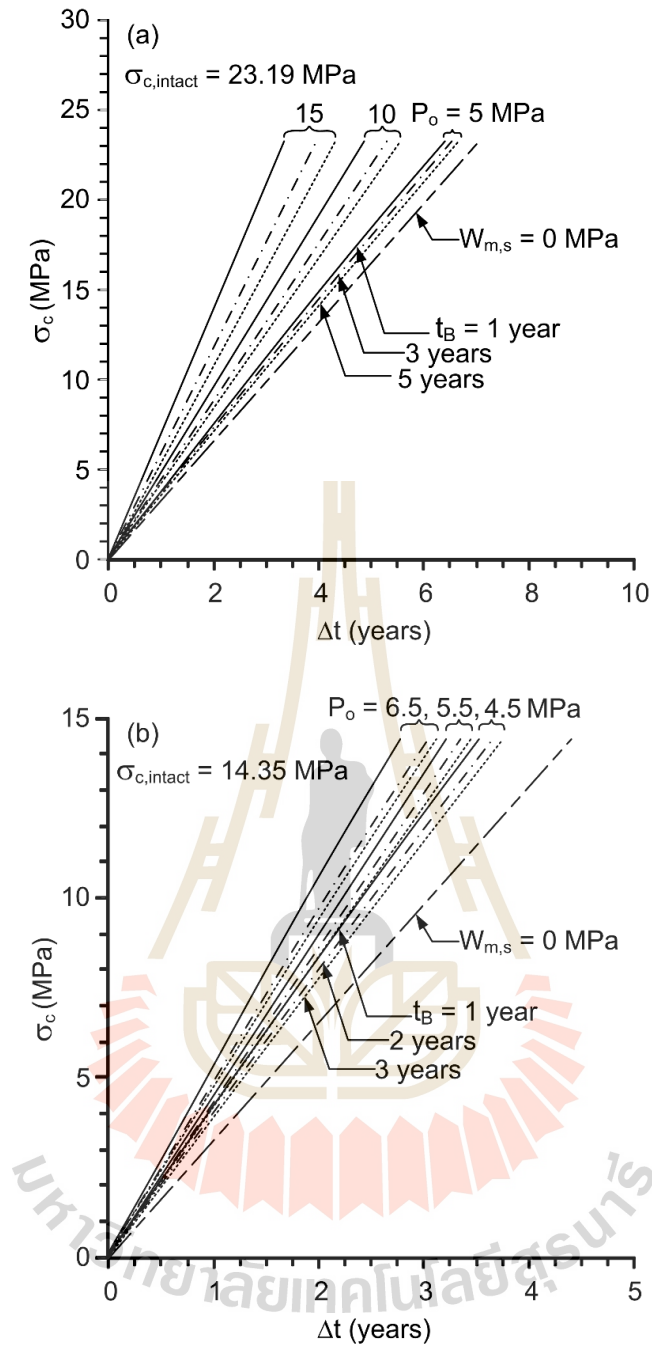


รูปที่ 7.5 ค่าความหนาแน่นของเกลือหินบดในฟังก์ชันของเวลาหลังจากมีการถมกลับในหลุมเจาะเกลือ (a) และหลุมเจาะโพแทช (b)

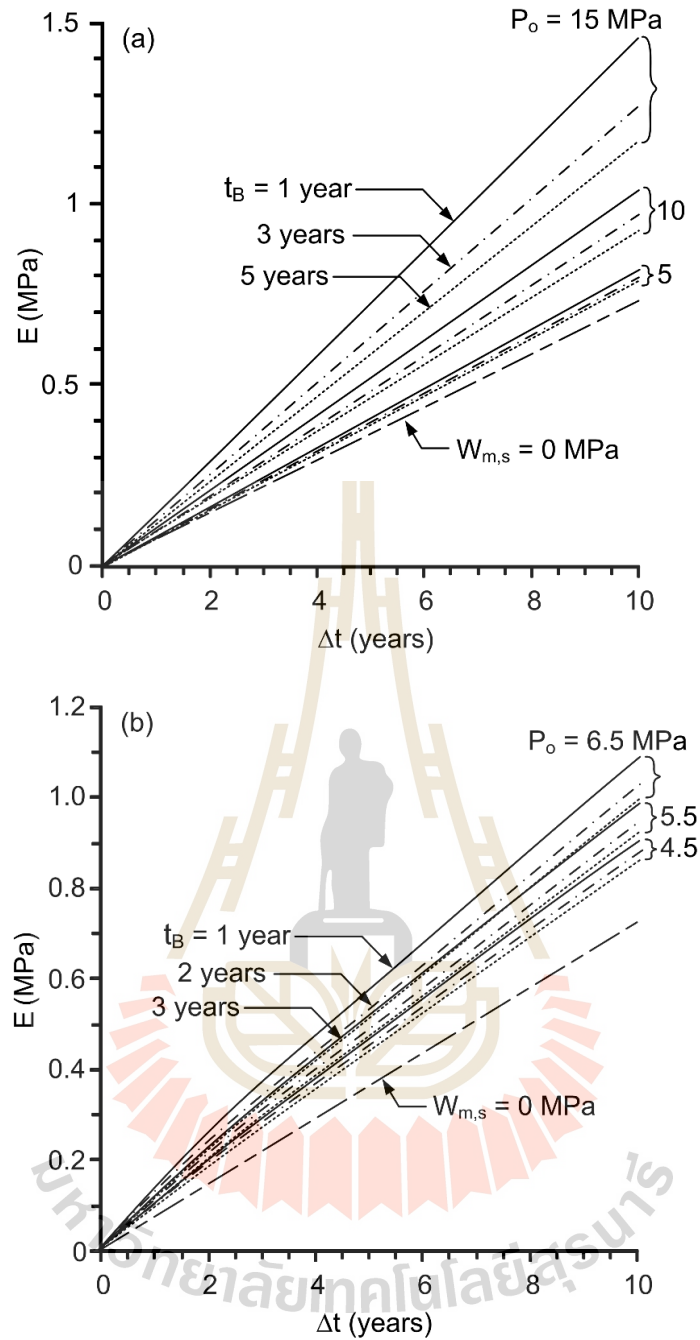




รูปที่ 7.6 ค่าความพรุนของเกลือหินบดในฟังก์ชันของเวลาหลังจากมีการถมกลับในหลุมเจาะเกลือ (a) และหลุมเจาะโพแทช (b)



รูปที่ 7.7 ค่าความแข็งของเกลื่อหินบดในฟังก์ชันของเวลาหลังจากมีการถมกลับในหลุมเจาะเกลื่อ (a) และหลุมเจาะโพแทช (b)



รูปที่ 7.8 ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของเกลือหินบดในฟังก์ชันของเวลาหลังจากมีการถมกลับในหลุมเจาะเกลือ (a) และหลุมเจาะโพแทช (b)

## บทที่ 8

### สรุปและวิจารณ์ผล

#### 8.1 สรุปผล

ค่าการอัดตัวของเกลือหินบดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำเกลือเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดอัดตัวสูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5% โดยน้ำหนัก การเคลื่อนตัวในแนวแกนและความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นกดและระยะเวลาในการอัดตัวเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Holcomb and Hannum (1982), Holcomb and Shields (1987) และ Hansen et al. (1993)

การยุบตัวที่เกิดขึ้นในตัวอย่างเกลือหินบดมี 2 กระบวนการ คือ กระบวนการการอัดตัวและกระบวนการ Recrystallization โดยกลไกที่ทำให้เกิดการลดลงของปริมาณช่องว่างในกระบวนการการอัดตัว คือ การจัดเรียงตัวใหม่ของเม็ดเกลือ การแตกและการเคลื่อนที่ระหว่างผิวสัมผัสของเม็ดเกลือ หลังจากได้รับความเค้นกด ส่วนกลไกที่เกิดขึ้นในกระบวนการ Recrystallization ประกอบด้วยกระบวนการ Recrystallization และกระบวนการการเชื่อมประสานของเม็ดเกลือหิน

เกลือหินบดสามารถอัดตัวและมีค่าช่องว่างระหว่างเม็ดเกลือและค่าความซึมผ่านลดลงเมื่อค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ค่ากำลังกดในแกนเดียวและค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นและค่าอัตราส่วนปัวซองส์มีค่าลดลงเมื่อความเค้นกดและระยะเวลาในการอัดตัวเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Wang et al. (1994) และ Miao et al. (1995) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังกดในแกนเดียว ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น และค่าอัตราส่วนปัวซองส์ในฟังก์ชันของความเค้นกดและระยะเวลาในการอัดตัวสามารถอธิบายได้ด้วยสมการเอกซ์โพเนนเชียลและสมการลอการิทึม

จากการทดสอบเพื่อหาค่าความเค้นเฉือนระบุว่า ความเค้นเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความเค้นกดคงที่ในแนวแกนสูงขึ้น เกลือหินและเกลือหินบดมีค่าความเค้นยึดติดเท่ากับ 0.033 และ 0.055 MPa และมีค่ามุมเสียดทานเท่ากับ 19 และ 29 องศาตามลำดับ

ผลการศึกษาประสิทธิภาพของเกลือหินบดหลังจากถมกลับในช่องเหมืองเกลือและเหมืองโพแทชระบุว่า การทรุดตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความลึกของช่องเหมืองและความสูงของห้องมีค่าเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของเกลือหินบดที่ใช้ในแบบจำลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของห้องเพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่น เปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าการทรุดตัวจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 9.1, 12.9 และ 21.1% สำหรับเหมืองเกลือ และเท่ากับ 44.4, 54.7 และ 60.9% สำหรับเหมืองโพแทช ที่ความลึกเท่ากับ 250 m และที่ความสูงของห้องเท่ากับ 4, 8 และ 12 m ตามลำดับ

เกลือหินบดที่ถูกอัดตัวภายใต้ความเค้นกดเท่ากับ 5 MPa เป็นระยะเวลา 15 วัน จึงเป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอัดตัวเพื่อเป็นวัสดุถมกลับในเหมืองใต้ดิน เนื่องจากค่าความเค้นและระยะเวลาที่กระทำต่อตัวอย่างมีความเหมาะสม ถึงแม้ว่าจะมีการอัดตัวด้วยความเค้นกดที่มากกว่า 5 MPa หรือ ใช้ระยะเวลานานกว่า 15 วัน ก็ไม่ส่งผลให้ประสิทธิภาพการลดลงของการทรุดตัวของผิวดินมีค่าเพิ่มขึ้น

คุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลศาสตร์ของเกลื้อหินบดที่ได้จากห้องปฏิบัติการถูกนำมาสร้างสมการความสัมพันธ์ในฟังก์ชันของค่าพลังงานความเครียดเฉลี่ยและระยะเวลาในการอัดตัว การประยุกต์ใช้แนวคิดของพลังงานความเครียดได้พิจารณาถึงค่าความเค้นและค่าความเครียดที่เกิดขึ้นต่อเกลื้อหินบด ซึ่งวิธีการนี้มีความง่ายต่อการประยุกต์ใช้มากกว่าวิธีการคำนวณแบบเดิมที่เคยมีในอดีต เช่น การใช้สมการทาง Healing mechanism ผลการคำนวณระบุว่าค่าความหนาแน่น ค่าความแข็ง และค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของเกลื้อหินบดมีค่าเพิ่มขึ้นและอัตราส่วนปัวซองส์มีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาและความเค้นกดมากขึ้น

ผลจากการคาดคะเนคุณสมบัติของเกลื้อหินบดหลังจากถกกลับในหลุมเจาะ ระบุว่าพลังงานความเครียดเฉลี่ยที่ปลดปล่อยออกมาจากหลุมเจาะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากการขุดเจาะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปีแรกของการขุดเจาะ และหลังจากนั้นจะมีอัตราการปลดปล่อยพลังงานลดลง เมื่อความลึกเพิ่มขึ้นค่าพลังงานความเครียดเฉลี่ยจะมีค่าเพิ่มขึ้น ผลจากการคาดคะเนคุณสมบัติของเกลื้อหินพบว่า ความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นและความพรุนมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น หากไม่มีพลังงานความเครียดเฉลี่ยกระทำต่อเกลื้อหินบดค่าความหนาแน่นและค่าความพรุนของเกลื้อหินบดจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ความแข็งและสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นในภาคสนามและระยะเวลาเพิ่มขึ้น เกลื้อหินบดสามารถแข็งขึ้นและมีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นถึงแม้ว่าจะไม่มีพลังงานความเครียดเฉลี่ยมากระทำอันเป็นผลเนื่องมาจากกระบวนการ Recrystallization

ระยะเวลาในการถกกลับ ( $t_b$ ) ของเกลื้อหินบดในหลุมเจาะเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพเชิงกลศาสตร์ของเกลื้อหินบด โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ระดับความลึกมากๆ ประสิทธิภาพของเกลื้อหินบดที่ถกกลับในหลุมเจาะระดับตื้นจะมีประสิทธิภาพค่อนข้างน้อย เนื่องจากที่หลุมเจาะระดับตื้นมีค่าพลังงานความเครียดเฉลี่ยที่กระทำต่อเกลื้อหินบดน้อย ค่าความแข็งและค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นสามารถมีสภาพเพิ่มขึ้นได้ในหลุมเจาะระดับตื้น เนื่องจากค่าทั้งสองถูกควบคุมด้วย 2 กระบวนการ คือ กระบวนการอัดตัว และกระบวนการ Recrystallization ซึ่งส่งผลให้เกลื้อหินบดสามารถแข็งขึ้นได้ในเชิงเวลาแม้จะมีพลังงานความเครียดเฉลี่ยที่กระทำต่อเกลื้อหินบดน้อยก็ตาม

## 8.2 การวิเคราะห์ผล

การศึกษานี้ได้ทำการทดสอบตัวอย่างเกลื้อหินบดทั้งหมด 32 ตัวอย่าง ภายใต้การผันแปรระยะเวลาในการอัดตัวตั้งแต่ 3 ถึง 180 วัน ระยะเวลาในการทดสอบการอัดตัวของเกลื้อหินบดในการศึกษานี้มีระยะเวลายาวนานมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่ผ่านมาในอดีต (Case et al., 1987; Miao et al., 1995; Pfeifle, 1991) ผลการทดสอบที่ได้เชื่อว่ามี ความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือเนื่องจากค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกนของตัวอย่างหินที่ความเค้นกดเดียวกันภายใต้การผันแปรระยะเวลาในการอัดตัวมีค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกนเท่ากันทุกครั้งของการทดสอบ

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการอัดตัวของเกลื้อหินบดภายใต้การผันแปรความเค้นกดและระยะเวลาในการอัดตัวมีมากเพียงพอต่อการวิเคราะห์และสร้างสมการ จากการสังเกตผลการทดสอบในรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกนที่ได้จากการทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นและมีการเปลี่ยนแปลงของค่าดังกล่าวเพียงเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาในการอัดตัวเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าสมการที่สร้างขึ้นเพื่อคาดคะเนคุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลศาสตร์ของเกลื้อหินบดมีความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือค่อนข้างมาก

ตัวอย่างเกลื้อหินบดที่ถูกเตรียมไว้สำหรับการทดสอบกำลังกดในแกนเดียวอาจถูกรบกวนเล็กน้อยระหว่างการนำแท่งตัวอย่างออกจากกระบอกกดทดสอบ เนื่องจากผิวสัมผัสระหว่างกระบอกกดและตัวอย่างเกลื้อหินอาจมีแรงเสียดทานเกิดขึ้น และอาจส่งผลให้ค่ากำลังกดในแกนเดียวมีความคาดเคลื่อนเล็กน้อย โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวอย่างเกลื้อหินบดที่ถูกอัดตัวภายใต้ความเค้นกดต่ำภายในระยะเวลาการอัดตัวน้อย

สมการความสัมพันธ์ที่ถูกสร้างขึ้นในการศึกษานี้มีความน่าเชื่อถือและมีความถูกต้องค่อนข้างสูง สามารถดูได้จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ที่ได้จากการสอบเทียบระหว่างผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการกับผลที่ได้จากการคาดคะเนด้วยสมการ ซึ่งเป็นจริงสำหรับทุกการทดสอบ ได้แก่ การทดสอบการอัดตัว การทดสอบเพื่อหาค่าความซึมผ่าน และการทดสอบกำลังกดในแกนเดียว อย่างไรก็ตามสมการที่นำเสนอในการศึกษานี้ไม่สามารถนำไปคาดคะเนคุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลศาสตร์ของเกลื้อหินบดที่มีการคละขนาดของเม็ดเกลื้อ หรือลักษณะของเม็ดเกลื้อที่แตกต่างจากการศึกษานี้ได้ แต่สมการดังกล่าวเป็นสมการที่ใช้บ่งบอกถึงพฤติกรรมของเกลื้อหินบดที่มีการคละขนาดของเม็ดเกลื้อที่คล้ายคลึงกับเศษหางแร่ที่ได้จากการทำเหมือง

สมการที่เสนอในการศึกษานี้สามารถใช้คาดคะเนพฤติกรรมการอัดตัวของเกลื้อหินบดที่มีค่าความหนาแน่นเริ่มต้นเท่ากับ  $1.274 \text{ g/cm}^3$  ได้เท่านั้น เนื่องจากหากเกลื้อหินบดมีค่าความหนาแน่นเริ่มต้นก่อนการอัดตัวสูงหรือต่ำกว่า  $1.274 \text{ g/cm}^3$  อาจส่งผลให้ค่าการอัดตัวมีค่ามากหรือน้อยกว่าที่ได้จากการทดสอบนี้ รวมถึงส่งผลให้ค่าคุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลศาสตร์ของเกลื้อหินบดมีค่าต่างจากการศึกษานี้ด้วย

รูปที่ 7.5 ถึง 7.8 สามารถใช้เป็นแนวทางในการวางแผนการถมกลับ หรือใช้ประเมินประสิทธิภาพและคุณสมบัติของเกลื้อหินบดหลังจากการถมกลับในหลุมเจาะได้ ในการประยุกต์ใช้ควรมีความระมัดระวังเกี่ยวกับคุณสมบัติการคืบของเกลื้อหินและโพแทชด้วยเนื่องจากค่าพลังงานความเครียดเฉลี่ยที่ปลดปล่อยออกมาจากหลุมเจาะและกระทำต่อเกลื้อหินบดมีความอ่อนไหวต่อค่าคุณสมบัติการคืบของเกลื้อหินและโพแทชมาก

## บรรณานุกรม

- กิตติเทพ เฟื่องขจร (2554). การทดสอบประสิทธิภาพการอัดตัวของเกลือหินบดในเชิงกลศาสตร์และ  
ชลศาสตร์ (Mechanical and Hydraulic Performance of Crushed Salt). สาขาวิชา  
เทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, ธันวาคม 2554.
- กิตติเทพ เฟื่องขจร (2556). การทดสอบประสิทธิภาพการอัดตัวของเกลือหินบดในเชิงกลศาสตร์และ  
ชลศาสตร์ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง (Mechanical and Hydraulic Performance of  
Crushed Salt under High Temperature). สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชา  
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, มีนาคม 2556.
- Alshibli, K.A. and Alsaleh, M.I. (2004). Characterizing surface roughness and shape of  
sands using digital microscopy. **Journal of Computing in Civil Engineering**.  
18(1): 36-45.
- ASTM D2938-95 (2002). **Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength  
of Intact Rock Core Specimens**. Annual book of ASTM standards, American  
Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM Standard D5607-08 (2008). **Standard Test Method for Performing Laboratory  
Direct Shear Strength Tests of Rock Specimens under Constant Normal  
Force**. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and  
Materials, West Conshohocken, PA.
- Brodsky, N.S., Hansen, F.D. and Pfeifle, T.W. (1996). Properties of dynamically compacted  
WIPP salt. In **Proc. 4th Conference on the Mechanical Behavior of Salt**. The  
Pennsylvania State University, June 17-18, 1996, Trans Tech Publications,  
Clausthal-Zellerfeld, Germany, pp. 303-316.
- Butcher, B.M. (1991). The advantages of a salt/bentonite backfill for waste isolation pilot  
plant disposal rooms. **Technical Report No.SAND90-3074**, Sandia National  
Laboratories, Albuquerque, NM.
- Callahan, G.D. and Hansen, F.D. (2002). Crushed salt constitutive model. In **Proc. of  
Basic and Applied Salt Mechanics**. pp. 239-252.
- Callahan, G.D., Loken, M.C., Hurtads, L.D. and Hansen, F.D. (1996). Evaluation of  
constitutive models for crushed salt. In **Proc. 5th Mechanical Behavior of Salt**.  
Clausthal-Zellerfeld, Germany, pp. 317-330.

- Callahan, G.D., Mellegard, K.D. and Hansen, F.D. (1998). Constitutive behavior of reconsolidating crushed salt. **Rep. No. SAND98-0179**, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.
- Case, J.B. and Kelsall, P. (1987). Laboratory investigation of crushed salt consolidation. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**. 25(5): 216-223.
- Case, J.B., Kelsall, P.C. and Withiam, J.L. (1987). Laboratory investigation of crushed salt consolidation. In **Proc. 28th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS)**. Tucson, Arizona.
- De Boer, R.B. (1977). On the thermodynamics of pressure solution-interaction between chemical and mechanical forces. **Geochimica et Cosmochimica Acta**. 41(2): 249-256.
- Findley, W.N., Lai, S.J. and Onaran, K. (1989). **Creep and Relaxation of Nonlinear Viscoelastic Materials: with an Introduction to Linear Viscoelasticity**. Courier Dover, New York.
- Fuenkajorn, K. and Daemen, J.J.K. (1988). Borehole closure in salt. **PhD. Thesis, University of Arizona, U.S.A.**
- Guises, R., Xiang, J., Latham, J.P. and Munjiza, A. (2009). Granular packing: numerical simulation and the characterization of the effect of particle shape. **Granular Matter**. 11(5): 281-292.
- Hansen, F.D. (1997). Reconsolidating salt: compaction, constitutive modeling, and physical processes. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 34(3-4): 119.e1–119.e12.
- Hansen, F.D. and Mellegard, K.D. (1999). Mechanical and permeability properties of crushed salt. In **Proc. of the 5th Conference on the Mechanical Behavior of Salt (MECASALT 5)**. Bucharest, Romania, pp. 253-256.
- Hansen, F.D., Callahan, G.D. and Van Sambeek, L.L. (1993). Reconsolidation of salt as applied to permanent seals for the waste isolation pilot plant. In **Proc. 3rd on the Mechanical Behavior of Salt**. Transtech Publications, Palaiseau, France, pp. 323-335.



- Heemann, U., Heusermann, S., Sarfeld, W. and Faust, B. (1999). Numerical modeling of the compaction behavior of crushed rock salt. In **Proc. 7th International Symposiums**. Graz, Austria, pp .627-632.
- Holcomb, D.J. and Hannum, D.W. (1982). Consolidation of crushed-salt backfill under conditions appropriate to the WIPP facility. **Rep. No. SAND82-0630**, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.
- Holcomb, D.J. and Shields, M. (1987). Hydrostatic creep consolidation of crushed salt with added water. **Rep. No. SAND87-1990**, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.
- Hwang, C.L., Wang, M.L. and Miao, S. (1993). Proposed healing and consolidation mechanisms of rock salt revealed by ESEM. *Microscopy Research and Technique*. 25(5-6): 456-464.
- Indraratna, B. and Ranjith, P. (2001). **Hydromechanical Aspects and Unsaturated Flow in Joints Rock**. Lisse: A.A. Balkema.
- Itasca (1992). **User Manual for FLAC-Fast Lagrangian Analysis of Continua**. Version 4.0, Minneapolis, Minnesota.
- Jaeger, J.C., Cook, N.G.W. and Zimmerman, R.W. (2007). **Fundamentals of Rock Mechanics**. 4th ed. Blackwell, Australia.
- Jia, X. Chai, H., Yan, Z. and Zhang, Y. (2009). PFC2D simulation research on vibrating compaction test of soil and rock aggregate mixture. In **Proc. of the 8th International Conference on Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields (BCR2A'09)**. University of Illinois at Urbana, Champaign, Champaign, Illinois, USA, pp. 551-560.
- Kelsall, P.C., Case, J.B., Nelson, J.W. and Franzone, J.G. (1984). Assessment of crushed salt consolidation and fracture healing in a nuclear waste repository in salt. **D'Appolonia Waste Mangement Services**.
- Koener, R.M. (1968). The behavior of cohesionless soils formed from various minerals. **PhD. dissertation, Duke University, Raleigh, NC**.
- Korthaus, E. (2002). Consolidation behavior of dry crushed salt: triaxial tests, benchmark exercise, and in-situ validation. **Basic and Applied salt Mechanics**. 257-269.

- Korthaus, E. (1998). Experiments on crushed salt consolidation with true triaxial testing device as a contribution to an EC benchmark exercise. **Rep. No. FI4W-CT95-0009**.
- Krumbein, W.C. and Sloss, L.L. (1963). **Stratigraphy and Sedimentation**. 2nd ed. Freeman and Company, San Francisco.
- Loken, M.C. and Statham, W. (1997). Calculation of density and permeability of compacted crushed salt within an engineered shaft sealing system. **Computing in Civil Engineering**. 485-492.
- Luangthip, A., Khamrat, S. and Fuenkajorn, K. (2016). Effects of carnallite contents on stability and extraction ratio of potash mine. In **Proc. 9th Asian Rock Mechanics Symposium**. Bali, Indonesia.
- Mellegard, K.D., Pfeifle, T.W. and Hansen, F.D. (1999). Laboratory characterization of mechanical and permeability properties of dynamically compacted crushed salt. **Technical Report No. SAND98-2046, Sandia National Laboratories, Prepared for the United States Department of Energy**.
- 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**. 121(10): 1122-1129.
- Munson, D. and Devries, K. (1991). Development and validation of a predictive technology for creep closure of underground rooms in salt. In **Proc. 7th ISRM Congress**. Aachen, Germany.
- Munson, D.E., Fossum, A.F. and Senseny, P.E. (1989). Advances in resolution of discrepancies between predicted and measured in situ WIPP room closures. **Rep. No. SAND88-2948**, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.
- Nair, K. and Boresi, A.P. (1970). Stress analysis for time dependent problems in rock mechanics. In **Proc. 2nd Congress of the International Society for Rock Mechanics**. Belgrade, pp. 531-536.
- Olivella, S. and Gens, A. (2002). A constitutive model for crushed salt. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**. 26: 719-746.

- Ouyang, S. and Daemen, J.J.K. (1989). Crushed salt consolidation. **Rep. No. NUREG/CR-5402**, Prepared by Department of Mining and Geological Engineering, University of Arizona.
- Pfeifle, T.W. (1991). Consolidation, permeability, and strength of crushed salt/bentonite mixtures with application to the WIPP. **Rep. No. SAND90-7009**, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.
- Power, M.C. (1982). Comparison charts for estimating roughness and sphericity. **AGI Data Sheets**, American Geological Institute, Alexandria, VA.
- Pudewills, A. and Krauss, M. (1999). Implementation of a viscoplastic model for crushed salt in the ADINA program. **Computers and Structures**. 72(1-3): 293-299.
- Ran, C. and Daemen, J.J.K. (1995). The influence of crushed rock salt particle gradation on compaction. In **Proc. 35th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS)**. June 5 - 7, Reno, NV, A. A. Balkema, Rotterdam.
- Ratigan, J.L. and Wangner, R.A. (1978). Thermomechanical analysis of crushed-salt backfilled disposal rooms in a conceptual radioactive waste repository in dome salt. In **Conceptual Design Report, National Waste Terminal Storage Repository for Storing Reprocessing Wastes in Dome Salt Formation**, Special Study No. 2, Vol. XVIII, Stearns-Roger Service, Denver, CO.
- Shor, A.J., Baes, C.F. and Canonico, C.M. (1981). Consolidation and permeability of salt in brine. **Rep. No. ORNL-5774**, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN.
- Sjaardema, G.D. and Krieg, R.D. (1987). A constitutive model for the consolidation of WIPP crushed salt and its use in analyses of backfilled shaft and drift configurations. **Rep. No. SAND87-1977**, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.
- Sompong, S., Tepnarong, P. and Fuenkajorn, K. (2013). Strength and permeability of consolidated crushed salt. In **Proc. of the EIT-JSCE International Symposium on International Human Resource Development for Disaster Resilient Countries 2013**. Imperial Queen's Park Hotel, September 12-13, Bangkok, Thailand.
- Spiers, C.J. and Brzezowski, R.H. (1993). Densification behavior of wet granular salt: theory versus experimental. In **Proc. 7th Symposium on Salt**. Amsterdam, pp. 83-92.

- Sriapai, T., Walsri, C. and Fuenkajorn, K. (2012). Effects of temperature on compressive and tensile strengths of salt. **ScienceAsia**. 38: 166-174.
- Stormont, J.C. and Finley, R.E. (1996). Sealing boreholes in rock salt. **Sealing of Boreholes and Underground Excavations in Rock**. K. Fuenkajorn and J.J.K. Deamen (eds). London: Chapman and Hall, pp. 184-224.
- Van Sambeek, L.L. (1992). Testing and modelling of backfill used in salt and potash mines. In **Proc. of the Rock Support in Mining and Underground Construction**. Balkema, Rotterdam, pp. 583-589.
- Wagner, R.A., Callahan, G.D. and Butcher, B.M. (1990). Mechanical analyses of WIPP disposal rooms backfilled with either crushed salt or crushed salt-bentonite. In **Proc. of the Materials Research Society**. Vol. 207, pp. 169-175.
- Wang, M.L., Maji, A.K. and Miao, S. (1994). Deformation mechanisms of WIPP backfill. **Technical Completion Report**, U.S. Department of Energy.
- Wendai, L. (2000). **Regression Analysis, Linear Regression and Profit Regression, In 13 Chapters; SPSS for Windows: Statistical Analysis**. Publishing House of Electronics Industry, Beijing.
- Wilalak, N. and Fuenkajorn, K. (2016). Constitutive equation for creep closure of shaft and borehole in potash layers with varying carnallite contents. In **Proc. 9th Asian Rock Mechanics Symposium**. Bali, Indonesia.
- Zeuch, D.H. (1990). Isostatic hot-pressing mechanism maps for pure and natural sodium chloride-applications to nuclear waste isolation in bedded and domal salt formations. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**. 27(6): 505-524.
- Zeuch, D.H., Holcomb, D.J. and Lauson, H.S. (1985). Analysis of consolidation of granulated rock salt using a plastic flow model of isostatic hot-pressing. **Rep. No. SAND84-1106**, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.

## ประวัตินักวิจัย

ศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เพ็ญขจร เกิดเมื่อวันที่ 16 กันยายน 2500 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร จบการศึกษาปริญญาเอกจาก University of Arizona ประเทศสหรัฐอเมริกา สาขาวิชา Geological Engineering เมื่อปี ค.ศ. 1988 และสำเร็จ Post-doctoral Fellows เมื่อปี ค.ศ. 1990 ที่ University of Arizona ปัจจุบันมีตำแหน่งเป็นประธานกรรมการบริษัท Rock Engineering International ประเทศสหรัฐอเมริกา และดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำอยู่ที่สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา มีความชำนาญพิเศษทางด้านกลศาสตร์หินในเชิงการทดลอง การออกแบบ และการวิเคราะห์โดยใช้คอมพิวเตอร์ ได้เคยทำการวิจัยเป็นหัวหน้าโครงการที่สำเร็จมาแล้วมากกว่า 20 โครงการ ทั้งในประเทศสหรัฐอเมริกาและประเทศไทย มีผลงานตีพิมพ์ นานาชาติมากกว่า 50 บทความ ทั้งสารสาร นิตยสาร รายงานรัฐบาล และบทความการประชุมนานาชาติ เป็นผู้แต่งตำรา “Sealing of Boreholes and Underground Excavations in Rock” ที่ใช้อยู่ในหลาย มหาวิทยาลัยในสหรัฐอเมริกา ดำรงตำแหน่งเป็นที่ปรึกษาทางวิชาการขององค์กรรัฐบาลและหลายบริษัทในประเทศสหรัฐอเมริกาและแคนาดา เช่น U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. Department of Energy, Dow Chemical Co., Southwest Research Institute, UNOCAL, Phelps Dodge Co., และ Amoco Oil Co. เป็นวิศวกรที่ปรึกษาของ UNISEACH จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นคณะกรรมการในการคัดเลือกข้อเสนอโครงการของ U.S. National Science Foundation และ Idaho State Board of Education และเป็นคณะกรรมการในการคัดเลือกบทความทางวิชาการของสำนักพิมพ์ Chapman & Hall ในประเทศอังกฤษ และ Elsevier Sciences Publishing Co., ในประเทศเนเธอร์แลนด์