



รหัสโครงการ SUT7-712-54-12-55

รายงานการวิจัย

ชุดโครงการวิจัย

การพัฒนาแหล่งเกลือหินสำหรับกักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรม
(Industrial Wastes Storage in Rock Salt)

โครงการวิจัยย่อย

การทดสอบประสิทธิภาพการอุดของส่วนผสมเกลือดีเกลือ
กับเบนโทไนต์ในรอยแตกของเกลือหิน
(Sealing Performance of Cement-Bentonite
Mixtures in Salt Fractures)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-712-54-12-55

รายงานการวิจัย

ชุดโครงการวิจัย

การพัฒนาแหล่งเกลือหินสำหรับกักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรม

(Industrial Wastes Storage in Rock Salt)

โครงการวิจัยย่อย

การทดสอบประสิทธิภาพการอุดของส่วนผสมเกลือดเกลือ

กับเบนโทไนต์ในรอยแตกของเกลือหิน

(Sealing Performance of Cement-Bentonite

Mixtures in Salt Fractures)

คณะผู้วิจัย

ผู้อำนวยการชุดโครงการวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เฟื่องขจร

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

หัวหน้าโครงการวิจัยย่อย

ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2554

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

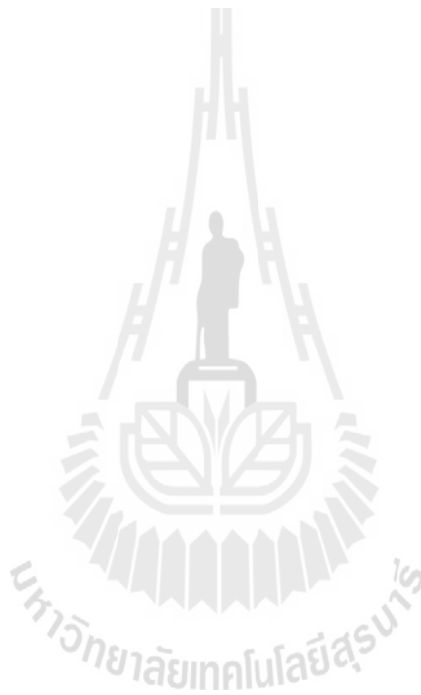
มิถุนายน 2554

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ 2554 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากทีมงานหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีในการทดสอบและ นางสาวกัลญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

มิถุนายน 2554



บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือ เพื่อประเมินขีดความสามารถทางกลศาสตร์และชลศาสตร์ของวัสดุขุดที่ได้มาจากการบดอัดดินเบนโทไนต์ผสมกับเกล็ดเกลือเพื่อนำมาใช้ในการขุดอุโมงค์ใต้ดินเพื่อใช้กักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรม เกล็ดเกลือสามขนาดที่ศึกษาในงานวิจัยนี้คือ 0.4-1, 1-2 และ 2-4 มิลลิเมตร ด้วยการนำเกล็ดเกลือเหล่านี้ผสมกับดินเบนโทไนต์จากบริษัท American Colloid Company อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักของดินเบนโทไนต์ต่อเกล็ดเกลือคือ 30:70, 40:60 และ 50:50 ผลการทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์บริสุทธิ์ที่ผสมกับน้ำเกลือระบุว่ามีปริมาณน้ำเกลือที่เหมาะสมคือร้อยละ 20 ซึ่งจะทำให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดประมาณ 15 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ผลของการทดสอบความเค้นเฉือนระบุว่ามีอัตราส่วนที่มีเกล็ดเกลือขนาดใหญ่จะให้ค่ากำลังเฉือนสูงกว่าส่วนผสมที่มีเกล็ดเกลือขนาดเล็ก ส่วนผสมที่มีปริมาณเกล็ดเกลือสูงจะมีค่ากำลังเฉือนสูงกว่าส่วนผสมที่มีปริมาณเกล็ดเกลือน้อย ผลการทดสอบการบวมตัวของส่วนผสมในระยะเวลา 10 วัน โดยใช้น้ำเกลือเข้มข้นระบุว่ามีอัตราส่วนและขนาดเกล็ดเกลือต่างกันจะมีการบวมตัวคล้ายคลึงกัน แต่มีค่าการบวมตัวน้อยกว่าการบวมตัวของดินเบนโทไนต์บริสุทธิ์ประมาณร้อยละ 70 ผลการทดสอบหาค่าความซึมผ่านภายใต้ความดันน้ำเกลือคงที่ระบุว่ามีดินเบนโทไนต์บริสุทธิ์ที่ถูกบดอัดมีความซึมผ่านน้อยกว่า 10^{-18} m^2 ค่าความซึมผ่านของผสมที่มีเกล็ดเกลือขนาดใหญ่จะสูงกว่าที่มีเกล็ดเกลือขนาดเล็ก ส่วนผสมทั้งหมดมีค่าความซึมผ่านอยู่ในช่วงระหว่าง 10^{-14} ถึง 10^{-12} m^2 ส่วนผสมที่มีดินเบนโทไนต์น้อยจะให้ค่าความซึมผ่านสูงกว่าส่วนผสมที่มีดินเบนโทไนต์มาก ผลจากงานวิจัยนี้แนะนำว่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักของดินเบนโทไนต์ต่อเกล็ดเกลือควรจะทำกับ 30:70 โดยมีขนาดของเกล็ดเกลืออยู่ในช่วง 2-4 มิลลิเมตรซึ่งเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุขุดในอุโมงค์ใต้ดินที่ใช้ทิ้งของเสียจากภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากส่วนผสมนี้มีค่ากำลังเฉือนสูงสุด แต่ในขณะเดียวกันก็มีค่าความซึมผ่านและความสามารถในการบวมตัวใกล้เคียงกับส่วนผสมอื่นที่ใช้ในการทดสอบในงานวิจัยนี้

Abstract

The objective of this study is to experimentally assess the mechanical and hydraulic performance of compacted bentonite–crushed salt seals (backfill) for the industrial waste repository in rock salt formation. Three size ranges of crushed salt are studied: 0.4–1, 1–2, and 2–4 mm. They are mixed with the commercial grade bentonite from American Colloid Co. The weight ratios of the bentonite–crushed salt mixtures are 30:70, 40:60 and 50:50. Results from the compaction tests on the pure bentonite specimens mixed with saturated brine provide the optimum brine content of 20% with the corresponding maximum dry density of about 15 kN/m^3 . Results from the direct shear test indicate that the compacted mixtures with larger salt grains show greater shear strength than those with the smaller ones. The mixtures with higher salt content also give greater shear strength than those with the lower salt content. Swelling test is performed on the compacted mixtures for up to 10 days. The swelling ability of all mixtures under saturated brine is not much different, and is about 70% less than that of the pure bentonite. The constant head flow test using brine indicates that the intrinsic permeability of the compacted pure bentonite is less than 10^{-18} m^2 . The permeability of the compacted mixtures containing larger salt grains is higher than those with the finer grains. All mixtures show the permeability ranging from 10^{-14} to 10^{-12} m^2 . The mixtures with lower bentonite content give slightly greater permeability than those with higher bentonite content. The compacted bentonite–crushed salt weight ratio of 30:70 with grain sizes ranging from 2–4 mm is recommended for use as a sealing material because it shows the highest shear strength while maintaining the permeability close to those of other mixtures.

สารบัญ

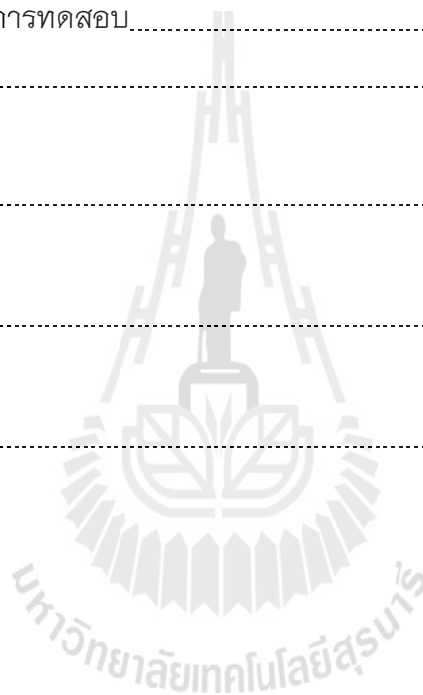
	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	1
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง / เก็บข้อมูล.....	3
1.6 ผลงานวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	4
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 การเกิดและชนิดของรอยแตก.....	7
2.2 ความซึมผ่านในมวลหิน.....	8
2.3 วัสดุและการอุดรอยแตก.....	14
2.4 การศึกษาการลดความซึมผ่านของรอยแตกในหิน.....	16
บทที่ 3 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ.....	19
3.1 วัตถุประสงค์.....	19
3.2 การเตรียมตัวอย่างเกล็ดเกล็ด.....	19
3.3 การเตรียมตัวอย่างน้ำเกล็ดอิมิตัว.....	19
3.4 ดินเบนโทไนต์.....	21
3.5 ผลที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบ.....	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือ	25
4.1 วัตถุประสงค์.....	25
4.2 การทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์.....	25
4.2.1 การจัดเตรียมตัวอย่างดินเบนโทไนต์.....	25
4.2.2 วิธีการทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์.....	25
4.2.3 การคำนวณผลการทดสอบ.....	27
4.3 การทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือ.....	31
4.3.1 การจัดเตรียมตัวอย่างดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือ.....	31
4.3.2 ธีทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือ.....	33
บทที่ 5 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน	35
5.1 วัตถุประสงค์.....	35
5.2 การจัดเตรียมตัวอย่าง.....	35
5.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	35
5.4 วิธีการทดสอบ.....	36
5.5 การคำนวณผลการทดสอบ.....	40
5.6 ผลการทดสอบ.....	41
บทที่ 6 การทดสอบการบวมตัวเชิงปริมาตร	49
6.1 วัตถุประสงค์.....	49
6.2 การจัดเตรียมตัวอย่าง.....	49
6.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	49
6.4 วิธีการทดสอบ.....	50
6.4 วิธีการทดสอบ.....	50
6.6 ผลการทดสอบ.....	50

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 7 การทดสอบความชื้นผ่าน.....	53
7.1 วัตถุประสงค์.....	53
7.2 การจัดเตรียมตัวอย่าง.....	53
7.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	53
7.4 วิธีการทดสอบ.....	55
7.5 การคำนวณผลการทดสอบ.....	55
7.6 ผลการทดสอบ.....	58
บทที่ 8 บทสรุป.....	61
บรรณานุกรม.....	63
ประวัตินักวิจัย.....	73



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำเกลืออิมิตัว.....	20
3.2 ผลการหาค่าประกอบทางเคมีของดินเบนโทไนต์เปรียบเทียบกับระหว่างผลที่ได้จากห้องปฏิบัติการ มทส. กับรายละเอียดการทดสอบของบริษัท American Colloid Company.....	22
3.3 ผลการทดสอบหาขีดจำกัดของ Atterberg ของดินเบนโทไนต์.....	23
4.1 การเปรียบเทียบน้ำหนักของเบ้าทดสอบแบบมาตรฐานกับเบ้าทดสอบแบบใหม่โดยผันแปรปริมาณความชื้นของน้ำเกลืออิมิตัว.....	28
4.2 ค่าคุณสมบัติของตัวอย่างดินเบนโทไนต์.....	29
5.1 ค่าความเค้นยึดติดและมุมเสียดทานภายในของส่วนผสมดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือที่อัตราส่วนต่างๆ.....	46
7.1 ค่าความความซึมผ่านของอัตราส่วนผสมระหว่างดินเบนโทไนต์และเกล็ดเกลือขนาดต่างๆ.....	59

สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	9
2.2	9
3.1	20
3.2	20
4.1	26
4.2	26
4.3	32
5.1	7
5.2	38
5.3	39
5.4	42
5.5	43

สารบัญญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.6 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและระยะการเคลื่อนตัวในแนวระนาบ โดยมีการผันแปรความเค้นตั้งฉากในอัตราส่วนผสมดินเบนโทไนต์ต่อเกล็ดเกลือที่ 30:70.....	44
5.7 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและความเค้นตั้งฉากของส่วนผสมระหว่างเบนโทไนต์ต่อเกล็ดเกลือทั้ง 3 ขนาด ที่อัตราส่วนผสมระหว่าง 50:50, 40:60 และ 30:70 ตามลำดับ.....	45
5.8 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและความเค้นตั้งฉากของดินเบนโทไนต์บริสุทธิ์.....	47
6.1 การทดสอบการบวมตัวเชิงปริมาตรในแบบหล่อทดสอบแบบมาตรฐาน.....	51
6.2 ความสัมพันธ์อัตราการบวมตัวของดินเบนโทไนต์ในฟังก์ชันของเวลาที่แสดง การเปรียบเทียบการบวมตัวโดยมีการผันแปรอัตราส่วนผสมของดินเบนโทไนต์กับ เกล็ดเกลือภายใต้สภาวะน้ำเกลืออิ่มตัว.....	51
7.1 ระบายตัวอย่างทดสอบที่ทำการต่อท่อทนแรงดันพร้อมทดสอบ.....	54
7.2 แผนภาพการเตรียมวัสดุ-อุปกรณ์สำหรับการทดสอบ.....	53
7.3 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดสอบหาค่าความซึมผ่านของส่วนผสมระหว่างดินเบนโทไนต์ กับเกล็ดเกลือขนาดต่างๆ.....	56
7.4 เปรียบเทียบค่าความซึมผ่านของส่วนผสมระหว่างดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือใน แต่ละอัตราส่วนผสม.....	59

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

การนำของเสียจากภาคอุตสาหกรรมรวมไปถึงสารเคมีที่เป็นอันตรายมาทิ้งในชั้นเกลือหินจำเป็นต้องทำการขุดเจาะช่องเหมืองและป้องกันการรั่วซึมของสารเคมีเป็นอย่างดี เพื่อให้สารพิษจากของเสียรั่วไหลเข้าไปปนเปื้อนกับชั้นน้ำบาดาลหรือรั่วซึมไปยังชั้นดินที่ใช้ในการกสิกรรมหรือแหล่งน้ำตามธรรมชาติ การอุดรอยแตกของหินด้วยเกล็ดเกลือผสมกับดินเบนโทไนต์จึงเป็นทางเลือกแบบหนึ่งที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลายเพื่อลดความซึมผ่านของรอยแตกในมวลหินบริเวณรอบๆ แหล่งทิ้งของเสียจากภาคอุตสาหกรรมไปถึงโครงสร้างวิศวกรรม เช่น อุโมงค์ที่อยู่ใต้ระดับน้ำบาดาล รานรากของเขื่อนที่ตั้งอยู่บนมวลหินที่มีรอยแตก เป็นต้น

การศึกษาศักยภาพของดินเบนโทไนต์ผสมกับเกล็ดเกลือเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการอุดรอยแตกในชั้นเกลือหินที่ถูกขุดเจาะเป็นโพรงหรืออุโมงค์สำหรับเป็นแหล่งทิ้งกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรม ไม่เพียงแต่จะช่วยให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของวัสดุอุดที่ช่วยลดค่าความซึมผ่านในรอยแตกของเกลือหิน แต่ยังสามารถให้คำแนะนำในการนำดินเบนโทไนต์มาผสมกับเกล็ดเกลือเพื่อประยุกต์ใช้อย่างเป็นรูปธรรมในภาคสนาม นอกจากนี้ยังเป็นการศึกษาเพื่อเป็นทางเลือกสำหรับการทิ้งกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมนอกเหนือจากวิธีที่มีอยู่ในปัจจุบัน ทั้งนี้เพื่อเป็นการช่วยลดปัญหาโลกร้อนที่ส่งผลกระทบต่ออย่างมากกับประเทศไทยและประเทศอื่นๆทั่วโลก

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการทำวิจัยนี้ คือ เพื่อศึกษาศักยภาพของดินเบนโทไนต์ผสมกับเกล็ดเกลือเชิงกลศาสตร์และเชิงพลศาสตร์เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการอุดรอยแตกในชั้นเกลือหินที่ถูกขุดเจาะเป็นโพรงหรืออุโมงค์สำหรับเป็นแหล่งทิ้งกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมที่ไม่สามารถบำบัดหรือนำกลับมาใช้ใหม่ได้

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1) การศึกษาความซึมผ่านของเกล็ดเกลือผสมกับดินเบนโทไนต์ในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการอุดรอยแตกในเกลือหินสำหรับกักเก็บกากของเสียในภาคอุตสาหกรรม

- 2) การทดสอบหาค่าความซึมผ่านของเกล็ดเกล็ดผสมดินเบนโทไนต์ในรอยแตกด้วยการให้แรงดันน้ำแบบคงที่ (Constant Head Test)
- 3) อัตราส่วนของดินเบนโทไนต์ที่ใช้ในการผสมกับเกล็ดเกล็ดมีอัตราส่วนร้อยละ 50 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
- 4) การทดสอบในห้องปฏิบัติการอยู่ภายใต้อุณหภูมิห้อง
- 5) ทดสอบหาค่ากำลังเฉือนของส่วนผสมโดยให้ความเค้นตั้งฉาก (Normal Stress) แก่ตัวอย่างหินมีค่าสูงสุดไม่เกิน 1,000 psi และต่ำสุดไม่น้อยกว่า 100 psi
- 6) ทดสอบการยุบตัวของส่วนผสมภายใต้แรงดันคงที่

1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

ผลกระทบจากการกัดกร่อนของซีเมนต์ที่เกิดจากกรดเกลือเป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งในการอุดรอยแตกในชั้นเกลือหินสำหรับเป็นแหล่งทิ้งกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมที่จำเป็นจะต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบเพื่อให้โพรงกักเก็บมีเสถียรภาพ วัตถุประสงค์หลักของการอุดรอยแตก คือ เพื่อลดค่าความซึมผ่านของรอยแตกในชั้นหิน ประสิทธิภาพในการลดค่าความซึมผ่านขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้อุด ซึ่งปัจจุบันได้มีงานวิจัยต่างๆ มากมายศึกษาเกี่ยวกับวัสดุที่ใช้ผสมซีเมนต์เพื่อลดค่าความซึมผ่านในรอยแตก อาทิ ดินเหนียว ดินเบนโทไนต์ ถ้ำลอย เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ดินเบนโทไนต์ เนื่องจากดินเบนโทไนต์เมื่อผสมกับน้ำจะมีคุณสมบัติการบวมตัวได้ดี มีความซึมผ่านต่ำมาก และเมื่อแห้งจะมีการเกาะตัวกับผนังของรอยแตกได้เป็นอย่างดี ส่วนเกล็ดเกล็ดจะทำหน้าที่เสริมความแข็งแรงให้กับส่วนผสม การนำเกล็ดเกล็ดมาประยุกต์ใช้จะสามารถลดปริมาณวัสดุที่เหลือจากการทำเหมืองเกลือใต้ดิน และจะทำให้ส่วนผสมมีความเข้ากันได้เชิงเคมีกับชั้นเกลือหินที่อยู่โดยรอบ ดังนั้นในการศึกษานี้จะเน้นที่อัตราส่วนระหว่างดินเบนโทไนต์และเกล็ดเกล็ดที่เหมาะสมสำหรับใช้อุดรอยแตกในชั้นเกลือหิน

การศึกษานี้จะเน้นไปที่การทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อประเมินหาค่าคุณภาพของดินเบนโทไนต์ต่อการซึมผ่านของน้ำในรอยแตกของเกลือหิน โดยมีปัจจัยและตัวแปรคือ อัตราส่วนระหว่างดินเบนโทไนต์และเกล็ดเกล็ด ความเค้นที่ตั้งฉากกับรอยแตก และอัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของรอยแตกและของวัสดุ และการทดสอบกำลังเฉือนของวัสดุโดยมีปัจจัยที่สำคัญคือ แรงเค้นกดในแนวตั้งฉาก

1.5 วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง / เก็บข้อมูล

การวิจัยแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาและทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งรวมถึงทฤษฎีและกฎต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณการเคลื่อนตัวของของไหลในรอยแตกของหิน คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการอุดรอยแตก ลักษณะและต้นกำเนิดของรอยแตกในหิน ผลกระทบของความเค้นต่อความดันของของไหลและต่อพฤติกรรมของรอยแตกในหิน ผลการวิจัยที่ดำเนินการมาแล้วทั้งในและต่างประเทศ ผลการทบทวนวรรณกรรมวิจัยทั้งหมดรวมทั้งรายการเอกสารอ้างอิงได้สรุปไว้ในรายงานการวิจัยฉบับนี้

ขั้นตอนที่ 2 จัดเตรียมวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุหลักที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ 1) ดินเบนโทไนต์ที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรมเพื่อศึกษาคุณสมบัติและศักยภาพสำหรับเป็นวัสดุอุดรอยแตกในชั้นเกลือหิน และ 2) เกล็ดเกลือสำหรับใช้ผสมกับดินเบนโทไนต์ ในงานวิจัยนี้จะใช้เกล็ดเกลือผสมกับดินเบนโทไนต์ในการศึกษา โดยจะใช้ชุดของส่วนผสม 3 ส่วน ภายใต้ความเค้นกด 4 ระดับ

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของส่วนผสม

มีการทดสอบหาค่าความหนาแน่น (Density) และคุณสมบัติการยุบตัวเพื่อศึกษาว่าส่วนผสมในระดับเท่าใดจะมีความเหมาะสมที่สุด ผลที่ได้จะนำมาเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาที่ดำเนินอยู่ทั้งในและต่างประเทศเพื่อหาความคล้ายคลึงและความแตกต่างต่อไป

ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสม

การทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมมีรูปแบบที่คล้ายคลึงกับขั้นตอนที่ 2 โดยจะดำเนินการหลังจากที่อัดส่วนผสมให้เป็นแท่งจากนั้นจึงทำการทดสอบค่าความซึมผ่านด้วยวิธี Constant head test

ขั้นตอนที่ 5 การทดสอบกำลังเฉือนของส่วนผสม

การทดสอบกำลังเฉือนของส่วนผสมจะมีแรงเค้นกดในแนวตั้งฉากตั้งแต่ 100 ถึง 1,000 psi และผันแปรส่วนผสมเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือตั้งแต่ร้อยละ 50 ถึง 70

ขั้นตอนที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

วิธีการ ขั้นตอน และผลการทดสอบรวมไปถึงผลการวิเคราะห์ต่างๆ ที่ได้จากการวิจัยได้นำมาสรุปและวิจารณ์ผลเพื่อวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือและความแม่นยำของผลที่ตรวจวัดได้ เพื่อให้คำแนะนำในการนำดินเบนโทไนต์มาผสมกับเกล็ดเกลือเพื่อประยุกต์ใช้อย่างเป็นรูปธรรมในภาคสนาม

ขั้นตอนที่ 7 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิด ขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุปได้นำเสนอโดยละเอียดในรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ เพื่อที่จะส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ และตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลงานวิจัยที่เสนอมานี้มีประโยชน์อย่างมากกับงานด้านธรณีวิทยา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และวิศวกรรมธรณี ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

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

1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยที่เสนอมานี้จะมีประโยชน์อย่างมากและโดยตรงกับหลายหน่วยงาน ทั้งภาครัฐและเอกชน สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ และวิศวกรรมธรณี รวมถึงหน่วยงานที่ทำงานเกี่ยวข้องกับการก่อสร้างในชั้นหิน เช่น การสร้างเขื่อน การสร้างอุโมงค์ เหมืองแร่บนดินและใต้ดิน หน่วยงานเหล่านี้ได้แก่

- 1) กรมทรัพยากรน้ำ
- 2) กองธรณีเทคนิค กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
- 3) สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
- 4) กองธรณีเทคนิค กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน
- 5) สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ และวิศวกรรมธรณี

- 6) บริษัทเอกชนที่ออกแบบและก่อสร้างอุโมงค์ และความลาดชันในมวลหิน
- 7) กระทรวงพลังงาน
- 8) บริษัทสำรวจและขุดเจาะน้ำมันในประเทศไทย
- 9) องค์การบริหารส่วนตำบล และองค์การบริหารส่วนจังหวัด



บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในหัวข้อนี้สรุปผลที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรมวิจัยเบื้องต้นที่เกี่ยวกับการเกิดและชนิดของรอยแตก ความสัมพันธ์ในมวลหิน วัสดุและการอุดรอยแตก การศึกษาการลดความเครียดของรอยแตกในหิน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1 การเกิดและชนิดของรอยแตก

รอยแตก (Fracture มีรากศัพท์มาจากภาษาละตินว่า Fractus แปลว่า แตก) หมายถึง ผิวที่แตกออกของหินหรือแร่ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงลักษณะอันเนื่องมาจากการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยว (Twiss and Moores, 1992)

โดยทั่วไปรอยแตกในมวลหิน (Rock mass) จะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อความเค้นมีค่าเท่ากับ ความแกร่งของหิน แหล่งหรือกลไกที่มีความเป็นไปได้ที่จะสามารถทำให้เกิดความเครียดสูงของเปลือกโลก คือ 1) Lithostatic คือ การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของหินกดทับทั้งที่ถูกฝังอยู่และที่ถูกลำบากออกไปโดยการยกตัวและการผุกร่อน 2) ความดันของของไหล 3) แรงที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลก 4) ความร้อนจากการเย็นตัวของหินแทรกซอนและหินพุ และการเย็นตัวที่เกิดจากการยกตัวและการผุกร่อนของเปลือกโลก 5) การชนของวัตถุบนโลก และ 6) กระบวนการทางธรณีวิทยาอื่นๆ เช่น การคดโค้ง กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับภูเขาไฟ และการแทรกซอนของเกลือ (National Research Council, 1996)

Bates and Jackson (1980) จำแนกรอยแตกในมวลหินเป็น 3 ประเภท ตามกลุ่มทางธรณีวิทยาบนพื้นฐานทางธรรมชาติของความไม่ต่อเนื่องที่เกิดจากการเคลื่อน ดังนี้

- 1) รอยแตกขยายหรือแนวแตก (Joints) เป็นผิวขรุขระ 2 แบบ ที่เคลื่อนออกจากกัน ในทิศทางที่ตั้งฉากต่อกัน ในเชิงกลศาสตร์จะเรียกรอยแตกประเภทนี้ว่า “Mode I” (Lawn and Wilshaw, 1975)
- 2) รอยแตกเฉือนหรือรอยเลื่อน (Faults) เป็นพื้นผิวที่เคลื่อนออกจากกันในทิศทางที่ขนานกัน ถ้าเป็นแบบตั้งฉากกับแนวรอยแตกในเชิงกลศาสตร์จะเรียกว่า “Mode II” แต่ถ้าขนานกับแนวรอยแตกจะเรียกว่า “Mode III”
- 3) รอยแตกซิด หรือ Pressure Solution Surfaces เป็นรอยแตกในหินตะกอนที่ถูกเชื่อมเข้าด้วยกันโดยสารละลายที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อผิวของเกรน

2.2 ความซึมผ่านในมวลหิน

ความซึมผ่านเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของของไหล เช่น น้ำ ก๊าซ หรือเอนกสถานะ เช่น น้ำ+ก๊าซ, น้ำ+ก๊าซ+น้ำมัน ในการไหลผ่านวัสดุที่มีรูพรุน เช่น ดินหรือหิน โดยค่าความซึมผ่านรวมของมวลหินสามารถแทนด้วยสมการ

$$k = k_f + k_m$$

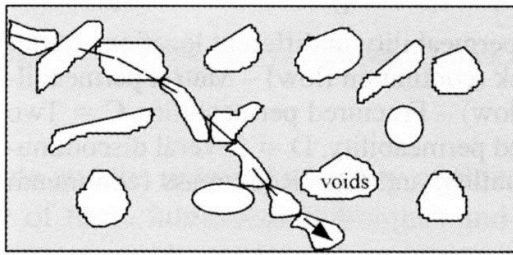
โดย k = ความซึมผ่านรวมของมวลหิน
 k_f = ความซึมผ่านของแต่ละรอยแตก
 k_m = ความซึมผ่านของเนื้อหิน

หินที่มีเนื้อเป็นผลึกของไหลจะสามารถไหลผ่านเนื้อหินได้น้อยกว่าการไหลผ่านรอยแตก เนื่องจากจำนวนรูพรุนที่ต่อกันและขนาดของรูพรุนในหินแข็งโดยทั่วไปมีน้อย (Gale, 1975; Iwai, 1976; Raven & Gale, 1985) ค่าความซึมผ่านยังมีผลต่อพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของหิน และต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของเสถียรภาพโครงสร้างวิศวกรรมในหิน ของไหลในตัวอย่างหินสามารถไหลผ่านเนื้อหินและช่องว่างที่ต่อกันหรือทั้งสองแบบดังแสดงในรูปที่ 2.1 สำหรับการไหลแบบที่มีของไหลเพียงชนิดเดียว ค่าความซึมผ่านสามารถแบ่งเป็น 3 กลุ่มหลัก คือ 1) ความซึมผ่านของเนื้อหิน 2) ความซึมผ่านของรอยแตก และ 3) ความซึมผ่านของทั้งเนื้อหินและรอยแตก ความสัมพันธ์ของรอยแตกรูปแบบต่างๆ รวมทั้งประเภทของความซึมผ่านได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.2 การคำนวณความซึมผ่านแต่ละประเภทมีดังนี้

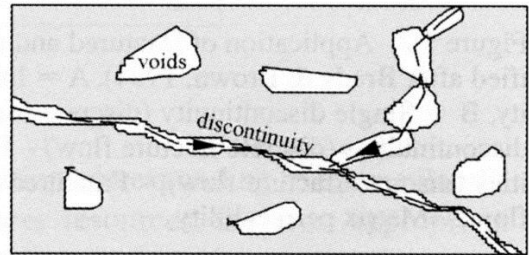
1) **ความซึมผ่านของเนื้อหิน** ค่าความซึมผ่านของเนื้อหิน (k_m) รูปทรงกระบอกสามารถคำนวณจาก Darcy's law ได้ดังนี้

$$k_m = \frac{4q\mu}{\pi D^2 (dp/dx)} \quad (1)$$

โดย q = อัตราการเคลื่อนที่ของของไหลผ่านตัวอย่างหิน
 dp/dx = Pressure Gradient ตามความยาว (dx) ของตัวอย่างหิน
 μ = ความหนืดของของไหล
 D = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของตัวอย่างหิน

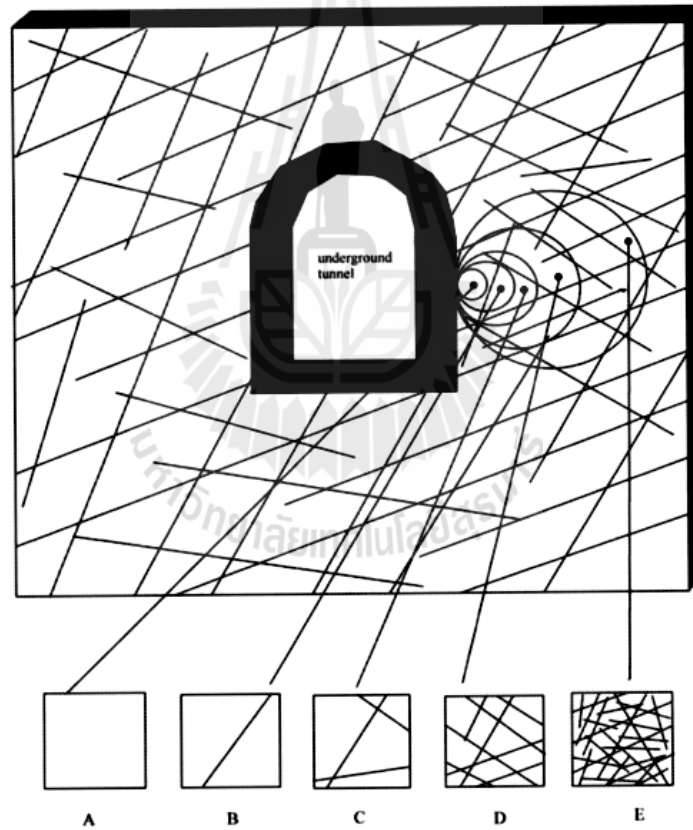


Intact rock with voids, where possible flow occurs through interconnected voids



Specimen with a major discontinuity, where flow occurs through discontinuity and any interconnected voids

รูปที่ 2.1 เส้นทางการเคลื่อนที่ของของไหลในเนื้อหินและในรอยแตกของตัวอย่างหิน (Indraratna and Ranjith, 2001)



รูปที่ 2.2 ชนิดของความซึมผ่านในตำแหน่งต่างๆ (ดัดแปลงมาจาก Brady and Brown, 1994)

- A = หินที่ไม่มีรอยแตก (ไหลอย่างต่อเนื่อง) - ความซึมผ่านในเนื้อหิน
- B = หินที่มีรอยแตกเดียว (ไหลไม่ต่อเนื่อง) - ความซึมผ่านในรอยแตก
- C = หินที่มีรอยแตกน้อย (ไหลไม่ต่อเนื่อง) - ความซึมผ่านในรอยแตก
- D = หินที่มีหลายรอยแตก (ไหลไม่ต่อเนื่อง) - ความซึมผ่านในรอยแตก
- E = มวลหิน (ไหลอย่างต่อเนื่อง) - ความซึมผ่านในเนื้อหิน

ถ้าไม่พิจารณา Hydraulic Gradient และความเค้นรอบข้างที่ให้กับตัวอย่างหิน ค่าความซึมผ่านของเนื้อหินจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเนื้อหินซึ่งแทนด้วยขนาดของรูพรุน รูปร่าง และการเชื่อมต่อกันของช่องว่าง ถ้าของไหลที่ผ่านเป็นก๊าซเพียงอย่างเดียวจะสามารถประมาณค่าความซึมผ่านของเนื้อหินได้ตามสมการ

$$k_m = \frac{2qp_e\mu L}{(p_i^2 - p_e^2)A} \quad (2)$$

โดย q = อัตราการไหลของก๊าซ
 μ = ความหนืดของก๊าซ
 L = ความยาวของตัวอย่างหิน
 A = พื้นที่ภาพตัดขวางของตัวอย่างหิน
 p_i = ความดันของก๊าซที่เข้าไป
 p_e = ความดันของก๊าซที่ออกมา

ถ้าวัดค่าความซึมผ่านโดยใช้วิธีแบบ Transient ค่าความดันจะขึ้นอยู่กับเวลาตามความสัมพันธ์

$$p_t = p_0 e^{-\alpha t} \quad (3)$$

โดย p_t = ความดันสุดท้าย
 p_0 = ความดันเริ่มต้น
 t = เวลา
 α = ค่าคงที่

และสมการในการหาค่าความซึมผ่านของเนื้อหินโดยใช้วิธีแบบ Transient ซึ่งถูกเสนอโดย Kranz et al. (1979) คือ

$$k_m = \frac{\alpha\beta\mu LV_1V_2}{A(V_1 + V_2)} \quad (4)$$

โดย β = ค่าความกดอัดที่อุณหภูมิคงที่ (Isothermal Compressibility)
 A = พื้นที่หน้าตัดขวาง
 V_1 = ปริมาตรของของไหลในช่องว่างที่ด้านบนของตัวอย่าง
 V_2 = ปริมาตรของของไหลในช่องว่างที่ด้านล่างของตัวอย่าง
 L = ความยาวของตัวอย่างหิน

2) การคำนวณความซึมผ่านของรอยแตกเดี่ยว Indraratna and Ranjith (2001) กล่าวว่า ปัจจัยหลักที่ควบคุมการไหลและค่าความซึมผ่านในรอยแตกเดี่ยว คือ ความขรุขระของผิวรอยแตก ความเปิดเผยอ ทิศทางการวางตัว ความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือน และพฤติกรรมด้านการรับน้ำหนัก นอกเหนือจากปัจจัยเหล่านี้แล้ว ขนาดของความเปิดเผยอก็เป็นปัจจัยหลักซึ่งเป็นส่วนประกอบของความเค้นภายนอก ความดันของไหล และคุณสมบัติทางด้านรูปร่างของแนวแตก ดังนั้น สมการการหาค่าความซึมผ่านในรอยแตกเดี่ยวจะเปลี่ยนไปตามปัจจัยที่เกี่ยวข้องคือ

$$k = \frac{e^2}{12} \quad (5)$$

โดย k = ความซึมผ่านของรอยแตกเดี่ยว
 e = ความเปิดเผยอของแนวแตก

ความเปิดเผยอของแนวแตกจะขึ้นอยู่กับความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือนที่มากกระทำบนแนวแตก สมมติให้เนื้อหินมีคุณสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง (Isotropic) และมีความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง ตาม Hooke's law ความสัมพันธ์ของความเปิดเผยอและความเค้นจะเป็นดังนี้

$$e = e_0 \pm \delta e \quad (6)$$

โดย e_0 = ความเปิดเผยอเริ่มต้นของแนวแตก
 δe = ความเปลี่ยนแปลงของความเปิดเผยอที่เกิดจากความเค้น (ความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือน) ที่มากกระทำต่อแนวแตก

ในกลศาสตร์หิน Jaeger and Cook (1979) ได้เสนอสมการหาค่าความเปลี่ยนแปลงทั่วไป (δe_n) ดังนี้

$$\delta e_n = \frac{1}{K_n} [\sigma_z \cos \beta + \sigma_h \sin \beta] \quad (7)$$

โดย K_n = ความแกร่งตั้งฉากของรอยแตก
 σ_z = ความเค้นในแกนตั้ง
 σ_h = ความเค้นในแกนนอน
 β = มุมการวางตัวของรอยแตก

ถ้าพิจารณาค่าความดันน้ำที่กระทำตั้งฉากกับผิวของรอยแตก สมการที่ 3 จะเปลี่ยนเป็น

$$\delta e_n = \frac{1}{K_n} [\sigma_1 \cos \beta - \sigma_3 \sin \beta - p_w] \quad (8)$$

โดย p_w = ความดันน้ำภายในรอยแตก

รวมสมการที่ 1, 2 และ 3 จะได้สมการการหาค่าความซึมผ่านในรอยแตกเดี่ยวสำหรับแนวแตกที่เป็นแผ่นเรียบดังนี้

$$k = \frac{(e_0 + \delta e_n)^2}{12} \quad (9)$$

สมการนี้มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในการพิจารณาหรือทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เนื่องจากง่ายและเชื่อถือได้

Detoumay (1980) ได้แนะนำความสัมพันธ์ที่จะอธิบายค่าความซึมผ่านในรอยแตกโดยพื้นฐานของความเปิดเผยไฮดรอลิกเริ่มต้นและความชิดของแนวแตกดังนี้

$$k = \frac{e_0^2 \left(1 - \frac{v}{v_0}\right)^2}{12} \quad (10)$$

โดย e_0 = ความเปิดเผยไฮดรอลิกเริ่มต้นที่ความเค้นเป็นศูนย์
 v_0 = ความชิดของแนวแตกเมื่อความเปิดเผยไฮดรอลิกมีค่าใกล้ศูนย์
 v = การเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยทั่วไปของแนวแตก ซึ่งอาจคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 4

Snow (1968) ได้สังเกตแบบจำลองอย่างง่ายเพื่ออธิบายความผันแปรของการไหลในรอยแตกที่ตรงข้ามกับความเค้นตั้งฉากคือ

$$k = k_0 + K_n \frac{e^2}{s} (\sigma - \sigma_0) \quad (11)$$

โดย	k_0	= ความซึมผ่านเริ่มต้นของรอยแตกที่ความเค้นตั้งฉากเริ่มต้น (σ_0)
	K_n	= ความแกร่งตั้งฉาก
	s	= ความกว้างของรอยแตก
	e	= ความเปิดเผยไฮโดรลิก

Jones (1975) ได้แนะนำความสัมพันธ์อย่างง่ายระหว่างความซึมผ่านในรอยแตกและความเค้นตั้งฉากดังนี้

$$k = c_0 (\log(\sigma_{ch} / \sigma_c))^3 \quad (12)$$

โดย	σ_{ch}	= ความดันสมานรอบด้าน (Confining Healding Pressure) ที่ซึ่งค่าความ-ซึมผ่านเป็นศูนย์
	σ_c	= ความเค้นประสิทธิผลรอบด้าน
	c_0	= ค่าคงที่ที่ขึ้นกับผิวของรอยแตกและความเปิดเผยแรกเริ่ม

Nelson (1975) ได้เสนอความสัมพันธ์อย่างง่ายสำหรับความซึมผ่านของรอยแตกในหินทรายดังนี้

$$k = A + B\sigma_c^{-m} \quad (13)$$

โดย A , B และ m เป็นค่าคงที่ที่ได้จากการวิเคราะห์ย้อนกลับ ค่าคงที่นี้อาจเปลี่ยนแปลงได้ตามชนิดของหิน สำหรับหินชนิดเดียวกันจะขึ้นอยู่กับสภาพของผิวรอยแตก

Gangi (1978) จำลองผิวของหินให้เหมือนกับเตียงตะปูและได้เสนอแบบจำลองทางทฤษฎีสำหรับความซึมผ่านของรอยแตกที่ขึ้นกับความดันรอบด้านดังนี้

$$k = k_0 (1 - (\sigma_c / P_1)^m)^3 \quad (14)$$

โดย	P_1	= ความยืดหยุ่นประสิทธิผลของความขรุขระ
	m	= ค่าคงที่ซึ่งบอกถึงการกระจายตัวที่ขึ้นกับความยาวของความขรุขระ

สมการนี้จะให้ผลดีก็ต่อเมื่อไม่คิดผลกระทบต่อการไหลที่เกิดจากความขรุขระของผิวรอยแตก ซึ่งไม่สมเหตุสมผลในทางปฏิบัติ

2.3 วัสดุและการอุดรอยแตก

Butron et al. (2010) ได้นำเสนอแนวคิดใหม่ในการอุดรอยแตกก่อนการขุดเจาะอุโมงค์ เพื่อป้องกันการหดและลดปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่อุโมงค์รถไฟ โดยใช้สารละลายซิลิกาในการอุดรอยแตกของหลังคาอุโมงค์ ส่วนรอยแตกของผนังอุโมงค์จะใช้ปูนซีเมนต์ในการอุด สำหรับขั้นตอนการออกแบบการอุดรอยแตกนี้จะใช้วิธีการที่มีแบบแผนด้วยการกำหนดค่าตัวแปรสำหรับการออกแบบก่อนเริ่มลงมือทำการสำรวจ นอกจากนี้การทดสอบความดันของน้ำและความดันปริมาตร รวมไปถึงการจดบันทึกเวลาได้ถูกนำมาใช้ในการประเมินผล ซึ่งผลการศึกษาพบว่า การออกแบบประสบความสำเร็จ ผลรวมของค่าอัตราการไหลของน้ำลดลงจาก $4.9 \times 10^{-08} \text{ m}^2/\text{s}$ ถึงขีดจำกัดของการวัด ($1.6 \times 10^{-08} \text{ m}^2/\text{s}$) และการหดของน้ำลดลงแปดจุดจากหลังคา การปรับปรุงลักษณะรอยแตกของหินให้ดีขึ้นแสดงให้เห็นว่ารอยแตกด้านที่ได้รับการอุดจากซีเมนต์มีความสัมพันธ์กับระยะเวลาในการไหลของน้ำ และประสิทธิภาพของการอุดรอยแตกจะขึ้นอยู่กับขนาดขอบเขตความใหญ่ของระบบการไหลของน้ำในมวลหิน

การศึกษาของ Baik et al. (2007) พบว่า เบนโทไนต์ที่ได้รับการบดอัดถือว่าเป็นวัสดุที่มีศักยภาพในการช่วยลดความเป็นกรดและต่างสำหรับกระบวนการกำจัดของเสียใต้ดินจำพวกสารที่มีระดับกัมมันตภาพรังสีสูง การพังทลายของอนุภาคเบนโทไนต์ที่เกิดจากการไหลของน้ำใต้ดินบริเวณรอยต่อของเบนโทไนต์ที่ได้รับการบดอัด รอยแตกของหินแกรนิตได้ถูกศึกษาทดลองภายใต้สภาพธรณีวิทยาทางเคมีที่แตกต่างกันไป ผลการทดลองพบว่าอนุภาคเบนโทไนต์อาจจะถูกกรองออกมากจากสารลดความเป็นกรดและต่างในเบนโทไนต์ที่ได้รับการบดอัด โดยเป็นผลมาจากการไหลของน้ำบาดาลซึ่งขึ้นอยู่กับเวลาในการสัมผัส อัตราการไหลของน้ำบาดาลและค่าตัวแปรเกี่ยวกับธรณีวิทยาทางเคมีของน้ำใต้ดิน เช่น ความเป็นกรดและความเข้มข้นของอิออน ถึงแม้ว่าการแทรกตัวของเบนโทไนต์เข้าไปในรอยแตกของหินจะเป็นตัวช่วยลดการกัดกร่อน รอยแตกของหินจากน้ำใต้ดินก็ตาม แต่การเกิดการประสานกันของเบนโทไนต์ก็ยังถือว่าเป็นกระบวนการหลักในการชะล้างการพังทลายของอนุภาคเบนโทไนต์ ซึ่งจากการทดลองพบว่า การพังทลายของอนุภาคเบนโทไนต์ได้รับผลกระทบอย่างมากจากความเข้มข้นของอิออนของน้ำใต้ดิน ถึงแม้ว่าผลกระทบของความเป็นกรดหรือต่างที่ศึกษาในช่วง 7-10 จะมีไม่มากก็ตาม การพังทลายของอนุภาคเบนโทไนต์จากการไหลของน้ำใต้ดินไม่ได้ทำให้ประสิทธิภาพทางกายภาพ และการทำงานของสารลดความเป็นกรดและต่างในเบนโทไนต์ที่ได้รับการบดอัดนี้ลดลง อย่างไรก็ตามเป็นที่คาดหวังว่าการพังทลายของอนุภาคเบนโทไนต์จากการไหลของน้ำใต้ดินจะทำให้เกิดอนุภาคเบนโทไนต์ ซึ่งสามารถกำหนดสถานะของน้ำใต้ดินและทำหน้าที่เป็นแหล่งที่มาของสารแขวนลอยเพื่ออำนวยความสะดวกในการเคลื่อนย้ายสารกัมมันตภาพรังสีผ่านรอยแตกของหิน

Huang (1997) ได้ศึกษาในห้องปฏิบัติการเกี่ยวกับการตรวจสอบคุณสมบัติของซีเมนต์ที่มีส่วนผสมของซีเมนต์ลอย (อนุภาคขนาดเล็กซึ่งเกิดจากการเผาไหม้อย่างไม่สมบูรณ์ของถ่านหินหรือเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งอื่นๆ) ซึ่งเป็นอุปสรรคในการแยกของเสียอันตรายและสารกัมมันตรังสีระดับต่ำ ในการศึกษาที่ซีเมนต์ลอยถูกใช้ในการแทนที่ร้อยละ 30 โดยมวลของซีเมนต์ และยังมีส่วนผสมอีกสามชนิดที่ถูกผสมเข้าไปในซีเมนต์ได้แก่ สารเบนโทไนต์ ผงฝุ่นซิลิกา และเส้นใยโพรพิลีน โดยจะถูกผสมเข้าไปที่ละชนิดเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของซีเมนต์ในลักษณะต่างๆ นอกจากนี้ค่าความสามารถในการไหล การตั้งค่าเวลาของการผสมซีเมนต์ ค่ากำลังอัดในทิศทางเดียว การกระจายขนาดของรูพรุน และการซึมผ่านของน้ำก็จะถูกนำมาพิจารณาสำหรับการแข็งตัวของซีเมนต์ที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ จนถึง 120 วัน ทำยที่สุดความทนทานของซีเมนต์ที่มีส่วนผสมของซีเมนต์ลอยได้ถูกตรวจสอบอย่างรอบคอบในแง่ของการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพภายหลังจากการสัมผัสเกลือของกรดกำมะถันและวัฏจักรของการเปียก-แห้ง

Fransson (2001) ได้ทำการวิจัยเพื่อค้นหาและอธิบายถึงปริมาณหินที่เหมาะสมในการทดสอบการอุดรอยแตกในภาคสนามที่ห้องปฏิบัติการประเทศสวีเดน ค่าอัตราการไหลของน้ำที่คงที่และจำนวนรอยแตกที่สอดคล้องกันจากแผนที่ธรณีวิทยาของการทดสอบหลุมเจาะถูกนำมาคำนวณความน่าจะเป็นของรอยแตกที่สามารถเป็นสื่อนำไฟฟ้าได้เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลในแต่ละหลุมเจาะ นอกจากนี้ค่าอัตราการไหลของน้ำและค่าความสามารถเฉพาะของหลุมเจาะยังถูกนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบเพื่อหาค่าปริมาณน้ำจำเพาะสูงสุด จากการศึกษาความเป็นไปได้ของรอยแตกที่สามารถเป็นสื่อนำไฟฟ้าจากการทดสอบหลุมเจาะ ข้อมูลปริมาณจำเพาะของน้ำและค่าความถี่ของรอยแตกในแต่ละหลุมเจาะนั้นพอเพียงสำหรับการสร้างแบบจำลองของรอยแตกและปริมาณของหิน ยิ่งกว่านั้นค่ากลางของปริมาณจำเพาะของน้ำในหลุมเจาะยังเป็นตัวบ่งบอกถึงผลกระทบของอาณาเขตที่เชื่อมต่อกันของรอยแตกอีกด้วย การทดสอบในภาคสนามยังแสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของวิธีในการปรับปรุงการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบไฮโดรลิกและการทำแผนที่ธรณีวิทยาสำหรับ grouting fan.

Rahmani (2004) กล่าวว่า เป็นเวลากว่า 20 ปี ที่การการอุดรอยแตกถูกนำมาใช้เพื่อเป็นการเพิ่มความแข็งแรง ลดการเคลื่อนตัว และลดค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านทั้งของดินและมวลหินแตก เนื่องจากความสำคัญทางวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ในการคาดการณ์ผลกระทบของการอุดรอยแตกนั้นมีความน่าสนใจ ซึ่งมีวิธีการต่างๆ มากมายที่นำมาใช้ประเมินปริมาณของผลกระทบของการอุดรอยแตก หนึ่งในนั้นคือการประเมินด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข วิธีนี้สามารถจำลองการกระจายตัวของการอุดรอยแตกและผลกระทบที่เกิดขึ้นบนรอยแตก ได้มีการศึกษาด้วยวิธีเชิงตัวเลขจำนวนน้อยที่สามารถแสดงให้เห็นถึงการแทรกซึมของการอุดรอยแตกผ่านรอยแตกของหินได้ เนื่องจากความซับซ้อนของแบบจำลอง การศึกษาเหล่านี้จึงใช้

สมมุติฐานอย่างง่าย หรือทำการลดขนาดของรอยแตกให้น้อยลง ทำให้ผลของแบบจำลองเกิดความไม่สมจริง

ในการศึกษานี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อลดสมมุติฐานที่ไม่สมจริงออก และพัฒนาแบบจำลองให้มีความสมจริงมากขึ้น เพราะในความเป็นจริงการอุดรอยแตกนั้นอยู่ในสถานะแบบของไหลบิงแฮม แต่หลายๆ แบบจำลองมักไม่ให้ความสนใจเท่าที่ควร อันเนื่องมาจากความซับซ้อนเช่นเดียวกัน รอยแตกของหินแท้จริงก็มีความซับซ้อนและมีการเปิดเผยที่แปรผันแตกต่างกัน บางแบบจำลองได้กำหนดให้การแตกเป็นระนาบที่ขนานกันและมีการเปิดเผยคงที่ เพื่อความสะดวกในการใช้สมการและลดระยะเวลาในการประมวลผล จึงแทนที่แบบจำลองแบบสองมิติด้วยแบบจำลองท่อนหนึ่งมิติที่มีคุณสมบัติเทียบเท่ากัน แบบจำลองแสดงให้เห็นถึงการแทรกซึมของการอุดรอยแตกที่ใช้ระยะเวลานาน ผลการศึกษาแบบจำลองสามารถใช้ทำนายลักษณะการแทรกซึมของการอุดรอยแตกสำหรับสถานะของรอยแตกและวัสดุการอุดรอยแตกที่แตกต่างกันได้

2.4 การศึกษาการลดความซึมผ่านของรอยแตกในหิน

Ryan and Day (2002) ได้ศึกษาการทำกำแพงที่บ้น้ำเพื่อป้องกันการไหลในแนวระนาบของน้ำใต้ดินโดยนำเอาซีเมนต์ ดิน และเบนโทไนต์มาผสมเข้าด้วยกัน เรียกว่า Soil-Cement-Bentonite slurry wall (SCB) แทนวิธีการทำกำแพงที่บ้น้ำแบบทั่วไป ซึ่งใช้ส่วนผสมจากดินกับเบนโทไนต์ หรือเรียกว่า Soil-Bentonite slurry wall (SB) เนื่องจากในบางสภาพกำแพงที่บ้น้ำอาจรับน้ำหนักกดทับจากแรงกระทำภายนอก โดยเฉพาะน้ำหนักของฐานรากที่มากเกินไปของดินและเบนโทไนต์จะทนรับได้ แต่เมื่อนำซีเมนต์มาผสมกับดินและเบนโทไนต์ส่งผลให้กำแพงที่บ้น้ำสามารถรับแรงได้มากขึ้น นอกจากนั้นค่าความซึมผ่านของ SCB ยังมีค่าน้อยกว่า SB ซึ่งถือเป็นสิ่งที่ดี คือมีค่าเท่ากับ 5×10^{-7} cm/s จากค่ามาตรฐานที่ไม่มากกว่า 1×10^{-6} cm/s และสามารถรับแรงในช่วง 15-300 psi ได้

Kashir and Yanful (2000) ได้ศึกษาจากห้องปฏิบัติการเกี่ยวกับการป้องกันความซึมผ่านของสารพิษที่มาจากบ่อทิ้งกากแร่พบว่า หากใช้กำแพงที่บ้น้ำที่เป็นส่วนผสมระหว่างดินและเบนโทไนต์แบบทั่วไปเป็นวิธีที่ไม่เหมาะสมสำหรับกรณีดังกล่าว เนื่องจากภายในโครงสร้างของกำแพงที่บ้น้ำที่ทำมาจากดินและเบนโทไนต์ มีปริมาณของช่องว่างที่มากเกินไป ทำให้เกิดการรั่วไหลของกรดที่มาจากกากแร่ได้ หรือเรียกว่า acid mine drainage (AMD) ซึ่งในการทดลองนี้ได้นำดินตะกอนประปามาผสมกับเบนโทไนต์ 6% โดยน้ำหนักมาทดสอบความซึมผ่านของ AMD จากนั้นได้ทดสอบความซึมผ่านด้วยวิธีใหม่โดยการเพิ่มแร่จำพวกคาร์บอเนตเข้าไปในส่วนผสมและแบ่งการทดสอบเป็นสองวิธีคือ carbonate-rich หรือในที่นี้เรียกว่า Brescia backfill และ

carbonate-free หรือ Heath Steele backfill โดยวิธีแบบ Brescia backfill ได้ใส่คาร์บอนเนตลงไป ปริมาณ 32% เป็นวิธีที่ให้ผลดีที่สุด สามารถยับยั้งความซึมผ่านของกรดที่มาจากกากแร่ได้ดีและ ยังช่วยลดค่าความเป็นกรดของ AMD ได้จนอยู่ในระดับที่น่าพอใจ จากการวัดค่าสัมประสิทธิ์ ความซึมผ่านมีค่าเท่ากับ 1×10^{-9} cm/s ส่วนวิธีแบบ Heath Steele backfill ไม่ได้เติมคาร์บอนเนต แต่มีส่วนผสมของ clay mineral ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านเท่ากับ 3×10^{-8} cm/s และสามารถยับยั้งการเกิด AMD ได้ แต่สิ่งที่แตกต่างจากวิธีการแรกคือไม่สามารถทำให้ AMD มีค่า pH ที่เป็นกลางได้

Owaidat et. al. (1999) ได้ร่วมมือกันทำโครงการภายใต้การควบคุมของ The U.S. Army Corps of Engineers เพื่อสร้างกำแพงทึบน้ำสำหรับป้องกันการพังทลายของสันเขื่อน (levee) ของแม่น้ำอเมริกันริเวอร์ ในเมืองซาคราเมนโต รัฐแคลิฟอร์เนีย เพื่อป้องกันอันตราย ต่อประชาชนและที่อยู่อาศัยในช่วงของฤดูน้ำหลาก เนื่องจากในฤดูที่มีน้ำมากสันเขื่อนมักเกิดการ พังทลายจากการอุ้มน้ำที่มากเกินไปจนขีดจำกัด ส่งผลให้เกิดน้ำท่วมสร้างความเสียหายให้กับ ประชาชนที่อยู่อาศัยอยู่บริเวณใกล้เคียง เพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าวทางคณะผู้ทำการศึกษาจึง ได้ออกแบบโครงสร้างสำหรับลดผลกระทบที่เกิดขึ้นในรูปของกำแพงทึบน้ำ ซึ่งได้ออกแบบ กำแพงทึบน้ำที่มีส่วนผสมของดิน ซีเมนต์ และเบนโทไนต์ หรือ Soil-Cement-Bentonite slurry wall (SCB) เหตุผลเนื่องจาก SB แบบธรรมดาไม่รับแรงเฉือนที่ต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับ ขนาดของโครงการที่มีแรงดันด้านข้างจากปริมาณน้ำที่มากในฤดูน้ำหลาก ส่วน Cement-Bentonite แม้จะรับแรงเฉือนได้ดี แต่มีราคาสูงเมื่อต้องนำมาใช้กับโครงการขนาดใหญ่ เพราะ ระยะทางในการสร้างกำแพงทึบน้ำมีความยาวหลายกิโลเมตร หลังจากการเลือกส่วนผสมที่ เหมาะสม โครงการได้ใช้เวลาประมาณสองเดือนในการก่อสร้างกำแพงทึบน้ำ ผลของการ ทดสอบหลังจากทำการสร้างกำแพงทึบน้ำจาก SCB ซึ่งมีความลึกของกำแพงประมาณ 80 ฟุต พบว่า เมื่อนำตัวอย่างหลังจากปล่อยให้กำแพงจับตัวกัน 28 วัน มาทดสอบได้ค่ากำลังรับแรงกด ในแกนเดียวมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 15 psi. และมีค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านเท่ากับ 5×10^{-7} cm/s ซึ่งได้ผลเป็นที่น่าพอใจ

บทที่ 3

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.1 วัตถุประสงค์

เนื้อหาในบทนี้อธิบายขั้นตอน วิธีการ และข้อปฏิบัติในการจัดเตรียมตัวอย่างเกลือ วิธีการบด การคัดขนาดโดยการร่อนผ่านตะแกรง คุณสมบัติเชิงเคมีของดินเบนโทไนต์ การเตรียมน้ำเกลืออิ่มตัว ซึ่งวัสดุเหล่านี้จะนำมาใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาส่วนผสมที่เหมาะสมในการนำมาเป็นวัสดุอุดรอยแตกในชั้นเกลือหิน

3.2 การเตรียมตัวอย่างเกล็ดเกลือ

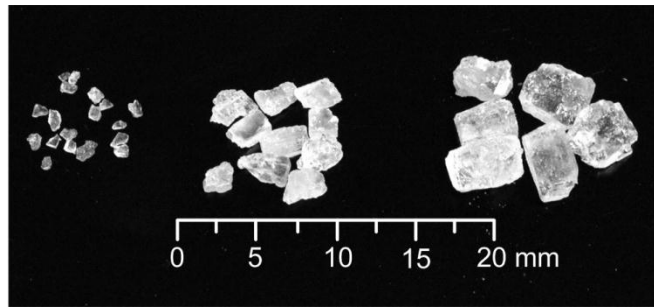
ตัวอย่างเกลือหินทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบได้คัดเลือกมาจากการขุดเจาะเกลือหินชั้นกลาง (Middle salt) และเกลือหินชั้นล่าง (Lower salt) โดยได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัทเหมืองแร่โปแตชอาเซียน จำกัด อ.บ่าเหนือจ.นครราชสีมา ซึ่งการเตรียมตัวอย่างเกล็ดเกลือมีขั้นตอนดังนี้

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

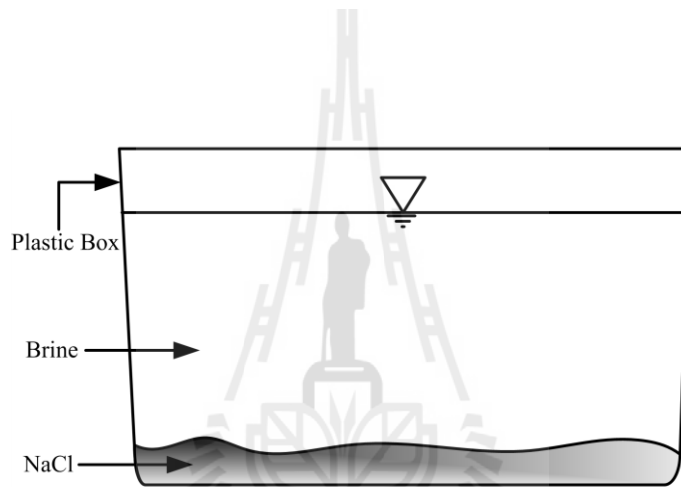
3.3 การเตรียมตัวอย่างน้ำเกลืออิ่มตัว

การเตรียมตัวอย่างน้ำเกลืออิ่มตัว (Saturated Salt water) เพื่อนำไปใช้เป็นส่วนผสมในการทดสอบหาค่าความชื้นที่เหมาะสมมีวิธีดำเนินการดังนี้

- 1) นำเกลือบริสุทธิ์หรือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) น้ำหนัก 2.7 กิโลกรัม บดละเอียดผสมกับน้ำบริสุทธิ์ 5.4 กิโลกรัม ในถังพลาสติกขนาด 28×30×50 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.2 เพื่อให้ได้สัดส่วนเกลือต่อน้ำบริสุทธิ์มากกว่า 39:100 โดยน้ำหนัก
- 2) ใช้ถังพลาสติกคนสารละลายอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 20 นาที เปิดฝาทิ้งไว้ตลอดเวลาเพื่อให้เกิดการระเหยอย่างต่อเนื่อง จากนั้นสังเกตว่าเกล็ดเกลือไม่สามารถละลายต่อไปได้ แสดงว่าได้ตัวอย่างน้ำเกลืออิ่มตัวซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำเกลืออิ่มตัวดังตารางที่ 3.1



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 ตัวอย่างการเตรียมน้ำเกลืออิมิตัว เพื่อใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 3.1 ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำเกลืออิมิตัว

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

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 ที่ความดันบรรยากาศปกติ
 1 atm

3.4 ดินเบนโทไนต์

ดินเบนโทไนต์ที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้เป็นของบริษัท American Colloid Company โดยได้นำดินเบนโทไนต์ไปทดสอบเพื่อหาค่าพื้นฐานทางเคมี ค่าพิกัดพลาสติก (Plastic limit, PL) ค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid limit, LL) และค่าดัชนีสภาพพลาสติก (Plastic index, PI) ซึ่งได้ผลการทดสอบดังนี้

ตารางที่ 3.2 เป็นการเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงเคมีของดินเบนโทไนต์ที่ทดสอบได้จากห้องปฏิบัติการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดังที่ระบุไว้ในข้อกำหนดของบริษัท American Colloid ซึ่งมีผลสอดคล้องกันเป็นอย่างดี โดยมี SiO_2 เป็นองค์ประกอบทางเคมีมากที่สุดคือร้อยละ 60 รองลงมาคือ Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Na_2O และ MgO ตามลำดับ ที่เหลือมีองค์ประกอบทางเคมีของแร่โลหะอื่นๆ น้อยกว่าร้อยละ 1

ตารางที่ 3.3 สรุปผลการทดสอบขีดจำกัดของ Atterberg ของดินเบนโทไนต์ การทดสอบได้ดำเนินการตามมาตรฐานสากลของ ASTM โดยการหาค่า Liquid limit และ Plastic limit ได้ใช้มาตรฐาน ASTM D423-66 และ ASTM D424-59 ซึ่งทำการทดสอบด้วยน้ำเกลือและน้ำจืด วิธีการคำนวณความชื้นของน้ำจืดในตัวอย่างทดสอบ สามารถหาได้โดยใช้สมการของ ASTM D7476-08 กับวิธีการคำนวณความชื้นเมื่อใช้น้ำเกลือในส่วนผสม ดังนี้

$$w_c = [(w_1 - w_2) / (w_2 - w_{\text{can}})] \times 100$$

หรือ

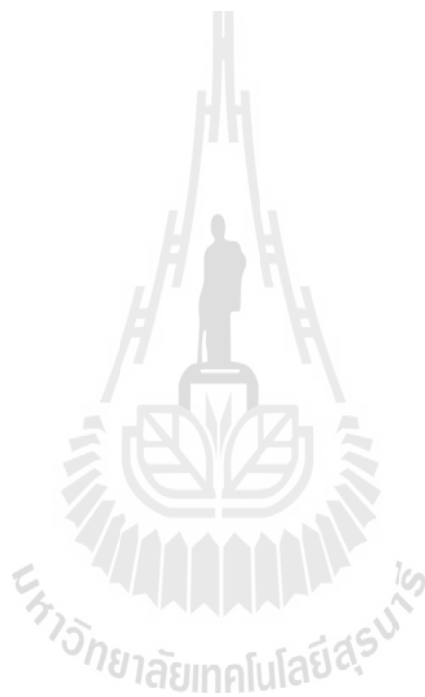
$$w_B = \frac{[100 + S_B] \times [w_1 - w_2 - (w_i / 100)(w_2 - w_{\text{can}})]}{100(w_2 - w_{\text{can}}) - S_B(w_1 - w_2)} \times 100$$

ตารางที่ 3.2 ผลการหาองค์ประกอบทางเคมีของดินเบนโทไนต์เปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากห้องปฏิบัติการ มทส. กับรายละเอียดการทดสอบของบริษัท American Colloid Company

Oxide	Concentration (%wt)	
	SUT Lab	American Colloid Co.
SiO ₂	61.93	61.30
Al ₂ O ₃	19.85	19.80
Fe ₂ O ₃	4.45	3.90
Na ₂ O	1.63	2.20
MgO	2.44	1.30
CaO	1.27	0.60
K ₂ O	0.44	0.40
TiO ₂	0.19	0.10
P ₂ O ₅	0.05	-
SO ₃	1.27	-
Cl	-	-
V ₂ O ₅	-	-
Cr ₂ O ₃	-	-
MnO	0.02	-
CuO	0.01	-
Rb ₂ O	-	-
SrO	0.03	-
Y ₂ O ₃	0.01	-
ZrO ₂	0.03	-
Nb ₂ O ₅	0.01	-
BaO	0.03	-
CeO ₂	0.04	-
LOI.at 1025 °C	6.29	-
total	100.00	89

ตารางที่ 3.3 ผลการทดสอบหาขีดจำกัดของ Atterberg ของดินเบนโทไนต์

Test Conditions	Brine content (%)	Water content (%)
Liquid limit	108	357
Plastic limit	48.9	43.67
Plasticity index	59.01	313.33



เมื่อ	W_c	= ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)
	W_B	= ปริมาณความชื้นของน้ำเกลืออิ่มตัว (ร้อยละ)
	W_i	= ปริมาณความชื้นเริ่มต้น (ร้อยละ)
	W_{can}	= น้ำหนักภาชนะอลูมิเนียม (กรัม)
	W_1	= น้ำหนักดินเปียก + ภาชนะอลูมิเนียม (กรัม)
	W_2	= น้ำหนักดินแห้ง + ภาชนะอลูมิเนียม (กรัม)
	S_B	= ความสามารถของเกลือในการละลายน้ำ (น้ำหนักเกลือบดละเอียด / น้ำหนักน้ำกลั่น $\times 100\%$)

3.5 ผลที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบ

ผลที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบคือ ค่าคุณสมบัติของดินเบนโทไนต์ น้ำเกลืออิ่มตัวและเกลือทั้ง 3 ขนาด ได้แก่ เกล็ดเกลือขนาดใหญ่ (2-4.75 มิลลิเมตร) ขนาดกลาง (1-2 มิลลิเมตร) และขนาดเล็ก (0.425-1.000 มิลลิเมตร) ซึ่งวัสดุทั้งสามจะนำมาผสมกันเพื่อทำการศึกษาการบดอัด ค่ากำลังเฉือนสูงสุด การบวมตัว และค่าความซึมผ่าน ซึ่งจะอธิบายในบทต่อไป

บทที่ 4

การทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์กับเกลือแกง

4.1 วัตถุประสงค์

เพื่อหาความชื้นของน้ำเกลือที่เหมาะสม (Optimum Brine Content) จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของน้ำเกลือกับความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) เพื่อนำค่าคุณสมบัติดังกล่าวไปใช้ในการทดสอบในบดอัดไป

4.2 การทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์

การทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์ เพื่อหาค่าความชื้นของน้ำเกลือที่เหมาะสม สามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

4.2.1 การจัดเตรียมตัวอย่างดินเบนโทไนต์

การจัดเตรียมตัวอย่างดินเบนโทไนต์ เพื่อทำการทดสอบการบดอัดมี 4 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) เตรียมดินเบนโทไนต์น้ำหนัก 2.5 กิโลกรัม ใส่ลงไปในกระบะแห้งและสะอาด ขนาด 35×40×18 เซนติเมตร ทั้งหมด 7 ตัวอย่าง
- 2) เตรียมน้ำเกลืออิ่มตัว (Saturated Salt water) โดยใช้กระบอกตวงด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 ของน้ำหนักดินเบนโทไนต์
- 3) ทำการผสมน้ำเกลืออิ่มตัวกับดินเบนโทไนต์ที่ได้จัดเตรียมไว้ในแต่ละอัตราส่วน ด้วยการตวงน้ำเกลืออิ่มตัวใส่ในขวดสเปรย์แล้วฉีดเพื่อคลุกเคล้าให้เข้ากันดังรูปที่ 4.1
- 4) ทำการทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์โดยทันที เพื่อลดผลกระทบของความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไป

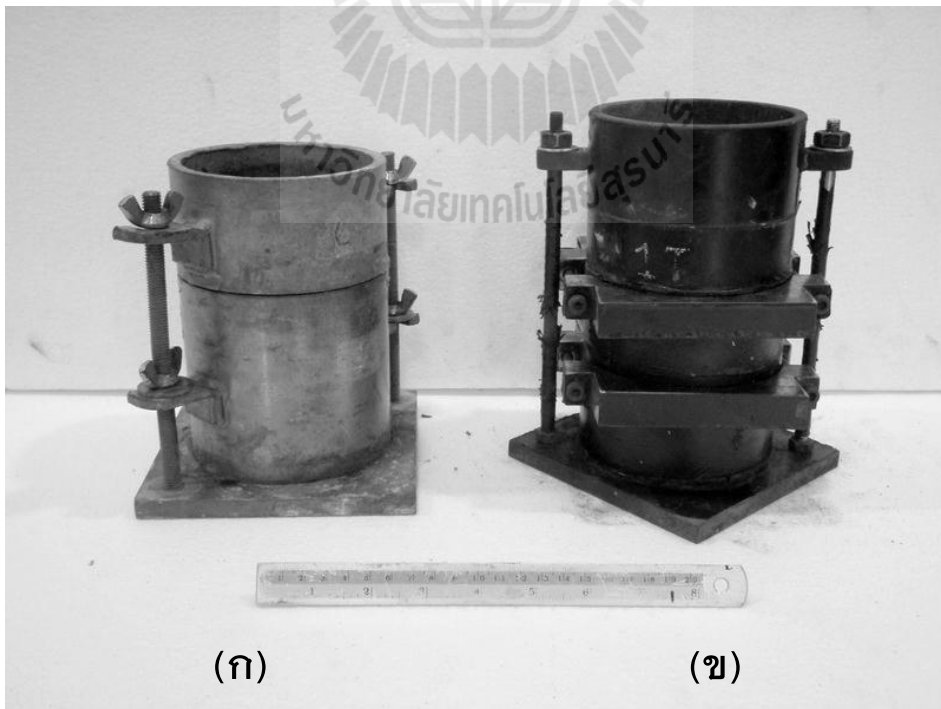
4.2.2 วิธีการทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์

ขั้นตอนการทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์มี 7 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) นำดินเบนโทไนต์ที่ได้จากการจัดเตรียมตัวอย่างดังกล่าวใส่ลงในแบบหล่อทดสอบแบบสามแหวน (3-ring mold) ตามมาตรฐาน ASTM D1557 (Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10.13 เซนติเมตร และความสูง 15.19 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 วิธีการผสมดินเบนโทไนต์และน้ำเกลืออิ่มตัว โดยทำการตวงน้ำเกลืออิ่มตัว
ใส่ในขวดสเปรย์ฉีดพรมแล้วคลุกเคล้าให้เข้ากัน



รูปที่ 4.2 (ก) คือแบบหล่อแบบมาตรฐานและ (ข) คือแบบหล่อแบบสามแฉก

- 2) การบดอัดดินเบนโทไนต์ เป็นการบดอัดเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Compaction) ด้วยการปล่อยน้ำหนักจากค้อนเหล็กขนาด 10 ปอนด์ ให้ตกกระทบบนแบบหล่อทดสอบดินเบนโทไนต์ จำนวน 27 ครั้งต่อหนึ่งชั้น โดยคำนวณจากสมการพลังงานบดอัดต่อปริมาตรดังสมการ 4.1
- 3) ทำการบดอัดโดยให้น้ำหนักกระจายลงอย่างทั่วพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างเป็นจำนวน 6 ชั้น
- 4) เมื่อทำการบดอัดจนครบจำนวนครั้งแล้วถอดปลอกยึดแบบหล่อทดสอบออก จากนั้นใช้ไม้บรรทัดเหล็กชูดกแต่งดินให้อยู่ในระดับขอบแบบหล่อทดสอบพอดี
- 5) ปิดทำความสะอาดเศษดินที่ตกค้างอยู่บนแบบหล่อทดสอบออก แล้วนำไปชั่งน้ำหนักและทำการบันทึกค่าไว้ดังตารางที่ 4.1
- 6) เก็บตัวอย่างดินเบนโทไนต์ในตำแหน่งบน กลาง และล่างจากแบบหล่อทดสอบ แล้วนำตัวอย่างที่ได้ไปชั่งน้ำหนักและทำการจดบันทึกค่าไว้ จากนั้นนำตัวอย่างดังกล่าวไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังตารางที่ 4.2
- 7) นำตัวอย่างดินเบนโทไนต์แห้งที่อบไว้มาชั่งน้ำหนัก เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความชื้นของน้ำเกลือ (Brine Content) ดังสมการที่ 4.2

4.2.3 การคำนวณผลการทดสอบ

การทดสอบการบดอัดแบบพลศาสตร์ได้ใช้ค้อนเหล็กปล่อยน้ำหนักให้ตกกระทบบนดินเบนโทไนต์ในแบบหล่อแบบสามแหวน สามารถคำนวณพลังงานตามมาตรฐาน ASTM D1557 ได้ดังสมการ

$$J \left(\frac{\text{ft} \cdot \text{lb}}{\text{ft}^3} \right) = \frac{W(\text{lb}) \times L(\text{ft}) \times t \times n}{V(\text{ft}^3)} \quad (4.1)$$

$$56250 \left(\frac{\text{ft} \cdot \text{lb}}{\text{ft}^3} \right) = \frac{10(\text{lb}) \times 1.5(\text{ft}) \times 6 \times n}{0.432(\text{ft}^3)}$$

จำนวนครั้งการบดอัดแต่ละชั้นเท่ากับ 27 ครั้งต่อชั้น

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบน้ำหนักของเบ้าทดสอบแบบมาตรฐานกับเบ้าทดสอบแบบใหม่ โดยผันแปรปริมาณความชื้นของน้ำเกลืออิ่มตัว

Brine content (%)	Standard Mold			Modified Mold		
	Weight of Standard Mold (g)	Weight of Standard Mold + wet soil (g)	Weight of dry soil (g)	Weight of Modified Mold (g)	Weight of Modified Mold + wet soil (g)	Weight of dry soil (g)
0	3,820	2,420	1,400	6,000	7,800	1,800
5	3,820	2,240	1,580	6,000	8,100	2,100
10	3,820	2,040	1,780	6,000	8,320	2,320
15	3,820	1,990	1,830	6,000	8,320	2,320
20	3,820	2,000	1,820	6,000	8,320	2,320
25	3,820	2,040	1,780	6,000	8,280	2,280
30	3,820	2,140	1,680	6,000	8,200	2,200



ตารางที่ 4.2 ค่าคุณสมบัติของตัวอย่างดินเบนโทไนต์

Sample Number	Location with Respect to Mold Length	Wet Density (g/cm ³)	Dry Density (g/cm ³)	Brine Content (%)
B1-1	Top	1.4611	1.2727	0.0000
	Middle	1.4611	1.2765	0.0000
	Bottom	1.4611	1.2755	0.0000
B2-1	Top	1.7046	1.4259	7.3790
	Middle	1.7046	1.4228	7.7756
	Bottom	1.7046	1.4231	7.7445
B3-1	Top	1.8832	1.5134	15.0529
	Middle	1.8832	1.5084	15.7064
	Bottom	1.8832	1.5180	14.4397
B4-1	Top	1.8832	-	-
	Middle	1.8832	1.4662	21.5717
	Bottom	1.8832	1.4676	21.3686
B5-1	Top	1.8832	1.4272	27.4861
	Middle	1.8832	1.4225	28.2294
	Bottom	1.8832	1.4299	27.0514
B6-1	Top	1.8507	1.3630	34.1548
	Middle	1.8507	1.3624	34.2574
	Bottom	1.8507	1.3608	34.5501
B7-1	Top	1.7858	1.2683	43.2451
	Middle	1.7858	1.2736	42.1707
	Bottom	1.7858	1.2762	41.6311

เมื่อ J = พลังงานบดอัดต่อปริมาตร
 W = น้ำหนักค้อน
 L = ระยะตก
 t = จำนวนชั้น
 n = จำนวนครั้งที่บดอัด
 V = ปริมาตรแบบหล่อ

การคำนวณหาค่าปริมาณความชื้นของน้ำเกลือที่เหมาะสมสามารถทำได้จากการ
 ลงจุดค่าปริมาณความชื้นของน้ำเกลือแล้วเลือกจุดที่สูงที่สุดของแผนภูมิ

การหาความชื้นของน้ำเกลือที่เหมาะสมทำได้จากการลงจุดข้อมูลของค่าปริมาณ
 ความชื้นของน้ำเกลือและเลือกจุดที่สูงที่สุดในแผนภูมิ

สมการคำนวณหาปริมาณความชื้นของน้ำเกลือสามารถหาได้จากสมการ

$$w_c = \left[\frac{(W_1 - W_2)}{(W_2 - W_{can})} \right] \times 100$$

หรือ
$$w_B = \frac{[100 + S_B] \times [W_1 - W_2 - (w_i / 100)(W_2 - W_{can})]}{100(w_2 - w_{can}) - S_B(w_1 - w_2)} \times 100 \quad (4.2)$$

เมื่อ w_c = ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)
 w_B = ปริมาณความชื้นของน้ำเกลืออิ่มตัว (ร้อยละ)
 w_i = ปริมาณความชื้นเริ่มต้น (ร้อยละ)
 W_{can} = น้ำหนักภาชนะอลูมิเนียม (กรัม)
 W_1 = น้ำหนักดินเปียก + ภาชนะอลูมิเนียม (กรัม)
 W_2 = น้ำหนักดินแห้ง + ภาชนะอลูมิเนียม (กรัม)
 S_B = ความสามารถของเกลือในการละลายน้ำ (น้ำหนักเกลือบดละเอียด /
 น้ำหนักน้ำกลั่น) $\times 100\%$

4.2.4 ผลการทดสอบ

จากการทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์ที่ความชื้นต่างๆ ในแบบหล่อทดสอบ
 แล้วนำตัวอย่างดินเบนโทไนต์ที่ได้ไปอบให้แห้งในเตาอบเพื่อนำไปคำนวณหาค่าความชื้นของ
 น้ำเกลือ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าความหนาแน่นแห้ง (Dry Density)

และปริมาณความชื้นของน้ำเกลือทำให้สามารถหาจุดที่แสดงค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับปริมาณความชื้นของน้ำเกลือที่เหมาะสมออกมาได้ดังรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นแห้งในฟังก์ชันของความชื้นของน้ำเกลือสำหรับการทดสอบในแบบหล่อทดสอบ ซึ่งได้ค่าปริมาณความชื้นของน้ำเกลือที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับร้อยละ 20 โดยจะนำค่าความชื้นนี้ไปใช้ในการทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือในขั้นตอนต่อไป กล่าวคือ จะใช้ปริมาณน้ำเกลืออิ่มตัวร้อยละ 20 ของปริมาณดินเบนโทไนต์ในทุกการทดสอบ

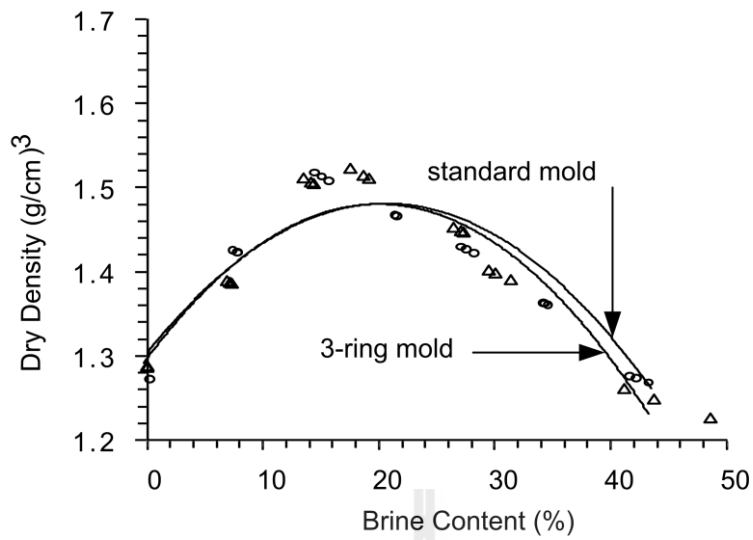
4.3 การทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือ

การบดอัดดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือเพื่อนำตัวอย่างไปทำการทดสอบการบวมตัว (Swelling Test) การทดสอบความซึมผ่าน (Permeability Test) และการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength Test) ในบดอัดไปแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

4.3.1 การจัดเตรียมตัวอย่างดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือ

การจัดเตรียมตัวอย่างดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือมี 5 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) ทำการคัดขนาดเกล็ดเกลือด้วยตะแกรงเบอร์ 40, 18 และ 10 จะจำแนกเกล็ดเกลือออกเป็น 3 ขนาด ขนาดเล็ก 0.425-1 มิลลิเมตร ขนาดกลาง 1-2 มิลลิเมตร และขนาดใหญ่ 2-4.75 มิลลิเมตร (บทที่ 3)
- 2) ในการทดสอบนี้ได้ทำการกำหนดน้ำหนักรวมของดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือเท่ากับ 2.5 กิโลกรัม ซึ่งกำหนดอัตราส่วนในการผสมเป็นเปอร์เซ็นต์ดังนี้ เกล็ดเกลือ 50 ต่อดินเบนโทไนต์ 50 เกล็ดเกลือ 60 ต่อดินเบนโทไนต์ 40 และ เกล็ดเกลือ 70 ต่อดินเบนโทไนต์ 30
- 3) เตรียมตัวอย่างน้ำเกลืออิ่มตัวด้วยกระบอกตวง โดยคิดเป็นร้อยละ 20 ของน้ำหนักดินเบนโทไนต์
- 4) ทำการผสมเกล็ดเกลือเม็ดเล็ก ดินเบนโทไนต์ และน้ำเกลืออิ่มตัวด้วยสัดส่วนข้างต้น ในกระบะแห้งและสะอาดขนาด 35×40×18 เซนติเมตร โดยใช้ขวดสเปรย์ฉีดน้ำเกลืออิ่มตัวและคลุกเคล้าให้เข้ากัน
- 5) ทำการผสมเกล็ดเกลือเม็ดกลางและเม็ดใหญ่ด้วยวิธีการแบบเดียวกัน



รูปที่ 4.3 ค่าความชื้นของน้ำเกลือที่เหมาะสมจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของน้ำเกลือกับความหนาแน่นแห้งสูงสุด โดยเปรียบเทียบระหว่างแบบหล่อแบบมาตรฐาน และแบบหล่อแบบสามแหวน

4.3.2 วิธีทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือ

ขั้นตอนการทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือมี 6 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) นำดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือที่ได้จากการจัดเตรียมตัวอย่างดังกล่าวใส่ลงในแบบหล่อทดสอบแบบสามแฉกตามมาตรฐาน ASTM D1557 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10.13 เซนติเมตร และความสูง 15.19 เซนติเมตร
- 2) การบดอัดดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือเป็นการบดอัดเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Compaction) ด้วยการปล่อยน้ำหนักจากค้อนเหล็กขนาด 10 ปอนด์ ให้ตกกระทบบนแบบหล่อทดสอบดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือ จำนวน 27 ครั้งต่อหนึ่งชั้น เช่นเดียวกับกับวิธีทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์
- 3) ทำการบดอัดโดยให้น้ำหนักกระจายลงอย่างทั่วพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างเป็นจำนวน 6 ชั้น
- 4) เมื่อทำการบดอัดจนครบจำนวนครั้งแล้วถอดปลอกยึดแบบหล่อทดสอบออกจากนั้นใช้ไม้บรรทัดเหล็กชุดตักแต่งดินให้อยู่ในระดับขอบแบบหล่อทดสอบพอดี
- 5) บัดทำความสะอาดเศษดินที่ตกค้างอยู่บนแบบหล่อทดสอบออก แล้วนำไปชั่งน้ำหนักและทำการจดบันทึกค่าไว้
- 6) นำตัวอย่างที่บดอัดแล้วไปทำการทดสอบการบวมตัว การทดสอบความชื้นผ่าน และการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน โดยการทดสอบดังกล่าวได้กล่าวไว้ในบทที่ 5

บทที่ 5

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน

5.1 วัตถุประสงค์

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนเป็นการทดสอบเพื่อหาลำดับรับแรงเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress) ของส่วนผสมระหว่างดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือทั้งหมด 4 ส่วนผสมและเกล็ดเกลือทั้ง 3 ขนาด ได้แก่ เกล็ดเกลือขนาดเล็ก (0.425–1 มิลลิเมตร) ขนาดกลาง (1–2 มิลลิเมตร) และขนาดใหญ่ (2–4.75 มิลลิเมตร) ในอัตราส่วนผืนแปรทั้ง 4 อัตราส่วน กล่าวคือ อัตราส่วนผสมระหว่างดินเบนโทไนต์ต่อเกล็ดเกลือที่ 50:50, 40:60, 30:70 และ 100:0 (ดินเบนโทไนต์บริสุทธิ์) ตามลำดับ

5.2 การจัดเตรียมตัวอย่าง

การจัดเตรียมตัวอย่างเริ่มจากการนำตัวอย่างทดสอบที่ผ่านการบดอัดด้วยการผันแปรอัตราส่วนของดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือขนาดต่างๆ ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 ซึ่งมีอัตราส่วนผสม ดังนี้

- 1) อัตราส่วนระหว่างดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือ 30:70
- 2) อัตราส่วนระหว่างดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือ 40:60
- 3) อัตราส่วนระหว่างดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือ 50:50
- 4) ดินเบนโทไนต์บริสุทธิ์

การทดสอบในอัตราส่วนที่ข้อที่ 1 ถึงข้อที่ 3 จะทำการผันแปรขนาดของเกล็ดเกลือ โดยทุกตัวอย่างการทดสอบจะใช้ปริมาณความชื้นของน้ำเกลือที่เหมาะสมที่ร้อยละ 20 ของน้ำหนักดินเบนโทไนต์ (เป็นผลที่ได้จากการทดสอบในบทที่ 4)

5.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของส่วนผสมระหว่างเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือประกอบด้วย 2 ส่วน ดังนี้

- 1) แบบหล่อตัวอย่างทดสอบแบบสามวงแหวนประกอบด้วย วงแหวนบน วงแหวนกลางและวงแหวนล่างมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10.13 เซนติเมตร และความสูง 15.19 เซนติเมตร และมีวงแหวนประกบด้านบนเพื่อให้วงแหวนทั้งสามอยู่กับฐานยึดด้วยน็อตและเสาค้ำ โดยมีคิม

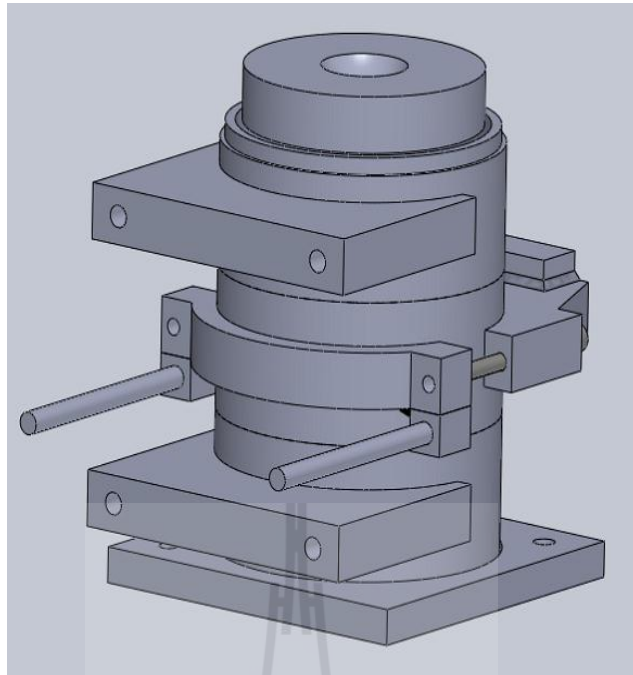
หนีบวงแหวนบนและกลาง คีมหนีบวงแหวนกลางและล่างเพื่อป้องกันไม่ให้วงแหวนทั้งสามขยับเมื่อทำการบดอัดตัวอย่างดิน หลังจากทำการทดสอบการบดอัดสมบูรณ์แล้วจะนำวงแหวนประกบที่ยึดด้านบนและคีมหนีบวงแหวนบน และกลางและคีมหนีบวงแหวนกลางและล่างออก จากนั้นยกทั้งชุดบดอัดใส่เข้าไปในชุดให้แรงเฉือนเพื่อทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างที่ต้องการทดสอบดังรูปที่ 5.1

2) อุปกรณ์สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน ประกอบด้วยชุดให้แรงเฉือนซึ่งมีเสาค้ำยันพร้อมแม่แรงไฮดรอลิกในแนวตั้งยึดติดอยู่กับคานด้านบนและฐานล่าง ที่ด้านบนของตัวอย่างจะมีแผ่นดันที่ใช้สำหรับส่งผ่านความเค้นตึงฉาก (Normal Stress) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 92.6 มิลลิเมตร ไปยังตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ โดยมีแม่แรงไฮดรอลิกในแนวระนาบซึ่งยึดกับเสาค้ำยัน ฐานรองด้านหน้า และฐานรองด้านหลังเพื่อให้แรงในแนวตั้งฉากและแรงเฉือนกับตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ โดยวงแหวนบนและวงแหวนล่างจะมีแผ่นรับแรงเฉือนเพื่อป้องกันไม่ให้วงแหวนทั้งสองขยับตามแรงเฉือนเมื่อทำการทดสอบ โดยวงแหวนกลางจะถูกเฉือนด้วยแม่แรงไฮดรอลิกในแนวระนาบ ซึ่งด้านหลังของวงแหวนกลางจะมีคีมหนีบวงแหวนกลางติดกับขาเหล็ก โดยฐานรองด้านหลังมีรูที่ไม่มีเกลียวสำหรับสอดขาทั้งสองข้างของคีมหนีบวงแหวนกลางเพื่อให้วงแหวนกลางเคลื่อนที่ไปตามทิศทางของแรงเฉือนดังรูปที่ 5.2

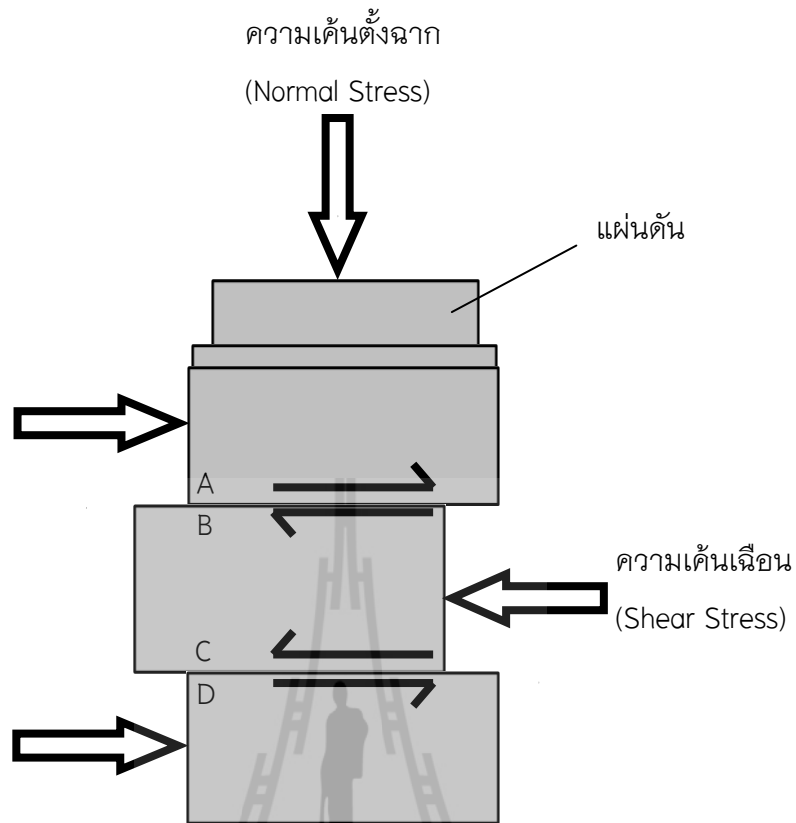
5.4 วิธีการทดสอบ

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนเพื่อหาค่ากำลังเฉือนสูงสุดของส่วนผสมระหว่างเบนโทไนด์กับเกล็ดเกลือมี 5 ชั้นตอน ดังนี้

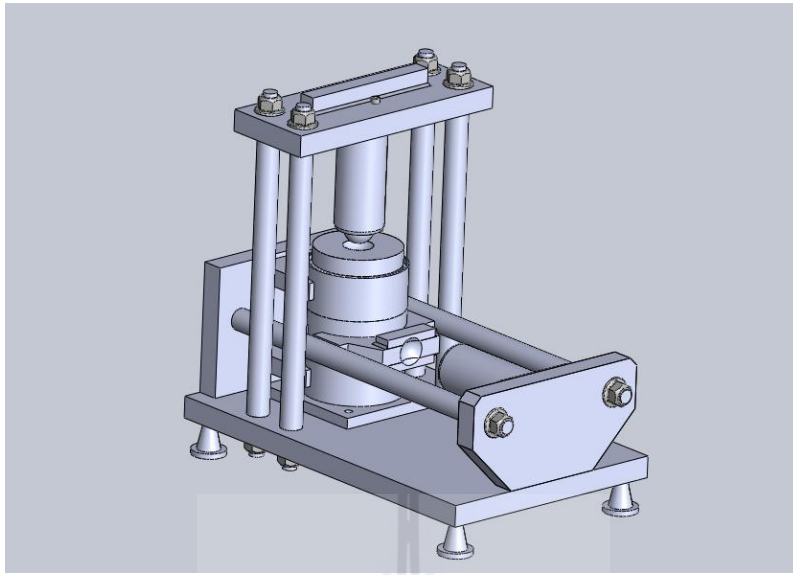
- 1) นำตัวอย่างที่ทำการบดอัดแล้วมาชั่งน้ำหนักเพื่อใช้ในการคำนวณ โดยได้อธิบายไว้ในบทที่ 4
- 2) ประกอบแบบหล่อทดสอบแบบสามแหวนเข้ากับอุปกรณ์สำหรับการทดสอบกำลังเฉือนดังรูปที่ 5.3
- 3) ติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้งด้านบนของกระบอกเพื่อวัดระยะการทรุดตัวและแนวระนาบเพื่อวัดระยะการเคลื่อนตัว
- 4) ให้ความเค้นตึงฉากด้วยแม่แรงไฮดรอลิกกระทำในแนวตั้งฉากกับตัวอย่าง โดยผันแปรความเค้นตึงฉากที่ 0.2, 0.5, 3 และ 5 MPa ในแต่ละอัตราส่วนผสม ทำการจดบันทึกค่าการเคลื่อนตัวและรักษาความเค้นตึงฉากให้คงที่



รูปที่ 5.1 แบบหล่อทดสอบที่ประกอบเข้ากับคีมหนีบวงแหวนกลางติดกับขาเหล็ก ฐานรองด้านหลังมีรูที่ไม่มีเกลียวสำหรับสอดขาทั้งสองข้างของคีมหนีบวงแหวนกลาง โดยวงแหวนบนและวงแหวนล่างจะมีแผ่นรับแรงเฉือนเพื่อป้องกันไม่ให้วงแหวนทั้งสองขยับตามแรงเฉือนเมื่อทำการทดสอบ



รูปที่ 5.2 ภาพตัดขวางของแบบหล่อทดสอบที่มีแผ่นคั่นสำหรับส่งผ่านความเค้นตั้งฉาก ลงบนตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ ซึ่งวงแหวนกลางจะถูกเฉือนโดยความเค้นเฉือน โดยมีระนาบการเฉือนเกิดขึ้น 2 ระนาบ คือ ระนาบด้านบน (ระนาบ A-B) และระนาบด้านล่าง (ระนาบ C-D)



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.3 (ก) คือภาพเพอร์สเปคทีฟของอุปกรณ์ทดสอบกำลังรับแรงเฉือน และ (ข) คืออุปกรณ์ที่ทำการติดตั้งเครื่องมือพร้อมทำการทดสอบ

- 5) ให้ความเค้นเฉือนด้วยแม่แรงไฮดรอลิกในแนวระนาบทำการอ่านค่าการเคลื่อนตัวในแนวระนาบทุกระยะ 0.5 มิลลิเมตรและจดบันทึกค่าไปพร้อมกันอย่างต่อเนื่องจนถึงจุดที่เกิดความเค้นเฉือนสูงสุด (Peak Shear Strength) บันทึกค่าเพื่อนำไปคำนวณหาค่าความเค้นยึดติด (Cohesion) และค่ามุมเสียดทานภายใน (Friction angle) จากสมการ (5.1) ถึง สมการ (5.3) จากนั้นทำการให้ความเค้นเฉือนอย่างต่อเนื่องเพื่อหาความต้านแรงเฉือนคงเหลือ (Residual Shear Strength) ซึ่งแรงเฉือนสูงสุดจะเกิดขึ้นทันทีหลังมีการเคลื่อนตัวของรอยแตกเมื่อความต้านแรงเฉือนมีแนวโน้มลดลงแล้วจึงหยุดทำการทดสอบ

5.5 การคำนวณผลการทดสอบ

การคำนวณผลการทดสอบกำลังเฉือนของส่วนผสมระหว่างดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกล็ดสามารถคำนวณได้จากสมการ

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

โดยที่

τ = ค่าความเค้นเฉือน

F = แรงต้านทานการเฉือน

A = พื้นที่เฉือนของตัวอย่าง

ลงจุดระหว่างค่าความเค้นตั้งฉากและค่าความเค้นเฉือนสูงสุดแล้วลากเส้นผ่านจุดเหล่านั้น เส้นนี้คือเส้นแทนค่าความแข็งแรงหรือกำลังของดินดังสมการ

$$\tau = a\sigma_n^b \quad (5.2)$$

โดยที่

τ = ค่าความเค้นเฉือน

a, b = ค่าคงที่

σ_n = ความเค้นตั้งฉากบนระนาบวิบัติ

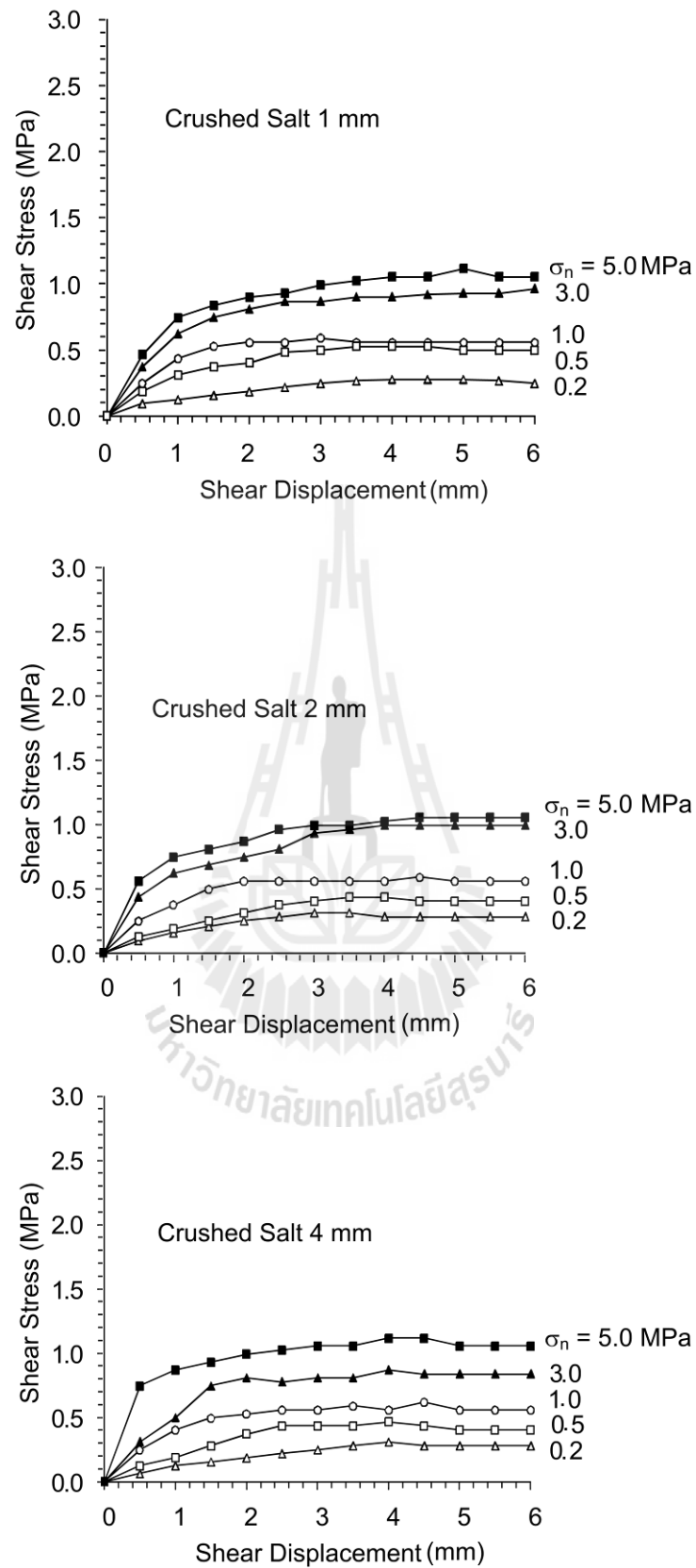
ค่ามุมเสียดทานภายในหาได้จากสมการ

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

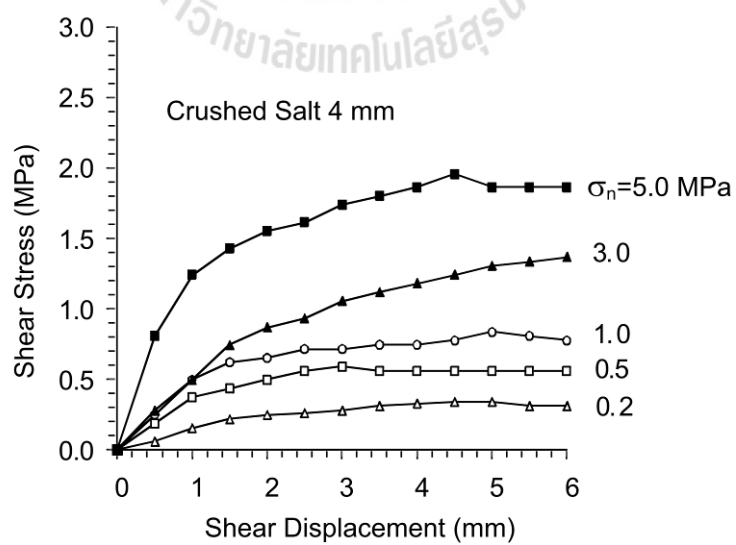
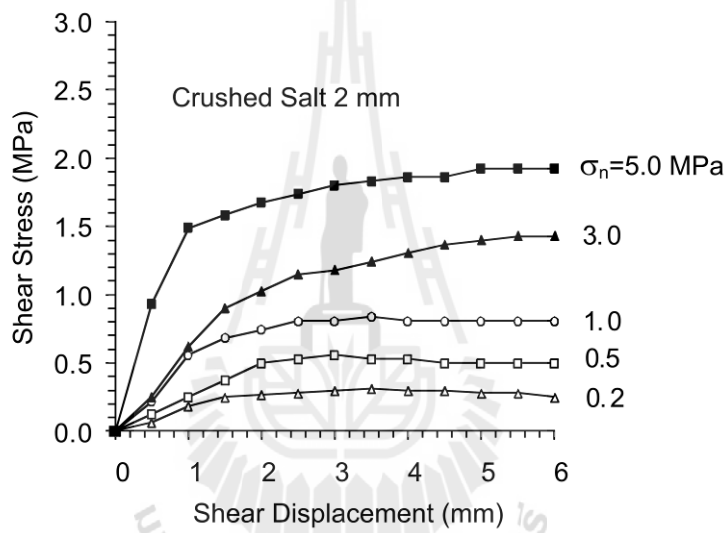
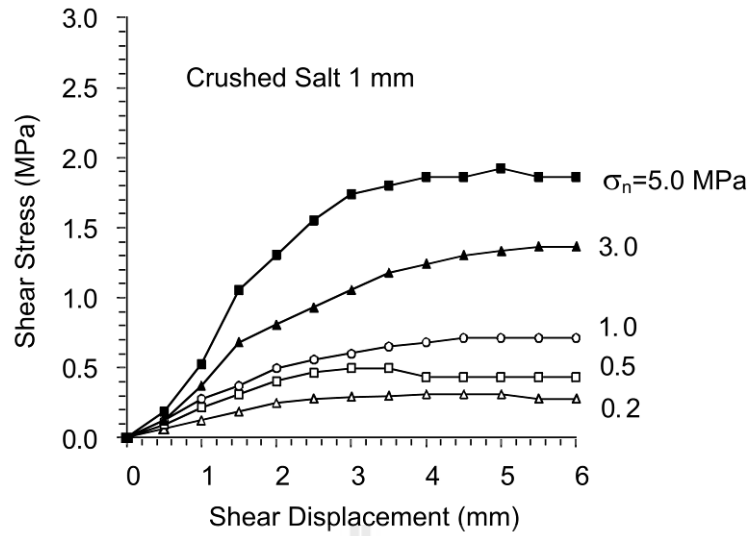
5.6 ผลการทดสอบ

จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือด้วยการทดสอบกำลังรับเฉือนแบบสามแฉวน ทำให้ทราบค่าของความเค้นเฉือนในรูปของระยะการเคลื่อนตัวในแนวระนาบโดยมีการผันแปรขนาดของเกล็ดเกลือและอัตราของส่วนผสมดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือทั้ง 3 อัตราส่วนดังรูปที่ 5.4 ถึงรูปที่ 5.6 จากความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ข้อสรุปว่าเกล็ดเกลือขนาดใหญ่ที่มีอัตราส่วนระหว่างดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือ 30:70 มีกำลังเฉือนสูงที่สุดดังรูปที่ 5.7 ในส่วนของความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนสูงสุดและความเค้นตั้งฉากของอัตราส่วนผสมดินเบนโทไนต์ต่อเกล็ดเกลือที่อัตราส่วนต่างๆ ทำให้ได้ค่าความเค้นยึดติดและมุมเสียดทาน ซึ่งได้แสดงไว้ดังตารางที่ 5.1 สำหรับความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนในรูปของความเค้นตั้งฉากของดินเบนโทไนต์บริสุทธิ์ (100%) ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 5.8

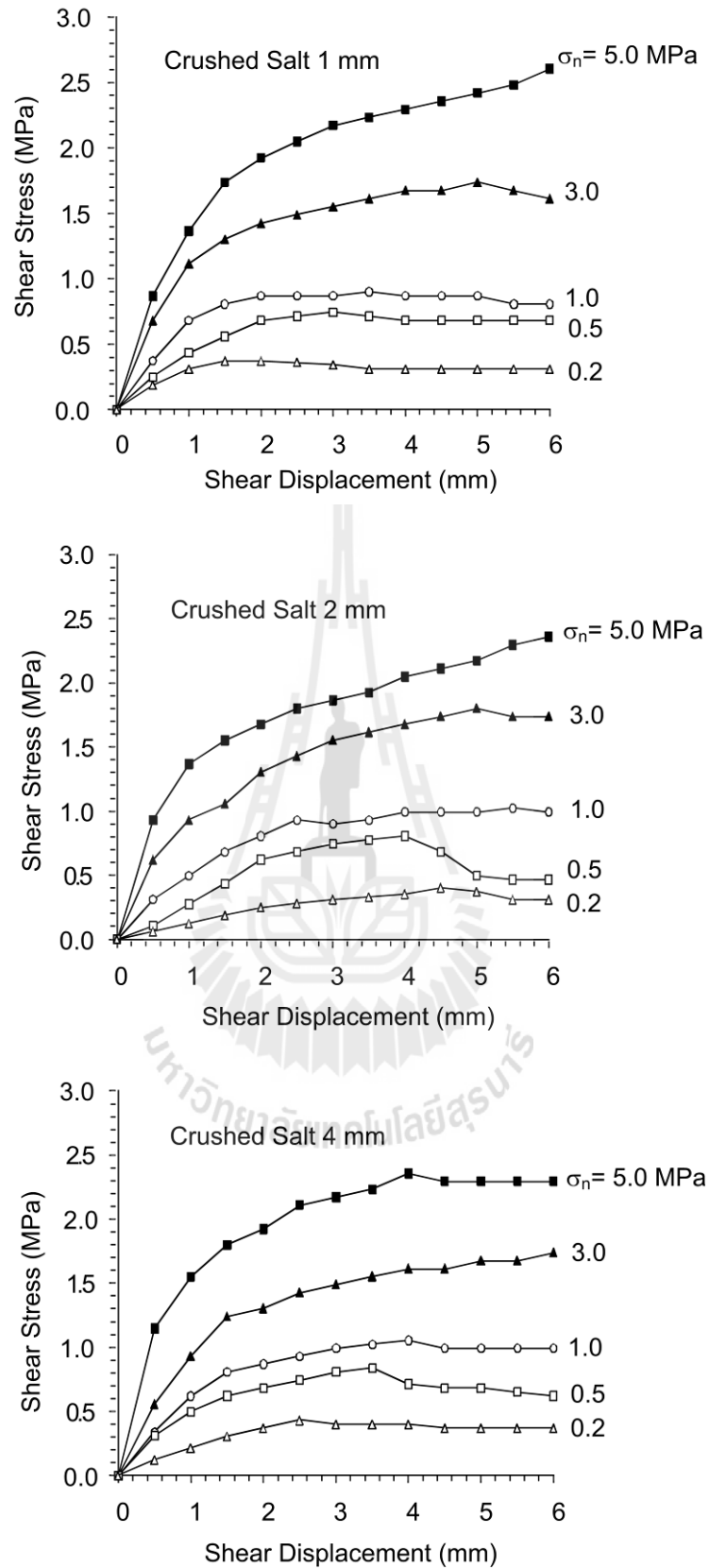




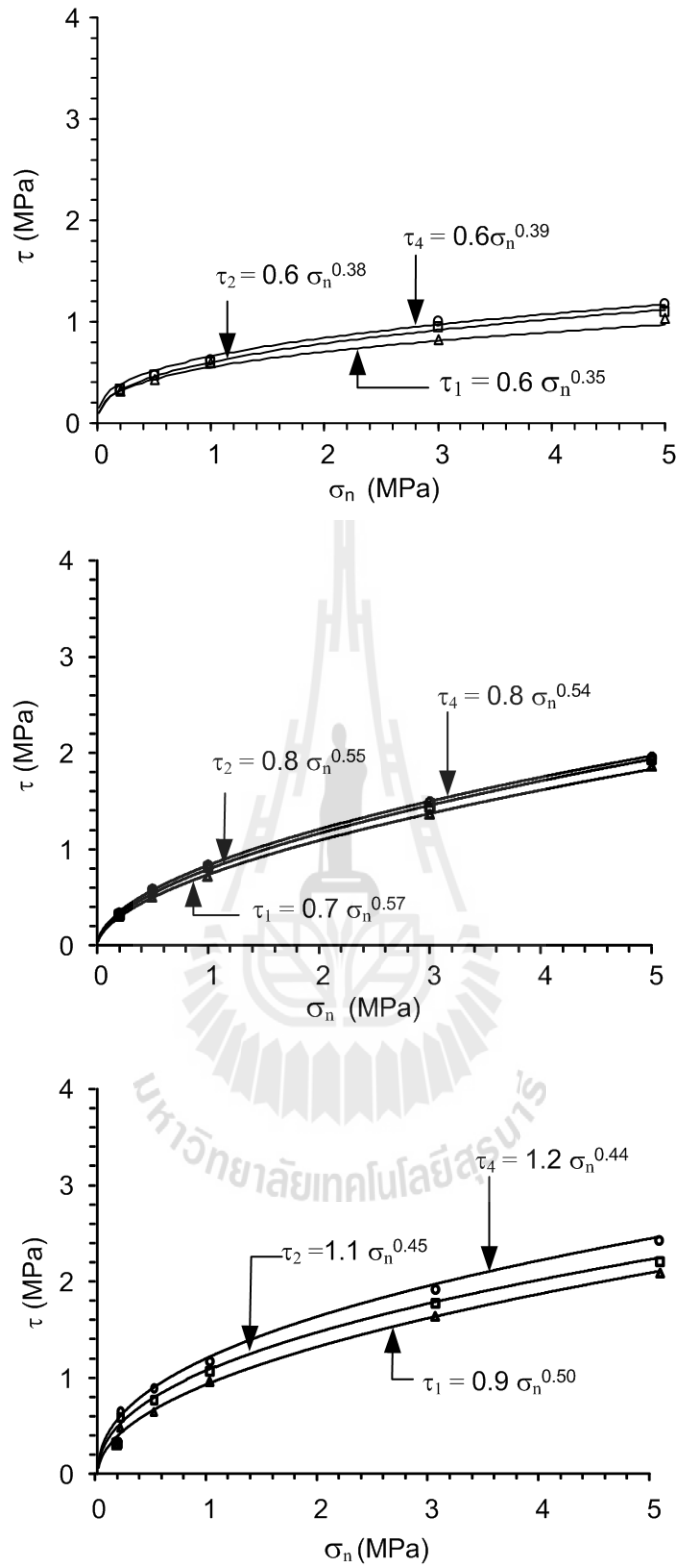
รูปที่ 5.4 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและระยะการเคลื่อนตัวในแนวระนาบโดยมีการผันแปรความเค้นตั้งฉากในอัตราส่วนผสมดินเบนโทไนต์ต่อเกล็ดเกลือที่ 50:50



รูปที่ 5.5 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและระยะการเคลื่อนตัวในแนวระนาบโดยมีการผันแปรความเค้นตั้งฉากในอัตราส่วนผสมดินเบนโทไนต์ต่อเกลือที่ 40:60

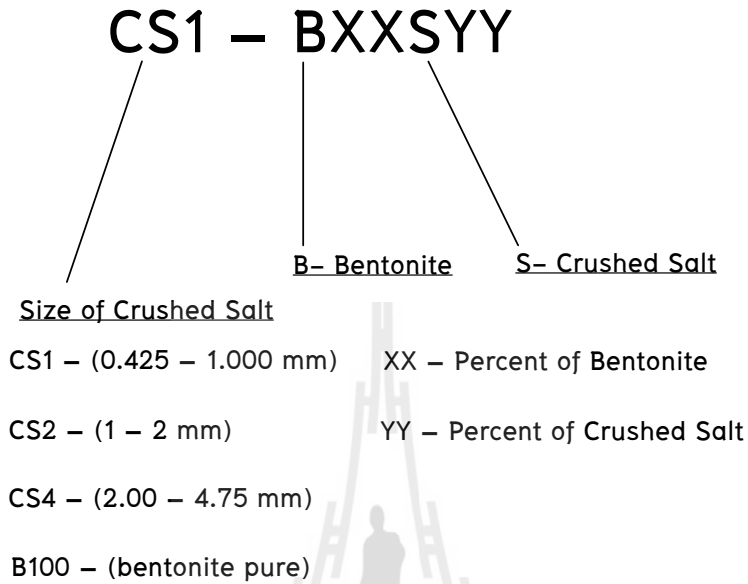


รูปที่ 5.6 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและระยะการเคลื่อนตัวในแนวระนาบโดยมีการผันแปรความเค้นตั้งฉากในอัตราส่วนผสมดินเบนโทไนต์ต่อเกล็ดเกลือที่ 30:70

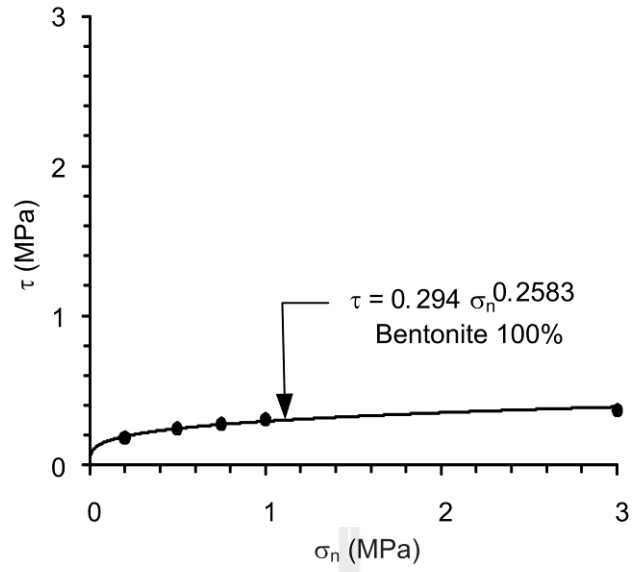


รูปที่ 5.7 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและความเค้นตั้งฉากของ ส่วนผสมระหว่างเบนโทไนต์ต่อเกล็ดเกลือทั้ง 3 ขนาด ที่อัตราส่วนผสม ระหว่าง 50:50, 40:60 และ 30:70 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 ค่าความเค้นยึดติดและมุมเสียดทานภายในของส่วนผสมดินเบนโทไนต์กับเกลือ
เกลือที่อัตราส่วนต่างๆ



mixture (%)	Sample Number	Cohesion	ϕ_p
bentonite 30 crushed salt 70	CS1-B30S70	0.435	18.056
	CS2-B30S70	0.555	18.263
	CS4-B30S70	0.690	18.107
bentonite 40 crushed salt 60	CS1-B40S60	0.452	16.013
	CS2-B40S60	0.548	15.605
	CS4-B40S60	0.589	15.605
bentonite 50 crushed salt 50	CS1-B50S50	0.483	7.463
	CS2-B50S50	0.435	6.617
	CS4-B50S50	0.495	7.069
bentonite 100	B100S0	0.262	2.136



รูปที่ 5.8 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและความเค้นตั้งฉาก
ของดินเบนโทไนต์บริสุทธิ์



บทที่ 6

การทดสอบการบวมตัวของเซมิคอนดักเตอร์

6.1 วัตถุประสงค์

การทดสอบการบวมตัวของส่วนผสมมีจุดประสงค์เพื่อหาผลกระทบของอัตราส่วนระหว่างดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือต่อความสามารถในการบวมตัวของดินเบนโทไนต์เมื่อสัมผัสกับน้ำเกลือ ซึ่งในบทนี้ได้ทำการผสมดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือขนาดกลาง (1–2 มิลลิเมตร) ในอัตราส่วน 30:70, 40:60 และ 50:50 เพื่อทำการทดสอบการบวมตัวของเซมิคอนดักเตอร์

6.2 การเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างเริ่มจากการนำตัวอย่างทดสอบที่ผ่านการบดอัดด้วยแบบหล่อมาตรฐาน (Standard mold) ดังได้อธิบายในบทที่ 4 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10.13 เซนติเมตร และความสูง 11.65 เซนติเมตร ทำการบดอัดด้วยวิธีมาตรฐาน ASTM D698 โดยแบ่งชั้นการบดอัดเป็น 5 ชั้นและทำการบดอัดชั้นละ 25 ครั้ง ด้วยการผันแปรอัตราส่วนระหว่างดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือขนาดกลาง ดังนี้

- 1) อัตราส่วนระหว่างดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือ 30:70
- 2) อัตราส่วนระหว่างดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือ 40:60
- 3) อัตราส่วนระหว่างดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือ 50:50
- 4) ดินเบนโทไนต์บริสุทธิ์

6.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการบวมตัวของเซมิคอนดักเตอร์มีดังนี้

- 1) แบบหล่อทดสอบแบบมาตรฐานที่ผ่านการบดอัดในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างในอัตราส่วนต่างๆ
- 2) แผ่นอะคลิลิควงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 98 มิลลิเมตรหนา 10 มิลลิเมตร และเจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร จำนวน 5 รู เพื่อเป็นช่องในการไหลผ่านของน้ำเกลืออิ่มตัว
- 3) ทราห์หรือหินที่มีความพรุน (Porous Stone)

6.4 วิธีการทดสอบ

วิธีการทดสอบการบวมตัวของดินเชิงปริมาตรมี 4 ขั้นตอน ดังนี้

1) ทำการถอดแบบหล่อส่วนบนออก แล้วคว้านตัวอย่างด้านบนของแบบหล่อที่ได้เตรียมไว้ให้มีความลึก 1.3 เซนติเมตร จากขอบบนของแบบหล่อ เติมหทรายลงไปแทนที่ให้ได้ระดับขอบแบบหล่อพอดี จากนั้นก็ประกอบแบบหล่อส่วนบนกลับเข้าที่เดิม

2) ใส่แผ่นอะคลิลิคลงไปใบบแบบหล่อทดสอบแบบมาตรฐาน พร้อมทั้งติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัวของดินในแนวตั้งดังรูปที่ 6.1 ทำการวัดความสูงจากฐานถึงผิวบนอะคลิลิค ซึ่งได้ค่าความสูงเริ่มต้นเท่ากับ 10.35 เซนติเมตร

3) เติมน้ำเกลือลงไปตามช่องรูบนแผ่นอะคลิลิค โดยควบคุมระดับของน้ำเกลือให้อยู่ในระดับเดียวกับขอบบนของแผ่นอะคลิลิค

4) วัดการบวมตัวของตัวอย่างในช่วงต้นของการทดสอบทุก 5 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในช่วงถัดมาให้วัดทุก 30 นาที จนครบ 5 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการวัดทุก 1 ชั่วโมง อย่างต่อเนื่องจนครบ 240 ชั่วโมง (10 วัน)

6.5 การคำนวณผลการทดสอบ

การคำนวณผลการทดสอบโดยใช้ความสัมพันธ์ของอัตราการบวมตัวของดินจากการ

$$D = \frac{\Delta H}{H} \times 100 \quad (6.1)$$

โดยที่

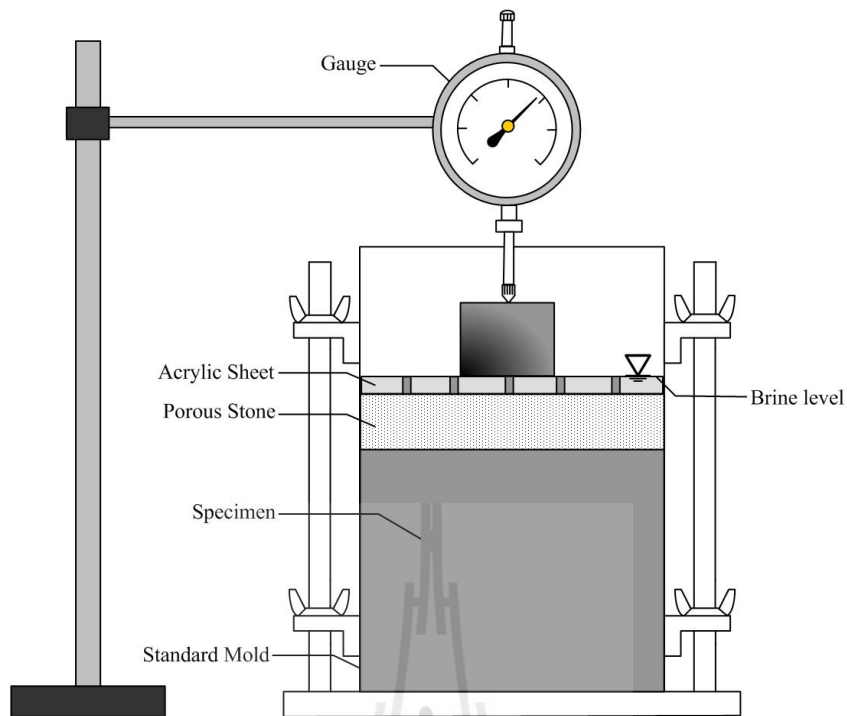
D = อัตราส่วนการบวมตัว (%)

H = ความสูงเริ่มต้น

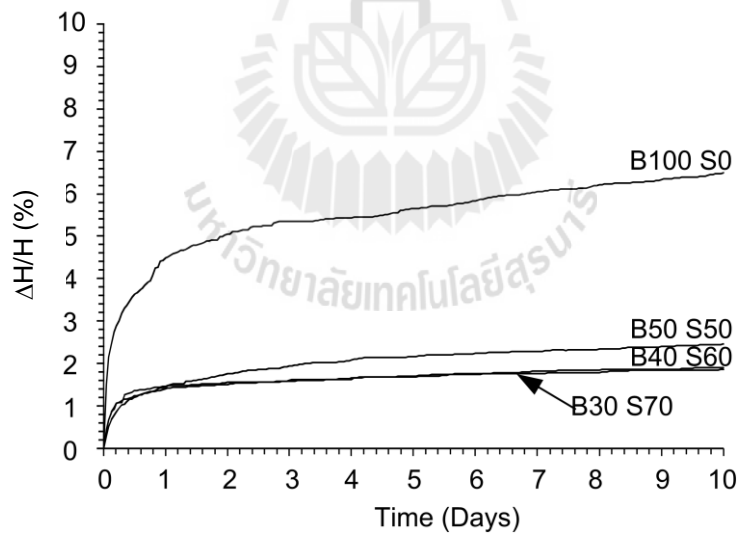
ΔH = ความสูงที่เปลี่ยนแปลง

6.6 ผลการทดสอบ

จากการทดสอบการบวมตัวของดินเชิงปริมาตรในแบบหล่อทดสอบแบบมาตรฐาน ได้แสดงความสัมพันธ์อัตราการบวมตัวของดินเบนโทไนต์ในฟังก์ชันของเวลา ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบการบวมตัวโดยมีการผันแปรอัตราส่วนผสมของดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือภายใต้สภาวะน้ำเกลืออิ่มตัว ผลทดสอบได้ข้อสรุปว่า ดินเบนโทไนต์บริสุทธิ์จะมีอัตราการบวมตัวสูงที่สุดลำดับต่อมาเป็นอัตราส่วนระหว่างดินเบนโทไนต์ต่อเกล็ดเกลือร้อยละ 50:50 สำหรับในอัตราส่วน 40:60 และ 30:70 มีผลคล้ายคลึงกันและมีอัตราการบวมตัวน้อยที่สุดดังรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.1 การทดสอบการบวมตัวของเชิงปริมาตรในแบบหล่อทดสอบแบบมาตรฐาน



รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์อัตราการบวมตัวของดินเบนโทไนต์ในฟังก์ชันของเวลาที่แสดงการเปรียบเทียบการบวมตัวโดยมีการผันแปรอัตราส่วนผสมของดินเบนโทไนต์กับเกลือเกล็ดภายใต้สภาวะน้ำเกลืออิ่มตัว

บทที่ 7

การทดสอบความซึมผ่าน

7.1 วัตถุประสงค์

การทดสอบความซึมผ่านเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพ (Intrinsic permeability) ของส่วนผสมระหว่างดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือด้วยวิธีความดันคงที่ (Constant Head Test) เพื่อนำผลการทดสอบมาใช้ในการเลือกส่วนผสมระหว่างดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือที่เหมาะสมในการอุดรอยแตกในชั้นเกลือหิน

7.2 การเตรียมตัวอย่าง

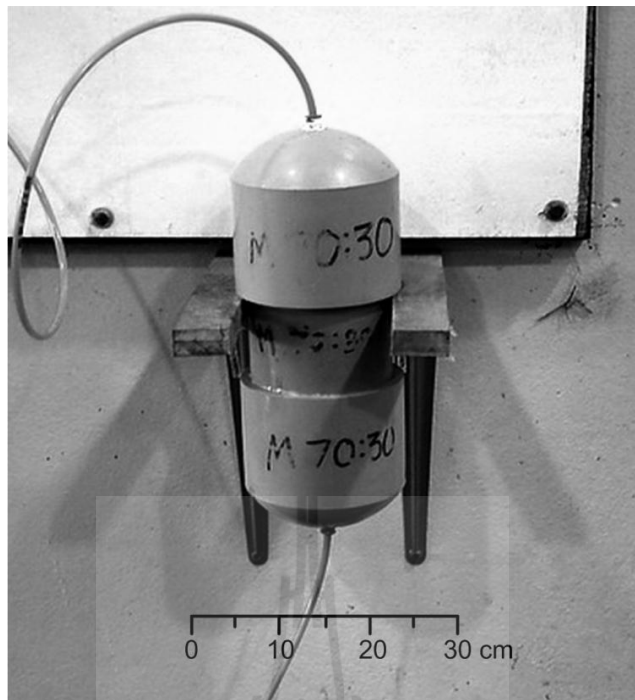
การเตรียมตัวอย่างเริ่มจากการนำตัวอย่างที่ผ่านการบดอัดด้วยแบบหล่อมาตรฐาน (Standard Mold) ดังได้อธิบายในบทที่ 4 และผันแปรอัตราส่วนระหว่างดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือขนาดต่างๆ ดังได้อธิบายในบทที่ 5 โดยทำการเตรียมตัวอย่างดังนี้

- 1) นำตัวอย่างทดสอบออกจากแบบหล่อแล้วทำการตกแต่งผิวด้านข้าง จากนั้นนำตัวอย่างทดสอบใส่ในท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 98 มิลลิเมตร และความสูงเท่ากับ 178 มิลลิเมตร
- 2) ปิดทับตัวอย่างทดสอบด้วยผ้าขาวบางและบรรจุทรายหนาเท่ากับ 25.4 มิลลิเมตร ทั้งสองด้านของกระบอกตัวอย่างทดสอบ
- 3) ปิดทับด้วยแผ่นอะคลิลิคที่ทำการเจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 4 มิลลิเมตร มีรูกระจายทั่วทั้งแผ่นทั้งสองด้านของกระบอกตัวอย่างทดสอบ
- 4) ทำการเจาะฝาครอบท่อพีวีซีพร้อมใส่ข้อต่อท่อความดัน จากนั้นนำไปประกอบเข้ากับกระบอกตัวอย่างทดสอบ ทั้งสองด้าน
- 5) ปิดระบบด้านหนึ่งแล้วเติมน้ำเกลืออิ่มตัว (Saturated Salt Water) เข้าไปในกระบอกทดสอบให้เต็มจากนั้นปิดระบบด้วยท่อตันทั้งสองด้าน

7.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมระหว่างดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือมี 7 รายการ ดังนี้

- 1) กระบอกตัวอย่างทดสอบ (PVC Test Chamber) รูปทรงแคปซูล (Capsule Shaped) ที่ใส่ตัวอย่างทดสอบตามหัวข้อการเตรียมตัวอย่าง จำนวน 10 กระบอก ดังรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 ครอบอกตัวอย่างทดสอบที่ทำการต่อท่อนแรงดันพร้อมทดสอบ



- 2) ถังแก๊สไนโตรเจน (N_2 Gas tank)
- 3) วาล์วหลัก (Regulating Value) ขนาดความดัน 15 psi (ป้อนต่อตารางนิ้ว) ใช้ในการควบคุมความดันของการทดสอบทุกส่วนผสมโดยใช้ความดันที่ 10 psi
- 4) ระบายออกอัดน้ำเกลือ (Brine pump)
- 5) วาล์วเข็ม (Needle Value) ใช้ปรับแรงดันสู่กระบอกตัวอย่างทดสอบ
- 6) ท่อทนแรงดันยาว 2 เมตร จำนวน 3 เส้น ดังรูปที่ 7.2 มีรายละเอียดดังนี้
 - เส้นที่ 1 ต่อระหว่างวาล์วความดันกับกระบอกอัดน้ำเกลือด้านบน
 - เส้นที่ 2 ต่อระหว่างกระบอกอัดน้ำเกลือด้านล่างกับกระบอกตัวอย่างทดสอบด้านล่าง โดยมีวาล์วเข็มใช้ในการปรับความดันอย่างละเอียดติดตั้งอยู่ด้วย
 - เส้นที่ 3 ต่อระหว่างกระบอกตัวอย่างทดสอบด้านบนกับหลอดแก้ววัดปริมาตร
- 7) หลอดแก้ววัดปริมาตร (High – Precision Pipette) ความจุ 25 มิลลิลิตร

7.4 วิธีการทดสอบ

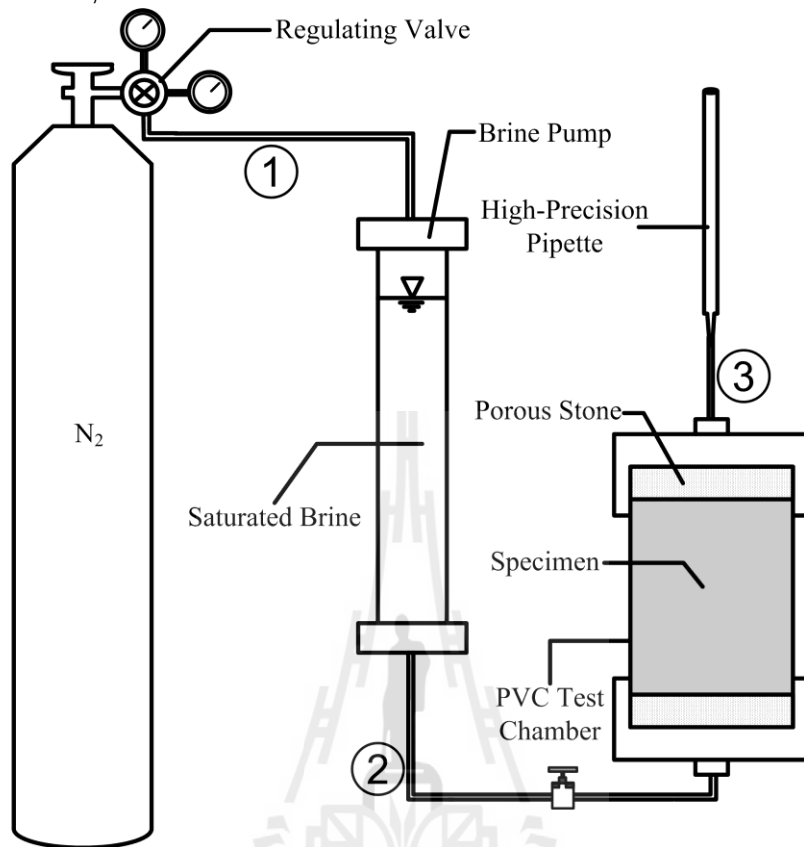
วิธีการทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมระหว่างดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือมี 4 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) ติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบและจัดเตรียมตัวอย่างทดสอบที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ดังรูปที่ 7.3
- 2) เปิดวาล์วหลักโดยควบคุมความดันที่ 10 psi สำหรับการทดสอบทุกส่วนผสมเพื่อไล่ฟองอากาศออกจากกระบอกตัวอย่างทดสอบเป็นเวลา 3 – 5 นาที
- 3) จับเวลาน้ำเกลืออิ่มตัวไหลผ่านหลอดแก้ววัดปริมาตร 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร บันทึกค่าเวลาที่ได้และทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย และนำไปใช้ในการหาค่าความซึมผ่านดังสมการที่ 7.1 ถึงสมการที่ 7.3
- 4) การทดสอบเหมือนข้อ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ในทุกกระบอกตัวอย่างทดสอบ

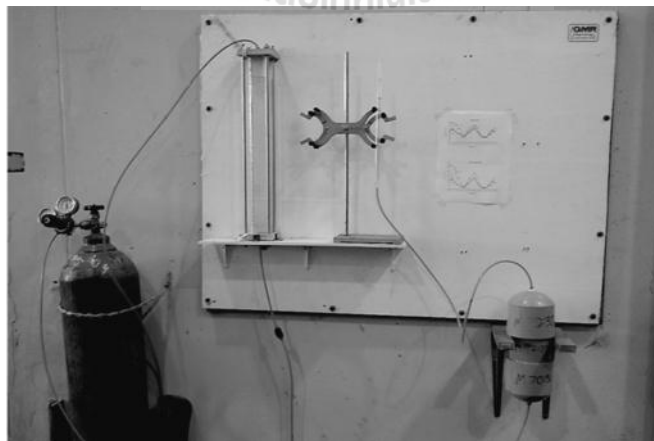
7.5 การคำนวณผลการทดสอบ

การคำนวณหาค่าความสูงที่ต่างกัน (Δh) เพื่อนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านสามารถหาได้จากสมการ

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



รูปที่ 7.2 แผนภาพการเตรียมวัสดุ-อุปกรณ์สำหรับการทดสอบ



รูปที่ 7.3 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดสอบหาค่าความซึมผ่านของส่วนผสมระหว่างดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือขนาดต่างๆ

โดยที่ Δh = ระดับความสูงที่ต่างกัน (m)
 ΔP = ความดันที่ต่างกันของจุดต้นและจุดปลาย (kPa)
 γ_f = น้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรของน้ำเกลือ (kN/m^3)

การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (Hydraulic Conductivity) สามารถหาได้จากสมการ

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

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

โดยที่ K = สัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (m/s)
 Q = อัตราการไหล (m^3/s)
 L = ระยะทางในการซึมผ่าน
 A = พื้นที่หน้าตัดของการไหล (m^2)
 Δh = ระดับความสูงที่ต่างกันของจุดต้นและจุดปลาย (m)

แทนค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านที่ได้จากสมการ (7.2) เพื่อหาค่าความซึมผ่านเชิง

กายภาพจากสมการ

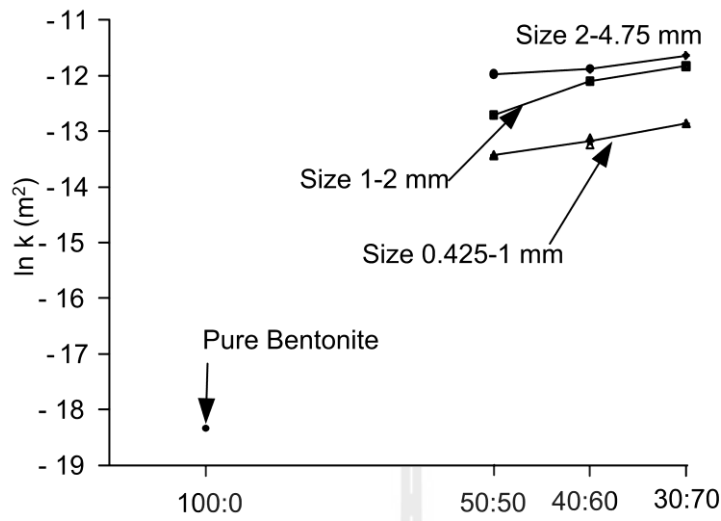
$$k = \frac{K \mu}{\gamma_f} \quad (7.3)$$

โดยที่ k = ความซึมผ่านเชิงกายภาพ (m^2)
 μ = ความหนืดจลน์ ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)

7.6 ผลการทดสอบ

จากการทดสอบความชื้นผ่านของตัวอย่างส่วนผสมดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือ ทำให้ได้ผลสรุปว่า ดินเบนโทไนต์บริสุทธิ์มีความชื้นผ่านเชิงกายภาพน้อยที่สุดเท่ากับ $4.56 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ ในขณะที่เกล็ดเกลือขนาดใหญ่มีค่าความชื้นผ่านสูงที่สุดในทุกอัตราส่วนผสม ซึ่งค่าความชื้นผ่านในเกล็ดเกลือขนาดกลางและขนาดเล็กมีค่าลดลงตามลำดับ โดยที่อัตราส่วนผสมของดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือที่ 30:70, 40:60 และ 50:50 มีค่าความชื้นผ่านจากมากไปหาน้อยตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกันในทุกขนาดเกล็ดเกลือดังรูปที่ 7.4 ส่วนตารางที่ 7.1 แสดงค่าความชื้นผ่านที่วัดได้จากการทดสอบนี้





รูปที่ 7.4 เปรียบเทียบค่าความซึมผ่านของส่วนผสมระหว่างดินเบนโทไนต์กับเก็ลดีดเก็ลลือในแต่ละอัตราส่วนผสม

ตารางที่ 7.1 ค่าความซึมผ่านของอัตราส่วนผสมระหว่างดินเบนโทไนต์และเก็ลดีดเก็ลลือขนาดต่างๆ

ขนาดเก็ลดีดเก็ลลือ (มิลลิเมตร)	ค่าความซึมผ่าน (ตารางเมตร)			
	อัตราส่วน (เบนโทไนต์ : เก็ลดีดเก็ลลือ)			
	30:70	40:60	50:50	100:0
0.425-1	0.137×10^{-12}	0.066×10^{-12}	0.036×10^{-12}	0.456×10^{-18}
1-2	2.296×10^{-12}	0.782×10^{-12}	0.193×10^{-12}	
2-4.75	2.296×10^{-12}	1.300×10^{-12}	1.045×10^{-12}	

บทที่ 8

บทสรุป

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ เพื่อศึกษาคัดแยกภาพเชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์ของดินเบนโทไนต์ผสมเกล็ดเกลือ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการอุดรอยแตกในชั้นเกลือหินที่ถูกขุดเจาะเป็นโพรงหรืออุโมงค์สำหรับเป็นแหล่งทิ้งกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมที่ไม่สามารถบำบัดหรือนำกลับมาใช้ใหม่ได้

การศึกษานี้ประกอบด้วย การทดสอบกำลังเฉือนของส่วนผสมดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือที่ถูกบดอัดตามมาตรฐาน ASTM และการทดสอบหาค่าความซึมผ่านของดินเบนโทไนต์ที่ถูกบดอัด นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเพื่อตรวจสอบความสามารถในการบวมตัวของส่วนผสมที่ถูกบดอัดภายใต้ น้ำเกลือที่อิ่มตัว

ตัวอย่างเกล็ดเกลือถูกเตรียมมาจากตัวอย่างแห้งเกลือที่เจาะได้จากชุดหินมหาสารคาม โดยนำมาบดและคัดขนาดออกเป็นสามขนาดคือ 0.425-1 มิลลิเมตร 1-2 มิลลิเมตร และ 2-4.75 มิลลิเมตร ดินเบนโทไนต์ที่ใช้ในการศึกษาได้มาจากบริษัท American Colloid Company ส่วนน้ำเกลืออิ่มตัวถูกจัดเตรียมมาจากเกลือบริสุทธิ์ผสมกับน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง โดยส่วนผสมจะให้น้ำหนักเกลือต่อน้ำหนักน้ำมากกว่า 39:100 เพื่อให้มั่นใจว่าน้ำเกลือมีการอิ่มตัวตลอดเวลา

ผลการทดสอบการบดอัดของดินเบนโทไนต์บริสุทธิ์พบว่า ปริมาณน้ำเกลือที่เหมาะสมคือ 20% โดยน้ำหนัก ซึ่งจะให้ค่าความหนาแน่นแห้งของดินเบนโทไนต์สูงสุดประมาณ 15 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งปริมาณน้ำเกลือที่ได้นี้จะนำมาใช้ในการผสมกับดินเบนโทไนต์ที่ผสมกับเกล็ดเกลือเพื่อใช้ในการบดอัดต่อไป

อัตราส่วนโดยน้ำหนักของดินเบนโทไนต์ต่อเกล็ดเกลือที่ใช้ในการศึกษาคือ 30:70 40:60 และ 50:50 ผลการทดสอบอัตราส่วนเหล่านี้เมื่อผสมกับน้ำเกลือเข้มข้นพบว่า ค่ากำลังเฉือนสูงสุดจะได้จากส่วนผสมที่ 30:70 ที่ใช้ขนาดของเกล็ดเกลือ 2-4.75 มิลลิเมตร ซึ่งความเค้นเฉือนต่ำสุดจะได้จากส่วนผสมในอัตราส่วนที่ 50:50 ที่ใช้ขนาดของเกล็ดเกลือ 0.425-1 มิลลิเมตร

ผลการทดสอบการบวมตัวของส่วนผสมที่ถูกบดอัดแล้วภายใต้ น้ำเกลือเข้มข้นในช่วงเวลา 10 วัน หลังจากการบดอัดพบว่า ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนต่างกันและขนาดเกล็ดเกลือต่างกันจะมีความสามารถในการบวมตัวคล้ายคลึงกัน อย่างไรก็ตามความสามารถในการบวมตัวของส่วนผสมเหล่านี้จะน้อยกว่าของดินเบนโทไนต์บริสุทธิ์ประมาณร้อยละ 70

การทดสอบหาค่าความซึมผ่านภายใต้ความดันน้ำเกลือคงที่ระบุว่า ดินเบนโทไนต์บริสุทธิ์ที่ถูกบดอัดจะมีความซึมผ่านน้อยกว่า 10^{-18} m^2 ค่าความซึมผ่านของส่วนผสมที่มีเกล็ดเกลือขนาดใหญ่จะสูงกว่าส่วนผสมที่มีเกล็ดเกลือขนาดเล็ก ส่วนผสมทั้งหมดมีค่าความซึมผ่านอยู่ในช่วงระหว่าง 10^{-14} ถึง 10^{-12} m^2 ส่วนผสมที่มีดินเบนโทไนต์น้อยจะให้ค่าความซึมผ่านสูงกว่าส่วนผสมที่มีดินเบนโทไนต์มาก

ผลจากงานวิจัยนี้แนะนำว่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักของดินเบนโทไนต์ต่อเกล็ดเกลือที่ใช้ในการอุดรอยแตกในชั้นเกลือหินควรมีค่าเท่ากับ 30:70 โดยมีขนาดของเกล็ดเกลืออยู่ในช่วง 2-4 มิลลิเมตร ซึ่งเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุอุดในอุโมงค์ใต้ดินที่ใช้ทิ้งของเสียจากภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากส่วนผสมนี้มีค่ากำลังเฉือนสูงสุด แต่ในขณะเดียวกันก็มีค่าความซึมผ่านและความสามารถในการบวมตัวใกล้เคียงกับส่วนผสมอื่นที่ใช้ในการทดสอบในงานวิจัยนี้



บรรณานุกรม

- Adler, P. M., Zazovsky, A., Baranger, Ph., Bonte, G., Laurens, J. F., and Sureau, J. F. (1996). Hydrodynamic aspect of the inhibition of a salt wall by brine initially contained in a cavity. In **Proceedings of the 3rd Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 249–261). Clausthal–Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Ahn, H–S. and Jo, H. Y. (2009). Influence of exchangeable cations on hydraulic conductivity of compacted bentonite. **Applied Clay Science**. 44(1–2): 144–150.
- Akgun, H. (2010). Geotechnical characterization and performance assessment of bentonite/sand mixtures for underground waste repository sealing. **Applied Clay Science**. 49(4): 394–399.
- Al–Ajmi, A. M. and Zimmerman, R.W. (2005). Relation between the Mogi and the Coulomb failure criteria. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.** 42: 431–439.
- Alawaji, H. A. (1999). Swell and compressibility characteristics of sand–bentonite mixtures inundated with liquids. **Applied Clay Science**. 15(3–4): 411–430.
- Alexeev, A. D., Revva, V. N., Alyshev, N. A. and Zhitlyonok, D. M. (2004). True triaxial loading apparatus and its application to coal outburst prediction. **Int. J. Coal. Geol.** 58: 245–250.
- Allemandou, X. and Dusseault, M. B. (1993). Healing processes and transient creep of salt rock. In A. Anagnostopoulos (ed.). **Geotechnical Engineering of Hard Soils–Soft Rocks**. 1–3: 1581–1590. Rotterdam, Brookfield: A.A. Balkema.
- Allemandou, X. and Dusseault, M. B. (1996). Procedures for cyclic creep testing of salt rock, results and discussions. In **Proceedings of the 3rd Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 207–218). Clausthal–Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Arieli, A., Heard, H. C., and Mukherjee, A. K. (1982). Deformation modelling in sodium chloride intermediate and elevated temperatures. In R. W. Rohde and J. L. Swearingen (eds). **Mechanical Testing for Deformation Model Development** (pp. 342–365). Philadelphia: ASTM Spec. Technical Publications.

- Arnedo, D., Alonso, E. E., Olivella, S., and Romero, E. (2008). Gas injection tests on sand/bentonite mixtures in the laboratory. **Physics and Chemistry of the Earth A/B/C**. 33: S237–S247.
- ASTM C150/C150M–09. Standard specification for Portland cement. In **Annual Book of ASTM Standards** (Vol. 04.01). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D1557 – 09. Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort (56,000 ft–lbf/ft³ (2,700 kN–m/m³)). In **Annual Book of ASTM Standards** (Vol. 04.08). West Conshohocken: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D698 – 07. Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12,400 ft–lbf/ft³ (600 kN–m/m³)). In **Annual Book of ASTM Standards** (Vol. 04.08). West Conshohocken: American Society for Testing and Materials.
- Baik, M. H., Cho, W. J., and Hahn, P. S. (2007). Erosion of bentonite particles at the interface of a compacted bentonite and a fractured granite. **Engineering Geology**. 91: 229–239
- Baille, W., Tripathy, S., and Schanz, T. (2010). Swelling pressures and one–dimensional compressibility behaviour of bentonite at large pressures. **Applied Clay Science**. 48(3): 324–333.
- Bates, R.L. and Jackson, J.A. (1980). **Glossary of Geology**, Second Edition. American Geology Institute.
- Beziat, A., Dardaine, M., and Mouche, E. (1992). Measurements of the thermal conductivity of clay–sand and clay–graphite mixtures used as engineered barriers for high–level radioactive waste disposal. **Applied Clay Science**. 6(4): 245–263.
- Borgesson, L. (1985). Water flow and swelling pressure in non–saturated bentonite–based clay barriers. **Engineering Geology**. 21(3–4): 229–237.
- Brady, B. H. G. and Brown, E. T. (1994). **Rock Mechanics for Underground Mining** (2nd ed.). London: Chapman & Hall.

- Butron, C., Gustafson, G., Fransson, A., and Funehag, J. (2010). Drip sealing of tunnels in hard rock: A new concept for the design and evaluation of permeation grouting. **Tunnelling and Underground Space Technology**. 25: 114–121.
- Chegbeleh, L. P., Nishigaki, M., Akudago, J. A., and Katayama, T. (2009). Experimental study on ethanol/bentonite slurry injection into synthetic rock fracture: Application to seepage control. **Applied Clay Science**. 45: 232–238.
- Cho, W. J., Lee, J. O., and Chun, K. S. (1999). The temperature effects on hydraulic conductivity of compacted bentonite. **Applied Clay Science**. 14(1–3): 47–58.
- Cui, Y. J., Tang, A. M., Loiseau, C., and Delage, P. (2008). Determining the unsaturated hydraulic conductivity of a compacted sand–bentonite mixture under constant–volume and free–swell conditions. **Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C**. 33: S462–S471.
- Dai, Z., Samper, J., Wolfsberg, A., and Levitt, D. (2008). Identification of relative conductivity models for water flow and solute transport in unsaturated bentonite. **Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C**. 33: S177–S185.
- Detoumay, E. (1980). Hydraulic conductivity of closed rock fractures: An experimental and analytical study. In **Proceeding of the 13th Canadian Rock Mechanics Symposium** (pp 168–173). Toronto: (n.p.).
- Dixon, D. A., Gray, M. N., and Thomas, A. W. (1985). A study of the compaction properties of potential clay–sand buffer mixtures for use in nuclear fuel waste disposal. **Engineering Geology**. 21(3–4): 247–255.
- Ebina, T., Minja, R. J. A., Nagase, T., Onodera, Y., and Chatterjee, A. (2004). Correlation of hydraulic conductivity of clay–sand compacted specimens with clay properties. **Applied Clay Science**. 26(1–4): 3–12.
- Fransson, A. (2001). Characterisation of a fractured rock mass for a grouting field Test. **Tunnelling and Underground Space Technology**. 16: 331–339
- Gale, G. E. (1975). **A Numerical, Field and Laboratory Study of Fluid Flow in Rocks with Deformable Fractures**. Ph.D. thesis, University of California, Berkeley.
- Gangji, A. F. (1978). Variation of whole and fractured porous rocks permeability with confining pressure. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**. 15: 249–257.

- Gens, A., Guimaraes L. N., Garcia–Molina, A., and Alonso, E. E. (2002). Factors controlling rock–clay buffer interaction in a radioactive waste repository. **Engineering Geology**. 64(2–3): 297–308.
- Graham, J., Oswell, J. M., and Gray, M. N. (1992). Effective stress concept in saturated sand–clay buffer. **Canadian Geotechnical J.** 29(6): 1033–1043.
- Graham, J., Saadat, F., and Gray, M. N. (1990). High–pressure triaxial testing on the canadian reference buffer material. **Engineering Geology**. 28(3–4): 391–403.
- Graham, J., Saadat, F., Gray, M. N., Dixon, D. A., and Zhang, Q. Y. (1989). Strength and volume change behaviour of a sand–bentonite mixture . **Canadian Geotechnical J.** 26(2): 292–305.
- Grasselli, G. and Egger, P. (2003). Constitutive law for the shear strength of rock joints based on three–dimensional surface parameters. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**. 40 (1): 25–40.
- Güven, N. (1990). Longevity of bentonite as buffer material in a nuclear–waste repository. **Engineering Geology**. 28(3–4): 233–247.
- Herbert, H–J., Kasbohm, J., Moog, H.C., and Henning, K–H. (2004). Long–term behaviour of the wyoming bentonite mx–80 in high saline solutions. **Applied Clay Science**. 26(1–4): 275–291.
- Hosseini, A. K., Pellet, F., Jafari, K. M., and Boulon, M. (2004). Shear strength reduction of rock joints due to cyclic loading. In 13th **World Conference on Earthquake Engineering** (Paper No. 3070). Vancouver: B.C..
- Huang, W. H. (1997). Properties of cement–fly ash grout admixed with bentonite, silica fume, or organic fiber. **Cement and Concrete Research**. 27(3): 395–406
- Indraratna, B. and Ranjith, P. (2001). **Hydromechanical Aspects and Unsaturated Flow in Joints Rock**. Lisse: A. A. Balkema.
- Ito, H. (2006). Compaction properties of granular bentonites. **Applied Clay Science**. 31(1–2): 47–55.
- Ito, H. and Komine, H. (2008). Dynamic compaction properties of bentonite–based materials. **Engineering Geology**. 98(3–4): 133–143.

- Iwai, K. (1976). **Fundamental Studies of Fluid Flow Through a Single Fracture**. Ph.D. thesis, University of California, Berkeley.
- Jaeger, J. C., and Cook, N. G. W. (1979). **Fundamentals of Rock Mechanics** (3rd ed.). London: Chapman & Hall.
- Jafari, M. K., Pellet, F., Boulon, M., and Hosseini, A. K. (2004). Experimental study of mechanical behaviour of rock joints under cyclic loading. **Rock Mechanics and Rock Engineering**. 37 (1): 3–23.
- Jafari, M. K., Hosseini, A. K., Pellet, F., Boulon, M., and Buzzi, O. (2003). Evaluation of shear strength of rock joints subjected to cyclic loading. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**. 3 (7): 619–630.
- Jan, Y-L., Tsai, S-C., Wei, Y-Y., Tung, N-C., Wei, C-C., and Hsu, C-N. (2007). Coupled mechanics, hydraulics and sorption properties of mixtures to evaluate buffer/backfill materials. **Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C**. 32(8–14): 789–794.
- Jones, F. O. (1975). A laboratory study of the effects of confining pressure on fracture flow and storage capacity in carbonate rocks. **Journal of Petroleum Technology**. 21: 21–27.
- Kanno, T., Kato, K., and Yamagata, J. (1996). Moisture movement under a temperature gradient in highly compacted bentonite. **Engineering Geology**. 41(1–4): 287–300.
- Karland, O., Nilsson, U., Weber, H., and Wersin, P. (2008). Sealing ability of wyoming bentonite pellets foreseen as buffer material – Laboratory results. **Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C**. 33: S472–S475.
- Kashir, M., and Yanful, E. K. (2000). Compatibility of slurry wall backfill soils with acid mine drainage. **Advances in Environmental Research**. 4: 251–268.
- Kaufhold, S. and Dohrmann, R. (2009). Stability of bentonites in salt solutions sodium chloride. **Applied Clay Science**. 45(3): 171–177.
- Kaufhold, S., Stuhrenberg, D., and Dohrmann, R. (2009). Water redistribution between bentonite and salt at elevated temperature. **Applied Clay Science**. 46(3): 245–250.

- Komine, H. (2010). Predicting hydraulic conductivity of sand–bentonite mixture backfill before and after swelling deformation for underground disposal of radioactive wastes. **Engineering Geology**. 114(3–4): 123–134.
- Komine, H. (2004). Simplified evaluation on hydraulic conductivities of sand–bentonite mixture backfill. **Applied Clay Science**. 26(1–4): 13–19.
- Komine, H. and Ogata, N. (1994). Experimental study on swelling characteristics of compacted bentonite. **Canadian Geotechnical J.** 31(4): 478–490.
- Kranz, R. L., Frankel, A. D., Engelder, T., and Scholz, C. H. (1979). The permeability of whole and jointed barre granite. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**. 16: 225–334.
- Lawn, B. R., and Wilshaw, T. R. (1975). **Fracture of Brittle Solids**. Cambridge: Cambridge University Press.
- Lee, J. O., Cho, W. J., and Kwon, S. (2011). Suction and water uptake in unsaturated compacted bentonite. **Annals of Nuclear Energy**. 38(2–3): 520–526.
- Leea, H. S., Park, Y. J., Cho, T. F., and You, K. H. (2001). Influence of asperity degradation on the mechanical behavior of rough rock joints under cyclic shear loading. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**. 38 (7): 967–980.
- Lingnau, B. E., Graham, J., Yarechewski, D., Tanaka, N., and Gray, M. N. (1996). Effects of temperature on strength and compressibility of sand–bentonite buffer. **Engineering Geology**. 33(6): A257–A258.
- Liu, L. (2010). Permeability and expansibility of sodium bentonite in dilute solutions. **Physicochem. Eng. Aspects**. 358(1–3): 68–78.
- Ma, M. and Brady, B. H. (1999). Analysis of the dynamic performance of an underground excavation in jointed rock under repeated seismic loading. **Geotechnical and Geological Engineering**. 17 (1): 1–20.
- Mirza, U. A. (1984). Prediction of creep deformations in rock salt pillars. In **Proceedings of the 1st Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 311–337). Clausthal–Zellerfeld: Trans Tech Publications.

- National Research Council. (1996). **Rock Fractures and Fluid Flow: Contemporary Understanding and Applications**. Washington, D.C.: National Academy Press.
- Nelson, R. (1975). **Fracture Permeability in Porous Reservoirs: Experimental and Field Approach**. Ph.D. dissertation, Department of Geology, Texas A&M University.
- Nilsson, J. (1985). Field compaction of bentonite-based backfilling. **Engineering Geology**. 21(3-4): 367-376.
- Ould-Lahoucine, C., Sakashita, H., and Kumada, T. (2002). Measurement of thermal conductivity of buffer materials and evaluation of existing correlations predicting it. **Nuclear Engineering Design**. 216(1-3): 1-11.
- Owaidat, L. M., Andromalos, K. B., and Sisley, J. L. (1999). Construction of a soil-cement-bentonite slurry wall for a levee strengthening program. **Association of State Dam Safety Officials Annual Conference**. St. Louis, Missouri.
- Pestrenin, V. M. and Pestrenina, I. V. (2010). Nonlinear Hereditary Model of the Prestressed Salt Rock. **Journal of Mining Science**. 46(1): 21-27.
- Pollard, D. D. and Aydin, A. (1988). Progress in understanding jointing over the past century. **Geological Society of America Bulletin**. 100: 1181-1204.
- Prikryl, R. and Weishauptova, Z. (2010). Hierarchical porosity of bentonite-based buffer and its modification due to increased temperature and hydration. **Applied Clay Science**. 47(1-2): 163-170.
- Puntel, E., Bolzon, G., and Saouma, E. V. (2006). A fracture mechanics based model for joints under cyclic loading. **Journal of Engineering Mechanics**. 132 (11): 1151-1159.
- Rahmani, H. (2004). **Estimation of grout distribution in a fractured rock by numerical modeling**. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of applied science in the faculty of graduate studies (Civil Engineering), University of Tehran.
- Ran, C., Daemen, J. J. K., Schuhen, M. D., and Hansen, F. D. (1997). Dynamic compaction properties of bentonite. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.** 34(3-4): 253.e1-253.e19.

- Rao, S. M. and Thyagaraj, T. (2007). Role of direction of salt migration on the swelling behaviour of compacted clays. **Applied Clay Science**. 38(1-2): 113-129.
- Raven, K. G. and Gale, J. E. (1985). Water flow in a natural rock fracture as a function of stress and sample size. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**. 22(4): 251-261.
- Ryan, C. R. and Day, S. R. (2002). Soil-cement-bentonite slurry wall. **International Deep Foundation Congress** (GSP No. 116). Orlando: American Society of Civil Engineers.
- Savage, D., Walker, C., Arthur, R., Rochelle, C., Oda, C., and Takase, H. (2007). Alteration of bentonite by hyperalkaline fluids : a review of the role of secondary minerals. **Physics and Chemistry of the Earth**. 32(1-7): 287-297.
- Snow, D. T. (1968). Anisotropic Permeability of Fractured Media. **Water Resources Research**. 5(6): 1273-1289.
- Souley, M., Homand, F., and Amadei, B. (1995). An extension to the Saeb and Amadei constitutive model for rock joints to include cyclic loading paths. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts**. 32 (2): 101-109.
- Sugiyama, T. and Tsuji, Y. (2008) Use of a migration technique to study alteration of compacted sand-bentonite mixture in contact with concrete. **Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C**. 33: S276-S284.
- Sun, D., Cui, H., and Sun, W. (2009). Swelling of compacted sand-bentonite mixtures. **Applied Clay Science**. 43(3-4): 485-492.
- Suzuki, S., Sazarashi, M., Akimoto, T., Haginuma, M., and Suzuki, K., (2008). A study of the mineralogical alteration of bentonite in saline water. **Applied Clay Science**. 41(3-4): 190-198.
- Tang, G. X., Graham, J., Blatz, J., Gray, M., and Rajapakse, R. K. N. D. (2002). Suctions, stresses and strengths in unsaturated sand-bentonite. **Engineering Geology**. 64(2-3): 147-156.

- Tien, Y-M., Wu, P-L., Huang, W-H., Kuo, M-F., and Chu, C-A. (2007). Wall friction measurement and compaction characteristics of bentonite powders. **Powder Technology**. 173(2): 140-151.
- Twiss, R. J., and Moores, E. M. (1992). **Structural Geology**. New York: W. H. Freeman and Company.
- Villar, M. V. (2006). Infiltration tests on a granite/bentonite mixture: influence of water salinity. **Applied Clay Science**. 31(1-2): 96-109.
- Villar, M. V. and Lloret, A. (1990). Temperature influence on the mechanical behaviour of a compacted bentonite. **In Elsevier Geo-Engineering Book Series**. 2: 305-310.
- Villar, M. V. and Lloret, A. (2004). Influence of temperature on the hydro-mechanical behaviour of a compacted bentonite. **Applied Clay Science**. 26(1-4): 337-350.
- Villar, M. V. and Lloret, A. (2008). Influence of dry density and water content on the swelling of a compacted bentonite. **Applied Clay Science**. 39(1-2): 38-49.
- Vrolijk, P., Ben, A., and Pluijm, V. D. (1999). Clay gouge. **Structural Geology**. 21(8-9): 1039-1048.
- Warr, L. and Berger, J. (2007). Hydration of bentonite in natural waters: Application of 'confined volume' wet-cell x-ray diffractometry. **Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C**. 32(1-7): 247-258.
- Warren, J. (1999). **Evaporites: Their Evolution and Economics**. Blackwell Science, Oxford.
- Yamaguchi, T., Sakamoto, Y., Akai, M., Takazawa, M., Iida, Y., Tanaka, T., and Nakayama, S. (2007). Experimental and modeling study on long-term alteration of compacted bentonite with alkaline groundwater. **Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C**. 32(1-7): 298-310.
- Yamaguchi, T., Yamada, F., Negishi, K., Hoshino, S., Mukai, M., Tanaka, T., and Nakayama, S. (2008). Development and verification of a reactive transport model for long-term alteration of bentonite-cement-seawater systems. **Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C**. 33: S285-S294.

- Yong, R. N. and Mohamed, A. M. O. (1996). Evaluation of coupled heat and moisture flow parameters in a bentonite–sand buffer material. **Engineering Geology**. 41(1–4): 269–286.
- Yong, R. N., Mohamed, A. M. O., Shooshpasha, I., and Onofrei, C. (1997). Hydro–thermal performance of unsaturated bentonite–sand buffer material. **Engineering Geology**. 47(4): 351–365.





ประวัติผู้ประพันธ์

ศาสตราจารย์ ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี (เกียรตินิยม) สาขาวิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปี พ.ศ. 2539 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมปฐพี จากสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ในปี พ.ศ. 2541 และวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเทคนิคธรณี จากมหาวิทยาลัย Saga ประเทศญี่ปุ่น ในปี พ.ศ. 2544

ศ. สุขสันต์ ได้เริ่มปฏิบัติงานในตำแหน่งอาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2545 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งศาสตราจารย์ หัวหน้าหน่วยศูนย์วิจัยความเป็นเลิศด้านวิศวกรรมโยธา หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา บรรณาธิการวารสารเทคโนโลยีสุรนารี กรรมการสภาวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และกรรมการสภาวิชาการผู้ทรงคุณวุฒิ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ท่านได้รับทุนสนับสนุนงานและทำวิจัยหลายทุนทั้งจากองค์กรภายในและภายนอกประเทศ มีผลงานวิจัยที่เผยแพร่ในวารสารและสัมมนาวิชาการระดับนานาชาติและระดับประเทศมากกว่า 150 เรื่อง และมีผลงานประพันธ์หนังสือสองเล่ม “ปฐพีกลศาสตร์” “วิศวกรรมฐานราก” และตำราหนึ่งเล่ม “เทคนิคการปรับปรุงพื้นดิน” งานวิจัยที่สนใจ ได้แก่ ลักษณะทางวิศวกรรมของดินตามธรรมชาติ การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของดิน และเทคนิคการปรับปรุงดิน

ศ. สุขสันต์ มีประสบการณ์เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาระดับบัณฑิตศึกษาและการให้บริการวิชาการ อาทิ วิศวกรที่ปรึกษาด้านกำแพงกันดินเสริมกำลัง (Mechanically Stabilized Earth Wall) บริษัท จีไอฟอร์ม จำกัด ที่ปรึกษาคณะอนุกรรมการวิศวกรรมปฐพี วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย และกองบรรณาธิการวารสารคณาจารย์อุตสาหกรรม พระจอมเกล้าพระนครเหนือ เป็นต้น นอกจากนี้ท่านยังเป็นทรงคุณวุฒิในการประเมินโครงการวิจัย ผลงานวิจัย และหนังสือให้กับหน่วยงานภาครัฐและเอกชนทั้งในและต่างประเทศ