

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล

#### 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางเคมีของดิน

##### 4.1.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน

ผลการทดสอบคุณสมบัติขั้นพื้นฐานของดินเหนียว หนองงูเห่า, นนทบุรี และ Kaoline ได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 4.1 สำหรับดินเหนียวหนองงูเห่าค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit, LL) ประมาณ 91.15%, ค่าดัชนีพลาสติกซิตี (Plasticity Index, PI) ประมาณ 37.02%, ค่าความชื้นในธรรมชาติมีค่าประมาณ 98.3 % ซึ่งจะได้ค่าดัชนีความเหลว (Liquid Index, LI) ประมาณ 1.13 ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่าเป็นดินอ่อนที่มีความไว, ค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าประมาณ 2.68 และค่าความหนาแน่นเปียกมีค่าประมาณ  $14.6 \text{ kN/m}^3$  สำหรับดินเหนียวนนทบุรีค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit, LL) ประมาณ 58.95%, ค่าดัชนีพลาสติกซิตี (Plasticity Index, PI) ประมาณ 20.67% ค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าประมาณ 2.61 และค่าความหนาแน่นเปียกมีค่าประมาณ  $18.5 \text{ kN/m}^3$  สำหรับดินเหนียว Kaoline ค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit, LL) ประมาณ 34.5%, ค่าดัชนีพลาสติกซิตี (Plasticity Index, PI) ประมาณ 25.39% ค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าประมาณ 2.67 และค่าความหนาแน่นเปียกมีค่าประมาณ  $18.6 \text{ kN/m}^3$

##### 4.1.2 ผลการทดสอบส่วนประกอบทางเคมี

ส่วนประกอบทางเคมีในดินที่ทำการทดสอบได้แก่ Salt Content, Organic Content และ pH เนื่องจากดินกรุงเทพฯ เป็นดินที่ตกตะกอนในทะเล (Marine Deposit) โครงสร้างของดินจึงมีแนวโน้มที่จะจัดเรียงกันแบบระเกะระกะ (Flocculated Structure) ดังนั้น Salt Content ในดินซึ่งมี NaCl เป็นส่วนประกอบหลัก จึงเป็นตัวบ่งชี้เสถียรภาพของโครงสร้างดิน ถ้าดินผ่านกระบวนการ Leaching ซึ่งเป็นกระบวนการชะล้างปริมาณเกลือในมวลดินด้วยน้ำ จะทำให้ปริมาณ NaCl น้อยลงเมื่อเทียบกับปริมาณ NaCl ในน้ำทะเลที่มีค่าประมาณ 40 กรัม/ลิตร ทำให้โครงสร้างของดินขาดเสถียรภาพ (Meta - Structure) และดินจะมีพฤติกรรมที่มีความไว ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการทรุดตัวและพฤติกรรมทางด้านกำลังรับน้ำหนักของดินด้วย

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน และเคมีของดินเหนียวธรรมชาติ

Type of Soil (m)	Natural Water Content (%)	Total Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Liquid Limit (%)	Plastic Limit (%)	Plasticity Index (%)	Liquidity Index (%)	Specific Gravity	Salt Content g/litre	Organic Content (%)	pH
Nong-Ghu-Hou Clay	98.3	14.5	91	37	54	1.13	2.7	12.5	4.0	8.3
Nonthaburi Clay	-	18.5	58	20	38	-	2.6	2.1	0.3	8.0
Kaolin Clay	-	18.6	34	25	9	-	2.7	2.0	0.4	8.0

หมายเหตุ

1. ตัวอย่างดินเหนียว นนทบุรี เป็นดินเหนียวแปลงสภาพแบบแห้ง จึงไม่สามารถหาค่า Natural Water Content ได้
2. ตัวอย่างดินเหนียว Kaolin เป็นแร่ดินเหนียว มีสภาพแห้งเป็นผง จึงไม่สามารถหาค่า Natural Water Content ได้

## 4.2 เปรียบเทียบผลกระทบของอุปกรณ์และเวลาที่ใช้ในการทดสอบ Fall Cone Test

### 4.2.1 ศึกษาผลกระทบเนื่องจากเวลาที่ใช้ในการทดสอบ Fall Cone Test

จากมาตรฐาน BS 1377 การทดสอบเครื่องมือ Fall Cone Test จะปล่อยกรวยตกโดยอิสระจมนลงจากผิวดินเป็นเวลา 5 วินาทีจากนั้นจึงทำการวัดระยะที่จมลงของกรวย ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานสำหรับวัดค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit) ซึ่งในงานวิจัยโดยทั่วไปเมื่อนำเครื่องมือทดสอบ Fall Cone มาทำการหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Untrained Shear Strength) จะใช้เวลาในการตกของกรวยเป็นมาตรฐานเดียวกับการทดสอบพิกัดเหลว คือ 5 วินาที ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการจมของกรวยเปรียบเทียบกับเวลา โดยบันทึกค่าการจมของกรวยไปถึงเวลา 600 วินาทีและเก็บบันทึกระยะที่จมในทุกๆ 1 วินาที เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์โดยการเปลี่ยนแนวของแกน time ให้อยู่ในมาตราส่วน Log Scale จะได้ตาม รูปที่ 4.1 จากรูปจะพบว่ากราฟการเคลื่อนตัวของระยะที่จมกับเวลาแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ช่วงที่ (1) จะมีลักษณะที่ไม่เป็นเส้นตรง และ ช่วงที่ (2) จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง เราอธิบายพฤติกรรมในช่วง (1) ที่ไม่เป็นเส้นตรง เนื่องมาจากเกิดการเคลื่อนตัวของระยะที่จมกับเวลาเป็นไปตามทฤษฎีทาง Dynamic ตาม สมการที่ 4.1 และ สมการที่ 4.2

$$v = \left\{ 2gz \left[ 1 - \left( \frac{z}{d} \right)^2 \right] \right\}^{0.5} \quad \text{----- (4.1)}$$

$$t = \int_0^z \frac{dz}{\left\{ 2gz \left[ 1 - \left( \frac{z}{d} \right)^2 \right] \right\}^{0.5}} \quad \text{----- (4.2)}$$

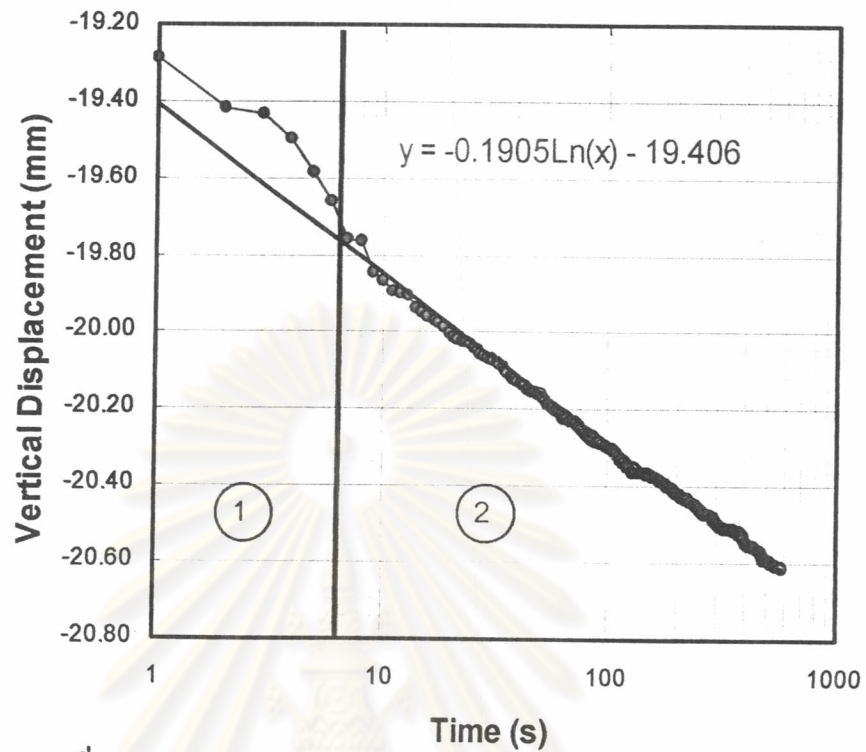
$t$  = Time of penetrated,  $t_p$  = Time for penetration to the maximum depth

$v$  = cone velocity

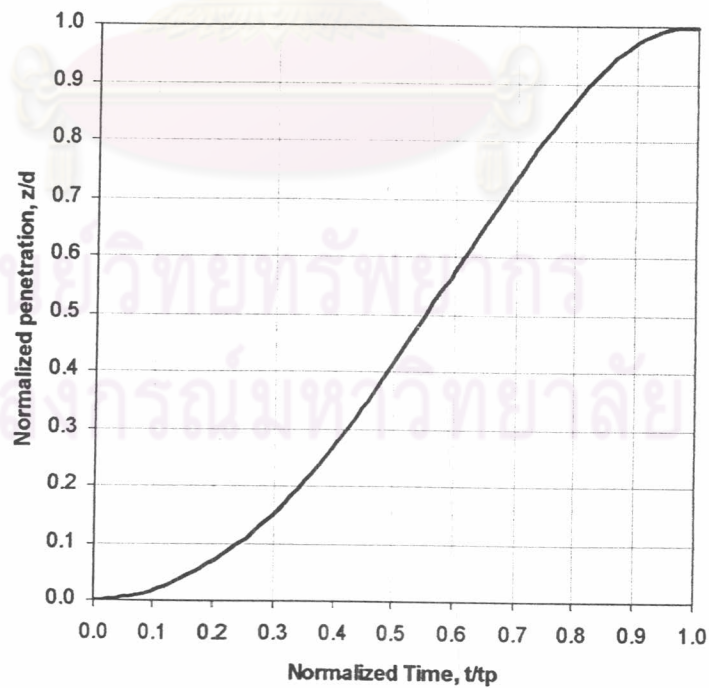
$z$  = Instantaneous cone penetration

$d$  = final penetration Value

ซึ่งจากสมการที่ 4.1 และ 4.2 เราสามารถแสดงเป็นกราฟการเคลื่อนตัวของทาง Dynamic ที่ได้จากการ Normalized Time ( $t/t_p$ ) กับ Normalized Penetration ( $z/d$ ) ซึ่งแสดงดัง รูปที่ 4.2

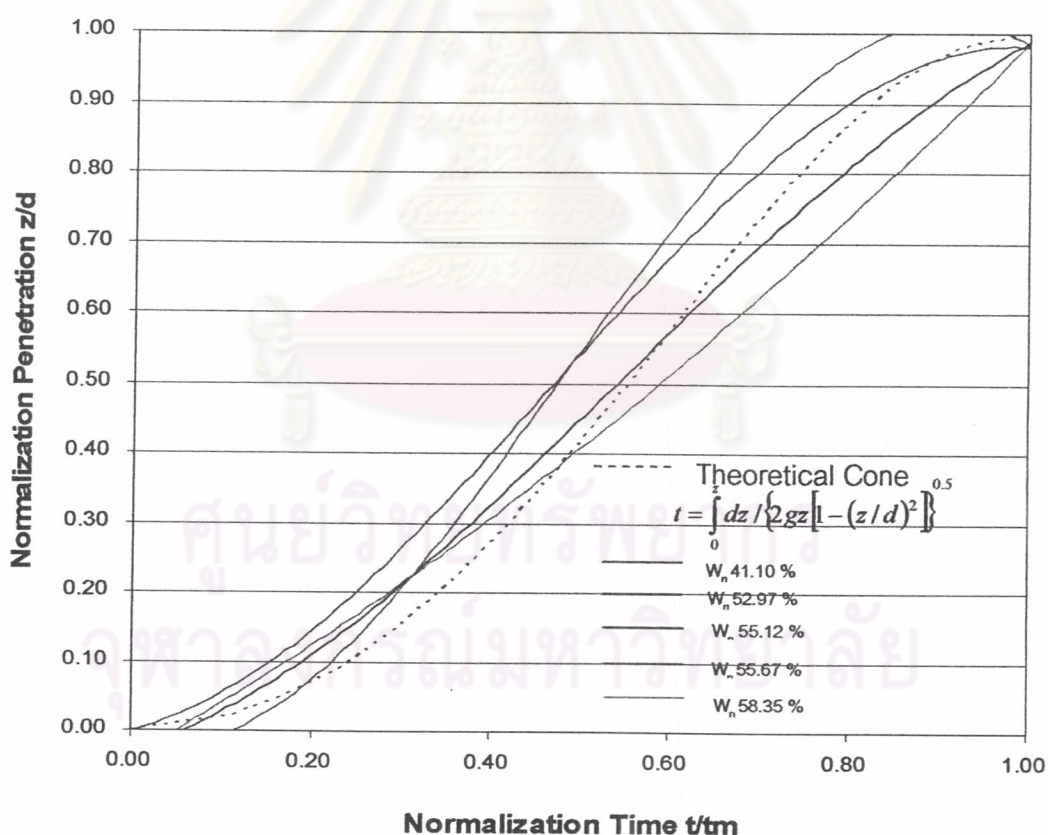


รูปที่ 4.1 แสดงระยะที่จมของกรวย (Vertical Displacement, mm.) เปรียบเทียบกับเวลา (Time, sec) ของดิน นนทบุรี ที่ค่า Water Content 58.35 %

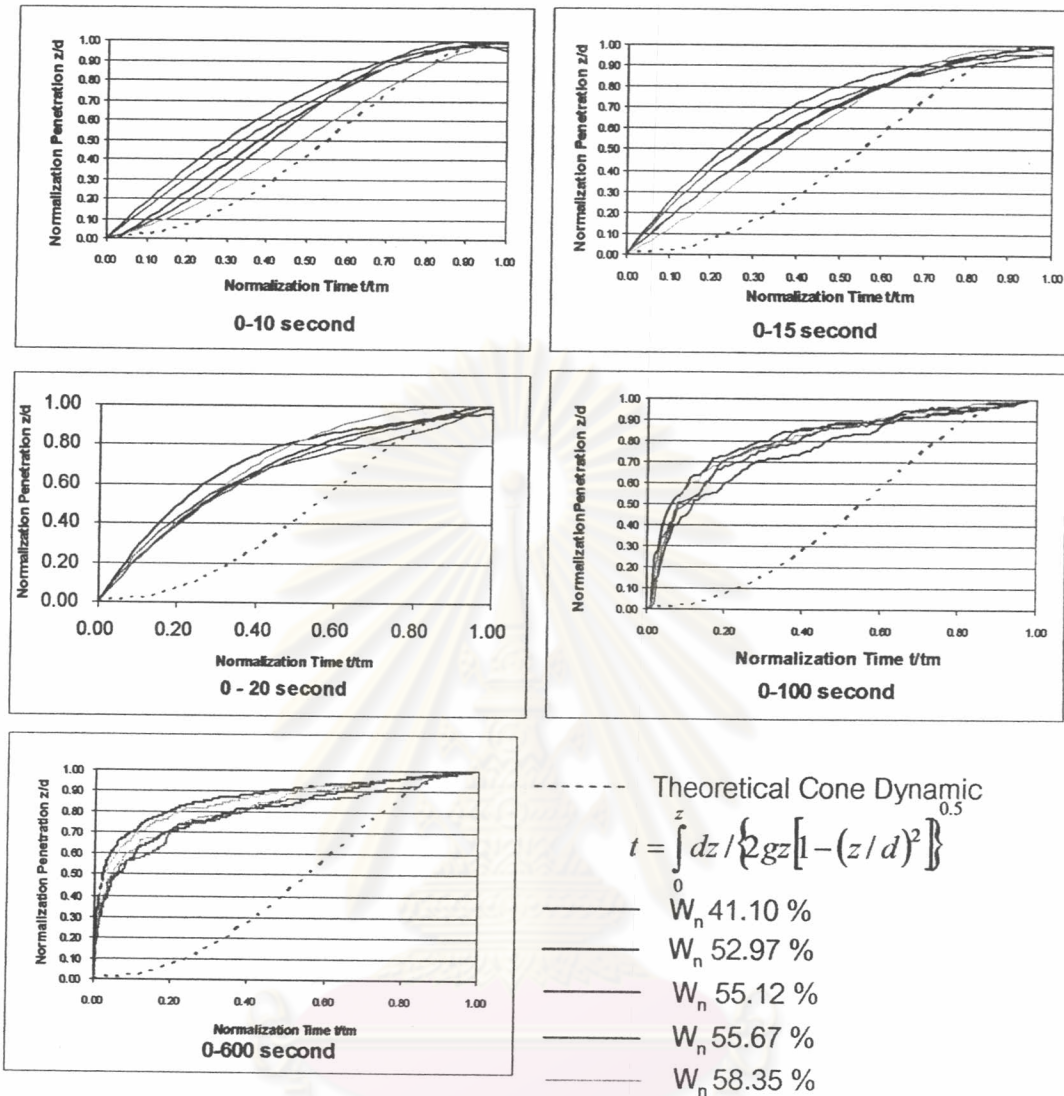


รูปที่ 4.2 ทฤษฎีการเคลื่อนตัวทาง Dynamic ของ Fall Cone Test โดยแสดงเป็น Normalized penetration กับ Normalized Time โดย Hansbo (1957)

จากรูปที่ 4.2 แสดงพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของดินที่เป็นไปตามทฤษฎีทาง Dynamic ของการทดสอบ Fall Cone Test เมื่อเรานำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ Fall Cone Test จากรูปที่ 4.1 มาเปรียบเทียบกับทฤษฎีโดยการ Plot กราฟ Normalized Penetration กับ Normalized Time โดยเปรียบเทียบในแต่ละช่วงเวลาตั้งแต่ 0-5 วินาที ดังแสดงในรูป 4.3 เส้นประสีแดงแสดงทฤษฎีทาง Dynamic ของ Hasbo (1957) สีอื่นๆแสดง Penetration VS Time โดยเปลี่ยนแปลงค่า Water Content ต่างๆกันจากรูปพบว่าในช่วงเวลา 0-5 วินาที พฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของหัวกรวยเป็นไปตามทฤษฎีทาง Dynamic แต่เมื่อเวลาผ่านไปในช่วง 0-10 วินาที พบว่ากราฟจะเริ่มมีแนวโน้มเบี่ยงเบนไปจากทฤษฎีทาง Dynamic และเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นที่ 0-15, 0-20, 0-30, 0-100, 0-600 จะพบว่ามีแนวโน้มออกห่างไปจากทฤษฎีเรื่อยๆ ดังแสดงในรูป 4.4 และเมื่อหัวกรวยจมลงไปที่เวลาเลยจาก 5 วินาทีไปแล้วการเคลื่อนตัวจะเกิดการเคลื่อนตัวในลักษณะที่เป็น Creep



รูปที่ 4.3 แสดงเปรียบเทียบที่ช่วงเวลา 0-5 วินาที ของการตกของหัวกรวย เมื่อเทียบกับทฤษฎี Dynamic Fall Cone



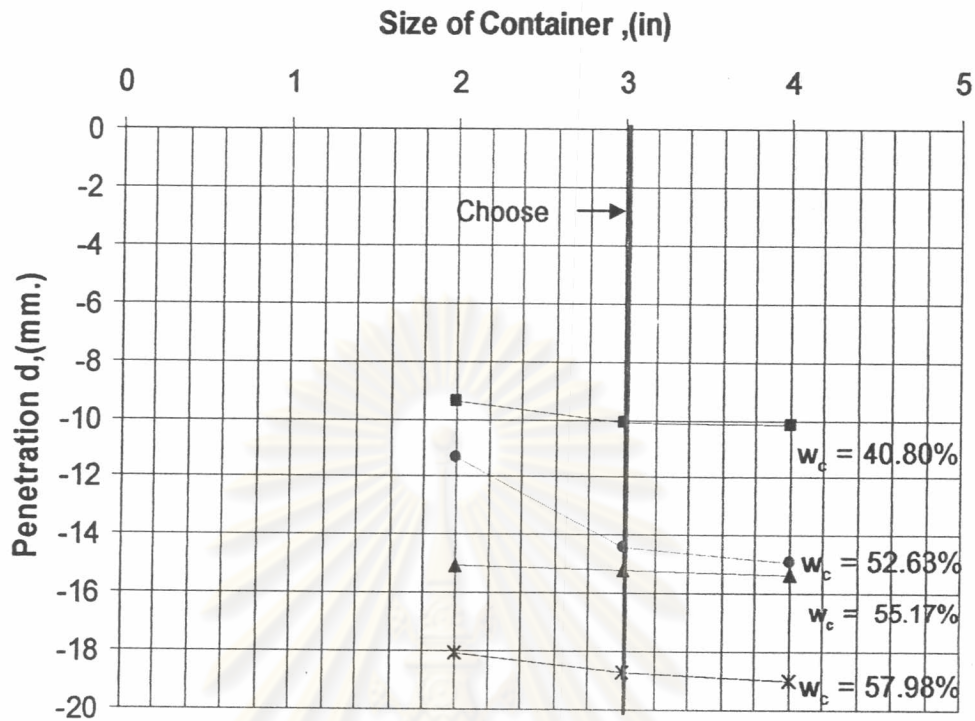
รูปที่ 4.4 แสดงการเกิด Creep ของ Fall Cone ที่ช่วงเวลาต่างๆ กัน เมื่อเทียบกับทฤษฎี Dynamic Fall Cone

ดังนั้นจากรูปที่ 4.1 สามารถอธิบายได้ว่าในช่วงที่ (1) ที่กราฟไม่เป็นเส้นตรงเพราะการเคลื่อนตัวจมลงของหัวกรวย (Penetration) เป็นตามทฤษฎี Dynamic แต่ในช่วงที่ (2) การเคลื่อนตัวจมลงของหัวกรวยจะเกิดขึ้นในลักษณะของการเกิด Creep และเกิดการเคลื่อนตัวน้อยมากเมื่อเวลาผ่านไปเมื่อเทียบกับช่วง 5 วินาทีแรกที่เกิดการจมลงของหัวกรวย ซึ่งตามมาตรฐาน BS1377 จะใช้เวลาในการทดสอบเพื่อวัดค่าการจมของหัวกรวยที่ 5 วินาทีซึ่งอยู่ในช่วงของทฤษฎีทาง Dynamic

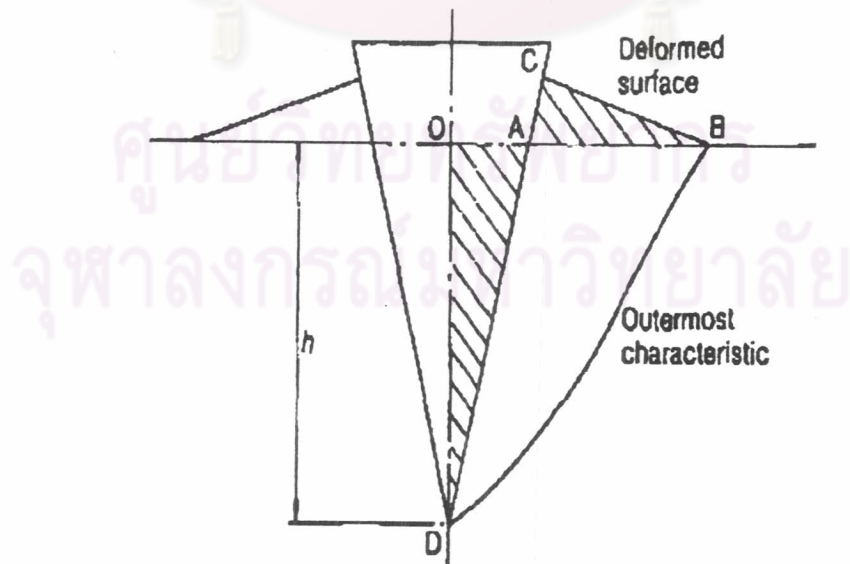
#### 4.2.2 ศึกษาผลกระทบเนื่องจากขนาดด้วยไส้ดิน (Size of Container) ของ เครื่องมือ Fall Cone Test

การทดสอบ Fall Cone Test ด้วยเครื่องมือมาตรฐานจะใช้ด้วยไส้ดินที่มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 เซนติเมตร สูง 4.0 เซนติเมตร ซึ่งเราจะพบว่าขนาดของด้วยไส้ดินมีขนาดเล็กและอาจมีผลกระทบเนื่องจากระนาบวิบัติ (Failure Plane) ที่เกิดจากหัวกรวยที่ตกลงมา จากการทดสอบเปรียบเทียบขนาดของด้วยไส้ดิน โดยใช้ด้วยไส้ดินที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2 นิ้ว, 3 นิ้ว และ 4 นิ้ว ตามลำดับทำการทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลง Water Content ให้แตกต่างกันไปเรื่อยๆ โดยใช้ดินที่ทดสอบเป็น ดินนพบุรี แล้วบันทึกระยะจมที่ 5 วินาทีทดสอบกับหัวกรวยที่มีขนาด 30°หนัก 80 กรัมซึ่งเป็นหัวกรวยมาตรฐานตาม BS 1377 แล้วนำผลการทดสอบมาวาดกราฟ ระหว่าง Water Content กับระยะจมของหัวกรวย (Penetration) ได้ตามรูปที่ 4.5 จากรูปเราพบว่า ระยะจมของหัวกรวย (Penetration) ที่วัดได้จากด้วยไส้ดินขนาด 2 นิ้ว มีค่าน้อยกว่า ระยะจมจากด้วยไส้ดินขนาด 3 นิ้วและ 4 นิ้วซึ่งจะได้ค่าระยะจมที่ใกล้เคียงกันจนเกือบที่จะเป็นเส้นเดียวกัน ซึ่งอธิบายเหตุผลที่เกิดเหตุการณ์แบบนี้ได้ว่าเกิดจากผลกระทบของ Mesh of characteristic และการเกิด Heave

จากการศึกษาของ Houlsby(1982) อธิบายขนาดของด้วยไส้ดิน (Size of Container) ไว้ตามรูปที่ 4.6 และ ตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่อกรวยตกที่ 20 มิลลิเมตร(mm.) ค่ารัศมีของเส้น OB ที่ได้มากที่สุดจะมีค่า 21.4 มิลลิเมตร(mm.) เพราะฉะนั้นขนาดต่ำที่สุดของด้วยไส้ดินจึงไม่ควรต่ำกว่า 42.8 มิลลิเมตร (mm.) หรือ 1.71 นิ้ว (in.) แต่เมื่อเราทำการทดสอบจริงพบว่าใช้ด้วยไส้ดินที่มีขนาด 2 นิ้วก็ยังมีผลกระทบที่เกิดจาก Mesh of characteristic และการเกิด Heave อยู่ ซึ่งทำให้ค่าระยะจมของหัวกรวยมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง และจะทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่อ่านได้จากการทดสอบแบบกรวยตกมีค่าสูงเกินความเป็นจริง เมื่อทดสอบกับด้วยไส้ดินขนาด 2 นิ้ว แต่ไม่มีผลกระทบกับด้วยไส้ดินขนาด 3 นิ้ว และ 4 นิ้ว เพราะผลกระทบจาก Mesh of characteristic และการเกิด Heave ไปไม่ถึง ตามรูปที่ 4.7 ซึ่งเมื่อเราพิจารณาแล้วในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาระยะจมของหัวกรวยอยู่ระหว่าง 20- 25 มิลลิเมตร จึงเลือกใช้ขนาดของด้วยไส้ดินเป็นขนาด 3 นิ้ว (7.62 เซนติเมตร) เพื่อเป็นมาตรฐานในการทดสอบ



รูปที่ 4.5 แสดงเปรียบเทียบขนาดของถ้วยใส่ดิน (Size of Container) ขนาด 2", 3" และ 4" โดย plot เปรียบเทียบระหว่าง ระยะที่จมของหัวกรวย (Penetration) กับ Water Content ของดิน นนทบุรี



รูปที่ 4.6 แสดงผลกระทบเนื่องจากการเกิด Heave และ Slip Line เพื่อหาขนาดของถ้วยใส่ดิน (size of Container) ของ Houlsby(1982)

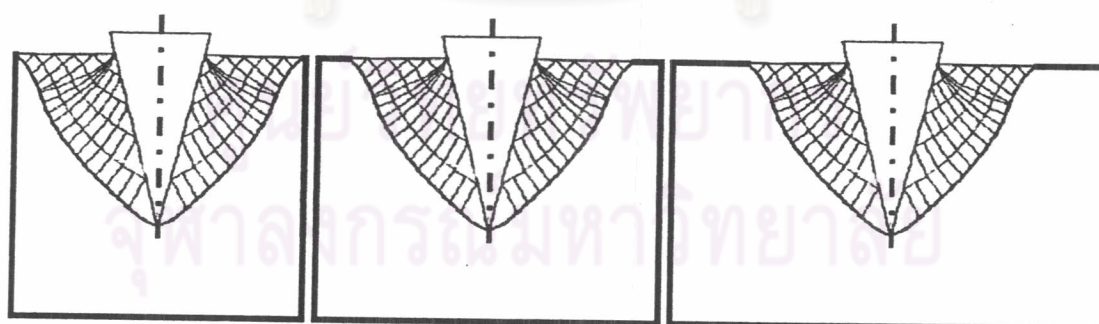


ตารางที่ 4.2 แสดงค่าระยะ OB จากรูปที่ 4.7 เมื่อเกิดผลกระทบจาก  $a_u/c_u$  และ Heave ที่ทำให้ค่า OB เปลี่ยนไป

$a_u / c_u$	F	OB: (mm.)
0.0	1.124	17.7
0.2	1.355	18.5
0.4	1.577	19.2
0.6	1.787	19.8
0.8	1.967	20.3
1.0	2.143	21.4

$a_u$  = wall adhesion

$c_u$  = undrained shear strength



Container 2"

Container 3"

Container 4"

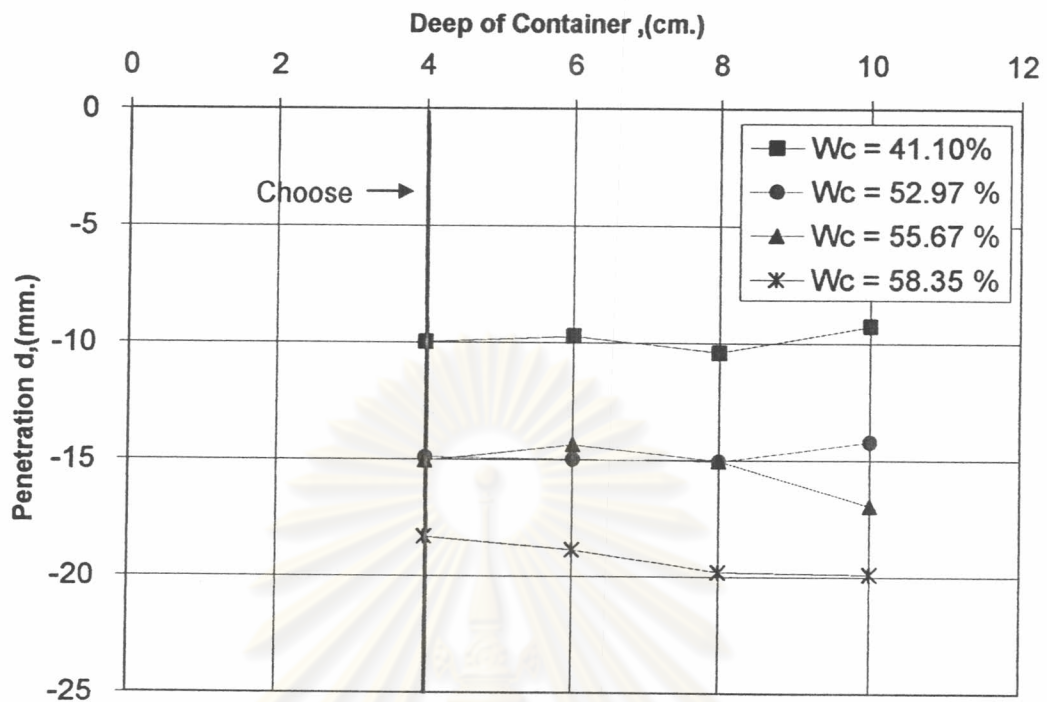
รูปที่ 4.7 แสดงผลกระทบจาก Mesh of Failure ของถ้วยใส่ดิน (size of Container) 2", 3" และ 4"

#### 4.2.3 ศึกษาผลกระทบเนื่องจากความลึกของถ้วยใส่ดิน (Depth of Container) ของเครื่องมือ Fall Cone Test

ขนาดความลึกมาตรฐานของถ้วยใส่ดินการทดสอบ Fall Cone Test อยู่ที่ 4.0 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน BS1377 แต่เราไม่ทราบว่าที่ระดับความลึก 4 เซนติเมตรนี้จะมีผลกระทบเนื่องจาก Mesh of Failure หรือไม่จึงทำการทดสอบเพื่อเปรียบถ้วยใส่ดินที่มีความลึกแตกต่างกัน จากการทดสอบเปรียบเทียบความลึกของถ้วยใส่ดิน ด้วยความลึก 10 เซนติเมตร, 8 เซนติเมตร, 6 เซนติเมตร และ 4 เซนติเมตร ตามลำดับ และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ทำการทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลง Water Content ให้แตกต่างกันไปเรื่อยๆ 4-5 ค่าด้วยกัน โดยใช้ดินที่ทดสอบเป็นดินนันทบุรี ผ่านการเตรียมตัวอย่างตามวิธีมาตรฐาน และบันทึกระยะเวลาที่ 5 วินาที ทดสอบกับหัวกรวยที่มีขนาด 30°หนัก 80 กรัมซึ่งเป็นหัวกรวยมาตรฐานตาม BS 1377 ซึ่งเป็นหัวกรวยมาตรฐานในการหาค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit) จากนั้นนำผลการทดสอบมาวาดกราฟ ระหว่าง Water Content กับระยะเวลาของหัวกรวย (Penetration) ได้ตามรูปที่ 4.8

จากรูปเราพบว่า ระยะเวลาของหัวกรวย (Penetration) ที่วัดได้จากความลึก 10 เซนติเมตร, 8 เซนติเมตร, 6 เซนติเมตร และ 4 เซนติเมตร มีค่าใกล้เคียงกันในทุกๆ Water Content ซึ่งจากการทดสอบ water content ต่างกัน 4 ชนิด พบว่าค่าระยะที่จมของหัวกรวย (Penetration) มีค่าแตกต่างกันอยู่ในช่วง  $\pm 1$  มิลลิเมตร (mm.) ซึ่งเป็นค่าที่แตกต่างกันน้อยมาก แสดงให้เห็นว่าผลจากความลึกของถ้วยใส่ดิน (container) ไม่มีผลต่อระยะเวลาของหัวกรวย เมื่อดูจากผลกระทบของ Mesh of characteristic ตามรูปที่ 4.6 และ รูปที่ 4.7 ยิ่งอธิบายได้ชัดเจนขึ้นว่า ความลึกของหัวกรวยไม่มีผลกระทบต่อผลการทดสอบกรวยตก

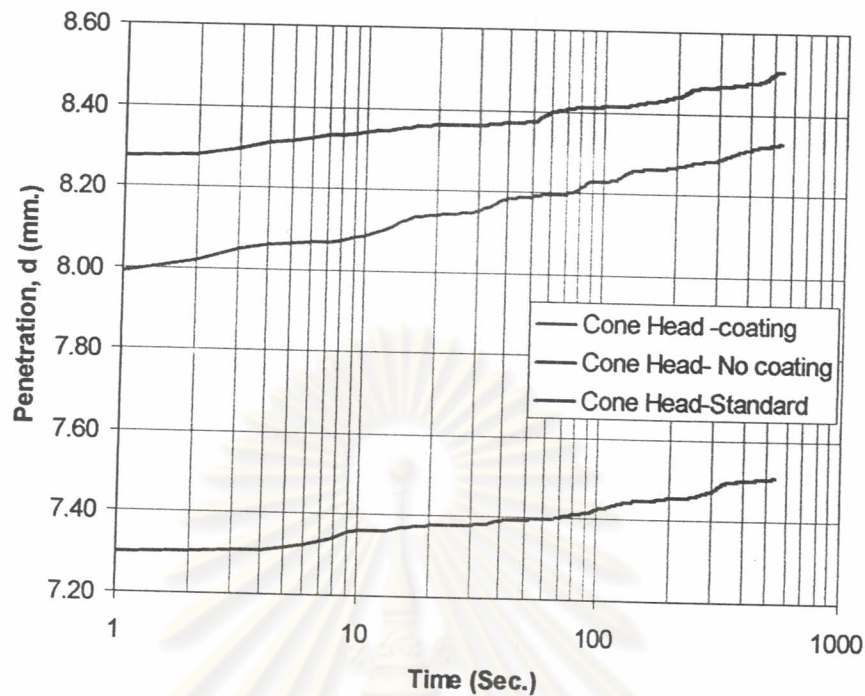
จากการทดสอบพบว่าความลึกของถ้วยใส่ดิน (Depth of Container) ไม่มีผลกระทบต่อค่าระยะเวลาของหัวกรวย แต่การทดสอบในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบที่ระยะเวลาของหัวกรวยอยู่ระหว่าง 20-25 มิลลิเมตร เพราะฉะนั้นระยะที่น้อยที่สุดในการทดสอบจึงควรไม่ต่ำกว่า 30 มิลลิเมตร แต่เครื่องมือที่ใช้ทดสอบมีค่าความลึกของถ้วยใส่ดินต่ำที่สุดคือ 40 มิลลิเมตร เพราะฉะนั้นจึงใช้ความลึกของความใส่ดินเพื่อเป็นมาตรฐานในงานวิจัยนี้อยู่ที่ 40 มิลลิเมตร และเมื่อรวมกับการทดสอบขนาดของถ้วยใส่ดิน (Size of Container) ถ้วยใส่ดินมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบจึงอยู่ที่ เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว (7.62 เซนติเมตร) และความลึกของถ้วยใส่ดินเท่ากับ 4 เซนติเมตร เวลาที่ใช้ในการวัดค่าระยะเวลาของหัวกรวยอยู่ที่ 5 วินาที



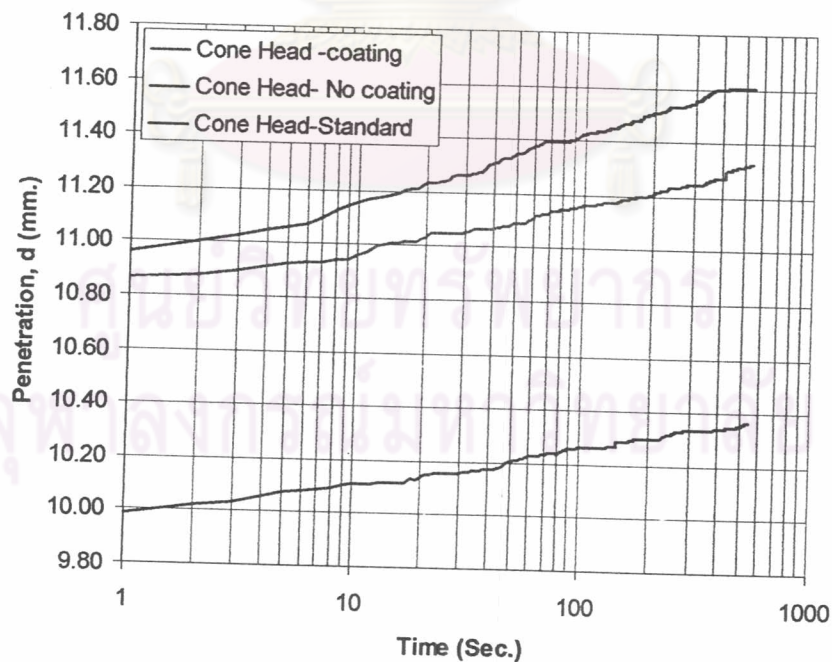
รูปที่ 4.8 แสดงเปรียบเทียบขนาดของถ้วยใส่ดิน (Size of Container) ความลึก 4, 6, 8, 10 เซนติเมตร โดย plot เปรียบเทียบระหว่าง ระยะที่จมของหัวกรวย (Penetration) กับ Water Content ของดิน นนทบุรี

#### 4.2.4 ศึกษาผลกระทบเนื่องจากพื้นผิวของหัวกรวย (Roundness of Cone)

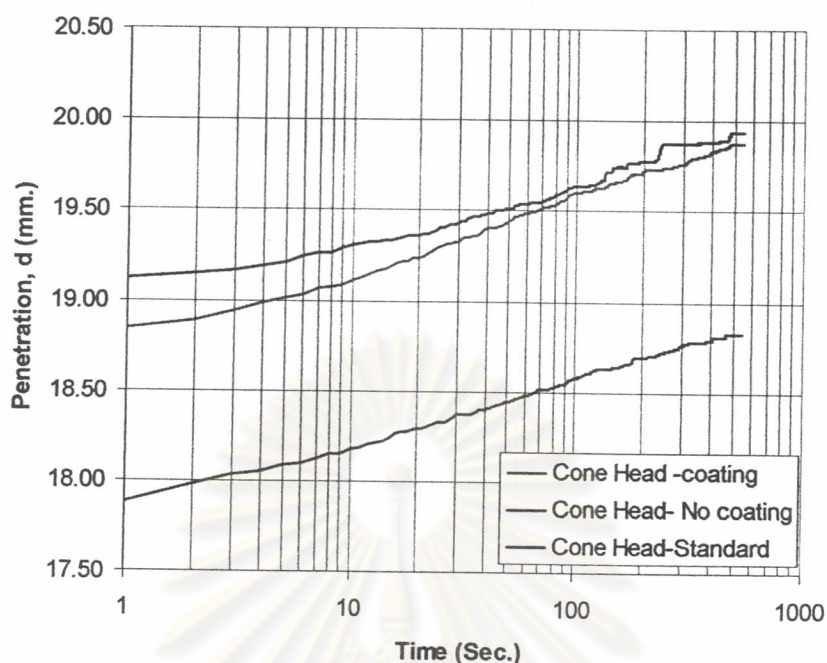
ในการทดสอบนี้เราจะใช้หัวกรวยที่มีขนาดเท่ากันคือขนาด  $30^\circ$  และน้ำหนักของหัวกรวยเท่ากันคือ 80 กรัม โดยใช้หัวกรวยที่ใช้ในการทดสอบแตกต่างกัน คือ หัวกรวย Stainless, หัวกรวย Plastic ที่เคลือบสารหล่อลื่น, หัวกรวย Plastic ที่ไม่เคลือบสารหล่อลื่น ทำการทดสอบเปรียบเทียบกันโดยใช้ตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบเป็นชนิดเดียวกัน ที่ค่า Water Content เดียวกัน จากนั้นทำการทดสอบกับตัวอย่างดินหนองงูเห่าโดยวัดค่าระยะจมจนถึง 600 วินาที พบว่าได้ออกมารูปที่ 4.9 สำหรับ Water Content 63.72 %,ตามรูปที่ 4.10 สำหรับ Water Content 71.37 %,รูปที่ 4.11 สำหรับ Water Content 84.15 %และ รูปที่ 4.12 สำหรับ Water Content 86.61 %



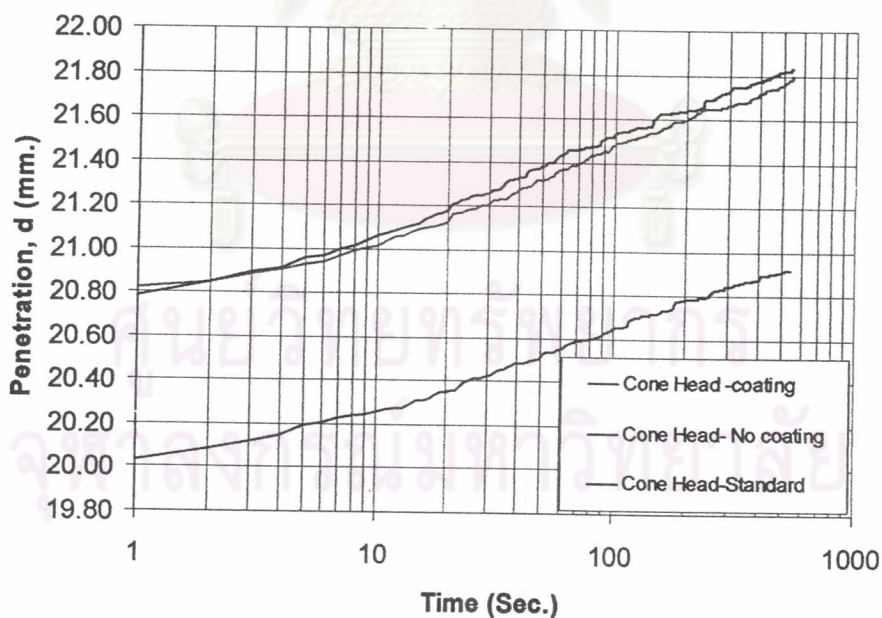
รูปที่ 4.9 แสดงเปรียบเทียบหัวกรวยมาตรฐาน, หัวกรวย Plastic ที่เคลือบสารหล่อลื่น, หัวกรวย Plastic ที่ไม่เคลือบสารหล่อลื่น โดยใช้หัวกรวยขนาด  $30^\circ$  หนัก 80 กรัม ของตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า Water Content 63.72 %



รูปที่ 4.10 แสดงเปรียบเทียบหัวกรวยมาตรฐาน, หัวกรวย Plastic ที่เคลือบสารหล่อลื่น, หัวกรวย Plastic ที่ไม่เคลือบสารหล่อลื่น โดยใช้หัวกรวยขนาด  $30^\circ$  หนัก 80 กรัม ของตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า Water Content 71.37 %



รูปที่ 4.11 แสดงเปรียบเทียบหัวกรวยมาตรฐาน, หัวกรวย Plastic ที่เคลือบสารหล่อลื่น, หัวกรวย Plastic ที่ไม่เคลือบสารหล่อลื่น โดยใช้หัวกรวยขนาด  $30^{\circ}$  หนัก 80 กรัม ของตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า Water Content 84.15 %



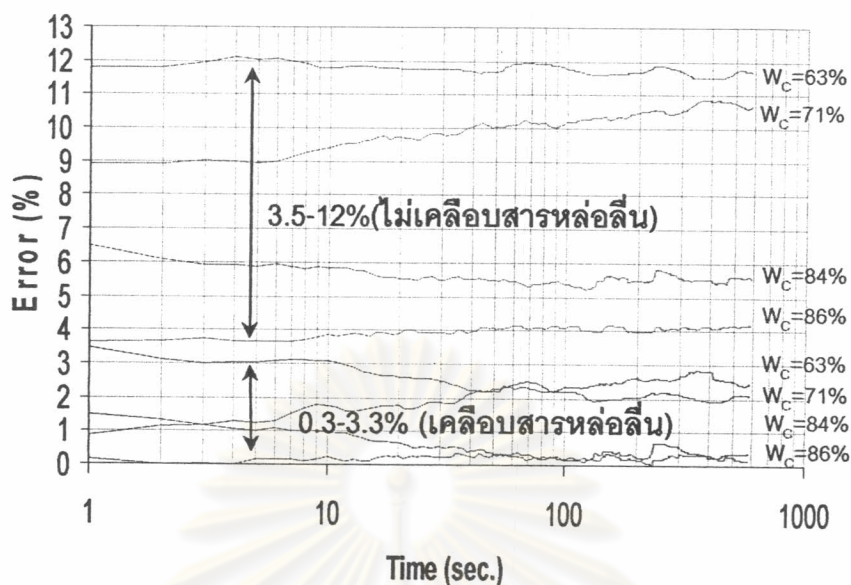
รูปที่ 4.12 แสดงเปรียบเทียบหัวกรวยมาตรฐาน, หัวกรวย Plastic ที่เคลือบสารหล่อลื่น, หัวกรวย Plastic ที่ไม่เคลือบสารหล่อลื่น โดยใช้หัวกรวยขนาด  $30^{\circ}$  หนัก 80 กรัม ของตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า Water Content 86.61 %

จากรูปที่ 4.9, 4.10, 4.11 และ 4.12 พบว่าหัวกรวยมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ (Cone Stainless) กับหัวกรวย Plastic ที่เคลือบสารหล่อลื่นมีค่าใกล้เคียงกันแต่หัวกรวย Plastic ที่เคลือบสารหล่อลื่นจะมีค่าระยะจมของหัวกรวยน้อยกว่าหัวกรวยมาตรฐานเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากผลกระทบของ Friction ของพื้นผิวที่ขรุขระของหัวกรวย แต่สำหรับหัวกรวย Plastic ที่ไม่เคลือบ จะมีค่าระยะจมน้อยกว่า หัวกรวยมาตรฐานค่อนข้างมากซึ่งมาจากผลกระทบของ Friction ของพื้นผิวที่ขรุขระของหัวกรวยมีมากกว่าหัวกรวยที่เคลือบสารหล่อลื่น เมื่อเราพิจารณาระยะจมที่ เวลา 5 วินาที ซึ่งเป็นเวลามาตรฐานในการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 แสดงค่าระยะจมของหัวกรวย Plastic ที่เคลือบสารหล่อลื่น จะได้เส้นกราฟเกือบที่จะเท่ากับกราฟที่ได้จากหัวกรวยมาตรฐาน แต่สำหรับกราฟที่ได้จากรยะจมของหัวกรวย Plastic ที่ไม่ได้เคลือบสารหล่อลื่น พบว่ามีค่าแตกต่างจากหัวกรวยมาตรฐาน อยู่ประมาณ  $\pm 2$  mm. ทำให้สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 4.13 โดยการคำนวณค่า error จากสมการ

$$\text{error} = \frac{\text{Penetration of Standard Cone} - \text{Penetration of Coating \& Uncoating Cone}}{\text{Penetration of Standard Cone}} \times 100\%$$

ซึ่งจากรูปที่ 4.13 แสดงค่าความผิดพลาดเนื่องจากหัวกรวยที่ไม่ได้เคลือบสารหล่อลื่นอยู่ที่ 3.5-12% แต่เมื่อหัวกรวยทำการเคลือบสารหล่อลื่นเรียบร้อยแล้วความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเมื่อเทียบกับกรวยมาตรฐานอยู่ที่ 0.3-3.3 % เท่านั้น แสดงให้เห็นว่าขรุขระของพื้นผิวหัวกรวยมีผลกระทบต่อค่าระยะจมของหัวกรวย ซึ่งจะมีผลต่อการหาค่ากำลังรับแรงเฉือนต่อไป ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องเคลือบหัวกรวยด้วยสารหล่อลื่นเพื่อให้หัวกรวยที่ใช้ในการทดสอบ มีค่าที่ถูกต้องมากที่สุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.13 แสดงค่า error ของหัวกรวยที่เคลือบสารหล่อลื่น กับ ไม่เคลือบสารหล่อลื่น ที่ค่า Water Content ต่างๆ กัน

ตารางที่ 4.3 แสดงระยะจมของหัวกรวยที่เวลา 5 วินาที

Water Content (%)	Standard Cone (Stainless)	Plastic Cone (Coat)	Plastic Cone (No Coat)
63.73	8.317	8.066	7.316
71.37	11.063	10.923	10.071
84.15	19.213	19.017	18.087
86.61	20.960	20.931	20.196

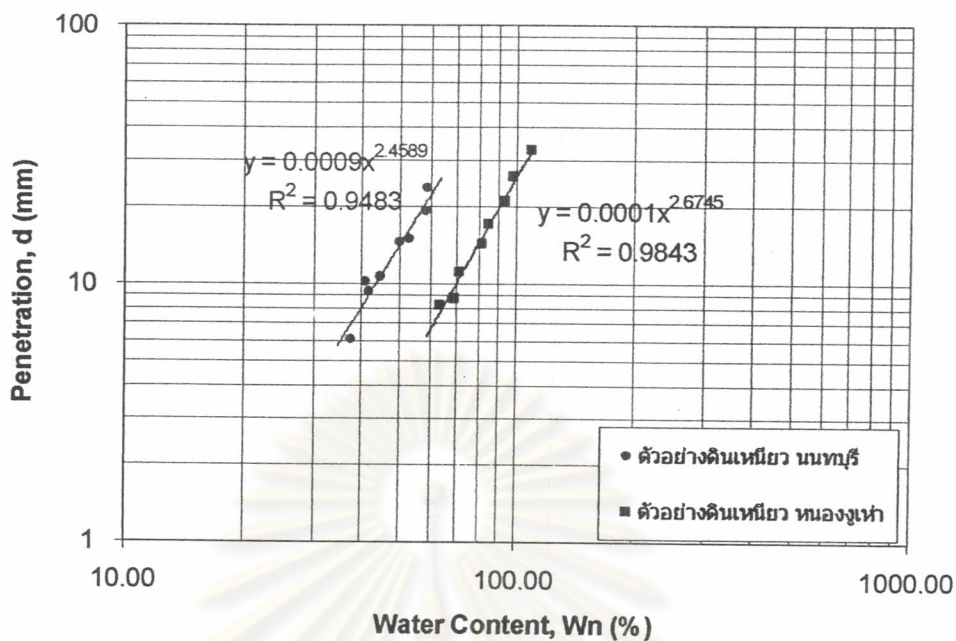
#### 4.3 การทดสอบ Fall Cone Test เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะจม (Cone Penetration) กับ Water Content

เมื่อเราได้มาตรฐานในการทดสอบซึ่งใช้ด้วยไส้ตัวอย่างขนาด 3 นิ้ว ความลึก 4 เซนติเมตร เครื่องมือในการวัดระยะที่จมโดยใช้ LVDT (วิธีการสอบเทียบ LVDT ดูในภาคผนวก ก) และเวลาที่ใช้เป็นมาตรฐานคือ 5 วินาที จากนั้นจึงทำการทดสอบตามมาตรฐาน BS1377 เพื่อลองหาค่า Liquid Limit สำหรับตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า และตัวอย่างดินเหนียวนนทบุรี ตามรูปที่ 4.14

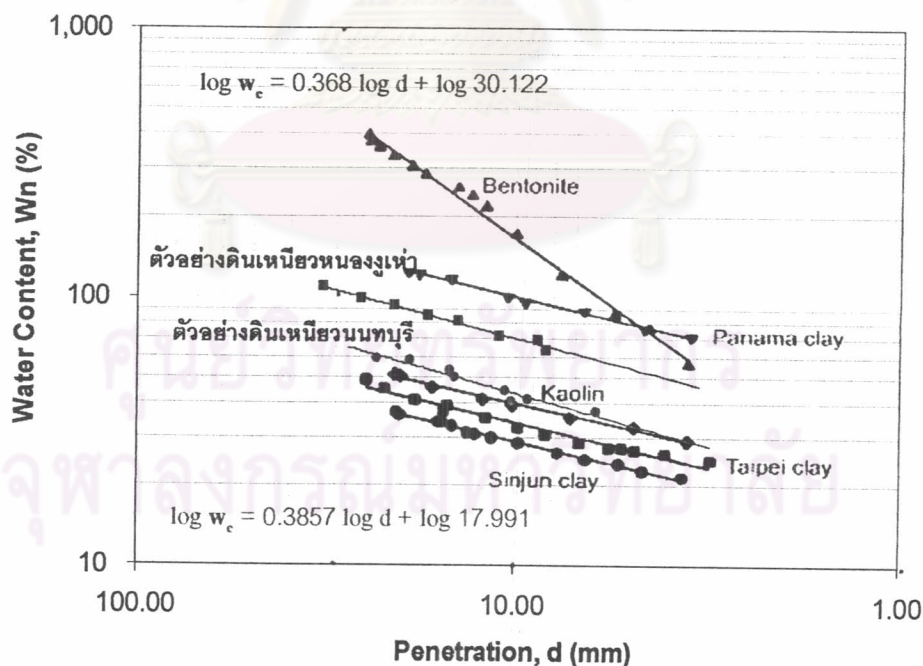
จากรูปที่ 4.14 พบว่าค่าพิกัดเหลว(Liquid Limit) ของดินเหนียวหนองงูเห่าที่วัดได้จากการทดสอบตามวิธีของ Casagrande มีค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit) เท่ากับ 91.15 % แต่ที่ได้จากการทดสอบแบบกรวยตกมีค่าน้อยกว่าเล็กน้อย ซึ่งค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit) เท่ากับ 89.1 % ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบของ Youssef et al. (1965) และ Ryley (1970) ได้ทำการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าระยะจมต่างๆของกรวยที่มีมุม  $30^{\circ}$  หนัก 80 กรัม กับค่าปริมาณความชื้น (Water Content) ของดินต่างกัน จำนวน 25 ชนิด ซึ่งส่วนใหญ่ได้มาจาก UK และได้แสดงพิกัดเหลวของ Casagrande ไว้ด้วย ดังแสดงในรูป 2.3 ที่แสดงให้เห็นว่าค่าพิกัดเหลวที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีกรวยตก (Fall Cone Test) จะมีค่าน้อยกว่าค่าพิกัดเหลวที่ได้มาจากการทดสอบแบบ Casagrande เช่นเดียวกันกับตัวอย่างดินเหนียวนนทบุรี ได้ค่าพิกัดเหลว(Liquid Limit) ของดินเหนียวนนทบุรีที่วัดได้จากการทดสอบตามวิธีของ Casagrande มีค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit) เท่ากับ 58.95 % แต่ที่ได้จากการทดสอบแบบกรวยตกมีค่าน้อยกว่าเล็กน้อย มีค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit) เท่ากับ 57.8 % ซึ่งก็เหมือนกับตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า ที่ค่าพิกัดเหลวที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีกรวยตก (Fall Cone Test) จะมีค่าน้อยกว่าค่าพิกัดเหลวที่ได้มาจากการทดสอบแบบ Casagrande เล็กน้อย

เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ การทดสอบของ Feng, T.W. (2000) จะได้กราฟของตัวอย่างดินหนองงูเห่าและตัวอย่างดินนนทบุรีตามรูปที่ 4.15, 4.16, 4.17 และ 4.18

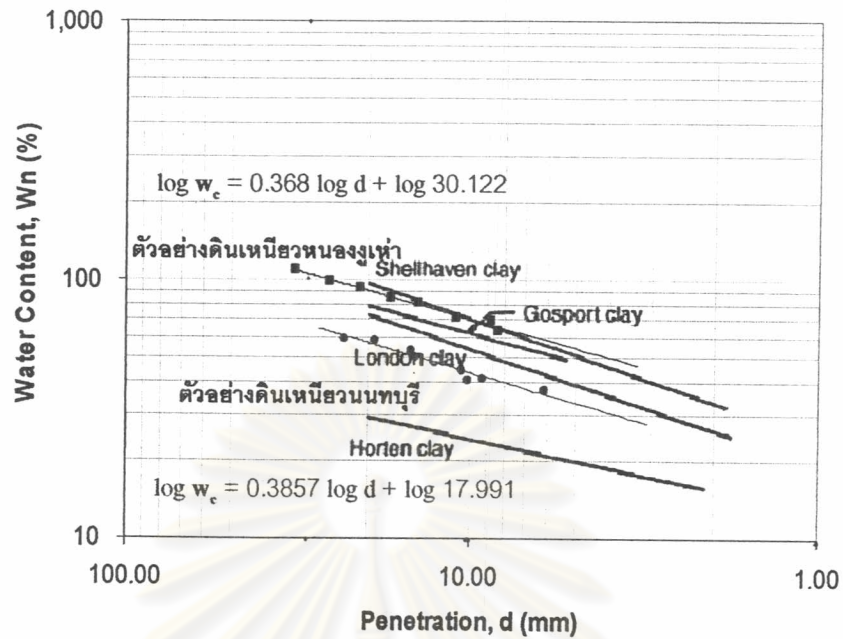




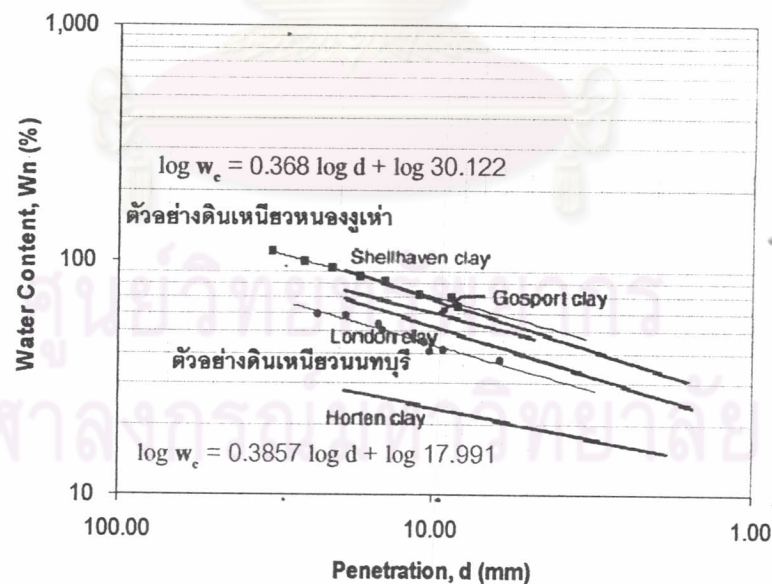
รูปที่ 4.14 แสดงค่า Water Content (%) กับ ระยะจมของหัวกรวยหัวกรวยมาตรฐาน (Penetration d, mm.) ของตัวอย่างดินเหนียวหนทบุรี และตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า ใน scale Log-Log



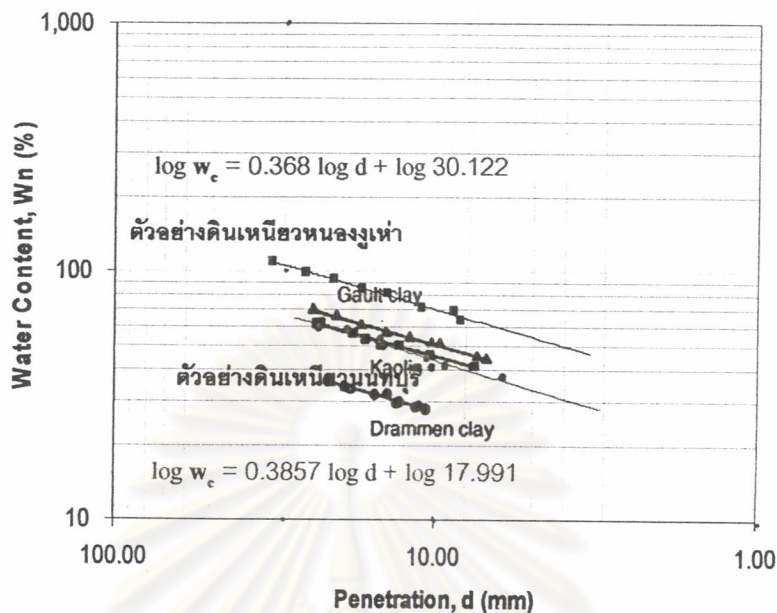
รูปที่ 4.15 แสดงค่า Water Content (%) กับ ระยะจมของหัวกรวยหัวกรวย (Penetration d, mm.) ของตัวอย่างดินเหนียวหนทบุรี และตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า เปรียบเทียบกับผลการทดสอบของ Feng, T.W. (2000)



รูปที่ 4.16 แสดงค่า Water Content (%) กับ ระยะจมของหัวกรวยหัวกรวย (Penetration  $d$ , mm.) ของตัวอย่างดินเหนียวนนทบุรี และตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า เปรียบเทียบกับผลการทดสอบของ Skempton & Northey (1953)



รูปที่ 4.17 แสดงค่า Water Content (%) กับ ระยะจมของหัวกรวยหัวกรวย (Penetration  $d$ , mm.) ของตัวอย่างดินเหนียวนนทบุรี และตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า เปรียบเทียบกับผลการทดสอบของ Karlsson (1961)



รูปที่ 4.18 แสดงค่า Water Content (%) กับ ระยะจมของหัวกรวยหัวกรวย (Penetration d, mm.) ของตัวอย่างดินเหนียวนนทบุรี และตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า เปรียบเทียบกับผลการทดสอบของ Wood (1985)

และจากสมการการหาค่า Plastic Limit จากการทดสอบ Fall Cone Test ของ Feng, T.W. (2000) ไปไปตามสมการ

$$P.L. = c(2)^m \tag{4.1}$$

ซึ่ง c และ m หาได้จากสมการเส้นตรงของกราฟการทดสอบ Fall Cone Test ระหว่าง Penetration – Water Content ใน scale Log-Log ดังสมการ

$$\log w = \log c + m \log d$$

โดยที่ค่า c และ m ของตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่าและตัวอย่างดินเหนียวนนทบุรีมีแสดงในตารางที่ 4.4 สำหรับตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า ค่า c = 30 และ m = 0.638 ทำให้ได้ค่า Plastic Limit = 38 % (ASTM D4318-84 = 37%) และสำหรับตัวอย่างดินเหนียวนนทบุรี ค่า c = 18 และ m = 0.357 ทำให้ได้ค่า Plastic Limit = 23 % (ASTM D4318-84 = 21%)

ตารางที่ 4.4 แสดงค่า  $c$  และ  $m$  จากสมการของ Feng, T.W. (2000)

Soil	$LL_{Casagrande}$ : %	$e$ : %	$m$	Reference
Sirjan clay	36	14	0.332	Present investigation
Taipei clay	43	17	0.332	Present investigation
Panama clay	125	47	0.321	Present investigation
Kaolin	50	20	0.301	Present investigation
Bentonite	423	17	1	Present investigation
Shellhaven clay	97	26	0.436	Skempton & Northey (1953)
London clay	73	21	0.410	Skempton & Northey (1953)
Horten clay	30	13	0.266	Skempton & Northey (1953)
Gosport clay	80	28	0.352	Skempton & Northey (1953)
Swedish clay	83	26	0.425	Karlsenn (1961)
Swedish clay	70	25	0.360	Karlsenn (1961)
Swedish clay	63	22	0.360	Karlsenn (1961)
Swedish clay	54	21	0.308	Karlsenn (1961)
Drammen clay	35	12	0.350	Wood (1985)
Kaolin	59	21	0.343	Wood (1985)
Gault clay	65	23	0.345	Wood (1985)
Bentonite	526	16	1	Ward & Bezirci (1986)
Turkey soil	110	20	0.569	Ward & Bezirci (1986)
Turkey soil	52	21	0.335	Ward & Bezirci (1986)
Bandung clay	100	39	0.312	Hartson (1988)
Bandung clay	86	31	0.341	Hartson (1988)
Bandung clay	78	30	0.318	Hartson (1988)
Bandung clay	72	30	0.292	Hartson (1988)
Bandung clay	65	32	0.237	Hartson (1988)
Bandung clay	63	30	0.239	Hartson (1988)
Bandung clay	59	31	0.216	Hartson (1988)
หนองพู่	91.15	30	0.368	Sutee (2003)
หนองบัว	58.95	18	0.357	Sutee (2003)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.4 ทดสอบเครื่องมือหากำลังแรงเฉือนด้วยใบพัดในห้องทดสอบ (Laboratory Vane Shear Test)

##### 4.4.1 ศึกษาผลจากเปลี่ยนค่า Water Content กับกำลังรับแรงเฉือน

เมื่อทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในห้องทดสอบ (Laboratory Vane Shear Test) โดยการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4648-94 ติดตั้งใบพัด (Miniature Vane Blade) ขนาด 1.25x1.25 เซนติเมตรพร้อมสปริงเบอร์ 4 และ อัตราการหมุนของใบพัด (Rate of Shear) คือ 60°/นาที่ เมื่อทำการทดสอบโดยการเปลี่ยน Water Content ไปเรื่อยๆ เพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า Water Content กับตัวอย่างดิน 3 ชนิด คือ ดินหนองงูเห่า, ดินนนทบุรี และ ดิน Kaoline ได้กราฟตามรูปที่ 4.19, รูปที่ 4.20 และ รูปที่ 4.21 ตามลำดับ และรูปที่ 4.22 จะแสดงตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิดพร้อมกัน

จากรูป 4.19, 4.20, 4.21 และ 4.22 จะเห็นว่าลักษณะของกราฟจะเป็นไปในลักษณะเดียวกัน โดยเส้นโค้งขึ้นในช่วงแรกที่ค่า Water Content น้อยและจะชันน้อยลงเรื่อยๆ เมื่อเลยค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit) ไปแล้ว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินจะมีค่าจะมีลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อค่าปริมาณความชื้นของดินเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณความชื้นเลยค่าพิกัดเหลวไปแล้วพบว่า ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินจะมีความชันน้อยลงจนเกือบที่จะเป็นเส้นตรงหรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก แต่เมื่อทำการเปลี่ยนแปลง Water Content เป็นค่า Liquidity Index จะได้กราฟแสดงค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน (Shear Strength, kPa) กับค่า Liquidity Index ดังรูปที่ 4.23 เพราะการเปรียบเทียบตัวอย่างดินหลายชนิดใช้ค่า Liquidity Index จะดีกว่าเนื่องจากค่า Liquidity Index จะคำนึงถึงช่วงของค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit) และค่าพิกัดพลาสติก (Plastic Limit) ของดินด้วย จากรูปที่ 4.23 จะได้เส้นกราฟที่ใกล้เคียงกันเกือบที่จะเป็นเส้นเดียวกันสำหรับดินหนองงูเห่า และดินเหนียวนนทบุรี แต่สำหรับดินเหนียว Kaoline จะเส้นกราฟจะชันสูงกว่าดินเหนียวหนองงูเห่าและดินเหนียวนนทบุรี อันมีเหตุผลเนื่องมาจาก ดินเหนียว Kaoline มีช่วงพิกัดเหลว (liquid Limit) ที่ 34.50% และ พิกัดพลาสติก (Plastic Limit) ที่ 25.39 % ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันมาก หรือมีช่วง Liquidity Index ที่แคบมากจนเกือบหาค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกไม่ได้ เนื่องจากมีทรายปนในเนื้อดินเหนียว Kaoline ที่ใช้ในการทดสอบค่อนข้างสูง ทำให้ดินเหนียว Kaoline มีพฤติกรรมการยึดเกาะตัวคล้ายกับดินทราย (Cohesion Less Soil) ซึ่งดินทรายมีการจัดเรียงตัวของอนุภาคแบบ Interlocking ซึ่งทำให้มีค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงกว่าดินเหนียวที่มีการจัดเรียงตัวแบบ Cohesive Soil จึงทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength) ของดิน Kaoline มีค่าสูงกว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินหนองงูเห่าและดินนนทบุรี ค่อนข้างมากดังแสดงในรูปที่ 4.23

เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงรูปที่ 4.14 ให้อยู่ในมาตราส่วน Logarithm หรือเป็นกราฟ log-log ดังรูปที่ 4.24 ซึ่งจะพบว่าเส้นกราฟที่ได้จะเป็นกราฟเส้นตรง จากรูปที่ 4.24 เราพบว่าสมการของดินแต่ละชนิดมีค่าดังต่อไปนี้

$$\text{ดินหนองงูเห่า} \quad \log w_n = -0.2934 \log c_u + 2.0384$$

$$\text{ดินนนทบุรี} \quad \log w_n = -0.2690 \log c_u + 1.8151$$

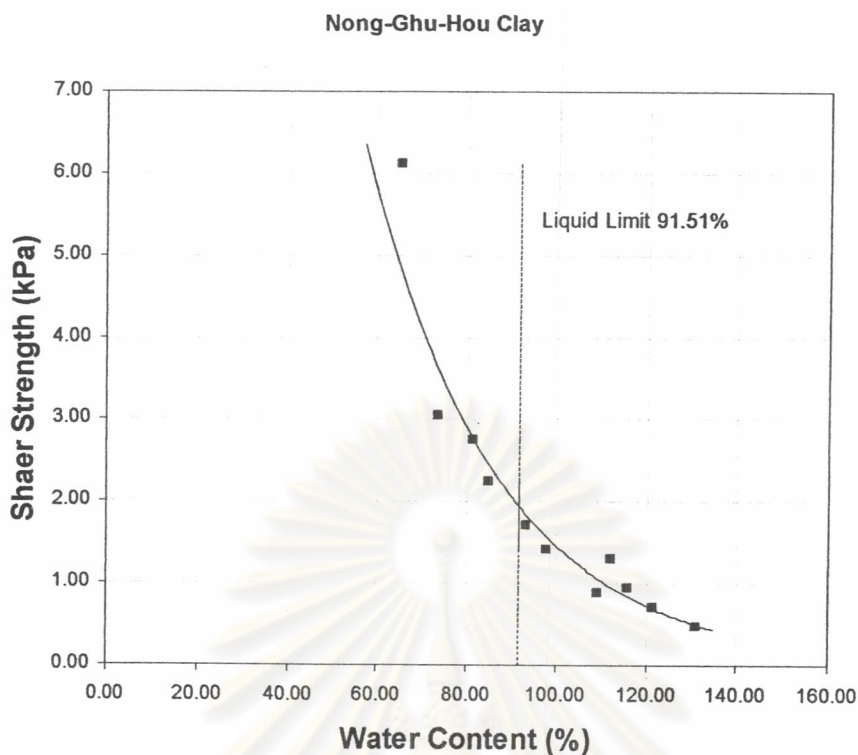
$$\text{ดิน Kaoline} \quad \log w_n = -0.1982 \log c_u + 1.6439$$

ซึ่งเราพบว่าความชันกราฟของดินหนองงูเห่าและดินนนทบุรีมีค่าใกล้เคียงกัน แต่สำหรับดิน Kaoline มีค่ามากกว่าดินทั้งสองมาก ทำให้เราทราบพฤติกรรมของกำลังรับแรงเฉือนของดิน Kaoline ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง Water Content เพียงเล็กน้อยก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับแรงเฉือนมาก ซึ่งดินชนิดนี้เป็นดินที่ Sensitive สูง และเมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองอื่นๆ ในลักษณะเดียวกันที่ผ่านมาพบว่าจะได้ตามรูปที่ 4.25 และรูปที่ 4.26 จะพบว่าจากรูปที่ 4.25 เป็นการเปรียบเทียบกับทดสอบของ Skempton & Northley (1953) ใช้ตัวอย่างดินทดสอบทั้งหมด 4 ชนิด ตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่าและตัวอย่างดินเหนียวนนทบุรี มีการเคลื่อนตัวไปในทิศทางเดียวกับการทดสอบของ Skempton & Northley (1953) และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Zreik(1995), Leroueil et al.(1983) และ Locat&Demers (1988) ดังรูปที่ 4.26 พบว่าการเคลื่อนตัวและความชันของกราฟตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่าและตัวอย่างดินเหนียวนนทบุรีมีความสอดคล้องจนเกือบจะเป็นเส้นเดียวกันกับการทดสอบของ Zreik(1995), Leroueil et al.(1983) และ Locat&Demers (1988) และได้สมการสำหรับการหาค่ากำลังรับแรงเฉือนออกมาเป็นดังนี้

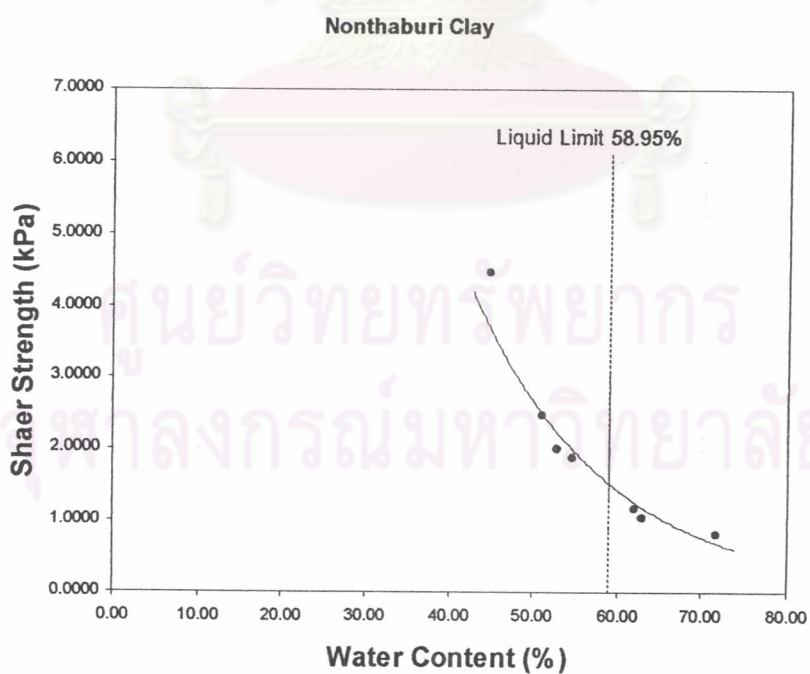
$$\text{ดินหนองงูเห่า} \quad \log(c_u) = (I_L - 1.355) / -0.513$$

$$\text{ดินนนทบุรี} \quad \log(c_u) = (I_L - 1.166) / -0.398$$

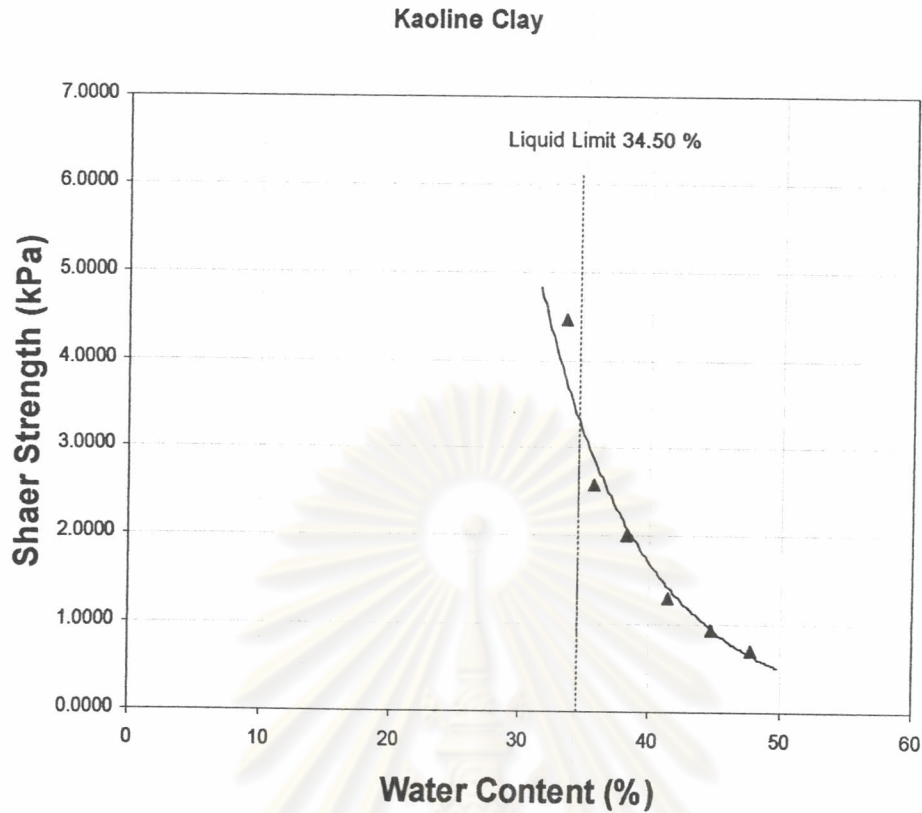
สมการที่ได้จากตัวอย่างดินหนองงูเห่าและตัวอย่างดินนนทบุรีมีค่าใกล้เคียงกัน กับสมการการทดสอบของ Zreik(1995), Leroueil et al.(1983) และ Locat&Demers (1988) ทำให้เราทราบว่าไม่ว่าจะเป็นดินเหนียวประเภทใดจะมีพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงค่า LI กับค่า Shear Strength ไปในแนวเดียวกันคือ จะมีความชันลดลงอย่างมากเมื่อค่า Liquidity Index กว่า 1.0 (ที่ค่า Liquid Limit) แต่เมื่อค่า Liquidity Index มากกว่า 1.0 แล้วความชันของค่ากำลังรับแรงเฉือนจะลดลงจนเกือบที่จะเป็นเส้นตรงและจะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เนื่องจากดินที่ใช้ทดสอบอยู่ในสภาวะของเหลวเรียบร้อยแล้ว



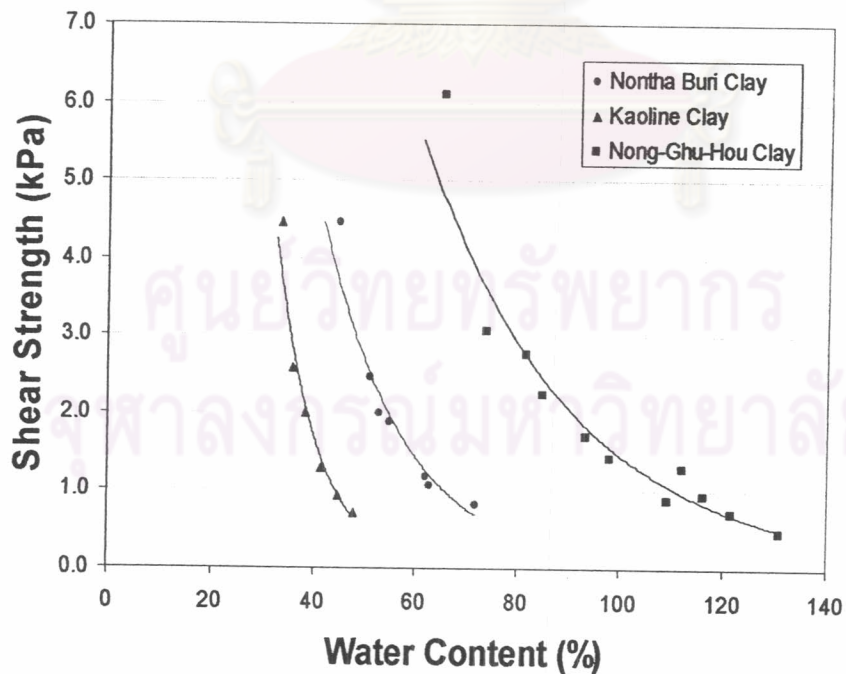
รูปที่ 4.19 แสดงค่ากำลังรับแรงเฉือน (shear Strength, kPa) กับ ค่าปริมาณค่าชื้นของดิน (Water Content, %) ของดินเหนียวหนองงูเห่า



รูปที่ 4.20 แสดงค่ากำลังรับแรงเฉือน (shear Strength, kPa) กับ ค่าปริมาณค่าชื้นของดิน (Water Content, %) ของดินเหนียวนนทบุรี

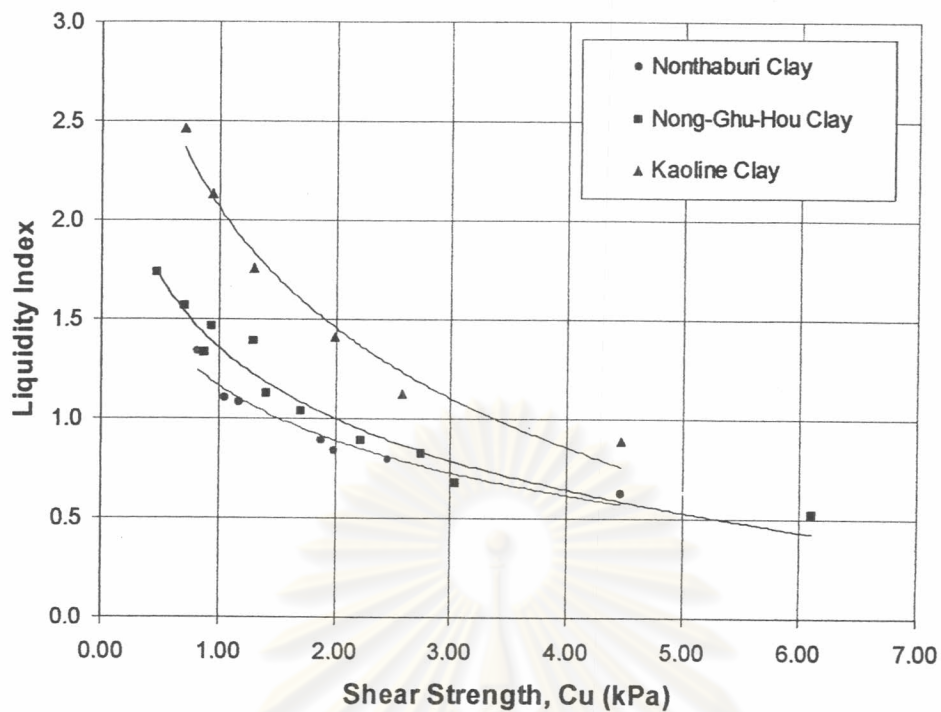


รูปที่ 4.21 แสดงค่ากำลังรับแรงเฉือน (shear Strength, kPa) กับ ค่าปริมาณค่าขึ้นของดิน (Water Content, %) ของดินเหนียว Kaoline

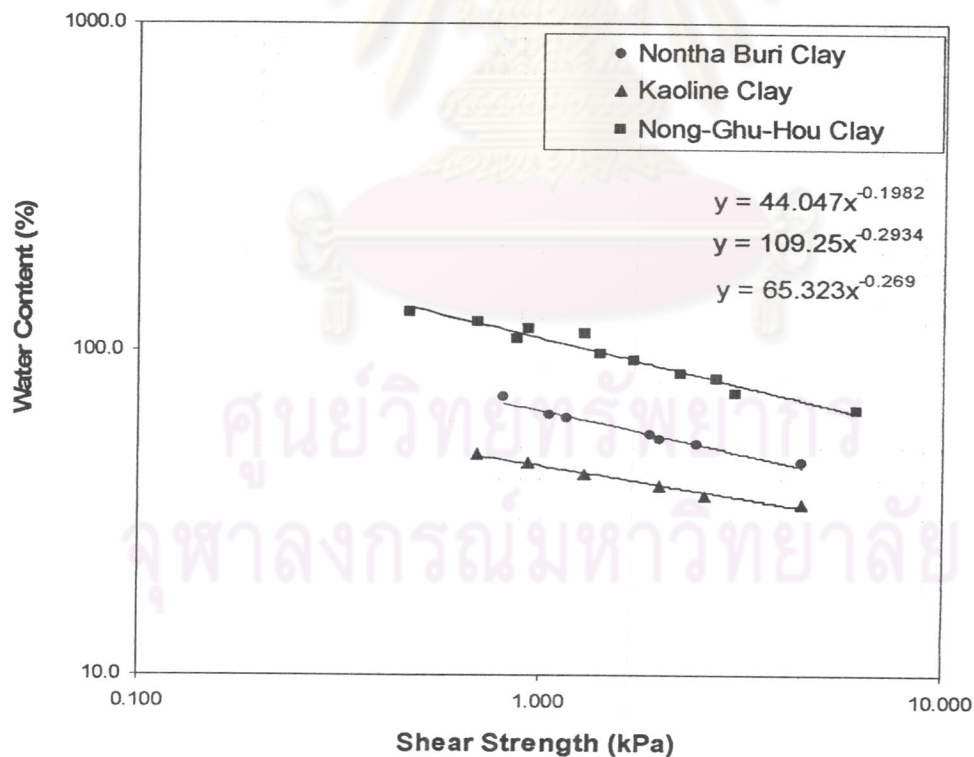


รูปที่ 4.22 แสดงค่ากำลังรับแรงเฉือน (shear Strength, kPa) กับ ค่าปริมาณค่าขึ้นของดิน (Water Content, %) ของดินเหนียวหนองงูเห่า, ดินเหนียวนนทบุรี, ดินเหนียว Kaoline

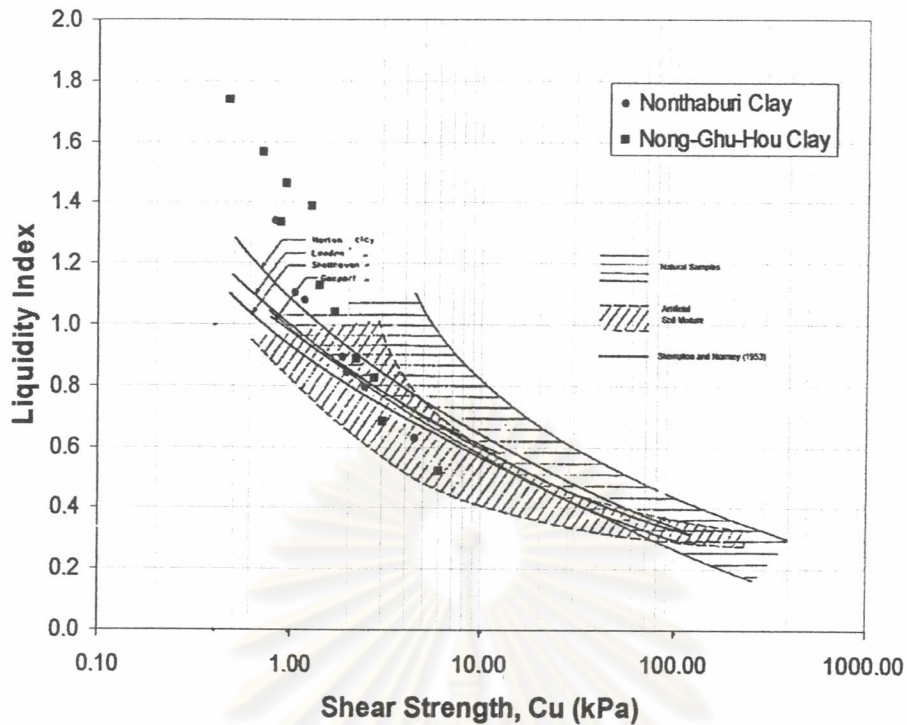




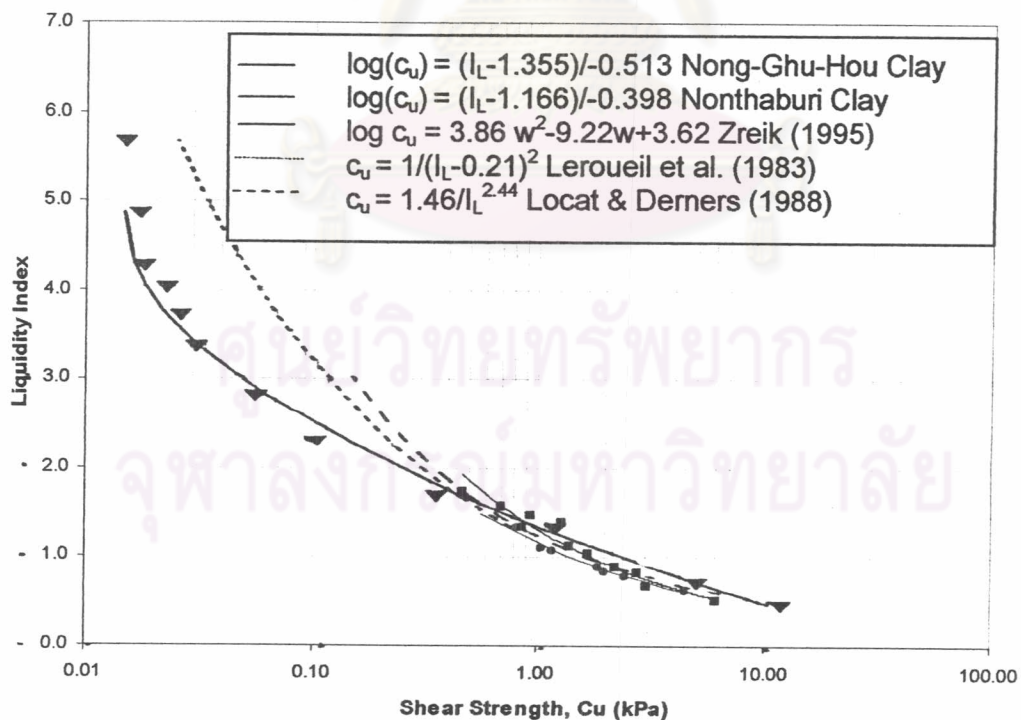
รูปที่ 4.23 แสดงค่ากำลังรับแรงเฉือน (shear Strength, kPa) กับ Liquidity Index ของดินเหนียวหนองงูเห่า, ดินเหนียวนนทบุรี, ดินเหนียว Kaoline



รูปที่ 4.24 แสดงค่ากำลังรับแรงเฉือน (shear Strength, kPa) กับ Water Content (%) ใน Log-Log scale ของดินเหนียวหนองงูเห่า, ดินเหนียวนนทบุรี, ดินเหนียว Kaoline



รูปที่ 4.25 แสดงค่ากำลังรับแรงเฉือน (shear Strength, kPa) กับ Liquidity Index ของ ตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า, ดินเหนียวนนทบุรี เปรียบเทียบกับกราฟที่ได้ จาก Skempton Northley (1953)



รูปที่ 4.26 แสดงค่ากำลังรับแรงเฉือน (shear Strength, kPa) กับ Liquidity Index ของ ตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า, ดินเหนียวนนทบุรี เปรียบเทียบกับกราฟที่ได้ จาก with Zreik(1995), Leroueil et al.(1983), Locat&Demers (1988)

#### 4.4.2 ศึกษาผลจากเปลี่ยนค่า Salt Content กับกำลังรับแรงเฉือน

เมื่อทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในห้องทดสอบ (Laboratory Vane Shear Test) โดยการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4648-94 ติดตั้งใบพัด (Miniature Vane Blade) ขนาด 1.25x1.25 เซนติเมตรพร้อมสปริงเบอร์ 4 และ อัตราการหมุนของใบพัด (Rate of Shear) คือ 60°/นาาที ทำการทดสอบโดยการเปลี่ยนค่า Salt Content ไปที่ค่า Salt Content 10 g/L, 20 g/L และ 40 g/L กับตัวอย่างดินหนองงูเห่าและตัวอย่างดินนนทบุรี

ในการเตรียมตัวอย่างดินน้ำที่ใช้ในการเปลี่ยนค่า Water Content จำเป็นต้องใช้น้ำผสม NaCl เพื่อให้ได้ค่า Salt Content ที่ต้องการ ซึ่งเราสามารถคำนวณหาปริมาณน้ำเกลือที่จะใช้ผสมดิน ตามสูตรดังนี้

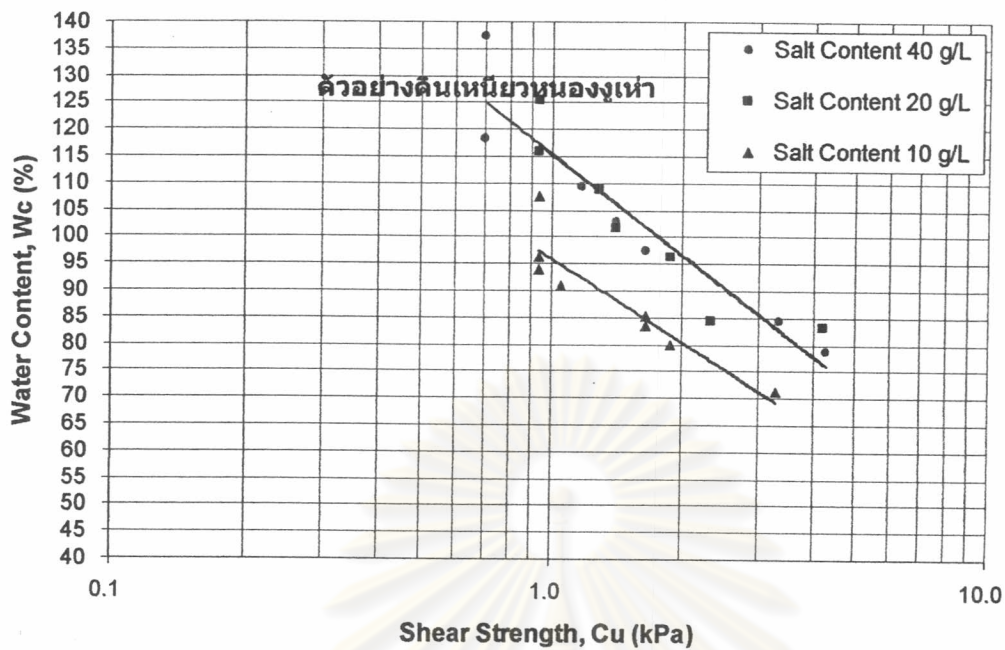
$$W_w = \frac{(w_f - w_i)W_t}{(100 + w_i)} \quad \text{-----(4.2)}$$

เมื่อ	$W_w$	= ปริมาณน้ำเกลือที่จะใช้ผสมดิน	กรัม
	$w_f$	= ความชื้นที่ต้องการจะผสมดิน	%
	$w_i$	= ความชื้นดินเฉลี่ยที่จะใช้ทดสอบ	%
	$W_t$	= น้ำหนักตัวอย่างดินที่จะใช้ทดสอบ	กรัม

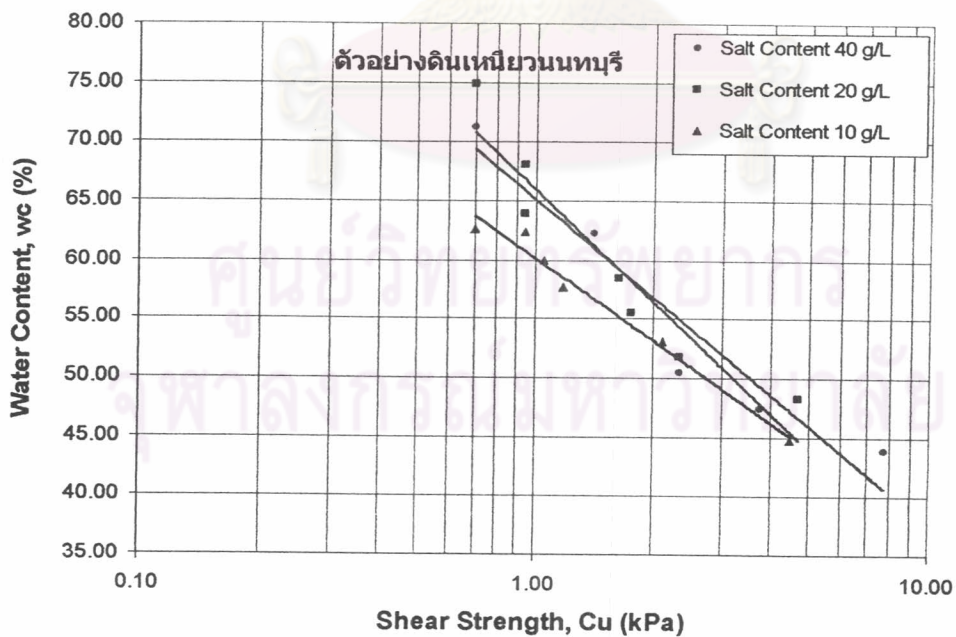
จากนั้นจึงตัวอย่างดินที่มีค่า Salt Content ตามต้องการมาทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4648-94 นำผลการทดสอบมาวัดกราฟระหว่างค่า Water Content (%) กับค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength, kPa) สำหรับตัวอย่างดินหนองงูเห่าได้รูปที่ 4.27 และตัวอย่างดินนนทบุรีได้รูปที่ 4.28 เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.27 และ 4.28 เราพบว่าลักษณะเส้นกราฟค่ากำลังรับแรงเฉือนจะแปรผกผันกับค่า Water Content คือเมื่อค่า Water Content เพื่อขึ้นจะทำให้ค่ากำลังแรงเฉือนมีค่าลดลง และถึงแม้ว่าเราเปลี่ยนค่า Salt Content ไม่ทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนเปลี่ยนแปลงไปน้อยมาก โดยดูจากลักษณะกราฟที่เกาะกลุ่มอยู่ด้วยและไปในทิศทางเดียวกัน แต่ก็มีมีความแตกต่างกันเล็กน้อย เมื่อดูจากรูปที่ 4.27 และ 4.28 จะพบว่าทางเดินของเส้นตัวอย่างดินที่มีค่า Salt Content 10 g/L จะอยู่ต่ำกว่าตัวอย่างดินที่มีค่า Salt Content 20 g/L และ 40 g/L และเส้นตัวอย่างดินที่มีค่า Salt Content 20 g/L จะอยู่ต่ำกว่าตัวอย่างดินที่มีค่า Salt Content 40 g/L แสดงให้เห็นว่าค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength) ของดินจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อ Salt Content มีค่าเพิ่มมากขึ้น สาเหตุที่ทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเพิ่มมากขึ้นเนื่องมาจากดินที่

ใช้ในการทดสอบเป็นดินกรุงเทพฯซึ่งเป็นดิน Marine Clay มาก่อนจากนั้นเกิดขบวนการ Leaching ทำให้ดินมีการเปลี่ยนโครงสร้างดินจาก Stable Structure เป็น Meta-Stable Structure (Skempton and Northey, 1952) เมื่อค่า Salt Content เพิ่มมากขึ้น จากการเพิ่มปริมาณเกลือเข้าไปทำให้เพิ่มประจุของ  $\text{Na}^+$  และ  $\text{Cl}^-$  ซึ่ง  $\text{Na}^+$  เกิดการละลายน้ำ จากนั้นอิออนลบของ  $\text{Cl}^-$  จึงเข้าไปจับกับอิออนบวกของอนุภาคของดิน ทำให้ดินที่มีโครงสร้างแบบ Meta-Stable Structure มีการจัดเรียงตัวใหม่ให้เป็นแบบ Dispersive Structure ซึ่งทำให้อนุภาคของดินมีความเป็นระเบียบมากขึ้น ซึ่งเมื่ออนุภาคของดินจัดเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้น จึงทำให้ดินมีความสามารถรับกำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength) เพิ่มมากขึ้น ซึ่งได้ออกมาตามผลการทดสอบตามรูปที่ 4.27 และรูปที่ 4.28 แต่สำหรับดินที่มีค่า Salt Content 20 g/L กับ 40 g/L มีค่ากำลังรับแรงเฉือนกับ Water Content แตกต่างกันไม่มากนักเกือบที่มีค่าเท่ากัน ดูจากรูปที่ 4.27 และ รูปที่ 4.28 อาจจะมีสาเหตุมาจาก อิออนลบของ  $\text{Cl}^-$  เข้าไปจับตัวกับอิออนบวกของอนุภาคของดินเหนียวจนเต็มแล้ว ถึงแม้ว่าจะเพิ่มประจุลบเข้าไปอีกเท่าไร ไม่สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวของอนุภาคดินได้อีก จึงทำให้สามารถอธิบาย เส้นกราฟจากรูปที่ 4.27 และ รูปที่ 4.28 ได้ว่าค่าของตัวอย่างดินที่มีค่า Salt Content 20 g/L และตัวอย่างดินที่มีค่า Salt Content 40 g/L มีเส้นกราฟระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือน(Shear Strength) – Water Content ใกล้เคียงกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.27 แสดงค่า Water Content (%) กับ ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength, kPa) ของตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า เมื่อทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงค่า Salt Content ที่ 40 g/L, 20 g/L และ 10 g/L



รูปที่ 4.28 แสดงค่า Water Content (%) กับ ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength, kPa) ของตัวอย่างดินเหนียวนนทบุรี เมื่อทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงค่า Salt Content ที่ 40 g/L, 20 g/L และ 10 g/L

และเมื่อทำการทดสอบหาค่า Liquid Limit เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า Salt Content พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงตามตารางที่ 4.5 ซึ่งแสดงค่า Liquid Limit และ Plastic Limit ที่ค่า Salt Content 10 g/L, 20 g/L และ 40 g/L จากตารางที่ 4.5 พบว่า สำหรับตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า เมื่อค่า Salt Content อยู่ 10 g/L จะมีค่า Liquid Limit เท่ากับ 82 % , ค่า Salt Content อยู่ 20 g/L จะมีค่า Liquid Limit เท่ากับ 88 % , ค่า Salt Content อยู่ 40 g/L จะมีค่า Liquid Limit เท่ากับ 89 % จะเห็นว่าเมื่อมีการเปลี่ยนค่า Salt Content อยู่ที่ 20 g/L และ 40 g/L พบว่าค่า Liquid Limit มีค่าใกล้เคียงกันและใกล้เคียงกับ Liquid Limit ที่ได้จากการทดสอบโดยไม่เติม Salt Content ซึ่งอยู่ที่ 91 % แต่เมื่อค่า Salt Content อยู่ที่ 10 g/L พบว่าค่า Liquid Limit ลดลงไปมากเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดิน

ในทำนองเดียวกันสำหรับตัวอย่างดินนหนบุรีเมื่อค่า Salt Content อยู่ 10 g/L จะมีค่า Liquid Limit เท่ากับ 55 % , ค่า Salt Content อยู่ 20 g/L จะมีค่า Liquid Limit เท่ากับ 58 % , ค่า Salt Content อยู่ 40 g/L จะมีค่า Liquid Limit เท่ากับ 58 % จะเห็นว่าเมื่อมีการเปลี่ยนค่า Salt Content อยู่ที่ 20 g/L และ 40 g/L พบว่าค่า Liquid Limit มีค่าใกล้เคียงกันและใกล้เคียงกับ Liquid Limit ที่ได้จากการทดสอบโดยไม่เติม Salt Content ซึ่งอยู่ที่ 59 % แต่เมื่อค่า Salt Content อยู่ที่ 10 g/L พบว่าค่า Liquid Limit ลดลงไปมากเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดิน

ตารางที่ 4.5 แสดงค่า Liquid Limit และ Plastic Limit ที่ค่า Salt Content 10 g/L, 20 g/L และ 40 g/L

Type of Soil	Salt Content					
	10 g/L		20 g/L		40 g/L	
	PL(%)	LL(%)	PL(%)	LL(%)	PL(%)	LL(%)
ตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า	38	82	40	88	40	89
ตัวอย่างดินเหนียวหนบุรี	22	55	25	58	24	58

4.5 เปรียบผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนของเครื่องมือกรวยตก (fall Cone Test) กับ เครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนด้วยใบพัดในห้องทดสอบ (Laboratory Vane Shear Test)

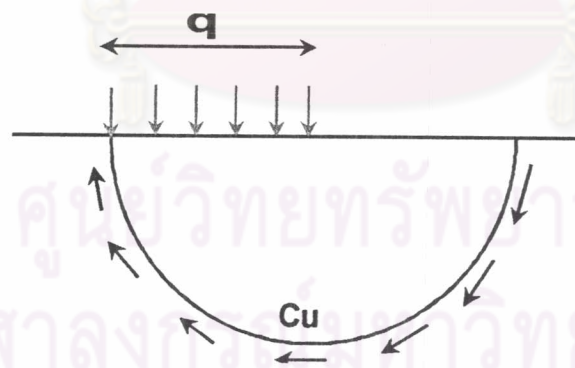
4.5.1 เปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือน เพื่อหาค่า  $K$  ของเครื่องมือกรวยตก (Fall Cone Apparatus)

จากสมการหาค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength,  $c_u$ ) จากเครื่องมือกรวยตก (Fall Cone Apparatus) ของ Hasbo (1957) ดังสมการที่ (4.1)

$$c_u = \frac{KW}{d^2} \quad (4.3)$$

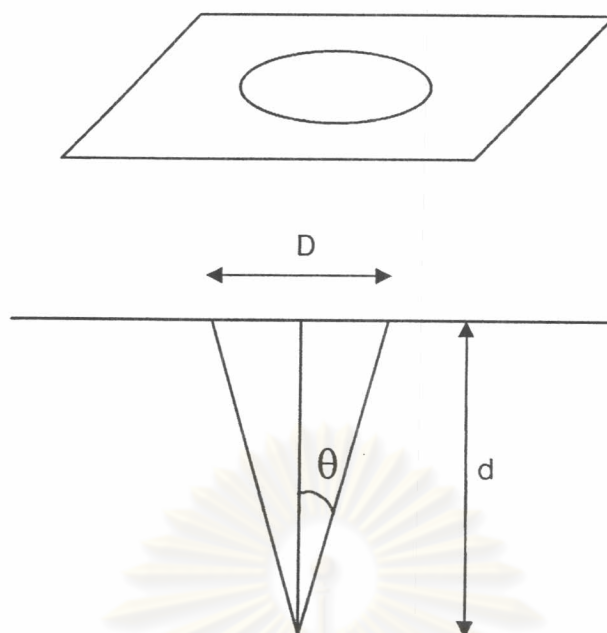
เมื่อ  $c_u$  คือ ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดิน  
 $W$  คือ น้ำหนักกรวย  
 $d$  คือ ค่าระยะจุมของกรวย  
 $K$  คือ ค่าคงที่ของกรวย

เมื่อเรานำสมการที่ 4.1 ของ Hansbo (1957) มาทำการวิเคราะห์จะพบว่า สมการของ Hansbo (1957) มีพื้นฐานมาจากการหาค่า Bearing Capacity ตามการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้



จากสมการ Bearing Capacity

$$q = 2\pi c_u$$



เมื่อ  $D \propto d$

$$\frac{D}{2} = d \tan \theta$$

จากรูปสมการ Bearing Capacity คือ

$$q = \frac{W}{\frac{\pi D^2}{4}} = 2\pi c_u$$

$$\frac{W}{\frac{\pi}{4} (2d \tan \theta)^2} = 2\pi c_u$$

เพราะฉะนั้นจะได้สมการเป็น

$$c_u = \frac{\left( \frac{\cot^2 \theta}{2\pi^2} \right) W}{d^2}$$

เมื่อนำค่า  $c_u$  ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับสมการ 4.1 ของ Hansbo (1957) จะได้

$$K = \frac{\cot^2 \theta}{2\pi^2} \quad (4.4)$$



จากสมการที่ 4.3 เราจะพบว่าค่า  $K$  ที่ได้จากสมการของ Hansbo(1957) จะเป็นค่าคงที่ ที่แปรผันตามค่ามุมของหัวกรวย ดังสมการที่ 4.5

$$K \propto f(\theta) \quad (4.5)$$

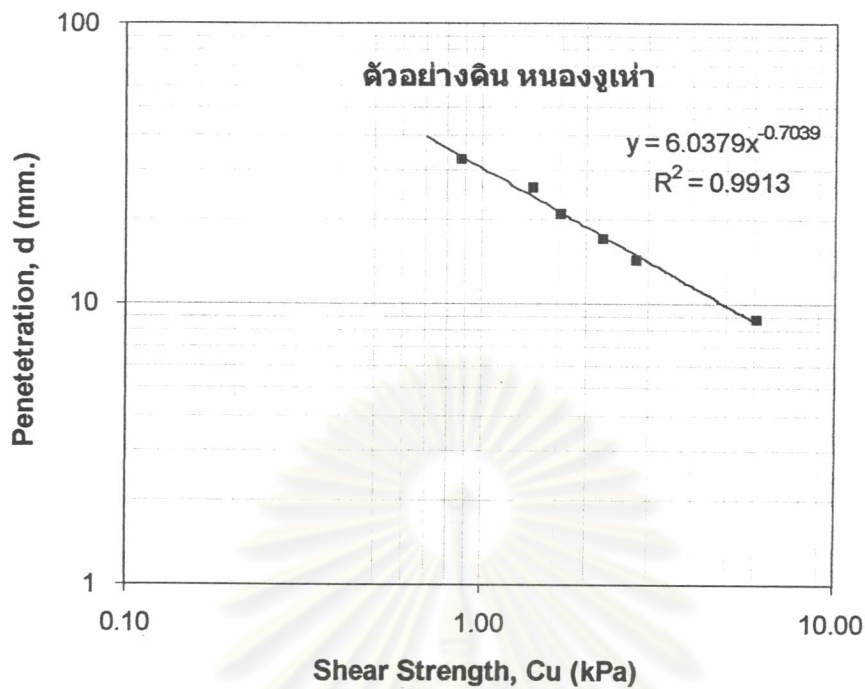
เมื่อเรานำสมการที่ 4.4 ใส่ค่ามุมของหัวกรวยที่ใช้ในการทดสอบคือ มุม  $22.5^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  จะได้ค่า  $K$  ออกมาตามตารางที่ 4.6 ซึ่งค่า  $K$  ที่ได้จากการทดสอบควรมีค่าไม่แตกต่างจากที่คำนวณมากนัก

ตารางที่ 4.6 แสดงค่า  $K$  จากการคำนวณสมการที่ 4.2 ที่มุมหัวกรวยต่างกัน

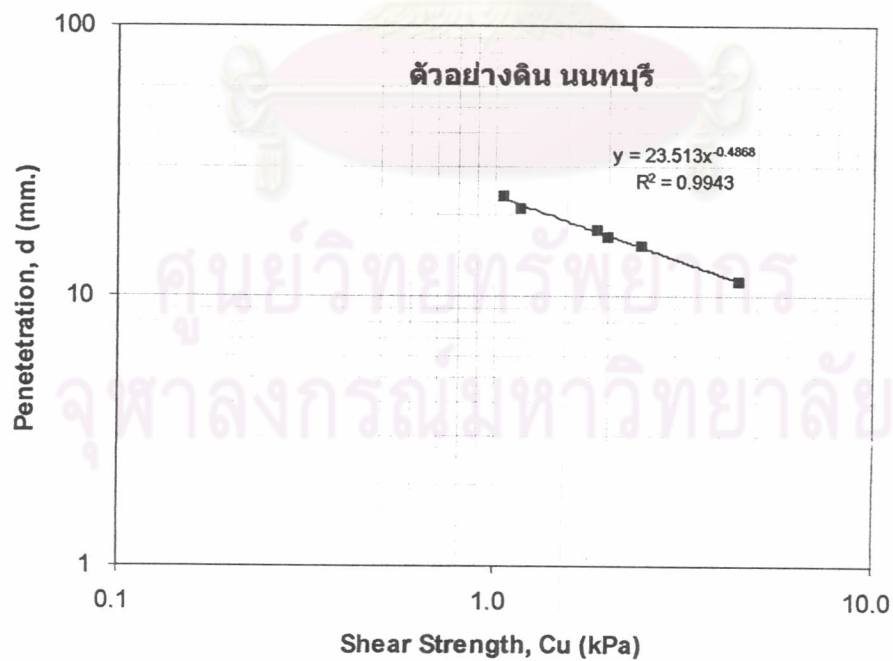
มุมของหัวกรวย	K
$22.5^\circ$	1.280
$30^\circ$	0.706
$60^\circ$	0.152
$90^\circ$	0.051

เมื่อทำการทดสอบ ตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่าและตัวอย่างดินเหนียวนนทบุรี ด้วยเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนด้วยใบพัดในห้องทดสอบ (Laboratory Vane Shear Test) เพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength,  $c_u$ ) เปรียบกับระยะจมของหัวกรวย (Penetration,  $d$ ) ที่ได้จากการทดสอบกรวยตก (Fall Cone Test) สำหรับตัวอย่างดินหนองงูเห่าและ สำหรับตัวอย่างดินนนทบุรี โดยใช้หัวกรวยขนาด  $30^\circ$  และหนัก 80 กรัม

พบว่าค่าระยะจมของหัวกรวย (Penetration,  $d$ ) จะแปรผกผันกับค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength,  $c_u$ ) เมื่อเราทำการเปลี่ยนมาตราส่วนให้อยู่ใน scale Log-Log ดังรูปที่ 4.29 สำหรับตัวอย่างดินหนองงูเห่าและ รูปที่ 4.30 สำหรับตัวอย่างดินนนทบุรี จะพบว่าความสัมพันธ์ที่ได้ออกมาในรูปแบบของกราฟเส้นตรง ซึ่งง่ายต่อการนำไปใช้ประโยชน์ เมื่อสังเกตดูค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่ค่าระยะจมของหัวกรวยที่ระยะ 20 มิลลิเมตร(mm.) ซึ่งจะอยู่ตรงตำแหน่งของค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit ตามมาตรฐาน BS 1377) มีค่าอยู่ที่ประมาณ 1.7-1.8 kPa ซึ่งใกล้เคียงกับการทดสอบของ Youssef et al. (1965) และ Sherwood & Ryley (1953) ที่กล่าวว่าคุณค่ากำลังรับแรงเฉือนที่พิกัดเหลวมีค่าประมาณ 1.7 kPa จึงเป็นการยืนยันว่าผลการทดสอบนี้ถูกต้องและมีค่าที่เชื่อถือได้



รูปที่ 4.29 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength  $c_u$ , kPa) กับ ระยะจมของหัวกรวย (Penetration  $d$ , mm.) ทดสอบกับตัวอย่างดินหนองงูเห่า



รูปที่ 4.30 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength  $c_u$ , kPa) กับ ระยะจมของหัวกรวย (Penetration  $d$ , mm.) ทดสอบกับตัวอย่างดินนนทบุรี

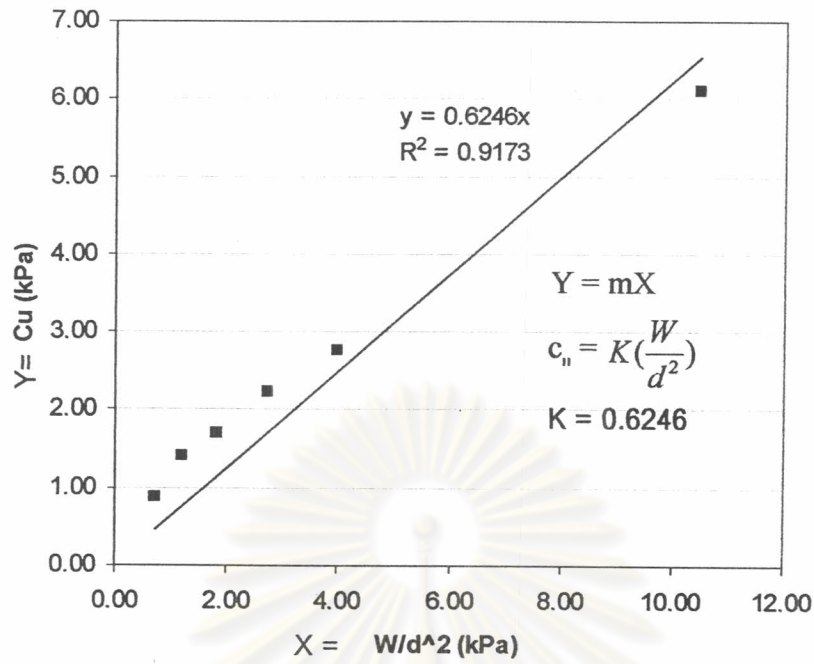
เมื่อเรานำผลการทดสอบ มาเขียนกราฟใหม่เพื่อหาค่า  $K$  จากสมการที่ 4.1 โดยเปลี่ยนเป็นการเขียนกราฟระหว่าง ค่า  $c_u - \frac{W}{d^2}$  จะได้ออกมาตามรูปที่ 4.31 สำหรับตัวอย่างดินหนองงูเห่าและ รูปที่ 4.32 สำหรับตัวอย่างดินนหนบุรี โดยเราจำเป็นต้องบังคับกราฟให้ตัดที่จุด (0,0) เพื่อที่จะหาค่า Slope ออกมาในรูป  $y = mx$  ซึ่งเมื่อแทนค่า  $y = c_u$  และค่า  $x = \frac{W}{d^2}$  จะได้อ่า slope  $m = K$  ตามสมการที่ 4.1

จากรูปที่ 4.27 และ รูปที่ 4.28 สำหรับตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่าจะได้ค่า  $K = 0.625$ ,  $R^2 = 0.917$  และสำหรับตัวอย่างดินเหนียวนหนบุรีได้ค่า  $K = 0.713$ ,  $R^2 = 0.9972$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงตามที่คำนวณตามตารางที่ 4.7 แต่ในที่นี้ค่า  $K$  ที่ได้ไม่จำเป็นต้องใกล้เคียงกับค่าโดยประมาณที่ 0.706 (ตามตาราง 4.6) เสมอไป ดังเช่นจากการทดสอบของ Houlsby(1982) ที่เสนอค่า  $K = 2.83$  สำหรับหั่วกรวย  $30^\circ$  ซึ่งมีค่าแตกต่างกันมากกับคนอื่นที่เสนอค่า  $K \approx 0.7-1.0$  ดังแสดงตามตารางที่ 4.7 จากผลการทดสอบที่ผ่านมาแสดงว่าค่า  $K$  ที่ได้จากการเสนอของ Houlsby(1982) น่าจะเป็นค่า  $K$  ที่เสนอผิดพลาดเพราะมีค่ามากกว่าความเป็นจริงค่อนข้างมาก และค่า  $K$  ที่ถูกต้องของสมการ 4.1 (Hasbo, 1957) น่าจะอยู่ในช่วงระหว่าง 0.6 - 0.8 และค่า  $K$  ที่ได้จะเป็นฟังก์ชันกับค่ามุมของหั่วกรวย (Cone Angle) และชนิดของดินที่ใช้ทดสอบ  $K = f(\theta, \text{type of soil})$

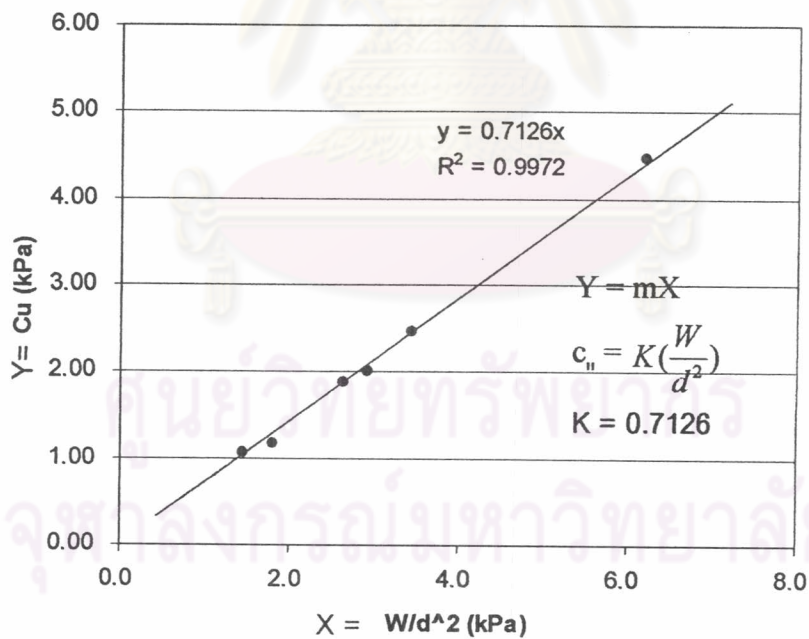
ตารางที่ 4.7 สรุปค่า  $K$  ที่ได้จากงานวิจัยที่ผ่านมา

Reference	$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 45^\circ$	$\alpha = 60^\circ$	$\alpha = 75^\circ$	$\alpha = 90^\circ$	Basis for K Values
Houlsby(1982)	2.89	1.25	0.645	0.36	0.205	Theoretical values for smooth cones
Karlsson(1961)	$0.79 \pm 0.05$	...	$0.29 \pm 0.04$	...	...	Six remold soils of widely varying Atterberg limits ( $w_L = 30$ to 320); lab vane $c_u$ at $d\theta/dt \approx 2^\circ/s$ with $H/D = 2$ and $D = 15, 30, \text{ or } 45 \text{ mm}$ ; $c_u = 0.2$ to 10 kPa
Wood(1985)	$0.85 \pm 0.05$	$0.49 \pm 0.08$	$0.29 \pm 0.05$	$0.19 \pm 0.04$	...	Three remolded soils (Drammen clay $I_p = 14$ ; Kaolin, $I_p = 26$ , Gaut clay, $I_p = 41$ ); special lab vane; $c_u = 1$ to 20 kPa
Sutee (2003)	$0.67 \pm 0.0046$	-	$0.24 \pm 0.06$	-	0.068	See Text

Note:  $w_L$  = liquid limit;  $I_p$  = Plasticity index;  $H/D$  = height/diameter of lab vane;  $\theta$  = angular rotation



รูปที่ 4.31 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength  $c_u$ , kPa) กับ  $\frac{W}{d^2}$  (kPa) เพื่อหาค่า K ของตัวอย่างดินหนองงูเห่า

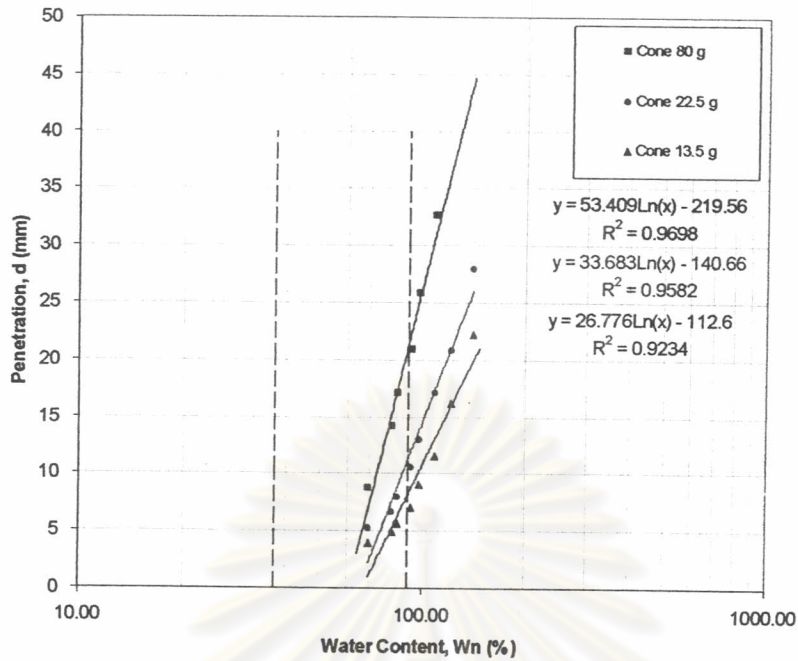


รูปที่ 4.32 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength  $c_u$ , kPa) กับ  $\frac{W}{d^2}$  (kPa) เพื่อหาค่า K ของตัวอย่างดินนนทบุรี

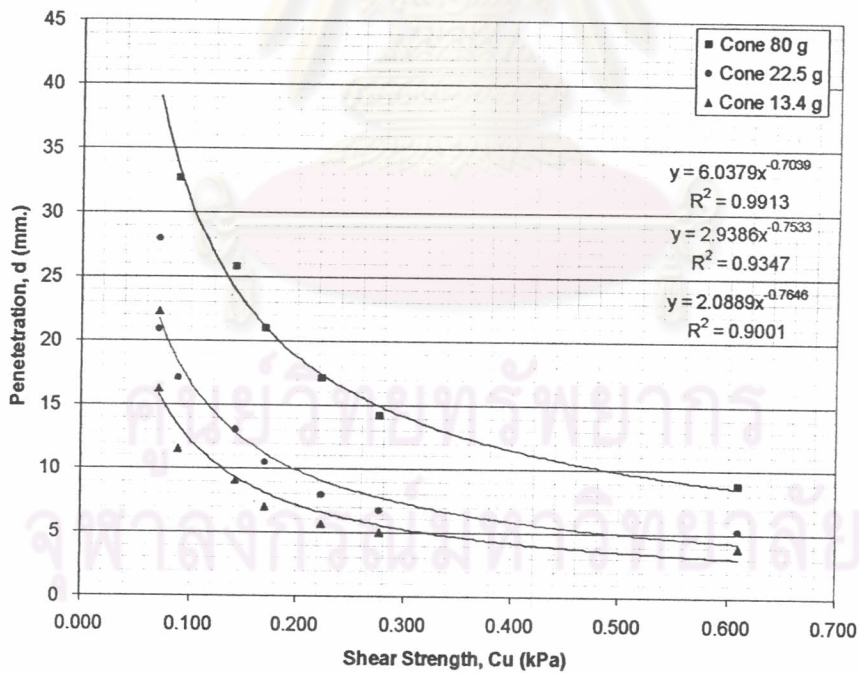
#### 4.5.2 เปรียบเทียบค่า K ของจากหัวกรวยตก (Cone Head) น้ำหนักต่างกันแต่ มุมเท่ากันที่ $30^\circ$

จากการทดสอบหาค่า K โดยใช้หัวกรวยมาตรฐานขนาด  $30^\circ$  หนัก 80 กรัม ตามที่กล่าวมา ในหัวข้อที่แล้วจะได้ค่า K อยู่ในช่วง 0.6 – 0.8 และค่า K ที่ได้เป็นฟังก์ชันกับค่ามุมของหัวกรวย (Cone Angle,  $\theta$ ) แต่เมื่อเราทำการทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของหัวกรวยที่ใช้ทดสอบ โดยการลดน้ำหนักของหัวกรวยลง (เพราะสำหรับตัวอย่างดินเหนียวที่มีค่า Water Content สูงมาก จะมีค่ากำลังรับแรงเฉือนต่ำมาก ซึ่งเราต้องการที่จะวัดค่ากำลังรับแรงเฉือนให้ได้ค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้) โดยเราใช้หัวกรวยที่มีมุมขนาด  $30^\circ$  และมีน้ำหนักตั้งแต่ 80 กรัม, 22.5 กรัม และ 13.5 กรัม โดยใช้วัสดุที่ใช้ในการผลิตหัวกรวยต่างกัน สำหรับหัวกรวยหนัก 80 กรัมใช้วัสดุ Stainless ในการผลิต, สำหรับหัวกรวยหนัก 22.5 กรัมใช้ Aluminum ในการผลิต และ สำหรับหัวกรวยหนัก 13.5 กรัมใช้ Plastic สีขาวขุ่นในการผลิต ที่จำเป็นจะต้องใช้วัสดุที่แตกต่างกันในการผลิต เนื่องจากความต้องการจะลดน้ำหนักของหัวกรวยให้ได้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ แต่รูปร่างจะต้องเหมือนกันเพื่อที่จะสามารถนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกันได้ เมื่อใช้วัสดุในการผลิตหัวกรวยแตกต่างกันพื้นผิวของหัวกรวยย่อมแตกต่างกันไปด้วย เราจึงจำเป็นที่จะต้องเคลือบสารหล่อลื่นให้กับหัวกรวยทุกตัวเพื่อให้ได้พื้นผิวที่ใช้ในการทดสอบหัวกรวยเหมือนกัน เพื่อลดผลกระทบของพื้นผิวของหัวกรวยที่จะทำผลการทดลองออกมาผิดพลาด เมื่อทำการทดสอบหัวกรวยต่างชนิดกัน กับตัวอย่างดินหนองงูเห่า โดยการเปลี่ยนแปลงค่า Water Content แตกต่างกันได้ตาม รูปที่ 4.33 แสดงค่า Water Content กับค่าระยะจมของหัวกรวย (Penetration, d) , รูปที่ 4.34 แสดงค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength  $c_u$ , kPa) กับ ระยะจมของหัวกรวย (Penetration d, mm.)

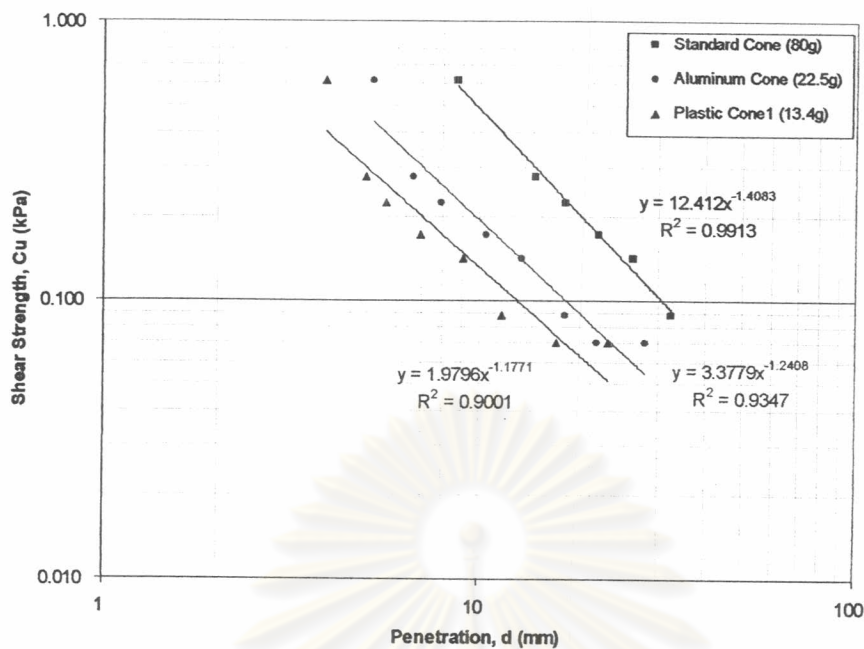
จากรูปที่ 4.33 และรูปที่ 4.34 พบว่าค่าระยะจมของหัวกรวย (Penetration, d) จะแปรผกผันกับค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength,  $c_u$ ) เหมือนกับการทดสอบในหัวข้อผ่านมา เมื่อเราทำการเปลี่ยนมาตราส่วนให้อยู่ใน scale Log-Log ดังรูปที่ 4.35 สำหรับตัวอย่างดินหนองงูเห่า จะพบว่าความสัมพันธ์ที่ได้ออกมาในรูปแบบของกราฟเส้นตรง ซึ่งง่ายต่อการนำไปใช้ประโยชน์ เมื่อสังเกตจากรูปที่ 4.33, 4.34 และ 4.35 พบว่าที่พิกัดเหลว (Liquid Limit) หัวกรวยหนัก 22.5 กรัม อ่านค่าพิกัดเหลวที่ระยะจมประมาณ 10.5 มิลลิเมตร และ หัวกรวยหนัก 13.5 กรัม อ่านค่าพิกัดเหลวที่ระยะจมประมาณ 7.8 มิลลิเมตร แล้วนำค่าที่ประมาณได้มาวาดกราฟจะได้กราฟที่ใช้หาค่าระยะจมของหัวกรวยที่พิกัดเหลวกับน้ำหนักของหัวกรวยที่แตกต่างกันตามรูปที่ 4.36



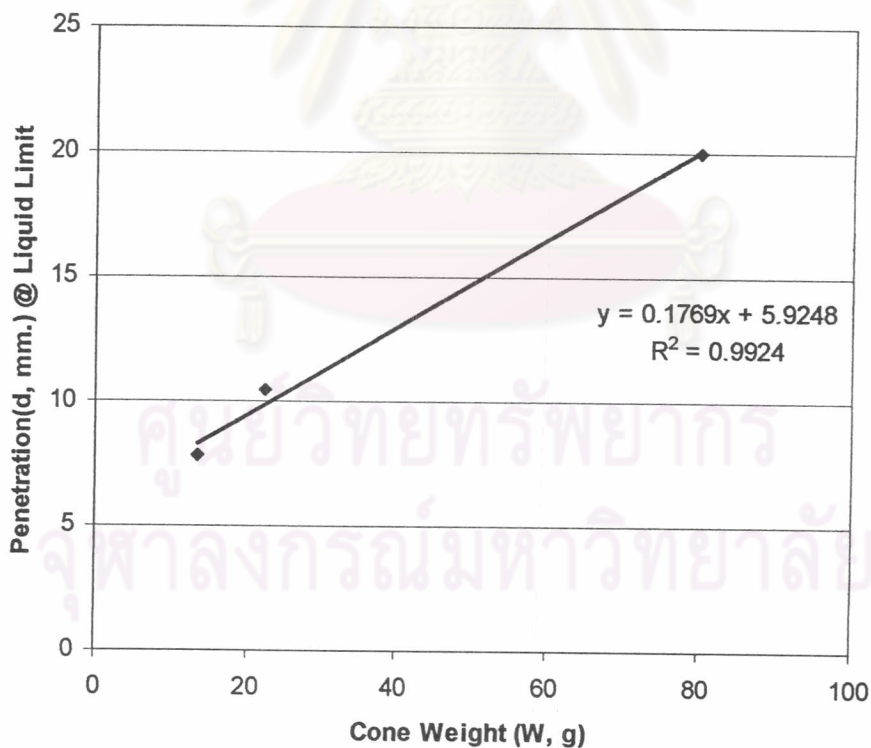
รูปที่ 4.33 ค่า Water Content ( $w_n$ , %) กับ ระยะจมของหัวกรวย (Penetration  $d$ , mm.) ทดสอบกับตัวอย่างดินหนองงูเห่า โดยเปลี่ยนแปลงน้ำหนักหัวกรวย



รูปที่ 4.34 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength  $c_u$ , kPa) กับ ระยะจมของหัวกรวย (Penetration  $d$ , mm.) ทดสอบกับตัวอย่างดินหนองงูเห่า โดยเปลี่ยนแปลงน้ำหนักหัวกรวย



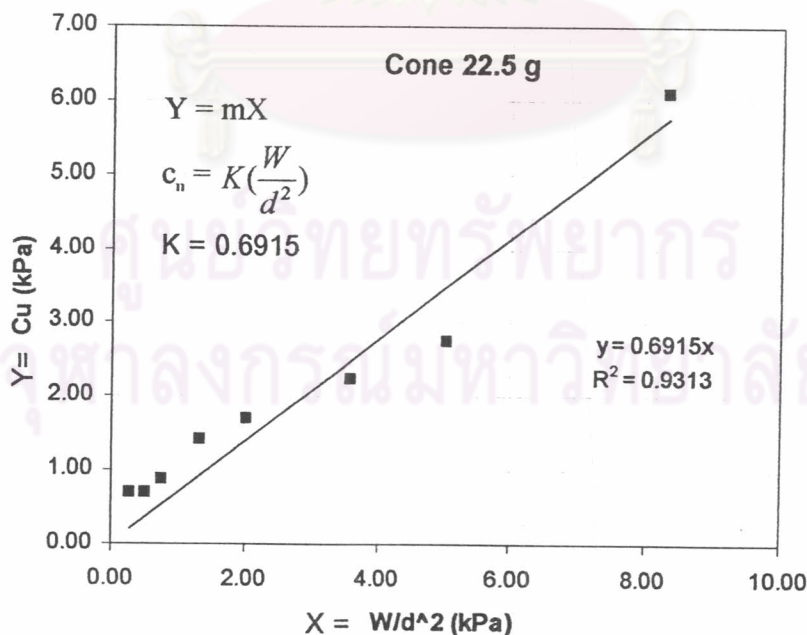
รูปที่ 4.35 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength  $c_u$ , kPa) กับ ระยะจมของหัวกรวย (Penetration  $d$ , mm.) ทดสอบกับตัวอย่างดินหนองงูเห่า โดยเปลี่ยนแปลงน้ำหนักหัวกรวย ใน Scale Log-Log



รูปที่ 4.36 ค่าระยะจมของหัวกรวยที่พิกัดเหลว (Penetration @ Liquid Limit,  $d$ ) กับ น้ำหนักของหัวกรวยที่แตกต่างกัน (Cone Weight,  $W$ )

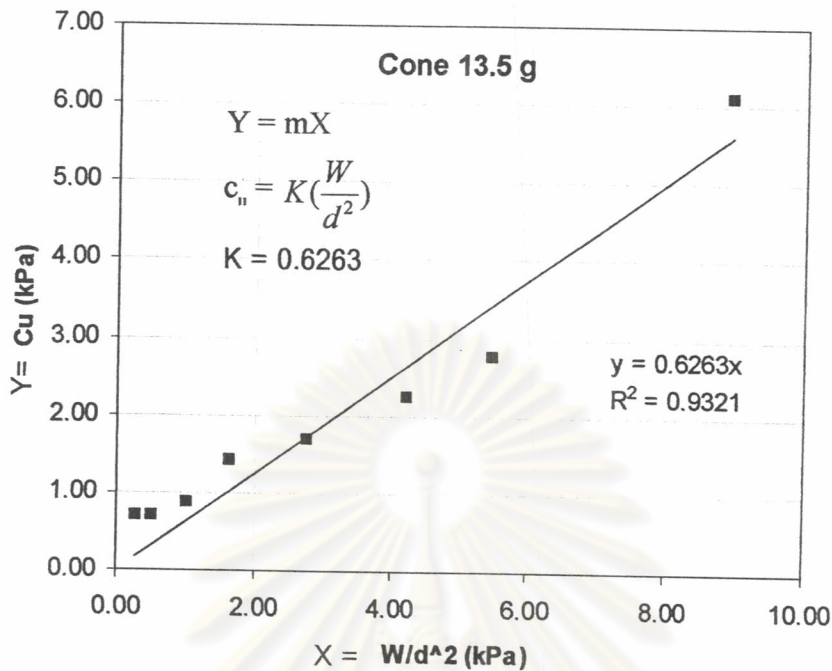
เมื่อเรานำผลการทดสอบจากรูปที่ 4.34 มาเขียนกราฟใหม่เพื่อหาค่า  $K$  จากสมการที่ 4.1 เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่า  $K$  ที่หาได้จากหัวข้อที่แล้ว โดยเปลี่ยนเป็นการเขียนกราฟระหว่าง ค่า  $c_u - \frac{W}{d^2}$  จะได้ออกมาตามรูปที่ 4.37 สำหรับหัวกรวยที่มีน้ำหนัก 22.5 กรัมและรูปที่ 4.38 สำหรับหัวกรวยที่มีน้ำหนัก 13.5 กรัม โดยเราจำเป็นที่จะต้องบังคับกราฟให้ตัดที่จุด  $(0,0)$  เพื่อที่จะหาค่า Slope ออกมาในรูป  $y = mx$  ซึ่งเมื่อแทนค่า  $y = c_u$  และค่า  $x = \frac{W}{d^2}$  จะได้ค่า slope  $m = K$  ตามสมการที่ 4.1

จากรูปที่ 4.37 และ รูปที่ 4.38 สำหรับหัวกรวยที่มีน้ำหนัก 22.5 กรัมจะได้ค่า  $K = 0.6915$ ,  $R^2 = 0.9313$  และสำหรับหัวกรวยที่มีน้ำหนัก 13.5 กรัม ได้ค่า  $K = 0.6263$ ,  $R^2 = 0.9321$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับหัวกรวยมาตรฐานที่มีค่า  $K = 0.625$ ,  $R^2 = 0.917$  สำหรับตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่าตามที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่แล้ว และมีค่าใกล้เคียงตามที่คำนวณตามตารางที่ 4.7 ซึ่งค่า  $K$  ที่ได้จากหัวกรวยน้ำหนักแตกต่างกัน แต่มีค่าใกล้เคียงกัน คืออยู่ในช่วงระหว่าง 0.6 - 0.8 ซึ่งเป็นการยืนยันว่าค่า  $K$  จากสมการของ Hansbo (1957) ค่า  $K$  ที่ได้จะเป็นฟังก์ชันกับค่ามุมของหัวกรวย (Cone Angle)  $K = f(\theta)$  ซึ่งหัวกรวยที่มีมุมเท่ากันแต่น้ำหนักที่ใช้แตกต่างกันกลับได้ค่า  $K$  ใกล้เคียงกัน แต่ไม่เท่ากัน ซึ่งอาจจะมีสาเหตุหลายประการ เช่น ความผิดพลาดในการทดสอบ, ดินเป็น Non-Homogenous แต่ถึงอย่างไรก็ถือว่าค่า  $K$  ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.37 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength  $c_u$ , kPa) กับ  $\frac{W}{d^2}$  (kPa) เพื่อหาค่า  $K$  ของตัวอย่างดินหนองงูเห่า โดยใช้หัวกรวยหนัก 22.5 กรัม มุม  $30^\circ$





รูปที่ 4.38 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength  $c_u$ , kPa) กับ  $\frac{W}{d^2}$  (kPa) เพื่อหาค่า K ของตัวอย่างดินเหนียวเหนียว โดยใช้หัวกรวยหนัก 13.5 กรัม มุม  $30^\circ$

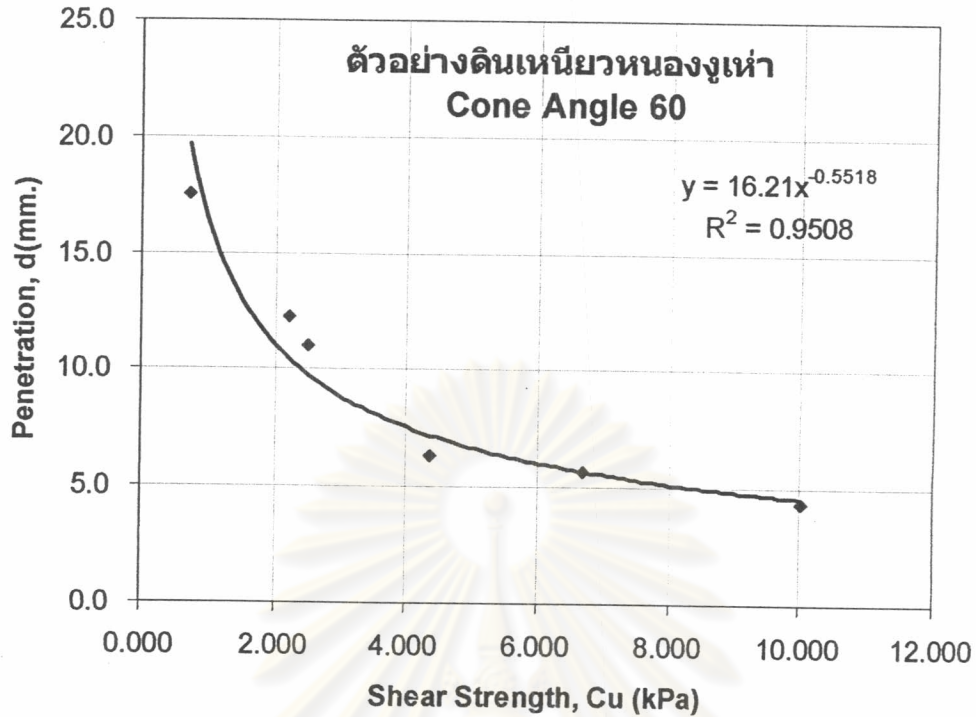
#### 4.5.3 เปรียบเทียบค่า K ของจากมุมหัวกรวยตก (Cone Angle) ที่แตกต่างกันที่ $30^\circ$ , $60^\circ$ , $90^\circ$

เมื่อเราทำการทดสอบหาค่า K โดยใช้หัวกรวยมาตรฐานขนาด  $30^\circ$  หนัก 80 กรัม, 22.5 กรัม, 13.5 กรัม ตามที่กล่าวมาในหัวข้อที่แล้วจะได้ค่า K เป็นค่าคงที่ที่อยู่ในช่วง 0.6 – 0.8 ซึ่งสรุปได้ว่าค่า K ที่ได้เป็นฟังก์ชันกับค่ามุมของหัวกรวย (Cone Angle,  $\theta$ ) จากนั้นเราจะทำการทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงมุมหัวกรวย (Cone Angle) ที่ใช้ทดสอบโดยการเปลี่ยนมุมของหัวกรวยจากมุม  $30^\circ$  โดยเพิ่มมุม  $60^\circ$  และมุม  $90^\circ$  เพื่อเปรียบเทียบหาค่า K โดยเราใช้น้ำหนักของหัวกรวยเท่ากันคือ 80 กรัม และใช้วัสดุที่ใช้ในการผลิตหัวกรวยมุม  $60^\circ$  และมุม  $90^\circ$  คือ Plastic สีขาวขุ่นในการผลิต เนื่องจากเมื่อเปลี่ยนขนาดมุมของหัวกรวยให้ใหญ่ขึ้น จะทำให้น้ำหนักของหัวกรวยเพิ่มขึ้นด้วย จึงจำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงวัสดุที่ใช้ในการผลิตให้เบาลง ซึ่ง Plastic สีขาวขุ่นมีความเหมาะสมที่สุดในการใช้งาน จากนั้นเราจำเป็นต้องเคลือบสารหล่อลื่นให้กับหัวกรวยทุกตัวเพื่อให้ได้พื้นผิวที่ใช้ในการทดสอบหัวกรวยเหมือนกัน เพื่อลดผลกระทบของพื้นผิวของหัวกรวยที่จะทำผลการทดลองออกมาผิดพลาด เมื่อทำการทดสอบหัวกรวยที่มุมต่างชนิดกัน 3 แบบกับตัวอย่างดินเหนียว

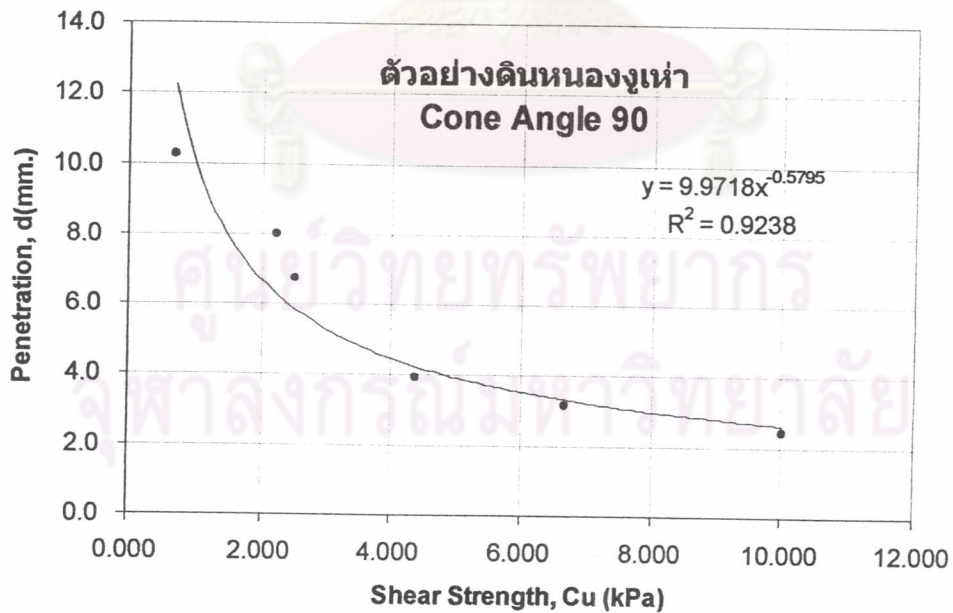
หนองงูเห่า และตัวอย่างดินเหนียวบนทปูรี จะผลการทดสอบตาม รูปที่ 4.39 แสดง ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength  $c_u$ , kPa) กับ ระยะจมของหัวกรวย (Penetration  $d$ , mm.) สำหรับดินหนองงูเห่าของหัวกรวยมุม  $60^\circ$ , รูปที่ 4.40 แสดง ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength  $c_u$ , kPa) กับ ระยะจมของหัวกรวย (Penetration  $d$ , mm.) สำหรับดินหนองงูเห่าของหัวกรวยมุม  $90^\circ$ , รูปที่ 4.41 แสดง ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength  $c_u$ , kPa) กับ ระยะจมของหัวกรวย (Penetration  $d$ , mm.) สำหรับดินนทปูรีของหัวกรวยมุม  $60^\circ$  และ รูปที่ 4.42 แสดง ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength  $c_u$ , kPa) กับ ระยะจมของหัวกรวย (Penetration  $d$ , mm.) สำหรับดินนทปูรีของหัวกรวยมุม  $90^\circ$  จากรูปที่ 4.39, 4.40, 4.41 และ 4.42 พบว่าค่าระยะจมของหัวกรวย (Penetration,  $d$ ) จะแปรผกผันกับค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength,  $c_u$ ) เหมือนกับการทดสอบในหัวข้อผ่านมา เมื่อเราทำการเปลี่ยนมาตรฐานให้อยู่ใน scale Log-Log ดังรูปที่ 4.43, 4.44, 4.45 และ 4.56 จะได้กราฟในรูปเส้นตรงซึ่งง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานมากกว่า เมื่อเราสังเกตรูปที่ 4.43, 4.44, 4.45 และ 4.56 ที่ค่าพิกัดเหลว(Liquid Limit) Wroth & Wood(1978) ได้เสนอกำลังรับแรงเฉือนที่พิกัดเหลวจะมีค่าประมาณอยู่ที่ 1.7 kPa เพราะฉะนั้นจากรูป 4.43 ค่าระยะจมของหัวกรวย  $60^\circ$  หนัก 80 กรัม ที่พิกัดเหลวสำหรับดินหนองงูเห่ามีค่า  $d = 12.8$  mm. , จากรูป 4.44 ค่าระยะจมของหัวกรวย  $90^\circ$  หนัก 80 กรัม ที่พิกัดเหลวสำหรับดินหนองงูเห่ามีค่า  $d = 7.9$  mm., จากรูป 4.45 ค่าระยะจมของหัวกรวย  $60^\circ$  หนัก 80 กรัม ที่พิกัดเหลวสำหรับดินนทปูรีมีค่า  $d = 13.2$  mm., จากรูป 4.45 ค่าระยะจมของหัวกรวย  $90^\circ$  หนัก 80 กรัม ที่พิกัดเหลวสำหรับดินนทปูรีมีค่า  $d = 8.4$  mm.

เมื่อเราทำการเปรียบเทียบหัวกรวยที่มีมุม  $60^\circ$  หนัก 80 กรัม เหมือนกันพบว่าระยะจมที่พิกัดเหลว อยู่ที่ 12.8 mm. และ 13.2 mm. ซึ่งแสดงว่าค่าระยะจมที่พิกัดเหลวของหัวกรวย  $60^\circ$  หนัก 80 กรัม อยู่ที่  $d @ \text{Liquid Limit} = 13$  mm.(โดยประมาณ) และสำหรับหัวกรวยที่มีมุม  $90^\circ$  หนัก 80 กรัม เหมือนกันพบว่าระยะจมที่พิกัดเหลว อยู่ที่ 7.9 mm. และ 8.4 mm. ซึ่งแสดงว่าค่าระยะจมที่พิกัดเหลวของหัวกรวย  $90^\circ$  หนัก 80 กรัม อยู่ที่  $d @ \text{Liquid Limit} = 8.0$  mm. (โดยประมาณ) แสดงให้เห็นว่าค่าระยะจมของหัวกรวย (Cone Penetration,  $d$ ) ที่ค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit) ของดินทุกชนิดชนิดจะมีระยะจมเท่ากัน แต่ระยะจมของหัวกรวยที่พิกัดเหลวจะขึ้นอยู่กับ น้ำหนักของหัวกรวย(Cone Weight,  $W$ ) และ ขนาดมุมของหัวกรวย (Cone Angle,  $\theta$ ) ดังสมการที่ 4.4

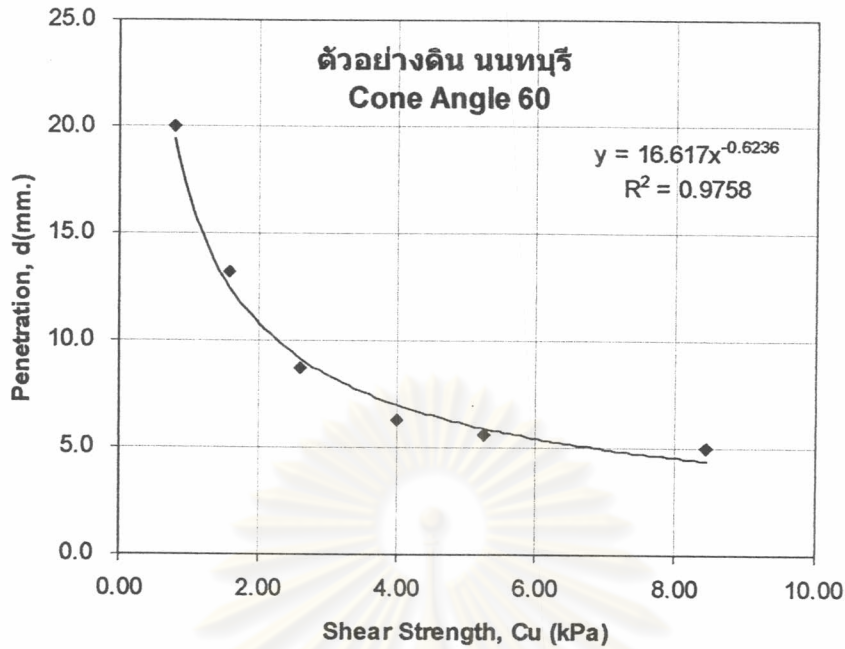
$$d @ \text{Liquid Limit} = f(W, \theta) \quad (4.4)$$



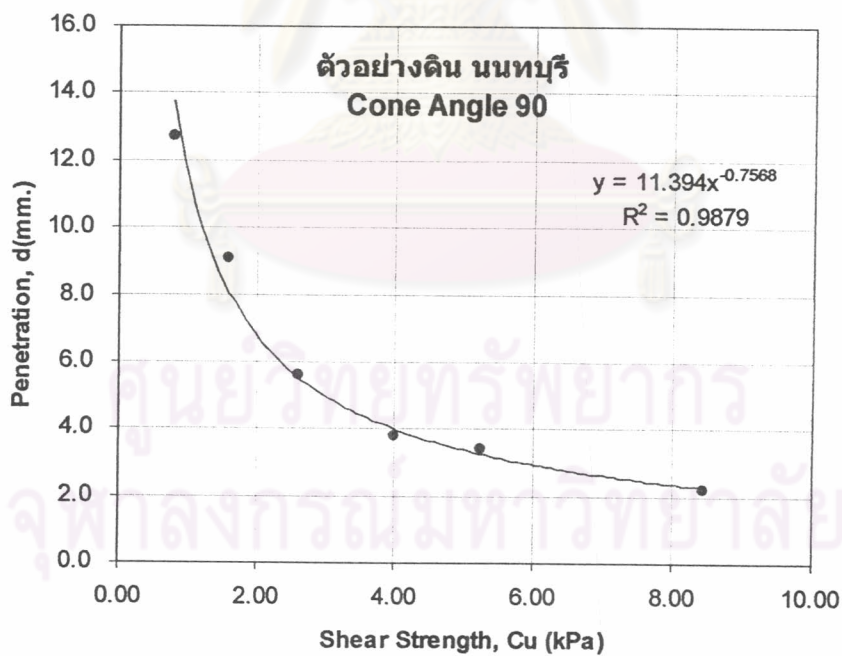
รูปที่ 4.39 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength  $c_u$ , kPa) กับ ระยะจมของหัวกรวย (Penetration  $d$ , mm.) สำหรับตัวอย่างดินหนองงูเห่า โดยใช้หัวกรวยมุม  $60^\circ$  หนัก 80 กรัม



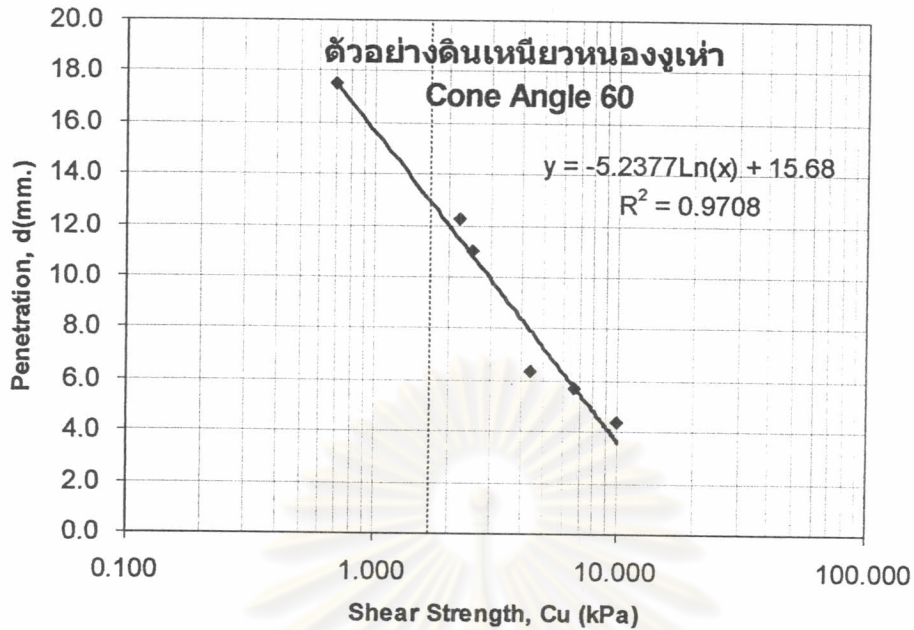
รูปที่ 4.40 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength  $c_u$ , kPa) กับ ระยะจมของหัวกรวย (Penetration  $d$ , mm.) สำหรับตัวอย่างดินหนองงูเห่า โดยใช้หัวกรวยมุม  $90^\circ$  หนัก 80 กรัม



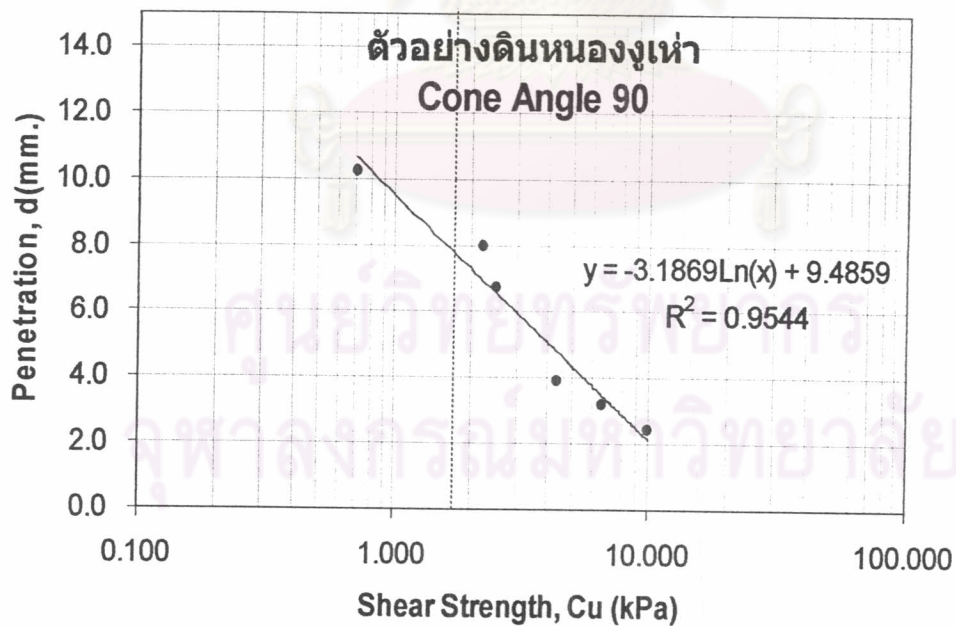
รูปที่ 4.41 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength  $c_u$ , kPa) กับ ระยะจมของหัวกรวย (Penetration  $d$ , mm.) สำหรับตัวอย่างดินนนทบุรี โดยใช้หัวกรวยมุม  $60^\circ$ หนัก 80 กรัม



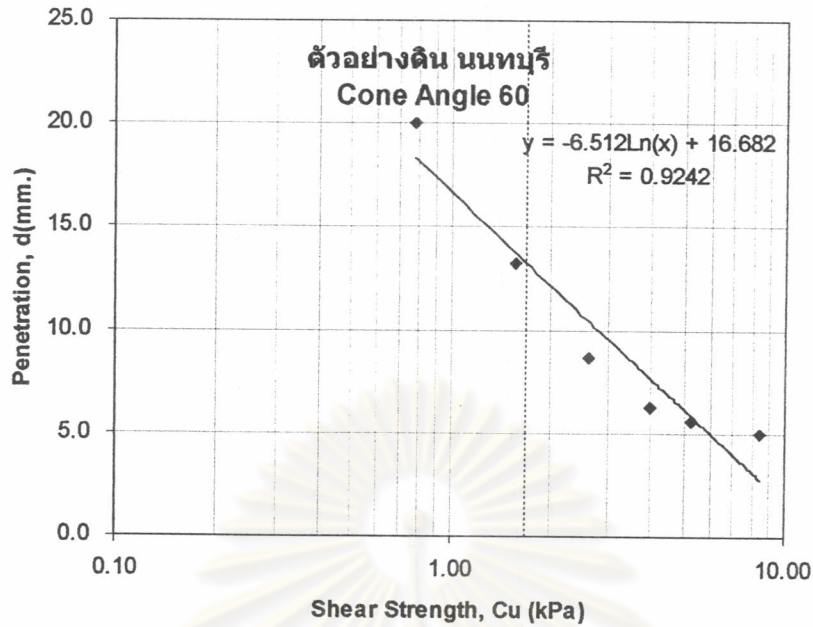
รูปที่ 4.42 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength  $c_u$ , kPa) กับ ระยะจมของหัวกรวย (Penetration  $d$ , mm.) สำหรับตัวอย่างดินนนทบุรี โดยใช้หัวกรวยมุม  $90^\circ$ หนัก 80 กรัม



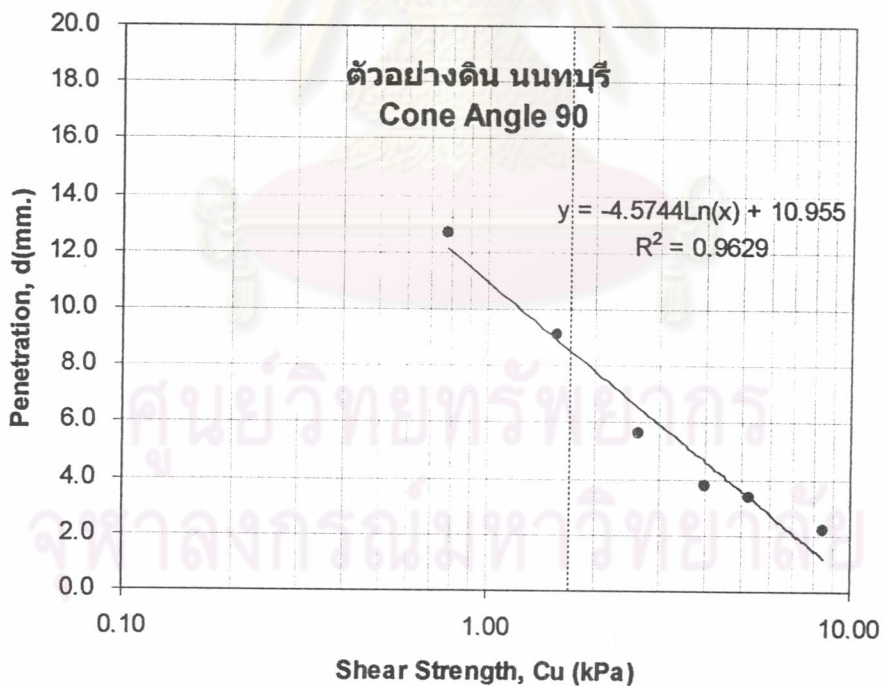
รูปที่ 4.43 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength  $c_u$ , kPa) กับ ระยะจมของหัวกรวย (Penetration  $d$ , mm.) ในกราฟ Log-Log สำหรับตัวอย่างดินหนองงูเห่า โดยใช้หัวกรวยมุม  $60^\circ$ หนัก 80 กรัม



รูปที่ 4.44 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength  $c_u$ , kPa) กับ ระยะจมของหัวกรวย (Penetration  $d$ , mm.) ในกราฟ Log-Log สำหรับตัวอย่างดินหนองงูเห่า โดยใช้หัวกรวยมุม  $90^\circ$ หนัก 80 กรัม



รูปที่ 4.45 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength  $c_u$ , kPa) กับ ระยะจมของหัวกรวย (Penetration  $d$ , mm.) ในกราฟ Log-Log สำหรับตัวอย่างดินนนทบุรี โดยใช้หัวกรวยมุม  $60^\circ$ หนัก 80 กรัม

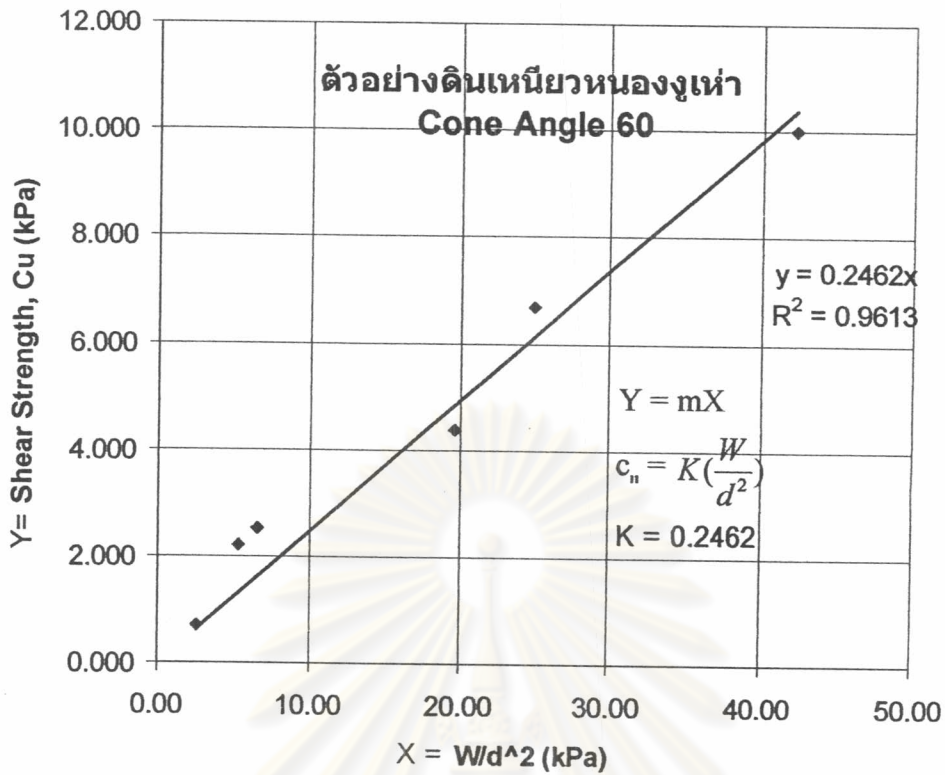


รูปที่ 4.46 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength  $c_u$ , kPa) กับ ระยะจมของหัวกรวย (Penetration  $d$ , mm.) ในกราฟ Log-Log สำหรับตัวอย่างดินนนทบุรี โดยใช้หัวกรวยมุม  $90^\circ$ หนัก 80 กรัม

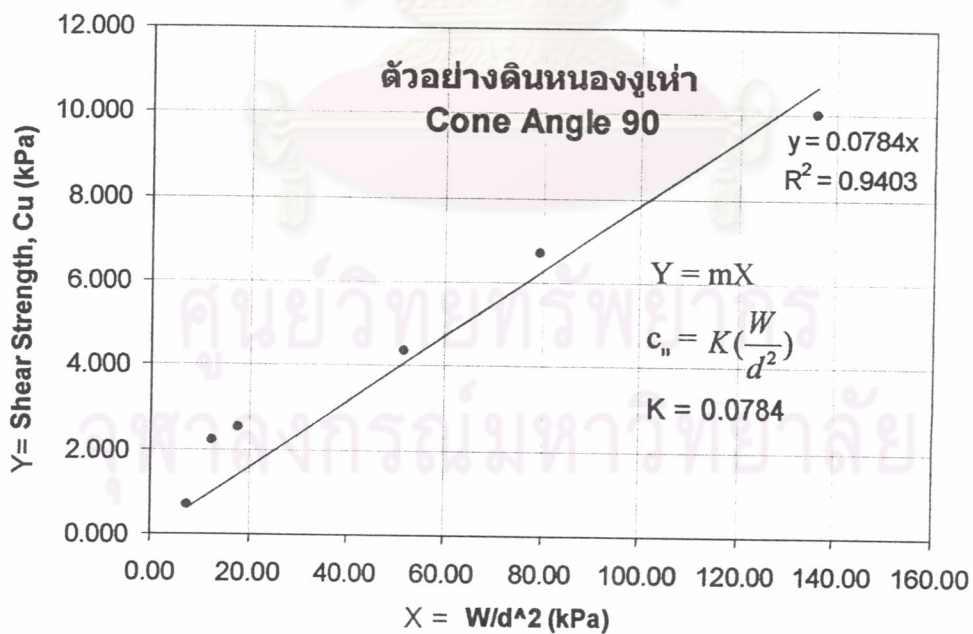
เมื่อนำผลการทดสอบจากรูปที่ 4.39, 4.40, 4.41 และ 4.42 มาเขียนกราฟใหม่ เพื่อหาค่า  $K$  จากสมการที่ 4.1 โดยเปลี่ยนเป็นการเขียนกราฟระหว่าง ค่า  $c_u - \frac{W}{d^2}$  จะได้ออกมาตามรูปที่ 4.47 สำหรับหัวกรวยมุม  $60^\circ$  หนัก 80 กรัมใช้ตัวอย่างดินหนองงูเห่า และ รูปที่ 4.48 สำหรับหัวกรวยมุม  $90^\circ$  หนัก 80 กรัมใช้ตัวอย่างดินหนองงูเห่า รูปที่ 4.49 สำหรับหัวกรวยมุม  $60^\circ$  หนัก 80 กรัมใช้ตัวอย่างดินนนทบุรี และรูปที่ 4.50 สำหรับหัวกรวยมุม  $90^\circ$  หนัก 80 กรัมใช้ตัวอย่างดินนนทบุรี โดยเราจำเป็นต้องบังคับกราฟให้ตัดที่จุด  $(0,0)$  เพื่อที่จะหาค่า Slope ออกมาในรูป  $y = mx$  ซึ่งเมื่อแทนค่า  $y = c_u$  และค่า  $x = \frac{W}{d^2}$  จะได้ออกค่า slope  $m = K$  ตามสมการที่ 4.1

จากรูปที่ 4.47 และ รูปที่ 4.48 สำหรับหัวกรวยที่มีขนาดมุม  $60^\circ$  หนัก 80 กรัม สำหรับดินหนองงูเห่าจะได้ค่า  $K = 0.2462$  ,  $R^2 = 0.613$  และ ดินนนทบุรีจะได้ค่า  $K = 0.2339$  ,  $R^2 = 0.9427$  ซึ่งค่า  $K$  ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก เมื่อทำการเปรียบเทียบกับ ค่า  $K$  ตามตารางที่ 4.7 ซึ่งค่า  $K$  เฉลี่ยอยู่ที่ 0.29 สำหรับหัวกรวย  $60^\circ$  ซึ่งค่า  $K$  ที่ได้จากการทดสอบก็มีค่าใกล้เคียงกันจึงให้ตอบที่ว่า ค่า  $K$  สำหรับหัวกรวย  $60^\circ$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0.2-0.3 และจากรูปที่ 4.58 และ รูปที่ 4.50 สำหรับหัวกรวยที่มีขนาดมุม  $90^\circ$  หนัก 80 กรัม สำหรับดินหนองงูเห่าจะได้ค่า  $K = 0.0784$  ,  $R^2 = 0.9403$  และ ดินนนทบุรีจะได้ค่า  $K = 0.0566$  ,  $R^2 = 0.8415$  ซึ่งค่า  $K$  มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อทำการเปรียบเทียบกับ ค่า  $K$  ตามตารางที่ 4.7 ซึ่งค่า  $K$  เฉลี่ยอยู่ที่ 0.012 สำหรับหัวกรวย  $90^\circ$  ตามตารางที่ 4.7 ค่า  $K$  จากการคำนวณอยู่ที่ 0.051 ซึ่งค่า  $K$  ที่ได้จากการทดสอบก็มีค่าใกล้เคียงกับค่า  $K$  ที่ได้จากการคำนวณมากกว่า จึงให้ตอบที่ว่า ค่า  $K$  สำหรับหัวกรวย  $90^\circ$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0.05-0.08

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

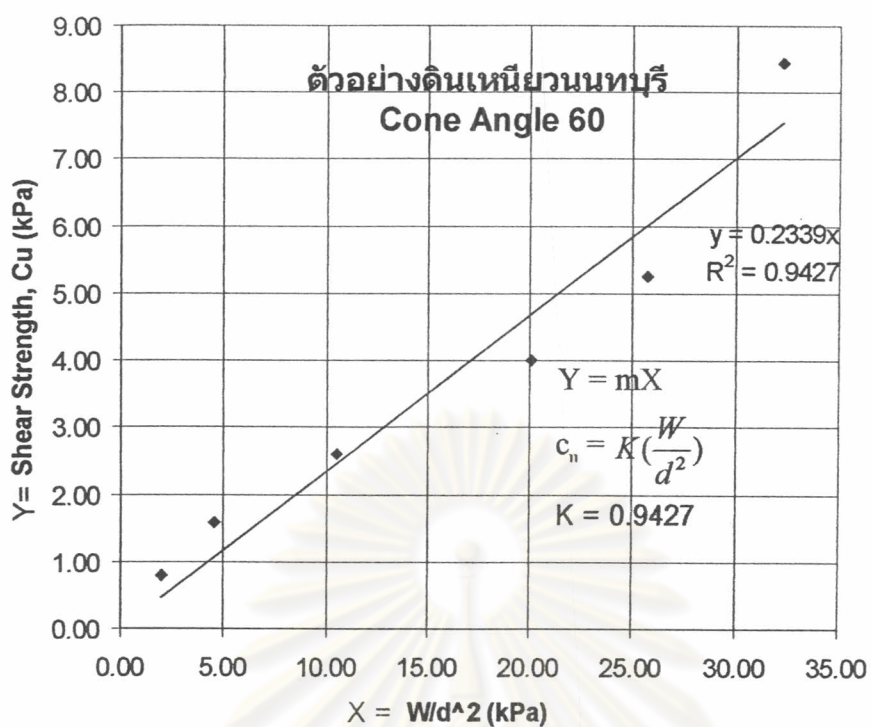


รูปที่ 4.47 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength  $c_u$ , kPa) กับ  $\frac{W}{d^2}$  (kPa) เพื่อหาค่า K ของตัวอย่างดินหนองงูเห่า โดยใช้มุม  $60^\circ$  หัวกรวยหนัก 80 กรัม

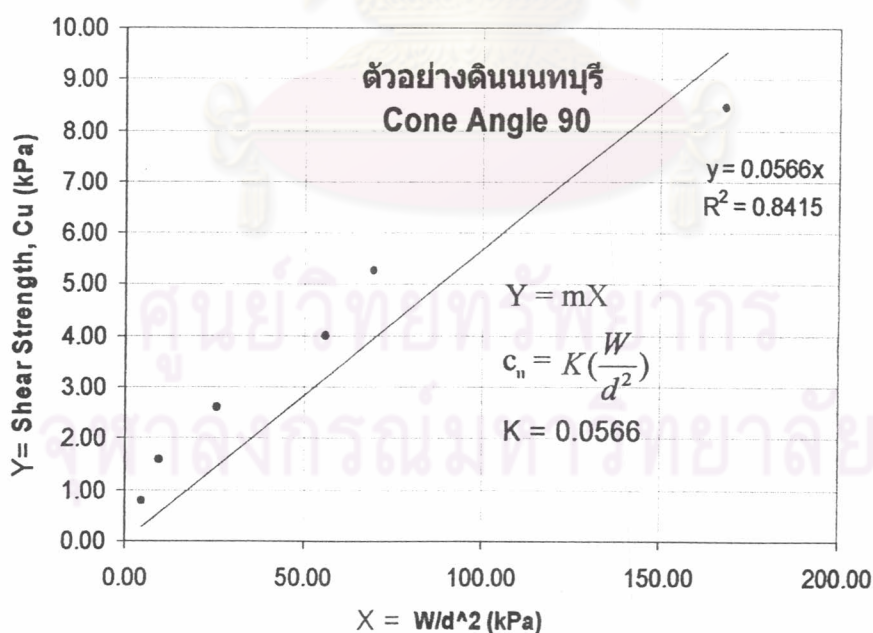


รูปที่ 4.48 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength  $c_u$ , kPa) กับ  $\frac{W}{d^2}$  (kPa) เพื่อหาค่า K ของตัวอย่างดินหนองงูเห่า โดยใช้มุม  $90^\circ$  หัวกรวยหนัก 80 กรัม





รูปที่ 4.49 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength  $c_u$ , kPa) กับ  $\frac{W}{d^2}$  (kPa) เพื่อหาค่า K ของตัวอย่างดินนหนური โดยใช้มุม  $60^\circ$  หัวกรวยหนัก 80 กรัม



รูปที่ 4.50 ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength  $c_u$ , kPa) กับ  $\frac{W}{d^2}$  (kPa) เพื่อหาค่า K ของตัวอย่างดินนหนური โดยใช้มุม  $60^\circ$  หัวกรวยหนัก 80 กรัม

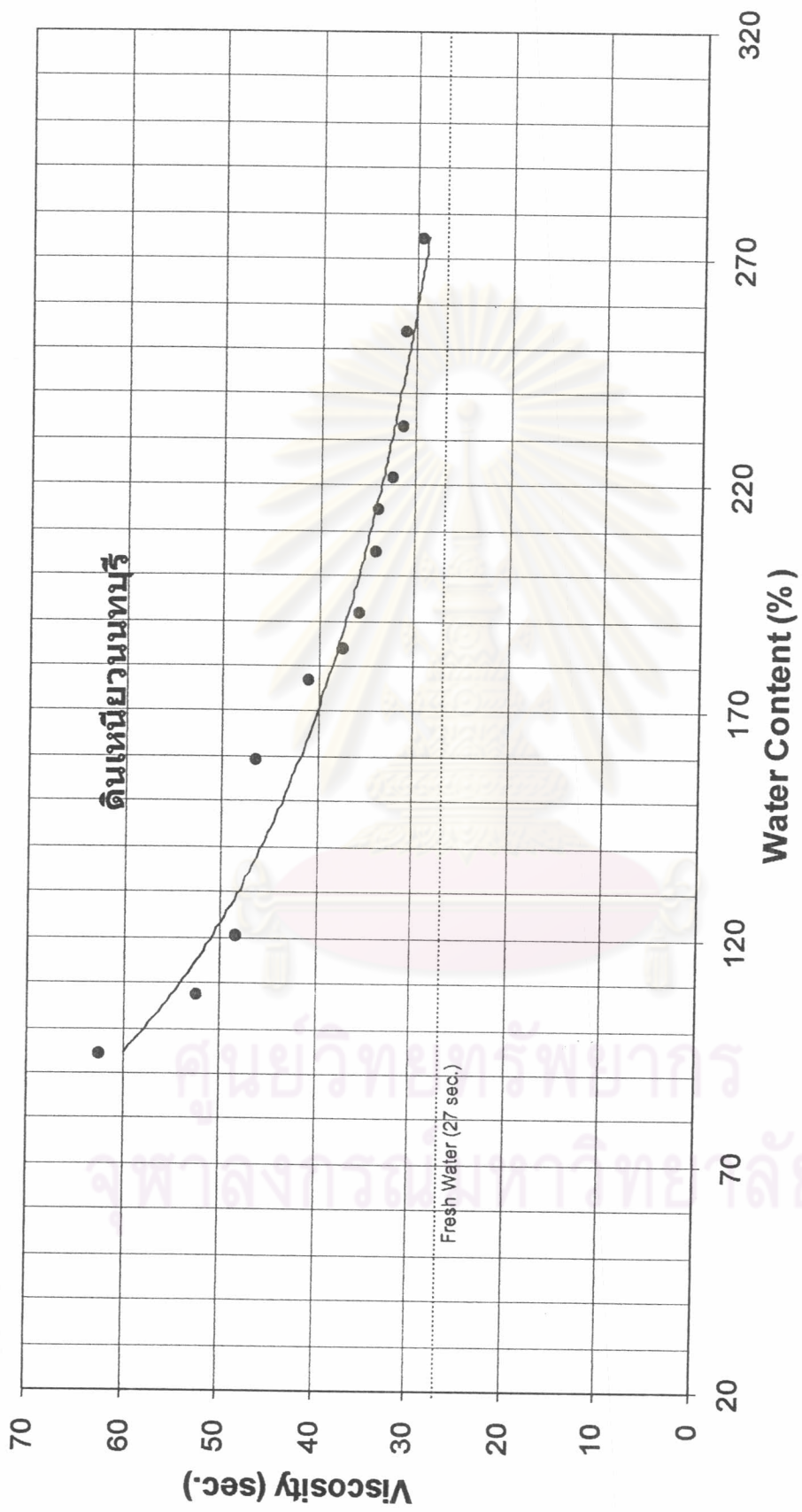
#### 4.6 ทดสอบเครื่องมือหาค่าความหนืด(Viscosity Test)

##### 4.6.1 ศึกษาผลจากเปลี่ยนค่า Water Content กับค่าความหนืด ด้วยเครื่องมือทดสอบ Marsh Funnel Viscometer

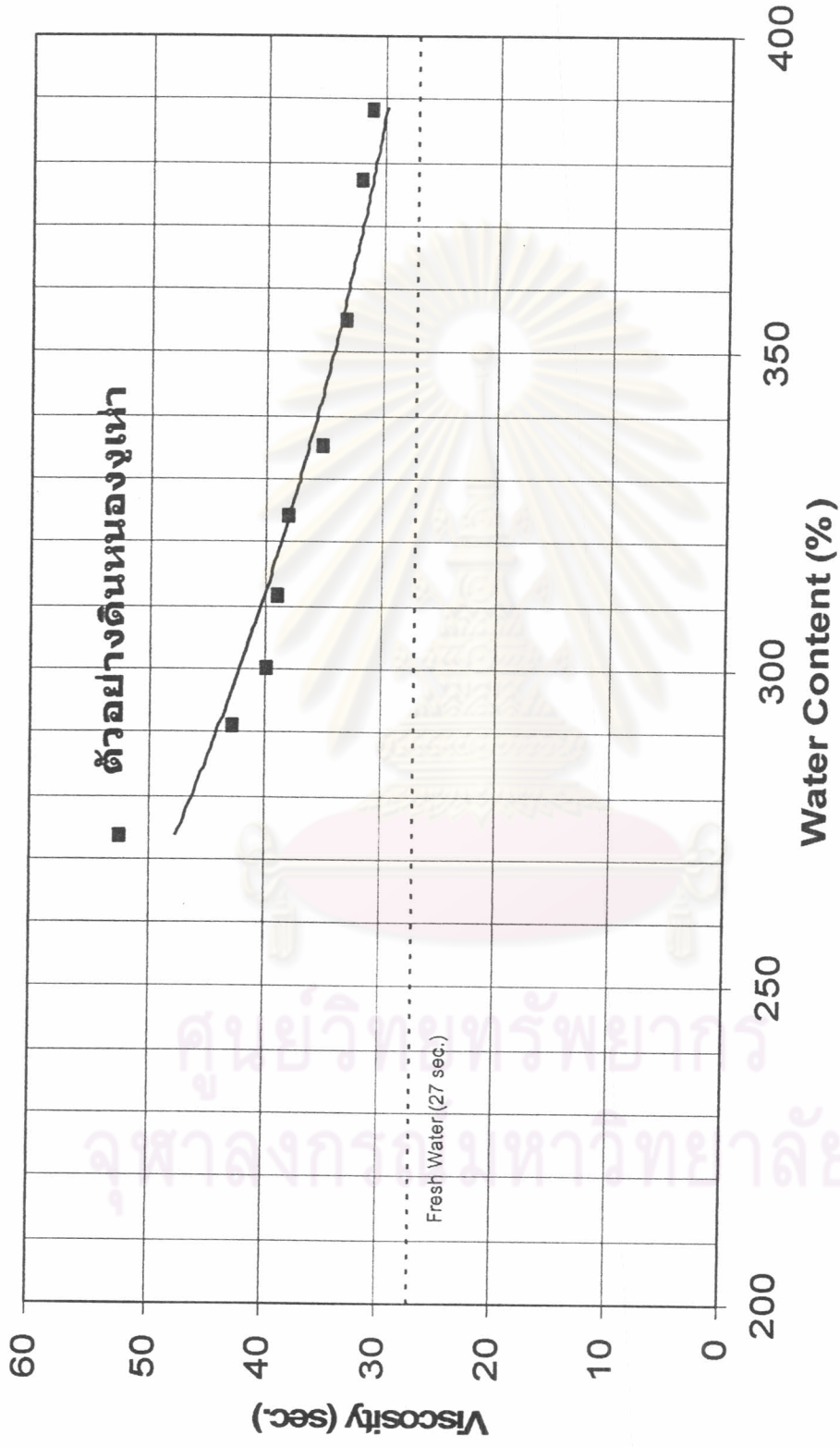
จากการทำการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือน(Shear Strength) กับค่า Water Content ในหัวข้อที่ผ่านมา จากนั้นจึงทำการทดสอบหาค่าความหนืดกับค่า Water Content โดยการทดสอบด้วยเครื่องมือ Marsh Funnel Viscometer ตามมาตรฐาน API RP 13 B Section 2 ซึ่งได้ผลการทดสอบค่า Viscosity ออกมาในหน่วยของ วินาที (Second) ทำการทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงค่า Water Content ได้ผลการทดสอบตามรูปที่ 4.51 แสดงค่า Water Content – Viscosity ของตัวอย่างดินเหนียวหนทุรี และรูปที่ 4.52 แสดงค่า Water Content – Viscosity ของตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า จากรูปที่ 4.51 และ รูปที่ 4.52 เราพบว่าความความหนืด (Viscosity,  $\eta$ ) มีค่าลดลงเมื่อค่า Water Content เพิ่มมากขึ้นและจะมีค่าวิ่งเข้าไปหาค่าความหนืดของน้ำกลั่นซึ่งมีค่าความหนืดอยู่ที่ 27 วินาที (ที่อุณหภูมิ 27° ฟาเรนไฮต์) แต่กราฟของดินหนองงูเห่าและดินหนทุรี มีความแตกต่างกันอยู่พอสมควรดังรูปที่ 4.53 เนื่องมาจากค่า Properties ของดินที่มีช่วงของ Liquid Limit และ Plastic Limit ไม่เหมือนกัน

เมื่อเราต้องการเปรียบเทียบตัวอย่างดินทั้งสองชนิด โดยไม่คิดถึงผลของ Liquid Limit และ Plastic Limit ทำให้เขียนกราฟใหม่ได้ดังรูปที่ 4.54 แสดง Liquidity Index กับ Viscosity ของตัวอย่างดินหนทุรี ซึ่งกราฟที่ได้ใน scale Log-Log และรูปที่ 4.55 แสดง Liquidity Index กับ Viscosity ของตัวอย่างดินหนองงูเห่า ซึ่งกราฟที่ได้ใน scale Log-Log ได้กราฟที่เป็นเส้นตรง และเมื่อนำกราฟที่ได้มาเปรียบเทียบกันจะได้ตามรูปที่ 4.56 จากกราฟที่ได้จะพบว่าลักษณะของกราฟที่ได้จากตัวอย่างดินหนองงูเห่า และตัวอย่างดินหนทุรี ข้อมูลจะวิ่งเข้าหากันและตัดกันที่ประมาณค่าความหนืด(Viscosity,  $\eta$ ) ของน้ำกลั่นแต่ไม่ถึงค่าความหนืดของของน้ำกลั่น เพราะตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบเมื่อผสมน้ำแล้วจะเป็นเสมือนสารละลาย ทำให้มีค่าความหนืดเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อผสมน้ำเข้าไปมากๆจะทำให้สารละลายที่ได้มีหนืดลดลง จนถึงจุดหนึ่ง อนุภาคที่อยู่ในสารละลายนั้นๆ จะไม่มีผลกระทบต่อค่าความหนืด แม้ว่าเราจะเติมน้ำเข้าไปซักเท่าใดก็จะไม่สามารถทำให้ค่าความหนืดลดลงได้อีก และค่าความหนืดที่ได้จะต้องไม่ต่ำกว่าค่าความหนืดของน้ำ อันเนื่องมาจากน้ำเป็นสารบริสุทธิ์แต่ ดิน+น้ำ เป็นสารละลาย ทำให้ค่าความหนืดที่ได้จะต้องสูงกว่าน้ำกลั่น

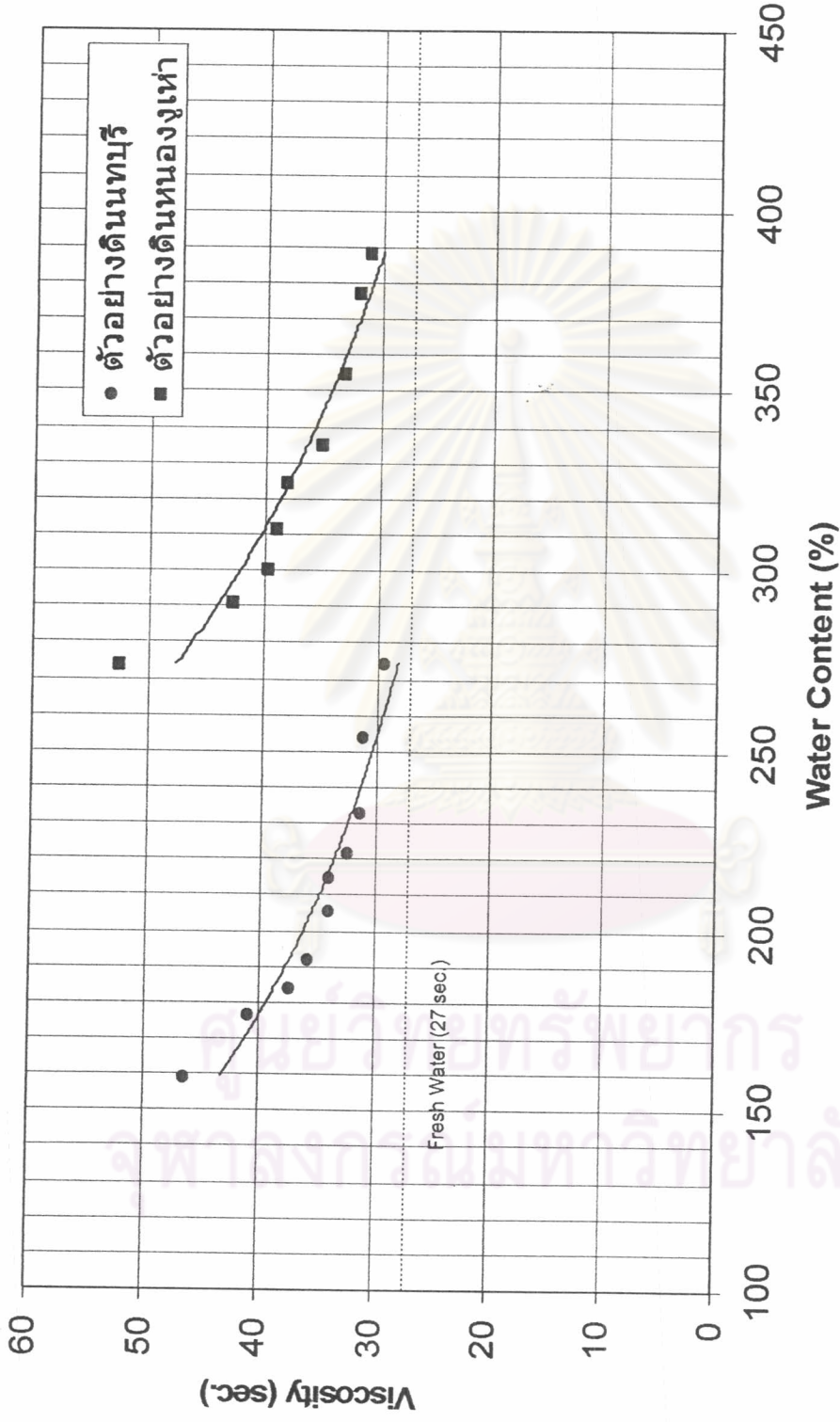
ค่าความหนืดที่ได้จากเครื่องมือ Marsh Funnel Viscometer มีหน่วยเป็นวินาที (second) เมื่อต้องการแปลงหน่วยให้เป็น mPa-sec ตามเครื่องมือ Baroid Rheometer ได้ตามรูปที่ 4.57 ที่แสดงการแปลงหน่วยของค่าความหนืด ในหน่วย วินาที (second) เป็น mPa-s



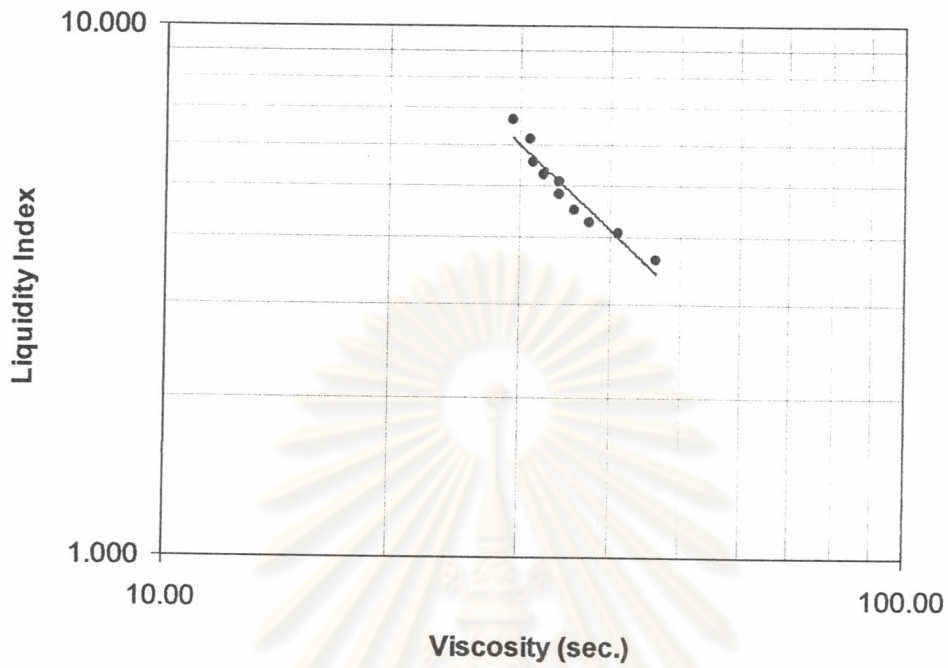
รูปที่ 4.51 แสดงค่า Water Content (%) กับ Viscosity ( $\eta$ , sec) ของตัวอย่างดินเหนียวหนืด ทดสอบด้วยเครื่องวัด Marsh Funnel Viscometer



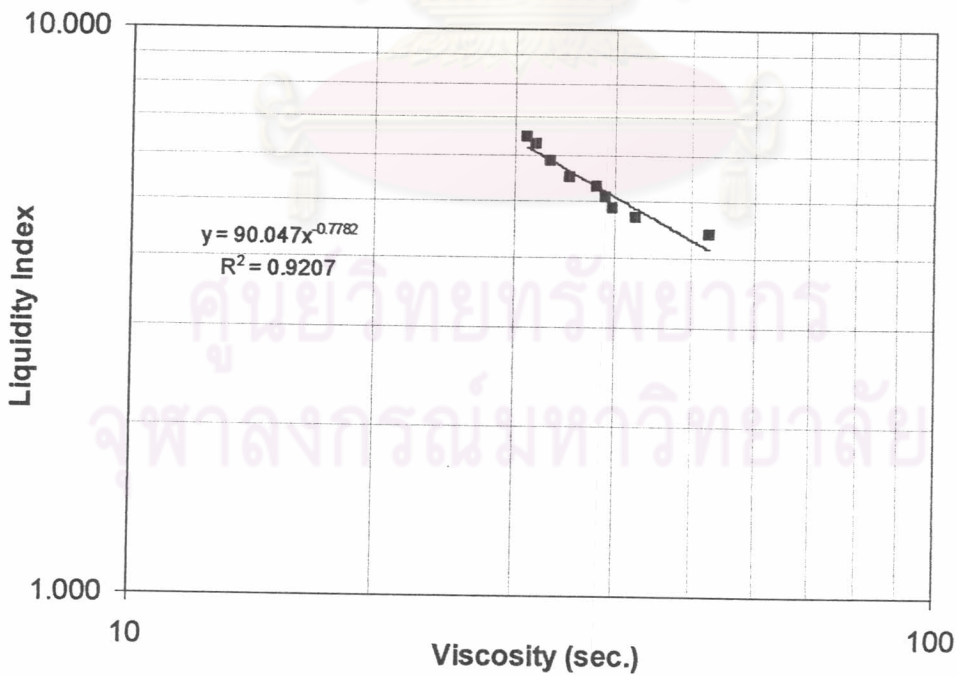
ที่ 4.52 แสดงค่า Water Content (%) กับ Viscosity (η , sec) ของตัวอย่างดินหนองเห่า ทดสอบด้วยเครื่องมือ Marsh Funnel Viscometer



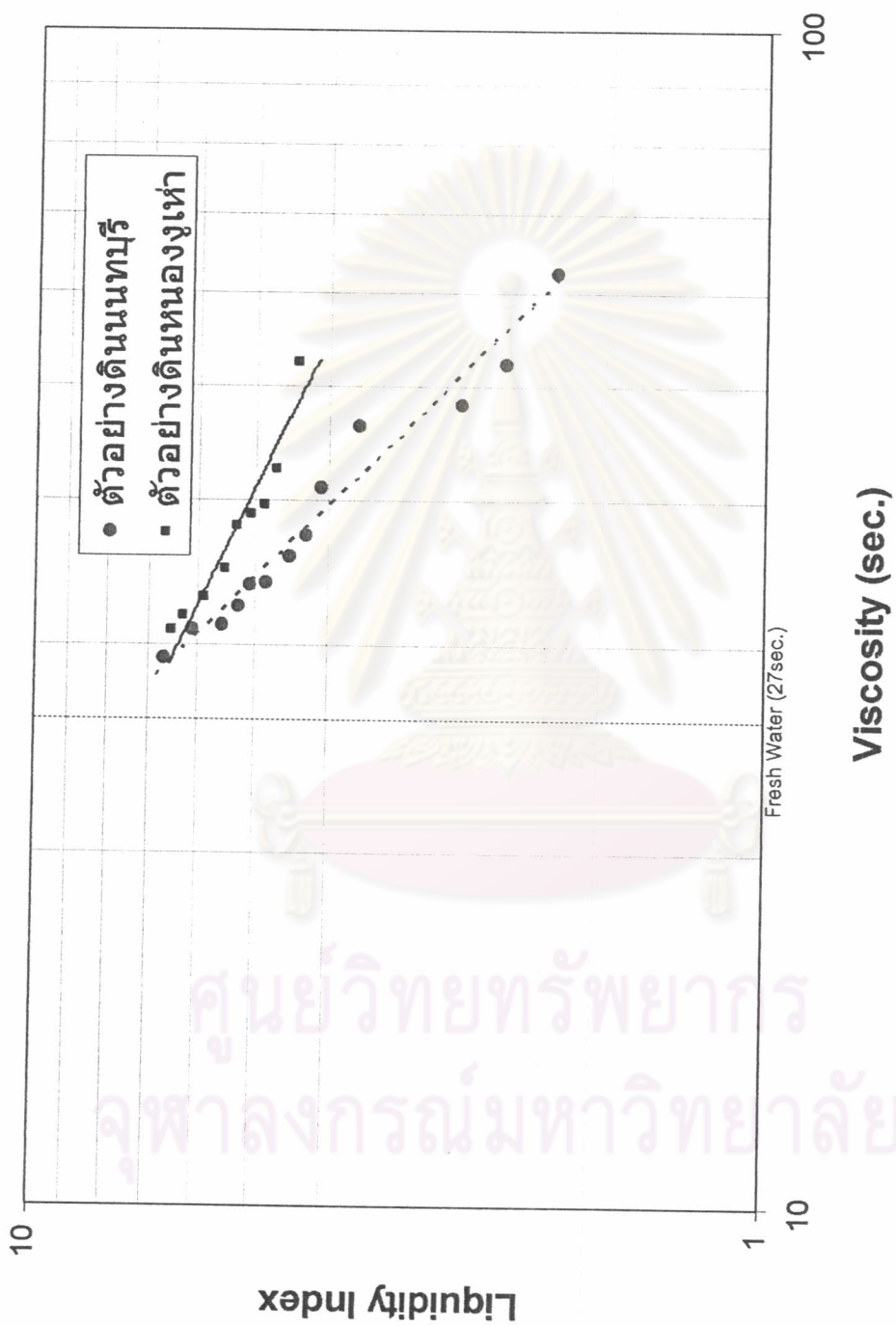
ที่ 4.53 แสดงค่า Water Content (%) กับ Viscosity (๗ . sec) ของตัวอย่างดินนทพรีและหนองเห่า ทดสอบด้วยเครื่องมือ Marsh Funnel Viscrometer



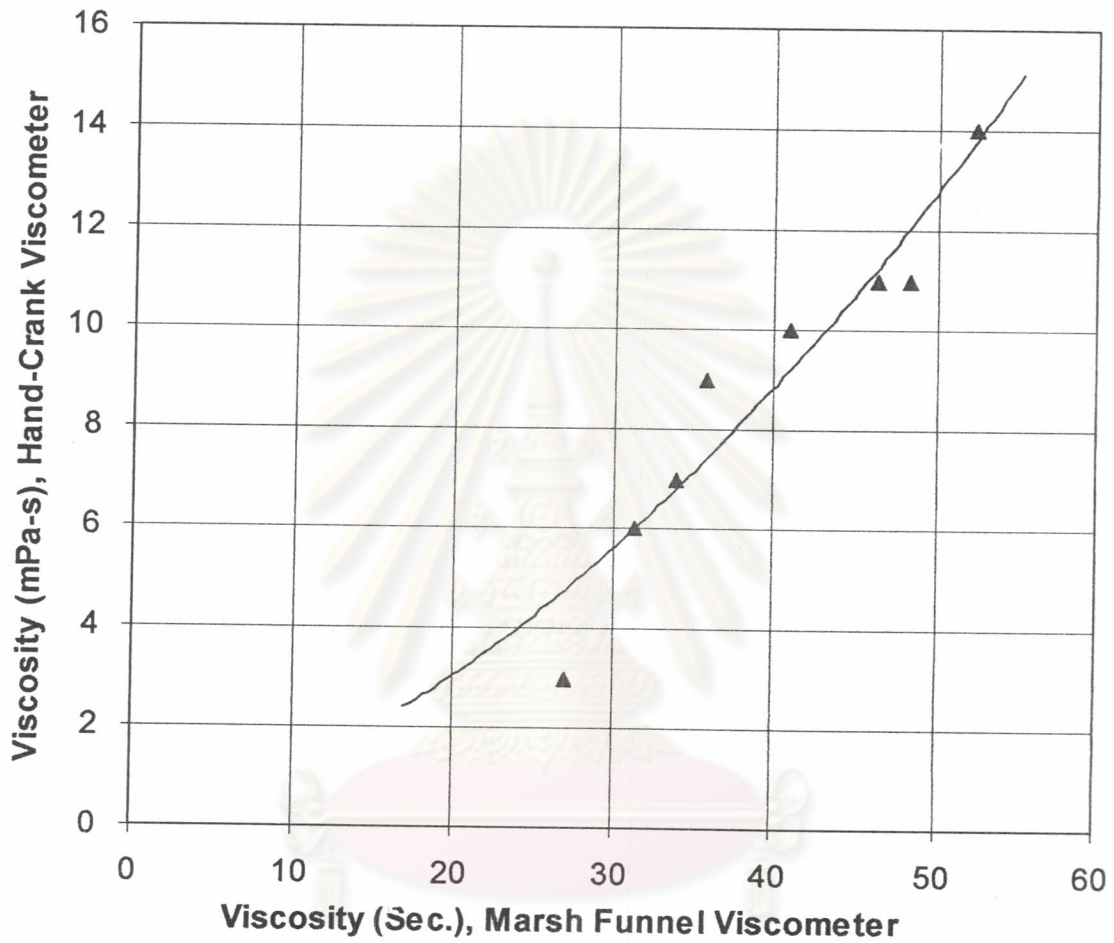
รูปที่ 4.54 แสดงค่า Viscosity ( $\eta$ , sec) กับ Liquidity Index scale Log-Log ของตัวอย่างดิน นนทบุรี ทดสอบด้วยเครื่องมือ Marsh Funnel Viscometer



รูปที่ 4.55 แสดงค่า Viscosity ( $\eta$ , sec) กับ Liquidity Index scale Log-Log ของตัวอย่างดิน หนองงูเห่า ทดสอบด้วยเครื่องมือ Marsh Funnel Viscometer



รูปที่ 4.56 แสดงค่า Viscosity ( η , mPa-s) กับ Liquidity Index scale Log-Log ของตัวอย่างดินนันทบุรี และ ตัวอย่างดินหนองงูเห่าและ เครื่องมือ Marsh Funnel Viscometer



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.57 แสดงการแปลงหน่วยของค่าความหนืด ในหน่วย วินาที (second) เป็น mPa-s

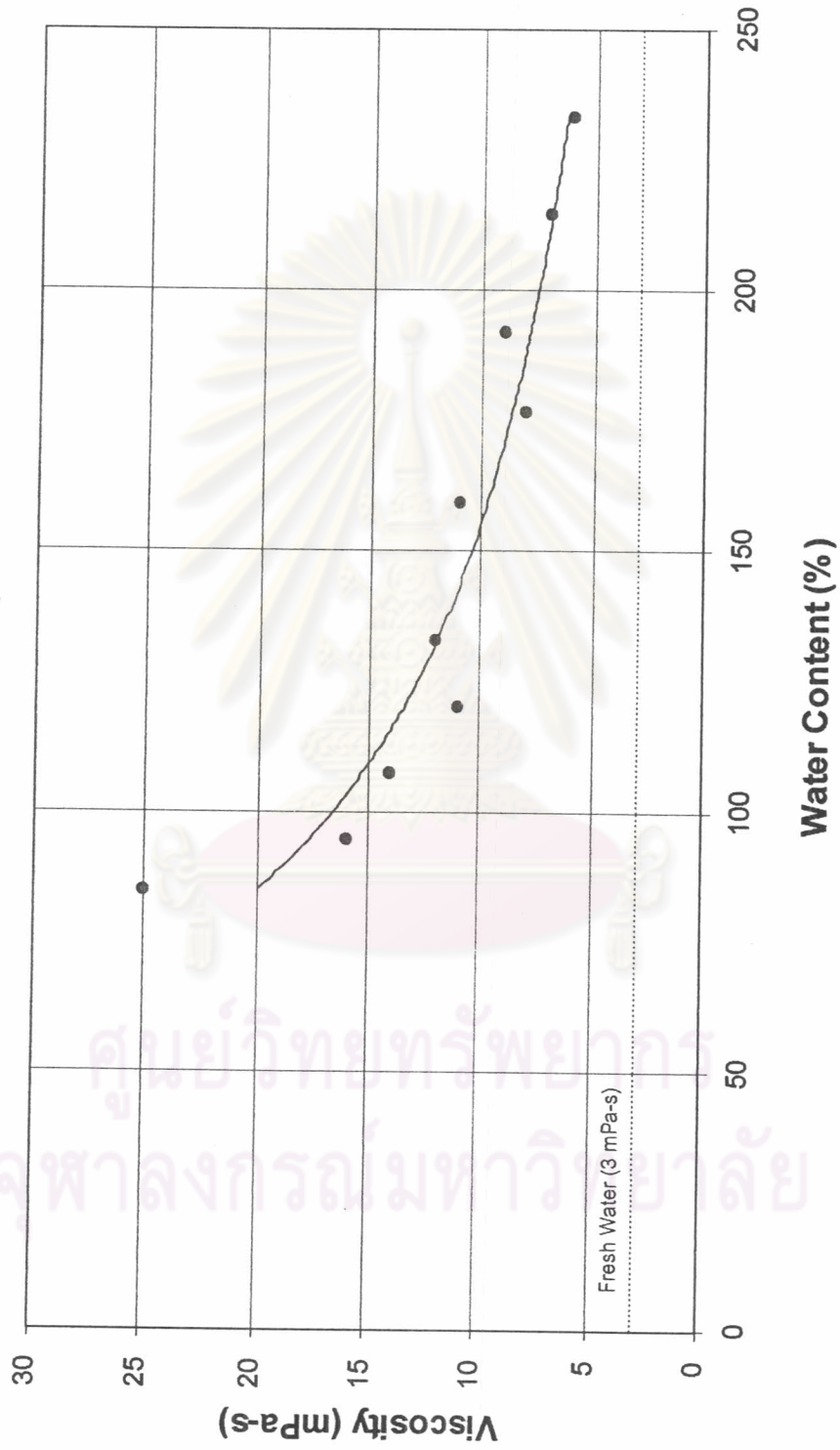


#### 4.6.2 ศึกษาผลจากเปลี่ยนค่า Water Content กับค่าความหนืด (Viscosity) ด้วย เครื่องมือทดสอบ Hand-Crank Viscometer

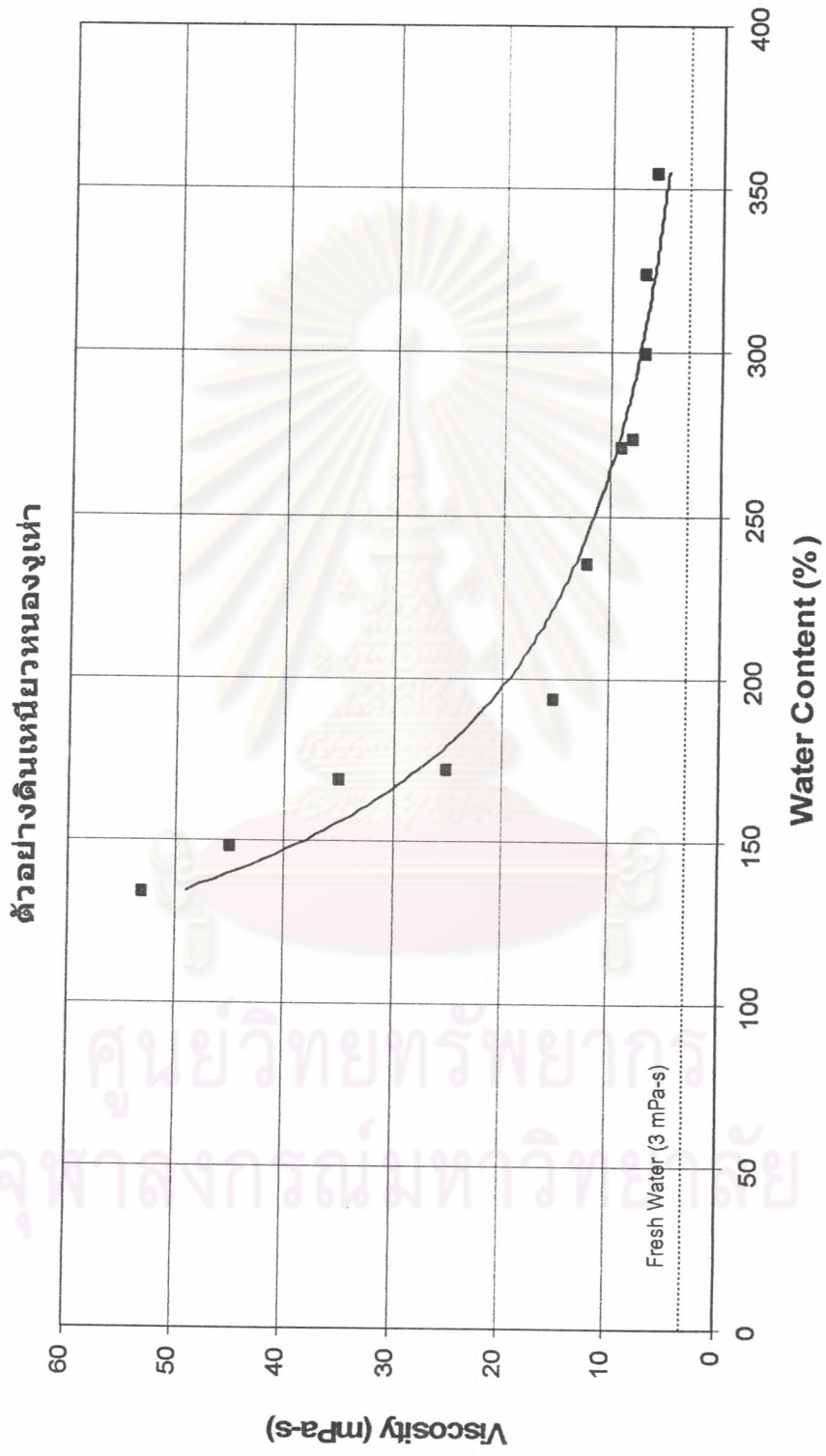
จากการทำการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength) กับค่า Water Content ในหัวข้อที่ผ่านมา จากนั้นจึงทำการทดสอบหาค่าความหนืดกับค่า Water Content โดยการทดสอบด้วยเครื่องมือ Hand-Crank Viscometer ตามมาตรฐาน API RP 13 B ,I Section 2 ซึ่งได้ผลการทดสอบค่า Viscosity ออกมาในหน่วยของ วินาที (Second) ทำการทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงค่า Water Content ได้ผลการทดสอบตามรูปที่ 4.58 แสดงค่า Water Content – Viscosity ของตัวอย่างดินเหนียวนนทบุรี และรูปที่ 4.59 แสดงค่า Water Content – Viscosity ของตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า จากรูปที่ 4.58 และ รูปที่ 4.59 เราพบว่าความความหนืด (Viscosity,  $\eta$ ) มีค่าลดลงเมื่อค่า Water Content เพิ่มมากขึ้นและจะมีค่าวิ่งเข้าไปหาค่าความหนืดของน้ำกลั่นซึ่งมีค่าความหนืดอยู่ที่ 3 mPa-s (ที่อุณหภูมิ 27° ฟาเรนไฮต์) จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบดินนนทบุรีและดินหนองงูเห่าดังรูปที่ 4.60

เมื่อเราต้องการเปรียบเทียบตัวอย่างดินทั้งสองชนิด โดยไม่คิดถึงผลของ Liquid Limit และ Plastic Limit โดยการเขียนกราฟใหม่ได้ดังรูปที่ 4.61 แสดง Liquidity Index กับ Viscosity ของตัวอย่างดินนนทบุรี ซึ่งกราฟที่ได้ใน scale Log-Log และรูปที่ 4.62 แสดง Liquidity Index กับ Viscosity ของตัวอย่างดินหนองงูเห่า ซึ่งกราฟที่ได้ใน scale Log-Log จะได้กราฟที่เป็นเส้นตรง และเมื่อนำกราฟที่ได้มาเปรียบเทียบกันจะได้ตามรูปที่ 4.63 จากกราฟที่ได้จะพบว่าลักษณะของกราฟที่ได้จากตัวอย่างดินหนองงูเห่า และตัวอย่างดินนนทบุรี ข้อมูลจะวิ่งเข้าหากันค่าความหนืด (Viscosity,  $\eta$ ) ของน้ำกลั่นที่ประมาณ 3 mPa-s และเมื่อเส้นกราฟของตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบทั้งสองวิ่งไปถึงค่าความหนืดของน้ำกลั่น ที่ประมาณ 3 mPa-s ก็จะมีแนวโน้มไปกับค่าความหนืดของน้ำกลั่น ที่เส้นกราฟไม่สามารถวิ่งเลยค่าความหนืดของน้ำกลั่นได้นั้น เพราะตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบเมื่อผสมน้ำแล้วจะเป็นเหมือนสารละลาย ทำให้มีค่าความหนืดเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อผสมน้ำเข้าไปมากๆจะทำให้สารละลายที่ได้มีหนืดลดลง จนถึงจุดหนึ่ง อนุภาคที่อยู่ในสารละลายนั้นๆ จะไม่มีผลกระทบต่อค่าความหนืด แม้ว่าเราจะเติมน้ำเข้าไปสักเท่าใดก็จะไม่สามารถทำให้ค่าความหนืดลดลงได้อีก และค่าความหนืดที่ได้จะต้องไม่ต่ำกว่าค่าความหนืดของน้ำ อันเนื่องมาจากน้ำเป็นสารบริสุทธิ์แต่ ดิน+น้ำ เป็นสารละลาย ทำให้ค่าความหนืดที่ได้จะต้องสูงกว่าน้ำกลั่น

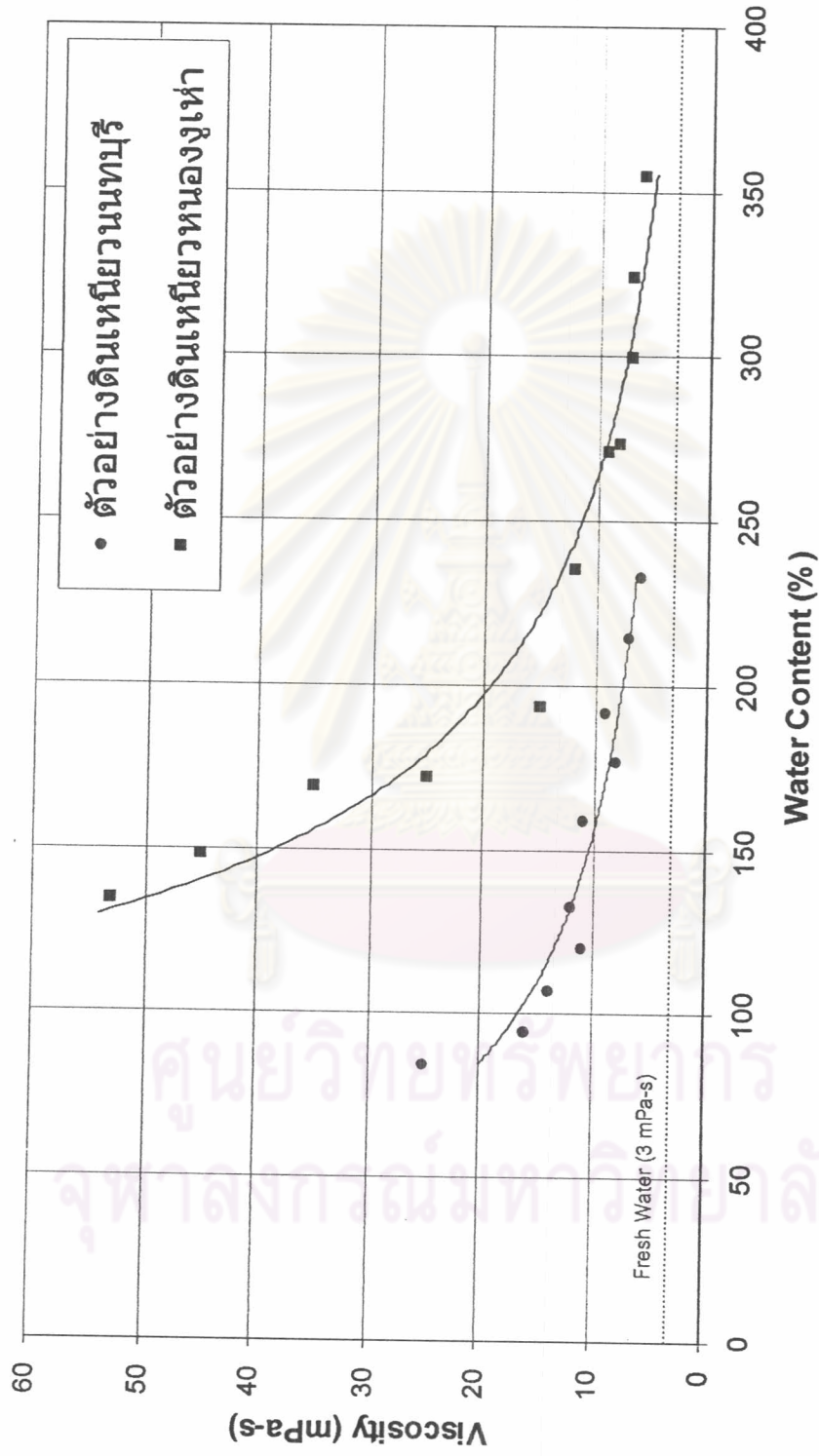
### ตัวอย่างดินนพบุรี



รูปที่ 4.58 แสดงค่า Viscosity ( $\eta$ , mPa-s) กับ Liquidity Index ของตัวอย่างดินนพบุรี ทดสอบด้วยเครื่องมือ Hand-Crank Viscometer

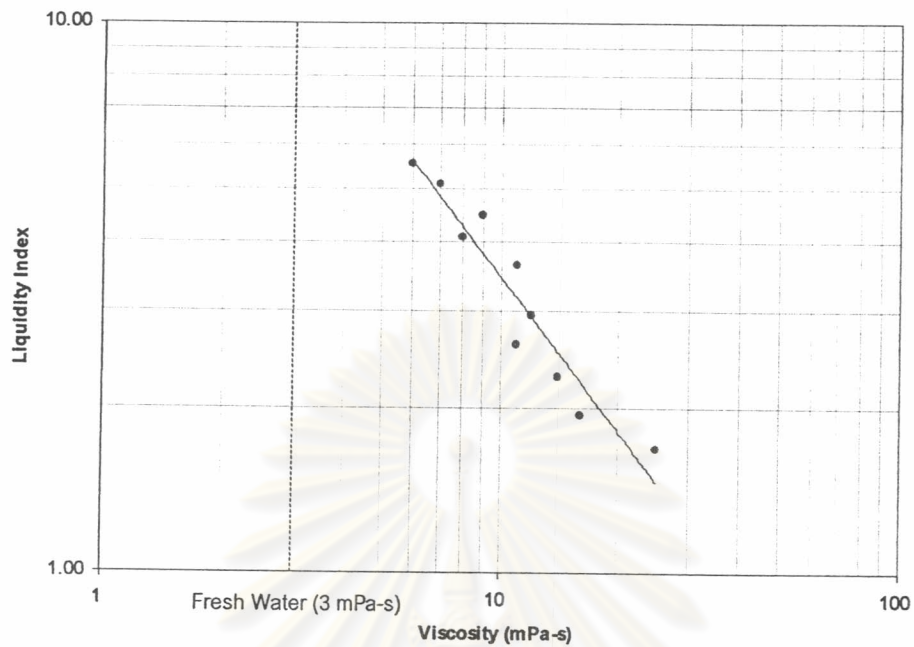


รูปที่ 4.59 แสดงค่า Viscosity ( $\eta$ , mPa-s) กับ Liquidity Index ของตัวอย่างดินเหนียวงูเห่า ทดสอบด้วยเครื่องมือ Hand-Crank Viscometer



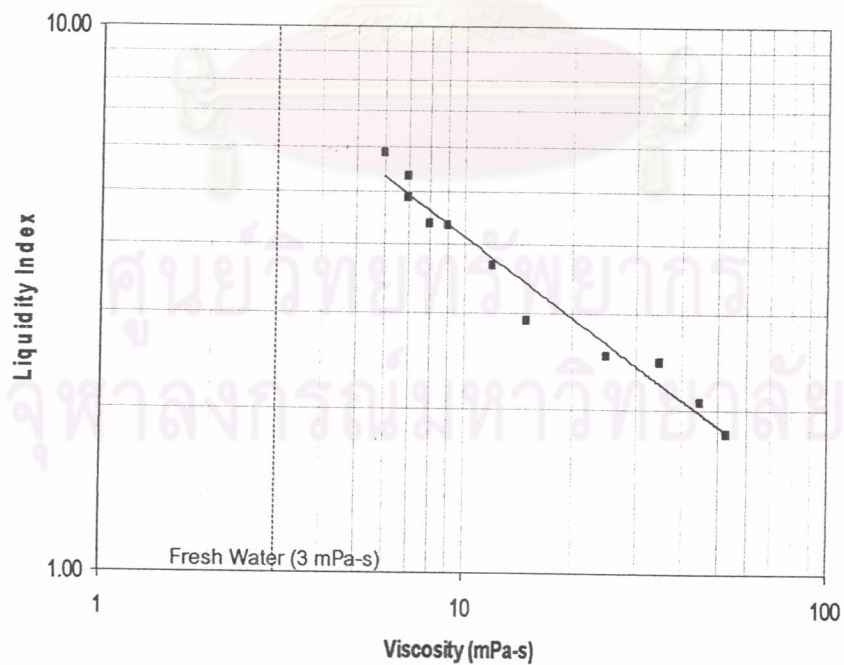
รูปที่ 4.60 แสดงเปรียบเทียบค่า Viscosity ( $\eta$ , mPa-s) กับ Liquidity Index scale Log-Log ของตัวอย่างดินเหนียวทึบ และ ตัวอย่างดินเหนียวงูเห่า ทดสอบด้วยเครื่องมือ Hand-Crank Viscometer

ตัวอย่างดินนหนบุรี

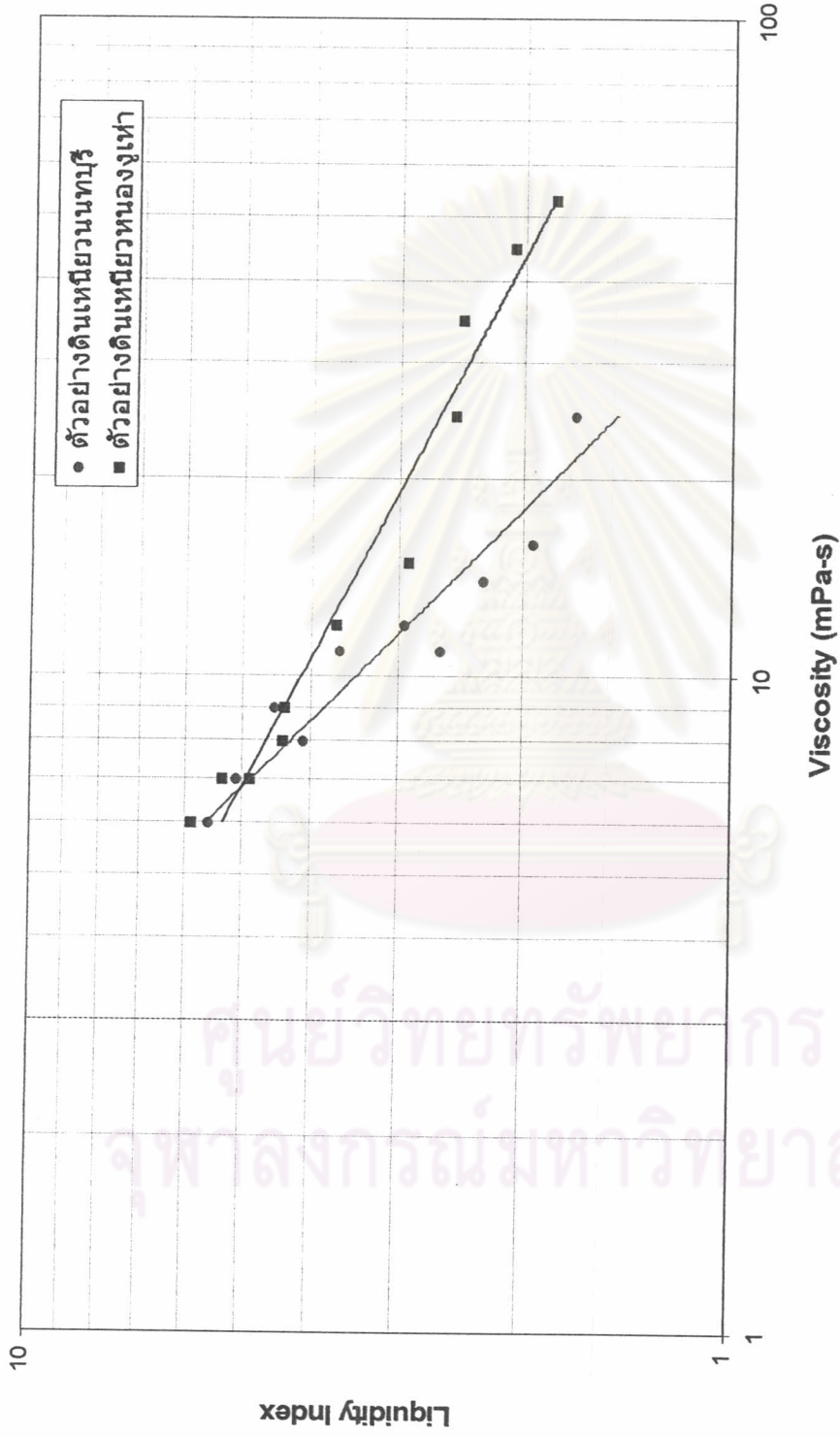


รูปที่ 4.61 แสดงค่า Viscosity ( $\eta$ , mPa-s) กับ Liquidity Index scale Log-Log ของ ตัวอย่างดินนหนบุรี ทดสอบด้วยเครื่องมือ Hand-Crank Viscometer

ตัวอย่างดินหนองเห่า



รูปที่ 4.62 แสดงค่า Viscosity ( $\eta$ , mPa-s) กับ Liquidity Index scale Log-Log ของ ตัวอย่างดินหนองเห่า ทดสอบด้วยเครื่องมือ Hand-Crank Viscometer



รูปที่ 4.63 แสดงการเปรียบเทียบค่า Viscosity ( $\eta$ , mPa-s) กับ Liquidity Index scale Log-Log ของ ตัวอย่างดินบนทรายกับตัวอย่างดินเหนียวหนักของงูเห่า ทดสอบด้วยเครื่องมือ Hand-Crank Viscometer

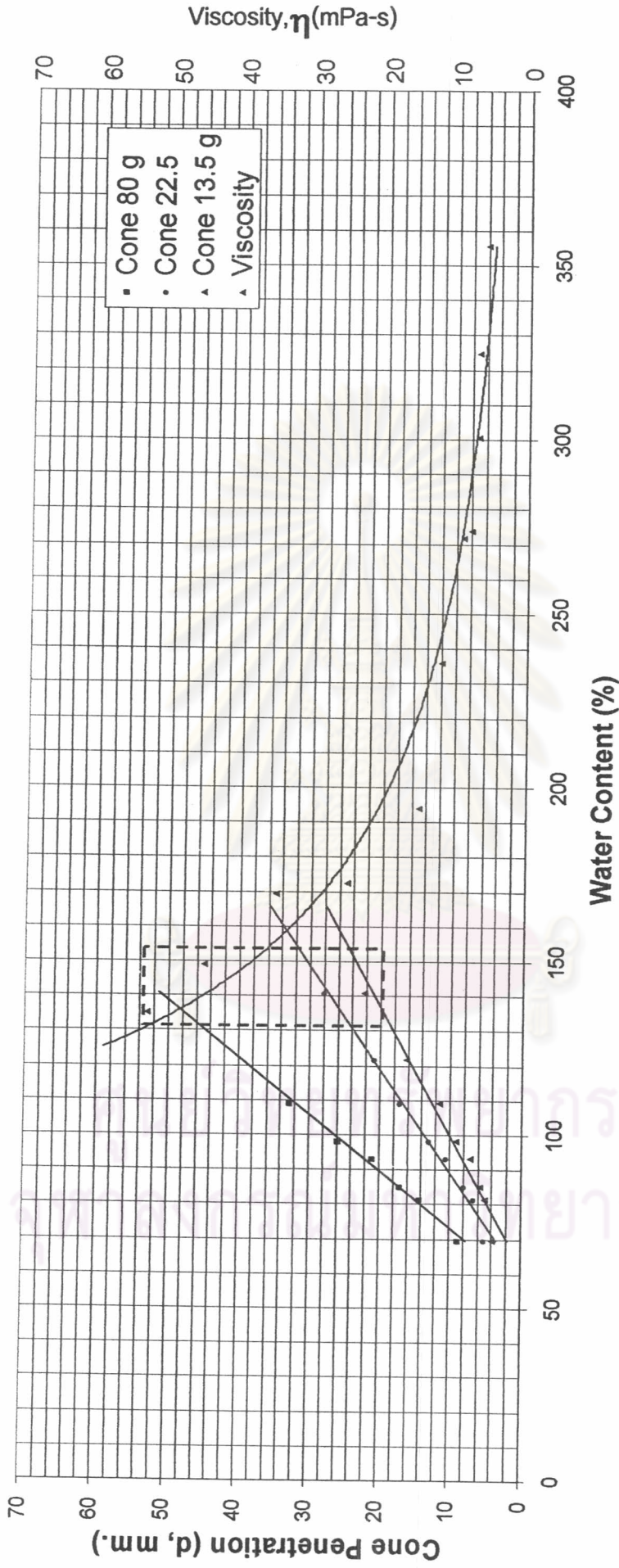
#### 4.7 นำผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือน(Shear Strength, $c_u$ ) เปรียบเทียบกับค่าความหนืด (Viscosity, $\eta$ )

เป็นขั้นตอนสุดท้ายในงานวิจัยนี้โดยการนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือน(Shear Strength,  $c_u$ ) ที่ได้จากทดสอบด้วยเครื่องมือกรวยตก (Fall Cone Test) และค่าความหนืด (Viscosity,  $\eta$ ) ที่ได้จากทดสอบ มาทำการเชื่อมโยงข้อมูลซึ่งกันและกัน โดยข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมีข้อมูลที่เชื่อมโยงกัน 2 ส่วนด้วยกันคือ ดินที่ใช้ทดสอบเป็นดินชนิดเดียวกันและมีส่วนที่ค่า Water Content จึงจะนำมาทำการเชื่อมโยงข้อมูลกันได้ จากนั้นจึงนำข้อมูลจากรูปที่ 4.30 ที่แสดงข้อมูลของ Water Content (%) กับระยะจมของหัวกรวย (Penetration d, mm.) มาเชื่อมต่อกับข้อมูลที่ได้จากรูปที่ 4.59 แสดงค่า Viscosity ( $\eta$ , mPa-s) กับ Liquidity Index ของตัวอย่างดินหนองงูเห่า ทดสอบด้วยเครื่องมือ Hand-Crank Viscometer จะได้ตามรูปที่ 4.64 ที่แสดงผลการทดสอบค่า Water Content (%) กับค่าระยะจมของหัวกรวย (Cone Penetration d,mm.) โดยใช้หัวกรวยขนาด 30° หนัก 80 g, 22.5 g, 13.5 g และค่าความหนืด (Viscosity  $\eta$ , mPa-s) และรูปที่ 4.65 แสดงผลการทดสอบค่า Liquidity Index กับค่าระยะจมของหัวกรวย (Cone Penetration d,mm.) โดยใช้หัวกรวยขนาด 30° หนัก 80 g, 22.5 g, 13.5 g และค่าความหนืด (Viscosity  $\eta$ , mPa-s)

จากรูปที่ 4.64 พบว่าจะมีจุดที่สามารถนำข้อมูลทำการเชื่อมโยงกันได้อยู่ระหว่าง Water Content (%) ประมาณ 125-165 % ซึ่งเราสามารถนำข้อมูลมาเขียนเป็นรูปที่ 4.66 ที่แสดงระยะที่จม (Penetration d, mm.)ของกรวย 30° หนัก 80 g, 22.5 g และ 13.5 g กับค่าความหนืด (Viscosity,  $\eta$ ) สำหรับตัวอย่างดินหนองงูเห่า และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength,  $c_u$ ) จากค่าระยะจมของดินตามสมการ  $c_u = \frac{KW}{d^2}$  ซึ่งค่า K ของหัวกรวยหนัก 22.5 กรัม มีค่าเท่ากับ K = 0.6915 และ ค่า K ของหัวกรวยหนัก 13.5 กรัม มีค่าเท่ากับ K = 0.625 เมื่อแทนค่าลงไปในสมการ และนำมาเขียนกราฟ ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength) กับ ค่าความหนืดได้ตามรูปที่ 4.67 ซึ่งเส้นกราฟออกมาทับกันพอดี แสดงให้เห็นว่าดินชนิดเดียวกันย่อมมี Viscosity-Shear Strength เดียวกัน จากนั้นจึงทำการหาสมการความสัมพันธ์ จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่าง Viscosity-Shear Strength ของตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า คือ

$$c_u = \frac{120.598}{(-0.4253\eta + 44.181)^2}$$

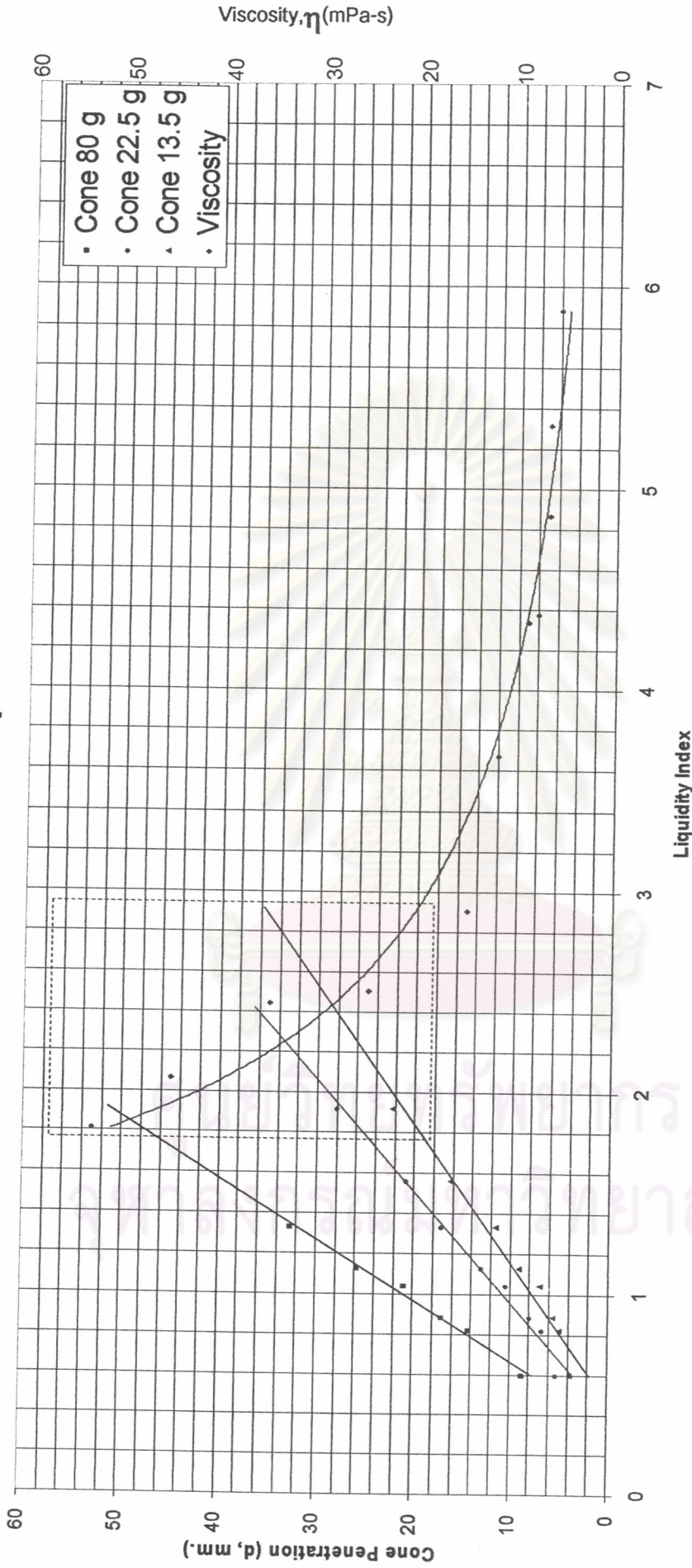
ตัวอย่างดินเหนียวหนองงูเห่า



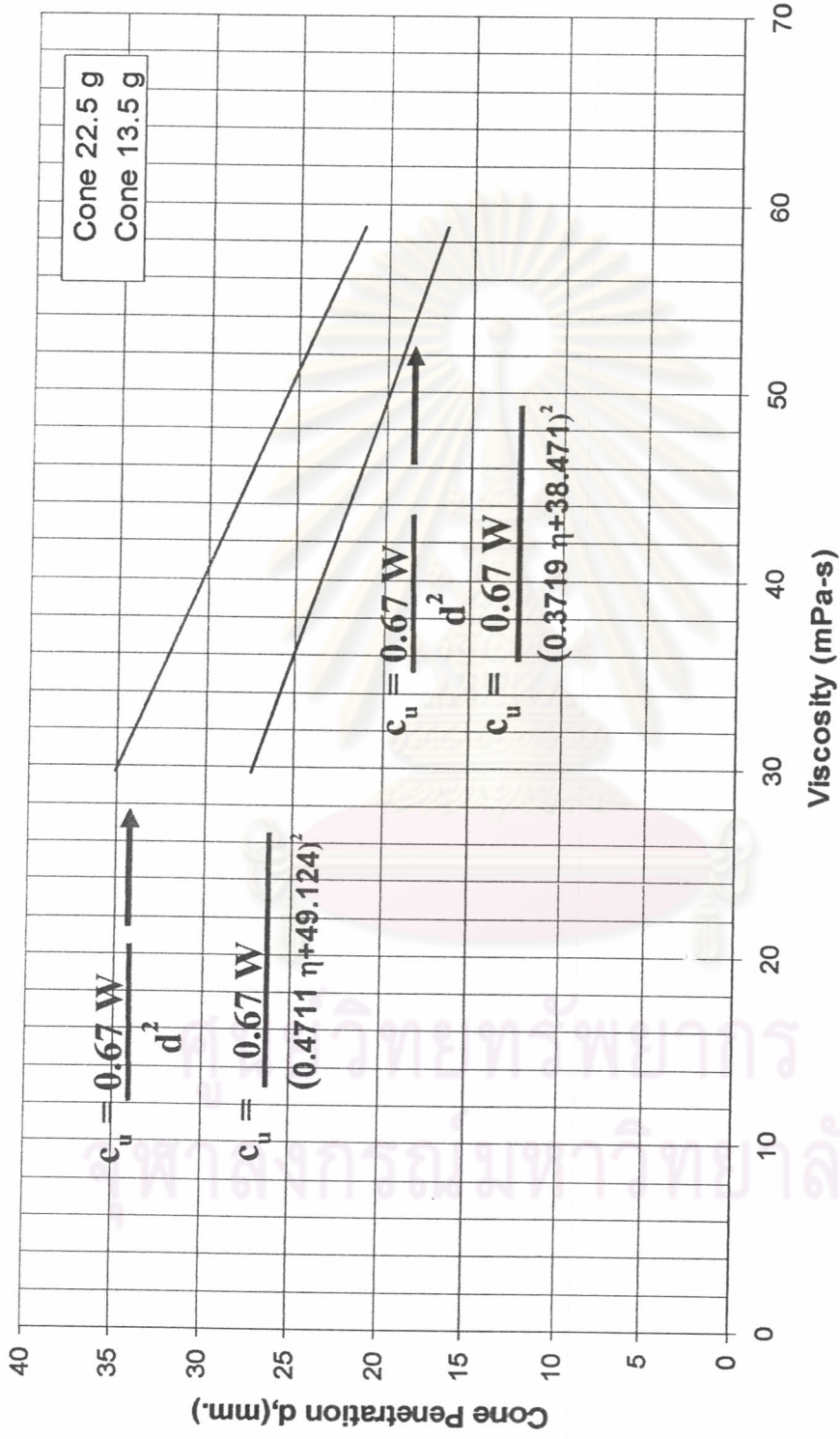
รูปที่ 4.64 แสดงผลการทดสอบค่า Water Content (%) กับค่าระยะจมของหัวกรวย (Cone Penetration d,mm.) โดยใช้หัวกรวยขนาด 30°หนัก 80 g, 22.5 g, 13.5 g และค่าความหนืด (Viscosity  $\eta$ , mPa-s)



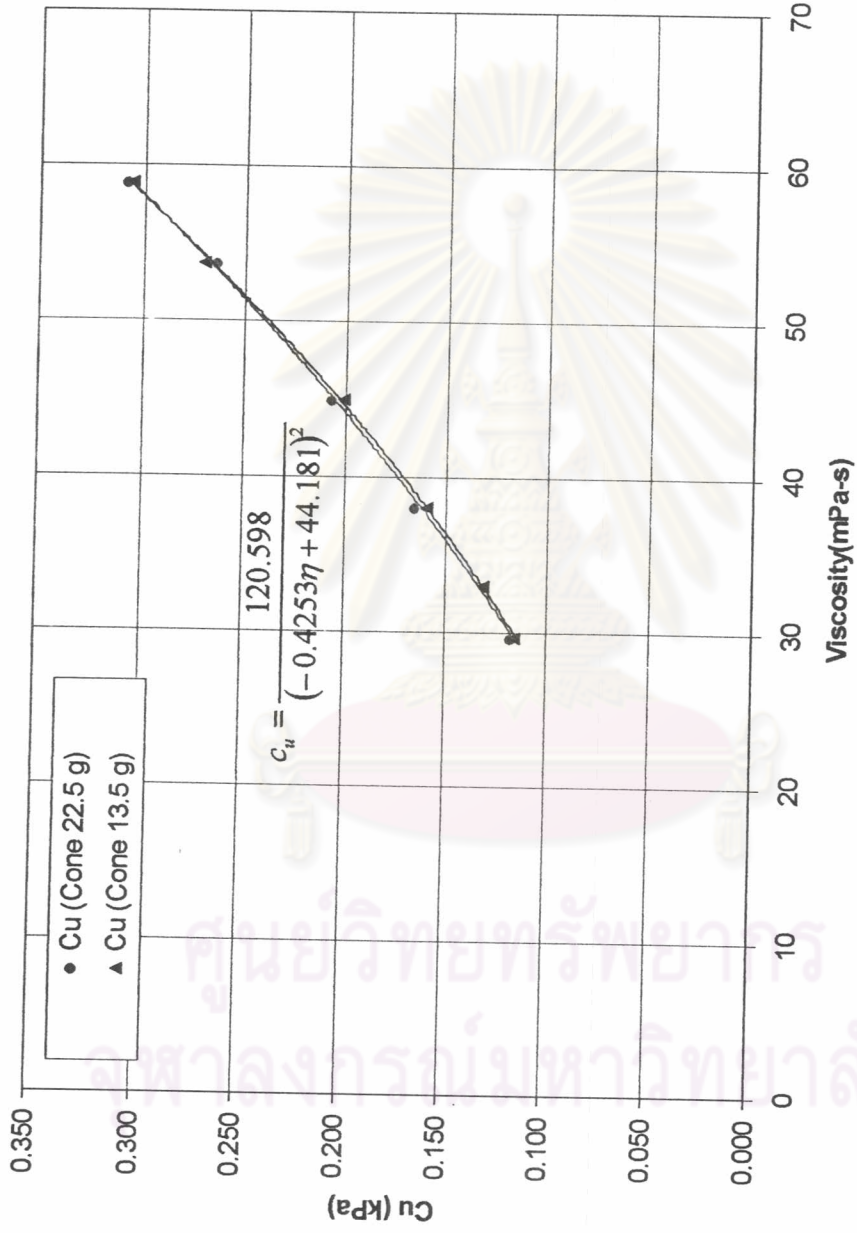
ตัวอย่างดินเหนียวของงูเห่า



รูปที่ 4.65 แสดงผลการทดสอบค่า Liquidity Index กับค่าระยะจมของหัวกรวย (Cone Penetration d,mm.) โดยใช้หัวกรวยขนาด 30°หนัก 80 g, 22.5 g, 13.5 g และค่าความหนืด (Viscosity  $\eta$ , mPa-s) ตัวอย่างดินเหนียวงูเห่า



รูปที่ 4.66 แสดงระยะที่จม (Penetration d, mm.) ของกรวย 30° หนัก 80 g, 22.5 g และ 13.5 g กับค่าความหนืด (Viscosity, η) สำหรับตัวอย่างดินหนองงูเห่า



รูปที่ 4.67 แสดงค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength  $c_u$ , kPa) กับค่าความหนืด (Viscosity,  $\eta$ ) ของทราย  $30^\circ$  หนัก 22.5 g และ 13.5 g สำหรับตัวอย่างดินเหนืองูเห่า