

## บทที่ 2

### การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

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

การค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 3 ประเด็นหลัก คือ

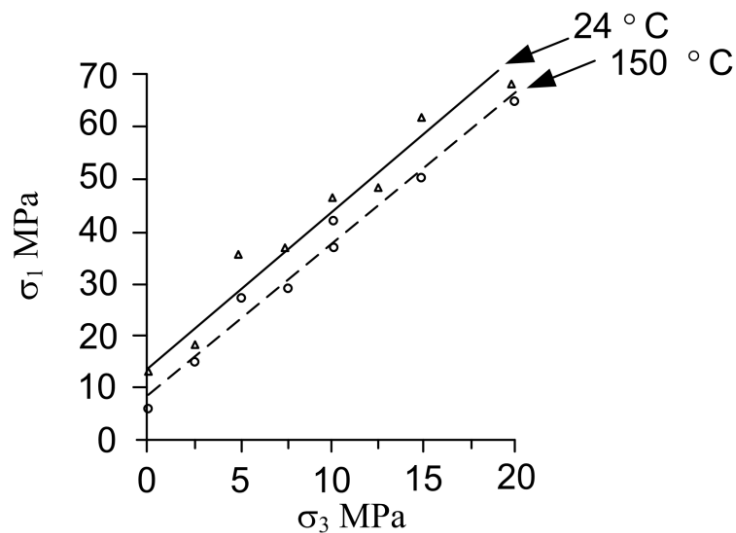
#### 2.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อกำลังรับแรงของหิน

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

ยุบตัวที่ต่ำกว่า  $10^{-8} \text{ s}^{-1}$  และที่อุณหภูมิ  $200^{\circ}\text{C}$  ควรใช้อัตราการยุบตัวที่ต่ำกว่า  $10^{-7} \text{ s}^{-1}$  เพราะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกลือหินเกิดการเคลื่อนไหลเร็วขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดการวิรูปได้ง่าย (Harmami et al., 1996)

Araujo et al. (1997) ได้ทำศึกษาคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของหินในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิห้อง ด้วยการทดสอบแบบสามแกนกับตัวอย่างหิน Friable sandstones จากแอ่ง Potiguar ทางตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศบราซิล โดยควบคุมแรงกดให้คงที่ ตัวอย่างจะถูกทดสอบที่อุณหภูมิ  $24^{\circ}\text{C}$ ,  $80^{\circ}\text{C}$  และ  $150^{\circ}\text{C}$  โดยความเค้นล้อมรอบแปรผันระหว่าง 2.5–20 MPa ค่าการอัดตัวระบุว่าความสามารถในการอัดตัวจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น รูปที่ 2.1 แสดงค่าเส้นถดถอยในระนาบ  $\sigma_1$ – $\sigma_3$  สำหรับอุณหภูมิ  $24^{\circ}\text{C}$  และ  $150^{\circ}\text{C}$  ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าโดยเฉลี่ยแล้วกำลังการต้านทานแรงกดจะลดลง 18% เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก  $24^{\circ}\text{C}$  ถึง  $150^{\circ}\text{C}$

Inada et al. (1997) ได้จำลองความเค้นล้อมรอบของการขุดเจาะ โดยศึกษาความแข็งและคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของหินแกรนิตและหินทัฟฟ์ภายใต้อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ ด้วยการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวและการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลที่มีผลกระทบจากน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง ผลการทดสอบระบุว่าค่ากำลังรับแรงกดของหินแต่ละชนิดจะมีค่าต่ำลงเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น



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

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

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

## 2.2 การกักเก็บกากนิวเคลียร์ในหลุมเจาะระดับลึก

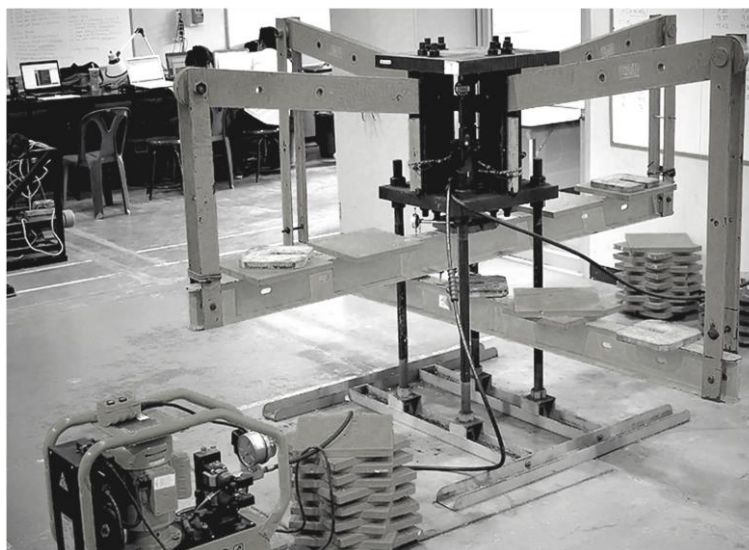
Gibb (1999) กล่าวว่าความปลอดภัยในการกักเก็บของเสียกัมมันตรังสีโดยเฉพาะพลังงานที่ใช้แล้ว เป็นหนึ่งในความท้าทายของวงการวิทยาศาสตร์ในปัจจุบัน วิธีแก้ปัญหาที่แนะนำกันในระดับชาติคือการกำจัดทางธรณีวิทยา โดยการฝังในเหมืองและการออกแบบทางวิศวกรรมในพื้นที่กักเก็บแบบ Multi-barrier ถึงแม้จะเรียกว่าการกักเก็บในที่ลึกแต่ก็ถือว่าตื่นในทางธรณีวิทยา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

ของเหลวที่อยู่ระดับลึกหลายกิโลเมตรซึ่งให้เห็นได้ชัดว่าการกักเก็บของเสียกัมมันตรังสีในที่ลึกมาก ๆ มีความปลอดภัยและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและของโครงการใหม่ๆ ได้มีความพยายามที่จะใช้ประโยชน์จากศักยภาพความร้อนที่ออกมาจากของเสียกัมมันตรังสี จึงได้มีการนำเสนอการใช้ประโยชน์จากเหมืองและหลุมเจาะ ความรู้ส่วนมากในการกักเก็บของเสียที่ประเทศสวีเดนจะทำการตรวจสอบที่ Aspo ในการกักเก็บของเสียอุณหภูมิข้างในและรอบๆ ภาชนะบรรจุของเสีย (วัสดุที่ทำจากทองแดงหรือโลหะอื่นๆ มีทั้งรูปทรงกระบอกหรือทรงลูกบาศก์ ใช้บรรจุของเสียก่อนที่จะนำไปทิ้งในหลุมเจาะหรือในเหมือง) อยู่ในระดับที่ต่ำ โดยปกติอุณหภูมิจะต่ำกว่า  $150^{\circ}\text{C}$  เพื่อลดการกักความร้อนของภาชนะบรรจุของเสียและป้องกันการพาความร้อนของน้ำบาดาลทั้งในและนอกพื้นที่กักเก็บของเสีย นอกจากนี้อุณหภูมิที่สูงกว่า  $90^{\circ}\text{C}$  สามารถทำให้เกิดปัญหากับเบนทอไนต์ที่ปิดผนึกล้อมรอบภาชนะบรรจุของเสียได้ ปริมาณการรังสีระดับสูงในแต่ละภาชนะบรรจุของเสียและระยะห่างของภาชนะบรรจุของเสียจะถูกใช้เป็นเกณฑ์ในการเลือกสถานที่และสร้าง “ความปลอดภัย” สำหรับการกักเก็บในเหมือง ไม่เพียงแต่สภาพทางธรณีวิทยาและธรณีเคมีที่ต้องตรวจสอบอย่างละเอียด แต่ผลกระทบเหล่านี้ต้องมีการคาดการณ์ไว้ด้วย แม้ว่าหินอัคนีและหินแปรส่วนมากจะมีความสามารถในการซึมผ่านไม่ได้ แต่การซึมผ่านของน้ำก็ถูกควบคุมด้วยชุดรอยแตก และเป็นไปได้ยากที่หินที่ตกผลึกในชั้นบนของเปลือกโลกจะไม่มีรอยแตก

## 2.3 ปัจจัยอื่นๆ

Rajendra et al. (2006) ได้สร้างแบบจำลองทางกายภาพสำหรับการทดสอบการกดในสามแกนและการกดทดสอบในสามแกนจริงของมวลหินที่จะถูกนำไปใช้อธิบายพฤติกรรมการแตกที่เกิดขึ้น ตัวอย่างหินประกอบด้วยรอยแตกที่ต่อเนื่องจำนวน 3 ชุด การทดสอบได้ใช้ระบบกดทดสอบในสามแกนจริง (TTS) ที่ถูกพัฒนาขึ้น ผลที่ได้แสดงความเครียดที่เพิ่มมากขึ้น (Strain hardening) ความเครียดที่ลดลง (Strain softening) และพฤติกรรมเชิงพลาสติกของมวลหินที่ถูกจำลองซึ่งขึ้นกับรูปร่างเชิงเรขาคณิตของรอยแตกและสภาวะความเค้น

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



รูปที่ 2.2 โครงทดสอบในสามแกนจริง (Walsri et al., 2009)

Walsri et al. (2009) ได้ทำการพัฒนาโครงทดสอบในสามแกนจริงดัง เพื่อหา กำลังรับแรงกดและกำลังรับแรงดึงภายใต้ความเค้นในสามทิศทางจริงสำหรับการทดสอบหินทราย 3 ชนิด ภายใต้ความเค้นกดในสามแกนจริง ผลลัพธ์ที่ได้ของหินทรายเป็นแบบเท่ากันทุกทิศทาง (Transversely isotropic) โดยได้มีการตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นในทิศทางที่ขนานกับ การวางตัวของชั้นหิน แต่อัตราส่วนของปัวซองบนระนาบปกติมีค่าน้อยกว่าผลที่ได้ในทิศทางขนานกับการวางตัวของชั้นหิน ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิชภายใต้แรงกดในแกนเดียวมีผลกระทบต่อค่าความเค้นหลักกลางของค่ากำลังดึงสูงสุดของหิน ซึ่งการทดสอบตัวอย่างหินในสามแกนเป็นกิจกรรมสำคัญที่รวมอยู่ในการสำรวจ วิเคราะห์ และออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมในมวลหิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างที่อยู่ใต้ดิน เช่น อุโมงค์ และเหมืองใต้ดิน เป็นต้น 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

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