



รหัสโครงการ SUT7-719-56-12-53

รายงานการวิจัย

ชุดโครงการวิจัย

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

โครงการวิจัยย่อย

การศึกษากำลังเฉือนของรอยแตกในหินแกรนิตภายใต้อุณหภูมิสูง
(Shear Strength of Fracture in Granite under Elevated Temperatures)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-719-56-12-53

รายงานการวิจัย

ชุดโครงการวิจัย

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

โครงการวิจัยย่อย

การศึกษากำลังเฉือนของรอยแตกในหินแกรนิตภายใต้อุณหภูมิสูง
(Shear Strength of Fracture in Granite under Elevated Temperatures)

คณะผู้วิจัย

ผู้อำนวยการชุดโครงการวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เพ็ญขจร
สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

หัวหน้าโครงการวิจัยย่อย

อาจารย์ ดร.เดโช เพ็ญภูมิ
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

วัตถุประสงค์ของการศึกษาคือเพื่อหาผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่ากำลังเฉือนของ รอยแตกในตัวอย่างหินแกรนิตชุดตาก การทดสอบค่ากำลังเฉือนในสามแกนได้ใช้โครงกดทดสอบ ในสามแกนจริง ซึ่งสามารถควบคุมความเค้นล้อมรอบให้คงที่และเพิ่มความเค้นในแนวแกนได้ ในการทดสอบได้ใช้อัตราการกดเท่ากับ 1 เมกะปาสคาลต่อวินาที และหยุดทดสอบเมื่อระยะการ เคลื่อนตัวในแนวเฉือนเท่ากับ 2 มิลลิเมตร การทดสอบแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือการทดสอบ กำลังเฉือนบนรอยแตกผิวขรุขระและการทดสอบกำลังเฉือนบนรอยแตกผิวเรียบ ตัวอย่างที่ใช้ใน การทดสอบมีขนาดเท่ากับ $5.0 \times 5.0 \times 8.7$ ลูกบาศก์เซนติเมตร พื้นที่รอยแตกมีค่าเท่ากับ 5×10 ตารางเซนติเมตร โดยทำการทดสอบภายใต้อุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง) 100, 300 และ 500 องศาเซลเซียส และผันแปรความเค้นล้อมรอบที่ 1, 3, 7, 12 และ 18 เมกะ- ปาสคาล ผลการทดสอบได้แสดงผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่ากำลังเฉือนของรอยแตกหินแกรนิต ได้อย่างชัดเจน รอยแตกผิวขรุขระที่มีค่ากำลังเฉือนลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตได้ จากการลดลงของค่ามุมเสียดทานและค่าความเค้นยึดติดเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในการศึกษาได้เสนอ สมการเอกซ์โพเนนเชียลเพื่อใช้ในการคาดคะเนค่ากำลังต้านทานการเฉือนของรอยแตกผิวขรุขระ ภายใต้อุณหภูมิของช่วงการทดสอบ ค่ากำลังเฉือนของตัวอย่างรอยแตกผิวเรียบมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส เนื่องจากกระบวนการ Stick-slip ผู้วิจัยแนะนำว่าควรมี การศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลกระทบของความขรุขระและองค์ประกอบแร่ของรอยแตกต่อกำลัง เฉือนของรอยแตก

Abstract

The objective of this study is to experimentally determine the shear strength of fractures in Tak granite under elevated temperatures. Triaxial shear tests are performed using a polyaxial load frame. The effects of temperature on the peak shear strengths of tension-induced fractures and smooth surfaces are determined. The polyaxial load frame applies confining (lateral) stresses while the axial stress is increased. The axial load is applied at the rate of 1 MPa/s until a total displacement of 2 mm is reached. The specimens have nominal dimensions of $5.0 \times 5.0 \times 8.7 \text{ cm}^3$ and the fracture area of $5 \times 10 \text{ cm}^2$. The normal of fracture plane makes an angle of 60° with the axial (major principal) stress. The testing temperatures range from 30°C (ambient temperature), 100°C , 300°C to 500°C with confining stresses from 1, 3, 7, 12 to 18 MPa. The results clearly show the thermal effect on the friction resistance of granite fractures. For rough fracture surfaces the higher the temperatures can lower the shear strength. This can be seen also from the reductions of the friction angle and cohesion with increasing temperature. The proposed exponential equation can be used to predict the friction resistances of the fractures under temperatures within the range tested here. The shear strength of smooth surface tends to increase with temperature particularly above 100°C . This may be due to stick-slip phenomenon. More testing is needed to assess the effects of fracture roughness and mineral compositions on the fracture shear strength.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
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 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อกำลังรับแรงเฉือนของรอยแตก.....	5
2.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อกำลังรับแรงกดของหิน.....	5
2.3 ผลกระทบของความเค้นล้อมรอบต่อกำลังรับแรงกดของหิน.....	7
2.4 การอัดของเสียในหลุมลึกในหินแกรนิต.....	10
บทที่ 3 การจัดเตรียมตัวอย่าง.....	13
3.1 ตัวอย่างหินแกรนิต.....	13
3.1.1 ตัวอย่างที่มีรอยแตกผิวขรุขระ.....	13
3.1.2 ตัวอย่างที่มีรอยแตกผิวเรียบ.....	18
3.2 การให้ความร้อน.....	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.1 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ.....	19
3.2.2 เบ้ากวดให้ความร้อน.....	19
3.2.3 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ.....	19
บทที่ 4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	21
4.1 วัตถุประสงค์.....	21
4.2 โครงกวดทดสอบในสามแกน.....	21
4.3 วิธีการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกน.....	23
4.3.1 การเตรียมตัวอย่างหินสำหรับการทดสอบ.....	24
4.3.2 วิธีติดตั้งตัวอย่างหินแกรนิตในโครงกวดทดสอบและการตรวจวัด.....	24
4.4 การคำนวณผลการทดสอบ.....	25
บทที่ 5 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	27
5.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตกผิวขรุขระ.....	27
5.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตกผิวเรียบ.....	27
บทที่ 6 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	35
6.1 สมการสำหรับกำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกผิวขรุขระ.....	35
6.2 สมการสำหรับกำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกผิวเรียบ.....	36
บทที่ 7 สรุปผลงานวิจัย.....	39
7.1 สรุปและวิจารณ์ผล.....	39
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	40
บรรณานุกรม.....	41
ประวัตินักวิจัย.....	45

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	กำลังต้านทานแรงกดเฉลี่ยและมอดูลัสความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่างๆ..... 8
3.1	คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างหินแกรนิต (ผิวยูรุษระ)..... 16
5.1	ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกผิวยูรุษระ..... 28
5.2	ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกผิวเรียบ..... 32
6.1	ค่าคงที่ที่คำนวณจากโปรแกรม SPSS สำหรับรอยแตกผิวยูรุษระ..... 36
6.2	ค่าคงที่ที่คำนวณจากโปรแกรม SPSS สำหรับรอยแตกผิวเรียบ..... 38



สารบัญญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 แผนผังแสดงรูปแบบการกักเก็บกากนิวเคลียร์ในหลุมเจาะที่ระดับลึก.....	2
2.1 เกณฑ์การแตกจากการทดสอบ multiple failure ของชั้นหินทราย.....	6
2.2 โครงกตทดสอบในสามแกนจริง.....	10
3.1 ตัวอย่างหินแกรนิตขนาด $5 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ ที่ใช้ในการทดสอบ.....	14
3.2 การให้แรงกดแบบแนวเส้น.....	14
3.3 การตัดตัวอย่างหินให้ได้ขนาด $5.0 \times 5.0 \times 8.7 \text{ cm}^3$	15
3.4 ตัวอย่างของสแกนไลน์จากรอยแตกของหินแกรนิตบางส่วนที่นำมาประเมิน ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (Barton, 1982) $JRC = 12-16$	15
3.5 ตัวอย่างระนาบรอยแตกผิวขรุขระขนาด $5 \times 10 \text{ cm}^{216}$	16
3.6 ตัวอย่างระนาบรอยแตกผิวเรียบขนาด $5 \times 10 \text{ cm}^2$	19
3.7 อุปกรณ์ให้ความร้อน.....	20
4.1 โครงกตทดสอบในสามแกน.....	22
4.2 องค์ประกอบของโครงกตทดสอบในสามแกน.....	22
4.3 การสอบเทียบอัตราส่วนของแรงเสียดทานด้านข้างที่เกิดจาก σ_3 โดยใช้ Electronic load cell อัตราส่วนนี้สามารถนำไปใช้ในการคำนวณแก้ไขค่า การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแท่งตัวอย่างหินด้านข้าง.....	23
4.4 การติดตั้งเบ้ากดให้ความร้อน.....	25
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดกับค่าการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน ของรอยแตกผิวขรุขระ.....	29
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดกับค่าความเค้นตั้งฉากของรอยแตก ผิวขรุขระ.....	30
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวของรอยแตกในแนวเฉือนและค่า การเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉาก.....	31
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดกับค่าการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนของ รอยแตกผิวเรียบบางตัวอย่าง.....	33
5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดกับค่าความเค้นตั้งฉากของรอยแตก ผิวเรียบ.....	34

สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
6.1	การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบ (จุด) กับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS (เส้นทึบ) ของรอยแตกผิวขรุขระในหินแกรนิต.....	36
6.2	การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบ (จุด) กับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS (เส้นทึบ) ของรอยแตกผิวเรียบในหินแกรนิต.....	37



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

เทคโนโลยีการกักเก็บกากกัมมันตรังสีด้วยวิธีการอัดวัสดุลงไปหลุมเจาะระดับลึก (Deep Hole Injection) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ได้มีวิวัฒนาการมานานแต่เพิ่งจะแพร่หลายมากขึ้นเมื่อ 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 และมวลหินมีค่าความซึมผ่านต่ำ นอกจากนั้นหินแกรนิตยังมีความคงทนต่ออุณหภูมิสูงซึ่งเป็นอุณหภูมิที่อาจเกิดจากการสลายตัว (Decay) ของธาตุกัมมันตรังสีของกากกัมมันตรังสีดังกล่าว

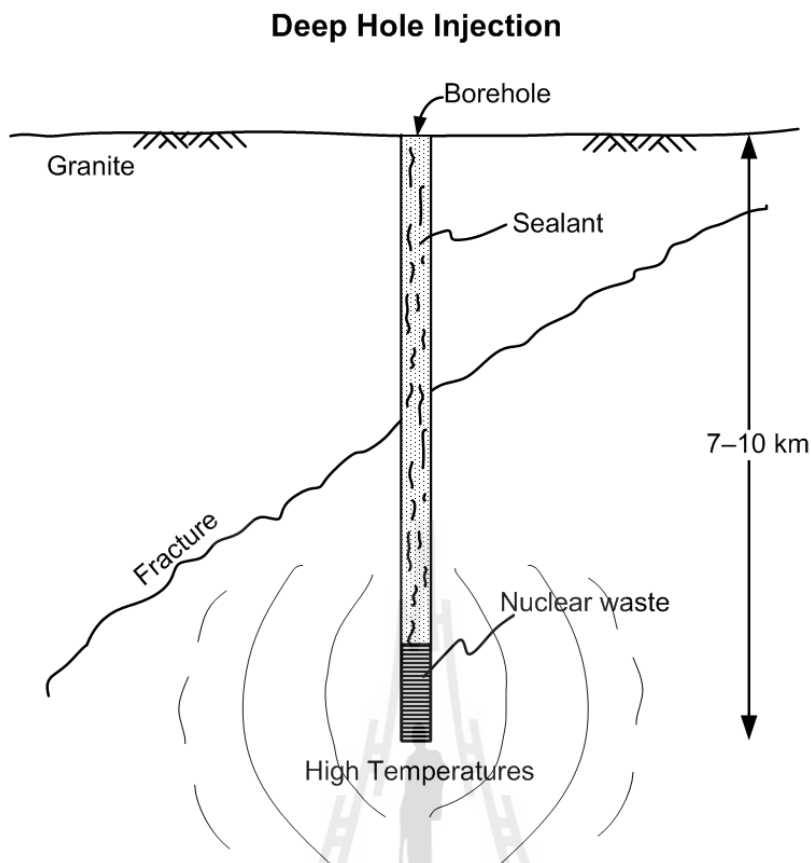
ในอนาคตอันใกล้ประเทศไทยจำเป็นต้องมีการพัฒนาพลังงานนิวเคลียร์ ซึ่งข้อดีประการหนึ่งคือ ในประเทศไทยมีมวลหินแกรนิตจำนวนมาก สามารถใช้ในการกักเก็บของเสียจากโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ดังกล่าวได้อย่างพอเพียง จึงจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่จะต้องมีการศึกษาศักยภาพของมวลหินแกรนิตในเชิงกลศาสตร์และเชิงพลศาสตร์สำหรับเทคโนโลยีการทิ้งของเสียในระดับลึก เพื่อให้มั่นใจว่าจะไม่เกิดการรั่วไหลเข้าสู่ชั้นน้ำบาดาลหรือผิวดิน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกในหินแกรนิตภายใต้อุณหภูมิระหว่าง 30-500°C โดยมีการผันแปรความเค้นในแนวตั้งจากไม่น้อยกว่า 4 ระดับ ผลการศึกษาจะนำไปประยุกต์ใช้ในการประเมินเสถียรภาพของหลุมเจาะสำหรับกักเก็บกากกัมมันตรังสีที่อาจมีรอยแตกอยู่ในบริเวณใกล้เคียง

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการ
- 2) หินที่ใช้ทดสอบอยู่ภายใต้อุณหภูมิระหว่าง 30-500°C
- 3) ความเค้นตั้งฉากของการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกได้ทดสอบอย่างน้อย 4 ระดับ
- 4) ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบไม่น้อยกว่า 16 ตัวอย่าง
- 5) การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานสากล ASTM



รูปที่ 1.1 แผนผังแสดงรูปแบบการกักเก็บกากนิวเคลียร์ในหลุมเจาะที่ระดับลึก

1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

เทคโนโลยีการกักเก็บกากนิวเคลียร์ด้วยวิธีทิ้งในหลุมเจาะระดับลึกในหมวดหินแกรนิตถึงแม้จะมีข้อดีหลายประการทางด้านเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์และศักยภาพในการกักเก็บเชิงจลศาสตร์ แต่ในบางพื้นที่มวลหินแกรนิตอาจมีรอยแตกและรอยร้าวที่เกิดจากการเคลื่อนตัวเนื่องจากการผันแปรของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น อุณหภูมิดังกล่าวเกิดจากการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีที่อาจส่งผลให้เกิดการเคลื่อนตัว สภาวะดังกล่าวสามารถจำลองได้ในห้องปฏิบัติการด้วยการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนภายใต้อุณหภูมิและแรงดันสูง ผลที่ได้สามารถนำมาสร้างเกณฑ์การเคลื่อนตัวหรือกำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกในสภาวะภายใต้การกักเก็บกากนิวเคลียร์

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษากำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างหิน และการรับกำลังเฉือนของมวลหินภายใต้อุณหภูมิสูงที่อยู่ในความเค้นล้อมรอบ รวมไปถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของหินแกรนิต

ขั้นตอนที่ 2 การจัดเตรียมตัวอย่างหิน

ตัวอย่างหินแกรนิตรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด $5.0 \times 5.0 \times 8.7 \text{ cm}^3$ ที่ใช้ในการทดสอบได้ถูกทำให้เกิดรอยแตกในห้องปฏิบัติการอย่างน้อย 16 ตัวอย่าง ด้วยการให้แรงดึงแบบแนวเส้น

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกในสามแกนจริง

ในขั้นตอนนี้ประกอบด้วยการทดสอบหาค่ากำลังเฉือนของรอยแตกในสามแกนจริงด้วยโครงทดสอบในสามแกนจริง (True triaxial load frame) โดยมีปัจจัยการทดสอบคือ 1) ผนังแปรอัตราส่วนระหว่างค่าความเค้นขนานกับรอยแตกกับค่าความเค้นบนรอยแตก และ 2) ผนังแปรอุณหภูมิที่ให้กับตัวอย่างทดสอบตั้งแต่ $30-500^\circ\text{C}$

ขั้นตอนที่ 4 การเปรียบเทียบผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ขั้นตอนนี้ได้นำผลการทดสอบมาหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกในสามแกนจริงภายใต้อุณหภูมิที่ผนังแปรที่มีความเค้นล้อมรอบมาทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำไปพัฒนาความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์

ขั้นตอนที่ 5 การพัฒนาความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์

ผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการได้นำไปสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์จากผลการทดสอบในรูปแบบของค่ากำลังรับแรงเฉือนของหินแกรนิตภายใต้ความเค้นล้อมรอบและรูปแบบของค่ากำลังรับแรงเฉือนของหินแกรนิตภายใต้อุณหภูมิสูง

ขั้นตอนที่ 6 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิด ขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุปได้นำเสนอโดยละเอียดในรายงานฉบับสมบูรณ์นี้ เพื่อส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ และตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ

1.6 ผลสำเร็จของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ

ผลงานวิจัยที่เสนอมานี้มีประโยชน์อย่างมากกับงานด้านธรณีวิทยา วิศวกรรม สิ่งแวดล้อม และวิศวกรรมธรณี ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

- 1) ตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารระดับนานาชาติ
- 2) เผยแพร่องค์ความรู้ให้กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั้งภาครัฐและเอกชน

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

การค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 4 ประเด็นหลัก คือ

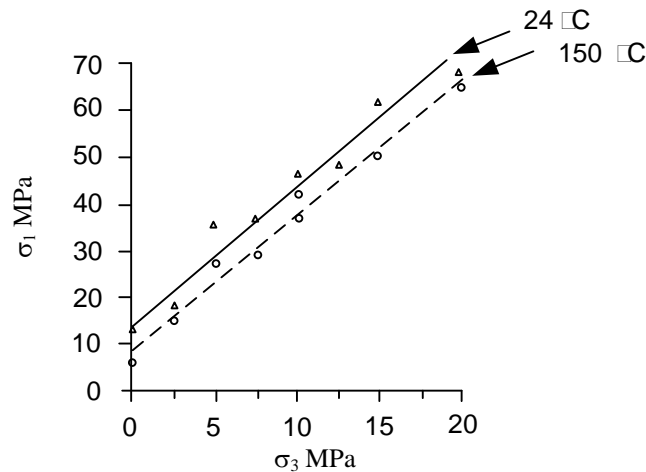
2.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อกำลังรับแรงเฉือนของรอยแตก

Garanmayeh et al. (2010) ได้ศึกษากำลังรับแรงเฉือนที่อุณหภูมิสูงของ Sn-Sb-Ag (Monolithic) และ Sn-Sb-Ag-Al₂O₃ (Composite) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของโลหะทั้งสองโดยการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนตรงแบบป้อนเฉือน (Shear punch testing) ที่อุณหภูมิในช่วง 25–130°C ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 25–130°C ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่จุดครากและค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดมีค่าลดลง

Rodrigues et al. (2011) ได้ศึกษากำลังรับแรงเฉือนบริเวณจุดต่อของคานภายใต้สภาวะไฟไหม้ จุดมุ่งหมายหลักของงานวิจัยนี้คือการตรวจวัดผลกระทบจำนวนของรูเจาะในจุดต่อกับกำลังรับแรงเฉือนแบบ Perfobond ซึ่งวิธีการประเมินกำลังรับแรงเฉือนและความเหนียวของตัวอย่างที่จุดต่อที่อุณหภูมิสูงได้ทำการให้ความร้อนกับตัวอย่างจากอุณหภูมิห้องไปถึงอุณหภูมิสูงที่ต้องการ จากนั้นให้น้ำหนักกดทับจนกระทั่งตัวอย่างหินวิบัติ ทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมของจุดต่อเหล่านี้ที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง ผลปรากฏว่าการรับแรงเฉือนที่อุณหภูมิสูงของจุดต่อเหล่านี้ไม่ดีเท่ากับอุณหภูมิห้อง

2.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อกำลังรับแรงกดของหิน

Araujo et al. (1997) ได้ทำการวิจัยคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของแหล่งกักเก็บหินในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิห้อง โดยทำการทดสอบแบบสามแกนซึ่งควบคุมการกดให้คงที่กับตัวอย่างหิน Friable sandstone จากแอ่ง Potiguar ทางตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศบราซิล ตัวอย่างได้ถูกทดสอบที่อุณหภูมิ 24°C, 80°C และ 150°C โดยความเค้นล้อมรอบจะแปรผันระหว่าง 2.5–150 MPa ค่ากำลังรับแรงกดจากผลการทดสอบสามารถระบุได้ว่า ความสามารถในการรับแรงกดจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในรูปที่ 2.1 แสดงค่าเส้นลดถอยในระนาบ σ_1 - σ_3 สำหรับอุณหภูมิ 24°C และ 150°C ของชั้นหินทราย ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า โดยเฉลี่ยแล้ว กำลังรับแรงกดจะลดลง 18% เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 24–150°C



รูปที่ 2.1 เกณฑ์การแตกจากการทดสอบ multiple failure ของชั้นหินทราย (Araujo et al., 1997)

Fall et al. (2009) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิสูงต่อกำลังและโครงสร้างขนาดเล็กของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ถม เช่น ความพรุน โครงสร้างของรูพรุน โดยชุดการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์หลังจากผ่านการบ่มที่เวลาต่างกันและอุณหภูมิต่างกัน ตัวอย่างที่ถูกทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C39 ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ การทดสอบกำลังรับแรงกดที่อัตราการเปลี่ยนรูปร่างคงที่ที่ 1 mm/min การเปลี่ยนรูปแนวแกนจะถูกบันทึกอัตโนมัติโดยระบบการเก็บข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์ ตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ชนิดต่างๆ ถูกทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C, 200°C, 400°C และ 600°C ในห้องปฏิบัติการ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิสูงมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ โดยทั่วไปเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 200°C จะทำให้ความแข็งแรงของซีเมนต์เพสต์ส่วนมากสูงขึ้น มีการกระจายตัวของความพรุนของซีเมนต์เพสต์เล็กน้อย เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 200°C ความแข็งแรงของซีเมนต์เพสต์จะลดลง ที่อุณหภูมิเกิน 400°C ค่ากำลังส่วนมากจะลดลงอย่างชัดเจน และยังสรุปได้ว่ากำลังรับแรงกดของซีเมนต์เพสต์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างขนาดเล็ก (ความพรุน การกระจายตัวของความพรุนและแร่)

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 เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm ตัวอย่างแต่ละกลุ่มถูกเพิ่มความร้อน 25°C, 50°C, 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C, 700°C, 800°C, 900°C, 1000°C, 1100°C, 1200°C และ

1300°C ในการทดสอบได้ควบคุมอัตราการกดที่ 0.0015 mm/s ผลการทดสอบด้วยการสแกนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงให้เห็นว่าพื้นที่ผิวรอยแตกมีลักษณะการแตกแบบผสมของรอยร้าวที่เกิดผ่านผลึก ซึ่งเกิดการแตก การเลื่อน และเกิดรอยบวมที่ผิวที่อุณหภูมิ 800°C ผลการทดสอบการหักเหของรังสีเอ็กซ์แสดงให้เห็นว่าบางผลึกของหินแกรนิตมีการเปลี่ยนแปลง และเมื่อทดสอบโดยการส่งผ่านคลื่นเสียงแสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงกดมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นประมาณ 800°C การแตกของหินแกรนิตมีการเปลี่ยนแปลงจากการแตกแบบเปราะเป็นการแตกแบบกึ่งเปราะ กำลังรับแรงกดเฉลี่ยและโมดูลัสความยืดหยุ่นมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่างๆ ในตารางที่ 2.1

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

2.3 ผลกระทบของความเค้นล้อมรอบต่อกำลังรับแรงกดของหิน

Fuenkajorn and Kenkhunthod (2010) ได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวและกำลังรับแรงกดในสามแกนโดยใช้โครงกดทดสอบหลายแกนเพื่อประเมินผลกระทบของอัตราการให้แรงต่อความแข็งแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหินทราย 3 ชนิด การเปลี่ยนแปลงความเค้นภายในแนวแกนถูกควบคุมด้วยอัตราคดที่ 0.001, 0.01, 0.1, 1.0 และ 10 MPa/s โดยรักษาความดันล้อมรอบคงที่ที่ 0, 3, 7 และ 12 MPa ความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของหินทรายเพิ่มขึ้นเป็นทวีคูณกับอัตราการให้แรง โดยอัตราการให้แรงขึ้นอยู่กับสมการการคำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและแรงเฉือน ซึ่งเป็นพื้นฐานต่อข้อสมมติฐานของพลังงานความเครียดเบี่ยงเบนคงที่ของหินที่แตกภายใต้ความเค้นตั้งฉาก จึงเป็นเหตุเป็นผลให้ได้สมการที่ขึ้นกับอัตราการให้แรงของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและแรงเฉือน ส่งผลให้เหมือนกับสมการ brittle isotropic in tact rock

ตารางที่ 2.1 กำลังต้านทานแรงกดเฉลี่ยและมอดูลัสความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่างๆ

(Xu et al., 2009)

Temperature (°C)	25	200	500	800	900	1000	1100	1200
Compressive strength σ_c (MPa)	191.90	135.96	151.90	185.22	89.94	71.61	77.98	36.09
Elastic modulus E (GPa)	38.37	28.68	31.25	25.11	11.02	8.39	6.61	2.87

Kapang et al. (2012) ได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกนจริงเพื่อตรวจสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกที่ถูกจำลองขึ้นในหินทราย 3 ชนิดของประเทศไทย โดยโครงทดสอบแบบหลายแกนได้ถูกใช้เพื่อให้ความเค้นล้อมรอบ (σ_p และ σ_o) ต่อตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นบล็อกสี่เหลี่ยมผืนผ้า และมีขนาด $76 \times 76 \times 126$ mm ระบายของรอยแตกที่ถูกจำลองขึ้นทำมุมเอียง 59.1° กับความเค้นหลักในแนวแกน โดยผลจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความเค้นล้อมรอบที่ขนานกับระนาบรอยแตกสามารถไปลดกำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกได้ภายใต้ความเค้นตั้งฉากเดียวกันรอยแตกที่อยู่ภายใต้ความเค้นล้อมรอบที่ขนานกับระนาบรอยแตกที่มีค่าสูง พบว่ามีการขยายตัวของรอยแตกมากกว่าอยู่ภายใต้ความเค้นล้อมรอบที่ขนานกับระนาบรอยแตกที่มีค่าต่ำ จากเกณฑ์ของ Coulomb ค่าของมุมเสียดทานลดลงในเชิงเอกซ์โพเนนเชียลเมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนของความเค้นล้อมรอบ (σ_p/σ_o) และค่าความเค้นยึดติดมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มค่าความเค้นล้อมรอบที่ขนานกับระนาบรอยแตก ค่าความเค้นล้อมรอบ σ_p ไม่ส่งผลกระทบต่อค่ามุมเสียดทานพื้นฐานของรอยแตกพื้นผิวเรียบ และการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกภายใต้ $\sigma_p = 0$ พบว่ามีความสัมพันธ์กันเป็นอย่างดีกับผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง ดังนั้นอาจตั้งสมมติฐานได้ว่าเมื่อมีการให้แรงด้านข้างในทิศทางที่ขนานกับระนาบรอยแตก (σ_p) และเมื่อพื้นผิวของความขรุขระได้รับความเค้นดังกล่าวก็อาจเกิดความเครียดภายในพื้นผิวรอยแตก เป็นผลให้เกิดการเฉือนหรือการเลื่อนไหลได้ง่ายกว่ากรณีที่ไม่มีความเค้นล้อมรอบ

Song and Haimson (1997) ได้จำลองหลุมเจาะในตัวอย่างหินทรายและหินแกรนิตเพื่อศึกษาพฤติกรรมและความสัมพันธ์ด้านการแตกของหินในหลุมเจาะ (Borehole breakout) และความเค้นด้วยเครื่องทดสอบแรงกดในสามแกนจริง โดยการใช้การสันนิษฐานที่ว่าสภาวะความเค้นที่ขอบเขตรอยแตกของผนังหลุมเจาะมีค่าความเค้นที่เท่ากัน ซึ่งกฎเกณฑ์ของ Mohr-Coulomb ไม่สามารถนำมาใช้ในการพิจารณาการแตกของหลุมเจาะได้ แต่กฎเกณฑ์ของแรงกดในสามแกนจริงใช้ได้ดีกว่าเนื่องจากผลของ σ_2 มีความเหมาะสมต่อขอบเขตของการแตก เช่น กฎเกณฑ์ของ Nadai ใช้สำหรับหินทราย และกฎเกณฑ์ของ Mogi ใช้สำหรับหินแกรนิต

$$\tau_{\text{oct}} = f_1 (\sigma_{\text{oct}}) \quad (2.1)$$

เมื่อ $\tau_{\text{oct}} = 1/3[(\sigma_1 - \sigma_3)/2 + (\sigma_2 - \sigma_3)/2 + (\sigma_3 - \sigma_1)/2] \cdot 1/2$

และ $\sigma_{\text{oct}} = 1/3(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$

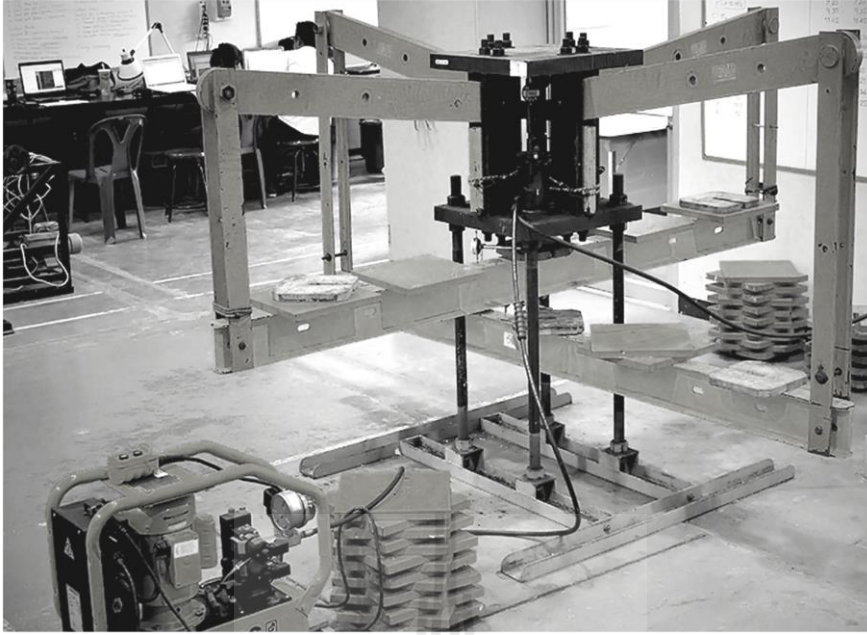
โดยที่ f_1 คือ ผลที่ได้จากการทดสอบ

$$\tau_{\text{oct}} = f_2 (\sigma_2^m) \quad (2.2)$$

เมื่อ $\sigma_{\text{oct}} = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$

โดยที่ f_2 คือฟังก์ชันที่เพิ่มขึ้นทางคณิตศาสตร์ขึ้นกับชนิดหิน การวิเคราะห์แผ่นหินบาง (Thin section) มีบทบาทสำคัญต่อกลไกทางกลศาสตร์ของการแตก และค่าความแข็งขึ้นกับชนิดของหิน

Walsri et al. (2009) ได้ทำการพัฒนาโครงการทดสอบในสามแกนจริง (รูปที่ 2.2) เพื่อหาค่ากำลังรับแรงกดและกำลังรับแรงดึงภายใต้ความเค้นในสามทิศทางจริงสำหรับการทดสอบหินทราย 3 ชนิด ภายใต้ความเค้นกดในสามแกนจริง ผลลัพธ์ที่ได้ของหินทรายเป็นแบบเท่ากันทุกทิศทาง (Transversely isotropic) โดยได้มีการตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นในทิศทางที่ขนานกับ การวางตัวของชั้นหิน แต่อัตราส่วนของปัวซองบนระนาบปกติมีค่าน้อยกว่าผลที่ได้ในทิศทางขนานกับการวางตัวของชั้นหิน ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลภายใต้แรงกดในแกนเดียวมีผลกระทบต่อค่าความเค้นหลักกลางของค่ากำลังดึงสูงสุดของหิน ซึ่งการทดสอบตัวอย่างหินในสามแกนเป็นกิจกรรมสำคัญที่รวมอยู่ในการสำรวจ วิเคราะห์ และออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมในมวลหิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างที่อยู่ใต้ดิน เช่น อุโมงค์ และเหมืองใต้ดิน เป็นต้น อย่างไรก็ตามการทดสอบแรงกดในสามแกนนี้ส่วนใหญ่จะไม่สอดคล้องกับสถานะของความเค้นที่เกิดขึ้นจริงในภาคสนาม 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



รูปที่ 2.2 โครงทดสอบในสามแกนจริง (Walsri et al., 2009)

2.4 การอัดของเสียในหลุมลึกในหินแกรนิต

Gibb (1999) กล่าวว่าความปลอดภัยในการกักเก็บของเสียกัมมันตรังสีโดยเฉพาะพลังงานที่ใช้แล้ว เป็นหนึ่งในความท้าทายของวงการวิทยาศาสตร์ในปัจจุบัน วิธีแก้ปัญหาที่แนะนำกันในระดับชาติก็คือการกำจัดทางธรณีวิทยา โดยการฝังในเหมืองและการออกแบบทางวิศวกรรมในพื้นที่กักเก็บแบบ Multi-barrier ถึงแม้จะเรียกว่าการกักเก็บในที่ลึกแต่ก็ถือว่าตื่นในทางธรณีวิทยา ของโครงการใหม่ๆ ในปัจจุบันภายใต้การพัฒนากการกักเก็บของเสียกัมมันตรังสีในหลุมที่ลึกมากๆ และมีอุณหภูมิสูง ความก้าวหน้าในองค์ความรู้เรื่องหินเปลือกโลกและของเหลวที่อยู่ระดับลึกหลายกิโลเมตรชี้ให้เห็นได้ชัดว่าการกักเก็บของเสียกัมมันตรังสีในที่ลึกมากๆ มีความปลอดภัยและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและของโครงการใหม่ๆ ได้มีความพยายามที่จะใช้ประโยชน์จากศักยภาพความร้อนที่ออกมาจากของเสียกัมมันตรังสี จึงได้มีการนำเสนอการใช้ประโยชน์จากเหมืองและหลุมเจาะ ความรู้ส่วนมากในการกักเก็บของเสียที่ประเทศสวีเดนจะทำการตรวจสอบที่ Aspö ในการกักเก็บของเสียอุณหภูมิข้างในและรอบๆ ภาชนะบรรจุของเสีย (วัสดุที่ทำจากทองแดงหรือโลหะอื่นๆ มีทั้งรูปทรงกระบอกหรือทรงลูกบาศก์ ใช้บรรจุของเสียก่อนที่จะนำไปทิ้งในหลุมเจาะหรือในเหมือง) อยู่ในระดับที่ต่ำ โดยปกติอุณหภูมิจะต่ำกว่า 150°C เพื่อลดการกักความร้อนของภาชนะบรรจุของเสียและป้องกันการพาความร้อนของน้ำบาดาลทั้งในและนอกพื้นที่กักเก็บของเสีย นอกจากนี้อุณหภูมิที่สูงกว่า 90°C สามารถทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับเบนทอไนต์ที่ปิดผลึกล้อมรอบภาชนะบรรจุของเสียได้ ปริมาณการรังสีระดับสูงในแต่ละภาชนะบรรจุ

ของเสียและระยะห่างของภาชนะบรรจุของเสียจะถูกใช้เป็นเกณฑ์ในการเลือกสถานที่และสร้าง “ความปลอดภัย” สำหรับการกักเก็บในเมือง ไม่เพียงแต่สภาพทางธรณีวิทยาและธรณีเคมีที่ต้องตรวจสอบอย่างละเอียด แต่ผลกระทบเหล่านี้ต้องมีการคาดการณ์ไว้ด้วย แม้ว่าหินอัคนีและหินแปรส่วนมากจะมีความสามารถในการซึมผ่านไม่ได้ แต่การซึมผ่านของน้ำก็ถูกควบคุมด้วยชุดรอยแตก และเป็นไปได้ยากที่หินที่ตกผลึกในชั้นบนของเปลือกโลกจะไม่มีรอยแตก



บทที่ 3

การจัดเตรียมตัวอย่าง

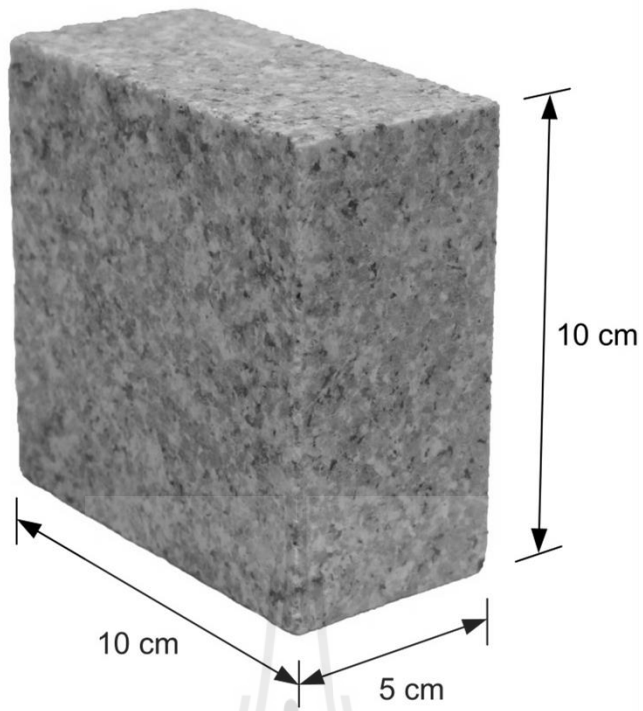
เนื้อหาในบทนี้ได้อธิบายขั้นตอน วิธีการ และข้อปฏิบัติในการจัดเตรียมตัวอย่าง หินแกรนิตเพื่อใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการและศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกในหินแกรนิตในสามแกนภายใต้อุณหภูมิ 30°C, 100°C, 300°C, และ 500°C โดยมีความเค้นล้อมรอบคงที่คือ 1, 3, 7, 12, และ 18 MPa

3.1 ตัวอย่างหินแกรนิต

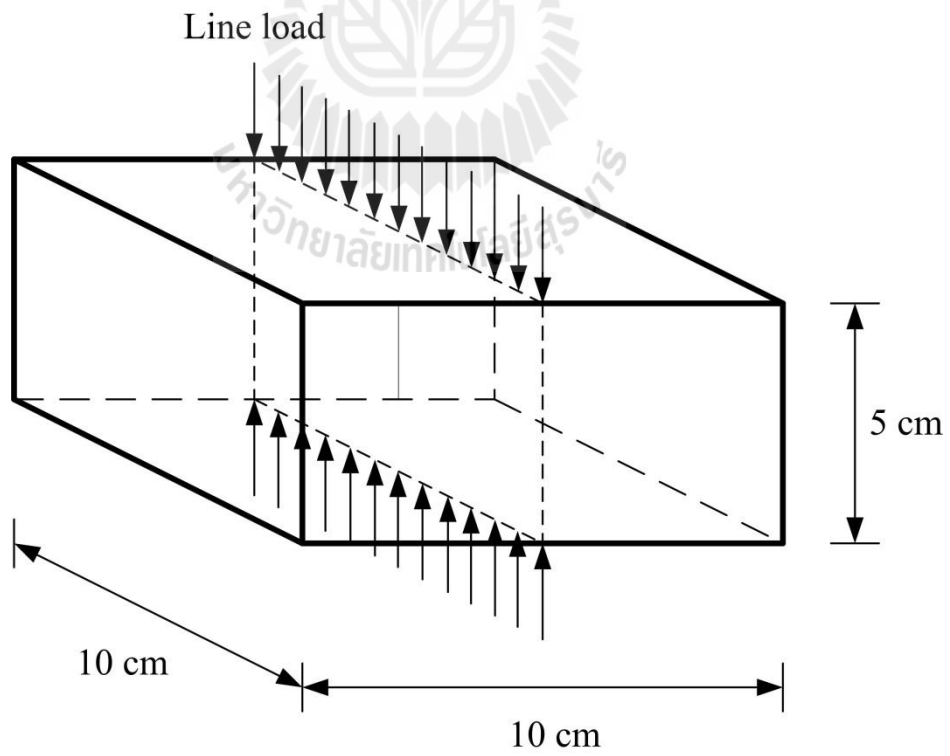
ตัวอย่างหินแกรนิตที่ใช้ในการศึกษานี้มาจากหินแกรนิตตาก (Tak Granite) ซึ่งเป็นหินที่เกิดจากการเย็นตัวของหินหนืดที่อยู่ลึกลงไปใต้เปลือกโลก หินหนืดที่แทรกดันตัวขึ้นมาอย่างช้าๆ ได้ระดับหนึ่งแล้วเย็นตัวแข็งเป็นหินก่อนถึงผิวโลก แร่ประกอบหินต่างๆ ได้มีการตกผลึกและเย็นตัวลงอย่างช้าๆ ผลึกของแร่จึงมีลักษณะหยาบและส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมแสดงหน้าผลึกเกาะประสานตัวกันแน่นสนิท แร่ประกอบหินประกอบด้วย Plagioclase 16.2%, Quartz 5.4%, K-feldspar 5%, Biotite 2.7%, Hornblende 0.5%, Ore/Rest tr, Groundmass 70% (Atherton et al., 1992) จากการศึกษาอายุหินแกรนิตโดยวิธีไอโซโทปพบว่าหินแกรนิตตากมีอายุตั้งแต่ 66.4–360 ล้านปี โดยหินแกรนิตอายุน้อยจะอยู่ทางทิศตะวันตกของจังหวัดตาก ตัวอย่างหินแกรนิตได้จัดซื้อจากร้านค้าหินประดับ สำหรับการจัดเตรียมตัวอย่างหินในห้องปฏิบัติการเพื่อใช้ในการทดสอบได้แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

3.1.1 ตัวอย่างที่มีรอยแตกผิวขรุขระ

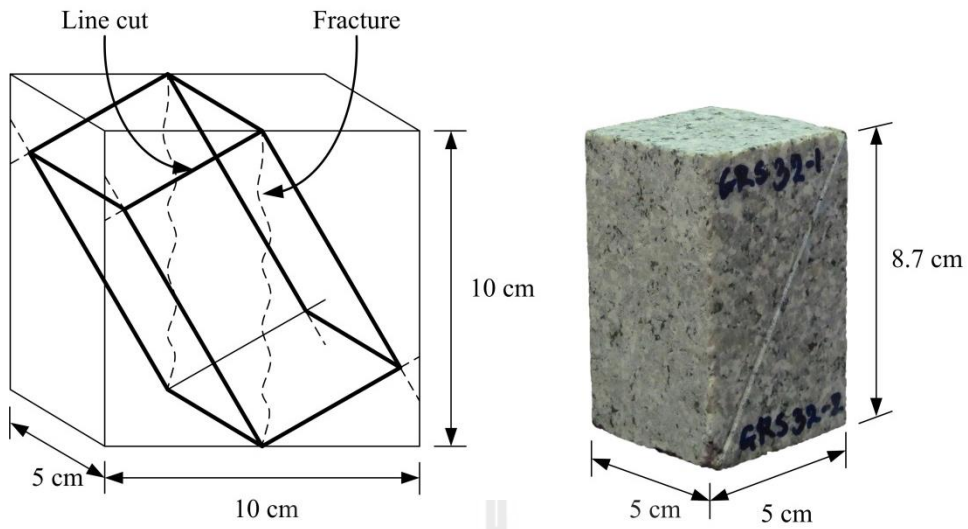
นำตัวอย่างหินแกรนิตมาตัดให้มีขนาด $5 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 จากนั้นทำการให้แรงดึงแบบแนวเส้นเพื่อสร้างรอยแตก (รูปที่ 3.2) แล้วนำไปตัดให้ได้ขนาด $5.0 \times 5.0 \times 8.7 \text{ cm}^3$ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 รอยแตกที่สร้างขึ้นมีค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (Joint Roughness Coefficient: JRC) ที่ประมาณ 12–16 เมื่อเทียบกับ Barton chart (Barton, 1982) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งจะได้รอยแตกขนาด $5 \times 10 \text{ cm}^2$ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และได้ใช้ตัวอย่างหินแกรนิตทั้งหมด 65 ก้อน ดังตารางที่ 3.1



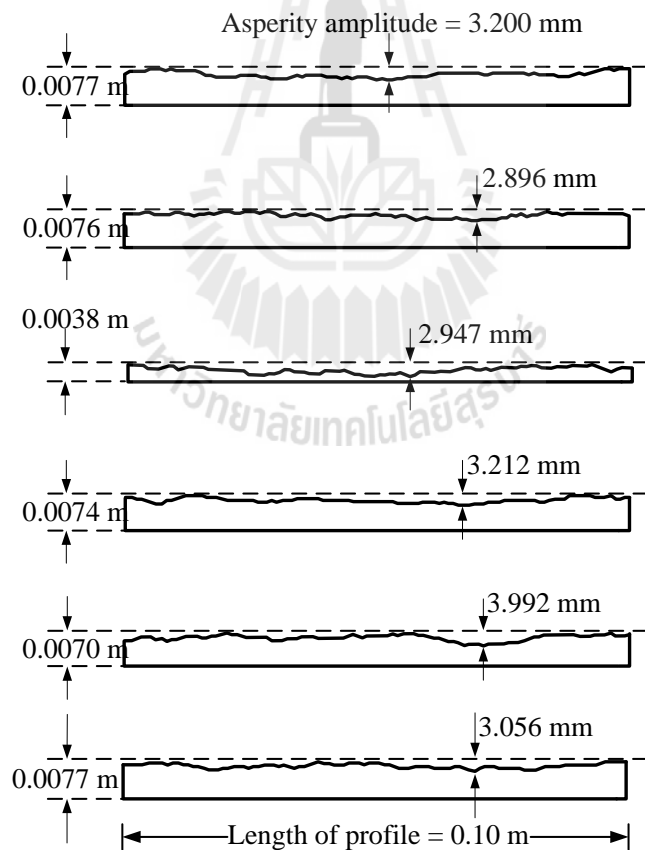
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างหินแกรนิตขนาด $5 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ ที่ใช้ในการทดสอบ



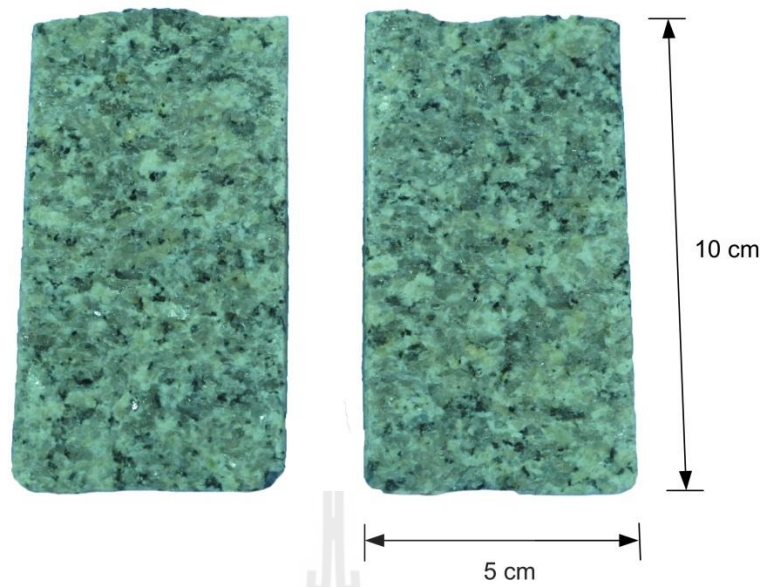
รูปที่ 3.2 การให้แรงกดแบบแนวเส้น



รูปที่ 3.3 การตัดตัวอย่างหินให้ได้ขนาด $5.0 \times 5.0 \times 8.7 \text{ cm}^3$



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างของสแกนไลน์จากรอยแตกของหินแกรนิตบางส่วนที่นำมาประเมินค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (Barton, 1982) $JRC = 12-16$



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างระนาบรอยแตกผิวขรุขระขนาด $5 \times 10 \text{ cm}^2$

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างหินแกรนิต (ผิวขรุขระ)

Specimen No.	Dimension (cc)	Density (g/cc)
GRS-01	8.35×5.44×4.91	2.50
GRS-02	8.40×5.22×4.84	2.59
GRS-03	84.8×5.51×4.88	2.53
GRS-04	8.52×5.52×4.90	2.51
GRS-05	8.52×5.55×4.85	2.52
GRS-06	8.46×5.34×4.88	2.50
GRS-07	8.40×5.45×4.84	2.56
GRS-08	8.40×5.37×4.83	2.59
GRS-09	8.43×5.18×4.81	2.59
GRS-10	8.46×5.55×4.83	2.59
GRS-11	8.63×5.17×4.83	2.57
GRS-12	8.37×5.33×4.80	2.60
GRS-13	8.57×5.32×4.80	2.55
GRS-14	8.60×5.40×4.83	2.58
GRS-15	8.44×5.16×4.85	2.59

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างหินแกรนิต (ผิวขรุขระ) (ต่อ)

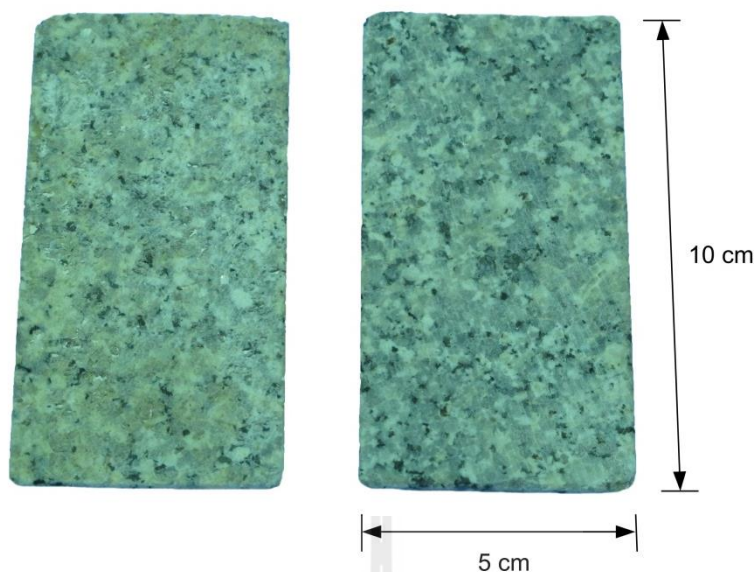
Specimen No.	Dimension (cc)	Density (g/cc)
GRS-16	8.47×5.42×4.89	2.53
GRS-17	8.44×5.44×4.81	2.60
GRS-18	8.43×5.16×4.84	2.58
GRS-19	8.56×5.21×4.83	2.56
GRS-20	8.57×5.34×4.81	2.61
GRS-21	8.70×5.20×4.81	2.56
GRS-22	8.54×5.28×4.82	2.57
GRS-23	8.62×5.42×4.81	2.57
GRS-24	8.69×5.42×4.82	2.55
GRS-25	8.82×5.35×4.83	2.55
GRS-26	8.76×5.35×4.84	2.56
GRS-27	8.53×5.42×4.82	2.56
GRS-28	8.81×5.42×4.82	2.58
GRS-29	8.51×5.42×4.82	2.56
GRS-30	8.70×5.20×4.82	2.60
GRS-31	8.56×5.34×4.92	2.58
GRS-32	8.59×5.34×4.92	2.59
GRS-33	8.62×5.28×4.96	2.53
GRS-34	8.51×5.42×4.95	2.53
GRS-35	8.55×5.59×4.93	2.54
GRS-36	8.72×5.30×4.95	2.55
GRS-37	8.62×5.21×4.95	2.61
GRS-38	8.47×5.42×4.89	2.58
GRS-39	8.52×5.33×4.94	2.55
GRS-40	8.60×5.36×4.93	2.56
GRS-41	8.56×5.36×4.92	2.59
GRS-42	8.57×5.33×4.92	2.58
GRS-43	8.46×5.21×4.92	2.62
GRS-44	8.68×5.33×4.90	2.54
GRS-45	8.60×5.13×4.97	2.56

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างหินแกรนิต (ผิวยุขระ) (ต่อ)

Specimen No.	Dimension (cc)	Density (g/cc)
GRS-46	8.86×5.38×4.91	2.55
GRS-47	8.86×5.37×4.87	2.56
GRS-48	8.57×5.48×4.93	2.56
GRS-49	8.72×5.50×4.98	2.56
GRS-50	8.62×5.69×4.92	2.55
GRS-51	8.70×5.15×4.90	2.63
GRS-52	8.65×5.13×4.94	2.61
GRS-53	8.75×5.23×4.95	2.60
GRS-54	8.62×5.28×4.91	2.59
GRS-55	8.47×5.32×4.93	2.60
GRS-56	8.67×5.25×4.92	2.56
GRS-57	8.70×5.25×4.87	2.55
GRS-58	8.54×5.29×4.93	2.57
GRS-59	8.66×5.43×4.97	2.53
GRS-60	8.65×5.23×4.92	2.57
GRS-61	8.29×5.35×4.93	2.54
GRS-62	8.50×5.40×4.97	2.54
GRS-63	8.61×4.95×4.91	2.62
GRS-64	8.68×5.15×4.94	2.57
GRS-65	8.50×5.16×4.85	2.63

3.1.2 ตัวอย่างที่มีรอยแตกผิวเรียบ

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกในสามแกนภายใต้ปัจจัยเดียวกันกับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตกผิวยุขระ โดยตัดหินแกรนิตให้มีขนาด $5 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ (รูปที่ 3.1) แล้วทำการตัดเพื่อสร้างพื้นผิวเรียบ จากนั้นนำไปตัดให้ได้ขนาด $5.0 \times 5.0 \times 8.7 \text{ cm}^3$ เพื่อให้ได้พื้นที่ผิวเรียบขนาด $5 \times 10 \text{ cm}^2$ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 จากนั้นการทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกในสามแกนได้ดำเนินการโดยใช้โครงทดสอบในสามแกน



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างระนาบรอยแตกผิวเรียบขนาด $5 \times 10 \text{ cm}^2$

3.2 การให้ความร้อน

อุปกรณ์ให้ความร้อนบนตัวอย่างหินประกอบด้วย อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (Thermostat) เบ้ากตให้ความร้อน (Loading platen) และอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 สามารถอธิบายหน้าที่การใช้งานได้ดังนี้

3.2.1 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ

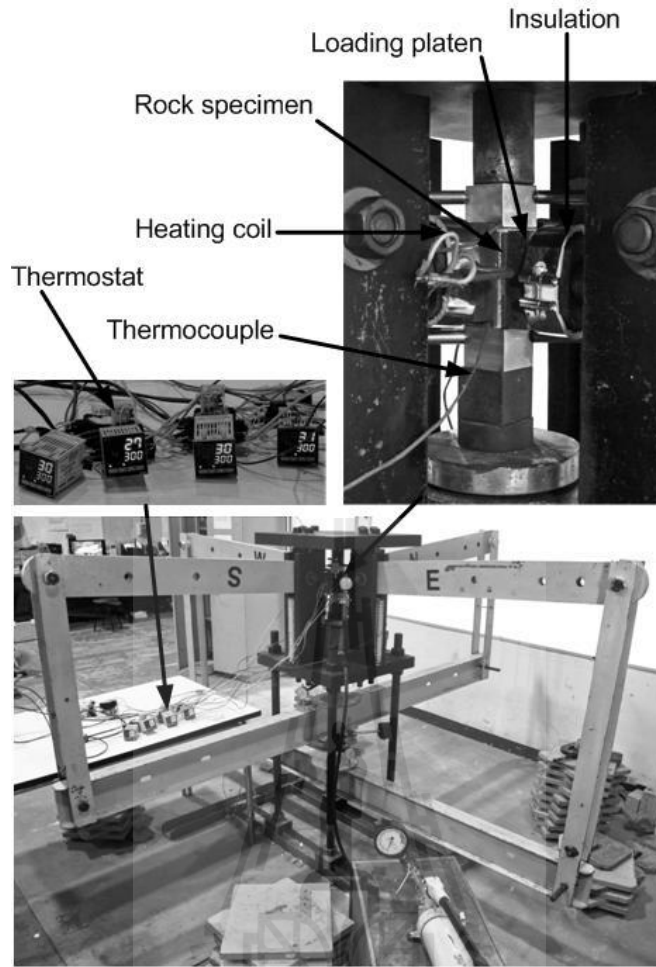
เป็นเครื่องมือควบคุมอุณหภูมิ ทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าไปที่ขดลวดให้ความร้อน เพื่อเพิ่มอุณหภูมิตามที่กำหนด และจะตัดกระแสไฟฟ้าเมื่อถึงอุณหภูมิที่กำหนดไว้

3.2.2 เบ้ากตให้ความร้อน

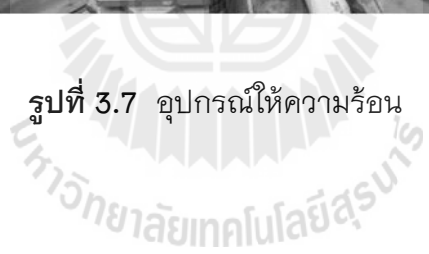
มีพื้นผิวสำหรับถ่ายเทความร้อนให้กับตัวอย่างหินขนาด $4.8 \times 8.4 \text{ cm}^2$ ประกอบด้วย เบ้ากต ขดลวดให้ความร้อน (Heater coil) และฉนวนกันความร้อน (Insulation) โดยนำขดลวดให้ความร้อนพันรอบเบ้ากต แล้วหุ้มด้วยฉนวนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน เบ้ากตให้ความร้อนจะทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนและให้น้ำหนักไปที่ตัวอย่างหิน

3.2.3 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

เป็นสายทองแดงเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิกับตัวอย่างหินเพื่อตรวจวัดอุณหภูมิของตัวอย่างหิน



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์ให้ความร้อน



บทที่ 4

การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

4.1 วัตถุประสงค์

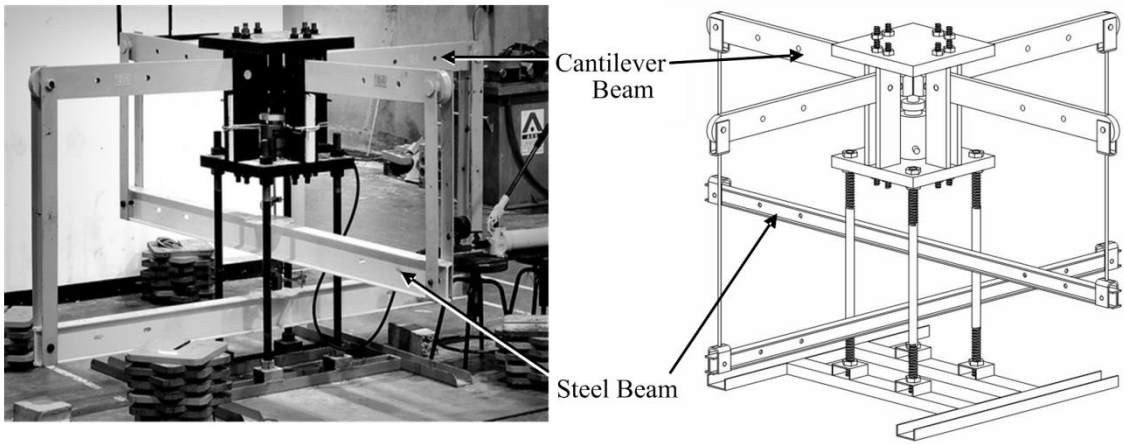
เนื้อหาในบทนี้อธิบายขั้นตอน วิธีการ และข้อปฏิบัติในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกของหินแกรนิตในสามแกนภายใต้ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 30°C, 100°C, 300°C, และ 500°C และมีความเค้นล้อมรอบเท่ากับ 1, 3, 7, 12, และ 18 MPa โดยวัตถุประสงค์ของการทดสอบเพื่อจำลองสภาวะของความเค้นที่กระทำบนรอยแตกของหินแกรนิตภายใต้อุณหภูมิ 30°C, 100°C, 300°C และ 500°C

4.2 โครงกทดสอบในสามแกน

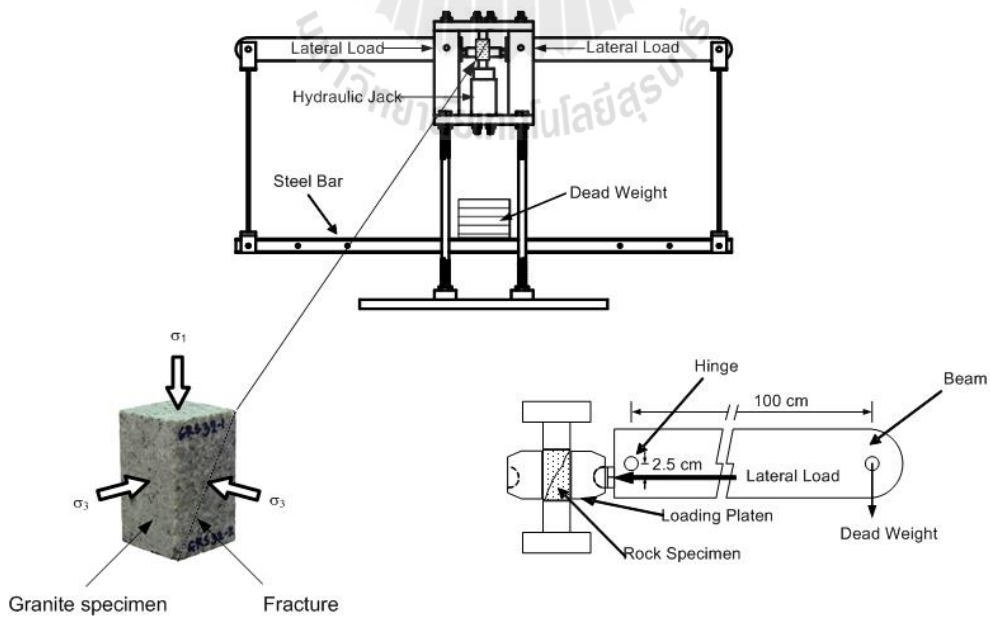
โครงกทดสอบในสามแกนที่ใช้ในการศึกษานี้มีพื้นฐานการออกแบบ 3 ประการ คือ

- 1) สามารถกำหนดค่าความเค้นล้อมรอบให้คงที่ในขณะที่ทำการทดสอบ
- 2) สามารถทดสอบตัวอย่างหินที่มีขนาดเท่ากับหรือใหญ่กว่าแท่งตัวอย่างหินที่ใช้ทดสอบแรงกดสูงสุดในสามแกนแบบดั้งเดิม (เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 54 mm)
- 3) สามารถวัดค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกนหลักได้โดยตรง

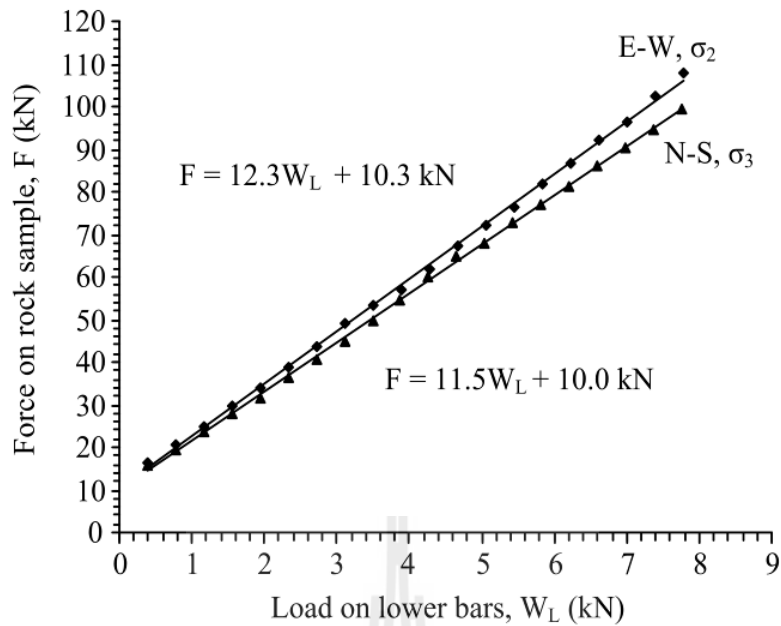
รูปที่ 4.1 แสดงโครงกทดสอบในสามแกนจริง (Walsri et al., 2009) ที่ประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดในสามแกน โดยค่าความเค้นด้านข้างที่กระทำบนตัวอย่างหินในแต่ละด้านจะได้รับแรงที่เกิดจากคานทอดแรงส่วนล่างของคานรับตุ้มน้ำหนัก (Dead weight) ที่ใช้เหล็กเส้นแขวนตุ้มน้ำหนักเชื่อมต่อระหว่างจุดปลายของคานทั้งสองข้าง (ที่จุดกึ่งกลางของคานรับตุ้มน้ำหนัก) เพื่อใช้ใส่ตุ้มน้ำหนักในการดึงแขนของคานทอดแรง (Cantilever beam) ทั้งสองข้างลงดังแสดงในรูปที่ 4.2 ที่จุดปลายด้านในของคานทอดแรงจะใช้เพลายึดติดกับเสายึดคานทอดแรงที่อยู่ในแต่ละด้านของโครงกทดสอบ ในขณะที่ทำการทดสอบคานทอดแรงทุกข้างจะถูกปรับให้อยู่ในแนวระนาบ ซึ่งส่งผลต่อแรงกดด้านข้างบนตัวอย่างหินที่จุดกึ่งกลางของโครงกทดสอบ และได้กำหนดระยะห่างของเหล็กเส้นแขวนตุ้มน้ำหนักที่ใช้แขวนคานรับตุ้มน้ำหนักจากจุดปลายด้านนอกถึงปลายด้านใน อัตราส่วนของแรงมีค่าเท่ากับ 12.3 เท่า ในทิศตะวันออก-ตะวันตก (E-W) และ 11.5 เท่า ในทิศเหนือ-ใต้ (N-S) ซึ่งได้ทำการสอบเทียบโดยใช้ Electronic load cell ดังรูปที่ 4.3 อัตราส่วนของแรงที่ได้นี้ถูกนำมาใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแท่งตัวอย่างด้านข้างด้วยการวัดอัตราการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของแท่ง



รูปที่ 4.1 โครงกวดทดสอบในสามแกน (Walsri et al., 2009)



รูปที่ 4.2 องค์ประกอบของโครงกวดทดสอบในสามแกน



รูปที่ 4.3 การสอบเทียบอัตราส่วนของแรงเสียดทานด้านข้างที่เกิดจาก σ_3 โดยใช้ Electronic load cell อัตราส่วนนี้สามารถนำไปใช้ในการคำนวณแก้ไขค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Walsri et al., 2009) ของแท่งตัวอย่างหินด้านข้าง

เหล็กทั้งสองที่อยู่ด้านล่าง ส่วนแรงที่กระทำด้านข้างได้ออกแบบให้สามารถให้ความเค้นมากกว่า 50 MPa และปัมไฮดรอลิกเป็นอุปกรณ์ให้ความเค้นที่กระทำในแนวตั้ง (σ_1) ซึ่งสามารถให้ความเค้นสูงมากกว่า 100 MPa โครงทดสอบสามารถรองรับขนาดของตัวอย่างหินได้ตั้งแต่ $2.5 \times 2.5 \times 2.5 \text{ cm}^3$ ถึง $10 \times 10 \times 20 \text{ cm}^3$ การทดสอบกับแท่งตัวอย่างที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันจะต้องมีการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหัวกดทั้งสองข้างให้เหมาะสม

4.3 วิธีการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกน

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกนภายใต้อุณหภูมิสูงในห้องปฏิบัติการเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุด และศึกษาผลกระทบของความเค้นล้อมรอบต่อรอยแตกของหินภายใต้อุณหภูมิสูง โดยกำหนดให้ความเค้นล้อมรอบตัวอย่างหินแกรนิตมีค่าระหว่าง 1, 3, 7, 12 และ 18 MPa ที่อุณหภูมิ 30°C, 100°C, 300°C และ 500°C โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 รูปแบบ คือ 1) การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตกผิวขรุขระ 2) การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตกผิวเรียบ

4.3.1 การเตรียมตัวอย่างหินสำหรับใช้ในการทดสอบ

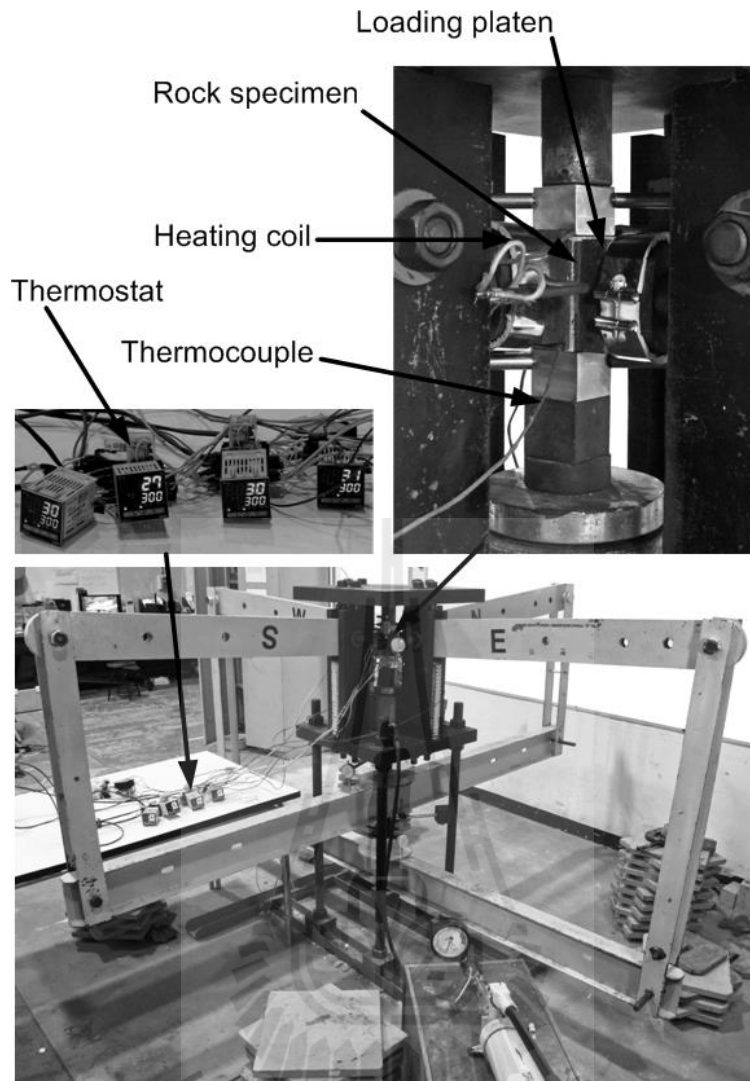
ตัวอย่างหินแกรนิตที่ใช้สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกนภายใต้ อุณหภูมิสูงเมื่อถูกสร้างรอยแตกในห้องปฏิบัติการด้วยการให้แรงดึงแบบแนวเส้นและตัดตัวอย่าง หินให้ได้ขนาดตามที่ต้องการแล้ว จากนั้นนำตัวอย่างหินมาประกบกันและประกบซ้ำด้วยแผ่น เหล็ก (Steel plate)

4.3.2 วิธีติดตั้งตัวอย่างหินแกรนิตในโครงกดทดสอบและการตรวจวัด

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกนบนหินแกรนิต (ผิวขรุขระ และผิวเรียบ) มี วิธีการและขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) จัดเตรียมตัวอย่างหินแกรนิตเพื่อใส่ในโครงกดทดสอบ โดยให้รอยแตกของ ตัวอย่างวางตัวในแนวเหนือ-ใต้กับโครงกดทดสอบ
- 2) ยกคานในแนวเหนือ-ใต้เพื่อใส่ตัวอย่างหินแกรนิตพร้อมกับเบ้ากดให้ความร้อน เข้าไปในแท่นกด จากนั้นปล่อยคานลงเพื่อให้เบ้ากดให้ความร้อนชนกับตัวอย่างหิน
- 3) ติดตั้งเทอร์โมคอปเปอร์ที่กึ่งกลางตัวอย่างหิน
- 4) ยกคานในแนวตะวันออก-ตะวันตกเพื่อใส่ตัวอย่างหินแกรนิตพร้อมกับเบ้ากดให้ ความร้อนเข้าไปในแท่นกด แล้วปล่อยคานลงเพื่อให้เบ้ากดให้ความร้อนชนกับ ตัวอย่างหิน
- 5) นำเบ้ากดติดตั้งทั้งด้านล่างและด้านบนของตัวอย่างหินเพื่อให้แรงกดในแนวแกน
- 6) เปิดอุปกรณ์ปรับอุณหภูมิไปที่ 100°C, 300°C หรือ 500°C ดังแสดงรูปที่ 4.4 เพื่อให้ความร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนทำการทดสอบ
- 7) ประกอบคานด้านล่างทั้งสองแกนและใส่น้ำหนักกดทับ (แผ่นเหล็กตันรูป สี่เหลี่ยม) เพื่อส่งผ่านความเค้นล้อมรอบให้กับตัวอย่างหิน จากนั้นเพิ่มแผ่น น้ำหนักตามที่ได้ออกแบบไว้
- 8) กดตัวอย่างหินแกรนิตด้วยปั๊มไฮดรอลิกจนกระทั่งเกิดการวิบัติ จากนั้นบันทึกค่า กำลังเฉือนสูงสุดที่ได้
- 9) ทำการปิดเครื่องเทอร์โมสตัท แล้วปล่อยให้ตัวอย่างหินเย็นตัวลง

ในระหว่างการทดสอบจะทำการตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหินแกรนิตใน แต่ละแนวแกน โดยจะติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัว (Dial gauge) ในแนวแกนและความเค้น ด้านข้างทั้ง 2 แกน ซึ่งได้ทำการตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวระหว่างการทดสอบในขณะที่ตัวอย่าง หินแกรนิตรับแรงกดเพิ่มขึ้นด้วยปั๊มไฮดรอลิกจนกระทั่งถึงค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุด



รูปที่ 4.4 การติดตั้งเบ้ากดให้ความร้อน

4.4 การคำนวณผลการทดสอบ

การทดสอบด้วยเครื่องทดสอบในสามแกน สามารถให้ค่าความเค้นในแนวแกน (σ_1) และความเค้นล้อมรอบ (σ_3) โดยมีการจัดบันทึกค่าความเค้นหลักในแนวแกนและค่าการเคลื่อนที่ของตัวอย่างหิน ค่าที่บันทึกไว้ได้นำมาคำนวณหาความเค้นตั้งฉาก (σ_n) และค่ากำลังรับแรงเฉือน (τ) (Jaeger et al., 2007) ดังสมการ

$$\tau = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\beta \quad (4.1)$$

$$\sigma_n = \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\beta \quad (4.2)$$

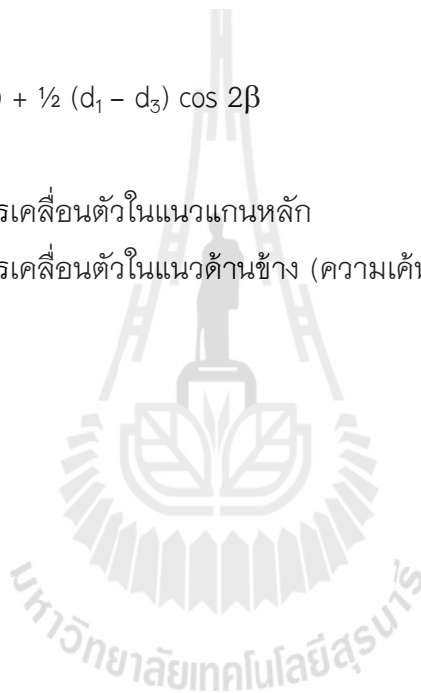
- โดยที่ σ_1 คือ ความเค้นหลักในแนวแกน
 σ_3 คือ ความเค้นล้อยมรอบ
 β คือ มุมระหว่างความเค้นหลักในแนวแกนกับความเค้นตั้งฉาก (รอยแตกของตัวอย่างหินแกรนิตที่ใช้ในการทดสอบมีค่ามุมเท่ากับ 60° ทุกตัวอย่าง)

การคำนวณการเคลื่อนตัวของรอยแตกในแนวแกนตั้งฉากและการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$d_s = \frac{1}{2} (d_1 - d_3) \sin 2\beta \quad (4.3)$$

$$d_n = \frac{1}{2} (d_1 + d_3) + \frac{1}{2} (d_1 - d_3) \cos 2\beta \quad (4.4)$$

- โดยที่ d_1 คือ ระยะการเคลื่อนตัวในแนวแกนหลัก
 d_3 คือ ระยะการเคลื่อนตัวในแนวด้านข้าง (ความเค้นล้อยมรอบ)



บทที่ 5

ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

เนื้อหาในบทนี้เสนอผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการซึ่งประกอบด้วย ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตกผิวขรุขระและผิวเรียบ ในสามแกนภายใต้อุณหภูมิ 30°C, 100°C, 300°C, และ 500°C และผันแปรความเค้นล้อมรอบที่ 1, 3, 7, 12, และ 18 MPa ตามรูปแบบการทดสอบที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อกำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตกของหินแกรนิต

5.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตกผิวขรุขระ

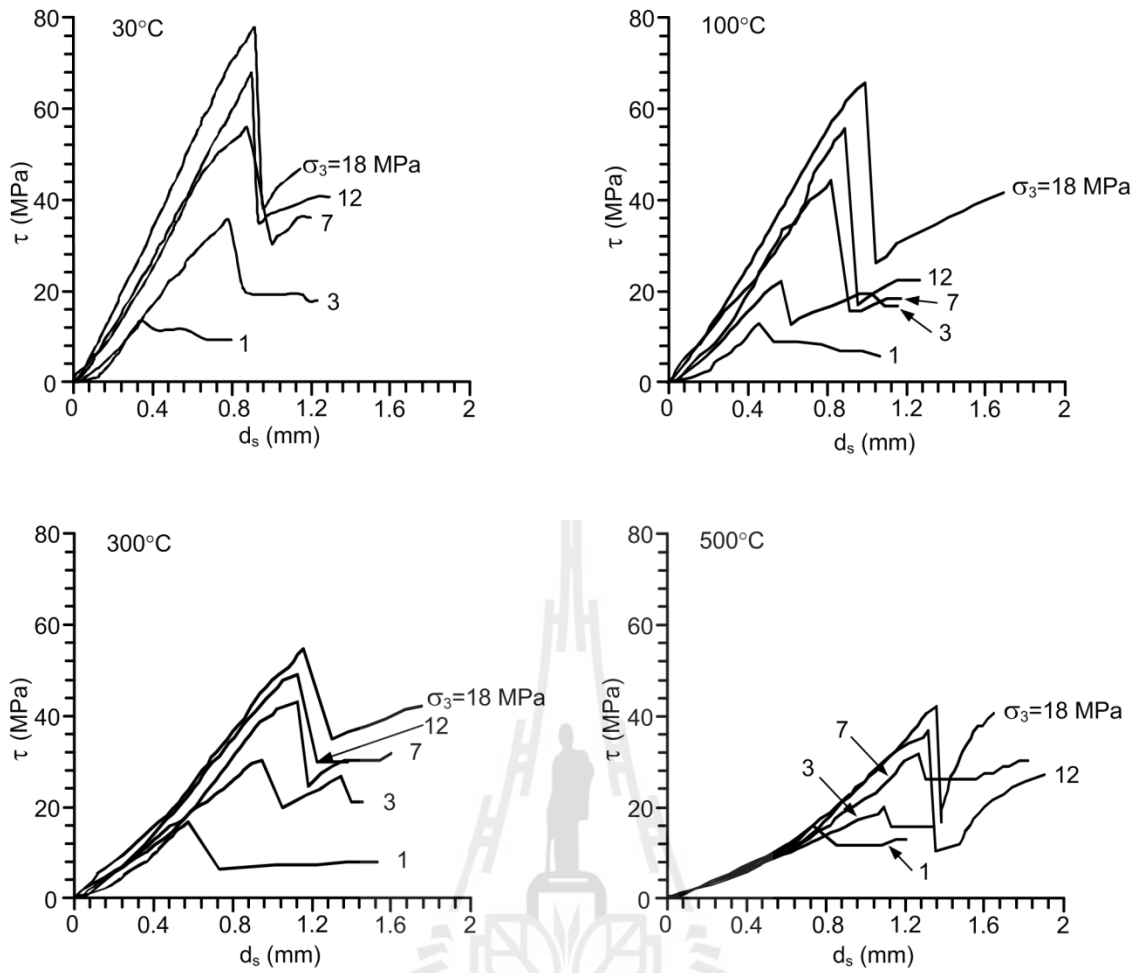
ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตกผิวขรุขระของตัวอย่างหินแกรนิตจะแสดงในรูปของค่าความเค้นในแนวแกน ความเค้นล้อมรอบ ความเค้นตั้งฉากและกำลังรับแรงเฉือนที่จุดแตก ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบระบุว่าอุณหภูมิมิมีผลต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนและพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของรอยแตกผิวขรุขระ โดยการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนบนรอยแตกผิวขรุขระที่จุดแตกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.1 และค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดบนรอยแตกผิวขรุขระจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.2 ส่วนรูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน (d_s) และการเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉาก(d_n) ของรอยแตกผิวขรุขระภายใต้อุณหภูมิต่างๆ

5.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตกผิวเรียบ

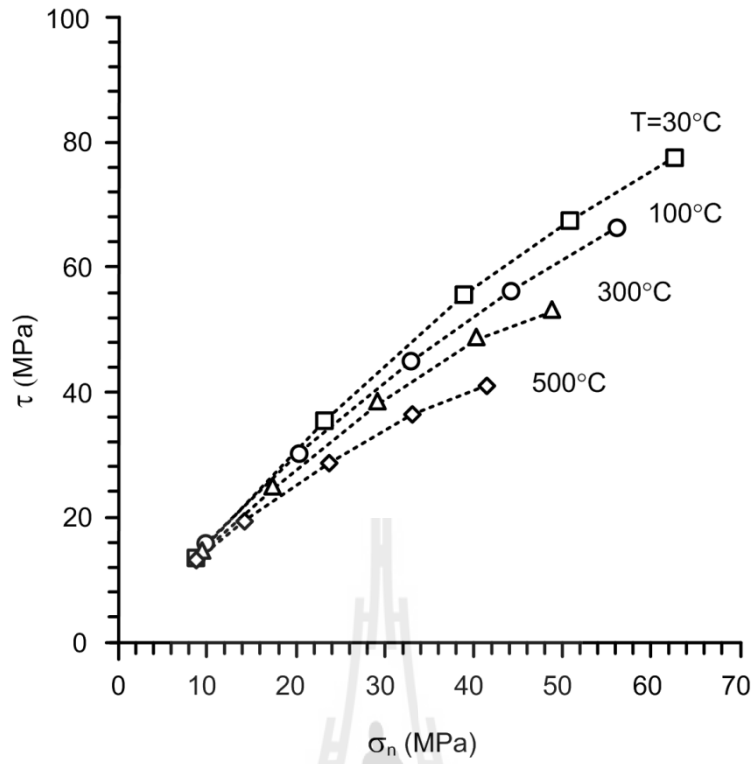
ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตกผิวเรียบได้แสดงในรูปของค่าความเค้นในแนวแกน ความเค้นล้อมรอบ ความเค้นตั้งฉาก และกำลังรับแรงเฉือนที่จุดแตก ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบระบุว่าอุณหภูมิมิมีผลต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนและพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของรอยแตกผิวเรียบ โดยการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนบนรอยแตกผิวเรียบที่จุดแตกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.4 และอุณหภูมิมิมีผลต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกผิวเรียบ โดยค่ากำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตกผิวเรียบจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.5 ทั้งนี้เกิดจากกระบวนการ stick-slip โดยผิวหินที่เรียบจะมีความเหนียวมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกผิวขรุขระ

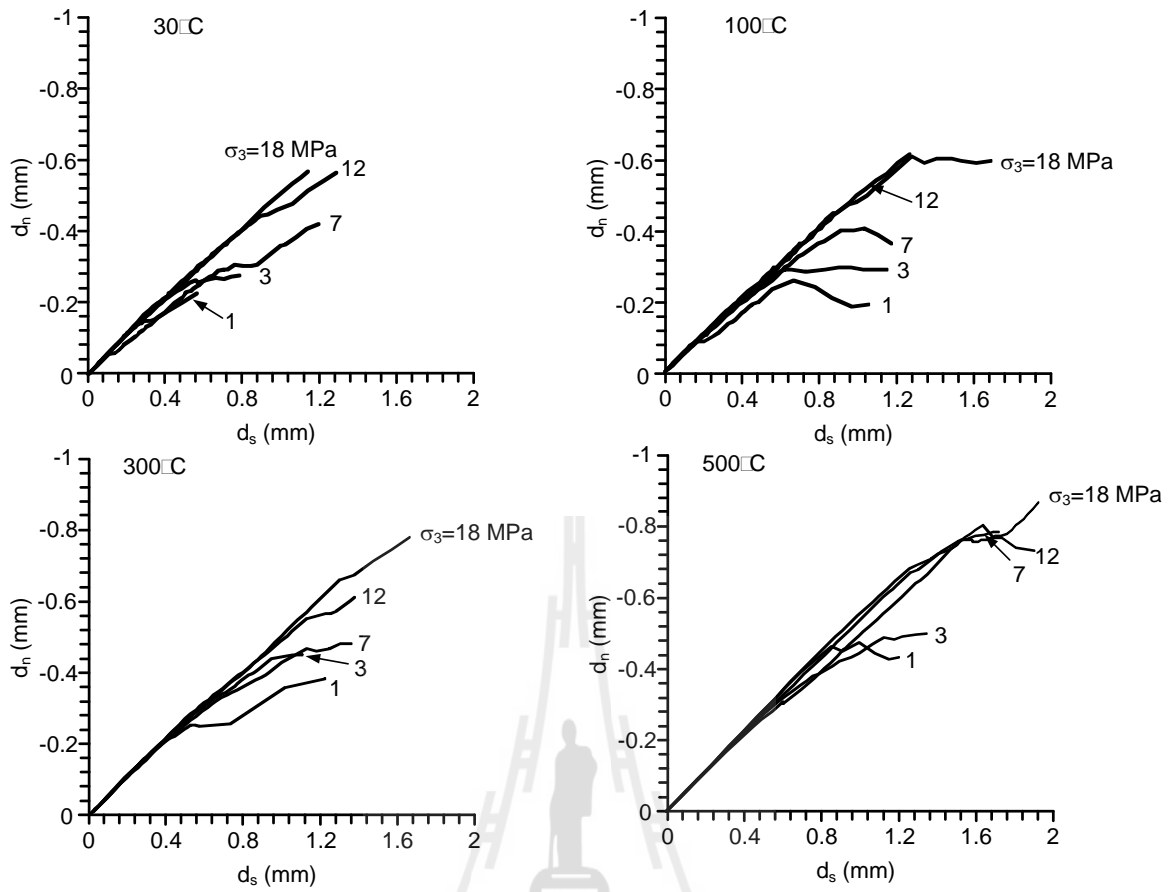
อุณหภูมิ (°C)	σ_3 (MPa)	σ_1 (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
30	1	32.08	8.77	13.46
	3	84.44	23.36	35.26
	7	135.03	39.01	55.44
	12	167.67	50.92	67.41
	18	196.55	62.64	77.31
100	1	37.03	10.01	15.16
	3	72.62	20.40	30.14
	7	110.45	32.86	44.79
	12	141.45	44.37	56.06
	18	170.84	56.21	66.18
300	1	35.23	9.56	14.82
	3	60.75	17.44	25.01
	7	96.05	29.26	38.97
	12	125.09	40.27	48.97
	18	141.13	48.78	53.32
500	1	32.03	8.76	13.44
	3	47.96	14.24	19.47
	7	73.64	23.66	28.86
	12	96.22	33.06	36.47
	18	112.26	41.57	40.82



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดกับค่าการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนของรอยแตกผิวขรุขระ



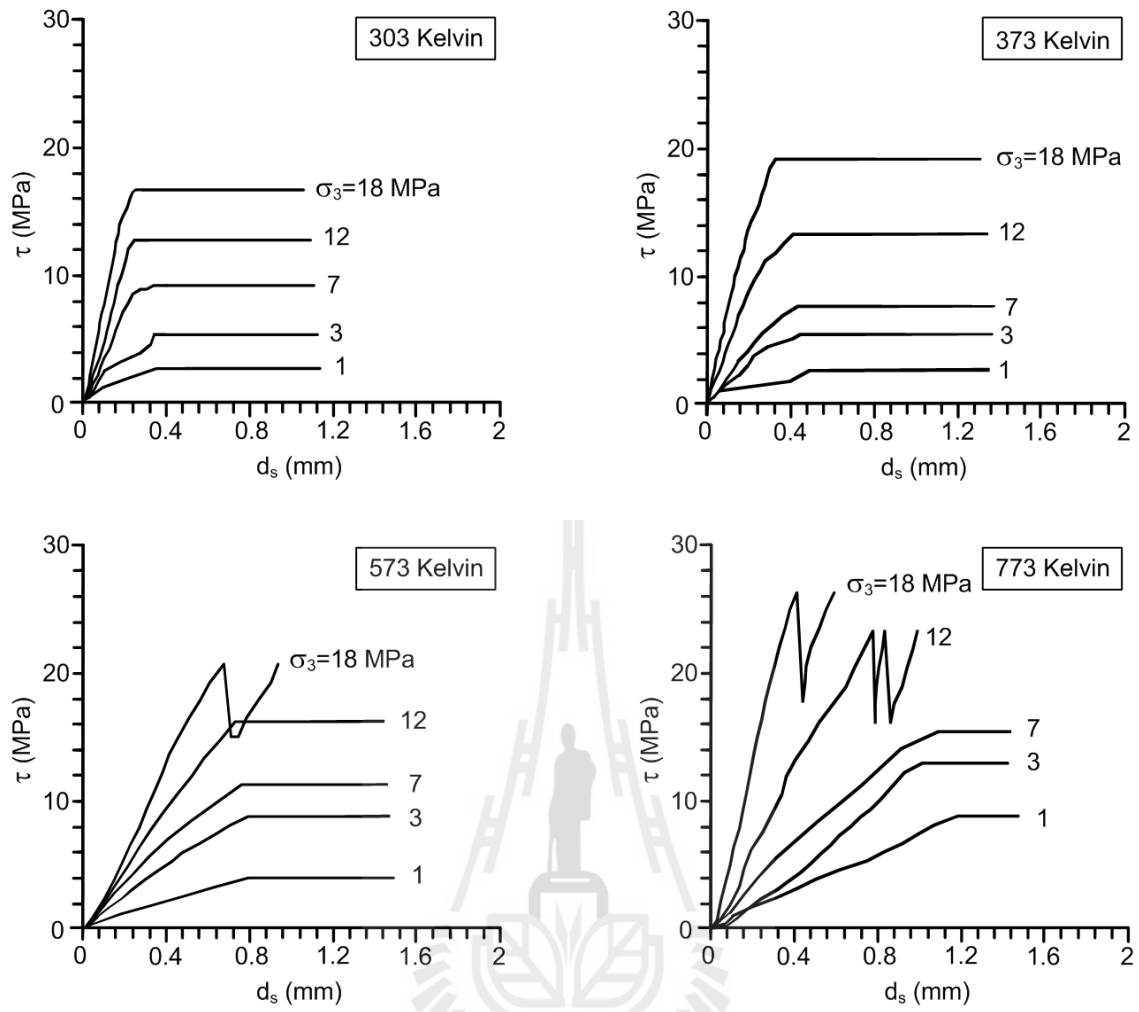
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดกับค่าความเค้นตั้งฉากของรอยแตก
ผิวขรุขระ



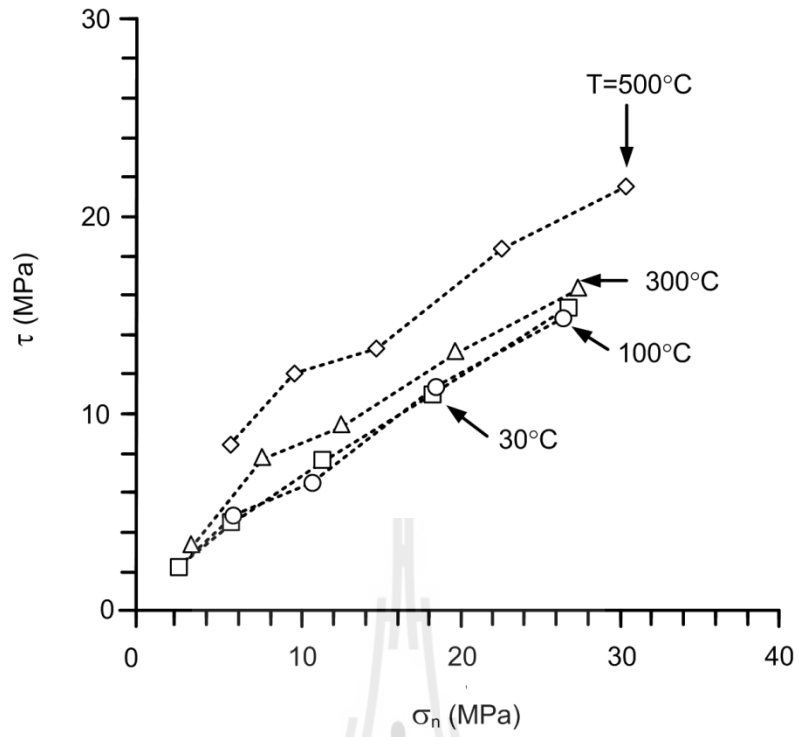
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวของรอยแตกในแนวเฉียงและค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉาก

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกผิวเรียบ

อุณหภูมิ (°C)	σ_3 (MPa)	σ_1 (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
30	1	6.00	2.25	2.16
	3	13.14	5.53	4.39
	7	24.29	11.32	7.49
	12	36.90	18.22	10.78
	18	52.87	26.72	15.10
100	1	6.19	2.30	2.25
	3	13.84	5.71	4.69
	7	21.56	10.64	6.30
	12	37.47	18.37	11.03
	18	54.71	27.18	15.89
300	1	8.88	2.97	3.41
	3	20.69	7.42	7.66
	7	28.50	12.38	9.31
	12	42.15	19.54	13.06
	18	55.43	27.36	16.21
500	1	19.59	5.65	8.05
	3	29.73	9.68	11.58
	7	37.38	14.59	13.15
	12	53.95	22.49	18.17
	18	66.99	30.24	21.21



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดกับค่าการเคลื่อนตัวในแนว
เฉือนของรอยแตกผิวเรียบบางตัวอย่าง



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับเฉือนสูงสุดกับค่าความเค้นตั้งฉากของรอยแตก
ผิวเรียบ

บทที่ 6

การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

เนื้อหาในบทนี้เสนอการพัฒนากลศาสตร์ทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายและคาดคะเนกำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตกของหินแกรนิตภายใต้การผันแปรความเค้นล้อมรอบและอุณหภูมิ ในรูปความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนและค่าความเค้นตั้งฉากที่จุดแตก การพัฒนากลศาสตร์แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ตามลักษณะการทดสอบ

6.1 สมการสำหรับกำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกผิวขรุขระ

ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตกผิวขรุขระในบทที่ 5 ได้นำมาวิเคราะห์เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับความเค้นตั้งฉากภายใต้การผันแปรอุณหภูมิ ซึ่งถูกเสนอขึ้นเพื่อเชื่อมความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือน อุณหภูมิ และความเค้นตั้งฉากของรอยแตกผิวขรุขระในหินแกรนิต โปรแกรม SPSS (Wendai, 2000) ได้นำมาคำนวณค่าคงที่ที่อยู่ในสมการ (6.1) โดยใช้สมการเชิงประจักษ์ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบถดถอย (Regression analysis) ในโปรแกรม SPSS (Version 19) ดังในสมการ

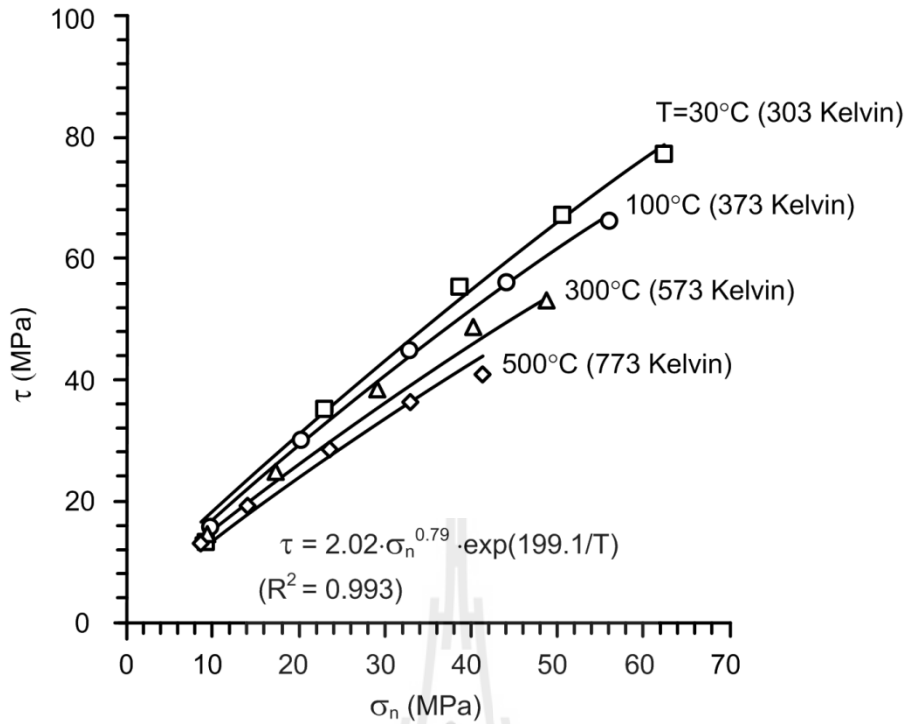
$$\tau = \alpha \cdot \sigma_n^\beta \exp(-\lambda/T) \quad (6.1)$$

โดยที่ α, β และ λ คือ ค่าคงที่
 τ คือ ค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุด
 σ_n คือ ค่าความเค้นตั้งฉาก
 T คือ อุณหภูมิ (Kelvin)

รูปที่ 6.1 แสดงผลการคำนวณด้วยโปรแกรม SPSS ที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of correlation) เท่ากับ 0.993 ซึ่งระบุว่าสมการ (6.1) สามารถอธิบายผลการทดสอบได้ดีมาก ตารางที่ 6.1 แสดงค่าคงที่ α, β และ λ เมื่อแทนค่าตัวแปรลงในสมการ (6.1) จะได้

$$\tau = 2.02 \cdot \sigma_n^{0.79} \exp(199.1/T) \quad (6.2)$$

สมการ (6.2) จะมีประโยชน์ในการใช้คาดคะเนกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของรอยแตกผิวขรุขระในหินแกรนิตระดับลึกภายใต้ความเค้นล้อมรอบและอุณหภูมิที่สูงขึ้น



รูปที่ 6.1 การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบ (จุด) กับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS (เส้นทึบ) ของรอยแตกผิวขรุขระในหินแกรนิต

ตารางที่ 6.1 ค่าคงที่ที่คำนวณจากโปรแกรม SPSS สำหรับรอยแตกผิวขรุขระ

Parameters	Values	R ²
α	2.02	0.993
β	0.79	
λ	-199.1	

6.2 สมการสำหรับกำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกผิวเรียบ

ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตกผิวเรียบในบทที่ 5 ได้นำมาวิเคราะห์เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับความเค้นตั้งฉากภายใต้การผันแปรอุณหภูมิ ซึ่งถูกเสนอขึ้นเพื่อเชื่อมความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือน อุณหภูมิ และความเค้นตั้งฉากของรอยแตกผิวเรียบในหินแกรนิตด้วยการนำโปรแกรม SPSS มาคำนวณค่าคงที่ที่อยู่ในสมการ (6.3) โดยใช้สมการเชิงประสพการณ์ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบถดถอยในโปรแกรม SPSS (Version 19) ดังสมการ

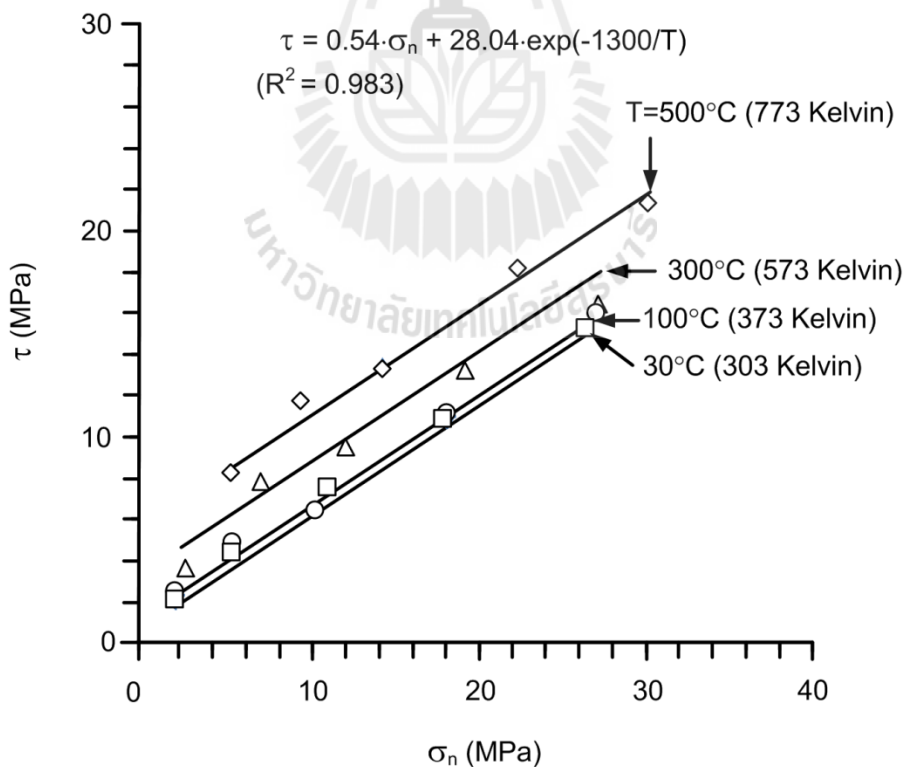
$$\tau = \xi \cdot \sigma_n + \chi \exp(\omega/T) \quad (6.3)$$

เมื่อ ξ , χ และ ω คือค่าคงที่

รูปที่ 6.2 แสดงผลการคำนวณด้วยโปรแกรม SPSS ที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.983 ซึ่งระบุว่าสมการ (6.3) สามารถอธิบายผลการทดสอบได้ดีมาก ตารางที่ 6.2 แสดงค่าคงที่ ξ , χ และ ω เมื่อแทนค่าตัวแปรลงในสมการ (6.3) จะได้

$$\tau = 0.54 \cdot \sigma_n + 28.04 \exp(-1300/T) \quad (6.4)$$

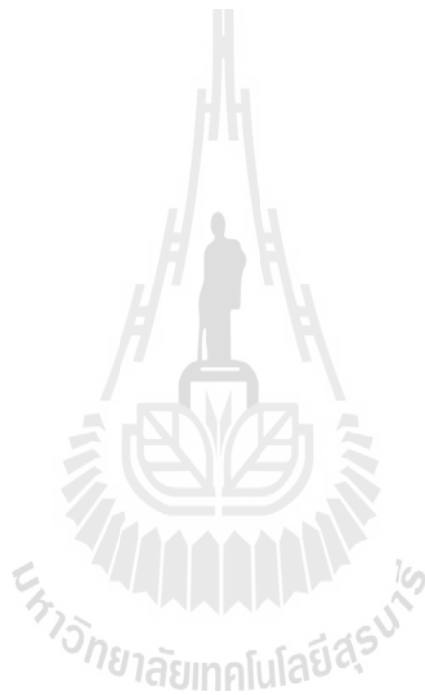
สมการที่ 6.2 และสมการที่ 6.4 สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการคาดคะเนพฤติกรรมของกำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตกของตัวอย่างหินแกรนิตภายใต้การผันแปรความเค้นล้อมรอบและอุณหภูมิ โดยความเค้นตั้งฉากและอุณหภูมิต้องอยู่ในช่วงของการทดสอบเท่านั้น ซึ่งจะต้องตระหนักและพึงระวังถึงการประยุกต์ใช้สมการดังกล่าว



รูปที่ 6.2 การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบ (จุด) กับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS (เส้นทึบ) ของรอยแตกผิวเรียบในหินแกรนิต

ตารางที่ 6.2 ค่าคงที่ที่คำนวณจากโปรแกรม SPSS สำหรับรอยแตกผิวเรียบ

Parameters	Values	R^2
ξ	0.54	0.983
χ	28.04	
ω	-1300	



บทที่ 7

สรุปผลงานวิจัย

7.1 สรุปและวิจารณ์ผล

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือเพื่อหาผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกในตัวอย่างหินแกรนิต โดยการทดสอบได้ทำการผันแปรอุณหภูมิที่ 30°C, 100°C, 300°C และ 500°C และผันแปรความเค้นล้อมรอบที่ 1, 3, 7, 12 และ 18 MPa ได้แบ่งการทดสอบเป็น 2 รูปแบบ คือการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตกผิวขรุขระและการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตกผิวเรียบ โดยการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตกผิวขรุขระได้เลือกรอยแตกของหินที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระเท่ากับ 12-16

ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตกผิวขรุขระระบุว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้พฤติกรรมของหินแกรนิตมีความเหนียวมากขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนลดลงและระยะการเคลื่อนตัวที่จุดกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดมีค่ามากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Stesky et al. (1974) ที่ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของแรงเฉือนของหินซิลิกา 7 ชนิด ผลการทดสอบระบุว่ากำลังรับแรงเฉือนมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สำหรับการลดลงของค่ากำลังรับแรงเฉือนภายใต้อุณหภูมิสูงในการศึกษานี้ยังขึ้นกับความเค้นล้อมรอบด้วย โดยอุณหภูมิจะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับแรงเฉือนเมื่อความเค้นล้อมรอบต่ำ แต่เมื่อความเค้นล้อมรอบสูงขึ้น อุณหภูมิจะส่งผลต่อเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับแรงเฉือนโดยทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนมีค่าลดลง จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวของรอยแตกในแนวตั้งฉากกับค่าการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิไม่ได้ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของรอยแตกในแนวตั้งฉาก เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบอยู่ในช่วง 12-16 ส่วน ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตกผิวเรียบระบุว่า ค่ากำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตกผิวเรียบจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Lockner et al. (1986) และ Mitchell et al. (2013) ผลดังกล่าวอาจเกิดจากการอ่อนตัวของผิวหินเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นโดยรอยแตกมีการเชื่อมประสานกันทำให้เกิดกระบวนการ stick-slip ซึ่งจะพบในช่วงอุณหภูมิ 300°C-500°C ที่ความเค้นล้อมรอบ 12 และ 18 MPa และในทางตรงกันข้ามจากผลการทดสอบของ Stesky (1978) ระบุว่า กระบวนการ Stick-slip จะเกิดในช่วงอุณหภูมิต่ำและมีความเค้นล้อมรอบมากๆ ทั้งนี้ Kawamoto and Shimamoto (1998) ได้อธิบายว่าองค์ประกอบแร่ในตัวอย่างหินเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้การเกิด Stick-slip ที่อุณหภูมิและความเค้นต่างๆ

อนึ่ง อุณหภูมิสูงสุดที่ทำการศึกษา (500°C) มีค่าต่ำกว่าจุดหลอมละลายของแร่ Quartz อย่างมาก ดังนั้น อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการทิ้งกากนิวเคลียร์จึงไม่มีผลต่อการหลอมละลายของแร่ใดๆ ในหินแกรนิต

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนกับความเค้นตั้งฉากภายใต้การผันแปรอุณหภูมิของรอยแตกผิวเรียบและผิวขรุขระ ได้นำมาเปรียบเทียบกับกราฟวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS ผลระบุว่าข้อมูลจากการทดสอบและข้อมูลจากการคาดคะเนย้อนกลับของสมการที่ได้จากโปรแกรม SPSS มีค่าใกล้เคียงกัน จึงสามารถนำสมการดังกล่าวไปใช้คาดคะเนค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดบนรอยแตกของหินแกรนิตในระดับลึกได้ โดยอุณหภูมิจะต้องอยู่ในช่วงของการศึกษาเท่านั้น

7.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการวิจัยในอนาคตที่ควรดำเนินการมี 3 รูปแบบ คือ

- 1) ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตกของตัวอย่างหินแกรนิต โดยทำการทดสอบภายใต้อุณหภูมิที่สูงขึ้นเกินกว่า 1000°C และความเค้นล้อมรอบที่สูงขึ้นเกินกว่า 20 MPa เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเฉือนของตัวอย่างหินให้ครอบคลุมมากกว่านี้
- 2) ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตกของตัวอย่างหินแกรนิต โดยทำการทดสอบภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ เพื่อจำลองพฤติกรรมการเฉือนของโครงสร้างหินภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำในระดับลึก
- 3) ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตกของตัวอย่างของหินชนิดต่างๆ เพื่อศึกษาความหลากหลายของชนิดหินที่แพร่กระจายในประเทศไทย และเป็นการต่อยอดองค์ความรู้ด้านนี้ต่อไป

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.e1-298.e16.
- Arnold, B. and Brady, P. (2012). Nuclear waste technical review board spring meeting. *Sandia National Laboratories*. Sand 2012-1383C.
- 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.
- 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.
- Barton, N. (1982). Shear strength investigations for surface mining. In *Proceedings of the 3^d International Conference on Surface mining*. SME, Vancouver, pp. 171-196.
- Brady, P.V. and Arnold, B.W. (2011). Pilot testing deep borehole disposal of nuclear waste. *Sandia National Laboratories*. NM Worke shop 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.
- Fall, M. and Samb, S.S. (2009). Effect of high temperature on strength and microstructural properties of cemented paste backfill. *Fire Safety Journal*. 44 (4): 642-651.
- Fuenkajorn, K. and Kenkhunthod, N. (2010). Influence of loading rate on deformability and strength of three Thai sandstones. *Geotechnical and Geological Engineering*. 28: 707-715.
- Geranmayeh, A.R., Mahmudi, R. and Kangoie, M. (2010). High-temperature shear strength of lead-free Sn-Sb-Ag/Al₂O₃ composite solder. *Materials Science and Engineering*. 528 (12): 3967-3972.

- Gibb, F.G.F. (1999). High-temperature, very deep, geological disposal: a safer alternative for high-level radioactive waste. *Waste Management*. 19: 207–211.
- Jaeger, J.C., Cook, N.G.W., and Zimmerman, R.W. (2007). *Fundamentals of Rock Mechanics*. Fourth Edition, Blackwell Publishing, Oxford.
- Kapang, P., Walsri, C., Sriapai, T. and Fuenkajorn, K. (2012). Shear strengths of sandstone fractures under true triaxial stresses. *Journal of Structural Geology*. 48: 57–71.
- Lockner, D.A., Summers, R. and Byerlee, J.D. (1986). Effects of temperature and sliding rate on frictional strength of granite. *Pure and Applied Geophysics*. 124 (3).
- Mitchell, E.K., Fialko, Y. and Brown, K.M. (2013). Temperature dependence of frictional healing of Westerly granite: Experimental observations and numerical simulations. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 14 (3): 567–582.
- 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.
- Rodrigues, J.P.O. and Laím, L. (2011). Behaviour of perfobond shear connectors at high temperatures. *Engineering Structures*. 33 (10): 2744–2753.
- Song, I. and Haimson, B.C. (1997). Polyaxial strength criteria and their use in estimating in situ stress magnitudes from borehole breakout dimensions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 34 (3–4): 116.e1–116.e16.
- Stesky, R.M. (1978). Rock friction—effect of confining pressure, temperature, and pore pressure. *Pure and Applied Geophysics*. 116.
- Stesky, R.M., Brace, W.F., Riley, D.K. and Robin, P.Y.F. (1974). Friction in faulted rock at high temperature and pressure. *Tectonophysics*. 23: 177–203.
- 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*.
- Walsri, C., Poonprakon, P., Thosuwan, R. and Fuenkajorn, K. (2009). Compressive and tensile strengths of sandstone under true triaxial stresses. In *Proceedings of the 2nd Thailand Symposium on Rock Mechanics*. March 12–13, 2009, Chonburi, pp. 199–218.

- Wendai, L. (2000). Regression analysis, linear regression and probit regression In 13 chapters. SPSS for windows: statistical analysis. *Publishing House of Electronics Industry*. Beijing.
- Xu, X., Kang, Z., Ming, J., Ge, W. and Jing, C. (2009). Research of microcosmic mechanism of brittle-plastic transition for granite under high temperature. *Procedia Earth and Planetary Science*. 1 (1): 432-437.
- 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

อาจารย์ ดร.เดโช เพื่อกภูมิ เกิดเมื่อวันที่ 7 มิถุนายน 2520 ที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี จบการศึกษาระดับปริญญาตรี จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา เมื่อปี พ.ศ. 2543 จบการศึกษาระดับปริญญาโทและปริญญาเอกจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี หลักสูตรวิศวกรรมธรณี ในปี พ.ศ. 2546 และปี พ.ศ. 2552 ตามลำดับ ในขณะที่ศึกษาอยู่ได้เป็นผู้ช่วยวิจัยให้กับโครงการวิจัยหลายโครงการ หลังจากจบการศึกษาระดับปริญญาเอกได้ทำงานในตำแหน่งนักวิจัยให้กับหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีเป็นระยะเวลา 1 ปี ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา มีความชำนาญพิเศษทางด้านกลศาสตร์ของหินในเชิงการทดลอง การออกแบบ และการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ มีสิ่งตีพิมพ์นานาชาติมากกว่า 15 บทความ ทั้งวารสารและบทความการประชุมนานาชาติ

