



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength of Soil)

กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำจะเกิดขึ้นกับดินเหนียวที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ต่ำ เมื่อมีแรงภายนอกมากกระทำที่จะทำให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess Pore Pressure) มีผลทำให้กำลังรับแรงเฉือนดินมีค่าลดลง แต่เนื่องด้วยค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ต่ำทำให้เกิดการระบายแรงดันน้ำส่วนเกินได้ช้ามาก จึงต้องวิเคราะห์กำลังแบบหน่วยแรงรวม (Total Stress Analysis) สำหรับการวิเคราะห์ในกรณีแบบไม่ระบายน้ำ ในระยะสั้น (Short-term) ซึ่งการลดแรงดันส่วนเกินนั้น ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของดิน โดยใช้หาค่ากำลังรับแรงเฉือนดินในระยะสั้น เช่น การขุดชั่วคราว หรือขณะทำการก่อสร้าง และสำหรับหาความสามารถในการรับน้ำหนักของดินฐานรากระยะสั้น

วิธีทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนในห้องปฏิบัติการมีหลายวิธีการด้วยกัน แต่ในงานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวในสภาพที่เป็นโคลน ซึ่งใช้เครื่องมือการทดสอบหลักในห้องปฏิบัติการคือวิธีการทดสอบแรงเฉือนในห้องทดลองด้วยใบพัด (Laboratory Vane Shear Test)

2.1.1 การทดสอบ Field Vane Shear Test

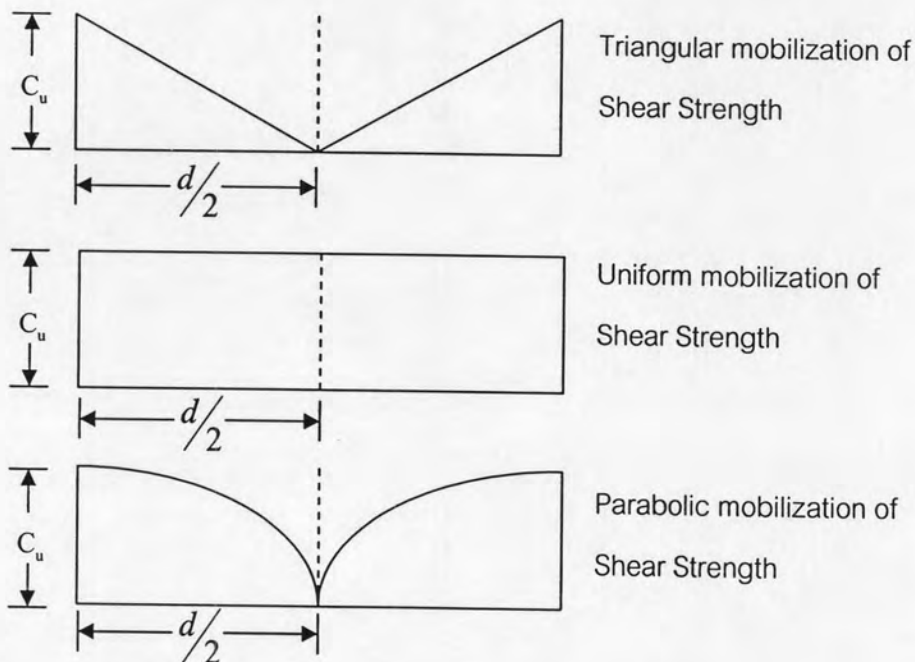
การทดสอบ Field Vane Shear Test เป็นการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว โดยไม่จำเป็นต้องเก็บตัวอย่างดินเพื่อทำการทดสอบ จึงเป็นการทดสอบที่มีความคลาดเคลื่อนจากการรบกวนดินน้อยมาก โดยปกติเป็นการทดสอบกับดินเหนียวอ่อน ที่ความลึกไม่เกิน 15-17 เมตร ตามมาตรฐาน ASTM D2573 โดยใช้ใบพัดกากบาท (Vane Blade) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 35 ถึง 100 มม. สูงอยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 2.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนาใบพัดน้อยกว่า 3 มม. ส่วนแกนหลอดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 12.5 ถึง 16.5 มม. ในการทดสอบทำโดยกดใบพัดและปลดใบพัดลงไปในดินเหนียวระดับทดสอบ ประมาณ 0.5 เมตร จากนั้นกดใบพัดลงไปที่ระดับทดสอบ หมุนใบพัดด้วยมือหรือมอเตอร์ไฟฟ้าด้วยอัตราเร็วประมาณ 0.1 องศา/วินาที พร้อมบันทึกค่าอย่างน้อยทุกๆ 15 วินาที โดย

กำหนดการวิบัติของดินไม่เกิน 2 ถึง 5 นาที และสามารถหาค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดโดยนำค่าแรงบิดมาคำนวณได้จากสมการ (2.1) ดังนี้

$$(c_u)_{fv} = \frac{T}{\pi \left(\frac{hd^2}{2} + \beta \frac{d^3}{4} \right)} \times 98.07 \text{ kPa} \quad (2.1)$$

โดยที่สมมติให้ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่ปลายบนและล่างมีค่าคงที่เท่ากันตลอดแนวรัศมีของใบพัด

- เมื่อ T = ค่าแรงบิด (Torque) ที่ดินวิบัติ, N-m.
 h = ความสูงของใบพัด, m.
 b = ความกว้างของใบพัด, m.
 β = การกระจายตัวแรงเฉือน ดังรูปที่ 2.1
 = 1/2 สำหรับการกระจายกำลังเฉือนแบบสามเหลี่ยม
 = 2/3 สำหรับการกระจายกำลังเฉือนสม่ำเสมอ
 = 3/5 สำหรับการกระจายกำลังแบบพาราโบลา



รูปที่ 2.1 ลักษณะการกระจายกำลังรับเฉือนแบบต่างๆ

ค่าที่ได้จากการทดสอบต้องทำการปรับแก้โดยนำมาคำนวณโดยใช้สมการที่ 2.2

$$\tau_{\text{mobilized}} = \mu \cdot (c_u)_{fv} \quad (2.2)$$

โดยค่าปรับแก้ (μ) = $1.05 - b(\text{PI})^{0.5}$

และ $b = 0.015 + 0.0075 \log t_f$

ซึ่ง t_f คือระยะเวลาที่ใช้ในการวิบัติ มีหน่วยเป็น นาที

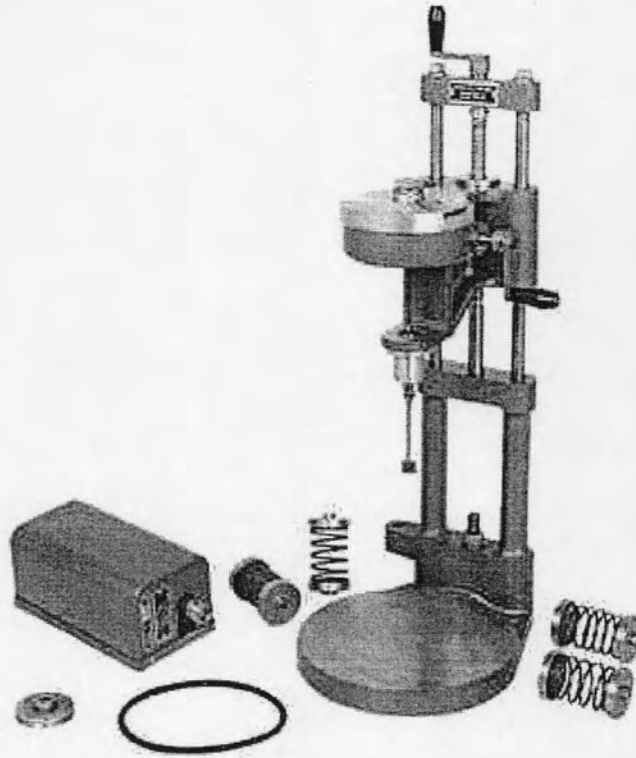
การหาค่าความไวตัวของดิน โดยการทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนดินที่ถูกรบกวน (Remolded Clay) เป็นารทดสอบซ้ำ โดยมีขั้นตอนเหมือนรอบแรก และคำนวณหากำลังรับแรงเฉือนโดยค่าที่ได้เป็นค่ากำลังรับแรงเฉือนดินที่ถูกรบกวน $(c_{ur})_{fv}$ แล้วนำมาคำนวณหาค่าความไว (Sensitivity) ตัวของดินได้จากสมการ

$$S_{T-fv} = (c_u)_{fv} / (c_{ur})_{fv} \quad (2.3)$$

2.1.2 การทดสอบ Laboratory Vane Shear Test

การทดสอบแรงเฉือนในห้องทดลองด้วยใบพัด (Laboratory Vane Shear Test) ตามรูปที่ 2.2 เป็นการทดสอบที่จำลองมาจากการทดสอบ Field Vane Shear Test โดยเป็นการทดสอบแบบเก็บตัวอย่างแบบไม่ถูกรบกวน (undisturbed sample) แล้วนำมาทดสอบห้องทดลองสำหรับดิน

เหนียวอ่อนถึงแข็ง ในดินเหนียวที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ($\theta=0$) โดยนำตัวอย่างดินเหนียวที่ได้จากการเก็บตัวอย่างแบบไม่รบกวนมาทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4648-94 โดยใช้ใบพัดกาทขนาดเล็ก (Miniature Vane Blade) ขนาดประมาณ 12 มม. X 12 มม. หรืออัตราส่วน 1:1, 2:1 กดลงบนตัวอย่าง จากนั้นหมุนใบพัดด้วยมือหรือมอเตอร์ไฟฟ้าด้วยอัตราเร็ว 60-90°/นาที ทำการวัดแรงบิดที่วัดการต้านการวิบัติจากหมุนของใบพัด ซึ่งทำให้สามารถคำนวณแรงเฉือนที่เกิดขึ้นได้เช่นเดียวกับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสนาม (Field Vane Shear Test) โดยค่าที่ได้จากการคำนวณสามารถนำมาใช้ได้โดยไม่ต้องมีการปรับแก้



รูปที่ 2.2 ลักษณะ เครื่องทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในห้องทดสอบด้วยใบพัดตามมาตรฐาน ASTM 2573

สามารถคำนวณสำหรับการกระจายกำลังเฉือนสมำเสมอจากสมการ (2.4) ดังนี้

$$c_u = \frac{T}{\pi \left(\frac{hb^2}{2} + \frac{b^3}{6} \right)} \times 98.07 \text{ kPa} \quad (2.4)$$

โดยที่สมมติให้ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่ปลายบนและล่างมีค่าคงที่เท่ากันตลอดแนวรัศมีของใบพัด

เมื่อ T = ค่าแรงบิด (Torque) ที่ดินวิบัติ, N-m.

h = ความสูงของใบพัด, m.

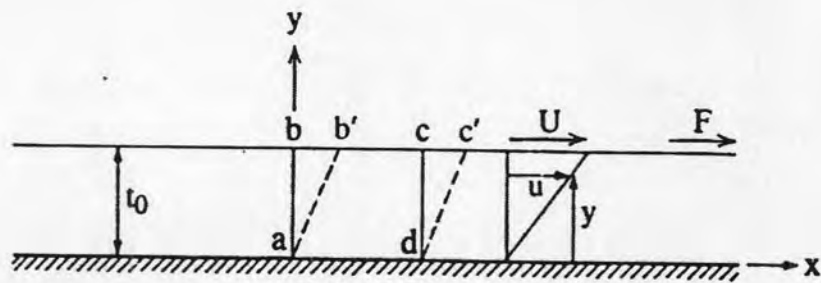
b = ความกว้างของใบพัด, m.

ค่าแรงบิด (Torque, T) จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของสปริง (K) ซึ่งจะสามารถวัดค่ากำลังรับแรงเฉือนได้ในช่วงที่กว้างมากขึ้นเมื่อใช้ค่าคงที่ของสปริงที่เปลี่ยนแปลงไป

2.2 ความหนืด

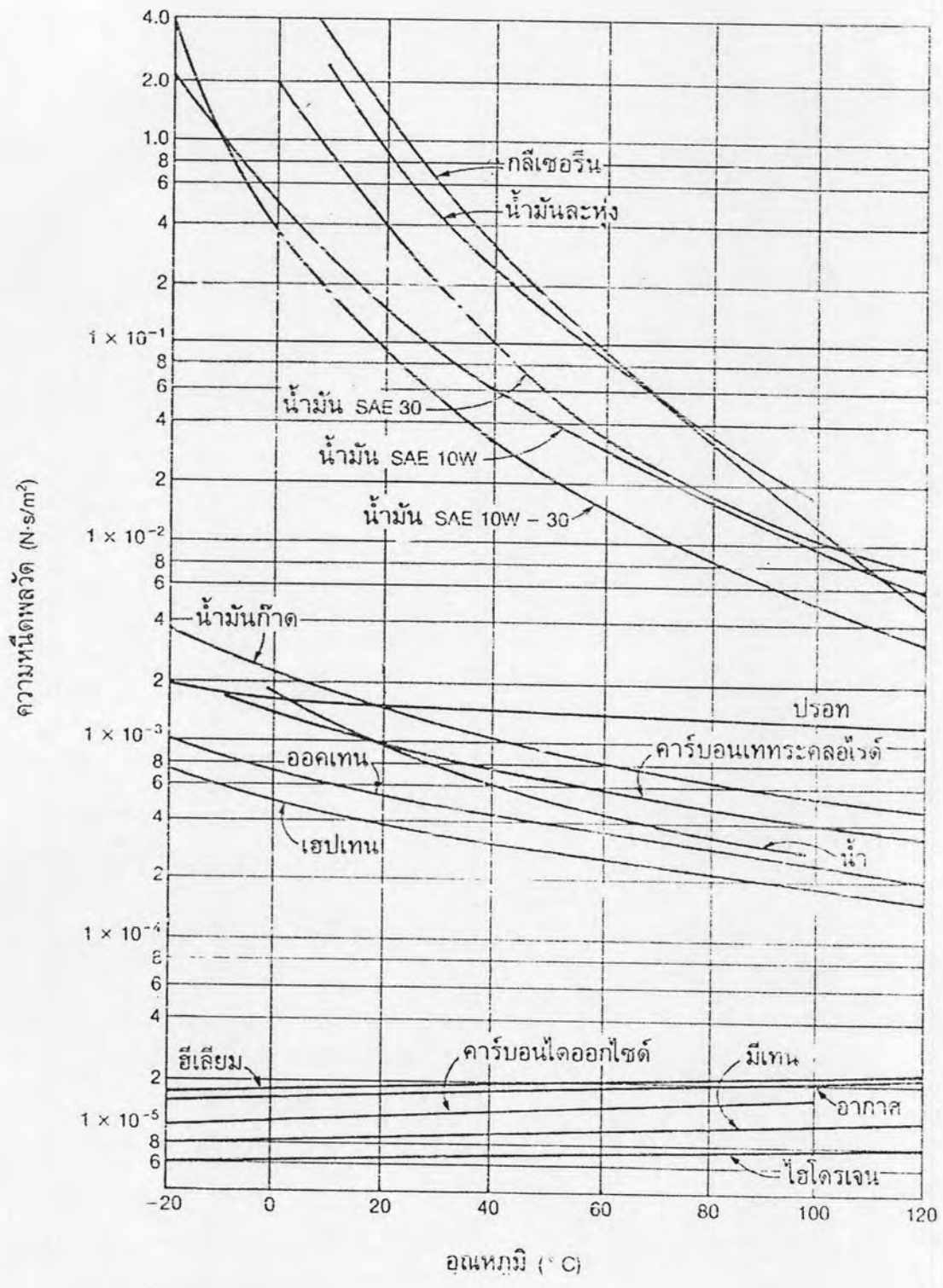
2.2.1 ทฤษฎี

ความหนืดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของของไหล ซึ่งจะวิเคราะห์แรงต้านทานการไหลในชั้นการไหลที่มีความเร็วไม่เท่ากัน เป็นที่ทราบกันดีว่าของไหลเป็นสสารที่เปลี่ยนแปลงรูปร่างได้อย่างต่อเนื่องกัน ภายใต้การกระทำของความเค้นเฉือนหนึ่งๆ ทั้งนี้ไม่ว่าความเค้นเฉือนนั้นจะมีค่าน้อยเท่าใดก็ตาม เมื่อพิจารณาแรงเฉือนที่กระทำต่อพื้นที่ผิวหนึ่งๆ ก็คือส่วนประกอบแรงเฉือนที่กระทำที่ผิวของวัตถุ และจะสามารถพิจารณาได้ เท่ากับแรงเฉื่อยของแรงที่กระทำหารด้วยพื้นที่กระทำบนพื้นผิวนั้น ความเค้นเฉือนที่จุดนี้คือขนาดของแรงกระทำไปยังพื้นที่ๆลดลงเป็นจุดๆ ซึ่งจะต้องพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน กับอัตราการเปลี่ยนแปลง (Rate of Deformation) ซึ่งความต้านทานต่อการเฉือน หรือ angular deformation แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในของไหลเป็นผลมาจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล และการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม ระหว่างโมเลกุลของของไหล ค่าความหนืดสัมบูรณ์ และค่าความหนืดจลน์ของของไหลบางชนิดแสดงไว้ในรูปที่ 2.3 และ 2.4

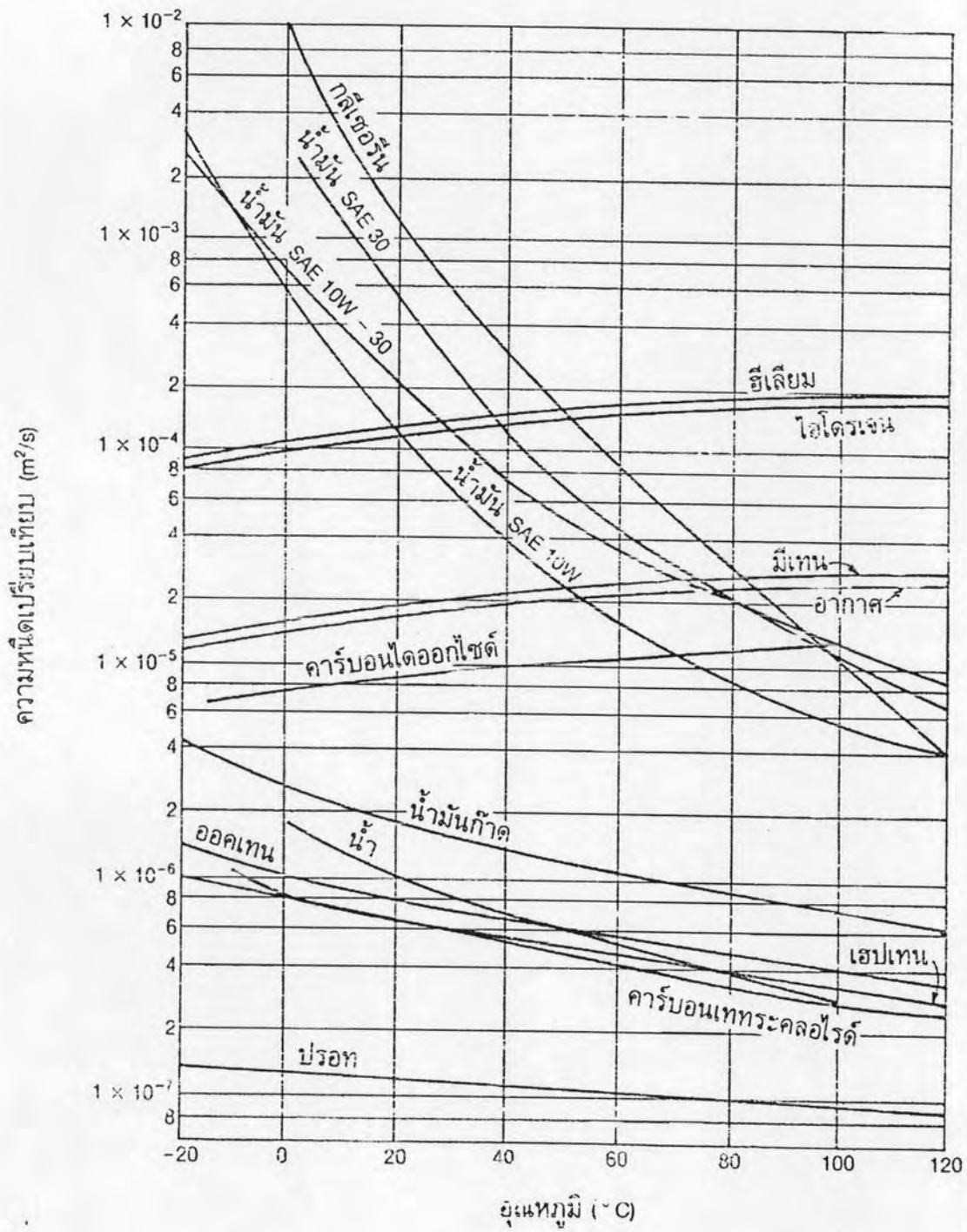


รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนรูปของของไหลเมื่อมีแรงเฉือน F มากกระทำ

ในรูปที่ 2.5 สสารที่อยู่ระหว่างช่องว่างของเพลตที่มีระยะห่างกันเล็กน้อย โดยเพลตชั้นล่างจะถูกยึดไม่ให้มีการเคลื่อนที่ และให้แรง F กระทำที่เพลตบน ทำให้เกิดความเค้นเฉือน F/A บนสสารใดๆ ระหว่างเพลต เมื่อ A คือพื้นที่ของเพลตบน แรง F เป็นทำให้เพลตบนเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วสม่ำเสมอ โดยไม่สำคัญว่าขนาดของแรง F มีขนาดมากหรือน้อยเพียงไร เมื่อวัตถุที่อยู่ระหว่างเพลตเป็นของไหล



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดพลวัตกับอุณหภูมิ Bruce et al. (1990)



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเปรียบเทียบกับอุณหภูมิ Bruce et al. (1990)

ในขณะที่ที่ทันใดที่ของไหลสัมผัสกับขอบเขตของของแข็งที่มีอัตราเร็วเท่ากับผิวขอบเขต นั่นคือจะไม่มีการเลื่อนไถลที่ผิวขอบเขต [1] นี่คือการสังเกตจากการทดสอบ ได้พิสูจน์ยืนยัน ซึ่งได้จากการพิสูจน์ยืนยัน ในการทดสอบจำนวนมากกับของไหล และวัสดุที่ผิว (plate) หลายๆชนิด การเคลื่อนที่ของของไหลที่ ab ไหลไปยังตำแหน่ง ab' แต่ละอนุภาคของของไหลจะเคลื่อนที่ขนานกับเฟลต และด้วยอัตราเร็ว U จะแปรผันอย่างสม่ำเสมอจากศูนย์ที่เฟลตด้านซึ่งถูกยึดไว้ ถึงอัตราเร็ว U ที่เฟลตด้านบน จากการทดสอบแสดงถึงความสัมพันธ์โดยตรงกับ A และ U และมีความสัมพันธ์ผกผันกับความหนาของของไหล t ในสมการจาก

$$F = \mu \frac{AU}{t} \quad (2.5)$$

ซึ่ง μ คือค่าคงที่ เป็นคุณสมบัติที่ประกอบจากผลกระทบของอนุภาคของของไหล เมื่อความเค้นเฉือน (Shear Stress, τ) $\tau = F / A$

$$\tau = \frac{\mu U}{t} \quad (2.6)$$

โดยอัตราส่วน U/t คือ ความเร็วเชิงมุม (angular velocity) ของเส้น ab หรือ อัตราเร็วเชิงมุมของการเปลี่ยนรูป (rate of angular deformation) ของของไหล นั่นคือ อัตราส่วน U/t ลดลงอัตราเร็วเชิงมุมก็จะลดลง อัตราเร็วเชิงมุมสามารถเขียนอีกอย่างได้คือ du/dy ซึ่ง U/y และ du/dy จะแสดงถึงอัตราเร็วที่เปลี่ยนแปลงต่อระยะความหนาที่เปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ du/dy ในการพิจารณา ซึ่งความเร็วเชิงมุม (angular velocity) และความเค้นเฉือนกับ y ความลาดของอัตราเร็ว (velocity gradient) dy/dt จะสามารถนิยามได้เช่น ที่อัตราการเคลื่อนที่ของแต่ละชั้นเคลื่อนที่สัมพันธ์กันชั้นใกล้ๆ กันในสมการ

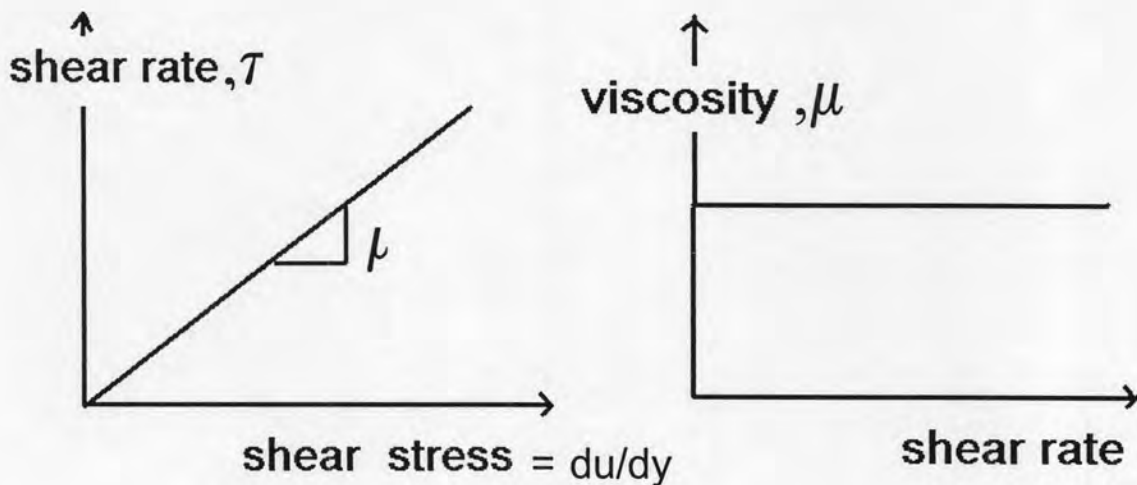
$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.7)$$

คือความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนของของไหล ถ้าของไหลมีพฤติกรรมเป็นไปตามกฎของนิวตัน ก็เรียกว่าสมการความหนืดของนิวตัน (Newtonian's law of viscosity) ซึ่งเป็นความสมการเส้นตรง กล่าวคือ เมื่อให้กราฟแกน y คือ ความเค้นเฉือน และแกน x คือ อัตราเฉือน (Shear Rate, du/dy) ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และ du/dy เป็นเส้นตรงดังรูปที่ 2.6

ที่มีความชันคือ μ และเรียกของไหลนี้ว่า ของไหลนิวโทเนียน (Newtonian fluid) เช่น น้ำ น้ำมัน เป็นต้น

โดย μ เรียกว่าความหนืดของของไหลหรือค่าความหนืดสัมบูรณ์ (Absolute Viscosity)

$$\text{หน่วยของ } \mu = \frac{N/m^2}{m/s} = \frac{N \cdot s}{m^2} = Pa \cdot s$$



รูปที่ 2.6 พฤติกรรมของของไหลนิวโทเนียน จากอัตราเฉือนที่มีผลต่อความเค้นเฉือนและความหนืด

ของไหลอนิวโทเนียนเป็นคุณสมบัติ สำหรับวัสดุที่ไม่ใช่ของเหลวที่นั้นไม่สอดคล้องกับคำนิยามของของเหลว วัสดุที่มีความเป็นพลาสติกจะมีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างแน่นอน เท่ากับปริมาณตามสัดส่วนของแรง แต่ไม่ต่อเนื่องเมื่อมีแรงเค้นมากกระทำภายใต้ yield shear stress สูญญากาศสมบูรณ์ ระหว่างเฟลตเป็นสาเหตุในการเปลี่ยนรูปที่ทุกๆ การเพิ่มอัตราเร็ว ถ้าใช้ทรายวางบริเวณ 2 เฟลต จากพฤติกรรมทางด้านแรงเสียดทานของ Coulomb จะกำหนดขอบเขตแรงที่เป็นสาเหตุการเคลื่อนไหวอย่างต่อเนื่อง ฉะนั้นวัสดุที่เป็นพลาสติก และของแข็งจะยกเว้นจากการวิเคราะห์ของของเหลวแบบไหลนิวโทเนียน

ของไหลที่มีความเค้นเฉือนไม่เป็นสมการเส้นตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ไม่เป็นไปตามสมการความหนืดของนิวตัน จะจัดอยู่ในประเภท ของไหลอนิวโทเนียน เช่น ยาสีฟัน สลิวไซท์ ดินทราย และดินเหนียว เป็นต้น เนื่องจากการไม่แปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงทำให้เกิดความยุ่งยากสลับซับซ้อนในการหาความสัมพันธ์ จำมีสมการมากมายที่พยายามอธิบายถึง

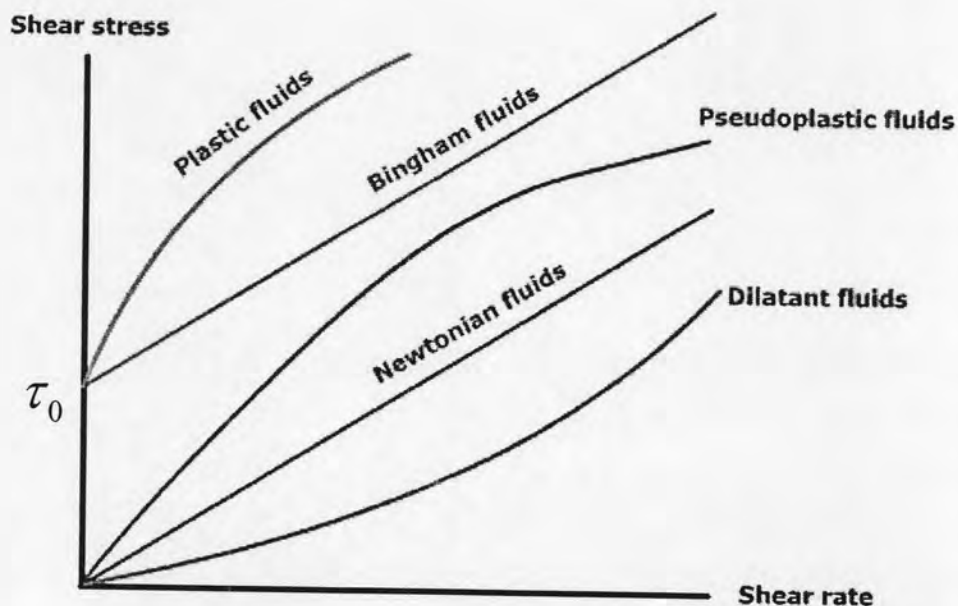
พฤติกรรมของความเค้นเฉือนกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในของไหลนอกแบบนิวตัน โดยสมการที่ใช้สามารถกำหนดได้ว่า

$$\tau_{xy} = \eta \frac{du}{dy} \quad (2.8)$$

η คือค่าความหนืดปรากฏ ซึ่งขึ้นอยู่กับเวลา และชนิดของของไหล

จากความลาดของความสัมพันธ์ระหว่าง τ กับ du/dy ได้ความหนืดสัมบูรณ์, η ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของของไหลแต่ละชนิดที่จะต้านทานต่อความเค้นเฉือน ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหลจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น เพราะเมื่ออุณหภูมิมากขึ้น จะทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของของไหลลดลง

การวิเคราะห์ของไหลตามทฤษฎีแบบ นิวโทเนียน และ นอนนิวโทเนียน ในของไหลแบบ นิวโทเนียน จะมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรงระหว่างขนาดของความเค้นเฉือนที่กระทำต่อผลลัพธ์ของอัตราการเปลี่ยนรูป [ในสมการ (2.6) μ จะมีค่าคงที่โดยไม่คำนึงถึงอัตราเร็วในการเปลี่ยนรูป] แสดงในรูปที่ 2.7 และสำหรับของไหลแบบ นอนนิวโทเนียน จะมีความสัมพันธ์แบบ nonlinear ระหว่างขนาดของความเค้นเฉือนที่กระทำต่ออัตราการเปลี่ยนรูป สำหรับวัสดุที่เป็น idea plastic จะกำหนดความเค้นคลากมีค่าคงที่ และมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงของความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือน

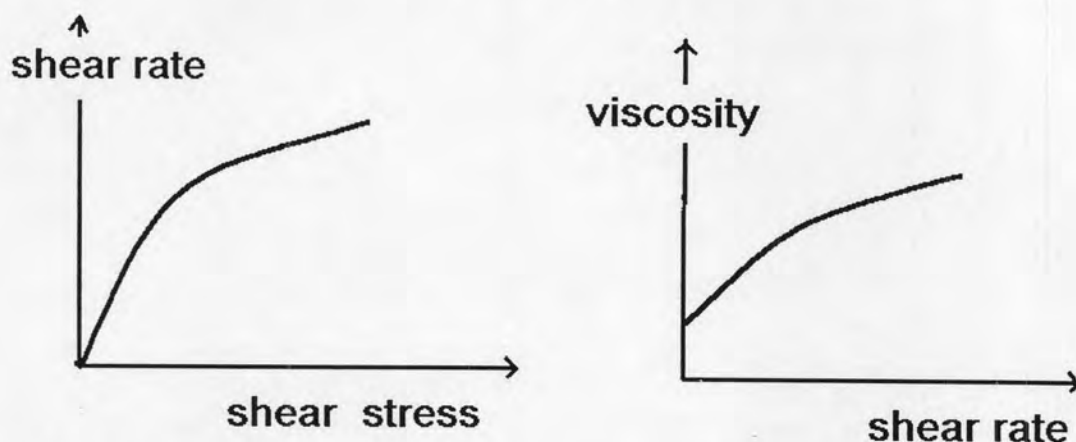


edit by M. Sukjai

รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และอัตราเฉือน ของวัสดุต่างชนิดกัน

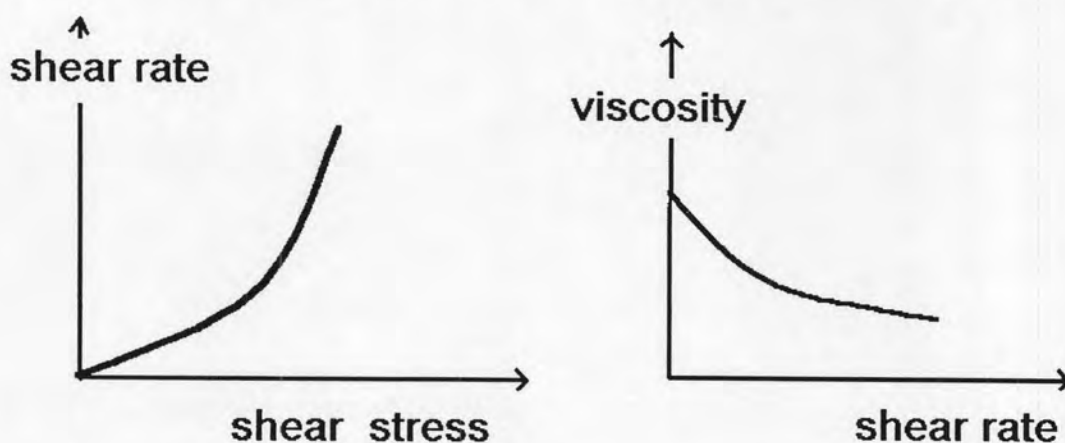
จะสามารถแบ่งชนิดของของไหลนอนิวโทเนียนได้เป็น 4 ประเภทดังรูปที่ 2.8 คือ

1. ของไหลประเภทไดเลแทน (Dilatant fluids) เป็นของไหลที่มีความหนืดมากขึ้นเมื่อความเร็วเชิงมุมมากขึ้น เช่น ทราวดูดเป็นต้น ดังรูปที่ 2.8



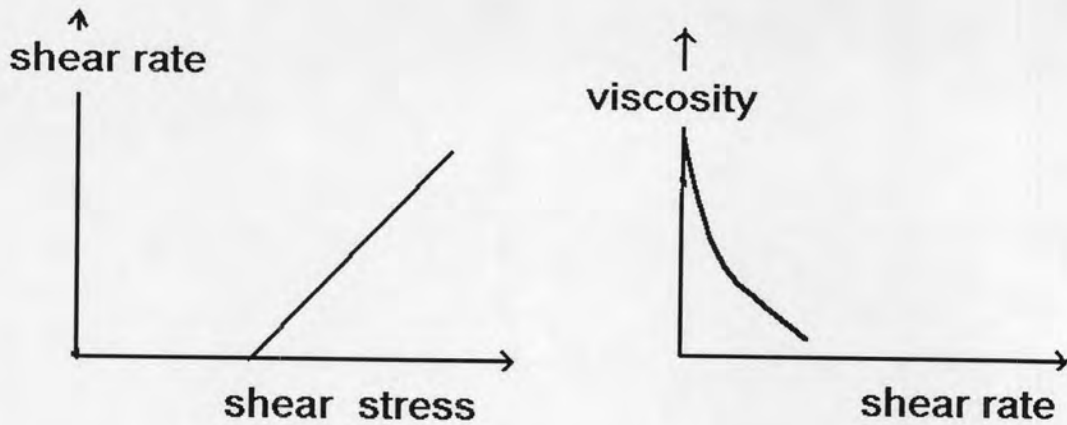
รูปที่ 2.8 พฤติกรรมของของไหลประเภทไดเลแทน จากอัตราเฉือนที่มีผลต่อความเค้นเฉือน และ ความหนืด

2. ของไหลประเภทสโตพลาสติก (Pseudoplastic fluids) เป็นของไหลที่มีความหนืดลดลงเมื่อมีความเร็วเชิงมุมมากขึ้น เช่น นม และสารละลายจำพวกวุ้นเป็นต้น ดังรูปที่ 2.9



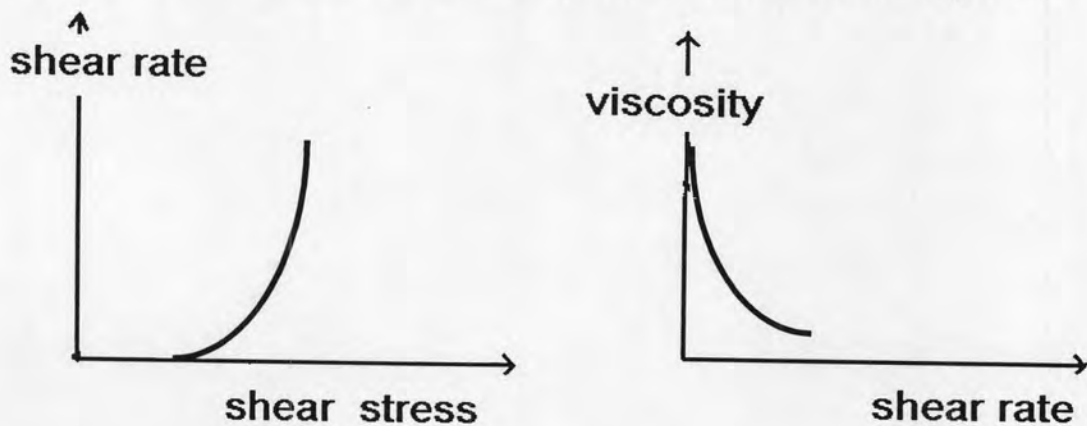
รูปที่ 2.9 พฤติกรรมของของไหลประเภทสโตพลาสติก จากอัตราเฉือนที่มีผลต่อความเค้นเฉือน และ ความหนืด

3. ของไหลประเภทบิงแฮม (Bingham fluids) เป็นของไหลที่จะต้องมีค่าความเค้นคลาก จำนวนหนึ่งก่อนจึงจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมในของไหลจะมีพฤติกรรมการไหลคล้ายกับของไหลนิวโทเนียน ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 พฤติกรรมของของไหลประเภทบิงแฮม จากอัตราเฉือนที่มีผลต่อความเค้นเฉือน และความหนืด

4. ของไหลประเภทพลาสติก (Plastic fluids) เป็นของไหลที่จะต้องมีความเค้นคลาก (Yield stress; τ_0) จำนวนหนึ่งก่อน จึงจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมในของไหลจะมีพฤติกรรมการไหลคล้ายกับของไหล Pseudoplastic เช่น ซอสมะเขือเทศ เป็นต้น ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 พฤติกรรมของของไหลประเภทพลาสติก จากอัตราเฉือนที่มีผลต่อความเค้นเฉือน และความหนืด

ความหนืดจลน์ (Kinematics Viscosity) เป็นอัตราส่วนเปรียบเทียบระหว่างความหนืดสัมบูรณ์ต่อความหนาแน่น ใช้สัญลักษณ์

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{คือ ค่าความหนืดจลน์} \quad (2.9)$$

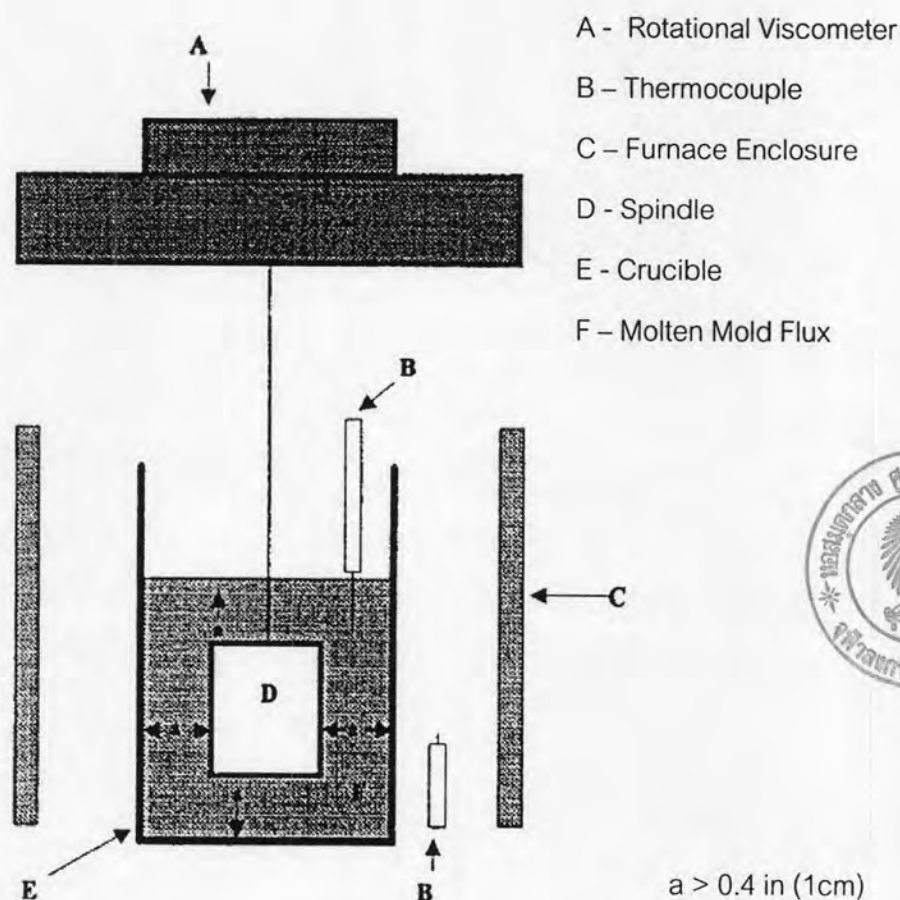
หน่วยของ
$$\nu = \frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{kg}/\text{m}^3} = \text{m}^2/\text{s}$$

ความหนืดจลน์แปรผันตามอุณหภูมิ ซึ่งมีพฤติกรรมคล้ายกับความหนืดสัมบูรณ์ กล่าวคือ ถ้าเป็นของไหลที่มีความหนืดเปรียบเทียบน้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

2.2.2 การทดสอบ ความหนืด (Viscosity) ของดินเหนียว

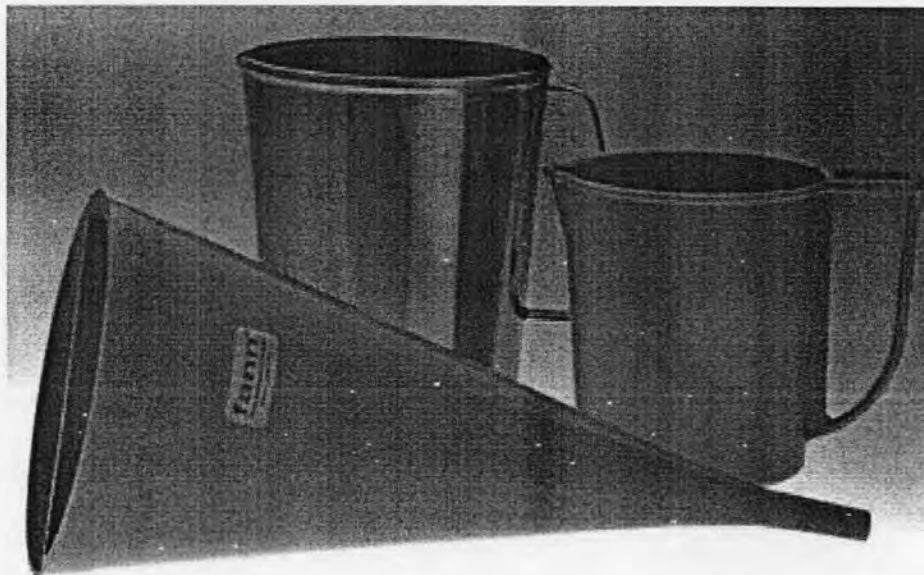
การทดสอบความหนืด (Viscosity) คือการทดสอบการไหลของเหลวเปรียบเทียบกับเวลา โดยทั่วไปแล้วการทดสอบหาความหนืดของดินมีหลากหลายวิธีด้วยกัน แต่ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดหาวิธีการทดสอบหาความหนืด 2 วิธี คือ

1. เครื่องทดสอบหาค่าความหนืดแบบหมุน (Rotational Viscometer) คือการทดสอบการไหลของของเหลวเปรียบเทียบกับเวลา โดยเครื่องทดสอบหาค่าความหนืดแบบหมุนเป็นเครื่องทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C1276 ดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดยประกอบด้วยแกนหมุน (Spindle) และภาชนะใส่ดิน (Mold) ทำการปรับแก้ค่าของเครื่องทดสอบเพื่อหาค่ามาตรฐานของเครื่องมือตามความเร็วที่ใช้ในการทดสอบนั้น และเมื่อต้องการหาความหนืดของวัสดุที่ต้องการทดสอบให้นำค่าที่อ่านได้ที่ความเร็วมาคูณด้วยค่าปรับแก้มาตรฐานของเครื่องมือ ได้ค่าความหนืดของวัสดุทดสอบ



รูปที่ 2.12 ลักษณะเครื่องมือทดสอบหาความหนืดตามมาตรฐาน ASTM C 1276

2. Marsh Funnel Viscometer ตามมาตรฐาน API RP 13 B Section 2 ดังรูปที่ 2.13 เป็นการวัดอัตราการไหลของไหลของไหลเทียบกับเวลา โดยกรวยมีความจุ 946 cm^3 อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ $21 \pm 3^\circ\text{C}$ ทดสอบโดยการเทของไหลลงในกรวยให้ได้ปริมาตรตามต้องการแล้วทำการจับเวลาการไหลของไหลของไหลนั้น ซึ่งผลการทดสอบแสดงออกมาในหน่วย Second



รูปที่ 2.13 ลักษณะเครื่อง Marsh Funnel ทดสอบความหนืดตามมาตรฐาน API RP 13B Section 2

3. Brookfield เป็นเครื่องมือสำหรับหาค่าความหนืดของของเหลว สามารถหาความหนืดของของเหลวได้ในอุณหภูมิ -100°C ถึง 300°C ดังเครื่องมือที่แสดงในรูป 2.14 โดยทำการวัดค่าพารามิเตอร์ของ แรงบิด (Torque), ความเค้นเฉือน (Shear Stress) ความเร็วรอบในการหมุน (Speed of Rotation) และค่าความหนืดที่อัตราเฉือน (Shear Rate) ที่กำหนดโดยความหนืดที่ได้ วัดจากแรงต้านทานการไหลของของเหลวเทียบกับอัตราเร็วในการเคลื่อนตัวของของเหลว โดยเครื่อง Brookfield DV-III จะมีหลักการโดยค่าความหนืดของของเหลวเกิดจะจากแรงต้านการหมุนของแกนหมุน (Spindle) ส่งผ่านไปยังสปริงที่ได้ทำการปรับแก้แล้ว โดยจะอ่านค่าการเสียรูปของสปริง ซึ่งค่าการเสียรูปของสปริงจะถูกวัดด้วยเครื่องแปลงกำลังจากแรงเหวี่ยง (Rotary transducer) ค่าที่วัดได้จาก DV-III (ในหน่วย centipoises) จะพิจารณาจากอัตราเร็วในการหมุน ขนาด และรูปร่าง ของแกนหมุน กับ ขนาด และรูปร่างของกระบอกใส่แกนหมุน และค่าสูงสุดของแรงบิดที่เกิดขึ้นได้จากสปริง ซึ่งสปริงที่ใช้จะมีค่าแรงบิด (ในหน่วย dyne-cm) สูงสุดไม่เท่ากัน

และการอ่านค่าจะเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงบิดสูงสุดของสปริง ซึ่งจะแสดงค่าได้ในช่วง 00.0 – 99.9% และถ้าแรงบิดที่เกิดขึ้นสูงกว่าค่าแรงบิดสูงสุด ก็จะแสดงค่าเป็น “EEE” และให้ลดอัตราเร็วในการหมุนให้ลดลง เพื่อหาค่าความหนืดของของเหลวที่แรงบิดสูงสุด (จะแสดงที่ 99.9%) ที่อัตราเร็วรอบใดๆ จะเป็นค่าอัตราเร็วรอบสูงสุดที่เครื่องมือวัดได้สำหรับของเหลวที่อุณหภูมินั้น ส่วนอัตราเร็วในการเข็นจะขึ้นอยู่กับแกนหมุนและอัตราเร็วในการหมุน ซึ่งแกนหมุนจะต้องได้รับการปรับแก้เพื่อให้เกิดความถูกต้อง โดยอัตราเร็วในการหมุนจะมีค่า 0 ถึง 250 รอบต่อนาที และค่าความหนืดจะคำนวณได้จาก แรงเข็นหารด้วยอัตราเร็วในการเข็น ดังสมการ 2.10

$$\eta = \frac{\text{shear stress}}{\text{shear rate}} \left(\frac{100 \cdot \text{dyne/cm}^2}{1/\text{sec}} \right) \Rightarrow (\text{cP}) \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.14 ลักษณะเครื่อง Brookfield Model DV-III สำหรับหาค่าความหนืดของของเหลว

4. Baroid Rheometer หรือ Hand-Crank Viscometer ตามมาตรฐาน API RP 13 B , I , Section เครื่องมือดังกล่าวแสดงในรูป 2.15 เป็นการทดสอบหา Plastic Viscosity และ Yield Point ของของไหล ทำการทดสอบโดยการนำตัวอย่างของไหลใส่ถ้วยเตรียมตัวอย่างแล้วนำมาประกอบกับเครื่องมือ ทำการหมุนแกนของเครื่องมือด้วยอัตราเร็ว 600 และ 300 รอบ/วินาที ที่อุณหภูมิ 24 ± 3 °C อ่านค่าความหนืดที่ 600 และ 300 รอบ/วินาที จากนั้นคำนวณหาค่าความหนืดตามสมการ

$$\text{ความหนืดพลาสติก (เซนติพอยส์)} = \left(\frac{\text{ค่าที่อ่านที่อัตราเร็ว}}{600 \text{ รอบ/นาที่}} \right) - \left(\frac{\text{ค่าที่อ่านที่อัตราเร็ว}}{300 \text{ รอบ/นาที่}} \right) \quad (2.11)$$

$$\text{Yield Point (Pa)} = 1.44 \times \left(\frac{\text{ค่าที่อ่านที่อัตราเร็ว}}{300 \text{ รอบ/นาที่}} - \text{ความหนืดพลาสติก} \right) \quad (2.12)$$

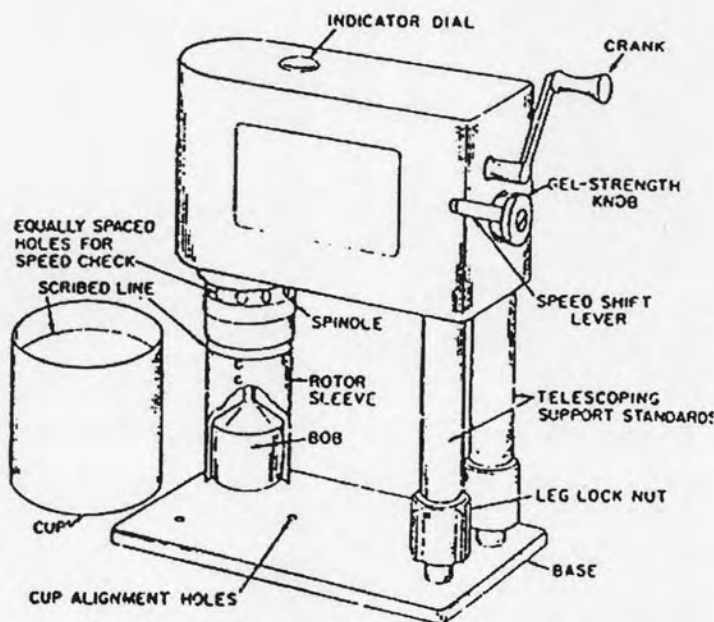


Fig. 7 - Diagram of Baroid Rheometer.

รูปที่ 2.15 ลักษณะเครื่อง Hand-Crank Viscometer ทดสอบความหนืดตามมาตรฐาน API RP 13B, I , Section 3

2.3 ผลงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต

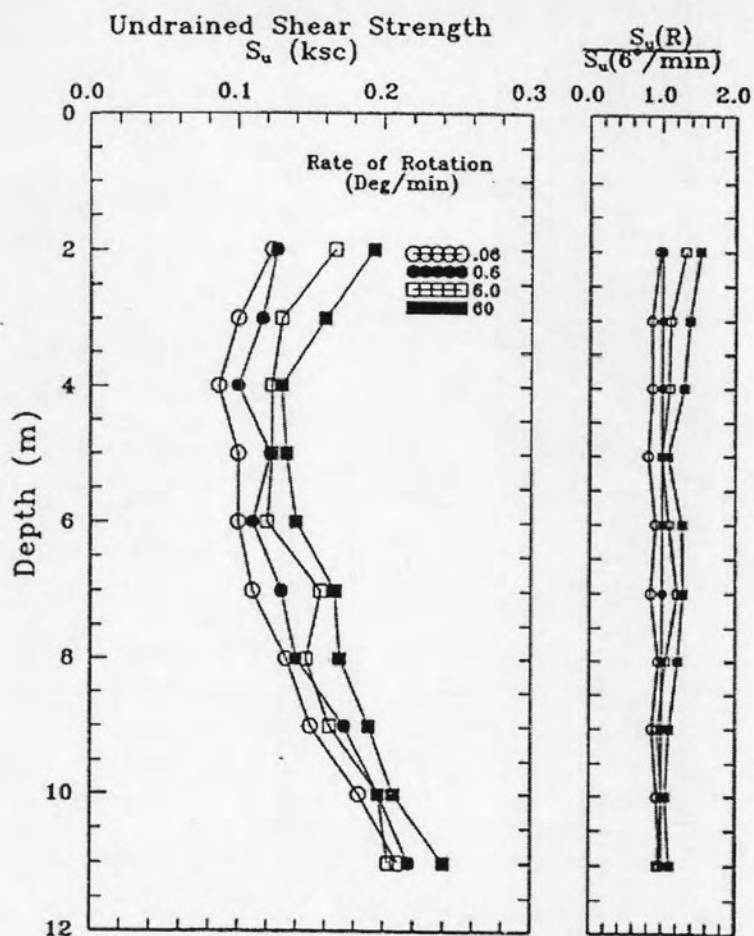
2.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับ Vane Shear Test

การพัฒนาเครื่องมือในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบใบพัด ทั้งในประเทศสวีเดน และในประเทศเยอรมัน ในปี ค.ศ. 1928 ถึง ค.ศ. 1929 และในปี 1947 สถาบันเทคโนโลยีปฐพีสวีเดน (Swedish Geotechnical Institute) ได้เริ่มขยายการใช้งานการใช้งานโดยได้ทำการทดสอบหาลำลังรับแรงเฉือนในสนามโดยใช้ใบพัด โดย Cadling and Odenstad (1950)

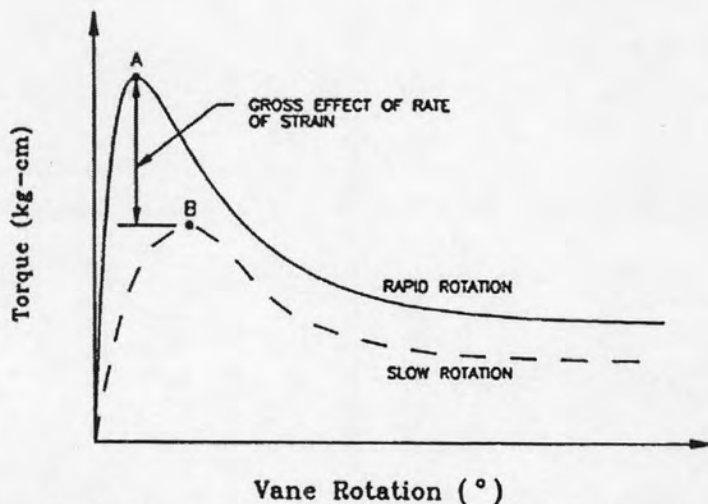
Donald et al. (1977) ได้สรุปข้อเสียในการทดสอบหาลำลังรับแรงเฉือนแบบใบพัด เนื่องจากในการทดสอบจะมีค่าความผิดพลาดของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำได้จากปัจจัยอันเนื่องมาจากดินเช่น ผลกระทบของความไม่เป็นเนื้อเดียวของดิน (Anisotropy effect), อัตราเร็วในการเฉือน (strain rate), และขั้นตอนที่เกิดการวิบัติ (Progressive failure)

Wiesel (1973) พบว่ากำลังรับแรงเฉือนเปลี่ยนไปเมื่อมีการเปลี่ยนอัตราส่วน H:D ของใบพัดลดลง ทำให้กำลังรับแรงเฉือนลดลง และมุมที่ทำให้ดินวิบัติมีค่าลดลง ซึ่งแสดงถึงคุณสมบัติของความไม่เป็นเนื้อเดียวของดิน จะมีผลทำให้อัตราส่วนของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินบนระนาบแนวราบต่อแนวตั้งจะมีค่าน้อยกว่า 1 ในดิน normally consolidated และมากกว่า 1 ในดิน slightly overconsolidated Richardson et al. (1975) ได้ศึกษาถึงคุณสมบัติของความไม่เป็นเนื้อเดียวของดินกรุงเทพฯ โดยใช้ใบพัดแบบต่างๆกัน พบว่ากำลังบนระนาบแนวตั้งจะให้กำลังประมาณ 1.5 เท่าของกำลังบนระนาบแนวราบ และสรุปได้ว่าระหว่างระนาบแนวราบและแนวตั้ง ค่ากำลังรับแรงเฉือนแปรผันเป็นรูปวงรี

Bjerrum (1972) ได้ศึกษาถึงผลกระทบจากอัตราเร็วในการเฉือนตัวอย่างดินเหนียว ว่า จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอัตราเร็ว Cadling and Odenstad (1950) ได้ทำการทดสอบโดยการเพิ่มอัตราเร็วขึ้นประมาณ 10 เท่าทำให้กำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้นถึง 20% และถ้าอัตราเร็วในการเฉือนน้อยกว่า 0.1° /วินาที ค่ากำลังรับแรงเฉือนจะไม่ลดลง แสดงถึงเมื่ออัตราเร็วในการเฉือนที่ 0.1° /วินาที จะเป็นค่าอัตราเร็วต่ำสุดที่จะได้ค่ากำลังรับแรงเฉือนต่ำสุด Wiesel (1973) ได้ทำการทดสอบหาลำลังรับแรงเฉือนที่อัตราเร็วในการหมุนแตกต่างกัน พบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนจะมีค่าลดลงที่อัตราเร็วลดลง ดังรูปที่ 2.16 Kenney et al. (1968) ได้ทำการทดสอบ Triaxial vane test พบว่ากำลังรับแรงเฉือนจะลดลงและระยะเวลาในการวิบัติจะนานขึ้น เมื่ออัตราเร็วในการหมุนลดลง ดังรูปที่ 2.17 Law (1985) และ Satoshi (1989) ได้สรุปผลการทดสอบไปในทิศทางเดียวกัน

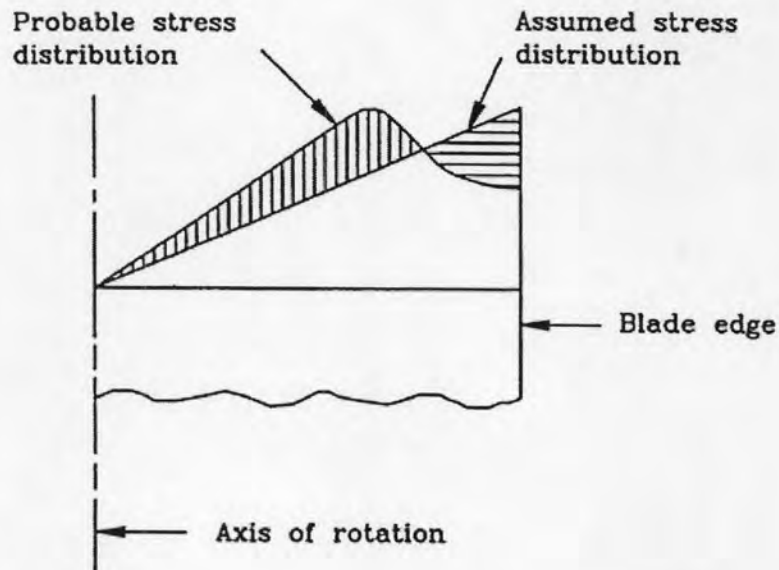


รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือน กับความลึก ที่อัตราเร็วในการหมุน แตกต่างกัน โดย Wiesel (1973)



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแรงเฉือน กับอัตราเร็วในการหมุน โดย Kenney et al., (1965)

Donald et al. (1977) ได้แสดงถึงการวิบัติของดินที่ค่ากำลังสูงสุดของดินที่มีลักษณะเพราะว่าจะเกิดค่ากำลังสูงสุดที่บริเวณมุมของใบพัด และมีการกระจายความเค้น จะเป็นไปตามรูปที่ 2.18

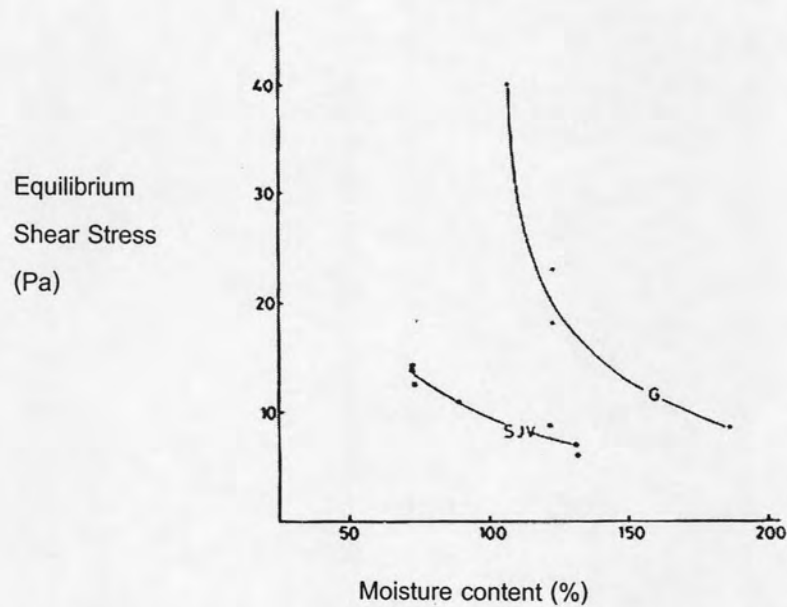


รูปที่ 2.18 แสดงการกระจายแรงเฉือนบนระนาบวิบัติตามแนวราบของใบพัด โดย Donald et al., (1977)

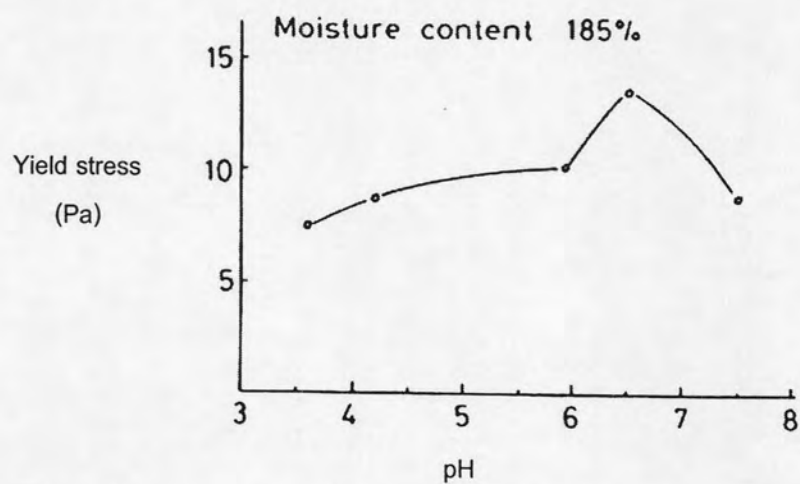
2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับความหนืด

Bentley (1979) ได้ใช้ตัวอย่างดินเหนียว 2 ชนิดคือ St. Jean Vianney clay (SJV) มีค่าความไวตัว (Sensitivity, S_t) ประมาณ 200 ขึ้นไป และดินเหนียว Gloucester ค่าความไวตัวประมาณ 20 ทำการทดสอบหาค่าความหนืด (viscosity) ด้วย Viscometer กับดินเหนียวตัวอย่างจากการทดสอบพบว่าตัวอย่างดินเหนียว Gloucester มีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นตามเวลา และตัวอย่างดินเหนียว SJV ค่าความหนืดกลับลดลงตามเวลาพฤติกรรมตรงกันข้ามกันนี้สามารถอธิบายได้จากความคละกันของอนุภาคในมวลของดิน และส่วนผสมทางแร่ธาตุต่างๆในดินแตกต่างกัน จากนั้น Bentley (1979) ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเฉือนของดินกับปริมาณความชื้น (Water Content) ตามรูปที่ 2.19 พบว่าเมื่อปริมาณค่าชื้นเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนลดลงและดินที่มีค่าความไวตัวมากจะมีค่ากำลังรับแรงเฉือนน้อยกว่าดินที่มีค่าความไวตัวน้อย ที่

ปริมาณความชื้นเดียวกัน นอกจากนั้น Bentley (1979) ยังทดสอบอีกว่าเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า Yield Stress มีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย ดังรูปที่ 2.20 จากรูปพบว่าค่า Yield Stress มีค่ามากที่สุดที่ $\text{pH} \approx 6.5$ Yong et al. (1979) ได้เคยอธิบายเหตุผลนี้ว่าเนื่องจาก ดินเป็น สารประกอบของ Cementitious Material เมื่ออยู่ที่สภาวะที่เหมาะสม (เช่นที่ pH ที่เหมาะสม) จึงทำให้ดินมีการยึดเกาะตัวได้ดียิ่งขึ้น จึงทำให้ค่า Yield Stress เพิ่มมากขึ้นด้วย



รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ของ ค่าความชื้นกับค่ากำลังรับแรงเฉือน โดย Bentley (1979)



รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ของ pH กับ Yield Stress สำหรับดิน Gloucester โดย Bentley (1979)

Torrance (1987) ได้ศึกษาความสัมพันธ์เกี่ยวกับค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อนที่ถูกรบกวนด้วยวิธีการยดกกับค่า Yield Stress ซึ่งหาค่าได้จากวิธีการทดสอบหาค่าความหนืด จากการทดสอบพบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนด้วยวิธีการยดกและ Viscometer ค่าอัตราเร็วในการเฉือนของดินมีผลอย่างมากต่อค่าความต้านทานแรงเฉือน (Shear Resistance) ตามรูปที่ 2.21 จากรูปพบว่าเมื่อค่าอัตราเร็วในการเฉือนของดินเพิ่มมากขึ้นค่าความต้านทานแรงเฉือน (Shear Resistance) เพิ่มมากขึ้นด้วยและพบว่าเมื่อค่าความเค็มของดิน (Salinity) เพิ่มขึ้นค่าความต้านทานแรงเฉือนก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย หลังจากนั้น Torrance (1987) ได้นำตัวอย่างดินเหนียวซึ่งเปลี่ยนแปลงทางเคมีในแบบต่างๆตาม ตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2 ซึ่งพบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางคุณสมบัติของดินเป็นอย่างมากตาม ตาราง จากนั้นเมื่อนำตัวอย่างดินมาทำการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบกรวยยดก และหาค่า Yield Stress จากการทดสอบหาค่าความหนืด โดยเปลี่ยนแปลงค่าความเค็มและค่าทางเคมีต่างๆ ได้ความสัมพันธ์ตามรูปที่ 2.22 Torrance (1987) ได้อธิบายความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นว่า จากรูป (a) ถึง (d) การหาความสัมพันธ์จะกระทำได้อย่างไรก็ตามพบความสัมพันธ์ในแต่ละรูปได้ว่าเมื่อค่าความชื้น ของตัวอย่างดินเดียวจะลดลงเมื่อค่าความเค็มของดินลดลงซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ทางด้าน Plasticity

Locat (1988) ได้เสนอว่า การศึกษาพฤติกรรมเกี่ยวกับการไหลของดินเหนียวที่มีความไวตัวสูงมีความสัมพันธ์กับค่าความหนืดพลาสติก, Yield Stress, กำลังรับแรงเฉือนของดินที่ถูกรบกวน (Remolded Shear Strength), และ Liquidity Index โดยทั่วไปแล้วสามารถทำนายค่ากำลังรับแรงเฉือนได้กล่าวถึงดินที่มีค่า Liquidity Index สูงกว่า 6 สำหรับดินที่มีค่า Liquidity Index ที่อยู่ระหว่าง 2-5 ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่ถูกรบกวนมีค่าระหว่าง 5-90 Pa. และค่าความหนืดพลาสติกมีค่าอยู่ในช่วง 7-200 mPa-s. พฤติกรรมการไหลของดินมีค่าขึ้นตรงกับ ชนิดของดิน, ความเค็มของดิน (Pore-water Salinity), แร่ธาตุต่างๆในดิน และค่าปริมาณความชื้น (Water Content) ชนิดของการไหลของดินในรูปแบบต่างๆได้แสดงในรูปที่ 2.23 ซึ่งค่าความหนืดก็มีลักษณะเดียวกันกับความชื้น ของส่วนโค้งในรูป จากรูปพบว่า Curve 2 คือ Thickening liquids แสดงว่าค่าความหนืดจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า Shear Rate มีค่าเพิ่มขึ้น, Curve 3 แสดงพฤติกรรมที่ตรงกันข้ามคือเมื่อค่าความหนืดจะลดลงเมื่อค่า Shear Rate มีค่าลดลง, Curve 4 เป็นการไหลแบบ Plastic หรือการไหลแบบ Casson แสดงรูปแบบการไหลโดยใช้ค่า Yield Stress (หรือ Yield Point) และค่าความหนืดลดลงแบบช้าๆ ที่อัตราความเร็วในการเฉือนสูงๆ, Curve 5 แสดงว่าค่าความหนืดมีค่าคงที่ ที่ค่าค่าหนึ่งจะมีลักษณะเหมือนการไหลของวัสดุต่างๆไป ซึ่งเรียกว่า Bingham Fluids จากการทดสอบสามารถหาความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นได้เป็น ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Yield

Stress กับค่าความหนืด ดังรูปที่ 2.24, ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Yield Stress กับค่า Liquidity Index ดังรูปที่ 2.25, ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดกับค่า Liquidity Index ดังรูปที่ 2.26 และ ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินถูกรบกวนกับค่า Yield Stress ดังรูปที่ 2.27 จากรูปที่ 2.26 Locat (1988) ได้หาความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงที่เกิดขึ้นได้ตามสมการที่ (2.13)

$$\eta = (9.27/l_L)^{3.33} \text{ mPa-s} \quad (2.13)$$

โดยที่

$$\eta = \text{ค่าความหนืด (Viscosity)}$$

$$l_L = \text{ค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit, L.I.)}$$

อีกทั้งได้หาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวถูกรบกวน (c_u) กับค่า Liquidity Index จากรูป Locat (1988) ได้ใช้ Curve A หาสมการความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นได้ตามสมการที่ (2.14)

$$c_u = (19.8/l_L)^{2.44} \text{ Pa.} \quad (2.14)$$

สุธี (2003) ได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบใบพัด พบว่าเมื่อค่า Liquidity Index มีค่าน้อยกว่า 1 การเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับแรงเฉือนจะเป็นไปอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อค่า Liquidity Index มากกว่า 1 ไปแล้วการเปลี่ยนแปลงค่าจะกำลังรับแรงเฉือนจะน้อยลงเนื่องจากดินมีสภาพเป็นของเหลว

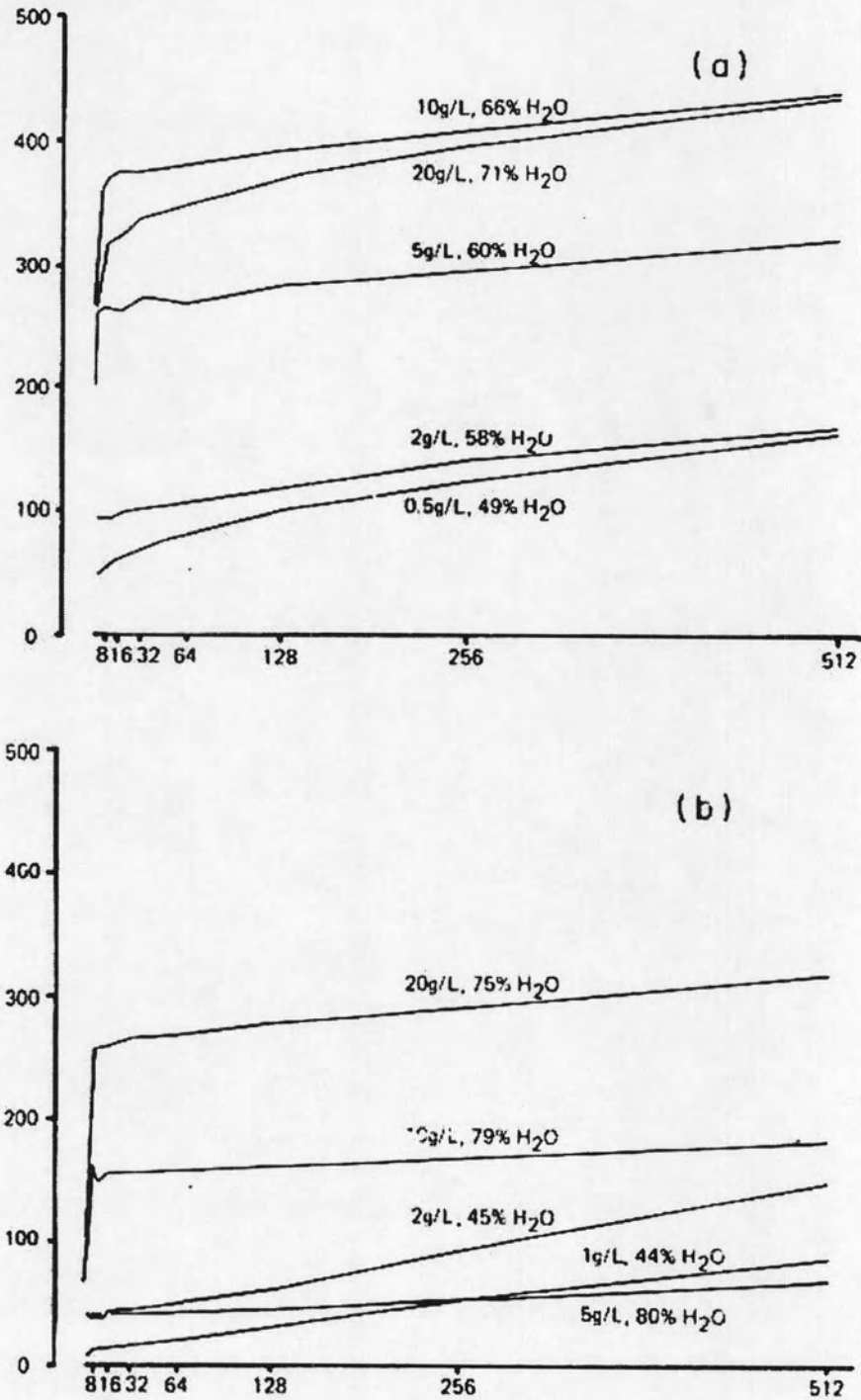
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดกับปริมาณความชื้น จะแปรผกผันกัน เมื่อค่าปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความหนืดลดลง โดยจะแปรผันกับค่าพิกัดเหลวของดินและมีค่าความหนืดคงที่เมื่อปริมาณความชื้นมีค่าสูงขึ้นจนมากกว่าค่าพิกัดเหลวประมาณ 3.5 ถึง 4 เท่า ซึ่งจะมีค่าความหนืดใกล้เคียงกับน้ำที่ 27 วินาทีสำหรับการทดสอบด้วยเครื่องมือ Marsh Funnel Viscometer และมีค่า 3 kPa-s สำหรับการทดสอบด้วยเครื่องมือ Hand-Crank Viscometer ดังรูปที่ 2.28 และ 2.29 และการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนกับค่าความหนืดโดยการทดสอบแบบกรวยตกได้ในช่วงความชื้น 125% - 165% ดังรูปที่ 2.30 ตามสมการที่ (2.15)

$$c_u = \frac{120.6}{(-0.4253\eta + 44.181)^2} \quad (2.15)$$

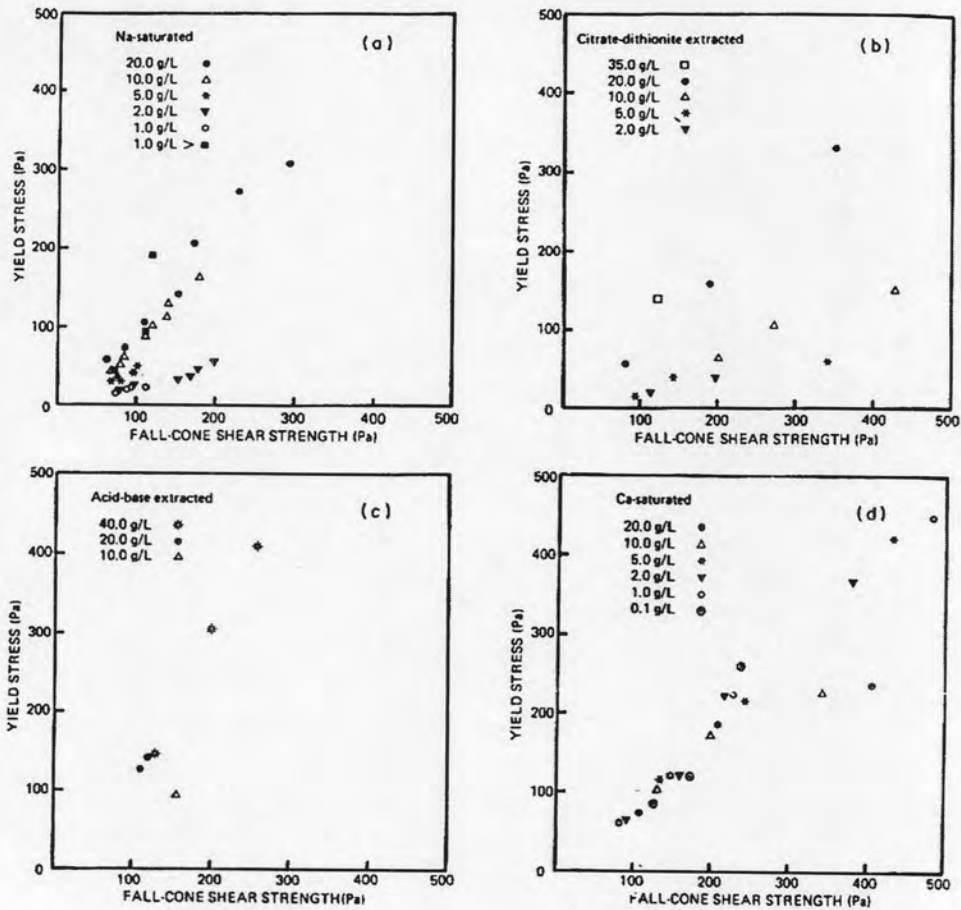
โดยที่

$$c_u = \text{ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน (kPa)}$$

$$\eta = \text{ค่าความหนืด (mPa-s)}$$



รูปที่ 2.21 (a) ดินเหนียว South Nation และ (b) ดินเหนียว St. Leon le Ground ใน sodium-saturated state โดยเปลี่ยนแปลง ค่าความเค็มและค่าความชื้น โดย Torrance (1987)



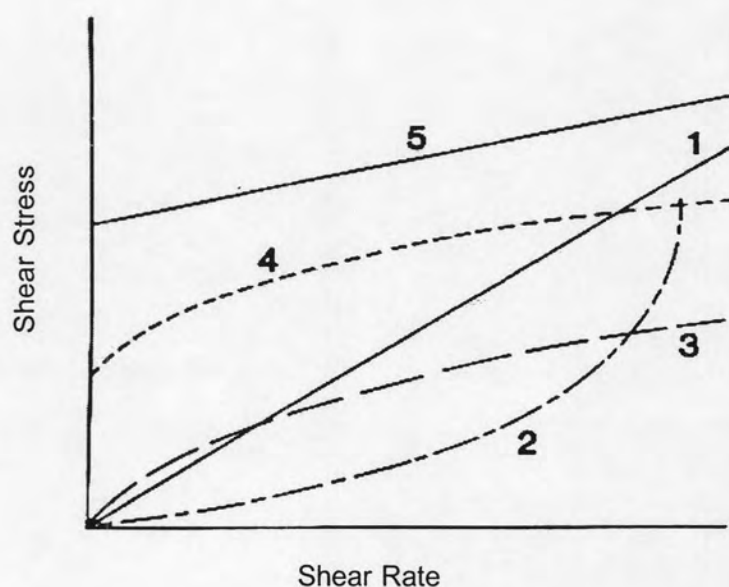
รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง Yield Stress ซึ่งหาค่าโดยใช้วิธีทดสอบค่าความหนืด และ ค่ากำลังรับแรงเฉือนซึ่งใช้วิธีกรวยตกในการทดสอบ (a) Na-saturated, (b) citrate-dithionite extracted และ Na-saturated (c) acid-base extracted และ Na-saturated, (d) Ca-saturated โดย Torrance (1987)

ตาราง 2.1 ข้อมูลทั่วไปของดินที่ใช้ทดสอบ โดย Torrance (1987)

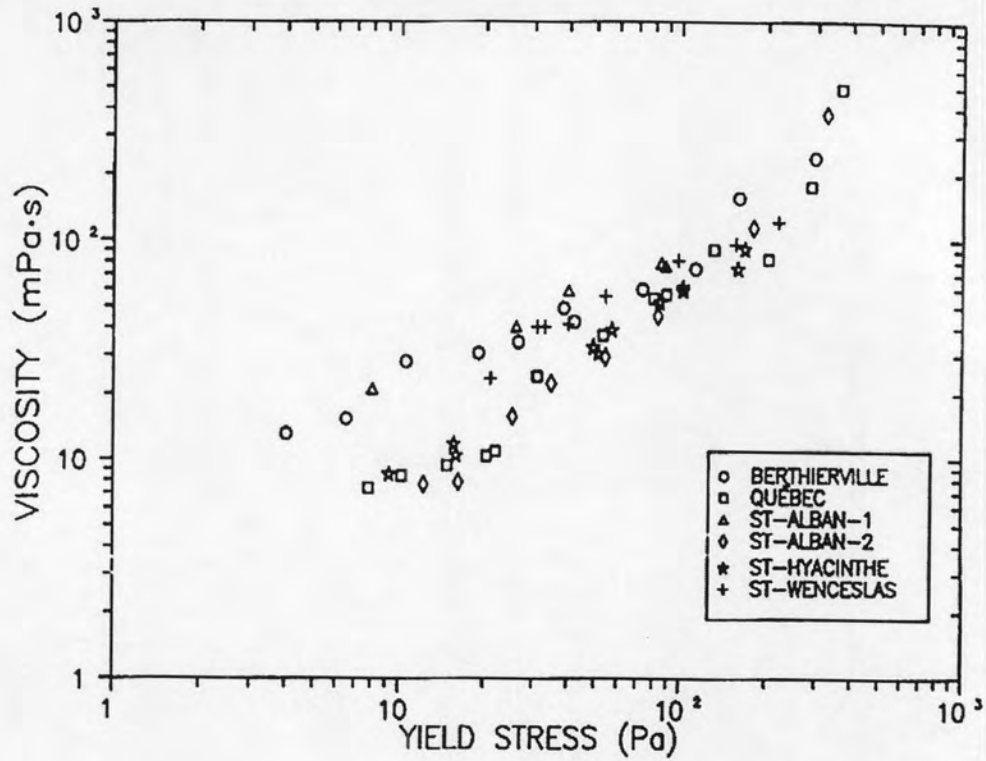
Soil	Salinity (g / L)	Pretreatment	Water			
			Content (%)	ω_L	ω_p	I_p
St. Leon le Grand, Quebec Canada	23.4	50	50	47.2	23.1	24.1
South Nation, Ontario Canada	1.1	65	45	36	20	16
Grand Baleine, Quebec Canada	0.8	67	51	35.7	25.9	9.8

ตาราง 2.2 ข้อมูล Atterberg Limits ของดินเหนียวที่มี sodium-saturated, ค่าความเค็มสูง โดย Torrance (1987)

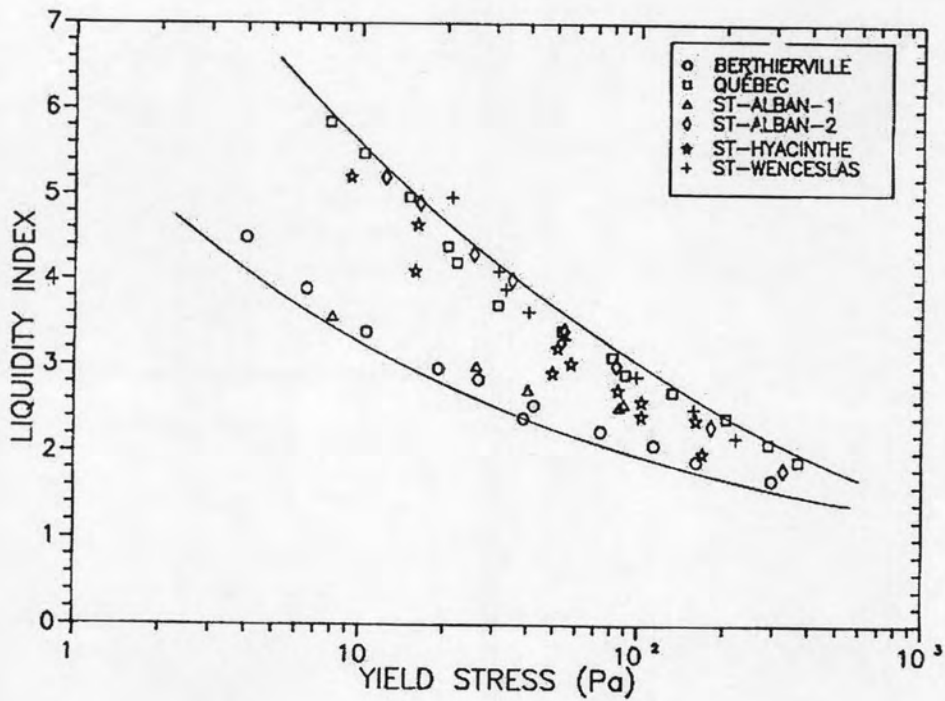
Soil	Salinity (g / L)	Pretreatment	ω_L	ω_p	I_p
St. Leon le Grand, Quebec Canada	20	Na-saturated	46.8	23.0	23.8
		Citrate-dithionite	32.7	20.3	12.4
South Nation, Ontario Canada	20	Na-saturated	48.4	20.7	27.7
		Citrate-dithionite	47.8	21.1	26.7
		Acid-base	32.6	17.9	14.7
Grand Baleine, Quebec Canada	20	Na-saturated	37.1	23.6	13.5
		Citrate-dithionite	35.5	21.0	12.5
		Acid-base	27.6	21.4	6.2



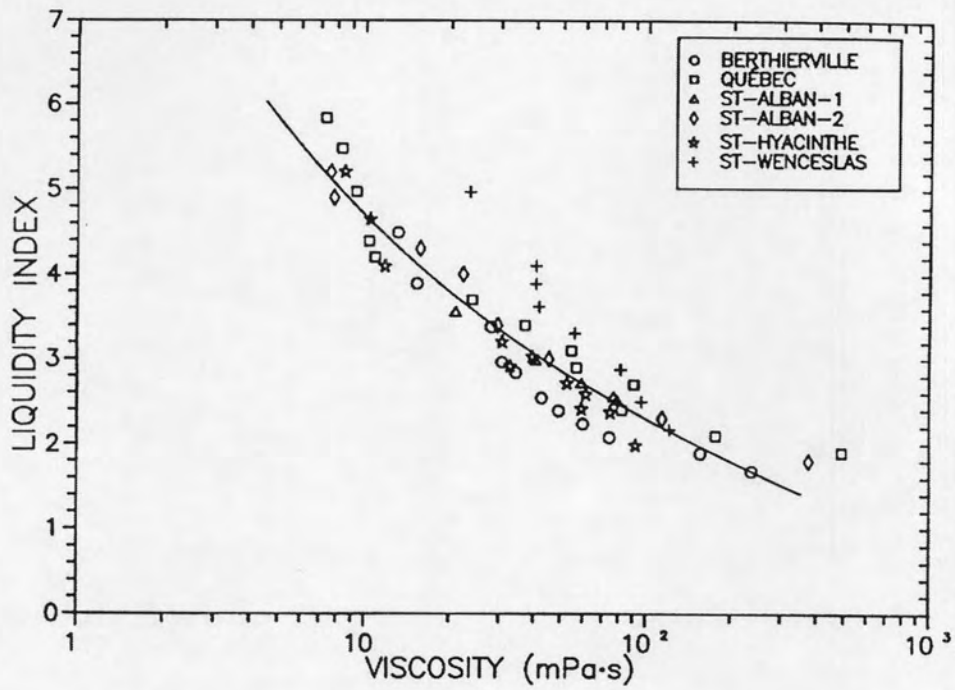
รูปที่ 2.23 ชนิดของการไหลแบบต่างๆ (1) Newtonian (2) thickening (3) fluidizing (4) Casson (5) Bingham โดย Locat (1988)



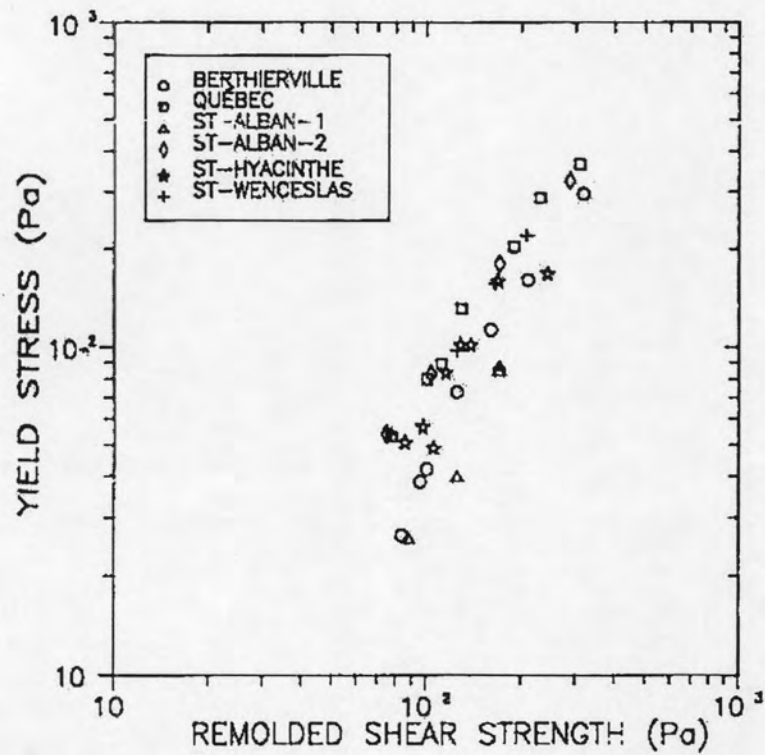
รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง Viscosity และ yield Stress โดย Locat (1988)



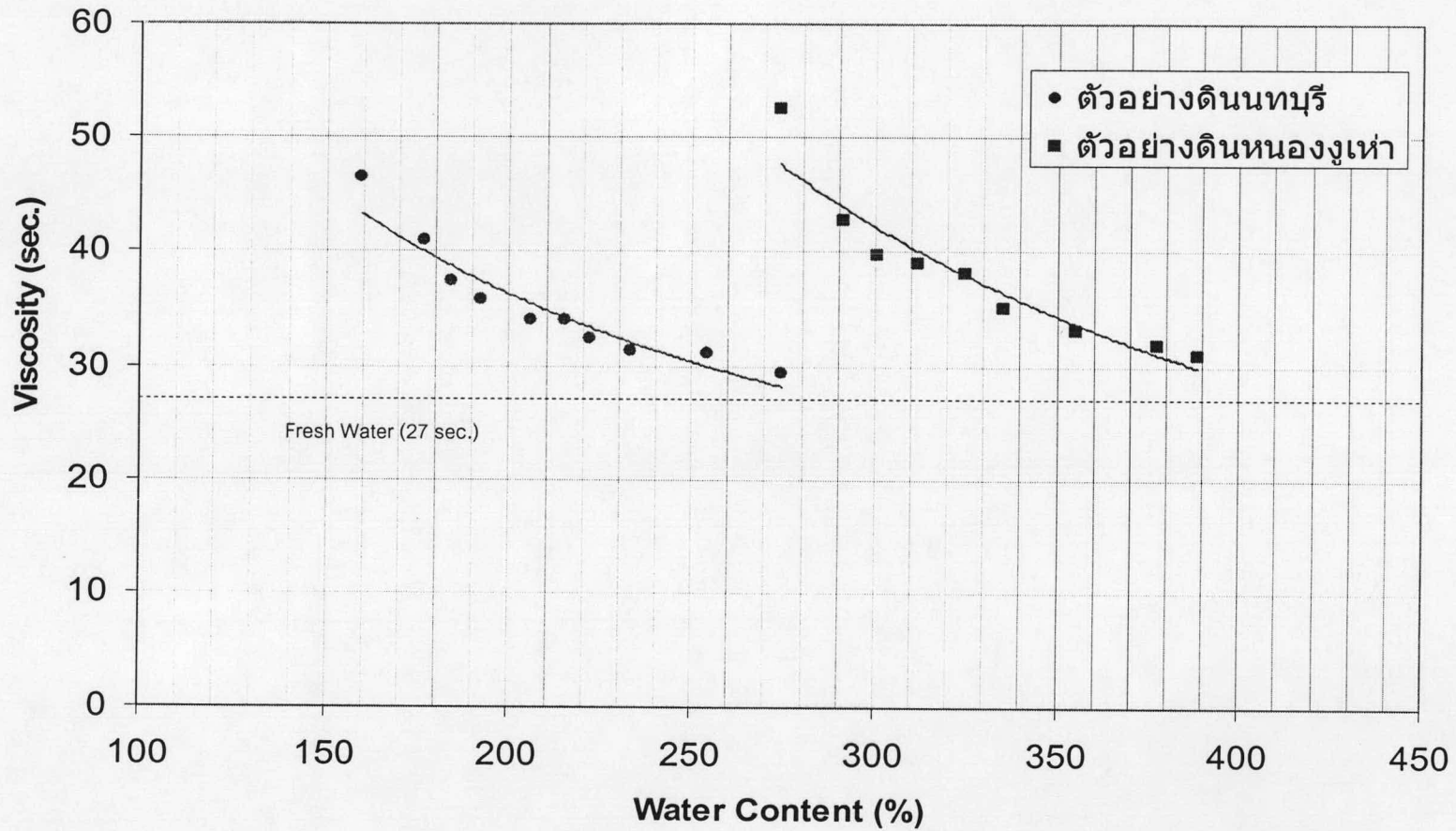
รูปที่ 2.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง Liquidity Index และ yield Stress โดย Locat (1988)



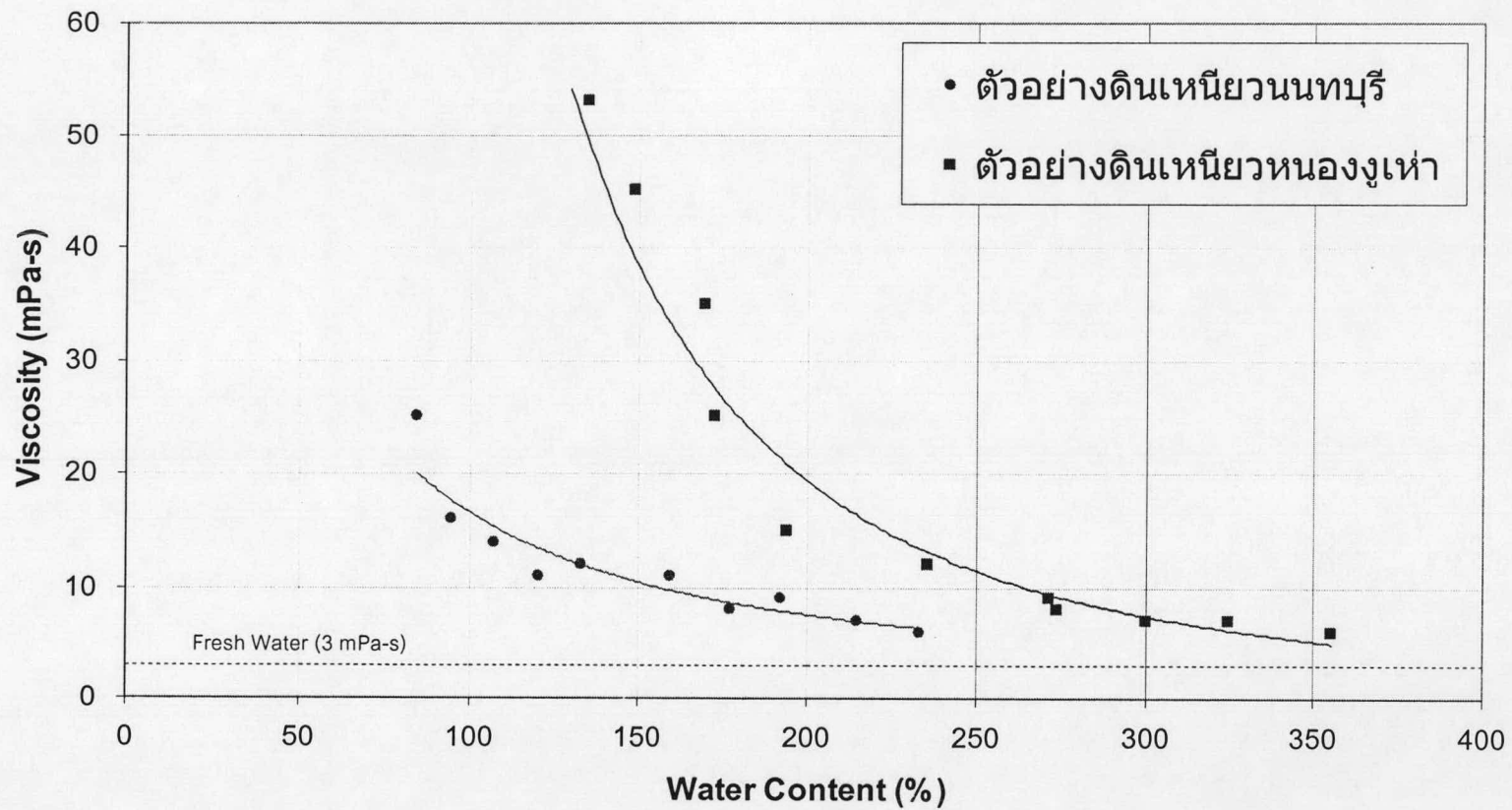
รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง Liquidity Index และ Viscosity โดย Locat (1988)



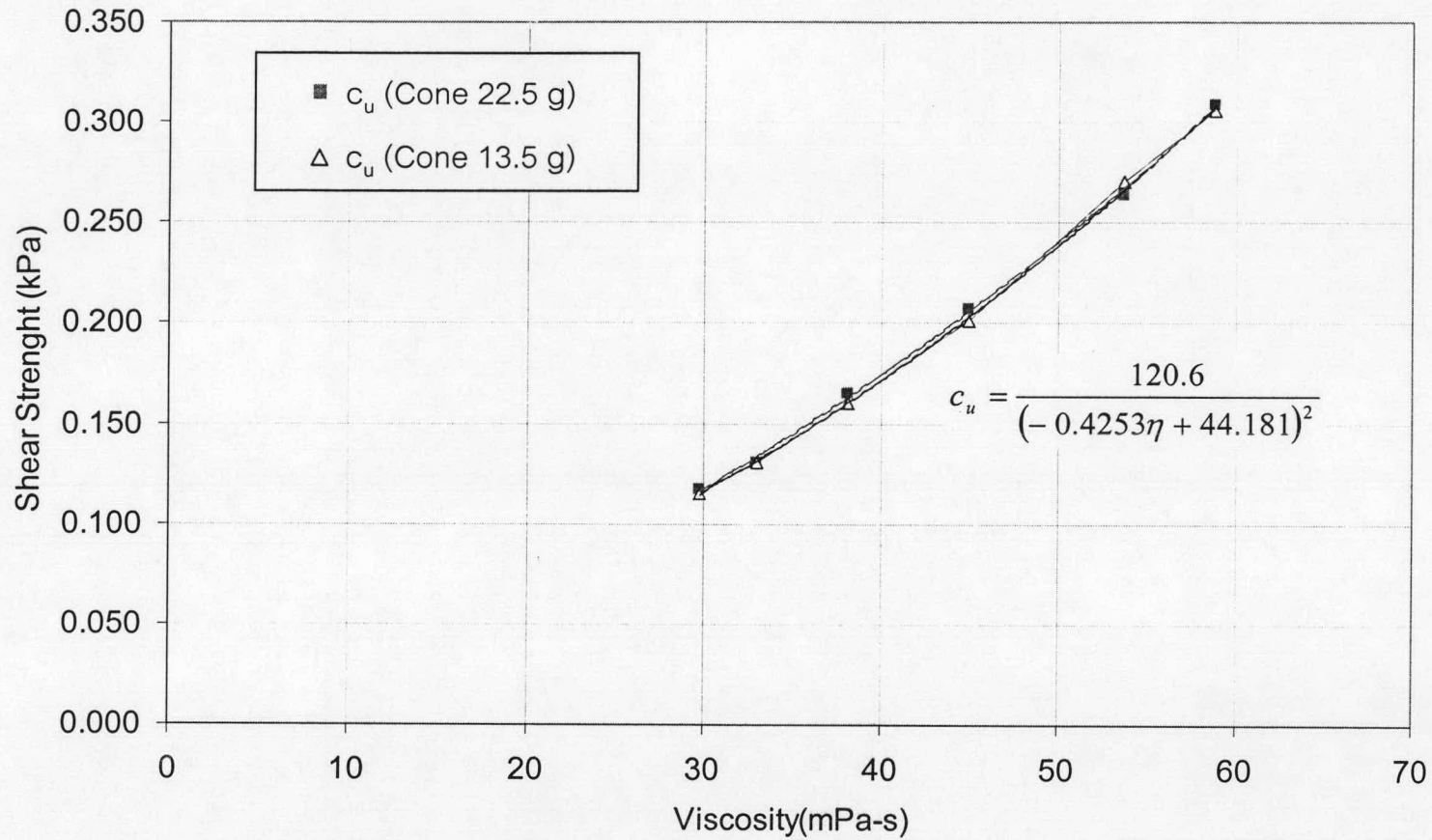
รูปที่ 2.27 ความสัมพันธ์ของ Yield Stress และ Remoulded Shear Strength โดย Locat (1988)



รูปที่ 2.28 ค่า Water Content (%) กับ Viscosity (η , sec) ของตัวอย่างดินนทบุรีและหนองงูเห่า ทดสอบด้วยเครื่องมือ Marsh Funnel Viscometer โดย สุธี (2003)



รูปที่ 2.29 เปรียบเทียบค่า Water Content (%) กับ Viscosity (η , mPa-s) ของตัวอย่างดินนนทบุรี และ ตัวอย่างดินหนองงูเห่า ทดสอบด้วยเครื่องมือ Hand-Crank Viscometer โดย สุทธิ (2003)



รูปที่ 2.30 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength c_u , kPa) กับ ค่าความหนืด (Viscosity, η) ของกรวย 30° หนัก 22.5 g และ 13.5 g สำหรับตัวอย่างดินหนองงูเห่า โดย สุทธิ (2003)