



รหัสโครงการ SUT7-719-55-12-63

รายงานการวิจัย

ชุดโครงการวิจัย

การพัฒนาแหล่งเกลือหินสำหรับกักเก็บของเสีย

จากภาคอุตสาหกรรมในระยะยาว

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

โครงการวิจัยย่อย

การทดสอบประสิทธิภาพการอัดตัวของเกลือหินบด

ในเชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง

(Mechanical and Hydraulic Performance of Crushed Salt

under High Temperature)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-719-55-12-63

รายงานการวิจัย

ชุดโครงการวิจัย

การพัฒนาแหล่งเกลือหินสำหรับกักเก็บของเสีย

จากภาคอุตสาหกรรมในระยะยาว

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

โครงการวิจัยย่อย

การทดสอบประสิทธิภาพการอัดตัวของเกลือหินบด

ในเชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง

(Mechanical and Hydraulic Performance of Crushed Salt
under High Temperature)

คณะผู้วิจัย

ผู้อำนวยการชุดโครงการวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เฟื่องขจร

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

หัวหน้าโครงการวิจัยย่อย

อาจารย์ ดร.เดโช เฟื่องภูมิ

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2555

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มีนาคม 2556

กิตติกรรมประกาศ

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

ผู้วิจัย

มีนาคม 2556



บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้ คือ เพื่อประเมินศักยภาพคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และเชิงศาสตร์ของเกลือหินบดผสมน้ำเกลืออิ่มตัวที่อยู่ภายใต้การอัดตัว ขนาดของเม็ดเกลือหินบดช่วง 0.075 ถึง 4.76 มิลลิเมตร ซึ่งอยู่ภายใต้อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูง และได้ทำการทดสอบหาปริมาณน้ำเกลือสูงสุดที่ให้กำลังในการอัดตัวสูงสุดสำหรับใช้ในการทดสอบด้วย การทดสอบการอัดตัวได้กระทำโดยให้ความเค้นกดในแนวแกนคงที่กับตัวอย่างเกลือหินบดที่อยู่ในกระบอกเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 มิลลิเมตร เท่ากับ 2.5, 5, 7.5 และ 10 MPa และอยู่ภายใต้การควบคุมอุณหภูมิให้คงที่เท่ากับ 30, 65 และ 100 องศาเซลเซียส คุณสมบัติเชิงศาสตร์ยังคงถูกสังเกตการณ์อย่างต่อเนื่องในขณะที่ค่ากำลังกดสูงสุดของตัวอย่างเกลือหินบดได้ถูกตรวจวัดหลังจากที่กดอัดเป็นระยะเวลา 3, 5, 7, 10 และ 15 วัน ค่าความเครียดในแนวแกนได้ถูกตรวจวัดและนำมาใช้ในการคำนวณขนาดการยุบตัวของแต่ละตัวอย่าง ผลที่ได้ระบุว่าปริมาณน้ำเกลือที่ทำให้ตัวอย่างเกลือหินบดมีความหนาแน่นสูงสุด (Optimum brine content) คือส่วนผสมระหว่างเกลือหินบดและน้ำเกลือเข้มข้นในอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ปริมาณการยุบตัวและความหนาแน่นของตัวอย่างเกลือหินบดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและความเค้นกดในแนวแกนที่ให้กับตัวอย่าง ค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือหินบดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณการอัดตัวสูงขึ้น และค่าความชื้นผ่านและความพรุนของตัวอย่างเกลือหินบดจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความเค้นกดในแนวแกนและอุณหภูมิ จากผลการทดสอบดังกล่าวสามารถสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายและคาดคะเนพฤติกรรมกรรมการอัดตัวเชิงกายภาพคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ และคุณสมบัติเชิงศาสตร์ของตัวอย่างเกลือหินบดเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบและเลือกใช้เกลือหินบดเป็นวัสดุถมกลับในช่องว่างของเหมืองเกลือและเหมืองแร่โพแทชใต้ดินในระยะยาวต่อไปได้

Abstract

The objective of this study is to determine the mechanical and hydraulic performance of consolidated crushed salt mixed with saturated brine under ambient and elevated temperatures. The crushed salt has grain sizes ranging from 0.075 to 4.76 mm. The maximum brine content corresponding to the maximum consolidation is also determined. The consolidation tests are performed by applying constant axial stresses to the crushed salt samples installed in the 54 mm diameter steel cylinders. The constant axial stresses are 2.5, 5, 7.5 and 10 MPa. The constant testing temperatures are controlled at 30, 65 and 100 Celsius. The hydraulic properties are continuously monitored while the uniaxial compressive strengths are measured after the samples are consolidated for 3, 5, 7 and 10 days. The axial strains are monitored and used to calculate the magnitude of the consolidation of each specimen. The results indicate that the optimum brine content for the crushed salt is 5%. The consolidation magnitude and density of the crushed salt samples increases with temperatures and applied axial stresses. The uniaxial compressive strength increases with the consolidation magnitude. The porosity and hydraulic conductivity decreases as the consolidation increases. The test results are used to develop a set of empirical equations to design the initial installation parameters in terms of the physical, mechanical and hydraulic properties of the crushed salt, which will tentatively be used as sealing materials in the voids and gaps occurred in the underground salt and potash mined.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	3
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	4
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	5
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	7
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
บทที่ 3 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ.....	15
3.1 วัตถุประสงค์.....	15
3.2 การเตรียมตัวอย่างเกล็ดเกลือ.....	15
3.3 การเตรียมตัวอย่างน้ำเกลืออิมิตัว.....	18
3.4 ผลที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบ.....	18
บทที่ 4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	21
4.1 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ.....	21
4.1.1 วัตถุประสงค์.....	21
4.1.2 การจัดเตรียมตัวอย่าง.....	21
4.1.3 วิธีการทดสอบ.....	26
4.1.4 วิธีการคำนวณผลการทดสอบ.....	28

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 การทดสอบค่าความซึมผ่าน.....	28
4.2.1 วัตถุประสงค์	28
4.2.2 การจัดเตรียมตัวอย่าง.....	29
4.2.3 วิธีการทดสอบ.....	30
4.2.4 การคำนวณผลการทดสอบ.....	32
4.3 การทดสอบกำลังกดสูงสุดในแกนเดียว.....	33
4.3.1 วัตถุประสงค์	33
4.3.2 การจัดเตรียมตัวอย่าง.....	33
4.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	34
4.3.4 วิธีการทดสอบ.....	34
4.3.5 การคำนวณผลการทดสอบ.....	37
บทที่ 5 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	39
5.1 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ.....	39
5.1.1 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำที่สภาวะความเค้นกดในแนวแกน และอุณหภูมิคงที่.....	39
5.1.2 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำที่สภาวะความเค้นกดในแนวแกน คงที่ผันแปรอุณหภูมิ.....	43
5.1.3 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำที่อุณหภูมิคงที่ผันแปรความเค้นกด ในแนวแกน.....	46
5.2 ผลการทดสอบค่าความซึมผ่าน.....	48
5.2.1 ผลการทดสอบค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพที่สภาวะความเค้นกด ในแนวแกนและอุณหภูมิคงที่.....	48
5.2.2 การทดสอบค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพที่สภาวะความเค้นกด ในแนวแกนคงที่ผันแปรอุณหภูมิ.....	48
5.2.3 การทดสอบค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพที่สภาวะอุณหภูมิคงที่ผันแปร ความเค้นกดในแนวแกน.....	50

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3 ผลการทดสอบกำลังกดสูงสุดในแกนเดียว.....	51
5.3.1 ผลการทดสอบกำลังกดสูงสุดในแกนเดียวของตัวอย่างเกลียวหีนบด ที่กดอัดที่สภาวะความเค้นกดในแนวแกนและอุณหภูมิคงที่.....	52
5.3.2 ผลการทดสอบกำลังกดสูงสุดในแกนเดียวของตัวอย่างเกลียวหีนบด ที่กดอัดที่สภาวะความเค้นในแนวแกนคงที่ผันแปรอุณหภูมิ.....	52
5.3.3 ผลการทดสอบกำลังกดสูงสุดในแกนเดียวของตัวอย่างเกลียวหีนบด ที่กดอัดที่สภาวะอุณหภูมิคงที่ผันแปรความเค้นในแนวแกน.....	56
บทที่ 6 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ	59
6.1 การสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรและความเค้น ที่ใช้ในการกดอัดตัวอย่างเกลียวหีนบด.....	59
6.2 การสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรและระยะเวลา ที่ใช้ในการกดอัดตัวอย่างเกลียวหีนบด.....	61
6.3 การสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ ของตัวอย่างเกลียวหีนบด.....	64
บทที่ 7 บทสรุป	69
7.1 สรุปและวิจารณ์ผล.....	69
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	70
บรรณานุกรม	73
ประวัตินักวิจัย	77

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำเกลืออิ่มตัว	19
5.1 ค่ากำลังกดสูงสุดและอัตราส่วน Poisson's ratio ของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดด้วยความเค้นคงที่และระยะเวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 303 Kelvin.....	53
5.2 ค่ากำลังกดสูงสุดและอัตราส่วน Poisson's ratio ของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดด้วยความเค้นกดคงที่ 10 MPa เป็นระยะเวลา 15 วัน.....	56
5.3 ค่ากำลังกดสูงสุดและอัตราส่วน Poisson's ratio ของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดด้วยความเค้นกดผันแปรที่อุณหภูมิต่างๆ.....	56
6.1 ค่าตัวแปรที่ได้จากการสอบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกดสูงสุดในแกนเดียวกับระยะเวลาในการกดอัดของแต่ละความเค้นกดในแนวแกน.....	66

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 ลักษณะการดูดหลุมเจาะและการถมกลับหรืออุดช่องในเหมืองเกลือใต้ดินสำหรับเทคโนโลยีการทิ้งกากของเสียอันตราย.....	2
2.1 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับวัดค่าความซึมผ่านของตัวอย่างโดยวิธีการใช้แก๊สและการใช้น้ำเกลือ.....	13
3.1 การจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหินบดสำหรับใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	16
3.2 ค่าการกระจายตัวของขนาดเม็ดเกลือหินบด.....	17
3.3 ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างเกลือหินบด ที่กดอัดด้วยความเค้น 4 MPa เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	17
3.4 ตัวอย่างการเตรียมน้ำเกลืออิ่มตัว เพื่อใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	19
4.1 ตัวอย่างเกลือหินบดผสมกับน้ำเกลือเข้มข้นก่อนทำการทดสอบ.....	22
4.2 ชุดอุปกรณ์สำหรับทดสอบประกอบด้วย ครอบทดสอบและเบ้ากดทดสอบ.....	23
4.3 บรรจุตัวอย่างเกลือหินบดที่ผสมกับน้ำเกลืออิ่มตัวลงในครอบทดสอบ.....	23
4.4 อัดตัวอย่างเบาๆ ด้วยแท่งเหล็กเพื่อให้เกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและลดช่องว่างระหว่างเม็ดเกลือ.....	24
4.5 การติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวและเครื่องให้แรงในแนวแกนสำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง.....	24
4.6 อุปกรณ์ทดสอบที่อุณหภูมิ 65 และ 100 องศาเซลเซียส.....	25
4.7 การติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวและเครื่องให้แรงในแนวแกนสำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิ 65 และ 100 องศาเซลเซียส.....	25
4.8 ชุดอุปกรณ์ทดสอบค่าความซึมผ่าน ประกอบด้วยครอบทดสอบและเบ้ากดทดสอบที่มีการติดตั้งแหวนยางรูปวงกลม (O-ring).....	30
4.9 การทดสอบวัดค่าความซึมผ่าน.....	31
4.10 แผนภูมิแสดงอุปกรณ์การทดสอบค่าความซึมผ่าน.....	32
4.11 การดันตัวอย่างเกลือหินบดที่ผ่านการกดอัดแล้วออกจากครอบทดสอบด้วย Load Platen.....	35
4.12 ตัวอย่างเกลือหินบดที่ถูกดันออกจากครอบ.....	35
4.13 การทดสอบกำลังกดสูงสุดในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือหินบดหลังจากการอัดตัวแล้ว.....	36

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวแกนกับระยะเวลากดอัดของตัวอย่าง เกลือหินบดที่กดอัดด้วยความเค้นกดคงที่ 2.5, 5, 7.5 และ 10 MPa ภายใต้สภาวะ อุณหภูมิห้อง (303 Kelvin).....	40
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวแกนกับความเค้นในการกดอัดของ ตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดเป็นระยะเวลา 3, 5, 7, 10 และ 15 วัน ภายใต้สภาวะ อุณหภูมิห้อง.....	41
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับระยะเวลากดอัดของตัวอย่างเกลือหินบด ที่กดอัดด้วยความเค้นกดคงที่ 2.5, 5, 7.5 และ 10 MPa ภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง..	41
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับความเค้นในการกดอัดของตัวอย่างเกลือหิน บดที่กดอัดเป็นระยะเวลา 3, 5, 7, 10 และ 15 วัน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง.....	42
5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างกับระยะเวลากดอัดของตัวอย่างเกลือหินบด ที่กดอัดด้วยความเค้นกดคงที่ 2.5, 5, 7.5 และ 10 MPa ภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง..	42
5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างกับความเค้นในการกดอัดของตัวอย่างเกลือ หินบดที่กดอัดเป็นระยะเวลา 3, 5, 7, 10 และ 15 วัน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง.....	43
5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวแกนกับระยะเวลาในการกดอัดของตัวอย่าง เกลือหินบดที่กดอัดด้วยความเค้น 10 MPa ภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่มีการผันแปร จาก 303 Kelvin เป็น 338 และ 373 Kelvin เปรียบเทียบกับสภาวะอุณหภูมิห้อง.....	44
5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับระยะเวลาในการกดอัดของตัวอย่างเกลือหิน บดที่กดอัดด้วยความเค้น 10 MPa ภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่มีการผันแปรจาก 303 Kelvin เป็น 338 และ 373 Kelvin เปรียบเทียบกับสภาวะอุณหภูมิห้อง.....	44
5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรกับระยะเวลาในการกดอัดของ ตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดด้วยความเค้น 10 MPa ภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่มีการ ผันแปรจาก 303 Kelvin เป็น 338 และ 373 Kelvin เปรียบเทียบกับสภาวะอุณหภูมิ ห้อง.....	45
5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวแกนกับระยะเวลาในการกดอัดของตัวอย่าง เกลือหินบดที่มีการผันแปรความเค้นกดตั้งแต่ 2.5 ถึง 10 MPa ทุก 5 วันภายใต้สภาวะ อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 373 Kelvin.....	46

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างหนาแน่นกับระยะเวลาในการกดอัดของตัวอย่างเกลือหินบดที่มีการผันแปรความเค้นกดตั้งแต่ 2.5 ถึง 10 MPa ทุก 5 วัน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 373 Kelvin.....	47
5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างกับระยะเวลาในการกดอัดของตัวอย่างเกลือหินบดที่มีการผันแปรความเค้นกดตั้งแต่ 2.5 ถึง 10 MPa ทุก 5 วัน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 373 Kelvin.....	47
5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพกับระยะเวลาในการกดอัดของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดด้วยความเค้นกด 2.5, 5, 7.5 และ 10 MPa ภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง.....	49
5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพกับความเค้นในการกดอัดของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดเป็นระยะเวลา 3, 5, 7, 10 และ 15 วัน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง.....	49
5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพกับระยะเวลาในการกดอัดของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดด้วยความเค้นกดคงที่ 10 MPa ภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่มีการผันแปรจาก 303 Kelvin เป็น 338 และ 373 Kelvin เปรียบเทียบกับอุณหภูมิห้อง	50
5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพกับระยะเวลาในการกดอัดของตัวอย่างเกลือหินบดที่มีการผันแปรความเค้นกดตั้งแต่ 2.5 ถึง 10 MPa ทุก 5 วัน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 373 Kelvin.....	51
5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังกดสูงสุดกับระยะเวลาในการกดอัดของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดด้วยความเค้นกด 2.5, 5, 7.5 และ 10 MPa ที่อุณหภูมิห้อง.....	53
5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดด้วยความเค้นกดในแนวแกน 2.5, 5, 7.5 และ 10 MPa เป็นระยะเวลา 15 วัน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง.....	54
5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังกดสูงสุดกับอุณหภูมิในการกดอัดของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดด้วยความเค้นกดคงที่ 10 MPa เป็นระยะเวลา 15 วัน.....	55

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดด้วยความเค้นกดคงที่ 10 MPa เป็นระยะเวลา 15 วัน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 303, 338 และ 373 Kelvin.....	55
5.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดด้วยความเค้นกดผันแปร 4 ระดับ คือ 2.5, 5, 7.5 และ 10 MPa ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 373 Kelvin.....	57
6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรกับความเค้นกดในการกดอัดตัวอย่าง (σ_n) ในแต่ละระยะเวลาการกดอัด.....	60
6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ a (บน) และ b (ล่าง) กับระยะเวลาในการกดอัดตัวอย่างเกลือหินบด (t).....	60
6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรกับระยะเวลาในการกดอัด (t) ในแต่ละอุณหภูมิ.....	62
6.4 ความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ระหว่างค่าคงที่ c (บน) และ (d) ล่าง กับอุณหภูมิ (T)....	63
6.5 ความสัมพันธ์กำลังกดสูงสุดในแกนเดียว (σ_n) กับระยะเวลาในการกดอัด (t) แต่ละความเค้นกดในแนวแกน.....	64
6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ e (บน) และ f (ล่าง) กับความเค้นกดในแนวแกน (σ_n)....	65
6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกดสูงสุดในแกนเดียว (σ_{UCS}) กับอุณหภูมิ (T).....	67

บทที่ 1

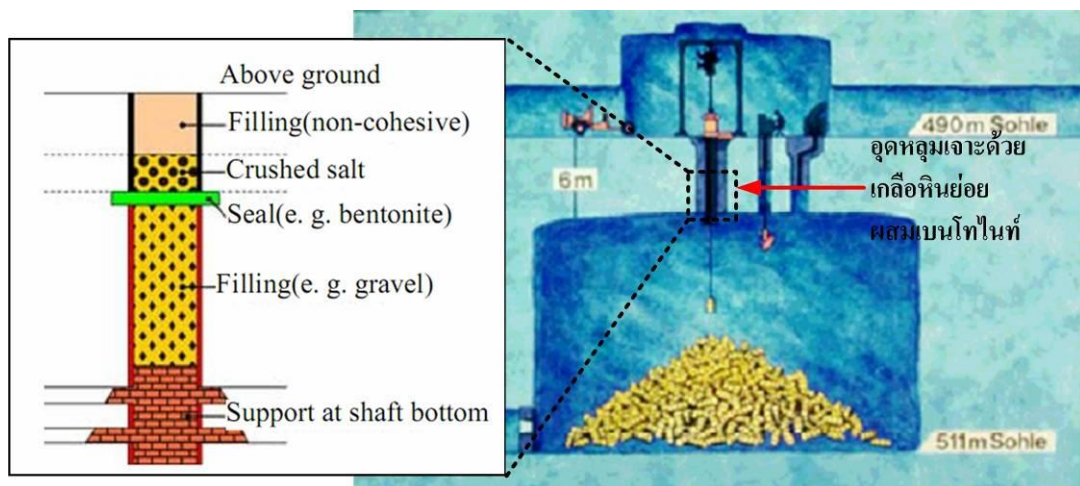
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

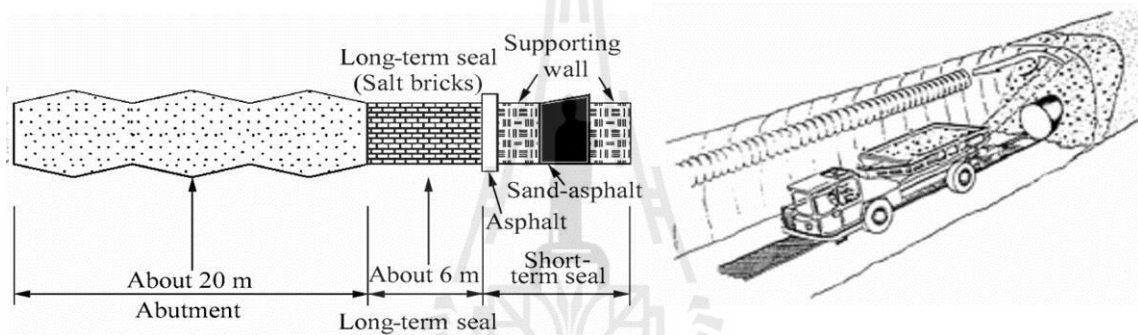
เทคโนโลยีการกักเก็บหรือการทิ้งกากของเสียอันตรายที่ไม่สามารถบำบัดได้จากภาคอุตสาหกรรมไว้ในเหมืองเกลือใต้ดินนับว่ามีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับประเทศไทย กฎเกณฑ์สำคัญที่จะทำให้การดำเนินการประสบความสำเร็จได้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของชั้นเกลือหินและการออกแบบลักษณะการวางตัวรวมทั้งขนาดช่องเปิดของเหมืองที่มีเสถียรภาพ ปัจจัยอีกประการหนึ่งที่มีความสำคัญคือวัสดุที่ใช้ถมกลับเข้าไปยังช่องว่างในเหมืองใต้ดินภายหลังจากที่มีการนำเอากากของเสียอันตรายไปทิ้งตามปริมาณที่ได้ออกแบบไว้ คุณสมบัติที่ต้องพิจารณาสำหรับวัสดุถมกลับคือความเหมาะสมเชิงกลศาสตร์ (ความสามารถในการต้านทานความเค้นที่เกิดขึ้นในเหมืองใต้โดยไม่มีปริบัติ) ความเหมาะสมเชิงกลศาสตร์ (มีค่าความซึมผ่านต่ำ) สามารถดูดซับน้ำเกลือและสารพิษอันตรายไม่ให้รั่วไหลสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกและสะดวกในการดำเนินงาน

เทคโนโลยีนี้ได้ใช้อย่างเป็นทางการเป็นรูปธรรมในต่างประเทศมากกว่า 20 ปี โครงการที่เป็นที่รู้จักกันอย่างกว้างขวางคือ “Waste Isolate Pilot Plant (WIPP)” วัสดุถมกลับที่นิยมใช้คือเกลือหินบดบริสุทธิ์หรือเกลือหินบดผสมกับเบนทอนไนต์ในอัตราส่วนที่เหมาะสม แล้วทำการบดอัด (Compaction) หรือกดอัด (Compression) ให้เป็นแท่งเกลือก้อนสี่เหลี่ยม เมื่อต้องการใช้จะนำเอาแท่งเกลือไปเรียงเป็นกำแพงซ้อนกันหลายชั้นเพื่อปิดกั้นช่องว่างระหว่างพื้นที่กักเก็บกากของเสียอันตราย (สารกัมมันตภาพรังสี) และพื้นที่ที่เป็นทางขนส่ง (รูปที่ 1.1) การใช้เกลือหินบดนับว่ามี ความเหมาะสมมากเพราะมีความเข้ากันในเชิงเคมีและเชิงกายภาพกับเกลือหินเดิม ในขบวนการขุดเจาะช่องเหมืองจะได้เกลือหินซึ่งสามารถนำไปใช้ได้เลย จึงทำให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการจัดหาวัสดุอย่างอื่น

เทคโนโลยีนี้ยังเป็นเทคโนโลยีใหม่สำหรับประเทศไทย ดังนั้นหากจะพิจารณาสร้างเหมืองเกลือใต้ดินเพื่อการทิ้งกากของเสียจะต้องมีการออกแบบและทดสอบคุณสมบัติของวัสดุถมกลับอย่างละเอียดเพื่อให้เข้าใจกลไกการอัดตัว พฤติกรรมเชิงกลศาสตร์และกลศาสตร์ของเกลือหินบดจากแอ่งเกลือหินในประเทศไทย และนำไปประเมินความเหมาะสมที่จะใช้เกลือหินบดเป็นวัสดุถมกลับในเทคโนโลยีนี้ ซึ่งเป็นกฎเกณฑ์สำคัญที่จะประเมินความเป็นไปได้ของการนำเอาเทคโนโลยีนี้มาใช้อย่างเป็นทางการเพื่อลดและป้องกันปัญหาสิ่งแวดล้อมจากของเสียอันตรายในประเทศไทย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการวิจัยเพื่อศึกษาคุณสมบัติของเกลือหินบดให้ละเอียดในประเด็นต่อไปนี้



(ก) การอุดหลุมเจาะในแนวตั้ง



(ข) การอุดหลุมช่องเหมืองในแนวระดับ

รูปที่ 1.1 ลักษณะการอุดหลุมเจาะ (ก) และการถมกลับหรืออุดช่องในเหมืองเกลือใต้ดิน (ข) สำหรับเทคโนโลยีการทิ้งกากของเสียอันตราย (Brewitz and Rothfuchs, 2007; Zhang et al., 2006)

- 1) การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นและปริมาตรช่องว่างเมื่อเกลือหินบดถูกกดอัดด้วยความเค้นและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน
- 2) การเปลี่ยนแปลงค่าความซึมผ่านของเกลือหินบดในสภาวะที่ทดสอบ
- 3) การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และเชิงพลศาสตร์ในเชิงเวลา
- 4) ส่วนผสมของเกลือหินบดที่เหมาะสมและมีคุณสมบัติที่ดีที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อเกลือหินบด (Crushed salt gradation) และความเค้นกด (Axial stress) บนตัวอย่าง ระยะเวลาที่ทดสอบและปริมาณน้ำเกลือเข้มข้น (Brine content) ในตัวอย่างต่อพฤติกรรมภายใต้การกดอัด (Compression test) และการอัดตัวแบบคายน้ำ (Consolidation drained test) ภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นผ่าน การลดลงของปริมาตรช่องว่าง การเพิ่มขึ้นของความเครียดในแนวแกน และการวิบัติของตัวอย่างเกลือหินบด
- 2) พัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Empirical relationship) เพื่ออธิบายพฤติกรรมของการอัดตัว (การลดลงของช่องว่าง (e) และอัตราการเกิดความเครียด (ϵ_{axial})) และเกณฑ์การวิบัติตามกฎของคูลอมบ์ (c และ ϕ) ของเกลือหินบดที่สัมพันธ์กับความเค้น (σ_{axial}) ความชื้น (w_b) เวลา (t) และอุณหภูมิ (T)
- 3) ระบุส่วนผสมและสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมตัวอย่างเกลือหินเพื่อใช้เป็นวัสดุถมกลับ โดยพิจารณาจากคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ซึ่งมีอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้อง (มีความสามารถในการต้านทานความเค้นในสภาวะจริง) และมีความเหมาะสมเชิงกลศาสตร์ (มีค่าความชื้นผ่านอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้)

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) ศึกษาและประมวลข้อมูลจากเอกสารอ้างอิงเกี่ยวกับการทดสอบการอัดตัวและประสานตัวของเกลือหินบดในห้องปฏิบัติการ การใช้เกลือหินบดสำหรับเป็นวัสดุถมกลับ (Backfill) และอัตราส่วนที่ใช้ พฤติกรรมเชิงกลศาสตร์และพลศาสตร์ของวัสดุถมกลับที่มีการออกแบบและใช้กันอย่างเป็นรูปธรรมในต่างประเทศที่อยู่ภายใต้อุณหภูมิสูง
- 2) ในงานวิจัยนี้ได้นำแท่งตัวอย่างเกลือหินไปบดด้วยเครื่องบด (Crushing machine) เพื่อให้ได้ขนาดเม็ดที่ต่างกัน สำหรับการกดอัดด้วยความเค้นในกระบอกสแตนเลส
- 3) ตัวอย่างเกลือหินบดถูกนำไปทดสอบการกระจายตัวของเม็ดเกลือด้วยวิธี Sieve analysis
- 4) ตัวอย่างเกลือหินบดมีการผสมน้ำเกลือเข้มข้นเข้าไปในตัวอย่าง โดยมีการผันแปรระดับความชื้น (Brine content) ในตัวอย่างจำนวน 4 ระดับ คือ 2%, 4%, 6% และ 10% โดยน้ำหนัก ภายหลังจากคลุกเคล้าเข้ากับน้ำเกลือเข้มข้นเป็นอย่างดีแล้ว ตัวอย่างถูกนำไปกดอัดด้วยความเค้นก่อน (Pre-compressed) ที่ระดับเดียวกันคือ 4 MPa ในกระบอกสแตนเลส (รัศมีภายในเท่ากับ 54 มิลลิเมตร) เป็นชั้นๆ จำนวน 4 ชั้น ให้ได้ความยาวรวมของตัวอย่างในกระบอกทดสอบเท่ากับ 160 มิลลิเมตร และให้ความร้อนคงที่กับตัวอย่างที่ระดับต่างกันอย่างน้อย 3 ระดับ

- 5) ตัวอย่างที่กดอัดเรียบร้อยแล้วถูกนำไปติดตั้งในเครื่องกด Consolidation machine โดยมีการกดด้วยแรงคงที่ 4 ระดับ คือ 2.5, 5, 7.5 และ 10 MPa เป็นระยะเวลา 3, 5, 7, 10 และ 15 วัน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่างกันอย่างน้อย 3 ระดับ คือ 30, 65 และ 100 องศาเซลเซียส เมื่อครบกำหนดแต่ละช่วง ตัวอย่างถูกนำออกมาทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์ มีการอ่านค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวของตัวอย่างและบันทึกค่าไว้ตลอดเวลาที่ทดสอบเพื่อนำไปคำนวณหาปริมาตรช่องว่างที่เปลี่ยนไป
- 6) การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์โดยวัดอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนผ่านตัวอย่างเกล็ดหินบดที่อยู่ภายใต้อุณหภูมิสูงและคำนวณออกมาเป็นค่าความซึมผ่านที่ลดลงตามเวลาที่ทดสอบ การทดสอบเชิงกลศาสตร์ได้มีการนำเอาตัวอย่างหินไปทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวของช่วงเวลากการทดสอบที่ต่างกันเพื่อนำมาสร้างเป็นเกณฑ์การวัดที่พิจารณาถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
- 7) ผลงานวิจัยได้นำไปเผยแพร่องค์ความรู้ในรูปของบทความวิชาการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการและวารสารทางวิชาการในระดับนานาชาติ

1.4. ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

งานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะนำเอาเศษเกล็ดหินที่ขุดออกมาจากการทำเหมืองเกล็ดหินใต้ดินไปใช้ประโยชน์เพื่อเป็นวัสดุถมกลับ หรือวัสดุอุด (Seal material) ตามช่องทางเดินในเหมืองภายหลังจากที่มีการนำเอาของเสียอันตราย (Toxic waste) ไปทิ้งไว้ เนื่องจากโครงการดังกล่าวยังไม่มีการดำเนินการอย่างเป็นทางการเป็นรูปธรรม (เป็นเพียงแนวคิดของผู้วิจัยเท่านั้น) จึงไม่มีตัวอย่างจากเหมืองเกล็ดหินสำหรับเทคโนโลยีนี้โดยตรง โดยตัวอย่างเกล็ดหินที่ใช้ในการทดสอบได้จากหลุมเจาะสำรวจและเหมืองเกล็ดหินใต้ดินของภาคเอกชน

ก้อนเกล็ดหินที่ได้จากการขุดตัดจากเหมืองใต้ดินของภาคเอกชน หรือแท่งตัวอย่างเกล็ดหินจากหลุมเจาะสำรวจถูกนำไปบดย่อยด้วยเครื่องย่อยหิน (Crushing machine) ให้ได้ขนาดเม็ดเกล็ดหินที่เล็กลงและมีขนาดคละกันไป ตัวอย่างเกล็ดหินบดถูกนำไปผสมกับน้ำเกล็ดหินเข้มข้นในปริมาณที่แตกต่างกันเพื่อไม่ให้เกิดการละลายตัวอย่างเพิ่มหลังจากที่ผสมกับเม็ดเกล็ดหินแล้ว และทำการกดอัดด้วยพลังงานที่เท่ากันเพื่อหาว่าปริมาณน้ำเกล็ดหินเท่าไรที่ให้ค่าความหนาแน่นสูงสุด ซึ่งตัวอย่างต้องอยู่ภายใต้อุณหภูมิสูง โดยตัวอย่างที่ให้ค่าความหนาแน่นสูงสุดจะถูกนำไปกดอัดด้วยความเค้นกดที่ต่างกัน โดยให้ความเค้นกดคงที่ที่ระยะเวลาต่างกัน เมื่อครบเวลาที่กำหนดให้นำตัวอย่างไปประเมินคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ (ทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวภายใต้อุณหภูมิสูง) และคุณสมบัติเชิงชลศาสตร์ (วัดค่าความซึมผ่านภายใต้อุณหภูมิสูง) นำผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการไปเปรียบเทียบความสอดคล้องกับผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม FLAC 4.0

และ PFC 3.1 ความสำเร็จของการวิจัยนี้สามารถระบุได้ว่าอุณหภูมิมีผลต่อคุณสมบัติของเกลือหินบดอย่างไร และสามารถจัดเตรียมเกลือหินบดให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเป็นวัสดุถมกลับ เพื่อสามารถนำไปใช้งานจริงได้อย่างเป็นรูปธรรม

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และเชิงพลศาสตร์ของเกลือหินบดที่นำมาใช้เป็นวัสดุถมกลับในเหมืองเกลือใต้ดิน พฤติกรรมของเกลือหินบดภายใต้ความเค้นกดที่กระทำ และผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในงานวิจัยนี้

ขั้นตอนที่ 2 การเก็บและจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหินบด

นำแท่งตัวอย่างเกลือหินที่ได้จากหลุมเจาะที่ขุดจากเหมืองใต้ดินไปบดย่อยให้ได้ขนาดเล็กลงโดยไม่ต้องคัดขนาด เพื่อใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ส่วนผสมที่ใช้กำหนดให้มีเม็ดเกลือขนาดใหญ่ที่สุดไม่เกิน 4.76 มิลลิเมตร

ขั้นตอนที่ 3 การประดิษฐ์กระบอกลำสำหรับทดสอบ

กระบอกลำสำหรับใช้บรรจุและทดสอบการอัดตัวของตัวอย่างเกลือหินบดทำจากสแตนเลสเพื่อป้องกันการผุกร่อนหรือเสื่อมสภาพเนื่องจากการทำปฏิกิริยากับเกลือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของกระบอกลำมีค่าเท่ากับ 54 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดของตัวอย่างที่เหมาะสมกับการทดสอบกำลังกดสูงสุดในแกนเดียวที่ห้องปฏิบัติการมีอุปกรณ์รองรับสำหรับการทดสอบนี้อยู่แล้ว กระบอกลำทดสอบมีความหนาประมาณ 1 ถึง 3 เซนติเมตร ด้านหัวและท้ายของกระบอกลำมีเบ้ากดตัวอย่างทำหน้าที่ส่งแรงกดให้กับตัวอย่าง และเจาะรูไว้ให้มีการระบายน้ำเกลือออกจากตัวอย่างได้

ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

จุดประสงค์ของการทดสอบในห้องปฏิบัติการ คือ เพื่อประเมินการอัดตัวของตัวอย่างเกลือหินบดและความสามารถในการเชื่อมประสานตัว (Self-healing) ภายใต้ความชื้นและความเค้นที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นการจำลองสภาวะแวดล้อมในเหมืองเกลือใต้ดินสำหรับ

เทคโนโลยีการกักเก็บกากของเสียอันตรายจากภาคอุตสาหกรรม ประสิทธิภาพในการเชื่อมประสานตัวของเกล็ดหินบดจากการทดสอบและประเมินคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และเชิงกลศาสตร์ที่เปลี่ยนไป กล่าวคือ ประเมินค่าความซึมผ่าน (Hydraulic conductivity) ของตัวอย่างเกล็ดหินบดจากการวัดอัตราการไหลผ่านด้วยก๊าซไนโตรเจน และมีการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ได้แก่กำลังกดสูงสุดในแกนเดียว

ขั้นตอนที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

นำค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวที่ได้จากการตรวจวัดในขั้นตอนที่ 3 มาคำนวณเป็นความเครียดตามแนวแกน (ϵ_{axial}) ของตัวอย่างและการเปลี่ยนแปลงช่องว่าง (e) ในตัวอย่างเพื่อสร้างความสัมพันธ์กับเวลา (t) ที่ทดสอบ จากนั้นนำความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ไปสอบเทียบเพื่อหาค่าตัวแปรในสมการที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการอัดตัวของตัวอย่างด้วยความเค้นกดของตัวอย่างโดยอ้างอิงสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีการพัฒนาไว้แล้ว

ผลการทดสอบกำลังกดในแกนเดียวและในสามแกนได้นำไปสร้างเกณฑ์การวิบัติตามกฎของคูลอมป์ (c และ ϕ) ของเกล็ดหินบดที่อยู่ในรูปของความสัมพันธ์กับขนาดผล (D) ความชื้นของน้ำเกล็ด (w) ระดับความเค้นกด (σ_{axial}) และเวลา (t)

ขั้นตอนที่ 6 การศึกษาด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

ในขั้นตอนนี้ได้มีการจำลองเหมืองเกล็ดใต้ดินภายหลังจากที่มีการถมกลับด้วยเกล็ดหินบดแล้วโดยใช้โปรแกรม FLAC เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพและทำนายพฤติกรรมของเหมืองเกล็ดใต้ดิน นำค่าคุณสมบัติด้านความแข็งและพฤติกรรมในเชิงเวลาของเกล็ดหินบดที่สอบเทียบได้ในขั้นตอนที่ 4 มาใช้เป็นค่าคงที่ในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

ขั้นตอนที่ 7 การถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่กลุ่มเป้าหมาย

ผลงานวิจัยนี้จะนำไปเผยแพร่องค์ความรู้ในรูปแบบของบทความในการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ และวารสารทางวิชาการในระดับนานาชาติ เช่น Engineering Geology (JIF = 1.212) หรือ International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences (JIF = 1.244) หรือ Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (JIF = 0.673)

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

งานวิจัยที่เสนอมานี้มีประโยชน์อย่างมากกับงานด้านวิศวกรรมธรณี วิศวกรรมโยธา และวิศวกรรมเหมืองแร่ที่เกี่ยวข้องกับการปิดและฟื้นฟูเหมืองหลังจากเสร็จสิ้นกิจการทำเหมือง การป้องกันการทรุดตัวของผิวดินจากการทำเหมืองใต้ดิน และงานด้านวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับการกักเก็บของเสียอันตรายที่ไม่สามารถบำบัดได้

หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยที่เสนอมานี้มีประโยชน์อย่างมากและโดยตรงกับหลายหน่วยงาน ทั้งภาครัฐและเอกชน ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการวิเคราะห์และออกแบบเหมืองใต้ดินเพื่อเทคโนโลยีการทิ้งกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรม หน่วยงานเหล่านี้ได้แก่

- 1) กองธรณีเทคนิค กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
- 2) กองธรณีเทคนิค กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน
- 3) สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมเหมืองแร่ และวิศวกรรมธรณี
- 4) โรงพยาบาลทั้งภาครัฐและเอกชน
- 5) บริษัทเอกชนและโรงงานอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดสารพิษอันตราย

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัยได้ค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และเชิงพลศาสตร์ของเกลือหินบดที่นำมาใช้เป็นวัสดุถมกลับในเหมืองเกลือใต้ดิน รวมทั้งพฤติกรรมของเกลือหินบดภายใต้ความเค้นกดที่กระทำและผลกระทบจากความชื้น ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และเชิงพลศาสตร์ของเกลือหินบด

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เกลือหินบดสำหรับเป็นวัสดุถมกลับหรือเป็นวัสดุอุดช่องทางในเหมืองเพื่อป้องกันการรั่วไหลของสารพิษออกจากเหมืองเกลือใต้ดินนั้นมีการศึกษากันอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ (Case and Kelsall, 1987; Butcher, 1991; Korthaus, 1996; Brodsky et al., 1996; Callahan et al., Case and Kelsall, 1987; Chumbe et al., 1996; Davidson and Dusseault, 1996; Hansen, 1993; Krumhansl et al., 1999; Olivella and Gens, 2002; Schneefub and Droste; 1993; Ran and Daemen, 1995) ซึ่งจะใช้กับเหมืองเกลือที่เลิกกิจการหรือเหมืองเกลือที่ใช้เป็นแหล่งกักเก็บกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งกากนิวเคลียร์และสารพิษอันตราย วัสดุที่ใช้ถมกลับนั้นอาจจะเป็นเกลือหินบดเพียงอย่างเดียวหรือผสมกันระหว่างเกลือหินบดกับเบนทอนไนต์ งานวิจัยเหล่านี้จะมุ่งประเด็นไปที่การออกแบบส่วนผสมในวัสดุถมกลับ (ขนาดคละของเกลือหินบดและสัดส่วนของเกลือกับเบนทอนไนต์) และผลกระทบจากปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการอัดตัวของตัวอย่างที่ผสมกัน ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น ความเค้นกด บนตัวอย่าง และระยะเวลาในการอัดตัว ในการทดสอบได้มีการตรวจวัดค่าความชื้นผ่านโดยใช้ก๊าซไนโตรเจนหรือใช้น้ำเกลือเข้มข้น การวัดค่าความพรุนและปริมาตรช่องว่าง การวัดอัตราการเกิดความเครียดของตัวอย่างในเชิงเวลา กำลังรับแรงกดและแรงเฉือนของตัวอย่าง นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (ความเครียดเชิงปริมาตร) ในฟังก์ชันของเวลาและเขียนคำสั่งให้สามารถใช้คำนวณได้ด้วยโปรแกรม FLAC (ITASCA, 1992), ADINA (Pudewills and Krauss, 1999) และ PFC (Jia et al., 2009)

Butcher (1991) ได้เสนอเกณฑ์การเลือกวัสดุถมกลับในเหมืองเกลือใต้ดินโดยพิจารณาจาก 2 เกณฑ์ คือ 1) เกณฑ์บังคับ (Required Criteria) ได้แก่ (1) ค่าความชื้นผ่านต่ำ (2) มีเสถียรภาพทางด้านเคมี วัสดุถมกลับต้องไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับน้ำเกลือหรือส่วนต่างในห้อยกักเก็บ (3) มีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์ และ (4) สะดวกในการจัดการ และ 2) เกณฑ์ที่ต้องการ

เพิ่มเติม (Desirable Criteria) ซึ่งจะเป็นไปตามนี้หรือไม่ก็ได้ ได้แก่ (1) ไม่มีผลกระทบจากสารผสมเพิ่ม (2) สามารถดูดซับน้ำเกลือที่เกิดขึ้นในเหมืองเกลือ (3) สามารถดูดซับสารกัมมันตภาพรังสี (4) การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (ความสามารถในการลดปริมาตรช่องว่าง) และ (5) ประสิทธิภาพในการนำความร้อน

Ran and Daemen (1995) ได้ศึกษาผลกระทบของขนาด การลดขนาดของเกลือหิน และความชื้นต่อความสามารถในการบดอัด (Compaction) ในการศึกษาได้เสนอสมการเพื่อใช้คำนวณความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density) เมื่อมีส่วนผสมระหว่างเกลือเม็ดเล็กและเกลือเม็ดใหญ่

Case and Kelsall (1987) ได้ศึกษาค่ากบฏภาพของเกลือหินบดสำหรับใช้เป็นวัสดุถมกลับ (Backfill) และวัสดุอุด (Seal material) ซึ่งได้มีการทดสอบการอัดตัว (Consolidation test) ของเกลือหินบดในห้องปฏิบัติการโดยมีจุดประสงค์เพื่อทำความเข้าใจในกระบวนการอัดตัวของตัวอย่างว่ามีผลต่อค่าความชื้นผ่าน ความพรุน และอัตราการเกิดความเครียดได้อย่างไร ตัวอย่างเกลือหินที่นำมาจากโครงการทิ้งกากนิวเคลียร์ Waste Isolation Pilot Plant และที่เหมือง Avery Island Mine การทดสอบใช้ระยะเวลา 1 ถึง 2 เดือน ขนาดของเม็ดเกลือคือ 1, 10, และ 20 มิลลิเมตร เมื่อนำมาผสมกันจะมีค่าความพรุนเริ่มต้นระหว่าง 26% ถึง 36% ตัวอย่างที่จัดเตรียมมีความชื้นที่ 0% และ 2% โดยน้ำหนัก ความชื้นผ่านเริ่มต้นที่วัดได้มีค่าระหว่าง 10^3 ถึง 10^5 มิลลิคาร์ซี การทดสอบดำเนินการภายใต้อุณหภูมิห้อง ความดันล้อมรอบตัวอย่างมีค่าระหว่าง 0.34 ถึง 17 MPa การทดสอบนี้มุ่งความสนใจไปที่ผลกระทบจากความชื้นต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นผ่าน ความพรุน และอัตราการเกิดความเครียดเชิงปริมาตรของตัวอย่าง ผลการทดสอบตัวอย่างที่มีค่าความชื้น (2%) พบว่าหลังจากหนึ่งเดือนผ่านไปค่าความชื้นผ่านลดลงเหลือ 10^{-5} มิลลิคาร์ซี และความพรุนลดลงเหลือ 5% อัตราการอัดตัวของตัวอย่างที่มีความชื้นจะมีค่ามากเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่แห้ง และอัตราการเกิดความเครียดเชิงปริมาตรเปลี่ยนแปลงจาก 10^{-8} เป็น 10^{-6} ต่อวินาที ซึ่งไม่มีแนวโน้มว่าเข้าสู่ช่วงที่เกิดอัตราความเครียดคงที่ (Steady state) ในช่วง 2 เดือนที่ทำการทดสอบ

Butcher (1991) ทดสอบคุณสมบัติของวัสดุถมกลับ 2 ชนิด คือ เกลือหินบริสุทธิ์ และเกลือหิน (70% โดยน้ำหนัก) ผสมกับเบนทอนไนต์ (30% โดยน้ำหนัก) เพื่อใช้ในโครงการ Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) ซึ่งเป็นโครงการทิ้งกากนิวเคลียร์ในเหมืองเกลือใต้ดินที่ประเทศดรูว์กี ตัวอย่างทั้งสองชนิดถูกทดสอบกดอัดจนกระทั่งได้ค่าความชื้นผ่านต่ำกว่า 10^{-18} m^2 ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของรัฐบาล ผลการทดสอบได้ข้อสรุปว่าเกลือหินบดผสมเบนทอนไนต์มีประสิทธิภาพดีกว่าเกลือหินบดเพียงอย่างเดียว การผสมเบนทอนไนต์ในเกลือหินบดมีข้อดีคือเบนทอนไนต์มีความสามารถในการดูดซับน้ำเกลือและสารกัมมันตภาพรังสี

Korthaus (1996) ได้ทดสอบการอัดตัวของเกลือหินบดในสภาวะแห้งด้วยเครื่องกด โดยให้ความเค้นแบบสามแกนจริง โดยมีการตรวจวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนตัวอย่างตามระยะเวลาที่ทำการทดสอบแล้วนำผลไปสอบเทียบหาค่าตัวแปรในสมการเชิงคณิตศาสตร์แบบยืดหยุ่นเชิงพลาสติก (Viscoplastic constitutive law) ในการทดสอบตัวอย่างจะอยู่ภายใต้ความเค้นในช่วง 2 ถึง 20 MPa มีค่าความพรุนเริ่มต้นประมาณ 0.25 และ 0.037 อุณหภูมิที่ทดสอบอยู่ในช่วง 21.5 องศาเซลเซียส ถึง 150 องศาเซลเซียส และมีการอัดตัวบนตัวอย่างด้วยอัตราการเกิดความเครียดเท่ากับ 10^{-9} และ 5×10^{-8} ต่อวินาที ซึ่งพบว่าทั้งค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดเชิงปริมาตรและความเครียดเบี่ยงเบน (Deviatoric deformation rate) ในเชิงเวลาที่ได้จากการทดสอบทั้งแบบที่มีความเค้นเท่ากันทุกทิศทาง (Hydrostatic) และแบบที่มีความเค้นเฉือนนั้นสามารถอธิบายด้วยสมการเชิงคณิตศาสตร์

Pudewills and Krauss (1999) ได้ศึกษาพฤติกรรมทางอุณหกลศาสตร์ (Thermomechanical) ของเกลือหินบดด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม ADINA โดยสมมติให้เกลือหินบดมีพฤติกรรมยืดหยุ่นแบบพลาสติก (Viscoplastic) ซึ่งแสดงในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีการพิจารณาทั้งอัตราการเกิดความเครียดเชิงปริมาตร (Volumetric strain) และอัตราการเกิดความเครียดเบี่ยงเบน (Deviatoric strain rate) บนตัวอย่างภายใต้สภาวะที่มีความเค้นเท่ากันทุกทิศทาง (Hydrostatic stress) และสภาวะที่เกิดความเค้นเฉือน สมการทางคณิตศาสตร์ที่เสนอโดย Hein (1991) ประกอบด้วย

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

$$h_1 = \frac{a}{[(\eta_0 / \eta)^c - 1] / \eta_0^c + d]^m} \quad (2)$$

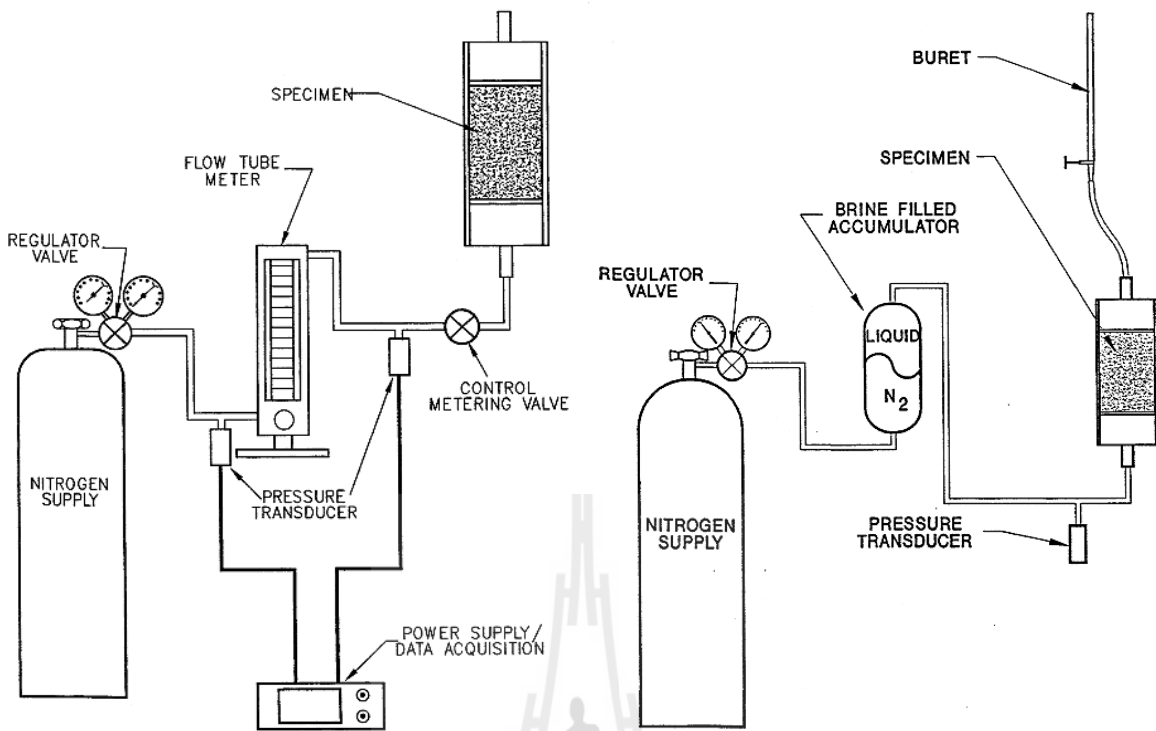
$$h_2(\eta) = b \cdot h_1(\eta) + 1 \quad (3)$$

เมื่อ $\dot{\epsilon}_{ij}$ คือความเครียดหลักที่เกิดขึ้น η คือความพรุน η_0 คือความพรุนเริ่มต้น T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ p คือค่าความเค้นตั้งฉากเฉลี่ย I คือหน่วย Tensor ของเมตริก Q คือพลังงานกระตุ้น R คือค่าคงที่ของแก๊ส q คือค่าความไม่ผันแปรของความเค้น S_{ij} คือ Tensor ของความเค้นเบี่ยงเบน A, a, b, c, d, m, n เป็นค่าคงที่ของสมการ และ Q/R มีค่าคงที่เท่ากับ 6520 K^{-1} จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Oedometer test) ด้วยอัตราการเกิดความเครียด $6.9 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ ให้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และผลการจำลองการอัดตัวแบบเพิ่มความเค้น

เป็น 3 ระดับ ระดับละ 15 วัน โดยการเทียบค่าความเครียดเฉลี่ยและค่าความพรุนที่เปลี่ยนไป ผลที่ได้จากการจำลองและการทดสอบพบว่ามีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี โดยผลการจำลองจะให้ค่าที่ต่ำกว่าเล็กน้อย

Mellegard et al. (1999) ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และค่าความซึมผ่านของตัวอย่างเกลือหินบดหลังจากทำการบดอัดด้วยการกระแทกด้วยตุ้มน้ำหนักเพื่อหาว่าความหนาแน่นของตัวอย่างขึ้นกับพลังงานที่ใช้ในการบดอัดอย่างไร และนำตัวอย่างไปทดสอบด้วยอัตราความเครียดคงที่และวัดค่าความซึมผ่านของตัวอย่างด้วยแก๊สและน้ำเกลือเข้มข้น (รูปที่ 2.1) นอกจากนี้ยังทดสอบการอัดตัวภายใต้แรงกดในสามแกนเพื่อศึกษาพฤติกรรมเชิงเวลาด้วยผลดังกล่าวได้นำไปสอบเทียบหาค่าตัวแปรในสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีผู้พัฒนาไว้แล้ว การศึกษาพบว่า การบดอัดยิ่งใช้ระยะตกของตุ้มน้ำหนักมาก (พลังงานสูง) จะทำให้ได้ความหนาแน่นของตัวอย่างสูงด้วย และค่าความซึมผ่านจะลดลงเมื่อความหนาแน่นของเกลือหินบดเพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึงช่องว่างลดลงและมีการต่อกันของช่องว่างน้อยลง

Jia et al. (2009) ได้ใช้โปรแกรม PFC2D เพื่อจำลองการอัดตัวของตัวอย่างดินและหินย่อยภายใต้การบดอัด โดยตัวอย่างที่จำลองจะถูกสมมติให้มีขนาดคละที่แตกต่างกันไป ในการจำลองได้วิเคราะห์หาค่าความพรุนและความหนาแน่นแห้งของดินและหินที่ผสมกัน โดยนำกราฟไปเทียบกับผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และมีการสังเกตลักษณะการเคลื่อนตัวของอนุภาคเกลือขณะที่มีการจำลองการบดอัด จากการศึกษาด้วยแบบจำลองในการนำดินผสมกับหินย่อยพบว่า มีคุณสมบัติที่ดีสำหรับนำไปใช้ในงานถมถนน การผสมหินย่อยกับดินจะทำให้การบดอัดดีกว่าใช้ดินเม็ดเล็กเพียงอย่างเดียว



(ก) การวัดค่าความซึมผ่านโดยใช้แก๊ส

(ข) การวัดค่าความซึมผ่านโดยใช้น้ำเกลือ

รูปที่ 2.1 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับวัดค่าความซึมผ่านของตัวอย่างโดยวิธีการใช้แก๊ส

(ก) และการใช้น้ำเกลือ (ข) (Mellegard et al., 1999)

บทที่ 3

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.1 วัตถุประสงค์

เนื้อหาในบทนี้อธิบายถึงขั้นตอน วิธีการ และข้อปฏิบัติในการจัดเตรียมตัวอย่างเกล็ดเกลือ วิธีการบด การคัดขนาดโดยการร่อนผ่านตะแกรง รวมถึงการเตรียมน้ำเกลืออิ่มตัวเพื่อใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

3.2 การเตรียมตัวอย่างเกล็ดเกลือ

ตัวอย่างเกล็ดหินทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบได้คัดเลือกมาจากการขุดเจาะเกลือหินชั้นกลาง (Middle salt) และเกลือหินชั้นล่าง (Lower salt) โดยได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัทเหมืองแร่โปแตชอาเซียน จำกัด อ.ป่าหน่จณรงค์ จ.ชัยภูมิ ซึ่งการเตรียมตัวอย่างเกล็ดเกลือมีขั้นตอนดังนี้

1) การบดเกล็ดเกลือ นำแท่งเกล็ดหินใส่ในเครื่องบด (2HP-4 POLES, Spec jis c-4004) ให้มีขนาดเล็กลง ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยเกล็ดหินที่ผ่านการบดมีขนาดไม่เกิน 4.75 มิลลิเมตร ซึ่งมีการจัดเตรียมเพื่อให้ได้น้ำหนักรวมประมาณ 100 กิโลกรัม สำหรับใช้ในการทดสอบ

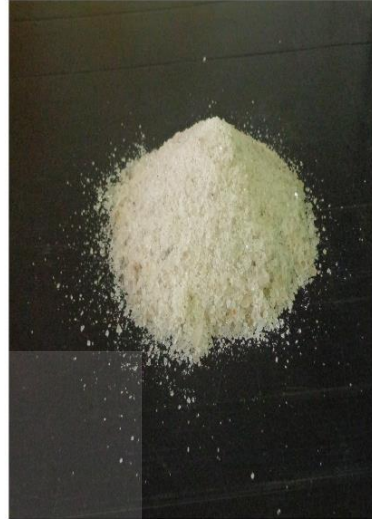
2) การหาค่าการกระจายตัวของขนาดเม็ดเกล็ดหินบด ทำได้ด้วยการนำเกล็ดหินบดไปร่อนผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 4, 8, 18, 40, 60, 100, 140 และ 200 ซึ่งมีขนาดช่องว่างตะแกรงเท่ากับ 4.76, 2.36, 1, 0.425, 0.25, 0.15, 0.106 และ 0.075 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากนั้นนำค่าน้ำหนักคงค้างบนตะแกรงและน้ำหนักผ่านตะแกรงมาคำนวณหาค่าการกระจายตัวของขนาดเม็ดเกลือ (Grain size analysis) แสดงดังรูปที่ 3.2

3) การหาค่าความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Brine content) โดยการผสมน้ำเกลือเข้มข้นเข้าไปในตัวอย่างเกล็ดหินบด และผันแปรระดับความชื้น (Brine content) ทั้งสิ้น 4 ระดับ คือ 2%, 4%, 6% และ 8% โดยน้ำหนัก ภายหลังจากคลุกเคล้าเข้ากับน้ำเกลือเข้มข้นเป็นอย่างดีแล้ว นำตัวอย่างไปกดอัดด้วยความเค้นก่อน (Pre-compressed) ที่ระดับเดียวกันคือ 4 MPa ในกระบอกสแตนเลส (รัศมีภายในเท่ากับ 54 มิลลิเมตร) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าการอัดตัวของตัวอย่างเกล็ดหินบดที่ความชื้นต่างกัน โดยพิจารณาจากค่าความหนาแน่นของตัวอย่างเกล็ดหินบดที่ถูกกดอัดด้วยความเค้นที่เท่ากันและในระยะเวลาที่เท่ากัน



บดตัวอย่างเกลือหิน

นำตัวอย่างเกลือหินที่บดแล้วไปร่อนผ่านตะแกรง



หมายเลขของตะแกรง
ที่ใช้หาค่าการกระจายตัวของเกลือหินบด

#4: 4.760 mm

#8: 2.360 mm

#18: 1.000 mm

#40: 0.426 mm

#60: 0.250 mm

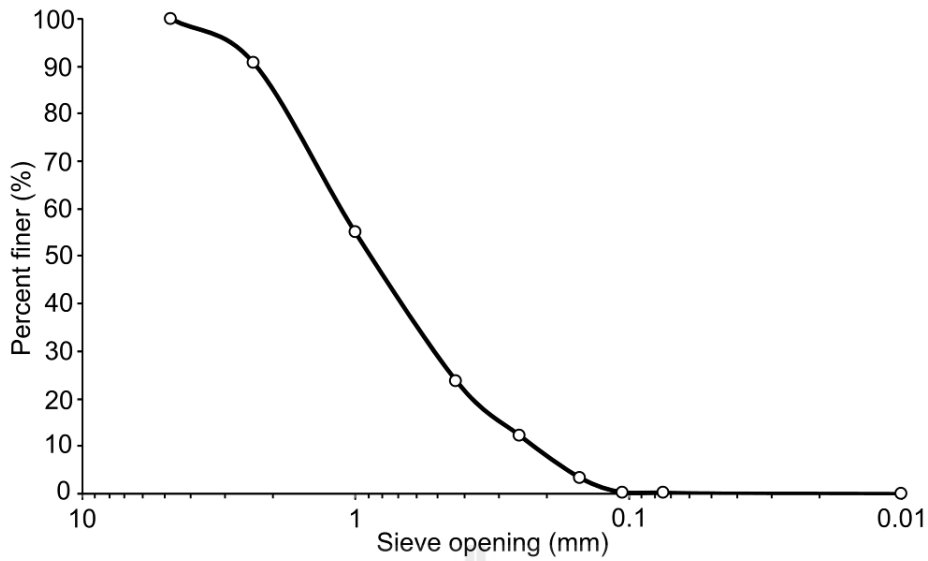
#100: 0.150 mm

#140: 0.106 mm

#200: 0.075 mm

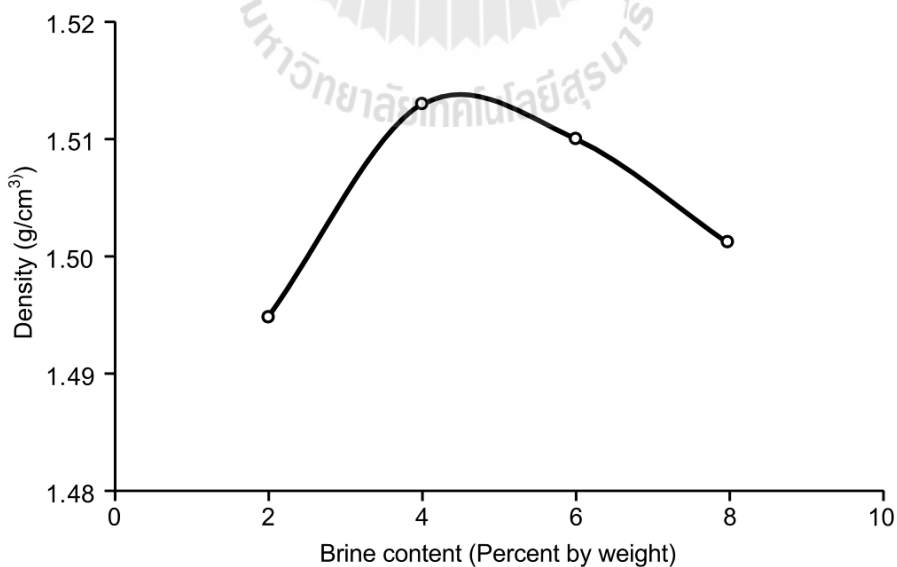
Pan

รูปที่ 3.1 การจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหินบดสำหรับใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 3.2 ค่าการกระจายตัวของขนาดเม็ดเกลือหิบบด

จากผลการทดสอบพบว่าค่าความชื้นที่ 4% และ 6% โดยน้ำหนัก ให้ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างเกลือหิบบดที่ใกล้เคียงกันและมีค่าสูงสุดดังแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของตัวอย่างเกลือหิบบดและค่าความชื้น (รูปที่ 3.3) ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เลือกค่าเฉลี่ยที่อยู่ในระหว่าง 4-6% ได้แก่ความชื้นที่ 5% โดยน้ำหนัก เป็นความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบต่อไป



รูปที่ 3.3 ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างเกลือหิบบด ที่กดอัดด้วยความเค้น 4 MPa เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.3 การเตรียมตัวอย่างน้ำเกลืออิ่มตัว

การเตรียมตัวอย่างน้ำเกลืออิ่มตัว (Saturated salt water) เพื่อนำไปใช้เป็นส่วนผสมในการทดสอบหาค่าความชื้นที่เหมาะสมดำเนินการดังนี้

1) นำเกลือบริสุทธิ์หรือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) น้ำหนัก 2.7 กิโลกรัม บดละเอียดผสมกับน้ำบริสุทธิ์ 5.4 กิโลกรัม ในถังพลาสติกขนาด 28×30×50 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.4 เพื่อให้ได้สัดส่วนเกลือต่อน้ำบริสุทธิ์มากกว่า 39:100 โดยน้ำหนัก (<http://en.wikipedia.org/wiki/Brine>)

2) ใช้แท่งพลาสติกคนสารละลายอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 20 นาที เปิดฝาทิ้งไว้ตลอดเวลาเพื่อให้เกิดการระเหยอย่างต่อเนื่อง จากนั้นสังเกตว่าเกล็ดเกลือไม่สามารถละลายต่อไปได้แล้ว แสดงว่าได้ตัวอย่างน้ำเกลืออิ่มตัวซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำเกลืออิ่มตัวดังตารางที่ 3.1

ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำเกลืออิ่มตัว สามารถคำนวณได้จากสมการ

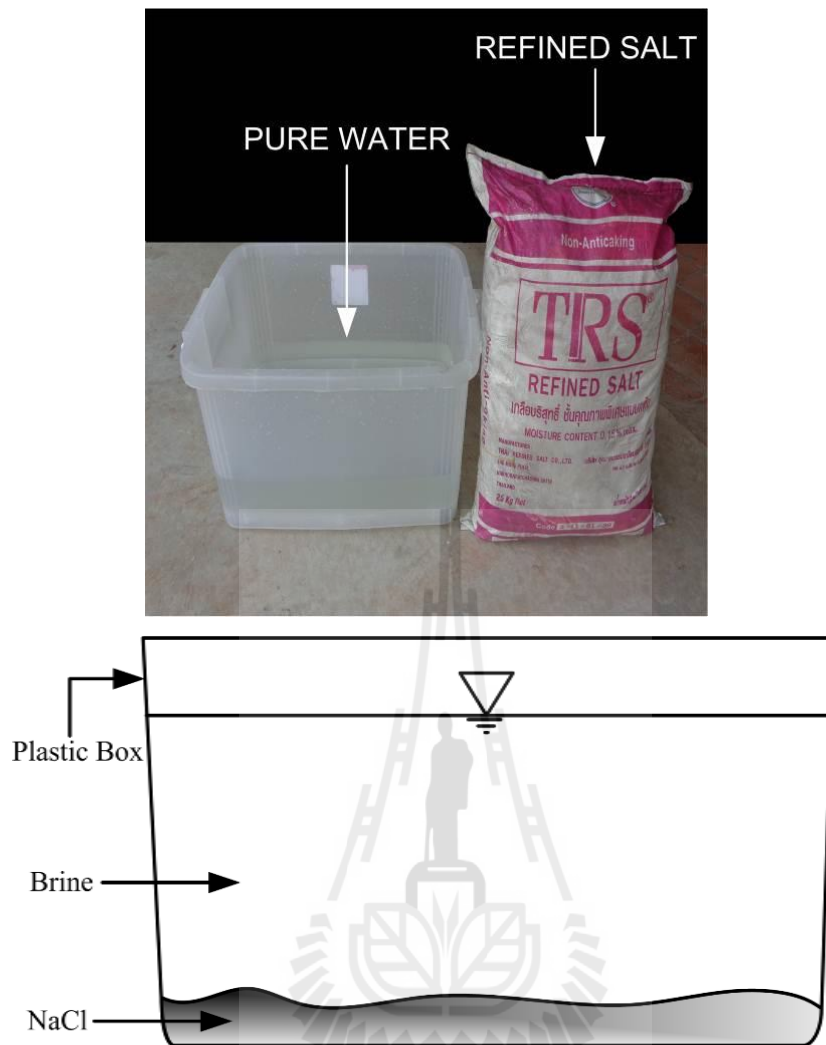
$$SG_B = \rho_{\text{Brine}} / \rho_{\text{H}_2\text{O}} \quad (3.1)$$

โดยที่

- SG_B = ความถ่วงจำเพาะของน้ำเกลืออิ่มตัว
- ρ_{Brine} = ความหนาแน่นของน้ำเกลืออิ่มตัว (วัดด้วยเครื่องไฮโดรมิเตอร์ (kg/m^3))
- $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ = ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3) เท่ากับ 1000 kg/m^3 ที่ความดัน บรรยากาศปกติ 1 atm

3.4 ผลที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบ

ผลที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบคือ น้ำเกลืออิ่มตัวดังได้อธิบายในหัวข้อก่อนหน้านี้และเกล็ดเกลือคละขนาดที่มีขนาดไม่เกิน 4.75 มิลลิเมตร ซึ่งวัสดุทั้งสองจะนำมาผสมกันที่ปริมาณความชื้น 5% โดยน้ำหนักเพื่อใช้ในการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ การทดสอบค่าความซึมผ่าน และการทดสอบค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดของตัวอย่างเกลือหินบดที่ถูกรัดแล้ว ซึ่งได้อธิบายในบทต่อไป



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างการเตรียมน้ำเกลืออิ่มตัว เพื่อใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 3.1 ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำเกลืออิ่มตัว

SG.	Temperature (องศาเซลเซียส)	References
1.2	25	Lab test
1.23	15	www.csgnetwork.com
1.2	20	http://Cheeseforum.org

บทที่ 4

การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

เนื้อหาในบทนี้ได้อธิบายขั้นตอน วิธีการ และข้อปฏิบัติในการทดสอบการอัดตัวของคาน้ำ การทดสอบค่าความชื้นผ่าน และการทดสอบหาค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวของตัวอย่างเกล็ดหินบดภายใต้สภาวะความเค้นในแนวแกนต่างกัน 4 ระดับ คือ 2.5, 5, 7.5 และ 10 MPa ที่อุณหภูมิระหว่าง 30–100 องศาเซลเซียส (303.15–373.15 Kelvin) พร้อมทั้งเสนอสมการที่ใช้สำหรับการคำนวณผลการทดสอบ ซึ่งการทดสอบนี้เป็นการจำลองการใช้เกล็ดหินบดผสมน้ำเกล็ดเข้มข้นอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและการเลือกวัสดุผสมกลับในช่องว่างหรือตามช่องทางเดินของเหมืองใต้ดินภายใต้สภาวะความเค้นและอุณหภูมิต่างๆ และประเมินคุณสมบัติ พฤติกรรม ตลอดจนเสถียรภาพของวัสดุผสมกลับในระยะยาว

4.1 การทดสอบการอัดตัวของคาน้ำ

4.1.1 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของการทดสอบการอัดตัวของคาน้ำคือ ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและความเค้นกดบนตัวอย่างเกล็ดหินบดต่อพฤติกรรมการลดลงของปริมาตรช่องว่าง การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่น (Density) และการเพิ่มขึ้นของค่าความเครียดตามแนวแกนของตัวอย่างเกล็ดหินบด โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรช่องว่าง ค่าความหนาแน่น และค่าความเครียดตามแนวแกนกับเวลา ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความเค้นในแนวแกนบนตัวอย่างเกล็ดหินบดที่ต่างกัน

4.1.2 การจัดเตรียมตัวอย่าง

การจัดเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบการอัดตัวของคาน้ำ แบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) เตรียมตัวอย่างเกล็ดหินบด (ดังที่อธิบายไว้ในบทที่ 3) น้ำหนัก 1,000 กรัม ใส่ลงในถังพลาสติกขนาด 18×23×35 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- 2) เติมน้ำเกล็ดอิมิตัวจำนวน 50 กรัม เพื่อใช้ผสมกับเกล็ดหินบดที่เตรียมไว้ให้ได้อัตราส่วนร้อยละ 5 ของน้ำหนักเกล็ดหินบด

3) ผสมเกลือหินบดเข้ากับน้ำเกลืออิ่มตัว ด้วยการตวงน้ำเกลืออิ่มตัวใส่ในขวดสเปรย์ แล้วฉีดเพื่อคลุกเคล้าให้เข้ากันในถังผสมดังรูปที่ 4.1

4) เมื่อเกลือหินบดผสมคลุกเคล้าเข้ากันกับน้ำเกลืออิ่มตัวแล้ว จากนั้นบรรจุตัวอย่างใส่ลงในกระบอกทดสอบที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 54 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 64 มิลลิเมตร ความยาวของกระบอกเท่ากับ 200 มิลลิเมตร มีปากกดตัวอย่างที่ด้านหัวและท้ายของกระบอก โดยปากกดตัวอย่างมีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 53 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร ทำหน้าที่ส่งแรงกดให้กับตัวอย่างและระบายน้ำเกลือออกจากตัวอย่างผ่านทางรูเจาะขนาด 10 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3

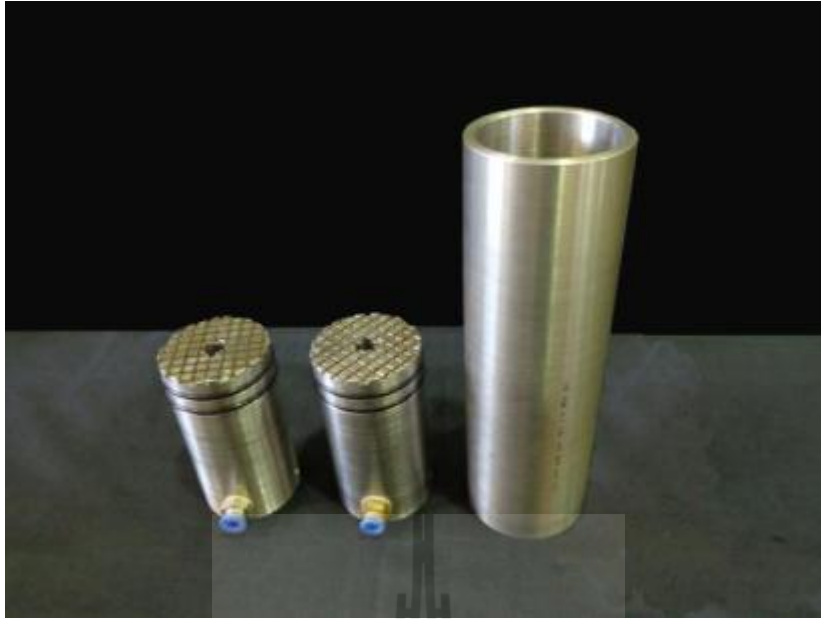
5) อัดตัวอย่างเกลือหินบดเบาๆ ด้วยแท่งเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 50 มิลลิเมตร ยาว 220 มิลลิเมตร ลงในกระบอกทดสอบเพื่อให้เกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และลดช่องว่างระหว่างเม็ดเกลือหินบดในเบื้องต้นดังรูปที่ 4.4

6) ติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัว (Dial gage) และอุปกรณ์ให้แรงกดในแนวแกน สำหรับการทดสอบที่สภาวะอุณหภูมิห้องดังรูปที่ 4.5

7) ติดตั้งอุปกรณ์ให้ความร้อนสำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิ 65 และ 100 องศาเซลเซียส ด้วยการพันเทปให้ความร้อน (Heating tape) รอบกระบอกทดสอบแล้วหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนออกจากตัวอย่าง จากนั้นบรรจุตัวอย่างเกลือหินบดที่ผสมคลุกเคล้าเข้ากันกับน้ำเกลืออิ่มตัวลงในกระบอกทดสอบที่มีการพันเทปให้ความร้อน ดังรูปที่ 4.6 และ รูปที่ 4.7 เพื่อทำการกดทดสอบในลำดับต่อไป



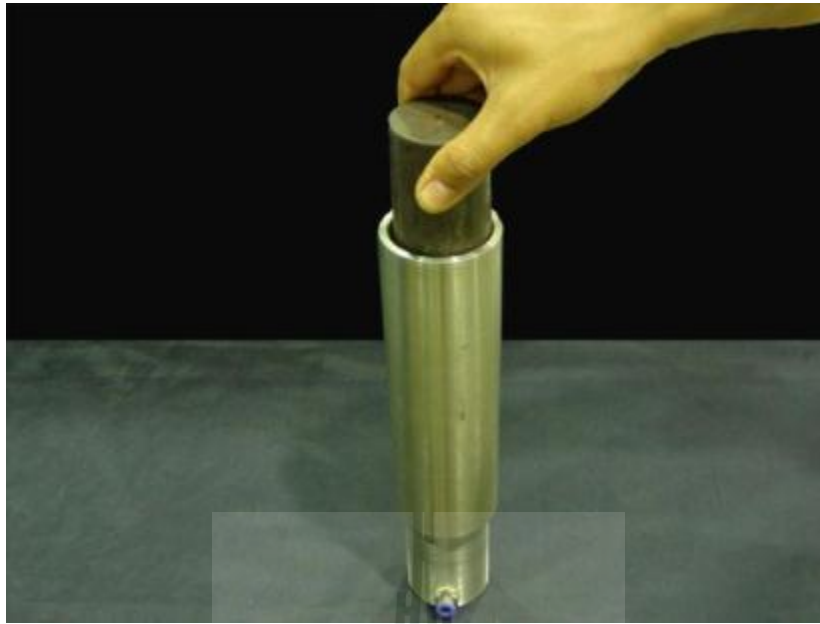
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างเกลือหินบดผสมกับน้ำเกลือเข้มข้นก่อนทำการทดสอบ (ปริมาณน้ำเกลือที่ใช้คือ 5% โดยน้ำหนัก)



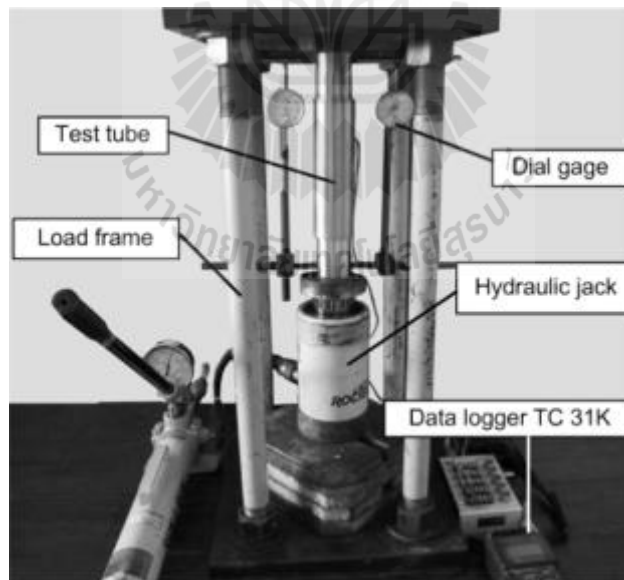
รูปที่ 4.2 ชุดอุปกรณ์สำหรับทดสอบประกอบด้วย กระจกทดสอบและเบ้าทดสอบ



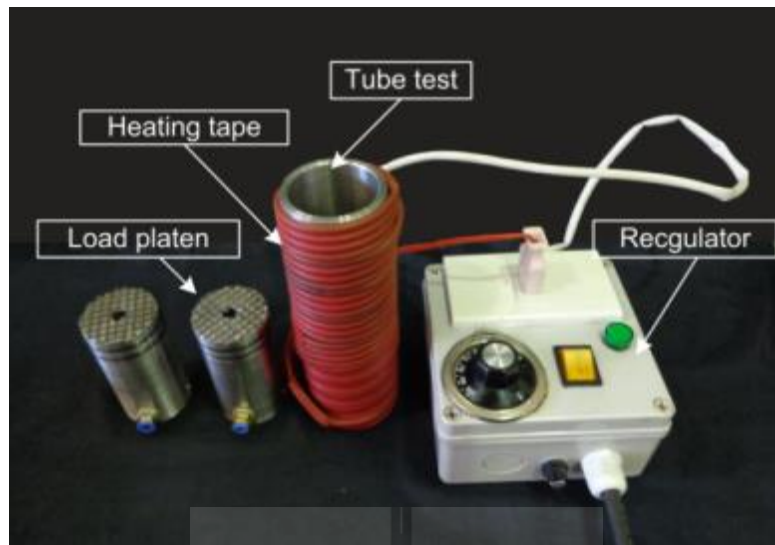
รูปที่ 4.3 บรรจุตัวอย่างเกลือหินบดที่ผสมกับน้ำเกลืออิ่มตัวลงในกระจกทดสอบ



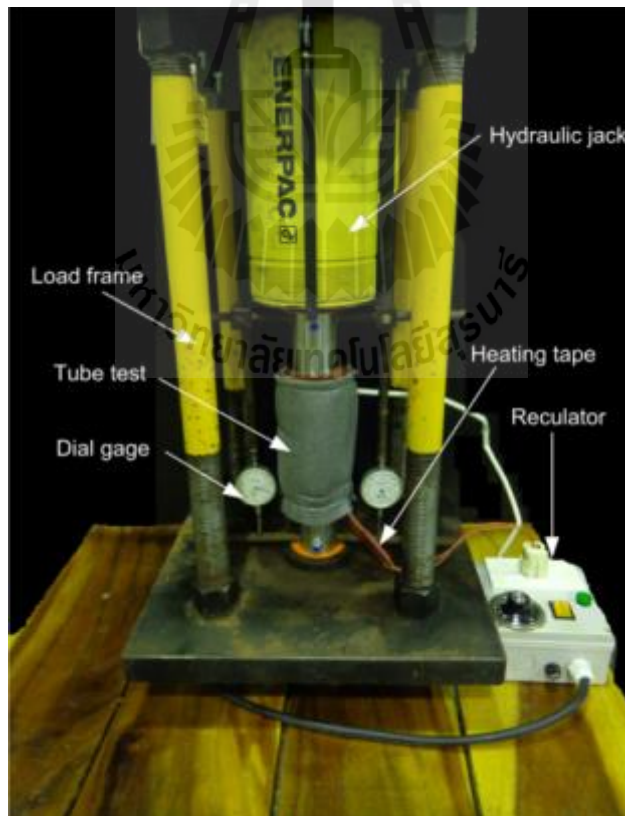
รูปที่ 4.4 อัดตัวอย่างเบาๆ ด้วยแท่งเหล็กเพื่อให้เกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและลดช่องว่างระหว่างเม็ดเกลือ



รูปที่ 4.5 การติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวและเครื่องให้แรงในแนวแกนสำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 4.6 อุปกรณ์ทดสอบที่อุณหภูมิ 65 และ 100 องศาเซลเซียส ประกอบด้วย สายเทปให้ความร้อน ชุดควบคุมอุณหภูมิ สายพันให้ความร้อน และเครื่องควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ 4.7 การติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวและเครื่องให้แรงในแนวแกนสำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิ 65 และ 100 องศาเซลเซียส

4.1.3 วิธีการทดสอบ

การทดสอบการอัดตัวของตัวอย่างเกลือหินบดภายใต้สภาวะความเค้นกดในแนวแกนและอุณหภูมิที่ต่างกัน สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ คือ

1) การทดสอบการอัดตัวของตัวอย่างเกลือหินบดภายใต้สภาวะความเค้นกดในแนวแกนและอุณหภูมิคงที่

นำตัวอย่างที่ได้จากการจัดเตรียมตัวอย่างมาทำการทดสอบเพื่อหาค่าการลดลงของปริมาตรช่องว่าง การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่น และการเพิ่มขึ้นของค่าความเครียดตามแนวแกนของตัวอย่างเกลือหินบดภายใต้ความเค้นกดในแนวแกนและอุณหภูมิคงที่เชิงเวลา แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

- (1) นำกระบอกทดสอบที่บรรจุตัวอย่างเกลือหินบดผสมน้ำเกลืออิ่มตัวในอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และปิดหัวท้ายกระบอกด้วยเบ้ากดเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ติดตั้งเข้ากับเครื่องให้แรงกดในแนวแกน ซึ่งให้แรงกดจากปั๊มไฮดรอลิกส่งผ่านเบ้ากดไปยังตัวอย่างเกลือหินบดภายในกระบอกทดสอบดังรูปที่ 4.5
- (2) กดอัดตัวอย่างเกลือหินบดที่อยู่ในกระบอกตามระยะเวลาการทดสอบของแต่ละตัวอย่างการทดสอบ คือ 3, 5, 7 และ 15 วัน ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) ด้วยความเค้นกดในแนวแกนคงที่ต่างกัน 4 ความเค้น คือ 2.5, 5, 7.5 และ 10 MPa ตลอดระยะเวลาการทดสอบของแต่ละตัวอย่างการทดสอบ
- (3) ทำการวัดค่าการทรุดตัวในแนวตั้งเชิงเวลา เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่น อัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตร และค่าความเครียดตามแนวแกนจากสมการที่ 4.1 ถึงสมการที่ 4.4

2) การทดสอบการอัดตัวของตัวอย่างเกลือหินบดภายใต้สภาวะความเค้นกดในแนวแกนคงที่ผันแปรอุณหภูมิ (ทำการผันแปรอุณหภูมิ 2 ระดับ คือ 65 และ 100 องศาเซลเซียส) สามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

- (1) นำกระบอกทดสอบที่พันด้วยเทปให้ความร้อนและบรรจุตัวอย่างเกลือหินบดผสมน้ำเกลืออิ่มตัวในอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ปิดหัวท้ายกระบอกด้วยเบ้ากดเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ติดตั้งเข้ากับเครื่องให้แรงกดในแนวแกน ซึ่งให้แรงกดจากปั๊มไฮดรอลิกส่งผ่านเบ้ากดไปยังตัวอย่างเกลือหินบดภายในกระบอกทดสอบดังรูปที่ 4.7

- (2) กัดอัดตัวอย่างเกลือหินบดที่อยู่ในกระบอกลบเป็นระยะเวลา 7 วัน ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) ด้วยความเค้นกดในแนวแกนคงที่ 10 MPa หลังจากนั้นได้ทำการปรับอุณหภูมิเป็น 65 องศาเซลเซียส แล้วกัดอัดต่อไปจนครบระยะเวลา 15 วัน
- (3) สำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ได้ทำการกัดอัดตัวอย่างเกลือหินบดที่อยู่ในกระบอกลบเป็นระยะเวลา 7 วัน ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง ด้วยความเค้นกดในแนวแกนคงที่ 10 MPa หลังจากนั้นได้ทำการปรับอุณหภูมิเป็น 100 องศาเซลเซียส แล้วกัดอัดต่อไปจนครบระยะเวลา 15 วัน
- (4) ทำการวัดค่าการทรุดตัวในแนวตั้งเชิงเวลา เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่น อัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตร และค่าความเครียดตามแนวแกนโดยใช้สมการที่ 4.1 ถึงสมการที่ 4.4

3) การทดสอบการอัดตัวคายน้ำที่สภาวะอุณหภูมิคงที่ผันแปรความเค้นกดในแนวแกน (ทำการผันแปรความเค้นกดในแนวแกน 4 ระดับ คือ 2.5, 5, 7.5 และ 10 MPa ที่อุณหภูมิคงที่ 2 อุณหภูมิ คือ อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส) สามารถแบ่งได้ 4 ขั้นตอน ดังนี้

- (1) นำกระบอกลบที่บรรจุตัวอย่างเกลือหินบดผสมน้ำเกลืออิ่มตัวในอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และปิดหัวท้ายกระบอกลบด้วยเบ้ากดเป็นที่เรียบร้อยแล้วติดตั้งเข้ากับเครื่องให้แรงกดในแนวแกน ซึ่งให้แรงกดจากปั๊มไฮดรอลิกส่งผ่านเบ้ากดไปยังตัวอย่างเกลือหินบดภายในกระบอกลบทดสอบดังรูปที่ 4.5
- (2) กัดอัดตัวอย่างเกลือหินบดที่อยู่ในกระบอกลบที่สภาวะอุณหภูมิห้อง ด้วยความเค้นกดในแนวแกนเริ่มต้น 2.5 MPa เป็นระยะเวลา 5 วัน จากนั้นผันแปรความเค้นกดในแนวแกนโดยเพิ่มขึ้นเป็น 5, 7.5 และ 10 MPa ทุกๆ 5 วัน ตามลำดับ จนครบ 4 ระดับความเค้น
- (3) สำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส มีการกัดอัดตัวอย่างเกลือหินบดที่อยู่ในกระบอกลบที่สภาวะอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ด้วยความเค้นกดในแนวแกนเริ่มต้น 2.5 MPa เป็นระยะเวลา 5 วัน จากนั้นผันแปรความเค้นกดในแนวแกนโดยเพิ่มขึ้นเป็น 5, 7.5 และ 10 MPa ทุกๆ 5 วัน ตามลำดับ เช่นเดียวกับการทดสอบที่อุณหภูมิห้องจนครบ 4 ระดับความเค้น
- (4) ทำการวัดค่าการทรุดตัวในแนวตั้งเชิงเวลา เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่น อัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตร และค่าความเครียดตามแนวแกนโดยใช้สมการที่ 4.1 ถึงสมการที่ 4.4

4.1.4 วิธีการคำนวณผลการทดสอบ

การคำนวณค่าความเครียดตามแนวแกนที่เกิดขึ้นในตัวอย่างเกลือหินบดสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (4.1)$$

โดยที่ ε คือค่าความเครียดตามแนวแกน ΔL คือความยาวของตัวอย่างเกลือหินบดที่เปลี่ยนแปลงไป และ L คือความยาวของตัวอย่างเกลือหินบดเริ่มต้น สำหรับการคำนวณค่าความหนาแน่นของตัวอย่างเกลือหินบดสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4.2)$$

โดยที่ ρ คือความหนาแน่น (g/cc) m คือมวล (g) และ V คือปริมาตร (cc) ค่าอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรในตัวอย่างเกลือหินบดสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$e_0 = \frac{v_0 \rho}{m_0} - 1 \quad (4.3)$$

โดยที่ e_0 คืออัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรเบื้องต้น v_0 คือปริมาตรเริ่มต้น ρ คือความหนาแน่นแห้ง และ m_0 คือมวลของเกลือหินบดเริ่มต้น เมื่อเวลาเปลี่ยนไปปริมาตรของตัวอย่างเกลือหินบดลดลง สามารถคำนวณค่าอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรที่เปลี่ยนไปตามเวลาได้จากสมการ

$$\Delta e = e_t - e_0 \quad (4.4)$$

โดยที่ Δ คืออัตราส่วนของช่องว่างต่อปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไป e_t คืออัตราส่วนของช่องว่างที่เวลาเท่ากับ t และ e_0 คืออัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรเบื้องต้น

4.2 การทดสอบค่าความซึมผ่าน

4.2.1 วัตถุประสงค์

เพื่อเปรียบเทียบค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพ (Intrinsic permeability) ของตัวอย่างเกลือหินบดผสมน้ำเกลือเข้มข้นอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยวัดอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนผ่านตัวอย่างเกลือหินบดที่ถูกกดอัดเป็นระยะเวลา 3, 5, 7, 10 และ 15 วัน ภายใต้สภาวะความเค้นกดในแนวแกนและอุณหภูมิที่ต่างกัน 3 รูปแบบการทดสอบ คือ

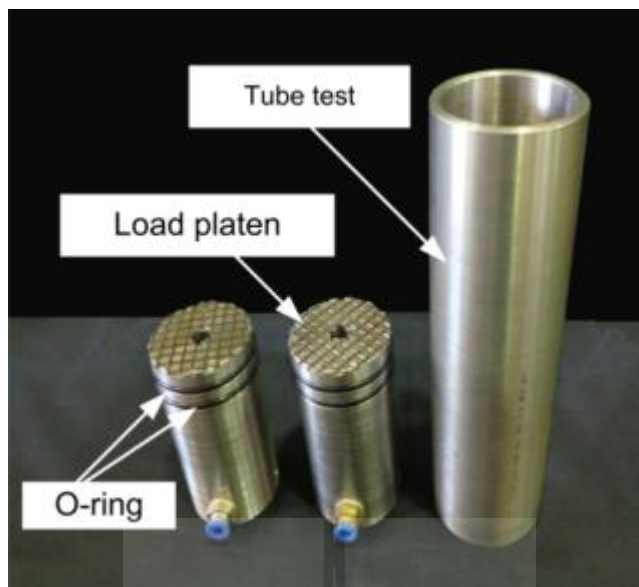
- 1) การทดสอบค่าความซึมผ่านที่สภาวะความเค้นกดในแนวแกนและอุณหภูมิตั้งที่
- 2) การทดสอบค่าความซึมผ่านที่สภาวะความเค้นกดในแนวแกนคงที่ผันแปรอุณหภูมิตั้งที่
- 3) การทดสอบค่าความซึมผ่านที่สภาวะอุณหภูมิตั้งที่ผันแปรความเค้นกดในแนวแกน

ด้วยการวัดอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนผ่านตัวอย่างเกลือหินบดทุกๆ 6 ชั่วโมง จนกระทั่งครบระยะเวลาการกักตัวของแต่ละตัวอย่างการทดสอบ แล้วทำการคำนวณออกมาเป็นค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพที่ลดลงตามเวลา

4.2.2 การจัดเตรียมตัวอย่าง

การจัดเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพมี 6 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) เตรียมตัวอย่างเกลือหินบด (ดังที่อธิบายไว้ในบทที่ 3) หนัก 1,000 กรัม ใส่ลงในถังพลาสติกขนาด 18×23×35 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- 2) เตรียมน้ำเกลืออิ่มตัวจำนวน 50 กรัม เพื่อใช้ผสมกับเกลือหินบดที่เตรียมไว้ให้ได้อัตราส่วนร้อยละ 5 ของน้ำหนักเกลือหินบด
- 3) ผสมเกลือหินบดเข้ากับน้ำเกลืออิ่มตัว ด้วยการตวงน้ำเกลืออิ่มตัวใส่ในขวดสเปรย์ แล้วฉีดเพื่อคลุกเคล้าให้เข้ากันในถังผสม
- 4) เมื่อเกลือหินบดผสมคลุกเคล้าเข้ากันกับน้ำเกลืออิ่มตัวแล้ว จากนั้นบรรจุตัวอย่างใส่ลงในกระบอกทดสอบที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 54 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 64 มิลลิเมตร ความยาวของกระบอกเท่ากับ 200 มิลลิเมตร มีเบ้ากดตัวอย่างที่ด้านหัวและท้ายของกระบอก โดยเบ้ากดตัวอย่างมีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 53 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร ทำหน้าที่ส่งแรงกดให้กับตัวอย่างและระบายน้ำเกลือออกจากตัวอย่างผ่านทางรูเจาะขนาด 10 มิลลิเมตร ซึ่งรูเจาะดังกล่าวนี้ใช้เป็นรูสำหรับต่อกับสายอัดก๊าซไนโตรเจน เพื่อทดสอบอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนผ่านตัวอย่างเกลือหินบด และมีการติดแหวนยางรูปวงกลม (O-ring) 2 ตัวที่เบ้ากดตัวอย่างเพื่อป้องกันก๊าซไนโตรเจนรั่วออกบริเวณช่องว่างด้านข้างระหว่างเบ้ากดตัวอย่างกับกระบอกทดสอบดังรูปที่ 4.8
- 5) ระหว่างที่บรรจุเกลือหินบดลงในกระบอกทดสอบ ทำการอัดตัวอย่างเบื้องต้นด้วยแท่งเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 50 มิลลิเมตร ยาว 220 มิลลิเมตร ลงในกระบอกทดสอบเพื่อให้เกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและลดช่องว่างระหว่างเกล็ดเกลือ



รูปที่ 4.8 ชุดอุปกรณ์ทดสอบค่าความซึมผ่าน ประกอบด้วยกระบอกทดสอบและเบ้ากดทดสอบที่มีการติดตั้งแหวนยางรูปวงกลม (O-ring)

6) ติดตั้งอุปกรณ์ให้ความร้อนสำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิ 65 และ 100 องศาเซลเซียส ด้วยการพันเทปให้ความร้อนรอบกระบอกทดสอบแล้วหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนออกจากตัวอย่าง

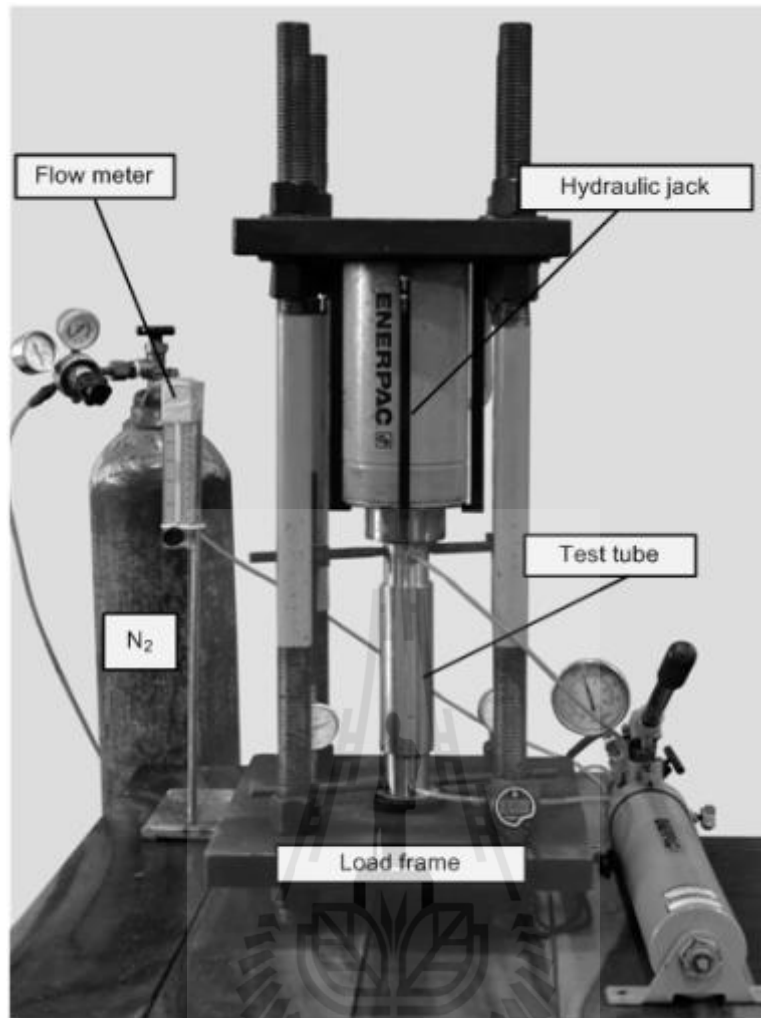
4.2.3 วิธีการทดสอบ

นำตัวอย่างที่ได้จากการจัดเตรียมตัวอย่างมาทำการทดสอบเพื่อหาค่าความซึมผ่านโดยการวัดอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนผ่านตัวอย่างเกลือหินบด ซึ่งมี 6 ชั้นตอนดังนี้

1) นำกระบอกทดสอบที่บรรจุตัวอย่างเกลือหินบดผสมน้ำเกลืออิ่มตัวในอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และปิดหัวท้ายกระบอกด้วยเบ้ากดเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ติดตั้งเข้ากับเครื่องให้แรงกดในแนวแกน ซึ่งให้แรงกดจากปั๊มไฮดรอลิกส่งผ่านเบ้ากดไปยังตัวอย่างเกลือหินบดภายในกระบอกทดสอบดังรูปที่ 4.9

2) กดอัดตัวอย่างเกลือหินบดที่อยู่ในกระบอกตามระยะเวลาการทดสอบ คือ 3, 5, 7, 10 และ 15 วัน ที่สภาวะความเค้นกดและอุณหภูมิต่างกันทั้ง 3 รูปแบบการทดสอบ (ตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.2.1)

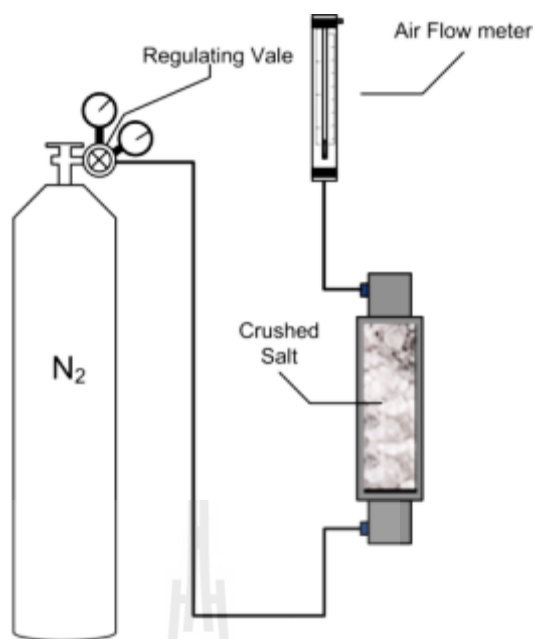
3) ทำการวัดค่าการทรุดตัวในแนวตั้งเชิงเวลา เพื่อนำไปคำนวณหาค่าปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาในการกดอัด



รูปที่ 4.9 การทดสอบวัดค่าความซึมผ่าน

4) วัดค่าอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนผ่านตัวอย่างเกลือหินบดทุกๆ 6 ชั่วโมง โดยทำการติดตั้งชุดกระบอกทดสอบและเบ้ากดทดสอบตัวอย่างที่กำลังทำการกดอัดตัวอย่างอยู่ เข้ากับชุดอุปกรณ์ทดสอบค่าความซึมผ่าน โดยต่อสายยางทนแรงดันจากเบ้ากดด้านบนเข้ากับเครื่องวัดอัตราการไหล (Flow meter) และต่อเบ้ากดทดสอบด้านล่างเข้ากับวาล์วควบคุมแรงดัน จากถังแก๊สไนโตรเจนด้วยสายยางทนแรงดันชนิดและขนาดเดียวกันดังรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10

5) เปิดวาล์วควบคุมความดันเพื่อให้แก๊สไหลเข้าสู่ระบบ โดยใช้แรงดัน 2 ระดับคือ 10 และ 20 Psi ทำการอ่านค่าอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนผ่านตัวอย่างเกลือหินบดจากเครื่องวัดอัตราการไหล บันทึกค่าอัตราการไหลและคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของตัวอย่างเกลือหินบดที่ระยะเวลาต่างกันจากสมการที่ 4.5 ถึงสมการที่ 4.7



รูปที่ 4.10 แผนภูมิแสดงอุปกรณ์การทดสอบค่าความซึมผ่าน

6) เมื่อวัดค่าอัตราการไหลในแต่ละครั้งแล้วเสร็จ ทำการถอดสายยางทนแรงดันออกจากปากทดสอบทั้งสองเป่า และเมื่อครบกำหนดทุก 6 ชั่วโมง ทำการติดตั้งและวัดค่าอัตราการไหลซ้ำตามขั้นตอนที่ 4 ถึงขั้นตอนที่ 6 จนกระทั่งครบระยะเวลาการทดสอบค่าความซึมผ่านแต่ละตัวอย่างการทดสอบ

4.2.4 การคำนวณผลการทดสอบ

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.5 ถึงสมการที่ 4.7 โดยคำนวณหาค่าความสูงที่ต่างกัน (Δh) เพื่อนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านดังสมการ

$$\Delta h = \frac{\Delta P}{\gamma_f} \quad (4.5)$$

โดยที่ Δh คือระดับความสูงที่ต่างกัน (m) ΔP คือความดันที่ต่างกันของจุดต้นและจุดปลาย (kPa) และ γ_f คือน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรของก๊าซไนโตรเจน (kN/m^3) การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (Hydraulic Conductivity) สามารถคำนวณได้จากการแทนค่าอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่อ่านได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลโดยใช้สมการ

$$Q = KA \left(\frac{\Delta h}{L} \right)$$

หรือ
$$K = \frac{QL}{\Delta h A} \quad (4.6)$$

โดยที่ K คือสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (m/s) Q คืออัตราการไหล (m^3/s) L คือระยะทางการซึมผ่าน (m) A คือพื้นที่หน้าตัดของการไหล (m^2) และ Δh คือระดับความสูงที่ต่างกันของจุดต้นและจุดปลาย (m)

แทนค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านที่ได้จากสมการ 4.6 เพื่อหาค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพดังสมการ

$$k = \frac{K \mu}{\gamma_f} \quad (4.7)$$

โดยที่ k คือความซึมผ่านเชิงกายภาพ (m^2) และ μ คือความหนืดจลน์ (Pa·s)

4.3 การทดสอบกำลังกดสูงสุดในแกนเดียว

4.3.1 วัตถุประสงค์

การทดสอบกำลังกดในแกนเดียว (Uniaxial compression test) เป็นการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังกดหรือความเค้นกดสูงสุดในแกนเดียว (Uniaxial compressive strength) และหาค่า Poisson's ratio ของตัวอย่างเกลือหินบดหลังจากที่ถูกรัดอัดภายใต้สภาวะความเค้นกดในแนวแกนและอุณหภูมิต่างๆ ตามแต่ละรูปแบบการทดสอบ

4.3.2 การจัดเตรียมตัวอย่าง

การจัดเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังกดสูงสุดมี 5 ขั้นตอน ดังนี้

1) เมื่อทำการกดอัดตัวอย่างเกลือหินบดในกระบอกทดสอบด้วยความเค้นกดในแนวแกนภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่แปรผัน จนครบระยะเวลาที่กำหนดตามแต่ละรูปแบบการทดสอบแล้ว จากนั้นจึงนำกระบอกทดสอบที่มีตัวอย่างเกลือหินบดบรรจุอยู่ภายในออกจากเครื่องให้แรงกด

2) นำตัวอย่างเกลือหินบดที่ผ่านการกดอัดครบระยะเวลาที่กำหนดแล้วออกจากกระบอกทดสอบด้วยปั๊มไฮดรอลิก โดยการใช้แท่งเหล็กทรงกระบอกตัน (Load platen) ขนาด

เส้นผ่าศูนย์กลาง 52 มิลลิเมตร ยาว 220 มิลลิเมตร ทำหน้าที่ส่งแรงดันสำหรับต้นตัวอย่างเกลื่อหีบดออกจากกระบอกเพื่อนำไปทดสอบกำลังกดสูงสุดในแกนเดียวต่อไป ดังรูปที่ 4.11

3) เมื่อได้ตัวอย่างเกลื่อหีบดที่ต้นออกจากกระบอกแล้ว ดังรูปที่ 4.12 ให้ทำการชั่งน้ำหนัก วัดขนาดความยาวและเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างเกลื่อหีบดแล้วจดบันทึก

4) ทำการปรับแต่งด้านหัวท้ายของตัวอย่างเล็กน้อย เพื่อให้หัวและท้ายของตัวอย่างขนานกันและตั้งฉากกับแนวแกนของตัวอย่างทดสอบ จากนั้นทำการชั่งน้ำหนัก วัดขนาดความยาวและเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างเกลื่อหีบดก่อนทำการทดสอบกำลังกดสูงสุดในแกนเดียวอีกครั้งแล้วจดบันทึกไว้ เพื่อใช้เป็นค่าความยาวและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเริ่มต้นสำหรับคำนวณค่าความเครียด และค่าอัตราส่วน Poisson's ratio ของตัวอย่างเกลื่อหีบดต่อไป

5) ทำการเตรียมตัวอย่างเหมือนข้อ 1-4 ตามลำดับ ทุกตัวอย่างการทดสอบ

4.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

อุปกรณ์สำหรับการทดสอบกำลังกดสูงสุดในแกนเดียวประกอบด้วย

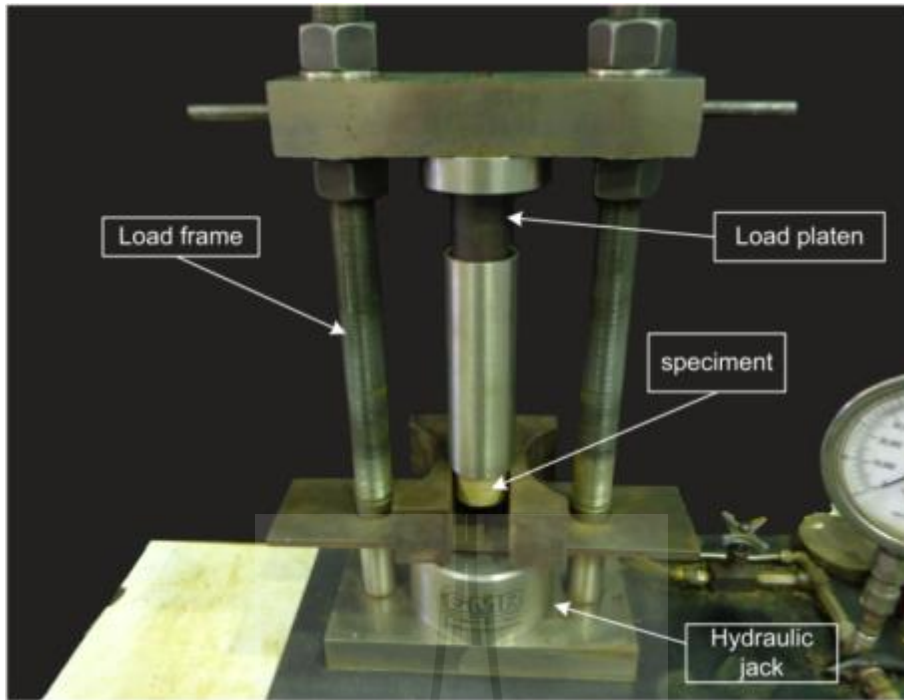
- 1) ชุดโครงกดทดสอบ
- 2) ปืนไฮดรอลิกสำหรับให้แรงกดในแนวแกน
- 3) มาตรการเคลื่อนตัวในแนวแกนและแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง

โดยขณะที่ทำการทดสอบมีการตรวจวัดขนาดของตัวอย่างเกลื่อหีบดที่เปลี่ยนแปลงไปตามการเพิ่มขึ้นของแรงกด ทั้งการเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวในแนวแกน (Axial displacements) และการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่าง (Diametric displacements) ด้วยมาตรการเคลื่อนตัว เพื่อนำไปคำนวณค่าความเครียดและอัตราส่วน Poisson's ratio ของตัวอย่างเกลื่อหีบดต่อไป

4.3.4 วิธีการทดสอบ

การทดสอบกำลังกดในแกนเดียวเพื่อหาค่ากำลังกดสูงสุดของเกลื่อหีบดมี 6 ขั้นตอน ดังนี้

1) นำตัวอย่างที่ผ่านการกดอัดด้วยการอัดตัวคายน้ำที่ความเค้นกดในแนวแกน และระยะเวลาการอัดตัวภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่กำหนดของแต่ละรูปแบบการทดสอบทุกตัวอย่างการทดสอบ (อธิบายในหัวข้อ 4.1) มาทำการชั่งน้ำหนัก วัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง และขนาดความยาวของตัวอย่าง แล้วบันทึกข้อมูล



รูปที่ 4.11 การดันตัวอย่างเกลื่อหินบดที่ผ่านการกดอัดแล้วออกจากกระบอกทดสอบด้วย Load Platen



รูปที่ 4.12 ตัวอย่างเกลื่อหินบดที่ถูกดันออกจากกระบอก

2) ประกอบอุปกรณ์สำหรับการทดสอบกำลังกดสูงสุดในแกนเดียว พร้อมทั้งติดตั้งตัวอย่างเกลื่อหินบดเพื่อทำการทดสอบกำลังกดสูงสุดในแกนเดียว ดังรูปที่ 4.13

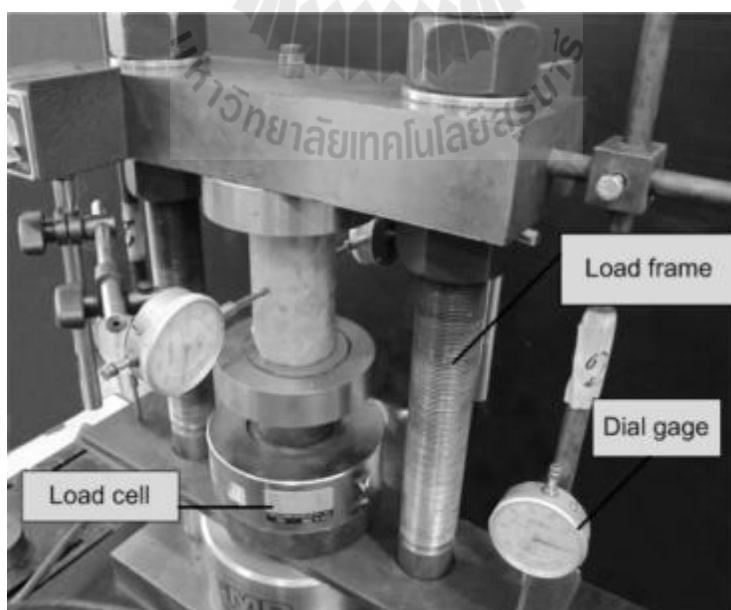
3) ติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัวในแนวแกนและแนวเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่าง เพื่อวัดระยะการเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างเกลื่อหินบด ที่เปลี่ยนแปลงขณะทำการทดสอบ

4) ให้แรงกดในแนวแกนด้วยปั๊มไฮดรอลิก โดยให้แรงกดตัวอย่างในแนวแกนด้วยอัตรา 0.5–1.0 MPa/second อ่านค่าแรงกดที่เพิ่มขึ้นจากเครื่องอ่านค่าอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic load cell) ทุกๆ 0.5 MPa พร้อมทั้งค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของตัวอย่างทั้งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในแนวแกนและเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างเกลื่อหินบดจากมาตรวัดการเคลื่อนตัวที่มีความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร

5) ทำการให้แรงกดในแนวแกน แล้วจดบันทึกค่าแรงกดที่ใช้กดตัวอย่างเกลื่อหินบด ค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวในแนวแกนและตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลางไปพร้อมกันอย่างต่อเนื่อง เพื่อนำไปคำนวณหาค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียว ค่าความเครียดตามแนวแกนค่า ความเครียดตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง ค่าความเครียดเชิงปริมาตร และค่าอัตราส่วน Poisson's ratio โดยใช้สมการที่ 4.8 ถึงสมการที่ 4.13

6) เมื่อตัวอย่างเกลื่อหินบดเกิดการวิบัติจึงหยุดให้แรงกด

7) ทดสอบตามลำดับจากข้อ 1–5 ในทุกตัวอย่างการทดสอบ



รูปที่ 4.13 การทดสอบกำลังกดสูงสุดในแกนเดียวของตัวอย่างเกลื่อหินบดหลังจากการอัดตัวแล้ว

4.3.5 การคำนวณผลการทดสอบ

การคำนวณผลการทดสอบกำลังกดสูงสุดในแกนเดียวของตัวอย่างเกลื่อหินบด สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\sigma_c = P_f / A \quad (4.8)$$

เมื่อ σ_c คือค่ากำลังกดหรือความเค้นกดสูงสุดในแกนเดียว P_f คือค่าแรงกดสูงสุดวัดที่จุดวิบัติของตัวอย่างหิน และ A คือพื้นที่หน้าตัดเดิมของตัวอย่างหิน ($A = \pi D^2 / 4$) ภายใต้แรงกด P คือความเค้นในแนวแกน (σ_d) สามารถคำนวณได้จาก

$$\sigma_d = P / A \quad (4.9)$$

ความเครียดตามแนวแกนและตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลางสามารถคำนวณได้จาก

$$\varepsilon_d = \Delta L / L \quad (4.10)$$

$$\varepsilon_d = \Delta D / D \quad (4.11)$$

เมื่อ ε_d คือความเครียดตามแนวแกน ε_d คือความเครียดตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง ΔL คือการเปลี่ยนแปลงความยาวของตัวอย่างหินภายในระยะความยาวเดิม L และ ΔD คือการเปลี่ยนแปลงของเส้นผ่าศูนย์กลางจากเส้นผ่าศูนย์กลางเดิม D คือผลที่ได้จากการทดสอบสามารถประเมินค่าความเครียดเชิงปริมาตร (ε_v) ในขณะใดๆ ภายใต้แรงกดที่มากกระทำโดยใช้

$$\varepsilon_v = \varepsilon_d + 2\varepsilon_d \quad (4.12)$$

และค่าอัตราส่วน Poisson' s ratio สามารถคำนวณได้จากผลการทดสอบเช่นกัน โดยใช้สมการ

$$\nu = -\varepsilon_d / \varepsilon_d \quad (4.13)$$

โดย ν คือค่าอัตราส่วน Poisson' s ratio ของตัวอย่างเกลื่อหินบด

บทที่ 5

ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

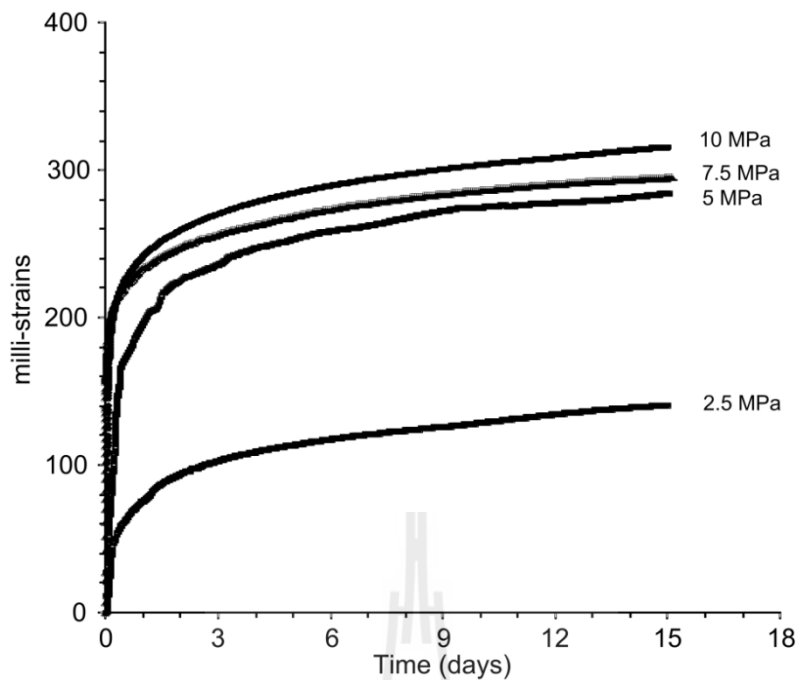
เนื้อหาในบทนี้นำเสนอผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการได้แก่ ผลการทดสอบการอัดตัวของตัวคาน้ำ ผลการทดสอบความชื้นผ่าน และผลการทดสอบกำลังกดสูงสุดในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือหินบดผสมน้ำเกลือเข้มข้นที่มีอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยทำการกดอัดตัวอย่างเกลือหินบดในกระบอกทดสอบด้วยความเค้นกดในแนวแกน 4 ระดับ คือ 2.5, 5, 7.5, และ 10 MPa เป็นระยะเวลา 3, 5, 7, 10 และ 15 วัน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่ผันแปรต่างกัน 3 ระดับคือ 30, 65 และ 100 องศาเซลเซียส (303, 338 และ 373 Kelvin) ตามแต่ละรูปแบบการทดสอบดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 เพื่อศึกษาผลกระทบของความเค้นกดในแนวแกนและอุณหภูมิต่อพฤติกรรมของเกลือหินบด เพื่อเป็นข้อมูลหรือแนวทางในการออกแบบและเลือกใช้วัสดุถมกลับในช่องว่างเหมืองใต้ดินต่อไป

5.1 ผลการทดสอบการอัดตัวคาน้ำ

ผลการทดสอบการอัดตัวคาน้ำของตัวอย่างเกลือหินบดผสมน้ำเกลือเข้มข้นอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่มีการทดสอบการกดอัดภายใต้สภาวะความเค้นกดในแนวแกนและอุณหภูมิที่ผันแปรต่างกันทั้ง 3 รูปแบบการทดสอบ สามารถแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดในแนวแกน ความหนาแน่น และปริมาณช่องว่างต่อปริมาตรกับระยะเวลาที่ใช้ในการกดอัด ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ผลการทดสอบการอัดตัวคาน้ำที่สภาวะความเค้นกดในแนวแกนและอุณหภูมิคงที่

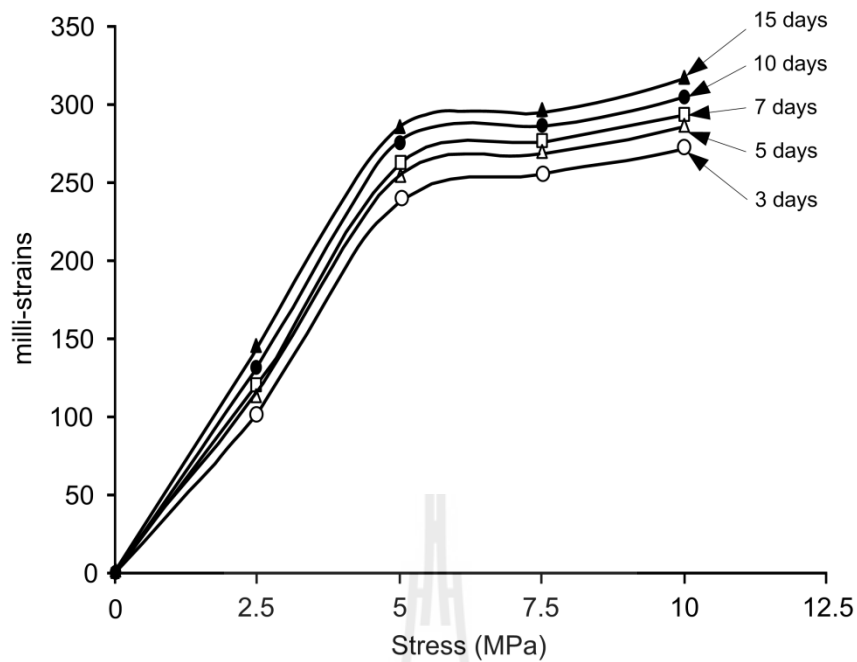
ผลการทดสอบการอัดตัวคาน้ำที่ทำให้ความเค้นกดในแนวแกนและอุณหภูมิคงที่สามารถแสดงอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น ปริมาณช่องว่าง และความเครียดในแนวแกนกับระยะเวลาในการกดอัดตัวอย่างเกลือหินบด ในรูปที่ 5.1 แสดงพฤติกรรมการยุบตัวของเกลือหินบดในรูปของความเครียดในแนวแกนเชิงเวลา ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวมีลักษณะคล้ายคลึงกับการทดสอบการเคลื่อนไหลของตัวอย่างเกลือหินกล่าวคือ ในช่วงแรกสามารถสังเกตเห็นการยุบตัวในช่วงที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดเชิงเวลา (Transient creep phase) และช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดในช่วงเวลาคงที่ (Steady-state creep phase) อย่างชัดเจนที่ความเค้นในแนวแกนระดับต่างๆ นอกจากนี้เมื่อนำค่า



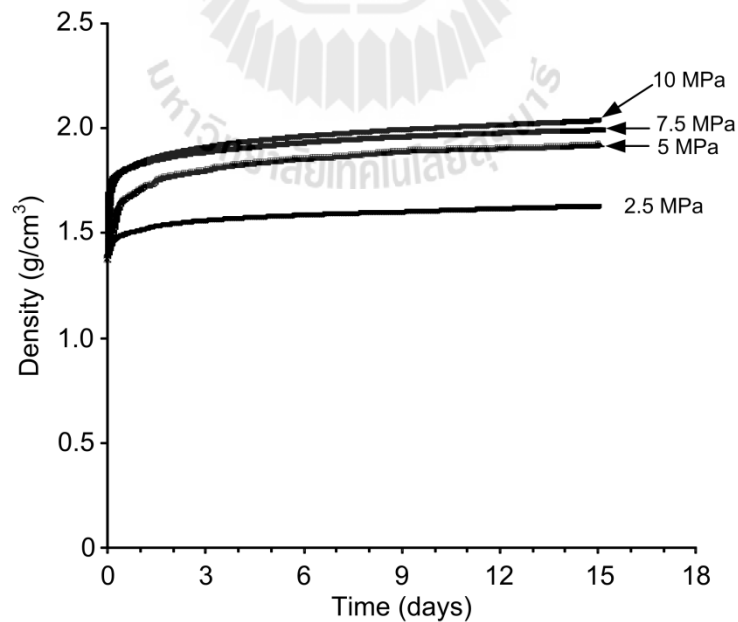
รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวแกนกับระยะเวลาทดสอบของตัวอย่างเกลือหินบดที่ทดสอบด้วยความเค้นกดคงที่ 2.5, 5, 7.5 และ 10 MPa ภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง (303 Kelvin)

ความเครียดในแนวแกนของแต่ละความเค้นกดที่ช่วงเวลาต่างๆ (รูปที่ 5.2) มาพิจารณาจึงพบว่าในช่วงที่ทำการเพิ่มความเค้นกดจาก 2.5 MPa เป็น 5 MPa มีค่าความเครียดในแนวแกนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ในขณะที่เพิ่มความเค้นกดจาก 5 MPa เป็น 7.5 และ 10 MPa พบว่าค่าความเครียดมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น สาเหตุเนื่องมาจากในช่วงแรกของการยุบตัวของตัวอย่างเกลือหินบดมีช่องว่างเหลืออยู่มาก ดังนั้นเมื่อทำการเพิ่มความเค้นในช่วงแรกจึงส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความเครียดอย่างรวดเร็ว ในขณะที่เพิ่มระดับความเค้นให้สูงขึ้น ปริมาณช่องว่างในตัวอย่างไม่ค่อยลง ทำให้ไม่สามารถยุบตัวได้มาก ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความเครียดเพียงเล็กน้อย

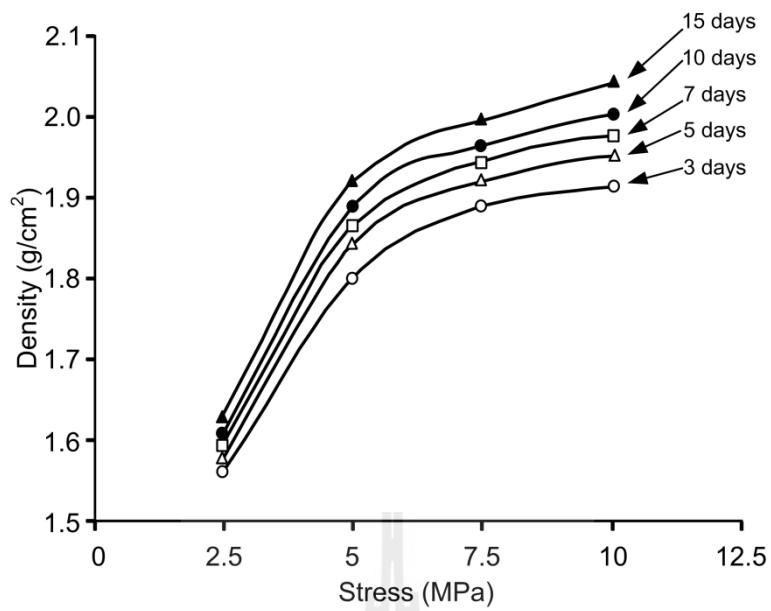
รูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับระยะเวลาในการกดอัด และค่าความหนาแน่นกับความเค้นในการกดอัด ซึ่งพฤติกรรมค่าความหนาแน่นของตัวอย่างเกลือหินบดคล้ายคลึงกับค่าความเครียดที่สัมพันธ์กับระยะเวลาและความเค้นกด ในขณะที่ค่าอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรมีค่าลดลงเมื่อความเค้นกดในแนวแกนและระยะเวลาในการกดอัดเพิ่มขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างกับระยะเวลาในการกดอัดดังแสดงในรูปที่ 5.5 และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างกับความเค้นกดในแนวแกนได้แสดงในรูปที่ 5.6



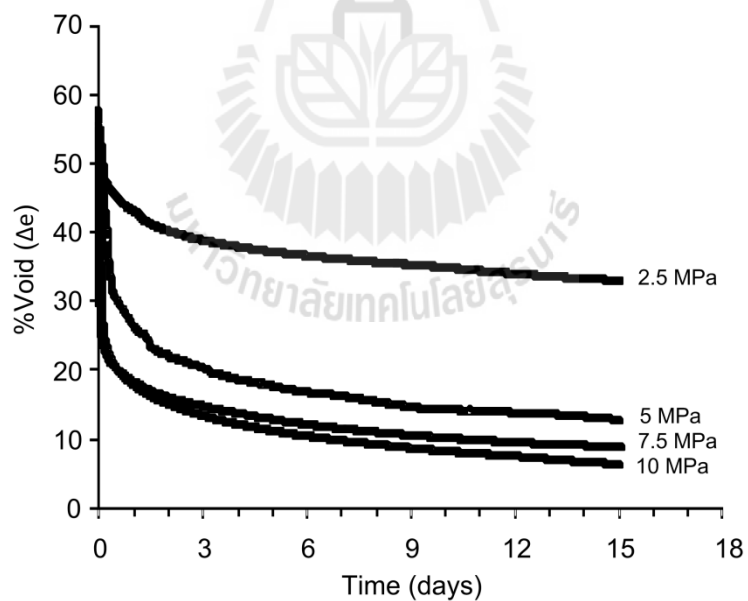
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวแกนกับความเค้นในการกดอัดของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดเป็นระยะเวลา 3, 5, 7, 10 และ 15 วัน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง



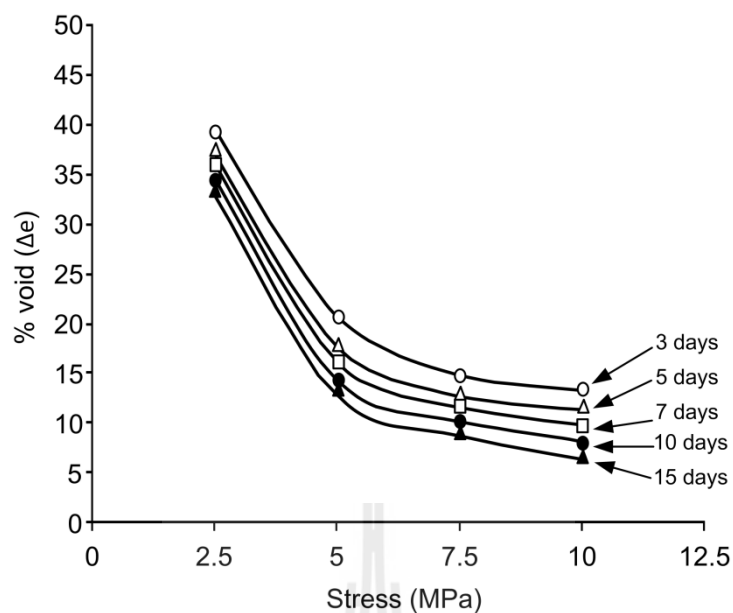
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับระยะเวลากดอัดของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดด้วยความเค้นกดคงที่ 2.5, 5, 7.5 และ 10 MPa ภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับความเค้นในการกดอัดของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดเป็นระยะเวลา 3, 5, 7, 10 และ 15 วัน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างกับระยะเวลากดอัดของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดด้วยความเค้นกดคงที่ 2.5, 5, 7.5 และ 10 MPa ภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง

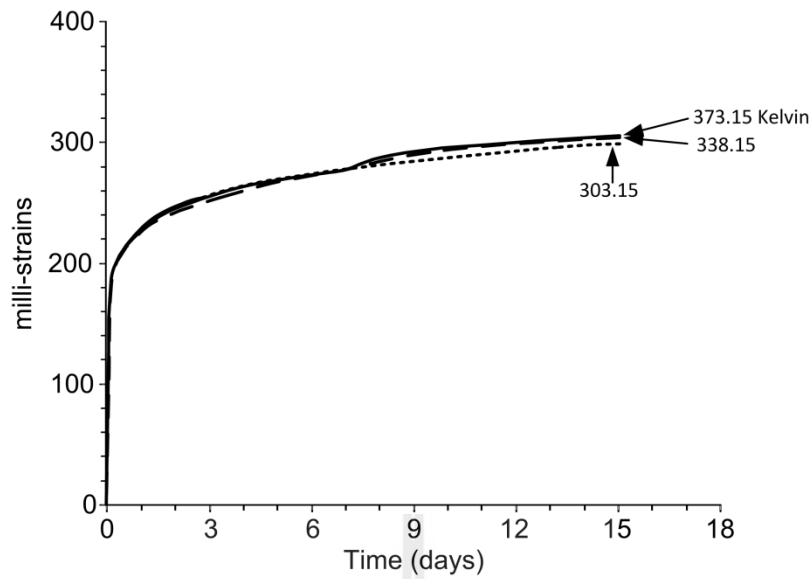


รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างกับความเค้นในการกดอัดของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดเป็นระยะเวลา 3, 5, 7, 10 และ 15 วัน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง

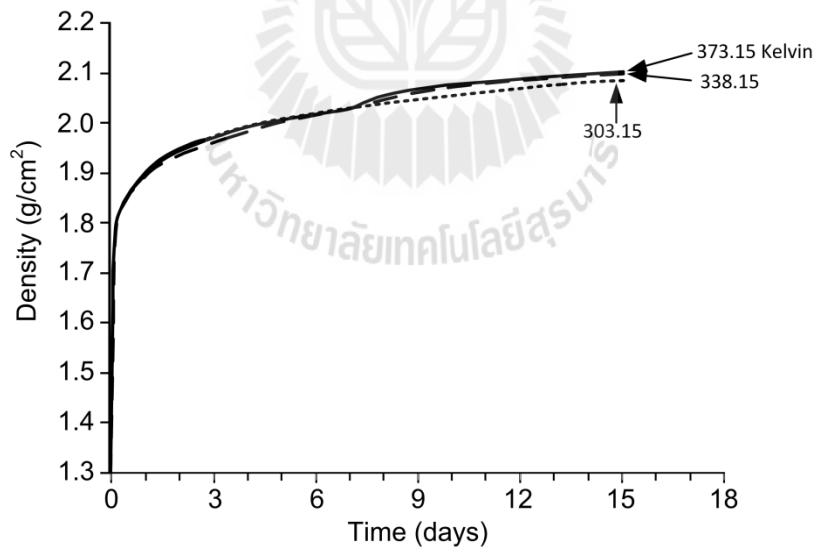
จากผลการทดสอบสามารถกล่าวได้ว่าความเค้นกดในแนวแกนและระยะเวลาในการกดอัดตัวอย่างเกลือหินบดมีผลกระทบต่อพฤติกรรมการยุบตัวของตัวอย่างเกลือหินบด โดยค่าการยุบตัว ค่าความหนาแน่น และค่าความเครียดในแนวแกนมีค่าสูงขึ้นตามขนาดของความเค้นกดในแนวแกนและระยะเวลาในการกดอัดที่เพิ่มขึ้น

5.1.2 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำที่สภาวะความเค้นกดในแนวแกนคงที่ผันแปรอุณหภูมิ

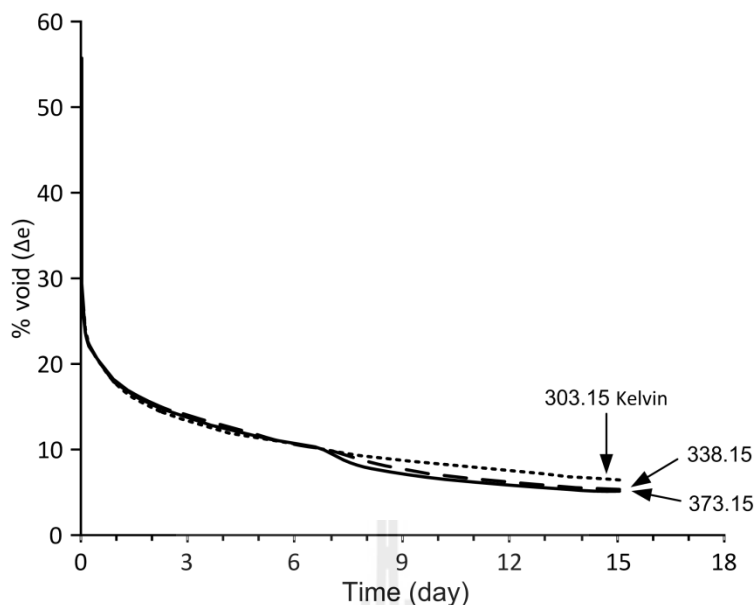
ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำที่สภาวะความเค้นในแนวแกนคงที่ 4 ระดับ คือ 2.5, 5, 7.5 และ 10 MPa และมีการผันแปรอุณหภูมิตั้งแต่ 30 ถึง 100 องศาเซลเซียส สามารถนำมาแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวแกนกับระยะเวลาในการกดอัดได้ ดังรูปที่ 5.7 ส่วนความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นและอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรเชิงเวลาได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.8 และรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวแกนกับระยะเวลาในการกดอัดของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดด้วยความเค้น 10 MPa ภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่มีการผันแปรจาก 303 Kelvin เป็น 338 และ 373 Kelvin เปรียบเทียบกับสภาวะอุณหภูมิห้อง



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับระยะเวลาในการกดอัดของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดด้วยความเค้น 10 MPa ภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่มีการผันแปรจาก 303 Kelvin เป็น 338 และ 373 Kelvin เปรียบเทียบกับสภาวะอุณหภูมิห้อง



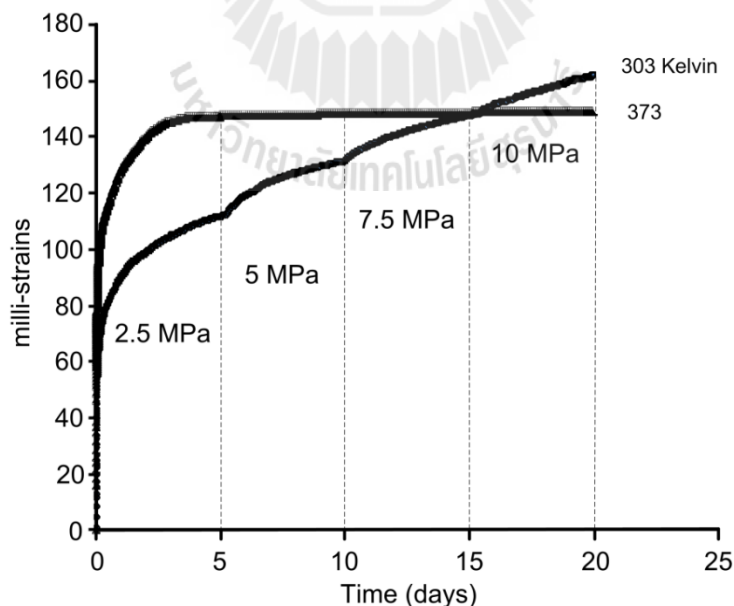
รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรกับระยะเวลาในการกดอัดของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดด้วยความเค้น 10 MPa ภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่มีการผันแปรจาก 303 Kelvin เป็น 338 และ 373 Kelvin เปรียบเทียบกับสภาวะอุณหภูมิห้อง

ผลการทดสอบระบุว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นมีผลทำให้ค่าการยุบตัว ค่าความหนาแน่น และความเครียดในแนวแกนของตัวอย่างเกลือหินบดมีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่อัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรมีค่าลดลง กล่าวคือหลังจากที่ทำการเพิ่มอุณหภูมิจาก 30 องศาเซลเซียส เป็น 65 และ 100 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ค่าการยุบตัว ค่าความหนาแน่น และค่าความเครียดในแนวแกนของตัวอย่างเกลือหินบดมีค่าสูงขึ้นและมีอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในขณะที่ค่าการยุบตัว ค่าความหนาแน่น ค่าความเครียดในแนวแกน และอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรของตัวอย่างเกลือหินบดที่อุณหภูมิ 65 และ 100 องศาเซลเซียส ให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน

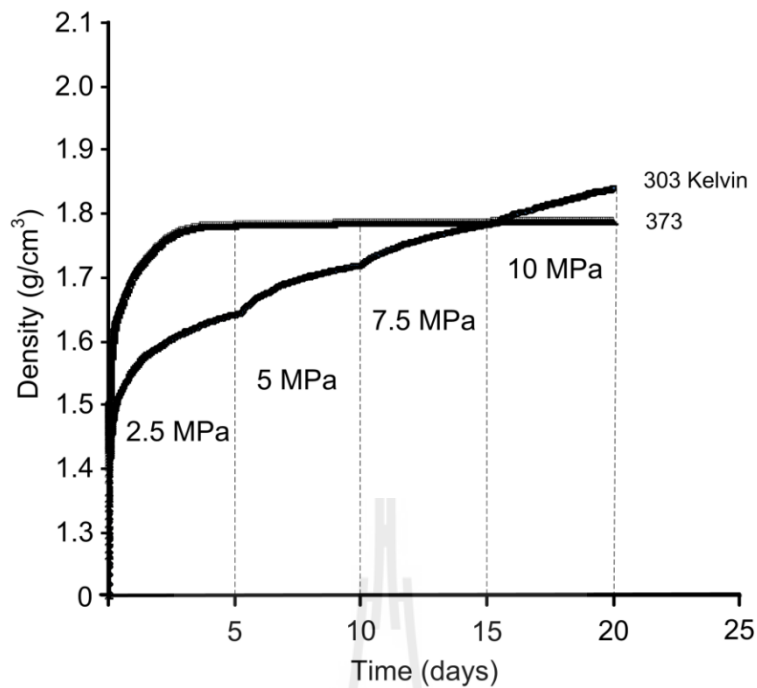
5.1.3 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำที่อุณหภูมิคงที่ผันแปรความเค้นกดในแนวแกน

วัตถุประสงค์ของการทดสอบนี้ คือเพื่อศึกษาและสังเกตพฤติกรรมการยุบตัวของเกลื้อหินบดต่อการให้ความเค้นกดแบบขั้นบันได (Step loadings) ซึ่งอยู่ภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่เท่ากับ 30 และ 100 องศาเซลเซียส โดยที่ผลการทดสอบสามารถแสดงอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวแกน ความหนาแน่นและอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรกับระยะเวลาในการกดอัดได้ดังรูปที่ 5.10 ถึงรูปที่ 5.12 ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวระบุว่าการเพิ่มความเค้นกดแบบขั้นบันไดจาก 2.5 MPa เป็น 5, 7.5 และ 10 MPa ตามลำดับ ทุกๆ 5 วัน มีผลต่อพฤติกรรมการยุบตัว ค่าความหนาแน่น อัตราส่วนช่องว่าง และค่าความเครียดในแนวแกนของตัวอย่างเกลื้อหินบดเพียงเล็กน้อย โดยหลังจากที่มีการเพิ่มความเค้นกดในแนวแกน ค่าการยุบตัวของตัวอย่างเกลื้อหินบดมีค่าใกล้เคียงกับค่าการยุบตัวก่อนทำการเพิ่มความเค้นกดให้กับตัวอย่าง

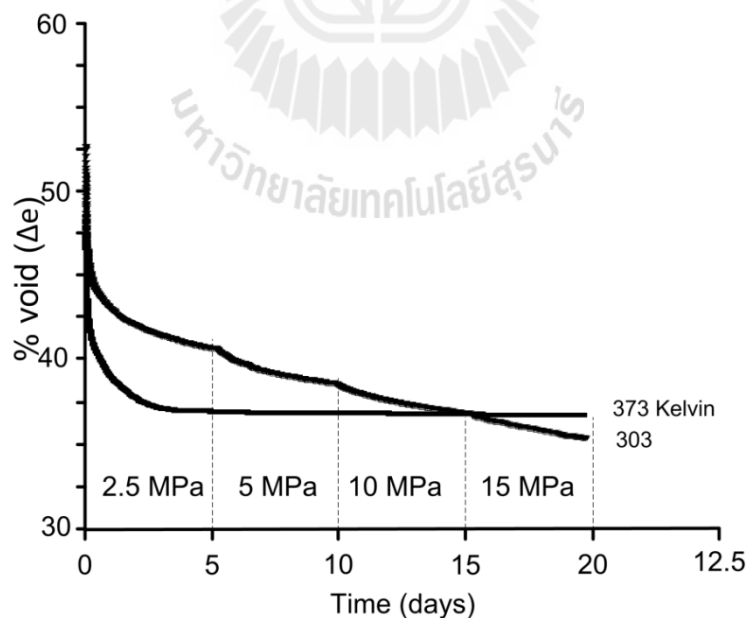
ผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ตัวอย่างเกลื้อหินบดมีอัตราการยุบตัวอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการกดอัดจากนั้นจึงมีค่าคงที่ ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากความชื้นในตัวอย่างเกลื้อหินบดที่ลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากอุณหภูมิสูง ส่งผลให้อัตราการยุบตัวของตัวอย่างเกลื้อหินบดหลังจากที่ความชื้นลดลงมีค่าต่ำกว่าอัตราการยุบตัวช่วงเริ่มต้นของการกดอัด จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าการให้ความเค้นกดแบบขั้นบันไดจะทำให้ตัวอย่างเกลื้อหินบดมีอัตราการยุบตัวที่เร็วกว่าการให้ความเค้นกดแบบคงที่



รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวแกนกับระยะเวลาในการกดอัดของตัวอย่างเกลื้อหินบดที่มีการผันแปรความเค้นกดตั้งแต่ 2.5 ถึง 10 MPa ทุก 5 วันภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 373 Kelvin



รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างหนาแน่นกับระยะเวลาในการกดอัดของตัวอย่างเกลือหินบดที่มีการผันแปรความเค้นกดตั้งแต่ 2.5 ถึง 10 MPa ทุก 5 วัน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 373 Kelvin



รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างกับระยะเวลาในการกดอัดของตัวอย่างเกลือหินบดที่มีการผันแปรความเค้นกดตั้งแต่ 2.5 ถึง 10 MPa ทุก 5 วัน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 373 Kelvin

5.2 ผลการทดสอบค่าความซึมผ่าน

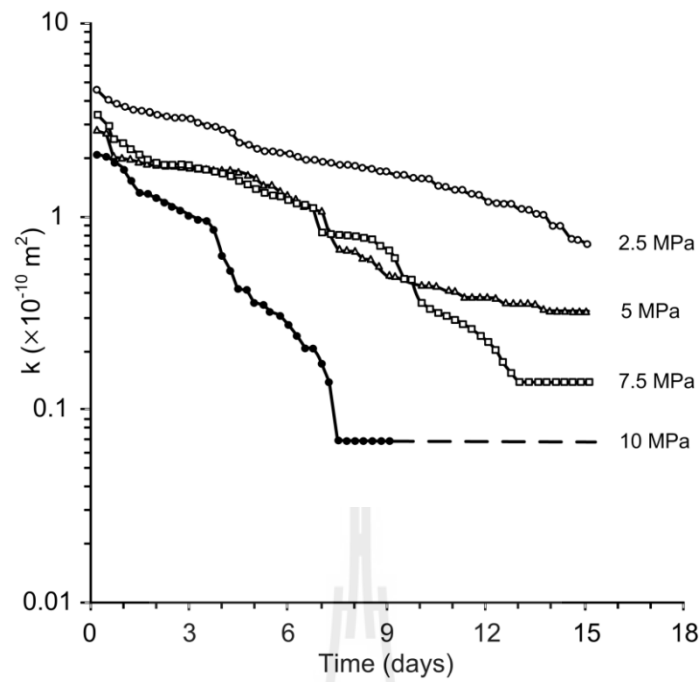
ผลการทดสอบค่าความซึมผ่านของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดภายใต้สภาวะความเค้นกดในแนวแกนและอุณหภูมิที่ผันแปรต่างกันทั้ง 3 รูปแบบการทดสอบ สามารถแสดงในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพกับระยะเวลาที่ใช้ในการกดอัดได้ดังนี้

5.2.1 ผลการทดสอบค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพที่สภาวะความเค้นกดในแนวแกนและอุณหภูมิคงที่

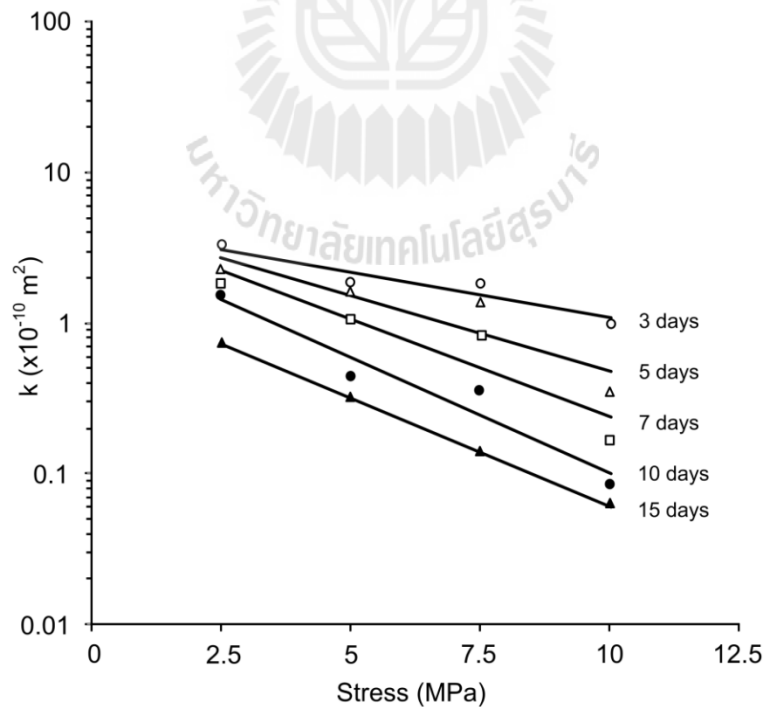
ผลการทดสอบค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพที่สภาวะความเค้นกดในแนวแกนคงที่ 4 ระดับ คือ 2.5, 5, 7.5 และ 10 MPa ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) คงที่ตลอดระยะเวลาการทดสอบ สามารถนำผลมาแสดงในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพกับระยะเวลาในการกดอัดได้ดังรูปที่ 5.13 และรูปที่ 5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพกับความเค้นกดในแนวแกน ซึ่งผลการทดสอบระบุว่าค่าความเค้นกดในแนวแกนและระยะเวลาในการกดอัดมีผลต่อพฤติกรรมของค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพของตัวอย่างเกลือหินบด กล่าวคือค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพของตัวอย่างเกลือหินบดมีค่าลดลงเมื่อค่าความเค้นกดในแนวแกนและระยะเวลาในการกดอัดเพิ่มขึ้น โดยตัวอย่างเกลือหินบดที่ถูกกดอัดด้วยความเค้นกดในแนวแกนที่ระดับต่ำจะมีค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพที่ลดลงอย่างสม่ำเสมอ และตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดด้วยความเค้นกดในแนวแกนที่ระดับสูงมีค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพที่ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกจากนั้นจึงมีค่าคงที่

5.2.2 การทดสอบค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพที่สภาวะความเค้นกดในแนวแกนคงที่ผันแปรอุณหภูมิ

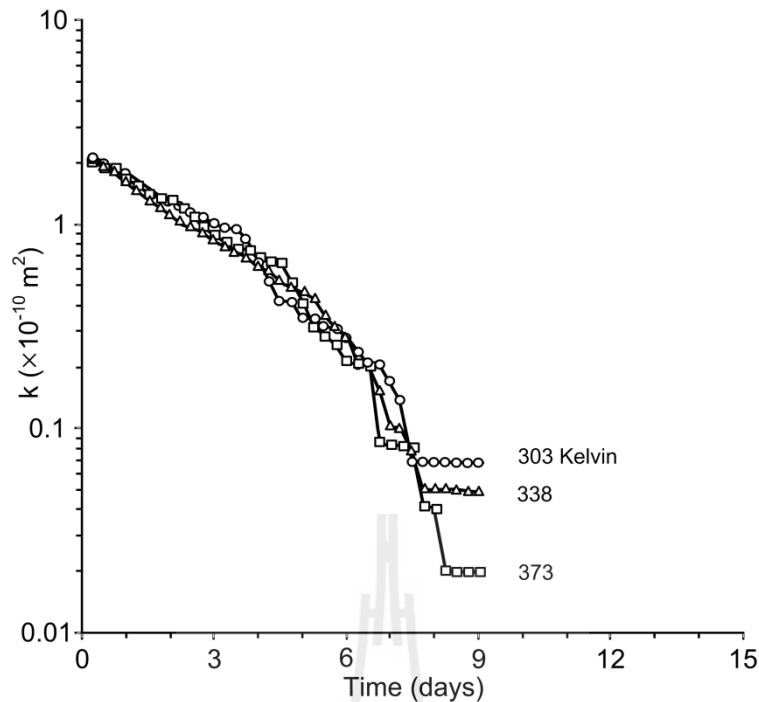
ผลการทดสอบค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพที่สภาวะความเค้นกดในแนวแกนคงที่ 4 ระดับคือ 2.5, 5, 7.5 และ 10 MPa และมีการผันแปรอุณหภูมิตั้งแต่ 30 ถึง 100 องศาเซลเซียส สามารถนำมาแสดงในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพกับระยะเวลาในการกดอัดที่อุณหภูมิต่างๆ ได้ดังรูปที่ 5.15 ซึ่งผลการทดสอบระบุว่าอุณหภูมิมิมีผลต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพของตัวอย่างเกลือหินบด โดยค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพของตัวอย่างเกลือหินบดมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากค่าการยุบตัวของตัวอย่างเกลือหินบดมีค่าสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ทำให้ช่องว่างระหว่างเม็ดเกลือหินบดน้อยลง ส่งผลให้ค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพลดลงด้วย โดยตัวอย่างเกลือหินบดที่ถูกกดอัดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะได้ค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดที่อุณหภูมิ 65 และ 30 องศาเซลเซียส ที่ความเค้นกดในแนวแกนและระยะเวลาในการกดอัดเท่ากัน



รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพกับระยะเวลาในการกักอัดของตัวอย่างเกลือหินบดที่กักอัดด้วยความเค้นกด 2.5, 5, 7.5 และ 10 MPa ภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง



รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพกับความเค้นในการกักอัดของตัวอย่างเกลือหินบดที่กักอัดเป็นระยะเวลา 3, 5, 7, 10 และ 15 วัน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง

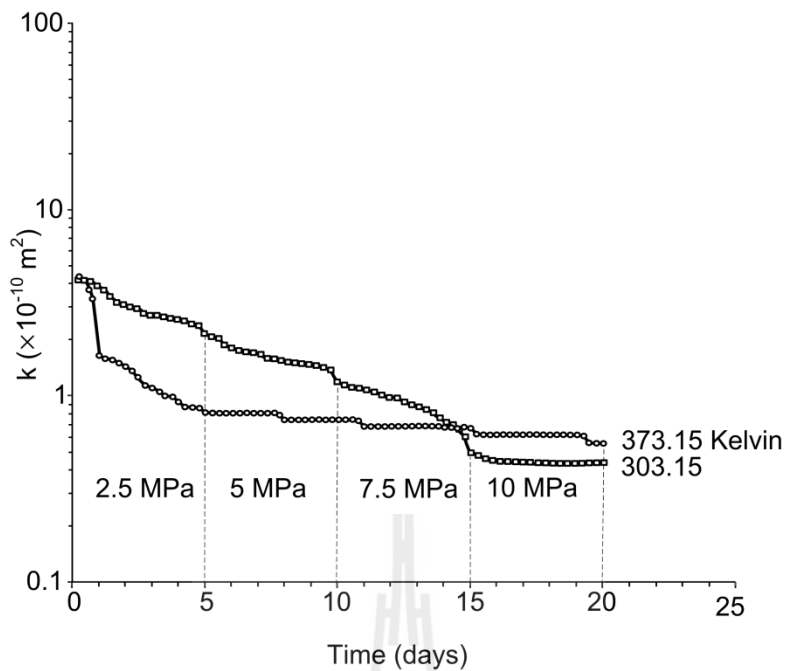


รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพกับระยะเวลาในการกักอัดของตัวอย่างเกลือหินบดที่กักอัดด้วยความเค้นกดคงที่ 10 MPa ภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่มีการผันแปรจาก 303 Kelvin เป็น 338 และ 373 Kelvin เปรียบเทียบกับอุณหภูมิห้อง

5.2.3 การทดสอบค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพที่สภาวะอุณหภูมิต่างที่ผันแปร

ความเค้นกดในแนวแกน

ผลการทดสอบค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพที่สภาวะอุณหภูมิต่างที่ 2 ระดับ คือ 30 และ 100 องศาเซลเซียส และมีการผันแปรความเค้นกดในแนวแกน โดยการเพิ่มความเค้นกดจาก 2.5 MPa เป็น 5, 7.5 และ 10 MPa ตามลำดับ ทุกๆ 5 วัน สามารถนำมาแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพกับระยะเวลาในการกักอัดได้ดังรูปที่ 5.16 ซึ่งผลการทดสอบระบุว่า การผันแปรความเค้นกดในแนวแกน มีผลกระทบต่อค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพเพียงเล็กน้อย โดยค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพหลังจากทำการเพิ่มความเค้นกดในแนวแกนมีค่าใกล้เคียงกับค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพก่อนทำการเพิ่มความเค้นกดกับตัวอย่าง ซึ่งในช่วงเริ่มต้นของการกักอัดค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพของตัวอย่างเกลือหินบดที่กักอัดที่อุณหภูมิต่างที่ 100 องศาเซลเซียส มีค่าต่ำกว่าค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพของตัวอย่างเกลือหินบดที่กักอัดที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากที่อุณหภูมิต่างที่ 100 องศาเซลเซียส ตัวอย่างเกลือหินบดมีการยุบตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกจากนั้นจึงมีค่าคงที่



รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพกับระยะเวลาในการกดอัดของตัวอย่างเกลือหินบดที่มีการผันแปรความเค้นกดตั้งแต่ 2.5 ถึง 10 MPa ทุก 5 วัน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 373 Kelvin

สำหรับในช่วง 7 วัน หลังจากเริ่มกดอัดไปแล้วค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดที่อุณหภูมิห้องมีค่าต่ำกว่าค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เนื่องจากสภาวะอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความร้อนทำให้น้ำระเหยออกจากตัวอย่างเกลือหินบดได้อย่างรวดเร็ว ค่าการยุบตัวที่เกิดขึ้นจึงมีค่าน้อยกว่าค่าการยุบตัวที่อุณหภูมิห้อง เป็นผลให้ค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส มีค่าสูงกว่าค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพที่อุณหภูมิห้อง เมื่อเปรียบเทียบกับความเค้นกดในแนวแกนและระยะเวลาในการกดอัดเท่ากัน

5.3 ผลการทดสอบกำลังกดสูงสุดในแกนเดียว

ผลการทดสอบกำลังกดสูงสุดในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดด้วยความเค้นกดในแนวแกนและอุณหภูมิที่ผันแปรต่างกัน ทั้ง 3 รูปแบบการทดสอบ สามารถนำมาแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวกับระยะเวลาที่ใช้ในการกดอัดดังนี้

5.3.1 ผลการทดสอบกำลังกดสูงสุดในแกนเดียวของตัวอย่างเกล็ดหินบดที่กดอัดที่ สภาวะความเค้นกดในแนวแกนและอุณหภูมิคงที่

ผลการทดสอบค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวของตัวอย่างเกล็ดหินบดที่ถูกกดอัดที่ สภาวะความเค้นกดในแนวแกนคงที่ 4 ระดับ คือ 2.5, 5, 7.5 และ 10 MPa ที่อุณหภูมิห้องตลอด ระยะเวลาการทดสอบ สามารถแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังกดสูงสุดในแกน เดียวกับระยะเวลาในการกดอัดได้ดังตารางที่ 5.1 ซึ่งผลการทดสอบระบุว่าค่าความเค้นกดใน แนวแกนและระยะเวลาในการกดอัดมีผลต่อค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวของตัวอย่างเกล็ดหิน บด โดยค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวของตัวอย่างเกล็ดหินบดมีค่าสูงขึ้น เมื่อมีระยะเวลาในการ กดอัดนานขึ้นและความเค้นกดในแนวแกนสูงขึ้นซึ่งสามารถแสดงในรูปของความสัมพัทธ์ระหว่าง ค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวและระยะเวลาในการกดอัดได้ดังรูปที่ 5.17 และสามารถแสดงในรูป ของความสัมพัทธ์ระหว่างความเค้นกดในแนวแกนและความเครียดของตัวอย่างเกล็ดหินบดได้ดัง รูปที่ 5.18

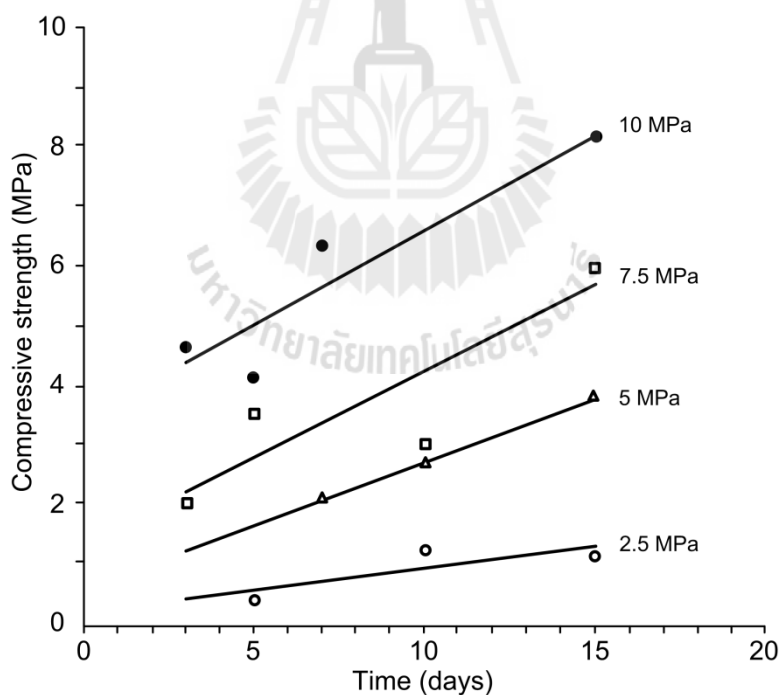
5.3.2 ผลการทดสอบกำลังกดสูงสุดในแกนเดียวของตัวอย่างเกล็ดหินบดที่กดอัดที่ สภาวะความเค้นในแนวแกนคงที่ผันแปรอุณหภูมิ

การทดสอบค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวของตัวอย่างเกล็ดหินบดที่ถูกกดอัดที่ สภาวะความเค้นกดในแนวแกนคงที่ 4 ระดับ คือ 2.5, 5, 7.5 และ 10 MPa และมีการผันแปร อุณหภูมิตั้งแต่ 30 ถึง 100 องศาเซลเซียส ผลที่ได้สามารถแสดงในรูปของความสัมพัทธ์ระหว่าง ค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวกับอุณหภูมิได้ดังรูปที่ 5.19 ซึ่งผลการทดสอบระบุว่าเมื่อทำการกด อัดตัวอย่างเกล็ดหินบดที่อุณหภูมิสูงแล้วนำตัวอย่างที่ถูกกดอัดมาทดสอบหาค่ากำลังกดสูงสุดใน แกนเดียว (Uniaxial compressive strength test) พบว่ามีค่าสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ใช้ กดอัดดังแสดงในรูปที่ 5.20 ซึ่งเป็นความสัมพัทธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแต่ละ อุณหภูมิ

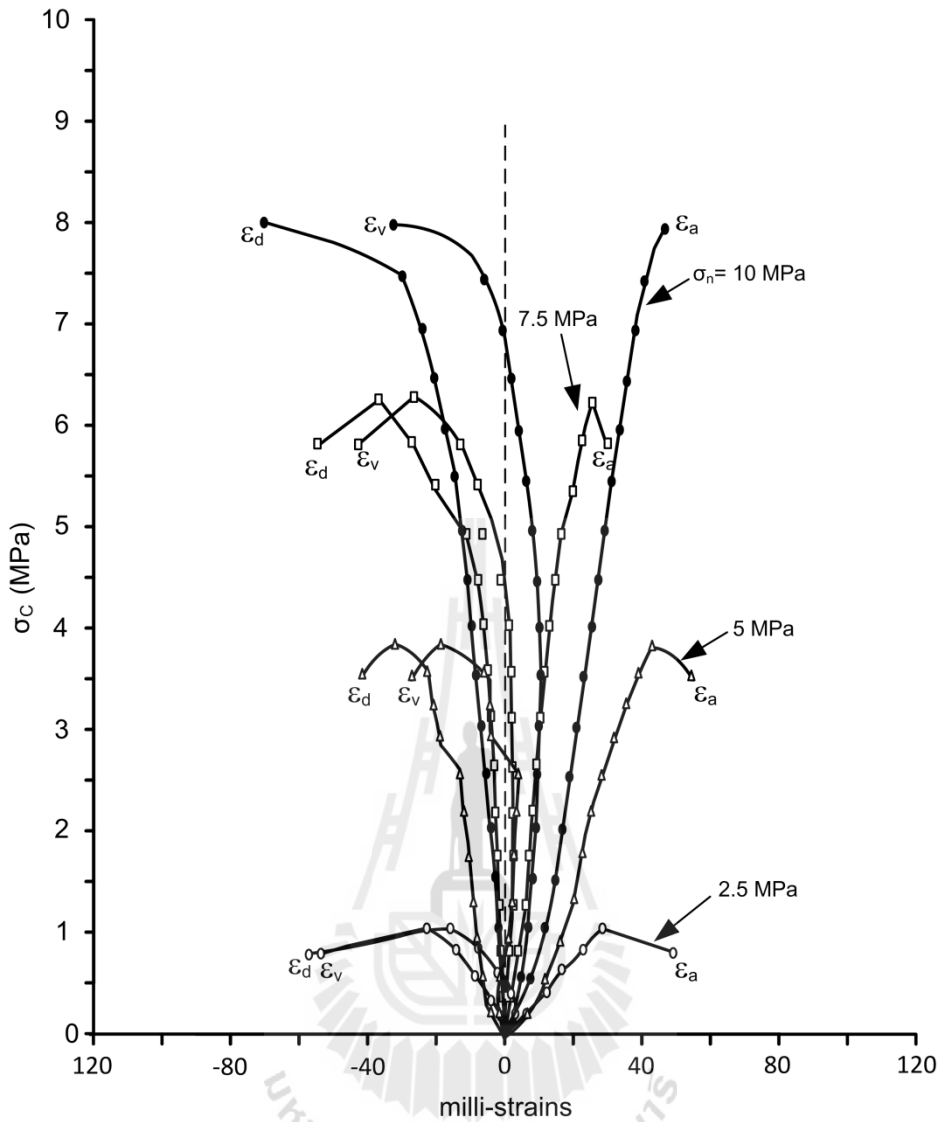
ตัวอย่างเกล็ดหินบดที่กดอัดด้วยความเค้นกดในแนวแกนคงที่ 10 MPa เป็น ระยะเวลา 7 วัน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้องแล้วทำการปรับอุณหภูมิเพิ่มเป็น 65 และ 100 องศา เซลเซียส ไปจนครบ 15 วัน จะให้ค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่า กำลังกดสูงสุดในแกนเดียวของตัวอย่างเกล็ดหินบดที่กดอัดที่อุณหภูมิห้องตลอดระยะเวลา 15 วัน ซึ่งค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวของตัวอย่างเกล็ดหินบดที่กดอัดที่อุณหภูมิห้องแล้วปรับอุณหภูมิ เพิ่มเป็น 100 องศาเซลเซียส จะให้ค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวสูงสุดดังแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.1 ค่ากำลังกดสูงสุดและอัตราส่วน Poisson's ratio ของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดด้วยความเค้นคงที่และระยะเวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 303 Kelvin

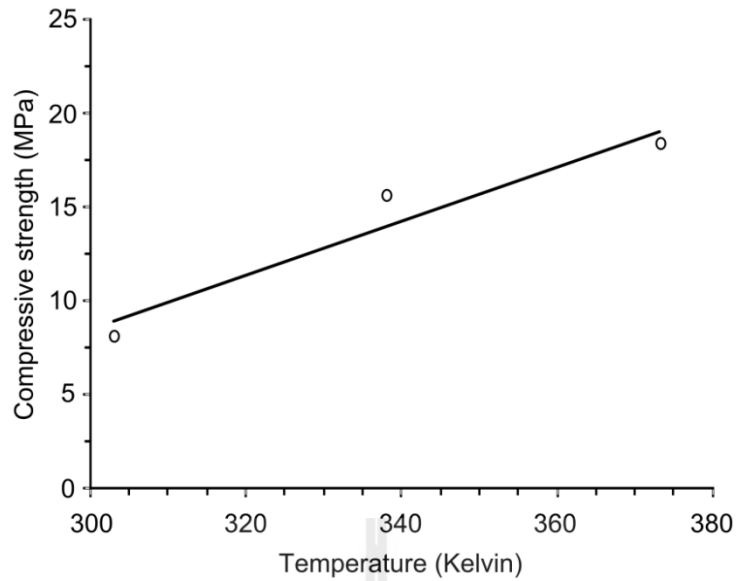
ความเค้น กดใน แนวแกน (MPa)	ระยะเวลาในการอัดตัว									
	3 วัน		5 วัน		7 วัน		10 วัน		15 วัน	
	σ_c (MPa)	ν	σ_c (MPa)	ν	σ_c (MPa)	ν	σ_c (MPa)	ν	σ_c (MPa)	ν
2.5	-	-	0.35	0.46	-	-	1.20	0.45	1.10	0.45
5.0	-	-	-	-	2.10	0.42	2.60	0.42	3.80	0.42
7.5	1.97	0.39	3.54	0.39	-	-	-	-	6.20	0.38
10.0	4.61	0.39	4.10	0.32	6.30	0.34	-	-	8.10	0.32



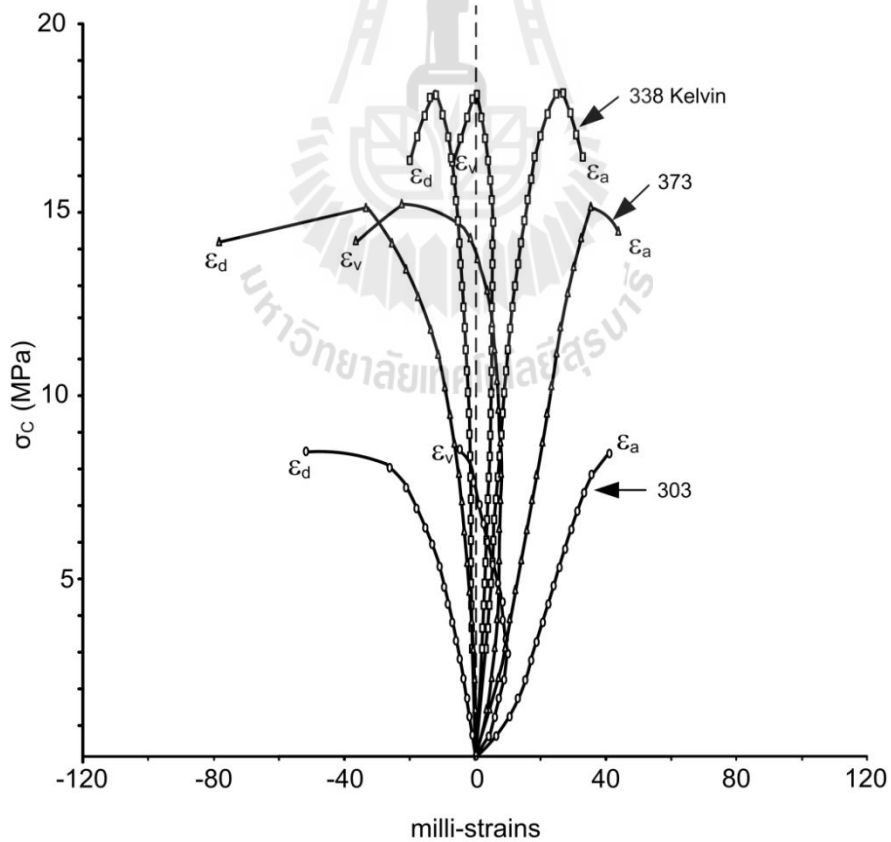
รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังกดสูงสุดกับระยะเวลาในการกดอัดของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดด้วยความเค้นกด 2.5, 5, 7.5 และ 10 MPa ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดด้วยความเค้นกดในแนวแกน 2.5, 5, 7.5 และ 10 MPa เป็นระยะเวลา 15 วันภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง



รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังกดสูงสุดกับอุณหภูมิในการกดอัดของตัวอย่างเกลือบหินบดที่กดอัดด้วยความเค้นกดคงที่ 10 MPa เป็นระยะเวลา 15 วัน



รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของตัวอย่างเกลือบหินบดที่กดอัดด้วยความเค้นกดคงที่ 10 MPa เป็นระยะเวลา 15 วัน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 303, 338 และ 373 Kelvin

ตารางที่ 5.2 ค่ากำลังกดสูงสุดและอัตราส่วน Poisson's ratio ของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดด้วยความเค้นกดคงที่ 10 MPa เป็นระยะเวลา 15 วัน

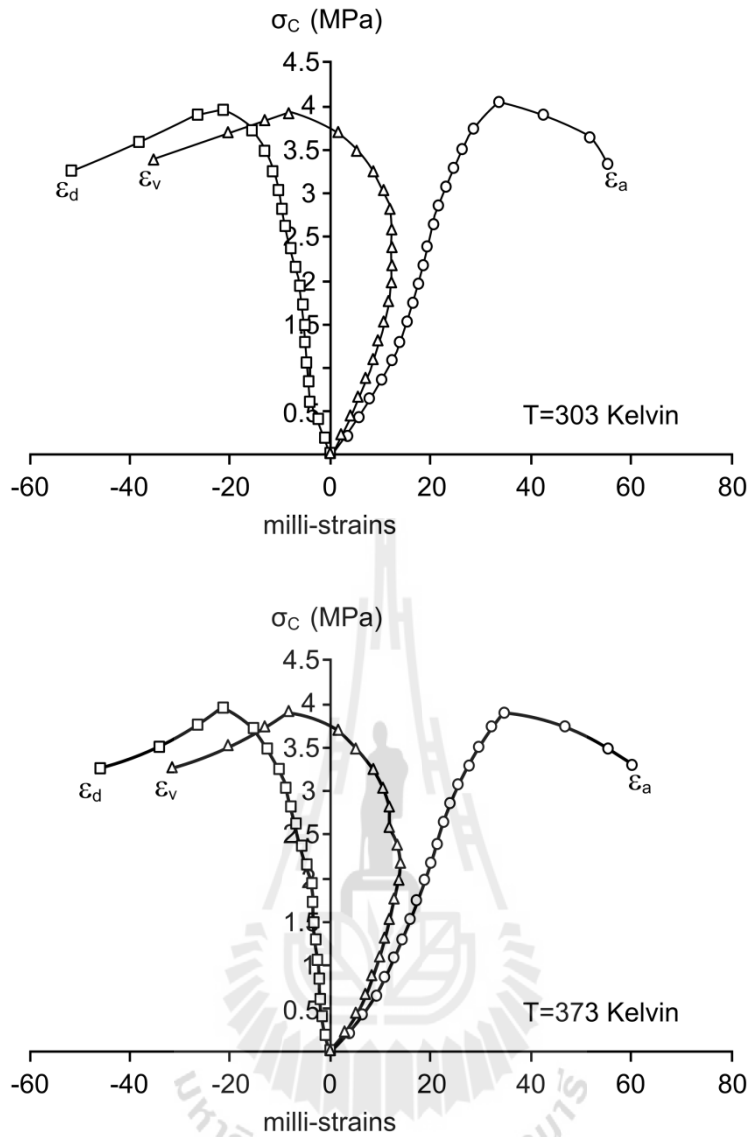
Temperature (Kelvin)	σ_c (MPa)	ν
303	8.10	0.32
338	15.60	0.30
373	18.34	0.26

5.3.3 ผลการทดสอบกำลังกดสูงสุดในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดที่สถานะอุณหภูมิคงที่ผันแปรความเค้นในแนวแกน

ผลการทดสอบค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดที่สถานะอุณหภูมิคงที่ 30 และ 100 องศาเซลเซียส และมีการผันแปรความเค้นกดในแนวแกน 4 ระดับ คือ 2.5, 5, 7.5 และ 10 MPa ทุกๆ 5 วัน สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.3 ซึ่งผลการทดสอบระบุว่า การผันแปรความเค้นกดในแนวแกนมีผลต่อค่ากำลังกดสูงสุดเพียงเล็กน้อย โดยที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวจะมีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือหินบดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถสังเกตได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างเกลือหินบดทั้งสองอุณหภูมิที่แสดงอยู่ในรูปที่ 5.21

ตารางที่ 5.3 ค่ากำลังกดสูงสุดและอัตราส่วน Poisson's ratio ของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดด้วยความเค้นกดผันแปรที่อุณหภูมิต่างๆ

Temperature (Kelvin)	σ_c (MPa)	ν
303	4.19	0.42
373	3.93	0.43



รูปที่ 5.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดด้วยความเค้นกดผันแปร 4 ระดับ คือ 2.5, 5, 7.5 และ 10 MPa ที่อุณหภูมิห้อง (บน) และอุณหภูมิ 373 Kelvin (ล่าง)

บทที่ 6

การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

เนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอการพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายและคาดคะเนพฤติกรรมกรรมการอัดตัวของตัวอย่างเกลือหินบดภายใต้การผันแปรของอุณหภูมิและความเค้นกดในแนวแกน โดยอยู่ในรูปความสัมพันธ์ของอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรที่ขึ้นกับความเค้นกดในแนวแกนและอุณหภูมิ ซึ่งสมการดังกล่าวสามารถคาดคะเนค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดของตัวอย่างเกลือหินบดที่ถูกกดอัดที่ระดับความเค้นในแนวแกนต่างๆ และอยู่ภายใต้อุณหภูมิที่ผันแปรโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดของตัวอย่างเกลือหินบดต่อค่าความเค้นที่ใช้กดอัดที่อุณหภูมิต่างๆ

6.1 การสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรและความเค้นที่ใช้ในการกดอัดตัวอย่างเกลือหินบด

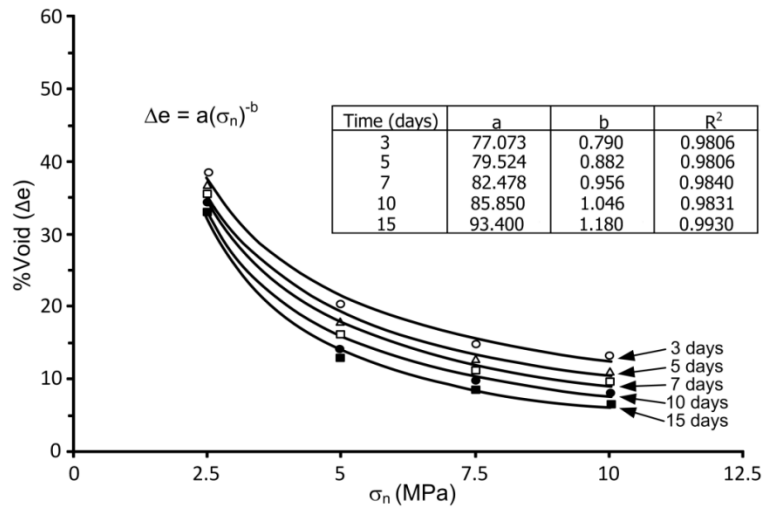
จากผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างเกลือหินบดผสมน้ำเกลือเข้มข้นในบทที่ 5 ทำให้สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรและความเค้นที่ใช้ในการกดอัดตัวอย่างเกลือหินบดที่ระยะเวลาต่างๆ ได้ดังแสดงในรูปที่ 6.1 และรูปที่ 6.2 ซึ่งอยู่ในรูปของสมการยกกำลัง (Power equation) โดยที่ค่าคงที่ a และ b สามารถนำมาสร้างความสัมพันธ์กับระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบได้ โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าค่าคงที่ a และ b เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการกดอัดตัวอย่างเกลือหินบดเพิ่มขึ้นซึ่งสามารถอธิบายได้โดยใช้สมการเส้นตรง (Linear equation) ดังแสดงในสมการที่ 6.1 และสมการที่ 6.2 ตามลำดับ

$$a = 1.3532t + 72.8390 \quad (6.1)$$

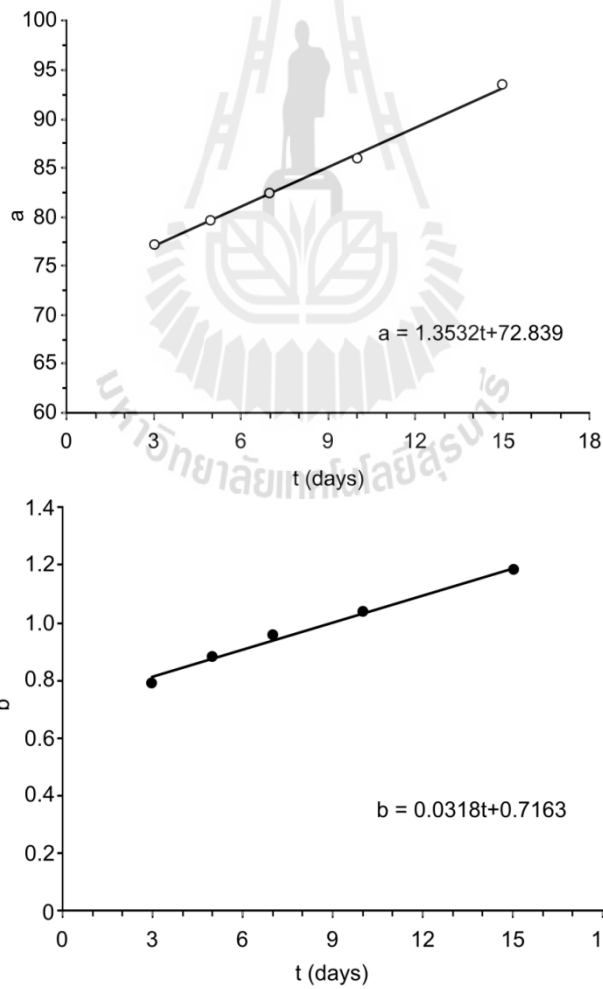
$$b = 0.0318t + 0.7163 \quad (6.2)$$

โดย a และ b คือค่าคงที่ที่ได้จากการสอบเทียบ และ t คือระยะเวลาในการกดอัดตัวอย่างเกลือหินบดในหน่วยวัน และจากสมการอัตราส่วนช่องว่างที่ได้จากการสอบเทียบผลการทดสอบได้แก่

$$\Delta e = a(\sigma_n)^{-b} \quad (6.3)$$



รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรกับความเค้นกดในการกดอัดตัวอย่าง (σ_n) ในแต่ละระยะเวลาการกดอัด



รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ a (บน) และ b (ล่าง) กับระยะเวลาในการกดอัดตัวอย่าง แกลือหินบด (t)

โดย e คืออัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตร และ σ_n คือความเค้นกดในแนวแกน (MPa) เมื่อนำสมการที่ 6.1 และ 6.2 แทนค่าลงในสมการที่ 6.3 จะได้สมการ

$$\Delta e = (1.3532t + 72.839)(\sigma_n)^{(-0.0318t - 0.7163)} \quad (6.4)$$

โดยสมการที่ 6.4 สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการคาดคะเนพฤติกรรมกรรมการลดลงของอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรของตัวอย่างเกลือหินบดที่สัมพันธ์กับความเค้นกดในแนวแกนเชิงเวลาได้ ซึ่งพิจารณาทั้งระยะเวลาในการกดอัดในช่วง 0 ถึง 15 วัน และความเค้นกดในแนวแกนระหว่าง 2.5 ถึง 10 MPa ทั้งนี้สมการดังกล่าวสามารถคำนวณอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรของตัวอย่างเกลือหินบดผสมน้ำเกลือเข้มข้นที่อัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และสามารถประยุกต์ใช้ได้ในช่วงความเค้นกดในแนวแกนและระยะเวลาในช่วงที่ใช้ทดสอบเท่านั้น ซึ่งควรตระหนักและพึงระวังถึงการประยุกต์ใช้สมการดังกล่าวที่ความเค้นกดในแนวแกนหรือระยะเวลาใดๆ

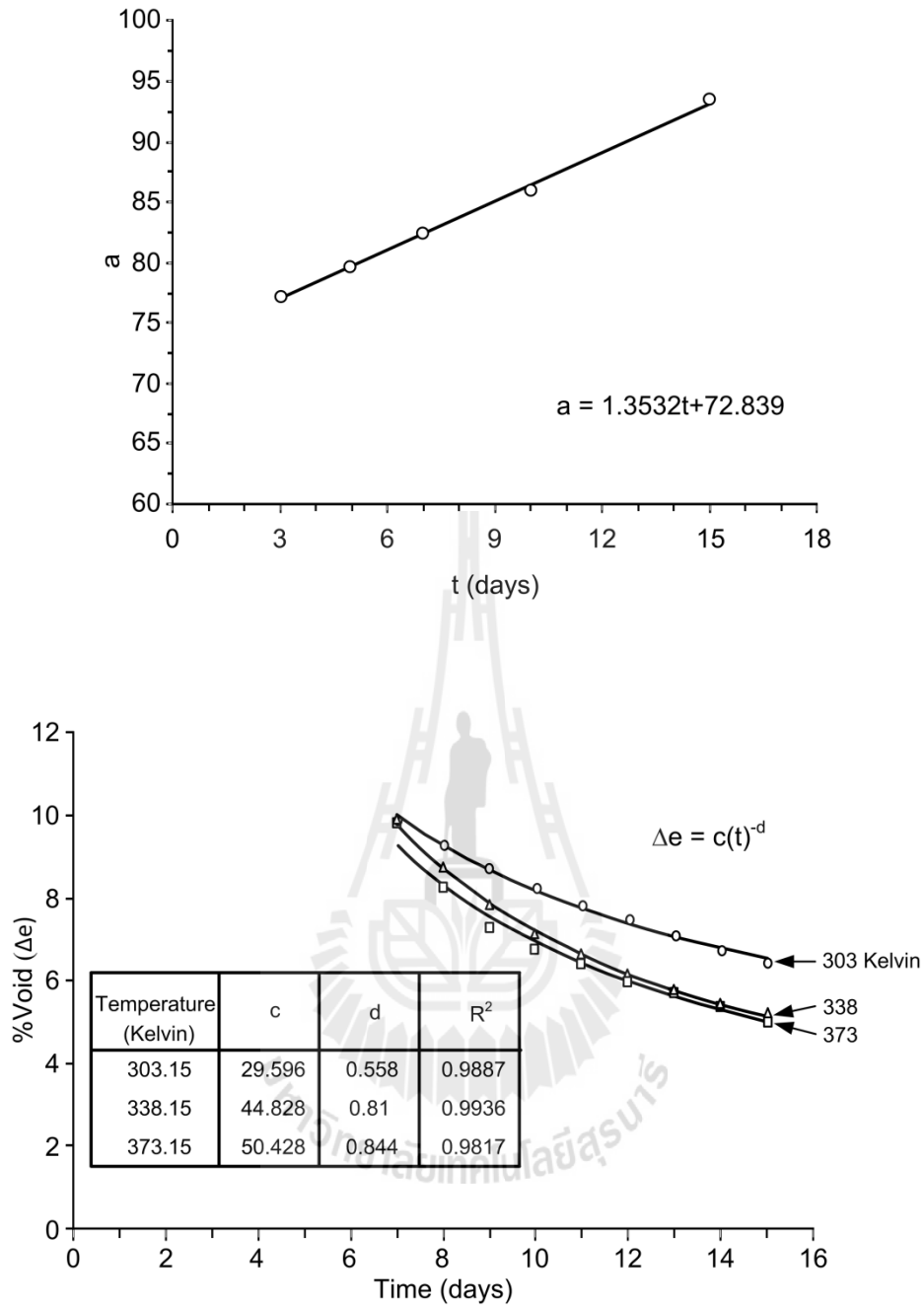
6.2 การสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรและระยะเวลาที่ใช้ในการกดอัดตัวอย่างเกลือหินบด

จากผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างเกลือหินบดที่สภาวะความเค้นกดในแนวแกนคงที่และผันแปรอุณหภูมิ ทำให้สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรและระยะเวลาที่ใช้ในการกดอัดตัวอย่างเกลือหินบดที่อุณหภูมิคงที่ระดับต่างๆ ได้ดังรูปที่ 6.3 และรูปที่ 6.4 ซึ่งอยู่ในรูปของสมการยกกำลัง โดยที่ค่าคงที่ c และ d สามารถนำมาสร้างความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบได้ โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าค่าคงที่ c และ d เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการกดอัดตัวอย่างเกลือหินบดเพิ่มขึ้นซึ่งสามารถอธิบายได้โดยใช้สมการเส้นตรง ดังแสดงในสมการที่ 6.5 และสมการที่ 6.6 ตามลำดับ

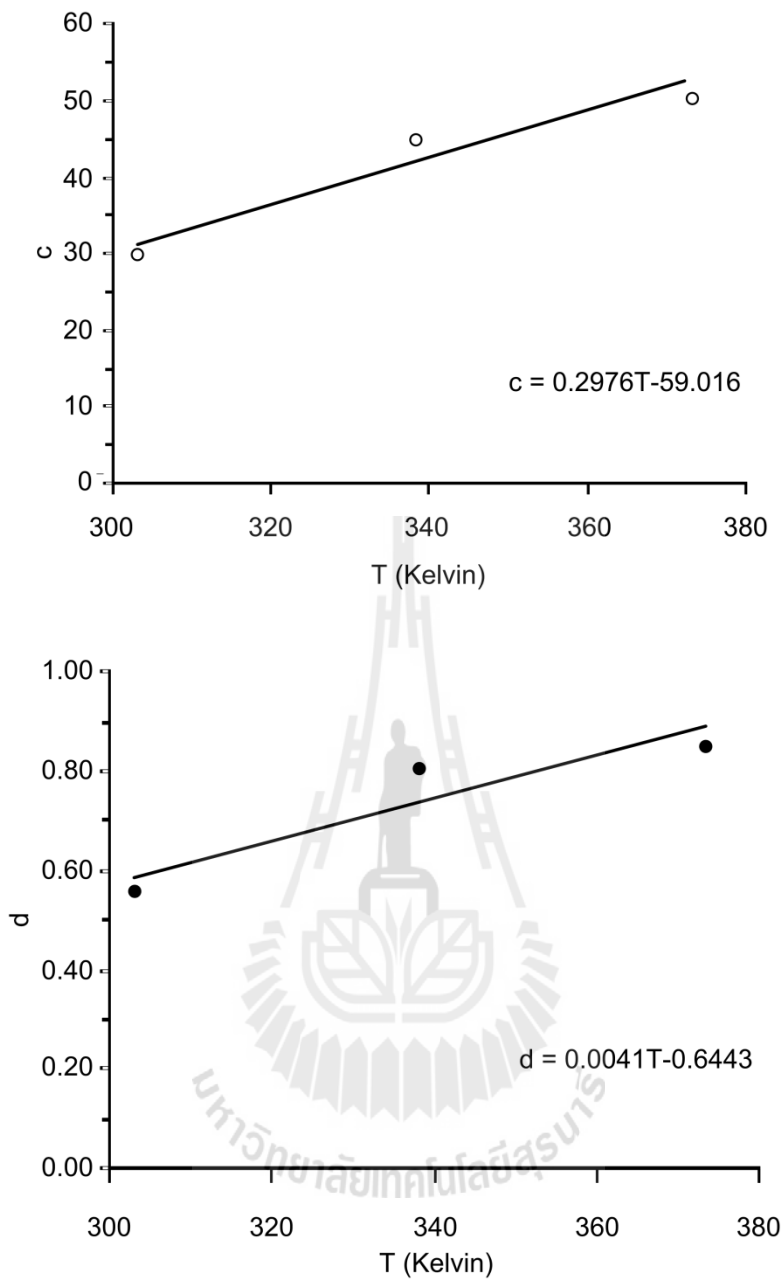
$$c = 0.2976T - 59.016 \quad (6.5)$$

$$d = 0.0041T - 0.6443 \quad (6.6)$$

โดย c และ d คือค่าคงที่ที่ได้จากการสอบเทียบและ T คืออุณหภูมิในการกดอัดตัวอย่างเกลือหินบดในหน่วย Kelvin จากสมการอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรที่ได้จากการสอบเทียบผลการทดสอบที่อุณหภูมิต่างๆ ได้แก่



รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรกับระยะเวลาในการกดอัด (t) ในแต่ละอุณหภูมิ



รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ระหว่างค่าคงที่ c (บน) และ (d) ล่าง กับอุณหภูมิ (T)

$$\Delta e = c(t)^{-d} \quad (6.7)$$

เมื่อนำสมการที่ 6.5 และสมการที่ 6.6 มาแทนค่าลงในสมการที่ 6.7 จะได้สมการ

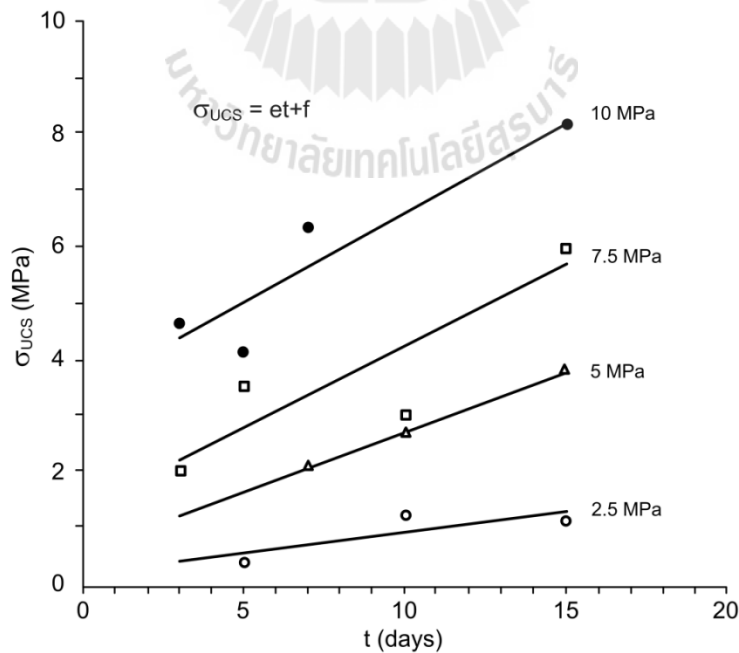
$$\Delta e = (0.2976T - 59.016)t^{-0.0041T + 0.6443} \quad (6.8)$$

โดยสมการที่ 6.8 สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการคาดคะเนพฤติกรรมการลดลงของอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรของตัวอย่างเกลือหินบดที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิเชิงเวลาได้ ซึ่งพิจารณาทั้งระยะเวลาในการกดอัดที่ 15 วัน ความเค้นกดในแนวแกน 10 MPa และสภาวะอุณหภูมิ 0 ถึง 100 องศาเซลเซียส (303 ถึง 373 Kelvin) ทั้งนี้สมการดังกล่าวสามารถคำนวณอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรของตัวอย่างเกลือหินบดผสมน้ำเกลือเข้มข้นที่อัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และสามารถประยุกต์ใช้ได้ในช่วงอุณหภูมิที่ทดสอบเท่านั้น ซึ่งควรตระหนักและพึงระวังถึงการประยุกต์ใช้สมการดังกล่าวที่อุณหภูมิใดๆ

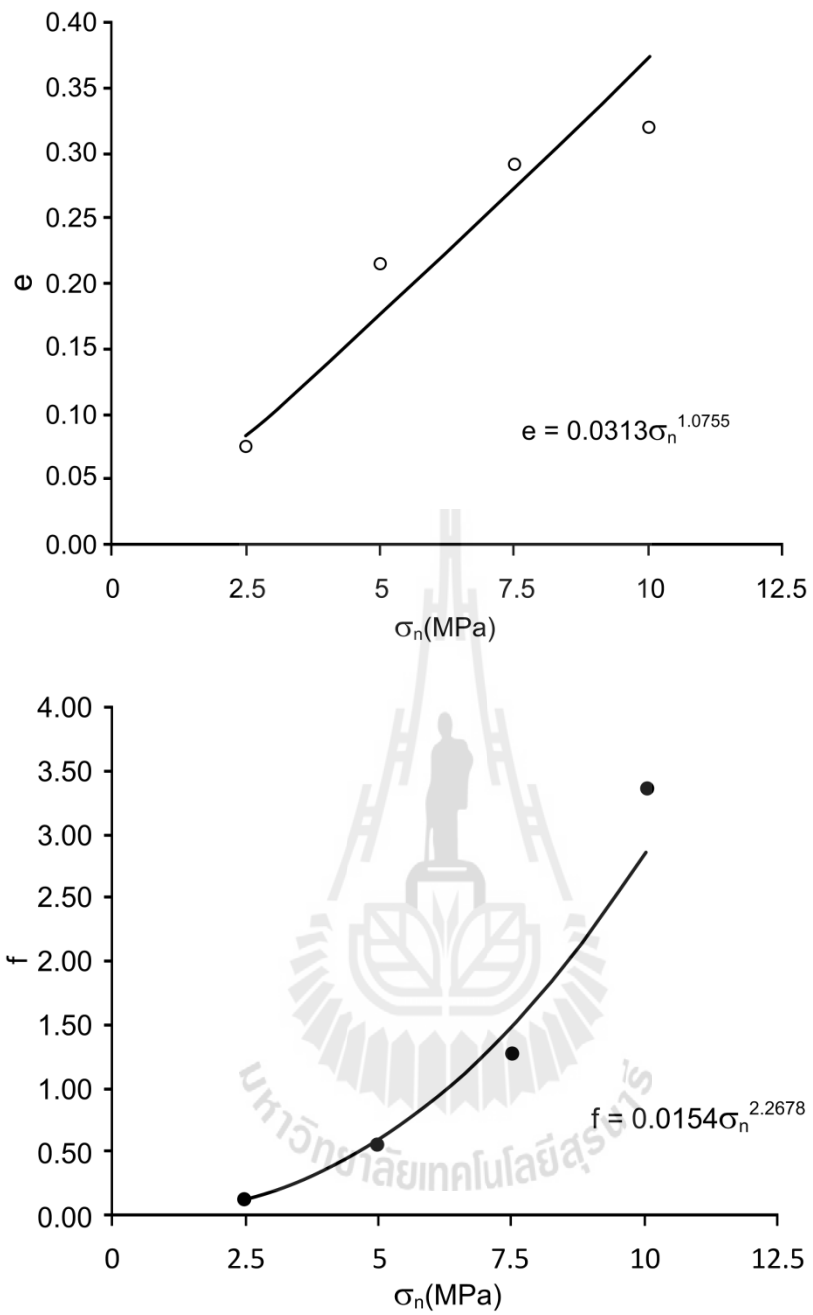
6.3 การสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของตัวอย่างเกลือหินบด

กลศาสตร์ของตัวอย่างเกลือหินบด

จากผลการทดสอบค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือหินบดผสมน้ำเกลือเข้มข้นอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ทำให้สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวและระยะเวลาที่ใช้ในการกดอัดตัวอย่างเกลือหินบดของแต่ละความเค้นกดที่ให้กับตัวอย่างได้ดังรูปที่ 6.5 รูปที่ 6.6 และตารางที่ 6.1 ซึ่งอยู่ในรูปของสมการเส้นตรง โดยที่ค่าคงที่ e และ f สามารถนำมาสร้างความสัมพันธ์กับความเค้นกดอัดที่ใช้ในการทดสอบได้ โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าค่าคงที่ e และ f เพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นกดในแนวแกนเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยใช้สมการยกกำลัง ดังสมการที่ 6.9 และสมการที่ 6.10 ดังนี้



รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์กำลังกดสูงสุดในแกนเดียว (σ_n) กับระยะเวลาในการกดอัด (t) แต่ละความเค้นกดในแนวแกน



รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ e (บน) และ f (ล่าง) กับความเค้นกดในแนวแกน (σ_n)

ตารางที่ 6.1 ค่าตัวแปรที่ได้จากการสอบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกดสูงสุดในแกนเดียวกับระยะเวลาในการกดอัดของแต่ละความเค้นกดในแนวแกน

σ_n (MPa)	e	f	R^2
2.5	0.0750	0.1333	0.8515
5	0.2153	0.5367	0.9919
7.5	0.2921	1.2801	0.8638
10	0.3205	3.3734	0.8663

$$e = 0.0133\sigma_n^{1.0755} \quad (6.9)$$

$$f = 0.0154\sigma_n^{2.2678} \quad (6.10)$$

โดย e และ f คือค่าคงที่ที่ได้จากการสอบเทียบและ σ_n คือความเค้นกดในแนวแกนที่กดอัดตัวอย่างเกลือหินบด (MPa) จากสมการกำลังกดสูงสุดในแกนเดียวที่ได้จากการสอบเทียบผลการทดสอบที่สภาวะความเค้นกดในแนวแกนระดับต่างๆ และมีอุณหภูมิคงที่ได้แก่

$$\sigma_{UCS} = et + f \quad (6.11)$$

โดย σ_{UCS} คือค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือหินบด (MPa) และเมื่อนำสมการที่ 6.9 และสมการที่ 6.10 มาแทนค่าลงในสมการที่ 6.11 จะได้สมการ

$$\sigma_{UCS} = (0.0133\sigma_n^{1.0755})t + 0.0154\sigma_n^{2.2678} \quad (6.12)$$

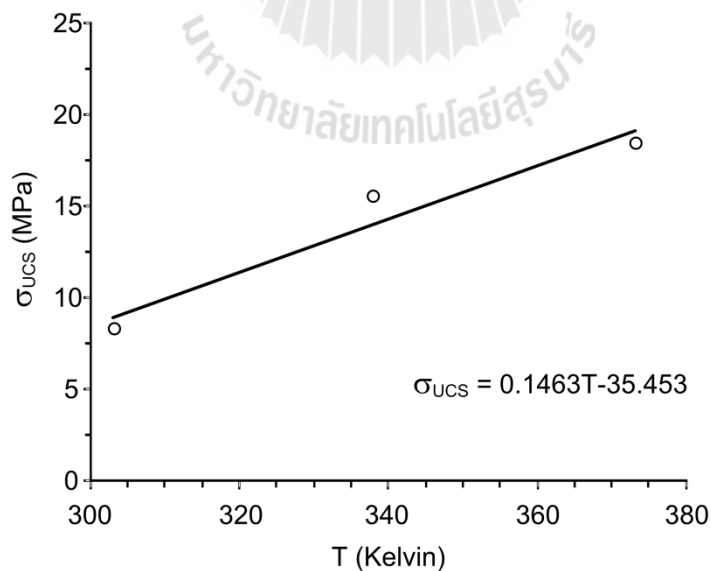
โดยสมการที่ 6.12 สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการคาดคะเนค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือหินบดที่สัมพันธ์กับความเค้นกดในแนวแกนเชิงเวลาได้ ซึ่งพิจารณาทั้งระยะเวลาในการกดอัดในช่วง 3 ถึง 15 วัน และความเค้นกดในแนวแกน 2.5 ถึง 10 MPa ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง ทั้งนี้สมการดังกล่าวสามารถคำนวณกำลังกดสูงสุดในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือหินบดผสมน้ำเกลือเข้มข้นอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และสามารถประยุกต์ใช้ได้ในช่วงความเค้นกดในแนวแกนและระยะเวลาที่ทดสอบเท่านั้น ซึ่งควรตระหนักและพึงระวังถึงการประยุกต์ใช้สมการดังกล่าวที่ความเค้นกดในแนวแกนและระยะเวลาใดๆ

จากผลการทดสอบกำลังกดสูงสุดในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือหินบดที่มีการผันแปรอุณหภูมิ พบว่าจากการสอบเทียบด้วยสมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกดสูงสุดในแกนเดียวกับอุณหภูมิที่มีการผันแปรดังรูปที่ 6.7 สามารถสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$\sigma_{UCS} = 0.1463T - 35.453 \quad (6.13)$$

โดย T คืออุณหภูมิในการกดอัดตัวอย่างเกลือหินบด (Kelvin)

สมการที่ 6.13 สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการคาดคะเนค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือหินบดที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิ ซึ่งพิจารณาระยะเวลาในการกดอัดที่ 15 วัน และความเค้นกดในแนวแกน 10 MPa โดยมีการผันแปรอุณหภูมิในช่วง 303 ถึง 373 Kelvin ทั้งนี้สมการดังกล่าวสามารถคำนวณกำลังกดสูงสุดในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือหินบดผสมน้ำเกลือเข้มข้นอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และสามารถประยุกต์ใช้ได้ในช่วงความเค้นกดในแนวแกนระยะเวลาในการกดอัดตัวอย่างเกลือหินบด และอุณหภูมิที่ทดสอบเท่านั้น ซึ่งควรตระหนักและพึงระวังถึงการประยุกต์ใช้สมการดังกล่าวที่ความเค้นกดในแนวแกน ระยะเวลาในการกดอัด และที่อุณหภูมิใดๆ



รูปที่ 6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกดสูงสุดในแกนเดียว (σ_{UCS}) กับอุณหภูมิ (T)

บทที่ 7

บทสรุป

7.1 สรุปและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของความเค้นกดในแนวแกนและอุณหภูมิต่อพฤติกรรมของเกลือหินบดที่ขึ้นกับเวลา โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดตามแนวแกน ค่าความหนาแน่น ค่าอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตร และค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพของตัวอย่างเกลือหินบดที่ขึ้นกับเวลาในการกดอัด รวมทั้งพิจารณาค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดภายใต้สภาวะความเค้นกดและอุณหภูมิต่างๆ

การทดสอบในงานวิจัยนี้เป็นการจำลองการใช้เกลือหินบดเป็นวัสดุถมกลับในช่องว่างหรือช่องทางเดินภายในเหมืองใต้ดินหลังจากที่มีการนำของเสียในภาคอุตสาหกรรมไปทิ้ง โดยทำการกดอัดตัวอย่างเกลือหินบดผสมน้ำเกลือเข้มข้นอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่บรรจุอยู่ในกระบอกทดสอบด้วยความเค้นต่างกัน 4 ระดับ คือ 2.5, 5, 7.5, และ 10 MPa เป็นระยะเวลา 3, 5, 7, 10 และ 15 วัน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 30, 65, และ 100 องศาเซลเซียส ผลการทดสอบระบุว่าที่ระดับอุณหภูมิเดียวกันและระยะเวลาในการกดอัดเท่ากัน ค่าความเครียดตามแนวแกน ค่าความหนาแน่น และค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวมีค่าเพิ่มสูงขึ้นแปรผันตรงกับขนาดความเค้นกดในแนวแกนที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพและอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่าความเค้นกดในแนวแกน ซึ่งค่าความซึมผ่านเริ่มต้นอยู่ระหว่าง $4.51 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ ถึง $2.1 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ มีค่าลดลงอยู่ในช่วง $7.21 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ ถึง $6.80 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ หลังจากถูกกดอัดเป็นระยะเวลา 15 วัน ด้วยความเค้นกดในแนวแกน 2.5 และ 10 MPa ตามลำดับ

เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิให้ตัวอย่างเกลือหินบดที่กำลังกดอัด พบว่าค่าความเครียดในแนวแกน ค่าความหนาแน่น และค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวมีค่าสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ โดยที่ค่าความเครียดในแนวแกน ค่าความหนาแน่น และค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ให้ค่าดังกล่าวข้างต้นสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่กดอัดที่อุณหภูมิ 65 และ 30 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพและค่าอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ โดยค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพมีค่าเท่ากับ $0.068 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ เมื่อกดอัดที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 15 วัน และมีค่าลดลงเป็น $5.00 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ และ $2.02 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ สำหรับที่อุณหภูมิ 65 และ 100 องศาเซลเซียส ตามลำดับที่ระยะเวลากดอัดเท่ากัน

ตัวอย่างเกลือหินบดที่มีการทดสอบด้วยการกดอัดภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่ 2 อุณหภูมิ คือ 30 และ 100 องศาเซลเซียส โดยมีการผันแปรความเค้นกดในแนวแกนเพิ่มขึ้นจาก ความเค้นกดเริ่มต้น 2.5 MPa เป็น 5, 7.5 และ 10 MPa ทุกๆ 5 วัน พบว่าพฤติกรรมกรรมการทรุดตัวของตัวอย่างเกลือหินบดมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยค่าการทรุดตัวหลังจากที่มีการผันแปร ความเค้นในแต่ระดับความเค้นมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เป็นผลให้ค่าความเครียด ค่าความหนาแน่น ค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพ และอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรของตัวอย่างเกลือหินบดหลังจากที่มีการผันแปรความเค้นกดในแนวแกนมีแนวโน้มเป็นไปตามพฤติกรรมของตัวอย่างเกลือหินบดที่ถูกอัดด้วยความเค้นกดคงที่ ผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าความเค้นกดเริ่มต้นที่ใช้กดอัดตัวอย่างเกลือหินบดมีผลต่อพฤติกรรมของเกลือหินบดมากกว่าความเค้นกด ที่มากระทำภายหลังทั้งในสภาวะอุณหภูมิ 30 และ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส การทรุดตัวของตัวอย่างเกลือหินบดมีค่าการทรุดตัวอย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการทรุดตัวที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความร้อนทำให้น้ำระเหย ออกจากตัวอย่างเกลือหินบดอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้การทรุดตัวของตัวอย่างเกลือหินบดที่ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส มีอัตราการทรุดตัวสูงในช่วงแรกแล้วคงที่

ค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวและการลดลงของอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตร สามารถคาดคะเนได้โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการสอบเทียบผลการทดสอบ ซึ่งทำให้คาดคะเนคุณสมบัติและพฤติกรรมของเกลือหินบดที่ขึ้นกับความเค้นกดในแนวแกนและ อุณหภูมิเชิงเวลาในระยะยาวได้ จากผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ คุณสมบัติเชิงชล ศาสตร์ และสมการที่ได้จากการสอบเทียบผลการทดสอบในงานวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้ในการ ออกแบบและเลือกใช้เกลือหินบดผสมน้ำเกลือเข้มข้นเป็นวัสดุถมกลับในช่องว่างหรือทางเดินใน เหมืองใต้ดินหลังจากที่มีการนำของเสียจากภาคอุตสาหกรรมไปทิ้งได้ โดยผลการทดสอบทั้ง เชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์ของตัวอย่างเกลือหินบดผสมน้ำเกลือเข้มข้นอัตราส่วนร้อยละ 5 โดย น้ำหนักหลังจากที่กดอัดด้วยความเค้นกดในแนวแกน 10 MPa เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 15 วัน ระบุว่าเกลือหินบดผสมน้ำเกลือเข้มข้นดังกล่าวมีคุณสมบัติเหมาะสมในระดับหนึ่งสำหรับใช้เป็น วัสดุถมกลับในช่องว่างของเหมืองใต้ดิน พิจารณาจากค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียวและค่าความ ซึมผ่านเชิงกายภาพ

7.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดในเรื่องของระยะเวลาและอุปกรณ์ในการทดสอบ จึง ทำให้ผลการทดสอบยังไม่ครอบคลุมคุณสมบัติของวัสดุที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุถมกลับในช่องว่าง ของเหมืองใต้ดิน ดังนั้นในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกและออกแบบการใช้เกลือหินบดเป็น

วัสดุถมกลับในช่องว่างของเหมืองใต้ดินในอนาคตควรมีการศึกษาถึงพฤติกรรมและคุณสมบัติของเกลือหินบดในเชิงรายละเอียดที่หลากหลายเพิ่มมากขึ้น อาทิเช่น คุณสมบัติในการละลายของเกลือหินบด คุณสมบัติในการคืนตัวหรือขยายตัวของตัวอย่างเกลือหินบด ค่ากำลังดึงของเกลือหินบด พฤติกรรมที่เกิดจากการสั่นสะเทือน พฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับสารกัมมันตรังสี ตลอดจนพฤติกรรมที่ได้รับผลกระทบจากความชื้น ความเค้นกดในแนวแกนและอุณหภูมิอื่นๆ ที่ไม่ได้มีการทดสอบในงานวิจัยนี้ เพื่อให้เกิดองค์ความรู้ที่หลากหลายและเป็นประโยชน์สูงสุดต่ออุตสาหกรรมแหล่งกักเก็บในโพรงเกลือที่ยั่งยืนต่อไป



บรรณานุกรม

- Butcher, B.M. (1991). Mechanics analysis of WIPP disposal room backfilled with either crushed salt or crushed salt-bentonite. In *MRS proceedings* volume. 207. Sandia National Laboratories. Div. 6345. P.O.Box 5800. Albuquerque, NM 87185.
- Butcher, B.M. (1991). The advantages of a salt/bentonite backfill for waste isolation pilot plant disposal rooms. *SAND90-3074*. Albuquerque, NM: sandia National Laboratories.
- Case, J.B. and Kelsall, P. (1987). Laboratory investigation of crushed salt consolidation. *International of Rock Machanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 25(5): 216-223.
- Fuenkajorn, K. and Phueakphum, D. (2009) Effects of loading on mechanical properties of Maha Sarakham salt. *Suranaree Journal of Science and Technology* 16(2): 91-102.
- Fuenkajorn, K. and Phueakphum, D. (2010) Effects of cyclic loading on mechanical properties of Maha Sarakham salt. *Engineering Geology* 112 (1-4): 43-52.
- Fuenkajorn, K. and Phueakphum, D. (2010) Physical model simulation of shallow openings in jointed rock mass under static and cyclic loadings. *Engineering Geology* 113 (1-4): 81-89.
- Fuenkajorn, K. and Phueakphum, D. (2011) Laboratory assessment of healing of fracture in rock salt. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 70(4): 665-672.
- Fuenkajorn, K., Phueakphum, D. and Jandakaew, M. (2003) "Healing of Rock Salt Fractures. In *Proceedings of the 38th Symposium on Engineering Geology and Geotechnical engineering*. University of Nevada, Reno, Nevada, March 19-21, pp. 393-408.
- Intaraprasit, C., Phueakphum, D., Tepnarong, P. and Fuenkajorn, K. (2009) Modified point load testing of volcanic rocks from Chatree Gold mine. In *Proceedings of the Second Thailand Symposium on Rock Mechanics*. 12-13 March 2009, Chonburi, pp. 309-318.
- Jia, X., Meng, Y. and Chai, h. (2009). PFC2D simulation research on vibrating compaction test of soil and rock aggregate mixture. In *Proceedings of the 8th International Conference (BCR2A'09)*. June 29 - July 2 2009, University of Illinois at Urbana - Champaign, Champaign, Illinois, USA

- Kensakoo, T., Phueakphum, D. and Fuenkajorn, K. (2007) Mechanical properties of Maha Sarakham salt as affected by inclusions. In *Proceedings of the First Thailand Symposium on Rock Mechanics (ThaiRock 2007)*. The Greenery Resort, Khao Yai, 13–14 September 2007, pp. 103–117.
- Korthaus, E. (1996) Consolidation and deviatoric deformation behaviour of dry crushed salt at temperature up to 150° C. In *Proc. of 4th Conf. on the Mechanical Behavior of Salt*. Montreal, Canada, pp. 365–377.
- Phueakphum, D. and Fuenkajorn, K. (2006) Experimental Assessment of Solar Thermal Energy Storage in Rock Fills In the 2nd Conference on Energy Technology Network of Thailand; E-NETT. 27–29 July 2006, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 7 pp.
- Phueakphum, D. and Fuenkajorn, K. (2007) End effect on strength and stiffness of Maha Sarakham siltstone specimens. In *EIT-JSCE Seminar on Rock Engineering 2007*. 19 September 2007, Engineering Institute of Thailand (EIT), Office Building, Bangkok, Thailand, (Published in CD ROM).
- Phueakphum, D. and Fuenkajorn, K. (2008) Effect of cyclic loading on mechanical properties of salt. In *EIT-JSCE Joint International Symposium 2008 – Monitoring and Modeling in Geo-Engineering*. 15–16 September 2008, Imperial Queen’s Park Hotel, Bangkok, Thailand, (Published in CD ROM).
- Phueakphum, D. and Fuenkajorn, K. (2009) Effects of cyclic loading on mechanical properties of salt. In *Proceedings of International Symposium on Rock Mechanics “Rock Characterization, Modelling and Engineering Design Methods.”* 19–22 May 2009, The University of Hong Kong, (Published in CD ROM).
- Phueakphum, D. and Fuenkajorn, K. (2009) Effects of cyclic loading on mechanical properties of Maha Sarakham salt. In *Proceedings of the Second Thailand Symposium on Rock Mechanics on Rock Mechanics*. 12–13 March 2009, Chonburi, pp. 107–120.
- Phueakphum, D. and Fuenkajorn, K. (2009) Mechanical properties of Maha Sarakham salt under cyclic loads. In *Proceedings of the 9th International Symposium on Salt (WorldSalt2009)*. Beijing International Convention Center (BICC), Beijing, 4–6 September 2009, pp. 91–103.

- Phueakphum, D. and Fuenkajorn, K. (2009) Solar thermal energy storage in basaltic rock. In *EIT-JSCE Joint International Symposium 2009 – Geotechnical Infrastructure and Asset Management*. 7–8 September 2009, Imperial Queen's Park Hotel, Bangkok, Thailand. pp. 261–275.
- Phueakphum, D. and Fuenkajorn, K. (2010) A rock fills based solar thermal energy storage system for housing. *ScienceAsia* 36: 237–243.
- Phueakphum, D. and Fuenkajorn, K. (2010) Physical model simulation of solar thermal energy storage in basaltic rock fills. *Research and Development Journal of the Engineering Institute of Thailand* 21(3): 11–24.
- Phueakphum, D. and Sri-In T. (2007) End effect on strength and stiffness of Maha Sarakham siltstone specimens. In *Proceedings of the First Thailand Symposium on Rock Mechanics (ThaiRock 2007)*. The Greenery Resort, Khao Yai, 13–14 September 2007, pp. 161–169.
- Phueakphum, D. Walsri, C. and Fuenkajorn, K. (2011) Brazilian tensile strength tests under axial compression. In *Proceedings of the 9th Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineering Conference*. 13–14 January 2011, Bangkok, Thailand,
- Phueakphum, D., Sri-in, T. and Fuenkajorn, K. (2008) Strength and stiffness of claystone specimens tested with neoprene capping. *Research and Development Journal of the Engineering Institute of Thailand* 19(4): 1–7.
- Pudewills, A. and Krauss, M. (1999). Implementation of a viscoplastic model for crushed salt in the ADINA program. *Computers & Structures* 72(1–3): 293–299.
- Ran, C. and Daemen, J.J.K. (1995). The influence of crushed rock salt particle gradation no compaction. In *the 35th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. June 5–7, 1995, Reno, NV A. A. Balkema, Rotterdam. Permission to Distribute – American Rock Mechanics Association.

ประวัตินักวิจัย

อาจารย์ ดร.เดโช เพ็ชอกภูมิ เกิดเมื่อวันที่ 7 มิถุนายน 2520 ที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี จบการศึกษาระดับปริญญาตรี จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา เมื่อปี พ.ศ. 2543 จบการศึกษาระดับปริญญาโทและปริญญาเอกจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สาขาวิชา-เทคโนโลยีธรณี หลักสูตรวิศวกรรมธรณี ในปี พ.ศ. 2546 และปี พ.ศ. 2552 ตามลำดับ ในขณะที่ศึกษาอยู่ได้เป็นผู้ช่วยวิจัยให้กับโครงการวิจัยหลายโครงการ หลังจากจบการศึกษาระดับปริญญาเอกได้ทำงานในตำแหน่งนักวิจัยให้กับหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีเป็นระยะเวลา 1 ปี ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา มีความชำนาญพิเศษทางด้านกลศาสตร์ของหินในเชิงการทดลอง การออกแบบ และการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ มีสิ่งตีพิมพ์นานาชาติมากกว่า 15 บทความ ทั้งวารสารและบทความการประชุมนานาชาติ

