



รหัสโครงการ SUT7-719-54-12-53

## รายงานการวิจัย

### ชุดโครงการวิจัย

การพัฒนาแหล่งเกลือหินสำหรับกักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรม

(Industrial Wastes Storage in Rock Salt)

### โครงการวิจัยย่อย

การทดสอบประสิทธิภาพการอัดตัวของเกลือหินบด

ในเชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์

(Mechanical and Hydraulic Performance of Crushed Salt)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-719-54-12-53

## รายงานการวิจัย

### ชุดโครงการวิจัย

การพัฒนาแหล่งเกลือหินสำหรับกักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรม  
(Industrial Wastes Storage in Rock Salt)

### โครงการวิจัยย่อย

การทดสอบประสิทธิภาพการอัดตัวของเกลือหินบด  
ในเชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์  
(Mechanical and Hydraulic Performance of Crushed Salt)

### คณะผู้วิจัย

#### ผู้อำนวยการชุดโครงการวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เฟื่องขจร  
สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี  
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

#### หัวหน้าโครงการวิจัยย่อย

อาจารย์ ดร.ปัทมาธิดา ชีระกุลสถิตย์  
สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี  
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2554

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ธันวาคม 2554

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปี  
งบประมาณ 2554 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากทีมงาน  
หน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีในการทดสอบและ นางสาวกัลญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัย  
ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้



ผู้วิจัย

ธันวาคม 2554

## บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือเพื่อกำหนดปัจจัยสำหรับเกล็ดเกลือบดที่จะนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุอุดในช่องเหมีอง และเพื่อประเมินศักยภาพเชิงกลศาสตร์และเชิงพลศาสตร์ของเกล็ดเกลือบดภายใต้การอัดตัว การศึกษานี้ได้ทำการทดสอบการอัดตัว ความซึมผ่านของก๊าซ และค่ากำลังเฉือนของเกล็ดเกลือบด 3 ขนาด คือ 0.425–1.0, 1.0–2.0 และ 2.0–4.75 มิลลิเมตร ตัวอย่างเกล็ดเกลือบดที่นำมาทดสอบการบดอัดมีปริมาณน้ำเกลือบดผสมอยู่ 0, 5 และ 10% โดยน้ำหนัก โดยใช้ความเค้นกดในแนวแกนผันแปรจาก 1, 2, 3 ถึง 4 MPa เป็นเวลา 1,000 ชั่วโมงหรือประมาณ 41 วัน ผลการทดสอบระบุว่าความเค้นที่สูงขึ้นจะส่งผลให้เกิดการอัดตัวเร็วขึ้น และมีอัตราการเพิ่มของความหนาแน่นสูงขึ้น ตัวอย่างเกล็ดเกลือบดที่แห้งสนิทจะไม่สามารถถูกบดอัดได้โดยง่าย ปริมาณน้ำเกลือบดที่ผสมอยู่ 5% และ 10% จะทำให้การอัดตัวมีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้ปริมาณน้ำเกลือบดทั้งสองระดับจะให้ผลของอัตราการอัดตัวที่เหมือนกัน ซึ่งเป็นเช่นนี้ทุกขนาดของเกล็ดเกลือบดที่นำมาทดสอบ การลดตัวของช่องว่างในเชิงเวลาของตัวอย่างเกล็ดเกลือบดสามารถคาดคะเนได้ด้วยสมการ exponential มุมเสียดทานภายในและความเค้นยึดติดของตัวอย่างเกล็ดเกลือบดที่ถูกบดอัดจะเพิ่มขึ้นในเชิงเวลา ตัวอย่างเกล็ดเกลือบดที่มีขนาดเล็กจะให้ค่ามุมเสียดทานและค่าความเค้นยึดติดสูงกว่าเกล็ดเกลือบดที่มีขนาดใหญ่ ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของเกล็ดเกลือบดทุกขนาดจะลดลงในเชิงเวลาภายใต้การบดอัดเช่นกัน ซึ่งจะมีการลดตัวอย่างรวดเร็วในช่วง 5 วันแรก และมีค่าค่อนข้างคงที่หลังทดสอบได้ 10 วัน โดยเกล็ดเกลือบดทั้งสามขนาดจะมีค่าความซึมผ่านใกล้เคียงกัน ผลการทดสอบระบุว่าควรใช้เกล็ดเกลือบดที่มีขนาดเล็กมาเป็นวัสดุอุด ควรผสมด้วยน้ำเกลือบดประมาณ 5% และถูกบดอัดด้วยความดันล้อมรอบไม่ต่ำกว่า 5 MPa

## Abstract

The objectives of this study are to determine the initial installation parameters for the crushed salt plugs or backfill in the mine opening, and to assess the mechanical and hydraulic performance of the material under consolidation. Consolidation, gas flow and direct shear tests are performed on crushed salt with three grain size ranges, 0.425–1.0, 1.0–2.0 and 2.0–4.75 mm. The crushed salt specimens used in the consolidation testing having initial brine contents of 0%, 5% and 10% by weight are subject to the constant axial stresses varying from 1, 2, 3, to 4 MPa for up to 1000 hrs (about 41 days). The results indicate that the greater the applied stress, the quicker the consolidation, and hence the higher rate of density increase. The completely dry specimen can not be easily consolidated. The brine contents of 5% and 10% yield an effective consolidation and give similar consolidation curves for all grain sizes. The reduction of the void ratio with time can be predicted by an exponential equation. The internal friction angle and cohesion of the crushed salt increased exponentially with increasing the consolidation time and with decreasing the grain sizes. The results of the constant head gas flow test for up to 1000 hours indicate that the hydraulic conductivities of the consolidated crushed salt of all grain size ranges are similar. They rapidly decreased during the first 5 days and tended to be constant after 10 days of testing. Based on the test results obtained here it is recommended that the fined-grain crushed salt be used as backfill and be consolidated with brine content of about 5% under a minimum confining pressure of 4 MPa.

## สารบัญ

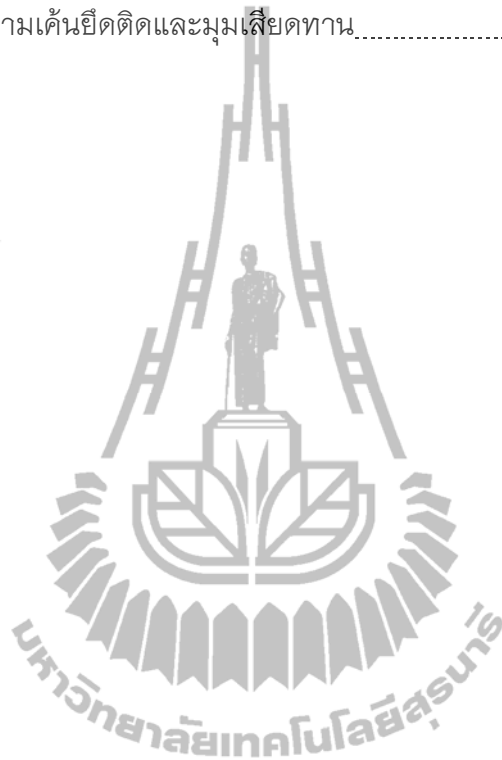
	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	3
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	4
1.5 วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง / เก็บข้อมูล.....	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	8
1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	8
<b>บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>9</b>
2.1 คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และเชิงพลศาสตร์ของเกลือหินบด.....	9
<b>บทที่ 3 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ.....</b>	<b>15</b>
3.1 วัตถุประสงค์.....	15
3.2 การเตรียมตัวอย่างเกล็ดเกลือ.....	15
3.3 การเตรียมตัวอย่างน้ำเกลืออิ่มตัว.....	15
3.4 ผลที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบ.....	17

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 4 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ</b> .....	19
4.1 วัตถุประสงค์.....	19
4.2 การจัดเตรียมตัวอย่าง.....	19
4.3 วิธีการทดสอบ.....	22
4.4 วิธีการคำนวณผลการทดสอบ.....	22
4.5 ผลการทดสอบ.....	24
4.6 การสร้างความสัมพันธ์ในเชิงคณิตศาสตร์.....	24
<b>บทที่ 5 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน</b> .....	27
5.1 วัตถุประสงค์.....	27
5.2 การจัดเตรียมตัวอย่าง.....	27
5.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	29
5.4 วิธีการทดสอบ.....	29
5.5 การคำนวณผลการทดสอบ.....	31
5.6 ผลการทดสอบ.....	32
<b>บทที่ 6 การทดสอบค่าความซึมผ่าน</b> .....	41
6.1 วัตถุประสงค์.....	41
6.2 การจัดเตรียมตัวอย่าง.....	41
6.3 วิธีการทดสอบ.....	42
6.4 การคำนวณผลการทดสอบ.....	42
6.5 ผลการทดสอบ.....	45
<b>บทที่ 7 สรุปและวิจารณ์ผล</b> .....	49
<b>บรรณานุกรม</b> .....	51
<b>ประวัตินักวิจัย</b> .....	55

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำเกลืออิ่มตัว.....	16
5.1 สรุปผลการหาค่าความเค็มยึดติดและมุมเสียดทาน.....	39





## สารบัญญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 ลักษณะการอุดหลุมเจาะและการถมกลับหรืออุดช่องในเหมืองเกลือใต้ดินสำหรับเทคโนโลยีการทิ้งกากของเสียอันตราย.....	2
1.2 แนวคิดการจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหินบดสำหรับใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	6
2.1 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับวัดค่าความซึมผ่านของตัวอย่างโดยวิธีการใช้แก๊สและการใช้น้ำเกลือ.....	13
3.1 ตัวอย่างเกล็ดเกลือทั้ง 3 ขนาด สำหรับใช้ในการทดสอบ.....	16
3.2 ตัวอย่างการเตรียมน้ำเกลืออิ่มตัว เพื่อใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	16
4.1 การผสมเกล็ดเกลือเข้ากับน้ำเกลืออิ่มตัวในอัตราส่วนต่างๆ.....	20
4.2 แบบหล่อทดสอบการอัดตัวคายน้ำเพื่อหาค่าความชื้นของน้ำเกลือที่เหมาะสม.....	20
4.3 การเทส่วนผสมระหว่างเกล็ดเกลือเข้ากับน้ำเกลืออิ่มตัวในอัตราส่วนต่างๆ ลงในแบบหล่อทดสอบ.....	21
4.4 การกระแทกเบาๆ ด้วยแท่งเหล็กลงในแบบหล่อ.....	21
4.5 แบบหล่อทดสอบทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวและเครื่องให้แรงในแนวตั้ง....	23
4.6 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับเวลาในอัตราส่วนความชื้นของน้ำเกลืออิ่มตัวร้อยละ 10, 5 และ 0 ตามลำดับ.....	25
4.7 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างของเกล็ดเกลือกับเวลาในอัตราส่วนความชื้นของน้ำเกลืออิ่มตัวร้อยละ 10, 5 และ 0 ตามลำดับ.....	26
5.1 เกล็ดเกลือที่ผสมกับน้ำเกลือโดยคิดเป็นร้อยละ 5 ของน้ำหนักเกล็ดเกลือ.....	28
5.2 การตัดเกล็ดเกลือที่ผสมกับน้ำเกลือใส่เบ้าทดสอบ.....	28
5.3 การอัดเกล็ดเกลือโดยใช้แท่งเหล็กกระแทกเบาๆ เพื่อให้เกล็ดเกลือแน่นสม่ำเสมอทั่วทั้งเบ้าทดสอบ.....	30
5.4 การประกอบเครื่องทดสอบกำลังเฉือนเข้ากับกระบอกตัวอย่าง.....	30
5.5 แผนภูมิความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของระยะการเคลื่อนตัวในแนวระนาบโดยมีการผันแปรขนาดของเกล็ดเกลือ กำลังกดแนวตั้ง และระยะเวลาการอัดตัวคายน้ำที่ 1 ชั่วโมง.....	33

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.6 แผนภูมิความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของระยะเวลาเคลื่อนตัวในแนวระนาบโดยมีการผันแปรขนาดของเกล็ดเกล็ด กำลังกดแนวตั้ง และระยะเวลาการอัดตัวคายน้ำที่ 10 ชั่วโมง.....	34
5.7 แผนภูมิความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของระยะเวลาเคลื่อนตัวในแนวระนาบโดยมีการผันแปรขนาดของเกล็ดเกล็ด กำลังกดแนวตั้ง และระยะเวลาการอัดตัวคายน้ำที่ 20 ชั่วโมง.....	35
5.8 แผนภูมิความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของระยะเวลาเคลื่อนตัวในแนวระนาบโดยมีการผันแปรขนาดของเกล็ดเกล็ด กำลังกดแนวตั้ง และระยะเวลาการอัดตัวคายน้ำที่ 100 ชั่วโมง.....	36
5.9 ความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนสูงสุดในฟังก์ชันของความเค้นตั้งฉากโดยมีการผันแปรขนาดของเกล็ดเกล็ดในระยะเวลาการอัดตัวคายน้ำต่างกันที่ 1 ชั่วโมง.....	37
5.10 ความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนสูงสุดในฟังก์ชันของความเค้นตั้งฉากโดยมีการผันแปรขนาดของเกล็ดเกล็ดในระยะเวลาการอัดตัวคายน้ำต่างกันที่ 10 ชั่วโมง.....	37
5.11 ความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนสูงสุดในฟังก์ชันของความเค้นตั้งฉากโดยมีการผันแปรขนาดของเกล็ดเกล็ดในระยะเวลาการอัดตัวคายน้ำต่างกันที่ 20 ชั่วโมง....	38
5.12 ความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนสูงสุดในฟังก์ชันของความเค้นตั้งฉากโดยมีการผันแปรขนาดของเกล็ดเกล็ดในระยะเวลาการอัดตัวคายน้ำต่างกันที่ 100 ชั่วโมง..	38
5.13 ค่าความเค้นยึดติดและค่ามุมเสียดทานภายในที่เพิ่มขึ้นในเชิงเวลา ในระหว่างการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของเกล็ดเกล็ด ภายใต้ความเค้นกดในแนวแกนเท่ากับ 4 MPa.....	40
6.1 แผนภูมิแสดงอุปกรณ์การทดสอบวัดค่าความซึมผ่าน.....	43
6.2 แบบหล่อทดสอบที่ใช้ในการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบวัดค่าความซึมผ่าน.....	43
6.3 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพกับระยะเวลาในการอัดตัวคายน้ำของเกล็ดเกล็ดขนาดใหญ่ ขนาดกลาง และขนาดเล็กตามลำดับ...	46
6.4 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพกับระยะเวลาในการอัดตัวคายน้ำโดยเปรียบเทียบเกล็ดเกล็ดทั้งสามขนาด.....	47

# บทที่ 1

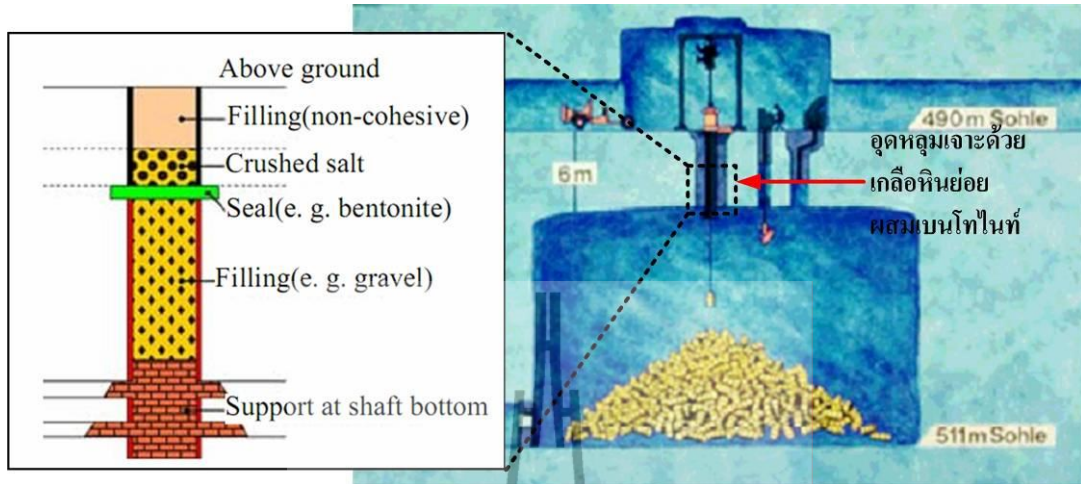
## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

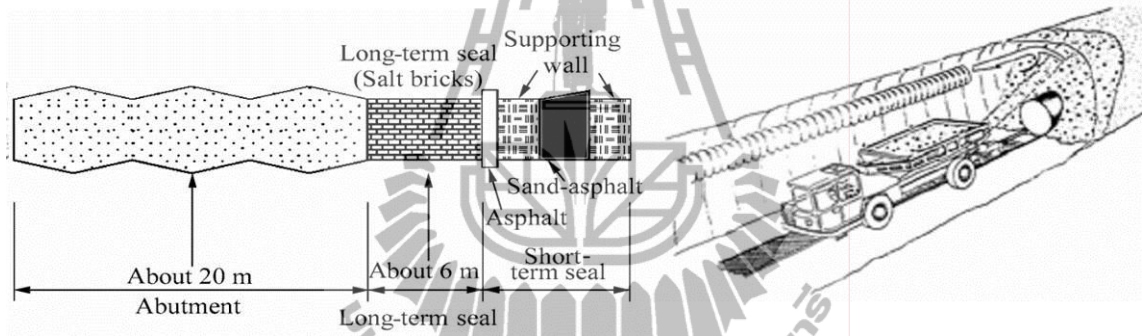
เทคโนโลยีการกักเก็บหรือการทิ้งกากของเสียอันตรายที่ไม่สามารถบำบัดได้จากภาคอุตสาหกรรมไว้ในเหมืองเกลือใต้ดินนับว่ามีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับประเทศไทย กฎหมายสำคัญที่จะทำให้การดำเนินการประสบความสำเร็จได้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของชั้นเกลือหินและการออกแบบลักษณะการวางตัวรวมทั้งขนาดช่องเปิดของเหมืองที่มีเสถียรภาพ ปัจจัยอีกประการหนึ่งที่มีความสำคัญคือวัสดุที่ใช้ถมกลับเข้าไปยังช่องว่างในเหมืองใต้ดินภายหลังจากที่มีการนำเอากากของเสียอันตรายไปทิ้งตามปริมาณที่ได้ออกแบบไว้ คุณสมบัติที่พึงพิจารณาสำหรับวัสดุถมกลับคือความเหมาะสมเชิงกลศาสตร์ (มีความสามารถในการต้านทานความเค้นที่เกิดขึ้นในเหมืองได้โดยไม่มีปริบัติ) ความเหมาะสมเชิงพลศาสตร์ (มีค่าความซึมผ่านต่ำ) สามารถดูดซับน้ำเกลือและสารพิษอันตรายไม่ให้รั่วไหลสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกและสะดวกในการดำเนินงาน

เทคโนโลยีนี้ได้ใช้อย่างเป็นรูปธรรมในต่างประเทศมากกว่า 20 ปี โครงการที่เป็นที่รู้จักกันอย่างกว้างขวางคือ “Waste Isolate Pilot Plant (WIPP)” วัสดุถมกลับที่นิยมใช้คือเกลือหินบดบริสุทธิ์หรือเกลือหินบดผสมกับเบนโทไนต์ในอัตราส่วนที่เหมาะสม แล้วทำการบดอัด (Compaction) หรือกดอัด (Compression) ให้เป็นแท่งเกลือก้อนสี่เหลี่ยม เมื่อต้องการใช้จะนำเอาแท่งเกลือไปเรียงเป็นกำแพงซ้อนกันหลายชั้นปิดกั้นช่องทางระหว่างพื้นที่กักเก็บกากของเสียอันตราย (สารกัมมันตภาพรังสี) และพื้นที่ที่เป็นทางขนส่ง (รูปที่ 1.1) การใช้เกลือหินบดนับว่ามีความเหมาะสมมากเพราะมีความเข้ากันในเชิงเคมีและเชิงกายภาพกับเกลือหินเดิม ในขบวนการขุดเจาะช่องเหมืองจะได้เกลือหินซึ่งสามารถนำไปใช้ได้เลย จึงทำให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการจัดหาวัสดุอย่างอื่น

เทคโนโลยีนี้ยังเป็นเทคโนโลยีใหม่สำหรับประเทศไทย ดังนั้นหากจะพิจารณาสร้างเหมืองเกลือใต้ดินเพื่อการทิ้งกากของเสียจะต้องมีการออกแบบและทดสอบคุณสมบัติของวัสดุถมกลับให้ละเอียดเพื่อให้เข้าใจกลไกการอัดตัว พฤติกรรมเชิงกลศาสตร์และพลศาสตร์ของเกลือหินบดจากแอ่งเกลือหินในประเทศไทย และนำไปประเมินความเหมาะสมที่จะใช้เกลือหินบดเป็นวัสดุถมกลับในเทคโนโลยีนี้และเป็นกฎหมายสำคัญที่จะประเมินความเป็นไปได้ของการนำเอาเทคโนโลยีนี้มาใช้เป็นรูปธรรมเพื่อลดและป้องกันปัญหาสิ่งแวดล้อมจากของเสียอันตรายในประเทศไทย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการวิจัยเพื่อศึกษาคุณสมบัติของเกลือหินบดให้ละเอียดใน



(ก) การอุดหลุมเจาะในแนวตั้ง



(ข) การอุดหลุมช่องเหมืองในแนวระดับ

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

ประเด็นต่อไปนี้ 1) การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นและปริมาตรช่องว่างเมื่อเกลือหินบดถูกกดอัดด้วยความเค้นที่แตกต่างกัน 2) การเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นผ่านของเกลือหินบดในสภาวะที่ทดสอบ 3) การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และเชิงชลศาสตร์ในเชิงเวลาและ 4) ส่วนผสมของเกลือหินบดที่เหมาะสมและมีคุณสมบัติที่ดีที่สุด

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาผลกระทบเกี่ยวกับการลดขนาดของเกลือหินบด (Crushed salt gradation) ความเค้นกด (Axial stress) บนตัวอย่าง ระยะเวลาที่ทดสอบ และปริมาณน้ำเกลือเข้มข้น (Brine content) ในตัวอย่างต่อพฤติกรรมภายใต้การกดอัด (Compression test) และการอัดตัวแบบคายน้ำ (Consolidation drained test) โดยวัดค่าความชื้นผ่าน การลดลงของปริมาตรช่องว่าง และการวิบัติของตัวอย่างเกลือหินบด
- 2) พัฒนাসมาการทางคณิตศาสตร์จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Empirical relationship) เพื่ออธิบายพฤติกรรมการอัดตัว (การลดลงของช่องว่าง ( $e$ ) และอัตราการเกิดความเครียด ( $\epsilon_{axial}$ ) และเกณฑ์การวิบัติตามกฎของคูลอมป์ ( $c$  และ  $\phi$ ) ของเกลือหินบดที่สัมพันธ์กับความเค้น ( $\sigma_{axial}$ ) ความชื้น ( $w_b$ ) และเวลา ( $t$ )
- 3) ระบุส่วนผสมและสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมตัวอย่างเกลือหินเพื่อใช้เป็นวัสดุถมกลับ โดยพิจารณาจากคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ (มีความสามารถในการต้านทานความเค้นในสภาวะจริง) และมีความเหมาะสมเชิงชลศาสตร์ (มีค่าความชื้นผ่านอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้)

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) ศึกษาและประมวลข้อมูลจากเอกสารอ้างอิงเกี่ยวกับการทดสอบการอัดตัวและประสานตัวของเกลือหินบดในห้องปฏิบัติการ การใช้เกลือหินบดสำหรับเป็นวัสดุถมกลับ (Backfill) และอัตราส่วนที่ใช้ รวมทั้งพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์ของวัสดุถมกลับที่มีการออกแบบและใช้กันอย่างเป็นรูปธรรมในต่างประเทศ
- 2) ในงานวิจัยนี้ได้นำแท่งตัวอย่างเกลือหินไปบดด้วยเครื่องบด (Crushing machine) เพื่อให้ได้ขนาดเม็ดที่ต่างกัน ซึ่งมีการคัดขนาดด้วยการร่อนผ่านตะแกรงตามมาตรฐาน ASTM C 136-06 ตัวอย่างที่ค้างตะแกรงแต่ละเบอร์จะถูกนำมากำหนดอัตราส่วนผสมเพื่อให้ได้ขนาดคละตามที่ต้องการ ขนาดคละที่กำหนดอัตราส่วนผสมใหม่มี 2 ตัวอย่าง

- 3) ตัวอย่างเกลือหินบดแต่ละขนาดจะได้มีการผสมน้ำเกลือเข้มข้นเข้าไปในตัวอย่าง โดยมีการผันแปรระดับความชื้น (Brine content) ในตัวอย่างจำนวน 3 ระดับ คือ 0%, 5% และ 10% โดยน้ำหนัก ภายหลังจากคลุกเคล้าเข้ากับน้ำเกลือเข้มข้นเป็นอย่างดีแล้ว ตัวอย่างจะถูกนำไปกดอัดด้วยความเค้น (Pre-compressed) ที่ระดับเดียวกันคือ 4 MPa ในกระบอกสแตนเลส (รัศมีภายในเท่ากับ 54 มิลลิเมตร) ให้เป็นชั้นๆ จำนวน 4 ชั้น ให้ได้ความยาวรวมของตัวอย่างในกระบอกทดสอบเท่ากับ 160 มิลลิเมตร
- 4) ตัวอย่างที่กดอัดเรียบร้อยแล้วได้ถูกนำไปติดตั้งในเครื่องกด Consolidation machine โดยมีการกดด้วยแรงคงที่ 3 ระดับ คือ 1, 2, 3 และ 4 MPa เป็นระยะเวลาสูงสุด 1,000 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดแต่ละช่วง ตัวอย่างจะถูกนำออกมาทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดและความยาวของตัวอย่าง จะถูกอ่านและบันทึกไว้ตลอดเวลาที่ทดสอบเพื่อนำไปคำนวณหาปริมาตรช่องว่างที่เปลี่ยนไป
- 5) การทดสอบคุณสมบัติเชิงชลศาสตร์ได้มีการวัดอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนผ่านตัวอย่างเกลือหินบดและคำนวณออกมาเป็นค่าความซึมผ่านที่ลดลงตามเวลาที่ทดสอบ การทดสอบเชิงกลศาสตร์จะมีการนำเอาตัวอย่างหินไปทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวและกำลังรับแรงกดในสามแกนของช่วงเวลาการทดสอบที่ต่างกันเพื่อนำมาสร้างเป็นเกณฑ์การวิบัติ
- 6) ผลงานวิจัยจะนำไปเผยแพร่องค์ความรู้ในรูปของบทความในการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการและวารสารทางวิชาการในระดับนานาชาติ

#### 1.4. ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

งานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะนำเอาเศษเกลือที่ขุดออกมาจากการทำเหมืองเกลือใต้ดินไปใช้ประโยชน์เพื่อเป็นวัสดุถมกลับ (Backfill) หรือวัสดุอุด (Seal material) ตามช่องทางเดินในเหมืองภายหลังจากที่มีการนำเอาของเสียอันตราย (Toxic waste) ไปทิ้งไว้ เนื่องจากโครงการดังกล่าวยังไม่มีการดำเนินการอย่างเป็นทางการเป็นรูปธรรม (เป็นเพียงแนวคิดของผู้วิจัยเท่านั้น) จึงไม่มีตัวอย่างจากเหมืองเกลือสำหรับเทคโนโลยีนี้โดยตรง โดยตัวอย่างเกลือหินจะได้จากหลุมเจาะสำรวจและเหมืองเกลือใต้ดินของภาคเอกชน

ก้อนเกลือหินที่ได้จากการขุดตัดจากเหมืองใต้ดินของภาคเอกชน หรือแท่งตัวอย่างเกลือหินจากหลุมเจาะสำรวจได้ถูกนำไปบดย่อยด้วยเครื่องย่อยหิน (Crushing machine) ให้ได้ขนาดเม็ดเกลือที่เล็กลง เกลือหินที่บดนี้จะมีขนาดของเม็ดเกลือลดลงกันไป ก่อนจะนำมาใช้ในการทดสอบจะต้องมีการคัดขนาดด้วยการร่อนผ่านตะแกรง (Sieve) เพื่อให้ได้เม็ดเกลือที่มีขนาด

ระหว่าง 2-5 มิลลิเมตร ซึ่งต้องใช้ตะแกรงเบอร์ #4 (4.76 mm) ถึงเบอร์ #10 (2.00 mm) ตัวอย่างแต่ละขนาดที่ต่างตะแกรงแต่ละเบอร์จะถูกนำมาผสมในอัตราส่วนใหม่เพื่อให้ได้ขนาดคละที่ต่างกัน 2 ขนาด จุดประสงค์ของการเตรียมตัวอย่างให้ได้ขนาดคละที่ต่างกันก็เพื่อศึกษาผลกระทบของการคละขนาดต่อประสิทธิภาพในการอัดตัวของตัวอย่างเกล็ดหินบดนั่นเอง ตัวอย่างเกล็ดทั้ง 2 ขนาดคละนี้ได้นำไปผสมกับน้ำเกล็ดเข้มข้นในปริมาณที่แตกต่างกันเพื่อไม่ให้เกิดการละลายตัวอย่างเพิ่มหลังจากที่ผสมกับเม็ดเกล็ดแล้ว และทำการกดอัดด้วยพลังงานที่เท่ากันเพื่อหาว่าปริมาณน้ำเกล็ดเท่าไรที่ให้ค่าความหนาแน่นสูงสุด และตัวอย่างที่ให้ค่าความหนาแน่นสูงสุดจะถูกกดอัดด้วยความเค้นกดที่ต่างกัน โดยให้ความเค้นกดคงที่ที่ระยะเวลาต่างกัน เมื่อครบกำหนดได้นำตัวอย่างไปประเมินคุณสมบัติทางกลศาสตร์ (ทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวและในสามแกน) และชลศาสตร์ (วัดค่าความซึมผ่าน)

## 1.5 วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง / เก็บข้อมูล

การวิจัยแบ่งออกเป็น 8 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

### ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และเชิงชลศาสตร์ของเกล็ดหินบดที่นำมาใช้เป็นวัสดุถมกลับในเมืองเกล็ดใต้ดินรวมทั้ง พฤติกรรมของเกล็ดหินบดภายใต้ความเค้นกดที่กระทำและผลกระทบจากความชื้นในประเด็นต่างๆ เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในงานวิจัยนี้

### ขั้นตอนที่ 2 การเก็บและจัดเตรียมตัวอย่างเกล็ดหินบด

นำแท่งตัวอย่างเกล็ดหินที่ได้จากหลุมเจาะหรือก้อนตัวอย่างเกล็ดหินที่ขุดจากเหมืองใต้ดินไปบดย่อยให้ได้ขนาดเล็กลงและร่อนผ่านตะแกรงระหว่างขนาด 4.76 มิลลิเมตร (#4) ถึง 2.00 มิลลิเมตร (#10) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ตามมาตรฐาน ASTM C136-06 เพื่อทำการแยกขนาดของผลึกเกล็ด ตัวอย่างเกล็ดแต่ละขนาดจะถูกกำหนดอัตราส่วนผสมใหม่ โดยกำหนดอัตราส่วนผสมของเกล็ดเม็ดแต่ละขนาดหรือขนาดคละจำนวน 2 ระดับ เพื่อใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ส่วนผสมที่ใช้จะกำหนดให้มีเกล็ดขนาดใหญ่ที่สุดไม่เกิน 5 มิลลิเมตร และขนาดเล็กที่สุดไม่ต่ำกว่า 2 มิลลิเมตร



รูปที่ 1.2 แนวคิดการจัดเตรียมตัวอย่างเกลือบดสำหรับใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ



### ขั้นตอนที่ 3 การประดิษฐ์กระบอกสำหรับทดสอบ

กระบอกสำหรับใช้บรรจุและทดสอบการอัดตัวของตัวอย่างเกลือหินบดจะต้องทำจากสแตนเลสเพื่อป้องกันการผุกร่อนหรือเสื่อมสภาพเนื่องจากการทำปฏิกิริยากับเกลือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของกระบอกตัวอย่างจะต้องมีค่าเท่ากับ 54 มิลลิเมตรเมตร ซึ่งเป็นขนาดของตัวอย่างที่เหมาะสมกับการทดสอบกำลังรับแรงกดในสามแกนที่ห้องปฏิบัติการมีอุปกรณ์สำหรับทดสอบในรูปแบบนี้อยู่แล้ว กระบอกทดสอบจะต้องมีความหนาประมาณ 5 ถึง 10 มิลลิเมตร ด้านหัวและท้ายของกระบอกจะมีแผ่นปิดทำหน้าที่ส่งแรงกดให้กับตัวอย่าง และจะเจาะรูไว้ให้มีการระบายน้ำเกลือออกจากตัวอย่างได้

### ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

จุดประสงค์ของการทดสอบในห้องปฏิบัติการ คือ เพื่อประเมินการอัดตัวของตัวอย่างเกลือบดและความสามารถในการเชื่อมประสานตัว (Self-healing) ภายใต้ความชื้น และความเค้นที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นการจำลองสภาวะแวดล้อมในเมืองเกลือใต้ดินสำหรับเทคโนโลยีการกักเก็บกากของเสียอันตรายจากภาคอุตสาหกรรม ประสิทธิภาพในการเชื่อมประสานตัวของเกลือหินบดจากการทดสอบจะประเมินจากคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และเชิงพลศาสตร์ที่เปลี่ยนแปลง กล่าวคือ ประเมินค่าความซึมผ่าน (Hydraulic conductivity) ของตัวอย่างเกลือหินบดจากการวัดอัตราการไหลผ่านด้วยก๊าซไนโตรเจน และมีการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ได้แก่กำลังรับแรงแรงเฉือน

### ขั้นตอนที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ผลที่ได้จากการตรวจวัดในขั้นตอนที่ 3 จะนำค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวมาคำนวณเป็นความเครียดตามแนวแกน ( $\epsilon_{axial}$ ) ของตัวอย่างและการเปลี่ยนแปลงช่องว่าง (e) ในตัวอย่างเพื่อสร้างความสัมพันธ์กับเวลา (t) ที่ทดสอบ ความสัมพันธ์นี้จะนำไปสอบเทียบเพื่อหาค่าตัวแปรในสมการที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการอัดตัวของตัวอย่างโดยอ้างอิงสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีการพัฒนาไว้แล้ว

ผลการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวและในสามแกนจะนำไปสร้างเกณฑ์การวิบัติตามกฎของคูลอมป์ (c และ  $\phi$ ) ของเกลือหินบดที่อยู่ในรูปของความสัมพันธ์กับขนาดคละ (D) ความชื้นของน้ำเกลือ (w) ระดับความเค้นกด ( $\sigma_{axial}$ ) และเวลา (t)

### ขั้นตอนที่ 6 การศึกษาด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

ในขั้นตอนนี้จะมีการจำลองเหมืองเกลือใต้ดินภายหลังจากมีการถล่มกลับด้วยเกลือหินบดแล้วโดยใช้โปรแกรม FLAC เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพและทำนายพฤติกรรมของเหมืองเกลือใต้ดินเมื่อมีการถล่มกลับด้วยเกลือหินบด ค่าคุณสมบัติด้านความแข็งและพฤติกรรมในเชิงเวลาของเกลือหินบดที่สอบเทียบได้ในขั้นตอนที่ 4 จะนำมาใช้เป็นค่าคงที่ในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

### ขั้นตอนที่ 7 การถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่กลุ่มเป้าหมาย

ผลงานวิจัยจะนำไปเผยแพร่องค์ความรู้ในรูปของบทความวิชาการในการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ 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 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยที่เสนอมานี้มีประโยชน์อย่างมากกับงานด้านวิศวกรรมธรณี วิศวกรรมโยธา และวิศวกรรมเหมืองแร่ที่เกี่ยวข้องกับการปิดและฟื้นฟูเหมืองหลังจากเสร็จสิ้นกิจการทำเหมือง การป้องกันการทรุดตัวของผิวดินจากการทำเหมืองใต้ดิน และงานด้านวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับการกักเก็บของเสียอันตรายที่ไม่สามารถบำบัดได้

### 1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยที่เสนอมานี้จะมีประโยชน์อย่างมากและโดยตรงกับหลายหน่วยงาน 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 รวมทั้งพฤติกรรมของเกลือหินบดภายใต้ความเค้นกดที่กระทำและผลกระทบจากความชื้นซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

#### 2.1 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 วัสดุที่ใช้ถมกลับนั้นอาจจะเป็นเกลือหินบดเพียงอย่างเดียวหรือผสมกันระหว่างเกลือหินบดกับเบนโทไนต์ งานวิจัยเหล่านี้จะมุ่งประเด็นไปที่การออกแบบส่วนผสมในวัสดุถมกลับ (ขนาดคละของเกลือหินบดและสัดส่วนของเกลือกับเบนโทไนต์) และผลกระทบจากปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการอัดตัวของตัวอย่างที่ผสมกัน ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น ความเค้นกดบนตัวอย่าง และระยะเวลาในการอัดตัว ในการทดสอบได้มีการตรวจวัดค่าความซึมผ่านโดยใช้ก๊าซไนโตรเจนหรือใช้น้ำเกลือเข้มข้น การวัดค่าความพรุนและปริมาตรช่องว่าง การวัดอัตราการเกิดความเครียดของตัวอย่างในเชิงเวลา กำลังรับแรงกดและแรงเฉือนของตัวอย่าง นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (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) ค่าความซึมผ่านต่ำ (2) มีเสถียรภาพทางด้านเคมี วัสดุถมกลับต้องไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับน้ำเกลือหรือส่วนต่างในห้อง

กักเก็บ (3) มีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์ และ (4) สะดวกในการจัดการ และ 2) เกณฑ์ที่ต้องการเพิ่มเติม (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) ได้ศึกษาค่าความหนาแน่นของเกลือหินบดสำหรับใช้เป็นวัสดุถมกลับ (Backfill) และวัสดุอุด (Seal material) ซึ่งได้มีการทดสอบการอัดตัว (Consolidation test) ของเกลือหินบดในห้องปฏิบัติการโดยจุดประสงค์เพื่อทำความเข้าใจในกระบวนการอัดตัวของตัวอย่างว่ามีผลต่อค่าความชื้นผ่าน ความพรุน และอัตราการเกิดความเครียดได้อย่างไร ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้มาจากโครงการทิ้งกากนิวเคลียร์ Waste Isolation Pilot Plant และที่เหมือง Avery Island Mine การทดสอบใช้ระยะเวลา 1 ถึง 2 เดือน มีขนาดเม็ด 1, 10, และ 20 มิลลิเมตร เมื่อนำมาผสมกันแล้วจะมีค่าความพรุนเริ่มต้นระหว่าง 26% ถึง 36% ตัวอย่างที่จัดเตรียมจะมีความชื้นในตัวอย่างที่ 0% และ 2% โดยน้ำหนัก ค่าความชื้นผ่านเริ่มต้นที่วัดได้ระหว่าง  $10^5$  ถึง  $10^5$  มิลลิคาร์ซี การทดสอบดำเนินการภายใต้อุณหภูมิห้อง ความดันล้อมรอบตัวอย่างมีค่าอยู่ระหว่าง 0.34 ถึง 17 MPa การทดสอบนี้มุ่งความสนใจไปที่ผลกระทบจากความชื้นต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นผ่าน ความพรุน และอัตราการเกิดความเครียดเชิงปริมาตรของตัวอย่าง ผลการทดสอบของตัวอย่างที่มีค่าความชื้น (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) ผสมกับเบนโทไนต์ (30% โดยน้ำหนัก) เพื่อใช้ในโครงการ Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) ซึ่งเป็นโครงการทิ้งกากนิวเคลียร์ในเหมืองเกลือใต้ดินที่ประเทศตุรกี ตัวอย่างทั้งสองชนิดจะถูกทดสอบกักอัดจนกระทั่งได้ค่าความชื้นผ่านต่ำกว่า  $10^{-18} \text{ m}^2$  ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของรัฐบาล ผลการทดสอบได้ข้อสรุปว่าเกลือหินบดผสมเบนโทไนต์จะมี

ประสิทธิภาพดีว่าเกลือหินบดเพียงอย่างเดียว การผสมเบนโทไนต์ในเกลือหินบดมีข้อดีคือเบนโทไนต์มีความสามารถในการดูดซับน้ำเกลือและสารกัมมันตภาพรังสี

Korthaus (1996) ได้ทดสอบการอัดตัวของเกลือหินบดในสภาวะแห้งด้วยเครื่องกด โดยให้ความเค้นแบบสามแกนจริง ผลการทดสอบจะตรวจวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนตัวอย่างตามระยะเวลาที่ทำการทดสอบแล้วนำผลไปสอบเทียบหาค่าตัวแปรในสมการเชิงคณิตศาสตร์แบบยืดหยุ่นเชิงพลาสติก (Viscoplastic constitutive law) ในการทดสอบตัวอย่างจะอยู่ภายใต้ความเค้นในช่วง 2 ถึง 20 MPa มีค่าความพหุนเริ่มต้นประมาณ 0.25 และ 0.037 อุณหภูมิที่ทดสอบอยู่ในช่วง 21.5°C ถึง 150°C และมีการอัดตัวบนตัวอย่างด้วยอัตราการเกิดความเครียดเท่ากับ  $10^{-9}$  และ  $5 \times 10^{-8}$  ต่อวินาที ซึ่งพบว่าทั้งค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดเชิงปริมาตรและความเครียดเบี่ยงเบน (Deviatoric deformation rate) ในเชิงเวลาที่ได้จากการทดสอบทั้งแบบที่มีความเค้นเท่ากันทุกทิศทาง (Hydrostatic) และแบบที่มีความเค้นเฉือนด้วยนั้นสามารถอธิบายด้วยสมการเชิงคณิตศาสตร์

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

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

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

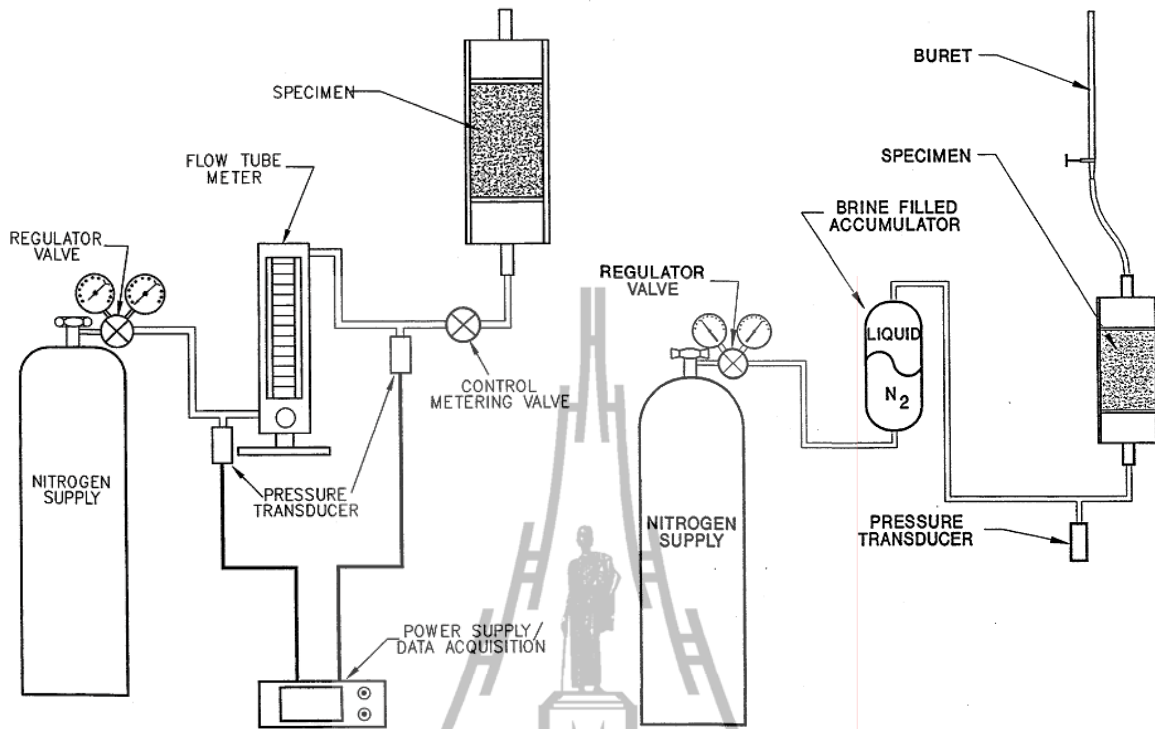
$$h_2(\eta) = b \cdot h_1(\eta) + 1 \quad (3)$$

เมื่อ  $\dot{\epsilon}_{ij}$  คือความเครียดหลักที่เกิดขึ้น  $\eta$  คือความพหุน  $\eta_0$  คือความพหุนเริ่มต้น  $T$  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  $6520 \text{ K}^{-1}$  จากการทดสอบ

การอัดตัวคายน้ำ (Oedometer test) ด้วยอัตราการเกิดความเครียด  $6.9 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$  ให้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และผลการจำลองการอัดตัวแบบเพิ่มความเค้นเป็น 3 ระดับ ระดับละ 15 วัน โดยการเทียบค่าความเครียดเฉลี่ยและค่าความพรุนที่เปลี่ยนไปผลที่ได้จากการจำลองและการทดสอบพบว่ามีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี โดยที่ผลการจำลองจะให้ค่าที่ต่ำกว่าเล็กน้อย

Mellegard et al. (1999) ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และค่าความซึมผ่านตัวอย่างเกลือหินบดหลังจากทำการบดอัดด้วยการกระทำด้วยตุ้มน้ำหนักเพื่อหาว่าความหนาแน่นของตัวอย่างขึ้นกับพลังงานที่ใช้ในการบดอัดอย่างไร และนำตัวอย่างไปทดสอบด้วยอัตราการความเครียดคงที่และวัดค่าความซึมผ่านของตัวอย่างด้วยแก๊สและน้ำเกลือเข้มข้น (รูปที่ 2.1) นอกจากนี้ยังทดสอบการอัดตัวภายใต้แรงกดในสามแกนเพื่อศึกษาพฤติกรรมในเชิงเวลาด้วย ผลดังกล่าวได้นำไปสอบเทียบหาค่าตัวแปรในสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีผู้พัฒนาไว้แล้วจากการศึกษาพบว่าการบดอัดยิ่งใช้ระยะตกของตุ้มน้ำหนักมาก (พลังงานสูง) จะทำให้ได้ความหนาแน่นของตัวอย่างสูงด้วย และค่าความซึมผ่านจะลดลงเมื่อความหนาแน่นของเกลือหินบดเพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึงช่องว่างลดลงและมีการต่อกันของช่องว่างน้อยลง

Jia et al. (2009) ได้ใช้โปรแกรม PFC2D เพื่อจำลองการอัดตัวของตัวอย่างดินและหินย่อยภายใต้การบดอัด โดยตัวอย่างที่จำลองจะถูกสมมติให้มีขนาดคละที่แตกต่างกันไป ในการจำลองได้วิเคราะห์หาค่าความพรุน ความหนาแน่นแห้งของดินและหินที่ผสมกัน โดยจะนำกราฟไปเทียบกับผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และมีการสังเกตลักษณะการเคลื่อนตัวของอนุภาคเกลือขณะที่มีการจำลองการบดอัดด้วย จากการศึกษาด้วยแบบจำลองในการนำดินผสมกับหินย่อยพบว่ามีความสมบัติที่ดีสำหรับนำไปใช้ในงานถนน 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

ตัวอย่างเกล็ดหินทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบได้คัดเลือกมาจากการขุดเจาะเกล็ดหินชั้นกลาง (Middle salt) และเกล็ดหินชั้นล่าง (Lower salt) โดยได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัทเหมืองแร่โปแตชอาเซียน จำกัด อ.บำเหน็จณรงค์ จ.ชัยภูมิ ซึ่งการเตรียมตัวอย่างเกล็ดเกลือมีขั้นตอนดังนี้

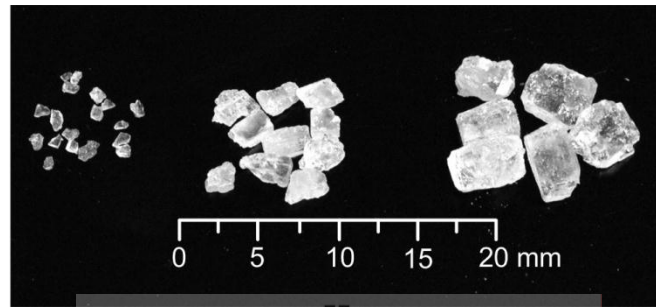
- 1) การบดเกล็ดเกลือ นำแห้งเกล็ดหินมาบดด้วยเครื่องบด (2HP-4 POLES, Spec jis c-4004) ให้มีขนาดเล็กลง โดยเกล็ดหินที่ผ่านการบดจะมีขนาดไม่เกิน 4.75 มิลลิเมตร
- 2) การคัดขนาดเกล็ดเกลือ นำเกล็ดเกลือที่บดแล้วมาร่อนผ่านตะแกรง 3 เบอร์ คือ เบอร์ 10, 18 และ 40 โดยเกล็ดเกลือที่ค้างตะแกรงเบอร์ 10 จะมีขนาด 4.75-2.00 มิลลิเมตร ค้างตะแกรงเบอร์ 18 มีขนาด 2-1 มิลลิเมตรและค้างตะแกรง 40 มีขนาด 1.000-0.425 มิลลิเมตร ซึ่งแต่ละขนาดจะมีการจัดเตรียมเพื่อให้ได้น้ำหนักรวมประมาณ 100 กิโลกรัม สำหรับใช้ในการทดสอบ โดยรูปร่างตัวอย่างเกล็ดเกลือแต่ละขนาดได้แสดงดังรูปที่ 3.1

#### 3.3 การเตรียมตัวอย่างน้ำเกลืออิ่มตัว

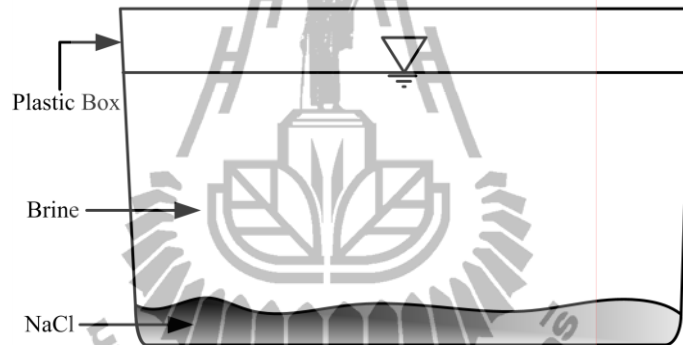
การเตรียมตัวอย่างน้ำเกลืออิ่มตัว (Saturated Salt water) เพื่อนำไปใช้เป็นส่วนผสมในการทดสอบหาค่าความชื้นที่เหมาะสมดำเนินการดังนี้

- 1) นำเกลือบริสุทธิ์หรือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) น้ำหนัก 2.7 กิโลกรัม บดละเอียด ผสมกับน้ำบริสุทธิ์ 5.4 กิโลกรัม ในถังพลาสติกขนาด 28x30x50 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.2 เพื่อให้ได้สัดส่วนเกลือต่อน้ำบริสุทธิ์มากกว่า 39:100 โดยน้ำหนัก
- 2) ใช้ถังพลาสติกคนสารละลายอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 20 นาที เปิดฝาดังไว้ตลอดเวลาเพื่อให้เกิดการระเหยอย่างต่อเนื่อง จากนั้นสังเกตว่าเกล็ดเกลือไม่สามารถละลายต่อไปได้แล้ว แสดงว่าได้ตัวอย่างน้ำเกลืออิ่มตัวซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำเกลืออิ่มตัวดังตารางที่





**รูปที่ 3.1** ตัวอย่างเกล็ดเกลือทั้ง 3 ขนาด ได้แก่ 0.425–1.000 มิลลิเมตร 1–2 มิลลิเมตร และ 2.00–4.75 มิลลิเมตร สำหรับใช้ในการทดสอบ



**รูปที่ 3.2** ตัวอย่างการเตรียมน้ำเกลืออิ่มตัว เพื่อใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ

**ตารางที่ 3.1** ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำเกลืออิ่มตัว

SG.	Temperature (°C)	References
1.2	25°	Lab test
1.23	15°	<a href="http://www.csgnetwork.com">www.csgnetwork.com</a>
1.2	20°	<a href="http://Cheeseforum.org">http://Cheeseforum.org</a>

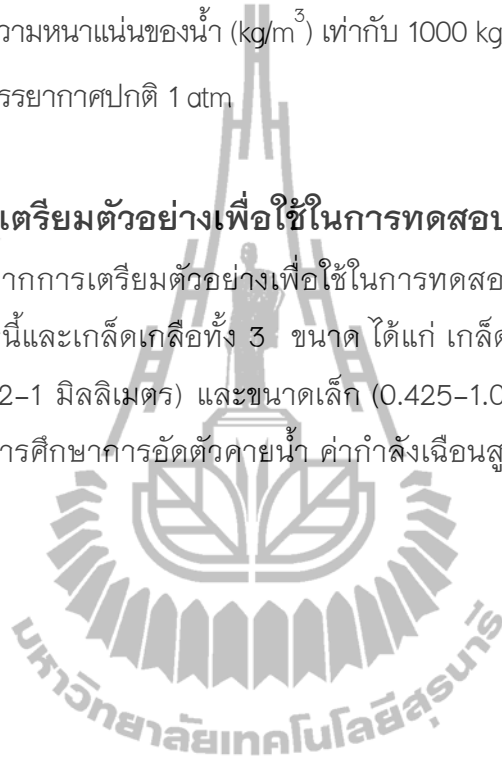
ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำเกลืออิ่มตัว สามารถคำนวณได้จากสมการ

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

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

### 3.4 ผลที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบ

ผลที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบคือ น้ำเกลืออิ่มตัวตั้งได้อธิบายในหัวข้อก่อนหน้านี้และเกล็ดเกลือทั้ง 3 ขนาด ได้แก่ เกล็ดเกลือขนาดใหญ่ (4.75–2 มิลลิเมตร) ขนาดกลาง (2–1 มิลลิเมตร) และขนาดเล็ก (0.425–1.000 มิลลิเมตร) ซึ่งวัสดุทั้งสองจะนำมาผสมกันในการศึกษาการอัดตัวคายน้ำ ค่ากำลังเฉือนสูงสุด และค่าความซึมผ่าน ซึ่งจะอธิบายในบทต่อไป



## บทที่ 4

### การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ

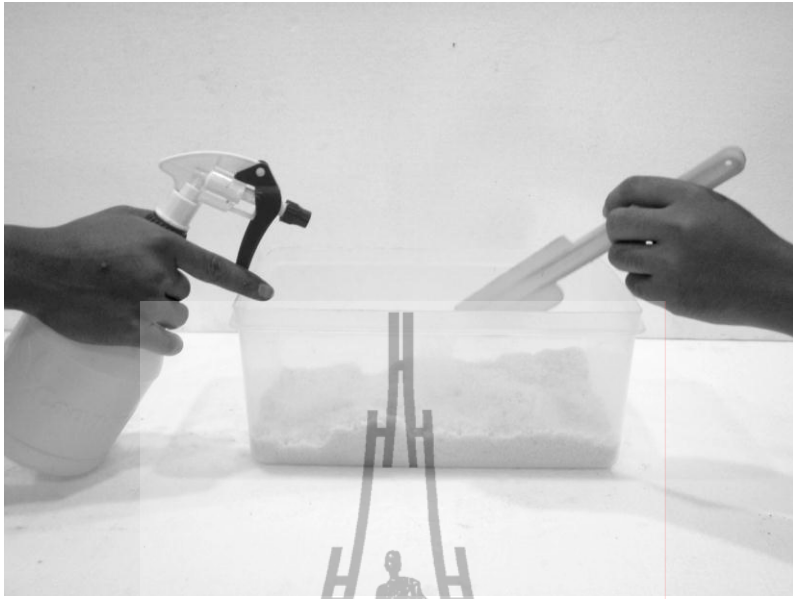
#### 4.1 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของการทดสอบนี้คือ เพื่อหาอัตราส่วนของน้ำเกลือที่เหมาะสม (Optimum Brine Content) จากความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น (density) กับเวลา โดยมีการผันแปรขนาดของเกล็ดเกลือ 3 ขนาด ได้แก่ 0.425–1.0 mm, 1.0–2.0 mm และ 2.0–4.75 mm ซึ่งมีการผันแปรอัตราส่วนน้ำเกลือต่อเกล็ดเกลือโดยน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 0, 5 และ 10 เพื่อนำค่าคุณสมบัติดังกล่าวไปใช้ทดสอบในบทถัดไป

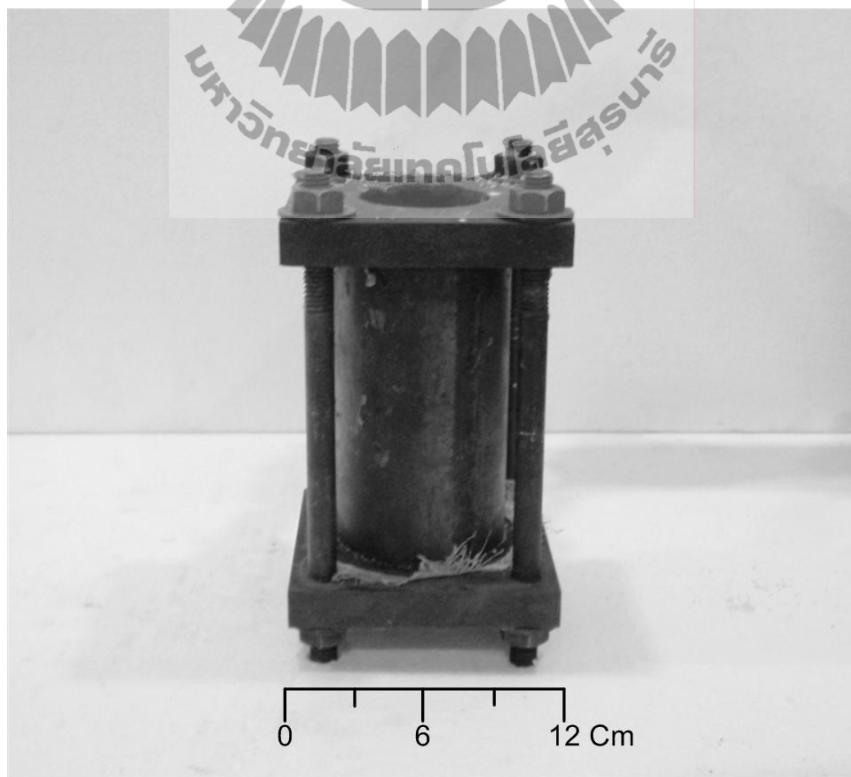
#### 4.2 การจัดเตรียมตัวอย่าง

การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ เพื่อหาค่าความชื้นของน้ำเกลือที่เหมาะสมสามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

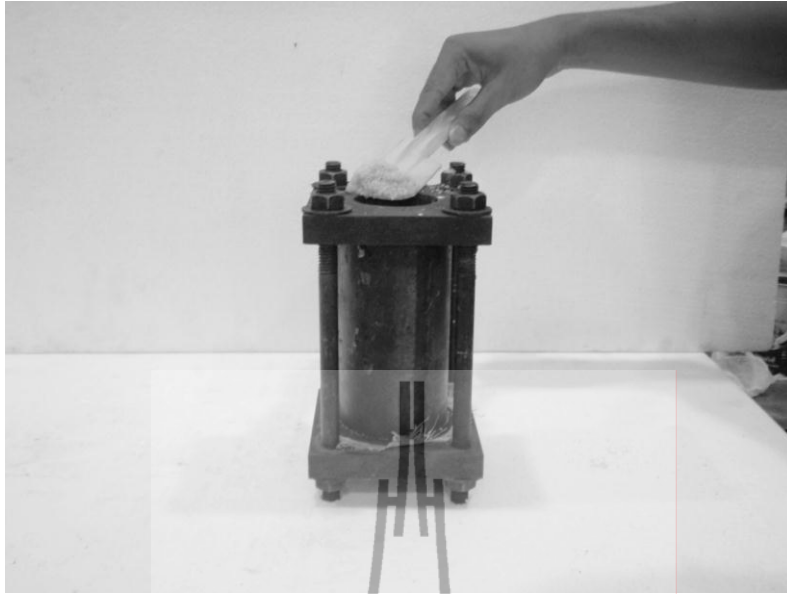
- 1) เตรียมตัวอย่างเกล็ดเกลือเม็ดเล็กขนาด 0.425–1.0 mm ที่ได้จากการคัดขนาด (ดังที่อธิบายไว้ในบทที่ 3) น้ำหนัก 2,500 กรัม ลงในถังพลาสติกขนาด 18×23×35 เซนติเมตร
- 2) เตรียมน้ำเกลืออิ่มตัว (Saturated Salt water) โดยใช้กระบอกตวงในอัตราส่วนร้อยละ 0, 5 และ 10 ของน้ำหนักเกล็ดเกลือ
- 3) ผสมเกล็ดเกลือเข้ากับน้ำเกลืออิ่มตัว ด้วยการตวงน้ำเกลืออิ่มตัวใส่ในขวดสเปรย์ แล้วฉีดเพื่อคลุกเคล้าให้เข้ากัน ดังรูปที่ 4.1
- 4) เทส่วนผสมลงในแบบหล่อทดสอบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 5.4 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 8 เซนติเมตร และมีความสูงเท่ากับ 15 เซนติเมตร ปลายด้านล่างประกบกับแผ่นเหล็กขนาด 12×12×1.9 เซนติเมตร ที่ทำการเจาะรูขนาด 0.2 เซนติเมตร จำนวน 15 รู เพื่อใช้ในการระบายน้ำออกจากตัวอย่าง ปลายด้านบนประกบกับแผ่นเหล็กขนาด 12×12×1.9 เซนติเมตร ซึ่งมีรูตรงกลางแผ่นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 5.8 เซนติเมตร และแผ่นเหล็กทั้งสองมีรูขนาดเท่ากับ 0.9 เซนติเมตร อยู่ที่มุมทั้งสี่ด้านเพื่อทำการยึดแบบหล่อทดสอบด้วยน็อตขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8 เซนติเมตร ยาว 25 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.2 และ รูปที่ 4.3
- 5) กระแทกเบาๆ ด้วยแท่งเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 5 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร ลงในแบบหล่อเพื่อให้เกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและลดช่องว่างระหว่างเกล็ดเกล็ดดังรูปที่ 4.4
- 6) เตรียมตัวอย่างเกล็ดเกลือเม็ดกลางขนาด 1.0–2.0 mm และเม็ดใหญ่ขนาด 2.0–4.75 mm ด้วยวิธีการเดียวกัน



รูปที่ 4.1 การผสมเกล็ดเกลือเข้ากับน้ำเกลืออิ่มตัวในอัตราส่วนต่างๆ ด้วยการตวงน้ำเกลือใส่ขวดสเปรย์แล้วฉีดคลุกเคล้าให้เข้ากัน



รูปที่ 4.2 แบบหล่อทดสอบการอัดตัวคายน้ำเพื่อหาค่าความชื้นของน้ำเกลือที่เหมาะสม



รูปที่ 4.3 การเทส่วนผสมระหว่างเกล็ดเกล็ดเข้ากับน้ำเกล็ดอิมิตัวในอัตราส่วนต่างๆ ลงในแบบหล่อทดสอบ



รูปที่ 4.4 การกระแทกเบาๆ ด้วยแท่งเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร ลงในแบบหล่อ

### 4.3 วิธีการทดสอบ

นำตัวอย่างที่ได้จากการจัดเตรียมตัวอย่างมาทำการทดสอบเพื่อหาค่าความชื้นที่เหมาะสม ด้วยการอัดตัวคายน้ำภายใต้แรงกดในแนวตั้งซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1) นำแท่งเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร วางลงไป ในกระบอกทดสอบเพื่อทำหน้าที่ส่งผ่านแรงไปยังเกล็ดเกล็ดดังรูปที่ 4.5

2) ให้แรงในแนวตั้งฉากเป็นเวลา 96 ชั่วโมง ด้วยการผันแปรขนาดของทุกๆ 24 ชั่วโมง เริ่มตั้งแต่ 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa และ 20 MPa ด้วยอัตราคงที่ตามลำดับ

3) ทำการวัดค่าการทรุดตัวในแนวตั้งในเชิงเวลา เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นและอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรจากสมการที่ (4.1) ถึงสมการที่ (4.3)

### 4.4 วิธีการคำนวณผลการทดสอบ

การหาคำนวณค่าความหนาแน่นเพื่อหาค่าความชื้นที่เหมาะสมสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (4.1)$$

โดยที่  $\rho$  = ความหนาแน่น (g/cc)

$M$  = มวล (g)

$V$  = ปริมาตร (cc)

$$e_0 = \frac{V_0 \rho}{m_0} - 1 \quad (4.2)$$

โดยที่  $e_0$  = อัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตร (void ratio) เบื้องต้น

$V_0$  = ปริมาตรเริ่มต้น

$\rho$  = ความหนาแน่นแห้ง

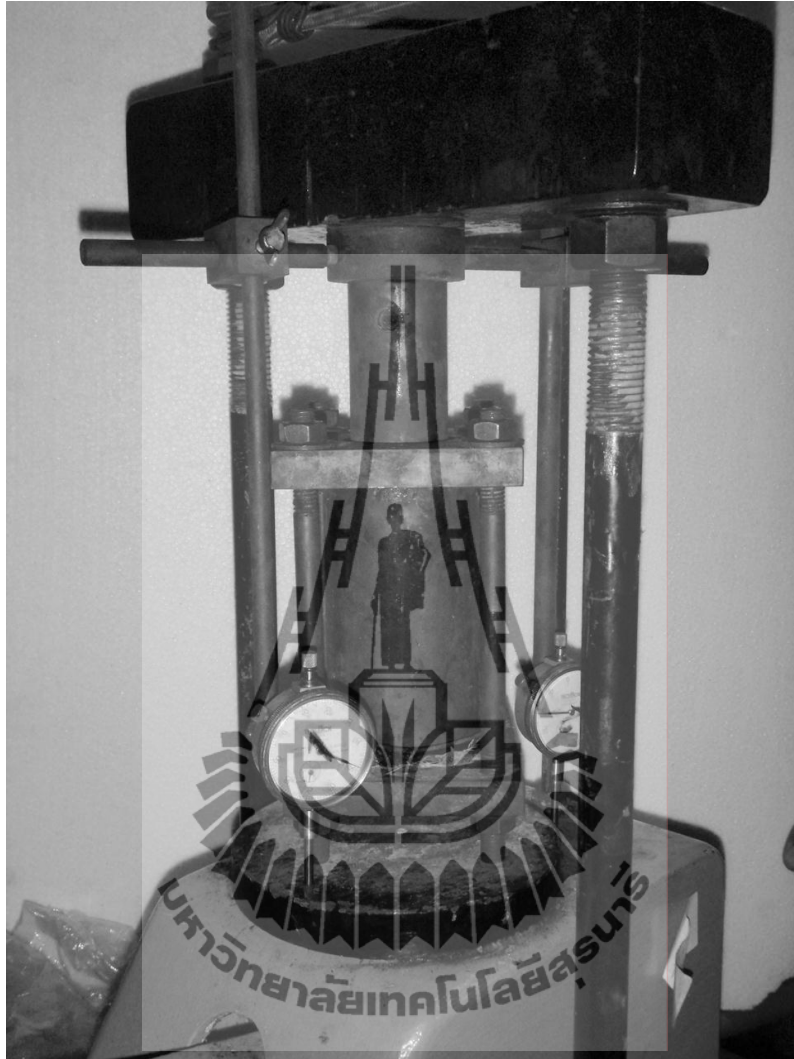
$m_0$  = มวลของเกล็ดเกล็ดเริ่มต้น

$$\Delta e = e_t - e_0 \quad (4.3)$$

โดยที่  $\Delta e$  = อัตราส่วนของช่องว่างต่อปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไป

$e_t$  = อัตราส่วนของช่องว่างที่เวลาเท่ากับ  $t$

$e_0$  = อัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรเบื้องต้น



รูปที่ 4.5 แบบหล่อทดสอบทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวและเครื่องให้แรงในแนวตั้ง

#### 4.5 ผลการทดสอบ

การทดสอบการอัดตัวคายน้ำด้วยการผันแปรเกล็ดเกลือขนาดต่างๆ ในแบบหล่อทดสอบ เพื่อหาค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม จากการเปรียบเทียบแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงต่อเวลาแสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วนน้ำเกลือร้อยละ 5 และร้อยละ 10 ให้ค่าความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกันในเกล็ดเกลือทุกขนาดดังรูปที่ 4.6 และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างของเกล็ดเกลือต่อเวลาดังรูปที่ 4.7 เพราะฉะนั้นค่าอัตราส่วนของน้ำเกลือที่เหมาะสมคือร้อยละ 5 ซึ่งจะนำไปใช้ในการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนและค่าความซึมผ่านในบทต่อไป

#### 4.6 การสร้างความสัมพันธ์ในเชิงคณิตศาสตร์

สมการทางคณิตศาสตร์ได้ถูกพัฒนาขึ้นจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Empirical relationship) เพื่ออธิบายพฤติกรรมการลดลงของช่องว่าง ( $e$ ) และอัตราการเกิดความเครียด ( $\epsilon_{axial}$ ) ของเกลือหินบดที่สัมพันธ์กับความชื้น ( $w_b$ ) และเวลา ( $t$ )

$$e = -At + B \quad (4.4)$$

$$A = 0.003(w_b) + 0.394 \quad (4.5)$$

$$B = 64.41e^{-0.01(w_b)} \quad (4.6)$$

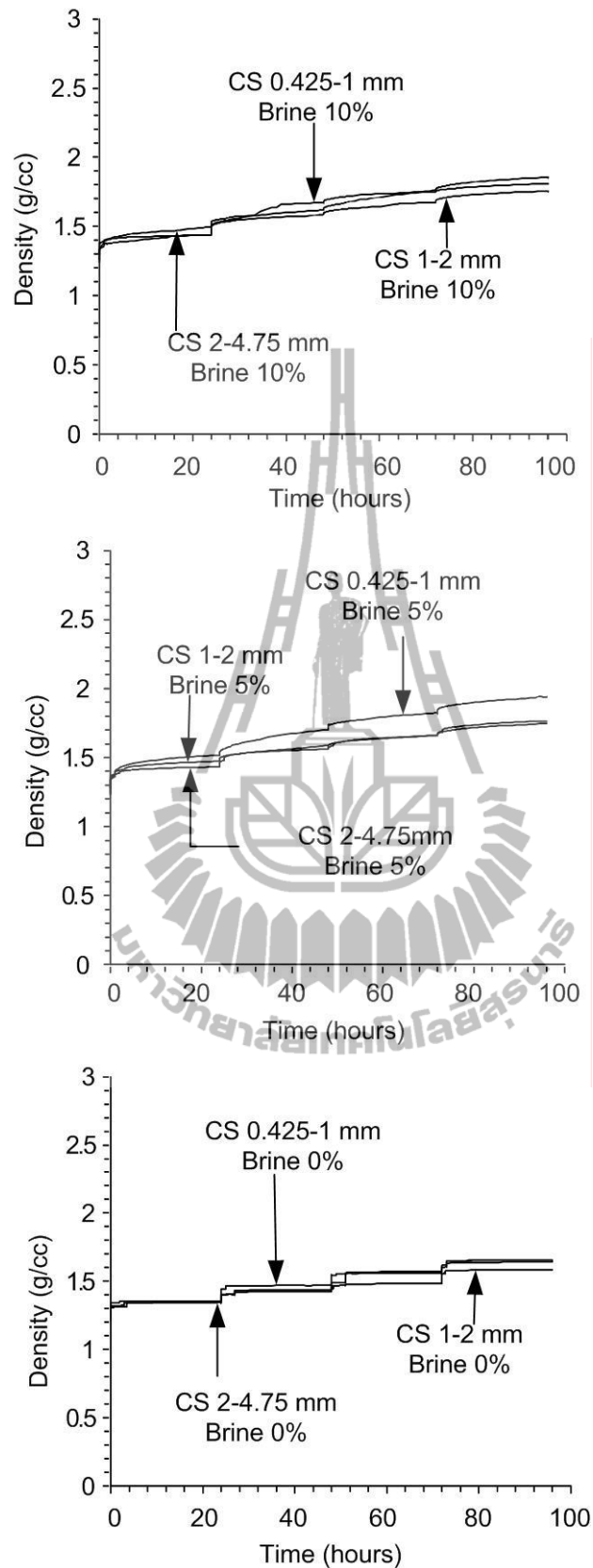
$$e = - [0.003(w_b) + 0.394]t + 64.41e^{-0.01(w_b)} \quad (4.7)$$

โดยที่

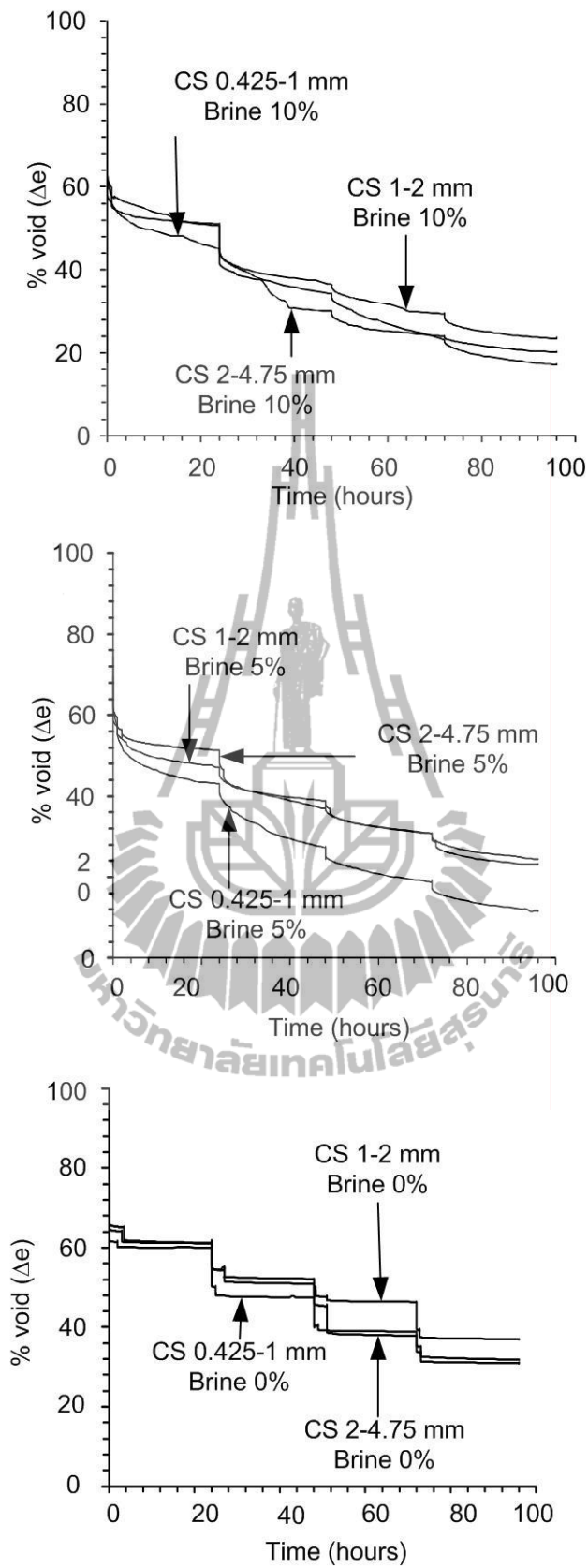
- $e$  = อัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตร (void ratio)
- $A, B$  = ตัวแปรในสมการ (4.4)
- $w_b$  = ความชื้น (%)
- $t$  = เวลา (ชั่วโมง)

สมการข้างต้นสามารถใช้ในการคาดคะเนการลดช่องว่างในเชิงเวลาของเกลือหินบดภายใต้แรงกดในแนวแกนได้





รูปที่ 4.6 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับเวลาในอัตราส่วนความชื้นของน้ำเกลือ  
อิ่มตัวร้อยละ 10, 5 และ 0 ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างของเกล็ดเกลือกับเวลาในอัตราส่วนความชื้นของน้ำเกลืออิ่มตัวร้อยละ 10, 5 และ 0 ตามลำดับ

## บทที่ 5

### การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน

#### 5.1 วัตถุประสงค์

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนเป็นการทดสอบเพื่อหาลักษณะรับแรงเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress) ของเกิลต์เกลื้อทั้ง 3 ขนาด ได้แก่ เกิลต์เกลื้อขนาดใหญ่ (2–4.75 มิลลิเมตร) ขนาดกลาง (1–2 มิลลิเมตร) และขนาดเล็ก (0.425–1.000 มิลลิเมตร) โดยเกิลต์เกลื้อแต่ละขนาดมีการผันแปรระยะเวลาการอัดตัวคายน้ำ

#### 5.2 การจัดเตรียมตัวอย่าง

การจัดเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังรับแรงเฉือนมี 6 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) เตรียมเกิลต์เกลื้อน้ำหนัก 2.5 กิโลกรัม ใส่ลงไปในกระบะแห้งและสะอาดขนาด 18×23×35 เซนติเมตร
- 2) เตรียมน้ำเกลืออิ่มตัว (Saturated Salt Water) โดยใช้กระบะบอกรวดด้วยอัตราส่วน ร้อยละ 5 ของน้ำหนักเกิลต์เกลื้อ
- 3) ทำการผสมน้ำเกลืออิ่มตัวกับเกิลต์เกลื้อที่ได้จัดเตรียมไว้ ด้วยการตวงน้ำเกลือ อิ่มตัวใส่ในขวดสเปรย์แล้วฉีดเพื่อคลุกเคล้าให้เข้ากันดังรูปที่ 5.1
- 4) นำตัวอย่างที่คลุกเคล้ากันเสร็จแล้วใส่ลงในแบบหล่อทดสอบแบบสามแหวน (3-Rings Mold) ตามมาตรฐาน ASTM D1557 (Standard Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 10.13 เซนติเมตร และมีความสูงเท่ากับ 15.19 เซนติเมตร ดังรูปที่ 5.2
- 5) ทำการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) โดยนำแผ่นดินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 9.26 เซนติเมตร วางทับด้านบนตัวอย่าง จากนั้นให้แรงคงที่ (Constant Load)
- 6) ทำการจัดเตรียมตัวอย่างเหมือนข้อ 1–5 ตามลำดับ โดยแต่ละตัวอย่างการทดสอบมีการผันแปรดังนี้ 3 ขนาดเกิลต์เกลื้อ × 4 ระยะเวลาการอัดตัวคายน้ำ × 4 ความเค้นตั้งฉาก (Normal Stress) รวมทั้งหมด 48 ตัวอย่างการทดสอบ



รูปที่ 5.1 เกล็ดเกล็ดที่ผสมกับน้ำเกล็ดโดยคิดเป็นร้อยละ 5 ของน้ำหนักเกล็ดเกล็ด



รูปที่ 5.2 การตักเกล็ดเกล็ดที่ผสมกับน้ำเกล็ดใส่เบ้าทดสอบ

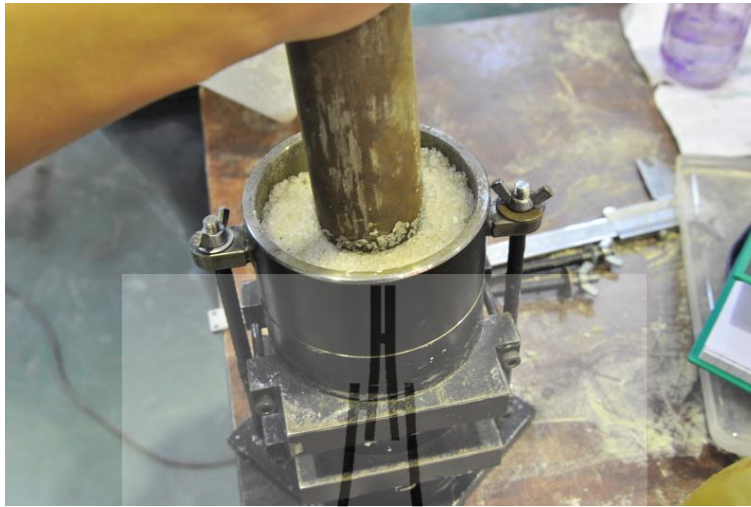
### 5.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

อุปกรณ์สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนประกอบด้วยชุดให้แรงเฉือนซึ่งมีเสาค้ำยันพร้อมกับแม่แรงไฮดรอลิกในแนวตั้งยึดติดอยู่กับคานด้านบนและฐานล่าง ที่ด้านบนของตัวอย่างจะมีแผ่นดันที่ใช้สำหรับส่งผ่านความเค้นตึงฉาก (Normal Stress) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 9.26 เซนติเมตร ไปยังตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ โดยมีแม่แรงไฮดรอลิกในแนวระนาบซึ่งยึดกับเสาค้ำยัน ฐานรองด้านหน้า และฐานรองด้านหลังเพื่อให้แรงในแนวตั้งฉากและแรงเฉือนกับตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ โดยวงแหวนบนและวงแหวนล่างจะมีแผ่นรับแรงเฉือนเพื่อป้องกันไม่ให้วงแหวนทั้งสองขยับตามแรงเฉือนเมื่อทำการทดสอบ วงแหวนกลางจะถูกเชื่อมด้วยแม่แรงไฮดรอลิกในแนวระนาบ ซึ่งด้านหลังของวงแหวนกลางจะมีคีมหนีบวงแหวนกลางติดกับขาเหล็กโดยฐานรองด้านหลังมีรูที่ไม่มีเกลียวสำหรับสอดขาทั้งสองข้างของคีมหนีบวงแหวนกลางเพื่อให้วงแหวนกลางเคลื่อนที่ไปตามทิศทางของแรงเฉือนดังรูปที่ 5.3

### 5.4 วิธีการทดสอบ

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนเพื่อหาค่ากำลังเฉือนสูงสุดของเกิลต์เกิลมี 6 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) นำตัวอย่างทำการทดสอบการอัดตัวคายน้ำดังได้อธิบายในหัวข้อการจัดเตรียมตัวอย่างมาซึ่งน้ำหนักแล้วบันทึกข้อมูลไว้
- 2) ประกอบแบบหล่อทดสอบแบบสามแหวนเข้ากับอุปกรณ์สำหรับการทดสอบกำลังเฉือนดังรูปที่ 5.4
- 3) ติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้งด้านบนของกระบอกเพื่อวัดระยะการทรุดตัวและแนวระนาบเพื่อวัดระยะการเคลื่อนตัว
- 4) ให้ความเค้นตึงฉากด้วยแม่แรงไฮดรอลิกกระทำในแนวตั้งฉากกับตัวอย่าง โดยผันแปรความเค้นตึงฉากที่ 1, 2, 3 และ 4 MPa ในแต่ละตัวอย่างทดสอบ ทำการจดบันทึกค่าการเคลื่อนตัวและรักษาความเค้นตึงฉากให้คงที่ กล่าวคือความเค้นตึงฉากที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนมีค่าเท่ากับกับความเค้นตึงฉากที่ใช้ในการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ
- 5) ให้ความเค้นเฉือนด้วยแม่แรงไฮดรอลิกในแนวระนาบ ทำการอ่านค่าการเคลื่อนตัวในแนวระนาบทุกระยะ 0.5 มิลลิเมตร และจดบันทึกค่าไปพร้อมกันอย่างต่อเนื่องจนถึงจุดที่เกิดความเค้นเฉือนสูงสุด (Peak Shear Strength) บันทึกค่าเพื่อนำไปคำนวณหาค่าความเค้นยึดติด (Cohesion) และค่ามุมเสียดทานภายใน (Friction angle) จากสมการ (5.1) ถึงสมการ (5.3) จากนั้นทำการให้ความเค้น



รูปที่ 5.3 การอัดเกล็ดเกลือโดยใช้แท่งเหล็กกระแทกเบาๆ เพื่อให้เกล็ดเกลือแน่นสม่ำเสมอทั่วทั้งเบ้าทดสอบ



รูปที่ 5.4 การประกอบเครื่องทดสอบกำลังเฉือนเข้ากับกระบอกดัดตัวอย่าง

เงื่อนไขอย่างต่อเนื่องเพื่อหาความต้านแรงเฉือนคงเหลือ (Residual Shear Strength) ซึ่งแรงเฉือนสูงสุดจะเกิดขึ้นทันทีหลังจากมีการเคลื่อนตัวของรอยแตก เมื่อความต้านแรงเฉือนมีแนวโน้มลดลงแล้วจึงหยุดทำการทดสอบ

6) ทดสอบเหมือนข้อ 1-5 ตามลำดับ ในทุกตัวอย่างการทดสอบ

## 5.5 การคำนวณผลการทดสอบ

การคำนวณผลการทดสอบกำลังเฉือนของเกล็ดเกลือสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\tau = F / 2A \quad (5.1)$$

เมื่อ

$\tau$  = ค่าความเค้นเฉือน

$F$  = แรงต้านทานการเฉือน

$A$  = พื้นที่เฉือนของตัวอย่าง

ลงจุดระหว่างค่าความเค้นตั้งฉากและค่าความเค้นเฉือนสูงสุดบน Mohr's Diagram แล้วลากเส้นตรงผ่านจุดเหล่านั้น เส้นตรงนี้เรียกว่า "Mohr - Coulomb Failure Envelope" คือเส้นแทนค่าความแข็งแรงหรือกำลังของเกล็ดเกลือตั้งสมการ

$$\tau = C + \sigma_n \tan \phi \quad (5.2)$$

เมื่อ

$\tau$  = ความเค้นเฉือน

$C$  = ความเค้นยึดติด

$\sigma_n$  = ความเค้นตั้งฉากบนระนาบวิบัติ

$\phi$  = มุมเสียดทานภายใน

ค่ามุมเสียดทานภายในหาได้จากสมการ

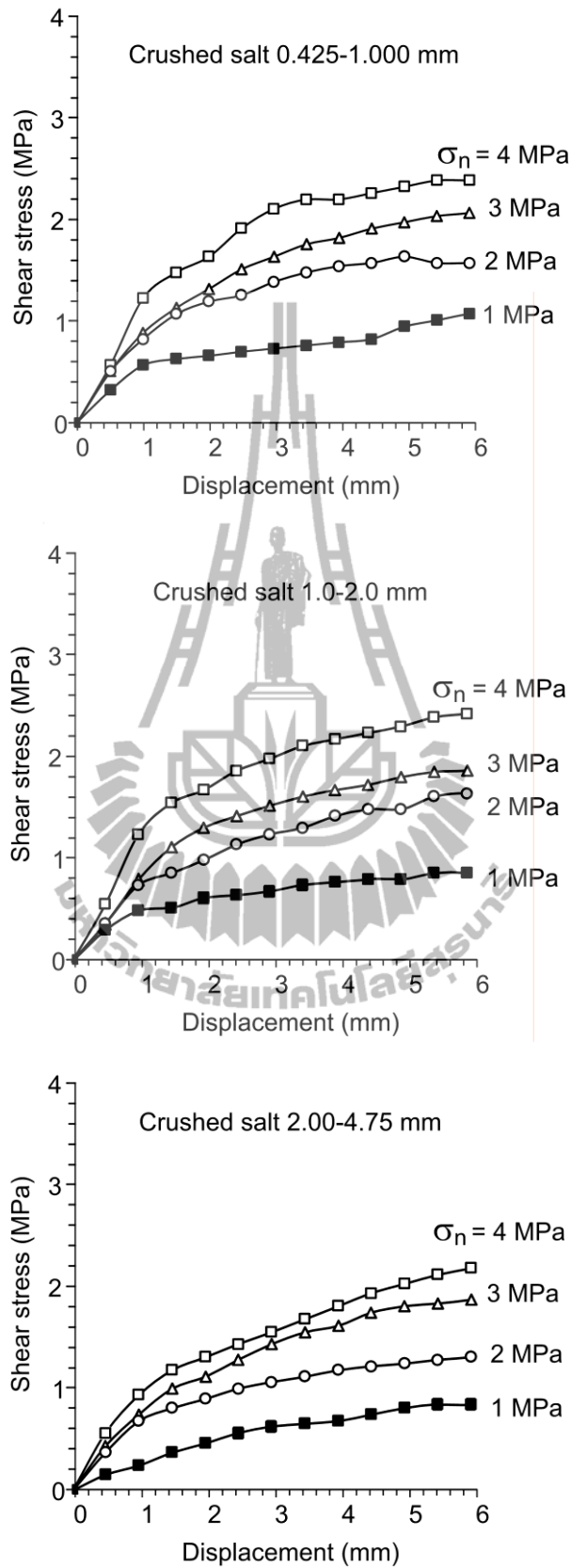
$$\phi = \tan^{-1}(\text{slope}) = \tan^{-1}(\Delta y / \Delta x) \quad (5.3)$$

## 5.6 ผลการทดสอบ

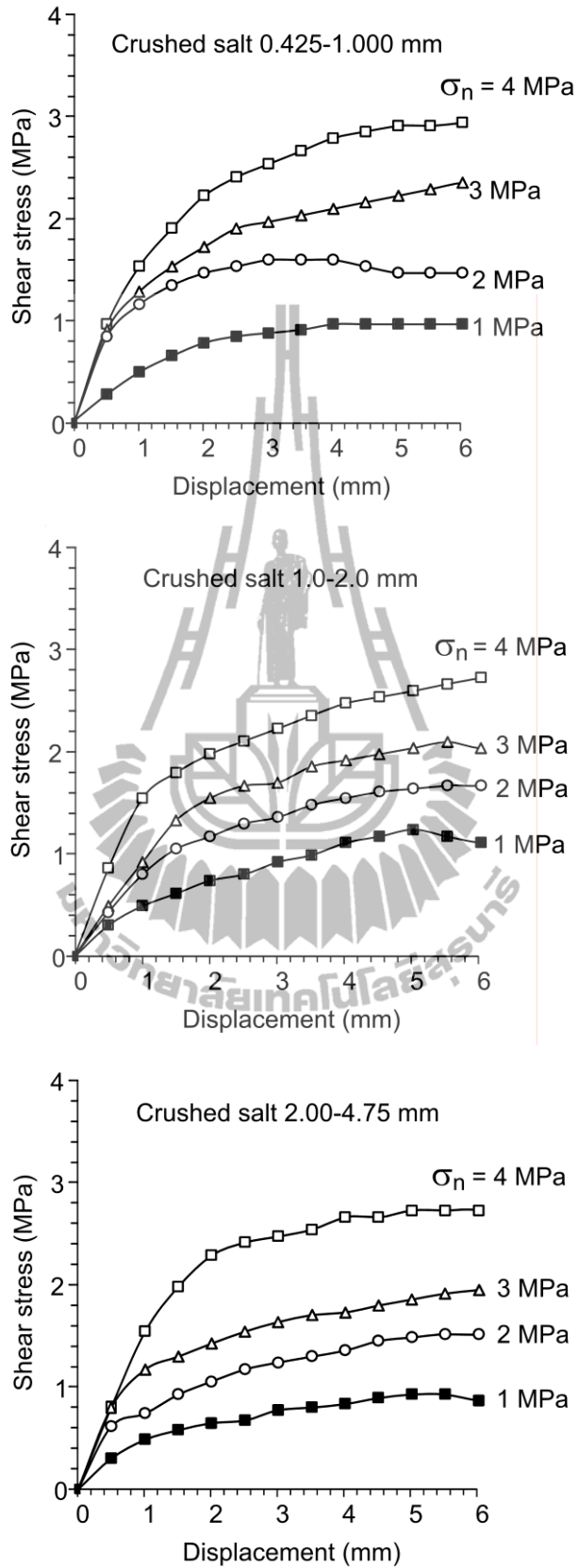
จากการทดสอบกำลังรับแรงเหวี่ยงของเกล็ดเกลือด้วยการทดสอบกำลังรับแรงเหวี่ยงแบบดาวแหวน ทำให้ทราบค่าของความเค้นเหวี่ยงในรูปของระยะเวลาเคลื่อนตัวในแนวระนาบโดยมีการผันแปรดังนี้ 3 ขนาดเกล็ดเกลือ  $\times$  4 ระยะเวลาการอัดตัวคายน้ำ  $\times$  4 ความเค้นตั้งฉาก ดังรูป 5.5 ถึงรูปที่ 5.8 จากความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ข้อสรุปว่าเกล็ดเกลือขนาดเล็กที่ระยะเวลาการอัดตัวคายน้ำ 100 ชั่วโมง และที่ความเค้นตั้งฉาก 4 MPa มีกำลังเหวี่ยงสูงสุด ในส่วนของความสัมพันธ์ของความเค้นเหวี่ยงสูงสุดในฟังก์ชันของความเค้นตั้งฉากของเกล็ดเกลือที่ผันแปรขนาด ระยะเวลาการอัดตัวคายน้ำ และความเค้นตั้งฉากต่างๆ ดังรูปที่ 5.9 ถึงรูปที่ 5.12 ทำให้ได้ค่าความเค้นยึดติดและมุมเสียดทาน ซึ่งได้แสดงไว้ดังตารางที่ 5.1 และรูปที่ 5.13



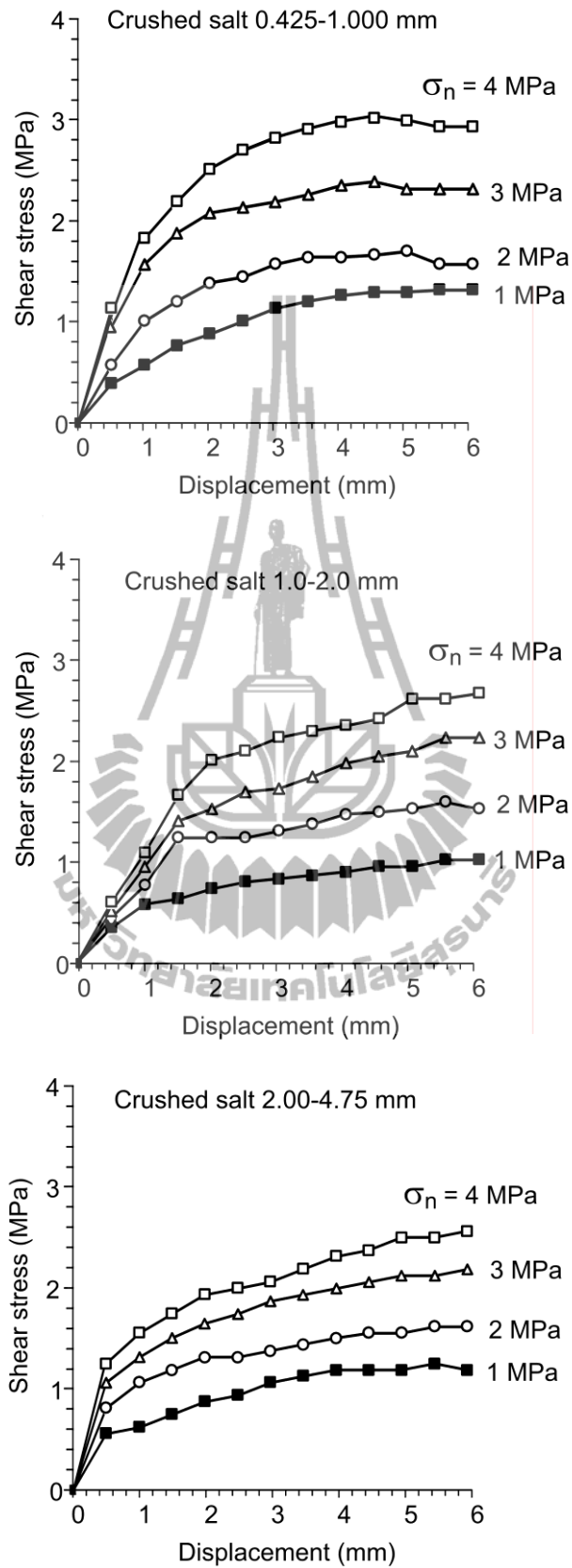




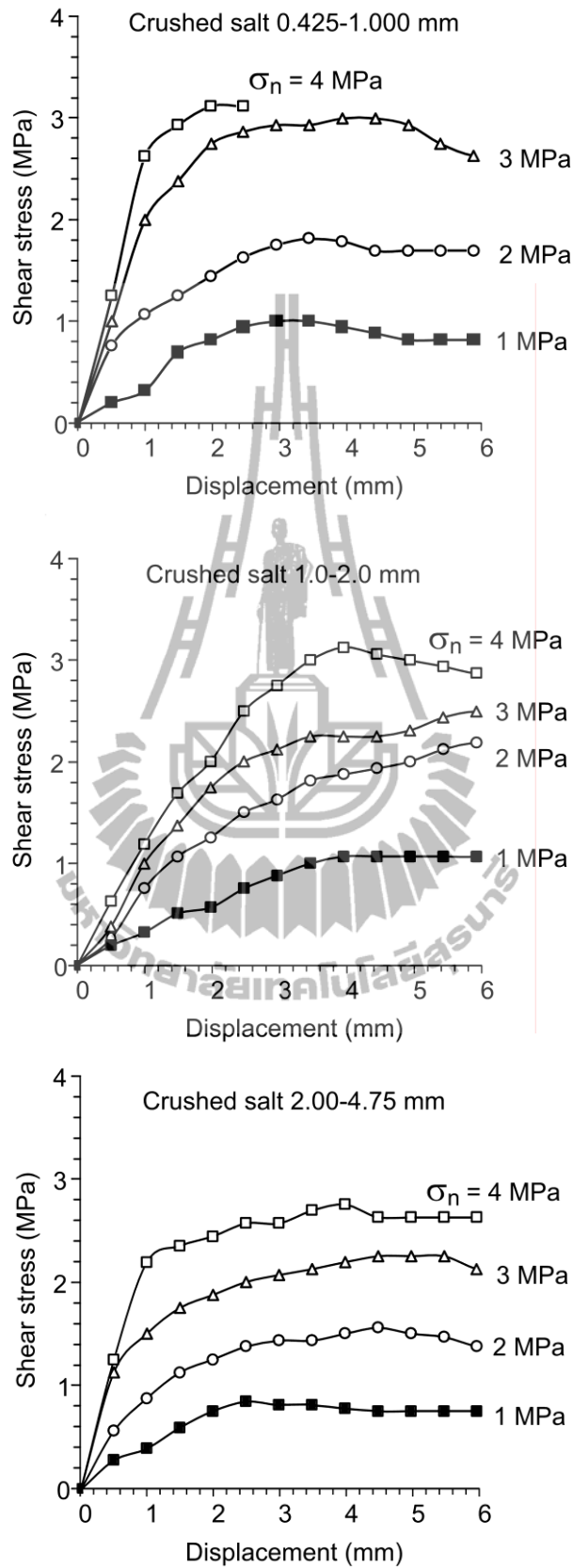
รูปที่ 5.5 แผนภูมิความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของระยะการเคลื่อนตัวในแนวระนาบโดยมีการผันแปรขนาดของเกล็ดเกลือ กำลังกดแนวตั้ง และระยะเวลาการอัดตัวคายน้ำที่ 1 ชั่วโมง



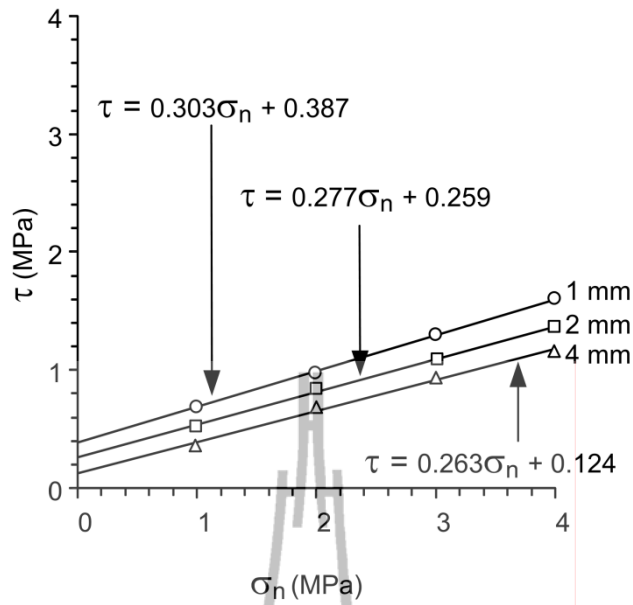
รูปที่ 5.6 แผนภูมิความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของระยะการเคลื่อนตัวในแนวระนาบโดยมีการผันแปรขนาดของเกล็ดเกลือ กำลังกดแนวตั้ง และระยะเวลาการอัดตัวคายน้ำที่ 10 ชั่วโมง



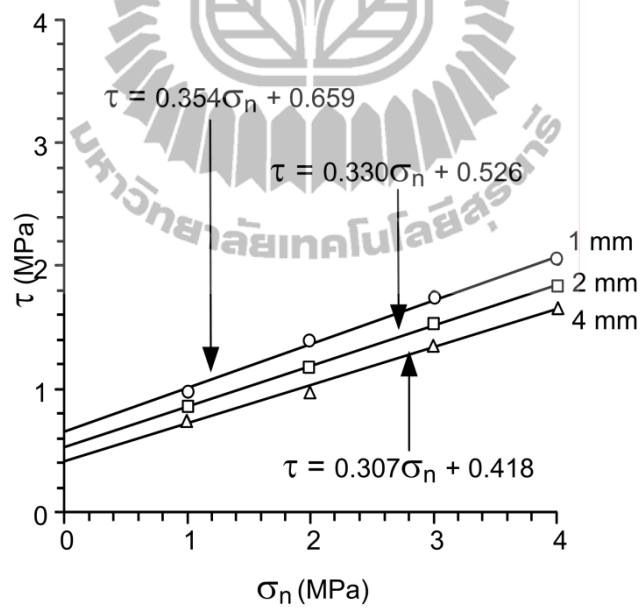
รูปที่ 5.7 แผนภูมิความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของระยะการเคลื่อนตัวในแนวระนาบโดยมีการผันแปรขนาดของเกล็ดเกลือ กำลังกดแนวตั้ง และระยะเวลาการอัดตัวคายน้ำที่ 20 ชั่วโมง



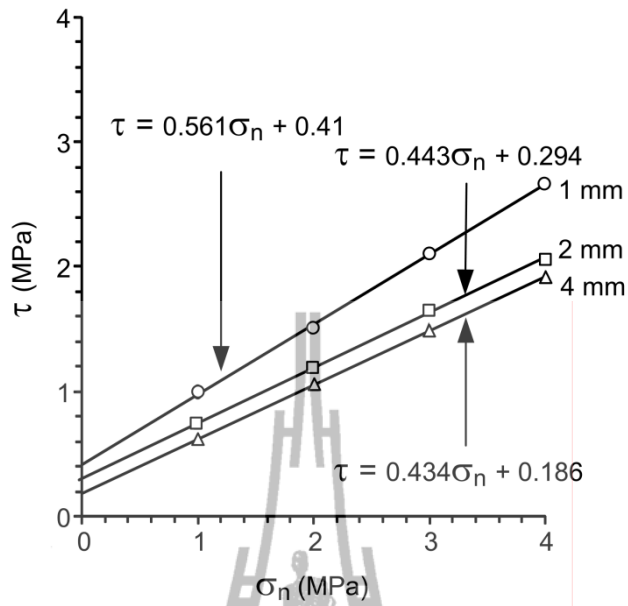
รูปที่ 5.8 แผนภูมิความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของระยะการเคลื่อนตัวในแนวระนาบโดยมีการผันแปรขนาดของเกล็ดเกลือ กำลังกดแนวตั้ง และระยะเวลาการอัดตัวคายน้ำที่ 100 ชั่วโมง



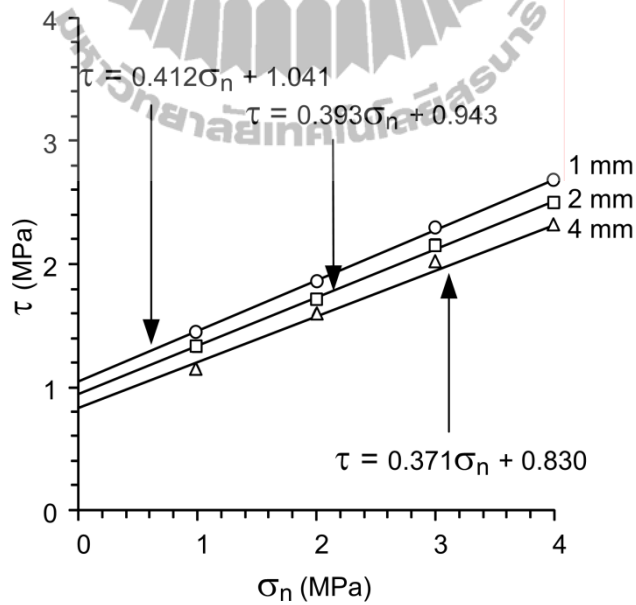
รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนสูงสุดในฟังก์ชันของความเค้นตั้งฉากโดยมีการผันแปรขนาดของเกิดเกล็ดเกลือในระยะเวลาการอัดตัวคายน้ำต่างกันที่ 1 ชั่วโมง



รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนสูงสุดในฟังก์ชันของความเค้นตั้งฉากโดยมีการผันแปรขนาดของเกิดเกล็ดเกลือในระยะเวลาการอัดตัวคายน้ำต่างกันที่ 10 ชั่วโมง

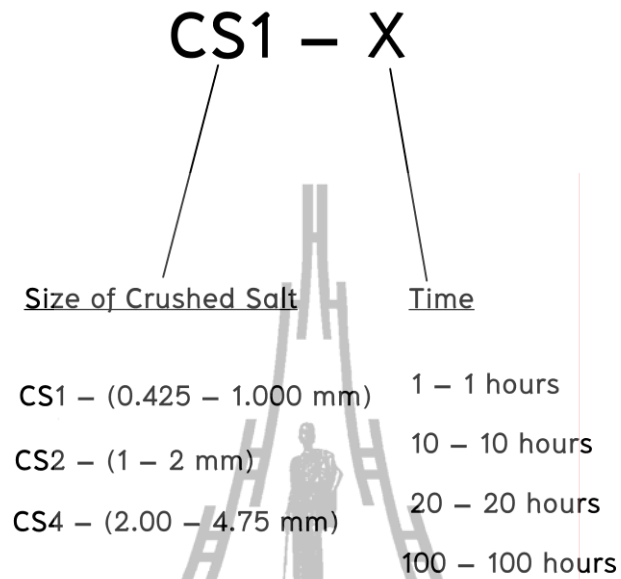


รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนสูงสุดในฟังก์ชันของความเค้นตั้งฉากโดยมีการผันแปรขนาดของเกล็ดเกล็ดในระยะเวลาการอัดตัวคายน้ำต่างกันที่ 20 ชั่วโมง

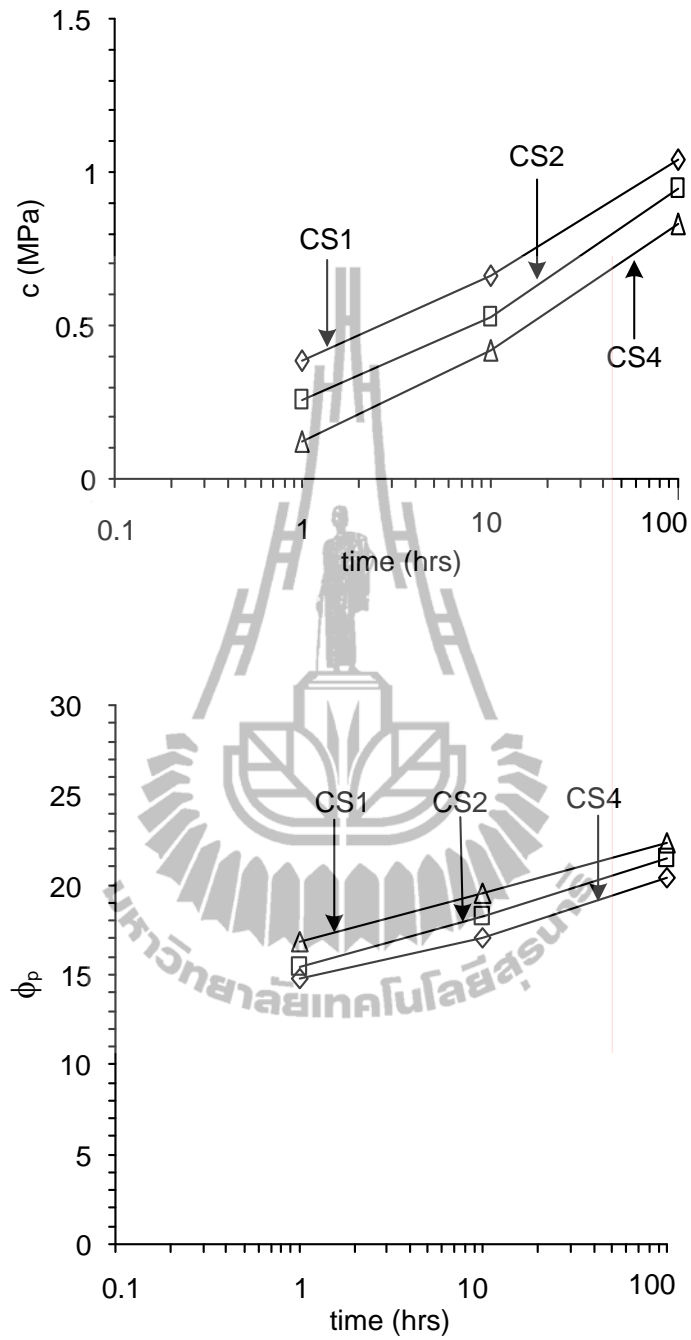


รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนสูงสุดในฟังก์ชันของความเค้นตั้งฉากโดยมีการผันแปรขนาดของเกล็ดเกล็ดในระยะเวลาการอัดตัวคายน้ำต่างกันที่ 100 ชั่วโมง

ตารางที่ 5.1 สรุปผลการหาค่าความเค้นยึดติดและมุมเสียดทาน



Time (hrs)	Sample Number	c	$\phi_p$
1	CS1-1	0.387	16.857
	CS2-1	0.259	15.483
	CS4-1	0.124	14.735
10	CS1-10	0.659	19.494
	CS2-10	0.526	18.263
	CS4-10	0.418	17.066
20	CS1-20	0.410	29.29
	CS2-20	0.294	23.89
	CS5-20	0.186	23.46
100	CS1-100	1.041	22.392
	CS2-100	0.943	21.455
	CS4-100	0.830	20.355



รูปที่ 5.13 ค่าความเค้นยึดติดและค่ามุมเสียดทานภายในที่เพิ่มขึ้นในเชิงเวลา ในระหว่างการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของเกล็ดเกล็ด ภายใต้ความเค้นกดในแนวแกน เท่ากับ 4 MPa



## บทที่ 6

### การทดสอบค่าความซึมผ่าน

#### 6.1 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของการทดสอบค่าความซึมผ่านคือ เพื่อหาและเปรียบเทียบค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพ (Intrinsic permeability) ของเกล็ดเกลือทั้ง 3 ขนาด ได้แก่ เกล็ดเกลือขนาดใหญ่ (2.0–4.75 มิลลิเมตร) ขนาดกลาง (1.0–2.0 มิลลิเมตร) และขนาดเล็ก (0.425–1.0 มิลลิเมตร) ที่ผ่านการอัดตัวคายน้ำอย่างต่อเนื่องจนถึง 1,000 ชั่วโมง

#### 6.2 การจัดเตรียมตัวอย่าง

การจัดเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพมี 6 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) เตรียมตัวอย่างเกล็ดเกลือขนาด 0.425–1.0 mm ที่ได้จากการคัดขนาด (อธิบายไว้ในบทที่ 3)หนัก 2,500 กรัม ลงในถังพลาสติกขนาด 18×23×35 เซนติเมตร
- 2) เตรียมน้ำเกลืออิ่มตัว (Saturated Salt water) โดยใช้กระบอกตวงในอัตราส่วนร้อยละ 5 ของน้ำหนักเกล็ดเกลือ ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม (อธิบายไว้ในบทที่ 4)
- 3) ผสมเกล็ดเกลือเข้ากับน้ำเกลืออิ่มตัว ด้วยการตวงน้ำเกลืออิ่มตัวใส่ในขวดสเปรย์ แล้วฉีดเพื่อคลุกเคล้าให้เข้ากัน
- 4) เทส่วนผสมลงในแบบหล่อทดสอบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 5.4 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 8 เซนติเมตร และมีความสูง 15 เซนติเมตร ปลายด้านล่างประกบกับแผ่นเหล็กขนาด 12×12×1.9 เซนติเมตร ที่ทำการติดตั้งข้อต่อทนแรงดันขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.4 เซนติเมตร ปลายด้านบนประกบกับแผ่นเหล็กขนาด 12×12×1.9 เซนติเมตร ซึ่งมีรูตรงกลางแผ่นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5.8 เซนติเมตร และแผ่นเหล็กทั้งสองมีรูขนาด 0.9 เซนติเมตร อยู่ที่ยูมทั้งสี่ด้านเพื่อทำการยึดแบบหล่อทดสอบด้วยน็อตขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8 เซนติเมตร ยาว 25 เซนติเมตร (อธิบายไว้ในบทที่ 4)
- 5) หลังจากบรรจุเกล็ดเกลือลงในแบบหล่อทดสอบจนเต็ม ทำการกระแทกเบาๆ ด้วยแท่งเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร ลงในแบบหล่อเพื่อให้เกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและลดช่องว่างระหว่างเกล็ดเกลือ
- 6) สำหรับตัวอย่างเกล็ดเกลือเม็ดกลางขนาด 1.0–2.0 mm และเม็ดใหญ่ขนาด 2.0–4.75 mm ให้เตรียมด้วยวิธีการเดียวกัน

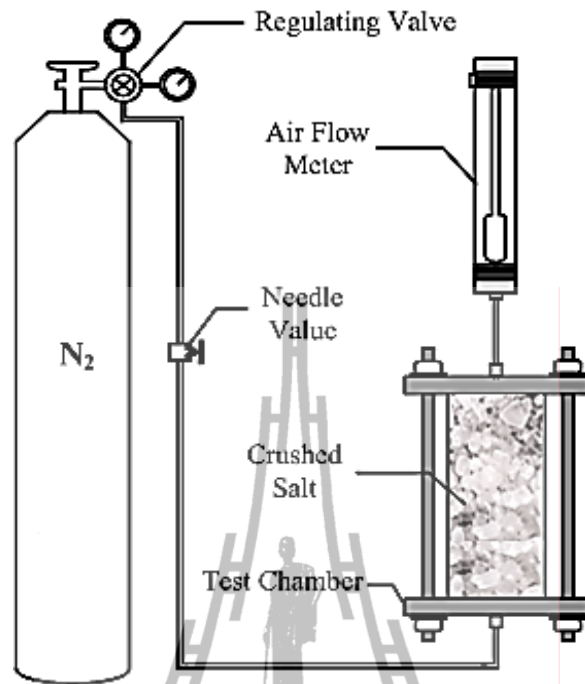
### 6.3 วิธีการทดสอบ

นำตัวอย่างที่ได้จากการจัดเตรียมตัวอย่างมาทำการทดสอบเพื่อหาค่าความซึมผ่าน โดยการอัดแรงดันด้วยก๊าซไนโตรเจน ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

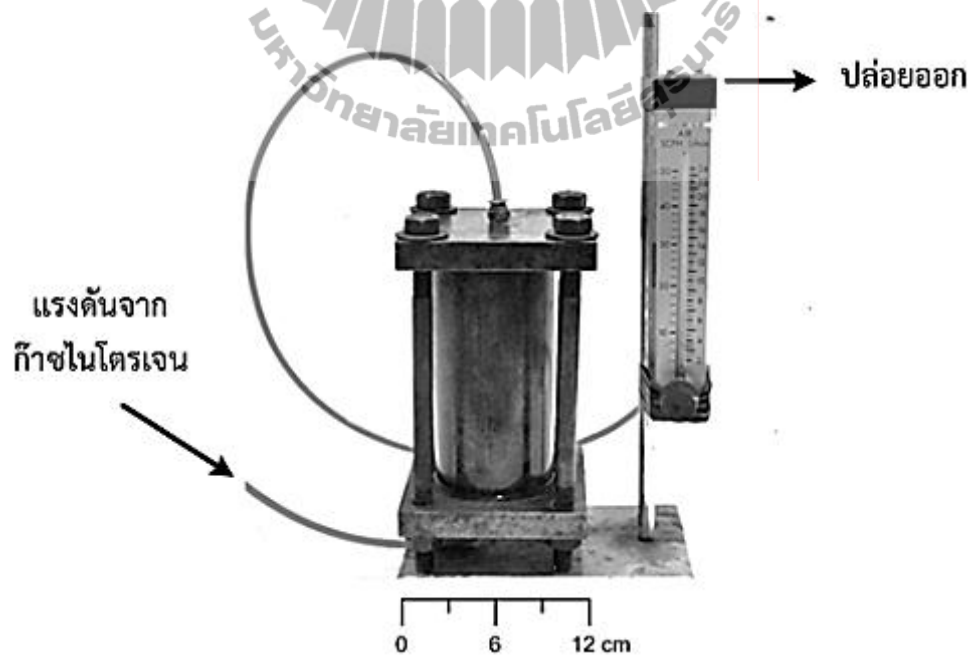
- 1) นำแท่งเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร วางลงไปใ้ ครอบทดสอบเพื่อทำหน้าที่ส่งผ่านแรงไปยังเกล็ดเกลื่อ
- 2) ให้แรงในแนวตั้งฉากขนาด 4 MPa เป็นเวลา 72 ชั่วโมง
- 3) ทำการวัดค่าการทรุดตัวในแนวตั้งในเชิงเวลา เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นและอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตร (อธิบายไว้ในบทที่ 4)
- 4) เมื่อต้องการทดสอบค่าความซึมผ่าน ให้ทำการปลดแบบหล่อทดสอบออกจากเครื่องให้แรงในแนวแกน และปลดแผ่นเหล็กประกบด้านบนออก แล้วใส่แผ่นเหล็กขนาด  $12 \times 12 \times 1.9$  เซนติเมตร ที่ทำการติดตั้งข้อต่อทนแรงดันขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.4 เซนติเมตร
- 5) นำแบบหล่อทดสอบติดตั้งเข้ากับเครื่องวัดอัตราการไหลและติดตั้งแบบหล่อทดสอบอีกด้านเข้ากับวาล์วควบคุมแรงดันจากถังแก๊สไนโตรเจนด้วยสายยางทนแรงดันดังรูปที่ 6.1 และรูปที่ 6.2
- 6) เปิดวาล์วควบคุมความดันเพื่อให้แก๊สไหลเข้าสู่ระบบ โดยใช้แรงดันผันแปรจาก 10 psi ถึง 100 psi ทำการบันทึกค่าอัตราการไหลที่ได้เพื่อนำไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านในแต่ละแรงดัน จากสมการที่ (7.1) ถึงสมการที่ (7.3)
- 7) ปลดแบบหล่อทดสอบออกจากระบบ นำเข้าเครื่องให้แรงในแนวแกนเป็นเวลา 72 ชั่วโมง และทำซ้ำตามขั้นตอนที่ 3 ถึงขั้นตอนที่ 5 จนกระทั่งได้ระยะเวลาการอัดตัวคายน้ำครบ 1000 ชั่วโมง
- 8) นำค่าที่วัดได้จากอัตราการไหลแทนค่าในสมการ และนำไปลงจุดสร้าง ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพกับระยะเวลาในการอัดตัวคายน้ำ

### 6.4 การคำนวณผลการทดสอบ

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7.1) ถึงสมการที่ (7.3) เพื่อคำนวณหาค่าความสูงที่ต่างกัน ( $\Delta h$ ) ในการนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านจากสมการ



รูปที่ 6.1 แผนภูมิแสดงอุปกรณ์การทดสอบวัดค่าความซึมผ่าน



รูปที่ 6.2 แบบหล่อทดสอบที่ใช้ในการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบวัดค่าความซึมผ่าน

$$\Delta h = \frac{\Delta P}{\gamma_f} \quad (7.1)$$

โดยที่  $\Delta h$  = ระดับความสูงที่ต่างกัน (m)  
 $\Delta P$  = ความดันที่ต่างกันของจุดต้นและจุดปลาย (kPa)  
 $\gamma_f$  = น้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรของน้ำเกลือ (kN/m<sup>3</sup>)

การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (Hydraulic Conductivity) สามารถหาได้จากสมการ

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

$$K = \frac{QL}{\Delta h A} \quad (7.2)$$

โดยที่  $K$  = สัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (m/s)  
 $Q$  = อัตราการไหล (m<sup>3</sup>/s)  
 $L$  = ระยะทางการซึมผ่าน  
 $A$  = พื้นที่หน้าตัดของการไหล (m<sup>2</sup>)  
 $\Delta h$  = ระดับความสูงที่ต่างกันของจุดต้นและจุดปลาย (m)

แทนค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านที่ได้จากสมการ (7.2) เพื่อหาค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพจากสมการ

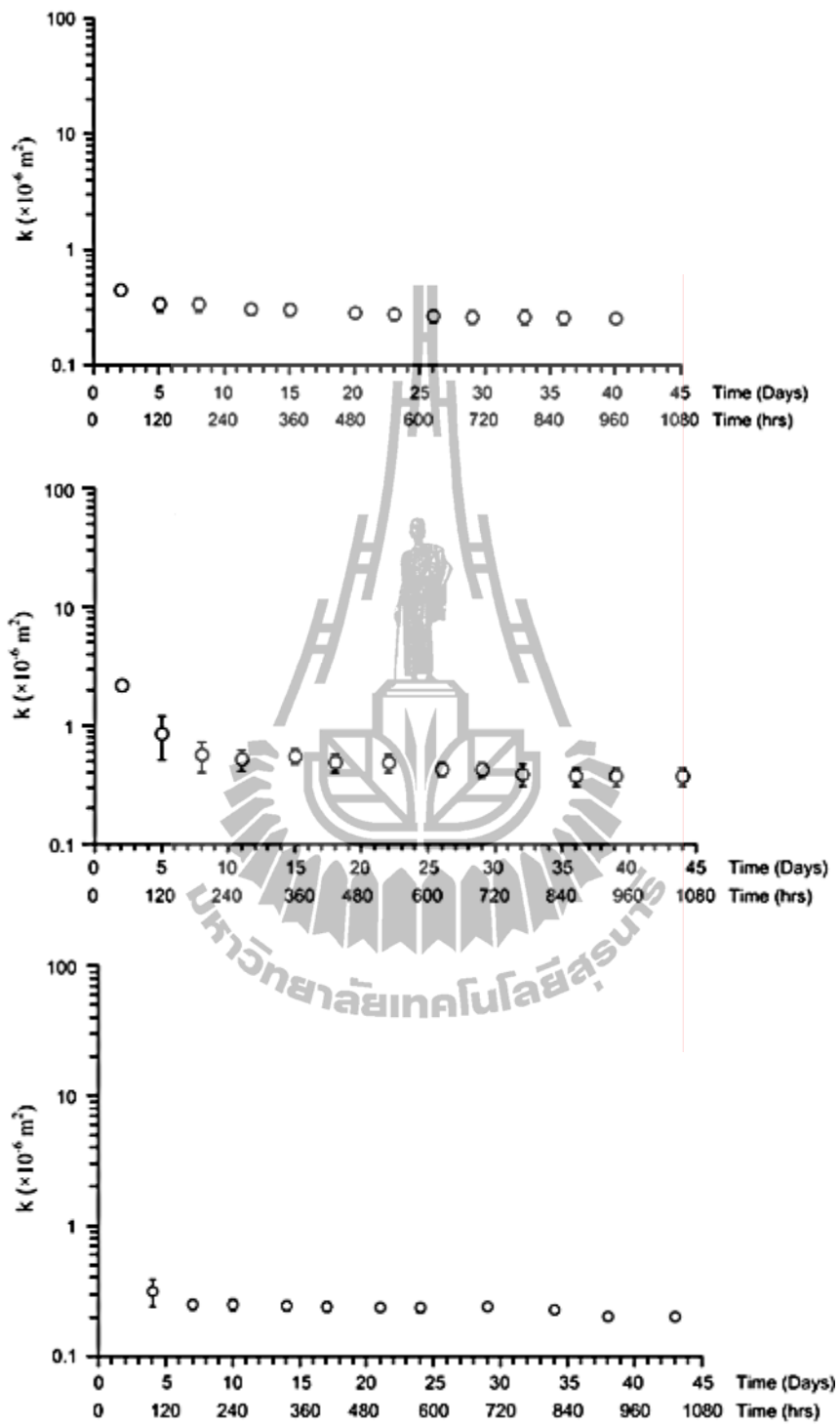
$$k = \frac{K \mu}{\gamma_f} \quad (7.3)$$

โดยที่  $k$  = ความซึมผ่านเชิงกายภาพ (m<sup>2</sup>)  
 $\mu$  = ความหนืดจลน์ (Pa·s)

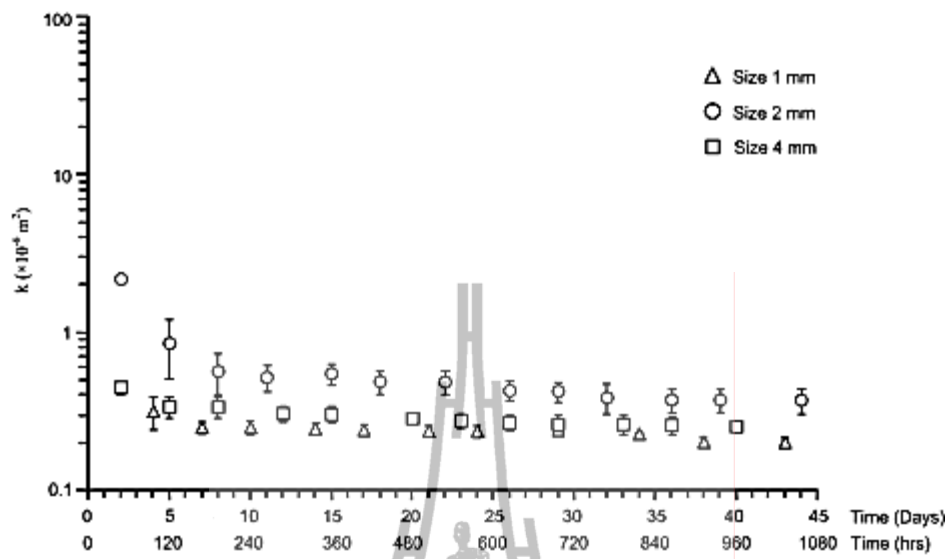
## 6.5 ผลการทดสอบ

การทดสอบค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพในสภาวะการถูกอัดตัวคายน้ำด้วยระยะเวลา 1000 ชั่วโมง โดยทำการเปรียบเทียบเกล็ดเกลือทั้งสามขนาดได้แก่ เกล็ดเกลือขนาดใหญ่ (2.0–4.75 มิลลิเมตร) ขนาดกลาง (1.0–2.0 มิลลิเมตร) และขนาดเล็ก (0.425–1.0 มิลลิเมตร) เมื่อระยะเวลาในการอัดตัวคายน้ำมากขึ้นค่าความซึมผ่านจะลดลงและให้ค่าความซึมผ่านคงที่หลังจาก 300 ชั่วโมง จนครบ 1000 ชั่วโมง จากการเปรียบเทียบแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพกับระยะเวลาในการอัดตัวคายน้ำแสดงให้เห็นว่าเกล็ดเกลือทั้งสามขนาดมีค่าความซึมผ่านในเชิงเวลาไม่ต่างกันมากนัก ดังแสดงในรูปที่ 6.3 และรูปที่ 6.4





รูปที่ 6.3 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพกับระยะเวลาในการ  
 อัดตัวคายน้ำของเกล็ดเกลือขนาดใหญ่ ขนาดกลาง และขนาดเล็กตามลำดับ



รูปที่ 6.4 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพกับระยะเวลาในการอัดตัวคายนํ้าโดยเปรียบเทียบเกล็ดเกลือทั้งสามขนาด



## บทที่ 7

### สรุปและวิจารณ์ผล

การทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบของการลดขนาดของเกลือหินบดภายใต้การอัดตัวคายน้ำที่ความเค้นกดคงที่ในเชิงเวลา (Consolidation drained test) โดยมีระยะเวลาในการทดสอบ 1 ถึง 100 ชั่วโมง ซึ่งในการทดสอบได้ลดขนาดของเกลือ 3 ขนาด ได้แก่ เกล็ดเกลือขนาดใหญ่ (2–4.75 มิลลิเมตร) เกล็ดเกลือขนาดกลาง (1–2 มิลลิเมตร) และเกลือขนาดเล็ก (0.425–1.000 มิลลิเมตร) ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของเกลือ 3 ขนาดพบว่าขนาดของเกลือไม่มีผลกระทบต่อค่าการอัดตัวคายน้ำ ผลที่ได้จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำที่ความเค้นกดคงที่ในเชิงเวลาสามารถนำไปหาอัตราส่วนของน้ำเกลือที่เหมาะสม (Optimum brine content) และสามารถนำไปสร้างความสัมพันธ์ระหว่างการลดตัวของอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรในเชิงเวลาและความชื้นได้

อัตราส่วนของน้ำเกลือที่เหมาะสมได้นำไปใช้ในการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนของเกลือทั้ง 3 ขนาด ผลที่ได้ระบุว่าในช่วงระยะเวลาและความเค้นตั้งฉากเท่ากันเกลือขนาดเล็กจะให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุด ค่ากำลังรับแรงเฉือนนี้จะเพิ่มขึ้นตามเวลาแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล โดยมีค่ามุมเสียดทานที่ 1, 10, 20 และ 100 ชั่วโมง เท่ากับ 16.9, 19.5, 29.3 และ 22.4 องศาตามลำดับ และค่าความเค้นยึดติดที่ 1, 10, 20 และ 100 ชั่วโมง เท่ากับ 0.38, 0.66, 0.41, 1.04 MPa

ผลจากการทดสอบค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพ (Intrinsic permeability) ของเกลือทั้ง 3 ขนาด ระบุว่าเมื่อระยะเวลาในการอัดตัวคายน้ำเพิ่มขึ้นค่าความซึมผ่านจะมีค่าลดลงและค่อนข้างคงที่หลังจากเวลาผ่านไป 300 ชั่วโมง จนถึง 1,000 ชั่วโมง ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพและระยะเวลาการอัดตัวคายน้ำของเกลือทั้ง 3 ขนาด มีความคล้ายคลึงกัน

ผลจากการทดสอบประสิทธิภาพของเกลือหินบดเชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์ในงานวิจัยนี้สามารถใช้กำหนดอัตราส่วนที่เหมาะสมของเกลือหินบดที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมเหมืองเกลือ และการกักเก็บในโพรงเกลือ เช่น ใช้เป็นวัสดุถมกลับในช่องเหมืองหรือนำไปใช้เป็นกำแพงปิดกั้นช่องทางระหว่างพื้นที่กักเก็บกากของเสียอันตราย โดยผลการทดสอบระบุชัดเจนว่าเกลือหินบดมีความเหมาะสม เพราะมีความซึมผ่านต่ำและมีค่ากำลังเฉือนสูง สามารถทนต่อแรงที่มากกระทำ เกลือหินบดที่มีขนาดเล็กและบดอัดเป็นระยะเวลานาน (300 ชั่วโมง ขึ้นไป) สามารถให้เกลือหินบดที่มีค่าความซึมผ่านต่ำและความแข็งอย่างเหมาะสม



## บรรณานุกรม

- ASTM C136-06. Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. In **Annual Book of ASTM Standards** (Vol. 04.02) West Conshohocken: American Society for Testing and Materials.
- Brewitz, W. and Rothfuchs, T. (2007). Concept and technologies for radioactive waste disposal in rock salt. **Acta Montanistica Slivaca** 12 (1): 67-74.
- Brodsky, N. S., Hansen, F. D., and Pfeifle, T. W. (1996). Properties of dynamically compacted WIPP salt. In **The Fourth Conference on the Mechanical Behavior of Salt**. The Pennsylvania State University, June 17 and 18, 1996. Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany, pp. 303-316.
- Butcher, B. M. (1991). The advantages of a salt/Bentonite backfill for Waste Isolation Pilot Plant disposal rooms. **Technical Report No.SAND90-3074**. Prepared for The United States Department of Energy.
- Callahan, G. D., Loken, M. C., Hurtado, L. D., and Hansen, F. D. (1996). Evaluation of constitutive models for crushed salt. In **The Fourth Conference on the Mechanical Behavior of Salt**. The Pennsylvania State University, June 17 and 18, 1996. Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany, pp. 317-330.
- Case, J. B. and Kelsall, P. C. (1987). Laboratory investigation of crushed salt consolidation. In **The 28th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS)**, June 29 – July 1, 1987, Tucson, AZ, pp. 189-196.
- Chumbe, D., Lloret, A., and Alonso, E. (1996). Creep and permeability tests on compacted granular salt. In **The Fourth Conference on the Mechanical Behavior of Salt**, The Pennsylvania State University, June 17 and 18, 1996. Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany, pp. 330-339.
- Davidson, B. C. and Dusseault, M. B. (1996). Granular halite backfill as a structural and disposal medium. In **The Fourth Conference on the Mechanical Behavior of Salt**, The Pennsylvania State University, June 17 and 18, 1996. Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany, pp. 341-352.

- Gommlich, G. (1993). In situ experiments for density on crushed salt as backfilling. In **The Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt**, The Pennsylvania State University, September 14–16, 1993. Trans Tech Publications, Clausthal–Zellerfeld, Germany, pp. 365–372.
- Hansen, F. D. (1993). Reconsolidation of salt as applied to permanent seals for the Waste Isolation Pilot Plant. In **The Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt**, The Pennsylvania State University, September 14–16, 1993. Trans Tech Publications, Clausthal–Zellerfeld, Germany, pp. 323–335.
- Hansen, F. D. and Ahrens, E. H. (1996). Large-scale dynamic compaction of natural salt. In **The Fourth Conference on the Mechanical Behavior of Salt**, The Pennsylvania State University, June 17 and 18, 1996. Trans Tech Publications, Clausthal–Zellerfeld, Germany, pp. 353–364.
- Heemann, U., Heusermann, S., Sarfeld, W., and Faust, B. (1999). Numerical modelling of the compaction behaviour of crushed rock salt. Available online: <http://www.iff-berlin.de/pdf/numogvii-finpap.pdf>.
- Hein, H. J. (1991). **Ein stoffgesetz zur Beschreibung des thermomechanischen Verhaltens von Salzgranulat**. Dissertation, RWTH Aachen.
- Jia, X. Chai, H., Yan, Z. and Zhang, Y. (2009). PFC2D simulation research on vibrating compaction test of soil and rock aggregate mixture. In **Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields (BCR2A'09)**, June 29–July 2, University of Illinois at Urbana, Champaign, Champaign, Illinois, USA, pp. 551–560.
- Kappei, G. and Gessler, K. (1984). In situ tests on the behavior of backfill materials. In **The Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt**, The Pennsylvania State University, September 24–28, 1984. Trans Tech Publications, Clausthal–Zellerfeld, Germany, pp. 311–328.
- Korthaus, E. (1993). Measurement of crushed salt consolidation under hydrostatic and deviatoric stress conditions. In **The Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt**, The Pennsylvania State University, September 14–16, 1993. Trans Tech Publications, Clausthal–Zellerfeld, Germany, pp. 311–322.

- Korthaus, E. (1996). Consolidation and deviatoric behavior of dry crushed salt at temperatures up to 150°C. In **The Fourth Conference on the Mechanical Behavior of Salt**, The Pennsylvania State University, June 17 and 18, 1996. Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany, pp. 365–377.
- Krumhansl, J. L., Molecke, M. A., Papenguth, H. W., and Brush, L. H. (1999). A historical review of Waste Isolation Pilot Plant backfill development. In **Proceedings 7<sup>th</sup> International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation (ICEM'99)**, September 26–30, Nagoya, Japan.
- Li, X., Xu, J., Zhu, W., and Zhuang, D. (2007). Simulation test study on compaction character of grouting backfill in caving area. In **International Conference on Waste Management, Environmental Geotechnology and Global Sustainable Development (ICWMEGGSD'07 – GzO'07)**, Ljubljana, Slovenia, August 28 – 30.
- Mellegard, K. D., Pfeifle, T. W. and Hansen, F. D. (1999). Laboratory characterization of mechanical and permeability properties of dynamically compacted crushed salt. **Technical Report No. SAND98–2046**. Sandia National Laboratories, Prepared for the United States Department of Energy.
- Olivella, S. and Gens, A. (2002). A constitutive model for crushed salt. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics** 26: 719–746.
- Olivella, S., Gens, A., Alonso, E. E., and Carrera, J. (1996). Analysis of creep deformation of galleries backfilled with porous salt aggregates. In **The Fourth Conference on the Mechanical Behavior of Salt**, The Pennsylvania State University, June 17 and 18, 1996. Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany, pp. 379–386.
- Prij, J., Heijdra, J. J., and Horn, B. A. (1993). Convergence and compaction of backfilled openings in rock salt. In **The Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt**, The Pennsylvania State University, September 14–16, 1993. Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany, pp. 337–350.

- 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 on compaction. In **The 35<sup>th</sup> U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS)**, June 5 – 7, 1995, Reno, NV, A. A. Balkema, Rotterdam.
- Schneefub, J. And Droste, J. (1993). Thermomechanical effects in backfilled drifts. In **The Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt**, The Pennsylvania State University, September 14–16, 1993. Trans Tech Publications, Clausthal–Zellerfeld, Germany, pp. 373–380.
- Zhang, C., Schmidt, M. M., and Staupendahl, G. (1993). Experimental and modelling results for compaction of crushed salt. In **The Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt**, The Pennsylvania State University, September 14–16, 1993. Trans Tech Publications, Clausthal–Zellerfeld, Germany, pp. 391–402.
- Zhang, C., Wang, J., and Su, K. (2006). Concepts and tests for disposal of radioactive waste in deep geological formations. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering** 25(4): 750–768.

## ประวัตินักวิจัย

อาจารย์ ดร. บัณฑิตา ชีระกุลสถิตย์ เกิดเมื่อวันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2518 ที่จังหวัดนครพนม จบการศึกษาปริญญาตรีจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี ในปี พ.ศ. 2541 และจบการศึกษาปริญญาเอกจากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ คณะวิชาวิทยาศาสตร์ ภาควิชาธรณีวิทยา ในปี พ.ศ. 2548 ปัจจุบันมีตำแหน่งเป็นอาจารย์ประจำอยู่ที่สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา โดยได้รับทุนการศึกษาจากโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก สำนักกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ในขณะที่ศึกษาในระดับปริญญาเอก และได้รับทุน AIEJ จากประเทศญี่ปุ่น สำหรับการเดินทางไปศึกษาวิจัยและใช้เครื่องมือวิเคราะห์ธรณีเคมีที่มหาวิทยาลัย Shimane ณ ประเทศญี่ปุ่น มีความชำนาญพิเศษทางด้านธรณีปิโตรเลียม ธรณีเคมี ไอโซโทป การศึกษาสัณฐานวิทยาของถ่านหินและหินตะกอน บรรพชีวิน และมีผลงานทางวิชาการตีพิมพ์มากมายทั้งในวารสารและบทความการประชุมในประเทศและนานาชาติ

