

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล

#### 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางเคมีของดิน

##### 4.1.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน

ผลการทดสอบคุณสมบัติชั้นพื้นฐานของดินเหนียว บริเวณถนนพระราม 9 ที่ระดับความลึก 3.00 - 6.00 ม. จากหลุมเจาะทั้ง 3 หลุมแล้วนำมาผสมรวมกันแล้วมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 มีค่าดังนี้

ค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit, LL.) เท่ากับ 66%

ค่าดัชนีพลาสติกซิตี (Plasticity Index, PI.) เท่ากับ 38%

ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) เท่ากับ 2.56

ค่าที่ได้จากการทดสอบพบว่าค่าพิกัดเหลว และค่าดัชนีพลาสติกซิตี ลดลงอย่างมากจากเดิมค่าพิกัดเหลวมีค่าอยู่ในช่วง 76.5 – 116.7% และค่าดัชนีพลาสติกซิตีมีค่าอยู่ในช่วง 45.7 – 75.7% เนื่องจากการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ทำโดยร่อนแบบเปียกทำให้ความเหนียวลดลงไปพร้อมกับน้ำ สำหรับค่าความถ่วงจำเพาะถือว่าใกล้เคียงกับค่าเดิม

##### 4.1.2 ผลการทดสอบส่วนประกอบทางเคมี

ผลการทดสอบส่วนประกอบทางเคมีของดินเหนียว บริเวณถนนพระราม 9 ที่ระดับความลึก 3.00 - 6.00 ม. จากหลุมเจาะทั้ง 3 หลุมแล้วนำมาผสมรวมกันแล้วมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 มีค่าดังนี้

ค่าอินทรีย์ในดิน (Organic Content) เท่ากับ 3.4% ของน้ำหนักแห้ง

ค่าคลอไรด์ในดิน (Chloride Content) เท่ากับ 0.32 % ของน้ำหนักแห้ง

ค่าซัลเฟตในดิน (Sulfate Content) เท่ากับ 0.48 % ของน้ำหนักแห้ง

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 7.5

## 4.2 การสอบเทียบค่าเครื่อง Rotational Viscometer

### 4.2.1 การคำนวณขีดจำกัดค่าความหนืดของเครื่อง Rotational Viscometer

จากสมมุติฐานของนิวตัน จากกฎข้อที่ 3 กล่าวว่า “แรงกระทำย่อมมีขนาดเท่ากับแรงต้านการกระทำ (หรือแรงปฏิกิริยา) แต่มีทิศตรงข้ามกันเสมอ” นั่นคือเมื่อมีแรงที่กระทำต่อวัสดุหนึ่ง วัสดุใต้นั้น วัสดุใต้นั้นจะเกิดมีแรงต้านการกระทำในทิศตรงข้ามเสมอ ดังรูปที่ 4.1 โดยจะพบว่าแรงต้านการเคลื่อนที่ ของของเหลวและก๊าซ นั่นก็คือความหนืด ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กันระหว่างความเค้นต่ออัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของของไหลดังแสดงในสมการที่ 4.1

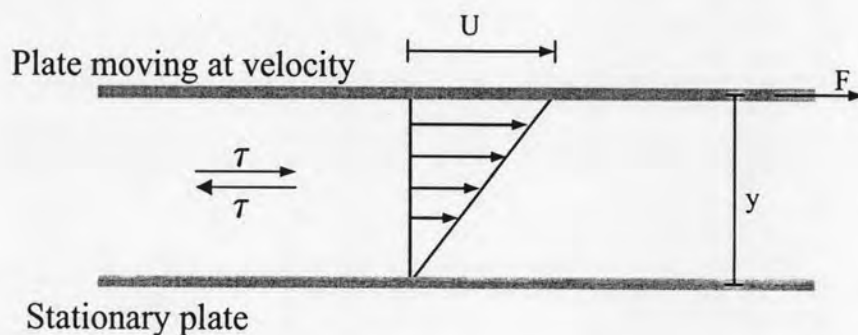
$$\mu = \tau / \text{velocity gradient} \quad (4.1)$$

$$\text{Shear Stress } (\tau) = F/A \quad \text{มีหน่วยเป็น } \text{N/m}^2$$

$$\text{Velocity gradient} = dU/dy \quad \text{มีหน่วยเป็น } \text{sec}^{-1}$$

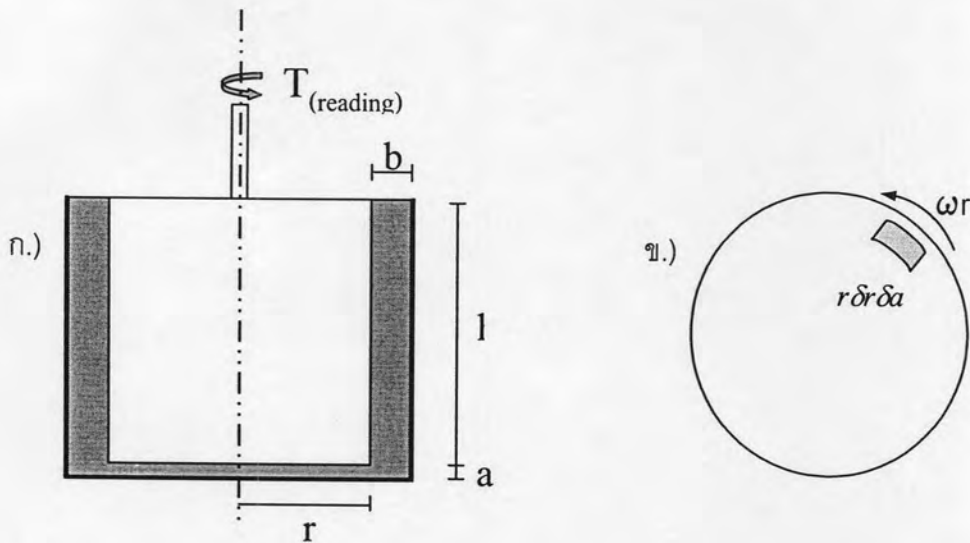
$$\text{Absolute Viscosity } (\eta) = \frac{F}{A} \cdot \frac{dy}{dU} \quad \text{มีหน่วยเป็น } \text{Pa}\cdot\text{s}$$

จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า เมื่อมีแรง (F) มากกระทำที่ผิวด้านบนของของไหล (Plate moving at velocity) ด้วยอัตราเร็ว (U) ของไหลมีการเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว  $dU/dy$  จากผิวบนของของไหลมายังล่างที่สัมผัสวัสดุ (Stationary plate) โดยที่ผิวล่างของวัสดุไม่มีการเคลื่อนที่ เมื่อของไหลถูกแรงมากกระทำให้เกิดการเคลื่อนที่ วัสดุที่ไม่มีการเคลื่อนที่จะเกิดแรงต้านในทิศทางตรงกันข้ามคือ ความเค้น ( $\tau$ ) ในตัววัสดุ นั่นก็คือความหนืดของวัสดุ



รูปที่ 4.1 แรงต้านของวัสดุจากการกระทำของแรง F

จากสมการที่ 4.1 นำมาแยกพิจารณาแรงต้านที่เกิดบริเวณด้านข้าง และบริเวณ  
ด้านล่างของแกนหมุน



รูปที่ 4.2 ลักษณะการพิจารณาแรงต้านของวัสดุที่เกิดขึ้นจากการหมุนของแกนหมุน (ก. แสดงรูปตัดของภาชนะใส่ดินกับแกนหมุน ข. แสดงรูปด้านล่างของภาชนะใส่ดินกับแกนหมุน)

พิจารณาจากด้านข้างของแกนหมุน

$$\eta_v = \frac{T_v}{\pi D^2 \frac{h}{2}} \cdot \frac{b}{\omega r}$$

$$\eta_v = \frac{T_v b}{2\pi^2 h \cdot 2\pi N r / 60}$$

$$\eta_v = \frac{15 T_v b}{\pi^2 r^3 h N}$$

$$T_v = \frac{\eta_v \pi^2 r^3 h N}{15 b}$$

พิจารณาจากด้านล่างของแกนหมุน

$$\delta T = r \tau \delta A = r \cdot \frac{\eta_h \omega r}{a} \cdot r \delta r \delta \alpha$$

$$\delta T = \frac{\eta_h \pi N}{30 a} \int_0^r \int_0^{2\pi} r^3 dr d\theta$$

$$\delta T = \frac{\eta_h \pi N}{30 a} \cdot \frac{r^4}{4} \cdot 2\pi$$

$$T_h = \frac{\eta_h \pi^2 r^4 N}{60 a}$$

โดยให้  $T_{(reading)}$  คือจากแรงลัพท์ที่เกิดจากแรงต้านการหมุนจากด้านข้างและด้านล่างของแกนหมุน

$$T_{(reading)} = T_v + T_h = \frac{\eta_v \pi^2 r^3 h N}{15 b} + \frac{\eta_h \pi^2 r^4 N}{60 a}$$

สำหรับวัสดุที่มีคุณสมบัติในการรับแรงเหมือนกันทั้งสองทิศทาง ;  $\eta_v = \eta_h$

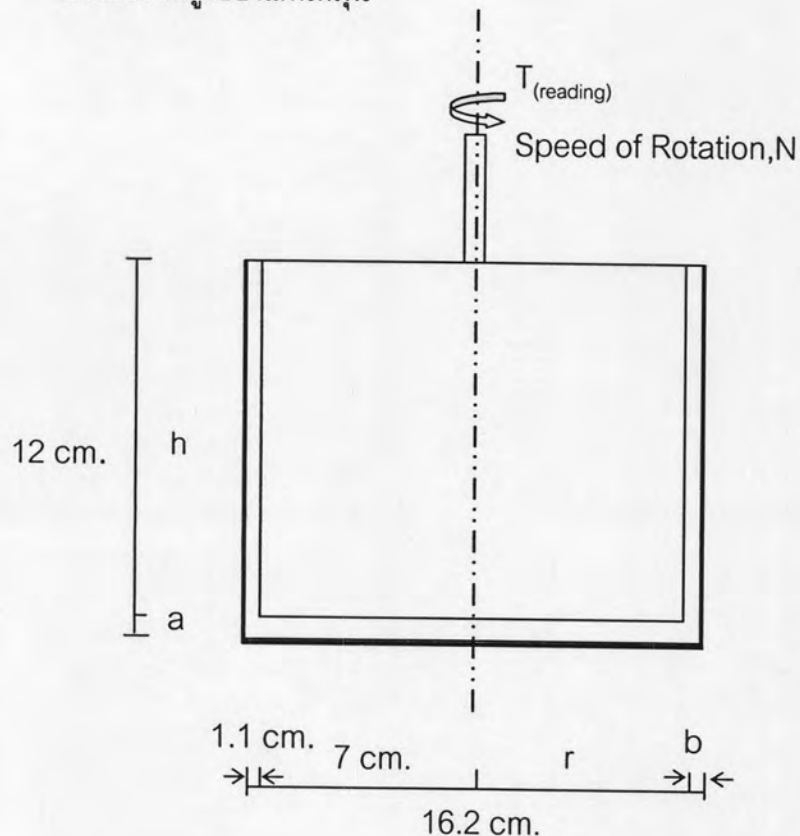
$$T_{(reading)} = \frac{\eta \pi^2 r^3 N}{60 a b} \cdot [4ah + rb]$$

เมื่อต้องการหาค่าความหนืดได้ดังสมการที่ 4.2

$$\eta = \frac{60abT_{(reading)}}{\pi^2 r^3 N(4ah + rb)} \quad (4.2)$$

จากสมการที่ได้ประกอบจาก 3 ส่วนคือ

1. แรงบิดที่เกิดขึ้น  $T_{(reading)}$  ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.0245 – 0.4903 N-m
2. อัตราเร็วในการหมุน  $N$  ซึ่งใช้อยู่ในช่วง 0.12 – 38.5 รอบต่อนาที
3. ขนาดของแกนหมุนและภาชนะใส่ดิน (Shape Factor, K) ได้แก่
  - a คือระยะห่างของช่องว่างระหว่างแกนหมุนกับภาชนะทางด้านล่าง = 1.0 ซม.
  - b คือระยะห่างของช่องว่างระหว่างแกนหมุนกับภาชนะทางด้านข้าง = 1.1 ซม.
  - r คือรัศมีของแกนหมุน = 7 ซม.
  - h คือความสูงของแกนหมุน = 11 ซม.



รูปที่ 4.3 รายละเอียดขนาดต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณค่าความหนืดของ Rotational Viscometer

จากสมการที่ 4.2 เมื่อแยกพิจารณาค่าของ K ได้

$$\eta = \frac{60ab}{\pi^2 r^3 (4ah + rb)} \cdot \frac{T_{(reading)}}{N} = \frac{T_{(reading)}}{K \cdot N} \quad (4.3)$$

$$\frac{1}{K} = \frac{60ab}{\pi^2 r^3 (4ah + rb)}$$

แทนค่าด้วยขนาดของแกนหมุน และภาชนะใส่ดินได้

$$\frac{1}{K} = \frac{60 \cdot 0.01 \cdot 0.011}{\pi^2 \cdot 0.07^3 (4 \cdot 0.01 \cdot 0.11 + 0.07 \cdot 0.011)}$$

$$K = 0.0026518$$

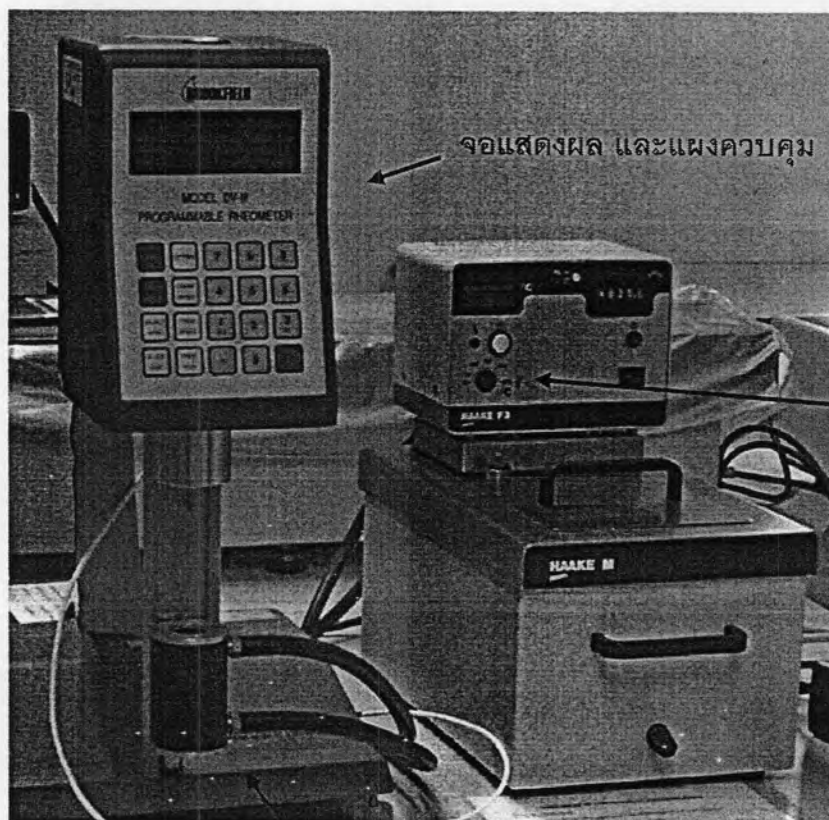
และเมื่อแทนค่า K ลงในสมการที่ 4.2 ได้

$$\eta = \frac{T_{(reading)}}{0.0026518N} \quad \text{Pa-s} \quad (4.4)$$

จากสมการที่ 4.2 เมื่อแทนค่า  $T_{(reading)}$  และ N ได้ค่าความหนืดที่ทดสอบได้ของเครื่อง Rotational Viscometer ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.24 – 1146.6 Pa-s

#### 4.2.2 การสอบเทียบค่าความหนืดของน้ำมันมาตรฐาน

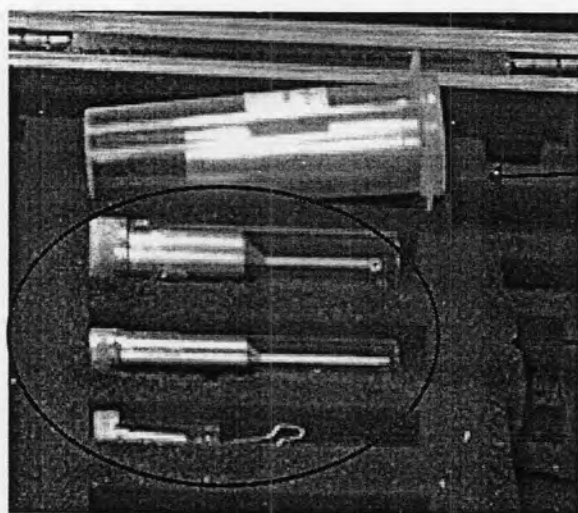
ทำการเลือกวัสดุมาตรฐานจากขีดจำกัดของเครื่องทดสอบหาค่าความหนืด มีค่าในช่วง 0.24 – 1146.6 Pa-s จึงเลือกน้ำมันมาตรฐาน คือ Pennzoil HD SAE30 และ Pennzoil HD SAE50 ดังรูปที่ 4.5 เพื่อใช้เป็นวัสดุมาตรฐานในการสอบเทียบเครื่อง Rotational Viscometer การทดสอบนำวัสดุมาตรฐานทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ Brookfield Model DV III ดังรูปที่ 2.14 และ 4.5 โดยหาค่าความหนืดของน้ำมันมาตรฐานที่อุณหภูมิประมาณ 20°C และ 30°C (แสดงดังรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8) เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อความหนืด เพราะฉะนั้นจึงทำการสอบเทียบค่าที่สองอุณหภูมิ เพื่อที่สามารถนำมาคำนวณหาความหนืดที่อุณหภูมิขณะทำการทดสอบ



จอแสดงผล และแผงควบคุม

ปรับอุณหภูมิตัวอย่าง

กระบอกลใส่ตัวอย่างน้ำมัน



กระบอกลใส่ตัวอย่างน้ำมัน

แกนหมุน (Spindle) ขนาดต่างๆ

รูปที่ 4.4 รายละเอียดเครื่อง Brookfield ที่ใช้ในการสอบเทียบน้ำมัน



รูปที่ 4.5 น้ำมันมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ

จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่าค่าความหนืดของน้ำมันมาตรฐาน มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนอัตราเร็วในการหมุน ซึ่งแสดงถึงคุณสมบัติของของเหลวแบบนิวโทเนียน แต่มีความเปลี่ยนแปลงความหนืดเมื่อมีการเปลี่ยนอุณหภูมิ โดยเมื่ออุณหภูมิของน้ำมันมาตรฐานมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาตรของของเหลวมีการขยายตัว ทำให้แรงเสียดทานระหว่างโมเลกุลของน้ำมันมาตรฐานลดลง มีผลทำให้ความหนืดของน้ำมันมาตรฐานมีค่าลดลง ซึ่งในการทดสอบตัวอย่างดินที่ใช้ นั้น จำเป็นที่ต้องมีการบันทึกค่าอุณหภูมิขณะทดสอบด้วย เนื่องจากตัวอย่างดินที่ทำการทดสอบนั้นมีส่วนประกอบของน้ำ ซึ่งเป็นของเหลวที่มีคุณสมบัติแบบนิวโทเนียน เช่นเดียวกับน้ำมันมาตรฐาน จึงมีผลทำให้ความหนืดลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่มีผลเล็กน้อย นั้น เพราะฉะนั้นความหนืดที่ปรากฏมีผลจากปริมาณความชื้นในดิน

#### 4.2.3 การสอบเทียบค่าความหนืดของเครื่อง Rotational Viscometer

จากผลการทดสอบค่าความหนืด ของวัสดุมาตรฐานที่ได้จากการสอบเทียบด้วยเครื่อง Brookfield Model DV III นำมาใช้ในการสอบเทียบกับเครื่อง Rotational Viscometer โดยการนำวัสดุมาตรฐานมาทดสอบที่อุณหภูมิ 26.5 °C ทำการทดสอบหาค่าแรงบิดที่อัตราเร็วรอบเท่ากับ 100, 150, 200, 250, 300, 350 และ 400 รอบต่อนาที ค่าที่ได้นำมาหาค่าความสัมพันธ์ของความหนืด, แรงบิด และอัตราเร็วในการหมุน โดยค่าความหนืดที่ใช้เป็นค่าความหนืดของวัสดุมาตรฐานที่อุณหภูมิ 26.5 °C คำนวณโดยการอินเทอร์โพล (Interpolate) จากอุณหภูมิที่ทำการทดสอบได้ค่าความหนืดของน้ำมันมาตรฐาน Pennzoil HD SAE30 และ SAE 50 มีค่าเท่ากับ

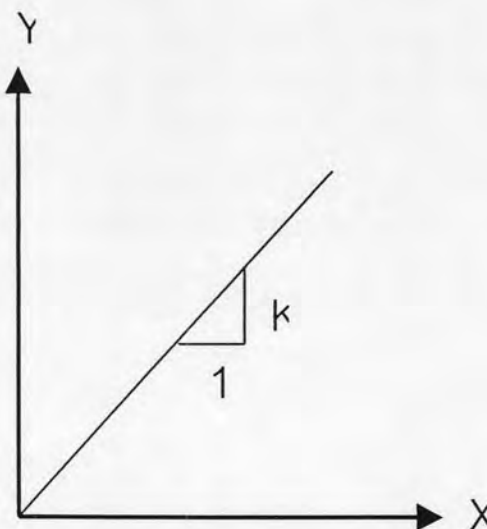
1.97 และ 5.59 Poise ตามลำดับ ค่าแรงบิดจากการอ่านค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นจากการทดสอบที่อัตราเร็วรอบที่ทำการทดสอบ เมื่อนำค่าที่ได้มาพล็อต ได้ผลดังรูปที่ 4.9 โดยกราฟที่ได้มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงเมื่อทำการพล็อตระหว่าง แรงบิดต่อความหนืด กับอัตราเร็วในการหมุน โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.3 ซึ่งความสัมพันธ์ที่ได้ นำมาใช้สำหรับคำนวณหาค่าความหนืดของวัสดุที่นำมาใช้ทดสอบหาค่าความหนืด โดยในการทดสอบให้หมุนที่อัตราเร็วรอบที่ต้องการทราบค่าความหนืด แล้วทำการบันทึกค่าแรงบิดที่ปรากฏ (Apparent Torque)

การวิเคราะห์ค่า  $K$  ทำโดยการนำความสัมพันธ์จากสมการที่ 4.3 มาทำการ Normalization ด้วย  $\eta$  แล้วทำการพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $N$  ให้เป็นแกน  $X$  และ  $T/\eta$  ให้เป็นแกน  $Y$  ดังรูปที่ 4.6 โดยเมื่อนำหาค่าความหนืดที่ปรากฏ (Apparent Viscosity) และอัตราเร็วมาพล็อตตามรูปที่ 4.6 ได้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ 4.5 เพื่อ

$$\eta = \frac{T_{(reading)}}{0.0022236N} \quad \text{Pa-s.} \quad (4.5)$$

ค่า  $K$  จากสอบเทียบค่าเท่ากับ 0.0022236 ค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับ  $K$  จากทฤษฎี มีค่าเท่ากับ 0.0026518 ดังรูปที่ 4.9

ในการทดสอบได้เลือกค่า  $K$  ที่ได้จากการสอบเทียบเนื่องจากมีค่าใกล้เคียงกับค่า  $K$  ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี เนื่องจากมีความสอดคล้องกับเครื่องมือ



จากสมการที่ 4.3 ได้  $\eta = \frac{T}{K \cdot N}$

Normalization by  $\eta$

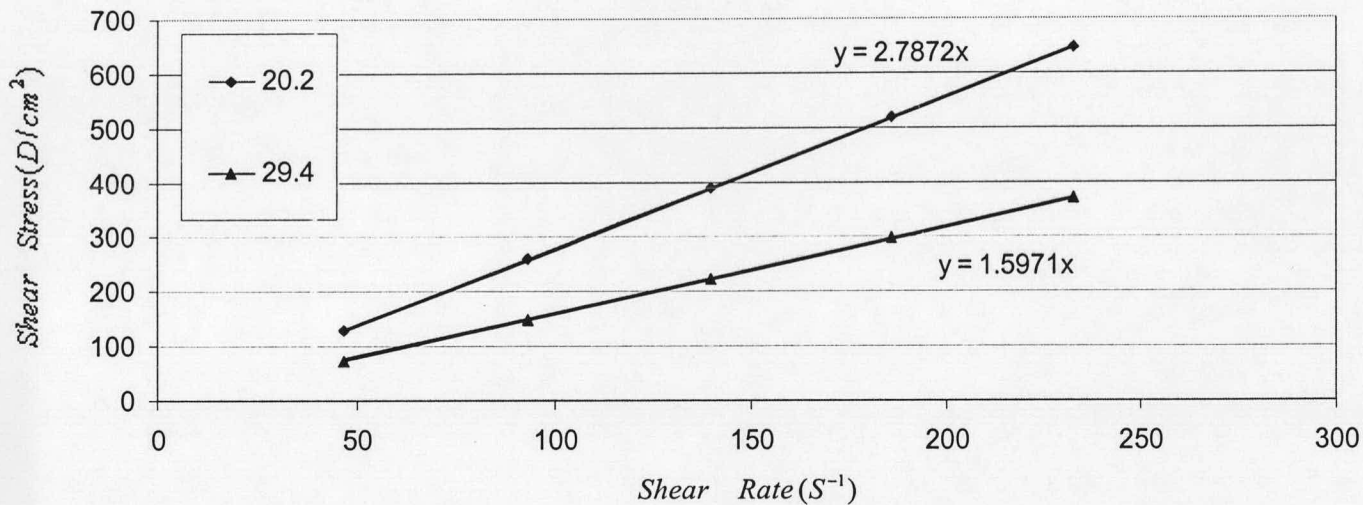
$$\frac{T}{\eta} = K \cdot N$$

แทน  $T/\eta$  และ  $N$  ค่าลงบนกราฟได้

$$Y = K \cdot X$$

รูปที่ 4.6 การวิเคราะห์ค่า  $K$  ที่ได้จากทฤษฎี และการสอบเทียบ

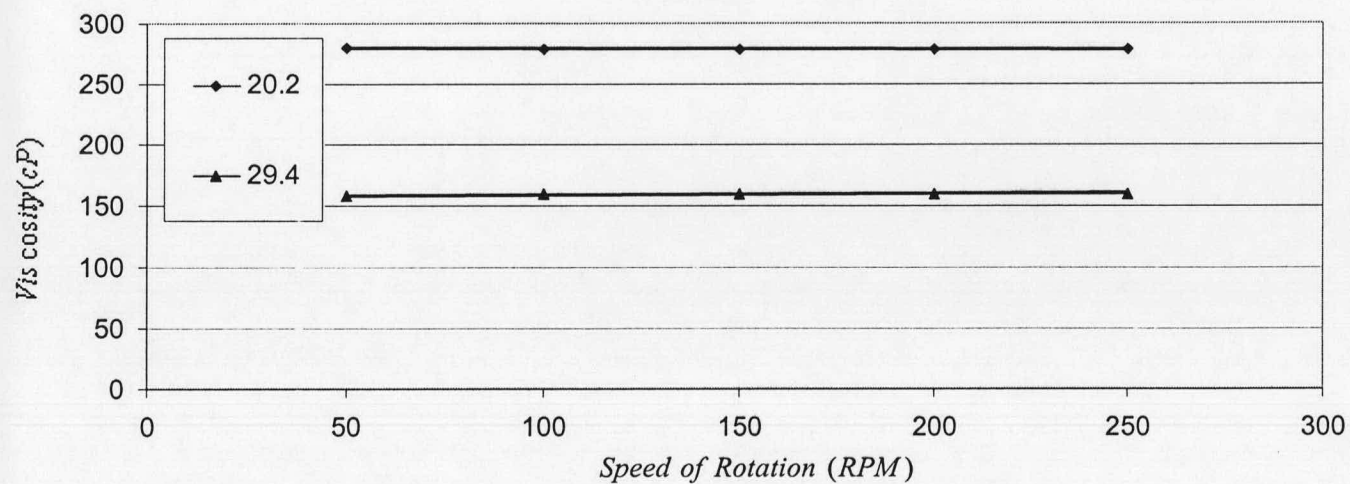




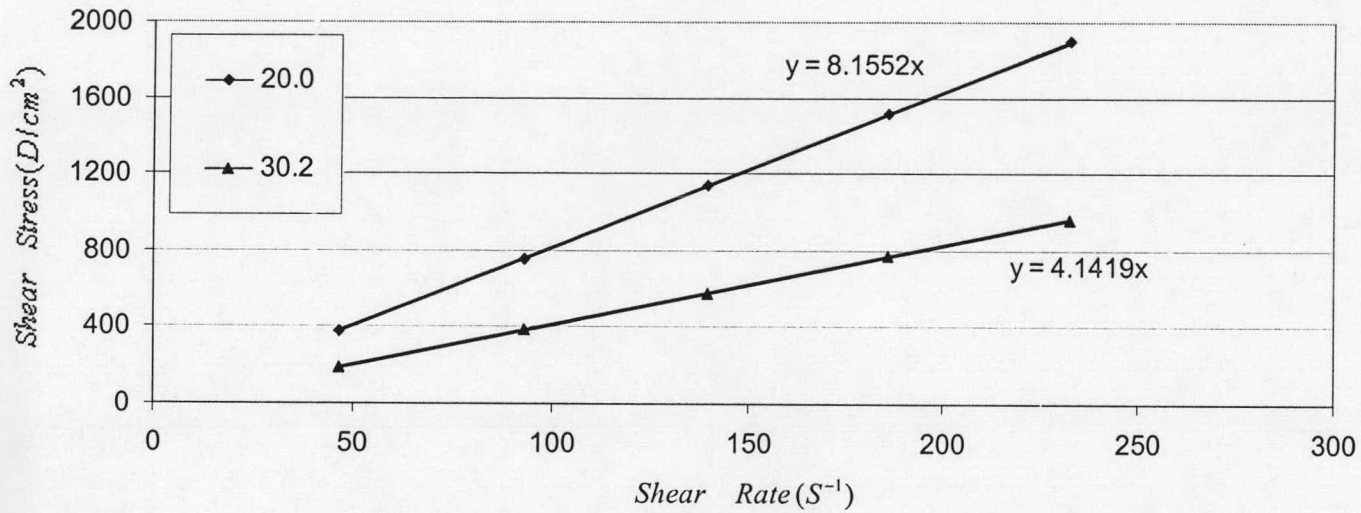
รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบน้ำมันมาตรฐาน Pennzoil HD SAE 30

ก. ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด

ข. ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับความเร็วในการหมุน



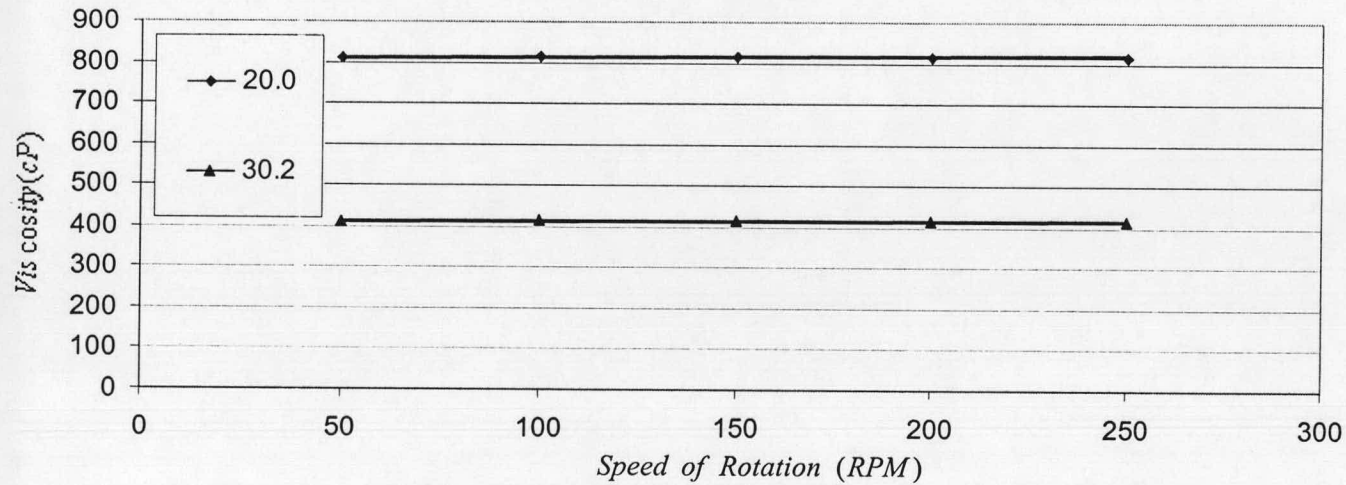
\*1dyne,D =  $10^{-5}$  N  
 1  $D/cm^2$  = 0.1  $N/m^2$   
 1 Poise = 100 cP  
 = 1.0  $g \cdot s/cm^2$   
 = 0.1 Pa-s



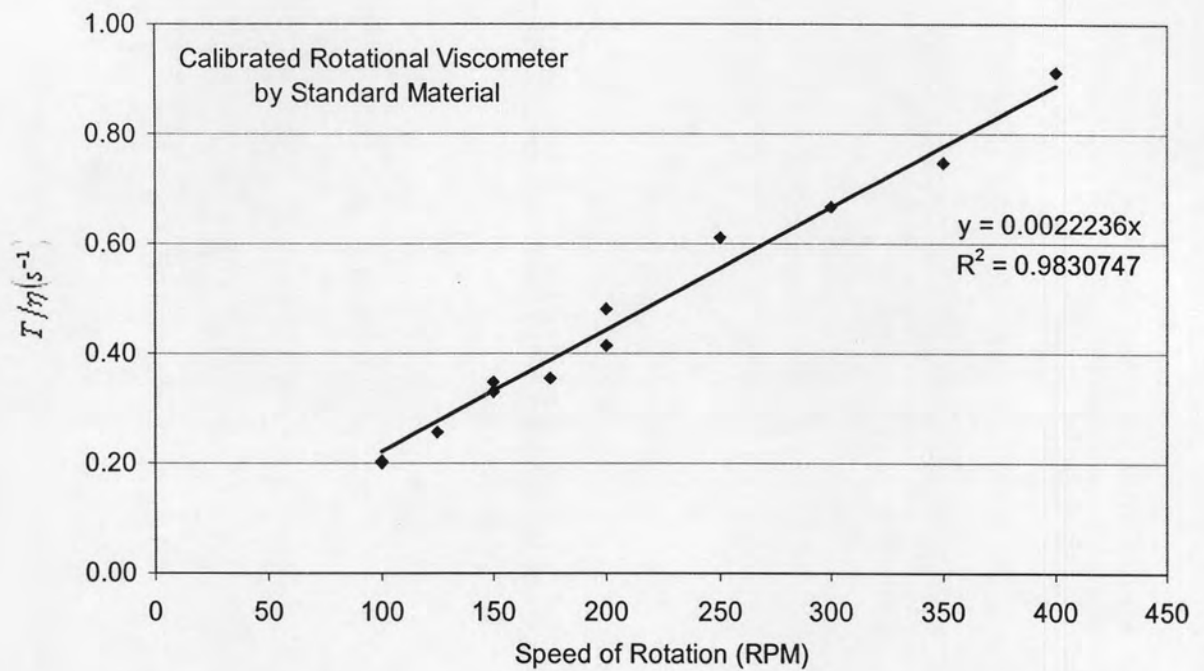
รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบน้ำมันมาตรฐาน Pennzoil HD SAE 50

ก. ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด

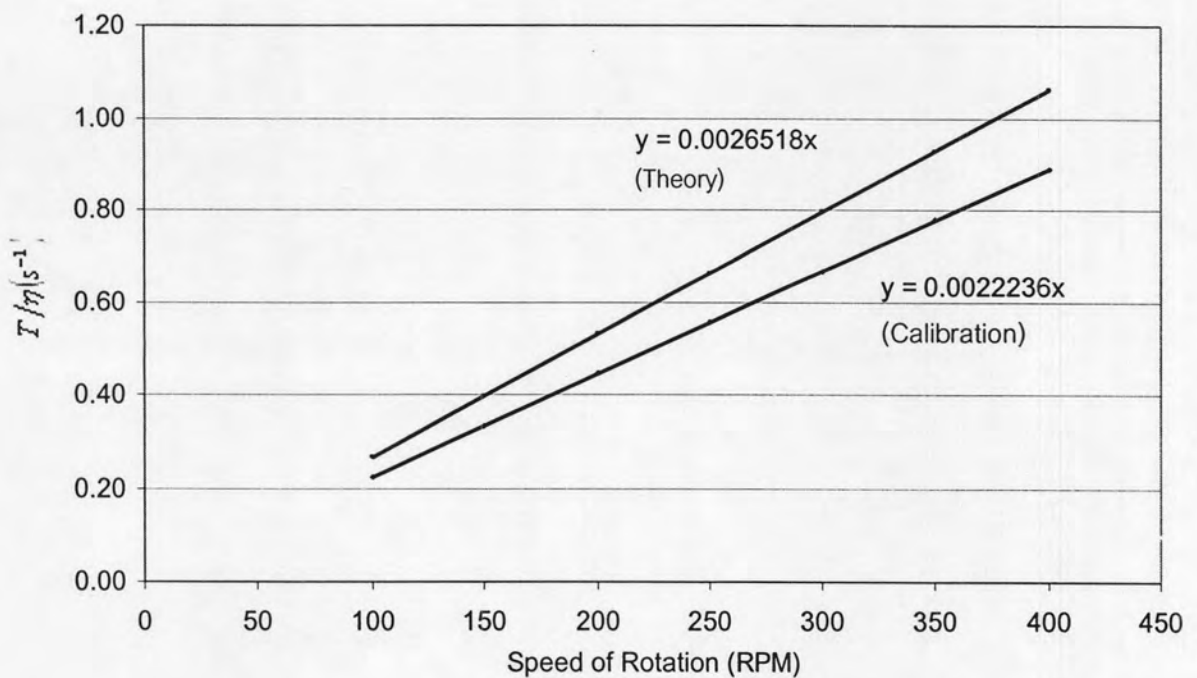
ข. ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับความเร็วในการหมุน



\*1dyne,D =  $10^{-5}$  N  
 1  $D/cm^2$  = 0.1  $N/m^2$   
 1 Poise = 100 cP  
 = 1.0  $g \cdot s/cm^2$   
 = 0.1 Pa-s



รูปที่ 4.9 ผลการสอบเทียบค่ามาตรฐานของเครื่อง Rotational Viscometer



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบค่า K จากทฤษฎี กับค่า K จากการสอบเทียบ

#### 4.3 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวด้วยเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนด้วยใบพัดในห้องทดสอบ

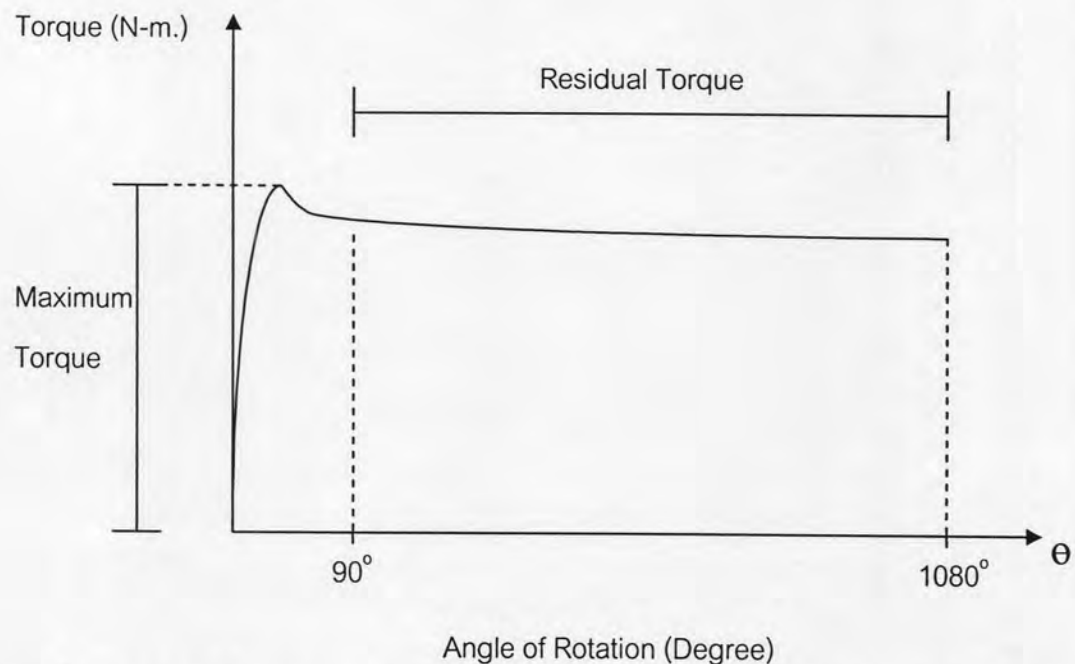
##### 4.3.1 การประเมินความหมายจากผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบที่ได้ทำการบันทึกค่ากำลังรับแรงเฉือนออกเป็น 2 ส่วนดังรูปที่ 4.11 ซึ่งค่าที่ได้ นำมาแยกพิจารณาหาความสัมพันธ์กับความชื้นในดิน อัตราเร็วในการหมุน และ ผลกระทบจากขนาดของใบพัด

1. ค่า Maximum Torque เป็นแรงบิดสูงสุดที่นำมาคำนวณกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของดินเหนียว โดยพิจารณาจากช่วง  $0^\circ - 90^\circ$  เพื่อที่นำมาคำนวณหา Peak Shear Strength

2. ค่า Residual Torque เป็นค่าที่นำมาคำนวณกำลังรับแรงเฉือนหลังวิบัติ ซึ่งมีค่าคงที่ หรือมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย โดยพิจารณาแรงบิดจากช่วง  $90^\circ - 1080^\circ$  มาคำนวณหาค่าเฉลี่ย เพื่อที่นำมาคำนวณหา Residual Strength

ค่ากำลังรับแรงเฉือนจากที่ได้จากการทดสอบ นำมาคำนวณ และบันทึกค่าทั้ง 2 ส่วน แสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.11 แสดงวิธีการประเมินความหมายจากผลการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือน

##### 4.3.2 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวด้วยเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนด้วยใบพัดในห้องทดสอบ

จากผลการทดสอบด้วย เครื่องมือทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนด้วยใบพัดในห้องทดสอบที่ความชื้นของดินเหนียวตั้งแต่ 75 - 125% โดยมีอัตราเร็วรอบในการหมุนใบพัดเท่ากับ

46.61, 139.32 และ 278.52 องศาต่อนาที กับใบพัดสองขนาดคือ 3x6 ซม. และ 6x9 ซม. โดยค่าที่ได้แสดงในรูปที่ 4.15 และ 4.16 พบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนที่พิจารณาแบบ Residual Strength มีความสัมพันธ์กันระหว่างค่าสูงกว่า แบบ Peak Shear Strength อันเนื่องมาจากดินที่ใช้เป็นดินที่ถูกรบกวนใหม่ทุกครั้งที่ทำกรทดสอบ ทำให้การเซ็ดตัวของดินอาจไม่สม่ำเสมอจนมีผลทำให้ Peak Shear Strength มีค่าไม่สัมพันธ์กัน

จากผลการทดสอบ พบว่าค่าความชื้นมีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนคือ เมื่อมีค่าความชื้นเพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนลดลงอันเนื่องมาจากน้ำไปแทนที่เม็ดดินเพิ่มมากขึ้นจนถึงจุดหนึ่งปริมาณน้ำมีผลทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนมีค่าใกล้เคียงน้ำ และเมื่อพิจารณาผลกระทบจากอัตราเร็วในการหมุน และขนาดของใบพัด พบว่ามีผลกระทบเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่าความชื้น

เมื่อนำผลการทดสอบไปทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ด้วยโปรแกรม NONLIN (Phillip H. S., 1993) โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีเหลวกับอัตราเร็วในการเฉือนที่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือน ได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.6

$$c_u = 10.34 \cdot LI^{-4.57} \cdot \omega^{0.00797} \quad (4.6)$$

โดย  $c_u$  คือค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ, kPa.

LI. คือดัชนีเหลวมีค่าเท่ากับ  $\frac{w - PI.}{LL. - PL..}$

$\omega$  คืออัตราเร็วในการหมุนใบพัด, deg/min

จากสมการที่ 4.4 เห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ด้วยกำลังของความเร็วยกกำลังมีค่าประมาณ 0.000797 ดังนั้น เมื่อความเร็วรอบยกกำลังค่าน้อยนี้ ได้ค่าเข้าใกล้ 1 หรือกล่าวได้ว่า ตัวแปรนี้ไม่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือน เพราะฉะนั้นผู้เขียนจึงตัดตัวแปรนี้ออกจากความสัมพันธ์ที่มีต่อกำลังรับแรงเฉือน หลังจากนั้นนำค่าผลการทดสอบ LI. และ  $c_u$  ไปหาความสัมพันธ์ด้วยโปรแกรม NONLIN อีกครั้งหนึ่ง ดังตัวอย่างที่แสดงรูปที่ 4.7 ได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.7 ดังรูปที่ 4.17 ซึ่งนำมาพล็อตเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบ

$$c_u = 10.41 \cdot LI^{-4.45} \quad \text{kPa} \quad (4.7)$$

```

Title Relation of Undrained Shear Strength (kPa) and Liquidity Index (%)
Register ! Please register your use of Nonlin
Variables l,su ! Two variables: l and su
Parameters b,n ! Two parameters to estimate: b and n
Function su=b*(l^n) ! Equation
ITERATIONS 1000 ! 1000 time of calculation
Plot Grid ! Plot equation and data with grid lines
Data
1.233 4.433
1.233 4.380
1.233 4.715
1.233 4.268
1.233 4.263
1.233 4.320
1.285 3.401
1.285 3.736
1.285 3.777
1.285 3.196
1.285 3.383
1.285 3.370
1.317 2.707
1.317 2.527

```

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

ข้อมูล l และ su ตามลำดับ

รูปที่ 4.12 ตัวอย่างการเขียนข้อมูล สำหรับโปรแกรม Nonlin

```

Nonlin version 2.5
Copyright (c) 1992-1993 (shareware) Phillip H. Sherrod.

Relation of Undrained Shear Strength (kPa) and Liquidity Index (%)
Function: su=b*(l^n)
Number of observations = 150
Maximum allowed number of iterations = 1000
Convergence tolerance factor = 1.000000E-010
Stopped due to: Relative function convergence.
Number of iterations performed = 9
Final sum of squared deviations = 3.57710E+000
Standard error of estimate = 0.155466
Average deviation = 0.108221
Maximum deviation for any observation = 0.622317
Proportion of variance explained (R^2) = 0.9786 (97.86%)
Adjusted coefficient of multiple determination (Ra^2) = 0.9785 (97.85%)
Durbin-watson test for autocorrelation = 0.604

```

ค่า R<sup>2</sup> ที่ได้จากการประมวลผล

ค่า b และ n ที่ได้จากการประมวลผล

```

---- Descriptive Statistics for Variables ----

```

Variable	Minimum value	Maximum value	Mean value	Standard dev.
l	1.233	2.536	1.90932	0.421032
su	0.202	4.715	1.08412	1.059821

```

---- Calculated Parameter values ----

```

Parameter	Initial guess	Final estimate	Standard error	t	Prob(t)
b	1	10.4119372	0.2428211	42.88	0.00001
n	1	-4.45834389	0.06995499	-63.73	0.00001

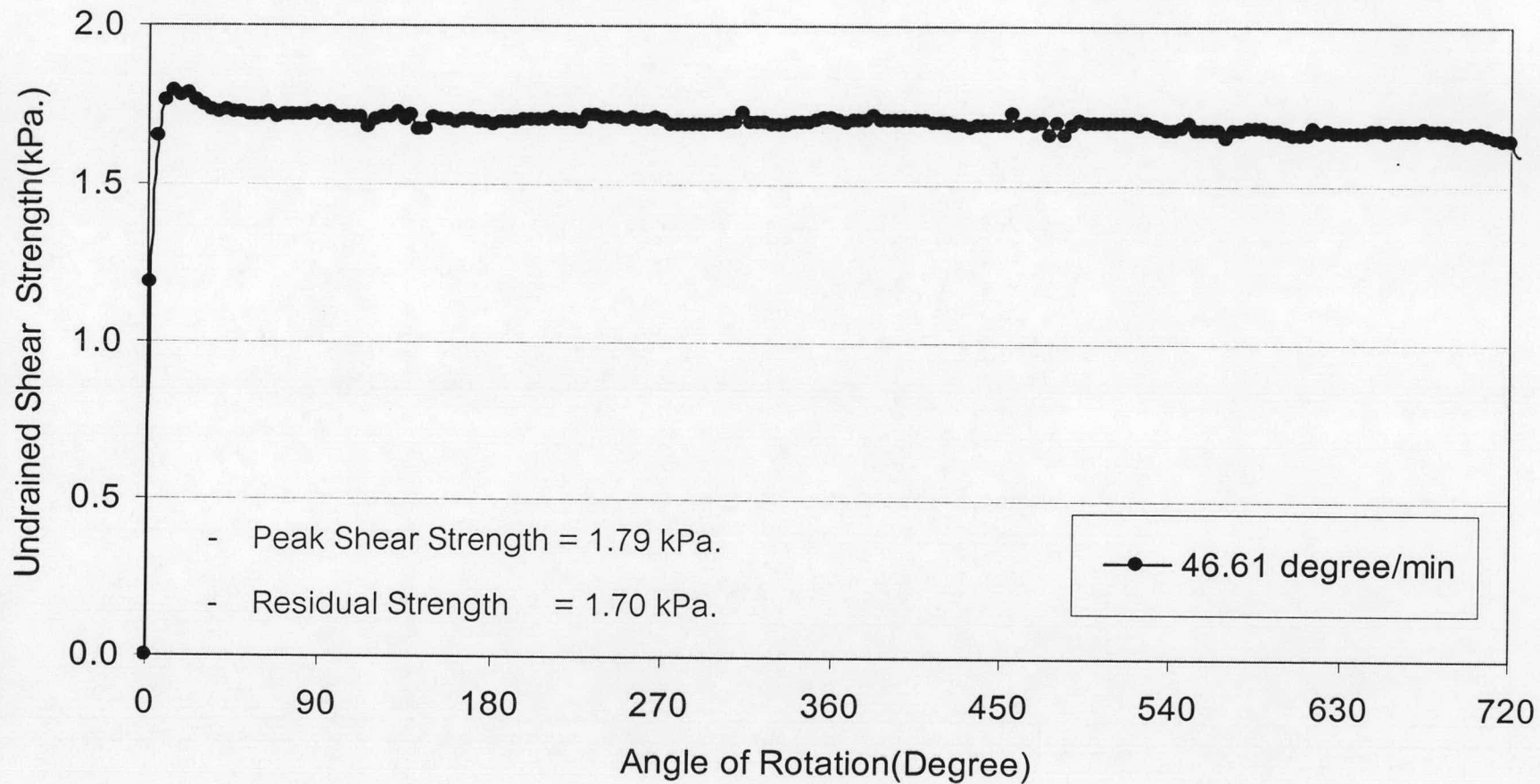
```

---- Analysis of Variance ----

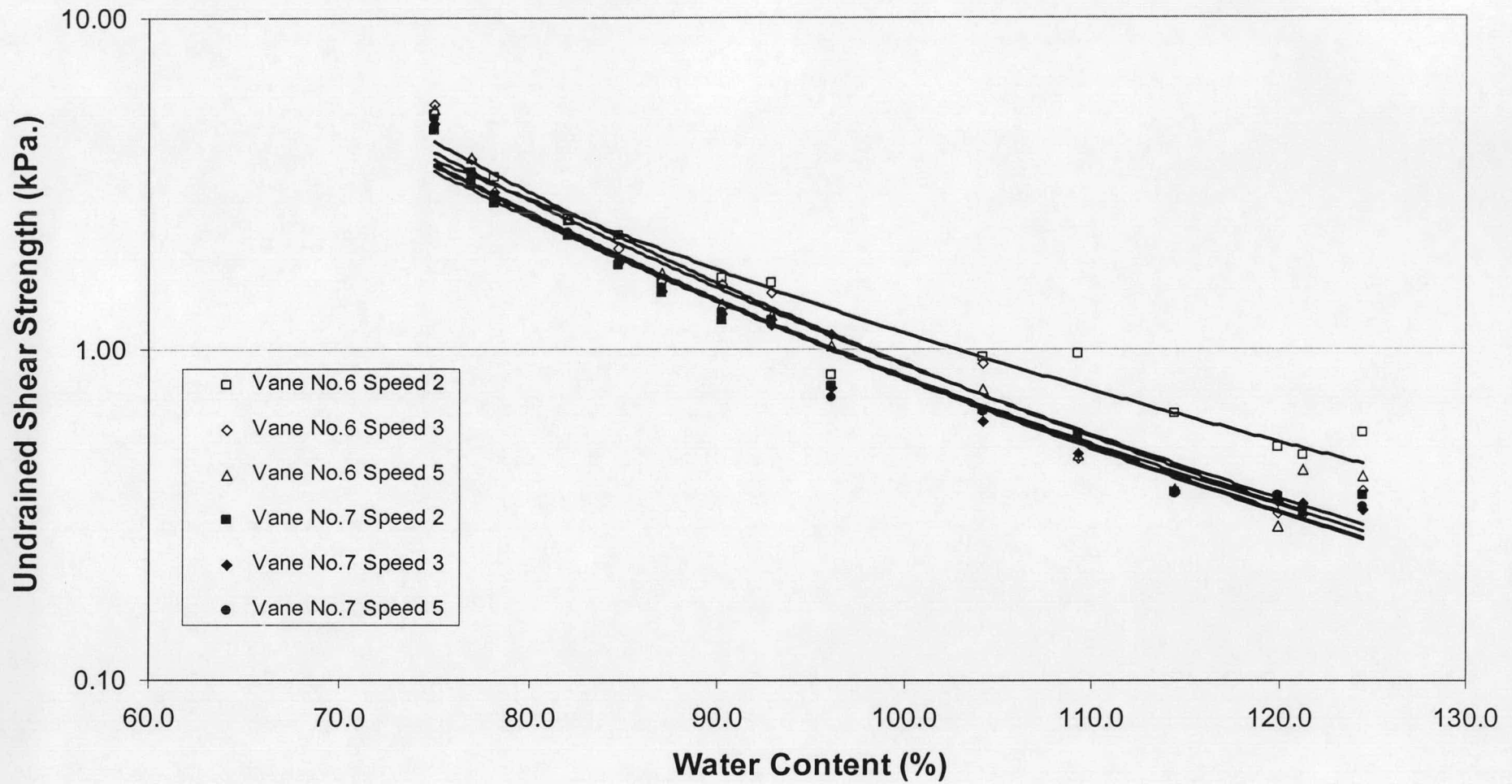
```

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F value	Prob(F)
Regression	1	163.7829	163.7829	6776.40	0.00001
Error	148	3.5771	0.0241696		
Total	149	167.36			

รูปที่ 4.13 ตัวอย่างผลการประมวลผลด้วยโปรแกรม Nonlin

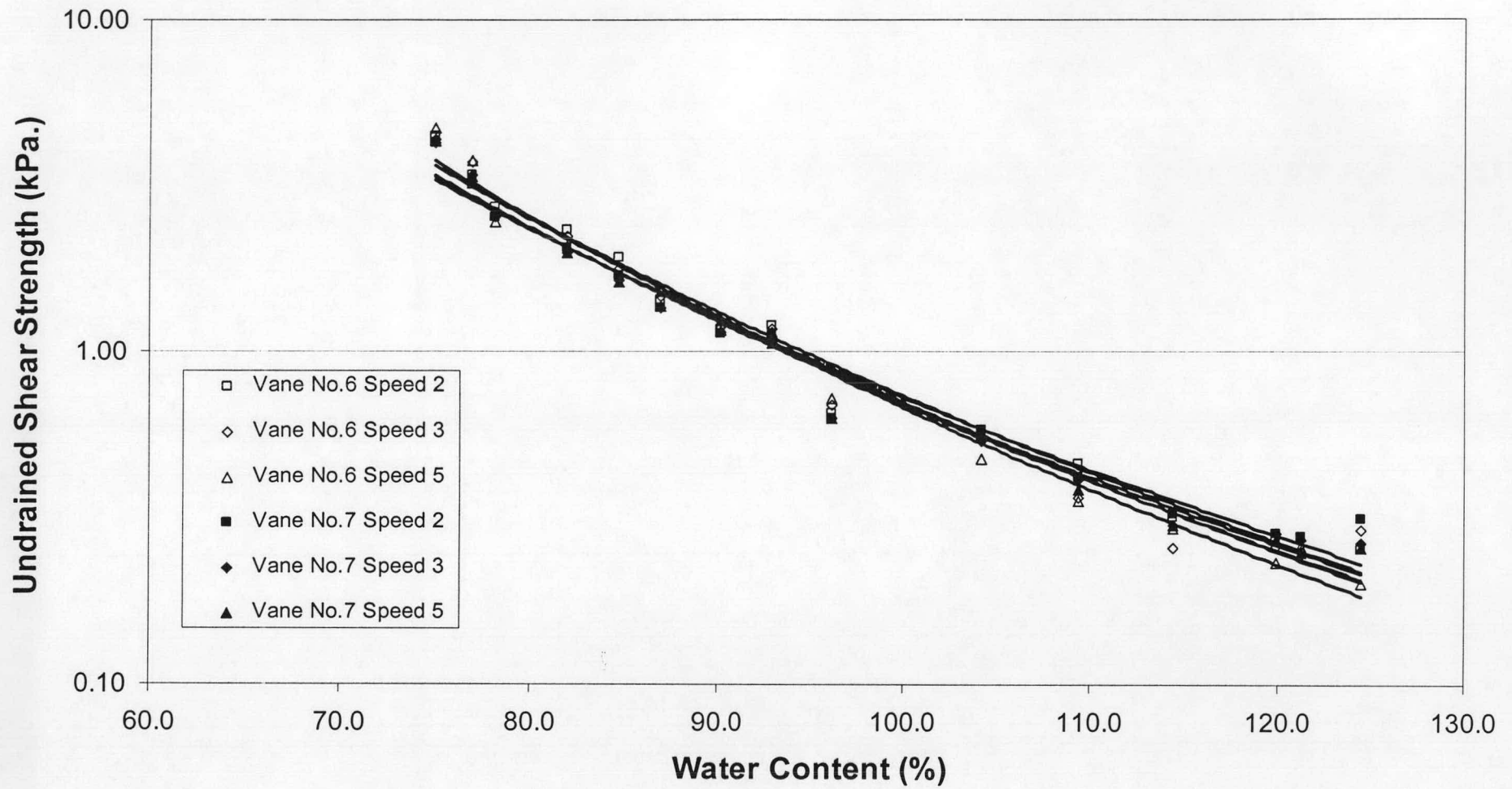


รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ปริมาณความชื้น 84.72% โดยใช้ใบพัดขนาด 6x9 ซม.

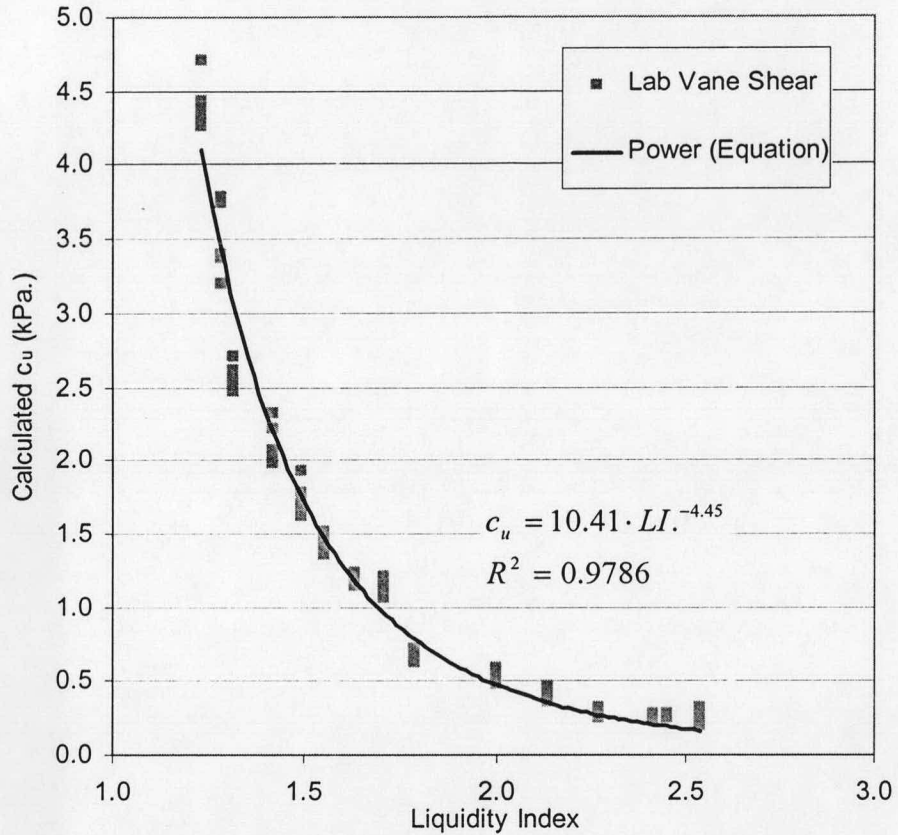


รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินกับ Water Content (%) จากการประเมินแบบ Peak Shear Strength

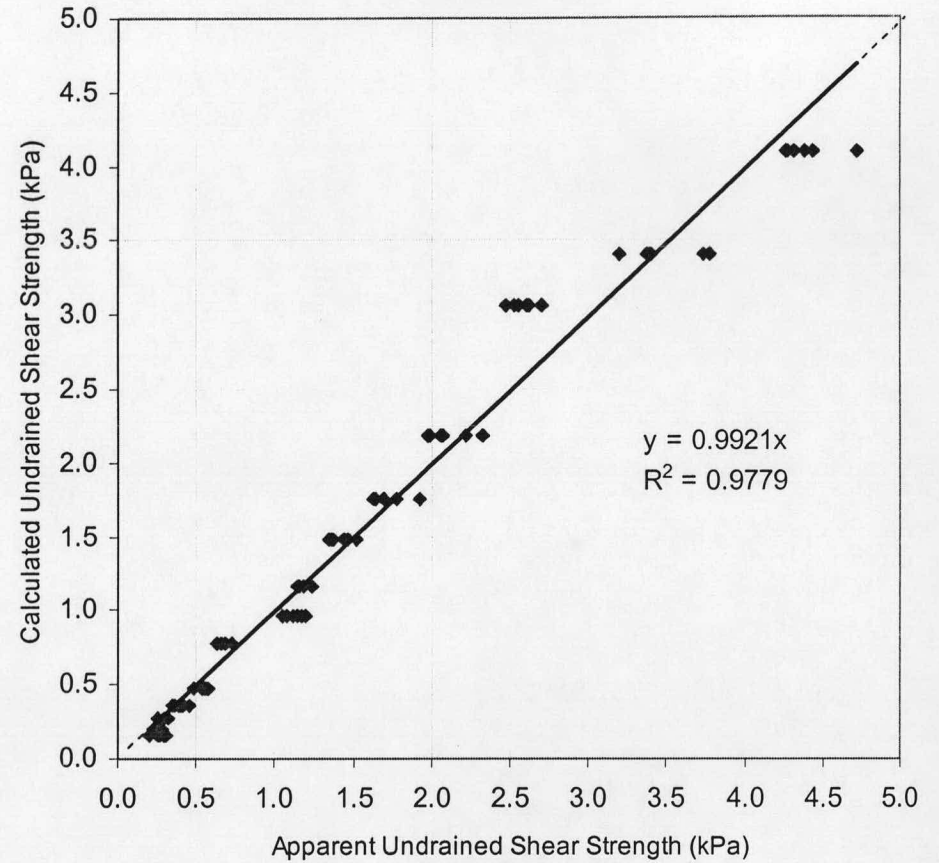




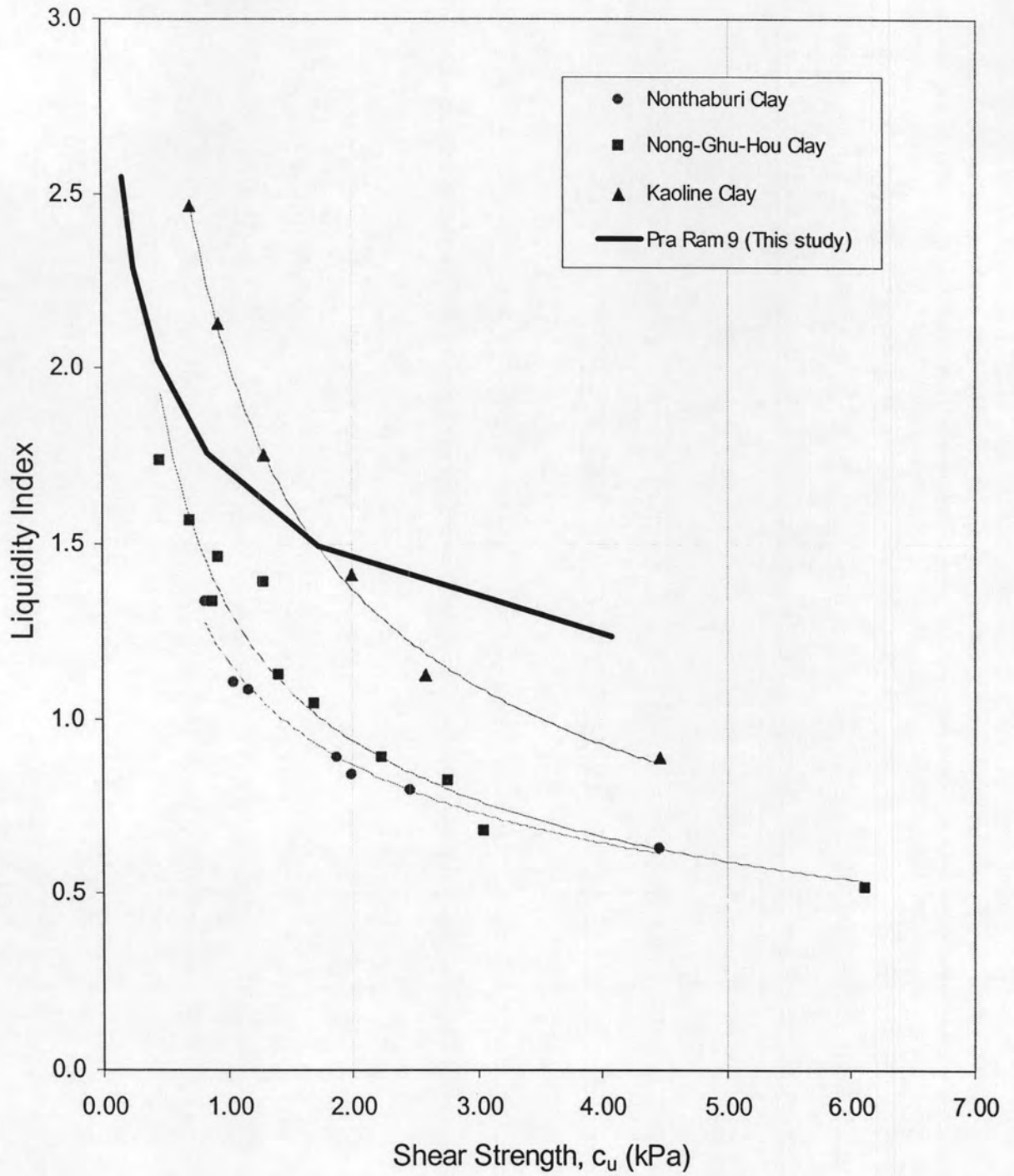
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินกับ Water Content (%) จากการประเมินแบบ Residual Strength



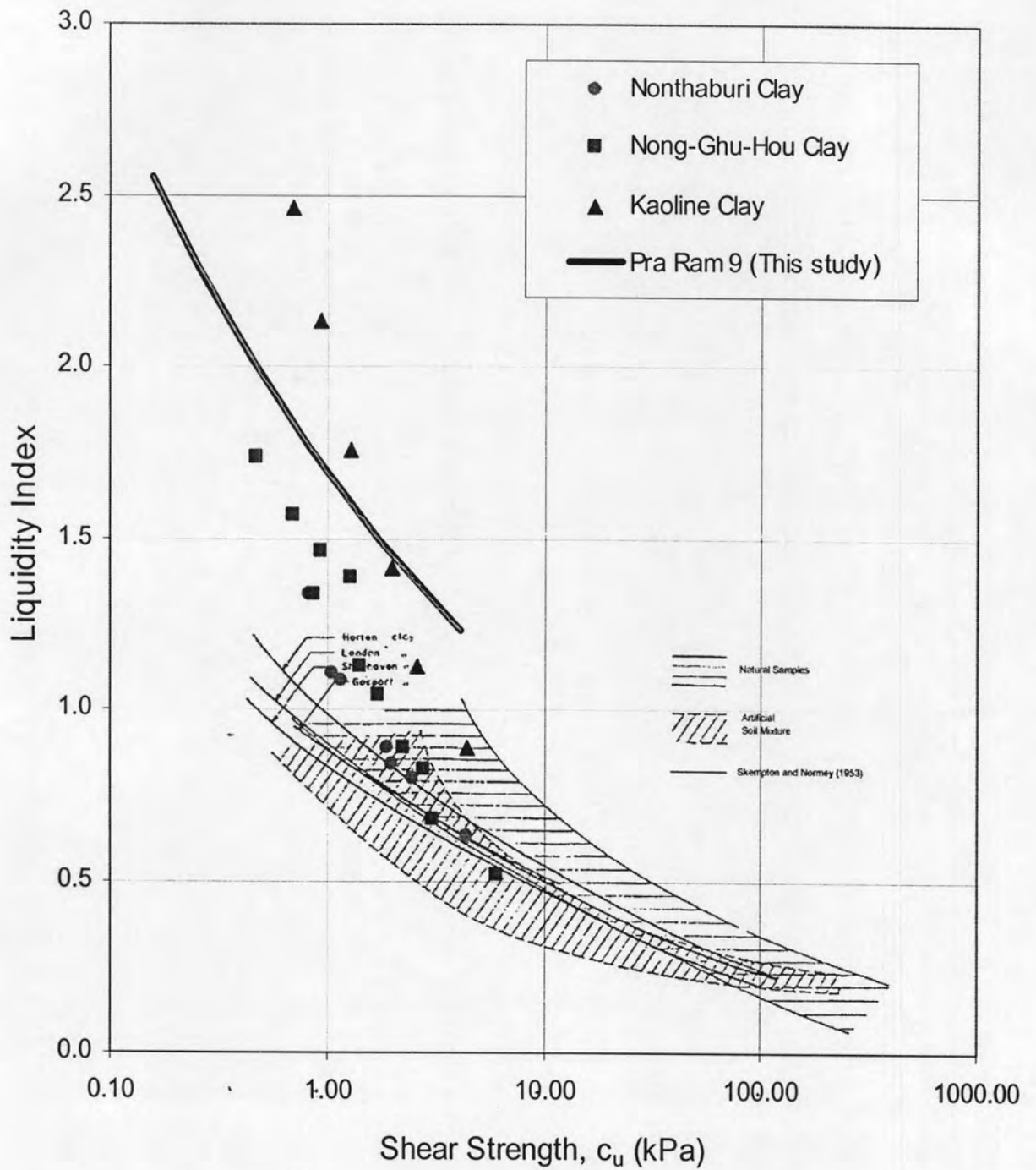
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินจากสมการที่ 4.5 กับ Liquidity Index จากการโปรแกรม NONLIN



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินจากสมการที่ 4.5 กับ ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่ปรากฏจากการโปรแกรม NONLIN



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนกับ Liquidity Index ของดินบริเวณ ถนนพระราม 9 เปรียบเทียบกับ ตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า, ดินเหนียว นนทบุรี, Kaoline Clay

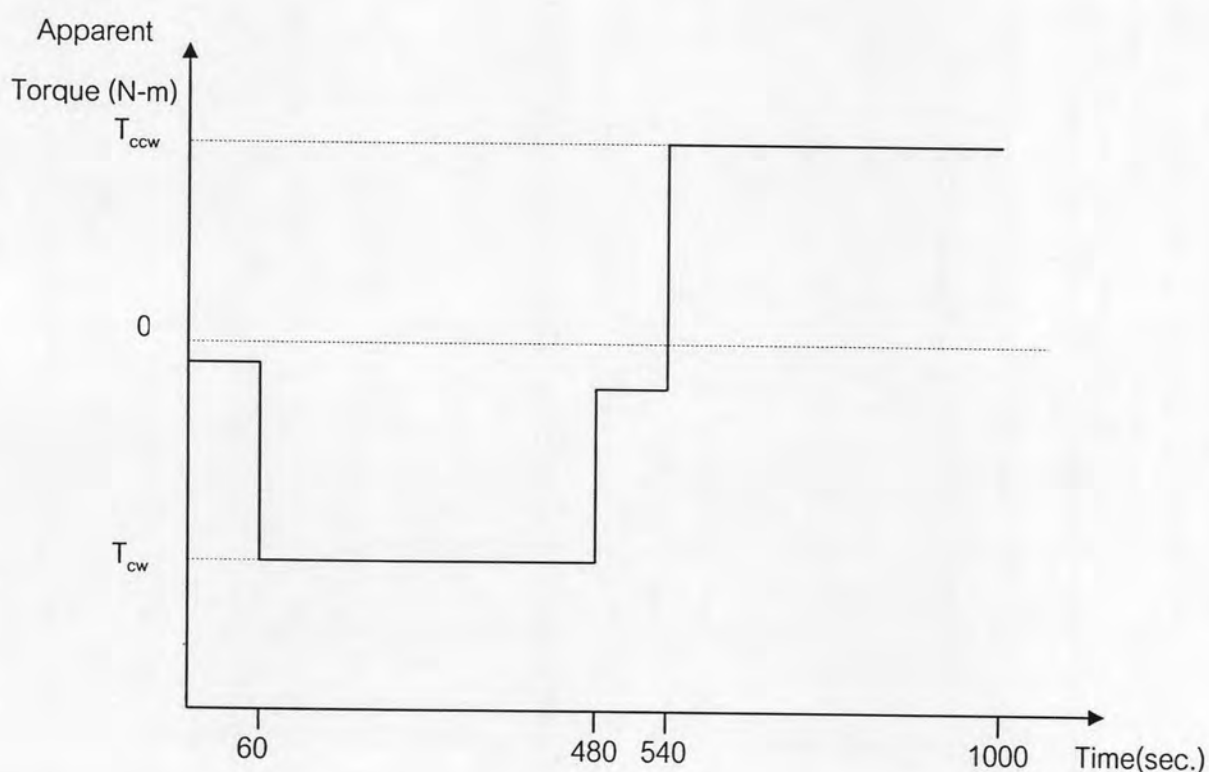


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนกับ Liquidity Index ของดินบริเวณ ถนนพระราม 9 เปรียบเทียบกับ ตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า, ดินเหนียว นนทบุรี Kaoline Clay และ Skempton Northley (1953) บน log-log scale

#### 4.4 การทดสอบหาค่าความหนืดของดินเหนียวด้วยเครื่อง Rotational Viscometer

##### 4.4.1 การประเมินความหมายจากผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบที่ นำมาทำการบันทึกค่าแรงบิดที่เกิดขึ้น จากการหมุนแกนหมุนที่อัตราเร็วใดๆ โดยนำค่าแรงบิดที่ปรากฏ (Apparent Torque) ที่ได้จากการหมุนทิศทางตามเข็มนาฬิกา มาลบกับแรงบิดเฉลี่ยที่ได้จากการหมุนทิศทางทวนเข็มนาฬิกา มาถอดค่าสัมบูรณ์แล้วหารด้วย 2 ค่าที่ได้เป็นแรงบิดที่ปรากฏ มีหน่วยเป็น N-m. ดังสมการที่ 4.8 โดยผลจากการทดสอบ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.21 ค่าที่ได้จากการคำนวณให้นำมาใช้คำนวณหาค่าความหนืดที่ปรากฏ (Apparent Viscosity) จากสมการที่ 4.3



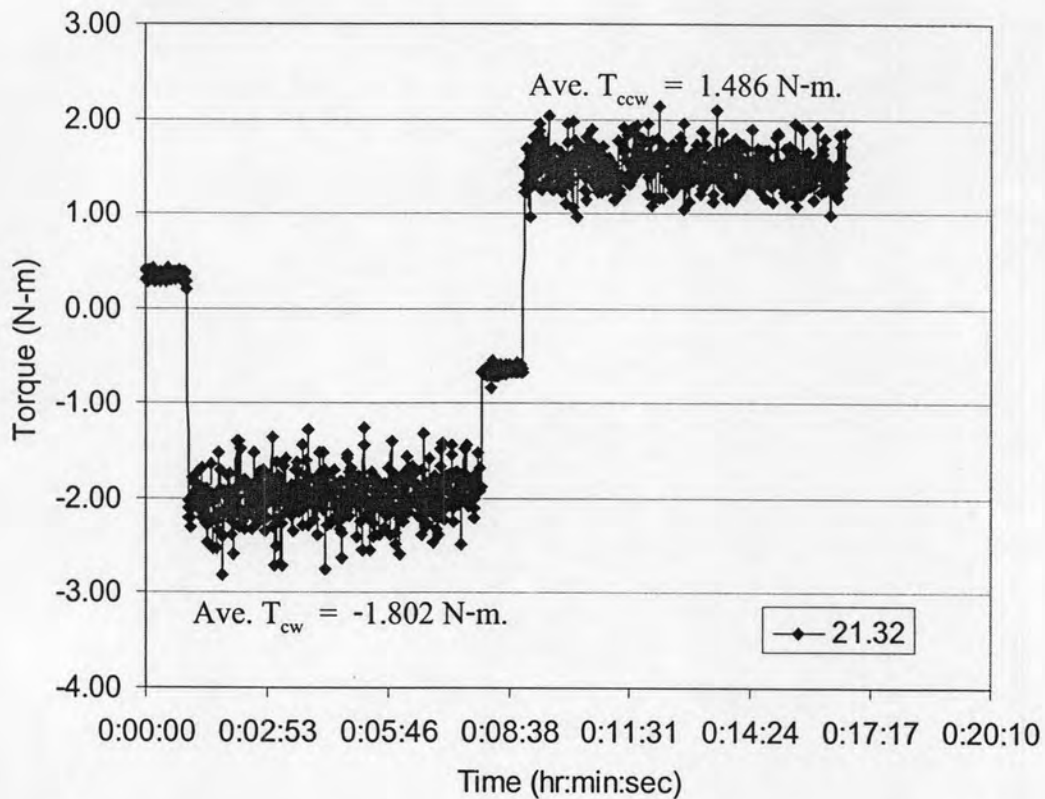
รูปที่ 4.21 วิธีการประเมินความหมายของค่าแรงบิดที่ปรากฏจากผลการทดสอบหาความหนืด

$$\text{Torque, } T_{\text{reading}} = | \text{Ave. } T_{cw} - \text{Ave. } T_{ccw} | / 2 \quad \text{N-m.} \quad (4.8)$$

โดย  $T_{cw}$  คือค่าแรงบิดเฉลี่ยที่ได้จากการหมุนทิศทางตามเข็มนาฬิกา

$T_{ccw}$  คือค่าแรงบิดเฉลี่ยที่ได้จากการหมุนทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

จากสมการที่ 4.3 นำมาคำนวณหาค่าความหนืดโดยค่า  $T_{\text{reading}}$  คำนวณตามสมการที่ 4.6 ค่า  $K$  ได้จากการสอบเทียบเครื่องกับวัสดุมาตรฐาน และค่า  $N$  ได้จากการกำหนดอัตราเร็วในการหมุน



รูปที่ 4.22 การทดสอบหาค่าความหนืดที่ปริมาณความขึ้น 111.33% โดยใช้ความเร็วในการหมุน 21.32 รอบต่อนาที

จากผลการทดสอบตามรูปที่ 4.22 นำมาคำนวณตามสมการ 4.8 ได้

$$\begin{aligned} \text{Torque, } T_{\text{reading}} &= | \text{Ave. } T_{\text{cw}} - \text{Ave. } T_{\text{ccw}} | / 2 \\ &= | -1.802 - 1.486 | / 2 = 1.644 \text{ N-m.} \end{aligned}$$

นำค่าที่ได้จากการทดสอบมาคำนวณหาค่าความหนืดที่ปรากฏจากสมการที่ 4.5

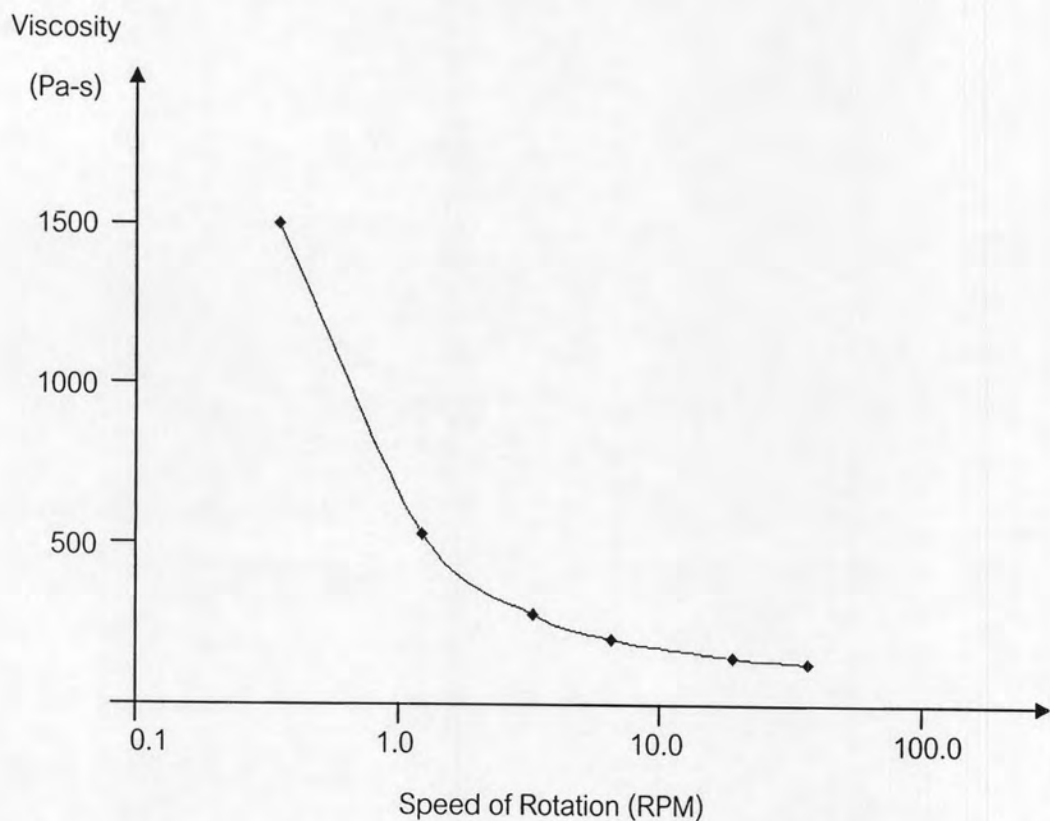
$$\begin{aligned} \text{Apparent Viscosity} &= \frac{T_{(\text{reading})}}{0.0022236N} \\ &= \frac{1.644}{0.0022236 \cdot 21.32} = 34.48 \text{ Pa-s} \end{aligned}$$



สำหรับค่าความขึ้นดินหนึ่ง หาค่าความหนืดของดินที่อัตราเร็วรอบหมุนที่อัตราเร็วรอบประมาณ 0.39, 0.77, 1.3, 3.9, 7.7, 19.35 และ 38.6 รอบ/นาที แล้วนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดกับอัตราเร็วในการหมุน ดังรูปที่ 4.23 โดยนำมาหาความสัมพันธ์ตามทฤษฎี Power-Law ดังสมการที่ 4.9

$$\eta = a \cdot N^b \quad (4.9)$$

- โดย  $\eta$  คือค่าความหนืดที่ปรากฏ, Pa-s
- $N$  คืออัตราเร็วรอบในการหมุนแกนหมุน, RPM
- $a$  คือตัวแปรของความหนืด ที่เปลี่ยนแปลงผกผันกับความขึ้น
- $b$  คือตัวแปรคงที่ของความหนืด



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดที่ปรากฏกับอัตราเร็วในการหมุนต่างๆ ที่ ปริมาณความขึ้น 111.33%

#### 4.4.2 ผลการทดสอบค่าความเหนียวของดินเหนียวด้วยเครื่องมือ Rotational Viscometer

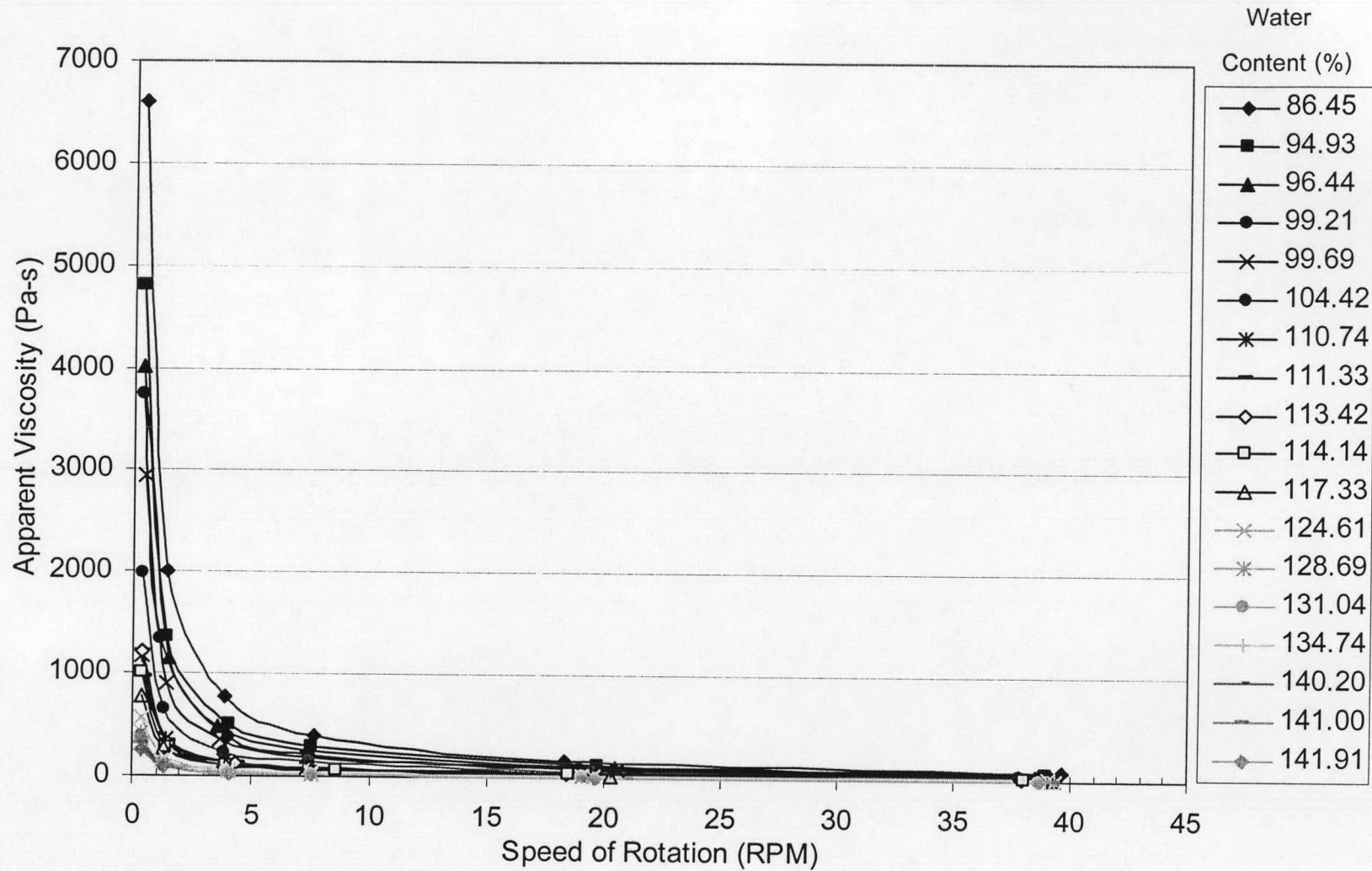
จากผลการทดสอบหาค่าความเหนียวด้วยเครื่อง Rotational Viscometer ที่ความชื้นของดินเหนียวตั้งแต่ 86 -142% ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.24 จากนั้น นำค่าที่ได้มาพล็อตด้วย log-log Scale ระหว่างความเหนียว และอัตราเร็วรอบในการหมุนโดยแปลงค่าความชื้นเป็นดัชนีเหลวดังรูปที่ 4.25 ความเหนียวที่ได้เป็นความเหนียวที่ปรากฏ ณ. อุณหภูมิหนึ่ง และอัตราเร็วในการหมุนค่าหนึ่ง จากกราฟที่ได้พบว่าที่ดัชนีเหลวใดๆ มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง โดยมีความชันคงที่ และมีความเหนียวลดลงเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น แสดงถึงลักษณะของดินเหนียวที่มีคุณสมบัติของของไหลแบบนอนนิวโทเนียน มีลักษณะคล้ายกับประเภทสตูโดพลาสติก แต่มีความเค้นคลากจำนวนหนึ่งก่อน จึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมในของไหล หลังจากมีการเคลื่อนที่แล้วจะมีความเหนียวลดลงเมื่ออัตราเร็วรอบเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเริ่มทำการหมุนเกิดแรงด้านการเคลื่อนที่ และเพิ่มอัตราเร็วในการหมุนของแกนหมุนในแต่ละการทดสอบ ทำให้โครงสร้างของดินมีการเรียงตัวเพื่อพัฒนากำลังได้ยากขึ้น จึงเกิดแรงด้านการเคลื่อนที่น้อยลง มีผลทำให้ความเหนียวในดินเหนียวลดลง สำหรับค่าความชื้นในดินที่เพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้ดินมีการจับตัวที่หลวมขึ้น จึงเกิดแรงด้านการเคลื่อนที่ลดลง มีผลทำให้ความเหนียวลดลง และเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมากจนถึงจุดๆหนึ่ง ค่าความเหนียวของดินเหนียวที่ปรากฏ มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเพิ่มอัตราเร็ว หรือมีผลกระทบต่ออัตราเร็วรอบน้อยลง ซึ่งกลายเป็นคุณสมบัติของไหลแบบนิวโทเนียน นั่นคือปริมาณความชื้นในดินสูงมากจนปริมาณดินไม่มีผลกระทบต่ออัตราเร็วในการหมุนของแกนหมุน

เมื่อนำผลการทดสอบไปทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ด้วยโปรแกรม NONLIN โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีเหลวกับอัตราเร็วในการหมุนของแกนหมุนที่มีผลต่อความเหนียว ได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.10

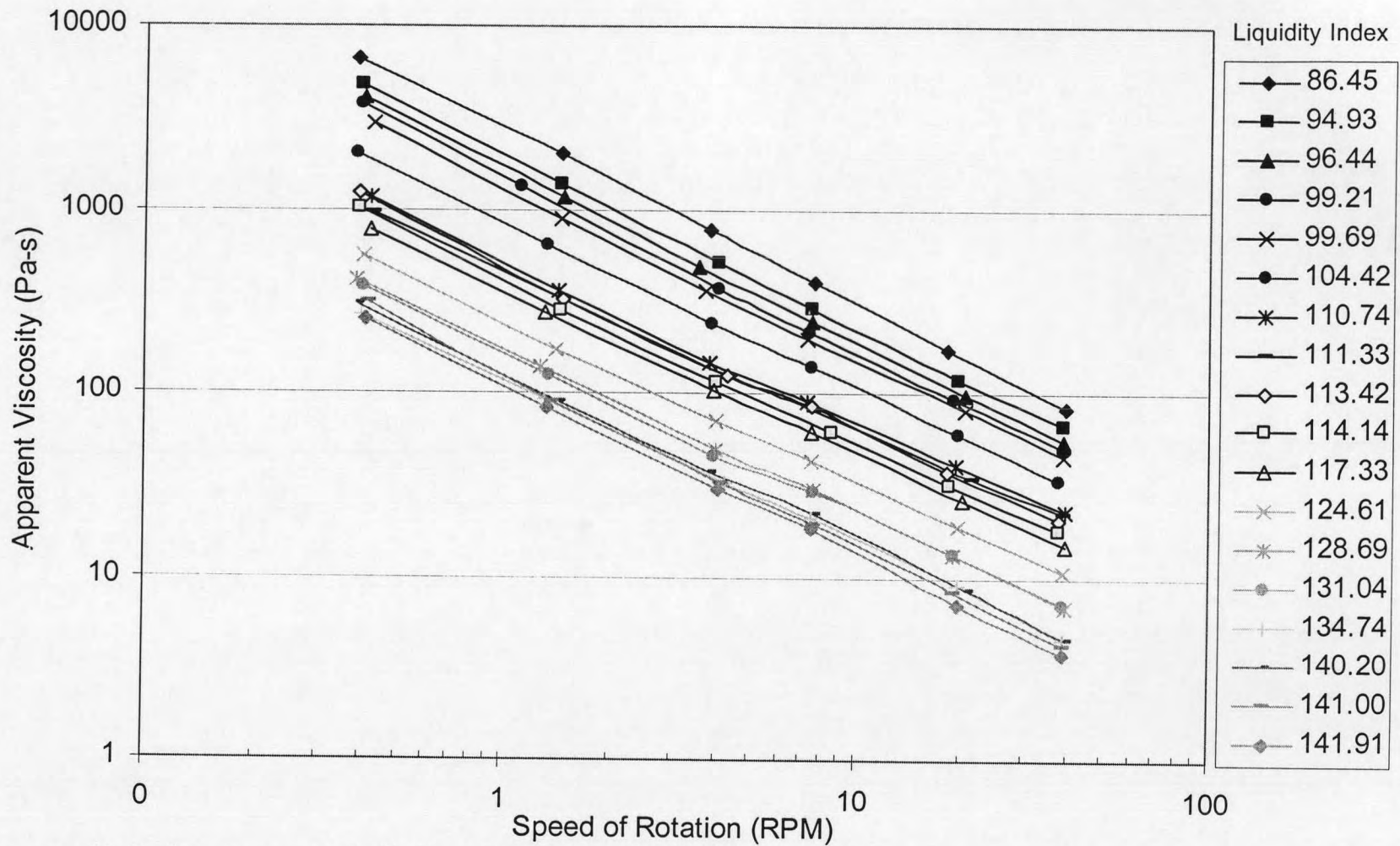
$$\eta = 19554.5 \cdot L.I.^{-4.376} \cdot N^{-0.937} \quad (4.10)$$

จากสมการที่ 4.10 สามารถนำมาพล็อตร่วมกับผลที่ได้จากการทดสอบ โดยให้พล็อตระหว่าง ดัชนีเหลว กับค่าความเหนียวมาพล็อตบน log scale แสดงดังรูปที่ 4.26

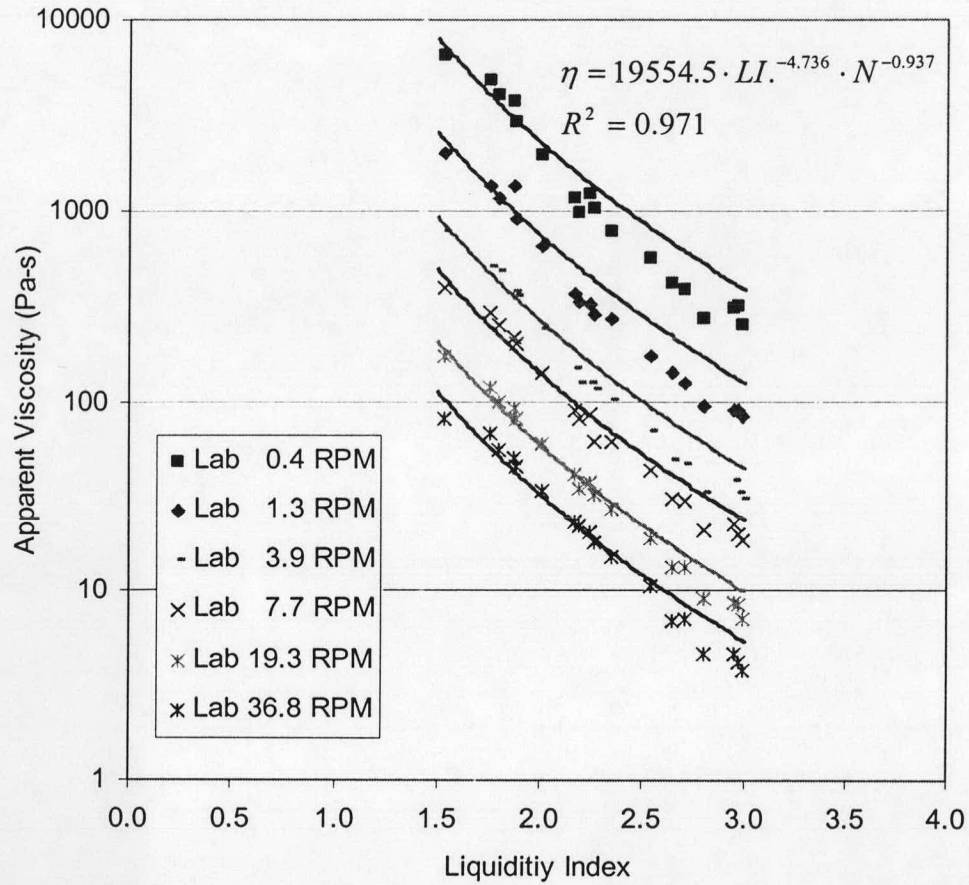




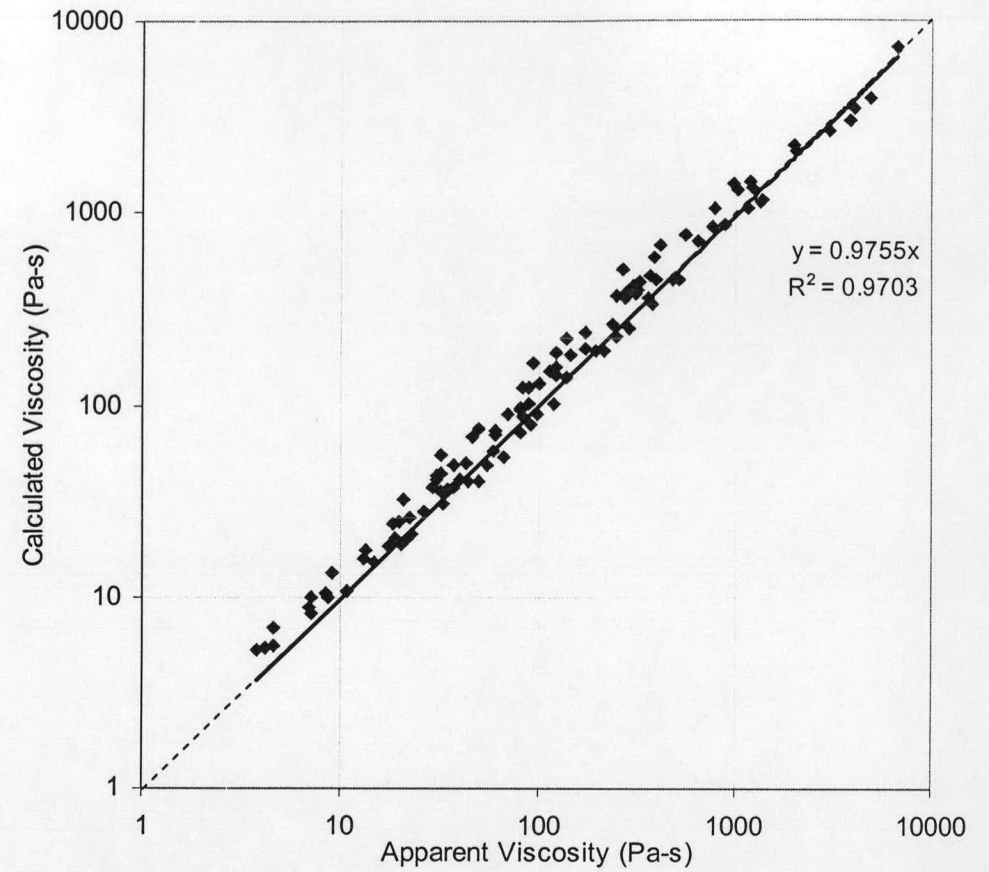
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอัตราเร็วในการหมุนต่างๆ ที่ปริมาณความชื้นต่างๆ



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอัตราเร็วในการหมุนต่างๆ ที่ดัชนีเหลวต่างๆ บน log-log scale



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดของดินจากสมการที่ 4.8 กับ Liquidity Index ที่อัตราเร็วรอบต่างๆ จากการโปรแกรม NONLIN



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดของดินจากสมการที่ 4.8 กับ ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่ปรากฏจากการโปรแกรม NONLIN

#### 4.5 การหาความสัมพันธ์ระหว่างหนืดและกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว

จากผลการทดสอบหาค่าความหนืดด้วยเครื่อง Rotational Viscometer เพื่อนำมาคำนวณหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว จะทำได้โดยนำผลที่ได้จากการทดสอบ คือ อัตราเร็วรอบในการทดสอบ และค่าความหนืดที่อัตราเร็วรอบในการทดสอบ มาคำนวณด้วยสมการที่ 4.8 ซึ่งทำการจัดรูปใหม่เพื่อหาค่าดัชนีเหลวดังสมการที่ 4.9 แล้วนำค่าดัชนีเหลวมาคำนวณด้วยสมการที่ 4.5 เพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือน

$$L.I. = \left( \frac{10^5}{5.114 \cdot N^{0.937} \cdot \eta} \right)^{0.2285} \quad (4.9)$$

โดยที่  $\eta$  = ความหนืดที่ปรากฏ (Apparent Viscosity), Pa-s.

$N$  = ความเร็วในการหมุน , รอบต่อนาที

หรือจะสามารถทำการคำนวณได้เร็วยิ่งขึ้นได้โดยการนำสมการที่ 4.5 มาจัดรูปแบบใหม่เพื่อหาค่าดัชนีเหลวจะได้

$$L.I. = (0.096 \cdot c_u)^{-0.2243} \quad (4.10)$$

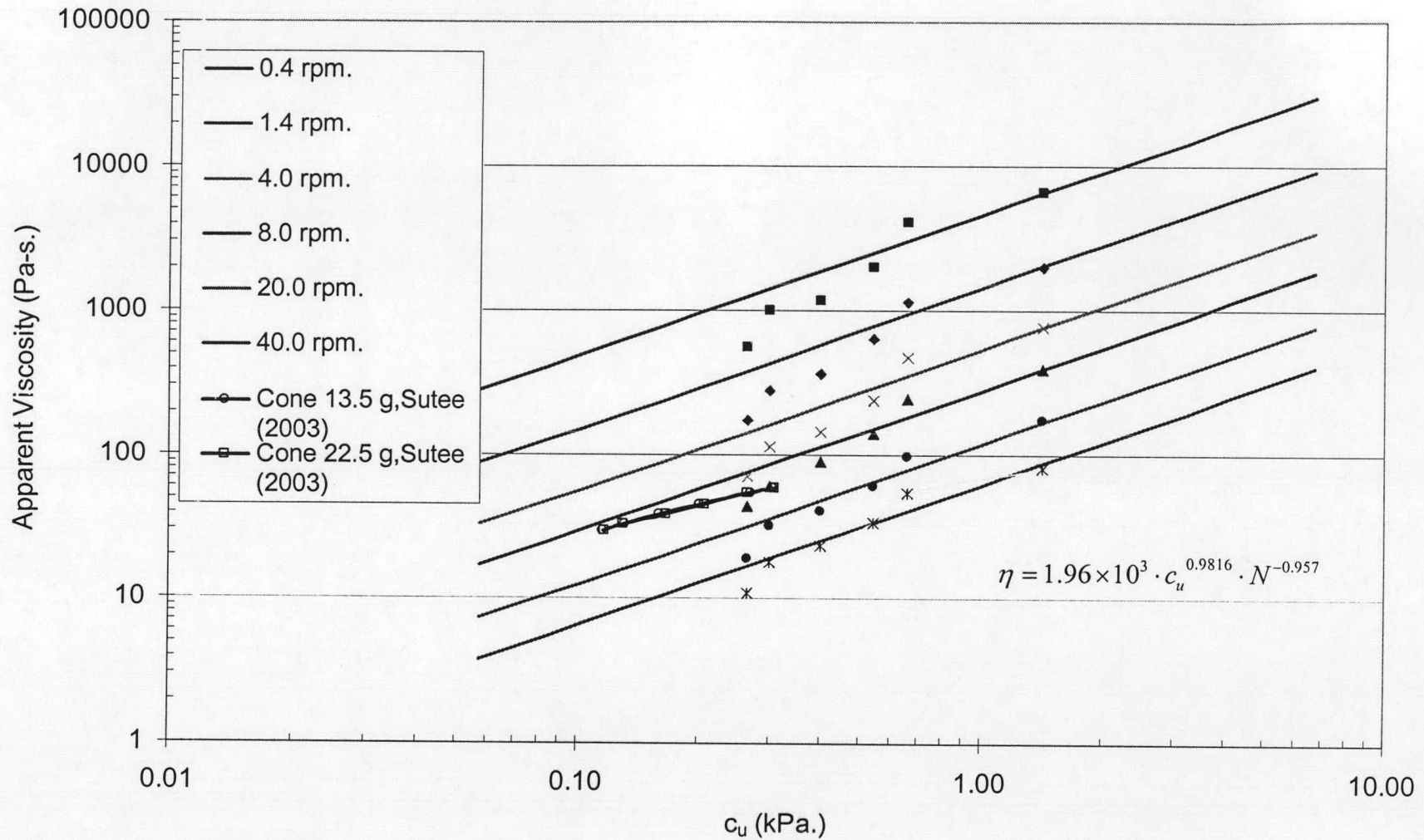
โดยที่  $c_u$  = กำลังรับแรงเฉือน, kPa

นำ L.I. สมการที่ 4.9 เท้ากับสมการที่ 4.10 ได้สมการที่ 4.11 ดังนี้

$$(0.096 \cdot c_u)^{-0.2243} = \left( \frac{10^5}{5.114 \cdot N^{0.937} \cdot \eta} \right)^{0.2285}$$

$$\therefore \eta = 1.96 \times 10^3 \cdot c_u^{0.9816} \cdot N^{-0.957} \text{ Pa-s} \quad (4.11)$$

โดยสมการที่ 4.11 เป็นความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดสอบหาค่าความหนืดด้วยเครื่อง Rotational Viscometer ที่ใช้ในการทดสอบเท่านั้น



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากสมการที่ 4.11 กับความหนืดของดินเหนียว ที่อัตราเร็วรอบต่างๆ จากการโปรแกรม NONLIN ของดินบริเวณถนนพระราม 9 เปรียบเทียบกับ ตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า โดยสุธี (2003)