



รหัสโครงการ SUT7-719-60-24-06

## รายงานการวิจัย

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเชิงเวลาของหินคาร์นัลไลต์  
ที่มีผลกระทบจากความชื้น

(Time-Dependent Deformation of Carnallite as Affected  
by Humidity and Carnallite Content)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-719-60-24-06

## รายงานการวิจัย

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเชิงเวลาของหินคาร์เนลไลท์  
ที่มีผลกระทบจากความชื้น

(Time-Dependent Deformation of Carnallite as Affected  
by Humidity and Carnallite Content)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เดโช เผือกภูมิ  
สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2559-2560  
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

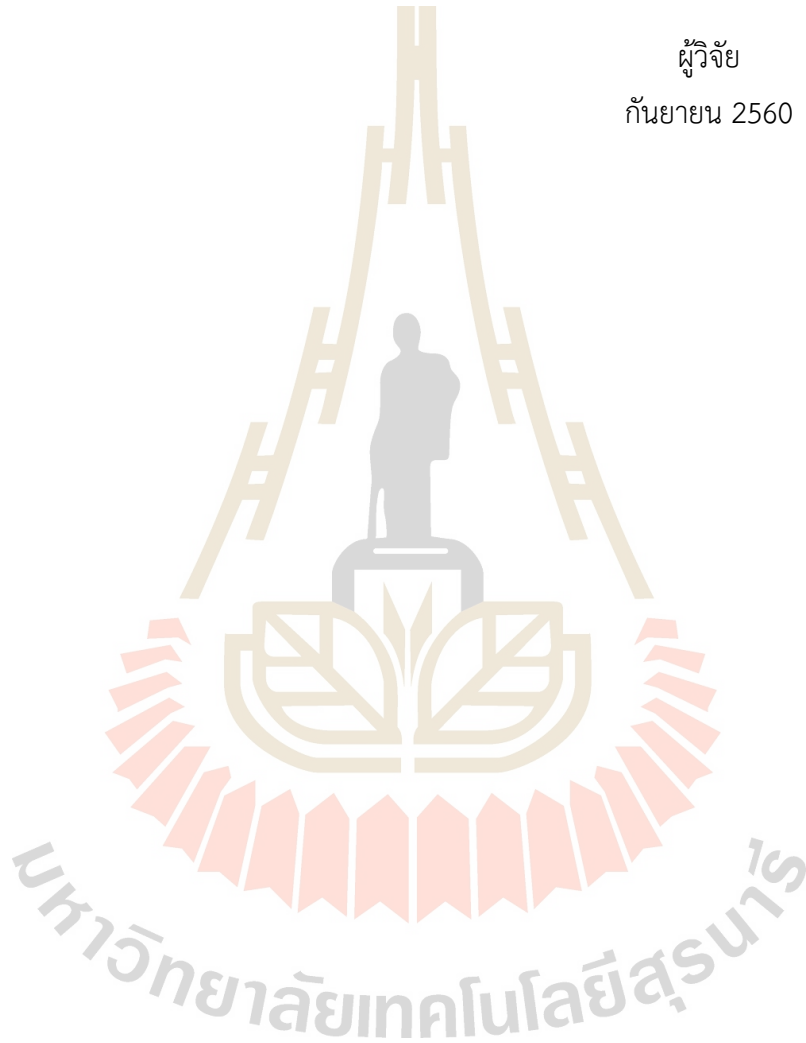
กันยายน 2560

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560-2561 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากทีมงานหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีในการทดสอบและ นางสาวกัลญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัยและ พิสูจน์อักษร ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

กันยายน 2560



## บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปร่างที่ขึ้นกับเวลาของเสาค้ำยันในเมืองแรโพแทชที่ได้รับผลกระทบจากปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์ การทดสอบการคืบในแกนเดียวของแท่งตัวอย่างหินคาร์บอนิลไลต์ได้ผันแปรปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์ตั้งแต่ 0-90% โดยใช้หินทดสอบ 15 ตัวอย่าง ภายใต้แรงกดคงที่ระหว่าง 2-16 MPa และดำเนินการทดสอบอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 21 วัน ข้อมูลการทดสอบได้ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อทำการสอบเทียบค่าคงที่ของพฤติกรรมเชิงยืดหยุ่น ความหนืดเชิงยืดหยุ่นและเชิงพลาสติกให้อยู่บนพื้นฐานของแบบจำลอง Burgers ข้อมูลจากการทดสอบมีความสอดคล้องเป็นอย่างดีกับแบบจำลอง โดยมีค่า R มากกว่า 0.85 จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าตัวแปรจากแบบจำลองของ Burgers ลดลงในรูปแบบของเอ็กซ์โพเนนเชียลเมื่อมีปริมาณของแร่คาร์บอนิลไลต์เพิ่มขึ้น แต่เมื่อมีปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์ 100% ค่าความหนืดเชิงยืดหยุ่นจะเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าตัวอย่างหินที่มีแร่คาร์บอนิลไลต์บริสุทธิ์จะมีแนวโน้มอยู่ในรูปแบบจำลองของ Maxwell มากกว่ารูปแบบจำลองของ Burgers ผลกระทบของปริมาณและการกระจายตัวของแร่คาร์บอนิลไลต์ในตัวอย่างหินได้ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยการคำนวณเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรม FLAC ผลการวิเคราะห์ระบุว่าภายใต้ปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์ที่เท่ากัน ถ้ามีการแทรกของจำนวนชั้นคาร์บอนิลไลต์มากขึ้น จะทำให้ค่าความหนืดเชิงพลาสติกมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความเครียดเชิงเวลาลดลง ซึ่งบ่งเป็นนัยว่าการคาดการณ์พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปร่างของเสาค้ำยันโดยใช้ผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการอาจทำให้ค่าการเปลี่ยนรูปร่างของเสาค้ำยันในภาคสนามเกินกว่าความเป็นจริง เนื่องจากการวางตัวถูกจำกัดด้วยขนาดของแท่งตัวอย่าง ผลกระทบของความชื้นต่อเสาค้ำยันในเมืองแรโพแทช ได้ถูกประเมินโดยให้ตัวอย่างทดสอบอยู่ภายใต้ความชื้น 95% ผลที่ได้ระบุว่าเมื่อมีปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์เกินกว่า 37% การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบจะเพิ่มขึ้นในเชิงเวลาอย่างรวดเร็ว สำหรับแท่งตัวอย่างหินที่มีปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์เจือปนอยู่ 90% การสูญเสียน้ำหนักจะมีมากถึง 60% ภายในเวลา 60 ชั่วโมง ผลที่ได้บ่งเป็นนัยว่าระบบระบายอากาศในเมืองแรโพแทชควรมีการควบคุมความชื้นเพื่อให้เสาค้ำยันมีเสถียรภาพดีในระหว่างดำเนินการทำเหมือง (ก่อนการติดตั้งวัสดุถมกลับ)

## Abstract

This study aims at assessing the time-dependent deformation of support pillar in potash mines as affected by carnallite contents. Series of uniaxial creep tests are performed on carnallite specimens are loaded with carnallite contents varying from 0% (pure halite) to over 90%. Fifteen specimens are loaded under constant axial stresses between 2-16 MPa for 21 days. Regression analysis is performed on the test results to calibrate the elastic, visco-elastic and visco-plastic parameters of the Burgers model. Good correlation is obtained ( $R > 0.85$ ). The Burgers parameters exponentially decrease with increasing the carnallite content ( $C_{\%}$ ). When the  $C_{\%}$  equal 100, the material viscosity  $\eta_2$  approaches zero. This implies that the pure carnallite rather behaves as the Maxwell material than the Burgers material. The effects of the carnallite distribution in the specimens are analyzed by performing numerical simulations using FLAC code. The results indicate that under the same  $C_{\%}$  the greater numbers of the inter-bedding between halite and carnallite induce the higher visco-plastic coefficient of the specimen, and hence results in a lower creep deformation. This suggests also that the prediction of the pillar deformation using the laboratory test results would likely over-estimate that of the actual (large scale) pillars in the mine. This is because the numbers of the inter-bedding in the small specimens are limited by their sizes. The effect of the humidity on the potash pillars is assessed by subjecting the specimens to the humidity of 95% in a humidity control chamber. The results indicate that when the carnallite content exceeds 37%, the weight loss of the specimen rapidly increases with time. For the specimen with 90% carnallite the specimen weight loss reaches 60% within 60 hours. This implies that the ventilated-air in potash mines should be humidity-controlled to maintain the pillar integrity during operation (before backfill installation).

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5.1 เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป.....	3
1.5.2 บริการความรู้แก่ประชาชนและหน่วยงานราชการ.....	3
1.5.3 บริการความรู้แก่ภาคธุรกิจ.....	3
<b>บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>5</b>
2.1 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของเกลื้อหิน.....	5
2.2 คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลื้อหิน.....	8
2.3 การทดสอบเกลื้อหินเชิงกลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการ.....	9
2.3.1 การทดสอบแรงกดในแกนเดียว.....	10
2.3.2 พฤติกรรมการคืบของเกลื้อหิน.....	11
2.3.3 พฤติกรรมการคืบของแร่คาร์บอเนต.....	14

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การเก็บและการจัดเตรียมตัวอย่างหิน.....	17
3.1 วัตถุประสงค์.....	17
3.2 การเตรียมตัวอย่างหินสำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	17
บทที่ 4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	25
4.1 วัตถุประสงค์.....	25
4.2 การทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว.....	25
4.3 การทดสอบการคืบในแกนเดียว.....	29
4.4 การทดสอบเพื่อหาผลกระทบของความชื้น.....	30
บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	33
5.1 วัตถุประสงค์.....	33
5.2 การสอบเทียบผลการทดสอบ.....	33
5.3 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	36
บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	43
6.1 บทสรุปของการวิจัย.....	43
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	44
บรรณานุกรม.....	45
ประวัตินักวิจัย.....	53

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	คุณสมบัติทางกายภาพสำหรับตัวอย่างหินในการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว.....	19
3.2	คุณสมบัติทางกายภาพสำหรับตัวอย่างเกลือหินในการทดสอบการคืบใน.....	21
3.3	คุณสมบัติทางกายภาพสำหรับตัวอย่างเกลือหินในการทดสอบความชื้น.....	23
5.1	ผลการสอบเทียบค่าคงที่จากการทดสอบการคืบการในแกนเดียว.....	34
5.2	ค่าคุณสมบัติของแร่เฮไลต์และแร่คาร์นัลไลต์ที่ใช้ในการจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	37



## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า	
2.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและเวลาการทดสอบที่ผันแปรอัตราการใช้แรง..	15
3.1	แหล่งกำเนิดของตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบ.....	18
3.2	ตัวอย่างหินคาร์บอนิลไลท์ที่มีแร่คาร์บอนิลไลท์ผันแปรตั้งแต่ 0-100%.....	18
4.1	การติดตั้งตัวอย่างหินในโครงทดสอบในแกนเดียว.....	25
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างเกลือหินในฟังก์ชันของปริมาณการเจือปนของแร่คาร์บอนิลไลท์.....	27
4.3	ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงกดในแกนเดียวที่ผันแปรปริมาณแร่คาร์บอนิลไลท์ตั้งแต่ 0-100% ที่จุดแตกและจุดเปลี่ยนแปลง.....	27
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น และอัตราส่วนปัวซองสีในฟังก์ชันของปริมาณการเจือปนของแร่คาร์บอนิลไลท์.....	28
4.5	รูปแบบการทดสอบการคืบในแกนเดียวโดยใช้คานทดสอบและตุ้มน้ำหนัก.....	29
4.6	การสอบเทียบอัตราส่วนของแรงโดย Electronic load cell.....	30
4.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวแกนหลักและระยะเวลาในการทดสอบที่ผันแปรตามปริมาณแร่คาร์บอนิลไลท์ตั้งแต่ 0-100%.....	31
4.8	อุปกรณ์การตรวจวัดความชื้น.....	31
4.9	กราฟแสดงผลกระทบจากความชื้นต่อหินคาร์บอนิลไลท์ที่มีการผันแปรปริมาณแร่คาร์บอนิลไลท์.....	32
5.1	องค์ประกอบของแบบจำลอง Burgers.....	34
5.2	ชุดค่าคงที่จากการสอบเทียบด้วยแบบจำลอง Burgers ภายใต้การผันแปรปริมาณของแร่คาร์บอนิลไลท์.....	35
5.3	พื้นที่หนึ่งในสี่ส่วนของแท่งตัวอย่างหินที่ทำการจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	37
5.4	รูปแบบจำลองชุดหินตัวอย่างของการทดสอบการคืบในแกนเดียวที่มีปริมาณและการกระจายตัวของแร่คาร์บอนิลไลท์แตกต่างกัน.....	38
5.5	พื้นที่การเกิดความเค้นเฉือนของตัวอย่างหินภายใต้การผันแปรปริมาณและการกระจายตัวของแร่คาร์บอนิลไลท์.....	40
5.6	การเคลื่อนไหลของหินภายใต้แรงกดคงที่.....	41
5.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวแกนหลักและระยะเวลาของตัวอย่างหินภายใต้การผันแปรปริมาณและการกระจายตัวของแร่คาร์บอนิลไลท์ตั้งแต่ 20% ถึง 80% จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	42

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

เสาค้ำยันในเหมืองแร่โพแทชและเกลือหินจะมีความอ่อนไหวต่อปริมาณความชื้นของอากาศในช่องเหมือง หรืออากาศที่ระบายลงมาจากผิวดิน ความชื้นจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเสาค้ำยันตามแนวรัศมีหรือปริมาตรของเสาค้ำยัน ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงกดและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในเชิงเวลา (Brodsky and Munson, 1991) จากการศึกษาก่อนหน้านี้ Hunsche and Schulze (1996) ได้ศึกษาความชื้นต่อคุณสมบัติของเกลือหิน ผลระบุว่า ค่ากำลังรับแรงกดของเกลือหินมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากเกลือหินมีความไวต่อความชื้นในอากาศและจะทำปฏิกิริยาเคมีกับความชื้นทำให้เกิดการละลายและมีน้ำเกลือเยิ้มออกมา ซึ่งความชื้นสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้ Billiotte et al. (1996) และ Bonte (1996) ยังได้ศึกษาอิทธิพลของความชื้นต่อค่ากำลังรับแรงกดของตัวอย่างเกลือหินภายใต้ความชื้นสูงด้วยการนำตัวอย่างเกลือหินแช่ในน้ำเกลือพบว่า เกลือหินมีค่ากำลังรับแรงกดลดลงเพียง 1 MPa จากค่ากำลังรับแรงกดภายใต้สภาวะปกติ (30 MPa) ซึ่งกระบวนการเช่นนี้มักจะเกิดขึ้นในเหมืองเกลือหินเพียงเล็กน้อย เนื่องจากแร่เฮไลต์มีความอ่อนไหวต่อปริมาณความชื้นน้อยกว่าแร่โพแทช จากการศึกษาในอดีตผลกระทบของความชื้นต่อคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเสาค้ำยันในเหมืองโพแทชยังไม่ค่อยมีการศึกษาเท่าที่ควร แต่เป็นที่ทราบกันดีว่าแร่คาร์แนลไลต์ซึ่งเป็นองค์ประกอบชนิดหนึ่งของหินคาร์แนลไลต์สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำหรือความชื้นในอากาศที่อาจส่งผลให้เกิดการละลายของแร่ดังกล่าวได้ (Warren, 2010; Stanton and Gorman, 1968; Spencer and Lowenstein, 1990) ด้วยเหตุนี้ในเหมืองแร่โพแทชจึงจำเป็นต้องศึกษาผลกระทบของความชื้นในอากาศต่อเสถียรภาพเชิงเคมีและเชิงกลศาสตร์ของเสาค้ำยันที่มีแร่คาร์แนลไลต์เป็นองค์ประกอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาการยุบตัวของเสาค้ำยันเชิงเวลา (Creep) ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อการทรุดตัวของผิวดินด้านบนที่เป็นประเด็นเกี่ยวข้องกับผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมในอุตสาหกรรมการพัฒนาทรัพยากรแร่โพแทชใต้ดินในประเทศไทย ดังนั้น ความรู้พื้นฐานและความเข้าใจอย่างลึกซึ้งเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหินคาร์แนลไลต์ที่ได้รับผลกระทบจากความเค้นกดและสภาวะความชื้นโดยรอบจึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับภาครัฐและเอกชนในอุตสาหกรรมการทำเหมืองของประเทศไทย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์ที่เจือปนอยู่ในหินคาร์บอนิลไลต์ (ผันแปรตั้งแต่ 0-100%) และความเค้นกดต่อการคืบของหินคาร์บอนิลไลต์ โดยทำการทดสอบการคืบในแกนเดียวเพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในแนวแกน
- 2) ศึกษาการละลายของมวลแร่คาร์บอนิลไลต์และพื้นผิวด้านนอกของแท่งตัวอย่างที่สัมผัสอากาศ โดยมุ่งเน้นไปที่ระยะเวลาการละลายของมวลแร่คาร์บอนิลไลต์ว่ามีความรวดเร็วหรือช้าเพียงใด
- 3) เพื่อพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์ (Creep law) โดยอาศัยข้อมูลจากห้องปฏิบัติการมาวิเคราะห์ในเชิงเวลา รวมถึงการประเมินการผันแปรของปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์ที่เจือปนอยู่ในหินคาร์บอนิลไลต์ต่อการคืบ เพื่อใช้คาดคะเนเสถียรภาพของเสาค้ำยันในเหมืองแร่โพแทชในระยะยาว

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) ศึกษาการคืบในแกนเดียวของตัวอย่างหินคาร์บอนิลไลต์ (เกลือหินที่มีแร่คาร์บอนิลไลต์เจือปน) ในเชิงกลศาสตร์ต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 21 วัน
- 2) การทดสอบการคืบในแกนเดียวใช้ตัวอย่างรูปทรงแท่งที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 54 มิลลิเมตร จำนวนอย่างน้อย 15 ตัวอย่าง
- 3) การทดสอบกำลังกดสูงสุดในแกนเดียวใช้ตัวอย่างรูปทรงแท่งที่มีขนาดเท่ากับ 54 มิลลิเมตร จำนวนอย่างน้อย 40 ตัวอย่าง
- 4) ทดสอบการคืบในแกนเดียวโดยผันแปรความเค้นกดตั้งฉากที่ 20-40% ของค่ากำลังกดสูงสุดของแท่งตัวอย่างหินคาร์บอนิลไลต์
- 5) การทดสอบการผันแปรความชื้นต่อแท่งตัวอย่างหินตั้งแต่ 30-95%
- 6) การทดสอบดำเนินการภายใต้อุณหภูมิห้อง
- 7) งานวิจัยนี้ไม่มีการสำรวจในภาคสนาม
- 8) ผลงานวิจัยจะนำไปเผยแพร่องค์ความรู้ในรูปของบทความวิชาการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ และวารสารทางวิชาการในระดับนานาชาติ

## 1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำแท่งตัวอย่างหินคาร์บอนิลไลต์มาทดสอบการคืบในแกนเดียวเพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์ต่อเสถียรภาพของเสาค้ำยันในเหมืองแร่โพแทชในระยะยาวซึ่งเป็นที่ทราบกันว่าหินคาร์บอนิลไลต์ที่มีความอ่อนไหวต่อความชื้นในอากาศอย่างมากเมื่อเทียบกับเกลือหินบริสุทธิ์ ดังนั้น การจำลองสภาวะของเสาค้ำยันในเหมืองแร่โพแทชเชิงเวลาจึงต้องพิจารณาถึงผลกระทบด้านความชื้นร่วมด้วย โดยการศึกษาจะแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ คือ 1) การทดสอบกำลัง

กตสูงสุดในแกนเดียวเพื่อหาค่าความแข็งของตัวอย่างหินคาร์บอนิลไทท์ที่แท้จริงเพื่อนำมากำหนดความเค้นกดคงที่ในการทดสอบการคืบในแกนเดียว 2) การทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์ต่อการคืบของหินในแกนเดียว และ 3) การทดสอบเพื่อหาผลกระทบของความชื้นต่อการละลายของมวลแร่คาร์บอนิลไลต์ในเชิงเวลา โดยนำแท่งตัวอย่างหินบรรจุภายในภาชนะปิดที่มีการควบคุมความชื้นในระดับที่กำหนด

ผลที่ได้ทำให้สามารถเข้าใจถึงผลกระทบของปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์และความชื้นต่อเสถียรภาพของเสาค้ำยันในเหมืองโพแทชใในระยะยาว เป็นผลให้สามารถใช้ทรัพยากรแร่ได้อย่างมีประสิทธิภาพใในการกำหนดขนาดของเสาค้ำยันที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้น ซึ่งต่างจากการออกแบบที่ผ่านมาในอดีต

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลงานวิจัยที่เสนอนี้มีประโยชน์อย่างมากใในด้านวิศวกรรมธรณี วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และวิศวกรรมเหมืองแร่ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและการขุดเจาะเหมืองแร่โพแทชใต้ดิน ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

### 1.5.1 เป็นองค์ความรู้ใในการวิจัยต่อไป

เป็นองค์ความรู้ใหม่ใในการเข้าใจถึงพฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลาของหินคาร์บอนิลไทท์ที่มีปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์ที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของเสาค้ำยันเมื่อเจอความชื้นในอากาศ และกำลังรับแรงกดที่แท้จริงของหินคาร์บอนิลไทท์ ซึ่งการศึกษานี้ยังได้รวบรวมองค์ความรู้ทางด้านกลศาสตร์หินเพื่อใช้ในการคาดคะเนเสถียรภาพของโครงสร้างทางวิศวกรรมเพื่อประโยชน์สำหรับผู้สนใจ

### 1.5.2 บริการความรู้แก่ประชาชนและหน่วยงานราชการ

การให้ความรู้แก่หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เช่น กรมทรัพยากรธรณี และกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เพื่อให้ทราบถึงผลกระทบของความชื้นในอากาศต่อเสถียรภาพของเสาค้ำยันในเหมืองแร่โพแทช สำหรับใช้ในการพิจารณาและการออกแบบเหมืองให้เหมาะสมกับความเค้นที่สามารถรับได้จริง

### 1.5.3 บริการความรู้แก่ภาคธุรกิจ

เป็นแหล่งข้อมูลและให้ความรู้แก่หน่วยงานภาคธุรกิจ เช่น งานด้านวิศวกรรมการออกแบบเหมืองใในการประเมินเสถียรภาพหินคาร์บอนิลไทท์สำหรับนำมาประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะของการใช้งาน และความเค้นที่หินสามารถรับได้จริง

## บทที่ 2

### การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัยได้ค้นคว้าและทำการศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของเกลือหิน ซึ่งจะสะท้อนให้เห็นในรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือการเคลื่อนไหล (Creep) โดยเน้นด้านผลกระทบที่มีผลต่อค่าความเค้นสูงสุดของหินคาร์บอเนตในแกนเดียว

#### 2.1 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน

ปัจจัยและสภาวะแวดล้อมที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของเกลือหินมีอยู่หลายประการ ซึ่งจะสะท้อนให้เห็นในรูปแบบของการเปลี่ยนรูปหรือการเคลื่อนไหล (Creep) รวมทั้งยังทำให้ความต้านทานต่อแรงกดหรือแรงดึงมีค่าลดลง Fokker (1998) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การเคลื่อนไหลและความต้านทานของเกลือหินภายใต้สภาวะตามธรรมชาติและในห้องปฏิบัติการ รวมไปถึงขนาดผลึก แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึก การเปลี่ยนรูปตามเวลา อุณหภูมิ ความชื้น และสิ่งเจือปน เป็นต้น

Fokker (1998) ทำการศึกษาผลกระทบด้านขนาดของผลึกต่อพฤติกรรมการคืบและค่าความแข็งแรงของเกลือหินภายใต้สภาวะต่างๆ โดยส่วนมากขนาดผลึกของเกลือหินสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่าจากการแตกของตัวอย่างที่มีขนาด  $5 \times 10 \times 12$  mm ผลการศึกษาระบุว่าเมื่อผลึกของเกลือหินมีขนาดใหญ่จะมีผลกระทบทางกลศาสตร์มากยิ่งขึ้นในด้านการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและการแตกของตัวอย่างหิน

ขนาดผลึกหรือขนาดเม็ดเกลือจะมีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนรูปร่างและการเคลื่อนไหลของเกลือหิน กล่าวคือเมื่อเปรียบเทียบขนาดผลึกกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างหินขนาด 60 mm พบว่าผลึกที่มีขนาดใหญ่จะมีโอกาสเกิดการเคลื่อนตัวตามแนวแตก (Cleavage plane) และตามระนาบเลื่อน (Slip plane) ได้มากขึ้น (Aubertin และคณะ, 1993a; Billiotte และคณะ, 1996; Aubertin, 1996) นักวิจัยหลายกลุ่มได้แก่ Franssen and Spiers (1990) Raj and Pharr (1992) Senseny และคณะ (1992) และ Wanten และคณะ (1996) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของผลึกและการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติกของเกลือหิน พบว่าความต้านแรงเฉือนและการเปลี่ยนรูป (Shear strength and deformation) จะเกิดขึ้นตามแนวหรือทิศทางของผลึก ดังนั้นตัวอย่างเกลือหินที่มีขนาดเล็กเกินไปจะมีความต้านแรงกดที่แปรปรวน ผลการทดสอบที่ได้จึงไม่สามารถเปรียบเทียบกับขนาดอื่นได้ ดังนั้น ASTM จึงได้ออกข้อกำหนดมาตรฐานสากลขึ้น (ASTM D2938 and D3967; Barber, 1990) เพื่อที่จะกำหนดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างให้มีมาตรฐานและสามารถเทียบเคียงกันได้ กล่าวคือเส้นผ่าศูนย์กลางต้องมีขนาดมากกว่าสิบเท่าของขนาดผลึก

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของเกลือหินในด้านความต้านทานของเกลือหิน เกลือหินที่มีลักษณะเนื้อต่างกันจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกต่ำกว่าบริเวณที่เป็นเนื้อเดียวกัน ลักษณะดังกล่าวนี้ Wanten และคณะ (1996) และ Allemandou and Dusseault (1993) ได้สังเกตพฤติกรรมเกลือหินจากการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนและการทดสอบแรงกดในแกนเดียว พบว่าค่าความเค้นจะขึ้นกับแรงยึดเหนี่ยวภายในผลึกและรอยต่อระหว่างผลึกของเกลือหิน ความเปราะเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของเกลือหินที่แสดงถึงความสามารถในการยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกสังเกตได้จากขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง การตัด และการขัดตัวอย่างเกลือหิน จะพบว่าบริเวณขอบของตัวอย่างเกิดการแตกได้ง่าย แสดงให้เห็นว่าเกลือหินมีความสามารถยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกค่อนข้างต่ำ

อัตราการกัดหรือความเร็วของการกัดที่กระทำต่อเกลือหินที่แตกต่างกันจะทำให้เกลือหินมีการเปลี่ยนรูปร่างตามเวลาไม่เท่ากัน กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ การเคลื่อนไหลของเกลือหินที่เกิดขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาในสภาวะแรงกดที่แตกต่างกัน ภายใต้อัตราการกัดที่สูงเกลือหินจะมีพฤติกรรมแบบเปราะ อย่างไรก็ตามภายใต้อัตราแรงกดที่ต่ำจะทำให้พฤติกรรมของเกลือหินเป็นแบบพลาสติกมากขึ้น เป็นผลทำให้ความต้านแรงกดต่ำ ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวได้ศึกษาโดย Aubertin และคณะ (1993b) และ Hardy (1996) พบว่าน้ำหนักกดทับในชั้นเกลือหินภายใต้ระยะเวลาานแรงกดทับในเนื้อหินจะค่อยๆ ลดลง โดย Hardy (1996) ได้ทำการทดสอบตัวอย่างเกลือหินด้วยแรงกด 10.3 MPa และรักษาระดับการเปลี่ยนรูปเป็นระยะเวลา 12 เดือน พบว่าความต้านแรงกดได้ลดลงไปถึง 21%

ความร้อนหรืออุณหภูมิจะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนรูปของเกลือหินเป็นอย่างมาก อีกทั้งยังทำให้ช่วงเวลากการเคลื่อนไหลยาวนานมากขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลให้ความหนืดของเกลือหินเพิ่มขึ้นด้วย (Ghoreychi and Berest, 1990; Broek and Heilbron, 1998) โดยการศึกษาที่เกี่ยวกับอุณหภูมิและความลึกในชั้นหินได้มีผู้วิจัยหลายท่านทำการศึกษาไว้แล้ว (Franssen and Spiers, 1990; Cristescu and Hunsche, 1996; Raj and Pharr, 1992; Senseny และคณะ 1992; Berest and Blum, 1993; Carter และคณะ 1993; Schneefub and Droste, 1996; Berest และคณะ 1998) ซึ่งสามารถสรุปผลได้โดยสังเขปคือ ความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามระดับความลึกของชั้นหิน โดยความร้อนดังกล่าวจะทำให้เกลือหินมีคุณสมบัติความเป็นพลาสติกมากยิ่งขึ้นและทำให้ความต้านแรงกดลดลง โดยปกติเกลือหินจะมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 800°C แต่การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600°C ตลอดระยะเวลาเพียง 8 ชั่วโมง ก็สามารถทำให้เกลือหินสูญเสียความต้านแรงกดไปได้ การทดสอบในห้องปฏิบัติการเกี่ยวข้องกับผลกระทบของอุณหภูมิที่ดำเนินการโดย Cristescu (1994 a, b) และ Cristescu and Hunsche (1996) ระบุว่า การทดสอบภายใต้อุณหภูมิ 100°C ควรใช้อัตราการยุบตัวที่ต่ำกว่า  $10^{-8} \text{ s}^{-1}$  และภายใต้อุณหภูมิ 200°C ควรใช้อัตราการยุบตัวต่ำกว่า  $10^{-7} \text{ s}^{-1}$  เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกลือหินเกิดการเคลื่อนไหลเร็วขึ้น เป็นผลให้เกลือหินมีการเปลี่ยนรูปร่างได้ง่ายขึ้น

ความชื้นเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ทำให้คุณสมบัติของเกลือหินเปลี่ยนไป กล่าวคือ ความต้านแรงกดของเกลือหินจะลดลง (Hunsche and Schulze, 1996) เนื่องจากเกลือหินจะมีความไวต่อความชื้นในอากาศ โดยความชื้นจะทำปฏิกิริยาเคมีกับเกลือหินทำให้เกิดการละลายและมีน้ำเกลือไหลซึมออกมา สำหรับการเตรียมตัวอย่างเกลือหินในห้องปฏิบัติการสามารถป้องกันผลกระทบของความชื้นได้โดยการนำตัวอย่างเกลือหินมาห่อหุ้มด้วยพลาสติกกันความชื้น นอกจากนี้ความชื้นยังสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายเมื่อมีอุณหภูมิเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดย Billiotte และคณะ (1996) และ Bonte (1996) ได้ทำการทดสอบหาความต้านแรงกดกับตัวอย่างเกลือหินที่มีความชื้นสูง ด้วยการนำตัวอย่างเกลือหินแช่ในน้ำเกลือพบว่าเกลือหินจะมีความต้านแรงกดลดลง โดยเกลือหินที่ปราศจากความชื้นจะมีค่ากำลังต้านแรงกดเท่ากับ 30 MPa และจะลดลงเหลือเพียง 1 MPa เมื่อเกลือหินมีความชื้นเท่ากับ 7%

Lee และคณะ (1998) ได้ประเมินปัญหาของแร่ที่ถูกละลายในน้ำเกลือ อาทิ แร่ Halite, Sylvinit และ Carnallitic โดยทำการทดสอบการคืบในแกนเดียวภายใต้สภาวะที่มีและไม่มี การเพิ่มของน้ำเกลือ ขณะทำการทดสอบได้วัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในแนวแกนหลักและการสลายตัวทางเคมี มีการทดสอบและสังเกตการสลายตัวของแร่ Sylvite และ Carnallite ที่มีความสัมพันธ์กับการตกตะกอนของแร่ Halite โดยกระบวนการทางธรรมชาตินี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ น้ำเกลือ และองค์ประกอบของแร่ โดยทั่วไปแล้วเมื่อมีการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำเกลือกับแร่ดังกล่าวจะส่งผลให้ความต้านทานต่อพฤติกรรม การเสีรูปร่างการคืบลดลง ซึ่งจะสังเกตได้จากความเงาของแร่ที่ถูกละลายภายใต้จุดเปลี่ยน (Dilation) ตามเงื่อนไขที่กำหนด น้ำเกลือซึ่งเป็นตัวทำละลายเป็นสาเหตุหลักต่อการเพิ่มกระบวนการการแตกและการสลายตัวของพื้นที่รับแรงกด เช่น พื้นที่ที่ผ่านการแตก และพื้นที่ที่มีแรงเสียดทานมาก ความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบและความผันแปรตามสภาพแวดล้อม รวมถึงปัญหาของน้ำเกลือที่ไหลเข้าไปยังกักเกลือที่ถูกนำกลับมาใช้มกลับในช่องเปิดใต้ดินระบุว่า สาเหตุหลักที่ทำให้ผลของพฤติกรรม การคืบเพิ่มขึ้นมาจากน้ำเกลือที่มีอุณหภูมิสูงเข้าไปทำปฏิกิริยา ส่งผลให้เกิดการสลายตัวของแร่ที่เป็นแร่ องค์ประกอบในเกลือหิน

สิ่งเจือปนในเนื้อหินเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อความต้านแรงกดของเกลือหิน สิ่งเจือปนเหล่านี้ได้แก่ Anhydrite และตะกอนอื่นๆ ที่มีการกระจายตัวในเกลือหิน ซึ่งในบางกรณีอาจไปลดความต้านแรงกดและทำให้เกลือหินมีพฤติกรรม การเคลื่อนไหลที่ต่างกันออกไป (Peach, 1996; Hunsche, และคณะ 1996; Hansen และคณะ 1987) สิ่งเจือปนเพียงเล็กน้อยในเกลือหินจะมีผลต่อพฤติกรรม การเคลื่อนไหล เนื่องจากสิ่งเจือปนเหล่านี้จะลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกและการเคลื่อนไหลของเกลือหิน อีกทั้งทำให้เกิดการผันแปรเชิงกลศาสตร์โดยทำให้แรงกดมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอและไม่ต่อเนื่องกัน (Franssen and Spiers, 1990; Raj and Pharr, 1992; Senseny และคณะ 1992)

## 2.2 คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน

นักวิจัยบางกลุ่มได้เสนอว่าเกลือหินมีคุณสมบัติเหมือนโลหะและเซรามิก (Munson and Wawersik, 1991; Chokski and Langdon, 1991) แต่แท้จริงแล้วเกลือหินจัดเป็นหินชนิดหนึ่งจำพวก Alkali halides ที่มีคุณสมบัติต่างกับโลหะ เซรามิก และหินอื่นๆ โดย Barber (1990) และ Aubertin และคณะ (1992, 1993b, 1999) ได้ศึกษาคุณสมบัติของเกลือหินและสรุปว่าเกลือหินมีคุณสมบัติแบบกิ่งเปราะกิ่งเหนียว หรือมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น-พลาสติก กล่าวคือ เกลือหินจะมีพฤติกรรมทั้งแบบยืดหยุ่น แบบยืดหยุ่น-พลาสติก และแบบพลาสติก (Jeremic, 1994; Aubertin และคณะ 1992, 1993b, 1999; Fokker, 1995, 1998) ผลจากการศึกษาโดยนักวิจัยกลุ่มนี้สามารถสรุปโดยสังเขปได้ดังนี้

พฤติกรรมเชิงยืดหยุ่น (Elastic behavior) ของเกลือหินส่วนใหญ่จะถูกพิจารณาในลักษณะความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงและมีการวิบัติแบบเปราะ ความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงสามารถสังเกตได้เมื่อแรงกดมีค่าต่ำกว่าแรงกดอ่อนตัว (Yield stress) ในช่วงความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงจะสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของหินได้ ซึ่งปกติแล้วเกลือหินจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่ค่อนข้างต่ำ โดยพฤติกรรมเชิงยืดหยุ่น-พลาสติก (Elastic and plastic behavior) ของเกลือหินจะเกิดขึ้นเมื่อแรงกดที่มากกระทำต่อเกลือหินยังไม่เกินจุดอ่อนตัว กล่าวคือเมื่อปล่อยแรงกดจะทำให้เกลือหินกลับสู่สภาพเดิม หรืออีกนัยหนึ่งคือเกลือหินมีการเปลี่ยนรูปไปชั่วขณะเท่านั้น ในขณะที่เดียวกันเมื่อให้แรงกดต่อไปเกลือหินจะเข้าสู่ช่วงที่เป็นพลาสติก กล่าวคือความเค้นได้เกินจุดความเค้นอ่อนตัวไปแล้วนั่นเอง ส่งผลให้เมื่อทำการลดแรงกดแล้วเกลือหินจะไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้และถ้าให้แรงกดต่อไปเกลือหินจะไม่สามารถทนแรงกดที่สะสมไว้ได้จนเกิดการวิบัติในที่สุด

พฤติกรรมเชิงพลาสติก (Plastic behavior) เกลือหินจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงรูปร่างถาวรจนกว่าแรงที่กระทำจะเกินจุดอ่อนตัว (Thorel and Ghoreychi, 1996; Frayne, 1996) ภายใต้อายุแรงกดสูง ส่งผลให้เกลือหินมีการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกที่ไม่สิ้นสุดหากแรงกดที่กระทำยังมีค่าคงที่ อย่างไรก็ตามเกลือหินจะไม่สามารถทนรับแรงกดได้และเกิดการวิบัติในที่สุดเมื่อถึงขีดจำกัดของความเครียดแล้ว การเปลี่ยนรูปของเกลือหินที่ภายใต้อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของผลึกได้ง่าย ส่งผลให้เกลือหินเกิดการเคลื่อนไหลง่ายขึ้นเมื่อได้รับแรงกด ดังนั้นในเชิงกลศาสตร์ แรงกดและความร้อนคือปัจจัยสำคัญในการศึกษาพฤติกรรมและกลไกการเคลื่อนไหลของเกลือหิน (Senseny และคณะ 1992; Carter และคณะ 1993) นอกจากนี้การเปลี่ยนรูปของเกลือหินจะมีความสัมพันธ์กับอัตราความเครียดแบบไม่ยืดหยุ่นและความเค้นผันแปรด้วย (Spiers และคณะ 1990; Barber, 1990; Chokski and Langdon, 1991; Wolfenstine และคณะ 1991)

สำหรับการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์จะมีการออกแบบวิธีการทดสอบให้มีความสอดคล้องกับพฤติกรรมของเกลือหินในธรรมชาติเช่น การกำหนดอัตราความเค้นคงที่เพื่อประเมินพฤติกรรม การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง การกำหนดการยุบตัวคงที่เพื่อประเมินการคลายความเค้น และการกำหนดให้แรงกดคงที่เพื่อประเมินการเคลื่อนไหลของเกลือหินตลอดระยะเวลาการทดสอบ โดยแต่ละ



การทดสอบจะอยู่ภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกันไปเป็นต้น ในที่สุดจึงได้ผลการทดสอบที่แสดงให้เห็นกลไกการเคลื่อนไหลภายใต้สภาวะต่างๆ เช่น ในเชิงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราความเค้น ความเครียด อุณหภูมิของการเคลื่อนไหล (Steady creep state) ส่วนพฤติกรรมการเคลื่อนไหลในช่วงสั้น (Transient creep state) ผลที่ได้จะเน้นถึงการเคลื่อนไหลแบบไม่ยืดหยุ่นซึ่งจะมีการผันแปรเป็นอย่างมาก

Fuenkajorn and Daemen (1988) ได้ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินในห้องปฏิบัติการ และสรุปว่าพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินค่อนข้างซับซ้อนและขึ้นกับเวลา เมื่อเกลือหินมีแรงเข้ามากระทำ การตอบสนองต่อแรงนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 4 พฤติกรรม ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วจะเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน คือ 1) พฤติกรรมแบบยืดหยุ่น (Elastic behavior หรือ Instantaneous responses) ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นโดยฉับพลันและไม่ขึ้นกับเวลา 2) พฤติกรรมแบบหนืดแข็งยืดหยุ่น (Visco-elastic behavior) เป็นพฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลา ซึ่งเกลือหินจะเปลี่ยนรูปตามเวลาภายใต้แรงที่มากระทำแต่เกลือหินก็สามารถคืนตัวเป็นรูปร่างเดิมได้เมื่อแรงนั้นหมดไป 3) พฤติกรรมแบบหนืดแข็งพลาสติก (Visco-plastic behavior) เป็นการเปลี่ยนรูปของเกลือหินอย่างถาวรและขึ้นกับเวลา ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อแรงที่มากระทำสูงเกินขอบเขตของจุดอ่อนตัวของเกลือหิน และ 4) พฤติกรรมการวิบัติ (Creep failure behavior) เป็นการวิบัติหรือการแตกของเกลือหินที่ขึ้นกับเวลาซึ่งเป็นผลมาจากการพัฒนาของรอยแตกและรอยร้าวเล็กๆ (Micro-cracks) ที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนเกลือหินแตก ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นเมื่อเกลือหินอยู่ภายใต้แรงที่มากระทำที่สูงมาก กล่าวคือสูงเกินขอบเขตของกำลังอัดสูงสุดหรือเรียกว่า Creep strength พฤติกรรมทั้งหมดดังกล่าวข้างต้นสามารถเกิดขึ้นพร้อมๆ กันได้ ขึ้นกับขนาดของแรงที่มากระทำและขึ้นกับสภาวะแวดล้อมที่เกลือหินวางตัวอยู่ ด้วยเหตุนี้ในเชิงคณิตศาสตร์ การศึกษาพฤติกรรมของเกลือหินจึงต้องอาศัยสมการควบคุม (Governing equations) ที่ซับซ้อนหลายสมการเข้ามาพิจารณาประกอบกัน

### 2.3 การทดสอบเกลือหินเชิงกลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการ

เกลือหินมีพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ที่แตกต่างจากหินชนิดอื่นๆ โดยพฤติกรรมของเกลือหินจะขึ้นกับเวลา คือสามารถเปลี่ยนรูปในเชิงพลาสติกภายใต้แรงที่มากระทำ ดังนั้นการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินจึงมีผู้วิจัยหลายท่านได้ออกแบบและพัฒนาการทดสอบขึ้นมาเพื่อให้ได้คุณสมบัติตรงตามความต้องการและมีวิธีการทดสอบที่ใกล้เคียงกับสภาวะจริงในชั้นเกลือหิน วิธีการทดสอบเบื้องต้นที่มีผู้วิจัยหลายท่านได้ทดสอบมาแล้ว เช่น การทดสอบแรงกดในแกนเดียว (Uniaxial compressive strength test) การทดสอบแรงกดในแกนเดียวแบบวัฏจักร (Uniaxial cyclic loading test) การทดสอบแรงกดในสามแกน (Triaxial strength test) การทดสอบแรงกดในสามแกนแบบวัฏจักร (Triaxial cyclic loading test) การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียว (Uniaxial creep test) การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวแบบขั้นบันได (Muiti-Steps uniaxial creep test) การทดสอบ

การเคลื่อนไหลในสามแกน (Triaxial creep test) การทดสอบการเคลื่อนไหลในสามแกนแบบขั้นบันได (Multi-steps triaxial creep test) การทดสอบแรงดึง (Tensile strength test) การทดสอบความซึมผ่าน (Permeability) การวัดคลื่นเสียง (Acoustic emission) และการประสานตัวของรอยแตก (Healing fracture) เป็นต้น

### 2.3.1 การทดสอบแรงกดในแกนเดียว

การทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว (Uniaxial compressive strength test) เป็นวิธีเบื้องต้นที่ใช้ศึกษาหาค่าความต้านแรงกดสูงสุดในเกลือหิน โดยการให้แรงกดในแกนเดียวผ่านแท่งหินทรงกระบอกจนกระทั่งหินแตก แรงกดสูงสุดที่ได้จะมีการแปรผันตามอัตราการให้แรงและอัตราการยุบตัว Hansen และคณะ (1984) ทำการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวของแท่งเกลือหินที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50-100 mm โดยมีแหล่งที่มาจาก Richton, Weeks Island, Vacherie, Permian, Avery Island, Jefferson Island, Lyons, Cote Blanche, New Mexico และ Paradox ในประเทศสหรัฐอเมริกาซึ่งตัวอย่างเกลือหินในแต่ละแหล่งมีค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียว คือ 13.3, 13.9, 15.3, 22.1, 24.0, 25.2, 25.2, 26.0 และ 33.3 MPa ตามลำดับ Fuenkajorn and Daemen (1988) ได้ทำการทดสอบแรงกดในแกนเดียวของเกลือหินจากแหล่ง Permian Basin New Mexico โดยทำการทดสอบภายใต้อัตราการให้แรงกดที่หลากหลาย คือมีค่าระหว่าง 3-190 MPa/min ผลการทดสอบระบุว่าค่ากำลังรับความต้านแรงกดของเกลือหินโดยเฉลี่ยมีค่า 18.44 MPa นอกจากนี้ Wanten และคณะ (1993) ได้ทำการทดสอบแรงกดในแกนเดียวแบบควบคุมอัตราการยุบตัวหรืออัตราความเครียดมีค่าตั้งแต่  $10^{-4}$  ถึง  $10^{-7} \text{ s}^{-1}$  บนผลึกเกลือหินในช่วงอุณหภูมิผันแปรตั้งแต่  $20^{\circ}\text{C}$  ถึง  $200^{\circ}\text{C}$  พบว่าเกิดการเคลื่อนไหลของผลึกเกลืออย่างต่อเนื่อง และค่าความต้านทานแรงกดสูงสุดมีค่าระหว่าง 15 ถึง 30 MPa

Boontongloan (2000) ได้ทำการทดสอบแรงกดในแกนเดียวแบบควบคุมอัตราแรงกดบนแท่งตัวอย่างเกลือหินจากแอ่งสกลนครในพื้นที่จังหวัดอุดรธานีให้เกิดการวิบัติภายใน 5 ถึง 10 นาที ผลที่ได้สรุปว่าเกลือหินชั้นบนมีค่าความต้านทานแรงกดในแกนเดียวเฉลี่ยประมาณ 18.5 MPa เกลือหินชั้นกลางมีค่าความต้านทานแรงกดในแกนเดียวเฉลี่ยประมาณ 26 MPa ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นแบบเส้นสัมผัสและแบบเส้นตัดที่ 50% ของความต้านทานสูงสุดเท่ากับ 5.6 GPa และ 9.9 GPa ตามลำดับ และเกลือหินชั้นล่างมีค่าเฉลี่ยความต้านแรงกดในแกนเดียวเท่ากับ 25 MPa ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นแบบเส้นสัมผัสและแบบเส้นตัดที่ 50% ของความต้านทานสูงสุดเท่ากับ 6.4 GPa และ 11.4 GPa ตามลำดับ และอัตราส่วน Poisson's ratio เท่ากับ 0.35 และ 0.42 ตามลำดับ Wetchasat (2002) ทำการทดสอบแรงกดในแกนเดียวบนตัวอย่างหินจากหลุมเจาะของพื้นที่จังหวัดอุดรธานีภายใต้การผันแปรอัตราการกด 0.01, 0.05, 0.1, 0.5 และ 1.0 MPa/sec ผลการทดสอบระบุว่าค่าความต้านทานแรงกดของเกลือหินมีความสอดคล้องกันกล่าวคือ เกลือชั้นกลางและเกลือชั้นล่างมีค่าเท่ากับ 23.0 และ 31.1 MPa ตามลำดับ Devries et al. (2002) ทำการทดสอบและรวบรวมข้อมูลผลการทดสอบแรงกดในแกนเดียวของเกลือ

หินจากแหล่ง Petal, McIntosh Dome โดยใช้ตัวอย่างจากหลุมเจาะ Bay 19 gas Well No. 2, Napoleonville, McIntosh, Spindletop และ Barbers Hill พบว่ามีค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียว คือ 14.9, 17.1, 21.2, 18.7, 22.5, และ 25.1 MPa ตามลำดับ ในปีต่อมา Phueakphum (2003) ได้ทำการทดสอบตัวอย่างเกลือหินจากแหล่งของเกลือชั้นกลางจากแอ่งสกลนครด้วยอัตราแรงกดที่ 0.1 MPa พบว่ามีค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียวเท่ากับ 30.2 MPa ค่าความเครียดสูงสุดมีค่าระหว่าง 0.017-0.035 นอกจากนี้ยังมีผู้วิจัยอื่นที่ทำการทดสอบเกลือหินจากแหล่งจังหวัดอุดรธานีเพิ่มเติมอีก และพบว่ามีผลการทดสอบที่ใกล้เคียงกัน (Fuenkajorn and Jandakaew, 2003; Fuenkajorn et al., 2003)

### 2.3.2 พฤติกรรมการคืบของเกลือหิน

การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวของเกลือหินมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเกลือหินที่ขึ้นกับเวลา โดยการให้แรงกดคงที่ในแนวแกนตลอดระยะเวลาการทดสอบ ผลที่ได้จะแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวแกนกับเวลา โดยพฤติกรรมของเกลือหินสามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วง คือ การเคลื่อนไหลช่วงสั้นหรือช่วงแรก (Transient or preliminary creep stage) การเคลื่อนไหลช่วงคงที่หรือช่วงที่สอง (Steady or secondary creep stage) และการเคลื่อนไหลช่วงสุดท้าย (Tertiary creep stage) ซึ่งเกลือหินจากแหล่งเดียวกันแต่อยู่คนละชั้นกันอาจมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน นักวิจัยหลายท่านได้ทำการวิจัยการเคลื่อนไหลในแกนเดียวของเกลือหิน และพบผลการทดสอบที่สอดคล้องกัน (Fuenkajorn and Daemen, 1988; Allemandou and Dusseault, 1996; Hunsche and Schulze, 1996; Pudewills and Hornberger, 1996; Chen และคณะ 1997) นอกจากนี้ Hunsche และคณะ (1996) ได้ทำการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวภายใต้อุณหภูมิแปรผันตั้งแต่ 22°C ถึง 630°C พบว่าเกลือหินมีความอ่อนตัวมากขึ้นและมีพฤติกรรมในเชิงพลาสติกหากทำการทดสอบภายใต้อุณหภูมิสูง ปี ค.ศ. 1993 ASTM ได้กำหนดมาตรฐานการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวคือ ASTM D4341 และ ASTM D4405 สำหรับหินแข็งและหินอ่อนตามลำดับ

Ong et al. (1998) ทำการศึกษาการเคลื่อนไหลในสามแกนของเกลือหินโพแทชจากแหล่ง Patience Lake Member ในสหรัฐอเมริกา Hamami และคณะ (1996) ทำการทดสอบการเคลื่อนไหลในสามแกนภายใต้อุณหภูมิผันแปรจาก 20°C ถึง 90°C พบว่าภายใต้อุณหภูมิสูงเกลือหินมีการยุบตัวสูงกว่าภายใต้อุณหภูมิต่ำ จากวิธีการทดสอบในข้างต้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการทดสอบแบบขั้นบันไดได้ (Hamami และคณะ 1996; Allemandou and Dusseault, 1993) กล่าวคือ การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวแบบขั้นบันไดจะมีการให้แรงกดคงที่ไปถึงค่าหนึ่งที่กำหนดไว้ จากนั้นจึงรักษาค่าแรงกดไว้เพื่อให้เกิดการเคลื่อนไหลในระยะเวลาหนึ่งแล้วเพิ่มแรงกดขึ้นไปอีกระดับอย่างเป็นระบบ หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการทดสอบการเคลื่อนไหลด้วยค่าแรงกดที่แตกต่างกันโดยใช้ตัวอย่างเกลือหินเพียงตัวอย่างเดียว การทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียวแบบขั้นบันไดเป็นการลดจำนวนตัวอย่างเกลือหินที่ใช้ในการทดสอบในแต่ละระดับหรือขั้นของค่าความเค้น โดยผลการทดสอบจะต่างกับ

การทดสอบแบบปกติที่มีค่าความเค้นเดียวต่อหนึ่งตัวอย่าง (Fuenkajorn and Daemen, 1998) Hamami และคณะ (1996) ได้ทำการทดสอบการเคลื่อนไหลในสามแกนแบบขั้นบันไดภายใต้แรงกดล้อมรอบ การวิเคราะห์ผลการทดสอบได้ใช้สมการยกกำลัง (Power law) พบว่าสมการดังกล่าวไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมของเกลือหินได้ดีเพียงพอ หรืออีกนัยหนึ่งคือเกลือหินมีผลกระทบจากแรงที่มากระทำในอดีต (ผลกระทบของวิถีความเค้น) ทำให้มีพฤติกรรมแตกต่างกัน โดยลักษณะเช่นนี้เรียกว่า Memory Effect

การทดสอบความคืบในสามแกน คือการตรวจสอบพฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลาของเกลือหินภายใต้สภาวะที่ค่อนข้างจำกัด โดยเป็นการทดสอบที่ค่าความเค้นมีสภาวะใกล้เคียงกับสภาวะจริงในภาคสนาม Ong และคณะ (1998) ได้ทำการศึกษาการเสียรูปร่างภายใต้การคืบของเกลือหินและโพแทชจากแหล่งทะเลสาป Patience โดยทำการทดสอบการคืบในสามแกนเป็นระยะเวลาภายใต้การปรับเปลี่ยนแรงในแนวแกนหลักและแรงดันด้านข้างให้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยมีการเก็บข้อมูลระหว่างการทดสอบทุก 5 นาที จากนั้นจึงเปลี่ยนเป็นทุกครึ่งชั่วโมงเมื่ออัตราการคืบค่อยๆ ลดลง หลังจากทำการลดแรงลงได้ทำการตรวจวัดขนาดของแท่งตัวอย่าง พบว่าพฤติกรรมของเกลือหินจะเข้าสู่ความเป็นพลาสติกเมื่ออยู่ภายใต้แรงดันที่สูง

กิตติเทพ เพ็องขจร (2554) ได้ทำการทดสอบการคืบในสามแกนจริงของเกลือหินชุดมหาสารคาม เพื่อศึกษาผลกระทบของความเค้นหลักกลางต่อพฤติกรรมเชิงเวลาของหิน โครงทดสอบในสามแกนจริงได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้ความเค้นกดคงที่ในสามแกนต่อตัวอย่างหินรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ  $5.4 \times 5.4 \times 5.4$  cm ค่าความเค้นเฉือนในสามมิติผันแปรจาก 5, 8, 11 ถึง 14 MPa ในขณะที่ค่าความเค้นเฉือนจะปรับให้คงที่เท่ากับ 15 MPa สำหรับทุกตัวอย่าง สภาวะการให้แรงมี 3 รูปแบบ คือ การกดในสามแกน การกดในหลายแกน และการกดแบบยึดในสามแกน การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างถูกตรวจวัดในแนวแกนหลักเชิงเวลาต่อเนื่องถึง 21 วัน เมื่อนำผลจาก Burgers Model มาเทียบเคียงผลในเชิงสถิติในรูปแบบของความเครียดเฉือนในสามแกนต่อเวลาพบว่า การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเกลือหินโดยฉับพลันและการเปลี่ยนรูปร่างแบบความหนืดเชิงยืดหยุ่นจะไม่ขึ้นกับการผันแปรของค่าความเค้นหลักกลาง อย่างไรก็ตามภายใต้ความเค้นเฉือนในสามมิติที่เท่ากัน ปัจจัยความหนืดเชิงพลาสติกของเกลือหินจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นหลักกลางเพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อหาค่าการหดตัวของโพรงเกลือที่ใช้กักเก็บพลังงานอากาศอัดในชั้นเกลือหิน ผลที่ได้ระบุว่า การทดสอบการคืบของเกลือหินแบบสามแกนภายใต้แรงกด (แบบดั้งเดิม) จะให้ค่าการหดตัวของโพรงเกลือในเชิงเวลาสูงกว่าการหดตัวของโพรงเกลือในสภาวะจริงที่จำลองจากผลการทดสอบในสภาวะการคืบแบบยึดตัวและแบบหลายแกน

กิตติเทพ เพ็ญขจร (2557) ได้ทำการทดสอบการคืบในแกนเดียวและการให้แรงแบบวัฏจักร เพื่อประเมินผลกระทบของการให้แรงและอุณหภูมิแบบวัฏจักรของพฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลาของเกลือหินชุดมหาสารคาม ตัวอย่างเกลือหินที่มีรูปร่างกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 mm โดยตัวอย่างถูกให้แรงด้วยอุปกรณ์ให้น้ำหนักกดทับแบบคงที่ แรงกดในแนวแกนมีการสอบเทียบล่วงหน้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์โหลดเซลล์เพื่อให้ความเค้นที่กดบนตัวอย่างถูกต้อง โดยความเค้นกดคงที่ที่ให้กับตัวอย่างเกลือหินมีขนาด 6.5, 9.6, 13.0 และ 16.0 MPa หลังจากให้แรงแบบคงที่เป็นระยะเวลา 21 วัน ตัวอย่างจะถูกผันแปรแรงกดจาก 1 MPa และกลับไปค่าเริ่มต้นของแต่ละชุดการทดสอบ ซึ่งรอบของการผันแปรแรงกดคือ 24 ชั่วโมง ตัวอย่างจะถูกผันแปรแรงกดในแนวแกนเป็นระยะเวลา 21 วัน อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบมีการผันแปรตามสภาวะความเค้นที่ 30°C และ 100°C (273 และ 303 เคลวิน) ภายใต้การให้แรงกดคงที่ค่าความเครียดในช่วงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดหรือการเคลื่อนไหลต่อช่วงเวลาคงที่ได้แสดงในรูปของความเครียดเฉือนหกด้านในเชิงเวลา ซึ่งสามารถอธิบายได้ดีที่สุดด้วยสมการเอ็กซ์โพเนนเชียลที่สามารถอธิบายพฤติกรรมความหนืดเชิงพลาสติกของเกลือหินได้ทั้งการทดสอบการให้แรงแบบคงที่และการให้แรงแบบวัฏจักร การทดสอบการให้แรงสลับอุณหภูมิจะให้ค่าความเครียดสูงกว่าการทดสอบการให้แรงแบบคงที่ในทุกความเค้นกด

ผลการสอบเทียบตัวแปรความหนืดเชิงพลาสติกได้นำมาใช้ในการจำลองการยุบตัวเชิงเวลาของโพรงกักเก็บด้วยโปรแกรม FLAC2D การยุบตัวของโพรงภายใต้สภาวะการให้แรงแบบวัฏจักรมีค่าประมาณ 13.2% ซึ่งมากกว่าที่สภาวะการให้แรงคงที่ที่อุณหภูมิห้อง และมีค่าประมาณ 17% ที่ 100°C ค่าการยุบตัวสูงสุดสำหรับสภาวะการให้แรงสลับอุณหภูมิมีค่าประมาณ 8.9% ของเส้นผ่าศูนย์กลางโพรง แสดงให้เห็นว่าทั้งการทดสอบและการจำลองด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ของโพรงกักเก็บภายใต้สภาวะการให้แรงสลับอุณหภูมิจะให้ผลการประเมินการยุบตัวของโพรงที่เป็นไปในเชิงอนุรักษ์ ในทางปฏิบัติแล้วค่าตัวแปรความหนืดเชิงพลาสติกควรมีการปรับขึ้นประมาณ 15% สำหรับผลการทดสอบการคืบแบบทั่วไปเพื่อให้การออกแบบเป็นไปในเชิงอนุรักษ์

Sriapai and Fuenkajorn (2010) ได้ทำการทดสอบกำลังกดในสามแกนจริงของเกลือหินเพื่อคาดคะเนเกณฑ์การแตกในสามมิติ ตัวอย่างเกลือหินมีขนาด 5.4×5.4×10.8 cm และใช้โครงกดทดสอบในสามแกนในการทดสอบ โดยให้ค่าความเค้นหลักกลางคงที่ผันแปรตั้งแต่ 0 ถึง 80 MPa และค่าความเค้นหลักต่ำสุดคงที่ผันแปรตั้งแต่ 0 ถึง 28 MPa ในขณะที่ความเค้นหลักสูงสุดจะถูกกดจนกระทั่งหินแตก เกณฑ์การแตกของ Coulomb มีความมเสียดทานเท่ากับ 50°C และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 5 MPa ผลกระทบของความเค้นหลักกลางของเกลือหินสามารถอธิบายได้ด้วยเกณฑ์การแตกของ Modified Wiebols and Cook ส่วนเกณฑ์การแตกของ Mogi จะสามารถทำนายการแตกของเกลือหินได้ดีเฉพาะความเค้นหลักต่ำสุด สำหรับเกณฑ์การแตกของ Modified Lade สามารถทำนายการแตกของเกลือหินได้สูงกว่าผลการทดสอบในทุกระดับของความเค้นหลักต่ำสุด เกณฑ์การแตกของ Coulomb และเกณฑ์การแตกของ Hoek and Brown ไม่สามารถอธิบายความแข็ง

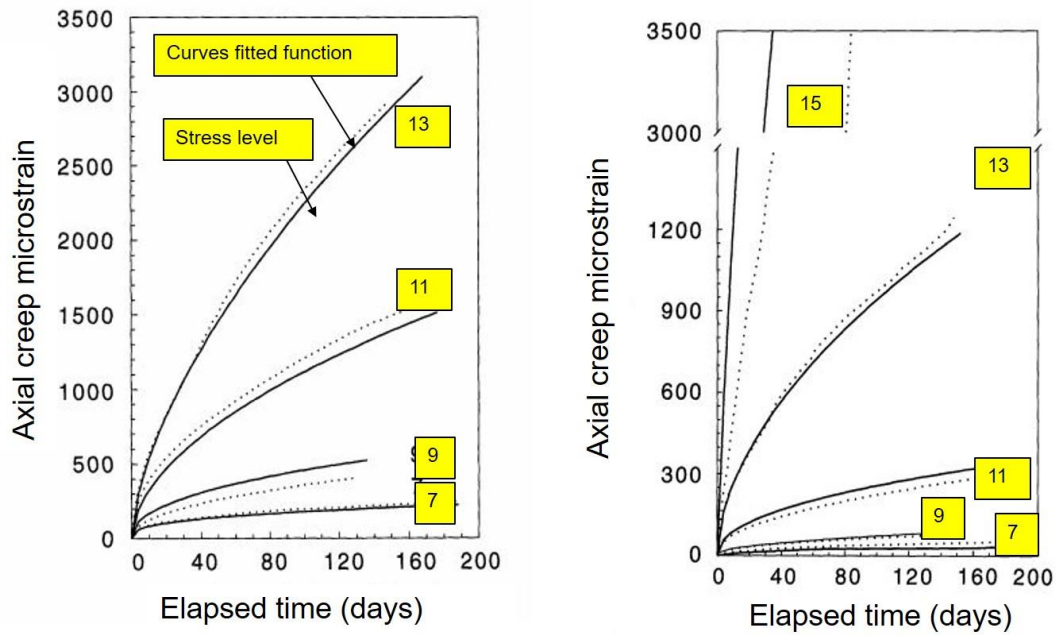
ของเกลือหินได้ เนื่องจากทั้งสองกฎเกณฑ์ไม่มีการพิจารณาผลกระทบของความเค้นหลักกลาง ทั้ง Circumscribed และ Inscribed ของเกณฑ์การแตก Drucker-Prager สามารถทำนายผลการทดสอบ ได้ต่ำกว่าความเค้นหลักสูงสุดในทุกสภาวะของความเค้น

Sriapai et al. (2012) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอัตราการกดของเกลือหินภายใต้การทดสอบการกดในแกนเดียวและสามแกนกับตัวอย่างเกลือหินขนาด  $5.4 \times 5.4 \times 5.4$  cm โดยใช้โครงกดทดสอบ (Polyaxial frame) และกำหนดค่าความเค้นหลักต่ำสุดเท่ากับ 0, 3, 7, 12, 20 และ 28 MPa ในขณะที่อัตราการกดในแนวแกนผันแปรตั้งแต่ 0.001, 0.01, 0.1, 1 และ 10 MPa/s ผลที่ได้พบว่าค่าความแข็งของเกลือหินจะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลและยังทำการสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความเครียดและความเค้นเฉือน ซึ่งสมการดังกล่าวสามารถอธิบายค่าความแข็งของเกลือหินได้ดีในระยะยาว

Fuenkajorn and Phueakphum (2010) ได้ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาผลกระทบของอัตราการกดแบบวัฏจักรของเกลือหินชุดมหาสารคาม ผลจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความแข็งของเกลือหินมีค่าลดลงเมื่อจำนวนของการกดมีค่าสูงขึ้น โดยนำเสนอในสมการแบบ Power และค่าความยืดหยุ่นของเกลือหินจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับวัฏจักรแรกๆ

### 2.3.3 พฤติกรรมการคืบของแร่คาร์บอเนต

Duncan และคณะ (1993) ทำการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการคืบของแร่โพแทช โดยการให้แรงคงที่เป็นระยะเวลาตั้งแต่ 2 ถึง 8 เดือน โดยส่วนมากการทดสอบจะใช้ระยะเวลามากกว่า 4 เดือน เนื่องจากแรงที่ทำให้เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแร่โพแทชอยู่ระหว่าง 9 และ 11 MPa โดยพฤติกรรมการคืบจะน้อยมากเมื่อให้แรงต่ำกว่า 11 MPa ส่วนแรงที่อยู่ระหว่าง 11 และ 13 MPa จะส่งผลให้ค่าความเครียดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนเข้าสู่การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติก และเมื่อให้แรงคงที่เท่ากับ 13 MPa พบว่าการคืบแบบพลาสติกจะเปลี่ยนแปลงเข้าสู่พฤติกรรมแบบเปราะจนกระทั่งหินมีการวิบัติในที่สุด (รูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและเวลาการทดสอบที่ผันแปรอัตราการให้แรง (Duncan และคณะ 1993)

จากการทดสอบข้างต้นสรุปได้ว่าการทดสอบการคืบในช่วงระยะเวลาสั้นน้อยกว่า 1 ปี จะไม่แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการคืบในแนวแกนหลักในช่วงคงที่ โดยจะสามารถสังเกตพฤติกรรมการคืบของแร่โพแทชได้อย่างสมบูรณ์หากทำการทดสอบเป็นระยะเวลายาวกว่า 1 ปี

จะเห็นได้ว่างานวิจัยในอดีตทั้งในและต่างประเทศจะมุ่งเน้นไปที่การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเชิงเวลาและผลกระทบจากความชื้นของเกลือหินเท่านั้น แต่ยังไม่มียานวิจัยใดที่ทำการทดสอบอย่างเป็นระบบในเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาผลกระทบของความชื้นและความเค็มกตที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเกลือหินที่มีแร่คาร์บอเนตเจือปนอยู่ โดยองค์ความรู้นี้จะเป็ประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับภาครัฐและเอกชนที่ดำเนินการเกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมเหมืองแร่โพแทช อีกทั้งยังช่วยเสริมสร้างความเข้าใจด้านความปลอดภัยของเสาค้ำยันและการยุบตัวของผิวดินในพื้นที่เหมืองแร่โพแทชในประเทศไทยด้วย

## บทที่ 3

### การเก็บและจัดเตรียมตัวอย่างหิน

#### 3.1 วัตถุประสงค์

เนื้อหาในบทนี้อธิบายถึงขั้นตอน และวิธีการในการจัดเตรียมตัวอย่างหินคาร์บอนไลท์ที่มีปริมาณแร่คาร์บอนไลท์แตกต่างกันสำหรับใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยแบ่งตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบมีแหล่งกำเนิดในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยดังรูปที่ 3.1

#### 3.2 การเตรียมตัวอย่างหินสำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ตัวอย่างบล็อกหินคาร์บอนไลท์ที่ใช้ในการทดสอบได้คัดเลือกมาจากเกลือหินชั้นล่าง (Lower salt) ของหมวดหินมหาสารคาม ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท อาเซียนโปแตชชัยภูมิ จำกัด (มหาชน) โดยนำมาตัดให้มีรูปร่างและขนาดตามมาตรฐาน ASTM คือมีรูปร่างทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 54×54×108 mm จำนวนไม่น้อยกว่า 100 ตัวอย่าง สำหรับใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว การทดสอบการคืบในแกนเดียว และการทดสอบเพื่อหาผลกระทบของความชื้น (รูปที่ 3.2) การเตรียมตัวอย่างหินได้ใช้น้ำมันพืชแทนการใช้น้ำเพื่อเป็นสารหล่อลื่นขณะทำการตัดตัวอย่างหินเพื่อป้องกันการละลายของแร่คาร์บอนไลท์ ขนาดและความหนาแน่นของตัวอย่างหินแสดงในตารางที่ 3.1 ถึง 3.3 การหาปริมาณแร่คาร์บอนไลท์สามารถทำได้เนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่นของแร่เฮไลต์ และแร่คาร์บอนไลท์ การคำนวณหาปริมาณแร่คาร์บอนไลท์สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของสมการ

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

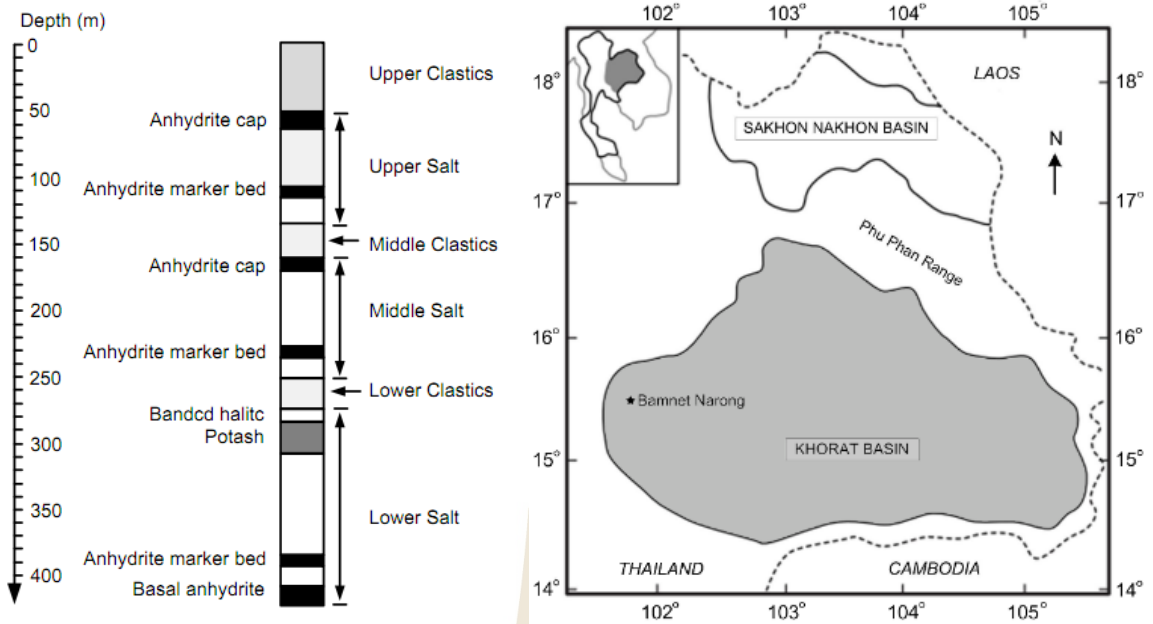
โดยที่

$\rho$  คือ ค่าความหนาแน่นของตัวอย่าง

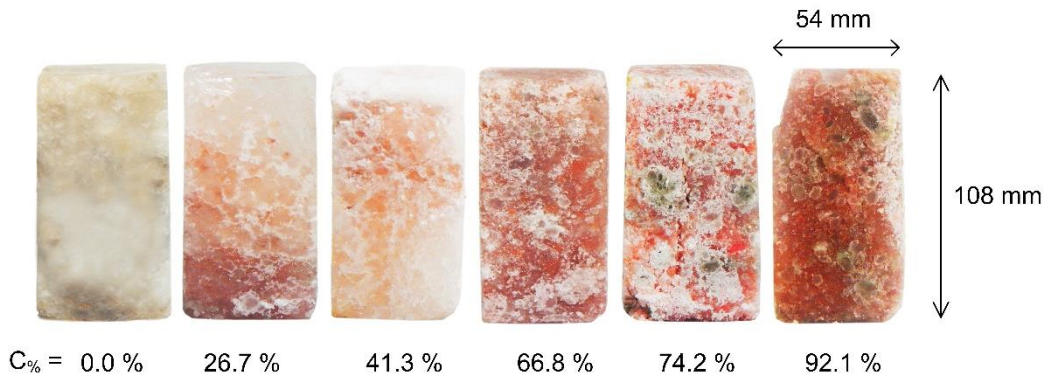
$\rho_s$  คือ ค่าความหนาแน่นของแร่เฮไลต์ (2.16 g/cc)

$\rho_c$  คือ ค่าความหนาแน่นของแร่คาร์บอนไลท์ (1.66 g/cc)





รูปที่ 3.1 แหล่งกำเนิดของตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างหินคาร์บอเนตที่มีแร่คาร์บอเนตไลต์ผิวนแปรตั้งแต่ 0-100%

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกายภาพสำหรับตัวอย่างหินในการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว

ตัวอย่างหิน	ความกว้าง (mm)	ความยาว (mm)	ความสูง (mm)	น้ำหนัก (g)	ความหนาแน่น (g/cc)	C <sub>%</sub>
UCS-01	54.6	53.8	108.9	526.8	1.65	92
UCS-02	54.6	55.2	110.9	623.5	1.86	53
UCS-03	54.5	53.8	110.6	656.0	2.02	24
UCS-04	51.9	49.1	107.4	423.0	1.61	100
UCS-05	54.6	54.9	111.3	569.8	1.71	81
UCS-06	55.0	56.9	107.4	547.0	1.63	95
UCS-07	53.4	53.5	110.4	559.0	1.77	69
UCS-08	54.2	54.7	109.7	590.8	1.82	61
UCS-09	55.8	56.2	110.1	646.8	1.87	51
UCS-10	52.9	53.4	101.8	500.5	1.74	75
UCS-11	53.9	54.3	107.7	561.3	1.78	68
UCS-12	57.0	55.8	110.7	633.3	1.80	65
UCS-13	50.3	53.6	111.2	517.5	1.73	78
UCS-14	54.9	53.4	107.6	600.0	1.90	46
UCS-15	53.4	53.7	108.0	582.3	1.88	50
UCS-16	53.3	56.0	109.5	625.0	1.91	44
UCS-17	52.8	55.7	111.0	541.0	1.66	90
UCS-18	55.2	55.3	109.2	720.3	2.16	0
UCS-19	53.9	53.2	108.9	565.0	1.81	62
UCS-20	55.0	55.7	107.7	694.0	2.10	0
UCS-21	53.1	54.9	107.8	665.3	2.12	0
UCS-22	55.3	56.3	110.0	599.5	1.75	73
UCS-23	55.0	55.3	110.2	577.8	1.72	78
UCS-24	56.3	53.5	105.8	621.5	1.95	37
UCS-25	53.9	53.4	106.5	563.5	1.84	57
UCS-26	54.5	54.7	110.0	541.5	1.65	91
UCS-27	55.6	56.2	110.5	609.8	1.77	70

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกายภาพสำหรับตัวอย่างหินในการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว (ต่อ)

ตัวอย่างหิน	ความกว้าง (mm)	ความยาว (mm)	ความสูง (mm)	น้ำหนัก (g)	ความหนาแน่น (g/cc)	C%
UCS-28	51.0	52.1	106.1	536.3	1.90	46
UCS-29	53.3	53.4	109.1	664.5	2.14	0
UCS-30	54.0	53.6	108.4	581.0	1.85	55
UCS-31	55.5	55.9	110.2	711.3	2.08	14
UCS-32	53.5	54.8	109.7	586.3	1.82	60
UCS-33	57.9	54.1	109.8	639.6	1.86	54
UCS-34	55.0	54.8	110.3	633.4	1.91	45
UCS-35	54.3	54.6	110.4	554.0	1.69	84
UCS-36	54.8	54.1	109.6	641.6	2.06	19
UCS-37	55.6	54.9	110.0	567.0	1.69	84
UCS-38	56.1	57.2	111.6	619.4	1.73	77
UCS-39	57.5	56.8	110.5	604.4	1.67	87
UCS-40	55.1	55.9	110.4	574.9	1.69	84



ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกายภาพสำหรับตัวอย่างเกลือหินในการทดสอบการคืบในแกนเดียว

ตัวอย่างหิน	ความกว้าง (mm)	ความยาว (mm)	ความสูง (mm)	น้ำหนัก (g)	ความหนาแน่น (g/cc)	C <sub>90</sub>
Creep-01	52.02	52.27	108.60	574.40	1.94	38.43
Creep-02	54.92	54.75	108.80	604.20	1.85	55.95
Creep-03	54.97	55.25	109.60	594.40	1.79	66.87
Creep-04	54.35	54.87	108.62	567.10	1.75	73.13
Creep-05	53.92	54.77	109.27	552.70	1.71	79.93
Creep-06	53.70	54.15	110.20	564.10	1.76	71.36
Creep-07	55.75	57.00	113.22	668.80	1.86	53.78
Creep-08	55.67	57.15	113.70	722.70	2.00	28.99
Creep-09	54.10	54.57	108.05	555.30	1.74	74.88
Creep-10	54.95	56.02	109.42	595.50	1.77	70.05
Creep-11	55.72	55.50	109.15	577.30	1.71	80.33
Creep-12	54.15	54.05	109.37	624.10	1.95	37.57
Creep-13	53.30	52.90	105.30	503.50	1.70	82.88
Creep-14	55.30	55.55	109.85	554.90	1.64	92.07
Creep-15	54.92	55.30	109.92	550.60	1.65	91.23
Creep-16	54.32	54.95	109.32	555.10	1.70	81.98
Creep-17	52.90	52.85	99.65	525.30	1.89	49.02
Creep-18	54.85	54.57	108.92	605.60	1.86	54.05
Creep-19	54.70	54.37	108.55	614.20	1.90	46.01
Creep-20	45.97	46.20	89.62	355.50	1.86	52.24
Creep-21	46.35	45.87	90.35	323.20	1.68	85.29
Creep-22	45.50	45.05	92.12	307.60	1.62	94.83
Creep-23	55.10	54.90	107.65	541.30	1.66	88.88
Creep-24	51.95	55.17	110.32	577.20	1.82	59.78
Creep-25	55.12	54.37	109.72	547.50	1.66	88.45
Creep-26	54.77	55.15	110.00	618.50	1.86	53.34
Creep-27	53.95	53.85	109.42	652.40	2.05	19.25

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกายภาพสำหรับตัวอย่างเกลือหินในการทดสอบการคืบในแกนเดียว (ต่อ)

ตัวอย่างหิน	ความกว้าง (mm)	ความยาว (mm)	ความสูง (mm)	น้ำหนัก (g)	ความหนาแน่น (g/cc)	C%
Creep-28	54.17	54.42	109.00	665.60	2.07	15.88
Creep-29	54.12	54.87	109.45	665.60	2.04	20.09
Creep-30	53.80	53.75	108.17	560.00	1.79	66.04
Creep-31	53.70	53.57	108.52	531.60	1.70	81.67
Creep-32	54.70	54.60	107.40	534.00	1.66	88.43
Creep-33	54.42	54.70	109.95	594.20	1.81	61.55
Creep-34	53.55	54.00	110.68	626.50	1.96	36.15
Creep-35	55.71	55.83	109.25	577.40	1.70	82.27
Creep-36	54.25	54.05	107.90	547.70	1.73	76.59
Creep-37	54.85	54.75	108.83	584.40	1.79	66.39
Creep-38	61.70	61.70	149.60	951.00	2.13	5.86
Creep-39	58.65	53.13	108.65	701.88	2.07	15.48
Creep-40	62.40	62.40	120.90	749.00	2.03	23.78
Creep-41	52.80	54.35	108.05	642.00	2.07	15.98
Creep-42	54.00	55.60	112.18	714.83	2.12	6.70
Creep-43	55.45	55.33	108.43	635.60	1.91	44.49
Creep-44	54.33	55.73	109.55	544.60	1.64	92.47
Creep-45	63.10	63.10	138.00	915.00	2.12	6.90
Creep-46	54.39	54.41	108.40	600.30	1.87	51.56
Creep-47	54.75	54.00	109.50	607.50	1.88	50.62
Creep-48	53.00	54.38	109.00	617.00	1.96	34.97
Creep-49	56.75	54.75	109.38	651.90	1.92	43.16
Creep-50	54.88	56.25	109.63	589.80	1.74	74.46

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติทางกายภาพสำหรับตัวอย่างเกลือหินในการทดสอบความชื้น

ตัวอย่างหิน	ความกว้าง (mm)	ความยาว (mm)	ความสูง (mm)	น้ำหนัก (g)	ความหนาแน่น (g/cc)	C <sub>%</sub>
PT-01	42.59	43.29	86.00	268.60	1.69	83.22
PT-02	42.93	42.11	84.51	278.40	1.82	60.27
PT-03	41.69	42.16	85.09	242.30	1.62	96.32
PT-04	43.97	43.89	86.42	278.60	1.67	87.36
PT-05	47.26	42.34	89.62	305.70	1.70	81.26
PT-06	44.12	43.81	87.56	295.00	1.74	74.39
PT-07	44.31	44.03	87.73	294.50	1.72	78.41
PT-08	41.07	41.39	83.08	257.70	1.83	59.81
PT-09	43.73	45.40	90.46	317.20	1.77	70.30
PT-10	43.73	43.14	85.81	268.80	1.66	89.17
PT-11	49.41	48.32	97.72	388.70	1.67	88.19
PT-12	44.99	44.97	88.88	305.00	1.70	82.78
PT-13	42.68	42.27	84.21	261.80	1.72	77.92
PT-14	45.11	44.83	91.21	344.40	1.87	52.24
PT-15	44.34	44.32	90.18	308.10	1.74	75.22
PT-16	47.36	45.33	90.05	319.10	1.65	90.95
PT-17	43.91	45.53	86.75	328.50	1.89	47.40
PT-18	44.96	45.06	90.48	335.20	1.83	59.08
PT-19	50.93	51.74	96.60	513.70	2.02	25.29
PT-20	44.05	43.86	87.81	296.60	1.75	73.47
PT-21	44.81	44.97	89.73	309.10	1.71	80.43
PT-22	45.04	44.62	89.80	301.00	1.67	87.81
PT-23	44.86	44.65	89.17	306.70	1.72	79.04
PT-24	50.14	50.25	95.12	488.10	2.04	22.03
PT-25	45.13	45.15	90.15	381.00	2.07	15.29

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติทางกายภาพสำหรับตัวอย่างเกลือหินในการทดสอบความชื้น (ต่อ)

ตัวอย่างหิน	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)	ความสูง (mm)	น้ำหนัก (g)	ความหนาแน่น (g/cc)	C <sub>%</sub>
PT-26	46.8	81.40	277.00	1.98	32.28
PT-27	45.6	77.50	259.70	2.05	19.12
PT-28	46.5	77.90	257.90	1.95	37.42



## บทที่ 4

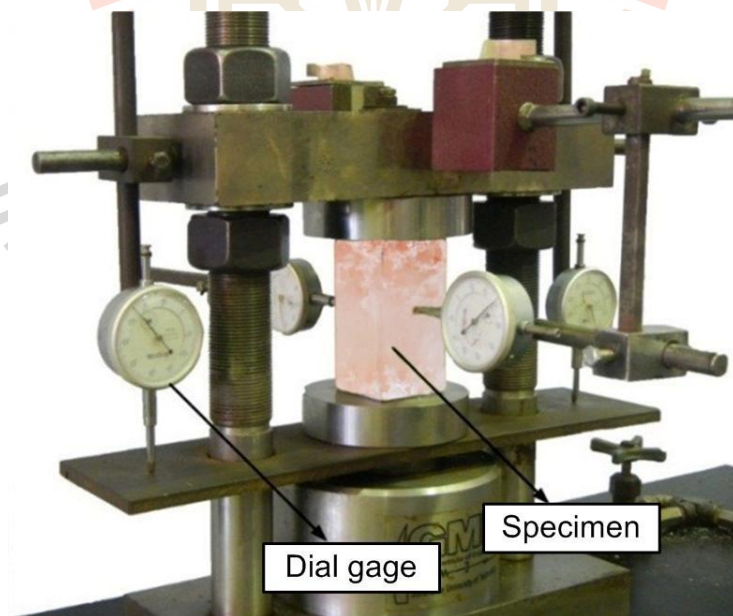
### การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

#### 4.1 วัตถุประสงค์

เนื้อหาในบทนี้ได้อธิบายถึงขั้นตอน วิธีการ และข้อปฏิบัติในการทดสอบ โดยแบ่งออกเป็น 3 ชุดการทดสอบ ได้แก่ การทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว การทดสอบการคืบในแกนเดียว และการทดสอบเพื่อหาผลกระทบของความชื้น มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของหินคาร์บอนิลไลท์ที่มีการผันแปรปริมาณของแร่คาร์บอนิลไลท์ และได้รับผลกระทบจากความชื้น

#### 4.2 การทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว

การทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว (Uniaxial compression test) มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่ากำลังรับแรงกดหรือความเค้นสูงสุดในแกนเดียวของแท่งตัวอย่างหินคาร์บอนิลไลท์ที่มีการผันแปรปริมาณของแร่คาร์บอนิลไลท์ตั้งแต่ 0-100% การทดสอบได้ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D 7012-07 และ ISRM (Bieniawski and Bernede, 1978) โดยตัวอย่างหินจะถูกกดตามแนวแกนด้วยอัตราเร็วเท่ากับ 0.1 MPa/s ด้วยเครื่องทดสอบ (Loading machine) แสดงดังรูปที่ 4.1 ในขณะที่ทำการทดสอบได้ติดตั้งมาตรวัด (Dial gage) เพื่อวัดค่าความเครียดในแนวแกนและในแนวตั้งฉาก ซึ่งค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว ( $\sigma_c$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการ



รูปที่ 4.1 การติดตั้งตัวอย่างหินในเครื่องทดสอบในแกนเดียว



$$\sigma_c = P/A \quad (4.1)$$

โดยที่ P คือ แรงกดสูงสุดที่ทำให้เกิดการวิบัติ  
A คือ พื้นที่หน้าตัดของแท่งตัวอย่างหิน

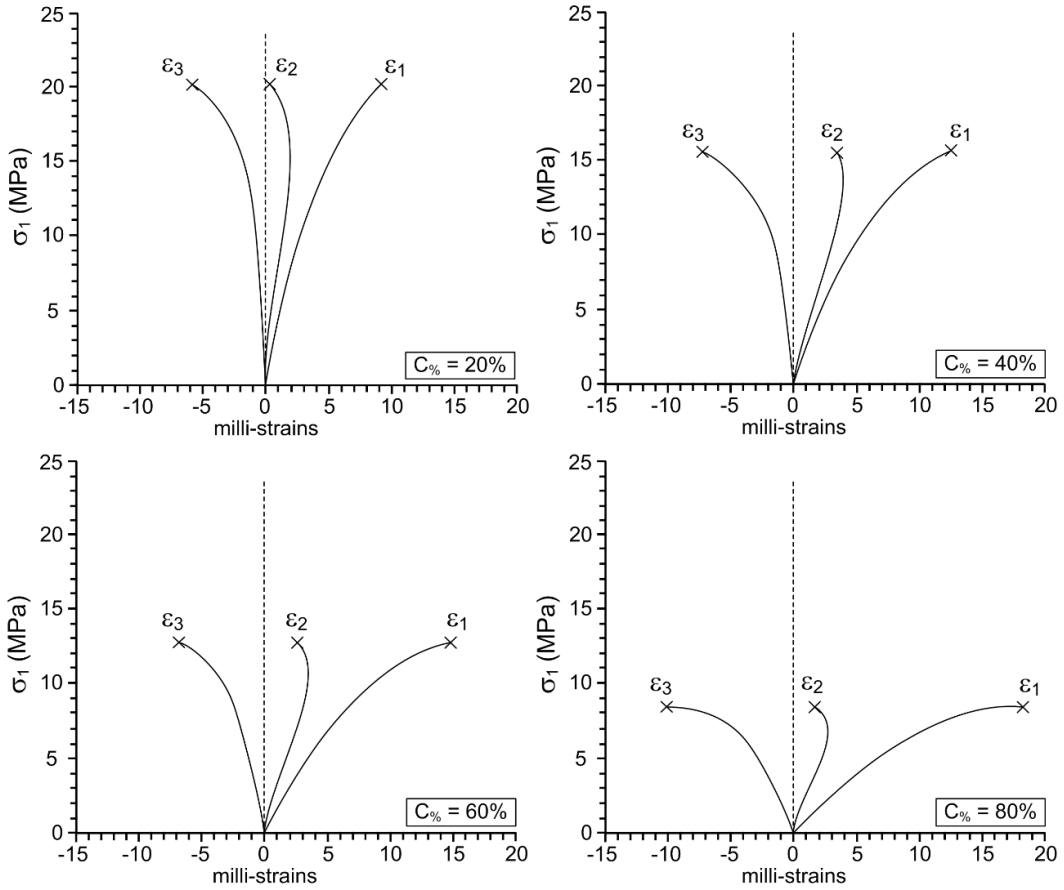
ตัวอย่างหินที่นำมาทดสอบในการศึกษาครั้งนี้มีการกระจายตัวของปริมาณแร่คาร์แนลไลต์ในระดับต่างๆ ค่อนข้างแตกต่างกัน กล่าวคือ ตัวอย่างหินที่มีปริมาณแร่คาร์แนลไลต์น้อยกว่า 60% จะมีการกระจายตัวของแร่คาร์แนลไลต์ไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งตัวอย่าง สามารถแยกแยะระหว่างเกลือหินและแร่คาร์แนลไลต์ได้อย่างชัดเจน และเมื่อปริมาณคาร์แนลไลต์มีค่ามากกว่า 60% ขึ้นไป การกระจายตัวของแร่คาร์แนลไลต์จะค่อนข้างสม่ำเสมอทั่วทั้งตัวอย่าง จึงทำให้เนื้อหินมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น หลังจากการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวสามารถระบุได้ว่า ในตัวอย่างหินที่มีการเจือปนของแร่คาร์แนลไลต์ในปริมาณน้อย รอยแตกส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างผลึกเกลือหินกับแร่คาร์แนลไลต์ได้ง่ายกว่าการเกิดในเกลือหินเอง ส่วนตัวอย่างหินที่มีปริมาณแร่คาร์แนลไลต์สูงส่วนใหญ่จะมีการวิบัติในบริเวณรอยต่อระหว่างผลึกเกลือหินกับแร่คาร์แนลไลต์และในตัวแร่คาร์แนลไลต์เอง เนื่องด้วยคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของแร่คาร์แนลไลต์ค่อนข้างอ่อนกว่าเกลือหินเป็นอย่างมาก รูปที่ 4.2 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเกลือหินที่มีการเจือปนของแร่คาร์แนลไลต์ประมาณ 20%, 40%, 60% และ 80% ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างเกลือหินที่มีการเจือปนของแร่คาร์แนลไลต์มากจะมีค่าความเค้นลดลงในขณะที่ค่าความเครียดเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งภายใต้ตัวอย่างเกลือหินที่มีปริมาณแร่คาร์แนลไลต์เจือปนอยู่มาก รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นสูงสุดในแกนเดียว ( $\sigma_c$ ) ในฟังก์ชันของปริมาณการเจือปนของแร่คาร์แนลไลต์ในตัวอย่างเกลือหิน

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่ากำลังรับแรงที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ( $\sigma_{c,d}$ ) และค่ากำลังรับแรงสูงสุดในแกนเดียว ( $\sigma_{c,f}$ ) มีค่าลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลเมื่อมีปริมาณแร่คาร์แนลไลต์เพิ่มขึ้น โดยสามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวกับปริมาณแร่คาร์แนลไลต์ได้ดังสมการต่อไปนี้

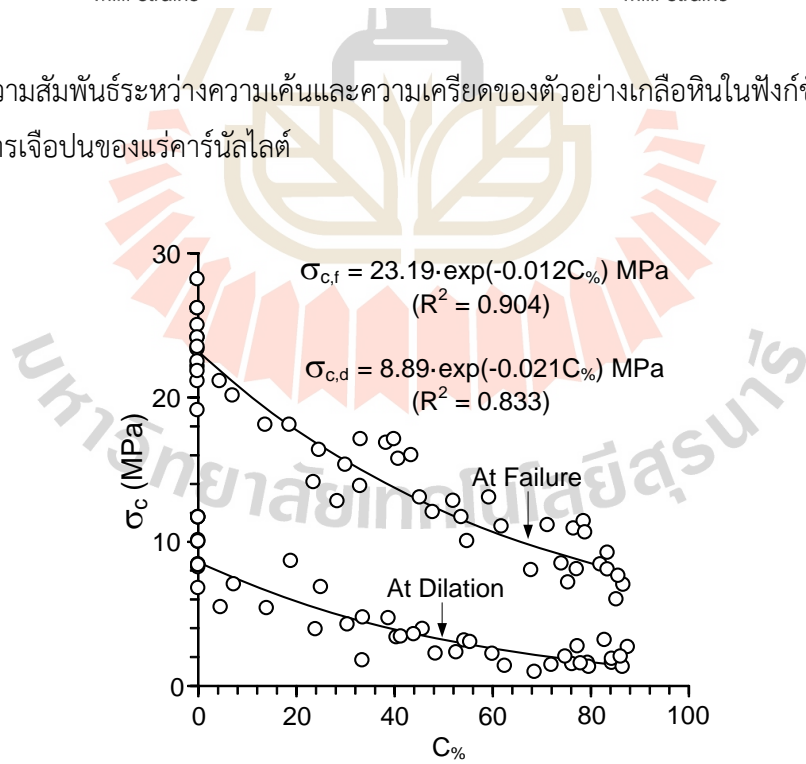
$$\sigma_{c,d} = 8.89 \cdot \exp(-0.021 \cdot c\%) \quad \text{MPa} \quad (4.2)$$

$$\sigma_{c,f} = 23.19 \cdot \exp(-0.012 \cdot c\%) \quad \text{MPa} \quad (4.3)$$

สมการดังกล่าวมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับข้อมูลการทดสอบ โดยมีค่า  $R^2$  มากกว่า 0.8



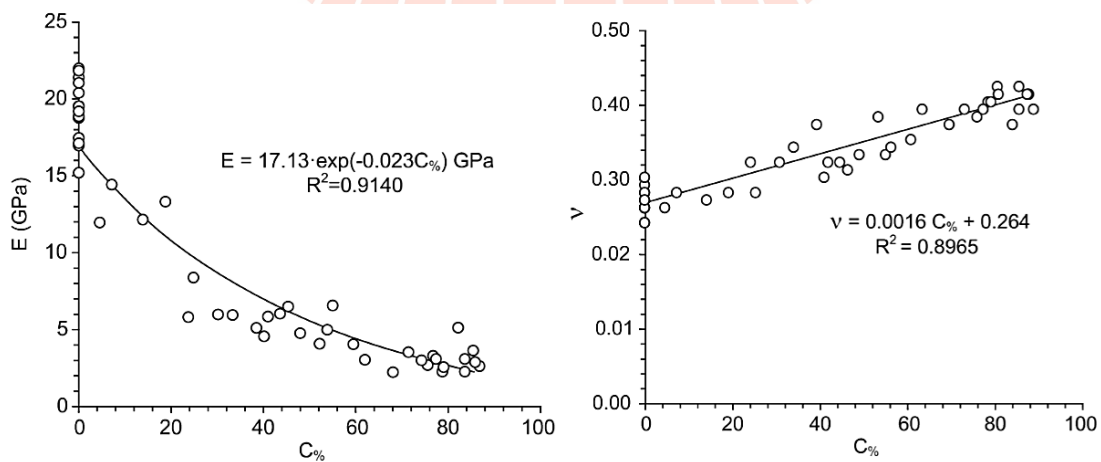
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างเกลือหินในฟังก์ชันของปริมาณการเจือปนของแร่คาร์บอนิลไลต์



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงกดในแกนเดียวที่ผันแปรปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์ตั้งแต่ 0-100% ที่ จุดแตกและจุดเปลี่ยนแปลง

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสามารถบอกได้ว่าหินมีการตอบสนองต่อแรงที่มากระทำอย่างไร ซึ่งโดยส่วนใหญ่พฤติกรรมทางด้านกลศาสตร์ของหินในเชิงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้แรงที่มากระทำจะนำเสนอในรูปของสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E) และอัตราส่วนปัวซองส์ (ν) โดยสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองส์สามารถคำนวณได้จากความเค้นและความเครียดที่จุด 50% ของความเค้นสูงสุด เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างหินจะเห็นได้ว่า สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมีค่าลดลงเมื่อปริมาณการเจือปนของแร่คาร์บอนิลต์เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (a) ผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างแร่คาร์บอนิลต์บริสุทธิ์จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นน้อยกว่า 2 GPa อย่างไรก็ตามค่าอัตราส่วนปัวซองส์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อปริมาณการเจือปนของแร่คาร์บอนิลต์เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.4 (b) จึงสามารถสรุปได้ว่าแร่คาร์บอนิลต์มีแนวโน้มที่จะเสียรูปได้ง่ายกว่าแร่เฮไลต์ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะแร่คาร์บอนิลต์ไม่มีแนวแตก (Cleavage) และมีค่าความแข็งน้อยกว่าแร่เฮไลต์

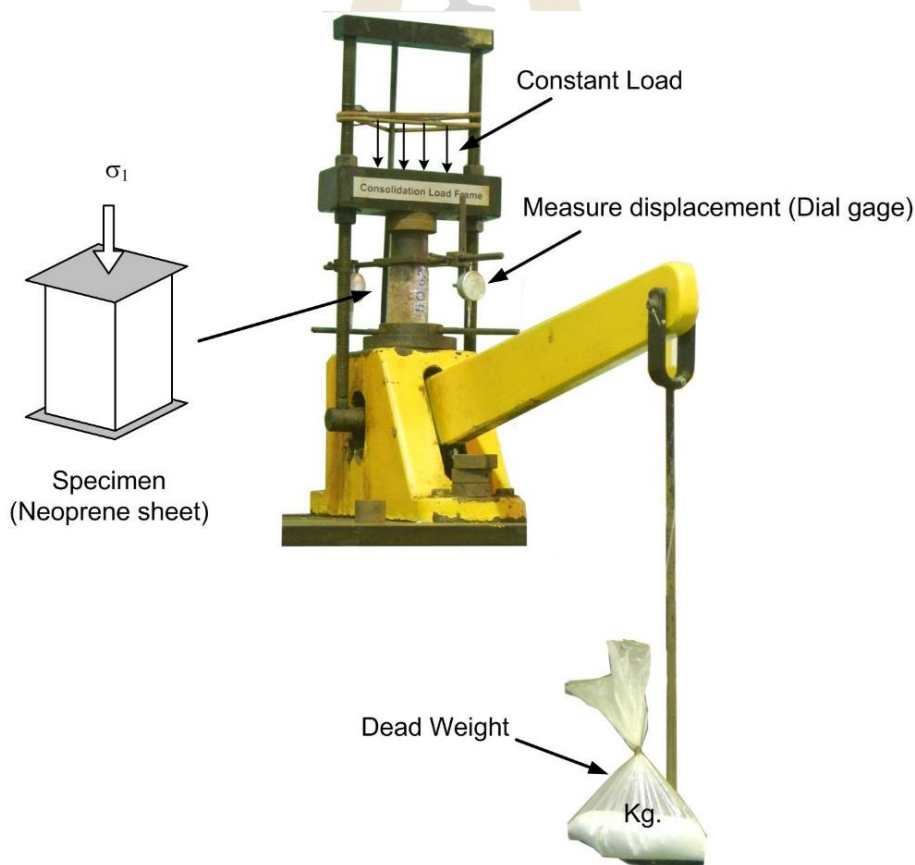
ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสามารถบอกได้ว่าหินมีการตอบสนองต่อแรงที่มากระทำอย่างไร ซึ่งโดยส่วนใหญ่พฤติกรรมทางด้านกลศาสตร์ของหินในเชิงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้แรงที่มากระทำจะนำเสนอในรูปของสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E) และอัตราส่วนปัวซองส์ (ν) โดยสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองส์สามารถคำนวณได้จากความเค้นและความเครียดที่จุด 50% ของความเค้นสูงสุด เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างหินจะเห็นได้ว่า สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมีค่าลดลงเมื่อปริมาณการเจือปนของแร่คาร์บอนิลต์เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (a) ผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างแร่คาร์บอนิลต์บริสุทธิ์จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นน้อยกว่า 2 GPa อย่างไรก็ตามค่าอัตราส่วนปัวซองส์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อปริมาณการเจือปนของแร่คาร์บอนิลต์เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.4 (b) จึงสามารถสรุปได้ว่าแร่คาร์บอนิลต์มีแนวโน้มที่จะเสียรูปได้ง่ายกว่าแร่เฮไลต์ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะแร่คาร์บอนิลต์ไม่มีแนวแตก (Cleavage) และมีค่าความแข็งน้อยกว่าแร่เฮไลต์



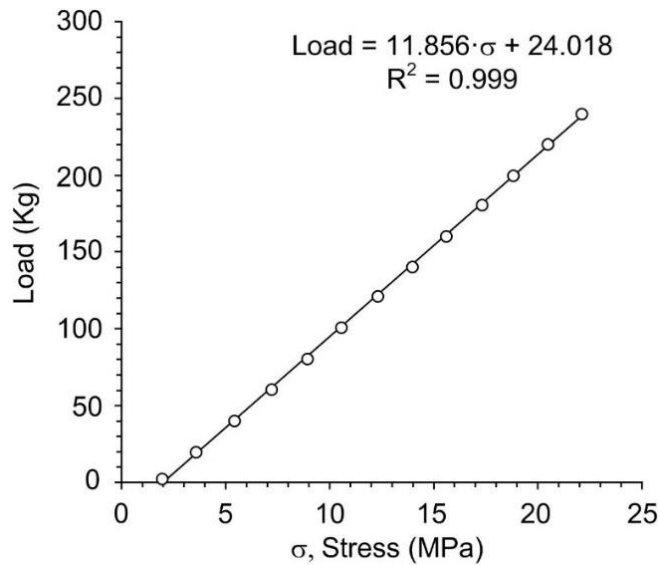
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (a) และอัตราส่วนปัวซองส์ (b) ในฟังก์ชันของปริมาณการเจือปนของแร่คาร์บอนิลต์

### 4.3 การทดสอบการคืบในแกนเดียว

การทดสอบการคืบในแกนเดียวมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างหินเชิงเวลาภายใต้ความเค้นกดคงที่ในแกนเดียว ( $\sigma_3=0$ ) รูปที่ 4.5 แสดงวิธีการทดสอบการคืบในแกนเดียวโดยใช้คานทดสอบแรงและตุ้มน้ำหนัก การทดสอบได้กำหนดค่าความเค้นกดคงที่เท่ากับ 2, 4, 6.5, 9.6, 13 และ 16 MPa ตามลำดับ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเสียรูปของหินคาร์บอนิลไลท์ที่มีการผันแปรปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์ตั้งแต่ 0-100% โดยได้ดำเนินการทดสอบอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 21 วัน และใช้ตัวอย่างหินไม่น้อยกว่า 15 ตัวอย่าง ก่อนทำการติดตั้งตัวอย่างหินในเครื่องทดสอบการคืบได้ทำการห่อหุ้มหินด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันตัวอย่างหินจากความชื้นขณะทำการทดสอบ จากนั้นจึงหุ้มด้วยแผ่น Neoprene บริเวณด้านบนและล่างที่เป็นพื้นที่รับแรง เพื่อลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างเนื้อหินและแผ่นเหล็ก สำหรับการคำนวณหาความสัมพันธ์ของแรงและน้ำหนักที่ใช้ในการให้แรงบนตัวอย่างหินแสดงดังสมการในรูปที่ 4.6 ระหว่างการทดสอบได้ทำการติดตั้งมาตรวัดในแนวแกน เพื่อตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวในขณะที่ตัวอย่างหินอยู่ภายใต้แรงกดคงที่ เพื่อนำมาคำนวณหาค่าความเครียดที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4.5 รูปแบบการทดสอบการคืบในแกนเดียวโดยใช้คานทดสอบแรงและตุ้มน้ำหนัก

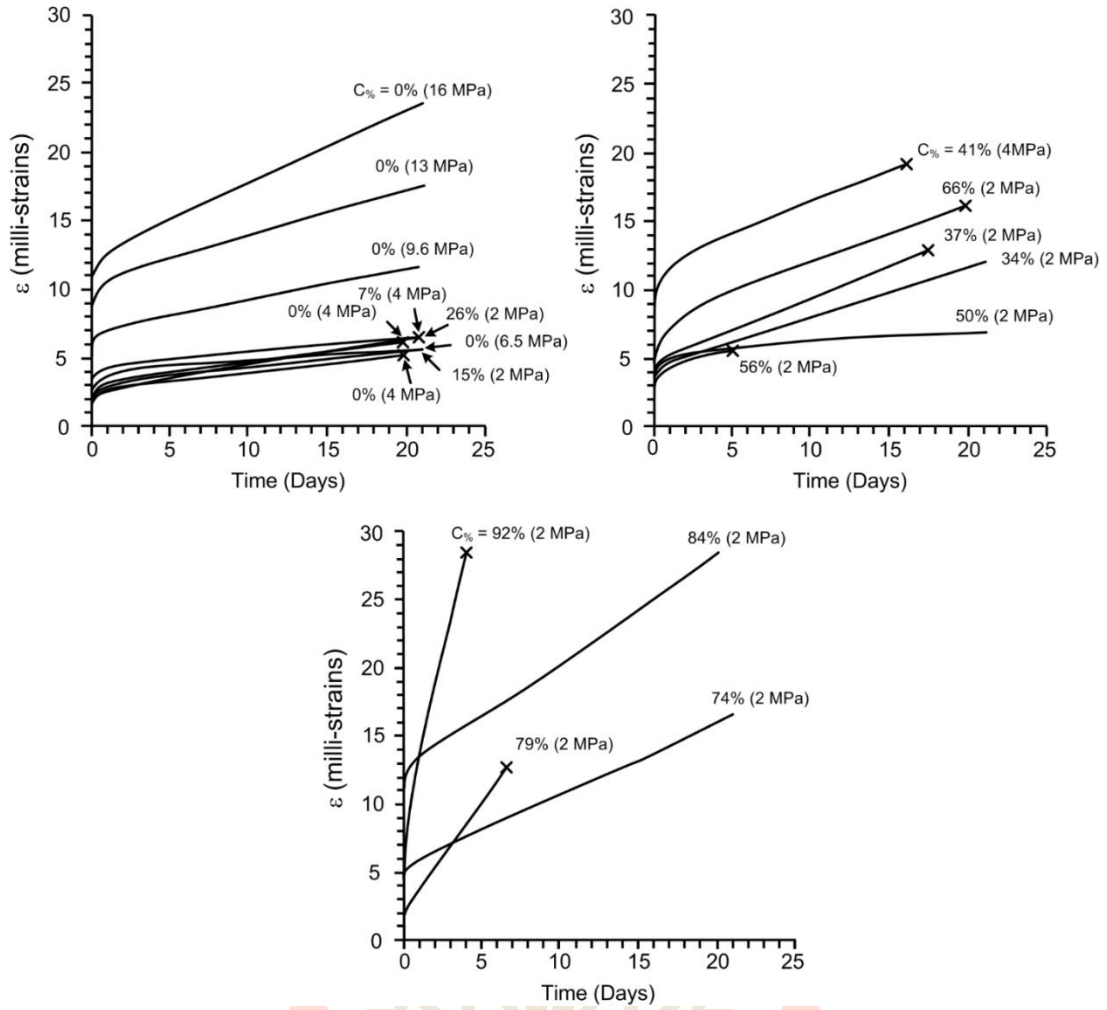


**รูปที่ 4.6** การสอบเทียบอัตราส่วนของแรงโดย Electronic load cell อัตราส่วนนี้ได้นำมาใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแท่งตัวอย่างหิน

รูปที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบการคืบในแกนเดียวที่สัมพันธ์ในเชิงเวลา จากกราฟแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการคืบในช่วงทันทีทันใด (Instantaneous) พฤติกรรมการคืบในช่วงสั้น (Transient) และพฤติกรรมการคืบช่วงคงที่ (Steady-state) ของหินคาร์บอนิลไลท์ที่ผันแปรปริมาณแร่คาร์บอนิลไลท์ตั้งแต่ 0-100% ผลการทดสอบระบุว่าค่าความเครียดเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีปริมาณแร่คาร์บอนิลไลท์สูง พฤติกรรมการคืบดังกล่าวมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Fuenkajorn (2007) เป็นอย่างดี โดยตัวอย่างหินคาร์บอนิลไลท์ที่มีปริมาณแร่คาร์บอนิลไลท์สูงและอยู่ภายใต้แรงกดสูงจะเกิดการวิบัติก่อนระยะเวลา 21 วัน ตามที่กำหนดไว้ในกาทดสอบ

#### 4.4 การทดสอบเพื่อหาผลกระทบของความชื้น

การทดสอบเพื่อหาผลกระทบของความชื้นมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการละลายของมวลแร่คาร์บอนิลไลท์ภายใต้ความชื้นเท่ากับ 95% วิธีการทดสอบทำได้โดยนำแท่งตัวอย่างหินบรรจุในภาชนะปิดที่มีการควบคุมความชื้นในระดับที่กำหนด โดยใช้อุปกรณ์ที่แสดงดังรูปที่ 4.8 ขณะทำการทดสอบได้ทำการจดค่าความชื้นและตรวจวัดอุณหภูมิทุกครั้งชั่วโมงเป็นเวลาทั้งสิ้น 60 ชั่วโมง โดยในการทดสอบได้ใช้ตัวอย่างหินทั้งหมด 7 ตัวอย่าง

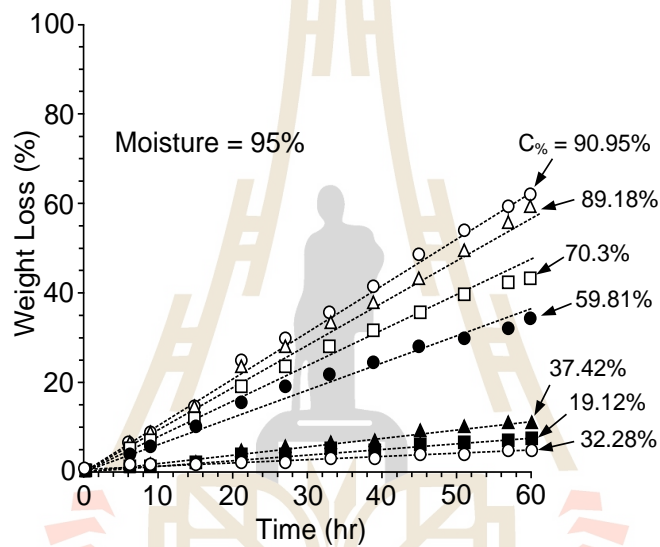


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวแกนหลักและระยะเวลาในการทดสอบที่ผันแปรตามปริมาณแร่คาร์บอนไฟต์ตั้งแต่ 0-100%



รูปที่ 4.8 อุปกรณ์การตรวจวัดความชื้น

ผลการทดสอบเพื่อหาผลกระทบจากความชื้นที่สัมพันธ์ในเชิงเวลาระบุว่า ตัวอย่างหินที่มีปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์เจือปนมากทำให้เกิดการละลายหายไปของมวลหินที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของแร่คาร์บอนิลไลต์มีน้ำเป็นองค์ประกอบ จึงทำให้มีปฏิกิริยาอย่างมากต่อความชื้น (รูปที่ 4.9) ในทางกลับกันความชื้นแทบจะไม่มีผลกระทบต่อหินที่มีปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์เจือปนน้อยหรือเป็นหินเกลือบริสุทธิ์เลย โดยเปอร์เซ็นต์การหายไปของน้ำหนักน้อยกว่า 10% รูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าอัตราการเสียน้ำหนักต่อเวลาของแท่งตัวอย่างหินจะเป็นเชิงเส้นตรง ซึ่งปรากฏในทุกตัวอย่างไม่ว่าจะมีการเจือปนของปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์มากน้อยเพียงใด และอัตราการเสียน้ำหนักนี้จะสูงขึ้นถ้ามีแร่คาร์บอนิลไลต์เจือปนอยู่มาก



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลกระทบจากความชื้นต่อหินคาร์บอนิลไลต์ที่มีการผันแปรปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์

## บทที่ 5

### การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

#### 5.1 วัตถุประสงค์

พฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเชิงเวลาของหินคาร์บอนิลไทท์ภายใต้แรงกดในแกนเดียว ได้ถูกนำมาวิเคราะห์โดยใช้สมการความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย Fuenkajorn และ Daemen (1988) ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของแบบจำลอง Burgers อีกทั้งยังได้ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการคืบของแท่งตัวอย่างหินคาร์บอนิลไทท์ภายใต้การผันแปรปริมาณและรูปแบบการกระจายตัวของแร่คาร์บอนิลไลต์ด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยการใช้โปรแกรม FLAC 4.0 (Itasca, 1992)

#### 5.2 การสอบเทียบผลการทดสอบ

ผลการทดสอบในบทที่ 4 ได้ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของตัวอย่างหินคาร์บอนิลไทท์ที่มีการผันแปรปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์ตั้งแต่ 0-100% ภายใต้การให้ความเค้นในแกนเดียวเชิงเวลา ผลการทดสอบดังกล่าวถูกนำมาสอบเทียบ (Calibrate) เพื่อให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติการเปลี่ยนรูปร่างเชิงเวลา (Creep) ที่มีความเกี่ยวข้องกับความหนืดเชิงยืดหยุ่น (Visco-elastic) และเชิงพลาสติก (Visco-plastic) โดยสมการเชิงคณิตศาสตร์ของ Fuenkajorn และ Daemen (1988) ได้ถูกนำมาพัฒนาในรูปแบบของสมการความหนืดแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง (Linear visco-elastic) สำหรับใช้ในการสอบเทียบค่าคงที่ให้อยู่บนพื้นฐานของแบบจำลอง Burgers ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบของความเครียด ( $\epsilon$ ) และฟังก์ชันของเวลาดังสมการ

$$\epsilon = \sigma \left[ \frac{1}{E_1} + \frac{t}{\eta_1} + \left( \frac{1}{E_2} \cdot (1 - \exp(-E_2 \cdot \frac{t}{\eta_2})) \right) \right] \quad (5.1)$$

โดยที่  $\epsilon$  คือ ความเครียดในเชิงเวลา

$\sigma$  คือ ความเค้น

$E_1$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์เชิงยืดหยุ่น

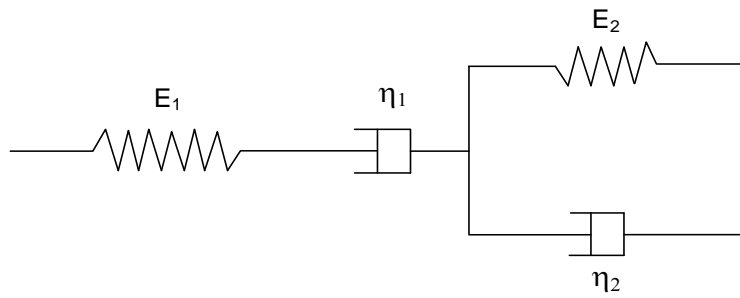
$E_2, \eta_2$  คือ ค่าความหนืดเชิงยืดหยุ่น

$\eta_1$  คือ ค่าความหนืดเชิงพลาสติก

$t$  คือ เวลา

รูปที่ 5.1 แสดงองค์ประกอบของแบบจำลอง Burgers ซึ่งประกอบด้วยค่าคงที่  $E_1, E_2, \eta_1$  และ  $\eta_2$  ตารางที่ 5.1 สรุปผลที่ได้จากการสอบเทียบค่าคงที่จากแบบจำลอง Burgers ภายใต้การผันแปรปริมาณของแร่คาร์บอนิลไลต์ที่ใช้ในการทดสอบ รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ของชุดค่าคงที่จากการสอบเทียบด้วย

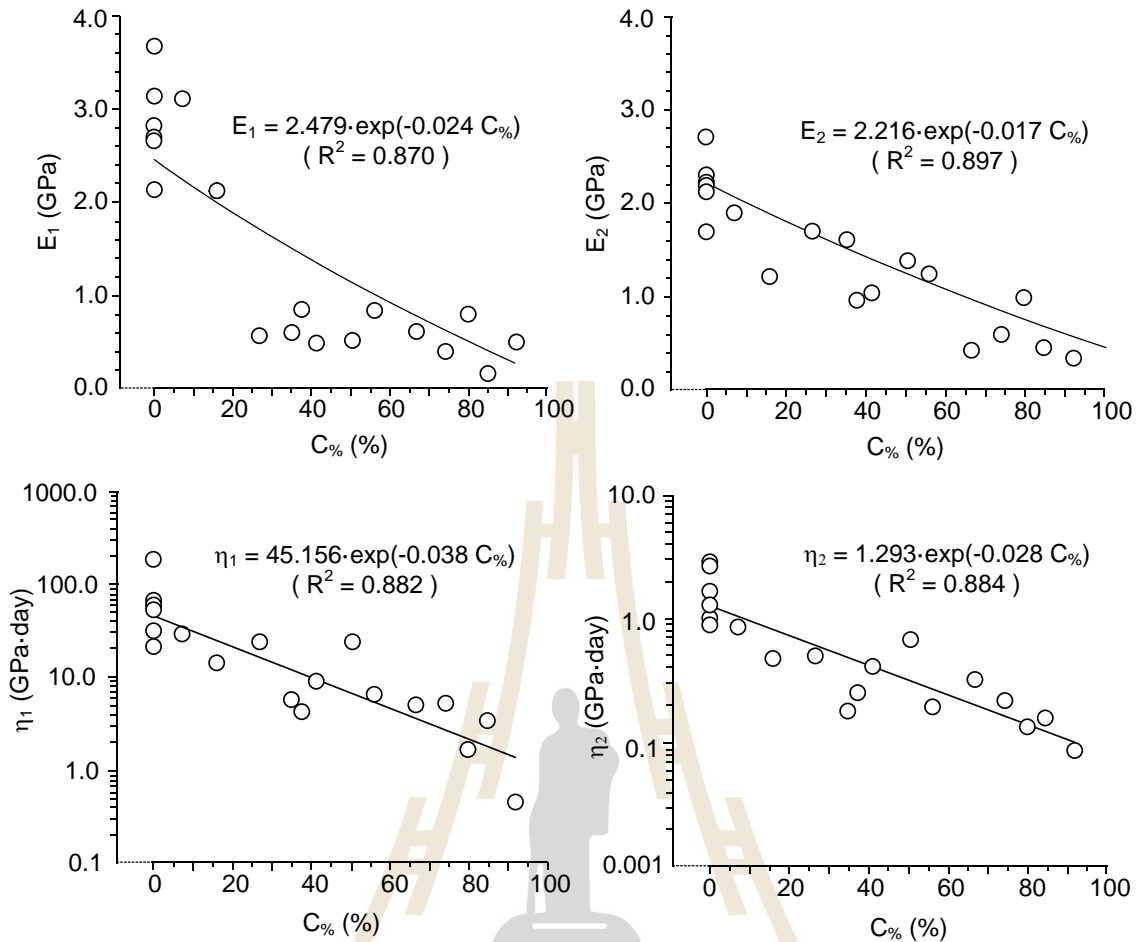




รูปที่ 5.1 องค์ประกอบของแบบจำลอง Burgers

ตารางที่ 5.1 ผลการสอบเทียบค่าคงที่จากการทดสอบการคืบการในแกนเดียว

ปริมาณแร่คาร์บอนิล (%)	ค่าคงที่จากแบบจำลอง Burgers			
	$E_1$ (GPa)	$E_2$ (GPa)	$\eta_1$ (GPa·Day)	$\eta_2$ (GPa·Day)
0.0	2.1	2.3	51.2	2.7
0.0	2.7	2.2	27.4	1.3
0.0	2.7	2.7	180.6	2.8
0.0	3.2	2.2	47.1	1.7
0.0	3.7	1.7	42.6	1.0
0.0	2.8	2.2	32.0	1.0
7.1	3.1	1.9	27.5	0.9
15.9	2.1	1.2	13.8	0.5
26.7	0.6	1.6	20.2	0.2
34.9	0.6	1.6	5.5	0.2
37.6	0.8	1.0	4.1	0.3
41.3	0.5	1.0	8.9	0.4
50.6	0.5	1.4	22.6	0.7
56.0	0.9	1.3	6.3	0.2
66.8	0.6	0.4	4.8	0.3
74.2	0.4	0.6	5.0	0.2
79.9	0.8	1.0	1.6	0.1
84.8	0.2	0.5	3.3	0.2
92.1	0.5	0.4	0.4	0.1



รูปที่ 5.2 ชุดค่าคงที่จากการสอบเทียบด้วยแบบจำลอง Burgers ภายใต้การผันแปรปริมาณของแร่คาร์บอนิลไลต์

แบบจำลอง Burgers ในฟังก์ชันของปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์ ผลการทดสอบสามารถอธิบายได้ด้วยพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ที่ซับซ้อนของวัสดุที่แตกต่างกันสองชนิด คือ แร่เฮไลท์ และแร่คาร์บอนิลไลต์ กล่าวคือตัวอย่างหินที่มีปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์เท่ากับ 100% จะมีค่าคงที่  $E_1$  และ  $E_2$  ต่ำมาก ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าตัวอย่างหินที่มีแร่คาร์บอนิลไลต์บริสุทธิ์จะส่งผลให้พฤติกรรมการคืบมีแนวโน้มที่จะอยู่ในรูปแบบของ Maxwell หรือในรูปแบบของความหนืดเชิงยืดหยุ่นต่ำ โดยยืนยันได้จากค่าความยืดหยุ่นของตัวอย่างหินที่มีปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์ 100% จากการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว สามารถใช้สมการเอ็กซีโพเนนเชียล ในการอธิบายความสัมพันธ์ของค่าคงที่ Burgers และปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์ได้ดังนี้

$$E_1 = \alpha \exp(-\alpha' \cdot C\%) \quad (5.2)$$

$$E_2 = \beta \exp \cdot (-\beta' \cdot C_{\%}) \quad (5.3)$$

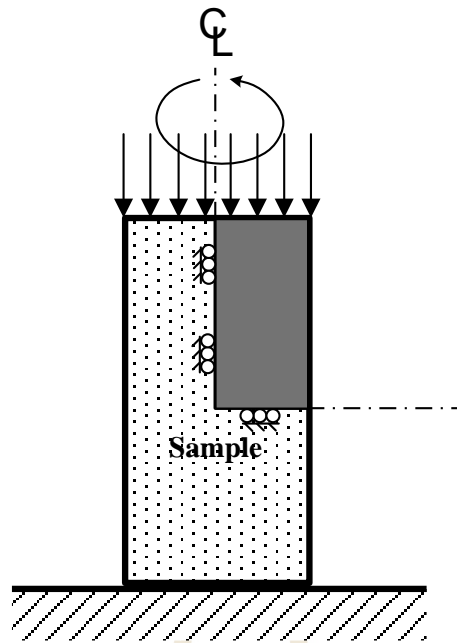
$$\eta_1 = \gamma \exp \cdot (-\gamma' \cdot C_{\%}) \quad (5.4)$$

$$\eta_2 = \delta \exp \cdot (-\delta' \cdot C_{\%}) \quad (5.5)$$

โดยที่  $\alpha$ ,  $\alpha'$ ,  $\beta$ ,  $\beta'$ ,  $\gamma$ ,  $\gamma'$ ,  $\delta$  และ  $\delta'$  คือค่าตัวแปรเชิงคณิตศาสตร์มีค่าเท่ากับ 2.479 GPa, 0.024, 2.216 GPa, 0.017, 45.156 GPa·day, 0.038, 1.293 GPa·day และ 0.028 ตามลำดับ สมการดังกล่าวมีความสอดคล้องเป็นอย่างดีกับข้อมูลการทดสอบที่มีค่า  $R^2$  มากกว่า 0.8

### 5.3 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

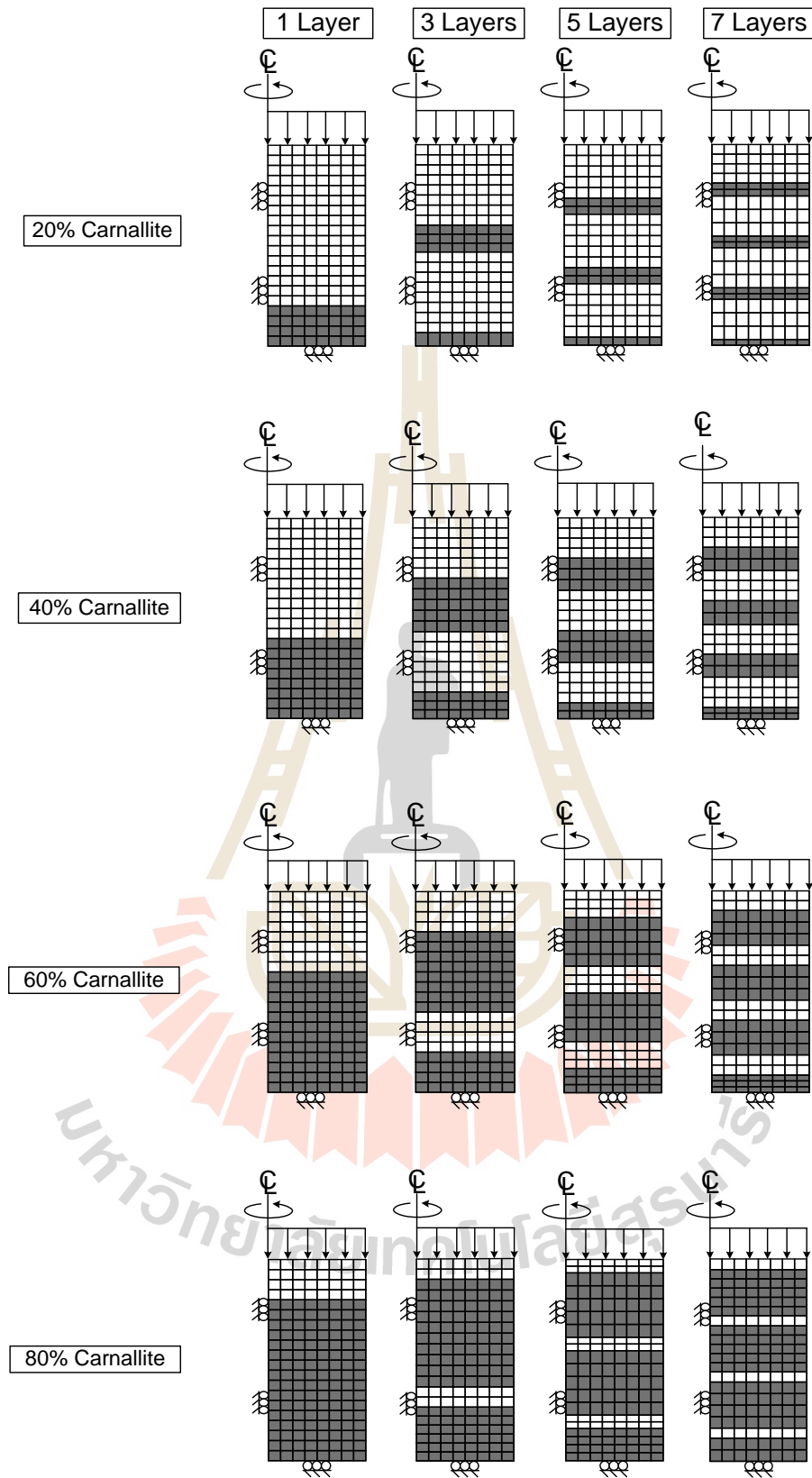
โปรแกรม FLAC 4.0 (Finite difference method) ได้ถูกใช้เพื่อทำการจำลองลักษณะของแท่งตัวอย่างหินภายใต้สภาวะความเค้นกดในแกนเดียวคงที่ซึ่งเวลาเท่ากับ 2 MPa ที่มีการผันแปรปริมาณแร่คาร์บอนิลต์ตั้งแต่ 20%, 40%, 60% ถึง 80% และมีการกระจายตัวของแร่ภายในตัวอย่างหินในรูปแบบต่างๆ กล่าวคือ แร่คาร์บอนิลต์มีการวางตัวเป็นชั้นหนาแยกออกจากชั้นแร่เฮไลต์ จนถึงลักษณะที่แร่คาร์บอนิลต์แทรกตัวเป็นชั้นบางๆ อยู่ภายในแท่งตัวอย่างหิน ซึ่งแบ่งออกเป็น 1, 3, 5 และ 7 ชั้นตามลำดับ โดยทำการจำลองเพียง 1 ใน 4 ส่วนของแท่งตัวอย่างหินเท่านั้น (รูปที่ 5.3) เนื่องจากแท่งตัวอย่างมีความสมมาตรและมีคุณสมบัติที่เท่ากันในทุกทิศทาง ซึ่งเป็นการลดความซับซ้อนและจำนวนข้อมูลในการจำลองให้น้อยลง คุณสมบัติการคืบของแร่เฮไลต์และแร่คาร์บอนิลต์ที่ใช้ในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ได้กำหนดให้มีค่าเท่ากับผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองของ Burgers จากสมการ 5.2 ถึง 5.3 ดังแสดงในตารางที่ 5.2 โดยค่าคงที่  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\eta_1$  และ  $\eta_2$  ที่นำมาใช้ในแบบจำลองเพื่อจำลองการคืบของตัวอย่าง ได้นำมาเฉพาะตัวอย่างแร่เฮไลต์ (0%=0) และตัวอย่างแร่คาร์บอนิลต์ (0%>90) สำหรับคุณสมบัติด้านความแข็งของแร่เฮไลต์และแร่คาร์บอนิลต์ได้อ้างอิงมาจากผลการทดสอบของ Luangthip และคณะ (2016) รูปที่ 5.4 แสดงรูปแบบการจำลองของตัวอย่างหินที่มีการผันแปรปริมาณและการกระจายตัวของแร่คาร์บอนิลต์



รูปที่ 5.3 พื้นที่หนึ่งในสี่ส่วนของแท่งตัวอย่างหินที่ทำการจำลองทางคอมพิวเตอร์

ตารางที่ 5.2 ค่าคุณสมบัติของแร่เฮไลต์และแร่คาร์เนลไลต์ที่ใช้ในการจำลองทางคอมพิวเตอร์

ตัวแปร	แร่เฮไลต์	แร่คาร์เนลไลต์
Elastic modulus ( $E_1$ , GPa)	2.48	0.22
Spring constant in visco-elastic phase ( $E_2$ , GPa)	2.22	0.40
Visco-plastic viscosity ( $\eta_1$ , GPa·day)	45.16	1.01
Visco-elastic viscosity ( $\eta_2$ , GPa·day)	1.29	0.08
Poisson's ratio ( $\nu$ )	0.27	0.40
Shear modulus ( $G$ , GPa)	6.66	0.66
Bulk modulus ( $K$ , GPa)	12	3
Tensile strength ( $T$ , MPa)	1.88	0.23



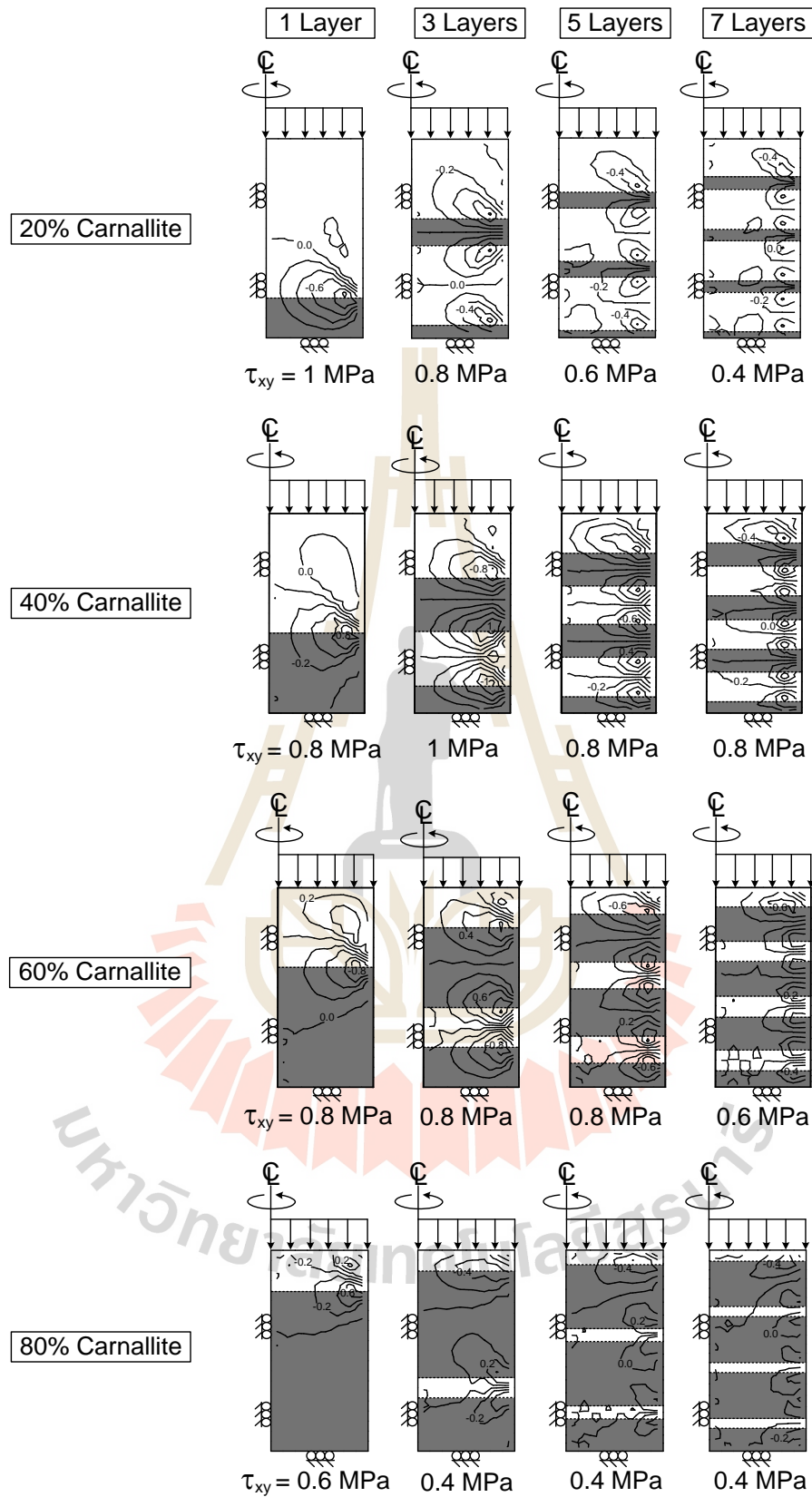
รูปที่ 5.4 รูปแบบจำลองชุดหินตัวอย่างของการทดสอบการคืบในแกนเดียวที่มีปริมาณและการกระจายตัวของแร่คาร์เนลไลต์แตกต่างกัน (ส่วนของแร่คาร์เนลไลต์คือพื้นที่สีเทา)

รูปที่ 5.5 แสดงผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ของตัวอย่างหินที่มีการผันแปรปริมาณและการกระจายตัวของแร่คาร์บอเนตภายใต้สภาวะความเค้นกดในแกนเดียวคงที่เชิงเวลาเป็นระยะเวลา 21 วัน ผลการจำลองแสดงให้เห็นอย่างเด่นชัดว่าจะเกิดแรงเฉือนมากบริเวณรอยต่อระหว่างแร่คาร์บอเนตและแร่เฮไลต์ เนื่องจากแร่คาร์บอเนตมีความอ่อนตัวมากกว่าทำให้สามารถเคลื่อนไหลได้ง่ายกว่าเมื่อเทียบกับแร่เฮไลต์ที่มีความแข็งมากกว่า ดังนั้น แร่ทั้ง 2 ชนิด จึงมีการเคลื่อนไหลหรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไม่เท่ากันภายใต้แรงกดคงที่ ส่งผลให้เกิดแรงเฉือนในบริเวณดังกล่าวมากกว่าบริเวณอื่น

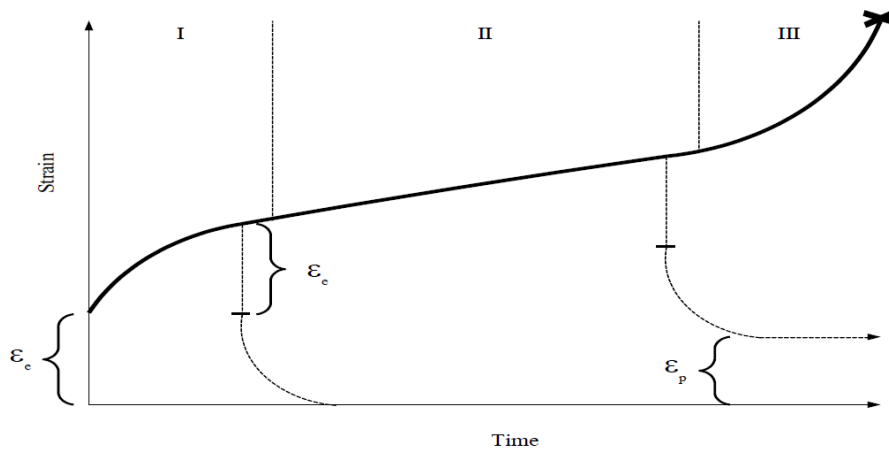
การเคลื่อนไหลของหินภายใต้แรงกดคงที่สามารถแสดงออกมาในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับเวลา ซึ่งจะทำให้เข้าใจขบวนการนี้ได้ง่ายขึ้น รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวซึ่งเป็นผลที่ได้จากการทดสอบโดยทั่วไป ในหลักการแล้วการเปลี่ยนรูปตามเวลาภายใต้แรงดันคงที่สามารถจำแนกออกเป็น 3 ช่วง คือ 1) ช่วงที่อัตราความเครียดเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient phase) ในช่วงนี้อัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาจะลดลงอย่างช้าๆ 2) ช่วงที่อัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาคงที่ (Steady-state phase) และ 3) ช่วงที่จะนำไปสู่การแตก (Tertiary phase)

รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวแกนหลักและระยะเวลาในการทดสอบภายใต้การผันแปรปริมาณแร่คาร์บอเนตจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ผลที่ได้ระบุว่าตัวอย่างหินที่มีแร่คาร์บอเนตแทรกอยู่จะมีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดในช่วงพฤติกรรมการคืบคงที่ (Steady-state) สำหรับตัวอย่างหินที่มีปริมาณแร่คาร์บอเนตเท่ากัน แต่มีการแทรกของจำนวนชั้นคาร์บอเนตมากกว่าจะทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดลดลง เนื่องจากการแทรกตัวหลายชั้นของแร่คาร์บอเนตเป็นการเพิ่มความต้านทานแรงเฉือนระหว่างผิวสัมผัสของแร่คาร์บอเนตและแร่เฮไลต์ของตัวอย่างหินดังกล่าว นอกจากนี้ผลการทดสอบยังระบุว่าปริมาณแร่คาร์บอเนตในช่วง 20%-40% จะมีผลกระทบอย่างมากต่อพฤติกรรมการคืบของตัวอย่างหิน กล่าวคือจะมีค่าความเค้นเฉือนมากขึ้นเอง (รูปที่ 5.7) สำหรับตัวอย่างหินที่มีปริมาณของแร่คาร์บอเนตในช่วงอื่นนอกเหนือจากนี้จะมีค่าความเค้นเฉือนน้อยลง และด้วยเหตุนี้ผลกระทบของการกระจายตัวของแร่คาร์บอเนตจึงมีแนวโน้มลดลงด้วย

จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์จะเห็นได้ว่าปริมาณและการกระจายตัวของแร่คาร์บอเนตมีนัยสำคัญต่อค่ากำลังรับแรงและพฤติกรรมการคืบของตัวอย่างหินคาร์บอเนตไลท์ ส่งผลให้ตัวอย่างหินที่มีปริมาณแร่คาร์บอเนตเท่ากันอาจจะมีค่าตัวแปรที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองของ Burgers มีความผันแปรมาก

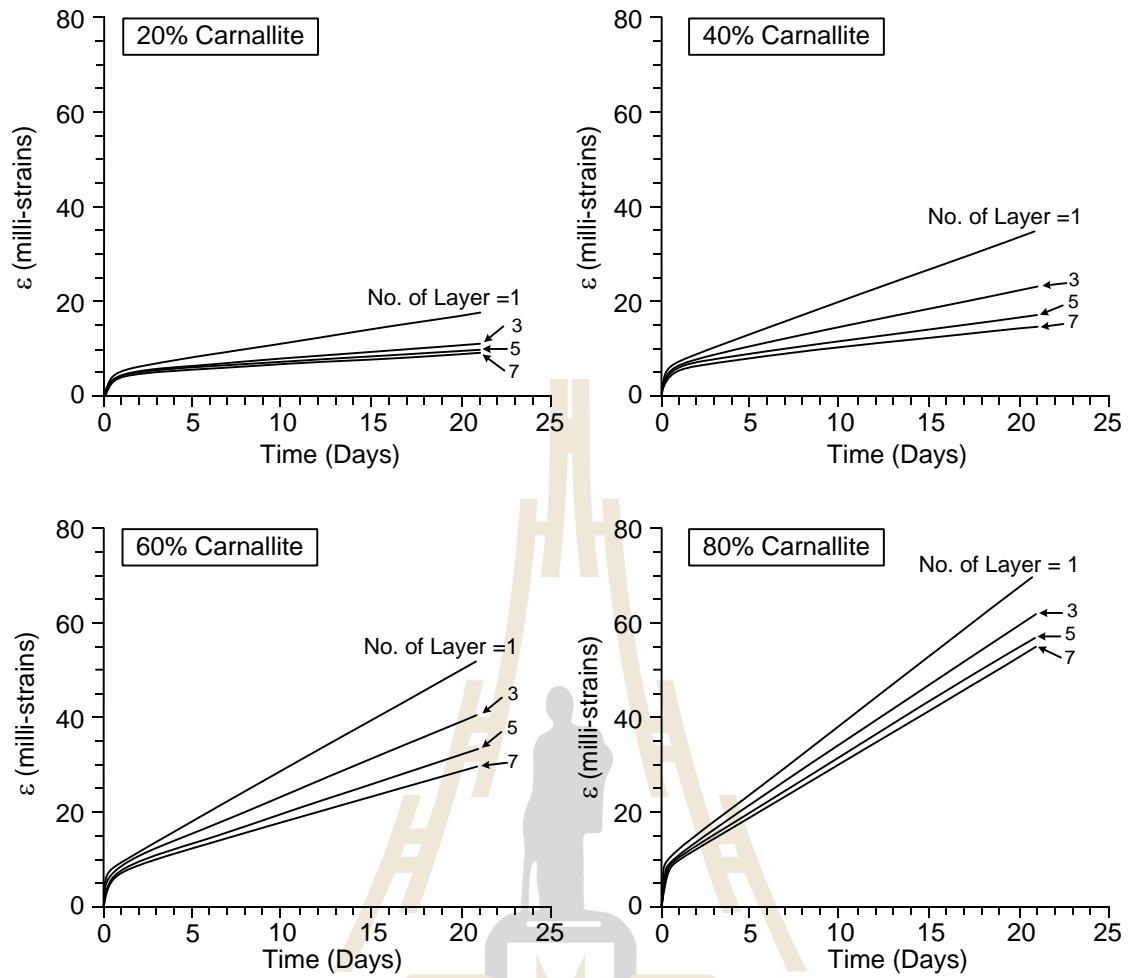


รูปที่ 5.5 พื้นที่การเกิดความเค้นเฉือนของตัวอย่างหินภายใต้การผันแปรปริมาณและการกระจายตัวของแร่คาร์เนลไลต์ (ส่วนของแร่คาร์เนลไลต์คือพื้นที่สีเทา)



รูปที่ 5.6 การเคลื่อนไหลของหินภายใต้แรงกดคงที่ ความเครียด (strain) ที่เกิดขึ้นตามกาลเวลาสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง (I) = ช่วงที่ความเครียดเปลี่ยนแปลงตามเวลา (II) = ช่วงที่มีความคงที่ของอัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อเวลา และ (III) = ช่วงที่จะนำไปสู่การแตก  $\epsilon_e$  คือความเครียดที่ได้จากการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น และ  $\epsilon_p$  คือความเครียดเชิงพลาสติกที่ได้จากการเปลี่ยนรูปร่างถาวร





รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวแกนหลักและระยะเวลาของตัวอย่างหินภายใต้การผันแปรปริมาณและการกระจายตัวของแร่คาร์เนลไลต์ตั้งแต่ 20% ถึง 80% จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

## บทที่ 6

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 บทสรุปของการวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณแร่คาร์บอนิลและ ความชื้นต่อเสถียรภาพของเสาเข็มในเหมืองแร่โพแทช โดยทำการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว การทดสอบการคืบในแกนเดียว และการทดสอบเพื่อหาผลกระทบของความชื้น ภายใต้การแปรผัน ปริมาณแร่คาร์บอนิลตั้งแต่ 0-100% ในการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวได้ใช้อัตราการคืบเท่ากับ 0.1 MPa/s ผลการทดสอบระบุว่าค่ากำลังรับแรงที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ( $\sigma_{c,d}$ ) และค่ากำลัง รับแรงสูงสุดในแกนเดียว ( $\sigma_{c,f}$ ) มีค่าลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลเมื่อมีปริมาณแร่คาร์บอนิลเพิ่มขึ้น สำหรับการทดสอบเพื่อหาผลกระทบของความชื้นที่สัมพันธ์ในเชิงเวลาระบุว่าตัวอย่างหินที่มีปริมาณแร่ คาร์บอนิลมากขึ้นจะทำให้เกิดการละลายหายไปของมวลหินมากขึ้นเช่นกัน เนื่องจากองค์ประกอบทาง เคมีของแร่คาร์บอนิลมีน้ำเป็นองค์ประกอบ จึงทำให้มีปฏิกิริยาอย่างมากต่อความชื้น ในทางกลับกัน ความชื้นแทบจะไม่มีผลกระทบต่อหินที่มีปริมาณแร่คาร์บอนิลเจือปนน้อยหรือเป็นหินเกลือบริสุทธิ์เลย และสำหรับการทดสอบการคืบในแกนเดียวผลการทดสอบระบุว่า ค่าความเครียดจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมี ปริมาณแร่คาร์บอนิลสูง พฤติกรรมการคืบดังกล่าวมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Fuenkajorn (2007) เป็นอย่างดี ผลการทดสอบดังกล่าวได้ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของ ตัวอย่างหินคาร์บอนิลที่พบพื้นฐานของแบบจำลอง Burgers พบว่าตัวอย่างหินที่มีปริมาณแร่คาร์บอนิลได้ เท่ากับ 100% จะมีค่าคงที่  $E_1$  และ  $E_2$  ต่ำมาก ส่งผลให้พฤติกรรมการคืบมีแนวโน้มที่จะอยู่ในรูปแบบ ของ Maxwell หรือในรูปแบบของความหนืดเชิงยืดหยุ่นต่ำ อย่างไรก็ตามความคลาดเคลื่อนของผลการ ทดสอบอาจเกิดจากความแปรปรวนของคุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างหิน กล่าวคือตัวอย่างหิน คาร์บอนิลที่ใช้ในการทดสอบอาจมีแร่อื่นเข้ามาปะปนนอกเหนือจากแร่คาร์บอนิล เช่น แร่แอนไฮ- ไดรต์ และดินเหนียว ส่งผลให้ค่าที่ได้จากการสอบเทียบกับแบบจำลองของ Burgers มีความคลาด เคลื่อนด้วยเช่นกัน

แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (FLAC 4.0) ได้ถูกนำมาใช้ในการจำลองชุดของตัวอย่างหินที่ มีการผันแปรปริมาณและการกระจายตัวของแร่คาร์บอนิลภายใต้สภาวะความเค้นกดในแกนเดียวคงที่ เชิงเวลาเป็นระยะเวลา 21 วัน ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างหินที่มีแร่คาร์บอนิลแทรกอยู่จะทำให้ มีค่าความเครียดลดลงในช่วงพฤติกรรมการคืบคงที่ (Steady-state) สำหรับตัวอย่างหินที่มีปริมาณแร่ คาร์บอนิลเท่ากัน แต่มีการแทรกของจำนวนชั้นคาร์บอนิลมากกว่าจะทำให้ความเครียดลดลง เนื่องจากการแทรกตัวหลายชั้นของแร่คาร์บอนิลเป็นการเพิ่มความต้านทานแรงเฉือนระหว่างผิวสัมผัสของแร่ คาร์บอนิลและแร่เฮไลต์ของตัวอย่างหินดังกล่าว จากผลการจำลองสามารถสรุปได้ว่าปริมาณแร่ คาร์บอนิลในช่วง 20%-40% จะมีผลกระทบอย่างมากต่อพฤติกรรมการคืบของตัวอย่างหิน กล่าวคือจะ

มีค่าความเค้นเฉือนมากนั่นเอง สำหรับตัวอย่างหินที่มีปริมาณของแร่คาร์บอนิลไลต์ในช่วงอื่นนอกเหนือจากนี้จะมีค่าความเค้นเฉือนน้อยลง และด้วยเหตุนี้ผลกระทบของการกระจายตัวของแร่คาร์บอนิลไลต์จึงมีแนวโน้มลดลงด้วย

ผลการทดสอบข้างต้นเป็นเพียงการศึกษาผลกระทบของปริมาณและการกระจายตัวของแร่คาร์บอนิลไลต์ที่มีผลกระทบต่อเสถียรภาพของเสาค้ำยันเท่านั้น อย่างไรก็ตามปัจจัยที่มีผลกระทบต่อเสถียรภาพของเสาค้ำยันอาจเกิดได้หลายสาเหตุเช่น ผลกระทบจากลักษณะทางธรณีวิทยา ความกว้างของเสาค้ำยัน อัตราการสกัดแร่ (Extraction ratio) หรือความชื้น เป็นต้น อีกทั้งในสภาวะจริงการกระจายตัวของแร่คาร์บอนิลไลต์อาจวางตัวอยู่แบบกระจัดกระจาย ส่งผลให้ไม่สามารถแยกปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์ได้อย่างชัดเจน ดังนั้น ผลจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์จึงเป็นเพียงการคาดการณ์เบื้องต้นเท่านั้น เพื่อให้สามารถใช้ทรัพยากรแร่ได้อย่างมีประสิทธิภาพในการออกแบบขนาดของเสาค้ำยันที่มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น ซึ่งต่างจากการออกแบบที่ผ่านมาในอดีต

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

การหาปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์โดยใช้วิธีการคำนวณจากความหนาแน่นอาจมีความคลาดเคลื่อนบ้างเล็กน้อย เนื่องจากตัวอย่างหินอาจมีแร่อื่นปะปนอยู่นอกเหนือจากแร่คาร์บอนิลไลต์ เช่น แร่แอนไฮไดรต์ หรือดินเหนียว จึงควรศึกษาวิธีการอื่นเพิ่มเติมที่มีการพิจารณาถึงผลกระทบจากการปะปนของแร่ชนิดอื่น ทั้งนี้เพื่อให้สามารถคำนวณหาปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์ได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น

การจำลองชุดของตัวอย่างหินที่มีการผันแปรปริมาณแร่คาร์บอนิลไลต์ด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ซึ่งกำหนดให้แร่คาร์บอนิลไลต์วางตัวแทรกเป็นชั้นอย่างชัดเจนอยู่กับแร่เฮไลต์อาจส่งผลให้เกิดการคลาดเคลื่อนไม่เสมือนในสภาวะจริง เนื่องจากแร่คาร์บอนิลไลต์อาจวางตัวอยู่แบบกระจัดกระจาย ดังนั้น จึงควรศึกษาเพิ่มเติมและจำลองการวางตัวของแร่คาร์บอนิลไลต์ให้มีความหลากหลายมากขึ้น

## บรรณานุกรม

- กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2554, การทดสอบคุณสมบัติการคืบในสามแกนจริงของเกลือหิน รหัสโครงการ SUT7-719-53-24-10 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา, 81 หน้า
- กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2557, การศึกษาพฤติกรรมเชิงเวลาของเกลือหินภายใต้วัฏจักรการให้แรงและอุณหภูมิ รหัสโครงการ SUT7-719-56-24-32 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา, 50 หน้า
- Allemandou, X. and Dusseault, M.B. (1993). Healing processes and transient creep of salt rock, Anagnostopoulos, A. (eds.), **Geotechnical Engineering of Hard Soils - Soft Rocks**, A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, U.S.A. 1-3: 1581-1590.
- 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). Ecole Polytechnique, November 1993, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany.
- ASTM D2938-95 (1998). Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens. In **Annual Book of ASTM Standards**, Vol. 04. 08.
- ASTM D3967-95 (1998). Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens. **Annual Book of ASTM Standards**, Vol. 04. 08.
- ASTM D4341-93 (1998). Standard test method for creep of cylindrical hard rock core specimens in uniaxial compression. **Annual Book of ASTM Standards**, Vol. 04. 08.
- ASTM D4405-93 (1998). Standard test method for creep of cylindrical soft rock core specimens in uniaxial compressions. **Annual Book of ASTM Standards**, Vol. 04.08.
- ASTM D7012-07 (2007). Compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures. **Annual Book of ASTM Standards** (Vol. 04. 08). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- Aubertin, M. (1996). On the physical origin and modeling of kinematic and isotropic hardening of salt. In **Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 1-18). Ecole Polytechnique, November 1993, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany.

- Aubertin, M., Gill, D.E. and Ladanyi, B. (1992). Modeling the transient inelastic flow of rock salt. In **the Seventh Symposium on Salt Elsevier Science Pub.** 1: 93-104.
- Aubertin, M., Gill, D.E. and Ladanyi, B. (1993a). Modelling the transient inelastic flow of rock salt. In **Proceedings of Seventh Symposium on Salt** (pp 93-104), Kyoto, Japan, April 1992, Elsevier Science Publishers, Amsterdam. Vol. 1.
- 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**, Canada. 36(4): 660-674
- Aubertin, M., Sgaoula, J., and Gill, D.E. (1993b). A damage model for rock salt: Application to tertiary creep. In **Proceedings of the Seventh Symposium on Salt** (pp 117-125), Kyoto, Japan, April 1992, Elsevier Science Publishers, Amsterdam. Vol. 1.
- Barber, D.J. (1990). Regimes of plastic deformation processes and microstructure. **An overview, Deformation Processes in Minerals, Ceramics and Rocks**, Unwin Hyman. 138-178.
- Berest, P. and Blum, P.A. (1993). In situ test in salt cavern. In **Proceedings of Seventh Symposium on Salt**, Kyoto, Japan, April 1992, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.1: 353-362.
- 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**, Ecole Polytechnique, Montreal, June 1996, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany. 511-524.
- Bieniawski, Z.T. and Bernede, M.J. (1978). Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 16(2): 138-140.
- Billiotte, J., LeGuen, 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). Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, September 1993, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany.

- 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), Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, September 1993, Trans Tech Publications, Clausthal- Zellerfeld, Germany.
- 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.**
- Brodsky, N.S. and Munson, D.E. (1991). The effect of brine on the creep of WIPP salt in laboratory tests. In **Proceeding of the 32nd U.S. Symposium on Rock Mechanics.** 1991.
- 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**, Ecole Polytechnique, Montreal, June 1996, Clausthal, Germany, Trans Tech Publications. 561-572.
- Carter, N.L., Horseman, S.T., Russell, J.E. and Handin, J. (1993). Rheology of Rocksalt. **Journal Structural Geology.** 15(10): 1257-1272.
- Chen, Z., Wang, M.L. and Lu, T. (1997). Study of Tertiary Creep of Rock Salt. **Journal of Engineering Mechanics.** 123(1): 77.
- Chokski, A.H. and Langdon, T.G. (1991). Characteristics of creep deformation in ceramics. **Materials Science and Technology.** 7: 577-584.
- Cristescu, N. (1994a). A procedure to determine nonassociated constitutive equations for geomaterials. **International Journal of Plasticity.** 10: 103-131.
- Cristescu, N. (1994b). **Visco-Plastic Behaviour of Geomaterials.** Springer Verlag, Vienna. 103-207.
- 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)., Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, September 1993, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany.

- DeVries, K.L., K.D. Mellegard and G.D. Callahan. (2002). Salt damage criterion proof-of-concept research. **Topical report, DE-FC26-00NT41026**, prepared for the U.S. Department of Energy, Pennsylvania.
- Duncan, E.J.S. and Lajtai, E. (1993). The creep of potash salt rocks from Saskatchewan. **Geotechnical and Geological engineering**. 11: 159-184.
- Fokker, P.A. (1995). The behavior of salt and salt caverns, **Ph.D. Thesis, Delft University of Technology**.
- Fokker, P.A. (1998). The micro-mechanics of creep in rocksalt. In **Proceedings of the Fourth Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 49-61). Ecole Polytechnique, Montreal, June 1996, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany.
- Franssen, R.C.M.W. (1998). Mechanical anisotropy of synthetic polycrystalline rock salt. In **Proceedings of the Fourth Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 63-75). The Pennsylvania State University, June 17-18, 1996, Clausthal-Zellerfeld, Trans Tech Publications, Germany.
- Franssen, R. C. M. W. 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.
- Frayne, M.A. (1996). Four cases study in salt rock: Determination of material parameters for numerical modeling. In **Proceedings Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 471-482), Ecole Polytechnique, November 1993, Trans Tech Publications, ClausthalZellerfeld, Germany.
- Fuenkajorn, K. (2007). Intrinsic variability of the mechanical properties of Maha Sarakham salt. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 15(1): 33-48.
- Fuenkajorn, K. and Daemen, J.J.K. (1988). Borehole Closure in salt. Key Question in Rock Mechanics: **Proceeding of the 29th U.S. Symposium**, University of Minnesota, U.S.A.
- Fuenkajorn, K. and Jandakaew, M. (2003). Compressed-air energy storage in salt dome at Borabu district, Thailand: Geotechnical Aspects. In **Proceedings of the 38<sup>th</sup> Symposium on Engineering Geology and Geotechnical Engineering** (pp. 377-391), University of Reno, Nevada, March 19-21, U.S.A.

- Fuenkajorn, K. and Phueakphum, D. (2010). Effects of cyclic loading on mechanical properties of Maha Sarakham salt. **Engineering Geology**. 112(1-4): 43-52.
- Fuenkajorn, K., Phueakphum, D. and Jandakaew, M. (2003). Healing of rock salt fractures: **Proceedings of the 38th Symposium on Engineering Geology and Geotechnical Engineering** (pp. 393-408), University of Nevada, Reno, March 19-21, U.S.A.
- Ghoreychi, M. and Berest, P. (1990). Thermomechanical modelling of radioactive waste disposal in salt formations. In **10<sup>th</sup> Conf. Struct. Mech. in Reactor Techn. (SMIRT)**, California.
- 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, Germany: Trans Tech Publications.
- Hansen, F.D., Mellegard, K.D. and Senseny, P.E. (1984). Elasticity and strength of ten natural rock salts, Mechanical Behavior of Salt. 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.
- 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 29th U.S. Symposium on Rock Mechanics** (pp. 199-206), University of Minnesota, Minneapolis, A. A. Balkema, Rotterdam.
- Hardy, H.R.Jr. (1996). Application of the Kaiser effect for the evaluation of in-situ stress in salt. In **Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Rock Salt** (pp. 85-100). Ecole Polytechnique, November 1993, Trans Tech Publications, Clausthal, Germany.
- Hunsche, U.E. 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). Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, September 1993, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany.



- Hunsche, U.E., Mingerzahn, G. and Schulze, O. (1996). The influence of textural parameters and mineralogical composition on the creep behavior of salt. In **Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 143-151). Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, September 1993, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany.
- Itasca (1992). User manual for FLAC-Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 3.0. **Itasca Consulting Group Inc.**, Minneapolis, MN.
- Jeremic, M.L. (1994). Rock Mechanics in Salt Mining. **A. A. Balkema, Rotherdam** (pp 532), the Netherlands.
- Lee, R. and Souza, De E. (1998). The effect of brine on the creep behavior and dissolution chemistry of evaporites. **Department of Mining Engineering, Queen's University**, Kingston, ON K7L 3N6, Canada. 35: 720-729.
- Luangthip, A., Khamrat, S. and Fuenkajorn, K. (2016). Effects of Carnallite Contents on Stability and Extraction Ratio of Potash Mine. In **Proceedings of the Ninth Conference on the Asian Rock Mechanics Symposium**. 18-20 October 2016, Bali, Indonesia.
- Munson, D.E. and Wawersik, W.R. (1991). Constitutive modeling of salt behavior – State of the technology. In **Proceeding 7th Int. Cong. Rock Mech**, ISRM, Aachen. 1797-1810.
- Ong, V., Unrau, J., Jones, J. Coode, A. and Mackintosh, D. (1998). Triaxial creep testing of saskatchewan potash samples. In **Proceedings of the Fourth Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 469-480). Clausthal, Germany: Trans Tech Publications.
- Peach, C. J. (1996). Deformation, dilatency and permeability developed in halite/anhydrite composition. In **Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 153-166), Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, September 1993, Trans Tech Publications, Clausthal- Zellerfeld, Germany.
- Phueakphum, D. (2003). Compressed-Air Energy Storage in Rock Salt of The Maha Sarakham Formation, **M. S. thesis, Suranaree University of Technology**, Thailand.

- Pudewills, A. and Hornberger, K (1996). A Unified Viscoplastic Model for Rock Salt. In **Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 45-52), Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, September 1993, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany.
- 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.
- 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), Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, September 14-16, 1993, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Federal Republic of Germany.
- 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.
- Spencer, R.J. and Lowenstein, T.K. (1990). Evaporites. In: Mcllreath, I.A., Morrow, D.W. (Eds.), Diagenesis II, **Geoscience Canada Reprint Series 4**. pp. 141-164.
- Spiers, C.J., Schutjens, P.M.T.M., Brzesowsky, R.H., Peach, C.J., Liezenbrg, J.L. and Zwart, H.J. (1990). Experimental determination of constitutive parameters governing creep of rock salt by pressure solution. **Deformation Mechanisms Rheology and Tectonics. Geological Society Special Publication**. 45: 215-227.
- Sriapai, T. and Fuenkajorn, K. (2010). Polyaxial Strengths of Maha Sarakham Salt. In **Proceeding of 6th Asian Rock Mechanics Symposium**. October 23-27, New Delhi, India.
- Sriapai, T., Walsri, C., Fuenkajorn, K. (2012). Effect of temperature on compressive and tensile strengths of salt. **ScienceAsia**. 38: 166-174.
- Stanton, R.L. and Gorman, H. (1968). A phenomenological study of grain boundary migration in some common sulfides. **Economic Geology**. 63: 907-923.
- Thorel, L. and Ghoreychi, M. (1996). Rock salt damage - Experimental results and interpretation. In **Proceedings Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 175-189), Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, September 1993, Trans Tech Publications, Clausthal, Germany.

- 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). Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, September 1993, Trans Tech Publications, Clausthal- Zellerfeld, Germany.
- Warren, J.K. (2010). Evaporites through time-tectonic, climatic, and eustatic controls in marine and nonmarine deposits. **Earth-Science Reviews**. 98(3-4): 217-268.
- 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.
- Wolfenstine, J., Ruano, O. A., Wadsworth, J., and Sherby, O. D. (1991). Harper-Dorn creep in single crystalline NaCl. **Scripta Metall. Mat.** 25: 2065-2070.



## 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

