



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ผลกระทบของความชื้นในการบดอัดต่อกำลังรับแรงเฉือนของดินใน  
สภาพไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

Effects of compaction moisture content on shear strength  
of compacted soil in unsaturated condition

สยาม ยิ้มศิริ

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล  
(งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 2559A10802017

สัญญาเลขที่ 125/2559

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ผลกระทบของความชื้นในการบดอัดต่อกำลังรับแรงเฉือนของดินใน  
สภาพไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

Effects of compaction moisture content on shear strength  
of compacted soil in unsaturated condition

สยาม ยิ้มศิริ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

กันยายน 2559

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 125/2559 ขอขอบพระคุณ ศรัณยู เบญจมงคล, ทศพล เชื้อจิ้น, นิตี กุญชู, และ ชัยวัฒน์ แถวจันทร์ ที่ช่วยในการดำเนินงานนี้

## บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการศึกษาผลกระทบของความชื้นในการบดอัดต่อกำลังรับแรงเฉือนของดินในสภาพไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยศึกษาความสัมพันธ์ของ shear strength กับ matric suction และ confining stress ของทรายปนดินเหนียว (subgrade) หลังการถูกบดอัดในสภาพไม่อิ่มตัวด้วยน้ำเพื่อจำลองสภาวะที่เกิดขึ้นกับดินที่ใช้ก่อสร้างโครงสร้างทาง นอกจากนี้ยังศึกษาผลกระทบของปริมาณดินเหนียวในทรายและ compactive effort ต่อความสัมพันธ์ดังกล่าว ในการศึกษาครั้งนี้ค่า suction ของดินบดอัดในสภาพไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะวัดโดย tensiometer และกำลังรับแรงเฉือนจะวัดโดยการทดสอบโดย CBR, unconfined compression test, และ direct shear test นอกจากนี้ยังมีการศึกษาคูณสมบัติ soil-water characteristic curve ของดินด้วย

## ABSTRACT

The objective of this research is to study the effects of molding water content on shear strength of soil under unsaturated condition. The relationship between shear strength, matric suction, and confining stress of clayey sand (subgrade) is investigated. The tested soil is prepared by being compacted in unsaturated condition to simulate its real construction condition. Moreover, the effects of clay contents and compactive efforts on the aforementioned relationships are also investigated. In this study, the suction of compacted soil in unsaturated condition is measured by tensiometer. The shear strength of soil is measured by CBR, unconfined compression test, and direct shear test. The soil-water characteristic curves are also investigated.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	i
บทคัดย่อ	ii
สารบัญ	iii
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1-1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	1-2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1-3
<b>บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม</b>	
2.1 การบดอัดดิน (Compaction)	2-1
2.1.1 ทฤษฎี	2-1
2.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง ปริมาณน้ำ และพลังงาน	2-2
2.1.3 การทดลองการบดอัดดิน	2-3
2.1.4 ทฤษฎีกราฟการบดอัด	2-5
2.2 ทฤษฎีกำลังรับแรงเฉือนของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ	2-6
2.2.1 ทฤษฎีของ Terzaghi	2-7
2.2.2 ทฤษฎีของ Fredlund	2-8
2.2.3 ทฤษฎีของ Vanapalli	2-9
2.3 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะดินกับน้ำ	2-10
2.3.1 Soil Water Characteristic Curve (SWCC) modeling parameters	2-12
2.3.2 สมการของ Brook and Corey (BC), 1964	2-13
2.3.3 สมการ Van Genuchten (VG), 1980	2-14
2.4 การทดสอบเครื่องอัดความดัน (Terpe cell)	2-15
2.5 การวัดแรงดูดระหว่างเม็ดดิน (suction measurement)	2-17
2.6 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดิน (Direct shear test)	2-19
2.7 การทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test)	2-23
2.8 การทดสอบแคลิฟอร์เนีย แบริงเรโซ (California Bearing Ratio)	2-26
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2-29

**บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน**

3.1	วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	3-1
3.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	3-1
3.3	การทดสอบการบดอัดดิน (Compaction Test)	3-1
3.4	การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดิน (Direct shear test)	3-3
3.5	การทดสอบเครื่องอัดความดัน (Tempe cell)	3-6
3.6	การวัด Suction ด้วยเครื่องมือ SWT5X	3-8
3.7	การทดสอบแรงอัดแกนเดี่ยว(Unconfined Compression Test)	3-9
3.8	การทดสอบแคลิฟอร์เนีย แบริงเรโซ (California Bearing Ratio)	3-11
3.9	แผนการปฏิบัติงาน	3-14
3.9.1	Direct shear test	3-14
3.9.2	Tempe Cell Test	3-15
3.9.3	Unconfined and CBR test	3-16

**บทที่ 4 ผลการทดลอง direct shear และ Temper cell**

4.1	ผลกระทบของปริมาณความชื้นในการบดอัดต่อคุณสมบัติต่างๆ	4-1
4.1.1	เปรียบเทียบการบดอัดดินที่พลังงานต่างกัน	4-1
4.1.2	เปรียบเทียบการบดอัดที่ปริมาณดินเหนียวต่างกัน	4-7
4.2	การวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านกำลังด้วยทฤษฎีของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ	4-15

**บทที่ 5 ผลการทดลอง unconfined compression และ CBR**

5.1	ผลกระทบของปริมาณความชื้นในการบดอัดต่อคุณสมบัติต่างๆ	5-1
5.1.1	เปรียบเทียบการบดอัดดินที่พลังงานต่างกัน	5-1
5.1.2	เปรียบเทียบการบดอัดที่ปริมาณดินเหนียวต่างกัน	5-8
5.2	การวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านกำลังด้วยทฤษฎีของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ	5-13
5.3	กราฟแสดงขอบเขตการวิบัติทางด้านกำลังของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ	5-15
5.4	การประยุกต์คุณสมบัติของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ	5-18

**บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง**

เอกสารอ้างอิง	R-1
ผลผลิต	
ประวัตินักวิจัย	

## บทที่ 1 บทนำ

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินในการบดอัดเนื่องจากปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปเกิดได้ตลอดเวลา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศในแต่ละพื้นที่ ผลจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำที่มีต่อกำลังของดิน กำลังรับแรงเฉือน ค่า Suction ค่า Cohesion และขอบเขตของการวิบัติของดิน ควรนำมาศึกษาพฤติกรรมด้านวิศวกรรมของดินบดอัด เพื่อเป็นแนวทางการออกแบบโครงสร้างชั้นทางและการก่อสร้างอาคารบนดินที่มีคุณสมบัติต่างๆ โครงการวิจัยนี้เสนอผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลง กำลังของดิน กำลังรับแรงเฉือน ค่า Suction ค่า Cohesion และขอบเขตของการวิบัติของดินเนื่องจากปริมาณน้ำ ในดินที่เปลี่ยนแปลงไป

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินในการบดอัดเนื่องจากปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปเกิดได้ตลอดเวลา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศในแต่ละพื้นที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศไทยซึ่งตั้งอยู่ในเขตภูมิอากาศร้อนชื้นมีฝนตกชุกเกือบตลอดปี ทำให้ปริมาณความชื้นในดินเปลี่ยนไป ซึ่งส่งผลกระทบต่อกำลังของดิน และคุณสมบัติต่างๆ ของดิน ดังนั้นผลจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำที่มีต่อกำลังของดิน กำลังรับแรงเฉือน ค่า Matric Suction ค่า Cohesion และขอบเขตของการวิบัติของดิน จึงควรนำมาเพื่อศึกษาพฤติกรรมด้านวิศวกรรมของดินบดอัด และเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบโครงสร้างชั้นทางและการก่อสร้างอาคารบนดินที่มีคุณสมบัติต่างๆ การศึกษาถึงผลของปริมาณความชื้นที่มีต่อคุณสมบัติต่างๆ ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างค่า ปริมาณความชื้นกับกำลังของดิน, กำลังรับแรงเฉือน, ค่า Matric Suction และค่า CBR และขอบเขตของการวิบัติของดิน

ดินเป็นวัสดุธรรมชาติเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะทางธรรมชาติที่แตกต่างกันจะแสดงพฤติกรรมที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งสามารถจำแนกตามสถานะได้เป็นสองชนิดด้วยกันคือ ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated soil) และดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated soil) ดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ คือมีน้ำอยู่เต็มช่องว่างของดิน ซึ่งมีระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (Degree of saturation) เท่ากับหนึ่ง จะประกอบด้วย ของแข็ง (เม็ดดิน) และน้ำ ซึ่งเราสามารถอธิบายกำลังของดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำได้ตามทฤษฎีหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress) ของ Terzaghi สำหรับดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ คือ ดินที่อิ่มตัวบางส่วน ซึ่งมีระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (Degree of saturation) น้อยกว่าหนึ่ง ดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ จะประกอบไปด้วย ของแข็ง (เม็ดดิน) น้ำ และอากาศ ดังนั้นทฤษฎีหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress) ของ Terzaghi ของสำหรับดินอิ่มตัวด้วยน้ำจึงไม่เหมาะสม สำหรับดินไม่อิ่มตัวเนื่องจากความดันน้ำในโพรงของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าเป็นลบ หน่วยแรงที่กระทำกับก้อนดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำนั้น ไม่ได้เพียงแต่กระทำกับเม็ดดินและน้ำในช่องว่างในก้อนดินเท่านั้น แต่หน่วยแรงนี้ ยังกระทำกับอากาศในช่วงว่างในก้อนดินด้วย ดังนั้นเพื่อจัดข้อสงสัยของการหาลำกำลังของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โครงการวิจัยนี้จึงศึกษาพฤติกรรม วิธีหาลำกำลัง และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ เพื่อนำไปใช้อธิบายพฤติกรรมที่แท้จริงของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำให้ชัดเจนมากยิ่งขึ้นโดยทฤษฎีของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- ศึกษาว่าปริมาณความชื้นมีผลกระทบต่อกำลังของดินที่ไม่อิ่มตัว
- ศึกษาปริมาณของดินเหนียวในที่มีอยู่ในดินมีผลกระทบต่อกำลังรับแรงเฉือนของดิน
- ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ปริมาณความชื้นกับกำลังของดิน
- ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ปริมาณความชื้นกับกำลังรับแรงเฉือน
- ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ปริมาณความชื้นกับค่า Matric Suction
- ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ปริมาณความชื้นกับค่า CBR
- ขอบเขตของการวิบัติของดิน (Failure Surface) จากทฤษฎีของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ
- ทำนายผล CBR จากคุณสมบัติของดิน

## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- อธิบายถึงปริมาณความชื้นมีผลกระทบต่อกำลังของดินที่ไม่อิ่มตัว
- อธิบายถึงปริมาณของดินเหนียวในที่มีอยู่ในดินมีผลกระทบต่อกำลังรับแรงเฉือนของดิน
- สามารถบอกถึงค่าความสามารถในการบดอัดดิน ในสภาวะความชื้นต่างๆ
- สามารถบอกถึงค่าความต้านทานแรงเฉือนของดิน ในสภาวะความชื้นต่างๆ
- สามารถทราบค่าแรงดูดของมวลดิน ในสภาวะความชื้นต่างๆ
- สามารถบอกถึงค่าของแคลิฟอร์เนีย แบริงเจอร์โซ ในสภาวะความชื้นต่างๆ
- สามารถบอกถึงขอบเขตของการวิบัติของดินได้จากทฤษฎีของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ
- สามารถทำนายผล CBR ได้



## บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม

### 2.1 การบดอัดดิน (Compaction)

การบดอัดดินให้ได้ความแน่นสูงตามความต้องการหรือตามจุดประสงค์ของการใช้งานจะต้องอาศัยน้ำเป็นตัวประสานเชื่อม แต่ถ้ามีน้ำมีอยู่มากเกินไปน้ำจะไปหุ้มเคลือบรอบๆมวลดินทำให้อุญของเม็ดดินแยกตัวห่างจากกัน หรือถ้ามีน้ำอยู่น้อยเกินไปการประสานเชื่อมไม่ดีพอที่จะช่วยให้การบดอัดเม็ดดินเปียดชิดกันเท่าที่ควร ด้วยเหตุผลและข้อเท็จจริงดังกล่าว R.R. Proctor (1933) ได้กำหนดวิธีทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับความแน่นของดินที่ได้จากการบดอัดในห้องปฏิบัติการซึ่งต่อมาได้เป็นที่ยอมรับและนิยมใช้ทดสอบการบดอัดดินในงานก่อสร้างโดยทั่วไปว่าเป็นวิธีทดสอบมาตรฐาน (Standard Proctor Test) โดยเฉพาะการทดสอบเพื่อควบคุมงานก่อสร้างถนนสนามบินเขื่อนดินพื้นโรงงานฯลฯ ในปัจจุบันยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งได้วิวัฒนาการมีขนาดใหญ่ขึ้นบรรทุกน้ำหนักได้มากขึ้นหลายเท่าตัวพลังงานที่ใช้ในการบดอัดก็จำเป็นจะต้องเพิ่มขึ้นด้วยจึงได้มีการกำหนดวิธีทดสอบการบดอัดดินโดยการเพิ่มพลังงานให้สูงขึ้นเพื่อจะได้ฐานดินที่มีความแน่นสูงรับน้ำหนักได้มากเรียกว่าวิธีทดสอบแบบโมดิไฟด์ (Modified Proctor Test) สำหรับพื้นที่จริงพลังงานที่ใช้ในการบดอัดเปรียบได้กับจำนวนครั้งที่เครื่องจักรบดอัดวิ่งผ่านแต่สำหรับในห้องปฏิบัติการทดลองจะถูกเปลี่ยนมาเป็นการกระทุ้งตามวิธีการทดลองของ Proctor โดยค่าพลังงานในการบดอัดนั้นจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักของค้อนกระทุ้ง ความสูงของระยะปล่อย จำนวนชั้นของการบดอัด จำนวนครั้งที่กระทุ้งต่อชั้น และปริมาตรของโมล

#### 2.1.1 ทฤษฎี

การบดอัดดินคือการปรับปรุงคุณภาพดินโดยการประยุกต์ใช้พลังงานเชิงกลซึ่งเป็นการปรับปรุงคุณภาพดิน ปริมาณความชื้นที่มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่นจะปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการบดอัดโดยอาศัยการสั่นสะเทือน และสำหรับดินเม็ดละเอียดสามารถทดสอบการบดอัดดินได้ในห้องปฏิบัติการโดยวิธีของ Proctor แต่ถ้าเป็นในสนามสามารถเลือกใช้เครื่องจักรบดอัดชนิดต่างๆกันโดยพิจารณาความเหมาะสมตามชนิดของดินจุดประสงค์ของการบดอัดดินก็เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของมวลดินซึ่งก่อให้เกิดประโยชน์หลายข้อดังนี้

- ลดการทรุดตัวของดิน
- เพิ่มกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินและปรับปรุงเสถียรภาพความลาดชัน
- ปรับปรุงกำลังต้านทานน้ำหนักของพื้นทาง
- ไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรเช่นสาเหตุจากการบวมตัวและการหดตัวของดิน
- ลดการซึมผ่านของน้ำในดิน

พื้นฐานการบดอัดดินที่มีความเชื่อมแน่นได้ถูกสร้างความสัมพันธ์ขึ้นโดย R.R. Proctor ในปี 1933 โดยเริ่มต้นเมื่อมีการสร้างเขื่อนเพื่อกักเก็บน้ำใน Los Angeles และเขาได้พัฒนาหลักการบดอัดดินโดยตีพิมพ์ใน

หนังสือ Engineering New-Record (Proctor, 1933) แล้วนำวิธีการทดสอบนี้ไปใช้ในห้องปฏิบัติการโดยเรียกวิธีการดังกล่าวว่า Proctor Test ซึ่งมีวิธีการทดสอบ 2 แบบคือ การบดอัดแบบมาตรฐานและการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ค่าพลังงานต่อปริมาณของการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานจะมีค่าสูงกว่าการบดอัดแบบมาตรฐานเท่ากับ 4.5 เท่า แต่การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานจะให้ความแน่นแห้งสูงกว่าการบดอัดแบบมาตรฐานเพียง 10% เท่านั้น โดยที่ Proctor ได้กล่าวไว้ว่าในการบดอัดดินมักจะมีตัวแปรควบคุมอยู่ 4 ตัวคือ

- ความหนาแน่นแห้ง
- ปริมาณความชื้น
- พลังงานในการบดอัด
- ชนิดของดิน

การบดอัดสามารถแยกได้ 2 ส่วนดังนี้

(i) การบดอัดดินในสนามโดยใช้เครื่องจักรมี 3 ลักษณะดังนี้

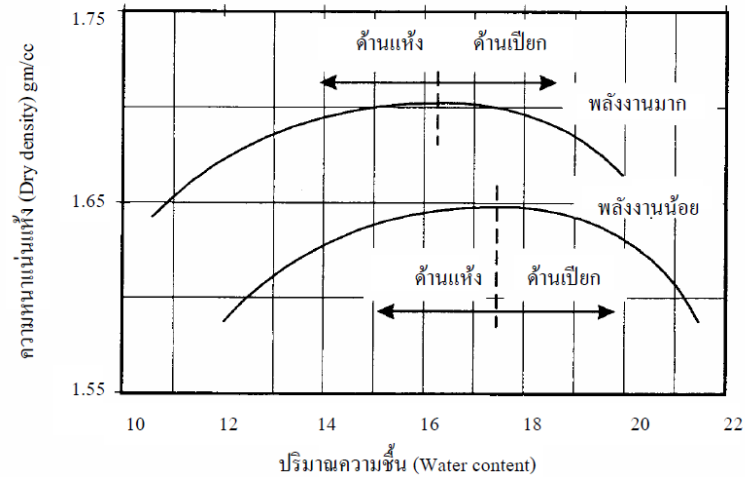
- วิ่งรถบดอัดไปมาเช่นรถบดล้อเหล็กหรือรถบดล้อยางรถบดตีนแกะ
- ประเภทสั้นหรือเขย่าเช่นรถบดสั้นสะเทือนเครื่องสั้นแบบแผ่นแบนและเครื่องสั้นแบบกระแทก
- ประเภทกระทู้เช่นสองเกลอสามเกลอกระบะโตหรือเครื่องกระทู้ที่ใช้กำลังจากเครื่องบด

(ii) การบดอัดดินในห้องทดลองมี 3 วิธีดังนี้

- วิธีบดอัดทางพลศาสตร์วิธีนี้จะทำโดยการใช้ค้อนเหล็กปล่อยตกบดอัดดินในแบบโมลซึ่งใช้กันทั่วไป
- วิธีบดอัดแบบนวดวิธีนี้เหมาะกับการเตรียมตัวอย่างดินสำหรับทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compression Test)
- วิธีบดอัดทางสถิติศาสตร์วิธีนี้เหมาะสำหรับการเตรียมตัวอย่างดินเพื่อการทดสอบแรงอัด 3 แกนและการอัดตัวคายน้ำ

### 2.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง ปริมาณน้ำ และพลังงาน

ความหนาแน่นของดินที่บดอัดแล้วนอกจากปริมาณน้ำที่ใช้ในการบดอัดแล้วยังขึ้นอยู่กับวิธีการบดอัดและพลังงานที่ใช้ในการบดอัด สำหรับการบดอัดดินชนิดเดียวกันโดยใช้ปริมาณน้ำที่เท่ากันแต่พลังงานในการบดอัดต่างกันจะให้ความหนาแน่นที่ต่างกันด้วย ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง ปริมาณน้ำ และพลังงานเมื่อใช้พลังงานในการบดอัดเพิ่มขึ้นจะให้ความหนาแน่นแห้งสูงขึ้น, ความชื้นที่เหมาะสมลดลง, ความหนาแน่นแห้งจะเพิ่มมากขึ้นในด้านที่แห้งและความหนาแน่นแห้งในด้านที่เปียกจะเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยดังรูปที่



รูปที่ 2-1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง, ปริมาณน้ำ, และพลังงาน

### 2.1.3 การทดลองการบดอัดดิน

การทดลองความแน่นแบบมาตรฐานและการทดลองความหนาแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบเป็นดังนี้

- ASTM D 1140 - 54 Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort [12,400 ft-lb/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>)] มีรายละเอียดดังตารางที่ 2-1
- ASTM D 1557 – 00 Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort [56,000 ft-lb/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>)] มีรายละเอียดดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-1 การบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor Test)

ลำดับ	วิธีการ		
	A	B	C
1.ขนาดของโมล	4 นิ้ว (10.16 cm.)	4 นิ้ว	6 นิ้ว (15.24 cm.)
2.ความสูงของโมล	4.584 นิ้ว (11.68 cm.)	4.584 นิ้ว	4.584 นิ้ว
3.ปริมาตรของโมล	0.0333 ลบ.ฟุต (944 ลบ.ซม.)	0.0333 ลบ.ฟุต (944 ลบ.ซม.)	0.075 ลบ.ฟุต (2124 ลบ.ซม.)
4.น้ำหนักของค้อน	5.5 ปอนด์ (2.5 กก.)	5.5 ปอนด์ (2.5 กก.)	5.5 ปอนด์ (2.5 กก.)
5.ระยะยก	12.0 นิ้ว	12.0 นิ้ว	12.0 นิ้ว
6.จำนวนชั้น	3	3	3
7.จำนวนชั้นที่กระทุ้งต่อชั้น	25	25	56
8.พลังงานในการบดอัด	12375 ฟุต-ปอนด์ ต่อ ลบ.ฟุต. (600 กม-เมตร/ลบ.ม)	12375 ฟุต-ปอนด์ ต่อ ลบ.ฟุต. (600 กม-เมตร/ลบ.ม)	12375 ฟุต-ปอนด์ ต่อ ลบ.ฟุต. (600 กม-เมตร/ลบ.ม)
9.วัสดุดิน	ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มม.) อาจจะใช้ดินที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 4 น้อยกว่าหรือเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์	ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 อาจจะใช้ดินที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 4 มากกว่าหรือเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์และดินที่ค้ำตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว (9.5 มม.)	ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ใช้ดินที่ค้ำตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว มากกว่าหรือเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์และดินที่ค้ำตะแกรงขนาด 3/4 นิ้ว น้อยกว่า 30 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 2-2 การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Test)

ลำดับ	วิธีการ		
	A	B	C
1.ขนาดของโมล	4 นิ้ว (10.16 cm.)	4 นิ้ว	6 นิ้ว (15.24 cm.)
2.ความสูงของโมล	4.584 นิ้ว (11.68 cm.)	4.584 นิ้ว	4.584 นิ้ว
3.ปริมาตรของโมล	0.0333 ลบ.ฟุต (944 ลบ.ซม.)	0.0333 ลบ.ฟุต (944 ลบ.ซม.)	0.075 ลบ.ฟุต (2124 ลบ.ซม.)
4.น้ำหนักของค้อน	10 ปอนด์ (4.54 กก.)	10 ปอนด์ (4.54 กก.)	10 ปอนด์ (4.54 กก.)
5.ระยะยก	18.0 นิ้ว (45.72 มม.)	18.0 นิ้ว (45.72 มม.)	18.0 นิ้ว (45.72 มม.)
6.จำนวนชั้น	5	5	5
7.จำนวนชั้นที่กระทบต่อชั้น	25	25	56
8.พลังงานในการบดอัด	56250 ฟุต-ปอนด์ ต่อ ลบ.ฟุต. (2700กม-เมตร/ลบ.ม)	56250 ฟุต-ปอนด์ ต่อ ลบ.ฟุต. (2700กม-เมตร/ลบ.ม)	56250 ฟุต-ปอนด์ ต่อ ลบ.ฟุต. (2700กม-เมตร/ลบ.ม)
9.วัสดุดิน	ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มม.) อาจจะใช้ดินที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 4 น้อยกว่าหรือเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์	ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 อาจจะใช้ดินที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 4 มากกว่าหรือเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์และดินที่ค้ำตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว (9.5 มม.)	ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ใช้ดินที่ค้ำตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว มากกว่าหรือเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์และดินที่ค้ำตะแกรงขนาด 3/4 นิ้ว น้อยกว่า 30 เปอร์เซ็นต์

### 2.1.4 ทฤษฎีกราฟการบดอัด

#### Water Films & Lubrication

Poctor (1933) ได้บอกถึงประสิทธิภาพของวิธีการต่างๆ ในการบดอัดดินสูงสุด โดยแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค ซึ่งทฤษฎีคือในดินที่แห้งมากจะมีฟิล์มน้ำบางๆ ซึ่งเกิดขึ้นโดยพื้นผิวโดยแรงดึงดูดล้อมรอบแต่ละอนุภาค และการดูดซึมความชื้นสามารถพัฒนาแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคให้สูงขึ้น ทำให้การบดอัดได้ยากขึ้น ซึ่งการเติมน้ำจะทำให้แรงดูดซึม, แรงเสียดทาน และทำให้เกิดการขยายตัวขึ้น เมื่อเติมน้ำมากขึ้นก็จะส่งผลให้เกิดการหล่อลื่น และการจัดเรียงตัวของอนุภาคใหม่ ผลกระทบนี้จะมีผลจนกว่าความชื้นเพียงพอที่จะเติมเต็มช่องว่างทั้งหมด เมื่อกระบวนการบดอัดเสร็จสิ้น ซึ่งดินนี้จะมีความหนาแน่นที่สุดและอัตราส่วนช่องว่างต่ำสุด แต่ถ้ามีปริมาณน้ำมากขึ้นจะต้องมีส่วนรองรับน้ำในอนุภาคโครงสร้างของดิน ซึ่งจะทำให้ความหนาแน่นแห้งลดลง, ดินมีความอ่อนตัวและไม่สามารถรับกำลังได้

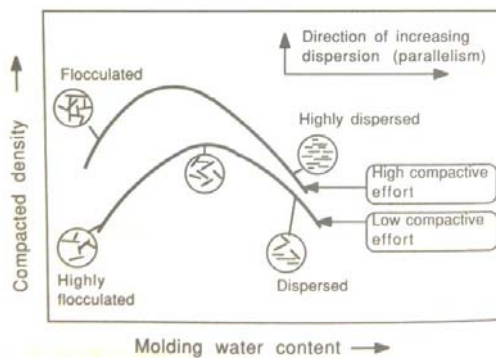
Pore water & air pressure

Winterkorn and Fang (1975) ให้คำอธิบายในสมัยแรก ใช้แนวคิดของแรงดันน้ำในช่องว่างและแรงดันช่องว่างอากาศ ซึ่งได้ชี้ให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างการบดอัดและความชื้นในดิน สามารถแสดงในรูปของอัตราส่วนช่องว่างกับอัตราส่วนน้ำในช่องว่าง (ปริมาณน้ำต่อปริมาณของแข็ง) กราฟการบดอัดโดยทั่วไปแสดงผลเกี่ยวกับปริมาณความชื้นที่เหมาะสมซึ่งตรงกันกับอัตราส่วนช่องว่างต่ำสุด

Hilf (1963) ได้อธิบายเกี่ยวกับกราฟการบดอัดซึ่งจะเห็นได้ว่าความหนาแน่นแห้งของดินที่ความชื้นต่างกันแต่มีความหนาแน่นแห้งเท่ากัน เนื่องจากในดินแห้งมีความยากในการบดอัด เนื่องจากมีค่าแรงเสียดทานสูงเพราะแรงดันคาพิลลารี แต่อากาศจะถูกไล่ออกอย่างรวดเร็วเพราะช่องว่างของอากาศมีขนาดใหญ่ ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำจะทำให้แรงดึงของน้ำในช่องว่างลดลง, ค่าแรงเสียดทานลดลง และช่วยให้บดอัดได้ดีขึ้นจนถึงความหนาแน่นสูงสุด และเมื่อการบดอัดที่เกินค่าความชื้นที่เหมาะสมจะทำให้ประสิทธิภาพน้อยลง

Microstructure

Lambe (1958) เสนอความหมายของคุณสมบัติกายภาพทางเคมี ที่ปริมาณความชื้นน้อยแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคดินเหนียวจะสร้างโครงสร้างที่จับตัวเป็นก้อนมากขึ้นหรือน้อยลงโดยสุมการวางแนวของอนุภาคแบบแผ่น ซึ่งเกิดในความหนาแน่นต่ำ นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของน้ำจะเพิ่มแรงผลักระหว่างการเหนียวนำอนุภาคเหล่านั้น ในทิศทางที่ขนานกันซึ่งใกล้กับปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ในกรณีการบดอัดเปียกของการจัดวางแนวที่เหมาะสมที่เพิ่มขึ้นอีก ซึ่งอธิบายเกี่ยวกับ โครงสร้างที่กระจัดกระจาย ดังแสดงในรูปที่ 2-2



รูปที่ 2-2 กราฟแสดงลักษณะการจัดเรียงโครงสร้างขนาดเล็กของดินในกราฟการบดอัด

**2.2 ทฤษฎีกำลังรับแรงเฉือนของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ**

ความหมายในนัยหนึ่งของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำคือดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำบางส่วนซึ่งจะมีระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำน้อยกว่าหนึ่ง ดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะมีสามส่วนได้แก่ของแข็ง (เม็ดดิน) น้ำ และอากาศ ดังนั้นการประยุกต์ทฤษฎีทางกลศาสตร์และชลศาสตร์จึงไม่เพียงพอต่อการอธิบายพฤติกรรมของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ พฤติกรรมของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำนั้นเกี่ยวข้องกับแรงและพลังงานที่ใช้ในการยึดส่วนประกอบของดินทั้งสามส่วนเข้าไว้ด้วยกัน ดังนั้นนอกจากทฤษฎีทางกลศาสตร์และชลศาสตร์แล้วพื้นฐานของฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับแรงดึงดูดระหว่างผิวของอนุภาคจึงได้ถูกนำมาใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของดินไม่อิ่มตัวด้วย ส่งผล

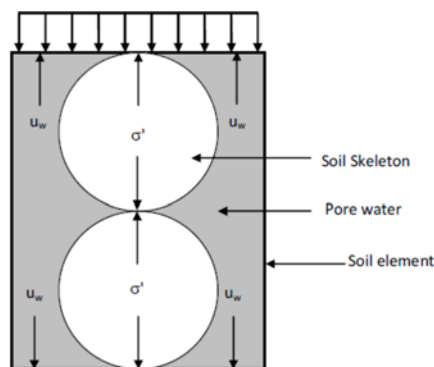
ให้ทฤษฎีกำลังต้านทานแรงเฉือนแบบประสิทธิผลของเทอซาก็ไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำได้ เนื่องจากแรงดันน้ำในโพรงที่มีค่าเป็นลบ Fredlund และคณะ (1978) ได้เสนอสมการในการหาลำดับกำลังต้านทานแรงเฉือนสำหรับดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำขึ้นโดยมีสมมติฐานว่าค่ามุมเสียดทานภายใน ( $\phi'$ ) มีค่าคงที่ทุกค่าแรงเฉือนและความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานรับแรงเฉือนกับแรงเฉือนเป็นเส้นตรง ในการหาลำดับกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำนั้นจำเป็นต้องทราบค่าแรงเฉือนและตัวแปรที่ 3 ของแรงเฉือน (the third shear parameter,  $\phi^b$ ) ดังนั้นเครื่องแรงอัดสามแกนจึงจำเป็นต้องถูกดัดแปลงจากการศึกษาของ Gan และคณะ (1988), Escario และคณะ (1989), Vanapalli และคณะ (1996) และ Thu และคณะ (2006) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับแรงเฉือนไม่เป็นเส้นตรง นอกจากนี้ Toll และคณะ (2008) พบว่ามุมเสียดทานภายใน ( $\phi'$ ) มีค่าไม่คงที่ทุกค่าแรงเฉือนโดยพบว่ามุม  $\phi_o$  มีค่ามากกว่า  $\phi'$  เมื่อ  $\phi_o$  ซึ่งเป็นมุมระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนกับหน่วยแรงสุทธิ (Angle of Friction due to Net Stress)

### 2.2.1 ทฤษฎีของ Terzaghi

แนวคิดของเทอซาก็ (1936) เกี่ยวกับน้ำหนักที่กระทำกับดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ คือ น้ำหนักที่กระทำกับมวลดินจะกระทำกับน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินกับเม็ดดิน โดยให้หน่วยแรงรวม (Total stress,  $\sigma$ ) คือ หน่วยแรงที่กระทำกับมวลดิน ซึ่งทำให้เกิดแรงดันน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (Pore water pressure,  $u_w$ ) และหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress,  $\sigma'$ ) หน่วยแรงประสิทธิผลนี้เป็นหน่วยแรงที่กระทำกับเม็ดดิน ดังแสดงในรูปที่ 2-3 ดังนั้นหน่วยแรงรวมจึงเป็นผลรวมของแรงดันน้ำในโพรงกับหน่วยแรงประสิทธิผล ดังแสดงในสมการที่ (2-1)

$$\sigma = \sigma' + u_w \quad (2-1)$$

กำลังรับแรงเฉือนของดินอิ่มตัวด้วยน้ำคำนวณหาได้ ตามแบบจำลองการวิบัติของ Mohr-Coulomb และแนวคิดหน่วยแรงประสิทธิผลของเทอซาก็ (1936) ดังแสดงในสมการที่ (2-2) อย่างไรก็ตามเมื่อดินเข้าสู่สภาพไม่อิ่มตัวด้วยน้ำช่องว่างระหว่างเม็ดดินจะมีอากาศอยู่ด้วย ดังนั้น แนวคิดหน่วยแรงประสิทธิผลของเทอซาก็จึงไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำได้



รูปที่ 2-3 แนวคิดหน่วยแรงประสิทธิผลของเทอซาก็ (1936)

$$\tau_f = c' + \sigma'_f \tan \phi' \quad (2-2)$$

เมื่อ

- $\tau_f$  = กำลังต้านทานแรงเฉือนที่จุดวิบัติ
- $c'$  = ค่าความเชื่อมแน่นประสิทธิผล
- $\sigma'_f$  = หน่วยแรงประสิทธิผลที่จุดวิบัติ =  $\sigma_f - u_{wf}$
- $\sigma_f$  = หน่วยแรงรวมที่จุดวิบัติ
- $u_{wf}$  = ความดันน้ำในโพรงที่จุดวิบัติ
- $\phi'$  = มุมเสียดทานประสิทธิผล

### 2.2.2 ทฤษฎีของ Fredlund

สมการในการหากำลังต้านทานแรงเฉือนสำหรับดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำของ Fredlund ดังแสดงในสมการที่ (2-3) ซึ่งสมมติฐานของ Fredlund คือ ค่ามุมเสียดทานภายใน ( $\phi'$ ) มีค่าคงที่ทุกค่าแรงดูดเมทริกซ์และความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานรับแรงเฉือนกับแรงดูดเมทริกซ์เป็นเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 2-4 ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างมุม  $\phi^b$  กับพารามิเตอร์ของหน่วยแรงประสิทธิผลที่ระนาบการเกิด  $\chi_f$  แสดงในสมการที่ (2-4) และ (2-5)

$$\tau_f = c' + \sigma_{nef} \tan \phi' + \psi_{mf} \tan \phi^b \quad (2-3)$$

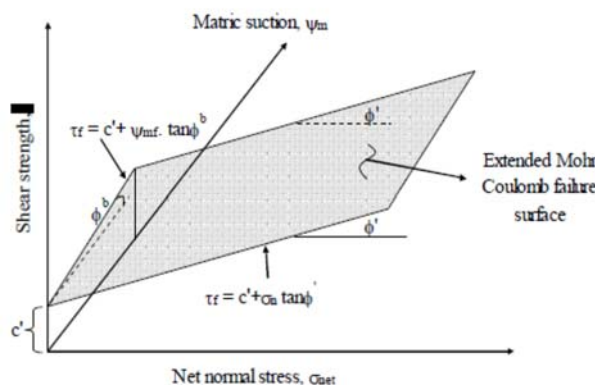
$$\tan \phi^b = \chi_f \tan \phi' \quad (2-4)$$

$$\chi_f = \frac{\tan \phi^b}{\tan \phi'} \quad (2-5)$$

เมื่อ

$\phi^b$  = มุมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานแรงเฉือนกับค่าแรงดูดเมทริกซ์ที่จุดวิบัติ ( $\psi_{mf}$ )

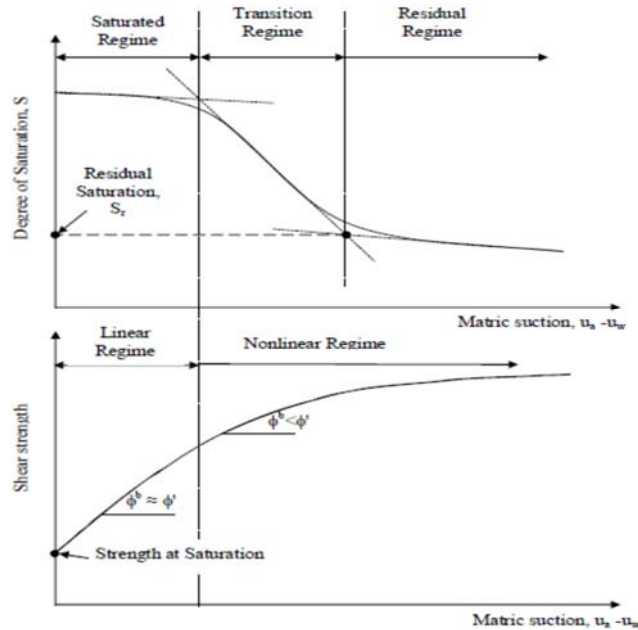
$\psi_{mf}$  = แรงดูดเมทริกซ์ (Matric suction) ที่จุดวิบัติ =  $(u_a - u_w)_f$



รูปที่ 2-4 แสดงเส้นขอบเขตความแข็งแรงของดินสำหรับดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Fredlund, 1978)



เมื่อ  $\chi_f$  มีค่าเท่ากับ 1.0 มุม  $\phi^b$  มีค่าเท่ากับมุม  $\phi'$  หมายความว่าดินอยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนและแรงดูดเมทริกในสภาวะนี้เป็นเส้นตรงซึ่งจะหมายความว่าดินอยู่ในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงเฉือนกับแรงดูดเมทริกในสภาวะนี้ไม่เป็นเส้นตรงดังรูปที่ 2-5



รูปที่ 2-5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Soil Water Characteristic Curve และกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

### 2.2.3 ทฤษฎีของ Vanapalli

Vanapalli ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างระดับความอิ่มตัวและตัวแปรของหน่วยแรงประสิทธิผล  $\chi_f$  โดยอาศัยผลการทดสอบของ Escario ในปี 1989 ดังแสดงในสมการที่ (2-6) และ (2-7) โดยแรงดึงดูดเมทริกอยู่ในช่วง 0 ถึง 1500 kPa:

$$\chi_f = s^k = \left( \frac{\theta}{\theta_s} \right)^k \quad (2-6)$$

$$\chi_f = \frac{s - s_r}{1 - s_r} = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2-7)$$

โดยที่

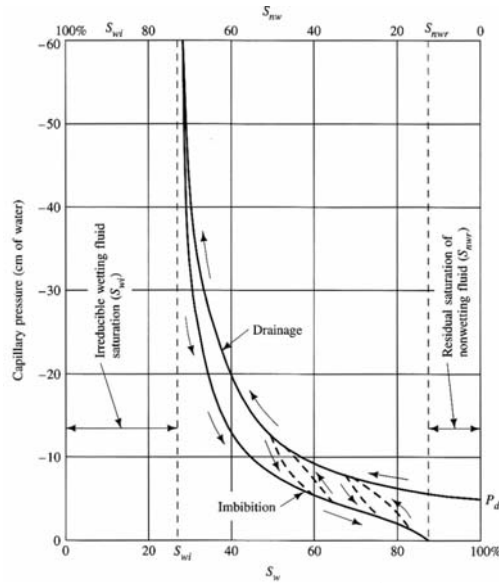
- $s$  = ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ
- $\theta$  = ปริมาณความชื้นโดยปริมาตร (Volumetric Water Content)
- $\theta_s$  = ปริมาณความชื้นที่อิ่มตัวโดยปริมาตร (Saturated Volumetric Water Content)
- $k$  = ตัวแปร

$\theta_r$	=	ปริมาณความชื้นที่เหลือโดยปริมาตร (Residual Volumetric Water Content)
$s_r$	=	ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำที่เหลือ (Residual Degree of Saturation)

### 2.3 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะดินกับน้ำ

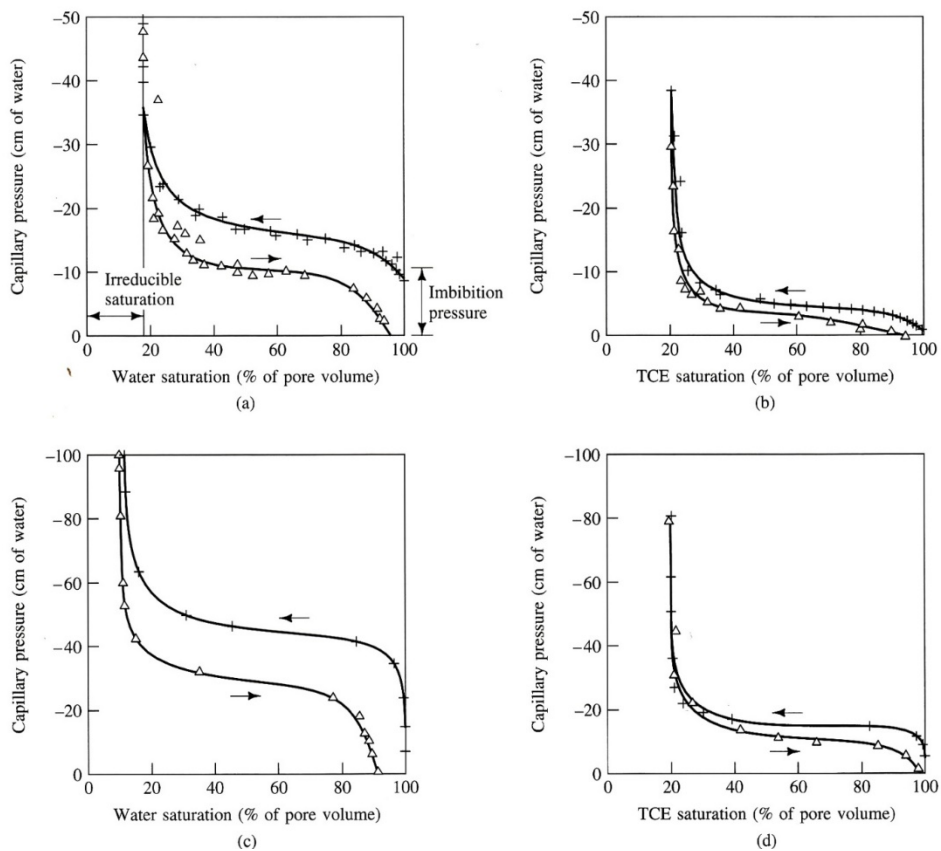
เส้นโค้งลักษณะเฉพาะดินกับน้ำ (Soil Water Characteristic Curve, SWCC) เป็นส่วนสำคัญของการแสดงความสัมพันธ์ใน ชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (vadose zone) โดยจะอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่าง soil suction และ soil water content เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของดินกับน้ำ (SWCC) ยังได้แสดงความสัมพันธ์ช่องว่างของ เม็ดดินไปจนถึงค่าการดูดซึมของน้ำโดยกระบวนการของดิน ณ ที่สภาวะความสัมพันธ์ที่มีปริมาณ water content ต่ำ จะมีค่าความสัมพันธ์ต่างไปด้วย ส่วนสภาวะที่มีปริมาณ water content สูง จะมี ความแตกต่างระหว่างช่องว่างของเม็ดดินและน้ำอิสระที่ลดต่ำลง ค่าความสัมพันธ์ของ soil suction จะลดต่ำลงเมื่อช่องว่างระหว่างเม็ดดินสามารถเข้าสู่ความสมดุลแล้ว น้ำอิสระกับ soil suction จะ เกิดสมดุลจนถึงช่วง จุดที่เป็นค่า 0 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะดินกับน้ำยังสามารถอธิบายความแตกต่าง ของ wetting characteristic curve and drying characteristic curve ที่เกิดขึ้นได้อีก

จากรูปที่ 2-6 สามารถเรียกอีกอย่างว่ากราฟ Soil water retention curve หรือกราฟ Capillary pressure curve เป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Capillary pressure และการอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation) ของดิน ซึ่งสามารถหาได้จากการทดลองโดยทำให้ดินอิ่มตัวด้วยน้ำหรืออยู่ในสภาวะที่ เปียก หรือ เรียกว่า Wetting fluid saturation,  $S_w$  จากนั้นจึงค่อยๆ ทำให้ดินอยู่ในสภาวะแห้ง โดยเพิ่ม ความดันเพื่อให้ น้ำไหลออก (Drainage) จุด  $P_d$  คือจุดที่ความดันสามารถทำให้น้ำเริ่มไหลออกเรียกว่า Displacement imbibitions bubbling pressure หรือ Air entry value เมื่อน้ำเริ่มไหลออกก็จะทำให้ค่า ของ Wetting fluid saturation,  $S_w$  น้อยลงเรื่อยๆ และสภาพของดินจะเปลี่ยนจากสภาวะจากดินที่ อิ่มตัวด้วยน้ำ เป็น สภาวะที่ดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ หรือเรียกว่า Nonwetting fluid saturation ,  $S_{nw}$  จน เส้นการแห้ง (Drying curve) ขึ้นเป็นแนวตั้ง แสดงว่าที่ความดันสูงกว่านี้ ก็ไม่สามารถทำให้น้ำไหล ได้ เนื่องจากมีแรงดันคาปิลลารี ทำให้มีน้ำเกาะอยู่ที่ผิวของเม็ดดิน โดยระยะของแนวตั้งถึงเส้นแกน Y เรียกว่า Irreducible wetting fluid saturation,  $S_{wi}$  ส่วนเส้นการเปียก (Imbibitions or wetting curve) คือการทำที่ดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ เปลี่ยนเป็นสภาวะที่ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยการทำให้น้ำซึม เข้าไปในชั้นดินดินอิ่มตัว แต่ค่าของ Wetting fluid saturation,  $S_w$  จะได้น้อยกว่าเดิมเนื่องจากน้ำที่เข้าไปแทนที่ในช่องว่างของเม็ดดินไม่สามารถไล่อากาศที่ ชังอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดินได้ ทั้งหมด จึงไม่สามารถทำให้ค่า Wetting fluid saturation,  $S_w$  กลับเป็น เหมือนสภาพเดิม โดยค่าความ แตกต่างนี้เรียกว่า Residual saturation of nonwetting fluid saturation,  $S_{nwr}$



รูปที่ 2-6 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะดินกับน้ำ (Fetter, 1999)

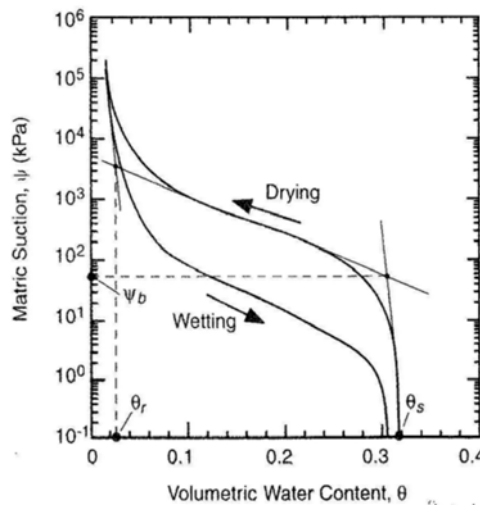
จากรูปที่ 2-7 เป็นตัวอย่างกราฟ Soil Water Characteristic Curve กราฟ (a) น้ำและอากาศใน Medium sand (b) อากาศและสาร LNAPL (Trichloroethylene) ใน Medium sand (c) น้ำและอากาศ ใน Fine sand และ (d) อากาศและสาร LNAPL (Trichloroethylene) ใน Fine sand



รูปที่ 2-7 ตัวอย่างกราฟ Soil water characteristic curve (Fetter, 1999)

### 2.3.1 Soil Water Characteristic Curve (SWCC) modeling parameters

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Capillary pressure และปริมาณความชื้นในดิน (Water content) ดังรูปที่ 2-8 สามารถหาได้จากตัวแปรที่ได้จากการทดลองโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Soil Water Characteristic Curve ประกอบด้วยตำแหน่งที่เกี่ยวข้องกับ Water content หรือ Suction ที่ สภาวะความถ่วงจำเพาะและตำแหน่งที่ได้จากการทดลองหลายๆครั้ง โดยทำการกำหนดเป็นค่าคงที่ นั่นคือ เลือกรากจับกลุ่มของสมการของเส้นโค้งโดยทั่วไปที่ทำการกำหนดจุด โดยที่ Saturated water content ( $\theta_s$ ) จะบรรยายถึงส่วนประกอบทั้งหมดที่ช่องว่างโพรงอากาศในดินถูกแทนที่ด้วยน้ำ ส่วนใหญ่จะเหมือนกับการดูดซึมที่แสดงในเส้นโค้งของกราฟ ส่วน Air entry หรือ Bubbling ( $\psi_b$ ) ความดันส่วนนี้ จะบรรยายถึงแรงดูดที่ทำให้ให้น้ำเริ่มเกิดการไหล โดยที่ปริมาณของ Air entry และ ปริมาณการตกค้าง (Residual water content,  $\theta_r$ ) จะสอดคล้องกันในการสร้างเส้นที่ผ่านระหว่างจุด ต่อจุด



รูปที่ 2-8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Capillary pressure และปริมาณความชื้นในดิน

สมการที่ได้จากกราฟมีดังนี้

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

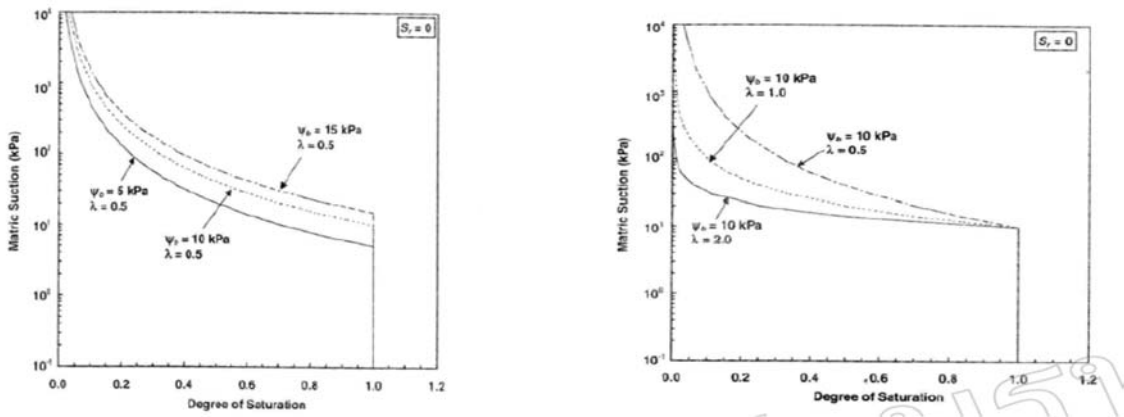
จุดประสงค์ของโมเดลเพื่ออธิบายถึงตัวแปรทั้งหมดซึ่งสามารถนิยามโดย แบบจำลอง Normalizing water content ( $\Theta$ ) หรือค่าความอิ่มตัว (Degree of saturation) ที่ดินอิ่มตัวเพื่อทำการ ประเมินถึงเปอร์เซ็นต์คงเหลือของของเหลวจึงสามารถกล่าวได้ว่าปริมาณคงเหลือของ Water content นั้นมีนัยสำคัญต่อปริมาณคงเหลือใน Degree of saturation ( $S_e$ )

$$S_e = \frac{S - S_r}{1 - S_r}$$

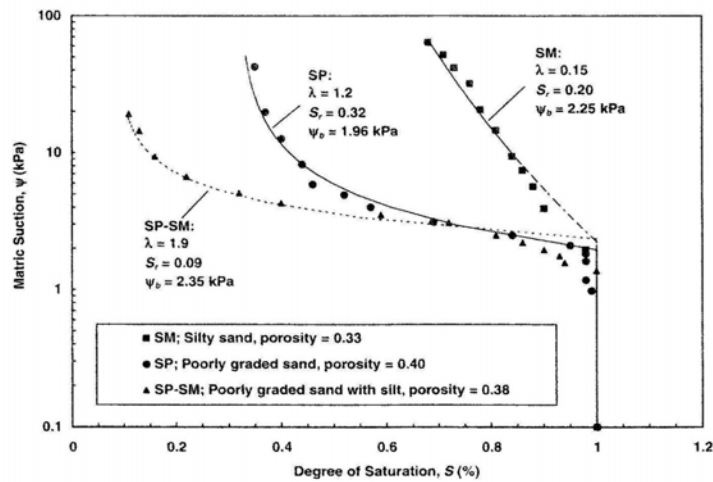
โดยที่  $\Theta = S_e$

2.3.2 สมการของ Brook and Corey (BC), 1964

จากรูปที่ 2-9 แสดงถึงแบบจำลอง SWCC ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ  $\lambda$  และ  $\psi_b$  แบบจำลอง ในรูปที่ 2-9a จะแสดงถึงผลกระทบของการเปลี่ยน  $\psi_b$  ให้  $\lambda$  เป็นค่าคงที่ ส่วนรูปที่ 2-9b แสดงผลกระทบของการเปลี่ยน  $\lambda$  ให้  $\psi_b$  เป็นค่าคงที่ ในแต่ละที่ค่าการอิ่มตัวส่วนที่เหลือ  $S_e$  สมมุติให้เท่ากับ 0 เช่นเดียวกับ  $\Theta = S_e$  จากรูป 2-9b เปรียบเทียบค่าที่ได้ของ  $\lambda$  เป็นค่าที่มากกว่า ครึ่งหนึ่งของช่องว่าง โดยให้ช่องว่างเป็นแกน y และ SWCC เป็นแกน x รูปที่ 2-10 แสดงถึง Suction water content ที่ทำการทดลองโดยชุดอุปกรณ์ Tempe cell และความสอดคล้องแบบจำลอง BC สำหรับดิน 3 ชนิด แบบจำลอง BC ทั้งหมดนี้ เป็นการเปรียบเทียบค่าเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ดิน ที่มีคุณภาพต่ำสุด (coarse grained) เมื่อเปรียบเทียบแล้วจะได้ค่าที่ต่ำสุด และขอบเขตการดูดก็ต่ำไป ด้วย แบบจำลองที่เกิดความคลาดเคลื่อนอาจมาจากการดูดที่เข้าใกล้ water content ในส่วนที่เหลือ สูง การไม่ปรากฏให้เห็นของจุดเปลี่ยนระดับในการทดลองของแบบจำลองในบ่อยครั้งจะส่งผลให้ ค่า SWCC คลาดเคลื่อนไปด้วย การที่ผิวของเม็ดดินไม่เรียบทำให้ปริมาณของความดันอากาศยังคง อยู่ในช่องว่างของดินและสิ่งเหล่านี้ส่งผลให้ค่าที่ได้ไม่มีความแน่นอนเมื่อแบบจำลองอยู่ในรูป อิมิตัวด้วยน้ำ



รูปที่ 2-9a การเปลี่ยน  $\psi_b$  ให้เป็น  $\lambda$  เป็นค่าคงที่ รูปที่ 2-9b การเปลี่ยน  $\lambda$  ให้เป็น  $\psi_b$  เป็นค่าคงที่



รูปที่ 2-10 Suction water content ที่ทำการทดลองโดยชุดอุปกรณ์ Tempe cell

สมการที่ได้มีดังนี้

$$S_e = \begin{cases} \left(\frac{\psi}{\psi_b}\right)^{-\lambda} & (\psi > \psi_b) \\ 1 & (\psi \leq \psi_b) \end{cases}$$

- โดยที่  $S_e$  = Effective Degree of Saturation  
 $\psi$  = ค่า Matrix Suction Head (ที่ระดับความสูงต่างๆ)  
 $\psi_b$  = ค่า Air Entry Head  
 $\lambda$  = ปริมาณค่าเฉลี่ยของฟองอากาศ

### 2.3.3 สมการ Van Genuchten (VG), 1980

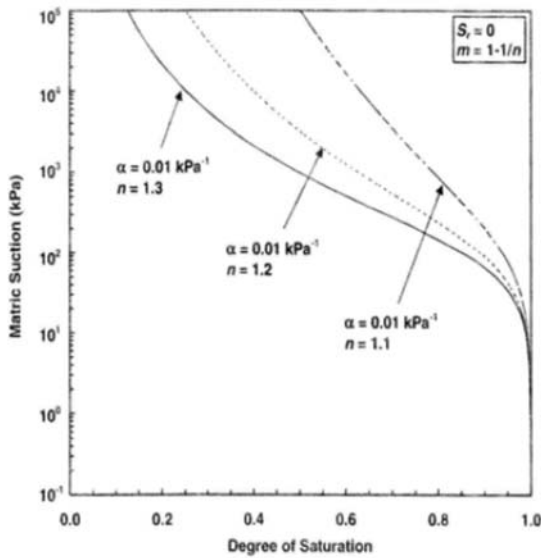
van Genuchten ได้เสนอถึงผิวของเม็ดดินในระบบปิด โดยแบบจำลองตัวแปรทั้ง 3 สำหรับ SWCC ดังแสดงในรูปที่ 2-11 จากสมการเมื่อ  $a, n, m$  เป็นตัวแปรจากการคำนวณของแบบจำลอง VG สิ่ง que แสดงให้เห็นสำหรับจุดโค้งสามารถยืดหยุ่นโค้งงอของกราฟได้มากกว่าแบบจำลอง BG แบบจำลองการดูดมี ความกว้างและตัวอย่างลักษณะรูปร่างของโค้งดีกว่า ความเรียบของผิวที่ทำให้ความอัดอากาศเข้ามา และการดูดเข้าใกล้ส่วนที่เหลืออยู่เป็นผลกระทบที่สามารถจับต้องได้(มองเห็นได้)จากสมการส่วนที่ แสดงออกมาในหน่วยของความดันหรือ head ในก่อนหน้านี้นี้ตัวแปร  $a$  เป็นตัวกำหนดให้  $\alpha$  มีความ ผกผันกับความดัน ในกรณีต่อมาตัวแปร  $a$  กำหนดให้เป็น  $\beta$  ซึ่งมีความผกผันกับความดัน ที่มา ของ  $\beta$  และ  $\alpha$  คือส่วนที่ให้พลังงานอากาศออกมา ซึ่ง  $\alpha$  จะใกล้เคียงกับความผกผันของอากาศที่ ออกมาและ  $\beta$  จะมีความผกผันกับความดันของอากาศที่ออกมา หรือจากความสูงของเส้นคาปิลลารี

$$\Theta = S_e = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right]^m : \begin{pmatrix} m, n \\ m = 1 - 1/2n \\ m = 1 - 1/2n \end{pmatrix}$$

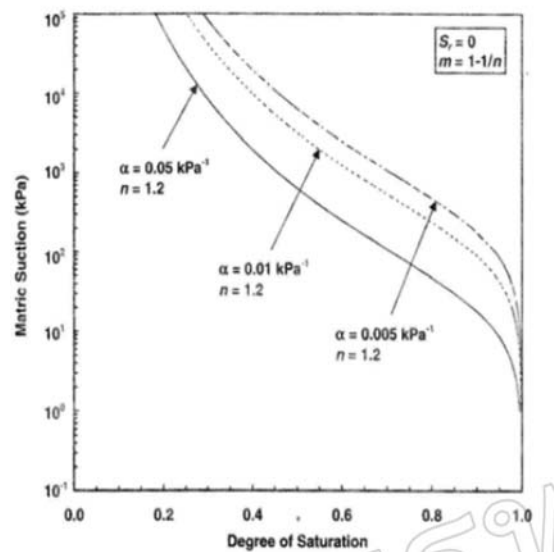
โดยที่

- $\alpha$  = ตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับสถานะของความถ่วงจำเพาะ
- $n$  = ตัวแปรที่เป็นความสัมพันธ์ของปริมาณค่าเฉลี่ยของฟองอากาศของดิน
- $m$  = ตัวแปรที่เป็นความสัมพันธ์ของลักษณะของเส้นโค้งในกราฟ

(โดยที่  $m$  เป็นความถี่จำกัดโดยมีความสัมพันธ์กับตัวแปร  $n$ )



รูปที่ 2-11a การเปลี่ยนค่าของตัวแปร  $n$



รูปที่ 2-11b การเปลี่ยนค่าของตัวแปร  $\alpha$

## 2.4 การทดสอบเครื่องอัดความดัน (Tempe cell)

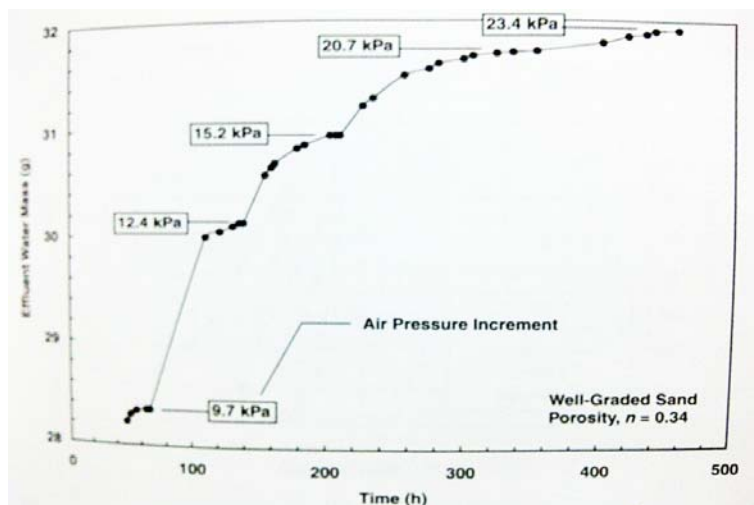
ส่วนบนและล่างวัสดุประกอบไปด้วยพลาสติกใสแข็งที่ทนความดันได้สูง มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 7-8 เซนติเมตรมีช่องสำหรับอากาศเข้าและออกจากระบบส่วนกลางของวัสดุประกอบไปด้วย ยาง (O-ring), แผ่นเซรามิก, ชิ้นส่วนสำหรับยึดอุปกรณ์ (Clamp screws) และกระบอกสแตนเลสหรือพลาสติกใสที่ทนความดันได้สูง มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5.7 เซนติเมตร สูง 5.7 เซนติเมตร ส่วนประกอบเครื่องอัดความดันสามารถใช้ความดันที่ 0-1 บาร์ ในรูปที่ 2-12



รูปที่ 2-12 อุปกรณ์ทดลองการไหลซึมผ่านแบบเครื่องอัดความดัน (Tempe Pressure Cell)

ซึ่งจากในตัวอย่างดินชนิดแรกที่อยู่ในเซลล์ซึ่งจะเป็นการจับคู่ของหลายชุดข้อมูล โดยจะประกอบไปด้วยกราฟของ soil-water characteristic curve เป็นที่แน่นอน โดยอาจจะประยุกต์ใช้กับความดันอากาศที่เพิ่มขึ้น สมดุลของ water content จะพิจารณาจากการเพิ่มขึ้นของแต่ละความดัน โดยการชั่งน้ำหนักของอุปกรณ์ทั้งหมด และสังเกตปริมาณของน้ำหนักที่สูญหายไปจากการระบายน้ำ โดยจะสำเร็จได้เมื่อระดับที่สูงที่สุดของ matric suction และ water content จุดสุดท้ายของตัวอย่างคือพิจารณาจาก gravimetrically water content นั้นอาจจะพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นของมวล เพื่อคำนวณค่า water content ที่สอดคล้องกันกับระดับของ matric suction

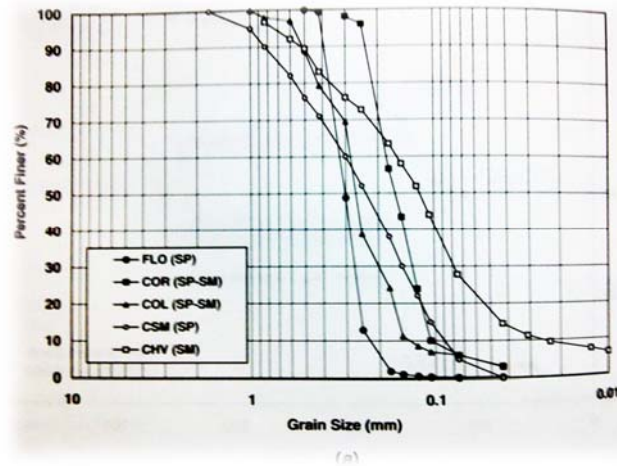
รูปที่ 2-14 จะบอกถึงการสะสมของมวลน้ำที่ถูกขับออกจาก Tempe cell โดยจะบอกเป็นฟังก์ชันของเวลา และนำมาประยุกต์ใช้กับความดันอากาศจากการดำเนินการทดสอบโดยใช้ตัวอย่างทรายที่มีเกรดดี บอกถึงปริมาณเวลาที่ต้องการสำหรับสภาพที่คงที่ซึ่งอยู่ในช่วง 75 ชั่วโมง ความดันอากาศจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และจะเพิ่มขึ้นมากที่สุด 150 ชั่วโมง การเพิ่มขึ้นหลังจากการสมดุลของเวลาโดยทั่วไปจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของระดับ suction และการลดขนาดของรูระบายน้ำ



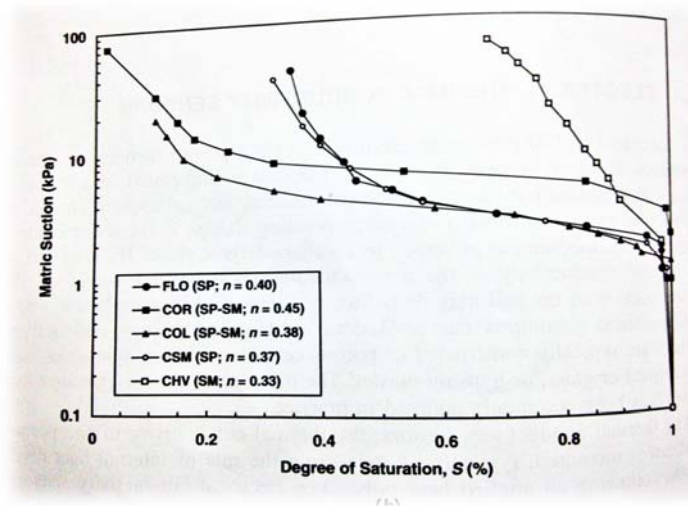
รูปที่ 2-14 มวลของน้ำในรูพรุนซึ่งไหลออกในระหว่างทำการทดสอบ Tempe cell



และจากรูปที่ 2-15 จะแสดงถึงการกระจายขนาดของเม็ดดิน (รูปที่ 2-15a) และบอกถึงความสอดคล้องกับกราฟ soil-water characteristic curves ที่ได้จากการใช้ Tempe cell (รูปที่ 2-15b) สำหรับห้าตัวอย่างของดินทรายนั้นจะบันทึกค่าสูงสุดของ suction ในช่วงที่น้อยกว่า 100kPa เกรตของดินที่ค่อนข้างไม่ดีและค่อนข้างดีขนาดของเม็ดดินจะกระจายตามตัวของกราฟ COR และ CHV ตามลำดับ และจะแสดงความราบและความชันใน characteristic curves



รูปที่ 2-15a การกระจายตัวของขนาดของเม็ดดิน



รูปที่ 2-15b กราฟ soil-water characteristic ที่ได้รับการทดสอบ Tempe pressure cell จาก 5 ตัวอย่างของดินทราย (ข้อมูลจาก Clayton, 1996)

## 2.5 การวัดแรงดูดระหว่างเม็ดดิน (suction measurement)

แรงดูดได้ถูกคิดค้นโดยนักธรณีฟิสิกส์ในช่วงต้น 1900 แรงดูดรวม (Total Suction) ความดันเชิงลบสัมพัทธ์ซึ่งประกอบด้วย 2 องค์ประกอบ ได้แก่ matric suction และ osmotic suction

- Matric suction คือความดันเชิงลบสัมพัทธ์ที่เกี่ยวข้องกับความดันก๊าซภายนอกของน้ำในดินซึ่งวิธีที่เหมือนกันกับส่วนประกอบของน้ำในดินจะต้องครอบคลุมเพื่อให้อยู่ในภาวะสมดุลสามารถดูดซึมผ่านผนังที่มีรูพรุนที่มีน้ำในดิน
- Osmotic suction คือความดันเชิงลบสัมพัทธ์ที่พื้นที่ของน้ำบริสุทธิ์จะต้องอยู่ในภาวะสมดุลผ่าน เยื่อเลือกผ่าน (เช่นดูดซึมไปโมเลกุลของน้ำเท่านั้น) เมมเบรนมีพื้นที่บรรจุวิธีเหมือนกันกับส่วนประกอบของน้ำในดิน

#### Tensiometer

เครื่องวัดแรงดึงเป็นเครื่องมือวัดที่ใช้วัดแรงดันน้ำเชิงลบของดินโดยตรง ตามพื้นฐานแรงดันของปริมาณน้ำในวัสดุทางเข้าอากาศสูง (High Air Entry : HAE) ถึงจุดสมดุลด้วยแรงดันน้ำในดินทำให้สามารถที่จะวัดความดันน้ำในดินเชิงลบ และในเครื่องวัดแรงดึงไม่มีเมมเบรนชนิดกึ่งซึมผ่านสำหรับสารละลายเกลือ ทำให้ผลของ osmotic suction ไม่สามารถวัดได้ ดังนั้นการวัดนี้จะทำให้ได้ในส่วนของ matric suction เพียงค่าเดียวสำหรับถ้วยเซรามิก HAE ขนาดเล็กที่ติดอยู่กับท่อเติมไปด้วยน้ำซึ่งเป็น deaired เชื่อมต่อกับอุปกรณ์วัดแรงดันซึ่งต้องทำให้ถ้วยเซรามิกและท่อเติมไปด้วยน้ำและทำให้ท่อเป็นสูญญากาศต่อมาทำเซรามิกให้แห้งเพื่อลดแรงดันน้ำในเซ็นเซอร์และไล่ฟองอากาศที่ปรากฏออก เนื่องจากปัญหาที่เกิดขึ้นจากโพรงอากาศ การใช้ถ้วยเซรามิกที่มีค่าอากาศสูงจะไม่เพิ่มขึ้นช่วงการวัดเครื่องวัดจากเครื่องวัดแรงดึง

#### Contact filter paper method

Contact filter paper เป็นการวัด Suction ทางอ้อมโดยการใช้กระดาษกรองเป็นวัสดุในการดูดซับปริมาณความชื้นที่อยู่ในดิน ถ้าดินมีความชื้นที่น้อยปริมาณความชื้นในกระดาษกรองจะมีปริมาณความชื้นที่น้อยเช่นเดียวกัน ซึ่งปริมาณความชื้นในกระดาษกรองจะถูกนำมาคำนวณเพื่อหาค่า Suction ได้ วิธี Contact filter paper นี้สามารถวัดค่า suction ได้ไม่จำกัด ซึ่งค่อนข้างที่จะใช้ระยะเวลาาน

#### Suction Probe

เป็นการวัดโดยตรงของค่า Matric suction ที่ต้องการในการทดสอบดินอิมิตัวด้วยน้ำ เนื่องจากการวัดแรงดันน้ำในช่องว่างจะปรากฏขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งการพัฒนา Suction probe สำหรับใช้วัด Matric suction ของดิน โดยใช้หลักการของการวัดแรงดูดโดยใช้ Suction probe เป็นพื้นฐานความสมดุลระหว่างความแรงดันน้ำในช่องว่างในดินและความแรงดันน้ำในช่องว่างภายในช่องน้ำ ขณะที่ถึงจุดสมดุลน้ำจะไหลออกมาจากช่องน้ำเข้าไปในดินหรือในทางกลับกัน Suction probe จะวัดแรงแรงดันน้ำในช่องว่าง ( $U_w$ ) Matric suction สามารถคำนวณได้จากความดันอากาศที่ใช้ ( $U_a$ ) ซึ่งรู้ค่าและ Matric suction คือค่าความแตกต่างระหว่าง แรงดันอากาศและความดันน้ำในช่องว่าง ( $U_a - U_w$ ) โดยทั่วไป Suction probe เป็นส่วนประกอบของตัวแปลงความดันกับวัสดุเซรามิกทางเข้าอากาศสูง (High Air Entry) ติดตั้งอยู่ที่ปลายสุดของของเครื่องมือ ซึ่งจะตอบสนองต่อปริมาณน้ำในดินและถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางทั้งในห้องปฏิบัติการและการใช้งานภาคสนาม

#### Relative humidity sensor

อุปกรณ์ตรวจจับความชื้นสัมพัทธ์ (RH) มักจะใช้ในสาขาอุตุนิยมหาวิทยาลัยใช้ในการวัดจุดน้ำค้างของอากาศซึ่งตรวจจับความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งสามารถใช้วัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ (RH) และอุณหภูมิของไอน้ำของดินที่ถูกวัดและแรงดูดรวม (total suction) โดยสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการของ Kelvin (Fredlund และ Rahardjo,

1993) อัลเบรทซ์และคณะ (2003) ใช้โพลิเมอร์ตรวจจับความจุ สำหรับวัดความชื้นสัมพัทธ์ในรูปแบบของตัวเลขของดินช่วงดินทรายถึงดินเหนียว โพลิเมอร์ตรวจจับความจุ ประกอบด้วยสองขั้วไฟฟ้า ที่คั่นด้วยชุดฟิล์มความร้อนโพลิเมอร์ โดยขึ้นอยู่กับค่า RH ที่ถูกวัด โดยฟิล์มจะ ดูดซับน้ำหรือน้ำที่ถูกปล่อย ซึ่งค่า RH จะถูกกำหนดด้วยการวัดการเปลี่ยนแปลงความจุของโพลิเมอร์ เทคโนโลยีความจุโพลิเมอร์เป็นเทคโนโลยีที่ให้ ความน่าเชื่อถือสูงสำหรับการวัดความชื้น

## 2.6 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดิน (Direct shear test)

การทดสอบ direct shear จะให้แรงกดในแนวตั้ง (normal force, normal stress) ที่ส่วนบนของ ตัวอย่างดิน จากนั้นให้แรงในแนวนอนกับครึ่งหนึ่งของตัวอย่างเพื่อเฉือนตัวอย่างออกจากกันตามระนาบวิบัติ ในแนวนอน ตัวอย่างดินอาจเป็นรูปร่างกลมหรือสี่เหลี่ยมและมี porous plate อยู่ที่ส่วนบนและส่วนล่างเพื่อ การระบายน้ำ ระหว่างการเฉือนดินจะวัดแรงในแนวนอนและการเคลื่อนตัวทั้งในแนวตั้งและแนวนอนของ ตัวอย่างดิน จะทำการทดสอบอย่างน้อย 3 ตัวอย่างที่เฉือนที่ vertical stress ต่างๆกันเพื่อหาค่า effective cohesion  $c'$  และ effective friction angle  $\phi'$  โดยที่ขอบเขตของค่า vertical stress ที่ใช้ในการทดสอบ มักจะเป็นค่าที่เกิดขึ้นในสนาม การวิเคราะห์ผลการทดสอบ direct shear test มีพื้นฐานมาจากสมการ Mohr-Coulomb failure envelope โดยสมมติว่าสภาพความเค้นบนระนาบวิบัติเป็นค่าที่อยู่บนเส้น failure envelope นี้ บนระนาบวิบัติจะมีความเค้น 2 ตัว คือ normal stress  $\sigma_n$  เนื่องจากแรงกดในแนวตั้ง  $P_v$  และ shear stress  $\tau_f$  เนื่องจากแรงในแนวนอน  $P_h$  โดยคำนวณจากสมการที่ (2-8) และ (2-9)

$$\sigma_n = \frac{P_v}{A} \quad (2-8)$$

$$\tau_f = \frac{P_h}{A} \quad (2-9)$$

โดยที่ A คือพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของตัวอย่างดิน ค่า stress เหล่านี้เป็นตามสมการ Mohr-Coulomb failure envelope สำหรับ effective stress ดังสมการที่ (2-10) และสำหรับ total stress ดังสมการที่ (2-11)

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - \Delta u) \tan \phi' \quad (2-10)$$

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \phi \quad (2-11)$$

หากทราบค่า  $\Delta u$  ก็สามารถใช้สมการที่ (2-10) วิเคราะห์หาค่า effective stress parameter  $c'$  และ  $\phi'$  ได้ แต่หากไม่ทราบค่า  $\Delta u$  ก็ต้องใช้สมการที่ (2-11) วิเคราะห์หาค่า total stress parameters  $c$  และ  $\phi$  ในการทดสอบกับ cohesion less soil จะมีการระบายน้ำอย่างสมบูรณ์ ( $\Delta u = 0$ ) ทำให้สามารถ วิเคราะห์ค่า  $c'$  และ  $\phi'$  ได้โดยตรงและเป็นค่าคุณสมบัติที่แท้จริงของดิน ในการทดสอบกับ cohesive soil จะมีความไม่แน่นอนอย่างมากในการประมาณค่า  $\Delta u$  เนื่องจากระหว่างการทดสอบอาจจะมีการระบายน้ำ บางส่วนจึงทำให้อาจจะได้ค่า  $c'$  และ  $\phi'$  ที่ไม่ถูกต้อง หากวิเคราะห์แบบ effective stress และในการ วิเคราะห์แบบ total stress ก็อาจจะได้ค่า  $c$  และ  $\phi$  ที่ไม่ถูกต้องเนื่องจากค่าเหล่านี้ขึ้นกับสภาพขอบเขต ของการทดสอบ นอกจากนี้การทดสอบ direct shear test ยังอาจจะไม่ได้ให้ค่า undrained shear strength

$S_u$  ถึงแม้ว่าจะพยายามเนียนตัวอย่างด้วยอัตราที่รวดเร็วเนื่องจากการระบายน้ำบางส่วนดังที่กล่าวมาแล้ว ฉะนั้นเพื่อความไม่สับสนในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบ direct shear ในสภาพ fully drained ( $\Delta u = 0$ )

การทดสอบ direct shear test มักจะดำเนินการ 3 ครั้ง ที่ค่า effective normal stress  $\sigma'_n$  ต่างๆ และวัดค่า  $\tau_f$  ที่ได้เพื่อหาค่า shear strength parameters โดยจะพล็อตผลการทดลองในกราฟ shear stress  $\tau$  กับ effective normal stress  $\sigma'_n$  แล้วลากเส้น failure envelope ผ่านจุดเหล่านี้จะได้จุดตัดแกน y คือ cohesion  $c'$  และความชันของเส้นคือ  $\tan \phi'$

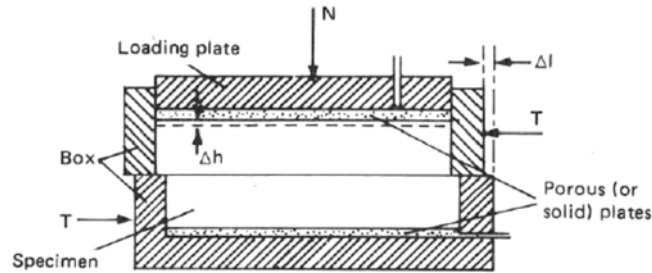
หากจะจำแนกประเภทการทดสอบ direct shear โดยอ้างอิงให้คล้ายกับประเภทของการทดสอบ triaxial อาจสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทเหมือนกัน แต่สภาพการทดสอบ direct shear จะทำให้ไม่ได้ผลการทดสอบเหมือนอย่างของ triaxial ดังนี้

- การทดสอบแบบ unconsolidated-undrained หรือ UU test เป็นการเนียนตัวอย่างหลังจากการให้แรง  $P_v$  โดยไม่มีการ consolidation (ทำนองเดียวกับ UU triaxial test หรือ UC test) การเนียนจะทำอย่างรวดเร็วจนให้เป็นสภาพไม่ระบายน้ำ อย่างไรก็ตามผลการทดสอบจะไม่ให้ค่า undrained shear strength  $S_u$  ของ cohesive soil เนื่องจากในการเนียนตัวอย่างจะมีการระบายน้ำจากระนาบวิบัติในระดับหนึ่ง
- การทดสอบแบบ consolidated-undrained หรือ CU test เป็นการเนียนตัวอย่างหลังจากการให้แรง  $P_v$  และอนุญาตให้มีการ consolidation หลังจากนั้นจะทำการเนียนอย่างรวดเร็วจนให้เป็นสภาพไม่ระบายน้ำ (ทำนองเดียวกับ CU triaxial test) ผลการทดสอบจะให้ค่า undrained shear strength  $S_u$  และ strength parameter ในรูปของ total stress ( $c, \phi$ ) (ไม่ทราบสภาพ effective stress เนื่องจากไม่ได้วัด  $\Delta u$ ) อย่างไรก็ตามการทดสอบจะไม่อยู่ในสภาพ undrained อย่างแท้จริงเนื่องจากในการเนียนตัวอย่างจะมีการระบายน้ำจากระนาบวิบัติในระดับหนึ่ง ดังนั้นการทดสอบนี้จึงอยู่ระหว่าง CU และ CD triaxial test
- การทดสอบแบบ consolidated-drained หรือ CD test เป็นการเนียนตัวอย่างหลังจากการให้แรง  $P_v$  และอนุญาตให้มีการ consolidation หลังจากนั้นจะทำการเนียนอย่างช้าๆเพื่อให้เป็นสภาพระบายน้ำ ( $\Delta u \approx 0$ ) (ทำนองเดียวกับ CD triaxial test) ผลการทดสอบจะให้ค่า strength parameter ในรูปของ effective stress ( $c', \phi'$ )

#### ทฤษฎีของการทดสอบ Direct Shear แบบ consolidated-drained หรือ CD test

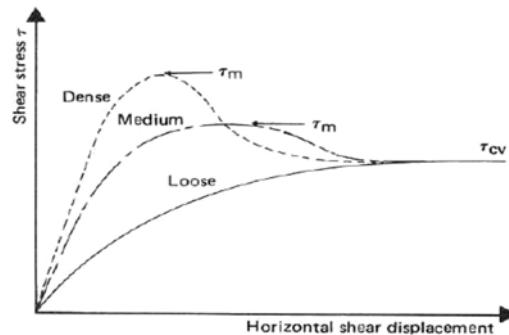
ตัวอย่างดินโดยทั่วไปจะมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.4 cm หรือสี่เหลี่ยมจัตุรัสกว้าง 6 cm และสูง 2.5 cm โดยอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงควรมากกว่า 2.5 สำหรับตัวอย่าง cohesionless ให้เตรียมตัวอย่างดินให้มีมวลเพียงพอสำหรับการทดสอบ 3 ครั้ง ที่ความหนาแน่นเดียวกัน สำหรับตัวอย่าง cohesive soil ให้เตรียมตัวอย่างจาก block sample หรือ tube sample ให้มีจำนวนตัวอย่างเพียงพอ ให้ vertical load ที่เหมาะสมต่อตัวอย่างดินและทิ้งไว้จนกระทั่ง primary consolidation สมบูรณ์ (ถ้า vertical load มีค่ามากก็ต้องให้แรงเป็นขั้นๆเหมือนกับการทดสอบ consolidation) ออกแรงเนียนดินในแนวนอน (แบบ strain controlled) โดยที่สภาพ stress ต่อตัวอย่างดินแสดง ในรูปที่ 2-16 โดยสำหรับ cohesion less soil ใช้อัตราการเนียน

ระหว่าง 0.5-2 mm/min ค่าอัตราการเฉือน ควรทำให้ตัวอย่างวิบัติภายใน 5-10 นาที สำหรับ cohesive soil ใช้อัตราการเฉือนเพื่อให้ได้เวลาที่วิบัติ  $tf = 50t_{50}$  โดยที่  $t_{50}$  คือเวลาที่ 50% consolidation ภายใต้แรงในแนวตั้ง  $P_v$  เมื่อไปจนกระทั่ง shear load มีค่าสูงสุดและลดลง 2 ค่าติดต่อกัน เมื่อทำการทดสอบเสร็จเอาดินออกมาเพื่อหาความชื้น ทำการทดสอบซ้ำกับสองตัวอย่างที่เหลือที่ consolidation load อื่นๆ

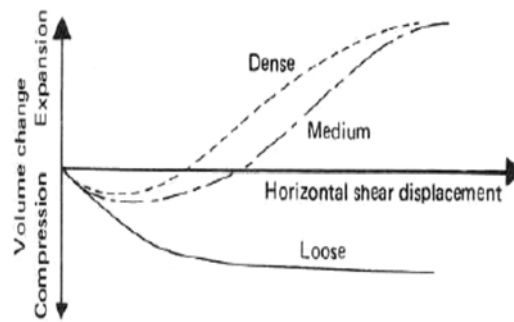


รูปที่ 2-16 สภาพ stress ของตัวอย่างดินภายใต้ direct shear test

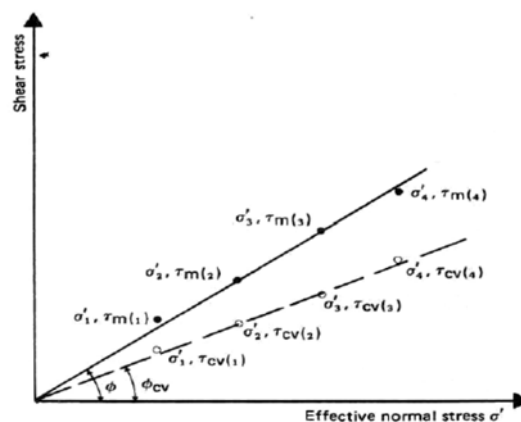
สำหรับแต่ละตัวอย่างดินแสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 2-17 คือ (a) horizontal displacement  $\delta h$  vs horizontal shear stress  $\tau$  และ (b) horizontal displacement  $\delta h$  vs vertical displacement  $\delta v$  หาค่า shear strength parameter ( $c'$ ,  $\phi'$ ) โดยพล็อต normal stress กับ ultimate และ residual shear stress ดังแสดงในรูปที่ 2-18



รูปที่ 2-17a กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง horizontal shear displacement  $\delta h$  และ shear stress  $\tau$



รูปที่ 2-17b กราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงปริมาตร



รูปที่ 2-18 การวิเคราะห์หา shear strength parameter ( $c'$ ,  $\phi'$ )

การทดสอบ direct shear เป็นการทดสอบอย่างรวดเร็วเพื่อหาคคุณสมบัติ consolidated drained strength เพราะตัวอย่างดินมี drainage path สั้นๆ ดังนั้นจึงทำให้ excess pore pressure ระบายได้เร็วกว่าการทดสอบ drained stress อื่นๆ การทดสอบสามารถทำได้กับดินทุกประเภทและตัวอย่างแบบ undisturbed, remolded, หรือ compacted material แต่จะมีข้อจำกัดเกี่ยวกับขนาดอนุภาคใหญ่สุด การทดสอบทำโดยเฉือนตัวอย่างดินผ่านระนาบการวิบัติที่กำหนดภายใต้การควบคุมอัตราการเฉือนและวัดค่า shear force, horizontal displacement, และ vertical displacement โดยทั่วไปจะทำการทดสอบกับตัวอย่าง 3 อันหรือมากกว่าภายใต้ normal stress ต่างๆกัน เพื่อหาผลกระทบของ normal stress ต่อ shear resistance และ displacement และคุณสมบัติ strength เช่น Mohr strength envelope โดยสภาพการทดสอบรวมถึง normal stress และสภาพความชื้นควรเลือกให้เป็นตัวแทนของสภาพในสนามอัตราการเฉือนควรจะช้าเพียงพอที่ทำให้เกิดสภาพ drained

ตัวอย่างดิน

- ตัวอย่างดินที่ใช้เตรียมควรจะมีขนาดเพียงพอที่จะสามารถเตรียมได้อย่างน้อยสามตัวอย่าง เตรียมตัวอย่างในห้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้น

- เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างวงกลมหรือความกว้างของตัวอย่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสต้องไม่น้อยกว่า 50 mm หรือ 10 เท่าของขนาดของอนุภาคใหญ่สุด (ใช้ค่ามาก)
- ความหนาตัวอย่างต้องไม่น้อยกว่า 12 mm หรือ 6 เท่าของขนาดของอนุภาคใหญ่สุด (ใช้ค่ามาก)
- ค่า diameter (width)-to-thickness ratio อย่างน้อย 2:1

#### การเตรียมตัวอย่างดิน

ตัวอย่างดินบดอัด – เตรียมตัวอย่างโดยบดอัดดินตามค่า water content และ unit weight ที่กำหนด โดย kneading หรือ tamping ดินใน shear box เป็นชั้น ๆ ผิวบนของแต่ละชั้น ควรทำให้ขรุขระก่อนที่จะบดอัดชั้น ถัดไปและขอบเขตของชั้น จะต้องไม่ตรงกับผิวการเฉือนใน shear box หรืออาจเตรียมตัวอย่างโดยการบดอัดดินตามการทดสอบการบดอัด (D698 หรือ D1557) แล้วตัดตัวอย่างดินสำหรับทำ direct shear จากตัวอย่างดินขนาดใหญ่เหมือนกับทำกับตัวอย่างคงสภาพ ตัวอย่างดินที่ใช้ต้องผสมน้ำอย่างทั่ว ถึงและบ่มตัวอย่างไว้ก่อนการบดอัดตามตาราง

#### ตาราง ระยะเวลาการบ่มตัวอย่างก่อนบดอัด

#### ตารางที่ 2-3 ตารางระยะเวลาการบ่มตัวอย่างก่อนบดอัด

Classification D2487	Minimum standing time, h
SW, SP	No requirement
M	3
SC, ML, CL	18
MH, CH	36

### 2.7 การทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test)

ความแข็งแรงหรือกำลังของดินเหนียว (Cohesive soil) จะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

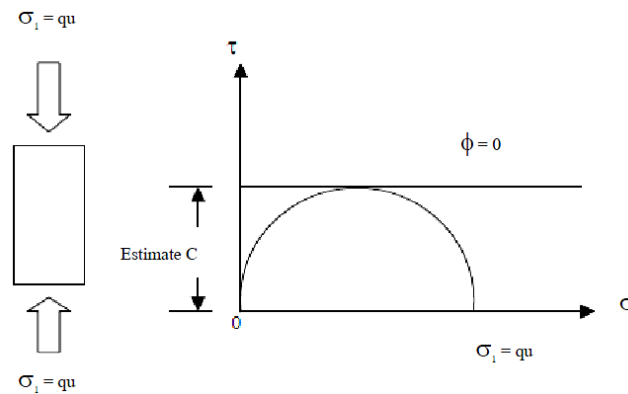
- Cohesion ซึ่งเกิดขึ้นจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า-เคมี (Electro chemical bonds) ระหว่างเม็ดดิน
- Friction ซึ่งเกิดขึ้นจากการขัดตัวของเม็ดดิน (Particle interlocking) และความฝืดระหว่างผิวของเม็ดดิน (Surface friction)

ในดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวปานกลาง (Soft และ Medium Clay) กำลังของดินส่วนใหญ่มักเกิดจาก Cohesion การทดลอง Unconfined compression เป็นวิธีการหาค่าประมาณ Cohesion ของดิน โดยวิธีง่าย ๆ ซึ่งทำได้รวดเร็ว

#### ทฤษฎี

การทดลอง UC. นี้เป็นการทดลองแบบไม่มีการอัดตัวคายนํ้าและไม่มีการระบายนํ้านิยมใช้กับการทดลองกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเหนียวอิ่มตัวด้วยนํ้าโดยความดันรอบข้างมีค่าเป็นศูนย์ แรงในแนวตั้งกระทำต่อดินตัวอย่างอย่างรวดเร็ว การทดลองนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่จะหาลังรับแรงเฉือนแบบไม่คายนํ้า  $s_u$  โดย

ถือว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในมวลดินในระหว่างการทดลองโดยวิธีการทดลองแบบนี้ไม่สามารถหาค่ามุมเสียดทานภายใน (มุม  $\phi$ ) ได้เนื่องจากการทดลองนี้จะทำแบบเร็วและน้ำยังไม่มีโอกาสระบายออกไปได้ค่ากำลังต้านทานต่อแรงเฉือนจะเท่ากับครึ่งหนึ่งของหน่วยแรงกดสูงสุด ( $q_u$ ) คือ  $S_u/2$  เมื่อ  $S_u$  คือกำลังต้านทานแรงกดแบบ UC. และในบางครั้งจะใช้สัญลักษณ์เป็นตัว  $(c)$  ก็จะมีค่าเท่ากับ  $c = q_u/2$  เมื่อ  $q_u =$  ความต้านทานต่อแรงอัดสูงสุดของดินแบบไม่ถูกจำกัด ดังรูปที่ 2-19



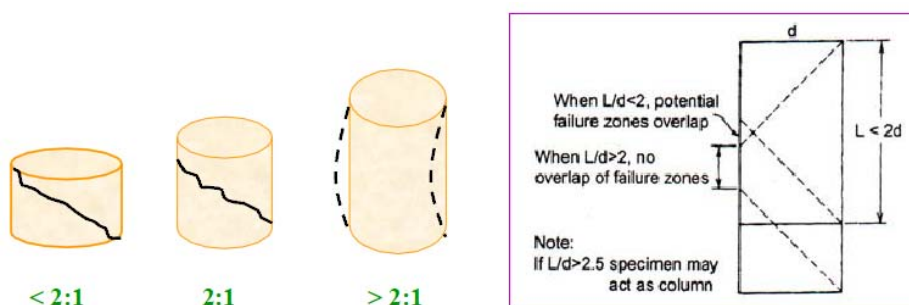
รูปที่ 2-19 แสดงสถานะ Stress โดย Mohr's Circle

การทดสอบแรงอัดดินโดยปราศจากแรงด้านข้างเป็นการทดสอบหา กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินโดยไม่มีแรงดันด้านข้างมากกระทำต่อผิว ตัวอย่างดินทำให้สภาพของตัวอย่างดินที่ทดสอบแตกต่างจากสภาพดินในธรรมชาติการทดสอบนี้สามารถให้ผลได้รวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบเป็นเพียงค่าโดยประมาณเท่านั้นแต่ก็สามารถนำไปใช้งานได้อย่างปลอดภัยจึงเป็นวิธีที่แพร่หลาย

ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังต้านทานแรงเฉือน

อัตราส่วนความชะลูด (Slenderness Ratio)

อัตราส่วนความชะลูดมีผลต่อพฤติกรรมการพังของตัวอย่าง ซึ่งถ้ามีอัตราส่วนความชะลูดสูงจะทำให้ดินที่ทดสอบเกิดการพังด้วยการโก่งของแท่งดินตัวอย่าง แทนซึ่งจะทำให้ไม่สามารถรู้ถึงพฤติกรรมการพังของดินได้อย่างถูกต้อง ดังรูปที่ 2-20



รูปที่ 2-20 ลักษณะการวิบัติของดินเมื่อรับแรงกด



### อัตราการเฉือน (Rate of Shearing)

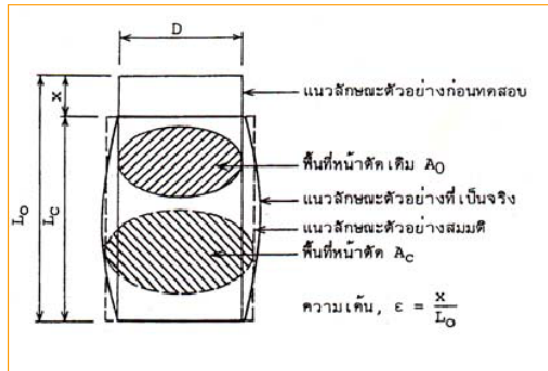
การทดลองนี้คล้ายลักษณะกับการทดสอบคอนกรีตโดยตัวอย่างดินเหนียวถูกวางในเครื่องอัดทำการวัดความเค้นและความเครียดจนกระทั่งตัวอย่างดินวิบัติการทดลอง UC ทำได้สองวิธีคือแบบ Stress Control และแบบ Strain Control วิธีที่นิยมใช้กันมากคือ Strain Control เพราะทำได้ง่ายกว่าในการทดลองการรับแรงอัดของแท่งดินตัวอย่างเราจะควบคุม Strain ในอัตรา 0.5 – 2 เปอร์เซ็นต์/นาทิจำแนกดินมีความยาว 50 มม. และต้องการควบคุม Strain ที่ 1% ก็หมายความว่าให้ดินรับแรงอัดแล้วเกิดการยุบตัวลงในอัตรา 0.5 มม./นาทิจำแนกดินตัวอย่างจะไม่มีอะไรห่อหุ้มและทดลองในห้องที่มีสภาพแห้งดังนั้นการทดลองจะต้องทำให้เสร็จสิ้นภายในเวลาที่น้อยที่สุด (10 นาที) เพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำในดินจะทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงกดเพิ่มขึ้นตัวอย่างดินที่นำมาทดลองจะทำการทดลองจนกระทั่งน้ำหนักที่กดลงบนตัวอย่างลดลงหรือทดลองจนถึง 20 % Strain

### การปรับแก้พื้นที่หน้าตัด

จากการทดลองเมื่อดินรับน้ำหนักดินจะหดสั้นเข้าและไปออกทางข้างพื้นที่หน้าตัดที่รับแรงก็มากขึ้น ดังนั้นในทางปฏิบัติเราจำเป็นต้องมีการปรับค่าพื้นที่หน้าตัดของดินทั้งนี้ก็เพื่อให้เหมือนกับสภาพที่ดินในสนามรับน้ำหนักจริงๆ นอกจากนี้การปรับพื้นที่ให้มากขึ้นยังช่วยลดค่าของ Stress เมื่อแรงที่มากระทำ วิธีปรับพื้นที่หน้าตัดของดินจะใช้หลักการคงตัวของปริมาตรดินคือให้พื้นที่หน้าตัดเดิม ( $A_0$ ) โตขึ้นความยาวเดิม ( $L_0$ ) จะลดลงแต่ปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงดังนั้นในตอนเริ่มทดลองดินมีพื้นที่หน้าตัด  $A_0$  ความยาว  $L_0$  ปริมาตรของดินในตอนเริ่มต้นคือการทดลอง UC ความยาวของแท่งตัวอย่างดินกำลังพอเหมาะแท่งตัวอย่างอยู่ระหว่างแผ่นรองสองแผ่นซึ่งรับน้ำหนักจากเครื่องกดถ่ายให้ดินพร้อมด้วยหินพูน 2 แท่งสอดแทรกขวางระหว่างดินกับแผ่นรองแรงกดจะกระทำตามแนวแกน Y ที่ละน้อยๆและทำให้ดินยุบตัวลงที่ละน้อยๆเป็นสัดส่วนกับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นบันทึกการหดตัวของดินและน้ำหนักที่กระทำเป็นระยะจนกระทั่งดินถึงจุดวิบัติ (สังเกตจากน้ำหนักที่กดจะลดลงแต่ดินก็ยังยุบตัวต่อไปอีก) นำค่าที่บันทึกไว้มาคำนวณหาค่า  $A_c$  และค่า  $q_u$  พร้อมกับเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของ Stress และ Strain ดังรูปที่ 2-21

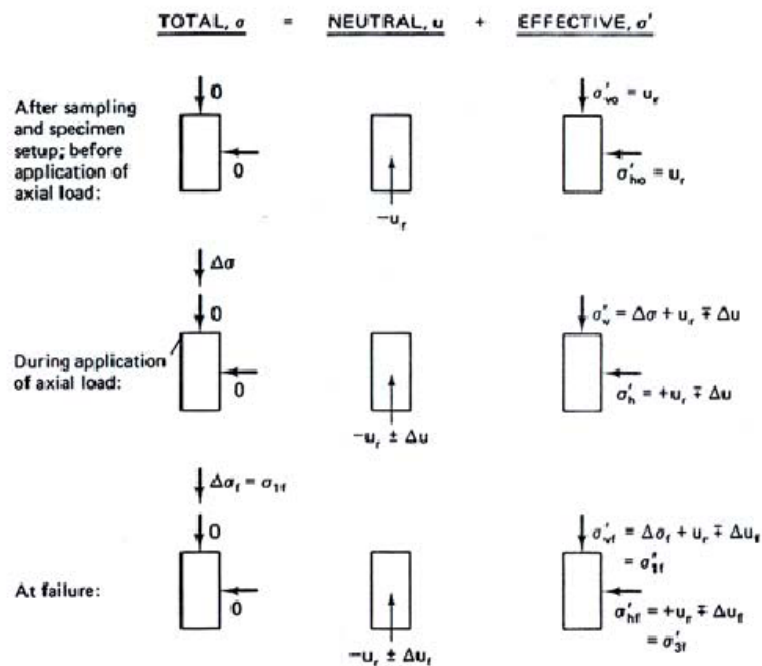
สมมุติฐานปริมาตรคงที่

$$\begin{aligned}
 A_o L_o &= A_c L_c \\
 &= A_c (L_o - x) \\
 A_c &= \frac{A_o L_o}{L_o - x} \\
 &= \frac{A_o}{1 - \frac{x}{L_o}} \\
 &= \frac{A_o}{1 - \epsilon}
 \end{aligned}$$



รูปที่ 2-21 ลักษณะของเมื่อตัวอย่างดินเมื่อรับแรงกด

สภาพของแรงเค้นภายใต้การทดสอบแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้าง

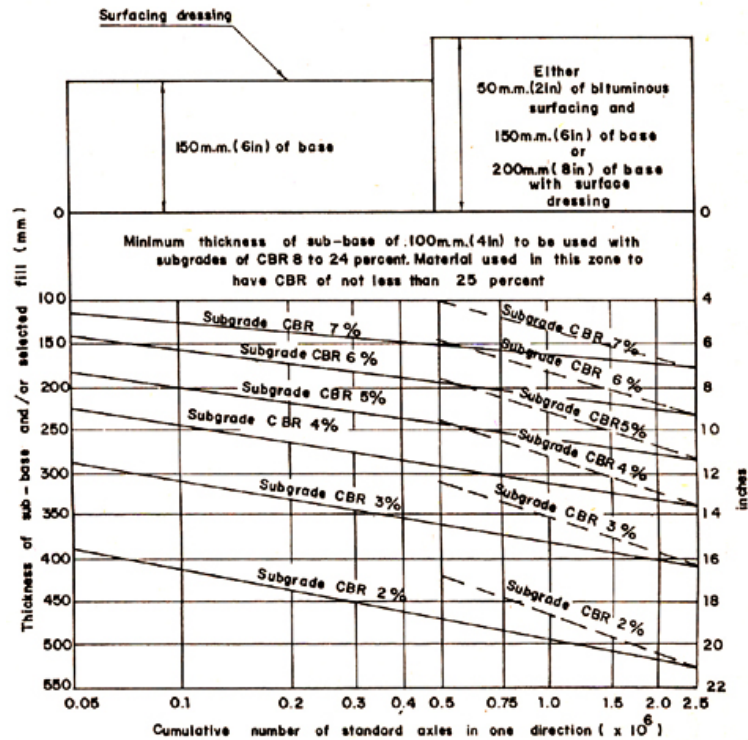


รูปที่ 2-22 สภาพของแรงเค้นภายใต้การทดสอบแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้าง

2.8 การทดสอบแคลิฟอร์เนีย แบริงเรโซ (California Bearing Ratio)

ในปี ค.ศ. 1929 California Division of Highway ได้กำหนดวิธีทดสอบจำแนกคุณสมบัติของดิน เพื่อที่จะนำมาใช้ประโยชน์ในการเลือกวัสดุที่เหมาะสมในการก่อสร้างถนนและในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 จำเป็นต้องพัฒนาการการก่อสร้างสนามบิน เพื่อรับกับเครื่องบินรบซึ่งน้ำหนักบรรทุกทุกอายุทศวรรษหนักเพิ่มขึ้น

มากหน่วยทหารช่างของสหรัฐอเมริกาได้นำวิธีการทดสอบคุณสมบัติแบบ CBR มาใช้ในการออกแบบและก่อสร้างทางวิ่งของสนามบินและวิธีการดังกล่าวก็เป็นที่ยอมรับและนิยมใช้กันโดยทั่วไป



รูปที่ 2-23 Design Chart ใช้กำหนดความหนาของรองพื้นทาง พื้นทาง และผิวทาง ตามวิธีของ Road ote No.31

ทฤษฎี

CBR test เป็นวิธีการทดสอบวัดแรงเฉือน (Shearing resistance) ของดินที่บดอัดจนแน่นดีแล้ว (ส่วนมากจะทดสอบที่ Optimum moisture content) โดยการใช้ท่อนเหล็กกลมตัน (Piston) ขนาดพื้นที่หน้าตัด 3 ตร.นิ้ว กดลงบนดินตัวอย่างที่เตรียมไว้ด้วยอัตรา 0.05 นิ้วต่อนาที แล้วนำไปหาอัตราส่วนเปรียบเทียบกับค่า Unit load มาตรฐานที่ได้จากการทดลองกด piston ขนาดเดียวกันนี้บนหินที่ compact แน่นที่ความลึกของ penetration เท่ากัน ค่าที่ได้นี้เรียกว่า “เปอร์เซ็นต์ CBR” เทียบอัตราส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์ของ Standard Unit load เขียนเป็นสมการของอัตราส่วนได้ดังนี้

$$CBR = \frac{\text{Test Unit Load}}{\text{Standard Unit Load}} \times 100\%$$

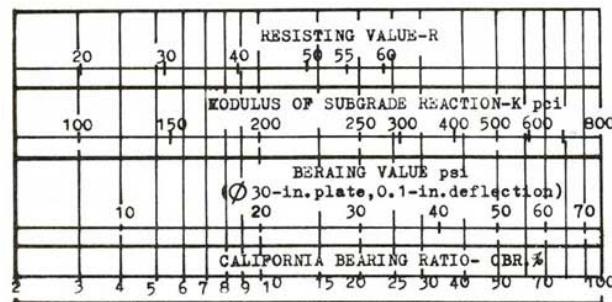
ค่า Standard unit load ซึ่งได้จากการทดลองกดท่อนเหล็กกลมตัน (Piston) มีพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้ว บนหินคลุกมาตรฐานบดอัดแน่นขนาดต่างๆ กันหลายขนาดมีค่ามาตรฐานดังตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-4 ค่า standard unit load ที่ความลึกต่างๆ

Penetration (in)	Unit load (Psi)
0.1	1000
0.2	1500
0.3	1900
0.4	2300
0.5	2600

ค่า %CBR โดยทั่วไปแล้ว จะใช้ค่าอัตราส่วนของแรงกดที่ความลึก 0.1 นิ้ว แต่ถ้าผลปรากฏออกมาว่า %CBR ของแรงกดที่ความลึก 0.2 นิ้ว สูงกว่าที่ความลึก 0.1 นิ้ว การทดลองควรจะต้องกระทำซ้ำอีกครั้ง ซึ่งถ้าค่า %CBR ที่ได้มายังเป็นไปในรูปเดิม ก็ให้ใช้ค่า %CBR ที่การยุบตัว 0.2 นิ้ว

ค่า CBR นำมาใช้ประโยชน์ในการออกแบบความหนาของถนนลาดยาง (flexible pavement) โดยการกำหนดความหนาจาก design charts หรืออาจใช้ช่วยในการกำหนดค่า Subgrade Modulus (K) ของดินจากตารางเปรียบเทียบเพื่อช่วยในการออกแบบถนนคอนกรีตได้อีกด้วย



รูปที่ 2-24 ความสัมพันธ์ระหว่าง CBR, K, R และ Bearing Value

จากค่า CBR ของดินแต่ละชนิดยังสามารถกำหนดคุณสมบัติของดินอย่างคร่าว ๆ ว่าเหมาะที่จะใช้กับงานก่อสร้างถนนในชั้นดินถม ชั้นรองพื้นทาง (subbase) หรือชั้นพื้นทาง (base) ดังตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 2-6 ความสัมพันธ์ของ % CBR และการใช้งาน

% CBR	คุณสมบัติเหมาะสมทางวิศวกรรม	การใช้งาน
0 – 3	very poor	subgrade
3 – 7	poor to fair	subgrade
7 – 20	fair	subbase
20 – 50	good	subbase, base
50 – 80	very	good base
> 80	excellent	base

การทดสอบ CBR ทำได้ทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนาม จากตัวอย่างดินที่บดอัดแน่นตามวิธีการของ Standard หรือ Modified Proctor ดินตัวอย่างที่เตรียมสำหรับทดลองในห้องปฏิบัติการจะต้องเตรียมขึ้น 2 ชุด ชุดหนึ่งใช้กดทดลองหาค่า Penetration ทันทีหลังจากเตรียมตัวอย่างเสร็จ อีกชุดหนึ่งจะต้องแช่น้ำไว้ 96 ชั่วโมง เพื่อให้ดินอมน้ำจนอิ่มตัว และเพื่อจุดประสงค์จะวัดหาอัตราการบวมตัวของดินด้วย ในระหว่างที่ทำการแช่น้ำอยู่จะต้องมีน้ำหนักวางกดทับบนดินตัวอย่าง (Surcharge) ไม่น้อยกว่า 10 ปอนด์ หรือเท่ากับน้ำหนักของพื้นทางและผิวจราจร เหตุผลที่ทำเช่นนี้ก็เพื่อจะหาค่า CBR ที่ควรเกิดขึ้นจริง ๆ ในสนาม กล่าวคือ ในหน้าฝนระดับน้ำใต้ดินจะสูงจนทำให้ดินที่รองรับถนนอยู่อิ่มตัว และอัตราการบวมตัวของดินที่จะมาใช้ในการก่อสร้างจะเป็นค่าหนึ่งซึ่งสามารถบ่งบอกถึงคุณสมบัติ และความเหมาะสมในการใช้งานของวัสดุนั้นๆ

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผลกระทบของการบดอัดต่อปริมาณความชื้นกับแรงเฉือนของดินไม่อิ่มตัว โดย E. COKCA, O. EROL and F. ARMANGIL

เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการดำเนินการบดอัดดินเหนียว (PL=23%) การพิจารณาการบดอัดกับผลของค่าปริมาณความชื้น ต่อการทดสอบแรงเฉือนของดินเหนียว สำหรับการวัดแรงเฉือน จะใช้วิธีการทดสอบด้วยวิธีการเฉือนตรง โดยตัวอย่างการบดอัดมีค่า optimum moisture content (i.e.  $w=24%$ ) ที่ด้านแห้งมีค่า optimum (i.e.  $w=18%$ ,  $20%$  and  $22%$ ) และที่ด้านเปียกมีค่า optimum (i.e.  $w=26%$  and  $28%$ ) ใช้ psychrometer เพื่อวัด suction และความสัมพันธ์ของ suction กับปริมาณความชื้น ของดิน ค่าแวนโน้มของ suction มุมของแรงเสียดทาน และการผสานกันของเม็ดดิน หากค่าความชื้นเปลี่ยนแปลงไปจนเข้าใกล้ ค่า optimum จะวิเคราะห์การบดอัดและมุมเสียดทานของเม็ดดินที่ด้านแห้งของการบดอัดเข้าใกล้ค่า optimum และปฏิกิริยาของมุมเสียดทานและการผสานเพิ่มขึ้น และมุมเสียดทานจะได้รับผลกระทบให้มีค่าลดลงหลังจากดินเริ่มเปียก

การวัดค่า Suction เทียบกับปริมาณความชื้นของ bentonite – sand mixtures โดย Setianto Samingan Agus, Tom Schanz, and Delwyn G. Fredlund

การบดอัดดินได้ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายเป็นปัญหาและอุปสรรคสำหรับการฝังกลบเนื่องจากลักษณะที่ดีอย่างเช่นค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำและขยายตัวสูง , ส่วนผสมของการบดอัดทรายเบนโทไนต์ โดยปกติไม่อิ่มตัวดังนั้น การทดสอบสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้พฤติกรรมของดินนอกเหนือจากปัจจัยที่ใช้โดยทั่วไปเช่นปริมาณน้ำและความหนาแน่นแห้ง(หรืออัตราส่วน void) การศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นไปที่การตรวจสอบลักษณะการดูดของส่วนผสมทรายเบนโทไนต์ วัดการดูดถูกใช้โดยเทคนิคต่างๆสำหรับส่วนผสมของการบดอัดทรายเบนโทไนต์ ใน การปฏิบัติการเพื่อหาผลข้อมูล และวิเคราะห์ เพื่อให้เข้าใจเกี่ยวกับการดูดในดินที่ขยายตัว พบว่าการดูดขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำและปริมาณส่วนผสมเบนโทไนต์กับการเปลี่ยนแปลงดินที่ขยายตัวเมื่อความชื้นมากขึ้น

## บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

การศึกษาเกี่ยวกับกำลังรับแรงเฉือนของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำโดยในการศึกษานี้มีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาจึงมีการปฏิบัติดังนี้

### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

#### ดินทราย

ตัวอย่างดินทรายที่ใช้ในการทดลองทำการเก็บตัวอย่างจากบริเวณหลังภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี ตัวอย่างทรายที่ได้เป็นตัวอย่างแบบถูกรบกวน (Disturbed sample) หลังจากนั้นนำมาทดสอบ Wet Sieve ตาม D422 หลังจากการทดสอบดังกล่าวได้ค่า  $C_u=4.4$ ,  $C_c=0.342$  ใช้วิธีการหาขนาดละเอียดในการทดสอบมาจำแนกดินตาม USCS ด้วยวิธี Unified Soil Classification ซึ่งได้ดินทรายที่มีลักษณะเป็น SP Sand

#### ดินเหนียว

ตัวอย่างดินเหนียวที่ใช้ในการทดลองจะต้องนำมาทำการทดสอบ Wet Sieve ตาม D422 และหลังจากนั้นนำมาทดสอบหาขีดจำกัดแอดเทอเบอร์ก หลังจากการทดสอบดังกล่าวได้ค่า  $LL=54$ ,  $PL=27$ ,  $PI=27$  และจำแนกดินตาม USCS ด้วยวิธี Unified Soil Classification โดยใช้กราฟ Plasticity chart ในการแบ่งชนิดของดินเหนียว ซึ่งได้ดินเหนียวมีลักษณะ CH Clay

### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- อุปกรณ์ Compaction test
- อุปกรณ์ Direct shear test
- อุปกรณ์ Tempe cell
- อุปกรณ์วัด Suction
- อุปกรณ์ Unconfined test
- อุปกรณ์ CBR test

### 3.3 การทดสอบการบดอัดดิน (Compaction Test)

#### เครื่องมือและอุปกรณ์

- การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานแบบหล่อทดสอบการบดอัดดินมีสองขนาดให้เลือกใช้คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4 นิ้ว ความสูง 4.584 นิ้วพร้อมด้วยปลอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเดียวกันและแผ่นฐานสูง 50 มม. (มีปริมาตร 1,000 ซม.<sup>3</sup>)

- ค้อนบดอัดแบบมาตรฐานหนัก 5.5 ปอนด์ระยะยก 12 นิ้วและแบบสูงกว่ามาตรฐานหนัก 10 ปอนด์ระยะยก 18 นิ้ว
- แม่แรงสำหรับดันตัวอย่างดินออกจากโมล
- เหล็กปาดดินสันตรงขนาด 30 ซม.
- ตะแกรงร่อนดินขนาดเบอร์ 4
- เครื่องชั่งชนิดอ่านได้ละเอียดถึง 0.10 กรัมถึง 10 กิโลกรัม

ขั้นตอนการปฏิบัติการทดลองบดอัดดิน (เลือกใช้การทดสอบด้วยวิธีการ A)

- นำตัวอย่างดินที่ได้จัดเตรียมไว้มาเทลงในภาตผสมดิน ใช้ค้อนยางทุบดิน ที่เกาะอยู่ออกจากกัน ถ้าตัวอย่างเป็นดินเหนียวอบให้แห้งแล้วทุบให้ละเอียดหรืออาจใช้เครื่องบดร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4
- วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง, ความสูงของโมลเพื่อหาปริมาตรของดินในโมลจากนั้นประกอบโมลและแผ่นฐานพร้อมชั่งน้ำหนัก (ไม่ต้องชั่งปลอกสวม)
- นำตัวอย่างดินที่เตรียมไว้มาทดสอบแบบมาตรฐานและการทดสอบแบบสูงกว่ามาตรฐานโดยเริ่มผสมน้ำให้มีความชื้นตามค่าที่ได้จากขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างแล้วคลุกเคล้าให้เข้ากัน
- ตักดินใส่โมลที่ประกอบไว้แล้วโดยประมาณให้ความสูงในแต่ละชั้นเท่าๆกันโดยมีจำนวน 3 ชั้นสำหรับโมลแบบมาตรฐานและ 5 ชั้นสำหรับโมลแบบสูงกว่ามาตรฐานเมื่อบดอัดครบจำนวนชั้นแล้วให้ดินพันขอบโมลขึ้นไปประมาณ 1 - 2 ซม.
- ใช้ค้อนหนัก 5.5 ปอนด์สำหรับบดอัดแบบมาตรฐานและ 10 ปอนด์สำหรับบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานบดอัดดินในโมลแต่ละชั้นให้ทั่วทั้งโมลให้บดอัดชั้นละ 25 ครั้งสำหรับโมลขนาด 4 นิ้ว. และ 56 ครั้งสำหรับโมลขนาด 6 นิ้วโดยให้โมลวางอยู่บนพื้นคอนกรีตเรียบ
- เมื่อตอกกระทั่งบดอัดครบจำนวนครั้งแล้วถอดปลอกสวมของโมลออกใช้บรรทัดเหล็กปาดดินส่วนที่สูงเกินปากโมลออกและถอดแต่งผิวดินให้เรียบเสมอปากโมลใช้แปรงปัดทำความสะอาดดินที่ค้างอยู่นอกโมลแล้วถอดแผ่นฐานออกนำไปชั่งน้ำหนักดินในโมลให้ได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม
- ดันแท่งตัวอย่างดินออกจากโมลแล้วผ่ากลางตามแนวตั้งเก็บดินตัวอย่างตามแนวผ่าอย่างน้อย 100 กรัมแล้วนำไปชั่งน้ำหนักและนำเข้าในเตาอบเพื่อคำนวณหาปริมาณความชื้นต่อไป
- ใช้ค้อนยางทุบก้อนดินที่เหลือให้แตกออกจนร่วนแล้วผสมน้ำเพิ่มอีก 2% คลุกเคล้ากันให้ทั่วสม่ำเสมอแล้วทำการทดลองซ้ำจนกระทั่งน้ำหนักดินในโมลที่ชั่งได้ครั้งสุดท้ายลดลงและอย่างน้อยควรจะเปลี่ยนหรือเพิ่มปริมาณน้ำถึง 5 ครั้ง
- หาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่าปริมาณน้ำสูงสุดที่ทำให้ดินแน่นที่สุดจากการเขียนเส้นกราฟ

สูตรการคำนวณ

- คำนวณหาปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละ 
$$\omega = \frac{W_{wet} - W_s}{W_s}$$

เมื่อ  $W$  = ปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละคิดเทียบกับมวลของดินอบแห้ง  
 $W_{wet}$  = มวลของดินเปียกมีหน่วยเป็นกรัม  
 $W_s$  = มวลของดินอบแห้งมีหน่วยเป็นกรัม

- คำนวณหาค่าความแน่นเปียก (Wet Density)

$$\gamma_{wet} = \frac{W_{wet}}{V}$$

เมื่อ  $\gamma_{wet}$  = ความแน่นเปียกมีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร  
 $W_{wet}$  = มวลของดินเปียกที่บดอัดในแบบมีหน่วยเป็นกรัม  
 $V$  = ปริมาตรของแบบมีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

- คำนวณหาค่าความแน่นแห้ง (Dry Density)

$$\gamma_d = \frac{\gamma_{wet}}{1 + w}$$

เมื่อ  $\gamma_d$  = ความแน่นแห้งมีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร  
 $\gamma_{wet}$  = ความแน่นเปียกมีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร  
 $W$  = ปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละ

### 3.4 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดิน (Direct shear test)

#### เครื่องมือและอุปกรณ์

- Shear box เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่มีการระบายน้ำผ่านส่วนบนและส่วนล่าง มีระนาบนอนที่แบ่ง shear box ออกเป็น 2 ส่วนที่หนาเท่ากันโดยจะยึดติดกันด้วย alignment screw shear box จะมี gap screw ที่ จะควบคุมช่องว่างระหว่างครึ่งบนและครึ่งล่างของ shear box น้ำหนักของส่วนบนของ shear box จะน้อยกว่า 1% ของแรงกด
  - Loading device อุปกรณ์สามารถออกแรงในแนวตั้งที่ผิวหน้าของตัวอย่าง มีกล่องโลหะ (shear box bowl) เพื่อแช่ shear box ในน้ำได้และให้แรงปฏิกิริยาต่อครึ่งหนึ่งของ shear box อุปกรณ์สามารถออกแรงเฉือนต่อตัวอย่างดินตามระนาบเฉือนที่กำหนดที่ขนานกับผิวหน้าของตัวอย่างดินด้วยอัตราการเคลื่อนตัวที่คงที่ระหว่าง 1.0 mm/min โดยมีความแปรปรวนไม่เกิน  $\pm 5\%$
  - Porous insert ทำหน้าที่ระบายน้ำจากตัวอย่างดินด้านบนและด้านล่างและถ่ายแรงเฉือนในแนวนอนจาก porous insert สู่ขอบเขตด้านบนและล่างของตัวอย่าง
  - Shear force measurement device – ใช้ proving ring ที่ละเอียด 2.5 N หรือ 1% ของแรงเฉือนที่วิบัติ
  - Deformation indicators – เป็น dial gage หรือ displacement transducer อ่านได้ละเอียด 0.0025 mm สำหรับวัดการเปลี่ยนแปลงความหนา และละเอียด 0.025 mm สำหรับวัดการเคลื่อนตัวในแนวราบ
- ตัวอย่างดิน



- ตัวอย่างดินที่ใช้เตรียมควรจะมีขนาดเพียงพอที่จะสามารถเตรียมใช้ได้สามตัวอย่าง
- ความกว้างของตัวอย่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสต้องไม่น้อยกว่า 50 mm
- ความหนาตัวอย่างต้องไม่น้อยกว่า 12 mm

#### วิธีการทดสอบ

- ประกอบ shear box อาจใช้จารบีทาบางๆที่ผิวในของ shear box เพื่อลดความฝืดระหว่างตัวอย่างและ shear box ระหว่างการ consolidation
- วางหินพรุนชั้นไว้ที่ทั้งสองด้านของตัวอย่างและติดตั้ง shear box ลงใน shear box bowl
- ติดตั้ง และปรับระบบการให้แรงเฉือนเพื่อไม่ให้มีแรงกระทำกับอุปกรณ์วัดแรง
- ติดตั้ง และปรับอุปกรณ์การวัดการเคลื่อนตัวในแนวนอนและตั้ง ค่าศูนย์
- วาง porous insert และ load transfer plate บนตัวอย่างดินใน shear box
- จัดแท่งกดแรงให้เข้าที่ จัดคานให้ได้ระดับในแนวนอน ถ้าเป็นระบบให้แรงแบบลมก็ปรับแท่งกดแรงให้พอดีกับกลไกการถ่ายแรง
- ให้แรงในแนวตั้งเล็กน้อย 7 kPa หรือประมาณ 2kg กับตัวอย่าง
- ติดตั้ง และปรับอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้งและตั้ง ค่าศูนย์
- ให้ค่าความเค้นในแนวตั้งที่เหมาะสมโดยการเพิ่มมวลที่แขวนที่คานให้แรงโดยที่ให้แรงในแนวตั้งเพิ่มขึ้นของตัวอย่างที่ 1, 2, 3 เท่ากับ 1 kg, 2 kg, 3 kg ตามลำดับ
- บันทึกการเคลื่อนตัวในแนวตั้งที่เกิดขึ้นกับเวลา ต้องตรวจสอบ primary consolidation ก่อนให้แรงลำดับถัดไป (ดู Test Method D2435) พล็อตการเคลื่อนตัวในแนวตั้งกับ log of time (ในหน่วยนาที)
- หลังจาก primary consolidation เสร็จสิ้น ให้เอา alignment screw ออกจาก shear box เปิดช่องว่างระหว่างครึ่งของ shear box 0.64 mm โดยใช้ gap screw แล้วเอา gap screw ออก
- เชื้อนด้วยอัตราที่ค่อนข้างต่ำเพื่อไม่ให้เกิดความดันน้ำส่วนเกินที่จุดวิบัติ โดยเลือกอัตราการเฉือนที่เหมาะสม สมการต่อไปนี้อาจใช้เป็นแนวทางในการประมาณระยะเวลาที่น้อยที่สุดที่ต้องการตั้งแต่เริ่มต้นการทดสอบจนถึงจุดวิบัติ จากสมการ  $t_f = 50$   $t_{50} = 50(2.5) = 125$  นาที

โดยที่

$t_f$  = ระยะเวลาทั้งหมดจนถึงการวิบัติ (นาที)

$t_{50}$  = เวลาที่ตัวอย่างดินต้องใช้สำหรับ 50% consolidation ภายใต้ความเค้นในแนวตั้งที่สนใจ (นาที)

กำหนดให้เวลาของ consolidation เท่ากับ 5 นาที(เพื่อป้องกันการระบายน้ำให้เกิดน้อยที่สุด):  $t_{50} = 2.5$  นาที

- คำนวณอัตราการเฉือนจากสมการ  $d_r = d_f / t_f$  :  $d_r = 5/125 = 0.04$  mm/min

โดยที่

$d_r$  = อัตราการเฉือน (mm/min)

$d_f$  = เนื่องจากเป็นดิน CH ใช้ 5 mm

$t_{50}$  = เวลาในการวิบัติ (min)

- ปรับ displacement rate ของ loading device
- บันทึกค่าเริ่มต้นของเวลา, การเคลื่อนตัวในแนวตั้งและแนวนอน, และแรงในแนวตั้งและแรงเฉือน
- เริ่มการทดสอบ
- บันทึกค่าของเวลา, การเคลื่อนตัวในแนวตั้งและแนวนอน, และแรงในแนวตั้งและแรงเฉือนในทุกๆช่วงของระยะการเคลื่อนตัว บันทึกข้อมูลทุกๆการเคลื่อนตัว 2% ของเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างของตัวอย่าง เพื่อให้ได้ shear stress-displacement curve ที่แม่นยำ
- เมื่อถึงสภาพวิบัติหยุดการทดลอง การเคลื่อนตัวอาจจะมีค่าประมาณ 10-20% ของเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างของตัวอย่างดิน(63.5 mm)

#### วิธีการคำนวณ

- ความเค้นเฉือนบนตัวอย่างดิน  $\tau = F/A$

โดยที่

$\tau$  = ความเค้นเฉือน (kPa)

F = แรงเฉือน (N)

A = พื้นที่เริ่มต้นของตัวอย่างดิน (mm<sup>2</sup>)

- ความเค้นในแนวตั้ง ฉากบนตัวอย่างดินจากสมการ  $n = N/A$

โดยที่

n = ความเค้นในแนวตั้ง ฉาก (kPa)

N = แรงในแนวตั้ง ฉากบนตัวอย่างดิน (N)

- คำนวณอัตราการเฉือนโดยการหารระยะการเคลื่อนตัวด้วยระยะเวลาหรือรายงานอัตราการเฉือนที่ใช้ในการทดสอบจากสมการ  $d_r = d_h/t_e$

โดยที่

$d_r$  = อัตราการเฉือน (mm/min)

$d_h$  = การเคลื่อนตัวในการทดสอบ (mm)

$t_e$  = ระยะเวลาการทดสอบ (min)

- คำนวณ % การเคลื่อนตัวในแนวราบสัมพัทธ์สำหรับแต่ละแรงเฉือนจากสมการ  $d_p = d_i/d_h$

โดยที่

$d_p$  = % การเคลื่อนตัวในแนวราบสัมพัทธ์ (%)

$d_i$  = การเคลื่อนตัว (mm)

- คำนวณ initial void ratio, dry unit weight, และ degree of saturation จาก specific gravity, initial water content, และปริมาตรของตัวอย่างดิน ปริมาตรของตัวอย่างดินได้จากการวัดขนาดของ shear box และความหนาของตัวอย่างดิน

#### หมายเหตุอื่นๆ

ข้อจำกัดของการทดสอบ direct shear ตามที่กล่าวใน ASTM D3080 คือ

- ระหว่างการทดสอบ direct shear จะมีการหมุนของ principal stress ซึ่งอาจจะตรงหรือไม่ตรงกับสภาพในสนาม นอกจากนี้การวิบัติอาจจะไม่เกิดขึ้นบนระนาบที่อ่อนแอที่สุดก็ได้เพราะว่าการวิบัติถูกบังคับให้เกิดขึ้นบนระนาบแนวนอนที่กึ่งกลางของตัวอย่างดิน โดยทั่วไป การทดสอบนี้จะให้ค่า effective friction angle  $\phi'$  ที่ค่อนข้างถูกต้องสำหรับ granular soil
- Shear stress และ displacement จะกระจายไม่สม่ำเสมอภายในตัวอย่างดินและไม่มีการกำหนดความสูงที่เหมาะสมในการคำนวณ shear strain การใช้อัตราการเฉือนที่ช้าทำให้ excess pore pressure สามารถระบายได้แต่ก็อาจเกิด plastic flow ของ soft cohesive soil
- ขอบเขตของ normal stress, อัตราการเฉือน, และสภาพการทดสอบโดยทั่วไป ไปควรจะเลือกให้
- เหมาะสมกับสภาพดินที่จะทดสอบ

### 3.5 การทดสอบเครื่องอัดความดัน (Tempe cell)

ส่วนบนและล่างวัสดุประกอบไปด้วยพลาสติกใสแข็งที่ทนความดันได้สูง มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 7-8 เซนติเมตรมีช่องสำหรับอากาศเข้าและออกจากระบบส่วนกลางของวัสดุประกอบไปด้วย ยาง (O-ring), แผ่นเซรามิก, ชิ้นส่วนสำหรับยึดอุปกรณ์ (Clamp screws) และกระบอกสแตนเลสหรือพลาสติกใสที่ทนความดันได้สูง มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5.7 เซนติเมตร สูง 5.7 เซนติเมตร ส่วนประกอบเครื่องอัดความดันสามารถใช้ความดันที่ 0-1 บาร์ ในรูปที่ 3-1



รูปที่ 3-1 อุปกรณ์ทดลองการไหลซึมผ่านแบบเครื่องอัดความดัน (Tempe Pressure Cell)

### เตรียมตัวอย่าง

- กำหนดความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (อีกกลุ่มจะกำหนดความชื้นที่เหมาะสม)
- กำหนดปริมาณของดิน(โดยจะต้องบดอัดให้ได้  $1/3$ ของแหวนตัวอย่างคือ  $1.9 \text{ cm}$  มีปริมาตรประมาณ  $50 \text{ cm}^3$ ) และน้ำ (น้ำจะอยู่ประมาณครึ่งของแหวนตัวอย่างคือ  $2.85 \text{ cm}$  มีปริมาตรประมาณ  $73 \text{ cm}^3$ )
- ผสมดินและน้ำเข้าด้วยกัน
- บรรจุดินไว้ในภาชนะที่ปิดสนิทห่อด้วยผ้าที่เปียกแล้วทิ้งไว้ 24 ชม.

### ชั่งน้ำหนักดินและแหวนตัวอย่าง

- ชั่งน้ำหนักดินและแหวนตัวอย่างทั้งหมด

### บรรจุแหวน

- ปิดฐานทั้งด้านบนและด้านล่างกับชั้นส่วนของพลาสติกที่ใช้หุ้ม
- เลื่อนคอมเพรสเซอร์ของลูกสูบแหวนจนกว่าจะกระชกกับคีย์ hex
- ใส่ดิน  $1/3$  จากของด้านล่างของแหวน
- บรรจุดินลงและปาดสูงสุดด้วยมีดหรือไม้พาย
- วางกระดาษรองลงบนด้านบนของดิน
- บีบอัดตัวอย่างดินด้วยการกดจนกระทั่งตัวอย่างเป็นระดับเดียวกันกับแหวน
- คลายที่ยึดของลูกสูบและถอดตัวอย่างออก
- ทำซ้ำอีกครั้งกับตัวอย่างดินที่เหลือ

### ตัวอย่างที่กำลังอิมตัว

- ถอดด้านบนออกจากเซลล์เทมพี
- ตรวจสอบเพื่อให้แน่ใจว่าแผ่นเซรามิกไม่ได้แตกและเซลล์สะอาด
- ทำหนึ่งตัวอย่างและกดมันลงไปถึงครึ่งข้างล่างของเซลล์ขณะที่ทำนั้นควรให้ความดันที่คงที่และสม่ำเสมอ ตัวอย่างจะมีความปลอดภัยเมื่อแหวนล็อกเข้ากับแหวนยางที่ส่วนบนของเซลล์
- ตั้งค่าภายในเซลล์ของแหวนเทมพี
- ทำซ้ำสำหรับอีก 2 ตัวอย่าง
- เติมน้ำสะอาดลงในอ่างจนกระทั่งน้ำได้ประมาณครึ่งหนึ่งของแหวนเทมพี
- ปลอຍให้ตัวอย่างไว้เป็นเวลา 4 วัน

### ขณะที่ทำ Tempe cell

- เชื่อมต่อท่ออัดแรงดันที่ด้านบนของเซลล์
- ไม่ควรมีน้ำหรือสิ่งใดๆอยู่ในขวดด้านล่างของเซลล์
- ชั่งน้ำหนักและบันทึกน้ำหนักของขวดที่ว่างเปล่า

- กำหนดความดันที่ต้องการ ใช้ความดันน้ำสำหรับที่ต้องการความดันน้อยกว่า 100 kPa ใช้ความดันคอมเพรสเซอร์สำหรับที่ต้องการความดันมากกว่า 100 kPa
- จดบันทึกน้ำหนักขวดที่ทดลองทุกวัน
- เมื่อไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักขวด ประมาณ 4 วัน ให้กำหนดความดันต่อไปประมาณความดันทั้งหมดที่ต้องการวัด

#### การรอบตัวอย่าง

- หลังจากการวัดความดันทั้งหมดทำการย้ายตัวอย่างจาก Tempe cell
- นำตัวอย่างไปอบโดย-บันทึกน้ำหนักของแต่ละกระป๋อง
- เอาดินออกจากวงแหวน
- Place ตัวอย่างหนึ่งเป็นสองกระป๋อง
- นำดินไปอบที่อุณหภูมิที่ 105°C ใช้เวลาในการอบ 24 ชั่วโมง
- บันทึกน้ำหนักของดินแห้งแต่ละตัวอย่าง

#### การพัฒนาเส้นโค้งของความชื้น

- -ป้อนข้อมูลที่ได้ลงในตัวคำนวณ Tempe cell
- -ได้ค่าการตกตะกอนและปริมาณของความชื้นในแต่ละดิน
- -นำข้อมูลที่ได้ไปสร้างเส้นโค้งความชื้นของตัวอย่าง

#### ทำความสะอาดเซลล์และแทนที่แผ่นเซรามิก

- -ถอดยางวงแหวนออกโดยใช้ไม้พายหรือวัตถุอื่นแบน
- -พลิกด้านล่างของเซลล์และค่อยๆ กระทบจนกว่าแผ่นเซรามิกออกมา
- -ทำความสะอาดจาน ยางวงแหวน ทั้งด้านบนและด้านล่างของ Tempe cell นำดินทั้งหมดออก

### 3.6 การวัด Suction ด้วยเครื่องมือ SWT5X

เครื่องมือ SWT5X เป็นอุปกรณ์ชนิด Tensiometer สามารถวัดค่า Suction ได้สูงสุด 160 kPa

#### การใช้งาน SWT5X

##### *Calibration*

- Calibration เครื่องมือโดยปรับเทียบที่ค่า 0 กิโลปาสกาล (ขณะวางในแนวนอน) และการตอบสนองเชิงเส้นแปลงสัญญาณให้มีแรงดันมีต่ำ และต้องตรวจสอบเซ็นเซอร์ปีละครั้ง และเปลี่ยนทุก 2 ปี

##### *ตรวจสอบค่าปรับเทียบ*

- หากมีความแตกต่างความดันภายในถ้วย รอบสัญญาณควรจะ 0 กิโลปาสกาลมีวิธีที่จะตรวจสอบ คือ เชื่อมต่อ TENSIO METER ไปยังอุปกรณ์อ่าน และกรอกน้ำใส่ SWT5X ในถ้วยแก้ว น้ำจะแตกตัวเป็นไอออน

ขึ้นไปยังศูนย์กลางของตัวเซ็นเซอร์ รองนกว่าการอ่านจะมีเสถียรภาพ หากมีฟองภายในถ้วยอาจใช้เวลา สักครู่ตัวอย่างค่าที่ควรจะเป็นอยู่ระหว่าง 0.3 และ -0.3 กิโลปาสคาล

#### การวัดค่า

- เชื่อมต่อ TENSIMETER ไปยังอุปกรณ์อ่านใส่น้ำเข้าไปในตัวเครื่องเสียบหัวที่เป็นเซรามิก ลงไปในดินรอ สักครู่ประมาณ 1-2 นาที อ่านค่าด้วยเครื่องมือวัด (ทำวิธีการวัดในคู่มือการปฏิบัติของ SWT5X)

#### การทำความสะดวก

- ทำความสะดวกหัวเซรามิก และเซ็นเซอร์ด้วยผ้าขนหนูชื้น ถ้าเซรามิกอุดตันจะล้างด้วย Rehalon ® ถ้ารู อุดตันด้วยอนุภาคดินให้แช่เซรามิกในน้ำ และขัดผิวเซรามิกที่เป็ยกด้วยกระดาษทรายกันน้ำ

#### การเก็บรักษา

- ถ้าไม่ได้ใช้งานเครื่อง SWT5X เป็นเวลานานความเอาใจออกจากตัวเครื่องเพื่อป้องกันการเกิดสาหร่ายและ เก็บทั้งในที่แห้ง

### 3.7 การทดสอบแรงอัดแกนเดี่ยว(Unconfined Compression Test)

#### เครื่องมือและอุปกรณ์

- เครื่องกดตัวอย่าง (Compression Machine) มีขนาดกำลังพอเพียงที่จะกดตัวอย่างและมีอัตราการกด พอเหมาะ
- วงแหวนวัดแรง (Proving Ring) ที่มีขนาดพอเหมาะที่จะกดทดสอบตัวอย่างดินมีความไวที่เหมาะสมไม่แข็งเกินไป
- มาตรฐานปิด (Dial Gauge) อ่านละเอียด 0.01 มม. ความยาวช่วง 25 มม.
- อุปกรณ์แต่งตัวอย่าง
  - โครงตัดแต่งตัวอย่างดิน (Trimming Frame)
  - เลื่อยเส้นลวด (Wire Saw)
  - กระดาษเคลือบขี้ผึ้ง (Wax Paper)
- เครื่องชั่ง
- เครื่องมือหาความชื้นทั่วไป

#### ขั้นตอนการทดลอง

- ตัวอย่างดินเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว ความสูง 4.584 นิ้ว
- ถ้าเป็นตัวอย่างดินเป็นคงสภาพซึ่งเป็นดินที่ได้จากการบดอัดในโมล
- ถ้าเตรียมตัวอย่างดินแบบไม่คงสภาพปั้นดินตัวอย่างให้ได้ขนาดตามที่กำหนดไว้และปริมาณความชื้นเท่ากับ ดินตัวอย่างคงสภาพหลังจากนั้นให้ชั่งน้ำหนักวัดความสูงและวัดเส้นผ่าศูนย์กลางของดินตัวอย่าง
- วางดินตัวอย่างให้อยู่กึ่งกลางของแผ่นฐานของอุปกรณ์

- ติดตั้งมาตรวัดการหดตัวและมาตรวัดที่อยู่ในวงแหวนวัดแรง
- เริ่มการกดตัวอย่างโดยอัตราการกดคงที่ (การเคลื่อนที่แนวตั้งของเครื่องให้อยู่ในช่วง 0.02 ถึง 0.1 นิ้วต่อนาที่ปกติใช้ 0.05 นิ้วต่อนาที่) ตามความเหมาะสมในช่วงอ่านต่างๆกันเมื่อแรงกดถึงจุดสูงสุดนั้นคือถึงจุดวิบัติหรือจุดสูงสุดของกำลังดิน
- บันทึกข้อมูลจากวงแหวนวัดแรงทุกๆการหดตัว 0.005 นิ้วของตัวอย่าง(อาจจะใช้ 0.002 นิ้วในกรณีตัวอย่างเป็นดินเปราะ)
- เมื่อแรงในวงแหวนวัดแรงเพิ่มขึ้นไปสูงสุดแล้วเริ่มจะลดลงซึ่งแสดงว่าถึงจุดสูงสุดของกำลังของดินให้ยังคงอ่านผลต่อไปจนเห็นแนวเฉือนบนตัวอย่างได้ชัดเจนในบางกรณีที่ไม่มียรอยเฉือนปรากฏชัดเช่นตัวอย่างดินเปลี่ยนสภาพให้ทดสอบจนการหดตัวถึงประมาณ 20% ของความสูง
- บันทึกความชื้นของดินตัวอย่างก่อนทดลองและหลังทดสอบ
- วาดรูปหรือถ่ายรูปในส่วน of ตัวอย่างดินที่วิบัติพร้อมแสดงมุมของระนาบการวิบัติ

#### สูตรการคำนวณ

- คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดตัวอย่างดินตลอดทั้งตัวอย่าง

$$A_0 = \frac{A_1 + 2A_2 + A_3}{4}$$

เมื่อ  $A_0$  = พื้นที่หน้าตัดตัวอย่างดินเฉลี่ย

$A_1$  = พื้นที่หน้าตัดตัวอย่างดินด้านบน

$A_2$  = พื้นที่หน้าตัดตัวอย่างดินตรงกลาง

$A_3$  = พื้นที่หน้าตัดตัวอย่างดินด้านล่าง

- หาพื้นที่หน้าตัดดินตัวอย่าง

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

เมื่อ  $A$  = พื้นที่หน้าตัดตัวอย่างดิน

$D$  = เส้นผ่านศูนย์กลางตัวอย่างดินในด้านที่พิจารณา

- หาพื้นที่หน้าตัดดินตัวอย่างที่เปลี่ยนไป เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความสูงของตัวอย่างดินในระหว่างการทดสอบ

$$A_s = \frac{A_0}{(1 - \varepsilon)}$$

เมื่อ  $\varepsilon$  = อัตราส่วนระหว่างการหดตัวของดินตัวอย่างต่อความสูงของตัวอย่างเดิม ( $\varepsilon = \Delta V / L$ )

$A_s$  = พื้นที่หน้าตัดดินตัวอย่างขณะที่มีการหดตัว

$L$  = ความสูงของดินตัวอย่าง

$\Delta V$  = ระยะการหดตัว

- คำนวณหาแรงกดบนตัวอย่างดิน

$$\sigma_v = \frac{(P.R)K}{A_s}$$

เมื่อ  $\sigma_v$  = หน้อยแรงกดในแนวตั้ง

P.R= ค่าที่อ่านได้จาก Proving Ring

K =ค่าคงที่ของ Proving Ring

- $\text{พื้นที่แก้ไข} = \frac{\text{พื้นที่ตัดตัดตัวอย่าง}}{1 - \frac{\text{การเคลื่อนตัวในแนวตั้ง}}{\text{ความสูงตัวอย่าง}}}$
- คำนวณหาแรงกดในแนวตั้งจนกระทั่งการทรุดตัวเกิน 20% ของความสูงของตัวอย่าง
- การบันทึกและคำนวณข้อมูลจากการทดลองหาค่ากำลังต้านทานแรงอัดแกนเดียว

### 3.8 การทดสอบแคลิฟอร์เนีย แบริงเรโซ (California Bearing Ratio)

#### เครื่องมืออุปกรณ์

- แบบ (Mold) สำหรับเตรียมตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 นิ้ว สูง 7 นิ้ว พร้อม Collar สูง 2.5 นิ้ว และ base plate สำหรับยึด Mold และ Collar
- Spacer Disc สูง 2.5 นิ้ว
- Hammer หนัก 10 lb.
- Swelling Plate พร้อมขายึด มีเกลียวปรับความสูงต่ำได้
- สามขา (Tripod) สำหรับยึด Dial indicator เพื่อวัดอัตราการบวมของดินเมื่อแช่น้ำ
- Dial indicator วัดได้ 1 นิ้ว อ่านได้ละเอียด 0.001 นิ้ว
- น้ำหนักถ่วงทับ (Surcharge Weight) หนักแผ่นละ 5 ปอนด์
- Penetration piston เนื้อที่หน้าตัด 3 ตร.นิ้ว
- Loading device แบบ Hydraulic jack หรือ Screw jack มีอุปกรณ์วัดแรงได้ 10,000 ปอนด์
- ถังน้ำแช่ดินพร้อม mold
- ตะแกรงร่อนดินเบอร์ 4 และ 3/4 นิ้ว
- เครื่องชั่ง, ภาดคลุกดิน, เหล็กปาดสันตรง (Straight edge), กระจบอกลงน้ำ

#### ขั้นตอนการทดลองสำหรับตัวอย่างดินที่ไม่ต้องมีการแช่น้ำ (Unsoaked CBR Test)

- ชั่งดินที่เตรียมไว้ประมาณ 12 ปอนด์ หรือ 6 กก. และนำดินตัวอย่างประมาณ 100 กรัม เพื่อนำไปหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น (initial water content) ที่มีอยู่ในดินตัวอย่าง
- เตรียม mold ไว้ 2 ชุด ชั่งหาน้ำหนัก mold (เฉพาะ mold ไม่รวม base plate)
- ประกอบ mold เข้ากับ base plate และ spacer (ขนาด  $\varnothing 6" \times 2"$ ) ใช้กระดาษกรอง  $\varnothing 6"$  ปูทับบน spacer เพื่อป้องกันไม่ให้ดินเกาะติดกับแผ่นเหล็ก



- กระทบดินอัดแน่นใน mold ตามวิธี compaction test ASTM D 1557 optimum moisture content  $\pm 2\%$
- หลังจากบดอัดจนครบจำนวนชั้นและจำนวนครั้งแล้วถอด collar ออก ใช้ไม้บรรทัดเหล็ก (Straight edge) ปาดดินส่วนที่สูงเกินขอบ mold พร้อมกับซ่อมแต่ผิวบนของดินตัวอย่างให้เรียบเสมอกับปาก mold
- ถอด base plate และ spacer disc ออก นำ mold และดินไปชั่งหาน้ำหนักเพื่อจะนำไปหา wet density
- เอากระดาษกรองวางบน base plate เพื่อป้องกันไม่ให้ดินเกาะติดแผ่นเหล็กประกอบ mold ที่มีดินอัดแน่นนี้เข้ากับ base plate โดยให้ปาก mold ด้านที่มีดินเสมอกว้างบน base plate และส่วนที่มีช่องว่าง 2.5 นิ้วอยู่ด้านบน
- วางแผ่นเหล็ก surcharge อย่างน้อย 10 ปอนด์ ลงบนดินตัวอย่างใน mold
- จัดวาง mold พร้อมดินตัวอย่างเข้าเครื่องกดทดลองซึ่งมี piston ขนาดพื้นที่หน้าตัด 3 ตร.นิ้ว ประกอบติดอยู่ จัดให้ผิวหน้าของดินใน mold แตะสัมผัสกับ piston ดังกล่าว จัดเข็ม dial gauge ที่จะใช้วัด penetration ให้อยู่ที่จุดศูนย์
- จัดการ Load ในอัตรา 0.05 นิ้วต่อนาที พร้อมกับอ่านค่าน้ำหนักที่ตรงกับ penetration 0, 0.025, 0.050, 0.750, 0.100, 0.150, 0.200, 0.250, 0.300, 0.400 และ 0.500 นิ้ว
- เสร็จแล้วถอด mold ออกจากเครื่องกดทดลองเก็บตัวอย่างดินตรงกลางตามแนวตั้งประมาณ 100 กรัม (finer grained soil) หรือประมาณ 500 กรัม (coarse grained soil) นำไปหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น (water content)

#### ขั้นตอนการทดลองสำหรับตัวอย่างดินที่มีการแช่น้ำ (Soaked sample) ทำข้อ 12 - 18 เพิ่มเติม

- วางแผ่นเหล็ก surcharge หนัก 10 ปอนด์ ลงบนดินตัวอย่างใส่ swell plate สำหรับวัดอัตราการบวมของดิน ซึ่งมีด้านชั้นเกลียวขึ้นลงได้ติดอยู่กลาง plate ก่อนวางแผ่นเหล็ก surcharge ลงบนดินตัวอย่างจะต้องเอากระดาษกรองวางคั่นใต้แผ่น surcharge เสียก่อนเพื่อป้องกันไม่ให้ดินติดแน่นกับแผ่นเหล็กหลังจากแช่น้ำแล้ว
- แช่ mold ที่เตรียมในภาชนะที่เตรียมไว้ ให้น้ำท่วม surcharge ประมาณ 1 นิ้ว ใช้ dial gauge อ่านได้ละเอียด 0.001 นิ้ว ยึดติดกับ tripod แล้ววางบนปาก mold จัดให้ปลายของ dial gauge แตะสัมผัสกับก้าน swelling plate เพื่อวัดค่าการบวมตัวของดินต่อไป
- แช่ดินตัวอย่างไว้ประมาณ 4 วัน จดค่าการบวมตัวจาก dial gauge ทุกวันจนครบ 4 วัน (ถ้าหากค่าการบวมตัวคงที่อาจจะหยุดอ่านได้หลังจากแช่น้ำแล้ว 48 ชั่วโมง)
- หลังจากแช่ครบ 4 วันแล้ว ยก mold ออกจากน้ำและวางตะแคง mold เพื่อรินน้ำทิ้ง และปล่อยให้ทิ้งไว้ 15 นาที เพื่อให้น้ำไหลออกจาก mold จนหมด
- นำ mold พร้อมดินไปชั่งหาน้ำหนัก
- ทำการทดลองตามขั้นตอนการทดลองสำหรับตัวอย่างดินที่ไม่ต้องมีการแช่น้ำ
- เก็บดินตัวอย่างจาก soaked sample ไปหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น

#### การคำนวณ

- คำนวณหาค่าแรงกดโดยสมการ;

$$test\ unit\ load = \frac{penetration}{3} (psi)$$

- เขียนกราฟระหว่าง Test unit load ในแกนตั้งกับ penetration ในแกนนอน จากค่าที่ได้ทั้ง Unsoaked และ Soaked sample ลงในกระดาษกราฟแผ่นเดียวกัน โดยปกติแล้วจะได้รูป curve โค้งคว่ำผ่านจุด origin แต่บางครั้งอาจจะปรากฏว่า curve ที่ได้มีรัศมีลักษณะโค้งหงายในช่วงแรก ซึ่งจำเป็นจะต้องมีการแก้ไขให้ได้ค่าที่ถูกต้องด้วยการลากเส้นตรงให้สัมผัสกับ curve ตรงส่วนที่มี slope ขั้นที่สุด ไปตัดกับแกนนอนที่จุดนั้นเป็น origin ใหม่และ origin ใหม่จะต้องอยู่ทางด้านขวาของ origin เดิมเสมอ เรียกว่า “Initial Correction”
- อ่านค่า test unit load จากกราฟที่ 0.1 และ 0.2 นิ้ว จากกราฟ และคำนวณหาค่า %CBR โดยค่า standard unit load ใช้ค่าจากตาราง

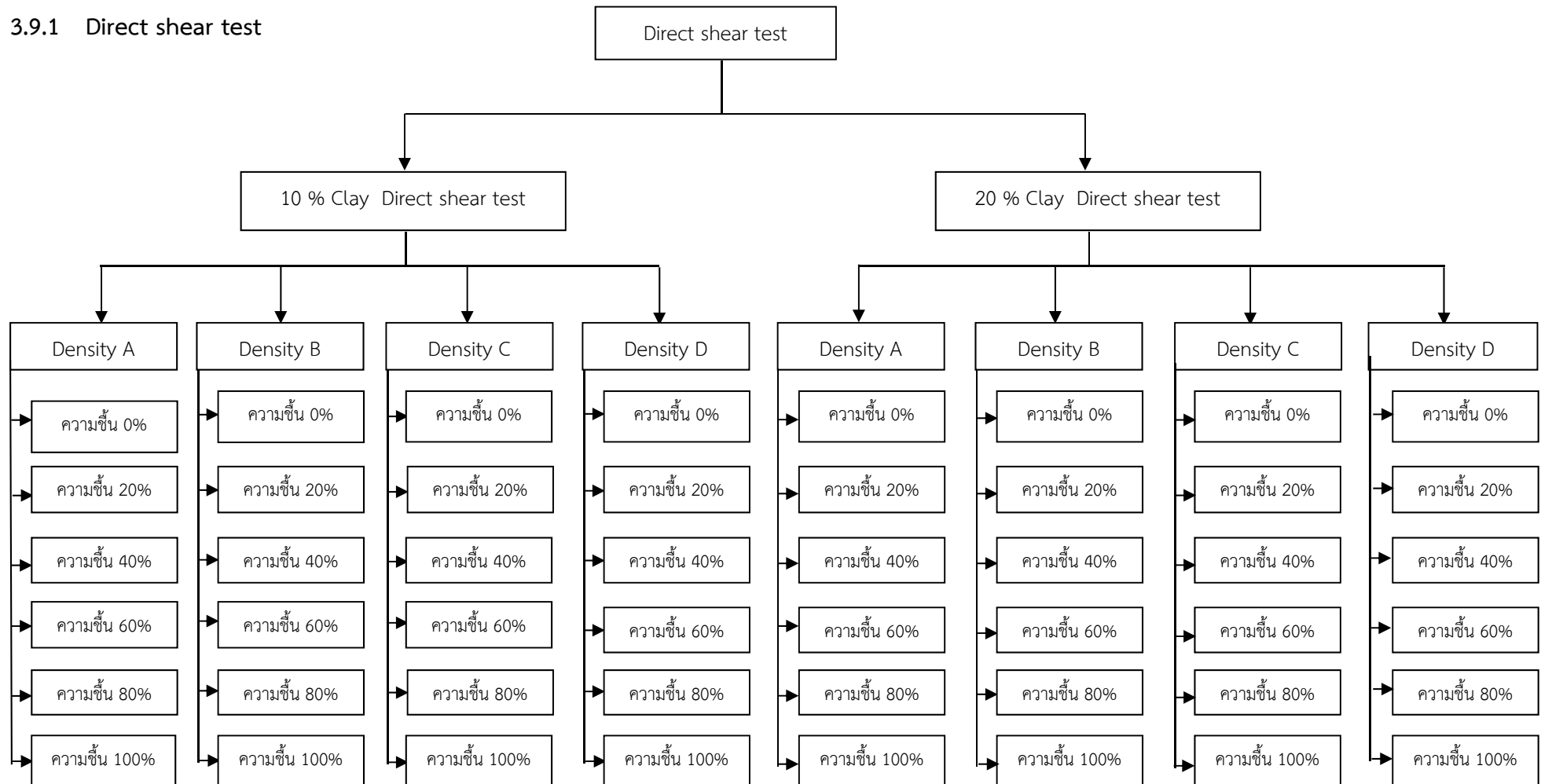
$$\%CBR = \frac{test\ unit\ load}{standard\ unit\ load} \times 100\%$$

- คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นและ dry density ของดินตัวอย่างทั้งสอง
- ถ้า % CBR ที่ 0.2 “มีค่ามากกว่า % CBR ที่ 0.1 ให้ทำการทดสอบอีกครั้ง ถ้าผลยังเหมือนเดิมให้ใช้ % CBR ที่ 0.2”

### 3.9 แผนการปฏิบัติงาน

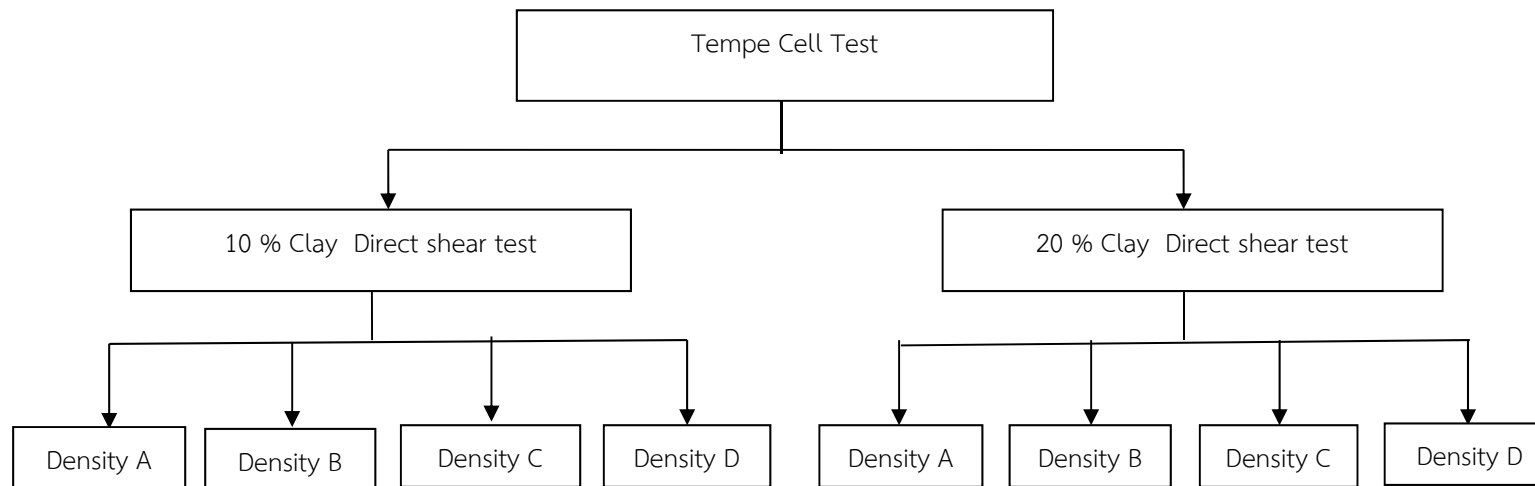
การเตรียมดินในการทดลองจะออกแบบดังนี้

#### 3.9.1 Direct shear test



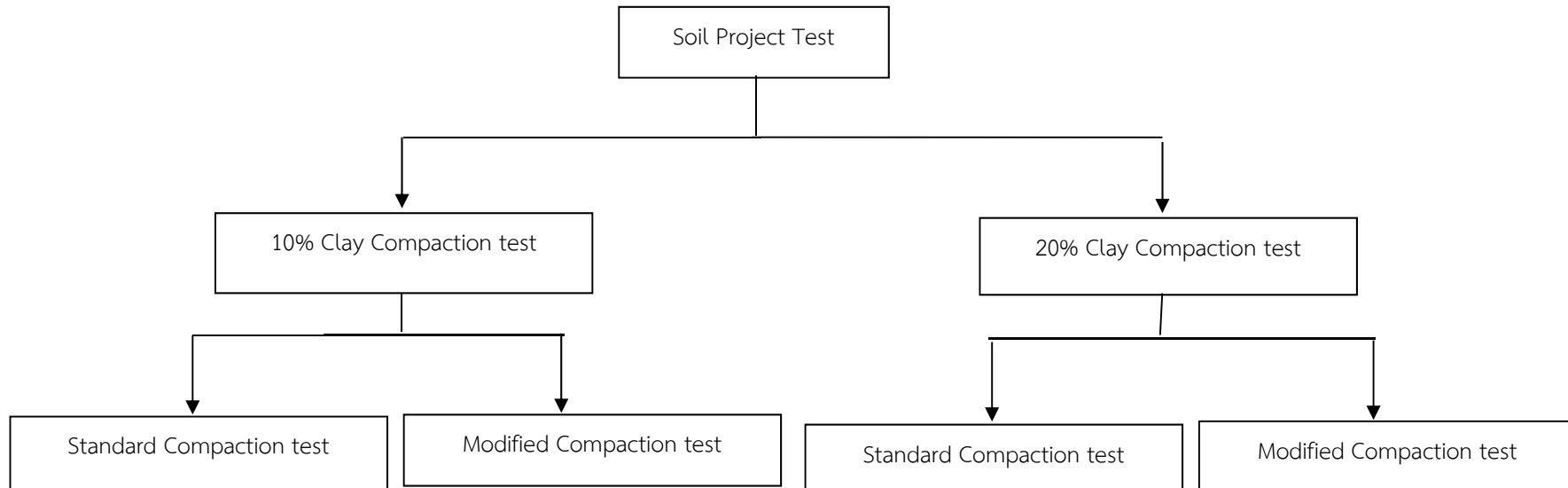
รูปที่ 3-2 แผนการทดสอบ direct shear

3.9.2 Tempe Cell Test

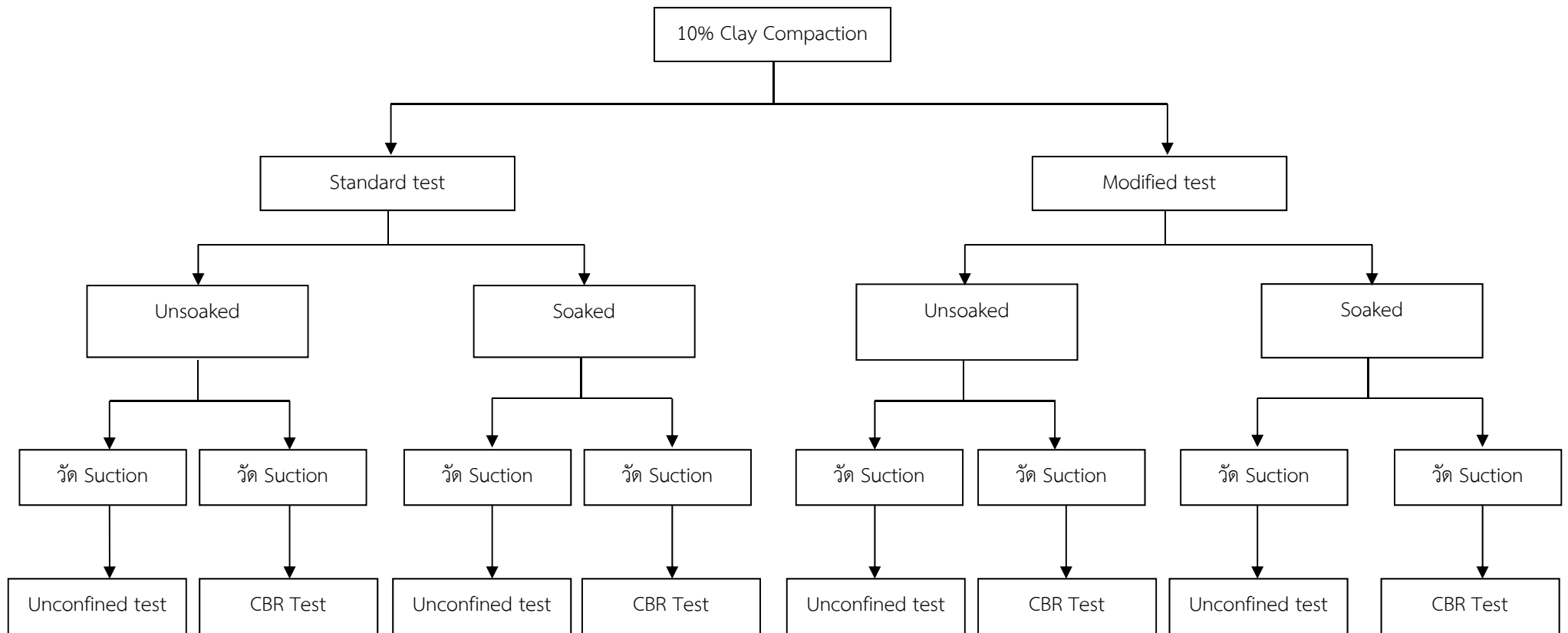


รูปที่ 3-3 แผนการทดสอบ Tempe cell

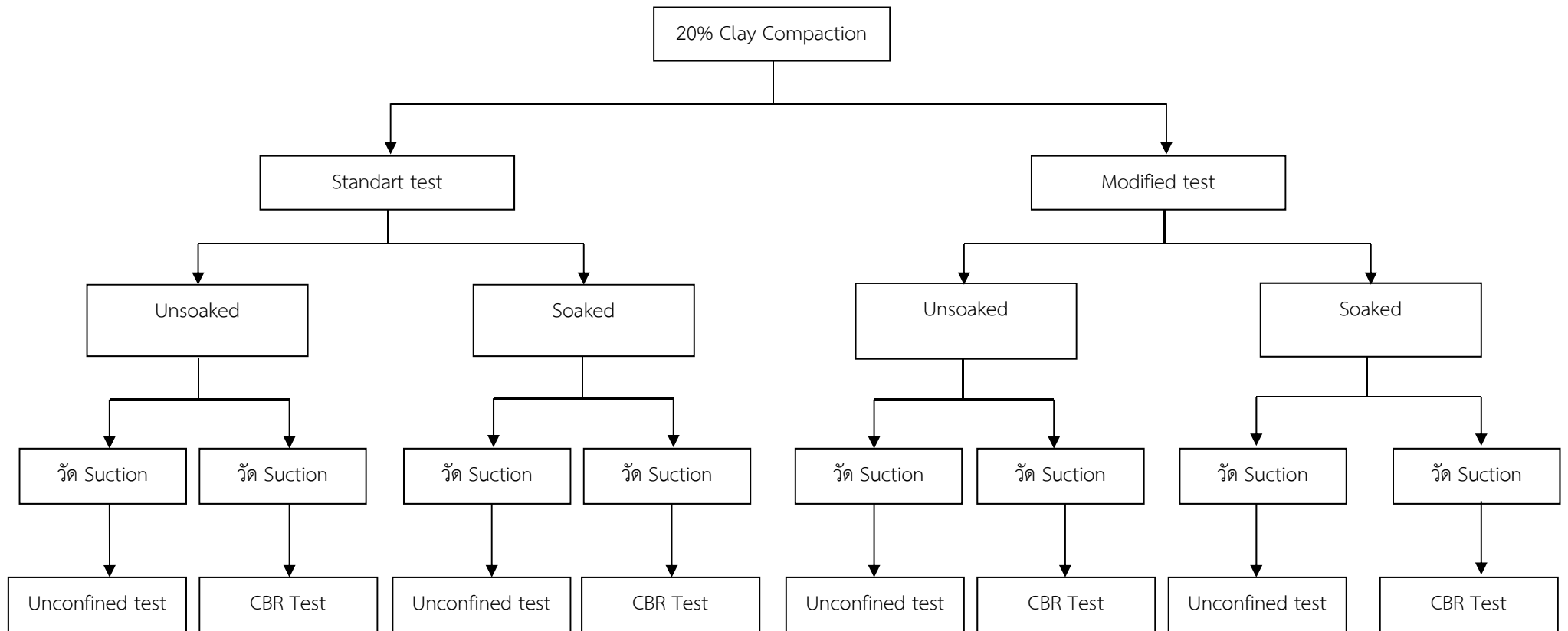
3.9.3 Unconfined and CBR test



รูปที่ 3-4 แผนการทดสอบ unconfined compression และ CBR (1)



รูปที่ 3-5 แผนการทดสอบ unconfined compression และ CBR (2)



รูปที่ 3-6 แผนการทดสอบ unconfined compression และ CBR (3)

## บทที่ 4 ผลการทดลอง direct shear และ Temper cell

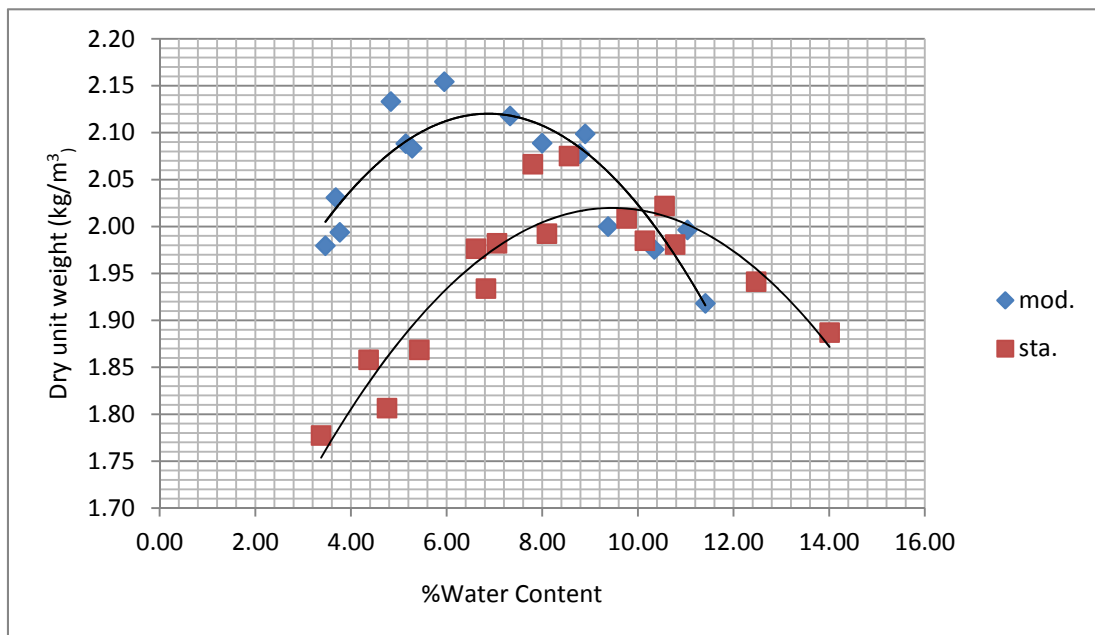
ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ผลการศึกษาจากการทดลองของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำในสภาพความชื้นและพลังงานในการบดอัดที่ต่างกัน การวิเคราะห์ผลกระทบต่อกำลังของดิน เพื่อให้เข้าใจถึงคุณสมบัติของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำอันได้แก่ มุมเสียดทานประสิทธิผล ( $\phi'$ ), มุมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานแรงเฉือนกับค่าแรงคูเมทริกที่จุดวิกฤติ  $\psi_{mf}(\phi^b)$ , และแรงดึงดูทางไฟฟ้า-เคมีระหว่างเม็ดดิน (Cohesion, C)

### 4.1 ผลกระทบของปริมาณความชื้นในการบดอัดต่อคุณสมบัติต่างๆ

#### 4.1.1 เปรียบเทียบการบดอัดดินที่พลังงานต่างกัน

ดินทรายที่ผสมดินเหนียว 10%

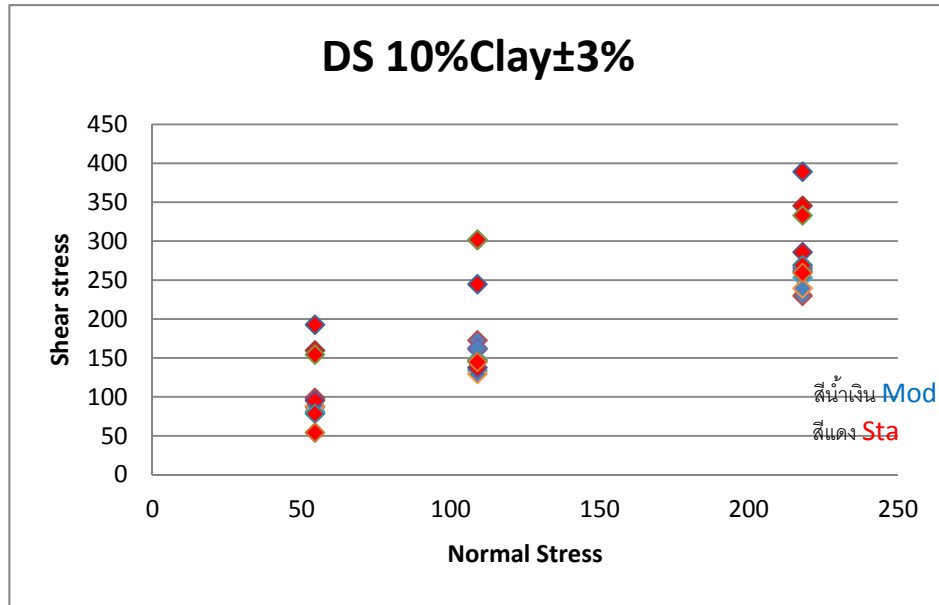
จากรูปที่ 4-1 จะเห็นได้ว่าการบดอัดที่พลังงานสูงจะให้ดินมีความหนาแน่นมากกว่าการบดอัดในพลังงานที่ต่ำกว่า และมีค่าความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการบดอัดต่ำกว่าการบดอัดในพลังงานที่ต่ำกว่า



รูปที่ 4-1 กราฟแสดงผล compaction curve 10%clay

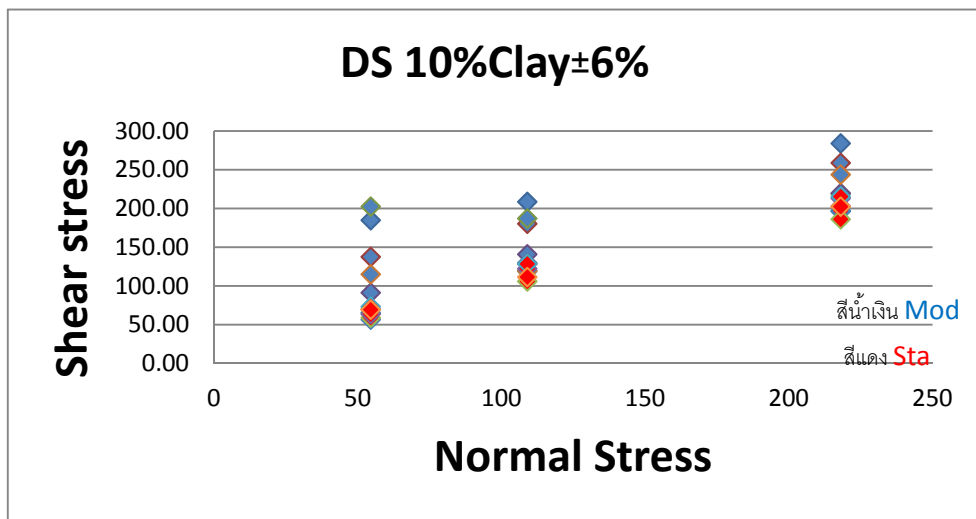
จากรูป 4-2 จะเห็นได้ว่า ค่า Shear stress Standard มากกว่า Shear stress Modify ค่าที่ได้ไม่ตรงตาม ทฤษฎีที่น่าจะเป็นคือค่าความหนาแน่นมาก Shear stress ต้องมาก ความหนาแน่นน้อย Shear stress น้อยกว่า สาเหตุที่เกิดเนื่องจากการทดสอบ Direct Shear เป็นการทดสอบที่ไม่แน่นอนอาจจะมีผลคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น





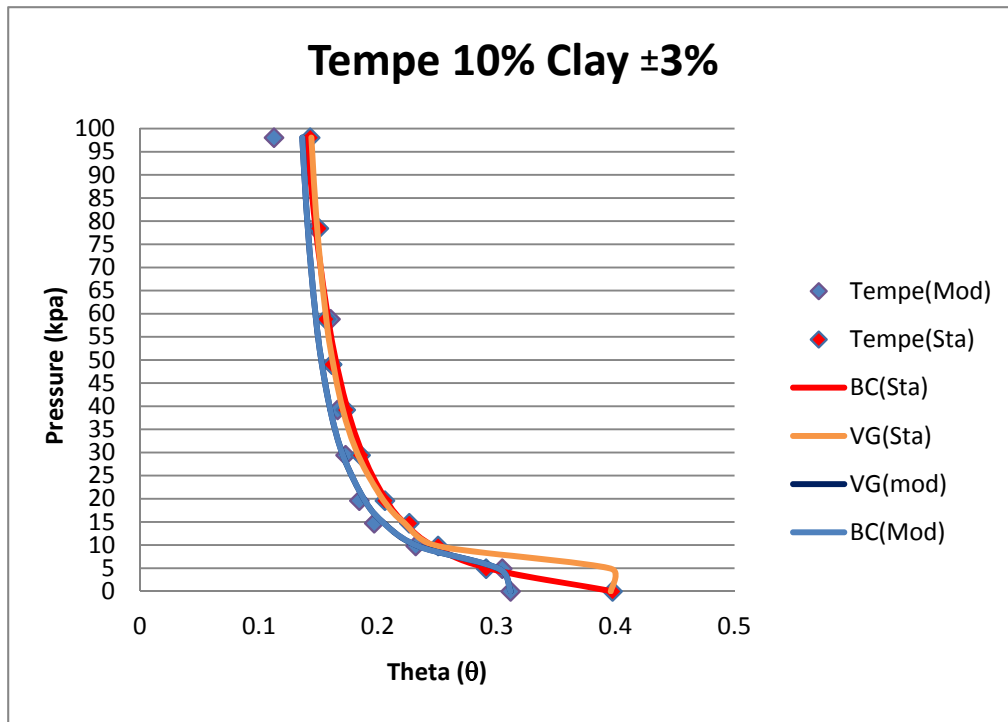
รูปที่ 4-2 กราฟแสดงผล Direct Shear 10%Clay ±3% ระหว่าง Modify กับ Standard

จากรูปที่ 4-3 จากกราฟจะเห็นได้ว่า Direct Shear 10%Clay ±6% Modify มีค่า Shear stress มากกว่า Direct Shear 10%Clay ±6% Standard จะเห็นได้ว่าเมื่อความหนาแน่นมากเพิ่มมากขึ้นค่า Shear stress เพิ่มขึ้นไปด้วย อันเนื่องมาจาก ความหนาแน่นมากขึ้นการเสียดทานก็มากขึ้นตาม ทำให้กำลังเสียดทานของดินมากตามไปด้วย



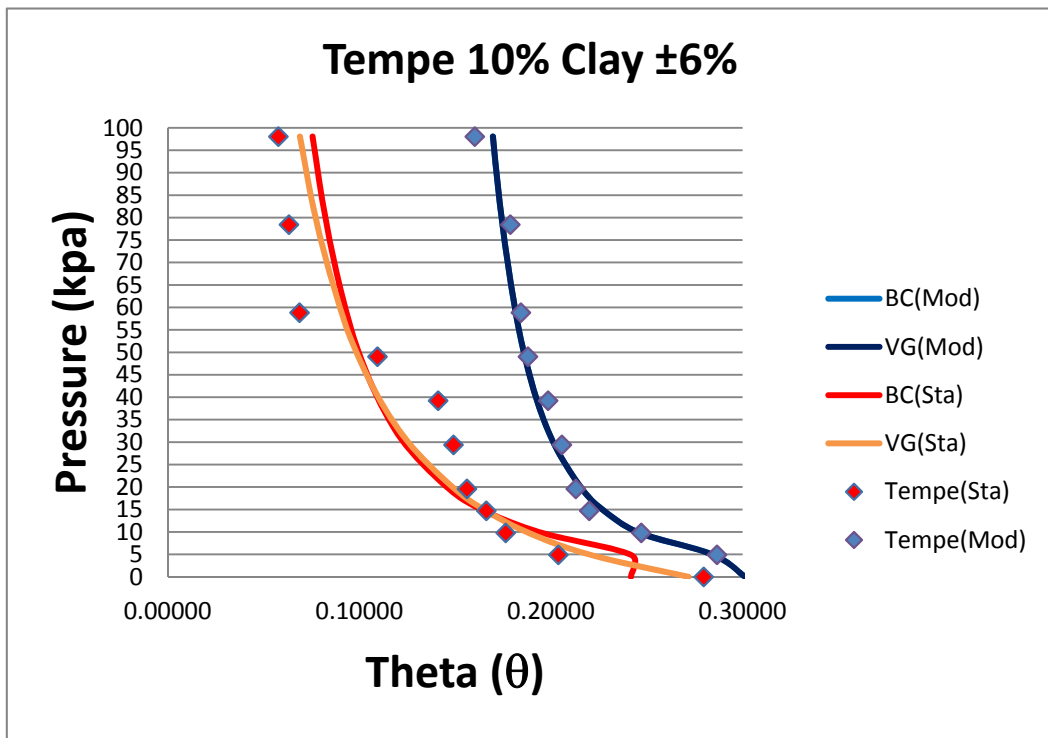
รูปที่ 4-3 กราฟแสดงผล Direct Shear 10%Clay ±6% ระหว่าง Modify กับ Standard

จากรูป 4-4 จากกราฟผลการทดลองจะเห็นได้ว่า 10%Clay  $\pm$ 3% Modify มีความหนาแน่นมากกว่า 10%Clay  $\pm$ 3% Standard ผลการทดลองที่ได้ดังนี้ 10%Clay  $\pm$ 3% Modify มีค่า Theta เริ่มต้น น้อยกว่า 10%Clay  $\pm$ 3% Standard เพราะความหนาแน่นแห้งมากก็จะส่งผลให้ช่องว่างน้อยลง จึงทำให้ Theta เริ่มต้น น้อยลงตามไปด้วย จะเห็นได้ว่า Pressure ที่เพิ่มขึ้น ค่า Theta จะเปลี่ยนแปลงดังนี้ 10%Clay  $\pm$ 3% Modify ค่า pressure เพิ่มขึ้น Theta จะลดลงต่ำกว่า 10%Clay  $\pm$ 3% Standard



รูปที่ 4-4 กราฟแสดงผล Tempe Cell 10%Clay  $\pm$ 3% ของ Modify กับ Standard ระหว่าง Pressure กับ Theta

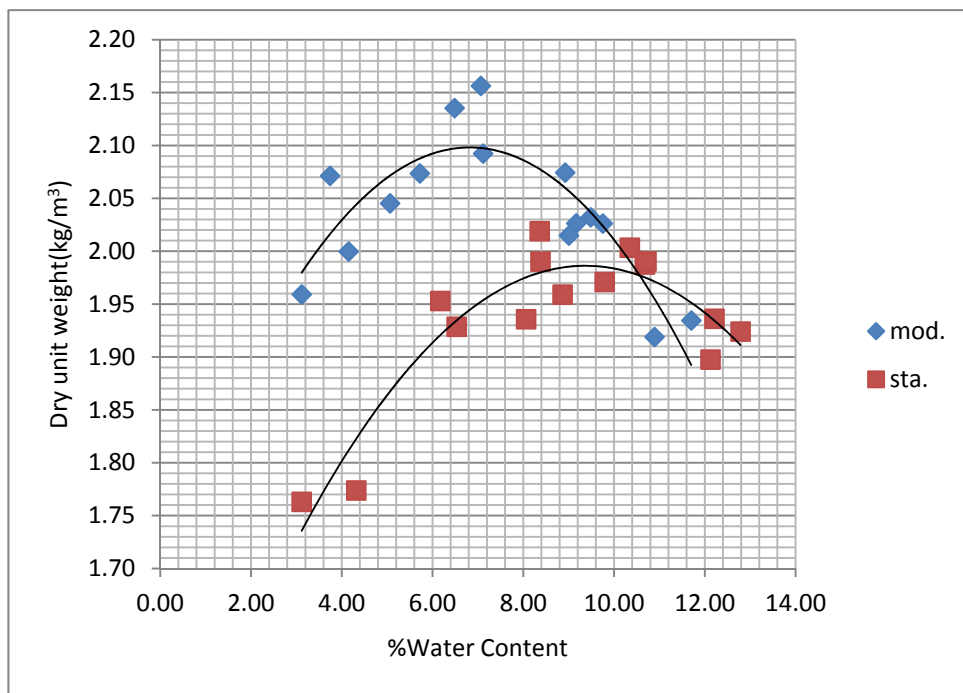
จากรูป 4-5 จากกราฟ compaction curve จะเห็นได้ว่า 10%Clay  $\pm$ 6% Modify มีความหนาแน่นแห้งที่มากกว่า 10%Clay  $\pm$ 6% Standard จึงส่งผลให้การทดลองมีค่าดังนี้ เมื่อ Pressure ที่เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นที่มากกว่าค่า Theta ที่ลดลงจะลดลงต่ำกว่า ความหนาแน่นที่น้อยกว่า



รูปที่ 4-5 กราฟแสดงผล Tempe Cell 10%Clay  $\pm 6\%$  ของ Modify กับ Standard ระหว่าง Pressure กับ Theta

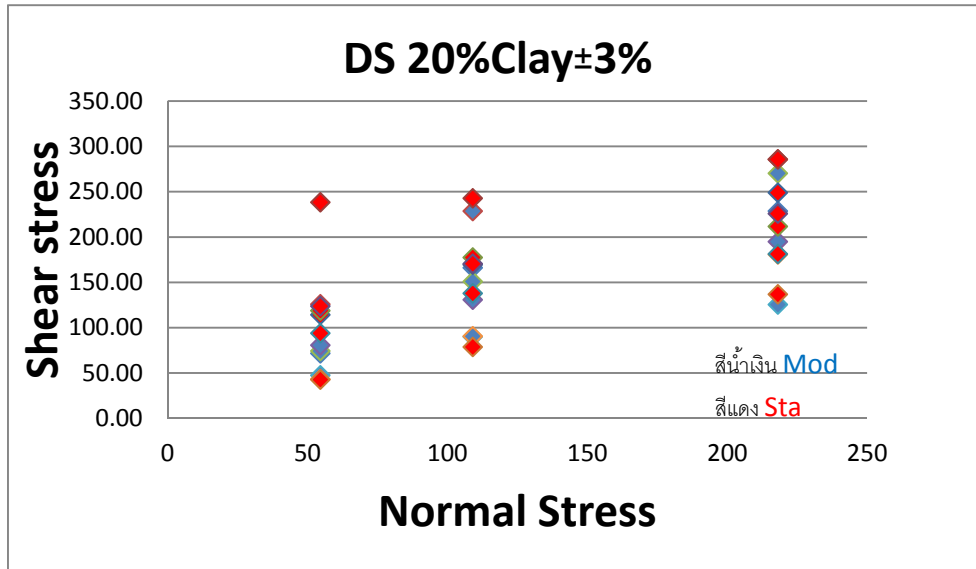
ดินทรายที่ผสมดินเหนียว 20%

จากรูปที่ 4-6 จะเห็นได้ว่ามีลักษณะเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.1 แสดงว่าผลการทดลองดังกล่าวเป็นเช่นเดียวกันรูปที่ 4-1



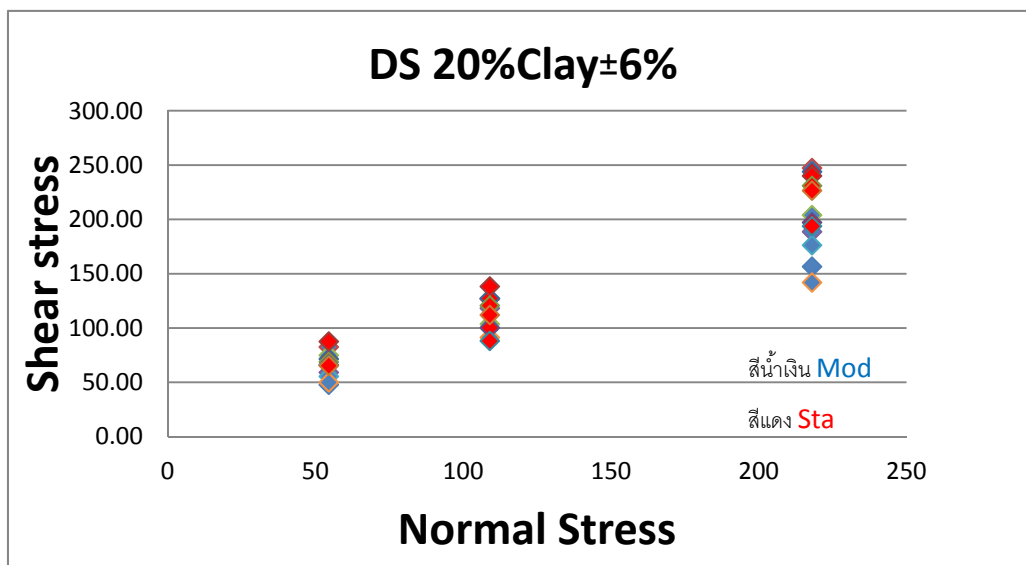
รูปที่ 4-6 กราฟแสดงผล compaction curve 20%clay

รูปที่ 4-7 จะเห็นได้ว่า Direct Shear 20%Clay  $\pm$ 3% Standard มีค่า Shear stress มากกว่า Direct Shear 20%Clay  $\pm$ 3% Modify แต่ค่า Shear stress ของ Modify และ Standard มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากค่าความหนาแน่นที่บดอัดได้นั้นใกล้เคียงกันมาก คือ 1.939 และ 1.922 ตามลำดับ กราฟนี้ทำให้เห็นว่าเมื่อความหนาแน่นเดียวกัน กำลังรับแรงเฉือนจะต้องใกล้เคียงกัน



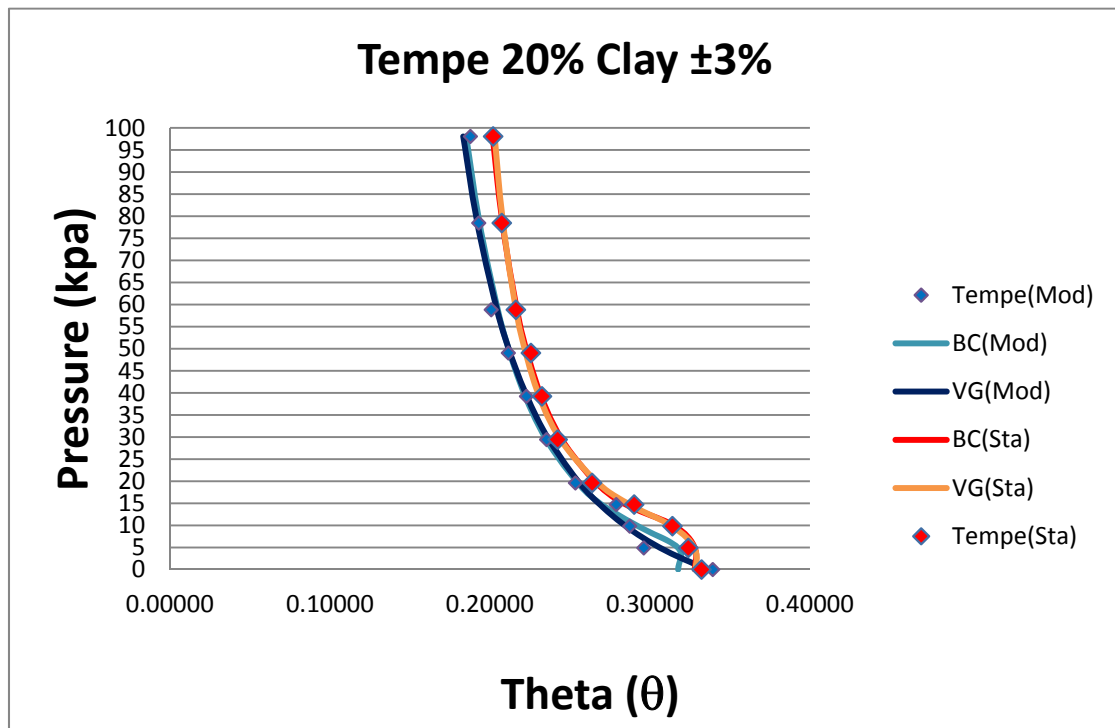
รูปที่ 4-7 กราฟแสดงผล Direct Shear 20%Clay  $\pm$ 3% ระหว่าง Modify กับ Standard

รูปที่ 4-8 จะเห็นได้ว่า Direct Shear 20%Clay  $\pm$ 6% Modify มีค่า Shear stress สลับกันมากน้อยกับ Direct Shear 20%Clay  $\pm$ 6% Standard เนื่องจากความหนาแน่นมากกำลังรับแรงเฉือนก็จะมากขึ้นตาม และจะเห็นว่าค่า Shear stress ที่มีค่าใกล้เคียงกันนั้น อันเนื่องมาจากค่าความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกัน



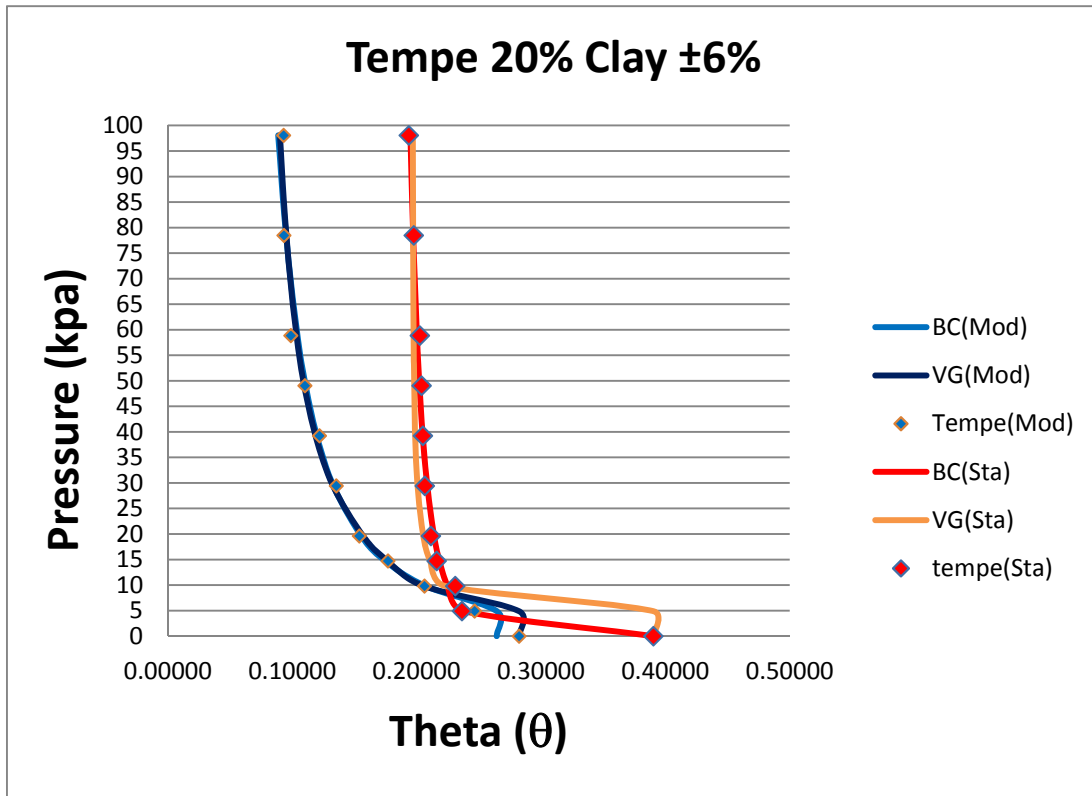
รูปที่ 4-8 กราฟแสดงผล Direct Shear 20%Clay  $\pm$ 6% Modify กับ Standard ระหว่าง Shear stress กับ Normal stress

จากรูป 4-9 จากกราฟ compaction curve 20% clay จะเห็นได้ว่า 20%Clay  $\pm$ 3% Modify มีความหนาแน่นมากกว่า 20%Clay  $\pm$ 3 Standard ผลการทดลองที่ได้ดังนี้ 20%Clay  $\pm$ 3% Modify มีค่า Theta เริ่มต้น น้อยกว่า 20%Clay  $\pm$ 3% Standard เพราะความหนาแน่นแห้งมากก็จะส่งผลให้ช่องว่างน้อยลง จึงทำให้ Theta เริ่มต้นน้อยลงตามไปด้วย จะเห็นได้ว่า Pressure ที่เพิ่มขึ้น ค่า Theta จะเปลี่ยนแปลงดังนี้ ความหนาแน่นมากกว่า ค่า pressure เพิ่มขึ้น Theta จะลดลงต่ำกว่า ความหนาแน่นที่น้อยกว่า



รูปที่ 4-9 กราฟแสดงผล Tempe Cell 20%Clay  $\pm$ 3% ของ Modify กับ Standard ระหว่าง Pressure กับ Theta

จากรูป 4-10 จากกราฟ compaction curve 20% clay จะเห็นได้ว่า 20%Clay  $\pm$ 3% Modify มีความหนาแน่นมากกว่า 20%Clay  $\pm$ 3 Standard ผลที่ได้จาก Tempe Cell สรุปได้ดังนี้ กราฟที่มีความหนาแน่นมากค่า Theta เริ่มต้น จะน้อยเนื่องมาจาก ความหนาแน่นมากปริมาณช่องว่างก็น้อย เมื่อ Pressure เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นที่น้อยกว่าก็จะมีค่า Theta ที่ช่วงแรกลดลงอย่างมาก นั่นหมายถึง เมื่อความหนาแน่นที่น้อยกว่า จะให้ค่า  $\psi^b$  ที่น้อยกว่าความหนาแน่นที่มากกว่า

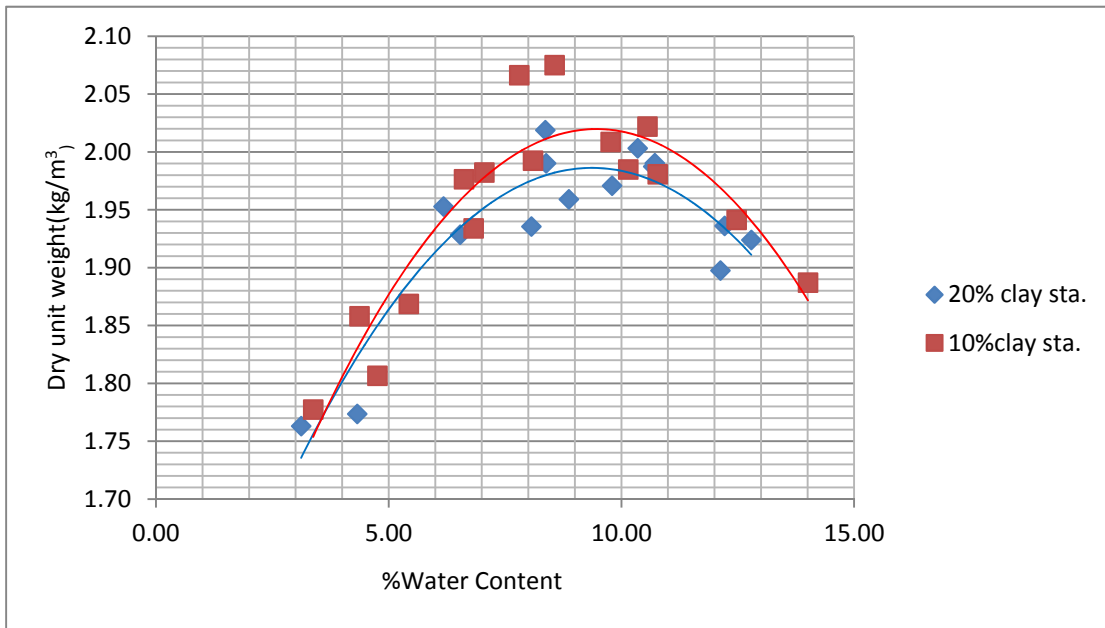


รูปที่ 4-10 กราฟแสดงผล Tempe Cell 20%Clay  $\pm 6\%$  ของ Modify กับ Standard ระหว่าง Pressure กับ Theta

#### 4.1.2 เปรียบเทียบการบดอัดที่ปริมาณดินเหนียวต่างกัน

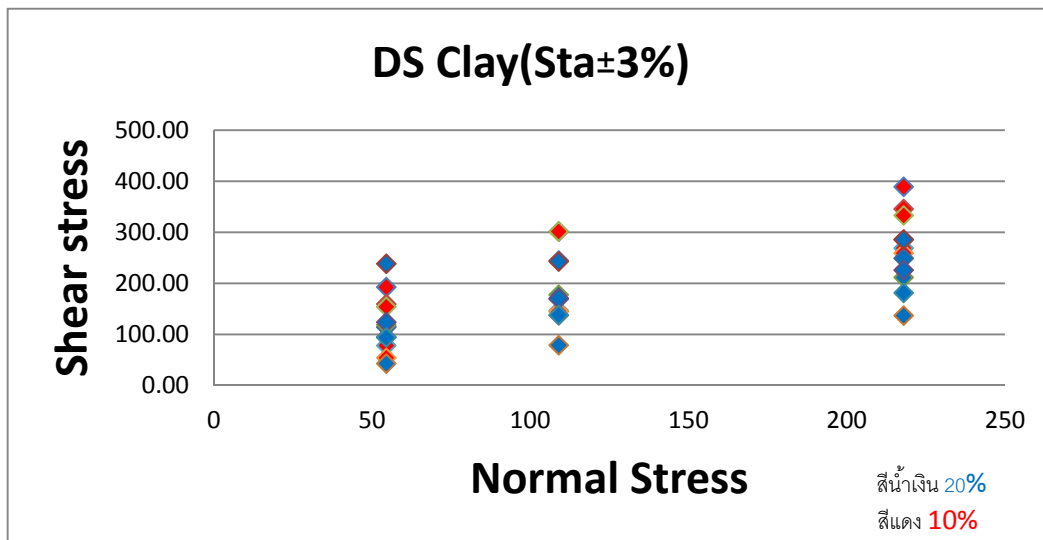
##### การทดสอบมาตรฐาน (Standard Proctor Test)

จากรูปที่ 4-11 จะเห็นว่าที่พลังงานในการบดอัดเดียวกัน ที่ส่วนผสมของดินต่างกันจะสังเกตได้ว่าดินทรายที่มีปริมาณดินเหนียวต่ำกว่าจะมีค่าความหนาแน่นที่มากกว่าดินทรายที่ผสมดินเหนียวมากกว่า เป็นเพราะว่าปริมาณดินเหนียวที่ถูกเพิ่มขึ้นไป อาจมีผลทำให้การบดอัดทำได้ยากยิ่งขึ้นความหนาแน่นจากการบดอัดที่พลังงานหนึ่งๆจึงลดลง



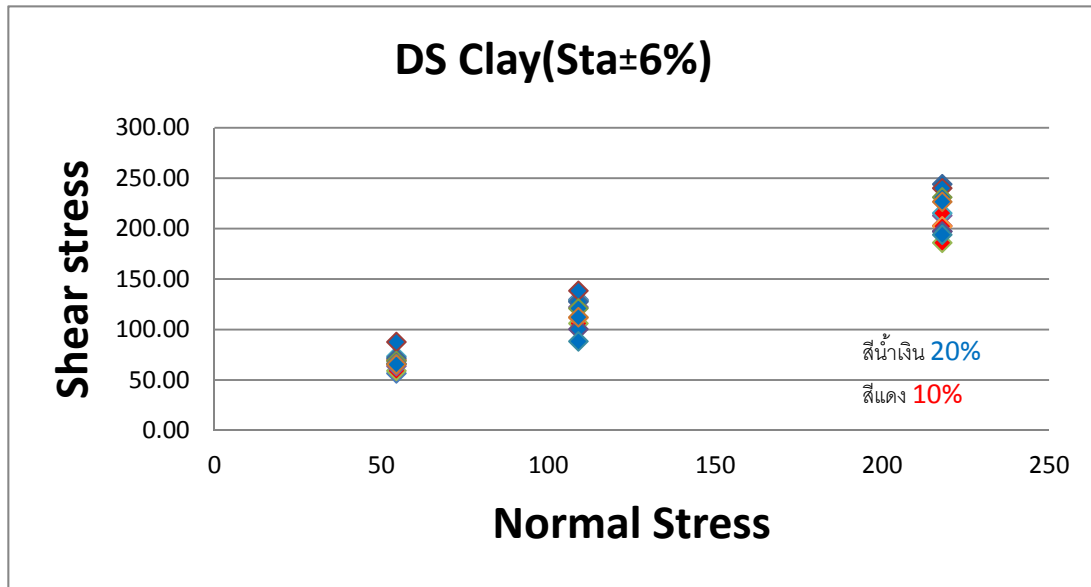
รูปที่ 4-11 กราฟแสดงผล compaction curve standard

จากรูป 4-12 จะเห็นได้จากการทดลองว่า Direct Shear 10% Clay Standard  $\pm 3\%$  มีค่า Shear stress ที่มากกว่า Direct Shear 20% Clay Standard  $\pm 3\%$  เนื่องจาก Direct Shear 10% Clay Standard  $\pm 3\%$  มีค่าความหนาแน่นที่มากกว่า Direct Shear 20% Clay Standard  $\pm 3\%$  จึงส่งผลให้ Direct Shear 10% Clay Standard  $\pm 3\%$  มีค่า Shear stress ที่มากกว่า



รูปที่ 4-12 กราฟแสดงผลระหว่าง Shear stress กับ Normal stress ของ Direct Shear 10% Clay Standard  $\pm 3\%$  และ Direct Shear 20% Clay Standard  $\pm 3\%$

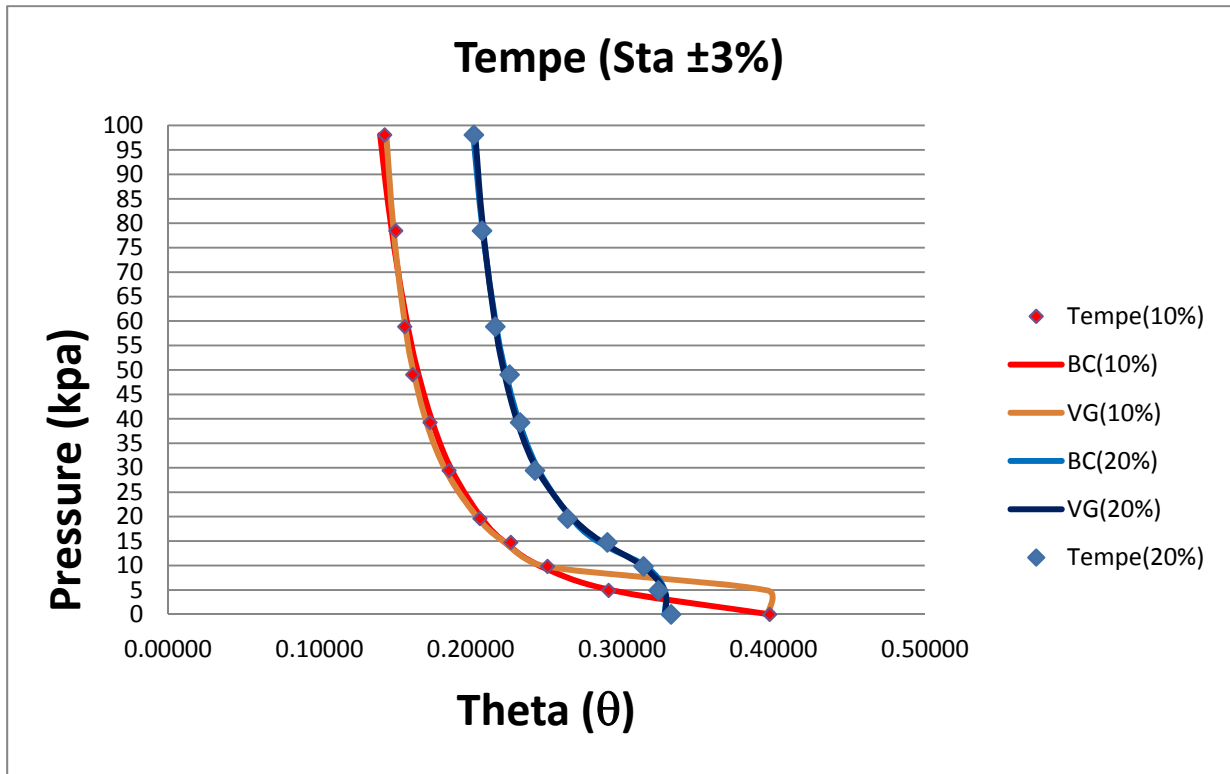
จากรูป 4-13 จะเห็นได้ว่า ค่า Shear stress ที่มีค่าใกล้เคียงกันนั้น อันเนื่องมาจากความหนาแน่นของ Direct Shear 10% Clay Standard  $\pm 3\%$  และ Direct Shear 20% Clay Standard  $\pm 3\%$  มีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่ขณะที่ 20% Clay Standard  $\pm 3\%$  มีความหนาแน่นน้อยกว่าแต่กำลังรับแรงเฉือนมากกว่า อาจจะเป็นเพราะว่าดินเหนียวมากขึ้นส่งผลกำลังรับแรงมากขึ้น



รูปที่ 4-13 กราฟแสดงผลระหว่าง Shear stress กับ Normal stress ของ Direct Shear 10% Clay Standard  $\pm 6\%$  และ Direct Shear 20% Clay Standard  $\pm 6\%$

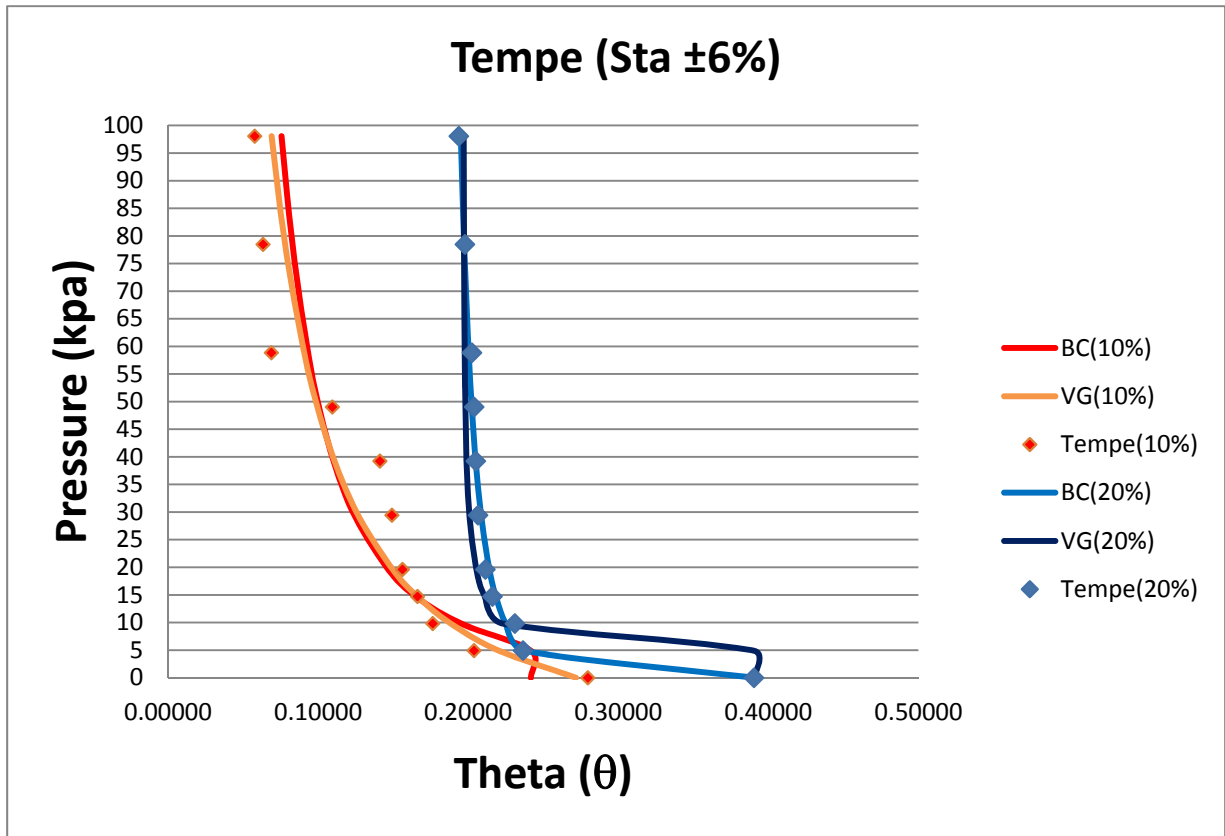
จากรูป 4-14 จากกราฟ compaction curve standard เห็นได้ว่า 10% Clay Standard  $\pm 3\%$  มีความหนาแน่นที่มากกว่า 20% Clay Standard  $\pm 3\%$  แต่การทดลองที่บดอัดได้ 10% Clay Standard  $\pm 3\%$  มีค่าความหนาแน่นที่น้อยกว่า 20% Clay Standard  $\pm 3\%$  จากกราฟจะเห็นได้ว่า 20% Clay Standard  $\pm 3\%$  มีความหนาแน่นที่มากกว่า มีค่า Theta เริ่มต้นน้อยกว่า 10% Clay Standard  $\pm 3\%$  ที่มีความหนาแน่นที่น้อยกว่า มีค่า Theta เริ่มต้นที่มากกว่า และการลดลงของ Theta จะลดลงตามนี้ เมื่อความหนาแน่นมากค่า Theta ที่ลดลงจะช้ากว่าความหนาแน่นที่น้อยกว่า





รูปที่ 4-14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Pressure กับ Theta ของ Tempe Cell 10% Clay Standard  $\pm 3\%$  กับ 20% Clay Standard  $\pm 3\%$

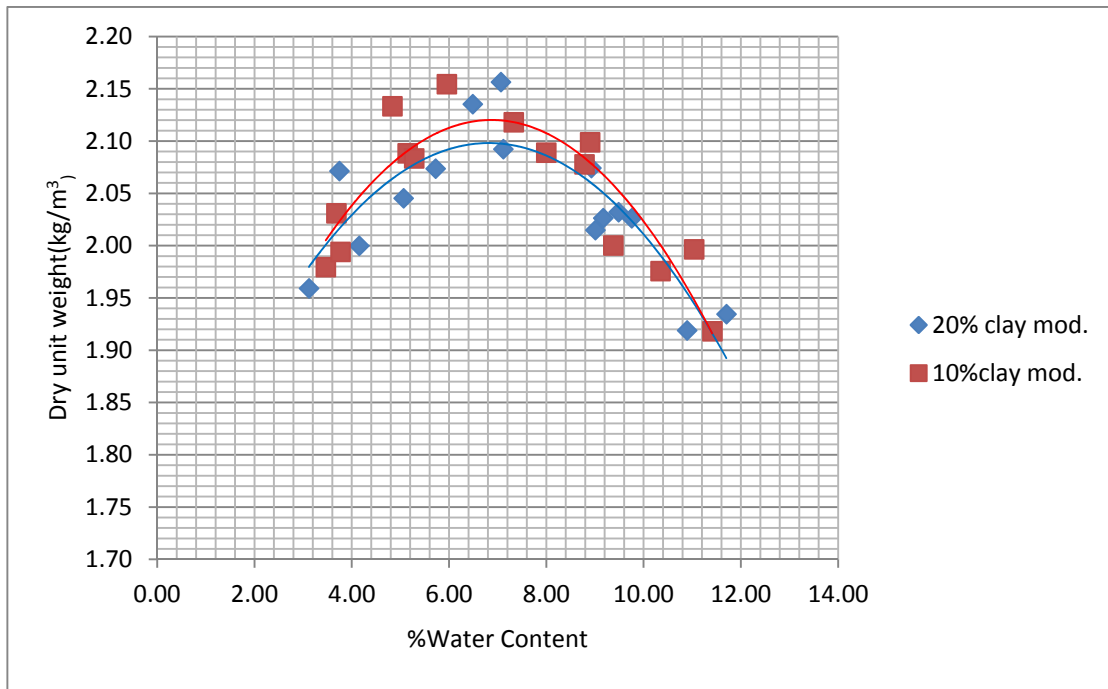
จากรูป 4-15 จากกราฟ compaction curve standard เห็นได้ว่า 10% Clay Standard  $\pm 6\%$  มีความหนาแน่นที่มากกว่า 20% Clay Standard  $\pm 6\%$  จากกราฟการทดลองจะเห็นได้ว่า 10% Clay Standard  $\pm 6\%$  มีความหนาแน่นมากกว่าและ ค่า Theta เริ่มต้นที่น้อยกว่าเนื่องจากเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ปริมาตรช่องว่างจะน้อยลง เมื่อความหนาแน่นที่น้อยกว่า จะให้ค่า  $\psi^b$  ที่น้อยกว่าความหนาแน่นที่มากกว่า



รูปที่ 4-15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Pressure กับ Theta ของ Tempe Cell 10% Clay Standard  $\pm 6\%$  กับ 20% Clay Standard  $\pm 6\%$

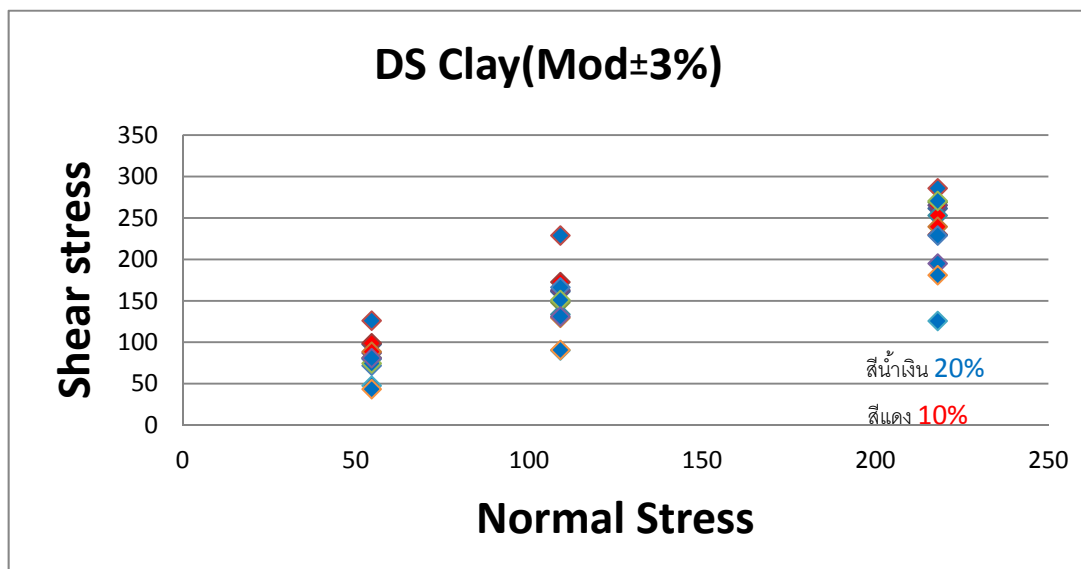
การทดสอบแบบโมดิไฟด์ (Modified Proctor Test)

จากรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่ามีลักษณะเช่นเดียวกับกับรูปที่ 4-6 แสดงว่าผลการทดลองดังกล่าวเป็นเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4-7



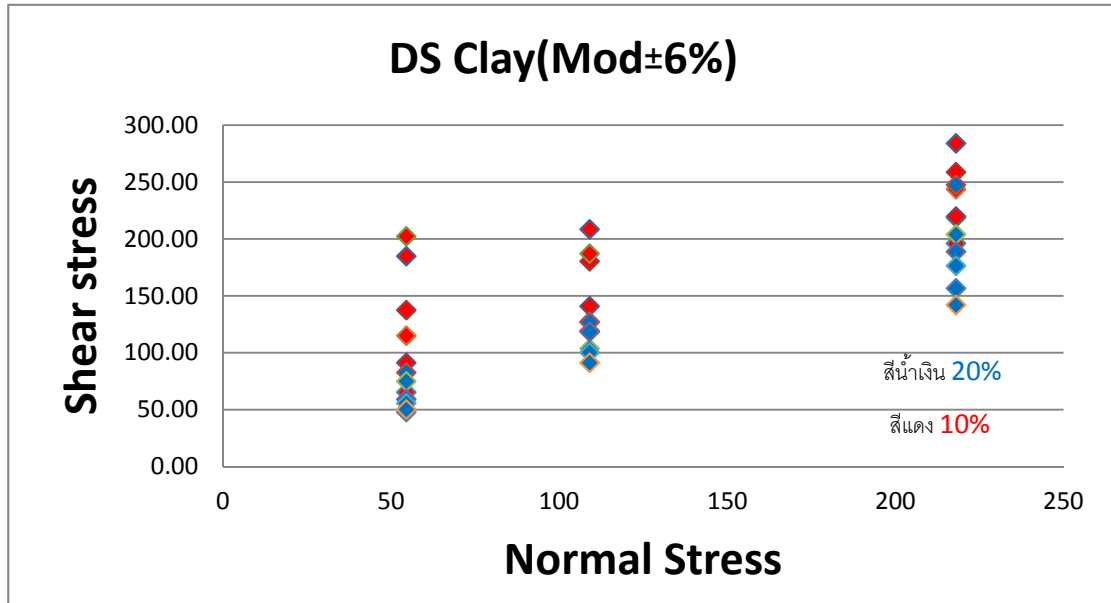
รูปที่ 4-16 กราฟแสดงผล compaction curve Modified

จากรูปที่ 4-11 จะเห็นได้จากการทดลองว่าค่าสูงสุด Shear stress ของ Direct Shear 20% Clay Modify  $\pm 3\%$  มีค่าที่มากกว่า Direct Shear 10% Clay Modify  $\pm 3\%$  เนื่องจากเปอร์เซ็นต์ดินเหนียวที่มากกว่าและความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกันทำให้สรุปได้ว่าเปอร์เซ็นต์ดินเหนียวที่มากกว่าทำให้กำลังรับแรงเฉือนมากกว่า



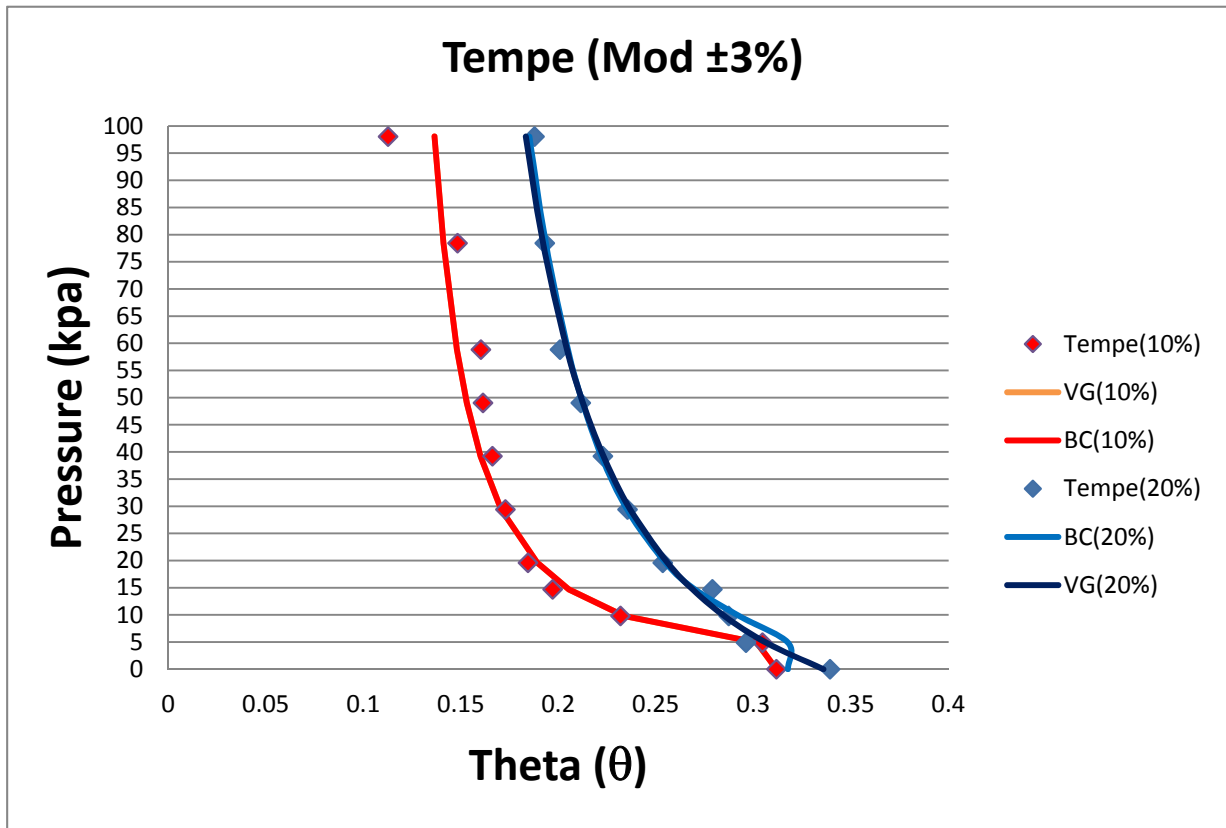
รูปที่ 4-17 กราฟแสดงผลระหว่าง Shear stress กับ Normal stress ของ Direct Shear 10% Clay Modify  $\pm 3\%$  และ Direct Shear 20% Clay Modify  $\pm 3\%$

จากรูปที่ 4-12 จะเห็นได้ว่าค่า Shear stress ของ Direct Shear 10% Clay Modify  $\pm 6\%$  มีค่ามากกว่า Direct Shear 20% Clay Modify  $\pm 6\%$  อันเนื่องมาจากความหนาแน่นที่มากกว่า ทำให้ดินมีกำลังรับแรงเฉือนที่มากขึ้นตามไปด้วย



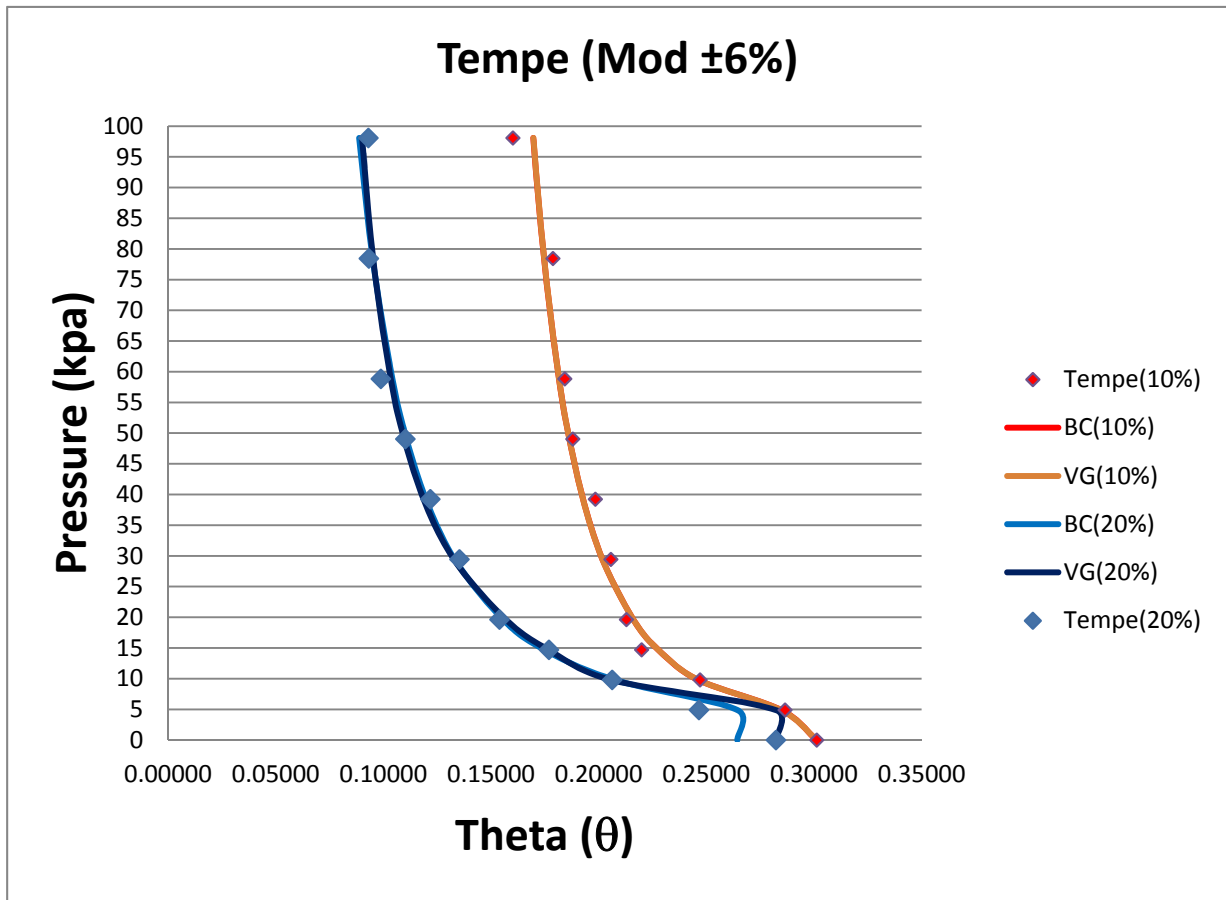
รูปที่ 4-18 กราฟแสดงผลระหว่าง Shear stress กับ Normal stress ของ Direct Shear 10% Clay Modify  $\pm 6\%$  และ Direct Shear 20% Clay Modify  $\pm 6\%$

จากรูป compaction curve Modified เห็นได้ว่า 10% Clay Modify  $\pm 3\%$  มีค่าความหนาแน่นที่มากกว่า 20% Clay Modify  $\pm 3\%$  จากกราฟจะเห็นได้ว่า 10% Clay Modify  $\pm 3\%$  มีค่า Theta เริ่มต้นน้อยกว่า 20% Clay Modify  $\pm 3\%$  เนื่องจากความหนาแน่นมาก ปริมาณช่องว่างน้อย จากกราฟก็จะเห็นได้ อีกว่ากราฟ 10% Clay Modify  $\pm 3\%$  ที่มีความหนาแน่นมากกว่าจะมีความชันของกราฟมากกว่าเนื่องจากเมื่อความหนาแน่นมากกว่าทำให้เมื่อ Pressure เพิ่มขึ้น Theta ลดลงน้อย



รูปที่ 4-19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Pressure กับ Theta ของ Tempe Cell 10% Clay Modify  $\pm 3\%$  กับ 20% Clay Modify  $\pm 3\%$

จากรูป compaction curve Modified เห็นได้ว่า 10% Clay Modify  $\pm 6\%$  มีค่าความหนาแน่นที่มากกว่า 20% Clay Modify  $\pm 6\%$  จากกราฟจะเห็นได้ว่า 20% Clay Modify  $\pm 6\%$  มีค่า Theta เริ่มต้นที่น้อยกว่า 10% Clay Modify  $\pm 6\%$  อาจเนื่องเกิดจากค่าความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกัน แต่จะเห็นว่ากราฟของ 10% Clay Modify  $\pm 6\%$  มีชันมากกว่า 20% Clay Modify  $\pm 6\%$  นั้นแสดงให้เห็นว่า ความหนาแน่นที่มากกว่า เมื่อ Pressure ที่เพิ่มขึ้นค่า Theta จะลดลงช้ากว่า ความหนาแน่นที่น้อยกว่า



รูปที่ 4-20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Pressure กับ Theta ของ Tempe Cell 10% Clay Modify ±6% กับ 20% Clay Modify ±6%

#### 4.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านกำลังด้วยทฤษฎีของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

ด้วยแนวคิดของ Terzaghi เกี่ยวกับกำลังต้านทานแรงเฉือนสามารถใช้ได้เพียงกับดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ แต่ด้วยเนื่องจากเมื่อดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำมีโพรงอากาศภายในดิน ดังนั้น สมการ  $\tau_f = c' + \sigma_f \tan \phi'$  ของ Terzaghi จึงไม่สามารถใช้ได้ และ Frenlund ได้มีน้ำเสนอสมการ  $\tau_f = c' + \sigma_{neff} \tan \phi' + \psi_{mf} \tan \phi^b$

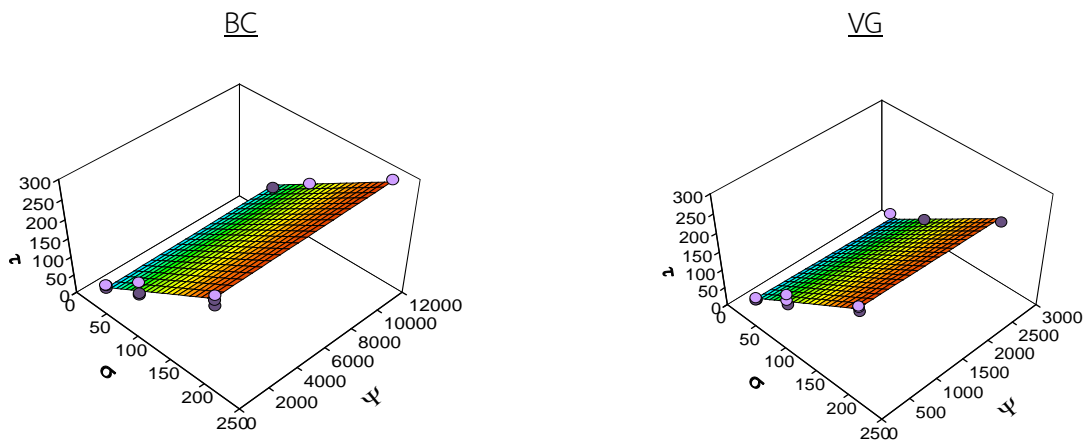
การวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาค่า  $c'$ ,  $\phi'$ ,  $\phi^b$  ซึ่งค่าเหล่านี้เป็นคุณสมบัติต่างๆของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งทำได้โดยใช้ค่า  $\tau$  กับ  $\sigma'$  ที่ได้จากการทำ Direct Shear และหาค่าของ  $\psi_{mf}$  จากการทำ Tempe Cell แล้วนำไปใส่สมการของ Frenlund คือ สมการ  $\tau_f = c' + \sigma_{neff} \tan \phi' + \psi_{mf} \tan \phi^b$  จึงสามารถทำให้เราทราบค่าของคุณสมบัติต่างๆของดินเหล่านี้ได้

เราสามารถสร้างกราฟแสดงขอบเขตการวิบัติได้ 2 วิธีคือ

1. Brook and Corey โดยสมการ คือ  $S_e = \begin{cases} \left(\frac{\psi}{\psi_b}\right)^{-\lambda} & (\psi > \psi_b) \\ 1 & (\psi \leq \psi_b) \end{cases}$

2. Van Genuchten โดยสมการ คือ  $\Theta = S_e = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right]^m : \begin{cases} m, n \\ m = 1 - 1/2n \\ m = 1 - 1/2n \end{cases}$

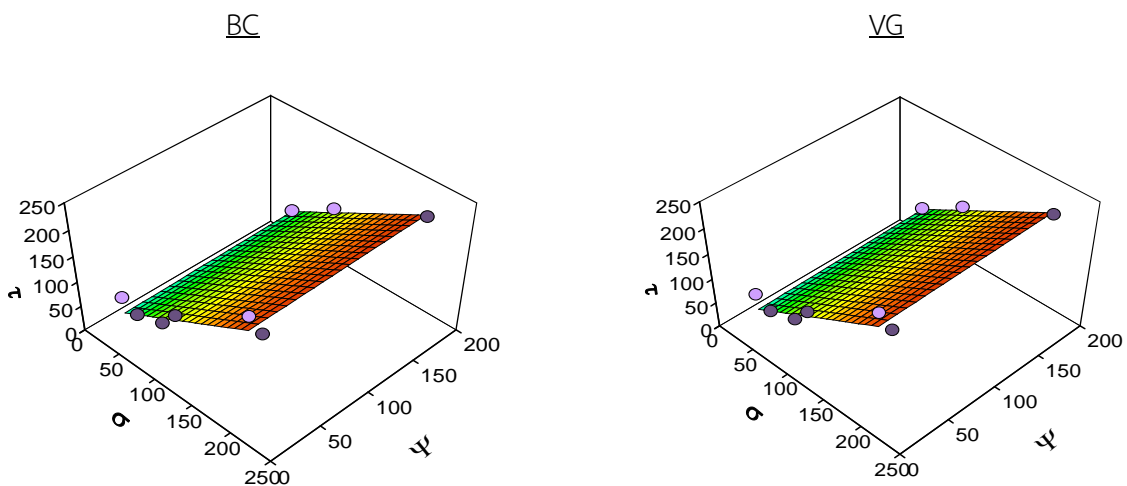
ได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4-21 ถึง 4-28 และสรุปในตารางที่ 4-1



$$\tau_f = 19.871 + \sigma_{\text{netf}} \tan(45.65) + \psi_{\text{mf}} \tan(45.65)$$

$$\tau_f = 19.871 + \sigma_{\text{netf}} \tan(45.65) + \psi_{\text{mf}} \tan(45.65)$$

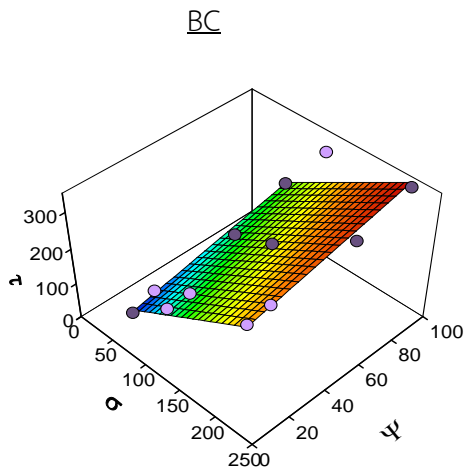
รูปที่ 4-21 10% Clay (MDF) ±3%



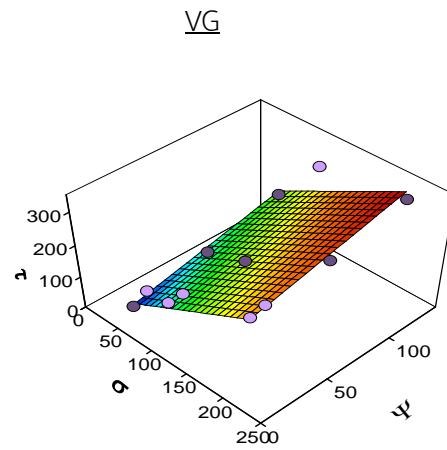
$$\tau_f = 41.47 + \sigma_{\text{netf}} \tan(38.68) + \psi_{\text{mf}} \tan(1.98)$$

$$\tau_f = 41.47 + \sigma_{\text{netf}} \tan(38.68) + \psi_{\text{mf}} \tan(1.98)$$

รูปที่ 4-22 10% Clay (MDF) ±6%

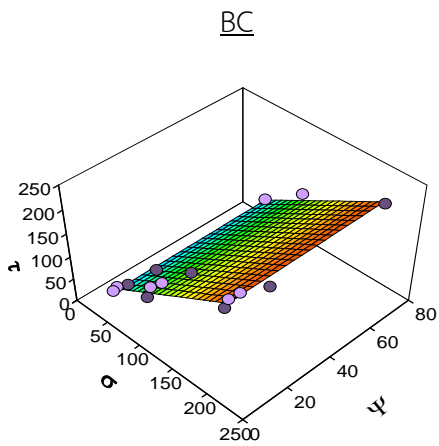


$$\tau_f = -10.14 + \sigma_{netf} \tan(48.72) + \psi_{mf} \tan(47.20)$$

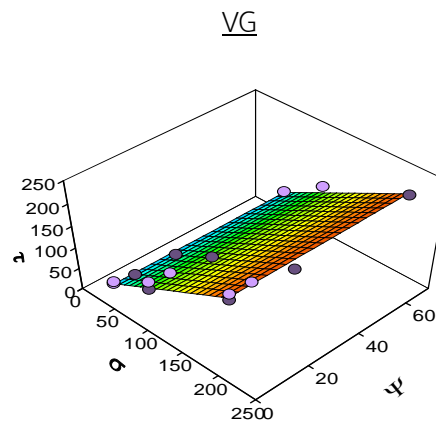


$$\tau_f = -7.54 + \sigma_{netf} \tan(48.72) + \psi_{mf} \tan(42.49)$$

รูปที่ 4-23 10% Clay (STD) ±3%



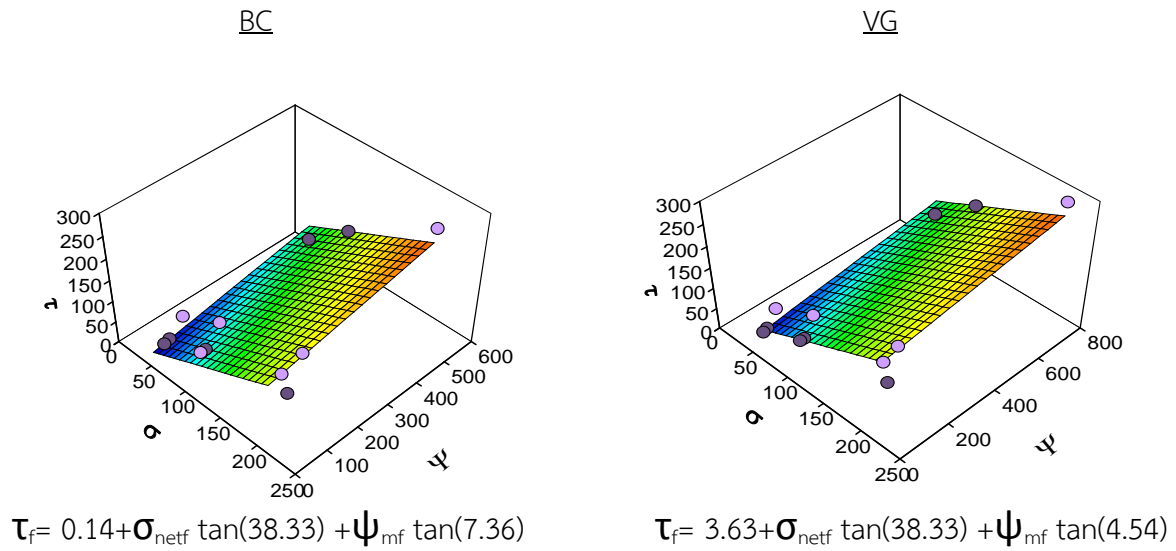
$$\tau_f = 24.47 + \sigma_{netf} \tan(39.64) + \psi_{mf} \tan(0.75)$$



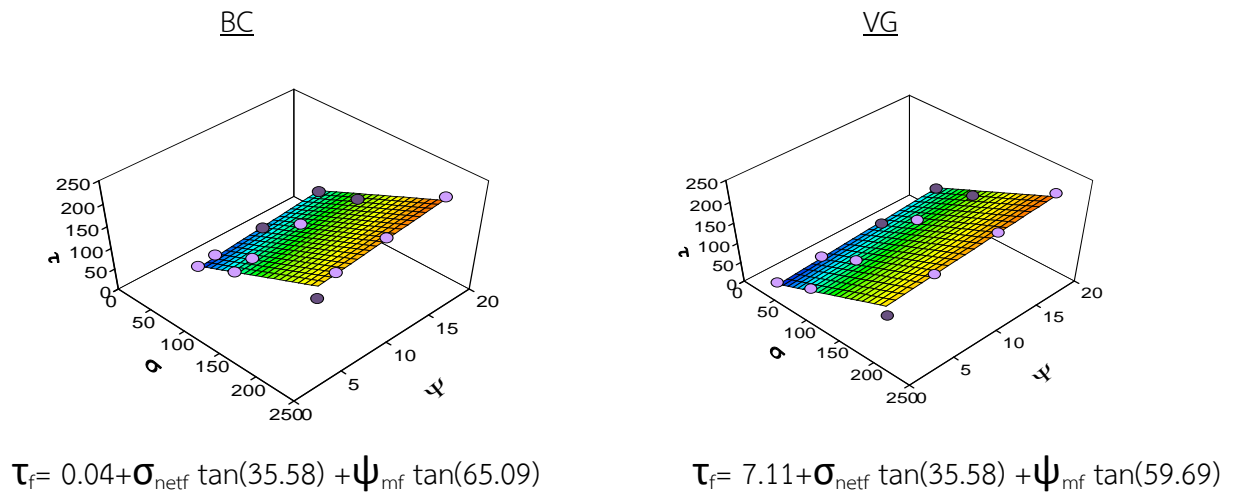
$$\tau_f = 24.96 + \sigma_{netf} \tan(39.64) - \psi_{mf} \tan(0.59)$$

รูปที่ 4-24 10% Clay (STD) ±6%



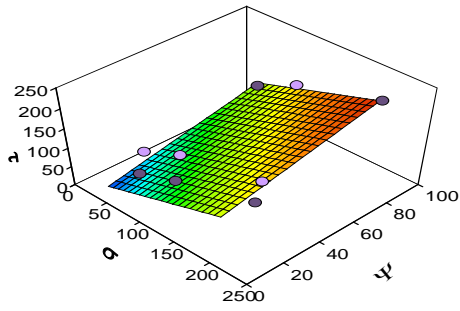


รูปที่ 4-25 20% Clay (MDF) ±3%



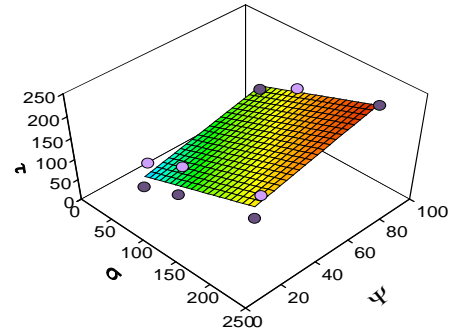
รูปที่ 4-23 20% Clay (MDF) ±6%

BC



$$\tau_f = 21.52 + \sigma_{netf} \tan(29.42) + \psi_{mf} \tan(43.98)$$

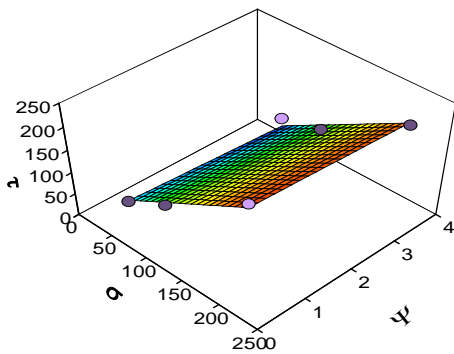
VG



$$\tau_f = 21.90 + \sigma_{netf} \tan(29.42) + \psi_{mf} \tan(43.98)$$

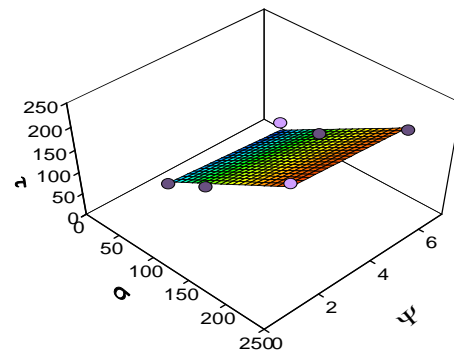
รูปที่ 4-27 20% Clay (STD) ±3%

BC



$$\tau_f = 21.93 + \sigma_{netf} \tan(42.05) - \psi_{mf} \tan(79.86)$$

VG



$$\tau_f = 21.63 + \sigma_{netf} \tan(42.05) - \psi_{mf} \tan(76.90)$$

รูปที่ 4-28 20% Clay (STD) ±6%

ตารางที่ 4-1 คุณสมบัติของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

			C		$\phi'$		$\phi_b$	
			BC	VG	BC	VG	BC	VG
10%	Mod	3	19.87092	19.87135	45.652	45.652	11.497	11.495
		6	41.46801	41.46393	38.678	38.678	1.981	1.97
	Sta	3	-10.1346	-7.54462	48.718	48.718	47.203	42.493
		6	24.47262	24.96616	39.638	39.637	0.75	-0.593
20%	Mod	3	0.136992	3.625949	38.326	38.325	7.357	4.541
		6	0.043066	7.110536	35.575	35.575	65.092	59.685
	Sta	3	21.51898	21.8974	29.417	29.417	43.981	43.001
		6	21.92678	27.62823	42.054	42.054	-79.858	-76.904

## บทที่ 5 ผลการทดลอง unconfined compression และ CBR

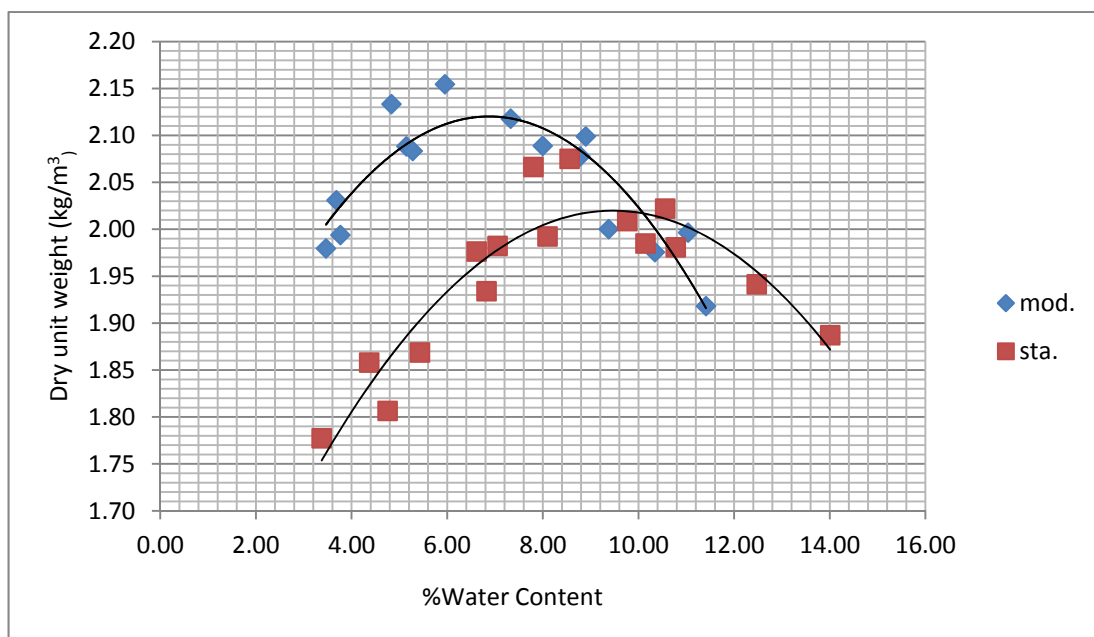
ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ผลการศึกษาจากการทดลองของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำในสภาพความชื้นและพลังงานในการบดอัดที่ต่างกัน การวิเคราะห์ผลกระทบต่อกำลังของดิน เพื่อให้เข้าใจถึงคุณสมบัติของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำอันได้แก่ มุมเสียดทานประสิทธิผล ( $\phi'$ ), แรงดูดเมทริก ( $\psi_m$ ), มุมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานแรงเฉือนกับค่าแรงดูดเมทริกที่จุดวิกฤติ  $\psi_{mf}(\phi^b)$ , แรงดึงดูทางไฟฟ้า-เคมีระหว่างเม็ดดิน (Cohesion, C)

### 5.1 ผลกระทบของปริมาณความชื้นในการบดอัดต่อคุณสมบัติต่างๆ

#### 5.1.1 เปรียบเทียบการบดอัดดินที่พลังงานต่างกัน

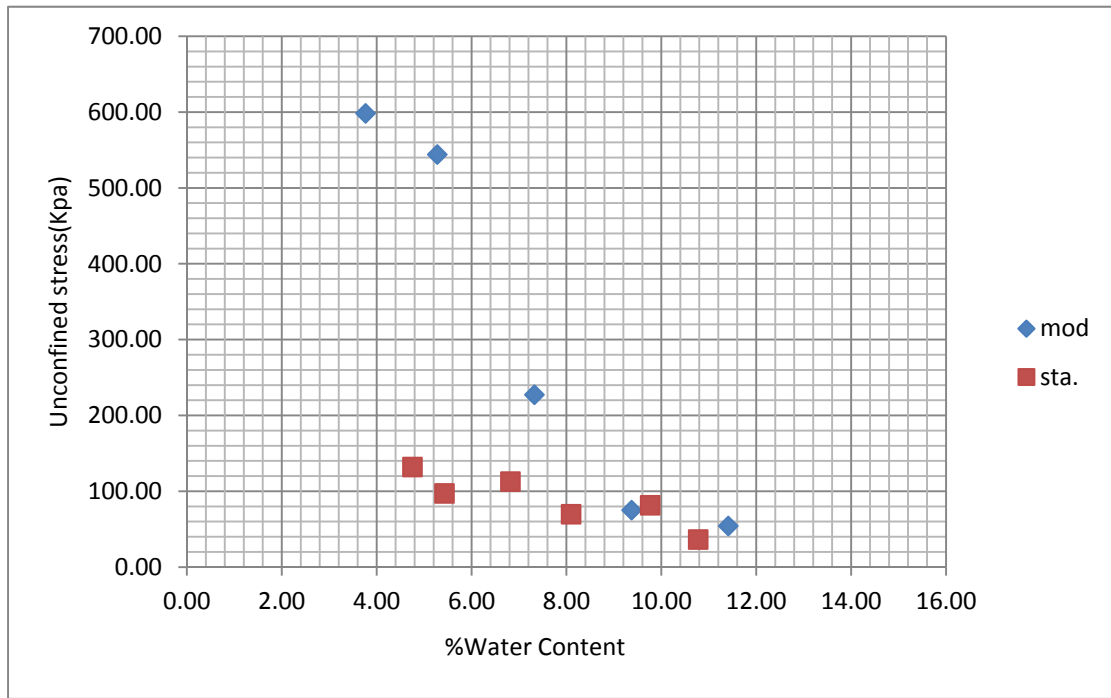
ดินทรายที่ผสมดินเหนียว 10%

จากรูปที่ 5-1 จะเห็นได้ว่าการบดอัดที่พลังงานสูงจะให้ดินมีความหนาแน่นมากกว่าการบดอัดในพลังงานที่ต่ำกว่า และมีค่าความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการบดอัดต่ำกว่าการบดอัดในพลังงานที่ต่ำกว่า



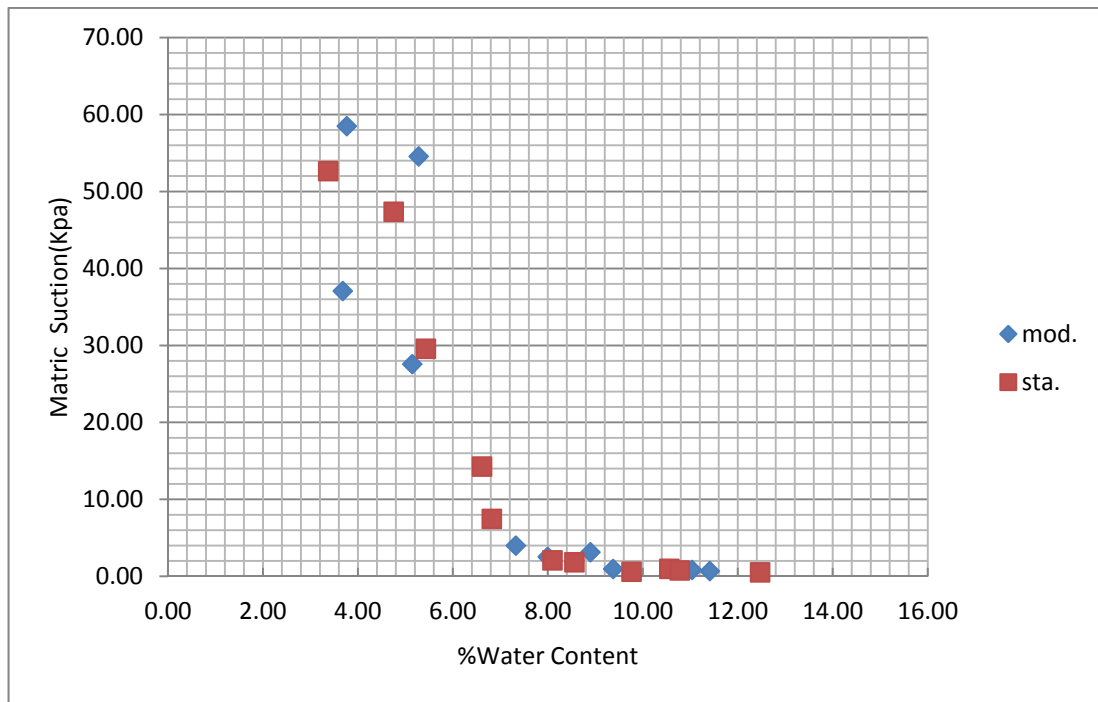
รูปที่ 5-1 ผล compaction curve 10%clay

จากรูปที่ 5-2 จะเห็นได้ว่าเมื่อพลังงานในการบดอัดมากขึ้นจะทำให้ดินมีกำลังในการรับแรงที่สูงขึ้นด้วย โดยเฉพาะทางด้านที่มีความชื้นน้อยกว่า OMC (ด้านแห้ง) จะสังเกตเห็นได้ว่าค่ากำลังในการรับแรงที่พลังงานการบดอัดที่สูงมีค่าสูงกว่าพลังงานในการบดอัดที่ต่ำกว่าอย่างเห็นได้ชัด แต่ทางด้านที่มีความชื้นมากกว่า OMC (ด้านเปียก) จะเห็นว่าความสามารถในการรับแรงมีค่าค่อนข้างไม่แตกต่างกัน



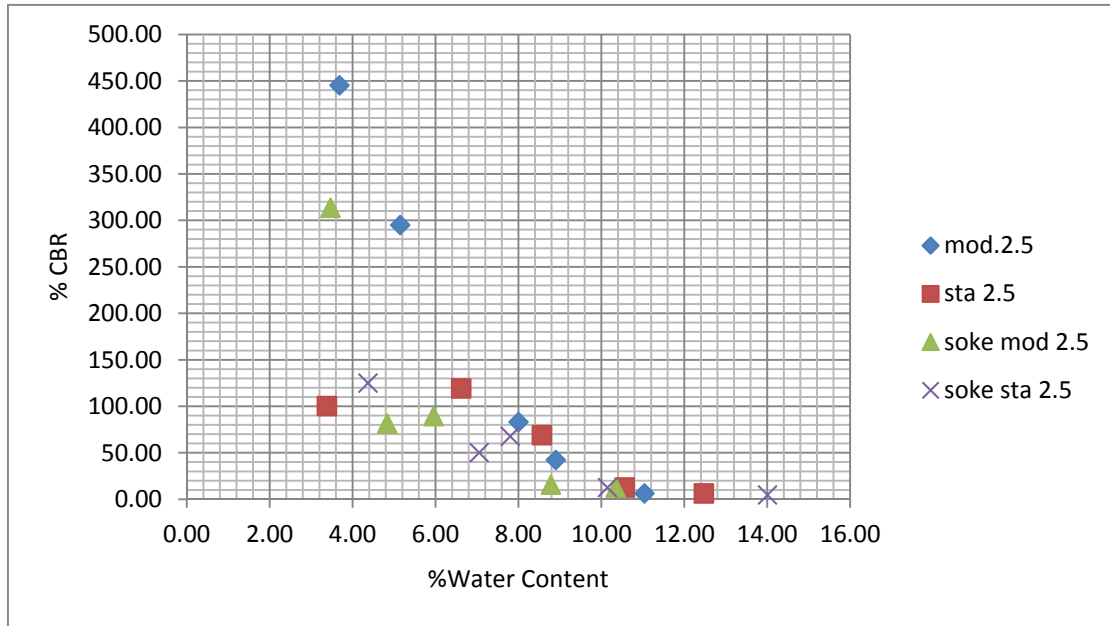
รูปที่ 5-2 ผล Unconfined compressive stress 10%clay

จากรูปที่ 5-3 เมื่อทำการวิเคราะห์ผลโดยใช้เส้นแนวโน้มดังกล่าวจะเห็นว่าที่พลังงานการบดอัดใดๆ ไม่ส่งผลให้ค่าแรงดูดภายในดินเกิดการเปลี่ยนแปลง แต่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าตามปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นแสดงว่าค่าแรงดูดภายในดินแปรผันตามค่าความชื้นที่เปลี่ยนไป



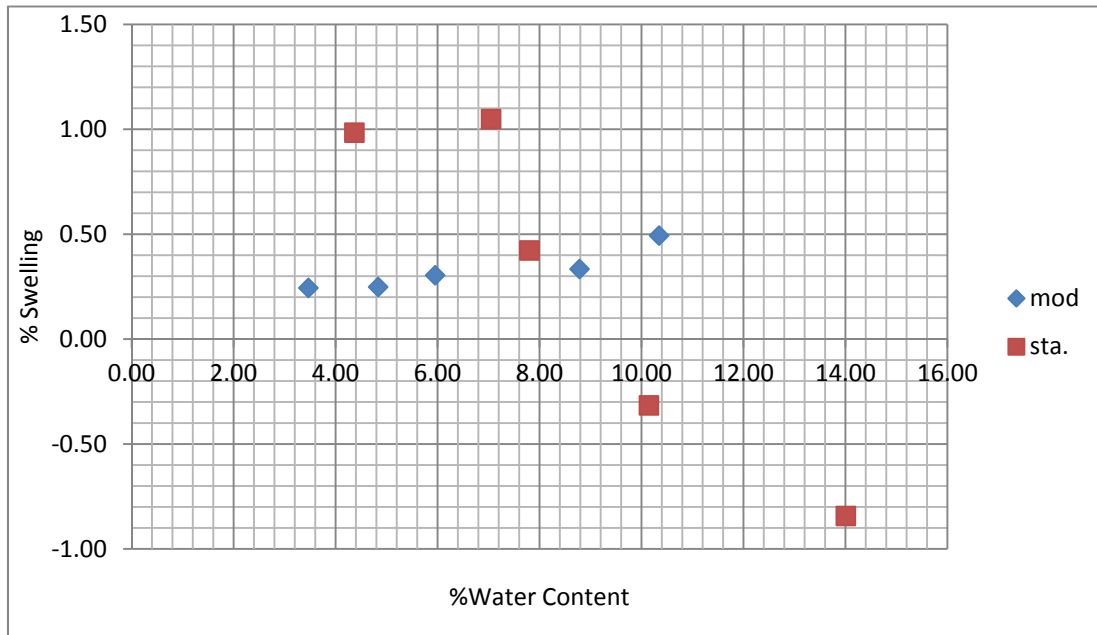
รูปที่ 5-3 ผล Suction 10%clay

จากรูปที่ 5-4 เมื่อเทียบกับค่าOMCจะเห็นได้ว่าที่ความชื้นด้านแห้งของการทดสอบแบบไม่แช่น้ำ ที่พลังงานการบดอัดที่มากกว่าจะมีค่า %CBR ที่มากกว่าการบดอัดที่พลังงานน้อยกว่า แต่เมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นจนถึงด้านเปียกค่า %CBR ของแต่ละพลังงานจะมีค่าที่ไม่แตกต่างกัน อีกทั้งในการทำการทดสอบแบบแช่น้ำ ค่า %CBR ของแต่ละพลังงานค่า %CBR ดังกล่าวก็ไม่มี ความแตกต่างกัน



รูปที่ 5-4 ผล CBR 2.5 10%clay

จากรูปที่ 5-5 จะเห็นว่าดินตัวอย่างที่ทดสอบมีการบวมตัวหรือหดตัวที่น้อยมาก จึงไม่สามารถสรุปได้ว่า ผลของการบวมตัวในแต่ละพลังงานในการบดอัดที่ต่างกัน ว่ามีการบวมตัวหรือหดตัวต่างกันได้อย่างแน่ชัด

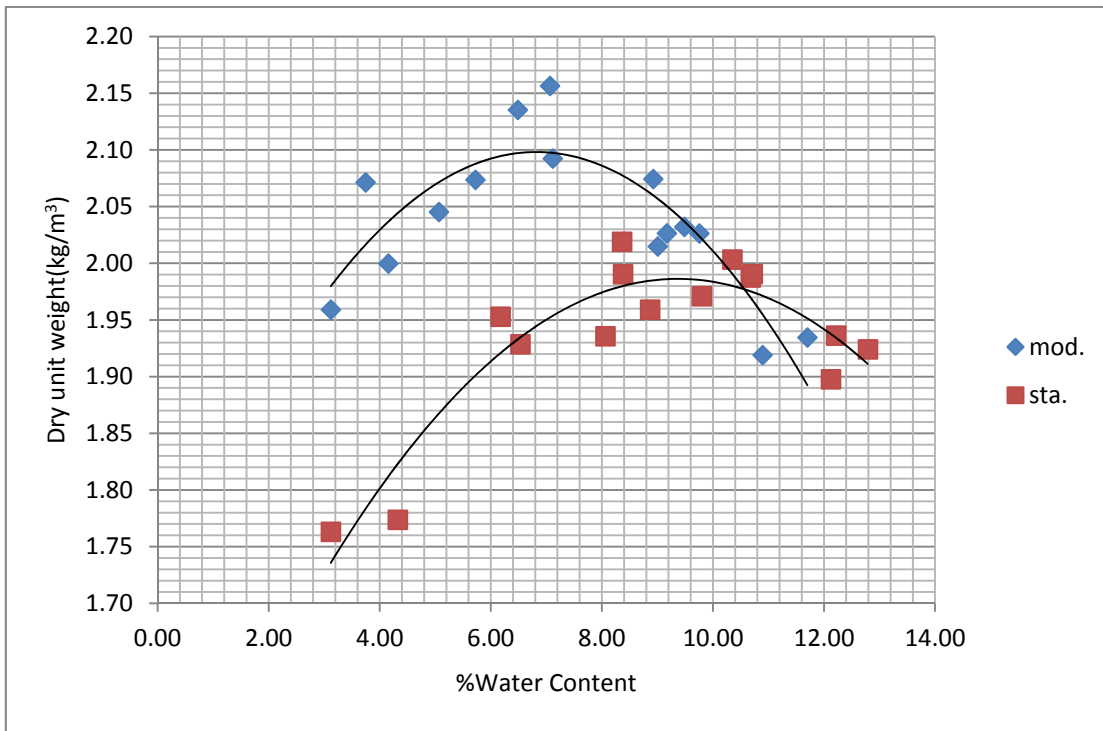


รูปที่ 5-5 ผล Swelling 10%clay

เมื่อทำการสรุปผลจากกราฟผลการทดลอง จะได้ว่าที่ค่าความหนาแน่นเดียวกันในปริมาณความชื้นที่แตกต่างกัน มีค่า UCS และ %CBR มีค่าที่ต่างกันโดยที่ดินที่มีปริมาณความชื้นน้อยกว่า OMC จะมีค่า UCS และ %CBR ที่สูงกว่าดินที่มีปริมาณความชื้นที่มากกว่า OMC ในความหนาแน่นเดียวกัน ซึ่งเป็นผลเนื่องจากแรงดูดในดินด้วยเช่นเดียวกันและเมื่อในพลังงานงานที่ต่างกันก็ค่า UCS และ %CBR ก็มีค่าแตกต่างกันด้วยเนื่องจากที่ในพลังงานการบดอัดที่สูงจะทำให้ดินมีความหนาแน่นที่มากกว่าพลังงานที่ต่ำจึงทำให้เกิดผลต่างของค่า UCS และ %CBR ด้วย

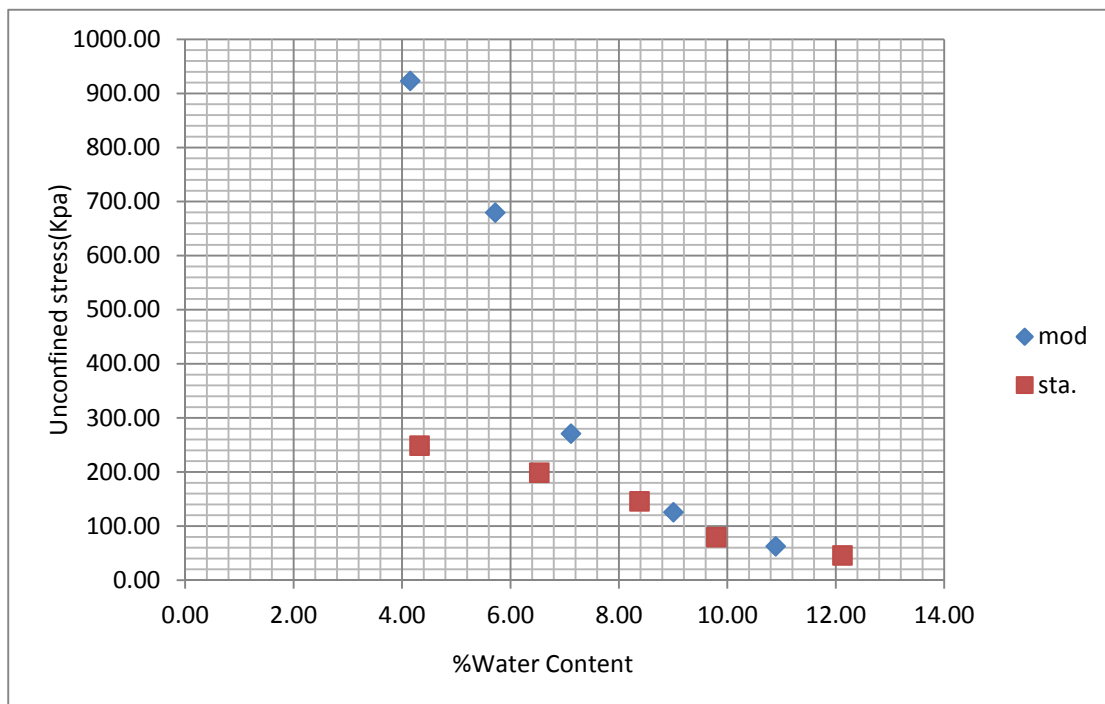
#### ดินทรายที่ผสมดินเหนียว 20%

จากรูปที่ 5-6 จะเห็นได้ว่ามีลักษณะเช่นเดียวกับกับรูปที่ 5-1 แสดงว่าผลการทดลองดังกล่าวเป็นเช่นเดียวกับรูปที่ 5-1



รูปที่ 5-6 ผล compaction curve 20%clay

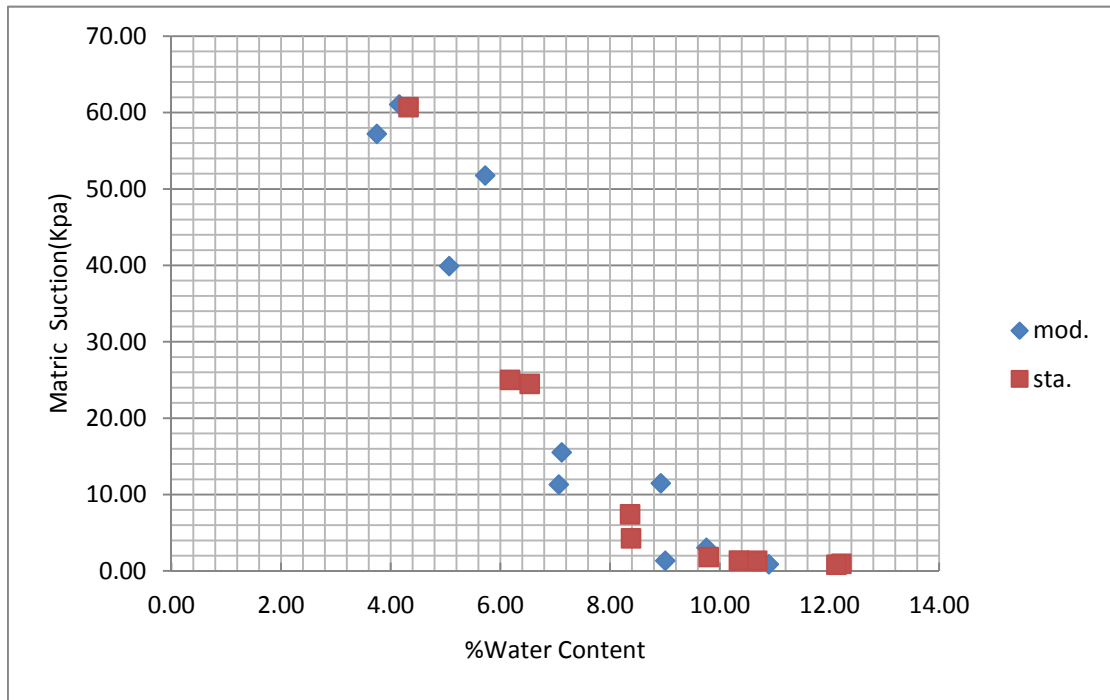
จากรูปที่ 5-7 จะเห็นได้ว่ามีลักษณะเช่นเดียวกันกับรูปที่ 5-2 แสดงว่าผลการทดลองดังกล่าวเป็นเช่นเดียวกันรูปที่ 5-2



รูปที่ 5-7 ผล Unconfined compressive stress 20%clay

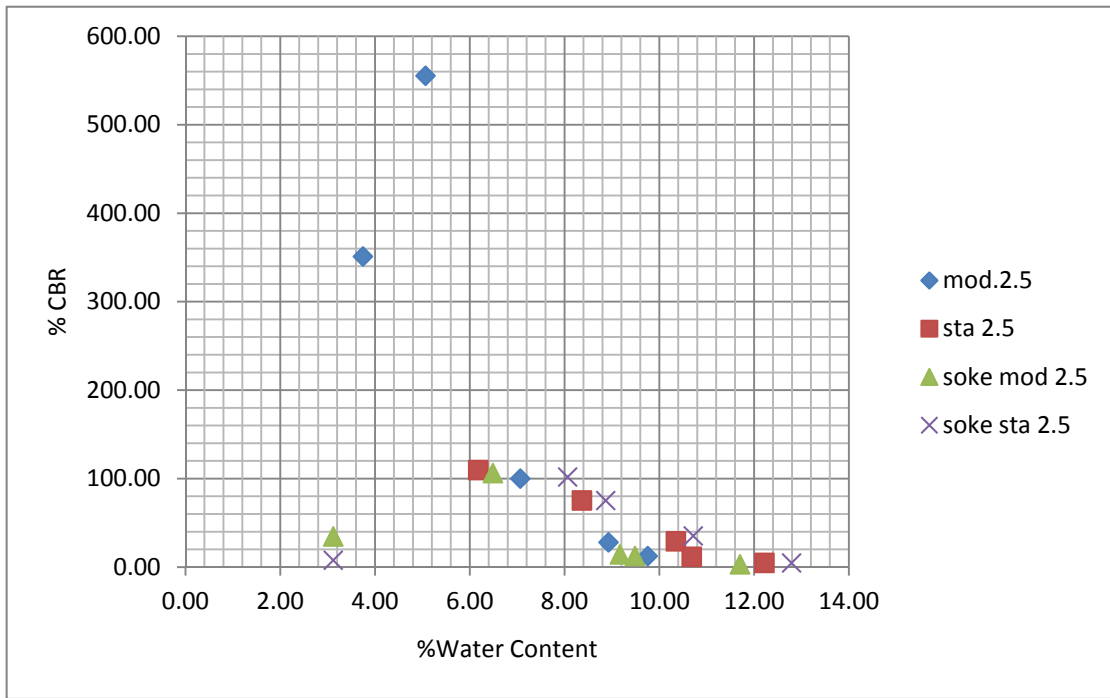


จากรูปที่ 5-8 จะเห็นได้ว่ามีลักษณะเช่นเดียวกันกับรูปที่ 5-3 แสดงว่าผลการทดลองดังกล่าวเป็นเช่นเดียวกันรูปที่ 5-3



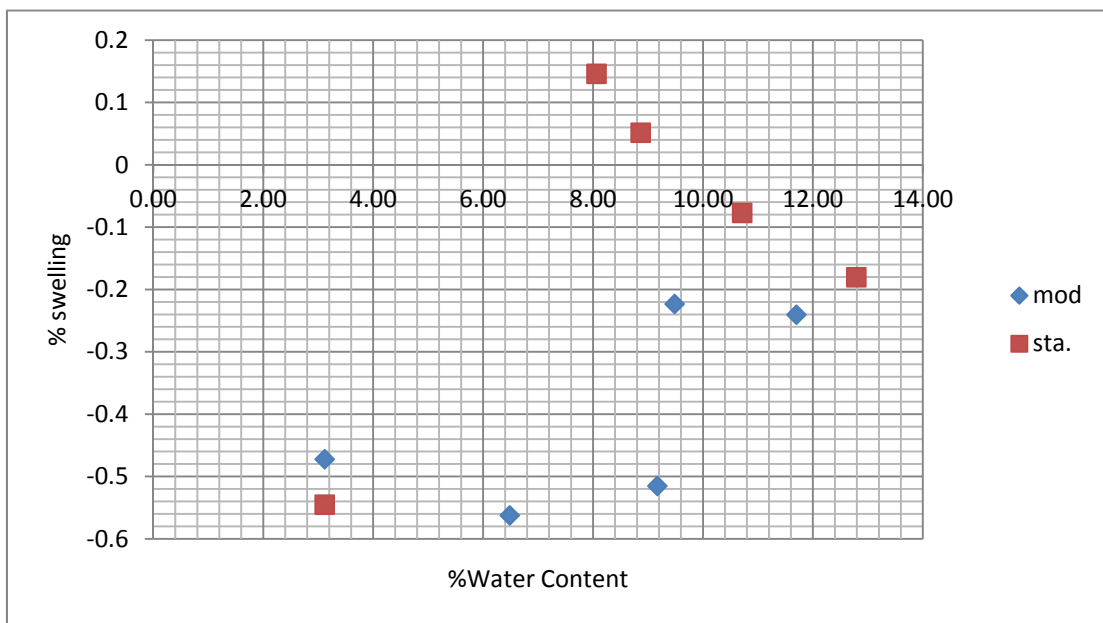
รูปที่ 5-8 ผล Suction 20% clay

จากรูปที่ 5-9 จะเห็นได้ว่ามีลักษณะเช่นเดียวกันกับรูปที่ 5-4 แสดงว่าผลการทดลองดังกล่าวเป็นเช่นเดียวกันรูปที่ 5-4



รูปที่ 5-9 ผล CBR 2.5 ที่ 20% clay

จากรูปที่ 5-10 จะเห็นได้ว่ามีลักษณะเช่นเดียวกันกับรูปที่ 5-5 แสดงว่าผลการทดลองดังกล่าวเป็นเช่นเดียวกันรูปที่ 5-5



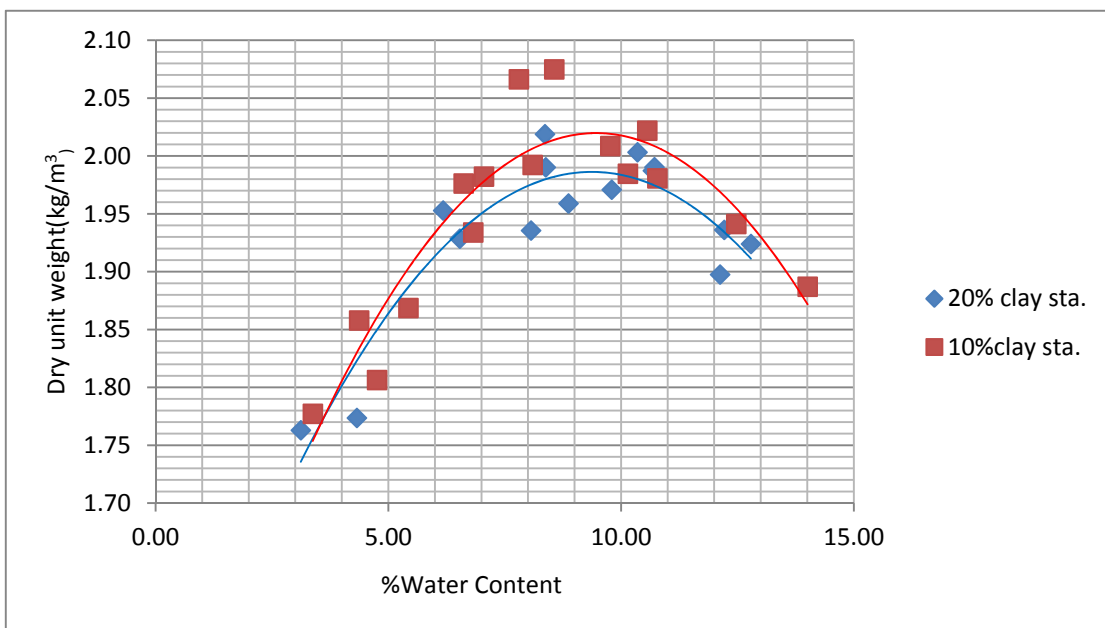
รูปที่ 5-10 ผล Swelling 20%clay

เมื่อทำการสรุปผลจากกราฟผลการทดลอง จะได้ว่าที่ค่าความหนาแน่นเดียวกันในปริมาณความชื้นที่แตกต่างกัน มีค่า UCS และ %CBR มีค่าที่ต่างกันโดยที่ดินที่มีปริมาณความชื้นน้อยกว่า OMC จะมีค่า UCS และ %CBR ที่สูงกว่าดินที่มีปริมาณความชื้นที่มากกว่า OMC ในความหนาแน่นเดียวกัน ซึ่งเป็นผลเนื่องจากแรงดูดในดินด้วยเช่นเดียวกันและเมื่อในพลังงานงานที่ต่างกันก็ค่า UCS และ %CBR ก็มีค่าแตกต่างกันด้วยเนื่องจากที่ในพลังงานการบดอัดที่สูงจะทำให้ดินมีความหนาแน่นที่มากกว่าพลังงานที่ต่ำจึงทำให้เกิดผลต่างของค่า UCS และ %CBR ด้วย

### 5.1.2 เปรียบเทียบการบดอัดที่ปริมาณดินเหนียวต่างกัน

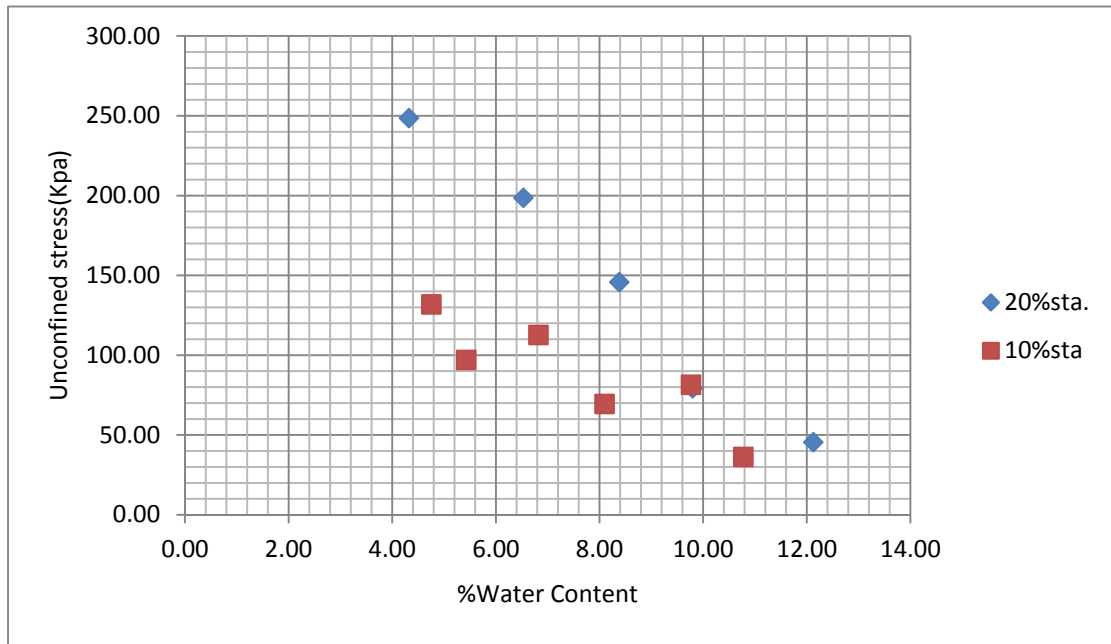
#### การทดสอบมาตรฐาน (Standard Proctor Test)

จากรูปที่ 5-11 จะเห็นได้ว่าที่พลังงานในการบดอัดเดียวกัน ที่ส่วนผสมของดินต่างกันจะสังเกตได้ว่าดินทรายที่มีปริมาณดินเหนียวต่ำกว่าจะมีค่าความหนาแน่นที่มากกว่าดินทรายที่ผสมดินเหนียวมากกว่า เป็นเพราะว่าปริมาณดินเหนียวที่ถูกเพิ่มขึ้นไป อาจมีผลทำให้การบดอัดทำได้ยากยิ่งขึ้นความหนาแน่นจากการบดอัดที่พลังงานหนึ่งๆจึงลดลง



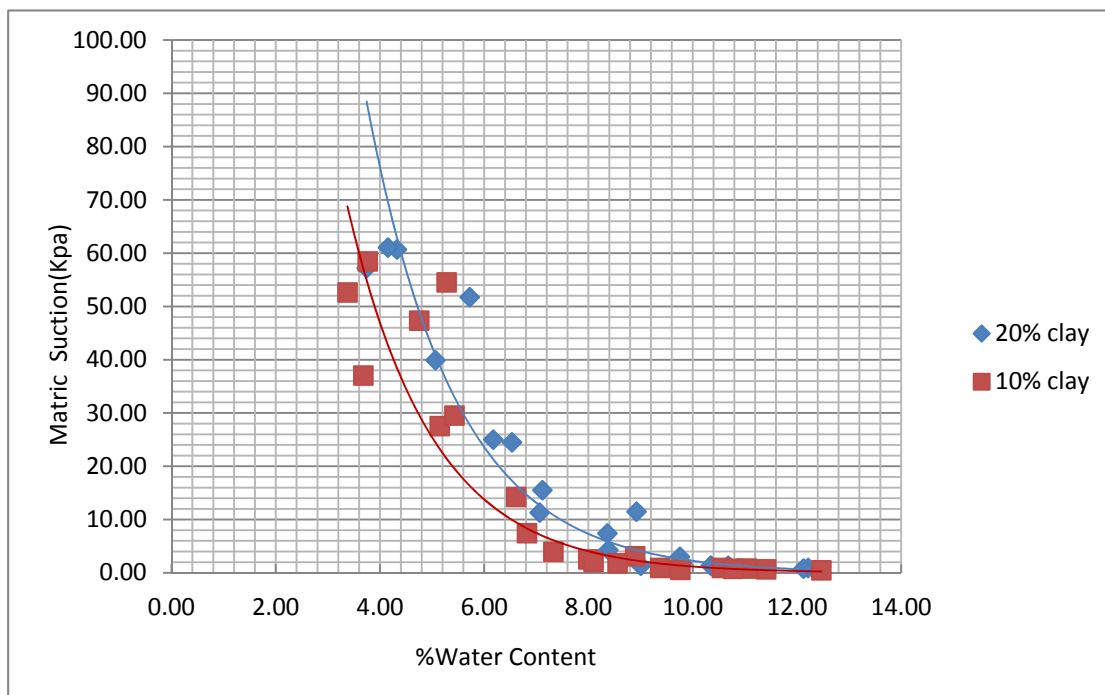
รูปที่ 5-11 ผล compaction curve standard

จากรูปที่ 5-12 จะเห็นได้ว่าที่ดินทรายที่มีปริมาณดินเหนียว 20% ให้ค่ากำลังในการรับแรงมากกว่าดินทรายที่มีปริมาณดินเหนียว 10% ทั้งที่ดินทรายที่มีปริมาณดินเหนียว 20% มีความหนาแน่นในการบดอัดน้อยกว่าแต่ให้กำลังในการรับแรงกดได้มากกว่า เนื่องจาก 20%clay มีค่าแรงดูดในดินมากกว่าที่ 10%clay จึงทำให้มีกำลังในการรับแรงได้มากกว่า ซึ่งเป็นไปตามแนวคิดหน่วยแรงประสิทธิผลของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ



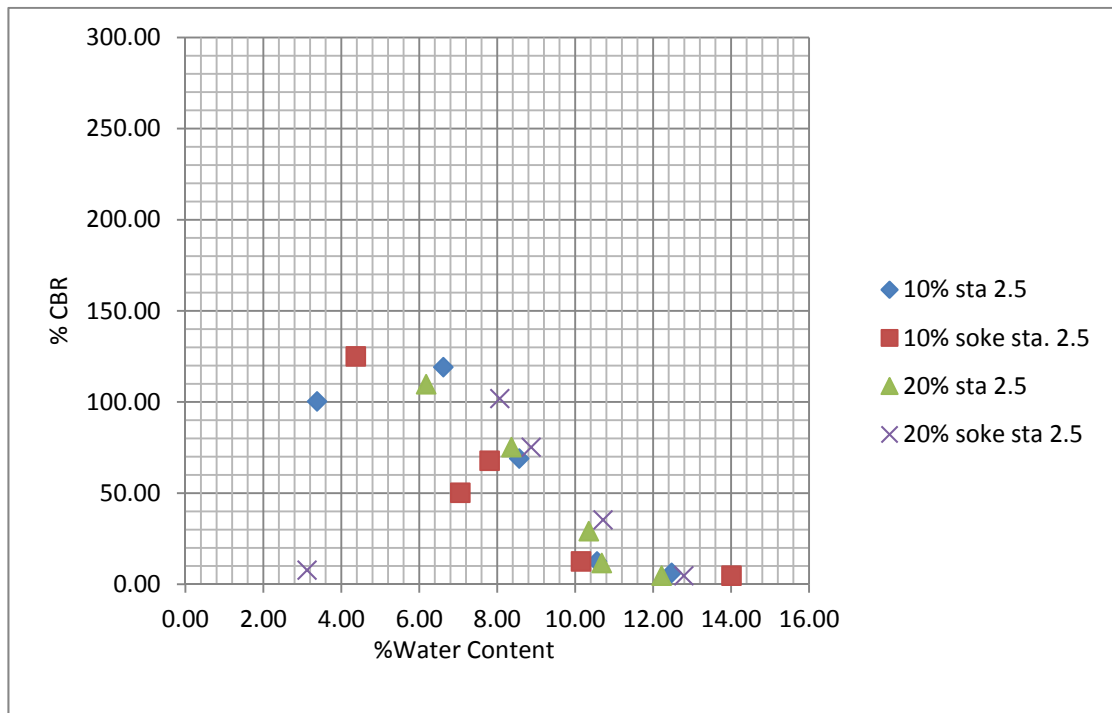
รูปที่ 5-12 ผล Unconfined compressive stress standard

จากรูปที่ 5-13 จะเห็นได้ว่าแรงดูดในดินในช่วงความชื้นที่ 4%-10% จะมีค่าแรงดูดในดินที่ค่อนข้างต่างกันเมื่อดินทรายมีปริมาณดินเหนียวมากขึ้นยิ่งทำให้แรงดูดในดินเพิ่มขึ้น แต่เมื่อดินมีปริมาณความชื้นมากยิ่งขึ้นจะเห็นว่าค่าแรงดูดในดินเริ่มไม่มีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากดินเริ่มเข้าใกล้สภาวะที่อิ่มตัวด้วยน้ำจึงทำให้ค่าแรงดูดในดินมีค่าใกล้เคียง 0 kPa แสดงว่าปริมาณดินเหนียวที่ผสมลงจะไปมีผลต่อค่าแรงดูดในดินโดยตรง



รูปที่ 5-13 ผล Suction standard

จากรูปที่ 5-14 จะเห็นว่าในการทดลองหาค่า CBR แบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำ ที่ปริมาณดินเดียวกัน 10%ไม่ค่อยเห็นผลความแตกต่างทางด้านค่า %CBR ที่ชัดเจน ที่การบดอัดแบบมาตรฐาน

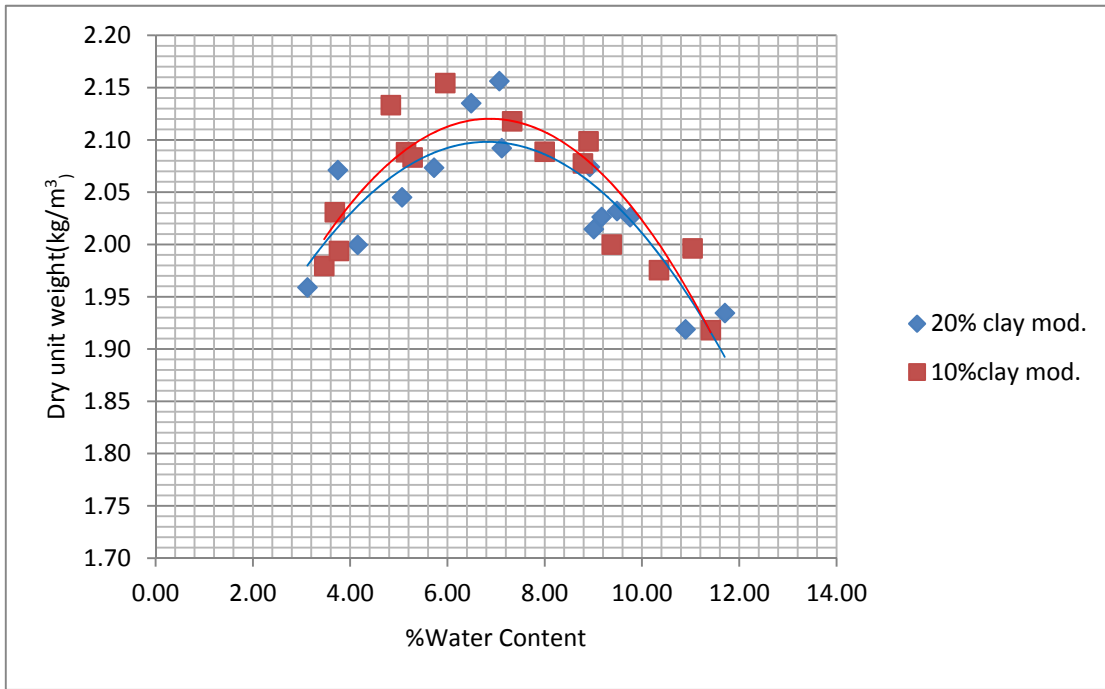


รูปที่ 5-14 ผล CBR 2.5 in standard

ดังนั้นการทดลองที่พลังงานมาตรฐานจะสรุปได้ว่าที่พลังงานในการบดอัดเดียวกัน และปริมาณดินเหนียวที่ต่างกัน จะได้ว่าที่ปริมาณดินเหนียวที่น้อยกว่าจะให้ความหนาแน่นที่มากกว่าแต่ทำให้ค่า UCS จะน้อยกว่าดินที่มีปริมาณดินเหนียวที่มากกว่า เนื่องจากในดินที่มีปริมาณดินเหนียวที่มากจะมีค่าแรงดุดในดินมากขึ้นจึงทำให้ค่า UCS มีค่ามากกว่าเช่นเดียวกัน

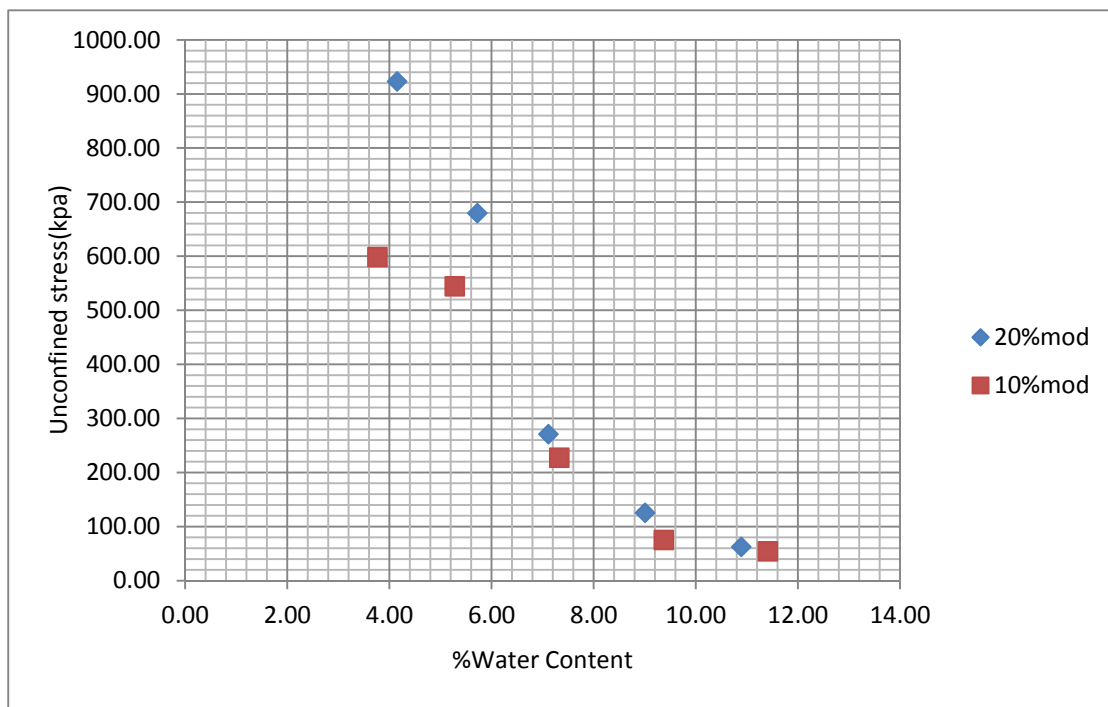
#### การทดสอบแบบโมดิไฟด์ (Modified Proctor Test)

จากรูปที่ 5-15 จะเห็นได้ว่ามีลักษณะเช่นเดียวกันกับรูปที่ 5-11 แสดงว่าผลการทดลองดังกล่าวเป็นเช่นเดียวกันรูปที่ 5-11



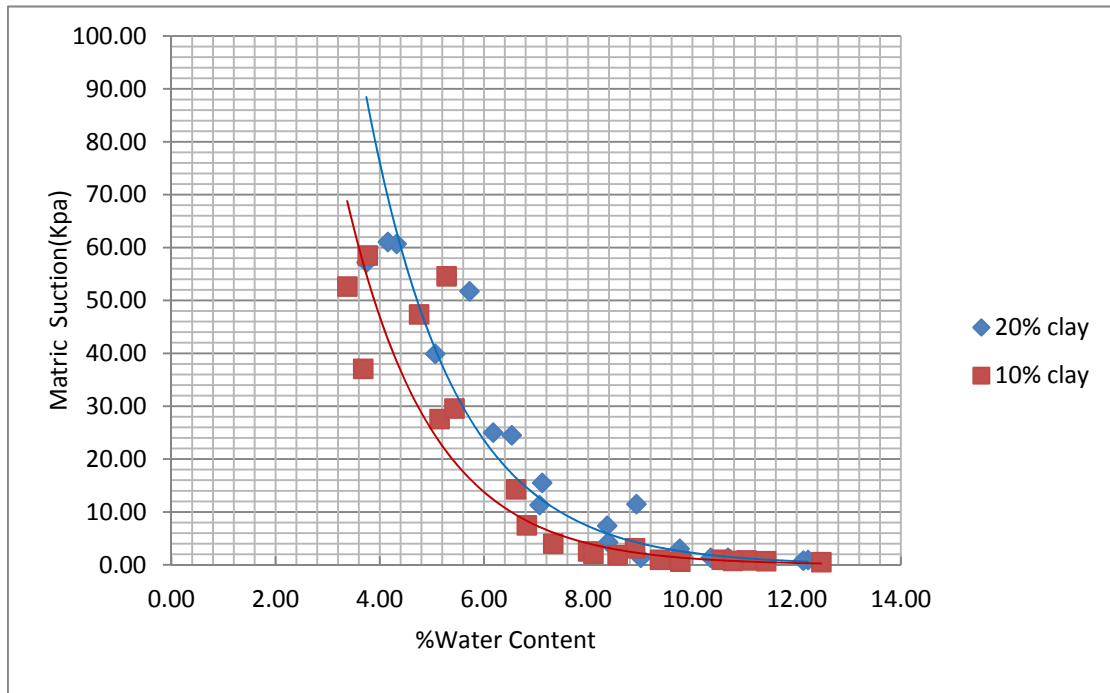
รูปที่ 5-15 ผล compaction curve Modified

จากรูปที่ 5-16 จะเห็นได้ว่ามีลักษณะเช่นเดียวกับกับรูปที่ 5-12 แสดงว่าผลการทดลองดังกล่าวเป็นเช่นเดียวกับรูปที่ 5-12



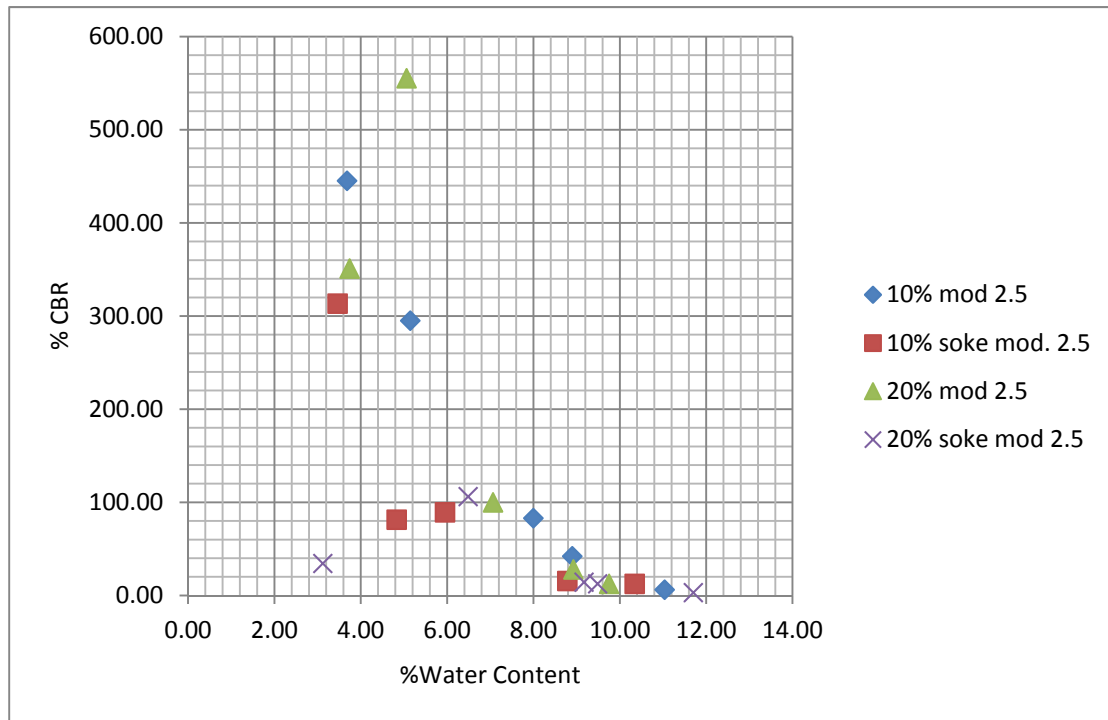
รูปที่ 5-16 ผล Unconfined compressive stress Modified

จากรูปที่ 5-17 จะเห็นได้ว่ามีลักษณะเช่นเดียวกับกับรูปที่ 5-13 แสดงว่าผลการทดลองดังกล่าวเป็นเช่นเดียวกับรูปที่ 5-13



รูปที่ 5-17 ผล Suction Modified

จากรูปที่ 5-18 จะเห็นได้ว่าทั้งในการทดสอบแบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำค่อนข้างจะไม่ค่อยมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณดินเหนียวที่แตกต่างกันมีผลกระทบต่อค่า %CBR ที่น้อยมาก



รูปที่ 5-18 ผล CBR 2.5 in Modified

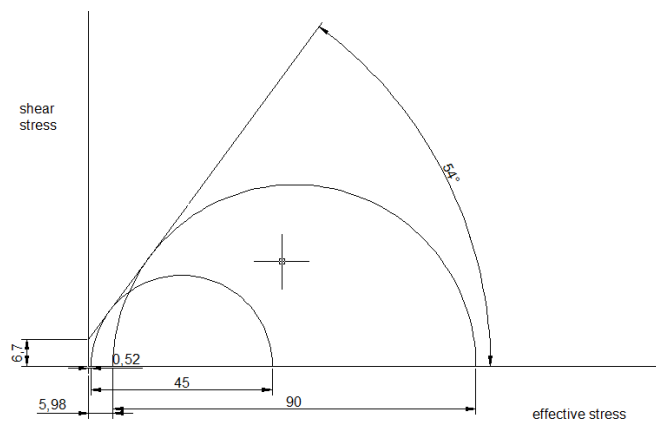
จากกราฟผลการทดลองของดินทรายผสมดินเหนียวแบบสูงกว่ามาตรฐานจะแบ่งเป็น 10%clay, 20%clay จะเห็นว่าดินทั้ง 2 ประเภท มีค่า UCS, CBR ใกล้เคียงกันเหมือนการทดสอบแบบมาตรฐาน แต่การทดสอบแบบสูงกว่ามาตรฐานมีค่า สูงกว่าเป็นดังกราฟ และถ้าดูจากค่า matric suction จะเห็นได้ว่าค่า matric suction ในทุกๆการทดลองแล้วเปรียบเทียบจะขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นของดินเท่านั้น ไม่เกี่ยวกับพลังงานการบดอัด ดังนั้นการทดลองที่พลังงานสูงกว่ามาตรฐานมีผลการทดลองลักษณะเดียวกันกับการทดลองในพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐานเพียงแต่จะให้ค่าความหนาแน่นและการรับแรงที่มากกว่าเท่านั้น

## 5.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านกำลังด้วยทฤษฎีของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

ด้วยแนวคิดของ Terzaghi เกี่ยวกับกำลังต้านทานแรงเฉือนสามารถใช้ได้เพียงกับดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ แต่ด้วยเนื่องจากเมื่อดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำมีโพรงอากาศภายในดิน ดังนั้น สมการ  $\tau_f = c' + \sigma'_v \tan \phi'$  ของ Terzaghi จึงไม่สามารถใช้ได้ ต่อมา ได้มีน้ำเสนอสมการ และ  $\tau_f = c' + \sigma'_{neff} \tan \phi' + \psi_{mf} \tan \phi^b$  สำหรับดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

การวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาค่า  $c'$ ,  $\phi'$ ,  $\phi^b$  ซึ่งค่าเหล่านี้เป็นคุณสมบัติต่างๆของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งใช้ในการวาดระนาบแสดงขอบเขตการวิบัติของดินตัวอย่างได้โดยทำการคิดที่ระนาบ  $\tau$  กับ  $\sigma'$  ตามทฤษฎีของ Terzaghi ด้วยวงกลมของมอร์ซึ่ง  $\sigma' = \sigma - u_w$  ในความหนาแน่น OMC  $\pm 2\%$  และ  $\pm 4\%$  ด้วยค่า Suction ( $u_w$ ), UCS ( $\sigma$ ) ซึ่งสามารถวงกลมของมอร์ได้ดังรูปที่ 5-19

จากรูปที่ 5-19 จะทำให้ค่า  $c'$  และ  $\phi'$  ซึ่งเป็นคุณสมบัติของดินที่ต้องการทราบและใช้ในการกำหนดของเขตการวิบัติ และการต้องการทราบค่า  $\phi^b$  จะเป็นการวาดด้วยวงกลมของมอร์ ที่ค่าแรงดูดในดิน ดังรูปที่ 5-20

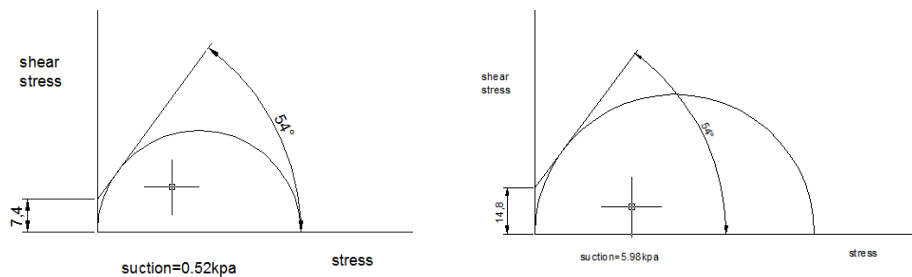


รูปที่ 5-19 Mohr's circle ที่ แกน suction = 0

จากรูปที่ 5-20 จะทำให้รู้ถึงค่า  $c'$  ที่แรงดูดใดๆแล้วทำการวาดกราฟระหว่าง Suction กับ  $c'$  ที่ระนาบ  $\tau_f$  และ Suction ซึ่งทำให้ทราบถึงค่า  $\phi^b$  แล้วหาค่าคุณสมบัติของดินที่ได้แทนลงในสมการของทฤษฎีของดินที่ไม่



อิมิตัวด้วยน้ำจะทำให้ได้ขอบเขตการวิบัติของดินที่ไม่อิมิตัวด้วยน้ำ ด้วยของมูลตามตารางที่ 5-1 และ 5-2 เพื่อหาค่าต่างๆในการวาดระนาบการวิบัติ



รูปที่ 5-20 Mohr's circle ที่แกน suction ต่างๆ

จากตารางที่ 5-1 และ 5-2 จะทำให้สามารถหาค่า  $c'$ ,  $\phi'$ ,  $\phi^b$  เพื่อใช้ในการวาดขอบเขตการวิบัติ แสดงในตารางที่ 5-3

ตารางที่ 5-1 ค่า  $c'$ ,  $\phi'$ ,  $\phi^b$  ของดิน 10%clay

	10%			
	modified			
	ความหนาแน่นแห้ง	%w	Suction	UCS
OMC $\pm 4\%$	1.96	2.90	94.54	610.00
OMC $\pm 2\%$	2.08	4.90	28.47	570.00
OMC	2.12	6.90	-	-
OMC $\pm 2\%$	2.08	8.90	2.58	95.00
OMC $\pm 4\%$	1.96	10.90	0.78	57.00
	standard			
	ความหนาแน่นแห้ง	%w	Suction	UCS
	OMC $\pm 4\%$	1.90	5.40	20.27
OMC $\pm 2\%$	1.99	7.40	5.98	90.00
OMC	2.02	9.40	-	-
OMC $\pm 2\%$	1.99	11.40	0.52	45.00
OMC $\pm 4\%$	1.90	13.40	0.15	30.00

ตารางที่ 5-2 ค่า  $c'$ ,  $\phi'$ ,  $\phi^b$  ของดิน 20%clay

	20%
--	-----

	standard			
	ความหนาแน่นแห้ง	%w	Suction	UCS
OMC ±4%	1.96	2.80	157.87	1050.00
OMC ±2%	2.08	4.80	48.51	830.00
OMC	2.10	6.80	-	-
OMC ±2%	2.08	8.80	4.58	140.00
OMC ±4%	1.96	10.80	1.40	63.65
	standard			
	ความหนาแน่นแห้ง	%w	Suction	UCS
OMC ±4%	1.88	5.40	35.11	227.00
OMC ±2%	1.96	7.40	11.01	175.00
OMC	1.99	9.40	-	-
OMC ±2%	1.96	11.40	1.08	50.00
OMC ±4%	1.88	13.40	0.34	40.81

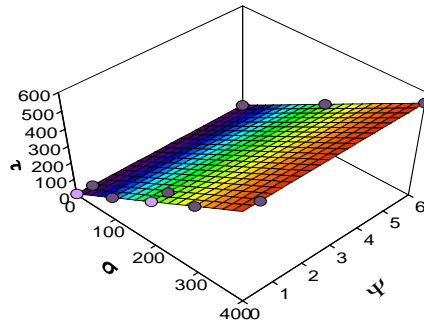
ตารางที่ 5-3 คุณสมบัติของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

			c'	$\phi'$	$\phi^b$
10clay	modified	OMC+2,-2 %	5.42	64	64
		OMC+4,-4 %	9.98	49	48
	standard	OMC+2,-2 %	6.70	54	53
		OMC+4,-4 %	6.47	42	42
20%clay	modified	OMC+2,-2 %	8.37	62	62
		OMC+4,-4 %	10.13	50	49
	standard	OMC+2,-2 %	4.94	60	60
		OMC+4,-4 %	7.73	48	46

เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 5-3 แทนในสมการตามทฤษฎีของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะทำให้สามารถวาดขอบเขตการวิบัติได้ดังต่อไปนี้

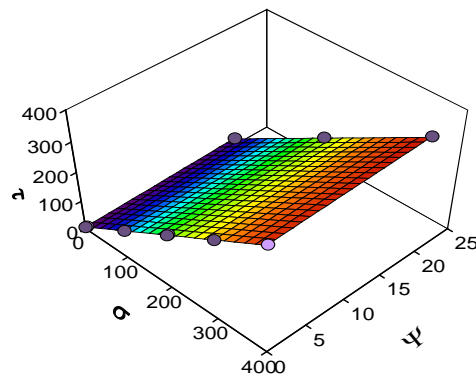
### 5.3 กราฟแสดงขอบเขตการวิบัติทางด้านกำลังของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

แสดงในรูป 5-21 ถึง 5-28 ซึ่งจากระนาบแสดงขอบเขตการวิบัติทำให้สามารถรู้ถึงความสามารถในการรับแรงของดินหลังการบดอัดเมื่อมีปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปได้



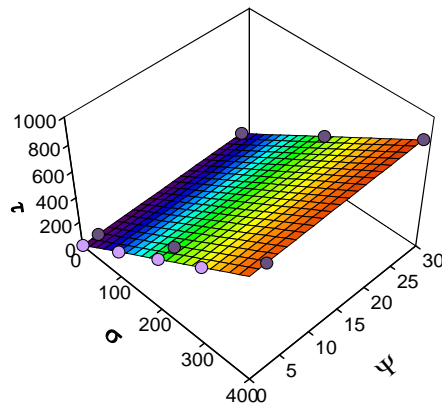
$$\tau_f = 6.7 + \sigma_{\text{netf}} \tan(54) + \psi_{\text{mf}} \tan(53)$$

รูปที่ 5-21 ดินทรายที่ผสมดินเหนียว 10% ด้วยการบดอัดแบบมาตรฐาน ที่ OMC +2%,-2%



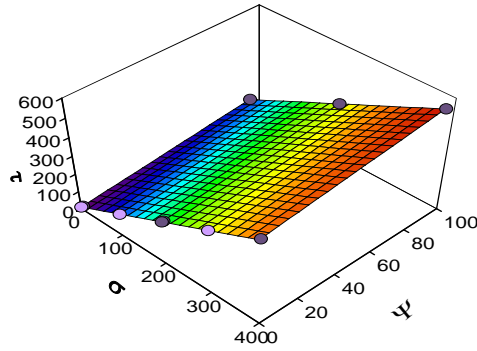
$$\tau_f = 6.47 + \sigma_{\text{netf}} \tan(42) + \psi_{\text{mf}} \tan(42)$$

รูปที่ 5-22 ดินทรายที่ผสมดินเหนียว 10% ด้วยการบดอัดแบบมาตรฐาน ที่ OMC +4%,-4%



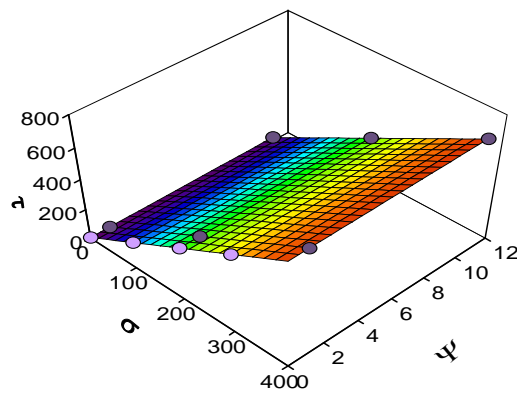
$$\tau_f = 5.42 + \sigma_{\text{netf}} \tan(64) + \psi_{\text{mf}} \tan(64)$$

รูปที่ 5-23 ดินทรายที่ผสมดินเหนียว 10% ด้วยการบดอัดแบบโมดิไฟด์ที่ OMC +2%,-2%



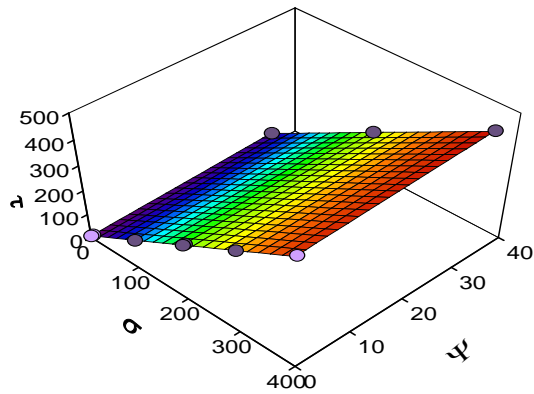
$$\tau_f = 9.98 + \sigma_{neff} \tan(49) + \psi_{mf} \tan(48)$$

รูปที่ 5-24 ดินทรายที่ผสมดินเหนียว 10% ด้วยการบดอัดแบบโมดิไฟด์ ที่ OMC +4%, -4%



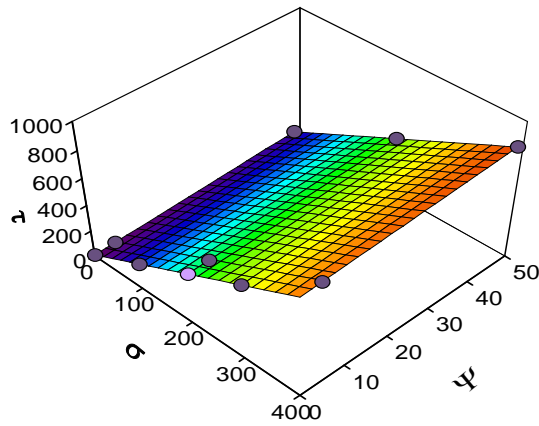
$$\tau_f = 4.94 + \sigma_{neff} \tan(60) + \psi_{mf} \tan(60)$$

รูปที่ 5-25 ดินทรายที่ผสมดินเหนียว 20% ด้วยการบดอัดแบบมาตรฐาน ที่ OMC +2%, -2%



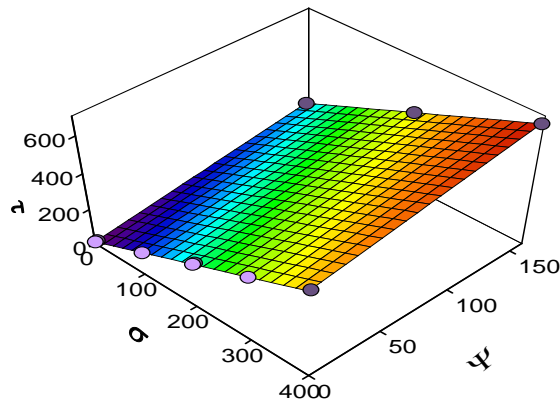
$$\tau_f = 7.73 + \sigma_{neff} \tan(48) + \psi_{mf} \tan(46)$$

รูปที่ 5-26 ดินทรายที่ผสมดินเหนียว 20% ด้วยการบดอัดแบบมาตรฐาน ที่ OMC +4%, -4%



$$\tau_f = 8.37 + \sigma_{\text{netf}} \tan(62) + \psi_{\text{mf}} \tan(62)$$

รูปที่ 5-27 ดินทรายที่ผสมดินเหนียว 20% ด้วยการบดอัดแบบโมดิไฟด์ที่ OMC +2%,-2%



$$\tau_f = 10.13 + \sigma_{\text{netf}} \tan(50) + \psi_{\text{mf}} \tan(49)$$

รูปที่ 5-28 ดินทรายที่ผสมดินเหนียว 20% ด้วยการบดอัดแบบโมดิไฟด์ที่ OMC +4%,-4%

#### 5.4 การประยุกต์คุณสมบัติของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

##### การทำนาย CBR ด้วยคุณสมบัติของดิน

การทดสอบหาค่า CBR เป็นการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงแบกทานของดินโดยทำการกดตัวอย่างให้มีความลึกระดับหนึ่งแล้วทำการเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงซึ่งจะไม่ใช่กำลังในการรับแรงที่สูงสุด โดยค่ากำลังสูงสุดอาจสามารถหาได้จากทฤษฎีของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ การเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงแบกทานตามทฤษฎีต่างๆของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำต่อค่ากำลังรับแรงแบกทานที่ได้จากการทดสอบ CBR ที่ 0.1 นิ้ว ในการทดสอบแบบแช่น้ำ (soaked) และไม่แช่น้ำ (Unsoak) เนื่องจากการทดสอบ CBR ไม่ได้เป็นการทดสอบที่ให้ผู้รู้ถึงกำลังรับแรงแบกทานสูงสุดของดินนั้นๆ ดังนั้นจึงให้การเปรียบเทียบระหว่างกำลังรับแรงแบกทานที่ได้จากการทดสอบ CBR กับ การคำนวณโดยใช้คุณสมบัติของดินโดยใช้สมการรับแรงแบกทานของ Terzaghi, Meyerhof, Hansen, Vesic เพื่อตรวจสอบกำลังอัตราส่วนระหว่างค่ากำลังรับแรงแบกทานสูงสุดต่อกำลังรับแรงจากการ

ทดลอง CBR ซึ่งค่าอัตราส่วนของ  $\frac{q_{ucal}}{q_{cbr}}$  จะมีค่ามากกว่า 1 เนื่องจากการทดสอบ CBR เป็นการทดสอบการกดตัวอย่างที่ระดับความลึกหนึ่ง ซึ่งไม่ได้ทำการกดตัวอย่างจนถึงจุดวิบัติ

ตารางที่ 5-4 ผลค่ากำลังในการรับแรงแบกทานสูงสุดของทฤษฎีต่างๆ

		10%clay							
		Terzaghi		Meyerhof		Hansen		Vesic	
		Unsoaked (MPa)	Soaked (MPa)	Unsoaked (MPa)	Soaked (MPa)	Unsoaked (MPa)	Soaked (MPa)	Unsoaked (MPa)	Soaked (MPa)
modified	OMC-2%	646.100	54.659	1904.896	285.901	1139.797	100.505	1141.673	102.382
	OMC+2%	108.254	54.659	432.611	285.901	194.684	100.505	196.560	102.382
	OMC-4%	45.217	3.997	62.957	5.667	56.691	4.933	56.714	4.956
	OMC+4%	4.335	3.997	6.137	5.667	5.357	4.933	5.380	4.956
standard	OMC-2%	11.623	5.629	18.869	9.065	15.147	6.951	15.205	7.008
	OMC+2%	6.147	5.629	9.912	9.065	7.659	6.951	7.717	7.008
	OMC-4%	3.917	1.031	4.758	1.267	4.497	1.175	4.503	1.181
	OMC+4%	1.053	1.031	1.293	1.267	1.200	1.175	1.206	1.181
		20%clay							
		Terzaghi		Meyerhof		Hansen		Vesic	
		Unsoak (MPa)	Soaked (MPa)	Unsoak (MPa)	Soaked (MPa)	Unsoak (MPa)	Soaked (MPa)	Unsoak (MPa)	Soaked (MPa)
modified	OMC-2%	553.620	46.650	1418.406	182.342	922.643	78.525	923.503	79.385
	OMC+2%	94.551	46.650	299.132	182.342	158.282	78.525	159.142	79.385
	OMC-4%	87.761	4.733	130.273	7.160	113.706	6.019	113.734	6.047
	OMC+4%	5.447	4.733	8.219	7.160	6.944	6.019	6.973	6.047
standard	OMC-2%	77.904	17.969	184.601	52.560	121.567	26.265	121.976	26.674
	OMC+2%	23.835	17.969	65.483	52.560	35.593	26.265	36.001	26.674
	OMC-4%	15.040	2.687	22.724	4.126	18.820	3.310	18.838	3.328
	OMC+4%	2.808	2.687	4.308	4.126	3.462	3.310	3.480	3.328

ตารางที่ 5-5 ค่ากำลังรับแรงแบกทานจากการทดลอง CBR

		10%clay		20%clay	
		Unsoaked (MPa)	Soaked (MPa)	Unsoaked (MPa)	Soaked (MPa)
modified	OMC-2%	21.39	8.28	23.46	9.66
	OMC+2%	2.415	1.38	4.347	2.07
	OMC-4%	35.19	19.32	41.4	13.11
	OMC+4%	0.552	0.69	0.207	0.276
standard	OMC-2%	6.9	7.107	7.935	7.59
	OMC+2%	0.69	0.414	4.14	1.242
	OMC-4%	10.35	7.59	8.28	9.66
	OMC+4%	0.552	0.345	0.276	0.207

จากตารางที่ 5-6 สามารถนำมาวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจากทฤษฎีกำลังรับแรงแบกทานของดินกับค่ากำลังรับแรงแบกทานจากการทดสอบCBR ได้ดังนี้

ตารางที่ 5-6 อัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงแบกทานสูงสุดต่อกำลังรับแรงแบกทานของการทดสอบ CBR

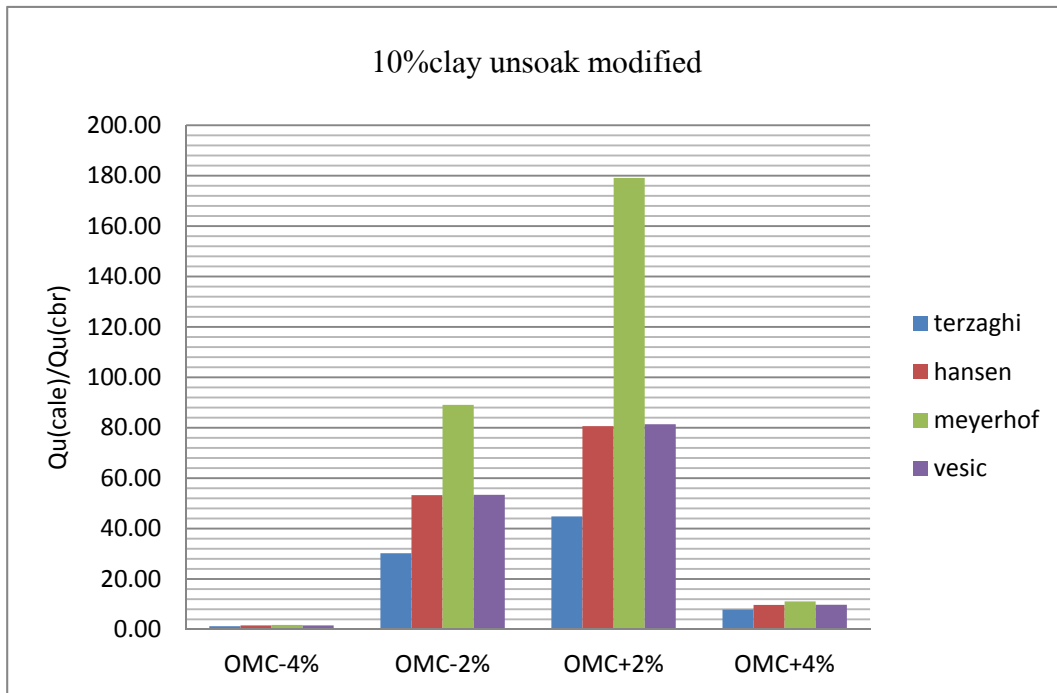
			Terzaghi		Hansen	
			Unsoaked	Soaked	Unsoaked	Soaked
10%clay	modified	OMC-4%	1.28	0.21	1.61	0.26
		OMC-2%	30.21	6.60	53.29	12.14
		OMC+2%	44.83	39.61	80.61	72.83
		OMC+4%	7.85	5.79	9.70	7.15
	standard	OMC-4%	0.38	0.14	0.43	0.15
		OMC-2%	1.68	0.79	2.20	0.98
		OMC+2%	8.91	13.60	11.10	16.79
		OMC+4%	1.91	2.99	2.17	3.41
			Meyerhof		Vesic	
			Unsoaked	Soaked	Unsoaked	Soaked
10%clay	modified	OMC-4%	1.79	0.29	1.61	0.26
		OMC-2%	89.06	34.53	53.37	12.36
		OMC+2%	179.14	207.17	81.39	74.19
		OMC+4%	11.12	8.21	9.75	7.18
	standard	OMC-4%	0.46	0.17	0.44	0.16
		OMC-2%	2.73	1.28	2.20	0.99
		OMC+2%	14.37	21.90	11.18	16.93
		OMC+4%	2.34	3.67	2.18	3.42



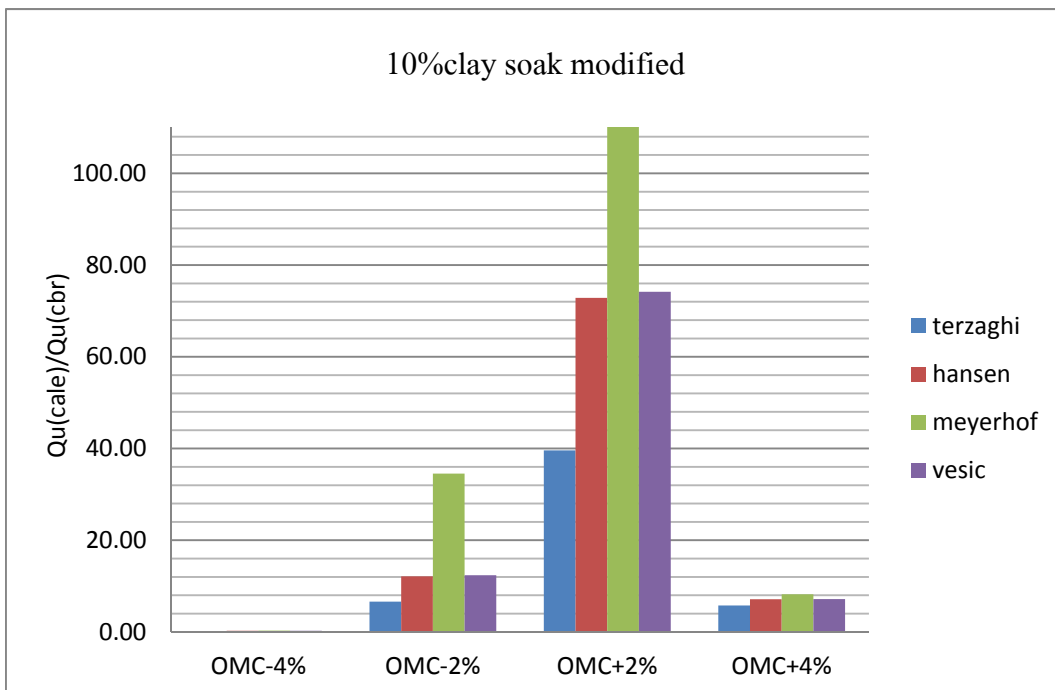
			Terzaghi		Hansen	
			Unsoaked	Soaked	Unsoaked	Soaked
20%clay	modified	OMC-4%	2.12	0.36	2.75	0.46
		OMC-2%	23.60	4.83	39.33	8.13
		OMC+2%	21.75	22.54	36.41	37.93
		OMC+4%	26.31	17.15	33.55	21.81
	standard	OMC-4%	1.82	0.28	2.27	0.34
		OMC-2%	9.82	2.37	15.32	3.46
		OMC+2%	5.76	14.47	8.60	21.15
		OMC+4%	10.17	12.98	12.54	15.99
			Meyerhof		Vesic	
			Unsoaked	Soaked	Unsoaked	Soaked
20%clay	modified	OMC-4%	3.15	0.55	2.75	0.46
		OMC-2%	60.46	18.88	39.37	8.22
		OMC+2%	68.81	88.09	36.61	38.35
		OMC+4%	39.70	25.94	33.69	21.91
	standard	OMC-4%	2.74	0.43	2.28	0.34
		OMC-2%	23.26	6.92	15.37	3.51
		OMC+2%	15.82	42.32	8.70	21.48
		OMC+4%	15.61	19.93	12.61	16.08

จากรูปที่ 5-29- 5-36 จะเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนของ  $\frac{q_{u_{cal}}}{q_{cbr}}$  ตามทฤษฎีของ Terzaghi, Meyerhof, Hansen, Vesic กับ  $q_{cbr}$  แล้วจะเห็นได้ว่า สมการตามทฤษฎี Terzaghi ให้ค่าอัตราส่วนของ  $\frac{q_{u_{cal}}}{q_{cbr}}$  น้อยที่สุด และสมการตามทฤษฎีของ Meyerhof ให้ค่าอัตราส่วนของ  $\frac{q_{u_{cal}}}{q_{cbr}}$  มากที่สุด ส่วนสมการตามทฤษฎี Hansen, Vesic ให้ค่าอัตราส่วนของ  $\frac{q_{u_{cal}}}{q_{cbr}}$  ใกล้เคียงกันและอยู่ระหว่าง Terzaghi และ Meyerhof ซึ่งสังเกตได้ว่าที่ OMC±4% จะมีอัตราส่วนที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับค่าที่ OMC±2% แต่เนื่องจากการใช้งานจริงทางภาคปฏิบัติ การบดอัดจะทำอยู่ในช่วง OMC±2% สามารถใช้ประเมินกำลังรับแรงแบกทานจากการทดสอบ CBR ได้ด้วยคุณสมบัติของดิน

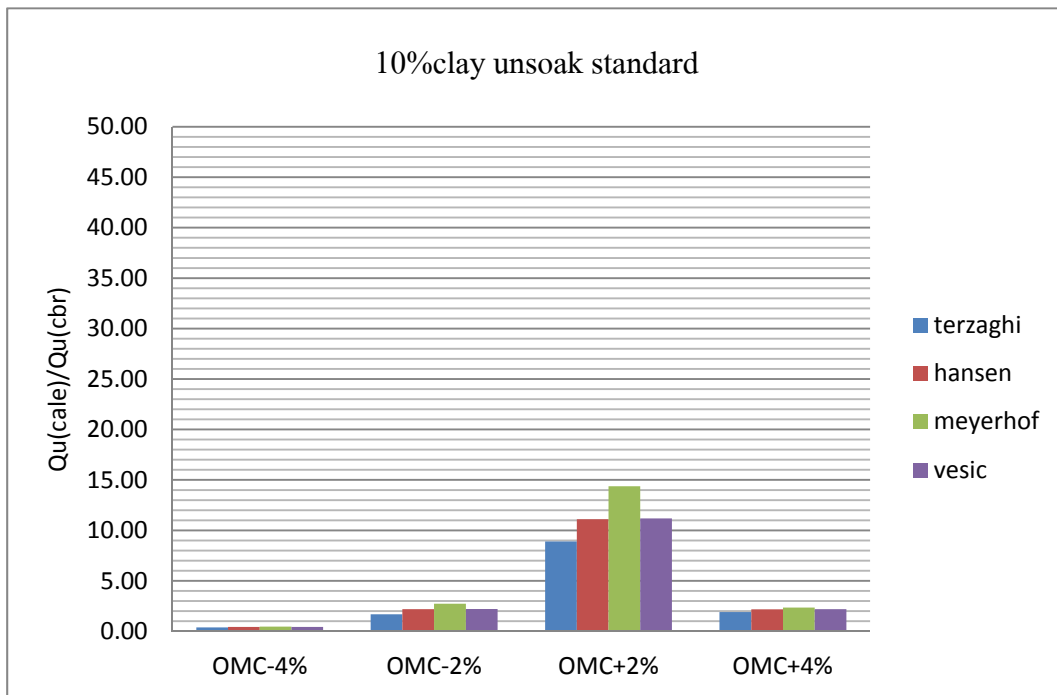
โดยหลักการทดสอบ CBR แล้ว ค่าอัตราส่วนของ  $\frac{q_{u_{cal}}}{q_{cbr}}$  จะมีค่ามากกว่า 1 เนื่องจากการทดสอบ CBR เป็นการทดสอบการกดตัวอย่างที่ระดับความลึกหนึ่งแล้วนำมาสรุปผล ซึ่งไม่ได้ทำการกดตัวอย่างจนถึงจุดวิบัติ ซึ่งกราฟเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงแบกทานดังกล่าว เพื่อใช้ในการทำนายกำลังรับแรงแบกทานโดยใช้คุณสมบัติต่างๆของดินจะทำให้สามารถประเมินกำลังรับแรงแบกทานของการทดสอบ CBR โดยไม่จำเป็นต้องทำการทดสอบ



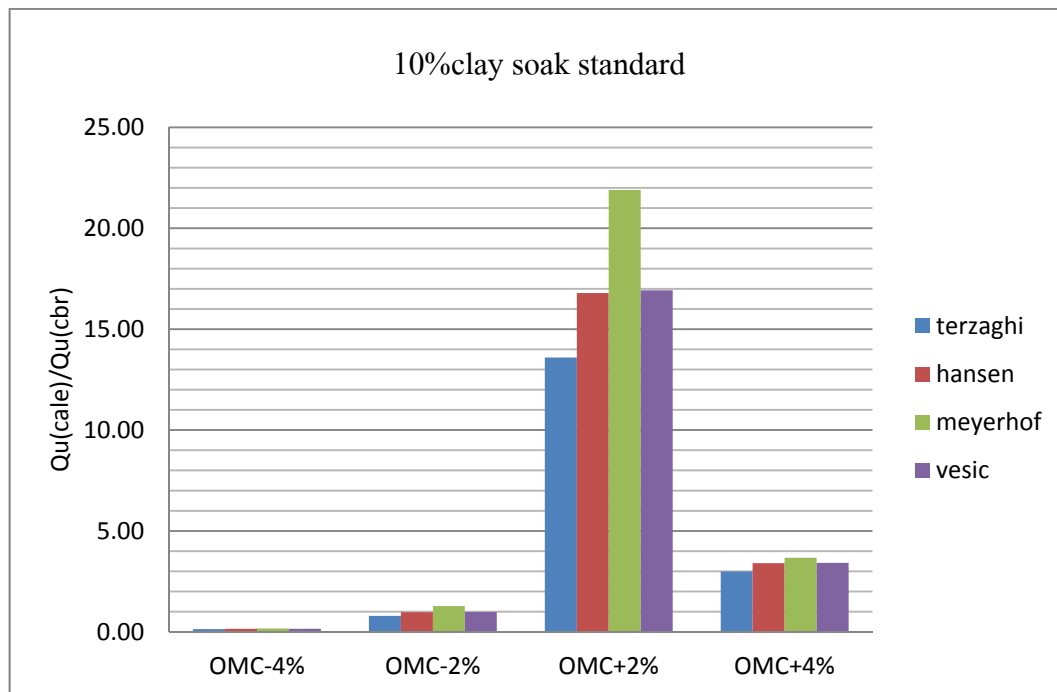
รูปที่ 5-29 อัตราส่วนของ  $\frac{q_{u\text{cal}}}{q_{\text{cbr}}}$  ที่ 10%clay Unsoaked modified



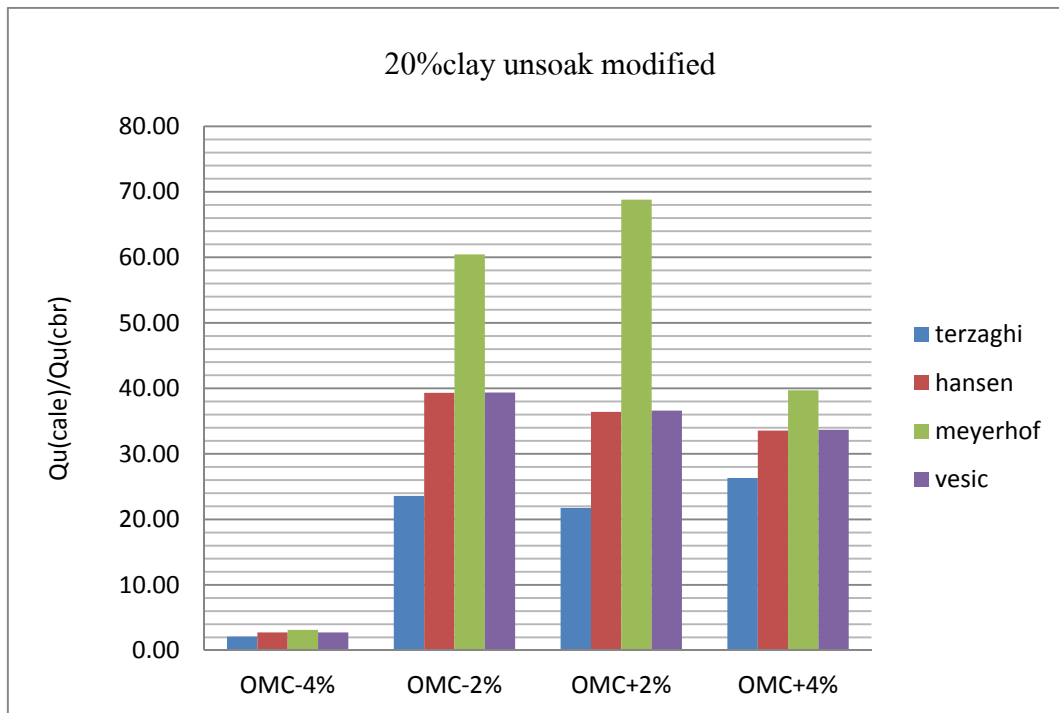
รูปที่ 5-30 อัตราส่วนของ  $\frac{q_{u\text{cal}}}{q_{\text{cbr}}}$  ที่ 10%clay soaked modified



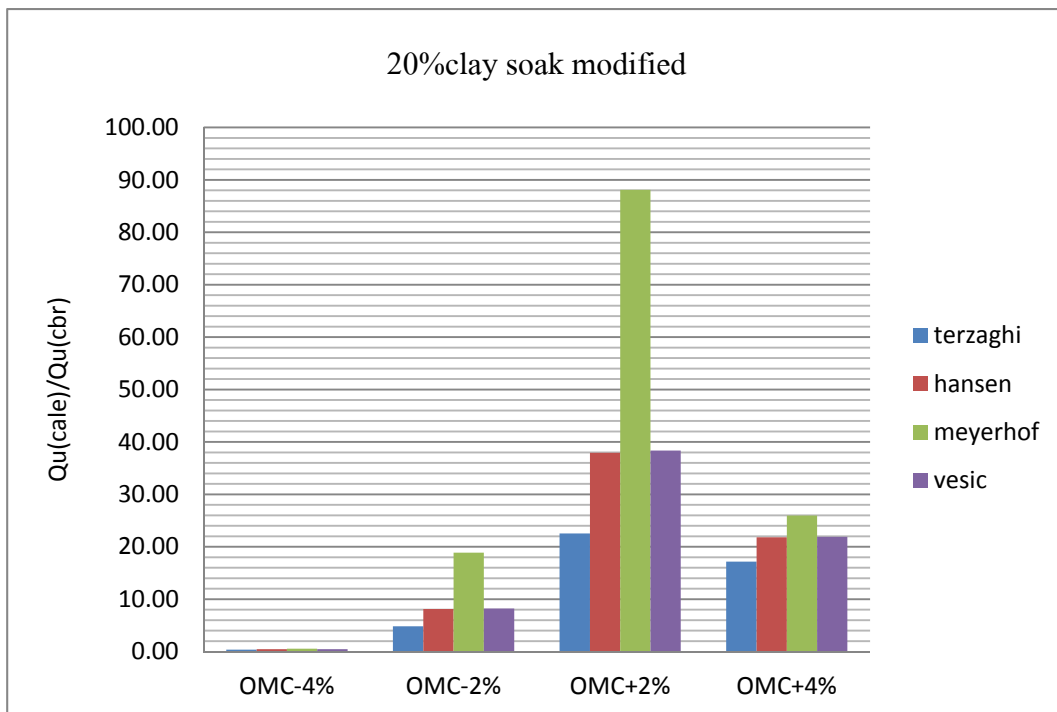
รูปที่ 5-31 อัตราส่วนของ  $\frac{q_{u_{cal}}}{q_{cbr}}$  ที่ 10%clay soaked standard



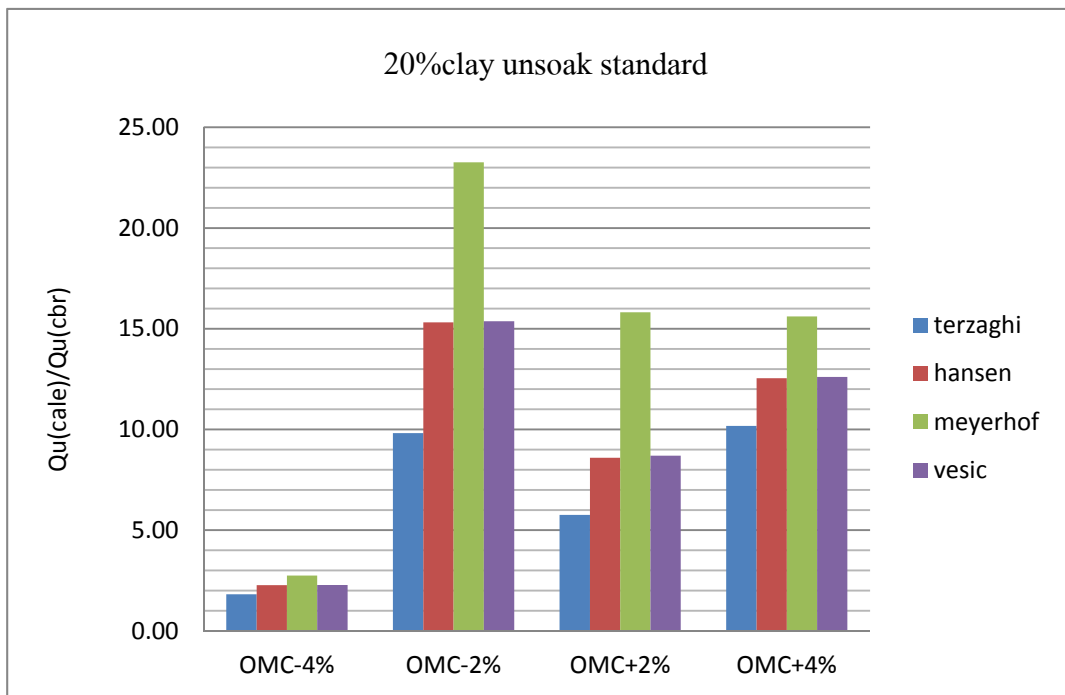
รูปที่ 5-32 อัตราส่วนของ  $\frac{q_{u_{cal}}}{q_{cbr}}$  ที่ 10%clay soaked standard



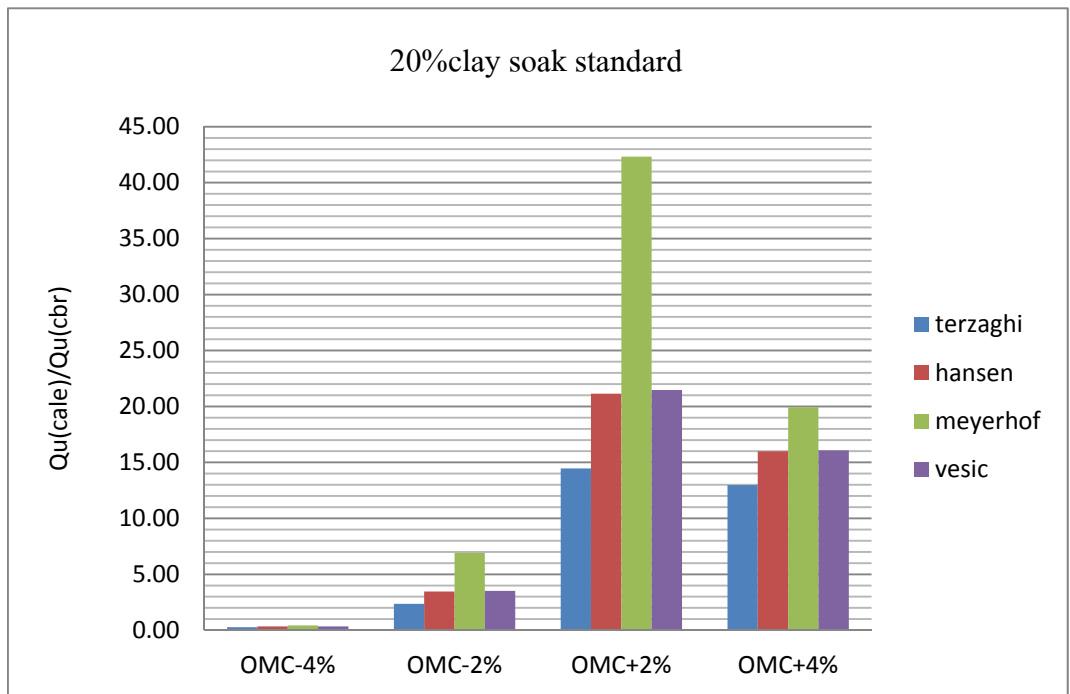
รูปที่ 5-33 อัตราส่วนของ  $\frac{q_{u_{cal}}}{q_{cbr}}$  ที่ 20%clay Unsoaked modified



รูปที่ 5-34 อัตราส่วนของ  $\frac{q_{u_{cal}}}{q_{cbr}}$  ที่ 20%clay soaked modified



รูปที่ 5-35 อัตราส่วนของ  $\frac{q_{u_{cal}}}{q_{cbr}}$  ที่ 20%clay Unsoaked standard



รูปที่ 5-36 อัตราส่วนของ  $\frac{q_{u_{cal}}}{q_{cbr}}$  ที่ 20%clay soaked standard

## บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ดำเนินการศึกษาผลกระทบของปริมาณดินเหนียวที่มีอยู่ในดินทราย 10% และ 20% ซึ่งในการทดลองนั้นจะทำการกำหนดความหนาแน่นตามแบบมาตรฐานและสูงกว่ามาตรฐาน โดยจะนำความหนาแน่นต่าง ๆ นั้นมาทำกระบวนการทดสอบแบบ direct shear, Tempe cell, unconfined, suction, และ CBR จะทำให้ได้ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนที่จุดวิบัติ ( $\tau_f$ ) และหน่วยแรงประสิทธิผลที่จุดวิบัติ ( $\sigma'_f$ ) จากนั้นนำค่าเหล่านี้ไปทำการวิเคราะห์หาค่าด้วยสมการของ Fredlund ซึ่งจะให้ได้ค่าคุณสมบัติต่างๆของดินตามที่ต้องการ โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

### ผลกระทบของปริมาณความชื้นในการบดอัดต่อคุณสมบัติต่างๆ

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ปริมาณความชื้นในการบดอัดมีผลกระทบต่อความหนาแน่นของดิน เป็นไปตามทฤษฎีในการบดอัดส่วนพลังงานในการบดอัดจะไม่มีผลต่อกระทบต่อแรงดูดภายในดิน ซึ่งเมื่อทำการเพิ่มปริมาณดินเหนียว จะทำให้กำลังในการรับแรงและแรงดูดในดินเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณความชื้น จะทำให้ค่าแรงดูดในดินลดลงและกำลังในการรับแรงลดลงเช่นเดียวกัน ทำให้เห็นว่า แรงดูดภายในดินมีจะผลกระทบโดยตรงต่อคุณสมบัติในการรับแรงของดิน และทางด้านพลังงานในการบดอัดจะส่งผลให้ดินมีคุณสมบัติในการแข็งแรงมากยิ่งขึ้นเมื่อพลังงานในการบดอัดมากขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน

### ผลกระทบของกำลังรับแรงของดินที่มีผลมาจากปริมาณของดินเหนียวที่มีอยู่ในดินทราย

จากผลการทดสอบหาลำดับรับแรงของดินสามารถสรุปได้ว่า ปริมาณดินเหนียวที่มีอยู่ในดินทรายหากเพิ่มปริมาณของดินเหนียวมากขึ้นก็จะทำให้กำลังรับแรงของดินเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากว่าปริมาณของดินเหนียวนั้นมีส่วนช่วยทำให้ค่ากำลังรับแรงที่ได้จากผลการทดสอบสูงมากขึ้นตามไปด้วย

### ผลกระทบของกำลังรับแรงของดินที่มีผลมาจากความชื้นที่อยู่ในดิน

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงของดินสามารถสรุปได้ว่า หากความชื้นที่มีอยู่ในดินเกิดการเปลี่ยนแปลงก็จะทำให้ส่งผลกระทบต่อกำลังรับแรงของดิน ซึ่งหากมีปริมาณความชื้นอยู่ในดินมากก็จะส่งผลให้ดินมีกำลังรับแรงลดน้อยลง และหากในดินมีความชื้นจนดินอิ่มตัวด้วยน้ำก็จะทำให้ดินนั้นสูญเสียกำลังรับแรงหรือมีค่ากำลังรับแรงของดินเท่ากับศูนย์ ในกรณีเดียวกันหากดินไม่มีความชื้นในดินอยู่เลยก็จะทำให้กำลังรับแรงของดินมีค่าเท่ากับศูนย์เช่นกัน

### ผลกระทบของกำลังรับแรงของดินที่มีผลมาจากความหนาแน่นของดิน

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงของดินสามารถสรุปได้ว่า หากความหนาแน่นของดินมีการเปลี่ยนแปลงก็จะส่งผลให้กำลังรับแรงของดินเกิดการเปลี่ยนแปลงตามไป โดยหากดินมีความหนาแน่นที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงของดินมีค่ามากขึ้นตามความหนาแน่นที่เพิ่มมากขึ้นด้วย

คุณสมบัติทางด้านกำลังด้วยทฤษฎีของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำของ Fredlund

จากการทดลอง ทำให้ทราบถึงผลของตัวแปร  $c'$ ,  $\phi'$ ,  $\phi^b$  ที่เป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการบ่งบอกถึงคุณสมบัติทางการรับกำลังของดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ความหนาแน่นและพลังงานต่างๆ และสามารถใช้ในการประเมินคุณสมบัติทางด้านกำลังของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำในความชื้นต่างๆของดินได้

การประยุกต์คุณสมบัติของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

จากการทดลอง สามารถใช้คุณสมบัติทางด้านกำลังของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ เพื่อประเมินกำลังในการรับแรงของการทดสอบแคลิฟอร์เนีย แบริ่งเรโซ โดยใช้อัตราส่วนของ  $\frac{q_{ucal}}{q_{cbr}}$  ในช่วงความชื้นสำหรับการปฏิบัติจริงที่ OMC+2% และ OMC -2% เพื่อช่วยในการลดขั้นตอนการทดสอบเมื่อทราบคุณสมบัติของดิน

## เอกสารอ้างอิง

- อัคคพัฒน์ สว่างสุริย์ (2551), “ผลจากการเปลี่ยนแปลงค่า Suction และปริมาณความชื้นต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินบดอัดแน่น”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 13, จัดโดยมหาวิทยาลัยศรีปทุม
- Agus, S. S., Schanz, T., and Fredlund, D. G. (2010), “Measurements of suction versus water content for bentonite–sand mixtures”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 47, No. 5, pp. 583-594
- Cokca, E., Erol, O., and Armangil, F. (2004), “Effects of compaction moisture content on the shear strength of an unsaturated clay”, *Geotechnical & Geological Engineering*, Vol. 22, Issue 2, pp 285-297
- Krahn, J. and Fredlund, D. G. (1972), “On total matric and osmotic suction”, *Soil Science*, Vol. 114, No. 5, pp. 339-348
- Lu, N. and Likos, W. J. (2004), *Unsaturated Soil Mechanics*, John Wiley & Sons



## ผลผลิต

สยาม ยิ้มศิริ, นิติ กุญช, และ ชัยวัฒน์ แก้วจันทร์ (2559), “ผลกระทบของความชื้นในการבודอัดต่อคุณสมบัติของดินבודอัด”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21, จัดโดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย



## ผลกระทบของความชื้นในการบดอัดต่อคุณสมบัติของดินบดอัด

### Effects of molding water content on properties of compacted soil

สยาม ยิ้มศิริ<sup>1\*</sup> นิตี กฤษชู<sup>1</sup> และ ชัยวัฒน์ แลวจันทร์<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของความชื้นในการบดอัดต่อคุณสมบัติของทรายปนดินเหนียวบดอัด โดยคุณสมบัติของดินที่สนใจคือ (i) หน่วยน้ำหนักแห้ง, (ii) กำลัง (unconfined compressive strength และ CBR), (iii) การบวมตัว, และ (iv) matric suction นอกจากนี้ได้นำข้อมูล unconfined compressive strength และ matric suction ไปใช้ในการวิเคราะห์สมการกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำแบบ extended Mohr-Coulomb และหลังจากนั้นได้ใช้สมการกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ได้ประมาณค่า CBR ที่ความชื้นในการบดอัดต่างๆเทียบกับค่าที่วัดได้ ข้อมูลเหล่านี้ได้ใช้ในการอธิบายผลกระทบของความชื้นในการบดอัดดิน

คำสำคัญ: ดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ, การบดอัดดิน, กำลังรับแรงเฉือน, การทดสอบซีบีอาร์

#### Abstract

This research studies effects of molding water content on properties of compacted clayey sand. The soil properties of interest are (i) dry unit weight, (ii) strength (unconfined compressive strength and CBR), (iii) swelling, and (iv) matric suction. Moreover, the data of unconfined compressive strength and matric suction are employed to analyze failure envelope of extended Mohr-Coulomb type. This obtained failure envelope is used to predict CBR results at various molding water contents compared to experimental results. The obtained data are used to explain the effects of molding water content on properties of compacted soil.

Keywords: unsaturated soil, soil compaction, shear strength, CBR test

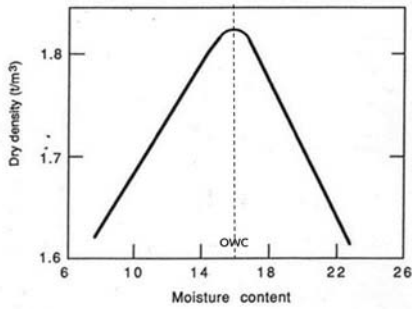
#### 1. คำนำ

ดินเป็นวัสดุตามธรรมชาติที่มีอยู่ทั่วไปและสามารถนำไปเป็นวัสดุก่อสร้างได้ โดยต้องมีการปรับปรุงคุณภาพและวิธีที่ง่ายและนิยมที่สุดคือการบดอัดดิน โดยทั่วไปการบดอัดดินคือการทำให้ดินในสภาพไม่อิ่มตัวด้วยน้ำแน่นขึ้นด้วยการทำให้อนุภาคดินเข้าใกล้กันมากขึ้นด้วยแรงกระทำซึ่งลดช่องว่างในดินที่เป็นอากาศโดยที่ปริมาตรของของแข็งและน้ำยังคงเท่าเดิม ผลของการบดอัดดินที่สำคัญคือ (i) ทำให้กำลังเพิ่มขึ้น, (ii) ลดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร, (iii) ลดความพรุนน้ำ, และ (iv) ลดการบวมตัวและหดตัว

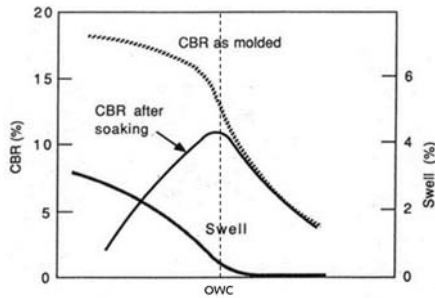
Proctor [1] ได้แสดงว่าความชื้นในการบดอัดมีผลกระทบต่อการบดอัดดินอย่างมาก สำหรับพลังงานการบดอัดหนึ่งๆนั้นเมื่อดินมีความชื้นน้อยจะทำให้เกิด capillary force ซึ่งทำให้เกิดความฝืดระหว่างอนุภาคดินทำให้การบดอัดทำได้ยาก เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจะทำให้ capillary force ลดลง ดังนั้นความฝืดระหว่างอนุภาคดินจึงลดลง ในช่วงนี้การเพิ่มน้ำในดินทำให้เกิดการหล่อลื่นระหว่างอนุภาคและช่วยในการจัดเรียงตัวของอนุภาค ผลที่นี้จะเกิดขึ้นจนกระทั่งน้ำเต็มช่องว่างในดินทั้งหมด เมื่อถึงจุดนี้ดินจะมีหน่วยน้ำหนักแห้งมากที่สุดและมี void ratio น้อยที่สุด ความชื้นที่จุดนี้เรียกว่า optimum water content (owc) หากเพิ่มน้ำเข้าไปอีกจะทำให้ดินมีหน่วยน้ำหนักแห้งลดลงและดินจะอ่อนตัวลงดังแสดงในรูปที่ 1(a) ค่า California Bearing Ratio (CBR) ของดินบดอัดที่พลังงานคงที่จะขึ้นกับความชื้นที่ทำการบดอัดดังแสดงในรูปที่ 1(b) ค่า CBR unsoaked จะมีค่าสูงเมื่อบดอัดที่ความชื้นแห้งกว่า owc แต่ค่า CBR soaked จะมีค่าสูงเมื่อบดอัดที่ความชื้น owc ตัวอย่างดินที่บดอัดที่ความชื้นสูงจะมีการ swell น้อย รูปที่ 2 แสดงว่าตัวอย่างดินที่มีความหนาแน่นแห้งเท่ากันแต่มีความชื้นอยู่ด้านเปียกและแห้งของ owc จะมี stress-strain curve จากการทดสอบ unconfined compression (UC) ต่างกัน โดยตัวอย่างดินที่มีความชื้นน้อยกว่า owc จะมี peak strength ที่สูงและมี strain ที่วิกฤตต่ำ ตัวอย่างดินที่มีความชื้นมากกว่า owc จะมี strength ต่ำและมี strain ที่วิกฤตสูง

\* ผู้เขียนผู้รับผิดชอบบทความ (Corresponding author)

E-mail address: ysiam@buu.ac.th

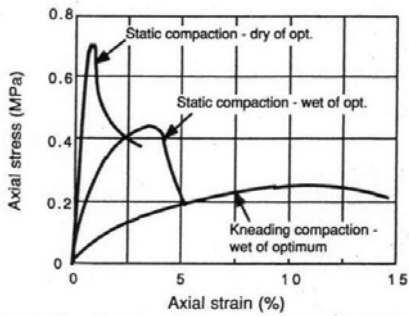


(a) Compaction curve



(b) CBR

รูปที่ 1 ผลกระทบของความชื้นในการบดอัด [2]

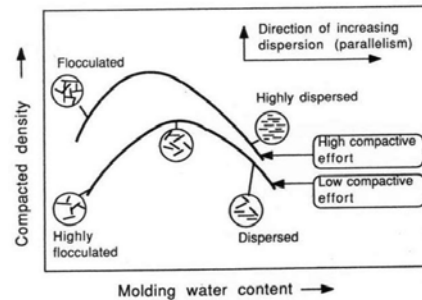


รูปที่ 2 ผลกระทบของความชื้นในการบดอัดต่อผลการทดสอบ UC [3]

Lambe [4] อธิบายว่าความชื้นในการบดอัดมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของดินเหนียวบดอัดเนื่องจากความแตกต่างในการจัดเรียงตัวของอนุภาคดิน ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยเมื่อความชื้นในการบดอัดน้อยจะทำให้อนุภาคดินมีขอบที่มีประจุบวกติดกับผิวหน้าที่มีประจุลบและทำให้เกิดโครงสร้างแบบ flocculated structure ที่มีการจัดเรียงตัวแบบระเกะระกะ เมื่อความชื้นในการบดอัดเพิ่มขึ้นจะเพิ่มแรงผลักระหว่างอนุภาคทำให้เกิดการจัดเรียงตัวแบบขนานกันที่ความชื้นใกล้ owc หากมีความชื้นมากกว่า owc จะเพิ่มการจัดเรียงตัวของอนุภาคแบบขนานที่เรียกว่า dispersed structure โดยดินที่มีโครงสร้างแบบ flocculated จะมีกำลังสูงที่ความเครียดต่ำ, มี permeability สูง, มีการหดตัวต่ำ, และมีการบวมตัวสูงกว่าดินที่มีโครงสร้างแบบ dispersed

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของความชื้นในการบดอัดต่อคุณสมบัติของทรายปนดินเหนียวบดอัด โดยคุณสมบัติของดินที่สนใจคือ (i) หนว้น้ำหนักแห้ง, (ii) กำลัง (unconfined compressive strength และ CBR), (iii) การบวมตัว, และ (iv) matric suction ข้อมูล unconfined compressive strength และ matric suction ที่ได้จะใช้ในการวิเคราะห์สมการกำลังรับ

แรงเฉือนของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำแบบ extended Mohr-Coulomb หลังจากนั้นจะใช้สมการดังกล่าวประมาณค่า CBR ที่ความชื้นในการบดอัดต่างๆเทียบกับค่าที่วัดได้ ข้อมูลเหล่านี้จะใช้ในการอธิบายผลกระทบของความชื้นในการบดอัด



รูปที่ 3 ผลกระทบของความชื้นในการบดอัดต่อ soil structure [4]

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำคือดินที่มีค่า degree of saturation น้อยกว่า 100% ดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำมีส่วนประกอบ 3 ส่วนได้แก่ของแข็ง (เม็ดดิน), น้ำ, และอากาศ พฤติกรรมของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำนั้นเกี่ยวข้องกับแรงและพลังงานที่ใช้ในการยึดส่วนประกอบของดินทั้งสามส่วนเข้าไว้ด้วยกัน ดังนั้นนอกจากทฤษฎีทางกลศาสตร์และชลศาสตร์แล้วพื้นฐานของฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับแรงดึงดูดระหว่างผิวของอนุภาคจึงได้ถูกนำมาใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำส่งผลให้ทฤษฎีกำลังรับแรงเฉือนแบบประสิทธิผลของ Terzaghi [5] ไม่สามารถประยุกต์ใช้กับดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำได้เนื่องจาก pore water pressure มีค่าเป็นลบ Fredlund et al. [6] เสนอสมการกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำเรียกว่า extended Mohr-Coulomb ดังสมการที่ (1) โดยใช้ตัวแปร stress state 2 ตัวคือ net normal stress ( $\sigma - u_a$ ) และ matric suction ( $\psi = u_a - u_w$ ) สมการที่ (1) แสดงเป็นระนาบที่เรียกว่า extended Mohr-Coulomb failure envelope ในรูปที่ 4

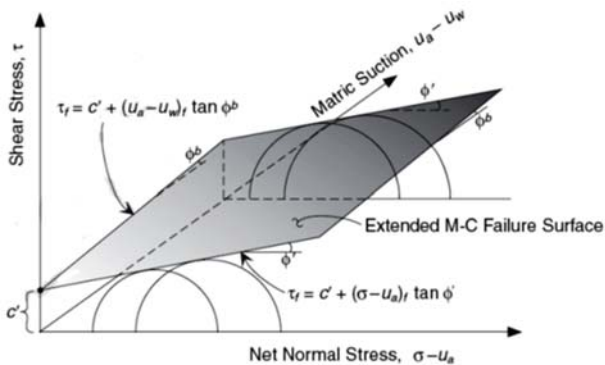
$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)_f \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \tan \phi_b \quad (1)$$

โดยที่  $\tau_f$  = shear stress ที่สภาพวิกฤติ,  $c'$  = effective cohesion คือจุดตัดของ extended Mohr-Coulomb failure envelope กับแกน shear stress เมื่อ net normal stress และ matric suction เท่ากับ 0,  $(\sigma - u_a)_f$  = net normal stress,  $\sigma_f$  = total normal stress,  $u_a$  = pore-air pressure,  $\phi'$  = internal friction angle ที่สัมพันธ์กับ net normal stress,  $(u_a - u_w)_f$  = matric suction ( $\psi$ ),  $u_w$  = pore-water pressure,  $\phi_b$  = internal friction angle ที่สัมพันธ์กับ matric suction

## 3. ตัวอย่างดินและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบเป็นส่วนผสมของทราย 80% และดินเหนียว 20% โดยน้ำหนัก โดยทรายเป็นประเภท SP (ตาม USCS) และมีค่า  $C_u=4.4$  และ  $C_c=0.34$  ส่วนดินเหนียวเป็นประเภท CH (ตาม USCS) และมีค่า  $LL=54$ ,  $PL=27$ , และ  $PI=27$  อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นอุปกรณ์ตามมาตรฐาน ASTM ในการทดสอบดังนี้ (i) การบดอัดดินแบบ

Modified Proctor [8], (ii) การทดสอบ California Bearing Ratio (CBR) [9], และ (iii) การทดสอบ unconfined compression [10] ส่วนการวัด matric suction ในตัวอย่างดินใช้ tensiometer ของบริษัท Delta-T Devices รุ่น SWT-5 ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 4 Extended Mohr-Coulomb failure envelope [7]



รูปที่ 5 SWT-5 - miniature tensiometer (ที่มา Delta-T Devices)

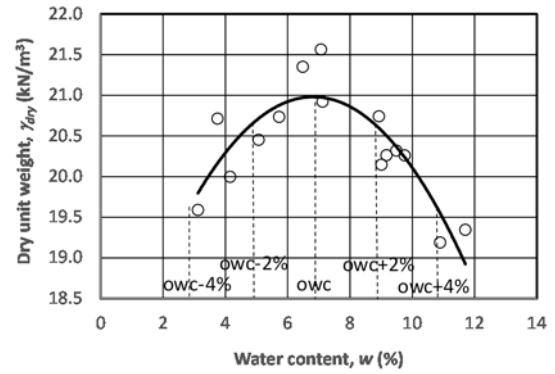
## 4. ผลการทดสอบ

### 4.1 ผลการทดสอบการบดอัดดิน

ผลการทดสอบการบดอัดดินตาม modified Proctor [8] ได้แสดงในรูปที่ 6 โดยได้  $\gamma_{dry,max} = 21.0 \text{ kN/m}^3$  และ  $owc = 6.8\%$  จากผลการทดสอบนี้จะสนใจตัวอย่างดินที่มีหน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากันแต่มีความชื้นทั้งในด้านเปียกและด้านแห้งของ owc โดยหน่วยน้ำหนักแห้งที่สนใจจะตรงกับ ความชื้น  $owc \pm 2\%$  และ  $owc \pm 4\%$  ดังแสดงข้อมูลในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบ

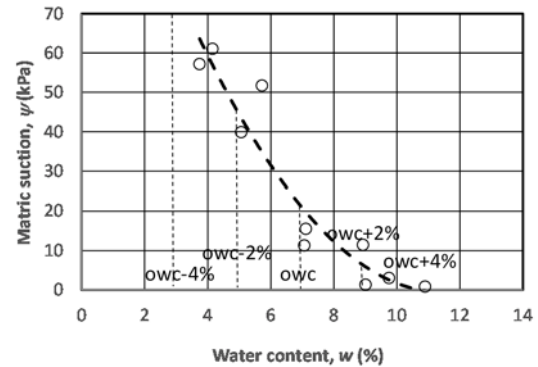
ความชื้นกำหนด	ความชื้น (%)	หน่วยน้ำหนักแห้ง, $\gamma_{dry}$ ( $\text{kN/m}^3$ )	Matric suction, $\psi$ (kPa)	CBR		Unconfined compressive strength, $q_{max}$ (kPa)
				unsoaked	soaked	
owc-4%	2.8	19.6	158	430	50	1050
owc-2%	4.8	20.8	49	430	100	800
owc	6.8	21.0	22	220	120	370
owc+2%	8.8	20.8	5	40	40	140
owc+4%	10.8	19.6	1	10	10	60



รูปที่ 6 ผลการทดสอบการบดอัดดินตาม modified Proctor

### 4.2 ผลการทดสอบการวัด matric suction

ผลการทดสอบการวัด matric suction ด้วย tensiometer ได้แสดงในรูปที่ 7 โดยแสดงว่าเมื่อทำการบดอัดตัวอย่างดินที่ความชื้นลดลงจะทำให้มีค่า matric suction มากขึ้น ค่า matric suction ของตัวอย่างดินที่มีความชื้นที่สนใจอ่านได้จากเส้นประและสรุปค่าในตารางที่ 1



รูปที่ 7 ผลการทดสอบการวัด matric suction

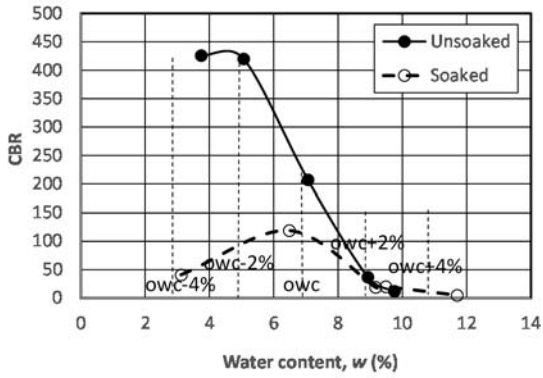
### 4.3 ผลการทดสอบ California Bearing Ratio

ผลการทดสอบ California Bearing Ratio (CBR) [9] ได้แสดงในรูปที่ 8 โดย CBR unsoaked มีค่าสูงเมื่อตัวอย่างดินมีความชื้นน้อยกว่า owc และมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อมีความชื้นเพิ่มขึ้น ส่วน CBR soaked มีค่าน้อยกว่า CBR unsoaked อย่างมากที่ด้านแห้ง แต่มีค่าใกล้เคียงกับ CBR unsoaked ที่ด้านเปียก โดย CBR soaked มีค่ามากที่สุดที่ความชื้นประมาณ owc รูปที่ 9 แสดงการบวมตัวของดินระหว่างการทดสอบ CBR soaked ซึ่งพบว่าค่า swell ลดลงเมื่อความชื้นในการบดอัดเพิ่มขึ้น ผลการทดสอบที่ได้นี้ตรงกับผลการทดสอบของ Yoder [2] ที่ได้แสดงมาแล้วในรูปที่ 1 ค่า CBR ของตัวอย่างดินที่มีความชื้นที่สนใจอ่านได้จากเส้นประและสรุปค่าในตารางที่ 1

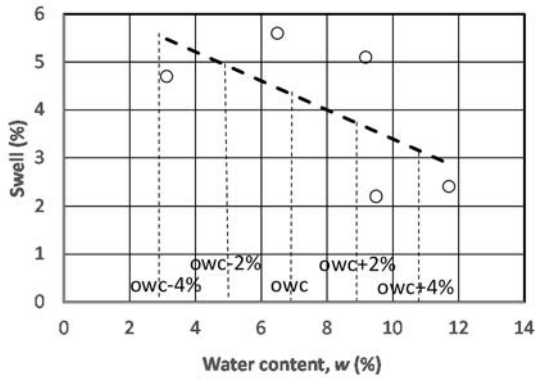
### 4.4 ผลการทดสอบ unconfined compression

รูปที่ 10 แสดงค่า unconfined compressive strength ( $q_{max}$ ) จากผลการทดสอบ unconfined compression (UC) [7] โดยการทดสอบนี้กระทำกับตัวอย่างที่ได้จากการบดอัดในโมลขนาด 4 นิ้วซึ่งมีอัตราส่วน  $H/D = 1.1$  ค่าที่ได้จึงต้องทำการปรับแก้โดยคูณด้วยค่า 0.92 [11] ผลการทดสอบแสดงว่าเมื่อทำการบดอัดตัวอย่างดินที่ความชื้นลดลงจะทำให้มีค่า unconfined compressive strength มากขึ้น รูปที่ 11 แสดง stress-

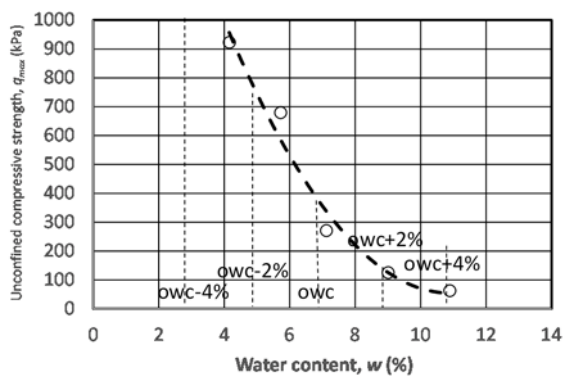
strain curve จากการทดสอบ UC ซึ่งแสดงว่าตัวอย่างดินที่มีความชื้นน้อยกว่า owc จะมี peak strength ที่สูงและมี strain ที่วิบัติต่ำ ตัวอย่างดินที่มีความชื้นมากกว่า owc จะมี strength ที่ต่ำและมี strain ที่วิบัติสูง ผลการทดสอบที่ได้นี้ตรงกับผลการทดสอบของ Lee & Harley [3] ที่ได้แสดงมาแล้วในรูปที่ 2 ค่า unconfined compressive strength ของตัวอย่างดินที่มีความชื้นที่สนใจอ่านได้จากเส้นประและสรุปค่าในตารางที่ 1



รูปที่ 8 ผลการทดสอบ California Bearing Ratio



รูปที่ 9 ผลการทดสอบ swell



รูปที่ 10 ผลการทดสอบ unconfined compression

## 5. วิเคราะห์ผลการทดสอบ

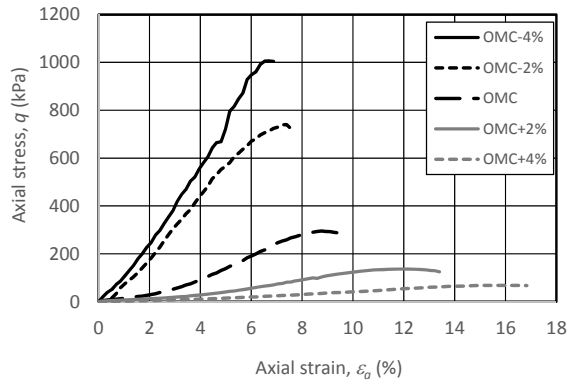
ผลการทดสอบ unconfined compression และ matric suction ในตารางที่ 1 ได้ใช้ในการวิเคราะห์หาคุณสมบัติของดินตาม extended Mohr-Coulomb failure envelope โดยมีสมมุติฐานว่า (i) ตัวอย่างดินที่มีหน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากันมีคุณสมบัติตาม extended Mohr-Coulomb

failure envelope เหมือนกัน และ (ii) ใช้ matric suction ที่วัดได้ก่อนการทดสอบ unconfined compression ในการวิเคราะห์ โดยเลือกวิเคราะห์ตัวอย่างดินที่มีหน่วยน้ำหนักแห้ง 19.6 และ 20.8 kN/m<sup>3</sup> ซึ่งตรงกับตัวอย่างดินที่มีความชื้น owc±4% และ owc±2% ตามลำดับ ตัวอย่างวิธีการวิเคราะห์สำหรับตัวอย่างดินที่มีความชื้น owc±2% เป็นดังนี้

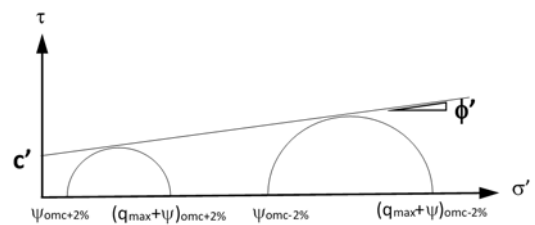
- ใช้ผลการทดสอบ unconfined compression และ matric suction วาด Mohr circle ในกราฟ  $\tau-\sigma'$  เพื่อหาค่า  $c'$  และ  $\phi'$  ดังแสดงในรูปที่ 12

- จากค่า  $c'$  และ  $\phi'$  ที่ได้ วาดระนาบ failure plane ให้สัมผัสกับ Mohr circle ในกราฟ  $\tau-(\sigma-u_a)-(u_a-u_w)$  เพื่อหาค่า  $\phi^b$  ดังแสดงในรูปที่ 13

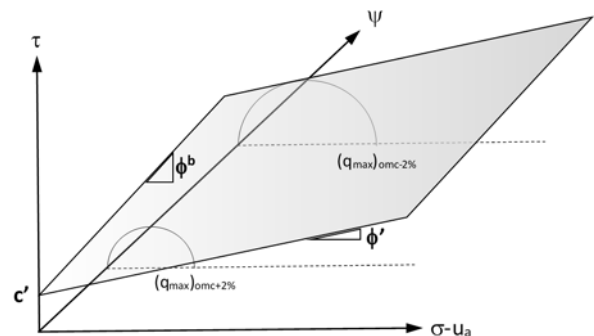
ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ดังกล่าวได้แสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 11 Stress-strain curve จากการทดสอบ UC



รูปที่ 12 การหาค่า  $c'$  และ  $\phi'$



รูปที่ 13 การหาค่า  $\phi^b$

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ extended Mohr-Coulomb failure envelope

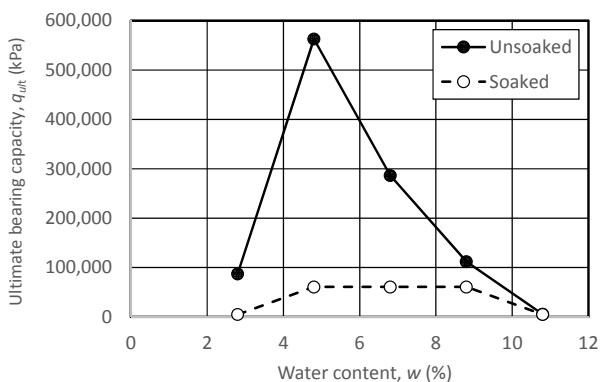
หน่วยน้ำหนักแห้ง, $\gamma_{dry}$ (kN/m <sup>3</sup> )	ความชื้น	c' (kPa)	$\phi'$ (°)	$\phi^b$ (°)
20.8	owc±2%	8.4	62	62
19.6	owc±4%	10.1	50	49

หากทราบค่า matric suction ของตัวอย่างดินที่ความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งต่างๆสามารถหาสมการ failure envelope ของตัวอย่างดินดังกล่าวได้โดยการแทนค่า  $\Psi$  และค่าในตารางที่ 2 ลงในสมการที่ 1 ผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงในตารางที่ 3 หากใช้คุณสมบัติในตารางที่ 3 วิเคราะห์หาค่า ultimate bearing capacity ตามทฤษฎี Terzaghi [12] ของการกดแท่ง CBR จะได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 14 โดยในกรณี soaked ใช้  $\Psi=0$  จะเห็นว่าผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 14 มีลักษณะคล้ายกับผลการทดสอบ CBR ที่แสดงในรูปที่ 8 ดังนั้นอาจสรุปได้ว่าผลกระทบของความชื้นต่อคุณสมบัติดินบดอัดมาจากความแตกต่างของ matric suction ของตัวอย่างดิน

ตารางที่ 3 Failure envelope ของดินที่มีหน่วยน้ำหนักแห้งและความชื้นต่างๆ

หน่วยน้ำหนักแห้ง, $\gamma_{dry}$ (kN/m <sup>3</sup> )	ความชื้น	Matric suction, $\Psi$ (kPa)	Failure envelope
20.8	owc-2%	49	$\tau = 100.6 + (\sigma - u_a) \tan 62$
20.8	owc+2%	5	$\tau = 17.8 + (\sigma - u_a) \tan 62$
19.6	owc-4%	158	$\tau = 191.9 + (\sigma - u_a) \tan 50$
19.6	owc+4%	1	$\tau = 11.3 + (\sigma - u_a) \tan 50$
21.0	owc	22	$\tau = 49.8 + (\sigma - u_a) \tan 62$

หมายเหตุ: ตัวอย่างดินที่มีหน่วยน้ำหนักแห้ง 21.0 kN/m<sup>3</sup> (ความชื้นที่ owc) ใช้คุณสมบัติ extended Mohr-Coulomb failure envelope เหมือนกับตัวอย่างดินที่มีหน่วยน้ำหนักแห้ง 20.8 kN/m<sup>3</sup> (ความชื้นที่ owc±2%)



รูปที่ 14 ultimate bearing capacity ของการกดแท่ง CBR

## 6. วิจัยและสรุปผลการทดสอบ

งานวิจัยนี้สามารถแสดงว่าผลกระทบของความชื้นต่อคุณสมบัติดินบดอัดมาจากความแตกต่างของ matric suction ของตัวอย่างดิน โดยแสดงว่าผลกระทบของความชื้นต่อผลการทดสอบ CBR ทั้ง unsoaked และ soaked สามารถวิเคราะห์แนวโน้มได้โดยใช้ทฤษฎีกำลังของดินในสภาพไม่

อิ่มตัวด้วยน้ำ อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์หา Extended Mohr-Coulomb failure envelope เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่รวบรวมโดย Fredlund & Rahardjo [13] พบว่าค่า  $\phi^b$  มีค่ามากเกินไปและยังแสดงว่าค่า  $\phi^b$  ควรจะน้อยกว่าค่า  $\phi'$  เหตุผลของข้อผิดพลาดนี้น่าจะมาจากการใช้ค่า  $\Psi$  จากสภาพเริ่มต้นของการทดสอบ UC เนื่องจากค่า  $\Psi$  ที่วัดมากกว่าค่าเริ่มต้นเพราะตัวอย่างดินเกิดการขยายตัวระหว่างการเลื่อน ซึ่งอาจทำให้ค่า  $\phi'$  และ  $\phi^b$  ที่ได้จากการวิเคราะห์นี้มากกว่าค่าจริง นอกจากนี้สมมุติฐานที่ว่าดินที่มีหน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากันจะมีคุณสมบัติของ extended Mohr-Coulomb failure envelope เดียวกันก็อาจไม่เป็นความจริงเนื่องจากความแตกต่างของ soil structure

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 125/2559

## เอกสารอ้างอิง

- [1] R.R. Proctor. "Design and construction of rolled earth dams". *Engineering News Record*, pp. 245-376, 1933.
- [2] E.J. Yoder. *Principles of Pavement Design*, Wiley, 1959.
- [3] K.L. Lee & S.C. Haley. "Strength of compacted clay at high pressure", *J of Soil Mech and Found*, 94(SM6), pp. 1303-1332, 1968.
- [4] T.W. Lambe. "The engineering behavior of compacted clay", *J of Soil Mech and Found*, 84(SM2), pp. 1-35, 1958.
- [5] K. Terzaghi. "The shear resistance of saturated soils", *1<sup>st</sup> ICSMFE*, 1, pp. 54-56, 1936.
- [6] D.G. Fredlund, N.R. Mogenstem, & R.A. Widger. "Shear strength of unsaturated soils", *Canadian Geotech J*, 15(3), pp. 313-321, 1978.
- [7] N. Lu & W.J. Likos. *Unsaturated Soil Mechanics*, Wiley, 2004.
- [8] ASTM D1557. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>)).
- [9] ASTM D1883. Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils.
- [10] ASTM D2166. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil
- [11] มอก 409-2525. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม วิธีทดสอบความต้านแรงอัดของแท่งคอนกรีต.
- [12] K. Terzaghi. *Theoretical Soil Mechanics*, Wiley, 1943.
- [13] D.G. Fredlund & H. Rahardjo, *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, Wiley, 1993.