

บทที่ 4

การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบในห้องปฏิบัติการมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างฐานข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของตัวอย่างหิน และเพื่อสอบถามผลที่ได้จากการทดสอบ งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดสอบทั้งหมดออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

- 1) การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์พื้นฐาน
- 2) การทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยน

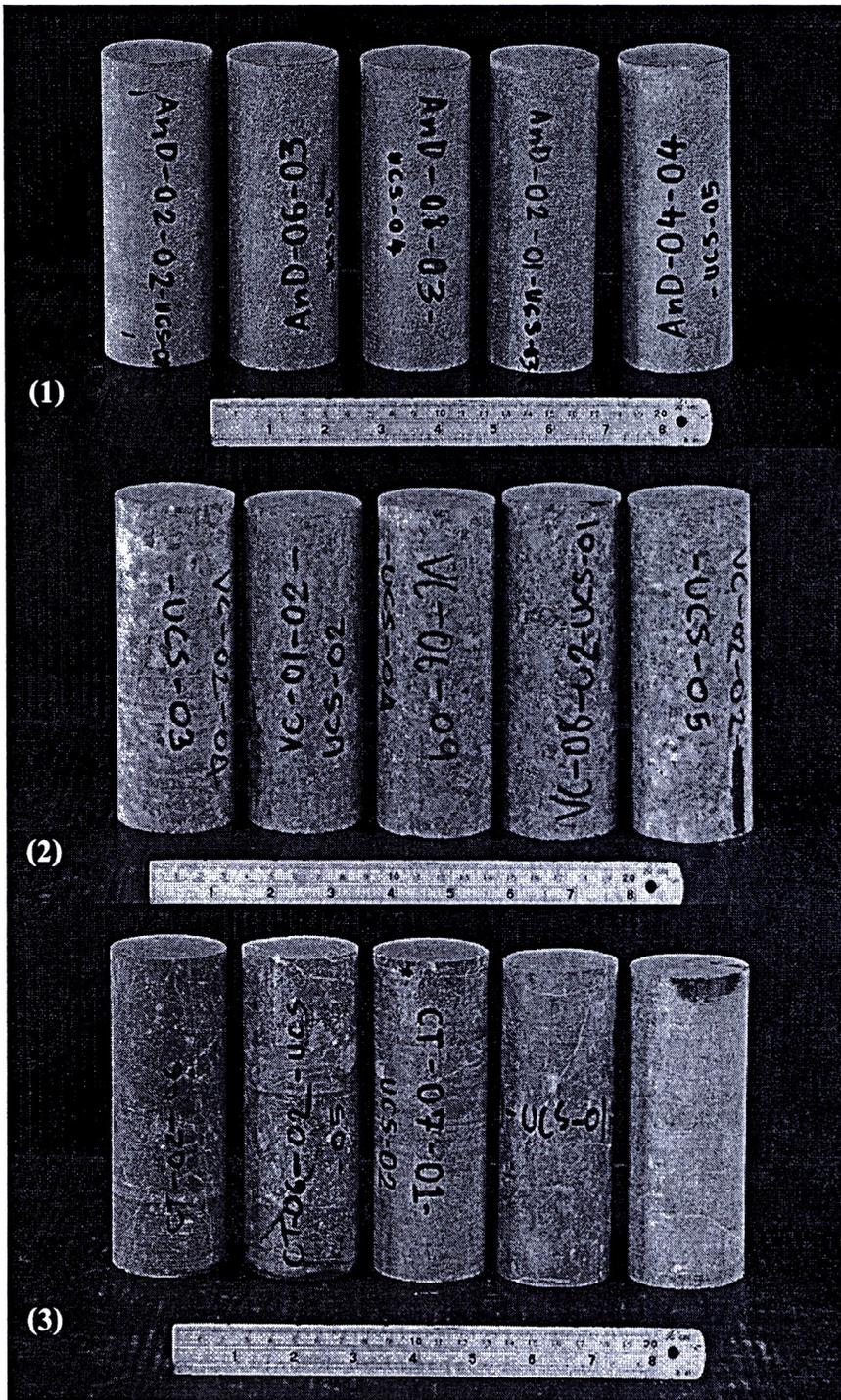
การทดสอบทั้ง 2 กลุ่ม ได้ใช้ตัวอย่างหิน 3 ชนิด ประกอบด้วย 1) Andesite 2) Silicified-Tuffaceous Sandstone และ 3) Pebbly Tuffaceous Sandstone ผลที่ได้จะนำไปศึกษาหาผลกระทบจากรูปร่างที่ไม่เป็นทรงเรขาคณิต (Irregular Shape) ของตัวอย่างหินต่อค่ากำลังรับแรงกดและแรงดึงสูงสุดจากวิธีการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยน

4.1 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์พื้นฐาน

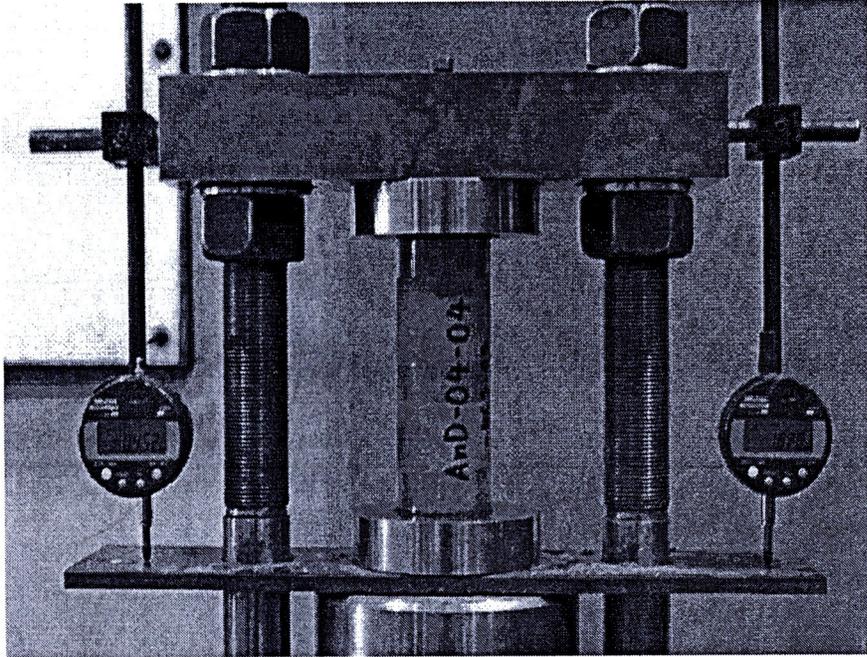
การทดสอบในกลุ่มนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างฐานข้อมูลเชิงกลศาสตร์ของตัวอย่างหินตามมาตรฐานสากล ASTM และข้อแนะนำของ ISRM การทดสอบจะประกอบด้วย 1) การทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียวและการวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น 2) การทดสอบแรงกดในสามแกน 3) การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน และ 4) การทดสอบจุดกดแบบดั้งเดิม

4.1.1 การทดสอบแรงกดในแกนเดียวและการวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความต้านแรงกดสูงสุดในแกนเดียวของตัวอย่างหิน และหาค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของตัวอย่างหิน ซึ่งเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของหินที่ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบโดยทั่วไป การทดสอบได้ปฏิบัติตามข้อกำหนดมาตรฐานสากล ASTM D7012 และข้อแนะนำของ ISRM (Brown, 1981) รูปที่ 4.1 แสดงแท่งตัวอย่างหินรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว ของหินทั้ง 3 ชนิดที่จัดเตรียมตามมาตรฐานเพื่อการทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียวและวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น

ในขบวนการทดสอบตัวอย่างหินจะถูกกดด้วยเครื่องกดตามแนวแกนของทรงกระบอก (รูปที่ 4.2) ตัวอย่างหินทุกก้อนจะถูกกดด้วยอัตราเท่ากันและจะถูกกดให้แตกภายในเวลา 5-10 นาที ระหว่างทำการทดสอบจะมีการบันทึกค่าแรงกดและปริมาณการยุบตัวของตัวอย่างหินอย่างต่อเนื่อง พร้อมทั้งสังเกตลักษณะการร้าวและการแตกของตัวอย่างหิน (รูปที่ 4.3) ผลที่ได้นำเสนอในรูปแบบแผนภูมิระหว่างค่าความเค้นกับความเครียดเพื่อหาความสัมพันธ์เชิงเส้น ซึ่งการคำนวณจะเป็นไปตามสมการ



รูปที่ 4.1 แท่งตัวอย่างหินรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว (1) Andesite (2) Silicified Tuffaceous Sandstone และ (3) Pebbly Tuffaceous Sandstone ที่จัดเตรียมตามมาตรฐานเพื่อการทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียวและวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างหิน Andesite มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 2 นิ้ว และ L/D เท่ากับ 2.5 ถูกติดตั้งในเครื่องทดสอบเพื่อทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียวและวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างหินทั้ง 3 ชนิด หลังจากถูกทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียว (1) Andesite (2) Silicified Tuffaceous Sandstone และ (3) Pebbly Tuffaceous Sandstone

$$\sigma_{\text{axial}} = P/A \quad (4.1)$$

$$\varepsilon_{\text{axial}} = \Delta L/L \quad (4.2)$$

โดยที่ σ_{axial} คือความเค้นในแนวแกน P คือแรงกดในแนวแกน A คือพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างหิน $\varepsilon_{\text{axial}}$ คือความเครียดในแนวแกน ΔL คือการเปลี่ยนแปลงความยาวของตัวอย่างหิน ในขณะที่แรงกดสูงขึ้น และ L คือความยาวทั้งหมดของตัวอย่างหินก่อนการกด ถ้าค่าแรงกดในแนวแกนสูงสุดที่จุดวิบัติหรือจุดแตกของหินเท่ากับ P_f ค่าความเค้นสูงสุดในแกนเดียว σ_c (Uniaxial compressive strength) จะคำนวณได้จาก

$$\sigma_c = P_f / A \quad (4.3)$$

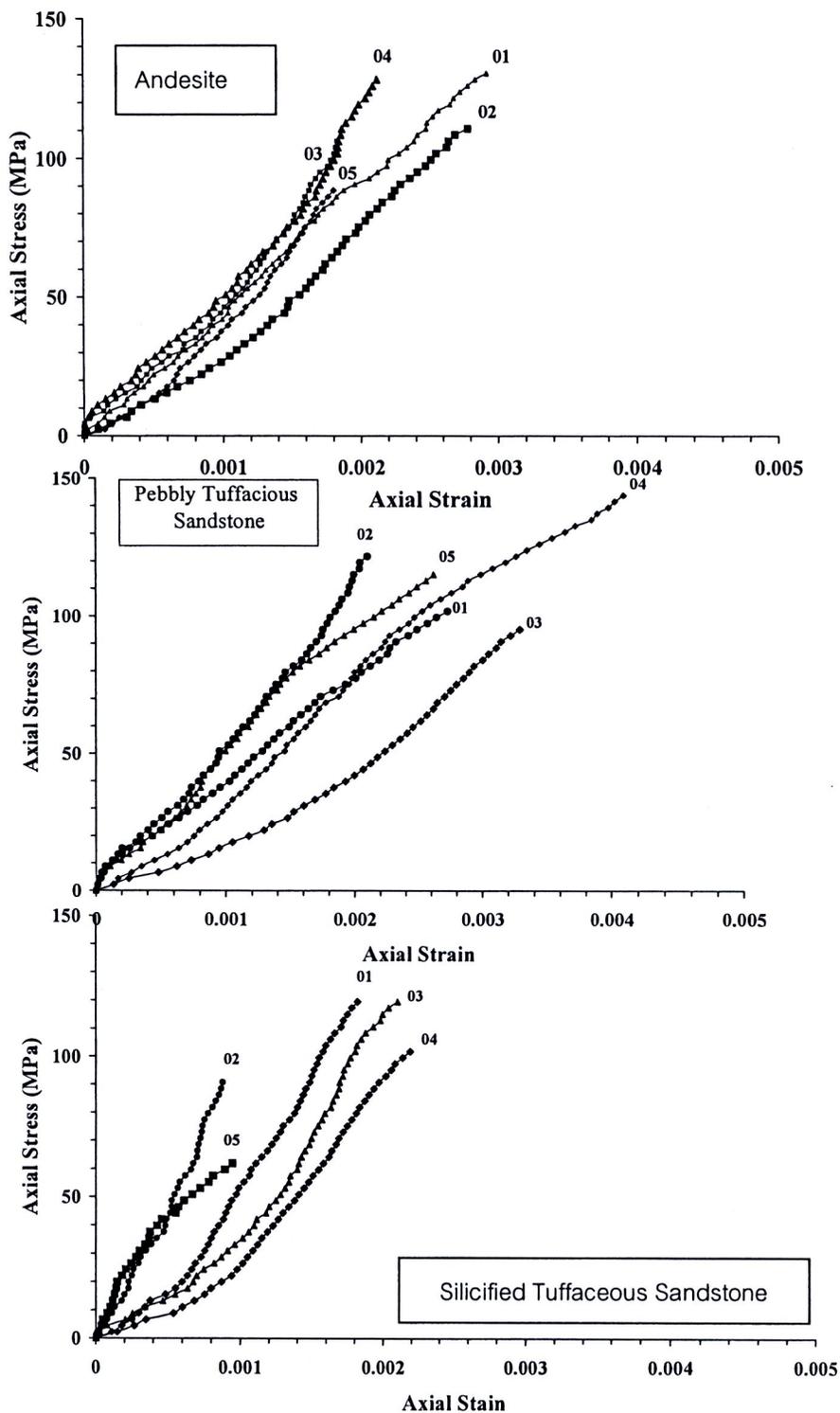
และค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (Young's modulus, E) สามารถคำนวณได้จาก

$$E = \frac{\Delta\sigma_{\text{axial}}}{\Delta\varepsilon_{\text{axial}}} \quad (4.4)$$

โดยที่ $\Delta\sigma_{\text{axial}}$ คือค่าของความเค้นที่เปลี่ยนแปลงตามแนวแกน และ $\Delta\varepsilon_{\text{axial}}$ คือค่าของความเครียดที่เปลี่ยนแปลงในแนวแกนที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของความเค้น โดยค่าทั้งสองจะวัดได้จากเส้นสัมผัสที่จุด 50% ของความเค้นกดสูงสุด

รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดตามแนวแกนของหินทั้ง 3 ชนิดที่วัดได้จากการทดสอบแรงกดในแกนเดียวตามลำดับ

ผลที่ได้จากการทดสอบแรงกดในแกนเดียวของหินทั้ง 3 ชนิด พบว่าค่ากำลังต้านแรงกดสูงสุดมีค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 115.0 ± 15.0 MPa สำหรับ Andesite 120.7 ± 25.2 MPa สำหรับ Silicified Tuffaceous Sandstone และ 111.4 ± 23.3 MPa สำหรับ Pebbly Tuffaceous Sandstone โดยค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมีค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 43.0 ± 3.4 GPa สำหรับ Andesite 63.3 ± 8.0 GPa สำหรับ Silicified Tuffaceous Sandstone และ 51.3 ± 5.3 GPa สำหรับ Pebbly Tuffaceous Sandstone ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ถึงตารางที่ 4.3 ตามลำดับ ส่วนตารางที่ 4.4 ได้สรุปผลการทดสอบแรงกดในแกนเดียวและการวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นสำหรับหินทั้ง 3 ชนิด



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดจากการทดสอบแรงกดในแกนเดียวของหินทั้ง 3 ชนิด

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบแรงกดในแกนเดียวและการวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นตามมาตรฐาน ASTM และ ISRM ของหิน Andesite (L/D ratio = 2.5)

Sample No.	Length (mm)	Diameter (mm)	Density (g/cc)	σ_c (MPa)	E (GPa)
AND-02-02-UCS-01	134.86	53.66	2.82	132.7	45.1
AND -06-03-UCS-02	134.94	53.66	2.83	110.6	39.7
AND -02-01-UCS-03	134.85	53.66	2.80	106.1	47.0
AND -08-03-UCS-04	134.17	53.66	2.84	128.2	39.2
AND -04-04-UCS-05	134.64	53.66	2.85	97.3	43.8
Average				115±15.0	43.0±3.4

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบแรงกดในแกนเดียวและการวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นตามมาตรฐาน ASTM และ ISRM ของหิน Silicified Tuffaceous Sandstone (L/D ratio= 2.5)

Sample No.	Length (mm)	Diameter (mm)	Density (g/cc)	σ_c (MPa)	E (GPa)
SST-02-01-UCS-01	133.09	53.66	2.71	119.4	65.69
SST-07-01-UCS-02	135.47	53.66	2.67	93.0	63.2
SST-07-03-UCS-03	130.95	53.66	2.68	119.4	50.3
SST-02-06-UCS-04	134.75	53.66	2.69	161.4	66.1
SST-06-02-UCS-05	135.77	53.66	2.70	110.6	71.3
Average				120.7±25.2	63.3±8.0

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแรงกดในแกนเดียวและการวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นตามมาตรฐาน ASTM และ ISRM ของหิน Pebbly Tuffaceous Sandstone (L/D ratio= 2.5)

Sample No.	Length (mm)	Diameter (mm)	Density (g/cc)	σ_c (MPa)	E (GPa)
TST-08-02-UCS-01	138.10	53.66	2.66	101.7	53.8
TST-01-02-UCS-02	132.36	53.66	2.68	123.8	54.5
TST-02-04-UCS-03	135.58	53.66	2.64	97.3	44.1
TST-06-09-UCS-04	135.15	53.66	2.67	145.9	47.5
TST-02-02-UCS-05	137.45	53.66	2.63	88.4	56.6
Average				111.4±23.3	51.3±5.3

ตารางที่ 4.4 สรุปผลการทดสอบแรงกดในแกนเดียวและการวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นตามมาตรฐาน ASTM และ ISRM สำหรับหินทั้ง 3 ชนิด (L/D ratio=2.5)

Rock Type	Number of Test Samples	Uniaxial Compressive Strength, σ_c (MPa)	Tangential Elastic Modulus, E_t (GPa)
Andesite	5	115.0±15.0	43.0±3.4
Silicified Tuffaceous Sandstone	5	120.7±25.2	63.3±8.0
Pebbly Tuffaceous Sandstone	5	111.4±23.3	51.3±5.3

4.1.2 การทดสอบแรงกดสูงสุดในสามแกน (Triaxial compression test) มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความต้านแรงกดสูงสุดของตัวอย่างหินภายใต้ความดันล้อมรอบคงที่ (Constant confining pressure) แล้วนำผลไปคำนวณหาค่าคงที่หรือตัวแปรที่สัมพันธ์กับการวิบัติของหิน รูปที่ 4.5 แสดงตัวอย่างหินที่จัดเตรียมตามมาตรฐานเพื่อการทดสอบแรงกดสูงสุดในสามแกน เครื่องมือที่ใช้ทดสอบประกอบด้วยเครื่องกดในแนวแกน ได้แก่ เครื่องกดทดสอบรุ่น SBEL PLT-75 ปัมป์ไฮดรอลิคสำหรับให้ความดันล้อมรอบแบบมือโยก และหม้อความดัน Hoek-Franklin Cell (Hoek and Franklin, 1968) (รูปที่ 4.6)

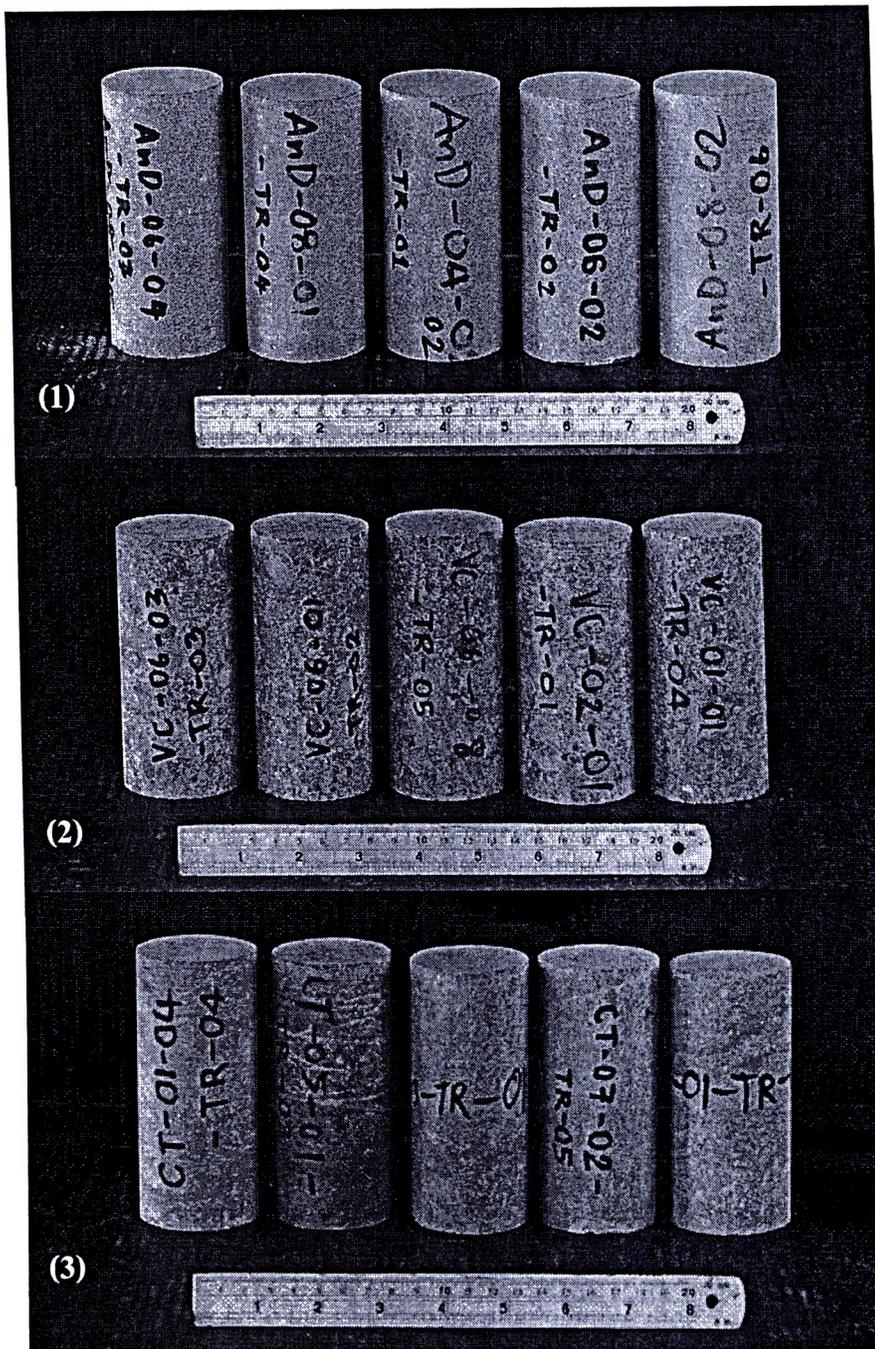
การทดสอบแรงกดในสามแกนได้ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D7012 และข้อแนะนำของ ISRM (Brown, 1981) โดยให้ความดันคงที่ล้อมรอบผิวด้านข้างหรือความเค้นรอง (σ_3) ของตัวอย่างหิน ซึ่งกรณีนี้ความเค้นรอง $\sigma_3 = \sigma_2$ จากนั้นจึงทำการกดตัวอย่างหินในแนวแกนจนกระทั่งถึงจุดวิบัติ (Failure) ซึ่งจะได้ค่าความต้านแรงกดในแนวแกน (σ_1) รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะของตัวอย่างหินทั้ง 3 ชนิด หลังจากถูกทดสอบแรงกดสูงสุดในสามแกน

แผนภูมิที่ได้จากผลการทดสอบของตัวอย่างหินแต่ละชนิดแสดงไว้ในรูปที่ 4.8 ตามลำดับ ซึ่งเป็นการนำค่าความเค้นในแนวแกนและความเค้นรองมาคำนวณและลงจุดในความสัมพันธ์ของ Mohr-Coulomb ตารางที่ 4.5 ถึงตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบตัวอย่างหินทั้ง 3 ชนิด เพื่อใช้เป็นกฎเกณฑ์สำหรับเปรียบเทียบกับ การทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนต่อไป

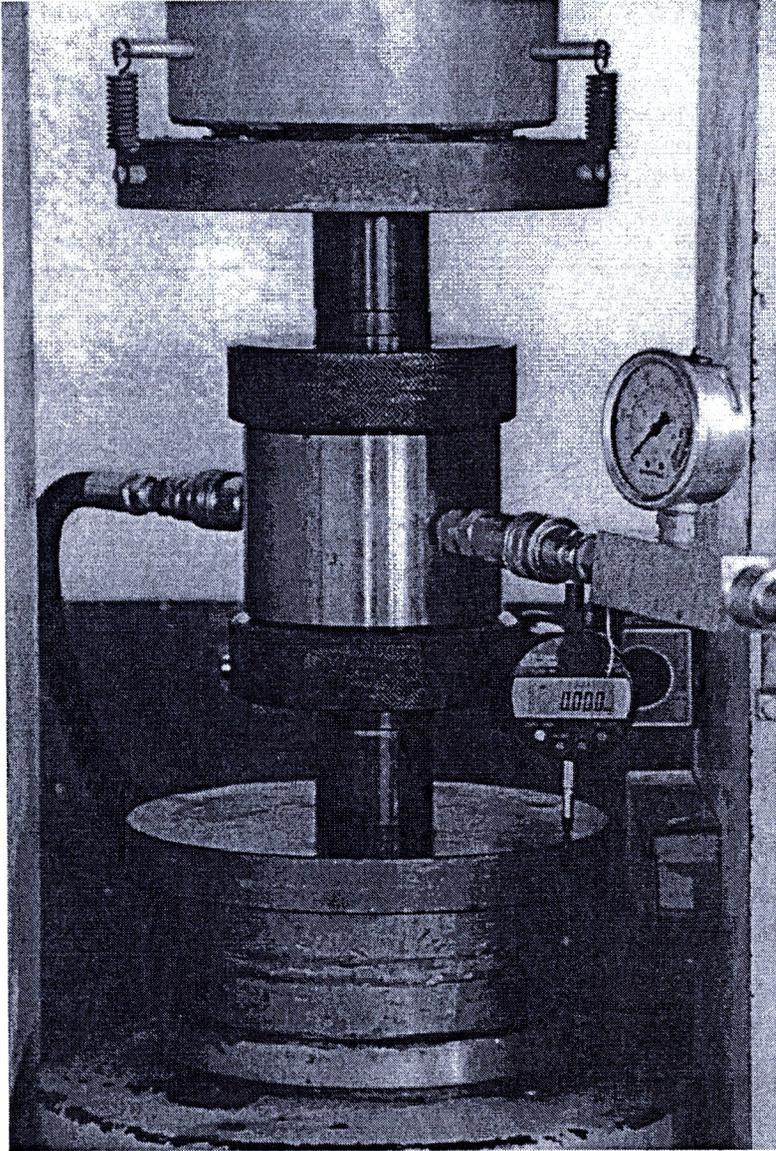
4.1.3 การทดสอบความต้านแรงดึงแบบบราซิลเลียน มีวัตถุประสงค์เพื่อหาแรงดึงสูงสุดของตัวอย่างหินวิธีการเตรียมจะปฏิบัติตามมาตรฐานสากล ASTM D3967 และข้อแนะนำของ ISRM (Brown, 1981) รูปที่ 4.9 แสดงตัวอย่างหินที่จัดเตรียมตามมาตรฐาน วิธีการทดสอบได้ใช้เครื่องกดทดสอบรุ่น SBEL PLT-75 โดยทำการกดในแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง (รูปที่ 4.10) ด้วยอัตราการกดคงที่เท่ากับ 0.5 MPa/s และจะกดจนกระทั่งตัวอย่างหินแตกและแยกออกจากกัน ค่าแรงกดสูงสุดที่ได้จะนำมาคำนวณเป็นค่าแรงดึงแบบบราซิลเลียน ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการ (ASTM D3967)

$$\sigma_B = 2 P_f / \pi DL \quad (4.5)$$

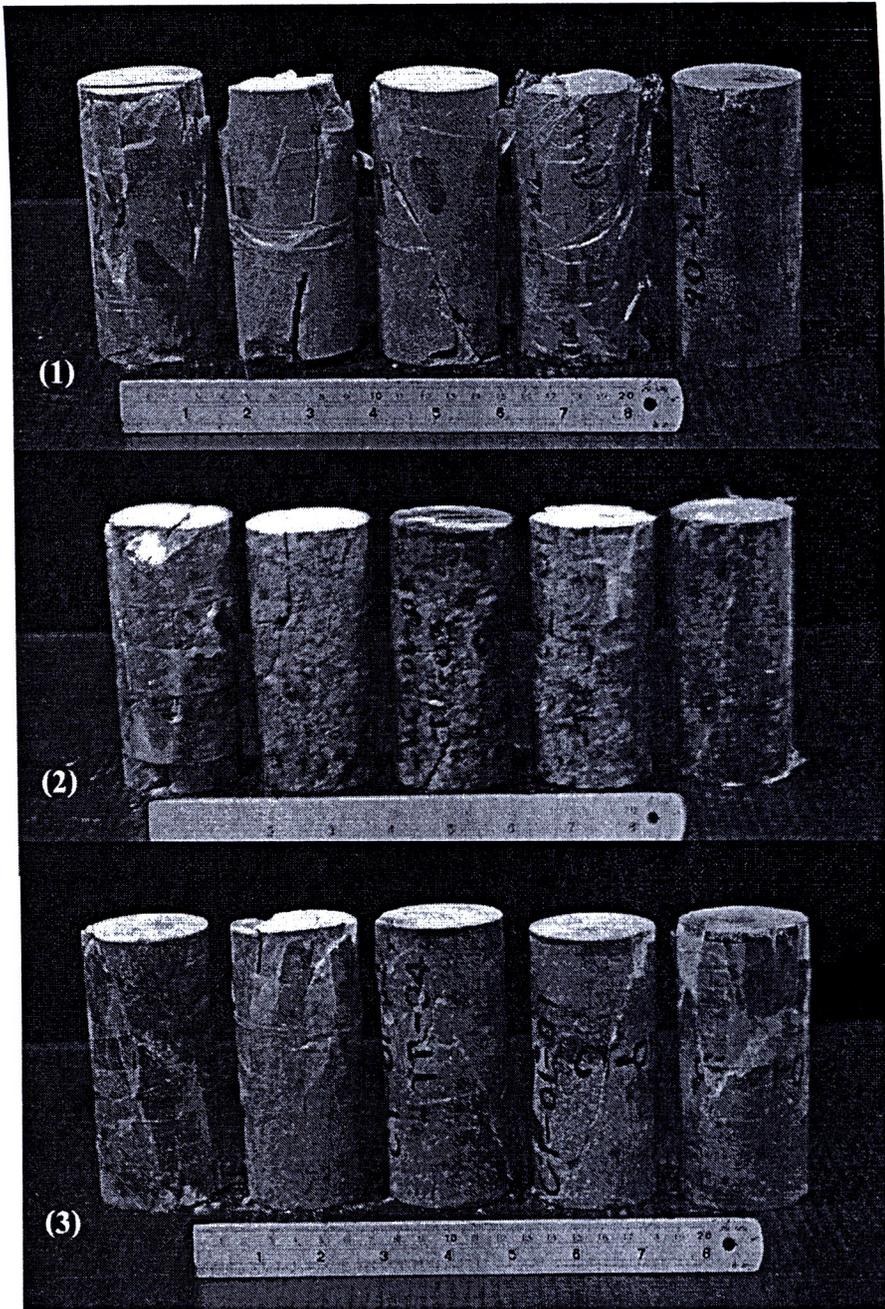
โดยที่ σ_B คือแรงดึงแบบบราซิลเลียน P_f คือแรงกดสูงสุดที่จุดวิบัติ D คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตัวอย่างหิน และ L คือความหนาของตัวอย่างหิน



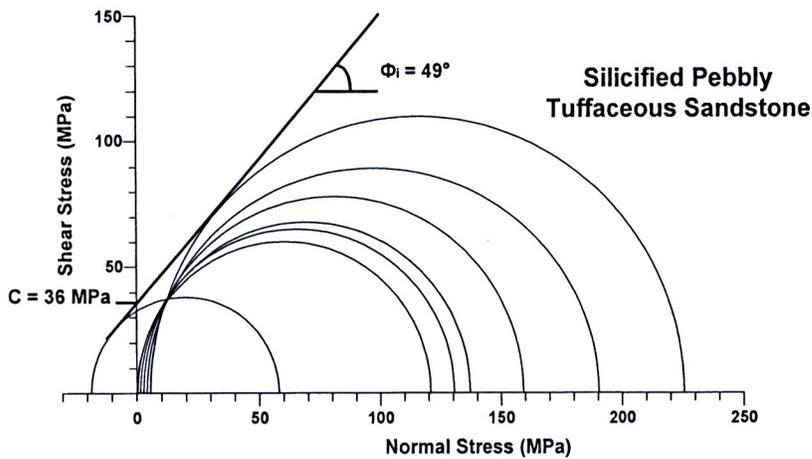
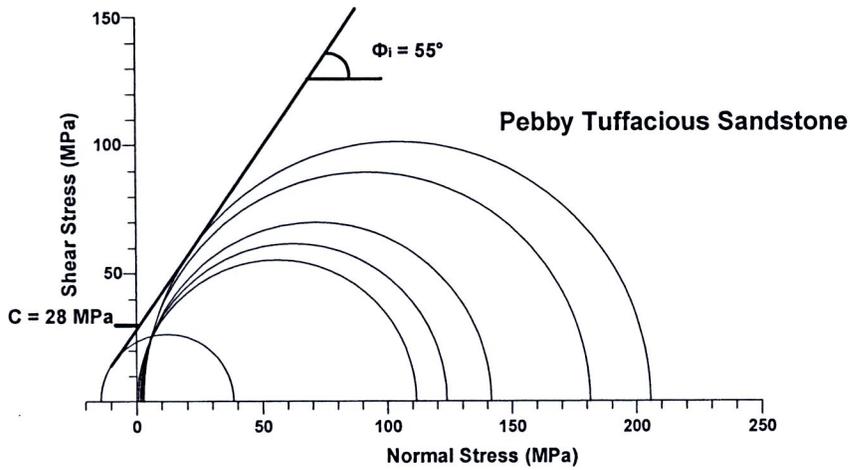
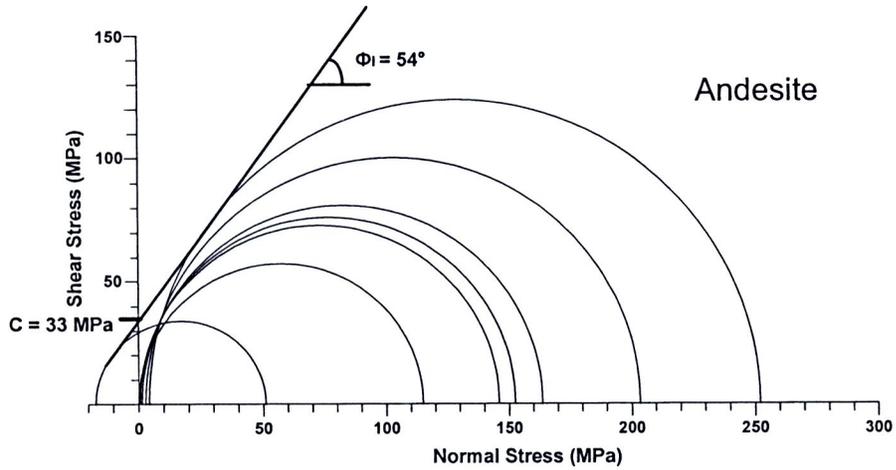
รูปที่ 4.5 แท่งตัวอย่างหินรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว (1) Andesite (2) Silicified Tuffaceous Sandstone และ (3) Pebbly Tuffaceous Sandstone ที่จัดเตรียมตามมาตรฐานเพื่อการทดสอบแรงกดสูงสุดในสามแกน



รูปที่ 4.6 หม้อความดัน Hoek-Franklin Cell สำหรับการทดสอบแรงกดในสามแกน
(Hoek and Franklin, 1968)



รูปที่ 4.7 ตัวอย่างหินทั้ง 3 ชนิด หลังจากถูกทดสอบแรงกดสูงสุดในสามแกน
 (1) Andesite (2) Silicified Tuffaceous Sandstone และ (3) Pebbly
 Tuffaceous Sandstone



รูปที่ 4.8 แผนภูมิตัวแปรการวิบัติของหินแกรนิตภายใต้สภาวะแรงกดในสามแกนโดยใช้ความสัมพันธ์ Mohr-Coulomb รวมทั้งผลการทดสอบแรงกดในแกนเดียว และผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน สำหรับนำมาประกอบในการคำนวณของหินทั้ง 3 ชนิด

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบแรงกดสูงสุดในสามแกนตามมาตรฐาน ASTM และ ISRM ของหิน
Andesite (L/D ratio=2.0)

Sample No.	Length (mm)	Diameter (mm)	Density (g/cc)	σ_3 (MPa)	σ_1 (MPa)
AND-02-02-TR-01	134.86	53.66	2.82	132.7	45.1
AND-06-03-TR-02	134.94	53.66	2.83	110.6	39.7
AND-02-01-TR-03	134.85	53.66	2.80	106.1	47.0
AND-08-03-TR-04	134.17	53.66	2.84	128.2	39.2
AND-04-04-TR-05	134.64	53.66	2.85	97.3	43.8
Average				115±15.0	43.0±3.4

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบแรงกดสูงสุดในสามแกนตามมาตรฐาน ASTM และ ISRM ของหิน
Silicified Tuffaceous Sandstone (L/D ratio=2.0)

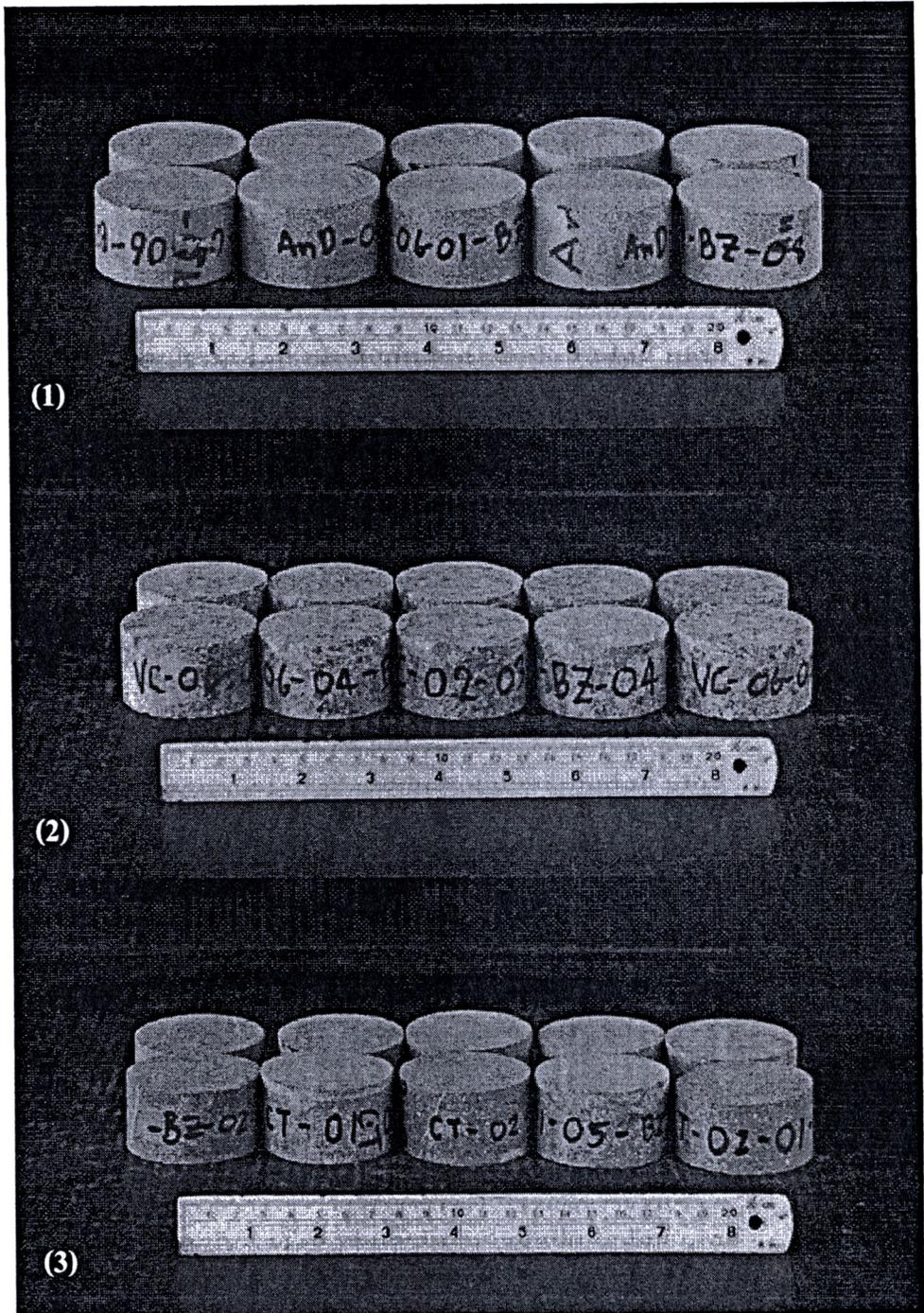
Sample No.	Length (mm)	Diameter (mm)	Density (g/cc)	σ_3 (MPa)	σ_1 (MPa)
SST-02-01-TR-01	133.09	53.66	2.71	119.4	65.69
SST-07-01-TR-02	135.47	53.66	2.67	93.0	63.2
SST-07-03-TR-03	130.95	53.66	2.68	119.4	50.3
SST-02-06-TR-04	134.75	53.66	2.69	161.4	66.1
SST-06-02-TR-05	135.77	53.66	2.70	110.6	71.3
Average				120.7±25.2	63.3±8.0

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบแรงกดในสามแกนตามมาตรฐาน ASTM และ ISRM ของหิน
Pebbly Tuffaceous Sandstone (L/D ratio=2.0)

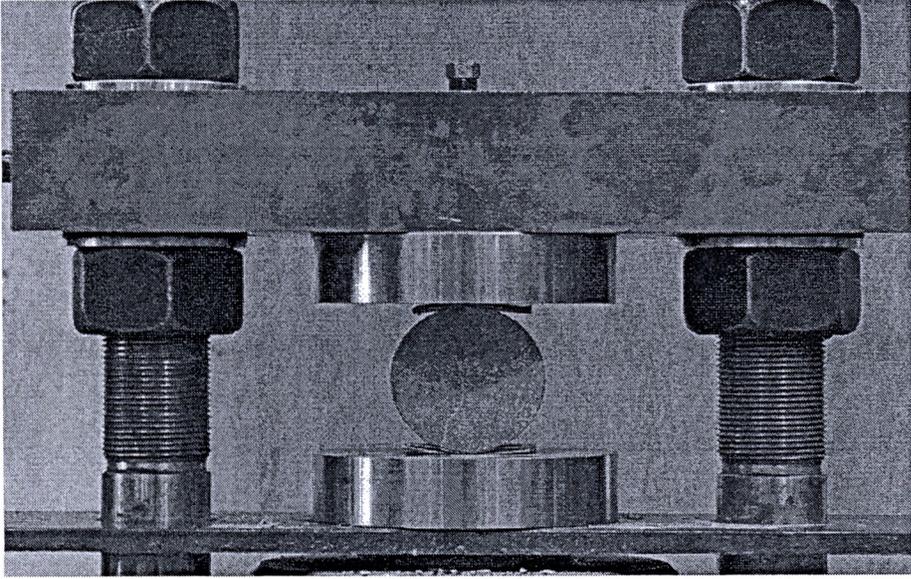
Sample No.	Length (mm)	Diameter (mm)	Density (g/cc)	σ_3 (MPa)	σ_1 (MPa)
TST-08-02-TR-01	138.10	53.66	2.66	101.7	53.8
TST-01-02-TR-02	132.36	53.66	2.68	123.8	54.5
TST-02-04-TR-03	135.58	53.66	2.64	97.3	44.1
TST-06-09-TR-04	135.15	53.66	2.67	145.9	47.5
TST-02-02-TR-05	137.45	53.66	2.63	88.4	56.6
Average				111.4±23.3	51.3±5.3

ตารางที่ 4.8 สรุปผลการทดสอบแรงกดในสามแกนตามมาตรฐาน ASTM และ ISRM สำหรับหิน
ทั้ง 3 ชนิด (L/D ratio=2.5)

Rock Type	Number of Samples	Average Density (g/cc)	Cohesion, c (MPa)	Internal Friction Angle, ϕ_i (degrees)
Andesite	5	2.83	33	54
Pebbly Tuffaceous Sandstone	5	2.65	28	55
Silicified Tuffaceous Sandstone	5	2.67	36	49



รูปที่ 4.9 ตัวอย่างหินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว (1) Andesite, (2) Silicified Tuffaceous Sandstone และ (3) Pebbly Tuffaceous Sandstone ที่จัดเตรียมตามมาตรฐานเพื่อการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเฉียง



รูปที่ 4.10 ตัวอย่างหินถูกกดในแนวเส้นผ่าศูนย์กลางสำหรับการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน

ผลการทดสอบระบุว่าตัวอย่างหินทั้ง 3 ชนิด มีการแตกในแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง (รูปที่ 4.11) ผลการทดสอบตัวอย่างหินทั้ง 3 ชนิด ได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.9 ถึงตารางที่ 4.12 ค่ากำลังต้านแรงดึงสูงสุดแบบบราซิลเลียนมีค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 17.0 ± 1.6 MPa สำหรับ Andesite 13.1 ± 3.3 MPa สำหรับ Silicified Tuffaceous Sandstone และ 19.1 ± 3.2 MPa สำหรับ Pebbly Tuffaceous Sandstone ซึ่งผลที่ได้นี้จะนำไปใช้เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนต่อไป

4.1.4 การทดสอบแบบจุดกด มีวัตถุประสงค์เพื่อหาดัชนีกำลังกดของหิน ซึ่งลักษณะของแรงที่กระทำบนตัวอย่างหินจะเป็นแบบจุด วิธีการเตรียมตัวอย่างจะปฏิบัติตามมาตรฐานสากล ASTM D3967 และข้อแนะนำของ ISRM (Brown, 1981) รูปที่ 4.12 แสดงตัวอย่างหินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว ของ Andesite ที่จัดเตรียมตามมาตรฐานเพื่อการทดสอบแบบจุดกด และรูปที่ 4.13 แสดงการทดสอบแบบจุดกดของตัวอย่าง Andesite ด้วยเครื่องกดทดสอบรุ่น SBEL PLT-75 โดยกดตัวอย่างหินในแนวแกนบริเวณจุดศูนย์กลางตัวอย่างจนแตกและแยกออกจากกันด้วยแรงกดสูงสุด (P_f) (รูปที่ 4.14) ค่าแรงกดสูงสุดที่ได้นำมาคำนวณเป็นค่าดัชนีกำลังกด ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการ (ASTM D3967)

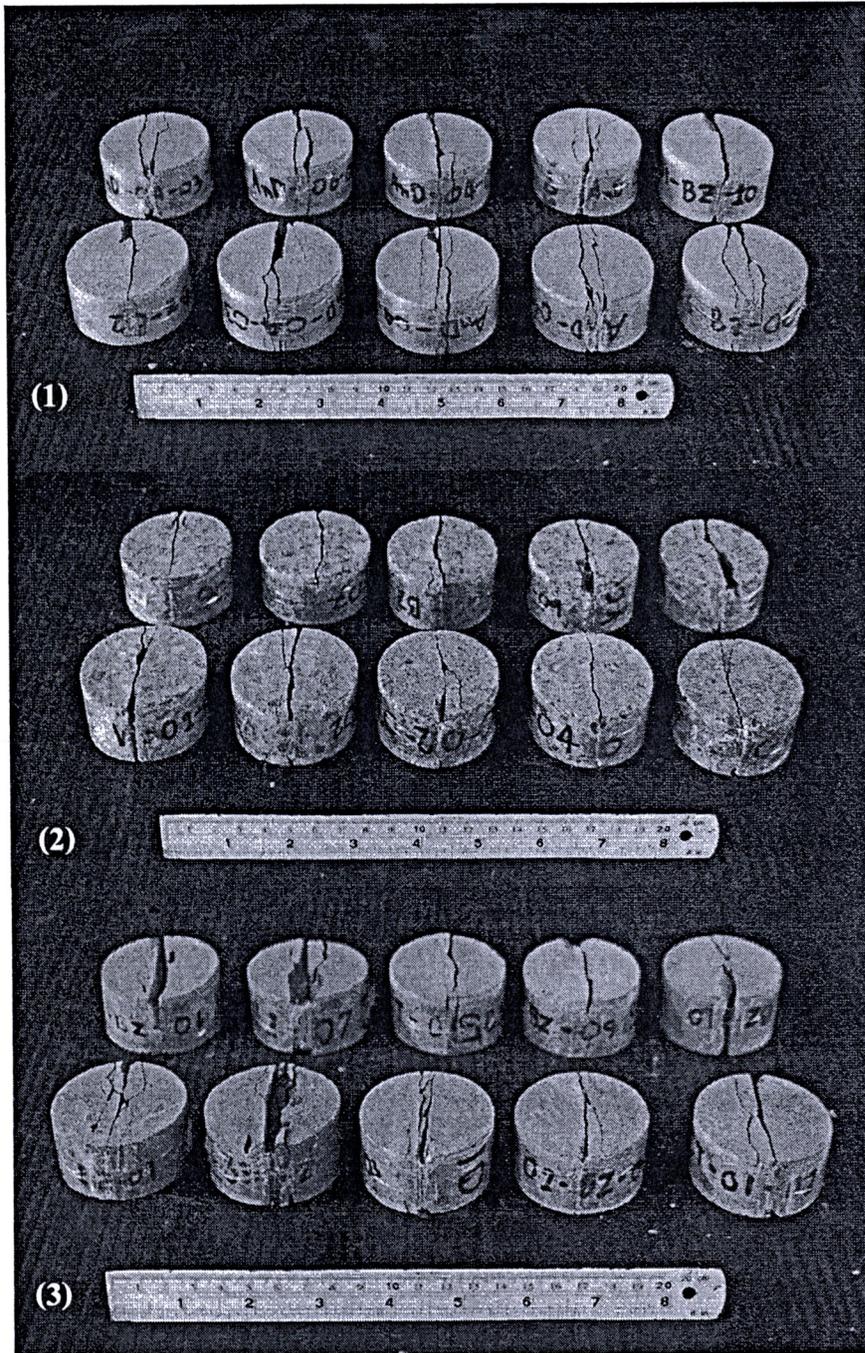
$$I_s = P_f / D \cdot t \quad (4.6)$$

เมื่อ D คือเส้นผ่าศูนย์กลางตัวอย่างหิน และ t คือความหนาของตัวอย่างหิน

ผลการทดสอบได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.13 ถึงตารางที่ 4.16 ค่าดัชนีจุดกดมีค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 8.1 ± 1.2 MPa สำหรับ Andesite 10.2 ± 2.0 MPa สำหรับ Silicified Tuffaceous Sandstone และ 10.8 ± 2.2 MPa สำหรับ Pebbly Tuffaceous Sandstone

4.2 การทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยน

จากงานวิจัยโดย กิตติเทพ เฟื่องขจร (2545) ได้มีการประดิษฐ์หัวกดแบบปรับเปลี่ยนเพื่อนำมาใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยยึดตามแนวคิดคือต้องการให้มีพื้นที่สัมผัสระหว่างหัวกดและเนื้อหินคงที่ไม่ว่าเนื้อหินจะมีความอ่อนหรือแข็งเพียงใดหรือหัวกดจะอยู่ภายใต้แรงกดมากน้อยเพียงใด ดังนั้น หัวกดที่ถูกปรับเปลี่ยนจะเป็นหัวตัดเรียบและมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปวงกลม วัสดุที่ใช้จะเป็นเหล็กแข็งซึ่งทนทานต่อการกดภายใต้ความดันสูง รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบหัวกดแบบปรับเปลี่ยน (Modified) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 และ 10 มิลลิเมตร กับหัวกดแบบดั้งเดิม (Conventional) ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป



รูปที่ 4.11 ตัวอย่างหินทั้ง 3 ชนิด หลังจากถูกทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน (1) Andesite (2) Silicified Tuffaceous Sandstone และ (3) Pebbly Tuffaceous Sandstone

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนตามมาตรฐาน ASTM และ ISRM ของหิน
Andesite (L/D ratio=0.5)

Sample No.	Thickness (mm)	Diameter (mm)	Density (g/cc)	Failure Load (kN)	σ_B (MPa)
AND-04-03-BZ-01	26.28	53.66	2.81	39.5	17.8
AND-04-03-BZ-02	25.51	53.66	2.79	35.0	16.3
AND-04-03-BZ-03	27.55	53.66	2.85	38.0	16.4
AND-04-03-BZ-04	26.69	53.66	2.79	41.5	18.4
AND-04-06-BZ-05	26.86	53.66	2.80	32.0	14.1
AND-04-06-BZ-06	26.99	53.66	2.86	41.5	18.2
AND-04-06-BZ-07	26.49	53.66	2.82	39.5	17.7
AND-04-06-BZ-08	26.42	53.66	2.86	34.0	15.3
AND-06-01-BZ-09	26.78	53.66	2.86	43.5	19.3
AND-06-01-BZ-10	27.58	53.66	2.85	38.5	16.6
				Average	17.0±1.6

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนตามมาตรฐาน ASTM และ ISRM ของหิน Silicified Tuffaceous Sandstone (L/D ratio=0.5)

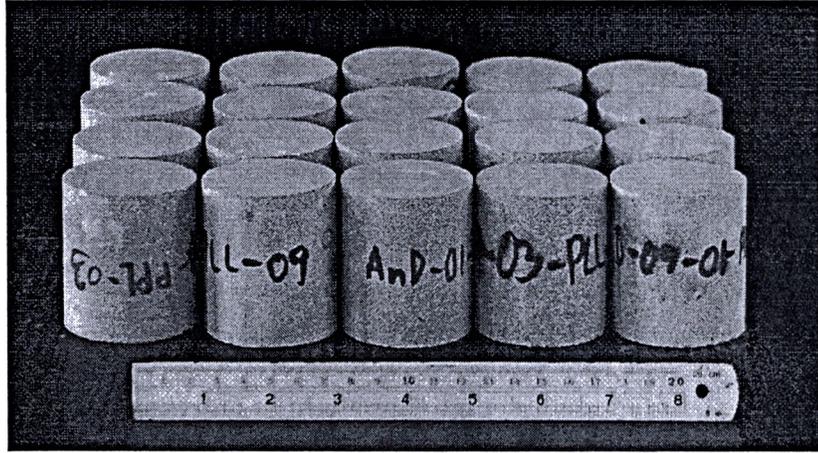
Sample No.	Thickness (mm)	Diameter (mm)	Density (g/cc)	Failure Load (kN)	σ_B (MPa)
SST-02-02-BZ-01	25.07	53.66	2.65	45.0	21.3
SST-01-06-BZ-02	26.64	53.66	2.64	52.0	23.2
SST-01-02-BZ-03	25.95	53.66	2.62	40.0	18.3
SST-01-02-BZ-04	25.93	53.66	2.61	32.0	14.6
SST-01-02-BZ-05	26.08	53.66	2.66	50.0	22.8
SST-02-01-BZ-06	27.10	53.66	2.66	50.0	22.0
SST-02-01-BZ-07	26.54	53.66	2.62	45.0	20.1
SST-01-05-BZ-08	27.78	53.66	2.68	35.0	15.0
SST-01-05-BZ-09	27.93	53.66	2.66	40.0	17.0
SST-01-05-BZ-10	27.95	53.66	2.66	40.0	17.0
				Average	19.1±3.2

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนตามมาตรฐาน ASTM และ ISRM ของหิน
Pebbly Tuffaceous Sandstone (L/D ratio=0.5)

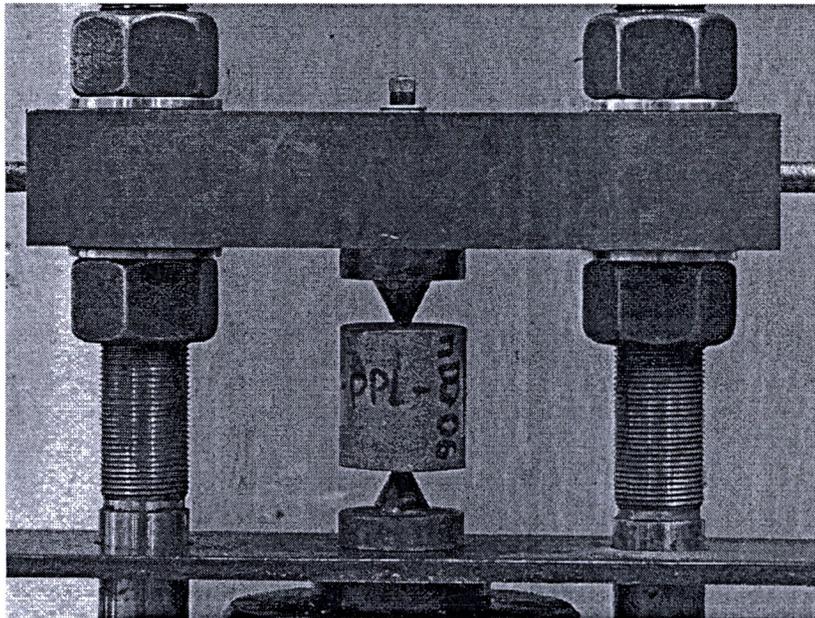
Sample No.	Thickness (mm)	Diameter (mm)	Density (g/cc)	Failure Load (kN)	σ_B (MPa)
TST-02-03-BZ-01	28.11	53.66	2.60	36.0	15.2
TST-02-03-BZ-02	27.57	53.66	2.60	25.5	11.0
TST-02-03-BZ-03	27.39	53.66	2.62	32.5	14.1
TST-02-03-BZ-04	26.88	53.66	2.63	17.5	7.7
TST-06-04-BZ-05	27.65	53.66	2.66	45.0	19.3
TST-06-04-BZ-06	27.29	53.66	2.64	28.0	12.2
TST-06-04-BZ-07	27.30	53.66	2.60	23.0	10.0
TST-06-02-BZ-08	27.48	53.66	2.64	28.5	12.3
TST-06-02-BZ-09	27.43	53.66	2.61	29.0	12.5
TST-06-02-BZ-10	26.58	53.66	2.65	37.0	16.5
				Average	13.1±3.3

ตารางที่ 4.12 สรุปการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนตามมาตรฐาน ASTM และ ISRM
สำหรับหินทั้ง 3 ชนิด (L/D ratio = 0.5)

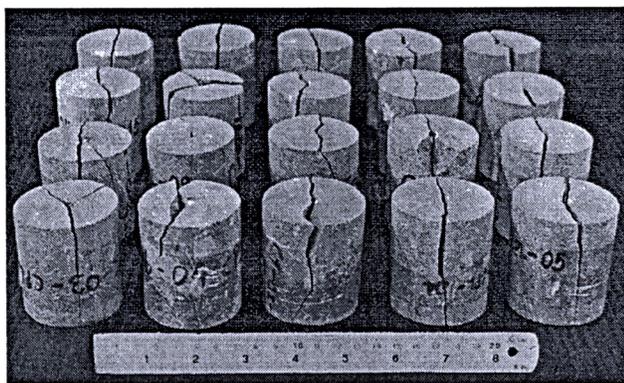
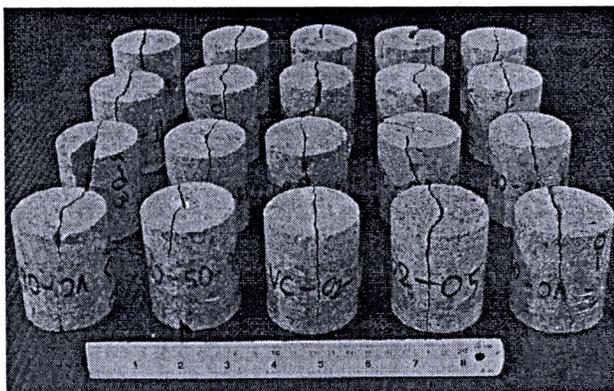
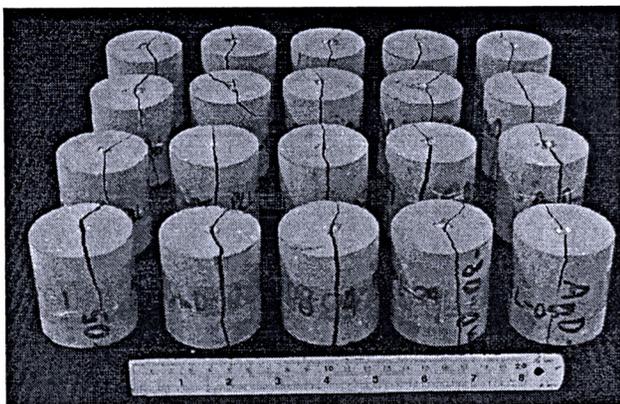
Rock Type	Average Diameter (mm)	Average Length (mm)	Average Density (g/cc)	Number of Samples	Brazilian Tensile Strength, σ_B (MPa)
Andesite	53.66	26.72	2.83	10	17.0±1.6
Pebbly Tuffaceous Sandstone	53.66	27.37	2.65	10	13.1±3.3
Silicified Tuffaceous Sandstone	53.66	26.70	2.67	10	19.1±3.2



รูปที่ 4.12 ตัวอย่างหินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว ของหิน Andesite ที่จัดเตรียมตามมาตรฐาน เพื่อการทดสอบแบบจุดกด



รูปที่ 4.13 ตัวอย่างหิน Andesite รูปทรงกระบอกถูกทดสอบแบบจุดกดตามแนวแกนด้วยเครื่อง SBEL PLT-75 มีแรงกดสูงสุดถึง 75,000 ปอนด์



รูปที่ 4.14 ตัวอย่างหินทั้ง 3 ชนิด หลังจากถูกทดสอบแบบจุดกด (1) Andesite (2) Silicified Tuffaceous Sandstone และ (3) Pebbly Tuffaceous Sandstone

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบแบบจุดกดตามมาตรฐาน ASTM และ ISRM ของหิน Andesite
(L/D ratio=1.0)

Sample No.	Length (mm)	Diameter (mm)	Density (g/cc)	Point Load Strength Index Test, I_s (MPa)
AND-06-05-CPL-01	53.97	53.66	2.84	5.2
AND-06-05-CPL-02	53.32	53.66	2.83	7.8
AND-08-04-CPL-03	54.32	53.66	2.84	9.0
AND-08-04-CPL-04	54.82	53.66	2.86	8.7
AND-06-01-CPL-05	53.30	53.66	2.85	7.6
AND-06-01-CPL-06	56.13	53.66	2.84	7.6
AND-04-04-CPL-07	56.17	53.66	2.81	7.5
AND-04-05-CPL-08	55.25	53.66	2.82	7.5
AND-03-02-CPL-09	55.95	53.66	2.80	8.5
AND-03-02-CPL-10	55.35	53.66	2.83	8.5
AND-06-06-CPL-11	54.75	53.66	2.83	7.5
AND-09-01-CPL-12	55.52	53.66	2.86	9.0
AND-09-01-CPL-13	55.03	53.66	2.83	9.0
AND-02-04-CPL-14	55.42	53.66	2.82	8.5
AND-09-03-CPL-15	56.07	53.66	2.82	8.5
AND-09-03-CPL-16	54.52	53.66	2.85	9.6
AND-01-03-CPL-17	55.30	53.66	2.83	8.7
AND-01-03-CPL-18	53.13	53.66	2.83	9.0
AND-01-04-CPL-19	54.65	53.66	2.84	5.6
AND-01-04-CPL-20	55.72	53.66	2.83	9.7
Average				8.1±1.2

ตารางที่ 4.14 ผลการทดสอบแบบจุดกดตามมาตรฐาน ASTM และ ISRM ของหิน Silicified Tuffaceous Sandstone (L/D ratio=1.0)

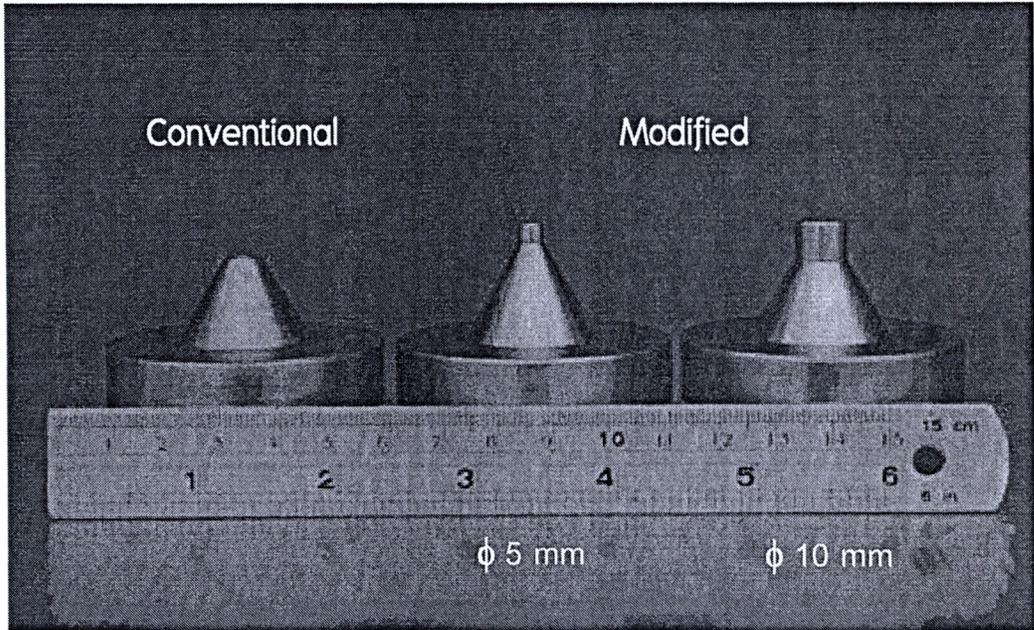
Sample No.	Length (mm)	Diameter (mm)	Density (g/cc)	Point Load Strength Index Test, I_s (MPa)
SST-02-03-CPL-01	53.73	53.66	2.68	12.5
SST-06-04-CPL-02	54.69	53.66	2.68	7.0
SST-02-07-CPL-03	55.05	53.66	2.69	7.0
SST-02-06-CPL-04	55.18	53.66	2.67	13.0
SST-02-04-CPL-05	56.26	53.66	2.67	12.5
SST-02-03-CPL-06	51.39	53.66	2.70	13.2
SST-02-03-CPL-07	54.83	53.66	2.71	7.1
SST-02-05-CPL-08	53.40	53.66	2.66	12.5
SST-02-05-CPL-09	53.99	53.66	2.65	7.0
SST-07-05-CPL-10	56.43	53.66	2.63	9.9
SST-07-05-CPL-11	53.81	53.66	2.66	10.6
SST-05-02-CPL-12	54.39	53.66	2.74	10.4
SST-05-02-CPL-13	54.91	53.66	2.71	10.4
SST-03-04-CPL-14	54.30	53.66	2.63	11.3
SST-03-04-CPL-15	55.56	53.66	2.63	10.6
SST-09-03-CPL-16	54.91	53.66	2.72	12.5
SST-09-03-CPL-17	57.03	53.66	2.71	12.5
SST-01-01-CPL-18	57.05	53.66	2.67	13.2
SST-02-07-CPL-19	55.96	53.66	2.69	11.1
SST-02-07-CPL-20	55.27	53.66	2.71	11.8
Average				10.8±2.2

ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบแบบจุดกดตามมาตรฐาน ASTM และ ISRM ของหิน Pebbly
Tuffaceous Sandstone (L/D ratio=1.0)

Sample No.	Length (mm)	Diameter (mm)	Density (g/cc)	Point Load Strength Index Test, I_s (MPa)
TST-06-05-CPL-01	56.57	53.66	2.63	12.5
TST-06-05-CPL-02	57.81	53.66	2.64	10.9
TST-02-05-CPL-03	56.86	53.66	2.63	10.6
TST-02-05-CPL-04	57.47	53.66	2.64	8.0
TST-08-03-CPL-05	56.06	53.66	2.68	11.5
TST-08-03-CPL-06	55.74	53.66	2.66	11.8
TST-08-01-CPL-07	54.91	53.66	2.68	11.1
TST-08-01-CPL-08	54.78	53.66	2.68	11.5
TST-04-02-CPL-09	54.22	53.66	2.63	10.3
TST-04-02-CPL-10	53.87	53.66	2.64	11.1
TST-08-04-CPL-11	53.71	53.66	2.67	11.5
TST-08-04-CPL-12	54.63	53.66	2.67	11.3
TST-06-07-CPL-13	55.45	53.66	2.67	10.8
TST-04-01-CPL-14	57.29	53.66	2.61	5.9
TST-06-06-CPL-15	54.57	53.66	2.61	9.9
TST-06-06-CPL-16	54.69	53.66	2.63	10.9
TST-06-06-CPL-17	54.97	53.66	2.66	12.2
TST-04-03-CPL-18	55.50	53.66	2.61	8.7
TST-04-03-CPL-19	55.21	53.66	2.62	5.2
TST-04-05-CPL-20	54.77	53.66	2.64	8.7
Average				10.2±2.0

ตารางที่ 4.16 สรุปผลการทดสอบแบบจุดกดตามมาตรฐาน ASTM และ ISRM ของหินทั้ง 3 ชนิด (L/D ratio=1.0)

Rock Types	Length (mm)	Diameter (mm)	Density (g/cc)	Point Load Strength Index, I_s (MPa)
Andesite	54.93	53.66	2.83	8.1±1.2
Pebbly Tuffaceous Sandstone	55.45	53.66	2.65	10.2±2.0
Silicified Tuffaceous Sandstone	54.91	53.66	2.68	10.8±2.2



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบหัวกดแบบดั้งเดิม (Conventional) กับหัวกดแบบปรับเปลี่ยน (Modified) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 5 มิลลิเมตร และ 10 มิลลิเมตร

การทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนสำหรับงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของตัวอย่างหินและการทดสอบเพื่อหาค่าแรงกดสูงสุด โดยหัวกดที่ใช้จะมีเส้นผ่าศูนย์กลาง (d) ผันแปรจาก 0.5, 10, 15 มิลลิเมตร ถึง 20 มิลลิเมตร และมีอัตราส่วนความหนาของตัวอย่างหินต่อขนาดหัวกด (t/d) คงที่ประมาณ 2.0-3.0 สำหรับตัวอย่างหินที่มีรูปทรงไม่เป็นเรขาคณิต

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนของตัวอย่างหินทั้ง 3 ชนิด ใช้เครื่องมือที่ใช้ทดสอบประกอบด้วย เครื่องทดสอบแบบจุดกดรุ่น SBEL PLT-75 ซึ่งมีความสามารถในการกดสูงสุดเท่ากับ 75,000 ปอนด์ หัวกดแบบปรับเปลี่ยนขนาดต่างๆ (5, 10, 15, และ 20 มิลลิเมตร) พร้อมติดตั้งมาตรตรวจวัดการยุบตัว (High-precision digital gages) ความละเอียดสูงสุด 0.001 มิลลิเมตร (รูปที่ 4.16)

วิธีการทดสอบดำเนินการโดยกดตัวอย่างหินที่จุดกึ่งกลางตามแนวแกนและให้แรงกดเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างเป็นระบบ 1-2 รอบ เพื่อตรวจวัดค่าแรงกดและระยะการยุบตัวของหัวกดที่จมลงในตัวอย่างหิน หลังจากนั้นให้แรงกดสูงสุดจนกระทั่งตัวอย่างหินเกิดการวิบัติ พร้อมทั้งสังเกตลักษณะการวิบัติและบันทึกภาพลักษณะรอยแตกเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป

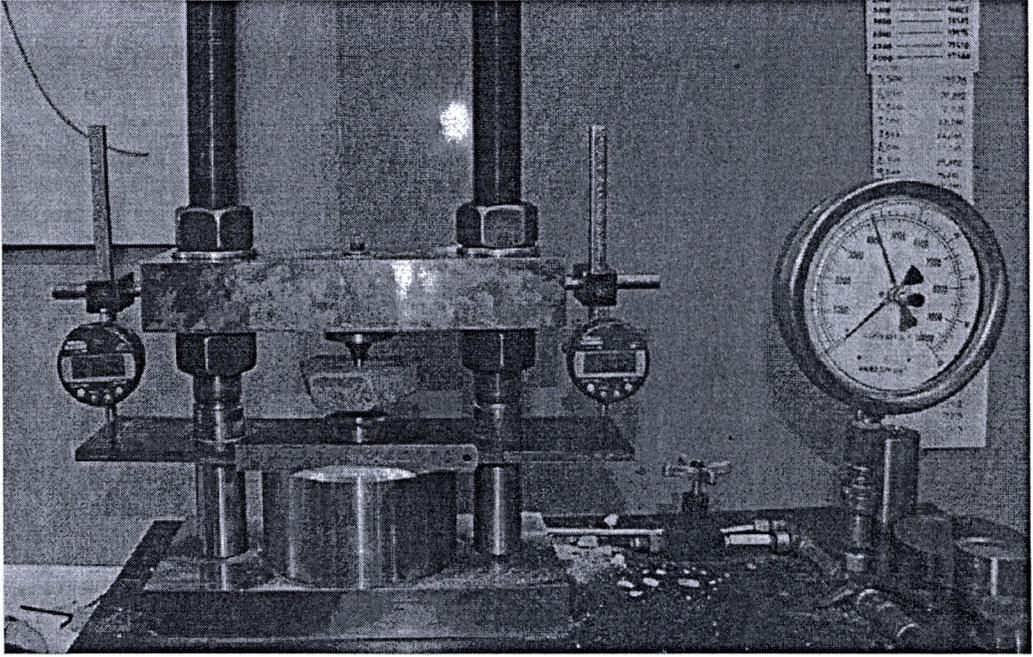
รูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 แสดงลักษณะการแตกของตัวอย่างหินบางส่วน ตัวอย่างหินส่วนใหญ่จะมีรอยแตกมากกว่าหนึ่งรอย แต่ทุกรอยแตกจะมีแนวขนานกับทิศทางของการกด ซึ่งบ่งบอกว่าเป็นรอยแตกแบบดึง (Tension) บริเวณใต้หัวกดตัวอย่างหินจะแตกเป็นรูปกรวย ซึ่งเป็น Compressive shear zone ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่ที่สุดเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวกดนั้นๆ

ตารางที่ 4.17 ถึงตารางที่ 4.19 แสดงรูปร่างของตัวอย่างหินและผลการคำนวณที่ได้จากการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยน ซึ่งจะอยู่ในรูปของฟังก์ชันการยุบตัว (Displacement function, $\Delta P/\Delta \delta$) และค่าความเค้นสูงสุด (P_{mpl}) สามารถคำนวณได้จากการนำค่าแรงกดแตก (p_f) หารด้วยพื้นที่หน้าตัดของหัวกดดังสมการ

$$P_{mpl} = p_f / (\pi d^2/4) \quad (4.7)$$

โดยที่ P_{mpl} คือความเค้นกดที่เกิดการวิบัติ p_f คือแรงกดที่จุดวิบัติ และ d คือเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวกด

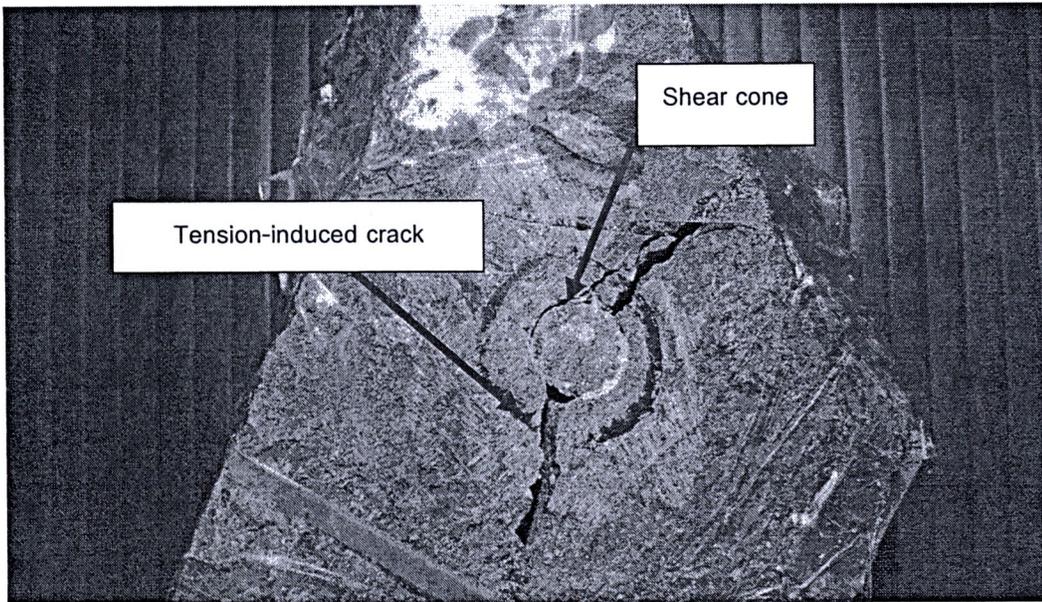
รูปที่ ก-1 ถึงรูปที่ ก-150 ในภาคผนวก ก แสดงผลของการทดสอบในรูปของแผนภูมิ โดยที่ค่า P จะนำเสนอในฟังก์ชันการยุบตัวของหัวกด (δ) เพื่อนำไปคำนวณหาค่าของฟังก์ชันการยุบตัว ($\Delta P/\Delta \delta$) สำหรับใช้คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นในบทต่อไป



รูปที่ 4.16 องค์ประกอบของเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยน



รูปที่ 4.17 ตัวอย่างหิน Andesite หลังจากถูกทดสอบแบบจุดกด



รูปที่ 4.18 ตัวอย่างหิน Andesite ถูกกดแตกด้วยหัวกดขนาด 20 มิลลิเมตร โดยมีการแตกเป็นรูปกรวยที่บริเวณใต้หัวกด (Shear cone) แสดงให้เห็นว่าหินแตกแบบแรงดึง (Tension-induced crack)

ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนของตัวอย่างหิน Andesite

Specimen Number	t/d	D _c /d	Failure Load, p _f (kN)	ΔP/Δδ (GPa/mm)	P _{mpl} (Mpa)
AND-MPL-01	2.46	5.43	28.0	1.25	159
AND-MPL-02	3.51	6.32	37.0	1.80	471
AND-MPL-03	2.36	6.34	15.0	1.70	191
AND-MPL-04	2.66	9.60	25.0	2.34	319
AND-MPL-05	2.84	9.03	37.0	3.69	471
AND-MPL-06	2.45	7.93	28.0	1.82	357
AND-MPL-07	2.63	8.74	26.0	2.34	331
AND-MPL-08	2.61	9.80	21.0	1.71	268
AND-MPL-09	2.80	7.77	27.0	0.56	344
AND-MPL-10	2.44	5.69	28.0	1.24	159
AND-MPL-11	2.51	6.13	65.0	1.38	368
AND-MPL-12	2.26	6.31	60.0	1.89	340
AND-MPL-13	2.33	11.26	18.0	1.51	468
AND-MPL-14	2.79	12.03	22.0	1.65	572
AND-MPL-15	2.39	5.03	40.0	0.11	227
AND-MPL-16	2.81	4.74	30.0	0.12	170
AND-MPL-17	3.05	8.61	39.0	0.21	497
AND-MPL-18	2.33	6.53	50.0	0.08	283
AND-MPL-19	2.94	13.86	38.0	2.00	484
AND-MPL-20	2.65	8.60	41.0	0.17	522
AND-MPL-21	2.38	4.25	55.0	0.87	311
AND-MPL-22	2.30	4.17	45.0	0.87	255
AND-MPL-23	2.23	5.57	50.0	2.31	283
AND-MPL-24	2.50	7.60	55.0	1.12	311
AND-MPL-25	2.59	12.43	18.0	5.85	468
AND-MPL-26	3.03	5.60	31.0	1.43	395
AND-MPL-27	2.73	16.40	39.0	1.56	497

ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนของตัวอย่างหิน Andesite (ต่อ)

Specimen Number	t/d	D_e/d	Failure Load, p_f (kN)	$\Delta P/\Delta \delta$ (GPa/mm)	P_{mpl} (MPa)
AND-MPL-28	2.82	9.06	22.0	2.00	280
AND-MPL-29	3.11	9.34	29.0	1.56	369
AND-MPL-30	2.46	13.14	25.0	6.50	650
AND-MPL-31	2.62	9.82	20.0	1.75	255
AND-MPL-32	2.60	11.47	18.0	1.56	468
AND-MPL-33	2.40	7.00	45.0	1.01	255
AND-MPL-34	3.04	8.00	24.0	1.35	306
AND-MPL-35	2.50	4.55	22.0	1.27	280
AND-MPL-36	2.43	16.97	12.0	2.92	312
AND-MPL-37	3.33	15.20	31.0	1.56	395
AND-MPL-38	2.38	6.61	17.0	2.60	442
AND-MPL-39	3.18	3.47	13.0	1.86	338
AND-MPL-40	2.45	5.51	15.0	2.60	390
AND-MPL-41	2.07	5.61	15.0	3.25	390
AND-MPL-42	2.23	4.25	50.0	2.31	283
AND-MPL-43	2.07	5.61	15.0	3.46	390
AND-MPL-44	3.24	3.40	31.0	2.34	395
AND-MPL-45	2.75	4.26	24.0	1.69	306
AND-MPL-46	3.02	3.97	13.0	1.75	166
AND-MPL-47	2.55	3.14	10.0	1.70	127
AND-MPL-48	2.57	2.20	25.0	0.94	142
AND-MPL-49	2.56	2.14	13.0	0.57	74
AND-MPL-50	2.43	1.66	18.0	0.78	102

ตารางที่ 4.18 ผลการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนของตัวอย่างหิน Silicified Tuffaceous Sandstone

Specimen Number	t/d	D_e/d	Failure Load, p_f (kN)	$\Delta P/\Delta \delta$ (GPa/mm)	P_{mpl} (MPa)
TST-MPL-01	2.70	5.46	22.0	2.12	293
TST-MPL-02	2.58	7.87	23.0	3.26	293
TST-MPL-03	2.75	7.30	20.0	1.43	255
TST-MPL-04	2.82	7.15	40.0	1.43	510
TST-MPL-05	2.54	13.45	22.0	2.64	280
TST-MPL-06	2.92	8.93	20.0	1.43	255
TST-MPL-07	2.43	8.53	55.0	1.12	311
TST-MPL-08	2.87	10.47	21.0	3.19	268
TST-MPL-09	2.30	7.87	37.0	2.12	471
TST-MPL-10	2.30	4.27	26.0	1.32	147
TST-MPL-11	2.82	12.43	45.0	3.19	573
TST-MPL-12	2.54	6.04	20.0	1.27	255
TST-MPL-13	2.88	11.80	29.0	1.59	369
TST-MPL-14	2.51	6.31	41.0	1.70	232
TST-MPL-15	2.14	11.04	12.0	2.60	312
TST-MPL-16	2.29	4.86	38.0	1.02	215
TST-MPL-17	2.59	7.15	11.0	6.50	286
TST-MPL-18	2.43	2.85	18.0	0.73	102
TST-MPL-19	2.85	3.16	13.0	1.28	130
TST-MPL-20	2.41	2.95	18.0	1.70	102
TST-MPL-21	2.98	4.17	30.0	1.00	170
TST-MPL-22	2.65	6.42	30.0	0.88	170
TST-MPL-23	3.14	6.11	45.0	1.01	255
TST-MPL-24	3.03	4.81	65.0	1.24	368
TST-MPL-25	2.23	2.23	26.0	1.26	331
TST-MPL-26	2.73	6.52	26.0	1.78	331

ตารางที่ 4.18 ผลการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนของตัวอย่างหิน Silicified Tuffaceous Sandstone (ต่อ)

Specimen Number	t/d	D_e/d	Failure Load, p_f (kN)	$\Delta P/\Delta \delta$ (GPa/mm)	P_{mpl} (MPa)
TST-MPL-27	2.16	8.87	42.0	1.70	535
TST-MPL-28	3.19	7.18	29.0	1.64	369
TST-MPL-29	2.31	5.16	20.0	1.28	255
TST-MPL-30	2.60	6.41	38.0	2.80	484
TST-MPL-31	2.87	4.96	33.0	1.58	420
TST-MPL-32	2.64	3.68	23.0	1.70	293
TST-MPL-33	2.38	4.15	23.0	1.30	293
TST-MPL-34	2.71	8.24	14.0	2.60	364
TST-MPL-35	2.83	8.00	22.0	3.25	572
TST-MPL-36	2.42	10.13	18.0	3.25	468
TST-MPL-37	2.54	7.15	9.0	2.17	234
TST-MPL-38	2.10	7.55	15.0	5.20	390
TST-MPL-39	2.93	5.08	11.0	2.60	286
TST-MPL-40	2.73	4.10	10.0	3.47	260
TST-MPL-41	2.34	6.28	8.0	2.60	208
TST-MPL-42	2.59	4.33	13.0	2.60	338
TST-MPL-43	2.65	5.46	22.0	4.35	280
TST-MPL-44	2.55	8.29	26.0	2.22	147
TST-MPL-45	2.54	3.68	24.0	3.15	306
TST-MPL-46	2.93	6.95	37.0	2.22	210
TST-MPL-47	2.47	2.97	18.0	1.28	102
TST-MPL-48	3.10	6.11	30.0	2.37	170
TST-MPL-49	2.25	3.37	16.0	3.71	416
TST-MPL-50	2.59	4.10	12.0	3.94	312

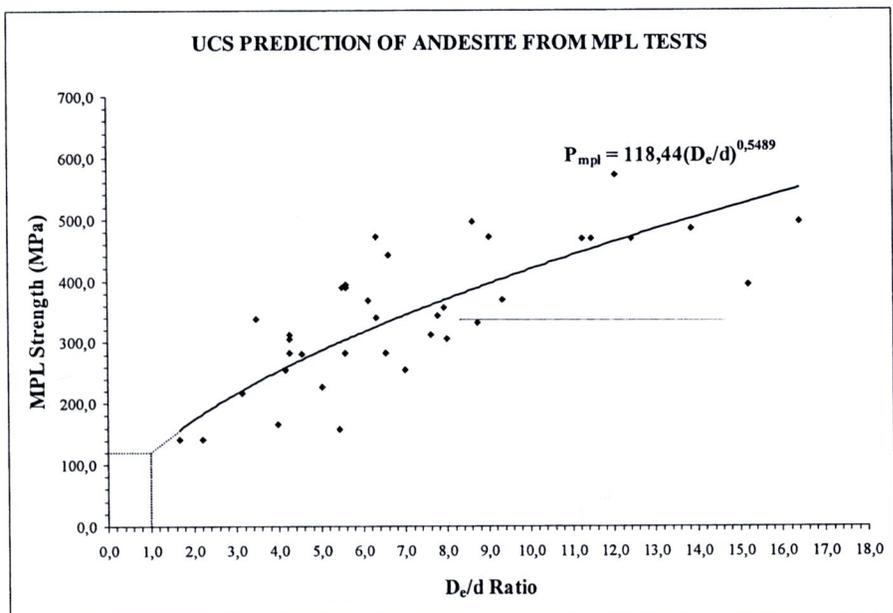
ตารางที่ 4.19 ผลการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนของตัวอย่างหิน Pebbly Tuffaceous Sandstone

Specimen Number	t/d	De/d	Failure Load, p_f (kN)	$\Delta P/\Delta \delta$ (GPa/mm)	P_{mpl} (MPa)
SST-MPL-01	3.00	7.82	17.0	2.80	442
SST-MPL-02	2.50	4.80	22.0	3.07	572
SST-MPL-03	3.14	4.24	34.0	3.56	433
SST-MPL-04	2.92	8.09	22.0	4.50	572
SST-MPL-05	2.75	11.42	30.0	5.32	780
SST-MPL-06	3.08	4.90	19.0	2.73	494
SST-MPL-07	3.17	6.11	28.0	4.18	728
SST-MPL-08	2.33	6.84	24.0	4.14	624
SST-MPL-09	2.55	4.80	23.0	3.71	598
SST-MPL-10	2.17	7.72	12.0	9.58	312
SST-MPL-11	3.12	9.03	27.0	4.00	702
SST-MPL-12	2.55	10.94	15.0	2.72	390
SST-MPL-13	2.86	7.42	40.0	4.08	510
SST-MPL-14	2.48	6.15	35.0	2.96	198
SST-MPL-15	2.53	8.05	21.0	2.82	546
SST-MPL-16	2.43	10.94	15.0	2.60	390
SST-MPL-17	2.34	10.90	25.0	4.16	650
SST-MPL-18	2.53	13.71	24.0	4.73	624
SST-MPL-19	3.27	4.34	32.0	3.30	408
SST-MPL-20	2.70	3.10	39.0	2.78	497
SST-MPL-21	2.69	6.91	41.0	1.85	522
SST-MPL-22	3.12	5.04	38.0	1.82	484
SST-MPL-23	3.19	6.27	26.0	1.50	331
SST-MPL-24	2.81	6.89	33.0	2.95	420
SST-MPL-25	2.10	7.20	39.0	2.59	497
SST-MPL-26	3.03	7.75	37.0	2.21	471

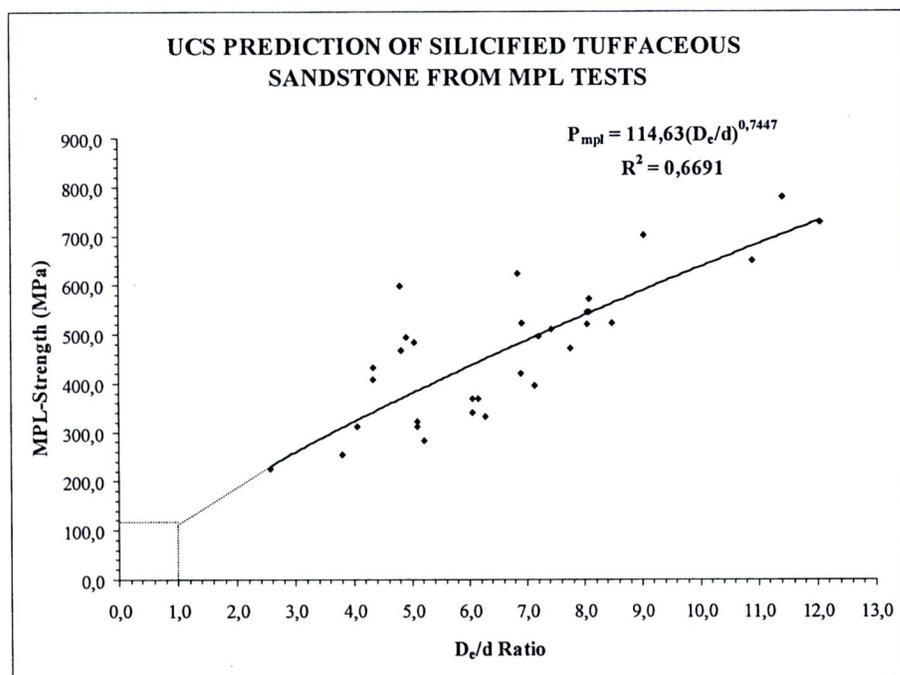
ตารางที่ 4.19 ผลการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนของตัวอย่างหิน Pebbly Tuffaceous Sandstone (ต่อ)

Specimen Number	t/d	De/d	Failure Load, p_f (kN)	$\Delta P/\Delta \delta$ (GPa/mm)	P_{mpl} (MPa)
SST-MPL-27	2.72	7.14	31.0	2.74	395
SST-MPL-28	2.92	8.55	60.0	2.09	764
SST-MPL-29	3.10	7.42	40.0	1.76	510
SST-MPL-30	2.84	8.47	41.0	1.58	522
SST-MPL-31	3.20	8.91	65.0	4.64	828
SST-MPL-32	2.61	2.56	40.0	1.78	226
SST-MPL-33	2.24	4.05	55.0	1.31	311
SST-MPL-34	2.31	3.79	45.0	2.15	255
SST-MPL-35	2.90	4.42	105.0	1.90	594
SST-MPL-36	2.41	5.21	50.0	1.02	283
SST-MPL-37	2.75	6.05	60.0	0.67	340
SST-MPL-38	2.63	6.16	65.0	1.27	368
SST-MPL-39	2.27	6.15	35.0	2.29	198
SST-MPL-40	2.36	5.08	55.0	0.90	311
SST-MPL-41	3.18	11.42	30.0	4.98	780
SST-MPL-42	3.03	8.09	21.0	3.92	546
SST-MPL-43	2.28	8.05	21.0	2.44	546
SST-MPL-44	2.83	11.42	30.0	5.71	780
SST-MPL-45	2.77	7.72	12.0	7.80	312
SST-MPL-46	2.88	12.06	28.0	4.11	728
SST-MPL-47	2.50	5.08	57.0	3.09	323
SST-MPL-48	2.75	4.42	105.0	3.38	594
SST-MPL-49	2.72	6.05	65.0	2.54	368
SST-MPL-50	2.60	8.05	20.0	3.60	520

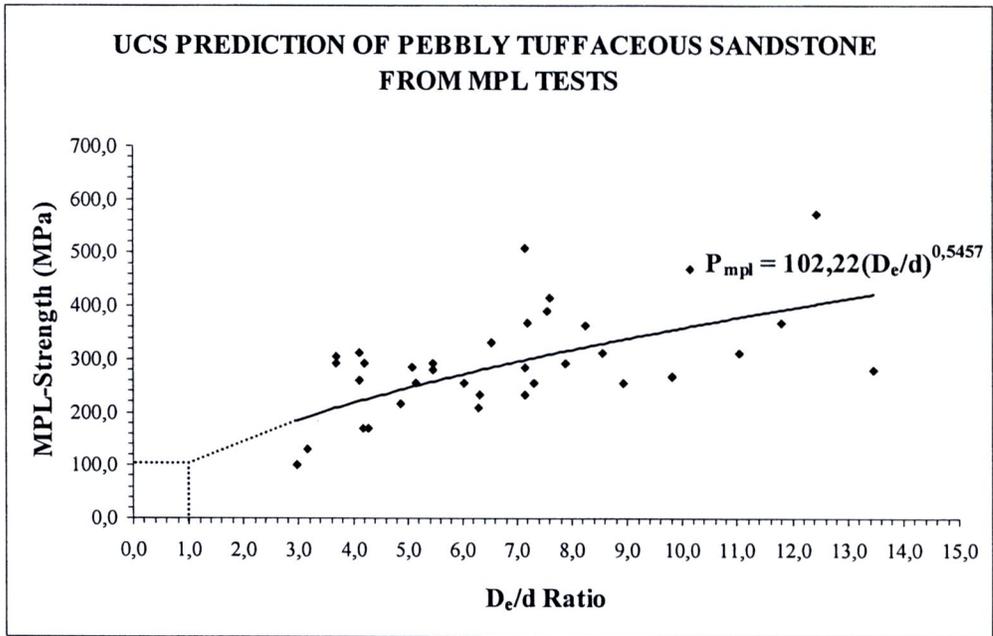
รูปที่ 4.19 ถึงรูปที่ 4.21 แสดงผลการทดสอบในรูปของแผนภูมิ โดยที่ค่า P_{mpl} ถูกนำเสนอในฟังก์ชันของอัตราส่วน D/d โดยมีค่าของอัตราส่วน t/d คงที่เท่ากับ 2.5 ผลที่ได้จากการทดสอบระบุว่าค่า P_{mpl} จะสูงขึ้นถ้าอัตราส่วน D/d มีค่าสูงขึ้น ผลที่ได้นี้จะถูกนำมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการศึกษาในบทต่อไป



รูปที่ 4.19 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดสูงสุดกับอัตราส่วนของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างหินต่อขนาดหัวกด สำหรับตัวอย่างหิน Andesite



รูปที่ 4.20 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดสูงสุดกับอัตราส่วนของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างหินต่อขนาดหัวกด สำหรับตัวอย่างหิน Silicified Tuffaceous Sandstone



รูปที่ 4.21 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดสูงสุดกับอัตราส่วนของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างหินต่อขนาดห้วงค สำหรับตัวอย่างหิน Pebbly Tuffaceous Sandstone