



รหัสโครงการ SUT7-719-56-12-52

รายงานการวิจัย

ชุดโครงการวิจัย

การศึกษาการทิ้งกากนิวเคลียร์ในหลุมเจาะระดับลึกในหินแกรนิต
(Study of Nuclear Waste Disposal into Deep Boreholes in Granite)

โครงการวิจัยย่อย

การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิสูงต่อความแข็งแรงของหินแกรนิต
เพื่อประยุกต์ใช้ในการทิ้งกากนิวเคลียร์ในหลุมเจาะ
(Laboratory Assessment of Effect of Elevated Temperatures on Strength
of Granite as Applied to Borehole Injection of Nuclear Waste)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-719-56-12-52

รายงานการวิจัย

ชุดโครงการวิจัย

การศึกษาการทิ้งกากนิวเคลียร์ในหลุมเจาะระดับลึกในหินแกรนิต
(Study of Nuclear Waste Disposal into Deep Boreholes in Granite)

โครงการวิจัยย่อย

การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิสูงต่อความแข็งของหินแกรนิต
เพื่อประยุกต์ใช้ในการทิ้งกากนิวเคลียร์ในหลุมเจาะ
(Laboratory Assessment of Effect of Elevated Temperatures on Strength of
Granite as Applied to Borehole Injection of Nuclear Waste)

คณะผู้วิจัย

ผู้อำนวยการชุดโครงการวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เฟื่องขจร
สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

หัวหน้าโครงการวิจัยย่อย

รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เฟื่องขจร
สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2556

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

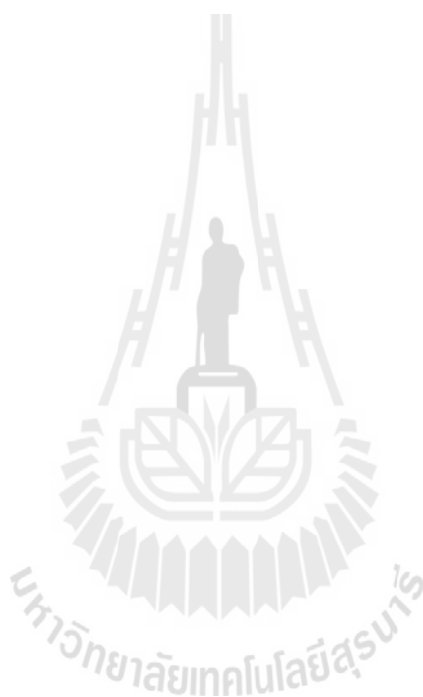
กันยายน 2556

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากทีมงานหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีในการทดสอบและ นางสาวกัลญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

กันยายน 2556



บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษาคือ เพื่อหาผลกระทบของอุณหภูมิสูงต่อกำลังกดและความยืดหยุ่นของหินแกรนิตชุดตึกในห้องปฏิบัติการ การทดสอบความแข็งดำเนินการภายใต้ความเค้นล้อมรอบและอุณหภูมิที่ผันแปร ความเค้นล้อมรอบในขณะที่ทดสอบมีค่าคงที่เท่ากับ 0, 3, 7 และ 12 เมกะปาสคาล โดยใช้โครงกดทดสอบในสามแกนจริง ตัวอย่างนำมาจัดเตรียมเป็นรูปแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ $5 \times 5 \times 10$ ลูกบาศก์เซนติเมตร อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบผันแปรจาก 273 ถึง 773 เคลวิน (0-500 องศาเซลเซียส) ผลการทดสอบระบุว่า ค่ากำลังกดในแกนเดียวและค่ากำลังดึงแบบบราซิชจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้เป็นอย่างดีด้วยสมการยกกำลัง ผลการทดสอบในสามแกนระบุว่า ค่าความเค้นยึดติดจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่ความเค้นมูเสียทานภายในจะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิที่ผันแปร นอกจากนี้ค่าความยืดหยุ่นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่ากำลังกดของหินแกรนิตภายใต้อุณหภูมิและความเค้นล้อมรอบที่ผันแปรสามารถอธิบายได้ด้วยพลังงานความเครียดเบี่ยงเบนที่จุดวิบัติในฟังก์ชันของพลังงานความเครียดเฉลี่ย

Abstract

The objective of this study is to experimentally determine the effect of elevated temperatures on the compressive strengths and elasticity of Tak granite. Failure strengths are determined for various temperatures and confining pressures. The confining stresses are maintained at 0, 3, 7, to 12 MPa using a polyaxial load frame. The specimens are prepared to obtain rectangular block specimens with nominal dimensions of $5 \times 5 \times 10 \text{ cm}^3$. The testing temperatures are varied from 273 to 773 K (0–500°C). The results indicate that the uniaxial compressive strength and Brazilian tensile strength decrease with increasing temperatures which can be best described by power equations. The triaxial test results suggest that the cohesion decreases as the temperature increases while the internal friction angle tends to be independent of the temperature. The elastic modulus also decreases with increasing temperature. The rock strength can be well described in terms of the distortional strain energy density as a function of the mean strain energy density at failure for various temperatures and confining pressures.

สารบัญ

| | หน้า |
|--|-----------|
| กิตติกรรมประกาศ..... | ก |
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ข |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | ค |
| สารบัญ..... | ง |
| สารบัญตาราง..... | ช |
| สารบัญรูปภาพ..... | ซ |
| | |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย..... | 1 |
| 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย..... | 1 |
| 1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย..... | 2 |
| 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย..... | 2 |
| 1.6 ผลสำเร็จของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ..... | 4 |
| 1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์..... | 4 |
| | |
| บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 5 |
| 2.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อกำลังรับแรงของหิน..... | 5 |
| 2.2 การกักเก็บกากนิวเคลียร์ในหลุมเจาะระดับลึก..... | 7 |
| 2.3 ปัจจัยอื่นๆ..... | 8 |
| | |
| บทที่ 3 การจัดเตรียมตัวอย่าง..... | 11 |
| 3.1 ตัวอย่างหินแกรนิต..... | 11 |
| 3.2 การตัดตัวอย่างหินแกรนิต..... | 11 |
| | |
| บทที่ 4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ..... | 15 |
| 4.1 วัตถุประสงค์..... | 15 |
| 4.2 โครงกทดสอบในสามแกนจริง..... | 15 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|-----------|
| 4.3 อุปกรณ์ให้ความร้อน..... | 17 |
| 4.3.1 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ..... | 17 |
| 4.3.2 เบ้ากต้ให้ความร้อน..... | 18 |
| 4.3.3 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ..... | 18 |
| 4.4 การทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวและในสามแกน..... | 19 |
| 4.4.1 การปรับเพิ่มและลดอุณหภูมิของตัวอย่างหิน..... | 19 |
| 4.4.2 การทดสอบและการตรวจวัดการเคลื่อนตัว..... | 19 |
| 4.5 การคำนวณผลการทดสอบ..... | 20 |
| 4.5.1 การคำนวณค่าความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ย..... | 20 |
| 4.5.2 การคำนวณค่าความเค้นยึดติดและค่ามุมเสียดทาน..... | 20 |
| 4.5.3 การคำนวณค่าคุณสมบัติความยืดหยุ่น..... | 20 |
| 4.5.4 การคำนวณค่าพลังงานความเครียด..... | 21 |
| 4.6 การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิล..... | 21 |
| 6.4.1 การปรับอุณหภูมิของตัวอย่างหินก่อนการทดสอบ..... | 21 |
| 6.4.2 วิธีการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิล..... | 22 |
| 6.4.3 การคำนวณผลการทดสอบ..... | 22 |
| บทที่ 5 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ..... | 23 |
| 5.1 วัตถุประสงค์..... | 23 |
| 5.2 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ..... | 23 |
| 5.2.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวและในสามแกน..... | 23 |
| 5.2.2 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิล..... | 26 |
| บทที่ 6 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ..... | 29 |
| 6.1 วัตถุประสงค์..... | 29 |
| 6.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อความแข็งและความยืดหยุ่นของหินแกรนิต..... | 29 |
| 6.3 การพัฒนาเกณฑ์การแตกของหินแกรนิต..... | 32 |

สารบัญ

| | หน้า |
|----------------------|------|
| บทที่ 7 บทสรุป..... | 35 |
| บรรณานุกรม..... | 37 |
| ประวัตินักวิจัย..... | 43 |



สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 3.1 ขนาดของตัวอย่างหินแกรนิตที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวและ ในสามแกน..... | 13 |
| 3.2 ขนาดของตัวอย่างหินแกรนิตที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิล..... | 14 |
| 5.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวภายใต้อุณหภูมิต่างๆ..... | 24 |
| 5.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงกดในสามแกนภายใต้การผันแปรอุณหภูมิและความเค้น ล้อมรอบ..... | 25 |
| 5.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิลภายใต้การผันแปรอุณหภูมิ..... | 27 |
| 6.1 ค่าคุณสมบัติความยืดหยุ่นและพลังงานความเครียดของหินแกรนิตที่จุดแตก..... | 30 |



สารบัญรูปรภาพ

| รูปที่ | หน้า | |
|--------|---|----|
| 1.1 | แผนผังแสดงรูปแบบการกักเก็บกากนิวเคลียร์ในหลุมเจาะที่ระดับลึก..... | 2 |
| 1.2 | โครงการทดสอบกดในสามแกนจริง..... | 3 |
| 2.1 | เกณฑ์การแตกจากการทดสอบ Multiple failure state ของชั้นหิน..... | 6 |
| 2.2 | โครงการทดสอบในสามแกนจริง..... | 9 |
| 3.1 | ตัวอย่างหินแกรนิตสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวและในสามแกน..... | 12 |
| 3.2 | ตัวอย่างหินแกรนิตสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิลตามมาตรฐาน ASTM D3967..... | 12 |
| 4.1 | โครงการทดสอบในสามแกนจริง..... | 16 |
| 4.2 | องค์ประกอบของโครงการทดสอบในสามแกนจริง..... | 16 |
| 4.3 | การสอบเทียบอัตราส่วนของแรงโดย Electronic load cell เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างด้านข้างของตัวอย่างหิน..... | 17 |
| 4.4 | การติดตั้งเบ้ากดให้ความร้อนกับขดลวดให้ความร้อนและเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ ควบคุมอุณหภูมิและอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ..... | 18 |
| 5.1 | ความเค้นหลักสูงสุดในแกนเดียวในฟังก์ชันของอุณหภูมิ..... | 24 |
| 5.2 | ความเค้นหลักสูงสุดในฟังก์ชันของความเค้นหลักต่ำสุดภายใต้อุณหภูมิ..... | 25 |
| 5.3 | ลักษณะการแตกของตัวอย่างหินจากการทดสอบกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว และในสามแกนภายใต้การผันแปรอุณหภูมิและความเค้นล้อมรอบ..... | 26 |
| 5.4 | ความเค้นดึงสูงสุดแบบบราซิลในฟังก์ชันของอุณหภูมิ..... | 28 |
| 5.5 | ลักษณะการแตกของตัวอย่างหินจากการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิล ภายใต้การผันแปรอุณหภูมิ..... | 28 |
| 6.1 | ความเค้นเฉือนในสามมิติที่จุดวิกฤติในฟังก์ชันของความเค้นเฉื่อย..... | 31 |
| 6.2 | ค่าความเค้นยึดติดและค่ามุมเสียดทานภายในในฟังก์ชันของอุณหภูมิ..... | 31 |
| 6.3 | ค่าปัจจัยความยึดหยุ่นในฟังก์ชันของอุณหภูมิ..... | 32 |
| 6.4 | พลังงานความเครียดเบี่ยงเบนในฟังก์ชันของพลังงานความเครียดเฉื่อย..... | 34 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

เทคโนโลยีการกักเก็บกากนิวเคลียร์ด้วยวิธีการอัดวัสดุลงไปในกลุ่มเจาะระดับลึก (Deep Hole Injection) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ได้มีวิวัฒนาการมานาน แต่เพิ่งจะแพร่หลายมากขึ้นเมื่อ 3-4 ปีที่ผ่านมา (Arnold et al. 2011; Swift et al. 2009; Brady and Arnold 2011; Brady et al. 2009; Arnold and Brady 2012; Pusch et al. 2012; Gibb 1999; Anderson 2004) โดยเฉพาะในประเทศสหรัฐอเมริกา แคนาดา และบางประเทศในทวีปยุโรป ข้อดีของเทคโนโลยีนี้คือ หินแกรนิตในระดับลึกมักมีรอยแตกน้อย และมีมวลหินมีค่าความซึมผ่านต่ำ นอกจากนั้นหินแกรนิตยังมีความคงทนต่ออุณหภูมิสูงซึ่งเป็นอุณหภูมิที่อาจเกิดจากการสลายตัว (Decay) ของธาตุกัมมันตรังสีของกากนิวเคลียร์ดังกล่าว

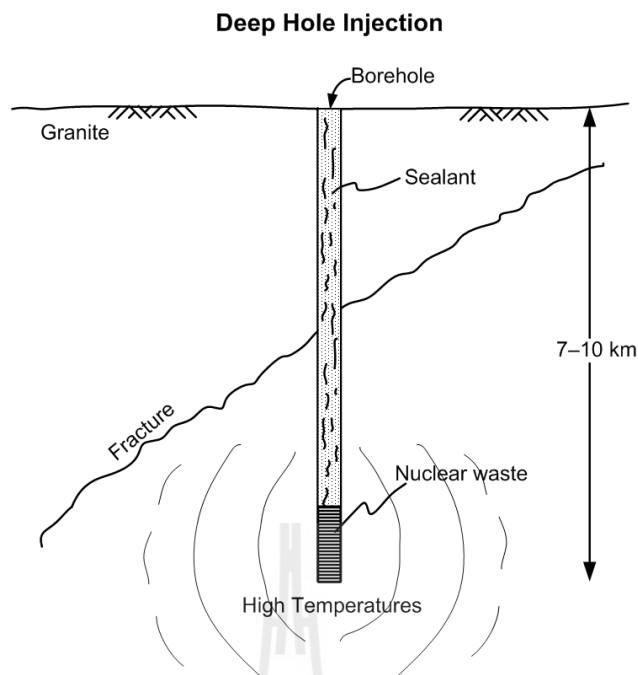
ในอนาคตอันใกล้ประเทศไทยจำเป็นต้องมีการพัฒนาพลังงานนิวเคลียร์ ซึ่งข้อดีประการหนึ่งคือ ในประเทศไทยมีมวลหินแกรนิตจำนวนมาก สามารถใช้ในการกักเก็บของเสียจากโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ดังกล่าวได้อย่างพอเพียง จึงจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่จะต้องมีการศึกษาคักยภาพของมวลหินแกรนิตในเชิงกลศาสตร์และเชิงพลศาสตร์สำหรับเทคโนโลยีการทิ้งของเสียในระดับลึก เพื่อให้มั่นใจว่าจะไม่เกิดการรั่วไหลเข้าสู่ชั้นน้ำบาดาลหรือผิวดิน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการวิจัยครั้งนี้ คือ การทดสอบหาค่าลึงกดของหินแกรนิตภายใต้อุณหภูมิระหว่าง 0-500°C เพื่อคาดคะเนเกณฑ์การแตกที่สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ได้อย่างมีประสิทธิภาพในการออกแบบและหาเสถียรภาพของกลุ่มเจาะกักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมในชั้นหินแกรนิต

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) ทดสอบกำลังรับแรงกดของหินแกรนิตในห้องปฏิบัติการ
- 2) ตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบอยู่ภายใต้อุณหภูมิระหว่าง 0-500°C
- 3) การทดสอบจะผันแปรค่าความเค้นหลักทรงตั้งตั้งแต่ 0-12 MPa
- 4) การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานสากล (ASTM standard)
- 5) ทดสอบตัวอย่างหินแกรนิตไม่น้อยกว่า 12 ตัวอย่าง



รูปที่ 1.1 แผนผังแสดงรูปแบบการกักเก็บกากนิวเคลียร์ในหลุมเจาะที่ระดับลึก

1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

เพื่อให้ทราบถึงเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์ของหินแกรนิตที่อยู่ใกล้กับแหล่งกักเก็บซึ่งจะอยู่ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง จึงจำเป็นที่จะต้องจำลองสภาวะดังกล่าวในห้องปฏิบัติการ โดยการทดสอบกำลังกดในสามแกน (Triaxial compressive strength test) ของตัวอย่างหินแกรนิตที่อยู่ภายใต้อุณหภูมิที่ระดับต่างๆ จาก 0-500°C ผลการทดสอบสามารถนำมาพัฒนาสมการเชิงคณิตศาสตร์เพื่อสร้างเกณฑ์การแตกของหินแกรนิตภายใต้อุณหภูมิและความดันที่หลากหลายซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการประเมินเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์ของหินแกรนิตที่อยู่ติดกับหรือใกล้เคียงกับจุดที่ทิ้งกากนิวเคลียร์

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้โดยแบ่งการค้นคว้าและศึกษาออกเป็น 2 ประเด็นหลักประกอบด้วย การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหิน และเทคโนโลยีในการกักเก็บของเสียในหลุมเจาะระดับลึก

ขั้นตอนที่ 2 การจัดเตรียมตัวอย่างหินแกรนิต

ตัวอย่างหินแกรนิตได้ถูกจัดเตรียมเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด $5 \times 5 \times 10 \text{ cm}^3$ จากนั้นทำการทดสอบกำลังรับแรงกดของตัวอย่างหินในสามแกน (Triaxial strength test) ภายใต้อุณหภูมิระหว่าง $0-500^\circ\text{C}$ โดยมีการทดสอบตัวอย่างหินแกรนิตไม่น้อยกว่า 12 ตัวอย่าง ดังรูปที่ 1.2 แสดงโครงกดทดสอบในสามแกนที่ใช้ในการทดสอบ

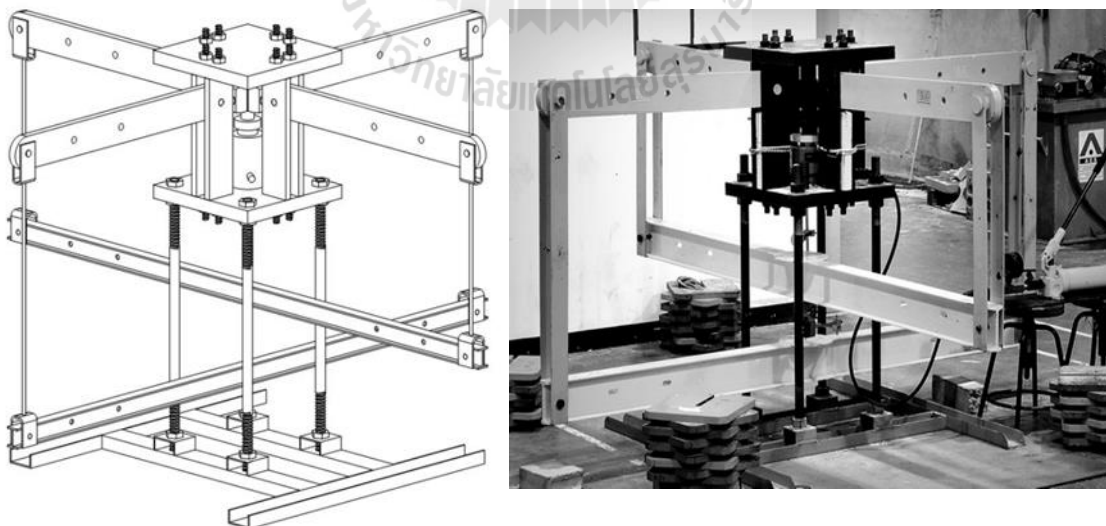
ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบหาค่าความแข็งในสามแกนของหินแกรนิตภายใต้

อุณหภูมิสูง

ในขั้นตอนนี้ได้ทำการทดสอบหาค่าความแข็งในสามแกนของหินแกรนิตด้วยโครงกดทดสอบในสามแกนจริง (Poly-axial load frame) โดยผันแปรค่าความเค้นและผันแปรอุณหภูมิระหว่าง $0-500^\circ\text{C}$ เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อความแข็งของหิน

ขั้นตอนที่ 4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการได้นำไปสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ โดยการอธิบายค่าความแข็งภายใต้อุณหภูมิสูง ซึ่งเลือกใช้สมการเชิงคณิตศาสตร์ตามเกณฑ์ของ Coulomb, Hoek and Brown, Mogi 1971, Druker and Prager, Lade และ Wiebols and Cook และนำอุณหภูมิมามาพิจารณาในสมการเหล่านี้



รูปที่ 1.2 โครงกดทดสอบกดในสามแกนจริง

ขั้นตอนที่ 5 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิด ขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุป ได้นำเสนอโดยละเอียดในรายงานฉบับสมบูรณ์ เพื่อที่จะส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ และตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ

1.6 ผลสำเร็จของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ

ผลงานวิจัยที่เสนอมานี้มีประโยชน์อย่างมากกับงานด้านธรณีวิทยา วิศวกรรม สิ่งแวดล้อม และวิศวกรรมธรณี ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังนี้

- 1) ตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารระดับนานาชาติ
- 2) เผยแพร่องค์ความรู้ให้กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั้งภาครัฐ และเอกชน
- 3) สร้างนักวิจัยระดับ Postdoctoral อย่างน้อย 1 คน
- 4) สร้างนักวิจัยระดับ Postgraduate อย่างน้อย 1 คน

1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยที่เสนอมานี้จะมีประโยชน์อย่างมากและโดยตรงกับหลายหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชน สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ และวิศวกรรมธรณี รวมถึงไปถึงหน่วยงานที่ทำงานเกี่ยวข้องกับการก่อสร้างในชั้นหิน เช่น การสร้างเขื่อน การสร้างอุโมงค์ เหมืองแร่บนดินและใต้ดิน หน่วยงานเหล่านี้ได้แก่

- 1) กรมทรัพยากรน้ำ
- 2) กองธรณีเทคนิค กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
- 3) สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
- 4) กองธรณีเทคนิค กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน
- 5) สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ และวิศวกรรมธรณี
- 6) บริษัทเอกชนที่ออกแบบและก่อสร้างอุโมงค์ และความลาดชันในมวลหิน
- 7) กระทรวงพลังงาน
- 8) บริษัทสำรวจและขุดเจาะน้ำมันในประเทศไทย
- 9) องค์การบริหารส่วนตำบล และองค์การบริหารส่วนจังหวัด

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อุณหภูมิมีผลกระทบต่อความแข็งและความยืดหยุ่นของหิน (Vostseen and Schellschmidt, 2003; Shimada, 2000; Okatov et. al, 2003) ผลงานวิจัยในอดีตระบุว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความแข็งและความยืดหยุ่นของหินจะลดลง สำหรับหินแกรนิตงานวิจัยส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับผลกระทบของอุณหภูมิ ประเด็นสำคัญอีกประการหนึ่งคือการทดสอบแรงกดในสามแกน (Triaxial compression test – Elliott, 1983; Brook, 1983) ของแท่งตัวอย่างหินรูปทรงกระบอกที่มีข้อจำกัดสำคัญประการหนึ่งคือ ค่าความเค้นในแกนหลักกลาง (Intermediate principal stress, σ_2) และค่าความเค้นในแกนหลักรอง (Minimum principal stress, σ_3) จะมีค่าเท่ากันในระหว่างการทดสอบ โดยปกติแล้วสภาวะของความเค้นที่เกิดขึ้นจริงในภาคสนามจะมีค่าไม่เท่ากัน นอกจากนี้ค่าความเค้นในแกนหลักทั้งสามทิศทางไม่จำเป็นต้องเท่ากัน คือ $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ เรียกว่าความเค้นกดในสามแกนจริง ดังนั้นผลที่ตรวจวัดได้ เช่น ค่าความเค้นกดสูงสุด ค่ามุมเสียดทานภายในค่าความเค้นยึดเหนี่ยว และค่าความยืดหยุ่นจะแตกต่างจากคุณสมบัติที่แท้จริงของมวลหินในภาคสนามอย่างชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับหินที่มีความแข็งน้อยและหินที่มีคุณสมบัติขึ้นกับเวลา เช่น เกลือหิน หินโคลน หินดินดาน เป็นต้น นอกจากนี้ผลกระทบที่เกิดจากค่าความเค้นในแกนหลักกลางที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้หินมีความแข็งมากขึ้นด้วย (Walsri, 2009)

การค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 3 ประเด็นหลัก คือ

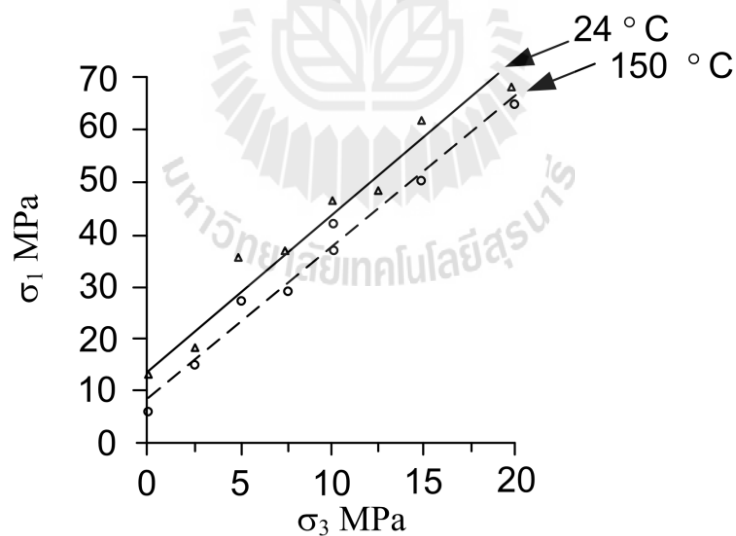
2.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อกำลังรับแรงของหิน

ความร้อนหรืออุณหภูมิมจะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนรูปของหินอย่างมาก และทำให้ช่วงเวลาการเคลื่อนไหลยาวนานมากขึ้น การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิและความลึกในชั้นหินได้มีผู้วิจัยหลายท่านศึกษาไว้แล้ว (Franssen and Spiers, 1990; Cristescu and Hunsche, 1996; Raj and Pharr, 1992; Senseny et al., 1992; Berest and Blum, 1993; Carter et al., 1993; Schneefub and Droste, 1996; Berest, Brouard and Durup, 1998) การศึกษาดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังนี้ ระดับความลึกของชั้นหินที่เพิ่มขึ้นจะทำให้มีความร้อนสูง ความร้อนจะทำให้เกลือหินมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับพลาสติกมากยิ่งขึ้นและทำให้ความต้านแรงกดลดลง โดยปกติเกลือหินมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 800°C แต่การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600°C ตลอดระยะเวลาเพียง 8 ชั่วโมง ก็สามารถทำให้เกลือหินสูญเสียความต้านแรงกดได้ Cristescu (1994) และ Cristescu and Hunsche (1996) ได้แนะนำว่าการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 100°C ควรใช้อัตราการ

ยวบตัวที่ต่ำกว่า 10^{-8} s^{-1} และที่อุณหภูมิ 200°C ควรใช้อัตราการยวบตัวที่ต่ำกว่า 10^{-7} s^{-1} เพราะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกลือหินเกิดการเคลื่อนไหลเร็วขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดการวิรูปได้ง่าย (Harmami et al., 1996)

Araujo et al. (1997) ได้ทำศึกษาคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของหินในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิห้อง ด้วยการทดสอบแบบสามแกนกับตัวอย่างหิน Friable sandstones จากแอ่ง Potiguar ทางตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศบราซิล โดยควบคุมแรงกดให้คงที่ ตัวอย่างจะถูกทดสอบที่อุณหภูมิ 24°C , 80°C และ 150°C โดยความเค้นล้อมรอบแปรผันระหว่าง 2.5–20 MPa ค่าการอัดตัวระบุว่าความสามารถในการอัดตัวจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น รูปที่ 2.1 แสดงค่าเส้นถดถอยในระนาบ σ_1 – σ_3 สำหรับอุณหภูมิ 24°C และ 150°C ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าโดยเฉลี่ยแล้วกำลังการต้านทานแรงกดจะลดลง 18% เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 24°C ถึง 150°C

Inada et al. (1997) ได้จำลองความเค้นล้อมรอบของการขุดเจาะ โดยศึกษาความแข็งและคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของหินแกรนิตและหินทัฟฟ์ภายใต้อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ ด้วยการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวและการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลที่มีผลกระทบจากน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง ผลการทดสอบระบุว่าค่ากำลังรับแรงกดของหินแต่ละชนิดจะมีค่าต่ำลงเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 2.1 เถนธ์การแตกจากการทดสอบ Multiple failure state ของชั้นหิน (Araujo et al., 1997)

Xu et al. (2009) ได้วิจัยผลกระทบของอุณหภูมิต่อลักษณะทางกลศาสตร์ของหินแกรนิตซึ่งถูกวิเคราะห์โดยใช้การสแกนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning electron microscope) การหักเหของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) การทดสอบโดยการส่งผ่านคลื่นเสียง (Acoustic emission) และการเปลี่ยนแปลงของกลไกขนาดเล็กแบบเปราะ-พลาสติก (The micromechanism of brittle-plastic transition) ในการทดสอบได้ใช้ตัวอย่างหินยาว 50 mm เส้นผ่าศูนย์กลาง 25 mm ตัวอย่างแต่ละกลุ่มถูกเพิ่มความร้อน 25, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100, 1200 และ 1300°C ในการทดสอบได้ควบคุมอัตราการกดที่ 0.0015 mm/s ผลการทดสอบด้วยการสแกนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงให้เห็นว่าพื้นที่ผิวรอยแตกมีลักษณะการแตกแบบผสมของรอยร้าวที่เกิดผ่านผลึก ซึ่งเกิดการแตก การเลื่อน และเกิดรอยบวมที่ผิวที่อุณหภูมิ 800°C ผลการทดสอบการหักเหของรังสีเอ็กซ์แสดงให้เห็นว่าบางผลึกของหินแกรนิตมีการเปลี่ยนแปลง และเมื่อทดสอบโดยการส่งผ่านคลื่นเสียงแสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงกดมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นประมาณ 800°C การแตกของหินแกรนิตมีการเปลี่ยนแปลงจากการแตกแบบเปราะเป็นการแตกแบบกึ่งเปราะ กำลังรับแรงกดเฉลี่ยและมอดูลัสความยืดหยุ่นมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่างๆ

Zhao et al. (2012) กล่าวว่าประสิทธิภาพและนวัตกรรมทางเทคโนโลยีของการพัฒนาเครื่องทดสอบหินแบบให้แรงสามแกน (XPS-20MN) ภายใต้อุณหภูมิสูงและความดัน ในรายงานนี้ได้นำเสนอผลการทดสอบตัวอย่างถ่านหินและหินแกรนิตที่อุณหภูมิสูงและที่ความดันสูง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นลักษณะของความเค้น-ความเครียดของตัวอย่างถ่านหินที่อุณหภูมิสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งลักษณะพลาสติกที่เพิ่มขึ้น ผลการทดสอบแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงในรูปของความร้อนและรูปแบบการแตกของตัวอย่างหินแกรนิตขนาดใหญ่ที่อุณหภูมิและความดันสูง เช่น โมดูลัสความยืดหยุ่นกับอุณหภูมิ และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวความร้อนเชิงเส้นตรงของหินแกรนิตเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ในขณะที่โมดูลัสความยืดหยุ่นลดลง (ลดลงในลักษณะเอกซีโพเนนเชียลฟังก์ชันกับอุณหภูมิ)

2.2 การกักเก็บกากนิวเคลียร์ในหลุมเจาะระดับลึก

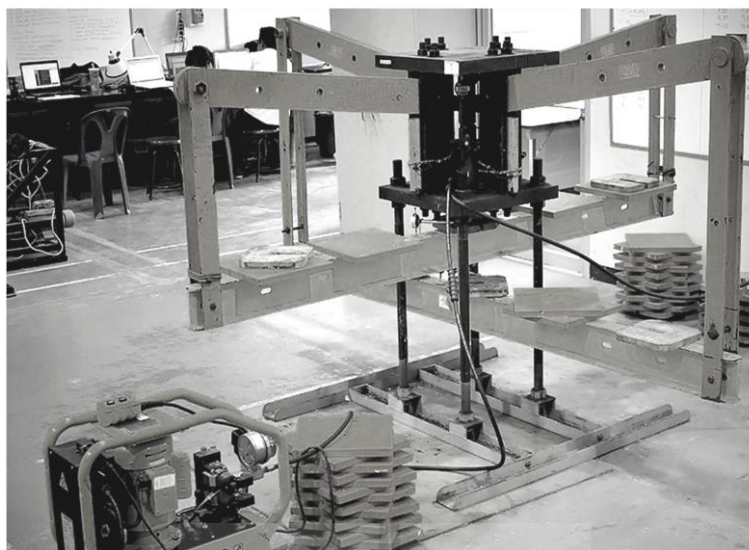
Gibb (1999) กล่าวว่าความปลอดภัยในการกักเก็บของเสียกัมมันตรังสีโดยเฉพาะพลังงานที่ใช้แล้ว เป็นหนึ่งในความท้าทายของวงการวิทยาศาสตร์ในปัจจุบัน วิธีแก้ปัญหานั้นแนะนำกันในระดับชาติก็คือการกำจัดทางธรณีวิทยา โดยการฝังในเหมืองและการออกแบบทางวิศวกรรมในพื้นที่กักเก็บแบบ Multi-barrier ถึงแม้จะเรียกว่าการกักเก็บในที่ลึกแต่ก็ถือว่าตื่นในทางธรณีวิทยา ของโครงการใหม่ๆ ในปัจจุบันภายใต้การพัฒนาการกักเก็บของเสียกัมมันตรังสีในหลุมที่ลึกมากๆ และมีอุณหภูมิสูง ความก้าวหน้าในองค์ความรู้เรื่องหินเปลือกโลกและ

ของเหลวที่อยู่ระดับลึกหลายกิโลเมตรซึ่งให้เห็นได้ชัดว่าการกักเก็บของเสียกัมมันตรังสีในที่ลึกมาก ๆ มีความปลอดภัยและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและของโครงการใหม่ๆ ได้มีความพยายามที่จะใช้ประโยชน์จากศักยภาพความร้อนที่ออกมาจากของเสียกัมมันตรังสี จึงได้มีการนำเสนอการใช้ประโยชน์จากเหมืองและหลุมเจาะ ความรู้ส่วนมากในการกักเก็บของเสียที่ประเทศสวีเดนจะทำการตรวจสอบที่ Aspö ในการกักเก็บของเสียอุณหภูมิข้างในและรอบๆ ภาชนะบรรจุของเสีย (วัสดุที่ทำจากทองแดงหรือโลหะอื่นๆ มีทั้งรูปทรงกระบอกหรือทรงลูกบาศก์ ใช้บรรจุของเสียก่อนที่จะนำไปทิ้งในหลุมเจาะหรือในเหมือง) อยู่ในระดับที่ต่ำ โดยปกติอุณหภูมิจะต่ำกว่า 150°C เพื่อลดการกักตัวของภาชนะบรรจุของเสียและป้องกันการพาความร้อนของน้ำบาดาลทั้งในและนอกพื้นที่กักเก็บของเสีย นอกจากนี้อุณหภูมิที่สูงกว่า 90°C สามารถทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับเบนทอไนต์ที่ปิดผลึกล้อมรอบภาชนะบรรจุของเสียได้ ปริมาณการรังสีระดับสูงในแต่ละภาชนะบรรจุของเสียและระยะห่างของภาชนะบรรจุของเสียจะถูกใช้เป็นเกณฑ์ในการเลือกสถานที่และสร้าง “ความปลอดภัย” สำหรับการกักเก็บในเหมือง ไม่เพียงแต่สภาพทางธรณีวิทยาและธรณีเคมีที่ต้องตรวจสอบอย่างละเอียด แต่ผลกระทบเหล่านี้ต้องมีการคาดการณ์ไว้ด้วย แม้ว่าหินอัคนีและหินแปรส่วนมากจะมีความสามารถในการซึมผ่านไม่ได้ แต่การซึมผ่านของน้ำก็ถูกควบคุมด้วยชุดรอยแตก และเป็นไปได้ยากที่หินที่ตกผลึกในชั้นบนของเปลือกโลกจะไม่มีรอยแตก

2.3 ปัจจัยอื่นๆ

Rajendra et al. (2006) ได้สร้างแบบจำลองทางกายภาพสำหรับการทดสอบการกักในสามแกนและการกักทดสอบในสามแกนจริงของมวลหินที่จะถูกนำไปใช้อธิบายพฤติกรรมการแตกที่เกิดขึ้น ตัวอย่างหินประกอบด้วยรอยแตกที่ต่อเนื่องจำนวน 3 ชุด การทดสอบได้ใช้ระบบกักทดสอบในสามแกนจริง (TTS) ที่ถูกพัฒนาขึ้น ผลที่ได้แสดงถึงความเครียดที่เพิ่มมากขึ้น (Strain hardening) ความเครียดที่ลดลง (Strain softening) และพฤติกรรมเชิงพลาสติกของมวลหินที่ถูกจำลองซึ่งขึ้นกับรูปร่างเชิงเรขาคณิตของรอยแตกและสภาวะความเค้น

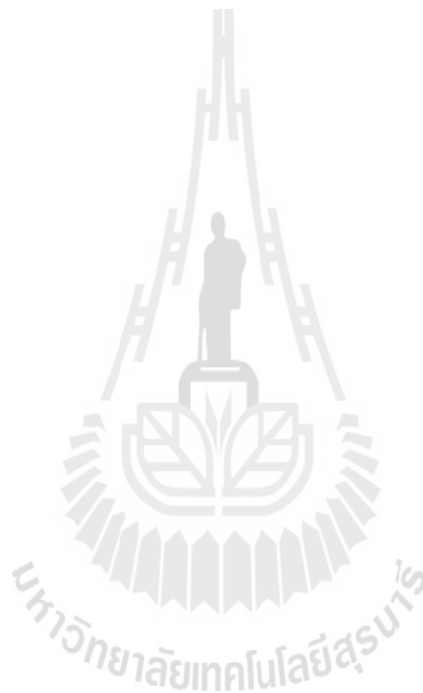
Sriapai et al. (2012) ได้ใช้โครงกักทดสอบในสามแกนจริง (Poly-axial load frame) ดังรูปที่ 2.2 เพื่อหาค่ากำลังกักในสามแกนจริงของเกลือหินชุดมหาสารคาม โดยใช้กฎเกณฑ์การแตกของ Coulomb และ Modified Wiebols and Cook โดยทำนายผลการทดสอบในรูปของค่าความเค้นเบี่ยงเบนและค่าความเค้นหลักกลาง โดยเกณฑ์การแตกของ Modified Wiebols and Cook สามารถอธิบายการแตกได้ดีกว่าเกณฑ์การแตกของ Coulomb (ในสภาวะแรงกด) แต่เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะแรงดึง เกณฑ์การแตกของ Coulomb สามารถทำนายผลได้สูงกว่าการทดสอบ 20% แต่เกณฑ์การแตกของ Modified Wiebols and Cook ไม่สามารถอธิบายการแตกแบบแรงดึงได้



รูปที่ 2.2 โครงทดสอบในสามแกนจริง (Walsri et al., 2009)

Walsri et al. (2009) ได้ทำการพัฒนาโครงทดสอบในสามแกนจริงดัง เพื่อหา กำลังรับแรงกดและกำลังรับแรงดึงภายใต้ความเค้นในสามทิศทางจริงสำหรับการทดสอบหินทราย 3 ชนิด ภายใต้ความเค้นกดในสามแกนจริง ผลลัพธ์ที่ได้ของหินทรายเป็นแบบเท่ากันทุกทิศทาง (Transversely isotropic) โดยได้มีการตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นในทิศทางที่ขนานกับ การวางตัวของชั้นหิน แต่อัตราส่วนของปัวซองบนระนาบปกติมีค่าน้อยกว่าผลที่ได้ในทิศทางขนานกับการวางตัวของชั้นหิน ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิชภายใต้แรงกดในแกนเดียวมีผลกระทบต่อค่าความเค้นหลักกลางของค่ากำลังดึงสูงสุดของหิน ซึ่งการทดสอบตัวอย่างหินในสามแกนเป็นกิจกรรมสำคัญที่รวมอยู่ในการสำรวจ วิเคราะห์ และออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมในมวลหิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างที่อยู่ใต้ดิน เช่น อุโมงค์ และเหมืองใต้ดิน เป็นต้น อย่างไรก็ตามการทดสอบแรงกดในสามแกนนี้ส่วนใหญ่จะไม่สอดคล้องกับสภาวะของความเค้นที่เกิดขึ้นจริงในภาคสนาม กล่าวคือ ความเค้นในแกนหลักในสามทิศทางไม่จำเป็นต้องเท่ากัน คือ $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ เรียกว่า ความเค้นกดในสามแกนจริง แต่การทดสอบโดยการจำลองความเค้นกดในสามแกนจริงจะทำได้ยากและใช้เครื่องมือพิเศษที่มีราคาสูงมาก (อยู่ในระดับหลายล้านดอลลาร์) ดังนั้นการทดสอบแบบกดในสามแกนจริงจึงไม่เป็นที่นิยมและแพร่หลาย ซึ่งโดยสรุปแล้วข้อเสียของเครื่องกดในสามแกนจริงที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันคือ 1) มีราคาสูง 2) มีความซับซ้อนในการใช้งาน 3) ไม่สามารถทดสอบการเคลื่อนไหลของหินได้อย่างต่อเนื่อง 4) ใช้พลังงานไฟฟ้ามากเพื่อที่จะควบคุมแรงกดให้คงที่ (Servo-Control) และ 5) ยากที่จะรักษาระดับของแรงให้คงที่อย่างแท้จริงในช่วงเวลาการทดสอบที่ต้องการความเค้นคงที่ด้านข้าง

Yun et al. (2010) อธิบายการทดสอบในสองแกนของหินแกรนิตรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 7.5, 10 และ 12.5 cm โดยทำการทดสอบกับเครื่องทดสอบในสองแกนที่ได้พัฒนาขึ้น ซึ่งมีกำลังรับน้ำหนักสูงสุดเท่ากับ 500 mT ในแต่ละทิศทาง และได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดการเปลี่ยนแปลงของแรงและรูปร่าง โดยใช้อัตราการกดที่ 1.25 และ 125 kN/s และอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในช่วงระหว่าง 4–30 $\mu\text{m/s}$ ซึ่งเกณฑ์การแตกในสองแกนของ Mohr–Coulomb และ Hoek–Brown ไม่ได้ตระหนักถึงผลกระทบของค่าความเค้นหลักกลาง จึงสรุปได้ว่าเกณฑ์การแตกของ Mohr–Coulomb และ Hoek–Brown นั้นไม่เหมาะสมกับสภาวะความเค้นในสองแกน (Biaxial loading condition) และสภาวะความเค้นในแนวระนาบ (Plane stress)



บทที่ 3

การจัดเตรียมตัวอย่าง

เนื้อหาในบทนี้อธิบายขั้นตอน วิธีการ และข้อปฏิบัติในการจัดเตรียมตัวอย่าง หินแกรนิตที่ใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่ากำลังรับแรงกด สูงสุดและค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด

3.1 ตัวอย่างหินแกรนิต

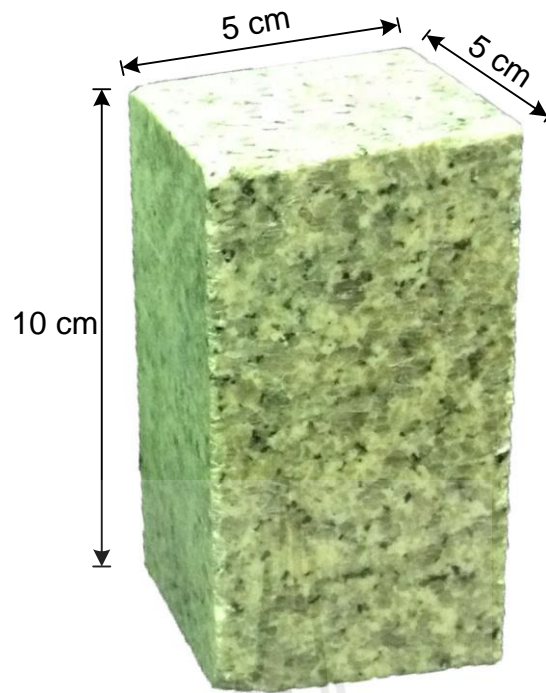
ตัวอย่างหินแกรนิตที่ใช้ในการศึกษานี้มาจากหินแกรนิตตาก (Tak Granite) ลักษณะการเกิดของหินแกรนิตตาก เกิดจากหินอัคนีเป็นหินที่เกิดจากการเย็นตัวของหินหนืด ที่อยู่ลึกลงไปใต้เปลือกโลก หินหนืดที่แทรกดันตัวขึ้นมาอย่างช้าๆ ได้ระดับหนึ่งแล้วเย็นตัวแข็งเป็นหินก่อนถึงผิวโลก แร่ประกอบหินต่างๆ ได้มีการตกผลึกและเย็นตัวลงอย่างช้าๆ ผลึกของแร่จึงมีขนาดหยยาบและส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมแสดงหน้าผลึกเกาะประสานตัวกันแน่นสนิท แร่ประกอบหินประกอบด้วย Plagioclase 16.2%, Quartz 5.4%, K-Fieldspar 5%, Biotite 2.7%, Hornblende 0.5%, Ore/Rest tr, Groundmass 70% (Atherton et al., 1992) จากการศึกษาอายุหินแกรนิตโดยวิธีไอโซโทปพบว่าหินแกรนิตตากมีอายุตั้งแต่ 66.4–360 ล้านปี โดยหินแกรนิตอายุอ่อนจะอยู่ทางทิศตะวันตกของจังหวัดตาก โดยทำการจัดซื้อจากร้านค้าหินประดับ

3.2 การตัดตัวอย่างหินแกรนิต

ในการจัดเตรียมตัวอย่างหินแกรนิตเบื้องต้นได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

1) การจัดเตรียมตัวอย่างหินแกรนิตสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว และในสามแกน โดยตัดให้มีรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด $5 \times 5 \times 10 \text{ cm}^3$ ดังรูปที่ 3.1

2) การจัดเตรียมตัวอย่างหินแกรนิตสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิล ตามมาตรฐาน ASTM D3967 โดยตัดให้มีรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 5.4 cm มีความหนาเท่ากับ 2.7 cm ดังรูปที่ 3.2 ในตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 แสดงขนาดของตัวอย่างหินแกรนิตที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างหินแกรนิตสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวและในสามแกน



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างหินแกรนิตสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิลตามมาตรฐาน ASTM D3967

ตารางที่ 3.1 ขนาดของตัวอย่างหินแกรนิตที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวและในสามแกน

| Specimen No. | Diameter (cm) | Width (cm) | Height (cm) | Density (g/cc) |
|--------------|---------------|------------|-------------|----------------|
| U-T-GR-1 | 5.20 | 5.17 | 10.02 | 2.49 |
| U-T-GR-2 | 5.17 | 5.13 | 10.13 | 2.49 |
| U-T-GR-3 | 5.18 | 5.15 | 9.98 | 2.53 |
| U-T-GR-4 | 5.18 | 5.16 | 10.15 | 2.46 |
| U-T-GR-5 | 5.22 | 5.20 | 10.08 | 2.45 |
| U-T-GR-6 | 5.07 | 5.11 | 10.00 | 2.58 |
| U-T-GR-7 | 5.05 | 5.05 | 10.00 | 2.62 |
| U-T-GR-8 | 5.07 | 5.07 | 10.06 | 2.59 |
| U-T-GR-9 | 5.09 | 5.09 | 10.00 | 2.60 |
| U-T-GR-10 | 5.07 | 5.07 | 10.05 | 2.60 |
| U-T-GR-11 | 5.05 | 4.96 | 10.00 | 2.66 |
| U-T-GR-12 | 5.08 | 5.01 | 10.07 | 2.64 |
| U-T-GR-13 | 5.04 | 5.04 | 10.04 | 2.64 |
| U-T-GR-14 | 5.03 | 5.12 | 10.01 | 2.57 |
| U-T-GR-15 | 5.08 | 5.20 | 10.05 | 2.56 |
| U-T-GR-16 | 4.96 | 5.06 | 9.95 | 2.54 |
| U-T-GR-17 | 4.97 | 5.02 | 10.21 | 2.57 |
| U-T-GR-18 | 4.95 | 4.97 | 9.96 | 2.58 |
| U-T-GR-19 | 4.92 | 4.92 | 9.96 | 2.61 |
| U-T-GR-20 | 4.93 | 5.07 | 10.02 | 2.54 |
| U-T-GR-21 | 4.98 | 4.08 | 10.22 | 2.67 |
| U-T-GR-22 | 4.78 | 5.01 | 10.15 | 2.62 |
| U-T-GR-23 | 5.01 | 5.01 | 10.14 | 2.56 |
| U-T-GR-24 | 4.95 | 5.02 | 10.22 | 2.60 |
| U-T-GR-25 | 4.95 | 5.02 | 10.24 | 2.59 |
| U-T-GR-26 | 4.95 | 4.95 | 10.24 | 2.60 |
| U-T-GR-27 | 5.01 | 5.01 | 10.25 | 2.57 |
| U-T-GR-28 | 4.94 | 5.00 | 9.97 | 2.59 |
| U-T-GR-29 | 5.20 | 5.01 | 9.97 | 2.59 |
| U-T-GR-30 | 5.13 | 5.08 | 10.02 | 2.61 |

ตารางที่ 3.1 ขนาดของตัวอย่างหินแกรนิตที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวและในสามแกน (ต่อ)

| Specimen No. | Diameter (cm) | Width (cm) | Height (cm) | Density (g/cc) |
|--------------|---------------|------------|-------------|----------------|
| U-T-GR-31 | 5.13 | 5.07 | 10.02 | 2.60 |
| U-T-GR-32 | 5.07 | 5.09 | 10.01 | 2.59 |
| U-T-GR-33 | 5.01 | 4.99 | 10.02 | 2.58 |
| U-T-GR-34 | 5.11 | 5.07 | 10.03 | 2.59 |
| U-T-GR-35 | 5.01 | 5.07 | 10.02 | 2.60 |
| U-T-GR-36 | 4.96 | 4.87 | 9.96 | 2.61 |
| U-T-GR-37 | 5.14 | 5.07 | 10.05 | 2.59 |

ตารางที่ 3.2 ขนาดของตัวอย่างหินแกรนิตที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิล

| Specimen No. | Diameter (cm) | Height (cm) | Density (g/cc) |
|--------------|---------------|-------------|----------------|
| BZ-GR-1 | 5.49 | 2.82 | 2.50 |
| BZ-GR-2 | 5.49 | 2.81 | 2.50 |
| BZ-GR-3 | 5.49 | 2.82 | 2.48 |
| BZ-GR-4 | 5.46 | 2.75 | 2.52 |
| BZ-GR-5 | 5.45 | 2.75 | 2.51 |
| BZ-GR-6 | 5.46 | 2.77 | 2.41 |
| BZ-GR-7 | 5.46 | 2.74 | 2.53 |
| BZ-GR-8 | 5.45 | 2.73 | 2.57 |
| BZ-GR-9 | 5.46 | 2.75 | 2.58 |
| BZ-GR-10 | 5.44 | 2.87 | 2.53 |
| BZ-GR-11 | 5.47 | 2.85 | 2.50 |
| BZ-GR-12 | 5.47 | 2.88 | 2.49 |
| BZ-GR-13 | 5.47 | 2.84 | 2.51 |
| BZ-GR-14 | 5.45 | 2.86 | 2.50 |
| BZ-GR-15 | 5.46 | 2.76 | 2.48 |
| BZ-GR-16 | 5.45 | 2.75 | 2.49 |
| BZ-GR-17 | 5.49 | 2.82 | 2.50 |
| BZ-GR-18 | 5.49 | 2.81 | 2.50 |
| BZ-GR-19 | 5.49 | 2.82 | 2.48 |

บทที่ 4

การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

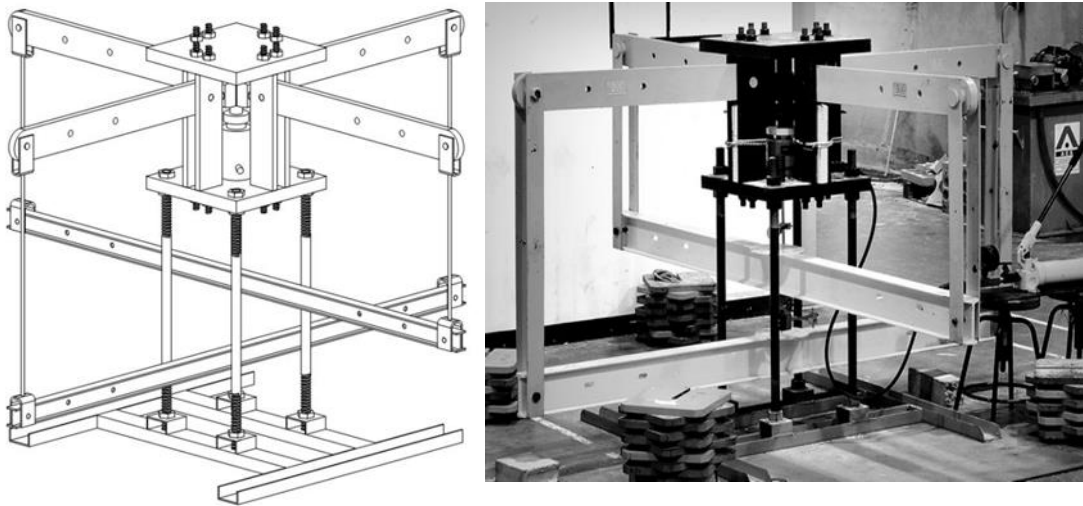
4.1 วัตถุประสงค์

เนื้อหาในบทนี้อธิบายถึงขั้นตอน วิธีการ และข้อปฏิบัติในการทดสอบกำลังรับแรงกด และกำลังรับแรงดึงสูงสุดภายใต้อุณหภูมิ 0, 30, 100, 300 และ 500°C และผันแปรความเค้นล้อมรอบที่ 0, 3, 7 และ 12 MPa โดยสมการในการคำนวณได้จากการจำลองความเค้นในสามทิศทางภายใต้การผันแปรอุณหภูมิและความเค้นล้อมรอบ

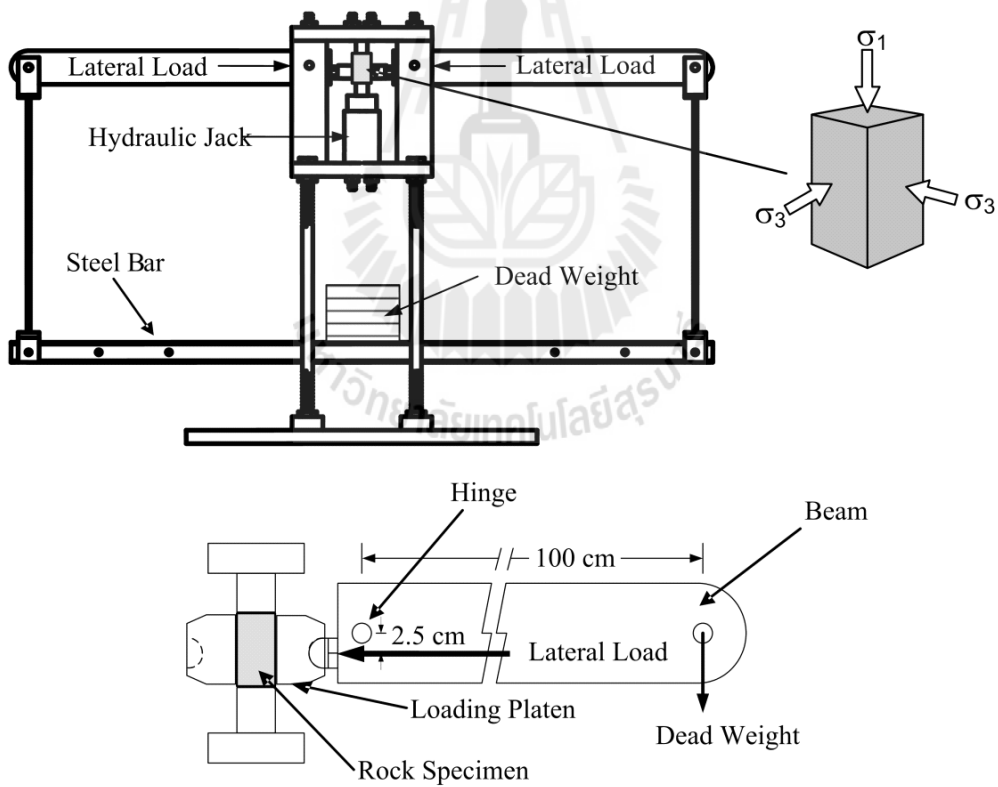
4.2 โครงกทดสอบในสามแกนจริง

โครงกทดสอบในสามแกนจริงได้นำมาใช้ในงานวิจัยนี้โดยมีปัจจัยพื้นฐานของการออกแบบ 3 ประการ คือ 1) เพื่อกำหนดค่าความเค้นด้านข้าง (σ_2 และ σ_3) ให้คงที่ในขณะที่ทำการทดสอบ 2) สามารถทดสอบตัวอย่างหินที่มีขนาดเท่ากับหรือใหญ่กว่าแท่งตัวอย่างหินที่ใช้ทดสอบ กำลังรับแรงกดสูงสุดในสามแกนแบบดั้งเดิมและ 3) สามารถวัดค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกนหลักได้โดยตรง

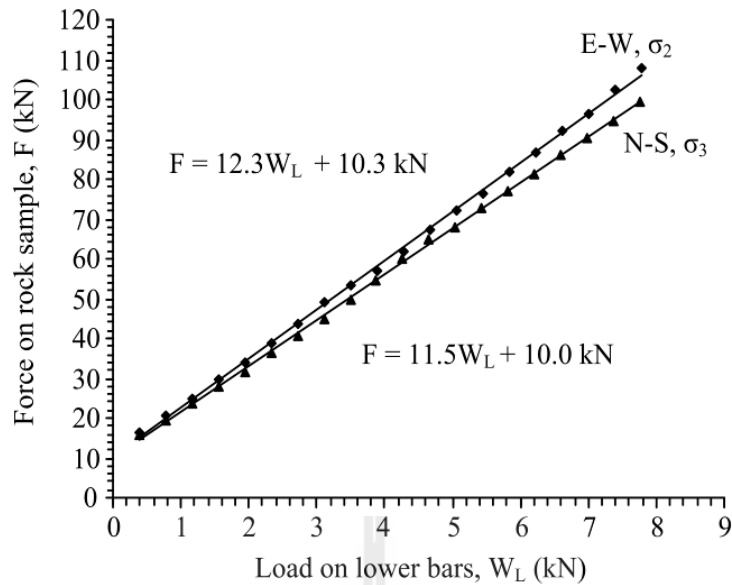
รูปที่ 4.1 แสดงโครงกทดสอบในสามแกนจริง (Walsri et al., 2009) ที่ประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อทดสอบค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวและในสามแกน ซึ่งค่าความเค้นด้านข้างที่กระทำบนตัวอย่างหินในแต่ละด้านจะได้รับจากแกนของคานทอดแรง (Loading plater) ในส่วนล่างของคานรับตุ้มน้ำหนัก (Steel bar) จะใช้เหล็กเส้นแขวนตุ้มน้ำหนัก (Dead weight) เชื่อมต่อระหว่างจุดปลายของคานทั้งสองข้างที่จุดกึ่งกลางของคานรับตุ้มน้ำหนักเพื่อใช้ใส่ตุ้มน้ำหนักในการดึงแกนของคานทอดแรงทั้งสองข้างลงดังแสดงในรูปที่ 4.2 ที่จุดปลายด้านในของคานทอดแรงจะใช้เพลาเชื่อมต่อกับเสายึดคานทอดแรงที่อยู่ในแต่ละด้านของโครงกทดสอบ ในขณะที่ทำการทดสอบคานทอดแรงทุกข้างจะปรับให้อยู่ในแนวระนาบ ซึ่งจะส่งผลต่อแรงกดด้านข้างบนตัวอย่างหินที่จุดกึ่งกลางของโครงกทดสอบ และได้กำหนดระยะห่างของเหล็กเส้นแขวนตุ้มน้ำหนักที่ใช้แขวนคานรับตุ้มน้ำหนักจากจุดปลายด้านนอกถึงปลายด้านใน อัตราส่วนของแรงจะมีค่าเท่ากับ 12.3 ในทิศตะวันออก-ตะวันตก (E-W) และ 11.5 เท่าในทิศเหนือ-ใต้ (N-S) ซึ่งได้ทำการสอบเทียบโดย Electronic load cell (รูปที่ 4.3) อัตราส่วนของแรงที่ได้นี้จะนำมาใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแท่งตัวอย่างด้านข้างด้วยการวัดอัตราการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของแท่งเหล็กทั้งสองที่อยู่ข้างล่าง ส่วนแรงกระทำด้านข้าง (σ_2 และ σ_3) ได้ออกแบบให้สามารถให้ความเค้นมากกว่า 50 MPa และมีไฮดรอลิกเป็นอุปกรณ์ให้ความเค้นกระทำในแนวตั้ง (σ_1)



รูปที่ 4.1 โครงกวดทดสอบในสามแกนจริง



รูปที่ 4.2 องค์ประกอบของโครงกวดทดสอบในสามแกนจริง



รูปที่ 4.3 การสอบเทียบอัตราส่วนของแรงโดย Electronic load cell เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างด้านข้างของตัวอย่างหิน

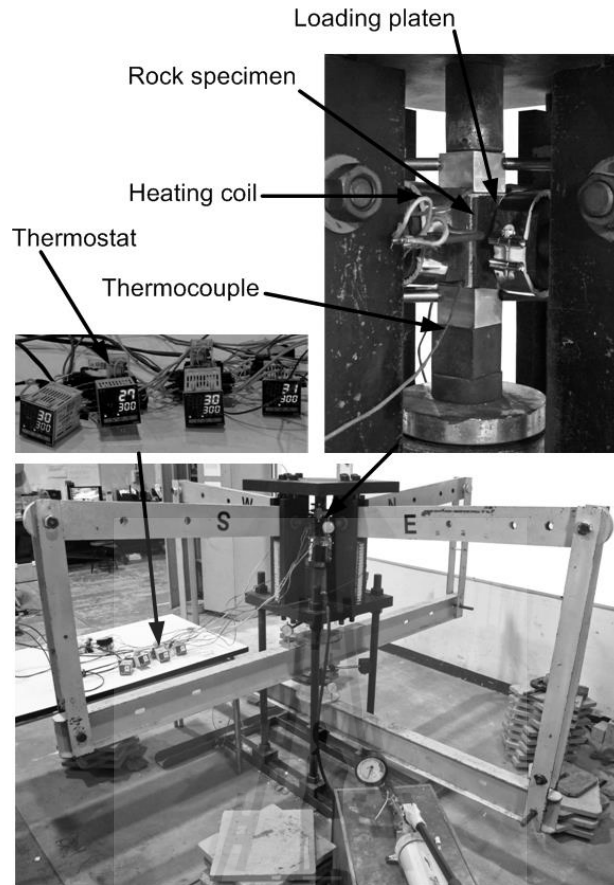
สามารถให้ความเค้นสูงมากกว่า 100 MPa เครื่องทดสอบสามารถรองรับขนาดของตัวอย่างหิน ได้ตั้งแต่ $2.5 \times 2.5 \times 2.5 \text{ cm}^3$ ถึง $5 \times 5 \times 100 \text{ cm}^3$ การทดสอบกับแท่งตัวอย่างที่มีขนาดและรูปร่าง แตกต่างกันจะต้องมีการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างเบ้ากดทั้งสองข้างให้เหมาะสม

4.3 อุปกรณ์ให้ความร้อน

อุปกรณ์ให้ความร้อนแก่ตัวอย่างหินประกอบด้วย อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (Thermostat) เบ้ากดให้ความร้อน (Loading platen) และอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple) ดัง แสดงในรูปที่ 4.4 ในการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างหินจะใช้เวลาทั้งสิ้น 24 ชั่วโมง ก่อนทำการ ทดสอบ สามารถอธิบายหน้าที่การใช้งานได้ดังนี้

4.3.1 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ

ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิและจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังขดลวดให้ความร้อนเพื่อเพิ่ม อุณหภูมิตามที่กำหนด และจะทำการตัดกระแสไฟฟ้าอัตโนมัติเมื่อถึงอุณหภูมิที่กำหนดไว้



รูปที่ 4.4 การติดตั้งเบ้ากวดให้ความร้อนกับชุดลวดให้ความร้อนเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิและอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

4.3.2 เบ้ากวดให้ความร้อน

ประกอบด้วย เบ้ากวด ชุดลวดให้ความร้อน (Heater coil) ฉนวนกันความร้อน (Insulation) สามารถทำได้โดยนำชุดลวดให้ความร้อนพันรอบเบ้ากวด แล้วหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน เบ้ากวดให้ความร้อนจะทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนและนำหนักไปยังตัวอย่างหิน

4.3.3 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

เป็นสายทองแดงเชื่อมต่อระหว่างเทอร์มิสตัดกับตัวอย่างหินเพื่อตรวจวัดอุณหภูมิของตัวอย่างหิน

4.4 การทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวและในสามแกน

วิธีการทดสอบแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ

4.4.1 การปรับเพิ่มและลดอุณหภูมิของตัวอย่างหิน

การทดสอบภายใต้อุณหภูมิสูง ได้ทำการติดตั้งเบ้ากดให้ความร้อนขนาด 4.8×4.8 cm² กับตัวอย่างหิน ซึ่งเบ้ากดจะรับความร้อนจากขดลวดให้ความร้อนที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิและอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ ส่วนการทดสอบภายใต้อุณหภูมิต่ำ ในการปรับลดอุณหภูมิได้นำตัวอย่างหินและเบ้ากดเข้าเครื่องทำความเย็นเพื่อลดอุณหภูมิ โดยการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิได้ดำเนินการเป็นเวลาทั้งสิ้น 24 ชั่วโมง ก่อนการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

4.4.2 การทดสอบและการตรวจวัดการเคลื่อนตัว

การทดสอบและการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหินเพื่อหาค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดได้มีการผันแปรความเค้นล้อมรอบเท่ากับ 0, 3, 7 และ 12 MPa ที่อุณหภูมิเท่ากับ 0, 30, 100, 300 และ 500°C มีวิธีการและขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) นำตัวอย่างหินติดตั้งกับโครงกดทดสอบ โดยยกคานในแนวตะวันออก-ตะวันตก เพื่อสอดตัวอย่างหินพร้อมกับเบ้ากดเข้าไปในแท่นกด จากนั้นปล่อยคานลงเพื่อให้เบ้ากดชนกับตัวอย่างหิน
- 2) ติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิตัวอย่างหินแนวตะวันออก-ตะวันตก
- 3) ยกคานในแนวเหนือ-ใต้ เพื่อสอดตัวอย่างหินพร้อมกับเบ้ากดเข้าไปในแท่นกด แล้วปล่อยคานลงเพื่อให้เบ้ากดชนกับตัวอย่างหิน
- 4) ติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิตัวอย่างหินแนวเหนือ-ใต้
- 5) นำเบ้ากดติดตั้งด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างหินเพื่อให้แรงกดในแนวแกน
- 6) เปิดเครื่องอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิปรับอุณหภูมิสูงตามต้องการ
- 7) ให้ความเค้นล้อมรอบกับตัวอย่างโดยประกอบคานด้านล่างทั้งสองแกนและใส่น้ำหนักกดทับ (แผ่นเหล็กตันรูปสี่เหลี่ยม) ตามที่ได้ออกแบบไว้
- 8) กดทดสอบตัวอย่างหินด้วยปั๊มไฮดรอลิกจนกระทั่งเกิดการวิบัติ (ในระหว่างการทดสอบทำการจดบันทึกค่าการเคลื่อนตัวและแรงกด)

ในการตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหิน ได้ดำเนินการติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัว (Dial Gauge) ทั้งหมด 3 ทิศทาง คือ แนวความเค้นหลักและความเค้นล้อมรอบ

4.5 การคำนวณผลการทดสอบ

4.5.1 การคำนวณค่าความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ย

การคำนวณค่าความเค้นเฉือน (τ_{oct}) และความเค้นเฉลี่ย (σ_m) ของหินแกรนิตที่พื้นแปรความเค้นล้อมรอบและอุณหภูมิ สามารถหาได้จากสมการ (Jaeger et al., 2007)

$$\tau_{oct} = (1/3) [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 + \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]^{1/2} \quad (4.1)$$

$$\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3 \quad (4.2)$$

4.5.2 การคำนวณค่าความเค้นยึดติดและค่ามุมเสียดทาน

การคำนวณค่าความเค้นยึดติด (c) และค่ามุมเสียดทาน (ϕ) ของหินแกรนิตที่พื้นแปรความเค้นล้อมรอบและอุณหภูมิ สามารถหาได้จากสมการ (Jaeger et al., 2007)

$$\sigma_1 = \sigma_c + \sigma_3 \tan^2 [(\pi/4) + (\phi/2)] \quad (4.3)$$

$$\sigma_1 = 2c \tan [(\pi/4) + (\phi/2)] \quad (4.4)$$

4.5.3 การคำนวณค่าคุณสมบัติความยืดหยุ่น

การคำนวณค่าคุณสมบัติความยืดหยุ่นสำหรับความเค้นในสามมิติได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสามารถหาได้จากสมการ (Jaeger and Cook, 1979)

$$G = (1/2) (\tau_{oct,e} / \gamma_{oct,e}) \quad (4.5)$$

$$3\sigma_{m,e} = (3\lambda + 2G) \Delta \quad (4.6)$$

$$E = 2G (1 + \nu) \quad (4.7)$$

$$\nu = \lambda / 2(\lambda + G) \quad (4.8)$$

| | | |
|--------|------------------|---|
| โดยที่ | G | คือ สัมประสิทธิ์ความแข็ง |
| | E | คือ สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น |
| | λ | คือ ค่าคงที่ Lamé |
| | v | คือ อัตราส่วนปัวซอง |
| | $\tau_{oct,e}$ | คือ ความเครียดเฉือน |
| | $\gamma_{oct,e}$ | คือ ความเค้นเฉือน |
| | $\sigma_{m,e}$ | คือ ความเค้นเฉลี่ย |
| | Δ | คือ ความเครียดเชิงปริมาตรที่ระดับ 40% ของความเค้นสูงสุด |

4.5.4 การคำนวณค่าพลังงานความเครียด

การคำนวณค่าพลังงานความเครียดของการทดสอบในงานวิจัยนี้เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดในสามมิติ ซึ่งสามารถแสดงในรูปสมการ

$$W_m = (3/2) \sigma_m \varepsilon_m = \sigma_m^2 / 2K \quad (4.9)$$

$$W_d = (3/2) \tau_{oct} \gamma_{oct} = (3/4G) \tau_{oct}^2 \quad (4.10)$$

| | | |
|--------|-----------------|-------------------------------------|
| โดยที่ | W_m | คือ พลังงานความเครียดเฉลี่ย |
| | W_d | คือ พลังงานความเครียดเบี่ยงเบน |
| | τ_{oct} | คือ ความเค้นเฉือน |
| | γ_{oct} | คือ ความเครียดเฉือน |
| | σ_m | คือ ความเค้นเฉลี่ย |
| | ε_m | คือ ความเครียดเฉลี่ยที่จุดแตกของหิน |

4.6 การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิล

การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิลแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ

4.6.1 การปรับอุณหภูมิของตัวอย่างหินก่อนการทดสอบ

ตัวอย่างหินแกรนิตที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิลภายใต้อุณหภูมิสูง ดำเนินการโดยนำตัวอย่างหินและเข้ากวดเข้าตู้อบเพื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ 100, 300 หรือ 500°C ตามการทดสอบ ส่วนตัวอย่างหินในการทดสอบที่อุณหภูมิต่ำ ดำเนินการโดยนำตัวอย่างหินและเข้ากวดเข้าเครื่องทำความเย็นเพื่อลดอุณหภูมิให้อยู่ที่ 0°C การเพิ่มหรือลดอุณหภูมิได้ดำเนินการเป็นเวลาทั้งสิ้น 24 ชั่วโมง ก่อนการทดสอบ

4.6.2 วิธีการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิล

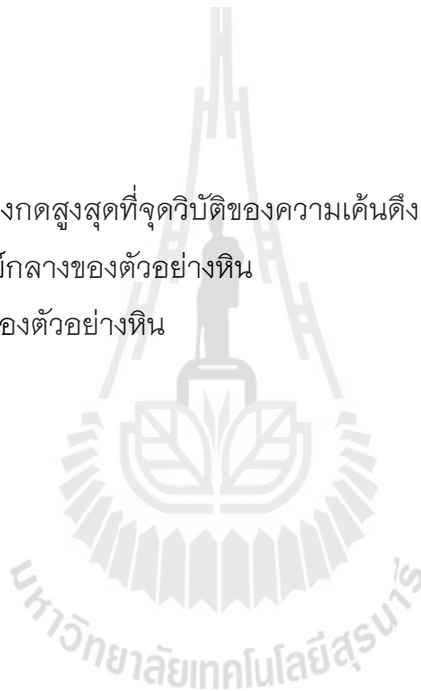
การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบบราซิลได้ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3967 คือ ตัวอย่างหินจะถูกกดตามแนวของเส้นผ่าศูนย์กลางด้วยอัตราความเร็วประมาณ 0.5–1.0 MPa/s จนกระทั่งหินแตก และทำการจดบันทึกค่าแรงกดสูงสุด เพื่อนำไปคำนวณค่ากำลังรับแรงดึงต่อไป

4.6.3 การคำนวณผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการได้นำมาคำนวณค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิล (σ_B) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (Jaeger and Cook, 1979)

$$\sigma_B = 2P/\pi DL \quad (4.11)$$

โดยที่ P คือ กำลังรับแรงกดสูงสุดที่จุดวิบัติของความเค้นดึงแบบบราซิล
D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของตัวอย่างหิน
L คือ ความยาวของตัวอย่างหิน



บทที่ 5

ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

5.1 วัตถุประสงค์

เนื้อหาในบทนี้เสนอผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วย ค่าความเค้นสูงสุดในแกนเดียวและในสามแกน และค่าความเค้นดึงสูงสุดแบบบราซิล โดยมีการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความแข็งของหินแกรนิตตั้งได้อธิบายในบทที่ 4

5.2 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ผลการทดสอบแบ่งเป็น 2 ชุด คือ 1) ผลการทดสอบกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวและในสามแกน 2) ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิล ผลลัพธ์ที่ได้แสดงค่าความแข็งของหินแกรนิตภายใต้การผันแปรอุณหภูมิและความเค้นล้อมรอบ และค่าคุณสมบัติความยืดหยุ่นซึ่งได้จากการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างระหว่างการทดสอบของหินในสามทิศทาง

5.2.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวและในสามแกน

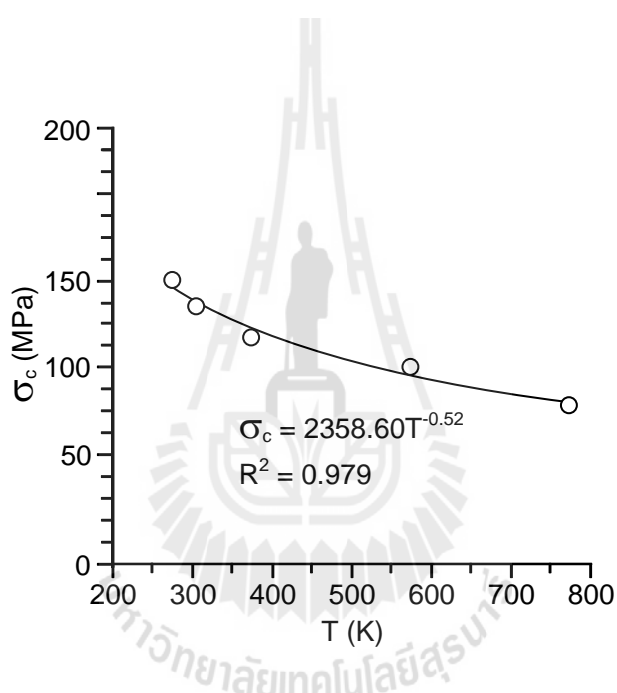
ตารางที่ 5.1 เสนอผลการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวภายใต้การผันแปรอุณหภูมิ ประกอบด้วย ค่าความหนาแน่น ค่าอุณหภูมิ และค่าความแข็งของตัวอย่างหิน รูปที่ 5.1 แสดงความเค้นสูงสุดในแกนเดียวในฟังก์ชันของอุณหภูมิ ผลที่ได้ระบุว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นหินแกรนิตจะอ่อนตัวลง ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการยกกำลัง

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงกดในสามแกนภายใต้การผันแปรอุณหภูมิและความเค้นล้อมรอบ ประกอบด้วย ค่าความหนาแน่น ค่าอุณหภูมิ และค่าความแข็งของตัวอย่างหิน รูปที่ 5.2 แสดงความเค้นหลักสูงสุดในฟังก์ชันของความเค้นหลักต่ำสุดภายใต้อุณหภูมิ ผลการทดสอบระบุว่าหินแกรนิตจะอ่อนตัวภายใต้อุณหภูมิสูงขึ้น สามารถอธิบายด้วยสมการยกกำลังดังแสดงในรูปที่ 5.2

รูปที่ 5.3 แสดงลักษณะการแตกของตัวอย่างหินจากการทดสอบกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวและในสามแกน ผลจากการทดสอบกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวระบุว่า ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C (373 K) แสดงลักษณะการแตกในแนวเฉียง และที่อุณหภูมิสูงกว่า 300°C (573 K) แสดงลักษณะการแตกแบบแยกออกจากกันตามแนวยาวที่ขนานกับแรงกด ส่วนการทดสอบกำลังรับแรงกดสูงสุดในสามแกนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C และความเค้นล้อมรอบน้อยกว่า 7 MPa แสดงลักษณะการแตกในแนวเฉียง และที่อุณหภูมิสูงกว่า 300°C และความเค้นล้อมรอบมากกว่า 7 MPa แสดงลักษณะการแตกในแนวเฉียงแบบเป็นชุด

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวภายใต้อุณหภูมิต่างๆ

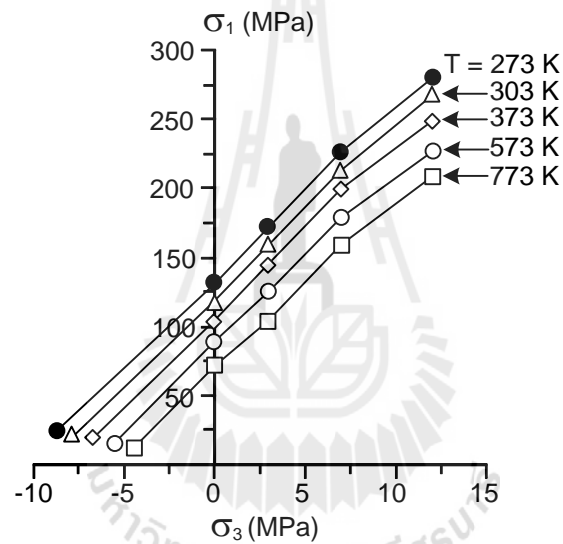
| Specimen No. | Density (g/cc) | Temperature (Kelvin) | σ_c (MPa) |
|--------------|----------------|----------------------|------------------|
| U-T-GR-37 | 2.59 | 273 | 131.09 |
| U-T-GR-10 | 2.61 | 303 | 118.81 |
| U-T-GR-09 | 2.60 | 373 | 104.07 |
| U-T-GR-13 | 2.64 | 573 | 90.43 |
| U-T-GR-07 | 2.62 | 773 | 73.08 |



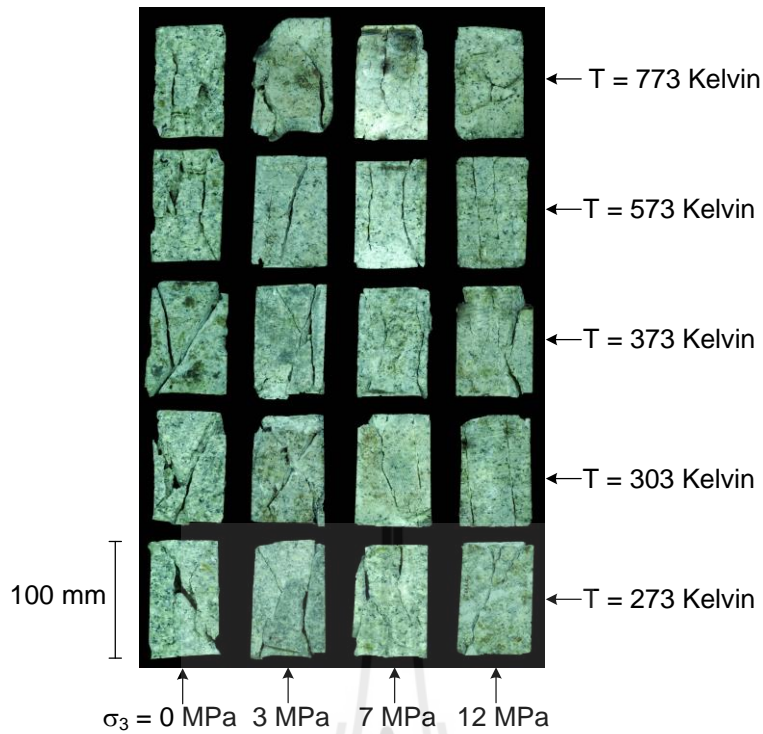
รูปที่ 5.1 ความเค้นหลักสูงสุดในแกนเดียวในฟังก์ชันของอุณหภูมิ

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงกดในสามแกนภายใต้การผันแปรอุณหภูมิและความเค้นล้อมรอบ

| σ_3 (MPa) | σ_1 (MPa) | | | | |
|------------------|------------------|--------|--------|--------|--------|
| | 273 K | 303 K | 373 K | 573 K | 773 K |
| 3 | 169.26 | 161.13 | 143.41 | 127.68 | 104.16 |
| 7 | 222.21 | 215.15 | 198.53 | 180.14 | 157.92 |
| 12 | 277.77 | 269.20 | 250.64 | 231.83 | 211.68 |



รูปที่ 5.2 ความเค้นหลักสูงสุดในฟังก์ชันของความเค้นหลักต่ำสุดภายใต้อุณหภูมิ



รูปที่ 5.3 ลักษณะการแตกของตัวอย่างหินจากการทดสอบกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว และในสามแกนภายใต้การผันแปรอุณหภูมิและความเค้นล้อมรอบ

5.2.2 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิล

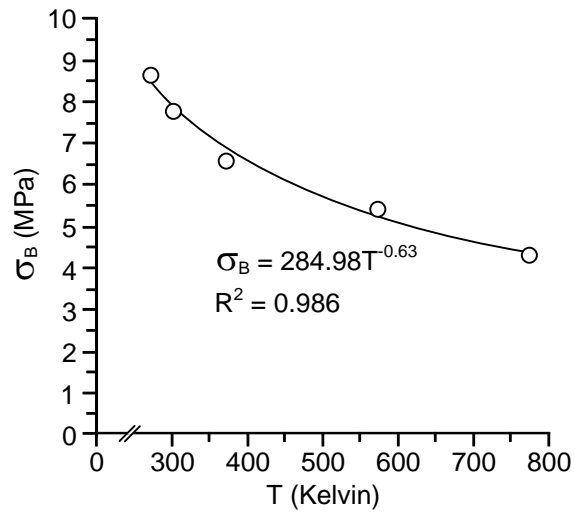
ตารางที่ 5.3 เสนอผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิลภายใต้การผันแปรอุณหภูมิ รูปที่ 5.4 แสดงค่าความเค้นดึงสูงสุดแบบบราซิลในฟังก์ชันของอุณหภูมิ ซึ่งผลการทดสอบระบุว่าค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดของหินแกรนิตจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของตัวอย่างหินสูงขึ้นสามารถอธิบายได้ด้วยสมการยกกำลัง

รูปที่ 5.5 แสดงลักษณะการแตกแบบดึงแต่เกิดจากการกดในทิศที่ตั้งฉากกันของตัวอย่างหินจากการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิลภายใต้การผันแปรอุณหภูมิ

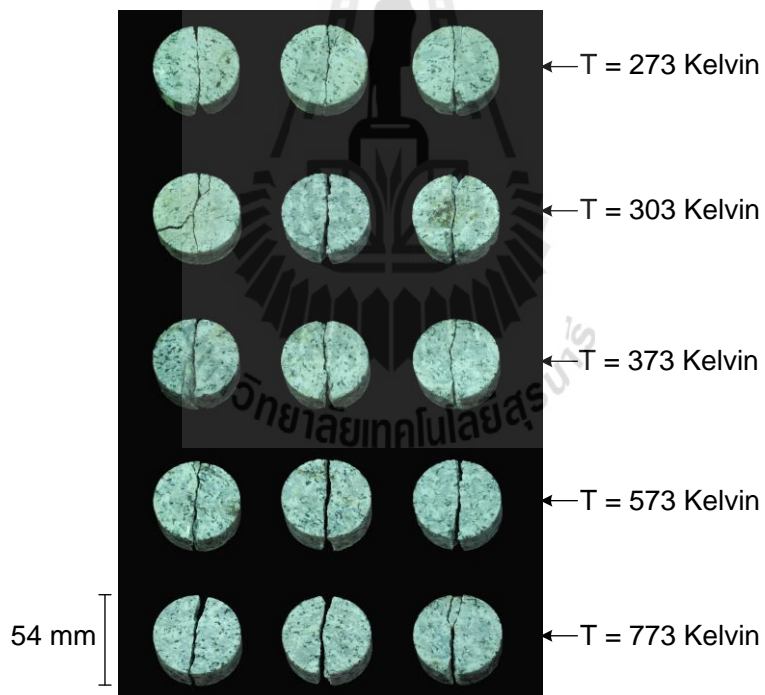
ผลการทดสอบกำลังรับแรงกดและกำลังรับแรงดึงภายใต้การผันแปรอุณหภูมิจะนำมาวิเคราะห์และสร้างสมการเชิงคณิตศาสตร์เพื่อพัฒนาเกณฑ์การแตกของหินแกรนิตในบทต่อไป

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิลภายใต้การผันแปรอุณหภูมิ

| Specimen No. | Density (g/cc) | Temperature (Kelvin) | σ_B (MPa) |
|--------------|----------------|----------------------|------------------|
| BZ-GR-1 | 2.54 | 273 | 8.64 |
| BZ-GR-2 | 2.53 | 273 | 8.67 |
| BZ-GR-3 | 2.50 | 273 | 8.64 |
| BZ-GR-4 | 2.57 | 303 | 7.64 |
| BZ-GR-5 | 2.58 | 303 | 7.86 |
| BZ-GR-6 | 2.57 | 303 | 7.78 |
| BZ-GR-7 | 2.64 | 373 | 6.85 |
| BZ-GR-8 | 2.63 | 373 | 6.58 |
| BZ-GR-9 | 2.51 | 373 | 6.32 |
| BZ-GR-10 | 2.48 | 573 | 5.31 |
| BZ-GR-11 | 2.45 | 573 | 5.46 |
| BZ-GR-12 | 2.50 | 573 | 5.54 |
| BZ-GR-13 | 2.53 | 773 | 4.29 |
| BZ-GR-14 | 2.60 | 773 | 4.43 |
| BZ-GR-15 | 2.52 | 773 | 4.25 |



รูปที่ 5.4 ความเค้นดึงสูงสุดแบบบราซิชในฟังก์ชันของอุณหภูมิ



รูปที่ 5.5 ลักษณะการแตกของตัวอย่างหินจากการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิช ภายใต้การผันแปรอุณหภูมิ

บทที่ 6

การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

6.1 วัตถุประสงค์

เนื้อหาในบทนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเกณฑ์การแตกของตัวอย่างหินแกรนิต ภายใต้การผันแปรของอุณหภูมิและความเค้นล้อมรอบ โดยอาศัยแนวคิดของการกักเก็บพลังงาน ความเครียดในตัวอย่างหินแกรนิตก่อนเกิดการวิบัติ ซึ่งพลังงานความเครียดนี้จะพิจารณาทั้ง พลังงานกล (ความเค้นล้อมรอบที่ให้กับตัวอย่างหินแกรนิต) และพลังงานความร้อน

6.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของหินแกรนิต

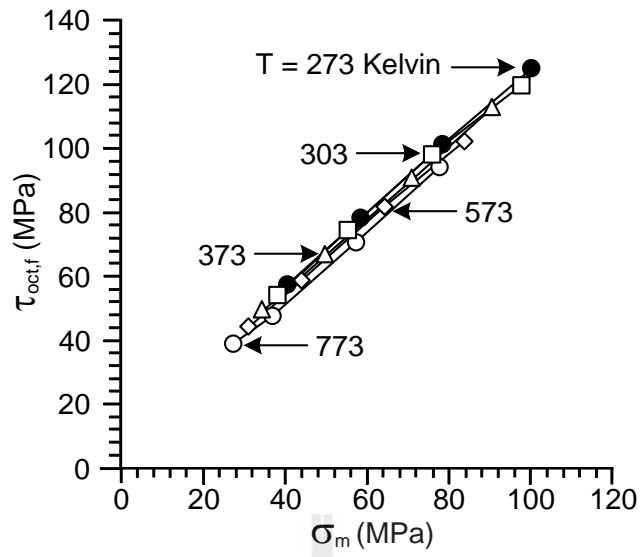
ตารางที่ 6.1 เสนอผลการทดสอบในรูปของค่าความเค้นเฉือนในสามมิติ ค่าความเค้นเฉื่อย ค่าปัจจัยความยืดหยุ่น พลังงานความเครียดเบี่ยงเบน และพลังงานความเครียดเฉื่อย ซึ่งค่าทั้งหมดนี้คำนวณจากค่าความเค้นและความเครียดที่จุดวิบัติในแต่ละตัวอย่าง รูปที่ 6.1 แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างความเค้นเฉือนในสามมิติและความเค้นเฉื่อย ผลระบุว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความเค้นเฉือนในสามมิติที่ทำให้หินแกรนิตเกิดการวิบัติจะมีค่าลดลง สำหรับค่าความเค้นยึดติด (Cohesion) และค่ามุมเสียดทานภายใน (Friction angle) ผลที่ได้ระบุว่าค่าความเค้นยึดติดและค่ามุมเสียดทานภายในจะมีค่าลดลงตามสมการยกกำลังเมื่ออุณหภูมิของตัวอย่างหินแกรนิตเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 6.2

จากผลการทดสอบในบทที่ 5 สามารถคำนวณค่าปัจจัยความยืดหยุ่นจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในสามแกนโดยผลที่ได้ระบุว่า สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E) สัมประสิทธิ์ความแข็งแรง (G) และสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นแบบก้อน (K) จะมีค่าลดลงตามสมการยกกำลังเมื่ออุณหภูมิของตัวอย่างหินแกรนิตเพิ่มขึ้น แต่ค่าอัตราส่วนปัวซอง (ν) จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิของตัวอย่างหินแกรนิตเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6.3

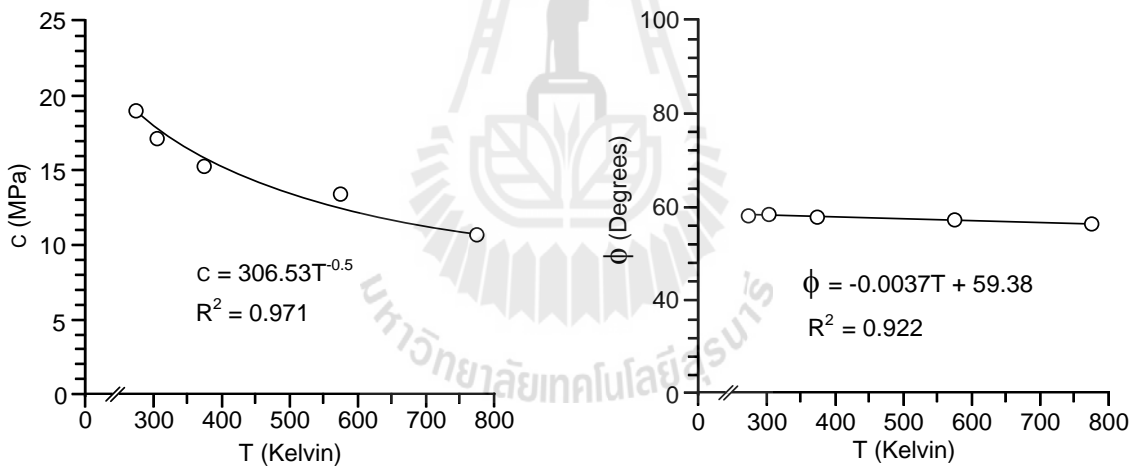
ความเค้นเฉือนที่จุดวิบัติ ความเค้นเฉื่อย และสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นดังกล่าวข้างต้นที่สัมพันธ์กับการผันแปรของอุณหภูมิและความเค้นล้อมรอบจะนำมาใช้ในการสร้างเกณฑ์การแตกของหินแกรนิต

ตารางที่ 6.1 ค่าคุณสมบัติความยืดหยุ่นและพลังงานความเครียดของหินแกรนิตที่จุดแตก

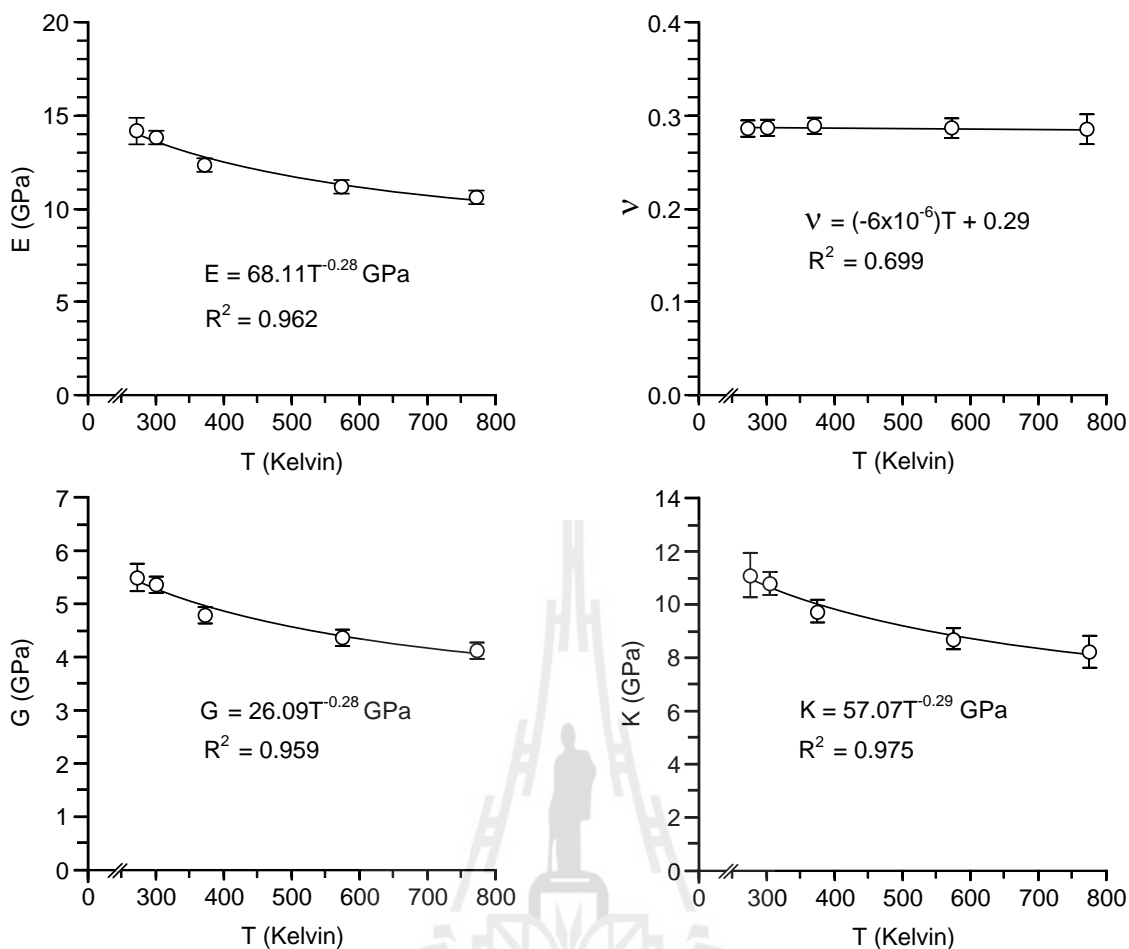
| T (K) | σ_m (MPa) | τ (MPa) | E (GPa) | ν | G (GPa) | K (GPa) | W_d (MPa) | W_m (MPa) |
|----------|---------------------|-----------------|------------|-----------|------------|------------|----------------|----------------|
| 273 | 43.67 | 61.79 | 13.35 | 0.28 | 5.17 | 10.41 | 0.55 | 0.09 |
| 273 | 58.67 | 78.37 | 14.05 | 0.28 | 5.47 | 10.81 | 0.84 | 0.16 |
| 273 | 78.67 | 101.45 | 14.87 | 0.29 | 5.72 | 12.34 | 1.35 | 0.25 |
| 273 | 100.33 | 125.28 | 14.53 | 0.28 | 5.68 | 10.94 | 2.07 | 0.46 |
| 273 | Mean±SD | | 14.19±0.68 | 0.29±0.01 | 5.51±0.25 | 11.13±0.84 | - | - |
| 303 | 39.67 | 56.01 | 13.63 | 0.28 | 5.33 | 10.23 | 0.44 | 0.08 |
| 303 | 55.67 | 74.54 | 13.93 | 0.28 | 5.44 | 10.55 | 0.77 | 0.15 |
| 303 | 76.33 | 98.12 | 13.92 | 0.29 | 5.39 | 11.15 | 1.34 | 0.26 |
| 303 | 98.00 | 120.00 | 13.74 | 0.29 | 5.31 | 11.12 | 2.03 | 0.43 |
| 303 | Mean±SD | | 13.81±0.15 | 0.29±0.01 | 5.37±0.06 | 10.76±0.45 | - | - |
| 373 | 34.67 | 49.06 | 12.41 | 0.28 | 4.85 | 9.36 | 0.37 | 0.06 |
| 373 | 50.00 | 66.18 | 12.24 | 0.28 | 4.77 | 9.36 | 0.69 | 0.13 |
| 373 | 71.33 | 90.28 | 12.33 | 0.30 | 4.76 | 10.02 | 1.28 | 0.25 |
| 373 | 91.00 | 112.49 | 12.38 | 0.30 | 4.78 | 10.11 | 1.99 | 0.41 |
| 373 | Mean±SD | | 12.34±0.07 | 0.29±0.01 | 4.79±0.04 | 9.71±0.41 | - | - |
| 573 | 30.00 | 42.63 | 11.00 | 0.28 | 4.29 | 8.46 | 0.32 | 0.05 |
| 573 | 44.33 | 58.77 | 11.40 | 0.27 | 4.48 | 8.37 | 0.58 | 0.12 |
| 573 | 64.67 | 81.62 | 11.35 | 0.29 | 4.42 | 8.80 | 1.13 | 0.24 |
| 573 | 84.33 | 102.04 | 11.00 | 0.30 | 4.23 | 9.17 | 1.85 | 0.39 |
| 573 | Mean±SD | | 11.19±0.22 | 0.29±0.01 | 4.35±0.11 | 8.70±0.36 | - | - |
| 773 | 24.33 | 39.00 | 10.67 | 0.28 | 4.17 | 8.08 | 0.27 | 0.04 |
| 773 | 37.00 | 47.68 | 10.62 | 0.26 | 4.20 | 7.47 | 0.41 | 0.09 |
| 773 | 57.67 | 71.14 | 10.60 | 0.30 | 4.08 | 8.79 | 0.93 | 0.19 |
| 773 | 78.00 | 94.13 | 10.61 | 0.29 | 4.10 | 8.54 | 1.62 | 0.36 |
| 773 | Mean±SD | | 10.63±0.03 | 0.28±0.01 | 4.14±0.06 | 8.22±0.58 | - | - |



รูปที่ 6.1 ความเค้นเฉือนในสามมิติที่จุดวิกฤติในฟังก์ชันของความเค้นเฉลี่ย



รูปที่ 6.2 ค่าความเค้นยึดติดและค่ามุมเสียดทานภายในในฟังก์ชันของอุณหภูมิ



รูปที่ 6.3 ค่าปัจจัยความยืดหยุ่นในฟังก์ชันของอุณหภูมิ

6.3 การพัฒนาเกณฑ์การแตกของหินแกรนิต

งานวิจัยนี้ได้นำกฎของพลังงานความเครียดมาประยุกต์ใช้เพื่ออธิบายความแข็งแรงและการเปลี่ยนรูปร่างของตัวอย่างหินแกรนิตภายใต้อุณหภูมิที่ผันแปร โดยสมมติว่าภายใต้พลังงานความเครียดเฉลี่ยระดับหนึ่ง พลังงานความเครียดเบี่ยงเบนจะมีค่าคงที่ ผลจากการคำนวณเชิงสถิติระบุว่าพลังงานความเครียดเบี่ยงเบน (W_d) จะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตรงกับพลังงานความเครียดเฉลี่ย (W_m) ดังสมการ

$$W_d = A \cdot W_m + B \quad (6.1)$$

ค่าคงที่ A และ B จะขึ้นกับความแข็งและความเค้นยึดติดของหินแกรนิตในแต่ละอุณหภูมิ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการวิเคราะห์เชิงสถิติของผลการทดสอบ เป็นที่น่าสังเกตว่าความสัมพันธ์ระหว่าง W_d และ W_m มีความคล้ายคลึงกันในประเด็นอัตราการเพิ่มของค่า W_d ต่อค่า W_m (ความชื้น) ที่พลังงานความเครียดเฉลี่ยระดับหนึ่ง อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าพลังงานความเครียดเบี่ยงเบนมีค่าลดลง ความแตกต่างของเส้นพลังงานความเครียดในแต่ละอุณหภูมิสะท้อนให้เห็นถึงความแตกต่างของพลังงานความร้อนของตัวอย่างหินแกรนิตนั่นเอง

ถ้าสมมติให้หินแกรนิตมีคุณสมบัติยึดหยุ่นเชิงเส้นตรงก่อนเกิดการวิบัติค่า W_d และ W_m สามารถคำนวณจากผลการทดสอบในแต่ละตัวอย่างหินได้ดังสมการ

$$W_d = \frac{3}{4} \left(\frac{T_{oct}^2}{G} \right) \quad (6.2)$$

$$W_m = \left(\frac{\sigma_m^2}{2K} \right) \quad (6.3)$$

โดยที่คุณสมบัติเชิงยึดหยุ่น G และ K สามารถคำนวณในฟังก์ชันของอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ ดังนั้น ความแข็งของหินแกรนิตในรูปของพลังงานความเครียดเบี่ยงเบนจึงสามารถนำมาสัมพันธ์กับระดับอุณหภูมิที่ต่างกันได้ จากผลการทดสอบสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงยึดหยุ่นต่างๆ กับการผันแปรของอุณหภูมิ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$E = 68.17 \cdot T^{-0.28} \quad (6.4)$$

$$G = 26.09 \cdot T^{-0.28} \quad (6.5)$$

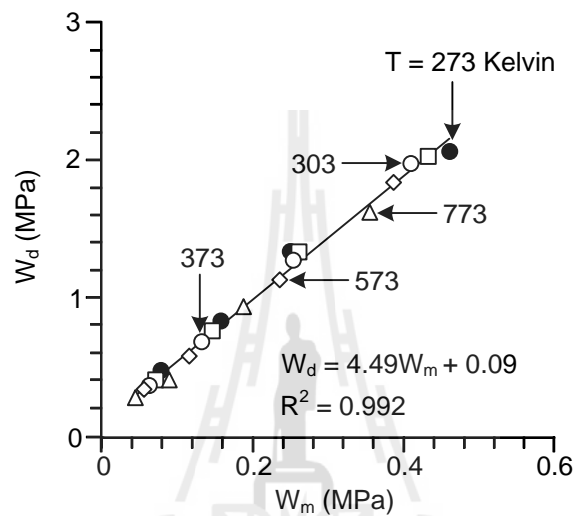
$$K = 54.07 \cdot T^{-0.29} \quad (6.6)$$

$$v = (-6 \cdot 10^{-6}) \cdot T + 0.29 \quad (6.7)$$

โดยการแทนค่าสมการ (6.4) ถึงสมการ (6.7) ลงในสมการ (6.2) และ (6.3) ซึ่งค่าพลังงานความเครียดเบี่ยงเบนที่จุดวิบัติควรจะคำนึงถึงผลกระทบจากอุณหภูมิของตัวอย่างหินแกรนิตเพื่อให้อยู่ในเกณฑ์การแตก หลังจากแทนค่าดังกล่าวข้างต้นค่าพลังงานความเครียดเบี่ยงเบนที่ได้รวมทั้งผลกระทบของอุณหภูมิและความเค้นล้อมรอบสามารถแสดงอยู่ในสมการเดียวคือ

$$W_d = A_{Th} \cdot W_m + B_{Th} \quad (6.8)$$

โดยที่ค่า A_{Th} และ B_{Th} เป็นค่าคงที่ที่ขึ้นกับความแข็งและการตอบสนองต่ออุณหภูมิที่ผันแปรของหินแกรนิต สำหรับหินแกรนิตที่มีค่า $A_{Th} = 4.49$ และค่า $B_{Th} = 0.09$ MPa เมื่อนำสมการดังกล่าวมาเทียบเคียงกับผลการทดสอบจะมีความสอดคล้องเป็นอย่างดี โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของความสัมพันธ์ $R^2 = 0.992$ ดังแสดงในรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 พลังงานความเครียดเบี่ยงเบนในฟังก์ชันของพลังงานความเครียดเฉลี่ย

บทที่ 7

บทสรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบด้านอุณหภูมิต่อคุณสมบัติเชิงกล-ศาสตร์ของหินแกรนิตเพื่อนำผลที่ได้มาพัฒนาเกณฑ์การแตกของหินแกรนิตภายใต้อุณหภูมิและความเค้นล้อมรอบ ด้วยการนำหินแกรนิตชุดตากลมาตัดให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด $5 \times 5 \times 10 \text{ cm}^3$ เพื่อใช้ทดสอบหาค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียวเดียวและในสามแกนด้วยโครงกดทดสอบในสามแกน โดยผันแปรความเค้นล้อมรอบจาก 0, 3, 7 ถึง 12 MPa และผันแปรอุณหภูมิจาก 0, 30, 100, 300 และ 500°C ($273-773 \text{ K}$) ผลงานวิจัยระบุว่าค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและความเค้นกดสูงสุดของหินแกรนิตจะลดลงถ้าอุณหภูมิของตัวอย่างเพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์แบบสมการยกกำลังสามารถอธิบายผลกระทบของอุณหภูมิต่อความแข็งและความยืดหยุ่นของหินได้ดี ผลการศึกษาสอดคล้องกับผู้วิจัยหลายท่าน (Vostseen and Schellschmidt, 2003; Shimada, 2000; Okatov et. al, 2003; Araujo et al. 1997; Inada et al. 1997; Xu et al. 2009) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงกดและกำลังรับแรงดึงลดลง ซึ่งเกณฑ์การแตกที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ได้อาศัยแนวคิดเกี่ยวกับพลังงานความเครียดสูงสุดที่หินแกรนิตจะรับได้ก่อนเกิดการวิบัติ พลังงานความเครียดดังกล่าวจะรวมพลังงานกลและพลังงานความร้อนเข้าด้วยกัน ในการพิจารณาปัจจัยทั้งสองนี้ได้นำค่าพลังงานความเครียดเบี่ยงเบนและพลังงานความเครียดเฉลี่ยมาคำนวณจากแต่ละตัวอย่างที่ทดสอบ เมื่อนำพลังงานทั้งสองรูปแบบมาลงจุดในแผนภูมิพบว่าในแต่ละระดับอุณหภูมิต่างกันค่าพลังงานความเครียดเบี่ยงเบนจะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตรงกับค่าพลังงานความเครียดเฉลี่ย โดยอัตราการเพิ่มขึ้นนี้จะมีลักษณะคล้ายคลึงกันสำหรับชุดการทดสอบในอุณหภูมิต่างกัน เพื่อที่จะรวมเกณฑ์การแตกของระดับอุณหภูมิเข้าด้วยกันเป็นเกณฑ์เดียว ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติความยืดหยุ่นและอุณหภูมิได้ถูกพัฒนาขึ้นในเชิงตัวเลขและนำมาแทนค่าในความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความเครียดเบี่ยงเบนและพลังงานความเครียดเฉลี่ย ผลลัพธ์ที่ได้คือเกณฑ์การแตกของหินแกรนิตเพียงชุดเดียวที่สามารถใช้คาดคะเนความเค้นสูงสุดภายใต้การผันแปรอุณหภูมิและความเค้นล้อมรอบ เกณฑ์การแตกนี้สอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการคาดคะเนเสถียรภาพและปัจจัยความปลอดภัยของหินแกรนิตที่อยู่รอบหลุมเจาะกักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรม ซึ่งหินแกรนิตในภาคสนามดังกล่าวจะอยู่ภายใต้การผันแปรอุณหภูมิและความเค้นล้อมรอบ

บรรณานุกรม

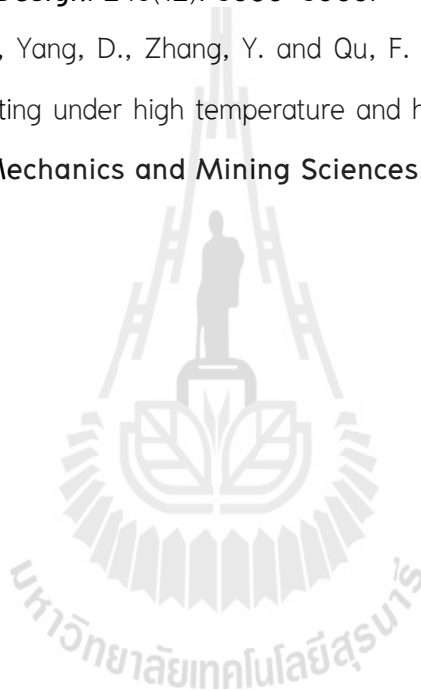
- Anderson, V. K. (2004). An evaluation of the feasibility of disposal of nuclear waste in very deep boreholes. **Department of nuclear engineering**. Cambridge, MA, MIT.
- Araujo, R. G. S., Sousa, J. L. A. O., and Bloch, M. (1997). Experimental investigation on the influence of temperature on the mechanical properties of reservoir rocks. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 34(3–4): 298–313.
- Arnold, B. W., Brady, P. V., Bauer, S. J., Herrick, C., Pye, S., and Finger, J. (2011). Reference design and operations for deep borehole disposal of high-level radioactive waste. **Sandia National Laboratories. Sandia report**. Sand 2011–6749.
- Arnold, B. W., Swift, P. N., Brady, P. V., Orrell, S. A., and Freeze, G. A. (2010). Into the deep. **Sandia National Laboratories**. Deep borehole.
- Arnold, B., and Brady, P. (2012). Nuclear waste technical review board spring meeting. **Sandia National Laboratories**. Sand2012–1383C.
- Atherton, M., Brotherton, M. and Mahawat, C. (1992) Integrated chemistry, textures, phase relations and modelling of a composite granodioritic–monzonitic batholith, Tak, Thailand. **Journal of Southeast Asian Earth Sciences**. 7(2–3): 89–112.
- ASTM D2664. Standard test method for triaxial compressive strength of undrained rock core specimens without pore pressure measurements. In **Annual Book of ASTM Standards** (Vol. 04.08). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D2938. Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens. In **Annual Book of ASTM Standards** (Vol. 04.08). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D3967. Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens. In **Annual Book of ASTM Standards** (Vol. 04.08). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- Berest, P. and Blum, P. A. (1993). In situ test in salt cavern. In **Proceedings of the 7th Symposium on Salt** (pp. 353–362). Kyoto, Japan.

- Berest, P., Brouard, B., and Durup, G. (1998). Behavior of sealed solution-mined caverns. In **Proceedings of the 4th Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 511–524). Clausthal–Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Brady, P. V. and Arnold, B. W. (2011). Pilot testing deep borehole disposal of nuclear waste. **Sandia National Laboratories**. NM Workshop report.
- Brady, P. V., Arnold, B. W., Freeze, G. A., Swift, P. N., Bauer, S. T., Kanny, J. L., Rechar, R. P. and Stein, J. S. (2009). Deep borehole disposal of high-level radioactive waste. **Sandia National Laboratories**. Sand 2009–4401.
- Carter, N. L., Horseman, S. T., Russell, J. E., and Handin, J. (1993). Rheology of rock salt. **Journal Structural Geology**. 15: 1257–1272.
- Chokski, A. H. and Langdon, T. G. (1991). Characteristics of creep deformation in ceramics. **Materials Science and Technology**. 7: 577–584.
- Closmann, P. J. and Bradley, W. B. (1979). The effect of temperature on tensile and compressive strengths and young's modulus of oil shale. **SPE Journal**. 19(5): 301–312.
- 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**. pp. 103–207.
- Cristescu, N. and Hunsche, U. (1996). A comprehensive constitutive equation for rock salt-determination and application. In **Proceedings of the 3rd Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 191–205). Clausthal–Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Durham, W. B. and Abey, A. E. (1982). Effect of pressure and temperature on the thermal properties of a salt and a quartz monzonite. In **Proceedings of the 22nd US. Symposium on Rock Mechanics**. Cambridge Mass: MIT.
- Dwivedi, R. D., Goel, R. K., Prasad, V. V. R., and Sinha, A. (2008). Thermo-mechanical properties of indian and other granites. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 45: 303–315.

- Franssen, R. C. M. W. (1998). Mechanical anisotropy of synthetic polycrystalline rock salt. **In Proceedings of the 4th Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 63–75). Clausthal–Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Gibb, F. G. F. (1999) High–temperature, very deep, geological disposal: a safer alternative for high–level radioactive waste. **Waste Management**. 19(3): 207–211.
- Ghoreychi, M. and Berest, P. (1990). Thermomechanical modelling of radioactive waste disposal in salt formations. **International of the 10th Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (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 3rd Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 53–66). Clausthal–Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Hanchen, M., Bruckner, S., and Steinfeld, A. (2011). High–temperature thermal storage using a packed bed of rocks – heat transfer analysis and experimental validation. **Applied Thermal Engineering**. 31(10): 1798–1806.
- Heins, R. W. and Friz, T.O. (1967). The effect of low temperature on the some physical properties of rock. **Drilling and rock mechanics conference**. Texas, USA.
- Inada, Y., Kinoshita, N., Ebisawa, A. and Gomi, S. (1997) Strength and deformation characteristics of rocks after undergoing thermal hysteresis of high and low temperatures. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 34(3–4): 140.e1–140.e14.
- Jaeger, J. C. and Cook, N. G. W. (1979). **Fundamentals of Rock Mechanics**. London: Chapman and Hall.
- Jaeger, J. C., Cook, N. G. W., and Zimmerman, R. W., (2007). **Fundamentals of Rock Mechanics**. Fourth Edition, Blackwell Publishing, Oxford.
- Okatov, R. P., Nizametdinov, F. K., Tsai, B. N., and Bondarenko, T. T. (2003). Time and temperature factors in construction of rock strength criteria. **Journal of mining science**. 39(2): 139–142.
- Pusch, R., Knutsson, S., Ramqvist, G., Mohammed M. H. and Pourbakhtial A. (2012). Can sealing of rock hosting a repository for highly radioactive waste be relied on?. **Natural science**. 4: 895–905.

- 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: 347–352.
- Rajendra, P., Tiwari, K. and Seshagiri, R. (2006). Post failure behaviour of a rock mass under the influence of triaxial and true triaxial confinement. **Engineering Geology**. 84(3–4): 112–129.
- Schneefub, J. and Droste, J. (1996). Thermomechanical effects in backfilled drifts. In **Proceedings of the 3rd Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 373–380). Clausthal–Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- 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: 363–378.
- Shimada, M. and Liu, J. (2000). Temperature dependence of strength of rock under high confining pressure. **Annals of Disas**. 43B-1: 75–84.
- 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 rocksalt by pressure solution. **Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics**. Geological Society Special Publication (pp. 215–227).
- Sriapai, T., Fuenkajorn, K. and Samsri, P. (2012) Effects of loading rate on strength and deformability of Maha Sarakham salt. **Engineering Geology**. 135–136: 10–23.
- Swift, P., Brady, P., Arnold, B., Freeze, G. and Bauer, S. (2009). Deep borehole disposal concepts: preliminary assessment for the disposal of used fuel assemblies. **Sandia National Laboratories**.
- Takarli, M., and Prince–Agbodjan, W. (2008). Temperature effect on physical properties and mechanical behavior of granite: experimental investigation of material damage. **Journal of ASTM international**. 5(3):1–13.
- Vosteen, H. and Schellschmidt, R. (2003). Influence of temperature on thermal conductivity, thermal capacity and thermal diffusivity for different types of rock. **Physics and Chemistry of the Earth**. Parts A/B/C. 28(9–11): 499–509.

- Walsri, C., Poonprakon, P., Thosuwan R., and Fuenkajorn, K. (2009). Compressive and tensile strengths of sandstones under true triaxial stresses. In **Proceeding 2nd Thailand Symposium on Rock Mechanics**. Chonburi, Thailand. 2: 199–218.
- Xu, X. I., Kang, Z. X., Ji, M., Ge, W. X. and Chen, J. (2009). Research of microcosmic mechanism of brittle–plastic transition for granite under high temperature. **Procedia Earth and Planetary Science**. 1(1): 432–437.
- Yun, B., Bae, B., Euh, D. and Song, C. (2010) Experimental investigation of local two–phase flow parameters of a subcooled boiling flow in an annulus. **Nuclear Engineering and Design**. 240(12): 3956–3966.
- Zhao, Y., Wan, Z., Feng, Z., Yang, D., Zhang, Y. and Qu, F. (2012) Triaxial compression system for rock testing under high temperature and high pressure. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 52: 132–138.



ประวัตินักวิจัย

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