

CE 372 ENGINEERING SOIL TESTS

การทดสอบเรื่องที่ 5

การทดสอบเพื่อประเมินค่าพิกัดสถานะความคงตัวของมวลดิน
(การประเมินค่าพิกัดอัตราเบอร์ก)

TESTS FOR THE CONSISTENCY LIMITS OF SOILS

(ATTERBERG LIMITS DETERMINATION)

1. บทนำ

ค่าพิกัดสถานะความคงตัว หรือ consistency limits ของมวลดิน เป็นคุณสมบัติเฉพาะของมวลดินเม็ดละเอียดประเภท cohesive soil หรือ มวลดินเม็ดละเอียดที่มี clay particles เป็นองค์ประกอบอยู่เป็นปริมาณมาก มวลดิน cohesive soil นี้ สามารถคงตัวอยู่ในสถานะต่างๆตามธรรมชาติในลักษณะที่บ่งบอกได้ด้วยความรู้สึกเมื่อจับต้อง ได้แก่ very soft (เหลวละ), soft (อ่อน หรือ เหลว), firm (เหนียว หรือ หนืด), stiff (ค่อนข้างแข็ง หรือ เหนียวแน่น), หรือ hard (เป็นดินแห้งแข็ง) ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นของมวลดินนั้นๆ

สถานะความคงตัว หรือ consistency ของมวลดินเม็ดละเอียด สามารถเปลี่ยนแปลงไปได้ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นของมวลดิน อธิบายได้ดังนี้คือ มวลดินที่มีความชื้นสูงมากจนมีสภาพเป็นโคลนเหลวสามารถไหลไปมา หรือเปลี่ยนแปลงรูปร่างลักษณะได้ภายใต้น้ำหนักของมวลดินนั่นเอง จะมีสถานะความคงตัวจัดอยู่ในประเภทของเหลวหนืด หรือ viscous liquid หากความชื้นของมวลดินดังกล่าวลดลง มวลดินจะมีความแข็งแรงมากขึ้น สามารถปั้นก้อนดินให้เป็นรูปร่างต่างๆได้โดยไม่แตกร้าวหรือสลายตัว มวลดินนั้นจะมีสถานะความคงตัวจัดอยู่ในประเภทของแข็งเหนียว หรือ plastic solid หากความชื้นของมวลดินนั้นลดลงต่อไป มวลดินจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น จนมีสถานะความคงตัวเป็นวัสดุประเภท กึ่งของแข็ง หรือ semi-solid ซึ่งเมื่อนำไปคลึงหรือปั้นเป็นรูปร่างต่างๆ จะเกิดรอยแยกหรือแตกร้าวบนก้อนมวลดินนั้น และเมื่อความชื้นลดลงต่อไป มวลดินก็จะเปลี่ยนสถานะความคงตัวเป็นก้อนดินแข็ง หรือ solid จนกระทั่งความชื้นหมดไปจากมวลดินนั้น ค่าความชื้นของมวลดิน ณ จุดที่มวลดินนั้นเกิดการเปลี่ยนสถานะความคงตัว จากสถานะหนึ่งไปสู่อีกสถานะหนึ่งเรียกว่า ค่าพิกัดสถานะความคงตัว หรือ consistency limits ซึ่งในที่นี้มีจุดเปลี่ยนสถานะที่สำคัญอยู่ 3 จุด มีชื่อเรียกแตกต่างกันตามการเปลี่ยนแปลงสถานะดังต่อไปนี้ คือ

- ก. **LIQUID LIMIT (LL)** เป็นค่าความชื้นของมวลดิน ณ จุดที่มวลดินนั้น เปลี่ยนสถานะความคงตัวระหว่าง การเป็นของเหลวหนืด หรือ viscous liquid กับการเป็นของแข็งเหนียวปั้นได้ หรือ plastic solid
- ข. **PLASTIC LIMIT (PL)** เป็นค่าความชื้นของมวลดิน ณ จุดที่มวลดินนั้น เปลี่ยนสถานะความคงตัวระหว่าง การเป็นของแข็งเหนียวปั้นได้ หรือ plastic solid กับการเป็นมวลกึ่งของแข็ง หรือ semi-solid
- ค. **SHRINKAGE LIMIT (SL)** เป็นค่าความชื้นของมวลดิน ณ จุดที่มวลดินนั้น เปลี่ยนสถานะความคงตัวระหว่าง การเป็นมวลกึ่งของแข็ง หรือ semi-solid กับการเป็นมวลดินแข็ง หรือ solid

2. วัตถุประสงค์ของการทดสอบ

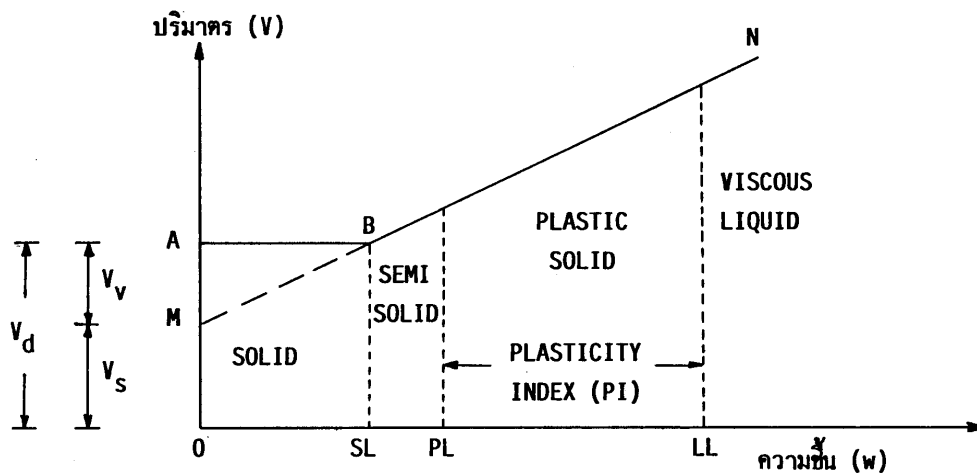
การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะให้นักศึกษาได้เรียนรู้ถึงทฤษฎีและหลักการ ที่เกี่ยวข้องกับวิธีการทดสอบพร้อมทั้งฝึกฝนการใช้อุปกรณ์ทดสอบ เพื่อประเมินค่า consistency limits หรือ Atterberg Limits ของมวลดินเม็ดละเอียด ซึ่งได้แก่ การทดสอบประเมินค่า Liquid Limit, Plastic Limit, และ Shrinkage Limit และรวมไปถึงการทดสอบประเมินค่า Linear Shrinkage ของตัวอย่างดิน เพื่อให้ได้ผลการทดสอบไปใช้ประเมินคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางวิศวกรรมของมวลดินนั้นต่อไป

3. เอกสารอ้างอิง

- 3.1 มาตรฐาน ASTM D 4318
Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils
- 3.2 มาตรฐาน ASTM D 427
Standard Test Method for Shrinkage Factors of Soils
- 3.3 มาตรฐาน AASHTO DESIGNATION T 89
Standard Method of Test for Determining the Liquid Limit of Soils
- 3.4 มาตรฐาน AASHTO DESIGNATION T 90
Standard Method for Determining the Plastic Limit and Plasticity Index of Soils
- 3.5 มาตรฐาน AASHTO DESIGNATION T 92
Standard Method for Determining the Shrinkage Factors of Soils
- 3.6 มาตรฐานอังกฤษ (BRITISH STANDARD) BS 1377 : 1975 TEST 2
Determination of the Liquid Limit
- 3.7 มาตรฐานอังกฤษ (BRITISH STANDARD) BS 1377 : 1975 TEST 3
Determination of the Plastic Limit
- 3.8 มาตรฐานอังกฤษ (BRITISH STANDARD) BS 1377 : 1975 TEST 4
Determination of the Plasticity Index
- 3.9 มาตรฐานอังกฤษ (BRITISH STANDARD) BS 1377 : 1975 TEST 5
Determination of the Linear Shrinkage
- 3.10 AUSTRALIAN STANDARD A 89-1966 TEST 5
Determination of the Linear Shrinkage of a Soil
- 3.11 BOWLES, J.E. (1992)
"Engineering Properties of Soils and their Measurement"
McGraw-Hill Book Co.; Fourth Edition 1992; Experiment No. 3 & 4
- 3.13 HEAD, K. H. (2006)
"Manual of Soil Laboratory Testing; Volume 1: Soil Classification and Compaction Tests"
Whittles Publishing, CRC Press; Third Edition 2006

4. ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ATTERBERG นักวิทยาศาสตร์ชาวสวีเดน ได้อธิบายสถานะความคงตัวของมวลดิน cohesive soil ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่าง การเปลี่ยนแปลงของความชื้น กับการเปลี่ยนแปลงปริมาณของมวลดิน เรียกในที่นี้ว่า phase diagram ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.1 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า การเปลี่ยนแปลงสถานะความคงตัวของมวลดิน จากการเป็นของเหลว (liquid) ไปเป็นของแข็ง (solid) เป็นผลเนื่องมาจากการที่ปริมาณน้ำในมวลดิน หรือความชื้นของมวลดินนั้นลดลง เมื่อ cohesive soil มีความชื้นสูง มวลดินจะคงตัวอยู่ในสถานะ viscous liquid มวลดินจะอยู่ในสภาพที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (saturated) มวลดินจะมีช่องว่างระหว่างเม็ดดินมาก ทำให้มีค่า porosity สูง และมีความแข็งแรงต่ำ เมื่อความชื้นหรือปริมาณน้ำในมวลดินลดลง เป็นผลให้เม็ดดินจัดตัวใกล้ชิดกันมากขึ้น ปริมาตรของช่องว่างระหว่างเม็ดดินจะลดลงเท่ากับปริมาณน้ำที่ระเหยหายไปจากมวลดิน ทำให้มวลดินมีปริมาตรลดลง โดยที่มวลดินนั้นยังคงสภาพ fully saturated ตลอดเวลา การที่เม็ดดินจัดตัวได้ใกล้ชิดกันมากขึ้น เป็นผลให้ปริมาตรช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (void) ลดลง และมวลดินมีความแข็งแรงสูงขึ้น ปริมาตรของมวลดินที่ลดลงในช่วงนี้ จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการลดลงของความชื้นของมวลดินนั้น ทำให้เส้นความสัมพันธ์ NB ใน phase diagram ในรูปที่ 5.1 เป็นเส้นตรงที่มีความชันเป็นค่าคงที่ ค่าความชัน หรือ slope ของเส้นตรง NB นี้ เรียกว่า ค่าอัตราการหดตัวของมวลดิน หรือ Shrinkage Ratio (SR) การลดลงของความชื้น และปริมาตรของมวลดิน โดยที่มวลดินยังคงสภาพอิ่มตัว (saturated) อยู่ตลอดเวลา นั้น เมื่อความชื้นในมวลดินลดลงต่ำกว่าค่า Liquid Limit มวลดินจะเปลี่ยนแปลงสถานะความคงตัวจากการเป็นของเหลวหนืด (viscous liquid) ไปเป็นของแข็งเหนียว (plastic solid) และเมื่อความชื้นในมวลดินลดลงต่ำกว่าค่า Plastic Limit มวลดินจะเปลี่ยนสถานะความคงตัวจากการเป็นของแข็งเหนียวไปเป็นมวลกึ่งของแข็ง (semi-solid) การลดลงของความชื้นและปริมาตรของมวลดิน ในขณะที่มวลดินคงสภาพ saturated อยู่ตลอดเวลา จะมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงต่อเนื่องไปจนความชื้นของมวลดินมีค่าลดลงเหลือเท่ากับค่า Shrinkage Limit ซึ่งเมื่อน้ำระเหยออกจากมวลดินจนมวลดินมีความชื้นเท่ากับค่า Shrinkage Limit ของมวลดินนั้นแล้ว เม็ดดินในมวลดินนั้นจะจัดตัวกันได้แน่นที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้เองตามธรรมชาติ เม็ดดินจะไม่สามารถจัดตัวให้ใกล้ชิดมากขึ้นไปกว่านี้ได้อีกหากมีการสูญเสียน้ำจากมวลดิน ดังนั้น เมื่อทำให้ความชื้นของมวลดินลดลงไปต่ำกว่าค่า Shrinkage Limit ปริมาตรของมวลดินก็จะไม่เปลี่ยนแปลงลดลงอีกต่อไป ดังแสดงให้เห็นเป็นเส้นความสัมพันธ์ AB ใน phase diagram มวลดินจะเปลี่ยนสถานะความคงตัวเป็นของแข็ง (solid) การลดลงของความชื้นหรือการระเหยของน้ำออกจากมวลดินในช่วง AB นี้จะทำให้มีอากาศเข้ามาแทนที่น้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ค่า degree of saturation ของมวลดินจะลดลงต่ำกว่า 1.0 (หรือ < 100%) โดยมีอากาศเข้าไปแทนที่น้ำใน voids จนกระทั่งน้ำระเหยออกจากมวลดินจนหมด ความชื้น และ degree of saturation ของมวลดินมีค่าเป็นศูนย์ มวลดินจะมีสถานะความคงตัวเป็นของแข็งแห้ง เมื่อพิจารณาจาก phase diagram ในรูปที่ 5.1 จะเห็นได้ว่า หากต่อเส้นความสัมพันธ์ NB ลงไปจนถึงแกนปริมาตรที่จุด M ด้วยความชันคงที่เท่าเดิม เส้นตรง BM จะเป็นเส้นสมมุติ แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาณของมวลดินนั้นเมื่อความชื้นลดลงต่ำกว่าค่า Shrinkage Limit และสมมุติว่า ปริมาตรของช่องว่างระหว่างเม็ดดินในมวลดิน สามารถลดลงต่อไปได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งในที่สุด เมื่อไม่มีน้ำเหลืออยู่ในมวลดินนั้นแล้ว จุด M ซึ่งอยู่บนแกนปริมาตรที่ความชื้นเป็นศูนย์ จะหมายถึงมวลดินที่ไม่มีช่องว่างระหว่างเม็ดดินเหลืออยู่อีกหรือปริมาตรของช่องว่างระหว่างเม็ดดินในมวลดิน (V_v) มีค่าเป็นศูนย์ ค่าปริมาตรที่อ่านได้บนแกนปริมาตรมวลดินที่จุด M จะเป็นค่าปริมาตรของเม็ดดิน (V_s) ที่มีอยู่ในมวลดินนั้น นอกจากนั้น ATTERBERG ยังได้คิดวิธีการทดสอบ เพื่อประเมินค่าพิกัดสถานะความคงตัว หรือ consistency limits ซึ่งได้แก่ค่า Liquid Limit, Plastic Limit, และ Shrinkage Limit ของมวลดิน fine-grained cohesive soils ค่าพิกัดเหล่านี้จึงเรียกกันโดยทั่วไปว่า Atterberg Limits

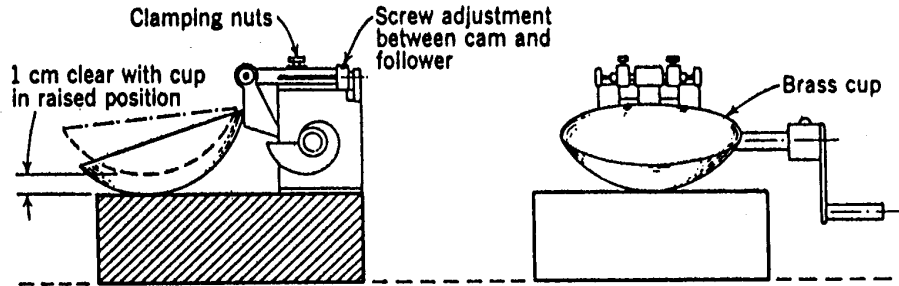


รูปที่ 5.1 PHASE DIAGRAM แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นกับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของมวลดินเม็ดละเอียด

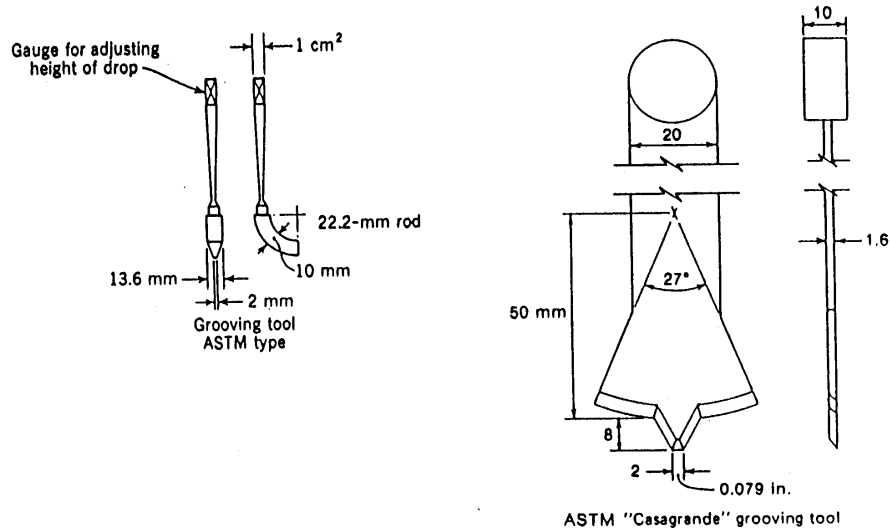
วิธีการทดสอบของ ATTERBERG ได้ผ่านการปรับปรุงแก้ไขโดย CASAGRANDE เพื่อให้การทดสอบเป็นไปโดยวิธีการที่มีมาตรฐานแน่นอน และเป็นที่ยอมรับได้โดยทั่วไป ใช้ทำการทดสอบกับมวลดินเม็ดละเอียดที่มีขนาดเม็ดดินเล็กกว่า 0.42 มม. ซึ่งเป็นเม็ดดินที่ร่อนผ่านช่องเปิดของตะแกรง B.S. No.36 หรือ ตะแกรง ASTM No.40 ดังนั้นดินเม็ดละเอียดในที่นี้ จึงครอบคลุมไปถึงมวลดินที่ประกอบไปด้วย fine sand, silt, และ clay แนวทางและหลักเกณฑ์การทดสอบเพื่อประเมินค่า Atterberg Limits โดยวิธีการที่ CASAGRANDE ได้ปรับปรุงแก้ไขจากวิธีของ ATTERBERG สามารถอธิบายโดยสรุปได้ดังนี้

4.1 การทดสอบเพื่อประเมินค่า LIQUID LIMIT ของมวลดิน (LL)

เป็นการทดสอบเพื่อประเมินค่าความชื้นของมวลดิน ขณะที่มวลดินเปลี่ยนสถานะความคงตัวระหว่างการเป็นของเหลวไหลได้ภายใต้น้ำหนักของมวลดินนั่นเอง กับการเป็นของแข็งอ่อนตัว เครื่องมือที่ใช้ทำการทดสอบ เรียกว่า Casagrande Liquid Limit Device มีลักษณะเป็นถ้วยทองเหลือง สามารถกระดกขึ้นลงได้บนแผ่นยางแข็ง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.2 ทำการทดสอบโดยนำดินเม็ดละเอียดที่เตรียมไว้ ผสมน้ำให้ตัวอย่างดินมีความชื้นสูง แล้วนำตัวอย่างดินใส่ลงในถ้วยทองเหลืองดังกล่าว แต่งผิวดินให้เรียบและอยู่ในแนวราบ แล้วใช้ grooving tool กรีดร่องผ่ากลางมวลดินเปียกในถ้วย ให้แยกจากกันเป็นสองส่วน จนมองเห็นกันถ้วยทองเหลืองเป็นแนวเส้นตรงกว้าง 2 มม. เคาะถ้วยทองเหลืองใส่ดินให้ตกกระทบแผ่นยางแข็งที่รองรับ ซึ่งมีระยะตกกระทบอิสระ 1 ซม. ด้วยอัตราความเร็วในการเคาะคงที่ 120 ครั้งต่อนาที นับจำนวนครั้งการเคาะที่ทำให้มวลดินเปียกทั้ง 2 ส่วนไหลเข้าหากัน ดังในรูปที่ 5.3 จนกระทั่งร่องที่กรีดไว้ปิดสนิทเป็นทางยาวประมาณ 1/2 นิ้ว หรือ 12.7 มม. ค่า Liquid Limit ของตัวอย่างดินที่ใช้ทำการทดสอบจะเป็นค่าความชื้นของมวลดิน ซึ่งเมื่อนำมาทำการทดสอบแล้ว จะไหลเข้าหากันปิดร่องที่กรีดไว้ได้ความยาวตามที่กำหนด เมื่อทำการเคาะ 25 ครั้ง ถ้ำร่องที่กรีดไว้ปิดสนิทได้



ก. CASAGRANDE LIQUID LIMIT DEVICE

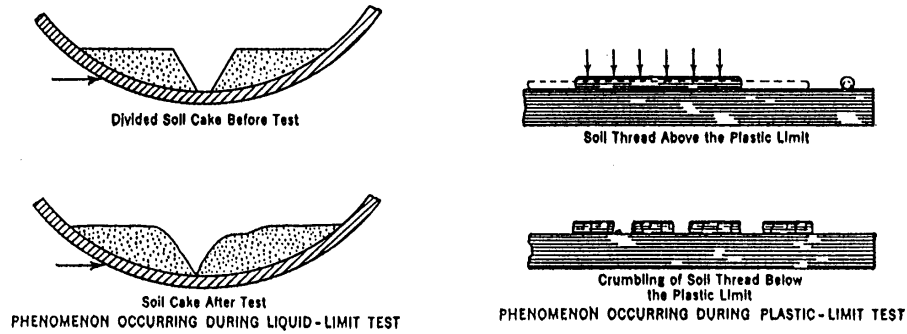


ข. GROOVING TOOLS (ที่นิยมใช้ทั่วไปมี 2 แบบ ตามในรูป)

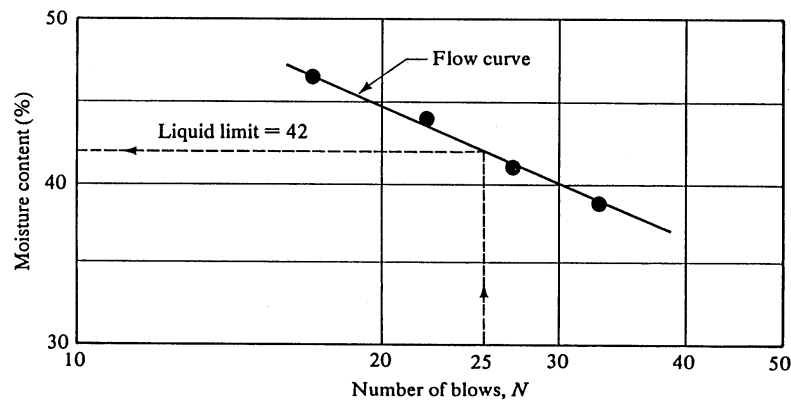
รูปที่ 5.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาค่า LIQUID LIMIT ของตัวอย่างดิน

ความยาวตามที่กำหนด เมื่อจำนวนเคาะน้อยกว่า 25 ครั้ง แสดงว่าความชื้นของตัวอย่างดินที่ใช้ทำการทดสอบสูงกว่าค่า Liquid Limit ของมวลดินนั้น ตัวอย่างดินจึงไหลเข้ามาปัดร่องได้โดยง่าย หรือ ถ้าต้องทำการเคาะมากกว่า 25 ครั้ง แสดงว่าความชื้นของตัวอย่างดินต่ำกว่าค่า Liquid Limit โดยทั่วไปเป็นการยากที่จะผสมน้ำให้แก่ตัวอย่างดินที่ใช้ทำการทดสอบให้มีความชื้นเท่ากับค่า Liquid Limit พอดี ดังนั้น จึงทำการเคาะทดสอบกับตัวอย่างดินที่ค่าความชื้นต่างๆ ทั้งสูงและต่ำกว่าค่า Liquid Limit ของตัวอย่างดินดังกล่าว แล้วบันทึกจำนวนครั้งที่ทำการเคาะตัวอย่างดินให้รอยกรีดปิดสนิทเป็นความยาวตามที่กำหนดที่แต่ละความชื้น นำข้อมูลมา plot กราฟ

ความสัมพันธ์ ระหว่างค่า water content (w) ของตัวอย่างดิน กับจำนวนครั้งที่ทำการเคาะ บนกระดาษกราฟ semi-logarithmic โดยให้ค่า water content อยู่บน linear scale และจำนวนครั้งการเคาะอยู่บน logarithmic scale ดังในรูปที่ 5.4 แล้วลากเส้นตรง (line of best fit) ในแนวของจุดต่างๆที่ plot ไว้ ค่า Liquid Limit ของตัวอย่างดิน จะเป็นค่าความชื้น ณ จุดที่เส้นกราฟลากผ่านจำนวนครั้งการเคาะ 25 ครั้ง ดังในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.3 ลักษณะของตัวอย่างดินเมื่อเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดสอบเพื่อประเมินค่า LIQUID LIMIT และ PLASTIC LIMIT



รูปที่ 5.4 การ PLOT และประเมินค่า LIQUID LIMIT ของตัวอย่างดิน จากผลการทดสอบ

นอกจากนี้ ยังสามารถทดสอบประเมินค่า Liquid Limit ของตัวอย่างดิน โดยทำการเคาะ ตัวอย่างดินเปียกเพียงตัวอย่างเดียว แล้วนำข้อมูลมาทำการคำนวณ เรียกว่าวิธี One-Point Liquid Limit ทำการทดสอบโดยผสมน้ำให้ตัวอย่างดินมีความชื้นเพียงพอที่จะทำการเคาะทดสอบระหว่าง 20-30 ครั้งแล้วทำให้รอยกรีดปิดสนิทเป็นระยะความยาวตามที่กำหนด บันทึกจำนวนครั้งที่ทำการเคาะและค่าความชื้นของตัวอย่างดิน นำไปคำนวณหาค่า Liquid Limit ของตัวอย่างดิน จากสมการ

$$LL = w_N \left(\frac{N}{25} \right)^{\tan \beta} \dots\dots\dots (5.1)$$

เมื่อ	LL	เป็นค่า Liquid Limit ของตัวอย่างดิน
	N	เป็นจำนวนครั้งที่เคาะจนรอยกรีดในตัวอย่างดินเปียกปิดสนิทเป็นระยะความยาว 1/2 นิ้ว ค่า N นี้จะต้องอยู่ระหว่าง 20 ถึง 30
	w _N	เป็นความชื้นของตัวอย่างดินที่ใช้ทำการเคาะทดสอบในครั้งนั้น
	tan β	เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดินที่นำมาทดสอบ โดยทั่วไปใช้ค่า tan β = 0.121

วิธีการทดสอบประเมินค่า Liquid Limit โดยการเคาะตัวอย่างดินใน Casagrande Liquid Limit Device ตามที่กล่าวมาแล้วนี้ เปรียบเสมือนเป็นการวัดค่า shear strength ของตัวอย่างดินที่ค่าความชื้นดังกล่าว โดย CASAGRANDE ได้พิจารณาแล้วพบว่า การเคาะ liquid limit device มาตรฐานแต่ละครั้ง เป็นการให้แรงเฉือนแก่ตัวอย่างดินมีค่า 1 g/cm² ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า มวลดิน cohesive soil ทุกชนิด มีความสามารถต้านทานแรงเฉือน หรือ shear strength ประมาณ 20-25 g/cm² (ประมาณ 2.0 – 2.5 kPa) ณ จุดที่มวลดินนั้นแปรสถานะจาก viscous liquid ไปเป็น plastic solid หรือ ขณะที่มวลดินมีความชื้นเท่ากับค่า Liquid Limit

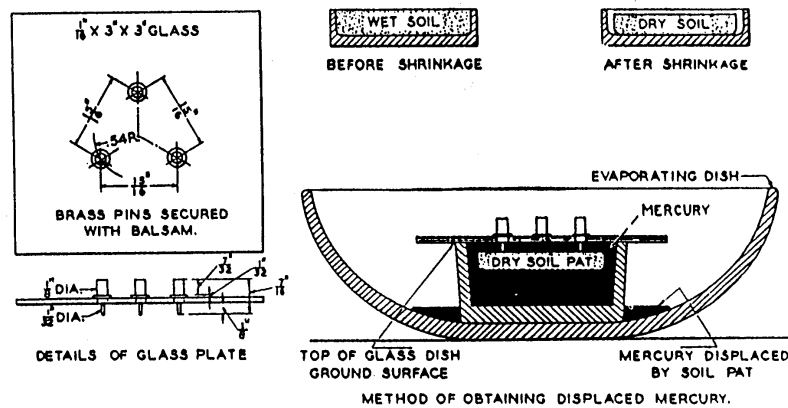
4.2 การทดสอบเพื่อประเมินค่า PLASTIC LIMIT ของมวลดิน (PL)

เป็นการทดสอบเพื่อประเมินค่าความชื้นของมวลดิน ขณะที่มวลดินเปลี่ยนแปลงสถานะความคงตัวระหว่างการเป็นของแข็งเหนียวขึ้นได้กับการเป็นมวลดินกึ่งของแข็ง ทำการทดสอบโดยผสมน้ำให้ตัวอย่างดินมีความชื้นพอสมควร แล้วปั้นเป็นก้อนกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 ซม. คลึงก้อนดินให้เป็นเส้นยาวด้วยนิ้วและอุ้งมือบนแผ่นกระจก เส้นดินที่อยู่ในสถานะของแข็งขึ้นได้ (คือ มีความชื้นสูงกว่า Plastic Limit) จะมีผิวเรียบเนียนเป็นเนื้อเดียวกันตลอดเส้น คลึงเส้นดินจนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กลงเหลือประมาณ 3 มม. การคลึงเส้นดินนี้ มีผลให้ความชื้นของเส้นดินลดลง เมื่อคลึงเส้นดินได้ขนาดดังกล่าวแล้ว เนื้อดินเริ่มมีรอยแยกตัว (crumble) หรือมีรอยร้าวรอยแยกปรากฏขึ้นบนผิวของเส้นดิน ดังในรูปที่ 5.3 แสดงว่าเส้นดินนั้นกำลังเปลี่ยนแปลงสถานะจาก plastic ไปเป็น semi-solid ความชื้นของตัวอย่างดินในขณะนั้น จะเป็นความชื้นที่ค่า Plastic Limit การทดสอบตามหลักเกณฑ์ที่ระบุไว้นี้จะต้องใช้ความระมัดระวัง ความชำนาญ และประสบการณ์ในการทดสอบพอสมควร ซึ่งอาจต้องทำการทดสอบซ้ำหลายครั้ง แล้วนำผลการทดสอบที่มีค่าใกล้เคียงกัน มาคำนวณหาค่าเฉลี่ยเป็นค่า Plastic Limit ของตัวอย่างดินเพียงค่าเดียว

4.3 การทดสอบเพื่อประเมินค่า SHRINKAGE LIMIT ของมวลดิน (SL)

เป็นการทดสอบ เพื่อประเมินค่าความชื้นของมวลดิน ขณะที่มวลดินนั้นเปลี่ยนแปลงสถานะความคงตัว ระหว่างการเป็นมวลกึ่งของแข็งกับการเป็นมวลดินแข็ง ซึ่งในกรณีที่ความชื้นของมวลดินลดลงจะพบว่า เมื่อความชื้นลดลงต่ำกว่าค่า Shrinkage Limit ของมวลดิน ปริมาตรของมวลดินดังกล่าว จะไม่ลดลงอีกต่อไป ดังนั้น ค่า Shrinkage Limit ของมวลดิน จึงกล่าวได้ว่าเป็นค่าความชื้นที่น้อยที่สุดที่มวลดินยุติการหดตัวอันเนื่องมาจากการสูญเสียความชื้น และปริมาตรของมวลดินที่มีความชื้นเท่ากับค่า Shrinkage Limit จะเป็นปริมาตรที่น้อยที่สุดที่มวลดินดังกล่าวจะคงตัวอยู่ได้ตามสภาพธรรมชาติ การทดสอบประเมินค่า Shrinkage Limit ของตัวอย่างดิน

ทำได้โดยนำดินเปียกความชื้น w_i (เมื่อ $w_i > LL$) ใส่ถ้วยโลหะปริมาตรคงที่ (V_t) นำไปอบจนแห้ง ก้อนดินแห้งในถ้วยโลหะจะมีขนาดเล็กกลง นำก้อนดินแห้งไปหาปริมาตร (V_d) โดยการแทนที่ปรอท ดังในรูปที่ 5.5 ค่าปริมาตร V_d ดังกล่าว จะเท่ากับปริมาตรเมื่อก่อนดินนั้นมีความชื้นเท่ากับค่า Shrinkage Limit ซึ่งเป็นขณะสุดท้ายที่ก้อนดินนั้นอยู่ในสภาพ saturated ในการทดสอบนี้ ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่า ขณะที่ความชื้นของตัวอย่างดินลดลงจาก w_i จนตัวอย่างดินมีความชื้นเท่ากับค่า Shrinkage Limit (SL) ปริมาตรของก้อนดินลดลงจาก V_t ลงมา เหลือเป็นปริมาตร V_d ปริมาตรที่หายไปในช่วงเวลาดังกล่าวคือ ($V_t - V_d$) จะเป็นปริมาตรของน้ำ (ΔW_w) ที่หายไปจากตัวอย่างดิน ขณะที่ความชื้นลดลงจาก w_i ลงมาเป็น w_{SL} ดังนั้นเมื่อค่า Shrinkage Limit ของมวลดิน เป็นค่าความชื้นเมื่อมวลดินมีปริมาตร V_d และยังอยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ จึงเขียนเป็นสมการได้คือ



รูปที่ 5.5 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบประเมินค่า SHRINKAGE LIMIT ของตัวอย่างดิน

$$SL = 100 \left(\frac{W_{w(SL)}}{W_s} \right) \dots\dots\dots (5.2)$$

เมื่อ SL เป็นค่าความชื้นที่ Shrinkage Limit ของมวลดิน มีหน่วยเป็น ร้อยละ
 $W_{w(SL)}$ เป็นมวลของน้ำในมวลดิน เมื่อก่อนดินนั้นมีความชื้นเท่ากับค่า Shrinkage Limit
 W_s เป็นมวลหรือน้ำหนักดินแห้งในก้อนตัวอย่างดินนั้น และ

$$W_{w(SL)} = (W_{wi} - \Delta W_w) \dots\dots\dots (5.3)$$

เมื่อ W_{wi} เป็นมวลของน้ำในมวลดินเมื่อมวลดินมีความชื้น w_i ขณะเริ่มทดสอบ
 ΔW_w เป็นมวลของน้ำในมวลดินที่หายไปเมื่อความชื้นของมวลดินลดลงจาก w_i จนมวลดินมีความชื้นเท่ากับ SL (Shrinkage Limit) และเมื่อ

$$\Delta V_w = (V_t - V_d) \dots\dots\dots (5.4)$$

โดยที่ ΔV_w เป็นปริมาตรน้ำที่หายไปจากมวลดิน เมื่อความชื้นของมวลดินลดลงจาก w_i จนมวลดินมีความชื้นเท่ากับ SL และ

$$\Delta W_w = \Delta V_w \rho_w \quad \text{ดังนั้น}$$

$$\Delta W_w = (V_t - V_d) \rho_w \quad \text{และสมการที่ 5.3 จะเขียนได้เป็น}$$

$$W_{w(SL)} = W_{wi} - (V_t - V_d) \rho_w \dots\dots\dots (5.5)$$

เมื่อนำสมการที่ 5.5 ไปแทนค่าในสมการที่ 5.2 จะได้

$$SL = 100 \left[\frac{W_{wi} - (V_t - V_d) \rho_w}{W_s} \right]$$

$$SL = \left[100 \left(\frac{W_{wi}}{W_s} \right) \right] - \left[100 \left(\frac{(V_t - V_d) \rho_w}{W_s} \right) \right]$$

และ เมื่อ $w_i = 100 \left(\frac{W_{wi}}{W_s} \right)$ เป็นความชื้นของตัวอย่างดินเปียกที่เตรียมขึ้นเพื่อการทดสอบ

$$\text{ดังนั้น } SL = w_i - \left[100 \left(\frac{(V_t - V_d) \rho_w}{W_s} \right) \right] \dots\dots\dots (5.6)$$

- เมื่อ SL เป็นค่า Shrinkage Limit ของตัวอย่างดินในหน่วยร้อยละ
- W_{wi} เป็นมวลของน้ำในมวลดินเมื่อมวลดินมีความชื้น w_i ขณะเริ่มทดสอบ
- W_s เป็นมวลหรือน้ำหนักดินแห้งในก้อนตัวอย่างดินที่ใช้ทำการทดสอบ
- w_i เป็นความชื้นของตัวอย่างดินเปียกที่ใช้ทดสอบ (มีหน่วยเป็น ร้อยละ)
- V_t เป็นปริมาตรของตัวอย่างดินในถ้วยโลหะ ขณะที่มีความชื้น w_i
- V_d เป็นปริมาตรของก้อนตัวอย่างดินแห้ง ซึ่งเป็นปริมาตรเดียวกันกับขณะที่ตัวอย่างดินนั้นมีความชื้นเท่ากับค่า Shrinkage Limit
- ρ_w เป็นความหนาแน่นของน้ำ มีค่า = 1 g/cc ในระบบ เมตริก, 1000 kg/m³ ในระบบ SI, และ 62.4 lb/ft³ ในระบบอังกฤษ

ผลจากการประเมินค่า Consistency Limits ของมวลดินเม็ดละเอียดตามที่กล่าวมาแล้วนี้จะนำไปสู่การคำนวณหาปริมาณที่ช่างบอกคุณสมบัติทางกายภาพพื้นฐานอื่นๆของมวลดินดังนี้ คือ

ก. **PLASTICITY INDEX (PI)** เป็นช่วงค่าความชื้น ที่มวลดินดังกล่าวคงตัวอยู่ในสถานะ plastic solid ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.1 ประเมินได้จากความสัมพันธ์

$$PI = LL - PL \dots\dots\dots (5.7)$$

เมื่อ PI, LL, และ PL เป็นค่า Plasticity Index, Liquid Limit, และ Plastic Limit ของมวลดินตามลำดับ

ข. **SHRINKAGE RATIO (SR)** เป็นค่าที่แสดงให้เห็นถึงปริมาณการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของมวลดิน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นของมวลดินนั้น มีนิยามกำหนดไว้ว่า ค่า Shrinkage Ratio เป็นค่าอัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรมวลดิน คิดเป็นร้อยละของปริมาตรมวลดินนั้นเมื่อแห้งกับการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในมวลดิน เมื่อมวลดินมีความชื้นสูงกว่าค่า Shrinkage Limit คิดเป็นร้อยละของน้ำหนักดินแห้งในมวลดินนั้น ดังนั้น

$$SR = \frac{100 \left(\frac{\Delta V}{V_d} \right)}{100 \left(\frac{\Delta W_w}{W_s} \right)} = \left(\frac{\Delta V}{V_d} \right) \left(\frac{W_s}{\Delta W_w} \right) \dots\dots\dots (5.8)$$

เมื่อตัวอย่างดินมีความชื้นสูงกว่า SL ปริมาตรของตัวอย่างดินที่เปลี่ยนแปลงไป (ΔV) เท่ากับ ปริมาตรน้ำที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงในตัวอย่างดินนั้น (ΔV_w) และเมื่อ $\Delta W_w = \Delta V_w \rho_w$ ทำให้

$$SR = \left(\frac{\Delta V}{V_d} \right) \left(\frac{W_s}{\Delta V \rho_w} \right) \text{ และ}$$

$$SR = \frac{W_s}{V_d \rho_w} \dots\dots\dots (5.9)$$

SR เป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วย และ หากทราบค่า SR และ SL ของมวลดิน จะสามารถประเมินค่า Specific Gravity (G_s)ของตัวอย่างดินนั้น ได้จากความสัมพันธ์

$$G_s = \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{SR} \right) - \left(\frac{SL}{100} \right) \right]} \text{ เมื่อ SL มีหน่วยเป็น ร้อยละ} \dots\dots\dots (5.10)$$

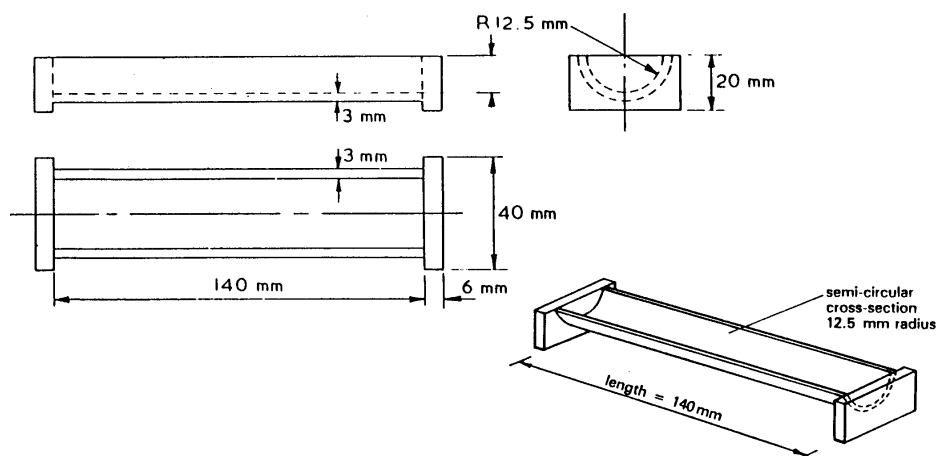
ค. **LINEAR SHRINKAGE (LS)** เป็นปริมาณการหดตัวของมวลดินในทิศทางเดียว เมื่อความชื้นของมวลดินลดลงจากค่า w_i ใดๆลงมา จนมวลดินมีความชื้นเท่ากับค่า Shrinkage Limit ระบุเป็นค่าขนาดการหดตัวของมวลดิน คิดเป็นร้อยละของขนาดของมวลดินในทิศทางเดียวกันนั้น เมื่อมวลดินนั้นมีความชื้น w_i หรือ

$$LS = 100 \left(\frac{\Delta L}{L_i} \right) \dots\dots\dots (5.11)$$

โดยที่ ΔL เป็นความยาวของตัวอย่างดินที่ลดลง เมื่อความชื้นลดลงจาก w_i ลงมาเป็นความชื้น ที่มีค่าเท่ากับ Shrinkage Limit ของมวลดินนั้น และ L_i เป็นความยาวของตัวอย่างดินเมื่อตัวอย่างดินมีความชื้น w_i ค่า Linear Shrinkage ของตัวอย่างดิน สามารถทดสอบประเมินค่าได้ โดยใช้ตัวอย่างดินที่มีความชื้นสูงกว่าค่า Liquid Limit ใส่ลงในรางทองเหลืองรูปครึ่งทรงกระบอกขนาดมาตรฐาน ดังในรูปที่ 5.6 แล้วนำไปอบจนแห้ง วัดความยาวของแท่งดินแห้งในราง จะสามารถคำนวณค่า LS ได้จากสมการที่ 5.11 การทดสอบเพื่อประเมินค่า Linear Shrinkage วิธีนี้ นิยมใช้กับตัวอย่างดินประเภท non-plastic silt หรือมวลดินที่มีทรายละเอียดปนอยู่มาก ซึ่งยากที่จะทดสอบประเมินค่า Plastic Limit โดยวิธีการปกติ เพราะค่า Linear Shrinkage ของตัวอย่างดิน สามารถนำไปใช้ประมาณค่า Plasticity Index ของตัวอย่างดินนั้นได้จากความสัมพันธ์แบบ empirical คือ

$$PI = 2.13 (LS) \dots\dots\dots (5.12)$$

เมื่อ LS เป็นค่า Linear Shrinkage ของมวลดิน มีหน่วยเป็น ร้อยละ



รูปที่ 5.6 ลักษณะและขนาดของรางมาตรฐาน (SHRINKAGE TROUGH) ที่ใช้ทดสอบประเมินค่า LINEAR SHRINKAGE ของตัวอย่างดิน

5. วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบในเรื่องนี้ เป็นทำการทดสอบเพื่อประเมินค่า consistency limits ทั้ง 3 ค่า ของ ตัวอย่างดิน คือ Liquid Limit, Plastic Limit, และ Shrinkage Limit และ รวมไปถึงการทดสอบเพื่อประเมินค่า Linear Shrinkage ของตัวอย่างดินเดียวกันนี้ โดยวิธีการมาตรฐาน จึงต้องใช้อุปกรณ์การทดสอบแยกตาม ประเภทการทดสอบดังต่อไปนี้

5.1 LIQUID LIMIT TEST

5.1.1 Liquid Limit Device 1 เครื่อง พร้อม grooving tool ขนาดมาตรฐาน 1 อัน

5.1.3 กระจกหาคความชื้น ขนาดเล็ก 6 ใบ

5.2 PLASTIC LIMIT TEST

5.2.1 แผ่นกระจกเรียบสำหรับคลึงเส้นตัวอย่างดินชื้น 1 แผ่น

5.2.2 กระจกหาคความชื้น ขนาดเล็ก 3 ใบ

5.3 SHRINKAGE LIMIT TEST

5.3.1 ถ้วยโลหะกลมก้นเรียบ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1.75 นิ้ว (44.4 มม) และลึก ประมาณ 0.5 นิ้ว (12.7 มม) ใช้เป็น shrinkage dish 1 ใบ

5.3.2 แผ่นแก้วติดปุ่มโลหะ 3 ปุ่ม ตั้งในรูปที่ 5.5 จำนวน 1 แผ่น

5.3.3 จานแก้วหรือถ้วยกระเบื้องขอบต่ำ เพื่อใช้รองรับปรอทที่ล้นจากการวัดปริมาตรก้อนดินแห้ง จำนวน 1 ใบ

5.3.4 ปรอท ปริมาณเพียงพอที่จะใช้ทำการทดสอบ

5.3.5 กระจกตวงขนาดเล็กความจุ 25-50 ml มีขีดแบ่งปริมาตรข้างกระจกตวงให้อ่านค่าได้ละเอียดถึง 0.2 ml เพื่อใช้วัดปริมาตรปรอท 1 กระจกตวง

5.4 LINEAR SHRINKAGE

5.4.1 รางทองเหลือง ขนาดมาตรฐาน รูปครึ่งทรงกระบอก (shrinkage trough) ตั้งในรูปที่ 5.6 จำนวน 2 ราง

5.4.2 กระจกหาคความชื้น ขนาดกลาง 1 กระจก

5.4.3 เวอร์เนีย ขนาดวัดความยาวได้ไม่ต่ำกว่า 150 มม. และอ่านค่าได้ละเอียดถึง 0.1 มม.

5.5 วัสดุอุปกรณ์ใช้ร่วมกันทั้ง 4 การทดสอบ

5.5.1 ตัวอย่างดินแห้ง เป็นเม็ดละเอียด ร่อนผ่านตะแกรง ASTM No.40 มาแล้ว หนักประมาณ 500-600 กรัม

5.5.2 น้ำกลั่น ปริมาณเพียงพอที่จะใช้ผสมดินทำการทดสอบ

5.5.3 ถ้วยกระเบื้องผสมดิน พร้อมมีดปาด สำหรับคลุกผสม และตักดินเปียกบรรจุภาชนะต่างๆที่ใช้ทำการทดสอบ จำนวน 2 ชุด

5.5.4 กระจกตวง ขนาดความจุ 100 cc หรือ ขวดฉีดน้ำ 1 ใบ

- 5.5.5 เครื่องชั่งไฟฟ้า ชั่งได้ละเอียดถึง 0.01 กรัม
- 5.5.6 เตาดอบ ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้
- 5.5.7 ถาดอลูมิเนียมขนาดใหญ่ สำหรับใส่กระป๋องหาความชื้นทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบ เพื่อนำเข้าเตาดอบ จำนวน 1 ใบ

6. วิธีการทดสอบ

6.1 การทดสอบเพื่อประเมินค่า LIQUID LIMIT ของตัวอย่างดิน

- 6.1.1 นำตัวอย่างดินเม็ดละเอียดที่เตรียมไว้ หนักประมาณ 200 กรัม ใส่ลงในถ้วยกระเบื้องแล้วผสมน้ำที่ละน้อย ใช้มีดปาดคลุกเคล้าให้น้ำและดินผสมกันโดยทั่วถึงแล้วเติมน้ำ ทำการคลุกเคล้าต่อไปอีก จนมวลดินมีลักษณะเหนียวหนืดและอ่อนตัวพอสมควร ความชื้นของตัวอย่างดินในขณะนี้จะยังต่ำกว่าค่า Liquid Limit ของตัวอย่างดินนั้น พอประมาณ
- 6.1.2 ใช้มีดปาดดิน ตักดินเปียกจากถ้วยผสมดิน ใส่ลงในถ้วยทองเหลืองของ Liquid Limit Device ใช้มีดปาดอัดเนื้อดินลงในถ้วยทองเหลืองให้แน่น จนไม่มีฟองหรือช่องว่างอากาศหลงเหลืออยู่ภายใน ตกแต่งผิวหน้าดินให้ราบเรียบ
- 6.1.3 ใช้ grooving tool กรีดร่องผ่ากลางตัวอย่างดินในถ้วยทองเหลือง ให้รอยร่องมีความลึกจนถึงผิวทองเหลืองกันถ้วย
- 6.1.4 หมุนมือหมุนกระดกถ้วยทองเหลืองขึ้น แล้วปล่อยให้ตกลงกระทบพื้นอย่างแข็ง ด้วยความเร็วประมาณ 120 ครั้งต่อนาที สังเกตดูการเคลื่อนที่ของมวลดินที่ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนในถ้วยทองเหลือง เมื่อมวลดิน 2 ส่วนเคลื่อนตัวเข้าหากัน จนร่องที่กรีดผ่าไว้ปิดสนิทเป็นระยะทางยาวประมาณ 1/2 นิ้ว ให้หยุดทำการเคาะ แล้วบันทึกจำนวนครั้งที่ทำการเคาะ (no. of blows) ตัวอย่างดินนี้
- 6.1.5 ใช้มีดปาดตักตัวอย่างดินเปียกจากถ้วยทองเหลืองบริเวณที่มวลดิน 2 ส่วนเคลื่อนเข้ามาชิดติดกัน ให้ได้น้ำหนักประมาณ 20-30 กรัม ใส่กระป๋องหาความชื้นที่จดหมายเลขและบันทึกน้ำหนักไว้แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก แล้วนำไปเข้าเตาดอบเพื่อประเมินค่าความชื้นของตัวอย่างดิน
- 6.1.6 ใช้มีดปาด ตักดินที่เหลืออยู่ในถ้วยทองเหลืองทั้งหมดกลับคืนลงไปถ้วยผสมดิน แล้วเติมน้ำให้ตัวอย่างดินมีความชื้นสูงขึ้นอีกตามความเหมาะสม ใช้มีดปาดคลุกผสมให้ทั่วถึง
- 6.1.7 ทำการทดสอบตามขั้นตอนที่ 6.1.2 ถึง ขั้นตอนที่ 6.1.6 อย่างน้อย 5 ครั้ง ให้ได้ข้อมูลความชื้นของตัวอย่างดิน และจำนวนครั้งที่ทำการเคาะ อย่างน้อย 5 ชุด จำนวนครั้งการเคาะ (no. of blows) ที่ได้จากการทดสอบ ควรจะมีค่าระหว่าง 45-10 ครั้ง และควรมีค่าจำนวนครั้งการเคาะที่สูงกว่า หรือ ต่ำกว่า 25 ครั้ง อย่างน้อย อย่างละ 2 ค่า
- 6.1.8 ถ้าการเคาะทดสอบครั้งแรกๆ ปรากฏว่าตัวอย่างดินแห้ง หรือเปียกแฉะเกินไป ให้เริ่มทำการทดสอบใหม่ โดยไม่ต้องบันทึกผลการทดสอบที่ใช้ไม่ได้นั้น

6.2 การทดสอบเพื่อประเมินค่า PLASTIC LIMIT ของตัวอย่างดิน

- 6.2.1 นำตัวอย่างดินเม็ดละเอียดที่เตรียมไว้ หนักประมาณ 50 กรัม ใส่ลงในถ้วยกระเบื้องแล้วผสมน้ำที่ละน้อย ใช้มีดปาดคลุกให้น้ำและดินผสมกันโดยทั่วถึง จนกระทั่งตัวอย่างดินมีลักษณะเหนียวหนืด ความชื้นของตัวอย่างดินในขณะนี้ ควรจะสูงกว่าค่า Plastic Limit เล็กน้อย

- 6.2.2 ใช้มือหยิบดินขึ้นจากถ้วยกระเบื้องมาเป็นก้อนกลม เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 ซม. จำนวน 2-3 ก้อน วางก้อนดินลงบนแผ่นกระจก
- 6.2.3 ใช้อุ้งมือส่วนที่เป็นนิ้วค้ำดินที่ละก้อนด้วยน้ำหนักกดพอประมาณ ใช้ความเร็วในการคลึงประมาณ 80-90 ครั้งต่อนาทีจนก้อนดินยึดตัวออกเป็นเส้น คลึงก้อนดินต่อไปจนเส้นดินมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3 มม.
- 6.2.4 ถ้าดินยังเกาะตัวเป็นเส้นโดยไม่มีรอยแยกบนผิวเส้นดิน ให้ยุบรวมเส้นดินแล้วปั้นเป็นก้อนกลม แล้วเริ่มทำการคลึงตามที่กำหนดไว้ในขั้นตอน 6.2.3 ต่อไปอีก
- 6.2.5 คลึงก้อนดินจนเป็นเส้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 มม. แล้วกลับปั้นก้อนเข้าไปมาระหว่างขั้นตอนทดสอบที่ 6.2.3 และ 6.2.4 จนกระทั่งเส้นดินเริ่มแยกแตกตัว หรือมีการลอกของผิวดิน (crumble) ในขณะที่กำลังคลึง ดังในรูปที่ 5.3 ให้หยุดคลึงเส้นดิน นำเส้นดินที่ crumble แล้วนั้น ใส่กระป๋องหาความชื้นที่จดหมายเลขและบันทึกน้ำหนักแล้ว นำไปชั่งน้ำหนักและเข้าเตาอบ เพื่อประเมินค่าความชื้นของตัวอย่างเส้นดินนั้น
- 6.2.6 ทำการทดสอบ 2-3 ครั้ง ตามจำนวนก้อนดินที่เตรียมไว้ในขั้นตอน 6.2.2 จะได้ข้อมูล เป็นค่า ความชื้นของตัวอย่างดินที่ Plastic Limit จากการทดสอบ 2-3 ค่า

6.3 การทดสอบเพื่อประเมินค่า SHRINKAGE LIMIT ของตัวอย่างดิน

- 6.3.1 ทดสอบหาปริมาตรของถ้วยโลหะ หรือ shrinkage dish ที่จะใช้ใส่ตัวอย่างดินเปียกในการทดสอบนี้ โดยเทปรอทใส่ในถ้วยโลหะจนล้นเล็กน้อย ใช้แผ่นแก้วติดปุ่มด้านผิวเรียบ วางกดลงไปบนผิวปรอท เพื่อไล่ปรอทส่วนเกินออกจากถ้วยทดสอบ จนแผ่นแก้ววางอยู่บนขอบถ้วย แล้วยกแผ่นแก้วออกช้าๆ เทปรอทจากถ้วยทดสอบลงในกระบอกตวง ความจุ 25 ml เพื่อวัดปริมาตรของถ้วยโลหะ ซึ่งจะเป็นปริมาตรของตัวอย่างดินเปียกที่ใช้ทดสอบ (V_1)
- 6.3.2 นำตัวอย่างดินเม็ดละเอียดที่เตรียมไว้หนักประมาณ 50-100 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบื้อง ผสมน้ำที่ละน้อย ใช้มีดปาดคลุกให้น้ำและดินผสมกันโดยทั่วถึง แล้วเติมน้ำ ทำการคลุกดินเปียกต่อไปจนความชื้นของตัวอย่างดินสูงกว่าค่า Liquid Limit เล็กน้อย
- 6.3.3 นำถ้วยโลหะที่ทดสอบประเมินปริมาตรไว้แล้วมาทาวาสลินบางๆ เคลือบผิวโลหะภายในถ้วย เพื่อไม่ให้เนื้อดินที่ใช้ทำการทดสอบเกาะติดกับผิวโลหะ แล้วนำถ้วยไปชั่งน้ำหนัก (W_3)
- 6.3.4 ใช้มีดปาด ตักตัวอย่างดินเปียกที่เตรียมไว้ใส่ลงไปในถ้วย โดยใส่ครั้งแรกให้ได้ปริมาตรประมาณ 1 ใน 3 ของถ้วย แล้วเคาะถ้วยลงบนพื้นโต๊ะ เพื่อไล่ฟองอากาศออกจากตัวอย่างดิน หลังจากนั้น เติมดินเปียกลงไปอีกในปริมาณพอกๆกัน เป็นครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 จนตัวอย่างดินเต็มถ้วย หลังจากเติมดินแต่ละครั้ง ให้เคาะถ้วยไล่ฟองอากาศออกจากตัวอย่างดินในถ้วยให้หมด เมื่อได้ตัวอย่างดินเปียกเต็มถ้วยแล้ว ใช้มีดปาดแต่งผิวหน้าตัวอย่างดินให้เรียบเสมอบนถ้วยโลหะ แล้วนำถ้วยตัวอย่างดินนี้ไปชั่งน้ำหนัก (W_1)
- 6.3.5 เก็บถ้วยโลหะใส่ตัวอย่างดินเปียกไว้ในห้องปฏิบัติการ เพื่อให้ตัวอย่างดินแห้งลงตามธรรมชาติเป็นเวลาประมาณ 24-48 ชั่วโมง แล้วจึงนำถ้วยตัวอย่างดินไปเข้าเตาอบ เพื่ออบให้ดินแห้งสนิท
- 6.3.6 นำถ้วยโลหะพร้อมก้อนดินแห้งไปชั่งน้ำหนัก (W_2) แล้วนำดินแห้งออกจากถ้วย ก้อนดินแห้งนี้ ควรจะคงสภาพเป็นชิ้นเดียว หากก้อนแห้งแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆหลายชิ้น ให้ทำการทดสอบใหม่

- 6.3.7 เทปรอทใส่ลงในถ้วยโลหะใบเดิมให้เต็ม โดยวิธีการตามขั้นตอนที่ 6.3.1 แล้วค่อยๆยกถ้วยโลหะบรรจุปรอทเต็ม ไปวางลงในจานแก้วขอบต่ำ
- 6.3.8 นำก้อนดินแห้งใส่ลงไปในปรอทในถ้วยโลหะ แล้วใช้แผ่นแก้วติดปุ่มกดก้อนดินแห้งให้จมลงในปรอททั้งก้อน ปรอทจะล้นออกจากถ้วยโลหะไหลลงไปในจานแก้วที่รองรับ ดังในรูปที่ 5.5 ยกถ้วยโลหะออกจากจานแก้วแล้วเทปรอทที่อยู่ในจานแก้วใส่กระบอกลง เพื่อวัดปริมาตรปรอทส่วนที่ล้นจากถ้วยโลหะเป็นปริมาตรของก้อนดินแห้ง (V_d)

6.4 การทดสอบเพื่อประเมินค่า **LINEAR SHRINKAGE** ของตัวอย่างดิน

- 6.4.1 นำรางโลหะ (shrinkage trough) ทั้ง 2 ราง ที่จะใช้ทำการทดสอบมาวัดความยาวภายในตามแกนราบโดยใช้เวอร์เนีย ซึ่งความยาวที่วัดได้นี้ จะเป็นความยาวของตัวอย่างดินเปียกที่ใช้ทดสอบ (L_1 หรือ L_i) แล้วใช้วาสลินทาเคลือบผิวโลหะภายในรางบางๆ เพื่อป้องกันมิให้ดินเกาะติดกับผิวโลหะ
- 6.4.2 นำตัวอย่างดินเม็ดละเอียดที่เตรียมไว้หนักประมาณ 200 กรัม ใส่ลงในถ้วยกระเบื้องแล้วผสมน้ำที่ละน้อย ใช้มีดปาดคลุกให้น้ำและดินผสมกันโดยทั่วถึง แล้วเพิ่มน้ำ พร้อมทั้งคลุกดินเปียกต่อไปจนความชื้นของตัวอย่างดินสูงกว่าค่า Liquid Limit เล็กน้อย
- 6.4.3 ใช้มีดปาดตัดตัวอย่างดินเปียกใส่ลงในรางที่ละน้อย และอัดดินใส่รางให้แน่น พร้อมกับเคาะรางใส่ดินลงบนพื้นเพื่อไล่ฟองอากาศ เมื่อได้ดินเปียกไร้ฟองหรือช่องว่างอากาศเต็มรางแล้ว ใช้มีดปาดแต่งผิวหน้าดินให้เรียบเสมอขอบราง
- 6.4.4 เก็บตัวอย่างดินเปียกที่เหลือใส่กระป๋องหาความชื้น ชั่งน้ำหนัก แล้วนำไปอบให้แห้ง เพื่อตรวจสอบว่า ตัวอย่างดินที่ใช้ทำการทดสอบนี้ มีความชื้นเท่าใด
- 6.4.5 เก็บรางโลหะใส่ตัวอย่างดินเปียกไว้ในห้องปฏิบัติการ เพื่อให้ตัวอย่างดินแห้งลงตามธรรมชาติ เป็นเวลาประมาณ 24-48 ชั่วโมง แล้วจึงนำรางตัวอย่างดินไปเข้าเตาอบเพื่ออบให้ดินแห้งสนิท
- 6.4.6 เมื่อนำรางตัวอย่างดินออกจากเตาอบแล้ว ก้อนตัวอย่างดินแห้งในรางจะต้องคงสภาพเป็นชิ้นเดียว หากก้อนดินแห้งแตกออกเป็นหลายชิ้น ให้ทำการทดสอบใหม่
- 6.4.7 ใช้เวอร์เนียวัดความยาวตามแนวนอนของก้อนดินแห้งในราง (L_2)

7. การคำนวณผลการทดสอบ

7.1 การคำนวณใน DATA SHEET

- 7.1.1 จากผลการทดสอบ Liquid Limit ทำการคำนวณค่าความชื้นของตัวอย่างดินแต่ละตัวอย่างแล้วนำค่าความชื้น พร้อมกับ จำนวนครั้งที่ทำการเคาะตัวอย่างดินนั้น ไป plot ลงในกระดาษกราฟ semi-logarithmic โดย plot ค่าความชื้นบน linear scale และ plot ค่าจำนวนครั้งการเคาะบน logarithmic scale ดังในรูปที่ 5.4 แล้วลากเส้นตรงในลักษณะ line of best fit ผ่านจุดทั้งหมดที่ plot ได้ อ่านค่าความชื้น ณ จุดที่เส้นตรงนี้ลากผ่านค่าจำนวนครั้งการเคาะ 25 ครั้ง จะได้เป็นค่า Liquid Limit ของตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบ

- 7.1.2 คำนวณค่าความชื้นของตัวอย่างดินที่ใช้ทำการทดสอบ Plastic Limit แล้วนำค่าความชื้นที่คำนวณได้มาหาค่าเฉลี่ยเพียงค่าเดียว ค่าความชื้นดังกล่าว จะเป็นค่าความชื้นที่ Plastic Limit ของตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบ
- 7.1.3 คำนวณค่า Shrinkage Limit ของตัวอย่างดินจากข้อมูลที่ทดสอบได้โดยใช้สมการที่ 5.6
- 7.1.4 คำนวณค่า Linear Shrinkage ของตัวอย่างดินที่ใช้ทำการทดสอบ โดยใช้สมการที่ 5.11 พร้อมทั้งคำนวณหาความชื้น ของตัวอย่างดินเปียก ที่ใช้ทดสอบ เพื่อเปรียบเทียบกับค่า Liquid Limit ของตัวอย่างดินเดียวกันนี้
- 7.1.5 คำนวณหาค่า Plasticity Index ของตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบ โดยใช้สมการที่ 5.7

7.2 การคำนวณเพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบ

- 7.2.1 นำค่าความชื้นของตัวอย่างดินจากผลการทดสอบ Liquid Limit เมื่อจำนวนครั้งที่เคาะตัวอย่างดิน มีค่าระหว่าง 20-30 ครั้ง มาคำนวณหาค่า Liquid Limit ของตัวอย่างดินดังกล่าว ในลักษณะการทดสอบแบบ one-point method โดยใช้สมการที่ 5.1
- 7.2.2 คำนวณค่า Plasticity Index ของตัวอย่างดินจากผลการทดสอบ Linear Shrinkage ที่คำนวณได้ในขั้นตอนที่ 7.1.4 โดยใช้สมการที่ 5.12
- 7.2.3 คำนวณค่า Shrinkage Ratio (SR) ของตัวอย่างดิน จากผลการทดสอบ Shrinkage Limit โดยใช้สมการที่ 5.9
- 7.2.4 ประเมินค่า Specific Gravity (G_s) ของตัวอย่างดิน จากผลการทดสอบ Shrinkage Limit โดยใช้สมการที่ 5.10
- 7.2.5 หากทราบค่า specific gravity ของตัวอย่างดินอยู่ก่อนแล้ว ให้คำนวณเพื่อประเมินค่า Shrinkage Limit ของตัวอย่างดินนี้ โดยสมการที่ 5.10 และโดยการ plot phase diagram ดังในรูปที่ 5.1

8. บทวิเคราะห์วิจารณ์

- 8.1 ให้สรุปผลการทดสอบและผลการคำนวณทั้งหมด พร้อมทั้งวิจารณ์ผลการทดสอบ และวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวอย่างดินที่ใช้ในทดสอบครั้งนี้
- 8.2 เปรียบเทียบค่า Liquid Limit ที่ประเมินได้จากการคำนวณในขั้นตอนที่ 7.1.1 กับค่าที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 7.2.1 หากค่าที่ได้แตกต่างกัน จงอธิบายถึงสาเหตุที่ทำให้เกิดความแตกต่างดังกล่าว
- 8.3 เปรียบเทียบค่า Plasticity Index ที่ประเมินได้จากการคำนวณ ในขั้นตอนที่ 7.1.5 กับค่าที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 7.2.2 หากค่าที่ได้ต่างกัน จงอธิบายถึงสาเหตุที่ทำให้เกิดความแตกต่างดังกล่าว
- 8.4 เปรียบเทียบค่า Shrinkage Limit ที่ประเมินได้จากการคำนวณ ในขั้นตอนที่ 7.1.3 กับค่าที่ประเมินได้จากขั้นตอนที่ 7.2.5 หากค่าที่ได้ต่างกัน จงอธิบายถึงสาเหตุที่ทำให้เกิดความแตกต่างดังกล่าว
- 8.5 วิเคราะห์วิจารณ์แสดงความคิดเห็นอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับวิธีการทดลองในเรื่องนี้

9. ข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับการทดลองนี้

9.1 การเตรียมตัวอย่างดินที่จะใช้ทำการทดสอบประเมินค่า consistency limits ให้ได้ผลการทดสอบที่ถูกต้องเป็นที่เชื่อถือได้ จะต้องทำการเตรียมตัวอย่างดินอย่างถูกต้องตามวิธีการที่กำหนด ซึ่งจะศึกษารายละเอียดได้จาก มาตรฐาน ASTM D 4318 หรือ ที่แนะนำโดย BOWLES (1992) วิธีเตรียมตัวอย่างดินที่ถูกต้องวิธีหนึ่งที่ BOWLES แนะนำคือ นำมวลดินที่จะใช้ทดสอบมาทำให้แห้งโดยตากไว้ในอากาศ (air-dried) ให้น้ำในมวลดินระเหยแห้งไปเองตามธรรมชาติ แล้วจึงใช้ค้อนยางทุบให้เม็ดดินแยกแตกตัวออกจากกัน ก่อนนำไปร่อนผ่านตะแกรง ASTM No.40 แล้วเก็บมวลดินเม็ดละเอียดส่วนที่ร่อนผ่านตะแกรงไว้ใช้ในการทดสอบ สำหรับการทดสอบเพื่อประเมินค่า Liquid Limit และ Plastic Limit ให้นำตัวอย่างดินที่เตรียมไว้แล้วนี้ ไปผสมน้ำให้มีความชื้นพอสมควร คลุกให้เข้ากันโดยทั่วถึง จนตัวอย่างดินมีสภาพเหนียวหนืด (plastic) หมักตัวอย่างดินทิ้งไว้ในสภาพดังกล่าว (curing) ประมาณ 24-48 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบ ส่วนการทดสอบประเมินค่า Shrinkage Limit และ Linear Shrinkage ไม่จำเป็นต้องหมักตัวอย่างดินก่อนทดสอบ สามารถใช้ดินแห้งที่เตรียมไว้ผสมน้ำ แล้วทดสอบได้ทันที เหตุผลที่ต้องเตรียมตัวอย่างดินอย่างระมัดระวังเช่นนี้ เพราะการทำตัวอย่างดินให้แห้งโดยนำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 100-105 °C (oven-dried) ก่อนทำการทดสอบ จะมีผลกระทบต่อโครงสร้าง องค์กรประกอบ และคุณสมบัติของเม็ดดิน clay ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการกำหนดคุณสมบัติ consistency และคุณสมบัติ plasticity ของมวลดินเม็ดละเอียด ทำให้ค่า Consistency Limits ของตัวอย่างดินที่ประเมินได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ค่า Liquid Limit ผิดไปจากความเป็นจริง คือ ค่า Liquid Limit ที่ประเมินได้จากตัวอย่างดินที่ทำให้แห้งโดยนำเข้าเตาอบ (oven-dried) จะน้อยกว่า ค่า Liquid Limit ที่ประเมินได้จากตัวอย่างดินที่ทำให้แห้งในสภาวะอากาศตามธรรมชาติ (air-dried) อย่างไรก็ตาม การทดสอบประเมินค่า Liquid Limit และ Plastic Limit โดยใช้ดินแห้งจากการตากไว้ในอากาศไปผสมน้ำแล้วทำการทดสอบทันที ผลการทดสอบก็จะยังอาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้บ้างระหว่าง 2-6 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงต้องนำตัวอย่างดินแห้งที่จะใช้ทดสอบไปผสมน้ำแล้วหมักทิ้งไว้ เพื่อเปิดโอกาสให้เม็ดดิน clay ในตัวอย่างดิน ได้ทำปฏิกิริยากับน้ำ พื้นสภาพเม็ดดินจนมีคุณสมบัติใกล้เคียงสภาพธรรมชาติ ก่อนที่จะถูกทำให้แห้ง แล้วจึงนำมาไปทดสอบ ผลกระทบจากวิธีการเตรียมตัวอย่างดิน ที่มีต่อผลของการทดสอบ ตามที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ จะเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัด กับมวลดินที่มีเม็ดดิน clay ปนอยู่เป็นปริมาณมาก ดังนั้น กรณีที่พิจารณาแล้วเห็นว่า ตัวอย่างดินชั้นในสภาพธรรมชาติที่จะใช้ทดสอบ เป็นดินเม็ดละเอียดล้วน ไม่มีดินเม็ดหยาบปน สามารถนำตัวอย่างดินดังกล่าวไปใช้ทดสอบได้ทันที โดยไม่ต้องทำให้แห้งเสียก่อน ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวกที่สุด และจะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเม็ดดิน clay ในตัวอย่างดินอีกด้วย ส่วนมวลดินที่มีเม็ดดิน clay ปนอยู่น้อย การเตรียมตัวอย่างดินเพื่อใช้ทำการทดสอบ จะไม่มีผลกระทบต่อผลของการทดสอบมากนัก อนึ่ง วิธีการที่กำหนดให้นักศึกษาปฏิบัติในการทดสอบในที่นี้ มีจุดประสงค์ที่จะฝึกฝนการใช้เครื่องมืออุปกรณ์การทดสอบเป็นหลัก และให้สามารถทำการทดสอบได้เสร็จสิ้นภายในเวลาที่กำหนด จึงไม่สามารถฝึกการเตรียมตัวอย่างตามขบวนการที่ถูกต้องตามที่กล่าวไว้ในที่นี้ทุกประการได้

9.2 การทำให้ตัวอย่างดินความชื้นสูงที่เตรียมขึ้นในภาชนะทดลอง แห้งสนิท ในการทดสอบเพื่อประเมินค่า Shrinkage Limit และค่า Linear Shrinkage ของตัวอย่างดิน จะนำภาชนะใส่ตัวอย่างดินเข้าเตาอบในทันทีที่ได้ จะต้องปล่อยตัวอย่างดินทิ้งไว้ในบรรยากาศธรรมชาติ เพื่อให้ความชื้นของตัวอย่างดินลดลง

อย่างช้า ๆ จนเกือบแห้ง แล้วจึงนำเข้าเตาอบจนแห้งสนิท ทั้งนี้หากนำตัวอย่างดินที่มีความชื้นสูงเข้าเตาอบ น้ำจะระเหยออกจากตัวอย่างดินและตัวอย่างดินเกิดการหดตัวอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้ก้อนดินแห้งจะแตกแยกออกจากกันเป็นชิ้น ๆ ไม่สามารถนำก้อนดินแห้งเหล่านั้นไปทำการวัดขนาด หรือวัดปริมาตรต่อไปได้

@@@@@@@@@@@@@@@@

CE 372 ENGINEERING SOIL TESTS

EXPERIMENT No. 5

CONSISTENCY (ATTERBERG) LIMITS TEST

ชื่อ-สกุล รหัส ตอนที่ กลุ่มที่ วันทดสอบ

LIQUID LIMIT (L.L.) TEST

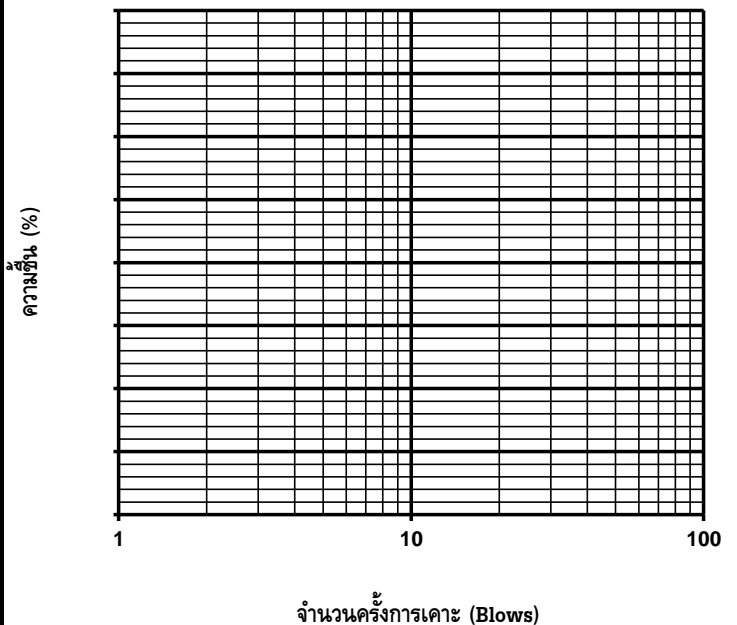
PLASTIC LIMIT (P.L.) TEST

การทดสอบครั้งที่	1	2	3	4	5	6	1	2	3
หมายเลขกระป๋องหาความชื้น									
น้ำหนักดินเปียก + กระป๋อง (กรัม)									
น้ำหนักดินแห้ง + กระป๋อง (กรัม)									
น้ำหนักกระป๋องหาความชื้น (กรัม)									
น้ำหนักน้ำในตัวอย่างดิน (กรัม)									
น้ำหนักดินแห้ง (กรัม)									
ความชื้นตัวอย่างดิน (%)									
จำนวนครั้งการเคาะ (ครั้ง)							ค่าเฉลี่ย P.L. (%)		

SHRINKAGE LIMIT (S.L.) TEST

LIQUID LIMIT PLOT

หมายเลขถ้วย SHRINKAGE		
น้ำหนักดินเปียก + ถ้วย (W1) (กรัม)		
น้ำหนักดินแห้ง + ถ้วย (W2) (กรัม)		
น้ำหนักถ้วย SHRINKAGE (W3) (กรัม)		
น้ำหนักน้ำในตัวอย่างดิน $W_w = (W1 - W2)$ (กรัม)		
น้ำหนักดินแห้ง $W_s = (W2 - W3)$ (กรัม)		
ความชื้นตัวอย่างดิน $w = 100(W_w/W_s)$ (%)		
ปริมาตรดินเปียกในถ้วย SHRINKAGE (Vi) (ลบ.ซม.)		
ปริมาตรก้อนดินแห้ง (Vd) (ลบ.ซม.)		
ค่า SHRINKAGE LIMIT (SL) (%)		
ค่าเฉลี่ย SHRINKAGE LIMIT (%)		



LINEAR SHRINKAGE (L.S.) TEST

SUMMARY OF RESULTS

หมายเลขราง LINEAR SHRINKAGE		
ความยาวดินเปียกในราง (L1) (มม.)		
ความยาวดินแห้งในราง (L2) (มม.)		
ระยะการหดตัว $L_3 = (L1 - L2)$ (มม.)		
ค่า LINEAR SHRINKAGE (L.S.) (%)		
ค่าเฉลี่ย LINEAR SHRINKAGE (L.S.) (%)		

LIQUID LIMIT (L.L.)	(L.L.)	(%)
PLASTIC LIMIT (P.L.)	(P.L.)	(%)
PLASTICITY INDEX (P.I. = L.L. - P.L.)	(P.I. = L.L. - P.L.)	(%)
SHRINKAGE LIMIT (S.L.)	(S.L.)	(%)
LINEAR SHRINKAGE (L.S.)	(L.S.)	(%)
ESTIMATED P.I. (P.I. = 2.13 x L.S.)	(P.I. = 2.13 x L.S.)	(%)