

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรม

2.1 บทนำ

ผลสรุปจากบทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะถูกนำเสนอเพื่อเพิ่มความเข้าใจเกี่ยวกับน้ำโคลนที่ใช้น้ำเป็นส่วนผสม (Water-based drilling mud) และการนำไปประยุกต์ใช้ การใช้สารพอลิเมอร์ในน้ำโคลน คุณสมบัติของน้ำยางธรรมชาติ และ มาตรฐาน API RP 13B ในบทนี้ยังอธิบายเกี่ยวกับคุณสมบัติทางวิทยากระแส (Rheological properties) ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่สำคัญของน้ำโคลน โดยแหล่งของข้อมูลได้มาจาก บทความวิจัยงานวิจัย วิทยานิพนธ์ และตำราที่เกี่ยวข้อง ผลสรุปจากการทบทวนวรรณกรรมมีดังต่อไปนี้

2.2 หน้าที่ของน้ำโคลนเจาะ

Bourgoyne *et al.* (1986) ได้อธิบายหน้าที่ของน้ำโคลนเจาะในการเจาะหลุมแบบหมุน (Rotary drilling) ไว้ว่าน้ำโคลนถือว่ามีหน้าที่สำคัญหลายอย่างและต้องมีคุณลักษณะที่เหมาะสมแก่การขุดเจาะ ซึ่งน้ำโคลนเจาะจะถูกใช้ในกระบวนการเพื่อ

- (1) ทำความสะอาดหลุมโดยนำพาเศษหินใต้ดินที่ถูกหัวเจาะตัด (cutting) ขึ้นมาทำการแยกที่ผิวดิน
- (2) ป้องกันความดันจากชั้นหินใต้ดิน และป้องกันการไหลของไหลจากชั้นหินเข้าสู่หลุมเจาะ
- (3) ช่วยในกระบวนการลงซีเมนต์เพื่อติดตั้งท่อกรอ (casing) และ
- (4) ช่วยหล่อเย็นและหล่อลื่นก้านเจาะและหัวเจาะ

เพื่อให้การเจาะเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ น้ำโคลนเจาะไม่ควร

- (1) มีคุณสมบัติที่ไปขัดขวางการหยั่งค่าธรณีหลุมเจาะ
- (2) มีคุณสมบัติที่ส่งผลเสียต่อชั้นหินที่เจาะผ่าน และ
- (3) มีคุณสมบัติที่กัดกร่อนอุปกรณ์ที่ใช้ในการขุดเจาะ

สำหรับเบนโทไนต์ที่ใช้น้ำโคลนจะเป็นโคลนประเภทมอนต์มอริลโลไนต์ (Chilingarian *et al.*, 1983) โดยจะถูกผสมในน้ำโคลนเพื่อ

- (1) เพิ่มคุณสมบัติในการทำทำความสะอาดหลุม
- (2) ลดการสูญเสียโคลนไปสู่ชั้นหินใต้ดินที่มีความซึมผ่าน
- (3) สร้างชั้นบางๆ ของโคลนเจาะที่มีความซึมผ่านต่ำที่ผนังหลุมเจาะ และ
- (4) รักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ

อย่างไรก็ตามถ้าพึ่งแค่เพียงเบนโทในตัวอย่างเดียวไม่สามารถทำให้การเจาะเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดได้ จึงต้องมีการเติมสารเติมแต่ง (Additive) ประเภทพอลิเมอร์เพื่อให้โคลนมีคุณสมบัติที่เหมาะสมและช่วยให้การเจาะเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

2.3 การใช้สารพอลิเมอร์ในโคลนเจาะ

สารพอลิเมอร์ถูกใช้ในการผสมน้ำโคลนตั้งแต่ปี ค.ศ.1930 (M.I. Swaco, 1998) โดยเริ่มจากการนำแป้งข้าวโพดมาใช้เป็นสารเติมแต่งในน้ำโคลนเพื่อควบคุมการสูญเสียโคลน หลังจากนั้นจึงมีการยอมรับและนำมาใช้มากขึ้น ปัจจุบันพอลิเมอร์ถือส่วนหนึ่งที่สำคัญของน้ำโคลนที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบหลัก (Water-based mud) ซึ่งมีหลายชนิดและถูกนำมาใช้ ยกตัวอย่างเช่น แป้งซึ่งได้มาจากธรรมชาติเป็นต้น พอลิเมอร์อาจจำแนกได้ในแง่ของการนำไปใช้ (Steve, 1998) ซึ่งหน้าที่หลักที่สำคัญก็ได้แก่การทำให้เกิดการจับตัวเป็นก้อน (Flocculants) การสลายการจับตัวกัน (Deflocculants หรือ Thinners) การเป็นสารเพิ่มความหนืด (Viscosifier) ให้กับน้ำโคลนเจาะและการเป็นสารเติมแต่งเพื่อควบคุมอัตราการซึมผ่าน (Filtration control additives) เป็นต้น

Stowe *et al.* (2004) ได้อธิบายข้อดีของพอลิเมอร์ลาเทกซ์ (Polymer latex) ที่เติมในน้ำโคลนที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบหลัก (Water-based mud) ว่าสามารถช่วยลดอัตราการสูญเสียโคลนไปสู่ชั้นหินมีความซึมผ่านได้ โดยจะสร้างแผ่นฟิล์มที่เกิดจากน้ำโคลนบางๆ ปิดกั้นชั้นหินดังกล่าวไว้ กล่าวปิดกั้นนี้ไม่ได้หมายความว่าสามารถป้องกันการสูญเสียโคลนได้ทั้งหมด แต่ฟิล์มบางที่เกิดขึ้นจะมีความซึมผ่านน้อยนั่นคือยอมให้น้ำโคลนผ่านได้ลดลง พอลิเมอร์ลาเทกซ์แบบที่มีขนาดอนุภาคเล็ก ระดับไมครอนจะใช้เติมในน้ำโคลนที่มีน้ำเค็มเป็นส่วนประกอบ (Salt water-based mud) โดยจะช่วยลดอัตราของแรงดันของน้ำโคลนที่จะซึมผ่านไปสู่ชั้นหินดินดาน นอกจากนี้การป้องกันแรงดันจากของไหลที่มาจากชั้นหินก็ถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะไว้อีกด้วย

Chesser *et al.*, (2008) ได้ศึกษาสารเติมแต่งสำหรับควบคุมอัตราการซึมผ่านที่ใช้สำหรับน้ำเกลือ โดยจะเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว เช่น แป้ง อนุพันธ์ของแป้ง ยาง อนุพันธ์ของยางและเซลลูโลส ซึ่งพอลิเมอร์เหล่านี้ใช้ได้ดี แต่ก็มีข้อเสียคือมีอัตราการดูดน้ำเข้ามาเป็นส่วนประกอบ (Hydration rate) ที่ต่ำเมื่ออยู่ในน้ำเกลือ โดยเฉพาะน้ำเกลือที่มีความความหนาแน่นสูง ซึ่งมีสัดส่วนของน้ำที่น้อยที่จะยอมให้พอลิเมอร์บวมตัวได้ ข้อเสียอีกอย่างหนึ่งของพอลิเมอร์ชนิดนี้คือมีข้อจำกัดด้านอุณหภูมิคือทนต่ออุณหภูมิที่ไม่สูงจึงไม่เหมาะกับการเจาะในระดับลึกที่มีอุณหภูมิสูง ในปัจจุบันน้ำโคลนที่ใช้ในการเจาะต้องมีสมบัติด้านการไหลที่เสถียรและมีอัตราการสูญเสียโคลนที่ต่ำที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาฟาเรนไฮต์ แต่น่าเสียดายที่พอลิเมอร์ประเภทไม่มีขั้วนี้ก็ทนต่ออุณหภูมิได้ไม่เกิน 225 องศาฟาเรนไฮต์ สารเติมแต่งสำหรับควบคุมอัตราการซึมผ่านที่ดีควรจะสร้างชั้นผนังของโคลน (Mud cake) ได้เร็วและทนอุณหภูมิสูง ๆ เป็นเวลานานได้

Chilingarian *et al.* (1983) ได้รายงานถึงข้อดีของยางขานทาน (Xanthan gum) หรืออีกชื่อหนึ่ง ที่เรียกว่า XC polymer ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่ละลายน้ำได้ไว้ว่า (1) ผสมและดูแลรักษาได้ง่าย (2) เข้ากันได้กับสารเติมแต่งและสารเคมีอื่นในน้ำโคลน (3) ใช้ร่วมกับน้ำเกลือได้ (4) คงความหนืดได้ดี เมื่ออยู่ในสภาวะที่แรงเฉือนสูง และ (5) แวนดวาล์วที่มีน้ำหนัก (Weighting agents) ได้ดีเยี่ยม

Stowe *et al.* (2004) ได้ศึกษาน้ำยางสังเคราะห์สองชนิดใช้กับน้ำโคลนที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบหลัก (Water-based mud) พบว่าโพลิเมอร์ลาเทกซ์นั้นสามารถลดความซึมผ่านของชั้นหินได้ โดยโพลิเมอร์ลาเทกซ์ 2 ชนิดที่ทำการศึกษาได้แก่ Carboxylated styrene-butadiene และ Sulfonated styrene polymer จากการศึกษพบว่าที่อุณหภูมิ 300 องศาฟาเรนไฮต์ น้ำโคลนที่ปราศจากน้ำยางผสม จะไม่สามารถควบคุมการสูญเสียในน้ำโคลนได้ แต่น้ำโคลนที่ผสมน้ำยางลงไปร้อยละ 3 โดยปริมาตร พบว่าอัตราการสูญเสียในน้ำโคลนจะลดลงตามเวลา

Bailey (2001) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการอัตราการสูญเสียในน้ำโคลนโดยใช้ยางขานทาน (Xanthan gum) เป็นสารเติมแต่งในน้ำโคลนโดยเติมแร่แบไรต์ต่อยางขานทาน (Barite/Xanthan) ในอัตราส่วน 4 กรัมต่อลิตร ของยางขานทาน ต่อ 160 กรัมต่อลิตร ของ API barite พบว่า น้ำโคลนจะมีอัตราการสูญเสียในน้ำโคลนมากที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เนื่องจากยางขานทานมีข้อจำกัดทางด้านอุณหภูมิ (Caen *et al.*, 1996) โดยจะเริ่มสูญเสียสภาพที่อุณหภูมิ 105 - 110 องศาเซลเซียส ซึ่งโดยทั่วไปจะพบว่าอัตราการสูญเสียในน้ำโคลนจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและสารเติมแต่งที่เป็นสารพอลิเมอร์ที่มาจากธรรมชาติก็จะเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิสูง ๆ

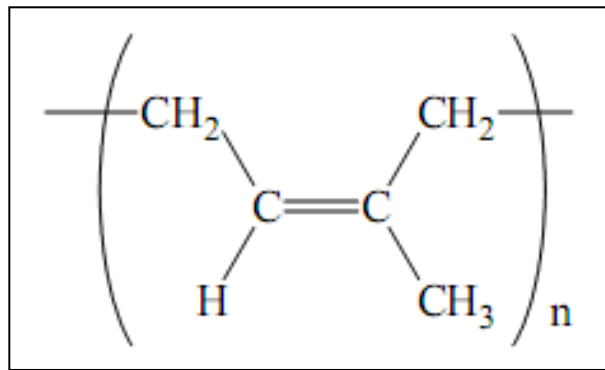
Vikas and Sharma (2004) ได้ศึกษาสมบัติการไหลของน้ำโคลนที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบหลัก (Water-based mud) โดยใช้ Polyanionic Cellulose (PAC) และ Tamarind gum ซึ่งเป็นพืชในท้องถิ่นของประเทศไทย จากการทดลองพบว่าน้ำโคลนที่เติมสารเติมแต่งดังกล่าวมีสมบัติการไหลที่ดี และควบคุมการสูญเสียในน้ำโคลนได้ที่มีความเข้มข้นของ Tamarind gum ต่ำๆ อีกทั้ง Tamarind gum ยังมีราคาถูกกว่า Guar gum ถึงเจ็ดเท่าซึ่งประหยัดกว่า นอกจากนี้ผลของการสูญเสียสภาพของชั้นหิน (Formation damage) ก็น้อยกว่าน้ำโคลนที่ใช้ Guar gum เป็นสารเติมแต่งอีกด้วย

2.4 น้ำยางธรรมชาติ (Natural rubber latex, NRL)

Blackley (1997) ได้ให้รายละเอียดเกี่ยวกับน้ำยางธรรมชาติและการจำแนกประเภทของน้ำยางธรรมชาติ โดยกล่าวว่า คำว่า ลาเทกซ์ (latex) จะใช้กับคอลลอยด์ของพอลิเมอร์ที่กระจายตัวอยู่ในตัวกลางที่เป็นน้ำ (Aqueous) หรือ ไม่ใช่ในน้ำ (Non-aqueous) ซึ่งน้ำยางก็จัดเป็นพอลิเมอร์ที่จำแนกอยู่ในสองพวกนี้ ในส่วนของน้ำยางสังเคราะห์โดยทั่วไปจะได้มาจากการบวนการเกิดพอลิเมอร์ด้วยการเติม (Addition polymerization) และกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบควบแน่น (Condensation polymerization) สำหรับยางธรรมชาติจะได้มาจากส่วนหนึ่งส่วนใดของต้นไม้ เช่น เปลือก ราก ใบ

ลำต้น เป็นต้น ในปัจจุบันน้ำยางธรรมชาติส่วนใหญ่จะเป็นสายพันธุ์ฮีเวีย บราซิลเลียนซิส (Hevea brasiliensis) ในวงศ์เปกล้า (Euphorbiaceae) (Blackley, 1997).

Cacioli (1997) ได้อธิบายส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ ใ้ว่าน้ำยางธรรมชาติที่ได้มาจากยางจากต้นยางพาราจะประกอบไปด้วย Cis-1,4-polyisoprene ร้อยละ 98 (รูปที่ 2.1) ซึ่งไม่ตกผลึกที่อุณหภูมิห้อง เพราะฉะนั้นจึงประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นผลึกหรืออสัณฐาน (Amorphous) และเป็นยาง (Rubbery) น้ำยางธรรมชาติจะมีส่วนประกอบหลักคือเป็นเนื้อยางร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก มีโปรตีนร้อยละ 2 - 3 มีเรซินร้อยละ 1.5 - 3.5 และมีส่วนที่เป็นน้ำร้อยละ 55 - 60



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมี Cis-1,4-polyisoprene

Sridee (2006) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดของน้ำยางธรรมชาติ ในช่วงอุณหภูมิ 10 – 40 องศาเซลเซียส โดยเพิ่มอุณหภูมิช่วงละ 5 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าที่อัตราแรงเฉือน (Shear rate) ต่าง ๆ ความหนืด (Viscosity) ของน้ำยางจะลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เหมือนกับของเหลวทั่วไปที่ความหนืดจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเช่นกัน

2.5 ข้อปฏิบัติตามมาตรฐาน API (API Recommended Practices)

สถาบันปิโตรเลียมของสหรัฐอเมริกา (The American Petroleum Institute, 1985) ได้กำหนดข้อปฏิบัติเกี่ยวกับมาตรฐานในการทดสอบด้านต่างๆ ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม หนึ่งในนั้นคือมาตรฐาน API RP 13B, “Recommended Practice Standard Procedure for Field Testing Water-Based Drilling Fluids” ซึ่งเป็นหลักปฏิบัติในการทดสอบน้ำโคลนที่ใช้น้ำเป็นส่วนผสม (Water-based mud) ซึ่งจะมีข้อปฏิบัติเพื่อทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของน้ำโคลน โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา 3 ส่วนด้วยกันคือ

(1) การทดสอบคุณสมบัติด้านการไหล ได้แก่ ความหนืด (Viscosity) และค่าความแข็งแรงของเจล (Gel strength)

(2) การทดสอบการซึมผ่านของของไหลของน้ำโคลน (Filtration test) กระทำเพื่อวัดการสูญเสียในน้ำโคลนไปสู่ชั้นหินที่มีความซึมผ่านสูง และ

(3) การวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH test) กระทำเพื่อวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำโคลน
เจาะ

2.6 วิทยากระแสของน้ำโคลน

มีหนังสือหลายเล่มที่นำเสนอเกี่ยวกับวิทยากระแสของน้ำโคลนและแบบจำลองที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการไหล วิทยากระแส คือศาสตร์ที่ใช้อธิบายการไหลของของเหลวและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของของเหลว อธิบายโดยความสัมพันธ์ระหว่างแรง การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและ แบบจำลองที่ถูกนำมาใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลซึ่งได้มาจากการพัฒนาสมการคณิตศาสตร์โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือน (Shear stress) และอัตราการเฉือน (Shear rate) โดยทั่วไปแบบจำลองที่ใช้กันอย่างกว้างขวางที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลของน้ำโคลนคือ แบบจำลองบิงแฮม (Bingham Plastic Model) และแบบจำลองเพาเวอร์ลอว์ (Power Law Model) และอีกแบบจำลองที่สำคัญคือ แบบจำลองเฮอส์เชล-บัคเคย์ (Herschel-Buckley Model) โดยทั้งสามแบบจำลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

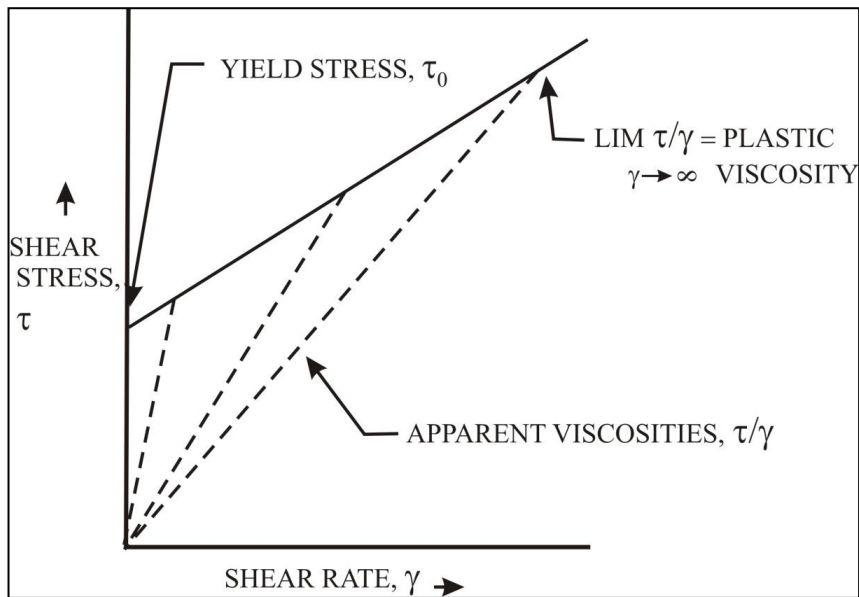
2.6.1 แบบจำลองบิงแฮม (Bingham Plastic Model)

แบบจำลองนี้นิยามโดยความสัมพันธ์

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \gamma \quad (2.1)$$

เมื่อ	τ	=	แรงเฉือน (Shear stress) ; lb/ft ²
	τ_0	=	แรงที่จุดคราก (Yield stress) ; lb/ft ²
	μ_p	=	ความหนืดพลาสติก (Plastic viscosity) ; cP
	γ	=	อัตราแรงเฉือน (Shear rate) ; sec ⁻¹

ของไหลแบบบิงแฮมพลาสติกจะไม่สามารถไหลได้จนกระทั่งมีการให้แรงกับของไหลจนถึงจุดคราก (Yield point) ของไหลจึงเริ่มไหล และเมื่อแรงมากกว่าจุดครากการเปลี่ยนแปลงของอัตราแรงเฉือนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงเฉือน และเรียกว่าความหนืดพลาสติก ค่าความหนืดพลาสติก จะเป็นค่าความชันของเส้นตรงบิงแฮม ดังรูปที่ 2.2 โดยค่าความหนืดพลาสติกจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราการเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “Shear thinning”



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์แบบจำลองบิงแฮม

2.6.2 แบบจำลองพาวเวอร์ลอว์ (Power Law Model)

แบบจำลองนี้นิยามโดยความสัมพันธ์

$$\tau = k\gamma^n \quad (2.2)$$

เมื่อ

τ = แรงเฉือน (Shear stress) ; lb/ft²

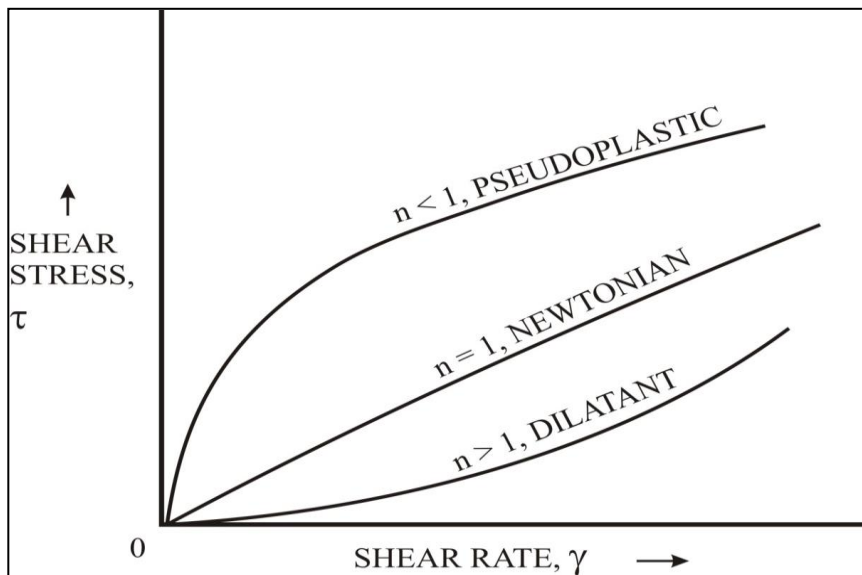
k = ดัชนีระดับความเข้มข้นของของไหล (Fluid consistency index)

γ = อัตราแรงเฉือน (Shear rate) ; sec⁻¹

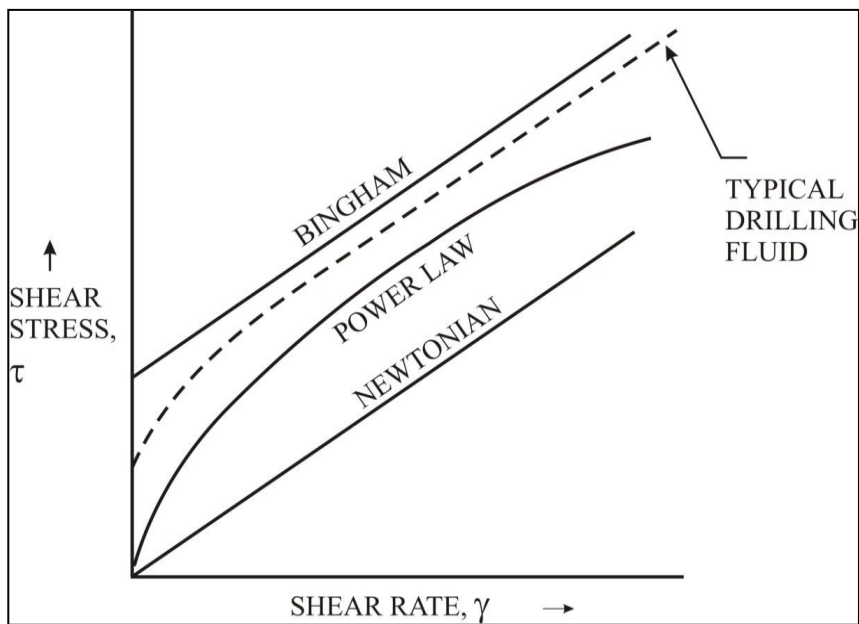
n = ดัชนีพฤติกรรมการไหล (Flow behavior index)

ค่าตัวแปรดัชนีระดับความเข้มข้นของของไหล (Fluid consistency index, k) และดัชนีพฤติกรรมการไหล (Flow behavior index, n) เป็นค่าคงที่ที่แสดงคุณลักษณะของของไหล โดยถ้าค่า k มีค่ามากแสดงว่าของไหลมีความหนืดมาก และค่า n เป็นค่าที่วัดระดับพฤติกรรมของความไม่เป็นนิวตัน (Non-Newtonian) ของของไหล โดยค่าตัวแปรทั้งสองได้มาจากกราฟ log-log ที่พล็อตระหว่างแรงเฉือนและอัตราการเฉือน โดยเมื่อ $n = 1$ ของไหลจะมีพฤติกรรมการไหลแบบนิวตัน (Newtonian) และเมื่อ n มากกว่า 1 ของไหลจะมีพฤติกรรมการไหลแบบไดเลแทนต์ (Dilatant) โดยค่าความหนืดจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการเฉือนเพิ่มขึ้น และถ้า n น้อยกว่า 1 ของไหลจะมีพฤติกรรมการไหลแบบซูโดพลาสติก (Pseudoplastic) โดยของไหลแบบซูโดพลาสติกจะมีพฤติกรรมการไหลขึ้นอยู่กับอัตราการเฉือน และค่าความหนืดจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราการเฉือนมีค่าลดลง รูปที่

2.3 แสดงความสัมพันธ์ของแบบจำลองเพาเวอร์ลอว์และรูปที่ 2.4 แสดงพฤติกรรมการไหลของน้ำโคลนเทียบกับแบบจำลองของนิวโตเนียน บิงแฮม และพาวเวอร์ลอว์



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์แบบจำลองเพาเวอร์ลอว์



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงพฤติกรรมของน้ำโคลนเปรียบเทียบกับแบบจำลองของนิวโตเนียน บิงแฮม และพาวเวอร์ลอว์

2.6.3 แบบจำลองเฮล์เชลบัคเคย์ (Herschel-Buckley Model)

แบบจำลองของเฮล์เชลบัคเคย์มีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\tau = \tau_y + k\gamma^n \quad (2.3)$$

โดย	τ	=	แรงเฉือน (Shear stress) ; lb/ft ²
	τ_y	=	แรงที่จุดคราก (Yield stress) ; lb/ft ²
	k	=	ดัชนีระดับความเข้มข้นของไหล (Fluid consistency index)
	γ	=	อัตราแรงเฉือน (Shear rate) ; sec ⁻¹
	n	=	ดัชนีพฤติกรรมการไหล (Flow behavior index)

แบบจำลองนี้อาจเรียกอีกอย่างว่าแบบจำลอง Modified power law หรือ Yield-pseudoplastic โดยใช้เพื่ออธิบายการไหลของน้ำโคลนและถูกใช้กันอย่างแพร่หลายเพราะ (1) อธิบายพฤติกรรมการไหลของน้ำโคลนได้ทุกประเภท (2) คำนวณค่าแรงที่จุดคราก (Yield stress) ซึ่งถูกนำมาใช้ในการคำนวณในส่วนของแรงดันเนื่องจากของไหล และ(3) รวมแบบจำลองระหว่างบิงแฮมและพาวเวอร์ลอว์เข้าไว้ด้วยกัน ค่าตัวแปรทางวิทยากระแสน้ำโคลนที่ถูกบันทึกไว้ในรายงานของไหลที่ใช้ในการเจาะตามมาตรฐานของ API (API Drilling Fluid Report) จะประกอบไปด้วยค่าความหนืดพลาสติก (Plastic viscosity) และจุดคราก (Yield point) จากแบบจำลองบิงแฮมพลาสติก ซึ่งตัวแปรสองตัวนี้ถือเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ใช้คำนวณค่าตัวแปรทางวิทยากระแสน้ำโคลนค่าอื่น ๆ ต่อไป