



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ความถูกต้องและความแม่นยำของผลการทดสอบ Atterberg limit จากการทดสอบหลายวิธี  
Accuracy and precision of Atterberg limit test results from various tests

นางสาววรรณวรางค์ รัตนานิกม

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้  
จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)  
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560  
มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 2560A10802130

สัญญาเลขที่ 155/2560

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ความถูกต้องและความแม่นยำของผลการทดสอบ Atterberg limit จากการทดสอบหลายวิธี

Accuracy and precision of Atterberg limit test results from various tests

นางสาววรรณวรางค์ รัตนานิกม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

กรกฎาคม 2560

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 155/2560

## บทคัดย่อ

โครงการวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบความถูกต้องและแม่นยำของผลการทดสอบหาค่าพิกัดเหลวลและพิกัดพลาสติกของตัวอย่างดินเหนียวที่ได้จากการทดสอบหลายวิธี ได้แก่ (i) วิธีถ้วยคาซา เคนดีและเครื่องมือกรวยตกสำหรับการทดสอบหาค่าพิกัดเหลวล (ii) วิธีการคลึงด้วยมือ วิธีการคลึงด้วยเครื่องคลึง และเครื่องมือกรวยตกสำหรับการทดสอบหาค่าพิกัดพลาสติก การเปรียบเทียบจะถูกพิจารณาเป็นกรณี ดังนี้ (i) วิธีวิเคราะห์ผลแบบ Multipoint method และ One-point method และ (ii) ผลการทดสอบระหว่างห้องปฏิบัติการ (หรือปัจจัยของผู้ทดสอบ) จากผลการศึกษาพบว่า ความถูกต้องและแม่นยำของค่าพิกัดเหลวลที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีถ้วยคาซาเคนดีและเครื่องมือกรวยตก และแต่ละวิธีวิเคราะห์ผลแบบ Multipoint method และ One-point method มีค่าไม่มีความแตกต่างกันมากนัก แต่พบว่าความถูกต้องและแม่นยำของค่าพิกัดพลาสติกจากการทดสอบด้วยวิธีคลึงด้วยมือมีค่าที่ดีกว่าการทดสอบโดยวิธีการคลึงด้วยเครื่องคลึง ผลการทดสอบหาค่าพิกัดเหลวลและพิกัดพลาสติกจากห้องปฏิบัติการต่างๆ พบว่าค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกัน

คำสำคัญ: ค่าพิกัดเหลวล, ค่าพิกัดพลาสติก, ความถูกต้อง, ความแม่นยำ, การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

## Abstract

This research investigates accuracy and precision of liquid and plastic limits test results by Thailand practice. The tests are performed by several available methods, i.e. (i) Casagrande cup and fall cone for liquid limit test and (ii) hand rolling and rolling device for plastic limit test. Comparisons are also investigated for cases of: (i) one-point and multipoint methods and (ii) single-operator and multi-laboratory. The results show that accuracy and precision of liquid limit obtained from Casagrande cup and cone penetrometer and from both one-point and multipoint methods are comparable. However, accuracy and precision of plastic liquid obtained from hand rolling are slightly better than those from rolling device. From this study, it is found that the obtained accuracy is slightly lower than that recommended in ASTM standard, whereas the obtained precision is much lower. The obtained results from plastic limit test of multi-laboratory is the most comparable to the standard.

Keywords: liquid limit, plastic limit, accuracy, precision, laboratory test

## สารบัญเรื่อง

กิตติกรรมประกาศ

บทคัดย่อ

สารบัญ

### บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1/1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	1/3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	1/3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1/4

### บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ	2/1
2.2 ค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit)	2/4
2.2.1 วิธีการทดสอบค่าพิกัดเหลว	2/4
2.2.1.1 วิธีเคาะถ้วยคาซาเกรดตี (Percussion cup method: Casagrande's cup)	2/4
2.2.1.2 วิธีการตักดิ่งของกรวยโดยใช้เครื่องมือกรวยตก (Fall cone method)	2/7
2.3 ค่าพิกัดพิกัดพลาสติก (Plastic Limit, PL)	2/8
2.3.1 วิธีการทดสอบค่าพิกัดพลาสติก	2/8
2.3.1.1 วิธีการคลึง	2/8
2.3.1.2 เครื่องมือกรวยตก (Fall cone method)	2/9
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2/10

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วิธีดำเนินการวิจัย	3/1
3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	3/3
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้การทดสอบ	3/4
3.4 วิธีการทดสอบ	3/6
3.4.1 การทดสอบหาขีดจำกัดเหลว ตามมาตรฐาน)ASTM D-4318(	3/7
3.4.2 การทดสอบหาขีดจำกัดพลาสติก ตามมาตรฐาน)ASTM D-4318(	3/9

### บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

4.1 ผลการทดสอบ	4/1
----------------	-----

4.2 ความสัมพันธ์ของค่า Liquid Limit โดยวิธี Multipoint Liquid Limit และวิธี One-Point Liquid Limit	4/2
4.3 ความสัมพันธ์ของค่า Liquid Limit โดยวิธี Casagrande method และวิธี Cone method	4/4
4.4 ความสัมพันธ์ของค่า Plastic Limit โดยวิธี Hand method และวิธี Rolling Device method	4/5
4.5 ความสัมพันธ์ของค่า Plastic Limit โดยวิธี Hand method และวิธี Cone method	4/6
4.6 การวิเคราะห์ข้อมูลโดยวิธีทางสถิติจากผลการทดสอบของผู้ทดลองคนเดียว	4/7
4.7 การเปรียบเทียบผลการทดสอบจากหลายห้องปฏิบัติการ	4/9
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย</b>	
5.1 สรุปผลการวิจัย	5/1
ผลงานตีพิมพ์	
รายงานการเงิน	
บรรณานุกรม	
ประวัตินักวิจัย	

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 Factors for one-point cone penetrometer liquid limit test	2/7
ตารางที่ 3.1 วิธีการทดสอบ	3/6
ตารางที่ 3.2 จำนวนการเคาะที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบซีดจำกัดเหลว	3/8
ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบหาค่า Atterberg Limits	4/1
ตารางที่ 4.2 ค่า Liquid Limit โดยวิธี Multipoint Liquid Limit และวิธี One-Point Liquid Limit	4/2
ตารางที่ 4.3 ค่า Liquid Limit โดยวิธี Casagrande method และวิธี Cone method	4/5
ตารางที่ 4.4 ค่า Plastic Limit โดยวิธี Hand method และวิธี Rolling Device method	4/6
ตารางที่ 4.5 ค่า Plastic Limit โดยวิธี Hand method และวิธี Cone method	4/6
ตารางที่ 4.6 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Atterberg Limit ในแต่ละวิธีการทดลอง	4/8
ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยของค่า Liquid Limit ที่ส่งตัวอย่างดินไปยังห้องปฏิบัติการตามมหาวิทยาลัยต่างๆ	4/9
ตารางที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยของค่า Plastic Limit ที่ส่งตัวอย่างดินไปยังห้องปฏิบัติการตามมหาวิทยาลัยต่างๆ	4/10



## สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 คุณสมบัติของมวลดิน	2/1
รูปที่ 2.2 สถานะของดินมวลละเอียดเมื่อปริมาณความชื้นในมวลดินแตกต่างกัน	2/2
รูปที่ 2.3 จำนวนครั้งในการเคาะ )N) ในสเกล semi-logarithm และค่าปริมาณความชื้น	2/5
รูปที่ 2.4 การทดสอบความแข็งของฐาน	2/6
รูปที่ 2.5 การทดสอบหาค่าพิกัดพลาสติกโดยวิธีการคลึง	2/9
รูปที่ 3.1 แผนผังวิธีการดำเนินการวิจัย	3/2
รูปที่ 3.2 เบนโทไนท์ (Bentonite)	3/3
รูปที่ 3.3 ดินธรรมชาติ (จากจังหวัดพิจิตร)	3/3
รูปที่ 3.4 ดินเหนียวเกาลิน (Kaolin)	3/3
รูปที่ 3.5 ชุดอุปกรณ์หาค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติก ตามมาตรฐาน ASTM D 4318	3/4
รูปที่ 3.6 อุปกรณ์หาค่าพิกัดพลาสติก (Plastic Limit-Rolling Device)	3/4
รูปที่ 3.7 ชุดอุปกรณ์หาค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติก โดยวิธีตักตึง ตามมาตรฐาน BS 1377-2	3/5
รูปที่ 3.8 ลูกตักทำจากสแตนเลส (Cone of Stainless Steel) ตามมาตรฐาน BS 1377-2	3/5
รูปที่ 3.9 ปาดร่องดินออกเป็น 2 ส่วนเท่าๆ กัน	3/7
รูปที่ 3.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Water Content (%) และ No. of Blow (N)	3/8
รูปที่ 3.11 ปั้นคลึงดินให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 มิลลิเมตร	3/9
รูปที่ 3.12 ตัวอย่างดินที่แตกออกจากกัน	3/10
รูปที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่า Liquid Limit โดยวิธีต่างๆ	4/1
รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่า Plastic Limit โดยวิธีต่างๆ	4/2
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Multipoint LL และ One-Point LL โดยวิธี Casagrande method	4/3
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Multipoint LL และ One-Point LL โดยวิธี Cone method	4/3
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า Liquid Limit โดยวิธี Casagrande method และวิธี Cone method	4/5
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า Plastic Limit โดยวิธี Hand method และวิธี Rolling Device method	4/6
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า Plastic Limit โดยวิธี Hand method และวิธี Cone method	4/7
รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Liquid Limit โดยวิธีต่างๆ	4/8

รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Plastic Limit โดยวิธีต่างๆ	4/8
รูปที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่า Liquid Limit จากหลายห้องปฏิบัติการ	4/10
รูปที่ 4.11 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่า Plastic Limit จากหลายห้องปฏิบัติการ	4/11

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ค่าปริมาณความชื้น (Water content) มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินมวลละเอียดหรือดินเหนียว ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของแร่ดินเหนียวมีความสามารถในการดึงดูดโมเลกุลของน้ำบริเวณผิว ซึ่งเรียกว่า Double layer water ชั้นน้ำนี้มีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบ dipolar คือมีส่วนที่เป็นประจุบวกของน้ำดึงดูดกับผิวของอนุภาคดินเหนียวซึ่งมีประจุลบ และนอกจากชั้นน้ำ Double layer water แล้วยังมีชั้นน้ำ Absorbed water layer ที่ประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำที่ยึดติดแน่นกับผิวของอนุภาคดินเหนียวด้วยพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) อีกด้วย น้ำหรือความชื้นที่ห่อหุ้มอนุภาคของแร่ดินเหนียวเหล่านี้จะส่งผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวโดยตรง เช่น คุณสมบัติความชื้นเหลวหรือค่าพิกัดชั้นเหลวของดินเหนียว (Consistency limit) คุณสมบัติพลาสติก (Plasticity behavior) รวมถึงคุณสมบัติการรับแรงของดินเหนียว เป็นต้น

ในปี ค.ศ. 1911 นักวิทยาศาสตร์ชาวสวีเดน ชื่อ A. Atterberg ได้พัฒนาวิธีการเพื่อใช้อธิบายค่าคุณสมบัติพิกัดชั้นเหลวของดินมวลละเอียดเมื่อมีปริมาณความชื้นในมวลดินแตกต่างกัน กล่าวคือ เมื่อปริมาณความชื้นในมวลดินต่ำ มวลดินนั้นจะแสดงลักษณะคล้ายของแข็ง (Solid) และเมื่อปริมาณความชื้นในมวลดินเพิ่มสูงขึ้นมากๆ มวลดินนั้นจะแสดงลักษณะคล้ายของเหลว (Liquid) โดยทั่วไปสามารถแบ่งสภาพของมวลดินที่มีปริมาณความชื้นในมวลดินมากน้อยแตกต่างกันได้เป็น 4 สถานะคือ สถานะของเหลว (Liquid state) สถานะพลาสติก (Plastic state) สถานะกึ่งของแข็ง (Semi-solid state) และสถานะของแข็ง (Solid state) โดยช่วงแบ่งสภาพของมวลดินแต่ละช่วงตามปริมาณความชื้นในมวลดินที่เปลี่ยนแปลงไปนี้ เรียกว่า ค่าพิกัดชั้นเหลวหรือค่าพิกัดออตเตอร์เบิร์ก (Atterberg limit) ซึ่งประกอบไปด้วย ค่าพิกัดเหลว (Liquid limit) ค่าพิกัดพลาสติก (Plastic limit) และค่าพิกัดหดตัว (Shrinkage limit) ตามลำดับ

“ค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit, LL)” คือปริมาณความชื้นในมวลดินขณะที่มวลดินเริ่มเปลี่ยนสภาพจากของเหลวไปเป็นสารหนืดตัวในสถานะพลาสติก หรือหมายถึงค่าความชื้นต่ำสุดที่ดินยังคงมีสภาพแบบ viscous flow “ค่าพิกัดพลาสติก (Plastic Limit, PL)” คือปริมาณความชื้นในมวลดินขณะที่มวลดินเริ่มเปลี่ยนสภาพจากพลาสติกเป็นกึ่งของแข็งหรือค่าความชื้นต่ำสุดที่ดินยังคงมีสภาพแบบพลาสติก และ “ค่าพิกัดหดตัว (Shrinkage Limit, SL)” คือปริมาณความชื้นซึ่งมวลดินเริ่มเปลี่ยนจากสภาพกึ่งของแข็งเป็นของแข็ง หรือเป็นค่าปริมาณความชื้นในมวลดินขณะที่มวลดินมีปริมาตรน้อยที่สุด แม้ว่าความชื้นในมวลดินจะลดลงไปต่ำกว่านี้ปริมาตรของมวลดินรวมจะไม่เปลี่ยนแปลง ดินแต่ละชนิดมีค่าพิกัดชั้นเหลวและ

คุณสมบัติพลาสติกแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติ soil-water interaction ของดิน ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดและปริมาณของแร่ดินเหนียว พื้นที่ผิวของอนุภาคดินเหนียว ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าบวกของดิน (Exchangable cation) รวมถึงคุณสมบัติของของเหลวในดิน เช่น ความเข้มข้นของเกลือ เป็นต้น ดินเหนียวพลาสติก (Plastic soil) จะมีพฤติกรรมแบบพลาสติกเมื่อมีค่าความชื้นอยู่ระหว่างค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติก ในขณะที่ดินไม่เป็นพลาสติก (Nonplastic soil) จะไม่แสดงขอบเขตทั้งสองนี้

ค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติก ถือเป็นค่าดัชนีที่สำคัญที่สามารถบ่งชี้คุณสมบัติพื้นฐานของดิน ใช้ในการจัดจำแนกชนิดของดินมวลละเอียด (Soil Classification, ASTM D2487, D3282) และสามารถใช้ในการเชิงประสพการณ์เพื่อประมาณคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่างๆ ของดินมวลละเอียดได้ เช่น กำลังรับแรงเฉือน (Shear strength) คุณสมบัติการยุบตัวของดิน (Compressibility behavior) ความสามารถในการซึมน้ำ (Permeability) คุณสมบัติการหดตัวและขยายตัวของดิน (Shrink-swell behavior) เป็นต้น (Skempton, 1944; Hansbo, 1957; Wood, 1990; Sivapullaiah et al., 2000; Youkselen, 2010; Andrade et al., 2011) นอกจากนี้ค่าพิกัดหดตัวมีประโยชน์สำหรับดินบางประเภทที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรอย่างมากเมื่อผ่านสภาวะแห้งเปียก จากความสำคัญที่กล่าวมาข้างต้นนี้จะเห็นได้ว่าการทดสอบค่าพิกัดชั้นเหลวที่ถูกต้องและแม่นยำจึงถือเป็นสิ่งจำเป็นที่ควรให้ความสำคัญในงานทางด้านวิศวกรรมปฐพี

วิธีการทดสอบค่าพิกัดเหลวที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีสองวิธี คือ วิธีเคาะถ้วยคาซาเกนตี (Percussion cup method: Casagrande's cup) และเครื่องมือกรวยตก (Fall cone method) ทั้งสองวิธีนี้ใช้หลักการและวิธีการทดสอบที่แตกต่างกัน คือค่าพิกัดเหลวที่ได้จากการทดสอบโดยเคาะวิธีถ้วยคาซาเกนตี (มาตรฐาน ASTM D4318) มีความสัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินอันเนื่องมาจากแรงต้านทานความหนืดของมวลดินที่เคลื่อนที่เข้าหากันเป็นระยะทาง 12.7 มิลลิเมตร ภายหลังจากการตกกระทบอย่างอิสระของถ้วยคาซาเกนตี 25 ครั้ง ที่ระดับความสูง 10 มิลลิเมตร ด้วยอัตราเร็ว 2 ครั้งต่อวินาที (Sridharan and Prakash, 2000) ส่วนค่าพิกัดเหลวที่ได้จากการทดสอบโดยเครื่องมือกรวยตก (มาตรฐาน BS 1377) มีความสัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินอันเนื่องมาจากแรงเสียดทานของกรวยที่มีมุมที่ปลาย  $30^\circ$  และมีน้ำหนัก 80 กรัม ที่จมลงไปมวลดินอย่างอิสระเป็นระยะทาง 20 มิลลิเมตรในเวลา 5 วินาที

วิธีการทดสอบค่าพิกัดพลาสติกที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันคือ วิธีการคลึง (Rolling method: ASTM D4318 และ BS 1377) ซึ่งนิยามว่าค่าพิกัดพลาสติกคือ ค่าปริมาณความชื้นในมวลดินที่น้อยที่สุดที่สามารถคลึงดินให้เป็นเส้นและแตกตัวเป็นเส้นร้าวที่เส้นผ่านศูนย์กลาง  $3.0 \pm 0.5$  มิลลิเมตร (1/8 นิ้ว) จากหลักการและวิธีทดสอบดังกล่าวนี้ถูกพิจารณาว่าเป็นการทดสอบที่มีความแปรปรวนสูง ดังนั้น ASTM D4318 ได้เสนอแนะการใช้เครื่องคลึง (Plastic limit rolling device) เพื่อช่วยให้ผลการทดสอบแม่นยำขึ้น

นอกจากนั้นในปี ค.ศ. 1978 Wood และ Wroth ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์หาค่าพิกัดพลาสติกด้วยเครื่องมือกรวยตกโดยใช้น้ำหนักกรวยสองค่าอีกด้วย

จากหลักการและวิธีการทดสอบที่แตกต่างกันนี้เอง ถือเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดข้อสงสัยเกี่ยวกับความแตกต่างของผลการทดสอบหาค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกที่ได้ในแต่ละวิธี นอกจากนั้นความคลาดเคลื่อนของผู้ทดสอบยังถือเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่สะท้อนถึงความถูกต้อง (Accuracy) และความแม่นยำ (Precision) ของผลการทดสอบ ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อการจำแนกชนิดของดินและการประมาณค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่สำคัญต่อการออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมปฐพีอีกด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลการทดสอบหาค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกที่ได้จากการทดสอบหลายวิธี เปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างห้องปฏิบัติการ (ปัจจัยผู้ทดสอบ) และวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อพิจารณาถึงความถูกต้องและความแม่นยำของผลการทดสอบหาค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกของตัวอย่างดินเหนียวด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้ คือ

1. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลการทดสอบหาค่าพิกัดเหลวของตัวอย่างดินเหนียวที่ได้จากการทดสอบโดยวิธีถ้วยคาซาเกนดีและเครื่องมือกรวยตก และแต่ละวิธีวิเคราะห์ผลแบบ Multipoint method และ One-point method

2. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลการทดสอบหาค่าพิกัดพลาสติกของตัวอย่างดินเหนียวที่ได้จากการทดสอบโดยวิธีการคลึงด้วยมือ วิธีการคลึงด้วยเครื่องคลึง (Plastic limit rolling device) และเครื่องมือกรวยตก

3. เพื่อศึกษาค่าความ .ถูกต้องและความแม่นยำของผลการทดสอบหาค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกของตัวอย่างดินเหนียวระหว่างห้องปฏิบัติการโดยการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

จากวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย ผู้วิจัยจึงออกแบบขอบเขตของโครงการวิจัยเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบความแตกต่างของผลการทดสอบหาค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกของตัวอย่างดินเหนียวที่ได้จากการทดสอบหลายวิธี โดยเตรียมตัวอย่างดินเหนียวที่ใช้ในการทดสอบ 3 ชนิดคือ ดินเบนโทไนท์ (Bentonite) ดินเหนียวธรรมชาติ และดินเหนียวเกาลิน (Kaolin) และทำการทดสอบดังนี้

1. ทดสอบหาค่าพิกัดเหลวของตัวอย่างดินเหนียวทั้ง 3 ชนิด ด้วยวิธีถ้วยคาซาเกนดีและเครื่องมือกรวยตก โดยผู้ทดสอบคนเดียวกันและเครื่องมือทดสอบชุดเดียวกันการทดสอบละ 15 ครั้ง และแต่ละวิธีวิเคราะห์ผลแบบ Multipoint method และ One-point method

2. ทดสอบหาค่าพิกัดพลาสติกของตัวอย่างดินเหนียวทั้ง 3 ชนิด ด้วยวิธีการคลึงด้วยมือ วิธีการคลึงด้วยเครื่องคลึง (Plastic limit rolling device) และเครื่องมือกรวยตก โดยผู้ทดสอบคนเดียวกันและเครื่องมือทดสอบชุดเดียวกันการทดสอบละ 15 ครั้ง

ตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิดจะถูกทดสอบที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมปฐพี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา (BUU) และเพื่อศึกษาถึงปัจจัยของผู้ทดสอบ ตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิดจะถูกส่งไปยังห้องปฏิบัติการอื่นๆ อีกจำนวน 6 แห่ง และทดสอบหาค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกด้วยวิธีต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วเพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างห้องปฏิบัติการ (หรือปัจจัยของผู้ทดสอบ) และวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อพิจารณาถึงความถูกต้องและความแม่นยำของผลการทดสอบหาค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกของตัวอย่างดินเหนียว

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถทราบถึงความแตกต่างและเปรียบเทียบผลการทดสอบหาค่าพิกัดเหลวของตัวอย่างดินเหนียวที่ได้จากการทดสอบโดยวิธีถ้วยคาซาเกนดีและเครื่องมือกรวยตก ซึ่งแต่ละวิธีวิเคราะห์ผลแบบ Multipoint method และ One-point method

2. สามารถทราบถึงความแตกต่างและเปรียบเทียบผลการทดสอบหาค่าพิกัดพลาสติกของตัวอย่างดินเหนียวที่ได้จากการทดสอบโดยวิธีการคลึงด้วยมือ วิธีการคลึงด้วยเครื่องคลึง (Plastic limit rolling device) และเครื่องมือกรวยตก

3. สามารถทราบถึงค่าความถูกต้องและความแม่นยำของผลการทดสอบหาค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกของตัวอย่างดินเหนียวระหว่างห้องปฏิบัติการซึ่งพิจารณาถึงปัจจัยของผู้ทดสอบ

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 บทนำ

ความชื้นในมวลดินมีอิทธิพลสูงต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดินทั้งในด้านการเปลี่ยนสถานะภาพ (เช่นน้ำมากดินเป็นของเหลว, น้ำน้อยดินเป็นของแข็ง) และการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางวิศวกรรม เช่น ความแข็งแรงของดินฐานรากมีค่าลดลงเมื่อมีน้ำมาก อิทธิพลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความชื้นดังกล่าวมีผลมากต่อดินที่มีขนาดเม็ดละเอียด (Fine Grain Soil) ได้แก่ดินที่เรียกว่าดินเหนียว (Cohesive Soil) ทั้งนี้แรงยึดเกาะระหว่างเม็ดดินหรือความเหนียวดังกล่าวเกิดจากการดึงดูดระหว่างประจุไฟฟ้าที่อยู่ในเม็ดดิน ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความชื้น สำหรับดินที่มีขนาดเม็ดดินใหญ่ (Coarse Grain Soil) อิทธิพลของการดึงดูดเนื่องจากประจุไฟฟ้ามีค่าน้อย ความเหนียวจึงไม่มี (Cohesionless Soil) ดินประเภทนี้จึงมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากเมื่อความชื้นในดินเปลี่ยนแปลงไป

ความชื้นในมวลดิน ณ จุดขณะเปลี่ยนสภาพ เรียกว่า “ขอบเขตสถานะภาพ” (Limit State) เช่น ปริมาณความชื้นที่ดินจะเริ่มไหลเหมือนของเหลว ฯลฯ ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของมวลดินนั้นๆ นอกจากนี้จะใช้เป็นตัวบ่งคุณสมบัติพื้นฐานแล้ว ยังใช้ในการจัดจำแนกหมวดหมู่ (Soil Classification) และคาดคะเนคุณสมบัติทางวิศวกรรมบางอย่าง เช่น การทรุดตัวของชั้นดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.1

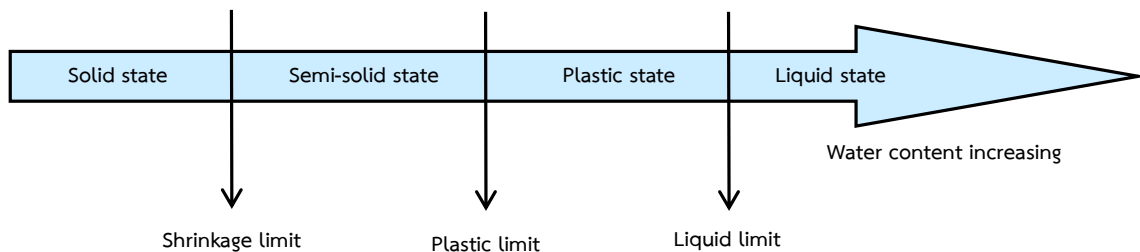


รูปที่ 2.1 คุณสมบัติของมวลดิน

พิกัดออตเตอร์เบิร์ก (Atterberg's Limits) ถูกเสนอขึ้นเป็นครั้งแรกโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวสวีเดน ชื่อ A.M. Atterberg หรือ พิกัดความชื้นเหลว (Consistency's Limit) หมายถึงปริมาณน้ำในมวลดินที่ทำให้สภาพความเหนียวตัวของมวลดินเปลี่ยนแปลงไป สถานภาพของมวลดินแบ่งออกเป็น 5 สถานภาพ โดยจุดแบ่งแต่ละสถานะภาพเรียกว่า พิกัด (Limit) ดังนี้

- 1) Cohesion Limit คือ ปริมาณน้ำในมวลดินที่ทำให้เศษดินเริ่มมีการยึดเกาะเข้าด้วยกัน
- 2) Sticky Limit คือ ปริมาณน้ำในมวลดินที่ทำให้มวลดินเริ่มมีการยึดเกาะกับผิวของโลหะ
- 3) พิกัดเหลว (Liquid Limit, LL)
- 4) พิกัดพลาสติก (Plastic Limit, PL)
- 5) พิกัดการหดตัว (Shrinkage Limit, SL)

ต่อมาได้มีการนำค่าขีดจำกัดมาประยุกต์ ซึ่งในปัจจุบันทางด้านวิศวกรรมโยธาจะใช้กันอยู่ 3 พิกัด เพื่ออธิบายคุณสมบัติของดินมวลละเอียดเมื่อมีปริมาณความชื้น (Water content) ในมวลดินแตกต่างกัน กล่าวคือ เมื่อปริมาณความชื้นในมวลดินต่ำ มวลดินนั้นจะแสดงลักษณะคล้ายของแข็ง (Solid) และเมื่อปริมาณความชื้นในมวลดินเพิ่มสูงขึ้นมากๆ มวลดินนั้นจะแสดงลักษณะคล้ายของเหลว (Liquid) โดยทั่วไปสามารถแบ่งสภาพของมวลดินที่มีปริมาณความชื้นในมวลดินจากน้อยไปหามากได้ 4 สถานะคือ สถานะของเหลว (Liquid state) สถานะพลาสติก (Plastic state) สถานะกึ่งของแข็ง (Semi-solid state) และ สถานะของแข็ง (Solid state) โดยช่วงแบ่งสภาพของมวลดินแต่ละช่วงตามปริมาณความชื้นในมวลดินที่เปลี่ยนแปลงไป เรียกว่า ค่าพิกัดชั้นเหลวหรือค่าพิกัดออตเตอร์เบิร์ก (Atterberg limit) ซึ่งประกอบไปด้วย ค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit) ค่าพิกัดพลาสติก (Plastic Limit) และค่าพิกัดหดตัว (Shrinkage Limit) ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 สถานะของดินมวลละเอียดเมื่อปริมาณความชื้นในมวลดินแตกต่างกัน



ค่าพิกัดชั้นเหลวของดินเหล่านี้ถือเป็นค่าดัชนีที่สำคัญที่สามารถบ่งชี้คุณสมบัติพื้นฐานของดิน ใช้ในการจัดจำแนกชนิดของดินมวลละเอียด) Soil Classification: ASTM D2487, D3282) และใช้ในการประเมินคุณสมบัติทางกายภาพอื่นๆ ของมวลดินได้ เช่น

(i) ค่าดัชนีพลาสติก (Plasticity index, PI) คือค่าผลต่างระหว่างค่าพิกัดเหลวและค่าพิกัดพลาสติก ดังสมการที่ (1) หรือหมายถึงช่วงการเปลี่ยนแปลงของค่าความชื้นของมวลดินโดยที่มวลดินนั้นจะยังคงรักษาสภาพเป็นพลาสติกอยู่ได้ โดยทั่วไปจะแสดงค่าเป็นจำนวนเต็ม

$$PI = LL - PL \quad (2.1)$$

(ii) ค่าดัชนีความเหลว (Liquidity index, LI) คือค่าดัชนีที่บอกค่าความชื้นของดินสัมพันธ์กับค่าพิกัดอัตราเตอร์เบิร์ก ดังสมการที่ (2) ซึ่งสามารถบ่งชี้ถึงสภาพของดินธรรมชาติได้ว่ามีลักษณะคล้ายของเหลวพลาสติก หรือของแข็งเปราะ โดยถ้าค่าดัชนีความเหลวมีค่าเป็นลบ แสดงว่าดินจะมีลักษณะเปราะ ถ้าค่าดัชนีความเหลวมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 แสดงว่าดินมีลักษณะคล้ายพลาสติก และถ้าค่าดัชนีความเหลวมีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าดินมีพฤติกรรมคล้ายของเหลว

$$LI = \frac{w - PL}{LL - PL} \quad (2.2)$$

(iii) แอคติวิตี (Activity, A) ในปี ค.ศ.1953 Skempton ได้นิยามค่าแอกติวิตีของดินเหนียว ดังสมการที่ (3) เพื่อแสดงถึงแนวโน้มในการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในดิน หากค่าแอกติวิตีของดินมีค่าน้อยแสดงว่าดินดังกล่าวมีแนวโน้มในการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้อย ค่าแอกติวิตีของดินโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 0.3 ถึง 5.5 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของแร่ดินเหนียว

$$A = \frac{PI}{\text{clay} \cdot \text{fraction}} \quad (2.3)$$

นอกจากนั้นค่าพิกัดชั้นเหลวของดินยังสามารถใช้สมการเชิงประสบการณ์ประมาณคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่างๆ ของดินมวลละเอียดได้ เช่น กำลังรับแรงเฉือน (Shear strength) คุณสมบัติการยุบอัดตัวของดิน (Compressibility behavior) ความสามารถในการซึมน้ำ (Permeability) คุณสมบัติการหดตัวและขยายตัวของดิน (Shrink-swell behavior) เป็นต้น (Skempton, 1944; Hansbo, 1957; Wood, 1990; Sivapullaiah et al., 2000; Youkselen and Aksiy, 2010; Andrade et al., 2011) ดังนั้น การทดสอบหาค่าพิกัดชั้นเหลวที่ถูกต้องและแม่นยำจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ควรให้ความสำคัญในงานทางด้านวิศวกรรมปฐพี

## 2.2 ค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit)

หมายถึง ปริมาณความชื้นที่น้อยที่สุดในดินที่ทำให้ดินสามารถไหลตัวได้ด้วยน้ำหนักของตัวเอง ขณะที่มวลดินเริ่มเปลี่ยนสภาพจากของเหลว (Viscous flow) ไปเป็นสารหนืดตัวในสถานะพลาสติก หรือ ถ้าพิจารณาจากกราฟแสดงสถานะภาพของดิน (รูปที่ 2.2) ก็จะเป็นค่าพิกัดที่เปลี่ยนจากสถานะของเหลว เป็นสถานะพลาสติก

### 2.2.1 วิธีการทดสอบหาค่าพิกัดเหลว

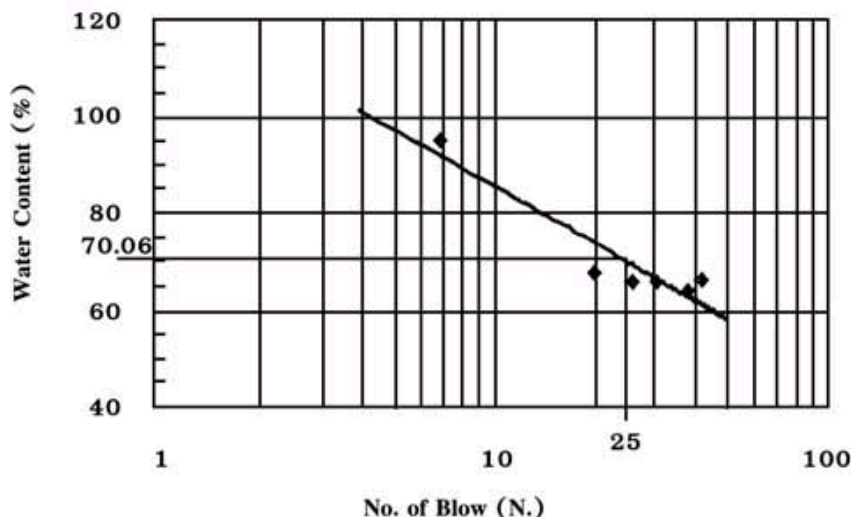
วิธีการทดสอบหาค่าพิกัดเหลวโดยทั่วไปมีสองวิธี คือ วิธีเคาะถ้วยคาซาเกินดี (Percussion cup method: Casagrande's cup) และวิธีการตกดิ่งของกรวยโดยใช้เครื่องมือกรวยตก (Fall cone method) ทั้งสองวิธีนี้ใช้หลักการและวิธีการทดสอบที่แตกต่างกัน ดังนี้

#### 2.2.1.1 วิธีเคาะถ้วยคาซาเกินดี (Percussion cup method: Casagrande's cup)

ถ้วยคาซาเกินดีเป็นเครื่องมือทดสอบที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย A. Casagrande เป็นมาตรฐาน ASTM D4318 และ BS 1377 ใช้สำหรับหาค่าพิกัดเหลวของดินเหนียวซึ่งนิยามว่าเป็น ค่าความชื้นในดินที่มีความสัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินอันเนื่องมาจากแรงต้านทานความหนืดของมวลดินที่เคลื่อนที่เข้าหากันเป็นระยะทาง 12.7 มิลลิเมตร ภายหลังการตกกระทบอย่างอิสระของถ้วยคาซาเกินดี 25 ครั้ง ที่ระดับความสูง 10 มิลลิเมตร ด้วยอัตราเร็ว 2 ครั้งต่อวินาที (Sridharan and Prakash, 2000) การวิเคราะห์ผลสามารถทำได้ 2 วิธีคือ

##### *(1) Multipoint method*

ทำการทดสอบหาค่าพิกัดเหลวของดินตามมาตรฐาน ASTM D4318 และ BS 1377 ที่ค่าความชื้นหลายๆ จุดที่มีค่าระหว่าง 15% ถึง 35% และพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งในการเคาะ (Blow count, N) ในสเกล semi-logarithm และค่าปริมาณความชื้น จะได้ความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรง (Best fit curve) ในรูป  $w = A \log N + B$  โดยค่าปริมาณความชื้นที่ตรงกับจำนวนครั้งในการเคาะ 25 ครั้งคือค่าพิกัดเหลว (รูปที่ 2.3)



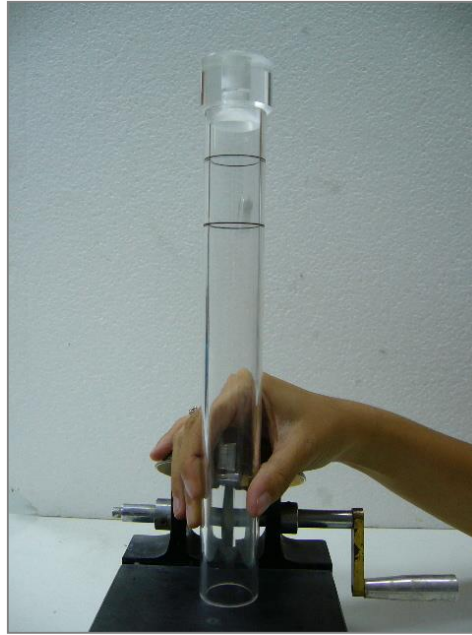
รูปที่ 2.3 จำนวนครั้งในการเคาะ (N) ในสเกล semi-logarithm และค่าปริมาณความชื้น

*(2) One-point method*

เพื่อให้ใช้ระยะเวลาสั้นลงในการทดสอบหาค่าพิกัดเหลว Waterways Experiment Station (1949) ได้เสนอวิธีการประมาณค่าพิกัดเหลวของดินโดยใช้สมการที่ (4) (ตามมาตรฐาน ASTM D4318 (Method B), 2010) จากการทดสอบเพียงจุดเดียว และค่า N ความอยู่ระหว่าง 20 ถึง 30 ครั้ง

$$LL = w_n \left( \frac{N}{25} \right)^{0.121} \quad (2.4)$$

อย่างไรก็ตามในการทดสอบหาค่าพิกัดเหลวด้วยวิธี Casagrande method นั้นควรคำนึงความแข็งแรงของฐานเครื่องมือทดสอบด้วยเพราะความแข็งแรงของฐานเครื่องมือทดสอบมีผลต่อผลการทดสอบ Norman (1985) ได้เปรียบเทียบผลการทดสอบหาค่าพิกัดเหลวโดยพิจารณาถึงความแข็งแรงของฐานอุปกรณ์ โดยใช้ตัวอย่างฐานอุปกรณ์ในการทดลอง 4 แบบ คือ 1) American Micarta base (มีความแข็งแรงมากที่สุด), 2) City and Guilds machine, 3) Road Research Laboratory machine (ฐานขนาดใหญ่), 4) Road Research Laboratory machine (มีความแข็งแรงน้อยที่สุด) ผลที่ได้คือ ฐานแบบที่ 1 จะได้ค่าพิกัดเหลวน้อยกว่าฐานของ B.S. 3%, ค่าพิกัดเหลวของฐานแบบที่ 1 และแบบที่ 4 มีค่าต่างกัน 7% และขนาดของฐานไม่มีผลกระทบต่อค่าพิกัดเหลว



รูปที่ 2.4 การทดสอบความแข็งของฐาน

ในการทดสอบหาค่าพิกัดเหลวด้วยวิธี Casagrande method มีข้อควรระวังดังนี้

- ดินที่จะนำมาใช้ทดสอบควรจะต้องผสมน้ำให้น้ำซึมเข้าถึงเนื้อดินอย่างทั่วถึง (Homogeneous) สำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ อาจจะต้องทิ้งไว้โดยการผสมน้ำแล้วปิดภาชนะไว้เป็นเวลา 1 คืน
- ระยะเวลาของ Casagrande's Cup ควรจะต้องได้ตามมาตรฐาน ดังนั้นควรทำการตรวจสอบก่อนการทดสอบทุกครั้ง
- พื้นยางของ Casagrande's cup ควรมีความแข็งตามมาตรฐาน โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 4318-00 (รูปที่ 2.4)
- การทดสอบ Liquid limit เพื่อให้ความถูกต้องสูงสุดควรทำการทดสอบจากสภาพดินที่เปียก (หลังจากทิ้งได้ 1 คืน) ไปยังสภาพดินที่แห้งขึ้น โดยการปล่อยให้ดินแห้งในอากาศหรือใช้มีดปาดดินคลุกเคล้าให้น้ำระเหย
- ดินตัวอย่างที่มีค่า PI ต่ำเช่น Silty Clay หรือ Sandy Clay ขณะที่ปริมาณน้ำในดินน้อยๆ การเคลื่อนที่ของตัวอย่างเข้าติดกันในร่อง อาจจะไม่ใช่การเคลื่อนที่ (Flow) เข้าสัมผัสกันอย่างแท้จริงแต่อาจเกิดจากปริมาณน้ำในดินน้อยเกินไปตัวอย่างจึงไม่ยึดเกาะพื้นผิวกระทะ ที่ปรากฏให้เห็นการเคลื่อนที่เข้าติดกันนั้น อาจเป็นเพราะตัวอย่างลื่นไถล (Slip) มาชนกัน ให้ตรวจสอบโดยใช้ Spatula เปิดผิวหน้าของตัวอย่างเพื่อตรวจสอบดูตรงที่ตัวอย่างชนกัน ถ้าปรากฏว่าตัวอย่างชนกันแต่ไม่ติดเป็นเนื้อเดียวแสดงว่าเกิดการ Slip ขึ้น ให้เพิ่มน้ำแล้วทำการทดสอบใหม่

### 2.2.1.2 วิธีการตกติ่งของกรวยโดยใช้เครื่องมือกรวยตก (Fall cone method)

ค่าพิกัดเหลวที่ได้จากการทดสอบโดยเครื่องมือกรวยตกตามมาตรฐาน BS 1377 มีความสัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินอันเนื่องมาจากแรงเสียดทานของกรวยที่มีมุมที่ปลาย  $30^\circ$  และมีน้ำหนัก 80 กรัม ที่จมลงไปบนมวลดินอย่างอิสระเป็นระยะทาง 20 มิลลิเมตรในเวลา 5 วินาที การวิเคราะห์ผลสามารถทำได้ 2 วิธีคือ

#### (1) Multipoint method

ทำการทดสอบหาค่าพิกัดเหลวของดินตามมาตรฐาน BS 1377 ที่ค่าความชื้นหลายๆ จุด และพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะจมของกรวย (Cone penetration) ในสเกล semi-logarithm และค่าปริมาณความชื้น จะได้ความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรง (Best fit curve) ในรูป  $w = A \log N + B$  โดยค่าปริมาณความชื้นที่ตรงกับระยะจมของกรวย 20 มิลลิเมตรในเวลา 5 วินาทีคือค่าพิกัดเหลวของดิน

#### (2) One-point method

เพื่อให้ใช้ระยะเวลาสั้นลงในการทดสอบหาค่าพิกัดเหลวโดยเครื่องมือกรวยตก Waterways Experiment Station (1949) ได้เสนอวิธีการประมาณค่าพิกัดเหลวของดินจากค่าปริมาณความชื้นของดินที่มีค่าระยะจมของกรวยอยู่ระหว่าง 15 ถึง 25 มิลลิเมตร (ใกล้เคียง 20 มิลลิเมตร) เพียงจุดเดียว ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5) และค่า factor ที่แนะนำ (ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1)

$$\text{Liquid limit} = \text{moisture content} \times \text{factor} \quad (2.5)$$

ตารางที่ 2.1 Factors for one-point cone penetrometer liquid limit test

Cone penetration	Factors for moisture content ranges		
	below 35 %	35 % to 50 %	above 50 %
mm			
15	1.057	1.094	1.098
16	1.052	1.076	1.075
17	1.042	1.058	1.055
18	1.030	1.039	1.036
19	1.015	1.020	1.018
20	1.000	1.000	1.000
21	0.984	0.984	0.984
22	0.971	0.968	0.967
23	0.961	0.954	0.949
24	0.955	0.943	0.929
25	0.954	0.934	0.909
Plasticity	low	intermediate	high

<sup>a</sup> Reference: Clayton and Jukes, 1978

Wasti and Bezirci (1985) ได้ทำการศึกษาการหาค่าพิกัดเหลว โดยวิธีตักดิ่งของกรวย (Fall Cone Method) โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้กับวิธีของ Casagrande ซึ่งค่าที่ได้มีความสัมพันธ์กันดีที่ค่าพิกัดเหลวอยู่ที่ประมาณ 100 ซึ่งเป็นค่ามากที่สุดโดยประมาณของดินธรรมชาติ สำหรับค่าพิกัดเหลวที่อยู่ในช่วงสูงกวานี้ วิธีตักดิ่งจะให้ค่าน้อยกว่า และจากข้อควรระวังดินที่จะนำมาใช้ทดสอบควรจะต้องผสมน้ำให้น้ำซึมเข้าถึงเนื้อดินอย่างทั่วถึง (Homogeneous) สำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ อาจจะต้องทิ้งไว้โดยการผสมน้ำแล้วปิดภาชนะไว้เป็นเวลา 1 คืน โดย C.F. Moon and K.B. White (1985) ได้ทำการเปรียบเทียบค่าพิกัดเหลว โดยทำการทดลอง 4 วิธีคือ 1) วิธีตักดิ่ง (Cone Penetrometer), 2) Casagrande (ผสมตัวอย่างดินกับน้ำทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง), 3) Casagrande (ไม่ได้ผสมตัวอย่างทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง), 4) Casagrande One-Point ผลที่ได้ค่าพิกัดเหลวจะอยู่ในช่วง 29%-199% แต่สามารถลดลงได้ถึง 30%-60% และทุกการทดลอง ยกเว้นวิธีที่ 3 ผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจตามมาตรฐาน BS 1377:1975 เพื่อแสดงถึงความจำเป็นที่ต้องทำให้น้ำซึมเข้าถึงเนื้อดินอย่างทั่วถึงก่อนทำการทดสอบ

### 2.3 ค่าพิกัดพิกัดพลาสติก (Plastic Limit, PL)

หมายถึง ปริมาณความชื้นในมวลดินขณะที่มวลดินเริ่มเปลี่ยนสภาพจากพลาสติกเป็นกึ่งของแข็งหรือหมายถึงค่าความชื้นต่ำสุดที่ดินยังคงมีสภาพแบบพลาสติก

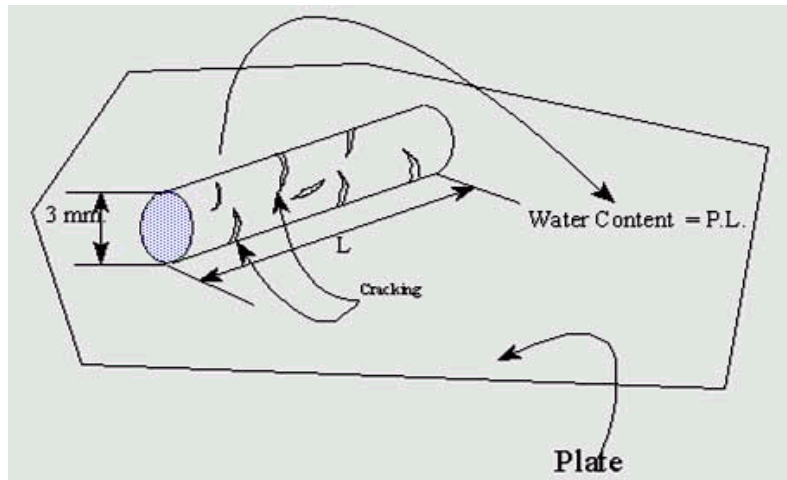
#### 2.3.1 วิธีการทดสอบหาค่าพิกัดพลาสติก

วิธีการทดสอบหาค่าพิกัดพลาสติกที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันมีอยู่ด้วยกันสองวิธี คือ วิธีการคลึง (Rolling method) และการทดสอบโดยเครื่องมือกรวยตก ซึ่งความแตกต่างของหลักการและวิธีทดสอบของทั้ง 2 วิธีนี้คือ

##### 2.3.1.1 วิธีการคลึง

ค่าพิกัดพลาสติกที่ได้จากการทดสอบโดยวิธีการคลึง (Rolling method: ASTM D4318 และ BS 1377) หมายถึงค่าปริมาณความชื้นในมวลดินที่น้อยที่สุดที่สามารถคลึงดินให้เป็นเส้นและแตกตัวเป็นเส้นร้าวที่เส้นผ่านศูนย์กลาง  $3.0 \pm 0.5$  มิลลิเมตร ( $1/8$  นิ้ว) (รูปที่ 2.5) จากหลักการและวิธีทดสอบดังกล่าวนี้ผลการทดสอบที่ได้มักขึ้นอยู่กับทักษะและความชำนาญของผู้ทดสอบมากเพราะมีการวิเคราะห์ผลการทดสอบโดยการพิจารณาสภาพการร่วนของดินและรอยแตกร้าวที่ผิวด้วยตา จึงถูกพิจารณาว่าเป็นการทดสอบที่มีความแปรปรวนสูง ดังนั้น ASTM D4318 (1991) จึงได้เสนอแนะการใช้เครื่องคลึง (Plastic limit rolling device) เพื่อช่วยให้ผลการทดสอบแม่นยำขึ้น เครื่องมือดังกล่าวมีลักษณะรูปร่างเป็นกล่องสี่เหลี่ยม ภายในมีส่วนที่ทำเป็นขอบกั้นทั้ง 2 ด้าน มีความสูง  $3.0 \pm 0.5$  มิลลิเมตร และอีกส่วนหนึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบมีมือจับเพื่อใช้สำหรับคลึงดิน) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (Bobrowski and Griekspoor (1992) ทำการทดสอบหา

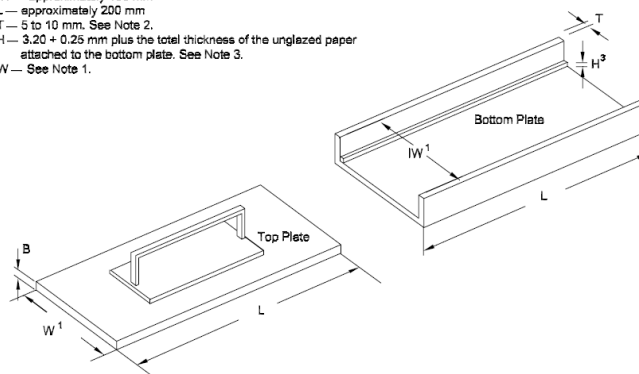
ค่าพิกัดพลาสติกของตัวอย่างดิน 5 ชนิด โดยวิธีคลึงด้วยมือและใช้เครื่องคลึงที่ถูกพัฒนาขึ้นพบว่าผลการทดสอบที่ได้จากทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 2.5 การทดสอบหาค่าพิกัดพลาสติกโดยวิธีการคลึง

Dimensions:

IW — approximately 100 mm  
 L — approximately 200 mm  
 T — 5 to 10 mm. See Note 2.  
 H — 3.20 + 0.25 mm plus the total thickness of the unglazed paper attached to the bottom plate. See Note 3.  
 W — See Note 1.



รูปที่ 2.6 เครื่องคลึง (Plastic limit rolling device)

2.3.1.2 เครื่องมือกรวยตก (Fall cone method)

ในปี ค.ศ.1978 Wood และ Wroth ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์หาค่าพิกัดพลาสติกด้วยเครื่องมือกรวยตกโดยใช้น้ำหนักกรวยสองค่า และสามารถคำนวณหาค่าพิกัดพลาสติกได้จากสมการที่ (6) เมื่อ  $W_1$  และ  $W_2$  คือค่าน้ำหนักของกรวยที่ทดสอบ  $\Delta$  คือค่าความแตกต่างของค่าความชื้นที่ตรงกับระยะจมของกรวยทั้งสองน้ำหนักเท่ากับ 20 มิลลิเมตรในเวลา 5 วินาที

$$PL = \frac{2\Delta}{\log(W_1/W_2)} \quad (2.6)$$

จากการศึกษาทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องพบว่า มาตรฐานการทดสอบหาค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกที่ใช้ในปัจจุบันมีหลายวิธี และแต่ละวิธีมักมีหลักการและวิธีการทดสอบที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดข้อสงสัยเกี่ยวกับความถูกต้องและแม่นยำ รวมถึงความแตกต่างของผลการทดสอบหาค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกที่ได้ในแต่ละวิธีตามมาตรฐาน นอกจากนี้ทักษะหรือความคลาดเคลื่อนของผู้ทดสอบยังถือเป็นอีกหนึ่งปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่สะท้อนถึงความถูกต้องและความแม่นยำของผลการทดสอบ ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อการจำแนกชนิดของดินและการประมาณคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่สำคัญต่อการออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมปฐพีอีกด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลการทดสอบหาค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกที่ได้จากการทดสอบหลายวิธี เปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างห้องปฏิบัติการ (ปัจจัยผู้ทดสอบ) และวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อพิจารณาถึงความถูกต้องและแม่นยำของผลการทดสอบหาค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกของดินเหนียวตัวอย่างด้วย

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เป็นที่ทราบกันดีว่าเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบหาค่าพิกัดชั้นเหลวของดินมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ซึ่งเครื่องมือแต่ละชนิดมักมีหลักการ มาตรฐาน และวิธีการทดสอบที่แตกต่างกัน การทดสอบหาค่าพิกัดเหลวที่นิยมในปัจจุบันมีด้วยกัน 2 วิธี การทดสอบวิธีแรกคือการทดสอบที่ถูกพัฒนาขึ้นโดยนักวิจัยชื่อคาซาเกนตี (Casagrande, 1932; Casagrande, 1958) เรียกวิธีการทดสอบนี้ว่า วิธีถ้วยคาซาเกนตี (Casagrande's cup method) การทดสอบนี้ได้รับความนิยมทั่วโลก และในแต่ละประเทศมีมาตรฐานการทดสอบที่ต่างกันมากขึ้นอยู่กับความแข็งของฐานเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ เช่น มาตรฐานอเมริกัน (American standard) กำหนดให้ใช้เครื่องมือชนิดฐานแข็งในการทดสอบ (Hard base) (ASTM D4318, 2000) ส่วนมาตรฐานอังกฤษ (British standard) กำหนดให้ใช้เครื่องมือชนิดฐานอ่อนในการทดสอบ (Soft base) (BS:1377-part 2, 1990) จากความแตกต่างของมาตรฐานการทดสอบนี้เอง ส่งผลให้นักวิจัยพยายามศึกษาถึงผลความแตกต่างที่ได้จากการทดสอบทั้งสองมาตรฐานนี้ เช่น Özer (2009) ทำการศึกษาและเปรียบเทียบค่าพิกัดเหลวของตัวอย่างดินธรรมชาติ 42ชนิด ที่ได้จากการเจาะสำรวจที่ระดับความลึก 2.5 – 10 เมตร จากบริเวณต่างๆ ในประเทศตุรกี โดยทำการทดสอบตามมาตรฐานอเมริกัน (ASTM D4318, 2000) และมาตรฐานอังกฤษ (BS:1377-part 2, 1990) ค่าพิกัดเหลวของดินตัวอย่างมีค่าอยู่ระหว่าง เปอร์เซ็นต์ 105 ถึง 30 จากผลการทดสอบพบว่า การทดสอบโดยวิธีถ้วยคาซาเกนตีแบบ soft base ตามมาตรฐานอังกฤษ ให้ค่าพิกัดเหลวที่สูงกว่าวิธีถ้วยคาซาเกนตีแบบ hard base ตามมาตรฐานอเมริกัน ประมาณ 5%

Norman (1985) ทำการศึกษาและเปรียบเทียบผลการทดสอบหาค่าพิกัดเหลวของตัวอย่างดินเหนียวที่ได้จากเครื่องมือถ้วยคาซาเกนตี 4 แบบที่มีลักษณะความแข็งของฐานแตกต่างกัน (เรียงลำดับจากฐานแข็งไปอ่อน หรือ B.S. hardness number น้อยไปมาก) คือ (1) American Micarta base ชนิดฐาน



แข็งทำจากพลาสติก Micarta No. 221 (B.S. hardness number=6.5) (2) City and Guilds machine (B.S. hardness number=19) (3) Road Research Laboratory machine ชนิดฐานขนาดใหญ่ (B.S. hardness number=23.5) (4) Road Research Laboratory machine ชนิดฐานอ่อน (B.S. hardness number=28.5) จากผลการทดสอบพบว่า ค่าพิกัดเหลวที่ได้จากเครื่องมือชนิดฐานแข็ง American Micarta base มีค่าน้อยกว่าชนิด City and Guilds machine และ Road Research Laboratory machine ชนิดฐานอ่อน 3% และ 7% ตามลำดับ แต่ขนาดของฐานไม่มีผลกระทบต่อค่าพิกัดเหลวของตัวอย่างดินเหนียว

การทดสอบอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมคือ การทดสอบโดยเครื่องมือกรวยตก (Fall cone penetration method: BSI 1377 Part 2, 1990) การทดสอบนี้ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกระหว่างปี 1914 ถึง 1922 โดย Geotechnical Commission of the Swedish State Railway (GCSSR) ค่าพิกัดเหลวที่ได้จากการทดสอบโดยเครื่องมือกรวยตกนี้มีความสัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินอันเนื่องมาจากแรงเสียดทานของกรวยที่จมลงไป ในมวลดินอย่างอิสระ Wasti and Bezirci (1985) ทำการศึกษาถึงความแตกต่างของค่าพิกัดเหลวโดยวิธีถ้วยคาซาเกนดีและวิธีเครื่องมือกรวยตกของดินเหนียวธรรมชาติพบว่า ผลการทดสอบที่ได้จากทั้งสองวิธีแสดงค่าพิกัดเหลวของดินเหนียวธรรมชาติใกล้เคียงกันเมื่อมีค่าต่ำกว่า 100% แต่หากค่าพิกัดเหลวของดินมีค่าสูงกว่าช่วงนี้ผลการทดสอบโดยวิธีเครื่องมือกรวยตกมีแนวโน้มสูงกว่าวิธีถ้วยคาซาเกนดี

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเพิ่มเติมของ Özer (2009) ถึงความแตกต่างของค่าพิกัดเหลวโดยวิธีถ้วยคาซาเกนดี (ตามมาตรฐาน ASTM D4318 และ BS:1377-part 2) และวิธีเครื่องมือกรวยตก พบว่า การทดสอบโดยวิธีถ้วยคาซาเกนดีแบบ hard base จะให้ค่าพิกัดชั้นเหลวต่ำกว่า สำหรับดินที่มีค่าพิกัดชั้นเหลวน้อยกว่า 70% และให้ค่าสูงกว่าเมื่อดินมีความชื้นเหลวมากกว่า 70% เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบโดยวิธีเครื่องมือกรวยตก นอกจากนี้สำหรับดินที่มีค่าพิกัดชั้นเหลวมากกว่า 40% การทดสอบโดยวิธีถ้วยคาซาเกนดีแบบ soft base จะให้ค่าพิกัดชั้นเหลวสูงกว่าวิธีกรวยตก ผลการทดสอบนี้ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Matteo (2012) ที่กล่าวว่าเมื่อดินมีค่าพิกัดเหลวระหว่าง %20- %50 ค่าพิกัดเหลวที่ได้จากวิธีเครื่องมือกรวยตกจะมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบโดยวิธีถ้วยคาซาเกนดีแบบ hard base 2. 2% โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการคือ  $LL_{cone} = 1.00LL_{cup} + 2.20$

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยจำนวนหนึ่งทำการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อความแตกต่างของค่าพิกัดชั้นเหลวของดิน เช่น Mishra et al. (2012) ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของเบนโทไนท์และความเข้มข้นของน้ำเกลือต่อค่าพิกัดเหลวของดินเหนียวโดยวิธีถ้วยคาซาเกนดีและเครื่องมือกรวยตก โดยแปรผันอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักแห้งของดินเหนียวและเบนโทไนท์เท่ากับ 100:20 ที่ได้จาก 12 แหล่ง ในประเทศญี่ปุ่นและประเทศสหรัฐอเมริกา รวมทั้งแปรผันอัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย NaCl และ

CaCl<sub>2</sub> เท่ากับ 0.5 และ 1 N ตามลำดับ ผลที่ได้จากการทดสอบ คือค่าพิกัดเหลวโดยวิธีถ้วยคาซาเกนดี จะ มีค่าสูงกว่าวิธีเครื่องมือกรวยตก และค่าพิกัดเหลวจะลดลงเมื่อเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของสารละลายเกลือ เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่าผลการทดสอบดังกล่าวนี้กลับไม่สอดคล้องกับผลงานวิจัยอื่น คือ พบว่าค่าพิกัดเหลวของดินที่มีค่าพลาสติกต่ำที่ได้จากการทดสอบโดยวิธีเครื่องมือกรวยตกมีค่าสูงกว่าค่าพิกัด เหลวที่ได้จากการทดสอบโดยวิธีถ้วยคาซาเกนดี แต่ในทางกลับกันกรณีที่ดินมีค่าพลาสติกสูง การทดสอบ โดยวิธีถ้วยคาซาเกนดีจะให้ค่าสูงกว่าวิธีเครื่องมือกรวยตก )i.e., Skopak and Ter-Stepanian, 1975; Budhu, 1985; Belvso et al., 1985; Sivapullaiah and Sridharan, 1985; Wasti and Bezirci, (1986

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบว่า แม้ว่าจากอดีตจนถึงปัจจุบันจะมีนักวิจัยพยายาม ทำการศึกษาเกี่ยวกับความแตกต่างของผลการทดสอบหาค่าพิกัดเหลวที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องมือชนิดต่างๆ แต่พบว่าช่วงของค่าพิกัดเหลวของตัวอย่างดินที่วิเคราะห์นั้นมักอยู่ในช่วงต่ำถึงปานกลาง และยังคงขาด แคลนการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับความแตกต่างของผลการทดสอบหาค่าพิกัดพลาสติกที่ได้จากการทดสอบโดย วิธีต่างๆ นอกจากนั้นยังขาดองค์ความรู้ที่เกี่ยวกับความแตกต่างของผลการทดสอบระหว่างห้องปฏิบัติการ ซึ่งพิจารณาถึงปัจจัยของผู้ทดสอบ และการวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อพิจารณาถึงความถูกต้องและแม่นยำ ของผลการทดสอบอีกด้วย

ดังนั้นเพื่อเติมเต็มฐานข้อมูลวิจัยที่ขาดแคลนอยู่ โครงการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและ เปรียบเทียบผลการทดสอบหาค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกที่ได้จากการทดสอบหลายวิธี เปรียบเทียบผล การทดสอบระหว่างห้องปฏิบัติการ (ปัจจัยผู้ทดสอบ) และวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อพิจารณาถึงความถูกต้อง และความแม่นยำของผลการทดสอบหาค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกของตัวอย่างดินเหนียว โดยตัวอย่าง ดินที่ใช้ในการทดสอบจะมีค่าพิกัดชั้นเหลวครอบคลุมอยู่ในช่วงต่ำถึงสูง เพื่อนำไปสู่การใช้เป็นฐานข้อมูลใน การพิจารณาคัดเลือกวิธีการทดสอบตามมาตรฐานที่เหมาะสมและมีความถูกต้องและแม่นยำสูง สามารถ สะท้อนถึงคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่างๆ ของดินที่ถูกต้อง ซึ่งข้อมูลต่างๆ เหล่านี้ ถือว่าเป็นข้อมูลที่สำคัญและเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในงานออกแบบทางด้านวิศวกรรมปฐพี

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วิธีดำเนินการวิจัย

เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบความแตกต่างของผลการทดสอบหาค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกของดิน และค่าความถูกต้องและแม่นยำของผลการทดสอบระหว่างห้องปฏิบัติการ (หรือปัจจัยของผู้ทดสอบ) ของดินตัวอย่างเมื่อใช้เครื่องมือทดสอบต่างชนิดกัน วิธีการดำเนินการวิจัยของโครงการวิจัยนี้จึงถูกออกแบบดังนี้ (รูปที่ 3.1)

เพื่อให้พิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกมีค่าครอบคลุมในช่วงต่ำ ปานกลางและสูง จึงเตรียมตัวอย่างดินเหนียวที่ใช้ในการทดสอบ 3 ชนิดคือ ดินเบนโทไนท์ (Bentonite) ดินเหนียวธรรมชาติ และดินเหนียวเกาลิน (Kaolin) และทำการทดสอบโดยวิธีต่างๆ ดังนี้

##### ส่วนที่ 1: การทดสอบหาค่าพิกัดเหลวด้วยวิธีต่างๆ

ทำการทดสอบหาค่าพิกัดเหลวของตัวอย่างดินเหนียวทั้ง 3 ชนิด ด้วยวิธีถ้วยคาซาเกนตีและเครื่องมือกรวยตก และแต่ละวิธีจะถูกวิเคราะห์ผลทั้งแบบ Multipoint method และ One-point method โดยผู้ทดสอบคนเดียวกันและเครื่องมือทดสอบชุดเดียวกันการทดสอบละ 15 ครั้ง

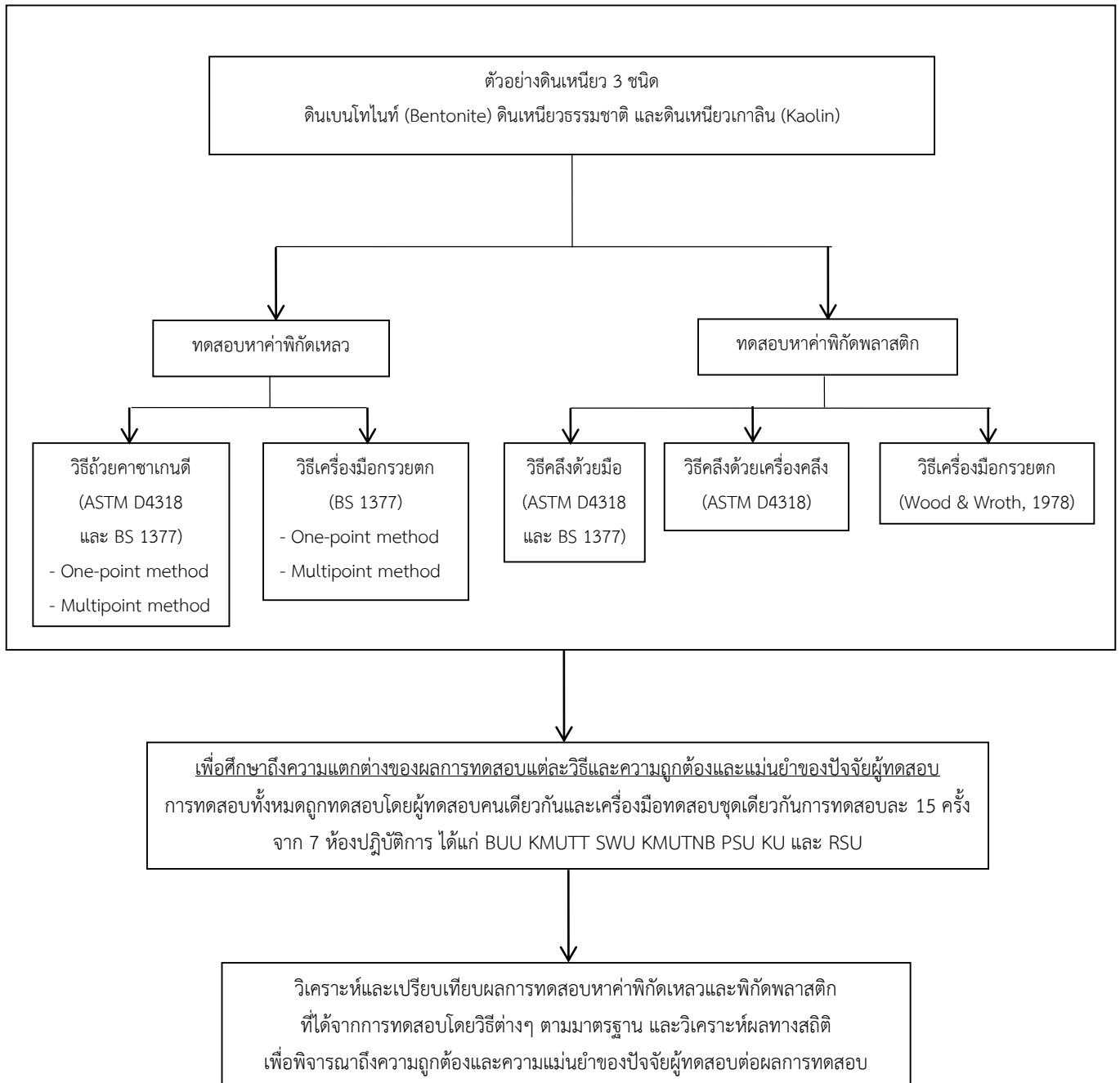
##### ส่วนที่ 2: การทดสอบหาค่าพิกัดพลาสติกด้วยวิธีต่างๆ

ทำการทดสอบหาค่าพิกัดพลาสติกของตัวอย่างดินเหนียวทั้ง 3 ชนิด ด้วยวิธีการคลึงด้วยมือ วิธีการคลึงด้วยเครื่องคลึง (Plastic limit rolling device) และเครื่องมือกรวยตก โดยผู้ทดสอบคนเดียวกันและเครื่องมือทดสอบชุดเดียวกันการทดสอบละ 15 ครั้ง

##### ส่วนที่ 3: การทดสอบหาค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกด้วยวิธีต่างๆ โดยพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างห้องปฏิบัติการ (หรือปัจจัยของผู้ทดสอบ)

เพื่อศึกษาถึงปัจจัยของผู้ทดสอบ ตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิดจะถูกทดสอบที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมปฐพี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา (BUU) และนอกจากนี้ตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิดนี้ จะส่งไปยังห้องปฏิบัติการของมหาวิทยาลัยอื่นๆ อีกจำนวน 6 แห่ง ได้แก่ ห้องปฏิบัติการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (KMUTT) ห้องปฏิบัติการมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (SWU) ห้องปฏิบัติการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (KMUTNB) ห้องปฏิบัติการมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (PSU) ห้องปฏิบัติการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (KU) และห้องปฏิบัติการมหาวิทยาลัยรังสิต (RSU) เพื่อทำการทดสอบหาค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกด้วยวิธีต่างๆ เช่นเดียวกับที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นในการทดสอบส่วนที่ 2 และ 3 เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างห้องปฏิบัติการ (หรือปัจจัยของผู้ทดสอบ) และข้อมูลผลการทดสอบต่างๆ จะถูกนำมาวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อพิจารณาถึง

ความถูกต้องและความแม่นยำของผลการทดสอบหาค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกของตัวอย่างดินเหนียว โดยก่อนทำการทดสอบต้องตรวจสอบเครื่องมือต่างๆ ให้เป็นไปตามข้อกำหนดในมาตรฐานด้วย เพื่อตัดปัจจัยเรื่องความแตกต่างของเครื่องมือที่ทดสอบ



รูปที่ 3.1 แผนผังวิธีการดำเนินการวิจัย

### 3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. เบนโทไนท์ (Bentonite) บริษัทผู้ผลิต คือ บริษัท วิทยาธรรม จำกัด



รูปที่ 3.2 เบนโทไนท์ (Bentonite)

2. ดินธรรมชาติจากจังหวัดพิจิตร



รูปที่ 3.3 ดินธรรมชาติ (จากจังหวัดพิจิตร)

3. ดินเหนียวเกาลิน (Kaolin) บริษัทผู้ผลิต คือ บริษัท วิทยาธรรม จำกัด



รูปที่ 3.4 ดินเหนียวเกาลิน (Kaolin)

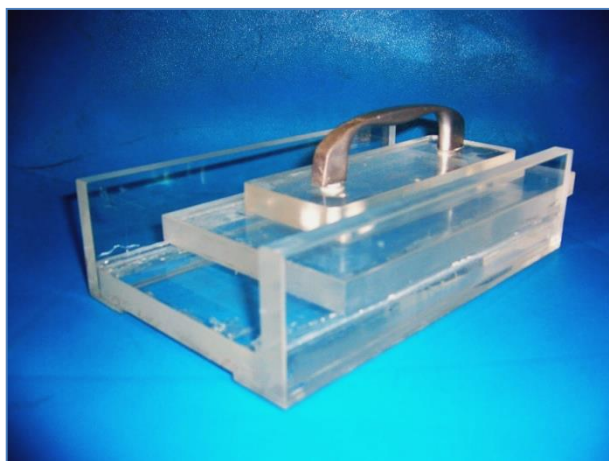
### 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้การทดสอบ

1. ชุดอุปกรณ์หาค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติก ตามมาตรฐาน ASTM D 4318 (รูปที่ 3.5)



รูปที่ 3.5 ชุดอุปกรณ์หาค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติก ตามมาตรฐาน ASTM D 4318

2. อุปกรณ์หาค่าพิกัดพลาสติก (Plastic Limit-Rolling Device) (รูปที่ 3.6)

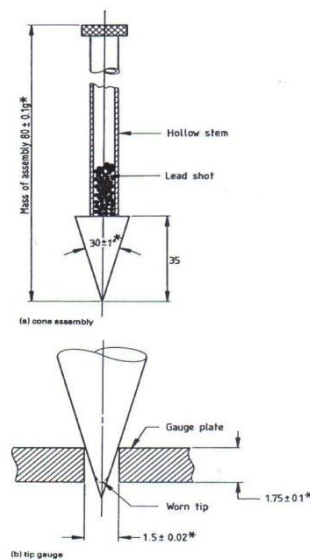


รูปที่ 3.6 อุปกรณ์หาค่าพิกัดพลาสติก (Plastic Limit-Rolling Device)

3. ชุดอุปกรณ์หาค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติก โดยวิธีตักดิ่ง (Cone Penetrometer Method) ตามมาตรฐาน BS 1377-2 ดังรูปที่ 3.7 และ 3.8



รูปที่ 3.7 ชุดอุปกรณ์หาค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติก โดยวิธีตักดิ่ง ตามมาตรฐาน BS 1377-2



รูปที่ 3.8 ลูกตักทำจากสแตนเลส (Cone of Stainless Steel)

ตามมาตรฐาน BS 1377-2 : 1990

### 3.4 วิธีการทดสอบ

#### (1) Casagrade's cup

- หาค่าพิกัดเหลวแบบหลายจุด (Multipoint Liquid Limit – Method A)
  - หาค่าพิกัดเหลวแบบจุดเดียว (One – Point Liquid Limit – Method B)
  - หาค่าพิกัดพลาสติกแบบใช้มือคลึง (Hand Method)
  - หาค่าพิกัดพลาสติกแบบใช้อุปกรณ์ช่วยคลึง (Rolling Device Method)
- โดยทำการทดลองตามมาตรฐาน ASTM D 4318-00

#### (2) Cone Penetrometer Method

- หาค่าพิกัดเหลวโดยวิธีตักตั้ง (Cone Penetrometer Method)
  - หาค่าพิกัดเหลวโดยวิธีตักตั้งแบบจุดเดียว (One – Point Cone Penetrometer Method)
- โดยทำการทดลองตามมาตรฐาน BS 1377-2 : 1990
- หาค่าพิกัดพลาสติกโดยวิธีตักตั้ง (Cone Penetrometer Method)
- โดยทำการทดลองอิงตามผลงานวิจัยของ D.M. Wood and C.P. Wroth (1978)

ตารางที่ 3.1 วิธีการทดสอบ

Soil	Properties	Reference	Method
- Bentonite - Natural soil - Light Kaolin	Liquid Limit	ASTM D 4318-00	- Multipoint Liquid Limit – Method A - One – Point Liquid Limit – Method B
		BS 1377-2 : 1990	- Cone Penetrometer Method - One – Point Cone Penetrometer Method
	Plastic Limit	ASTM D 4318-00	- Hand Method - Rolling Device Method
		Wood & Wroth (1978)	- Cone Penetrometer Method (240 g.)



### 3.4.1 การทดสอบหาขีดจำกัดเหลว (ตามมาตรฐาน ASTM D-4318)

#### ขั้นตอนการทดสอบ

1. ตรวจสอบอุปกรณ์ทดสอบให้มีระยะตกกระทบของถ้วยทองเหลืองเท่ากับ 10 มิลลิเมตร โดยใช้ด้ามของเครื่องมือปาดร่องดินวัดระยะตกกระทบของถ้วยทองเหลืองดังกล่าวและปรับสกรูยึดถ้วยทองเหลืองในตำแหน่งที่เหมาะสมจนกระทั่งมีระยะตามที่กำหนด
2. ใส่ตัวอย่างลงในบริเวณตอนล่างของถ้วยทองเหลืองด้วยมีดปาดดิน กดและปาดดินโดยไม่ให้มีฟองอากาศอยู่ภายในจนเรียบและอยู่ในแนวระดับ มีความหนาของดินส่วนที่หนาที่สุดเท่ากับ 10 มิลลิเมตร
3. จับยึดถ้วยทองเหลืองให้แน่น ใช้เครื่องมือปาดร่องดินทำการปาดตัวอย่างดินให้เป็นร่องตรงกลางจนเห็นพื้นถ้วย เพื่อแบ่งดินออกเป็น 2 ส่วนเท่าๆ กันดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ปาดร่องดินออกเป็น 2 ส่วนเท่าๆ กัน

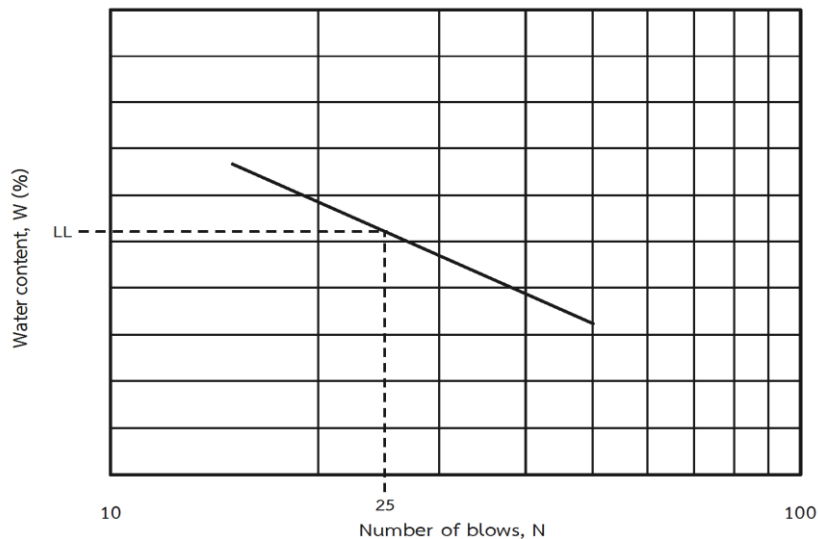
4. หมุนเคาะถ้วยทองเหลืองให้ตกกระทบกับแท่นรองในทันทีด้วยอัตรา 2 ครั้งต่อวินาที พร้อมกับนับจำนวนครั้งการเคาะไปด้วย จนกระทั่งดินเคลื่อนที่เข้ามาสัมผัสกันเป็นแนวยาว 12.7 มิลลิเมตร จึงหยุดเคาะ
5. ใช้มีดปาดดินตัดตัวอย่างในบริเวณที่ดินเคลื่อนที่มาสัมผัสในทิศทางที่ตั้งกับจำนวนครั้งการเคาะที่ทดลองได้
6. นำดินที่เหลืออยู่ในถ้วยทองเหลืองกลับไปผสมกับดินในถ้วยกระเบื้องเคลือบตามเดิมใช้กระบอกลดน้ำเติมลงไปจนความชื้นเพิ่มขึ้น แล้วผสมให้เข้ากัน ทำความสะอาดถ้วยทองเหลืองและเครื่องมือปาดร่องดินจนสะอาดและดำเนินการทดลองตามข้อ 2 ถึง ข้อ 5 เพื่อทำการทดลองอย่างน้อย 4 ครั้ง แต่ทุกครั้งควรมีจำนวนเคาะอยู่ระหว่างช่วงดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.2 จำนวนการเคาะที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบชีดจำกัดเหลว

ครั้งที่	จำนวนการเคาะ(ครั้ง)
1	30 ถึง 35
2	25 ถึง 30
3	20 ถึง 25
4	15 ถึง 20

7. หาความชื้น (Moisture Content) ของตัวอย่างโดยใช้ตุ้บ หรือตาม สวพ.ทล. 302/2551 มาตรฐานการทดสอบความชื้นด้วยตุ้บไมโครเวฟ

8. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับจำนวนครั้งที่เคาะ (หรือจำนวน Bowl) บนกระดาษ semi-log โดยให้แกนนอนเป็นค่า  $\log(N)$  และแกนตั้งเป็นค่าร้อยละความชื้น (หรือปริมาณ น้ำ,  $w$ ) ค่าความชื้น (ร้อยละ) ที่จำนวนเคาะ 25 ครั้ง คือค่าพิกัดเหลว ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Water Content (%) และ No. of Blow (N)

**ข้อควรระวัง**

1. เมื่อสิ้นสุดการเคาะดินแต่ละการทดสอบ ให้รีบเก็บตัวอย่างดินแล้วชั่งเพื่อหาความชื้นทันที เพราะน้ำในดินอาจจะระเหยทำให้ผลการทดสอบเกิดความคลาดเคลื่อนได้
2. ห้ามผสมดินในถ้วยทองเหลืองของเครื่องมือทดสอบชีดเหลวให้ผสมในถ้วยกระเบื้องเคลือบเท่านั้น
3. ในขณะที่ทำการทดสอบให้วางเครื่องทดสอบบนพื้นที่มีมั่นคงแข็งแรง และจับยึดเครื่องมือทดสอบไม่ให้เคลื่อนที่ขณะหมุนเคาะถ้วยทองเหลือง

### การคำนวณ

1. คำนวณปริมาณน้ำที่ผสมอยู่ในดินเป็นร้อยละของน้ำหนักต่อน้ำหนักดินอบแห้ง ดังนี้

$$\text{ความชื้นเป็นร้อยละ} = \frac{\text{น้ำหนักของน้ำ}}{\text{น้ำหนักของดินอบแห้ง}} \times 100 \quad (3.1)$$

### 3.4.2 การทดสอบหาขีดจำกัดพลาสติก ตามมาตรฐาน)ASTM D-4318(

#### ขั้นตอนการทดสอบ

1. ใช้ดินตัวอย่างเดียวกับที่ใช้ทดสอบขีดจำกัดเหลวประมาณ 20 กรัม แผ่กระจายดินออกสลับกับการนำมา รวมกันเป็นก้อนเพื่อลดปริมาณความชื้นในดินลงจนกระทั่งไม่ติดมือเมื่อนำมาปั้นและสามารถคลึงได้ง่าย
2. ใช้ดินนี้ประมาณ 1.5 – 2. กรัม นำไปคลึงด้วยฝ่ามือหรือนิ้วมือบนแผ่นกระจกในอัตรา 80 – 90 ครั้ง ต่อนาที จนเป็นเส้นขนาดสม่ำเสมอมีเส้นผ่านศูนย์กลาง (คลึงไปคลึงกลับ)3.2 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ในเวลาไม่เกิน 2 นาที ถ้าไม่ปรากฏรอยแตกที่ผิวของดิน ให้แผ่กระจายดินนั้นออกและนำไปคลึงเป็น เส้นใหม่อีกครั้ง จนกระทั่งเกิดรอยแตกขึ้นที่ผิวดินพอดี นำเส้นตัวอย่างใส่ภาชนะอบดิน



รูปที่ 3.11 ปั้นคลึงดินให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 มิลลิเมตร

3. แบ่งตัวอย่างดินมาอีก 1.5 -2 กรัม ทำเช่นเดียวกับข้อจนได้เส้นตัวอย่างในภาชนะอบดินมีน้ำหนักอย่างน้อย 6 กรัม นำไปชั่ง บันทึกน้ำหนักไว้
4. ทำการทดลองตามข้อ ใหม่อีกครั้ง แต่ใส่ตัวอย่างในภาชนะอบดินอีกใบหนึ่ง

5. หาความชื้นของตัวอย่างโดยใช้ตุ้บ หรือตาม สวพ.ทล. 302/2551 มาตรฐานการทดสอบความชื้นด้วยตุ้บไมโครเวฟ ในกรณีที่ความชื้นมีค่าต่างกันมากกว่า 2.6 ต้องทำการทดลองใหม่ แต่ถ้าไม่เกินค่าดังกล่าวให้รายงานค่าเฉลี่ยของความชื้นเป็นขีดจำกัดพลาสติก ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.12 ตัวอย่างดินที่แตกออกจากกัน

#### การคำนวณ

1. คำนวณค่าขีดจำกัดพลาสติก เป็นร้อยละของน้ำที่ผสมอยู่ในดินอบแห้ง ดังนี้

$$\text{ความชื้นเป็นร้อยละ} = \frac{\text{น้ำหนักของน้ำ}}{\text{น้ำหนักของดินอบแห้ง}} \times 100 \quad (3.2)$$

2. ค่าดัชนีความเป็นพลาสติก เป็นผลต่างระหว่างขีดจำกัดเหลวและขีดจำกัดพลาสติก ดังนี้

$$\text{ค่าดัชนีความเป็นพลาสติก (PI)} = \text{ค่าขีดจำกัดเหลว (LL)} - \text{ขีดจำกัดพลาสติก} \quad (3.3)$$

## บทที่ 4

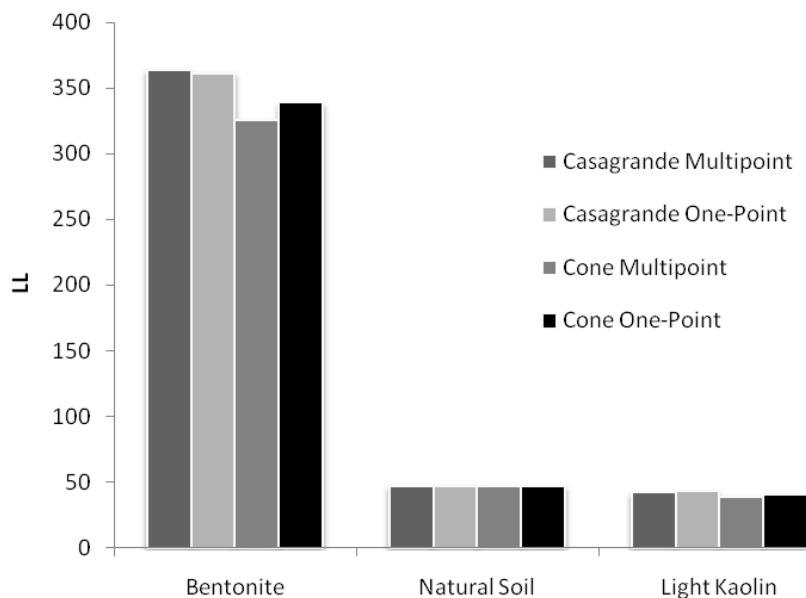
### ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

#### 4.1 ผลการทดสอบ

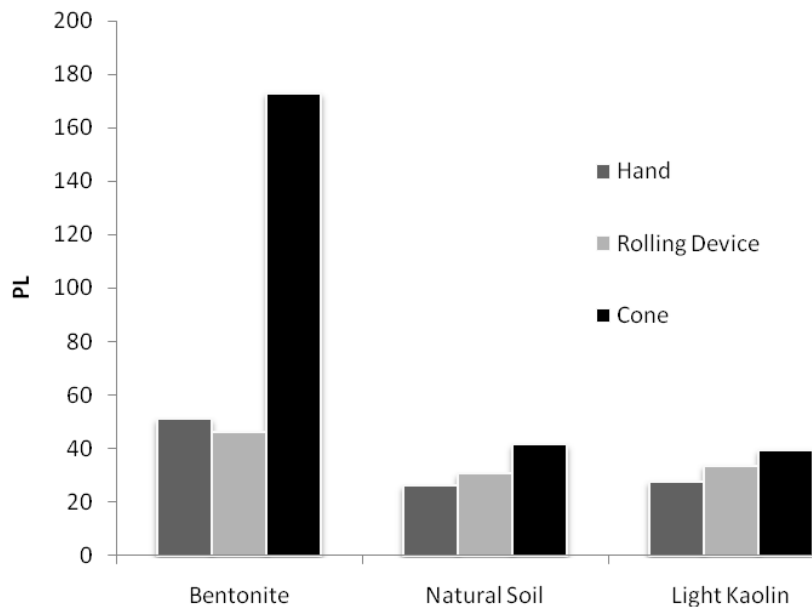
จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (BUU) โดยผู้ทดลองคนเดียว ซึ่งทดสอบดินสามชนิด โดยแบ่งเป็น Casagrande method และ Cone method โดยในแต่ละวิธีทดสอบ 15 ครั้ง ค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1 และผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบหาค่า Atterberg Limits

ดิน	Liquid Limit				Plastic Limit		
	Casagrande Multipoint	Casagrande One-Point	Cone Multipoint	Cone One-Point	Hand	Rolling Device	Cone
Bentonite	363.4	361.4	325.6	338.8	50.9	45.9	172.7
Natural Soil	47.1	46.7	46.3	46.7	26.0	30.5	41.3
Light Kaolin	42.4	42.9	38.8	40.8	27.5	33.5	39.3



รูปที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่า Liquid Limit โดยวิธีต่างๆ



รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่า Plastic Limit โดยวิธีต่างๆ

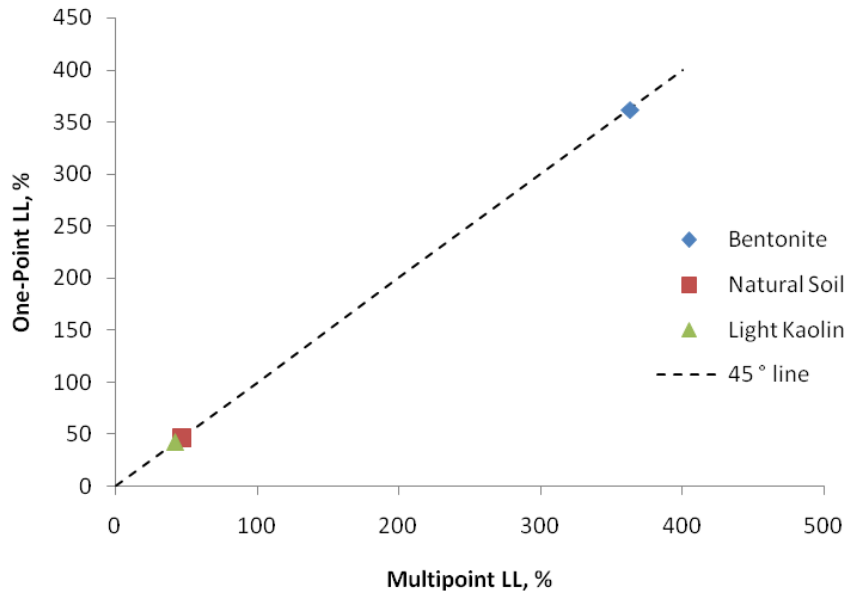
#### 4.2 ความสัมพันธ์ของค่า Liquid Limit โดยวิธี Multipoint Liquid Limit และวิธี One-Point Liquid Limit

ตารางที่ 4.2 แสดงข้อมูลเปรียบเทียบค่า Liquid Limit ระหว่างวิธี Multipoint และ One-Point ซึ่งแสดงค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นของทั้งสองวิธี และจากกราฟรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าค่าอยู่บนเส้น  $45^\circ$  นั้นคือค่า Liquid Limit ที่ได้จาก Multipoint และ One-Point โดย Casagrande method มีค่าใกล้เคียงกันมาก และต่อไปในงานวิจัยนี้จะใช้ค่า Liquid Limit จาก Multipoint เป็นตัวแทนค่าในวิธี Casagrande method และวิธี Cone method เพราะเนื่องด้วยวิธี Multipoint ได้รับการยอมรับและนิยมใช้ในการทดสอบมากกว่าวิธี One-Point

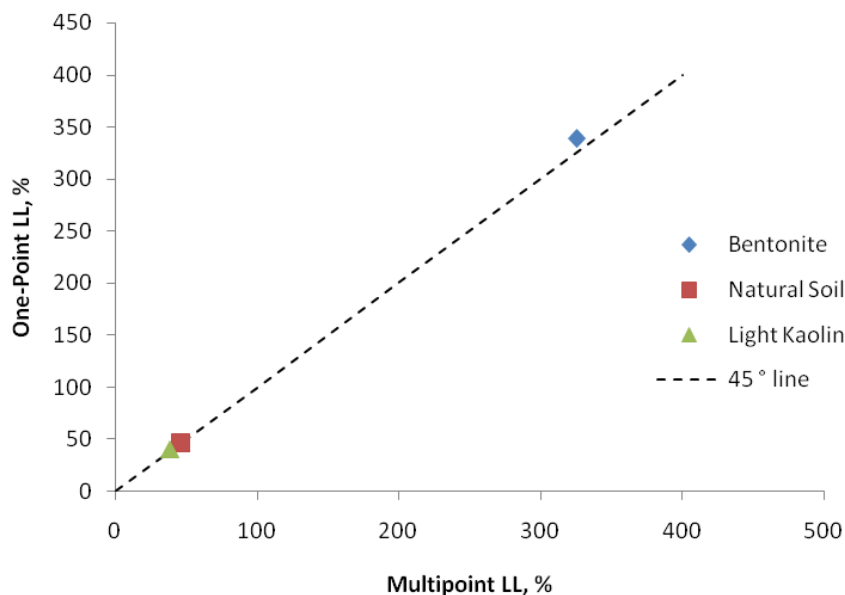
ตารางที่ 4.2 ค่า Liquid Limit โดยวิธี Multipoint Liquid Limit และวิธี One-Point Liquid Limit

ดิน	Multipoint		One-Point		ค่าคลาดเคลื่อนของ One-Point จาก Multipoint (%)	
	Casagrande	Cone	Casagrande	Cone	Casagrande	Cone
Bentonite	363.4	325.6	361.4	338.8	-0.6	+4.1
Natural Soil	47.1	46.3	46.7	46.7	-0.8	+0.9
Light Kaolin	42.4	38.8	42.9	40.8	+1.2	+5.2

จากตารางที่ 4.2 และกราฟรูปที่ 4.4 จะพบว่าค่า Liquid Limit โดย Cone method ที่ได้จากวิธี One-Point มีค่ามากกว่าวิธี Multipoint อยู่โดยเฉลี่ยประมาณ 3.4%



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Multipoint LL และ One-Point LL โดยวิธี Casagrande method



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Multipoint LL และ One-Point LL โดยวิธี Cone method

### 4.3 ความสัมพันธ์ของค่า Liquid Limit โดยวิธี Casagrande method และวิธี Cone method

ตารางที่ 4.3 แสดงข้อมูลเปรียบเทียบค่า Liquid Limit ระหว่างวิธี Casagrande และวิธี Cone ซึ่งแสดงค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นของทั้งสองวิธี และจากข้อมูลสามารถนำมาเขียนกราฟได้ดังกราฟรูปที่ 4.5 ซึ่งพบว่าค่าที่ได้จาก Cone method มีค่าน้อยกว่า Casagrande method โดยค่าจากสองวิธีนี้แตกต่างกันอยู่โดยเฉลี่ยประมาณ 7% และพบว่าค่าจะเริ่มคลาดเคลื่อนโดยให้ผลการทดสอบที่ไม่ใกล้เคียงกันในตัวอย่างดินที่มีค่า Liquid Limit มากกว่า 100% (Bentonite) ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ I. Littleton & Marion Farmilo (1977) ที่ได้ศึกษาความแตกต่างของค่า Liquid Limit จากวิธี Cone และ Casagrande โดยกล่าวว่าสำหรับค่า Liquid Limit ที่อยู่ในช่วง 20-100% จะมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.1 แต่ที่ค่า Liquid Limit สูงกว่า 100% ความสัมพันธ์จะไม่เป็นไปตามสมการนี้

$$LL \text{ by Cone} = 1.6 + 0.97 (LL \text{ by Casagrande}) \quad (4.1)$$

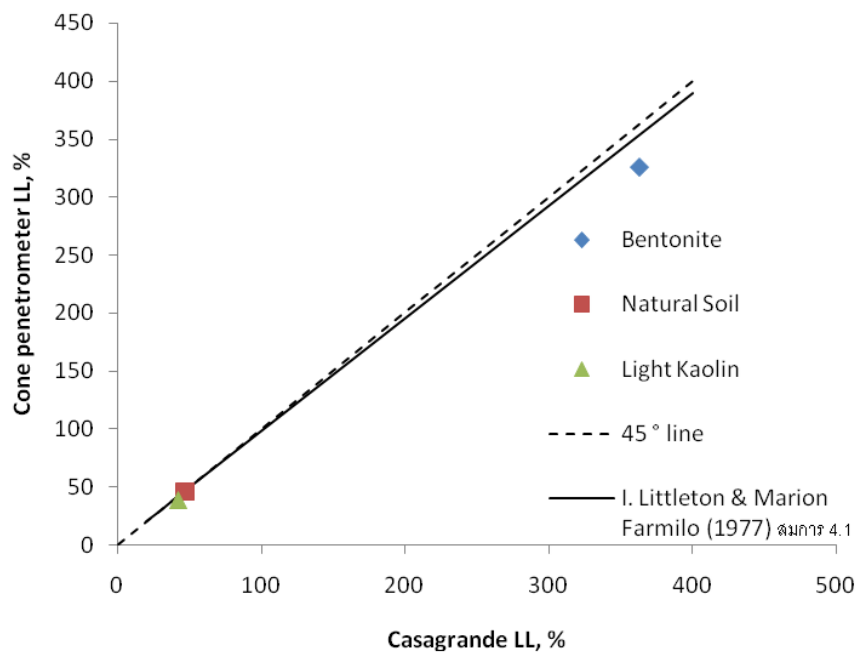
ตารางที่ 4.3 ค่า Liquid Limit โดยวิธี Casagrande method และวิธี Cone method

ดิน	Casagrande	Cone	ค่าคลาดเคลื่อนของ Cone จาก Casagrande (%)
Bentonite	363.4	325.6	-10.4
Natural Soil	47.1	46.3	-1.7
Light Kaolin	42.4	38.8	-8.5

จากผลงานวิจัยของ Moon, C.F. & White, K.B. (1985) ที่ได้ศึกษาเปรียบเทียบค่า Liquid Limit โดยวิธี Cone method และวิธี Casagrande method พบว่าค่า Liquid Limit ที่ได้จากวิธี Cone method จะมีค่าน้อยกว่าที่ได้จากวิธี Casagrande method อยู่ประมาณ 6% ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยนี้

และสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Wasti, Y. (1987) ที่ได้ศึกษาความแตกต่างของค่า Liquid Limit จากวิธี Cone method และ Casagrande method โดยกล่าวว่าสำหรับดินธรรมชาติ และ Bentonite จะมีความสัมพันธ์ในรูปของสมการที่แตกต่างกัน และการทดสอบด้วยวิธี Cone และ Casagrande นี้จะให้ผลที่ดีในดินที่มีค่า Liquid Limit น้อยกว่า 120% ส่วนดินที่มีค่า Liquid Limit สูงกว่านี้ค่าที่ได้จากวิธี Cone จะได้ค่าน้อยและความคลาดเคลื่อนสูง





รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า Liquid Limit โดยวิธี Casagrande method และวิธี Cone method

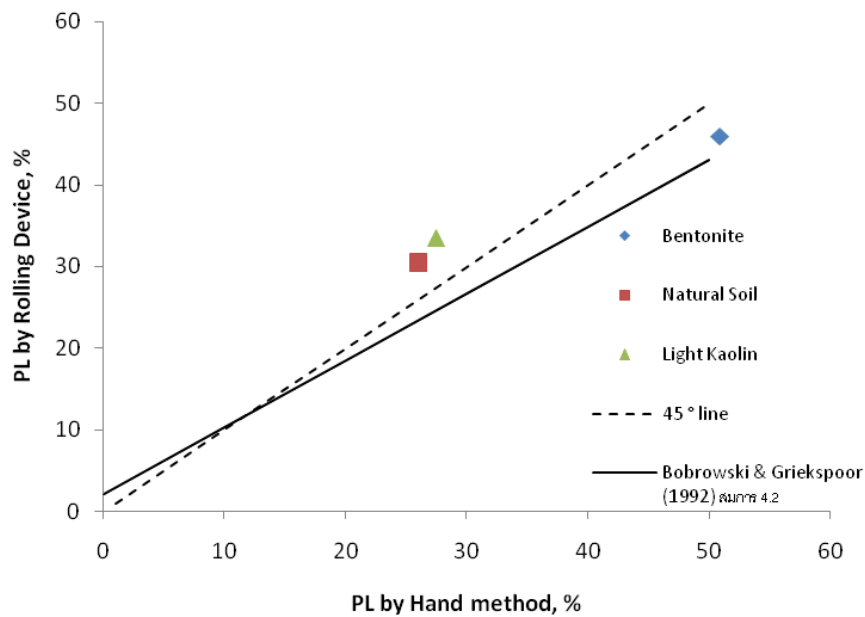
#### 4.4 ความสัมพันธ์ของค่า Plastic Limit โดยวิธี Hand method และวิธี Rolling Device method

ตารางที่ 4.4 แสดงข้อมูลเปรียบเทียบค่า Plastic Limit ระหว่างวิธี Hand และวิธี Rolling Device ซึ่งแสดงค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นของทั้งสองวิธี และจากข้อมูลสามารถนำมาเขียนกราฟได้ดังกราฟรูปที่ 4.6 ซึ่งจะพบว่าข้อมูลไม่อยู่บนเส้น 45° นั่นคือค่า Plastic Limit ที่ได้จาก Hand method และ Rolling Device method มีค่าไม่เท่ากัน โดยจะเห็นว่าตัวอย่างดินที่มีค่า Plastic Limit น้อย (Natural Soil & Light Kaolin) ค่าที่ได้จาก Rolling Device จะมีค่ามากกว่า ส่วนตัวอย่างดินที่มีค่า Plastic Limit มากกว่า (Bentonite) ค่าที่ได้จาก Rolling Device จะมีค่าน้อยกว่า และค่าที่ได้มีความสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Bobrowski & Griekspoor (1992) ที่ได้ศึกษาการหาค่า Plastic Limit ด้วยวิธี Rolling Device method โดยเปรียบเทียบกับวิธี Hand method ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับผลงานวิจัยนี้ โดยทาง Bobrowski & Griekspoor ได้เสนอสมการไว้ ดังสมการที่ 4.2

$$PL \text{ by Rolling Device} = 0.82 (PL \text{ by Hand}) + 2.04 \quad (4.2)$$

ตารางที่ 4.4 ค่า Plastic Limit โดยวิธี Hand method และวิธี Rolling Device method

ดิน	Hand	Rolling Device	ค่าคลาดเคลื่อนของ Rolling Device จาก Hand (%)
Bentonite	50.9	45.9	-9.8
Natural Soil	26.0	30.5	+17.3
Light Kaolin	27.5	33.5	+21.8



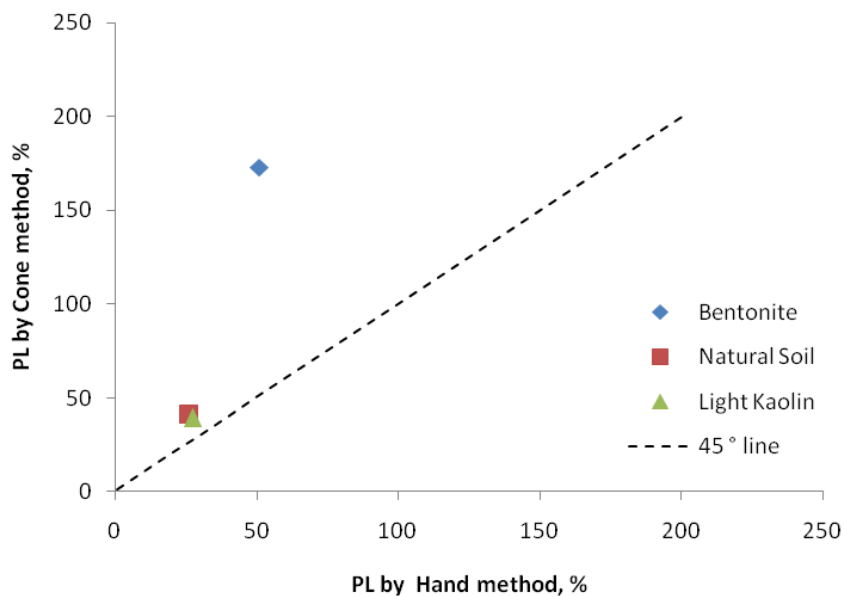
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า Plastic Limit โดยวิธี Hand method และวิธี Rolling Device method

#### 4.5 ความสัมพันธ์ของค่า Plastic Limit โดยวิธี Hand method และวิธี Cone method

ตารางที่ 4.5 ค่า Plastic Limit โดยวิธี Hand method และวิธี Cone method

ดิน	Hand	Cone	ค่าคลาดเคลื่อนของ Cone จาก Hand (%)
Bentonite	50.9	172.7	+239.3
Natural Soil	26.0	41.3	+58.8
Light Kaolin	27.5	39.3	+42.9

ตารางที่ 4.5 แสดงข้อมูลเปรียบเทียบค่า Plastic Limit ระหว่างวิธี Hand method และวิธี Cone method ซึ่งแสดงค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นของทั้งสองวิธี และจากข้อมูลสามารถนำมาเขียนกราฟได้ดัง กราฟรูปที่ 4.7 ซึ่งจะพบว่าค่าที่ได้จากทั้งสองวิธีนี้จะยังมีความแตกต่างกันมากในตัวอย่างดินที่มีค่า Plastic Limit มาก (Bentonite) ส่วนตัวอย่างดินที่มีค่า Plastic Limit น้อย (Natural Soil & Light Kaolin) ค่าที่ได้จะมีความใกล้เคียงกันมากกว่า และจะเห็นว่าค่า Plastic Limit ที่ได้จากวิธี Cone method มีค่ามากกว่า Hand method ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Wasti, Y. & Bezirci, M.H. (1986) และ Wasti, Y. (1987) ที่ได้ศึกษาการหาค่า Plastic Limit โดยวิธี Cone method และ Casagrande method โดยกล่าวไว้ว่าในการศึกษาเปรียบเทียบค่า Plastic Limit โดยสองวิธีนี้จะให้ผลการทดลองที่ค่อนข้างกระจาย มาก ในตัวอย่างดินที่มีค่า Liquid Limit มากกว่า 150%



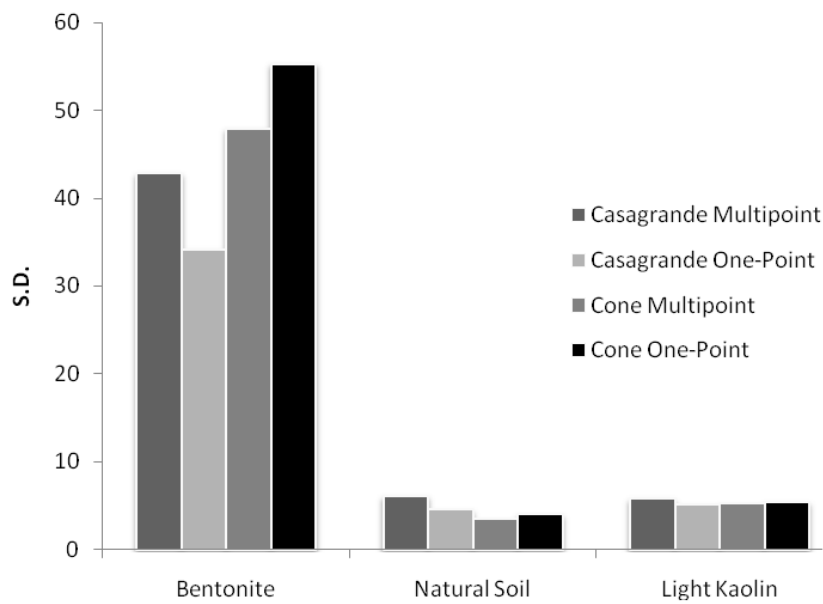
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า Plastic Limit โดยวิธี Hand method และวิธี Cone method

#### 4.6 การวิเคราะห์ข้อมูลโดยวิธีทางสถิติจากผลการทดสอบของผู้ทดลองคนเดียว

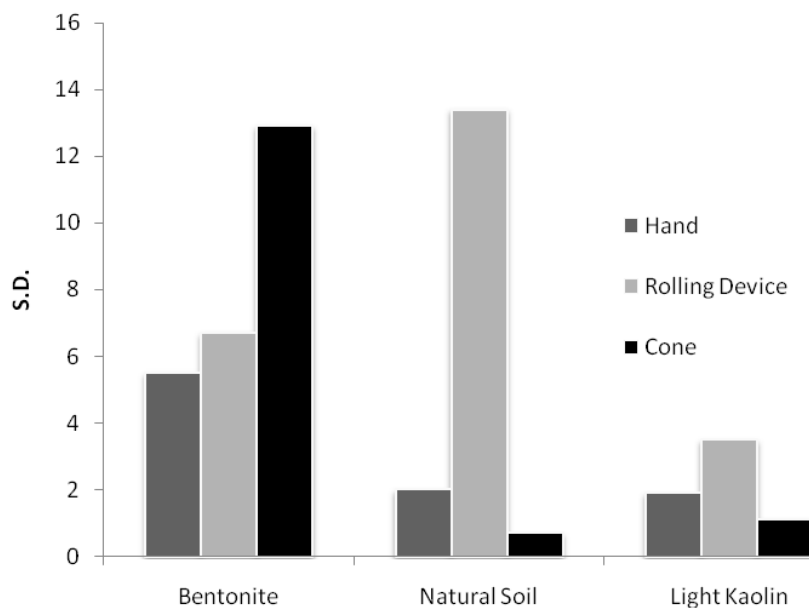
จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (BUU) โดยผู้ทดลองคนเดียว ซึ่งทดสอบดินสามชนิด โดยแบ่งเป็น Casagrande method และ Cone method โดยในแต่ละวิธีทดสอบ 15 ครั้ง รายละเอียดของผลการทดสอบในแต่ละครั้งแสดงในภาคผนวก ก ผลที่ได้แสดงเป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังตารางที่ 4.6 และเปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้ดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 โดยพบว่าในการทดสอบหาค่า Liquid Limit ผลที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธี Cone penetrometer แบบ Multipoint มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด และในการทดสอบหาค่า Plastic Limit ผลที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธี Cone มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด

ตารางที่ 4.6 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Atterberg Limit ในแต่ละวิธีการทดลอง

ดิน	Liquid Limit				Plastic Limit		
	Casagrande Multipoint	Casagrande One-Point	Cone Multipoint	Cone One-Point	Hand	Rolling Device	Cone
Bentonite	42.8	34.1	47.9	55.3	5.5	6.7	12.9
Natural Soil	6.1	4.5	3.4	4.0	2.0	13.4	0.7
Light Kaolin	5.8	5.1	5.2	5.4	1.9	3.5	1.1



รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Liquid Limit โดยวิธีต่างๆ



รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Plastic Limit โดยวิธีต่างๆ

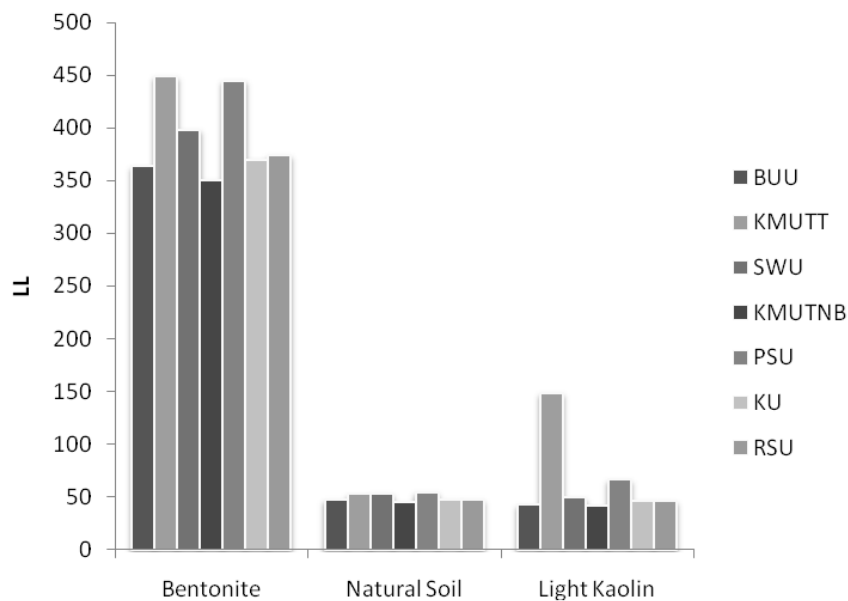
#### 4.7 การเปรียบเทียบผลการทดสอบจากหลายห้องปฏิบัติการ

จากตัวอย่างดินที่ได้ส่งไปทดลองยังห้องปฏิบัติการตามมหาวิทยาลัยต่างๆ ที่เข้าร่วม รวมทั้งข้อมูลจากห้องปฏิบัติการของผู้วิจัยด้วย เมื่อนำข้อมูลที่ได้รับมาหาค่าเฉลี่ย จะได้ผลดังตารางที่ 4.7, 4.8 และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยที่ได้ดังรูปที่ 4.10, 4.11 ซึ่งประกอบไปด้วยมหาวิทยาลัยต่างๆ ดังนี้

BUU	:	มหาวิทยาลัยบูรพา
KMUTT	:	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
SWU	:	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
KMUTNB	:	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
PSU	:	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
KU	:	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
RSU	:	มหาวิทยาลัยรังสิต

ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยของค่า Liquid Limit ที่ส่งตัวอย่างดินไปยังห้องปฏิบัติการตาม มหาวิทยาลัยต่างๆ

ดิน	BUU	KMUTT		SWU		KMUTNB		PSU		KU		RSU	
		ค่า	%Error	ค่า	%Error	ค่า	%Error	ค่า	%Error	ค่า	%Error	ค่า	%Error
Bentonite	363.4	448.6	+23.4	398.2	+9.6	350.3	-3.6	444.8	+22.4	370.0	+1.8	373.8	+2.9
Natural Soil	47.1	52.3	+11.0	52.9	+12.3	45.3	-3.8	54.3	+15.3	47.2	+0.2	47.4	+0.6
Light Kaolin	42.4	148.4	+250	49.1	+15.8	41.2	-2.8	66.2	+56.1	46.1	+8.7	46.0	+8.5

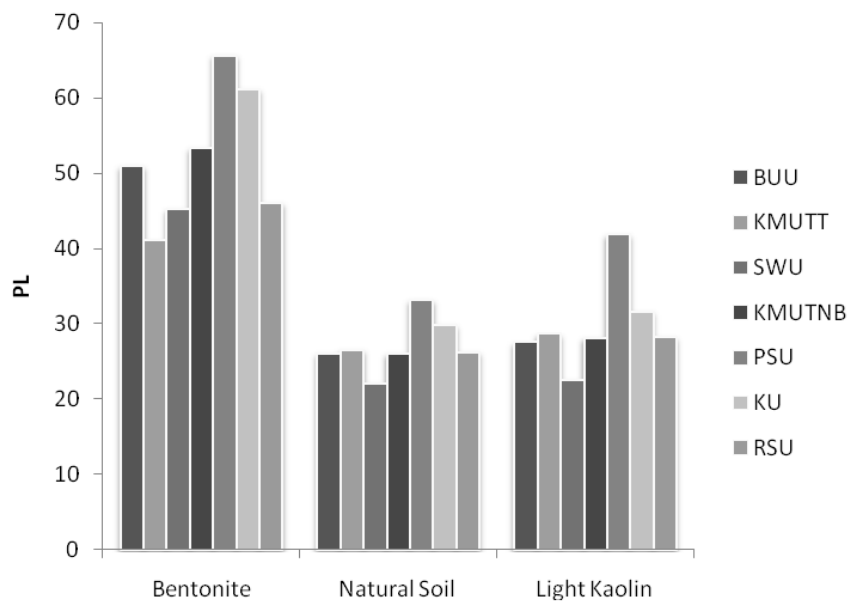


รูปที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่า Liquid Limit จากหลายห้องปฏิบัติการ

ผลการทดลองที่ได้จากห้องปฏิบัติการต่างๆ ค่า Liquid Limit เมื่อเปรียบเทียบกับค่าทดสอบจากผู้ทดสอบคนเดียว (BUU) จะพบว่าผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการอื่นให้ผลการทดสอบที่มากกว่า ซึ่งห้องปฏิบัติการ KMUTNB ให้ผลการทดสอบที่ใกล้เคียงกับ BUU มากที่สุด

ตารางที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยของค่า Plastic Limit ที่ส่งตัวอย่างดินไปยังห้องปฏิบัติการตาม มหาวิทยาลัยต่างๆ

ดิน	BUU	KMUTT		SWU		KMUTNB		PSU		KU		RSU	
		ค่า	%Error	ค่า	%Error	ค่า	%Error	ค่า	%Error	ค่า	%Error	ค่า	%Error
Bentonite	50.9	41.0	-19.4	45.2	-11.2	53.3	+4.7	65.6	+28.9	61.1	+21.0	46.0	-9.6
Natural Soil	26.0	26.5	+1.9	22.0	-15.4	26.0	0.0	33.1	+27.3	29.8	+14.6	26.2	+0.8
Light Kaolin	27.5	28.6	+4.0	22.5	-18.2	28.1	+2.2	41.8	+52.0	31.6	+14.9	28.2	+2.5



รูปที่ 4.11 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่า Plastic Limit จากหลายห้องปฏิบัติการ

การทดสอบเพื่อหาค่า Plastic Limit โดยผู้ทดสอบหลายคนจากห้องปฏิบัติการต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบค่ากับการทดสอบโดยผู้ทดสอบคนเดียว (BUU) พบว่าค่าที่ได้จาก KMUTNB ให้ผลการทดสอบที่ใกล้เคียงกับ BUU มากที่สุด

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงความแม่นยำของการทดสอบหาค่า Atterberg Limit โดยสนใจที่ค่า Liquid Limit และ Plastic Limit ดินที่นำมาศึกษาแบ่งเป็น 3 ชนิด คือ Bentonite, Natural Soil และ Kaolin ซึ่งค่า Liquid Limit ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM (Casagrande method) และ BS (Cone method) ทั้งแบบ Multipoint method และ One-Point method ส่วนค่า Plastic Limit นั้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM ทั้งแบบ Hand method และ Rolling Device method และได้หาค่า Plastic Limit อีกวิธีหนึ่งโดยอ้างอิงผลงานวิจัยของ Wood & Wroth (1978) ซึ่งทำเหมือนวิธี Cone method ตามมาตรฐาน BS แต่เปลี่ยนน้ำหนักของ Cone จาก 80 กรัม เป็น 240 กรัม และตัวอย่างดินอีกส่วนหนึ่งได้ส่งไปทดสอบยังห้องปฏิบัติการตามมหาวิทยาลัยต่างๆ (Round-robin test) เพื่อนำผลทั้งหมดมาศึกษาถึงความแม่นยำ โดยผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ในการทดสอบหาค่า Liquid Limit ตามมาตรฐาน ASTM (Casagrande method) นั้นพบว่าในการทดสอบแบบ Multipoint method และ One-Point method ค่าที่ได้ใกล้เคียงกัน
2. ในการทดสอบหาค่า Liquid Limit ตามมาตรฐาน BS (Cone method) พบว่าในตัวอย่างดินที่มีค่า Liquid Limit น้อยกว่า 100% นั้น ค่าที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ตัวอย่างดินที่มีค่า Liquid Limit มากกว่า 100% ค่าที่ได้จากการทดสอบแบบ One-Point จะมีค่ามากกว่าแบบ Multipoint อยู่เฉลี่ยโดยประมาณ 3.4%
3. ในการทดสอบหาค่า Liquid Limit นั้นพบว่าในการทดสอบด้วย Cone method ค่า Liquid Limit ที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าที่ได้จาก Casagrande method อยู่ประมาณ 7%
4. ในการทดสอบหาค่า Liquid Limit โดย Casagrande method ความแข็งของฐานมีผลกระทบต่อค่าที่ได้ ก่อนทำการทดสอบจึงควรที่จะทดสอบความแข็งของฐานว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ใช้ได้ตามมาตรฐานหรือไม่
5. ในการทดสอบหาค่า Plastic Limit ตามมาตรฐาน ASTM โดยวิธี Hand method และ Rolling Device method พบว่าในตัวอย่างดินที่มีค่า Plastic Limit น้อย ค่าที่ได้จาก Rolling Device method จะมีค่ามากกว่า Hand method ส่วนตัวอย่างดินที่มีค่า Plastic Limit มากกว่า พบว่าค่าที่ได้จาก Rolling Device method จะมีค่าน้อยกว่า Hand method
6. ในการทดสอบหาค่า Plastic Limit โดยการทดสอบอ้างอิงจากผลงานวิจัยของ Wood & Wroth (1978) และวิธี Hand method พบว่าค่าที่ได้จากทั้งสองวิธีนี้จะยังมีความแตกต่างกันมากใน



ตัวอย่างดินที่มีค่า Plastic Limit มาก ส่วนตัวอย่างดินที่มีค่า Plastic Limit น้อย ค่าที่ได้จากทั้งสองวิธีนี้จะมีความใกล้เคียงกัน

7. จากการทดสอบจะพบว่า นอกจากวิธีการทดสอบแล้ว ชนิดของตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบ มีผลกระทบต่อความแม่นยำของการหาค่า Atterberg Limit ด้วย โดยตัวอย่างดินที่มีค่า Atterberg Limit สูง ความผิดพลาดจะสูงด้วย

8. เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ โดยการเปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) พบว่าค่า Liquid Limit ที่ได้จาก Cone method แบบ Multipoint มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) น้อยที่สุด และพบว่าค่า Plastic Limit ที่ได้จาก Cone method (Wood & Wroth 1978) มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) น้อยที่สุด ซึ่งสามารถบอกได้ว่าสองวิธีนี้มีความแม่นยำในการหาค่า Liquid Limit และ Plastic Limit มากที่สุด แต่ทั้งนี้ชนิดของตัวอย่างดินก็มีผลกระทบต่อค่า S.D. เช่นกัน

## บรรณานุกรม

- Andrade F.A. et al. (2011), "Measuring the plasticity of clays: a review". Applied Clay Science 51, 1-7.
- Atterberg A. (1911a), "Lerornas forhallande till yatten, deras plasticitetsgranser och plasticitetsgrader". Kungliga Lantbruksakademiens Handli. Tidskr. 50 (2), 132-158. (in Swedish).
- Atterberg A. (1911b), "Die plastizitat der tone". Int. Mitt. Bodenkd. 1, 4-37. (in German).
- ASTM D2487-06 (2006), "Standard provision for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system)". ASTM International.
- ASTM D3282-94 (2004), "Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes". ASTM International.
- ASTM D4318 (2000), "Standard test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils". Annual book of American Society for Testing and Material standards, West Conshohocken, United States.
- Belviso R., Ciampoli S., Cotechchia V. and Federico A. (1985), "Use of the cone penetrometer to determine consistency limits". Ground Eng 18 (5), 91-92.
- British Standards (1990), "Method of test for soils for civil engineering purposes". Classification tests 1377-part 2.
- Budhu M. (1985), "The effect of clay content on the liquid limit from a fall cone and British cup device". Geotech test J. 8 (2), 91-95.
- Bobrowski L.J. and Griekspoor D.M. (1992) "Determination of plastic limit of soil by means of a rolling device". Geotechnical Testing Journal 15 (3), 284-287.
- Casagrande A. (1932), "Research on the Atterberg limits of soils". Public Roads 13, 121-130.
- Casagrande A. (1958), "Note on the design of the liquid limit device". Geotechnique 8 (2), 84-91.
-

- Clayton C.R.I. and Jukes A.W. (1978), "A one-point cone penetrometer liquid limit test". Geotechnique 28 (4), 469.
- Hansbo S. (1957), "A new approach to the determination of the shear strength of clay by the fall cone test". Swedish Geotechnical Institute.
- Matteo L. D. (2012), "Liquid limit of low-to medium-plasticity soils: comparison between Casagrande cup and cone penetrometer test". Bull Eng Geol Environ 71, 79-85.
- Mishra A.K., Ohtsubo M., Loretta Y. Li. and Higashi T. (2012), "Influence of various factors on the difference in the liquid limit values determined by Casagrande's and fall cone method". Environ Earth Sci 65, 21-27.
- Norman L.E.J. (1985), "A comparison of values of liquid limit determined with apparatus having bases of different hardness". Geotechnique 8 (2), 79-83.
- Özer M. (2009), "Comparison of liquid limit values determined using the hard and soft base Casagrande apparatus and the cone penetrometer". Bull Eng Geol Environ 68, 289-296.
- Sivapullaiah P.V. and Sridharan A. (1985), "Liquid limit of soil mixtures". Geotech test J. 8 (3), 111-116.
- Sivapullaiah P.V., Sridharan A. and Stalin V.K. (2000), "Hydraulic conductivity of bentonite-sand mixtures". Canadian Geotechnical Journal 37, 406-413.
- Skempton A.W. (1944), "Notes on the compressibility of clay". Q. J. Geol Soc Lond 100, 119-135
- Skopek J. and Ter-Stepanian G. (1975), "Comparison of liquid limit values determined according to Casagrande and Vasilev". Geotechnique 25 (1), 135-136.
- Sridharan A. and Prakash K. (2000), "Percussion and cone methods of determining the liquid limit of soils: controlling mechanisms". Geotechnical Testing Journal 23 (2) 236-244.
- Wasti Y. and Bezirei M.H. (1986), "Determination of the consistency limits of soils by the fall cone test". Canadian Geotechnical Journal 23 (2), 241-246.
-

Waterways Experiment Station (1949). "Simplification of the liquid limit test procedure". Technical Memorandum No.3-286. U.S. Army Corp. of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.

Wood D.M. (1990), "Soil behaviour and critical state soil mechanics". Cambridge University press, Cambridge.

Wood D.M. and Wroth C.P. (1978), "The use of the cone penetrometer to determine the plastic limit of soils". Ground Engineering 11 (3), 37.

Yukselen A.Y. (2010), "Characterization of two natural zeolites for geotechnical and geoenvironmental applications". Applied Clay Science 50, 130-136.

---