

รหัสโครงการ SUT7-719-47-24-18



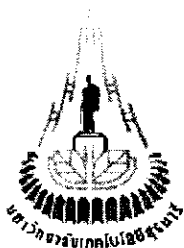
รายงานการวิจัย

การประเมินคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน
จากลักษณะทางศิลาวิทยา

**Prediction of Mechanical Properties of Rock Salt
from Petrographic Features**

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การประเมินคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน จากลักษณะทางศิลาวิทยา

Prediction of Mechanical Properties of Rock Salt From Petrographic Features

ผู้วิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. กิตติเทพ เฟื่องขจร

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2547 และ 2548

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

สิงหาคม 2548

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ 2547 และ 2548 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากนางสาวกัลญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ผู้วิจัย

สิงหาคม 2548

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเพื่อคาดคะเนกำลังรับแรงกดสูงสุด กำลังรับแรงดึงแบบบราซิลเลียน สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น และความเหน็ดเชิงพลาสติกของตัวอย่างเกลือหินโดยใช้ลักษณะเชิงแร่วิทยาและศิลาวิทยาเป็นดัชนีบ่งบอก ตัวอย่างเกลือหินได้มาจากเกลือชั้นกลางและเกลือชั้นล่างของหมวดหินมหาสารคาม บริเวณอำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี และบริเวณกิ่งอำเภอพระทองคำ จังหวัดนครราชสีมา ตัวอย่างถูกจัดเตรียมจากแท่งตัวอย่างเกลือหินที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 มิลลิเมตร ได้มาจากการขุดเจาะแนวตั้งในแอ่งโคราชและแอ่งสกลนคร ชุดของการทดสอบในห้องปฏิบัติการประกอบด้วย การทดสอบแรงกดในแกนเดียว การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน และการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียว การจัดเตรียมตัวอย่างและขั้นตอนการทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐานสากล ASTM นอกจากนี้ได้มีการตรวจสอบด้วยแว่นขยาย การทำ X-ray Diffraction และการละลายแท่งตัวอย่างเพื่อหาชนิดและปริมาณของสิ่งเจือปนที่อยู่ในแท่งตัวอย่างเกลือหิน

สิ่งเจือปนหลักที่พบในแท่งตัวอย่างที่ทดสอบคือแร่แอนไฮไดรต์ และแร่อิน แร่แอนไฮไดรต์เจือปนอยู่ในลักษณะเป็นแผ่นบางที่ตั้งฉากกับแกนของตัวอย่าง โดยมีความหนาผันแปรจาก 2-3 มิลลิเมตร ไปจนถึงหลายเซนติเมตร แร่อินซึ่งมีประมาณร้อยละ 1 ถึงร้อยละ 5 โดยน้ำหนักพบในบางตัวอย่างซึ่งจะกระจายตัวอยู่ระหว่างผลึกเกลือ ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดของตัวอย่างเกลือหินจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงจาก 27 MPa จนถึงประมาณ 40 MPa ในขณะที่แร่แอนไฮไดรต์ที่เจือปนเพิ่มจาก 0 จนถึงเกือบ 100% ซึ่งเป็นเพราะแร่แอนไฮไดรต์ที่เจือปนอยู่ทำให้ส่วนที่เป็นเกลือหินบริสุทธิ์สั้นลงเกิดลักษณะผลกระทบที่ปลายของตัวอย่าง (End effect) และส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น ผลกระทบระหว่างคุณสมบัติของเกลือหินกับแร่แอนไฮไดรต์ทำให้สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของตัวอย่างเพิ่มขึ้นจาก 22 GPa ไปจนถึง 36 GPa ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดของตัวอย่างเกลือหินจะเพิ่มขึ้นเช่นกันถ้าตัวอย่างเกลือหินนั้นมีปริมาณแร่แอนไฮไดรต์เกินกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ถ้าแร่แอนไฮไดรต์มีปริมาณต่ำกว่านี้ก็จะไม่มีผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดของตัวอย่าง สำหรับเกลือหินบริสุทธิ์ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดจะถูกควบคุมโดยลักษณะของการแตกถ้ารอยแตกที่เกิดขึ้นจากการทดสอบอยู่ในแนวรอยต่อระหว่างผลึกกำลังรับแรงดึงสูงสุดของตัวอย่างจะมีค่าต่ำลง เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกเกลือจะมีน้อยกว่าแรงยึดเหนี่ยวภายในผลึกเอง โดยกำลังรับแรงดึงสูงสุดภายในผลึกเกลืออาจมีค่าสูงถึง 2 MPa ในขณะที่กำลังรับแรงดึงสูงสุดของรอยต่อระหว่างผลึกอยู่ที่ประมาณ 1 MPa ค่าความเหน็ดเชิงพลาสติกของตัวอย่างเกลือหินจะเพิ่มขึ้นเมื่อผลึกเกลือมีขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากกลไกแบบ Dislocation glide เป็นตัวควบคุมการเคลื่อนไหลของตัวอย่างที่ประกอบด้วยผลึกเกลือขนาดใหญ่ ในทางตรงกันข้ามเกลือหินบริสุทธิ์ที่ประกอบด้วยเกลือผลึกละเอียดจะเปลี่ยนรูปด้วยกลไกแบบ Dislocation climb ซึ่งส่งผลให้ความเหน็ดเชิงพลาสติกมีค่าลดลง ผลกระทบของการเจือปนของแร่แอนไฮไดรต์ต่อค่าความเหน็ดเชิงพลาสติกไม่สามารถกำหนด

ได้ในงานวิจัยนี้เนื่องจากความหลากหลายของปริมาณแร่แอนไฮไดรต์ของกลุ่มตัวอย่างเกลือหินที่ทดสอบมีไม่เพียงพอ ผลกระทบของแร่ดินต่อคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของตัวอย่างเกลือหินยังไม่มี ความชัดเจนเพราะปริมาณแร่ดินที่เจือปนอยู่ในกลุ่มตัวอย่างมีค่าต่ำและกระจายตัวอยู่ในช่วงแคบ คือ ประมาณ 0-5% เท่านั้น

Abstract

The objective of this research is to predict the uniaxial compressive and Brazilian tensile strengths, elastic modulus and visco-plasticity coefficient of rock salt specimens by using their mineralogical and petrographic features as indicators. The salt specimens are from the Middle Salt and Lower Salt units of the Maha Sarakham Formation. They are prepared from 54 mm diameter cores drilled vertically into the Khorat and Sakon Nakhon basins. Series of laboratory testing have been carried out, including uniaxial compression tests, Brazilian tension tests, and uniaxial creep tests. The sample preparation and test procedure follow the ASTM standard practices as much as practical. Visual examination, X-ray diffraction and dissolution methods are also performed to determine types and amounts of the inclusions.

The main inclusions for the salt specimens tested here are anhydrite and clay minerals. The anhydrite inclusions appear as thin seams or beds perpendicular to the core axis with thickness varying from few millimeters to several centimeters. The clay minerals (about 1-5% by weight) scatter between the salt crystals of some specimens. The compressive strength of the salt specimens linearly increases from 27 MPa to about 40 MPa as the anhydrite inclusion increases in the range from 0% to nearly 100%. This is primarily because the anhydrite inclusion makes the salt portion shorter, creates the end effect, and hence increasing the specimen strength. The combined effect between the salt and anhydrite properties also causes the increase of the specimen elasticity from 22 GPa to as high as 36 GPa. Tensile strengths of the salt specimens will also increase with the anhydrite inclusion if the inclusion is beyond 50% by weight. Below this limit the anhydrite has insignificant impact on the specimen tensile strength. For pure salt specimens the tensile strength is mainly governed by the failure characteristics. If the tensile fracture is induced along the inter-crystalline boundaries, the specimen tensile strength will be lowered. This is because the inter-crystalline bonding of rock salt is much weaker than the strength of salt crystals. The crystal tensile strength can be as high as 2 MPa. The tensile strength of the inter-crystalline boundaries is estimated as 1 MPa. The visco-plasticity coefficient of salt specimens is found to be increased exponentially with the crystal size. This is because the dislocation glide mechanism governs the creep deformation for the specimens containing large salt crystals. On the other hand, pure salt specimens with fine crystals are deformed mostly by the dislocation climb mechanism, resulting in a lower visco-plasticity. Due to the insufficient diversity of the amount of anhydrite among

specimens, the effect of the anhydrite inclusion on the visco-plasticity can not be determined. The effect of clay minerals on the mechanical properties of the salt specimens remains unclear because the range of the clay contents among different specimens are relatively low and narrow (0- 5%).

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
Abstract.....	ง
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์.....	2
แนวคิดของงานวิจัย.....	3
วิธีดำเนินงานวิจัย.....	5
ขอบเขตของการวิจัย.....	7
ประโยชน์ที่จะได้รับและหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	8
องค์ประกอบของรายงาน.....	10
บทที่ 1 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11
1.1 แร่วิทยาของเกลือหิน.....	11
1.2 ศีลาวิทยาของเกลือหิน.....	11
1.3 คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน.....	13
1.4 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน.....	16
1.5 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินชนิดอื่นๆ.....	21
บทที่ 2 ฐานข้อมูลเชิงแร่วิทยาและกลศาสตร์ของเกลือหิน	29
2.1 ข้อมูลจากการทดสอบเกลือหินภายในประเทศ.....	29
2.2 ข้อมูลการทดสอบเกลือหินจากต่างประเทศ.....	30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 คุณลักษณะของตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบ	33
3.1 แหล่งที่มาของตัวอย่างเกลือหิน.....	33
3.2 การจัดสรรตัวอย่างเกลือหิน.....	33
3.3 การจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหิน.....	35
บทที่ 4 การทดสอบคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ของเกลือหิน	51
4.1 การทดสอบแรงกดในแกนเดียว.....	51
4.2 การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน.....	53
4.3 การทดสอบแรงกดในแกนเดียวแบบวัฏจักร.....	68
4.4 การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียว.....	70
4.5 การวิเคราะห์เชิงเคมี.....	75
บทที่ 5 การศึกษาความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์	83
5.1 การหาปริมาณสิ่งเจือปนในตัวอย่างเกลือหิน.....	83
5.2 ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิลเลียนของเกลือหิน.....	83
5.2.1 ผลกระทบของขนาดผลึกเกลือหิน.....	83
5.2.2 ลักษณะการแตกของเกลือหิน.....	89
5.2.3 ผลกระทบของแร่ดิน.....	89
5.2.4 ผลกระทบของแร่แอนไฮไดรต์.....	89
5.3 ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดของเกลือหิน.....	95
5.3.1 ผลกระทบของแร่ดิน.....	95
5.3.2 ผลกระทบของแร่แอนไฮไดรต์.....	95
5.4 ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของเกลือหิน.....	95
5.4.1 ผลกระทบของแร่ดิน.....	98
5.4.2 ผลกระทบของแร่แอนไฮไดรต์.....	98
5.5 ค่าความหนืดเชิงพลาสติกของเกลือหิน.....	98
5.5.1 ผลกระทบของขนาดผลึก.....	98
5.5.2 ผลกระทบของแร่ดิน.....	98
5.5.3 ผลกระทบของแร่แอนไฮไดรต์.....	103

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 การสอบทานสมการความสัมพันธ์.....	105
บทที่ 7 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	111
7.1 สรุป.....	111
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	113
บรรณานุกรม.....	115
ภาคผนวก ก ข้อมูลเชิงกลศาสตร์และเชิงแร่วิทยาของเกลือหิน	
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบการกดแบบวัฏจักร	
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ด้วย X-RAY DIFFRACTION	
ประวัตินักวิจัย	

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	รูปร่างและจำนวนตัวอย่างเกลือหินที่ได้จัดเตรียมสำหรับการทดสอบทั้งสี่ชนิด.....	44
3.2	คุณลักษณะทางกายภาพและทางแร่วิทยาของตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบ คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์.....	45
4.1	สรุปผลการทดสอบแรงกดในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือหิน.....	54
4.2	ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนของตัวอย่างเกลือหินในงานวิจัยนี้.....	62
4.3	ผลการทดสอบแรงกดในแกนเดียวแบบวัฏจักรของตัวอย่างเกลือหิน.....	71
4.4	ผลการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือหินภายใต้ความเค้น คงที่ในแนวแกนต่าง ๆ กัน.....	78
4.5	ผลการวิเคราะห์เชิงเคมีของตัวอย่างเกลือหินชั้นกลางของแอ่งสกลนคร.....	80

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ความเครียดที่เกิดขึ้นในเกลือหินกับระยะเวลาภายใต้แรงกดคงที่.....	15
1.2 ความเค้นดึงสูงสุดแบบบราซิล (σ_B) ทดสอบมาจากหินที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง (D) ต่าง ๆ กัน σ_B จะลดลงในขณะที่ D เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจจะแทนความสัมพันธ์ด้วยกฎของการยกกำลัง (Power law).....	26
1.3 ความเค้นกดสูงสุด (σ_c) ของหินอ่อนจากจังหวัดสระบุรีที่ได้จากการทดสอบหินรูปทรงกระบอกที่มีอัตราส่วนของความยาว (L) ต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (D) ที่ต่าง ๆ กัน σ_c จะลดลงในขณะที่อัตราส่วน L/D สูงขึ้น ซึ่งอาจสามารถแทนด้วยกฎของการยกกำลัง.....	28
3.1 ตัวอย่างเกลือหินบางส่วนที่ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท เอเซียแปซิฟิค โปแตชคอร์ปอเรชั่น จำกัด.....	34
3.2 การตัดแท่งตัวอย่างเกลือหินเพื่อให้ได้สัดส่วนและรูปร่างที่เหมาะสมกับการทดสอบแต่ละชนิด.....	36
3.3 การขัดตัวอย่างเกลือหินเพื่อให้มีผิวเรียบและปลายทั้งสองข้างขนานกันตามข้อกำหนดของ ASTM.....	37
3.4 คำอธิบายรหัสที่ติดบนตัวอย่างเกลือหินซึ่งจัดเตรียมสำหรับการทดสอบ.....	38
3.5 ตัวอย่างเกลือหินบางส่วนที่ใช้ในการทดสอบแรงกดในแกนเดียว.....	39
3.6 ตัวอย่างเกลือหินบางส่วนที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน.....	40
3.7 ตัวอย่างเกลือหินบางส่วนที่ใช้ในการทดสอบแรงกดในแกนเดียวแบบวงจักร.....	42
3.8 ตัวอย่างเกลือหินบางส่วนที่ใช้ในการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียว.....	43
4.1 การทดสอบแรงกดในแกนเดียว ตัวอย่างเกลือหินถูกกดด้วยอัตราคงที่ตามแนวแกนด้วยเครื่องกด Elect/ADR 2000.....	52
4.2 ผลการทดสอบแรงกดในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือหิน หมายเลขระบุเลขที่ตัวอย่าง.....	56
4.3 ลักษณะของตัวอย่างเกลือหินบางส่วนก่อน (a) และหลัง (b) ทำการทดสอบแรงกดในแกนเดียว.....	58
4.4 เปรียบเทียบค่าความต้านแรงกดของตัวอย่างเกลือหินที่ได้จากการทดสอบสำหรับเกลือหินในงานวิจัยนี้ และเกลือหินในต่างประเทศ.....	59
4.5 การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน ตัวอย่างเกลือหินรูปแผ่นถูกกดตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลางจนแตก.....	60

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
4.6	ลักษณะของตัวอย่างเกลือหินบางส่วนก่อน (a) และหลัง (b) ทำการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน.....	61
4.7	เปรียบเทียบค่าความต้านแรงดึงของตัวอย่างเกลือหินที่ได้จากการทดสอบสำหรับเกลือหินในงานวิจัยนี้ และเกลือหินในต่างประเทศ.....	67
4.8	การทดสอบแรงกดในแกนเดียวแบบวัฏจักร ตัวอย่างเกลือหินถูกกดด้วยแรงกดเพิ่มขึ้นและลดลงตามแนวแกนอย่างเป็นระบบด้วยอัตราคงที่.....	69
4.9	ลักษณะของตัวอย่างเกลือหินบางส่วนก่อน (a) และหลัง (b) ทำการทดสอบแรงกดในแกนเดียวแบบวัฏจักร.....	72
4.10	ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นจากผลการทดสอบแรงกดในแกนเดียวแบบวัฏจักรสำหรับตัวอย่างเกลือหินในงานวิจัยนี้ และเกลือหินในต่างประเทศ.....	73
4.11	การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียว แท่งตัวอย่างเกลือหินอยู่ภายใต้เครื่องกดที่ให้แรงกดคงที่ในแนวแกน.....	74
4.12	ลักษณะของตัวอย่างเกลือหินบางส่วนก่อน (a) และหลัง (b) ทำการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียว.....	76
4.13	ผลการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือหินโดยมีความเค้นคงที่ในแนวแกนที่ผันแปรตั้งแต่ 12, 16.25, 18.04 และ 19.50 MPa ตามลำดับ.....	77
4.14	เครื่องมือวิเคราะห์สารประกอบ X-ray Diffractometer Power (XRD) รุ่น D5005.....	79
5.1	ตัวอย่างเกลือหินที่ได้จากการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิลเลียน.....	84
5.2	ตัวอย่างเกลือหินที่ได้จากการทดสอบค่ากำลังรับแรงกดสูงสุด.....	85
5.3	ตัวอย่างเกลือหินที่ได้จากการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น.....	86
5.4	ตัวอย่างเกลือหินที่ได้จากการทดสอบค่าความเหนียวเชิงพลาสติก.....	87
5.5	ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดที่ผันแปรกับขนาดของผลึกในตัวอย่างเกลือหินบริสุทธิ์.....	88
5.6	ลักษณะการแตกผ่านผลึกเกลือหิน (Cleavage Fracturing) ซึ่งสามารถสังเกตได้จากฝัวยรอยแตกจะเรียบมันและมีมุมการแตกที่หลากหลาย.....	90
5.7	ลักษณะการแตกระหว่างรอยต่อผลึกเกลือหิน (Inter-granular Fracturing) ซึ่งสามารถสังเกตได้จากฝัวยรอยแตกที่เกิดขึ้นจะขรุขระไม่เรียบมัน และสังเกตเห็นรูปผลึกเกลือได้ชัดเจน.....	91

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.8 ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดที่ผันแปรกับลักษณะการแตกของผลึกเกลือแบบแตกระหว่างผลึก.....	92
5.9 ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดที่ผันแปรกับปริมาณแร่ดินที่เจือปนในตัวอย่างเกลือหินที่นำมาทดสอบ.....	93
5.10 ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดที่ผันแปรกับปริมาณแร่แอนไฮไดรต์ที่เจือปนในตัวอย่างเกลือหินที่นำมาทดสอบ.....	94
5.11 ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดที่ผันแปรกับปริมาณแร่ดินที่เจือปนในตัวอย่างเกลือหินที่นำมาทดสอบ.....	96
5.12 ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดที่ผันแปรกับปริมาณแร่แอนไฮไดรต์ที่เจือปนในตัวอย่างเกลือหินที่นำมาทดสอบ.....	97
5.13 ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่ผันแปรกับปริมาณแร่ดินที่เจือปนในตัวอย่างเกลือหินที่นำมาทดสอบ.....	99
5.14 ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่ผันแปรกับปริมาณแร่แอนไฮไดรต์ที่เจือปนในตัวอย่างเกลือหินที่นำมาทดสอบ.....	100
5.15 ค่าความเหน็ดเชิงพลาสติกของตัวอย่างเกลือหินที่ผันแปรกับขนาดของผลึกเกลือ.....	101
5.16 ค่าความเหน็ดเชิงพลาสติกของตัวอย่างเกลือหินที่ผันแปรกับปริมาณแร่ดินที่เจือปนในตัวอย่างเกลือหินที่นำมาทดสอบ.....	102
5.17 ค่าความเหน็ดเชิงพลาสติกของตัวอย่างเกลือหินที่ผันแปรกับปริมาณแร่แอนไฮไดรต์ที่เจือปนในตัวอย่างที่นำมาทดสอบ.....	104
6.1 แสดงความคลาดเคลื่อนของการประเมินปริมาณแร่แอนไฮไดรต์ด้วยตาเปล่า เมื่อเทียบกับการแยกสิ่งเจือปนด้วยการละลาย.....	107

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยมีชั้นเกลือหินแพร่กระจายอยู่อย่างกว้างขวาง ซึ่งชั้นเกลือหินเป็นแหล่งทรัพยากรที่สำคัญของประเทศไทยซึ่งสามารถพัฒนาหรือนำมาประยุกต์ใช้ได้หลายด้าน อาทิ การทำเหมืองแร่โพแทชที่จังหวัดอุดรธานีและจังหวัดชัยภูมิ รวมถึงการทำเหมืองเกลือแบบละลายที่อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา นอกจากนี้ยังมีการผลิตเกลือสินเธาว์โดยวิธีสูบน้ำบาดาลที่มีความเค็มขึ้นมาสกัดหรือตากแห้ง ประโยชน์อีกประการหนึ่งของโพรงที่ละลายในชั้นเกลือหินคือ สามารถนำมาใช้เป็นที่กักเก็บพลังงานในรูปของอากาศภายใต้แรงดัน กักเก็บของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และกักเก็บกากนิวเคลียร์ที่ได้มาจากโรงพยาบาลและห้องปฏิบัติการต่าง ๆ งานวิจัยเหล่านี้กำลังดำเนินการอยู่ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2543, 2544; วารสารนิวเคลียร์ปริทัศน์, 2543)

ปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมประการหนึ่งที่กำลังประสบอยู่คือ การเกิดแผ่นดินไหวในบริเวณใกล้เคียงกับพื้นที่ที่กำลังพัฒนาในรูปแบบต่าง ๆ ในขณะที่ประเทศไทยจำเป็นต้องอาศัยทรัพยากรในประเทศและพัฒนาทรัพยากรนั้นให้เกิดประโยชน์สูงสุด และเพื่อลดการนำเข้าจากต่างประเทศ การพัฒนาแหล่งเกลือหินในรูปแบบต่าง ๆ จึงจำเป็นต้องดำเนินต่อไป และในขณะเดียวกันจะต้องลดผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมให้น้อยที่สุด

การเกิดแผ่นดินไหวในระดับที่รุนแรงอาจจะเกิดจากการออกแบบเชิงวิศวกรรมที่ไม่เหมาะสม หรือเกิดจากการออกแบบที่ใช้ฐานข้อมูลของคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินที่ไม่เพียงพอหรือคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง การเกิดแผ่นดินไหวที่มีผลมาจากการทำเหมืองใต้ดินหรือการทำโพรงละลายใต้ดินในชั้นเกลือหินมีกลไกที่ซับซ้อน ซึ่งปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่ควบคุมคือคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน ลักษณะเด่นของคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินที่ทำให้ซับซ้อนและแตกต่างจากคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินทั่วไปคือ เกลือหินมีพฤติกรรมที่หลากหลายที่เกิดขึ้นหรือตอบสนองต่อแรงที่มากระทำพร้อม ๆ กัน พฤติกรรมเหล่านี้คือ ความยืดหยุ่น ความหนืดเชิงยืดหยุ่น ความหนืดเชิงพลาสติก และการเปลี่ยนรูปที่ขึ้นกับเวลา ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดการวิจัยและศึกษาในต่างประเทศอย่างหลากหลาย เพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมเหล่านี้อย่างแท้จริง มีการตั้งทฤษฎีและกฎเกณฑ์มากมายเพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่มากระทำกับการเปลี่ยนรูปและการวิบัติของเกลือหินในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ และได้มีการตั้งมาตรฐานการทดสอบสำหรับเกลือหินโดยเฉพาะ (เช่น ASTM D4405) เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลจากห้องปฏิบัติการเพื่อใช้ในการสอบเทียบ (Calibration) ค่าคงที่ที่ใช้อยู่ในกฎเกณฑ์ต่าง ๆ ดังกล่าว อย่างไรก็ตามการทดสอบเหล่านี้จะมีราคาสูงมาก และใช้เวลาในการทดสอบสำหรับแต่ละตัวอย่างหินที่ยาวนาน โดยทั่วไปราคาของเครื่องมือ

ค่าใช้จ่ายในการขุดเจาะและจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบเชิงกลศาสตร์จะสูงกว่าค่าใช้จ่ายสำหรับหินทั่วไปประมาณ 10 เท่าเป็นอย่างน้อย และอีกประการหนึ่งเวลาที่จะต้องใช้ในการทดสอบเกลือหินแต่ละตัวอย่างภายใต้แรงกดที่กำหนดเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวข้องกับความหนืด (Viscosity) ของเกลือหินจะใช้เวลาอย่างน้อย 30-60 วัน ในขณะที่การทดสอบเชิงกลศาสตร์ของหินทั่วไปจะใช้เวลาเพียง 15-30 นาทีเท่านั้น

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นทำให้การทดสอบเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินมีข้อจำกัดในเรื่องจำนวนของตัวอย่างที่จะนำมาทดสอบอย่างมาก ข้อจำกัดนี้ส่งผลให้ผู้ประกอบการไม่สามารถทดสอบตัวอย่างเกลือหินได้มากเท่าที่ควรจะทำ หรือส่งผลให้ผู้ประกอบการไม่ทำการทดสอบคุณสมบัติเชิง กลศาสตร์ของเกลือหินเลย ข้อบกพร่องหรือการละเลยเช่นนี้ทำให้โครงสร้างทางวิศวกรรม (โพรงหรืออูโมงค์) ในชั้นเกลือหินไม่มีเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์เท่าที่ควรจะเป็น หรือทำให้เกิดความไม่แน่นอนหรือความไม่น่าเชื่อถือของโครงสร้างนั้น ๆ เนื่องจากโครงสร้างเหล่านั้นได้ถูกออกแบบมาจากฐานข้อมูลทางด้านคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินที่ไม่เพียงพอ และอีกประการหนึ่งคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และเชิงศิลาวิทยาของชั้นเกลือหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีความแปรปรวนมากทั้งในเชิงความลึกและในเชิงพื้นที่ (นเรศ สัตยารักษ์ และคณะ, 2530; นเรศ สัตยารักษ์ และ ทรงภพ พลจันทร์, 2533; ปกรณ์ สุวานิช, 2521; สมเกียรติ จันทรมหา, 2530) ดังนั้นเพื่อให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติที่ใช้เป็นตัวแทนอย่างแท้จริง (Representative properties) ในภาคสนาม จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการทดสอบเกลือหินเป็นจำนวนมากเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ที่จะทำการก่อสร้าง หรืออาจจะค้นหาวิธีที่ง่ายและถูกกว่าในการที่จะประเมิน ค่าคคะเน หรืออ้างอิงคุณสมบัติเหล่านี้จากลักษณะทางกายภาพ ทางเคมี หรือทางแร่วิทยาของเกลือหิน

วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยคือ เพื่อคาดคะเนคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน (ความยืดหยุ่น ความหนืด กำลังกดสูงสุด และกำลังดึงสูงสุด) จากข้อมูลทางด้านศิลาวิทยา (ขนาดของผลึกเกลือ ปริมาณและชนิดของสิ่งเจือปน) โดยมีแนวคิดพื้นฐานคือ พยายามหาความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์แต่ละตัวกับปัจจัยเชิงศิลาวิทยาที่มีผลกระทบต่อตอบสนองเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน โดยข้อมูลของเกลือหินที่เกี่ยวข้องที่รวบรวมได้จากทั้งในและต่างประเทศและข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะนำมาใช้ประกอบการศึกษาในงานวิจัยนี้ ประโยชน์ของความสัมพันธ์เหล่านี้คือ สามารถลดค่าใช้จ่ายและเวลาที่ใช้ในการทดสอบเชิงกลศาสตร์ กล่าวคือวิศวกรสามารถคาดคะเนคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินได้ โดยทำการตรวจสอบคุณสมบัติเชิงศิลาวิทยาของแท่งเกลือหินที่นำขึ้นมาจากหลุมเจาะด้วยตาเปล่า ไม่ต้องวิเคราะห์

ทางเคมีและไม่ต้องจัดเตรียมหรือทดสอบตัวอย่างเกลือหินเชิงกลศาสตร์ นอกจากนั้นผลงานวิจัยที่ได้จะเป็นองค์ความรู้ใหม่ของประเทศไทย ซึ่งยังไม่มีผู้ใดทำมาก่อนแม้แต่ในต่างประเทศ

แนวคิดของงานวิจัย

เป็นที่ทราบกันดีว่าองค์ประกอบหลักของเกลือหินคือ แร่เกลือ (NaCl - Sodium Chloride) ซึ่งส่วนใหญ่จะมีปริมาณไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 ขององค์ประกอบทั้งหมดในเกลือหิน ในส่วนที่เหลือร้อยละ 10 โดยประมาณ จะเรียกว่าสิ่งเจือปน ซึ่งชนิดของสิ่งเจือปนส่วนใหญ่ที่พบได้แก่ แร่ดิน เหล็กออกไซด์ แคลเซียมคาร์บอเนต แคลเซียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต และธาตุโพแทสเซียม ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของคลอไรด์ เป็นต้น (ในกรณีที่มีธาตุโพแทสเซียมมาก หินนั้นจะเรียกว่า เกลือหินโพแทช) ชนิดและปริมาณของสิ่งเจือปนก็จะมีการผันแปรไปตามความลึกและพื้นที่ เนื่องจากองค์ประกอบหลักของเกลือหินคือ โซเดียมคลอไรด์ ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดที่สำคัญทางด้านคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลศาสตร์ของเกลือหินนั้น ซึ่งลักษณะเช่นนี้จะแตกต่างกับหินโดยทั่วไป กล่าวคือแร่ที่เป็นองค์ประกอบของหินส่วนใหญ่สามารถแปรปรวนได้มากในเชิงชนิด ปริมาณ ขนาด และความพรุน และยังสามารถเปลี่ยนแปลงทางเคมีด้วยขบวนการผุกร่อน ซึ่งทำให้คุณสมบัติทางกายภาพและทางกลศาสตร์ของหินเหล่านั้นสามารถแปรปรวนไปได้อย่างมาก สำหรับเกลือหินนั้นนอกจากจะมีการแปรปรวนของแร่ที่เป็นองค์ประกอบน้อย (เมื่อเทียบกับหินชนิดอื่น) ยังไม่มีขบวนการผุกร่อนเข้ามาเกี่ยวข้อง เพราะเกลือหินที่โผล่พื้นขึ้นมาอยู่บนผิวดินก็จะถูกละลายไปหมด ดังนั้น เกลือหินที่สนใจและทำการศึกษาในที่นี้จะเป็นเกลือหินที่อยู่ใต้ดิน ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของชั้นเกลือหินดั้งเดิม หรืออยู่ในรูปของโดมเกลือที่ถูกดันขึ้นมาใกล้ผิวดินมากขึ้น จากข้อแตกต่างระหว่างเกลือหินกับหินส่วนใหญ่ทำให้การศึกษาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์กับลักษณะทางสัณฐานวิทยา ซึ่งมีความเป็นไปได้อย่างมากสำหรับเกลือหิน แต่สำหรับหินส่วนใหญ่ที่นั้นเกือบจะเป็นไปไม่ได้เลย เนื่องจากจะมีตัวแปรเข้ามาเกี่ยวข้องมากมาย โดยเฉพาะตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีที่เกิดจากขบวนการการผุกร่อน

ถึงแม้เกลือหินโดยทั่วไปจะประกอบด้วยโซเดียมคลอไรด์มากกว่า 90% และมีสิ่งเจือปนอยู่น้อยกว่า 10% แต่สิ่งเจือปนเหล่านี้จะสามารถทำให้คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินนั้นแตกต่างกันได้อย่างมาก โดยเมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติความต้านแรงกดสูงสุด ความต้านแรงดึงสูงสุด และความยืดหยุ่นของเกลือหินจากหลายแหล่งทั่วโลก จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่า คุณสมบัติเหล่านี้นอกจากจะผันแปรได้ในแต่ละพื้นที่แล้ว (มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานค่อนข้างสูง) ในพื้นที่ต่างกัน คุณสมบัติเหล่านี้ก็จะมีค่าต่างกันด้วย ซึ่งการเปรียบเทียบเบื้องต้นนี้เป็นหลักฐานแสดงให้เห็นว่าสิ่งเจือปนหรือกล่าวโดยรวมคือคุณลักษณะเชิงสัณฐานวิทยาของเกลือหินจะมีผลอย่างมากต่อพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินนั้น

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นผู้วิจัยมีแนวคิดว่าคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน เช่น ความยืดหยุ่น (E) ความต้านกำลังกดสูงสุด (σ_c) ความต้านกำลังดึงสูงสุด (T) และความหนืด (η) นั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางศิลาวิทยาของเกลือหินเป็นส่วนใหญ่ จากการทบทวนวรรณกรรมวิจัยพบว่าเกลือหินที่บริสุทธิ์ที่ประกอบด้วยโซเดียมคลอไรด์ 100 เปอร์เซ็นต์ การแปรปรวนของคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์จะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำเกลือที่แทรกอยู่และขนาดการเรียงตัวและการอัดตัวของผลึกเกลือ เช่น เกลือหินที่มีผลึกใหญ่จะมีสัมประสิทธิ์ของความยืดหยุ่นและความแข็งสูงกว่าเกลือหินที่ประกอบไปด้วยผลึกขนาดเล็ก เป็นต้น ส่วนผลกระทบของสิ่งเจือปนจะค่อนข้างซับซ้อนและยากต่อการศึกษา เนื่องจากชนิดของสิ่งเจือปนนั้นมีความหลากหลายมาก และสิ่งเจือปนแต่ละชนิดถึงแม้จะมีปริมาณน้อยก็อาจส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ที่ต่างกัน เช่น ถ้าเกลือหินมีแร้ดินแทรกอยู่ระหว่างผลึกอาจทำให้เกลือหินนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและสัมประสิทธิ์ความหนืดต่ำกว่าเกลือหินที่ปราศจากแร้ดิน แต่ถ้าเกลือหินนั้นมีเหล็กออกไซด์หรือแคลเซียมคาร์บอเนตเจือปนอยู่ก็อาจจะทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น สัมประสิทธิ์ความหนืด และความแข็ง สูงกว่าเกลือหินที่ปราศจากธาตุเหล่านี้ เป็นต้น

ถึงแม้ผลกระทบของสิ่งเจือปนจะค่อนข้างซับซ้อน แต่การตรวจสอบอย่างละเอียดจากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ประกอบกับการศึกษาทางด้านศิลาวิทยา (และทางเคมีในบางกรณี) ความสัมพันธ์ทางด้านคณิตศาสตร์ก็น่าที่จะสร้างขึ้นมาได้ ซึ่งสามารถเขียนโดยรวมอยู่ในฟังก์ชันดังนี้

$$E \equiv f\{C, I_1, I_2, I_3 \dots I_n\} \quad (1)$$

$$\eta \equiv f\{C, I_1, I_2, I_3 \dots I_n\} \quad (2)$$

$$\sigma_c \equiv f\{C, I_1, I_2, I_3 \dots I_n\} \quad (3)$$

$$T \equiv f\{C, I_1, I_2, I_3 \dots I_n\} \quad (4)$$

โดยที่ E, η , σ_c และ T คือ ความยืดหยุ่น ความหนืด กำลังกดสูงสุด และกำลังดึงสูงสุดตามลำดับ C คือ ขนาดของผลึกเกลือ $I_1, I_2, I_3 \dots I_n$ คือ ปริมาณของสิ่งเจือปนชนิดที่ 1, 2, 3 ถึงชนิดที่ n ตามลำดับ โดยที่ n คือ จำนวนชนิดของสิ่งเจือปนทั้งหมดที่จะนำมาพิจารณา สมการ (1) ถึง (4) สามารถพัฒนาให้อยู่ในรูปชุดของค่าคงที่และตัวแปรที่แน่นอนได้ โดยอาศัยผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่หลากหลายและมีจำนวนเพียงพอที่จะกำหนดรูปแบบของความสัมพันธ์เชิงสถิติ ซึ่งแต่ละสมการอาจจะมีรูปแบบที่ต่างกัน และอาจมีชุดของค่าคงที่ที่ต่างกัน เช่น อาจจะมีอยู่ในรูปของ Linear, Exponential, Logarithmic หรือ Power equations เป็นต้น

วิธีดำเนินงานวิจัย

การวิจัยแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน ซึ่งรายละเอียดสามารถนำเสนอต่อต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วารสาร เอกสารการประชุม และรายงานการวิจัยทั้งในและต่างประเทศที่เกี่ยวข้องกับการหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติด้านกลศาสตร์ของหินกับลักษณะทางกายภาพ ศีลาวิทยา และองค์ประกอบทางเคมีของหิน ได้นำมาศึกษาเพื่อค้นหาข้อสรุปและนำประโยชน์ที่ได้ไปช่วยในการวิเคราะห์ในงานวิจัย รายละเอียดของสิ่งตีพิมพ์ทั้งหมดนี้ได้แสดงอย่างละเอียดในรูปของบรรณานุกรม

ขั้นตอนที่ 2 การพัฒนาฐานข้อมูลเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน

ผลการทดสอบเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน (ส่วนใหญ่จะเป็นผลงานวิจัยในต่างประเทศ) ได้นำมาประมวลโดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเด็นของความต้านแรงกดสูงสุดในแกนเดียว (Uniaxial compressive strength) ความต้านแรงดึงสูงสุดในแบบบราซิลเลียน (Brazilian tensile strength) ความยืดหยุ่น (Elasticity) และความหนืด (Viscosity) ซึ่งนำเสนอพร้อมกับลักษณะทางด้านศีลาวิทยาของตัวอย่างเกลือหินที่ถูกทดสอบ ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์เหล่านี้จะรวมไปถึงขนาดของผลึกเกลือในแท่งตัวอย่างเกลือหิน ชนิดและการวางตัวหรือแทรกตัวของสิ่งเจือปนและปัจจัยสภาวะแวดล้อมอื่น ๆ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับผลที่ทำการทดสอบ เช่น ขนาดของตัวอย่างเกลือหิน อุณหภูมิ ความชื้น อัตราการกดในระหว่างทดสอบ ฯลฯ นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้จากต่างประเทศแล้ว ในขั้นตอนนี้ได้มีการรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการทดสอบผลงานวิจัยในประเทศซึ่งเป็นโครงการที่เกี่ยวข้องกับเกลือหิน เช่น กิตติเทพ เฟื่องขจร (2543, 2544) และ Wetchasat (2002) เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

วัตถุประสงค์ของการทดสอบในห้องปฏิบัติการคือ สร้างข้อมูลพื้นฐานเพื่อใช้หาความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ และสอบเทียบ (Calibration) สูตรเชิงคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นเพื่อเชื่อมความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินกับลักษณะทางกายภาพ ศีลาวิทยา และการแทรกตัวของสิ่งเจือปน ในขั้นตอนนี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อยคือ

1) การคัดสรรและจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหิน แนวคิดในการคัดสรรตัวอย่างเกลือหินจากแท่งตัวอย่างเกลือหินที่ได้จากหลุมเจาะคือ ในแต่ละการทดสอบเชิงกลศาสตร์ชุดของตัวอย่างเกลือหินที่นำมาใช้จะมีความหลากหลายเชิงศีลาวิทยา ชนิดและปริมาณของสิ่งเจือปน การจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหิน (การตัด ผัน และกลึง) สำหรับการทดสอบแต่ละชนิดจะเป็นไปตามมาตรฐานของ

ASTM D4543 จากนั้นตัวอย่างหินแต่ละชิ้นจะนำมาศึกษาลักษณะทางกายภาพ (สี ความถ่วงจำเพาะ) และลักษณะทางศิลาวិทยา (ขนาดของผลึก ชนิด การเรียงตัว และปริมาณของสิ่งเจือปน) โดยอาศัยเพียงการตรวจสอบจากผิวภายนอกของแท่งตัวอย่างเกลือหิน

2) การทดสอบเชิงกลศาสตร์ การทดสอบในห้องปฏิบัติการจะแบ่งออกเป็น 4 ชนิด แต่ละชนิดใช้แท่งตัวอย่างเกลือหินอย่างน้อย 10 ตัวอย่างที่มีลักษณะทางศิลาวิทยาที่หลากหลาย

- (1) การทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียว (Uniaxial compressive strength test) มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่ากำลังกดสูงสุด (σ_c) ของตัวอย่างเกลือหิน วิธีการทดสอบจะใช้มาตรฐาน ASTM D2938
- (2) การทดสอบแรงดึงสูงสุดในแนวราบซิลเลียน (Brazilian tensile strength test) มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่ากำลังดึงสูงสุด (T) ของตัวอย่างเกลือหิน วิธีการทดสอบจะใช้มาตรฐาน ASTM D3967
- (3) การทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรในแกนเดียว (Uniaxial cyclic loading test) มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E) ของตัวอย่างเกลือหิน โดยค่านี้จะคำนวณจากเส้นสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในขณะผ่อนแรง (Unloading curve) ตัวอย่างหินจะกดด้วยแรงกดขึ้นลงหลายรอบจนกระทั่งหินนั้นแตก
- (4) การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียว (Uniaxial creep test) มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าความหนืดเชิงพลาสติก (η) ของตัวอย่างเกลือหิน วิธีการทดสอบจะใช้มาตรฐาน ASTM D4405

3) การศึกษาทางด้านศิลาวิทยาและทางเคมี ตัวอย่างเกลือหินหลังจากทดสอบแล้วจะนำมาศึกษาทางศิลาวิทยา โดยในขั้นตอนนี้จะทำการย่อยหรือละลายตัวอย่างเกลือหินเพื่อศึกษาปริมาณและชนิดของสิ่งเจือปนอย่างละเอียดด้วยการนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ทางเคมีด้วยวิธี X-ray diffraction ผลที่ได้จากการศึกษาสามารถแสดงในรูปของปริมาณและลักษณะการแทรกตัว

ขั้นตอนที่ 4 การสร้างความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์

ความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ในรูปแบบต่าง ๆ กับลักษณะทางศิลาวิทยาจะถูกสร้างขึ้นโดยอาศัยข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ สมการอาจเป็นแบบ Empirical (คืออยู่ในรูปแบบอิสระโดยไม่จำเป็นต้องมีเกณฑ์หรือทฤษฎีทางฟิสิกส์เข้ามาเกี่ยวข้อง) ตัวแปรที่อยู่ในสมการเหล่านี้คือ E, η , σ_c และ T โดยแต่ละตัวแปรสามารถนำมาสัมพันธ์กับชนิด ปริมาณ และลักษณะการแทรกตัวของสิ่งเจือปน ขนาดและการเรียงตัวของแร่ Halite (ถ้าเป็น

ไปได้) ซึ่งจะอาศัยข้อมูลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ จำนวนของค่าคงที่สามารถเชื่อมโยงตัวแปรต่าง ๆ เหล่านี้จะมีน้อยที่สุดเท่าที่จำเป็น เพื่อความสะดวกและง่ายต่อการใช้ และเพื่อให้การคำนวณมีประสิทธิภาพสูงสุด

ขั้นตอนที่ 5 การสรุปผลและเขียนรายงาน

ขั้นตอนและผลการศึกษาทั้งหมดได้นำมาสรุปในรายงานฉบับสมบูรณ์เพื่อที่จะส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ นอกจากนั้นแล้วผลการวิจัยชิ้นนี้จะนำเสนอในการประชุมเชิงวิชาการระดับชาติ เพื่อเผยแพร่ความรู้และรับข้อเสนอแนะในหมู่นักวิชาการทางด้านวิศวกรรมธรณี วิศวกรรมเหมืองแร่ วิศวกรรมโยธา และทางด้านธรณีวิทยาประยุกต์

ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้จะเกี่ยวข้องกับ

- 1) การรวบรวมและประมวลผลข้อมูลที่เกี่ยวข้องที่ได้ตีพิมพ์จากงานวิจัยทั้งในและต่างประเทศ
- 2) การคัดสรรและจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหินเพื่อใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ
- 3) การทดสอบเกลือหินเชิงกลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะประกอบด้วยการทดสอบแรงกดในแกนเดียว การทดสอบแรงกดแบบวัฏจักร การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน และการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียว
- 4) การศึกษาทางด้านศิลาวิทยาของแท่งตัวอย่างเกลือหินและการวิเคราะห์ทางเคมี
- 5) การสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างคุณสมบัติทางกลศาสตร์ (E, ν , σ_c และ T) กับลักษณะทางศิลาวิทยาของเกลือหิน
- 6) การสอบเทียบสมการเชิงคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น โดยใช้ข้อมูลเกลือหินจากทั่วโลก งานวิจัยนี้จะไม่ครอบคลุมบางประเด็นคือ
 - (1) ไม่มีการศึกษาวิเคราะห์และทดสอบผลกระทบของอุณหภูมิและความชื้นที่มีต่อคุณสมบัติของเกลือหิน กล่าวคือการทดสอบและวิเคราะห์จะทำให้อุณหภูมิต่ำ (Ambient temperature) เท่ากับอุณหภูมิห้อง
 - (2) การทดสอบจะใช้เกลือหินที่มีอยู่ในประเทศไทยเท่านั้น โดยแท่งตัวอย่างเกลือหินได้ขุดเจาะมาจากเกลือชั้นกลาง (Middle salt) และเกลือชั้นล่าง (Lower salt)

- (3) การทดสอบและวิเคราะห์ทางเคมีจะเลือกทำเฉพาะบางตัวอย่างเกลือหินเท่านั้น (ไม่น้อยกว่า 10 ตัวอย่าง) เพื่อนำผลที่ได้มาเขียนยื่นการศึกษาลักษณะทางศิลาวิทยา
- (4) คุณสมบัติการเคลื่อนไหลของเกลือหินที่จะศึกษาในที่นี้จะเน้นไปที่ความหนืดเชิงพลาสติก (Visco-plasticity) โดยจะแทนด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของความหนืด ซึ่งจะเป็นคุณสมบัติที่กำหนดการวิรูปตามกาลเวลาในระยะยาว ส่วนความหนืดเชิงยืดหยุ่น (Visco-elastic) จะไม่นำมาศึกษาในที่นี้ เพราะคุณสมบัตินี้จะมีผลต่อการวิรูปของเกลือหินตามกาลเวลาในระยะสั้นเท่านั้น และในเชิงวิศวกรรมออกแบบค่าความหนืดเชิงยืดหยุ่นก็จะมีบทบาทน้อย

ประโยชน์ที่จะได้รับและหน่วยงานที่น่าผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัยนี้มีหลายด้าน ซึ่งสามารถสรุปได้เป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

- 1) ทางด้านเศรษฐศาสตร์ ผลงานวิจัยนี้จะสามารถลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานและเวลาที่เกี่ยวข้องกับขบวนการจัดเตรียมและการทดสอบเชิงกลศาสตร์ของตัวอย่างเกลือหินในห้องปฏิบัติการ กล่าวคือ วิศวกรสามารถประเมินคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของแท่งตัวอย่างเกลือหินที่ขุดเจาะขึ้นมาได้ หรือจากลักษณะของหินในอุโมงค์หรือเหมือง ซึ่งผลจากการตรวจสอบทางด้านศิลาวิทยาที่ได้ในรูปขนาดของผลึกเกลือ ปริมาณ และชนิดของสิ่งเจือปนและนำมาคาดคะเนค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น ความหนืด กำลังรับแรงกดสูงสุด และกำลังรับแรงดึงสูงสุด
- 2) ทางด้านวิศวกรรมออกแบบ การออกแบบ โครงสร้างทางวิศวกรรมในชั้นเกลือหิน เช่น เหมืองเกลือโพแทชหรือโพรงละลายเกลือ จำเป็นที่จะต้องรู้คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของชั้นเกลือหินหรือโดมเกลือหินในบริเวณและความลึกที่ทำการก่อสร้าง เพื่อนำมาคำนวณเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์ของโครงสร้างนั้น ๆ หลักการและข้อปฏิบัติในปัจจุบันคือ ทำการคัดสรรตัวอย่างเกลือหินที่ทำการขุดเจาะขึ้นมาได้โดยพยายามให้ตัวอย่างที่เลือกมานั้นครอบคลุมในเชิงพื้นที่และเชิงความลึกของโครงสร้างให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งส่วนใหญ่จำนวนของตัวอย่างเกลือหินที่เลือกมาทดสอบเชิงกลศาสตร์จะไม่เกิน 10-20 ตัวอย่าง ทั้งนี้เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการทดสอบค่อนข้างสูง ประกอบกับสถาบันที่สามารถทดสอบเกลือหินให้ได้คุณสมบัติครบถ้วนและได้มาตรฐาน ในประเทศไทยมีเพียงไม่กี่แห่งเท่านั้น (เช่น Asian Institute of Technology, Sirinthorn Institute of Technology และ Suranaree University of Technology) ในกรณีเช่นนี้ถ้าพื้นที่ที่จะทำการก่อสร้างมีความแปรปรวนของคุณสมบัติเกลือหินสูง ผลที่ได้จากการทดสอบเพียง 10-20 ตัวอย่างก็มิอาจนำมาเป็นตัวแทนของ

คุณสมบัติของชั้นเกลือหินได้อย่างแท้จริง แต่ด้วยผลงานวิจัยนี้วิศวกรสามารถคาดคะเนคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ที่สำคัญในพื้นที่และความลึกที่สนใจได้ละเอียดมากขึ้น ซึ่งข้อมูลเชิงกลศาสตร์ของทุกหลุมเจาะและในแต่ละความลึก (อาจจะทำทุก 1 เมตร) สามารถนำมาแปลงเป็นคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ได้ทันที ดังนั้นผลที่ได้จากการออกแบบและการประเมินเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์ด้วยข้อมูลเชิงกลศาสตร์อย่างละเอียดและครอบคลุมจึงมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือมากขึ้น

3) ทางด้านการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม การเกิดแผ่นดินทรุด (Surface subsidence) และการเกิดหลุมยุบ (Sink holes) บนผิวดินที่อยู่ข้างบนเหมืองใต้ดินที่ขุดเจาะอยู่ในชั้นเกลือหินเป็นปัญหาใหญ่ที่สุดและเป็นปัญหาต่อเนื่องที่เกิดขึ้นในต่างประเทศ ผลกระทบเช่นนี้นอกจากจะทำให้เกิดความเสียหายต่ออาคารบ้านเรือน สิ่งก่อสร้าง ภูมิประเทศ และป่าไม้ที่อยู่บนผิวดินแล้ว ยังอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมทางด้านอุทกวิทยาและอุทกธรณีวิทยาในชั้นหินที่อยู่ตอนบนและบริเวณใกล้เคียงกับการขุดเจาะ เช่น เหมืองเกลือหินที่อยู่ทางเหนือของมลรัฐนิวเจอร์ซีย์ เป็นต้น เหตุผลที่ทำให้เกิดแผ่นดินทรุดอย่างรุนแรงมีหลายประการ ในทางวิศวกรรมปรากฏการณ์นี้อาจเกิดจากการออกแบบที่ไม่เหมาะสม การละลายที่จะมีมาตรการตรวจวัดในขณะที่ทำเหมือง และอาจเกิดจากการประเมินที่ผิดพลาดด้านคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินในพื้นที่นั้น ๆ ซึ่งอาจจะประเมินมาจากตัวอย่างหินเกลือจำนวนจำกัด และส่งผลให้ผลที่ทดสอบได้ไม่สามารถนำมาใช้เป็นตัวแทนของเกลือหินได้ทั้งพื้นที่ ประเด็นนี้สำคัญมากสำหรับประเทศไทย เนื่องจากประเทศไทยกำลังพัฒนาเหมืองเกลือโพแทชที่มีขนาดใหญ่ 2 แห่ง คือ ที่จังหวัดอุดรธานี (บริษัท เอเชียแปซิฟิก โพแทช คอร์ปอเรชัน จำกัด) และที่จังหวัดชัยภูมิ (กรมทรัพยากรธรณี) ซึ่งผลงานวิจัยนี้อาจสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการประเมินคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ในชั้นเกลือหินที่จะขุดเจาะเพื่อตรวจสอบความแปรปรวน หรือยืนยันคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินในพื้นที่เหมือง และในที่สุดสามารถนำข้อมูลมาใช้ในการประเมินเสถียรภาพของเหมือง หรือช่วยในการสร้างมาตรการป้องกันการทรุดตัวของแผ่นดินได้อย่างมีประสิทธิภาพในอนาคต

4) ทางด้านการพัฒนาองค์ความรู้ใหม่ของประเทศ ดังได้กล่าวมาแล้วว่าการประเมินคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินจากลักษณะทางศิลาวิทยายังไม่มียกวิชัยผู้ใดได้ทำหรือริเริ่มมาก่อนไม่ว่าในหรือต่างประเทศ เนื่องจากทรัพยากรแร่เกลือหินในประเทศไทยมีปริมาณมากติดอันดับหนึ่งในห้าของโลก องค์ความรู้ที่จะได้จากงานวิจัยนี้จึงสำคัญมากในแง่ของการพัฒนาแหล่งแร่เกลือหินของประเทศไทย ไม่ว่าจะอยู่ในรูปของการขุดเจาะขึ้นมาใช้ประโยชน์ หรือการประยุกต์ชั้นเกลือหินไว้เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานหรือของเสีย ฯลฯ ซึ่งจะทำให้การพัฒนานั้นเป็นไปอย่างยั่งยืน มีประสิทธิภาพ และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด และที่สำคัญที่สุดคือวิศวกรที่เกี่ยวข้องในอนาคตจะได้อาศัยองค์ความรู้ที่พัฒนาขึ้นในประเทศของเราเอง

หน่วยงานที่จะนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้โดยทันทีและง่ายต่อผู้ใช้ โดยไม่ต้องผ่านการฝึกอบรมแต่อย่างใด หน่วยงานภาครัฐที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ประกอบด้วย องค์กรที่ทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาทรัพยากรและวิศวกรรมเกลือหิน อาทิ กรมทรัพยากรธรณี กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และองค์การปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย เป็นต้น หน่วยงานภาคเอกชนประกอบด้วย บริษัทสำรวจและออกแบบ และบริษัทเหมืองแร่ที่ทำงานเกี่ยวข้องกับเกลือหิน ในส่วนของสถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ วิศวกรรมธรณี และวิศวกรรมโยธา ก็สามารถนำผลงานวิจัยนี้ไปใช้ศึกษาต่อ หรือนำไปปรับปรุงให้มีความแม่นยำมากขึ้น ซึ่งสามารถทำได้ในระดับบัณฑิตศึกษา เป็นต้น

องค์ประกอบของรายงาน

รายงานฉบับนี้เสนอขั้นตอนและผลงานวิจัยทั้งหมดของการศึกษา โดยบทนำจะอธิบายถึงที่มาของปัญหา วัตถุประสงค์ แนวคิด วิธีการ ขอบเขต และประโยชน์ของงานวิจัยนี้ บทที่หนึ่งเสนอผลการเสนอผลการทบทวนองค์ความรู้และเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านธรณีวิทยาของเกลือหิน ศิลาวิทยาของเกลือหิน คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน และหินชนิดอื่น ๆ

ฐานข้อมูลเชิงแร่วิทยา ศิลาวิทยา และกลศาสตร์ของเกลือหินได้นำเสนอในบทที่สอง คุณลักษณะของตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบ แหล่งที่มาของตัวอย่าง แนวคิดในการเลือกตัวอย่าง การเตรียมตัวอย่าง และการบรรยายคุณลักษณะของตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้สรุปไว้ในบทที่สาม บทที่สี่ศึกษาคุณสมบัติเชิงแร่วิทยาและกลศาสตร์ของเกลือหิน โดยเสนอวิธีการและผลของการศึกษาเชิงแร่วิทยาและการทดสอบในห้องปฏิบัติการ บทที่ห้าศึกษาความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ของคุณสมบัติต่าง ๆ ที่วัดได้

บทที่หกวิจารณ์ผลของการวิจัย โดยเน้นที่ความเพียงพอและความเหมาะสมของข้อมูล ปัจจัยและผลกระทบของปัจจัยที่พิจารณา ความแม่นยำของการคาดคะเนด้วยสมการความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ บทที่เจ็ดสรุปวิธีและผลที่ได้จากงานวิจัยทั้งหมด การนำผลไปประยุกต์ใช้และข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต เอกสารที่ถูกต้องอ้างอิงในงานวิจัยนี้ได้ให้ไว้ในบรรณานุกรม

บทที่ 1

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้สรุปผลการทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งหัวข้อหรือองค์ความรู้หลักที่นำมาสรุปในบทนี้ประกอบด้วย แร่วิทยาของเกลือหิน ศิลาวิทยาของเกลือหิน คุณสมบัติและพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ และปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของเกลือหินและหินโดยทั่วไป

1.1 แร่วิทยาของเกลือหิน

แร่ที่เป็นองค์ประกอบหลักในเกลือหินคือ เฮไลต์ (Halite) โดยมีองค์ประกอบทางเคมี คือ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ซึ่งประกอบด้วย ธาตุคลอรีน (Chlorine) ร้อยละ 60.7 และธาตุโซเดียม (Sodium) ร้อยละ 39.3 มีรูปผลึกพื้นฐานแบบสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ (Cubic) แต่อาจพบลักษณะเป็นเนื้อแน่น (Massive) หรือแบบเม็ด (granular) หรือแบบเส้น (fibrous) รอยแตกในเกลือหินจะพบในแนวตั้งฉากกับระนาบ (cleavage) ของเกลือ แต่ในบางครั้งอาจพบการแตกแบบก้นหอย (Conchoidal) แนวแตกเรียบสมบูรณ์ (Perfect cleavage) อยู่ในแนว {001} การเกิด Twining มักไม่พบในผลึกที่เกิดตามธรรมชาติแต่จะพบในผลึกเกลือที่ถูกสร้างขึ้น (Synthetic salt) ซึ่งจะเกิดการ Twin ในแนว {111} สีของเกลือหินที่พบขึ้นกับปริมาณและชนิดของสิ่งเจือปน โดยเมื่อบริสุทธิ์จะมีลักษณะใสไม่มีสีและมีคุณสมบัติโปร่งใส แต่เมื่อมีมลทินหรือมีสิ่งเจือปนจะมีสีเหลือง สีส้ม สีแดง สีน้ำเงิน สีเทา และสีน้ำตาล (Hurlbut, 1971) ความถ่วงจำเพาะของเกลือหินเท่ากับ 2.165 ความแข็งตาม Moh's Scale เท่ากับ 2.5 จุดหลอมตัวของเกลือหินอยู่ที่อุณหภูมิ 800.8°C และน้ำเกลือจะเปลี่ยนเป็นน้ำแข็งที่อุณหภูมิ -21.12°C แร่เฮไลต์เป็นแร่ที่พบมากในบริเวณที่เกิดการตกตะกอนแบบ Evaporite marine deposit ซึ่งจะมีความหนาของชั้นหินตั้งแต่ 100 เมตรหรือมากกว่า 1,000 เมตร แร่ประกอบหินชนิดอื่นที่พบได้แก่ แร่แคลไซต์ โคโลไมต์ ยิปซัม แอนไฮไดรต์ ซิลิไซด์ และแร่ดิน นอกจากนี้แร่เฮไลต์สามารถพบจากการตกตะกอนแบบ Saline Lakes deposits ซึ่งจะพบแร่บอแรต แร่ซัลเฟต และแร่คาร์บอเนตแทรกอยู่ด้วย (Nickel and Nichols, 1991; Deer et al., 1992; Nesse, 2000)

1.2 ศิลาวิทยาของเกลือหิน

ลักษณะทางด้านศิลาวิทยาที่ทำการทบทวนในหัวข้อนี้จะเกี่ยวข้องกับขนาดผลึกและทิศทางการวางตัวของผลึก รอยต่อระหว่างผลึก และสิ่งเจือปน (Inclusions) ขนาดของผลึกเกลือที่เกิดการทับถมเป็นชั้นอาจมีขนาดแตกต่างกันตั้งแต่ 2-3 มิลลิเมตร จนถึงมากกว่า 10 เซนติเมตร ส่วนใหญ่

ผลึกของเกลือในชั้นหินมักมีขนาดเดียวกัน ผลึกที่มีขนาดใหญ่มักพบสิ่งเจือปนค่อนข้างน้อยซึ่งแสดงผลการเกิดผลึกในกระบวนการตกผลึกใหม่ ขนาดของผลึกเกลือในโคมเกลือมีขนาดตั้งแต่ 0.005 เมตร ถึง 0.01 เมตร ในบางส่วนของโคมเกลืออาจพบผลึกที่มีขนาดเล็กมาก เกลือหินประกอบด้วยแร่ประกอบที่ค่อนข้างหลากหลาย โดยส่วนใหญ่แล้วแร่เหล่านี้ได้แก่ แร่แอนไฮไดรต์ แคลไซต์ โดโลไมต์ ดิน และเหล็กออกไซด์ แร่เหล่านี้จะถูกพบในลักษณะทับถมเป็นชั้น ซึ่งขนาดและการกระจายตัวอยู่ระหว่าง 0 ถึง 100% ในชั้นหินหรือในตัวอย่าง ถ้าชั้นหินหนาแร่เหล่านี้อาจแทรกอยู่ระหว่างผลึก (National Bureau of Standards Monograph 167, 1981)

Hansen (1984) ศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางกลศาสตร์ของเกลือหินในธรรมชาติ โดยทำการศึกษาทางด้านสรีลาวิทยาและทางด้าน Micromechanics ของตัวอย่างเกลือหิน 4 ชนิดที่อยู่ในสหรัฐอเมริกา ผลที่ได้แสดงถึงปริมาณของสิ่งเจือปนที่ลดลงกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นซึ่งมีผลกระทบต่ออาการเคลื่อนไหล การเปลี่ยนรูปเนื่องจากการควบคุมด้วยอัตราการกดจะขึ้นกับความเค้นและอุณหภูมิแต่จะไม่ขึ้นกับความบริสุทธิ์ของเกลือหิน ที่อุณหภูมิต่ำ (25°C) จะเกิดการเปลี่ยนรูปในลักษณะ Dislocation glide แต่ที่อุณหภูมิสูง (200°C) จะเกิดการเปลี่ยนรูปในลักษณะ Dislocation climb

Skrotzki and Haasen (1988) ได้ทำการศึกษาลักษณะของเนื้อหินที่มีผลกระทบต่ออาการเกิดการเคลื่อนไหลของเกลือหิน พฤติกรรมการเคลื่อนไหลจะทดสอบโดยใช้ Synthetic salt โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้องและให้แรงกดในทิศทางขนานและตั้งฉากกับแกนของผลึกในแนว <100> ผลที่ได้พบว่าตัวอย่างที่รับแรงในแนวขนานกับผลึกจะมีค่าความเครียดสูงกว่าตัวอย่างที่รับแรงในทิศทางตั้งฉากกับผลึก ซึ่งความแตกต่างนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น อัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาที่จะพบในทิศทางทั้งหมด ผลกระทบของเนื้อหินบนช่วงที่อัตราความเครียดเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient creep)

Peach (1996) ศึกษาผลกระทบของขนาดและความเข้มข้นในส่วนของ Polycrystalline anhydrite ที่กระจายตัวอยู่ในไฮไลต์ ตัวอย่างของ Synthetic salt ประกอบด้วยแอนไฮไดรต์ ปริมาณ 0 ถึง 35% ตัวอย่างถูกกดในแนวแกน โดยมีอัตราความเครียด 10^{-5} s^{-1} ที่อุณหภูมิ 22°C และความดันล้อมรอบเท่ากับ 20 MPa ภายใต้เงื่อนไขเหล่านี้เกลือหินที่บริสุทธิ์จะไม่แสดงการบวมของหิน (Dilatancy) หรือการเปลี่ยนแปลงทางด้านความซึมผ่าน การเพิ่มขึ้นของแอนไฮไดรต์ในตัวอย่างจะทำให้การไหลและการบวมตัวเพิ่มขึ้นเมื่อวัดด้วยความเครียดคงที่ ส่วนใหญ่แล้วการบวมตัวของตัวอย่างที่ประกอบด้วยแอนไฮไดรต์ มากกว่า 10 ถึง 20% จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของความซึมผ่านเปลี่ยนแปลงมากกว่า 10^{-21} m^2 ถึง 10^{-17} m^2

1.3 คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน

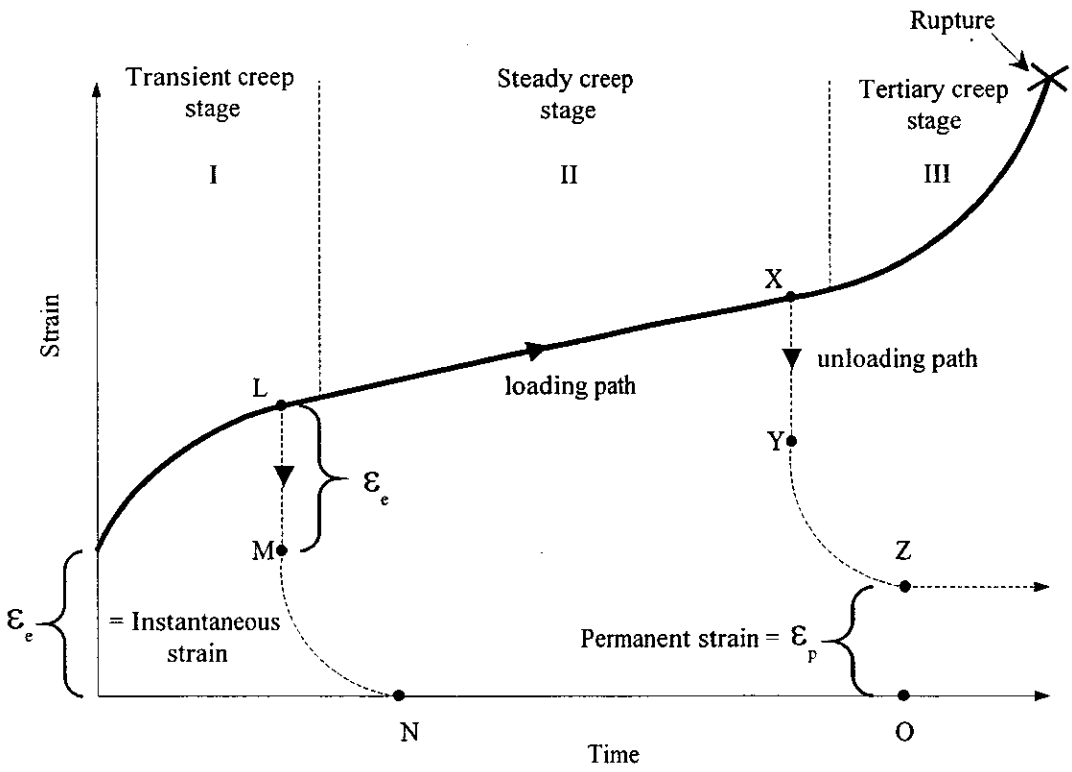
ผู้วิจัยหลายท่านเสนอว่าเกลือหินมีคุณสมบัติเหมือน โลหะและเซรามิก (Chokski and Langdon, 1991; Munson and Wawersik, 1993) แต่แท้จริงแล้วเกลือหินจัดเป็นหินชนิดหนึ่งประเภท Alkali halides ซึ่งมีคุณสมบัติไม่เหมือนกับโลหะ เซรามิก และหินอื่น ๆ Aubertin (1996) และ Aubertin et al. (1992, 1993, 1999) ได้ศึกษาคุณสมบัติของเกลือหินและสรุปว่า เกลือหินมีคุณสมบัติแบบกิ่งเปราะกิ่งเหนียวหรือมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น-พลาสติก ซึ่งสอดคล้องกับ Fuenkajom and Daemen (1988), Fokker and Kenter (1994) และ Fokker (1995, 1998)

Arieli et al. (1982) ได้ทำการทดสอบเกลือหินภายใต้อุณหภูมิตั้งแต่ 20 ถึง 200°C และพบว่าการเคลื่อนไหลภายในผลึก (Intracrystalline) ของ Synthetic salt จะถูกควบคุมโดยกระบวนการ Dislocation glide ซึ่งมีค่าความเค้นตั้งแต่ 10-20 MPa บริเวณจุดที่มีค่าความเค้นต่ำและมีอุณหภูมิสูง พบว่าการเคลื่อนไหลจะถูกควบคุมโดยกระบวนการ Dislocation climb และได้มีการทดสอบในเกลือหินที่เกิดตามธรรมชาติเพื่อเข้าใจพฤติกรรมในช่วงที่อัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาคงที่ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 20 ถึง 200°C โดยมีอัตราความเครียดลดลงจาก 10^{-10} s^{-1} และความดันล้อมรอบเพิ่มขึ้นเป็น 30 MPa การทดสอบพบว่าการเกิดการไหลที่ความเค้นต่ำกว่า 15 MPa และอัตราความเครียดต่ำกว่า 10^{-10} s^{-1} ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงการเคลื่อนไหลโดยกระบวนการ Dislocation glide และเพื่อศึกษาถึงอัตราที่ควบคุมทางด้านกลศาสตร์ Wawersik (1988) พบว่าการเกิด Cross-slip ของ Screw dislocations จะมีอัตราที่ค่อนข้างจำกัด Carter and Hansen (1983) สังเกตการเกิดรอยแตกเล็ก ๆ ในเนื้อหิน (Subgrain) ที่อุณหภูมิ 100 ถึง 200°C โดยได้แนะนำว่ากระบวนการ Dislocation climb จะเป็นตัวควบคุมอัตราในช่วงนี้ การทดสอบทางด้านแรงกดและแรงดึงกับ Synthetic salt พบว่าเมื่อมีแรงกดในแนว [001] ภายใต้อุณหภูมิต่ำกว่า 200°C ผลึกจะแสดงลักษณะเป็น 3 ช่วง ของพฤติกรรม การแข็งตัว (Work hardening behavior) เมื่อเกิดการเลื่อนใน Single {110} <110> system จะง่ายในการเกิด Glide stage หรือ Stage I ส่วนใน Stage II จะเกิดการ Hardening เนื่องจาก Second {110}<110> System ในขณะที่ Stage III จะมีลักษณะเช่นเดียวกับการเกิดโดย Cross-slip ซึ่งผลึกเดี่ยวจะแสดงการไหลที่ความเค้นต่ำกว่าผลึกชุด (Polycrystal) เนื่องจากยังมีการกระตุ้นจากการเลื่อนอยู่และไม่มีผลกระทบจาก Hardening และทิศทางของการกระจายตัว (Skrotzki and Haasen, 1988)

Jeremic (1994) พิจารณาลักษณะทางด้านกลศาสตร์ของเกลือหิน โดยแบ่งเป็นสามลักษณะคือ พฤติกรรมเชิงยืดหยุ่น (Elastic behavior) พฤติกรรมเชิงยืดหยุ่นพลาสติก (Elastic and plastic behavior) และพฤติกรรมเชิงพลาสติก (Plastic behavior) โดยพฤติกรรมเชิงยืดหยุ่นของเกลือหินจะถูกพิจารณาในลักษณะความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงและมีการวิบัติแบบเปราะ ความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงสามารถสังเกตได้เมื่อมีแรงกดต่ำกว่าแรงกดอ่อนตัว ในช่วงความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงจะขึ้นกับ

ความเครียดเชิงยืดหยุ่นและสามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นได้ ปกติแล้วเกล็ดหินจะมีสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่ต่ำกว่าหินอื่น ๆ ในส่วนของพฤติกรรมเชิงยืดหยุ่นพลาสติกจะเกิดขึ้นเมื่อแรงกดที่มากระทำต่อเกล็ดหินยังไม่เกินจุดอ่อนตัว การเปลี่ยนรูปเมื่อปล่อยแรงกดจะทำให้เกล็ดหินกลับสู่สภาพเดิมหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เกล็ดหินมีการเปลี่ยนรูปไปชั่วขณะเท่านั้น แต่ในขณะเดียวกันเมื่อให้แรงกดที่สูงขึ้นเกล็ดหินจะเข้าสู่ช่วงที่เป็นพลาสติก กล่าวคือความเค้นจะเลยจุดความเค้นอ่อนตัวไปแล้วนั่นเอง เมื่อลดแรงกดเกล็ดหินจะไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ ถ้าให้แรงกดต่อไปเกล็ดหินจะไม่สามารถทนแรงกดที่สะสมไว้ได้และในที่สุดก็จะวิบัติ การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น และการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกจะพิจารณาแยกกัน ซึ่งเกล็ดหินจะแสดงคุณสมบัติทั้งทางด้านความเครียดแบบยืดหยุ่นและความเครียดแบบพลาสติก ความแตกต่างระหว่างพฤติกรรมเชิงยืดหยุ่นและพฤติกรรมเชิงพลาสติกคือการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นจะเกิดขึ้นชั่วคราว (สามารถคืนตัวได้) การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกจะเกิดขึ้นอย่างถาวร (ไม่สามารถคืนตัวได้) ระดับของการเปลี่ยนรูปแบบถาวรขึ้นกับอัตราส่วนของความเครียดแบบพลาสติกกับความเครียดทั้งหมด การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นและแบบพลาสติกสามารถสังเกตได้จากแรงกดในระยะสั้น (Short term loading) แต่ต้องมีขนาดของแรงกดสูงมาก ซึ่งพฤติกรรมเชิงพลาสติกของเกล็ดหินจะไม่มีเปลี่ยนแปลงรูปอย่างถาวรจนกว่าแรงที่กระทำจะเกินจุดอ่อนตัว ที่แรงกดสูงเช่นนี้เกล็ดหินจะมีการเปลี่ยนรูปไปเรื่อย ๆ ไม่มีที่สิ้นสุดหากแรงกดที่กระทำยังคงเท่ากับแรงกดคงที่ เมื่อถึงขีดจำกัดของความเครียดค่าหนึ่งเกล็ดหินจะไม่สามารถทนรับแรงกดนี้ต่อไปได้และจะวิบัติ การเปลี่ยนแปลงรูปของเกล็ดหินที่ได้รับอุณหภูมิระดับสูงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนพฤติกรรมเป็นแบบกึ่งเปราะกึ่งเหนียว

การเปลี่ยนรูปที่ขึ้นกับระยะเวลาที่อยู่ภายใต้แรงที่มากระทำหรือการเคลื่อนไหลเป็นกระบวนการที่หินสามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างต่อเนื่องโดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงความเค้น ความเครียดที่เกิดจากการเคลื่อนไหลซึ่งจะคืนตัวได้น้อยมากเมื่อมีการเอาแรงกดออกไป ดังนั้นเกล็ดหินจะแสดงการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก การเคลื่อนไหลหรือการเปลี่ยนรูปตามเวลาภายใต้แรงกดคงที่ของหินปรากฏเป็น 3 ช่วง (รูปที่ 1.1) คือ 1) ช่วงที่อัตราความเครียดเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient phase, I) 2) ช่วงที่อัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาคงที่ (Steady-state phase, II) 3) ช่วงที่จะนำไปสู่การแตก (Tertiary phase, III) โดยเมื่อให้แรงกดในช่วงที่ 1 ที่จุด L ทำให้ความเครียดลดลงอย่างรวดเร็วไปยังจุด M และจะกลับไปสู่จุด O ที่จุด N ระยะ LM จะเท่ากับความเครียดที่ได้จากการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น (Instantaneous strain, ϵ_i) เมื่อนำเอาความเค้นเพิ่มเข้าไปในช่วงอัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาคงที่ (Steady-state phase) จะทำให้เกิดความเครียดเชิงพลาสติกที่ได้จากการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Permanent strain, ϵ_p)



รูปที่ 1.1 ความเครียดที่เกิดขึ้นในเกลือหินกับระยะเวลาภายใต้แรงคคงที่ (ตัดแปลงมาจาก Jeremic, 1994).

Wanten et al. (1996) ทำการศึกษาการเปลี่ยนรูปของผลึกเกลือเดี่ยว โดยผลึกมีความบริสุทธิ์สูงมีขนาด $5 \times 5 \times 5$ มิลลิเมตร และทำการกดในแนว [001] การทดสอบจะทำในจุดที่มีอัตราความเครียดจาก 10^{-4} ถึง 10^{-7} s^{-1} ที่อุณหภูมิ 20 ถึง 200°C โดยผลึกมีอัตราส่วนความยาวแกนผลึกเท่ากับ 1:1:1 เพื่อศึกษาการเกิดเคลื่อนตัวหลายแนว ซึ่งตัวอย่างได้แสดงถึงลักษณะของ Work hardening behavior ที่มีการกระตุ้นจาก $\{110\}\langle 110 \rangle$ Slip systems การศึกษาทางด้าน Microstructure พบว่าเกิดความหนาแน่นของ Dislocation ก่อนข้างสูงแต่ไม่มีการเกิดในลักษณะ Cross-slip หรืออาจมีน้อย การเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองทางด้าน Microphysics พบว่าข้อจำกัดของการเกิด Dislocation glide ขึ้นกับกลไกของการเปลี่ยนรูป

1.4 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินมีอยู่หลายประการ ซึ่งจะสะท้อนให้เห็นในรูปของการเปลี่ยนรูปหรือเกิดการเคลื่อนไหล รวมทั้งยังทำให้ความต้านทานต่อแรงกดหรือแรงดึงมีค่าลดลง ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การเคลื่อนไหลและความต้านทานของเกลือหิน ทั้งสถานะในชั้นเกลือหินและในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ขนาดผลึก แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึก อุณหภูมิ ความชื้น และสิ่งเจือปน เป็นต้น

ขนาดผลึกหรือขนาดเม็ดเกลือจะมีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนรูปร่างและการเคลื่อนไหลของเกลือหิน Fokker (1998) และ Aubertin (1996) อธิบายโดยการเปรียบเทียบขนาดผลึกกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm พบว่าผลึกที่มีขนาดใหญ่จะมีโอกาสเกิดแนวแตก (Cleavage plane) และระนาบเลื่อน (Slip plane) ได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาลักษณะทางด้านจุลภาค (Microscopic) โดย Langer (1984) ได้ศึกษาและสรุปเกี่ยวกับผลกระทบของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกกับอัตราการเคลื่อนไหลของเกลือหิน โดยพบว่าเกลือหินที่มีผลึกหรือเม็ดเกลือขนาดเล็กที่ถูกกระทำภายใต้ความเค้นต่ำ การเคลื่อนไหลจะเกิดขึ้นจากการเลื่อนของรอยต่อระหว่างผลึกเกลือ (Dislocation climb) แต่สำหรับผลึกเกลือที่มีขนาดใหญ่ กระบวนการเปลี่ยนรูปจะเกิดจากการเลื่อนของรอยแตกและรอยร้าวในผลึกเกลือ (Dislocation glide)

Franssen and Spiers (1990), Raj and Pharr (1992) และ Senseny et al. (1992) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของผลึกและการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกของเกลือหินพบว่าความต้านแรงเฉือนและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจะเกิดขึ้นตามแนวหรือทิศทางของผลึก ดังนั้นตัวอย่างเกลือหินที่มีขนาดเล็กเกินไปจะมีความต้านแรงกดที่ปรวนแปร ผลการทดสอบที่ได้จึงไม่สามารถเปรียบเทียบกับขนาดอื่นได้ ดังนั้น ASTM จึงได้ออกข้อกำหนดมาตรฐานสากลขึ้น (ASTM D2938, D2664, D3967) เพื่อที่จะกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างให้มีขนาดตามมาตรฐานและสามารถเทียบเคียงกันได้ กล่าวคือเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างต้องมีขนาดมากกว่าสิบเท่าของขนาดเฉลี่ยของผลึก

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของเกลือหินในด้านความต้านทานของเกลือหิน เกลือหินที่มีลักษณะเนื้อต่างกันจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกต่ำกว่าบริเวณที่เป็นเนื้อเดียวกัน ลักษณะดังกล่าวนี้ Allemandou and Dusseault (1996) ได้สังเกตพฤติกรรมเกลือหินจากการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนและการทดสอบแรงกดในแกนเดียวพบว่า ค่าความเค้นสูงสุดจะขึ้นกับแรงยึดเหนี่ยวภายในผลึกและรอยต่อระหว่างผลึกของเกลือหิน ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบโดย Fuenkajorn and Daemen (1988) ความเปราะเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของเกลือหินที่แสดงถึงความสามารถในการยึดเหนี่ยวระหว่างผลึก เช่น การเตรียมตัวอย่าง การตัดและการขัดตัวอย่างเกลือหิน จะพบว่าในบริเวณขอบของตัวอย่างอาจเกิดการแตกขึ้นได้ง่าย นั่นคือ เกลือหินมีความสามารถในการยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกค่อนข้างต่ำ

อัตราแรงกดที่กระทำต่อเกลือหินที่แตกต่างกันจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปตามเวลาหรือเปลี่ยนแปลงรูปร่างและใช้เวลาในการเปลี่ยนรูปไม่เท่ากัน กล่าวอีกนัยหนึ่งคือการเคลื่อนไหลของเกลือหินที่เกิดขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาในสภาวะแรงกดที่แตกต่างกัน ภายใต้อัตรากดสูงเกลือหินจะมีพฤติกรรมแบบเปราะ แต่ภายใต้อัตราแรงกดที่ต่ำจะทำให้พฤติกรรมของเกลือหินเป็นแบบพลาสติกมากขึ้น เป็นผลให้มีจุดอ่อนตัวของความต้านแรงกดที่ต่ำ ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวได้ศึกษาโดย Aubertin et al. (1993) และ Hardy (1996) พบว่าน้ำหนักกดทับในชั้นเกลือหินภายใต้ระยะเวลายาวแรงกดทับในเนื้อหินจะค่อย ๆ ลดลง Hardy (1996) ได้ทำการทดสอบตัวอย่างเกลือหินด้วยแรงกด 10.3 MPa และรักษาระดับการเปลี่ยนรูปไว้ในระยะเวลา 12 เดือน พบว่าความต้านแรงกดจะลดลงไปถึง 21%

ผลกระทบของวิถีความเค้น (Stress history) ต่อพฤติกรรมเกลือหินได้มีผู้วิจัยหลายท่านตระหนักถึง (Lindner and Brady, 1984; Senseny, 1984; Nair and Boreasi, 1970; Lux and Heusermann, 1983; Versluis and Lindner, 1984; Munson and Dawson, 1984; Donath et al., 1988) สำหรับการทดสอบการเคลื่อนไหลแบบดั้งเดิมในห้องปฏิบัติการภายใต้ความเค้นคงที่ ผลลัพธ์ที่ได้จะง่ายต่อการแปลความหมาย ซึ่งค่าที่ได้เหล่านี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบในภาคสนาม โดยต้องคำนึงถึงผลกระทบจากการเปลี่ยนรูปเนื่องจากวิถีความเค้นที่มากระทำ ในการทดสอบพบว่าตัวอย่างเกลือหินที่ถูกกระทำด้วยความเค้นเดียวกันจะมีการเคลื่อนไหลที่ต่างกันถ้าตัวอย่างเกลือหินนั้นมีวิถีความเค้นที่มากระทำแตกต่างกัน แต่เกลือหินมีความจำที่ไม่ถาวร โดยเมื่อถูกกระทำในเวลาที่นานขึ้นจะพบว่าพฤติกรรมของเกลือหินจะมีลักษณะเหมือนกันโดยไม่คำนึงถึงวิถีความเค้น Wawersik and Hannum (1980) ทำการทดสอบแรงกดสามแกนแบบดั้งเดิม (Conventional triaxial tests) กับเกลือหิน โดยกำหนดทางวิถีความเค้นที่ต่างกันสามรูปแบบประกอบด้วยการให้แรงดันด้านข้างคงที่ ให้ความเค้นเฉื่อยคงที่ และแรงในแนวแกนคงที่ ซึ่งการทดสอบทั้งหมดจะถูกให้แรงภายใต้แรงกดสามแกนแบบขั้นบันได ผลการทดสอบพบว่าทั้งค่าความเครียดหลักน้อยที่สุดและความเครียดหลักมากที่สุด

สุด มีค่ามากที่สุดภายใต้การทดสอบตามวิถีความเค้นแบบให้แรงดันด้านข้างคงที่ และมีค่าน้อยที่สุดตามวิถีความเค้นแบบให้แรงในแนวแกนคงที่ จากผลการทดสอบดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าความแตกต่างของวิถีความเค้นมีผลต่อพฤติกรรมของเกลือหิน Lux and Rokahr (1984) ทำการเปรียบเทียบผลจากการทดสอบสามแกนแบบดั้งเดิมกับการทดสอบสามแกนแบบแรงดึง (Extension triaxial tests) ผลจากการทดสอบสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ผลการทดสอบในช่วงระยะสั้นและระยะยาว สำหรับช่วงการทดสอบระยะสั้นค่ากำลังรับแรงของเกลือหินจะขึ้นกับสถานะของความเค้นและความเค้นเฉลี่ย ในส่วนของผลการทดสอบระยะยาวพบว่าค่าการยุบตัวของเกลือหินเนื่องจากการคืบของการทดสอบสามแกนแบบแรงดึงจะให้ค่าน้อยกว่าการทดสอบแรงกดสามแกนแบบดั้งเดิม นอกจากนี้งานวิจัยยังพบว่าการวิบัติของตัวอย่างเกลือหินภายใต้การทดสอบสามแกนแบบแรงดึงจะมีลักษณะคล้ายกับการวิบัติในภาคสนามรอบ โพรงเกลือ Hunsche and Albrecht (1990) ทำการศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นสถิต (Hydrostatic stress) อุณหภูมิ ค่ากำลังรับแรงคงค้าง (Residual strength) และวิถีความเค้น โดยทำการทดสอบกับเกลือหินภายใต้แรงกดสามแกนแบบให้แรงเป็นจริง ผลจากการทดสอบพบว่าค่าตัวแปรสัมประสิทธิ์โหลด (Load parameter) ที่ถูกใช้วัดเป็นตัวกลางการเปรียบเทียบได้ให้ผลต่างกันจากการทดสอบวิถีความเค้นที่ต่างกัน ซึ่งตัวแปรสัมประสิทธิ์โหลดดังกล่าวเป็นค่าตัวแปรที่บ่งบอกความสามารถของกำลังรับแรงของวัสดุ ดังนั้นจากการทดสอบดังกล่าวจึงสามารถกล่าวได้ว่าค่ากำลังรับแรงของเกลือหินขึ้นกับวิถีความเค้น Allemandou and Dusseault (1993) ทำการทดสอบเกลือหินโดยการคืบแบบวัฏจักรภายใต้แรงกดสามแกน (Triaxial cyclic creep tests) จุดประสงค์ของการทดสอบได้มุ่งเน้นไปที่ผลกระทบของวิถีความเค้น Octahedral stress และ Deveriatoric stress ที่มีต่อพฤติกรรมการคืบของเกลือหิน ในส่วนของผลกระทบของวิถีความเค้นได้ใช้การทดสอบสามแกนแบบดั้งเดิมและสามแกนแบบลดแรงดันด้านข้าง (Radial-unloading triaxial test) พบว่าการทดสอบสามแกนแบบดั้งเดิมจะให้ค่าการยุบตัวมากกว่าวิธีลดแรงดันด้านข้าง แต่ค่ากำลังรับแรงที่ตำแหน่งความเครียดสูงสุดนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน Aubertin et al. (1999) และ Yahya et al. (2000) ทำการทดสอบแบบอัตราความเครียดโดยเกลือหินจะถูกกระทำภายใต้แรงสามแกนแบบดั้งเดิม และแบบลดแรงดันด้านข้าง (Reduced triaxial extension) ซึ่งแรงกดดังกล่าวจะถูกให้แรงดันด้านข้างค่อนข้างสูง โดยจะพิจารณาให้เกลือหินมีพฤติกรรมความเป็นพลาสติกสูง (Fully plastic) จากผลการทดสอบพบว่าความแตกต่างของวิถีความเค้นมีผลกระทบต่อพฤติกรรมการให้แรงแบบวัฏจักรของเกลือหิน มงคล จันดาแก้ว (2546) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของวิถีความเค้นต่อพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของเกลือหิน โดยการทดสอบการเคลื่อนไหลสามแกนแบบดั้งเดิมและแบบลดความดันด้านข้าง และศึกษาพฤติกรรมของมวลเกลือรอบ โพรงเกลือ โดยใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อประเมินผลสำคัญของผลกระทบของวิถีความเค้นต่อโพรงกักเก็บในมวลเกลือหิน ผลการทดสอบระบุว่าที่ความเค้นเท่ากันตัวอย่างเกลือหินที่ทดสอบแบบดั้งเดิมมีการเปลี่ยนรูปร่างมากกว่าตัวอย่างที่ทดสอบแบบลดความดันด้านข้าง โดยความหนืดเชิงยืดหยุ่นและความหนืดเชิง

พลาสติกของเกลือหินที่สอบเทียบได้จากวิธีการทดสอบแบบลดความดันด้านข้างมีค่าสูงกว่าคุณสมบัติที่ได้จากการทดสอบแบบดั้งเดิมเล็กน้อย สำหรับการทดสอบตัวของพิวตินและการหดตัวของโพร่งที่คำนวณได้จากการทดสอบแบบลดความดันด้านข้างมีค่าน้อยกว่าจากการทดสอบแบบดั้งเดิมร้อยละ 31.6 และ ร้อยละ 25.7 สำหรับแบบจำลองรูปทรงกลม ส่วนแบบจำลองรูปทรงกระบอกมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 30.1 และร้อยละ 23.3 ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าพฤติกรรมเชิง กลศาสตร์ของตัวอย่างเกลือหินจะขึ้นกับวิถีความเค้น โดยการทดสอบแบบลดความดันด้านข้างให้ผลที่สอดคล้องกับความเค้นในภาคสนามมากกว่าวิธีการแบบดั้งเดิมแต่วิธีการทดสอบแบบดั้งเดิมแสดงผลการเคลื่อนไหลและคุณสมบัติของตัวอย่างเกลือหินเป็นไปในเชิงอนุรักษ์มากกว่า

ความร้อนหรืออุณหภูมิจะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนรูปของเกลือหินอย่างมาก ทำให้ช่วงเวลาการเคลื่อนไหลยาวนานมากขึ้นและทำให้ความหนืดของเกลือหินลดลง (Broek and Heilbron, 1998) การศึกษาเกี่ยวกับอุณหภูมิและความลึกในชั้นหินมีผู้วิจัยหลายท่านได้ศึกษาไว้แล้ว (Franssen and Spiers, 1990; Raj and Pharr, 1992; Senseny et al., 1992; Carter et al., 1993; Schneefub and Droste, 1996; Berest et al., 1998) การศึกษาดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า ระดับความลึกของชั้นหินที่เพิ่มขึ้นจะทำให้มีความร้อนสูงขึ้น ความร้อนจะทำให้เกลือหินมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับพลาสติกมากยิ่งขึ้นและทำให้ความต้านแรงกดลดลง โดยปกติเกลือหินมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 800°C แต่การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600°C ตลอดระยะเวลาเพียง 8 ชั่วโมงก็สามารถทำให้เกลือหินสูญเสียความต้านแรงกดไปได้ การทดสอบในห้องปฏิบัติการเกี่ยวกับอุณหภูมิ Cristescu and Hunsche (1996) ได้แนะนำว่าการทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C ควรใช้อัตราการยุบตัวที่ต่ำกว่า 10^{-8} s^{-1} และที่อุณหภูมิ 200°C ควรใช้อัตราการยุบตัวต่ำกว่า 10^{-7} s^{-1} เพราะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกลือหินเกิดการเคลื่อนไหลเร็วขึ้น กล่าวคือจะทำให้เกลือหินมีการเปลี่ยนรูปได้ง่าย (Hamami et al., 1996) นอกจากนั้นแล้ว อัตราการเคลื่อนไหลของเกลือหินที่มีการเปลี่ยนรูปในช่วงที่อัตราความเครียดเปลี่ยนแปลงตามเวลา และช่วงที่อัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาคงที่จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Senseny et al., 1986; Handin et al., 1984; Lama and Vutukuri, 1978, Dreyer, 1973) ซึ่งกฎพฤติกรรมของเกลือหินที่ได้จะตระหนักถึงผลกระทบที่เกิดจากอุณหภูมิโดยพิจารณาเป็นตัวแปรหนึ่งที่อยู่ในสมการความสัมพันธ์ แต่จะไม่คำนึงถึงผลกระทบของอุณหภูมิถ้าทำการทดสอบที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นอุณหภูมิที่จะทำการทดสอบควรจะควบคุมให้มีค่าคงที่

ความชื้นจะทำให้คุณสมบัติเกลือหินเปลี่ยนไป ความต้านแรงกดของเกลือหินจะลดลง (Hunsche and Schulze, 1996; Cleach et al., 1996) เนื่องจากจากเกลือหินจะมีความไวต่อความชื้นในอากาศ ความชื้นจะทำปฏิกิริยาเคมีกับเกลือหินทำให้เกิดการละลายเกลือและมีน้ำเกลือเข้มข้นมาสำหรับการเตรียมตัวอย่างเกลือหินในห้องปฏิบัติการความชื้นสามารถป้องกันได้โดยนำตัวอย่างเกลือหินมาห่อหุ้มด้วยพลาสติกกันความชื้น นอกจากนี้แล้วความชื้นสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายเมื่อมีอุณหภูมิเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของความชื้นต่อความต้านแรงกดได้ศึกษาโดย Billiotte

et al. (1996); Bonte (1996) และ Adler et al. (1996) ทำการทดสอบหาความต้านแรงกดกับตัวอย่างเกลือหินที่มีความชื้นสูงด้วยการนำตัวอย่างเกลือหินแช่ในน้ำเกลือ พบว่าเกลือจะมีความต้านแรงกดลดลงจากเกลือหินที่แห้งปกติมีกำลัง 30 MPa จะมีกำลังลดลงเหลือเพียง 1 MPa เมื่อมีความชื้นในเกลือหินเพียง 7% Varo and Passaris (1977) ได้ทำการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียว (Uniaxial creep tests) ของตัวอย่างเกลือหินบริสุทธิ์ภายใต้การผันแปรของค่าความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidities, R. H.) ต่าง ๆ กัน ระดับของความชื้นถูกควบคุมโดยใช้ท่อปิดที่บรรจุสารเคมีประเภทแคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride) และลิเทียมไนเตรด (Lithium nitrate) อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 60°C โดยค่าของความชื้นสัมพัทธ์อยู่ระหว่าง 13 ถึง 87% ผลที่ได้จากการทดสอบพบว่าค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่บรรยากาศจะมีผลกระทบต่ออัตราการเคลื่อนไหลของเกลือหิน โดยเฉพาะที่ความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 75% เมื่อเกลือหินเกิดกระบวนการละลายทำให้เกิดการเคลื่อนไหลมากขึ้น ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าเมื่อค่าความชื้นสูงขึ้นจะทำให้อัตราการเปลี่ยนรูปของเกลือหินมากขึ้น และเมื่อนำตัวอย่างเกลือหินไปแช่ในน้ำเกลือพบว่าอัตราการเคลื่อนไหลที่เกิดขึ้นจะสูงกว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% โดยตัวอย่างจะเกิดการวิบัติได้อย่างรวดเร็วเนื่องจากกระบวนการละลาย

สิ่งเจือปนหรือสิ่งสกปรกในเนื้อหินเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อความต้านแรงกดของเกลือหิน สิ่งเจือปนเหล่านี้เช่น Anhydrite และตะกอนอื่น ๆ ที่มีการกระจายตัวในเกลือหินบางกรณีจะลดความต้านแรงกดและทำให้เกลือหินมีพฤติกรรมเคลื่อนไหลที่ต่างกันออกไป (Peach, 1996; Hunsche and Schulze, 1996; Hansen et al., 1987) สิ่งเจือปนในเกลือหินจะมีผลต่อพฤติกรรม การเคลื่อนไหลแม้จะมีจำนวนเพียงเล็กน้อยก็ตามเพราะสิ่งเจือปนในเนื้อหินจะเป็นตัวที่กีดขวางแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกและการเคลื่อนไหลของเกลือหิน สิ่งเจือปนทำให้เกิดการแปรผันในเชิงกลศาสตร์โดยจะทำให้แรงกดมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอและไม่ต่อเนื่องกัน (Franssen and Spiers, 1990; Raj and Pharr, 1992; Senseny et al., 1992) สิ่งเจือปนหรือสิ่งสกปรกที่พบในเกลือหินที่มีขนาดแตกต่างกันจะมีปริมาณต่างกัน (Winchell, 1948) โดยตัวอย่างที่มีขนาดเล็ก เช่น ขนาดของตัวอย่างที่นำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ สิ่งเจือปนที่พบจะเป็นแร่เหล็กและแร่อื่นซึ่งแทรกอยู่ระหว่างผลึกหรือชั้นหิน นอกจากนั้นได้มีผู้วิจัยเสนอว่าลักษณะของสิ่งเจือปนที่พบอยู่ในเกลือหินตามธรรมชาติประกอบด้วย 3 รูปแบบด้วยกัน คือ 1) สิ่งเจือปนที่กระจายอยู่ระหว่างผลึกเกลือหรือแทรกตัวเป็นกลุ่ม 2) น้ำที่แทรกอยู่ในโครงสร้างของผลึกเกลือหรือปรากฏในลักษณะน้ำเกลือแทรกอยู่ระหว่างผลึก และ 3) ประจุไอออนของ K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Br^- และ I^- ซึ่งตรึงอยู่ในโครงสร้างผลึก และได้ทำการเปรียบเทียบตัวแปรที่ได้จากการทดสอบเกลือหินบริสุทธิ์ในช่วงที่อัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาคงที่ เกลือหินที่มี $MgCl_2$ 0.6% และเกลือหินที่มี KCl 0.1% เป็นองค์ประกอบเพื่อศึกษาผลกระทบต่ออัตราการเคลื่อนไหลของเกลือหิน แต่ไม่สามารถหาความสัมพันธ์ได้เนื่องจากข้อมูลไม่เพียงพอ (Handin et al., 1984)

ขนาดของตัวอย่างที่นำมาทดสอบเป็นอีกปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของเกลือหิน โดย Senseny (1984) ศึกษาผลกระทบของขนาดตัวอย่างกับการเคลื่อนไหลของเกลือหินที่มีการเปลี่ยนรูปในช่วงที่อัตราความเครียดเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient phase) และช่วงที่อัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาคงที่ (Steady-state phase) ซึ่งทำการศึกษาโดยใช้ตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. และ 50 มม. โดยสัดส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Length to diameter ratio, L/D) เท่ากับสาม ทำการทดสอบแรงกดในสามแกนภายใต้อุณหภูมิต่าง ๆ ผลจากการทดสอบพบว่าขนาดของตัวอย่างมีผลกระทบในช่วง Transient phase แต่ไม่มีผลกระทบในช่วง Steady-state phase ซึ่งความเครียดที่ได้ในช่วง Transient phase ของตัวอย่างที่มีขนาดเล็กจะมีค่ามากกว่าตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นกฎพฤติกรรมเกลือหินที่พัฒนาได้จากข้อมูลในห้องปฏิบัติการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากสมการความสัมพันธ์ที่ได้จากช่วง Transient creep จะมีค่าการเปลี่ยนรูปของเกลือหินสูง Mirza (1984) และ Mirza et al. (1980) ได้ทำการเปรียบเทียบอัตราความเครียดที่ได้จากช่วงที่อัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาคงที่เช่นกัน โดยทำการทดสอบเกลือหินที่ได้จากเสาค้ำยัน (Pillars) จากการทดสอบพบว่าผลกระทบของขนาดตัวอย่างมีการเปลี่ยนรูปน้อยมาก โดยเฉพาะเกลือหินที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันมาก ๆ ซึ่งตามธรรมชาติของเกลือหินมักไม่ปรากฏรอยแตกหรือรอยร้าวในเนื้อหิน แต่หากเนื้อหินมีรอยแตกหรือรอยร้าวสิ่งเหล่านี้จะสามารถประสานตัวโดยกระบวนการ Recrystallization

1.5 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินชนิดอื่น ๆ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาหรือกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางสัณฐานวิทยา กับคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินนั้นจะทำการศึกษสำหรับหินชนิดใดชนิดหนึ่งเท่านั้น เนื่องจากหินต่างชนิดกันจะมีลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่หลากหลายและมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน โดยปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ของหินต่าง ๆ มีดังนี้

ลักษณะเนื้อหินมีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ของหิน ซึ่งประกอบด้วยขนาดและลักษณะของเม็ดหินและผลึกแร่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในหินทราย ลักษณะเนื้อหินมีความสัมพันธ์กับกำลังรับแรงของหิน (Strength) และความยืดหยุ่นโดยกำลังรับแรงจะเพิ่มขึ้นถ้าผลึกแร่มีลักษณะเป็นเม็ดละเอียดมาก ๆ (Brace, 1961) แต่ในหินแกรนิตกำลังรับแรงของหินจะลดลงเมื่อขนาดของผลึกแร่มีขนาดใหญ่ขึ้น (Onodera and Asoka Kumara, 1980) Fahy and Guccione (1979) พบว่าขนาดของเม็ดหินทรายที่มีขนาดเท่ากันทำให้กำลังรับแรงมีค่าสูงขึ้น Handlin and Hager (1957) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกับขนาดของผลึกแร่ในหินปูนและหินอ่อนพบว่าขนาดของผลึกแร่ที่เพิ่มขึ้นทำให้กำลังรับแรงเพิ่มขึ้น

แร่ประกอบเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงของหิน เนื่องจากแร่ประกอบที่กระจายตัวในหินมีมากมายหลายชนิด บางชนิดทำให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้นแต่บางชนิดทำให้กำลังรับแรงกดต่ำลง Vutukuri et al. (1974) พบว่าหินทรายที่ประกอบด้วยแร่ควอตซ์ แร่แคลไซต์ และแร่เหล็ก จะทำให้มีความแข็งแรงมากกว่าหินที่มีส่วนประกอบของแร่ดิน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแร่ควอตซ์ และค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียวของหินทราย โดยปริมาณแร่ควอตซ์มากขึ้นจะทำให้ค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียวเพิ่มขึ้น (Bell, 1978; Fahy and Guccione, 1979; Gunsallus and Kulhawy, 1984; Dobereiner and De Fretias, 1986; Shakoor and Bonelli, 1991).

ความหนาแน่นของเม็ดหิน (Packing density) หรือปริมาณช่องว่างระหว่างเม็ดหินเป็นตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงของหิน Bell (1978) และ Dobernier and De Freitas (1986) ได้ศึกษาหาความสัมพันธ์เกี่ยวกับความหนาแน่นของเม็ดหินในหินทรายกับค่ากำลังรับแรงกด ค่ากำลังรับแรงดึง และค่าความยืดหยุ่น พบว่าเมื่อความหนาแน่นของเม็ดหินเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าต่าง ๆ เหล่านี้เพิ่มขึ้น Howarth and Rowlands (1986) ได้เสนอตัวแปร Texture coefficient เพื่อใช้ร่วมกับความหนาแน่นของเม็ดหิน Dobernier and De Fretias (1986) ได้สรุปว่าหินทรายที่มีความแข็งต่ำโดยทั่วไปจะเกิดจากความหนาแน่นของเม็ดหินต่ำ (Grain contact) ส่งผลกระทบบที่สำคัญต่อกำลังรับแรงกดของหินทรายและกำลังรับแรงกดของหินในสภาวะอิมตัวซึ่งมีค่าเท่ากับ 20 MPa ซึ่งใช้สำหรับแสดงค่าขอบเขตของกำลังรับแรงกดสูงสุดของหินที่มีกำลังรับแรงกดต่ำ Bell (1978) การวิบัติของหินจะถูกควบคุมโดยลักษณะการแตกตามขอบของเม็ดหิน นอกจากนั้นแล้วยังพบว่าความหนาแน่นที่มีค่าสูงยังทำให้หินมีกำลังรับแรงกดสูงขึ้นด้วย Ulusay et al. (1994) รายงานว่าลักษณะของผิว (Texture) มีความสำคัญต่อคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของหินทรายมากกว่าชนิดของแร่ที่เป็นส่วนประกอบของหิน Fuenkajorn and Daemen (1992) ได้สร้างความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์เพื่อเชื่อมโยงระหว่างความเค้นกดสูงสุดของหินภูเขาไฟ (Volcanic tuff) กับความพรุน ขนาด อัตราการกด และความหนาแน่นของตัวอย่างหิน โดยสรุปว่าเมื่อค่าความพรุนเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงกดของหินภูเขาไฟลดลง

ความชื้นในเนื้อหินมีผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงของหินทราย Dyke and Dobereiner (1991) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของความชื้นที่มีต่อกำลังรับแรงอัด (Compressive strength) โดยพบว่าความชื้นที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง

Fuenkajorn และ Daemen (1992) เสนอว่าความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneity) ของหินหรือมวลหินจะพบอยู่โดยทั่วไป และจะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติในการเปลี่ยนรูปและความแข็งของหิน ความไม่เป็นเนื้อเดียวกันสำหรับมวลหินอาจจะเกิดจากการแปรปรวนของแร่ประกอบหินที่ต่างขนาดและต่างชนิดและมีคุณสมบัติต่างกัน ในบริเวณที่สนใจ หรือเกิดจากอัตราการสุกก่อนที่ต่างกันของหินในบริเวณเดียวกัน ความไม่เป็นเนื้อเดียวกันในขนาดของหินชนิดเดียวกันที่เล็กลงมาอาจจะ

เกิดจากการกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอของสิ่งเจือปน (Inclusions) ของแร่ประกอบหินหรือของความพรุน (Porosity) ในเนื้อหิน หรืออาจจะเกิดจากการเรียงตัวอย่างไม่เป็นระบบของแร่ประกอบหินก็ได้ ความไม่เป็นเนื้อเดียวกันนี้จะส่งผลให้คุณสมบัติของหินที่ได้จากการตรวจวัดหรือจากการทดสอบมีความแปรปรวนสูง หรือมีความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ออกจากค่าเฉลี่ย (Mean) สูง ซึ่งส่วนใหญ่ค่าความเบี่ยงเบนนี้ไม่สามารถลดลงได้ด้วยวิธีการทดสอบหินจำนวนมากขึ้น เพราะสาเหตุที่เกิดจากการแปรปรวนภายในเนื้อหินเอง (Intrinsic variation) ไม่ได้เกิดจากขบวนการทดสอบหรือขบวนการเก็บตัวอย่าง วิธีหนึ่งที่จะลดความเบี่ยงเบนของค่าคุณสมบัติของหินลงได้คือ การจำแนกหินที่ทดสอบให้ย่อยลงไปหรือจัดกลุ่มของหินและที่มาของหินนั้นให้ต่างกันออกไป โดยทำเสมือนว่าหินที่มีสิ่งเจือปนหรือมีการผุกร่อนสูงเป็นหินอีกชนิดหนึ่งที่ต่างออกไปจากหินหลักที่ทำการทดสอบอยู่ เป็นต้น

การศึกษาในเชิงคณิตศาสตร์หรือความพยายามนำเอาสูตรทางคณิตศาสตร์เข้ามาอธิบายการแปรปรวนของคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินที่มีผลกระทบมาจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันนั้นมีน้อยมาก ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะรวมไปถึงค่าความต้านแรงกดหรือแรงดึงสูงสุด และค่าสัมประสิทธิ์ของความยืดหยุ่น เป็นต้น Fuenkajorn and Daemen (1992) เสนอแนวคิดอันหนึ่งว่า “ระดับของความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของหินจะขึ้นอยู่กับขนาดของหินที่กำลังพิจารณาอยู่ และระดับของความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของหิน โดยส่วนใหญ่จะลดลงถ้าขนาดของหินที่พิจารณามีค่าสูงขึ้น (หรือใหญ่ขึ้น)” การที่จะเข้าใจผลกระทบของการแปรปรวนต่อคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินจำเป็นต้องหาตัวแปรหรือปัจจัยที่เป็นต้นเหตุ (Key parameters) ซึ่งตัวแปรนี้อาจจะเป็นคุณลักษณะทางกายภาพ ทางเคมี หรือทางแร่วิทยา เช่น ความหนาแน่น ความพรุน ปริมาณของสิ่งเจือปน หรือปริมาณของแร่ที่ทำให้เกิดการแปรปรวน เป็นต้น ต่อมาจะต้องรู้ถึงผลกระทบของตัวแปรนี้เชิงคณิตศาสตร์ในแต่ละขนาดของหิน หินชนิดหนึ่งอาจจะมีตัวแปรมากกว่าหนึ่งตัวที่ทำให้เกิดการแปรปรวนของคุณสมบัติก็เป็นได้ นอกจากนั้นบทบาทของ Key parameter แต่ละตัวก็อาจจะต่างกันในแต่ละขนาดของหินที่พิจารณา ดังนั้นในการคำนวณหรือศึกษาคุณสมบัติของหินที่มีความแปรปรวนสูงควรพิจารณาขนาดของหินและผลกระทบของตัวแปรเหล่านี้ด้วย ตัวอย่างเช่น ค่าความเค้นกดสูงสุดของหินในสามมิติ (τ_{oct}) สามารถแสดงให้อยู่ในรูปของ (Fuenkajorn and Daemen, 1992)

$$\tau_{oct} = f \{I_1, V, Z\} \quad (1.1)$$

โดย I_1 คือ ผลรวมของความเค้นในทุกทิศทาง ($= \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$) V คือ ปริมาตรของหิน และ Z คือ Key parameter สมมติให้การแปรปรวนของหินชนิดนี้เกิดจากการกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอของรูพรุนหรือของความหนาแน่นของหิน (ρ) โดยมีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนเชิงเส้นตรงกับความแข็งของหิน ดังนั้น ในแต่ละขนาดและในแต่ละความดันรอบด้าน ค่า τ_{oct} สามารถแสดงได้เป็น

$$\tau_{\text{oct}} = A\rho + B \quad (1.2)$$

โดยที่ A และ B เป็นฟังก์ชันของปริมาตรของหิน และสมมติให้มีความสัมพันธ์กันแบบ Exponential คือ

$$A = \beta \cdot \exp(-\lambda V) \quad (1.3)$$

$$B = \gamma \cdot \exp(-\lambda V) \quad (1.4)$$

โดยที่ β γ และ λ เป็นค่าคงที่ที่ขึ้นกับคุณสมบัติของหินนั้น ดังนั้นจากสมการ (1.1) ถึง (1.4) ความเค้นกดสูงสุดของหินชนิดนี้สามารถรวมผลกระทบของความหนาแน่น (ρ) และขนาด (V) ได้ในเชิงคณิตศาสตร์เป็น

$$\tau_{\text{oct}} = \rho \cdot \beta \cdot \exp(-\lambda V) + \gamma \cdot \exp(-\lambda V) \quad (1.5)$$

ค่าคงที่ต่าง ๆ จะได้มาจากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของหินชนิดหนึ่ง โดยการทดสอบหินชนิดที่มีขนาดต่าง ๆ กัน และมีค่าความหนาแน่นต่างกันด้วย การพัฒนาสมการเช่นนี้จะทำได้ก็ต่อเมื่ออยู่ในสมมติฐานที่ว่าบทบาทของตัวแปรตัวหนึ่งจะไม่มีผลกระทบต่อบทบาทของตัวแปรอีกตัวหนึ่งในขนาดของหินที่เท่ากัน หรืออีกนัยหนึ่งคือการใช้กฎของการซ้อนทับ (Law of superposition) นั้นเอง

ขนาดของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ของหิน ผลกระทบด้านขนาดของตัวอย่างหินต่อกำลังรับแรงที่วัดได้ในห้องปฏิบัติการเกิดขึ้นจากการกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอของรูพรุนและรอยแตกหรือรอยร้าวเล็ก ๆ ที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ในเนื้อหิน (Griffith, 1924) ตัวอย่างหินที่มีขนาดต่างกันจะมีองค์ประกอบของรูพรุนและรอยแตกในอัตราส่วนที่ต่างกันและในรูปแบบที่ต่างกัน ตัวอย่างหินที่มีขนาดใหญ่ขึ้นมีโอกาสที่จะมีลักษณะของรูพรุนและรอยแตกที่หลากหลายขึ้น ผลจากการทดสอบโดยทั่วไปสามารถสรุปได้ว่า เมื่อตัวอย่างหินที่มีขนาดใหญ่ขึ้นค่ากำลังรับแรงของหินจะมีค่าลดลง (Evans, 1961; Lundborg, 1967; Jaeger and Cook, 1979; Bieniawski, 1981; Farmer, 1984)

ผลกระทบของขนาด (Size effect) ของตัวอย่างหินต่อค่าความเค้นกดสูงสุด หรือความเค้นดึงสูงสุดที่วัดได้ในห้องปฏิบัติการเกิดขึ้นจากการกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอของรูพรุนและรอยแตกหรือรอยร้าวเล็ก ๆ ที่มีอยู่ตามธรรมชาติในเนื้อหิน ตัวอย่างหินที่มีขนาดต่างกันจะมีองค์ประกอบของรูพรุนและรอยแตกในอัตราส่วนที่ต่างกันและในรูปแบบที่ต่างกัน ตัวอย่างหินที่มีขนาดใหญ่ขึ้นก็จะมีโอกาสที่จะมีลักษณะของรูพรุนและรอยแตกที่หลากหลายมากขึ้น ผลที่ได้จากการทดสอบโดยทั่วไปสามารถสรุปได้ว่า เมื่อตัวอย่างหินมีขนาดใหญ่ขึ้นค่าความเค้นกดสูงสุดและ

ความเค้นดึงสูงสุดก็จะมีค่าลดลง ผลกระทบของขนาดนี้จะมีอยู่ในหินทุกชนิด ไม่มากก็น้อย (Farmer, 1983; Jaeger and Cook, 1979; Goodman, 1989; Brook, 1985; Evan, 1961; Fuenkajorn and Daemen, 1986; Turk and Dearman, 1986; Tepnarong, 2002)

ผลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการระบุว่า ผลกระทบของขนาดจะมีบทบาทมากเมื่อหินอยู่ภายใต้ความเค้นดึง (Tensile stress) และจะมีบทบาทน้อยกว่าเมื่อหินอยู่ภายใต้ความเค้นกดแบบเฉือน (Compressive shear stress) เหตุที่เป็นเช่นนี้ Jaeger and Cook (1979) ให้เหตุผลว่า รูพรุนและรอยแตกเล็ก ๆ ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติในเนื้อหินเมื่อรับแรงดึงจะมีผลกระทบต่อการตอบสนองต่อแรงนั้นมากกว่าที่เนื้อหินนั้นอยู่ใต้แรงกด เพราะว่าภายใต้แรงกดรูพรุนและรอยแตกเหล่านี้บางส่วนหรือส่วนใหญ่จะมีการปิดหรือยุบตัวนั่นเอง ในการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์ได้มีผู้เสนอสมการมากมายเพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงของความเค้นสูงสุดต่อขนาดของตัวอย่างหิน ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะพัฒนามาจากผลการทดลอง (Empirical formula) สมการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ (Jaeger and Cook, 1979)

$$\sigma_c = k \cdot a^{-\alpha} \quad (1.6)$$

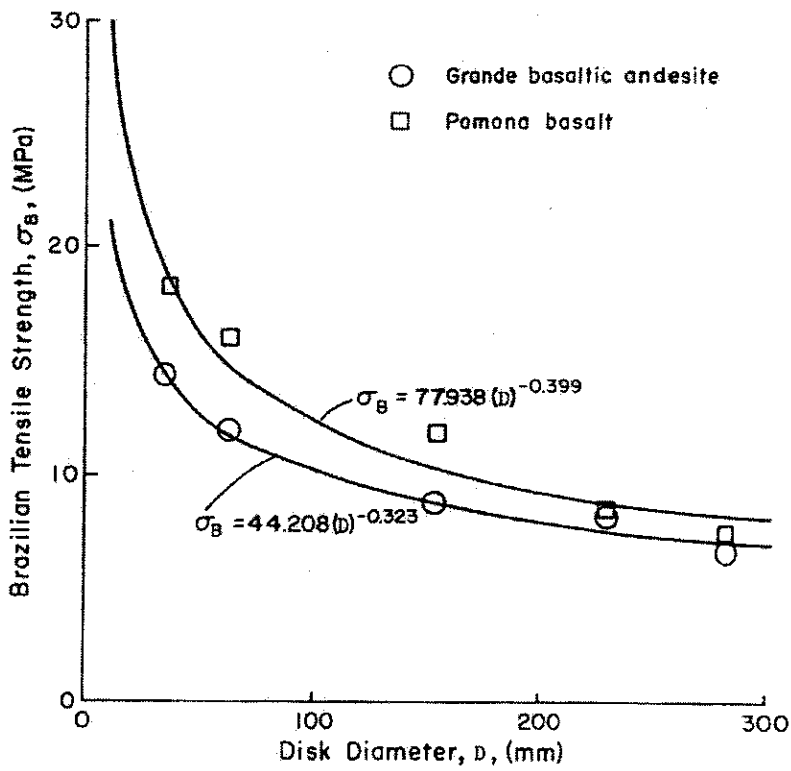
โดย σ_c คือ ความเค้นกดสูงสุด a คือ ความกว้างของตัวอย่างหินรูปลูกบาศก์ k และ α คือ ค่าคงที่ ถ้าตัวอย่างหินไม่เป็นรูปลูกบาศก์ค่าความเค้นสูงสุดจะแปรผันกับขนาด ซึ่งอาจแทนด้วยสมการ

$$\sigma_c = ka^{\beta/h} \alpha \quad (1.7)$$

โดย h คือความสูงของตัวอย่างหิน a คือด้านที่เล็กที่สุด k , β และ α คือค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับคุณสมบัติของหินแต่ละชนิด การลดลงของค่าความเค้นสูงสุดในขณะที่ขนาดของตัวอย่างหินเพิ่มขึ้นสามารถแทนด้วยสมการเชิงคณิตศาสตร์รูปแบบอื่นได้เหมือนกัน เช่น ความสัมพันธ์ที่มีพื้นฐานมาจากกฎทางด้านสถิติ

$$\ln \sigma_c = A - (1/m) \ln V \quad (1.8)$$

ในที่นี้ A และ m คือ ค่าคงที่ V คือ ปริมาตรของตัวอย่างหิน ในกรณีของความเค้นดึงสูงสุดสมการ (1.6) ถึง (1.8) สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่ออธิบายการผันแปรของความเค้นดึงสูงสุดต่อขนาดของตัวอย่างหินได้เช่นกัน Fuenkajorn and Daemen (1986) ได้ใช้กฎของการยกกำลัง สมการ (1.6) เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงของความเค้นดึงสูงสุดแบบบราซิลเลียนต่อขนาดของตัวอย่างหิน (ดังแสดงในรูปที่ 1.2) ประโยชน์อันหนึ่งของการศึกษาผลกระทบของขนาดคือ เพื่อใช้ในการประเมินหรือคาดคะเนความเค้นสูงสุดของหินหรือมวลหินที่มีขนาดใหญ่เกินกว่าที่จะนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการได้



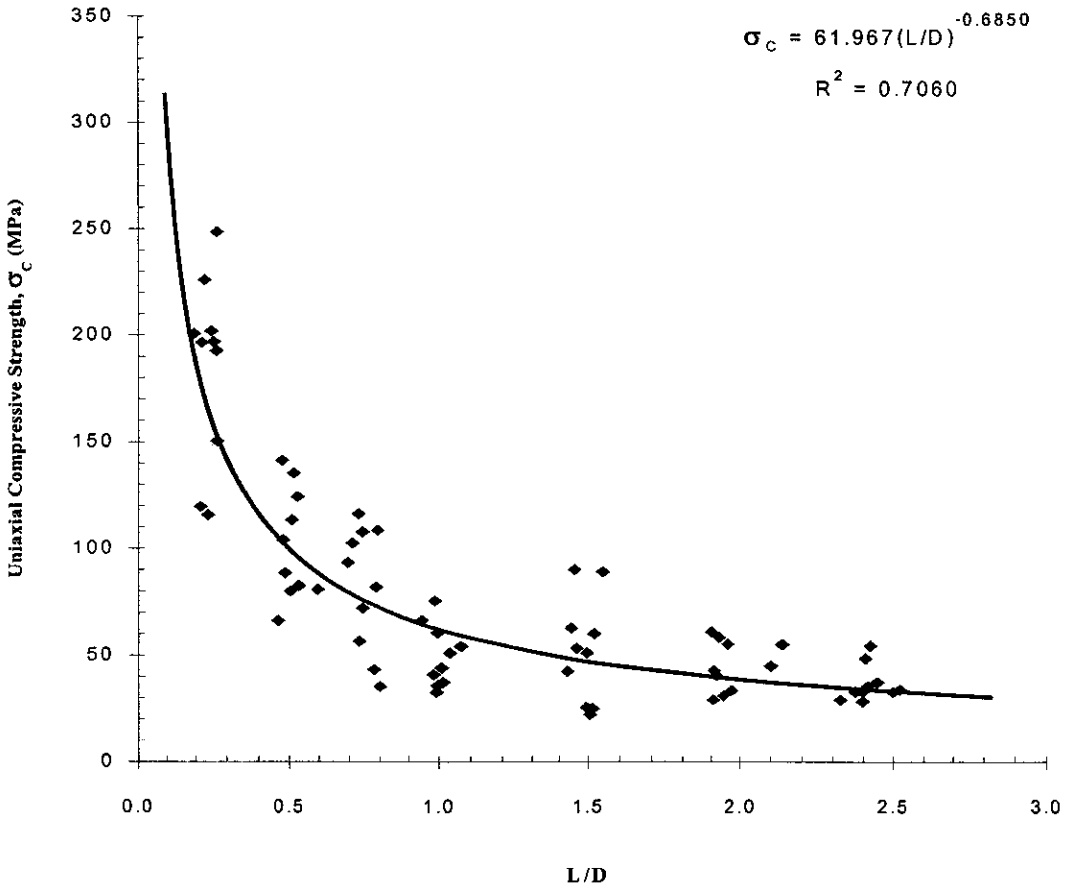
รูปที่ 1.2 ความเค้นดึงสูงสุดแบบบราซิล (σ_B) ทดสอบมาจากหินที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง (D) ต่าง ๆ กัน σ_B จะลดลงในขณะที่ D เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจจะแทนความสัมพันธ์ด้วยกฎของการยกกำลัง (Power law) (จาก Fuenkajorn and Daemen, 1986)

ผลกระทบของรูปร่าง (Shape effect) ของตัวอย่างหินต่อคุณสมบัติที่วัดได้ในห้องปฏิบัติการมีสาเหตุหลักมาจากการกระจายตัวที่ต่างกันของความเค้นในเนื้อหินที่อยู่ภายใต้การกดหรือการดึง สาเหตุที่ทำให้เกิดความแตกต่างของความเค้นในเนื้อหินส่วนใหญ่เกิดจากรูปร่างของตัวอย่างหินที่ต่างกัน และมาจากผลกระทบของความเสียดทานระหว่างผิวของหินที่สัมผัสกับแท่นกด ตัวอย่างอันหนึ่งที่เห็นได้ชัดและพบอยู่เสมอคือ ผลกระทบของอัตราส่วนของความยาว (L) ต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (D) ของตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบความเค้นกดในแกนเดียว (σ_c) ผลที่ได้จากห้องปฏิบัติการของผู้วิจัยหลายท่านระบุว่าค่า σ_c จะลดลงถ้าอัตราส่วน L/D สูงขึ้น (Farmer, 1983) ตัวอย่างหินที่มี L/D ต่ำ เช่น อยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 การกระจายของความเค้นในเนื้อหินที่ค่อนข้างสั้นเช่นนี้จะมีผลกระทบมาจากความเค้นเฉือนที่เกิดจากความเสียดทานระหว่างแท่นกดกับผิวหินทั้งสองปลาย หรือบางครั้งเรียกว่า “End effect” ลักษณะเช่นนี้จะทำให้หินแตกยากขึ้น ก็จะต้องใช้แรงกดสูงขึ้นเพื่อให้เกิดการแตกของตัวอย่างหิน ทำให้ผลที่ได้จากการคำนวณค่าความเค้นกดสูงสุดมีมากขึ้นตามมา ในขณะเดียวกันตัวอย่างหินรูปทรงกระบอกที่มี L/D สูงขึ้น เช่น อยู่ระหว่าง 2 ถึง 3 ผลกระทบที่เกิดจากความเสียดทานทั้งสองปลายจะมีน้อยลง แตกได้ง่ายขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งค่าความเค้นกดสูงสุดที่คำนวณได้จะมีค่าต่ำลง รูปที่ 1.3 แสดงตัวอย่างผลกระทบของอัตราส่วน L/D ต่อความเค้นกดสูงสุด (σ_c) ของตัวอย่างหินอ่อนจากจังหวัดสระบุรี Tepnarong (2002) ได้เสนอสมการยกกำลังเพื่อใช้อธิบายความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ระหว่าง σ_c และ L/D คือ

$$\sigma_c = \beta (L/D)^\gamma \quad (1.9)$$

โดย β และ γ เป็นค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับคุณสมบัติของหินแต่ละชนิด

ข้อสังเกตที่สำคัญอันหนึ่งคือ ตัวอย่างหินที่มีอัตราส่วน L/D สูง มีแนวโน้มที่จะแตกแบบ Extension failure ในขณะที่ตัวอย่างหินที่มีอัตราส่วน L/D ต่ำ มีแนวโน้มที่จะแตกแบบความเค้นกดเฉือน (Compressive shear failure)



รูปที่ 1.3 ความเค้นกดสูงสุด (σ_c) ของหินอ่อนจากจังหวัดสระบุรีที่ได้จากการทดสอบหินรูปทรงกระบอกที่มีอัตราส่วนของความยาว (L) ต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (D) ที่ต่าง ๆ กัน σ_c จะลดลงในขณะที่อัตราส่วน L/D สูงขึ้น ซึ่งอาจสามารถแทนด้วยกฎของการยกกำลัง (จาก Tepnarong, 2002)

บทที่ 2

ฐานข้อมูลเชิงแร่วิทยาและกลศาสตร์ของเกลือหิน

เนื้อหาในบทนี้สรุปผลการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับค่ากำลังรับแรงกดสูงสุด (σ_c) ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด (σ_t) ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E) ค่าความหนืดเชิงพลาสติก (V_p) และลักษณะเชิงแร่วิทยาของเกลือหิน (ขนาดของผลึกเกลือ ชนิดและปริมาณของสิ่งเจือปน) ที่ศึกษาได้จากวารสารทางวิชาการ เอกสารการประชุม และรายงานการวิจัยทั้งในและต่างประเทศ ข้อมูลนี้จะนำมาใช้ประกอบการสร้างความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และลักษณะเชิงแร่วิทยาของเกลือหิน ผลจากการรวบรวมข้อมูลนำเสนอในภาคผนวก ก โดยเรียงลำดับจากข้อมูลเกลือหินภายในประเทศและข้อมูลเกลือหินจากต่างประเทศ พร้อมทั้งแสดงแหล่งที่มาของแต่ละบทความ

2.1 ข้อมูลจากการทดสอบเกลือหินภายในประเทศ

ข้อมูลคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของตัวอย่างเกลือหินในประเทศได้จากการศึกษาหมวดหินมหาสารคาม (Maha Sarakham Formation) ในแอ่งโคราชและแอ่งสกลนคร ประกอบด้วย เกลือชั้นบน (Upper salt) เกลือชั้นกลาง (Middle salt) และเกลือชั้นล่าง (Lower salt) โดยมีผู้ศึกษาวิจัยไว้หลายท่าน (Plookphol, 1987; Boontongloan, 2000; Wetchasat, 2002; Fuenkajorn and Jandakaew, 2003; Phueakphum, 2003 และกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ 2546) ซึ่งสามารถสรุปผลการทดสอบและลักษณะเชิงแร่วิทยาของเกลือหินได้ดังนี้

1) กำลังรับแรงกดสูงสุดของเกลือชั้นบนมีค่าอยู่ระหว่าง 26.29-30.21 MPa เกลือชั้นกลางมีค่าอยู่ระหว่าง 23.0-37.07 MPa และเกลือชั้นล่างมีค่าอยู่ระหว่าง 27.95-31.1 MPa กำลังรับแรงกดสูงสุดของตัวอย่างเกลือหินจากเกลือชั้นบนและเกลือชั้นล่างมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากตัวอย่างที่นำมาทดสอบมีความเป็นเนื้อเดียวกันหรือค่อนข้างสะอาดมากกว่าเกลือชั้นกลาง สำหรับเกลือชั้นกลางพบว่าผลกระทบจากสิ่งเจือปนที่อยู่ในตัวอย่างที่นำมาทดสอบจึงทำให้ผลที่ได้จากการทดสอบมีค่าสูงกว่า จากการเปรียบเทียบกับผลการวิจัยที่ทำการทดสอบเกลือหินจากแอ่งโคราชและแอ่งสกลนครพบว่ามีความใกล้เคียงกัน

2) กำลังรับแรงดึงสูงสุดของเกลือชั้นบนมีค่าเท่ากับ 1.6 MPa เกลือชั้นกลางมีค่าอยู่ระหว่าง 1.44-3.36 MPa และเกลือชั้นล่างมีค่าอยู่ระหว่าง 1.6-2.02 MPa จากผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดของเกลือชั้นบนและเกลือชั้นล่างมีค่าใกล้เคียงกันมากกว่าเกลือชั้นกลาง อาจเนื่องจากตัวอย่างเกลือหินจากเกลือชั้นบนและเกลือชั้นล่างที่นำมาทดสอบค่อนข้างเป็นเนื้อเดียวกันหรือค่อนข้างบริสุทธิ์มากกว่าเกลือชั้นกลาง นอกจากนั้นการเปรียบเทียบกับผลการวิจัยที่ทำการทดสอบเกลือหินจากแอ่งโคราชและแอ่งสกลนครพบว่ามีความใกล้เคียงกัน

3) สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่ได้จากการรวบรวมข้อมูลพบเฉพาะเกลือชั้นกลางและเกลือชั้นล่าง โดยเกลือชั้นกลางมีค่าอยู่ระหว่าง 21.6-33.8 GPa และเกลือชั้นล่างมีค่าเท่ากับ 25.1-30.17 GPa ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบพบว่าเกลือชั้นกลางและเกลือชั้นล่างมีค่าใกล้เคียงกัน

4) ความหนืดเชิงพลาสติกของเกลือหินในประเทศได้จากเกลือชั้นกลางมีค่าอยู่ระหว่าง 3.55-19.5 GPa·Day (Fuenkajorn and Jandakaew, 2003) ซึ่งมีความเค้นคงที่ในแนวแกนที่แปรผันตั้งแต่ 7.8, 10.2, 11.2, 11.4 และ 12.6 MPa ผลการทดสอบระบุว่าความเค้นคงที่ในแนวแกนที่มีค่าสูงสุดจะทำให้เกลือหินมีการเปลี่ยนรูปได้มากที่สุด (ความเครียดสูงสุด) แต่มีเพียงตัวอย่างเดียวที่มีความเค้นคงที่ในแนวแกนเท่ากับ 11.2 MPa ที่มีค่าความหนืดเชิงพลาสติกแตกต่างจากข้อสรุปเบื้องต้น โดยอาจเกิดเนื่องจากการกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอของสิ่งเจือปน (Inclusion) ในตัวอย่างเกลือหิน

5) ขนาดของผลึกเกลือมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5-10 มิลลิเมตร จากการทดสอบโดยวิธี X-Ray Diffraction (XRD) พบว่ามีปริมาณของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ประมาณ 92-99% และสิ่งเจือปนประมาณ 1-8% โดยแบ่งเป็นแร่แอนไฮไดรต์ประมาณ 1-5% แร่ดินและแร่เหล็กประมาณ 1-3% (Wetchasat, 2002; Fuenkajorn and Jandakaew, 2003; Phueakphum, 2003)

2.2 ข้อมูลการทดสอบเกลือหินจากต่างประเทศ

ข้อมูลคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของตัวอย่างเกลือหินจากต่างประเทศรวบรวมได้จากเอกสารและรายงานการวิจัยในประเทศอินเดีย ประเทศเยอรมนี และประเทศสหรัฐอเมริกา โดยผลการทดสอบและลักษณะเชิงแร่วิทยาของเกลือหิน สามารถสรุปได้ดังนี้

กำลังรับแรงกดสูงสุดของตัวอย่างเกลือหินมีค่าอยู่ระหว่าง 15.3-33.6 MPa (ภาคผนวก ก) โดยพบว่าไม่มีผลกระทบจากอัตราแรงกดที่มากกระทำ ขนาดของตัวอย่างเกลือหิน รวมถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานของ ASTM แต่การแปรปรวนของค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดที่ได้อาจเกิดจากคุณสมบัติเชิงแร่วิทยาของตัวอย่าง เช่น ขนาดผลึก ปริมาณของสิ่งเจือปนที่อยู่ในตัวอย่าง และทิศทางการวางตัวของผลึกต่อแรงที่มากกระทำ ผลที่ได้จากการทดสอบพบว่าแรงที่มากระทำต่อผลึกในทิศทางตั้งฉากจะให้ค่ากำลังรับแรงกดมากที่สุด (Dubey and Gairola, 2000)

กำลังรับแรงดึงสูงสุดมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.86 MPa และค่าสูงสุดเท่ากับ 3.40 MPa ตัวอย่างที่นำมาทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 ถึง 117 มิลลิเมตร โดยมีอัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางตัวอย่างเท่ากับ 0.5 ถึง 1 อุณหภูมิที่ทำการทดสอบเป็นอุณหภูมิห้อง (Hansen et al., 1984; Fuenkajorn and Daemen, 1988; DeVries et al., 2002) ดังนั้นความแปรปรวนของค่ากำลังรับแรงดึงอาจเกิดจากผลกระทบของขนาดผลึก แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึก และสิ่งเจือปนใน

ตัวอย่างเกลือหิน ซึ่งค่ากำลังรับแรงดึงที่มีค่าน้อยเนื่องจากเกิดการแตกบริเวณรอยต่อระหว่างผลึก (Intercrystalline boundary) ค่ากำลังรับแรงดึงที่มีค่าสูงเกิดจากการแตกผ่านผลึกเกลือ

สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมีค่าอยู่ระหว่าง 1.45 ถึง 55.63 GPa ความแปรปรวนของค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นอาจเนื่องจากผลกระทบ 2 ประการ คือ 1) ผลกระทบจากปัจจัยภายใน ซึ่งประกอบด้วย ขนาดของผลึกเกลือ ปริมาณความชื้น ชนิดและปริมาณของสิ่งเจือปนในตัวอย่างเกลือหิน และ 2) ผลกระทบจากปัจจัยภายนอก ได้แก่ ความดันล้อมรอบ (confining pressure) และอัตราแรงกด (Loading rate) โดยจากการศึกษาพบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบแบบแรงกดในแกนเดียวและการทดสอบแบบควบคุมอัตราความเครียด โดยมีความดันล้อมรอบคงที่พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่ได้จากวิธีแรกมีค่าอยู่ระหว่าง 14.6-22.0 GPa แต่จากวิธีที่สองมีค่าระหว่าง 23.7-29.5 GPa ซึ่งค่าที่ได้จากวิธีที่สองนี้จะแสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นได้ดีกว่า เนื่องจากการทดสอบด้วยวิธีแรกนั้นค่าที่ได้อาจมีผลกระทบมาจากขนาดของผลึกเกลือ ซึ่งความดันล้อมรอบเป็นปัจจัยหนึ่งซึ่งช่วยลดผลกระทบจากสาเหตุนี้ได้ (DeVries et al., 2002)

สำหรับผลกระทบจากอัตราแรงกดพบว่าเมื่ออัตราแรงกดที่มากกระทำต่อตัวอย่างสูงขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่ได้มีค่าสูงขึ้นด้วย โดยจากการทดสอบด้วยวิธีทดสอบแรงกดในแกนเดียวแบบให้อัตราแรงกดคงที่และแบบอัตราความเครียดคงที่ ค่าที่ได้จากวิธีแรกมีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 1.45-26.90 GPa (ในกรณี Tangent modulus) และ 1.92-55.63 GPa (ในกรณี Secant modulus) แต่ค่าที่ได้จากวิธีที่สองเท่ากับ 1.67-2.22 GPa และ 5.44 GPa (ในกรณี Tangent modulus) ซึ่งการที่ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นจากวิธีแรกมีค่าสูงมากเนื่องจากผลกระทบของอัตราแรงกดที่มากกระทำกับตัวอย่างเกลือหินที่เพิ่มมากขึ้น (Fuenkajorn and Daemen, 1988)

ค่าความหนืดเชิงพลาสติกได้จากการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวของเกลือหิน (Uniaxial creep test) จากประเทศเยอรมนี โดยทำการทดสอบตัวอย่างเกลือหินที่ได้จาก Sarstedt salt dome ทางตอนใต้ของ Hannover ซึ่งประกอบด้วย Hangendsalz z2HG (Youngest halitic layer) และ Hauptsalz z2HS (Older halitic layer) โดยให้ค่าความเค้นคงที่ในแนวแกนเท่ากับ 12 และ 14 MPa ผลที่ได้จากการทดสอบพบว่าความหนืดเชิงพลาสติกจากชั้น Hangendsalz z2HG มีค่าอยู่ระหว่าง 10-23.3 GPa·Day และชั้น Hauptsalz z2HS มีค่าอยู่ระหว่าง 4.67-5 GPa·Day ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า Hauptsalz z2HS จะเกิดการเคลื่อนไหลได้เร็ว เนื่องจากผลกระทบของขนาดผลึกและสิ่งเจือปนที่แทรกอยู่ในตัวอย่าง Hauptsalz z2HS มีผลึกค่อนข้างใหญ่กว่า Hangendsalz z2HG นอกจากนั้นสิ่งเจือปนมี Liquid inclusion แทรกอยู่ระหว่างผลึก (Intergranular) ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปได้ง่ายกว่าผลึกเกลือที่มีสิ่งเจือปนอยู่ภายในผลึก (Handin et al., 1984) ทำให้ค่าความหนืดเชิงพลาสติกที่ได้มีค่าต่ำกว่า Hangendsalz z2HG

ลักษณะเชิงแร่วิทยาของเกลือหินที่ได้จากการรวบรวมข้อมูลพบว่า เกลือหินจากประเทศอินเดียมีขนาดผลึกเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5-10 มิลลิเมตร โดยทำการทดสอบด้วยวิธีทางเคมีพบว่า มีปริมาณของโซเดียมคลอไรด์เท่ากับ 78.84% ปริมาณของแร่ดินประมาณ 18.92% โดยอยู่ในรูป Water insoluble ปริมาณของแร่แอนไฮไดรต์เท่ากับ 1% แมกนีเซียมคลอไรด์ 2.14-2.74% และเหล็กออกไซด์ โซเดียมไบ-คาร์บอเนตและไทเทเนียมออกไซด์เท่ากับ 0.20-0.24% (Dubey and Gairola, 2000) สำหรับเกลือหินจากประเทศเยอรมนีมีขนาดผลึกเล็กจนถึงปานกลาง (Fine to medium grain) โดยมีปริมาณของโซเดียมคลอไรด์เท่ากับ 94% และปริมาณแอนไฮไดรต์ระหว่าง 1-5% (Hunsche et al., 1996) และเกลือหินจาก 10 แหล่งในประเทศสหรัฐอเมริกาพบว่า มีขนาดผลึกเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5-10 มิลลิเมตร และปริมาณของโซเดียมคลอไรด์มากกว่า 90% โดยมีปริมาณแร่ดินอยู่ระหว่าง 1-7% และปริมาณแอนไฮไดรต์ระหว่าง 1-6% (Hansen et al., 1984; DeVries et al., 2002)

บทที่ 3

คุณลักษณะของตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบ

เนื้อหาในบทนี้อธิบายขั้นตอน วิธีการ และข้อปฏิบัติในการจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหิน เพื่อใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ข้อกำหนดมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM) และจะกล่าวถึงแหล่งที่มาของตัวอย่างเกลือหิน รวมทั้งสรุปขนาด รูปร่าง และจำนวนของตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในแต่ละการทดสอบ

3.1 แหล่งที่มาของตัวอย่างเกลือหิน

ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในโครงการได้รับความอนุเคราะห์จาก 2 แหล่ง คือ 1) บริษัท เอเชียแปซิฟิก โปแตชคอร์ปอเรชั่น จำกัด (Asia Pacific Potash Corporation) อำเภอเมือง จังหวัด อุดรธานี โดยส่งมอบเป็นแท่งตัวอย่างเกลือหินรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 60 มิลลิเมตร จากหลุมเจาะสำรวจในแอ่งสกลนครเลขที่ BD99-1 และ BD99-2 ซึ่งจะขุดขึ้นมาจากเกลือ ชั้นกลาง (Middle salt) และเกลือชั้นล่าง (Lower salt) แท่งตัวอย่างเกลือหินที่ได้รับมีความยาวทั้งสิ้น ประมาณ 20 เมตร (รูปที่ 3.1) และ 2) ตัวอย่างเกลือหินจาก บริษัท สยามทรัพย์มณี จำกัด กิ่งอำเภอ พระทองคำ จังหวัดนครราชสีมา แท่งตัวอย่างเกลือหินมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 48 มิลลิเมตร ซึ่งจะขุดขึ้นมาจากเกลือหินชั้นกลาง และเกลือหินชั้นล่างจากหลุมเจาะหมายเลข SS-1 ในแอ่งโคราช

3.2 การคัดสรรตัวอย่างเกลือหิน

แนวคิดในการเลือกตัวอย่างเกลือหินที่นำมาใช้ในการทดสอบคือ ให้ตัวอย่างเกลือหิน มีความหลากหลายทางด้านแร่วิทยาและซิลิกาวิทยามากที่สุด รวมไปถึงขนาดของผลึก ชนิด และ ปริมาณของสิ่งเจือปน ซึ่งชนิดของสิ่งเจือปนที่ศึกษาเป็นหลักคือ แร่แอนไฮไดรต์ และแร่อิน โดยตัวอย่าง เกลือหินแต่ละตัวอย่างจะทำการตรวจสอบลักษณะทางด้านแร่วิทยาและซิลิกาวิทยาจากการตรวจสอบ ผิวภายนอกของแท่งตัวอย่างเกลือหินเท่านั้น การเตรียมตัวอย่างเกลือหินแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม สำหรับการทดสอบ 4 ชนิด คือ การทดสอบแรงกดในแกนเดียว (Uniaxial compressive strength tests) การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน (Brazilian tensile strength tests) การทดสอบแรงกดในแกนเดียว แบบวัฏจักร (Uniaxial cyclic loading tests) และการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียว (Uniaxial creep tests)



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างเกลือหินบางส่วนที่ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท เอเชียแปซิฟิก
โปแตซคอร์ปอเรชั่น จำกัด

3.3 การจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหิน

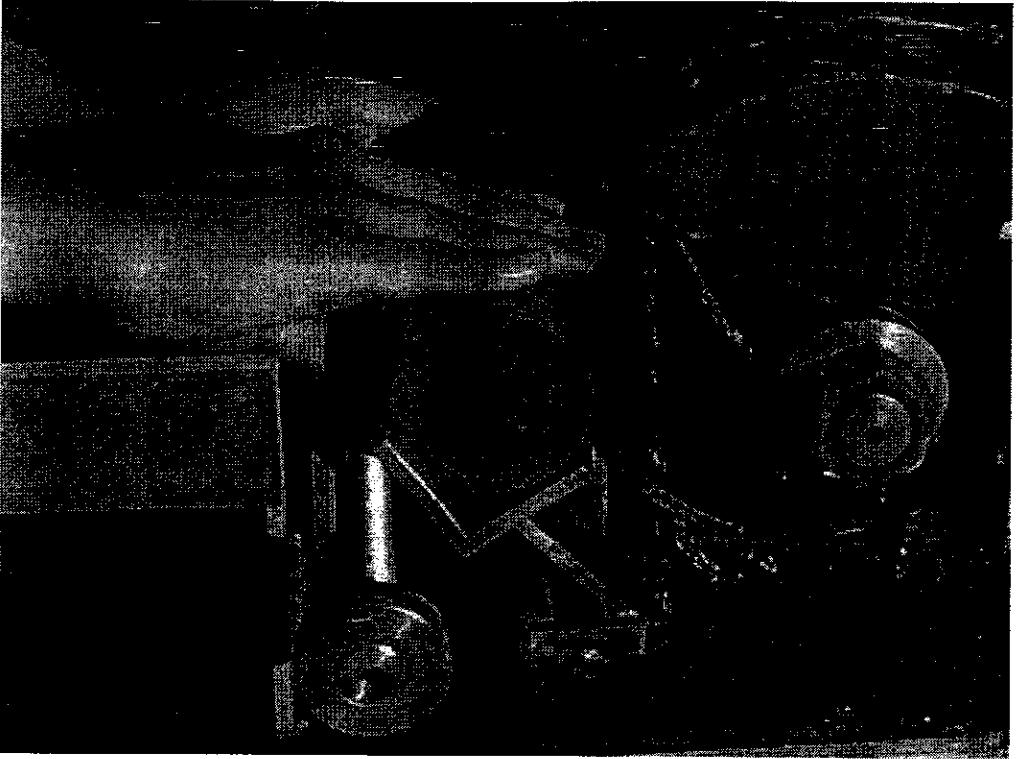
การจัดเตรียมตัวอย่างเริ่มจากการคัดเลือกแท่งตัวอย่างเกลือหินที่มีผิวสมบูรณ์ที่สุด ใกล้เคียงกับข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM D4543 ซึ่งตัวอย่างทดสอบจะต้องไม่มีรอยแตกร้าวหรือ รุพุนที่เกิดจากการซำรุดหรือละลายบนแท่งตัวอย่างและใช้ปากกาสีเข้มทำเครื่องหมายแสดง ตำแหน่งบน-ล่าง ระดับความลึก และช่วงความยาวที่ต้องการตัดเพื่อการทดสอบเชิงกลศาสตร์ของ เกลือหินในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างเกลือหินที่นำมาตัดและกลึงจะมีสัดส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (Length-to-diameter ratio, L/D) แปรผันตามชนิดของการทดสอบ

การตัดแท่งตัวอย่างได้ใช้เครื่องตัดหิน (รูปที่ 3.2) โดยใช้น้ำเกลืออิมัลชันหล่อเลี้ยงใบมีด น้ำเกลืออิมัลชันจัดเตรียมมาจากการละลายเกลือหินที่ได้จากหลุมเจาะเดียวกันเพื่อป้องกันผลกระทบในการละลายเกลือหินระหว่างการตัด เมื่อตัดแท่งตัวอย่างเสร็จแล้วต้องนำมาตรวจสอบความสมบูรณ์ ถ้าพบว่าหน้าตัดของตัวอย่างไม่ได้ฉากหรือมีรอยแตกมากเกินไปจะนำไปตัดใหม่อีกครั้ง นำตัวอย่าง เกลือหินที่ตัดเสร็จแล้วมาแช่น้ำด้วยผ้าแห้งแล้วนำไปวางทิ้งไว้ให้แห้งในห้องป้องกันความชื้นเพื่อนำ มาขัดปลายทั้งสองข้างต่อไป โดยแต่ละตัวอย่างได้ใช้ปากกาชนิดถาวรเขียนหมายเลขกำกับและใช้ พลาสติกหุ้มอีกชั้นหนึ่งเพื่อป้องกันความชื้นและการละลาย

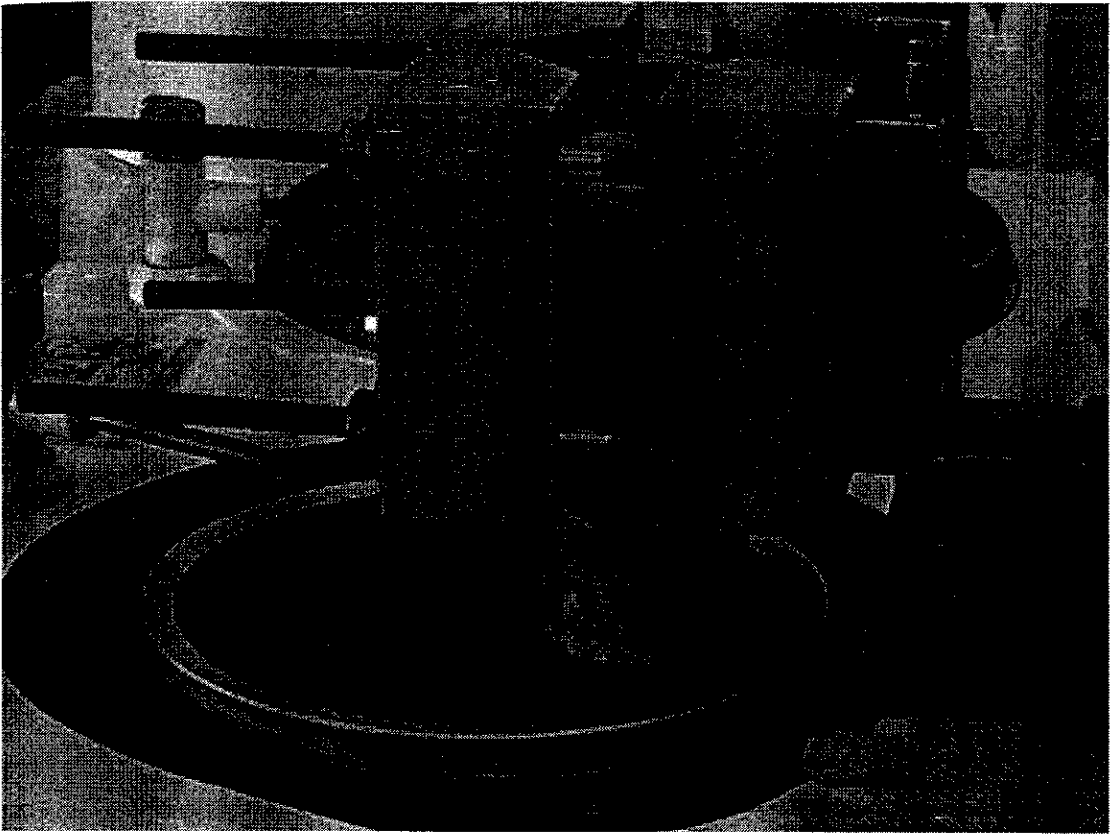
การขัดหน้าตัดตัวอย่างเกลือหินจะกระทำเพื่อให้หน้าตัดมีความเรียบและตั้งฉากกับ ผิวด้านข้างตามมาตรฐาน ASTM โดยใช้เครื่องขัดหน้าตัดหินร่วมกับระบบน้ำหล่อเลี้ยง (น้ำเกลือ อิมัลชัน) งานขัดจะใช้กระดาษทรายหยาบเบอร์ 200 และขัดด้วยความเร็วรอบ 400-500 รอบต่อนาที การขัดตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 3.3 เมื่อได้ตัวอย่างตามข้อกำหนดแล้วจะใช้พลาสติกหุ้มตัวอย่างเกลือหิน เพื่อเก็บรักษาและป้องกันความชื้น และป้องกันไม่ให้เกิดการละลายของเกลือหินจากการสัมผัสกับ อากาศโดยตรง ก่อนการทดสอบจะทำการติรหัสตัวอย่างโดยบอกแหล่งที่มาและชนิดของการทดสอบ รูปที่ 3.4 แสดงคำอธิบายรายละเอียดของรหัสที่ทำการติดบนตัวอย่างเกลือหินก่อนการทดสอบ

การทดสอบแรงกดในแกนเดียวจะใช้แท่งตัวอย่างมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 60 มิลลิเมตร โดยที่อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 2.5 หรือยาวประมาณ 15 เซนติเมตร ตัวอย่างเกลือหินที่นำมาใช้ในการทดสอบมีทั้งหมด 24 ตัวอย่าง ลักษณะเนื้อหิน (Texture) ประกอบด้วยผลึกเกลือใสไม่มีสี (Colorless halite) สีน้ำตาลใส (Honey halite) และปรากฏผลึกเกลือ สีขาวขุ่น (Milky halite) ปะปนอยู่ทั่วทั้งตัวอย่าง มีปริมาณของแร่แอนไฮโดรต์ประมาณ 1-100% และแร่ดินประมาณ 1-5% (รูปที่ 3.5)

การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนใช้ตัวอย่างเกลือหินที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ประมาณ 60 มิลลิเมตร โดยอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 0.5 หรือยาว ประมาณ 30 มิลลิเมตร ตัวอย่างเกลือหินที่นำมาใช้ในการทดสอบมีจำนวน 76 ตัวอย่าง ลักษณะเนื้อหิน ประกอบด้วยผลึกเกลือใสไม่มีสี และสีน้ำตาลใส ปรากฏผลึกเกลือสีขาวขุ่นมีปริมาณของแร่แอนไฮโดรต์ผันแปรระหว่าง 1-99% และแร่ดินผันแปรระหว่าง 1-5% (รูปที่ 3.6)

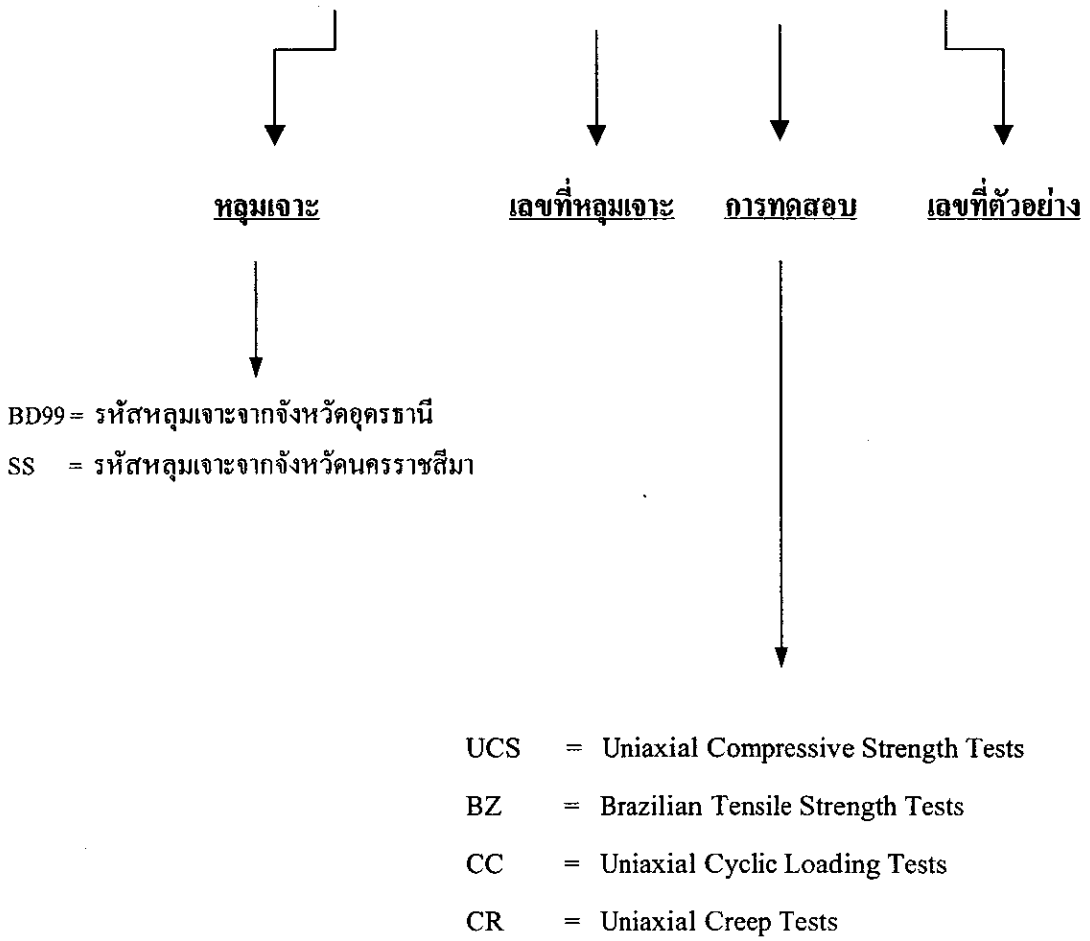


รูปที่ 3.2 การตัดแท่งตัวอย่างเกลือหินเพื่อให้ได้สัดส่วนและรูปร่างที่เหมาะสมกับการทดสอบแต่ละชนิด

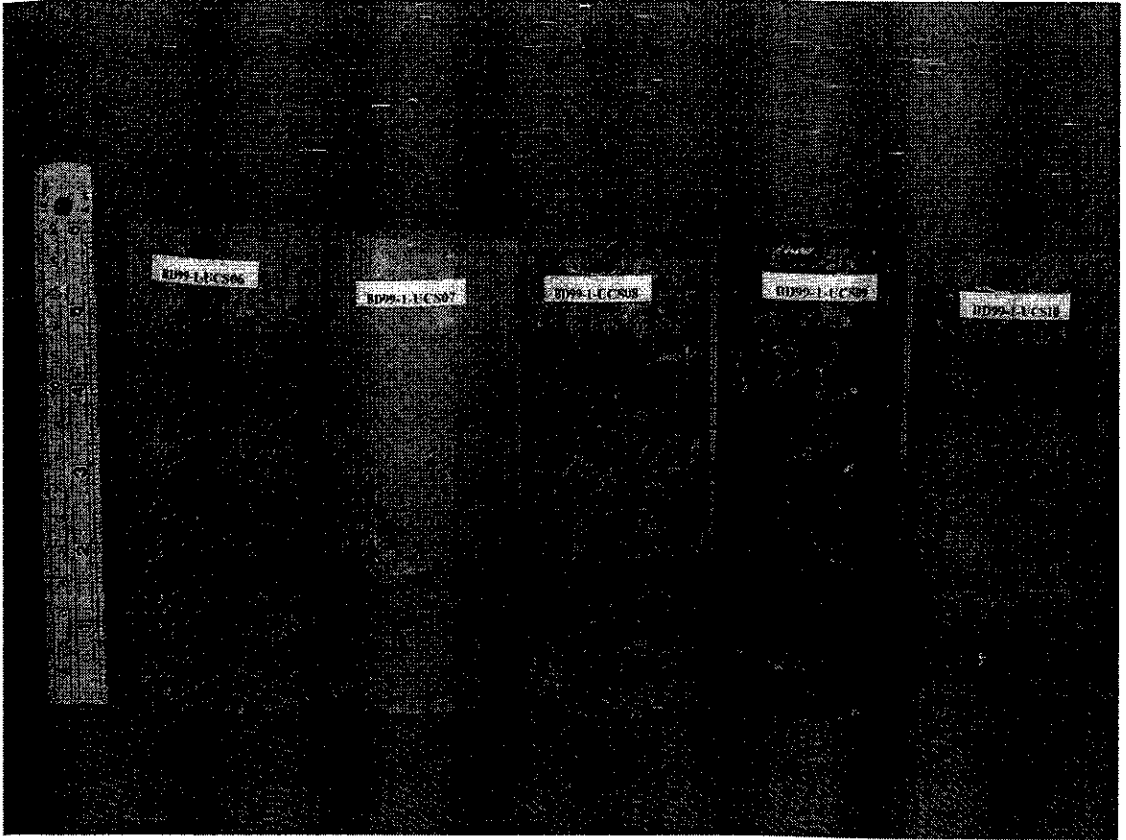


รูปที่ 3.3 การขัดตัวอย่างเกลือหินเพื่อให้มีผิวเรียบและปลายทั้งสองข้างขนานกันตามข้อกำหนดของ ASTM

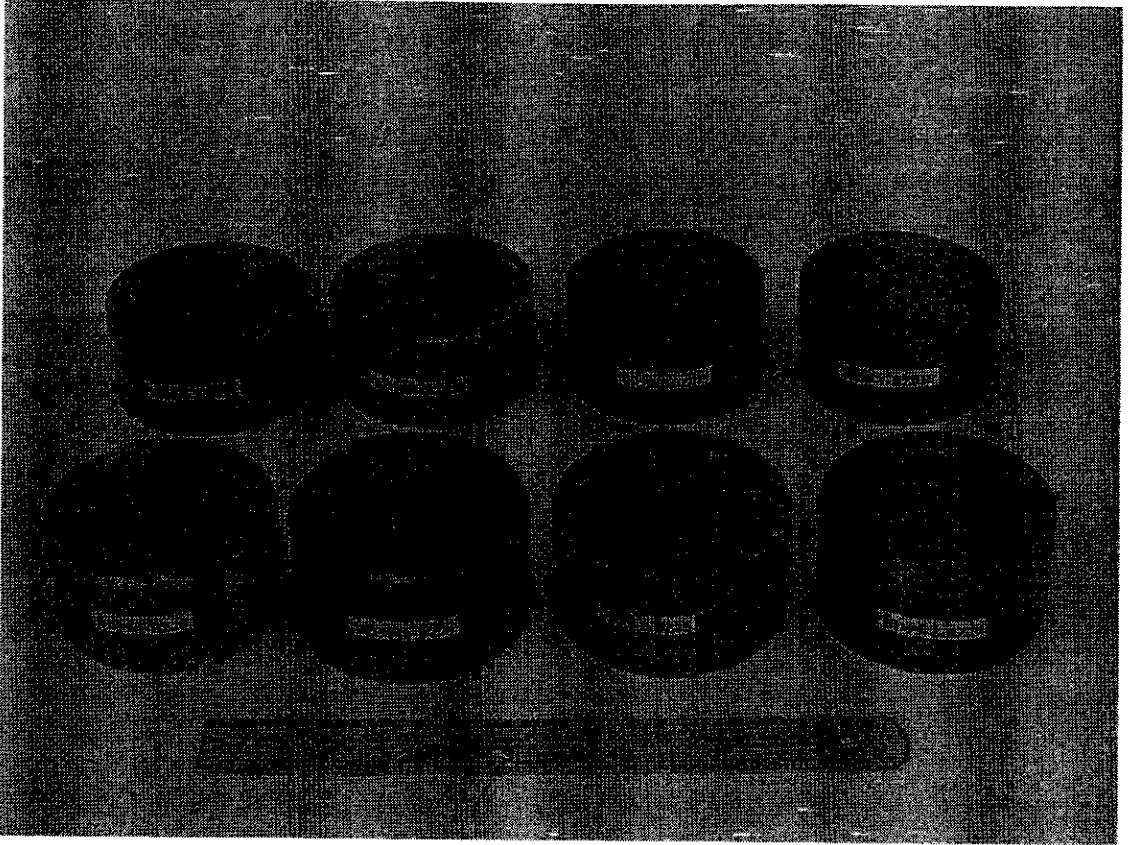
BD99 - 1 - UCS01



รูปที่ 3.4 คำอธิบายรหัสที่ติดบนตัวอย่างเกลือหินซึ่งจัดเตรียมสำหรับการทดสอบ



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างเกลือหินบางส่วนที่ใช้ในการทดสอบแรงกดในแกนเดียว



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างเกลื่อหินบางส่วนที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงแบบบราซิดเลียน

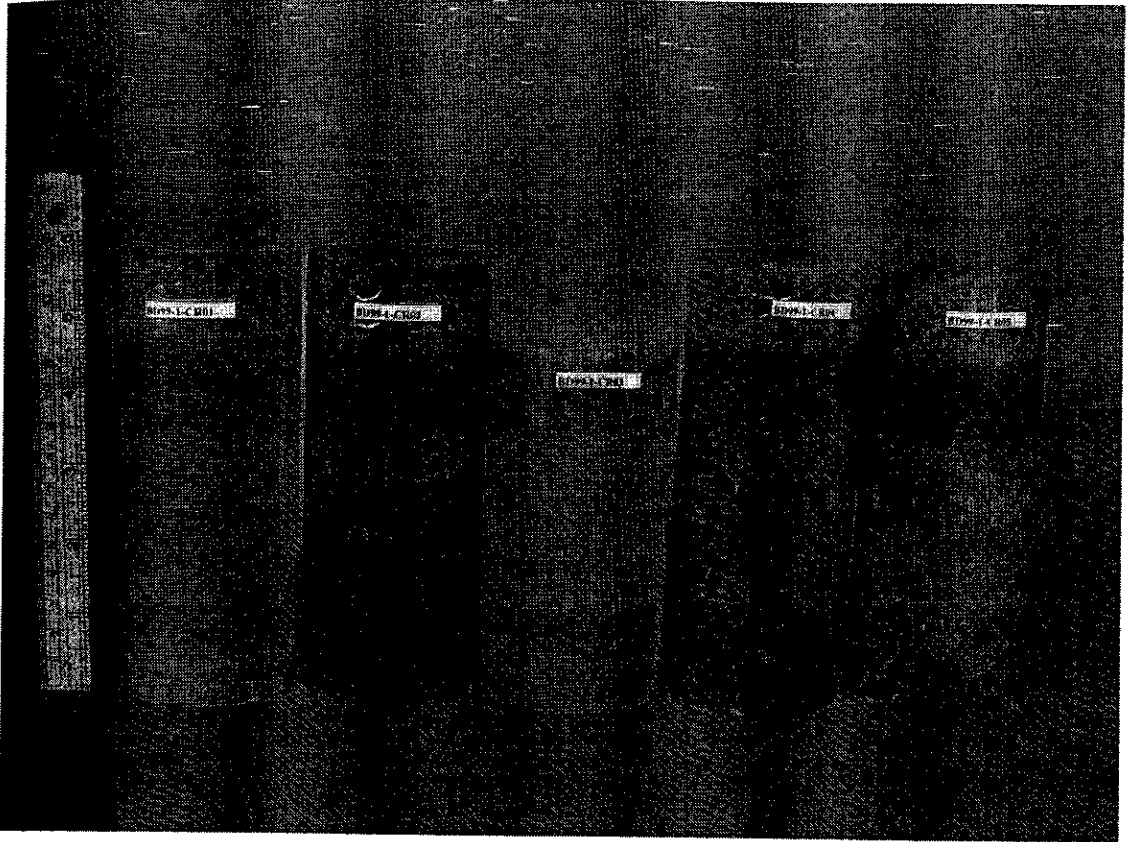
การทดสอบแรงกดในแกนเดียวแบบวัฏจักรใช้ตัวอย่างเกลือหินที่ค่อนข้างสมบูรณ์จำนวน 14 ตัวอย่าง ลักษณะเนื้อหินส่วนใหญ่จะประกอบด้วยผลึกเกลือไอไม่มีสี จนถึงมีสีน้ำตาลเข้มใส (Honey halite) ผสมอยู่กับผลึกเกลือสีขาวขนาดเล็กกระจายทั่วทั้งตัวอย่าง บางตัวอย่างปรากฏสิ่งเจือปนที่แสดงชั้น (Bed) อย่างชัดเจน โดยทำมุมขนานจนถึงมุมเอียงประมาณ 30 องศากับแนวระนาบของแท่งตัวอย่าง มีปริมาณของแร่แอนไฮไดรต์ผันแปรระหว่าง 5-100% และแร่คินฟันแปรระหว่าง 1-20% การทดสอบนี้ใช้ตัวอย่างเกลือหินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ในช่วง 2.5 ถึง 3.0 (รูปที่ 3.7)

การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวใช้ตัวอย่างเกลือหินจาก 2 แหล่ง โดยมีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 2.5 คือ ตัวอย่างเกลือหินจากจังหวัดอุดรธานี มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 60 มิลลิเมตร และตัวอย่างเกลือหินจากจังหวัดนครราชสีมา มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 48 มิลลิเมตร จำนวน 10 ตัวอย่าง ลักษณะเนื้อหินส่วนใหญ่จะประกอบด้วยผลึกเกลือไอไม่มีสีจนถึงสีน้ำตาลเข้มใสและสีเทาผสมอยู่กับผลึกเกลือสีขาวขนาดเล็กกระจายทั่วทั้งตัวอย่าง มีปริมาณของแร่แอนไฮไดรต์ผันแปรระหว่าง 1-99% และแร่คินฟันแปรระหว่าง 1-35% (รูปที่ 3.8)

ตารางที่ 3.1 แสดงรูปร่างและจำนวนตัวอย่างเกลือหินที่ได้จัดเตรียมสำหรับการทดสอบแต่ละชนิด โดยคุณลักษณะทางกายภาพและทางแร่วิทยาของตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์แสดงไว้ในตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างเกลือหินบางส่วนที่ใช้ในการทดสอบแรงกดในแกนเดียวแบบวัฏจักร



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างเกลือหินบางส่วนที่ใช้ในการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียว

ตารางที่ 3.1 รูปร่างและจำนวนตัวอย่างเกลือหินที่ได้จัดเตรียมสำหรับการทดสอบทั้งสี่ชนิด

Test Types	Udon Thani			Nakhon Ratchasima		
	Diameter (mm)	L/D Ratio	Number of Specimens	Diameter (mm)	L/D Ratio	Number of Specimens
Uniaxial Compressive Strength Tests	60	2.5	18	48	2.5	6
Brazilian Tensile Strength Tests	60	0.5	76	N/A		
Cyclic Loading Tests	60	2.5	10	48	2.5	4
Uniaxial Creep Tests	60	2.5	6	48	2.5	4

ตารางที่ 3.2 คุณลักษณะทางกายภาพและทางแร่วิทยาของตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบ
คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์

Test Methods	Specimen No.	Description
Uniaxial Compressive Strength Test	BD99-1-UCS01	ผลึกเกลือใสไม่มีสี มีขนาด 0.5-1 เซนติเมตร มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 99% และแร่อื่น 1%
	BD99-1-UCS02	ผลึกเกลือสีน้ำตาล มีขนาด 0.4-0.5 เซนติเมตร และพบผลึกเกลือใสไม่มีสี ขนาด 2.5 เซนติเมตร มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 95% และแร่อื่น 5% พบเป็นกลุ่มเล็ก ๆ แทรกอยู่ในตัวอย่าง
	BD99-1-UCS03	ผลึกเกลือใสไม่มีสี มีขนาด 0.5-2 เซนติเมตร และไม่พบสิ่งเจือปน
	BD99-1-UCS04	ผลึกเกลือใสไม่มีสี มีขนาด 0.5-1 เซนติเมตร มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 99% และแร่อื่น 1% พบเป็นกลุ่มเล็ก ๆ แทรกอยู่ในตัวอย่าง
	BD99-1-UCS05	ผลึกเกลือใสไม่มีสี มีขนาด 0.5-2 เซนติเมตร มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 99% และแร่อื่น 1% แทรกเป็นกลุ่มเล็ก ๆ ระหว่างผลึกเกลือ
	BD99-1-UCS06	ผลึกเกลือใสไม่มีสี มีขนาด 0.5-1 เซนติเมตร มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 99% และแร่อื่น 1% พบเป็นกลุ่มเล็ก ๆ แทรกอยู่ในตัวอย่าง
	BD99-1-UCS07	ผลึกเกลือใสไม่มีสี มีขนาด 0.5-1 เซนติเมตร มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 98% แร่แอนไฮไดรต์ 5% ซึ่งแทรกตัวเป็น lens อยู่ในตัวอย่าง
	BD99-1-UCS08	ผลึกเกลือใสไม่มีสี มีขนาด 0.5-1 เซนติเมตร มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 98% แร่แอนไฮไดรต์ 5% และแร่อื่น 1% ซึ่งแทรกตัวเป็น lens อยู่ในตัวอย่าง
	BD99-1-UCS09	ผลึกเกลือสีขาวขุ่น มีขนาด 0.4-0.5 เซนติเมตร มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 98% แร่แอนไฮไดรต์ 1% ซึ่งแทรกตัวเป็น lens และแร่อื่น 1% กระจายอยู่กับแร่แอนไฮไดรต์
	BD99-1-UCS10	ผลึกเกลือสีขาวขุ่น มีขนาด 0.1-0.5 เซนติเมตร มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 99% และแร่อื่น 1% พบเป็นกลุ่มเล็ก ๆ แทรกอยู่ในตัวอย่าง
	BD99-1-UCS11	ผลึกเกลือสีน้ำตาล มีขนาด 0.6-0.8 เซนติเมตร มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 80% แร่แอนไฮไดรต์ 15% และแร่อื่น 5% แทรกเป็นกลุ่มเล็ก ๆ ระหว่างผลึกเกลือ

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของตัวอย่างเกลือหินทางกายภาพและทางแร่วิทยาที่ใช้ในการทดสอบ
คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ (ต่อ)

Test Methods	Specimen No.	Description
Uniaxial Compressive Strength Test	BD99-2-UCS12	ผลึกเกลือสีขาวขุ่น มีขนาด 0.4-0.5 เซนติเมตร และไม่พบสิ่งเจือปน
	BD99-2-UCS13	ผลึกเกลือสีเทา มีขนาด 0.3-1 เซนติเมตร มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 90% และแร่ดิน 10% แทรกเป็นชั้นเล็ก ๆ อยู่ในตัวอย่าง
	BD99-2-UCS14	ผลึกเกลือสีขาวขุ่น มีขนาด 0.4-0.5 เซนติเมตร และไม่พบสิ่งเจือปน
	BD99-2-UCS15	ผลึกเกลือสีเทา มีขนาด 0.5-0.6 เซนติเมตร มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 99% และแร่ดิน 1%
	BD99-1-UCS16	ผลึกเกลือสีเทา มีขนาด 0.6-0.8 เซนติเมตร มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 99% และแร่ดิน 1%
	SS-1-UCS17	มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 1% และแร่ดิน 1% โดยมีปริมาณของแร่แอนไฮไดรต์ 98% เนื่องจากการทดสอบต้องการศึกษากำกำลังรับแรงกดสูงสุดของเกลือหินที่มีแร่แอนไฮไดรต์ปนอยู่ในปริมาณมาก (เกลือชั้นกลาง)
	BD99-2-UCS18	ผลึกเกลือสีเทา มีขนาด 0.6-0.8 เซนติเมตร มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 95% และแร่ดิน 5%
	SS-1-UCS19	ผลึกเกลือใสไม่มีสี มีขนาด 0.4-0.5 เซนติเมตร มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 20% และมีปริมาณแร่แอนไฮไดรต์ 80% (เกลือชั้นกลาง)
	SS-1-UCS20	ผลึกเกลือสีเทา ขนาด 0.3-0.4 เซนติเมตร มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 49% มีปริมาณแร่แอนไฮไดรต์ 50% และแร่ดิน 1% (เกลือชั้นล่าง)
	SS-1-UCS21	มีปริมาณแร่แอนไฮไดรต์ 100% (เกลือชั้นกลาง)
	SS-1-UCS22	ผลึกเกลือใสไม่มีสี มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 31% แทรกเป็น lens อยู่ในตัวอย่าง มีปริมาณแร่แอนไฮไดรต์ 64% และแร่ดิน 5% (เกลือชั้นล่าง)
	SS-1-UCS23	ผลึกเกลือใสไม่มีสี มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 7% กระจายอยู่ในตัวอย่าง มีปริมาณแร่แอนไฮไดรต์ 91% และแร่ดิน 2% (เกลือชั้นล่าง)
	SS-1-UCS24	มีปริมาณแร่แอนไฮไดรต์ 100% (เกลือชั้นล่าง)

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของตัวอย่างเกลือหินทางกายภาพและทางแร่วิทยาที่ใช้ในการทดสอบ
คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ (ต่อ)

Test Methods	Specimen No.	Description
Uniaxial Cyclic Loading Test	BD99-1-CC01	ผลึกเกลือโซเดียมมีสี มีขนาด 0.5-0.6 เซนติเมตร มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 94% แร่แอนไฮไดรต์ 5% และไม่พบสิ่งเจือปน
	BD99-1-CC02	ผลึกเกลือโซเดียมมีสี มีขนาด 0.2-0.3 เซนติเมตร มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 75% แร่แอนไฮไดรต์ 5% ซึ่งแทรกตัวเป็น lens และแร่ดิน 20%
	BD99-1-CC03	ผลึกเกลือสีขาวขุ่น มีขนาด 0.7-0.8 เซนติเมตร มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 55% แร่แอนไฮไดรต์ 40% แทรกตัวเป็นชั้น และแร่ดิน 5%
	BD99-1-CC04	ผลึกเกลือสีขาวขุ่น มีขนาด 1-1.5 เซนติเมตร มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 65% แร่แอนไฮไดรต์ 30% แทรกตัวเป็นชั้น และแร่ดิน 5%
	BD99-1-CC05	ผลึกเกลือโซเดียมมีสี มีขนาด 0.5-0.6 เซนติเมตร มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 75% แร่แอนไฮไดรต์ 20% แทรกตัวเป็นชั้น และแร่ดิน 5%
	BD99-1-CC06	ผลึกเกลือโซเดียมมีสี มีขนาด 0.8-0.9 เซนติเมตร มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 79% แร่แอนไฮไดรต์ 20% แทรกตัวเป็นชั้น และแร่ดิน 1% กระจายอยู่กับแร่แอนไฮไดรต์
	BD99-1-CC07	ผลึกเกลือโซเดียมมีสี มีขนาด 0.7-0.8 เซนติเมตร มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 80% แร่แอนไฮไดรต์ 5% แทรกตัวเป็น lens และแร่ดิน 15% กระจายอยู่กับแร่แอนไฮไดรต์
	BD99-1-CC08	ผลึกเกลือโซเดียมมีสี มีขนาด 0.5-0.6 เซนติเมตร มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 89% แร่แอนไฮไดรต์ 10% และแร่ดิน 1% พบเป็นกลุ่มเล็ก ๆ แทรกอยู่ในตัวอย่าง
	BD99-1-CC09	ผลึกเกลือโซเดียมมีสี มีขนาด 0.5-0.6 เซนติเมตร มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 80% แร่แอนไฮไดรต์ 10% และแร่ดิน 10% พบเป็นกลุ่มเล็ก ๆ กระจายอยู่กับแร่แอนไฮไดรต์
	BD99-1-CC10	ผลึกเกลือสีน้ำตาลใส มีขนาด 0.7-0.8 เซนติเมตร มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 99% และแร่ดิน 1%

ตารางที่ 3.2 คุณลักษณะของตัวอย่างเกลือหินทางกายภาพและทางแร่วิทยาที่ใช้ในการทดสอบ
คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ (ต่อ)

Test Methods	Specimen No.	Description
Uniaxial Cyclic Loading Test	SS-1-CC11	ผลึกเกลือสีเทา มีขนาด 0.1-0.2 เซนติเมตร มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 49% แร่แอนไฮไดรต์ 50% และแร่ดิน 1% (เกลือชั้นกลาง)
	SS-1-CC12	ผลึกเกลือใสไม่มีสี มีขนาด 0.2-0.3 เซนติเมตร มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 60% แร่แอนไฮไดรต์ 40% แทรกตัวเป็นชั้นอยู่ในตัวอย่าง (เกลือชั้นล่าง)
	SS-1-CC13	ผลึกเกลือใสไม่มีสี มีขนาด 0.4-0.5 เซนติเมตร มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 20% แร่แอนไฮไดรต์ 80% แทรกตัวเป็นชั้นอยู่ในตัวอย่าง (เกลือชั้นล่าง)
	SS-1-CC14	มีปริมาณแร่แอนไฮไดรต์ 100% (เกลือชั้นกลาง)
Brazilian Tensile Strength Test	BD99-1-BZ01 ถึง BD99-1-BZ76	ตัวอย่างเกลือหินมีความเป็นเนื้อเดียวกัน มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 99-50% แร่แอนไฮไดรต์ 1-50% และแร่ดิน 1-5% ยกเว้นตัวอย่างเกลือหินหมายเลข BD99-1-BZ62 ถึงหมายเลข BD99-1-BZ66 และตัวอย่างเกลือหินหมายเลข BD99-1-BZ70 ซึ่งมีปริมาณของแร่แอนไฮไดรต์ 85-98% เนื่องจากการทดสอบต้องการศึกษาค่าความต้านทานแรงดึงของเกลือหินที่มีแร่แอนไฮไดรต์เจือปนอยู่ในปริมาณมาก

ตารางที่ 3.2: คุณลักษณะของตัวอย่างเกลือหินทางกายภาพและทางแร่วิทยาที่ใช้ในการทดสอบ
คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ (ต่อ)

Test Methods	Specimen No.	Description
Uniaxial Creep Test	BD99-1-CR01	ผลึกเกลือใสไม่มีสี มีขนาด 0.9-1 เซนติเมตร มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 99% และแร่ดิน 1%
	BD99-1-CR03	ผลึกเกลือใสไม่มีสี มีขนาด 1-2 เซนติเมตร และไม่พบสิ่งเจือปน
	BD99-1-CR07	ผลึกเกลือใสไม่มีสี มีขนาด 1-2 เซนติเมตร มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 99% และแร่ดิน 5%
	BD99-1-CR09	ผลึกเกลือใสไม่มีสี มีขนาด 0.6-0.7 เซนติเมตร มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 85% แร่แอนไฮไดรต์ 5% ซึ่งแทรกตัวเป็น lens และแร่ดิน 10%
	BD99-1-CR11	ผลึกเกลือใสไม่มีสี มีขนาด 0.1-0.2 เซนติเมตร มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 1% แร่แอนไฮไดรต์ 99%
	BD99-1-CR12	ผลึกเกลือใสไม่มีสี มีขนาด 0.7-0.8 เซนติเมตร มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 80% และแร่ดิน 20%
	SS-1-CR02	ผลึกเกลือใสไม่มีสี มีขนาด 0.3-0.4 เซนติเมตร และไม่พบสิ่งเจือปนในตัวอย่าง (เกลือชั้นล่าง)
	SS-1-CR03	ผลึกเกลือสีเทา มีขนาด 0.3-0.4 เซนติเมตร มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 85% แร่แอนไฮไดรต์ 5% แทรกตัวเป็นชั้น และแร่ดิน 10% แทรกตัวเป็นชั้นกระจายอยู่กับแร่แอนไฮไดรต์ (เกลือชั้นล่าง)
	SS-1-CR06	ผลึกเกลือใสไม่มีสี มีขนาด 0.4-0.5 เซนติเมตร พบแร่ดิน 1% กระจายอยู่ในตัวอย่าง (เกลือชั้นกลาง)
	SS-1-CR07	ผลึกเกลือใสไม่มีสี มีขนาด 0.4-0.5 เซนติเมตร พบแร่ดิน 1% กระจายอยู่ในตัวอย่าง (เกลือชั้นกลาง)

บทที่ 4

การทดสอบคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ของเกลือหิน

การศึกษาคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ของเกลือหินในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการมาประกอบการสร้างความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์กับลักษณะทางด้านแร่วิทยาและสัณฐานวิทยาของเกลือหิน การทดสอบประกอบด้วย 1) การทดสอบแรงกดในแกนเดียว 2) การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน 3) การทดสอบแรงกดในแกนเดียวแบบวัฏจักร และ 4) การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียว

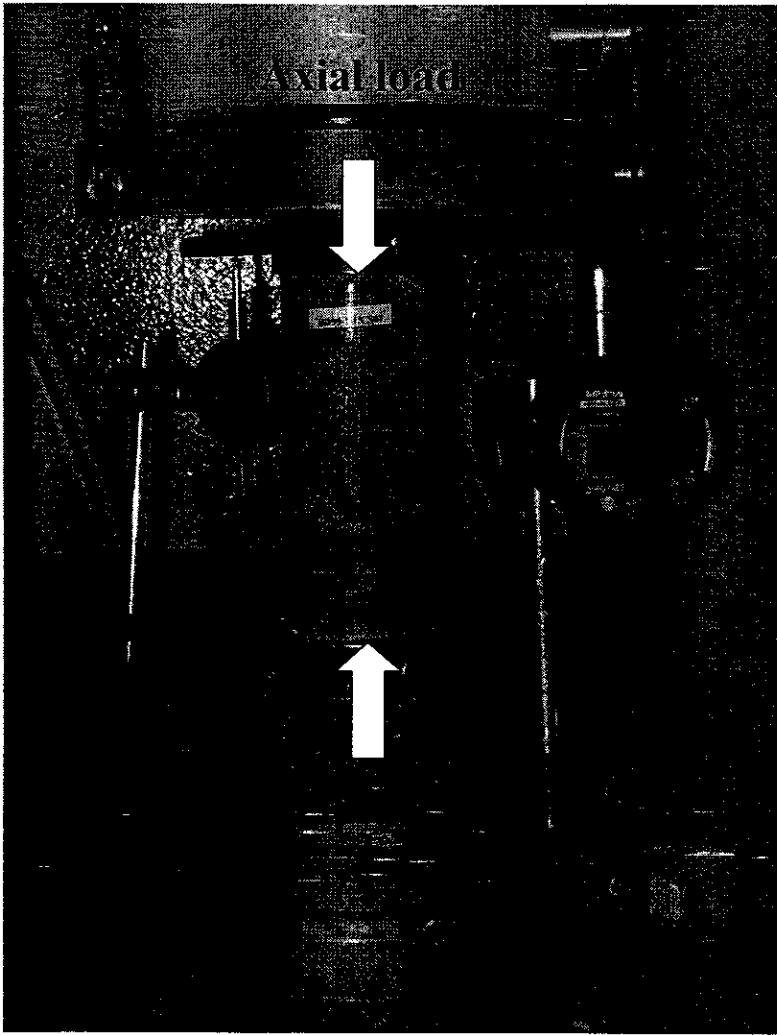
4.1 การทดสอบแรงกดในแกนเดียว

การทดสอบแรงกดในแกนเดียวมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดของเกลือหินในแกนเดียว โดยปราศจากความดันรอบข้าง (Unconfined condition) ตัวอย่างเกลือหินจะทดสอบด้วยอัตราความเค้นกดในแกนเดียวที่เท่ากันคือ 0.1 MPa/s ทำการทดสอบในห้องอุณหภูมิปกติและปฏิบัติตามข้อกำหนดมาตรฐานสากล ASTM D2938 และข้อเสนอแนะของ ISRM (Brown, 1981) เครื่องมือที่ใช้ทดสอบคือเครื่องกดทดสอบแบบดิจิทัลหมายเลข 9901X0003 รุ่น Elect/ADR 2000 มีความสามารถในการให้แรงกดสูงสุดเท่ากับ 2,000 kN เครื่องกดทดสอบจะให้แรงกดในแนวแกนของตัวอย่างเกลือหิน (รูปที่ 4.1) จนกระทั่งตัวอย่างเกลือหินแตกด้วยแรงกดสูงสุดระหว่างทำการทดสอบจะมีการบันทึกค่าแรงกดและระยะการยุบตัวของตัวอย่างเกลือหินตามระยะเวลา พร้อมทั้งสังเกตลักษณะการวิบัติ สำหรับค่าแรงกดสูงสุดที่อ่านได้จะเป็นหน่วยของแรงกดซึ่งสามารถแปลงค่าเป็นความเค้น โดยนำพื้นที่หน้าตัดของแต่ละตัวอย่างไปหารค่าแรงกด ส่วนค่าความเครียดในแนวแกนคำนวณจากการนำระยะการยุบตัวหารด้วยความยาวเดิมของแท่งตัวอย่าง (Engineering strain) ผลที่ได้จากการทดสอบนำเสนอโดยแผนภูมิระหว่างค่าความเค้นกับความเครียดเพื่อหาความสัมพันธ์เชิงเส้น การคำนวณจะเป็นไปตามสมการดังนี้

$$\sigma_{\text{axial}} = P/A \quad (4.1)$$

$$\epsilon_{\text{axial}} = \Delta L/L \quad (4.2)$$

โดยที่ σ_{axial} คือ ความเค้นในแนวแกน P คือ แรงกดในแนวแกน A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างเกลือหิน ϵ_{axial} คือ ความเครียดในแนวแกน ΔL คือ การเปลี่ยนแปลงความยาวของตัวอย่างเกลือหิน (การยุบตัว) และ L คือ ความยาวของตัวอย่างเกลือหินเดิมก่อนการกด ถ้าค่าแรงกดในแนวแกนสูงสุดที่จุดวิบัติหรือจุดแตกของเกลือหินเท่ากับ P_f ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว σ_c (Uniaxial compressive strength) จะคำนวณได้จาก



รูปที่ 4.1 การทดสอบแรงกดในแกนเดียว ตัวอย่างเกลือหินถูกกดด้วยอัตราคงที่ตามแนวแกน ด้วยเครื่องกด Elect/ADR 2000

$$\sigma_c = P_f/A \quad (4.3)$$

ตัวอย่างเกลือหินจากจังหวัดอุดรธานีที่นำมาใช้ในการทดสอบมีจำนวน 24 ตัวอย่าง ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดของตัวอย่างเกลือหินมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 30.77 ± 5.83 MPa (4462 ± 845 psi) ดังสรุปไว้ในตารางที่ 4.1 และนำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในรูปที่ 4.2 รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะของตัวอย่างเกลือหินบางส่วนก่อนและหลังทำการทดสอบ ตัวอย่างเกลือหินเกิดการวิบัติจะมีการบวมและแตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ที่บริเวณกึ่งกลางตัวอย่าง ซึ่งทำให้ตัวอย่างปรากฏเป็นสีขาวขุ่น และบางตัวอย่างปรากฏแนวการแตกวางตัวในแนวขนานกับแนวแกนของตัวอย่าง (Extension failure) ตัวอย่างเกลือหินที่มีแร่แอนไฮไดรต์แทรกอยู่ การแตกจะเกิดขึ้นบริเวณที่มีแร่แอนไฮไดรต์ค่อนข้างมากโดยเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเพียงเล็กน้อย รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าความต้านแรงกดของตัวอย่างเกลือหินในงานวิจัยนี้กับค่าที่ได้จากเกลือหินในต่างประเทศ เกลือหินจากจังหวัดอุดรธานีมีค่าความต้านแรงกดอยู่ในเกณฑ์สูงเมื่อเทียบกับเกลือหินจากแหล่งอื่น ๆ ในต่างประเทศ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยในประเทศที่ทำการทดสอบเกลือหินจากแหล่งอุดรธานี และบางพื้นที่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือพบว่ามีความใกล้เคียงกัน

4.2 การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน

การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดของเกลือหิน วิธีการเตรียมตัวอย่างและการทดสอบจะปฏิบัติตามมาตรฐานสากล ASTM D3967 และข้อเสนอแนะของ ISRM (Brown, 1981) เครื่องมือที่ใช้ทดสอบคือ เครื่องกดทดสอบแบบดิจิทัล หมายเลข 9901X0003 รุ่น Elect/ADR 2000 (รูปที่ 4.5) ตัวอย่างเกลือหินจะถูกกดตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางด้วยแรงกดที่เพิ่มขึ้นในอัตราคงที่เท่ากับ 0.5 MPa/s บริเวณจุดสัมผัสระหว่างตัวอย่างเกลือหินกับแท่นรองรับด้วยกระดาษแข็งทั้งสองด้านเพื่อให้ผิวสัมผัสระหว่างตัวอย่างเกลือหินกับแท่นกดมีความสม่ำเสมอ การทดสอบจะกดจนกระทั่งตัวอย่างเกลือหินแตกและแยกออกจากกัน ค่าแรงกดที่จุดวิบัติได้นำมาคำนวณเป็นค่าแรงดึงแบบบราซิลเลียนได้ตามสมการ (Jaeger and cook, 1979)

$$\sigma_b = 2 P_f/\pi DL \quad (4.4)$$

โดยที่ σ_b คือ แรงดึงแบบบราซิลเลียน P_f คือ แรงกดที่จุดวิบัติ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่าง และ L คือ ความหนาของตัวอย่าง

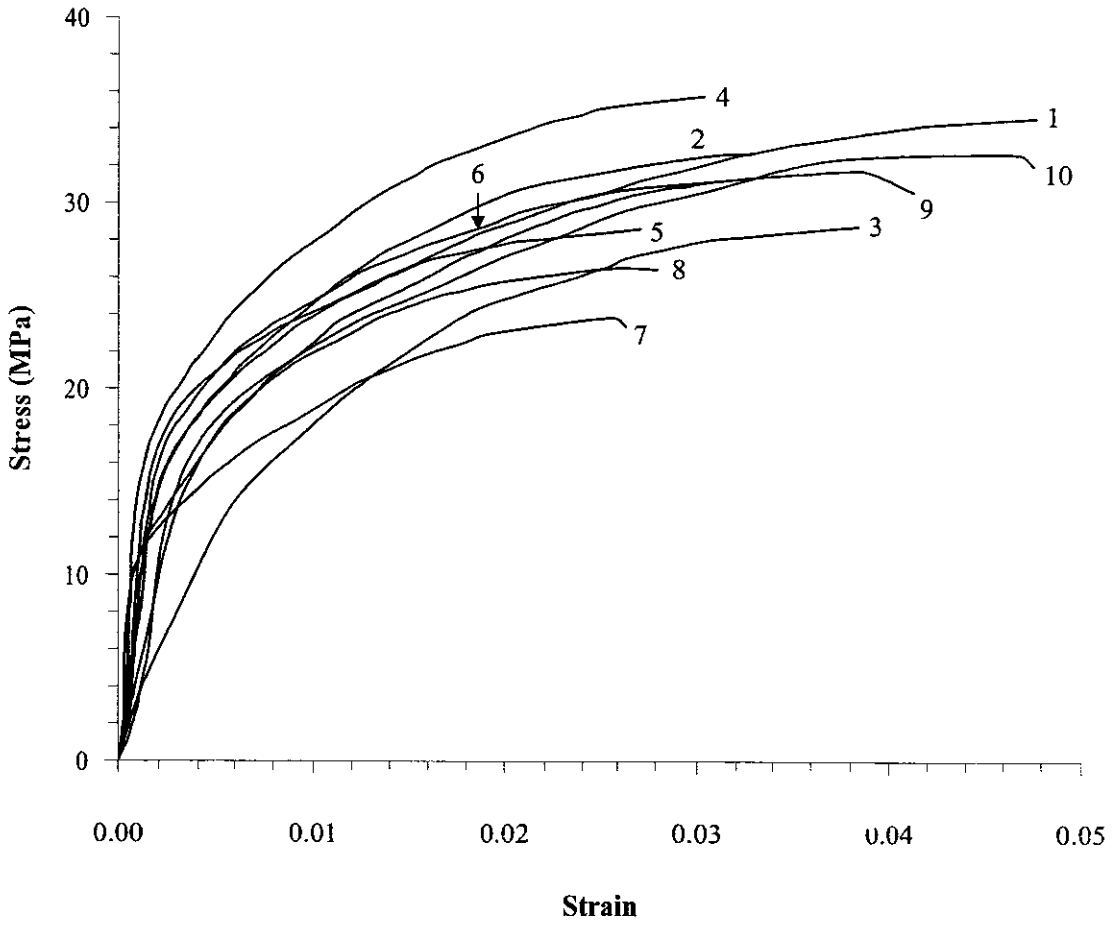
ผลการทดสอบระบุว่าตัวอย่างเกลือหินทั้งหมดมีการแตกในแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะของตัวอย่างเกลือหินบางส่วนก่อนและหลังทำการทดสอบ โดยผลการทดสอบทั้ง 76 ตัวอย่างได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.2 ตัวอย่างเกลือหินที่นำมาทดสอบมีค่าเฉลี่ยความต้านแรงดึงแบบบราซิลเลียนและความผันแปรเท่ากับ 1.97 ± 0.73 MPa (286 ± 106 psi) ซึ่งสอดคล้องกับเกลือหินจากแหล่งอื่น ๆ ในต่างประเทศ รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าความต้านแรงดึงแบบบราซิลเลียน

ตารางที่ 4.1 สรุปผลการทดสอบแรงกดในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือหิน

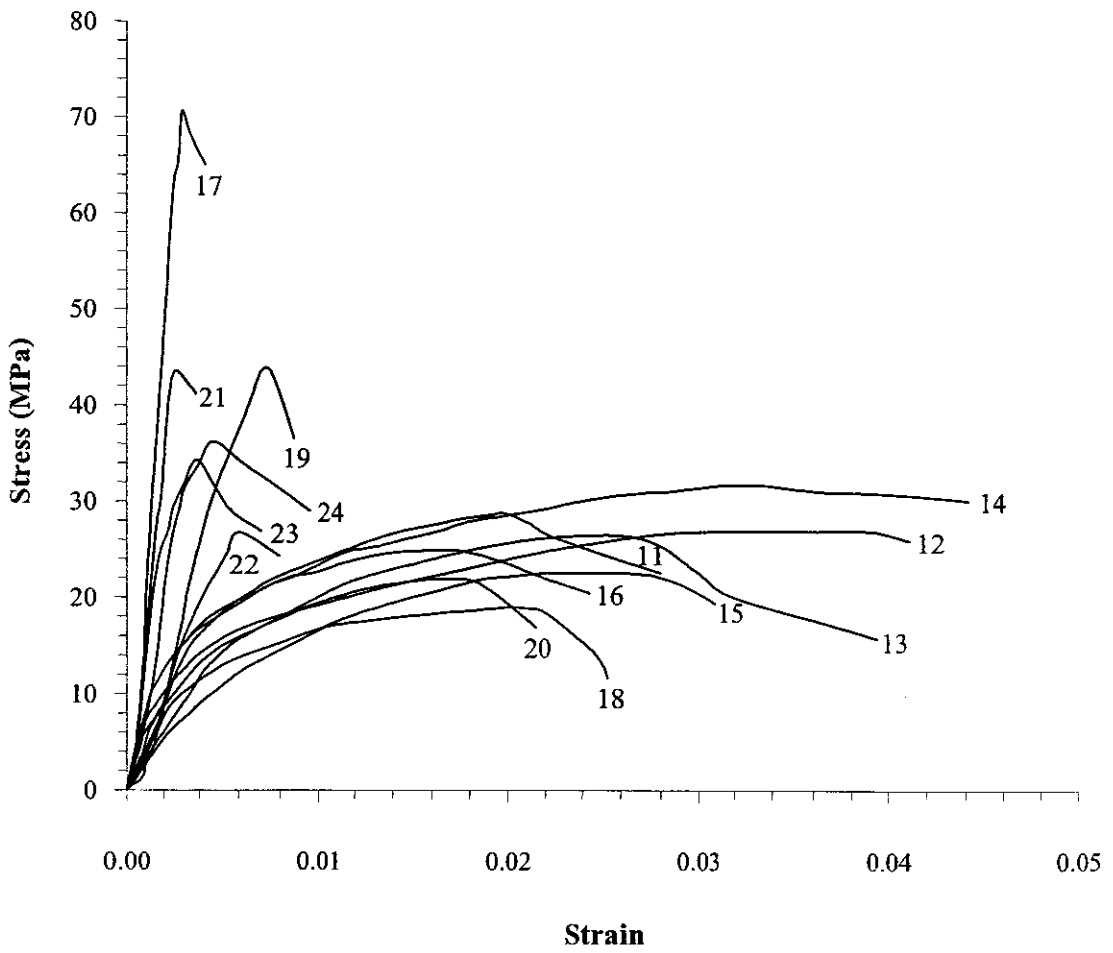
Specimen No.	Average Diameter D (mm)	Average Length L (mm)	Depth (m)	Weight (g)	Density (g/cc)	Failure Load (kN)	Compressive Strength σ_c (MPa)	Inclusions Determined by Visual Inspection (%)	
								Anhydrite	Clay
								BD99-1-UCS01	60.50
BD99-1-UCS02	60.42	150.73	321.10-321.51	947.30	2.19	94	32.67	-	5
BD99-2-UCS03	63.15	120.63	323.12-323.71	813.40	2.15	90	28.74	-	-
BD99-1-UCS04	60.63	151.03	326.51-327.10	952.30	2.18	103	35.76	-	1
BD99-1-UCS05	60.48	151.17	327.10-327.70	944.60	2.17	82	28.60	-	1
BD99-1-UCS06	61.20	153.67	314.14-314.59	977.80	2.16	91	31.10	-	1
BD99-1-UCS07	60.85	149.60	389.80-390.30	951.40	2.19	69	23.81	-	-
BD99-1-UCS08	60.97	150.40	444.25-444.83	965.60	2.20	77	26.44	5	1
BD99-1-UCS09	60.22	153.70	455.12-455.80	961.10	2.19	93	32.65	1	-
BD99-1-UCS10	60.25	149.07	225.80-228.70	928.40	2.18	90	31.68	-	1
BD99-1-UCS11	60.30	151.00	321.51-322.07	954.60	2.21	82	28.73	15	5
BD99-2-UCS12	60.90	156.19	365.48-365.88	996.50	2.19	78	26.90	-	-
BD99-2-UCS13	61.03	150.95	361.56-362.12	963.30	2.18	77	26.48	-	10

ตารางที่ 4.1 สรุปผลการทดสอบแรงกดในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือหิน (ต่อ)

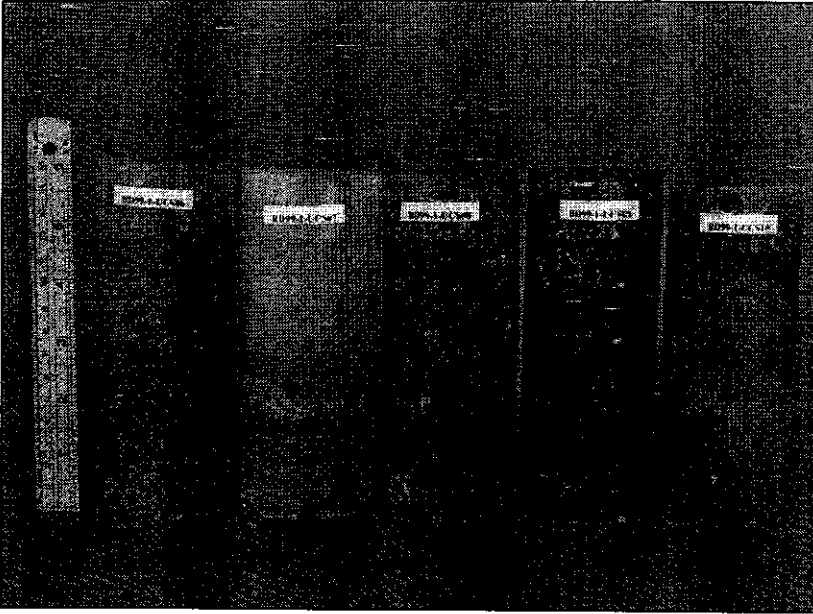
Specimen No.	Average Diameter	Average Length	Depth	Weight	Density	Failure Load	Compressive Strength	Inclusions Determined by Visual Inspection (%)	
	D (mm)	L (mm)	(m)	(g)	(g/cc)	(kN)	σ_c (MPa)	Anhydrite	Clay
BD99-2-UCS14	60.89	152.67	361.56-362.12	964.80	2.17	92	31.66	-	-
BD99-2-UCS15	60.78	155.32	227.8-228.36	983.50	2.18	65	22.56	-	1
BD99-1-UCS16	61.07	153.60	314.14-314.59	977.60	2.17	73	24.87	-	1
SS-1-UCS17	47.29	125.69	386.00-387.00	651.70	2.95	124	70.58	100	-
BD99-2-UCS18	61.04	144.91	227.80-230.60	916.70	2.16	56	18.99	-	5
SS-1-UCS19	47.27	120.91	268.23-268.37	563.40	2.65	77	43.85	85	-
SS-1-UCS20	47.50	131.52	355.81-356.0	549.10	2.36	38	21.71	50	1
SS-1-UCS21	47.42	130.63	267.23-267.37	677.10	2.93	77	43.57	100	-
SS-1-UCS22	47.31	125.38	265.72-266.0	556.60	2.52	47	26.75	90	-
SS-1-UCS23	47.21	126.93	267.37-267.50	634.20	2.85	60	34.19	95	-
SS-1-UCS24	47.50	125.99	386.33-386.46	589.60	2.64	64	36.19	100	-
Average Uniaxial Compressive Strength							30.77 ± 5.83 MPa		



รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบแรงกดในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือหิน หมายเลขระบุเลขที่ตัวอย่าง



รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบแรงกดในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือหิน หมายเลขระบุเลขที่ตัวอย่าง (ต่อ)

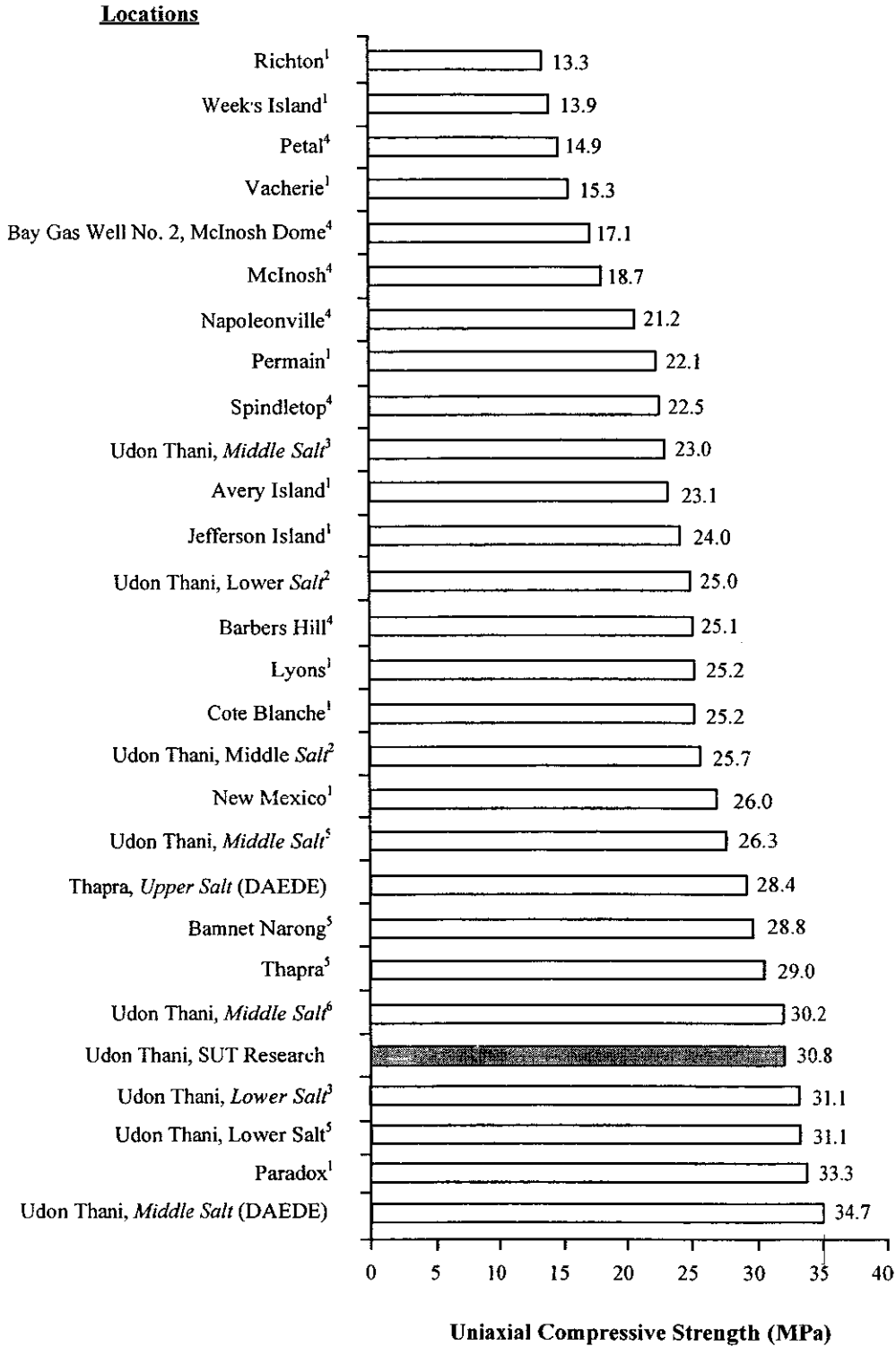


(a)

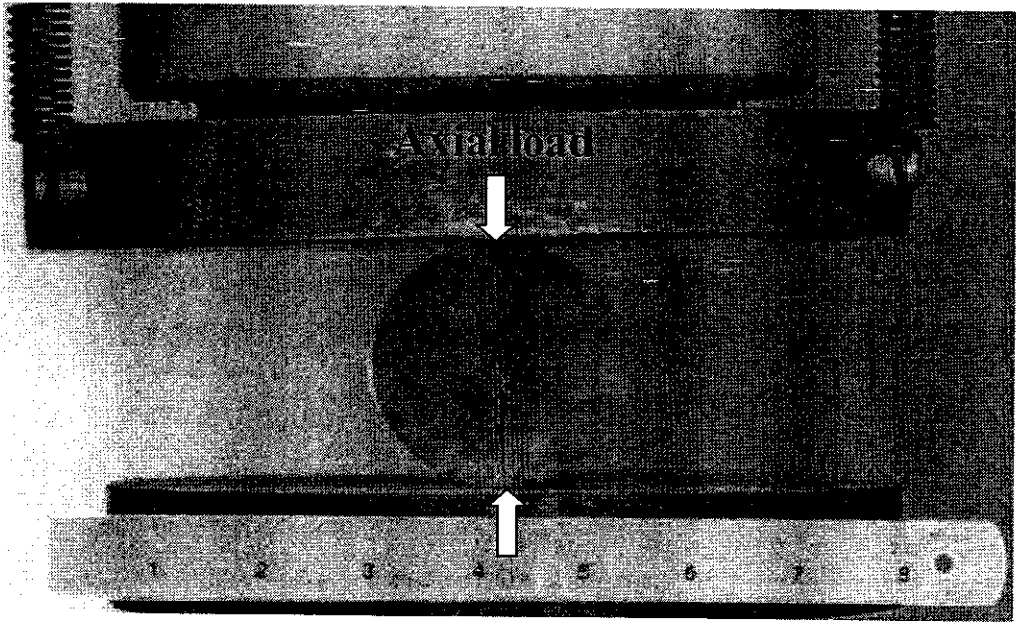


(b)

รูปที่ 4.3 ลักษณะของตัวอย่างเกลือหินบางส่วนก่อน (a) และหลัง (b) ทำการทดสอบแรงกดในแกนเดียว



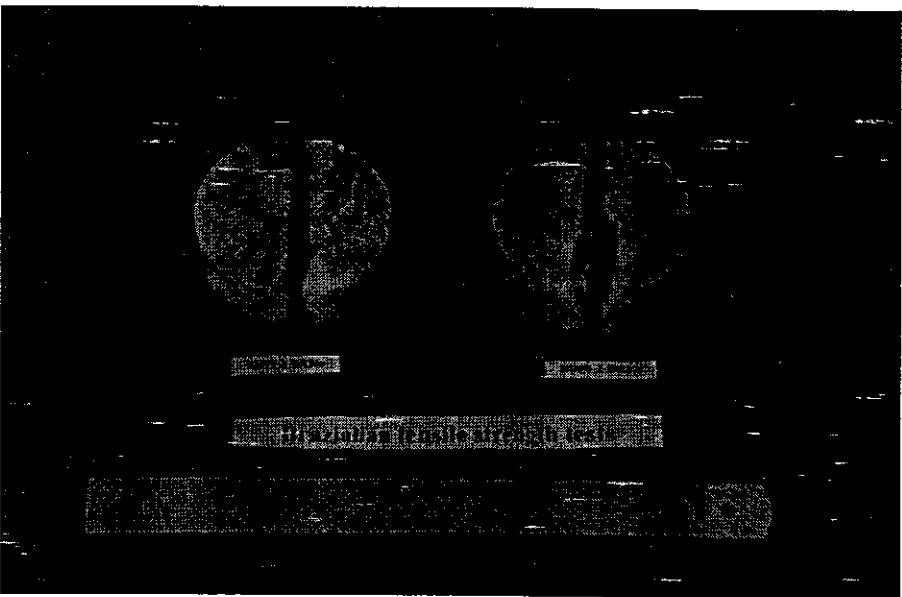
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าความต้านแรงกดของตัวอย่างเกลือหินที่ได้จากการทดสอบสำหรับเกลือหินในงานวิจัยนี้ และเกลือหินในต่างประเทศ (ข้อมูลแหล่งอื่นนำมาจาก ¹Hansen et al., 1984; ²Boontongloan, 2000; ³Wetchasat, 2002; ⁴DeVries et al., 2002; ⁵Fuenkajorn and Jandakaew, 2003 และ ⁶Phueakphum, 2003)



รูปที่ 4.5 การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน ตัวอย่างเกลือหินรูปแผ่นถูกกดตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลางจนแตก



(a)



(b)

รูปที่ 4.6 ลักษณะของตัวอย่างเกลือหินบางส่วนก่อน (a) และหลัง (b) ทำการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนของตัวอย่างเกลือหินในงานวิจัยนี้

Specimen No.	Average Diameter	Average Thickness	Depth	Weight	Density	Failure Load	Brazilian Tensile Strength, σ_B (MPa)	Inclusions Determined by Visual Inspection (%)	
	D (mm)	(mm)						(m)	(g)
	BD99-1-BZ01	60.32	30.97	237.26-237.66	188.10	2.12	6.08	2.08	-
BD99-1-BZ02	59.38	31.63	321.10-321.51	188.40	2.15	5.00	1.69	-	-
BD99-2-BZ03	62.77	33.15	323.12-323.71	215.50	2.10	6.97	2.12	-	-
BD99-1-BZ04	61.42	29.48	326.51-327.10	179.70	2.06	5.98	2.10	-	-
BD99-1-BZ05	60.85	32.02	327.10-327.70	199.40	2.14	4.51	1.48	-	-
BD99-1-BZ06	61.10	32.35	314.14-314.59	203.90	2.15	6.87	2.21	1	1
BD99-1-BZ07	59.52	34.27	389.80-390.30	197.10	2.07	4.12	1.29	-	-
BD99-1-BZ08	60.93	32.38	444.25-444.83	206.30	2.18	7.46	2.40	1	-
BD99-1-BZ09	60.42	32.92	455.12-455.80	204.70	2.17	6.38	2.04	5	-
BD99-1-BZ10	60.48	33.52	225.80-228.70	205.30	2.13	5.20	1.63	-	-
BD99-1-BZ11	60.58	32.50	225.80-228.70	199.10	2.12	5.89	1.90	-	-
BD99-1-BZ12	60.20	30.40	237.26-237.66	182.90	2.11	5.30	1.84	-	-
BD99-2-BZ13	61.38	33.20	362.12-362.68	209.90	2.14	7.26	2.27	-	-
BD99-2-BZ14	61.33	31.45	365.48-365.88	200.80	2.16	4.81	1.58	-	-
BD99-1-BZ15	60.78	30.83	389.80-390.30	189.20	2.11	3.24	1.10	-	-
BD99-1-BZ16	62.97	32.65	323.12-323.71	215.50	2.12	6.97	2.15	-	-

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนของตัวอย่างเกลือหินในงานวิจัยนี้ (ต่อ)

Specimen No.	Average Diameter	Average Thickness	Depth	Weight	Density	Failure Load	Brazilian Tensile Strength, σ_B	Inclusions Determined by Visual Inspection (%)	
	(mm)	(mm)	(m)	(g)	(g/cc)	(kN)	(MPa)	Anhydrite	Clay
BD99-2-BZ17	61.00	31.85	326.39-326.44	198.40	2.13	4.71	1.54	-	-
BD99-2-BZ18	61.22	35.23	362.12-362.68	222.60	2.15	6.67	1.97	-	-
BD99-1-BZ19	60.50	33.60	364.92-365.48	205.00	2.12	5.89	1.84	-	-
BD99-1-BZ20	60.42	32.63	389.80-390.30	198.00	2.12	4.41	1.42	-	-
BD99-1-BZ21	61.05	31.55	435.60-438.70	194.80	2.11	4.41	1.46	-	-
BD99-1-BZ22	60.98	32.70	435.60-438.70	200.70	2.10	4.12	1.31	-	1
BD99-1-BZ23	60.93	31.98	314.14-314.59	198.90	2.13	5.10	1.66	-	1
BD99-1-BZ24	62.92	34.82	323.12-323.71	229.00	2.11	6.67	1.94	1	-
BD99-2-BZ25	61.25	33.95	361.56-362.12	215.30	2.15	5.30	1.62	-	-
BD99-2-BZ26	61.12	32.73	362.12-362.68	207.00	2.15	4.81	1.53	-	1
BD99-2-BZ27	61.02	31.83	362.12-362.68	199.20	2.14	5.98	1.96	-	-
BD99-2-BZ28	61.10	31.87	362.12-362.68	199.60	2.14	7.26	2.37	-	1
BD99-2-BZ29	60.30	33.12	364.42-365.48	202.00	2.14	5.20	1.66	-	-
BD99-2-BZ30	60.42	32.08	365.91-366.07	197.00	2.14	4.71	1.55	-	-
BD99-2-BZ31	60.45	31.53	365.91-366.07	189.5	2.09	6.38	2.13	-	-
BD99-2-BZ32	60.40	32.23	365.91-366.07	198.8	2.15	5.49	1.79	-	-

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนของตัวอย่างเกลือหินในงานวิจัยนี้ (ต่อ)

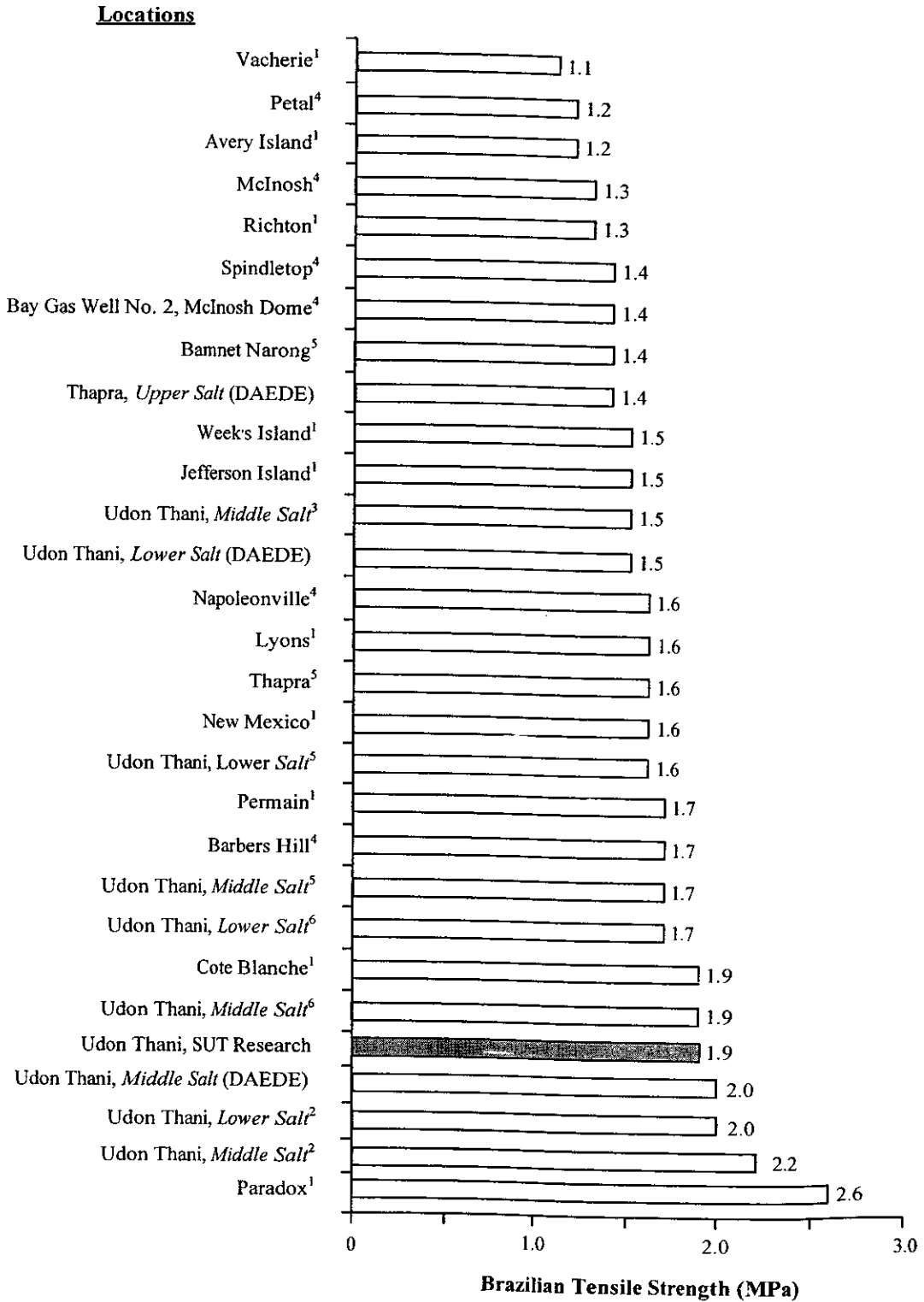
Specimen No.	Average	Average	Depth	Weight	Density	Failure	Brazilian	Inclusions	
	Diameter	Thickness						Determined by	
	D		Visual Inspection						
(mm)	(mm)	(m)	(g)	(g/cc)	(kN)	(MPa)	(%)	Anhy-	Clay
								drite	
BD99-2-BZ33	60.07	33.58	363.80-363.89	203.50	2.14	4.81	1.52	-	-
BD99-1-BZ34	61.13	32.17	396.96-397.54	200.70	2.12	3.53	1.14	-	5
BD99-1-BZ35	60.85	32.00	396.96-397.54	198.00	2.13	3.43	1.12	-	-
BD99-1-BZ36	60.62	32.28	421.44-421.60	196.80	2.11	3.24	1.05	-	-
BD99-1-BZ37	60.62	32.92	421.44-421.60	203.50	2.14	4.22	1.34	-	1
BD99-1-BZ38	60.87	30.55	421.44-421.60	192.00	2.16	4.12	1.41	-	-
BD99-2-BZ39	60.93	33.90	227.80-228.36	213.20	2.16	4.51	1.39	-	5
BD99-1-BZ40	60.95	32.70	314.14-314.59	205.60	2.15	5.89	1.88	-	1
BD99-1-BZ41	60.65	31.45	326.39-326.44	195.00	2.15	5.79	1.93	-	1
BD99-2-BZ42	60.55	31.03	364.92-365.48	192.20	2.15	5.00	1.69	1	-
BD99-1-BZ43	60.77	33.67	396.96-397.54	210.30	2.15	5.10	1.59	1	-
BD99-1-BZ44	60.72	31.73	455.12-455.80	192.70	2.10	5.40	1.78	1	1
BD99-1-BZ45	59.35	31.52	321.51-322.07	188.30	2.16	4.81	1.63	1	1
BD99-1-BZ46	60.02	30.93	321.51-322.07	189.00	2.16	6.08	2.08	-	1
BD99-1-BZ47	59.88	33.92	321.51-322.07	197.90	2.07	5.30	1.66	-	1
BD99-1-BZ48	59.93	33.92	455.12-455.80	206.30	2.16	6.67	2.09	1	1

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนของตัวอย่างเกลือหินในงานวิจัยนี้ (ต่อ)

Specimen No.	Average	Average	Depth	Weight	Density	Failure	Brazilian	Inclusions	
	Diameter	Thickness						Determined by	
	D							Visual Inspection	
(mm)	(mm)	(m)	(g)	(g/cc)	(kN)	(MPa)	Anhy-	Clay	
							drite		
BD99-1-BZ49	60.63	32.60	455.12-455.80	202.00	2.15	4.61	1.48	-	1
BD99-1-BZ50	60.60	33.78	455.12-455.80	209.90	2.15	4.12	1.28	1	1
BD99-1-BZ51	60.77	34.47	320.32-320.64	212.40	2.12	4.61	1.40	-	-
BD99-2-BZ52	60.73	32.47	326.39-326.44	204.60	2.17	7.06	2.28	1	1
BD99-1-BZ53	61.00	31.88	328.78-329.21	201.80	2.16	5.59	1.83	10	0
BD99-1-BZ54	60.65	31.30	290.86-291.07	199.70	2.21	5.00	1.68	20	5
BD99-1-BZ55	60.77	34.38	390.86-391.07	215.00	2.16	4.12	1.25	5	-
BD99-2-BZ56	61.00	34.10	227.80-228.36	215.50	2.16	6.08	1.86	-	-
BD99-2-BZ57	61.00	31.35	328.78-329.21	202.00	2.20	5.98	1.99	5	1
BD99-1-BZ58	60.08	32.83	259.00-259.09	204.80	2.20	7.85	2.53	20	-
BD99-1-BZ59	60.43	30.30	259.00-259.09	195.50	2.25	5.98	2.08	60	-
BD99-1-BZ60	60.43	32.78	320.32-320.64	211.20	2.25	5.40	1.73	10	-
BD99-1-BZ61	60.37	33.50	313.60-313.67	209.50	2.18	6.87	2.16	10	5
BD99-1-BZ62	61.00	31.33	316.13-316.30	242.40	2.65	15.01	4.99	99	-
BD99-1-BZ63	60.45	31.80	316.13-316.30	241.50	2.65	10.99	3.64	95	-
BD99-1-BZ64	60.68	32.07	316.13-316.30	246.70	2.66	9.22	3.01	95	-

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนของตัวอย่างเกลือหินในงานวิจัยนี้ (ต่อ)

Specimen No.	Average Diameter	Average Thickness	Depth	Weight	Density	Failure Load	Brazilian Tensile Strength, σ_B (MPa)	Inclusions Determined by Visual Inspection (%)	
	D (mm)	(mm)						(m)	(g)
	BD99-1-BZ65	60.87	31.82	316.13-316.60	243.00	2.62	10.30	3.38	95
BD99-1-BZ66	61.08	34.45	390.86-391.07	247.00	2.45	8.93	2.70	80	20
BD99-1-BZ67	60.75	33.58	257.50-258.55	216.30	2.22	5.69	1.77	20	-
BD99-1-BZ68	60.75	28.35	257.50-258.55	190.00	2.31	6.57	2.43	90	5
BD99-1-BZ69	60.68	28.25	259.85-260.02	185.10	2.26	6.18	2.29	20	-
BD99-1-BZ70	60.75	30.23	259.85-260.02	203.80	2.32	5.59	1.94	10	80
BD99-1-BZ71	60.43	32.97	259.85-260.02	207.80	2.20	6.18	1.97	20	-
BD99-1-BZ72	60.45	28.13	314.94-315.10	172.60	2.14	4.51	1.69	10	-
BD99-1-BZ73	59.85	28.27	314.94-315.11	171.20	2.15	5.79	2.18	1	-
BD99-1-BZ74	60.57	33.82	314.94-315.12	216.10	2.22	4.12	1.28	1	-
BD99-1-BZ75	60.35	25.82	314.94-315.13	158.30	2.14	6.08	2.48	30	-
BD99-1-BZ76	61.28	30.33	227.26-227.86	189.90	2.12	6.77	2.32	10	-
Average Brazilian Tensile Strength						1.97 ± 0.73 MPa			



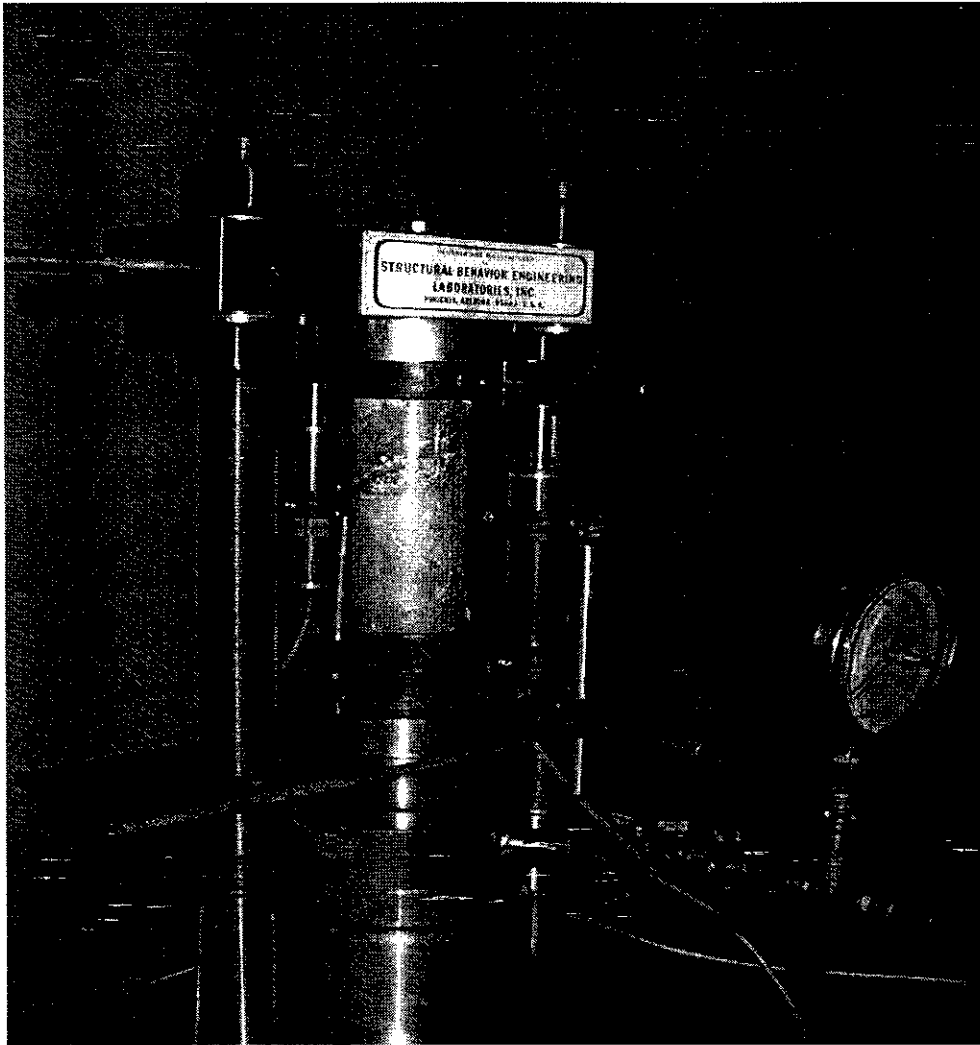
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าความต้านแรงดึงของตัวอย่างเกลือหินที่ได้จากการทดสอบสำหรับเกลือหินในงานวิจัยนี้ และเกลือหินในต่างประเทศ (ข้อมูลแหล่งอื่นนำมาจาก ¹Hansen et al., 1984; ²Boontongloan, 2000; ³Wetchasat, 2002; ⁴DeVries et al., 2002; ⁵Fuenkajorn and Jandakaew, 2003 และ ⁶Phueakphum, 2003)

ของเกลือหินจากทั้งในและต่างประเทศ ทั้งนี้ผลการทดสอบมีค่าความต้านแรงดึงใกล้เคียงกับผลการวิจัยของ Wetchasat (2002); Fuenkajorn et al. (2003) และ Fuenkajorn and Jandakaew (2003) ที่ใช้เกลือหินจากแหล่งเดียวกัน และเมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านแรงดึงของตัวอย่างเกลือหินกับแหล่งอื่น ๆ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 1.1 ถึง 2.6 MPa แล้วพบว่าความต้านแรงดึงมีค่าอยู่ในระดับปานกลาง

จากการสังเกตในขณะทดสอบพบว่ารอยแตกจะเกิดขึ้นในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางซึ่งเป็นแนวเดียวกับทิศทางแรงกด ความผันแปรของความต้านแรงดึงแบบบราซิลเลียนเท่ากับ 0.73 MPa (30%) ทั้งนี้ถือว่ามีความผันแปรค่อนข้างสูง อาจมีสาเหตุมาจากการกระจายตัวของสิ่งเจือปนที่ไม่สม่ำเสมอในเกลือหิน ซึ่งพบว่าตัวอย่างเกลือหินที่มีแร่แอนไฮไดรต์เจือปนในปริมาณมากจะมีค่ากำลังรับแรงดึงสูงขึ้น ผลที่ได้จะตรงข้ามกับตัวอย่างเกลือหินที่มีแร่ดินเจือปนอยู่ โดยพบว่าถ้าปริมาณของแร่ดินมากขึ้น ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดจะลดลง นอกจากนั้นผลึกของเกลือหินที่มีขนาดใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร โดยผลึกมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ $7 \times 7 \times 7$ มิลลิเมตรและบางตัวอย่างมีขนาดใหญ่ถึง $10 \times 10 \times 10$ มิลลิเมตร ความต้านแรงดึงที่มีค่าสูงส่วนใหญ่จะมีการแตกผากกลางผลึกเกลือตามทิศทางแรงกด ส่วนค่าแรงดึงที่มีค่าต่ำจะแตกตามแนวรอยต่อของผลึกเกลือหิน ซึ่งบ่งบอกว่าค่าแรงดึงเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวในเม็ดผลึกมีค่ามากกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดผลึก ซึ่งข้อสรุปนี้สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Hardy (1996)

4.3 การทดสอบแรงกดในแกนเดียวแบบวัฏจักร

การทดสอบแรงกดในแกนเดียวแบบวัฏจักรมีวัตถุประสงค์เพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของเกลือหิน เป็นการทดสอบในลักษณะที่ตัวอย่างเกลือหินอยู่ภายใต้แรงกดขึ้น-ลงอย่างต่อเนื่อง ขนาดของแรงที่กระทำมีค่าน้อยกว่าค่าความต้านแรงกดสูงสุด การทดสอบโดยให้แรงกดเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างเป็นระบบด้วยอัตราคงที่และมีข้อปฏิบัติคล้ายกับมาตรฐาน ASTM D2938 วิธีการทดสอบใช้เครื่องกดทดสอบรุ่น SBEL PLT-75 (รูปที่ 4.8) เครื่องจะให้แรงกดในแนวแกนของตัวอย่างเกลือหินจนถึงแรงกดสูงสุดที่กำหนดไว้ก่อนและลดแรงกดให้เหลือค่าต่ำสุดตามที่กำหนดไว้ในแต่ละตัวอย่าง ขนาดของแรงกดในแกนเดียวแต่ละรอบวัฏจักรมีค่าอยู่ระหว่าง 45 ถึง 50% ของค่าความต้านแรงกดสูงสุด (คำนวณได้จากการทดสอบแรงกดในแกนเดียว) และลดแรงกดลงต่ำสุดอยู่ที่ประมาณ 1.5 MPa การทดสอบจะกระทำซ้ำอย่างต่อเนื่องด้วยความถี่ 0.03 Hz เป็นจำนวนทั้งหมด 25 ถึง 50 รอบ โดยให้แรงกดสูงสุดและลดแรงกดให้เหลือค่าต่ำ ในระหว่างทำการทดสอบจะทำการบันทึกค่าแรงกด เวลา และระยะการยุบตัวของตัวอย่างเกลือหินตามแนวแกนในแต่ละรอบการกด สำหรับค่าแรงกดสูงสุดที่บันทึกได้จะเป็นหน่วยของแรง ซึ่งสามารถนำมาคำนวณเป็นความเค้นในแนวแกนได้



รูปที่ 4.8 การทดสอบแรงกดในแกนเดียวแบบวัฏจักร ตัวอย่างเกลือหินถูกกดด้วยแรงกดเพิ่มขึ้นและลดลงตามแนวแกนอย่างเป็นระบบด้วยอัตราคงที่

การคำนวณค่าความเค้นและความเครียดจะเป็นไปตามสมการที่ใช้ในการทดสอบความต้านแรงกดในแกนเดียว การคำนวณสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E) จะใช้ผลต่างของความเค้น ($\Delta\sigma$) ในช่วงแรกของการลดแรงกดในแต่ละรอบวัฏจักรแล้วนำมาหารด้วยผลต่างของความเครียด ($\Delta\varepsilon$) ที่เกิดจากความเค้นดังกล่าว ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$E = \Delta\sigma/\Delta\varepsilon \quad (4.5)$$

ผลการทดสอบแรงกดแบบวัฏจักรได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.3 และได้นำมาแสดงความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดสะสมที่เพิ่มขึ้นในแต่ละรอบของแรงกดของตัวอย่างเกลือหินในภาคผนวก ข (รูปที่ ข-1 ถึง ข-14) ซึ่งจะมีการให้แรงกดแบบวัฏจักรประมาณ 25-50 รอบ โดยตัวอย่างเกลือหินที่นำมาทดสอบมีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเฉลี่ยและความผันแปรเท่ากับ 24.92 ± 4.37 MPa (3613 ± 634 psi) รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะของตัวอย่างเกลือหินบางส่วนก่อนและหลังทำการทดสอบ โดยตัวอย่างเกลือหินที่ไม่มีสิ่งเจือปนจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นต่ำกว่าตัวอย่างเกลือหินที่มีสิ่งเจือปนแทรกอยู่ ค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของตัวอย่างเกลือหินสำหรับงานวิจัยนี้มีค่าน้อยกว่าผลการทดสอบที่ได้จากแหล่งอื่น (รูปที่ 4.10) อาจเนื่องจากตัวอย่างเกลือหินมีความหลากหลายทางด้านซิลิกาวิทยาและแร่วิทยาทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่ได้มีค่าแตกต่างกัน

4.4 การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียว

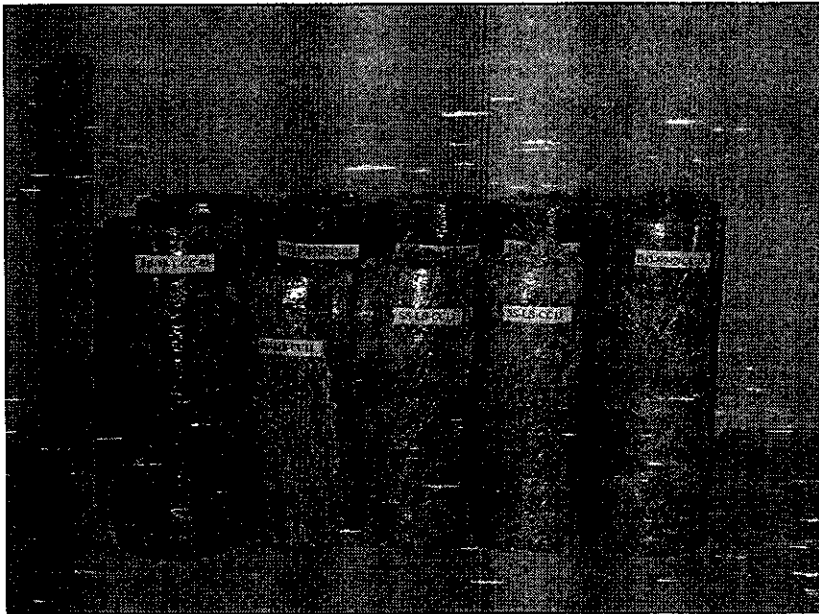
วัตถุประสงค์ของการทดสอบนี้คือ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนรูปตามกาลเวลา (Time-dependent deformation) ของแท่งตัวอย่างเกลือหินด้วยการให้แรงกดคงที่ในแนวแกน ผลลัพธ์ที่ได้จะนำมาใช้ในการหาค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับความหนืดเชิงพลาสติก (Viscoplasticity) ของเกลือหิน วิธีการและขั้นตอนการทดสอบจะเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานสากล ASTM D4405 ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบนี้ได้คัดเลือกจากหลุมเจาะสำรวจเลขที่ BD99-1 และ BD99-2 จากแอ่งสกลนครและหลุมเจาะเลขที่ SS-1 จากแอ่งโคราช โดยสัดส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D ratio) เท่ากับ 2.5 ทำการทดสอบทั้งหมด 10 ตัวอย่าง ความเค้นคงที่ในแนวแกนผันแปรตั้งแต่ 12, 16.25, 18.04 จนถึง 19.50 MPa ใช้เวลาการทดสอบประมาณ 15-30 วันต่อหนึ่งตัวอย่าง โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้เครื่องกดทดสอบแบบให้แรงกดคงที่ในแนวแกน (Consolidation machine) มีความสามารถในการให้แรงถึง 2 tons ตัวอย่างเกลือหินจะรับแรงกดคงที่จนกระทั่งมีการยุบตัวครบระยะเวลาที่กำหนดดังแสดงในรูปที่ 4.11 ระหว่างทำการทดสอบจะมีการบันทึกค่าการยุบตัวในแนวแกนต่อเวลาอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องวัดแบบดิจิตอลที่มีความละเอียด 0.001 มิลลิเมตร การบันทึกผลจะทำทุก 1 นาที ในช่วงแรกของการทดสอบ และในที่สุดจะขยายเวลาบันทึกออกไปจนถึงสองครั้งต่อหนึ่งวันหลังจากที่ทดสอบไปแล้ว 10 วัน ค่าความเค้นและความเครียดในแนวแกนสามารถคำนวณได้จากสมการ

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแรงกดในแกนเดียวแบบวัฏจักรของตัวอย่างเกลือหิน

Specimen No.	Average Diameter	Average Length	Density	Depth	Elastic Modulus	Inclusions Determined by Visual Inspection (%)	
	D (mm)	L (mm)	(g/cc)	(m)	E (GPa)	Anhydrite	Clay
BD99-2-CC01	61.25	151.25	2.16	362.12-362.68	21.30	-	-
BD99-1-CC02	60.75	150.33	2.18	228.10-228.30	24.14	5	30
BD99-2-CC03	61.12	154.29	2.22	328.78-329.21	26.39	20	-
BD99-1-CC04	60.87	150.01	2.23	313.60-313.87	20.00	5	1
BD99-2-CC05	60.89	150.07	2.26	228.71-228.88	22.92	10	1
BD99-1-CC06	60.78	149.87	2.23	315.22-315.76	23.61	10	1
BD99-1-CC07	60.75	149.73	2.28	315.76-316.02	23.16	10	1
BD99-1-CC08	60.53	150.03	2.21	259.58-259.86	22.96	5	1
BD99-1-CC09	60.48	147.60	2.17	225.80-228.70	21.23	-	-
BD99-1-CC10	60.68	150.47	2.17	326.51-327.10	21.55	-	1
SS-1-CC11	47.43	121.13	1.12	277.20-277.38	29.75	50	1
SS-1-CC12	47.40	131.87	2.94	266.81-267.0	25.08	40	-
SS-1-CC13	47.43	129.29	2.70	385.45-385.75	32.33	80	-
SS-1-CC14	47.45	131.68	2.34	351.0-351.25	34.52	100	-
Average Elastic Modulus					24.92 ± 4.37 MPa		

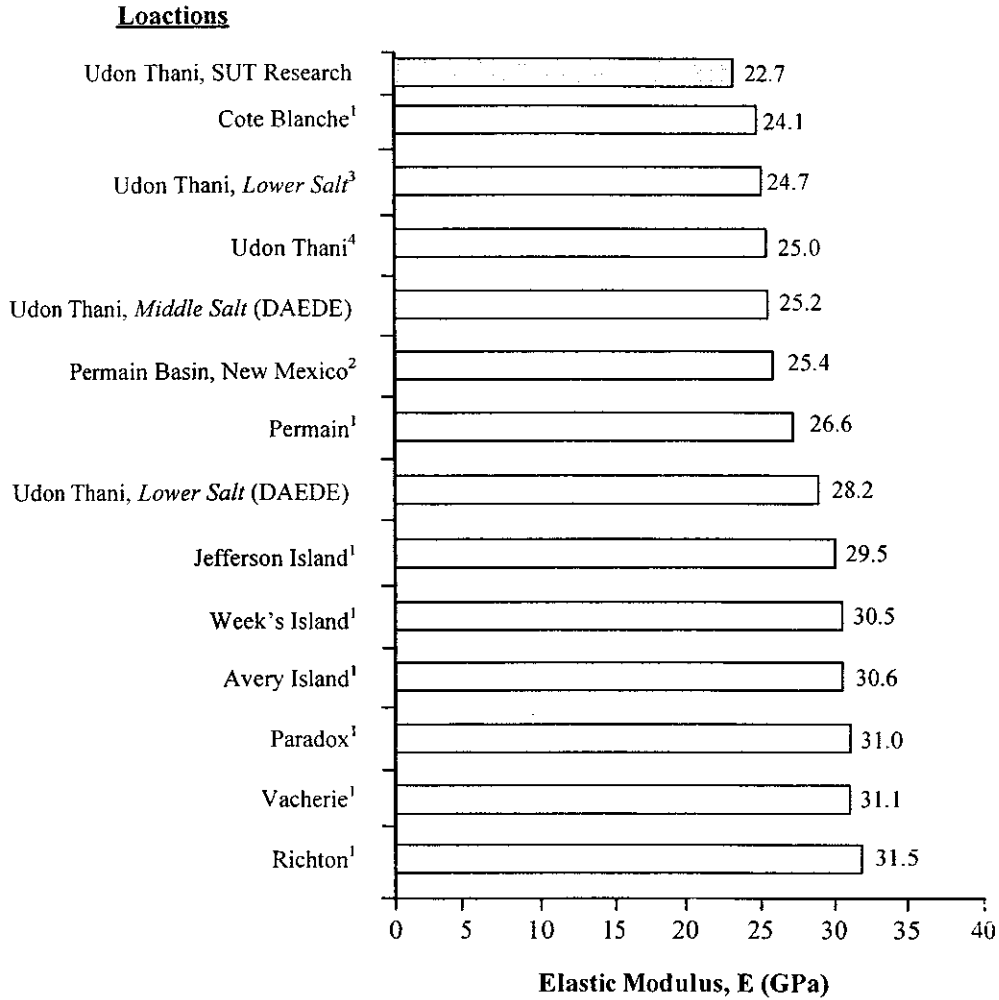


(a)



(b)

รูปที่ 4.9 ลักษณะของตัวอย่างเกลือหินบางส่วนก่อน (a) และหลัง (b) ทำการทดสอบแรงกดในแกนเดียวแบบวัฏจักร



รูปที่ 4.10 ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นจากผลการทดสอบแรงกดในแกนเดียวแบบวัฏจักร สำหรับตัวอย่างเกลือหินในงานวิจัยนี้ และเกลือหินในต่างประเทศ (ข้อมูลแหล่งอื่น นำมาจาก ¹Hansen et al., 1984; ²Fuenkajorn and Daeman, 1988; ³Wetchasat, 2002 และ ⁴Fuenkajorn and Jandakaew, 2003)



รูปที่ 4.11 การทดสอบการเคลื่อนไหลดินแกนเดี่ยว แท่งตัวอย่างเกลือหินอยู่ภายใต้เครื่องกด
ที่ให้แรงกดคงที่ในแนวแกน

$$\sigma_{\text{axial}} = P/A \quad (4.6)$$

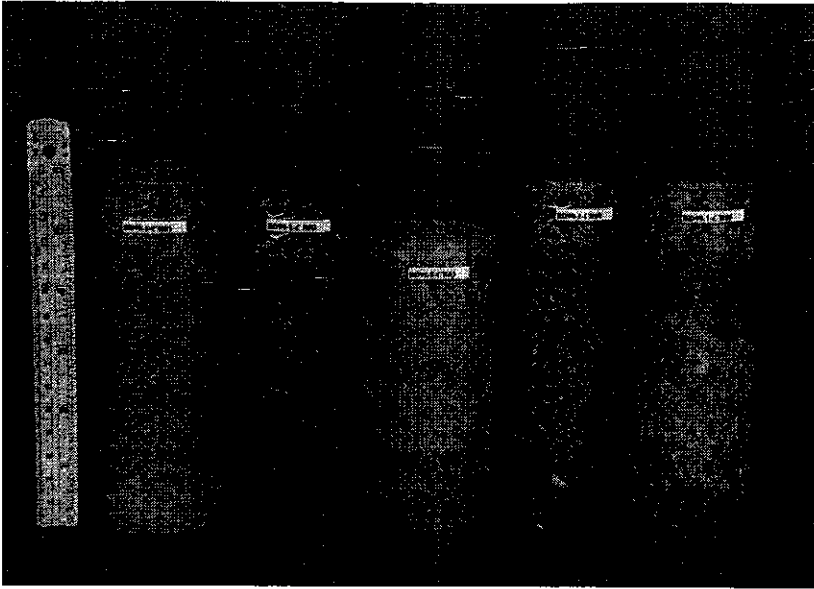
$$\epsilon_{\text{axial}} = \Delta L/L \quad (4.7)$$

โดยที่ σ_{axial} คือ ความเค้นในแนวแกน P คือ แรงกดในแนวแกน A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างเกลือหิน ϵ_{axial} คือ ความเครียดในแนวแกน ΔL คือ การเปลี่ยนแปลงความยาวของตัวอย่างหิน (หรือการยุบตัวในแนวแกน) และ L คือ ความยาวของตัวอย่างเกลือหินเดิมก่อนการกด

รูปที่ 4.12 แสดงลักษณะของตัวอย่างเกลือหินบางส่วนก่อนและหลังทำการทดสอบ โดยผลการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 4.13 เส้นกราฟแต่ละเส้นจะเป็นตัวแทนของความเค้นคงที่ในแนวแกนที่ผันแปรตั้งแต่ 12 ถึง 19.50 MPa จากกราฟค่าความเครียดที่เกิดขึ้นทันที (Instantaneous strain, ϵ_i) ของตัวอย่างเกลือหินมีค่าตั้งแต่ 3.0×10^{-3} ถึง 18×10^{-3} และอัตราความเครียดในช่วง Steady state (ϵ_p) มีค่าตั้งแต่ $130 \times 10^{-6} \text{ day}^{-1}$ ถึง $1500 \times 10^{-6} \text{ day}^{-1}$ ผลการทดสอบระบุว่าความเค้นคงที่ในแนวแกนที่มีค่าสูงสุดจะทำให้เกลือหินมีการเปลี่ยนรูปได้มากที่สุด (ความเครียดสูงสุด) จากการเปรียบเทียบอัตราความเครียดในช่วง Steady state กับผลการทดสอบของ Fuenkajorn and Daemen (1988) ที่ทดสอบได้เท่ากับ $408 \times 10^{-6} \text{ day}^{-1}$ พบว่ามีค่าเฉลี่ยสูงกว่าคือ $663 \times 10^{-6} \text{ day}^{-1}$ ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือหินภายใต้ความเค้นคงที่ต่าง ๆ กัน ค่าความเหน็ดเชิงพลาสติกโดยเฉลี่ยและความผันแปรเท่ากับ $18.95 \pm 23.25 \text{ GPa} \cdot \text{Day}$ โดยตัวอย่างหมายเลข BD-99-2-CR11 มีแร่แอนไฮไดรต์เจือปนอยู่ถึง 99% ซึ่งได้นำมาทดสอบเพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวอย่างเกลือหินที่มีแร่แอนไฮไดรต์กับค่าความเหน็ดเชิงพลาสติกพบว่าค่าความเหน็ดเชิงพลาสติกมีค่าสูงเนื่องจากตัวอย่างมีการเปลี่ยนรูปค่อนข้างน้อยเพราะแร่แอนไฮไดรต์ที่แทรกตัวอยู่ระหว่างผลึกเกลือทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกสูงขึ้น ซึ่งตรงข้ามกับปริมาณของแร่ดิน โดยเมื่อมีปริมาณแร่ดินเพิ่มขึ้นค่าความเหน็ดเชิงพลาสติกมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากมีการเปลี่ยนรูปค่อนข้างมาก นอกจากนั้นแล้วถ้าผลึกเกลือมีขนาดใหญ่ ค่าความเหน็ดเชิงพลาสติกจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเช่นกัน

4.5 การวิเคราะห์เชิงเคมี

วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์เชิงเคมีคือ เพื่อตรวจสอบชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในตัวอย่างเกลือหิน เกลือหิน 10 ตัวอย่างได้ถูกคัดสรรโดยมีปริมาณของสารประกอบแร่ที่หลากหลายและนำมาศึกษาปริมาณและชนิดของสิ่งเจือปนที่มีอยู่ การตรวจสอบใช้เครื่องมือวิเคราะห์ X-ray Diffractometer Power (XRD) รุ่น D5005 (รูปที่ 4.14) ผลการศึกษาแสดงไว้ในตารางที่ 4.5 ระบุว่าตัวอย่างเกลือหินที่เลือกมามีปริมาณแร่เฮไลต์ (NaCl) ระหว่างร้อยละ 58.5 ถึงร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก และมีสิ่งเจือปนที่เป็นแร่แอนไฮไดรต์ (CaSO_4 , Anhydrite) ร้อยละ 2.1 ถึงร้อยละ 36.9 โดยน้ำหนัก

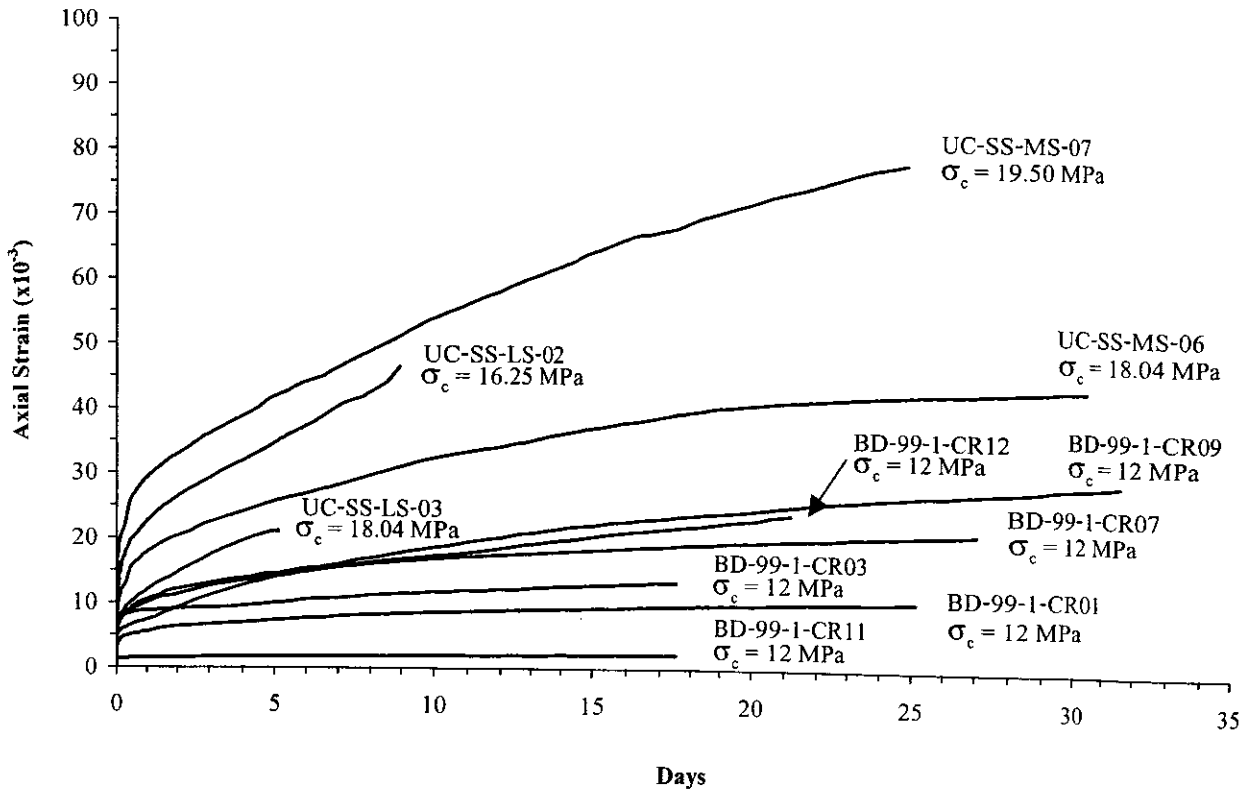


(a)



(b)

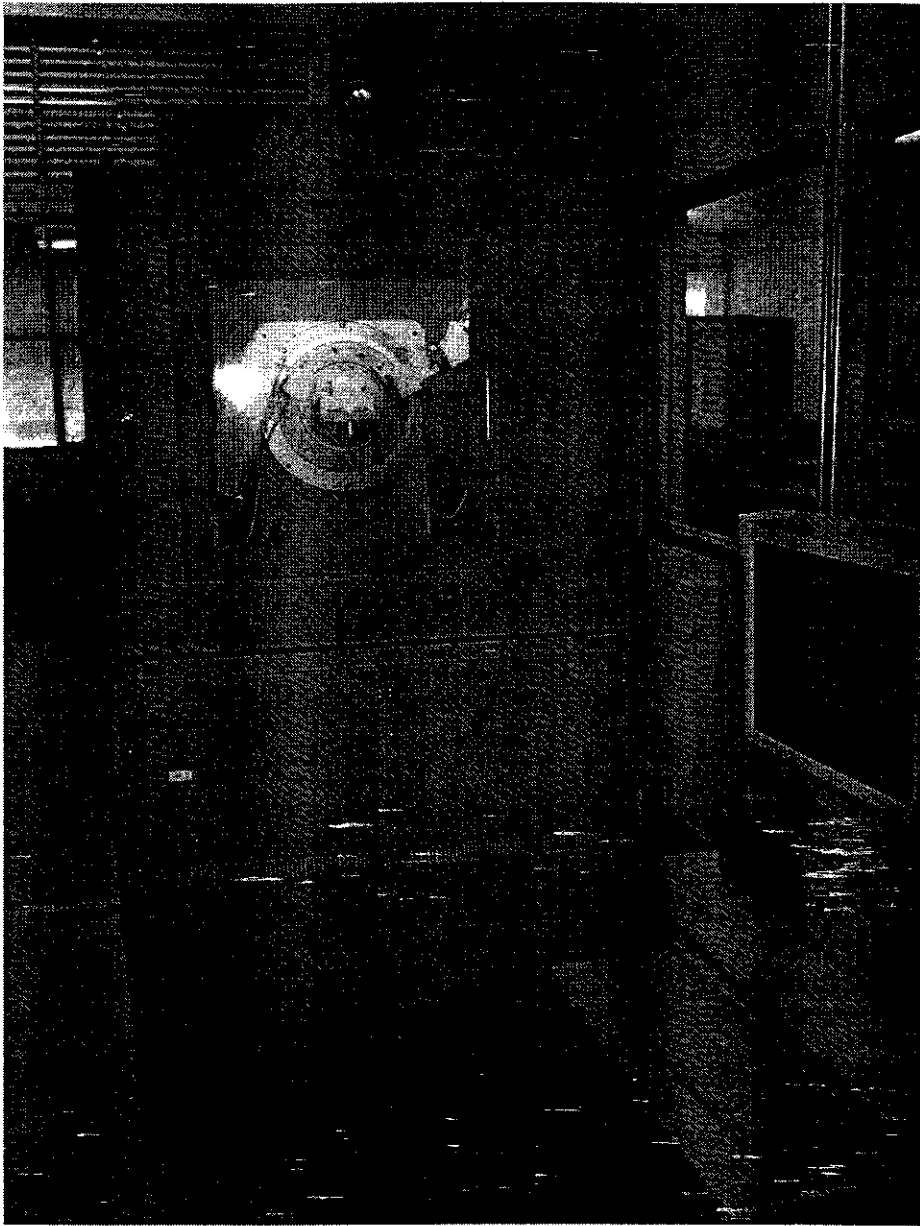
รูปที่ 4.12 ลักษณะของตัวอย่างเกลือหินบางส่วนก่อน (a) และหลัง (b) ทำการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียว



รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือหินโดยมีความเค้นคงที่
ในแนวแกนที่ผันแปรตั้งแต่ 12, 16.25, 18.04 และ 19.50 MPa ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือหินภายใต้ความเค้นคงที่
ในแนวแกนต่าง ๆ กัน

Specimen No.	Average diameter	Average length	Depth	Density	Constant axial stress	Octahedral Shear Stresses	Visco-plasticity V_4	Inclusions Determined by Visual Inspection (%)	
	D (mm)	L (mm)			σ_{axial} (MPa)	τ_{oct} (MPa)		(GPa·Day)	Anhydrite
BD99-1-CR01	60.50	149.30	237.26-237.66	2.18	12	5.66	30.07	-	-
BD99-2-CR03	63.17	123.60	323.12-323.71	2.16	12	5.66	21.98	-	-
BD99-1-CR07	60.72	150.27	389.80-390.30	2.19	12	5.66	17.02	-	-
BD99-1-CR09	60.18	152.17	455.12-455.80	2.18	12	5.66	10	1	20
BD99-2-CR11	60.97	120.13	229.94-230.07	2.71	12	5.66	80	99	-
BD99-1-CR12	60.75	150.87	455.12-455.80	2.21	12	5.66	7.27	1	30
SS-1-CR02	47.55	125.05	334.20-334.35	2.12	16.25	7.66	1.89	-	-
SS-1-CR03	47.65	125.13	353.00-353.17	2.18	18.04	8.50	3.01	5	10
SS-1-CR06	47.21	107.77	263.58-263.75	2.18	18.04	8.50	14.03	-	1
SS-1-CR07	47.21	107.97	262.70-262.85	2.17	19.50	9.19	4.23	-	1



รูปที่ 4.14 เครื่องมือวิเคราะห์สารประกอบ X-ray Diffractometer Power (XRD) รุ่น D5005

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์เชิงเคมีของตัวอย่างเกลือหินชั้นกลางของแอ่งสกลนคร

Specimen No.	Depth (m)	Constituents in weight percent		
		Halite	Anhydrite	Clay minerals
BD99-1-BZ42	364.92-365.48	100	-	-
BD99-1-BZ46	321.51-322.07	100	-	-
BD99-1-BZ47	321.51-322.07	100	-	-
BD99-1-BZ52	326.39-326.44	95.5	4.5	-
BD99-1-BZ53	328.78-329.21	82.8	17.2	-
BD99-1-BZ56	277.80-228.36	97.9	2.1	-
BD99-1-BZ58	259.00-259.09	68.2	31.8	-
BD99-1-BZ59	259.00-259.09	58.5	34.4	7.1
BD99-1-BZ67	257.50-258.55	63.1	36.9	-
BD99-1-BZ68	257.50-258.55	75.8	24.2	-

สำหรับแร่ดิน (Clay minerals) พบจากตัวอย่างหมายเลข BD-99-1-BZ59 เพียงตัวอย่างเดียว ซึ่งมีปริมาณร้อยละ 7.1 โดยน้ำหนัก ผลการตรวจสอบด้วย XRD สำหรับแต่ละตัวอย่างได้ให้ไว้ในภาคผนวก ค (รูปที่ ค-1 ถึงรูปที่ ค-10) ผลของการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่า สิ่งเจือปนส่วนใหญ่ของเกลือหินที่นำมาทดสอบคือ แร่แอนไฮไดรต์ ส่วนแร่ดินจะพบอยู่เพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามข้อสรุปนี้มิได้หมายความว่าเกลือหินชั้นกลางในอ่างสกลนครจะมีสิ่งเจือปนเพียง 2 ชนิดเท่านั้น แต่หมายความว่าเกลือหินที่นำมาทดสอบในงานวิจัยนี้มีสิ่งเจือปนที่เป็นแร่แอนไฮไดรต์และแร่ดินเป็นหลัก

บทที่ 5

การศึกษาความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ที่ได้รวบรวมจากเอกสารอ้างอิงประกอบกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เปรียบเทียบกับลักษณะเชิงเรขาคณิตของเกลือหิน คุณสมบัติที่นำมาศึกษาประกอบด้วย ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิลเลียน (σ_B) ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุด (σ_C) ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E) และค่าความเหนียวเชิงพลาสติก (η) โดยคุณสมบัติเหล่านี้จะนำมาสัมพันธ์กับขนาดของผลึกเกลือหิน ทิศทางการวางตัวของผลึกต่อแรงที่กระทำ และปริมาณแร่ดินและแร่แอนไฮไดรต์

5.1 การหาปริมาณสิ่งเจือปนในตัวอย่างเกลือหิน

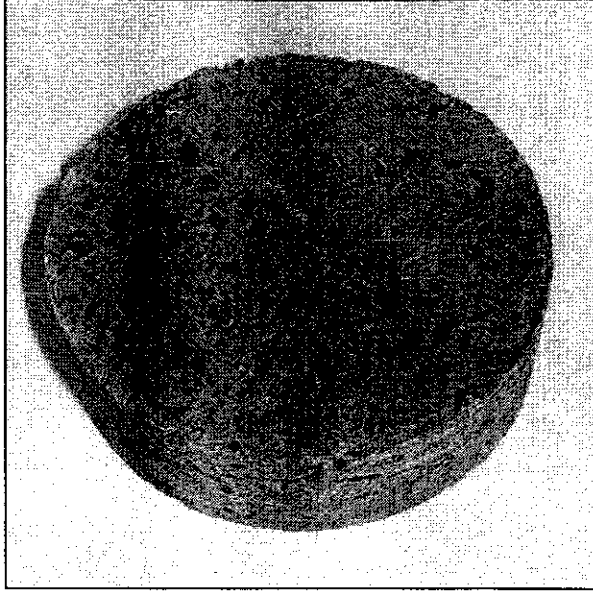
ปริมาณสิ่งเจือปนในตัวอย่างเกลือหินที่นำมาทดสอบสามารถวัดได้โดยการนำตัวอย่างเกลือหินที่ได้จากการทดสอบเชิงกลศาสตร์ในแต่ละวิธีมาทำการชั่งน้ำหนักและทำการละลายตัวอย่างทั้งหมด โดยใช้น้ำจืดเป็นตัวทำละลาย การละลายจะทำซ้ำหลายครั้งจนกระทั่งแร่เฮไลต์หมดไปจากตัวอย่าง หลังจากนั้นนำตัวอย่างที่เหลืออยู่มากรองด้วยผ้าขาวและกระดาษกรองเบอร์ 42 แล้วปล่อยให้แห้ง จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักของแร่แอนไฮไดรต์และแร่ดินที่เจือปนอยู่ การชั่งวัดมีความละเอียดถึง ± 0.001 กรัม โดยเครื่องชั่งน้ำหนักมาตรฐานของ Mettler Toledo รุ่น PG503-S รูปที่ 5.1 ถึงรูปที่ 5.4 แสดงลักษณะตัวอย่างเกลือหินก่อนทำการละลายและตะกอนของสิ่งเจือปนที่เหลือภายหลังจากการละลาย ผลจากการศึกษานี้จะนำมาเปรียบเทียบกับคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของแต่ละตัวอย่างต่อไป

5.2 ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิลเลียนของเกลือหิน

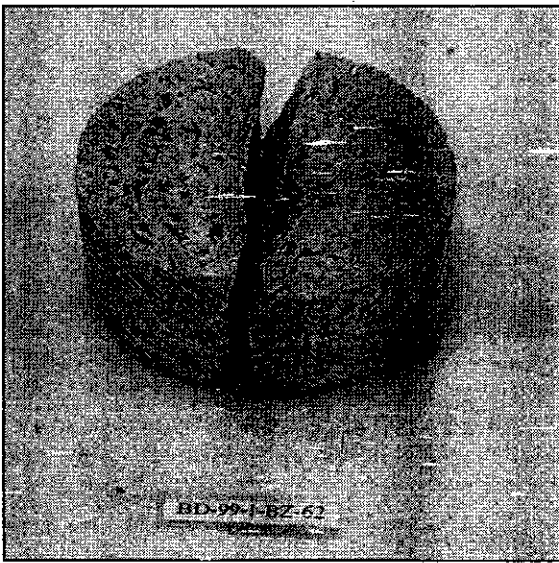
ลักษณะเชิงเรขาคณิตที่ได้นำมาศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิลเลียนของเกลือหินคือ ขนาดของผลึกเกลือ ปริมาณแร่ดินและแร่แอนไฮไดรต์

5.2.1 ผลกระทบของขนาดผลึกเกลือหิน

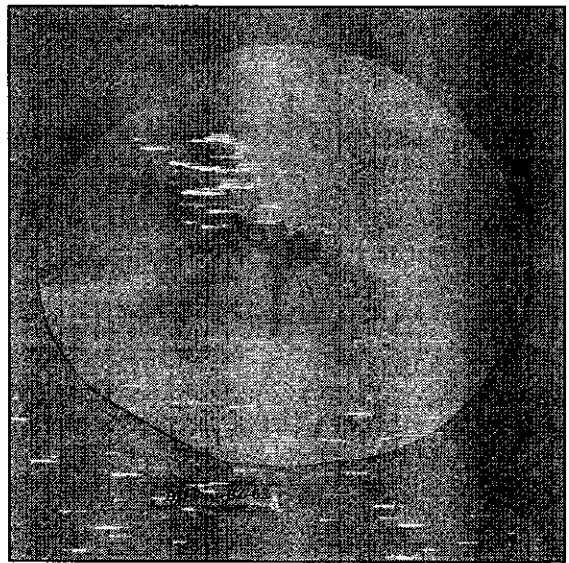
กราฟระหว่างค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดที่นำมาลงจุดเทียบกับขนาดของผลึกเกลือหินบริสุทธิ์ (รูปที่ 5.5) ระบุว่าเกลือหินที่ประกอบด้วยขนาดของผลึกที่เท่ากันสามารถมีค่ากำลังรับแรงดึงที่ต่างกันได้มาก ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่าขนาดของผลึกเกลืออาจไม่ใช่ปัจจัยเดียวที่มีผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด แต่ขนาดและทิศทางการวางตัวของผลึกอาจมีผลต่อลักษณะการแตกของผลึกภายใต้แรงที่กระทำเช่นกัน นอกจากนั้นค่ากำลังรับแรงดึงของผลึกและของรอยต่อระหว่างผลึก



(a)



(b)



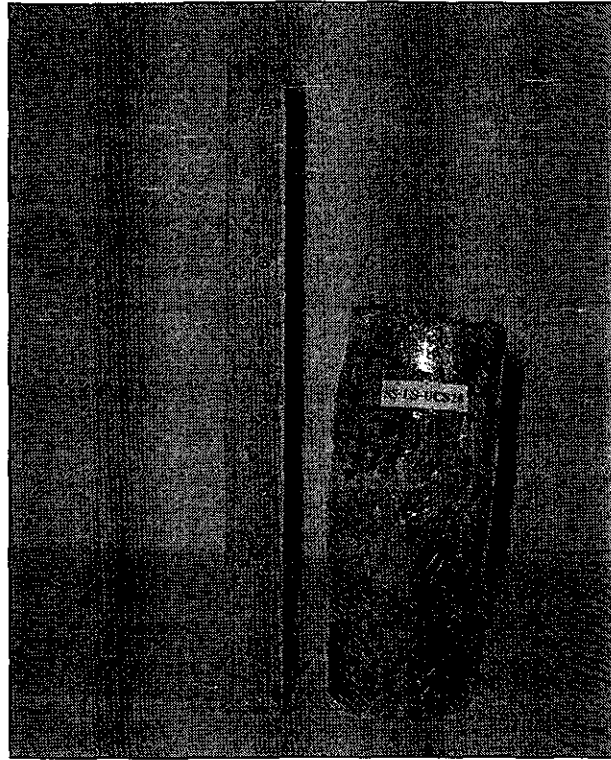
(c)

รูปที่ 5.1 ตัวอย่างเกลือหินที่ได้จากการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิลเลียน

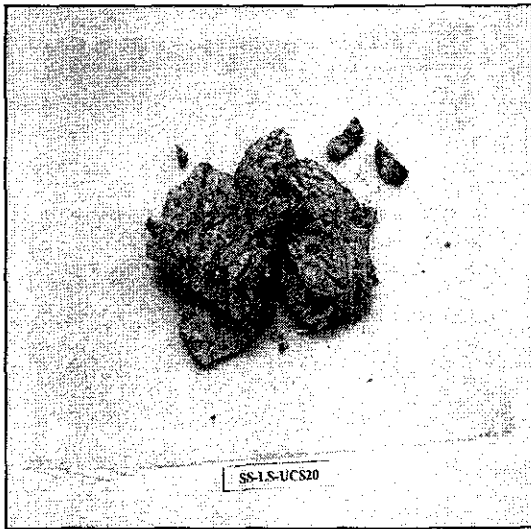
(a) ตัวอย่างเกลือหินก่อนการละลาย

(b) แร่แอนไฮไดรต์ที่เหลือจากการละลาย

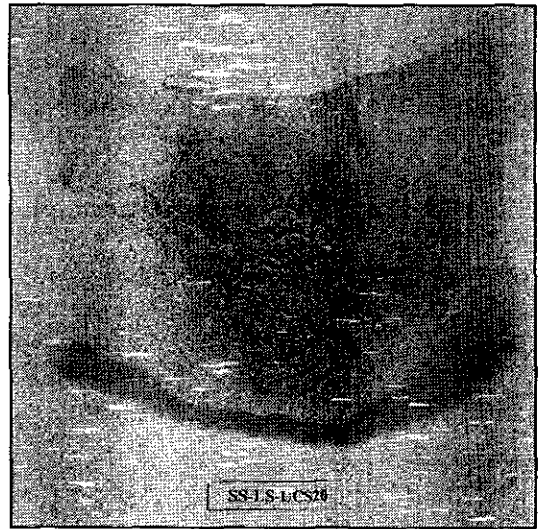
(c) แร่ดินที่เหลือจากการละลาย



(a)



(b)



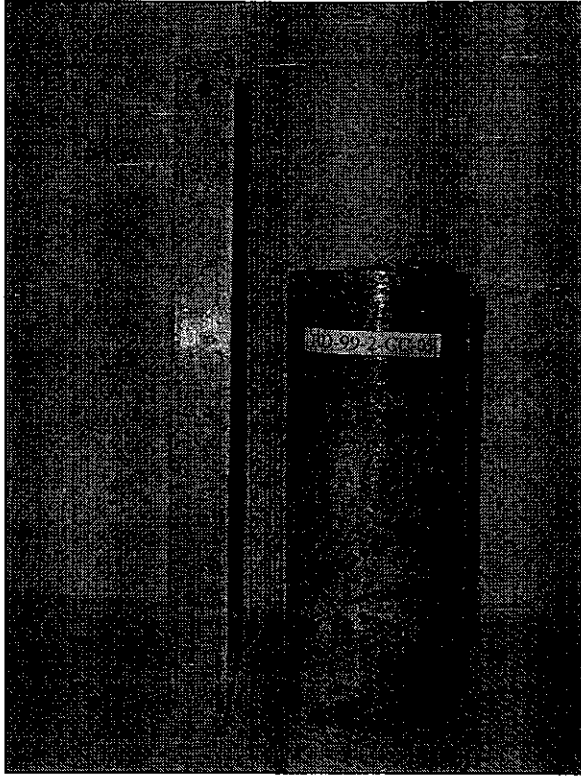
(c)

รูปที่ 5.2 ตัวอย่างเกล็ดหินที่ได้จากการทดสอบค่ากำลังรับแรงกดสูงสุด

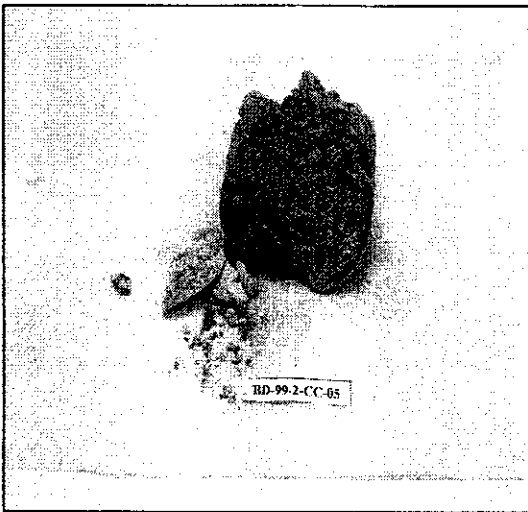
(a) ตัวอย่างเกล็ดหินก่อนการละลาย

(b) แร่แอนไฮไดรต์ที่เหลือจากการละลาย

(c) แร่ดินที่เหลือจากการละลาย



(a)



(b)



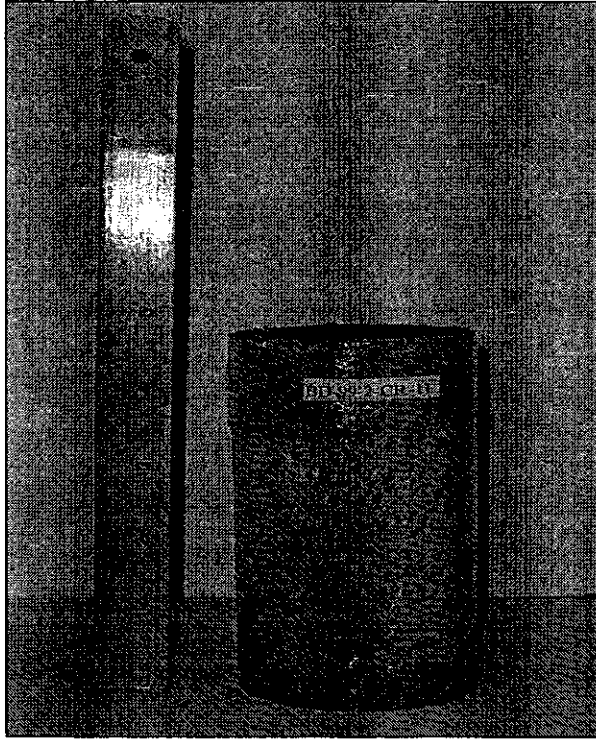
(c)

รูปที่ 5.3 ตัวอย่างเกลือหินที่ได้จากการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ความยึดหยุ่น

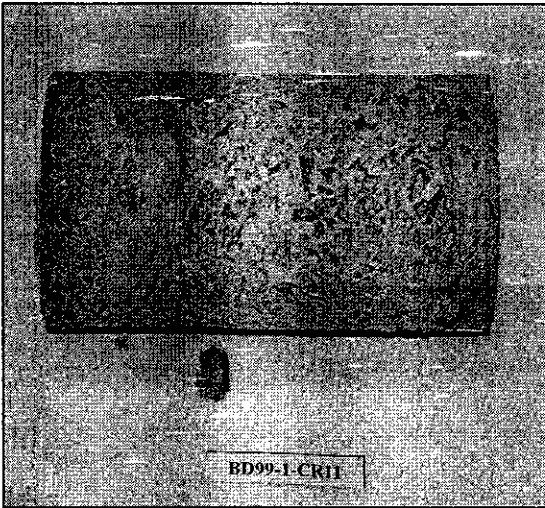
(a) ตัวอย่างเกลือหินก่อนการละลาย

(b) แร่แอนไฮไดรต์ที่เหลือจากการละลาย

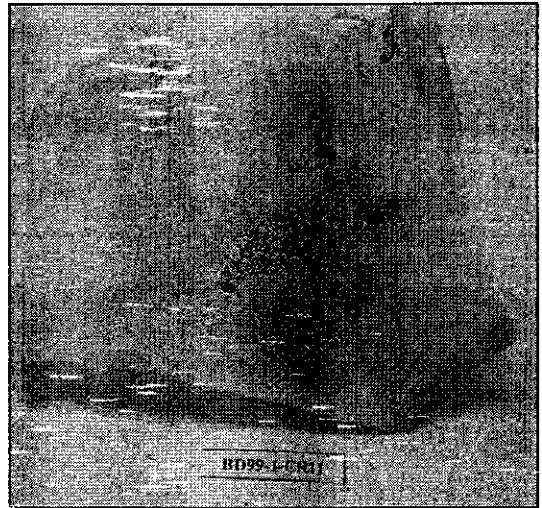
(c) แร่ดินที่เหลือจากการละลาย



(a)



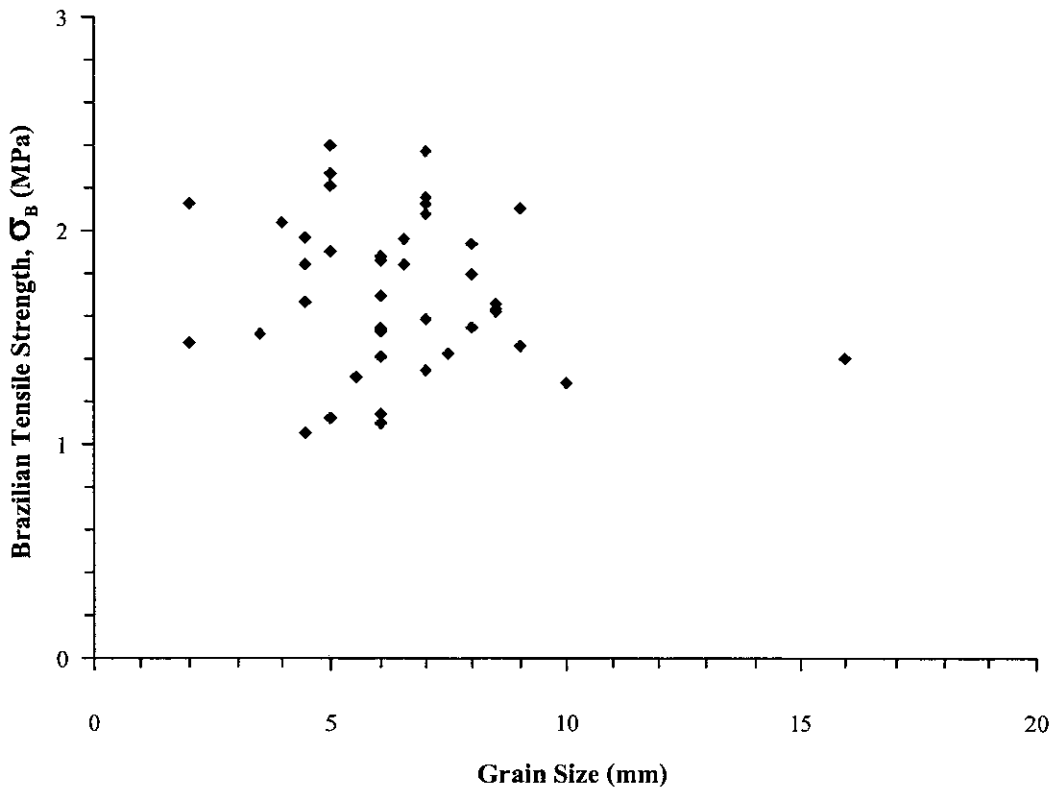
(b)



(c)

รูปที่ 5.4 ตัวอย่างเกลือหินที่ได้จากการทดสอบค่าความเหนียวเชิงพลาสติก

- (a) ตัวอย่างเกลือหินก่อนการละลาย
- (b) แร่แอนไฮไดรต์ที่เหลือจากการละลาย
- (c) แร่ดินที่เหลือจากการละลาย



รูปที่ 5.5 ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดที่ผันแปรกับขนาดของผลึกในตัวอย่างเกลือหินบริสุทธิ์ (Pure Salt)

เกลืออาจมีค่าต่างกัน ดังนั้นการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดกับขนาดของผลึกจึงไม่สามารถวิเคราะห์ได้โดยตรงจำเป็นต้องมีการพิจารณาด้วยว่าลักษณะการแตกของแต่ละตัวอย่างมีลักษณะแบบใด กล่าวคือมีการแตกผ่านผลึกเป็นส่วนใหญ่หรือมีการแตกระหว่างผลึกเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งปรากฏการณ์ที่ต่างกันนี้จะมีผลต่อค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดของตัวอย่างเกลือหินด้วย ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อต่อไป

5.2.2 ลักษณะการแตกของเกลือหิน

การแตกภายใต้แรงดึงแบบบราซิลเลียนสำหรับเกลือหินมี 2 ชนิด คือ การแตกผ่านผลึกหรือแตกแบบ Cleavage Fracturing (รูปที่ 5.6) และการแตกระหว่างรอยต่อผลึกหรือการแตกแบบ Inter-granular Fracturing (รูปที่ 5.7) รูปที่ 5.8 แสดงค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดที่ผันแปรกับลักษณะการแตกของผลึกเกลือแบบแตกระหว่างผลึก จะเห็นได้ว่าการแตกในสองลักษณะนี้มีความสัมพันธ์กัน โดยถ้าปริมาณของการแตกระหว่างผลึกสูงจะส่งผลให้ปริมาณของการแตกผ่านผลึกต่ำลง รูปที่ 5.8 แสดงให้เห็นว่าถ้าเกลือหินมีการแตกระหว่างผลึกมากจะทำให้ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดต่ำลง หรืออีกนัยหนึ่ง ถ้าเกลือหินมีการแตกภายใต้แรงดึงแบบ Cleavage Fracturing เพียงอย่างเดียว ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดจะมีประมาณ 2.05 MPa แต่ถ้าเกลือหินมีการแตกระหว่างรอยต่อผลึกเพียงอย่างเดียว ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดจะเหลือเพียง 1.05 MPa ผลการค้นพบนี้ยังบ่งบอกด้วยว่า การนำค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดที่ทดสอบได้ในห้องปฏิบัติการ ไปใช้ในการออกแบบในภาคสนามอาจจะไม่เป็นไปในเชิงอนุรักษ์ เนื่องจากเกลือหินในภาคสนามมีขนาดใหญ่การแตกภายใต้แรงดึงเกือบทั้งหมดจะเป็นการแตกระหว่างผลึกเกลือ

5.2.3 ผลกระทบของแร่ดิน

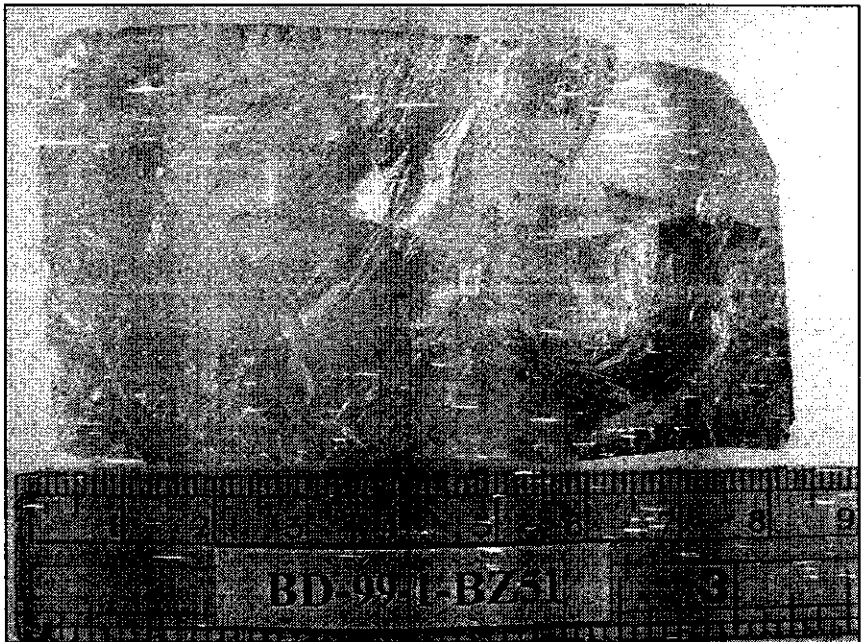
รูปที่ 5.9 แสดงค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดที่ผันแปรกับปริมาณแร่ดินที่เจือปนอยู่ในตัวอย่างเกลือหิน แร่ดินที่เจือปนอยู่ในตัวอย่างเกลือหินมีค่าอยู่ระหว่าง 1-4% ข้อมูลที่ได้จากการวิจัยนี้ระบุว่าปริมาณแร่ดินที่มีน้อยกว่าร้อยละ 4 นี้อาจไม่มีผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด และการศึกษาผลกระทบของแร่ดินอาจจะต้องใช้ชิ้นตัวอย่างเกลือหินที่มีปริมาณแร่ดินสูงกว่านี้ แต่ตัวอย่างเกลือหินที่คัดสรรมาจากแอ่งสกลนครมีแร่ดินเจือปนอยู่น้อยกว่าร้อยละ 4 ผลกระทบดังกล่าวจึงไม่สามารถกำหนดได้

5.2.4 ผลกระทบของแร่แอนไฮไดรต์

รูปที่ 5.10 แสดงค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดที่ผันแปรกับปริมาณแร่แอนไฮไดรต์ ปริมาณของแร่แอนไฮไดรต์ในตัวอย่างเกลือหินที่นำมาทดสอบจะมีปริมาณผันแปรจากศูนย์



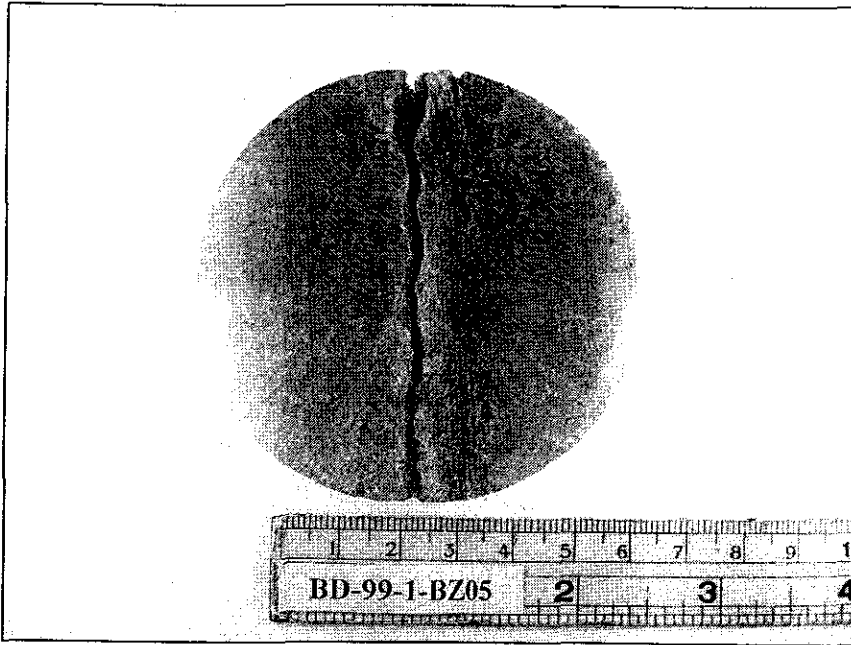
(a)



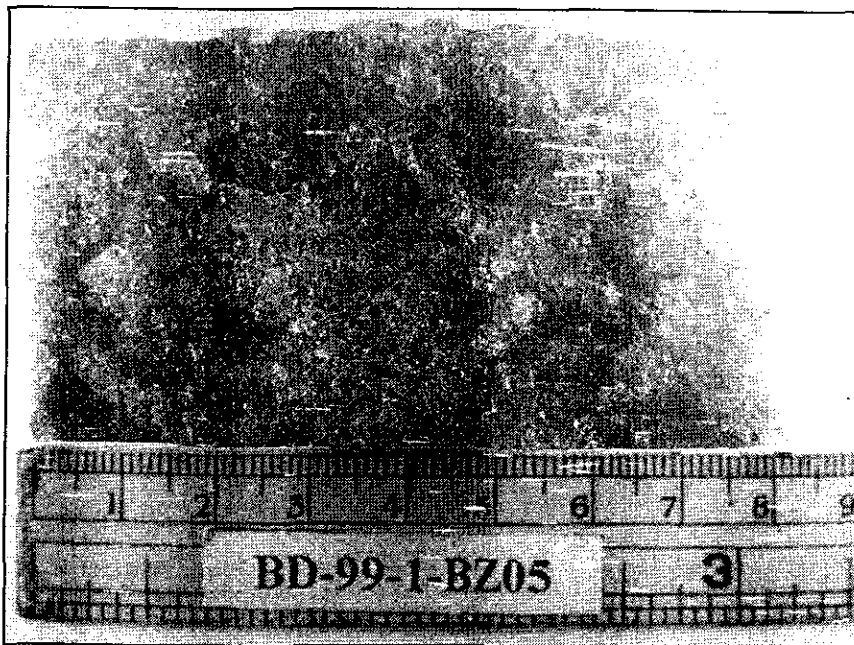
(b)

รูปที่ 5.6 ลักษณะการแตกผ่านผลึกเกลือหิน (Cleavage Fracturing) ซึ่งสามารถสังเกตได้จากผิวรอยแตกจะเรียบมันและมีมุมการแตกที่หลากหลาย

- (a) การแตกของตัวอย่างทดสอบที่มีขนาดของผลึกเกลือค่อนข้างใหญ่ รอยแตกที่เกิดขึ้นจะแตกผ่านผลึกของเกลือหิน
- (b) ลักษณะการแตกผ่านผลึกบนผิวรอยแตกของตัวอย่างทดสอบ



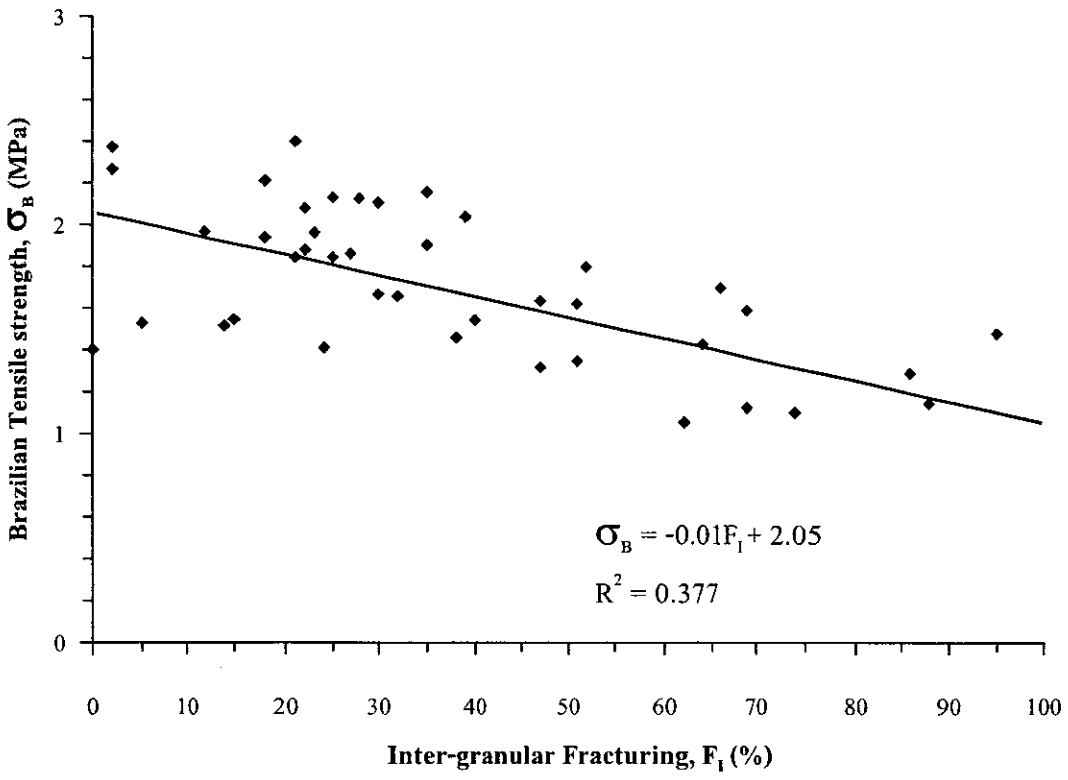
(a)



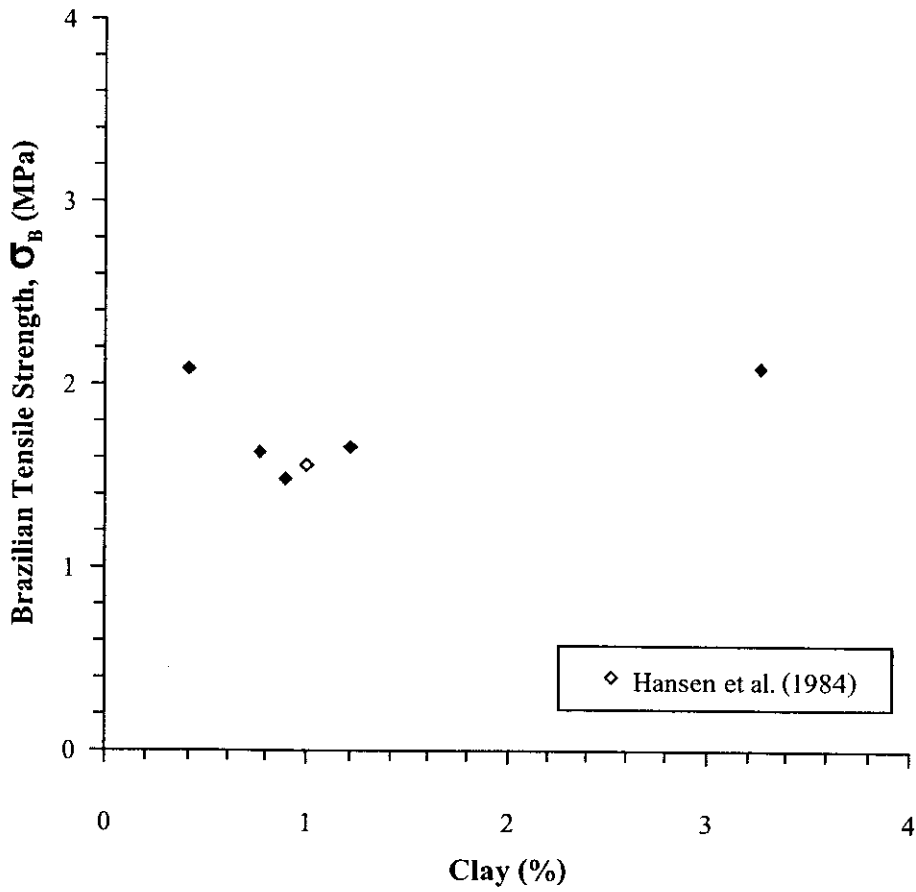
(b)

รูปที่ 5.7 ลักษณะการแตกระหว่างรอยต่อผลึกเกลือหิน (Inter-granular Fracturing) ซึ่งสามารถสังเกตได้จากผิวรอยแตกที่เกิดขึ้นจะขรุขระไม่เรียบมัน และสังเกตเห็นรูปผลึกเกลือได้ชัดเจน

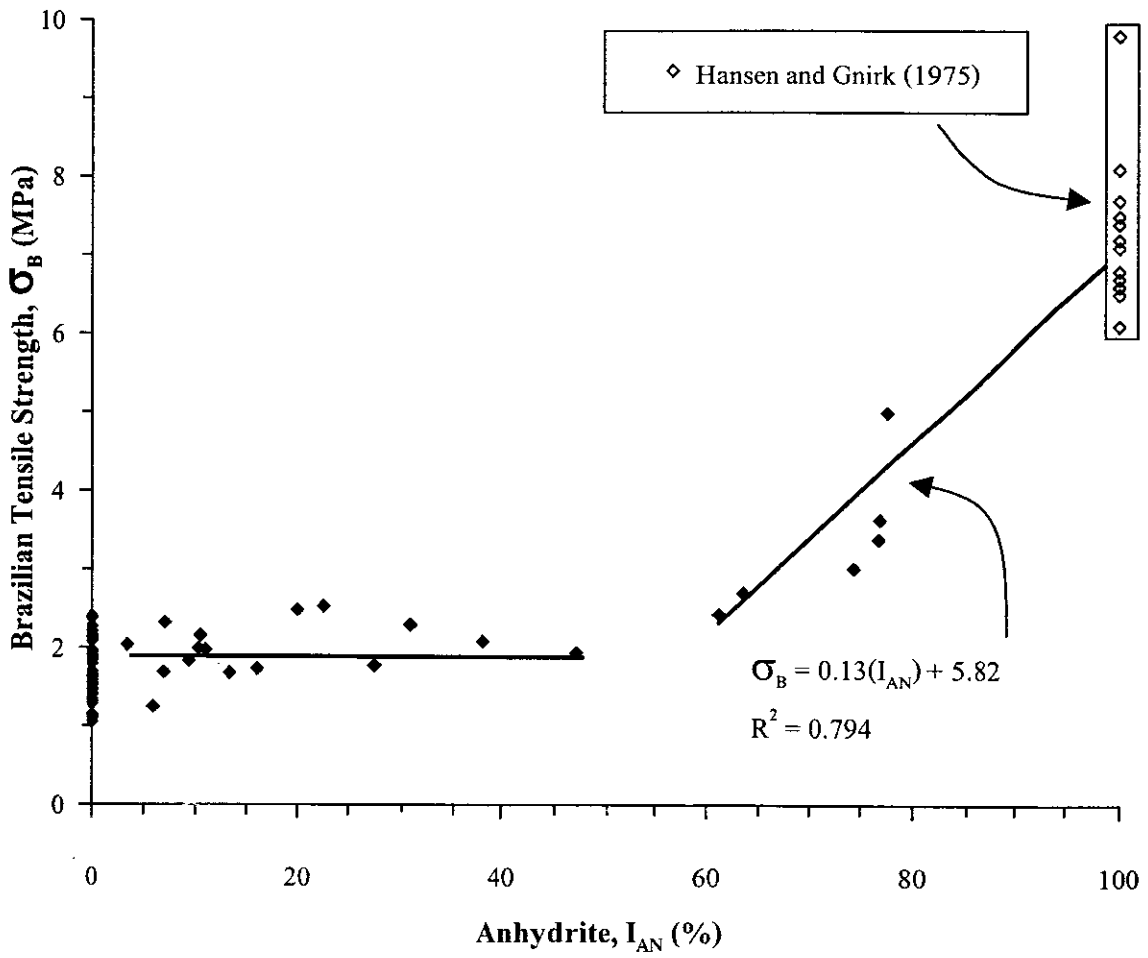
- (a) การแตกของตัวอย่างทดสอบที่มีขนาดของผลึกเกลือค่อนข้างเล็ก รอยแตกที่เกิดขึ้นจะแตกระหว่างผลึกของเกลือหิน
- (b) ลักษณะการแตกระหว่างผลึกบนผิวรอยแตกของตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 5.8 ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดที่ผันแปรกับลักษณะการแตกของผลึกเกลือแบบแตกระหว่างผลึก



รูปที่ 5.9 ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดที่ผันแปรกับปริมาณแร่ดินที่เจือปนในตัวอย่างเกลือหินที่นำมาทดสอบ



รูปที่ 5.10 ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดที่ผันแปรกับปริมาณแร่แอนไฮไดรต์ที่เจือปนในตัวอย่างเกลือหินที่นำมาทดสอบ

(เกลือหินบริสุทธิ์) ถึงร้อยละ 80 ผลการทดสอบบ่งบอกว่าถ้าปริมาณแร่แอนไฮไดรต์ที่มีอยู่ในตัวอย่างเกลือหินน้อยกว่าร้อยละ 50 อาจไม่มีผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิลเลียนเท่าใดนัก กล่าวคือค่ากำลังรับแรงดึงจะค่อนข้างคงที่ประมาณ 2 MPa แต่ถ้าปริมาณแร่แอนไฮไดรต์ที่เจือปนอยู่มากในช่วงร้อยละ 60 ถึงร้อยละ 80 จะทำให้ค่ากำลังรับแรงดึงสูงขึ้น ผลกระทบของปริมาณแร่แอนไฮไดรต์นี้สามารถสนับสนุนได้จากข้อมูลในต่างประเทศ (Hansen and Gnirk, 1975) ซึ่งระบุว่าค่ากำลังรับแรงดึงของแร่แอนไฮไดรต์บริสุทธิ์จะมีค่าสูงถึง 6-8 MPa การเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงดึงต่อปริมาณของแร่แอนไฮไดรต์จะค่อนข้างเป็นสัดส่วนโดยตรงในช่วงนี้ ซึ่งสามารถแสดงได้โดยสมการในรูปที่ 5.10

5.3 ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดของเกลือหิน

5.3.1 ผลกระทบของแร่ดิน

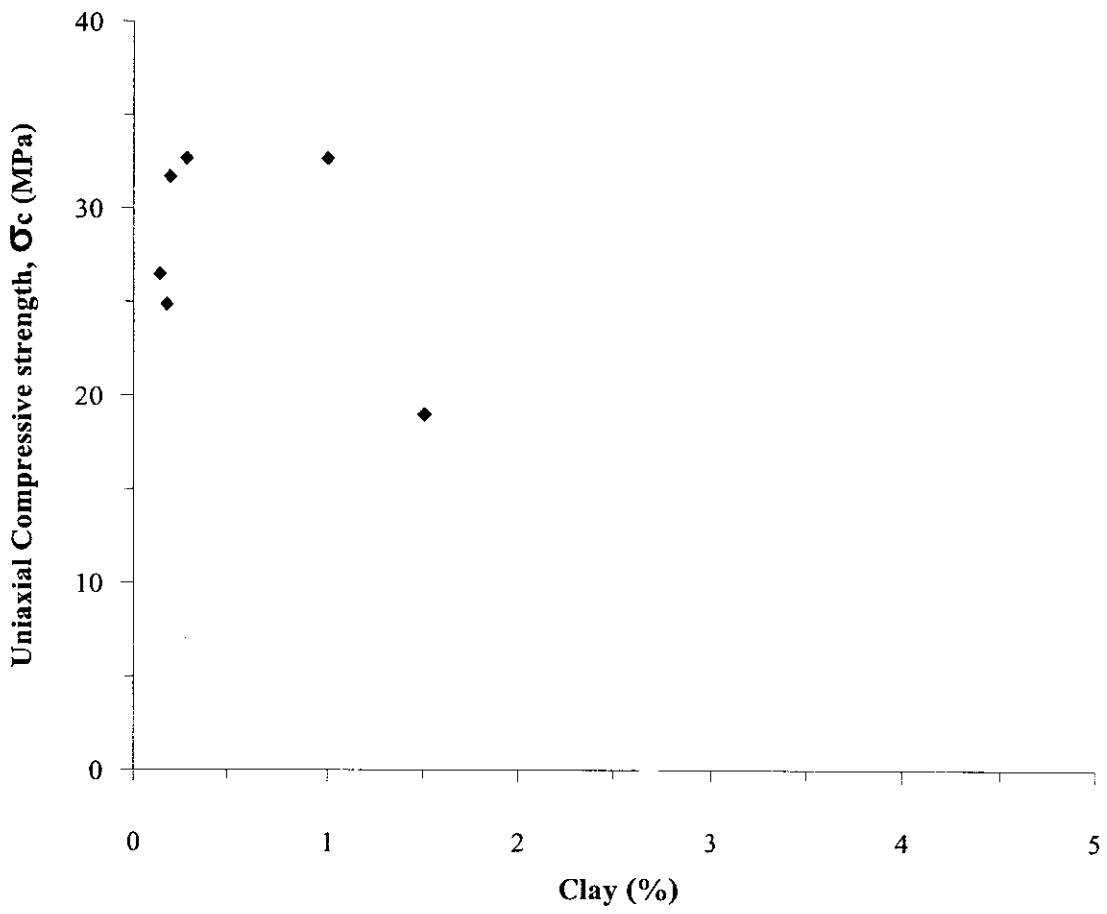
รูปที่ 5.11 แสดงค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดที่ผันแปรกับปริมาณแร่ดินที่เจือปนอยู่ในตัวอย่างเกลือหิน แร่ดินที่เจือปนอยู่ในตัวอย่างมีค่าอยู่ระหว่าง 1-2% ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้ระบุว่าปริมาณแร่ดินที่มีน้อยกว่าร้อยละ 2 อาจไม่มีผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงกดสูงสุด และการศึกษาผลกระทบของแร่ดินอาจจะต้องใช้ชิ้นตัวอย่างเกลือหินที่มีปริมาณแร่ดินสูงกว่านี้และใช้จำนวนตัวอย่างมากกว่านี้ แต่ตัวอย่างเกลือหินจากแหล่งสกลนครที่นำมาทดสอบมีปริมาณแร่ดินเจือปนอยู่น้อยกว่าร้อยละ 2 ผลกระทบของแร่ดินที่มากกว่าร้อยละ 2 จึงไม่สามารถกำหนดได้

5.3.2 ผลกระทบของแร่แอนไฮไดรต์

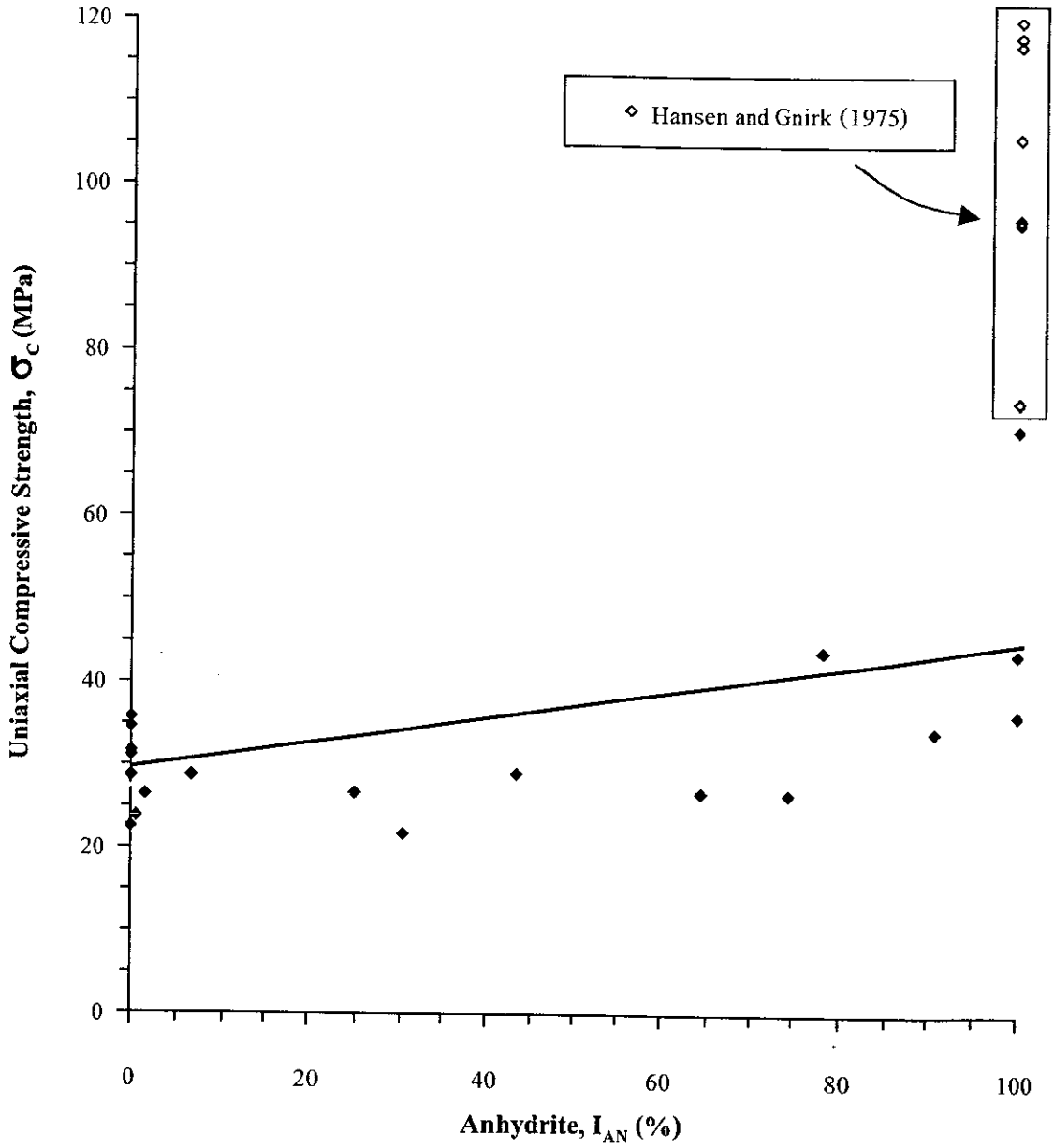
รูปที่ 5.12 แสดงค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดที่ผันแปรกับปริมาณแร่แอนไฮไดรต์ ปริมาณของแร่แอนไฮไดรต์ในตัวอย่างเกลือหินที่นำมาทดสอบจะผันแปรจากศูนย์ (เกลือหินบริสุทธิ์) ถึงร้อยละ 100 (แอนไฮไดรต์บริสุทธิ์) ผลการทดสอบบ่งบอกว่าปริมาณของแร่แอนไฮไดรต์ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงกดสูงขึ้น ผลกระทบของปริมาณแร่แอนไฮไดรต์สามารถสนับสนุนได้จากข้อมูลในต่างประเทศ (Hansen and Gnirk, 1975) ซึ่งระบุว่าค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดของแร่แอนไฮไดรต์บริสุทธิ์จะมีค่าสูงถึง 80-120 MPa การเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงกดต่อปริมาณของแร่แอนไฮไดรต์มีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้นตรง ซึ่งสามารถแสดงได้โดยสมการในรูปที่ 5.12

5.4 ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของเกลือหิน

ลักษณะเชิงแรมวิทาของเกลือหินที่นำมาศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นประกอบด้วย ผลกระทบของแร่ดินและผลกระทบของแร่แอนไฮไดรต์



รูปที่ 5.11 ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดที่ผันแปรกับปริมาณแร่ดินที่เจือปนในตัวอย่างเกลือหินที่นำมาทดสอบ



รูปที่ 5.12 ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดที่ผันแปรกับปริมาณแร่แอนไฮไดรต์ที่เจือปนในตัวอย่างเกลือหินที่นำมาทดสอบ

5.4.1 ผลกระทบของแร่ดิน

รูปที่ 5.13 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่ผันแปรกับปริมาณแร่ดินที่เจือปนอยู่ แร่ดินที่เจือปนอยู่ในตัวอย่างมีค่าอยู่ระหว่าง 1-4% ข้อมูลที่ได้นี้ระบุว่าปริมาณแร่ดินที่มีน้อยกว่าร้อยละ 4 อาจไม่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น ดังนั้นการศึกษาผลกระทบของแร่ดินจำเป็นต้องใช้ชิ้นตัวอย่างเกลือหินที่มีปริมาณแร่ดินสูงกว่านี้ แต่ตัวอย่างเกลือหินจากแอ่งสกลนครที่นำมาทดสอบมีปริมาณแร่ดินเจือปนอยู่น้อยกว่าร้อยละ 4 ความสัมพันธ์ดังกล่าวจึงไม่สามารถกำหนดได้

5.4.2 ผลกระทบของแร่แอนไฮไดรต์

รูปที่ 5.14 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่ผันแปรกับปริมาณแร่แอนไฮไดรต์ที่เจือปนอยู่ในตัวอย่างเกลือหิน ปริมาณของแร่แอนไฮไดรต์มีปริมาณผันแปรจากศูนย์ (เกลือหินบริสุทธิ์) ถึงร้อยละ 100 (แอนไฮไดรต์บริสุทธิ์) ปริมาณของแร่แอนไฮไดรต์มากขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นสูงขึ้น ผลกระทบของปริมาณแร่แอนไฮไดรต์สามารถสนับสนุนได้จากข้อมูลในต่างประเทศ (Hansen and Gnirk, 1975) ซึ่งระบุว่าค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของแร่แอนไฮไดรต์บริสุทธิ์จะมีค่าสูงถึง 40-60 MPa การเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นต่อปริมาณของแร่แอนไฮไดรต์จะค่อนข้างเป็นสัดส่วนโดยตรง ซึ่งสามารถแสดงได้โดยสมการในรูปที่ 5.14

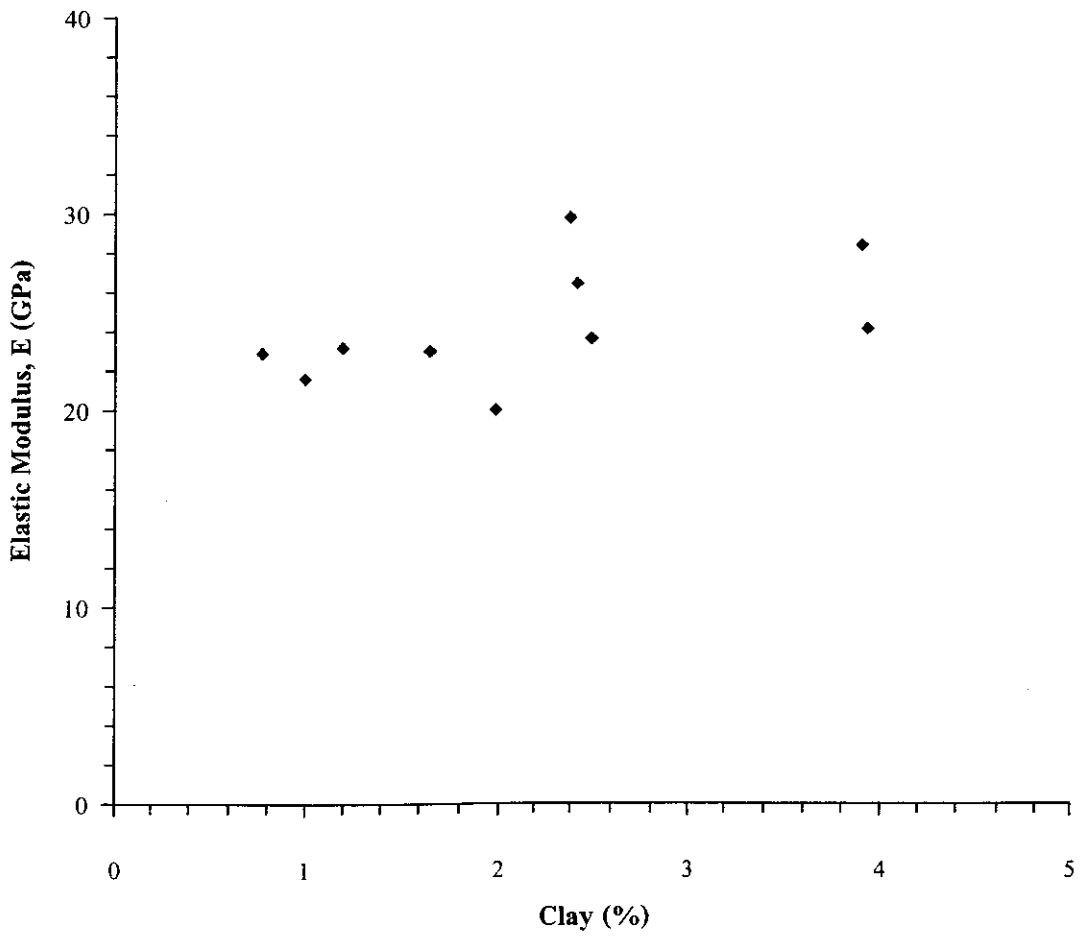
5.5 ค่าความเหน็ดแข็งพลาสติกของเกลือหิน

5.5.1 ผลกระทบของขนาดผลึก

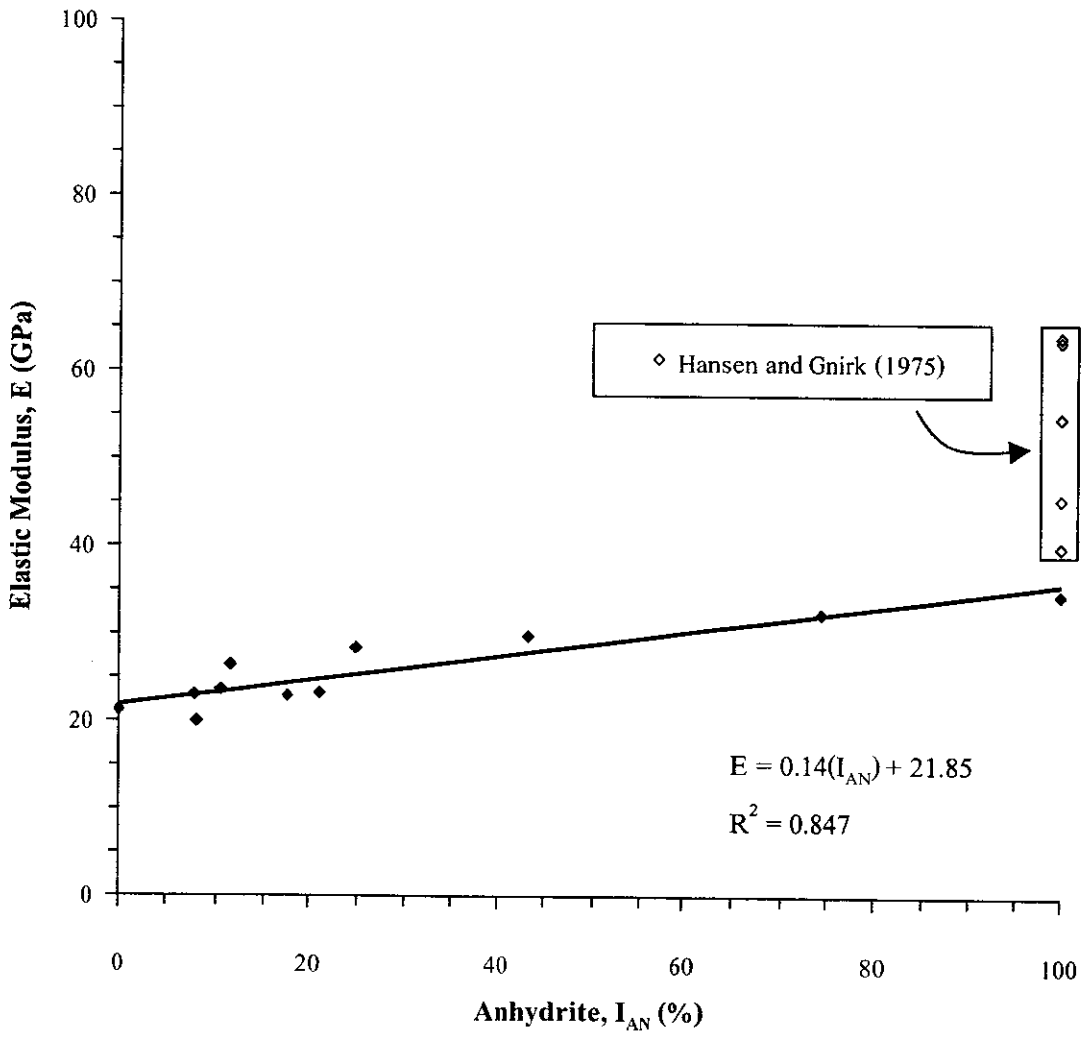
รูปที่ 5.15 แสดงค่าความเหน็ดแข็งพลาสติกที่ผันแปรกับขนาดของผลึกเกลือ โดยขนาดเฉลี่ยของผลึกในตัวอย่างเกลือหินที่นำมาทดสอบเท่ากับ 3-10 มิลลิเมตร และมีค่าความเหน็ดแข็งพลาสติกระหว่าง 1.89-30.07 GPa.day รูปที่ 5.15 แสดงให้เห็นว่าขนาดของผลึกที่ใหญ่ขึ้นอาจทำให้ค่าความเหน็ดแข็งพลาสติกสูงขึ้น โดยความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของผลึกเกลือกับค่าความเหน็ดแข็งพลาสติกเป็นแบบ Exponential ดังสมการในรูปที่ 5.15 ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลงานวิจัยในต่างประเทศที่ได้สรุปไว้ในบทที่ 1 ของรายงานนี้

5.5.2 ผลกระทบของแร่ดิน

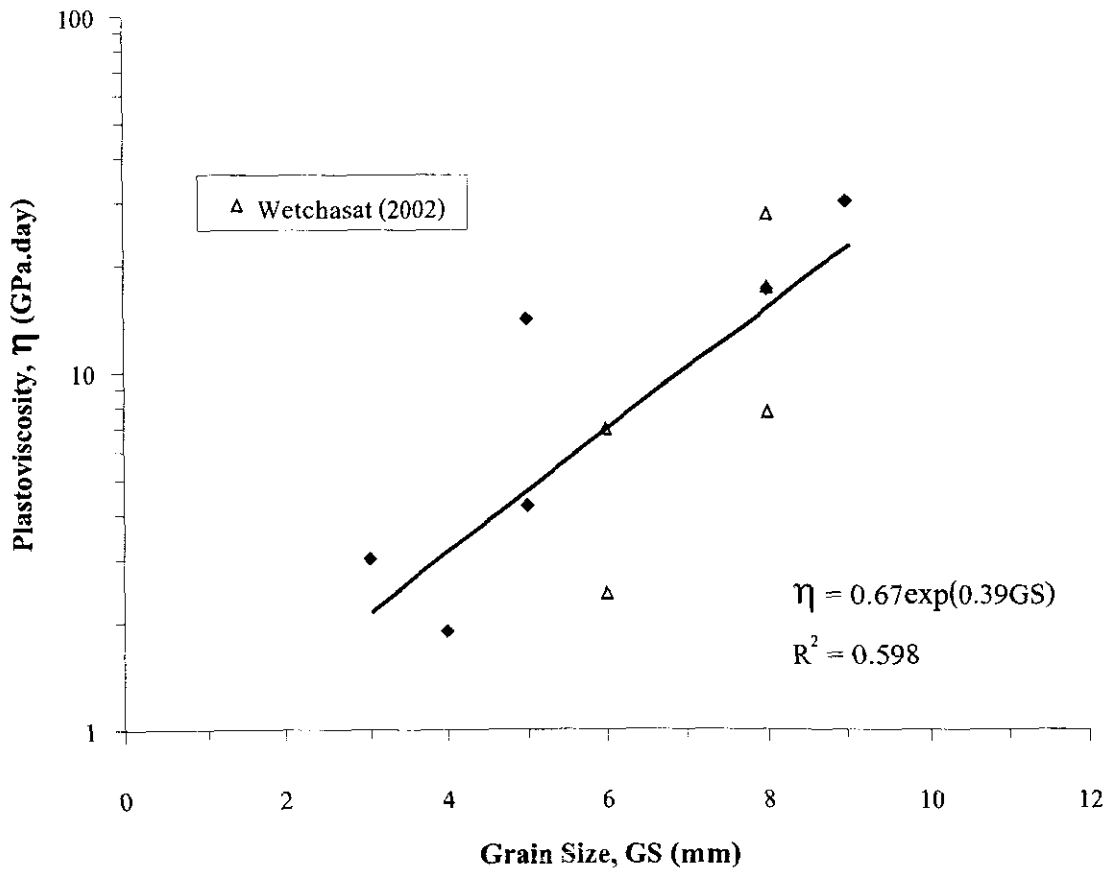
รูปที่ 5.16 แสดงค่าความเหน็ดแข็งพลาสติกที่ผันแปรกับแร่ดินที่เจือปนอยู่ ซึ่งมีปริมาณ 1-3% ปริมาณแร่ดินที่มีน้อยกว่าร้อยละ 3 อาจไม่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและการศึกษาผลกระทบของแร่ดินอาจต้องใช้ชิ้นตัวอย่างเกลือหินที่มีปริมาณแร่ดินสูงกว่านี้ แต่ตัวอย่างเกลือหินจากแอ่งสกลนครที่นำมาทดสอบมีปริมาณแร่ดินเจือปนอยู่น้อยกว่าร้อยละ 3 ดังนั้นผลกระทบของแร่ดินที่มากกว่าร้อยละ 3 จึงไม่สามารถกำหนดได้



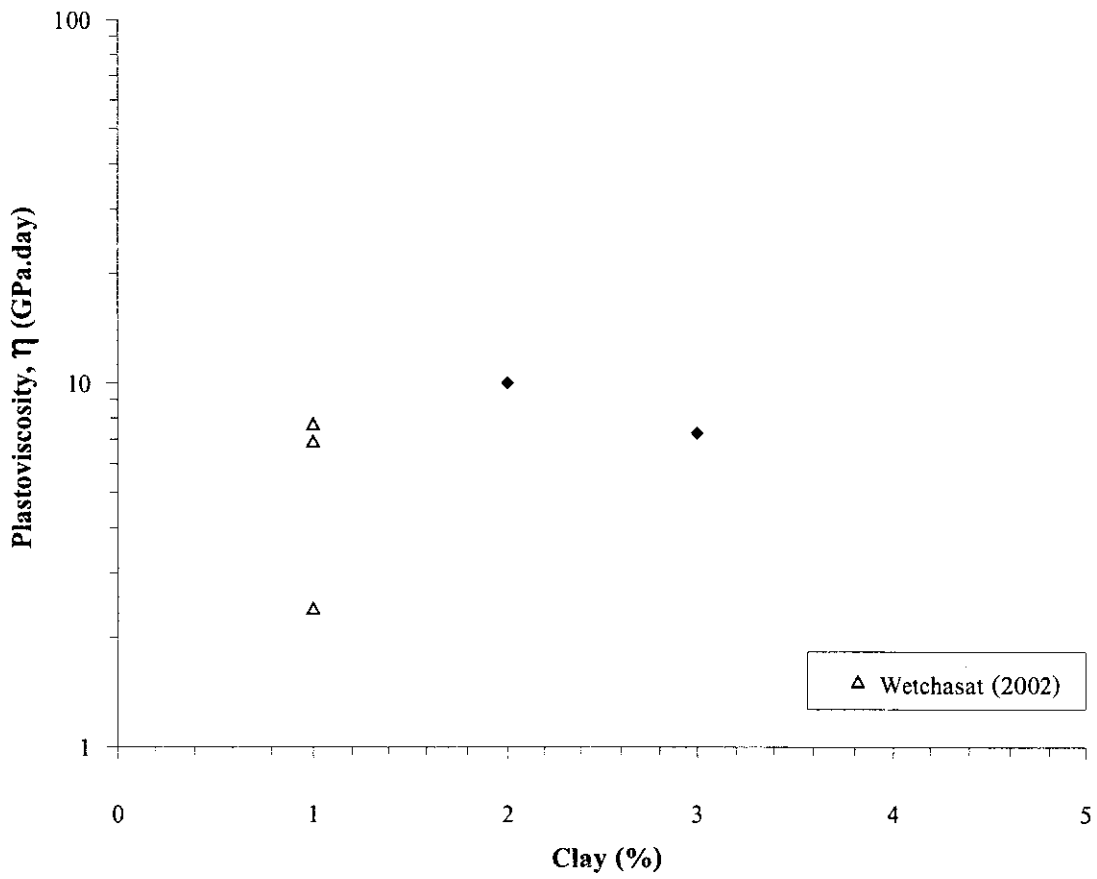
รูปที่ 5.13 ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่ผันแปรกับปริมาณแร่ดินที่เจือปนในตัวอย่างเกลือหินที่นำมาทดสอบ



รูปที่ 5.14 ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่ผันแปรกับปริมาณแร่แอนไฮไดรต์ที่เจือปน
ในตัวอย่างเกลือหินที่นำมาทดสอบ



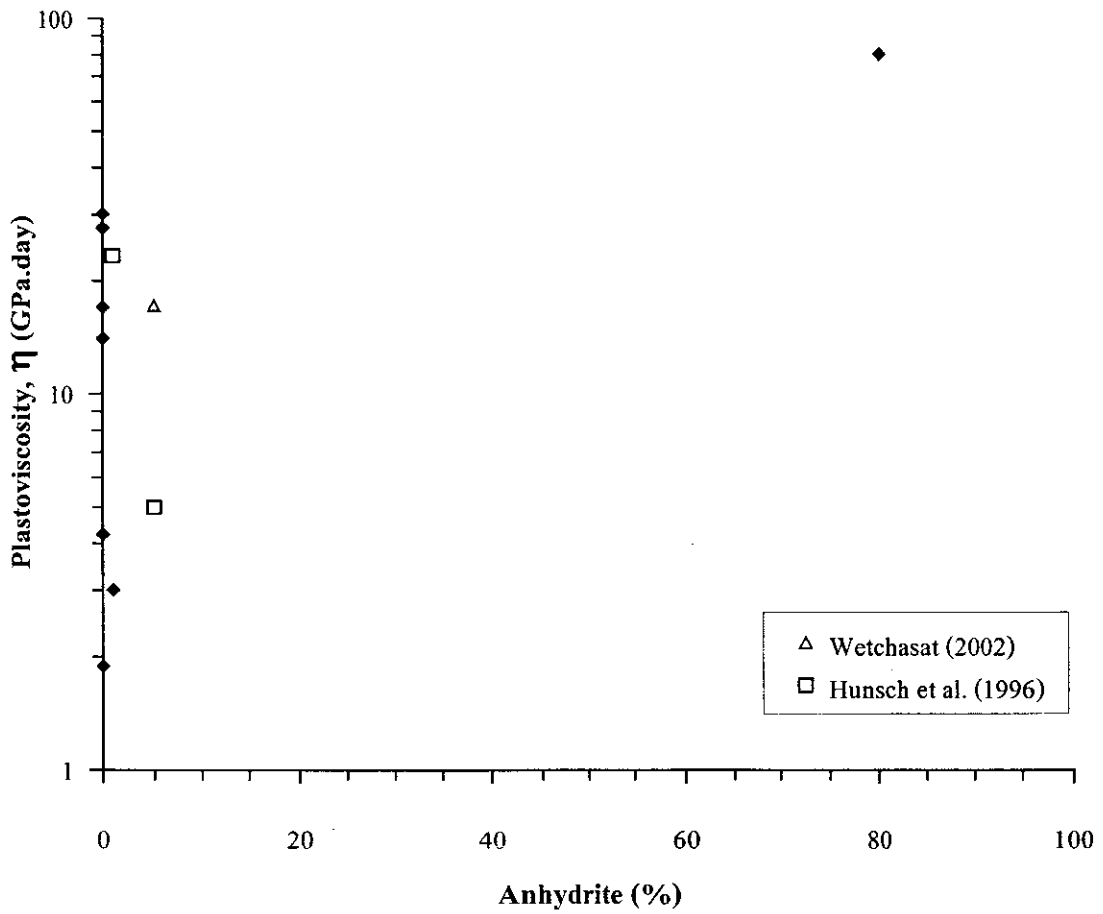
รูปที่ 5.15 ค่าความหนืดเชิงพลาสติกของตัวอย่างเกลือหินที่ผันแปรกับขนาดของผลึกเกลือ



รูปที่ 5.16 ค่าความหนืดเชิงพลาสติกของตัวอย่างเกลือหินที่ผันแปรกับปริมาณแร่ดินที่เจือปน
ในตัวอย่างเกลือหินที่นำมาทดสอบ

5.5.3 ผลกระทบของแร่แอนไฮไดรต์

รูปที่ 5.17 แสดงค่าความหนืดเชิงพลาสติกที่แปรผันกับปริมาณแร่แอนไฮไดรต์ที่เจือปนอยู่ในตัวอย่างทดสอบ จะเห็นได้ว่าปริมาณของแร่แอนไฮไดรต์ที่พบอยู่ในตัวอย่างเกลือหินมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ตัวอย่างเกลือหินมีปริมาณของแร่แอนไฮไดรต์เจือปนอยู่น้อยกว่าร้อยละ 5 เป็นส่วนใหญ่และมีเพียงตัวอย่างเดียวที่มีปริมาณแร่แอนไฮไดรต์สูงถึงร้อยละ 80 การศึกษาผลกระทบของแร่แอนไฮไดรต์จำเป็นต้องใช้หินตัวอย่างเกลือหินที่มีปริมาณแร่แอนไฮไดรต์หลากหลายกว่านี้ แต่ตัวอย่างเกลือหินที่นำมาทดสอบรวมถึงข้อมูลผลกระทบของปริมาณแร่แอนไฮไดรต์ที่ได้จากเอกสารอ้างอิงอื่น (Hunsche et al., 1996; Wetchasat, 2002) ไม่มีความหลากหลายของปริมาณแร่แอนไฮไดรต์ที่เพียงพอ ความสัมพันธ์ดังกล่าวจึงไม่สามารถกำหนดได้



รูปที่ 5.17 ค่าความหนืดเชิงพลาสติกของตัวอย่างเกลือหินที่ผันแปรกับปริมาณแร่แอนไฮไดรต์ที่เจือปนในตัวอย่างที่นำมาทดสอบ

บทที่ 6

การวิจารณ์ผล

เนื้อหาของบทนี้วิจารณ์และวิเคราะห์แนวคิดในการดำเนินการทดลองและผลการวิจัยเพื่อกำหนดหรือประเมินคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของตัวอย่างเกลือหิน โดยอาศัยลักษณะเชิงแร่วิทยาและศิลาวิทยาของแท่งตัวอย่าง ซึ่งประเด็นในการวิจารณ์ประกอบด้วย ชนิดและปริมาณของสิ่งเจือปนในตัวอย่างเกลือหิน ความแม่นยำหรือความคลาดเคลื่อนของการประเมินปริมาณสิ่งเจือปนในตัวอย่างเกลือหิน ข้อมูลคุณสมบัติของเกลือหิน ข้อจำกัดของตัวอย่างเกลือหินและการทดสอบ และผลกระทบของแร่ดินและแร่แอนไฮไดรต์ที่เจือปนในตัวอย่างเกลือหิน

ผลการรวบรวมข้อมูลที่ได้จากวารสาร เอกสารการประชุมและรายงานวิจัยทั้งในและต่างประเทศ (คงได้สรุปไว้ในบทที่ 2 และภาคผนวก ก) ระบุว่า ถึงแม้ว่าจะได้มีการตีพิมพ์หรือรายงานผลของการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินที่มากพอสมควร แต่ส่วนใหญ่แล้วลักษณะเชิงแร่วิทยามีได้ถูกอธิบายหรือรายงานควบคู่ไปกับผลการทดสอบด้วย บางเอกสารจะมีเพียงการอธิบายโดยรวมว่าตัวอย่างเกลือหินที่นำมาทดสอบมีสิ่งเจือปนโดยเฉลี่ยปริมาณเท่าใด ซึ่งลักษณะเช่นนี้ทำให้ฐานข้อมูลที่รวบรวมมาใช้ในงานวิจัยนี้ไม่เพียงพอและไม่สมบูรณ์เท่าที่คาดการณ์ไว้ ส่งผลให้การพัฒนาความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์จะต้องอาศัยข้อมูลที่ทดสอบได้จากงานวิจัยนี้เป็นหลัก

ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นเกลือชั้นกลางและเกลือชั้นล่างที่มาจากแอ่งสกลนครและแอ่งโคราช ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท เอเชียแปซิฟิก โปแตซคอร์ปอเรชั่น จำกัด และ บริษัท สยามทรพย์มณี จำกัด โดยสิ่งเจือปนที่แทรกอยู่ในแท่งตัวอย่างที่สามารถตรวจสอบได้ด้วยตาเปล่า ประกอบด้วย แร่แอนไฮไดรต์และแร่ดินเป็นส่วนใหญ่ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ของบทที่ 3 ผู้วิจัยตระหนักดีว่าสิ่งเจือปนที่แทรกอยู่ในชั้นเกลือหินจากทั้ง 2 แอ่งจะมีมากกว่าแร่สองชนิดนี้ แต่เนื่องจากตัวอย่างที่ได้รับความอนุเคราะห์มีจำนวนจำกัดและขาดความหลากหลายในแง่ของสิ่งเจือปน ดังนั้นขอบเขตของการศึกษาในงานวิจัยนี้จึงเน้นไปที่ผลกระทบของปริมาณแร่แอนไฮไดรต์และแร่ดิน เป็นหลัก

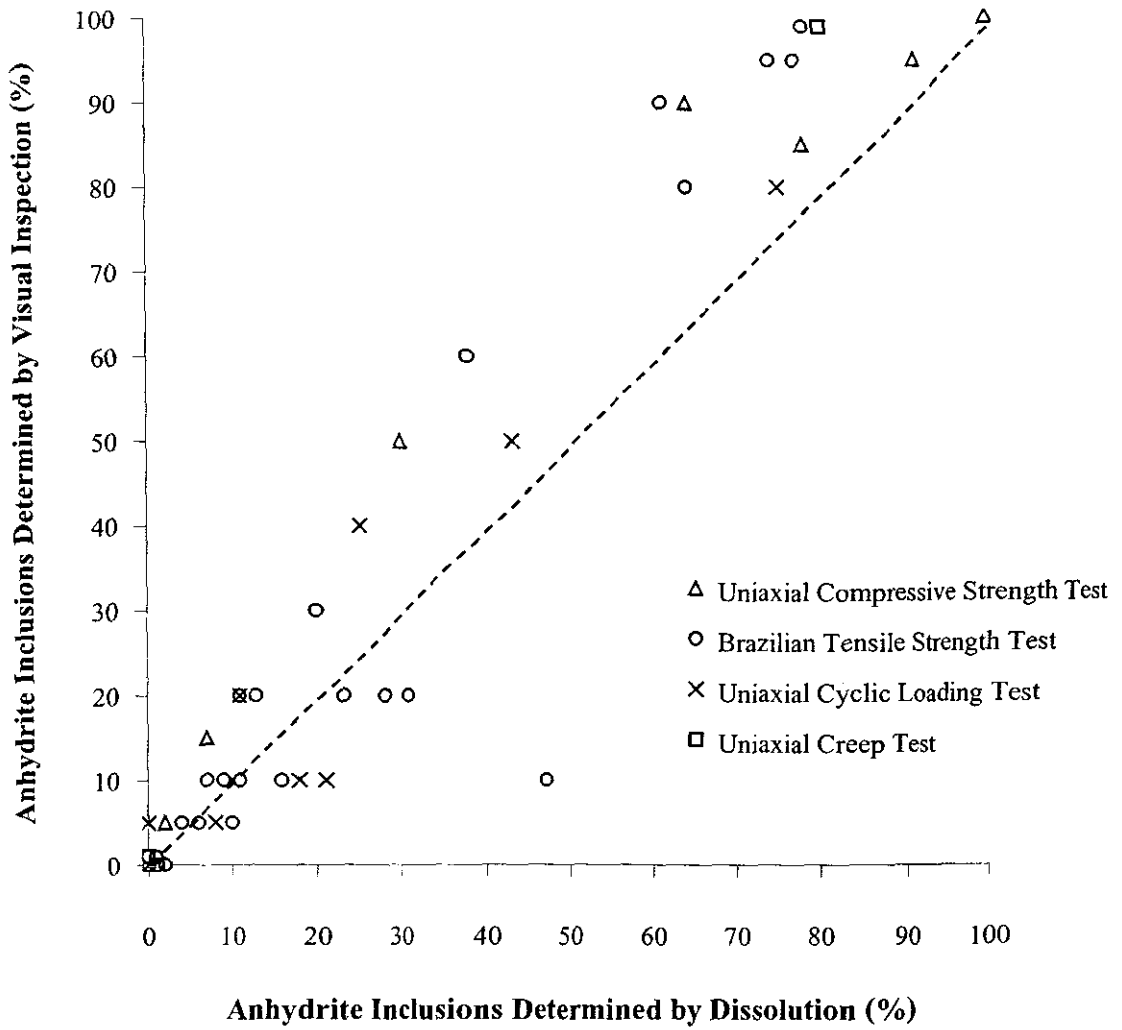
ความสามารถในการประเมินปริมาณของแร่แอนไฮไดรต์และแร่ดินในแท่งตัวอย่างเกลือหินด้วยตาเปล่าอย่างแม่นยำเป็นสิ่งจำเป็น เพราะจะนำไปสู่การคาดคะเนคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของแท่งตัวอย่างเกลือหินนั้น ในงานวิจัยนี้การประเมินด้วยตาเปล่าได้ดำเนินการโดยนักศึกษาระดับปริญญาโทซึ่งมีความรู้ทางแร่วิทยาและได้รับการอบรมในการดูแร่จาก Mr.Keith Crosby ซึ่งเป็นนักธรณีวิทยาเกลือหินของ บริษัท เอเชียแปซิฟิก โปแตซคอร์ปอเรชั่น จำกัด อย่างไรก็ตามผลการประเมินด้วยตาเปล่ายังมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างเมื่อเทียบกับปริมาณแร่ที่เจือปนอยู่จริงในแท่งเกลือหิน โดยปริมาณแร่เจือปนที่มีอยู่จริงได้ถูกตรวจสอบโดยการนำแท่งตัวอย่างเกลือหินมาละลายในน้ำจืด

หลาย ๆ ครั้ง แล้วนำส่วนที่เหลือที่ไม่ละลายแยกออกมาโดยการกรองผ่านกระดาษกรอง จากนั้น แร่แอนไฮไดรต์และแร่ดินก็จะถูกแยกออกจากกันได้โดยง่าย เพราะแร่แอนไฮไดรต์จะจับตัวเป็นก้อน แข็งและค่อนข้างใหญ่ ส่วนแร่ดินจะเหลืออยู่เป็นผงซึ่งจะมีแร็ลไลต์ (Illite) เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ (จากผลของ XRD) รูปที่ 6.1 แสดงให้เห็นว่าถ้ามีแร่แอนไฮไดรต์เจือปนอยู่น้อยกว่าร้อยละ 40 การประเมินด้วยตาเปล่าจะคลาดเคลื่อนอย่างไม่เป็นระบบ และมีความผิดพลาดอย่างมากเมื่อเทียบเป็นสัดส่วน แต่ถ้าปริมาณแร่แอนไฮไดรต์มีสูงกว่าร้อยละ 40 การคลาดเคลื่อนของผลการประเมินด้วยตาเปล่าจะไปในทางเดียวกัน กล่าวคือ การประเมินด้วยตาเปล่าจะสูงกว่าค่าที่แท้จริงเสมอด้วยความคลาดเคลื่อนประมาณร้อยละ 20 ดังนั้นวิศวกรหรือนักธรณีวิทยาจะต้องตระหนักในข้อสังเกตนี้ เพราะการศึกษาปริมาณแร่เจือปนด้วยตาเปล่าจะมีแนวโน้มที่ให้ค่าสูงกว่าความเป็นจริง ความละเอียดของการประเมินด้วยตาเปล่าควรจะมีค่าสูงถึงระดับ $\pm 5\%$ และด้วยประสบการณ์และการตรวจสอบผลการประเมินด้วยการละลายสำหรับบางตัวอย่างก็จะสามารถปรับปรุงให้การประเมินด้วยตาเปล่ามีความแม่นยำเพิ่มขึ้น

การประเมินปริมาณแร่ดินในแท่งตัวอย่างจะผิดพลาดค่อนข้างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อปริมาณแร่ดินที่เจือปนอยู่ในแท่งตัวอย่างมีน้อยกว่าร้อยละ 5 แร่ดินจะสามารถสังเกตได้โดยนำแสงสว่าง เช่น หลอดไฟมาส่องผ่านแท่งตัวอย่าง ถ้าเป็นเกลือหินบริสุทธิ์จะไม่เป็นรอยทึบภายในตัวอย่าง แต่ถ้ามีแร่ดินจะเห็นรอยทึบภายในตัวอย่าง อย่างไรก็ตามแร่ดินที่มีปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 5 มีผลกระทบน้อยมากต่อค่าคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของแท่งตัวอย่างเกลือหิน

จำนวนตัวอย่างเกลือหินที่นำมาทดสอบเชิงกลศาสตร์มีความเพียงพอสำหรับการทดสอบแต่ละชนิด แต่กลุ่มของตัวอย่างเหล่านี้ไม่มีความหลากหลายในเชิงปริมาณของสิ่งเจือปน (แร่แอนไฮไดรต์และแร่ดิน) ที่เพียงพอ ทำให้ความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ของคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์บางค่าไม่สามารถกำหนดได้ อนึ่งเนื่องจากแท่งตัวอย่างเกลือหินที่ทำการทดสอบได้มาจากการเจาะในแนวตั้งทั้งสิ้น ดังนั้นการเรียงตัวของแร่แอนไฮไดรต์ในแท่งตัวอย่างเกลือหินจะมีลักษณะเป็นแผ่นหนาหรือบางที่ตั้งฉากกับแกนของแท่งตัวอย่างทั้งหมด จึงควรตระหนักว่าผลกระทบเชิงกลศาสตร์อันเนื่องมาจากสิ่งเจือปนเหล่านี้จะเป็นคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ในแนวตั้งฉากหรือเกือบตั้งฉากกับแนวของสิ่งเจือปนทั้งสิ้น

ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิลเลียนของตัวอย่างเกลือหินจะขึ้นกับการแตกภายใต้แรงดึงว่ามีลักษณะอย่างไร ถ้าเกลือหินแตกผ่านผลึกเกลือเป็นส่วนใหญ่ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดก็จะค่อนข้างสูง แต่ถ้ารอยแตกส่วนใหญ่ผ่านรอยต่อระหว่างผลึกค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดก็จะต่ำลง ซึ่งผลการทดสอบนี้ (ดังแสดงในรูปที่ 5.8) บ่งบอกว่าค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างเกลือหินในห้องปฏิบัติการอาจมีค่าสูงเป็นสองเท่าของค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดของเกลือหินที่อยู่ใน



รูปที่ 6.1 แสดงความคลาดเคลื่อนของการประเมินปริมาณแร่แอนไฮไดรต์ด้วยตาเปล่า เมื่อเทียบกับการแยกสิ่งเจือปนด้วยการละลาย

ภาคสนาม (เช่น ในหลังคาของอูโมงค์) เนื่องจากลักษณะการแตกของมวลเกลือหินที่มีขนาดใหญ่จะมีรอยแตกเป็นแบบผ่านรอยต่อระหว่างผลึกเกือบทั้งสิ้น (Inter-granular Fracturing)

ผลกระทบของแร่แอนไฮโดรต์จะไม่ชัดเจนถ้าปริมาณการเจือปนของแร่แอนไฮโดรต์มีน้อยกว่าร้อยละ 50 หรืออีกนัยหนึ่งค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดของตัวอย่างเกลือหินที่มีแร่แอนไฮโดรต์เจือปนอยู่ระหว่าง 0-50% จะมีค่าค่อนข้างคงที่ แต่ถ้าปริมาณของแร่แอนไฮโดรต์มีสูงกว่าร้อยละ 50 ก็จะทำให้ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดของตัวอย่างเกลือหินเพิ่มขึ้น ได้อย่างชัดเจน

ผลการทดสอบระบุว่า ผลกระทบของแร่แอนไฮโดรต์ต่อค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดของตัวอย่างเกลือหินจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (รูปที่ 5.12) ซึ่งสามารถอธิบายได้อย่างเป็นเหตุเป็นผลเนื่องจากแร่แอนไฮโดรต์ที่เจือปนอยู่จะมีลักษณะเป็นแผ่นที่ตั้งฉากหรือเกือบตั้งฉากกับแกนของตัวอย่างเกลือหินหรือทิศทางของการกดนั่นเอง ในลักษณะเช่นนี้เกลือหินที่มีอยู่ในตัวอย่างก็จะถูกกดด้วยแรงหรือความเค้นที่เท่าเดิม ไม่ว่าจะมีความแอนไฮโดรต์เจือปนอยู่มากน้อยเพียงใด ตามทฤษฎีแล้วการเจือปนของแร่แอนไฮโดรต์ในลักษณะเช่นนี้จะไม่สามารถเพิ่มค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดของแท่งตัวอย่างได้ แต่เหตุที่ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณของแร่แอนไฮโดรต์เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจาก End effect โดยความยาวของเกลือหินในแท่งตัวอย่างถูกลดลงและแทนที่โดยการเจือปนของแร่แอนไฮโดรต์ที่แทรกเข้ามาในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งตัวอย่างเกลือหินนั้นมีค่าคงที่ ลักษณะ End effect นี้สามารถสังเกตได้จากการทดสอบตัวอย่างหินทั่วไปคือ ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดจะเพิ่มขึ้นถ้าตัวอย่างหินมีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง

แร่แอนไฮโดรต์มีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นสูงกว่าแร่เกลือ แร่แอนไฮโดรต์บริสุทธิ์จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นระหว่าง 30-60 GPa สำหรับเกลือหินบริสุทธิ์จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นอยู่ที่ประมาณ 20 GPa การเจือปนของแร่แอนไฮโดรต์ในตัวอย่างเกลือหินที่มีลักษณะเป็นแผ่นตั้งฉากกับทิศทางของแรงกดจึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความความยืดหยุ่นของตัวอย่างเกลือหินมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนแบบเส้นตรงเมื่อเทียบกับปริมาณแร่แอนไฮโดรต์ที่เจือปนอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 5.14

ผลการทดสอบในงานวิจัยนี้ประกอบกับข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยอื่นระบุว่า ค่าความเหน็ดเชิงพลาสติกของเกลือหินจะเพิ่มขึ้นถ้าเกลือหินนั้นประกอบด้วยผลึกเกลือที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้คือ แท่งตัวอย่างเกลือหินที่มีผลึกเกลือขนาดใหญ่การเคลื่อนตัวตามเวลาจะเกิดจากการเคลื่อนตัวของ Cleavage ของผลึกเกลือเอง กลไกนี้เรียกว่า Dislocation glide ซึ่งทำให้ค่าความเหน็ดเชิงพลาสติกนี้มีค่าสูง แต่ถ้าตัวอย่างเกลือหินประกอบด้วยผลึกเกลือที่มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่าง การเคลื่อนไหลจะเกิดขึ้นระหว่างผลึกเกลือเป็นส่วนใหญ่ กลไกนี้เรียกว่า Dislocation climb ส่งผลให้ค่าความเหน็ดเชิงพลาสติกมีค่าต่ำลง ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ (รูปที่ 5.15) สอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลงานวิจัยที่ได้ในต่างประเทศ (ดังสรุปไว้ในหัวข้อที่ 1.3) ปรัชญาการณณ์เช่น

นี้บอกเป็นนัยว่า ค่าความหนืดเชิงพลาสติกที่ได้จากตัวอย่างเกลือหินในห้องปฏิบัติการจะสูงกว่าค่าความหนืดเชิงพลาสติกของมวลเกลือหินขนาดใหญ่ในภาคสนาม (เช่น เสาค้ำยันในเมืองแร่หรืออุโมงค์) ซึ่งผลต่างระหว่างค่าทั้งสองอาจมีตั้งแต่ 10-100 เท่า และควรเป็นข้อควรพิจารณาในการนำผลที่ได้จากห้องปฏิบัติการ ไปประยุกต์ใช้ในภาคสนาม

ผลกระทบของแร่แอนไฮไดรต์ต่อค่าความหนืดเชิงพลาสติกของเกลือหินไม่สามารถกำหนดได้อย่างชัดเจนจากผลการทดสอบในงานวิจัยนี้ เนื่องจากความหลากหลายของปริมาณการเจือปนของแร่แอนไฮไดรต์ในกลุ่มตัวอย่างเกลือหินมีไม่เพียงพอ

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อคาดคะเนคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของตัวอย่างเกลือหินโดยอาศัยลักษณะทางเรขาคณิตที่สามารถตรวจสอบได้ด้วยตาเปล่า คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ดังกล่าวประกอบด้วย ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุด ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น ค่าความเหนียวเชิงพลาสติกและค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิลเลียน ซึ่งค่าเหล่านี้ได้มาจากการทดสอบแรงกดในแกนเดียว การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวและการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน ตัวอย่างเกลือหินที่นำมาทดสอบได้มาจากการเกลือชั้นกลางและเกลือชั้นล่างในแอ่งสกลนครและแอ่งโคราช การสร้างความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และเชิงเรขาคณิตได้ใช้ผลการทดสอบจากงานวิจัยนี้เป็นหลัก ร่วมกับข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งในและต่างประเทศ การศึกษาลักษณะเชิงเรขาคณิตได้ใช้วิธีมองด้วยตาเปล่าประกอบกับแว่นขยาย และบางตัวอย่างเกลือหินได้ถูกตรวจสอบปริมาณและชนิดของสิ่งเจือปนโดยวิธีการละลายและชั่งน้ำหนัก และวิธี X-ray Diffraction (XRD)

ผลการวิจัยระบุว่า ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดของตัวอย่างเกลือหินจะเพิ่มขึ้นถ้ามีปริมาณการเจือปนของแร่แอนไฮไดรต์เพิ่มขึ้น การเจือปนของแร่แอนไฮไดรต์ส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นแผ่นที่มีทิศทางตั้งฉากกับแกนของแท่งตัวอย่างทดสอบ ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดนี้จะเกิดขึ้นจากผลกระทบของ End effect โดยส่วนที่เป็นแร่เกลือบริสุทธิ์จะแตกก่อนที่แรงกดสามารถทำให้ส่วนที่เป็นแร่แอนไฮไดรต์แตกได้ นอกจากนี้การเจือปนของแร่แอนไฮไดรต์ในตัวอย่างเกลือหินจะทำให้สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของแท่งตัวอย่างสูงขึ้นค่อนข้างเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของแร่แอนไฮไดรต์ที่เจือปนโดยน้ำหนัก

ผลกระทบของแร่แอนไฮไดรต์ต่อค่าความเหนียวเชิงพลาสติกของแท่งตัวอย่างเกลือหินไม่สามารถพิสูจน์ได้ชัดเจนในงานวิจัยนี้ เนื่องจากตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวไม่มีความหลากหลายของการเจือปนของแร่แอนไฮไดรต์ที่เพียงพอ อย่างไรก็ตาม การทดสอบชุดตัวอย่างเกลือหินบริสุทธิ์พบว่า ค่าความเหนียวเชิงพลาสติกจะเพิ่มขึ้นถ้าขนาดเฉลี่ยของผลึกเกลือใหญ่ขึ้น กล่าวคือตัวอย่างเกลือหินที่ประกอบด้วยผลึกเกลือขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งตัวอย่างจะมีการเคลื่อนไหลตามเวลาแบบ Dislocation glide ในทางกลับกันถ้าแท่งตัวอย่างเกลือหินประกอบด้วยผลึกขนาดเล็ก การเคลื่อนไหลตามเวลาภายใต้แรงกดจะเป็นแบบ Dislocation climb

การเจริญของแร่แอนไฮไดรต์ที่มีน้อยกว่าร้อยละ 50 ในตัวอย่างเกลือหินจะไม่มีผลกระทบอย่างชัดเจนต่อค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด แต่ถ้าปริมาณโดยน้ำหนักของแร่แอนไฮไดรต์ที่เจริญอยู่ในแท่งตัวอย่างมีมากกว่าร้อยละ 60 จะทำให้ค่ากำลังรับแรงดึงแบบบราซิลเลียนสูงขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดนี้ค่อนข้างเป็นสัดส่วน โดยตรงกับปริมาณของแร่แอนไฮไดรต์ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนั้นผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิลเลียนของตัวอย่างเกลือหินบริสุทธิ์ระบุว่า ลักษณะการแตกภายใต้แรงดึงของเกลือหินจะมีผลโดยตรงต่อค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด กล่าวคือถ้ารอยแตกภายใต้แรงดึงนั้นผ่านรอยต่อระหว่างผลึกจะทำให้กำลังรับแรงดึงสูงสุดมีค่าต่ำ (ส่วนใหญ่เกิดขึ้นสำหรับตัวอย่างเกลือหินที่ประกอบด้วยผลึกขนาดเล็กและมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกต่ำ) แต่ถ้ารอยแตกภายใต้แรงดึงตัดผ่านผลึกเกลือจะส่งผลให้กำลังรับแรงดึงสูงสุดของตัวอย่างเกลือหินมีค่าสูง (ส่วนใหญ่เกิดขึ้นกับตัวอย่างเกลือหินที่ประกอบด้วยผลึกเกลือขนาดใหญ่และมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกสูง)

ผลกระทบของแร่ดินที่เจริญอยู่ต่อคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของตัวอย่างเกลือหินไม่สามารถกำหนดได้ชัดเจนในงานวิจัยนี้ เนื่องจากกลุ่มตัวอย่างเกลือหินที่นำมาทดสอบไม่มีความหลากหลายเพียงพอในเชิงปริมาณของแร่ดินที่เจริญอยู่ กล่าวคือปริมาณแร่ดินที่เจริญอยู่ในแต่ละตัวอย่างจะมีการผันแปรอยู่ในช่วงแคบระหว่าง 1-5% เท่านั้น จากการทดสอบในงานวิจัยนี้ระบุว่าการเจริญของแร่ดินเพียงเล็กน้อยนี้อาจไม่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของตัวอย่างเกลือหินมากเท่าใดนัก การผันแปรของค่าคุณสมบัติที่ทดสอบได้จะมีผลกระทบมาจากปัจจัยหลักอื่น ๆ คือ ปริมาณเกลือปนของแร่แอนไฮไดรต์ ขนาดของผลึกเกลือ การเรียงตัวของผลึกเกลือเมื่อเทียบกับทิศทางการกด (ซึ่งคาดว่ามีความกระทบมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับตัวอย่างเกลือหินที่ประกอบด้วยผลึกเกลือขนาดใหญ่) การอัดตัวและการกลายตัวของผลึกเกลือที่ประกอบอยู่ในแท่งตัวอย่างและปัจจัยในการทดสอบ

การประเมินปริมาณสิ่งเจือปนในตัวอย่างเกลือหินด้วยตาเปล่าหรือด้วยแว่นขยายมักจะให้ผลที่สูงกว่าความเป็นจริงและอาจมีความคลาดเคลื่อนมากถึงร้อยละ 20 สำหรับประเมินสิ่งเจือปนที่เป็นแร่แอนไฮไดรต์และแร่ดิน

การนำผลงานวิจัยไปประยุกต์ใช้พึงตระหนักว่า การศึกษาผลกระทบของสิ่งเจือปนต่อคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์นี้เป็นการศึกษาผลกระทบสำหรับแท่งตัวอย่างเกลือหิน มิใช่สำหรับมวลเกลือหินในภาคสนาม ดังนั้นการนำค่าคุณสมบัติเหล่านี้ไปวิเคราะห์ในเชิงเสถียรภาพและการออกแบบสำหรับอุโมงค์หรือเหมืองใต้ดินจะต้องพิจารณาปัจจัยอื่นร่วมด้วย อาทิ ผลกระทบของขนาด (Size effect) ผลกระทบของวิถีความเค้น (Stress path) ผลกระทบของ Stress gradient เป็นต้น

ข้อพิสูจน์ที่ได้จากผลงานวิจัยนี้ระบุว่า การเจือปนของแร่แอนไฮไดรต์และขนาดของผลึกเกลือที่ประกอบอยู่ในแท่งตัวอย่างเกลือหินจะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ที่ทดสอบได้ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ที่นำเสนอสามารถนำมาใช้ในการคาดคะเนคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของแท่งตัวอย่างเกลือหินได้อย่างรวดเร็ว โดยการประเมินเชิงเร็ววิทย์ด้วยตาเปล่าหรือด้วยแว่นขยายจากแท่งตัวอย่างเกลือหินที่ขุดเจาะขึ้นมาได้ และนำผลการประเมินนี้มาคาดคะเนคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และอาจมีการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพียงบางจุดหรือบางความลึกเท่านั้น เพื่อยืนยันว่าการคาดคะเนด้วยวิธีนี้มีความแม่นยำเพียงพอ

7.2 ข้อเสนอแนะ

จำนวนและความหลากหลายในเชิงปริมาณและชนิดของสิ่งเจือปนในกลุ่มตัวอย่างเกลือหินที่นำมาทดสอบในงานวิจัยนี้มีไม่เพียงพอที่จะสร้างความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์สำหรับทุกคุณสมบัติอย่างสมบูรณ์ การวิจัยในอนาคตจะสามารถเพิ่มเติมผลการทดสอบและทำให้ความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์สมบูรณ์ขึ้น ซึ่งอาจประกอบด้วย

1. ควรมีการศึกษาผลกระทบของแร่ดินต่อคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน โดยที่ปริมาณแร่ดินอาจผันแปรระหว่างร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ตัวอย่างเกลือหินที่มีแร่ดินเจือปนอยู่มากกว่าร้อยละ 50 อาจเสียสภาพความเป็นเกลือหินไปแล้ว
2. ควรมีการศึกษาผลกระทบของแร่แอนไฮไดรต์ต่อค่าความหนืดเชิงพลาสติกเพิ่มเติม และอาจมีการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวสำหรับตัวอย่างที่เป็นแร่แอนไฮไดรต์บริสุทธิ์ด้วย
3. ควรมีการศึกษาลักษณะเชิงกายภาพและเคมีของแร่แอนไฮไดรต์ที่สามารถผันแปรอยู่ในธรรมชาติ เนื่องจากคุณสมบัติทั้ง 2 นี้จะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของแร่แอนไฮไดรต์เอง
4. ควรมีการศึกษาผลกระทบของขนาดของผลึกเกลือต่อค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดและค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของตัวอย่างเกลือหิน ความเข้าใจในผลกระทบนี้จะทำให้วิศวกรสามารถนำผลที่ทดสอบได้จากห้องปฏิบัติการไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบหรือใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ได้อย่างถูกต้องมากขึ้น
5. ควรมีการศึกษาการผันแปรของการอัดตัวของผลึกเกลือในตัวอย่างเกลือหิน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือการผันแปรของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกซึ่งมักจะปรากฏในกลุ่มตัวอย่างเกลือหินที่นำมาทดสอบ การผันแปรของการอัดตัวนี้อาจศึกษาทางอ้อมโดยใช้ดัชนี เช่น ความหนาแน่นของแท่งตัวอย่าง (Bulk density) และความสามารถในการซึมผ่านของแท่งตัวอย่างเกลือหิน (Permeability) เป็นต้น
6. ควรมีการศึกษาหรือตรวจวัดความชื้นของแท่งตัวอย่างหรือปริมาณน้ำเกลือที่แทรกอยู่ระหว่างผลึกหรือในผลึกซึ่งมักจะพบในมวลเกลือหินที่อยู่ตามธรรมชาติ

7. งานวิจัยนี้เน้นไปที่สิ่งเจือปน 2 ชนิด คือ แร่แอนไฮไดรต์และแร่ดิน เนื่องจากเป็นสิ่งเจือปนหลักที่พบในแท่งตัวอย่างเกลือหินที่ได้รับความอนุเคราะห์ อย่างไรก็ตามมวลเกลือหินที่เกิดขึ้นในธรรมชาติไม่ว่าจากแหล่งใดมักมีสิ่งเจือปนอื่นแทรกอยู่ด้วย อาทิ แร่โพแทช แร่แคลเซียมคาร์บอเนต แร่แมกนีเซียมคลอไรด์ แร่เหล็กออกไซด์ เป็นต้น สิ่งเจือปนเหล่านี้อาจมีการผันแปรในเชิงปริมาณจากมวลเกลือหินในแต่ละแหล่งหรือจากแต่ละชั้นเกลือหิน ซึ่งการศึกษาผลกระทบของสิ่งเจือปนต่อคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์อาจสามารถทำได้ตามแนวทางที่ดำเนินการในงานวิจัยนี้

บรรณานุกรม

- กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม (2546) โครงการการทำเหมืองแร่โพแทช อำเภอบำเหน็จณรงค์ จังหวัดชัยภูมิ
- กิตติเทพ เพ็ญขจร (2543) การวิเคราะห์และออกแบบโพรงที่เกิดจากการผลิตเกลือโดยใช้วิธีละลายในชั้นหินเกลือที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย รหัสโครงการ SUT7-719-43-12-46 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา
- กิตติเทพ เพ็ญขจร (2543) การศึกษาเกี่ยวกับการทิ้งของเสียในหินเกลือในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข รหัสโครงการ SUT7-719-42-12-16 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา
- กิตติเทพ เพ็ญขจร (2544) การร่างคู่มือการทำเหมืองเกลือแบบละลายสำหรับผู้ประกอบการขนาดกลางและขนาดเล็ก ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย รหัสโครงการ SUT7-719-43-12-59 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา
- นเรศ สัตยารักษ์ และทรงภพ พลจันทร์ (2533) เกลือหินใต้ที่ราบสูงโคราช ใน การประชุมวิชาการกรมทรัพยากรธรณี ประจำปี 2533 16-17 สิงหาคม 2533 การจัดการทรัพยากรธรณี กรุงเทพฯ: กองเชื้อเพลิงธรรมชาติ กรมทรัพยากรธรณี
- นเรศ สัตยารักษ์, สมเกียรติ จันทรมหา, เจตต์ จุลวงษ์, ปกรณ์ สุวานิช และธวัช จาปะเกษตร์ (2530) อิทธิพลของชั้นเกลือหินที่มีต่อน้ำใต้ดินในภาคอีสาน ใน การประชุมวิชาการเรื่องธรณีวิทยากับการพัฒนาอีสานเขียว กรุงเทพฯ: สมาคมธรณีวิทยาแห่งประเทศไทย
- ปกรณ์ สุวานิช (2521) แร่โปแตชภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย เอกสารเศรษฐกิจธรณีวิทยา เล่มที่ 22 กองเศรษฐกิจธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี
- ไพรัตน์ เจริญกิจ (2544) แนวคิดการจัดการทรัพยากรเกลือหินภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย ใน การประชุมวิชาการด้านเหมืองแร่ โลหะการและปิโตรเลียมครั้งที่ 6 กรุงเทพฯ
- วรารกร ไม้เรียง และวรวรรณี สุขสาคร (2540) ระบบฐานความรู้สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในประเทศไทย ใน การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 4 กรุงเทพฯ
- สมเกียรติ จันทรมหา (2530) หน้าตาโดมเกลือใต้ที่ราบสูงโคราช ใน การประชุมวิชาการกรมทรัพยากรธรณี ครั้งที่ 4 กรุงเทพฯ: สำนักงานเลขานุการกรม กรมทรัพยากรธรณี
- สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และสิ่งแวดล้อม (2543) วารสารนิวเคลียร์ปริทัศน์ 15(1)

- Adeli, H. (1988). Artificial intelligence and expert systems. In H. Adeli (ed.). **Expert systems in construction and structural engineering** (pp. 1-12). London: Chapman and Hall.
- 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 Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 249-261). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- 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** (Vol. 1-3, pp. 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 Third 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.
- Assis, A.P., and Kaiser, P.K. (1991). Stress path dependence of creep parameters. In **Proceedings of the Seventh International Congress on Rock Mechanics** (pp.177-181). Rotterdam: A. A. Balkema.
- ASTM D2664. Standard test method for triaxial compressive strength of undrained rock core specimens without pore pressure measurements. In **Annual Book of ASTM Standards** (Vol. 04.08). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D2938. Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens. In **Annual Book of ASTM Standards** (Vol. 04.08). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D3967. Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens. In **Annual Book of ASTM Standards** (Vol. 04.08). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D4405. Standard test method for creep of cylindrical soft rock core specimens in uniaxial compressions. In **Annual Book of ASTM Standards** (Vol. 04.08). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.

- ASTM D4543. Standard practice for preparing rock core specimens and determining dimensional and shape tolerances. In **Annual Book of ASTM Standards** (Vol. 04.08). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- Atkinson, B. K., and Meredith, P. G. (1987). Experimental fracture mechanics data for rocks and minerals. In B. K. Atkinson (ed.). **Fracture mechanics of rocks** (pp. 477-525). San Diego: California.
- Aubertin, M. (1996). On the physical origin and modeling of kinematics and isotropic hardening of salt. In **Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 1-18). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Aubertin, M., Gill, D. E., and Ladanyi, B. (1992). Modeling the transient inelastic flow of rock salt. In **Proceedings of the Seventh Symposium on Salt** (vol. 1, pp. 93-104). Netherlands: Elsevier Science Pub.
- Aubertin, M., Julien M. R., Servant, S., and Gill, D. E. (1999). A rate-dependent model for the ductile behavior of salt rocks. **Canadian Geotechnical Journal**. 36 (4): 660-674.
- Aubertin, M., Sgaoula, J., and Gill, D. E. (1993). Constitutive modeling of rock salt: Basic considerations for semi-brittle behavior. In **Proceedings of the Fourth International Symposium on Plasticity and it's Current Applications** (pp. 92). Baltimore.
- Baud, P., Zhu, W., and Wong, T. F. (2000). Failure mode and weakening effect of water on sandstone. **Journal of Geophysical Research**. 105: 16371-16389.
- Bell, F. G. (1978). The physical and mechanical properties of the Fell Sandstones Northumberland England. **Engineering Geology**. 12: 1-29.
- Berest, P., Brouard, B., and Durup, G. (1998). Behavior of sealed solution-mined caverns. In **Proceedings of the Fourth Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 511-524). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Bieniawski, Z. T. (1981). Improved design of coal pillars for mining conditions. In **Proceedings of the First Annual Conference on the Ground Control in Mining** (pp. 12-22). West Virginia university.
- Billiotte, J., Guen, L. C., Deveughele, M., and Brulhet, J. (1996). On laboratory measurements of porosity and permeability of salt rocks (Bressa basis-France). In **Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 221-230). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.

- Bonte, G. (1996). Mechanical aspects of the inhibition of a salt wall by brine initially contained in a cavity. In **Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 263-267). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Boontongloan, C. (2000). **Engineering properties of the evaporitic and clastic rocks of Maha Sarakam Formation, Sakon Nakhon evaporite basin**. M.S. thesis, Asian Institute of Technology, Thailand.
- Boozer, G. D., Hiller, K. H., and Serdengecti, S. (1963). Effect of Pore fluids on the deformation behavior of Rock Subjected to Triaxial Compression. In **Proceedings of the fifth Symposium on the Rock Mechanics** (pp. 579-624). University of Minnesota. Golden, Colorado school of mines.
- Brace, W. F. (1961). Dependence of fracture strength of on grain size. In **Proceedings of the Fourth Symposium on the Rock Mechanics** (pp. 99-103). Pennsylvania University.
- Brace, W. F., and Riley, L. (1972). Static Uniaxial Deformation of 15 Rocks to 30 kb. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 9: 3939-3953.
- Broek, W. M. G. T., and Heilbron, H. C. (1998). Influence of salt behavior on the retrievability of radioactive waste. In **Proceedings of the Fourth Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 561-573). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Brook, N. (1985). The Equivalent core diameter method of size and shape correction in point load testing. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts**. 22: 61-70.
- Brown, C. E. (1993). Use of principal-component, correlation and stepwise multiple-regression analyses to investigation selected physical and hydraulic properties of carbonate-aquifers. **Journal of Hydrology**. 147: 169-195.
- Brown, E. T. (1981). **Rock Characterization Testing & Monitoring, ISRM Suggested Methods**. New York: Pergamon Press.
- Butler, A. G., and Franklin, J. A. (1990). Classex –An expert system for rock mass classification. In R. Brummer (ed.). **Static and dynamic considerations in rock engineering** (pp. 73-80). Brookfield VT: A. A. Balkema.
- Bylia, O.I., et al. (1997). The influence of simple and complex loading on structurechange in two-phase titanium alloy. **Scripta Metall**. 36: 949-954.

- Jai, J. G., Zhao, J., and Hudson, J. A. (1998). Computerization of rock engineering system using neural networks with an expert system. **Rock Mechanics and Rock Engineering**. 31 (3): 135-152.
- Carter, N. L., and Hansen, F. D. (1983). Creep of rock salt: a review. **Tectonophysics**. 92: 275-333.
- Carter, N. L., Horseman, S. T., Russell, J. E., and Handin, J. (1993). Rheology of rock salt. **Structural Geology**. 15 (10): 1257-1272.
- Chokski, A. H., and Langdon, T. G. (1991). Characteristics of creep deformation in ceramics. **Materials Science and Technology**. 7: 577-584.
- Clark, V. A., Tittmann, B. R., and Spencer, T. W. (1980). Effect of Volatiles on Attenuation (Q-1) and Velocity in Sedimentary Rocks. **Journal of Geophysical Research**. 85(B10): 190-198.
- Cleach, J. M. L., Ghazali, A., Deveughele, H., and Brulhet, J. (1996). Experimental study of the role of humidity on the thermomechanical behavior of various halitic rocks. In **Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 231-236). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Cristescu, N., and Hunsche, U. (1996). A comprehensive constitutive equation for rock salt determination and application. In **Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 191-205). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Crouch, S.L. (1972). A note on post-failure stress-strain path dependence in Norite. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 9: 197-204.
- Davey-Wilson, I. E. G., and May, I. M. (1989). Development of knowledge-based system for the selection of groundwater control methods. **Computers and Geotechnics**. 7: 189-203.
- Davey-Wilson, I. E. G. (1991). Development of a prolog based expert system for groundwater control. **Computers and Structures**. 40(1): 185-189.
- Davey-Wilson, I. E. G. (1993). Evaluation of artificial-intelligence and hypertext approaches to a geotechnical expert-system. In B. H. V. Topping and A. I. Khan (eds.). **Information technology for civil and structural engineers** (pp. 109-113). Edinburgh: Civil-Comp Press.

- Deer, W. A., Howie, R. A., and Zussman, J. (1992). **An Introduction to The Rock Forming Mineral**. London: Longmen Group Limited.
- Denby, B., and Kizil, M. S. (1991). Application of expert systems in geotechnical risk assessment for surface coal mine design. **International Journal of Surface Mining and Reclamation**. 5 (2): 75-82.
- DeVries, K. L., Mellegard, K. D., and Callahan, G. D. (2002). **Salt damage criterion proof-of-concept research**. Topical report, DE-FC26-00NT41026 prepared for the U.S. Department of Energy. Pennsylvania.
- Dobereiner, L., and De Fretias, M. H. (1986). Geotechnical properties of weak sandstone. **Geotechnique**. 36 (1): 79-94.
- Donath, F., Meyer, B., Hume, H., and Karakouzian, M. (1988). Core aging and storage effects study of Avery Island Salt. **Waste Management'88**. Arizona. Tuscon.
- Dreyer, W. (1973). **The Science of Rock Mechanics, Part 1: The Strength Properties of Rocks**. Cleveland: Trans Tech Publications.
- Dubey, R. K., and Gairola, V. K. (2000). Influence of structural anisotropy on the uniaxial compressive strength of pre-fatigued rocksalt from Himachal Pradesh, India. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Science**. 37: 993-999.
- Dyke, C. G., and Dobereiner, L. (1991). Evaluating the strength and deformability of sandstones. **Quarterly Journal of Engineering Geology**. 24: 123-134.
- Evans, I. (1961). The tensile strength of coal. **Colliery Engineering**. 38: 428-434.
- Fahy, M. P., and Guccione, M. J. (1979). Estimating strength sandstone using petrographic thin-section data. **Engineering Geology**. 16: 467-485.
- Farmer, I. W. (1983). **Engineering Behavior of Rock** (2nd ed.). New York: Chapman and Hall.
- Farmer, I. W., and Gilbert, M. J. (1984). Time dependent strength reduction of rock salt. In **Proceedings of the First Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 3-18). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Faure, R. M., Mascarelli, D., Vaunat, J., Leroueil, S., and Tavenas, F. (1995). Present state of development of XPENT, Expert-system for slope stability problems. In D.H., Bell (ed.). **Proceedings of the Sixth International Symposium Landslides** (pp. 1671-1678). Rotterdam: A.A. Balkema.

- Fokker, P. A. (1995). **The behavior of salt and salt caverns**. Ph. D. Thesis, Delft University of Technolgy.
- Fokker, P. A. (1998). The micro-mechanics of creep in rock salt. In **Proceedings of the Fourth Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 49-61). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Fokker, P. A., and Kenter, C. J. (1994). The micro mechanical description of rock salt plasticity. In **Eurock'94** (pp. 705-713). Rotterdam: A.A. Balkema.
- Franssen, R. C. M., and Spiers, C. J. (1990). Deformation of polycrystalline salt in compression and in shear at 250-350°C. **Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics, Geological Society Special Publication**. 45: 201-213.
- Franssen, R. C. M. (1998). Mechanical anisotropy of synthetic polycrystalline rock salt. In **Proceedings of the Fourth Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 63-75). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Fredrich, J. T., and Evans, B. (1990). Effect of Grain Size on Brittle and Semibrittle Strength Implications for Micromechanical Modeling of Failure in Compression. **Journal of Geophysical Research**. 95(B7): 907-920.
- Fuenkajorn, K., and Daemen, J. J. K. (1986). Shape effect on ring test tensile strength: Key to Energy Production. In **Proceedings of the Twenty-Seventh U.S. Symposium on Rock Mechanics** (pp. 155-163). Tuscaloosa: University of Alabama.
- Fuenkajorn, K., and Daemen, J. J. K. (1988). Boreholes closure in salt. **Technical Report prepared for the U.S. Nuclear Regulatory Commission, Report No. NUREG/CR-5243 RW**. University of Arizona.
- Fuenkajorn, K., and Daemen, J. J. K. (1992). An empirical strength criterion for heterogeneous tuff. **Engineering geology**. 32: 209-223.
- Fuenkajorn, K., and Jandakaew, M. (2003). Compressed-air energy storage in salt dome at Borabu district, Thailand: Geotechnical Aspects. In **Proceedings of the Thirty-Eighth Symposium on Engineering Geology and Geotechnical Engineering** (pp. 377-391). University of Reno: Nevada.
- Fuenkajorn, K., Phueakphum, D., and Jandakaew, M. (2003). Healing of rock salt fractures. In **Proceedings of the Thirty-Eighth Symposium on Engineering Geology and Geotechnical Engineering** (pp. 393-408). University of Reno: Nevada.

- Ghosh, A., Harpalani, S., and Daemen, J. K. K. (1987). Expert system for coal mine roof bolt design. In I. W. Farmer, J. K. K. Daemen, C. S. Desai, C. E. Glass, and S. P. Neuman (eds.). In **Proceedings of the Twenty-Eighth U.S. Rock Mechanics Symposium** (pp. 1137-1144). Arizona: Tuscon.
- Gokay, M. K. (1993). **Developing Computer Methodologies for Rock Engineering Decisions**. Ph.D. Thesis, Imperial College, University of London.
- Goodman, R. E. (1989). **Introduction to Rock Mechanics**. New York: John Wiley & Sons.
- Gottschalk, R. R., Kronenberg, A. K., Russell, J. E., and Handin, J. (1990). Mechanical Anisotropy of Gneiss: Failure Criterion and Texture Sources of Directional Behavior. **Journal of Geophysics Research**. 95(B13): 613-634.
- Griffith, A. A. (1924). Theory of rupture. In **Proceedings of the First Congression of the Applied Mechanics** (pp. 55-63). Delft: Technische Bockhandel en Drukkerij.
- Grivas, D. A., and Reagan, J. C. (1988). An expert system for the evaluation and treatment of earth slope instability. In C. Bonnard (ed.). In **Proceedings of the Fifth International Symposium On Landslides** (pp. 649-654). Lausanne Brookfield: A.A. Balkema.
- Guangzhi, Y., He, L. and Xuefn, X. (1988). The effect of the stress path on strength of rock. In **Proceedings of the Twenty Ninth U.S. Symposium on Rock Mechanics** (pp. 95-101). Rotterdam: A. A. Balkema.
- Gunsallus, K. L., and Kulhawy, F. H. (1984). A comparative evaluation of rock strength measures. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts**. 21: 233-248.
- Hadizadeh, J., and Law, R. (1991). Water Weakening of Sandstone and Quartzite Deformed at Various Stress and Strain Rates. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 28(5): 431-439.
- Halabe, V., and Einstein, H. H. (1994). SIMSECTION: Knowledge based user interface for tunneling. In F. G. Mclean, D. A. Campbell, and D. W. Harris (eds.). In **Proceedings of the Eighth International Conference Computer Methods and Advance in Gcomechanics, Morgantown** (pp. 429-434). Rotterdam: A.A. Balkema.

- Hamami, M., Tijani, S. M., and Vouille, G. (1996). A methodology for the identification of rock salt behavior using multi-step creep tests. In **Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 53-66). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Handlin, J., and Hager, R. V. (1957). Experimental deformation of sedimentary rock under a confining pressure. **Journal of the American Association for Petroleum Geology**, 41:1-50.
- Handlin, J., Russell, J. E., and Carter, N. L. (1984). Transient Creep of Repository Rocks. **Final Report: Mechanistic Creep Laws for Rock Salts, BMI/ONWI-550, Prepared by Texas A & M research Foundation for Office of Nuclear Waste Isolation**. Columbus, OH: Battelle Memorial Institute.
- Hansen, F. D. (1984). Physical and mechanical variability of natural rock salt. In **Proceedings of the Second Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 23-39). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Hansen, F. D., and Gnirk, P. F. (1975). Design aspects of the Alpha Repository: III. Uniaxial quasi-static and creep properties of the site rock. **Technical memorandum report RSI-0029**. RE/SPEC, Inc., Rapid City, SD (USA).
- Hansen, F. D., Mellegard, K. D., and Senseny, P. E. (1984). Elasticity and strength of the natural rock. In **Proceedings of the First Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 71-83). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Hansen, F. D., Senseny, P. E., Pfeifle, T. W., and Vogt, T. J. (1987). Influence of impurities on creep of salt from the Palo Duro Basin. In **Proceedings of the Twenty-Ninth U.S. Symposium on Rock Mechanics** (pp. 199-206). Rotterdam: A.A. Balkema.
- Hao, S. Y., and Zhang, Q. (1994). An Expert-System for Stability Analysis of Rock Slope. In H. J. Siriwardane and M. M. Zaman (eds.). In **Proceedings of the eighth International Conference Computer Methods and Advances in Geomechanics** (pp. 435-439). Rotterdam: A.A. Balkema.
- Hardy, H. R. (1996). Application of the Kaiser effect for the evaluation old in-situ stress in salt. In **Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Rock Salt** (pp. 85-100). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.

- Hartley, A. (1974). A review of geological factors influencing the mechanical properties of road surface aggregation. **Quaternary Journal of Engineering Geology**. 7: 69-100.
- Hoek, E. (1965). **Rock fracture under static stress conditions**. PhD Thesis , Cape Town University.
- Homoud, A. S., and Masri, G. A. (1998). An Expert System for Evaluating Failure Potential of Cut Slopes and Embankments Using Fuzzy Sets Theory. **Geotechnical Engineering Bullentin**. 7 (4): 249-276.
- Howarth, D. F., and Rowlands, J. C. (1986). Development of an index to quantify rock texture for qualitative assessment of intact rock properties. **Geotechnical Testing Journal**. 9: 169-179.
- Hudson, J. A. (1992). **Rock engineering system: Theory and practice**. New York: Ellis Horwood.
- Hunsche, U., Mingerzahn, G., and Schulze, O. (1996). The influence of textural parameters and mineralogical composition on the creep behaviour of rock salt. In **Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 143-151). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Hunsche, U., and Schulze, O. (1996). Effect of humidity and confining pressure on creep of rock salt. In **Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 237-248). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Hunsche, U. E., and Albrecht, H. (1990). Results of true triaxial strength tests on rock salt. **Engineering Fracture Mechanics**. 35: 867-877.
- Hurlbut, C. S. (1971). **Dana's Manual of Mineralogy** (18th ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Inoue, A., Kawakami, H. and Fujii, T. (1998). The effect of loading path on mechanical responses of a glass fabric composite at low cyclic fatigue under tension/torsion biaxial loading. In **American Society for Composite (ASC) the 13th Annual Technical Conference**. Maryland.
- Jaeger, J.C. (1967). Brittle fracture of rocks. In **Proceedings of the Eighth U.S. Symposium on Rock Mechanics**. Baltimore: Port City Press.
- Jaeger, J. C., and Cook, N. G. W. (1979). **Fundamentals of Rock Mechanics**. London: Chapman and Hall.
- Jandakaew, M. (2003). **Experimental assessment of stress path effects on salt deformation**. M.S. Thesis, Suranaree University of Technology, Thailand.

- Jeremic, M. L. (1994). **Rock Mechanics in Salt Mining** (530 pp.). Rotherdam: A.A. Balkema.
- Korshunov, A.A., et al. (1996). Grain-Structure refinement in titanium alloy under different loading schedules. **Journal of Material Sciences**. 31: 4635-4639.
- Lama, R. D., and Vutukuri, V. S. (1978). **Handbook on Mechanical Properties of Rocks (Vols. II, III): Series on Rock and Soil Mechanics**. Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Langer, M. (1984). The Rheological Behaviour of Rock Salt. In **Proceedings of the First Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp.201-240). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Lee, D.H., Juang, C.H., Chen, J.W., Lin, H.M. and Shieh, W.H. (1999). Stress paths and mechanical behavior of a sandstone in hollow cylinder tests. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 36: 857-870.
- Lindner, E. N., and Brady, B. H. G. (1984). Memory aspects of salt creep. In **Proceedings of the First Conference on the Mechanics Behavior of Salt** (pp. 241-273). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Lundborg, N. (1967). The strength-size relation of granite. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 4: 267-272.
- Lux, K. H., and Heusermann, S. (1983). Creep Tests on Rock Salt with Changing Load as a Basis for the Verification of Theoretical Material Laws. In **Proceedings of the Sixth International Symposium on Salt** (Vol. 1, pp. 417-435). Alexandria, VA: Salt Institute.
- Lux, K. H., and Rokahr, R. (1984). Laboratory investigations and theoretical statements as a basis for the design of cavern in rock salt formation. In **Proceedings of the First Conference on the Mechanics Behavior of Salt** (pp. 169-179). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Mirza, U. A. (1984). Prediction of creep deformations in rock salt pillars. In **Proceedings of the First Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 311-337). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Mirza, U. A., Potts, E. L. J., and Szeki, A. (1980). Influence of Volume on Creep Behavior of Rock Salt Pillars. In A. H. Coogan and L. Hauber (eds). In **Proceedings of the Fifth International Symposium on Salt** (pp. 379-392). Cleveland, Ohio: The Northern Ohio Geological Society.

- Moula, M. (1993). **Acknowledge based system to assist in the selection of appropriate geotechnical field tests**. Ph. D. Thesis, University of Durham.
- Munson, D. E., and Dawson, P. R. (1984). Salt Constitutive Modeling Using Mechanism Maps. In **Proceedings of the First Conference on the Mechanics Behavior of Salt** (pp. 717-737). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Munson, D. E., and Wawersik, W. R. (1993). Constitutive modeling of salt behavior - State of the technolog. In **Proceedings of the Seventh International Congression of the Rock Mechanics** (vol. 3, pp. 1797-1810). A.A. Balkema.
- Nair, K., and Boresi, A. P. (1970). Stress analysis for time dependent problems in rock mechanics. In **Proceedings of the Second Congress of the International Society for Rock Mechanics** (Vol. 2, No. 4, pp. 531-536). Belgrade.
- National Bureau of Standard Monograph 167. (1981). **Physical Properties Data for Rock Salt**. Washington: U.S. Government printing office.
- Neaupane, K. M., and Adhikari, N. R. (2002). Application of Neural Network for the Prediction of Settlements above Tunnels. **Research and Development Journal**. 13(1): 9-17.
- Nesse, W. D. (2000). **Introduction to Mineralogy**. New York: Oxford University Press.
- Nickel, E. H., and Nichols, M. C. (1991). **Mineral Reference Manual**. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Olsson, W. A. (1974). Grain Size Dependence of Yield Stress in Marble. **Journal of Geophysics Research**. 79(32): 4859-4862.
- Onodera, T. F., and Asoka Kumara, H. M. (1980). Relation between texture and mechanical properties of crystalline rocks. **Bulletin of the International Association for Engineering Geology**. 22: 173-177.
- Padmanabhan, K.A., Vasin, R.A., and Enikeev, F.U. (2001). **Superplastic flow: Phenomenology and mechanics**. Berlin: Springer.
- Palchik, V. (1999). Influence of Porosity and Elastic Modulus on Uniaxial Compressive Strength in Soft Brittle Porous Sandstone. **Rock Mechanics and rock engineering**. 32(4): 303-309.
- Paterson, M. S. (1978). **Experimental rock deformation the brittle field**. Springer-Verlag. New York.

- Peach, C. J. (1996). Deformation, dilatancy and permeability development in halite/anhydrite composites. In **Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 153-166). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Phueakphum, D. (2003). **Compressed-air energy storage in rock salt of the Maha Sarakham Formation**. M.S. Thesis, Suranaree University of Technology, Thailand.
- Plookphol, T. (1987). **Engineering properties of the evaporite in the Khorat Plateau**. M.S. thesis, Asian Institute of Technology, Thailand.
- Podnieks, E. R., Chamberlain, P. G., and Thill, R. E. (1972). Environmental Effect on Rock Properties. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 9(6): 699-712.
- Price, N. J. (1963). The Influence of Geological Factors on the Strength of Coal Measure Rocks. **Geological Magazine**. 100: 428-443.
- Prikryl, R. (2001). Some Microstructural Aspects of Strength Variation in Rock. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 38: 671-682.
- Pudewills, A., Muller-Hoeppe, N. and Papp, R. (1995). Thermal and thermo-mechanical analyses for disposal in drifts of a repository in rock salt. **Nuclear Technology**. 1: 79-88.
- Pyrak-Nolte, L. J. (1996). The seismic Response of Fractures and the Interrelation among Fractures Properties. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 33(8): 787-802.
- Raj, S. V., and Pharr, G. M. (1992). Effect of temperature on the formation of creep substructure in sodium chloride single crystal. **American Ceramic Society** 75. (2): 347-352.
- Reddish, D. J., Dunham, R. K., and Yao, X. L. (1994). An expert-system for assessment of surface structural damage in mining areas. In B.O. Skipp (ed.). **Risk and reliability in ground engineering** (pp. 134-144). London: Thomas Telford.
- Schneefub, J., and Droste, J. (1996). Thermomechanical effects in backfilled drifts. In **Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 373-380). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Senseny, P. E. (1984). Specimen size and history effects on creep of salt. In **Proceedings of the First Conference on the Mechanics Behavior of Salt** (pp. 369-379). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.

- Senseny, P. E., Handin, J. W., Hansen, F. D., and Russell, J. E. (1992). Mechanical behavior of rock salt: phenomenology and micro-mechanisms. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences** 29. 4: 363-37.
- Senseny, P. E., Pfeifle, T. W., and Mellegard, K. D. (1986). Exponential time constitutive law for Palo Duro Unit 4 salt from the J. Friemel No. 1 Well. **Technical Report, BMI/ONWI-595, prepared by RE/SPEC Inc., for the Office of Nuclear Waste Isolation.** Columbus, OH: Battelle Memorial Institute.
- Shakoor, A., and Bonelli, R. E. (1991). Relationship between petrographic characteristics, engineering index properties, and mechanical properties of selected sandstone. **Bulletin of the Association for Engineering Geology.** 28: 55-71.
- Singh, B., and Goel, R. K. (2001). **Rock Mass Classification: A Practical Approach in Civil Engineering.** Netherland: Elsevire Science.
- Sinha, A. K., and Sengupta, M. (1989). Expert system approach to slope stability. **Mining Science and Technology.** 8: 21-29.
- Sirat, M., and Talbot, C. J. (2001). Application of artificial neural networks to fracture analysis at the Aspo HRL, Sweden: fracture sets classification. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences.** 38: 621-639.
- Skrotzki, W., and Haasen, P. (1988). The role of cross-slip in the steady-state creep of salt. In **Proceedings of the Second Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 69-81). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Swanson, S.R. and Brown, W.S. (1971). An observation of loading path independence of fracture in rock. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.** 8: 277-281.
- Tepnarong, P. (2002). **Theoretical and experimental studies to determine compressive and tensile strengths of rocks, using modified point load testing.** M.S. Thesis, School of Geotechnology, Suranaree University of Technology, Thailand.
- Toll, D. G. (1995). The Role of a knowledge-based system in interpreting geotechnical information. **Geotechnique.** 45 (3): 525-531.
- Tominaga, Y ., Kon, N., Arakawa, M., and Yamaguchi, S. (1989). Development of an expert system for climate control underground. **Today's Technology for The Mining and Metallurgical Industries.** Japan: Dotesios Printers.

- Turk, N., and Dearman, W. R. (1986). A correction equation on the influence of length-to-diameter ratio on the uniaxial compressive strength of rocks. **Engineering Geology**. 22: 293-300.
- Ulusay, R., Tureli, K., and Ider, M. H. (1994). Prediction of engineering properties of a selected litharenite sandstone from its petrographic characteristics using correlation and multivariate statistical techniques. **Engineering Geology**. 37: 135-157.
- Varo, L., and Passaris, E. K. S. (1977). The Role of Water in the Creep Properties of Halite. In **Proceedings of the Conference on Rock Engineering** (pp. 85-100). University of Newcastle upon Tyne. England.
- Versluis, S., and Lindner, E. (1984). Geotechnical behaviour of salt under repository conditions: Radioactive waste management. In **Proceedings of an International Conference** (Vol. 3, pp. 433-441). Seattle, Vienna: International Atomic Energy Agency.
- Vutukuri, V. S., Lama, R. D., and Saluja, S. S. (1974). **Handbook on Mechanical Properties of Rocks** (Vol. 1). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Wanten, P. H., Spiers, C. J., and Peach, C. J. (1996). Deformation of NaCl single crystals at $0.27T_m < T < 0.44T_m$. In **Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 117-128). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Wawersik, W. R. (1988). Alternatives to a power-law creep model for rock salt at temperatures below 160°C . In **Proceedings of the Second Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 103-126). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Wawersik, W. R., and Hannum, D. W. (1980). Mechanical behavior of New Mexico rock salt in triaxial compression up to 200°C . **Journal of Geophysical Research**. 85: 891-900.
- Wawersik, W. R., and Preece, D. S. (1981). Creep testing of salt-procedure, problems and suggestions. In **Proceedings of the First Conference on the Mechanics Behavior of Salt** (pp. 421-449). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Wetchasat, K. (2002). **Assessment of mechanical performance of rock salt formations for nuclear waste repository in northeastern Thailand**. M.S. Thesis, School of Geotechnology, Suranaree University of Technology, Thailand.
- Wharry M. B., and Ashley D. B. (1986). Resolving subsurface risk in construction using an expert system. **Technical Report UTCEPM-86-1**. University of Texas: Austin.

- Winchell, A. N. (1948). **Elements of Optical Mineralogy: An Introduction to Microscopic Petrography** (5th ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Wong, T. F., David, C., and Zhu, W. (1997). The transition from Brittle faulting to cataclastic flow in Porous Sandstones: Mechanical deformation. **Journal of Geophysical Research**. 102: 3009-3025.
- Yahya, O. M. L., Aubertin, M., and Julien, M. R. (2000). A unified representation of the plasticity: Creep and relaxation behavior of rock salt. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 37(5): 787-800.
- Yu, T. R., and Vongpaisan, S. (1996). New blast damage criteria for underground blasting. **CIM Bulletin**. 89(998): 139-145.
- Zhang, Q., Mo, Y. B., and Tian, S. F. (1988). An expert system for classification of rock masses. In P. A. Cundall, R. L. Sterling, and A. M. Starfield (eds.). In **Proceedings of the Twenty-Ninth U.S. Symposium** (pp. 283-288). Brookfield: A.A. Balkema.

ภาคผนวก ก

ข้อมูลเชิงกลศาสตร์และเชิงเรขาคณิตของเกลื้อหิน

ตารางที่ ก-1 ข้อมูลเชิงกลศาสตร์และเชิงแร่วิทยาของเกลือหิน

Locations	Crystal Size (mm)	Percent of Impurities				Plasto-viscosity (GPa.day)	Tensile strength (MPa)	Compressive strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Sources
		Clay mineral	Iron oxides	Calcium carbonate	Anhydrite					
Maha Sarakham Formation Upper Salt, Khorat Basin Thapra, Khonkaen, Thailand	Avg. 5 mm	1-5	-	-	20	-	1.6	26.29-30.21	-	Fuenkajorn and Jandakaew (2003)
Maha Sarakham Formation Middle Salt, Sakhon Nakorn Basin, Udon Thani, Thailand	1-10 mm Avg. 7 mm	1-5	-	-	5-15	3.55-19.5	1.7	32.65-37.07	21.6-33.8	
Maha Sarakham Formation Lower Salt, Sakhon Nakorn Basin, Udon Thani, Thailand	1-10 mm Avg. 7 mm	-	-	-	-	-	1.6	31.1	28.2	
Maha Sarakham Formation Middle Salt, Sakhon Nakorn Basin, Udon Thani, Thailand	1-10 mm Avg. 7 mm	1-20	-	-	1-50	-	1.7-1.9	23.8-35.8	-	Phueakphum (2003)
Maha Sarakham Formation Khorat Basin Bamnet Narong Area, Thailand	Avg. 5 mm	-	-	-	-	-	3.36	27.91	-	กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ (2546)

ตารางที่ ก-1 ข้อมูลเชิงกลศาสตร์และเชิงแร่วิทยาของเกลือหิน (ต่อ)

Locations	Crystal Size (mm)	Percent of Impurities				Plasto-viscosity (GPa.day)	Tensile strength (MPa)	Compressive strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Sources
		Clay mineral	Iron oxide	Calcium carbonate	Anhydrite					
Maha Sarakham Formation Middle Salt, Sakhon Nakorn Basin, Udon Thani, Thailand	Avg. 5 mm	-	-	-	-	-	1.5	23.0	-	Wetchasat (2002)
Maha Sarakham Formation Lower Salt, Sakhon Nakorn Basin, Udon Thani, Thailand	Avg. 5 mm	-	-	-	-	-	-	31.1	24.7	
Maha Sarakham Formation Middle Salt, Sakhon Nakorn Basin, Udon Thani, Thailand	Avg. 5 mm	-	-	-	-	-	1.44-2.17	23.8-25.99	26.2	Boontongloan (2000)
Maha Sarakham Formation Lower Salt, Sakhon Nakorn Basin, Udon Thani, Thailand	Avg. 5 mm	-	-	-	-	-	2.02	24.9-32.7	25.1	
Maha Sarakham Formation Middle salt, Khorat Basin Banmet Narong Area, Thailand	Avg. 5 mm	-	-	-	-	-	2.02	30.87	29.66	Plookphol (1987)

ตารางที่ ก-1 ข้อมูลเชิงกลศาสตร์และเชิงแร่วิทยาของเกลือหิน (ต่อ)

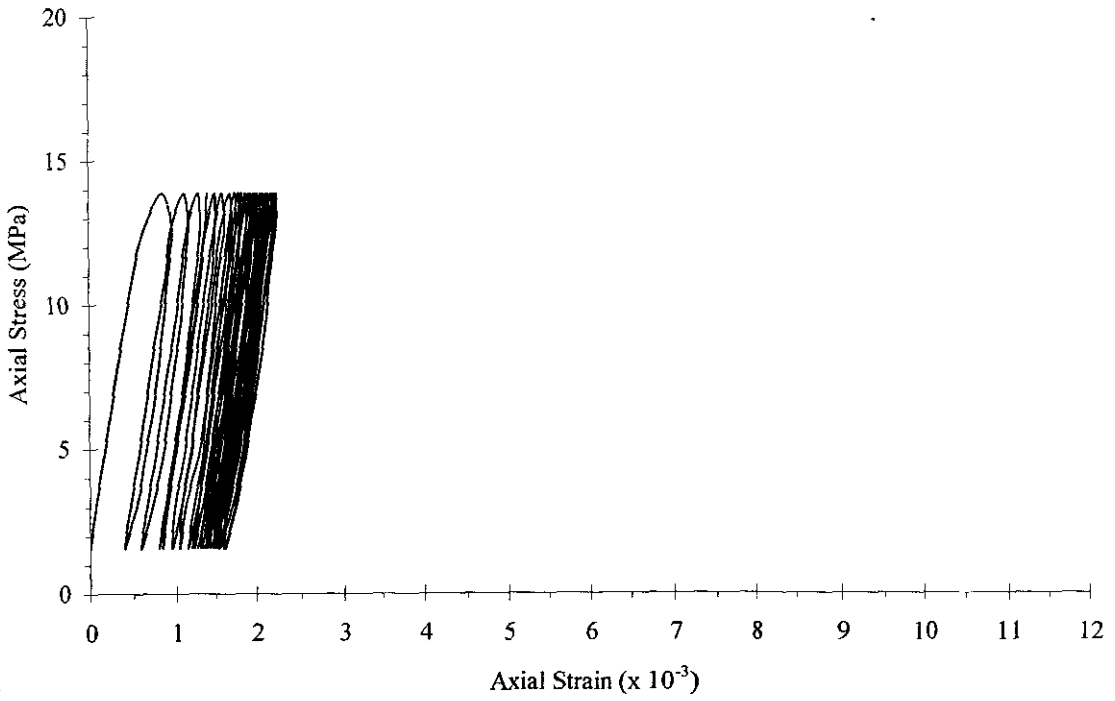
Locations	Crystal Size (mm)	Percent of Impurities				Plasto-viscosity (GPa.day)	Tensile strength (MPa)	Compressive strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Sources
		Clay mineral	Iron oxide	Calcium carbonate	Anhydrite					
Maha Sarakham Formation Lower salt, Khorat Basin Bannet Narong Area, Thailand	Avg. 5 mm					-	1.22	27.95	30.17	Plookphol (1987)
Avery Island, Dome Salt North America	2.5-15 Avg. 7.5 mm	1	-	0.1	1	-	1.17	23.1	21-38.2	Hansen, Mellegard and Senseny (1984)
Bay Gas Well No. 2 McIntosh Salt Dome, Alabama, America	-	-	-	-	1-6	-	1.11-1.53	15.3-18.3	23.7-29.5	DeVries, Mellegard and Callahan (2002)
Babers Hill, Texas	Avg. 8 mm	-	-	-	-	-	1.7	25.1	-	
Cote Blanche, Dome Salt North America	2-25 Avg. 10 mm	1	-	-	1	-	1.93	25.2	24.1	Hansen, Mellegard and Senseny (1984)

ตารางที่ ก-1 ข้อมูลเชิงกลศาสตร์และเชิงแร่วิทยาของเกลือหิน (ต่อ)

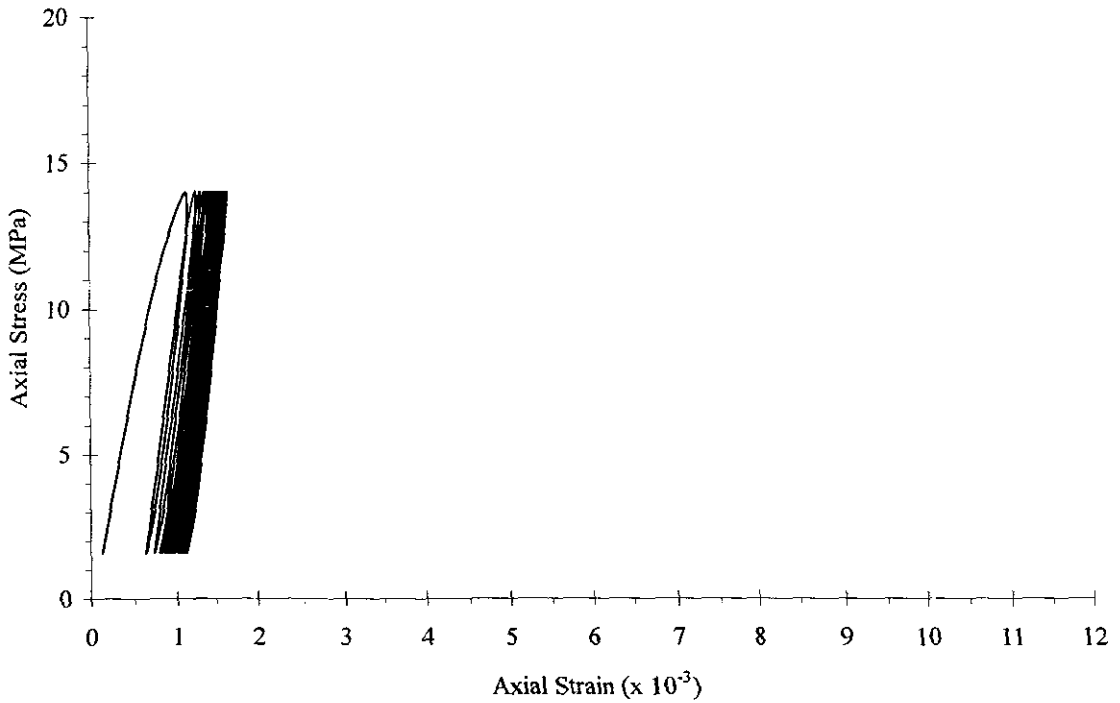
Locations	Crystal Size (mm)	Percent of Impurities				Plasto-viscosity (GPa.day)	Tensile strength (MPa)	Compressive strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Sources
		Clay mineral	Iron oxide	Calcium carbonate	Anhydrite					
Hangendsalz (z2HG) Sarstedt Salt (Dome), Germany	Fine	-	-	-	1	10-23.3	-	-	-	Hfunsche, Mingerzahn and Schulze (1996).
Hauptsalz, Sarstedt Salt (Dome), Germany	Fine-Medium	-	-	-	5	4.67-5	-	-	-	
Himachal Lower Shali Formation Pradesh, India	Avg. 10 mm	18.92	0.20-0.24	-	1	-	-	29.33	-	Dubey and Gairiola (2000)
Jefferson Island, Dome Salt North America	3-15 Avg. 5 mm	-	-	-	2	-	1.54	24	25.34.4	Hansen, Mellegard and Senseny (1984)
Lyons, Bedded Salt North America	10	1	-	-	-	-	1.56	25.2	-	
McIntosh salt dome Alabama, America	-	-	-	-	1-6	-	1.3	18.7	-	DeVries, Mellegard and Callahan (2002)
Napoleonville, Louisiana	2.5-15 Avg. 7.5 mm	-	-	-	-	-	1.6	21.2	-	

ตารางที่ ก-1 ข้อมูลเชิงกลศาสตร์และเชิงแร่วิทยาของเกลือหิน (ต่อ)

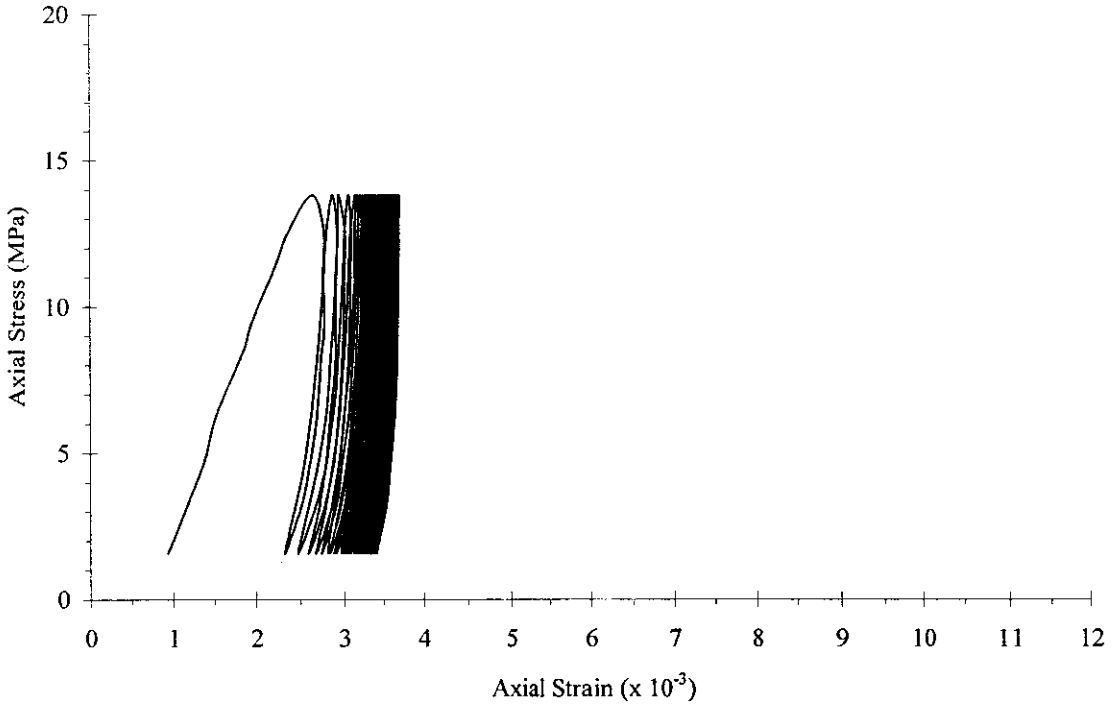
Locations	Crystal Size (mm)	Percent of Impurities				Plasto-viscosity (GPa.day)	Tensile strength (MPa)	Compressive strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Sources
		Clay mineral	Iron oxide	Calcium carbonate	Anhydrite					
Paradox Basin, Anticlinal Salt, North America	3-15 Avg. 5 mm	-	-	-	2	-	2.61	33.6	25.2-36.3	Hansen, Mellegard and Senseny (1984)
		-	-	-	4	-	1.72	22.1	19-33.4	
Permian, Bedded Salt North America	>10	-	-	-	-	-	1.32	13.3	26.7-36.4	Fuenkajorn and Daemen (1988)
		1	-	-	2	-	1.59	17-19	1.45-26.90 1.92-55.63	
Salado Formation Permian Basin New Mexico, North America	2-25 Avg. 10 mm	-	-	-	-	-	1.26 (1900 ft) 1.63 (2700 ft)	16.9 25.7	29.6-36.5	Hansen, Mellegard and Senseny (1984)
		7	-	-	3	-				



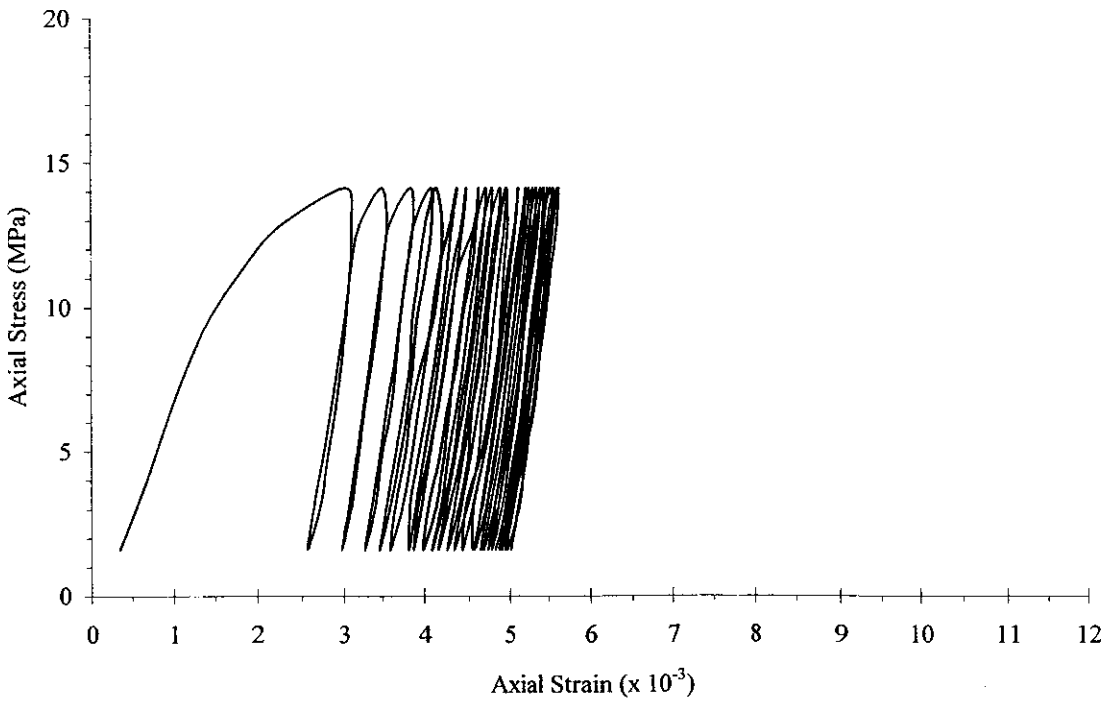
รูปที่ ข-1 ผลการทดสอบการกดแบบวัฏจักรของตัวอย่างเกลือหินหมายเลข BD99-2-CC01 โดยมีจำนวนรอบการกดเท่ากับ 25 รอบ



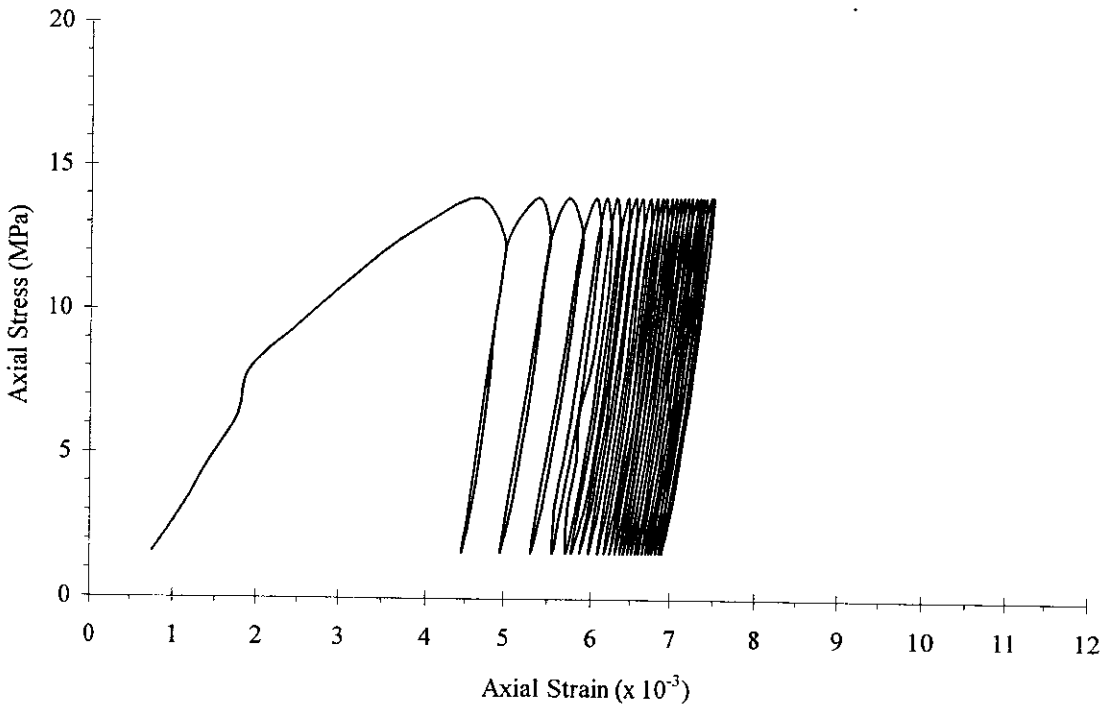
รูปที่ ข-2 ผลการทดสอบการกดแบบวัฏจักรของตัวอย่างเกลือหินหมายเลข BD99-1-CC02 โดยมีจำนวนรอบการกดเท่ากับ 50 รอบ



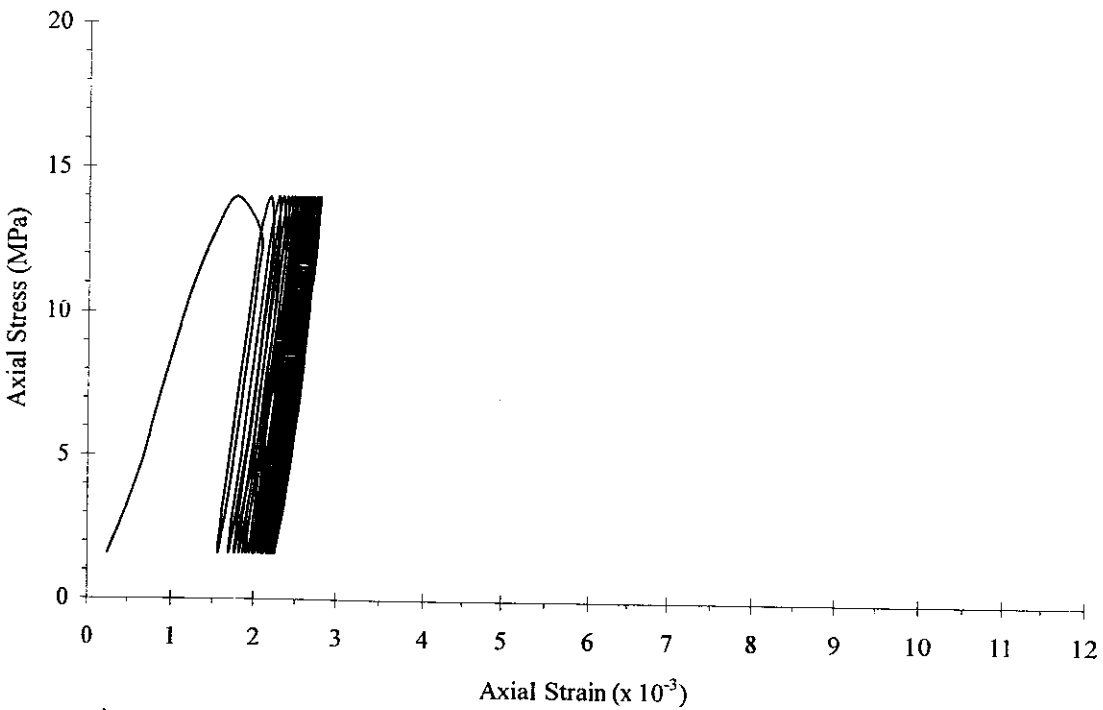
รูปที่ ช-3 ผลการทดสอบการกดแบบวัฏจักรของตัวอย่างเกลือหินหมายเลข BD99-2-CC03 โดยมีจำนวนรอบการกดเท่ากับ 50 รอบ



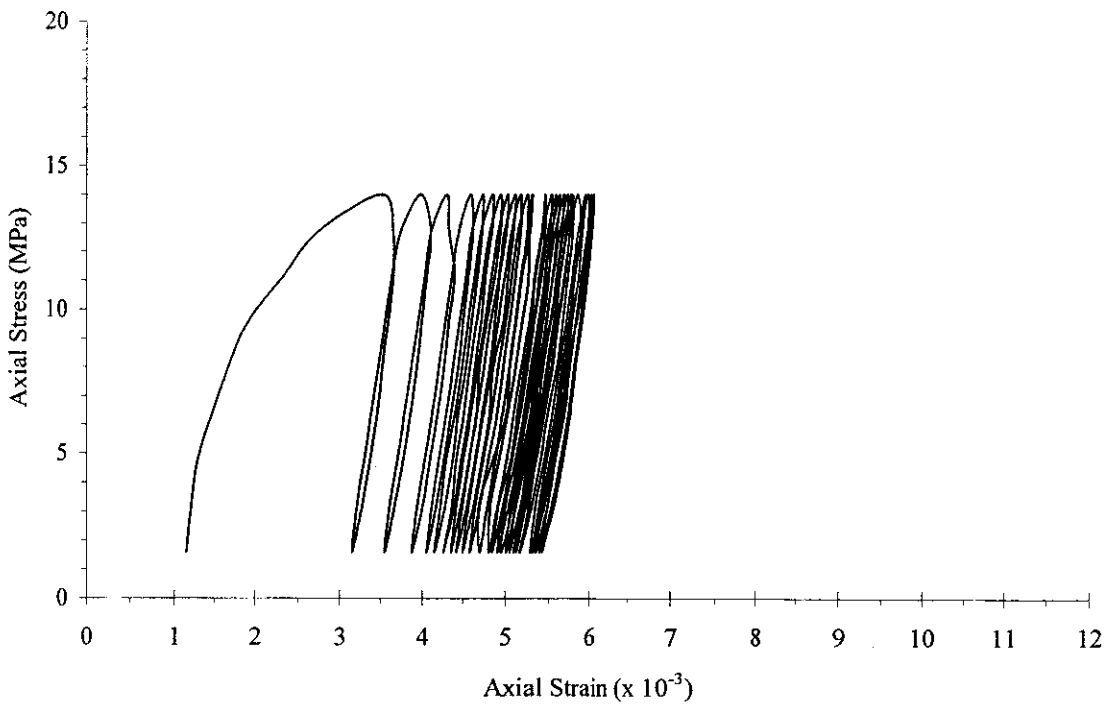
รูปที่ ช-4 ผลการทดสอบการกดแบบวัฏจักรของตัวอย่างเกลือหินหมายเลข BD99-1-CC04 โดยมีจำนวนรอบการกดเท่ากับ 25 รอบ



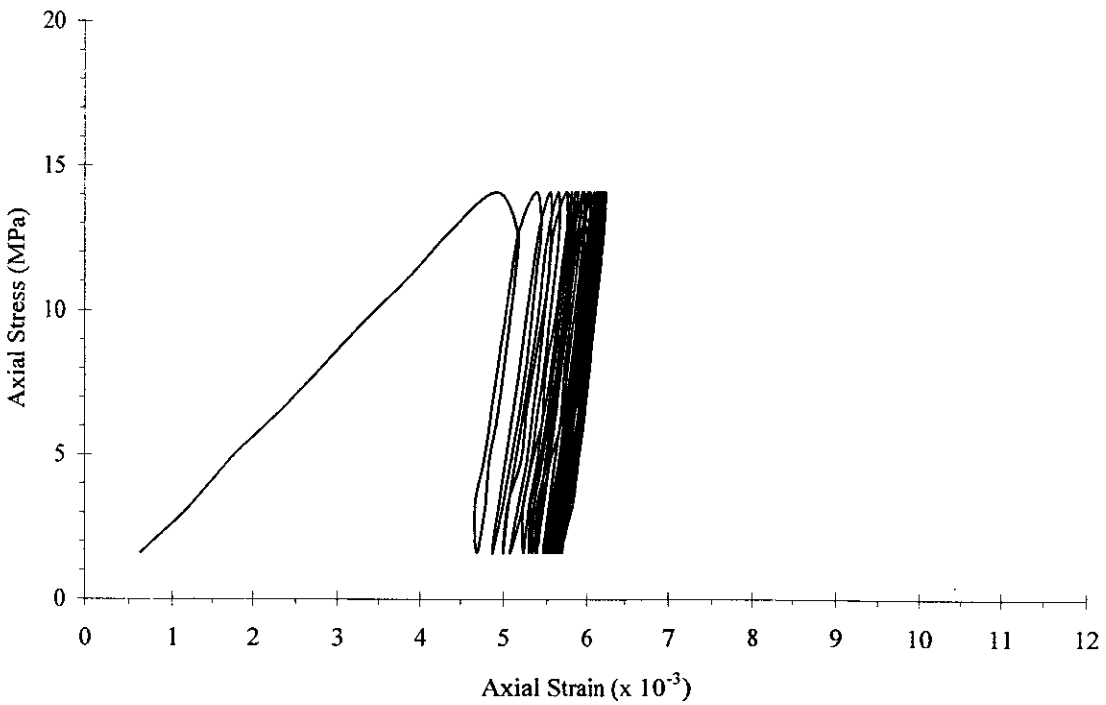
รูปที่ ข-5 ผลการทดสอบการกดแบบวัฏจักรของตัวอย่างเกลือหินหมายเลข BD99-2-CC05 โดยมีจำนวนรอบการกดเท่ากับ 25 รอบ



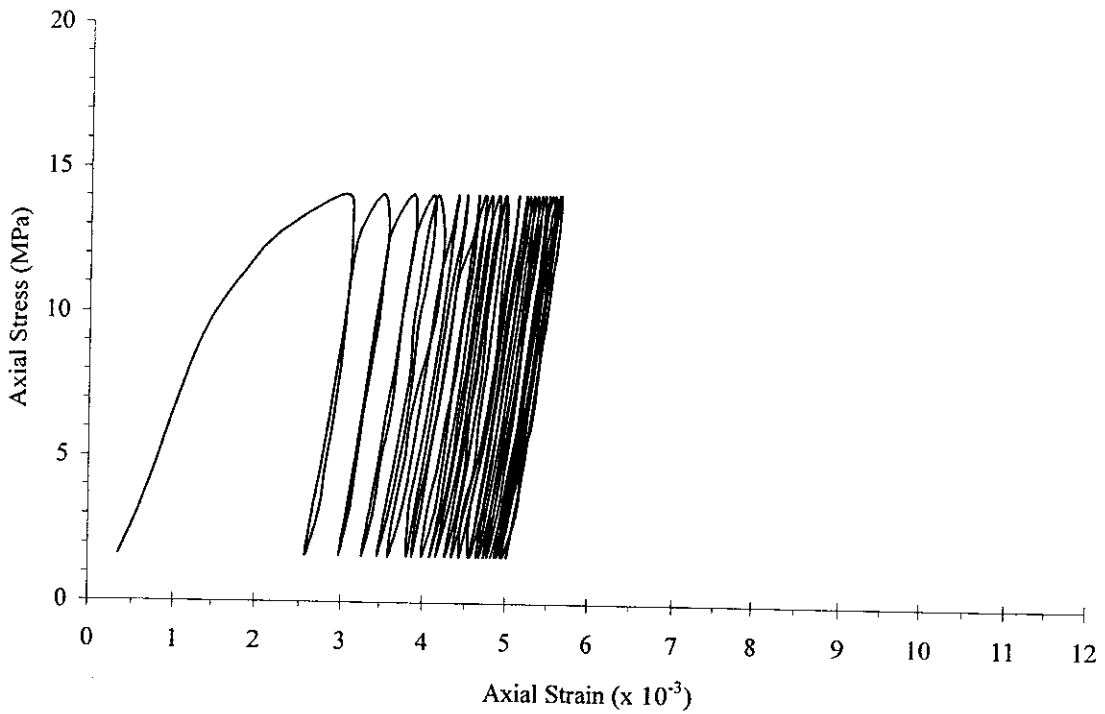
รูปที่ ข-6 ผลการทดสอบการกดแบบวัฏจักรของตัวอย่างเกลือหินหมายเลข BD99-1-CC06 โดยมีจำนวนรอบการกดเท่ากับ 25 รอบ



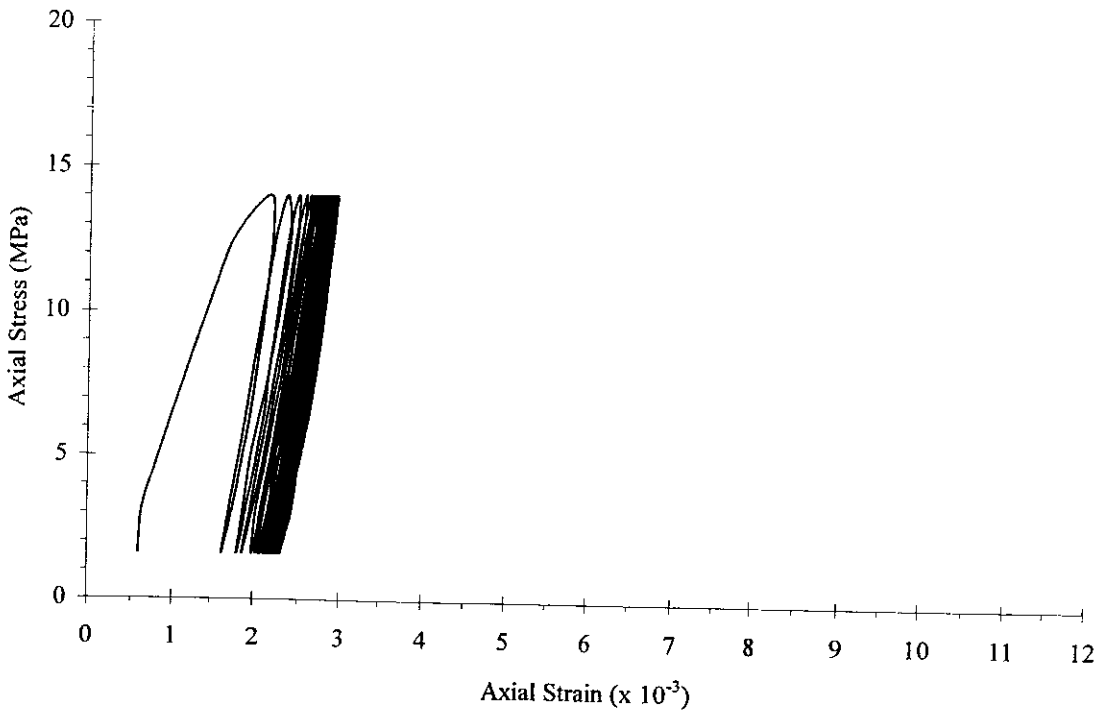
รูปที่ ข-7 ผลการทดสอบการกดแบบวัฏจักรของตัวอย่างเกลือหินหมายเลข BD99-1-CC07 โดยมีจำนวนรอบการกดเท่ากับ 25 รอบ



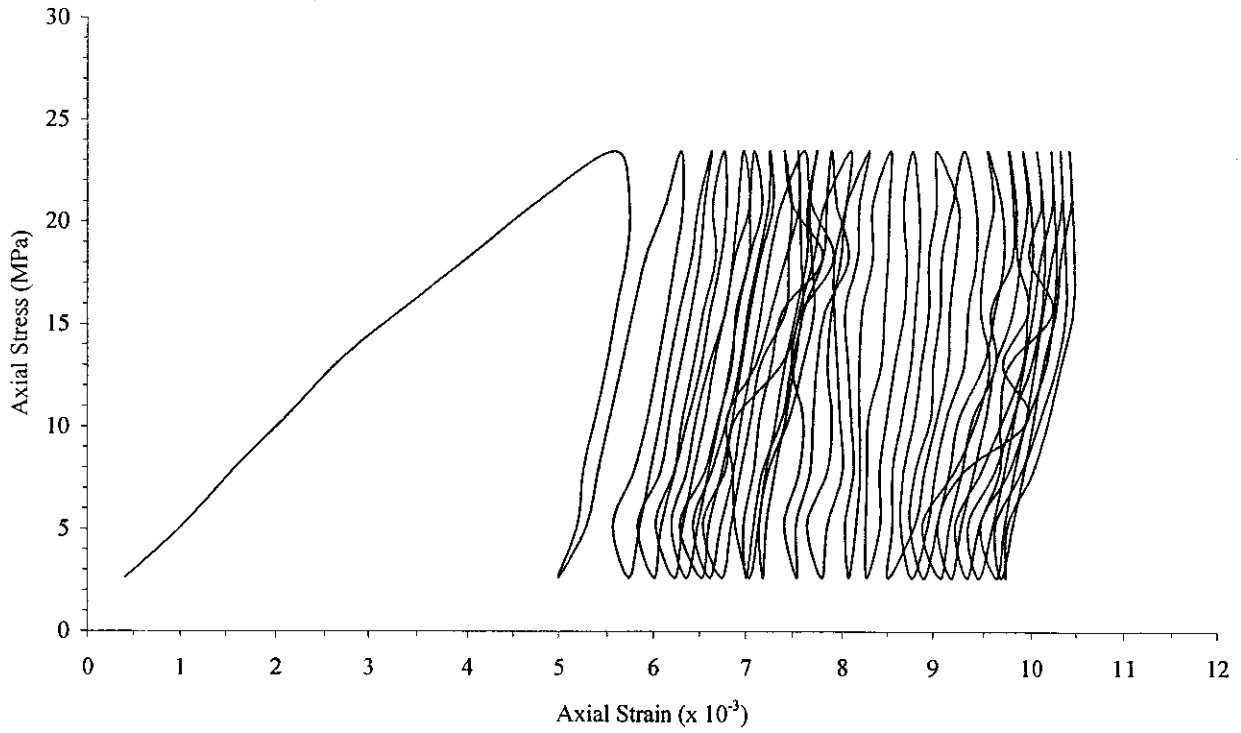
รูปที่ ข-8 ผลการทดสอบการกดแบบวัฏจักรของตัวอย่างเกลือหินหมายเลข BD99-1-CC08 โดยมีจำนวนรอบการกดเท่ากับ 25 รอบ



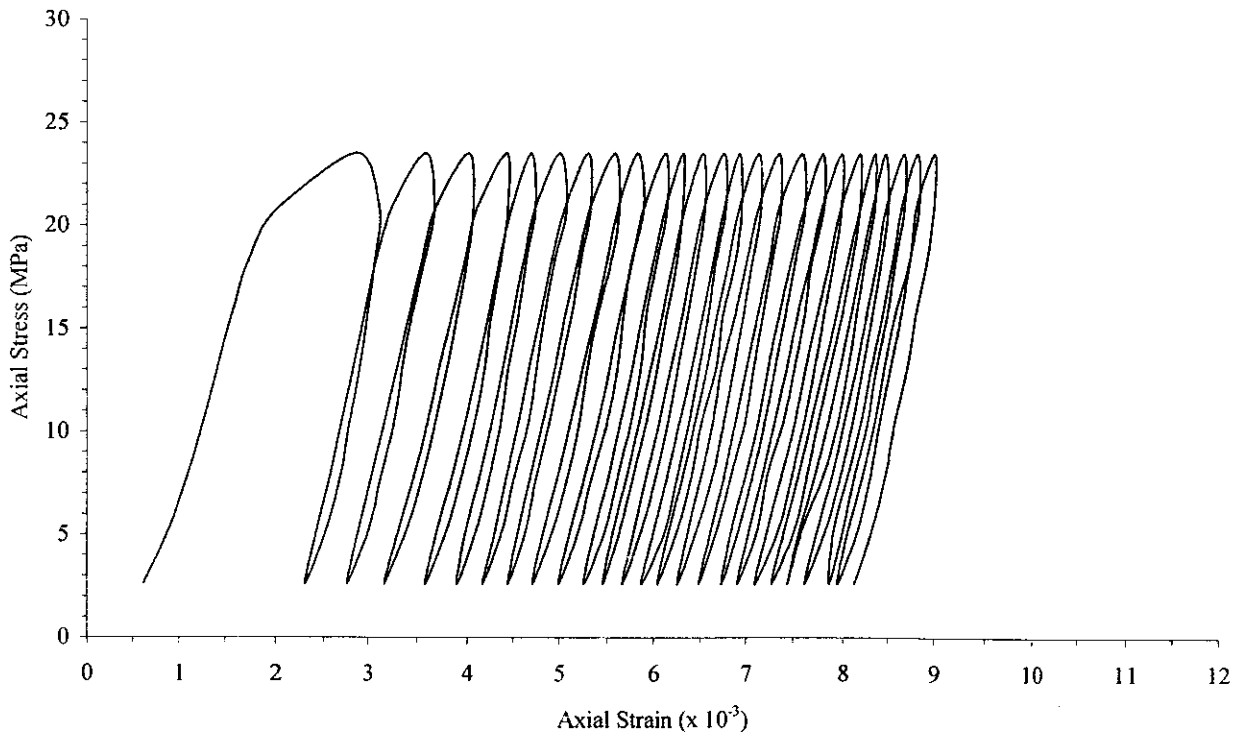
รูปที่ ข-9 ผลการทดสอบการกดแบบวัฏจักรของตัวอย่างเกลือหินหมายเลข BD99-1-CC09 โดยมีจำนวนรอบการกดเท่ากับ 25 รอบ



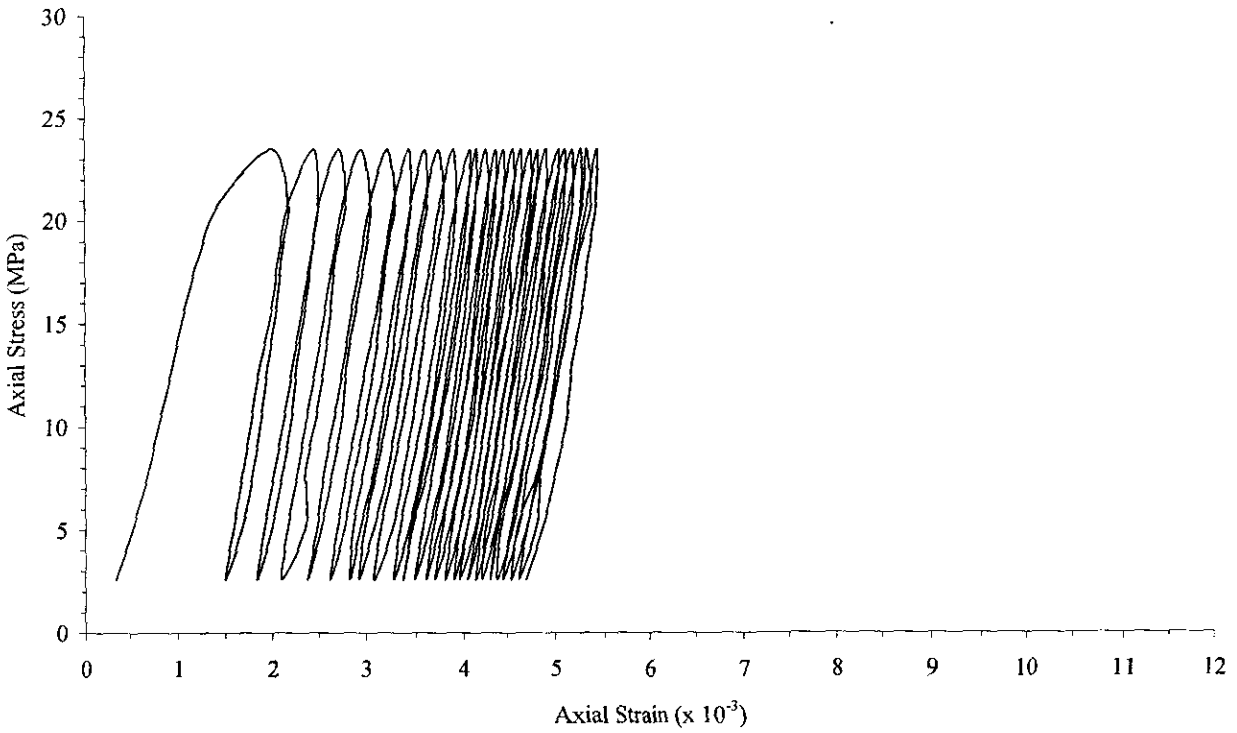
รูปที่ ข-10 ผลการทดสอบการกดแบบวัฏจักรของตัวอย่างเกลือหินหมายเลข BD99-1-CC10 โดยมีจำนวนรอบการกดเท่ากับ 25 รอบ



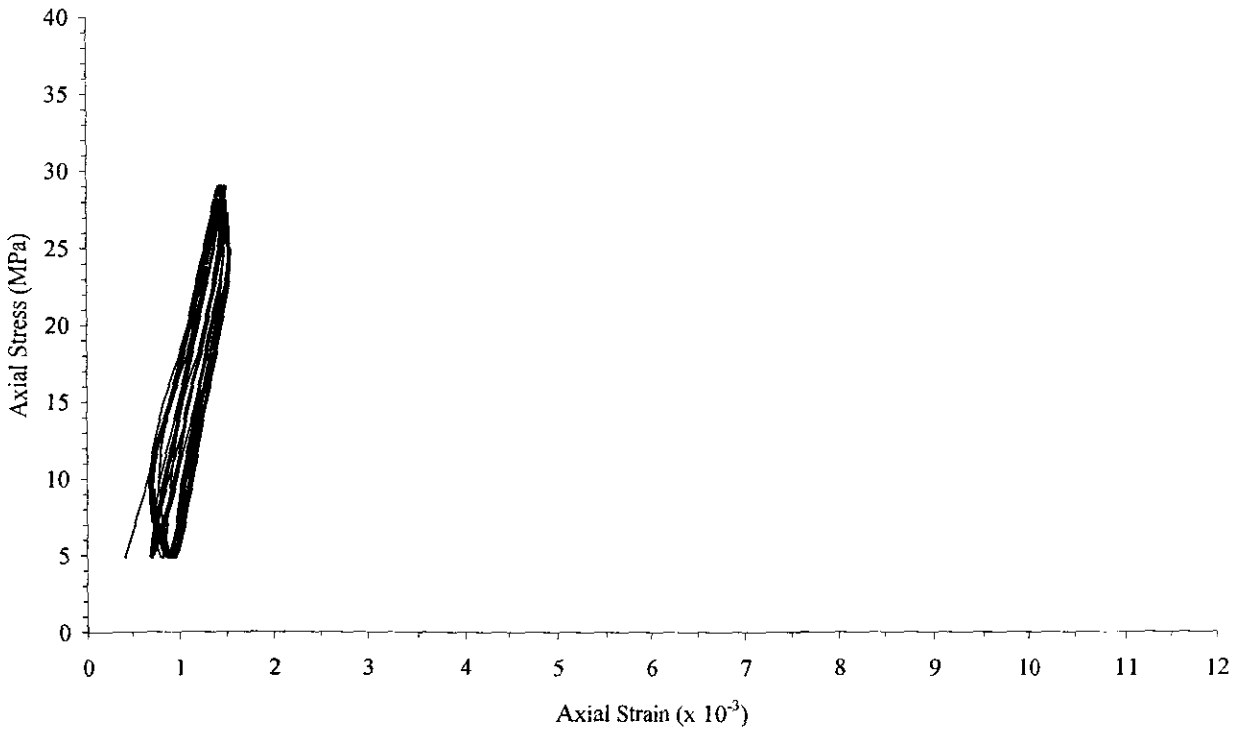
รูปที่ ข-11 ผลการทดสอบการกดแบบวัฏจักรของตัวอย่างเกลือหินหมายเลข SS-MS-CC11 โดยมีจำนวนรอบการกดเท่ากับ 25 รอบ



รูปที่ ข-12 ผลการทดสอบการกดแบบวัฏจักรของตัวอย่างเกลือหินหมายเลข SS-LS-CC12 โดยมีจำนวนรอบการกดเท่ากับ 25 รอบ



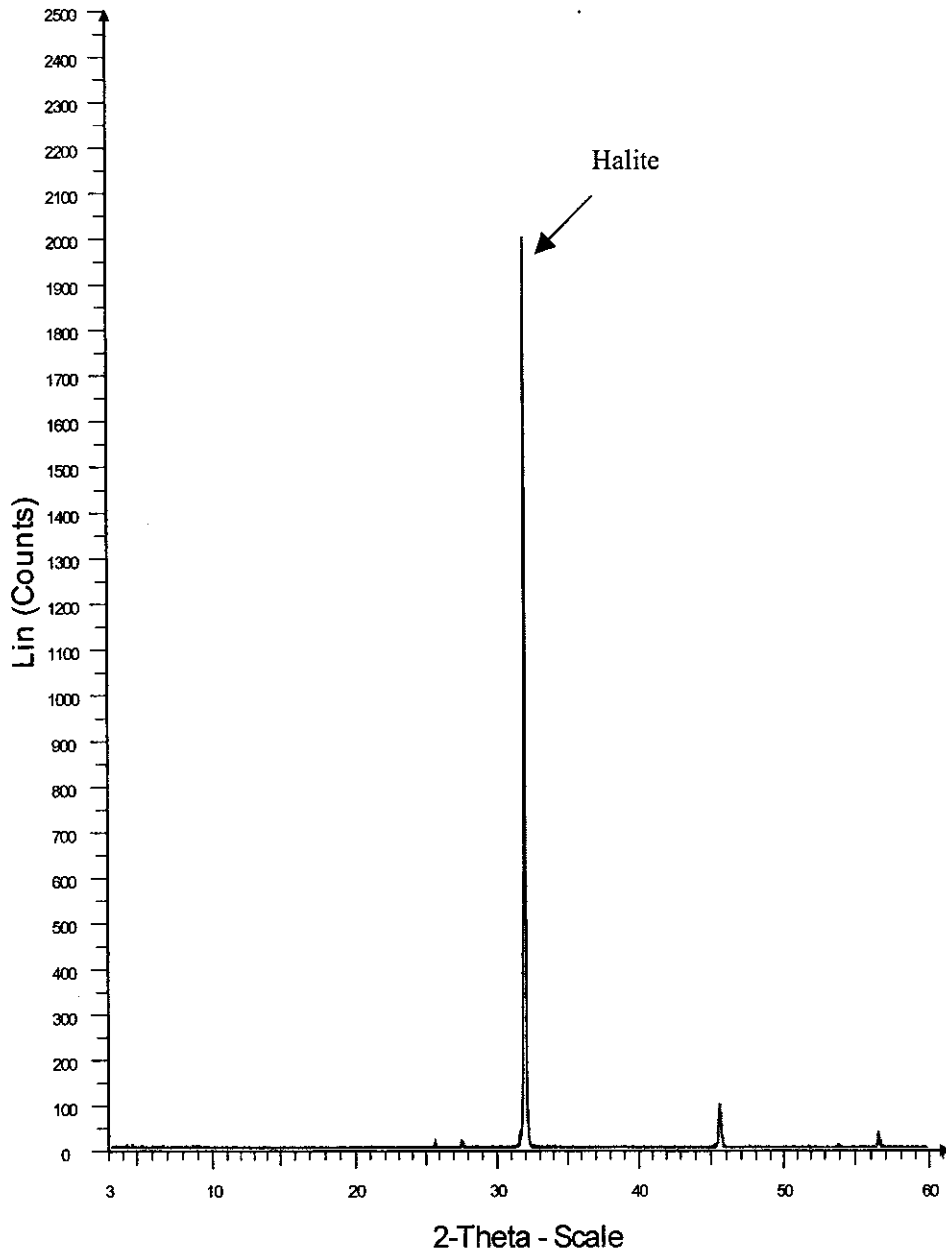
รูปที่ ข-13 ผลการทดสอบการรูดแบบวัฏจักรของตัวอย่างเกลือหินหมายเลข SS-LS-CC13 โดยมีจำนวนรอบการรูดเท่ากับ 25 รอบ



รูปที่ ข-14 ผลการทดสอบการรูดแบบวัฏจักรของตัวอย่างเกลือหินหมายเลข SS-MS-CC14 โดยมีจำนวนรอบการรูดเท่ากับ 21 รอบ

ภาคผนวก ค

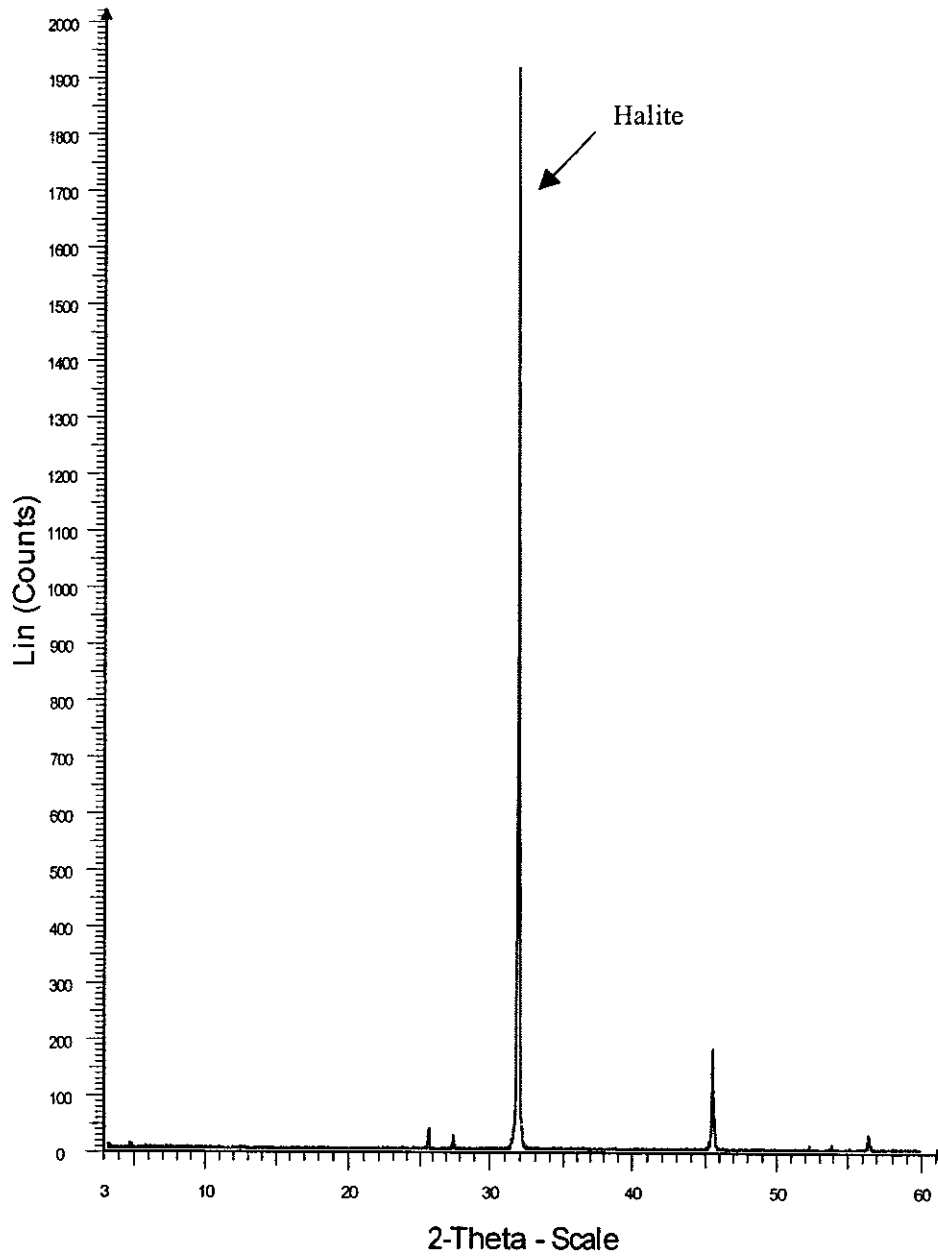
ผลการวิเคราะห์ด้วย X-RAY DIFFRACTION



รูปที่ ก-1 ผลการทดสอบตัวอย่างหมายเลข BD-99-1-BZ42

Lin (Counts) หมายถึง ความเข้มของกราฟ

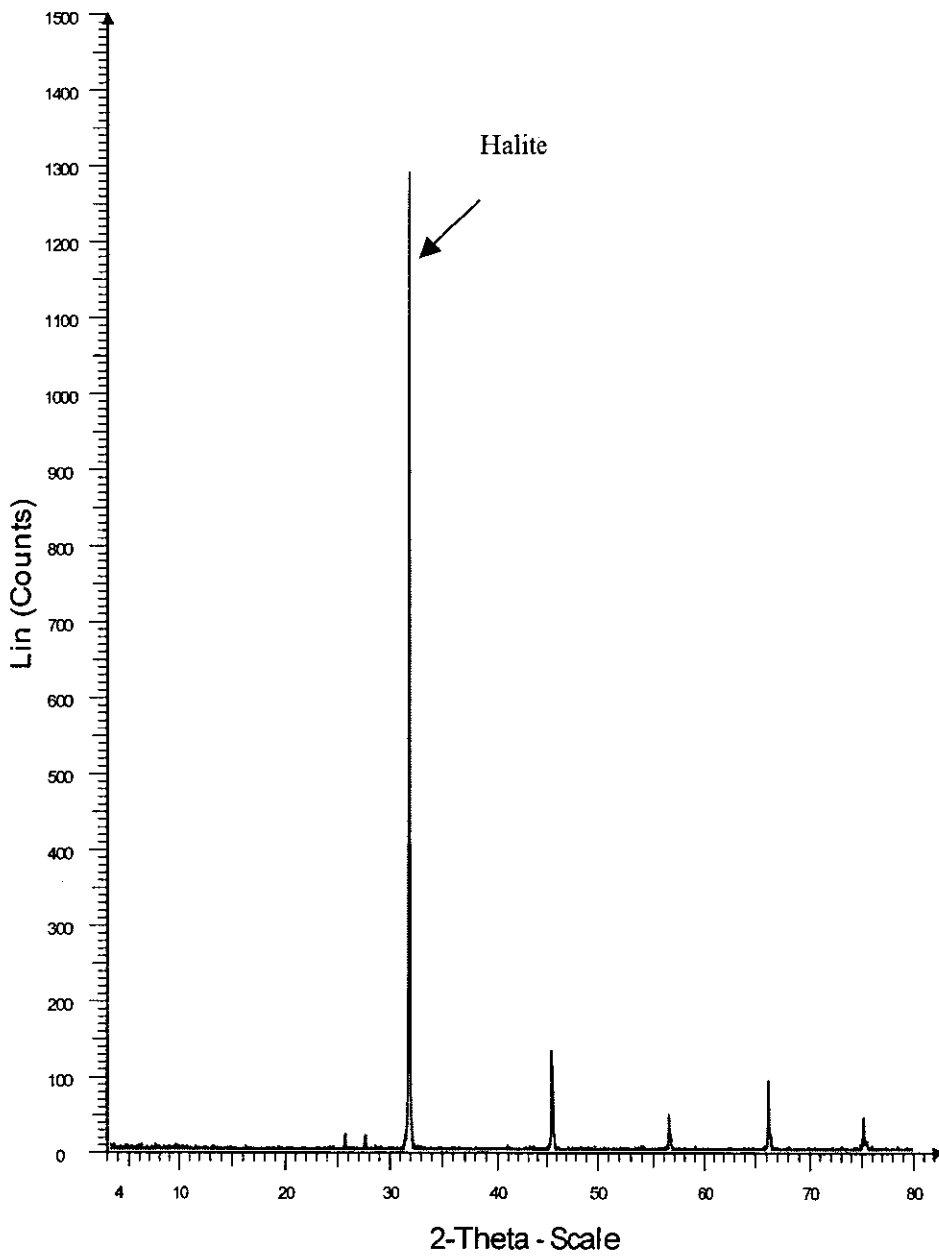
2-Theta-Scale หมายถึง มุมที่เกิดการหักเหของรังสีเอกซเรย์ เมื่อตกกระทบตัวอย่าง



รูปที่ ก-2 ผลการทดสอบตัวอย่างหมายเลข BD-99-1-BZ46

Lin (Counts) หมายถึง ความเข้มของกราฟ

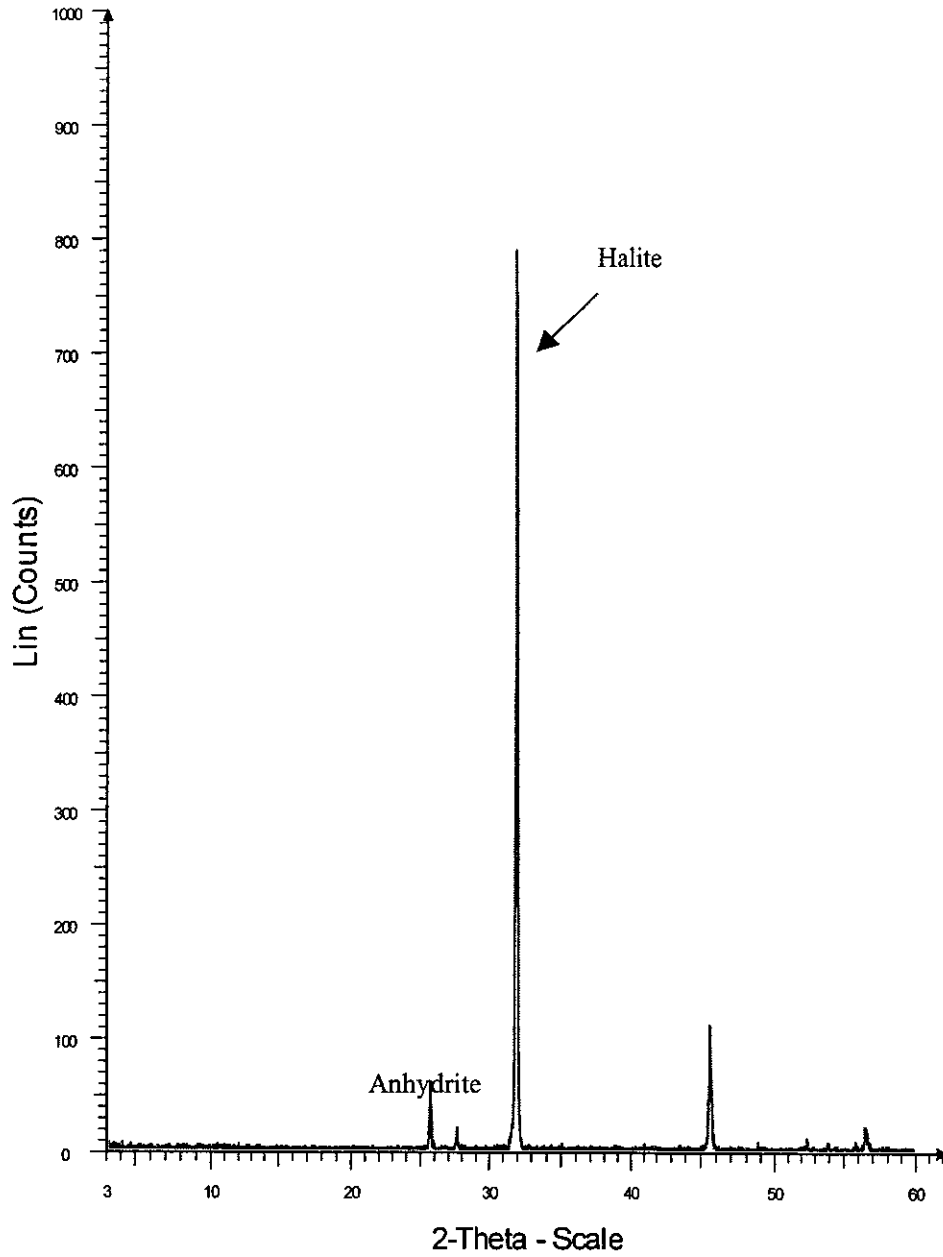
2-Theta-Scale หมายถึง มุมที่เกิดการหักเหของรังสีเอกซเรย์ เมื่อตกกระทบตัวอย่าง



รูปที่ ก-3 ผลการทดสอบตัวอย่างหมายเลข BD-99-1-BZ47

Lin (Counts) หมายถึง ความเข้มของกราฟ

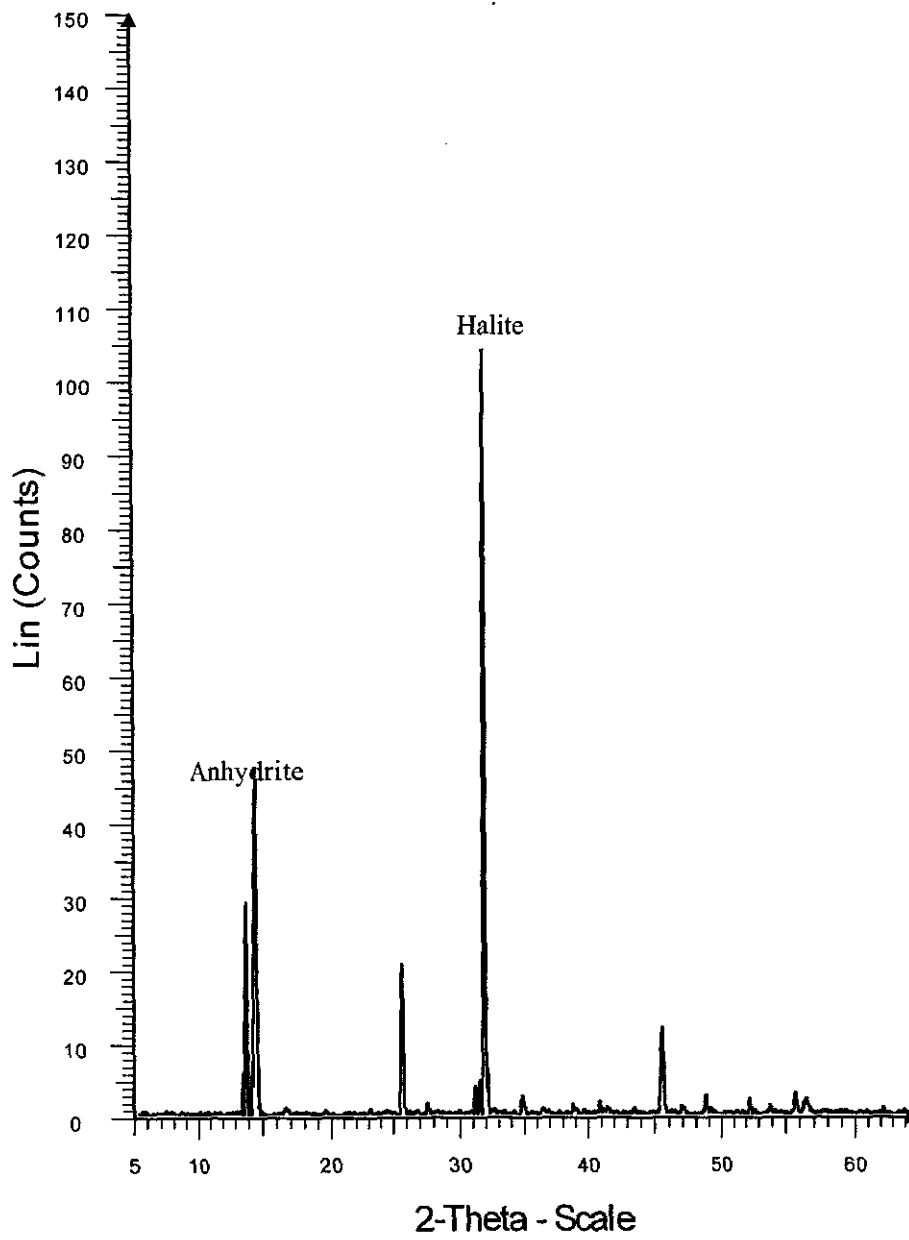
2-Theta-Scale หมายถึง มุมที่เกิดการหักเหของรังสีเอกซเรย์ เมื่อกระทบตัวอย่าง



รูปที่ ก-4 ผลการทดสอบตัวอย่างหมายเลข BD-99-1-BZ52

Lin (Counts) หมายถึง ความเข้มของกราฟ

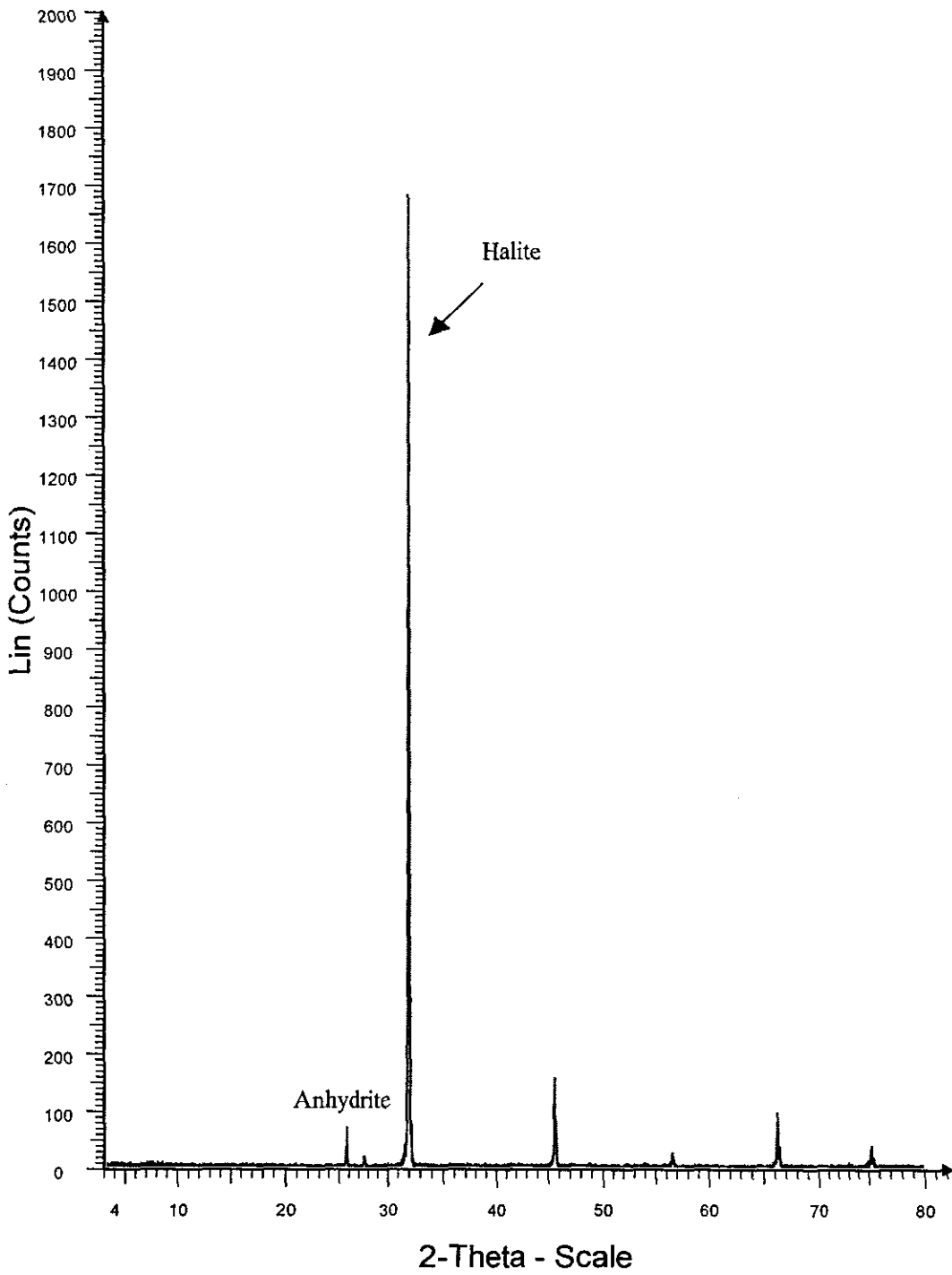
2-Theta-Scale หมายถึง มุมที่เกิดการหักเหของรังสีเอกซเรย์ เมื่อกระทบตัวอย่าง



รูปที่ ค-5 ผลการทดสอบตัวอย่างหมายเลข BD-99-1-BZ53

Lin (Counts) หมายถึง ความเข้มของกราฟ

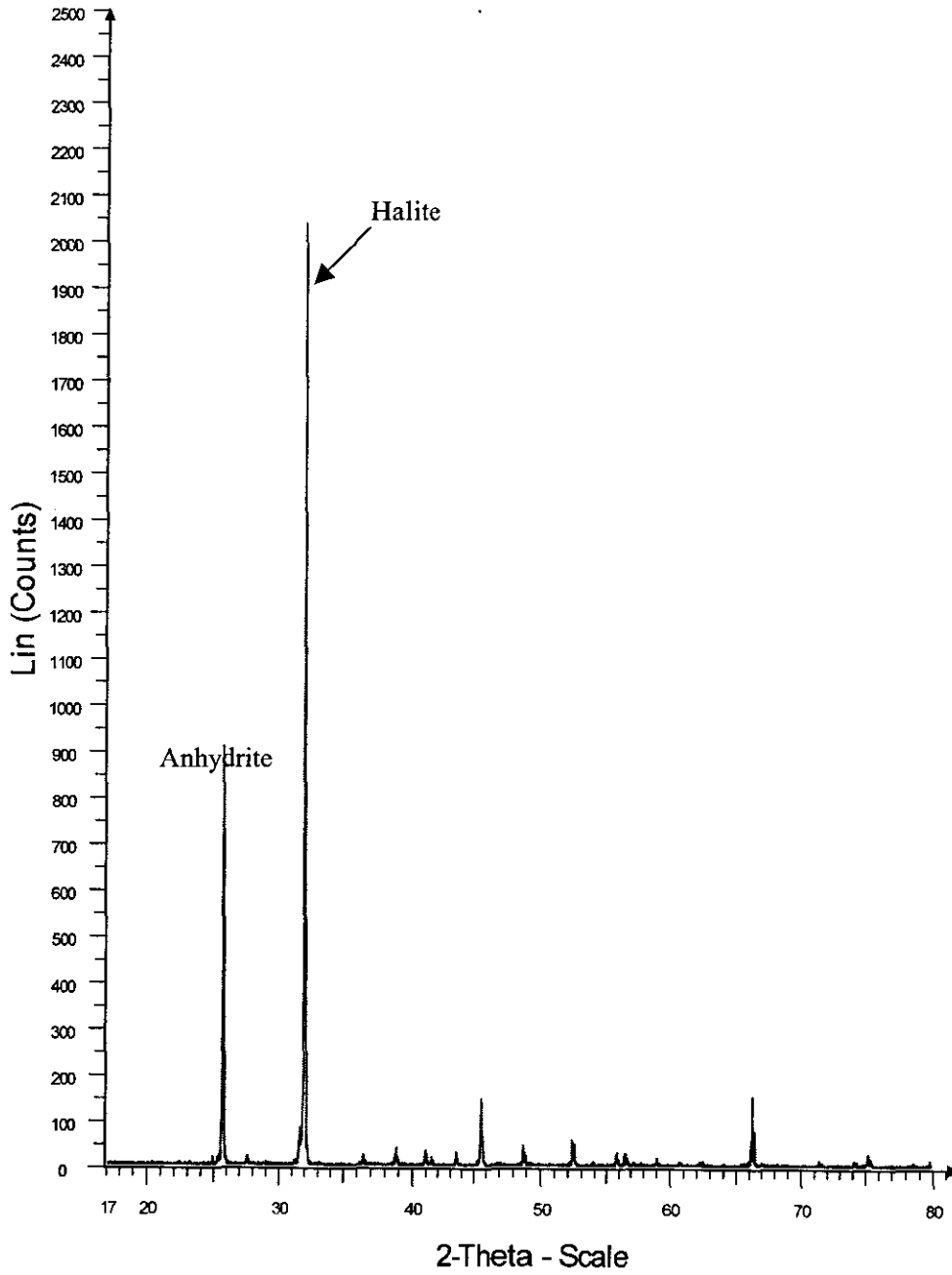
2-Theta-Scale หมายถึง มุมที่เกิดการหักเหของรังสีเอกซเรย์ เมื่อตกกระทบตัวอย่าง



รูปที่ ก-6 ผลการทดสอบตัวอย่างหมายเลข BD-99-1-BZ56

Lin (Counts) หมายถึง ความเข้มของกราฟ

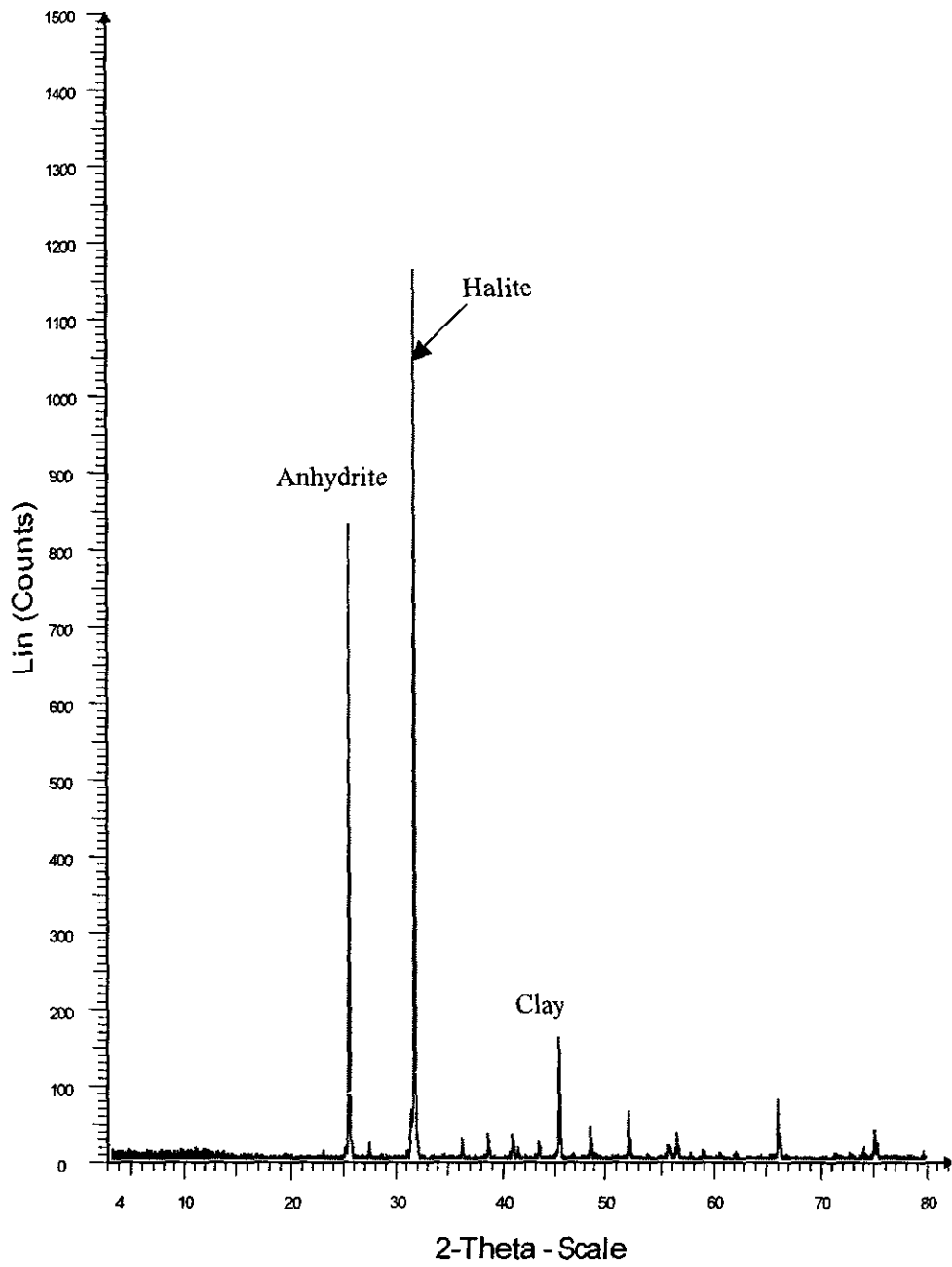
2-Theta-Scale หมายถึง มุมที่เกิดการหักเหของรังสีเอกซเรย์ เมื่อตกกระทบตัวอย่าง



รูปที่ ก-7 ผลการทดสอบตัวอย่างหมายเลข BD-99-1-BZ58

Lin (Counts) หมายถึง ความเข้มของกราฟ

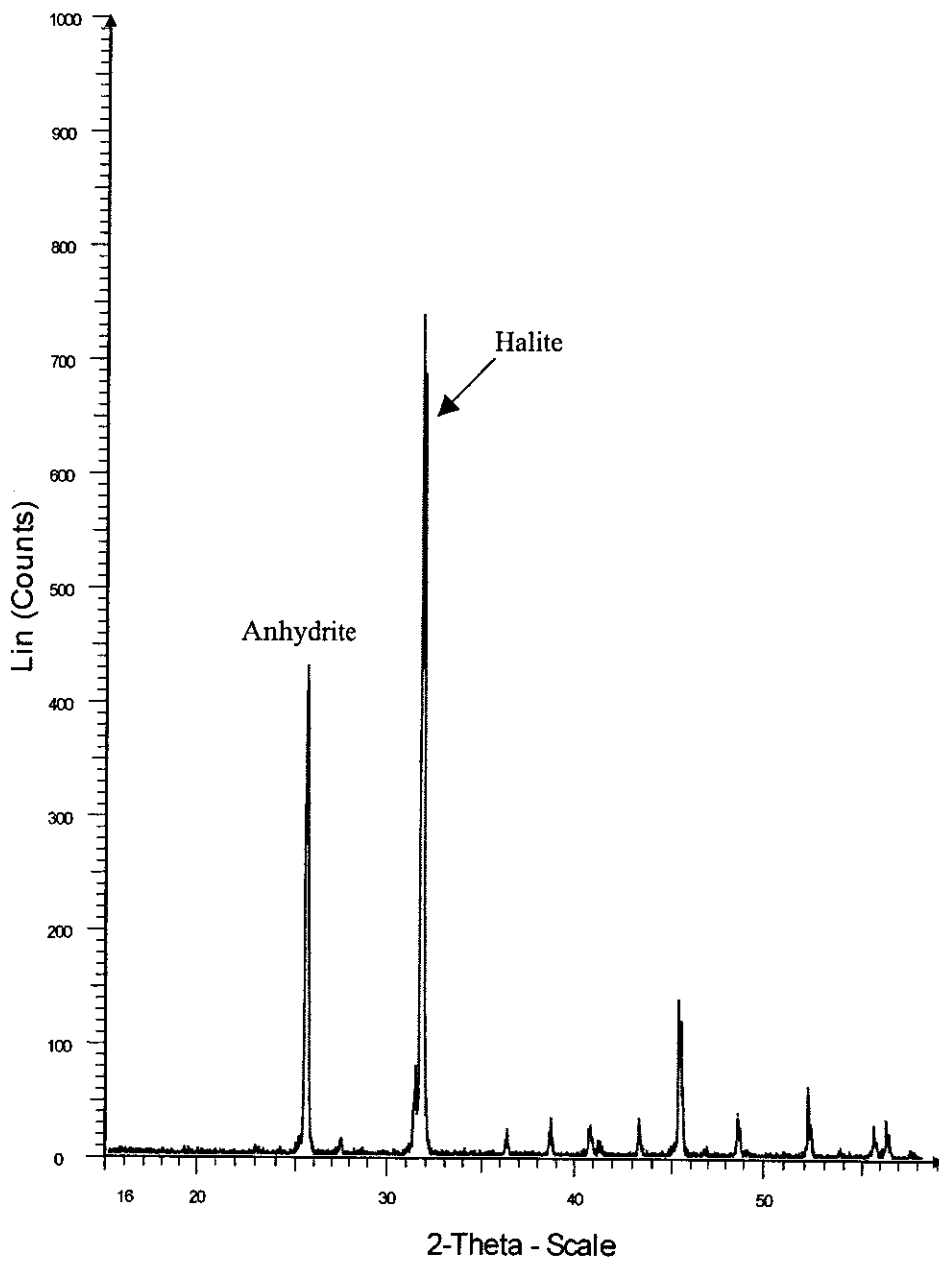
2-Theta-Scale หมายถึง มุมที่เกิดการหักเหของรังสีเอกซเรย์ เมื่อตกกระทบตัวอย่าง



รูปที่ ก-8 ผลการทดสอบตัวอย่างหมายเลข BD-99-1-BZ59

Lin (Counts) หมายถึง ความเข้มของกราฟ

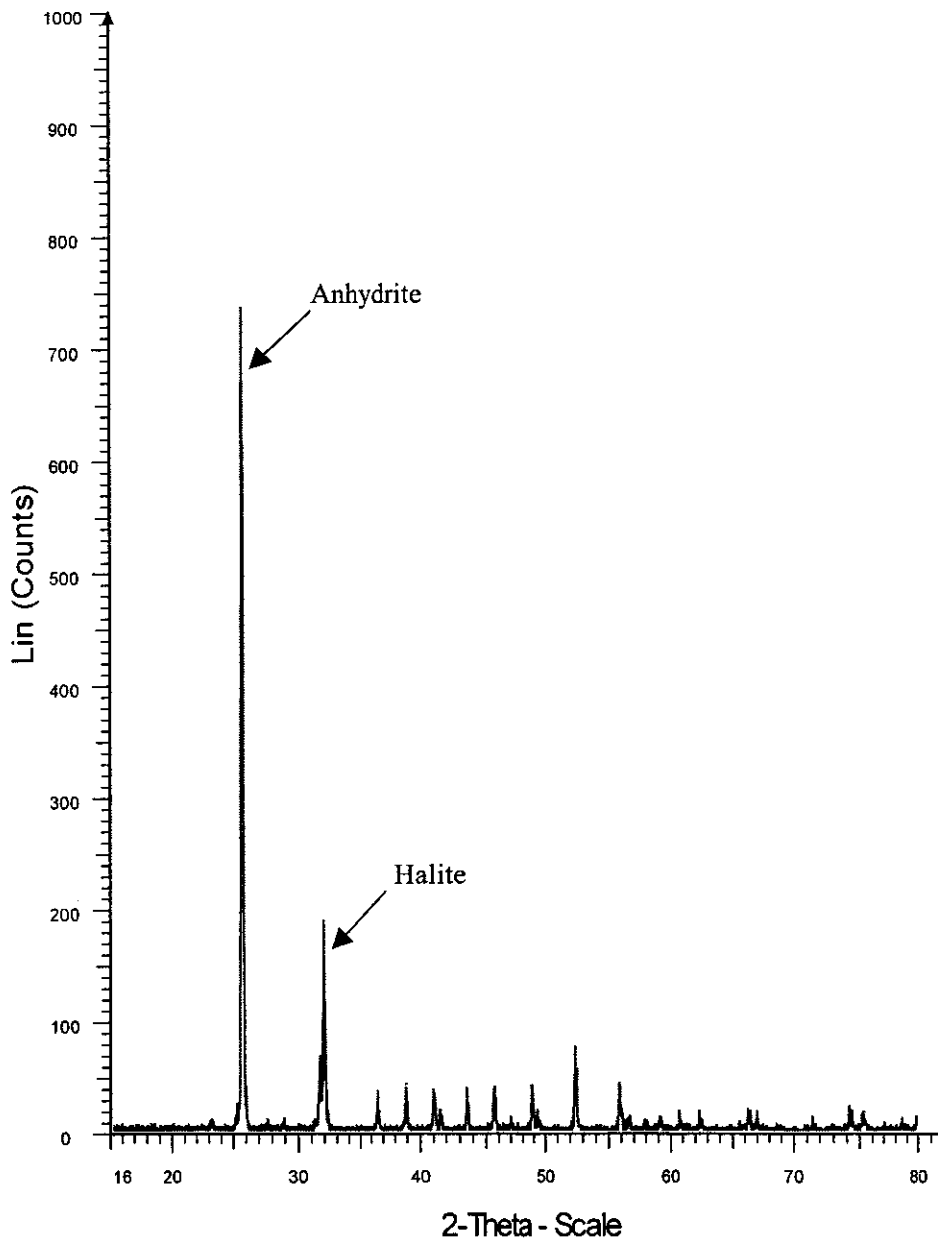
2-Theta-Scale หมายถึง มุมที่เกิดการหักเหของรังสีเอกซ์เรย์ เมื่อตกกระทบตัวอย่าง



รูปที่ ก-9 ผลการทดสอบตัวอย่างหมายเลข BD-99-1-BZ67

Lin (Counts) หมายถึง ความเข้มของกราฟ

2-Theta-Scale หมายถึง มุมที่เกิดการหักเหของรังสีเอกซ์เรย์ เมื่อตกกระทบตัวอย่าง



รูปที่ ค-10 ผลการทดสอบตัวอย่างหมายเลข BD-99-1-BZ68

Lin (Counts) หมายถึง ความเข้มของกราฟ

2-Theta-Scale หมายถึง มุมที่เกิดการหักเหของรังสีเอกซเรย์ เมื่อกระทบตัวอย่าง

ประวัตินักวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. กิตติเทพ เพ็ญขจร เกิดเมื่อวันที่ 16 กันยายน 2500 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร จบการศึกษาปริญญาเอกจาก University of Arizona ที่ประเทศสหรัฐอเมริกา ในสาขาวิชา Geological Engineering ในปี ค.ศ. 1988 และสำเร็จ Post-doctoral Fellows ในปี ค.ศ. 1990 ที่ University of Arizona ปัจจุบันมีตำแหน่งเป็นประธานกรรมการบริษัท Rock Engineering International ประเทศสหรัฐอเมริกา และดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำอยู่ที่สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา มีความชำนาญพิเศษทางด้านกลศาสตร์ของหินในเชิงการทดลอง การออกแบบและการวิเคราะห์โดยใช้คอมพิวเตอร์ ได้เคยทำการวิจัยเป็นหัวหน้าโครงการที่สำเร็จมาแล้วมากกว่า 10 โครงการทั้งในสหรัฐอเมริกาและประเทศไทย มีสิ่งตีพิมพ์นานาชาติมากกว่า 50 บทความ ทั้งวารสาร นิตยสาร รายงานรัฐบาล และบทความการประชุมนานาชาติ เป็นผู้แต่งตำรา "Sealing of Boreholes and Underground Excavations in Rock" ที่ใช้อยู่ในหลายมหาวิทยาลัยในสหรัฐอเมริกา ดำรงตำแหน่งเป็นที่ปรึกษาทางวิชาการขององค์กรรัฐบาลและหลายบริษัทในประเทศสหรัฐอเมริกา และแคนาดา เช่น U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. Department of Energy, Dow Chemical Co., Southwest Research Institute, UNOCAL, Phelp Dodge Co. และ Amoco Oil Co. เป็นวิศวกรที่ปรึกษาของ UNISEARCH จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นคณะกรรมการในการคัดเลือกข้อเสนอโครงการของ U.S. National Science Foundation และ Idaho State Board of Education และเป็นคณะกรรมการในการคัดเลือกบทความทางวิชาการของสำนักพิมพ์ Chapman & Hall ในประเทศอังกฤษ และ Elsevier Sciences Publishing Co. ในประเทศเนเธอร์แลนด์