

ผลกระทบของอุณหภูมิต่อกำลังเฉือนของรอยแตกในหินแกรนิต

กิตติเทพ เฟื่องขจร^{1*} และ ภาคภูมิ นาพุดชา²

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษาเพื่อหาผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่ากำลังเฉือนของรอยแตกในตัวอย่างหินแกรนิตชุดตาก การทดสอบดังกล่าวได้ใช้โครงกวดทดสอบในสามแกนจริง โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 รูปแบบ คือการทดสอบกำลังเฉือนบนรอยแตกผิวขรุขระ และการทดสอบกำลังเฉือนบนรอยแตกผิวเรียบ ภายใต้อุณหภูมิที่ 303 (อุณหภูมิห้อง) 373, 573 และ 773 เคลวิน และความเค้นล้อมรอบที่ 1, 3, 7, 12 และ 18 เมกะปาสคาล ผลการทดสอบได้แสดงผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่ากำลังเฉือนของรอยแตกหินแกรนิตได้อย่างชัดเจน

โดยรอยแตกผิวขรุขระมีค่ากำลังเฉือนลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตได้จากค่ามุมเสียดทานและค่าความเค้นยึดติดที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นในการศึกษาได้เสนอสมการของ Barton เพื่อใช้ในการคาดคะเนค่ากำลังเฉือนของรอยแตกผิวขรุขระภายใต้ช่วงอุณหภูมิของการทดสอบ สำหรับค่ากำลังเฉือนของตัวอย่างรอยแตกผิวเรียบมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 373 เคลวิน เนื่องจากกระบวนการกระตุกของการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน

คำสำคัญ: รอยแตก หินแกรนิต ผลกระทบของอุณหภูมิ ค่าความเค้นยึดติด ค่ามุมเสียดทาน

¹ ศาสตราจารย์ หน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

² นักศึกษา ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหการ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-4422-3363 อีเมล: kittitep@sut.ac.th



Effect of Temperatures on Shear Strength of Fractures in Granite

Kittitep Fuenkajorn^{1*} and Pakpoom Naphudsas²

Abstract

The objective of this study is to investigate the effect of the shear strength of fractures in Tak granite under the defined temperatures. Triaxial shear tests are performed using a polyaxial load frame conducted in 2 types of experiments: the effects of temperature on the peak shear strengths of tension-induced fractures and smooth surfaces. The testing temperatures range from 303 (ambient temperature), 373, 573 to 773 Kelvin 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 the increasing temperature. The proposed Barton's equation can be used to predict the friction resistances of the fractures under the temperatures within the range tested. The shear strength of smooth surface tends to increase with temperature particularly above 373 Kelvin. This may be due to stick-slip phenomenon.

Keywords: Fracture, Granite, Thermal Effect, Cohesion, Friction Angle

¹ Professor, Geomechanics Research Unit, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology.

² Student, School of Geotechnology, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology.

* Corresponding Author, Tel 0-4422-3363, E-mail: kittitep@sut.ac.th

1. บทนำ

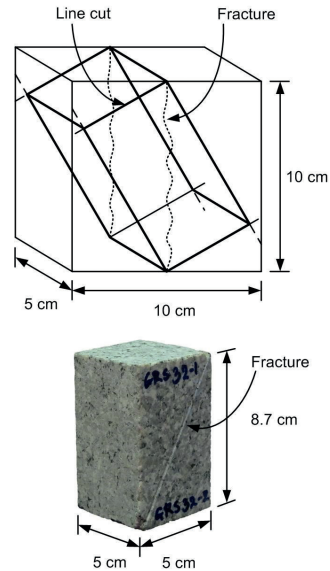
เทคโนโลยีการกักเก็บกากนิวเคลียร์ด้วยวิธีการอัดวัสดุลงในหลุมเจาะในหินแกรนิตระดับลึก (Deep Hole Injection) ได้มีการศึกษาอย่างยาวนานและได้รับความสนใจมากขึ้นเมื่อ 3-4 ปีที่ผ่านมา โดยเฉพาะในประเทศสหรัฐอเมริกา แคนาดา และบางประเทศในทวีปยุโรป ซึ่งข้อดีของเทคโนโลยีนี้คือ มวลหินแกรนิตในระดับลึกมีรอยแตกค่อนข้างน้อยและมีค่าความซึมผ่านต่ำ นอกจากนี้หินแกรนิตยังสามารถทนต่ออุณหภูมิที่เกิดจากการสลายตัว (Decay) ของธาตุกัมมันตรังสีของกากนิวเคลียร์ได้เป็นอย่างดี

ในอนาคตอันใกล้ประเทศไทยมีความจำเป็นในการพัฒนาแหล่งพลังงานนิวเคลียร์ ซึ่งในประเทศไทยนั้นมีมวลหินแกรนิตเป็นจำนวนมาก สามารถใช้กักเก็บของเสียจากโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ดังกล่าวได้อย่างเพียงพอ จึงจำเป็นอย่างยิ่งในการศึกษาศักยภาพของมวลหินแกรนิตในเชิงกลศาสตร์เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีการกักเก็บกากนิวเคลียร์ในหลุมเจาะระดับลึก

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่ากำลังเฉือนบรรอยแตกผิวขรุขระและรอยแตกผิวเรียบของตัวอย่างหินแกรนิตชุดตากภายใต้การผันแปรอุณหภูมิและความเค้นล้อมรอบ โดยใช้โครกกดทดสอบในสามแกนจริง และสร้างสมการเชิงประสพการณ์ของค่ากำลังเฉือนในฟังก์ชันของอุณหภูมิบรรอยแตกผิวขรุขระและรอยแตกผิวเรียบ

2. การเตรียมตัวอย่าง

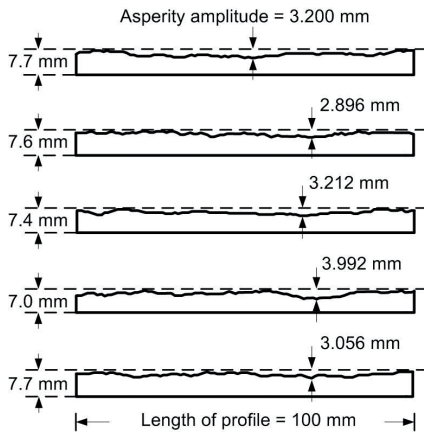
ตัวอย่างหินแกรนิตที่ใช้ในการศึกษานี้คือหินแกรนิตชุดตาก (Tak Granite) ซึ่งเกิดจากหินหนืดใต้เปลือกโลกแทรกดันตัวขึ้นมาอย่างช้าๆ ในระดับหนึ่งแล้วเกิดการเย็นตัวแข็งเป็นหินก่อนถึงผิวโลก แร่ประกอบหินต่างๆ ได้มีการตกผลึกและเย็นตัวลงอย่างช้าๆ ผลึกของแร่จึงมีลักษณะหยาบและส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมแสดงหน้าผลึกเกาะประสานตัวกันแน่นสนิท แร่ประกอบหินประกอบด้วย Plagioclase 16.2%, Quartz 5.4%,



รูปที่ 1 การตัดตัวอย่างหินแกรนิตให้มีขนาดเท่ากับ 5.0×5.0×8.7 ลูกบาศก์เซนติเมตร

K-fieldspar 5%, Biotite 2.7%, Hornblende 0.5%, Ore/Rest tr, Groundmass 70% [1] จากการศึกษาอายุหินแกรนิตด้วยวิธีไอโซโทปพบว่าหินแกรนิตตากมีอายุตั้งแต่ 66.4-360 ล้านปี โดยหินแกรนิตอายุน้อยจะอยู่ทางทิศตะวันตกของจังหวัดตาก

ตัวอย่างหินแกรนิตรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 5.0×10.0×10.0 ลูกบาศก์เซนติเมตร ถูกนำมาสร้างรอยแตกผิวขรุขระและรอยแตกผิวเรียบ บริเวณกึ่งกลางของตัวอย่างหินโดยรอยแตกผิวขรุขระถูกสร้างขึ้นด้วยวิธีการให้แรงกดแบบเส้นและตัวอย่างรอยแตกผิวเรียบถูกสร้างขึ้นด้วยวิธีการตัดด้วยใบเลื่อย จากนั้นนำตัวอย่างดังกล่าวไปตัดให้มีขนาด 5.0×5.0×8.7 ลูกบาศก์เซนติเมตร ส่งผลให้พื้นที่รอยแตกมีขนาดเท่ากับ 5.0×10.0 ตารางเซนติเมตร และมุมระหว่างความเค้นในแนวแกนกับความเค้นตั้งฉากมีค่าเท่ากับ 60 องศา ดังแสดงในรูปที่ 1 การตรวจวัดค่าความขรุขระของตัวอย่างรอยแตกผิวขรุขระได้ตรวจวัดโดยใช้เลเซอร์สแกนตามทิศทางการเฉือน ซึ่งสามารถอ่านค่าความขรุขระได้ละเอียดถึง 0.01 มิลลิเมตร

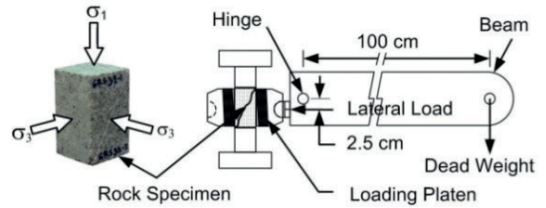
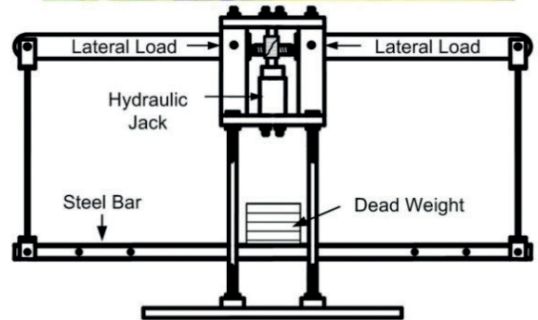


รูปที่ 2 ตัวอย่างความขรุขระของรอยแตกที่สร้างขึ้นจากการตรวจวัดด้วยเลเซอร์

จากนั้นเปรียบเทียบพื้นผิวความขรุขระดังกล่าว (Joint Roughness Coefficient: JRC) กับ Barton's Chart [2] ผลที่ได้ระบุว่ารอยแตกที่สร้างขึ้นมีค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระอยู่ระหว่าง 12 ถึง 16 ดังแสดงในรูปที่ 2

3. โครงกวดทดสอบในสามแกนจริง

โครงกวดทดสอบในสามแกนจริง [3] สามารถเพิ่มความเค้นได้ทั้งสามแกน รูปที่ 3 แสดงหลักการให้แรงของโครงกวด โดยค่าความเค้นด้านข้างที่กระทำบนตัวอย่างหินในแต่ละด้านได้รับแรงที่เกิดขึ้นจากคานทอดแรง โดยใช้เหล็กเส้นเชื่อมต่อระหว่างคานล่างกับปลายของคานทอดแรง (Cantilever Beam) ทั้งสองข้าง ที่จุดกึ่งกลางของคานล่างจะรับตุ้มน้ำหนัก (Dead Weight) เพื่อดึงปลายแขนของคานทดสอบทั้งสองข้างและใช้เพลลาที่ยึดติดกับเสายึดคานทอดแรงที่อยู่ในแต่ละด้านของโครงกวดทดสอบ ในขณะที่ทดสอบคานทอดแรงทุกข้างจะถูกปรับให้อยู่ในแนวระนาบ ซึ่งส่งผลต่อแรงกดด้านข้างบนตัวอย่างหินที่จุดกึ่งกลางของโครงกวดทดสอบ และได้กำหนดระยะห่างของเหล็กเส้นแขนตุ้มน้ำหนักที่ใช้แขนคานรับตุ้มน้ำหนักจากจุดปลายด้านนอกถึงปลายด้านใน อัตราส่วนของแรงจะมีค่าเท่ากับ 12.3 เท่าในทิศตะวันออก-ตะวันตก (E-W) และ 11.5 เท่าในทิศเหนือ-ใต้ (N-S) ซึ่งได้สอบเทียบ



รูปที่ 3 องค์ประกอบของโครงกวดทดสอบในสามแกน

โดยใช้ Electronic Load Cell อัตราส่วนของแรงที่ได้นี้ถูกนำมาใช้คำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแท่งตัวอย่างด้านข้างด้วยการวัดอัตราการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของแท่งเหล็กทั้งสองที่อยู่ด้านล่าง ส่วนแรงที่กระทำด้านข้างได้ออกแบบให้สามารถให้แรงมากกว่า 5 กิโลนิวตัน และมีปั๊มไฮดรอลิกเป็นอุปกรณ์ให้ความเค้นในแนวแกน (σ_1) ซึ่งสามารถให้แรงสูงมากกว่า 200 กิโลนิวตัน โครงกวดทดสอบสามารถรองรับขนาดของตัวอย่างหินได้ตั้งแต่ 2.5×2.5×2.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ถึง 10×10×20 ลูกบาศก์เซนติเมตร การทดสอบกับแท่งตัวอย่างที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันจะต้องมีการปรับเปลี่ยนระยะห่างทั้งสองข้างให้เหมาะสม

4. ขั้นตอนการทดสอบ

ในการทดสอบได้ผันแปรอุณหภูมิที่ 303, 373, 573 และ 773 เคลวิน และความเค้นล้อมรอบที่ 1, 3, 7, 12 และ 18 เมกะปาสคาล โดยนำตัวอย่างหินแกรนิตที่มีรอยแตกติดตั้งในเครื่องทดสอบโดยใช้เบ้ากดความร้อนและให้ความร้อนแก่ตัวอย่างรอยแตกเป็นเวลา 2 ชั่วโมงก่อนทดสอบ รูปที่ 4 แสดงอุปกรณ์ให้ความร้อนบนตัวอย่างหินประกอบไปด้วยอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple) เบ้ากดให้ความร้อน (Loading Platen) และอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (Thermostat) ซึ่งชุดอุปกรณ์ให้ความร้อนดังกล่าวทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างแกรนิตให้คงที่ตลอดการทดสอบ หลังจากนั้นใส่ตุ้มน้ำหนักเพื่อเพิ่มความเค้นล้อมรอบ (σ_3) ให้กับตัวอย่างหินแกรนิตในขณะเดียวกันได้เพิ่มความเค้นในแนวแกนจนกระทั่งตัวอย่างหินแกรนิตอยู่ในสภาวะความเค้นตั้งฉากเท่ากับศูนย์ (ความเค้นล้อมรอบเท่ากันทุกทิศทาง) จากนั้นเพิ่มความเค้นในแนวแกนและตรวจวัดพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปร่างของรอยแตกระหว่างการทดสอบทั้งสามทิศทางโดยบันทึกค่าดังกล่าวเมื่อแรงกดในแนวแกนเพิ่มขึ้นทุกๆ 8.4 กิโลนิวตัน จนกระทั่งตัวอย่างหินเกิดการวิบัติ ทั้งนี้ความแตกต่างของอุณหภูมิก่อนและหลังการทดสอบจะมีค่าไม่เกิน 5 เคลวิน

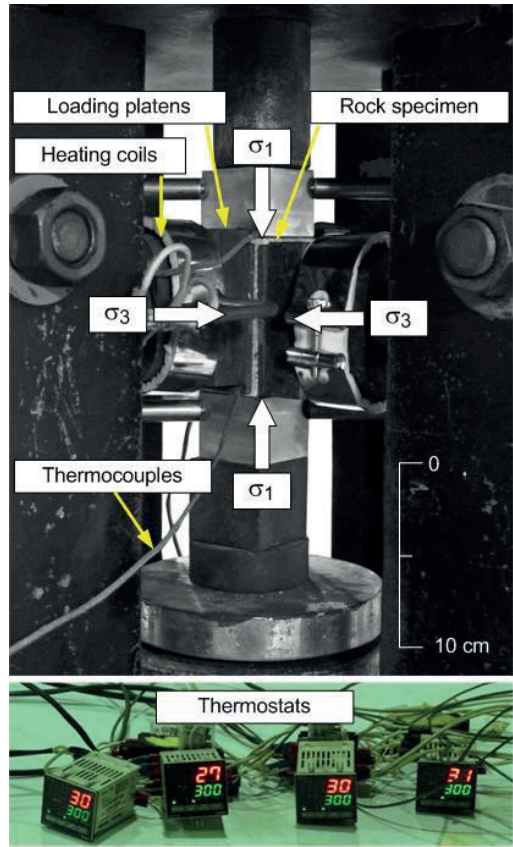
ผลจากการทดสอบสามารถนำมาคำนวณค่ากำลังเฉือน (τ) และค่าความเค้นตั้งฉาก (σ_n) [4] ดังสมการ

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

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

โดยที่

- σ_1 คือความเค้นหลักในแนวแกน
- σ_2 คือความเค้นล้อมรอบ
- β คือมุมระหว่างความเค้นหลักในแนวแกนกับความเค้นตั้งฉาก ซึ่งมุมดังกล่าวที่ใช้ในการทดสอบมีค่าเท่ากับ 60 องศา ทุกตัวอย่าง



รูปที่ 4 การติดตั้งเบ้ากดความร้อนและการตรวจวัดอุณหภูมิ

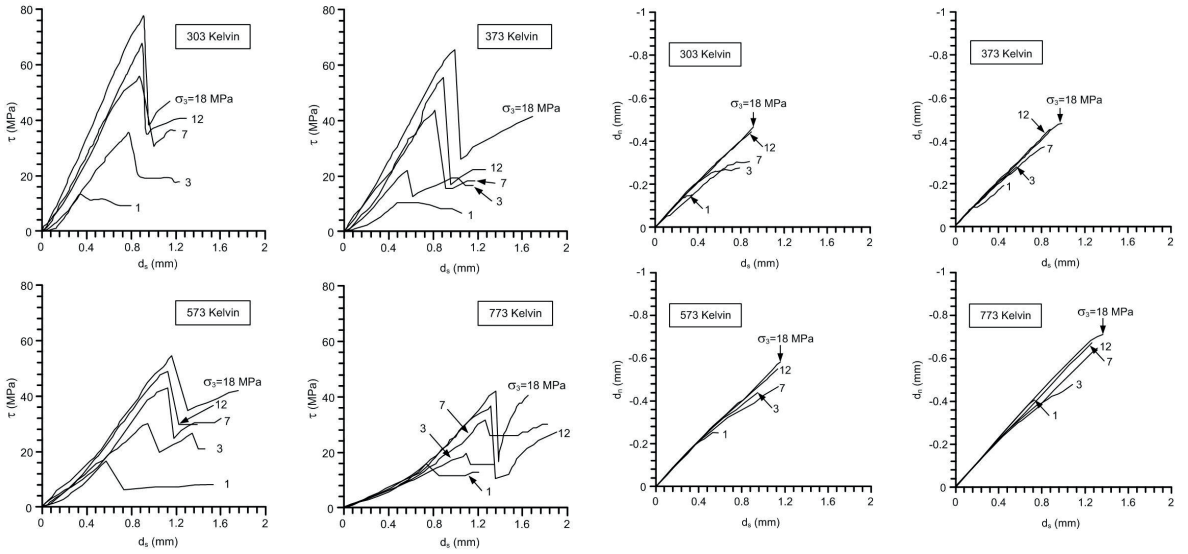
การคำนวณระยะการเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉาก (d_n) และการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน (d_s) บนผิวรอยแตกสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$d_s = \frac{1}{2}(d_1 - d_3) \sin 2\beta \quad (3)$$

$$d_n = \frac{1}{2}(d_1 + d_3) + \frac{1}{2}(d_1 - d_3) \cos 2\beta \quad (4)$$

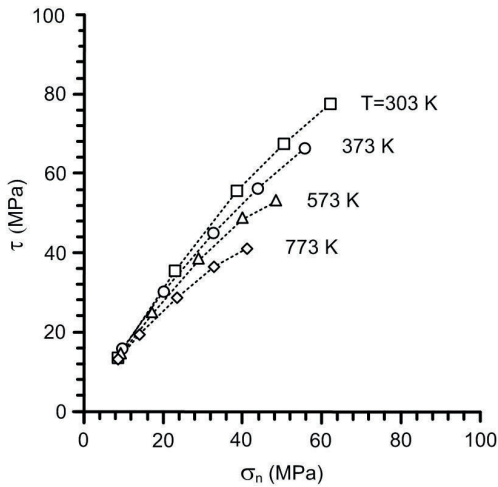
โดยที่

- d_1 คือระยะการเคลื่อนตัวในแนวแกนหลัก
- d_3 คือระยะการเคลื่อนตัวในแนวด้านข้าง (ความเค้นล้อมรอบ)



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉือนสูงสุดกับค่าการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนของรอยแตกผิวขรุขระ

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนและการเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉากของรอยแตกผิวขรุขระ



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉือนสูงสุดกับค่าความเค้นตั้งฉากของรอยแตกผิวขรุขระ

5. ผลการทดสอบกำลังเฉือนภายใต้อุณหภูมิ

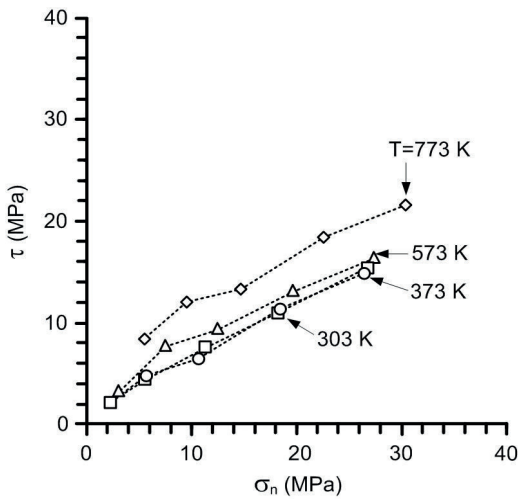
5.1 กำลังเฉือนบนตัวอย่างผิวขรุขระ

ผลการทดสอบกำลังเฉือนบนรอยแตกผิวขรุขระของตัวอย่างหินแกรนิตแสดงในรูปของค่าความเค้น

ในแนวแกน ความเค้นล้อมรอบ ความเค้นตั้งฉากและกำลังเฉือนที่จุดแตก ผลการทดสอบระบุว่าอุณหภูมิมีผลต่อค่ากำลังเฉือนและพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของรอยแตกผิวขรุขระ โดยการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนบนรอยแตกผิวขรุขระที่จุดแตกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5 และค่ากำลังเฉือนสูงสุดบนรอยแตกผิวขรุขระมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6 ส่วนรูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนและการเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉากของรอยแตกผิวขรุขระภายใต้อุณหภูมิต่างๆ

5.2 กำลังเฉือนบนตัวอย่างผิวเรียบ

ผลการทดสอบกำลังเฉือนบนรอยแตกผิวเรียบแสดงในรูปของค่าความเค้นในแนวแกน ความเค้นล้อมรอบ ความเค้นตั้งฉาก และกำลังเฉือนที่จุดแตก ผลการทดสอบระบุว่าอุณหภูมิมีผลต่อค่ากำลังเฉือนและพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของรอยแตกผิวเรียบ โดยการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนบนรอยแตกผิวเรียบที่จุดแตกมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉือนสูงสุดกับค่าความเค้นตั้งฉากของรอยแตกผิวเรียบ

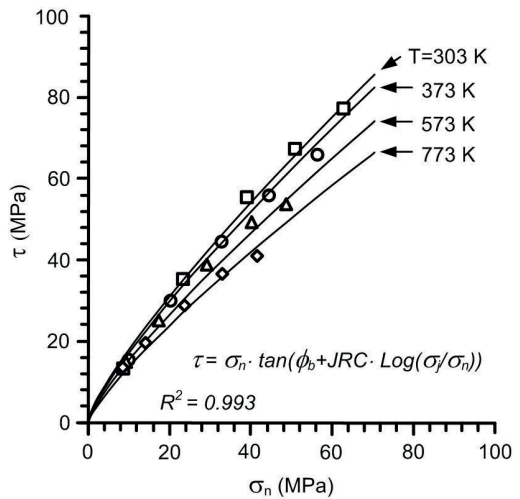
เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและค่ากำลังเฉือนสูงสุดบนรอยแตกผิวเรียบมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 8 ทั้งนี้เกิดจากกระบวนการกระตุกของการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน (Stick-slip) โดยผิวของรอยแตกผิวเรียบมีความหนืดมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

6. การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบได้เสนอการพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้อธิบายและคาดคะเนกำลังเฉือนบนรอยแตกของหินแกรนิตภายใต้การผันแปรความเค้นล้อมรอบและอุณหภูมิในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉือนและค่าความเค้นตั้งฉากที่จุดแตก การพัฒนาสมการแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ตามลักษณะการทดสอบคือสมการสำหรับกำลังเฉือนบนรอยแตกผิวขรุขระและสมการสำหรับกำลังเฉือนบนรอยแตกผิวเรียบ

6.1 สมการสำหรับกำลังเฉือนบนรอยแตกผิวขรุขระ

นำผลการทดสอบกำลังเฉือนบนรอยแตกผิวขรุขระมาวิเคราะห์เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเฉือนกับความเค้นตั้งฉากภายใต้การผันแปรอุณหภูมิ โดยเสนอ



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบ (จุด) กับผลการวิเคราะห์แบบถดถอยด้วยสมการของ Barton (เส้นทึบ) ของรอยแตกผิวขรุขระในหินแกรนิต

สมการของ Barton [5] เพื่อเชื่อมความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเฉือน อุณหภูมิ และความเค้นตั้งฉากบนรอยแตกผิวขรุขระของหินแกรนิต ดังสมการ

$$\tau = \sigma_n \tan(\phi_b + JRC \log(\sigma_j / \sigma_n)) \quad (5)$$

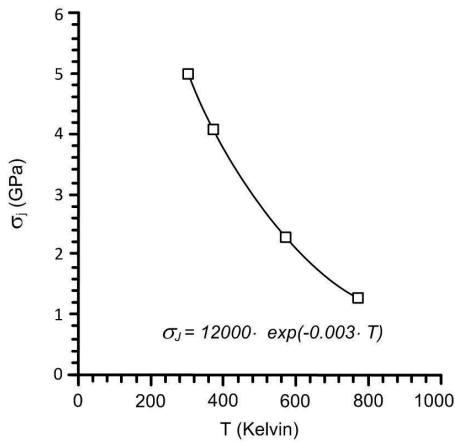
โดยที่

ϕ_b คือค่ามุมเสียดทานพื้นฐานจากการทดสอบผิวเรียบมีค่าเท่ากับ 28.37 องศา

JRC คือค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระมีค่าเท่ากับ 12

σ_j คือค่ากำลังกดสูงสุดของหิน

นำผลการทดสอบค่ากำลังเฉือนและค่าความเค้นตั้งฉากในรูปสมการความสัมพันธ์ของ Barton มาวิเคราะห์แบบถดถอยในโปรแกรม SPSS (Version 19) [6] ดังรูปที่ 9 ได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of Correlation) เท่ากับ 0.993 พบว่าค่ากำลังกดสูงสุดของหินมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นดังรูปที่ 10 ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการเอกซ์โพเนนเชียล ดังสมการ



รูปที่ 10 ผลการวิเคราะห์แบบถดถอยด้วยโปรแกรม SPSS ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังกดสูงสุดและอุณหภูมิ

$$\sigma_j = \alpha \cdot \exp(\lambda \cdot T) \quad (6)$$

โดยที่

α และ λ คือค่าคงที่

T คืออุณหภูมิ (เคลวิน)

เมื่อแทนสมการ (6) ในสมการของ Barton ได้

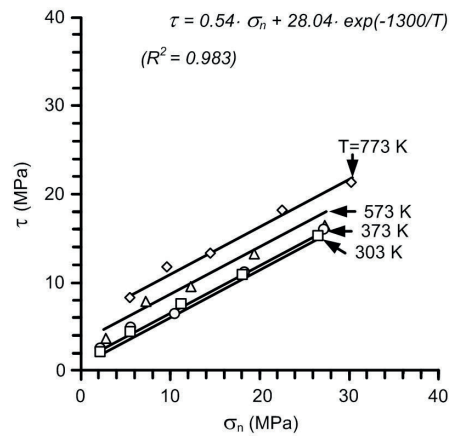
$$\tau = \sigma_n \tan(\phi_b + JRC \text{Log}(\alpha \cdot \exp(\lambda \cdot T) / \sigma_n)) \quad (7)$$

6.2 สมการสำหรับกำลังเฉือนบนรอยแตกผิวเรียบ

นำผลการทดสอบกำลังเฉือนบนรอยแตกผิวเรียบมาวิเคราะห์เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเฉือนกับความเค้นตั้งฉากภายใต้การผันแปรอุณหภูมิ เพื่อเชื่อมความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเฉือน อุณหภูมิและความเค้นตั้งฉากบนรอยแตกผิวเรียบของหินแกรนิตด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบถดถอยในโปรแกรม SPSS (Version 19) เพื่อคำนวณค่าคงที่ในสมการ

$$\tau = \xi \sigma_n + \chi \cdot \exp(\omega / T) \quad (8)$$

โดยที่ ξ , χ และ ω คือค่าคงที่



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบ (จุด) กับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS (เส้นทึบ) ของรอยแตกผิวเรียบในหินแกรนิต

รูปที่ 11 แสดงผลการคำนวณด้วยโปรแกรม SPSS มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.983 ซึ่งระบุว่าการสมการที่ (8) สามารถอธิบายผลการทดสอบได้ดี

สมการที่ 7 และสมการที่ 8 สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการคาดคะเนพฤติกรรมของกำลังเฉือนบนรอยแตกของตัวอย่างหินแกรนิตภายใต้การผันแปรความเค้นล้อมรอบและอุณหภูมิ โดยความเค้นตั้งฉากและอุณหภูมิต้องอยู่ในช่วงของการทดสอบเท่านั้น ซึ่งต้องตระหนักและพึงระวังในการประยุกต์ใช้สมการดังกล่าว

7. อภิปรายผลและสรุป

ผลการทดสอบกำลังเฉือนบนรอยแตกผิวขรุขระระบุว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้พฤติกรรมของหินแกรนิตมีความเหนียวมากขึ้น ส่งผลให้กำลังเฉือนลดลงและระยะการเคลื่อนตัวที่จุดกำลังเฉือนสูงสุดมีค่ามากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Stesky และคณะ [7] ในการศึกษาพฤติกรรมของแรงเฉือนของหินซิลิกา 7 ชนิด ผลการศึกษาดังกล่าวระบุว่ากำลังเฉือนมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สำหรับการลดลงของกำลังเฉือนภายใต้การผันแปรอุณหภูมิสูงในการศึกษานี้ยังขึ้นกับความเค้นล้อมรอบด้วย โดยที่ความเค้นล้อมรอบต่ำอุณหภูมิไม่ส่งผลต่อการ

เปลี่ยนแปลงค่ากำลังเฉือน แต่เมื่อความเค้นล้อมรอบสูงขึ้น อุณหภูมิจะส่งผลต่อเปลี่ยนแปลงค่ากำลังเฉือน โดยทำให้ค่ากำลังเฉือนมีค่าลดลง ส่วนผลการทดสอบกำลังเฉือนบนรอยแตกของผิวเรียบระบุว่าค่ากำลังเฉือนบนรอยแตกผิวเรียบมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Lockner และคณะ [8] และ Mitchell และคณะ [9] ผลดังกล่าวอาจเกิดจากการอ่อนตัวของผิวรอยแตกเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้รอยแตกมีการเชื่อมประสานกันมากขึ้น ส่งผลให้เกิดกระบวนการกระตุกในแนวเฉือนของพื้นผิวรอยแตก ซึ่งพบในช่วงอุณหภูมิ 573 และ 773 เคลวิน และที่ความเค้นล้อมรอบเท่ากับ 12 และ 18 เมกะปาสกาล (ไม่ได้แสดงผลการทดสอบ) ในทางตรงกันข้ามผลการทดสอบของ Stesky [10] ระบุว่ากระบวนการกระตุกของพื้นผิวรอยแตกจะเกิดในช่วงอุณหภูมิต่ำและที่ความเค้นล้อมรอบสูง ทั้งนี้ Kawamoto และ Shimamoto [11] ได้อธิบายว่าองค์ประกอบแร่ในตัวอย่างหินเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้การเกิดกระบวนการกระตุกของพื้นผิวรอยแตกที่อุณหภูมิและความเค้นต่าง ๆ อีกด้วย

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉือนกับความเค้นตั้งฉากภายใต้การผันแปรอุณหภูมิของรอยแตกผิวขรุขระ ได้นำผลการทดสอบดังกล่าวมาสร้างเกณฑ์การแตกด้วยสมการของ Barton ซึ่งสามารถใช้คาดคะเนกำลังเฉือนสูงสุดของตัวอย่างหินได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ ซึ่งพบว่าค่ากำลังเฉือนของรอยแตกผิวขรุขระขึ้นอยู่กับค่ากำลังกดสูงสุดของหินภายใต้อุณหภูมิต่างๆ สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉือนกับความเค้นตั้งฉากภายใต้การผันแปรอุณหภูมิของรอยแตกผิวเรียบได้นำมาเปรียบเทียบกับทฤษฎีการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS ผลระบุว่าข้อมูลจากการทดสอบและข้อมูลจากการคาดคะเนย้อนกลับของสมการที่ได้จากโปรแกรม SPSS มีค่าใกล้เคียงกัน จึงสรุปได้ว่าสามารถนำสมการดังกล่าวไปใช้คาดคะเนค่ากำลังเฉือนสูงสุดของรอยแตกของหินแกรนิตในระดับลึกได้ โดยช่วงอุณหภูมิในการทดสอบมีค่าครอบคลุมช่วงอุณหภูมิในสภาวะจริงในขณะกักเก็บ

กากนิวเคลียร์ ซึ่งการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีของกากนิวเคลียร์ระดับต่ำ (Low Level Waste) มีค่าอยู่ระหว่าง 363 ถึง 373 เคลวิน คือมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิใต้พิภพที่ระดับความลึกเดียวกัน โดยที่อุณหภูมิใต้พิภพของมวลหินแกรนิตชุดตากที่ระดับความลึก 100 เมตรมีค่าเพียง 239 เคลวิน [12]

ผู้วิจัยแนะนำว่าควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลกระทบของความขรุขระและขนาดของรอยแตกต่อกำลังเฉือนภายใต้อุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษานี้

8. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษารั้วนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จากการส่งเสริมการศึกษาระดับอุดมศึกษาและมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ จึงขอขอบพระคุณอย่างสูงซึ่งที่อนุญาตให้เผยแพร่บทความนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Atherton, M. Brotherton, and C. Mahawat, "Integrated chemistry, textures, phase relations and modelling of a composite granodioritic-monzonitic batholith, Tak, Thailand," *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, vol. 7, no. 2-3, pp. 89-112, 1992.
- [2] N. Barton, "Shear strength investigations for surface mining," in *Proceedings of the 3rd International Conference on Surface mining*, Vancouver, 1982, pp. 171-196.
- [3] K. Fuenkajorn and N. Kenkhunthod, "Influence of loading rate on deformability and strength of three Thai sandstones," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 28, pp. 707-715, 2010.
- [4] J. C. Jaeger, N. G. W. Cook, and R. W. Zimmerman, *Fundamentals of Rock Mechanics*, 4th Edition, Oxford: Blackwell Publishing, 2007, pp. 17-73.
- [5] D. C. Wyllie and C. W. Mah, *Rock slope engineering*:



- civil and mining*, 4th Edition, New York: Spon Press, Madison, 2004.
- [6] L. Wendai, *Regression analysis, linear regression and probit regression In 13 chapters. SPSS for windows: statistical analysis*, Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000.
- [7] R.M. Stesky, W.F. Brace, D.K. Riley, and P.Y.F. Robin, "Friction in faulted rock at high temperature and pressure," *Tectonophysics*, vol. 23, pp. 177-203, 1974.
- [8] D.A. Lockner, R. Summers, and J.D. Byerlee, "Effects of temperature and sliding rate on frictional strength of granite," *Pure and applied geophysics*, vol. 124, no. 3, 1986.
- [9] E.K. Mitchell, Y. Fialko, and K.M. Brown, "Temperature dependence of frictional healing of Westerly granite: Experimental observations and numerical simulations," *Geochem. Geophys. Geosyst.*, vol. 14 no. 3, pp. 456-582, 2013.
- [10] R.M. Stesky, "Rock Friction-Effect of Confining Pressure, Temperature and Pore Pressure," *Tectonophysics*, vol. 116, 1978.
- [11] E. Kawamoto and T. Shimamoto, "The strength profile for biminerale shear zones: an insight from high-temperature shearing experiments on calcite-halite mixtures," *Tectonophysics*, vol. 1, no. 1, 1998.
- [12] S.M. Barr, "Hot springs and geothermal gradients in northern Thailand," *Geothermics*, vol. 8, no. 2, 1979.