



รหัสโครงการ SUT7-719-60-12-07

รายงานการวิจัย

ผลกระทบของปริมาณแร่คาร์เนลไลต์ต่อเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์
ของหลังคาช่องเหมืองโพแทช

(Effects of Carnallite Content on Mechanical Stability
of Potash Mine roofs)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-719-60-12-07

รายงานการวิจัย

ผลกระทบของปริมาณแร่คาร์เนลไลต์ต่อเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์
ของหลังคาช่องเหมืองโพแทช

(Effects of Carnallite Content on Mechanical Stability
of Potash Mine roofs)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เดโช เผือกภูมิ
สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2560
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

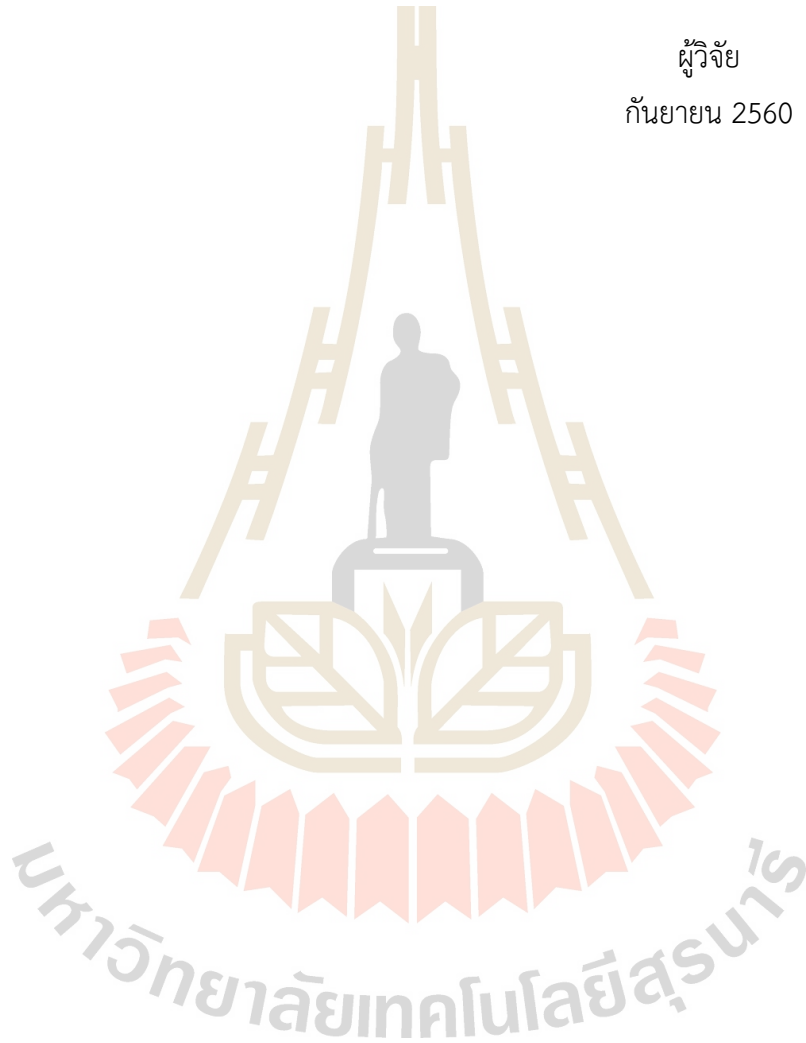
กันยายน 2560

กิตติกรรมประกาศ

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

ผู้วิจัย

กันยายน 2560



บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดความกว้างของช่องเหมืองที่มากที่สุด และระยะเวลาสูงสุดที่ช่องเหมืองยังคงมีเสถียรภาพโดยไม่ต้องมีการค้ำยันเมื่อมีการผันแปรปริมาณแร่คาร์บอนิลต์ โดยทำการทดสอบการดัดงอแบบสี่จุดที่มีรูปร่างแบบแท่งสี่เหลี่ยมขนาด $50 \times 50 \times 200 \text{ mm}^3$ และผันแปรปริมาณแร่คาร์บอนิลต์ตั้งแต่ 0% ถึง 100% ซึ่งตัวอย่างเกลือหินถูกกดตามแนวขวางด้วยสี่จุดและผันแปรอัตราการดึงเท่ากับ 0.004, 0.0004, 0.00004 และ 0.000004 MPa/s ผลการทดสอบบ่งชี้ว่าค่ากำลังดึงลดลงเมื่อปริมาณแร่คาร์บอนิลต์เพิ่มขึ้น และมีอัตราการดึงลดลง สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ $\sigma_t = 8.21 \exp[-0.02 C\%] (\sigma_R)^{0.17} \text{ MPa}$ ซึ่งสมการความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความเครียดและการผันแปรปริมาณแร่คาร์บอนิลต์ที่จุดแตกสามารถคำนวณได้จากสมการ $W = 2.17 \exp[-0.03 C\%] \text{ kPa}$ รูปแบบของ Maxwell ได้ถูกนำมาใช้ในการอธิบายพฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลาของตัวอย่างเกลือหินเพื่อหาค่าความยืดหยุ่นและความหนืด ซึ่งค่าดังกล่าวได้จากการสอบเทียบจากแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดดึงและเวลาที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โปรแกรม FLAC ถูกนำมาใช้เพื่อสาธิตการจำลองช่องเหมืองในชั้นเกลือหินภายใต้การผันแปรความลึก โดยกำหนดให้ความหนาของหลังคาเท่ากับ 40% ของความกว้างช่องเหมือง การคำนวณความเค้นที่หลังคาพร้อมกับเกณฑ์พลังงานความเครียดได้ถูกนำมาใช้เพื่อหาความเครียดดึงที่จุดวิกฤต โดยระยะเวลาสูงสุดที่ช่องเหมืองยังคงมีเสถียรภาพโดยไม่ต้องมีการค้ำยันสามารถคาดการณ์ได้จากการแทนที่ค่าความเครียดที่จุดวิกฤตลงในแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและเวลา



Abstract

This study aims at determining the maximum unsupported span and standup time of potash mine roof under varying carnallite contents. Four-point bending tests are performed on prismatic beams ($50 \times 50 \times 200 \text{ mm}^3$) of potash specimens with carnallite contents ranging from 0 to 100%. The applied loading rates are maintained constant. They are equivalent to the induced tensile stress rates at the crack initiation point ranging from 0.004, 0.0004, 0.00004, and 0.000004 MPa/s. The tensile strains are monitored at the point where the incipient tensile crack is induced. The results indicate that tensile strengths (σ_t) decrease when the carnallite contents ($C_{\%}$) increase and the stress rates (σ_R) decrease, which can be best represented by an empirical equation: $\sigma_t = 8.21 \exp [-0.02 C_{\%}] (\sigma_R)^{0.17}$ MPa. The strain energy at failure (W) has been calculated and derived as a function of $C_{\%}$, which can be described by: $W = 2.17 \exp [-0.03 C_{\%}]$ kPa. The Maxwell model is used to describe the time-dependent tensile strain of the specimens. Its elastic and visco-plastic parameters are calibrated by regression analysis of the test results, and hence series of tensile strain-time curves can be constructed for various applied tensile stresses. The maximum tensile stresses induced in the mine roof are calculated using FLAC program for various depths. The local regulations require that the roof thickness is not less than 40% of the room width because the potash layer lies under relatively soft claystone. The calculated roof stresses combining with the strain energy criterion are used to determine the critical tensile strain that the roof can sustain before failure occurs. By substituting the critical strain into the strain-time curves the standup time can be predicted.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของเกลือหิน.....	5
2.2 กำลังดึงของเกลือหิน.....	6
2.3 ผลกระทบของอัตราการดึง.....	9
2.4 การทดสอบการดัดงอแบบสี่จุด.....	9
2.5 การทดสอบกำลังดึงแบบบราซิล.....	11
2.6 การจำลองโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์.....	11
บทที่ 3 การเก็บและการจัดเตรียมตัวอย่างหิน.....	15
3.1 วัตถุประสงค์.....	15
3.2 การเตรียมตัวอย่างหินสำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	15

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	21
4.1 วัตถุประสงค์.....	21
4.2 การทดสอบการดัดงอแบบสี่จุด.....	21
4.3 การทดสอบแรงดึงแบบบราซิล.....	23
4.4 ผลการทดสอบการดัดงอแบบสี่จุดและการทดสอบแรงดึงแบบบราซิล.....	24
บทที่ 5 การสร้างความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์.....	29
5.1 วัตถุประสงค์.....	29
5.2 ความเค้นดึงสูงสุด.....	29
5.3 รูปแบบของ Maxwell.....	31
5.4 เกณฑ์การแตกบนพื้นฐานของพลังงานความเครียด.....	32
บทที่ 6 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	37
6.1 วัตถุประสงค์.....	37
6.2 การจำลองหลังคาช่องเหมือน.....	37
6.3 ผลการจำลองหลังคาช่องเหมือน.....	40
บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต.....	49
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	49
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	50
บรรณานุกรม.....	51
ประวัตินักวิจัย.....	55

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	คุณสมบัติพื้นฐานของเกลือหินจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	5
2.2	ค่ากำลังดึงของเกลือหินแบบบราซิลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	6
3.1	คุณสมบัติทางกายภาพสำหรับการทดสอบการดัดงอแบบสี่จุด.....	18
3.2	คุณสมบัติทางกายภาพสำหรับการทดสอบกำลังดึงแบบบราซิล.....	19
5.1	ผลการคำนวณจากตัวอย่างหินภายใต้การผันแปรปริมาณแร่คาร์บอนิลต์และอัตราการดึง....	34
6.1	คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินที่มีการผันแปรปริมาณแร่คาร์บอนิลต์.....	39
6.2	ผลการจำลองหลังคาช่องเหมืองภายใต้การผันแปรระดับความลึกและปริมาณแร่คาร์บอนิลต์.....	41
6.3	ค่าตัวแปรเชิงคณิตศาสตร์ในสมการที่ (6.1).....	43

สารบัญญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ค่ากำลังดึงจากการทดสอบแรงดึงทางอ้อมของชิ้นเกลือหิน.....	7
2.2 ค่ากำลังดึงจากการทดสอบแรงดึงทางตรงของเกลือหินบริสุทธิ์ และค่ากำลังดึงจากการทดสอบแรงดึงทางอ้อม.....	7
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดึงและค่ากำลังกดของหินกับความเครียด.....	8
2.4 แผนภาพการทดสอบการดัดงอแบบ 4 จุด โดยมีระยะกดเท่ากับ 1/3 ของความยาวของตัวอย่างหิน.....	10
2.5 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างหลังจากการคืบที่ระดับความเค้น 1.9 MPa.....	12
2.6 รอยแตกหลังจากการจำลองเป็นระยะเวลา 1 ปี ที่ระดับความเค้น 1.9 MPa.....	12
3.1 แหล่งกำเนิดของตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบ (Suwanich, 2007).....	16
3.2 ตัวอย่างเกลือหินภายใต้การผ่นแปรปริมาณแร่คาร์เนลไลต์ตั้งแต่ 0 ถึง 100%.....	16
3.3 ตัวอย่างการติดตั้ง Stain gage ที่บริเวณตรงกลางของแท่งตัวอย่างเกลือหิน.....	17
3.4 ตัวอย่างเกลือหินภายใต้การผ่นแปรปริมาณแร่คาร์เนลไลต์ตั้งแต่ 0 ถึง 100% สำหรับการทดสอบกำลังดึงแบบบราซิล.....	17
4.1 การทดสอบการดัดงอแบบสี่จุด.....	22
4.2 ตำแหน่งระยะห่างระหว่างจุดกด.....	22
4.3 การทดสอบแรงดึงแบบบราซิล.....	24
4.4 ตัวอย่างเกลือหินหลังการทดสอบการดัดงอแบบสี่จุดภายใต้การผ่นแปรปริมาณแร่คาร์เนลไลต์.....	25
4.5 ตัวอย่างเกลือหินหลังการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลภายใต้การผ่นแปรปริมาณแร่คาร์เนลไลต์.....	25
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของเกลือหิน.....	26
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดและเวลาการแตกของตัวอย่างเกลือหิน.....	27
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึงสูงสุดกับปริมาณแร่คาร์เนลไลต์ภายใต้การผ่นแปรอัตราการดึง.....	28
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดึงของเกลือหินแบบบราซิลภายใต้การผ่นแปรปริมาณแร่คาร์เนลไลต์.....	28
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึงสูงสุดกับปริมาณแร่คาร์เนลไลต์ภายใต้การผ่นแปรอัตราการดึง.....	30

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึงสูงสุดกับอัตราการดึงภายใต้การผันแปรปริมาณแร่คาร์บอนิลต์.....	30
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดึงของหินแบบบราซิลกับการผันแปรปริมาณแร่คาร์บอนิลต์.....	31
5.4 รูปแบบเชิงฟิสิกส์ของ Maxwell.....	31
5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยืดหยุ่นกับปริมาณแร่คาร์บอนิลต์ของตัวอย่างหินภายใต้การผันแปรอัตราการดึง.....	33
5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดกับปริมาณแร่คาร์บอนิลต์ของตัวอย่างหินภายใต้การผันแปรอัตราการดึง.....	33
5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความเครียดกับการผันแปรปริมาณแร่คาร์บอนิลต์.....	35
6.1 ตัวอย่างรูปแบบการจำลองช่องเหมืองของชั้นเกลือหินภายใต้การผันแปรระดับความลึกที่ 100, 150 และ 200 m และความกว้างของช่องเหมืองเท่ากับ 10 m.....	38
6.2 ตัวอย่างรูปแบบการจำลองช่องเหมืองของชั้นเกลือหินภายใต้การผันแปรระดับความลึกที่ 100, 150 และ 200 m และความกว้างของช่องเหมืองเท่ากับ 15 m.....	38
6.3 ตัวอย่างรูปแบบการจำลองช่องเหมืองของชั้นเกลือหินภายใต้การผันแปรระดับความลึกที่ 100, 150 และ 200 m และความกว้างของช่องเหมืองเท่ากับ 20 m.....	39
6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับเวลาของการจำลองหลังคาช่องเหมืองที่ระดับความลึก 100 m ภายใต้การผันแปรความกว้างของช่องเหมือง.....	44
6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับเวลาของการจำลองหลังคาช่องเหมืองที่ระดับความลึก 150 m ภายใต้การผันแปรความกว้างของช่องเหมือง.....	45
6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับเวลาของการจำลองหลังคาช่องเหมืองที่ระดับความลึก 200 m ภายใต้การผันแปรความกว้างของช่องเหมือง.....	46
6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแร่คาร์บอนิลต์กับระยะเวลาสูงสุดของหลังคาช่องเหมืองที่ยังคงมีเสถียรภาพโดยไม่ต้องมีการค้ำยันภายใต้การผันแปรระดับความลึก.....	47

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

อุตสาหกรรมการทำเหมืองโพแทชในประเทศไทยเริ่มมีการแพร่หลายมากขึ้นในช่วง 2-3 ปีที่ผ่านมา ซึ่งเสถียรภาพของช่องเหมืองเป็นหนึ่งในประเด็นสำคัญที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยของวิศวกรและพนักงานเหมืองแร่ที่ปฏิบัติงาน เป็นที่ทราบกันดีว่าเกลือหินที่มีแร่คาร์เนลไลต์เป็นองค์ประกอบหลักมีค่ากำลังกดต่ำกว่าเกลือหินบริสุทธิ์ ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการทั้งในและต่างประเทศ ประเด็นที่สำคัญประการหนึ่งที่ยังไม่ได้มีการทดสอบหรือให้ความสนใจคือค่ากำลังดึงที่เกิดขึ้นบริเวณหลังคาช่องเหมืองเกลือหินที่มีแร่คาร์เนลไลต์เป็นองค์ประกอบหลักในเชิงเวลา ซึ่งค่ากำลังดึงนี้มีผลโดยตรงต่อเสถียรภาพบริเวณหลังคาและต่อการออกแบบความกว้างของช่องเหมือง โดยทั่วไปในระหว่างการขุดเจาะเหมืองใต้ดิน จำเป็นต้องมีความปลอดภัยในระดับหนึ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณหลังคาช่องเหมืองที่ต้องการป้องกันไม่ให้เกิดการแตกหรือการหลุดร่วงของหินหรือแร่ที่ค้างอยู่บริเวณหลังคา ก่อนที่จะมีการถมกลับช่องเหมืองเมื่อแล้วเสร็จกระบวนการ การประเมินเสถียรภาพของหลังคาช่องเหมืองจึงจำเป็นต้องทราบค่ากำลังดึงของทั้งเกลือหินบริสุทธิ์และเกลือหินที่มีแร่คาร์เนลไลต์เจือปนอยู่ในปริมาณต่างๆ เพื่อนำผลการศึกษามาใช้ในการออกแบบและประเมินเสถียรภาพได้อย่างแม่นยำ และเพื่อให้กระบวนการขุดเจาะเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ปลอดภัย และลดการใช้วัสดุค้ำยันบริเวณหลังคาช่องเหมือง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) ศึกษาผลกระทบของปริมาณแร่คาร์เนลไลต์ (Carnallite content) ต่อกำลังดึงของตัวอย่างเกลือหินที่มีแร่คาร์เนลไลต์เป็นองค์ประกอบ โดยทดสอบการดัดงอแบบสี่จุด (Four point bending test) ภายใต้การผันแปรปริมาณแร่คาร์เนลไลต์และอัตราการดึงที่ต่างกัน เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงกำลังดึงในเชิงเวลา
- 2) พัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Empirical relationship) เพื่ออธิบายผลกระทบของปริมาณแร่คาร์เนลไลต์ในเกลือหินต่อค่ากำลังดึงและอัตราการดึง
- 3) สาธิตการหาระยะเวลาสูงสุดที่หลังคาช่องเหมืองยังมีเสถียรภาพโดยไม่มีการค้ำยัน โดยมีการพิจารณาปริมาณแร่คาร์เนลไลต์

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) ศึกษาและประมวลข้อมูลจากเอกสารอ้างอิงเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของตัวอย่างเกลือหินที่มีแร่คาร์บอนิลต์เจือปน โดยเฉพาะค่ากำลังดึงรวมไปถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมและการเปลี่ยนรูปร่างของแร่คาร์บอนิลต์
- 2) ในงานวิจัยนี้นำตัวอย่างเกลือหินที่มีแร่คาร์บอนิลต์เจือปนที่ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทเหมืองแร่โปแตชอาเซียน จำกัด (มหาชน) มาตัดให้เป็นแท่งสี่เหลี่ยมขนาด $50 \times 50 \times 200$ mm³ สำหรับการทดสอบการดัดงอแบบสี่จุดจำนวนไม่น้อยกว่า 24 ตัวอย่าง
- 3) การทดสอบกำลังดึงแบบบราซิล ได้นำตัวอย่างเกลือหินที่มีแร่คาร์บอนิลต์เจือปนมาตัดให้เป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 mm สูง 24 mm จำนวนไม่น้อยกว่า 30 ตัวอย่าง
- 4) ผลงานวิจัยจะนำไปเผยแพร่องค์ความรู้ในรูปของบทความในการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการและวารสารทางวิชาการในระดับนานาชาติ

1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

งานวิจัยนี้มีแนวคิดในการนำตัวอย่างเกลือหินที่มีแร่คาร์บอนิลต์เจือปนมาทดสอบกำลังดึงในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณแร่คาร์บอนิลต์ต่อค่ากำลังดึงของหลังคาช่องเหมือง และศึกษาพฤติกรรมเชิงเวลาต่อกำลังดึงของตัวอย่างเกลือหิน โดยมีการผันแปรอัตราการดึงที่ระดับต่างๆ ซึ่งเน้นไปที่การทดสอบการดัดงอแบบสี่จุด โดยลักษณะความเค้นดึงที่เกิดขึ้นมีความสอดคล้องกับความเค้นดึงที่เกิดขึ้นบริเวณหลังคาช่องเหมือง และทำการทดสอบกำลังดึงแบบบราซิล (Brazilian tensile strength test) พฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลาต่อกำลังดึงของเกลือหินที่มีแร่คาร์บอนิลต์เจือปนสามารถนำมาคำนวณหาระยะเวลาที่มากที่สุดที่หลังคาช่องเหมืองคงความมีเสถียรภาพโดยไม่ต้องมีการค้ำยัน (Stand-up time) ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ช่วยให้การออกแบบมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น นอกจากนี้ผลที่ได้ทำให้เข้าใจถึงความสัมพันธ์ของปริมาณแร่คาร์บอนิลต์ที่เจือปนอยู่ในเกลือหินต่อกำลังดึงมากขึ้น จึงสามารถนำเกณฑ์ความสัมพันธ์ที่ได้ไปใช้ในการออกแบบหลังคาช่องเหมือง และเพื่อให้เห็นในเชิงประจักษ์อย่างเป็นรูปธรรมจึงได้ทำการจำลองหลังคาช่องเหมืองโดยใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่ใช้กันทั่วไปในการวิเคราะห์เสถียรภาพของช่องเหมือง ทั้งนี้ ผลที่ได้สามารถทำให้ประสิทธิภาพการออกแบบและการคำนวณปริมาณแร่ที่ได้จากการทำเหมืองเป็นไปอย่างถูกต้องและปลอดภัยยิ่งขึ้น

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทำการศึกษาและค้นคว้าวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติพื้นฐานของเกลือหิน กำลังดึงของเกลือหิน ผลกระทบของอัตราการดึง การทดสอบการดัดงอแบบสี่จุด การทดสอบกำลังดึงแบบบราซิล และการจำลองโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์

ขั้นตอนที่ 2 การเก็บและเตรียมตัวอย่างเกลือหินที่มีแร่คาร์บอเนตเจือปน

นำตัวอย่างเกลือหินที่มีแร่คาร์บอเนตเจือปนมาตัดเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด $50 \times 50 \times 200$ mm³ สำหรับการทดสอบการดัดงอแบบสี่จุด ซึ่งตัวอย่างเกลือหินที่มีแร่คาร์บอเนตเจือปนอยู่ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เหมือนแร่โปแตชอาเซียน จำกัด (มหาชน) จังหวัดชัยภูมิ การทดสอบใช้ตัวอย่างทั้งสิ้นไม่น้อยกว่า 50 ตัวอย่าง นอกจากนี้ยังเตรียมตัวอย่างเกลือหินที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 5.4 mm และหนา 2.4 mm เพื่อใช้ทดสอบหาค่ากำลังดึงแบบบราซิล โดยใช้ทั้งสิ้นไม่น้อยกว่า 30 ตัวอย่าง

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบหาค่าคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของแร่คาร์บอเนต

ในขั้นตอนนี้ได้ทำการทดสอบหาค่ากำลังดึงโดยแบ่งออกเป็น 2 การทดสอบ คือ 1) การทดสอบการดัดงอแบบสี่จุด โดยผันแปรปริมาณแร่คาร์บอเนตที่เจือปนในเกลือหินในปริมาณที่ต่างกัน และผันแปรอัตราการดึงที่ 0.013 MPa/s ถึง 0.00013 MPa/s เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปร่างที่เกิดจากความเค้นดึงในเชิงเวลา ซึ่งใช้ตัวอย่างเกลือหินไม่น้อยกว่า 24 ตัวอย่าง และ 2) การทดสอบกำลังดึงแบบบราซิล ใช้ตัวอย่างเกลือหินที่มีแร่คาร์บอเนตเจือปนไม่น้อยกว่า 30 ตัวอย่าง ในการทดสอบทั้งสองรูปแบบได้ทำการผันแปรปริมาณของแร่คาร์บอเนตในเกลือหินตั้งแต่ 0% ถึง 100%

ขั้นตอนที่ 4 การสร้างสมการความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์

สมการเชิงคณิตศาสตร์ถูกสร้างขึ้นเพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแร่คาร์บอเนตในตัวอย่างเป็นผลอย่างไรต่อค่ากำลังรับแรงดึงในเชิงเวลา ผลที่ได้จากการทดสอบสามารถนำไปสอบเทียบ โดยใช้สมการรูปแบบของ Maxwell เพื่อหาค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับความหนืดเชิงยืดหยุ่นและเชิงพลาสติก (Visco-elastic และ Visco-plastic) ภายใต้การผันแปรปริมาณแร่คาร์บอเนต ซึ่งความสัมพันธ์ที่ได้สามารถนำมาใช้ในการจำลองเพื่อหาระยะเวลาสูงสุดที่ช่องเหมืองยังมีเสถียรภาพโดยไม่มีภัยคุกคาม

ขั้นตอนที่ 5 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

มีการนำโปรแกรม FLAC 4.0 (Finite difference method) มาใช้สาธิตการจำลองช่องเหมืองในชั้นเกลือหิน โดยการจำลองนำคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินที่สอบเทียบได้จากขั้นตอนที่ 4 มาเป็นตัวแปรนำเข้าในแบบจำลองคอมพิวเตอร์ และมีการคำนวณหาค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบริเวณหลังคาในเชิงเวลา โดยผลการคำนวณค่าความเครียดดังกล่าวได้นำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณโดยใช้เกณฑ์การแตกที่พัฒนาขึ้น ทั้งนี้เพื่อเป็นการยืนยันผลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการว่ามีความถูกต้องและเหมาะสมหรือไม่ อนึ่งเพื่อให้สมการที่สร้างขึ้นมีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้ในการกำหนดระยะเวลาสูงสุดที่หลังคาสามารถอยู่ได้อย่างมีเสถียรภาพโดยไม่มีการค้ำยัน

ขั้นตอนที่ 6 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิด ขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุปได้นำเสนอโดยละเอียดในรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ เพื่อส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ และตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้มีประโยชน์อย่างมากกับงานด้านวิศวกรรมธรณี วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และวิศวกรรมเหมืองแร่ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและการขุดเจาะเหมืองแร่โพแทชใต้ดิน เพื่อให้เหมืองแร่ดังกล่าวมีเสถียรภาพตลอดอายุการทำเหมือง ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

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

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัยได้ทำการค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติพื้นฐานของเกลือหิน กำลังดึงของเกลือหิน ผลกระทบของอัตราการดึง การทดสอบการดัดงอแบบสี่จุด การทดสอบกำลังดึงแบบบราซิล และการจำลองโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์

2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของเกลือหิน

Mellegard et al. (2012) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงกายภาพของเกลือหินในห้องปฏิบัติการด้วยวิธี X-ray fluorescence (XRF) เพื่อจำแนกความหนาแน่นของเกลือหินในแต่ละแหล่ง โดยตัวอย่างเกลือหินที่ทดสอบมีการผันแปรปริมาณแร่ซิลิเกต ซึ่งผลการทดสอบระบุว่า ตัวอย่างเกลือหินที่มีความหนาแน่นต่ำที่มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1.99 ถึง 2.11 จะมีปริมาณแร่ซิลิเกตสูง และตัวอย่างเกลือหินที่มีปริมาณแร่เฮไลต์สูง จะมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 2.12 ถึง 2.19 g/cc ดังนั้น ความหนาแน่นของแร่เฮไลต์จึงมีค่าประมาณ 2.16 g/cc และความหนาแน่นของแร่ซิลิเกตมีค่าประมาณ 1.99 g/cc (Hurlbut และ Klein, 1977) ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของเกลือหินจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ชื่อแร่	ความหนาแน่น (g/cc)	แหล่งอ้างอิง
NaCl (halite)	2.14	Birch et al. (1942)
	2.17	Heiland (1940), Hodgman et al. (1955-1956)
	2.16	Straumanis (1953)
	2.16	Sathe et al. (1945)
	2.16	Batuecas และ Carreira (1955)
	2.16	Forsythe (1954)
	2.16	Johnston และ Hutchison (1942)
	2.15	Bacher (1949)
	2.16	National Research council of the U.S.A. (1929)
Average : NaCl (halite)	2.16	

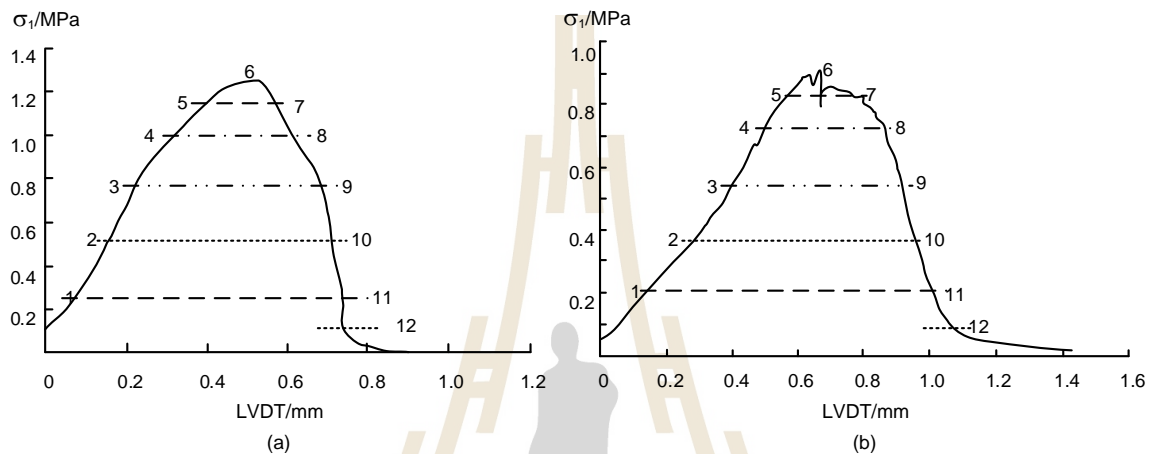
2.2 กำลั้งตั้งของเกลือหิน

Hansen et al. (1984), Boontongloan (2000), Wetchasat (2002), Devries et al. (2002), Fuenkajorn และ Jandakeaw (2003) และ Phueakhum (2003) ได้ทำการเปรียบเทียบกำลั้งตั้งของเกลือหินแบบบราซิลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ผลที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 2.2

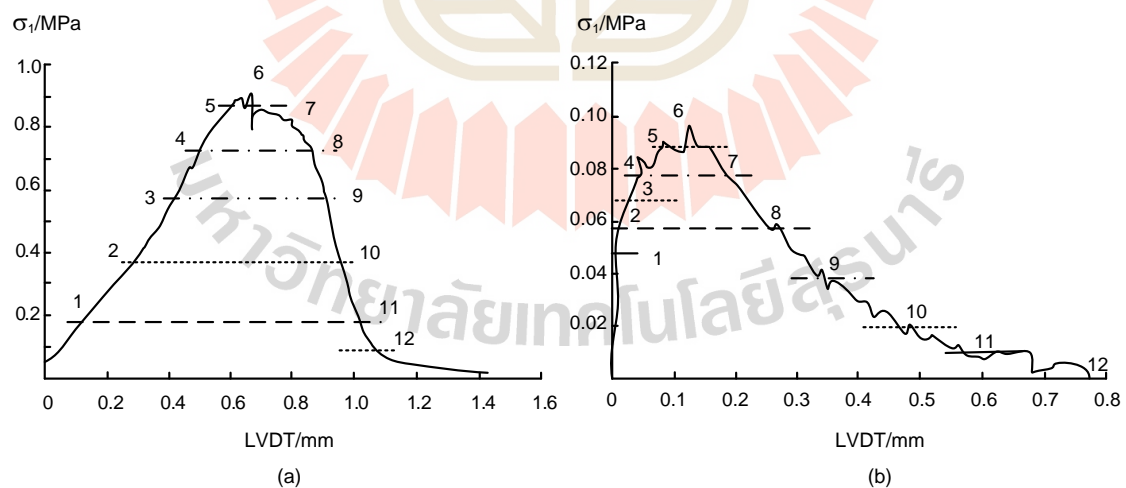
ตารางที่ 2.2 ค่ากำลั้งตั้งของเกลือหินแบบบราซิลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

สถานที่	ค่ากำลั้งตั้งของเกลือหินแบบบราซิล (MPa)
Vacherie	1.1
Petal	1.2
McInosh	1.3
Richton	1.3
Spindletop	1.4
Bay Gas Well No.2, McIntosh Dome	1.4
Bamnet Narong	1.4
Week's Island	1.5
Jefferson Island	1.5
Udon Thani, Middle Salt	1.5
Udon Thani, Lower Salt (DEDE)	1.5
Napoleonville	1.6
Lyons	1.6
Trapra	1.6
New Mexico	1.6
Udon Thani, Lower Salt	1.6
Permain	1.7
Barbers Hill	1.7
Udon Thani, Middle Salt	1.7
Udon Thani, Middle Salt	1.9
Udon Thani, Middle Salt (DEDE)	2.0
Udon Thani, Lower Salt	2.0
Udon Thani, Middle Salt	2.2
Paradox	2.6

Liu et al. (2010) ได้ทำการศึกษาค่ากำลังดึงของเกลือหินภายใต้การทดสอบแรงดึงทางตรงและทางอ้อมของชั้นเกลือหิน (Interlayer salt rock) และเกลือหินบริสุทธิ์ โดยผลการทดสอบระบุว่าค่ากำลังดึงทางอ้อมของชั้นเกลือหินสูงกว่าค่ากำลังดึงทางอ้อมของเกลือหินบริสุทธิ์ และค่ากำลังดึงทางตรงของเกลือหินบริสุทธิ์มีค่าสูงกว่าค่ากำลังดึงทางอ้อมแสดงในรูปที่ 2.1 ถึงรูปที่ 2.2 จากการทดสอบความแตกต่างของค่ากำลังดึงทางตรงและทางอ้อมระบุว่า ค่ากำลังดึงทางตรงมีค่ามากกว่าค่ากำลังดึงทางอ้อม



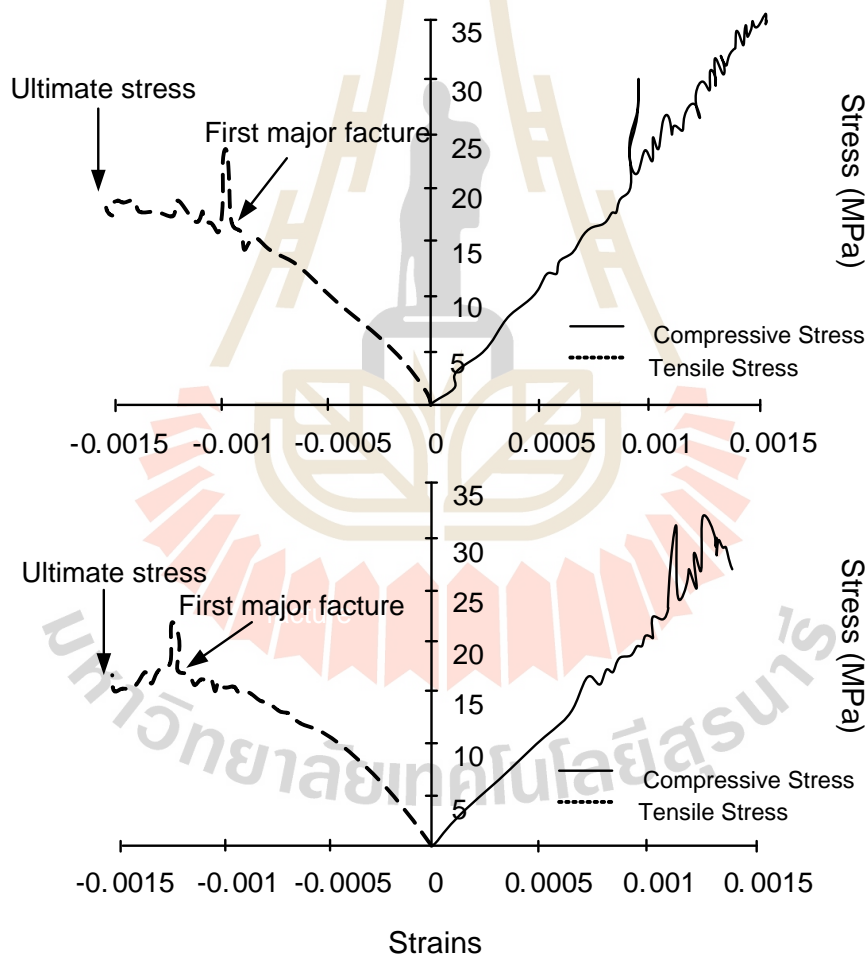
รูปที่ 2.1 ค่ากำลังดึงจากการทดสอบแรงดึงทางอ้อมของชั้นเกลือหิน (a) และเกลือหินบริสุทธิ์ (b) (Liu et al., 2010)



รูปที่ 2.2 ค่ากำลังดึงจากการทดสอบแรงดึงทางตรงของเกลือหินบริสุทธิ์ (a) และค่ากำลังดึงจากการทดสอบแรงดึงทางอ้อม (b) (Liu et al., 2010)

Jager et al. (2007) ได้ทำการทดสอบการดัดงอและการทดสอบกำลังดึงในแกนเดียวของตัวอย่างหิน โดยผลการทดสอบระบุว่า ค่ากำลังดึงจากการทดสอบการดัดงอมีค่ามากกว่าค่ากำลังดึงจากการทดสอบกำลังดึงในแกนเดียว Morgans (1956), Berenbaum และ Brodie (1959a) และ Evans (1961) ได้วิเคราะห์การทดสอบการดัดงอและการทดสอบแรงดึงในแกนเดียวเพื่อศึกษากำลังดึงของตัวอย่างหิน โดยสรุปผลได้ว่าการทดสอบการดัดงอเป็นวิธีทดสอบที่ง่ายกว่าการทดสอบแรงดึงในแกนเดียว

Weinberger (1994) ได้ทำการทดสอบการดัดงอแบบสี่จุดเพื่อศึกษาค่ากำลังดึงและค่ากำลังกดของหิน ซึ่งตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบมีขนาด $18 \times 18 \times 150 \text{ mm}^3$ โดยผลการทดสอบระบุว่า ค่ากำลังกดของการทดสอบการดัดงอมีค่าสูงกว่าค่ากำลังดึงของหิน และเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดึงและค่ากำลังกดของหินกับความเครียด (Weinberger, 1994)

2.3 ผลกระทบของอัตราการดึง

Wisetsaen et al. (2015) ได้ทำการศึกษาค่ากำลังดึงของเกลือหินด้วยวิธีการทดสอบกำลังดึงแบบวงแหวนภายใต้การผันแปรอัตราการดึงและอุณหภูมิ โดยตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 mm หนา 38 mm และเจาะรูตรงกลางให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 31.5 mm ซึ่งตัวอย่างเกลือหินถูกกดตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลางให้สอดคล้องกับอัตราการดึงที่จุดเริ่มแตกที่รูตรงกลางเท่ากับ 3×10^{-5} , 3×10^{-4} , 3×10^{-3} , 3×10^{-2} และ 3×10^{-1} MPa/s การทดสอบได้มีการผันแปรอุณหภูมิจาก 270 ถึง 375 K โดยผลการทดสอบระบุว่า ค่ากำลังดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการดึงที่จุดเริ่มแตกสูงขึ้น และค่ากำลังดึงมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จากกฎของเอกซ์โพเนนเชียลสามารถอธิบายพฤติกรรมของเกลือหินที่ขึ้นกับเวลาภายใต้กำลังดึงและสามารถนำมาคาดคะเนค่ากำลังดึงของเกลือหินที่ขึ้นกับเวลาของหลังคาโพรงเกลือภายใต้การผันแปรอุณหภูมิ เช่น บริเวณรอบโพรงกักเก็บของเสีย

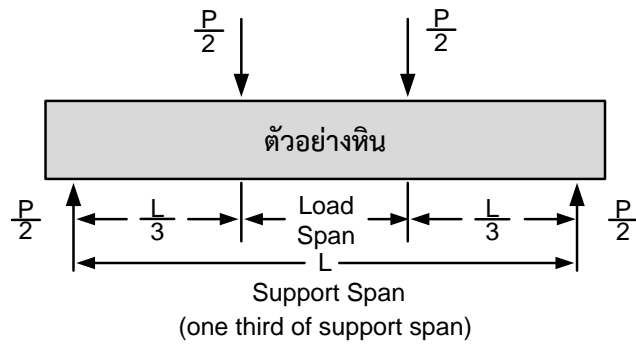
Zhang และ Wong (2014) ได้ทำการศึกษาค่ากำลังดึงของหินแบบบราซิลภายใต้การผันแปรอัตราความเครียดที่แตกต่างกันคือ 0.005, 0.01, 0.02, 0.08, 0.2 และ 0.6 m/s ซึ่งค่าสูงสุดของความเครียดดึงจะเหนี่ยวนำให้เกิดค่ากำลังดึงของหินแบบบราซิลของตัวอย่างหิน ผลที่ได้จากการทดสอบกำลังดึงแบบบราซิลระบุว่า ค่ากำลังดึงของหินแบบบราซิล (σ_t) เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการดึงเพิ่มขึ้น โดยค่าความเค้นดึงคำนวณได้จาก

$$\sigma_t = F/\pi Rt \quad (2.1)$$

โดยที่ F = แรงอัดที่กระทำต่อแผ่นกด
 R และ T = รัศมีและความหนาตามลำดับ

2.4 การทดสอบการดัดงอแบบสี่จุด

ตัวอย่างหินสำหรับการทดสอบการดัดงอแบบสี่จุดจะมีลักษณะคล้ายคาน โดยมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม ขนาดของตัวอย่างหินแสดงในรูปที่ 2.1 โดยพื้นที่ผิวต้องขนานและไม่มีจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเตรียมตัวอย่าง ซึ่งตัวอย่างหินในการทดสอบแรงดัดงอแบบสี่จุดถูกวางไว้ตรงกลางแท่นรองรับระหว่างจุดรับแรงสองจุด จากนั้นกดตัวอย่างหินด้วยแท่นกดจากด้านบน ซึ่งมีจำนวนจุดรองรับแรงกดที่ขึ้นอยู่กับลักษณะของการทดสอบ จากรูปที่ 2.1 แสดงแผนภาพการทดสอบการดัดงอแบบสี่จุด (ASTM D6272-10) โดยจุดรองรับในการส่งผ่านแรงกดต่อตัวอย่างหินทุกจุดต้องมีความโค้งมนเพื่อลดความเข้มของความเค้นในบริเวณนั้น หากหัวกดไม่มีความโค้งมนอาจส่งผลให้ตัวอย่างหินทดสอบเกิดการแตกในบริเวณจุดกดนั้นได้ นอกจากนี้จุดรับแรงกดทั้งหมดสามารถปรับเปลี่ยนเป็นแบบยึดติดโดยไม่สามารถหมุนได้ หรืออาจหมุนตัวได้บ้างเล็กน้อยเพื่อช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างตัวอย่างหินกับจุดรองรับที่อาจส่งผลกระทบต่อผลการทดสอบได้ โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณการทดสอบแรงดัดงอแบบสี่จุด คือ



รูปที่ 2.4 แผนภาพการทดสอบการดัดงอแบบ 4 จุด โดยมีระยะกดเท่ากับ $1/3$ ของความยาวของตัวอย่างหิน โดยที่ P คือ แรงกด

$$\sigma_t = PL/bd^2 \quad (2.2)$$

โดยที่ σ_t = ค่าความเค้นดึงสูงสุดแบบกดสี่จุด
 P = แรงกดสูงสุดที่จุดแตกของตัวอย่างหิน
 L = ความยาวของตัวอย่างหินวัดจากจุดกดที่ปลายทั้งสองด้าน
 b = ความกว้างของตัวอย่างหิน
 d = ความหนาของตัวอย่างหิน

Yokoyama (1988) ได้พัฒนาสมการสำหรับการทดสอบการดัดงอแบบสี่จุดจากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด โดยวิเคราะห์สมการจากแรงตามแนวแกน แรงที่กระทำและความเครียดที่เกิดด้านบนและด้านล่างของคาน ซึ่งสามารถคำนวณหาความเค้นดึงและกดได้จากสมการที่ 2.3 และ 2.4

$$\sigma_t = [dM(\epsilon_t + \epsilon_c) + 2M(d\epsilon_t + \epsilon_c)] / bh^2d\epsilon_t \quad (2.3)$$

$$\sigma_c = [dM(\epsilon_t + \epsilon_c) + 2M(d\epsilon_t + \epsilon_c)] / bh^2d\epsilon_c \quad (2.4)$$

โดยที่ dM , $d\epsilon_t$ และ $d\epsilon_c$ = การเพิ่มขึ้นของช่วงเวลาและความเครียดในระหว่างการทดสอบ
 L_t และ L_c = ระยะห่างระหว่างจุดโหนดของด้านแรงดึงและด้านแรงกด
 ϵ_t และ ϵ_c = ความเครียดแรงดึงและความเครียดแรงกด
 M = ช่วงเวลาที่เกิดการดัดของคาน ($M = 0.5P(L_t - L_c)$)
 b = ความกว้างของคาน
 h = ความสูงของคาน

2.5 การทดสอบกำลังดึงแบบบราซิล

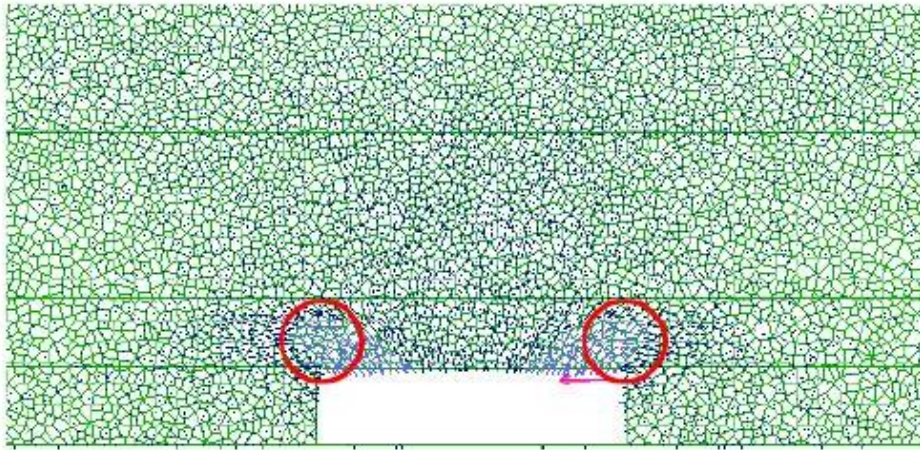
การทดสอบกำลังดึงแบบบราซิล (ASTM D3967-08) สำหรับเกลือหิน (Hunsen et al., 1984; Khan et al., 1988; Senseny et al., 1992; Fuenkajorn และ Daemen, 1988) ได้ทำการทดสอบโดยให้แรงกดในแนวเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างเกลือหินทรงกระบอกด้วยอัตราแรงกด 0.057 ถึง 0.342 MPa/s จนกระทั่งตัวอย่างเกลือหินเกิดการแตกในแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง โดยค่าแรงกดสูงสุดที่ได้สามารถนำไปคำนวณค่ากำลังดึงซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.3 ถึง 1.6 MPa และพบว่าอัตราการดึงที่เร็วเกินไปจะทำให้ค่ากำลังดึงสูง โดย Hunsche (1993) ได้ศึกษาเกี่ยวกับอัตราการการดึงที่เหมาะสมภายใต้การทดสอบกำลังดึง พบว่าควรใช้อัตราการการดึงระหว่าง 0.017 ถึง 0.248 MPa/s เนื่องจากไม่ส่งผลกระทบต่อค่ากำลังดึงของเกลือหิน

Hardy (1998) ได้ทำการทดสอบกำลังดึงของตัวอย่างเกลือหินที่มีขนาดผลึกละเอียด (Fine-grained) ด้วยวิธีการทดสอบ 3 รูปแบบ คือ 1) การทดสอบแรงดึงทางตรง 2) การทดสอบกำลังดึงแบบบราซิล และ 3) การทดสอบแรงดึงแบบวงแหวน ภายใต้อัตราการการดึง 0.003 ถึง 0.059 MPa/s ผลการทดสอบทั้งสามรูปแบบพบว่า ค่ากำลังดึงของตัวอย่างเกลือหินมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.63 MPa 3.97 MPa และ 0.68 MPa ตามลำดับ

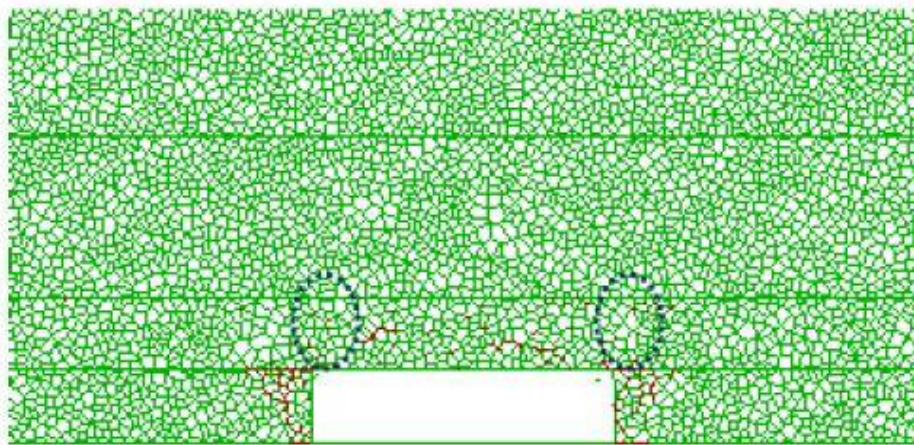
Fuenkajorn และ Daemen (1988) ได้ทำการทดสอบ Brazilian test โดยใช้เกลือหินจาก Salado Formation โดยผลการทดสอบสรุปว่า ถ้าพบรอยแตกผ่ากลางผลึกเกลือจะมีค่ากำลังดึงที่สูง แต่ถ้าพบรอยแตกผ่ารอยต่อระหว่างผลึก (Crystal boundaries) ค่ากำลังดึงที่วัดได้จะมีค่าต่ำ

2.6 การจำลองโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์

Xue (2015) ได้ทำการศึกษาการแตกของหลังคาช่องเหมือง โดยใช้โปรแกรม UDEC ในการจำลองการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเชิงเวลาของมวลหิน ซึ่งการศึกษาได้กำหนดระยะเวลาในการจำลอง 1 ปี เพื่อศึกษาพฤติกรรมการคืบก่อนและหลังการขุดเจาะ โดยตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองคอมพิวเตอร์ นำมาจากการสอบเทียบกับการทดสอบแรงกดในแกนเดียวในห้องปฏิบัติการ ซึ่งผลการจำลองระบุว่า หลังการขุดเจาะค่าความเค้นในแนวระนาบมีค่าสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าค่าความเค้นเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการแตกของหลังคาช่องเหมือง หลังจากระยะเวลาในการจำลองผ่านไป 1 ปี ความเค้นมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.9 เป็น 2.9 MPa และเกิดรอยแตกบริเวณพื้นที่ที่มีการโก่งตัว ซึ่งเป็นผลกระทบจากความเครียดในแนวนอนที่สูงขึ้น จึงส่งผลให้หลังคาช่องเหมืองเกิดการแตก (รูปที่ 2.5 ถึง รูปที่ 2.6)



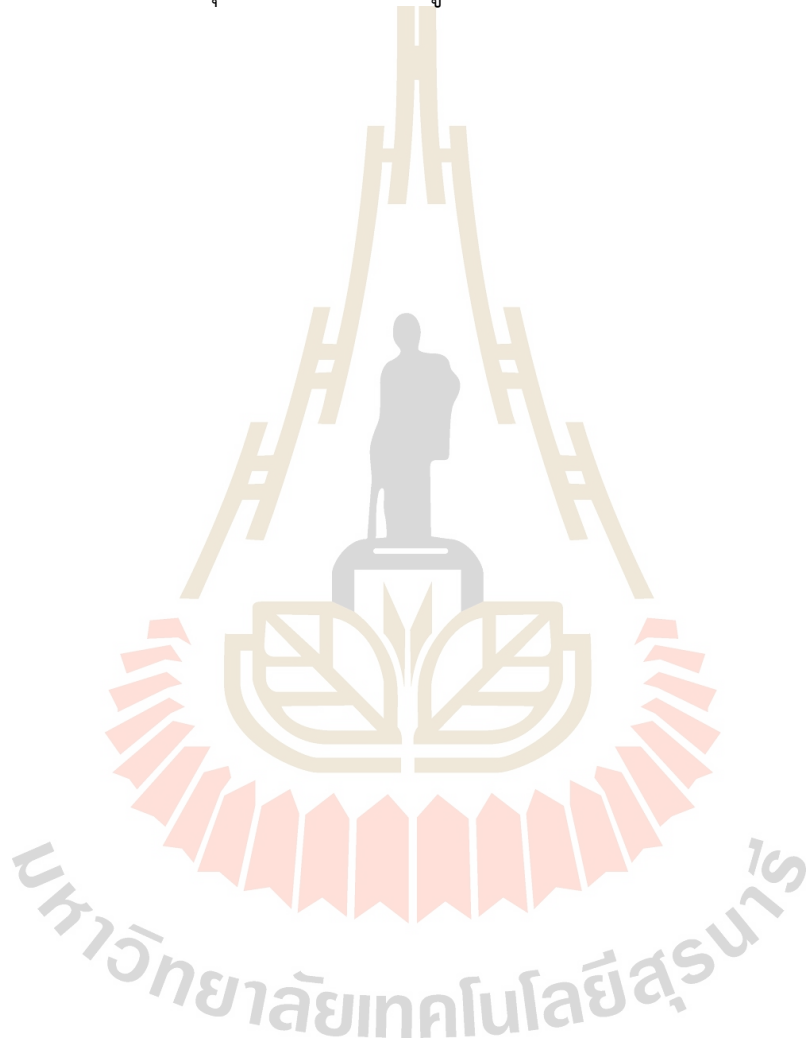
รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างหลังจากการค้ำที่ระดับความเค้น 1.9 MPa (Xue, 2015)



รูปที่ 2.6 รอยแตกหลังจากการจำลองเป็นระยะเวลา 1 ปี ที่ระดับความเค้น 1.9 MPa (Xue, 2015)

Mishra และ Ray (2014) ได้ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของหม้อถ่วงถ่านหิน โดยใช้โปรแกรม FLAC 3D เพื่อศึกษาพฤติกรรมของถ่านหินที่ขึ้นกับเวลา โดยค่าตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองคอมพิวเตอร์ นำมาจากการสอบเทียบกับผลการทดสอบการค้ำในห้องปฏิบัติการ ซึ่งการจำลองได้ทำการศึกษาปัจจัยความปลอดภัยและความเครียดที่ทำให้เกิดการแตกของหลังคาช่องหม้อถ่วง โดยผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณใกล้เสาค้ำยัน จะส่งผลให้ค่าความเค้นเพิ่มขึ้น ทำให้หลังคาช่องหม้อถ่วงเกิดการแตก ดังนั้น ผลการจำลองสรุปผลได้ว่า ปัจจัยความปลอดภัยที่มีค่าในช่วงระหว่าง 0.7 ถึง 1.0 ควรทำการค้ำยันหลังคาช่องหม้อถ่วงเพื่อให้มีเสถียรภาพมากขึ้น

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบและการคำนวณกำลังดึงของเกลื่อหินและเกลื่อหินที่มีแร่คาร์บอนิลต์เจือปน ยังไม่มีผู้ใดดำเนินการทั้งในและต่างประเทศ ทั้งนี้ เนื่องจากการออกแบบช่องเหมือง อยู่ภายใต้สมมุติฐานให้หลังคาช่องเหมืองมีกำลังดึงเป็นศูนย์ เพื่อให้การออกแบบเป็นไปในเชิงอนุรักษ์ อย่างไรก็ตาม การออกแบบลักษณะเช่นนี้อาจทำให้ผลผลิตที่ได้จากอุตสาหกรรมเหมืองแร่โพแทชไม่มี ประสิทธิภาพเท่าที่ควร ประกอบกับปัจจุบันมีเทคโนโลยีในการค้ำยันหลังคาช่องเหมือง เช่น การติดตั้ง ยึดหินในรูปแบบต่างๆ ด้วยเหตุนี้ความเข้าใจองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับกำลังดึงของเกลื่อหินและเกลื่อหิน ที่มีแร่คาร์บอนิลต์ (หรือแร่อื่นในกลุ่มโพแทช) เจือปนอยู่จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมาก



บทที่ 3

การเก็บและจัดเตรียมตัวอย่างหิน

3.1 วัตถุประสงค์

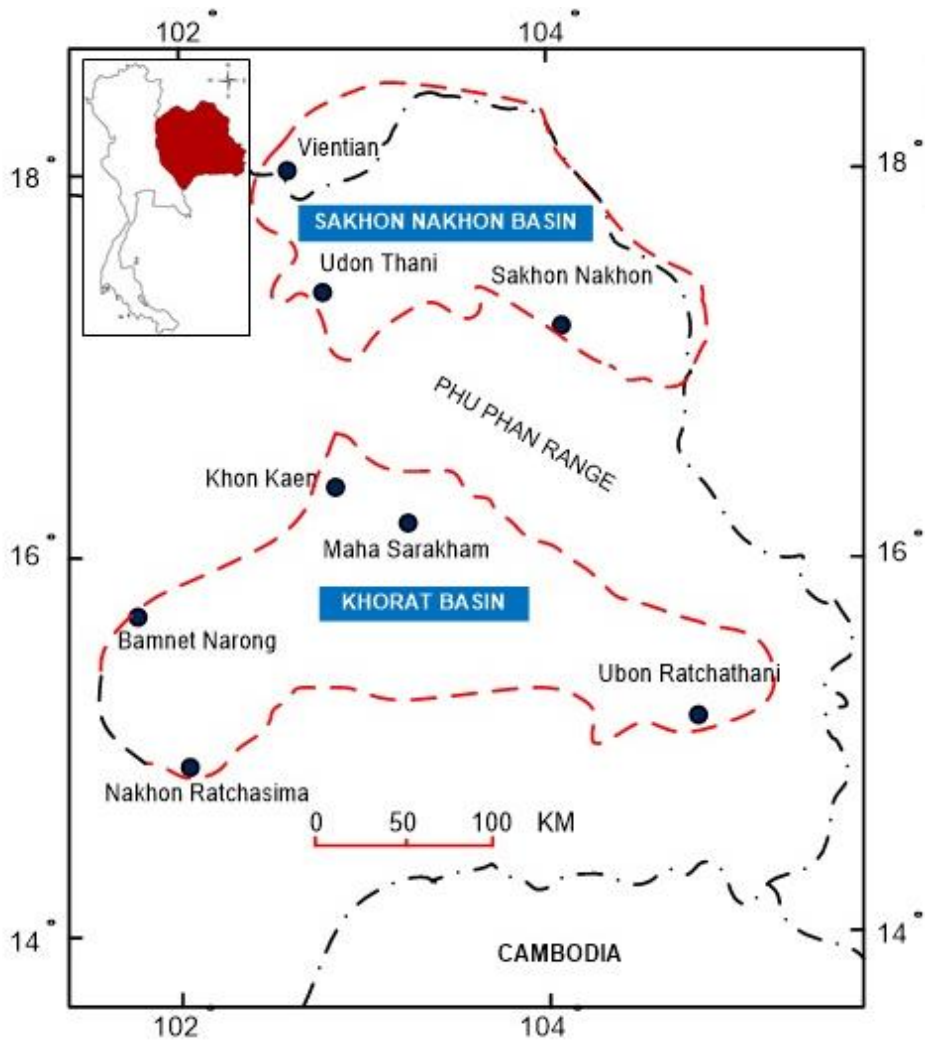
เนื้อหาในบทนี้อธิบายถึงขั้นตอนและวิธีการในการจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหินเพื่อใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยหินที่ใช้ในการทดสอบเป็นเกลือหินมีปริมาณแร่คาร์บอเนตตั้งแต่ 0 ถึง 100% ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ทดสอบนำมาจากเกลือหินชั้นล่าง ชุมมหาสารคาม ดังแสดงในรูปที่ 3.1

3.2 การเตรียมตัวอย่างหินสำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

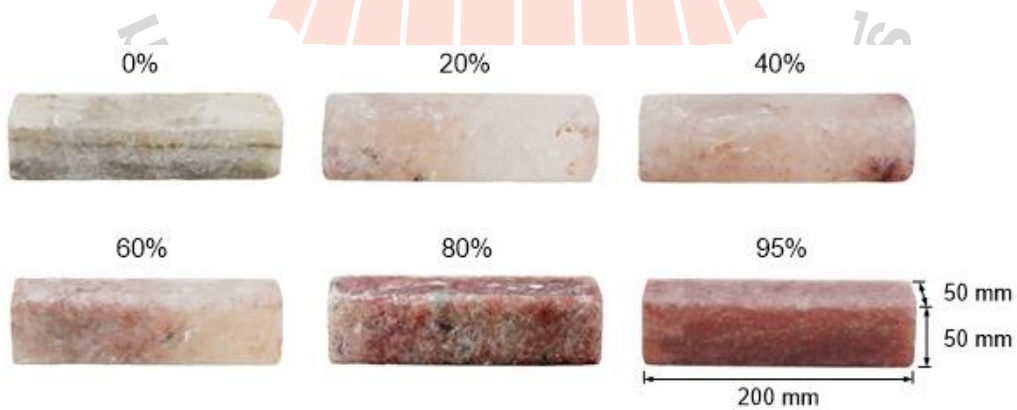
ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เหมืองแร่โปแตช อาเซียน จำกัด (มหาชน) โดยตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบมีปริมาณแร่คาร์บอเนตปะปนอยู่ ซึ่งตัวอย่างเกลือหินมีทั้งชั้นแร่เฮไลต์และแร่คาร์บอเนต เรียกรวมกันว่าหินคาร์บอเนต (Warren, 1999) ในการทดสอบตัวอย่างเกลือหินได้ดำเนินการทดสอบ 2 รูปแบบ ได้แก่ การทดสอบการดัดงอแบบสี่จุด และการทดสอบกำลังดึงแบบบราซิล สำหรับการทดสอบการดัดงอแบบสี่จุดมีการจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหินให้มีรูปร่างแบบแท่งสี่เหลี่ยมขนาด $50 \times 50 \times 200 \text{ mm}^3$ จำนวนไม่น้อยกว่า 24 ตัวอย่าง (รูปที่ 3.2) และทำการติดตั้ง Strain gage ขนาดความยาว 2 mm บริเวณตรงกลางของตัวอย่างเกลือหินในแนวขนานกับชั้นหิน เพื่อใช้วัดความเครียดแรงดึงของหิน (รูปที่ 3.3) สำหรับการทดสอบกำลังดึงแบบบราซิลได้มีการจัดเตรียมตัวอย่างเกลือหินให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 mm และมี L/D เท่ากับ 0.50 จำนวนไม่น้อยกว่า 30 ตัวอย่าง (รูปที่ 3.4) โดยการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM และในการทดสอบทั้งสองรูปแบบได้ทำการผันแปรปริมาณของแร่คาร์บอเนตในเกลือหินตั้งแต่ 0% ถึง 100% โดยตัวอย่างหินที่นำมาทดสอบในการศึกษาครั้งนี้มีการกระจายตัวของปริมาณแร่คาร์บอเนตในระดับต่างๆ ค่อนข้างแตกต่างกัน กล่าวคือ ตัวอย่างหินที่มีปริมาณแร่คาร์บอเนตน้อยกว่า 60% จะมีการกระจายตัวของแร่คาร์บอเนตไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งตัวอย่าง สามารถแยกแยะระหว่างเกลือหินและแร่คาร์บอเนตได้อย่างชัดเจน และเมื่อปริมาณคาร์บอเนตมีค่ามากกว่า 60% ขึ้นไป การกระจายตัวของแร่คาร์บอเนตค่อนข้างสม่ำเสมอทั่วทั้งตัวอย่าง จึงทำให้เนื้อหินมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพสำหรับการทดสอบการดัดงอแบบสี่จุด และตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพสำหรับการทดสอบกำลังดึงแบบบราซิล โดยสมการที่ 3.1 แสดงวิธีการหาปริมาณแร่คาร์บอเนตสำหรับแต่ละตัวอย่างเกลือหินดังสมการ

$$C_{\%} = \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho_s - \rho_c} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

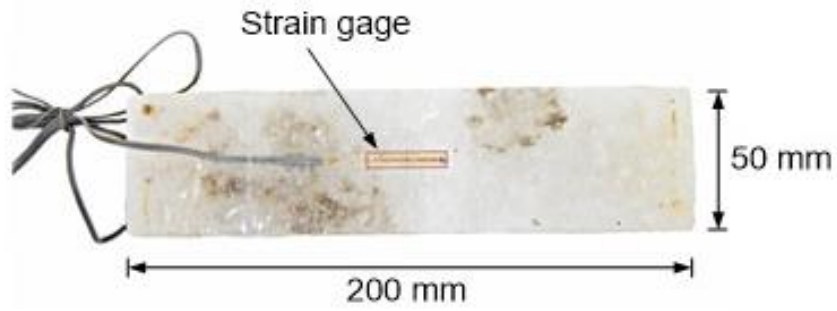
โดยที่ ρ = ความหนาแน่นของตัวอย่างหิน
 ρ_s = ความหนาแน่นของเกลือหิน (2.16 g/cc)
 ρ_c = ความหนาแน่นของแร่คาร์บอเนต (1.60 g/cc)



รูปที่ 3.1 แหล่งกำเนิดของตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบ (Suwanich, 2007)



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างเกลือหินภายใต้การผันแปรปริมาณแร่คาร์บอนไดออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 100%



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างการติดตั้ง Stain gage ที่บริเวณตรงกลางของแท่งตัวอย่างเกลือหิน



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างเกลือหินภายใต้การผันแปรปริมาณแร่คาร์บอนไลท์ตั้งแต่ 0 ถึง 100% สำหรับการทดสอบกำลังดึงแบบบราซิล

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกายภาพสำหรับการทดสอบการดัดงอแบบสี่จุด

ตัวอย่างเกลือหิน	ความยาว (mm)	ความกว้าง (mm)	ความสูง (mm)	ความหนาแน่น (g/cc)	ปริมาณแร่คาร์บอเนต (%)
PT-04	200.08	49.70	51.10	1.62	91.00
PT-17	198.82	51.58	50.84	1.67	86.72
PT-20	200.58	48.75	49.72	1.80	65.00
PT-22	199.68	51.43	49.88	1.83	58.68
PT-26	199.11	49.83	50.14	1.85	55.54
PT-27	200.78	50.02	50.55	1.62	95.34
PT-29	199.78	50.65	50.57	2.01	26.78
PT-30	195.36	48.58	48.95	1.74	74.87
PT-31	201.78	50.12	50.25	2.16	0.00
PT-32	203.04	50.42	50.23	1.65	91.07
PT-33	201.75	50.58	50.52	1.82	61.49
PT-34	201.86	50.21	48.65	1.64	92.37
PT-37	202.05	49.60	48.64	2.06	17.33
PT-39	199.93	50.00	50.82	2.02	24.68
PT-42	202.30	50.98	51.25	1.89	47.36
PT-45	202.93	52.03	50.75	1.98	32.14
PT-46	201.10	51.88	51.63	1.94	40.11
PT-48	200.53	51.53	51.68	1.92	42.39
PT-50	202.68	50.83	51.48	1.99	30.86
PT-51	200.96	50.61	51.63	2.05	19.64
PT-54	197.44	49.85	47.87	1.74	75.53
PT-64	201.06	49.00	44.44	2.11	0.00
PT-66	194.38	50.15	50.50	2.10	0.00
PT-67	205.05	50.01	50.50	2.08	0.00

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกายภาพสำหรับการทดสอบกำลังดึงแบบบราซิล

ตัวอย่างเกลือหิน	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)	ความยาว (mm)	L/D	ความหนาแน่น (g/cc)	ปริมาณแร่คาร์บอเนต (%)
PT-BZ-01	54.00	24.30	0.45	2.05	20.08
PT-BZ-02	55.40	26.40	0.48	2.17	0.00
PT-BZ-03	54.80	25.00	0.46	1.97	33.40
PT-BZ-04	55.30	24.70	0.45	1.95	37.33
PT-BZ-05	55.70	24.50	0.44	1.86	53.22
PT-BZ-06	56.20	24.00	0.43	1.92	42.02
PT-BZ-07	55.60	25.60	0.46	1.67	86.66
PT-BZ-08	54.30	25.20	0.46	1.68	85.02
PT-BZ-09	54.20	24.80	0.46	1.72	78.44
PT-BZ-10	54.70	25.40	0.46	1.96	35.48
PT-BZ-11	55.00	24.90	0.45	1.98	32.15
PT-BZ-12	55.30	24.00	0.43	1.93	41.18
PT-BZ-13	53.80	24.00	0.45	1.96	36.27
PT-BZ-14	55.60	23.90	0.43	2.01	26.22
PT-BZ-15	55.40	25.60	0.46	2.12	8.01
PT-BZ-16	55.60	24.30	0.44	2.05	19.84
PT-BZ-17	56.00	25.10	0.45	2.01	26.00
PT-BZ-18	55.00	23.80	0.43	2.06	17.57
PT-BZ-19	54.00	24.70	0.46	1.98	32.62
PT-BZ-20	54.00	24.00	0.44	1.74	75.77
PT-BZ-21	54.30	24.00	0.44	1.64	93.38
PT-BZ-22	54.20	25.40	0.47	1.67	86.78
PT-BZ-23	55.00	24.00	0.44	1.91	45.14
PT-BZ-24	55.40	24.00	0.43	1.79	65.50
PT-BZ-25	54.00	23.80	0.44	1.79	66.55
PT-BZ-26	54.00	24.20	0.45	1.82	61.35

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกายภาพสำหรับการทดสอบกำลังดึงแบบบราซิล (ต่อ)

ตัวอย่างเกลือหิน	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)	ความยาว (mm)	L/D	ความหนาแน่น (g/cc)	ปริมาณแร่คาร์บอเนต (%)
PT-BZ-27	55.70	25.10	0.45	1.76	70.88
PT-BZ-28	55.40	24.30	0.44	1.77	69.67
PT-BZ-29	54.30	23.70	0.44	1.78	67.56
PT-BZ-30	54.00	25.30	0.47	1.78	68.39
PT-BZ-31	54.00	24.80	0.46	1.77	69.29
PT-BZ-32	55.30	23.80	0.43	1.95	37.55
PT-BZ-33	55.00	24.22	0.44	2.04	21.90
PT-BZ-34	54.20	24.00	0.44	1.95	37.88
PT-BZ-35	54.20	24.00	0.44	2.08	14.60
PT-BZ-36	55.00	25.00	0.45	1.69	84.79
PT-BZ-37	54.00	25.20	0.47	1.79	65.62
PT-BZ-38	54.00	24.70	0.46	1.67	86.63
PT-BZ-39	54.10	24.30	0.45	1.86	53.67
PT-BZ-40	54.60	25.00	0.46	1.77	69.89
PT-BZ-41	55.10	23.80	0.43	1.68	86.54
PT-BZ-42	53.70	24.50	0.46	1.68	86.14
PT-BZ-43	54.30	24.10	0.44	2.19	0.00
PT-BZ-44	53.60	24.00	0.45	2.20	0.00
PT-BZ-45	54.00	24.30	0.45	2.09	0.00
PT-BZ-46	55.40	26.40	0.48	2.16	0.00

บทที่ 4

การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

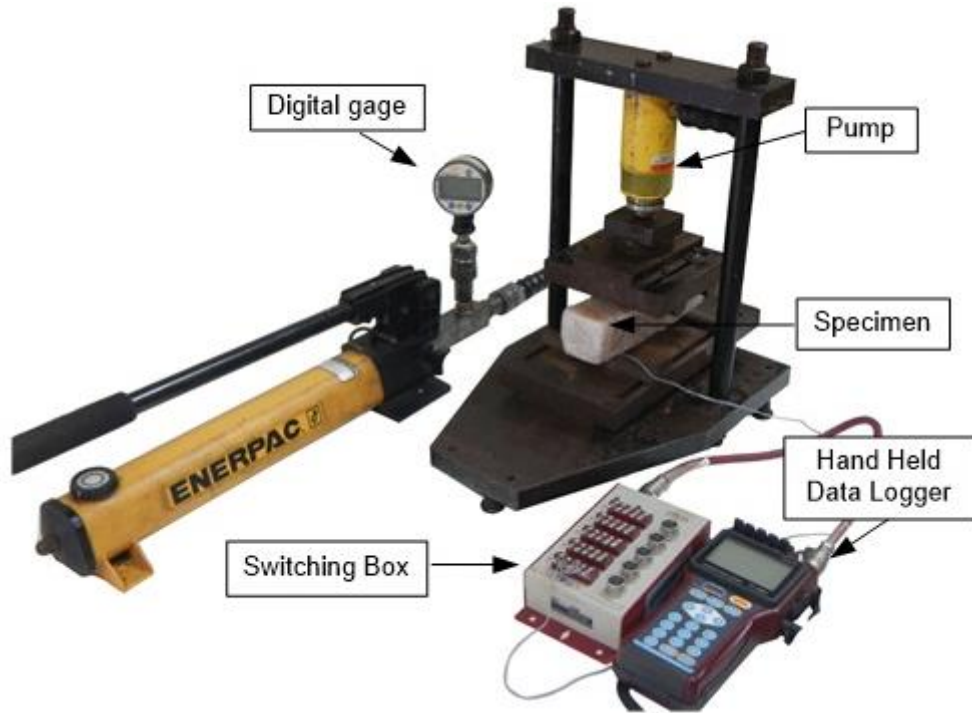
4.1 วัตถุประสงค์

การทดสอบในห้องปฏิบัติการมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของตัวอย่างเกลือหิน ซึ่งในการศึกษานี้แบ่งเป็น 2 การทดสอบ ได้แก่ การทดสอบการดัดงอแบบสี่จุด และการทดสอบแรงดึงแบบบราซิล เพื่อศึกษาค่ากำลังดึงของตัวอย่างเกลือหินภายใต้การผันแปรปริมาณแร่คาร์บอนิลต์ และอัตราการดึง

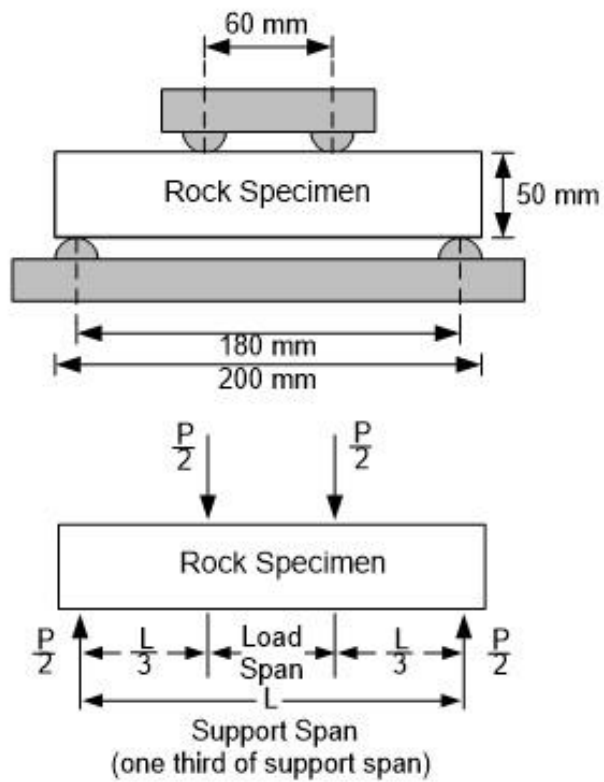
4.2 การทดสอบการดัดงอแบบสี่จุด

การทดสอบการดัดงอแบบสี่จุดมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าความเค้นดึงสูงสุดของเกลือหิน (Goodman, 1989) ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบจะมีประโยชน์ในการประเมินเสถียรภาพของหลังคาเหมืองใต้ดินหรืออุโมงค์ที่ขุดเจาะอยู่ในชั้นหินตะกอนที่อยู่ในแนวระนาบ การกระจายตัวของความเค้นในตัวอย่างเกลือหินสำหรับการทดสอบแรงดัดงอแบบสี่จุดจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับการกระจายตัวของความเค้นในชั้นหินที่เป็นส่วนของหลังคาเหมืองหรืออุโมงค์ ซึ่งความเค้นดึงสูงสุดของเกลือหินที่ได้จากการทดสอบการดัดงอแบบสี่จุด สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในกรณีดังกล่าวได้อย่างเหมาะสมมากกว่าผลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแบบบราซิล

การทดสอบ (รูปที่ 4.1) ดำเนินการโดยการนำตัวอย่างเกลือหินแท่งสี่เหลี่ยมที่มีการผันแปรปริมาณแร่คาร์บอนิลต์วางตามแนวขวางบนโครงทดสอบที่มีจุดกดสี่จุด ซึ่งระยะห่างระหว่างจุดกดจะมีค่าเท่ากันคือ 60 mm (รูปที่ 4.2) จากนั้นติดตั้ง Switching box เข้ากับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับบันทึกข้อมูลการเคลื่อนตัวของตัวอย่างเกลือหิน ซึ่งตัวอย่างเกลือหินจะถูกกดตามแนวขวางด้วยสี่จุดภายใต้การผันแปรอัตราการดึง 4 อัตรา คือ 0.004, 0.0004, 0.00004 และ 0.000004 MPa/s (ได้ทำการเปลี่ยนอัตราการดึงจากเดิม 0.013 ถึง 0.00013 MPa/s เนื่องจากมีปริมาณแร่คาร์บอนิลต์ตั้งแต่ 70–100% ส่งผลให้หินแตกเร็วเกินไป ทำให้ไม่สามารถนับเวลาในการแตกของหินได้ และเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องยิ่งขึ้น) โดยจะให้แรงเพิ่มขึ้นแบบคงที่ในเชิงเวลาตามอัตราแรงดึงที่กำหนดจนกระทั่งตัวอย่างหินเกิดการวิบัติ ในการทดสอบได้กำหนดช่วงระยะเวลาการเพิ่มขึ้นของค่าความเค้นที่ละ 10 วินาที เช่น หากทดสอบที่อัตราการดึงเท่ากับ 0.004 MPa/s ภายใน 10 วินาที จะต้องเพิ่มแรงในแนวตั้งฉากกับตัวอย่างที่จะทำให้เกิดความเค้นดึงบริเวณจุดกึ่งกลางของตัวอย่างหินเท่ากับ 0.004 MPa ซึ่งจะทำให้การเพิ่มแรงดังกล่าวไปเรื่อยๆ จนหินเกิดการวิบัติ โดยแรงที่ให้แก่ตัวอย่างหินด้วยปั๊มไฮดรอลิกสามารถหาได้จากสมการที่ (4.1) ซึ่งในสมการจะปรากฏเป็นแรง P และพบว่าที่อัตราการให้แรงดึงช้าๆ จะทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบนานขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของแรงดึงบริเวณจุดกึ่งกลางของ



รูปที่ 4.1 การทดสอบการดัดงอแบบสี่จุด



รูปที่ 4.2 ตำแหน่งระยะห่างระหว่างจุดกด

ตัวอย่างมีอัตราการเพิ่มขึ้นน้อยมาก จึงทำให้ตัวอย่างสามารถรับแรงดึงได้นานขึ้นก่อนเกิดการโค้งงอจนกระทั่งเกิดการวิบัติ ในการทดสอบได้ใช้ตัวอย่างเกลือหินไม่น้อยกว่า 24 ตัวอย่าง โดยวิธีการทดสอบได้ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D6272-10 ในระหว่างการทดสอบได้บันทึกค่าการเคลื่อนตัวของตัวอย่างเกลือหินจนกระทั่งเกิดการแตก หลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์รูปแบบการแตกของตัวอย่างเกลือหิน ซึ่งความเค้นดึงสูงสุดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.1)

$$\sigma_t = PL/bd^2 \quad (4.1)$$

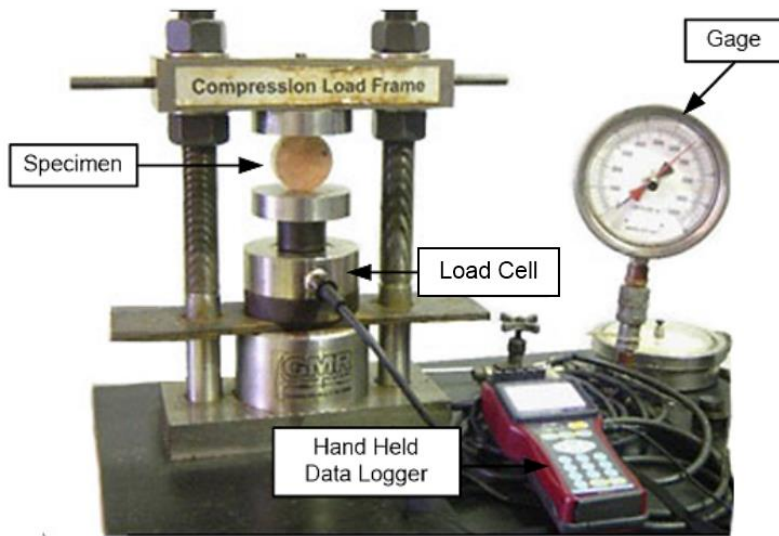
โดยที่ σ_t = ค่าความเค้นดึงสูงสุด
 P = แรงกดสูงสุดที่จุดแตกของตัวอย่างเกลือหิน
 L = ความยาวของตัวอย่างเกลือหินวัดจากจุดกดที่ปลายทั้งสองด้าน
 b = ความกว้างของตัวอย่างเกลือหิน
 d = ความหนาของตัวอย่างเกลือหิน

4.3 การทดสอบแรงดึงแบบบราซิล

การทดสอบแรงดึงแบบบราซิล (รูปที่ 4.3) มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อหาค่ากำลังดึงสูงสุดของเกลือหินที่จุดแตก (Brazilian tensile strength) ซึ่งถือเป็นการทดสอบความเค้นดึงสูงสุดของหินโดยอ้อม การทดสอบทำได้โดยการนำตัวอย่างเกลือหินมากดตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลางด้วยอัตราการใช้แรงประมาณ 0.5 ถึง 1.0 MPa/s ซึ่งแรงกดทำให้เกิดความเค้นดึงในแนวตั้งฉากกับทิศทางของการกด โดยความเค้นดึง ซึ่งจะมีค่าสูงสุดบริเวณจุดกึ่งกลางของตัวอย่างเกลือหิน โดยระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบแต่ละตัวอย่างประมาณ 30 นาที ความเค้นกดที่อยู่ในแนวเส้นผ่าศูนย์กลางของการกดที่ตั้งฉากกับความเค้นดึงจะมีค่าเป็น 3 เท่าของความเค้นดึงที่เกิดขึ้น ในการทดสอบได้ใช้ตัวอย่างเกลือหินไม่น้อยกว่า 30 ตัวอย่าง ภายใต้การผันแปรปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์ วิธีการทดสอบดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D3967-08 โดยระหว่างการทดสอบได้ทำการบันทึกค่าแรงกดที่จุดเริ่มต้นการทดสอบจนกระทั่งตัวอย่างเกลือหินเกิดการแตก หลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์รูปแบบการแตกของตัวอย่างเกลือหิน ซึ่งค่าความเค้นดึงสูงสุดแบบบราซิลที่หินจะรับได้ (σ_B) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\sigma_B = 2P/\pi DL \quad (4.2)$$

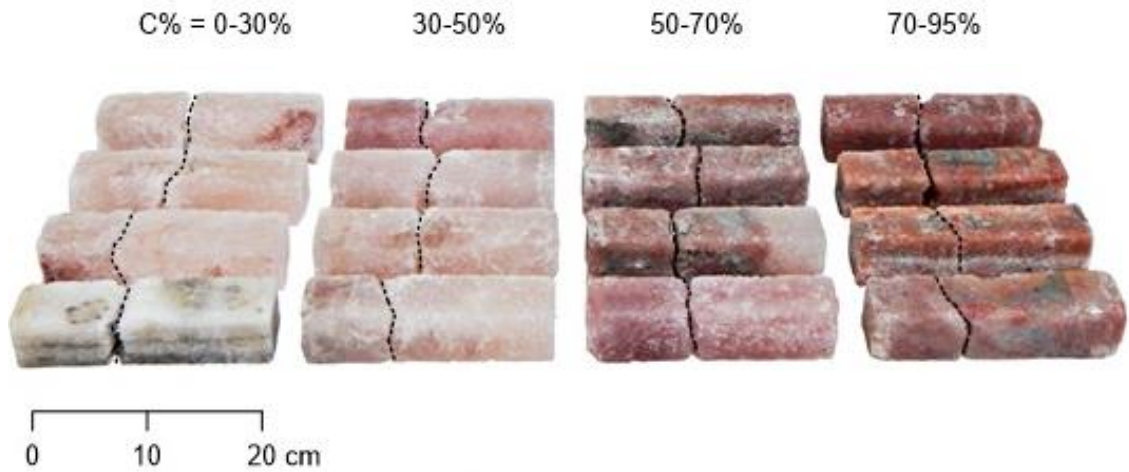
โดยที่ P = แรงกดที่จุดแตก
 σ_B = ความเค้นดึงสูงสุดแบบบราซิลที่หินจะรับได้
 D = เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่าง
 L = ความหนาของตัวอย่าง



รูปที่ 4.3 การทดสอบแรงดึงแบบบราซิล

4.4 ผลการทดสอบการดัดงอแบบสี่จุดและการทดสอบแรงดึงแบบบราซิล

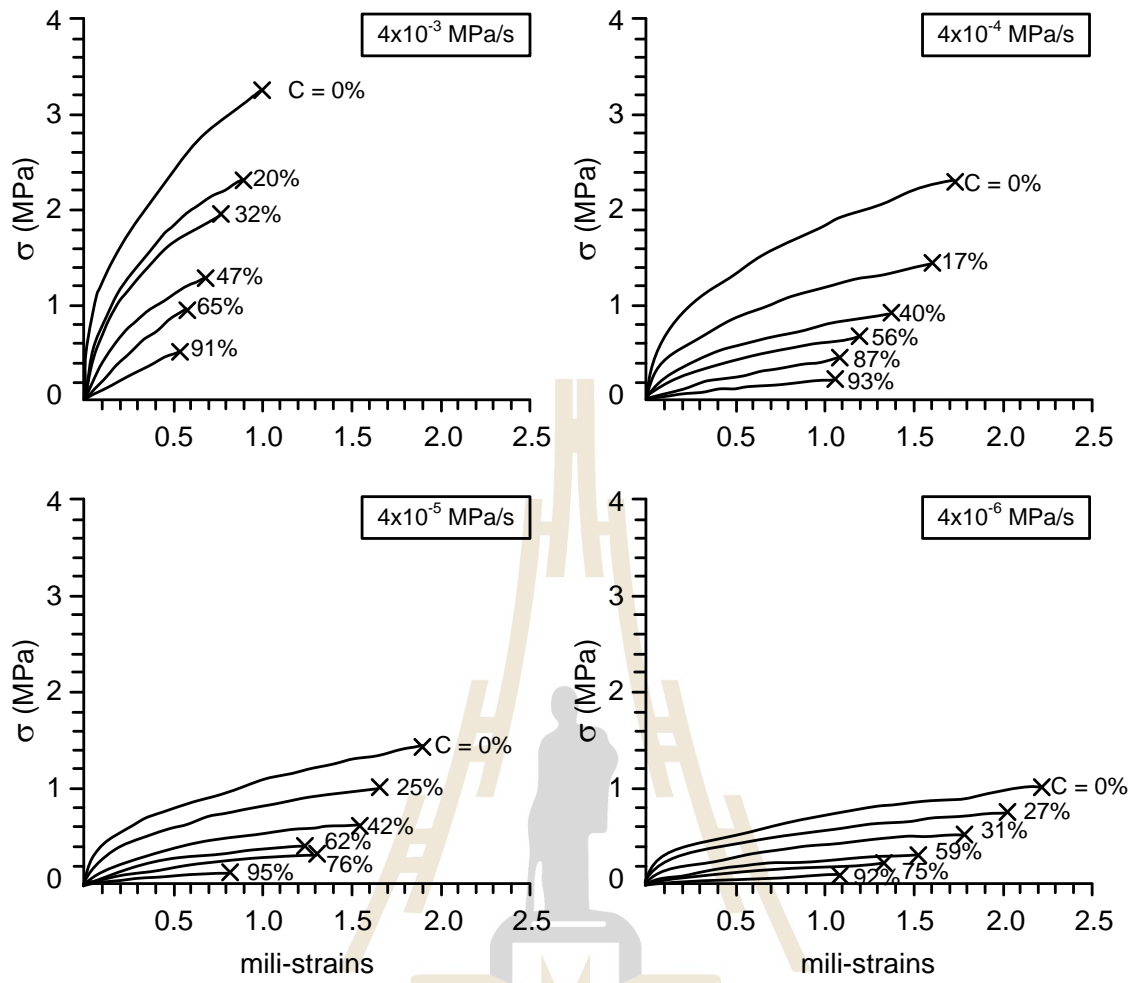
รูปที่ 4.4 แสดงตัวอย่างเกลือหินหลังการทดสอบการดัดงอแบบสี่จุดภายใต้การผันแปรปริมาณแรงแคร้คาร์บอนไฟต์และอัตราการดึงที่ 0.004, 0.0004, 0.00004 และ 0.000004 MPa/s ผลการทดสอบระบุว่าตัวอย่างเกลือหินมีลักษณะการแตกแบบดึงที่เกิดจากแรงกดในทิศทางตั้งฉากกับตัวอย่างหิน โดยรอยแตกจะอยู่ในขอบเขตของการให้แรงดึง รูปที่ 4.5 แสดงตัวอย่างเกลือหินหลังการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลภายใต้การผันแปรปริมาณแรงแคร้คาร์บอนไฟต์ จากการทดสอบพบว่าตัวอย่างเกลือหินมีลักษณะการแตก 2 รูปแบบ คือ การแตกแบบแยกภายในผลึกเกลือ และการแตกแบบเปราะระหว่างผลึกเกลือ รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นดึงและค่าความเครียดของหินภายใต้การผันแปรปริมาณแรงแคร้คาร์บอนไฟต์และอัตราการดึง โดยค่าความเครียดดึงที่เกิดขึ้นถูกตรวจวัดด้วย Strain gage ที่ติดตั้งในแนวแกนของตัวอย่าง และตั้งฉากกับแรงกดที่กระทำต่อตัวอย่าง และรูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความความเครียดดึงในฟังก์ชันของเวลาของตัวอย่างเกลือหิน จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าภายใต้อัตราการดึงที่สูงขึ้นส่งผลให้ความเค้นดึงมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่ค่าความเครียดมีค่าลดลง ผลการทดสอบดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Wisetsaen et al. (2015) ภายใต้อัตราการดึงเดียวกันพบว่าค่าความเค้นดึงมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณแรงแคร้คาร์บอนไฟต์ต่ำลง (รูปที่ 4.8) รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นดึงสูงสุดแบบบราซิลของเกลือหินที่จุดแตกและปริมาณแรงแคร้คาร์บอนไฟต์ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าความเค้นดึงสูงสุดของเกลือหินลดลงเมื่อปริมาณแรงแคร้คาร์บอนไฟต์เพิ่มขึ้น



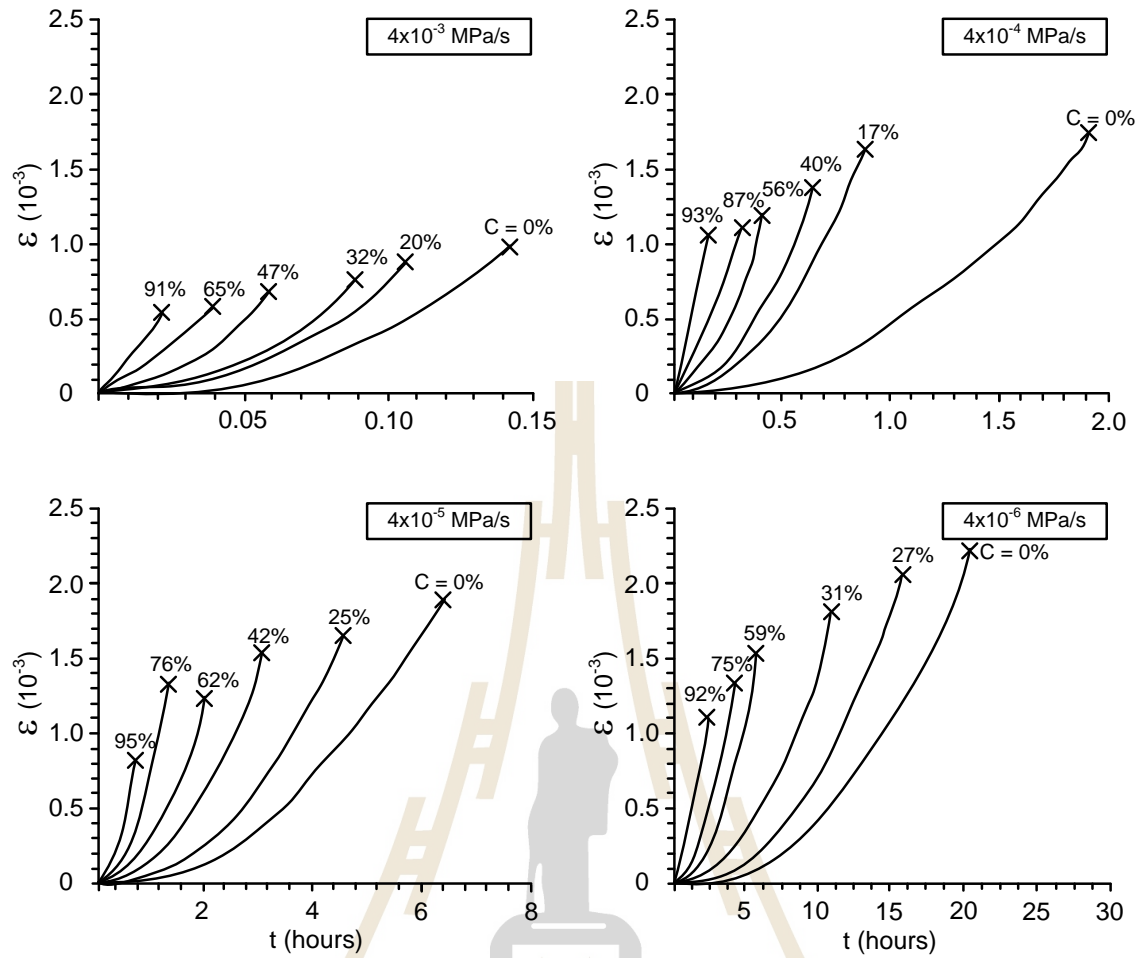
รูปที่ 4.4 ตัวอย่างเกลือหินหลังการทดสอบการดัดงอแบบสี่จุดภายใต้การผันแปรปริมาณแร่คาร์บอนไลต์



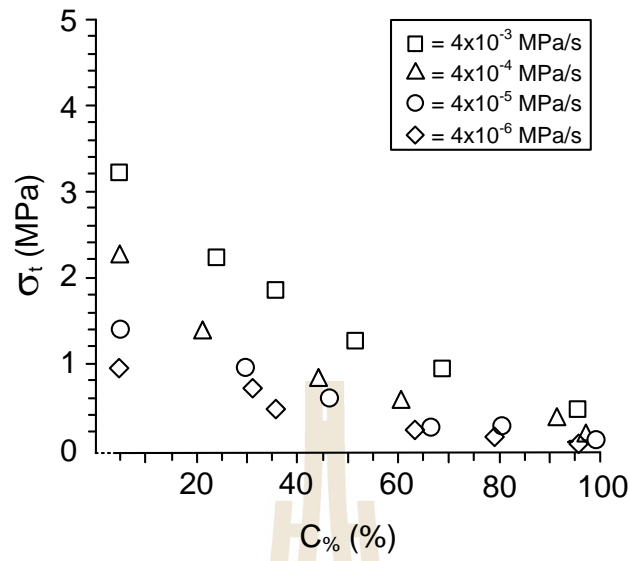
รูปที่ 4.5 ตัวอย่างเกลือหินหลังการทดสอบแรงดิ่งแบบบราซิไลต์ภายใต้การผันแปรปริมาณแร่คาร์บอนไลต์



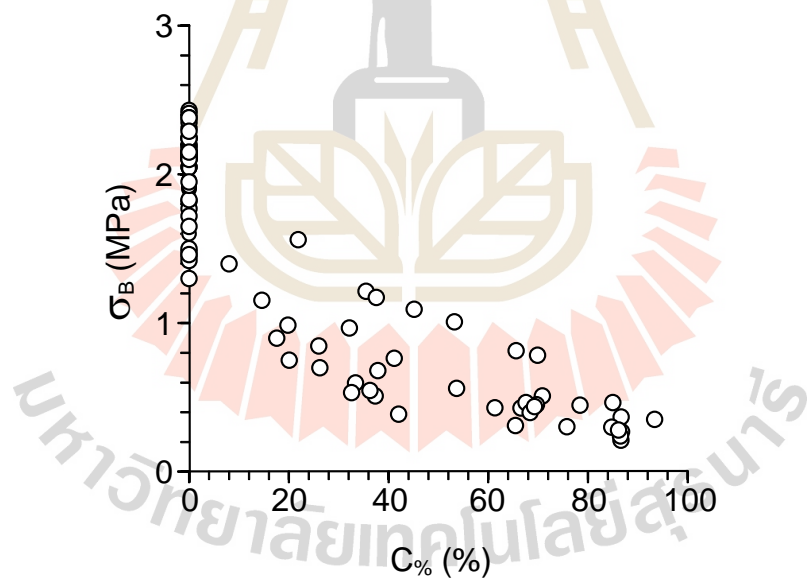
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของเกลือหิน



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดและเวลาการแตกของตัวอย่างเกลือหิน



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึงสูงสุดกับปริมาณแร่คาร์บอนไลต์ภายใต้การผันแปรอัตราการดึง



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดึงของเกลือหินแบบบราซิลภายใต้การผันแปรปริมาณแร่คาร์บอนไลต์

บทที่ 5

การสร้างสมการความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์

5.1 วัตถุประสงค์

สมการเชิงคณิตศาสตร์ถูกสร้างขึ้นเพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์ในตัวอย่งเกลือหินที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น ความเค้น และความเครียดในเชิงเวลา โดยผลที่ได้จากการทดสอบในบทที่ 4 จะถูกนำมาสอบเทียบโดยใช้รูปแบบของ Maxwell เพื่อหาค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับความยืดหยุ่น (Elastic) และความหนืด (Viscosity) ภายใต้การผันแปรปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์และอัตราการดึง ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถใช้ในการออกแบบและคาดคะเนความมีเสถียรภาพของช่องเหมืองใต้ดิน

5.2 ความเค้นดึงสูงสุด

ในการศึกษานี้ได้ทำการทดสอบ 2 รูปแบบ ได้แก่ การทดสอบการดึงแบบสี่จุดและการทดสอบกำลังดึงแบบบราซิล สำหรับการทดสอบการดึงแบบสี่จุดได้ทำการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นดึงสูงสุดภายใต้การผันแปรปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์และอัตราการดึงดังแสดงในรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2 โดยผลการวิเคราะห์ดังกล่าวระบุว่าความเค้นดึงสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีอัตราการดึงสูงขึ้น และมีค่าลดลงเมื่อปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์สูงขึ้น ได้นำผลการทดสอบมาสร้างสมการความสัมพันธ์กับปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์และอัตราการดึง โดยอาศัยโปรแกรม SPSS (Wendai, 2000) เข้ามาช่วยในการสร้างสมการและหาค่าตัวแปรเชิงคณิตศาสตร์ ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึงสูงสุด ปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์และอัตราการดึงสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

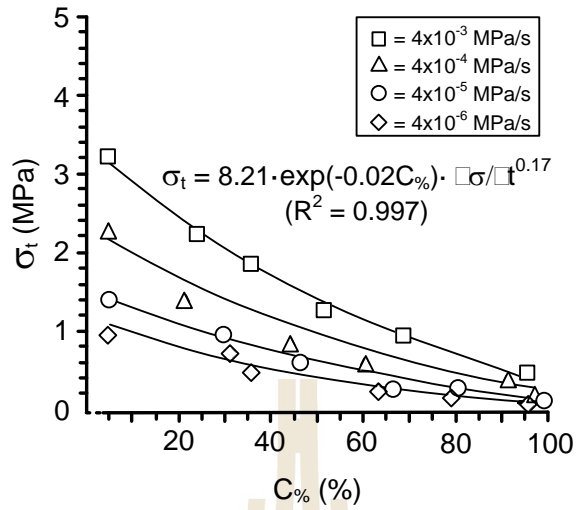
$$\sigma_t = \alpha \cdot \exp(-\alpha' \cdot C_{\%}) \cdot \partial \sigma / \partial t^{\chi} \quad (5.1)$$

โดยที่ α , α' , และ χ = ค่าตัวแปรเชิงคณิตศาสตร์ดังแสดงในสมการของรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2

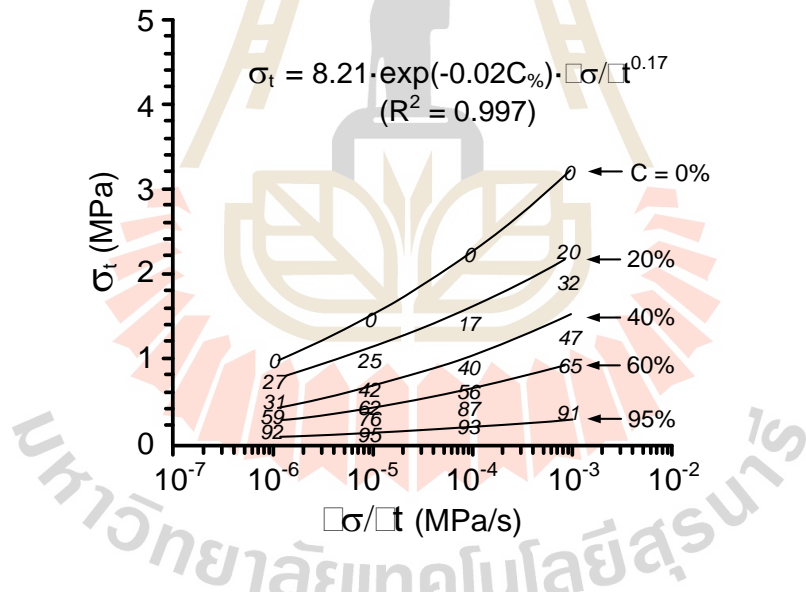
สำหรับการทดสอบกำลังดึงแบบบราซิลสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดึงของหินแบบบราซิลกับการผันแปรปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์ดังแสดงในรูปที่ 5.3 โดยผลการวิเคราะห์ดังกล่าวระบุว่าค่ากำลังดึงของหินแบบบราซิลมีการลดลงแบบเอกซิโพเนนเชียลเมื่อปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์เพิ่มขึ้นซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$\sigma_b = \beta \cdot \exp(-\beta' \cdot C_{\%}) \quad (5.2)$$

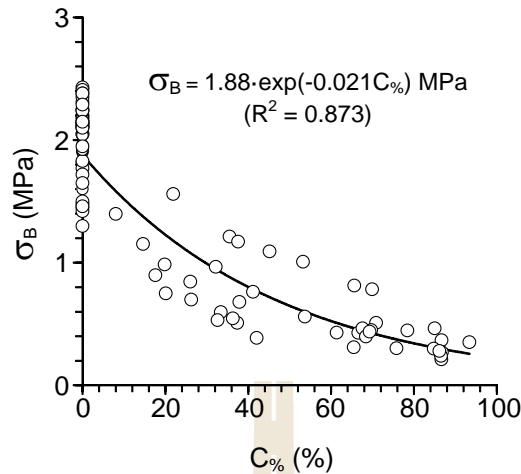
โดยที่ β และ β' = ค่าตัวแปรเชิงคณิตศาสตร์ดังแสดงในสมการของรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึงสูงสุดกับปริมาณแร่คาร์บอนไคต์ภายใต้การผันแปรอัตราการดึง



รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึงสูงสุดกับอัตราการดึงภายใต้การผันแปรปริมาณแร่คาร์บอนไคต์



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดึงของหินแบบบราซิลกับการผันแปรปริมาณแร่คาร์บอนไลต์

5.3 รูปแบบของ Maxwell

รูปแบบของ Maxwell ได้ถูกนำมาใช้ในการอธิบายพฤติกรรมหินที่ขึ้นกับเวลาของตัวอย่างเกลือหินภายใต้อัตราการดึงในแนวแกนที่เพิ่มขึ้นตามเวลาด้วยอัตราคงที่ (σ_R) ซึ่งความเครียดในแนวแกนที่เกิดขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (ϵ_t) รูปที่ 5.4 แสดงรูปแบบเชิงฟิสิกส์ของ Maxwell ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมความยืดหยุ่นและความหนืด โดยความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ดังกล่าวสามารถใช้ในการคำนวณหาค่าความเครียดเชิงเวลาจากความสัมพันธ์ของความยืดหยุ่นและความหนืด (Fuenkajorn และ Daemen (1988)) ได้ดังสมการ

$$\epsilon_t = \sigma_R \left[\frac{t}{E} + \frac{t^2}{2\eta} \right] \quad (5.3)$$

โดยที่

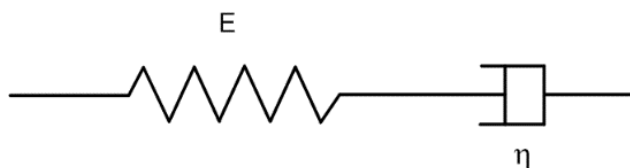
ϵ_t = ความเครียดเชิงเวลา

σ_R = อัตราการดึงคงที่

t = เวลา

E = ความยืดหยุ่น

η = ความหนืด



รูปที่ 5.4 รูปแบบเชิงฟิสิกส์ของ Maxwell

สมการที่ (5.3) ถูกนำมาสอบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดดึงในฟังก์ชันของเวลา (รูปที่ 4.7) เพื่อหาค่าตัวแปรความยืดหยุ่น (E) และความหนืด (η) โดยใช้โปรแกรม SPSS รูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยืดหยุ่นและค่าความหนืดภายใต้การผันแปรปริมาณแร่คาร์บอนิลไดออกไซด์ที่อัตราการดึงแตกต่างกันตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณแร่คาร์บอนิลไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความยืดหยุ่นและค่าความหนืดลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล (ตารางที่ 5.1) โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยืดหยุ่นและค่าความหนืดในฟังก์ชันของอัตราการดึงและปริมาณแร่คาร์บอนิลไดออกไซด์สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$E = \delta \cdot \exp(-\delta' \cdot C_{\%}) \quad (5.4)$$

$$\eta = \omega \cdot \exp(-\omega' \cdot C_{\%}) \quad (5.5)$$

โดยที่ δ, δ', ω และ ω' = ค่าตัวแปรเชิงคณิตศาสตร์ดังแสดงในสมการของรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 ตามลำดับ

5.4 เกณฑ์การแตกบนพื้นฐานของพลังงานความเครียด

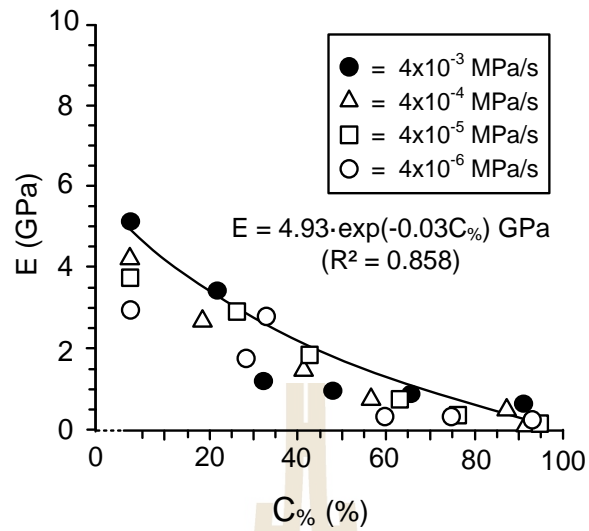
คุณสมบัติและพฤติกรรมของหินที่มีความซับซ้อนอันเนื่องมาจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของหิน ส่งผลให้ไม่สามารถวิเคราะห์การเปลี่ยนรูปหรือการแตกของหินได้ด้วยทฤษฎีพื้นฐานทั่วไป อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ในเชิงของพลังงานความเครียด (Strain energy) ถือเป็นการวิเคราะห์อย่างตรงไปตรงมาและสามารถใช้อธิบายพฤติกรรมการแตกของหินได้ ซึ่งสามารถคำนวณโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเชิงเส้นตรงดังสมการ

$$W = \frac{1}{2} (\sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \sigma_3 \varepsilon_3) \quad (5.6)$$

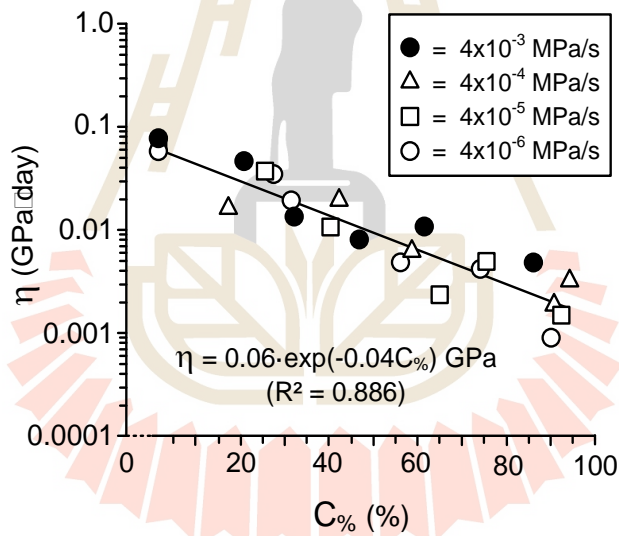
ผลการทดสอบในบทที่ 4 ได้นำมาใช้ในการสร้างเกณฑ์การแตกบนพื้นฐานของพลังงานความเครียด โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความเครียดของแต่ละตัวอย่างหินกับการผันแปรปริมาณแร่คาร์บอนิลไดออกไซด์ภายใต้อัตราการดึงที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 5.7 และตารางที่ 5.1 ผลที่ได้ระบุว่าพลังงานความเครียดไม่ขึ้นกับอัตราการดึง แต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแร่คาร์บอนิลไดออกไซด์ลดลง โดยสามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$W = \lambda \cdot \exp(-\kappa \cdot C_{\%}) \quad (5.7)$$

โดยที่ λ และ κ = ค่าตัวแปรเชิงคณิตศาสตร์ดังแสดงในสมการของรูปที่ 5.7



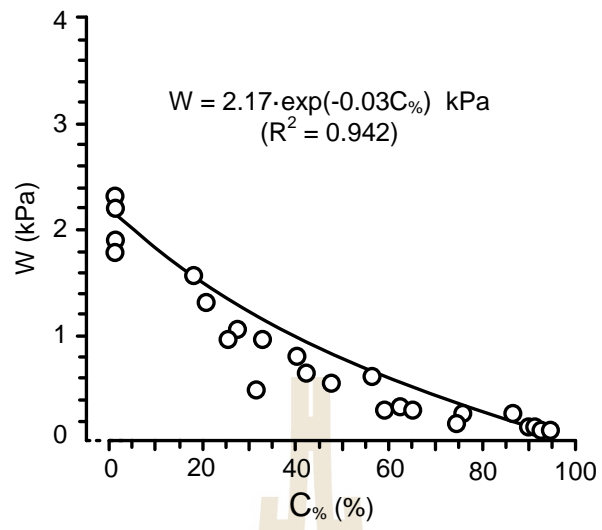
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยืดหยุ่นกับปริมาณแร่คาร์บอนไลท์ของตัวอย่างหินภายใต้การผันแปรอัตราการตึง



รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดกับปริมาณแร่คาร์บอนไลท์ของตัวอย่างหินภายใต้การผันแปรอัตราการตึง

ตารางที่ 5.1 ผลการคำนวณจากตัวอย่างหินภายใต้การผันแปรปริมาณแร่คาร์บอเนตและอัตราการดึง

อัตราการดึง (MPa/s)	ปริมาณแร่คาร์บอเนต (%)	σ_t (MPa)	E (GPa)	η (GPa.day)	W (kPa)
0.004	0	3.21	4.43	0.056	2.18
	20	2.15	4.59	0.059	1.33
	32	1.69	4.66	0.060	0.98
	47	1.25	4.73	0.061	0.55
	65	0.88	4.79	0.062	0.29
	91	0.52	4.84	0.063	0.15
0.0004	0	2.17	4.59	0.059	2.30
	17	1.55	4.68	0.060	1.56
	40	0.98	4.77	0.062	0.82
	56	0.71	4.81	0.062	0.64
	87	0.38	4.86	0.063	0.27
	93	0.34	4.87	0.063	0.11
0.00004	0	1.47	4.69	0.060	1.86
	25	0.89	4.78	0.062	1.00
	42	0.63	4.82	0.062	0.67
	62	0.42	4.86	0.063	0.34
	76	0.32	4.87	0.063	0.28
	95	0.22	4.89	0.063	0.10
0.000004	0	0.99	4.77	0.062	1.78
	27	0.58	4.83	0.063	1.07
	31	0.53	4.84	0.063	0.51
	59	0.30	4.88	0.063	0.30
	75	0.22	4.89	0.063	0.20
	92	0.16	4.90	0.064	0.13



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความเครียดกับการผันแปรปริมาณแร่คาร์บอนไลต์



บทที่ 6

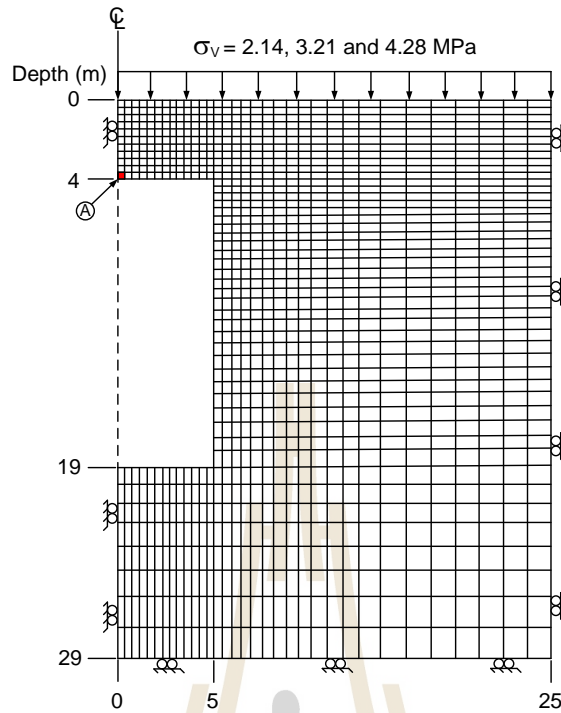
แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

6.1 วัตถุประสงค์

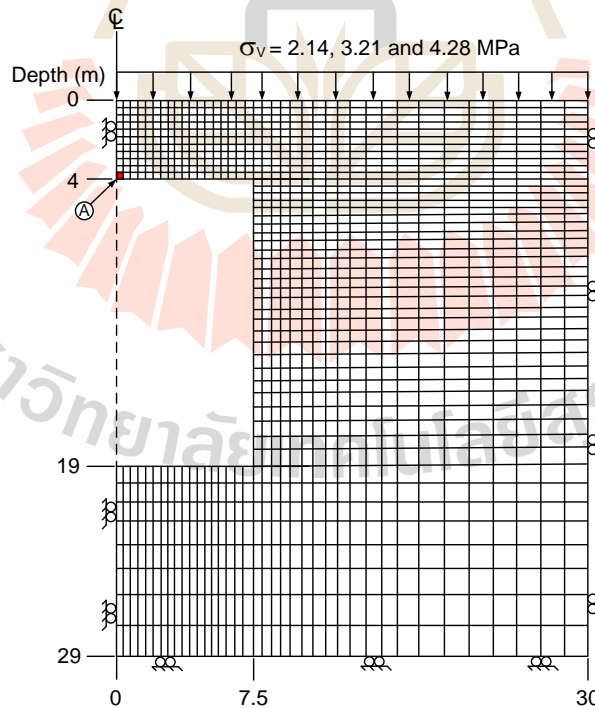
โปรแกรม FLAC 4.0 (Finite difference method) ถูกนำมาใช้เพื่อสาธิตการจำลองช่องเหมืองในชั้นเกลือหิน โดยนำคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินจากการสอบเทียบในบทที่ 5 มาใช้เป็นตัวแปรในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ เพื่อคำนวณหาระยะเวลาสูงสุดที่ช่องเหมืองยังคงมีเสถียรภาพโดยไม่ต้องมีการค้ำยัน (Stand-up time)

6.2 การจำลองหลังคาช่องเหมือง

การจำลองหลังคาช่องเหมืองด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ได้ทำการผันแปรระดับความลึกเท่ากับ 100, 150 และ 200 m ความกว้างของช่องเหมืองเท่ากับ 10, 15, 20 m และปริมาณแร่ คาร์บอนไดออกไซด์ตั้งแต่ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100% (รูปที่ 6.1 ถึงรูปที่ 6.3) โดยกำหนดให้เสาค้ำยันเท่ากับ 40 m สำหรับความหนาของหลังคาช่องเหมืองกำหนดให้เท่ากับ 40% ของความกว้างของช่องเหมือง มวลหินปิดทับเหนือหลังคาช่องเหมืองได้จำลองให้มีแรงกระจายสม่ำเสมอคือ 2.14, 3.21 และ 4.28 MPa ตามระดับความลึกที่กำหนด ค่าตัวแปรเชิงคณิตศาสตร์จากการสอบเทียบในรูปแบบของ Maxwell (ตารางที่ 5.1 ในบทที่ 5) ถูกนำมาใช้เป็นตัวแปรในส่วนของแบบจำลองที่เกิดแรงดึงบริเวณหลังคาช่องเหมือง สำหรับคุณสมบัติของเกลือหินในส่วนที่ไม่ได้เกิดแรงดึงได้กำหนดให้มีค่าเท่ากับผลการทดสอบของ Wilalak และ Fuenkajorn (2016) ดังแสดงในตารางที่ 6.1 หรือพูดอีกนัยหนึ่งคือ บริเวณหลังคาของช่องเหมืองจะใช้คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และการคืบที่ได้จากการทดสอบภายใต้แรงดึงจากการทดสอบการดัดงอแบบสี่จุด ส่วนบริเวณเสาค้ำยันและบริเวณพื้นที่ห้องจะใช้คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และการคืบที่ได้จากการทดสอบภายใต้แรงกด เนื่องจากบริเวณหลังคาจะเกิดการวิบัติภายใต้แรงดึงได้ง่ายกว่าแรงกด ดังนั้น เพื่อให้สอดคล้องกับความเค้นที่เกิดขึ้นจริงในช่องเหมือง จึงได้จำลองคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์หรือค่าตัวแปรต่างๆ บริเวณหลังคาด้วยผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบการดัดงอแบบสี่จุด อีกทั้งแรงที่กระทำต่อตัวอย่างขณะทำการทดสอบดังกล่าวยังมีความคล้ายคลึงกับแรงที่กระทำบนหลังคาของช่องเหมืองมากกว่าการทดสอบแรงดึงแบบอื่น กล่าวคือ ค่าคุณสมบัติของเกลือหินที่ได้จากการทดสอบการดัดงอแบบสี่จุดได้รวมผลกระทบทั้งแรงดึงและแรงกดที่กระทำต่อตัวอย่างขณะทำการทดสอบ ดังนั้นค่าตัวแปรต่างๆ ที่นำมาใช้ในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์จึงมีความเหมาะสมในการจำลองหลังคาช่องเหมือง โปรแกรม FLAC 4.0 ถูกใช้ในการคำนวณความเค้นดึงและความเครียดที่มีการผันแปรตามเวลาในหลังคาช่องเหมืองที่จุด A (รูปที่ 6.1 ถึงรูปที่ 6.3) ซึ่งเป็นจุดที่มีค่าความเค้นดึงสูงสุด โดยเกณฑ์พลังงานความเครียดของตัวอย่างเกลือหินในบทที่ 5 ได้ถูกนำมาใช้ในการเปรียบเทียบกับพลังงานความเครียดที่ได้จากแบบจำลองช่องเหมืองในชั้นเกลือหินสำหรับการคำนวณหาระยะเวลาสูงสุดที่หลังคาช่องเหมืองยังคงมีเสถียรภาพโดยไม่ต้องมีการค้ำยัน



รูปที่ 6.1 ตัวอย่างรูปแบบการจำลองช่องเหมืองของชั้นเกลือหินภายใต้การผันแปรระดับความลึกที่ 100, 150 และ 200 m และความกว้างของช่องเหมืองเท่ากับ 10 m



รูปที่ 6.2 ตัวอย่างรูปแบบการจำลองช่องเหมืองของชั้นเกลือหินภายใต้การผันแปรระดับความลึกที่ 100, 150 และ 200 m และความกว้างของช่องเหมืองเท่ากับ 15 m

6.3 ผลการจำลองหลังคาช่องเหมือง

การหาค่าระยะเวลาสูงสุดที่หลังคาช่องเหมืองยังมีเสถียรภาพโดยไม่มีการค้ำยัน สามารถหาได้จากการนำค่าความเค้นและความเครียดดึงบริเวณหลังคาที่ได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์มาคำนวณหาค่าพลังงานความเครียด ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยอาศัยสมการที่ (5.7) เพื่อพิจารณาว่าพลังงานความเครียดดังกล่าวมีค่าเท่ากับพลังงานความเครียดที่จุดแตกของเกลือหินหรือไม่ โดยจะทำการผันแปรระยะเวลาในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ไปเรื่อยๆ จนกว่าค่าพลังงานความเครียดที่เกิดขึ้นบริเวณหลังคาที่ได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์จะมีค่าเท่ากับพลังงานความเครียดที่จุดแตกที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งระยะเวลา ณ จุดดังกล่าวจะเป็นระยะเวลาสูงสุดที่หลังคาสามารถอยู่ได้โดยไม่มีการค้ำยัน

ผลการคำนวณความเค้นดึงในหลังคาช่องเหมืองที่จุด A ภายใต้การผันแปรตามเวลาอย่างต่อเนื่องที่ระดับความลึกต่างๆ แสดงในตารางที่ 6.2 จากการเปรียบเทียบค่าความเค้นดึงและความเครียดที่ได้จากแบบจำลองกับเกณฑ์พลังงานความเครียดในบทที่ 5 จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่า เมื่อปริมาณแร่คาร์บอนิลต์เพิ่มขึ้น ความเครียดและระยะเวลาที่จุดวิบัติของหลังคาช่องเหมืองจะมีค่าลดลงที่ระดับความลึกเดียวกัน การเพิ่มขึ้นของความลึกส่งผลให้ความเครียดที่จุดวิบัติมีค่าลดลง (รูปที่ 6.4 ถึงรูปที่ 6.6) รูปที่ 6.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแร่คาร์บอนิลต์กับระยะเวลาสูงสุดที่หลังคาช่องเหมืองยังคงมีเสถียรภาพโดยไม่ต้องมีการค้ำยันภายใต้การผันแปรระดับความลึก ซึ่งจะเห็นได้ว่าระยะเวลาสูงสุดของหลังคาช่องเหมืองที่สามารถอยู่ได้โดยไม่มีการค้ำยันมีค่าลดลงเมื่อปริมาณแร่คาร์บอนิลต์และความลึกเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 6.2) ระยะเวลาสูงสุดที่หลังคาช่องเหมืองยังคงมีเสถียรภาพโดยไม่ต้องมีการค้ำยันที่ได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ถูกนำมาสร้างสมการความสัมพันธ์กับความลึกของช่องเหมืองและปริมาณแร่คาร์บอนิลต์โดยอาศัยโปรแกรม SPSS ในการหาสมการและค่าตัวแปรเชิงคณิตศาสตร์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการดังนี้

$$\text{Stand-up time} = \exp[-(C_0 + ((\rho \cdot \text{Depth}) - \rho') / \xi)] \quad (6.1)$$

โดยที่ ρ , ρ' และ ξ = ค่าตัวแปรเชิงคณิตศาสตร์ดังแสดงในตารางที่ 6.3

สมการดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในการคาดคะเนระยะเวลาสูงสุดของหลังคาที่สามารถอยู่ได้โดยไม่มีการค้ำยันในเหมืองเกลือและเหมืองโพแทชที่มีปริมาณแร่คาร์บอนิลต์เจือปนในระดับต่างๆ และที่ระดับความลึกต่างๆ

ตารางที่ 6.2 ผลการจำลองหลังคาช่องเหมืองภายใต้การผันแปรระดับความลึกและปริมาณแร่คาร์บอนิลต์

ความลึก (m)	ความกว้างของช่องเหมือง (m)	ปริมาณแร่คาร์บอนิลต์ (%)	ความเค้นดึงเริ่มต้นบริเวณหลังคา (MPa)	ความเครียดดึงบริเวณหลังคา	เวลา (Month)
100	10	0	1.38	0.00314	18473
		20	1.38	0.00172	4233
		40	1.38	0.00094	787
		60	1.38	0.00052	94
		80	1.38	0.00029	13
		100	1.38	0.00016	2
	15	0	2.03	0.00214	10322
		20	2.03	0.00116	1845
		40	2.03	0.00064	276
		60	2.03	0.00034	54
		80	2.03	0.00020	8
		100	2.03	0.00011	1
20	0	2.68	0.00162	5534	
	20	2.68	0.00088	869	
	40	2.68	0.00049	112	
	60	2.68	0.00026	24	
	80	2.68	0.00015	2	
	100	2.68	0.00008	0	

ตารางที่ 6.2 ผลการจำลองหลังคาช่องเหมืองภายใต้การผันแปรระดับความลึกและปริมาณแร่คาร์บอนิลต์ (ต่อ)

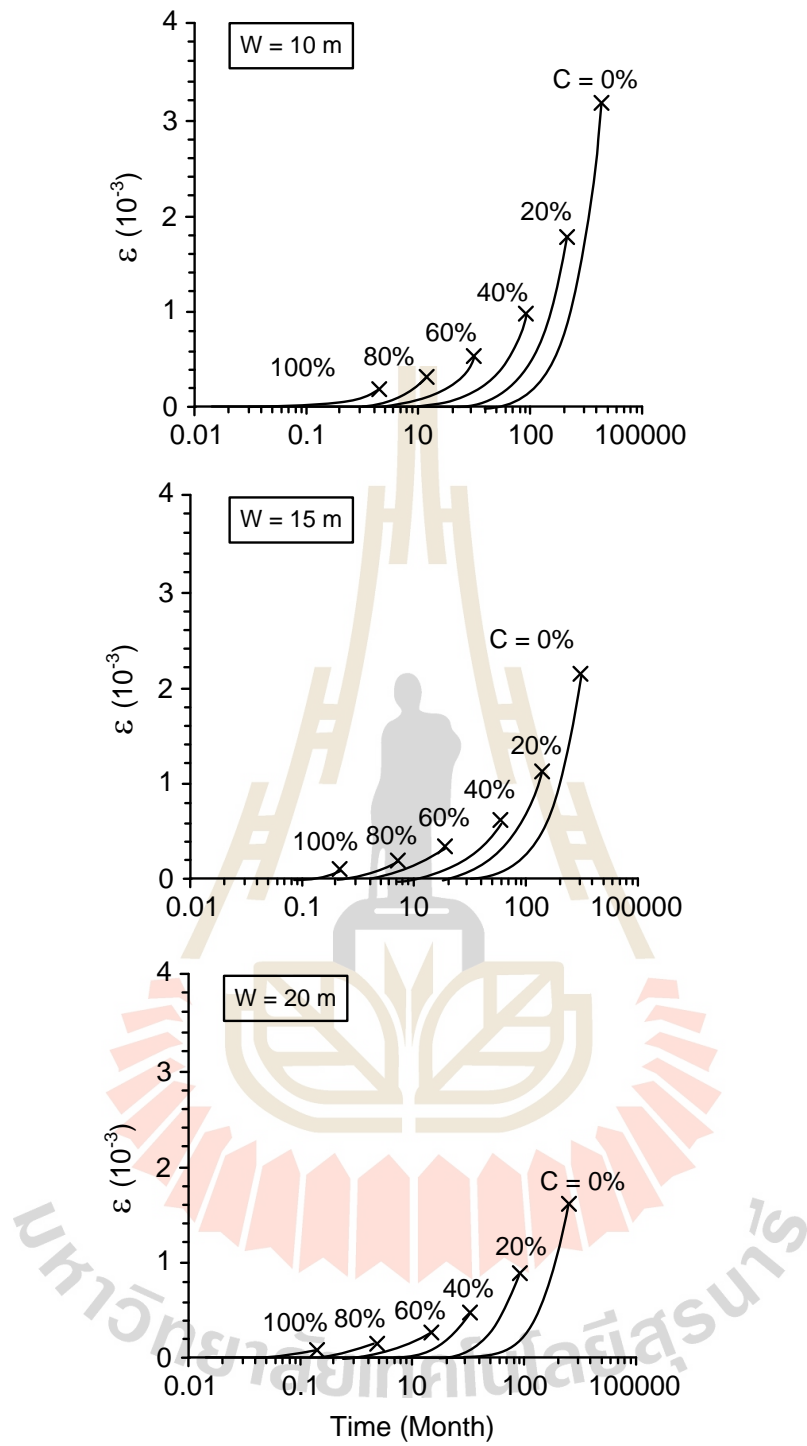
ความลึก (m)	ความกว้างของช่องเหมือง (m)	ปริมาณแร่คาร์บอนิลต์ (%)	ความเค้นดึงเริ่มต้นบริเวณหลังคา (MPa)	ความเครียดดึงบริเวณหลังคา	เวลา (Month)
150	10	0	2.07	0.00210	8760
		20	2.07	0.00115	2030
		40	2.07	0.00063	365
		60	2.07	0.00035	33
		100	2.07	0.00011	1
	15	0	2.73	0.00159	4075
		20	2.73	0.00086	823
		40	2.73	0.00048	122
		60	2.73	0.00025	17
		80	2.73	0.00015	2
		100	2.73	0.00008	0
	20	0	3.42	0.00127	2634
		20	3.42	0.00069	269
		40	3.42	0.00038	53
		60	3.42	0.00020	6
		80	3.42	0.00012	1
		100	3.42	0.00006	0

ตารางที่ 6.2 ผลการจำลองหลังคาช่องเหมืองภายใต้การผันแปรระดับความลึกและปริมาณแร่คาร์บอนิลต์ (ต่อ)

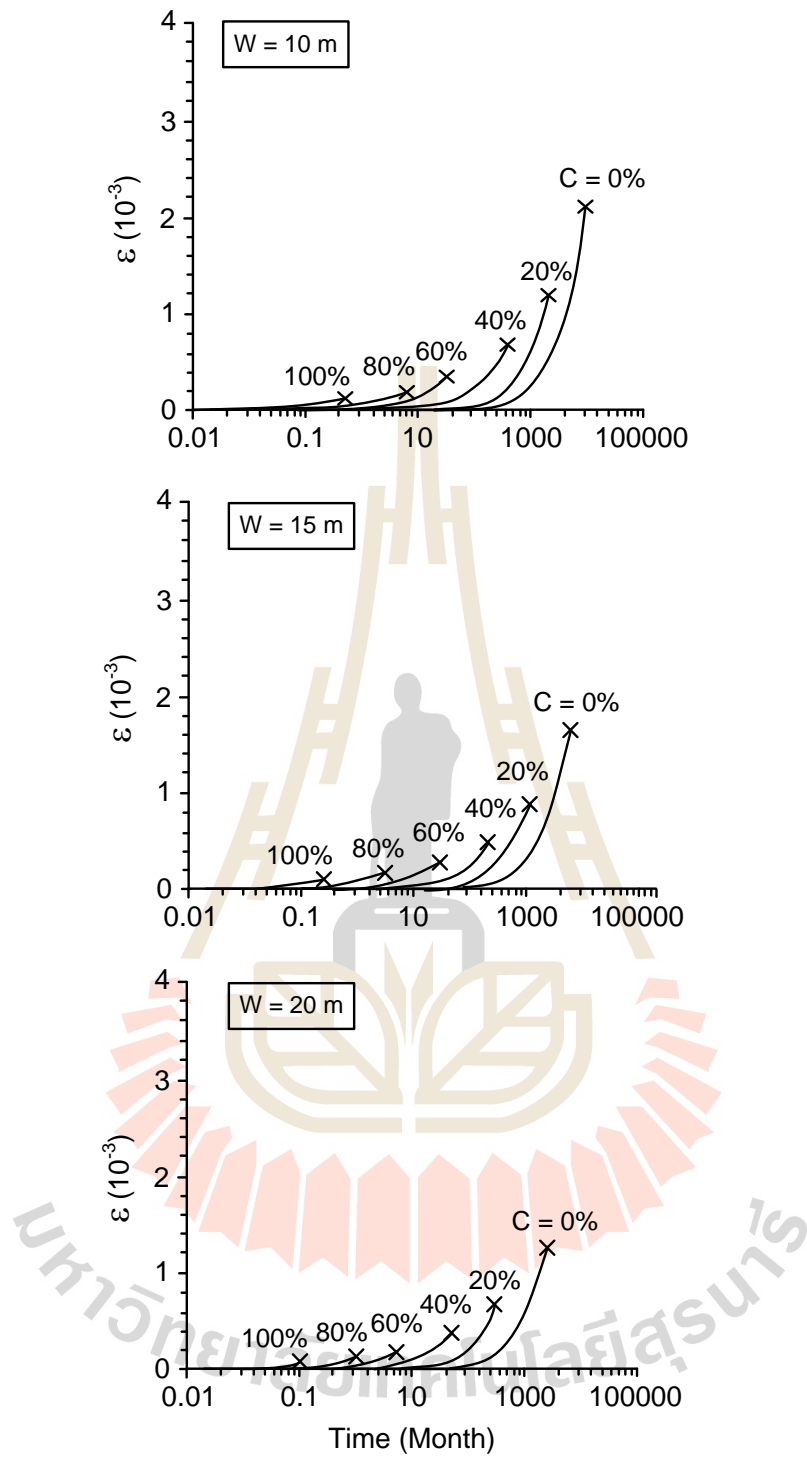
ความลึก (m)	ความกว้างของช่องเหมือง (m)	ปริมาณแร่คาร์บอนิลต์ (%)	ความเค้นดึงเริ่มต้น บริเวณหลังคา (MPa)	ความเครียดดึง บริเวณหลังคา	เวลา (Month)
200	10	0	2.66	0.00163	4326
		20	2.66	0.00089	857
		40	2.66	0.00049	150
		60	2.66	0.00027	15
		80	2.66	0.00015	3
		100	2.66	0.00008	0
	15	0	3.53	0.00123	2523
		20	3.53	0.00067	312
		40	3.53	0.00037	42
		60	3.53	0.00020	6
		80	3.53	0.00011	1
		100	3.53	0.00006	0
	20	0	4.50	0.00096	873
		20	4.50	0.00052	102
		40	4.50	0.00029	11
		60	4.50	0.00015	2
		80	4.50	0.00009	0
		100	4.50	0.00005	0

ตารางที่ 6.3 ค่าตัวแปรเชิงคณิตศาสตร์ในสมการที่ (6.1)

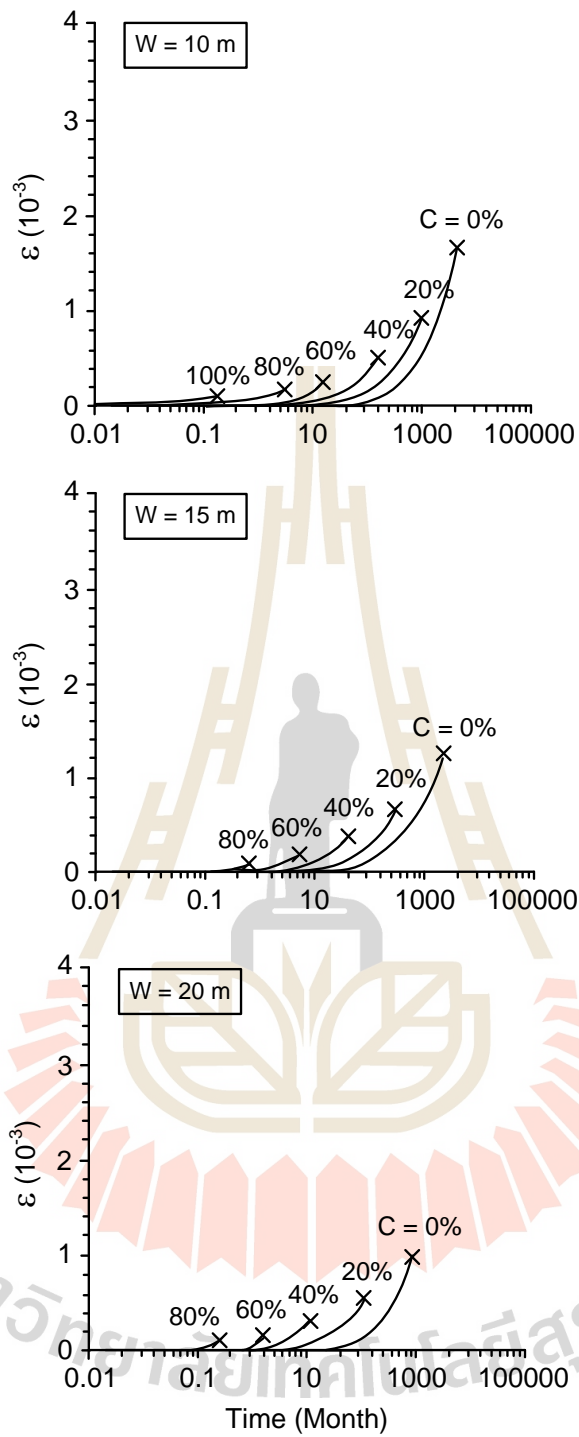
ตัวแปร	ความกว้างช่องเหมือง (m)		
	10	15	20
φ	0.164	0.194	0.217
φ'	124.611	119.740	110.701
ξ	10.891	10.693	10.259
R^2	0.980	0.982	0.976



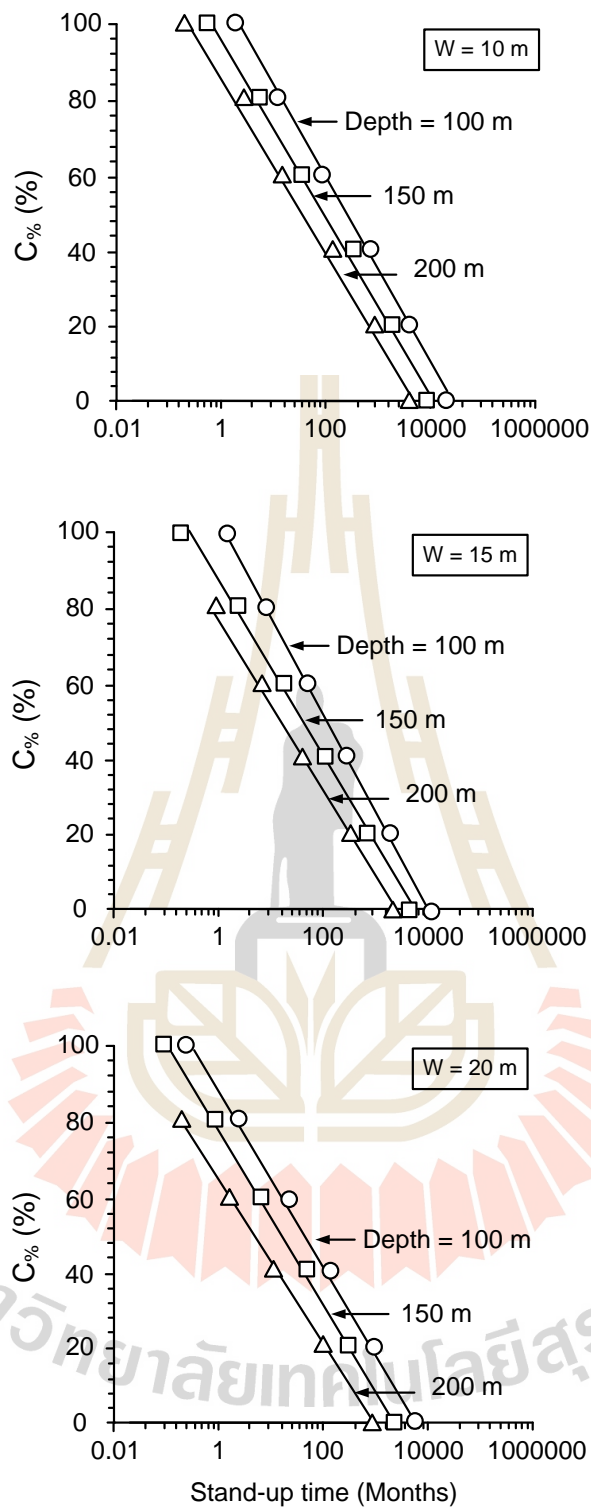
รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับเวลาของการจำลองหลังคาช่องเหมืองที่ระดับความลึก 100 m ภายใต้การผันแปรความกว้างของช่องเหมือง



รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับเวลาของการจำลองหลังคาช่องเหมืองที่ระดับความลึก 150 m ภายใต้การผันแปรความกว้างของช่องเหมือง



รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับเวลาของการจำลองหลังคาช่องเหมืองที่ระดับความลึก 200 m ภายใต้การผันแปรความกว้างของช่องเหมือง



รูปที่ 6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแร่คาร์บอนิลไดต์กับระยะเวลาสูงสุดของหลังคาช่องเหมืองที่ยังคงมีเสถียรภาพโดยไม่ต้องมีการค้ำยันภายใต้การผันแปรระดับความลึก

บทที่ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

7.1 สรุปผลการวิจัย

การทดสอบในห้องปฏิบัติการมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาค่ากำลังดึงของตัวอย่างเกลือหิน ภายใต้การผันแปรปริมาณแร่คาร์บอเนตตั้งแต่ 0 ถึง 100% และอัตราการดึง 4 อัตรา คือ 0.004, 0.0004, 0.00004 และ 0.000004 MPa/s ซึ่งในการศึกษานี้ได้แบ่งเป็น 2 การทดสอบ ได้แก่ การทดสอบการดึงแบบสี่จุด และการทดสอบแรงดึงแบบบราซิล ผลการทดสอบระบุว่า ความเค้นดึงจะมีค่าสูงขึ้นและความเครียดมีค่าลดลงเมื่ออัตราการดึงสูงขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Wisetsaen et al. (2015) และภายใต้อัตราการดึงเดียวกันพบว่าค่าความเค้นดึงมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณแร่คาร์บอเนตต่ำลง สำหรับการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลผลการทดสอบระบุว่า ค่าความเค้นดึงสูงสุดแบบบราซิลของเกลือหินลดลงเมื่อปริมาณแร่คาร์บอเนตเพิ่มขึ้น โดยรูปแบบสมการของ Maxwell สามารถอธิบายพฤติกรรมของเกลือหินที่ขึ้นกับเวลาภายใต้อัตราการดึงได้เป็นอย่างดี ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณแร่คาร์บอเนตเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าความยืดหยุ่นและค่าความหนืดลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล

อย่างไรก็ตามความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของผลการทดสอบเพื่อหาค่าความเค้นสูงสุดของตัวอย่างเกลือหินอาจขึ้นกับช่วงของอัตราการดึงที่นำมาใช้ เนื่องจากหากมีการผันแปรอัตราการดึงในช่วงที่กว้างขึ้น ก็อาจจะส่งผลให้สมการที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นดึงสูงสุดในฟังก์ชันของการผันแปรปริมาณแร่คาร์บอเนตมีความแม่นยำมากขึ้น สำหรับความแตกต่างระหว่างผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการที่สังเกตได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึงสูงสุดกับการผันแปรปริมาณแร่คาร์บอเนต และอัตราการดึงหรือกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยืดหยุ่นและค่าความหนืดกับปริมาณแร่คาร์บอเนตอาจเกิดจากความแปรปรวนของคุณสมบัติทางกายภาพของหินเอง กล่าวคือตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบอาจมีแร่อื่นเข้ามาปะปนนอกเหนือจากแร่คาร์บอเนต เช่น แร่แอนไฮไดรต์ หรือแร่ดินเหนียว จึงอาจเกิดความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบดังกล่าว

การจำลองหลังคาของช่องเหมืองโดยใช้โปรแกรม FLAC 4.0 ดำเนินการเพื่อคำนวณความเค้นดึงในหลังคาของช่องเหมืองภายใต้การผันแปรของเวลาอย่างต่อเนื่อง ผลการจำลองระบุว่า ความเค้นดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความกว้างของช่องเหมืองและความลึกเพิ่มขึ้น จากการเปรียบเทียบค่าความเค้นดึงและความเครียดกับเกณฑ์พลังงานความเครียดพบว่า ความเค้นดึงและความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา และความเครียดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแร่คาร์บอเนตลดลงที่ระดับความลึกเดียวกัน นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของความลึกส่งผลให้ความเครียดมีค่าลดลง โดยระยะเวลาสูงสุดที่หลังคาช่องเหมืองยังคงมีเสถียรภาพโดยไม่ต้องมีการค้ำยันจะลดลงเมื่อปริมาณแร่คาร์บอเนตและความลึกเพิ่มขึ้น

ผลการทดสอบดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นเป็นการศึกษาผลกระทบของปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์ในช่องเหมืองใต้ดินเพื่อคำนวณหาความกว้างของช่องเหมืองที่มากที่สุดและระยะเวลาสูงสุดที่ช่องเหมืองยังคงมีเสถียรภาพโดยไม่ต้องมีการค้ำยัน อย่างไรก็ตามปัจจัยที่มีผลกระทบต่อหลังคาช่องเหมืองในสถานะจริงอาจเกิดจากหลายสาเหตุเช่น โครงสร้างลักษณะทางธรณีวิทยาในพื้นที่ต่างๆ ระดับความลึกหรือแรงดันของน้ำบาดาล เป็นต้น อีกทั้งในสถานะจริงของช่องเหมืองมีการกระจายตัวของแร่คาร์บอนิลไลต์ปะปนอยู่ในชั้นเกลือหิน ส่งผลให้ไม่สามารถแยกปริมาณของแร่คาร์บอนิลไลต์ได้อย่างชัดเจน ดังนั้น ผลจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์จึงเป็นเพียงแนวทางเบื้องต้นในการคาดการณ์เท่านั้น

7.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบอาจมีแร่อื่นเข้ามาปะปนนอกเหนือจากแร่คาร์บอนิลไลต์ เช่น แร่แอนไฮไดรต์ หรือแร่ดินเหนียว ดังนั้น ควรนำแร่ดังกล่าวเข้ามาพิจารณาเพื่อให้ค่าที่ได้จากการทดสอบถูกต้องยิ่งขึ้น

การทดสอบการตัดงอแบบสี่จุดไม่ได้ทำการวัดการแอ่นตัวของตัวอย่างเกลือหิน ทำให้ไม่ทราบค่าการแอ่นตัวของตัวอย่างเกลือหิน จึงไม่มีเกณฑ์ที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการคาดการณ์การแอ่นตัวของเหมืองใต้ดิน

ในการจำลองหลังคาช่องเหมืองด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ได้จำลองให้มีแรงกระจายสม่ำเสมอ อาจทำให้เกิดความผิดพลาดจากแรงที่มากกระทำโดยตรง ดังนั้น การจำลองหลังคาช่องเหมืองควรพิจารณาจากผิวดินด้านบนจนถึงระดับความลึกของช่องเหมือง เนื่องจากบริเวณดังกล่าวอาจมีชั้นหินชนิดต่างๆ รวมด้วย และจะทำให้การจำลองเสมือนจริงยิ่งกว่าวิธีที่กล่าวมาข้างต้น



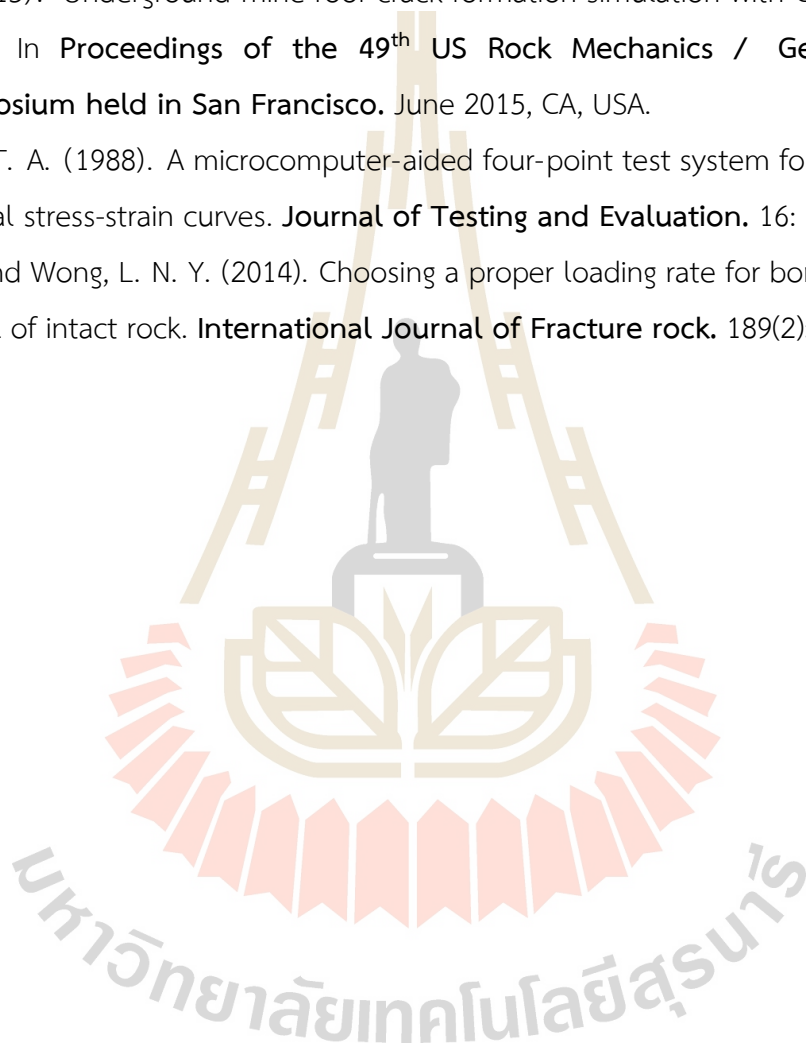
บรรณานุกรม

- ASTM D3967-08. Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens. In **Annual Book of ASTM Standard**. (Vol. 04.08). West Conshohocken: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D6272-10. Standard test method for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating material by four-point bending. In **Annual Book of ASTM standard**. (Vol. 04.08). West Conshohocken: American Society for Testing and Materials.
- Bacher, K. (1949). Determination of the elastic constants of rocks by supersonics. **Erdal u. Kohle**. 2(4): 125-127.
- Batuecas, T. and Carreira, M. (1955). High-precision pycnometric investigations on pure substances. **Anales de la Real Sociedad Española de Física y Química**. 51B: 311-320.
- Berenbaum, R. and Brodie, I. (1959). The tensile strength of coal. **Journal of the Institute of Fuel**. 32: 320-327.
- Birch, F., Schairer, J. F., and Spicer, H. C. (1942). **Handbook of Physical Constants**. Geological Society of America Special Papers. 36: 25-32.
- 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**.
- Devries, K. L., Mellegard, K. D., and Callahan, G. D. (2002). Laboratory testing in support of a bedded salt failure criterion. **SMRI: Fall 2002 meeting**. October 2003, Chester, United Kingdom, England.
- Evans, I. (1961). The tensile strength of coal. **Colliery Engineering**. 38: 428-434.
- Forsythe, W. Z. (1954). **Smithsonian Physical Tables**. Smithsonian Miscellaneous Collections. 120: 294-320.
- Fuenkajorn, K. and Daemen, J. J. K. (1988). Borehole Closure in Salt, **Technical Report NUREC/CR-5243**, prepared for the U. S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D. C.

- Fuenkajorn, K. and Jandakaew, M. (2003). Compressed-air energy storage in salt dome at Borabu district, Thailand: Geotechnical Aspects. In **Proceedings of the 38th Symposium on Engineering Geology and Geotechnical Engineering** (pp. 377-391). University of Reno, Nevada, March 19-21.
- Hansen, F. D., Mellegard, K. D., and Senseny, P. E. (1984). Elasticity and strength of ten natural rock salts, Mechanical Behavior of Salt I. In **Proceedings of the First Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 71-83). The Pennsylvania State University, November 9- 11, 1981, Clausthal-Zellerfeld, Federal Republic of Germany, Trans Tech Publications.
- Hardy, H. R. Jr. (1998). Strength and acoustic emission in salt under tensile loading. In **Proceedings of the Fourth Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 143- 162). Ecole Polytechnique, Montreal, June 1996, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany.
- Heiland, C. A. (1940). **Geophysical Exploration**. Prentice-Hall. Inc., New York.
- Hodgman, C. D., Weast, R. C., and Selby, S. M. (1955-1956). **Handbook of Chemistry and Physics**. Chemical Rubber Publishing Co., Cleveland, Ohio.
- Hunsche, U. E. (1993). Failure behavior of rock salt around underground cavities. In **Proceedings of the Seventh Symposium on Salt** (pp. 59-65). Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V.
- Hurlbut, C. H. and Klein, C. (1977). Manual of mineralogy. **19th Edition**. Wiley, New York.
- Jaeger, J. C., Cook, N. G. W., and Zimmerman, R. W. (2007). **Fundamentals of Rock Mechanics Fourth Edition**. Blackwell publishing, Oxford.
- Johnston, H. L. and Hutchison, D. A. (1942). Density of sodium chloride. **Physical Review**. 62: 32-36.
- Khan, I. A., Mahtab, M. A., and Yegulalp, T. M. (1988). Predicting strength of salt from point load tests. In **Proceedings of the Second Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 211-222). Federal Institute of Geosciences and Natural Resources, Hannover, September 1984, Trans Tech Publications, Clausthal, Germany.
- Liu, L. F., Pei, J. L., Ma, K., Zhou, H., and Hou, Z. (2010). Underground Storage of CO₂ and Energy. In **Proceedings of the Sino-German Conference** (pp. 105-112). July 2010, Beijing, China.

- Luangthip, A., Khamrat, S. and Fuenkajorn, K. (2016). Effects of carnallite contents on stability and extraction ratio of potash mine. In **Proc. 9th Asian Rock Mechanics Symposium**. Bali, Indonesia.
- Mellegard, K. D., Robert, L. A., and Callahan, G. D. (2012). Effect of sylvite content on mechanical properties of potash. **Mechanical Behavior of Salt VII- Berest, Ghoreychi, Hadj-Hassen and Tijani** (pp. 71-79). Taylor and Francis Group, London.
- Mishra, B. and Ray, A. K. (2014). Numerical analysis of the time-dependent behavior of immediate roof in a hypothetical one-entry mine. **Mining Engineering**. 66(3): 45-51.
- Morgans, T. A. (1956). Method for determining stress in rock. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 112: 32-35.
- National Research council of the U.S.A. (1929). **International Critical Tables**. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York.
- Phueakphum, D. (2003). Compressed-air energy storage in rock salt of the Maha Sarakham Formation. **M.S. thesis, Suranaree University of Technology, Thailand**.
- Sathe, N. V., Phalniker, N. L., and Bhide, B. V. (1945). Dielectric constants of inorganic salts. **Journal of the Indian Chemical Society**. 22: 29-36.
- Senseny, P. E., Hansen, F. D., Russell, J. E., Carter, N. L., and Handin, J. W. (1992). Mechanical behaviour of rock salt: phenomenology and micromechanisms. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 29(4): 363-378.
- Straumanis, M. Z. (1953). Density determinations by a modified suspension method, X-ray molecular weight and soundness of sodium Chlorides. **American Mineralogist**. 38: 662-670.
- Weinberger, R., Reches, Z., and Eidelman, A. (1994). Tensile properties of rock in four-point beam test under confining pressure. **Rock Mechanics**. 435-442.
- Wendai, L. (2000). **Regression Analysis, Linear Regression and Profit Regression, In 13 Chapters; SPSS for Windows: Statistical Analysis**. Publishing House of Electronics Industry, Beijing.
- Wetchasat, K. (2002). Assessment of mechanical performance of rock salt formations for nuclear waste repository in northeastern Thailand. **M. S. thesis, Suranaree University of Technology, Thailand**.

- Wilalak, N. and Fuenkajorn, K. (2016). Constitutive equation for creep closure of shaft and borehole in potash layers with varying carnallite contents. In **Proceedings of the 9th Asian Rock Mechanics Symposium**. October 18-21, Bali, Indonesia.
- Wisetsaen, S. , Walsri, C. , and Fuenkajorn, K. (2015). Effects of loading rate and temperature on tensile strength and deformation of rock salt. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 73: 10-14
- Xue, Y. (2015). Underground mine roof crack formation simulation with Creep of Rock Mass. In **Proceedings of the 49th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium held in San Francisco**. June 2015, CA, USA.
- Yokoyama, T. A. (1988). A microcomputer-aided four-point test system for determining uniaxial stress-strain curves. **Journal of Testing and Evaluation**. 16: 198-204.
- Zhang, X. and Wong, L. N. Y. (2014). Choosing a proper loading rate for bonded-particle model of intact rock. **International Journal of Fracture rock**. 189(2): 163-179.



ประวัตินักวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เดโซ เผือกภูมิ เกิดเมื่อวันที่ 7 มิถุนายน 2520 ที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี จบการศึกษาปริญญาเอกจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในสาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี ในปี พ.ศ. 2552 หลังจากจบการศึกษาระดับปริญญาเอกได้ทำงานในตำแหน่งนักวิจัย สังกัดหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปัจจุบันมีตำแหน่งเป็นอาจารย์ประจำอยู่ที่สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา มีความชำนาญพิเศษทางด้านกลศาสตร์ของหินในเชิงการทดลอง การออกแบบและการวิเคราะห์โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขทั้งงานที่เกี่ยวข้องกับเหมืองบนผิวดินและเหมืองใต้ดิน อีกทั้งมีความสนใจในการการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุเพื่อใช้ในการอุดช่องเหมืองและงานในการבודอัดเพื่องานทางด้านวิศวกรรมธรณี มีสิ่งตีพิมพ์ระดับชาติและนานาชาติมากกว่า 20 บทความ ทั้งวารสาร นิตยสาร และบทความการประชุมระดับชาติและนานาชาติ เป็นผู้แต่งตำรา “ธรณีเทคนิค (Geotechniques)” ที่ใช้ในการเรียนการสอนระดับปริญญาตรี

