

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมเชิงอุทกวิทยาของดิน

ด้วยเศษพลาสติกขนาดเล็กที่ใช้แล้ว

THE STUDY OF WASTE PLASTIC FLAKES

ALTERING SOIL HYDROLOGICAL PROPERTIES



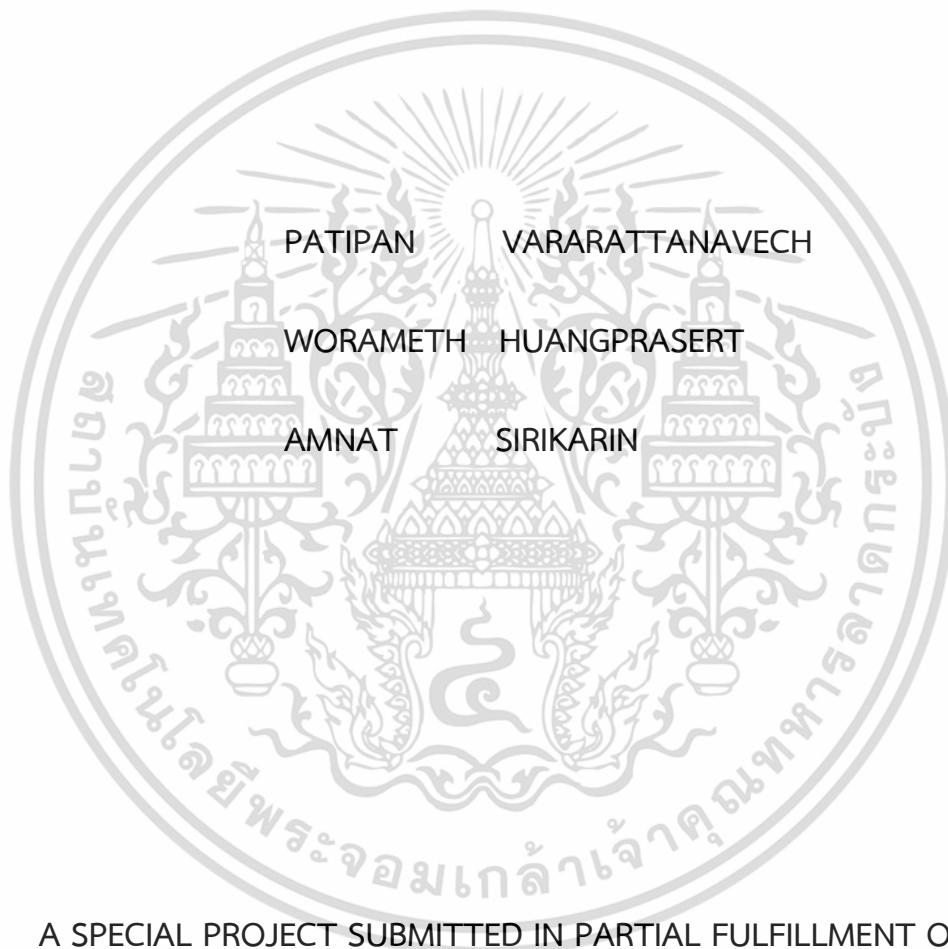
ปริญญานิพนธ์นี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY OF WASTE PLASTIC FLAKES
ALTERING SOIL HYDROLOGICAL PROPERTIES



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมเชิงอุทกวิทยาของดิน

ด้วยเศษพลาสติกขนาดเล็กที่ใช้งานแล้ว

นายปฏิภาณ วรรัตน์ธนาเวช รหัสประจำตัว 59010777

นายวรเมธ ห่วงประเสริฐ รหัสประจำตัว 59011172

นายอำนาจ ศิริคะรินทร์ รหัสประจำตัว 59011574

ผศ.ดร.วิรุฬห์ คำชุม

ปีการศึกษา 2562

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันปัญหามลพิษของโลกนั้นเป็นปัญหาสำคัญ ซึ่งพลาสติกนั้นเป็นปัญหาตัวหลักของปัญหาดังกล่าว จากการศึกษาได้พบว่าพลาสติกนั้น สามารถใช้ในการเสริมกำลังของดินได้และถูกใช้อย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตาม การศึกษาการใช้พลาสติกปรับปรุงคุณภาพดินนั้น ไม่ได้ให้ความสนใจกับคุณสมบัติเชิงอุทกวิทยามากนัก โดยการศึกษาจะผลระหว่าง ช่องว่างระหว่างดินกับพลาสติก และการกั้นน้ำของพลาสติก ว่าปัจจัยใดมีผลต่อคุณสมบัติเชิงอุทกวิทยามากกว่ากัน ดังนั้นผู้ศึกษาจึงศึกษาโดยใช้ “เส้นโค้งความอ้วนน้ำ” ซึ่งเป็นคุณสมบัติเชิงอุทกวิทยาของดิน ที่เป็นตัวแปรสำคัญในการพิจารณาเสถียรภาพของดิน โดยศึกษานี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการเลือกพิจารณาใช้พลาสติกในการปรับปรุงคุณภาพดิน ซึ่งจะสามารถใช้ประโยชน์จากพลาสติกที่ผ่านการใช้งานมาแล้วได้

ในการศึกษานี้จะทำการใช้พลาสติกประเภท โพลีเอทิลีน และ โพลีฟลูออรีน ซึ่งมีขนาดเฉลี่ย 2 ถึง 10 มิลลิเมตร และดินดินลูกรัง เป็นตัวอย่างทดลอง โดยแบ่งตัวอย่างเป็น ดินเปล่า, ดินผสมพลาสติก 0.4%, ดินผสมพลาสติก 1.0% โดยมวล ซึ่งการทดลองจะใช้วิธี “Instantaneous Profile Method (IPM)” จะลองการไหลของน้ำในดิน โดยจะแบ่งเป็นการไหลจาก สภาวะเปียกไปแห้ง และจากสภาวะแห้งไปเปียก ในดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

ซึ่งจากผลการทดลองนั้นได้ว่า ดินผสมพลาสติกที่ 0.4% โดยมวลนั้นมีอัตราการไหลของน้ำในดินต่ำสุดจากตัวอย่างทั้งหมด โดยเนื่องจากผลของคุณสมบัติในการกั้นน้ำของพลาสติกนั้นมีผลต่ออัตราการไหลของน้ำในดินสูงกว่าผลเนื่องจากช่องว่างระหว่างพลาสติกและดิน แต่ในขณะเดียวกันถ้าเพิ่มปริมาณพลาสติก อัตราการไหลของน้ำในดินนั้นมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากช่องว่างระหว่างดินและพลาสติก แต่ที่ดินผสมพลาสติกที่ 1.0% โดยมวลนั้น อัตราการไหลของน้ำในดินนั้นก็ยังคงมีค่าต่ำว่าดินที่ไม่ผสมพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Study of Recycled Plastic Flakes Altering Soil Hydrological Properties

Patipan Vararattanavech Student ID. 59010777

Worameth Huangprasert Student ID. 59011172

Amnat Sirikarin Student ID. 59011574

Asst.Dr. Viroon Kamchoom

Academic Year 2019

ABSTRACT

Nowadays, our earth has many serious pollutions but the one that absolute increasing every day is the Plastic waste. According to many researches told that plastic waste has been widely used for reinforcing in geotechnical engineering. However, a lot of researchers don't pay attention to the hydraulic properties, that have 2 main problem about the void ratio and hydrophobic when we add plastic flakes into soil which one has higher affect hydraulic properties. Therefore, we decide to study in the "Hydraulic Conductivity and Soil Water Retention Curve (SWRC)" These hydraulic properties are the key parameters when analysis in reinforced slope stability. Furthermore, our experiment which about plastic flakes in soil improvement can be an alternative choice to reduce plastic waste that increasing every day.

In this study, our plastic flakes consisted of Polyethylene and Polypropylene which have average length about 2-10 millimeters. Our experiment has soil sample which use lateritic soil mix randomly with plastic flakes at 0%, 0.4% and 1% by dry soil weight in soil acrylic column and demonstrate hydraulic properties by "Instantaneous profile method (IPM)" in "unsaturated soil"

The result shows that 0.4% plastic has lowest permeability due to Hydrophobic which affect more than void ratio between soil and plastic. But if we add more plastic flake, void ratio will increase which affect High permeability. However, hydraulic conductivity of 1% plastic is still lower than base soil.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิรุฬห์ คำชุม และ รศ.ดร. แผลมทอง เหล่าคงถาวร ที่กรุณาให้คำปรึกษาปรับปรุง แก้ไขข้อบกพร่อง คอยแนะนำช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหา คอยให้ความรู้ เอาใจใส่ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือจนสำเร็จได้ด้วยดี พวกเราผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และ ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ในทุก ๆ รายวิชาที่ศึกษาเพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับการทำปริญญาานิพนธ์เล่มนี้ โดยคณาจารย์ทุกท่าน ได้ถ่ายทอดความรู้ทั้งทางด้านวิชาการ ความรู้ทั่วไป และประสบการณ์ต่าง ๆ จนสามารถนำมาใช้ในการทำงานและการดำเนินชีวิตได้อย่างดียิ่ง ตลอดจนขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ร่วมเป็นกรรมการในการสอบปริญญาานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ในภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่คอยให้คำแนะนำ ช่วยเหลือซึ่งกันและกันในการทำปริญญาานิพนธ์ รวมถึงตลอดระยะเวลาที่ได้เรียนรู้และศึกษาในภาควิชาวิศวกรรมโยธา

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดาอันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งเป็นผู้ให้ความรัก กำลังใจ และสนับสนุนการศึกษาของคณะผู้จัดทำมาโดยตลอด ทำให้คณะผู้จัดทำมีวันนี้ คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างสูง

นายปฏิภาณ วรรัตน์ธนาเวช

นายวรเมธ ห่วงประเสริฐ

นายอำนาจ ศิริคะรินทร์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 Permeability.....	4
2.1.1 กฎของดาร์ซี.....	5
2.1.2 กฎของการไหลต่อเนื่อง.....	5
2.1.3 การหาสัมประสิทธิ์ของน้ำ ในดินแบบความดันน้ำคงที่.....	6
2.2 Fiber-reinforcement.....	7
2.3 คุณสมบัติเชิงกลของพลาสติก.....	8
2.3.1 Polypropylene (PP).....	8
2.3.2 Polyethylene (PE).....	8
2.4 คุณสมบัติพื้นฐานของดิน.....	8
2.4.1 สมบัติการซึมผ่านน้ำ (Hydraulic Conductivity).....	8
2.4.1.1 ความซึมผ่านของดิน.....	8
2.4.1.2 แรงดึงดูดน้ำในดิน (Soil suction).....	9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ IV อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4.1.3 กฎการไหลของดาร์ซี (Darcy's Law).....	9
2.4.2 ลักษณะดินที่นำมาทดลอง.....	11
2.4.3 การทดสอบการบดอัดดิน (Compaction).....	11
2.4.4 Percent Plastic Limit (%PL), Percent Liquid Limit (%LL).....	12
2.5 การทดสอบการไหลซึมด้วย Instantaneous Profile Method.....	13
2.5.1 Instantaneous Profile Method.....	13
2.5.2 เครื่องมือวัดความชื้นในดิน (Soil Moisture Sensor).....	13
2.5.3 เครื่องมือวัดความดันของน้ำในดิน (Suction Sensor).....	14
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.6.1 SIAMAK SAGHARI, GHADER BAGHERI and HAMID SHABANZADEH (2015).....	15
บทที่ 3 วิธีดำเนินการ.....	17
3.1 คุณสมบัติของดิน.....	17
3.1.1 การหาขนาดของเม็ดดิน (Grain Size Analysis).....	17
3.1.2 การหาค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit ,L.L.).....	19
3.1.3 ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit ,P.L.).....	19
3.1.4 การบดอัดดิน(Compaction).....	20
3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	22
3.2.1 การเตรียมตัวอย่าง Soil-Column.....	24
3.2.2 Instantaneous Profile Method (Dry Process).....	25
3.2.3 Instantaneous Profile Method (Wet Process).....	27
บทที่ 4 ผลการศึกษา.....	29
4.1 บทนำ.....	29
4.2 ผลการศึกษาจากแบบจำลอง.....	29
4.2.1 Instantaneous Profile Method.....	29
4.2.2 Soil Water Retention Curve.....	32
4.2.3 Hydraulic conductivity	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา.....	36
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	36
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	36
บรรณานุกรม.....	37
ภาคผนวก ก.....	38



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 2.1 ค่าโดยทั่วไปของสัมประสิทธิ์การซึมได้ของดินชนิดต่างๆ.....	5
ตาราง 2.2 เปรียบเทียบ Shear Stress ของดินลูกรังผสมเศษขยะพลาสติก.....	7
ตาราง 3.1 ข้อมูลขนาดคละและชนิดของเม็ดดิน.....	10
ตาราง 3.2 ข้อมูลการทดสอบหาค่าขีดจำกัดเหลว.....	17
ตาราง 3.3 ตารางผลการทดสอบหาค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำในดิน.....	19
ตาราง 3.4 Density Determination.....	20
ตาราง 3.5 Water Content.....	21
ตาราง 3.6 ข้อมูล Calibration of Pycnometer.....	21
ตาราง 3.7 ข้อมูลความถ่วงจำเพาะของทราย.....	22



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ VII ึ่งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ดินหลวมและดินแน่น	4
รูปที่ 2.2 แสดงแบบความดันน้ำคงที่.....	6
รูปที่ 2.3 ดินลูกรัง.....	11
รูปที่ 2.4 เส้นโค้งการบดอัด (Compaction curve).....	12
รูปที่ 2.5 แสดงสถานภาพต่างๆ ของตัวอย่างมวลดินเหนียว.....	12
รูปที่ 2.6 Soil Moisture Censor	14
รูปที่ 2.7 Suction Censor	14
รูปที่ 2.8 แบบจำลองอุปกรณ์ทดสอบด้วยวิธี Falling – Head.....	15
รูปที่ 2.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Permeability Coefficient กับ Length of Fibers.....	16
รูปที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Permeability Coefficient กับ Length of Fibers.....	16
รูปที่ 3.1 กราฟแสดงมาตรฐานชั้นรองพื้นทางของวัสดุมวลรวมของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย.....	18
รูปที่ 3.2 กราฟแสดง Gradation Curve ซึ่งประกอบด้วย Grade A, B, C, D และ E.....	18
รูปที่ 3.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นในดินกับจำนวนครั้งที่เคาะ.....	19
รูปที่ 3.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง (g/cm^3) กับปริมาณความชื้น (%).....	21
รูปที่ 3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิ (C) กับ น้ำหนักมวลระหว่างแก้วกับน้ำ (g).....	22
รูปที่ 3.6 ชั้นพลาสติกตัวอย่างที่จะนำมาวัดขนาด.....	23
รูปที่ 3.7 การวัดด้านกว้าง(เซนติเมตร), ยาว(เซนติเมตร).....	23
รูปที่ 3.8 Acrylic Column.....	24
รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการบดอัดดิน.....	25
รูปที่ 3.10 การติดตั้ง Moisture Sensor และ Suction Sensor ตามตำแหน่งที่กำหนดไว้.....	25
รูปที่ 3.11 ปิดกระบอก Soil-Column เพื่อไม่ให้น้ำไหลออกทางก้นกระบอก.....	26
รูปที่ 3.12 การวัด Moisture Sensor, Suction Sensorและปริมาณความชื้นในอากาศ.....	26
รูปที่ 3.13 การติดตั้งติดตั้ง Mariotte Bottle เพื่อทำ Wet Process.....	27
รูปที่ 3.14 เปิดกระบอก Soil-Column.....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ VIII อย่างเป็นทางการทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.15 ขั้นตอนปล่อยให้ดินจัดเรียงตัวโดยธรรมชาติ.....	28
รูปที่ 3.16 Instantaneous Profile Method (Wet Process).....	28
รูปที่ 4.1 Instantaneous Profile Method of Base Soil Dry Process (Matrix Suction).....	29
รูปที่ 4.2 Instantaneous Profile Method of Base Soil Dry Process (VWC).....	30
รูปที่ 4.3 Instantaneous Profile Method of 0.4% Plastic Dry Process (Matrix Suction).....	30
รูปที่ 4.4 Instantaneous Profile Method of 0.4% Plastic Dry Process (VWC).....	31
รูปที่ 4.5 Soil Water Retention Curve of Base Soil.....	32
รูปที่ 4.6 Soil Water Retention Curve of Soil with 0.4% plastic flakes.....	33
รูปที่ 4.7 Soil Water Retention Curve of Soil with 1% plastic flakes.....	33
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Matrix Suction และ Hydraulic Conductivity.....	34
รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง Hydraulic Conductivity และ Matrix Suction ของแต่ละตัวอย่างการทดลอง.....	35

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การศึกษาเรื่องการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมเชิงอุทกวิทยาของดินนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการออกแบบสิ่งก่อสร้างที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมปฐพี เช่น การสร้างถนน, งานก่อสร้างใต้ดิน, งานเขื่อน เป็นต้น ซึ่งพฤติกรรมเชิงอุทกวิทยานั้นมีผลต่อปัญหาการพังทลายและการเคลื่อนตัวของดินที่อาจส่งผลทำให้โครงสร้างเสียหายได้ โดยจำนวนพลาสติกนั้นมีความโน้มที่เพิ่มขึ้นในทุก ๆ วัน การรีไซเคิลเพียงอย่างเดียว นั้นไม่เพียงพอสำหรับปริมาณพลาสติกที่เพิ่มขึ้นในปัจจุบัน ด้วยเหตุนี้ความต้องการจัดการขยะพลาสติกจึงเพิ่มขึ้น ซึ่งขยะพลาสติกนั้นมีพฤติกรรมเป็นวัสดุเสริมแรงและสามารถใช้เสริมความมั่นคงของดินหรือใช้ในการพัฒนาคุณภาพดินในรูปแบบอื่น

โดยจากการศึกษาเรื่องพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงด้านคุณสมบัติเชิงอุทกวิทยาของดินด้วยเศษพลาสติกขนาดเล็กที่ใช้งานแล้ว (The Study of Recycled Plastic Flakes Altering Soil Hydrological Properties) ซึ่งส่งผลต่อเสถียรภาพและความมั่นคงของดินเพื่อที่นำไปใช้ในงานวิศวกรรมต่อไป โดยการศึกษาของผู้จัดทำก็เป็นอีกช่องทางหนึ่งในการใช้ประโยชน์จากเศษพลาสติกที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงการไหลของน้ำในดินไม่อิ่มน้ำที่มาจากผลของการใส่เศษพลาสติก
- 2) การหา soil water retention curve และ permeability function ของดินที่มีการผสมเศษพลาสติกในปริมาณต่างกัน
- 3) เพื่อศึกษาปริมาณพลาสติกที่เหมาะสมที่จะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในงานวิศวกรรมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1) งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมเชิงอุทกวิทยาของดินโดยใช้ดินลูกรัง จากจังหวัดฉะเชิงเทรา ประเภท SW มีขนาดคละผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และค้ำบนตะแกรงเบอร์ 200
- 2) พลาสติกชนิด Polypropylene (PP) และ Polyethylene (PE) ที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรม Dow Chemical Thailand LTD.
- 3) ค่าความหนาแน่นที่ Maximum Dry Density 80% Compaction
- 4) Soil Properties;
 - Atterberg Limit; ASTM D4318 และ ASTM D427
 - Grain Size Analysis; ASTM D422
 - Compaction Test ;ASTM D698-91
 - Specific Gravity of soil; ASTM D854
- 5) Hydraulic Properties;
 - Soil Suction
 - Volumetric Water Content
 - Soil-Water Retention Curve (SWRC)
 - Hydraulic Conductivity Function (HCF)
- 6) ลักษณะของชั้นพลาสติก (Plastic Characteristics)
 - ปริมาณที่ผสมลงในดิน
 - ขนาดพลาสติกแต่ละชั้นโดยเฉลี่ย
 - ความเป็น hydrophobic
- 7) ศึกษาโดยใช้เฉพาะวิธี Instantaneous Profile Method (Wet process and Dry process)
- 8) ศึกษาการไหลซึมแบบ 1 มิติเท่านั้น (1-Dimension Permeability)
- 9) การศึกษาไม่ได้ควบคุมอุณหภูมิ และความชื้น

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการ

- 1) ศึกษารวบรวมข้อมูลการใช้พลาสติกในการปรับปรุงคุณภาพดิน
- 2) ศึกษาคุณสมบัติเชิงอุทกวิทยา
- 3) ทำการทดลองหาคุณสมบัติของดินที่ใช้ทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) ปรับแก้เครื่องมือและสร้างสมการสอบเทียบเครื่องวัดปริมาณความชื้นในดินและเครื่องมือวัดความดันของน้ำในดิน
- 5) จัดเตรียมกระบอกอัลลีลิกและบดอัดดินตามที่กำหนด
- 6) เก็บข้อมูลปริมาณความชื้นในดินและความดันของน้ำในดิน โดยวิธี Instantaneous Profile Method ทั้งในขั้นตอน Dry Process, Wet Process
- 7) เปลี่ยนปริมาณพลาสติกในตัวอย่างการทดลองตามกรณีศึกษา
- 8) วิเคราะห์ สรุปผล และหาความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ได้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถนำปริมาณพลาสติกที่ทำให้คุณสมบัติทางอุทกวิทยาเหมาะสมที่สุดไปใช้งานในการก่อสร้างจริงได้
- 2) เพิ่มช่องทางการกำจัดและลดปริมาณพลาสติกใช้แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 Permeability

Permeability หรือความซึมได้ของน้ำ คือ ความสามารถที่มวลดินยอมให้น้ำซึมผ่านไปได้หากมวลดินยอมให้น้ำซึมผ่านได้ง่าย หมายถึงความซึมได้ของน้ำสูงเรียกว่า “Pervious Soil” และถ้ามวลดินไม่ยอมให้น้ำซึมผ่านหรือซึมผ่านได้ยาก เรียกว่า “Impervious Soil”



รูปที่ 2.1 (ซ้าย) ดินหลวม น้ำไหลผ่านง่าย สัมประสิทธิ์ความซึมได้สูง
(ขวา) ดินแน่น น้ำไหลผ่านยาก สัมประสิทธิ์ความซึมได้ต่ำ

ในมวลดินที่อัดตัว ช่องว่างระหว่างเม็ดดินซึ่งมีน้ำอยู่ต่อเนื่องกัน การไหลซึมของน้ำผ่านมวลดิน เป็นแบบ Laminar Flow ผ่านช่องคดเคี้ยวระหว่างเม็ดดิน ในขณะเดียวกันแรงดันของน้ำ ก็จะเสียไปเพราะแรงเสียดทานของผิวช่องเม็ดดิน Darcy (ปี ค.ศ. 1856) นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสได้เสนอกฎแห่งการไหลซึมไว้ว่า ความเร็วของการไหลซึมของของเหลวผ่านตัวกลางพรุนจะเป็นปฏิภาคกับไฮดรอลิกส์เกรเดียน (Hydraulic Gradient) มวลดินเป็นวัสดุที่มีช่องว่างต่อเนื่องในระหว่างเม็ดดิน ซึ่งน้ำสามารถไหลซึมผ่านได้ โดยมวลดินที่น้ำไหลซึมผ่านได้ง่าย ได้แก่ ดินจำพวกกรวดทราย ส่วนมวลดินที่น้ำไหลซึมผ่านได้ยากได้แก่ดิน ที่มีดินเหนียวปนอยู่หรือดินเหนียวล้วน ถ้าน้ำไหลผ่านมวลดินได้ง่ายค่าสัมประสิทธิ์จะมียาก นั่นคือดินจะมีช่องว่างมาก หรือดินอยู่ในสภาพหลวมและถ้าค่าสัมประสิทธิ์มีค่าน้อยเท่าใดก็แสดงว่าดินนั้นมีความหนาแน่นมาก ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมได้สามารถวัดความหนาแน่นของดินได้อีกวิธีหนึ่ง

การทดสอบในห้องปฏิบัติการจะมีอยู่ 2 วิธี คือ การทดสอบแบบความดันน้ำคงที่ สำหรับทดสอบกับ ดินเม็ด หยาบ และการทดสอบแบบความดันน้ำเปลี่ยนแปลง สำหรับทดสอบกับดินเม็ดละเอียด ถ้าหากสภาพดินที่แตกต่างกันหลายชั้นก็สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ โดยการนำค่าดังกล่าวของแต่ละชั้นมาใช้ในการแทนค่าสมการซึ่งพิจารณาได้ 2 ทิศทางคือ ทิศทางตั้งฉากกับชั้นดินและทิศทางขนานกับชั้นดินนอกจากนี้แล้วยังสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ได้จากการทดสอบในสนามอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 กฎของดาร์ซี

ทำการทดลองในทรายโดยให้น้ำไหลผ่านทรายที่อิ่มตัวด้วยน้ำ และให้น้ำไหลด้วยความเร็วที่ช้ามากลักษณะการไหลเป็นแบบลามิน่า และสภาพการไหลอยู่ในลักษณะคงตัว ดาร์ซีได้เขียนเป็นสมการว่า

$$v = k i$$

เมื่อ v = ความชันทางชลศาสตร์

k = สัมประสิทธิ์ของการซึม

i = เป็นค่าสัดส่วนระหว่างผลต่างของเฮดทั้งหมดกับความยาวของเส้นน้ำไหลซึม

และปริมาณอัตราการไหล q หาได้จาก

$$q = v A$$

$$q = k i A$$

เมื่อ A = พื้นที่หน้าตัดของดินที่น้ำ ไหลผ่านในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของการไหลของน้ำ

2.1.2 กฎของการไหลต่อเนื่อง

จะพิจารณาถึงการไม่สูญหายของน้ำในมวลดินด้วยกฎนี้ทำให้เกิดสมการที่ครอบคลุมการไหลซึมผ่านน้ำ มวลดิน เมื่อพิจารณาว่าดินเป็นสารที่มีสมบัติทางด้านการซึมผ่านมวลดินเท่ากันทุกด้าน

สัมประสิทธิ์ของการซึมของดิน (ค่า k) ทั่วไปอยู่ระหว่าง 1 ถึง 10^{-9} ซม.ต่อวินาทีดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าทั่วไปของสัมประสิทธิ์การซึม (ซม.ต่อวินาที)

ชนิดของดิน	ค่า k (ซม.ต่อวินาที)
กรวด	$1-10^2$
กรวดเม็ดละเอียด, ทรายหยาบ	$1-10^{-3}$
ทรายละเอียดและซิลต์ ดีไม่แน่น	$10^{-3}-10^{-5}$
ซิลต์อัดแน่นและซิลท์ นดินเหนียว	$10^{-5}-10^{-6}$
ดินเหนียวปนซิลท์และดินเหนียว	$10^{-6}-10^{-9}$

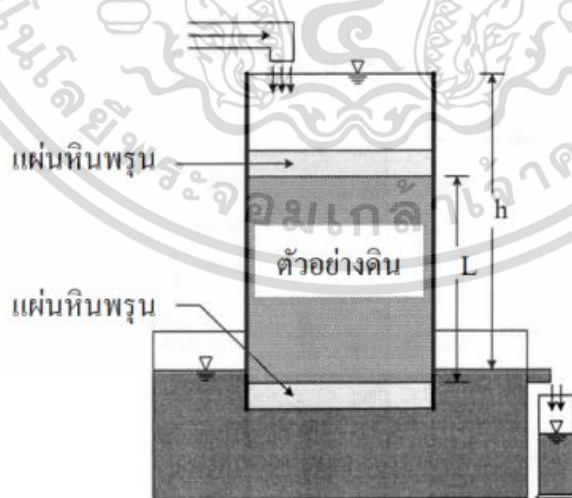
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์ของการซึมขึ้นอยู่กัส่วนประกอบของชนิดของเม็ดดินอย่างมาก การเก็บตัวอย่างดินมาทดสอบในห้องทดลอง มักให้ผลที่ไม่ดีเท่ากับการทดลองในสนาม เนื่องจากผลของการที่ตัวอย่างถูกรบกวน และการที่ส่วนประกอบของตัวอย่างดินแตกต่างออกไปจากดินในสนาม

ตัวประกอบที่มีผลกระทบต่อสัมประสิทธิ์ของการซึม ค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมนี้ขึ้นอยู่กับตัวประกอบหลายอย่างดังนี้

1. ความหนืดและความหนาแน่นของของเหลวที่ไหล
2. ขนาดและความต่อเนื่องของช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ซึ่งน้ำ จะต้องไหลผ่านสิ่งเหล่านี้
 - 1) ขนาดและรูปร่างเม็ดดิน เมื่อดินมีขนาดเม็ดละเอียดมากขึ้น ค่า k จะลดลง
 - 2) อัตราส่วนช่องว่างและความหนาแน่นของดิน
 - 3) การอิมตัวด้วยน้ำ
 - 4) โครงสร้างการเรียงตัวของเม็ดดิน
 - 5) เมื่อมีปริมาณของดินเม็ดละเอียดเพิ่มขึ้น ค่า k จะลดลง
3. การต่อเนื่องและการเป็นเนื้อเดียวกันของชนิดดินในธรรมชาติโดยถ้าชั้นดินมีดินชนิดอื่นปนแทรกอยู่ ดินที่แทรกนี้จะมีส่วนเข้าไปส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมของมวลดินทั้งหมด

2.1.3 การหาสัมประสิทธิ์ของน้ำ ในดินแบบความดันน้ำคงที่



รูปที่ 2.2 แสดงแบบความดันน้ำคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q = A k i$$

$$k = \frac{Q}{A i t} = \frac{Q L}{A t h}$$

- เมื่อ Q = ปริมาณน้ำที่ไหลซึมผ่านมวลดิน
 A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดิน
 t = เวลาของน้ำที่ไหลซึมผ่านดิน
 h = ระดับน้ำในช่วงความยาวการไหลซึม
 L = ความยาวของตัวอย่างดิน

2.2 Fiber-reinforcement

Fiber reinforcement จัดเป็นวัสดุ composite ประกอบด้วยการรวมวัสดุมากกว่า 2 ประเภทเข้าด้วยกัน โดยทั่วไปคอมโพสิตจะมีวัสดุที่เป็นเนื้อหลัก (matrix) และวัสดุเสริมแรง (reinforcement materials) ที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อหลักนั้น วัสดุที่เป็นเนื้อหลัก มีหน้าที่รองรับวัสดุเสริมแรง ในขณะที่วัสดุเสริมแรงจะช่วยเพิ่ม หรือปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุเนื้อหลัก ให้สูงขึ้น ซึ่งวัสดุเสริมแรงอาจมีลักษณะเป็นเส้น ก้อน อนุภาค หรือเกล็ดก็ได้ แทรกอยู่ในวัสดุเนื้อหลัก (base materials) อย่างโลหะ เซรามิกส์ หรือโพลิเมอร์ ผลของการรวมวัสดุต่างกัน 2 ประเภทเข้าด้วยกันทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรง ซึ่งในการทดลองของเราจะใช้วัสดุหลักเป็นดิน และวัสดุเป็นเศษพลาสติก

โดยการหากำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุ fiber-reinforcement สามารถอ้างอิงจากการทดลองกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินลูกรังผสมเศษขยะพลาสติก ทำให้ทราบว่าเมื่อนำพลาสติกมาเสริมแรงให้กับดินด้วยเปอร์เซ็นต์พลาสติกโดยน้ำหนักดินแห้งที่ต่างกัน นั้นสามารถเพิ่มกำลังรับแรงเฉือน ดังตารางเปรียบเทียบด้านล่าง โดยกำหนดให้ ความลึกและ Normal Stress มีขนาดเท่ากันจะได้ค่าดังนี้

ตาราง 2.2 เปรียบเทียบ Shear Stress ของดินลูกรังผสมเศษขยะพลาสติกที่ 0%, 0.2%, 0.4%, 1%, 2% โดยน้ำหนักดินแห้ง

% Plastic	Depth (m.)	Normal Stress (KPa.)	Shear Stress (KPa.)
0 %	5.00	71.78	43.72
0.2 %	5.00	71.78	44.19
0.4 %	5.00	71.78	55.56
1 %	5.00	71.78	62.34
2 %	5.00	71.78	57.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 คุณสมบัติเชิงกลของพลาสติก

พลาสติกที่นำมาทดสอบมาจากโรงงานอุตสาหกรรม มีด้วยกัน 2 ชนิด

2.3.1 Polypropylene (PP)

เป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกที่เบาที่สุด มีสมบัติเชิงกลดีมาก เหนียว ทนต่อแรงดึง แรงกระแทกและทรงตัวดี มีจุดหลอมตัวที่ 165 °C ใสและออกซิเจนซึมผ่านได้ต่ำ เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมาก มีการนำเอา PP ไปใช้งานในลักษณะเดียวกับ PE เมื่อต้องการให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น PP ได้ถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง ตัวอย่างเช่น ใช้ทำถาดร้อน พิล์มใส พิล์มห่อหุ้ม หรือบรรจุอาหารที่ไม่ต้องการให้ออกซิเจนซึมผ่าน พลาสติกหุ้มของบุหรี เชือก แห อวน ถังน้ำมัน ชิ้นส่วนรถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า เฟอร์นิเจอร์ ภาชนะเครื่องใช้ในครัวเรือน เป็นต้น

2.3.2 Polyethylene (PE)

เป็นเทอร์โมพลาสติก มีคุณสมบัติที่สำคัญคือ เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี , มีความเหนียว และทนทานต่อแรงดึงปานกลาง พวกที่มีความหนาแน่นต่ำจะใสมากแต่จะขุ่นเมื่อความหนาแน่นสูง ปกติจะไม่ละลายในตัวทำละลายใดๆ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 70 °C จะเริ่มละลาย PE ได้ถูกจำแนกเป็นหลายชนิด ตัวหลักๆ ที่ใช้กันมากคือ LDPE , LLDPE , MDPE , HDPE การใช้งานของ PE กว้างขวางมาก ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ เช่น ขวด, แผงบรรจุยา, และสายน้ำเกลือ, ชิ้นส่วนรถยนต์, เชือก, แห, อวน, ถังพลาสติก, ท่อ และรางน้ำ, เครื่องใช้ในครัวเรือน, ของเด็กเล่น, ฉนวนหุ้มสายไฟ, สายเคเบิล, ดอกไม้พลาสติก, เคลือบหลังพรม, ผ้าใบพลาสติก, แผ่นฟิล์มสำหรับการบรรจุหีบห่อ, แผ่นฟิล์มที่ใช้ในการเกษตร เป็นต้น

2.4 คุณสมบัติพื้นฐานของดิน

2.4.1 สมบัติการซึมผ่านน้ำ (Hydraulic Conductivity)

2.4.1.1 ความชื้นน้ำของดิน

ในมวลดินจะประกอบไปด้วยส่วนของเม็ดดิน ช่องว่างระหว่างเม็ดดินซึ่งเรียงตัวคดเคี้ยวไปมา ต่อเนื่องกัน การไหลของน้ำผ่านดินเกิดขึ้นได้เมื่อมีพลังงานต่างกันระหว่างจุดสองจุดในดินโดยไหลจากจุดที่มีพลังงานสูงกว่าไปยังจุดที่มีพลังงานต่ำน้ำจะไหลผ่านช่องว่างเหล่านี้ ดังนั้นหากช่องว่างระหว่างเม็ดดินมีขนาดเล็กน้ำก็จะไหลผ่านได้ยากกว่าดินที่มีช่องว่างขนาดใหญ่ ความสามารถของมวลดินที่ยอมให้น้ำไหลผ่านเรียกว่า “ความชื้นน้ำของดิน” (Hydraulic Conductivity) ซึ่งค่าที่จะบอกถึงความชื้นน้ำในดินได้เรียกว่า “สัมประสิทธิ์ความชื้นได้” หรือ “Coefficient of Permeability, k” นอกจากช่องว่างระหว่างเม็ดดินแล้วยังมีอิทธิพลอื่นๆ ที่มีผลต่อการไหลซึมผ่านของน้ำในดิน ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การกระจายตัวของเม็ดดิน (Particle Size Distribution)
2. รูปร่างและผิวของเม็ดดิน (Particle Shape and Texture)
3. องค์ประกอบแร่ธาตุในมวลดิน (Mineralogical Composition)
4. อัตราส่วนช่องว่างของดิน (Voids Ratio)
5. ระดับความอิ่มตัว (Degree of Saturation)
6. ลักษณะโครงสร้างของมวลดิน (Soil Fabric)
7. คุณสมบัติของของเหลวในช่องว่าง (Nature of Fluid)

2.4.1.2 แรงดึงดูดน้ำในดิน (Soil suction)

แรงดึงดูดน้ำในดิน คือแรงดูดยึดที่ดินมีกับน้ำที่อยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคดินซึ่งจะมีค่ามากขึ้นเมื่อความชื้นในดินลดลง และเมื่อช่องว่างระหว่างอนุภาคดินมีขนาดเล็กลง น้ำในช่องว่างดินที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดินจะอยู่ใต้อิทธิพลของแรงดึงดูดที่เรียกว่า แรงดึงดูดเมทริกหรือแรงคาพิลลารี (Matric or Capillary suction) และแรงดึงดูดออสโมติก (Osmotic suction) คือความสามารถในการดูดน้ำเข้าหาตัวเองของดิน ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของสารละลายเกลือของน้ำในดินด้วย โดยดินที่มีสารละลายเกลือปนอยู่ในน้ำมากความสามารถในการดูดน้ำเข้าหาตัวเองจะได้มากด้วย (Fredlund and Rahardjo, 1993) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ โดยที่ u_a คือแรงดันอากาศในช่องว่างดิน และ u_w คือ แรงดันน้ำในดิน

$$\Psi = (u_a - u_w) + \pi$$

แรงดึงดูดเมทริกหรือแรงคาพิลลารีสามารถหาได้ด้วยการใช้หม้อแรงดัน (Pressure plate) ตามมาตรฐาน ASTM D6836-02 ทดสอบหาค่าแรงคาพิลลารี เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและแรงดึงดูดเมทริกหรือแรงคาพิลลารี (Soil Water Characteristic Curve : SWCC)

2.4.1.3 กฎการไหลของดาร์ซี (Darcy's Law)

ในปี ค.ศ. 1856 Darcy ได้พบความสัมพันธ์ระหว่างการไหลของน้ำผ่านทรายว่า “อัตราการไหลจะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับความชันชลศาสตร์ (Hydraulic Gradient)” คือ

$$V \propto i$$

$$V = ki$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ v = อัตราการไหลของน้ำผ่านดิน

i = ความชันทางชลศาสตร์

k = สัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของดิน (Permeability of Soil)

$$q = vA$$

$$q = kiA$$

เมื่อ q = ปริมาณการไหลของน้ำผ่านดินต่อหนึ่งหน่วยเวลา

A = พื้นที่หน้าตัดของดินในทิศทางตั้งฉาก (Cross-Sectional Area)

สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินเป็นคุณสมบัติเฉพาะสำหรับดินแต่ละชนิด จึงต้องมีการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของดิน สำหรับดินนั้นๆ

ตาราง 2.3 ค่าโดยทั่วไปของสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินชนิดต่างๆ

ชนิดของดิน	สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน	
	cm/sec	ft/min
ทรายสะอาด (Clean Sand)	1-100	2-200
ทรายเม็ดหยาบ (Coarse Sand)	1-0.01	2-0.02
ทรายเม็ดละเอียด (Fine Sand)	0.01-0.001	0.02-0.002
ดินตะกอน (Silt)	0.001-0.00001	0.002-0.00002
ดินเหนียว (Clay)	<0.000001	<0.000002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 ลักษณะดินที่นำมาทดลอง

ดินที่นำมาทดลองเป็นดินลูกรัง คือ ดินที่พบชั้นลูกรัง ชั้นกรวด ชั้นเศษหิน หรือ พบเศษหินกรวด หินมนเล็ก มากกว่า 35 % ของเนื้อดินโดยปริมาตร เนื้อดินเป็นดินร่วนปนทราย, บางพื้นที่เป็นดินเหนียวปน หินกรวด หินมนเล็ก, บางพื้นที่เป็นดินที่เกิดจากการสลายตัวของหิน แล้วกลายสภาพมาเป็นลูกรัง เป็นดินที่มีความหนาแน่นสูง แต่ ศักยภาพในการเกษตรต่ำมาก ลักษณะสี แดง เหลือง ตามแต่พื้นที่ ราคาถูก เหมาะสำหรับการใช้งานทำถนน หรือลานจอดรถ

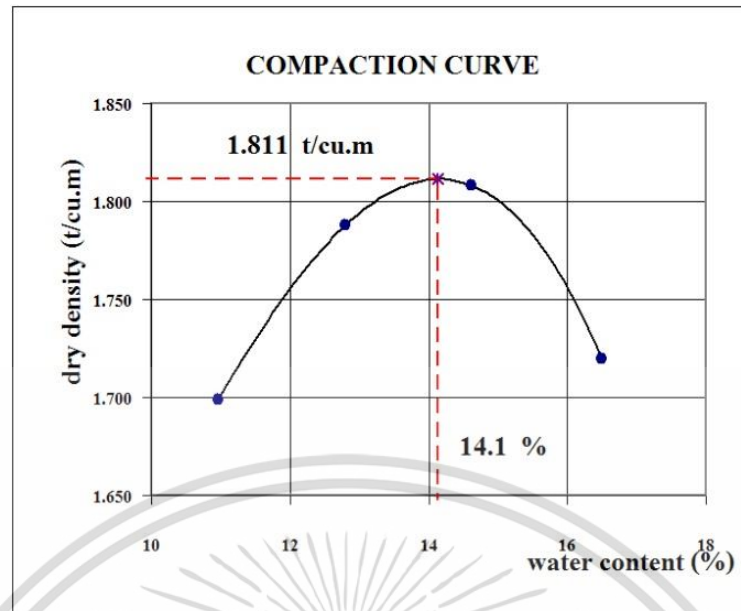


รูปที่ 2.3 ดินลูกรัง

2.4.3 การทดสอบการบดอัดดิน (Compaction)

การบดอัดดินคือ การปรับปรุงคุณภาพดินโดยการประยุกต์ใช้พลังงานเชิงกล ซึ่งเป็นการปรับปรุงคุณภาพดินปริมาณความชื้นที่มีความเหมาะสมที่สุด สำหรับดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่นจะปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการบดอัดโดยอาศัยการสั่นสะเทือนและสำหรับดินเม็ดละเอียด สามารถทดสอบการบดอัดดินได้ในห้องปฏิบัติการ โดยวิธีของ Proctor การทดสอบการบดอัดดิน (Compaction Test) จะต้องทดลองบดอัดตัวอย่างดินด้วยวิธีการตามมาตรฐาน (เช่น ASTM D698 ASTM D1557 เป็นต้น) ที่ปริมาณความชื้นต่าง ๆ กันประมาณ 4-5 ค่า คำนวณความชื้นและความหนาแน่นแห้งของดินในการบดอัดตัวอย่างดินแต่ละครั้ง แล้วพล็อตเส้นโค้งเรียงผ่านจุดที่ได้จากการทดลอง เพื่อหาความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) และความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Water Content) ดังรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

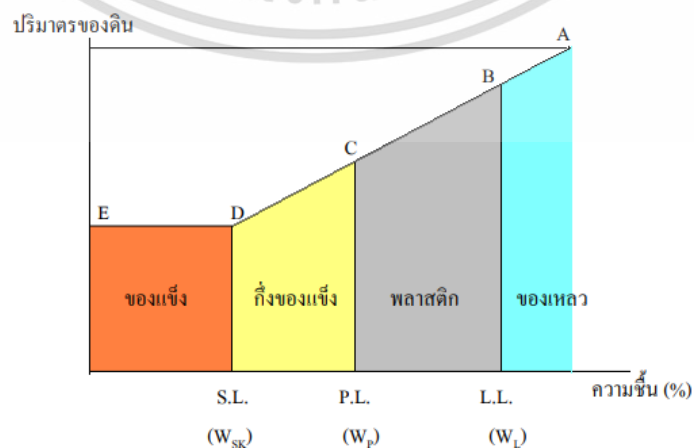


รูปที่ 2.4 เส้นโค้งการบดอัด (Compaction curve)

สามารถใช้โปรแกรม Microsoft Excel ในการพล็อตเส้นโค้งการบดอัด (Compaction curve) แล้วอ่านค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นที่เหมาะสมได้จากกราฟโดยตรงหรือ พล็อตเส้นโค้งการบดอัดโดยใช้เส้นแนวโน้ม (trend line) จากนั้นคำนวณความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นที่เหมาะสมจากสมการของเส้นแนวโน้มที่ได้จากโปรแกรม Microsoft Excel

2.4.4 Percent Plastic Limit (%PL), Percent Liquid Limit (%LL)

ค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit ,L.L.) และขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit ,P.L.) จะใช้พิจารณาในการจำแนกดิน สภาพกำลังของดิน ประมาณการทรุดตัวของดินแบบอัดตัวคายน้ำ และประมาณความหนาแน่นสูงสุดจากการบดอัดดินได้ ส่วนค่าขีดจำกัดการหดตัวจะใช้พิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินจากปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในดินที่มีการเปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 2.5 แสดงสถานภาพต่างๆ ของตัวอย่างมวลดินเหนียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Liquid Limit (WL หรือ L.L.) คือ ความชื้นในมวลดินขณะที่มวลดินเริ่มเปลี่ยนสภาพจากของเหลวไปเป็นสารหนืดตัวในสถานภาพพลาสติกที่จุด B

Plastic Limit (WP หรือ P.L.) คือ ความชื้นในมวลดินขณะที่เปลี่ยนสถานภาพจากพลาสติกเป็นกึ่งของแข็งที่จุด C

2.5 การทดสอบการไหลซึมด้วย Instantaneous Profile Method

2.5.1 Instantaneous Profile Method

Instantaneous Profile Method ได้ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในการหาความนำชลศาสตร์ (Hydraulic Conductivity) สำหรับดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยวิธีนี้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของ แรงดันของน้ำในดิน (Suction) และ ปริมาณความชื้นในดิน (Water Content) ในกระบอกดิน ซึ่งวัดเป็นความสัมพันธ์กับเวลาโดยความสัมพันธ์นี้พิจารณาทั้งความชื้นเพิ่ม และความชื้นลด (Dry and Wet Process)

เส้นโค้งการอุ้มน้ำ (Soil-Water Retention Curve) คือความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันของน้ำในดิน และปริมาณความชื้นในดิน ใช้ศึกษาคุณสมบัติของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยเส้นโค้งนี้จะมีพฤติกรรมขึ้นอยู่กับประเภทของดิน ซึ่งสามารถใช้คาดการณ์การกักเก็บน้ำในดิน ปริมาณน้ำสำหรับพืช และ เสถียรภาพของดินได้

2.5.2 เครื่องมือวัดความชื้นในดิน (Soil Moisture Sensor)

เครื่องมือวัดความชื้นในดินสามารถอ่านปริมาณความชื้นที่อยู่โดยรอบดินได้ สามารถวัดได้โดยใช้ก้านทั้งสองหยั่งลงไปดิน โดยที่จะสามารถอ่านค่าความต้านทานเพื่อที่นำไปหาความชื้นในดินได้ โดยปริมาณน้ำที่มากนั้นจะทำให้ดินสามารถนำไฟฟ้าได้ดี (ความต้านทานน้อย) ขณะที่ถ้าดินนั้นมีปริมาณน้ำน้อยจะทำให้ดินสามารถนำไฟฟ้าได้ไม่ดี (ความต้านทานสูง)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่วัดได้กับปริมาณความชื้นในดินจำเป็นจะต้องทำการปรับแก้ เนื่องจากมีตัวแปรหลายอย่างส่งผลต่อค่าเช่น ชนิดของดิน อุณหภูมิ และคุณสมบัติการนำไฟฟ้า

2.5.3 เครื่องมือวัดความดันของน้ำในดิน (Suction Sensor)

เครื่องมือวัดความดันของน้ำในดินโดยใช้แผ่นเซรามิกเพื่อวัดความดันของน้ำในดิน โดยแผ่นเซรามิกเชื่อมต่อกับเซนเซอร์กับดินที่ต้องการวัดความดันของน้ำในดิน โดยเซนเซอร์จะทำการวัดปริมาณน้ำบนแผ่นเซรามิกและใช้คุณสมบัติการเก็บน้ำของแผ่นเซรามิกเพื่อหาความดันน้ำในดิน ซึ่งสามารถวัดค่าได้ถึง 100 kPa ดังนั้นจึงสามารถช่วยอำนวยความสะดวกในการวัดที่ให้ความแม่นยำในการวัดและสามารถช่วยประหยัดเวลาในการทดสอบ



รูปที่ 2.6 Soil Moisture Sensor



รูปที่ 2.7 Suction Sensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 SIAMAK SAGHARI, GHADER BAGHERI and HAMID SHABANZADEH (2015)

Evaluation of Permeability Characteristics of a Polymer Fibers-reinforced Soil through Laboratory Tests

SIAMAK SAGHARI, GHADER BAGHERI and HAMID SHABANZADEH (2015) ได้ทดลองผสมดินทรายกับพลาสติกแบบสุ่มโดยแบ่งขนาดของพลาสติกเป็น 3 ขนาด (1 ซม., 3 ซม. และ 5 ซม.) และเปอร์เซ็นต์พลาสติกโดยเทียบมวลต่อมวล 5 เปอร์เซ็นต์ (0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8% และ 1.0%) และวัดค่า Permeability (K) ของดินโดยวิธี Falling-Head method และคำนวณได้จากสมการ

$$k = 2.30 \frac{al}{At} \log \frac{h_0}{h_1}$$

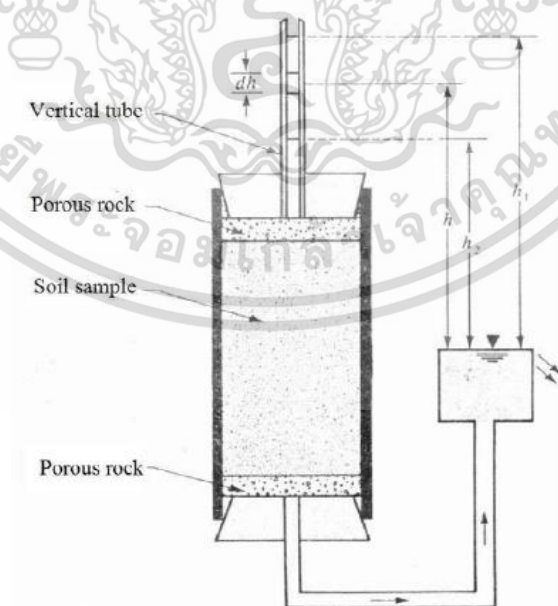
เมื่อ h_0 และ h_1 คือ ความสูงของระดับน้ำในท่อ

A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ

a คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง

l คือ ความสูงของตัวอย่าง

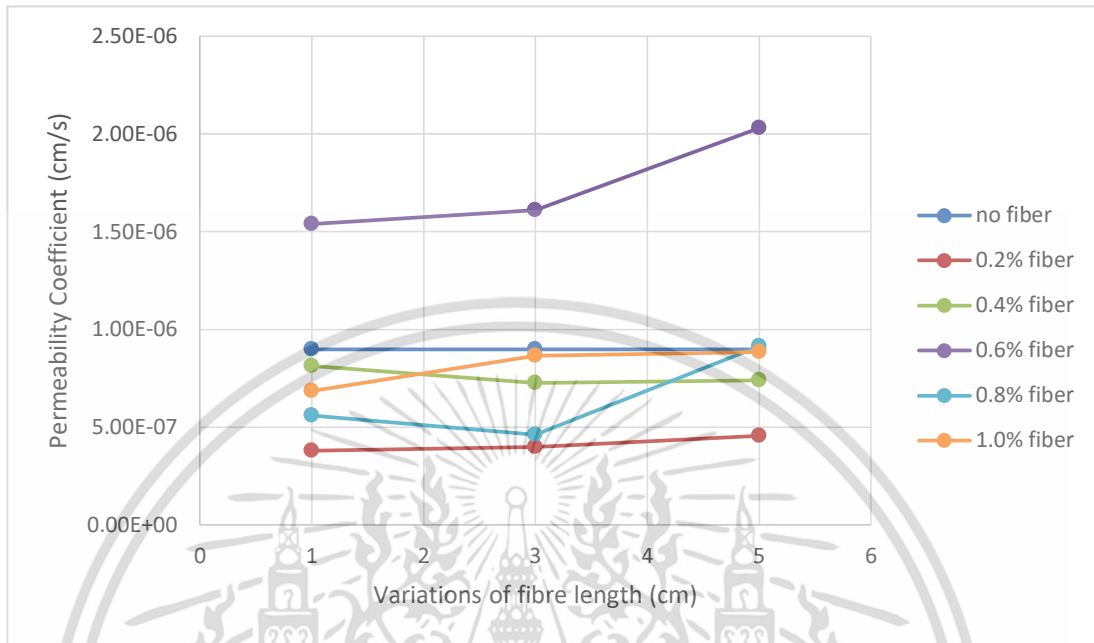
t คือ เวลาที่น้ำไหลผ่านตัวอย่าง



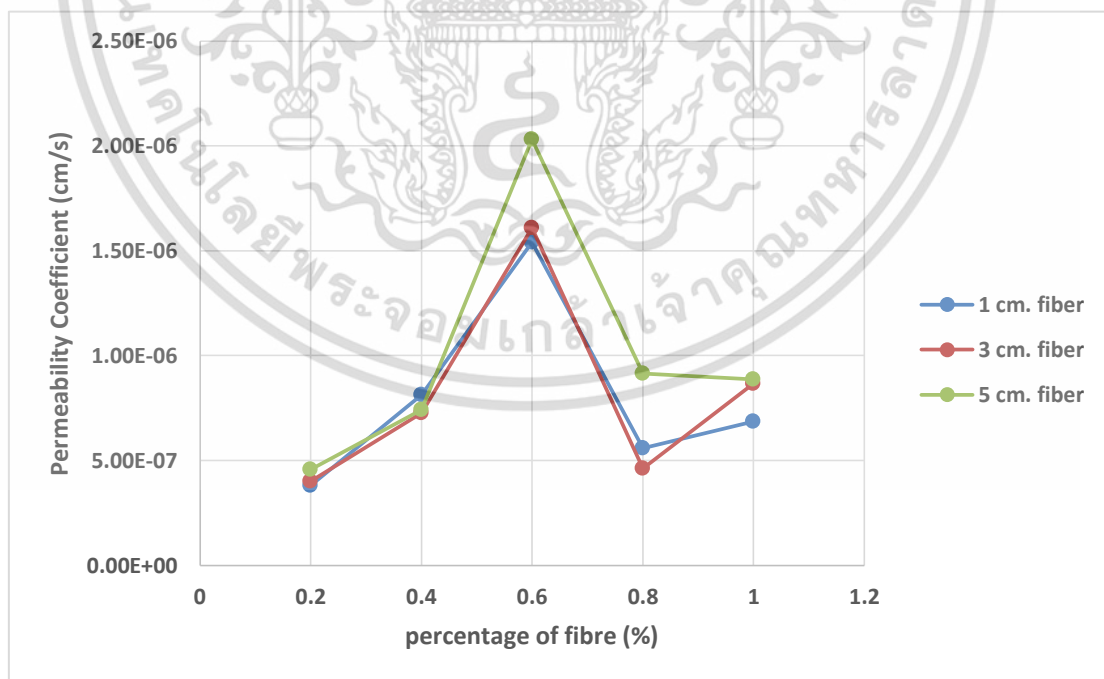
รูปที่ 2.8 แบบจำลองอุปกรณ์ทดสอบด้วยวิธี Falling - Head

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากทำการทดลอง จึงทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Permeability Coefficient กับ ความยาวของเศษพลาสติกและ Permeability Coefficient กับเปอร์เซ็นต์ของพลาสติกในดิน



รูปที่ 2.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Permeability Coefficient กับ Length of Fibers



รูปที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Permeability Coefficient กับ Length of Fibers

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 คุณสมบัติของดินตัวอย่าง

ในการศึกษาแบบจำลอง จำเป็นต้องหาคุณสมบัติของดินที่ใช้ในแบบจำลอง ซึ่งได้แก่ การหาขนาดของเม็ดดิน (Grain Size Analysis), การบดอัดดิน (Compaction), การซึมผ่านของน้ำในดิน (Permeability Test), การหาค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit, L.L.), ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit, P.L.) และ การหาขนาดของพลาสติก เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ผลการทดลองจากแบบจำลอง โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1.1 การหาขนาดของเม็ดดิน (Grain Size Analysis)

ตามมาตรฐานอ้างอิง: ASTM D-422

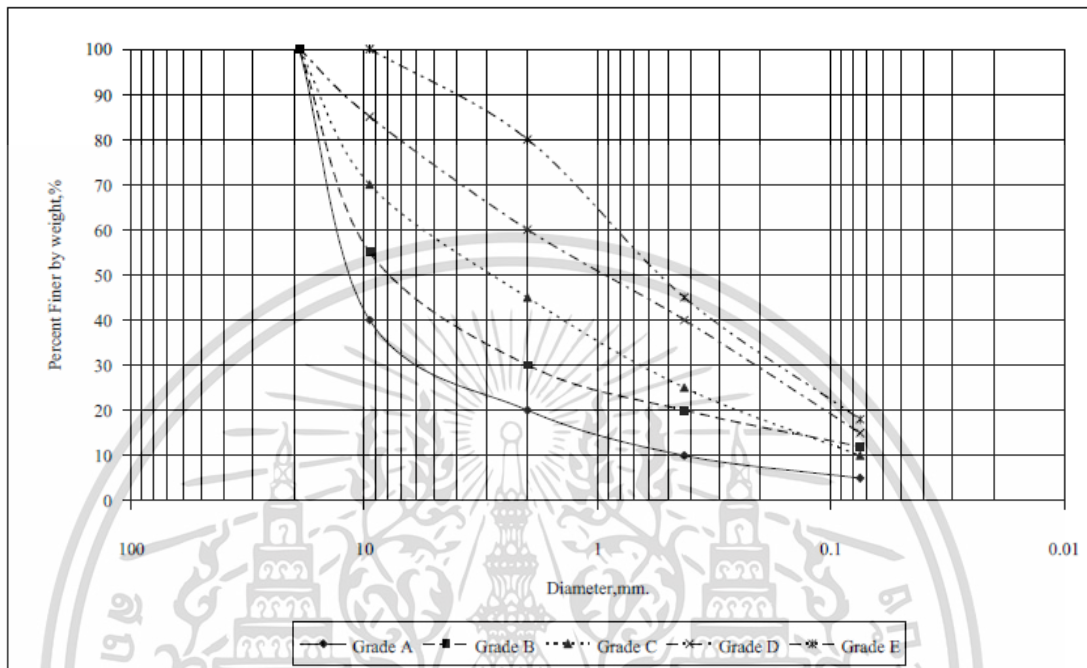
จากผลการทดลองพบว่าดินลูกรังมีคุณสมบัติ SC , A-2-6

ตาราง 3.1 ข้อมูลขนาดคละและชนิดของเม็ดดิน

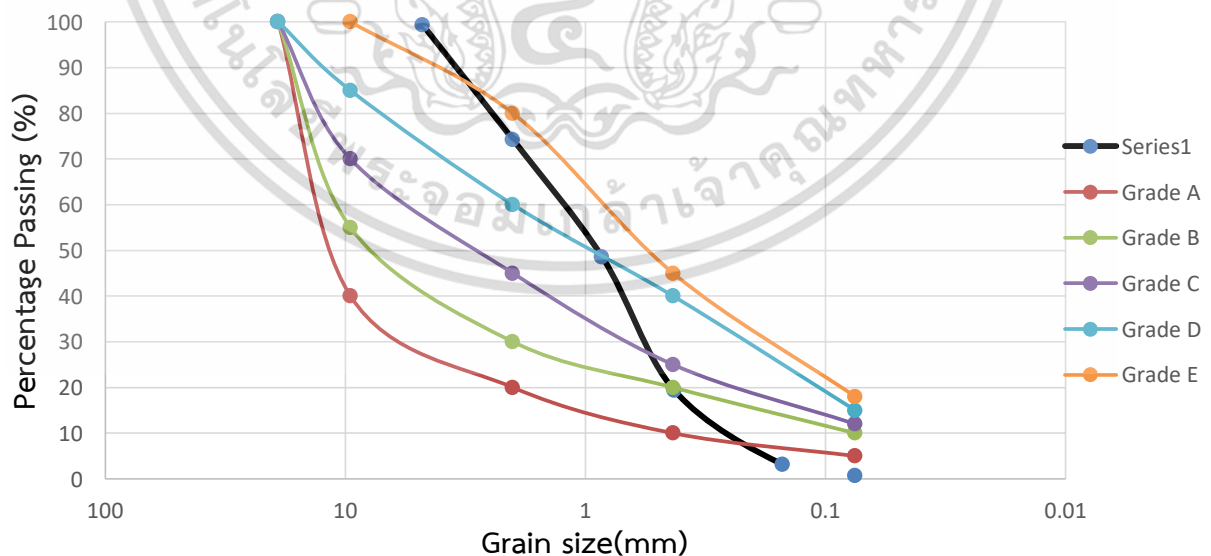
Sieves No.	Sieves Opening (mm.)	Weight of Sieve (g)	Weight of Sieve + Soil (g)	Weight of Soil Retained (g)	Cumulative Retained (g)	Cumulative Retained (%)	Percent Finer (%)
4	4.75	514	528	14	0.014	0.70	99.30
10	2.00	667	1168	501	0.515	25.76	74.24
20	0.85	397	910	513	1.028	51.43	48.57
40	0.425	376	960	584	1.612	80.64	19.36
100	0.15	320	644	324	1.936	96.85	3.15
200	0.075	325	374	49	1.985	99.30	0.70
Pan	0.00	318	332	14	1.999	100	0.00
Sum.		2917	4916	1999			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยจะใช้ตัวอย่างดินลูกรังจากจังหวัดพิษณุโลก โดยจะใช้เกณฑ์ ตามมาตรฐานชั้นรองพื้นทางของวัสดุมวลรวมของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย ซึ่งประกอบด้วย Grade A, B, C, D และ E ดังรูปที่ 3.1 ผลการทดลองพบว่าดินที่เรานำมาทดสอบเป็นดิน Grade E



รูปที่ 3.1 กราฟแสดงมาตรฐานชั้นรองพื้นทางของวัสดุมวลรวมของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย



รูปที่ 3.2 กราฟแสดง Gradation Curve ซึ่งประกอบด้วย Grade A, B, C, D และ E

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การหาค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit, L.L.) (มาตรฐาน ASTM D 4318-93)

ขีดจำกัดเหลว หมายถึง ปริมาณความชื้นที่น้อยที่สุดในดินที่ทำให้ดินสามารถไหลตัวได้ด้วยน้ำหนักของตัวเอง เป็นขีดจำกัดที่เปลี่ยนจากของเหลวเป็นพลาสติก

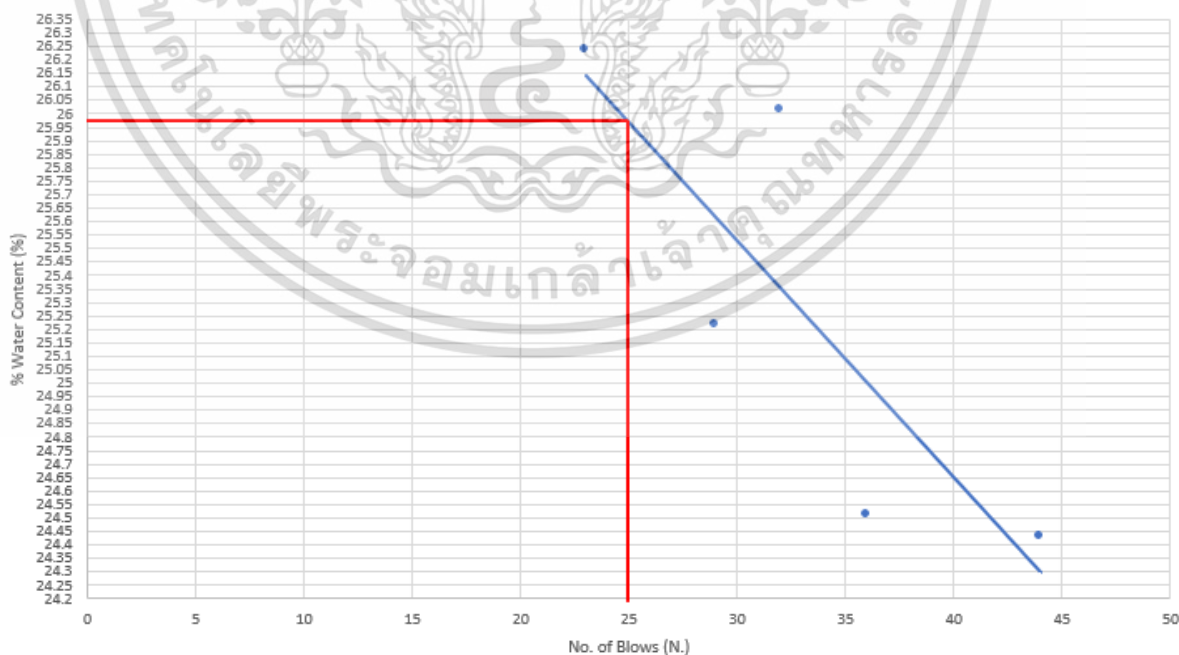
ตาราง 3.2 ข้อมูลการทดสอบหาค่าขีดจำกัดเหลว

Determination no	1	2	3	4	5
No of blow (n.)	44	36	32	29	23
Wet soil+can (g.)	34.9	30.97	32.94	30.83	31.74
Dry soil+can (g.)	31.02	27.45	29.23	27.32	28.3
Wt. of can (g.)	15.14	13.09	14.97	13.4	15.19
Wt. of water (g)	3.88	3.52	3.71	3.51	3.44
Wt. of dry soil (g.)	15.88	14.36	14.26	13.92	13.11
% water content (%)	24.43325	24.51253	26.01683	25.21552	26.23951

LL. = 25.97 %

3.1.3 ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit, P.L.) (มาตรฐาน: ASTM D 4318-93)

ขีดจำกัดพลาสติก หมายถึง ปริมาณความชื้นที่น้อยที่สุดในดินที่ทำให้ดินมีสภาพเหนียวเหนียว



รูปที่ 3.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นในดินกับจำนวนครั้งที่เคาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ตารางผลการทดสอบหาค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำในดิน

Plastic limit test						
ตัวอย่างหมายเลข		1	2	3	4	5
น้ำหนักกระป๋อง+น้ำหนักดินขึ้น	g	28.98	30.66	29.76	28.43	29.89
น้ำหนักกระป๋อง+น้ำหนักดินแห้ง	g	26.93	28.44	27.85	26.47	28.07
น้ำหนักกระป๋อง	g	13.47	14.18	14.58	13.22	14.07
น้ำหนักของน้ำ	g	2.05	2.22	1.91	1.96	1.82
น้ำหนักของดินแห้ง	g	13.46	14.26	13.27	13.25	14
ปริมาณน้ำในดิน	%	15.23	15.57	14.39	14.79	13.00
ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำในดิน	%	14.60				

PL. = 14.60%

PI. = 11.37%

3.1.4 การบดอัดดินและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและความหนาแน่น (Compaction and Moisture-Density Relation)

(มาตรฐาน: ASTM D 698-78 และ ASTM D 1557-78)

งานส่วนใหญ่ทางด้านวิศวกรรมโยธา เช่น งานเขื่อน งานถนน งานสนามบิน จะใช้ดินเป็น วัสดุถม (Fill Material) ทั้งสิ้น ส่วนใหญ่จะทำการบดอัดดินเพื่อให้ดินแน่นขึ้น โดยมีจุดประสงค์หลัก 3 ประการ คือ

1. ช่วยลดการทรุดตัวของชั้นดินในระยะยาว (Decrease future settlement)
2. เพิ่มความสามารถทางด้านกำลังของดิน (Increase shear strength) ทำให้ดินรับน้ำหนัก

บรรทุก ได้มากขึ้น

3. ลดการซึมน้ำของดิน (Decrease permeability) การบดอัดดินจะใช้เครื่องจักร ขนาดใหญ่ จำพวกรถบด ส่วนการควบคุมคุณภาพการบดอัดดินในสนามถือว่าเป็นสิ่งสำคัญ ดังนั้นจึงมี การทดลอง การบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำไปใช้ในการควบคุมและเปรียบเทียบกับการบดอัด ดินในสนาม การทดลอง การบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ มีด้วยกัน 2 วิธี คือ Standard Proctor Test และ Modified Proctor test ซึ่งทั้งสองวิธีแตกต่างกันที่พลังงานที่ใช้ในการบดอัด วิธี Modified Proctor test จะใช้พลังงานในการบดอัดดินที่สูงกว่า เนื่องจากเป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นมาจากวิธี Standard Proctor Test เพื่อตอบสนองความต้องการในการพัฒนาประเทศ ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ เลือกใช้การทดสอบแบบ Modified Proctor test เพื่อหาความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) ของดินตัวอย่าง ที่ใช้ในแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

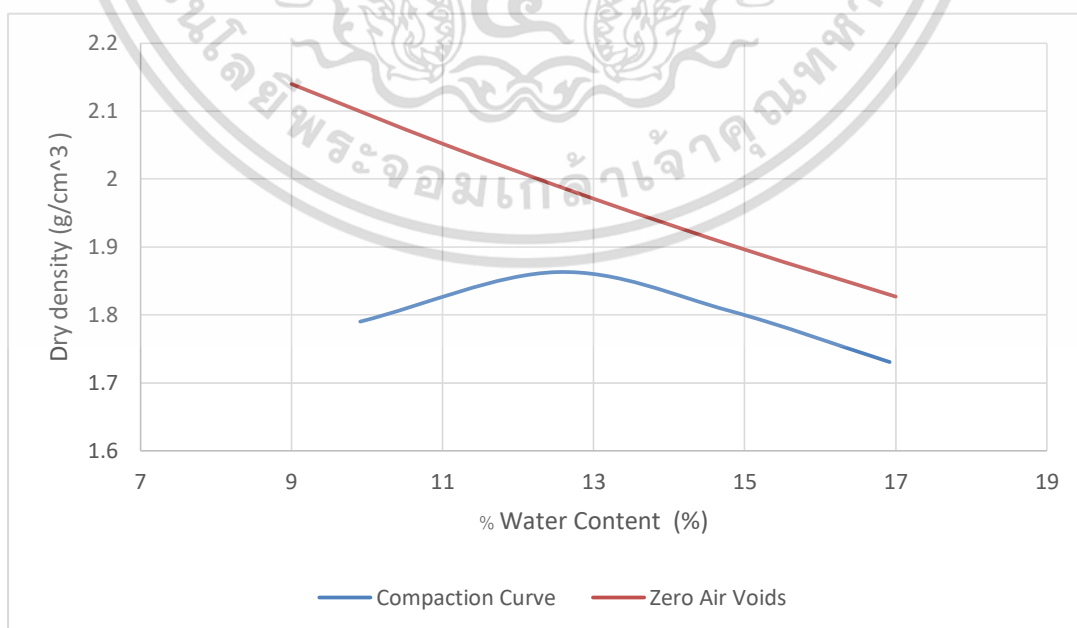
จากผลการทดลองพบว่าค่าความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) เท่ากับ 12.8 เปอร์เซ็นต์

ตาราง 3.4 Density Determination

Trail No.	1	2	3	4
Wt. of soil +mold (g)	9889	10158	10116	10009
Wt. of mold (g)	5668	5661	5668	5668
Wt. of soil in mold (g)	4221	4497	4448	4341
Wet density (g/cm^3)	1.968	2.096	2.073	2.023
Dry density (g/cm^3)	1.790	1.863	1.806	1.731

ตาราง 3.5 Water Content

Water Content				
Wet soil+container (g)	250.82	176.3	183.4	203.1
Dry soil+container (g)	229.95	158.37	161.54	176.03
Wt. of container (g)	19.35	15.13	13.77	16.04
Wt. of water (g)	20.87	17.93	21.86	27.07
Wt. of dry soil (g)	210.6	143.24	147.769	159.99
% Water Content (%)	9.91	12.52	14.79	16.92

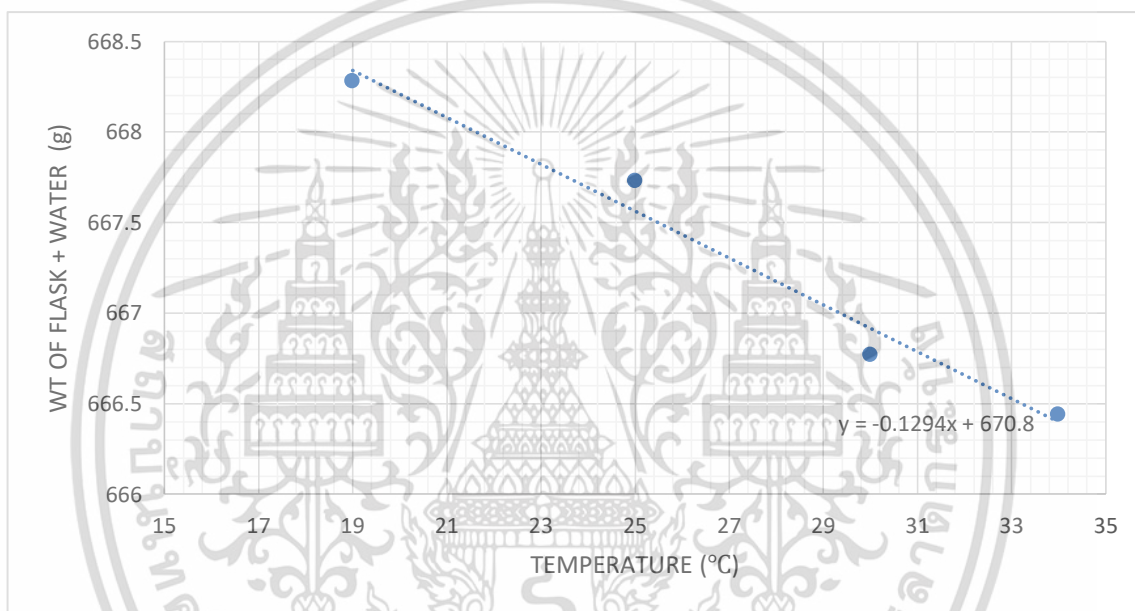


รูปที่ 3.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง (g/cm^3) กับปริมาณความชื้น (%) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific Gravity of Soil) (มาตรฐาน: ASTM D 854)

ตารางที่ 3.6 ข้อมูล Calibration of Pycnometer

No.	Flask + water (g)	TEMPERATURE (°C)
1	666.44	34
2	666.77	30
3	667.73	25
4	668.28	19



รูปที่ 3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิ (°C) กับ น้ำหนักรวมระหว่างแก้วกับน้ำ (g)

ตารางที่ 3.7 ข้อมูลความถ่วงจำเพาะของทราย

Sample No.	1	2	3	4
1. TEMPERATURE (°C)	25	25	24	23
2. FLASK + WATER (g)	667.56	665.85	661.18	666.41
3. FLASK + WATER + SOIL (g)	698.34	697.25	692.24	697.72
4. DRY SOIL (g)	50	50	50	50
5. GT	0.9971	0.9971	0.9973	0.9976
6. G.S.	2.593	2.681	2.632	2.669
7. AVERAGE G.S.	2.64			

ดังนั้น จากการทดลองพบว่า ค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน มีค่าเท่ากับ 2.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบหาขนาดของพลาสติก

1. ทำการเลือกชิ้นพลาสติกตัวอย่างที่จะนำมาวัดขนาด(ตารางเซนติเมตร) เป็นจำนวน 300 ชิ้น



รูปที่ 3.6 ชิ้นพลาสติกตัวอย่างที่จะนำมาวัดขนาด

2. ทำการวัดด้านกว้าง(เซนติเมตร), ยาว(เซนติเมตร) ทุกชิ้น



รูปที่ 3.7 การวัดด้านกว้าง(เซนติเมตร), ยาว(เซนติเมตร)

3. ทำการเฉลี่ยด้านกว้าง(เซนติเมตร), ยาว(เซนติเมตร)

อุปกรณ์

1. ไม้บรรทัดความละเอียด 1 มิลลิเมตร
2. ถาดแยกชิ้นพลาสติกที่วัดแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณผลการทดสอบ

1. ขนาดของชิ้นพลาสติก = กว้าง (cm) × ยาว (cm) cm²
2. ขนาดของชิ้นพลาสติกโดยเฉลี่ย จากชิ้นพลาสติก 300 ชิ้น

$$= \sum_0^{300} (\text{กว้าง (cm)} \times \text{ยาว (cm)}) \quad \text{cm}^2$$

3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง Soil-Column

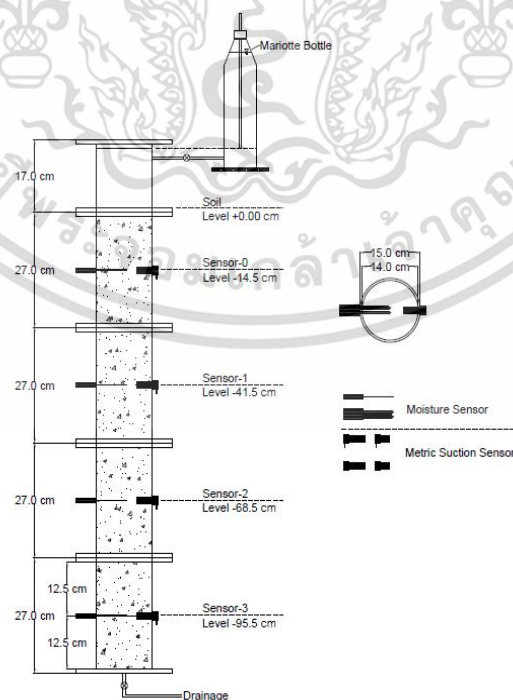
ก) ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดิน

1. นำตัวอย่างดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และค้ำบนตะแกรงเบอร์ 200 ไปบอบอย่างน้อย 12 ชั่วโมง
2. ทำการบดอัดดินลงกระบอก Soil-Column โดยบดอัดที่ความชื้น 12.5% โดยมวล และที่ Maximum Dry Density 80% Compaction (1.49 g/cm³) ซึ่งแบ่งบดอัดชั้นละ 5 ซม. โดยเตรียมตัวอย่างดินตามกรณีศึกษาทั้ง 4 กรณี

(2.1) การบดอัดดินเพียงอย่างเดียว

(2.2) การบดอัดดินที่ผสมพลาสติก 0.4% โดยมวล

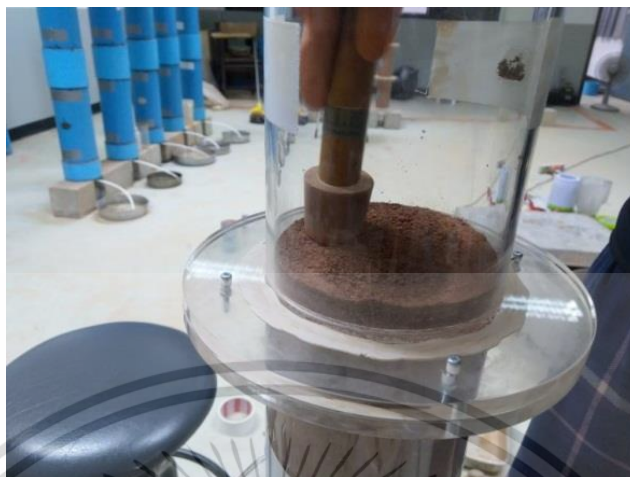
(2.3) การบดอัดดินที่ผสมพลาสติก 1.0% โดยมวล



รูปที่ 3.8 Acrylic Column

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. วัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง และความสูงของตัวอย่างดิน เพื่อหาพื้นที่หน้าตัด และปริมาตรจริง



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการบดอัดดิน

ข) ขั้นตอนการปล่อยให้ดินจัดเรียงตัวตามธรรมชาติ

1. นำตัวอย่างดินที่ได้จากขั้นตอน ก) เติมน้ำและปล่อยให้ น้ำไหลผ่าน Soil-Column
2. หยุดเติมน้ำ และปิดกระบอกไม้ให้น้ำไหลผ่าน เมื่อดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

3.2.2 Instantaneous Profile Method (Dry Process)

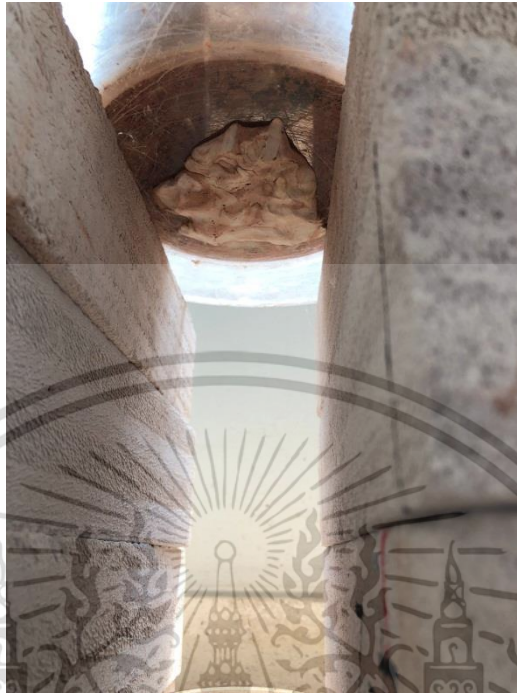
1. ทำการติดตั้ง Moisture Sensor และ Suction Sensor ตามตำแหน่งที่กำหนดไว้



รูปที่ 3.10 การติดตั้ง Moisture Sensor และ Suction Sensor ตามตำแหน่งที่กำหนดไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ท่านไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ปิดกระบอก Soil-Column เพื่อไม่ให้น้ำไหลออกทางก้นกระบอก



รูปที่ 3.11 ปิดกระบอก Soil-Column เพื่อไม่ให้น้ำไหลออกทางก้นกระบอก

3. ทำการวัด Moisture Sensor และ Suction Sensor เป็นเวลา 15 นาทีเป็นอย่างน้อย พร้อมจดบันทึกปริมาณความชื้นในอากาศ และสภาพอากาศ



รูปที่ 3.12 การวัด Moisture Sensor, Suction Sensor และปริมาณความชื้นในอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ทำการวัดค่าจันค่าจาก Suction Sensor เป็น -70kPa (แรงดูด)
5. ทำการทดสอบเช่นเดียวกับที่กล่าวมากับตัวอย่างดินทั้ง 4 ตัวอย่าง
6. เมื่อทำการทดสอบ Dry Process เสร็จสิ้น นำตัวอย่างดินเดิมไปทดสอบ Wet Process
7. นำค่าจาก Moisture Sensor และ Suction Sensor มาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับเวลา

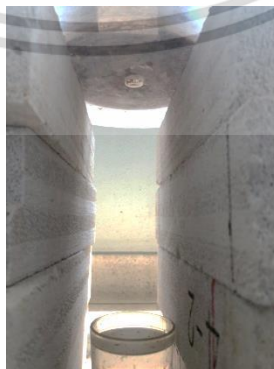
3.2.3 Instantaneous Profile Method (Wet Process)

1. นำตัวอย่างเดียวกับ Dry Process มาทดลองโดยติดตั้ง “Mariotte Bottle” เพิ่มเติมเพื่อช่วยควบคุมระดับน้ำใน Soil-Column ให้คงที่



รูปที่ 3.13 การติดตั้งติดตั้ง Mariotte Bottle เพื่อทำ Wet Process

2. เปิดกระบอก Soil-Column เพื่อยอมให้น้ำไหลผ่านกระบอกได้



รูปที่ 3.14 เปิดกระบอก Soil-Column

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เติมน้ำในกระบอก Soil-Column ผ่านทาง Mariotte Bottle เพื่อให้ระดับน้ำในกระบอกคงที่
4. ทำการวัด Moisture Sensor และ Suction Sensor เป็นเวลา 15 นาทีเป็นอย่างน้อย พร้อมจดบันทึกปริมาณความชื้นในอากาศ และสภาพอากาศ
5. ทำการทดสอบเช่นเดียวกับที่กล่าวมากับตัวอย่างดินทั้ง 4 ตัวอย่าง
6. นำค่าจาก Moisture Sensor และ Suction Sensor มาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับเวลา



รูปที่ 3.15 ขั้นตอนปล่อยให้ดินจัดเรียงตัวโดยธรรมชาติ



รูปที่ 3.16 Instantaneous Profile Method (Wet Process)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการศึกษา

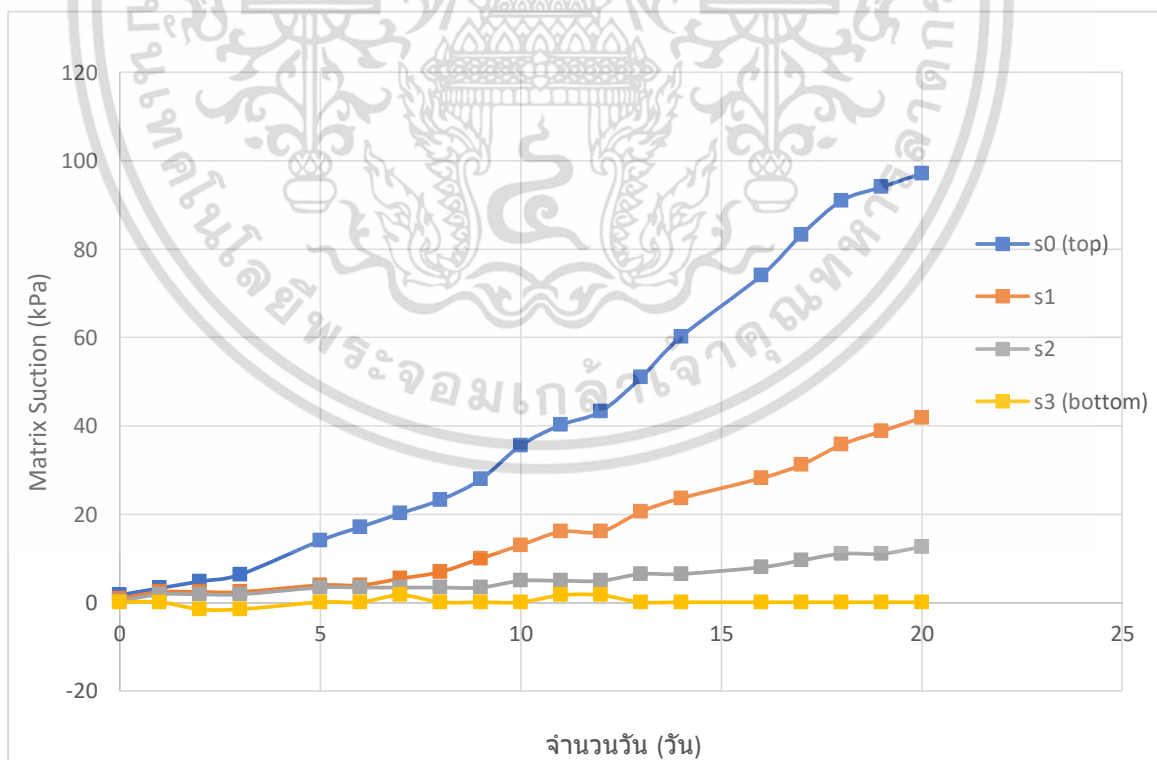
4.1 บทนำ

ในการศึกษาครั้งนี้ เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงอุทกวิทยาของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเศษพลาสติกที่ใช้งานแล้ว เพื่อใช้ในการพิจารณาในการเลือกปริมาณพลาสติกที่เหมาะสมซึ่งจะทำให้ลดอัตราการไหลของน้ำผ่านดินที่จะส่งผลให้ดินทรุดตัวได้ โดยทำการเปรียบเทียบการไหลผ่านของน้ำในดิน โดยวิธี “Instantaneous Profile Method” ที่เป็นการจำลองสภาพของดินตามธรรมชาติระหว่างดินบดอัด กับดินที่บดอัดผสมกับพลาสติก ปริมาณ 0.4%, 1% โดยมวล

4.2 ผลการศึกษาจากแบบจำลอง

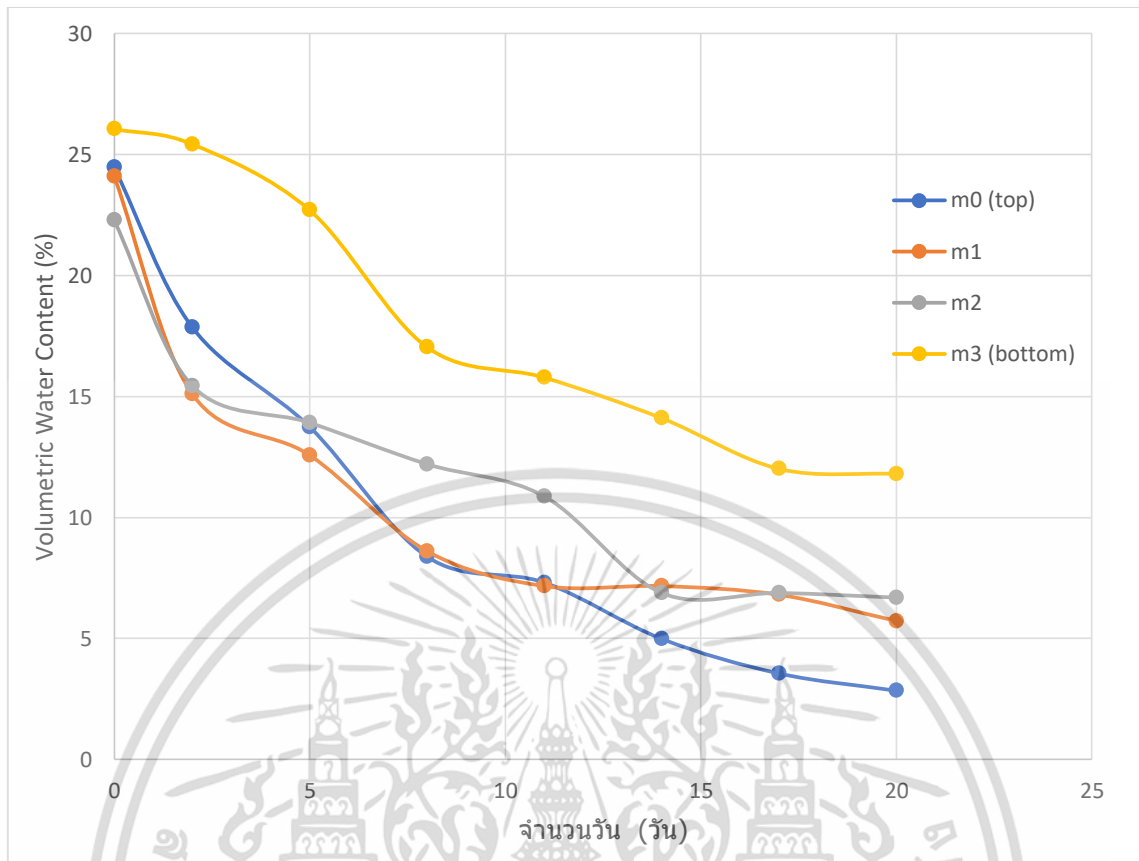
จากการทดลองจะแสดงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงอุทกวิทยา ของดินที่บดอัดที่ 80% ของ Maximum Dry Density ซึ่งบดอัดผสมกับเศษพลาสติกที่ใช้งานแล้ว ด้วยปริมาณ 0.4% และ 1.0% โดยมวลแห่งของดิน

4.2.1 Instantaneous Profile Method

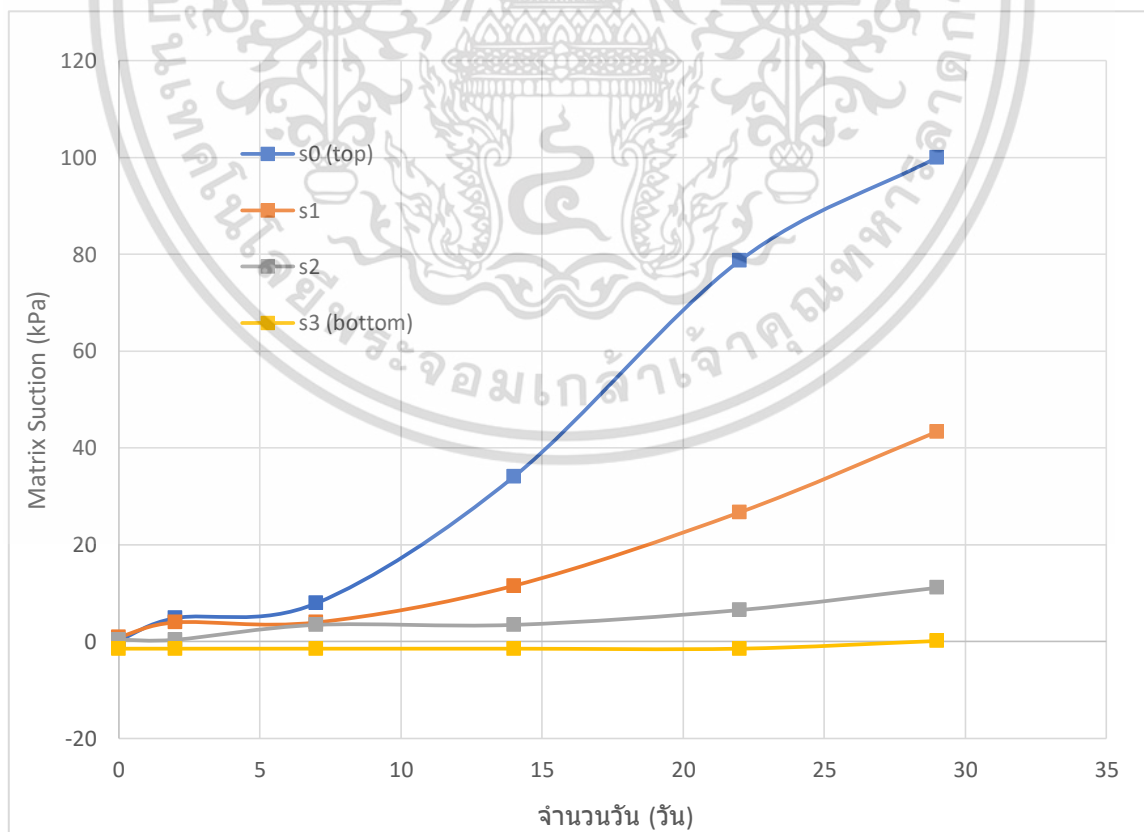


รูปที่ 4.1 Instantaneous Profile Method of Base Soil Dry Process (Matrix Suction)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

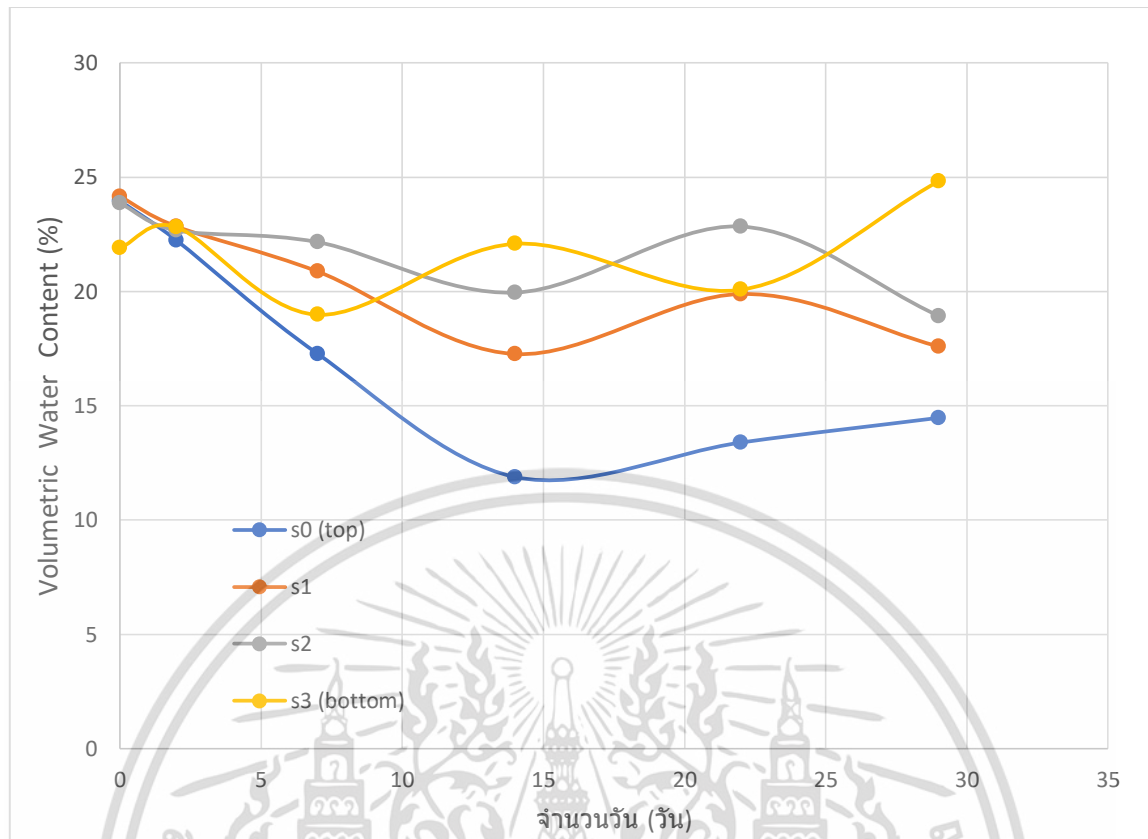


รูปที่ 4.2 Instantaneous Profile Method of Base Soil Dry Process (VWC)



รูปที่ 4.3 Instantaneous Profile Method of 0.4% Plastic Dry Process (Matrix Suction)

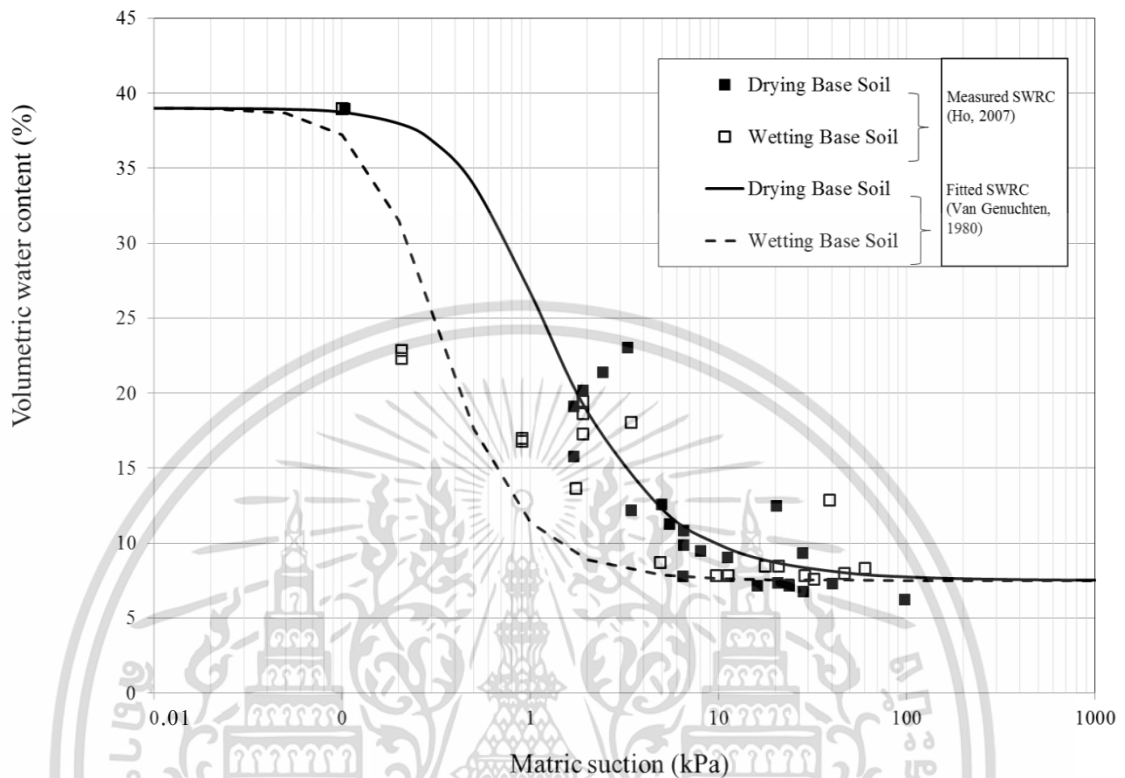
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 Instantaneous Profile Method of 0.4% Plastic Dry Process (VWC)

จากข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำในดินและเวลา จากการทดลอง Instantaneous Profile Method ในขั้นตอน Dry Process ของกระบอกดินเปล่า และกระบอกดินซึ่งบดอัดผสมกับเศษพลาสติก 0.4% จะเห็นได้ว่า ในการที่จะทำให้ดินในกระบอกมีค่า Matrix Suction สูงขึ้นซึ่งสามารถบ่งบอกปริมาณน้ำในดินได้อย่างคร่าวๆ จะเห็นได้ว่าในส่วนกระบอกของดินที่ผสมพลาสติกนั้น จะใช้เวลามากกว่ากระบอกดินที่ไม่ผสมพลาสติก ซึ่งสามารถบ่งบอกแนวโน้มการเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงอุทกวิทยาของดินได้

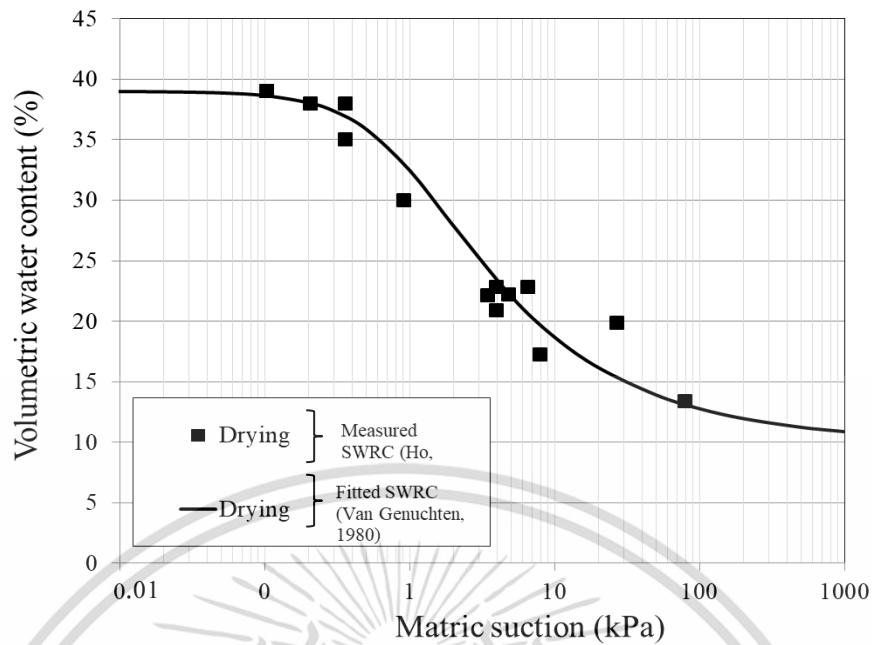
4.2.2 Soil Water Retention Curve



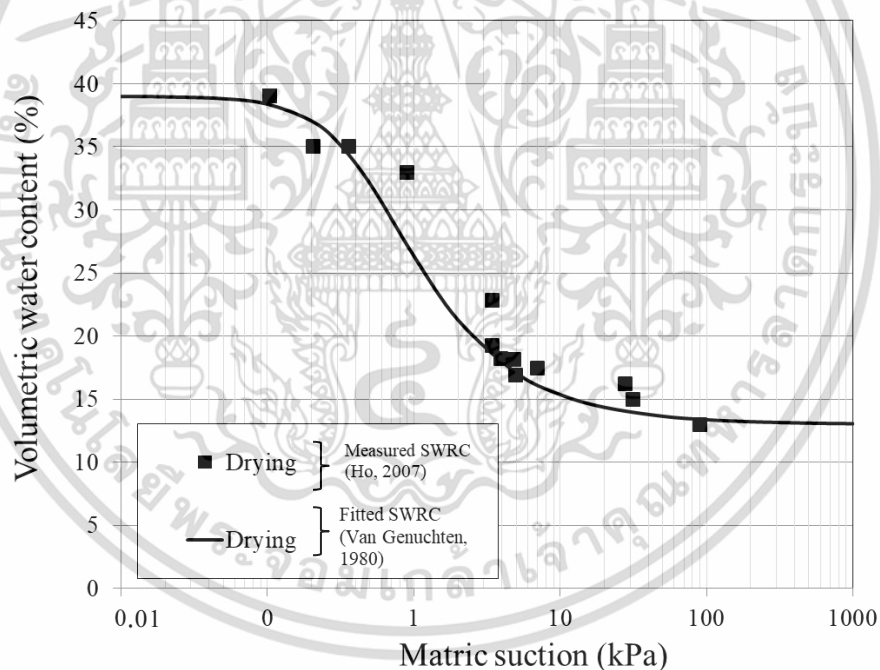
รูปที่ 4.5 Soil Water Retention Curve of Base Soil

กราฟเส้นโค้งความชื้นน้ำ (Soil Water Retention Curve) ของกระบอกดินเปล่า ซึ่งเป็นกราฟลักษณะที่ระหว่างแกนของ “Volumetric water content” และ “Matric Suction” ในส่วนของลักษณะของเส้นกราฟจะสามารถบอกได้ถึงการรักษาบน้ำในดินซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากความชันของเส้นกราฟ โดยเส้นโค้ง Soil Water Retention Curve นั้นเราจะเก็บค่าโดยตรงจากวิธี “Instantaneous profile method” (ข้อมูลจุดบนกราฟ) ซึ่งเส้นกราฟของ Soil Water Retention Curve เราจะนำมาปรับแก้โดยโมเดลทางคณิตศาสตร์ของ “van Genuchten” model

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 Soil Water Retention Curve of Soil with 0.4% plastic flakes



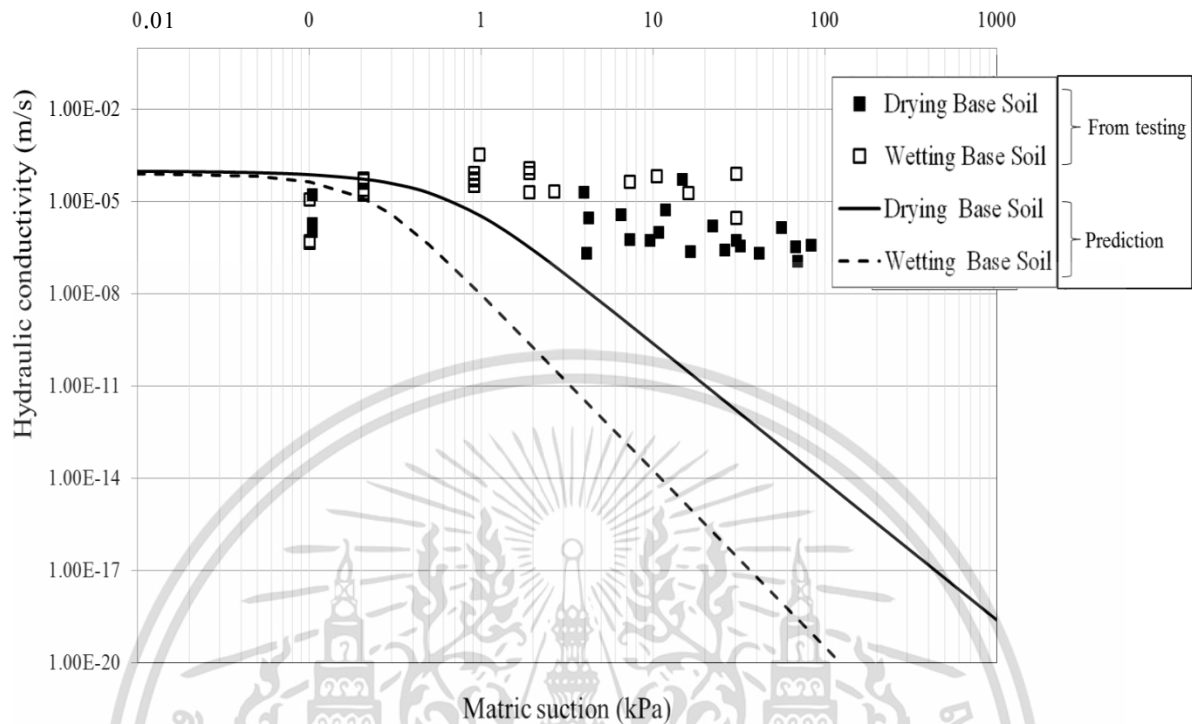
รูปที่ 4.7 Soil Water Retention Curve of Soil with 1% plastic flakes

รูปที่ 4.4 เป็นการเปรียบเทียบเส้นโค้งความชื้นน้ำ ของกระบอกดินเปล่าและดินที่บดอัดผสมกับพลาสติกที่ 0.4%และ1.0% โดยมวลงจะเห็นได้ว่า ปริมาณของพลาสติกนั้นส่งผลต่อคุณสมบัติของน้ำในดิน โดยสามารถวิเคราะห์ได้จากความชันของกราฟ ซึ่งได้ว่า กราฟที่มีความชันสูงจะส่งผลให้ดินมีคุณสมบัติอุ้มน้ำได้ต่ำ จากกราฟจะเห็นได้ว่า กระบอกดินเปล่ามีคุณสมบัติอุ้มน้ำได้ต่ำที่สุด และกระบอกที่บดอัดด้วย

เศษพลาสติกที่ 0.4% สามารถอุ้มน้ำได้ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 Hydraulic conductivity

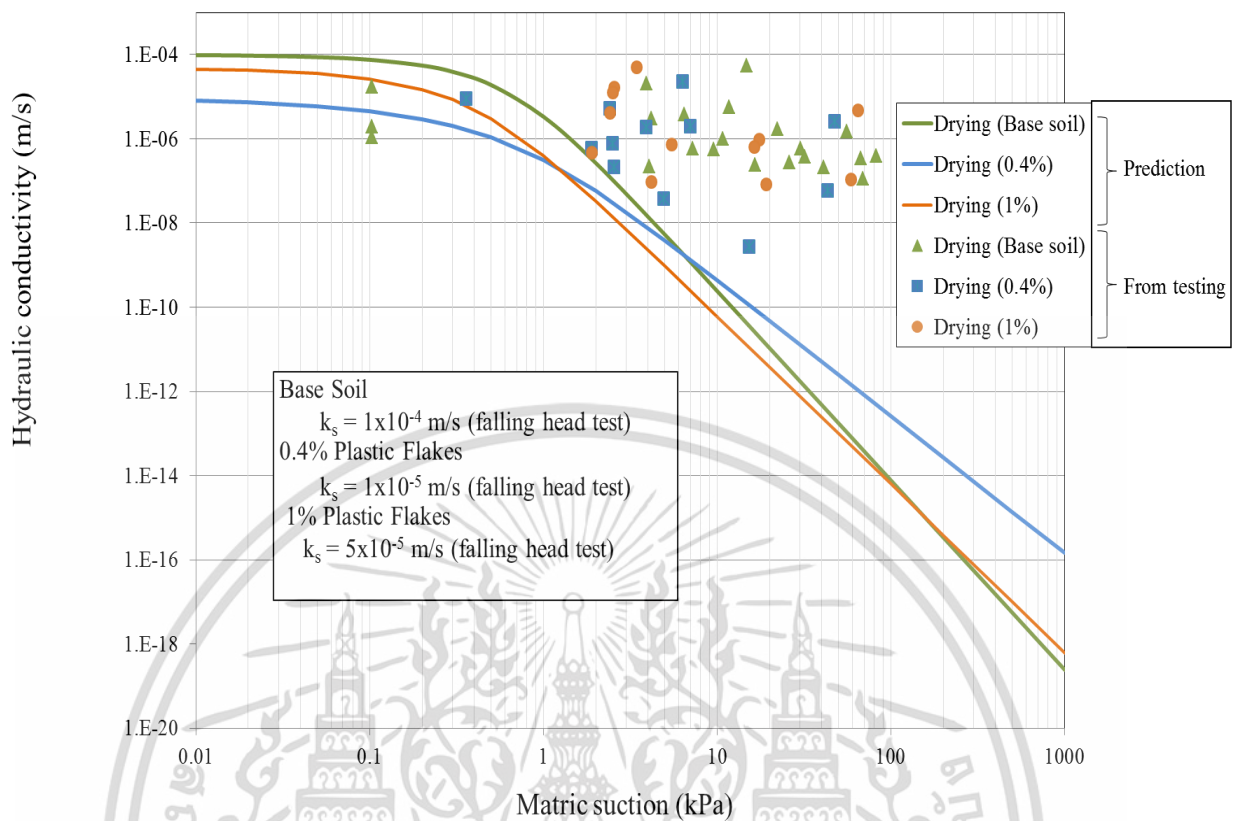


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Matric Suction และ Hydraulic Conductivity

รูปที่ 4.5 เป็นกราฟที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง “Matric Suction” และ “Hydraulic Conductivity (อัตราการไหลของน้ำในดิน)” ซึ่งค่าของอัตราการไหลของน้ำในดินแสดงเป็นข้อมูลจุดในกราฟนั้นได้มาจากการทดสอบโดย “Instantaneous Profile Method” ในส่วนของข้อมูลที่เป็นเส้นโค้งจะเป็นจะเป็นการประมาณค่ามาจากสมการของ “Van Genuchten” จากซึ่งนำตัวแปร Soil Water Retention Curve มาใช้ประมาณค่า อัตราการไหลของน้ำในดิน โดยค่าอัตราการไหลของน้ำในดินนั้นจะไม่คงที่ แต่จะแปรผกผันกับค่า Matrix Suction ของดิน

โดยกราฟจะแสดงข้อมูลอัตราการไหลของน้ำในดิน ใน Drying Process (เส้นทึบ) และ Wetting Process (เส้นประ)

อีกทั้งบ่งบอกได้ว่า ค่าอัตราการไหลของน้ำในดินที่ได้จากการคำนวณนั้น เมื่อเปรียบเทียบกับค่าอัตราการไหลที่ได้จากการทดสอบจากตัวอย่างดินจริงจะพบว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณนั้นเป็นค่าอัตราการไหลของน้ำในดินที่ต่ำกว่าความเป็นจริง ซึ่งอาจส่งผลต่อความปลอดภัยของโครงสร้างได้



รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง Hydraulic Conductivity และ Matric Suction ของแต่ละตัวอย่างการทดลอง

รูปที่ 4.6 เป็นกราฟเปรียบเทียบระหว่าง “Hydraulic Conductivity (อัตราการไหลของน้ำในดิน)” และ “Matric Suction” ของแต่ละตัวอย่างการทดลอง ซึ่งกราฟนี้สามารถอธิบายถึงอัตราการไหลของน้ำในดินที่ผสมด้วยเศษพลาสติกที่ 0% (ดินเปล่า), 0.4% และ 1% โดยน้ำหนัก

โดยผลจากการทดลองของการศึกษาการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมเชิงอุทกวิทยาของดินด้วยเศษพลาสติกขนาดเล็กที่ใช้แล้วในกระบวนการของ “Drying Process” (ดินแห้ง) ของการทดลองในรูปแบบของ “the instantaneous profile method” สามารถอธิบายได้ว่า 0.4% ของเศษพลาสติกที่ผสมในดินให้ค่าอัตราการไหลของน้ำในดินที่ต่ำที่สุดแต่ถ้าใส่เศษพลาสติกเพิ่มขึ้นไปจาก 0.4% ก็จะทำให้ค่าอัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้นเกิดเป็นรูปแบบของกราฟระฆังคว่ำ และจากการทดลองยังบอกอีกว่าอัตราการไหลของน้ำในดินที่ผสมด้วยเศษพลาสติก 1% ให้ค่าอัตราการไหลที่ต่ำกว่าอัตราการไหลของน้ำในดินเปล่า (0%)

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงอุทกวิทยาของดินเปล่า และดินที่ผสมเศษพลาสติกที่ 0.4% และ 1.0% โดยมวล ซึ่งใช้วิธี “Instantaneous Profile Method” ปรากฏว่า ดินที่ผสมด้วยพลาสติกที่ 0.4% จะส่งผลให้การไหลของน้ำในดินต่ำที่สุด เนื่องจากผล “Hydrophobic” ส่งผลมากกว่าการเกิดช่องว่างระหว่างดินและพลาสติก แต่ถ้าหากเพิ่มปริมาณพลาสติกจะเกิดช่องว่างมากขึ้น และส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำในดินสูงขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) สามารถนำข้อมูลไปศึกษาพัฒนาการปรับปรุงคุณภาพดินได้
- 2) ปรับเปลี่ยนความหลากหลายของดินที่ใช้ทดสอบ
- 3) ปรับเปลี่ยนวัสดุที่นำมาบดอัตร่วมกับดิน

บรรณานุกรม

[1]Hemant Kumar Gupta, Anant Kumar Gupta, Sarika Awasthi. // (2017). // “Enhancement in Stabilization Properties of Soil Using Waste Polypropylene Plastic Fiber”. / International Journal of Engineering Technology Science and Research.

[2]Amin Askarinejad, Alexander Beck, Francesca Casini, and Sarah M. Springman. // “Unsaturated Hydraulic Conductivity of a Silty Sand with the Instantaneous Profile Method”.

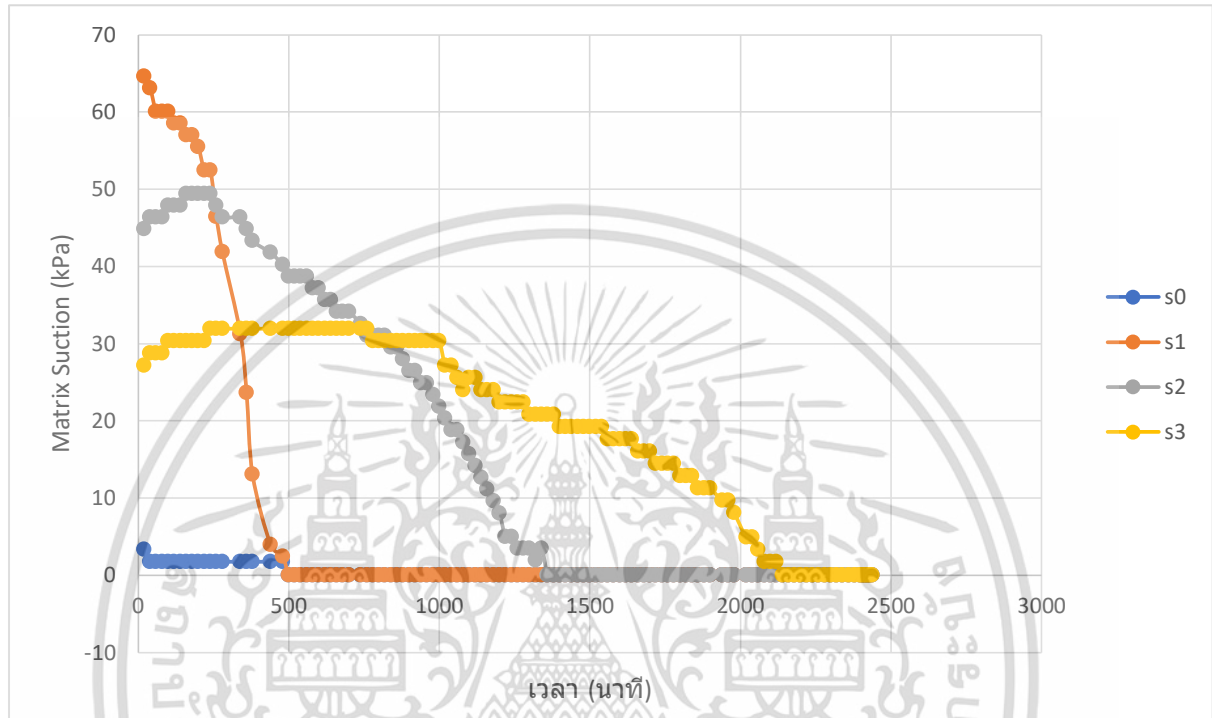
[3]Dr Viroon Kamchoom. // “Measurements of Permeability”. / King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

[4]SIAMAK SAGHARI, GHADER BAGHERI and HAMID SHABANZADEH. // (2015). // “Evaluation of Permeability Characteristics of a Polymer Fibers-reinforced Soil through Laboratory Tests”. / Islamic Azad University.

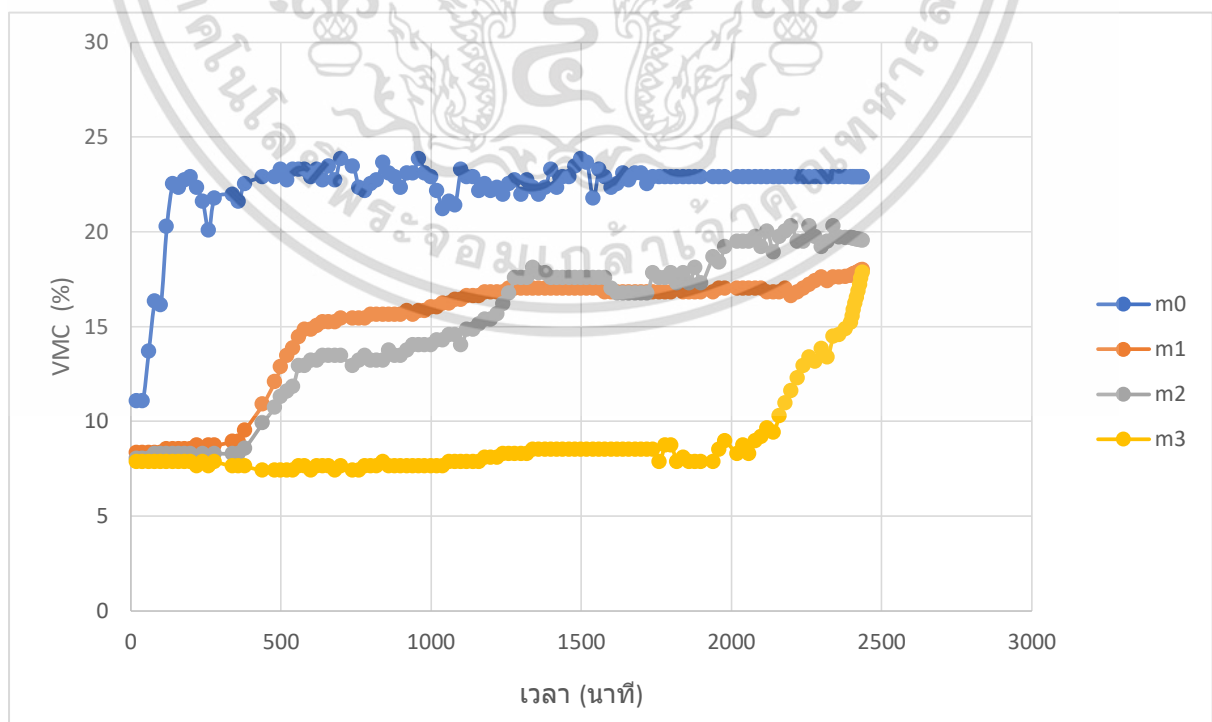
ภาคผนวก ก

ผลการทดลองจากแบบจำลอง

รูปที่ ก.1 Instantaneous Profile Method of Base Soil Wet Process (Matrix Suction)

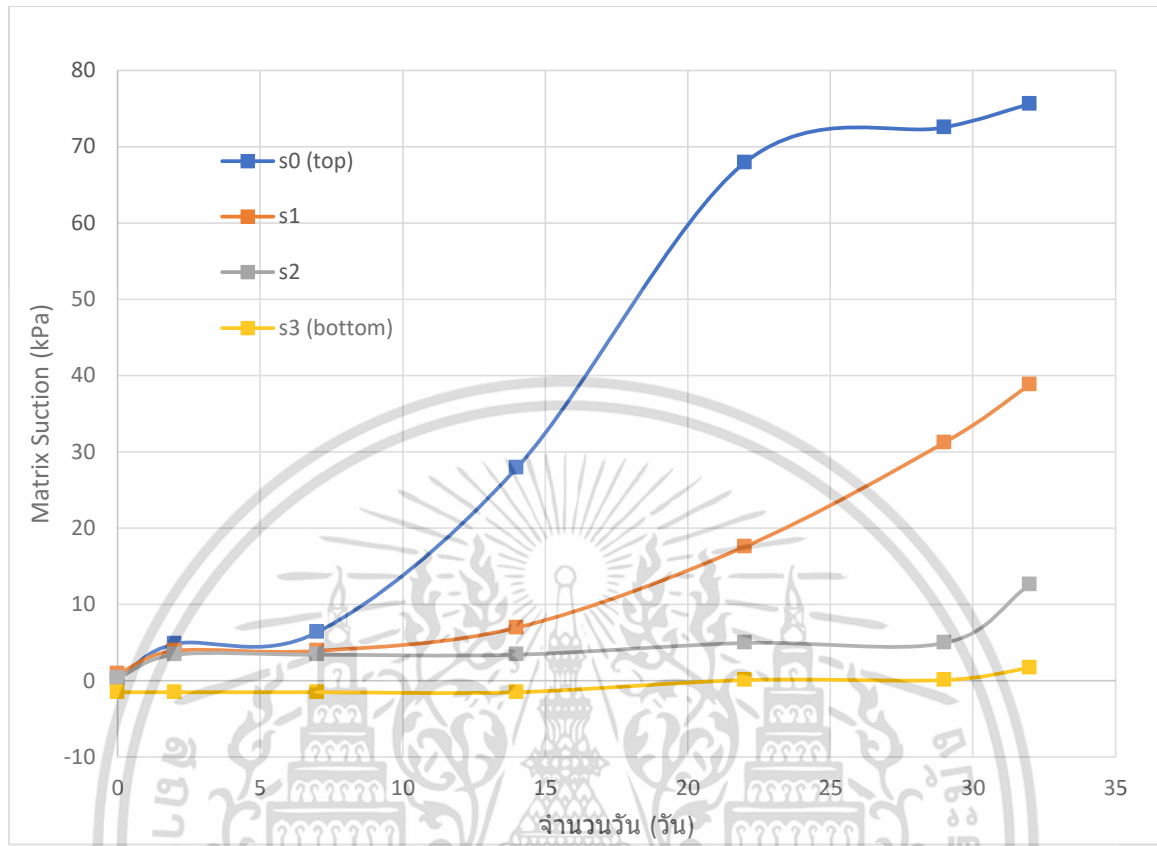


รูปที่ ก.2 Instantaneous Profile Method of Base Soil Wet Process (VWC)

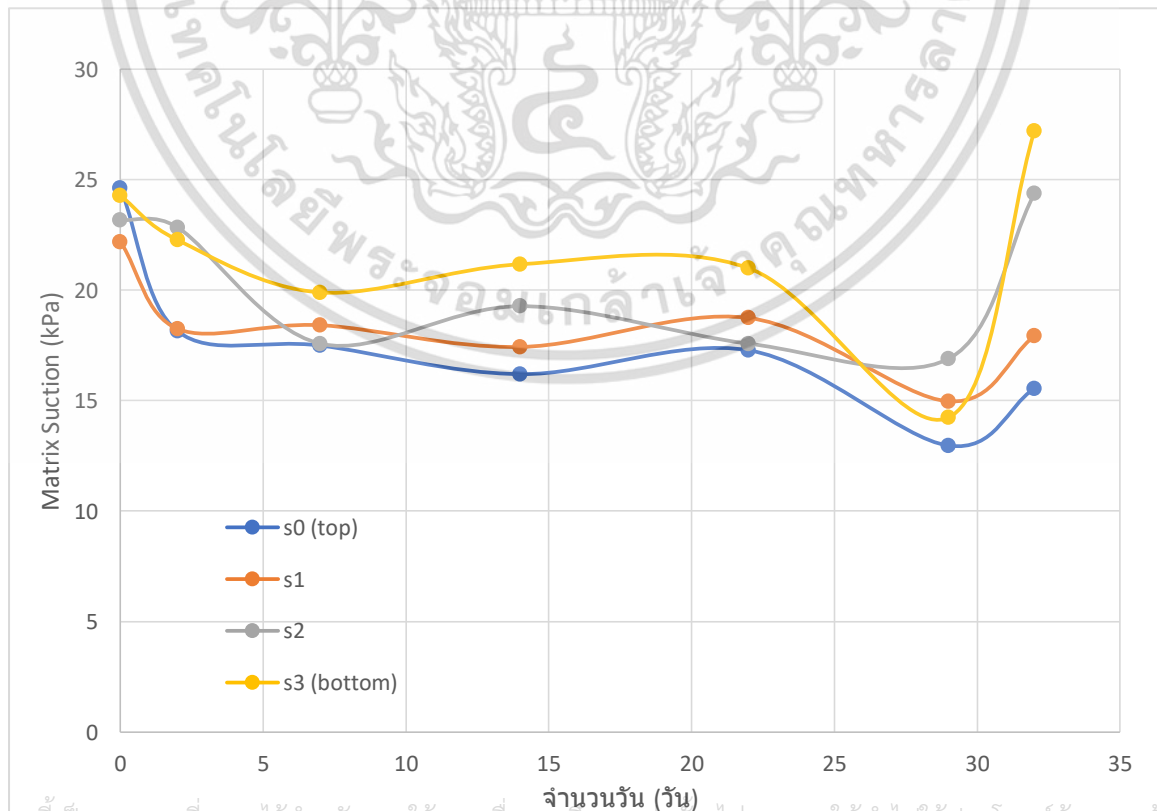


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก.3 Instantaneous Profile Method of 1% Plastic Dry Process (Matrix Suction)

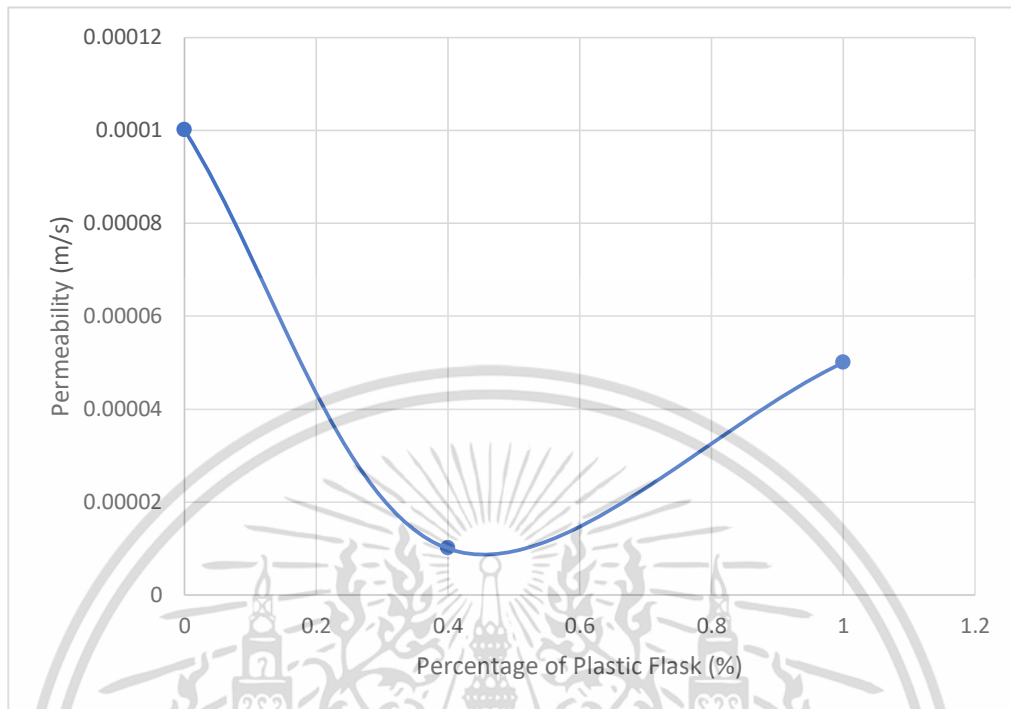


รูปที่ ก.4 Instantaneous Profile Method of 1% Plastic Dry Process (WVC)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก.5 ความสัมพันธ์อัตราการไหลของน้ำกับปริมาณเศษพลาสติก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้