



รหัสโครงการ SUT7-719-56-12-01

## รายงานการวิจัย

### ชุดโครงการวิจัย

การศึกษาการทิ้งกากนิวเคลียร์ในหลุมเจาะระดับลึกในหินแกรนิต

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

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-719-56-12-01

## รายงานการวิจัย

### ชุดโครงการวิจัย

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

### โครงการวิจัยย่อย

- 1 การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิสูงต่อความแข็งแรงของหินแกรนิต เพื่อประยุกต์ใช้ในการทิ้งกากนิวเคลียร์ในหลุมเจาะ  
หัวหน้าโครงการวิจัยย่อย: รศ.ดร.กิตติเทพ เฟื่องขจร
- 2 การศึกษากำลังเฉือนของรอยแตกในหินแกรนิตภายใต้อุณหภูมิสูง  
หัวหน้าโครงการวิจัยย่อย: อ.ดร.เดโช เผือกภูมิ

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 เพื่อหาผลกระทบของอุณหภูมิสูงต่อกำลังกดและความยืดหยุ่นของหินแกรนิตชุดตากและต่อกำลังเฉือนของรอยแตกในหินแกรนิต การทดสอบความแข็งดำเนินการภายใต้ความเค้นล้อมรอบและอุณหภูมิที่ผันแปร ความเค้นล้อมรอบในขณะทดสอบมีค่าคงที่เท่ากับ 0, 3, 7 และ 12 เมกะปาสคาล โดยใช้โครงกดทดสอบในสามแกนจริง ตัวอย่างนำมาจัดเตรียมเป็นรูปแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ  $5 \times 5 \times 10$  ลูกบาศก์-เซนติเมตร อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบผันแปรจาก 273 ถึง 773 เคลวิน (0-500 องศาเซลเซียส) ผลการทดสอบระบุว่า ค่ากำลังกดในแกนเดียวและค่ากำลังดึงแบบบราซิลจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้เป็นอย่างดีด้วยสมการยกกำลัง ผลการทดสอบในสามแกนระบุว่า ค่าความเค้นยึดติดจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันค่ามุมเสียดทานภายในจะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิที่ผันแปร นอกจากนี้ค่าความยืดหยุ่นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่ากำลังกดของหินแกรนิตภายใต้อุณหภูมิและความเค้นล้อมรอบที่ผันแปรสามารถอธิบายได้ด้วยพลังงานความเครียดเบี่ยงเบนที่จุดวิกฤติในฟังก์ชันของพลังงานความเครียดเฉลี่ย

ส่วนการทดสอบค่ากำลังเฉือนของรอยแตกในหินแกรนิตได้ใช้โครงกดทดสอบในสามแกนจริง ซึ่งสามารถควบคุมความเค้นล้อมรอบให้คงที่และเพิ่มความเค้นในแนวแกนได้ ในการทดสอบได้ใช้อัตราการกดเท่ากับ 1 เมกะปาสคาลต่อวินาที และหยุดทดสอบเมื่อระยะการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนเท่ากับ 2 มิลลิเมตร การทดสอบแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือการทดสอบกำลังเฉือนบนรอยแตกผิวขรุขระและการทดสอบกำลังเฉือนบนรอยแตกผิวเรียบ ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดเท่ากับ  $5.0 \times 5.0 \times 8.7$  ลูกบาศก์เซนติเมตร พื้นที่รอยแตกมีค่าเท่ากับ  $5 \times 10$  ตารางเซนติเมตร โดยทำการทดสอบภายใต้อุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง) 100, 300 และ 500 องศาเซลเซียส และผันแปรความเค้นล้อมรอบที่ 1, 3, 7, 12 และ 18 เมกะปาสคาล ผลการทดสอบได้แสดงผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่ากำลังเฉือนของรอยแตกหินแกรนิตได้อย่างชัดเจน รอยแตกผิวขรุขระที่มีค่ากำลังเฉือนลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตได้จากการลดลงของค่ามุมเสียดทานและค่าความเค้นยึดติดเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในการศึกษาได้เสนอสมการเอกซ์โพเนนเชียลเพื่อใช้ในการคาดคะเนค่ากำลังต้านทานการเฉือนของรอยแตกผิวขรุขระภายใต้อุณหภูมิของช่วงการทดสอบ ค่ากำลังเฉือนของตัวอย่างรอยแตกผิวเรียบมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส เนื่องจากกระบวนการ Stick-slip ผู้วิจัยแนะนำว่าควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลกระทบของความขรุขระและองค์ประกอบแร่ของรอยแตกต่อกำลังเฉือนของรอยแตก

## Abstract

The objective of this study is to experimentally determine the effect of elevated temperatures on the compressive strengths and elasticity of Tak granite, and on the shear strength of granite fractures. The compressive strengths of the rock are determined under the constant confining stresses of 0, 3, 7, to 12 MPa by 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.

To determine the effects of the elevated temperatures on the shearing resistance of the granite fractures, the triaxial shear tests are performed. The effects of temperature are determined for 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  $60^\circ$  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
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์หลักของแผนงานวิจัย.....	1
1.3 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวคิดของแผนงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 แผนการบริหารแผนงานวิจัยและแผนการดำเนินงาน.....	3
1.6 แผนการสร้างนักวิจัยรุ่นใหม่จากการทำการวิจัยตามแผนงานวิจัย.....	5
<b>บทที่ 2 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย</b> .....	<b>7</b>
2.1 ผลการดำเนินงานของโครงการวิจัยชุดที่ 1.....	7
2.2 ผลการดำเนินงานของโครงการวิจัยชุดที่ 2.....	7
<b>บทที่ 3 การประมวลและวิเคราะห์ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ</b> .....	<b>9</b>
3.1 การประเมินเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์.....	9
3.2 การประเมินกำลังรับแรงเฉือนภายใต้อุณหภูมิและแรงดันสูง.....	10
<b>บทที่ 4 สรุปรวมผลงานวิจัย</b> .....	<b>11</b>
4.1 สรุปรวมผลงานวิจัย.....	11
4.2 การศึกษาวิจัยเพิ่มเติม.....	12
<b>บรรณานุกรม</b> .....	<b>13</b>
<b>ประวัตินักวิจัย</b> .....	<b>19</b>

# บทที่ 1

## บทนำ

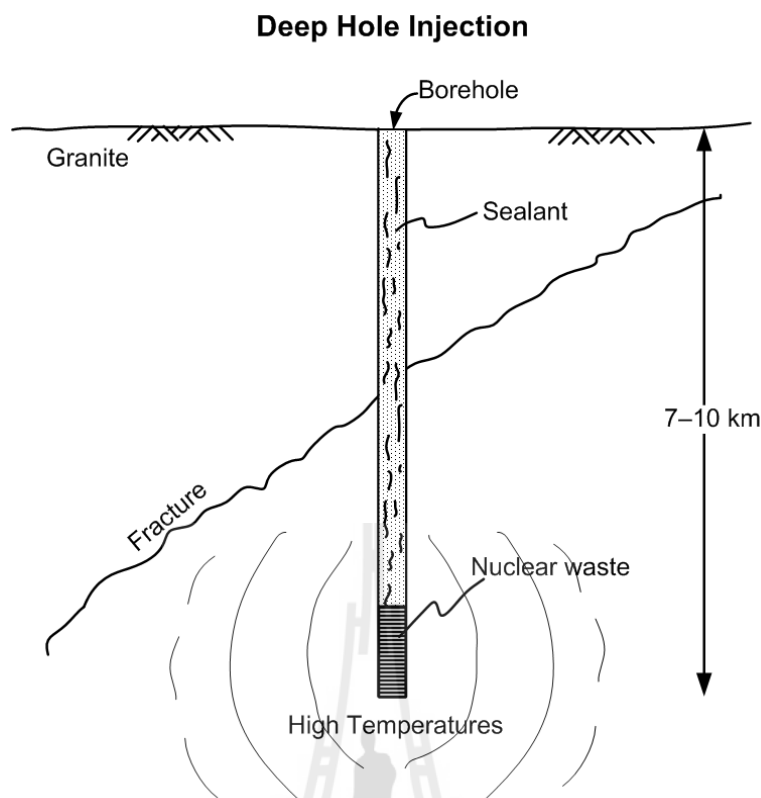
### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

เทคโนโลยีการกักเก็บกากนิวเคลียร์ด้วยวิธีการอัดวัสดุลงไปในกลุ่มเจาะระดับลึก (Deep Hole Injection) ดังแสดงในรูปที่ 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 และมวลหินมีค่าความซึมผ่านต่ำ นอกจากนั้นหินแกรนิตยังมีความคงทนต่ออุณหภูมิสูงซึ่งเป็นอุณหภูมิที่อาจเกิดจากการสลายตัว (Decay) ของธาตุกัมมันตรังสีของกากนิวเคลียร์ดังกล่าว

ในอนาคตอันใกล้ประเทศไทยจำเป็นต้องมีการพัฒนาพลังงานนิวเคลียร์ ซึ่งข้อดีประการหนึ่งคือ ในประเทศไทยมีมวลหินแกรนิตจำนวนมาก สามารถใช้ในการกักเก็บของเสียจากโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ดังกล่าวได้อย่างพอเพียง จึงจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่จะต้องมีการศึกษาศักยภาพของมวลหินแกรนิตในเชิงกลศาสตร์และเชิงพลศาสตร์สำหรับเทคโนโลยีการทิ้งของเสียในระดับลึก เพื่อให้มั่นใจว่าจะไม่เกิดการรั่วไหลเข้าสู่ชั้นน้ำบาดาลหรือผิวดิน

### 1.2 วัตถุประสงค์หลักของแผนงานวิจัย

วัตถุประสงค์ของการวิจัยครั้งนี้ คือ การทดสอบหากล้ากักของหินแกรนิตภายใต้อุณหภูมิระหว่าง 30-200°C เพื่อคาดคะเนเกณฑ์การแตกที่สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ได้อย่างมีประสิทธิภาพในการออกแบบและหาเสถียรภาพของหลุมเจาะกักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมในชั้นหินแกรนิต และทดสอบกำลังเฉือนของรอยแตกในหินแกรนิตภายใต้อุณหภูมิระหว่าง 30-200°C โดยมีการผันแปรความเค้นในแนวตั้งฉากไม่น้อยกว่า 4 ระดับ ผลการศึกษาจะนำไปประยุกต์ใช้ในการประเมินเสถียรภาพของหลุมเจาะสำหรับกักเก็บกากนิวเคลียร์ที่อาจมีรอยแตกอยู่ในบริเวณใกล้เคียง



รูปที่ 1 แผนผังแสดงรูปแบบการกักเก็บกากนิวเคลียร์ในหลุมเจาะที่ระดับลึก

### 1.3 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวคิดของแผนงานวิจัย

เพื่อให้ทราบถึงเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์ของหินแกรนิตที่อยู่ใกล้กับแหล่งกักเก็บซึ่งจะอยู่ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง จึงจำเป็นที่จะต้องจำลองสภาวะดังกล่าวในห้องปฏิบัติการ โดยการทดสอบกำลังกดในสามแกน (Triaxial Compressive Strength Test) ของตัวอย่างหินแกรนิตที่อยู่ภายใต้อุณหภูมิที่ระดับต่างๆ จาก 30-200°C ผลการทดสอบสามารถนำมาพัฒนาสมการเชิงคณิตศาสตร์เพื่อสร้างเกณฑ์การแตกของหินแกรนิตภายใต้อุณหภูมิและความดันที่หลากหลาย ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการประเมินเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์ของหินแกรนิตที่อยู่ติดกับหรือใกล้เคียงกับจุดทิ้งกากนิวเคลียร์และในบางพื้นที่ที่มวลหินแกรนิตอาจมีรอยแตกหรือรอยร้าวที่อาจเกิดการเคลื่อนตัวเนื่องจากการผันแปรของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น อุณหภูมิดังกล่าวเกิดจากการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีที่อาจส่งผลให้เกิดการเคลื่อนตัว สภาวะดังกล่าวสามารถจำลองได้ในห้องปฏิบัติการด้วยการทดสอบกำลังเฉือนภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง ผลที่ได้สามารถนำมาสร้างเกณฑ์การเคลื่อนตัวหรือกำลังเฉือนของรอยแตกในสภาวะภายใต้การกักเก็บกากนิวเคลียร์



#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลงานวิจัยที่เสนอมานี้มีประโยชน์อย่างมากกับงานด้านธรณีวิทยา วิศวกรรม สิ่งแวดล้อม และวิศวกรรมธรณี ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

- 1) ตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารระดับนานาชาติ
- 2) เผยแพร่องค์ความรู้ให้กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั้งภาครัฐและเอกชน

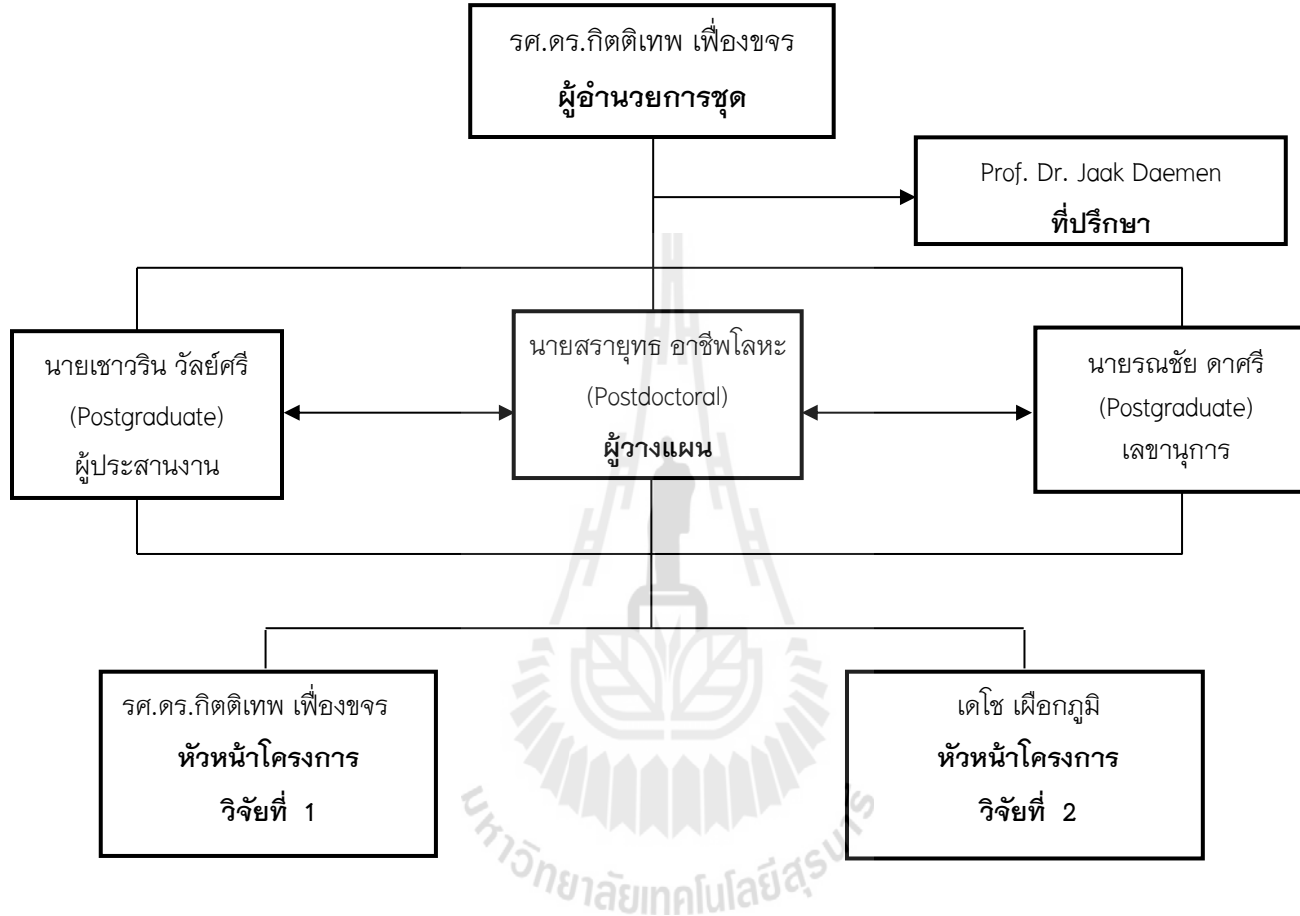
#### หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยที่เสนอมานี้จะมีประโยชน์อย่างมากและโดยตรงกับหลายหน่วยงานทั้ง ภาครัฐและเอกชน สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ และวิศวกรรมธรณี รวมถึงไปถึงหน่วยงานที่ทำงานเกี่ยวข้องกับการก่อสร้างในชั้นหิน เช่น การสร้างเขื่อน การสร้าง อุโมงค์ เหมืองแร่บนดินและใต้ดิน หน่วยงานเหล่านี้ได้แก่

- 1) กรมทรัพยากรน้ำ
- 2) กองธรณีเทคนิค กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและ สิ่งแวดล้อม
- 3) สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา กรมชลประทาน กระทรวงเกษตร และสหกรณ์
- 4) กองธรณีเทคนิค กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวง พลังงาน
- 5) สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ และวิศวกรรมธรณี
- 6) บริษัทเอกชนที่ออกแบบและก่อสร้างอุโมงค์ และความลาดชันในมวลหิน
- 7) กระทรวงพลังงาน
- 8) บริษัทสำรวจและขุดเจาะน้ำมันในประเทศไทย
- 9) องค์การบริหารส่วนตำบล และองค์การบริหารส่วนจังหวัด

#### 1.5 แผนการบริหารแผนงานวิจัยและแผนการดำเนินงาน

แผนการบริหารงานวิจัยประกอบด้วยคณาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิรวมทั้งสิ้น 2 ท่าน แต่ ละท่านจะรับผิดชอบในแต่ละโครงการ โดยจะมีผู้ประสานงาน ผู้วางแผนงาน และเลขานุการเป็น นักวิจัยระดับ Postdoctoral และ Postgraduate นอกจากนี้ยังมีผู้เชี่ยวชาญทางด้านเกลือหินจาก ต่างประเทศเป็นที่ปรึกษา คือ Prof. Dr. Jaak Daemen จาก University of Nevada, USA โดย แผนงานได้แสดงในรูปของแผนภูมิ (รูปที่ 2) ส่วนขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยของแต่ละโครงการได้ รวบรวมไว้ในที่นี้ด้วย



รูปที่ 2 โครงสร้างคณะผู้บริหารแผนงานวิจัยหรือชุดโครงการวิจัย

## 1.6 แผนการสร้างนักวิจัยรุ่นใหม่จากการทำการวิจัยตามแผนงานวิจัย

แผนงานการพัฒนา นักวิจัยรุ่นใหม่มีเป้าหมายเพื่อส่งเสริมและพัฒนาศักยภาพของนักวิจัยในการสร้างสรรค์งานวิจัยใหม่ องค์ความรู้ใหม่ และสามารถเป็นที่พึ่งพาให้กับนักวิจัยรุ่นหลังได้ รวมไปถึงผลักดันให้มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีก้าวไปสู่ความเป็นผู้นำในด้านงานวิจัย เพื่อให้เป็นที่ประจักษ์ในวงวิชาการทั้งในระดับประเทศและระดับนานาชาติ ซึ่งแผนการพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่สามารถแบ่งได้เป็น

**พัฒนานักวิจัยในระดับ Postdoctoral** จำนวน 1 คน ได้แก่

- 1) นายสรายุทธ อาชีพลีหะ

**พัฒนานักวิจัยในระดับ Postgraduate** จำนวน 2 คน ได้แก่

- 1) นายเชาวริน วัลย์ศรี
- 2) นายรณชัย ดาศรี



## บทที่ 2

### สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

ผลงานการวิจัยทั้งหมดในชุดโครงการนี้ได้นำมาสรุปโดยสังเขปในบทนี้ ซึ่งรายละเอียดต่างๆ ได้รวบรวมและเขียนไว้ในรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ของแต่ละชุดโครงการ ผลการดำเนินงานและข้อสรุปโดยสังเขปของแต่ละโครงการมีดังต่อไปนี้

#### 2.1 ผลการดำเนินงานของโครงการวิจัยชุดที่ 1

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความแข็งของหินแกรนิต โดยอยู่ภายใต้อุณหภูมิตั้งแต่ 0, 30, 100, 300 และ 500°C และผันแปรความเค้นล้อมรอบที่ 0, 3, 7 และ 12 MPa โดยผลการทดสอบแบ่งเป็น 2 ชุด คือ 1) ผลการทดสอบกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวและในสามแกน 2) ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิชล ผลลัพธ์ที่ได้แสดงค่าความแข็งของหินแกรนิตภายใต้การผันแปรอุณหภูมิและความเค้นล้อมรอบ และค่าคุณสมบัติความยืดหยุ่นซึ่งได้จากการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างระหว่างการทดสอบของหินในสามทิศทาง

ผลการทดสอบกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวภายใต้การผันแปรอุณหภูมิมิระบุว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นหินแกรนิตจะอ่อนตัวลง ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการยกกำลัง และผลการทดสอบกำลังรับแรงกดในสามแกนภายใต้การผันแปรอุณหภูมิและความเค้นล้อมรอบระบุว่าหินแกรนิตจะอ่อนตัวภายใต้อุณหภูมิสูงขึ้น สามารถอธิบายด้วยสมการยกกำลัง ส่วนผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิชลภายใต้การผันแปรอุณหภูมิ ผลการทดสอบระบุว่าค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดของหินแกรนิตจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของตัวอย่างหินสูงขึ้น สามารถอธิบายได้ด้วยสมการยกกำลัง (กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2556)

#### 2.2 ผลการดำเนินงานของโครงการวิจัยชุดที่ 2

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อกำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตกผิวขรุขระและผิวเรียบในสามแกนภายใต้อุณหภูมิ 30, 100, 300 และ 500°C และผันแปรความเค้นล้อมรอบที่ 1, 3, 7, 12 และ 18 MPa

ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตกผิวขรุขระของตัวอย่างหินแกรนิตระบุว่า อุณหภูมิมีผลต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนและพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของรอยแตกผิวขรุขระ โดยการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนบนรอยแตกผิวขรุขระที่จุดแตกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดบนรอยแตกผิวขรุขระจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตกผิวเรียบระบุว่าอุณหภูมิมีผลต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนและพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของรอยแตกผิวเรียบ โดยการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนบนรอยแตกผิวเรียบที่จุดแตกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และอุณหภูมิมีผลต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกผิวเรียบ โดยค่ากำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตกผิวเรียบจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้เกิดจากกระบวนการ Stick-slip โดยผิวหินที่เรียบจะมีความหนืดมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (เดโช ใฝ่อกภูมิ, 2556)



## บทที่ 3

### การประมวลผลและวิเคราะห์ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การวิจัยทั้งสองโครงการมีความเกี่ยวข้องกัน โดยมุ่งเน้นไปที่การประเมินเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์ของหินแกรนิตที่อยู่ใกล้กับแหล่งกักเก็บกากนิวเคลียร์ ซึ่งจะอยู่ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง (กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2556) และในบางพื้นที่มวลหินแกรนิตอาจมีรอยแตกและรอยร้าวที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของหินเนื่องมาจากการผันแปรของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น อุณหภูมิดังกล่าวเกิดจากการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีที่อาจส่งผลให้เกิดการเคลื่อนตัวของหิน ซึ่งสมการดังกล่าวสามารถประเมินกำลังรับแรงเฉือนภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง (เดโช เฟื่องภูมิ, 2556)

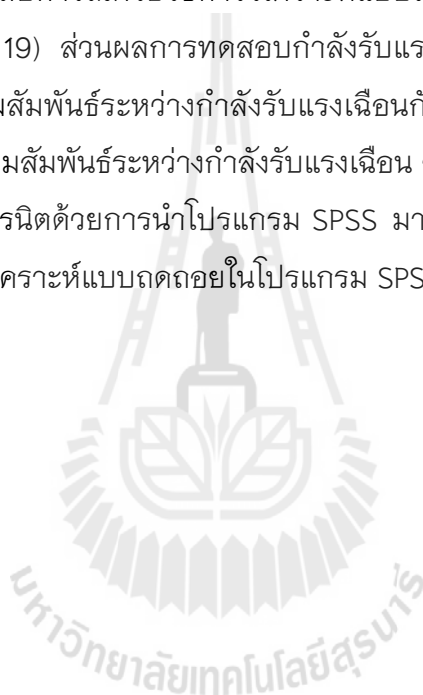
#### 3.1 การประเมินเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์

โครงการที่ 1 ได้ศึกษาและพัฒนาเกณฑ์การแตกของตัวอย่างหินแกรนิตภายใต้การผันแปรของอุณหภูมิและความเค้นล้อมรอบ โดยอาศัยแนวคิดของการกักเก็บพลังงานความเครียดในตัวอย่างหินแกรนิตก่อนเกิดการวิบัติ ซึ่งพลังงานความเครียดนี้จะพิจารณาทั้งพลังงานกล (ความเค้นล้อมรอบที่ให้กับตัวอย่างหินแกรนิต) และพลังงานความร้อน โดยมีการศึกษาค่าความเค้นเฉือนในสามมิติ ค่าความเค้นเฉื่อย ค่าปัจจัยความยืดหยุ่น พลังงานความเครียดเบี่ยงเบน และพลังงานความเครียดเฉื่อย ซึ่งค่าทั้งหมดนี้คำนวณจากค่าความเค้นและความเครียดที่จุดวิบัติในแต่ละตัวอย่าง ผลการศึกษาระบุว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความเค้นเฉือนในสามมิติที่ทำให้หินแกรนิตเกิดการวิบัติจะมีค่าลดลง สำหรับค่าความเค้นยึดติด (Cohesion) ส่วนค่ามุมเสียดทานภายใน (Friction angle) มีค่าลดลงตามสมการยกกำลังเมื่ออุณหภูมิของตัวอย่างหินแกรนิตเพิ่มขึ้น ผลการศึกษาค่าปัจจัยความยืดหยุ่นระบุว่า สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น ( $E$ ) สัมประสิทธิ์ความแข็ง ( $G$ ) และสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นแบบก้อน ( $K$ ) จะมีค่าลดลงตามสมการยกกำลังเมื่ออุณหภูมิของตัวอย่างหินแกรนิตเพิ่มขึ้น แต่ค่าอัตราส่วนปัวซอง ( $\nu$ ) จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิของตัวอย่างหินแกรนิตเพิ่มขึ้น ความเค้นเฉือนที่จุดวิบัติ ความเค้นเฉื่อย และสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นดังกล่าวข้างต้นที่สัมพันธ์กับการผันแปรของอุณหภูมิและความเค้นล้อมรอบสามารถนำมาใช้ในการสร้างเกณฑ์การแตกของหินแกรนิต

งานวิจัยนี้ได้นำกฎของพลังงานความเครียดมาประยุกต์ใช้เพื่ออธิบายความแข็งและการเปลี่ยนรูปร่างของตัวอย่างหินแกรนิตภายใต้อุณหภูมิที่ผันแปร โดยสมมติว่าภายใต้พลังงานความเครียดเฉื่อยระดับหนึ่ง พลังงานความเครียดเบี่ยงเบนจะมีค่าคงที่ ผลจากการคำนวณเชิงสถิติระบุว่าพลังงานความเครียดเบี่ยงเบน ( $W_0$ ) เพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตรงกับพลังงานความเครียดเฉื่อย ( $W_m$ ) (กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2556)

### 3.2 การประเมินกำลังรับแรงเฉือนภายใต้อุณหภูมิและแรงดันสูง

โครงการที่ 2 ได้ศึกษาและพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายและคาดคะเนกำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตกของหินแกรนิตภายใต้การผันแปรความเค้นล้อมรอบและอุณหภูมิ ในรูปความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนและค่าความเค้นตั้งฉากที่จุดแตก การพัฒนาสมการ แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ตามลักษณะการทดสอบ ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตก ผิวขรุขระ ได้นำมาวิเคราะห์เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับความเค้นตั้งฉาก ภายใต้การผันแปรอุณหภูมิ โดยเชื่อมความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือน อุณหภูมิ และความเค้นตั้งฉากของรอยแตกผิวขรุขระในหินแกรนิต โปรแกรม SPSS (Wendai, 2000) ได้นำมา คำนวณโดยใช้สมการเชิงประสพการณ์ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบถดถอย (Regression analysis) ในโปรแกรม SPSS (Version 19) ส่วนผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตกผิวเรียบ ได้นำมาวิเคราะห์เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับความเค้นตั้งฉากภายใต้การผันแปรอุณหภูมิ โดยเชื่อมความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือน อุณหภูมิ และความเค้นตั้งฉากของรอยแตกผิวเรียบในหินแกรนิตด้วยการนำโปรแกรม SPSS มาคำนวณค่าคงที่ โดยใช้สมการเชิงประสพการณ์ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบถดถอยในโปรแกรม SPSS (Version 19) (เดโซ เผือกภูมิ, 2556)



## บทที่ 4

### สรุปรวมผลงานวิจัย

#### 4.1 สรุปรวมผลงานวิจัย

ผลสรุปของชุดโครงการศึกษาการทิ้งกากนิวเคลียร์ในหลุมเจาะระดับลึกในหินแกรนิต สามารถนำไปใช้ออกแบบโพรงหรือช่องเหมืองสำหรับกักเก็บกากนิวเคลียร์ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งภายใต้อุณหภูมิและความดันสูงในมวลหินแกรนิตที่มีรอยแตกหรือรอยร้าว โดยผลงานวิจัยนี้ระบุว่าค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและความเค้นกดสูงสุดของหินแกรนิตจะลดลงถ้าอุณหภูมิของตัวอย่างเพิ่มขึ้น ผลการศึกษานี้ยังสอดคล้องกับผู้วิจัยหลายท่าน (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 เมื่อนำพลังงานทั้งสองรูปแบบมาลงจุดในแผนภูมิพบว่าในแต่ละระดับอุณหภูมิค่าพลังงานความเครียดเบี่ยงเบนจะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตรงกับค่าพลังงานความเครียดเฉลี่ย โดยอัตราการเพิ่มขึ้นนี้จะมีลักษณะคล้ายคลึงกันสำหรับชุดการทดสอบในอุณหภูมิที่ต่างกัน เพื่อที่จะรวมเกณฑ์การแตกของระดับอุณหภูมิเข้าด้วยกันเป็นเกณฑ์เดียว ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติความยืดหยุ่นและอุณหภูมิได้ถูกพัฒนาขึ้นในเชิงตัวเลขและนำมาแทนค่าในความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความเครียดเบี่ยงเบนและพลังงานความเครียดเฉลี่ย ผลลัพธ์ที่ได้คือเกณฑ์การแตกของหินแกรนิตเพียงชุดเดียวที่สามารถใช้คาดคะเนความเค้นสูงสุดภายใต้การผันแปรอุณหภูมิและความเค้นล้อมรอบ เกณฑ์การแตกนี้สอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการคาดคะเนเสถียรภาพและปัจจัยความปลอดภัยของหินแกรนิตที่อยู่รอบหลุมเจาะกักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมซึ่งหินแกรนิตในภาคสนามดังกล่าวจะอยู่ภายใต้การผันแปรอุณหภูมิและความเค้นล้อมรอบ (กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2556)

ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตกผิวขรุขระระบุว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้พฤติกรรมของหินแกรนิตมีความเหนียวมากขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนลดลงและระยะการเคลื่อนตัวที่จุดกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดมีค่ามากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Stesky et al. (1974) ที่ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของแรงเฉือนของหินซิลิกา 7 ชนิด ผลการทดสอบระบุว่ากำลังรับแรงเฉือนมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สำหรับการลดลงของค่ากำลังรับแรงเฉือนภายใต้อุณหภูมิสูงในการศึกษานี้ยังขึ้นกับความเค้นล้อมรอบด้วย โดยอุณหภูมิจะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับแรงเฉือนเมื่อความเค้นล้อมรอบต่ำ แต่เมื่อความเค้นล้อมรอบสูงขึ้น อุณหภูมิจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับแรงเฉือนโดยทำให้ค่ากำลังรับ



แรงเฉือนมีค่าลดลง จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวของรอยแตกในแนวตั้งฉากกับค่าการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิไม่ได้ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของรอยแตกในแนวตั้งฉาก เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบอยู่ในช่วง 12–16 ส่วน ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตกผิวเรียบระบุว่า ค่ากำลังรับแรงเฉือนบนรอยแตกผิวเรียบจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Lockner et al. (1986) และ Mitchell et al. (2013) ผลดังกล่าวอาจเกิดจากการอ่อนตัวของผิวหินเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นโดยรอยแตกมีการเชื่อมประสานกันทำให้เกิดกระบวนการ Stick-slip ซึ่งจะพบในช่วงอุณหภูมิ 300–500°C ที่ความเค้นล้อมรอบ 12 และ 18 MPa และในทางตรงกันข้ามจากผลการทดสอบของ Stesky (1978) ระบุว่า กระบวนการ Stick-slip จะเกิดในช่วงอุณหภูมิต่ำและมีความเค้นล้อมรอบมาก ๆ ทั้งนี้ Kawamoto and Shimamoto (1998) ได้อธิบายว่าองค์ประกอบแร่ในตัวอย่างหินเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้การเกิด Stick-slip ที่อุณหภูมิและความเค้นต่างๆ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนกับความเค้นตั้งฉากภายใต้การผันแปรอุณหภูมิของรอยแตกผิวเรียบและผิวขรุขระ ได้นำมาเปรียบเทียบกับกราฟวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS ผลระบุว่าข้อมูลจากการทดสอบและข้อมูลจากการคาดคะเนย้อนกลับของสมการที่ได้จากโปรแกรม SPSS มีค่าใกล้เคียงกัน จึงสามารถนำสมการดังกล่าวไปใช้คาดคะเนค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดบนรอยแตกของหินแกรนิตในระดับลึกได้ โดยอุณหภูมิจะต้องอยู่ในช่วงของการศึกษาเท่านั้น (เดโช เพ็ชกรภูมิ, 2556)

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

## 4.2 การศึกษาวิจัยเพิ่มเติม

จากการศึกษาวิจัยในชุดโครงการนี้ยังมีประเด็นที่จำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมดังนี้

1) ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่ากำลังกดและกำลังเฉือนบนรอยแตกของตัวอย่างหินแกรนิต โดยทำการทดสอบภายใต้อุณหภูมิที่สูงขึ้นเกินกว่า 1000°C และความเค้นล้อมรอบที่สูงขึ้นเกินกว่า 20 MPa เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเฉือนของตัวอย่างหินให้ครอบคลุมมากกว่านี้

2) ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่ากำลังกดและกำลังเฉือนบนรอยแตกของตัวอย่างหินแกรนิต โดยทำการทดสอบภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ เพื่อจำลองพฤติกรรมการเฉือนของโครงสร้างหินภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำในระดับลึก

3) ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่ากำลังกดและกำลังเฉือนบนรอยแตกของตัวอย่างหินชนิดต่างๆ เพื่อศึกษาความหลากหลายของชนิดหินที่แพร่กระจายในประเทศไทย และเป็นการต่อยอดองค์ความรู้ด้านนี้ต่อไป

## บรรณานุกรม

- กิตติเทพ เพ็ญขจร (2556) การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิสูงต่อความแข็งแรงของหินแกรนิตเพื่อประยุกต์ใช้ในการทิ้งกากนิวเคลียร์ในหลุมเจาะ, รายงานวิจัยสัญญาเลขที่ SUT7-719-56-12-52 สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา
- เดโช เพ็ญภูมิ (2556) การศึกษากำลังเฉือนของรอยแตกในหินแกรนิตภายใต้อุณหภูมิสูง, รายงานวิจัยสัญญาเลขที่ SUT7-719-56-12-53 สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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<sup>rd</sup> International Conference on Surface mining. SME, Vancouver, pp. 171–196.
- Berest, P. and Blum, P. A. (1993). In situ test in salt cavern. In Proceedings of the 7<sup>th</sup> 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 4<sup>th</sup> 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 Work 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.
- Carter, N. L., Horseman, S. T., Russell, J. E., and Handin, J. (1993). Rheology of rocksalt. *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 3<sup>rd</sup> 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 22<sup>nd</sup> 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.
- 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.
- Franssen, R. C. M. W. (1998). Mechanical anisotropy of synthetic polycrystalline rock salt. In Proceedings of the 4<sup>th</sup> Conference on the Mechanical Behavior of Salt (pp. 63–75). Clausthal–Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- 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/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite solder. Materials Science and Engineering. 528 (12): 3967–3972.
- Ghoreychi, M. and Berest, P. (1990). Thermomechanical modelling of radioactive waste disposal in salt formations. International of the 10<sup>th</sup> Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT), California.
- Gibb, F.G.F. (1999). High–temperature, very deep, geological disposal: a safer alternative for high–level radioactive waste. Waste Management. 19: 207–211.
- 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 3<sup>rd</sup> 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., 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.
- 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.

- Rodrigues, J.P.O. and Laím, L. (2011). Behaviour of perfobond shear connectors at high temperatures. *Engineering Structures*. 33 (10): 2744–2753.
- Schneefub, J. and Droste, J. (1996). Thermomechanical effects in backfilled drifts. In *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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., Thosuwat, R. and Fuenkajorn, K. (2009). Compressive and tensile strengths of sandstone under true triaxial stresses. In *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> 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. 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.
- 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.
- 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