บทที่ 4
การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

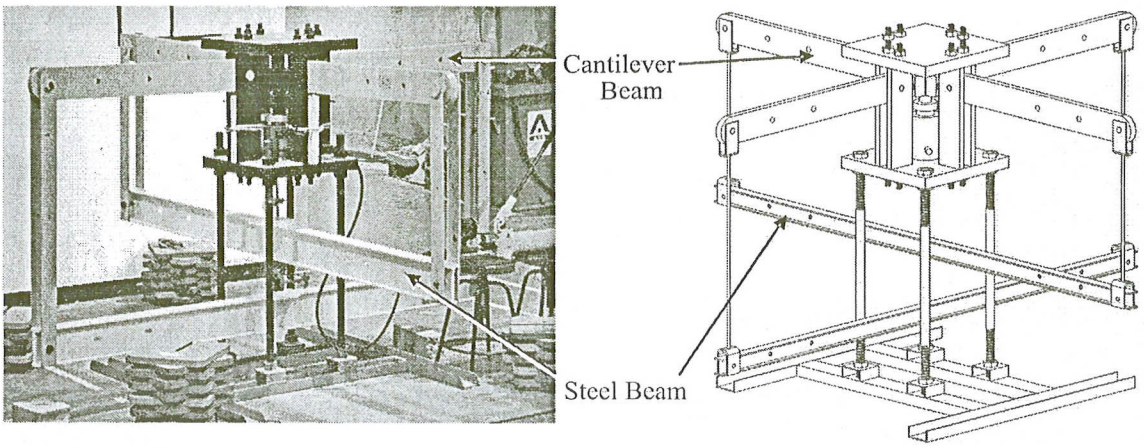
4.1 วัตถุประสงค์

เนื้อหาในบทนี้ได้อธิบายถึงขั้นตอน วิธีการ และข้อปฏิบัติในการทดสอบกำลังกดและกำลังดึงสูงสุดภายใต้อุณหภูมิห้องและสมการในการคำนวณผลการสอบ ซึ่งการทดสอบนี้เป็นการจำลองลักษณะความเค้นของหินในสามทิศทางภายใต้อุณหภูมิ โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในภาคสนาม เช่น การออกแบบโพรงอากาศสำหรับกักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรม และการทำเหมืองใต้ดินของบริษัทเกลือหิน ที่มีสภาวะความเค้นในสามทิศทางไม่เท่ากัน

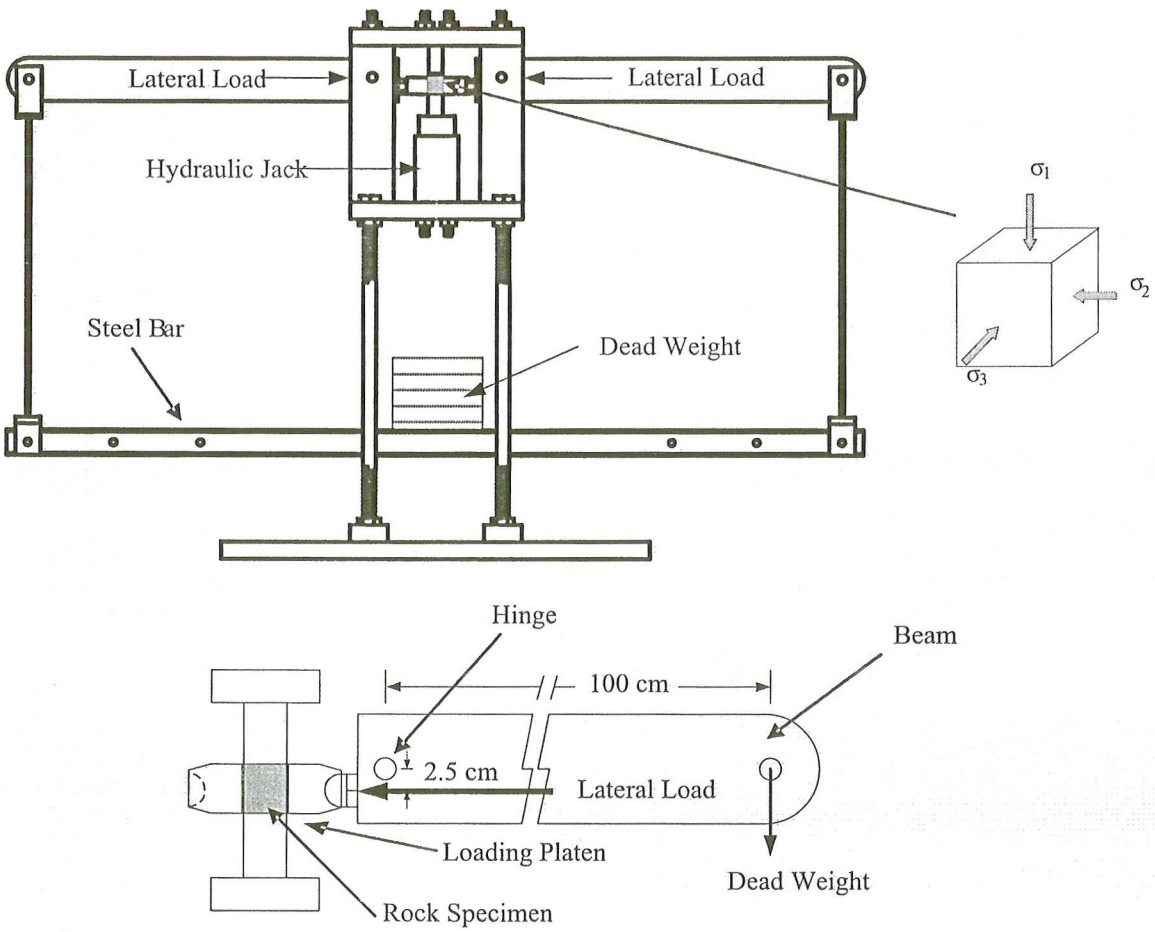
4.2 โครงกดทดสอบในสามแกนจริง

โครงกดทดสอบในสามแกนจริงมีปัจจัยพื้นฐานของการออกแบบ 3 ประการ คือ 1) เพื่อกำหนดค่าความเค้นด้านข้าง (σ_2 และ σ_3) ให้คงที่ในขณะทำการทดสอบ 2) สามารถทดสอบตัวอย่างหินที่มีขนาดเท่ากับหรือใหญ่กว่าแท่งตัวอย่างหินที่ใช้ทดสอบแรงกดสูงสุดในสามแกนแบบดั้งเดิม และ 3) สามารถวัดค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกนหลักได้โดยตรง

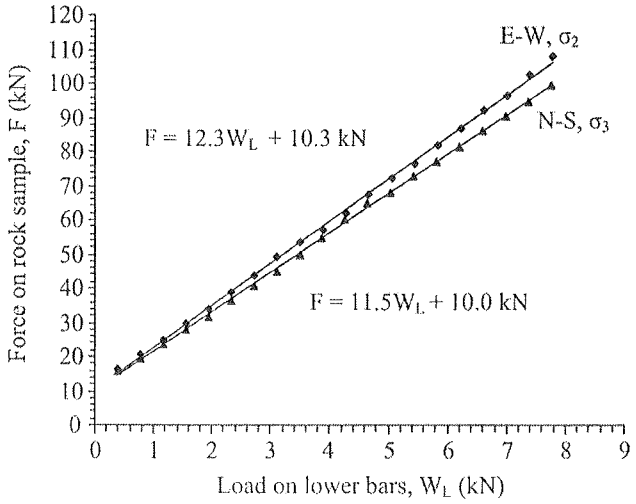
รูปที่ 4.1 แสดงโครงกดทดสอบในสามแกนจริงที่มีอยู่แล้วจาก Walsri et al. (2009) ซึ่งได้ถูกประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อทดสอบค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวและในสามแกน ซึ่งค่าความเค้นด้านข้างที่กระทำบนตัวอย่างหินในแต่ละด้านจะได้รับแรงที่เกิดขึ้นจากแขนของคานทดแรง ในส่วนล่างของคานรับตุ้มน้ำหนักจะใช้เหล็กเส้นแขวนตุ้มน้ำหนักเชื่อมต่อระหว่างจุดปลายของคานทั้งสองข้างที่จุดกึ่งกลางของคานรับตุ้มน้ำหนักเพื่อใช้ใส่ตุ้มน้ำหนักในการดึงแขนของคานทดแรงทั้งสองข้างลงดังแสดงในรูปที่ 4.2 ที่จุดปลายด้านในของคานทดแรงจะใช้เพลาเชื่อมต่อกับเสายึดคานทดแรงที่อยู่ในแต่ละด้านของโครงกดทดสอบ ในขณะที่ทำการทดสอบคานทดแรงทุกข้างจะปรับให้อยู่ในแนวระนาบซึ่งจะส่งผลต่อแรงกดด้านข้างบนตัวอย่างหินที่จุดกึ่งกลางของโครงกดทดสอบ และได้กำหนดระยะห่างของเหล็กเส้นแขวนตุ้มน้ำหนักที่ใช้แขวนคานรับตุ้มน้ำหนักจากจุดปลายด้านนอกถึงปลายด้านใน อัตราส่วนของแรงจะมีค่าเท่ากับ 12.3 ในทิศตะวันออก-ตะวันตก และ 11.5 เท่าในทิศเหนือ-ใต้ (รูปที่ 4.3) ซึ่งได้ทำการสอบเทียบโดย Electronic load cell อัตราส่วนของแรงที่ได้นี้จะนำมาใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแท่งตัวอย่างด้านข้างด้วยการวัดอัตราการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของแท่งเหล็กทั้งสองที่อยู่ข้างล่าง ส่วนแรงกระทำด้านข้าง (σ_2 และ σ_3) ได้ออกแบบให้สามารถให้ความเค้นมากกว่า 50 MPa และปั๊มไฮโดรลิคเป็นอุปกรณ์ให้ความเค้นกระทำในแนวดิ่ง (σ_1) สามารถให้ความเค้นสูงมากกว่า 100 MPa โครงกดทดสอบสามารถรองรับขนาดของตัวอย่างหินได้ตั้งแต่ 2.5×2.5×2.5 cm^3 ถึง 10×10×20 cm^3 การทดสอบกับแท่งตัวอย่างที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันจะต้องมีการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหัวกดทั้งสองข้างให้เหมาะสม



รูปที่ 4.1 โครงทดสอบในสามแกนจริง



รูปที่ 4.2 องค์ประกอบของโครงกดทดสอบในสามแกนจริง



รูปที่ 4.3 การสอบเทียบอัตราส่วนของแรงโดย Electronic load cell อัตราส่วนนี้นำไปใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแท่งตัวอย่างหินด้านข้าง

4.3 วิธีการทดสอบการกดในแกนเดียวและสามแกน

วิธีการทดสอบแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ

1) **การปรับอุณหภูมิของหินก่อนการทดสอบ** ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงกดภายใต้อุณหภูมิสูงจะต้องนำไปเข้าตู้อบเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้อยู่ที่ 100°C และ 200°C ส่วนตัวอย่างเกลือหินสำหรับทดสอบที่อุณหภูมิต่ำ จะต้องนำไปเข้าเครื่องทำความเย็นเพื่อลดอุณหภูมิให้อยู่ที่ 0°C ทั้งการเพิ่มและลดอุณหภูมินั้นได้นำตัวอย่างเกลือหินและหัวกดให้แรงทั้งสามทิศทางมาทำการปรับอุณหภูมิเป็นระยะเวลาทั้งสิ้น 24 ชั่วโมง ก่อนการทดสอบ

2) **วิธีติดตั้งตัวอย่างหินในโครงกดทดสอบ** หลังจากที่นำตัวอย่างเกลือหินออกจากตู้อบ หรือเครื่องทำความเย็นแล้วเวลาในการติดตั้งเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่ง ถ้าใช้เวลาในการติดตั้งการทดสอบมากจะส่งผลให้ตัวอย่างเกลือหินคายความร้อนออกไปมากทำให้เกลือหินเย็นลงหรือร้อนขึ้น (ในกรณีที่เอาออกจากเครื่องทำความเย็น) ผลการทดสอบที่ได้จะไม่เป็นไปตามเกณฑ์ที่ต้องการ ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการติดตั้งไม่ควรเกิน 1 นาที นับจากนำตัวอย่างหินออกจากตู้อบหรือเครื่องทำความเย็น

การติดตั้งตัวอย่างเกลือหินเพื่อทดสอบกำลังรับแรงกดสูงสุดมีวิธีการและขั้นตอนดังต่อไปนี้

(1) นำตัวอย่างหินออกจากตู้อบหรือเครื่องทำความเย็นและเตรียมผู้ช่วยเพื่อยกคานทั้ง 4 ด้าน

(2) จากนั้นยกคานในแนว E–W ขึ้นเพื่อสอดตัวอย่างเกลือหินเข้าไปในแท่นกดทดสอบแล้วปล่อยคานลงให้แท่นกดทดสอบชนกับตัวอย่างเกลือหินสำหรับเป็นตัวแทนของความเค้นหลักกลาง (σ_2) จากนั้นยกคานด้าน N–S ขึ้นใส่แท่นกดทดสอบแล้วปล่อยคานลงให้แท่นกดทดสอบชนกับตัวอย่างเกลือหินสำหรับเป็นตัวแทนของความเค้นหลักรอง (σ_3)

(3) นำหัวกดให้แรงด้านล่างและด้านบนของตัวอย่างเกลือหินเพื่อให้แรงกดในแนวแกน (σ_1)

(4) ประกอบคานด้านล่างทั้งสองแกนสำหรับใส่น้ำหนักกดทับ (แผ่นเหล็กตันรูปสี่เหลี่ยม) เพื่อส่งผ่านแรงทั้งความเค้นหลักกลาง (σ_2) และความเค้นหลักรอง (σ_3) จากนั้นให้เพิ่มแผ่นน้ำหนักตามการทดสอบที่ได้ออกแบบไว้

(5) กดตัวอย่างเกลือหินด้วยปั๊มไฮดรอลิคจนกระทั่งหินแตก

3) การกดทดสอบและการตรวจวัด ในระหว่างการทดสอบจะทำการตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหินในแต่ละแนวแกนโดยจะติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัว (Dial Gauge) ในแนวแกนและความเค้นด้านข้างทั้ง 2 แกน และได้ทำการตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวระหว่างการทดสอบ ในขณะที่ตัวอย่างเกลือหินถูกกดเพิ่มขึ้นด้วยปั๊มไฮดรอลิคจนกระทั่งหินแตก

4.4 การคำนวณผล

4.4.1 การคำนวณหาค่าความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ย

การคำนวณผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะประกอบด้วย การหาค่าความเค้นเฉือนในสามมิติ (τ_{oct}) และความเค้นเฉลี่ย (σ_m) ของเกลือหินในแต่ละอุณหภูมิ ซึ่งสามารถหาได้จาก (Jaeger et al., 2007) คือ

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

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

4.4.2 การคำนวณหาค่าความเค้นยึดติด

การคำนวณหาค่าความเค้นยึดติด (c) และค่ามุมเสียดทาน (ϕ) ของเกลือหินในแต่ละอุณหภูมิโดยใช้สมการ (Jaeger et al., 2007)

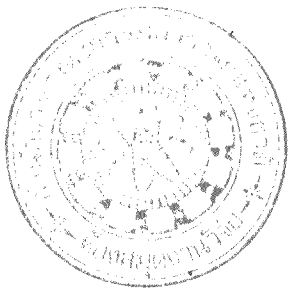
$$\sigma_1 = \sigma_c + \sigma_3 \tan^2 [(\pi/4) + (\phi/2)] \quad (4.3)$$

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

โดยที่ c คือความเค้นยึดติด ϕ คือมุมเสียดทาน σ_c คือความเค้นสูงสุดในแกนเดียว และ σ_3 คือความเค้นหลักต่ำสุด ซึ่งในการคำนวณหาค่าความเค้นยึดติดและค่ามุมเสียดทานได้ทำการคำนวณในช่วงที่ σ_3 = 0–10 MPa โดยพฤติกรรมการแตกของเกลือหินมีลักษณะเป็นเส้นตรง

4.4.3 การคำนวณหาค่าคุณสมบัติความยืดหยุ่น

การคำนวณหาค่าคุณสมบัติความยืดหยุ่นสำหรับความเค้นในสามมิติเป็นความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างความเค้น–ความเครียด โดย Jaeger and Cook (1979) ซึ่งความสัมพันธ์นี้สามารถเขียนได้ดังสมการ



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

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

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

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

โดยที่ G คือสัมประสิทธิ์ความแข็ง E คือสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น λ คือค่าคงที่ของ Lame ν คืออัตราส่วนของ Poisson $\tau_{oct,e}$ คือความเค้นเฉือน $\gamma_{oct,e}$ คือความเครียดเฉือน $\sigma_{m,e}$ คือความเค้นเฉลี่ย และ Δ คือความเครียดเชิงปริมาตร ที่ระดับ 40% ของความเค้นสูงสุด

4.4.4 การคำนวณหาค่าพลังงานความเครียด

การคำนวณหาค่าพลังงานความเครียดสำหรับการทดสอบในงานวิจัยนี้เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-เครียดในสามมิติ ซึ่งสามารถแสดงในรูปสมการได้ดังนี้

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

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

โดยที่ W_m, W_d, τ_{oct}, γ_{oct}, σ_m และ ε_m, คือพลังงานความเครียดเฉลี่ย พลังงานความเครียดเบี่ยงเบน ความเค้นเฉือน ความเครียดเฉือน ความเค้นเฉลี่ย และความเครียดเฉลี่ยที่จุดแตกของหินตามลำดับ

4.5 การทดสอบแรงดึงแบบบราซิล

การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ

1) การปรับอุณหภูมิของหินก่อนการทดสอบ ตัวอย่างเกลือหินที่ใช้สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดึงภายใต้อุณหภูมิสูงจะต้องนำไปเข้าตู้อบเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้อยู่ที่ 100°C และ 200°C ส่วนตัวอย่างเกลือหินสำหรับทดสอบที่อุณหภูมิต่ำ จะต้องนำไปเข้าเครื่องทำความ

เย็นเพื่อลดอุณหภูมิให้อยู่ที่ 0°C ทั้งการเพิ่มและลดอุณหภูมินั้นได้นำตัวอย่างเกลือหินและหัวกดให้แรงมาทำการปรับอุณหภูมิเป็นระยะเวลาทั้งสิ้น 24 ชั่วโมง ก่อนการทดสอบ

2) **วิธีทดสอบแรงดึงแบบบราซิล** การทดสอบค่าแรงดึงแบบบราซิลได้ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3967 คือ ตัวอย่างหินจะถูกกดตามแนวของเส้นผ่าศูนย์กลางด้วยอัตราความเร็วประมาณ 0.5–1.0 MPa/s จนกระทั่งหินแตก และทำการจดบันทึกผลการทดสอบ

3) **การคำนวณผลการทดสอบ** จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะนำมาคำนวณหาค่าแรงดึงสูงสุดแบบบราซิล (σ_b) ได้ (Jaeger and Cook, 1979) ดังนี้

$$\sigma_b = 2P/\pi DL \qquad (4.11)$$

โดยที่ P คือแรงกดที่จุดวิบัติของความเค้นดึงแบบบราซิล D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างหิน L คือความยาวของตัวอย่างหิน