



รหัสโครงการ SUT7-719-59-24-31

รายงานการวิจัย

การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และเชิงชลศาสตร์
ของเกลือเกล็ดผสมกับดินตะกอนประปาเพื่อใช้เป็นวัสดุถมกลับ
ในเหมืองเกลือหินและเหมืองโพแทช

(Laboratory Testing of Mechanical and Hydraulic Properties
of Sludge-Crushed Salt Mixture as Applied for Backfill
Material in Salt and Potash Mines)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-719-59-24-31

รายงานการวิจัย

การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และเชิงชลศาสตร์
ของเกลือเกล็ดผสมกับดินตะกอนประปาเพื่อใช้เป็นวัสดุถมกลับ
ในเหมืองเกลือหินและเหมืองโพแทช

(Laboratory Testing of Mechanical and Hydraulic Properties
of Sludge-Crushed Salt Mixture as Applied for Backfill
Material in Salt and Potash Mines)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เฟื่องขจร

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2559-2560

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

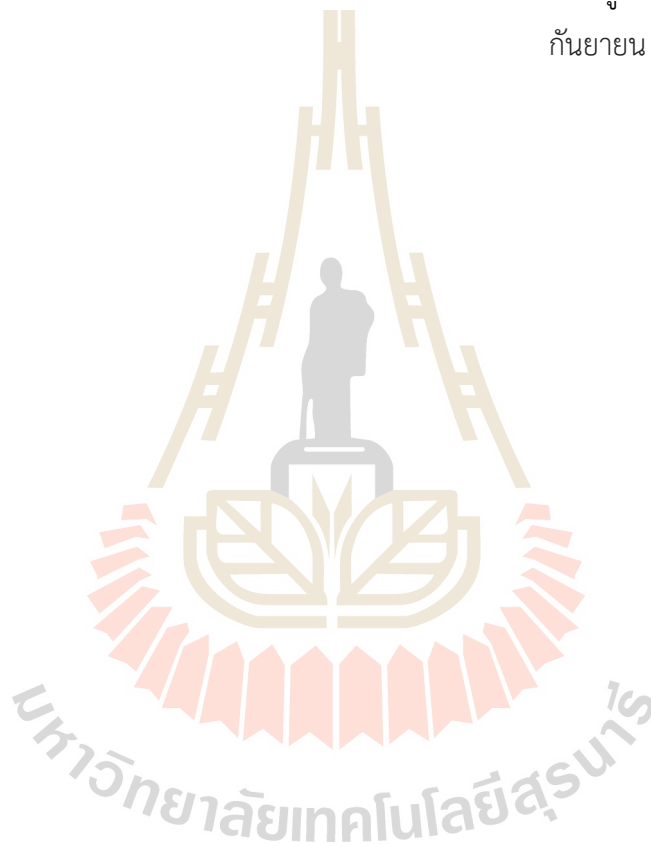
กันยายน 2560

กิตติกรรมประกาศ

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

ผู้วิจัย

กันยายน 2560



บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือ เพื่อหาค่ากำลังรับแรงกดและความซึมผ่านของส่วนผสมดินตะกอนประปากับเกลือบดภายใต้ผลกระทบของความเค้นและระยะเวลาการอัดตัวคายน้ำ โดยอัตราส่วนของดินตะกอนประปาผสมกับเกลือบดที่นำมาศึกษาผันแปรจาก 0:100, 25:75, 50:50, 75:25 ถึง 100:0 โดยน้ำหนัก ค่าปริมาณน้ำเกลือบดที่ใช้ผสมคืออัตราส่วนร้อยละ 5 ได้นำตัวอย่างหลังจากการอัดตัวคายน้ำเป็นระยะเวลา 2, 7, 15 และ 30 วัน มาทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียวภายใต้ความเค้นกดในแนวแกนเท่ากับ 2.5, 5 และ 7.5 MPa ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียวเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการอัดตัวคายน้ำ และมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของดินตะกอนประปาเพิ่มขึ้น ค่าความซึมผ่านมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของดินตะกอนประปาเพิ่มขึ้น ผลการทดสอบได้ถูกนำมาใช้ในการพัฒนาชุดของสมการเชิงประจักษ์สำหรับการใช้ในการออกแบบตัวแปรเบื้องต้นในรูปของคุณสมบัติเชิงกายภาพ เชิงกลศาสตร์ และเชิงพลศาสตร์ของส่วนผสมดินตะกอนประปากับเกลือบดที่ใช้เป็นวัสดุถมกลับในเหมืองเกลือ การจำลองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขได้ถูกดำเนินการเพื่อแสดงประสิทธิภาพของวัสดุถมกลับในเหมืองเกลือ ผลการจำลองระบุว่าอัตราส่วนของดินตะกอนประปาผสมกับเกลือบดที่ 25:75 โดยน้ำหนัก มีความเหมาะสมมากที่สุดสำหรับใช้เป็นวัสดุถมกลับ เนื่องจากมีค่าคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์สูงและค่าความซึมผ่านต่ำ

Abstract

The objective of this study is to determine the strength and permeability of sludge-crushed salt mixtures as affected by stresses and consolidation period. The tested sludge-to-crushed salt ratios vary from 0:100, 25:75, 50:50, 75:25 to 100:0 by weight. The optimum brine content is maintained at 5%. The samples after consolidation for 2, 7, 15 and 30 days are tested to determine the uniaxial compressive strength under applied axial stresses of 2.5, 5 and 7.5 MPa. The results show that the uniaxial compressive strengths increase with increasing consolidation time and decrease with increasing sludge content. The permeability decreases as the sludge content increases. The test results are used to develop a set of empirical equations for the design of initial installation parameters in terms of the physical, mechanical and hydraulic properties of sludge-crushed salt backfill in mine openings. Numerical simulations are performed to demonstrate the effectiveness of backfill materials in salt mine. The simulation results indicate that the mixture ratio of 25:75 by weight is probably the most suitable for backfill material because their high mechanical properties and low permeability.

สารบัญ

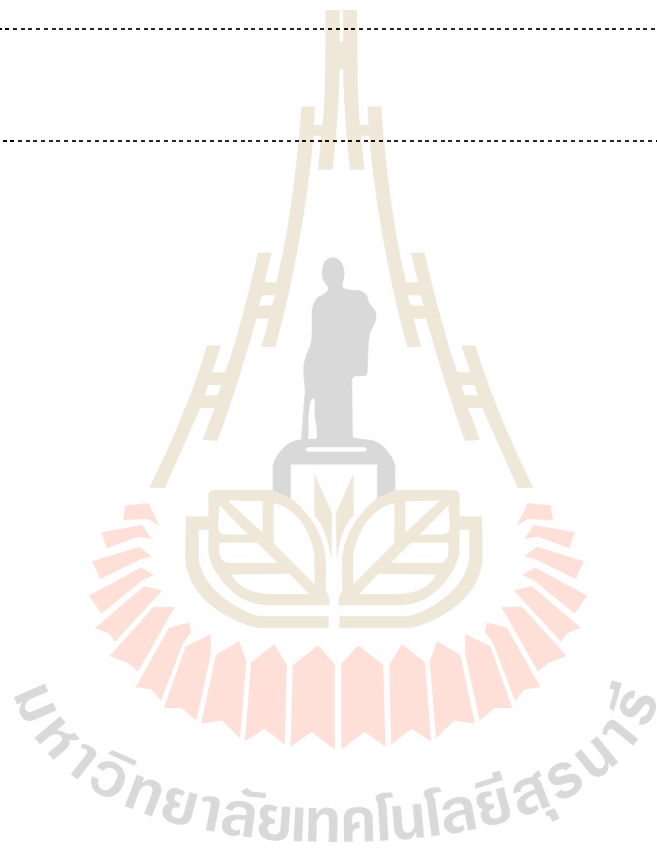
	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	3
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 ทฤษฎีและกฎเกณฑ์ที่ใช้ในปัจจุบัน.....	7
2.2 การทดสอบการבודัด.....	9
2.3 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	13
2.4 การศึกษาและทดสอบดินตะกอนประปาในประเทศไทย.....	14
บทที่ 3 การเตรียมตัวอย่าง.....	17
3.1 การเตรียมตัวอย่าง.....	17
3.2 การประดิษฐ์กระบอกสำหรับการทดสอบการอัดตัว.....	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	21
4.1 วัตถุประสงค์.....	21
4.2 ปริมาณน้ำเกลือที่เหมาะสม.....	21
4.3 การทดสอบการอัดตัว.....	22
4.4 การทดสอบความซึมผ่านของแก๊สไนโตรเจน.....	23
4.5 การทดสอบกำลังกดในแกนเดียว.....	24
บทที่ 5 การสร้างสมการทางคณิตศาสตร์.....	37
5.1 วัตถุประสงค์.....	37
5.2 สภาวะความเครียดในแกนเดียว.....	37
5.3 สมการทางคณิตศาสตร์.....	40
5.3.1 ค่าความเค้นเฉลี่ย.....	40
5.3.2 ความเครียดเชิงปริมาตร.....	42
5.3.3 ค่าความซึมผ่าน.....	42
5.3.4 ความหนาแน่น.....	46
5.3.5 กำลังรับแรงกดในแกนเดียว.....	46
5.3.6 ความยืดหยุ่นโมดูลัส.....	51
5.3.7 อัตราส่วนปัวซอง.....	51
บทที่ 6 การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	57
6.1 วัตถุประสงค์.....	57
6.2 การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	57
6.3 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	57
6.3.1 ความหนาของชั้นหินปิดทับ.....	62
6.3.2 ความสูงของช่องเหมือง.....	62
6.3.3 ช่วงเวลาก่อนใส่วัสดุถมกลับ.....	62

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 7 วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย.....	73
7.1 วิเคราะห์ผล.....	73
7.2 สรุปผลการวิจัย.....	74
บรรณานุกรม.....	77
ประวัตินักวิจัย.....	81



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 ตัวแปรของสมการในการหาค่าความเค้นเฉลี่ย.....	40
5.2 ตัวแปรของสมการทางคณิตศาสตร์ของความเครียดเชิงปริมาตร.....	43
5.3 ตัวแปรของสมการทางคณิตศาสตร์ของค่าความซึมผ่าน.....	45
5.4 ตัวแปรสมการทางคณิตศาสตร์ของความหนาแน่น.....	47
5.5 ตัวแปรสมการทางคณิตศาสตร์ของกำลังรับแรงกดในแกนเดียว.....	49
5.6 ตัวแปรสมการทางคณิตศาสตร์ของความยืดหยุ่น.....	52
5.7 ตัวแปรสมการทางคณิตศาสตร์ของอัตราส่วนปัวซอง.....	54
6.1 คุณสมบัติการคืบของหินเกลือ.....	58
6.2 คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินเกลือ.....	59
6.3 คุณสมบัติของวัสดุถมกลับ.....	59
6.4 ผลการทรุดตัวบริเวณพื้นผิวจากโปรแกรม FLAC 4.0.....	66
6.5 ผลการเปลี่ยนรูปร่างของหลังคาช่องเหมืองจากโปรแกรม FLAC 4.0.....	66
6.6 ผลการเปลี่ยนรูปร่างของพื้นช่องเหมืองจากโปรแกรม FLAC 4.0.....	67
6.7 ผลการเปลี่ยนรูปร่างด้านข้างของเสาค้ำยันจากโปรแกรม FLAC 4.0.....	67
6.8 ผลการเปลี่ยนรูปร่างความสูงของเสาค้ำยันจากโปรแกรม FLAC 4.0.....	68
7.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างดินตะกอนประปาและเบนทอไนต์.....	74

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบความเครียดเฉลี่ยระหว่างผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการกับการคาดคะเนเชิงตัวเลข.....	10
2.2 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับวัดค่าความชื้นผ่านของตัวอย่างโดยวิธีการใช้แก๊สและการใช้น้ำเกลือ.....	10
2.3 ค่าการบดอัดในฟังก์ชันของปริมาณน้ำและการคละขนาดของเม็ดเกลือ.....	11
2.4 เปรียบเทียบค่าความชื้นผ่านในฟังก์ชันของค่าความหนาแน่นแห้งระหว่างผลการทดสอบและการคาดคะเนย้อนกลับของเกลือหินบด.....	12
2.5 ความเครียดเฉลี่ยและการไหลของน้ำเกลือในฟังก์ชันของเวลา.....	13
3.1 ดินตะกอนประปาถูกอบในตู้อบภายใต้อุณหภูมิ 100°C.....	17
3.2 ดินตะกอนประปา.....	18
3.3 ตัวอย่างเกลือถูกบดด้วยเครื่องบด.....	18
3.4 เกล็ดเกลือ.....	19
3.5 ขนาดของดินตะกอนประปาและเกล็ดเกลือ.....	19
3.6 กระจกทดสอบทำจากสแตนเลส.....	20
4.1 ค่าความเครียดในแนวแกนเชิงเวลาภายใต้การผันแปรอัตราส่วนของน้ำเกลือ.....	21
4.2 การทดสอบการอัดตัว.....	22
4.3 ความเครียดกดในแนวแกนเชิงเวลาภายใต้การผันแปรความเค้นกด.....	23
4.4 ความลาดชันชลศาสตร์ในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรความเค้นกด.....	25
4.5 ตัวอย่างเกล็ดเกลือผสมดินตะกอนประปาภายหลังการทดสอบการอัดตัว.....	26
4.6 ความหนาแน่นในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรความเค้นกด.....	27
4.8 ตัวอย่างเกล็ดเกลือผสมดินตะกอนประปาภายหลังการทดสอบกำลังกดในแกนเดียว.....	28
4.9 ความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดภายหลังการทดสอบการอัดตัวเป็นเวลา 2 วัน...	29
4.10 ความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดภายหลังการทดสอบการอัดตัวเป็นเวลา 7 วัน...	30
4.11 ความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดภายหลังการทดสอบการอัดตัวเป็นเวลา 15 วัน...	31
4.12 ความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดภายหลังการทดสอบการอัดตัวเป็นเวลา 30 วัน...	32
4.13 ค่าความเค้นกดสูงสุดในเชิงเวลาของการบดอัดภายใต้การผันแปรความเค้นกด.....	33
4.14 ค่าความยืดหยุ่นในเชิงเวลาของการบดอัดภายใต้การผันแปรความเค้นกด.....	34
4.15 ค่าอัตราส่วนปัวซองในเชิงเวลาของการบดอัดภายใต้การผันแปรความเค้นกด.....	35

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 ความเค้นดัดข้างในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรความเค้น.....	38
5.2 ความเค้นเฉื่อยในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรความเค้นกด.....	39
5.3 ความเค้นเฉื่อยในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรความเค้นกด.....	41
5.4 ความเครียดเชิงปริมาตรในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรความเค้นกด.....	44
5.5 ค่าความซึมผ่านในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรความเค้นกด.....	45
5.6 ความหนาแน่นในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรความเค้นกด.....	48
5.7 กำลังรับแรงกดในแกนเดียวในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรความเค้นกด.....	50
5.8 ความยืดหยุ่นโมดูลัสในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรความเค้นกด.....	53
5.9 อัตราส่วนปัวซองในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรความเค้นกด.....	55
6.1 ลำดับชั้นเกลือหินและชั้นหินตะกอน หลุม K-089 ตำบลในเมือง จังหวัดอุดรธานี.....	58
6.2 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ภายใต้การผันแปรความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 100, 150 และ 200 m และความหนาของชั้นเกลือเท่ากับ 30 m.....	60
6.3 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ภายใต้การผันแปรความสูงของช่องเหมืองเท่ากับ 2, 4 และ 6 m ความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 100 m และความหนาของชั้นเกลือเท่ากับ 30 m.....	61
6.4 การทรุดตัวบริเวณพื้นผิวและการเปลี่ยนรูปร่างของเสาค้ำยันในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรอัตราส่วนดินตะกอนประปา โดยความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 100 m ช่วงเวลาก่อนใส่วัสดุถมกลับ 24 เดือน และความสูงของช่องเหมืองเท่ากับ 4 m.....	63
6.5 การทรุดตัวบริเวณพื้นผิวและการเปลี่ยนรูปร่างของเสาค้ำยันในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรอัตราส่วนดินตะกอนประปา โดยความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 150 m ช่วงเวลาก่อนใส่วัสดุถมกลับ 24 เดือน และความสูงของช่องเหมืองเท่ากับ 4 m.....	64
6.6 การทรุดตัวบริเวณพื้นผิวและการเปลี่ยนรูปร่างของเสาค้ำยันในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรอัตราส่วนดินตะกอนประปา โดยความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 200 m ช่วงเวลาก่อนใส่วัสดุถมกลับ 24 เดือน และความสูงของช่องเหมืองเท่ากับ 4 m.....	65
6.7 การทรุดตัวบริเวณพื้นผิวและการเปลี่ยนรูปร่างของเสาค้ำยันในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรอัตราส่วนดินตะกอนประปา โดยความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 100 m ช่วงเวลาก่อนใส่วัสดุถมกลับ 24 เดือน และความสูงของช่องเหมืองเท่ากับ 2 m.....	69

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.8 การทฤษฎีตัวบริเวณพื้นผิวและการเปลี่ยนรูปร่างของเสาค้ำยันในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรอัตราส่วนดินตะกอนประปา โดยความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 100 m ช่วงเวลาก่อนใส่วัสดุถมกลับ 24 เดือน และความสูงของช่องเหมืองเท่ากับ 6 m.....	70
6.9 การทฤษฎีตัวบริเวณพื้นผิวและการเปลี่ยนรูปร่างของเสาค้ำยันในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรอัตราส่วนดินตะกอนประปา โดยความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 100 m ช่วงเวลาก่อนใส่วัสดุถมกลับ 6 เดือน และความสูงของช่องเหมืองเท่ากับ 4 m.....	71
6.10 การทฤษฎีตัวบริเวณพื้นผิวและการเปลี่ยนรูปร่างของเสาค้ำยันในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรอัตราส่วนดินตะกอนประปา โดยความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 100 m ช่วงเวลาก่อนใส่วัสดุถมกลับ 12 เดือน และความสูงของช่องเหมืองเท่ากับ 4 m.....	72



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ในการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และเชิงพลศาสตร์ของดินตะกอนประปาที่นำมาผสมกับซีเมนต์เพื่อใช้เป็นวัสดุอุดรอยแตกในมวลหิน ผลการศึกษาระบุว่าดินตะกอนประปาสามารถใช้เป็นวัสดุอุดได้เป็นอย่างดีทั้งในระดับห้องปฏิบัติการ (กิตติเทพ, 2554) และในระดับภาคสนาม (กิตติเทพ, 2555) โดยเป้าหมายหลักคือการนำดินตะกอนประปาที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำประปาซึ่งมีมากถึง 247 ตันต่อเดือน (คมกริช และคณะ, 2553) มากำจัดทิ้ง โดยการนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด กล่าวคือ การนำดินตะกอนประปามาผสมกับเกลือหินบดเพื่อใช้เป็นวัสดุถมกลับในช่องเหมือง ซึ่งผลสัมฤทธิ์ของงานวิจัยนี้คือสามารถกำจัดดินตะกอนประปาที่เหลือทิ้งได้หมดสิ้น อีกทั้งยังเป็นประโยชน์ในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ โดยเฉพาะเหมืองใต้ดินที่จะเกิดขึ้นในอนาคตอันใกล้

คุณสมบัติที่ต้องพิจารณาสำหรับวัสดุถมกลับคือมีความเหมาะสมเชิงกลศาสตร์ (มีความสามารถในการต้านทานความเค้นที่เกิดขึ้นในเหมืองใต้โดยไม่เกิดการวิบัติ) และเชิงพลศาสตร์ (มีความซึมผ่านต่ำ) สามารถดูดซับน้ำเกลือไม่ให้รั่วไหลสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกและสะดวกต่อการดำเนินงานการนำดินตะกอนประปามาเป็นวัสดุถมกลับนอกจากจะเป็นการช่วยกำจัดตะกอนประปาที่เหลือทิ้งแล้ว ข้อดีอีกประการหนึ่งคือ ดินตะกอนประปาไม่มีการยุบตัวเชิงเวลา (Consolidation) เนื่องจากเป็นตะกอนทรายเม็ดละเอียดที่มีคุณสมบัติตรงข้ามกับดินเบนทอไนต์ที่ใช้ผสมกับเกลือหินบดหรือซีเมนต์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ซึ่งมีการยุบตัวเชิงเวลาถึงแม้จะมีการบวมตัวในช่วงแรกก็ตาม ส่งผลให้เมื่อเวลาผ่านไปจะทำให้ช่องเหมืองไม่มีเสถียรภาพและเกิดการทรุดตัวของผิวดิน นอกจากนี้ในขบวนการขุดเจาะช่องเหมืองจะได้เกลือหินซึ่งสามารถนำไปบดใช้ได้เลย จึงทำให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการจัดหาวัสดุอย่างอื่น นอกจากนี้ดินตะกอนประปายังเป็นวัสดุเหลือใช้ต่างกับดินเบนทอไนต์ที่มีราคาสูงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศ นอกจากนี้ผลงานวิจัยล่าสุดโดย Somtong et al. (2013) ยังระบุว่า การใช้เกล็ดเกลือมาเป็นวัสดุถมกลับเพียงอย่างเดียวจะมีความอ่อนตัวมาก และรับน้ำหนักได้น้อย ดังนั้นการนำดินตะกอนประปาที่มีขนาดเล็กและมีร่องค้ำประกอบหลักเป็นควอตซ์และซิลิกาจะช่วยเสริมความแข็งแรงของวัสดุถมกลับ ทำให้มีการยุบตัวน้อยในเชิงเวลาแต่ยังคงมีความซึมผ่านต่ำ

การออกแบบและทดสอบคุณสมบัติของวัสดุถมกลับอย่างละเอียดทำให้สามารถเข้าใจกลไกการอัดตัว พฤติกรรมเชิงกลศาสตร์และเชิงพลศาสตร์ของเกลือหินบดผสมดินตะกอนประปาเพื่อนำไปประเมินความเหมาะสมของวัสดุถมกลับ และเป็นปัจจัยสำคัญที่จะประเมินความเป็นไปได้ของการนำเอาเทคโนโลยีนี้มาใช้เป็นรูปธรรมเพื่อลดจำนวนดินตะกอนประปาที่เหลือทิ้งในประเทศไทย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการวิจัยเพื่อศึกษาคุณสมบัติของเกลือหินบดผสมดินตะกอนประปาให้ละเอียดในประเด็นต่อไปนี้ 1) การเปลี่ยนแปลงค่าความซึมผ่านของเกลือหินบดผสมดินตะกอนประปา 2) อัตรา

ส่วนผสมของดินตะกอนประปาและเกลือหินบดต่อค่าความแข็งและค่าความซึมผ่าน 3) การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และเชิงชลศาสตร์ในเชิงเวลา

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และเชิงชลศาสตร์ของตัวอย่างเกล็ดเกลือผสมดินตะกอนประปาโดยวิธีการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวและการทดสอบการอัดตัวภายใต้การผันแปรความเค้นกด (Axial stress) และระยะเวลาในการทดสอบ เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความซึมผ่าน ค่าปริมาตรช่องว่าง ค่าความเครียดในแนวแกน ค่าความแข็ง ค่าความยืดหยุ่นโมดูลัส และค่าอัตราส่วนบวมของตัวอย่างเกล็ดเกลือผสมดินตะกอนประปา
- 2) ศึกษาอัตราส่วนผสมของดินตะกอนประปากับเกลือหินบดที่ให้ค่าความแข็งแรงและมีความซึมผ่านต่ำที่สุด
- 3) สร้างสมการทางคณิตศาสตร์จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Empirical relationship) เพื่ออธิบายพฤติกรรมของการอัดตัว และพฤติกรรมทางกลศาสตร์ อัตราการเกิดความเครียด (ϵ_{axial}) ความหนาแน่น (ρ) ความแข็ง (σ_c) และการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (E), (v) ที่สัมพันธ์กับความเค้น (σ_{axial}) และเวลา (t) ของตัวอย่างเกล็ดเกลือผสมดินตะกอนประปา
- 4) สร้างสมการทางคณิตศาสตร์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ ชลศาสตร์ และกายภาพของตัวอย่างเกล็ดเกลือผสมดินตะกอนประปาที่สัมพันธ์กับความเค้น (σ_{axial}) และเวลา (t) เพื่อใช้คาดคะเนเสถียรภาพในระยะยาว
- 5) สร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อประเมินศักยภาพของเกล็ดเกลือผสมดินตะกอนประปา โดยอาศัยลักษณะทางธรณีวิทยา ความลึก และรูปร่างของช่องเหมืองในประเทศไทย

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) ตัวอย่างเกลือหินถูกบดด้วยเครื่องบดหินเพื่อให้มีเม็ดเกลือคละขนาดกัน โดยมีขนาดตั้งแต่ 0.075 ถึง 4.75 mm (ซึ่งเป็นขนาดที่สอดคล้องกับเศษเกลือหินที่ได้จากการทำเหมือง) ส่วนตัวอย่างดินตะกอนประปาได้ถูกนำมาตากให้แห้งและบดให้มีขนาด 0.075 mm
- 2) ตัวอย่างเกล็ดเกลือผสมดินตะกอนประปาวillนำมาผสมกับน้ำเกลือเข้มข้นเพื่อทดสอบหาค่าความชื้นที่เหมาะสม โดยมีการผันแปรระดับความชื้น (Brine content) 4 ระดับ คือ 2.5%, 5%, 7.5% และ 10% โดยน้ำหนัก
- 3) การทดสอบการอัดตัวได้ทำการทดสอบในแท่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 mm และมีความยาว 200 mm
- 4) อัตราส่วนของดินตะกอนประปาที่ใช้ในการผสมกับเกล็ดเกลือมีอัตราส่วนร้อยละ 25, 50 และ 75% โดยน้ำหนัก

- 5) การทดสอบดำเนินการโดยให้ความเค้นกดแก่ตัวอย่างเกล็ดเกลือผสมดินตะกอนประปาในกระบอกทดสอบทั้งหมด 3 อัตรา คือ 2.5, 5 และ 7.5 MPa เป็นระยะเวลาเท่ากับ 2, 7, 15 และ 30 วัน
- 6) การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ได้ดำเนินการโดยวัดอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนผ่านตัวอย่างเกล็ดเกลือผสมดินตะกอนประปาแล้วนำมาคำนวณค่าความซึมผ่านที่ลดลงตามเวลา
- 7) สร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม FLAC 4.0 (Itasca, 1992)
- 8) การทดสอบดำเนินการภายใต้อุณหภูมิต่ำ
- 9) ผลงานวิจัยได้นำไปเผยแพร่องค์ความรู้ในรูปของบทความในการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการและวารสารทางวิชาการในระดับนานาชาติ

1.4. ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

จากคุณสมบัติของดินตะกอนประปาที่มีความเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุอุดรอยแตกในมวลหิน ทำให้เกิดแนวคิดที่จะนำเอาดินตะกอนประปาผสมกับเกลือหินบดมาเป็นวัสดุถมกลับในช่องเหมือง ซึ่งการออกแบบการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะต้องพิจารณาถึงอัตราส่วนผสมของดินตะกอนประปาและเกลือหินบดที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการเป็นวัสดุถมกลับ กล่าวคือ การทดสอบในห้องปฏิบัติการเป็นการศึกษาพฤติกรรมของเกลือหินบดและดินตะกอนประปาในสภาวะใกล้เคียงกับสภาวะจริงในช่องเหมืองใต้ดินที่มีความเค้นกดและระยะเวลาที่แตกต่างกัน โดยจะพิจารณาทั้งในด้านกลศาสตร์และด้านชลศาสตร์ การทดสอบประกอบด้วย การทดสอบการอัดตัว (Consolidation testing) และการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว (Uniaxial compressive strength testing) ภายใต้การผันแปรความเค้นกดและระยะเวลาในการกดอัด จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าระยะเวลาในการอัดตัวมีผลต่อค่าความแข็งของเกลือหินบด ดังนั้น ในการทดสอบส่วนผสมดินตะกอนประปาและเกลือหินบดจึงต้องพิจารณาระยะเวลาในการบดอัดตัวเพื่อหาระยะเวลาที่ใช้ในการอัดตัวของส่วนผสมที่จะทำให้มีค่าความแข็งสูงสุด การทดสอบการอัดตัวได้มีการผันแปรความเค้นกดและระยะเวลาในการทดสอบ โดยระหว่างการทดสอบมีการตรวจวัดค่าความซึมผ่านทุกๆ 4-6 ชั่วโมง เมื่อครบระยะเวลาตัวอย่างจะถูกนำไปประเมินคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ (การทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว) และนำค่าที่ได้จากการทดสอบทั้ง 2 การทดสอบมาสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ กลศาสตร์ และคุณสมบัติเชิงกายภาพของส่วนผสมที่สัมพันธ์กับความเค้นและเวลา หลังจากนั้นจึงนำผลจากห้องปฏิบัติการมาประเมินศักยภาพของส่วนผสมดังกล่าวในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยพิจารณาศักยภาพของส่วนผสมในการช่วยลดการทรุดตัวของผิวดิน และการบวมตัวของเสาค้ำยัน ผลสำเร็จของการวิจัยนี้ คือ สามารถระบุได้ว่าปัจจัยใดที่มีผลต่อคุณสมบัติของส่วนผสมดินตะกอนประปาและเกลือหินบดมากที่สุด และสามารถจัดเตรียมอัตราส่วนผสมให้มีคุณสมบัติที่ดีสำหรับเป็นวัสดุ

ถมกลับเพื่อนำไปใช้งานได้อย่างเป็นรูปธรรม และสามารถใช้ประโยชน์จากดินตะกอนประปาได้ในเชิง
ประจักษ์

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยแบ่งออกเป็น 8 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบคุณสมบัติ
เชิงกลศาสตร์และเชิงพลศาสตร์ของเกล็ดเกลือและดินตะกอนประปาที่นำมาใช้เป็นวัสดุถมกลับในเมือง
เกลือและเหมืองโปแตซใต้ดินภายใต้การผันแปรความเค็มกดและระยะเวลาในด้านของค่าความหนาแน่น
ค่าความชื้นผ่าน ค่าการเคลื่อนตัว ค่าความแข็ง และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเกล็ดเกลือ

ขั้นตอนที่ 2 การเก็บและจัดเตรียมตัวอย่างดิน

ตัวอย่างเกล็ดเกลือที่ใช้ในการวิจัยนี้คือเกลือหินจากหมวดหินมหาสารคาม การเตรียมตัวอย่าง
ดำเนินการโดยนำแท่งเกลือหินที่ได้จากหลุมเจาะไปบดด้วยเครื่องบดหินให้มีขนาดคละกันระหว่าง 0.075 ถึง
4.75 mm สำหรับดินตะกอนประปาจะถูกนำมาตากให้แห้งและบดให้มีขนาด 0.075 mm โดยจะมีการผัน
แปรความชื้นของดินตะกอนประปา 4 ระดับ คือ 2.5, 5, 7.5 และ 10% โดยน้ำหนัก สำหรับหาปริมาณ
น้ำเกลือที่เหมาะสมที่ให้ค่าความหนาแน่นสูงสุด โดยระดับความชื้นดังกล่าวจะแตกต่างจากแบบเสนอ
โครงการวิจัย ที่ได้เสนอไว้ 3 ระดับ คือ 5, 10 และ 15% ทั้งนี้เพื่อให้ผลการทดสอบมีความครอบคลุมและ
ละเอียดมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังผันแปรอัตราส่วนของดินตะกอนประปาที่ใช้ในการผสมกับเกล็ดเกลือที่มี
อัตราส่วนร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100% โดยน้ำหนัก เพื่อใช้ในการทดสอบหาส่วนผสมที่มีความแข็งแรง
แต่มีค่าความชื้นผ่านต่ำสุดที่เหมาะสมจะใช้เป็นวัสดุถมกลับในช่องเหมือง และส่วนผสมที่ได้จะนำไปทดสอบ
ในขั้นตอนต่อไป

ขั้นตอนที่ 3 การประดิษฐ์กระบอกสำหรับการทดสอบการอัดตัว

กระบอกสำหรับใช้บรรจุและทดสอบการอัดตัวของตัวอย่างเกล็ดเกลือผสมดินตะกอน
ประปาทำจากสแตนเลสเพื่อป้องกันการผุกร่อนหรือเสื่อมสภาพเนื่องจากการทำปฏิกิริยากับเกลือ โดยมี
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของกระบอกตัวอย่างเท่ากับ 54 mm ยาวเท่ากับ 200 mm และหนา
เท่ากับ 10 mm โดยขนาดดังกล่าวเป็นขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงกดใน
แกนเดียว หลังจากกระบวนการทดสอบการอัดตัวได้เสร็จสิ้น ส่วนด้านหัวและท้ายของกระบอกทดสอบ
จะมีกระบอกปิดทำหน้าที่ส่งแรงกดให้กับตัวอย่างเกล็ดเกลือผสมดินตะกอนประปาที่มีขนาด
เส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 53 mm และมีรูไว้สำหรับระบายน้ำเกลือออกจากตัวอย่างด้วย

ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบในห้องปฏิบัติการมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของตัวอย่างเกล็ดเกลือผสมดินตะกอนประปาในเชิงกลศาสตร์และเชิงพลศาสตร์ ซึ่งการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 การทดสอบ คือ

1) การทดสอบการอัดตัว ดำเนินการหลังจากการเตรียมตัวอย่างเกล็ดเกลือผสมดินตะกอนประปาใส่ในกระบอกทดสอบแล้ว โดยการทดสอบได้ให้แรงความเค้นกดจากด้านบนกระบอกด้วยปั๊มไฮดรอลิกผ่านกระบอกปิดด้านบน ผันแปรจาก 2.5, 5 และ 7.5 MPa ภายใต้อุณหภูมิห้อง และทำการผันแปรระยะเวลาในการทดสอบเท่ากับ 2, 7, 15 และ 30 วัน ระหว่างการทดสอบได้ตรวจวัดการเคลื่อนตัวในแนวแกนด้วยมาตรวัดการเคลื่อนตัวเพื่อนำค่าที่วัดได้ไปใช้ในการคำนวณค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกน (ϵ_{axial}) และค่าความหนาแน่น (ρ) ระหว่างการทดสอบได้ทำการตรวจวัดค่าความชื้นผ่านทุกๆ 6 ชั่วโมง โดยวัดจากค่าการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ระดับ 10 psi เมื่อทำการทดสอบเสร็จสิ้นจึงนำเกล็ดเกลือผสมดินตะกอนประปาในแท่งกระบอกออกเพื่อนำมาตัดให้มีขนาดที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวต่อไป

2) การทดสอบกำลังกดในแกนเดียว ดำเนินการหลังจากทำการทดสอบการอัดตัวเสร็จสิ้นตามระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งการทดสอบนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติค่าความแข็งของตัวอย่างที่สามารถรับแรงได้จริง โดยการทดสอบจะใช้อัตราการใช้แรงกดเท่ากับ 0.5 ถึง 1 MPa/s จนกระทั่งตัวอย่างเกล็ดเกลือผสมดินตะกอนประปาเกิดการแตก ระหว่างการทดสอบได้ทำการวัดค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งและการเคลื่อนตัวในแนวนอนเพื่อนำค่าดังกล่าวไปคำนวณหาค่าความยืดหยุ่นโมดูลัส และค่าอัตราส่วนปัวซอง

ขั้นตอนที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบและสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์

นำผลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติเกล็ดเกลือผสมดินตะกอนประปาในขั้นตอนที่ 4 มาวิเคราะห์สร้างความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัว ความหนาแน่น การลดลงของช่องว่าง ความแข็งของหิน ความยืดหยุ่นโมดูลัส และอัตราส่วนปัวซองในเชิงเวลาและความเค้นกดที่ระดับต่างๆ ว่าค่าที่ได้มีความสัมพันธ์กันอย่างไร จากนั้นจึงทำการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์เชิงพลศาสตร์ และเชิงกายภาพของเกล็ดเกลือผสมดินตะกอนประปาที่สัมพันธ์กับความเค้นและเวลา

ขั้นตอนที่ 6 การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

นำข้อมูลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการมาสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้ลักษณะทางธรณีวิทยาจากข้อมูลจริง เพื่อประเมินศักยภาพของเกลือเคลื่อนที่ผสมดินตะกอนประปาเมื่อนำไปถมกลับในช่องเหมืองและทำการเปรียบเทียบการทรุดตัวของผิวดินระหว่างช่องเหมืองที่ไม่มีการถมกลับและช่องเหมืองที่มีการถมกลับด้วยเกลือเคลื่อนที่ผสมดินตะกอนประปา

ขั้นตอนที่ 7 การถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่กลุ่มเป้าหมาย

ผลงานวิจัยได้นำไปเผยแพร่องค์ความรู้ในรูปของบทความในการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการและวารสารทางวิชาการในระดับนานาชาติ

ขั้นตอนที่ 8 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิด ขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุปได้นำเสนอโดยละเอียดในรายงานฉบับสมบูรณ์ เพื่อที่จะส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้มีประโยชน์อย่างมากกับงานด้านวิศวกรรมธรณี วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และวิศวกรรมเหมืองแร่ที่เกี่ยวข้องกับการปิดและการฟื้นฟูเหมืองหลังจากเสร็จสิ้นการทำเหมืองแร่ใต้ดิน เพื่อป้องกันการทรุดตัวของผิวดินจากการทำเหมืองใต้ดิน ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

1.6.1 เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป

เพื่อเป็นองค์ความรู้ริเริ่มและสร้างสรรค์ในการพัฒนาเครื่องมือทดสอบและศึกษาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และเชิงพลศาสตร์ของเกลือเคลื่อนที่ผสมกับดินตะกอนประปาเพื่อใช้เป็นวัสดุถมกลับในเหมืองเกลือหินและโปแตสใต้ดิน

1.6.2 บริการความรู้แก่ประชาชนและหน่วยงานราชการ

การเผยแพร่ความรู้ในการประชุมวิชาการระดับชาติและการตีพิมพ์เอกสารการประชุมในหัวข้อที่เกี่ยวข้องจะเป็นประโยชน์ต่อหน่วยงานและชุมชนในพื้นที่ อาทิ กรมชลประทาน กรมทรัพยากรน้ำบาดาล กรมทรัพยากรธรณีและสิ่งแวดล้อม กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมเหมืองแร่ และวิศวกรรมธรณี เป็นต้น

1.6.3 บริการความรู้แก่ภาคธุรกิจ

เป็นการให้ความรู้แก่ผู้ประกอบการเหมืองใต้ดินเพื่อให้เข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการเกิดและวิธีป้องกันการเกิดแผ่นดินทรุด

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กิจกรรมเบื้องต้นในงานวิจัยนี้คือการทบทวนวรรณกรรมวิจัย งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เกล็ดเกลือเป็นวัสดุถมกลับหรือเป็นวัสดุอุดในเหมืองเกลือใต้ดินนั้นยังมีการศึกษาค่อนข้างน้อยทั้งในประเทศและต่างประเทศ ซึ่งส่วนใหญ่การศึกษาในต่างประเทศได้เน้นการศึกษาเกี่ยวกับเทคโนโลยีการกักเก็บหรือการทิ้งกากของเสียอันตรายที่ไม่สามารถบำบัดได้จากภาคอุตสาหกรรมไว้ในเหมืองเกลือใต้ดิน (Compaction) (Case and Kelsall, 1987; Brodsky et al., 1995; Ran and Daemen, 1995) และการนำเกล็ดเกลือมาใช้เป็นวัสดุถมกลับเพียงอย่างเดียวนั้นยังมีข้อเสีย คือ มีการยุบตัวของเกล็ดเกลือค่อนข้างมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นไปที่การออกแบบส่วนผสมระหว่างเกล็ดเกลือผสมดินตะกอนประปาเพื่อลดการยุบตัวเมื่อนำไปใช้เป็นวัสดุถมกลับ และศึกษาผลกระทบจากปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการอัดตัว ได้แก่ อัตราส่วนของส่วนผสมดังกล่าว ค่าความชื้น ความเค้นกดบนตัวอย่าง และระยะเวลาในการอัดตัว

2.1 ทฤษฎีและกฎเกณฑ์ที่ใช้ในปัจจุบัน

Case and Kelsall (1987) ศึกษาศักยภาพของเกลือหินบดสำหรับใช้เป็นวัสดุถมกลับ (Backfill) และวัสดุอุด (Seal material) ซึ่งได้มีการทดสอบการอัดตัว (Consolidation test) ของเกลือหินบดในห้องปฏิบัติการ โดยจุดประสงค์ของการศึกษาเพื่อให้เข้าใจถึงกระบวนการการอัดตัวของตัวอย่างว่ามีผลต่อค่าความซึมผ่าน ความพรุน และอัตราการเกิดความเครียดอย่างไร ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้มาจากโครงการทิ้งกากนิวเคลียร์ Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) และเหมือง Avery Island mine การทดสอบใช้ระยะเวลา 1 ถึง 2 เดือน เม็ดเกลือมีขนาดตั้งแต่ 1 ถึง 20 mm มีค่าความพรุนเริ่มต้นอยู่ระหว่าง 26% ถึง 36% ตัวอย่างที่จัดเตรียมมีความชื้นเท่ากับ 0% และ 2% โดยน้ำหนัก ค่าความซึมผ่านเริ่มต้นที่วัดได้มีค่าระหว่าง 103 ถึง 105 md การทดสอบดำเนินการภายใต้อุณหภูมิห้อง โดยให้ความดันล้อมรอบแก่ตัวอย่างอยู่ระหว่าง 0.34 ถึง 17 MPa การทดสอบนี้มุ่งเน้นไปที่ผลกระทบจากความชื้นต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความซึมผ่าน ความพรุน และอัตราการเกิดความเครียดเชิงปริมาตรของตัวอย่าง ผลการทดสอบตัวอย่างที่มีค่าความชื้น (2%) ระบุว่า ตัวอย่างมีค่าความซึมผ่านลดลงเหลือ 10^{-5} md และความพรุนลดลงเหลือ 5% ภายหลังระยะเวลาหนึ่งเดือน อัตราการอัดตัวของตัวอย่างที่มีความชื้น 2% จะมีค่ามากกว่าตัวอย่างแห้ง และอัตราการเกิดความเครียดเชิงปริมาตรเปลี่ยนแปลงจาก 10^{-8} เป็น 10^{-6} ต่อวินาที ซึ่งไม่มีแนวโน้มเข้าสู่ช่วงการเกิดอัตราความเครียดคงที่ (Steady state) ในช่วง 2 เดือน ที่ทำการทดสอบ

Butcher (1991) ทดสอบคุณสมบัติของวัสดุถมกลับ 2 ชนิด คือ เกลือหินบริสุทธิ์ และ เกลือหินผสมกับเบนทอไนต์ (เกลือ 70% และเบนทอไนต์ 30% โดยน้ำหนัก) เพื่อใช้ในโครงการ Waste Isolation Pilot Plant ซึ่งเป็นโครงการทิ้งกากนิวเคลียร์ในเหมืองเกลือใต้ดินที่ประเทศตุรกี ตัวอย่างทั้งสองชนิดได้ถูกทดสอบกักอัดจนกระทั่งมีค่าความซึมผ่านต่ำกว่า 10^{-18} m^2 ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของรัฐบาล ข้อเสนอแนะว่าเกลือหินผสมเบนทอไนต์จะมีประสิทธิภาพดีกว่าเกลือหินบดเพียงอย่างเดียว โดยการผสมเบนทอไนต์ในเกลือหินบดมีข้อดีคือ เบนทอไนต์มีความสามารถในการดูดซับน้ำเกลือและสารกัมมันตภาพรังสี

Pudewills and Krauss (1999) ศึกษาพฤติกรรมทางอุณหกลศาสตร์ (Thermomechanical) ของเกลือหินบดด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม ADINA เกลือหินบดถูกสมมติให้มีพฤติกรรมยืดหยุ่นแบบพลาสติก (Viscoplastic) โดยแสดงในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งมีการพิจารณาทั้งอัตราการเกิดความเครียดเชิงปริมาตร (Volumetric strain) และอัตราการเกิดความเครียดเบี่ยงเบน (Deviatoric strain rate) บนตัวอย่างภายใต้สภาวะที่มีความเค้นเท่ากันทุกทิศทาง (Hydrostatic stress) และสภาวะที่เกิดความเค้นเฉือน สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้เสนอโดย Hein (1991) ดังต่อไปนี้

$$\dot{\epsilon}_{ij} = A \cdot \exp^{-Q/RT} \cdot (h_1 \cdot p^2 + h_2 \cdot q^2)^n \cdot \left(\frac{1}{3} h_1 \cdot p \cdot I + h_2 S_{ij}\right) \quad (2.1)$$

$$h_1 = \frac{a}{\left[\left(\frac{\eta_0}{\eta}\right)^c - 1\right] / \eta_0^c + d} \cdot m \quad (2.2)$$

$$h_2 \eta = b \cdot h_1 \eta + 1 \quad (2.3)$$

- เมื่อ
- $\dot{\epsilon}_{ij}$ คือ ความเครียดหลักที่เกิดขึ้น
 - η คือ ความพหุน
 - η_0 คือ ความพหุนเริ่มต้น
 - T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์
 - p คือ ค่าความเค้นตั้งฉากเฉลี่ย
 - I คือ หน่วย Tensor ของเมตริก
 - Q คือ พลังงานกระตุ้น
 - R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส
 - q คือ ค่าความไม่ผันแปรของความเค้น
 - S_{ij} คือ Tensor ของความเค้นเบี่ยงเบน

A, a, b, c, d, m, n คือ ค่าคงที่ของสมการ

Q/R คือ ค่าคงที่เท่ากับ 6520 K^{-1}

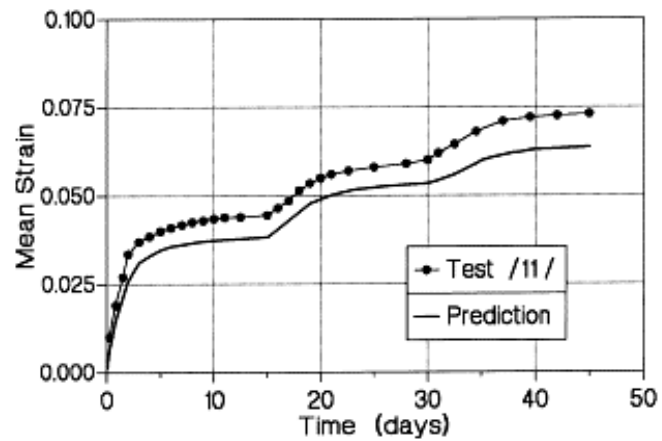
จากการทดสอบการอัดตัว (Odometer test) ด้วยอัตราการเกิดความเครียด $6.9 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ ให้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และผลการจำลองการอัดตัวแบบเพิ่มความเค้นเป็น 3 ระดับ ระดับละ 15 วัน โดยการเทียบค่าความเครียดเฉลี่ยและค่าความพรุนที่เปลี่ยนไป ผลที่ได้จากการจำลองและการทดสอบพบว่ามีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี โดยที่ผลการจำลองจะให้ค่าที่ต่ำกว่าเล็กน้อย (รูปที่ 2.1)

2.2 การทดสอบการบดอัด (Compaction Test)

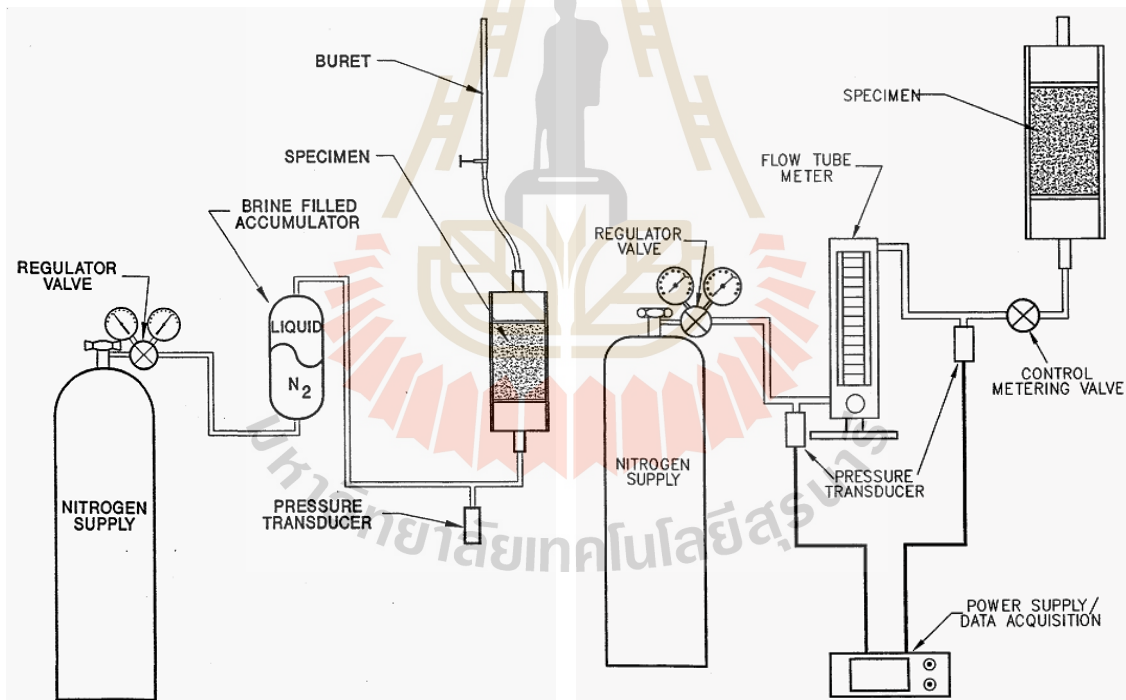
Somtong et al. (2013) ศึกษาและทดสอบการอัดตัวของเกลือหินขนาด 0.075 ถึง 4.75 mm โดยผันแปรความเค้นแนวแกนที่ 2.5, 5, 7.5 และ 10 MPa และผันแปรระยะเวลาการอัดตัวที่ 3, 5, 7, 10, 15 วัน ระหว่างการทดสอบได้วัดค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกน และวัดค่าความซึมผ่านโดยวัดอัตราการไหลด้วยแก๊สไนโตรเจน หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว ผลการทดสอบระบุว่า ค่าความซึมผ่านมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาและค่าความเค้นในการอัดตัวเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นและค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาและความเค้นในการอัดตัวเพิ่มขึ้น และค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียรมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นในการอัดตัวเพิ่มขึ้น

Mellegard et al. (1999) ได้ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และค่าความซึมผ่านตัวอย่างเกลือหินบดหลังจากทำการบดอัดด้วยการกระแทกด้วยตุ้มน้ำหนักเพื่อหาความหนาแน่นของตัวอย่างที่ ขึ้นกับพลังงานที่ใช้ในการบดอัด และนำตัวอย่างไปทดสอบด้วยอัตราความเครียดคงที่และวัดค่าความซึมผ่านของตัวอย่างด้วยแก๊สและด้วยน้ำเกลือเข้มข้น (รูปที่ 2.2) นอกจากนี้ยังทดสอบการอัดตัวภายใต้แรงกดในสามแกนเพื่อศึกษาพฤติกรรมในเชิงเวลาด้วย ผลดังกล่าวได้นำไปสอบเทียบหาค่าตัวแปรในสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีผู้พัฒนาไว้แล้ว จากการศึกษพบว่าภายใต้การบดอัดที่ใช้ระยะตกของตุ้มน้ำหนักมาก (พลังงานสูง) จะทำให้ได้ความหนาแน่นของตัวอย่างสูง และค่าความซึมผ่านมีค่าลดลงเมื่อความหนาแน่นของเกลือหินบดเพิ่มขึ้น ซึ่งหมายความว่าช่องว่างลดลงและมีการเชื่อมต่อกัน ระหว่างช่องว่างน้อยลง

Ran and Daemen (1995) ศึกษาผลกระทบของขนาดและการกระจายขนาดของเกลือหินและความชื้นต่อความสามารถในการบดอัด (Compaction) การศึกษาได้เสนอสมการเพื่อใช้คำนวณความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density) เมื่อมีส่วนผสมระหว่างเกลือเม็ดเล็กและเกลือเม็ดใหญ่ ผลเบื้องต้นระบุว่า การบดอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคของเม็ดเกลือใหญ่ขึ้น โดยพลังงานการบดอัดจะสูงขึ้น เมื่อมีการผันแปรการกระจายขนาดของเม็ดเกลือ และมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำสูงสุดถึง 5% อย่างไรก็ตามการบดอัดจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมากขึ้น (รูปที่ 2.3)



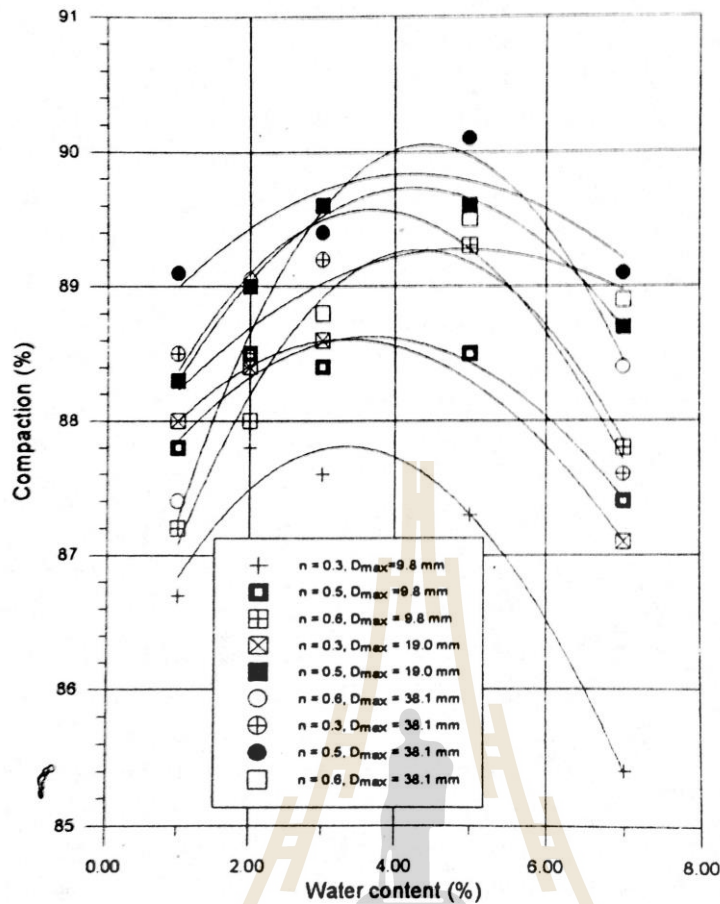
รูปที่ 2.1 การเปรียบเทียบความเครียดเฉลี่ยระหว่างผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการกับการคาดคะเนเชิงตัวเลข (Pudewills and Krauss, 1999)



(ก) การวัดค่าความซึมผ่านโดยใช้แก๊ส

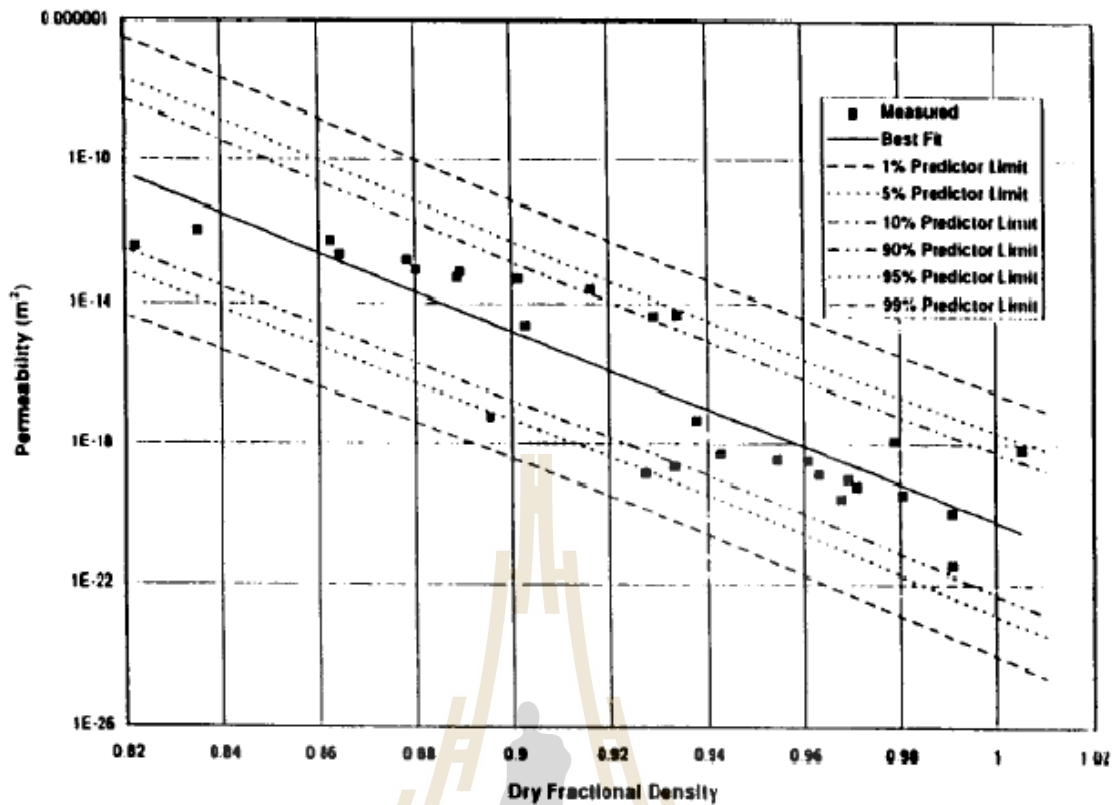
(ข) การวัดค่าความซึมผ่านโดยใช้น้ำเกลือ

รูปที่ 2.2 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับวัดค่าความซึมผ่านของตัวอย่างโดยวิธีการใช้แก๊ส (ก) และการใช้น้ำเกลือ (ข) (Mellegard et al., 1999)



รูปที่ 2.3 ค่าการบดอัดในฟังก์ชันของปริมาณน้ำและการกระจายขนาดของเม็ดเกลือ (Ran and Daemen, 1995)

Loken and Statham (1997) ได้นำเสนอการใช้เกลือหินบดเป็นวัสดุอุดของเสียของ Waste Isolation Pilot Plant ในประเทศเม็กซิโก โดยเกลือหินบดจะต้องมีความหนาแน่นประมาณ 90% ของความหนาแน่นสมบูรณ์ของเกลือหินดั้งเดิม เกลือหินบดจะมีพฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลา เมื่อเวลาผ่านไปจะช่วยลดค่าความชื้นผ่านของเกลือหินบดจากตอนเริ่มต้นและมีประสิทธิภาพในระยะยาวในการอุด รูปแบบโครงสร้างและรูปแบบการไหลของของเหลวถูกนำมาประเมินการอัดตัวของเกลือหินบดในฟังก์ชันของความลึก เวลา และความพรุน ผลการทดสอบระบุว่าค่าความชื้นผ่านมีค่าลดลงเมื่อค่าความหนาแน่นของเกลือหินบดมีค่าเพิ่มขึ้น (รูปที่ 2.4) นอกจากนี้ค่าความหนาแน่นยังมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการอัดตัวเพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นผ่านและค่าความหนาแน่นสามารถอธิบายได้ด้วยสมการเชิงเส้นตรง



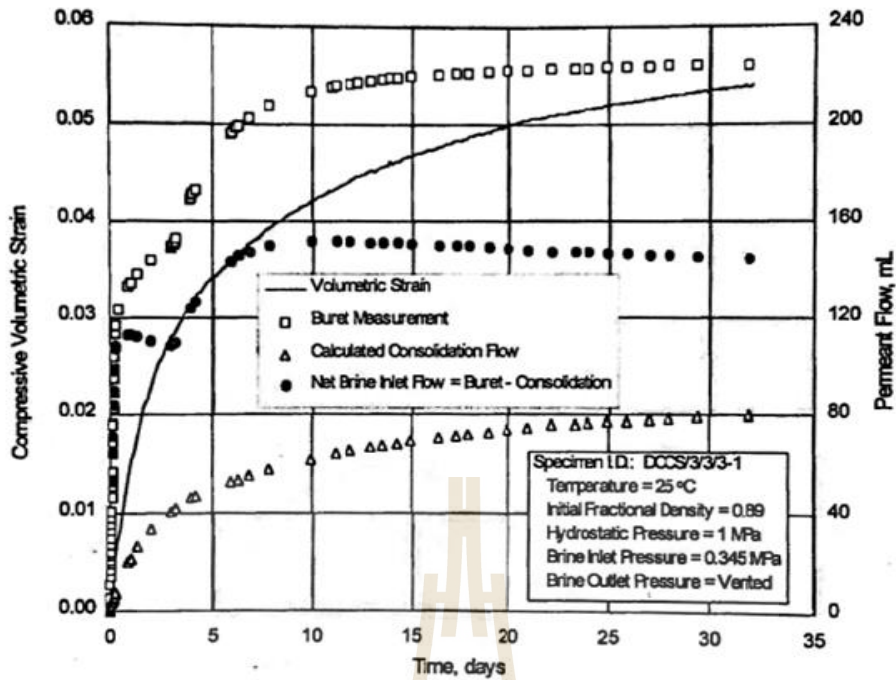
รูปที่ 2.4 เปรียบเทียบค่าความซึมผ่านในฟังก์ชันของค่าความหนาแน่นแห้งระหว่างผลการทดสอบและการคาดคะเนย้อนกลับของเกลื้อหินบด (Loken and Statham, 1997)

$$\log(k) = m\rho + b \quad (2.4)$$

เมื่อ k คือ ค่าความซึมผ่าน (m²)
 ρ คือ ค่าความหนาแน่นที่ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของหินดั้งเดิม (2,160 kg/m³)
 m, b คือ ค่าคงที่

โดยค่าความซึมผ่านจะมีค่าลดลงถึง 3.3×10^{-20} m² ใน 100 ปี ซึ่งเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้ในระยะยาว

Hansen and Mellegard (1999) ศึกษาการบดอัดเกลื้อหินบดแบบไดนามิกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 100 mm และยาวเท่ากับ 200 mm วัสดุในการทดสอบมีความชื้นเท่ากับ 1.6% โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบระบุว่าค่าความซึมผ่านมีค่าลดลงเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น รูปที่ 2.5 แสดงความเครียดเฉลี่ยและการไหลของน้ำเกลื้อในฟังก์ชันของเวลา



รูปที่ 2.5 ความเครียดเฉลี่ยและการไหลของน้ำเกลือในฟังก์ชันของเวลา (Hansen and Mellegard, 1999)

2.3 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (Numerical model)

Wagner et al. (1990) นำเสนอการคำนวณเชิงตัวเลขของพฤติกรรมเกลือหินบดผสมกับเบนทอนิต์ที่ใช้เป็นวัสดุอุดในเหมือง และศึกษาพฤติกรรมการคืบบริเวณรอบๆ เกลือหิน โดยแบบจำลองการอัดตัวของวัสดุกลับถูกพัฒนาด้วยโปรแกรม SPECTROM-32 Finite element ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวประกอบด้วย ความยืดหยุ่นไม่เชิงเส้น (Nonlinear elastic) และพารามิเตอร์ของการคืบ การพัฒนาสมการการคืบของการอัดตัวจะใช้โปรแกรม SPECTROM-32 ในการพิจารณา ซึ่งโดยทั่วไปจะมีรูปแบบการใช้งานที่เฉพาะเจาะจงของสมการความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากห้องปฏิบัติการ โดยตัวแปรที่ได้รับการสันนิษฐาน คือ ค่าเฉลี่ยปริมาณความเครียดที่ไม่ยืดหยุ่น ($\dot{\epsilon}_{eq1}^c$) และค่าเฉลี่ยความเครียดเฉือนที่ไม่ยืดหยุ่น ($\dot{\epsilon}_{eq2}^c$)

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

$$\dot{\epsilon}_{eq1}^c = \dot{\epsilon}_v^c \cdot \sigma_m \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_V^C = \frac{(1 + \varepsilon_V)^2}{P_0} B_0 (1 - e^{-b_1 \sigma_m}) \cdot e^{1 + \varepsilon_V} \frac{A p_0}{P_0} \quad (2.7)$$

เมื่อ $\varepsilon_V = \varepsilon_{kk}$ คือ ความเครียดเชิงปริมาตรโดยรวม
 $\varepsilon_V^C = \varepsilon_{kk}^C$ คือ ความเครียดแบบคืบเชิงปริมาตร
 $\sigma_m = \varepsilon_{kk}/3$ คือ ความเค้นเฉลี่ย
 $p_0 = 8$ คือ ความหนาแน่นเริ่มต้น และ
 B_0, B_1, A คือ ค่าคงที่ของวัสดุ

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

2.4 การศึกษาและทดสอบดินตะกอนประปาในประเทศไทย

Wetchasat and Fuenkajorn (2013) ได้ทำการประเมินศักยภาพเชิงกลศาสตร์และเชิงชลศาสตร์ของดินตะกอนประปาผสมกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ในห้องปฏิบัติการเพื่อลดค่าความซึมผ่านของรอยแตกในหิน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เป็นวัสดุทดแทนดินเบนทอไนต์ ซึ่งดินเบนทอไนต์ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายสำหรับเป็นองค์ประกอบของวัสดุอุดรอยแตกของหิน รอยแตกที่ใช้ในการทดสอบได้ถูกทำขึ้นในห้องปฏิบัติการ ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงเคมีระบุว่าดินตะกอนประปาสามารถจำแนกเป็น Elastic silt โดยมีขนาดเม็ดดินกว่าร้อยละ 90 เล็กกว่า 0.075 mm การศึกษาได้มุ่งเน้นไปที่การหาส่วนผสมเหลวของดินตะกอนประปาที่มีความหนืดน้อยที่สุด แต่ในขณะเดียวกันก็ให้ค่ากำลังกดสูงพอสมควรหลังจากแข็งตัว ผลการศึกษาระบุว่าสัดส่วนของส่วนผสมระหว่างดินตะกอนประปากับซีเมนต์ที่เหมาะสมในเชิงวิศวกรรมคือ 1:10, 3:10 และ 5:10 และสำหรับดินเบนทอไนต์กับซีเมนต์คือ 1:10, 2:10 และ 3:10 โดยทุกส่วนผสมมีอัตราส่วนระหว่างน้ำกับซีเมนต์เท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก สัดส่วนของดินตะกอนประปาเหล่านี้จะให้ค่าความหนืดของส่วนผสมน้อยที่สุดเท่ากับ 5 Pa·s และให้ค่ากำลังกดสูงสุดสำหรับดินตะกอนประปาต่อซีเมนต์เท่ากับ 3:10 โดยมีค่ากำลังกดและสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 1.77 และ 224 MPa ตามลำดับ ซึ่งจะใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากส่วนผสมของเบนทอไนต์กับซีเมนต์ ผลการทดสอบค่ากำลังเฉือนแบบตรงระบุว่า กำลังรับแรงเฉือนที่ผิวรอยต่อระหว่างวัสดุอุดกับหินมีค่าผันแปรจาก 0.36 ถึง 0.90 MPa ภายใต้ความเค้นกดระหว่าง 0.25 ถึง

1.25 MPa ความซึมผ่านของวัสดุอุดที่แข็งตัวถูกวัดภายใต้ระดับน้ำที่คงที่ มีค่าผันแปรจาก 10^{-17} ถึง 10^{-15} m² และจะลดลงอย่างต่อเนื่องในขณะที่มีระยะเวลาการบ่มตัวเพิ่มขึ้น ส่วนผสมที่มีดินตะกอนต่อซีเมนต์ 5:10 โดยน้ำหนักจะให้ค่าความซึมผ่านต่ำที่สุด ความซึมผ่านของส่วนผสมที่ถูกอัดอยู่ในช่องรอยแตกที่มีการเปิดเผยเท่ากับ 0.2, 1.0 และ 2.0 cm จากการทดสอบด้วยวิธีการไหลในแนวรัศมีในรอยแตกจะมีค่าอยู่ในช่วง 10^{-8} ถึง 10^{-7} m/s จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าส่วนผสมระหว่างดินตะกอนประปรากับซีเมนต์มีคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และเชิงพลศาสตร์ที่ดัดเทียมกับส่วนผสมระหว่างดินเบนทอไนต์กับซีเมนต์ ซึ่งระบุว่าดินตะกอนประปรายสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนที่เหมาะสมเพื่อผสมกับซีเมนต์และทำให้ได้มาซึ่งวัสดุอุดรอยแตกของหินที่มีประสิทธิภาพ การนำดินตะกอนประปรายมาประยุกต์ใช้ในลักษณะนี้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดดินตะกอนประปราย และลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการก่อสร้างพื้นที่ฝังกลบเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่นำดินตะกอนประปรายมาใช้ประโยชน์

Sangiumsak and Cheerarot (2008) ได้ศึกษาคุณสมบัติของมวลรวมประติษฐ์ที่ทำจากตะกอนน้ำประปรายจากโรงงานผลิตน้ำประปรายบางเขน โดยนำมาผสมกับดินเหนียวในอัตราส่วน 100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80 และ 0:100 โดยน้ำหนัก แล้วนำไปขึ้นรูปและเผาที่อุณหภูมิ 800, 1,000 และ 1,200°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาทดสอบกำลังอัดของมวลรวม ทดสอบความต้านทานการสึกกร่อน ทดสอบความคงตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และการดูดซึมน้ำ จากนั้นนำมวลรวมประติษฐ์ไปใช้เป็นมวลรวมหยาบในคอนกรีตและทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน โดยนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม ซึ่งใช้หินธรรมชาติเป็นมวลรวมหยาบ ผลจากการศึกษาพบว่ากำลังอัดของมวลรวมประติษฐ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณตะกอนและอุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้น มวลรวมประติษฐ์ที่มีอัตราส่วนระหว่างตะกอนต่อดินเหนียวเท่ากับ 60:40 เผาที่อุณหภูมิ 1,200°C มีค่ากำลังอัดสูงสุดที่ 490 kg/cm² เมื่อปริมาณตะกอนเพิ่มขึ้นทำให้มวลรวมประติษฐ์มีการดูดซึมน้ำ ความต้านทานการสึกกร่อนและความคงตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตลดลง ส่งผลให้คอนกรีตที่ผสมมวลรวมประติษฐ์ที่ทำจากดินตะกอนประปรายทุกอัตราส่วนมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้หินธรรมชาติทุกอายุการทดสอบ

Laothong (2003) ได้นำดินตะกอนที่เกิดจากกระบวนการปรับคุณภาพน้ำของโรงไฟฟ้าวังน้อยซึ่งเป็นของเสียที่ไม่เป็นอันตราย มีปริมาณเดือนละ 300 ตัน และมีค่าใช้จ่ายในการกำจัดเป็นเงิน 460,000 บาทต่อเดือน ซึ่งคิดค่าใช้จ่ายในการกำจัดทั้งเป็นเงิน 2.48 บาทต่อกิโลกรัม การนำดินตะกอนมาใช้ประโยชน์จะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่ดินตะกอน เท่ากับเป็นการลดค่าใช้จ่ายของโรงไฟฟ้า จากผลวิเคราะห์เบื้องต้นพบว่า ดินตะกอนมีคุณสมบัติเป็นดินทรายร่วน จึงได้นำมาใช้ประโยชน์ 4 ทางเลือก คือ การใช้ตะกอนดินแทนที่ซีเมนต์ในรูปซีเมนต์มอร์ตาร์ ใช้แทนที่ดินลูกรังในรูปบล็อกประสานดินซีเมนต์ ใช้แทนที่ดินเหนียวในรูปอิฐมวลฉนวน และใช้ทำเครื่องปั้นดินเผา

จากการศึกษาพบว่าทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดคือ การแทนที่ดินลูกรังในรูปบล็อกประสานดินซีเมนต์โดยใช้สัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อดินตะกอนต่อดินลูกรัง เท่ากับ 2:2:5 โดยน้ำหนัก ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีกำลังต้านแรงอัด 82.14 kg/cm^2 ที่อายุการบ่ม 28 วัน ซึ่งสูงกว่ามาตรฐานอุตสาหกรรมกำหนดไว้คือ 70 kg/cm^2 ค่าใช้จ่ายในการผลิตบล็อกประสานซีเมนต์ที่มีดินตะกอนผสมอยู่ประมาณ 1 กิโลกรัม ราคาก้อนละ 3.83 บาท มากกว่าค่าจ้างเหมากำจัดดินตะกอน 1 กิโลกรัม เป็นเงิน 1.35 บาท แต่มีราคาขายในท้องตลาดก้อนละ 6-8 บาท นับว่าการนำดินตะกอนไปใช้ผลิตบล็อกประสานดินซีเมนต์ จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ



บทที่ 3

การจัดเตรียมตัวอย่าง

3.1 การจัดเตรียมตัวอย่าง

ดินตะกอนประปาได้รับความอนุเคราะห์จากการประปานครหลวง เขตบางเขน กรุงเทพฯ ซึ่งถูกกำจัดความชื้นด้วยวิธีการตากแดดและอบด้วยอุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนกว่าความชื้นจะมีค่าคงที่ (รูปที่ 3.1) จากนั้นนำมาบดด้วยเครื่องบดละเอียดให้มีขนาด 0.075 mm (รูปที่ 3.2) คุณสมบัติเบื้องต้นสามารถจำแนกได้ดังนี้ ค่าขีดจำกัดความชื้นเหลว 59% ค่าขีดจำกัดพลาสติก 31% ค่าดัชนีพลาสติก 28% และค่าความถ่วงจำเพาะ 2.56 โดยเมื่อจำแนกประเภทของดินตะกอนตามระบบ Unified soil classification พบว่าเป็นจำพวกตะกอนเม็ดละเอียด

ตัวอย่างเกล็ดเกลือที่ใช้ในการวิจัยนี้คือเกลือหินจากหมวดหินมหาสารคาม การเตรียมตัวอย่างดำเนินการโดยนำแท่งเกลือหินที่ได้จากหลุมเจาะไปบดด้วยเครื่องบดหิน (รูปที่ 3.3) ให้มีขนาดระหว่าง 0.075 ถึง 4.75 mm (รูปที่ 3.4) ขนาดของดินตะกอนประปาและเกล็ดเกลือแสดงในรูปที่ 3.5

การทดสอบได้มีการผันแปรความชื้นของดินตะกอนประปา 4 ระดับ คือ 2.5, 5, 7.5 และ 10% โดยน้ำหนัก สำหรับหาปริมาณน้ำเกลือที่เหมาะสมที่ให้ค่าความหนาแน่นสูงสุด นอกจากนี้ยังผันแปรอัตราส่วนของดินตะกอนประปาที่ใช้ในการผสมกับเกล็ดเกลือที่มีอัตราส่วนร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100% โดยน้ำหนัก เพื่อใช้ในการทดสอบหาส่วนผสมที่มีความแข็งแรงแต่มีค่าความชื้นผ่านต่ำสุดที่เหมาะสมจะใช้เป็นวัสดุถมกลับในช่องเหมือง



รูปที่ 3.1 ดินตะกอนประปาถูกอบในตู้อบภายใต้อุณหภูมิ 100°C



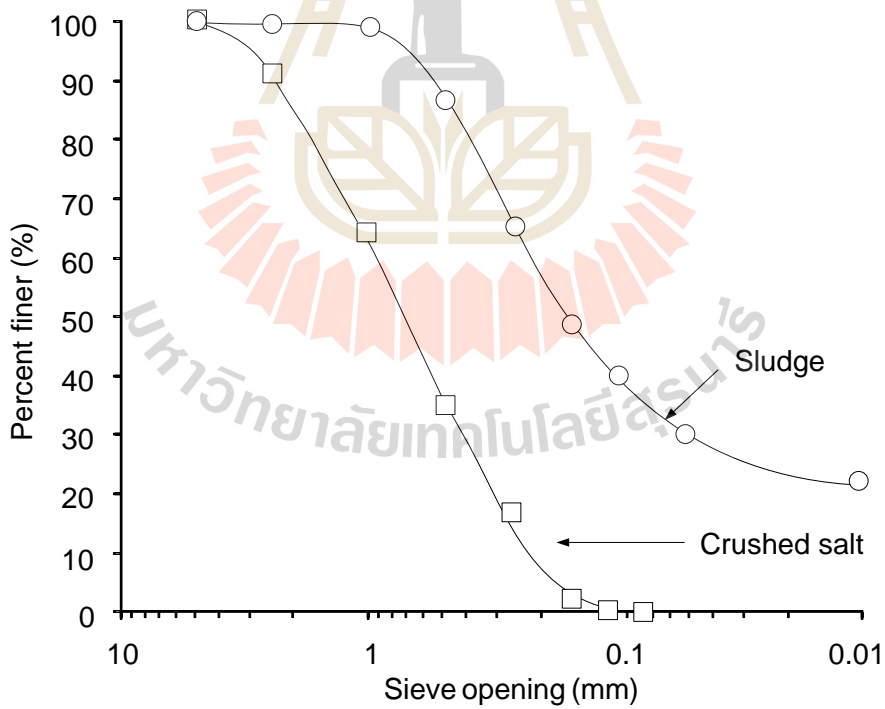
รูปที่ 3.2 ดินตะกอนประปา



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างเกลือถูกบดด้วยเครื่องบด



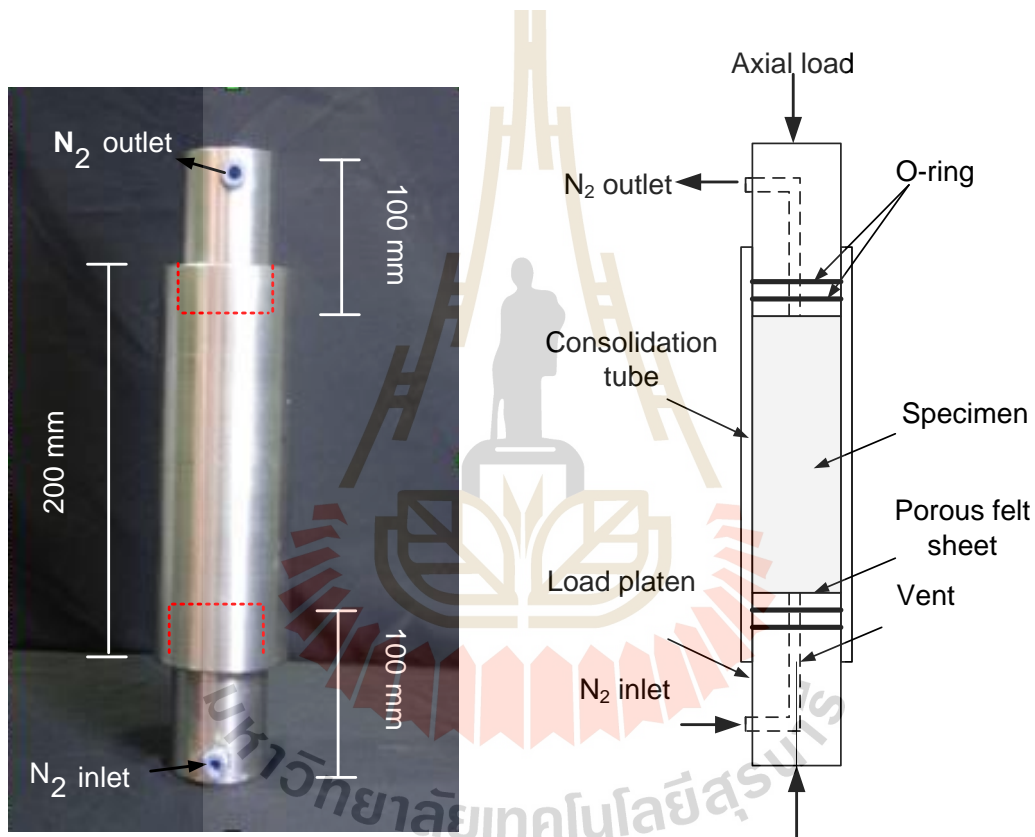
รูปที่ 3.4 เกล็ดเกลือ



รูปที่ 3.5 ขนาดของดินตะกอนประปาและเกล็ดเกลือ

3.2 การประดิษฐ์กระบอกลำหรับการทดสอบการอัดตัว

กระบอกลำหรับใช้บรรจุและทดสอบการอัดตัวของตัวอย่างเกล็ดเกลือผสมดินตะกอนประปะทำจากสแตนเลสเพื่อป้องกันการผุกร่อนหรือเสื่อมสภาพเนื่องจากการทำปฏิกิริยากับเกลือ โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของกระบอกลำตัวอย่างเท่ากับ 54 mm ยาวเท่ากับ 200 mm และหนาเท่ากับ 10 mm (รูปที่ 3.6) โดยขนาดดังกล่าวเป็นขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวยภายหลังจากกระบวนการทดสอบการอัดตัวได้เสร็จสิ้น ส่วนด้านหัวและท้ายของกระบอกลำทดสอบจะมีกระบอกลำปิดทำหน้าที่ส่งแรงกดให้กับตัวอย่างเกล็ดเกลือผสมดินตะกอนประปะที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 53 mm และมีรูไว้สำหรับระบายน้ำเกลือออกจากตัวอย่างด้วย



รูปที่ 3.6 กระบอกลำทดสอบทำจากสแตนเลส

บทที่ 4

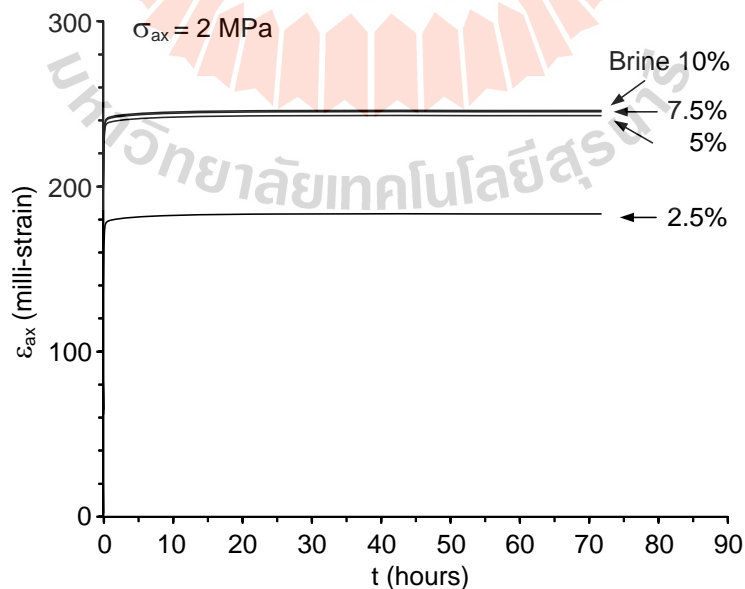
การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

4.1 วัตถุประสงค์

ในบทนี้ได้อธิบายถึงวิธีการและผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และเชิงชลศาสตร์ของตัวอย่างเกลือเคลือบดินตะกอนประปา การทดสอบประกอบด้วย การทดสอบการอัดตัวภายใต้การผันแปรความเค้นกดและระยะเวลาในการกดอัด และการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว โดยในแต่ละการทดสอบได้ทำการผันแปรอัตราส่วนของดินตะกอนประปาที่ใช้ผสมกับตัวอย่างเกลือเคลือบเท่ากับ 0, 25, 50, 75 และ 100% โดยน้ำหนัก เพื่อหาส่วนผสมที่มีความแข็งแรงแต่มีค่าความซึมผ่านต่ำสุด เหมาะสมจะใช้เป็นวัสดุถมกลับในช่องเหมือง

4.2 ปริมาณน้ำเกลือที่เหมาะสม

วัตถุประสงค์เพื่อหาอัตราส่วนของน้ำเกลือที่เหมาะสมกับดินตะกอนประปา โดยการผันแปรอัตราส่วนน้ำเกลือคือ 2.5, 5, 7.5 และ 10% โดยน้ำหนัก กำหนดความเค้นกดเท่ากับ 2 MPa การทดสอบดำเนินการภายใต้อุณหภูมิห้อง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าความเครียดในแนวแกนเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำเกลือเพิ่มมากขึ้น โดยอัตราส่วน 5, 7.5 และ 10% จะมีค่าความเครียดในแนวแกนเท่ากัน แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของน้ำเกลือที่เหมาะสมที่สุด คือน้ำเกลือ 5% โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ค่าความเครียดในแนวแกน (ϵ_{ax}) เชิงเวลา (t) ภายใต้การผันแปรอัตราส่วนของน้ำเกลือ

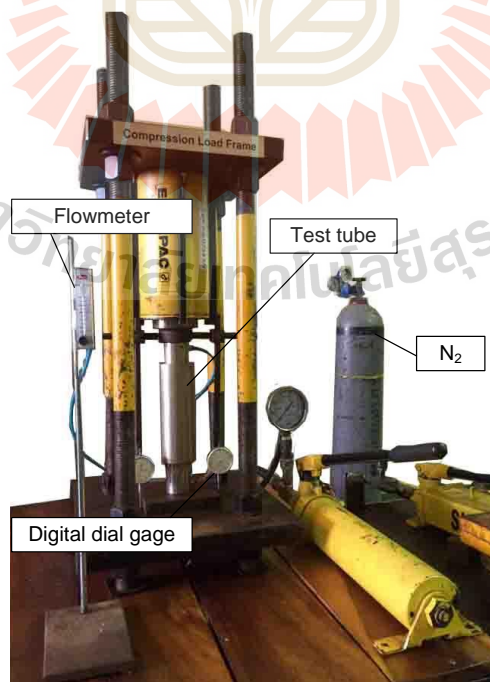
4.3 การทดสอบการอัดตัว

การทดสอบการอัดตัว (ASTM D2435-04, 2004) ดำเนินการหลังจากการเตรียมตัวอย่างเกล็ดเกลือผสมดินตะกอนประปาบรรจุในกระบอกทดสอบแล้ว (รูปที่ 4.2) โดยการทดสอบได้ให้แรงความเค้นกดจากด้านบนกระบอกด้วยปั๊มไฮดรอลิกผ่านกระบอกปิดด้านบนผันแปรจาก 2.5, 5 และ 7.5 MPa ภายใต้อุณหภูมิห้อง และทำการผันแปรระยะเวลาในการทดสอบเท่ากับ 2, 7, 15 และ 30 วัน ระหว่างการทดสอบได้ตรวจวัดการเคลื่อนตัวในแนวแกนด้วยมาตรวัดการเคลื่อนตัวเพื่อนำค่าที่วัดได้ไปใช้ในการคำนวณค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกน (ϵ_{axial}) และค่าความหนาแน่น (ρ) การเคลื่อนตัวในแนวแกนสามารถคำนวณได้จากสมการ

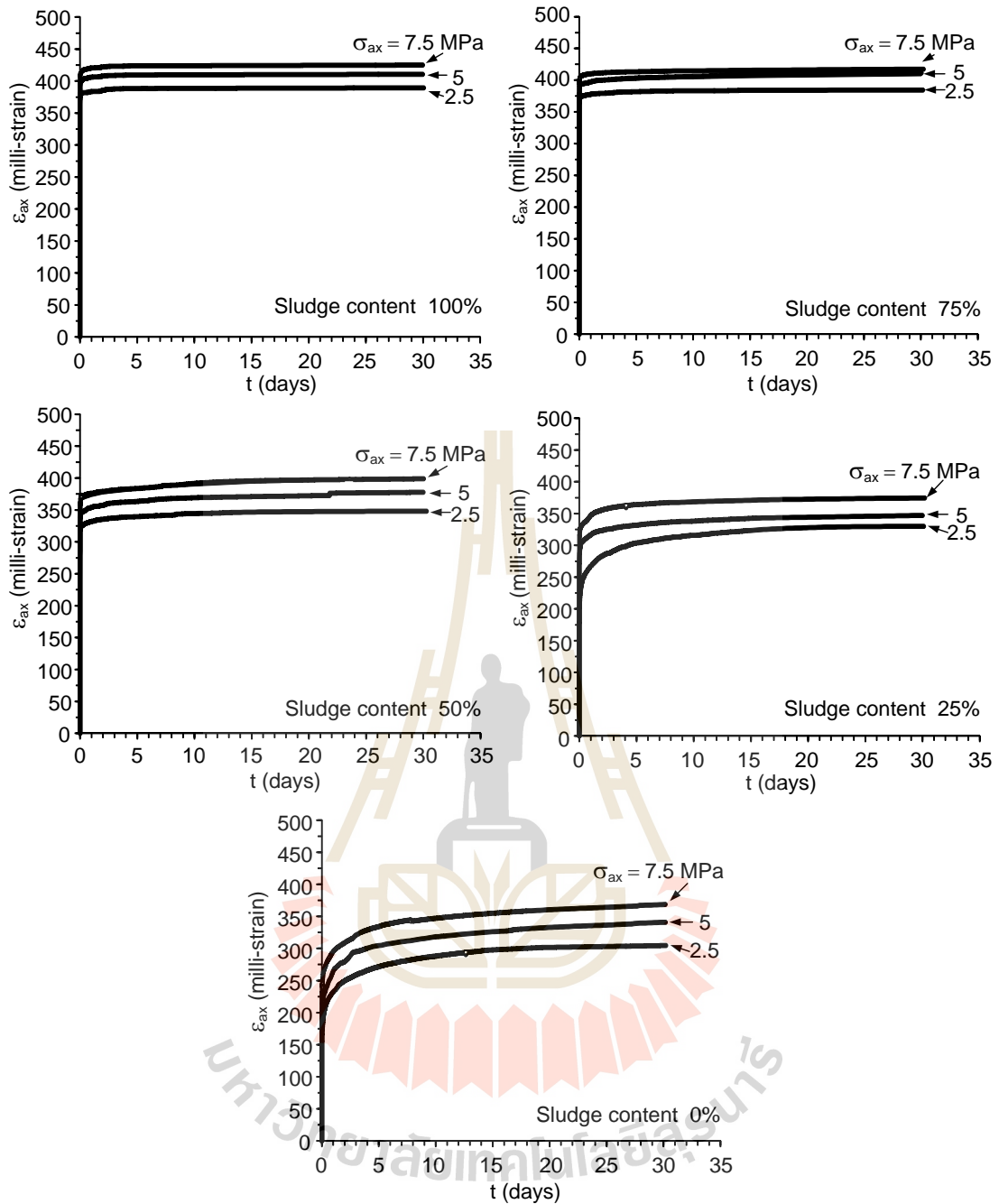
$$\epsilon_{ax} = \Delta L/L \quad (4.1)$$

โดย ϵ_{ax} คือการเคลื่อนตัวในแนวแกน และ $\Delta L/L$ คือความยาวของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไป

ผลการทดสอบระบุว่าค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกนเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นกดและเวลาในการทดสอบเพิ่มมากขึ้น และเมื่ออัตราส่วนของดินตะกอนประปาเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกนเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยเมื่ออัตราส่วนของดินตะกอนประปามากกว่า 50% โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้ค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกนไม่เพิ่มขึ้นในเชิงเวลา ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 การทดสอบการอัดตัว



รูปที่ 4.3 ความเครียดกดในแนวแกนเชิงเวลาภายใต้การผันแปรความเค้นกด

4.4 การทดสอบความซึมผ่านของแก๊สไนโตรเจน

การทดสอบเพื่อตรวจวัดค่าความซึมผ่านของแก๊สไนโตรเจน (ASTM D2434-68, 2006) ได้ดำเนินการระหว่างทดสอบการอัดตัว โดยทำการตรวจวัดทุกๆ 6 ชั่วโมง และวัดค่าการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ระดับ 20 psi ค่าความซึมผ่านสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Q = KA (\Delta h/L) \quad (4.2)$$

โดย K คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมผ่าน (m/s)
 Q คือ อัตราการไหล (m^3/s)
 A คือ พื้นที่หน้าตัด (m^2)
 k คือ ความลาดชลศาสตร์

การคำนวณหาความลาดชลศาสตร์ดังสมการ

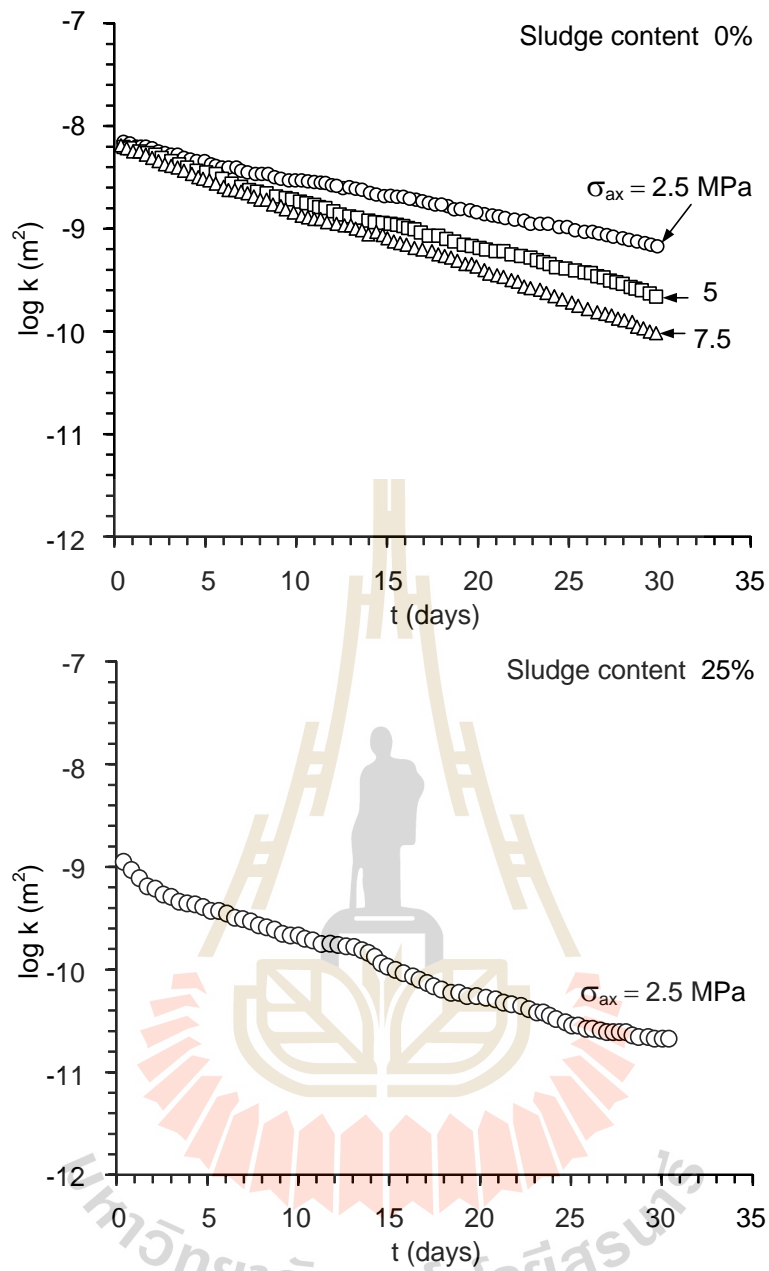
$$k = (K\mu/\gamma_f) \quad (4.3)$$

โดย k คือความลาดชลศาสตร์
 μ คือความหนืดไดนามิก

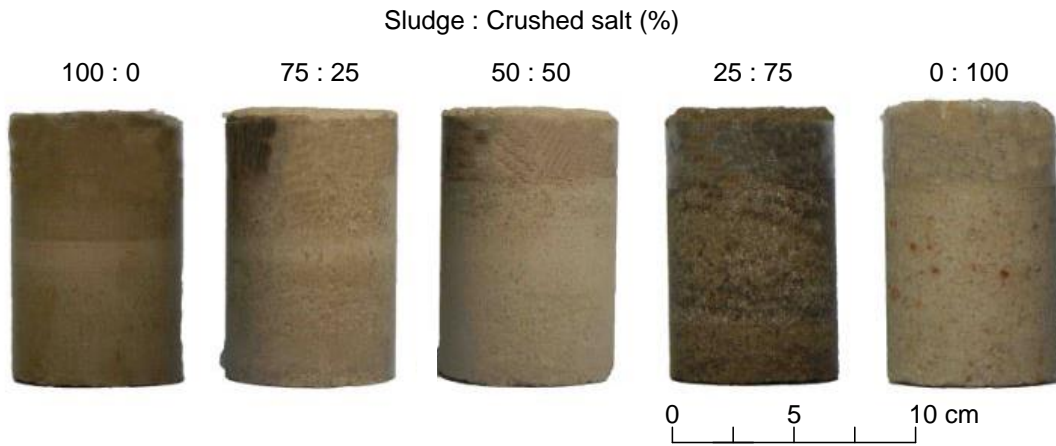
ผลการทดสอบระบุว่า เมื่อใช้เวลาในการบดอัดเพิ่มขึ้น ความเค้นกดและอัตราส่วนของดินตะกอนประปาจะเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความลาดชันชลศาสตร์ลดน้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 4.4 อย่างไรก็ตามจะไม่สามารถทำการตรวจวัดค่าได้เมื่ออัตราส่วนดินตะกอนประปาเท่ากับ 50, 75 และ 100% โดยน้ำหนัก เนื่องจากการตรวจวัดค่าความซึมผ่านสามารถวัดค่าต่ำที่สุดได้เพียง 10-11 m^2 เท่านั้น

4.5 การทดสอบกำลังกดในแกนเดียว

การทดสอบกำลังกดในแกนเดียว (ASTM D2938-95, 2002) ได้ดำเนินการภายหลังจากทำการทดสอบการอัดตัวเสร็จสิ้นตามระยะเวลาที่กำหนด โดยจะนำตัวอย่างออกมาจากกระบอกสแตนเลส (รูปที่ 4.5) ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างสามารถหาได้หลังการทดสอบการอัดตัว โดยค่าความหนาแน่นจะลดลงเมื่ออัตราส่วนของดินตะกอนประปาเพิ่มขึ้น และจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นกดและเวลาในการอัดตัวเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.6 สำหรับการทดสอบกำลังกดในแกนเดียว (รูปที่ 4.7) เป็นการศึกษาคุณสมบัติค่าความแข็งของตัวอย่างที่สามารถรับแรงได้จริง การทดสอบจะใช้อัตราการให้แรงกดเท่ากับ 0.5 ถึง 1 MPa/s จนกระทั่งตัวอย่างเกล็ดเกลือผสมดินตะกอนประปาเกิดการแตก ระหว่างการทดสอบได้ทำการวัดค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งและแนวนอน เพื่อนำค่าดังกล่าวไปคำนวณหาค่าความยืดหยุ่นโมดูลัสและค่าอัตราส่วนปัวซอง ตัวอย่างหลังการทดสอบกำลังกดในแกนเดียวแสดงในรูปที่ 4.8 ผลการทดสอบระบุว่าค่าความเค้นกดและค่าความยืดหยุ่นจะลดลงเมื่ออัตราส่วนของดินตะกอนประปาเพิ่มขึ้น และค่าอัตราส่วนปัวซองจะลดลงเมื่อความเค้นกด อัตราส่วนของดินตะกอนประปา และเวลาในการบดอัดเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ถึงรูปที่ 4.15

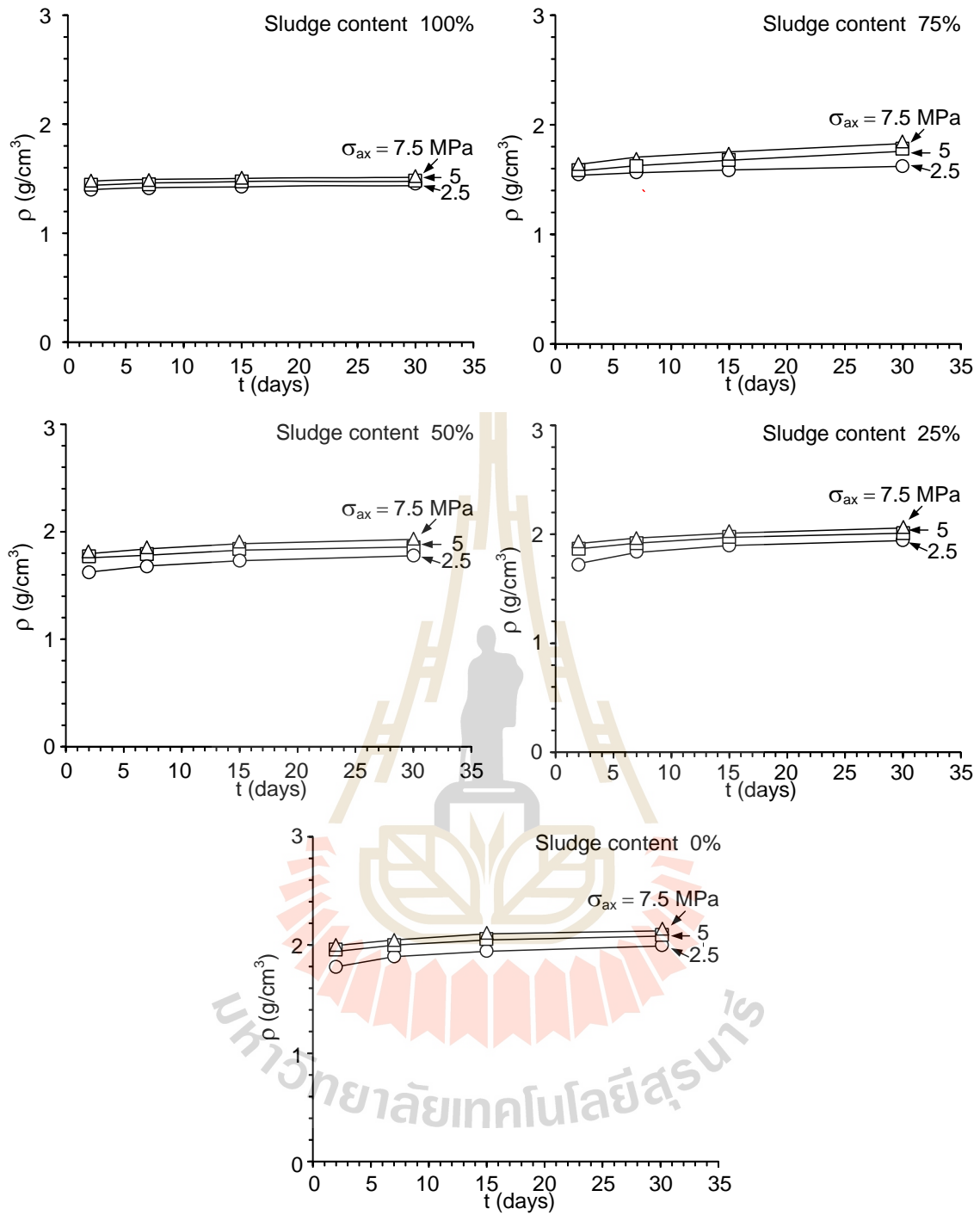


รูปที่ 4.4 ความลาดชันชลศาสตร์ในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรความเค้นกด

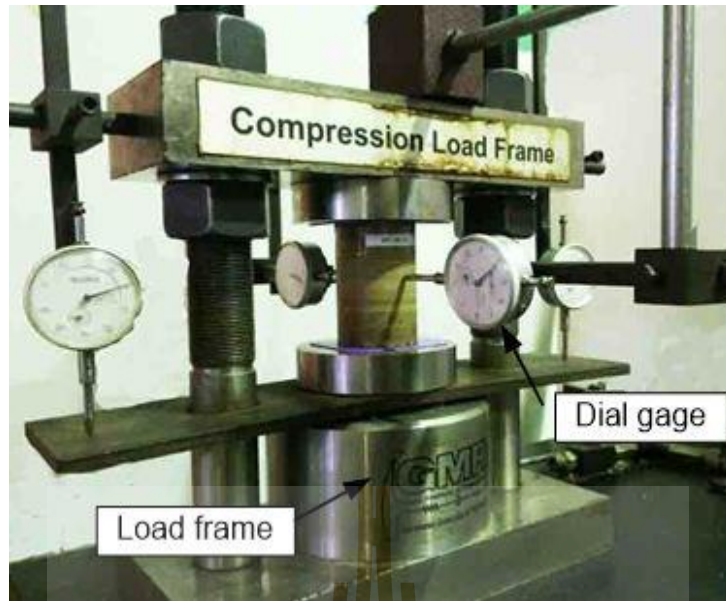


รูปที่ 4.5 ตัวอย่างเกล็ดเกลือผสมดินตะกอนประปาภายหลังการทดสอบการอัดตัว





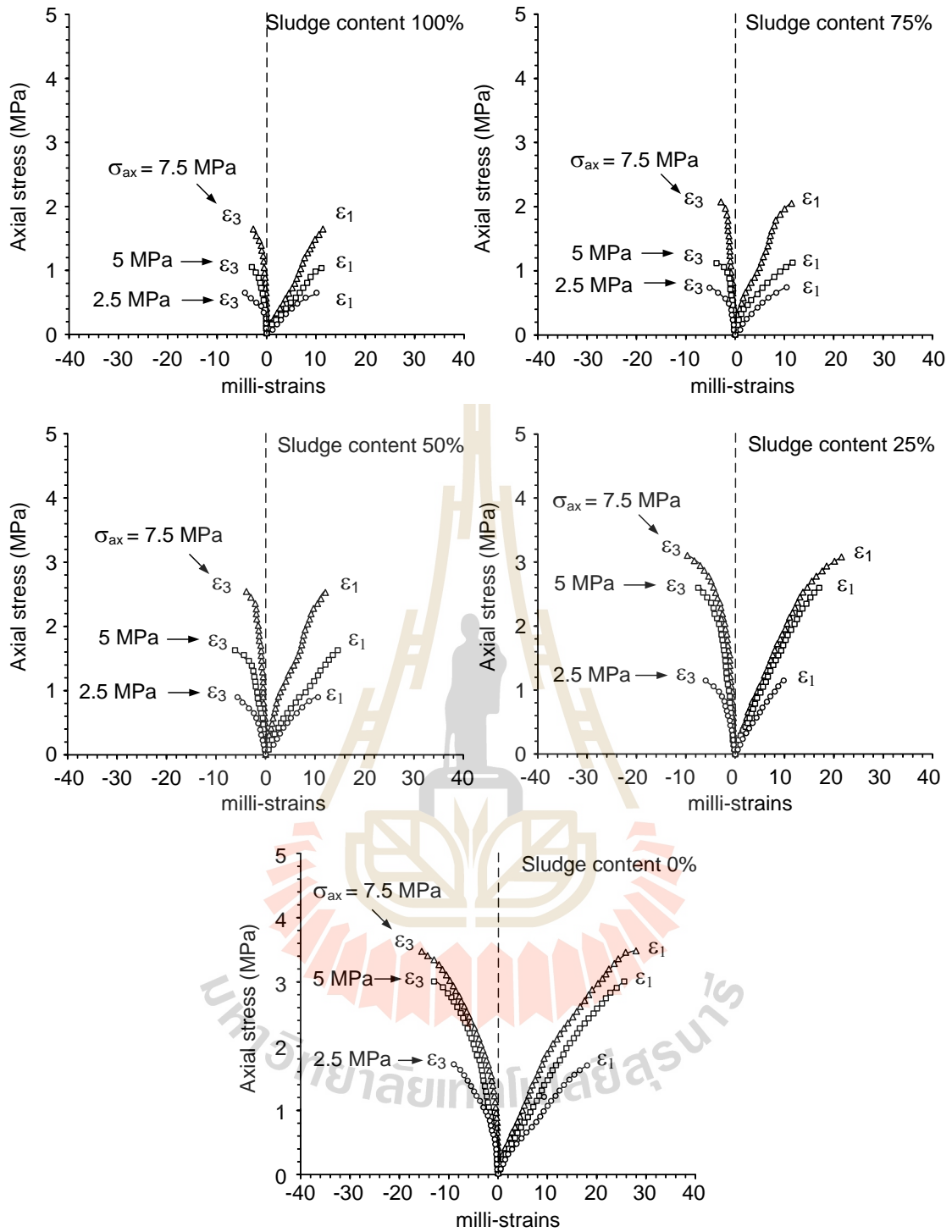
รูปที่ 4.6 ความหนาแน่นในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรความเค้นกด



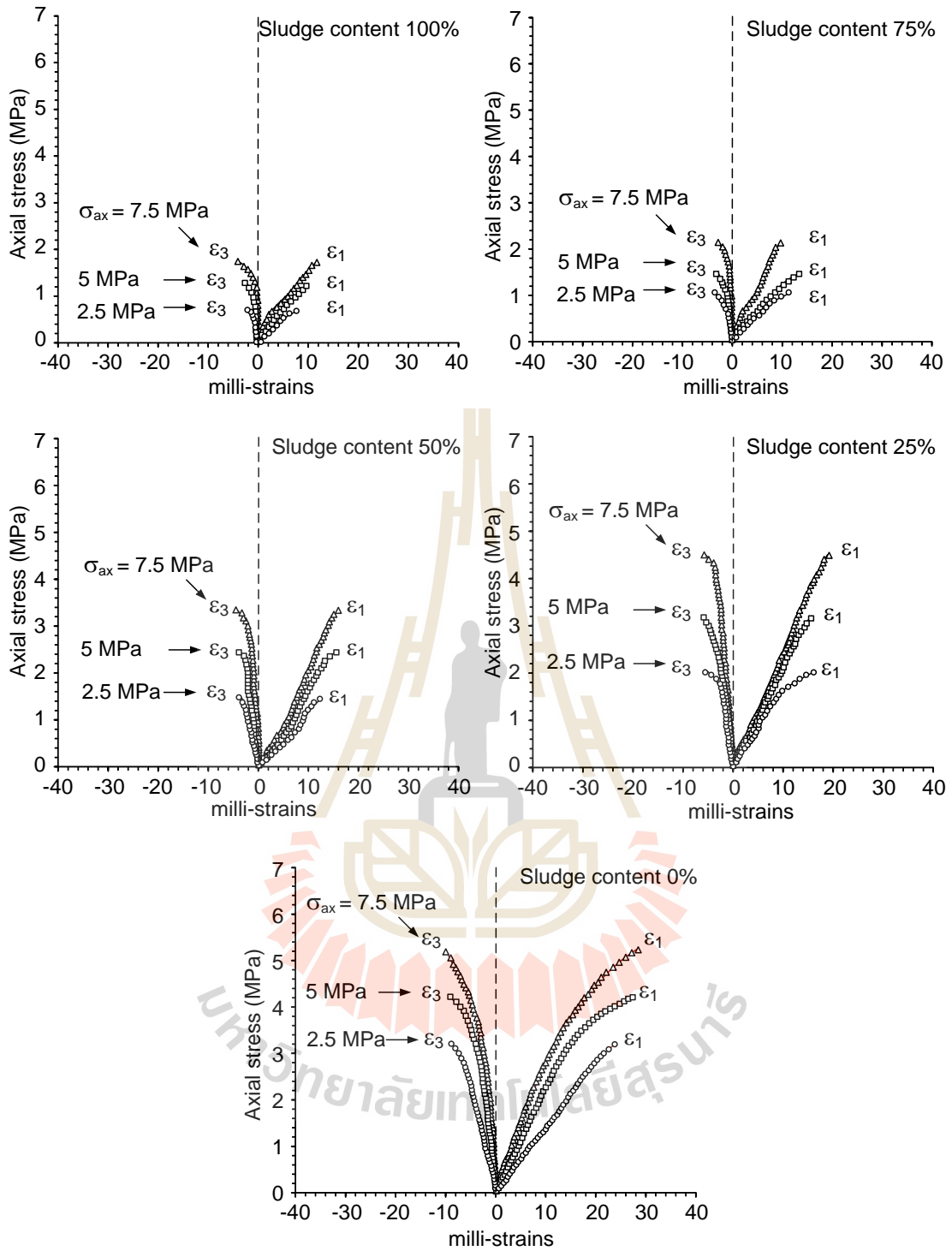
รูปที่ 4.7 การทดสอบกำลังกดในแกนเดียว



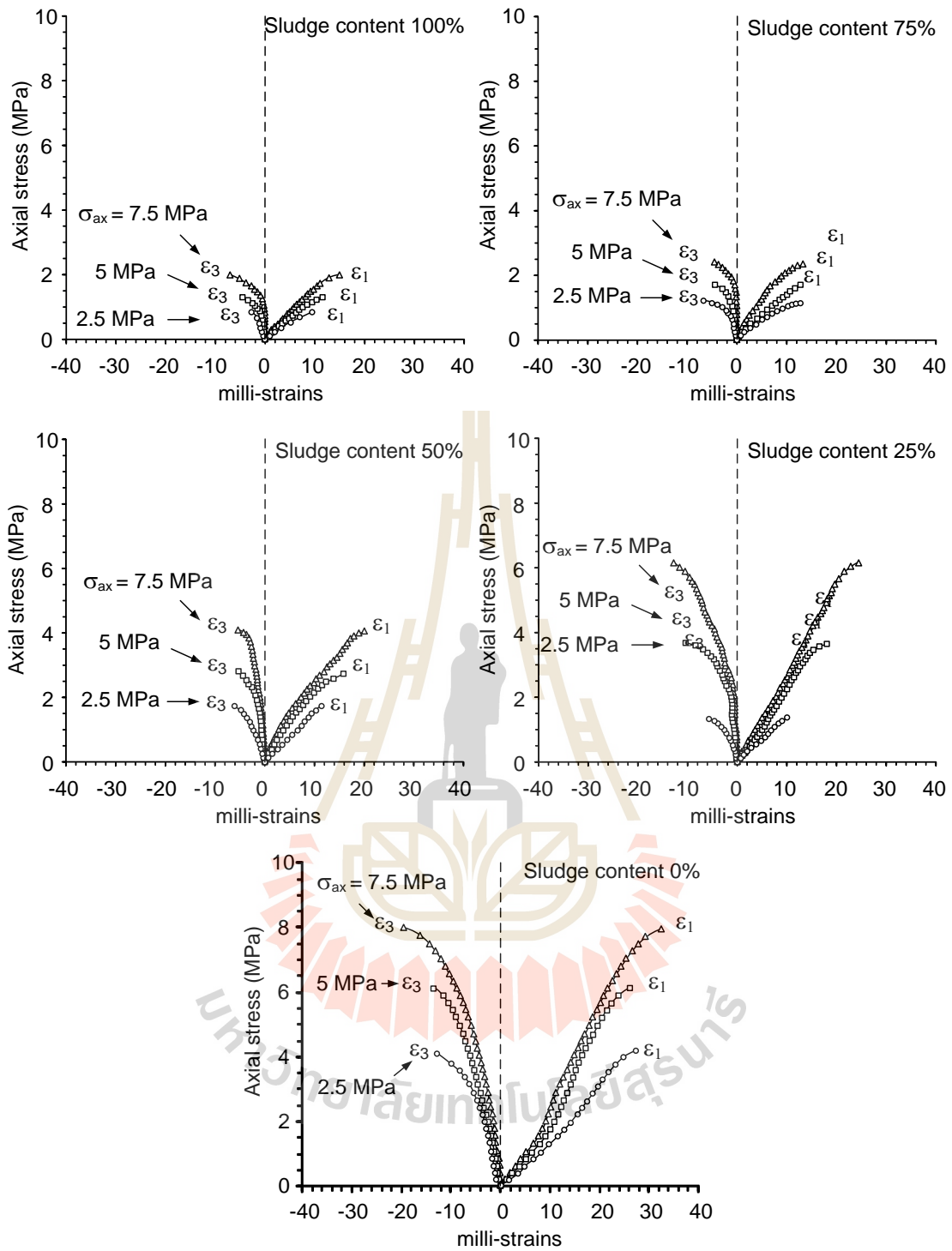
รูปที่ 4.8 ตัวอย่างเกล็ดเกลือผสมดินตะกอนประปาภายหลังการทดสอบกำลังกดในแกนเดียว



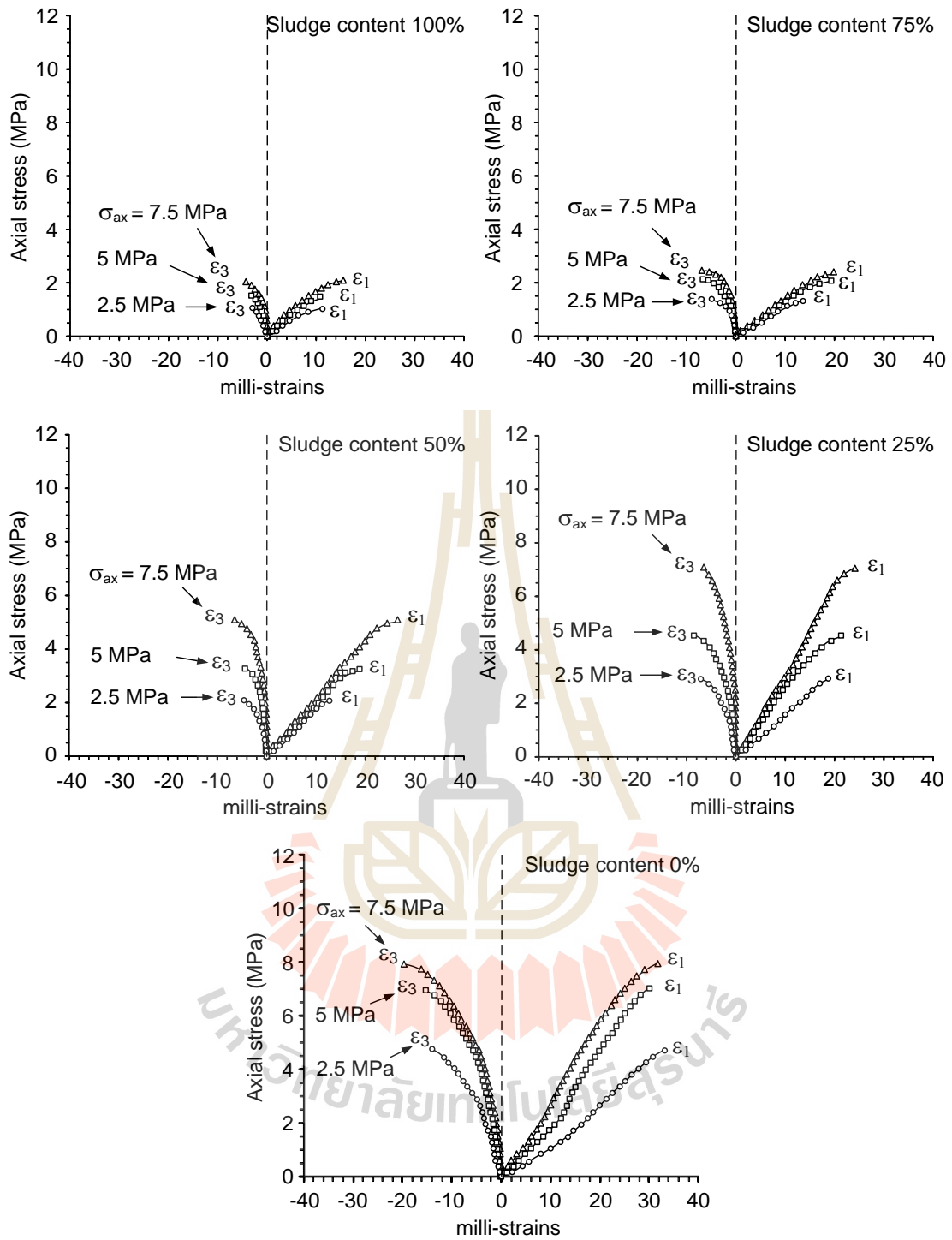
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดภายหลังจากการทดสอบการอัดตัวเป็นเวลา 2 วัน



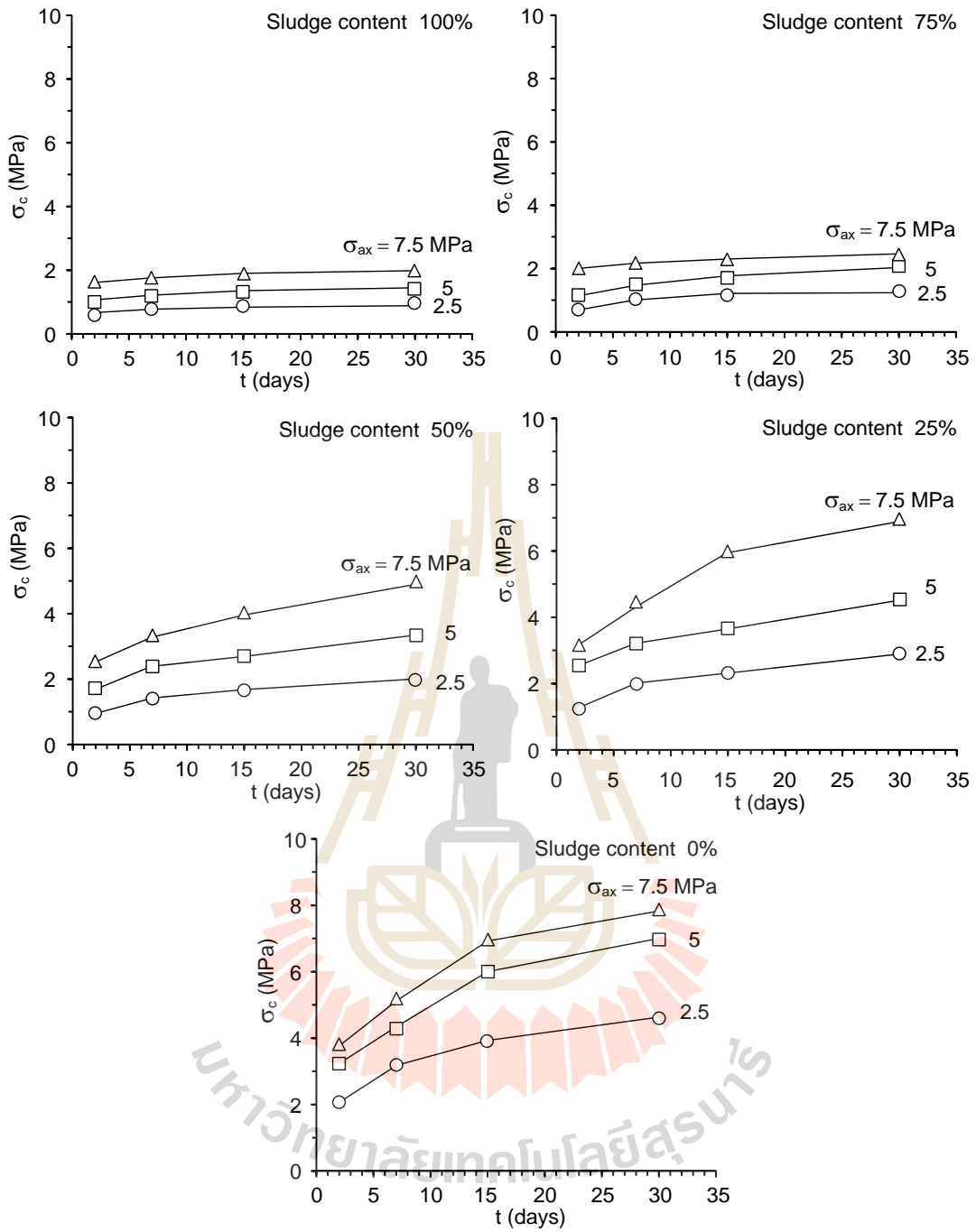
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดภายหลังจากการทดสอบการอัดตัวเป็นเวลา 7 วัน



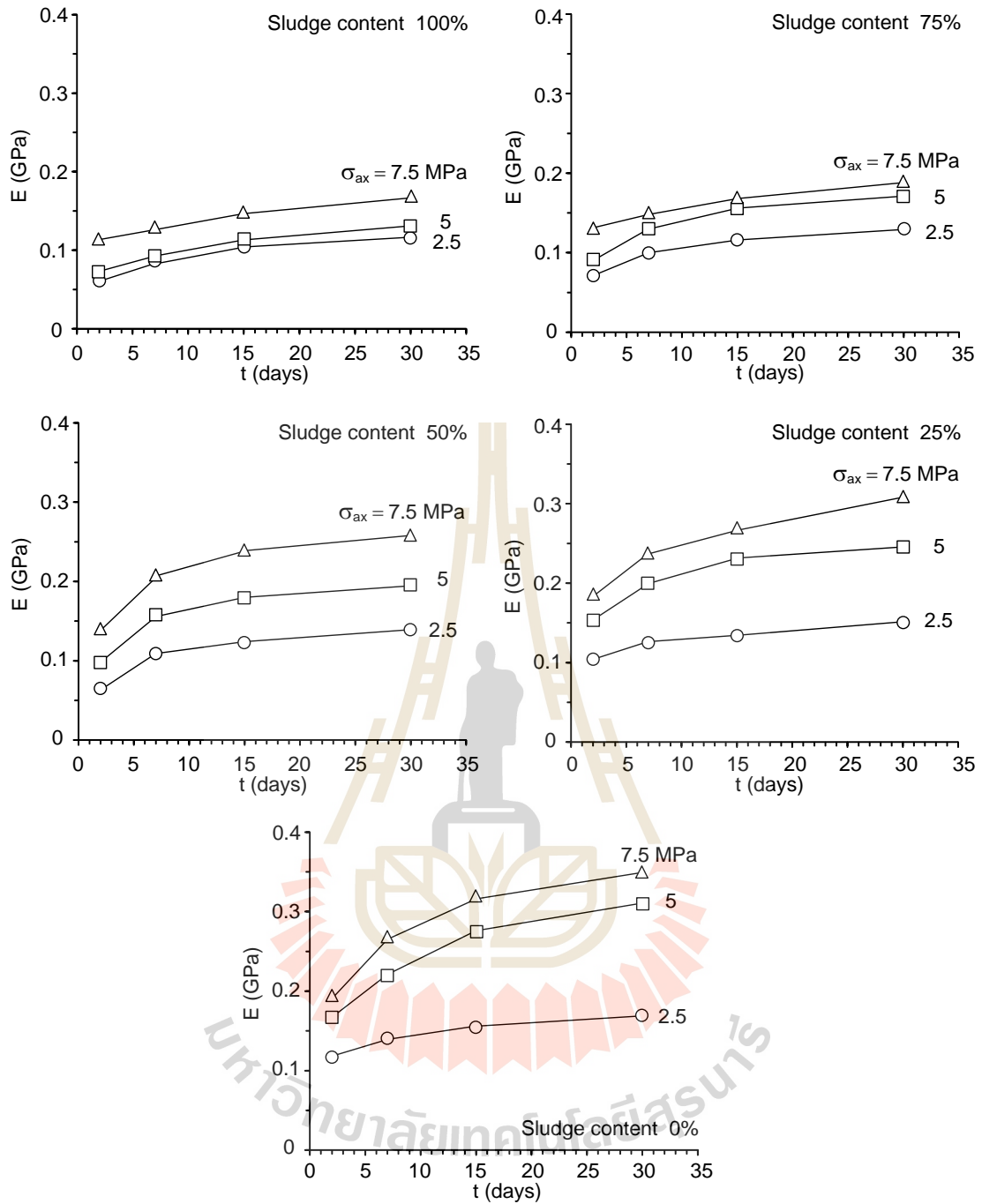
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดภายหลังจากทดสอบการอัดตัวเป็นเวลา 15 วัน



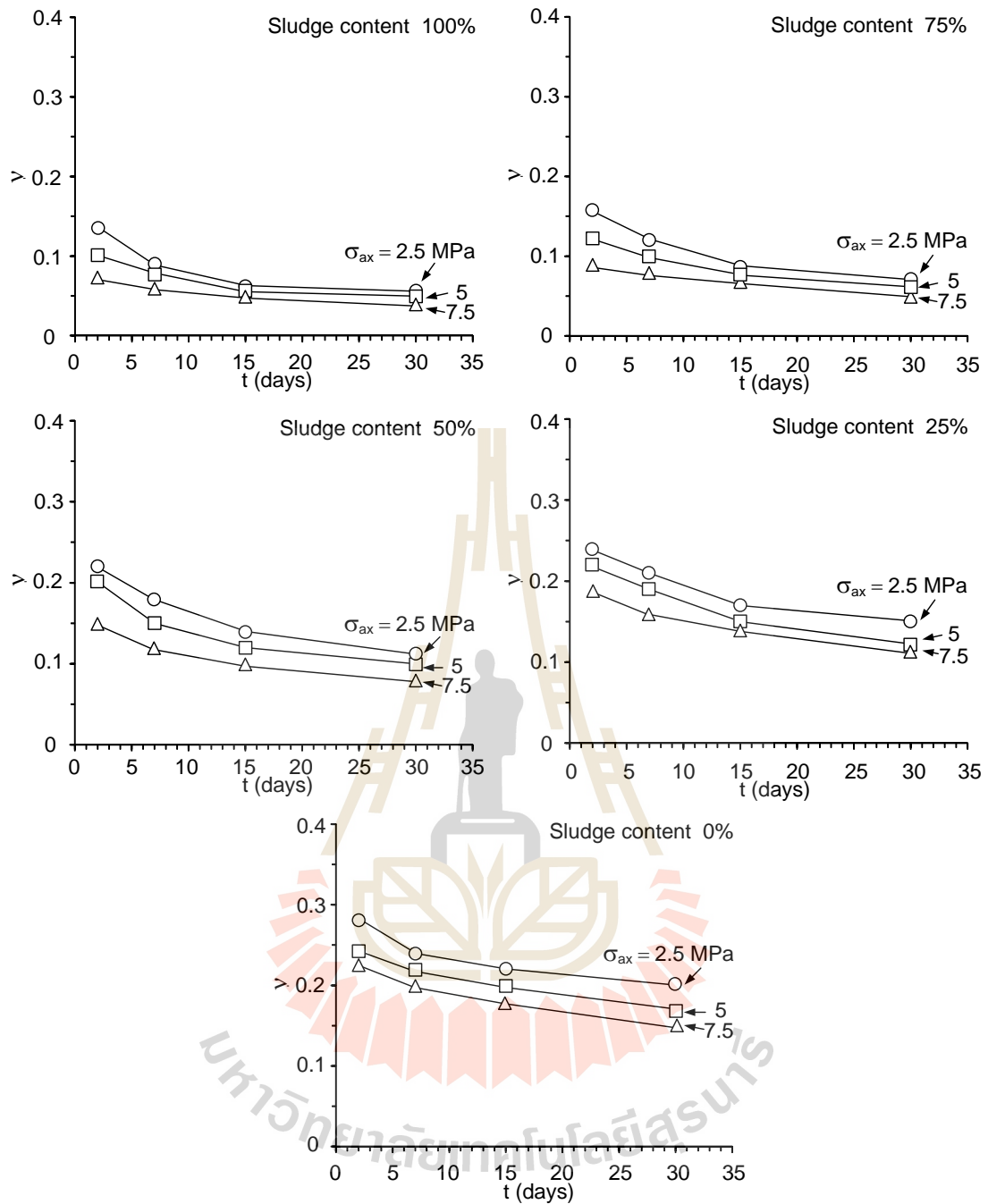
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดภายหลังจากการทดสอบการอัดตัวเป็นเวลา 30 วัน



รูปที่ 4.13 ค่าความเค้นกดสูงสุดในเชิงเวลาของการบดอัดภายใต้การผันแปรความเค้นกด



รูปที่ 4.14 ค่าความยืดหยุ่นในเชิงเวลาของการบดอัดภายใต้การผันแปรความเค้นกด



รูปที่ 4.15 ค่าอัตราส่วนปัวซองในเชิงเวลาของการบดอัดภายใต้การผันแปรความเค้นกด

บทที่ 5

การสร้างสมการทางคณิตศาสตร์

5.1 วัตถุประสงค์

การสร้างสมการทางคณิตศาสตร์จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Empirical relationship) มีวัตถุประสงค์เพื่ออธิบายพฤติกรรมทางกลศาสตร์ ชลศาสตร์ และกายภาพของตัวอย่างเกล็ดเกลือผสมดินตะกอนประปา โดยได้ทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ที่สัมพันธ์กับความเค้น (σ_{axial}) และเวลา (t) ด้วยโปรแกรม SPSS statistics 19 (Wendai, 2000) เพื่อหาค่าตัวแปรที่ทำให้สมการเป็นจริงสำหรับใช้คาดคะเนเสถียรภาพของช่องเหมืองในระยะยาว

5.2 สภาวะความเครียดในแกนเดียว (Uniaxial strain condition)

สมการทางคณิตศาสตร์สามารถคำนวณได้จากสภาวะความเครียดในแกนเดียว ($\epsilon_1 \neq 0$, $\epsilon_2 = \epsilon_3 = 0$, $\sigma_2 = \sigma_3 \neq 0$) ค่าความเค้นกด (σ_1) และค่าอัตราส่วนปัวซอง (ν) ที่ได้จากการทดสอบกำลังกดในแกนเดียวสามารถนำมาคำนวณหาความเค้นด้านข้างได้จากสมการ (Jaeger et al., 2007)

$$\sigma_2 = \sigma_3 = [\nu/(1-\nu)] \cdot \sigma_1 \quad (5.1)$$

โดยที่ σ_2 และ σ_3 คือ ความเค้นด้านข้าง

จากผลการสร้างสมการระบุว่าค่าความเค้นด้านข้างจะลดลงเมื่ออัตราส่วนของดินตะกอนประปาและเวลาในการบดอัดเพิ่มขึ้น และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นกดเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ค่าความเค้นเฉลี่ยสามารถคำนวณได้จาก (Jaeger et al., 2007)

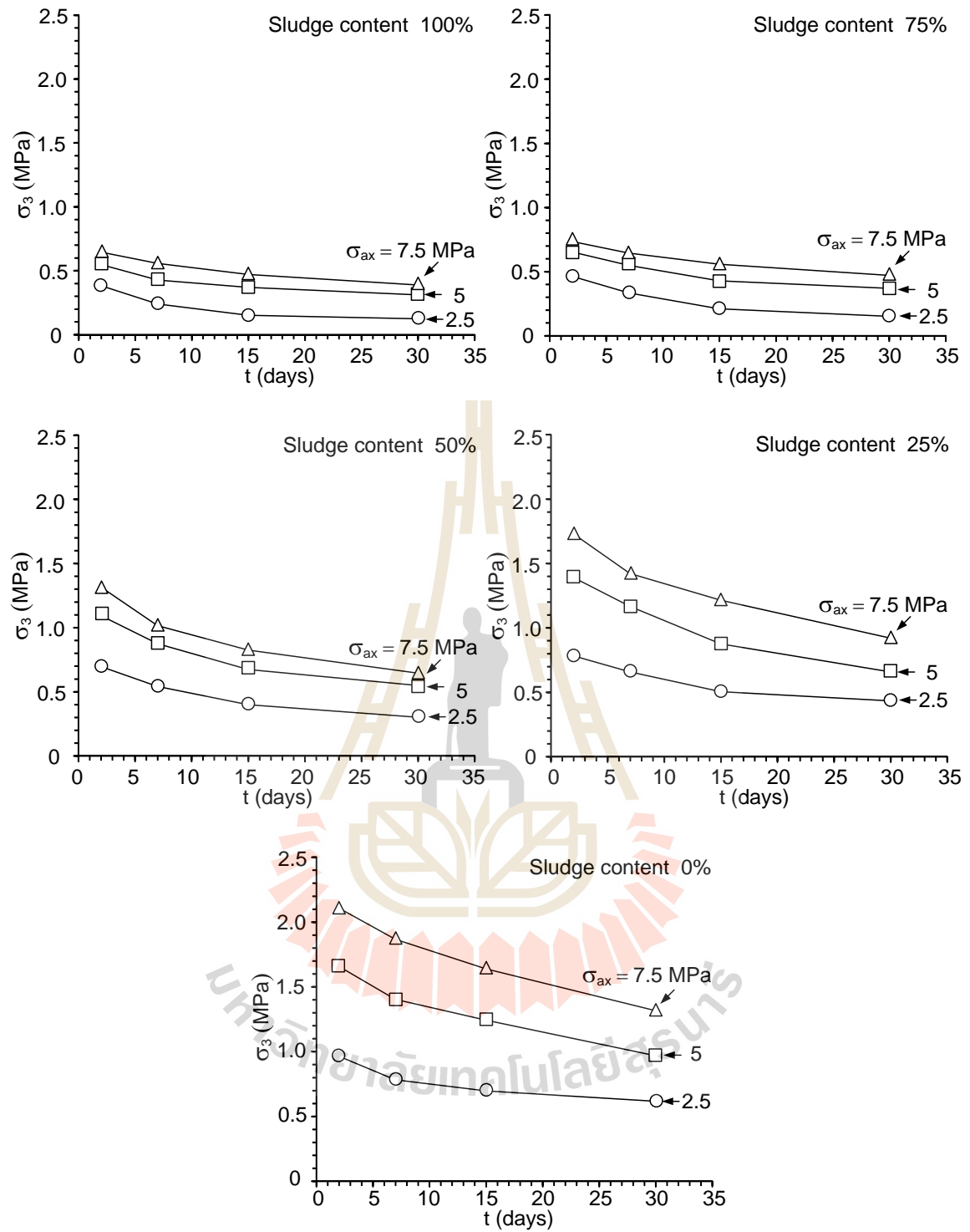
$$\sigma_m = (\sigma_{ax} + 2\sigma_3)/3 \quad (5.2)$$

โดยที่ σ_m คือ ค่าความเค้นเฉลี่ย

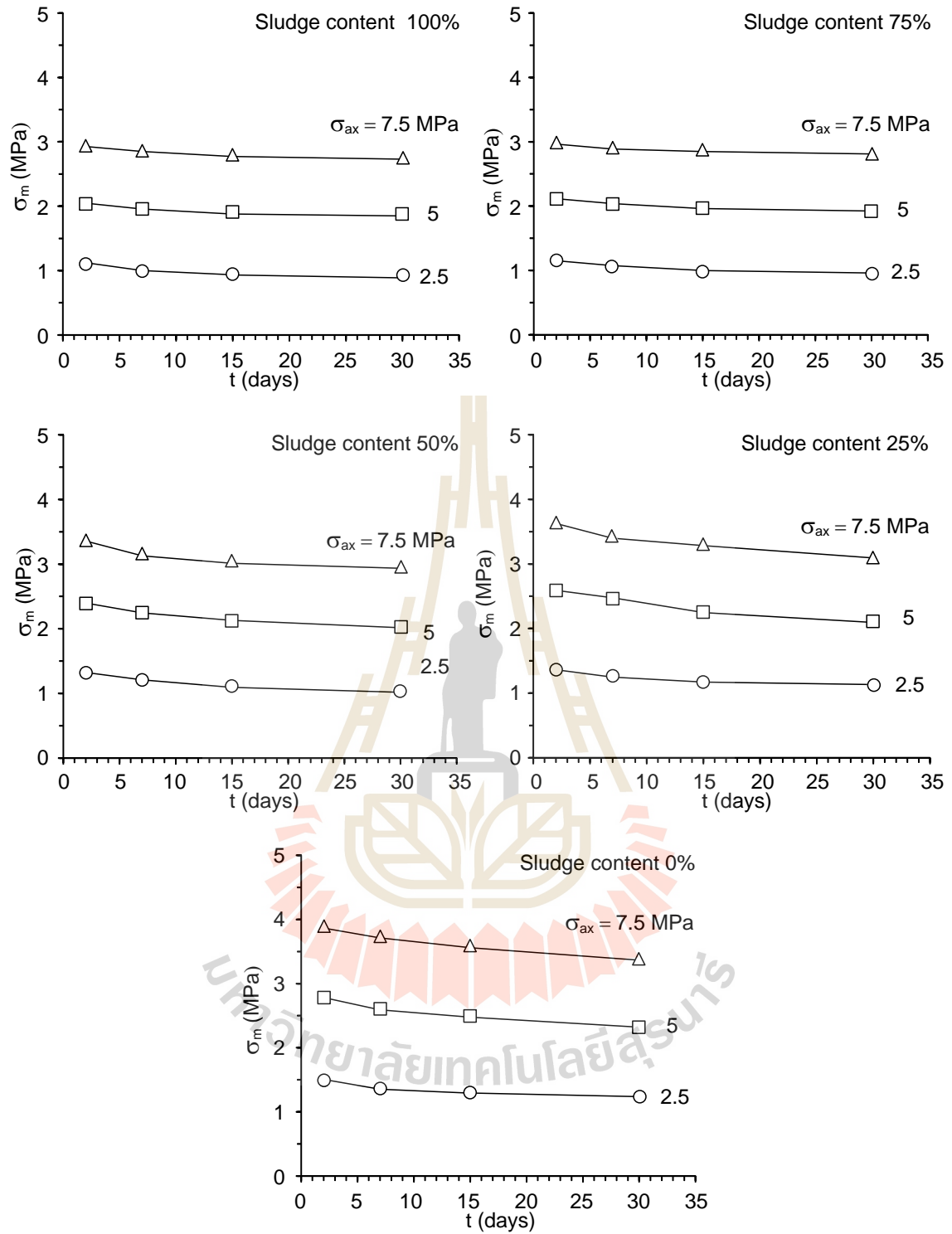
σ_3 คือ ความเค้นด้านข้าง และ

σ_{ax} คือ ความเค้นกด

จากผลการสร้างสมการระบุว่าค่าความเค้นเฉลี่ยจะลดลงเมื่ออัตราส่วนของตะกอนประปาและเวลาในการบดอัดเพิ่มมากขึ้น และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นกดเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.1 ความเค้นด้านข้างในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรความเค้นกด



รูปที่ 5.2 ความเค้นเฉลี่ยในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรความเค้นกด

5.3 สมการทางคณิตศาสตร์

5.3.1 ค่าความเค้นเฉลี่ย (Mean stress)

ผลการทดสอบกำลังกดในแกนเดียวสามารถนำมาพัฒนาเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ โดยพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของความเค้นกด (σ_{axial}) และเวลา (t) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

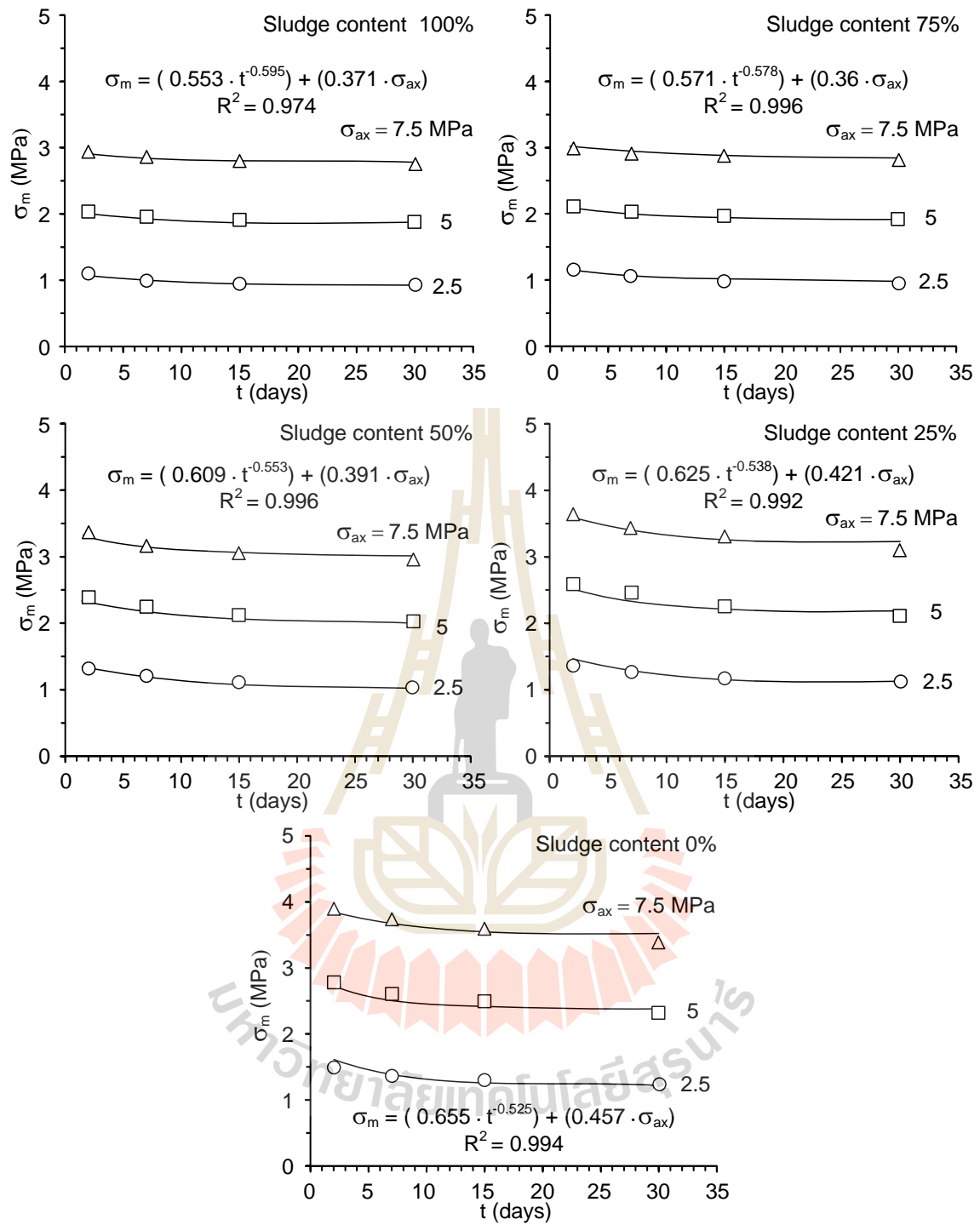
$$\sigma_m = (\alpha \cdot t \beta) + (\delta \cdot \sigma_{ax}) \quad (5.3)$$

โดยที่ σ_m คือ ความเค้นเฉลี่ย
 t คือ เวลาในการบดอัด (วัน)
 σ_{ax} คือ ความเค้นกด
 α, β, δ คือ ตัวแปรคงที่

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS statistical ได้แสดงในตารางที่ 5.1 ความแม่นยำระหว่างสมการทางคณิตศาสตร์และผลการทดสอบอยู่ในช่วง 0.974 ถึง 0.996 ดังแสดงในรูปที่ 5.3

ตารางที่ 5.1 ตัวแปรของสมการในการหาค่าความเค้นเฉลี่ย

อัตราส่วนดินตะกอน ประปาด่อน้ำหนัก(%)	พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์	ค่าสัมประสิทธิ์ ความสัมพันธ์
100	α	0.553	0.974
	β	-0.595	
	δ	0.371	
75	α	0.571	0.996
	β	-0.578	
	δ	0.360	
50	α	0.609	0.996
	β	-0.553	
	δ	0.391	
25	α	0.625	0.992
	β	-0.538	
	δ	0.421	
0	α	0.655	0.994
	β	-0.525	
	δ	0.457	



รูปที่ 5.3 ความเค้นเฉลี่ยในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรความเค้นกด

5.3.2 ความเครียดเชิงปริมาตร (Volumetric strain)

ค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกน (ϵ_{axial}) สามารถนำมาคำนวณเพื่อหาความเครียดเชิงปริมาตร จากผลการทดสอบระบุว่าค่าความเครียดเชิงปริมาตรจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของดินตะกอนประปา ความเค้นกด และเวลาในการบดอัดเพิ่มมากขึ้น การสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อคาดคะเน ความเครียดเชิงปริมาตรจะต้องพิจารณาถึงความเค้นเฉลี่ยและเวลาในการบดอัด ดังสมการ

$$\Delta v/v = \phi \cdot \sigma_m^\gamma \cdot t^\eta \quad (5.4)$$

โดยที่ $\Delta v/v$ คือ ความเครียดเชิงปริมาตร
 σ_m คือ ความเค้นเฉลี่ย
 t คือ เวลาในการบดอัด (วัน)
 ϕ, γ, η คือ ตัวแปรคงที่

ความแม่นยำระหว่างสมการทางคณิตศาสตร์และผลการทดสอบอยู่ในช่วง 0.865 ถึง 0.990 ค่าตัวแปรคงที่แสดงในตารางที่ 5.2 โดยสมการทางคณิตศาสตร์สามารถนำมาคาดคะเนความเครียดเชิงปริมาตรได้เป็นอย่างดี ดังแสดงในรูปที่ 5.4

5.3.3 ค่าความซึมผ่าน (Permeability)

จากผลการทดสอบที่ระบุว่าค่าความซึมผ่านจะลดลงเมื่ออัตราส่วนดินตะกอนประปา ความเค้นกด และเวลาในการบดอัดเพิ่มมากขึ้น สามารถคาดคะเนได้จากสมการ

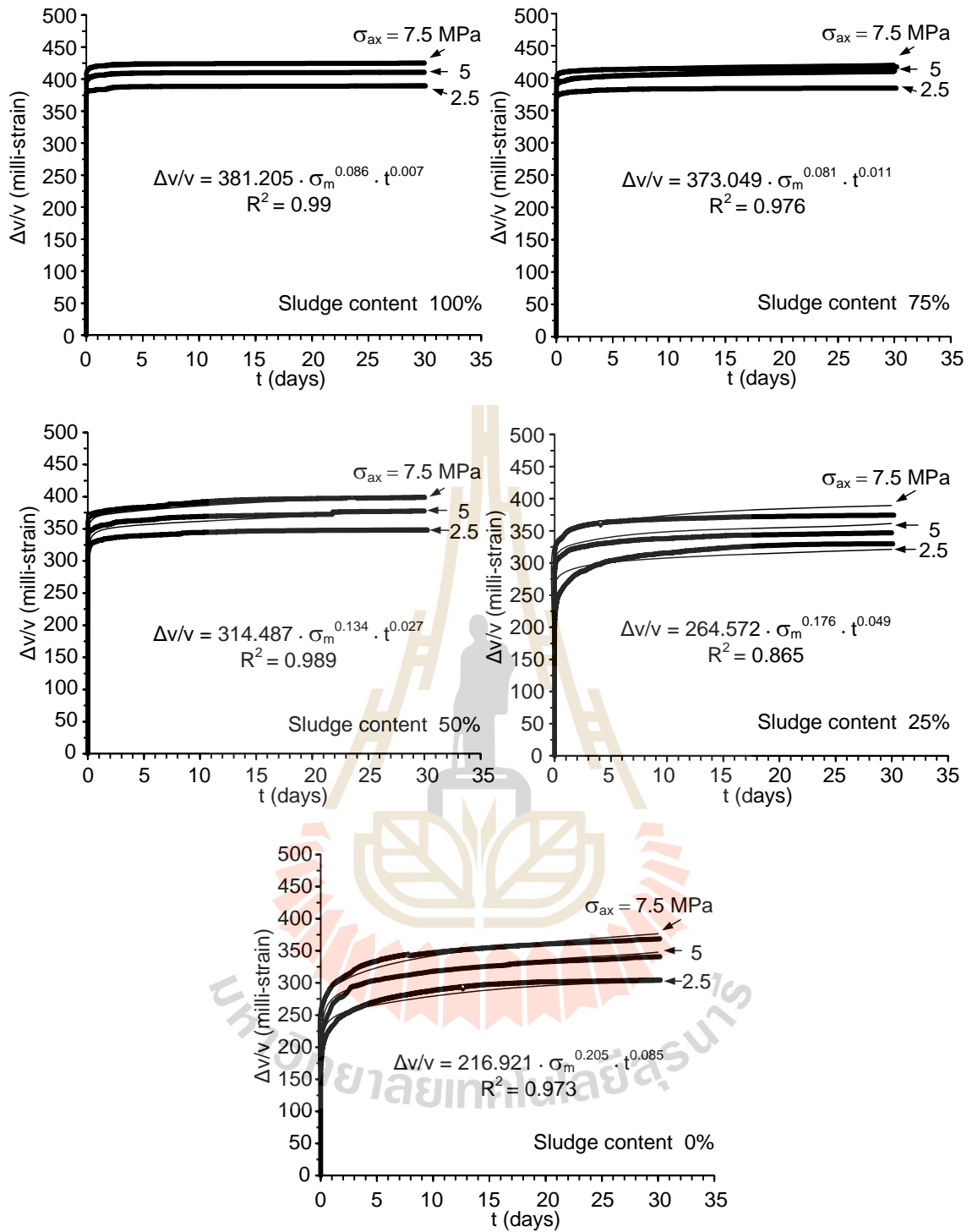
$$k = \varphi \cdot \exp(-k \cdot \sigma_m \cdot t) \quad (5.5)$$

โดยที่ k คือ ความลาดชันศาสตร์
 σ_m คือ ความเค้นเฉลี่ย
 t คือ เวลาในการบดอัด
 φ, k คือ ตัวแปรคงที่

ความแม่นยำระหว่างสมการทางคณิตศาสตร์และผลการทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.898 ค่าตัวแปรคงที่แสดงในตารางที่ 5.3 สมการทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวสามารถนำมาคาดคะเนความซึมผ่านได้เป็นอย่างดี ดังแสดงในรูปที่ 5.5

ตารางที่ 5.2 ตัวแปรของสมการทางคณิตศาสตร์ของความเครียดเชิงปริมาตร

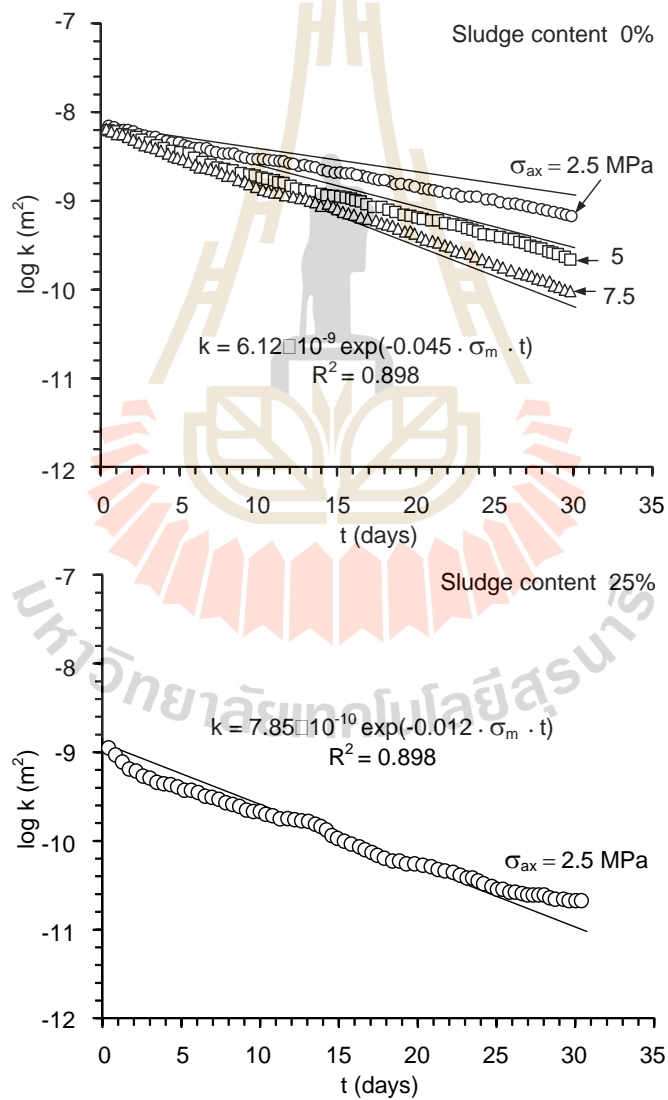
อัตราส่วนดินตะกอน ประปาด่อน้ำหนัก (%)	พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์	ค่าสัมประสิทธิ์ ความสัมพันธ์
100	ϕ	381.205	0.99
	γ	0.086	
	η	0.007	
75	ϕ	373.049	0.976
	γ	0.081	
	η	0.011	
50	ϕ	314.487	0.989
	γ	0.134	
	η	0.027	
25	ϕ	264.572	0.865
	γ	0.176	
	η	0.049	
0	ϕ	216.921	0.973
	γ	0.205	
	η	0.085	



รูปที่ 5.4 ความเครียดเชิงปริมาตรในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรความเค้นกด

ตาราง 5.3 ตัวแปรของสมการทางคณิตศาสตร์ของค่าความซึมผ่าน

อัตราส่วนดิน ตะกอนประปา ต่อน้ำหนัก (%)	พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์	ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์
25	φ	7.85×10^{-10}	0.898
	κ	-0.012	
0	φ	6.12×10^{-9}	0.898
	κ	-0.045	



รูปที่ 5.5 ค่าความซึมผ่านในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรความเค้นกด

5.3.4 ความหนาแน่น (Density)

จากผลการทดสอบที่ระบุว่าความหนาแน่นของตัวอย่างเกล็ดเกลือผสมดินตะกอนประปาจะลดลงเมื่ออัตราส่วนของดินตะกอนประปาเพิ่มขึ้น และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นกดและเวลาในการอัดตัวเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถคาดคะเนได้จากสมการ

$$\rho = \Omega \cdot \sigma_m^{\zeta} \cdot t^{\epsilon} \quad (5.6)$$

โดยที่	ρ	คือ	ความหนาแน่น
	σ_m	คือ	ความเค้นเฉลี่ย
	t	คือ	เวลาในการบดอัด
	Ω, ζ, ϵ	คือ	ตัวแปรคงที่

ความแม่นยำระหว่างสมการทางคณิตศาสตร์และผลการทดสอบมีค่าระหว่าง 0.801 ถึง 0.916 ค่าตัวแปรคงที่แสดงในตารางที่ 5.4 สมการทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวสามารถนำมาคาดคะเนความหนาแน่นได้เป็นอย่างดี ดังแสดงในรูปที่ 5.6

5.3.5 กำลังรับแรงกดในแกนเดียว (Uniaxial compressive strength)

จากผลการทดสอบที่ระบุว่าค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียวจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของดินตะกอนประปาเพิ่มมากขึ้น และจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาในการบดอัดและความเค้นกดมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถคาดคะเนได้จากสมการ

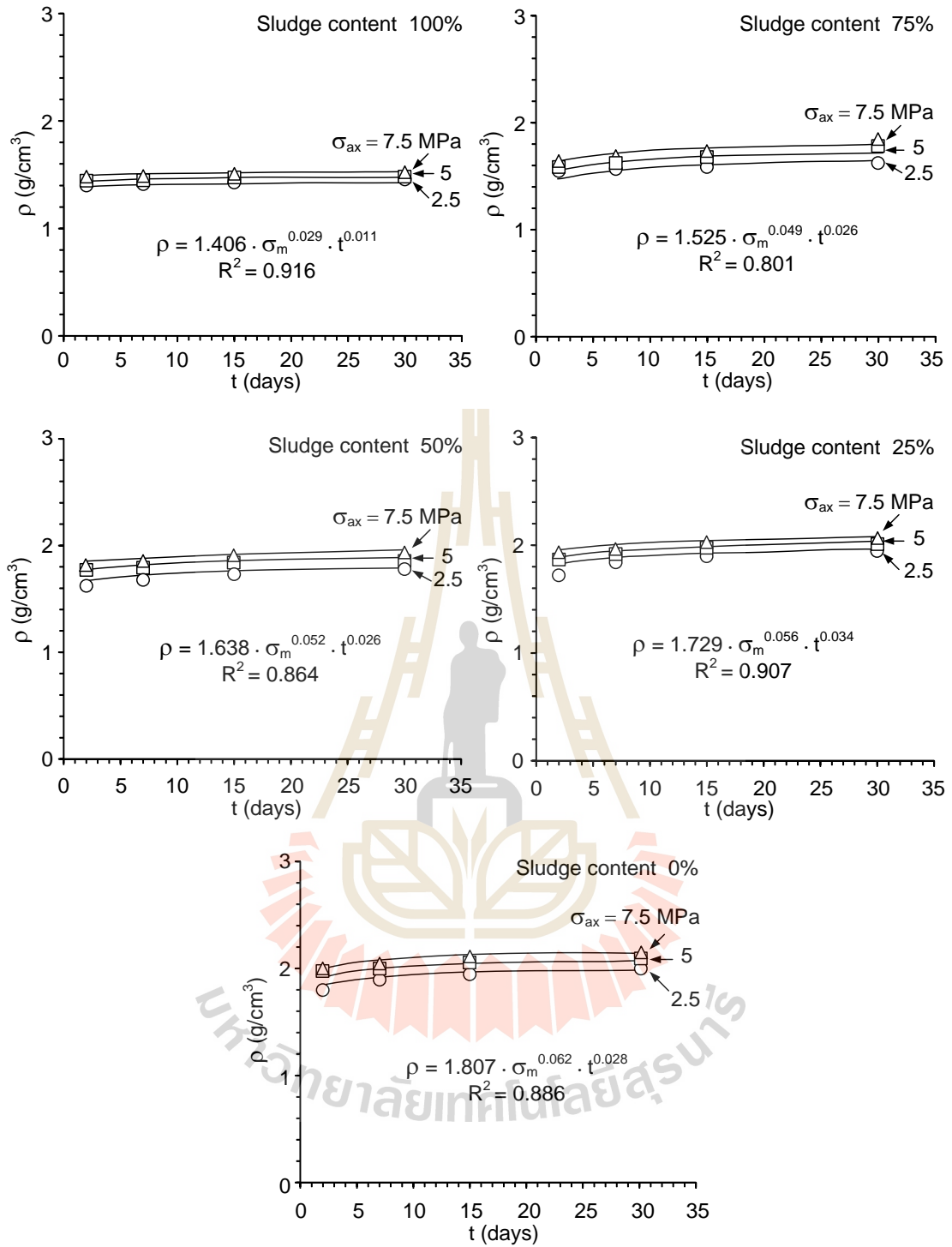
$$\sigma_c = \lambda \cdot \sigma_m^{\mu} \cdot t^{\nu} \quad (5.7)$$

โดยที่	σ_c	คือ	กำลังรับแรงกดในแกนเดียว
	σ_m	คือ	ความเค้นเฉลี่ย
	t	คือ	เวลาในการบดอัด
	λ, μ, ν	คือ	ตัวแปรคงที่

ความแม่นยำระหว่างสมการทางคณิตศาสตร์และผลการทดสอบมีค่าระหว่าง 0.881 ถึง 0.972 ค่าตัวแปรคงที่แสดงในตารางที่ 5.5 สมการทางคณิตศาสตร์สามารถนำมาคาดคะเนกำลังรับแรงกดในแกนเดียวได้เป็นอย่างดี ดังแสดงในรูปที่ 5.7

ตารางที่ 5.4 ตัวแปรสมการทางคณิตศาสตร์ของความหนาแน่น

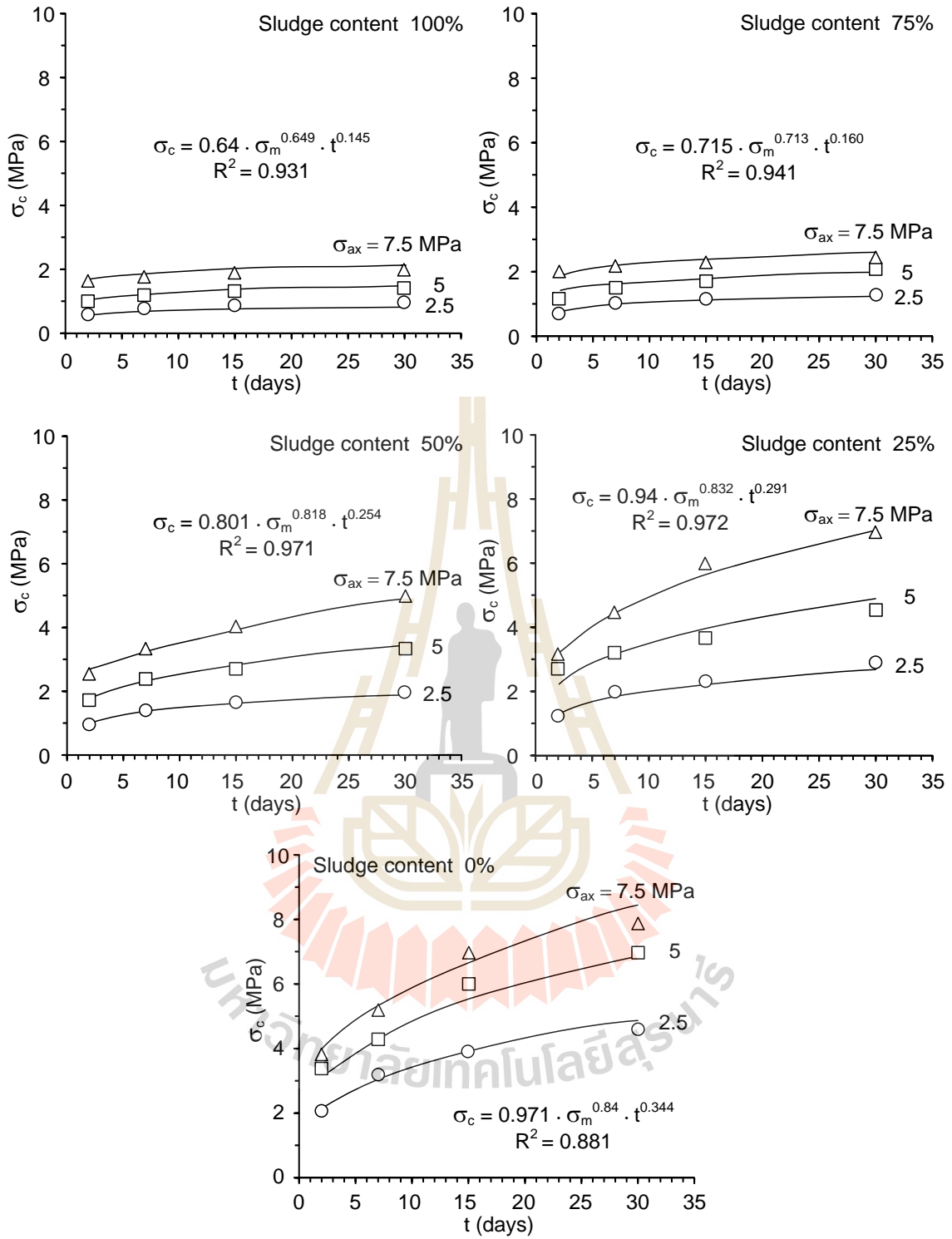
อัตราส่วนดินตะกอนประปา ต่อน้ำหนัก (%)	พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์	ค่าสัมประสิทธิ์ ความสัมพันธ์
100	Ω	1.406	0.916
	ζ	0.029	
	ι	0.011	
75	Ω	1.525	0.800
	ζ	0.049	
	ι	0.026	
50	Ω	1.638	0.864
	ζ	0.052	
	ι	0.028	
25	Ω	1.729	0.907
	ζ	0.056	
	ι	0.034	
0	Ω	1.807	0.886
	ζ	0.062	
	ι	0.028	



รูปที่ 5.6 ความหนาแน่นในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรความเค้นกด

ตารางที่ 5.5 ตัวแปรสมการทางคณิตศาสตร์ของกำลังรับแรงกดในแกนเดียว

อัตราส่วนดินตะกอน ประปาด่อน้ำหนัก (%)	พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์	ค่าสัมประสิทธิ์ ความสัมพันธ์
100	λ	0.64	0.931
	μ	0.649	
	ν	0.145	
75	λ	0.715	0.941
	μ	0.713	
	ν	0.16	
50	λ	0.801	0.971
	μ	0.818	
	ν	0.254	
25	λ	0.94	0.972
	μ	0.832	
	ν	0.291	
0	λ	0.971	0.881
	μ	0.84	
	ν	0.344	



รูปที่ 5.7 กำลังรับแรงกดในแกนเดียวในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรความเค้นกด

5.3.6 ความยืดหยุ่นโมดูลัส (Elastic modulus)

ความแม่นยำระหว่างสมการทางคณิตศาสตร์และผลการทดสอบมีค่าระหว่าง 0.779 ถึง 0.958 ค่าตัวแปรคงที่แสดงในตารางที่ 5.6 สมการดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในการคาดคะเนความยืดหยุ่นโมดูลัสได้เป็นอย่างดี ดังแสดงในรูปที่ 5.8

จากผลการทดสอบที่ระบุว่าความยืดหยุ่นจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของดินตะกอนประปาเพิ่มมากขึ้น และจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาในการบดอัดและความเค้นกกดมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถคาดคะเนได้จากสมการ

$$E = \alpha \cdot \sigma_m^{\zeta} \cdot t^{\varpi} \quad (5.8)$$

โดยที่ E คือ ความยืดหยุ่นโมดูลัส
 σ_m คือ ความเค้นเฉลี่ย
 t คือ เวลาในการบดอัด
 α, ζ, ϖ คือ ตัวแปรคงที่

5.3.7 อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio)

จากผลการทดสอบที่ระบุว่าค่าอัตราส่วนปัวซองจะลดลงเมื่อความเค้นกกด อัตราส่วนของดินตะกอนประปา และเวลาในการบดอัดเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถคาดคะเนได้จากสมการ

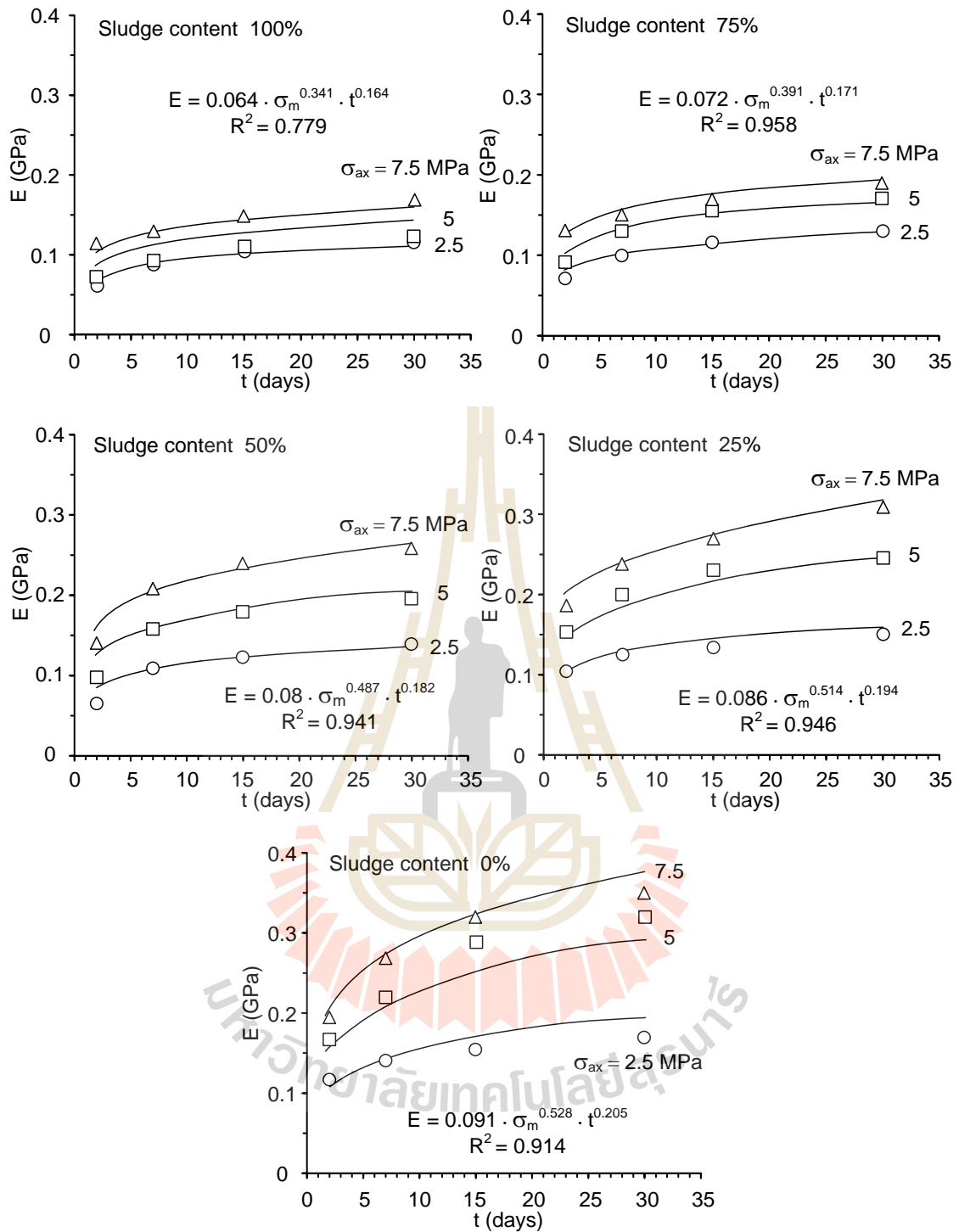
$$v = \omega \cdot \sigma_m^{\xi} \cdot t^{\vartheta} \quad (5.9)$$

โดยที่ v คือ อัตราส่วนปัวซอง
 σ_m คือ ความเค้นเฉลี่ย
 t คือ เวลาในการบดอัด
 ω, ξ, ϑ คือ ตัวแปรคงที่

ความแม่นยำระหว่างสมการทางคณิตศาสตร์และผลการทดสอบมีค่าระหว่าง 0.857 ถึง 0.965 ค่าตัวแปรคงที่แสดงในตารางที่ 5.7 สมการดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในการคาดคะเนค่าอัตราส่วนปัวซองได้เป็นอย่างดี ดังแสดงในรูปที่ 5.9

ตารางที่ 5.6 ตัวแปรสมการทางคณิตศาสตร์ของความยืดหยุ่น

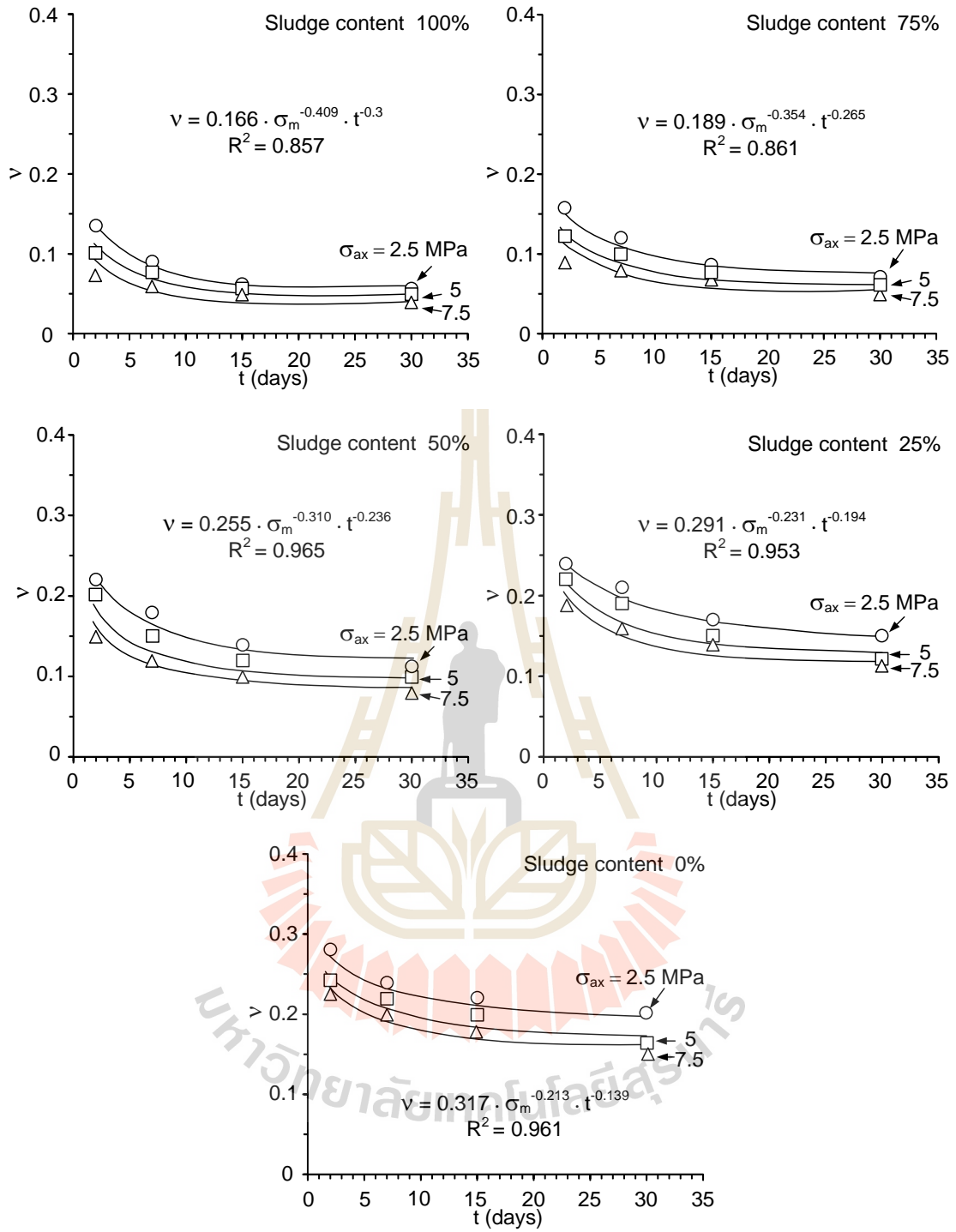
อัตราส่วนดินตะกอน ประปาด่อน้ำหนัก (%)	พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์	ค่าสัมประสิทธิ์ ความสัมพันธ์
100	๓	0.064	0.779
	๔	0.341	
	๕	0.164	
75	๓	0.072	0.958
	๔	0.397	
	๕	0.171	
50	๓	0.08	0.941
	๔	0.487	
	๕	0.182	
25	๓	0.086	0.946
	๔	0.514	
	๕	0.194	
0	๓	0.091	0.914
	๔	0.528	
	๕	0.205	



รูปที่ 5.8 ความยืดหยุ่นโมดูลัสในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรความเค้นกด

ตารางที่ 5.7 ตัวแปรสมการทางคณิตศาสตร์ของอัตราส่วนปัวซอง

อัตราส่วนดินตะกอน ประปาด่อน้ำหนัก (%)	พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์	ค่าสัมประสิทธิ์ ความสัมพันธ์
100	ω	0.166	0.857
	ξ	-0.409	
	δ	-0.300	
75	ω	0.189	0.861
	ξ	-0.354	
	δ	-0.265	
50	ω	0.255	0.965
	ξ	-0.31	
	δ	0.236	
25	ω	0.291	0.953
	ξ	-0.231	
	δ	-0.194	
0	ω	0.317	0.961
	ξ	-0.213	
	δ	-0.139	



รูปที่ 5.9 อัตราส่วนปัวซองในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรความเค้นกด

บทที่ 6

การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

6.1 วัตถุประสงค์

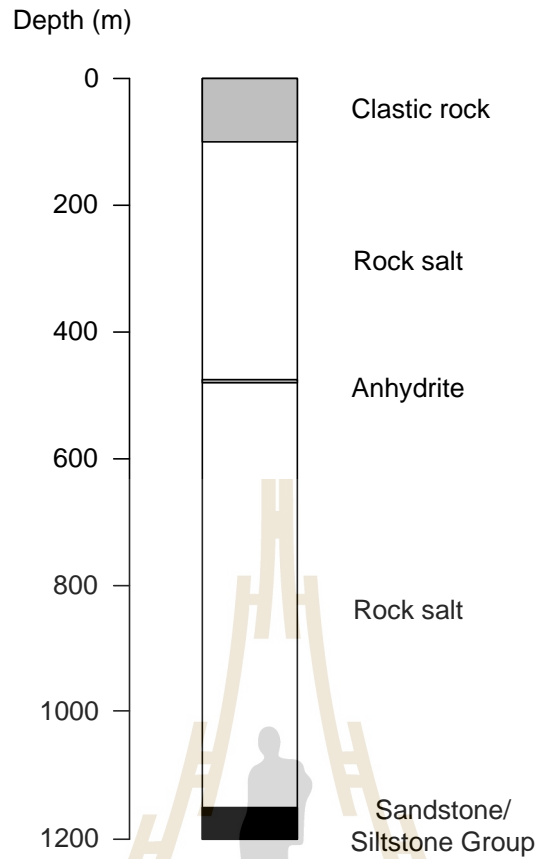
การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม FLAC 4.0 (Itasca, 1992) มีวัตถุประสงค์เพื่อหาประสิทธิภาพของวัสดุถมกลับในเหมืองเกลือและเหมืองโปแตส โดยพิจารณาจากการทรุดตัวของพื้นผิวและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเสาค้ำยัน ในการศึกษาได้ทำการผันแปรอัตราส่วนของดินตะกอนประปา ความหนาของชั้นหินปิดทับ ช่วงเวลาก่อนใส่วัสดุถมกลับ และความสูงของช่องเหมือง

6.2 การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

การศึกษาลักษณะการวางตัวของชั้นเกลือในประเทศไทยได้มาจากข้อมูลการขุดเจาะสำรวจโครงการสำรวจโปแตสในประเทศไทย จำนวน 194 หลุม (Japaksetr and Suwanich, 1977; Suwanich et al., 1982; Suwanich and Ratanajaruraks, 1986; Japaksetr, 1985) สำหรับการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการจำลองทางคอมพิวเตอร์จากลำดับชั้นหินของหลุมเจาะ K-089 ตำบลในเมือง จังหวัดอุบลราชธานี (รูปที่ 6.1) โดยคุณสมบัติของชั้นเกลือเป็นข้อมูลจากงานวิจัยของ Samsri et al. (2010) และ Sriapai et al. (2012) คุณสมบัติของชั้นหินตะกอนเป็นข้อมูลจาก Crosby (2007) และคุณสมบัติของวัสดุถมกลับเป็นข้อมูลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (ตารางที่ 6.1 ถึง 6.3) ในการจำลองได้ทำการผันแปรความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 100, 150 และ 200 m (รูปที่ 6.2) ความสูงของช่องเหมืองเท่ากับ 2, 4 และ 6 m (รูปที่ 6.3) ช่วงเวลาก่อนใส่วัสดุถมกลับคือ 6, 12 และ 24 เดือน

6.3 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์

ผลจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อหาประสิทธิภาพของวัสดุถมกลับในช่วงระยะเวลา 50 ปี โดยพิจารณาถึงการทรุดตัวของพื้นผิวและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเสาค้ำยันภายใต้การผันแปรอัตราส่วนดินตะกอนประปา ความหนาของชั้นหินปิดทับ ช่วงเวลาก่อนใส่วัสดุถมกลับ และความสูงของช่องเหมือง มีดังต่อไปนี้



รูปที่ 6.1 ลำดับชั้นเกลือหินและชั้นหินตะกอน หลุม K-089 ตำบลในเมือง จังหวัดอุดรธานี

ตารางที่ 6.1 คุณสมบัติการคืบของหินเกลือ (Samsri et al., 2010)

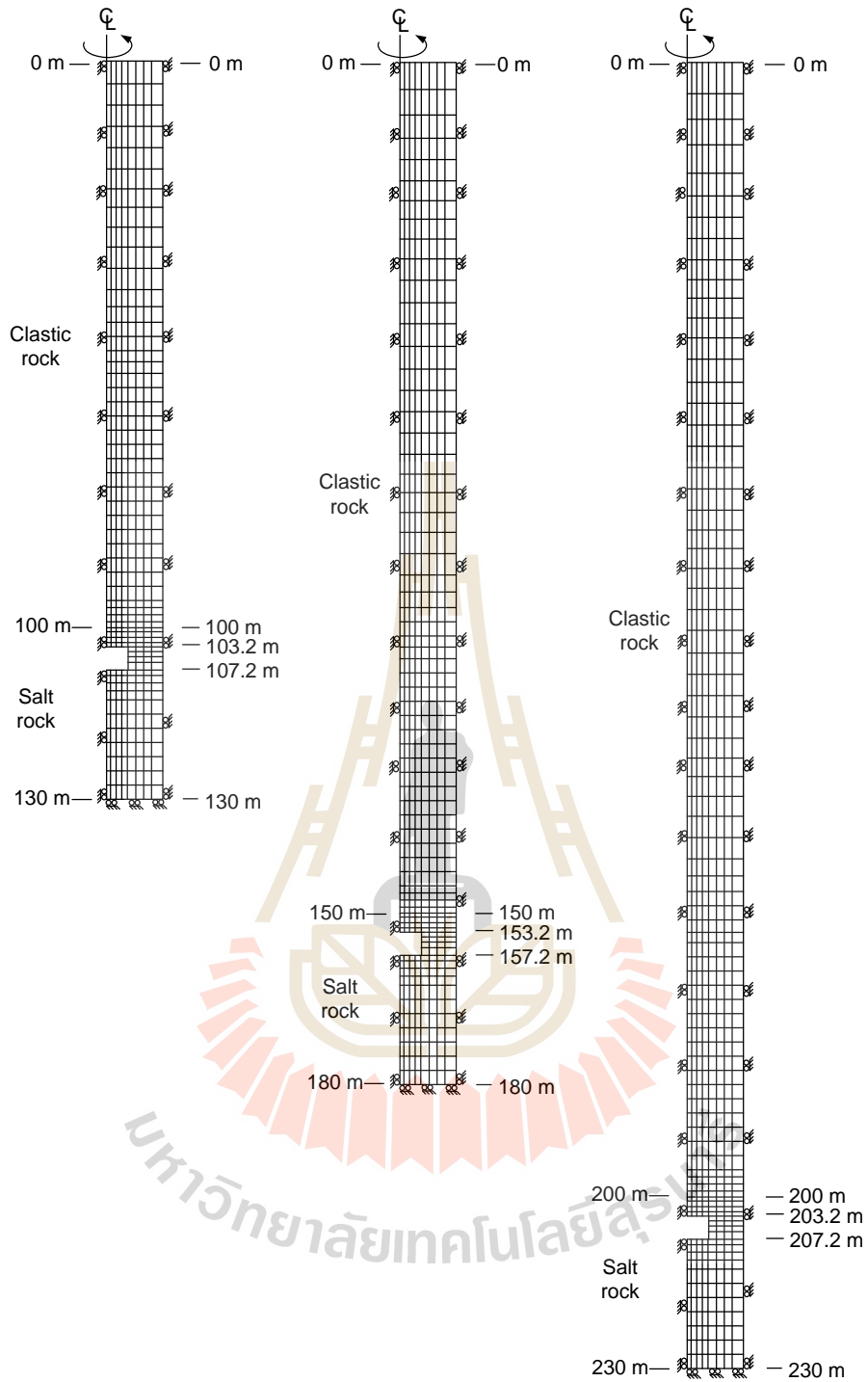
พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์
Elastic modulus, E_1 (GPa)	1.90
Spring constant in visco-elastic phase, E_2 (GPa)	5.79
Visco-plastic coefficient in steady-state phase, η_1 (GPa-day)	0.34
Visco-plastic coefficient in transient phase, η_2 (GPa-day)	0.71
Density, γ (g/cm ³)	2.20

ตารางที่ 6.2 คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินเกลือ (Crosby, 2007 และ Sriapai et al., 2012)

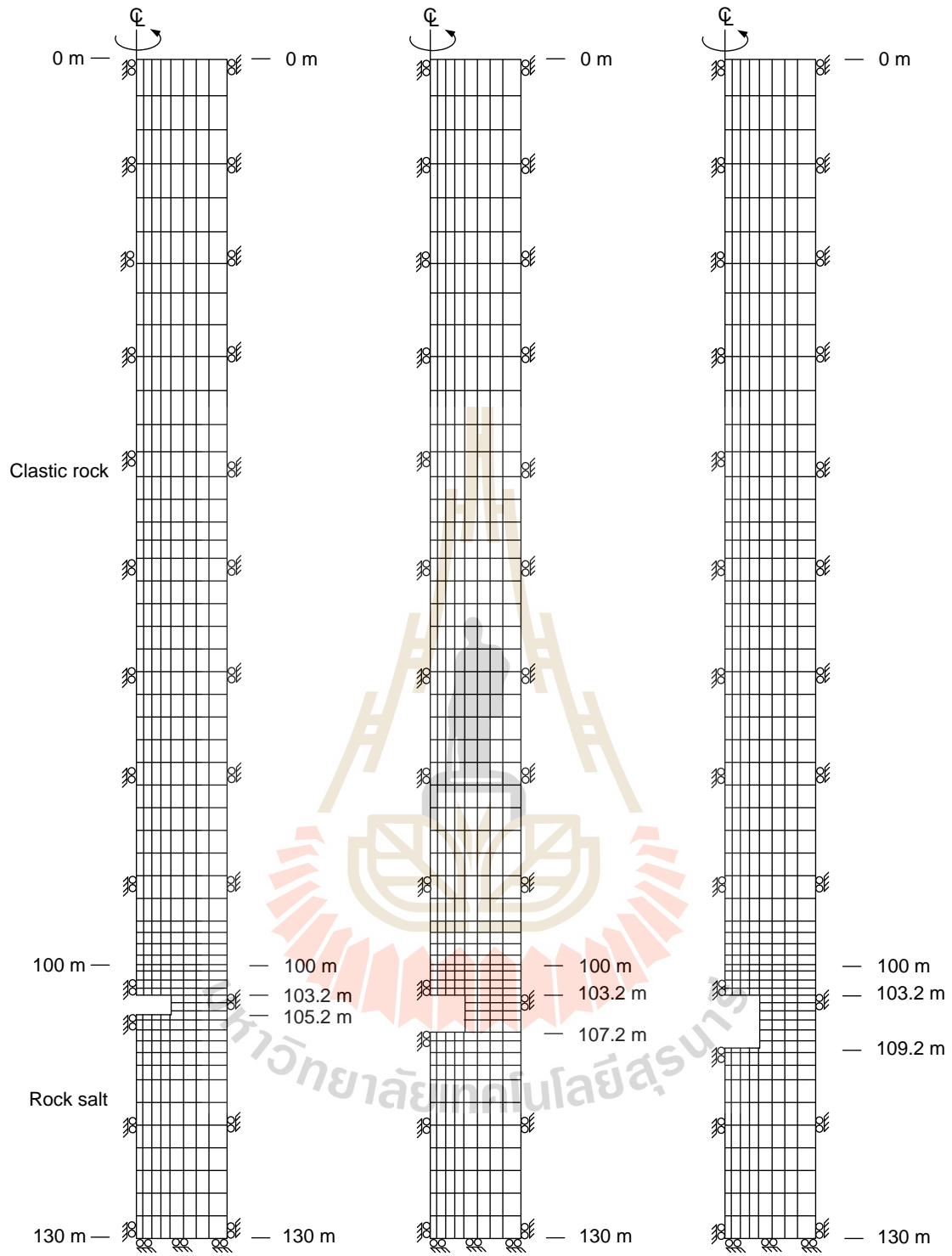
พารามิเตอร์	ชนิดหิน	
	หินตะกอน	เกลือหิน
Density (kg/m ³)	2490	2150
Bulk Modulus (GPa)	1.70	2.22
Shear Modulus (GPa)	0.30	1.67
Cohesion (MPa)	3.50	0.50
Internal Friction Angle (Degrees)	25	50
Tension (MPa)	0.83	1.00

ตารางที่ 6.3 คุณสมบัติของวัสดุถมกลับ

วัสดุ	คุณสมบัติ				
	ความหนาแน่น (kg/m ³)	Elastic modulus (GPa)	อัตราส่วนปัวซอง	มุมสัมประสิทธิ์เสียดทาน (degree)	ความเค้นยึดติด (MPa)
วัสดุถมกลับ มีอัตราส่วนดิน ตะกอนประปา 25%	2040	0.31	0.11	37	0.13
วัสดุถมกลับ มีอัตราส่วนดิน ตะกอนประปา 50%	1920	0.26	0.08	34	0.09
วัสดุถมกลับ มีอัตราส่วนดิน ตะกอนประปา 75%	1820	0.19	0.05	30	0.07



รูปที่ 6.2 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ภายใต้การผันแปรความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 100, 150 และ 200 m และความหนาของชั้นเกลือเท่ากับ 30 m



รูปที่ 6.3 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ภายใต้การผันแปรความสูงของช่องเหมืองเท่ากับ 2, 4 และ 6 m ความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 100 m และความหนาของชั้นเกลือเท่ากับ 30 m

6.3.1 ความหนาของชั้นหินปิดทับ

การจำลองทางคอมพิวเตอร์ได้ทำการผันแปรความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 100, 150 และ 200 m กำหนดให้ชั้นเกลือหนาเท่ากับ 30 m ความสูงของช่องเหมืองเท่ากับ 4 m ช่วงเวลาก่อนใส่วัสดุถมกลับคือ 24 เดือน รูปแบบการจำลองลักษณะการวางตัวของชั้นหินแสดงในรูปที่ 6.2 ผลการจำลองระบุว่า การทรุดตัวของบ้นพื้นผิวและการเปลี่ยนรูปร่างของเสาค้ำยันจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของชั้นหินปิดทับเพิ่มขึ้น (รูปที่ 6.4 ถึง 6.6) การทรุดตัวของบ้นพื้นผิวที่มากที่สุดอยู่ในช่วง 5.72 ถึง 11.14 cm โดยพบว่าอัตราส่วนดินตะกอนประปาเท่ากับ 25% จะมีความเหมาะสมที่สุดสำหรับใช้เป็นวัสดุถมกลับ เนื่องจากอัตราส่วนดังกล่าวทำให้คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของวัสดุถมกลับมีค่าสูงที่สุด ส่งผลให้การทรุดตัวของบ้นพื้นผิวลดลง กล่าวคือการทรุดตัวอยู่ในช่วง 4.92 ถึง 7.48 cm ผลกระทบจากความหนาของชั้นหินปิดทับแสดงในตารางที่ 6.4 ถึง 6.8

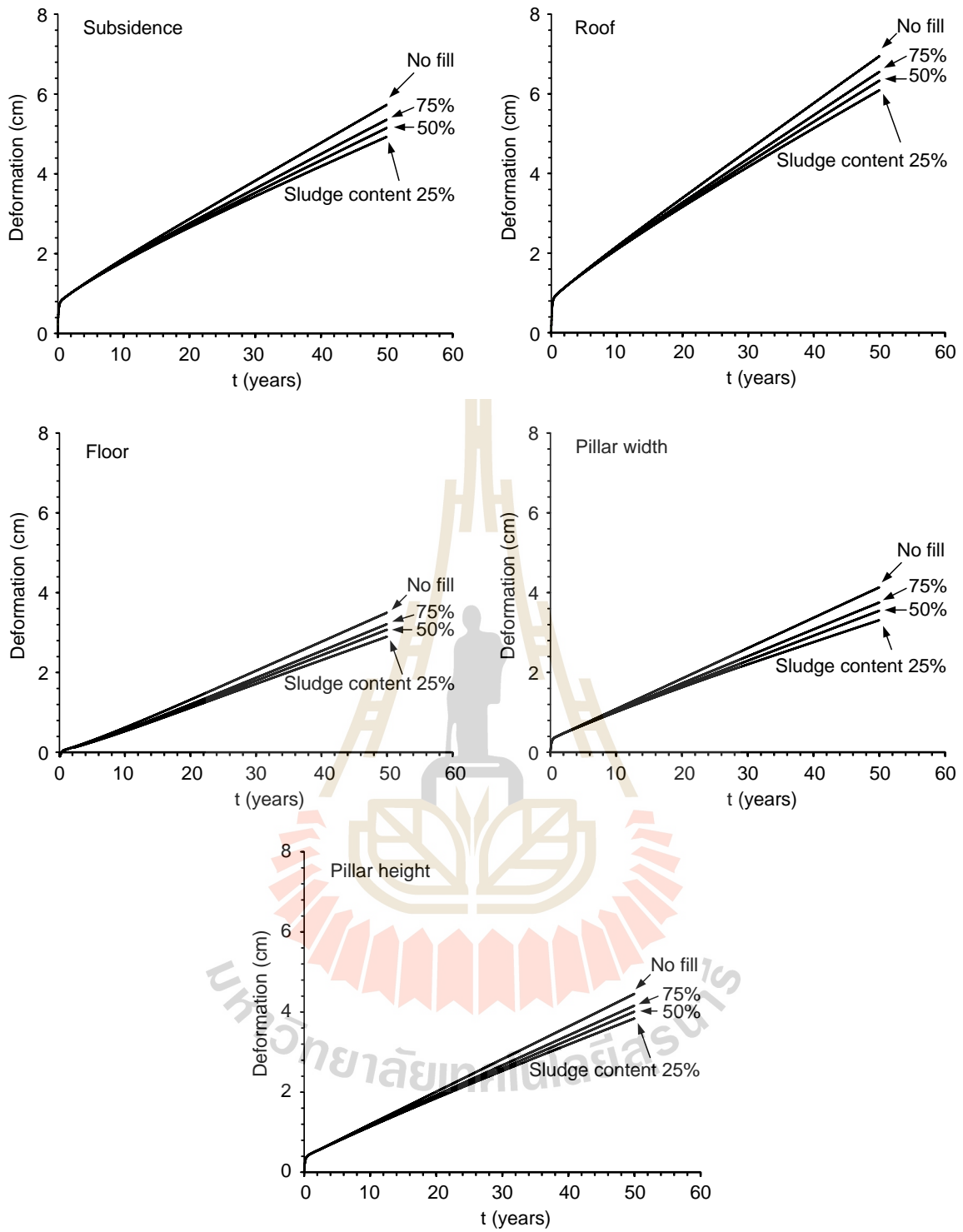
6.3.2 ความสูงของช่องเหมือง

การจำลองทางคอมพิวเตอร์ได้ทำการผันแปรความสูงของช่องเหมืองเท่ากับ 2, 4 และ 6 m (รูปที่ 6.3) โดยกำหนดความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 100 m ความหนาของชั้นเกลือเท่ากับ 30 m และช่วงเวลาก่อนใส่วัสดุถมกลับคือ 24 เดือน ผลการจำลองระบุว่า การทรุดตัวของบ้นพื้นผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของช่องเหมืองเพิ่มขึ้น การทรุดตัวของบ้นพื้นผิวที่มากที่สุดอยู่ในช่วง 4.15 ถึง 7.52 cm ซึ่งเป็นผลจากการไม่ได้ใส่วัสดุถมกลับ และเมื่อมีการใส่วัสดุถมกลับที่มีอัตราส่วนของดินตะกอนประปา 25% โดยน้ำหนัก ส่งผลให้การทรุดตัวมีค่าลดลงอยู่ในช่วง 3.93 ถึง 5.91 cm การเปรียบเทียบการทรุดตัวและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเสาค้ำยันภายใต้การผันแปรความสูงของช่องเหมืองแสดงในรูปที่ 6.7 และ 6.8

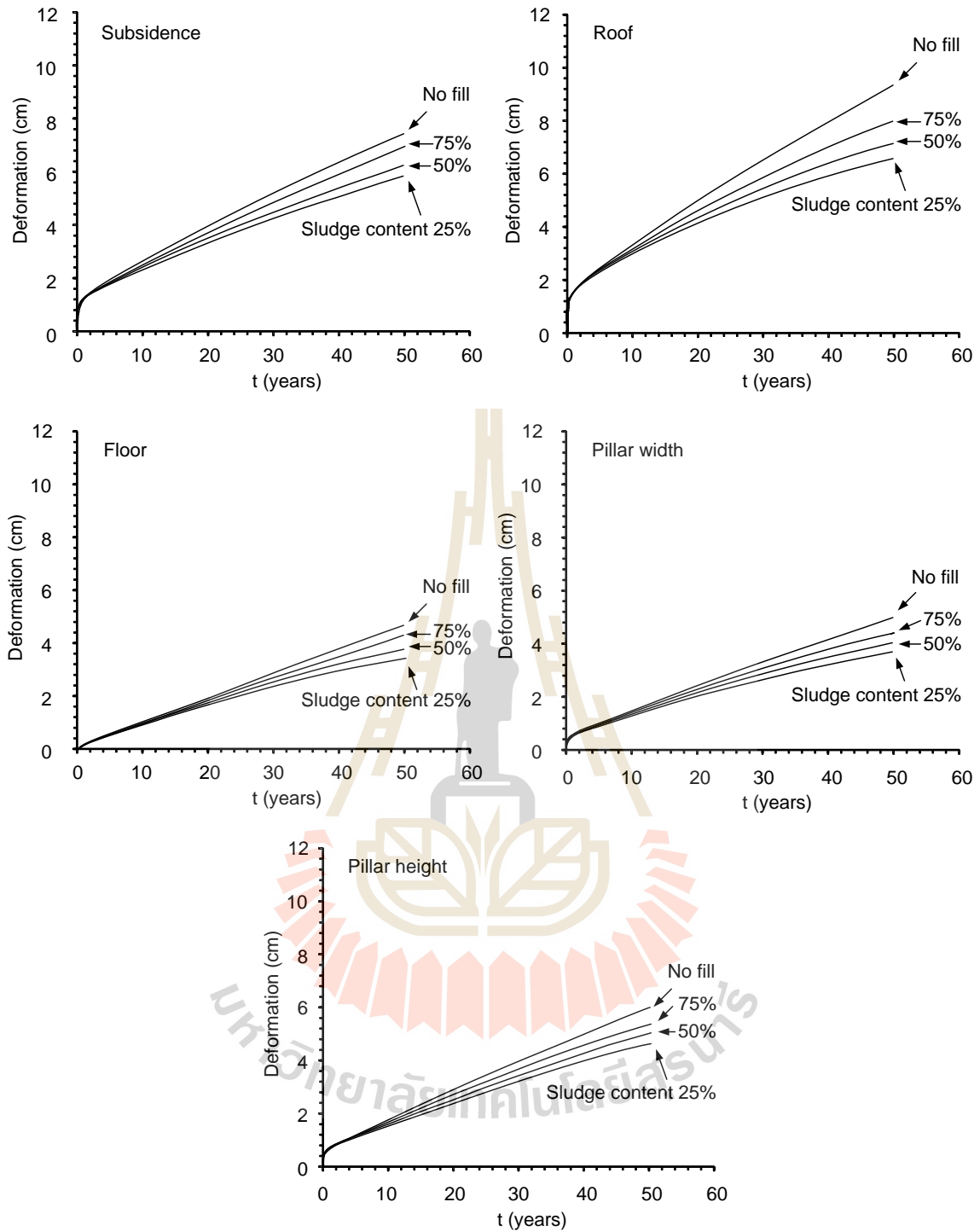
6.3.3 ช่วงเวลาก่อนใส่วัสดุถมกลับ

การจำลองทางคอมพิวเตอร์ได้ทำการผันแปรช่วงเวลาก่อนใส่วัสดุถมกลับเป็นระยะเวลา 6, 12 และ 24 เดือน โดยกำหนดความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 100 m ความหนาของชั้นเกลือเท่ากับ 30 m และความสูงของช่องเหมืองเท่ากับ 4 m ผลการจำลองระบุว่า การทรุดตัวของบ้นพื้นผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อช่วงเวลาก่อนใส่วัสดุถมกลับเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6.9 และ 6.10 โดยมีการทรุดตัวสูงสุดเท่ากับ 5.72 m และการทรุดตัวน้อยที่สุดอยู่ในช่วง 4.58 ถึง 4.92 cm

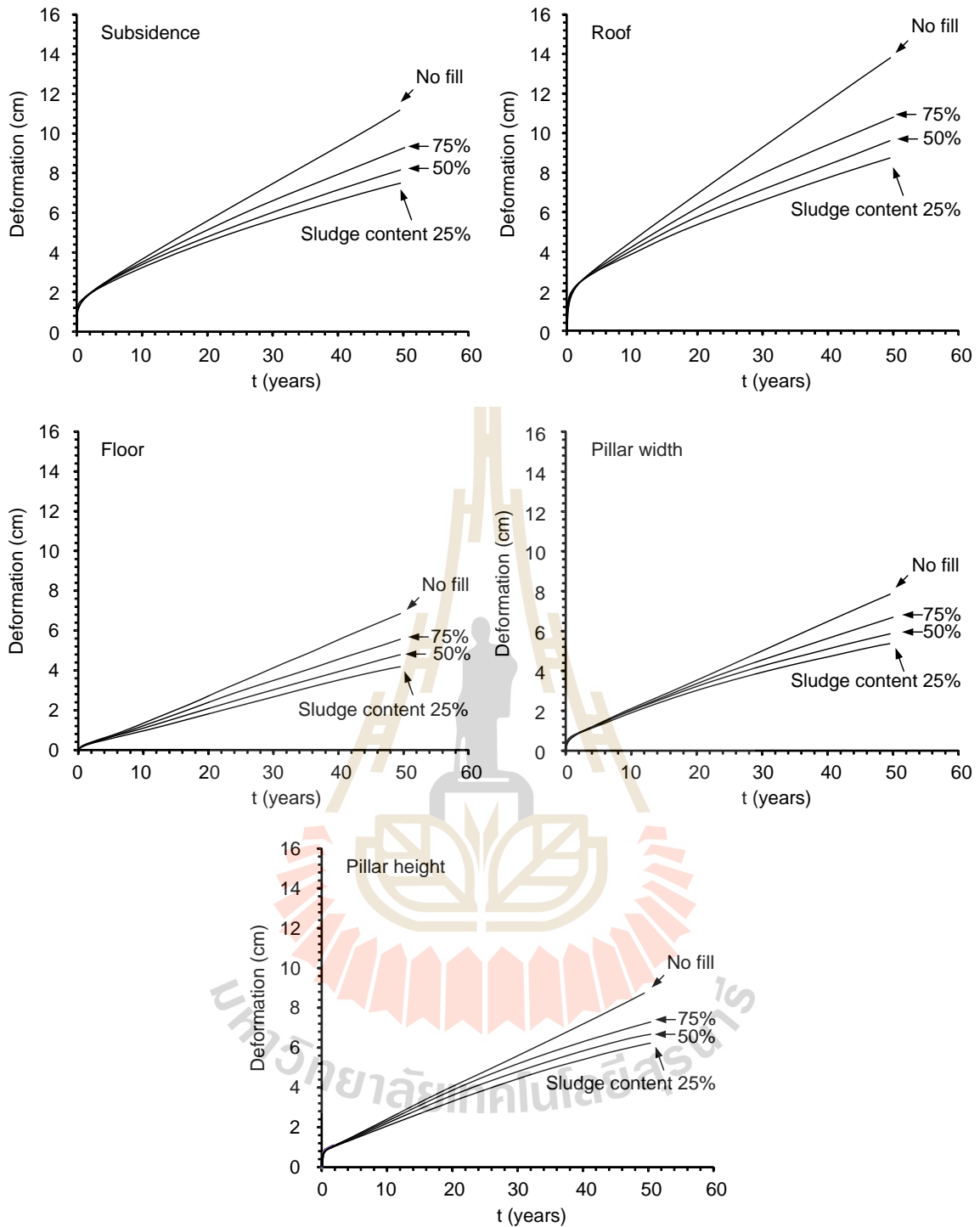
จากผลการจำลองคอมพิวเตอร์พบว่าตัวอย่างเกลือผสมดินตะกอนประปาสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุถมกลับในช่องเหมืองเกลือและโปแตสเพื่อลดการทรุดตัวของบ้นพื้นผิวและลดการเปลี่ยนรูปร่างของเสาค้ำยันได้ โดยอัตราส่วนดินตะกอนประปาเท่ากับ 25% โดยน้ำหนัก ถือว่ามีความเหมาะสมที่สุดสำหรับนำมาใช้เป็นวัสดุถมกลับ เนื่องจากอัตราส่วนดังกล่าวทำให้วัสดุถมกลับมีความแข็งแรงมากที่สุด ส่งผลให้ลดการเปลี่ยนรูปร่างของเสาค้ำยันและลดการทรุดตัวของบ้นพื้นผิวได้



รูปที่ 6.4 การทรุดตัวบริเวณพื้นผิวและการเปลี่ยนรูปร่างของเสาค้ำยันในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรอัตราส่วนดินตะกอนประปา โดยความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 100 m ช่วงเวลาก่อนใส่วัสดุถมกลับ 24 เดือน และความสูงของช่องเหมืองเท่ากับ 4 m



รูปที่ 6.5 การทรุดตัวบริเวณพื้นผิวและการเปลี่ยนรูปร่างของเสาค้ำยันในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรอัตราส่วนดินตะกอนประปา โดยความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 150 m ช่วงเวลาก่อนใส่วัสดุถมกลับ 24 เดือน และความสูงของช่องเหมืองเท่ากับ 4 m



รูปที่ 6.6 การทรุดตัวบริเวณพื้นผิวและการเปลี่ยนรูปร่างของเสาค้ำยันในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรอัตราส่วนดินตะกอนประปา โดยความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 200 m ช่วงเวลาก่อนใส่วัสดุถมกลับ 24 เดือน และความสูงของช่องเหมืองเท่ากับ 4 m

ตารางที่ 6.4 ผลการทรุดตัวของบริเวณพื้นผิวจากโปรแกรม FLAC 4.0

สภาวะ			การทรุดตัวของผิวดินเมื่อเวลาผ่านไป 50 ปี (cm)			
ความหนาของ ชั้นตะกอน ปิดทับ (m)	ช่วงเวลา ก่อนใส่วัสดุ ถมกลับ (เดือน)	ความสูง ของช่อง เหมือง (m)	ไม่ใส่ วัสดุถม กลับ	ใส่วัสดุถมกลับ มีอัตราส่วน ดินตะกอนประปา 25%	ใส่วัสดุถมกลับ มีอัตราส่วนดิน ตะกอนประปา 50%	ใส่วัสดุถมกลับ มีอัตราส่วน ดินตะกอนประปา 75%
100	6	4	5.72	4.58	5.02	5.23
100	12	4	5.72	4.80	5.07	5.29
100	24	4	5.72	4.92	5.15	5.35
100	24	2	4.15	3.93	3.98	4.03
100	24	6	7.52	5.91	6.32	6.67
150	24	4	7.43	5.80	6.21	6.80
200	24	4	11.14	7.48	8.15	9.12

ตารางที่ 6.5 ผลการเปลี่ยนรูปร่างของหลังคาช่องเหมืองจากโปรแกรม FLAC 4.0

สภาวะ			การทรุดตัวของผิวดินเมื่อเวลาผ่านไป 50 ปี (cm)			
ความหนาของ ชั้นตะกอน ปิดทับ (m)	ช่วงเวลา ก่อนใส่วัสดุ ถมกลับ (เดือน)	ความสูง ของช่อง เหมือง (m)	ไม่ใส่ วัสดุถม กลับ	ใส่วัสดุถมกลับ มีอัตราส่วน ดินตะกอนประปา 25%	ใส่วัสดุถมกลับ มีอัตราส่วนดิน ตะกอนประปา 50%	ใส่วัสดุถมกลับ มีอัตราส่วน ดินตะกอนประปา 75%
100	6	4	6.94	5.91	6.15	6.39
100	12	4	6.94	6.02	6.23	6.47
100	24	4	6.94	6.09	6.33	6.55
100	24	2	5.30	5.05	5.11	5.18
100	24	6	8.80	7.13	7.55	7.92
150	24	4	9.35	6.70	7.12	7.98
200	24	4	13.84	8.70	9.58	10.87

ตารางที่ 6.6 ผลการเปลี่ยนรูปร่างของพื้นที่ช่องเหมืองจากโปรแกรม FLAC 4.0

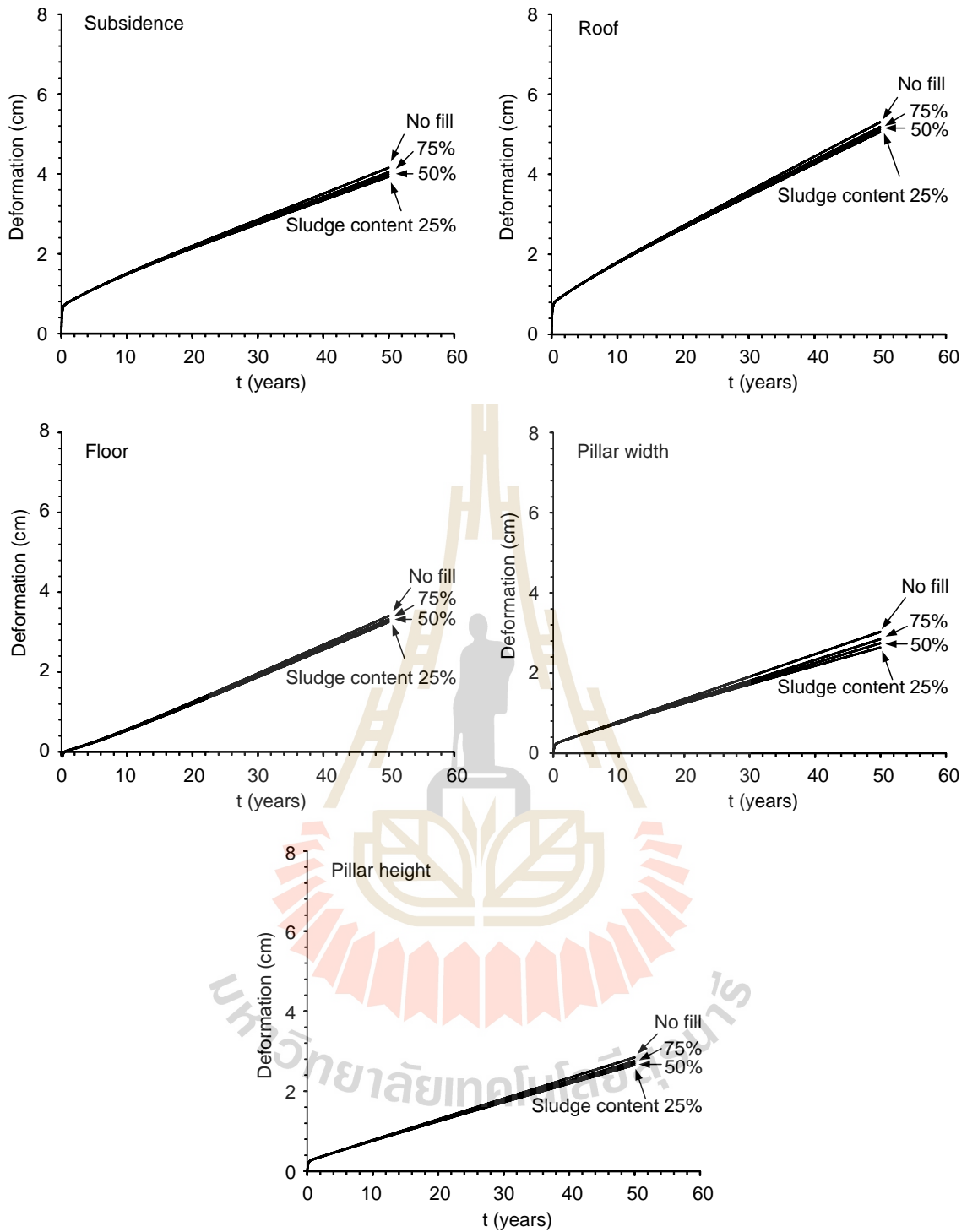
สภาวะ			การทรุดตัวของผิวดินเมื่อเวลาผ่านไป 50 ปี (cm)			
ความหนาของ ชั้นตะกอน ปิดทับ (m)	ช่วงเวลา ก่อนใส่วัสดุ ถมกลับ (เดือน)	ความสูง ของช่อง เหมือง (m)	ไม่ใส่ วัสดุถม กลับ	ใส่วัสดุถมกลับ มีอัตราส่วน ดินตะกอนประปา 25%	ใส่วัสดุถมกลับ มีอัตราส่วนดิน ตะกอนประปา 50%	ใส่วัสดุถมกลับ มีอัตราส่วน ดินตะกอนประปา 75%
100	6	4	3.50	2.77	2.95	3.10
100	12	4	3.50	2.82	3.00	3.15
100	24	4	3.50	2.90	3.07	3.21
100	24	2	3.40	3.25	3.29	3.32
100	24	6	3.55	3.00	3.15	3.31
150	24	4	4.69	3.40	3.77	4.30
200	24	4	6.87	4.22	4.75	5.53

ตารางที่ 6.7 ผลการเปลี่ยนรูปร่างด้านข้างของเสาค้ำยันจากโปรแกรม FLAC 4.0

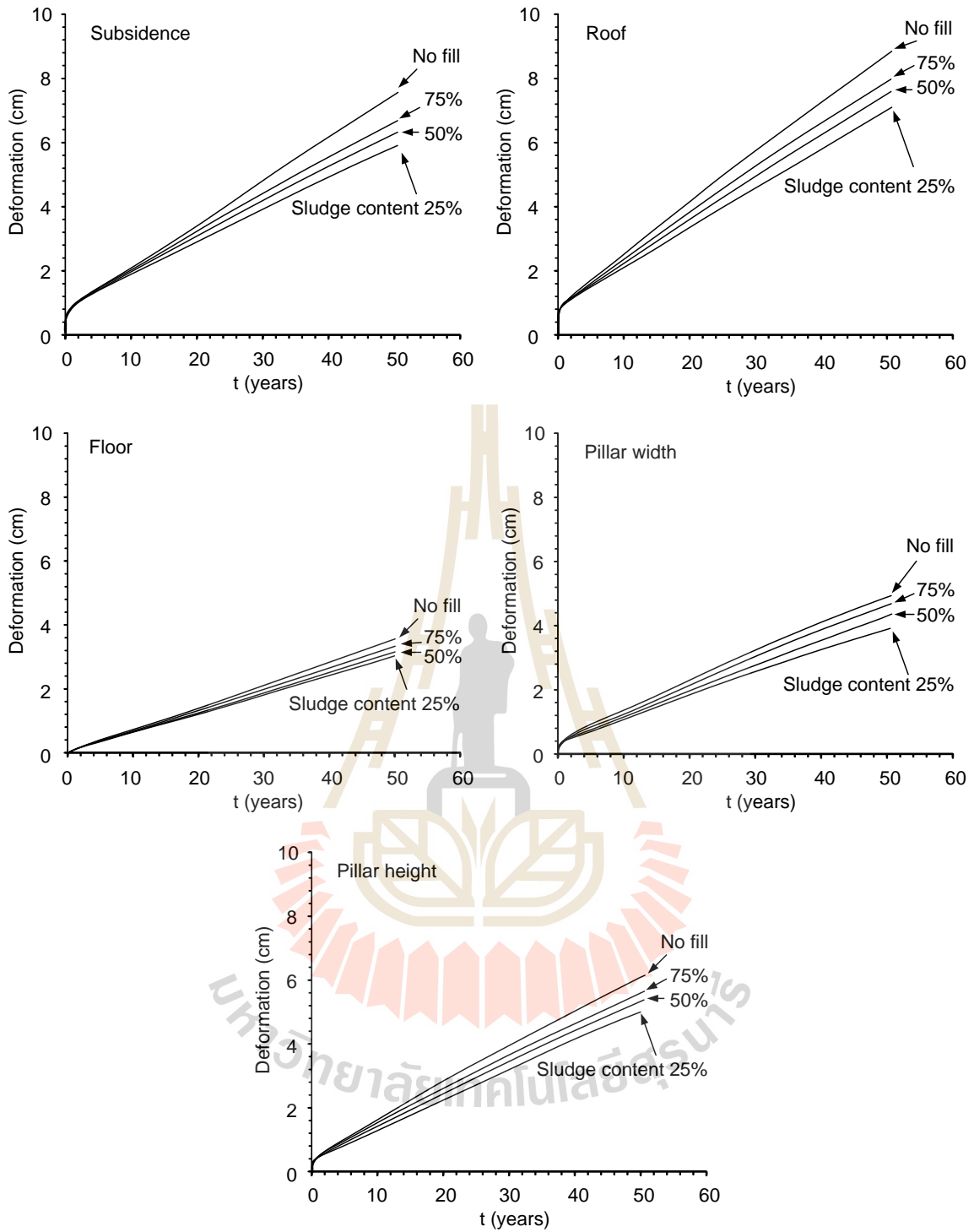
สภาวะ			การทรุดตัวของผิวดินเมื่อเวลาผ่านไป 50 ปี (cm)			
ความหนาของ ชั้นตะกอน ปิดทับ (m)	ช่วงเวลา ก่อนใส่วัสดุ ถมกลับ (เดือน)	ความสูง ของช่อง เหมือง (m)	ไม่ใส่ วัสดุถม กลับ	ใส่วัสดุถมกลับ มีอัตราส่วน ดินตะกอนประปา 25%	ใส่วัสดุถมกลับ มีอัตราส่วนดิน ตะกอนประปา 50%	ใส่วัสดุถมกลับ มีอัตราส่วน ดินตะกอนประปา 75%
100	6	4	4.13	3.11	3.45	3.67
100	12	4	4.13	3.22	3.49	3.71
100	24	4	4.13	3.31	3.54	3.75
100	24	2	3.03	2.64	2.74	2.84
100	24	6	4.93	3.98	4.34	4.66
150	24	4	4.99	3.72	4.00	4.42
200	24	4	7.85	5.40	5.85	6.51

ตารางที่ 6.8 ผลการเปลี่ยนรูปร่างความสูงของเสา ค้ำยันจากโปรแกรม FLAC 4.0

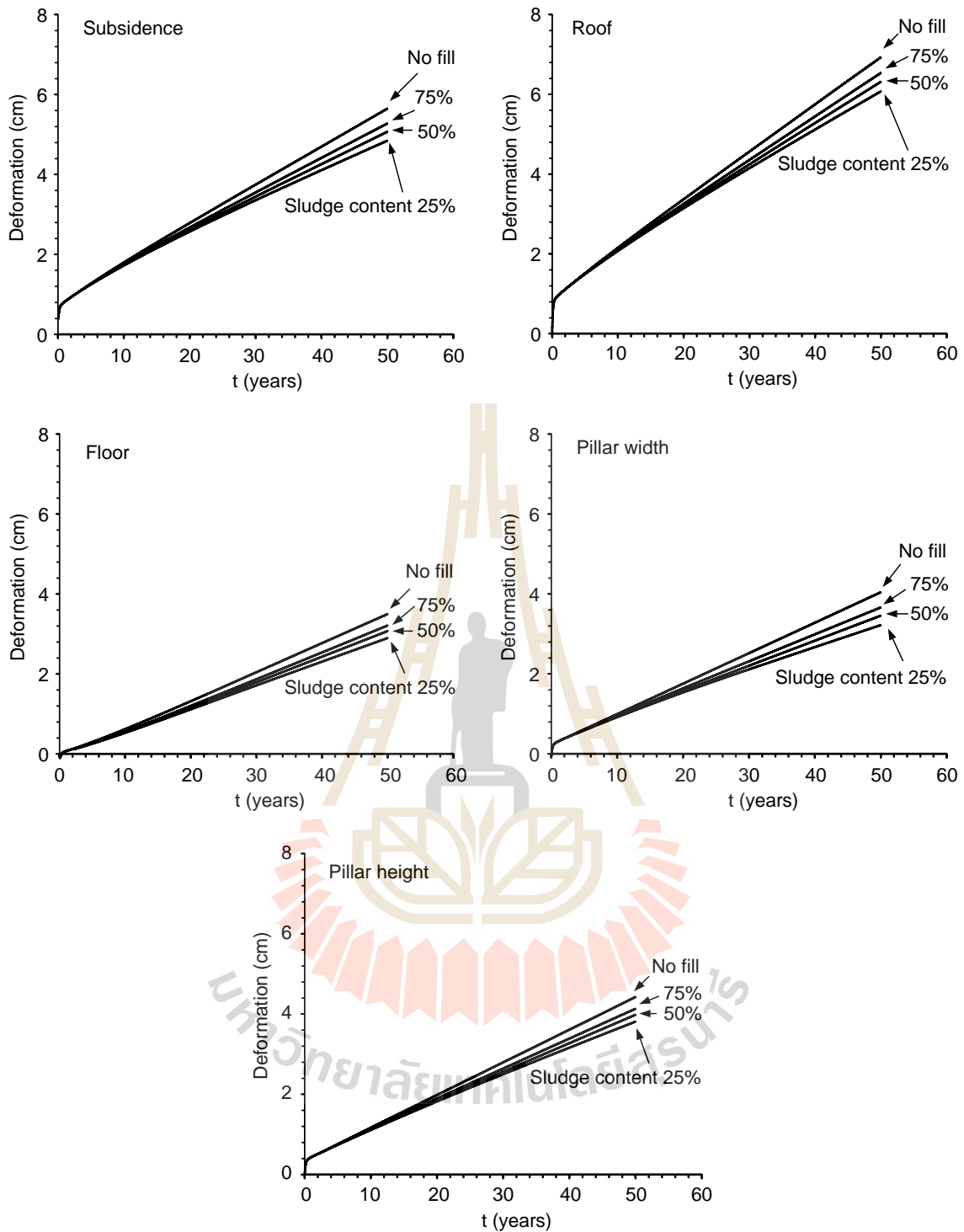
สภาวะ			การทรุดตัวของผิวดินเมื่อเวลาผ่านไป 50 ปี (cm)			
ความหนาของ ชั้นตะกอน ปิดทับ (m)	ช่วงเวลา ก่อนใส่วัสดุ ถมกลับ (เดือน)	ความสูง ของช่อง เหมือง (m)	ไม่ใส่ วัสดุถม กลับ	ใส่วัสดุถมกลับ มีอัตราส่วน ดินตะกอนประปา 25%	ใส่วัสดุถมกลับ มีอัตราส่วนดิน ตะกอนประปา 50%	ใส่วัสดุถมกลับ มีอัตราส่วน ดินตะกอนประปา 75%
100	6	4	4.45	3.55	3.91	4.08
100	12	4	4.45	3.78	3.96	4.13
100	24	4	4.45	3.84	4.01	4.16
100	24	2	2.84	2.65	2.70	2.74
100	24	6	6.15	5.03	5.32	5.58
150	24	4	5.98	4.62	4.91	5.33
200	24	4	8.72	6.21	6.66	7.31



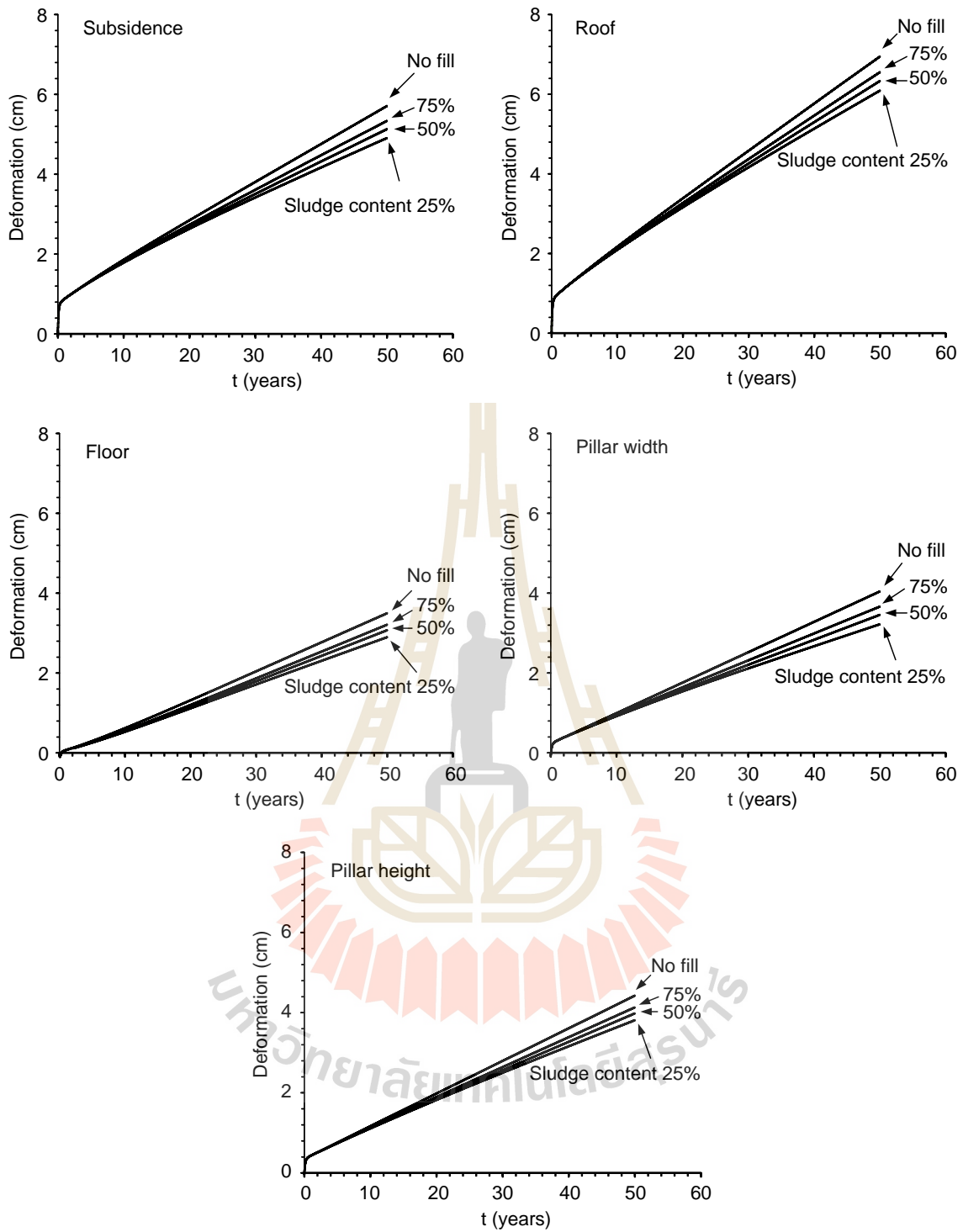
รูปที่ 6.7 การทรุดตัวบริเวณพื้นผิวและการเปลี่ยนรูปร่างของเสาค้ำยันในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรอัตราส่วนดินตะกอนประปา โดยความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 100 m ช่วงเวลาดอนใส่วัสดุถมกลับ 24 เดือน และความสูงของช่องเหมืองเท่ากับ 2 m



รูปที่ 6.8 การทรุดตัวบริเวณพื้นผิวและการเปลี่ยนรูปร่างของเสาค้ำยันในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรอัตราส่วนดินตะกอนประปา โดยความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 100 m ช่วงเวลาดำเนินการวัสดุถมกลับ 24 เดือน และความสูงของช่องเหมืองเท่ากับ 6 m



รูปที่ 6.9 การทรุดตัวบริเวณพื้นผิวและการเปลี่ยนรูปร่างของเสาค้ำยันในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรอัตราส่วนดินตะกอนประปา โดยความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 100 m ช่วงเวลาดำเนินการวัสดุถมกลับ 6 เดือน และความสูงของช่องเหมืองเท่ากับ 4 m



รูปที่ 6.10 การทรุดตัวบริเวณพื้นผิวและการเปลี่ยนรูปร่างของเสาค้ำยันในเชิงเวลาภายใต้การผันแปรอัตราส่วนดินตะกอนประปา โดยความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 100 m ช่วงเวลาก่อนใส่วัสดุถมกลับ 12 เดือน และความสูงของช่องเหมืองเท่ากับ 4 m

บทที่ 7

วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

7.1 วิเคราะห์ผล

ผลจากการทดสอบการอัดตัวโดยใช้กระบอกสแตนเลสจะให้ค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกน และปริมาณน้ำเกลือที่เหมาะสมสูงกว่าการทดสอบการอัดตัวแบบมาตรฐาน โดยขนาดของกระบอกสแตนเลสที่ใช้ในการทดสอบจะมีขนาดใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับขนาดกระบอกตามมาตรฐาน โดย Aydilek et al. (1999) ได้ศึกษาถึงผลกระทบของขนาดกระบอกสองขนาดสำหรับทดสอบการอัดตัวของตะกอนประปา โดยกระบอกเล็กจะมีขนาดตามมาตรฐาน ASTM D2435-04 (2004) คือมีรัศมีวงในเท่ากับ 50 mm และความสูงเท่ากับ 12 mm ส่วนกระบอกขนาดใหญ่จะมีรัศมีวงในเท่ากับ 50 mm และความสูงเท่ากับ 48 mm ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากระบอกขนาดใหญ่จะให้ค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกนสูงกว่ากระบอกขนาดเล็ก เนื่องจากมีช่องว่างระหว่างเม็ดตะกอนในกระบอกมากกว่า

ความเครียดเชิงปริมาตรของตัวอย่างเกล็ดเกลือผสมดินตะกอนประปาจะมีค่าสูงกว่าตัวอย่างเกล็ดเกลือเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้ เนื่องจากดินตะกอนประปามีขนาดเม็ดเล็กกว่าเกล็ดเกลือ กล่าวคือ มีขนาด 0.075 mm ในขณะที่เกล็ดเกลือมีขนาด 0.075 ถึง 2.35 mm โดยค่าความเครียดเชิงปริมาตรจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อส่วนผสมของดินตะกอนประปาเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ดินตะกอนประปายังมีคุณสมบัติที่ไม่ขึ้นกับเวลาเพราะเป็นตะกอนเม็ดละเอียด และมีความยืดหยุ่นต่ำ

เมื่ออัตราส่วนของดินตะกอนประปาเพิ่มมากขึ้นจะทำให้การซึมผ่านของแก๊สไนโตรเจนลดลงเนื่องจากดินตะกอนประปามีขนาดเม็ดเล็กกว่าเกล็ดเกลือ จึงส่งผลให้ส่วนผสมเกิดการอัดตัวกันแน่นมากขึ้น (Shor et al., 1981) จากการศึกษาการบดอัดเกล็ดเกลือผสมกับน้ำเกลือเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความซึมผ่าน รูพรุน และขนาดของเกล็ดเกลือ พบว่าเมื่อเกล็ดเกลือมีขนาดเล็กจะทำให้รูพรุนในตัวอย่างมีขนาดเล็กลงด้วย ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความซึมผ่านมีค่าลดลง

เมื่ออัตราส่วนของดินตะกอนประปาเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียว ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น และค่าอัตราส่วนปัวซอง เนื่องจากดินตะกอนประปาถูกจำแนกเป็นตะกอนเม็ดละเอียดและมีความยืดหยุ่นต่ำ ในขณะที่เกล็ดเกลือสามารถเปลี่ยนรูปร่างภายใต้แรงดัน

การทดสอบการอัดตัวของตัวอย่างเกล็ดเกลือผสมดินตะกอนประปาควรใช้เวลาในการทดสอบเป็นเวลานาน เพราะเกล็ดเกลือมีการเปลี่ยนรูปร่างในเชิงเวลา (Miao et al., 1995 และ Somtong et al., 2013)

ดินตะกอนประปาสามารถใช้เป็นวัสดุทดแทนเบนทอไนต์ได้ เนื่องจากวัสดุทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และเชิงกลศาสตร์คล้ายกัน ตารางที่ 7.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของดินตะกอนประปาและเบนทอไนต์

ตารางที่ 7.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างดินตะกอนประปาและเบนทอไนต์

คุณสมบัติ	วัสดุ	
	ดินตะกอนประปา	เบนทอไนต์
ส่วนประกอบ	Silica 90%	Monmorillonite 90%
Liquid Limit	59	105
Plastic Limit	31	35
ความหนาแน่น (g/cm ³)	1.8-2.0	1.8
ความซึมผ่าน (m ²)	น้อยกว่า 10 ¹⁰⁻¹¹	น้อยกว่า 10 ¹⁰⁻¹⁶
ค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียว (MPa)	2.0-7.0	2.9-5.0
Swell pressure (MPa)	-	1-2
Brine content (%)	5	4

7.2 สรุปผลการวิจัย

ดินตะกอนประปาที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์มาจากการประปานครหลวง เขตบางเขน กรุงเทพฯ โดยดินดังกล่าวถูกกำจัดความชื้นด้วยวิธีการตากแดดและอบด้วยอุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนกว่าความชื้นจะมีค่าคงที่ เมื่อดินตะกอนมีขนาด 0.075 mm คุณสมบัติเบื้องต้นสามารถจำแนกได้ดังนี้ ค่าขีดจำกัดความชื้นเหลวเท่ากับ 59% ค่าขีดจำกัดพลาสติกเท่ากับ 31% ค่าดัชนีพลาสติกเท่ากับ 28% ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.56 และจำแนกประเภทของดินตะกอนตามระบบ Unified soil classification เป็นพวกตะกอนเม็ดละเอียด

ตัวอย่างเกล็ดเกลือที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือเกลือหินจากหมวดหินมหาสารคาม การเตรียมตัวอย่างดำเนินการโดยนำแท่งเกลือหินที่ได้จากหลุมเจาะไปบดด้วยเครื่องบดหินจนกระทั่งได้เกล็ดเกลือขนาดระหว่าง 0.075 ถึง 4.75 mm

อัตราส่วนของน้ำเกลือที่เหมาะสมเท่ากับ 5% โดยอัตราส่วนนี้ได้ถูกนำไปใช้ในการทดสอบของงานวิจัยนี้

ค่าความเครียดเชิงปริมาตรจะเพิ่มมากขึ้น เมื่ออัตราส่วนของดินตะกอนประปา ความเค้นกด และเวลาในการอัดตัวเพิ่มมากขึ้น

ค่าความซึมผ่านของตัวอย่างเกล็ดเกลือผสมดินตะกอนประปาจะลดลงเมื่ออัตราส่วนของดินตะกอนประปา ความเค้นกด และเวลาในการอัดตัวเพิ่มมากขึ้น

ค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียว โมดูลัสความยืดหยุ่น และความหนาแน่นของตัวอย่างเกล็ดเกลือผสมดินตะกอนประปาจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อความเค้นกดและเวลาในการอัดตัวเพิ่มมากขึ้น และจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของดินตะกอนประปาเพิ่มมากขึ้น

อัตราส่วนปัวซองจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนดินตะกอนประปา ความเค็มกรด และเวลาในการบดอัดเพิ่มมากขึ้น

ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อหาประสิทธิภาพของวัสดุถมกลับในช่วงระยะเวลา 50 ปี ระบุว่า การเปลี่ยนรูปร่างของพื้นเหมือง เพดาน และเสา ค้ำยัน จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความหนาของชั้นหินปิดทับ ความสูงของช่องเหมือง และช่วงเวลาก่อนใส่วัสดุถมกลับเพิ่มมากขึ้น โดยจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นในช่วง 10 ปีแรก และหลังจากนั้นจะเริ่มคงที่จนถึง 50 ปี



บรรณานุกรม

- กิตติเทพ เฟื่องขจร (2554). การทดสอบประสิทธิภาพการอัดตัวของเกลือหินบดในเชิงกลศาสตร์และ
ชลศาสตร์ (Mechanical and Hydraulic Performance of Crushed Salt). สาขา-
วิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, ธันวาคม
2554.
- กิตติเทพ เฟื่องขจร (2555). โครงการศึกษาวิจัยศักยภาพของส่วนผสมดินตะกอนประปากับซีเมนต์
เพื่อใช้ลดความซึมผ่านของรอยแตกในมวลหิน. รายงานฉบับสมบูรณ์ เสนอต่อ การประปา
นครหลวง, โดยหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
สุรนารี, มีนาคม 2555.
- คมกริช เวชส์สัถ์, สุทธิรักษ์ บูชากุล, ปาริฉัตร ปันทอง และสุรเดช เหม่มพกุล (2553). การออกแบบ
และก่อสร้างระบบกักจัดตะกอนโดยใช้วิธีรีดกรองโรงงานผลิตน้ำบางเขน. การประชุม
วิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15, 12-14 พฤษภาคม 2553, อุบลราชธานี, ประเทศ
ไทย.
- ASTM D2434-68 (2006). **Standard test method for permeability of granular soils
(constant head)**. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing
and Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM D2435-04 (2004). **Standard test methods for one-dimensional consolidation
properties of soils using incremental loading**. Annual Book of ASTM
Standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM D2938-95 (2002). **Standard test method for unconfined compressive strength
of intact rock core specimens**. Annual Book of ASTM Standards, American
Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- Aydilek, A.H., Edil, T.B. and Fox, P.J. (1999). Consolidation characteristic of wastewater
sludge. **American society for testing and materials**. pp. 15.
- Brodsky, N.S., Zeuch, D.H. and Holcomb, D.J. (1995). Consolidation and permeability of
crushed salt WIPP salt. In **Proceedings of the Fourth Conference on the
Mechanical Behavior of Salt**. Clausthal-Zellerfeld, Germany, pp. 303-316.
- Butcher, B.M. (1991). The advantages of a salt/bentonite backfill for Waste isolation pilot
plant disposal rooms (Contractor Report SAND90-3074). **Sandia National
Laboratories**.

- Case, J.B. and Kelsall, P. (1987). Laboratory investigation of crushed salt consolidation. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts**. 25(5): 216-223.
- Crosby, K. (2007). Integration of rock mechanics and geology when designing the Udon South sylvinitic mine. In **Proceedings of the First Thailand Symposium on Rock Mechanics**. Nakhon Patchasima, pp. 3-22.
- Hansen, F.D. and Mellegard, K.D. (1999). Mechanical and permeability properties of crushed salt. In **Proceedings of the 5th Conference on the Mechanical Behavior of Salt (MECASALT 5)**. Bucharest, Romania, pp. 253-256.
- Hein, H.J. (1991). Ein Stoffgesetz zur Beschreibung des thermo-mechanischen Verhaltens von Salzgranulat. **Dissertation**, RWTH Aachen.
- Itasca (1992). **User manual for FLAC-fast Lagrangian analysis of continua, version 3.0**. Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, MN.
- Jaeger, J.C, Cook, N.G.W. and Zimmerman, R.W. (2007). **Fundamental of Rock Mechanics** (Fourth edition). Blackwell Publishing, Australia. pp. 475.
- Japaksetr, T. and Suwanich, P. (1977). Potash and rock salt in Thailand Bangkok: Economic Geology Division. **Department of Mineral Resources**. Bangkok.
- Japaksetr, T. (1985). Review on rock salt and potash exploration in Northeast Thailand. In **Proceedings Conference on Geology and Mineral Resources Development of the Northeast of Thailand**. Khon Kaen University, Thailand, pp. 135-147.
- Laothong, K. (2003). **The Utilization of Sludge Cake from Water Treatment Processes of Wang Noi Power Plant**. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering, Kasetsart University. pp. 99.
- Loken, M.C. and Statham, W. (1997). Calculation of density and permeability of compacted crushed salt within an engineered shaft sealing system. **Computer in Civil Engineering**. pp. 485-492.
- Mellegard, K.D., Pfeifle, T.W. and Hansen, F.D. (1999). Laboratory characterization of mechanical and permeability properties of dynamically compacted crushed salt. **Technical Report No. SAND98-2046, Sandia National Laboratories, Prepared for the United States Department of Energy**.

- Miao, S., Wang, M.L. and Schreyer, H.L. (1995). Constitutive models for healing of materials with application to compaction of crushed rock salt. **Engineering mechanics**. 121(10): 1122-1129.
- Pudewills, A. and Krauss, M. (1999). Implementation of a viscoplastic model for crushed salt in the ADINA program. **Computer and Structure**. 72(1-3): 293-299.
- Ran, C. and Daemen, J.J.K. (1995). The influence of crushed salt particle gradation on compaction. In **Proceedings of The Thirty-fifth U.S. Symposium on Rock Mechanics**. Reno, NV, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 761-766.
- Samsri, P., Sriapai, T., Walsri, C. and Fuenkajorn, K. (2010). Polyaxial creep testing of rock salt. In **Proceedings of the Third Thailand Symposium on Rock Mechanicson**. Thailand, pp. 125-132.
- Sangiumsak, N. and Cheerarot, R. (2008). The study of properties of artificial aggregates made from water supply sludge. In **Proceedings of the Eleventh Conference on International Convention on Civil Engineering**. Pattaya, Chonburi.
- Shor, A.J., Baes, C.F. and Canonico, C.M. (1981). Consolidation and permeability of salt in brine (ORNL-5774). **The Oak Ridge National Laboratory for the U.S. Department of Energy**. Oak Ridge, TN.
- Somtong, S., Tepnarong, P. and Fuenkajorn, K. (2013). Strength and permeability of consolidated crushed salt. In **Proceedings of the EIT-JSCE International Symposium on International Human Resource Development for Disaster-Resilient Countries**. September 12-13, Imperial Queen's Park Hotel, Bangkok, Thailand.
- Sriapai, T., Chaowarin, W. and Fuenkajorn, K. (2012). Effects of temperature on compressive and tensile strengths of salt. **Science Asia**. 38: 166-174.
- Suwanich, P. and Ratanajaruraks, P. (1986). Sequences of rock salt and potash in Thailand (Nonmetallic Minerals Bulletin No. 1). Bangkok: Economic Geology, Division. **Department of Mineral Resources**. Bangkok.
- Suwanich, P., Ratanajaruraks, P. and Kunawat, P. (1982). Core log Bamnet Narong area at Chaiyaphum province. Bangkok: Economic Geology Division. **Department of Mineral Resources**. Bangkok.

- Wagner, R.A., Callahan, G.D. and Butcher, B.M. (1990). Mechanical analyses of WIPP disposal rooms backfilled with either crushed salt or crushed salt-bentonite. In **Proceedings on Materials Research Society**. 207: 169-175.
- Wendai, L. (2000). **Regression analysis, linear regression and probit regression in 13 chapter**. SPSS for Windows: statistical analysis, Publishing House of Electronics Industry. Beijing.
- Wetchasat, K. and Fuenkajorn, K. (2013). Laboratory Assessment of Mechanical and Hydraulic Performance of Sludge-Mixed Cement Grout in Rock Fractures. In **Proceedings of the Fourth Thailand Symposium on Rock Mechanics**. Wang Nam Keaw, Nakhon Ratchasima, Thailand.



ประวัตินักวิจัย

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