

บทที่ 3

การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

3.1 บทนำ

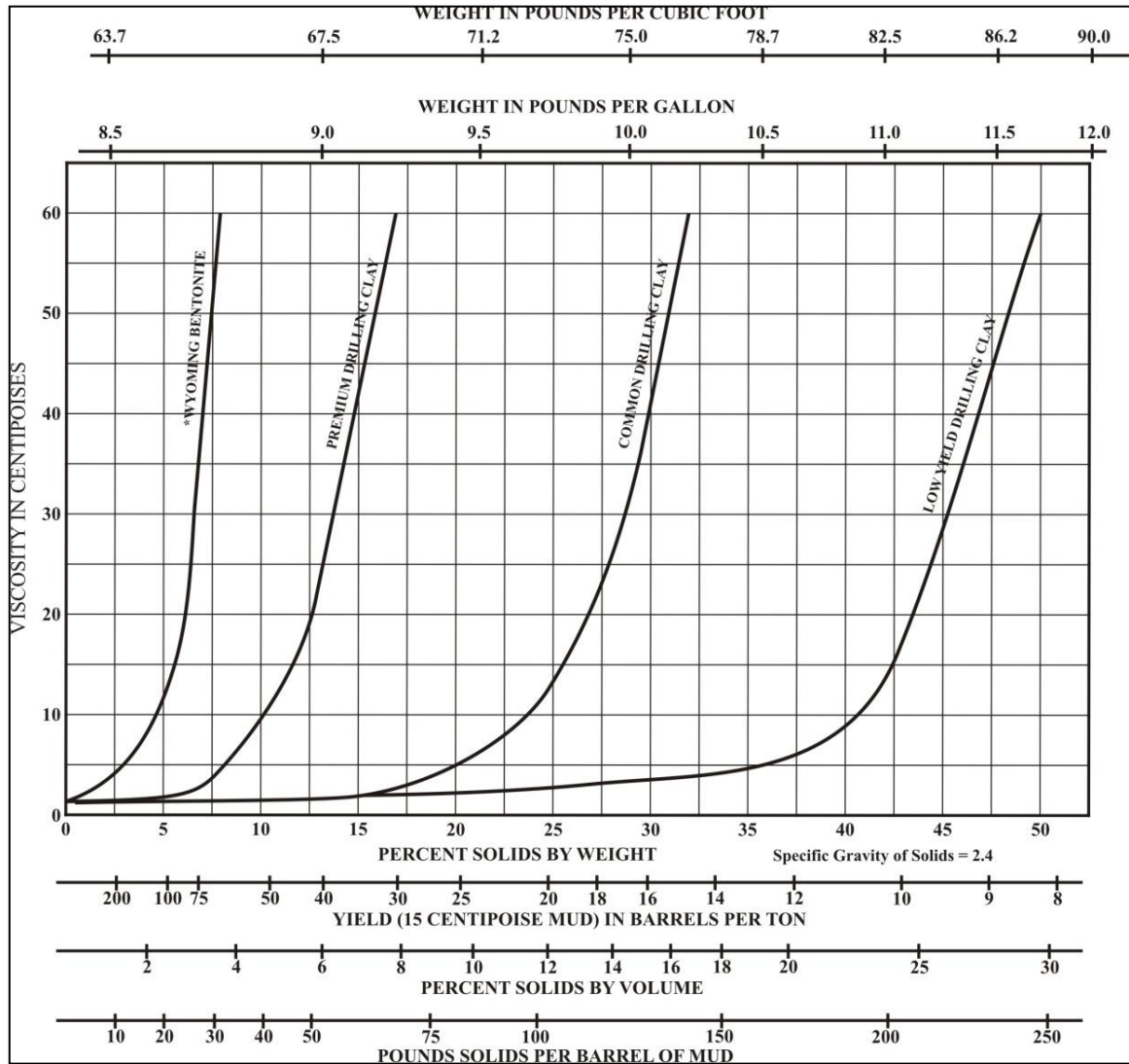
จุดประสงค์ของการทดสอบในห้องปฏิบัติการในงานวิจัยนี้คือการทดสอบอิทธิพลของความเข้มข้นน้ำยางพาราธรรมชาติและอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติด้านวิทยากระแสและคุณสมบัติป้องกันการซึมผ่านของตัวอย่างน้ำโคลนเบนโทไนต์ รายละเอียดในบทนี้ประกอบไปด้วย ส่วนของ การเตรียมตัวอย่างน้ำโคลนสำหรับการทดลอง เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และวิธีการทดลอง โดยในส่วนของ การทดสอบได้ถูกแบ่งออกเป็นสามส่วนคือ การทดสอบคุณสมบัติด้านวิทยากระแส คุณสมบัติการซึมผ่านและการทดสอบความเป็นกรด-ด่างของน้ำโคลนตัวอย่าง

3.2 การเตรียมตัวอย่างน้ำโคลน

ส่วนประกอบของน้ำโคลนตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยแร่เบนโทไนต์ที่ได้มาจากบริษัท MI-Swaco ประเทศอินโดนีเซีย แร่แบไรท์ที่ได้มาจากบริษัท Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย และน้ำยางพาราชั้นธรรมชาติร้อยละ 60 ได้มาจากบริษัท Thaihua rubber จังหวัดสกลนคร ประเทศไทย

โดยทั่วไปแล้วช่วงของความเข้มข้นเบนโทไนต์ในโคลนเจาะที่ใช้กันทั่วไปจะอยู่ในช่วงร้อยละ 1.5 ถึง 8.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยจะให้น้ำหนักของน้ำโคลนอยู่ในช่วง 8.85 ถึง 18 ปอนด์ต่อแกลลอน ขึ้นอยู่กับคุณภาพของเบนโทไนต์และชั้นหินที่ทำการเจาะผ่าน (MI-Swaco, 1998) รูปที่ 3.1 แสดงส่วนประกอบและคุณลักษณะโดยทั่วไปของน้ำโคลนเจาะ และจากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเบนโทไนต์เพิ่มขึ้น

เนื่องจากคุณภาพของแร่เบนโทไนต์ที่ใช้ในการทดลองไม่ใช่ Wyoming grade ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของอัตราส่วนของความเข้มข้นเบนโทไนต์ที่ใช้ที่ทำให้ความหนืดที่เหมาะสมสำหรับเจาะหลุมทั่วไป ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนของเบนโทไนต์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 4 6 และ 8 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จากตารางแสดงให้เห็นว่าเบนโทไนต์ที่อัตราส่วนความเข้มข้นร้อยละ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ให้ค่าความหนืดขั้นต่ำของน้ำโคลนที่เหมาะสมสำหรับการเจาะหลุมทั่วไป ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกทดสอบน้ำโคลนที่มีอัตราส่วนความเข้มข้นของเบนโทไนต์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยใช้เป็นส่วนผสมหลักในการทดลอง



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบและคุณลักษณะโดยทั่วไปของน้ำโคลนเจาะ (คัดลอกและดัดแปลงจาก Gatlin, 1960)

ตารางที่ 3.1 ความหนืดของเบนโทไนด์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

ร้อยละความเข้มข้นเบนโทไนด์ (โดยน้ำหนักต่อปริมาตร)	ความหนืดปรากฏ (Apparent viscosity) (cP)
2	0.5
4	3
6	11
8	33

น้ำโคลนเบนโทไนต์ถูกเตรียมโดยผสมเบนโทไนต์ 30 กรัมในน้ำจืดปริมาตร 500 มิลลิลิตร และเติมแร่แบไรต์อีก 60 กรัมเพื่อใช้ควบคุมน้ำหนักของน้ำโคลน ค่อย ๆ ผสมและทำการตีส่วนผสมดังกล่าวเป็นเวลา 15 นาทีโดยใช้เครื่องผสม Hamilton Beach ในระหว่างการตีน้ำโคลนค่อย ๆ ผสมน้ำยางพาราธรรมชาติอย่างช้า ๆ ลงในน้ำโคลนเพื่อป้องกันการเกิดการจับตัวเป็นก้อนของน้ำโคลน ตัวอย่างน้ำโคลนที่ได้จะมีความหนาแน่นประมาณ 1.12 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (9.34 ปอนด์ต่อแกลลอน) ซึ่งมีอัตราส่วนความเข้มข้นของเบนโทไนต์อยู่ที่ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นส่วนผสมหลัก น้ำหนักของน้ำโคลนตัวอย่างถูกทำการวัดโดยใช้เครื่องมือตรวจวัดตามมาตรฐานของ API คือ Mud balance ดังรูปที่ 3.2 น้ำยางพาราธรรมชาติที่ถูกเติมลงไปจะถูกใช้เป็นสารเติมแต่งในน้ำโคลนและถูกนำมาเปรียบเทียบกับคุณสมบัติกับน้ำโคลนที่ไม่ได้มีส่วนผสมของน้ำยางพาราธรรมชาติ โดยอัตราส่วนของส่วนประกอบต่าง ๆ ในน้ำโคลนตัวอย่างได้ถูกผสมดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.2 API Mud balance ที่ใช้วัดความหนาแน่นของน้ำโคลนตัวอย่าง

ตารางที่ 3.2 ส่วนประกอบของน้ำโคลนที่ใช้ในการทดลอง

ส่วนประกอบ	โคลนเบนโทไนต์	โคลนเบนโทไนต์ + NRL 1%	โคลนเบนโทไนต์ + NRL 3%	โคลนเบนโทไนต์ + NRL 5%
น้ำ (มล.)	500	500	500	500
เบนโทไนต์ (กรัม)	30	30	30	30
แบไรต์ (กรัม)	60	60	60	60
น้ำยางธรรมชาติ (NRL) (มล.)	-	5	15	25

3.3 การทดสอบคุณสมบัติวิทยากระแส

จุดประสงค์ของการทดสอบคุณสมบัติด้านวิทยากระแสก็เพื่อวัดค่าความหนืด (Viscosity) และค่าความแข็งแรงของเจล (Gel strength) ซึ่งมีผลต่อการไหลของน้ำโคลนเจาะ โดยใช้อธิบายการต้านทานการไหลและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของของไหล คุณสมบัติด้านวิทยากระแสจะมีความสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของน้ำโคลนจากกันหลุมเจาะและการนำเศษหินจากกันหลุมเจาะขึ้นมาสู่ผิวดิน รวมถึงการแขวนลอยเศษหินเมื่อในช่วงการหยุดเจาะ ตัวแปรด้านวิทยากระแสของน้ำโคลนในงานวิจัยนี้จะถูกทำการวัดและคำนวณในส่วนต่อไป

การทดสอบคุณสมบัติทางด้านวิทยากระแสในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบโดยใช้เครื่องวัดความหนืด Fann Viscometer รุ่น 35SA (รูปที่ 3.3) ซึ่งมีความเร็วรอบ จำนวน 6 ความเร็วรอบ (600, 300, 200, 100, 6 และ 3 รอบต่อนาที (rpm)) เป็นชนิดแกนทรงกระบอกหมุน ค่าความหนืดที่อ่านได้จะสัมพันธ์กับความเร็วนวน (Rotational speed) ในการศึกษาได้ทำการทดสอบตามข้อปฏิบัติตามมาตรฐานของ API RP 13B, “Recommended Practice Standard Procedure for Field Testing Water-Based Drilling Fluids” ซึ่งเป็นหลักปฏิบัติในการทดสอบน้ำโคลนที่ใช้น้ำเป็นส่วนผสม (API Recommended Practice, 1985)



รูปที่ 3.3 เครื่องวัดความหนืด Fann Viscometer รุ่น 35SA

3.3.1 ตัวแปรด้านวิทยากระแส

เพื่อให้เกิดความเข้าใจในการคำนวณเกี่ยวกับคุณสมบัติด้านวิทยากระแส ในส่วนนี้จึงนำเสนอรายละเอียดเกี่ยวกับคุณสมบัติพื้นฐานของน้ำโคลนเจาะที่เกี่ยวข้องกับการไหลและการคำนวณเกี่ยวกับคุณสมบัติด้านวิทยากระแสซึ่งใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลของของไหล

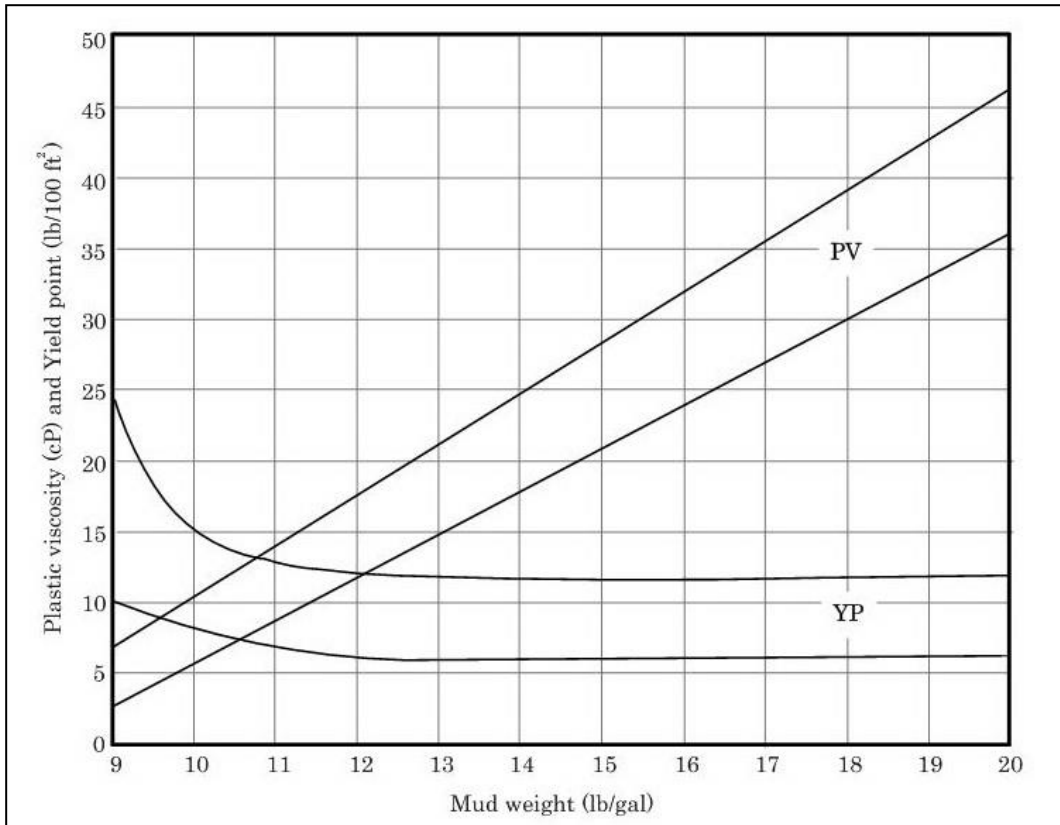
ความหนืดปรากฏ (Apparent viscosity) เป็นค่าความหนืดที่วัดจากการอ่านค่าจากเครื่องวัดความหนืดที่อัตราแรงเฉือนของน้ำโคลนตามมาตรฐาน API โดยความหนืดมีหน่วยเป็นเซนติพอยส์ (cP) ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการต้านทานการไหลของของไหล เมื่อมีแรงมากระทำ โดยค่าความหนืดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.3

ความหนืดพลาสติก (Plastic viscosity) คือ การวัดค่าความหนืดของของไหลเมื่อให้แรงกระทำเกินจุดคราก (Yield point) ไปแล้ว ปัจจัยที่ผลต่อค่าความหนืดพลาสติกคือแรงเสียดทานเชิงกล (Mechanical friction) ที่เกิดขึ้นอันได้แก่ (1) แรงเสียดทานระหว่างของแข็งในน้ำโคลน (2) แรงเสียดทานระหว่างของแข็งและของเหลวในน้ำโคลน และ (3) แรงเสียดทานระหว่างของเหลวด้วยกันเอง จะเห็นได้ว่าค่าความหนืดพลาสติกนั้นจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของของแข็งที่แขวนลอยในน้ำโคลน ความหนืดพลาสติกสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.4 และช่วงของค่าความหนืดพลาสติกที่เหมาะสมในการขุดเจาะแสดงอยู่ในรูปที่ 3.4

จุดคราก (Yield point) เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่แสดงถึงการต้านทานการไหลของของไหลของน้ำโคลน เป็นการวัดค่าแรงดึงดูดระหว่างมวลที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าเคมี (Electro-chemical attractive forces) ของของไหลภายใต้สภาวะการไหล แรงดังกล่าวเป็นผลให้เกิดประจุลบเคลื่อนที่มาบริเวณพื้นผิวของอนุภาค โดยขึ้นอยู่กับ (1) คุณสมบัติพื้นผิวของของแข็งในน้ำโคลน (2) ปริมาณความเข้มข้นของของแข็ง และ (3) สภาพแวดล้อมที่เป็นกระแสไฟฟ้าเคมีของไอออนที่ปรากฏ ซึ่งค่าจุดครากอาจควบคุมได้โดยใช้สารเคมีเติมแต่ง (Chemical additives) การควบคุมค่าจุดครากก็เพื่อรักษาค่าความหนืดของน้ำโคลนให้เหมาะสมสำหรับการเจาะนั่นเอง ค่าจุดครากสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.5 และช่วงของค่าจุดครากที่เหมาะสมในการขุดเจาะแสดงอยู่ในรูปที่ 3.4

ความแข็งแรงของเจล (Gel strength) คือการวัดคุณสมบัติโซโทรปิก (Thixotropic) ของน้ำโคลนภายใต้สภาวะสถิต (Static condition) ซึ่งจะคล้ายคลึงกับจุดคราก โดยค่าความแข็งแรงของเจลจะเป็นการวัดค่าแรงดึงดูดระหว่างมวลที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าเคมีระหว่างอนุภาคของแข็ง ค่าจุดครากและความแข็งแรงของเจลเป็นผลมาจากการจับตัวกันของอนุภาค (Flocculation) ของของไหลที่มีคุณสมบัติโซโทรปิก ค่าความแข็งแรงของเจลวัดได้โดยเครื่องวัดความหนืดที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที น้ำโคลนตัวอย่างจะถูกตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 10 วินาที และ 10 นาทีซึ่งจะถูกเรียกว่าค่าความแข็งแรงของเจลเริ่มต้น (Initial gel strength) และค่าความแข็งแรงของเจลที่เวลา 10 นาที (10 Minutes

gel strength) ตามลำดับ โดยอ่านค่าสูงสุดที่วัดได้ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที ค่าความแข็งแรงของเจล มีหน่วยเป็น $\text{lb}/100 \text{ ft}^2$



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงค่าความหนืดพลาสติก (Plastic viscosity) และค่าจุดคราก (Yield point) ของน้ำโคลนชนิดที่มีน้ำเป็นส่วนผสมหลัก (Water-base mud) (ดัดแปลงจาก MI-Swaco, 1998)

3.3.2 การหาค่าตัวแปรของน้ำโคลนเจาะ

ค่าตัวแปรของน้ำโคลนเจาะสามารถอธิบายโดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือน (Shear stress, τ) และอัตราแรงเฉือน (Shear rate, γ) โดยทำการคำนวณจากค่าที่ทำการวัดได้จากเครื่องวัดความหนืด โดยสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\tau = 0.01066 \times \phi_i \times N \quad (3.1)$$

$$\gamma = 1.703 \times \text{RPM} \quad (3.2)$$

เมื่อ

- τ = แรงเฉือน (Shear stress) ; lb/ft^2
- γ = อัตราแรงเฉือน (Shear rate) ; sec^{-1}
- ϕ_i = ค่าที่อ่านได้ที่เครื่องวัดความหนืดที่รอบความเร็วที่สังเกต
(Viscometer dial reading)

N = ค่าคงที่สปริงของเครื่องวัดความหนืด

RPM = ความเร็วรอบ (Rotational speed)

ค่าความหนืดปรากฏ (Apparent viscosity) ความหนืดพลาสติก (Plastic viscosity) และจุดคราก (Yield point) ถูกคำนวณจากค่าที่อ่านจากเครื่องวัดความหนืดที่ความเร็วรอบ 300 และ 600 รอบต่อนาที โดยใช้สมการจาก API recommended practice of standard procedure for field testing drilling fluid (API Recommended Practice, 1985) ดังนี้

$$\mu_a = \phi_{600} / 2 \quad (3.3)$$

$$\mu_p = \phi_{600} - \phi_{300} \quad (3.4)$$

$$\gamma_p = \phi_{300} - \mu_p \quad (3.5)$$

เมื่อ

μ_a = ค่าความหนืดปรากฏ (Apparent viscosity) ; cP

μ_p = ความหนืดพลาสติก (Plastic viscosity) ; cP

γ_p = จุดคราก (Yield point) ; lb/100 ft²

ค่าตัวแปรจากแบบจำลองพาวเวอร์ลอว์ (Power Law model) คือ ดัชนีพฤติกรรมการไหล (Flow behavior index, n) และดัชนีระดับความเข้มข้นของของไหล (Fluid consistency index, k) คำนวณจากค่าที่อ่านจาก Viscometer เช่นกัน ตามสมการ

$$n = 3.322 \log(\phi_{600} / \phi_{300}) \quad (3.6)$$

$$k = 510 \phi_{300} / 511^n \quad (3.7)$$

เมื่อ

n = ดัชนีพฤติกรรมการไหล (Flow behavior index)

k = ดัชนีระดับความเข้มข้นของของไหล (Fluid consistency index)

ϕ_{600} = ค่าที่อ่านได้ที่เครื่องวัดความหนืดที่ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที

ϕ_{300} = ค่าที่อ่านได้ที่เครื่องวัดความหนืดที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที

3.4 การทดสอบคุณสมบัติการซึมผ่าน

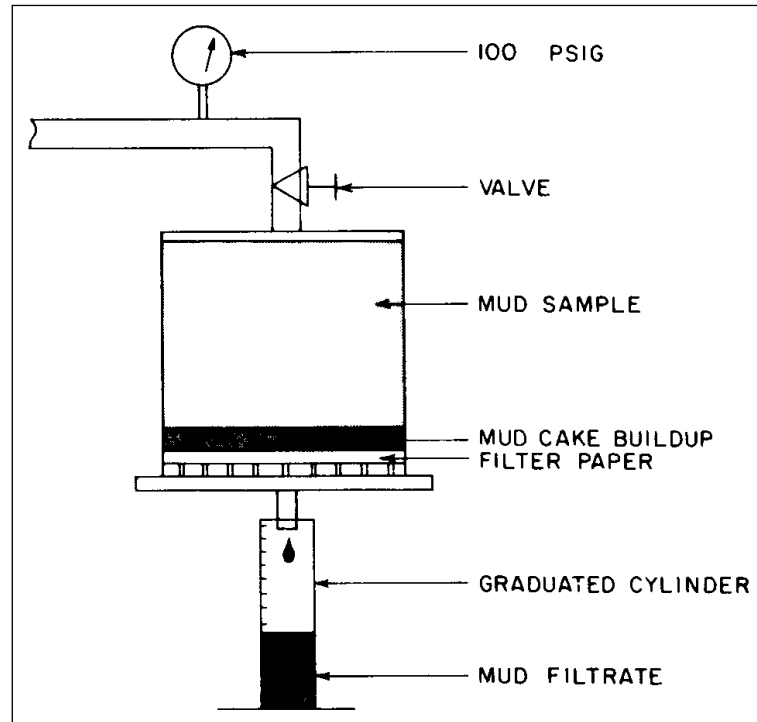
จุดประสงค์ของการทดสอบคุณสมบัติการซึมผ่าน (Filtration tests) ก็เพื่อจำลองการซึมผ่านของของไหลของน้ำโคลน และเพื่อวัดการสูญเสียในน้ำโคลนไปสู่ชั้นหินที่มีความซึมผ่านสูง

ภายใต้สภาพของความดันภายในหลุมเจาะ (Hydrostatic pressure) ที่มีค่ามากกว่าความดันจากชั้นหินใต้ดินที่ทำการเจาะผ่าน การซึมผ่านของของไหลแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ 1) เมื่อน้ำโคลนเจาะไม่มีการหมุนเวียน (Static filtration) และไม่มีการรบกวนการเกิดขึ้นผนังโคลนที่มีความซึมผ่านต่ำ (mudcake) และ 2) เมื่อมีการหมุนเวียนน้ำโคลนเจาะ (Dynamic filtration) และการเกิดขึ้นผนังโคลนถูกรบกวนเนื่องจากการไหลของน้ำโคลน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบแบบกรณีน้ำโคลนเจาะไม่มีการหมุนเวียน (Static filtration) เพื่อวัดคุณสมบัติการซึมผ่านของน้ำในน้ำโคลนเจาะตัวอย่างตามมาตรฐานของ API โดยใช้เครื่องมือการทดสอบคุณสมบัติการซึมผ่านตามมาตรฐานของ API

โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติการซึมผ่านโดยเครื่อง Baroid standard filter press rig laboratory รุ่น 821 (รูปที่ 3.5) โดยทำการวัด (1) ปริมาณการสูญเสียในน้ำโคลนผ่านกระดาษกรอง (Filtrate loss volume, มิลลิลิตร) และ (2) ความหนาของชั้นผนังโคลน (Mudcake thickness, มิลลิเมตร) ภายใต้สภาวะสถิต เครื่องมือที่ใช้ทดสอบประกอบไปด้วยถ้วยใส่ของไหล (Fluid cup) ที่ถูกยึดโดยที่ยึดจับ กระดาษกรองและเครื่องมือกระบอกอัดความดันด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2 Cartridge pressurization) และหลอดแก้ว (Graduated cylinder) สำหรับรองรับน้ำที่ซึมผ่าน (Filtrate) ที่ผ่านกระดาษกรอง ในการทดสอบได้ทำการอัดก๊าซที่สุกระบอกที่ความดัน 100 psig เป็นเวลา 30 นาที ทำการบันทึกค่าปริมาณน้ำที่ซึมผ่านในหน่วยมิลลิลิตร และความหนาของชั้นผนังโคลนในหน่วยมิลลิเมตร รูปที่ 3.6 แสดงแผนภาพของชุดทดสอบการซึมผ่านตามมาตรฐานของ API (API filter press) โดยการทดสอบได้ปฏิบัติตามมาตรฐาน API (API Recommended Practice, 1985)



รูปที่ 3.5 ชุดทดสอบคุณสมบัติการซึมผ่าน Baroid standard filter press



รูปที่ 3.6 แผนภาพชุดทดสอบคุณสมบัติการซึมผ่านตามมาตรฐาน API
(API filter press)

3.5 การทดสอบความเป็นกรด-ด่าง

การทดสอบความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของโคลนเจาะตัวอย่างกระทำโดยเครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง แบบ Glass electrode pH meter Metrohm 713 (รูปที่ 3.7) โดยหลักการวัดคือการวัดค่า pH ของสารละลายโดยใช้ความแตกต่างของความต่างศักย์ ที่เกิดขึ้นระหว่างแท่งแก้วตรวจวัด (Glass electrode) และแท่งแก้วอ้างอิง (Reference electrode) การวัดค่าและการปรับแต่งค่า pH ถือว่าเป็นพื้นฐานสำคัญในการควบคุมคุณภาพของน้ำโคลน ปฏิกริยาระหว่างโคลน ความสามารถในการละลาย และประสิทธิภาพของส่วนผสมโดยรวมถึงสารเติมแต่งในน้ำโคลนล้วนแล้วแต่ขึ้นอยู่กับค่า pH การควบคุมความเป็นกรดนั้นเป็นการป้องกันกระบวนการกัดกร่อน (Corrosion process) ที่มีต่ออุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเจาะซึ่งเป็นโลหะแทบทั้งหมด การทดสอบในการวิจัยนี้ได้ปฏิบัติตามมาตรฐาน API (API Recommended Practice, 1985)



รูปที่ 3.7 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) ในการวิจัย