

บทที่ 4

การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของซีเมนต์

4.1 วัตถุประสงค์

เนื้อหาของบทนี้ได้อธิบายถึงขั้นตอน วิธีการ และข้อปฏิบัติของการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วย การทดสอบกำลังกดสูงสุดในแกนเดียว การตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น ค่าอัตราส่วนปัวซอง การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน และการวัดค่าความหนืดของตัวอย่างซีเมนต์ผสมน้ำเกลือ

4.2 การทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียว

การทดสอบแรงกดในแกนเดียว (Uniaxial compression test) มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความต้านแรงกดสูงสุดในแกนเดียวของแท่งตัวอย่าง การทดสอบได้ปฏิบัติตามข้อกำหนดมาตรฐานสากล ASTM D7012 และข้อแนะนำของ ISRM (Brown, 1981)

การทดสอบนี้ได้นำแท่งตัวอย่างหินมากดด้วยเครื่องกดตามแนวแกน โดยทุกตัวอย่างจะถูกกดด้วยอัตราเท่ากัน (Constant loading rate) ให้แตกภายในเวลา 5-10 นาที ด้วยเครื่อง SBEL PLT-75 ซึ่งมีความสามารถในการกดสูงสุด 75,000 ปอนด์ (รูปที่ 4.1)

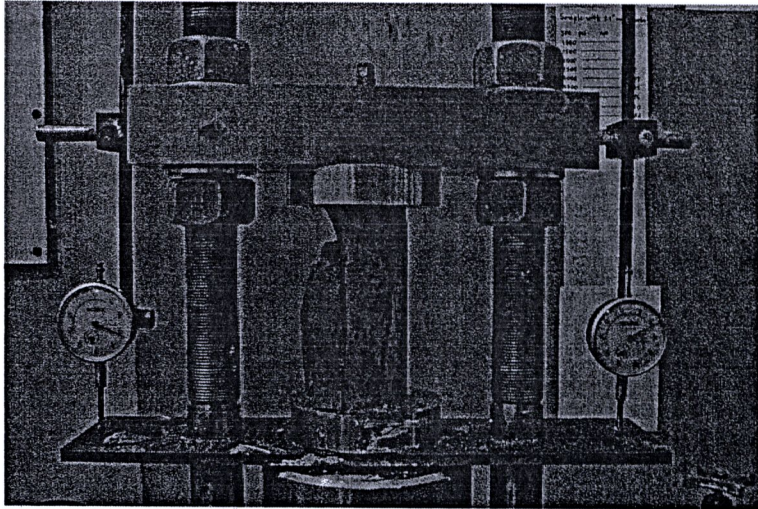
การทดสอบได้บันทึกค่าแรงกดและปริมาณการยุบตัวของแท่งตัวอย่างซีเมนต์ผสมน้ำเกลืออย่างต่อเนื่อง พร้อมทั้งสังเกตลักษณะการร้าวและการแตกของแท่งตัวอย่าง (รูปที่ 4.2) ผลที่ได้นำเสนอในรูปแบบภูมิระหว่งค่าความเค้นและความเครียดเพื่อหาความสัมพันธ์เชิงเส้น ซึ่งการคำนวณจะเป็นไปตามสมการที่ (4.1) และ (4.2)

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

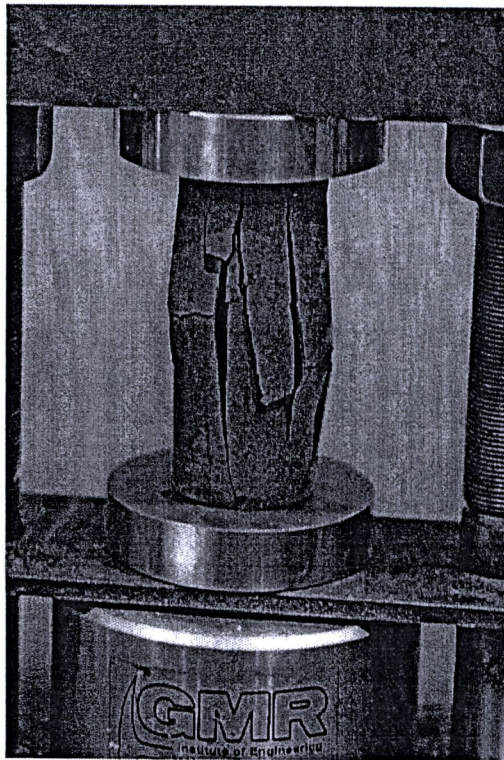
$$\epsilon_{\text{axial}} = \Delta L/L \quad (4.2)$$

โดยที่ σ_{axial} คือความเค้นในแนวแกน P คือแรงกดในแนวแกน A คือพื้นที่หน้าตัดของแท่งตัวอย่างหิน ϵ_{axial} คือความเครียดในแนวแกน ΔL คือการเปลี่ยนแปลงความยาวของแท่งตัวอย่างหินในขณะที่ให้แรงกดสูงขึ้น และ L คือความยาวทั้งหมดของแท่งตัวอย่างหินก่อนการกด ถ้าค่าแรงกดในแนวแกนสูงสุดที่จุดวิบัติเท่ากับ P_f ค่าความเค้นสูงสุดในแกนเดียว σ_c (Uniaxial compressive strength) จะคำนวณได้จาก

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



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างแท่งซีเมนต์ผสมน้ำเกลือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว และ $L/D = 2.5$ หลังจากทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียวและวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างแท่งซีเมนต์ผสมน้ำเกลือ อายุ 7 วัน หลังจากทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียว

ตารางที่ 4.1 สรุปผลการทดสอบแรงกดในแกนเดียวตามอายุของแท่งตัวอย่าง 1, 3, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่าเมื่ออายุของแท่งตัวอย่างมากขึ้นได้ส่งผลให้มีความแข็งแรงสูงสุดในแกนเดียวสูงขึ้นจาก 4.67, 12.83, 13.10, 14.63, 19.65 และ 24.02 MPa ตามลำดับ

4.3 การตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและค่าอัตราส่วนปัวซอง

ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (Young's modulus, E) สามารถคำนวณได้จาก

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

โดยที่ $\Delta\sigma_{\text{axial}}$ คือค่าความเค้นที่เปลี่ยนแปลงตามแนวแกน และ $\Delta\varepsilon_{\text{axial}}$ คือค่าความเครียดที่เปลี่ยนแปลงในแนวแกนที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของความเค้น โดยค่าทั้งสองจะวัดได้จากเส้นสัมผัสที่จุด 50% ของความเค้นกดสูงสุด

ค่าอัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's Ratio, ν) สามารถคำนวณได้จาก

$$\nu = \frac{-\varepsilon_{\text{lateral}}}{\varepsilon_{\text{axial}}} \quad (4.5)$$

โดยที่ $\varepsilon_{\text{lateral}} = \Delta D/D$ (ΔD คือเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างหินที่เปลี่ยนแปลง และ D คือเส้นผ่าศูนย์กลางเดิมของตัวอย่างหิน) $\varepsilon_{\text{lateral}}$ และ $\varepsilon_{\text{axial}}$ ได้จากการวัดที่จุด 50% ของค่าความเค้นสูงสุด ผลการทดสอบพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออายุของแท่งตัวอย่างมากขึ้น จาก 1, 3, 7, 14, 21 และ 28 วัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 0.17, 0.31, 0.35, 0.35, 0.42 และ 0.44 GPa ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

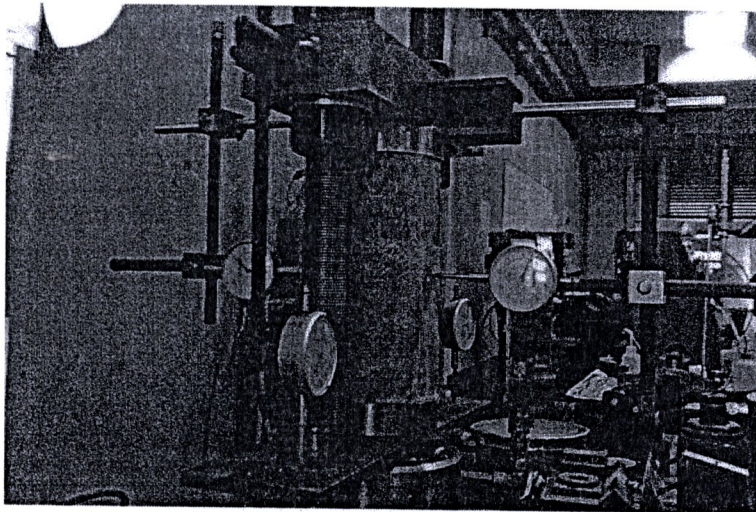
ตารางที่ 4.2 เป็นผลจากการตรวจวัดแท่งซีเมนต์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว ซึ่งได้ทำการตรวจวัดหาอัตราส่วนปัวซองของแท่งตัวอย่างอายุ 3 วัน รูปที่ 4.3 แสดงการติดตั้งตัวอย่างหินพร้อมมาตรวัดการเคลื่อนตัว (Dial Gages) ในแนวแกนและแนวตั้งฉากกับแกนของแรงกด

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียวของซีเมนต์ผสมน้ำเกลือตามมาตรฐาน
ASTM D7012

Cement Sample	Specimen Age (days)	Demeter (mm)	Length (mm)	L/D	Density (g/cc)	UCS (MPa)	Average (MPa)	Elastic Modulus (GPa)	Average (GPa)
SC-01-UCS-01	1	56.5	134.5	2.38	1.84	4.8	4.67	0.14	0.17
SC-01-UCS-02		56.5	135.0	2.39	1.84	4.4		0.17	
SC-01-UCS-03		56.5	135.0	2.39	1.84	4.8		0.19	
SC-03-UCS-04	3	56.5	134.5	2.38	1.87	13.6	12.83	0.33	0.31
SC-03-UCS-05		56.5	135.0	2.39	1.88	11.8		0.34	
SC-03-UCS-06		56.5	136.5	2.42	1.87	13.1		0.25	
SC-07-UCS-07	7	56.5	135.0	2.39	1.71	10.0	13.10	0.26	0.33
SC-07-UCS-08		56.5	135.0	2.39	1.86	14.4		0.43	
SC-07-UCS-09		56.5	135.0	2.39	1.86	14.9		0.30	
SC-14-UCS-10	14	56.5	136.3	2.41	1.86	16.4	14.63	0.44	0.35
SC-14-UCS-11		56.5	136.4	2.41	1.86	15.3		0.30	
SC-14-UCS-12		56.5	135.8	2.40	1.86	12.2		0.30	
SC-21-UCS-13	21	56.5	135.0	2.39	1.82	19.7	19.65	0.43	0.42
SC-21-UCS-14		56.5	135.5	2.40	1.82	17.5		0.46	
SC-21-UCS-15		56.5	136.0	2.41	1.82	21.8		0.38	
SC-28-UCS-16	28	56.5	137.0	2.42	1.86	21.8	24.02	0.42	0.44
SC-28-UCS-17		56.5	130.0	2.30	1.84	26.2		0.46	
SC-28-UCS-18		56.5	133.5	2.36	1.84	24.0		0.43	

ตารางที่ 4.2 ผลการตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและค่าอัตราส่วนปัวซองของตาม
มาตรฐาน ASTM D7012

Cement Sample	Specimen Age (days)	Demeter (mm)	Length (mm)	L/D	Density (g/cc)	Elastic Modulus (GPa)	Poisson's ratio
SC-03-UCSE-01	3	106.7	254.0	2.38	1.74	0.31	0.33
SC-03-UCSE-02		106.7	254.0	2.38	1.77	0.42	0.23
SC-03-UCSE-03		106.7	254.0	2.38	1.81	0.23	0.31
SC-03-UCSE-04		106.7	254.0	2.38	1.77	0.24	0.39
SC-03-UCSE-05		106.7	254.0	2.38	1.75	0.29	0.28



รูปที่ 4.3 การตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและค่าอัตราส่วนปัวซองของ
ด้วยการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทั้ง 2 แกน

4.4 การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน

การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนมีจุดประสงค์เพื่อหาแรงดึงสูงสุดของแท่งตัวอย่าง หิน วิธีการเตรียมได้ปฏิบัติตามมาตรฐานสากล ASTM D3967 และข้อแนะนำของ ISRM (Brown, 1981) วิธีการทดสอบได้ใช้เครื่องกดทดสอบรุ่น SBEL PLT-75 โดยทำการกดในแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง (รูปที่ 4.4) ด้วยอัตราการกดคงที่เท่ากับ 0.5 MPa/s และกดจนกระทั่งตัวอย่างซีเมนต์ผสมน้ำเกลือแตกและแยกออกจากกัน (รูปที่ 4.5) ค่าแรงกดสูงสุดที่ได้นำมาคำนวณเป็นค่าแรงดึงแบบบราซิลเลียน ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการ (ASTM D3967)

$$\sigma_B = 2 P_f / \pi DL \quad (3.5)$$

โดยที่ σ_B คือแรงดึงแบบบราซิลเลียน P_f คือแรงกดสูงสุดที่จุดวิบัติ D คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตัวอย่างหิน และ L คือความหนาของตัวอย่างหิน ตารางที่ 4.3 สรุปผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนตามอายุของแท่งตัวอย่าง 1, 3, 7, 14, 21 และ 28 วัน โดยให้ผลการทดสอบคือ 2.17, 2.26, 2.17, 1.78, 2.36 และ 2.06 MPa ตามลำดับ รูปที่ 4.6 แสดงตัวอย่างการแตกของซีเมนต์ผสมน้ำเกลืออายุ 1 วัน ทั้ง 5 ตัวอย่าง

4.5 การวัดค่าความหนืดของซีเมนต์ผสมน้ำเกลือ

การทดสอบความหนืดมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าความหนืด (Viscosity) และค่าความหนาแน่น (slurry density) ของส่วนผสมซีเมนต์และน้ำเกลืออิมิตัว การทดสอบความหนืดได้ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D2196 โดยมีขั้นตอนดังนี้

1) เทส่วนผสมซีเมนต์ลงในถ้วยตวงปริมาตร 500 cm³ บันทึกค่าอุณหภูมิและชั่งน้ำหนักของส่วนผสมเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าความหนาแน่นและค่าความถ่วงจำเพาะ

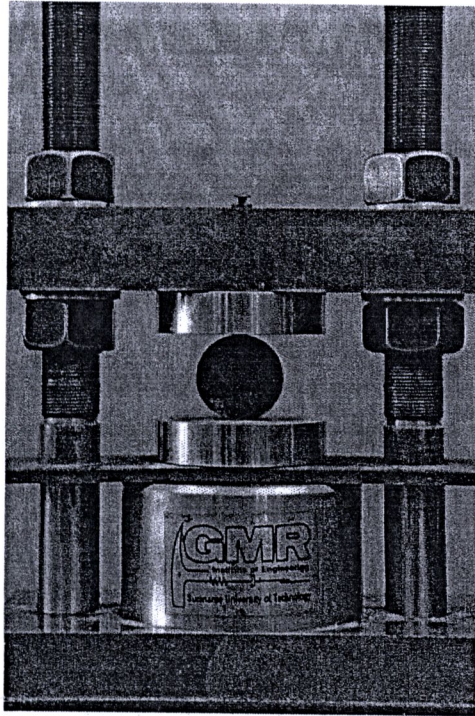
2) ปรับเข็มทดสอบ RV1 ถึง RV7 ให้เหมาะสมกับความหนืด แล้วติดตั้งเข็มทดสอบกับเครื่องทดสอบความหนืด แล้ววางถ้วยส่วนผสมใต้เครื่องทดสอบ (รูปที่ 4.7)

3) ปรับระยะเข็มทดสอบลงในส่วนผสม โดยให้ก้านปรับระดับสัมผัสกับก้นถ้วยส่วนผสมพอดี แล้วเปิดสวิตช์เครื่องทดสอบ โดยเริ่มที่ความเร็วรอบต่ำ รอบประมาณ 60 วินาที เพื่อให้เข็มหมุนได้อย่างคงที่ จากนั้นทำการบันทึกหมายเลขเข็มทดสอบและค่าความเร็วรอบในหน่วย rpm

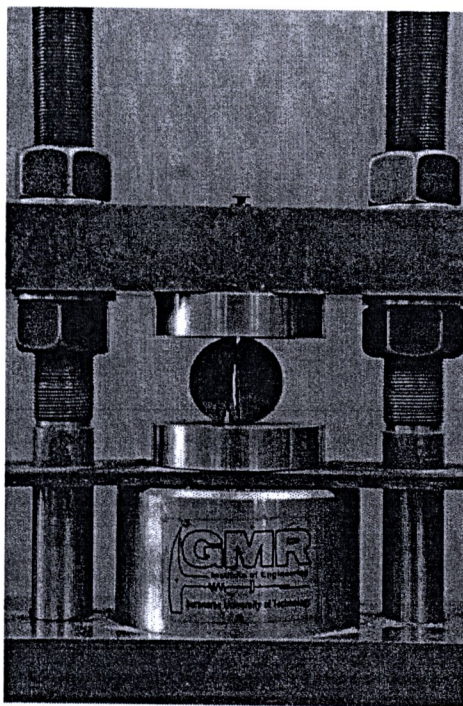
4) ทดสอบซ้ำด้วยความเร็วรอบเท่าเดิมประมาณ 3-5 ค่า เพื่อหาค่าเฉลี่ยความหนืด พร้อมทั้งสังเกตลักษณะความหนืดของตัวอย่างซีเมนต์ที่ผสม

5) คำนวณค่าความหนืดในหน่วย centipoises (MPa·s) จากค่าความเร็วรอบคูณกับตัวคูณของเข็มทดสอบที่ใช้

ผลที่ได้จากการทดสอบ 5 ตัวอย่างได้แสดงไว้ดังตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การทดสอบแรงดิ่งแบบบราซิลเลียนกับตัวอย่างแท่งซีเมนต์ผสมน้ำเกลืออายุ 1 วัน
ที่ถูกกดในแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างแท่งซีเมนต์ผสมน้ำเกลืออายุ 1 วัน ถูกกดในแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง
จนกระทั่งแตกตามแนวแกน

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนของซีเมนต์ผสมน้ำเกลือตามมาตรฐาน
ASTM 3967

Cement Sample	Specimen Age (days)	Demeter (mm)	Length (mm)	L/D	Density (g/cc)	Brazilian Tensile Strength (MPa)	Average (MPa)
SC-01-BZ-01	1	56.50	28.00	0.50	1.83	2.01	2.17
SC-01-BZ-02		56.50	28.00	0.50	1.74	2.42	
SC-01-BZ-03		56.50	27.50	0.49	1.89	2.01	
SC-01-BZ-04		56.50	28.00	0.50	1.85	2.01	
SC-01-BZ-05		56.50	28.00	0.50	1.80	2.42	
SC-03-BZ-06	3	56.50	28.00	0.50	1.86	2.01	2.26
SC-03-BZ-07		56.50	28.00	0.50	1.83	2.21	
SC-03-BZ-08		56.50	27.50	0.49	1.93	2.46	
SC-03-BZ-09		56.50	27.50	0.49	1.89	2.26	
SC-03-BZ-10		56.50	27.70	0.49	1.90	2.38	
SC-07-BZ-11	7	56.50	28.00	0.50	1.72	2.01	2.17
SC-07-BZ-12		56.50	28.00	0.50	1.70	2.42	
SC-07-BZ-13		56.50	28.00	0.50	1.70	2.01	
SC-07-BZ-14		56.50	28.00	0.50	1.73	2.01	
SC-07-BZ-15		56.50	28.00	0.50	1.73	2.42	
SC-14-BZ-16	14	56.50	26.30	0.47	1.95	1.72	1.78
SC-14-BZ-17		56.50	27.30	0.48	1.87	1.86	
SC-14-BZ-18		56.50	25.40	0.45	1.90	1.55	
SC-14-BZ-19		56.50	25.40	0.45	1.89	2.00	
SC-14-BZ-20		56.50	25.70	0.45	1.76	1.76	

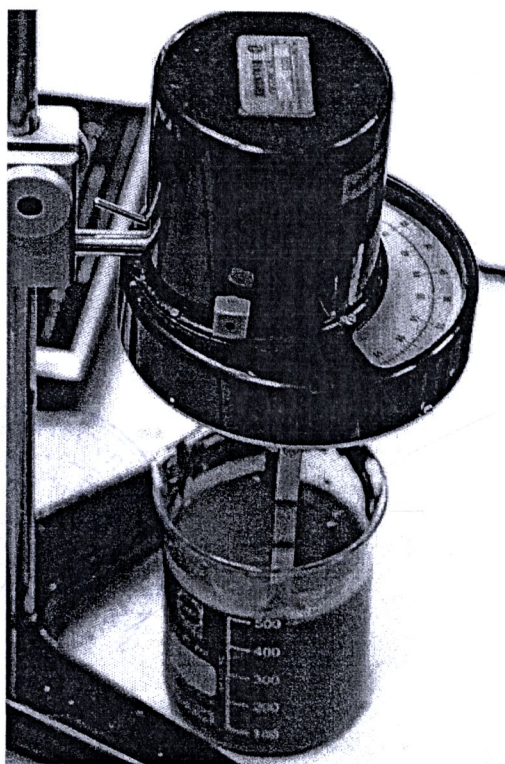
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนของซีเมนต์ผสมน้ำเกลือตามมาตรฐาน
ASTM 3967 (ต่อ)

Cement Sample	Specimen Age (days)	Demeter (mm)	Length (mm)	L/D	Density (g/cc)	Brazilian Tensile Strength (MPa)	Average (MPa)
SC-21-BZ-21	21	56.50	29.00	0.51	1.89	1.94	2.36
SC-21-BZ-22		56.50	28.00	0.50	2.06	2.42	
SC-21-BZ-23		56.50	30.00	0.53	1.64	2.63	
SC-21-BZ-24		56.50	28.00	0.50	1.99	2.01	
SC-21-BZ-25		56.50	28.00	0.50	1.83	2.82	
SC-21-BZ-26	28	56.50	28.00	0.50	1.71	2.21	2.06
SC-21-BZ-27		56.50	27.50	0.49	1.65	2.05	
SC-21-BZ-28		56.50	28.50	0.50	1.75	1.98	
SC-21-BZ-29		56.50	28.50	0.50	1.80	2.18	
SC-21-BZ-30		56.50	27.00	0.48	1.63	1.88	





รูปที่ 4.6 ตัวอย่างแท่งซีเมนต์ผสมน้ำเกลืออายุ 1 วัน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว และ $L/D = 0.5$ หลังจากถูกทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน



รูปที่ 4.7 เครื่องทดสอบความหนืด Brookfield® viscometer model RV

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบความหนืด ASTM D2196

Sample No.	Temperature (°C)		Cement Slurry	Dynamic Viscosity	Kinematic Viscosity
	Room	Slurry			
SC-01	31.0	28.0	17,580	1.65	0.73
SC-02	30.1	28.0	17,610	1.60	0.72
SC-03	30.4	27.4	17,580	1.82	0.82
SC-04	29.5	27.5	17,580	1.71	0.78
SC-05	30.2	27.8	17,580	1.81	0.80
Average				1.72	0.77

