

พฤติกรรมกำลังรับแรงเหวี่ยงและความหนืดของดินโคลน



นายวศิน เหลืองคชนารถ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SHEAR STRENGTH AND VISCOSITY BEHAVIORS OF SLURRY CLAY

Mr. Wasin Luangkhochanart

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

Copyright of Chulalongkorn University

วคิน เหลืองคนารถ: พฤติกรรมกำลังรับแรงเฉือน และความหนืดของดินโคลน (SHEAR STRENGTH AND VISCOSITY BEHAVIORS OF SLURRY CLAY) อ. ที่ปรึกษา: รศ. ดร.บุญชัย อุกฤษฏาชน, 90หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเฉือนกับความหนืดของดินเหนียวอ่อน ดินเหนียวที่ใช้เก็บมาจากบริเวณถนนพระราม 9 การเตรียมตัวอย่างกระทำโดยร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 เพื่อควบคุมคุณภาพดินเหนียวให้มีเม็ดกรวดและทรายปน การหาลำกำลังเฉือนทดสอบด้วยเครื่องทดสอบหาลำกำลังเฉือนแบบใบพัดในห้องปฏิบัติการ พารามิเตอร์ที่ศึกษาประกอบด้วย ขนาดของใบพัดที่ใช้เฉือนดิน อัตราเร็วในการหมุนของใบพัด และความชื้นของดิน การหาค่าความหนืดทดสอบด้วยเครื่อง Rotational Viscometer ออกแบบตามมาตรฐาน ASTM C1276 พารามิเตอร์ที่ศึกษาประกอบด้วย อัตราเร็ว ความชื้นของดิน การสอบเทียบเครื่องมือนี้กระทำกับวัสดุมาตรฐาน คือน้ำมันเครื่องเกรด SAE30 และ SAE50 โดยนำมาหาค่าความหนืดด้วยเครื่อง Brookfield Model DV-III ผลการสอบเทียบเครื่องประดิษฐ์ใหม่นี้มีค่า Shape Factor, K เท่ากับ 0.0022236

การทดสอบหาลำกำลังเฉือนในดินเหนียว กระทำกับดินที่ความชื้นอยู่ในช่วงระหว่าง 75% - 125% หรือดัชนีเหลวเท่ากับ 1.2 - 2.5 และอัตราเร็วในการหมุนประมาณ 46 - 278 องศา/นาที ได้มีการประเมินผลออกเป็น 2 ค่าคือ Peak shear strength และ Residual shear strength การวิเคราะห์ผลเลือกใช้ Residual shear strength พบว่ากำลังเฉือน (c_u) มีความสัมพันธ์กับดัชนีเหลว (liquidity index, LI.) แบบปฏิภาคผกผัน โดยได้สมการความสัมพันธ์คือ $c_u = 10.41 \cdot LI^{-4.45}$, $R^2 = 97.86\%$ โดยอัตราเร็วในการหมุน และขนาดของใบพัดไม่มีผลต่อกำลังเฉือนของดินเหนียว

การทดสอบหาค่าความหนืดในดินเหนียว ที่มีความชื้นอยู่ในช่วงระหว่าง 85% - 140% หรือดัชนีเหลว (LI.) เท่ากับ 1.5 - 3.0 และความเร็วในการหมุน (N) ประมาณ 0.4 - 40 รอบต่อนาที ความหนืด (η) มีความสัมพันธ์กับดัชนีเหลวแบบปฏิภาคผกผัน โดยสมการความสัมพันธ์คือ $\eta = 1.95 \times 10^4 \cdot LI^{0.9816} \cdot N^{-0.937}$, $R^2 = 97.1\%$ ผลการทดสอบแสดงว่าความหนืดมีค่าลดลงเมื่ออัตราเร็วเพิ่มขึ้น จากทฤษฎีของไหลสามารถสรุปได้ว่า ดินเหนียวเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็น ของไหลแบบนอนนิวทอนเนียนคล้ายกับประเภทสโตพลาสติก แต่มีความเค้นคลากเริ่มต้นค่าหนึ่ง กำลังเฉือนและความหนืดมีความสัมพันธ์แบบปฏิภาคโดยตรงกัน โดยได้สมการความสัมพันธ์คือ $\eta = 1.96 \times 10^3 \cdot c_u^{0.9816} \cdot N^{-0.937}$

ภาควิชา..... วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่อนิสิต.....*วคิน เหลืองคนารถ*.....
 สาขาวิชา..... วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....*[Signature]*.....
 ปีการศึกษา..... 2549.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ ผู้เขียนขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏ์ชน อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทาง ตรวจสอบ ตลอดจนปรับปรุงแก้ไข วิทยานิพนธ์นี้

Dr. Seah Tian Ho อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้ให้คำชี้แนะในการทำวิจัยมาโดยตลอด ทั้ง ได้ปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่กรุณาใช้เวลา และให้คำแนะนำ รวมทั้งให้ ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ดร.จิรวัดมน์ ชีวรุ่งโรจน์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ฯ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รองศาสตราจารย์ ดร. ดนัย อารยะพงษ์ อาจารย์ประจำภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริฉันทน์ เขียมศิริเลิศ อาจารย์ประจำภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดร.พรเพ็ญ วีระวัฒนกานนท์ อาจารย์ประจำภาควิชาเภสัชวิทยา คณะเภสัชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คุณวิฑูรย์ งามประดิษฐ์ ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บริษัท เอ็ม เอ เอ จีไอเทคนิค จำกัด สำหรับสถานที่ ความสะดวก ความรัก และความ อบอุ่น ในการทดสอบงานวิจัย

วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับความอนุเคราะห์ใน การสอบเทียบวัสดุมาตรฐาน

ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณสุธี มุกดาดีดิก พี่ๆ น้องๆ และเพื่อนๆ ทุกคนตลอดจนเจ้าหน้าที่วิจัย ปรู๊ฟกิลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ ความร่วมมือ และช่วยเหลือเป็นอย่างดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนปรารถนาที่จะแสดงความรำลึกถึงพระคุณของบิดา มารดา พี่ น้อง ใน ครอบครัว และคุณย่าที่น่ารักที่เป็นกำลังใจของผมเสมอมา ที่ได้ให้ความสนับสนุน และเป็น กำลังใจแก่ผู้เขียนมาโดยตลอด จนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญรูป	ฎ
สารบัญตาราง	ฒ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 คำนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength of Soil)..	4
2.1.1 การทดสอบหากำลังรับค่าแรงเฉือนในสนาม	4
2.1.2 การทดสอบหากำลังรับค่าแรงเฉือนในห้องทดลองด้วยใบพัด	6
2.2 ความหนืด (Viscosity)	8
2.2.1 ทฤษฎี.....	8
2.2.2 การทดสอบหาค่าความหนืดของดินเหนียว	16
2.3 งานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต.....	20
2.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการทดสอบหากำลังรับเฉือนด้วยใบพัด	20
2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการทดสอบหาค่าความหนืด	22

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการทดสอบและวิจัย	34
3.1 ตัวอย่างดินเหนียวที่ใช้ในการทดสอบ	34
3.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน และคุณสมบัติทางเคมีของดิน	35
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ.....	37
3.3.1 แบบใส่ดิน (Mold)	37
3.3.2 เครื่องทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบใบพัดในห้องทดสอบ	37
3.3.3 เครื่องทดสอบหาค่าความเหนียวของดินเหนียว ด้วยเครื่อง Rotational Viscometer	41
3.4 โปรแกรมการทดสอบ	44
3.4.1 การเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบ	44
3.4.2 ทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนด้วยวิธี การทดสอบแรงเฉือน ด้วยใบพัดในห้องทดสอบ	44
3.4.3 ทดสอบหาค่าความเหนียวของดินเหนียวด้วยเครื่อง Rotational Viscometer	44
3.5 ขั้นตอนการทดสอบ	45
3.5.1 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนด้วยเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรง เฉือนด้วยใบพัดในห้องทดสอบ	45
3.5.2 การทดสอบหาค่าความเหนียวด้วยเครื่อง Rotational Viscometer	47

บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล	49
4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางเคมีของดิน	49
4.1.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน	49
4.1.2 ผลการทดสอบส่วนประกอบทางเคมี	49
4.2 การสอบเทียบค่าเครื่อง Rotational Viscometer	50
4.2.1 การคำนวณขีดจำกัดค่าความหนืดของเครื่อง Rotational Viscometer	50
4.2.2 การสอบเทียบค่าความหนืดของน้ำมันมาตรฐาน	53
4.2.3 การสอบเทียบค่าความหนืดของเครื่อง Rotational Viscometer	55
4.3 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวด้วยเครื่องมือทดสอบ กำลังรับแรงเฉือนด้วยใบพัดในห้องทดสอบ	60
4.3.1 การประเมินความหมายจากผลการทดสอบ	60
4.3.2 ผลการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวด้วย เครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนด้วยใบพัดในห้องทดสอบ	60
4.4 การทดสอบหาค่าความหนืดของดินเหนียวด้วยเครื่อง Rotational Viscometer	69
4.4.1 การประเมินความหมายจากผลการทดสอบ	69
4.4.2 ผลการทดสอบค่าความหนืดของดินเหนียวด้วยเครื่องมือ Rotational Viscometer	72
4.5 การหาความสัมพันธ์ระหว่างหนืดและกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว	76
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ	78
5.1 สรุปผลการทดสอบ	78
5.2 ข้อเสนอแนะในการศึกษาเพิ่มเติม	79

	หน้า
รายการอ้างอิง.....	80
ภาคผนวก.....	83
ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินเหนียว ด้วยเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนด้วยใบพัด	84
ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบหาค่าความหนืดของดินเหนียวด้วยเครื่อง Rotational Viscometer	87
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	90



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่	หน้า
2.1	ลักษณะการกระจายกำลังรับเฉือนแบบต่างๆ..... 5
2.2	เครื่องทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในห้องทดสอบด้วยใบพัดตามมาตรฐาน ASTM 2573..... 7
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดพลวัตกับอุณหภูมิ..... 9
2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเปรียบเทียบกับอุณหภูมิ..... 10
2.5	การเปลี่ยนรูปของของไหลเมื่อมีแรงเฉือน F มากกระทำ 8
2.6	พฤติกรรมของของไหลนิวโทเนียน จากอัตราเฉือนที่มีผลต่อความเค้นเฉือน และ ความหนืด..... 12
2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และอัตราเฉือน ของวัสดุต่างชนิดกัน..... 13
2.8	พฤติกรรมของของไหลประเภทไดเลนแทน จากอัตราเฉือนที่มีผลต่อความเค้น เฉือน และ ความหนืด..... 14
2.9	พฤติกรรมของของไหลประเภทสโตพลาสติก จากอัตราเฉือนที่มีผลต่อความ เค้นเฉือน และ ความหนืด 14
2.10	พฤติกรรมของของไหลประเภทบิงแอม จากอัตราเฉือนที่มีผลต่อความเค้นเฉือน และ ความหนืด..... 15
2.11	พฤติกรรมของของไหลประเภทพลาสติก จากอัตราเฉือนที่มีผลต่อความเค้น เฉือน และ ความหนืด..... 15
2.12	ลักษณะเครื่องทดสอบหาความหนืดตามมาตรฐาน ASTM C 1276 16
2.13	ลักษณะเครื่อง Marsh Funnel ทดสอบความหนืดตามมาตรฐาน API RP 13B Section 2..... 17
2.14	ลักษณะเครื่อง Brookfield Model DV-III สำหรับหาค่าความหนืดของ ของเหลว..... 18
2.15	ลักษณะเครื่อง Hand-Crank Viscometer ทดสอบความหนืดตามมาตรฐาน API RP 13B, I , Section 3.... 19
2.16	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือน กับความลึก ที่อัตราเร็วในการหมุน แตกต่างกัน โดย Wiesel (1973)..... 21
2.17	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือน กับอัตราเร็วในการหมุน โดย Kenney et al., (1965) 21

รูปที่	หน้า
2.18 การกระจายแรงเฉือนบนระนาบวิบัติตามแนวราบของใบพัด โดย Donald et al., (1977)	22
2.19 ความสัมพันธ์ของ ค่าความชื้นกับค่ากำลังรับแรงเฉือน โดย Bentley (1979)	23
2.20 ความสัมพันธ์ของ pH กับ Yield Stress สำหรับดิน Gloucester โดย Bentley (1979).....	23
2.21 (a) ดินเหนียว South Nation และ (b) ดินเหนียว St. Leon le Ground ใน sodium-saturated state โดยเปลี่ยนแปลง ค่าความเค็มและค่าความชื้น โดย Torrance (1987).....	26
2.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง Yield Stress ซึ่งหาค่าโดยใช้วิธีทดสอบค่าความหนืด และ ค่ากำลังรับแรงเฉือนซึ่งใช้วิธีกรวยตกในการทดสอบ (a) Na-saturated, (b) citrate-dithionite extracted และ Na-saturate (c) acid-base extracted และ Na-saturated, (d) Ca-saturated โดย Torrance (1987)	27
2.23 ชนิดของการไหลแบบต่างๆ (1) Newtonian (2) thickening (3) fluidizing (4) Casson (5) Bingham โดย Locat (1988)	28
2.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง Viscosity และ yield Stress โดย Locat (1988)	29
2.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง Liquidity Index และ yield Stress โดย Locat (1988)	29
2.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง Liquidity Index และ Viscosity โดย Locat (1988)	30
2.27 ความสัมพันธ์ของ Yield Stress และ Remoulded Shear Strength โดย Locat (1988).....	30
2.28 ค่า Water Content (%) กับ Viscosity (η , sec) ของตัวอย่างดินนหนทุรีและ หนองงูเห่า ทดสอบด้วยเครื่องมือ Marsh Funnel Viscometer โดย สุทธิ (2003).....	31
2.29 เปรียบเทียบค่า Water Content (%) กับ Viscosity (η , mPa-s) ของตัวอย่าง ดินนหนทุรี และ ตัวอย่างดินหนองงูเห่า ทดสอบด้วยเครื่องมือ Hand-Crank Viscometer โดย สุทธิ (2003)	32
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).....	33

รูปที่	หน้า
3.1 แผนที่แสดงตำแหน่งหลุมเจาะ	34
3.2 รูปตัดของชั้นดินบริเวณหลุมเจาะ	35
3.3 ชุดมอเตอร์สำหรับทดสอบ Laboratory Vane Shear Test.....	39
3.4 กล่องควบคุมชุดมอเตอร์.....	39
3.5 ใบพัดขนาดต่างๆที่ใช้ในการทดสอบ	40
3.6 แกนหมุน และภาชนะสำหรับการทดสอบหาค่าความหนืด	41
3.7 รายละเอียด ขนาด รูปร่างของ แกนหมุน และภาชนะใส่ดิน	42
3.8 ลักษณะรูปด้านข้าง และรูปตัด ของแกนหมุน และภาชนะใส่ดิน	42
3.9 เครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบใบพัดในห้องทดสอบ	46
3.10 เครื่องทดสอบ Rotational Viscometer	48
4.1 แรงต้านของวัสดุจากการกระทำของแรง F.....	50
4.2 ลักษณะการพิจารณาแรงต้านของวัสดุที่เกิดขึ้นจากการหมุนของแกนหมุน	51
4.3 รายละเอียดขนาดต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณค่าความหนืดของ Rotational Viscometer	52
4.4 รายละเอียดเครื่อง Brookfield ที่ใช้ในการสอบเทียบน้ำมัน	54
4.5 น้ำมันมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ.....	55
4.6 การวิเคราะห์ค่า K ที่ได้จากทฤษฎี และการสอบเทียบ.....	56
4.7 ผลการทดสอบของน้ำมันมาตรฐาน Pennzoil HD SAE 30.....	57
4.8 ผลการทดสอบของน้ำมันมาตรฐาน Pennzoil HD SAE 50	58
4.9 ผลการสอบเทียบค่ามาตรฐานของเครื่อง Rotational Viscometer	59
4.10 เปรียบเทียบค่า K จากทฤษฎี กับค่า K จากการสอบเทียบ	59
4.11 วิธีการประเมินความหมายจากผลการทดสอบหาลำดับรับแรงเฉือน.....	60
4.12 ตัวอย่างการเขียนข้อมูล สำหรับ โปรแกรม Nonlin.....	62
4.13 ตัวอย่างผลการประมวลผลด้วยโปรแกรม Nonlin.....	62
4.14 ผลการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ปริมาณความชื้น 84.72% โดยใช้ใบพัด ขนาด 6x9 ซม.	63
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินกับ Water Content (%) จาก การประเมินแบบ Peak Shear Strength	64

รูปที่	หน้า
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินกับ Water Content (%) จาก การประเมินแบบ Residual Strength	65
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินจากสมการที่ 4.5 กับ Liquidity Index (%) จากการโปรแกรม NONLIN	66
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินจากสมการที่ 4.5 กับ ค่า กำลังรับแรงเฉือนของดินที่ปรากฏจากการโปรแกรม NONLIN.....	66
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนกับ Liquidity Index ของดินบริเวณ ถนนพระราม 9 เปรียบเทียบกับ ตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า, ดินเหนียว นนทบุรี, Kaoline Clay	67
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนกับ Liquidity Index ของดินบริเวณ ถนนพระราม 9 เปรียบเทียบกับ ตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า, ดินเหนียว นนทบุรี Kaoline Clay และ Skempton Northley (1953) บน log-log scale.....	68
4.21 วิธีการประเมินความหมายของค่าแรงบิดจากผลการทดสอบหาความเหนียว	69
4.22 วิธีการทดสอบหาค่าความเหนียวที่ปริมาณความชื้น 111.33% โดยใช้ความเร็วใน การหมุน 21.32 รอบต่อนาที	70
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเหนียวกับอัตราเร็วในการหมุนต่างๆ ที่ปริมาณ ความชื้น 111.33%	71
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความเหนียวกับอัตราเร็วในการหมุนต่างๆ ที่ปริมาณ ความชื้นต่างๆ	73
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความเหนียวกับอัตราเร็วในการหมุนต่างๆ ที่ดัชนีเหลวต่างๆ บน log-log scale.....	74
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนียวของดินจากสมการที่ 4.8 กับ Liquidity Index (%) ที่อัตราเร็วรอบต่างๆ จากการโปรแกรม NONLIN.....	75
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนียวของดินจากสมการที่ 4.8 กับ ค่ากำลังรับ แรงเฉือนของดินที่ปรากฏจากการโปรแกรม NONLIN.....	75
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากสมการที่ 4.11 กับความเหนียว ของดินเหนียว ที่อัตราเร็วรอบต่างๆ จากการโปรแกรม NONLIN ของดินบริเวณ ถนนพระราม 9 เปรียบเทียบกับ ตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า โดยสุธี (2003)	77

สารบัญตาราง

ผ

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1	ข้อมูลทั่วไปของดินที่ใช้ทดสอบ โดย Torrance (1987) 27
ตารางที่ 2.2	ข้อมูล Atterberg Limits ของดินเหนียวที่มี sodium-saturated, ค่า ความเค็มสูง โดย Torrance (1987)..... 28
ตารางที่ 3.1	ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน และเคมีของดินเหนียวตามธรรมชาติ ของดินบริเวณถนนพระราม 9 36
ตารางที่ 3.2	ขนาดต่างๆของใบพัด 40
ตารางที่ ก-1	ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบ Peak Shear Strength ของ ดินเหนียว ด้วยเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนด้วยใบพัดในห้อง ทดสอบ..... 85
ตารางที่ ก-2	ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบ Residual Strength ของดิน เหนียว ด้วยเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนด้วยใบพัดในห้อง ทดสอบ..... 86
ตารางที่ ข-1	ผลการทดสอบค่าความเหน็ดของดินเหนียว ด้วยเครื่อง Rotational Viscometer 88
ตารางที่ ข-1	ผลการทดสอบค่าความเหน็ดของดินเหนียว ด้วยเครื่อง Rotational Viscometer (ต่อ) 89

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 คำนำ

กำลังรับความเค้นเฉือน เป็นปัจจัยสำคัญในการพิจารณาว่าดินจะสามารถรับแรงที่กระทำได้เพียงไร โดยกำลังรับความเค้นเฉือนในดินจะพิจารณาออกเป็น 2 อย่างคือกำลังรับความเค้นเฉือนในแบบระบายน้ำ และกำลังรับความเค้นเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ โดยในงานวิจัยนี้จะพิจารณากำลังรับความเค้นเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ซึ่งจะเป็นการพิจารณาในลักษณะของดินที่มีความสามารถในการระบายน้ำได้ต่ำ เมื่อมีแรงกระทำต่อดิน จะมีความสามารถในการรับแรงที่กระทำนั้นได้หรือไม่ จะมีพฤติกรรมเป็นเช่นไรในช่วงเวลาที่ยังไม่มีการระบายน้ำในดิน และถ้าดินมีปริมาณความชื้นสูงมากๆ มีผลทำให้ดินมีลักษณะเหลว และมีกำลังรับแรงเฉือนต่ำ จนยากที่จะวัดได้เราสามารถหากำลังรับความเค้นเฉือนได้โดยวิธีใดได้บ้าง นอกจากการหากำลังรับความเค้นเฉือนโดยตรง เพื่อที่จะลดปัญหาจากการเก็บตัวอย่างแบบไม่รบกวน

งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะทำการทดสอบหาความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินโคลนกับการทดสอบหาค่าความหนืด (Viscosity) ของดินโคลน ซึ่งการทดสอบหาค่าความหนืดนี้เป็นวิธีทดสอบที่สามารถหาค่ากำลังรับแรงเฉือนในสนามได้ จากการทดสอบหาค่าความหนืดเพราะการหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวที่มีค่าปริมาณความชื้น (Water Content) สูงๆ จะต้องทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการเท่านั้นและต้องทำการทดสอบที่ยุ่งยาก แต่การทดสอบด้วยการหาค่าความหนืด สามารถทำการทดสอบได้ง่ายและสะดวกรวดเร็ว รวมทั้งสามารถทำการทดสอบในสนามได้อีกด้วย ซึ่งทำให้เราสามารถหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อนในบริเวณพื้นที่ได้ทันทีและ ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบก็จะได้ค่าที่แม่นยำยิ่งขึ้น ทำให้การทดสอบหาค่าความหนืดของดินเหนียวในสภาพโคลนมีความสำคัญอย่างมากในการหาค่ากำลังรับแรงเฉือน โดยงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบหาค่าความหนืดจากเครื่อง Rotational Viscometer ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ผู้ทำวิจัยได้ปรับปรุงขึ้นใหม่จากมาตรฐาน ASTM C1276 เพื่อใช้สำหรับงานดินโดยเฉพาะ ดังนั้นแนวทางงานวิจัยนี้ คือ หาความสัมพันธ์ ของค่ากำลังรับแรงเฉือน (C_u) กับค่าความหนืด (η) โดยต้องคำนึงถึงพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลกระทบต่อค่าความหนืด เช่น pH, ค่าปริมาณเกลือในดิน (Salt Content), อุณหภูมิ เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ประกอบด้วย

1. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังรับแรงเฉือน กับความหนืดของดินเหนียวในสภาพโคลน (Slurry Stage) โดยศึกษา กำลังรับแรงเฉือน วิธี Laboratory Vane Shear Test และศึกษาความหนืดโดย Rotational Viscometer
2. ศึกษา กำลังรับแรงเฉือนของดินเมื่ออัตราส่วน H:D ของใบพัดที่ขนาดต่างๆ และที่อัตราเร็วในการหมุนใบพัดต่างๆ
3. ศึกษาพฤติกรรมด้านความหนืดของดินเหนียว โดยการทดสอบด้วยเครื่อง Rotational Viscometer ที่อัตราเร็วในการหมุน Spindle ต่างๆ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการศึกษาโดยใช้ตัวอย่างดินเหนียวจากการเก็บตัวอย่างดินเหนียว บริเวณถนนพระราม 9
2. ทดสอบหาค่าแรงเฉือนในห้องทดลองด้วยใบพัด (Laboratory Vane Shear Test)
 - วิธีทดสอบแบบปกติ (Standard Test) ตามมาตรฐาน ASTM D4648
 - เปลี่ยนแปลงอัตราส่วน D:H ของใบพัด
 - เปลี่ยนแปลงอัตราเร็วในการเฉือน (Rate of Shear) ที่ความเร็วต่างๆ
3. ปรับปรุงเครื่องมือสำหรับการทดสอบหาค่าความหนืดของดินเหนียว ตามมาตรฐาน ASTM C1276
4. ทดสอบหาค่าความหนืด (Viscosity Test)
 - ทดสอบด้วยเครื่อง Rotational Viscometer ตามมาตรฐาน ASTM C1276
 - เปลี่ยนแปลงอัตราเร็วในการหมุนของแกนหมุน
5. พารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงกับตัวอย่างดิน
 - 5.1 สำหรับการทดสอบแรงเฉือนในห้องทดลองด้วยใบพัด เปลี่ยนแปลงค่าปริมาณความชื้นในดิน (Water Content) อยู่ในช่วงประมาณ 75% - 125%
 - 5.2 สำหรับการทดสอบความหนืดด้วยเครื่อง Rotational Viscometer เปลี่ยนแปลงค่าปริมาณความชื้นใน อยู่ในช่วงประมาณ 85% - 140%

5. หาความสัมพันธ์ร่วมกัน

5.1 กำลังรับแรงเฉือน(c_u) กับ ค่าความหนืด (η , Viscosity)

5.2 Liquidity Index – กำลังรับแรงเฉือน (c_u)

5.3 Liquidity Index – ความหนืด (η)

1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย

1.4.1 ประโยชน์ทางด้านวิชาการ

1. ความสัมพันธ์ของค่าความหนืด ของดินเหนียวอ่อน สามารถนำมาประยุกต์หาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ โดยที่การทดสอบหาความหนืดของดินเหนียวอ่อน จะกระทำได้ง่ายเมื่อ ทำการทดสอบในสนาม

2. สามารถหาค่ากำลังรับแรงเฉือนที่มีค่าต่ำมากๆที่เครื่องมือทดสอบในห้องปฏิบัติการทั่วไปไม่สามารถหาค่าได้ โดยการทดสอบหาค่าความหนืด

3. สามารถทราบถึงผลกระทบของอัตราเร็วในการเฉือน ที่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว

4. สามารถทราบความสัมพันธ์ด้านความหนืดของดินเหนียวที่อัตราเร็วต่างๆ

1.4.2 ประโยชน์ทางการประยุกต์

1. เป็นต้นแบบในการทำเครื่องมือสำหรับทำการทดสอบหาค่าความหนืดในดิน

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

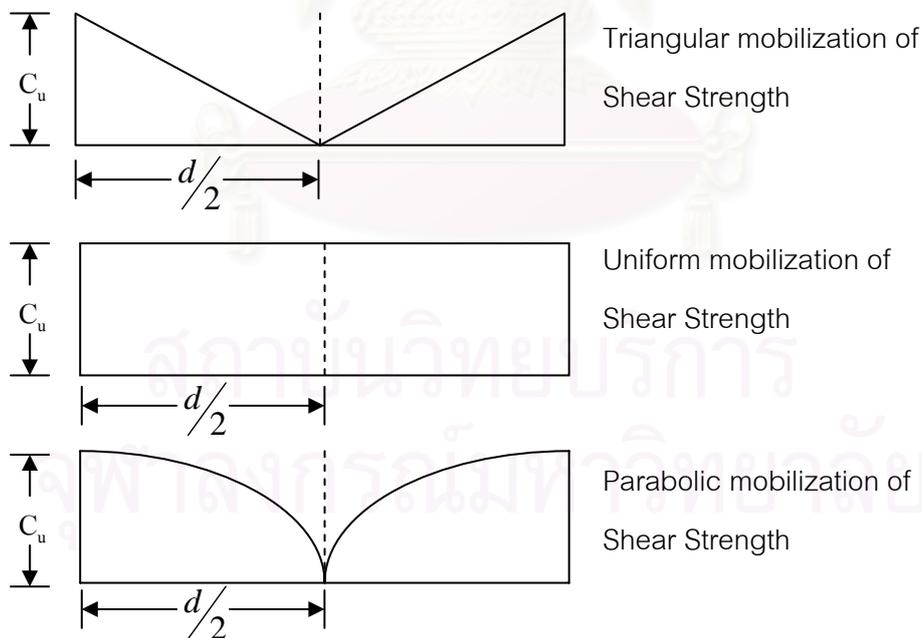
การทดสอบ Field Vane Shear Test เป็นการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว โดยไม่จำเป็นต้องเก็บตัวอย่างดินเพื่อทำการทดสอบ จึงเป็นการทดสอบที่มีความคลาดเคลื่อนจากการรบกวนดินน้อยมาก โดยปกติเป็นการทดสอบกับดินเหนียวอ่อน ที่มีความลึกไม่เกิน 15-17 เมตร ตามมาตรฐาน ASTM D2573 โดยใช้ใบพัดกากบาท (Vane 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 จากนั้นกดใบพัดลงไปที่จนถึงระดับทดสอบ 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 ($\theta=0$) โดยนำตัวอย่างดินเหนียวที่ได้จากการเก็บตัวอย่างแบบไม่ถูกรบกวนมาทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4648-94 โดยใช้ใบพัดกาบขนาดเล็ก (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

สามารถคำนวณสำหรับการกระจายกำลังเฉือนสม่ำเสมอจากสมการ (2.4) ดังนี้

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

โดยที่สมมติให้ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่ปลายบนและล่างมีค่าคงที่เท่ากันตลอดแนวรัศมีของใบพัด

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

h = ความสูงของใบพัด, m.

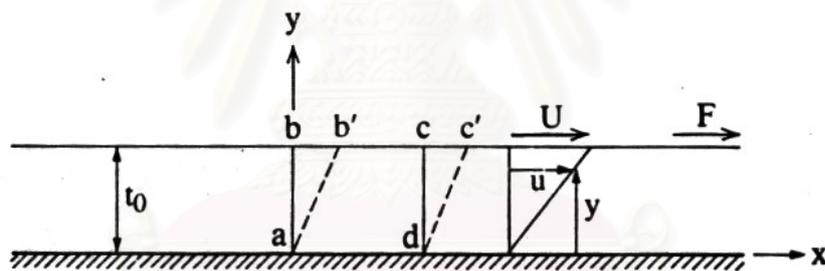
b = ความกว้างของใบพัด, m.

ค่าแรงบิด (Torque, T) จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของสปริง (K) ซึ่งจะสามารถวัดค่ากำลังรับแรงเฉือนได้ในช่วงที่กว้างมากขึ้นเมื่อใช้ค่าคงที่ของสปริงที่เปลี่ยนแปลงไป

2.2 ความหนืด

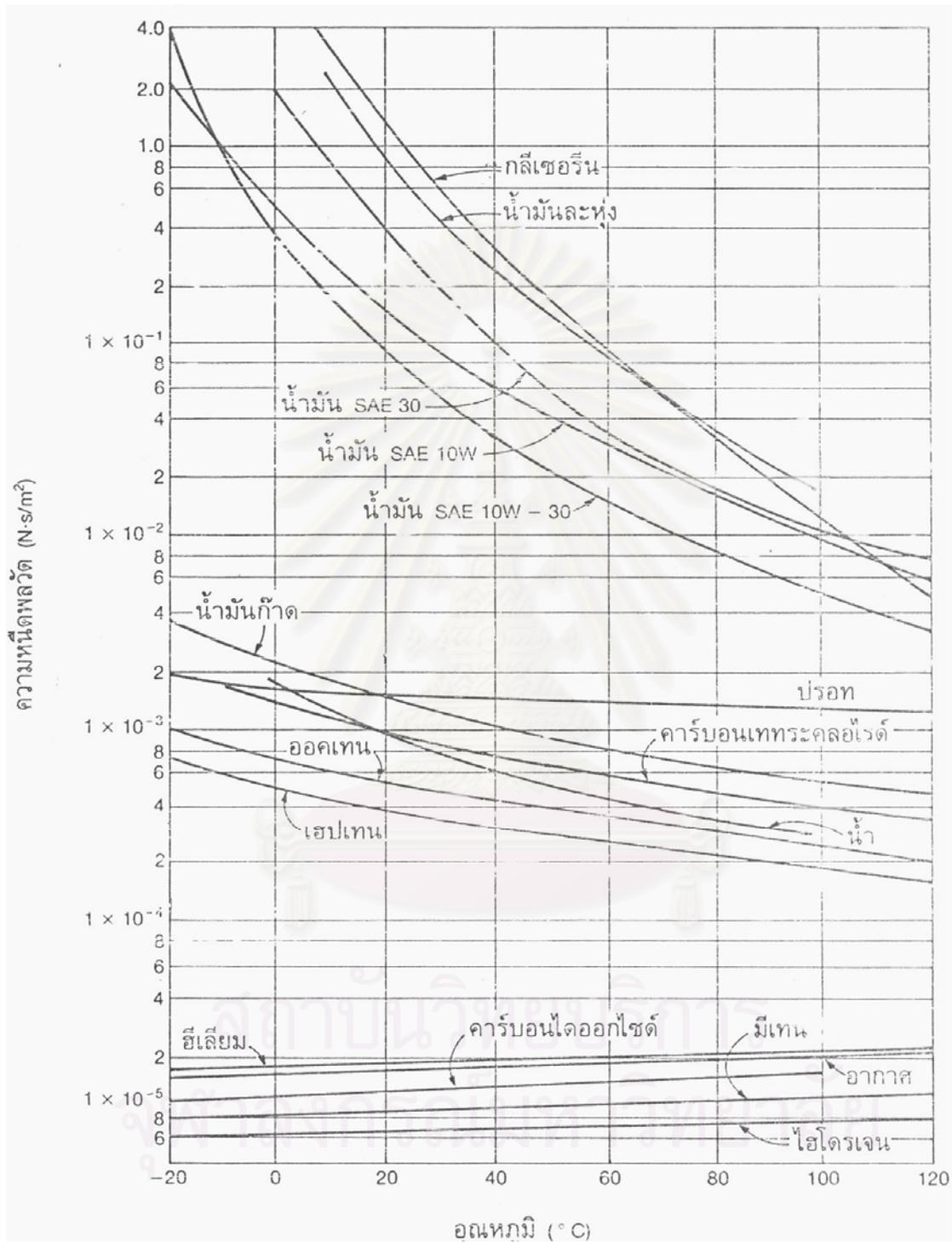
2.2.1 ทฤษฎี

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

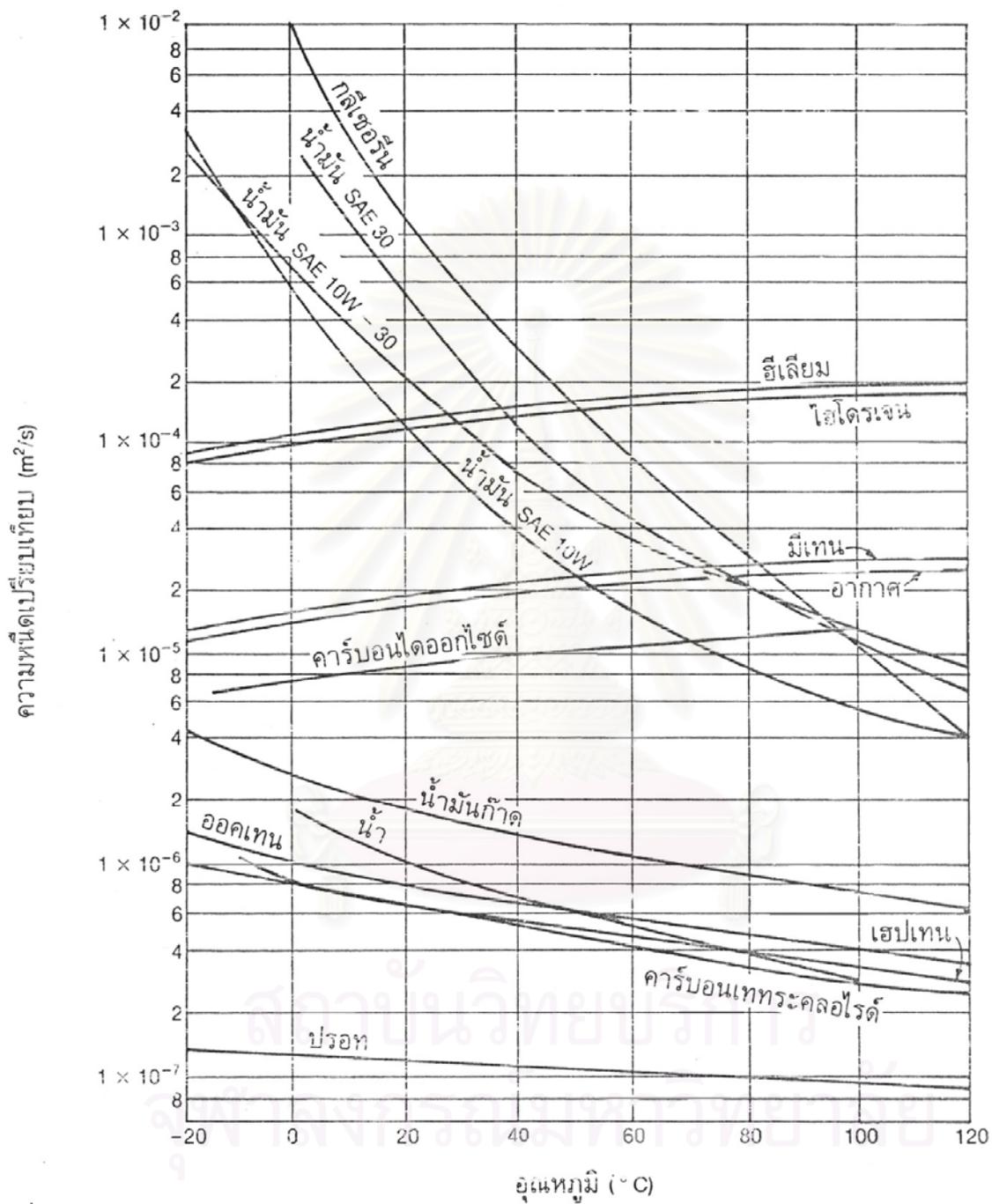


รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนรูปของของไหลเมื่อมีแรงเฉือน F มากกระทำ

ในรูปที่ 2.5 สสารที่อยู่ระหว่างช่องว่างของเพลตที่มีระยะห่างกันเล็กน้อย โดยเพลตชั้นล่างจะถูกยึดไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ 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)

ในขณะที่ทันทีที่ท่อที่ของไหลสัมผัสกับขอบเขตของของแข็งที่มีอัตราเร็วเท่ากับผิวขอบเขต นั้นคือจะไม่มี การเลื่อนไหลที่ผิวขอบเขต [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 หรืออัตราเร็วเชิงมุมของการเปลี่ยนรูป (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

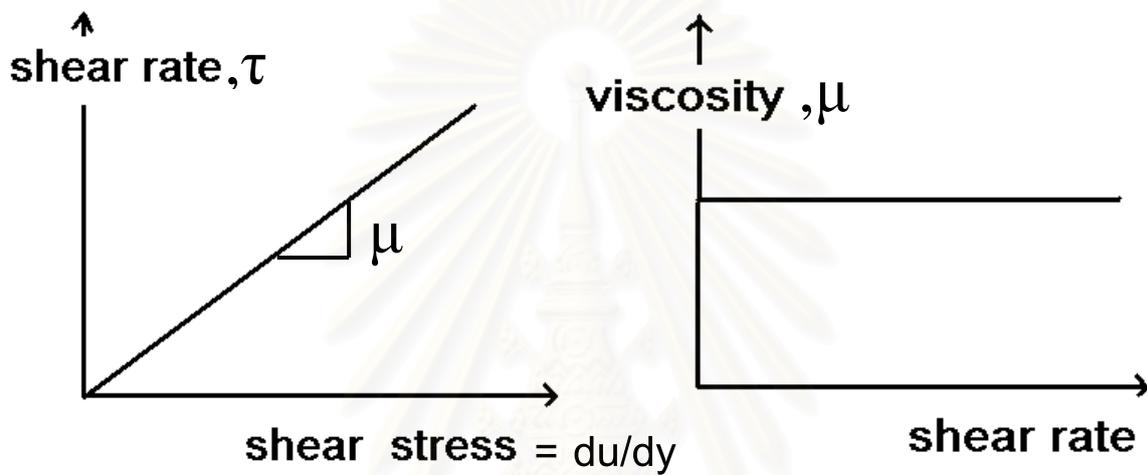
$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.7)$$

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

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

ของไหลที่มีความเค้นเฉือนไม่เป็นสมการเส้นตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ไม่เป็นไปตามสมการความหนืดของนิวตัน จะจัดอยู่ในประเภท ของไหลนอนิวโทเนียน เช่น ยาสีฟัน สีลูโซท์ ดินทราย และดินเหนียว เป็นต้น เนื่องจากการไม่แปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงทำให้เกิดความยุ่งยากสลับซับซ้อนในการหาความสัมพันธ์ จำมีสมการมากมายที่พยายามอธิบายถึง

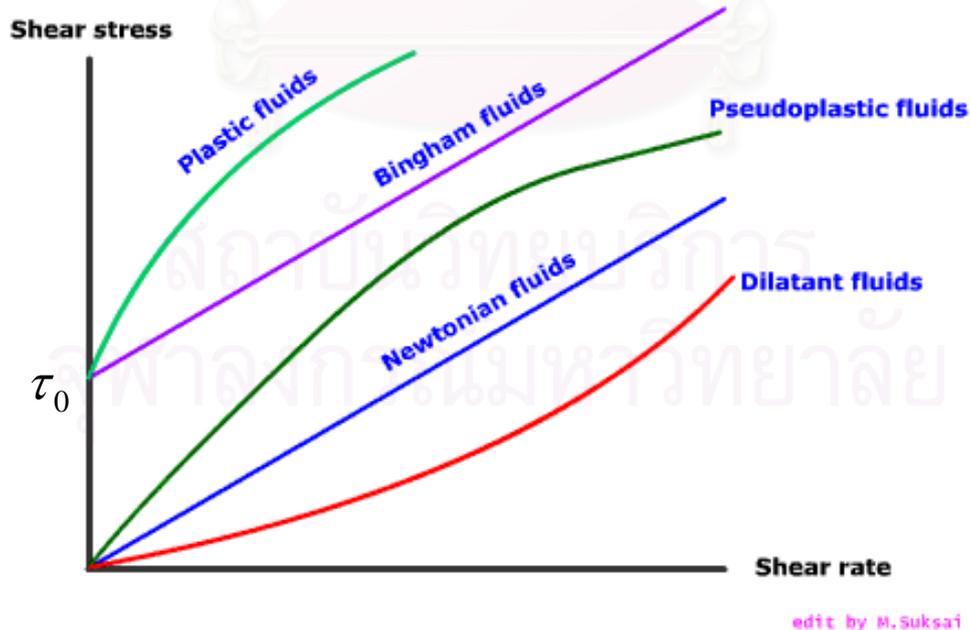
พฤติกรรมของความเค้นเฉือนกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในของไหลนอกแบบนิวตัน โดยสมการที่ใช้สามารถกำหนดได้ว่า

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

η คือค่าความหนืดปรากฏ ซึ่งขึ้นอยู่กับเวลา และชนิดของของไหล

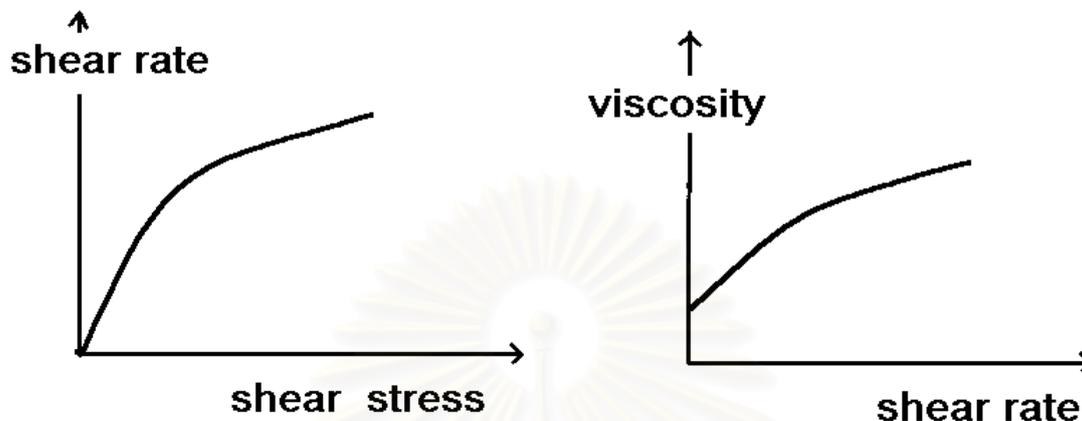
จากความลาดของความสัมพันธ์ระหว่าง τ กับ du/dy ได้ความหนืดสัมบูรณ์, η ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของของไหลแต่ละชนิดที่จะต้านทานต่อความเค้นเฉือน ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหลจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น เพราะเมื่ออุณหภูมิมากขึ้น จะทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของของไหลลดลง

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



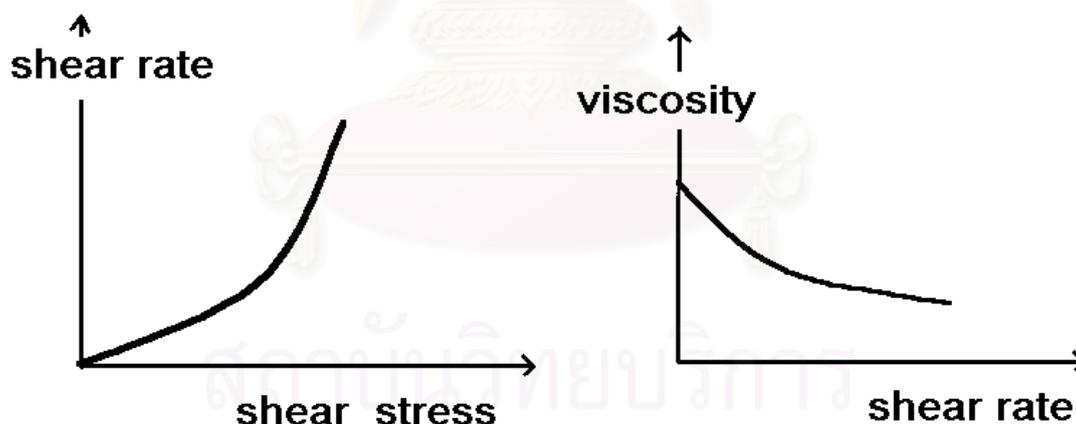
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และอัตราเฉือน ของวัสดุต่างชนิดกัน

จะสามารถแบ่งชนิดของของไหลนอนิวโทเนียนได้เป็น 4 ประเภทดังรูปที่ 2.8 คือ
 1.ของไหลประเภทไดเลตันแทน (Dilatant fluids) เป็นของไหลที่มีความหนืดมากขึ้นเมื่อความเร็วเชิงมุมมากขึ้น เช่น ทนาคูดเป็นต้น ดังรูปที่ 2.8



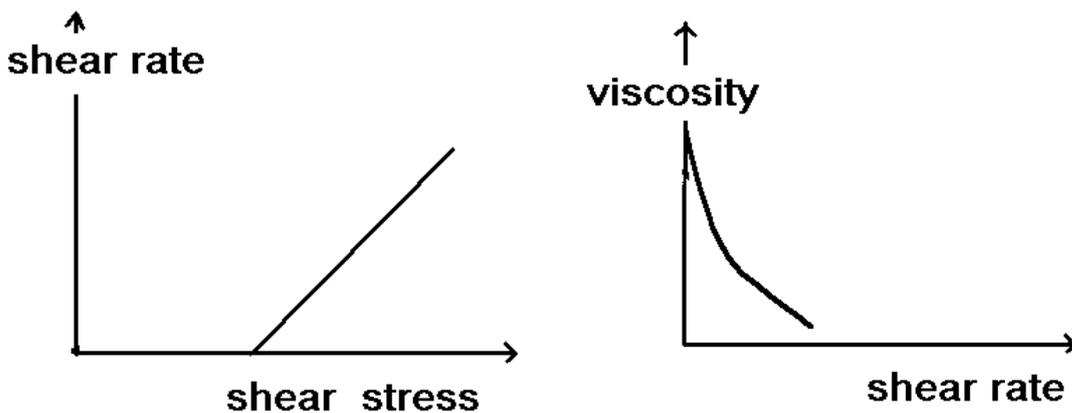
รูปที่ 2.8 พฤติกรรมของของไหลประเภทไดเลตันแทน จากอัตราเฉือนที่มีผลต่อความเค้นเฉือน และ ความหนืด

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



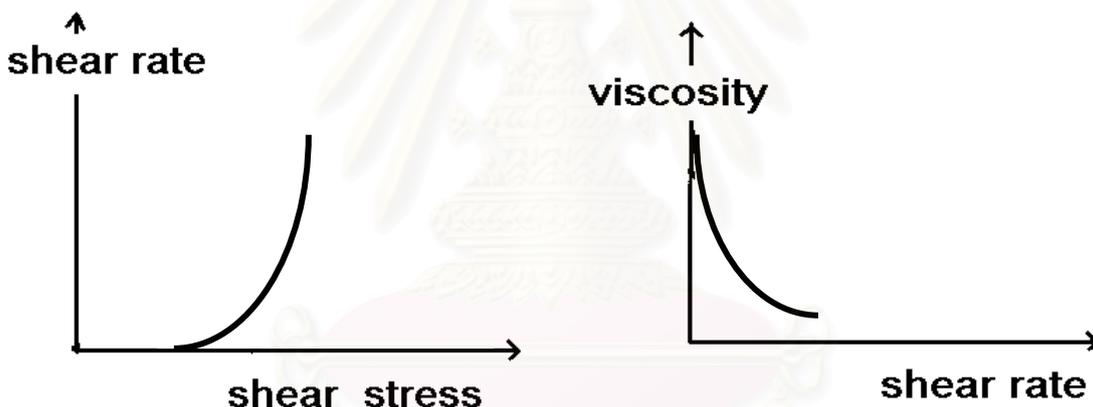
รูปที่ 2.9 พฤติกรรมของของไหลประเภทสโตพลาสติก จากอัตราเฉือนที่มีผลต่อความเค้นเฉือน และ ความหนืด

3.ของไหลประเภทบิงแฮม (Bingham fluids) เป็นของไหลที่จะต้องมีความเค้นคลาก 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

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \text{ คือ ค่าความหนืดจลน์} \tag{2.9}$$

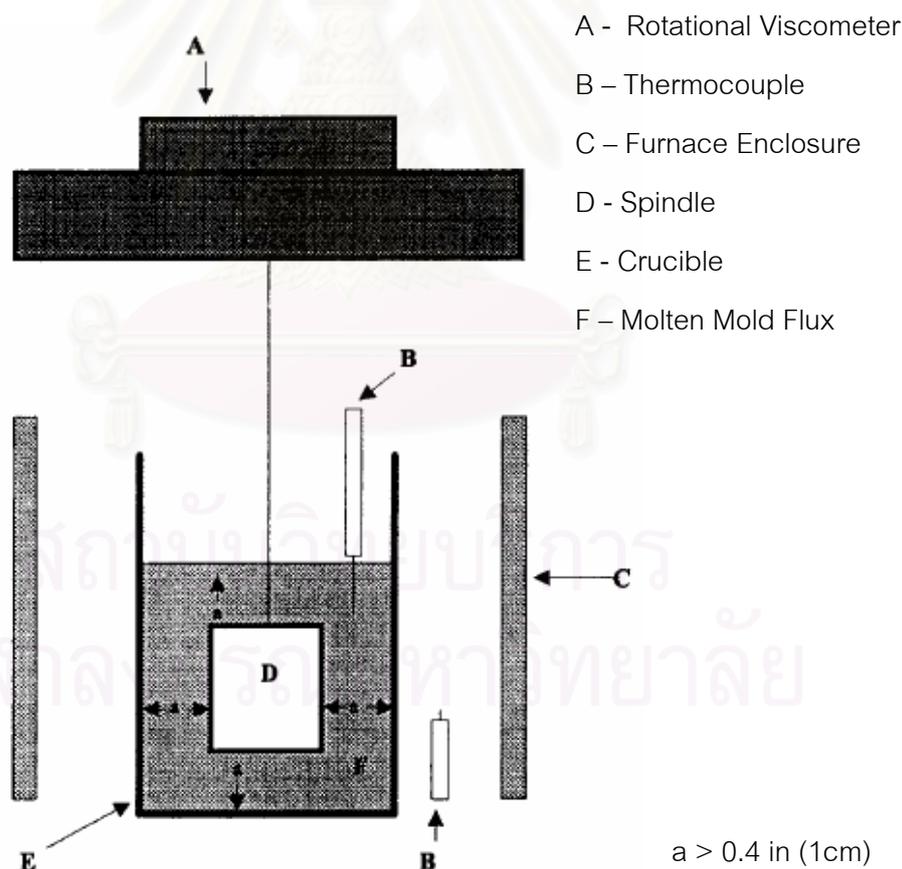
หน่วยของ
$$\nu = \frac{Pa \cdot s}{kg/m^3} = m^2/s$$

ความหนืดจลน์แปรผันตามอุณหภูมิ ซึ่งมีพฤติกรรมคล้ายกับความหนืดสัมบูรณ์ กล่าวคือ ถ้าเป็นของไหลที่มีความหนืดเปรียบเทียบน้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

2.2.2 การทดสอบ ความหนืด (Viscosity) ของดินเหนียว

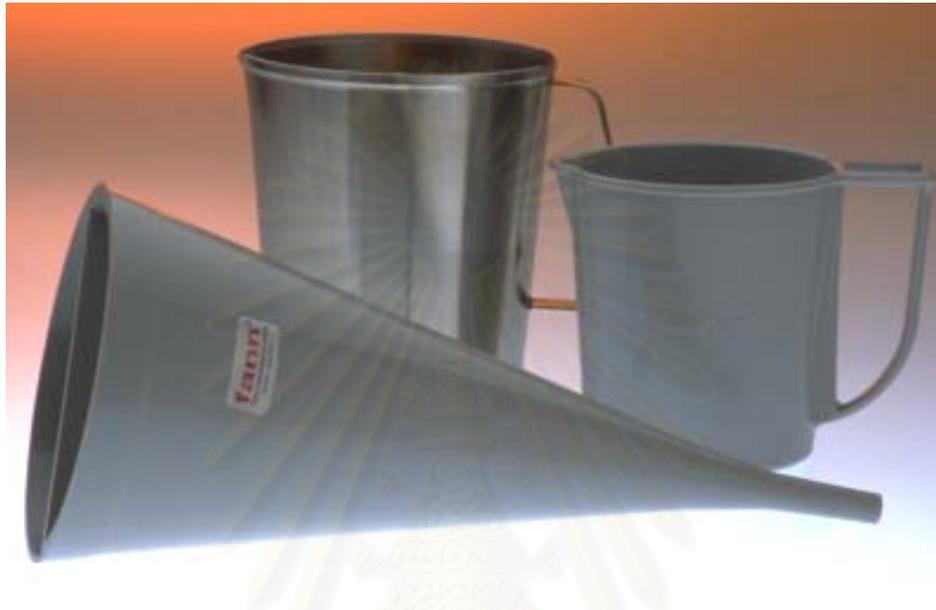
การทดสอบความหนืด (Viscosity) คือการทดสอบการไหลของเหลวเปรียบเทียบกับเวลา โดยทั่วไปแล้วการทดสอบหาความหนืดของดินมีหลากหลายวิธีด้วยกัน แต่ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดหาวิธีการทดสอบหาความหนืด 2 วิธี คือ

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 เป็นการวัดอัตราการไหลของไหลของเหลวเทียบกับเวลา โดยกรวยมีความจุ 946 cm³ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ 21 ± 3°C ทดสอบโดยการเทของไหลลงในกรวยให้ได้ปริมาตรตามต้องการแล้วทำการจับเวลาการไหลของไหลของเหลวที่ไหลนั้น 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 จะมีหลักการโดยค่าความหนืดของของเหลวเกิดจะจากแรงต้านทานหมุนของแกนหมุน (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 ส่วนอัตราเร็วในการเดินจะขึ้นอยู่กับแกนหมุนและอัตราเร็วในการหมุน ซึ่งแกนหมุนจะต้องได้รับการปรับแก้เพื่อให้เกิดความถูกต้อง โดยอัตราเร็วในการหมุนจะมีค่า 0 ถึง 250 รอบต่อนาที และค่าความหนืดจะคำนวณได้จาก แรงเฉือน หาดด้วยอัตราเร็วในการเดิน ดังสมการ 2.10

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



รูปที่ 2.14 ลักษณะเครื่อง Brookfield Model DV-III สำหรับหาค่าความหนืดของของเหลว

4. Baroid Rheometer หรือ Hand-Crank Viscometer ตามมาตรฐาน API RP 13 B , I , Section เครื่องมือดังแสดงในรูป 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

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

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

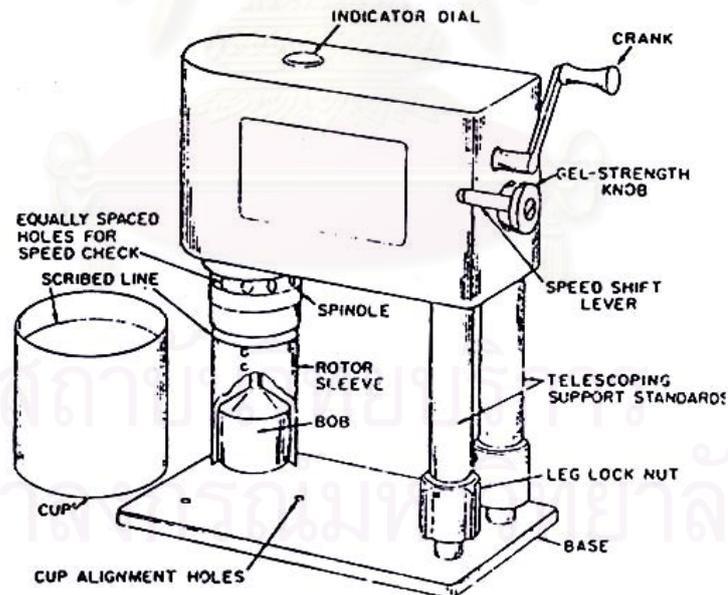


Fig. 7 - Diagram of Baroid Rheometer.

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

2.3 ผลงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต

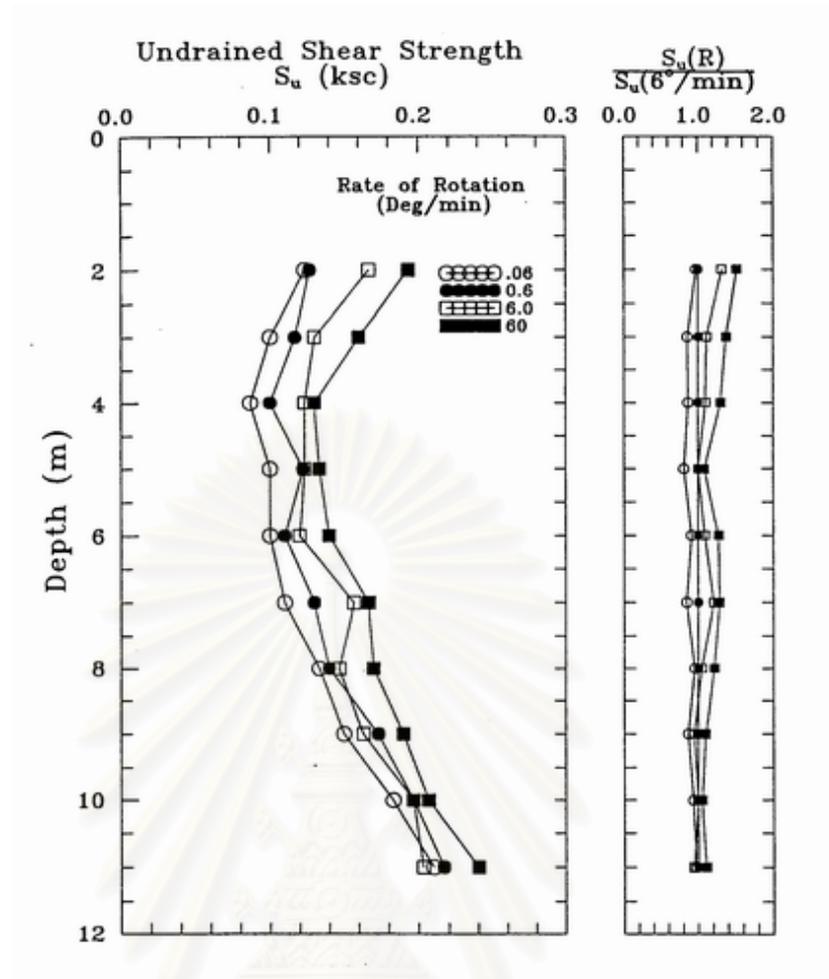
2.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับ Vane Shear Test

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

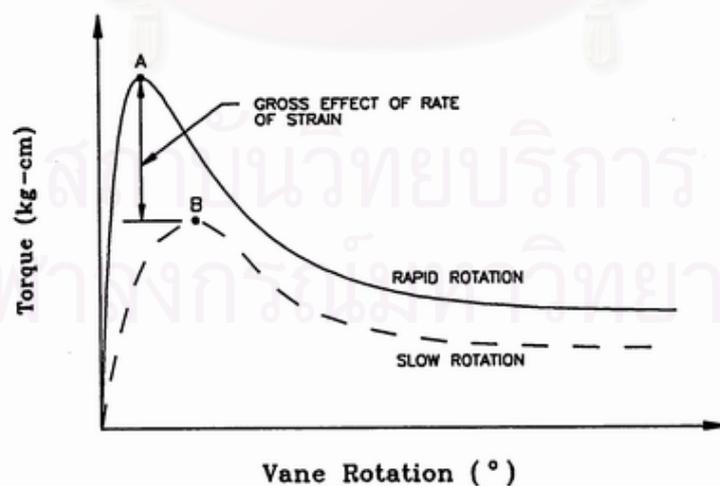
Donald et al. (1977) ได้สรุปข้อเสียในการทดสอบหาลำดับรับแรงเฉือนแบบใบพัด เนื่องจากในการทดสอบจะมีค่าความผิดพลาดของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำได้จากปัจจัยอันเนื่องมาจากดินเช่น ผลกระทบของความไม่เป็นเนื้อเดียวของดิน (Anisotropy effect), อัตราเร็วในการเฉือน (strain rate), และขั้นตอนที่เกิดการวิบัติ (Progressive 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) ได้ศึกษาถึงผลกระทบจากอัตราเร็วในการเฉือนตัวอย่างดินเหนียวว่า จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอัตราเร็ว Cadling and Odenstad (1950) ได้ทำการทดสอบโดยการเพิ่มอัตราเร็วขึ้นประมาณ 10 เท่าทำให้กำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้นถึง 20% และถ้าอัตราเร็วในการเฉือนน้อยกว่า 0.1° /วินาที ค่ากำลังรับแรงเฉือนจะไม่ลดลง แสดงถึงเมื่ออัตราเร็วในการเฉือนที่ 0.1° /วินาที จะเป็นค่าอัตราเร็วต่ำสุดที่จะได้ค่ากำลังรับแรงเฉือนต่ำสุด Wiesel (1973) ได้ทำการทดสอบหาลำดับรับแรงเฉือนที่อัตราเร็วในการหมุนแตกต่างกัน พบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนจะมีค่าลดลงที่อัตราเร็วลดลง ดังรูปที่ 2.16 Kenney et al. (1968) ได้ทำการทดสอบ Triaxial vane test พบว่ากำลังรับแรงเฉือนจะลดลงและระยะเวลาในการวิบัติจะนานขึ้น เมื่ออัตราเร็วในการหมุนลดลง ดังรูปที่ 2.17 Law (1985) และ Satoshi (1989) ได้สรุปผลการทดสอบไปในทิศทางเดียวกัน

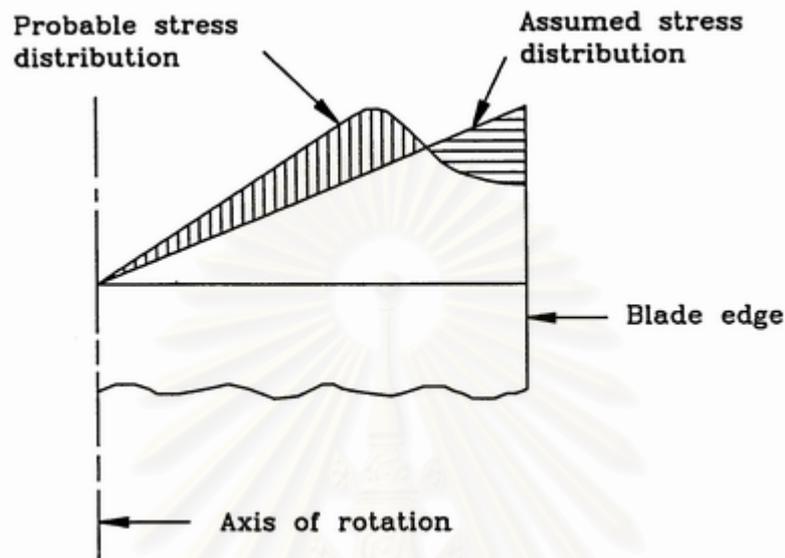


รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือน กับความลึก ที่อัตราเร็วในการหมุน แตกต่างกัน โดย Wiesel (1973)



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

Donald et al. (1977) ได้แสดงถึงการวิบัติของดินที่ค่ากำลังสูงสุดของดินที่มีลักษณะเพราะว่าจะเกิดค่ากำลังสูงสุดที่บริเวณมุมของใบพัด และมีการกระจายความเค้น จะเป็นไปตามรูปที่ 2.18

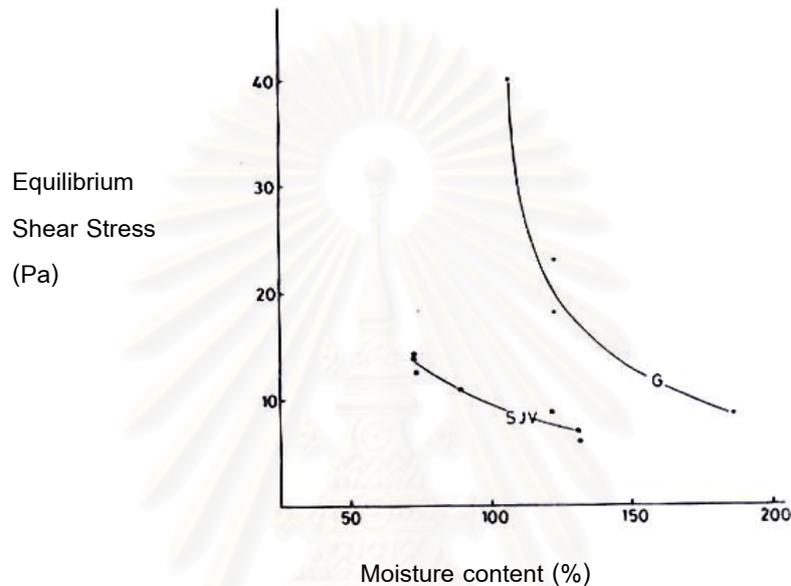


รูปที่ 2.18 แสดงการกระจายแรงเฉือนบนระนาบวิบัติตามแนวราบของใบพัด โดย Donald et al., (1977)

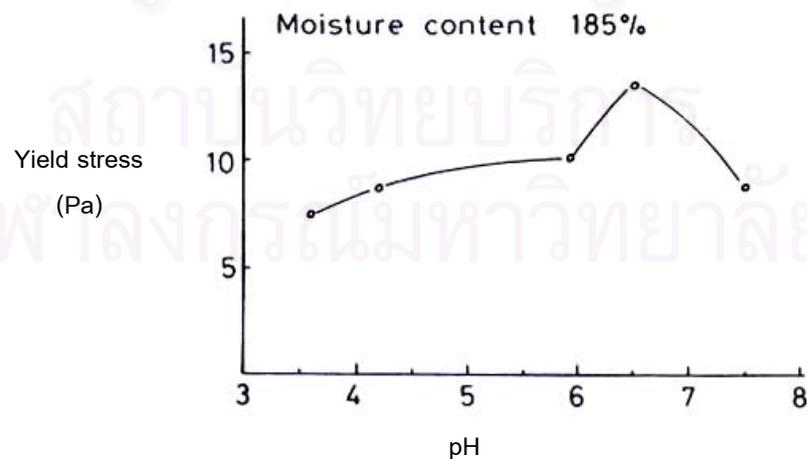
2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับความเหนียว

Bentley (1979) ได้ใช้ตัวอย่างดินเหนียว 2 ชนิดคือ St. Jean Vianney clay (SJV) มีค่าความไวตัว (Sensitivity, S_u) ประมาณ 200 ขึ้นไป และดินเหนียว Gloucester ค่าความไวตัวประมาณ 20 ทำการทดสอบหาค่าความเหนียว (viscosity) ด้วย Viscometer กับดินเหนียวตัวอย่างจากการทดสอบพบว่าตัวอย่างดินเหนียว Gloucester มีค่าความเหนียวเพิ่มขึ้นตามเวลา และตัวอย่างดินเหนียว SJV ค่าความเหนียวกลับลดลงตามเวลาพฤติกรรมตรงกันข้ามกันนี้สามารถอธิบายได้จากความคละกันของอนุภาคในมวลของดิน 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 ดินเป็นสารประกอบของ 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 ซึ่งหาค่าได้จากวิธีการทดสอบหาค่าความเหน็ด 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 จากการทดสอบหาค่าความเหน็ด โดยเปลี่ยนแปลงค่าความเค็มและค่าทางเคมีต่างๆ ได้ความสัมพันธ์ตามรูปที่ 2.22 Torrance (1987) ได้อธิบายความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นว่า จากรูป (a) ถึง (d) การหาความสัมพันธ์จะกระทำได้อย่างไรก็ตามพบความสัมพันธ์ในแต่ละรูปได้ว่าเมื่อค่าความชื้น ของตัวอย่างดินเดี่ยวจะลดลงเมื่อค่าความเค็มของดินลดลงซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ทางด้าน Plasticity

Locat (1988) ได้เสนอว่า การศึกษาพฤติกรรมเกี่ยวกับการไหลของดินเหนียวที่มีความไวตัวสูงมีความสัมพันธ์กับค่าความเหน็ดพลาสติก, Yield Stress, กำลังรับแรงเฉือนของดินที่ถูกรบกวน (Remolded Shear Strength), และ Liquidity Index โดยทั่วไปแล้วสามารถทำนายค่ากำลังรับแรงเฉือนได้กล่าวถึงดินที่มีค่า Liquidity Index สูงกว่า 6 สำหรับดินที่มีค่า Liquidity Index ที่อยู่ระหว่าง 2-5 ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่ถูกรบกวนมีค่าระหว่าง 5-90 Pa. และค่าความเหน็ดพลาสติกมีค่าอยู่ในช่วง 7-200 mPa-s. พฤติกรรมการไหลของดินมีค่าขึ้นตรงกับ ชนิดของดิน, ความเค็มของดิน (Pore-water Salinity), แร่ธาตุต่างๆในดิน และค่าปริมาณความชื้น (Water Content) ชนิดของการไหลของดินในรูปแบบต่างๆได้แสดงในรูปที่ 2.23 ซึ่งค่าความเหน็ดก็มีลักษณะเดียวกันกับความชื้น ของส่วนโค้งในรูป จากรูปพบว่า Curve 2 คือ Thickening liquids แสดงว่าค่าความเหน็ดจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า Shear Rate มีค่าเพิ่มขึ้น, Curve 3 แสดงพฤติกรรมที่ตรงกันข้ามคือเมื่อค่าความเหน็ดจะลดลงเมื่อค่า Shear Rate มีค่าลดลง, Curve 4 เป็นการไหลแบบ Plastic หรือการไหลแบบ Casson แสดงรูปแบบการไหลโดยใช้ค่า Yield Stress (หรือ Yield Point) และค่าความเหน็ดลดลงแบบช้าๆ ที่อัตราความเร็วในการเฉือนสูงๆ, Curve 5 แสดงว่าค่าความเหน็ดมีค่าคงที่ ที่ค่าหนึ่งจะมีลักษณะเหมือนการไหลของวัสดุทั่วไป 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)

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

สุทธิ (2003) ได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบไพบัต พบว่าเมื่อค่า Liquidity Index มีค่าน้อยกว่า 1 การเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับแรงเฉือนจะเป็นไปอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อค่า Liquidity Index มากกว่า 1 ไปแล้วการเปลี่ยนแปลงค่าจะกำลังรับแรงเฉือนจะน้อยลงเนื่องมาจากดินมีสภาพเป็นของเหลว

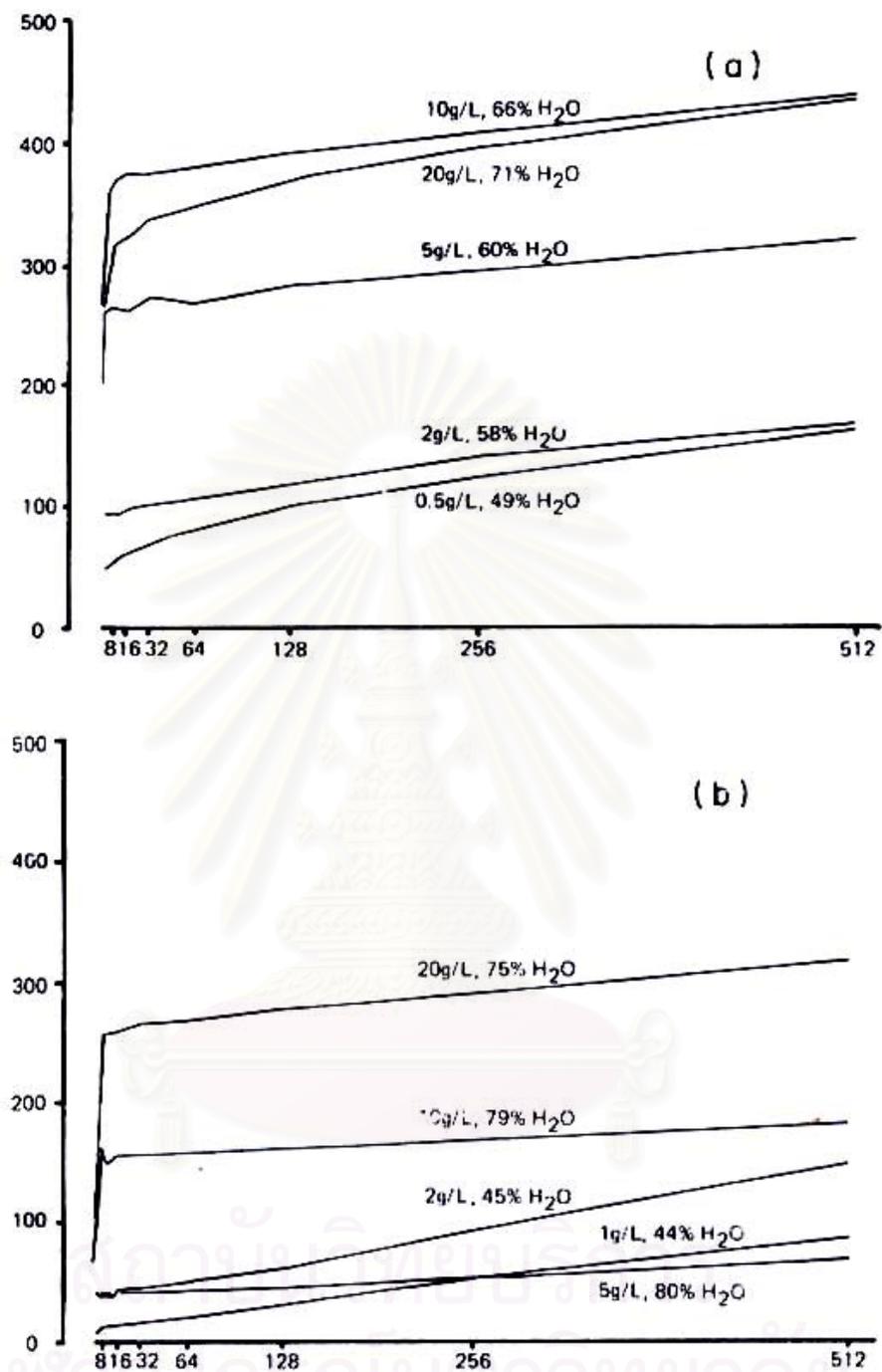
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดกับปริมาณความชื้น จะแปรผันผกผันกัน เมื่อค่าปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความหนืดลดลง โดยจะแปรผันกับค่าพิกัดเหลวของดินและมีค่าความหนืดคงที่เมื่อปริมาณความชื้นมีค่าสูงขึ้นจนมากกว่าค่าพิกัดเหลวประมาณ 3.5 ถึง 4 เท่า ซึ่งจะมีค่าความหนืดใกล้เคียงกับน้ำที่ 27 วินาทีสำหรับการทดสอบด้วยเครื่องมือ 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)

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

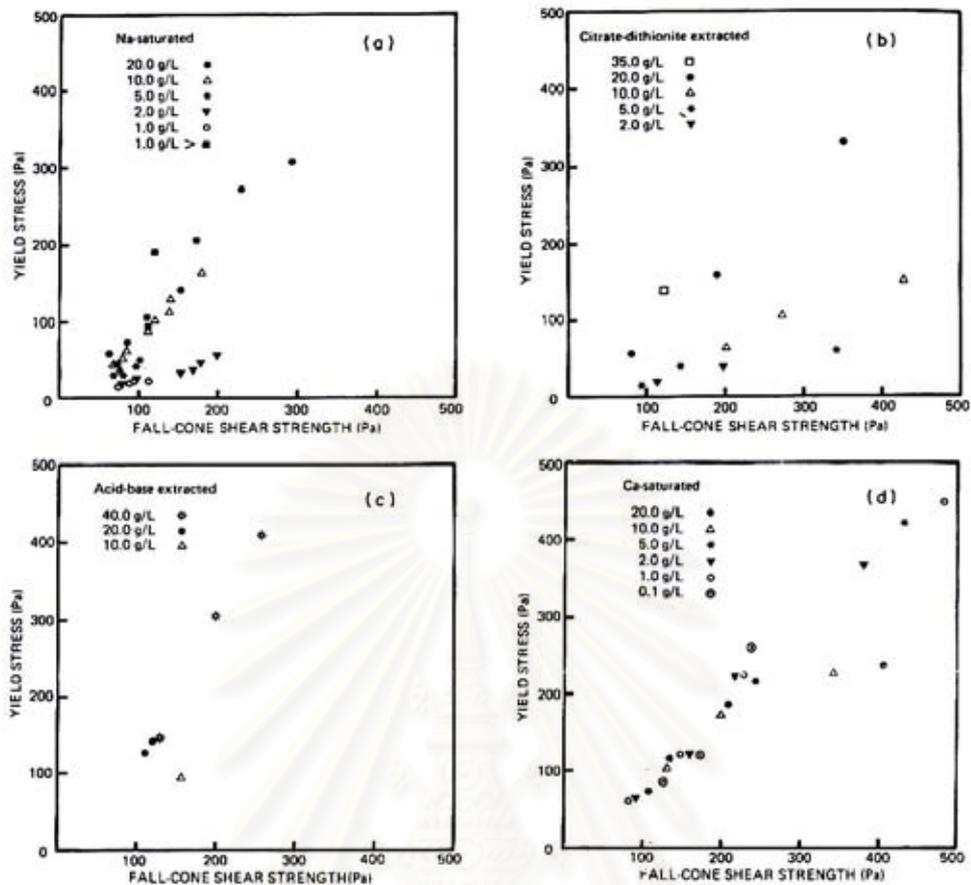
โดยที่

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

$$\eta = \text{ค่าความหนืด (mPa-s)}$$



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



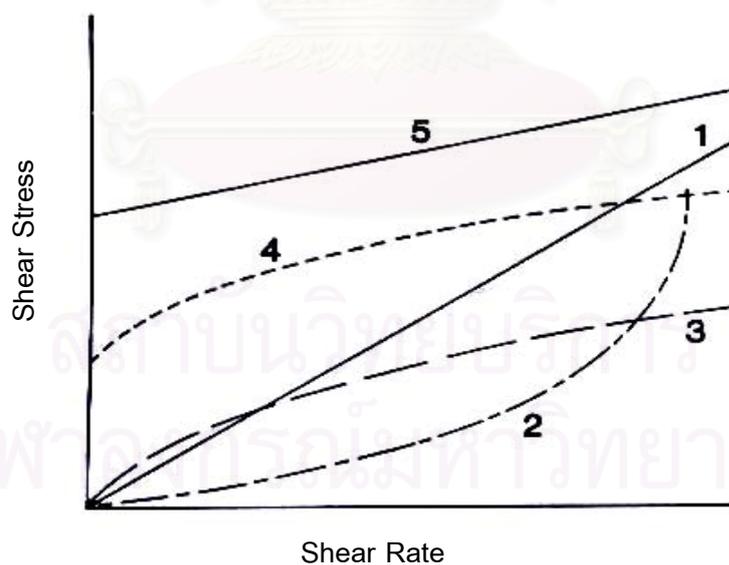
รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง Yield Stress ซึ่งหาค่าโดยใช้วิธีทดสอบค่าความหนืด และ ค่ากำลังรับแรงเฉือนซึ่งใช้วิธีการวัดกในการทดสอบ (a) Na-saturated, (b) citrate-dithionite extracted และ Na-saturated (c) acid-base extracted และ Na-saturated, (d) Ca-saturated โดย Torrance (1987)

ตาราง 2.1 ข้อมูลทั่วไปของดินที่ใช้ทดสอบ โดย Torrance (1987)

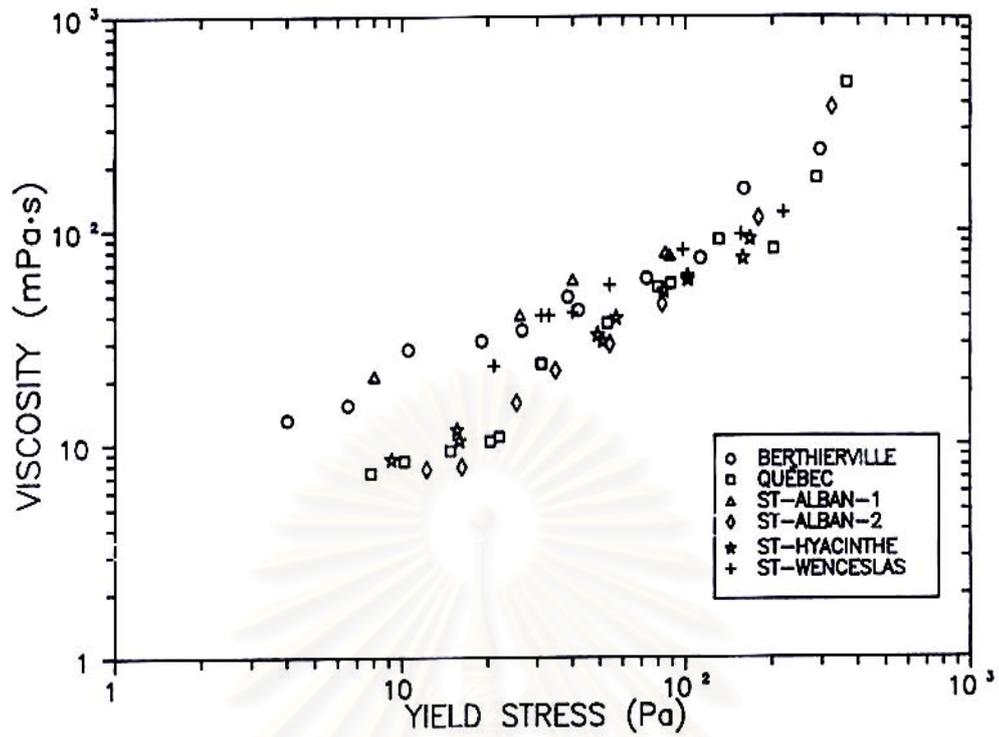
Soil	Salinity (g/L)	Pretreatment	Water		ω_L	ω_p	I_p
			Content	(%)			
St. Leon le Grand, Quebec Canada	23.4	50	50		47.2	23.1	24.1
South Nation, Ontario Canada	1.1	65	45		36	20	16
Grand Baleine, Quebec Canada	0.8	67	51		35.7	25.9	9.8

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

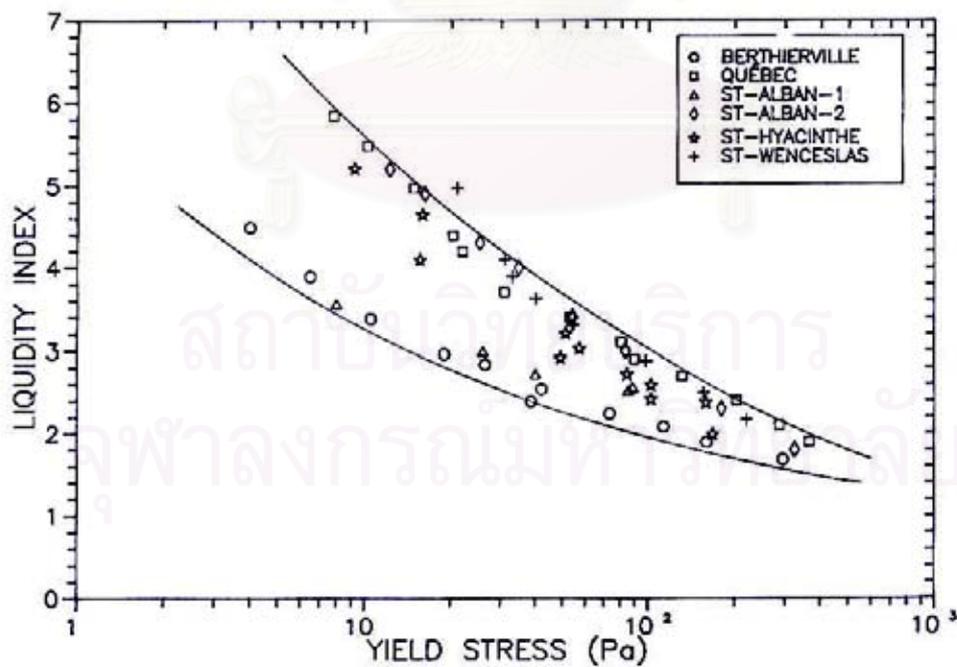
Soil	Salinity (g / L)	Pretreatment	ω_L	ω_p	I_p
St. Leon le Grand,	20	Na-saturated	46.8	23.0	23.8
Quebec Canada		Citrate-dithionite	32.7	20.3	12.4
		Acid-base	24.3	16.4	7.9
South Nation,	20	Na-saturated	48.4	20.7	27.7
Ontario Canada		Citrate-dithionite	47.8	21.1	26.7
		Acid-base	32.6	17.9	14.7
Grand Baleine,	20	Na-saturated	37.1	23.6	13.5
Quebec Canada		Citrate-dithionite	35.5	21.0	12.5
		Acid-base	27.6	21.4	6.2



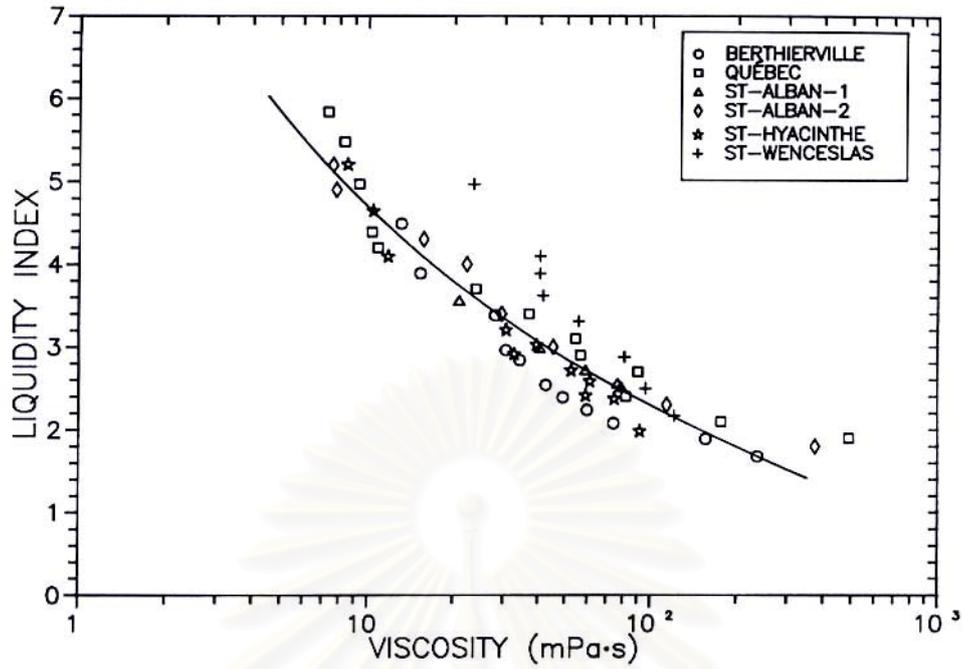
รูปที่ 2.23 ชนิดของการไหลแบบต่างๆ (1) Newtonian (2) thickening (3) fluidizing (4) Casson (5) Bingham โดย Locat (1988)



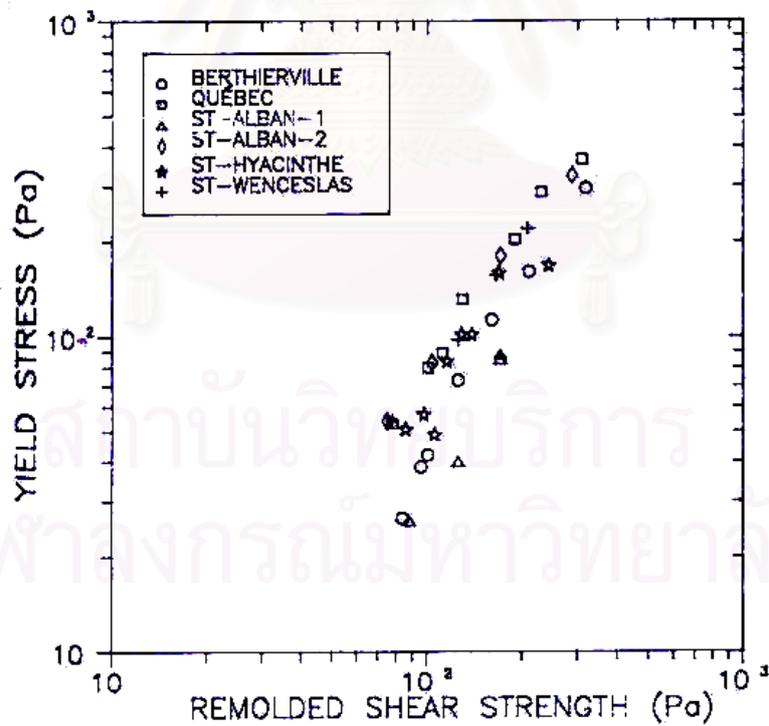
รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง Viscosity และ yield Stress โดย Locat (1988)



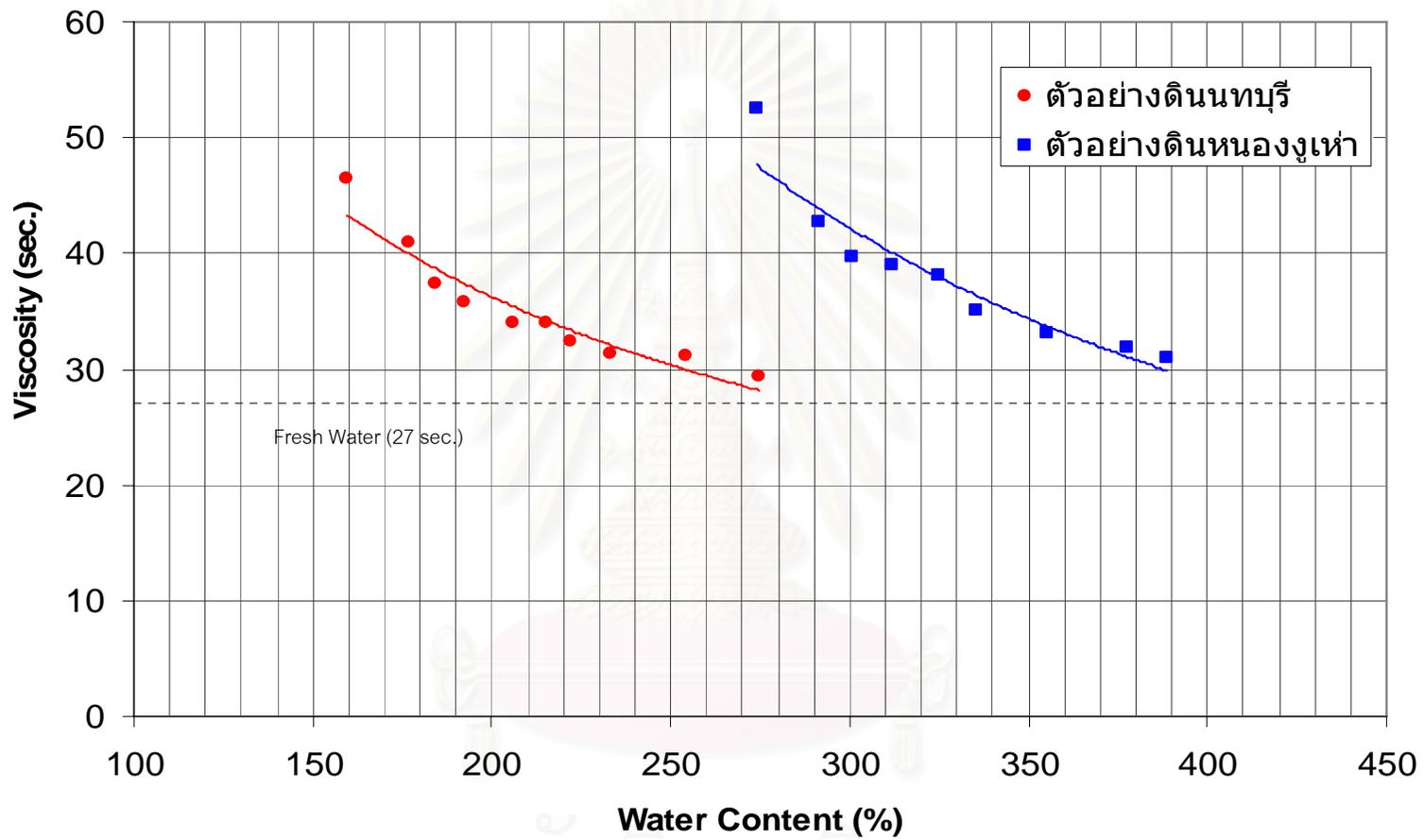
รูปที่ 2.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง Liquidity Index และ yield Stress โดย Locat (1988)



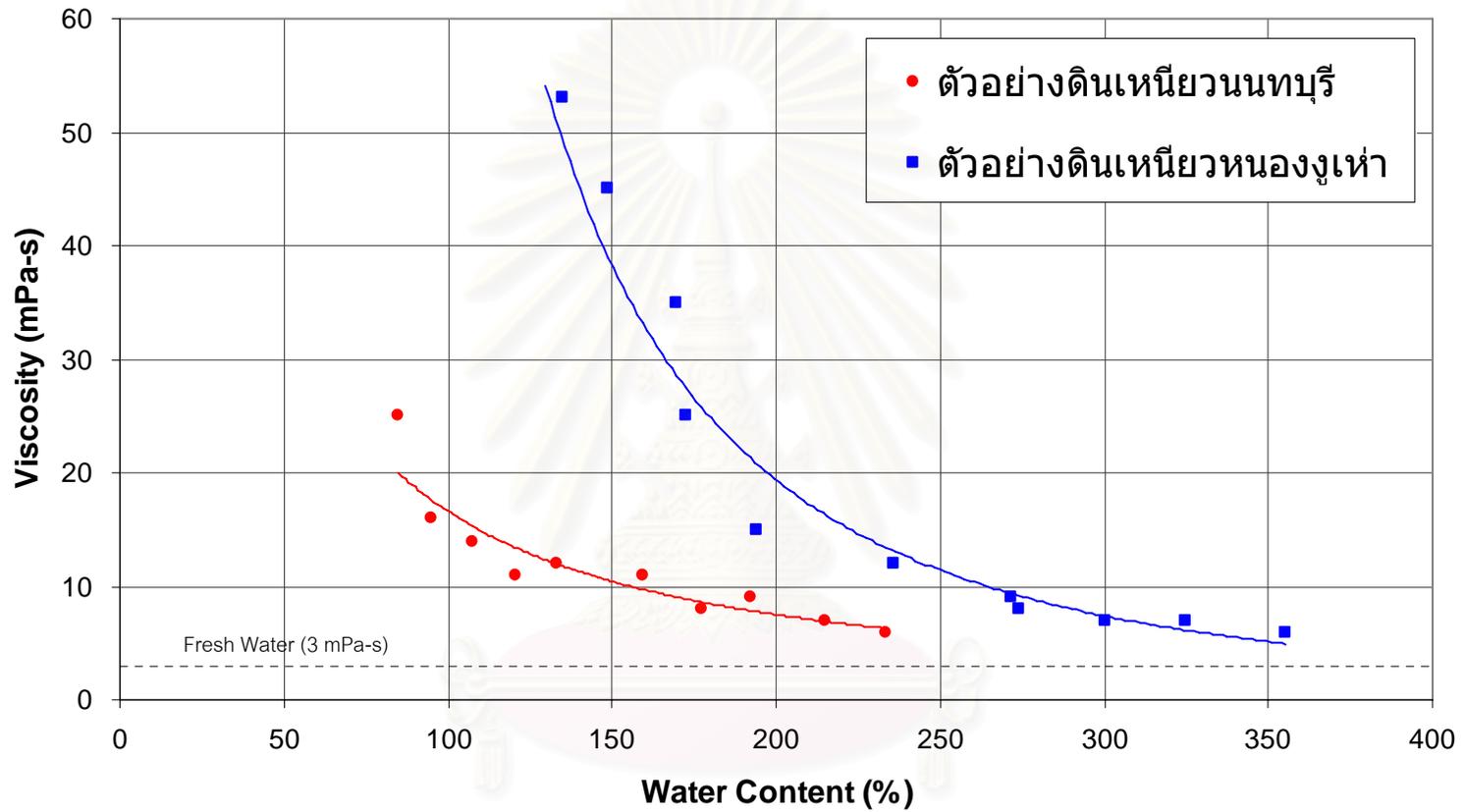
รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง Liquidity Index และ Viscosity โดย Locat (1988)



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

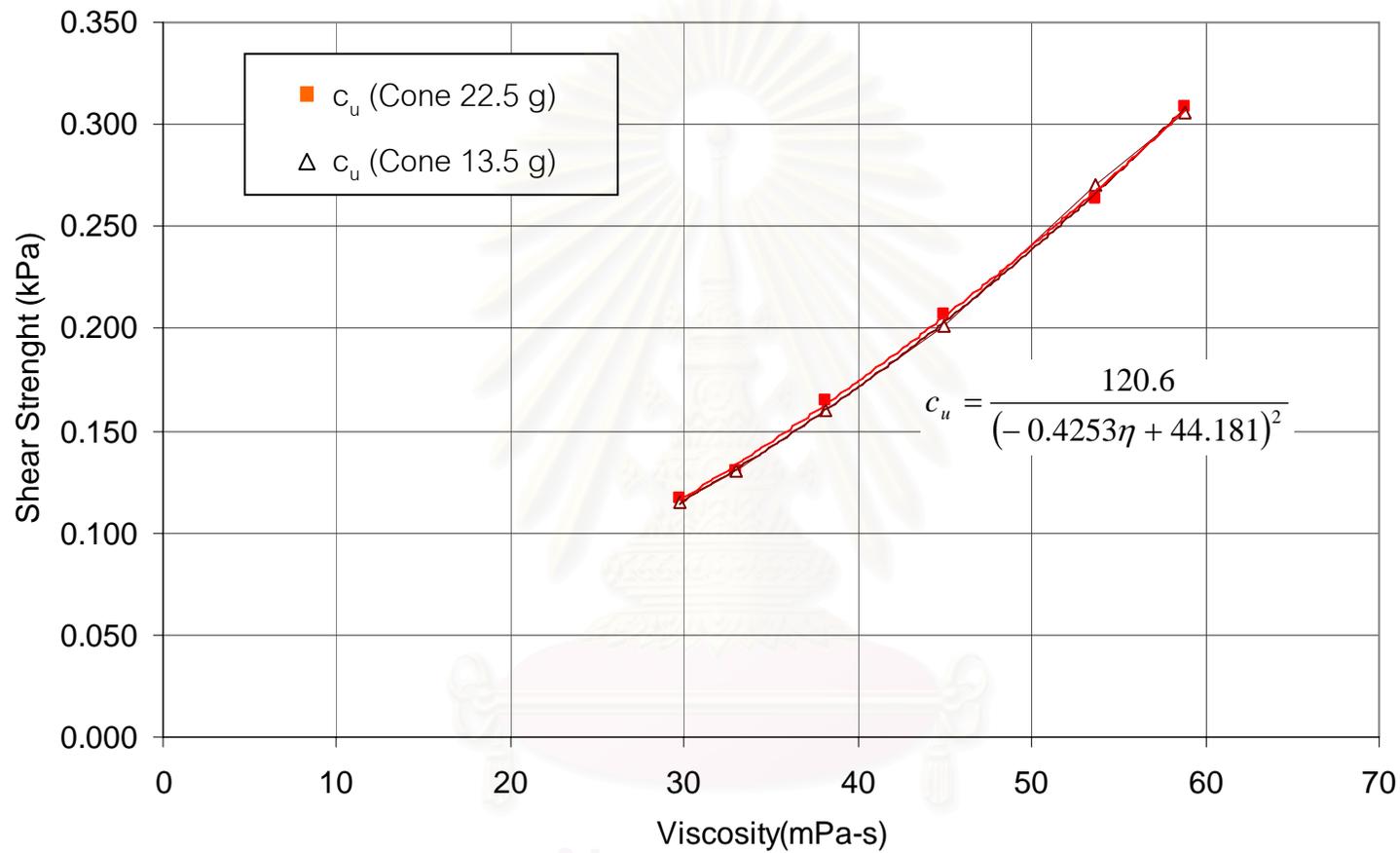


รูปที่ 2.28 ค่า Water Content (%) กับ Viscosity (η , sec) ของตัวอย่างดินนทบุรีและหนองงูเห่า ทดสอบด้วยเครื่องมือ Marsh Funnel Viscometer โดย สุทธิ (2003)



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

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



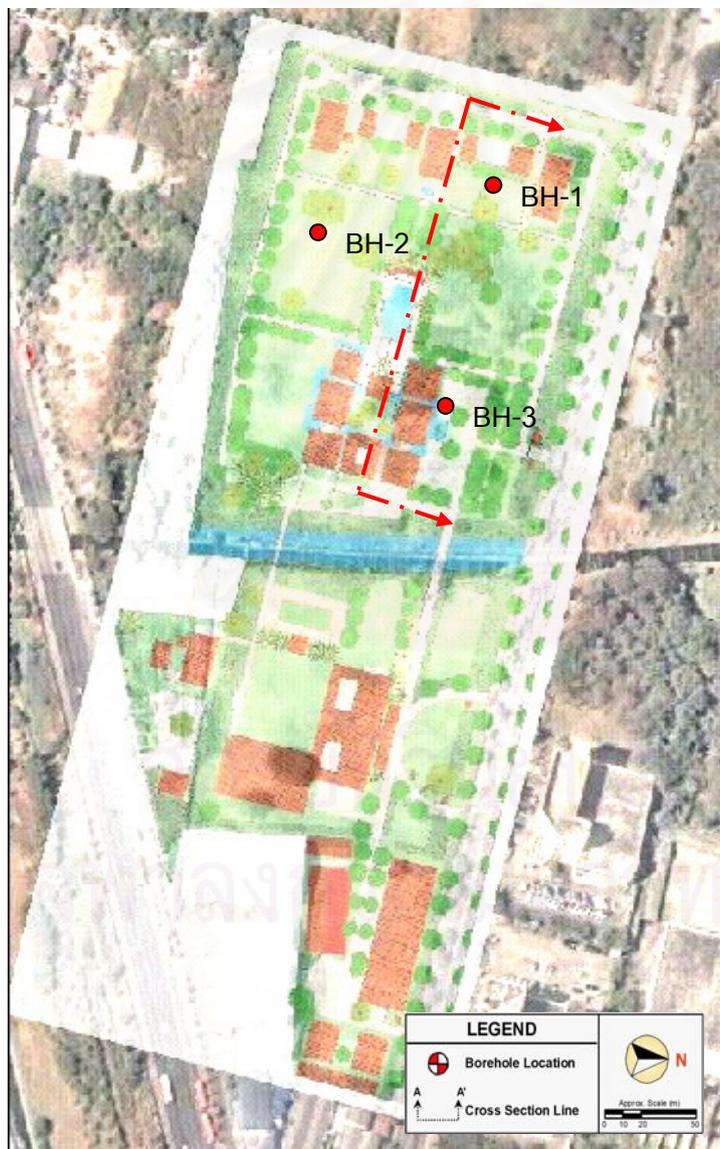
รูปที่ 2.30 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength c_u , kPa) กับ ค่าความหนืด (Viscosity, η) ของกรวย 30° หนัก 22.5 g และ 13.5 g สำหรับตัวอย่างดินหนองงูเห่า โดย สุทธิ (2003)

บทที่ 3

การทดสอบ และวิจัย

3.1 ตัวอย่างดินเหนียวที่ใช้ในการทดสอบ

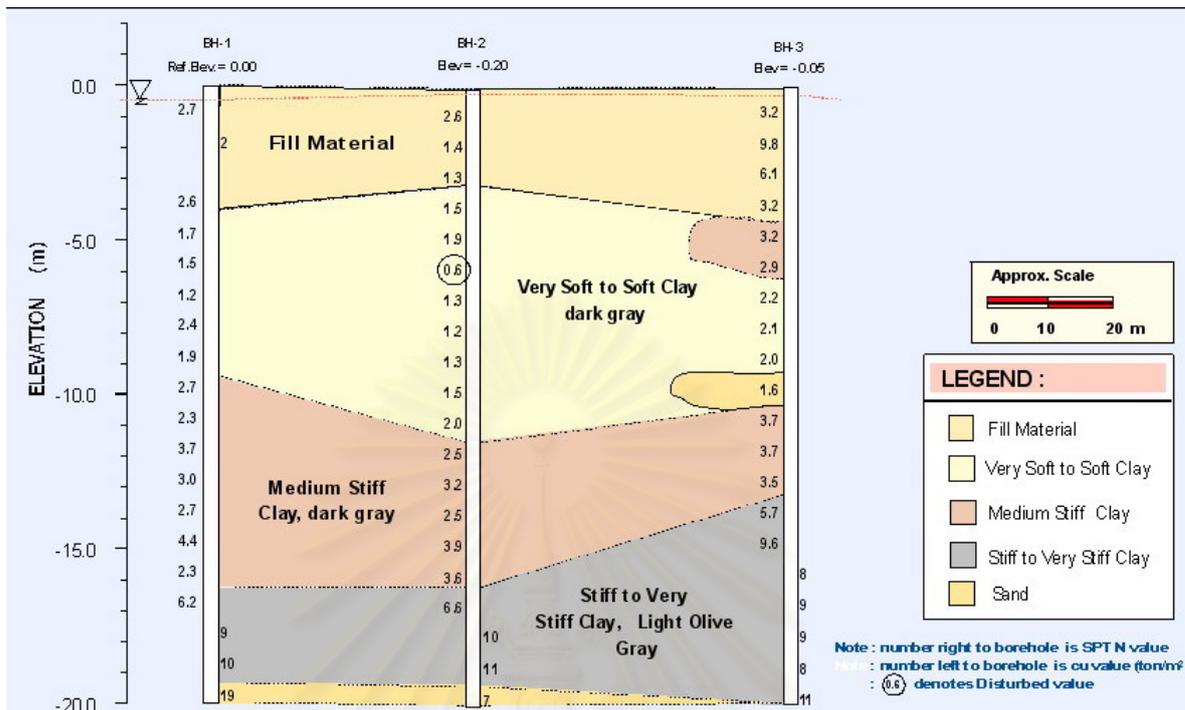
ตัวอย่างดินเหนียวที่ใช้ จะเก็บจากบริเวณถนนพระราม 9 ซึ่งมีการเจาะสำรวจจำนวน 3 หลุม ในการทดสอบใช้ดินที่ระดับความลึก 3.00 – 6.00 ม. โดยคุณสมบัติพื้นฐานของดินแสดงในตารางที่ 3.1



สัญลักษณ์

● ตำแหน่งหลุมเจาะ BH-1ถึง BH-3

รูปที่ 3.1 แผนที่แสดงตำแหน่งหลุมเจาะ



รูปที่ 3.2 รูปตัดของชั้นดินบริเวณหลุมเจาะ

3.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน และคุณสมบัติทางเคมีของดิน

ตัวอย่างดินเหนียวทั้ง แห่่ง จะนำมาศึกษาคุณสมบัติพื้นฐาน และคุณสมบัติทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM ดังนี้

คุณสมบัติพื้นฐาน

- การทดลองหาค่าความชื้นธรรมชาติในมวลดิน (Natural Moisture Content)
- การทดลองหาพิกัดเหลว (Liquid Limit) และพิกัดพลาสติก (Plastic Limit)
- การทดลองหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific Gravity of Soil Solid)
- การทดลองหาขนาดเม็ดดินด้วยไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer Analysis)

คุณสมบัติทางเคมี

- การทดสอบ Organic Content
- การทดสอบ pH
- การทดสอบหาค่าคลอไรด์ในดิน (Chloride Content)
- การทดสอบหาค่าซัลเฟตในดิน (Sulphate Content)

ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน และเคมีของดินเหนียวตามธรรมชาติของดินบริเวณถนนพระราม 9

Borehole No.	Depth (m)		Water Content (%)	Total Unit Weight (ton/m ³)	Liquid Limit, LL (%)	Plasticity Index, PI (%)	Specific Gravity, G _s	Grain Size Analysis (%)					Undrained Shear Strength, c _u (ton/m ²)		Organic Content %	pH Value	Chloride Content (%)	Sulphate Content %
	From	To						Gravel	Sand			Silt+Clay	PP Test	UC Test				
									Coarse	Medium	Fine							
BH-1	3.00	4.00	59.1	1.63	76.5	45.7		0	0	0	0	100		2.6				
BH-1	4.00	5.00	86.3	1.51	105.2	69.7		0	0	0	0	100		1.7				
BH-1	5.00	6.00	97.1	1.41	116.7	75.7		0	0	0	0	99		1.5				
BH-2	3.00	4.00	82.9	1.50	79.4	47.5		0	0	0	1	99		1.5				
BH-2	4.00	5.00	83.6	1.51	112.9	75.1		1	1	1	2	96		1.9				
BH-2	5.00	6.00	90.8	1.47	113.5	73.2		1	0	0	1	98						
BH-3	3.00	4.00	38.6	1.74	89.6	56.7		0	0	1	2	97	1.35	3.2	2.8	7	0.72	0.361
BH-3	4.00	5.00	57.2	1.64	80.9	50.6	2.62	0	0	0	0	100		3.2				
BH-3	5.00	6.00	76.7	1.54	109.0	67.1		0	0	0	0	100		2.9				

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ (Apparatus Laboratory Test)

3.3.1 แบบใส่ดิน (Mold)

เป็นภาชนะสำหรับใส่ดินเพื่อทำการทดสอบสำหรับการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไบบัต และการทดสอบหาค่าความหนืดด้วยเครื่อง Rotational Viscometer มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16.2 ซม. สูง 12 ซม. มีความจุ ประมาณ 2473.439 ลบ.ซม. ใช้สแตนเลสขัดเรียบ ผิวมันเป็นวัสดุ

3.3.2 เครื่องทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไบบัตในห้องทดสอบ

เป็นชุดเครื่องมือที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM 4648-94 ประกอบด้วย

3.3.2.1 ชุดมอเตอร์เป็นชุดที่สำหรับทดสอบตัวอย่าง ดังรูปที่ 3.3 จะประกอบด้วยอุปกรณ์ย่อยดังนี้

- แกนหลักสามารถเคลื่อนที่ชุดมอเตอร์ ให้เคลื่อนที่ขึ้นลงตามแนวดิ่ง โดยหมุนที่ Hand Clamp ทิศตามเข็มนาฬิกา จะทำให้มอเตอร์เคลื่อนที่ขึ้น ส่วนหมุนทิศทวนเข็มนาฬิกา มอเตอร์ก็จะเคลื่อนที่ลง
- มอเตอร์ และชุด Gear Box เพื่อปรับเพิ่ม – ลด อัตราเร็วในการหมุนของมอเตอร์ โดยอัตราเร็วสูงสุดมอเตอร์เท่ากับ 1500 รอบต่อนาที ติดกับ Gear Box สำหรับลดอัตราเร็วลดลง 3(1:3), 15(1:15) และ 100(1:100) เท่า ซึ่งจะเพิ่มแรงบิดให้กับมอเตอร์มีค่าประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ของอัตราลดความเร็ว โดยเมื่อติดชุด Gear Box เสร็จแล้วจะสามารถสร้างแรงบิดสูงสุดเท่ากับ 8 N-m.
- Torque Transducer เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดค่าแรงบิดโดยจะอ่านค่าได้สูงสุดประมาณ 0.5 N-m.
- Potentiometer เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดมุมของไบบัต
- Sample Holder เป็นอุปกรณ์ที่ใช้จับภาชนะใส่วัสดุทดสอบ

3.3.2.2 Control Module เป็นกล่องควบคุมชุดมอเตอร์ ดังรูปที่ 3.4 และรับค่าต่างๆกลับมาเพื่อต่อไปยัง อุปกรณ์อ่านค่าอื่นๆ ต่อไป เช่น Voltmeter Computer จะมีระบบควบคุมประกอบด้วย

- Main Power Switch สำหรับ เปิด-ปิด หลักที่จะให้กระแสไฟ เข้ามายังในกล่องควบคุม ทั้งยังเป็นตัวจ่ายกระแสไฟให้กับอุปกรณ์วัดได้แก่ Potentiometer และ Torque Transducer
- Motor Speed Dial สำหรับปรับอัตราเร็วในการหมุนของมอเตอร์ มีช่วงตั้งแต่ 0 เพิ่มขึ้นไปจนถึง 10
- Motor Power LED จะแสดงไฟสีแดงเมื่อมีการทำงานของมอเตอร์
- Motor Switch สำหรับจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อ เปิด-ปิด การทำงานของมอเตอร์
- Rotation Direction สำหรับกำหนดทิศทางในการหมุนของมอเตอร์ โดยมี 2 ทิศทางได้แก่ CW คือ Clockwise จะหมุนทิศทางตามเข็มนาฬิกา และ CCW คือ Counter Clockwise จะหมุนทิศทางทวนเข็มนาฬิกา
- Torque Output สำหรับวัดค่าแรงบิด โดยส่งค่าออกเป็นมิลลิโวลต์ ใช้กับ Voltmeter และอุปกรณ์วัดความดันไฟฟ้าอื่นๆ ที่มีความละเอียด และแม่นยำสูง
- Channel Output สำหรับวัดค่าความดันไฟฟ้าตาม Channel Selection สามารถใช้กับ Voltmeter และอุปกรณ์วัดความดันไฟฟ้าอื่นๆได้
- Channel Selection สำหรับเลือกช่องการอ่านค่าต่างๆ ได้แก่
 - Channel 1 สำหรับวัดค่ามุมองศา จะอยู่ในช่วง 0 ถึง 325 องศา ต่อแรงดันไฟฟ้าในช่วง 0 ถึง 4 โวลต์
 - Channel 2 สำหรับวัดค่าแรงบิด จะเป็นเครื่องมือวัดแรงบิดที่เกิดขึ้นผ่าน strain gage แล้ววัดความดันไฟฟ้ามาคำนวณแรงบิด
 - Channel 3 สำหรับวัดกระแสเข้า จะมีความดันไฟฟ้าเท่ากับ 4 โวลต์
- AC Main สำหรับต่อสายไฟเข้ากล่องควบคุม
- Motor, Torque, Rotation สำหรับต่อเข้าสู่มอเตอร์สำหรับส่งกระแสไฟฟ้า อ่านค่าแรงบิด และวัดมุมที่หมุนของมอเตอร์
- ADU สำหรับต่อเข้าอุปกรณ์ Data locker

3.3.2.3 Voltmeter หรือ Multi-Meter สำหรับวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ส่งมายังกล่องควบคุมแล้วนำไปคำนวณหาอัตราเร็ว และแรงบิดที่เกิดขึ้น

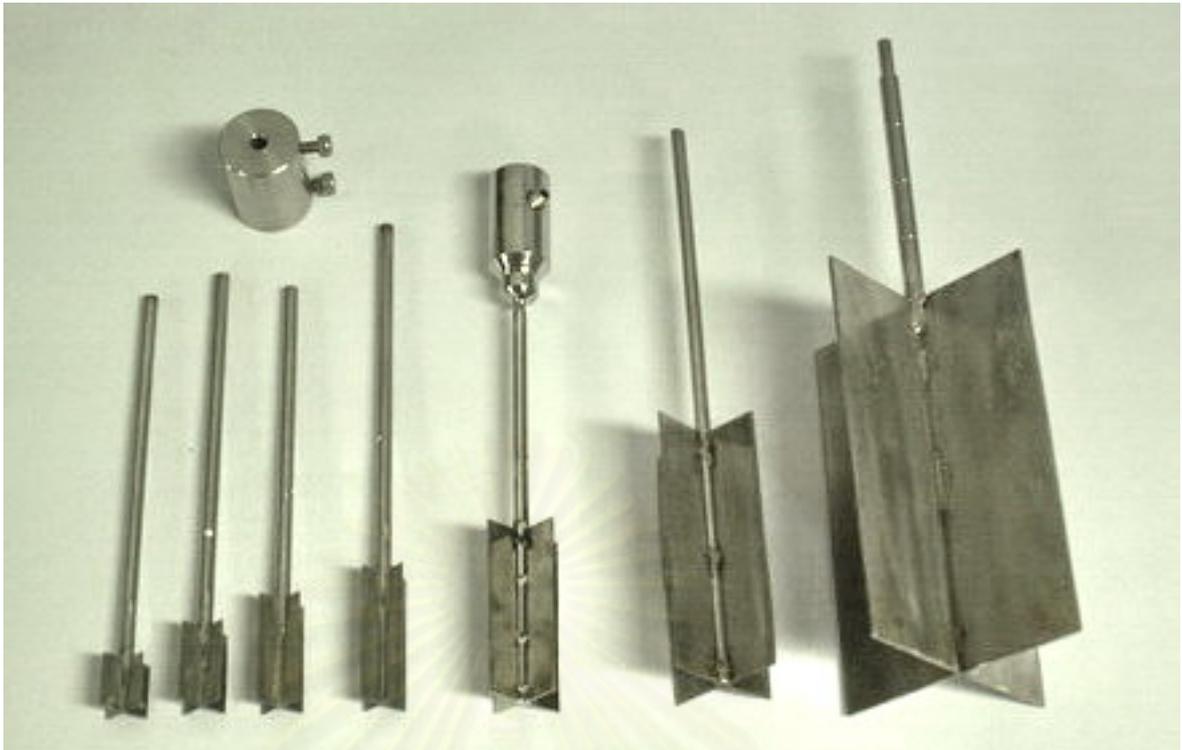
3.3.2.4 ใบพัด (Vane Blade) เป็นใบพัดสแตนเลส สำหรับใช้ทดสอบหากำลังรับแรงเฉือนดิน ดังรูปที่ 3.5 ประกอบด้วยใบพัดขนาดต่างๆดังนี้

รูปที่ 3.3 ชุดมอเตอร์
สำหรับทดสอบ Laboratory
Vane Shear Test



รูปที่ 3.4 กล่องควบคุมชุดมอเตอร์
(รูปบน แสดงภาพด้านหน้าของกล่อง
ควบคุม ,รูปล่าง แสดงภาพด้านหน้าของ
กล่องควบคุม)





Vane No. 1 2 3 4 5 6 7

รูปที่ 3.5 ไบพัดขนาดต่างๆที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 3.2 ขนาดต่างๆของไบพัด

Vane No.	1	2	3	4	5	6	7
Diameter of Vane (cm.)	1.26	1.26	1.27	1.27	2	3	6
Height of Vane (cm.)	1.26	1.89	2.63	3.18	4	6	9
Ratio D:H	1:1	1:1.5	1:2	1:2.5	1:2	1:2	1:1.5
c_u , min (kPa)*	5.84	4.25	3.17	2.68	0.83	0.25	0.04
c_u , max (kPa)**	117	85	63	54	17	5.0	0.79

หมายเหตุ

ลำดับที่ 1 – 4 เป็นไบพัดตามมาตรฐาน ASTM D4648

ลำดับที่ 5 - 7 เป็นไบพัดที่สร้างขึ้นใหม่เพื่อทำการทดสอบดินเหนียวอ่อน

* เป็นค่าที่อ่านได้ต่ำสุดของเครื่องมือ (แรงบิดต่ำสุด 0.0245 N-m.)

** เป็นค่าที่อ่านได้สูงสุดของเครื่องมือ (แรงบิดสูงสุด 0.4093 N-m.)

3.3.3 เครื่องทดสอบหาค่าความหนืดของดินเหนียวด้วยเครื่อง Rotational Viscometer

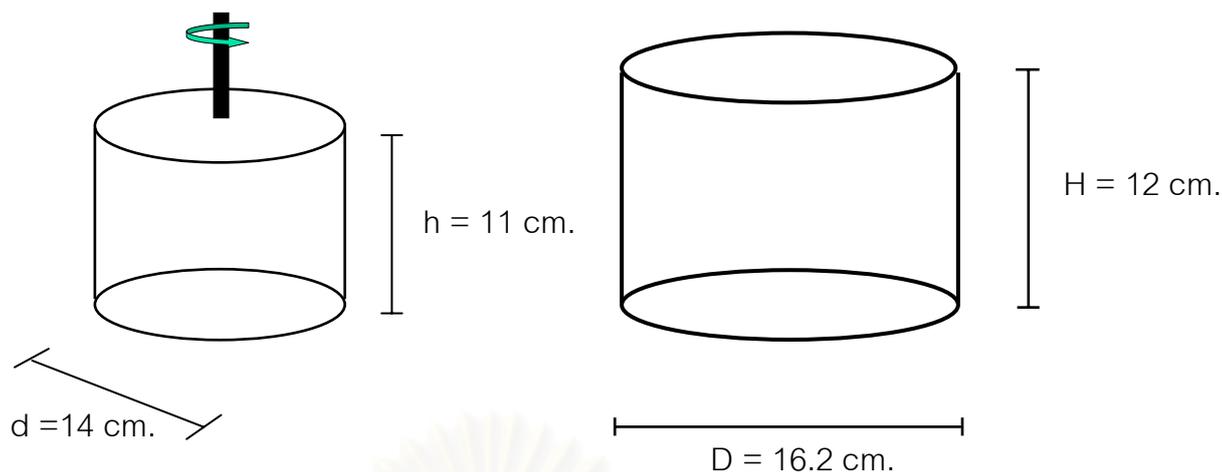
เป็นชุดเครื่องมือที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C1276 ประกอบด้วย

ชุดมอเตอร์, Control Module, Voltmeter หรือ Multi-Meter ซึ่งเป็นอุปกรณ์ชุดเดียวกับเครื่องทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบใบพัด

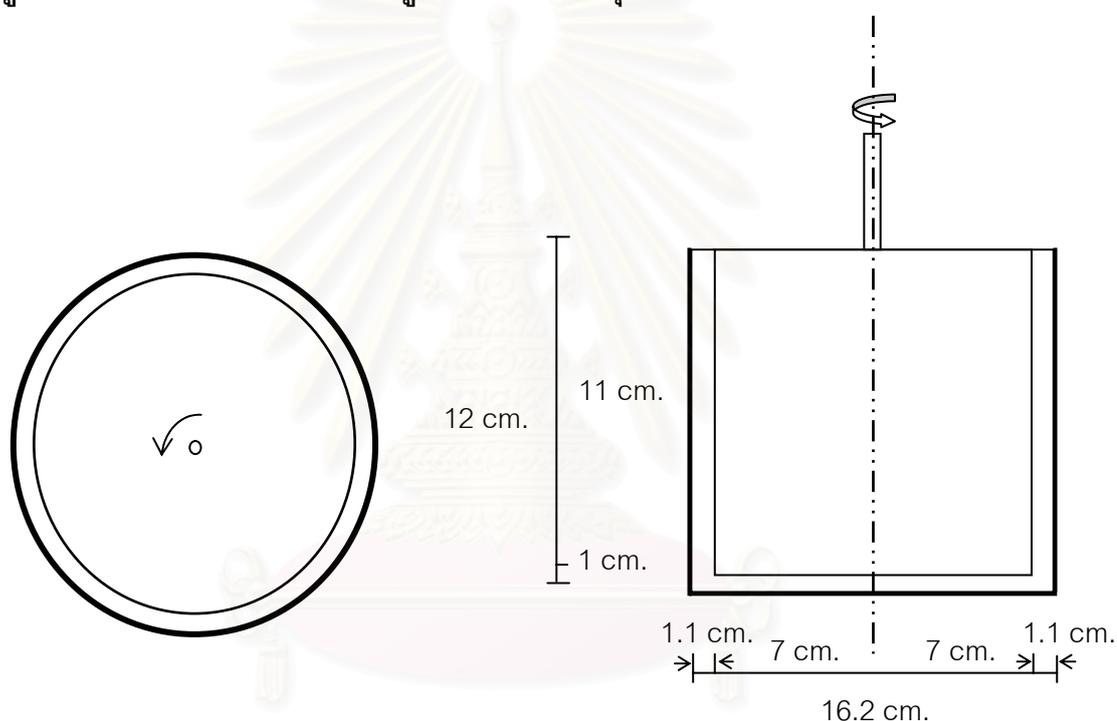
แกนหมุน(Spindle) เป็นเครื่องมือทำขึ้นใหม่ใช้เพื่อทำการทดสอบหาค่าความหนืดของดินเหนียว โดยทำจากสแตนเลส ทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 เซนติเมตร สูง 11 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.6 โดยจะใช้ในการทดสอบร่วมกับแบบใส่ดิน (Mold) เพื่อหาค่าความหนืด แต่ด้วยเนื่องจากเครื่องทดสอบหาค่าความหนืดนี้เป็นเครื่องต้นแบบจึงจำเป็นต้องทำการสอบเทียบค่ากับเครื่องทดสอบมาตรฐาน



รูปที่ 3.6 แกนหมุน และภาชนะสำหรับการทดสอบหาค่าความหนืด



รูปที่ 3.7 รายละเอียด ขนาด รูปร่างของ แกนหมุน และภาชนะใส่ดิน



รูปที่ 3.8 ลักษณะรูปด้านล่าง และรูปตัด ของแกนหมุน และภาชนะใส่ดิน

3.3.3.1 การเลือกวัสดุมาตรฐานสำหรับการสอบเทียบ

เลือกน้ำมันที่มีความหนืดแตกต่างกัน 2 ชนิดมาทำการทดสอบ โดยพิจารณาน้ำมันที่มีคุณสมบัติดังนี้

- ค่าความหนืดจะมีค่าคงที่หลังจากมีการเปลี่ยนอุณหภูมิไปแล้ว แต่เมื่ออุณหภูมิกลับมาเท่าเดิมความหนืดก็จะเท่าเดิม
- มีความสามารถรับแรงเฉือนได้มาก สามารถทำซ้ำได้หลายครั้งจึงจะเปลี่ยนแปลงความหนืด
- มีค่าความหนืดอยู่ในช่วงของเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

3.3.3.2 การหาค่าความหนืดของวัสดุมาตรฐาน

ทำการทดสอบหาค่าความหนืดโดยใช้เครื่อง Brookfield Model DV III มาทำการทดสอบที่อุณหภูมิประมาณ 20 และ 30 องศาเซลเซียส

- นำตัวอย่าง(น้ำมันมาตรฐานที่จะใช้ในการทดสอบ)ใส่ไปยังกระบอกใส่ตัวอย่าง
- ทำการปรับอุณหภูมิกับตัวอย่างที่จะทำการทดสอบ โดยการเซ็ตอุณหภูมิที่เครื่อง Brookfield หลังจากนั้น เครื่องจะทำการปรับอุณหภูมิของตัวอย่างให้เท่ากับอุณหภูมิที่กำหนดไว้ แล้วจึงทำการหมุนที่อัตราเร็วรอบเท่ากับ 50, 100, 150, 200 และ 250 รอบต่อนาที
- บันทึกค่าแรงบิด อัตราเร็วในการหมุน และค่าความหนืด
- นำค่าที่ได้มาพล็อตค่าระหว่าง ความหนืด กับ อัตราเร็วในการหมุน (รอบต่อนาที)

3.3.3.3 การสอบเทียบค่าเครื่องทดสอบหาค่าความหนืด

- นำน้ำมันที่ได้รับการทดสอบหาค่าความหนืดแล้วมาใส่ภาชนะ (Mold) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 12 เซนติเมตร ที่ระดับสูงประมาณ เซนติเมตร ทำการบันทึกอุณหภูมิก่อนทดสอบ
- จุ่มแกนหมุน (Spindle) ลงไปในภาชนะจนสุด และน้ำมันอยู่ในภาชนะจนเต็ม
- เลือกทิศทางการหมุนของแกนหมุนให้เป็น CW (หมุนตามเข็มนาฬิกา) และ ปรับ Speed Dial ที่ต้องการทดสอบ
- ทำการบันทึกค่าความดันไฟฟ้าจากเครื่องอ่าน เป็นระยะเวลา 1 นาที แล้วจึงหมุนแกนหมุนโดยกดปุ่ม Start เป็นระยะเวลา นาที
- กด Stop เพื่อหยุด เป็นระยะเวลา 1 นาที แล้วปรับทิศทางการหมุนของแกนหมุนให้เป็น CCW (หมุนทวนเข็มนาฬิกา)
- กด Start อีกครั้งเป็นระยะเวลา นาทีแล้วจึงหยุดหมุนทำการบันทึกอุณหภูมิหลังทดสอบ

- นำค่าที่ได้จากการทดสอบมาคำนวณค่าความเหนียวโดยหาค่า K ของเครื่องมือ จากการพล็อตระหว่างค่า แรงบิดต่อความเหนียว กับ อัตราเร็วในการหมุน (รอบต่อนาที)

3.4 โปรแกรมการทดสอบ

โปรแกรมการทดสอบได้ออกแบบมาเพื่อให้การทดสอบบรรลุวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 โดยมีรายละเอียดของการทดสอบที่สำคัญดังนี้

3.4.1 การเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบ

ทำการเก็บดินที่ได้จากการเจาะสำรวจ จากบริเวณถนนพระราม 9 ทั้ง 3 หลุม โดยเลือกที่ระดับความลึก 3.00 ถึง 5.00 เมตร จำนวนทั้งหมด 9 กระจบกลมผสมรวมกัน ด้วยเครื่อง Mixer แบบใบพัด แล้วนำมาผ่านตะแกรงขนาดเบอร์ 40 เพื่อแยกดินทรายและกรวด ออกจากดินที่ใช้ในการทดสอบ แล้วนำมาผึ่งแดดให้แห้ง

3.4.2 ทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนด้วยวิธี การทดสอบแรงเฉือนด้วยใบพัดในห้องทดสอบ

เป็นการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน ตามมาตรฐาน ASTM D4648 เพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินโคลน ทั้งนี้จะทำการทดสอบผลกระทบเนื่องจากอัตราเร็วในการหมุนที่แตกต่างกันของใบพัด และปริมาณความชื้นที่แตกต่างกัน จะมีผลกับค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเป็นอย่างไร

3.4.3 ทดสอบหาค่าความเหนียวของดินเหนียวด้วยเครื่อง Rotational Viscometer

เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความเหนียวของดิน ตามมาตรฐาน ASTM C1276 ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ทำขึ้นมาเพื่อใช้ในการทดสอบ เครื่องมือที่ใช้จะเป็นเครื่องมือต้นแบบในการทดสอบหาค่าความเหนียวสำหรับดินเหนียวอ่อน โดยจะทำการเปรียบเทียบผลกระทบเนื่องจากอัตราเร็วในการหมุนที่แตกต่างกันของแกนหมุน ปริมาณความชื้นที่แตกต่างกัน โดยจะควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ แล้วนำมาศึกษาถึงผลกระทบกับค่าความเหนียวของดินเหนียวอ่อน

จากผลการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนด้วยวิธี การทดสอบแรงเฉือนด้วย ไบพัตในห้องทดสอบ และผลการทดสอบหาค่าความเหนียวของดินเหนียวด้วยเครื่อง Rotational Viscometer จะนำมาหาความสัมพันธ์กับความชื้นที่เปลี่ยนแปลงของดินเหนียว โดยนำผลการ ทดสอบที่ได้มาเปรียบเทียบกับที่ค่าความชื้นที่เท่ากัน เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรง เฉือนของดินกับความเหนียวของดินเหนียวที่ความชื้นเดียวกัน เช่น ค่ากำลังรับแรงเฉือนจาก เครื่องมือ Laboratory Vane Shear ก็จะเปรียบเทียบกับความเหนียวจากเครื่องมือ Rotational Viscometer ที่ค่าปริมาณความชื้นเดียวกัน เป็นต้น แต่สำหรับค่าความเหนียวจะมีผลกระทบจาก อัตราเร็วในการหมุนมาประกอบในการพิจารณา ซึ่งผลที่ได้จะมีความสัมพันธ์ของอัตราเร็วรอบใน การหมุนของแกนหมุน

3.5 ขั้นตอนการทดสอบ

ขั้นตอนการทดสอบที่สำคัญแบ่งได้เป็น 2 ส่วนได้แก่ การทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบ กำลังรับแรงเฉือนด้วยไบพัตในห้องทดสอบดังรูปที่ 3.9, การทดสอบด้วยเครื่องมือวัดความเหนียว Rotational Viscometer ดังรูปที่ 3.10

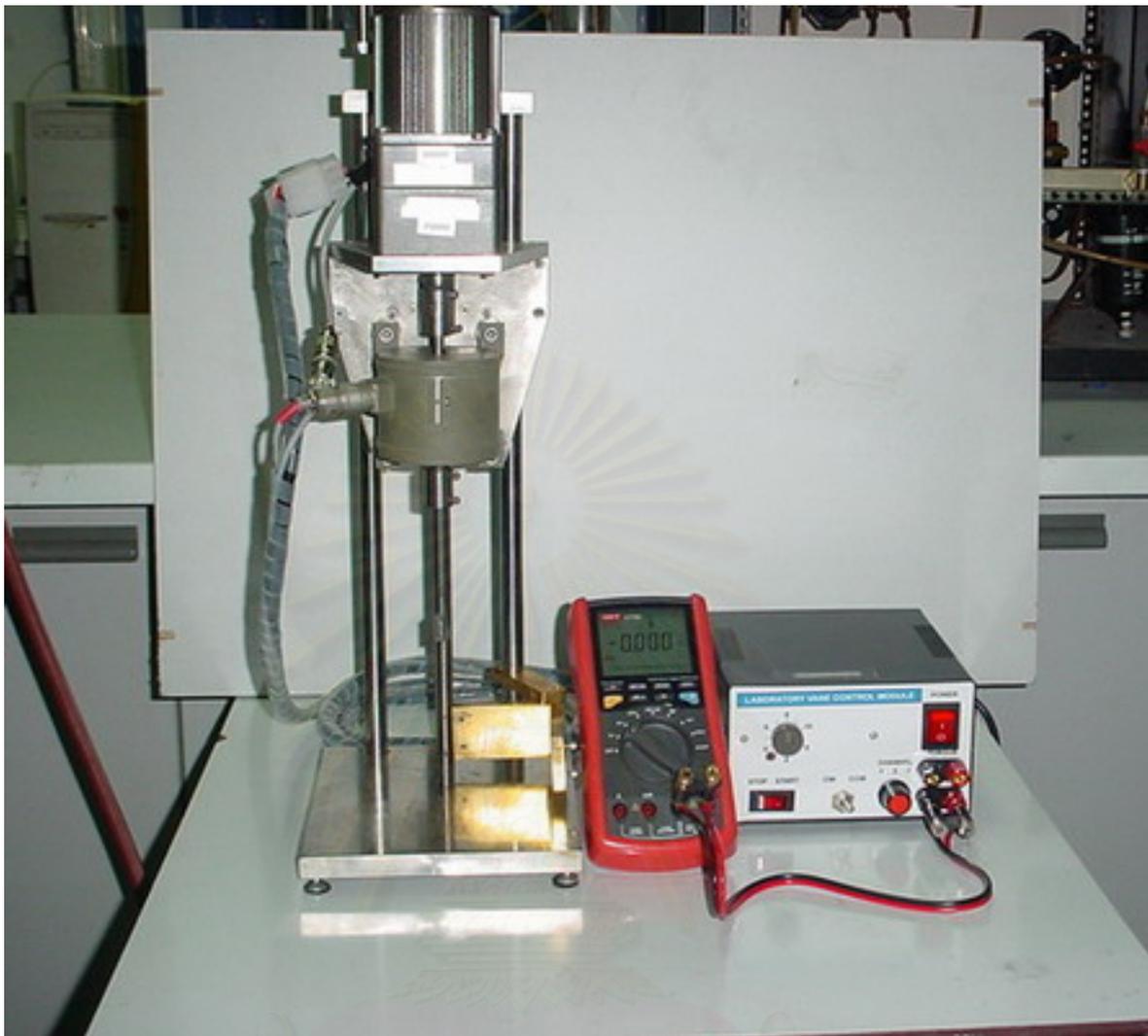
3.5.1 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนด้วยเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือน ด้วยไบพัตในห้องทดสอบ

ก. การเตรียมตัวอย่าง

- นำดินตัวอย่างประมาณ 3-4 Kg. มาผสมน้ำโดยใส่ปริมาณน้ำตาม ที่ ต้องการ จากนั้นนำตัวอย่างไปผสมโดยเครื่อง Mixer แบบไบพัตประมาณ 15 นาทีเพื่อให้ส่วนผสมกับดินให้เข้ากันให้ทั่ว แล้วนำดินที่ได้เก็บไว้ในภาชนะที่ปิดมิดชิดทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง เพื่อให้ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturate)
- นำตัวอย่างดินที่ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงแล้ว แล้วนำไปใส่ในถ้วยใส่ดิน(Container) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16.2 เซนติเมตร สูง 12 เซนติเมตร

ข. วิธีการทดสอบ

- นำตัวอย่างดินเหนียวมาทำการกวน (Disturb) ตัวอย่างดินเพื่อให้ดินอยู่ใน สภาพที่ไม่มี การเซ็ทตัวมาก่อน



รูปที่ 3.9 เครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบใบพัดในห้องทดสอบ

- ทำการทดสอบหากลังรับแรงเฉือนอ้างอิงมาตรฐาน ASTM D4648-94 โดยติดตั้งใบพัด (Miniature Vane Blade) ขนาด 3.00x6.00 เซนติเมตร (อัตราส่วน 1:2) สำหรับใบพัดเบอร์ 6 และขนาด 6.00x9.00 เซนติเมตร (อัตราส่วน 1:1.5) สำหรับใบพัดเบอร์ 7
- กดใบพัด (Vane Blade) ลงไปในดินโดยมีระยะจมนเท่ากับ 9 เซนติเมตร สำหรับใบพัดเบอร์ 6 และมีระยะจมน 11.5 เซนติเมตร สำหรับใบพัดเบอร์ 7
- เลือกทิศทางการหมุนของใบพัด และ ปรับ Speed Dial ที่ต้องการทดสอบ
- ทำการบันทึกค่าแรงบิดด้วยเครื่องอ่านทุกๆ 1 วินาที โดยค่าที่อ่านได้จะเป็นหน่วยความดันไฟฟ้า (โวลต์) จนครบ 1 นาที แล้วกด Start ที่ Motor

Switch เพื่อทำการหมุนมอเตอร์ตามอัตราเร็ว และทิศทางที่กำหนดไว้ ทำการบันทึกค่าจนวนค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่

- ทำการทดสอบโดยเปลี่ยนแปลงค่าอัตราเร็วในการหมุนที่อัตราเร็ว 46.61, 139.32 และ 278.52 องศา/นาที และเปลี่ยนแปลงค่าค่าความชื้นในดิน ไปเรื่อยๆโดยให้ค่าความชื้นในดินห่างกันไม่เกิน 10 % เพื่อสามารถนำไปเปรียบเทียบกับค่าความหนืด(Viscosity)ได้ด้วย

3.5.2 การทดสอบหาค่าความหนืดด้วยเครื่อง Rotational Viscometer

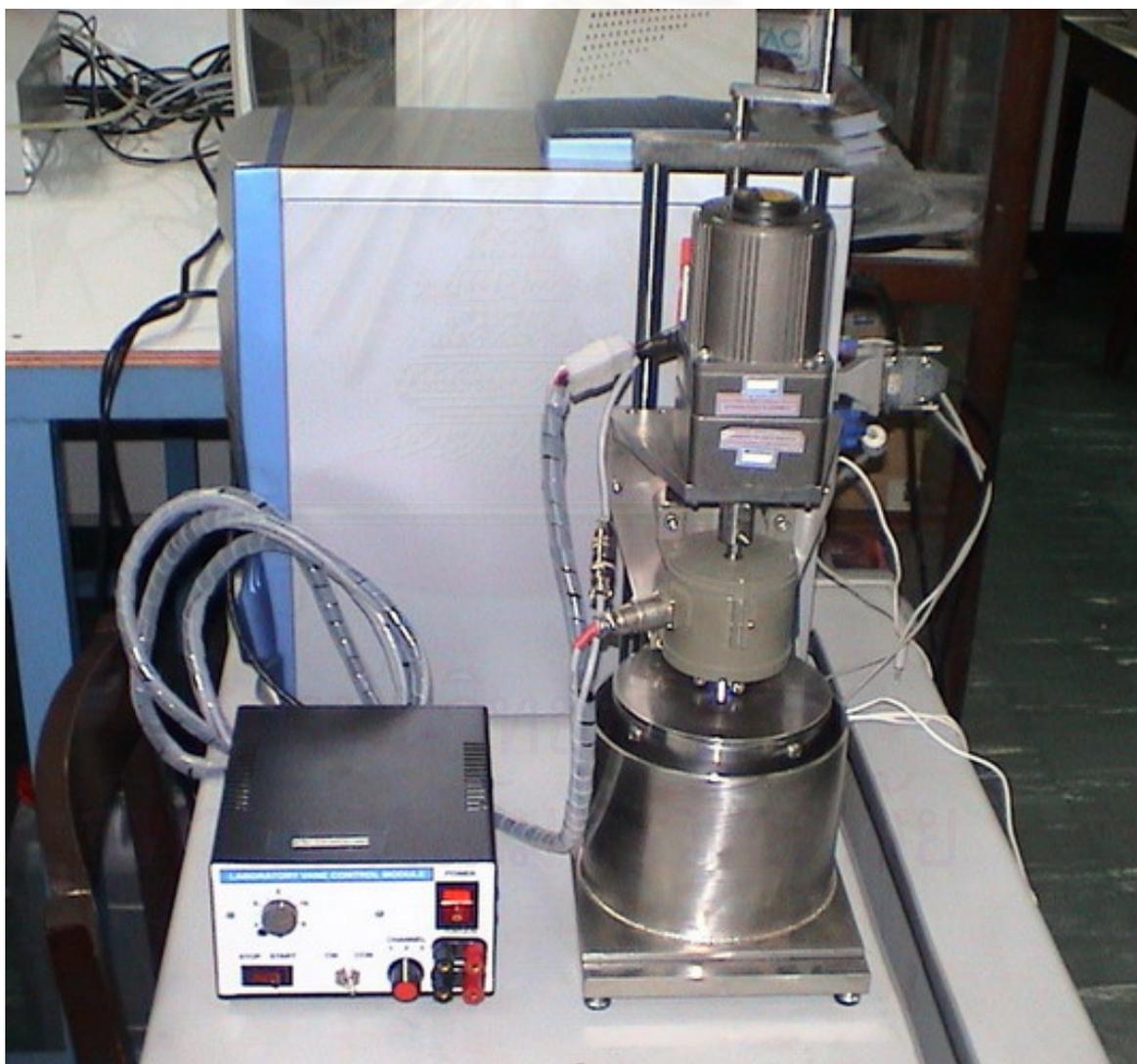
ก. การเตรียมตัวอย่าง

- นำดินตัวอย่างประมาณ 3-4 Kg มาผสมน้ำโดยใส่ปริมาณน้ำตามที่ต้องการ จากนั้นนำตัวอย่างไปผสมโดยเครื่อง Mixer แบบใบพัดประมาณ 15 นาทีเพื่อให้ส่วนผสมกับดินให้เข้ากันให้ทั่ว แล้วนำดินที่ได้เก็บไว้ในภาชนะที่ปิดมิดชิดทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง เพื่อให้ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturate)
- นำตัวอย่างดินที่ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงแล้ว แล้วนำไปใส่ในถ้วยใส่ดิน (Container) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16.2 เซนติเมตร สูง 12 เซนติเมตร โดยใส่ดินสูงประมาณ 3.8 เซนติเมตร

ข. วิธีการทดสอบ

- นำตัวอย่างดินเหนียวมาทำการกวน (Disturb) ตัวอย่างดินเพื่อให้ดินอยู่ในสภาพที่ไม่มีการเซ็ทตัวมาก่อน
- ทำการทดสอบหาค่าความหนืดตามมาตรฐาน ASTM C1276 โดยติดตั้งแกนหมุนกับชุดมอเตอร์ ปรับระดับแกนหมุนให้ต่ำลงจนที่ปลายแกนหมุนติดแบบใส่ดิน
- เลือกทิศทางหมุนของแกนหมุน โดยเลือกไปที่ CW (หมุนตามเข็มนาฬิกา) และ ปรับ Speed Dial ที่ต้องการทดสอบ
- ทำการบันทึกค่าแรงบิดด้วยเครื่องอ่านทุกๆ 1 วินาที โดยค่าที่อ่านได้จะเป็นหน่วยความดันไฟฟ้า (โวลต์) จนครบ 1 นาที แล้วกด Start ที่ Motor Switch เพื่อทำการหมุนมอเตอร์ตามอัตราเร็ว และทิศทางที่กำหนดไว้

- จนวนครบ 5 นาที หรือ แรงดันไฟฟ้ามีค่าคงที่เป็นระยะเวลาประมาณ 4 นาที จึงกด Stop ที่ Motor Switch เพื่อหยุดแกนหมุน และเลือกทิศทางการหมุนไปที่ CCW (หมุนทวนเข็มนาฬิกา) ปลดอยทิ้งไว้ 1 นาทีแล้วจึงกด Start ที่ Motor Switch อีกครั้งให้แกนหมุนทวนเข็มนาฬิกา 5 นาที หรือ เท่ากับการหมุนตามเข็มนาฬิกา แล้วกด Stop ที่ Motor Switch บันทึกค่าต่อไปอีก 1 นาที
- ทำการทดสอบโดยเปลี่ยนแปลงค่าอัตราเร็วในการหมุนที่อัตราเร็วประมาณ 0.39, 0.77, 1.3, 3.9, 7.7, 19.35 และ 38.6 รอบ/นาที และเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นในดิน ไปเรื่อยๆโดยให้ค่าความชื้นในดินห่างกันไม่เกิน 10 % เพื่อสามารถนำไปเปรียบเทียบกับค่ากำลังรับแรงเฉือน



รูปที่ 3.10 เครื่องมือทดสอบ Rotational Viscometer

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

ค่าที่ได้จากการทดสอบพบว่า มีค่าพิกัดเหลว 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

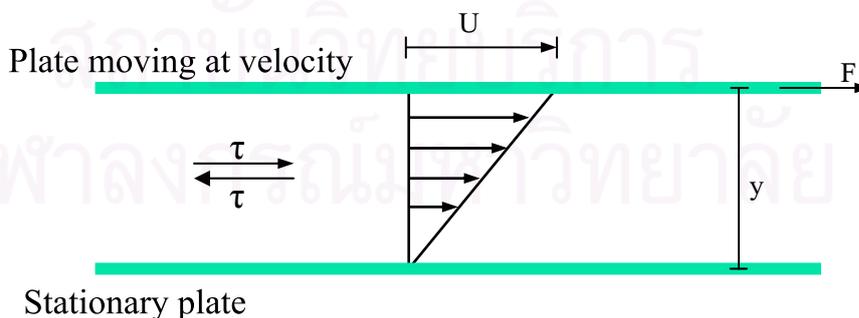
4.2.1 การคำนวณขีดจำกัดค่าความหนืดของเครื่อง Rotational Viscometer

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

$$\mu = \tau / \text{velocity gradient} \tag{4.1}$$

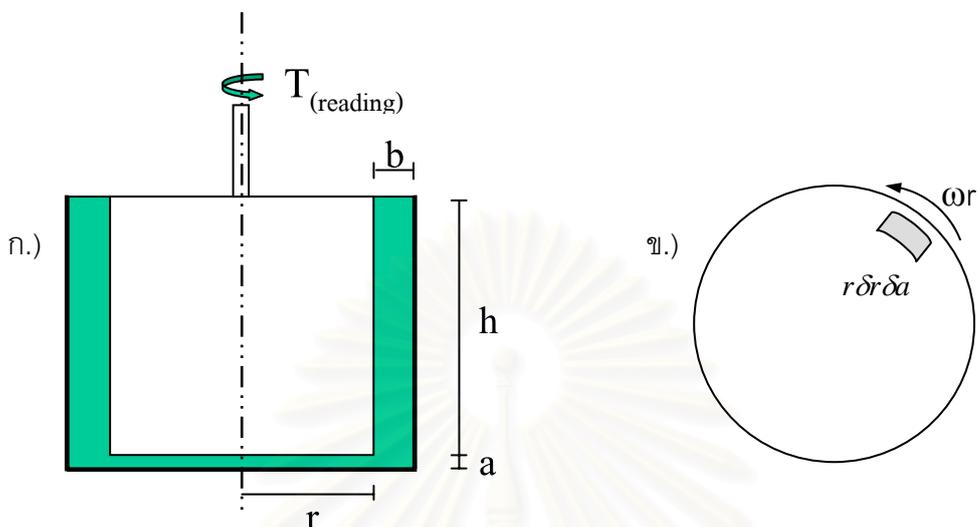
Shear Stress (τ)	= F/A	มีหน่วยเป็น N/m ²
Velocity gradient	= dU/dy	มีหน่วยเป็น sec ⁻¹
Absolute Viscosity(η)	= $\frac{F}{A} \cdot \frac{dy}{dU}$	มีหน่วยเป็น Pa-s

จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า เมื่อมีแรง (F) มากระทำที่ผิวด้านบนของของไหล (Plate moving at velocity) ด้วยอัตราเร็ว (U) ของไหลมีการเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว dU/dy จากผิวบนของของวัสดุมายังล่างที่สัมผัสวัสดุ (Stationary plate) โดยที่ผิวล่างของวัสดุไม่มีการเคลื่อนที่ เมื่อของไหลถูกแรงมากกระทำให้เกิดการเคลื่อนที่ วัสดุที่ไม่มีการเคลื่อนที่จะเกิดแรงต้านในทิศทางตรงกันข้ามคือ ความเค้น (τ) ในตัววัสดุ นั่นก็คือความหนืดของวัสดุ



รูปที่ 4.1 แรงต้านของวัสดุจากการกระทำของแรง F

จากสมการที่ 4.1 นำมาแยกพิจารณาแรงต้านที่เกิดบริเวณด้านข้าง และบริเวณ
 ด้านล่างของแกนหมุน



รูปที่ 4.2 ลักษณะการพิจารณาแรงต้านของวัสดุที่เกิดขึ้นจากการหมุนของแกนหมุน (ก. แสดงรูปตัดของภาชนะใส่ดินกับแกนหมุน ข. แสดงรูปด้านข้างของภาชนะใส่ดินกับแกนหมุน)

พิจารณาจากด้านข้างของแกนหมุน

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

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

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

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

พิจารณาจากด้านล่างของแกนหมุน

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

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

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

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

โดยให้ $T_{(reading)}$ คือจากแรงลัพธ์ที่เกิดจากแรงต้านการหมุนจากด้านข้างและด้านล่างของแกนหมุน

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

สำหรับวัสดุที่มีคุณสมบัติในการรับแรงเหมือนกันทั้งสองทิศทาง ; $\eta_v = \eta_h$

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

เมื่อต้องการหาค่าความหนืดได้ดังสมการที่ 4.2

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

จากสมการที่ได้ประกอบจาก 3 ส่วนคือ

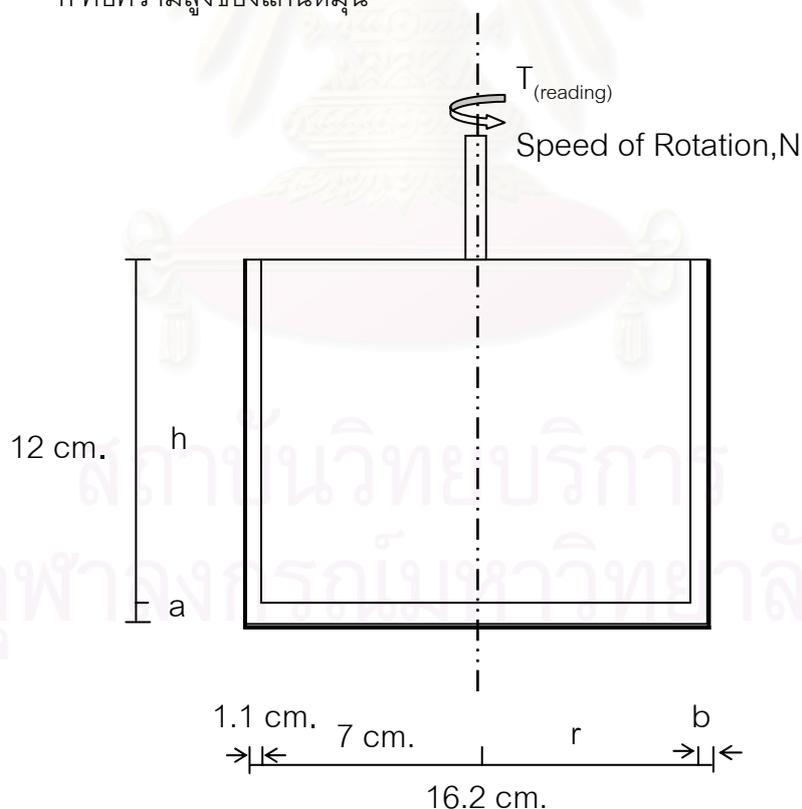
1. แรงบิดที่เกิดขึ้น $T_{(reading)}$ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.0245 – 0.4903 N-m
2. อัตราเร็วในการหมุน N ซึ่งใช้อยู่ในช่วง 0.12 – 38.5 รอบต่อนาที
3. ขนาดของแกนหมุนและภาชนะใส่ดิน (Shape Factor, K) ได้แก่

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

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

$$K = 0.0026518$$

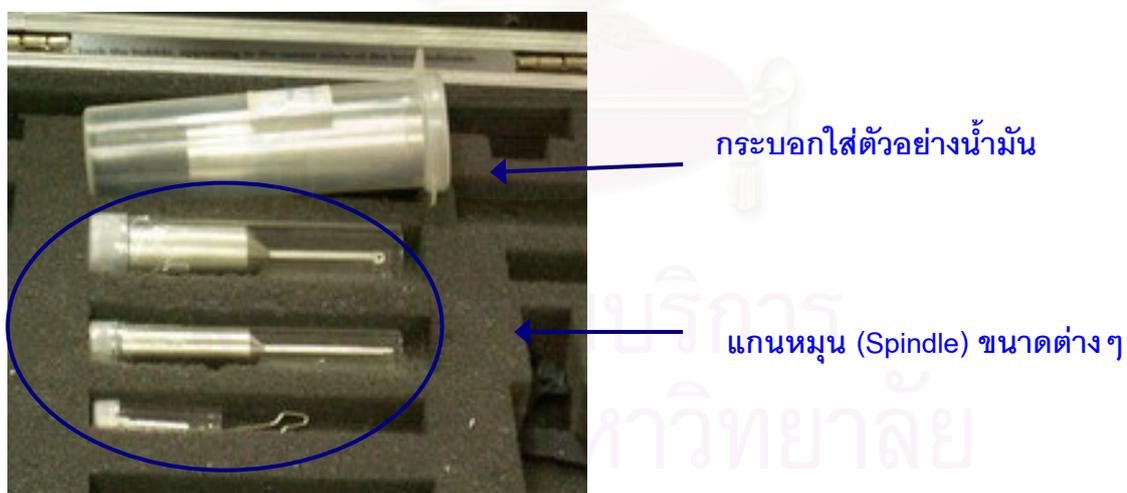
และเมื่อแทนค่า K ลงในสมการที่ 4.2 ได้

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

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



รูปที่ 4.4 รายละเอียดเครื่อง Brookfield ที่ใช้ในการสอบเทียบน้ำมัน



รูปที่ 4.5 น้ำมันมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ

จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่าค่าความหนืดของน้ำมันมาตรฐาน มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนอัตราเร็วในการหมุน ซึ่งแสดงถึงคุณสมบัติของของเหลวแบบนิวโทเนียน แต่มีความเปลี่ยนแปลงความหนืดเมื่อมีการเปลี่ยนอุณหภูมิ โดยเมื่ออุณหภูมิของน้ำมันมาตรฐานมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาตรของของเหลวมีการขยายตัว ทำให้แรงเสียดทานระหว่างโมเลกุลของน้ำมันมาตรฐานลดลง มีผลทำให้ความหนืดของน้ำมันมาตรฐานมีค่าลดลง ซึ่งในการทดสอบตัวอย่างดินที่ใช้นั้น จำเป็นที่ต้องมีการบันทึกค่าอุณหภูมิขณะทดสอบด้วย เนื่องจากตัวอย่างดินที่ทำการทดสอบนั้นมีส่วนประกอบของน้ำ ซึ่งเป็นของเหลวมีคุณสมบัติแบบนิวโทเนียน เช่นเดียวกับน้ำมันมาตรฐาน จึงมีผลทำให้ความหนืดลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่มีผลเล็กน้อย 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 ค่าที่ได้นำมาหาค่าความสัมพันธ์กันของความหนืด, แรงบิด และอัตราเร็วในการหมุน โดยค่าความหนืดที่ใช้เป็นค่าความหนืดของวัสดุมาตรฐานที่อุณหภูมิ 26.5 °C คำนวณโดยการอินเทอร์โพล (Interpolate) จากอุณหภูมิที่ทำการทดสอบได้ค่าความหนืดของน้ำมันมาตรฐาน Pennzoil HD SAE30 และ SAE 50 มีค่าเท่ากับ

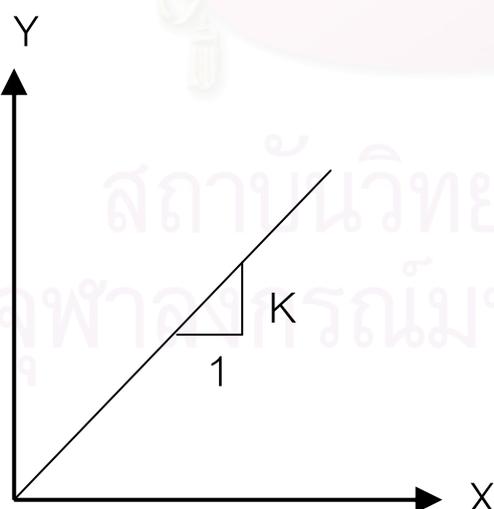
1.97 และ 5.59 Poise ตามลำดับ ค่าแรงบิดจากการอ่านค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นจากการทดสอบที่อัตราเร็วรอบที่ทำการทดสอบ เมื่อนำค่าที่ได้มาพล็อต ได้ผลดังรูปที่ 4.9 โดยกราฟที่ได้มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงเมื่อทำการพล็อตระหว่าง แรงบิดต่อความหนืด กับอัตราเร็วในการหมุน โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.3 ซึ่งความสัมพันธ์ที่ได้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

การวิเคราะห์ค่า K ทำโดยการนำความสัมพันธ์จากสมการที่ 4.3 มาทำการ Normalization ด้วย η แล้วทำการพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างค่า N ให้เป็นแกน X และ T/η 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 $\eta = \frac{T}{K \cdot N}$

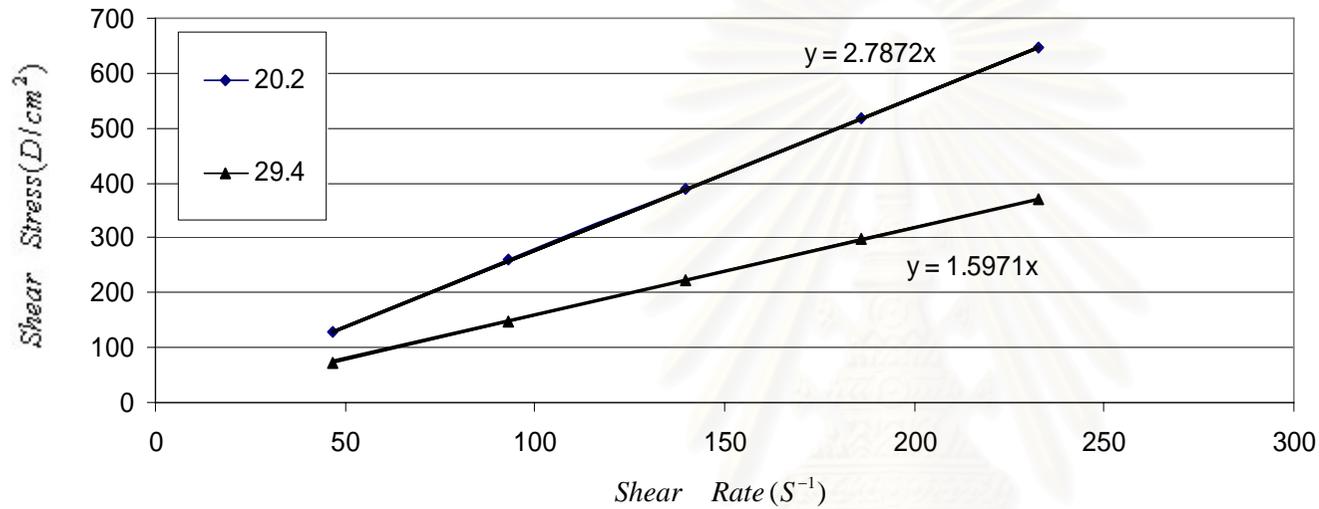
Normalization by η

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

แทน T/η และ N ค่าลงบนกราฟได้

$$Y = K \cdot X$$

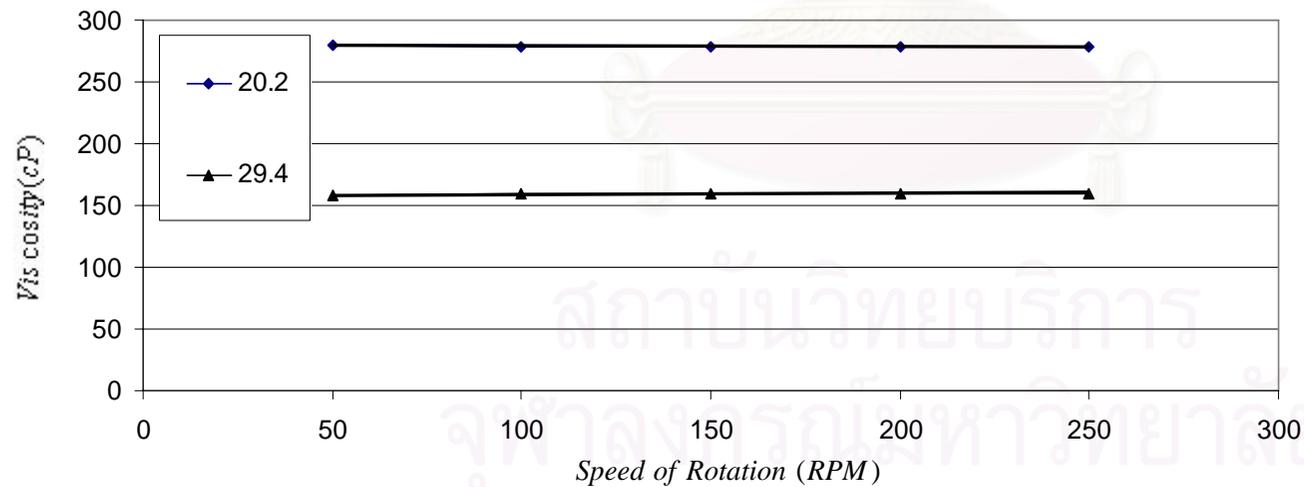
รูปที่ 4.6 การวิเคราะห์ค่า K ที่ได้จากทฤษฎี และการสอบเทียบ



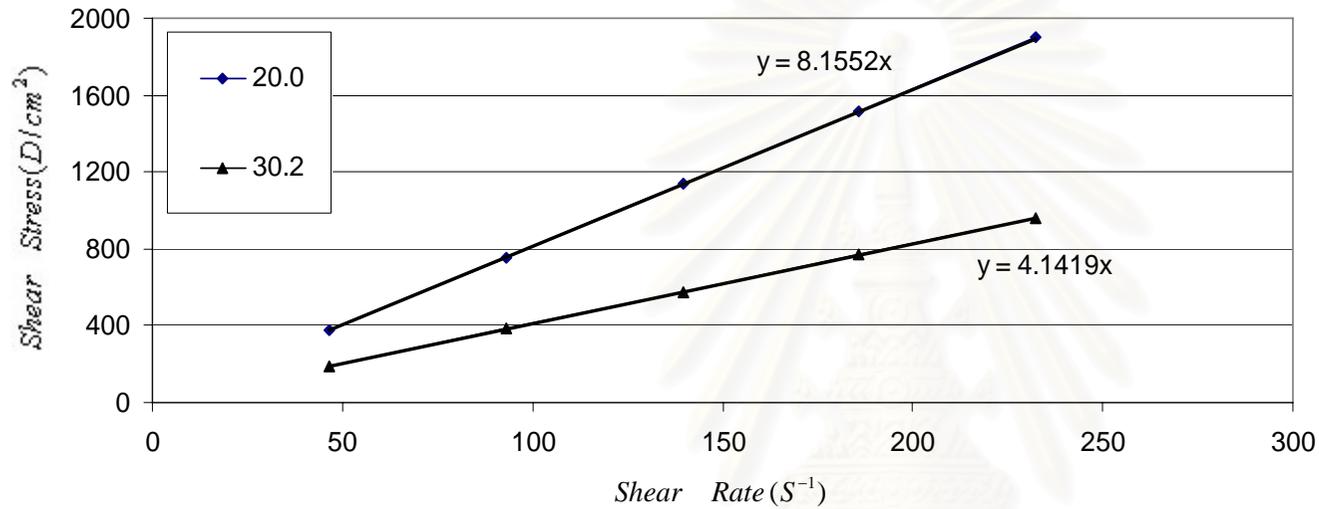
รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบน้ำมันมาตรฐาน Pennzoil HD SAE 30

ก. ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด

ข. ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับความเร็วในการหมุน



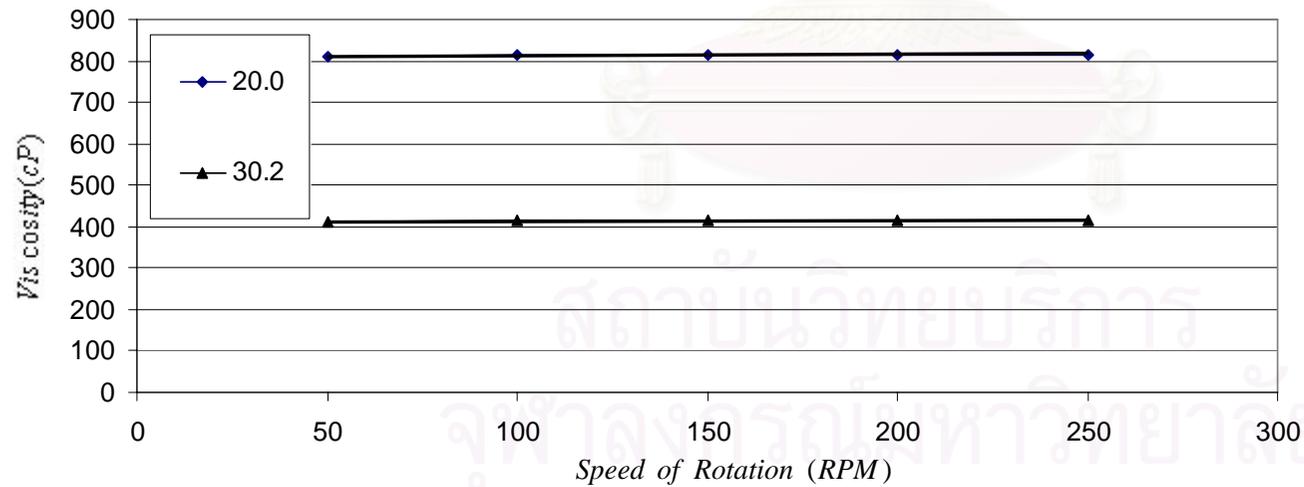
*1dyne,D = 10^{-5} N
 1 D/cm^2 = 0.1 N/m^2
 1 Poise = 100 cP
 = 1.0 $g \cdot s/cm^2$
 = 0.1 Pa-s



รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบน้ำมันมาตรฐาน Pennzoil HD SAE 50

ก. ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด

ข. ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับความเร็วในการหมุน



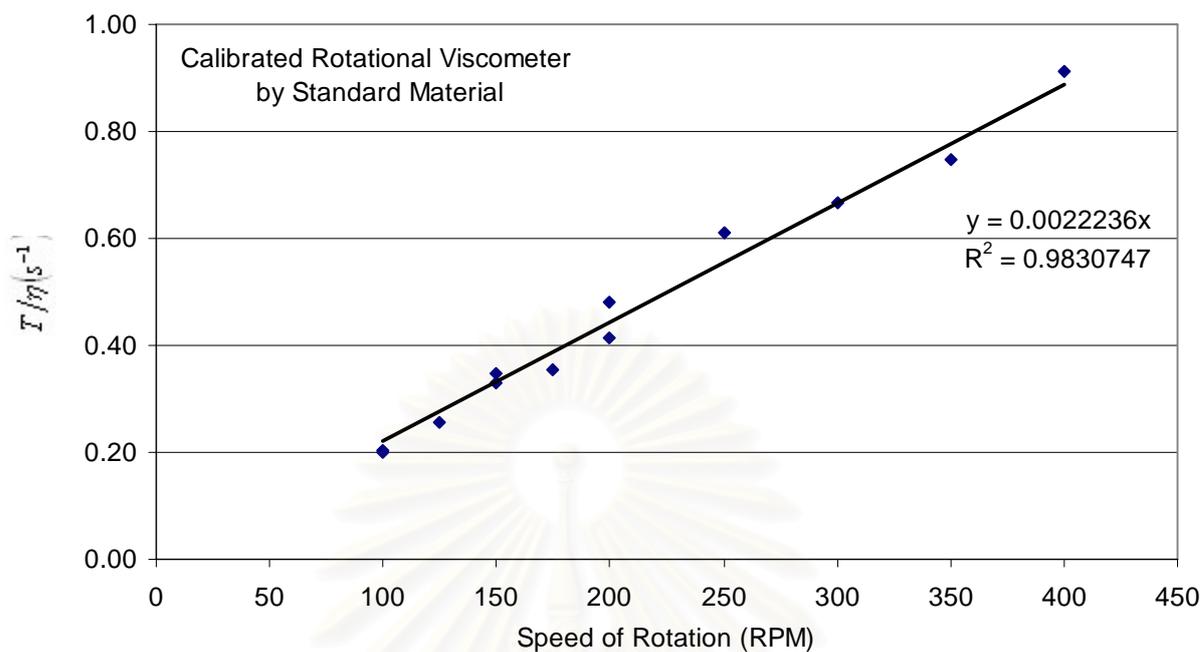
*1dyne,D = 10^{-5} N

1 D/cm^2 = 0.1 N/m^2

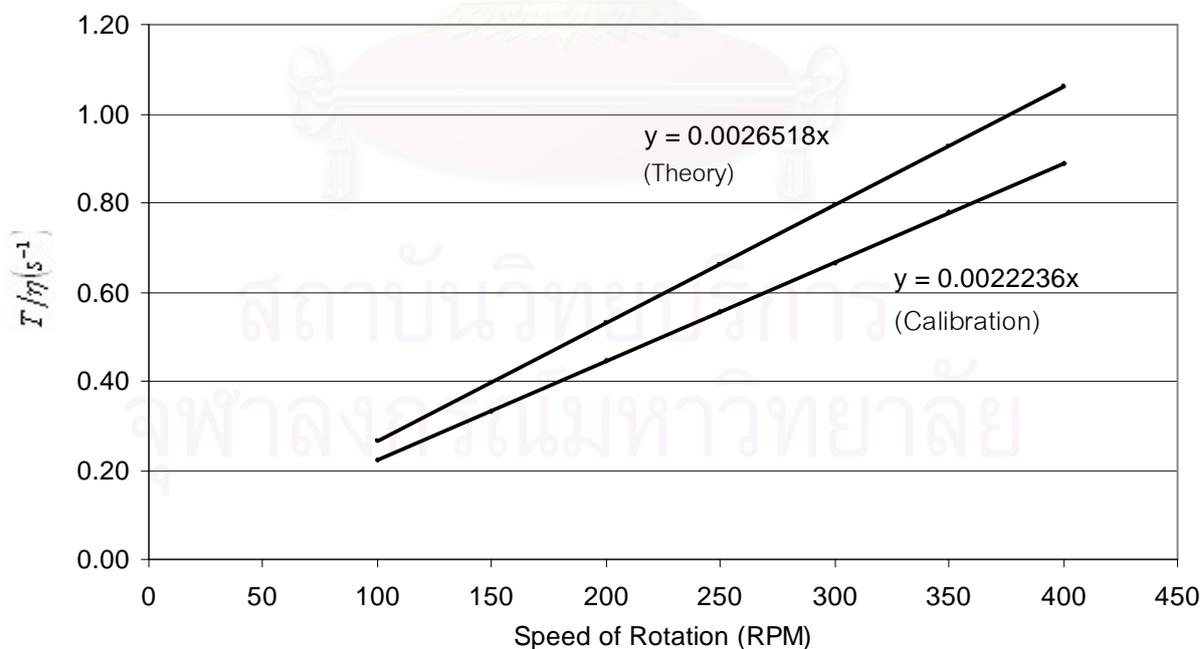
1 Poise = 100 cP

= 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

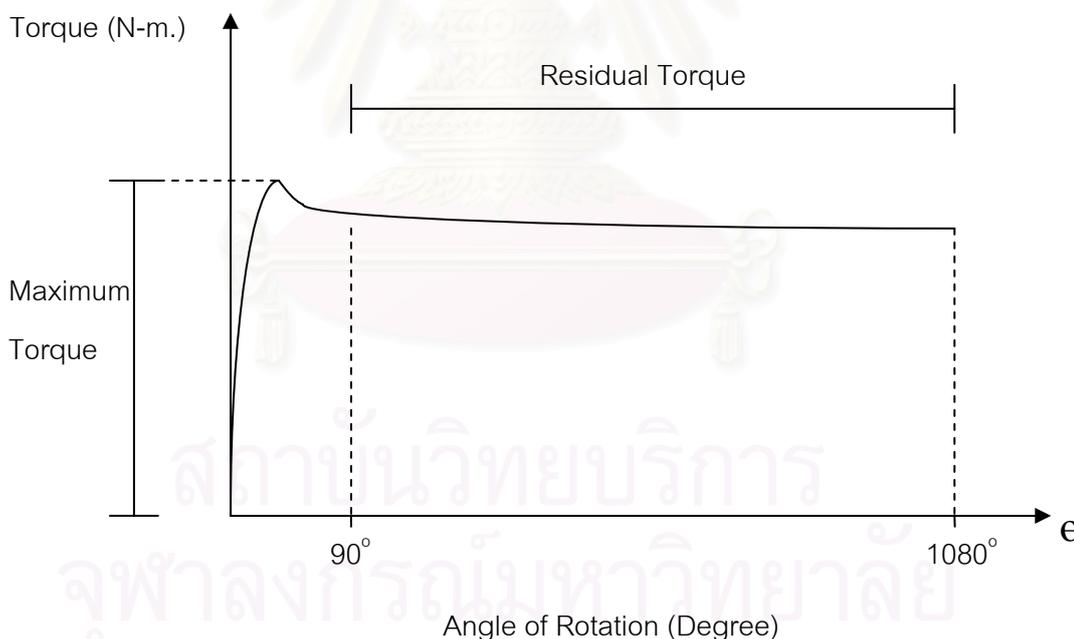
4.3 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวด้วยเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนด้วยใบพัดในห้องทดสอบ

4.3.1 การประเมินความหมายจากผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบที่ได้ทำการบันทึกค่ากำลังรับแรงเฉือนออกเป็น 2 ส่วนดังรูปที่ 4.11 ซึ่งค่าที่ได้ นำมาแยกพิจารณาหาความสัมพันธ์กับความชื้นในดิน อัตราเร็วในการหมุน และผลกระทบจากขนาดของใบพัด

1. ค่า Maximum Torque เป็นแรงบิดสูงสุดที่นำมาคำนวณกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของดินเหนียว โดยพิจารณาจากช่วง $0^{\circ} - 90^{\circ}$ เพื่อนำมาคำนวณหา Peak Shear Strength
2. ค่า Residual Torque เป็นค่าที่นำมาคำนวณกำลังรับแรงเฉือนหลังวิบัติ ซึ่งมีค่าคงที่ หรือมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย โดยพิจารณาแรงบิดจากช่วง $90^{\circ} - 1080^{\circ}$ มาคำนวณหา ค่าเฉลี่ย เพื่อนำมาคำนวณหา 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 องศาต่ออนาที กับใบพัดสองขนาดคือ 3x6 ซม. และ 6x9 ซม. โดยค่าที่ได้แสดงในรูปที่ 4.15 และ 4.16 พบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนที่พิจารณาแบบ Residual Strength มีความสัมพันธ์กันระหว่างค่าสูงกว่า แบบ Peak Shear Strength อันเนื่องมาจากดินที่ใช้เป็นดินที่ถูกรบกวนใหม่ทุกครั้งที่ทำการศึกษาทดสอบ 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 $\frac{w - PI.}{LL. - PL..}$

ω คืออัตราเร็วในการหมุนใบพัด, deg/min

จากสมการที่ 4.4 เห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ด้วยกำลังของความเร็วยกกำลังค่าประมาณ 0.000797 ดังนั้น เมื่อความเร็วรอบยกกำลังค่าน้อยนี้ ได้ค่าเข้าใกล้ 1 หรือกล่าวได้ว่าตัวแปรนี้ไม่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือน 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*(1^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*(1^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 = 0.622517
Proportion of variance explained (Ra^2) = 0.9786 (97.86%)
Adjusted coefficient of multiple determination (Ra^2) = 0.9785 (97.85%)
Durbin-watson test for autocorrelation = 0.604

```

ค่า R² 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

ค่า b และ n ที่ได้จากการประมวลผล

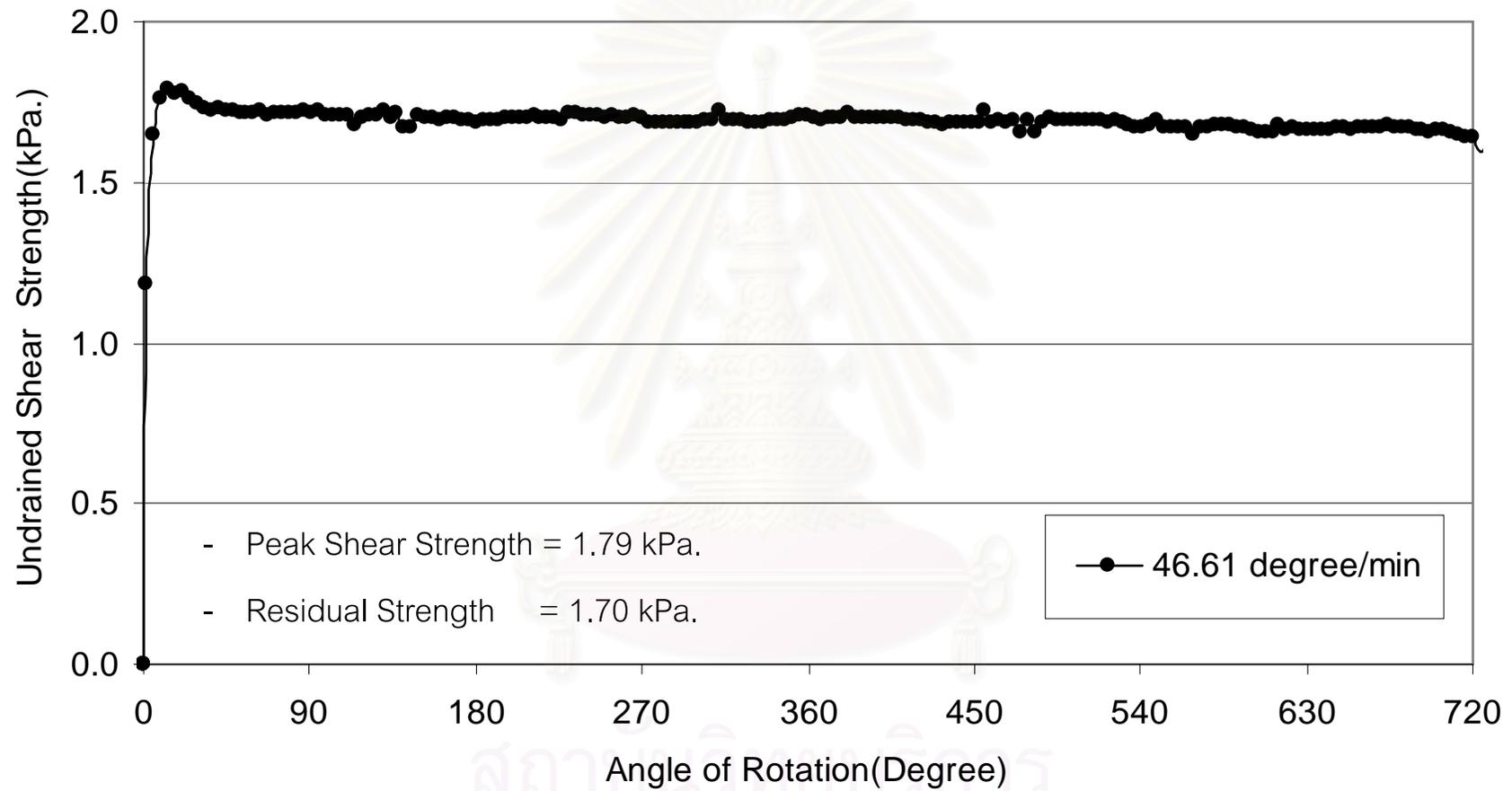
```

---- Analysis of Variance ----

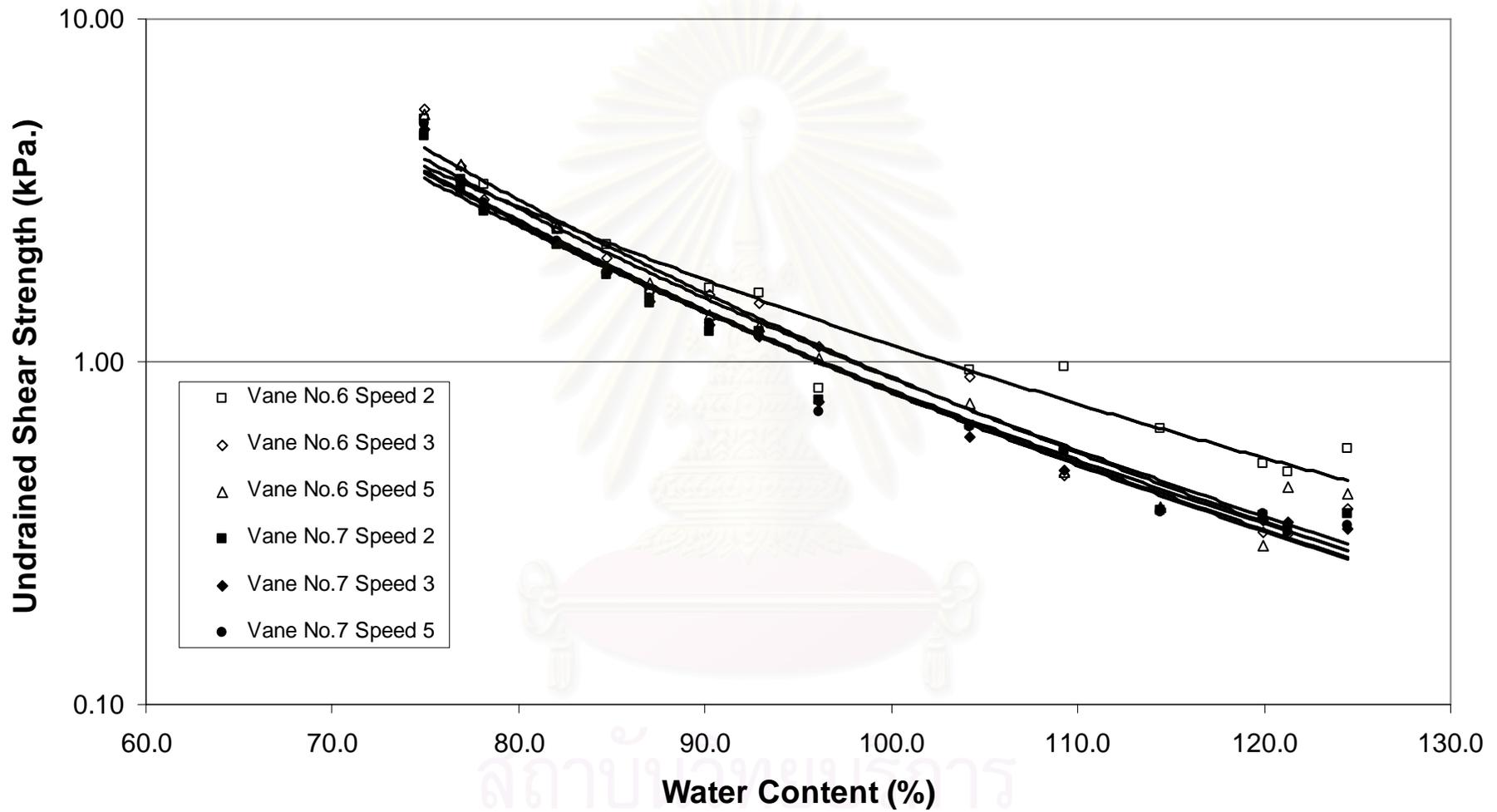
```

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			

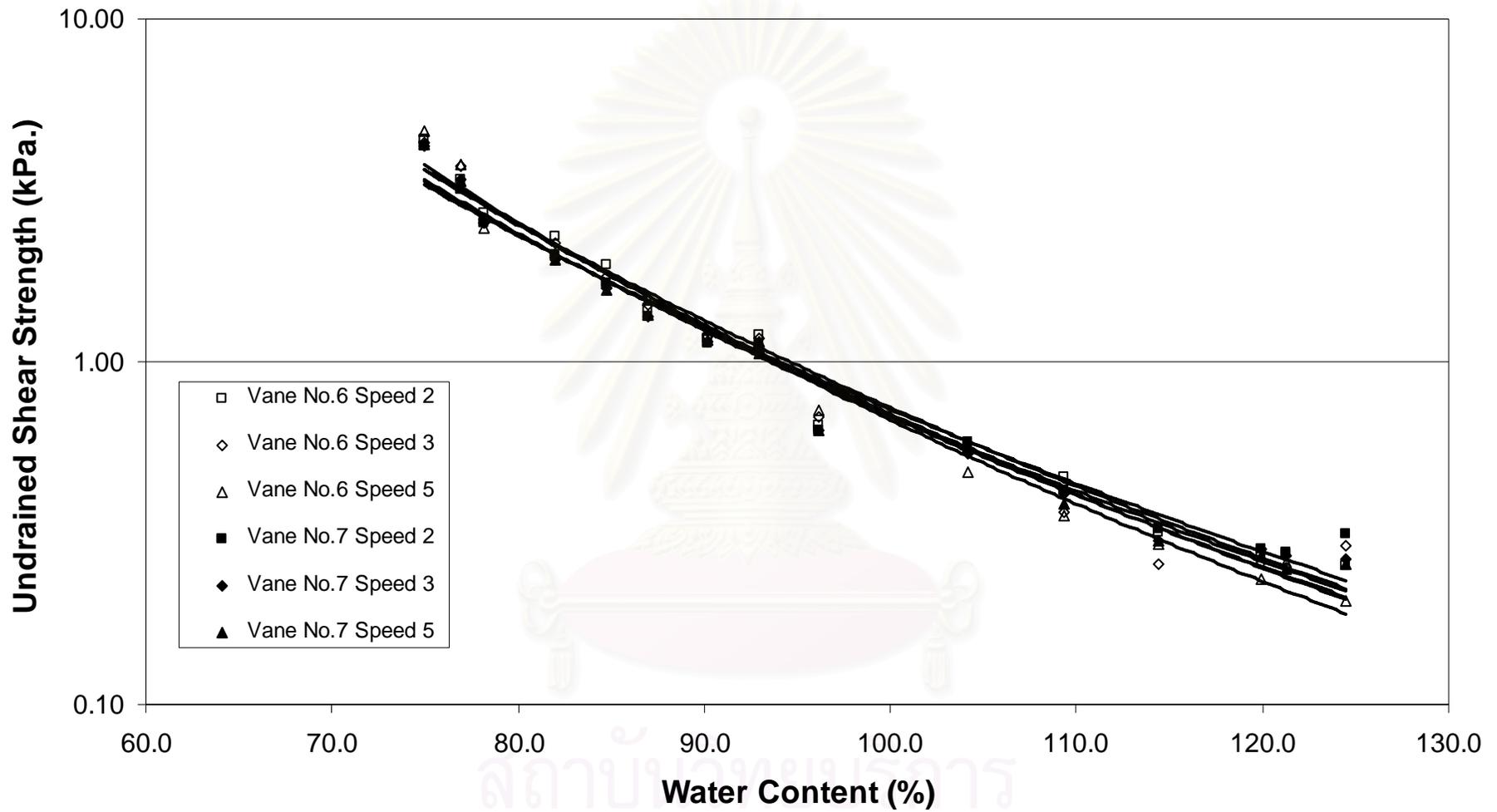
รูปที่ 4.13 ตัวอย่างผลการประมวลผลด้วยโปรแกรม Nonlin



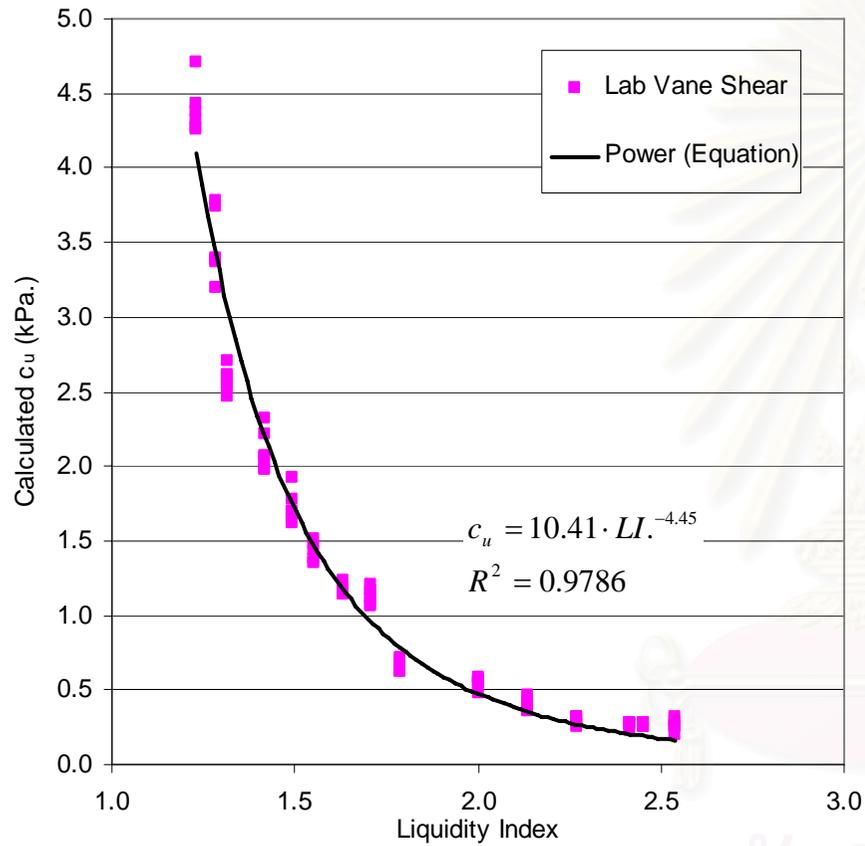
รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ปริมาณความชื้น 84.72% โดยใช้ใบพัดขนาด 6x9 ซม.



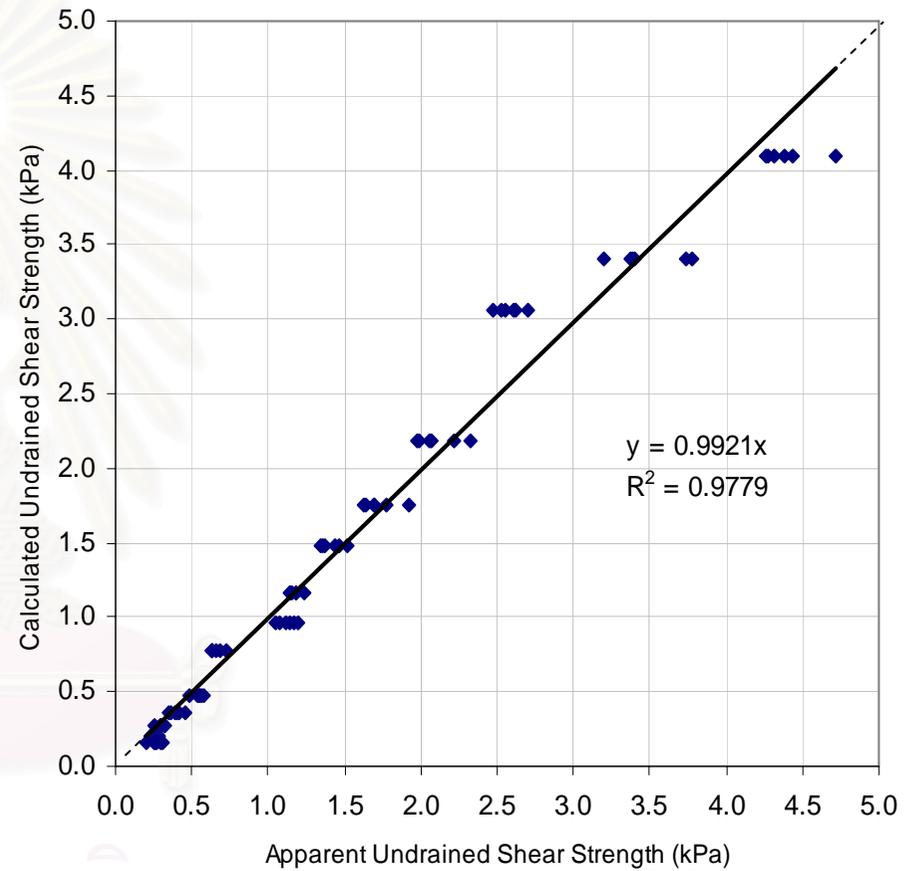
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินกับ Water Content (%) จากการประเมินแบบ Peak Shear Strength



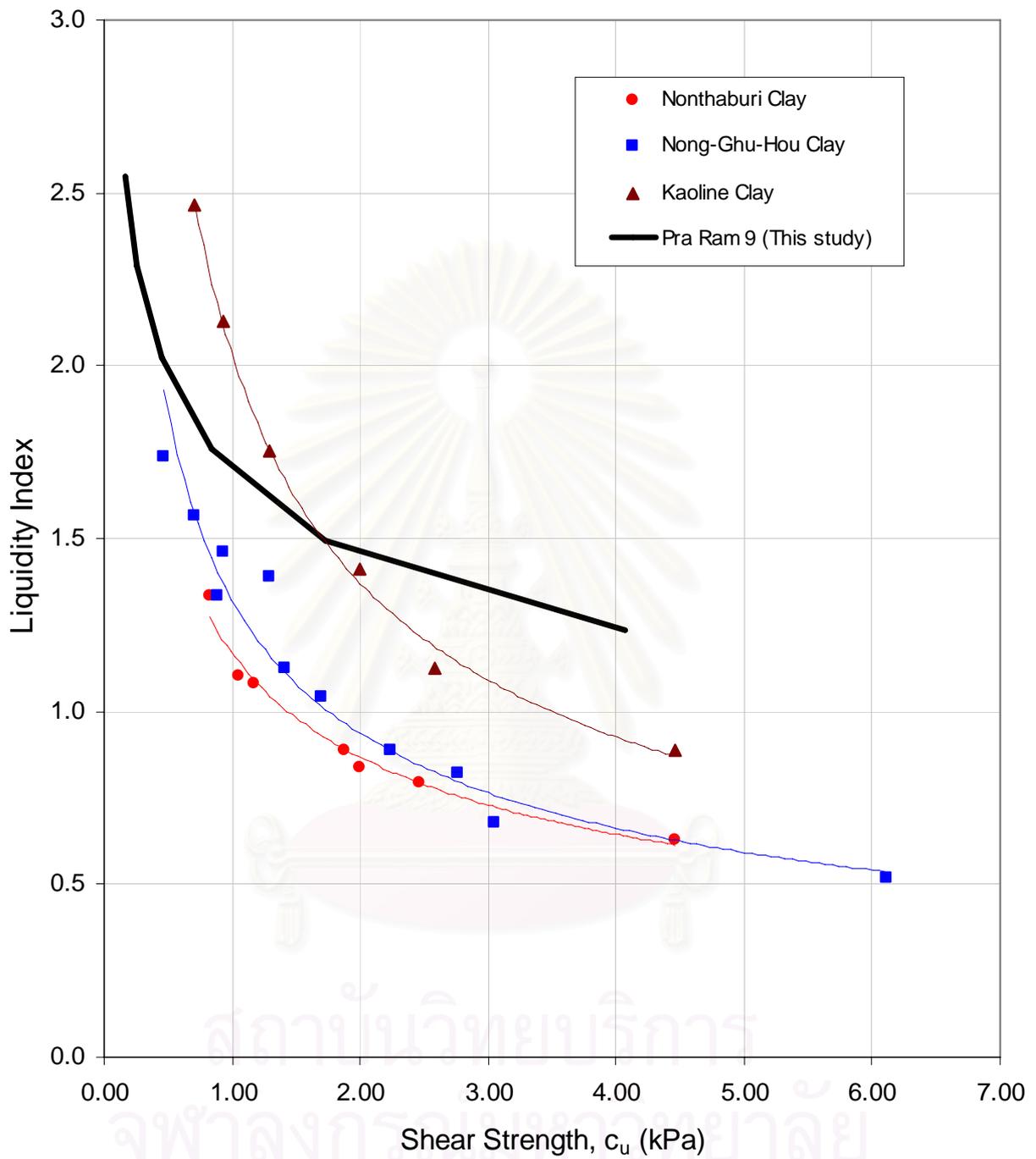
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินกับ Water Content (%) จากการประเมินแบบ Residual Strength



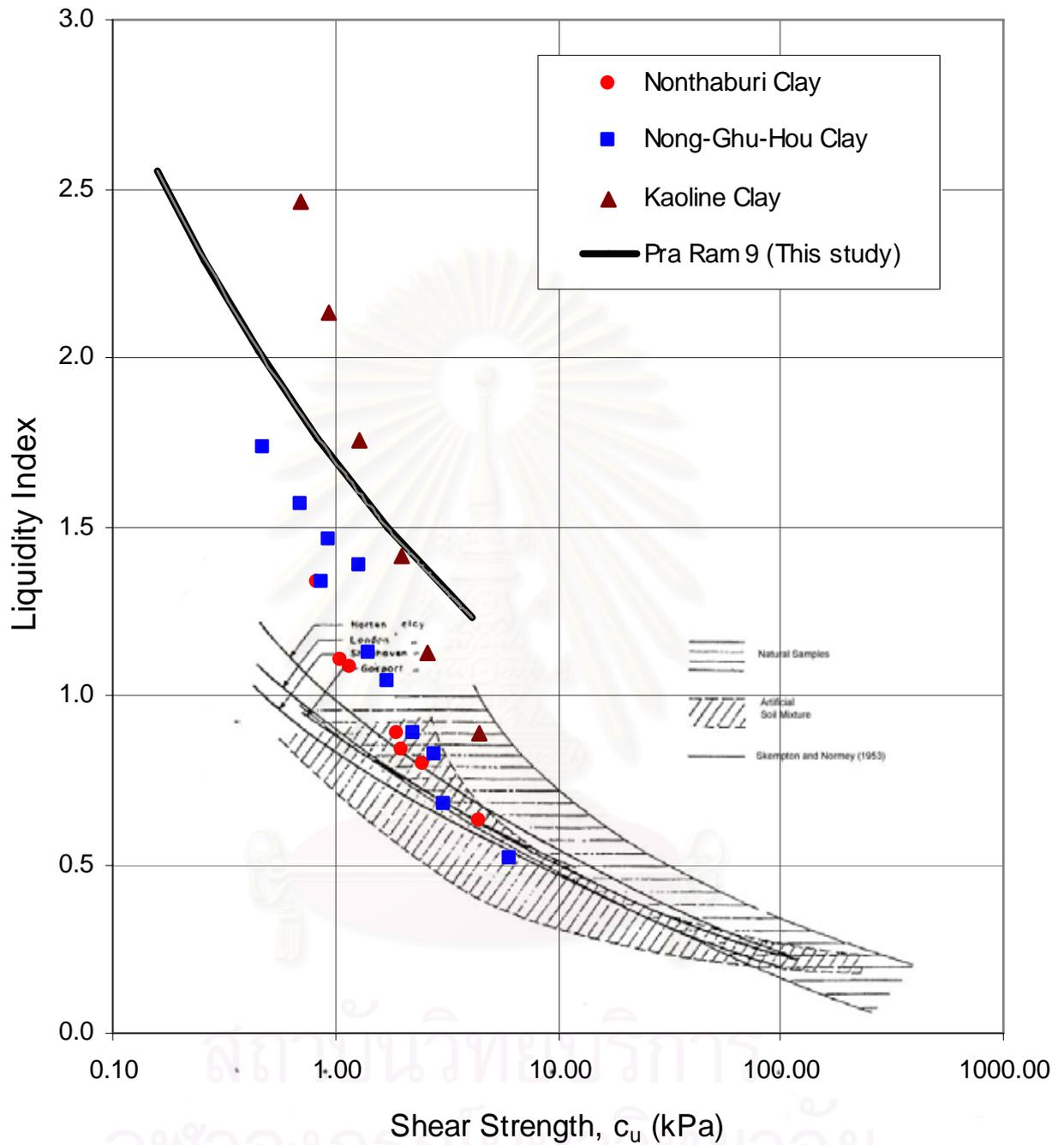
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินจากสมการที่ 4.5 กับ Liquidity Index จากการโปรแกรม NONLIN



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินจากสมการที่ 4.5 กับ ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่ปรากฏจากการโปรแกรม NONLIN



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

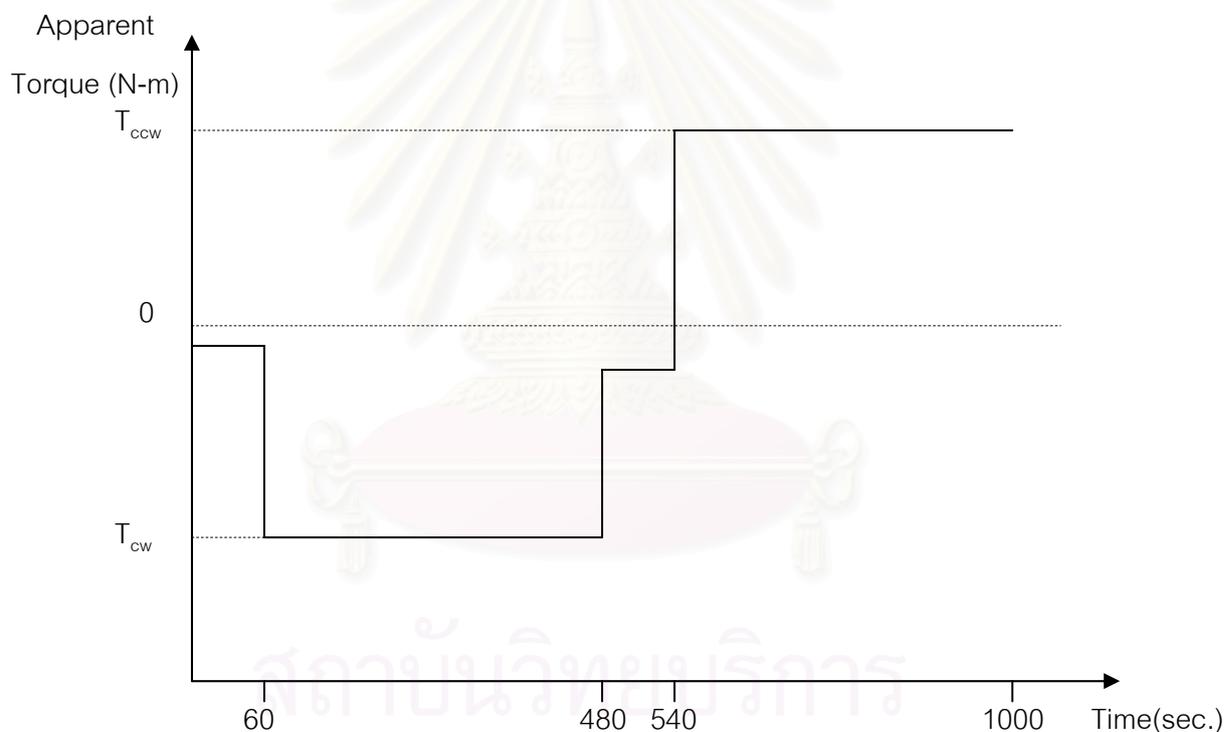


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนกับ Liquidity Index ของดินบริเวณ ถนนพระราม 9 เปรียบเทียบกับ ตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า, ดินเหนียว นนทบุรี Kaoline Clay และ Skempton Northley (1953) บน log-log scale

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



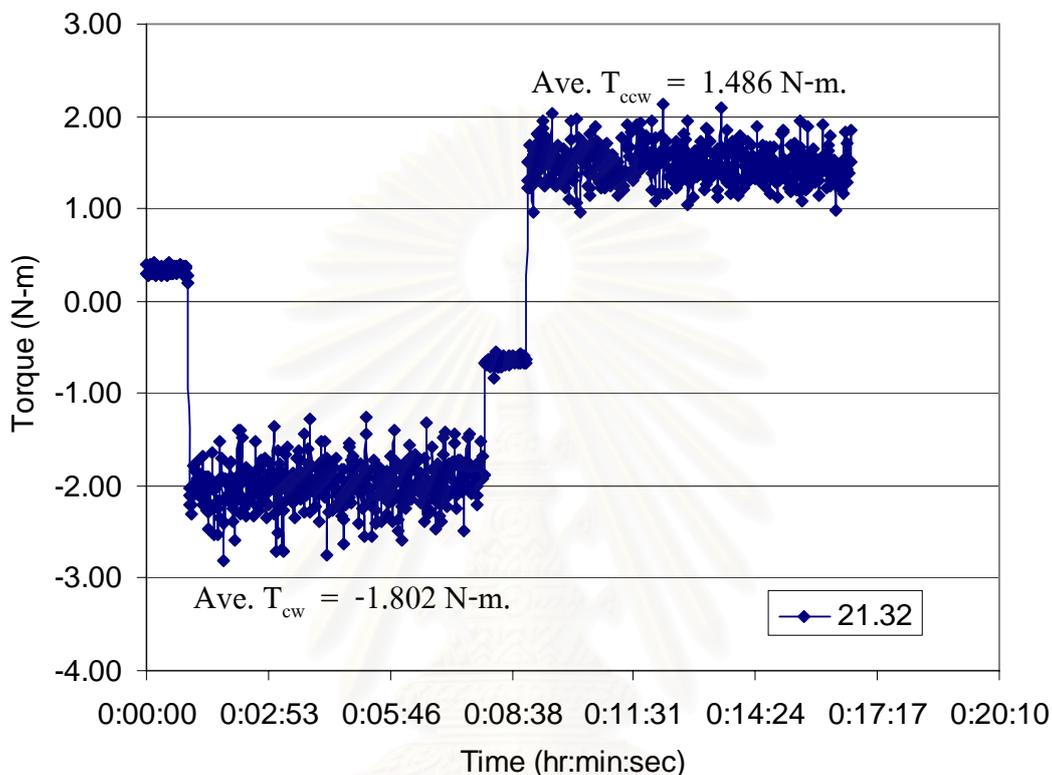
รูปที่ 4.21 วิธีการประเมินความหมายของค่าแรงบิดที่ปรากฏจากผลการทดสอบหาความหนืด

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

โดย T_{cw} คือค่าแรงบิดเฉลี่ยที่ได้จากการหมุนทิศทางตามเข็มนาฬิกา

T_{ccw} คือค่าแรงบิดเฉลี่ยที่ได้จากการหมุนทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

จากสมการที่ 4.3 นำมาคำนวณหาค่าความหนืดโดยค่า $T_{reading}$ 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

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

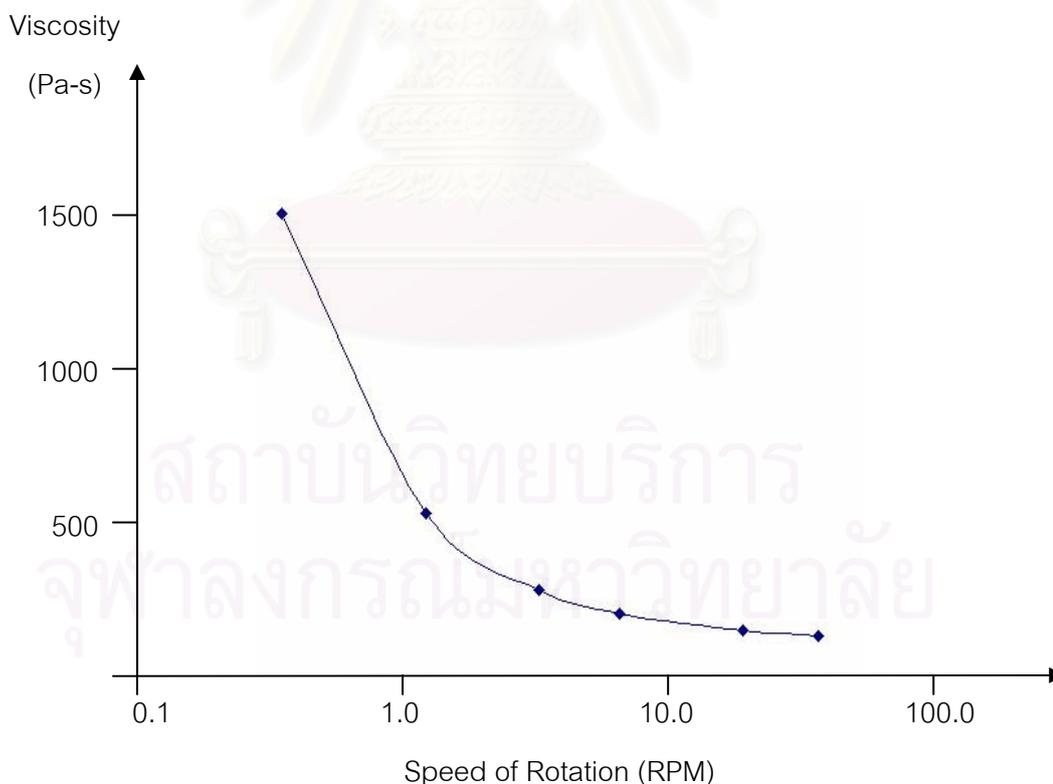
นำค่าที่ได้จากการทดสอบมาคำนวณหาค่าความหนืดที่ปรากฏจากสมการที่ 4.5

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

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

$$\eta = a \cdot N^b \tag{4.9}$$

- โดย η คือค่าความหนืดที่ปรากฏ, Pa-s
- N คืออัตราเร็วรอบในการหมุนแกนหมุน , RPM
- a คือตัวแปรของความหนืด ที่เปลี่ยนแปลงผกผันกับความขึ้น
- b คือตัวแปรคงที่ของความหนืด



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดที่ปรากฏกับอัตราเร็วในการหมุนต่างๆ ที่ ปริมาณความขึ้น 111.33%

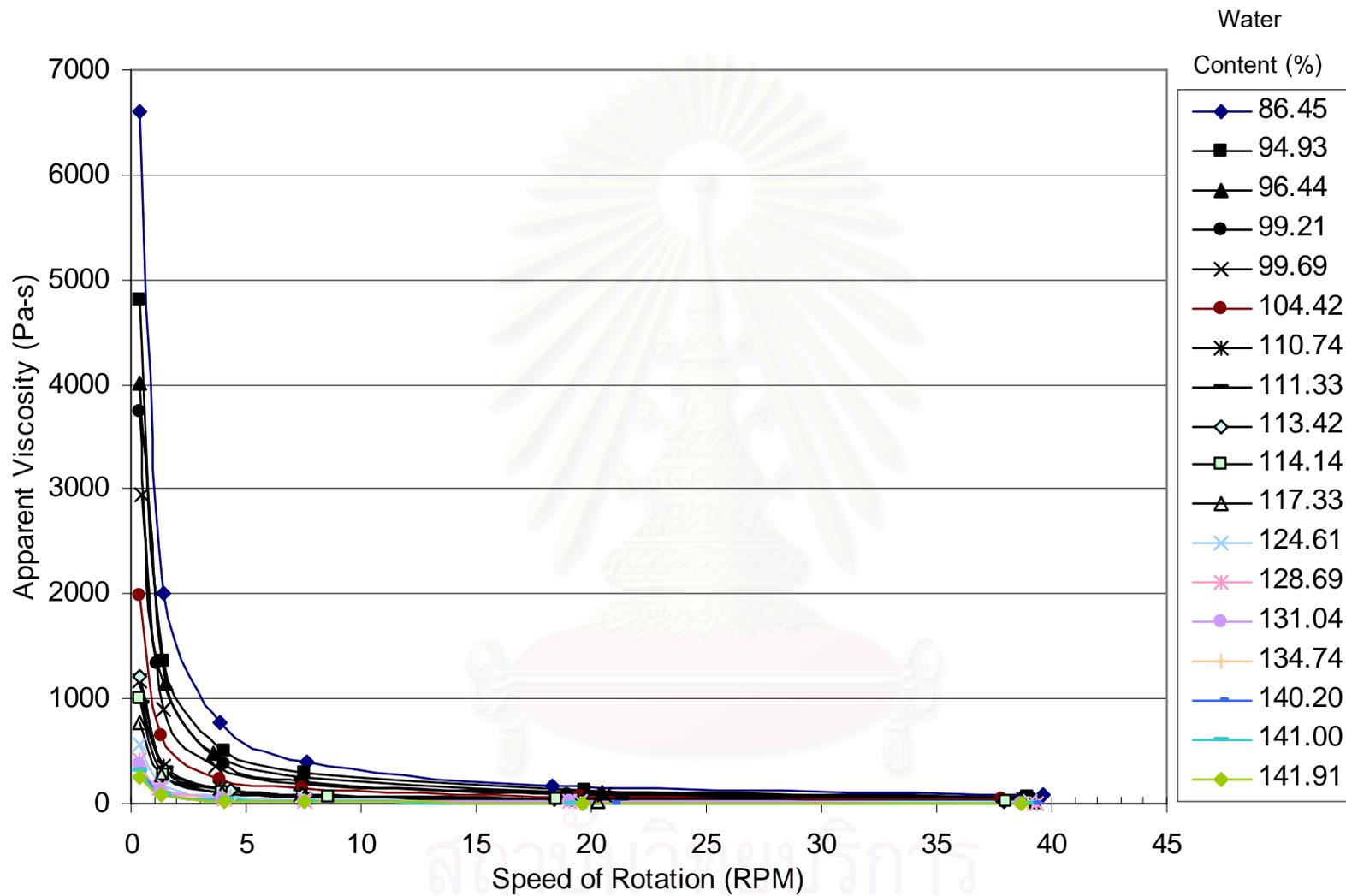
4.4.2 ผลการทดสอบค่าความเหนียวของดินเหนียวด้วยเครื่องมือ Rotational Viscometer

จากผลการทดสอบหาค่าความเหนียวด้วยเครื่อง Rotational Viscometer ที่ความชื้นของดินเหนียวตั้งแต่ 86 -142% ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.24 จากนั้น นำค่าที่ได้มาพล็อตด้วย log-log Scale ระหว่างความเหนียว และอัตราเร็วรอบในการหมุนโดยแปลงค่าความชื้นเป็นดัชนีเหลว ดังรูปที่ 4.25 ความเหนียวที่ได้เป็นความเหนียวที่ปรากฏ ณ. อุณหภูมิหนึ่ง และอัตราเร็วในการหมุนค่าหนึ่ง จากกราฟที่ได้พบว่าที่ดัชนีเหลวใดๆ มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง โดยมีความชันคงที่ และมีความเหนียวลดลงเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น แสดงถึงลักษณะของดินเหนียวที่มีคุณสมบัติของของไหลแบบนอนนิวโทเนียน มีลักษณะคล้ายกับประเภทสโตพลาสติก แต่มีความเค้นคลากจำนวนหนึ่งก่อน จึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมในของไหล หลังจากมีการเคลื่อนที่แล้วจะมีความเหนียวลดลงเมื่ออัตราเร็วรอบเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเริ่มทำการหมุนเกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ และเพิ่มอัตราเร็วในการหมุนของแกนหมุนในแต่ละการทดสอบ ทำให้โครงสร้างของดินมีการเรียงตัวเพื่อพัฒนากำลังได้ยากขึ้น จึงเกิดแรงต้านการเคลื่อนที่น้อยลง มีผลทำให้ความเหนียวในดินเหนียวลดลง สำหรับค่าความชื้นในดินที่เพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้ดินมีการจับตัวที่หลวมขึ้น จึงเกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ลดลง มีผลทำให้ความเหนียวลดลง และเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมากจนถึงจุดๆ หนึ่ง ค่าความเหนียวของดินเหนียวที่ปรากฏ มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเพิ่มอัตราเร็ว หรือมีผลกระทบต่ออัตราเร็วรอบน้อยลง ซึ่งกลายเป็นคุณสมบัติของไหลแบบนิวโทเนียน นั่นคือปริมาณความชื้นในดินสูงมากจนปริมาณดินไม่มีผลกระทบต่ออัตราเร็วในการหมุนของแกนหมุน

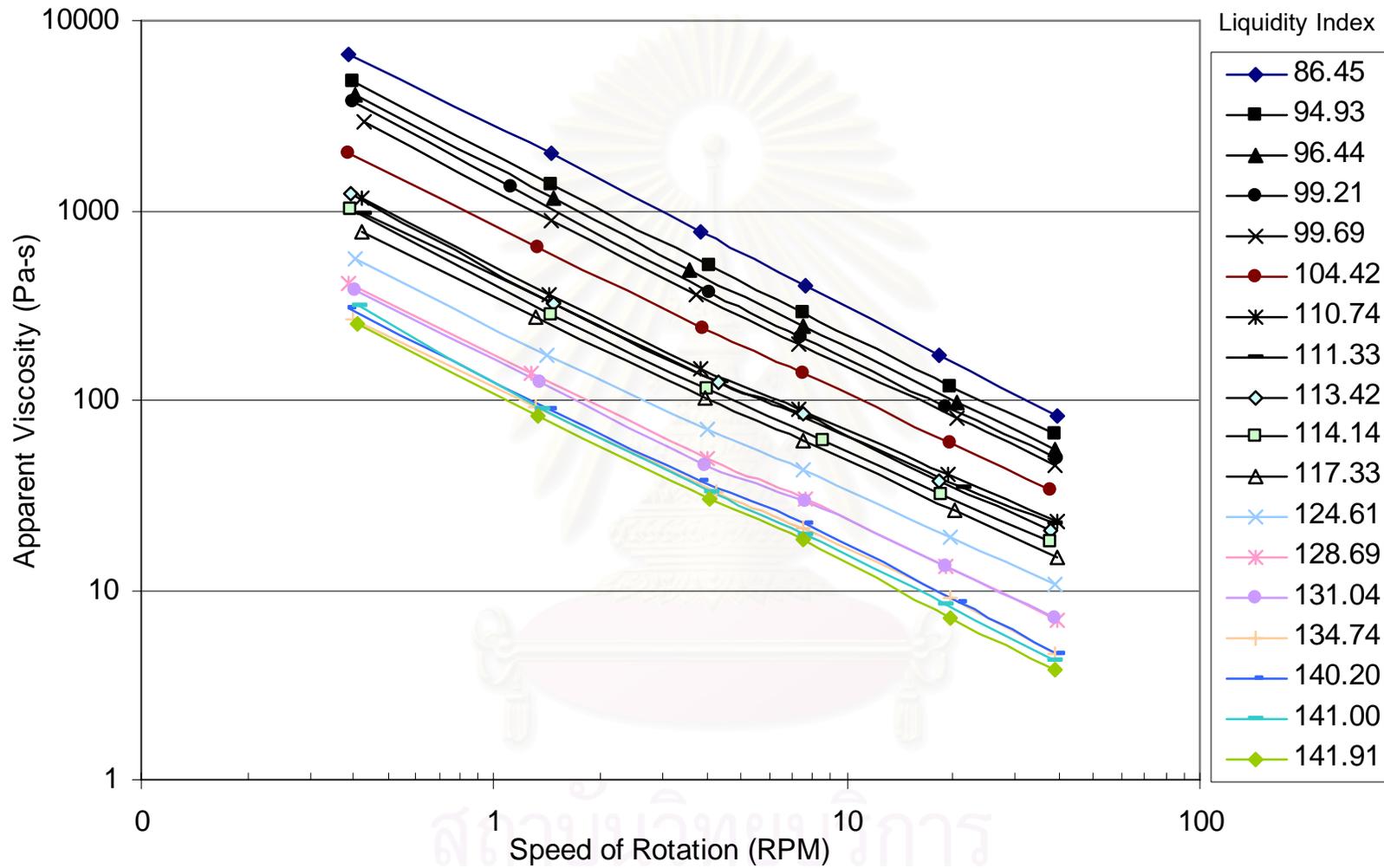
เมื่อนำผลการทดสอบไปทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ด้วยโปรแกรม NONLIN โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีเหลวกับอัตราเร็วในการหมุนของแกนหมุนที่มีผลต่อความเหนียว ได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.10

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

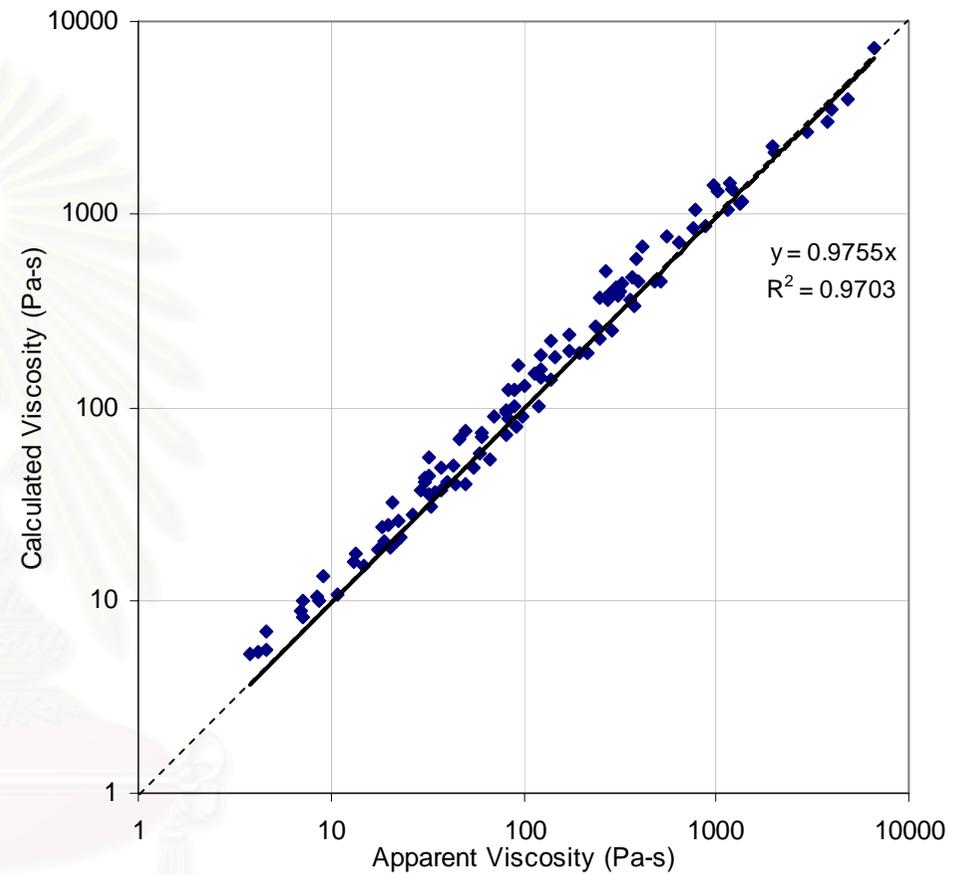
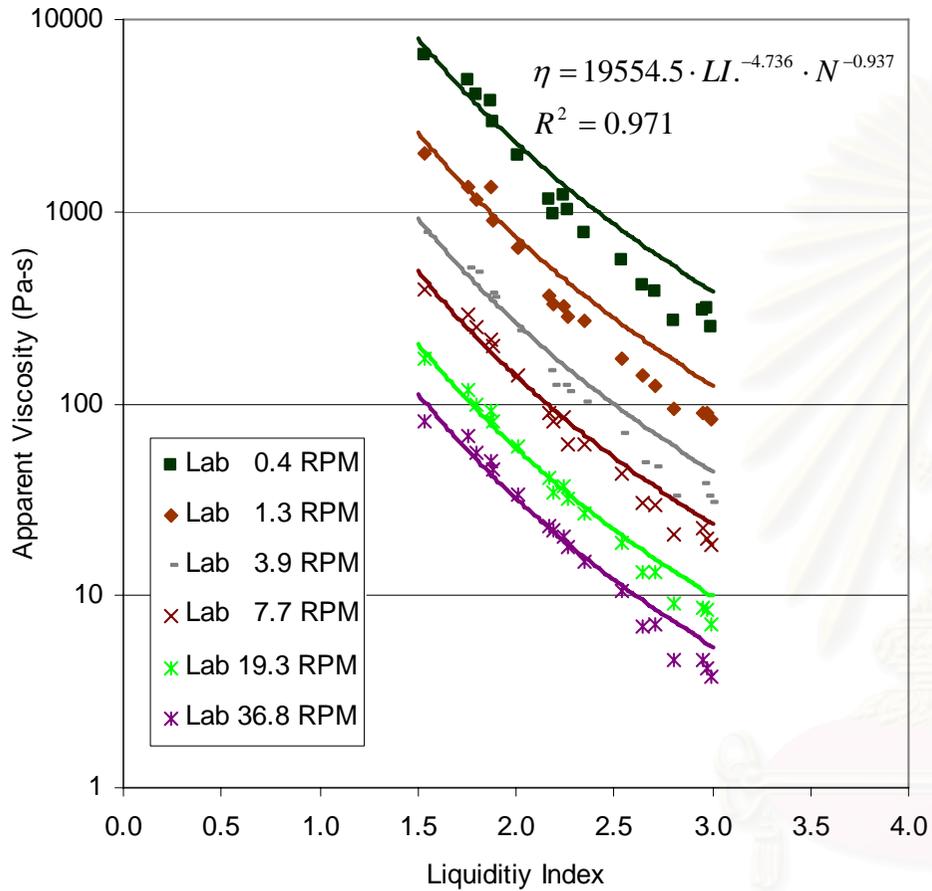
จากสมการที่ 4.10 สามารถนำมาพล็อตร่วมกับผลที่ได้จากการทดสอบ โดยให้พล็อตระหว่าง ดัชนีเหลว กับค่าความเหนียวมาพล็อตบน log scale แสดงดังรูปที่ 4.26



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 ซึ่งทำการจัดรูปใหม่เพื่อหาค่าดัชนีไหลวดังสมการที่ 4.9 แล้วนำค่าดัชนีไหลวมาคำนวณด้วยสมการที่ 4.5 เพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือน

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

โดยที่ η = ความหนืดที่ปรากฏ (Apparent Viscosity), Pa-s.

N = ความเร็วในการหมุน , รอบต่อนาที

หรือจะสามารถทำการคำนวณได้เร็วยิ่งขึ้นได้โดยการนำสมการที่ 4.5 มาจัดรูปแบบใหม่เพื่อหาค่าดัชนีไหลวจะได้

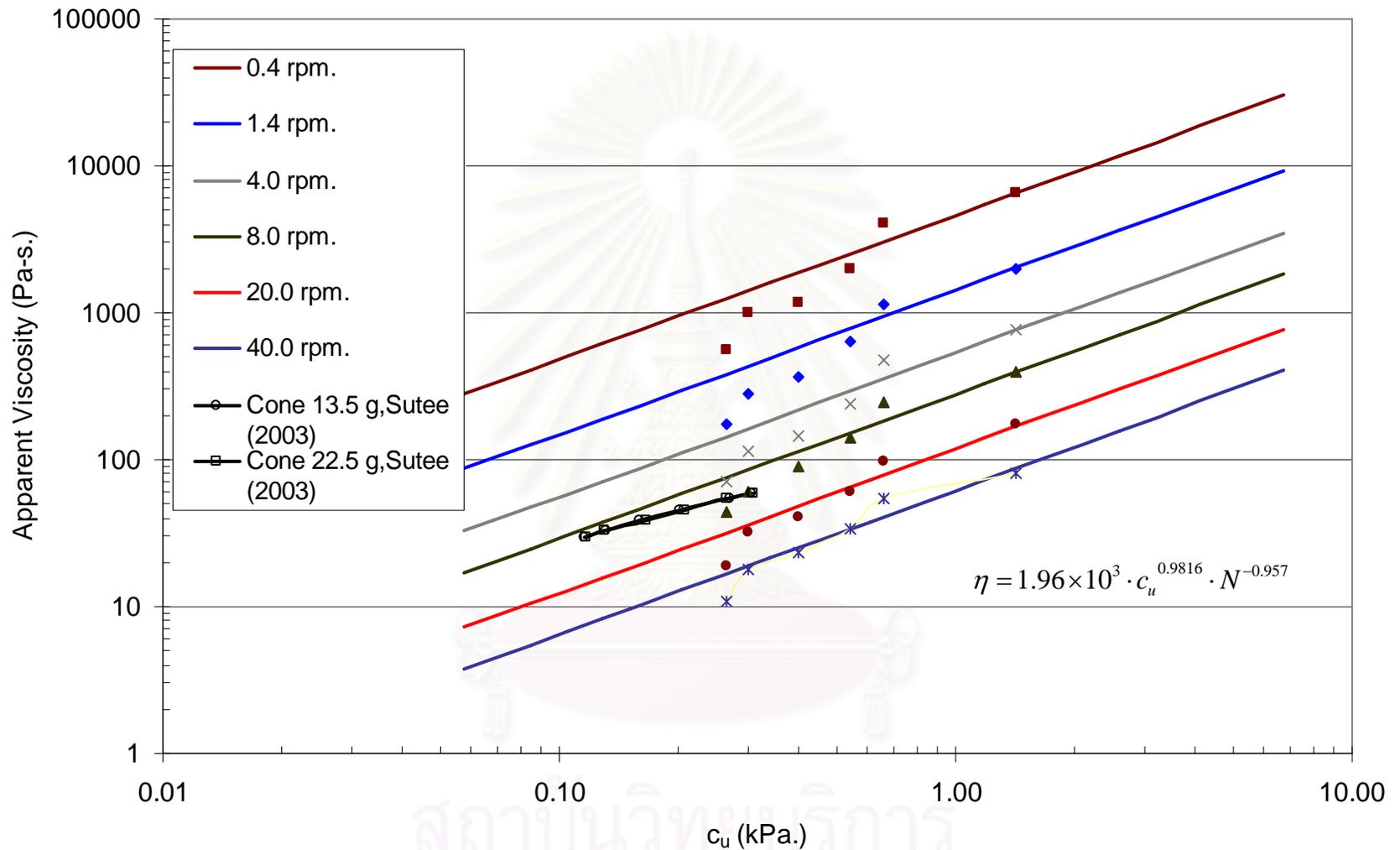
$$L.I. = (0.096 \cdot c_u)^{-0.2243} \quad (4.10)$$

โดยที่ c_u = กำลังรับแรงเฉือน, kPa

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

$$\begin{aligned} (0.096 \cdot c_u)^{-0.2243} &= \left(\frac{10^5}{5.114 \cdot N^{0.937} \cdot \eta} \right)^{0.2285} \\ \therefore \eta &= 1.96 \times 10^3 \cdot c_u^{0.9816} \cdot N^{-0.957} \quad \text{Pa-s} \quad (4.11) \end{aligned}$$

โดยสมการที่ 4.11 เป็นความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดสอบหาค่าความหนืดด้วยเครื่อง Rotational Viscometer ที่ใช้ในการทดสอบเท่านั้น



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

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังรับแรงเฉือน กับความหนืดของดินเหนียวโดยนำดินจากบริเวณพระราม 9 มาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 แล้วนำมาทำการทดสอบกับเครื่องทดสอบกำลังรับแรงเฉือนด้วยใบพัดในห้องทดสอบ และเครื่อง Rotational Viscometer ซึ่งเป็นเครื่องที่ได้ทำการปรับปรุงขึ้นใหม่ตามมาตรฐาน ASTM C1276 เพื่อการทดสอบในครั้งนี้ จากผลการทดสอบสามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1. ผลการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนสำหรับดินเหนียวในช่วงค่าความชื้น 75 - 125% พบว่าผลกระทบจากอัตราเร็วในการหมุน และขนาดของใบพัดที่มีผลต่อภาชนะมีผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความชื้น โดยอัตราเร็วในการเฉือนที่ระนาบวิบัติซึ่งอยู่ในช่วง 1.22 – 14.583 ชม/นาที หรือประมาณ 12 เท่า และผลกระทบจากขนาดของใบพัด จะให้ผลต่างกันไม่เกิน 5%

2. ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบกำลังรับแรงเฉือนด้วยใบพัดในห้องทดสอบ จะมีความสัมพันธ์กับค่าดัชนีเหลวดังสมการ

$$c_u = 10.41 \cdot LI^{-4.45} \quad \text{kPa.}$$

3. ผลการสอบเทียบเครื่องทดสอบหาค่าความหนืด Rotational Viscometer ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ โดยเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบมีค่า K เท่ากับ 0.0022236 สามารถหาค่าความหนืดของวัสดุได้ในช่วงระหว่าง 2.4 – 11450 Poise และสามารถศึกษาพฤติกรรมของไหลแบบนอนนิวโทเนียนได้ทุกประเภท โดยจะทราบค่าความหนืดของวัสดุที่ใช้ทดสอบสำหรับเครื่องทดสอบนี้ ได้จากสมการ

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

4. ผลการทดสอบหาค่าความหนืดสำหรับดินเหนียว ในช่วงค่าความชื้น 86 -142% ที่อัตราเร็วรอบในการหมุนแกนประมาณ 0.39 - 38.6 รอบ/นาที พบว่าดินเหนียวที่ใช้ในการทดสอบมีคุณสมบัติของของไหลแบบนอนนิวโทเนียน คล้ายกับประเภทสโตพลาสติก แต่มีความ

เค้นคลากจำนวนหนึ่งก่อน จึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมในของไหล หลังจากมีการเคลื่อนที่แล้วจะมีความหนืดลดลงเมื่ออัตราเร็วรอบเพิ่มขึ้น

5. ค่าความหนืดของดินเหนียวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง Rotational Viscometer จะมีความสัมพันธ์กับค่าดัชนีเหลว และอัตราเร็วในการหมุนแกนหมุนดังสมการ

$$\eta = 19554.5 \cdot LI^{-4.376} \cdot N^{-0.937} \quad \text{Pa-s}$$

6. จากผลการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบกำลังรับแรงเฉือนด้วยใบพัดในห้องทดสอบ และการทดสอบหาค่าความหนืดของดินเหนียวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง Rotational Viscometer จะมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\eta = 1.96 \cdot 10^3 \cdot c_u^{0.9816} \cdot N^{-0.937} \quad \text{Pa-s}$$

5.2 ข้อเสนอแนะในการศึกษาเพิ่มเติม

ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมต่อสำหรับอนาคต สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ทำการทดสอบตัวอย่างดินเหนียวให้มีความหลากหลาย โดยใช้ตัวอย่างดินเหนียวบริเวณริมแม่น้ำ หรือตัวอย่างดินบริเวณชายฝั่งทะเล เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานจริง
2. การหาค่าความหนืดที่ได้จากการทดสอบในงานวิจัยนี้ ไม่ได้คำนึงถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ โดยจะสามารถปรับปรุงที่ภาชนะใส่ดินให้มีความสามารถในการเพิ่ม-ลดอุณหภูมิ
3. พิจารณาถึงอัตราเร็วรอบในการหมุนของแกนหมุนที่เหมาะสมกับการใช้งานจริง หรือเพิ่ม-ลดอัตราเร็วรอบในการหมุนให้มีช่วงกว้างขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

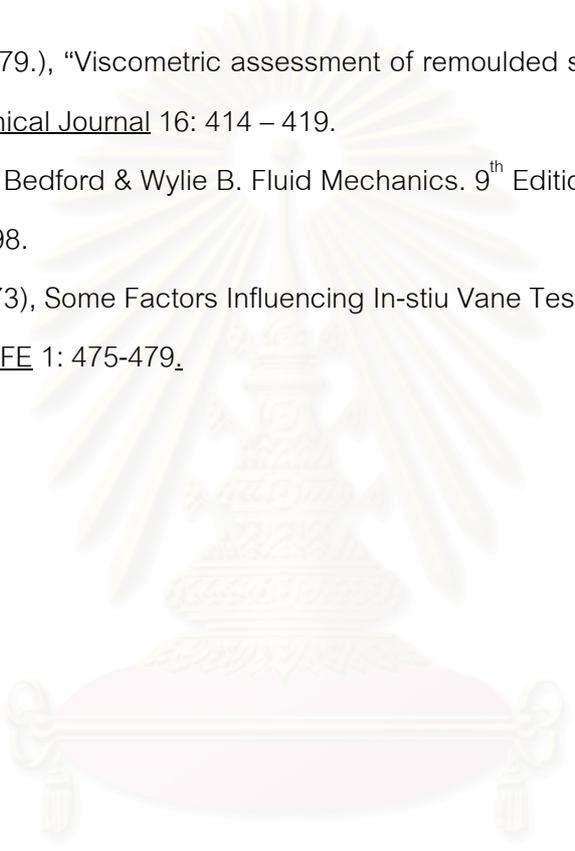
- จักรี จัตตะหะศรี. ชลศาสตร์. กรุงเทพฯ : ไลบรารี นาย, 2538.
- สถาพร คูวิจิตรจางู. ทดลองปฏิสัมพันธ์ศาสตร์. กรุงเทพฯ : ไลบรารี นาย, 2541.
- สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์. วิศวกรรมปฏิสัมพันธ์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2540.
- สุทธิ มุกดาติลก. ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนกับค่าความหนืดของดินเหนียว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- วรุณ คุณวาสี. ไฮดรอลิกส์. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ไทยวัฒนาพานิชย์ , 2529.

ภาษาอังกฤษ

- Annual book of ASTM standards. (2006), C 1276 – 94, Standard Test Method for Measuring the Viscosity of Mold Powders Above Their Melting Point Using a Rotational Viscometer. Vol. 15.01, pp. 367-369.
- Annual book of ASTM standards. (2006), D 2196 – 99, Standard Test Method for Rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational (Brookfield type) Viscometer. Vol. 06.01, pp. 228-232.
- Annual book of ASTM standards. (2006), D 2573 – 01, Standard Test Method for Field Vane Test in Cohesive Soil. Vol. 04.08, pp. 259-267.
- Annual book of ASTM standards. (2006), D 4648 – 05, Standard Test Method for Laboratory Miniature Vane Shear Test for saturated Fine-Grained clayey soil. Vol. 04.09, pp. 801-807.
- British Standard Institution. (1975.), Methods of test for soil for civil engineering purposes , BS 1377, pp 17-20.
- Bjerrum, L. (1972), Embankments on Soft Ground, 5th ASCE Specialty Conference on Performance of Earth and Earth Supported Structures, Purdue University, U.S.A., Vol. 2, pp 1-54, Also published in Norwegian Geotechnical Institute, Publication,95

- Cadling, L. & Odenstad, S. (1950), The Vane Borer: An Apparatus for determining the Shear Strength of the Clay Soils directly in the ground, Royal Swedish Geotechnical Institute, Proceedings 2.
- Chan I.C. (1993), Ko-Consolidated Vane Testing. Master's Thesis, Department of Engineering, Asian Institute of Technology.
- Das, B.J Principles of Foundation Engineering. 4th Edition. U.S.A : Brooks/Cole Publishing Company, 1999.
- Donald,L.B.,Jordan,D.O.,& Parker R.J. (1977), The Vane Test-a Critical Appraisal, Proceedings of the 9th ICSMFE (Tokyo) 1: 81-88.
- H.G. Bass, Introduction to Engineering Measurements. London : McGRAW-HILL, 1971.
- Jacques Locat. (1988).” Viscosity, yield stress, remolded strength, and liquidity index relationships for sensitive clay”, Canadian Geotechnical Journal V25, 4: 799-806.
- James Worner, P.E., Practical Handbook of Grouting. 1st Edition. U.S.A : John Wiley & Sons, 2004.
- J. Kenneth Torrance. (1987), Shear resistance of remoulded by viscometric and fall-cone methods: a comparison for the Canadian sensitive marine clays, Canadian Geotechnical Journal 24: 318-322.
- Kenney, T.C., & Landa, A. (1965), Vane Triaxial Apparatus, Proceedings VI ICSMFE (Montreal) 1, pp 269-272.
- Lambe, T.W.; and Whitman, R.W. Soil Mechanics. New York : Willey, 1969.
- Law, K.T. (1985), Triaxial Vane Tests on Soft Marine Clay, Canadian Geotechnical Journal 6 (1979): 11-18.
- Manual of Drilling Fluids Technology. Volume I Section II, MUD TESTING – TOOL AND TECHNIQUES, Viscosity-Marsh Funnel Viscometer ,pp.4-5.
- Manual of Drilling Fluids Technology. Volume I Section II, MUD TESTING – TOOL AND TECHNIQUES, Viscosity-Baroid Rheometer ,pp.5-6.
- Mitchell, J.K. Fundamental of Soil Behavior. 2nd Edition. U.S.A : John Wiley & Sons,1993.
- A. Perez-Foguet, A. Ledesma & A. Huerta (1998), Analysis of The Vane Test Considering Size and Time Effects, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 23: 343-412.
- Satoshi Y. (1989), Some Aspects of the Laboratory Vane Shear Test, Tsuchi-To-Kiso/ Soil

- Mechanics Foundation Engineering V37, 8: pp 21-26 (Published in Japanese).
- Seah T.H. and Lai K.C. (2003), Strength and Deformation Behavior of Soft Bangkok Clay, Geotechnical Testing Journal V26, 4.
- Seah T.H., Sangtian N. & Chan I.C. (2003), Vane Shear Behavior of Soft Bangkok Clay, Geotechnical Testing Journal V 27, 1.
- Skempton, A.W. & Northey, R.D. (1953.), "The sensitivity of Clay", Geotechnique 3,pp. 30-53
- S.P. Bentley. (1979.), "Viscometric assessment of remoulded sensitive clays", Canadian Geotechnical Journal 16: 414 – 419.
- Streeter V., K.W. Bedford & Wylie B. Fluid Mechanics. 9th Edition. Singapore : McGRAW-HILL, 1998.
- Wiesel, C.E. (1973), Some Factors Influencing In-situ Vane Test Results, Proceedings VIII ICSMFE 1: 475-479.

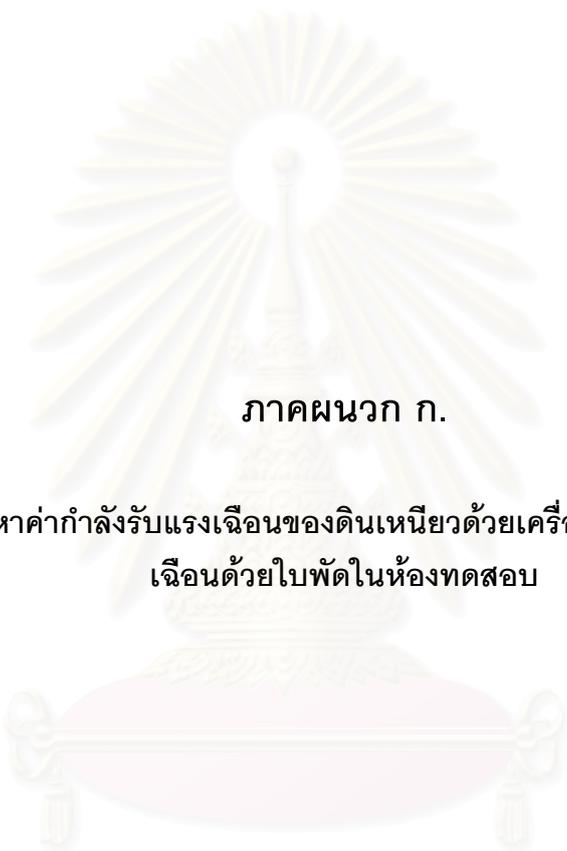


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก.

ผลการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวด้วยเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรง
เฉือนด้วยใบพัดในห้องทดสอบ

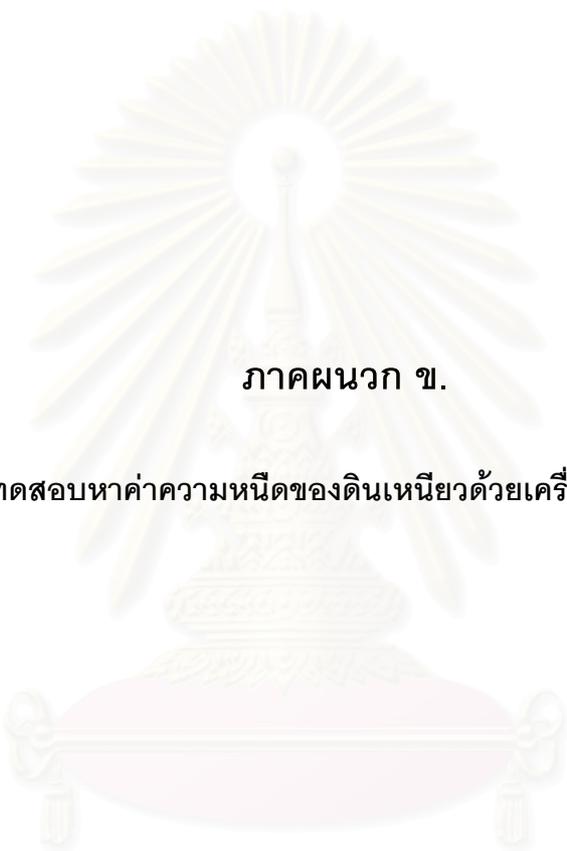
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-1 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบ Peak Shear Strength ของดินเหนียว ด้วยเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนด้วยใบพัดในห้องทดสอบ

Water Content(%) :			74.9	76.9	78.1	82.0	84.8	87.0	90.2	92.9	96.2	104.2	109.3	114.4	119.9	121.3	124.5
Vane Blade No.	Size	Speed of Rotation (°/m)	Peak Shear Strength (kPa)														
6	D=3 cm., H=6 cm.	46.6	5.1	3.4	3.3	2.5	2.2	1.6	1.6	1.6	0.8	1.0	1.0	0.6	0.5	0.5	0.6
		139.3	5.4	3.7	3.0	2.5	2.0	1.6	1.6	1.5	1.1	0.9	0.5	0.4	0.3	0.3	0.4
		278.5	5.3	3.8	2.9	2.5	1.9	1.7	1.4	1.3	1.0	0.8	0.5	0.4	0.3	0.4	0.4
7	D=6 cm., H=9 cm.	46.6	4.5	3.2	2.7	2.2	1.8	1.5	1.2	1.2	0.8	0.6	0.6	0.4	0.4	0.3	0.4
		139.3	4.7	3.4	2.8	2.2	1.8	1.5	1.3	1.2	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3
		278.5	5.0	3.4	2.9	2.2	1.8	1.5	1.3	1.2	0.7	0.6	0.6	0.4	0.4	0.3	0.3

ตารางที่ ก-2 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบ Residual Strength ของดินเหนียว ด้วยเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนด้วยใบพัดในห้องทดสอบ

Water Content(%) :			74.9	76.9	78.1	82.0	84.8	87.0	90.2	92.9	96.2	104.2	109.3	114.4	119.9	121.3	124.5
Vane Blade No.	Size	Speed of Rotation (°/m)	Residual Strength (kPa)														
6	D=3 cm., H=6 cm.	46.6	4.4	3.4	2.7	2.3	1.9	1.4	1.2	1.2	0.7	0.6	0.5	0.3	0.3	0.3	0.3
		139.3	4.4	3.7	2.5	2.2	1.8	1.5	1.2	1.2	0.7	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3
		278.5	4.7	3.8	2.5	2.1	1.7	1.5	1.2	1.1	0.7	0.5	0.4	0.3	0.2	0.3	0.2
7	D=6 cm., H=9 cm.	46.6	4.3	3.2	2.6	2.1	1.7	1.3	1.1	1.1	0.6	0.6	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3
		139.3	4.3	3.4	2.6	2.0	1.6	1.4	1.1	1.1	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3
		278.5	4.3	3.4	2.6	2.0	1.6	1.4	1.2	1.1	0.6	0.6	0.4	0.3	0.3	0.2	0.3



ภาคผนวก ข.

ผลการทดสอบทดสอบหาค่าความหนืดของดินเหนียวด้วยเครื่อง Rotational Viscometer

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-1 ผลการทดสอบค่าความหนืดของดินเหนียว ด้วยเครื่อง Rotational
Viscometer

W.C.= 86.4%	Speed of Rotation (RPM)	0.4	1.4	3.9	7.7	18.3	39.6
	Apparent Torque (N-m)	5.7	6.5	6.6	6.8	7.1	7.2
	Apparent Viscosity (Poise)	6594	2015	765.0	396.1	173.3	81.6
W.C.= 94.9%	Speed of Rotation (RPM)	0.4	1.5	4.1	7.5	19.7	39.0
	Apparent Torque (N-m)	4.3	4.4	4.6	4.9	5.2	5.9
	Apparent Viscosity (Poise)	4807	1354	510.8	288.7	118.9	67.1
W.C.= 96.4%	Speed of Rotation (RPM)	0.4	1.5	3.6	7.5	20.5	38.7
	Apparent Torque (N-m)	3.6	3.8	3.9	4.1	4.5	4.8
	Apparent Viscosity (Poise)	4016	1151	481.7	247.7	98.1	54.9
W.C.= 99.2%	Speed of Rotation (RPM)	0.4	1.1	4.1	7.4	19.0	39.2
	Apparent Torque (N-m)	3.3	3.4	3.4	3.6	3.9	4.4
	Apparent Viscosity (Poise)	3750	1333	372.1	217.1	92.7	49.8
W.C.= 99.7%	Speed of Rotation (RPM)	0.4	1.4	3.7	7.3	20.6	38.7
	Apparent Torque (N-m)	2.8	2.9	3.0	3.2	3.7	3.9
	Apparent Viscosity (Poise)	2952	888.8	359.5	197.0	80.7	44.8
W.C.= 104.4%	Speed of Rotation (RPM)	0.4	1.3	3.9	7.5	19.5	37.8
	Apparent Torque (N-m)	1.7	1.9	2.1	2.3	2.6	2.8
	Apparent Viscosity (Poise)	1981	645.6	237.9	140.3	60.0	33.5
W.C.= 110.7%	Speed of Rotation (RPM)	0.4	1.4	3.9	7.3	19.4	39.2
	Apparent Torque (N-m)	1.1	1.2	1.3	1.5	1.8	2.0
	Apparent Viscosity (Poise)	1164	364.2	146.6	90.0	40.7	23.3
W.C.= 111.3%	Speed of Rotation (RPM)	0.4	1.5	4.4	7.6	21.3	39.0
	Apparent Torque (N-m)	0.9	1.1	1.2	1.4	1.6	1.9
	Apparent Viscosity (Poise)	970.8	326.2	123.6	80.4	34.5	22.1
W.C.= 113.4%	Speed of Rotation (RPM)	0.4	1.5	4.3	7.5	18.4	37.9
	Apparent Torque (N-m)	1.1	1.1	1.2	1.4	1.5	1.7
	Apparent Viscosity (Poise)	1217	318.9	124.3	84.1	37.3	20.4

ตารางที่ ข-1 ผลการทดสอบค่าความหนืดของดินเหนียว ด้วยเครื่อง Rotational
Viscometer (ต่อ)

W.C.= 114.1%	Speed of Rotation (RPM)	0.4	1.4	4.0	8.6	18.5	38.0
	Apparent Torque (N-m)	0.9	0.9	1.0	1.2	1.3	1.5
	Apparent Viscosity (Poise)	1006	280.6	113.4	60.6	32.1	17.7
W.C.= 117.3%	Speed of Rotation (RPM)	0.4	1.3	4.0	7.6	20.3	39.3
	Apparent Torque (N-m)	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.3
	Apparent Viscosity (Poise)	771.1	271.7	101.4	61.2	26.6	14.9
W.C.= 124.6%	Speed of Rotation (RPM)	0.4	1.4	4.0	7.6	19.6	39.1
	Apparent Torque (N-m)	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	0.9
	Apparent Viscosity (Poise)	560.1	173.5	70.1	43.5	19.1	10.7
W.C.= 128.7%	Speed of Rotation (RPM)	0.4	1.3	4.0	7.6	19.1	39.3
	Apparent Torque (N-m)	0.4	0.4	0.4	0.5	0.6	0.6
	Apparent Viscosity (Poise)	416.1	138.9	49.5	30.5	13.4	6.9
W.C.= 131.0%	Speed of Rotation (RPM)	0.4	1.4	4.0	7.6	19.1	38.7
	Apparent Torque (N-m)	0.3	0.4	0.4	0.5	0.6	0.6
	Apparent Viscosity (Poise)	382.6	123.2	46.0	29.6	13.2	7.2
W.C.= 134.7%	Speed of Rotation (RPM)	0.4	1.3	4.3	7.5	19.6	38.9
	Apparent Torque (N-m)	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4
	Apparent Viscosity (Poise)	266.6	93.3	32.6	21.0	9.1	4.6
W.C.= 140.2%	Speed of Rotation (RPM)	0.4	1.4	3.8	7.6	20.9	39.2
	Apparent Torque (N-m)	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4
	Apparent Viscosity (Poise)	305.5	89.1	37.8	22.3	8.6	4.6
W.C.= 141.0%	Speed of Rotation (RPM)	0.4	1.4	4.1	7.6	19.1	38.9
	Apparent Torque (N-m)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4
	Apparent Viscosity (Poise)	309.9	90.0	32.5	19.7	8.4	4.2
W.C.= 141.9%	Speed of Rotation (RPM)	0.4	1.3	4.1	7.5	19.7	38.7
	Apparent Torque (N-m)	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3
	Apparent Viscosity (Poise)	249.6	83.0	30.5	18.3	7.1	3.8

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย วศิน เหลืองคนารถ เกิดวันที่ 24 กันยายน พ.ศ. 2520 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ เมื่อปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตที่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2546 ได้รับรางวัลบทความวิจัยดีเด่น สาขาวิชาวิศวกรรมปฐพี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประจำปี 2550



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย