

การกักเก็บน้ำในดินและการแปรผันของแรงดันน้ำในช่องว่างของความ
ลาดชันของคันดินที่ปลูกพืช

Soil water retention and pore water pressure variation of
vegetated slope



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า
ทหารลาดกระบังปีการศึกษา 2563

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Soil water retention and pore water pressure variation of
vegetated slope



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การกักเก็บน้ำในดินและการแปรผันของแรงดันน้ำในช่องว่างของความลาดชันของคันดินที่ปลูกพืช

นักศึกษา นายพงศธร สุขบาล 60010643
นายรัชชานนท์ ศรีสุขินวงศ์ 60010856
นายสมาวิชฐ์ เสนาปิ่น 60011019

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.วิรุฬห์ คำชุม

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.ดร.แหลมทอง เหล่าคงถาวร

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. วิรุฬห์ คำชุม	
รศ.ดร.แหลมทอง เหล่าคงถาวร	
ผศ.สมเกียรติ ขวัญพฤกษ์	
ดร.ณัฐรัตน์ สีนสมุทรผดุง	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว



(ผศ.ดร. อาทิตย์ เพชรศิริธร)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ 31/05/64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การกักเก็บน้ำในดินและการแปรผันของแรงดันน้ำในช่องว่างของความลาด ชั้นของคันดินที่ปลูก

นายพงศธร	สุขบาล	รหัสนักศึกษา 60010643
นายรัชชานนท์	ศรีสุชินวงศ์	รหัสนักศึกษา 60010856
นายสมาวิษฐ์	เสนาปิน	รหัสนักศึกษา 60011019

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิรุฬห์ คำชุม

ปีการศึกษา 2563

บทคัดย่อ

ลักษณะรากของหญ้าแฝก คือ เป็นระบบรากแก้ว และมีรากที่หยั่งลึก 1-3 เมตร ซึ่งอาจเสริมแรงในดินทำให้ดินมีคุณสมบัติเชิงกลและ เชิงไฮโดรลิกที่เปลี่ยนไป และยังมีลักษณะเป็นกอช่วยชะลอความเร็วของน้ำ และลดการกัดเซาะที่เกิดบนผิวดิน แต่อย่างไรก็ตาม ด้วยลักษณะของรากหญ้าแฝกที่มีความยาวลึก อาจส่งผลให้อัตราการไหลซึมของน้ำเพิ่มขึ้น และอาจเปลี่ยนค่าความอุ้มน้ำของดิน ซึ่งอาจส่งผลต่อเสถียรภาพของลาดดิน

จากเหตุผลเบื้องต้น บทความนี้จึงเป็นการวิจัยเชิงทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของการเจริญเติบโตของรากต่อสมบัติเชิงไฮโดรลิกของดิน โดยการทดสอบหาเส้นอัตราลักษณะและความชื้นน้ำ ของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยทดสอบกับคันดินถมซึ่งมีการบดอัดด้วย 70% ของ Maximum dry density ใน การทดสอบ compaction test ทดสอบทั้งหมด 2 ความชื้น โดยศึกษารากของหญ้าแฝกกลุ่ม พันธุ์สงขลา3 หรือพันธุ์พระราชทาน ที่จำลองการปลูกในคันดินซึ่งมีความชื้น 1ต่อ1.5 และ1ต่อ2 โดยเริ่มปลูก เดือน กันยายน 2563

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Soil water retention and pore water pressure variation of vegetated slope

PONGSATHORN	SUKKHABALN	ID 60010643
RATCHANONT	SRISUCHINNAWONG	ID 60010856
SAMAWIT	SENAPINN	ID 60011019

Advisor: Asst.Prof.Dr.Viroon Kamchoom

Academic Year 2020

Abstract

Soil-bioengineering using Vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides*) has been recognized as a green and eco-friendly slope protection alternative for shallow slope failure. There have been significant advances in research and applications for using this particular species to improve slope stability in the last decade, considering both mechanical (i.e., root anchorage) and hydrological (i.e., transpiration-induced soil matric suction and hence soil strength) reinforcements. However, early studies rarely considered soil and vegetation interaction, especially for soil hydraulic properties. The presence of roots can affect soil pore space, resulting in preferential flow. This can lead to instability of natural slopes and civil infrastructure in urban areas (e.g., road and railway embankments). In order to develop better and more sustainable mitigation strategies, the effects of root on soil mechanical and hydraulic properties will be considered in this study. The outcome will improve the stability assessment of vegetated soil slopes and provide better information for applications of this green slope technology.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร.วิรุพท์ คำชุม ที่กรุณาให้คำแนะนำเพื่อปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง อีกทั้งสละเวลาเพื่อให้คำปรึกษากับคณะผู้จัดทำตลอดจนให้ความรู้ เอาใจใส่ ให้คำแนะนำช่วยเหลือในการแก้ปัญหา ให้ประสบการณ์ ที่ดี อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งกับงานวิจัยนี้ พวกเราผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ในทุกๆรายวิชาที่ศึกษาเพื่อเป็นพื้นฐาน อันเป็นประโยชน์ยิ่งในการทำปริญญานิพนธ์เล่มนี้ให้สำเร็จลุล่วง ตลอดจนอาจารย์ประจำภาควิชาท่านต่างๆที่ให้คำแนะนำและกำลังใจอย่างดียิ่ง

ขอขอบคุณเพื่อนๆที่ คอยช่วยเหลือในการให้คำแนะนำในการทำโครงการรวมถึงการให้กำลังใจ และความรู้ตลอดระยะเวลา ที่ได้ศึกษาในภาควิชาวิศวกรรมโยธาจนนี้ตลอดมา

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งเป็นผู้ให้ความรักและให้กำลังใจ ในการสนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนของคณะผู้จัดทำมาโดยตลอด ทำให้คณะผู้จัดทำมีวันนี้ได้คณะ ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างสูง

นายพงศธร

สุขบาล

นายรัชชานนท์

ศรีสุชินวงศ์

นายสมาวิษฐ์

เสนาปิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1.1 Dr Anthony Kwan, LEUNG, Dr Ankit, GARG, Dr Charles Wang Wai, NG (2015) ผลกระทบของรากพืชต่อการกักเก็บน้ำและการกระตุ้นการดูด ในดินปลูก.....	4
2.1.2 อภินิติและสงเกียรติ (2013) เสถียรภาพของลาดดินที่ปลูกหญ้าแฝกใน สภาวะฝนตกแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Stability of Soil Slope with Vetiver Grass Subjected to Rainfall from Numerical Modeling).....	6
2.1.3 ฤทธิภูมิ, จิตาภา, ศิริประภา (2019) ผลกระทบของการเจริญเติบโตของรากต่อ สมบัติเชิงไฮดรอลิกของดิน (Soil water retention curve and hydraulic conductivity function of vegetated soil).....	8
2.2 คุณสมบัติของราก.....	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ไม่ควรนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลิขสิทธิ์นี้สงวนไว้ให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เรื่อง	หน้า
2.2.1 ผลของรากต่อดิน.....	10
2.2.2 หลุม้าแฝก.....	11
2.3 คุณสมบัติพื้นฐานของดิน.....	12
2.3.1 ดินอินทรีย์.....	12
2.3.2 ดินไม่อิมตัวด้วยน้ำ.....	12
2.3.3 ปริมาณน้ำในดิน (Water content).....	14
2.3.4 เครื่องมือวัดความชื้นในดิน (Soil Moisture Sensor).....	15
2.3.5 เครื่องมือวัดความดันของน้ำในดิน (Suction Sensor).....	16
2.3.6 เส้นอัตรลักษณ์ของดิน (Soil Water Characteristic Curve, SWCC).....	17
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	18
3.1 การเตรียมวัสดุสไลป.....	18
3.1.1 การถมดินสร้างสไลป.....	18
3.1.2 การเตรียมดินอินทรีย์.....	19
3.2 การเตรียมเครื่องมือ อุปกรณ์และติดตั้ง.....	23
3.2.1 การเตรียม Sensor และ Data logger.....	23
3.3 การเตรียมหลุม้าแฝกและปลูก.....	24
3.3.1 การเตรียมหลุม้าแฝก.....	24
3.3.2 การปลูกหลุม้าแฝก.....	26
บทที่ 4 ผลการศึกษา.....	27
4.1 การเปลี่ยนแปลงของ Metric Suction และ Volumetric Water Content ต่อเวลา.....	27
4.2 เส้นอัตรลักษณ์ของดิน (SWRC).....	30
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	32
5.1 บทนำ.....	32
5.2 สรุปผลการทดลอง.....	32
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญรูป

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 2.1.1 ตัวอย่างความยาวรากขอต้นไม้.....	5
ที่มา : วารสารEngineering Geology(2015)	
รูปที่ 2.1.2 ลักษณะหน้าตัดลาดดินธรรมชาติสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 และ finite element mesh สำหรับวิเคราะห์การไหลซึมกรณีปลูกหญ้าแฝก	7
ที่มา อภินิติและสงเกียรติ (2013)	
รูปที่ 2.1.3(ก) นำต้นอ่อนไปแช่น้ำ เพื่อให้รากงอก	8
รูปที่ 2.1.3(ข) ทำการ Saturated ดิน โดยการรักษา	8
รูปที่ 2.1.3(ค) แบบจำลองกระบอกดิน.....	9
รูปที่ 2.1.3(ง) กราฟเปรียบเทียบระหว่างเส้นอัตลักษณ์ของดินที่ไม่มีรากหญ้าแฝก...10และดินที่มีรากหญ้าแฝกอายุ 2 เดือน ด้วยวิธี Instantaneous Profile Method	10
รูปที่ 2.1.3(จ) กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างHydraulic Conductivity กับ Metric Suction ของดินที่มีรากหญ้าแฝกอายุ 2 เดือน กับ ดินที่ไม่มีหญ้าแฝก	10
รูปที่ 2.2.1 อิทธิพลจากพืชพรรณต่อการไหลของน้ำที่ผิวดิน	11
รูปที่ 2.3.2(ก) ผังแสดงส่วนประกอบของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ	13
ที่มา: Fredlund and Rahardjo (1993)	
รูปที่ 2.3.2(ข) แนวคิดของแบบจำลองแรงดูด ของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน.....	13
ที่มา: Lu and Likos (2004)	
รูปที่ 2.3.3 แสดงส่วนประกอบของมวลดิน	14
ที่มา : มานิต ช่วยงาน มิ.ย. 2552	
รูปที่ 2.3.4 Soil Moisture Sensor	16
รูปที่ 2.3.5 Suction Sensor.....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 2.3.6 เส้นอัตตลักษณ์ของดิน (Soil Water Characteristic Curve)	17
ที่มา: Lu and Likos (2004)	
รูปที่ 3.1.1 รูปภาพคันดิน.....	20
รูปที่ 3.1.2.1 Field Density Test โดยใช้ Sand Cone Method.....	19
รูปที่ 3.1.2.2 Atterberg Limit.....	19
รูปที่ 3.1.2.3(ก) Hydrameter Analysis.....	20
รูปที่ 3.1.2.4 การทดสอบ Specific gravity	20
รูปที่ 3.1.2.5 การบดอัดดิน	21
รูปที่ 3.1.2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Dry Density กับ Water Content.....	21
รูปที่ 3.1.2.9 เตรียมดินโดยการร่อนผ่านตะแกรง	22
รูปที่ 3.2.1(ก) ขนาดเซนเซอร์ Suction	23
รูปที่ 3.2.1(ค) ขนาดเซนเซอร์moisture	23
รูปที่ 3.2.2(ค) ตำแหน่งการวาง Sensor	24
รูปที่ 3.3.1 นำดินอ่อนไปแช่น้ำ เพื่อให้รากงอก	25
รูปที่ 3.3.2 อนุบาลในดินมูลไส้เดือน 2 อาทิตย์	25
รูปที่ 3.3.2.1 นำดินอ่อนไปปลูกที่ นิเมตรใหม่ 36.....	26
รูปที่ 3.3.2.2 ภาพถ่ายจากมุมสูง เพื่อดูการเจริญเติบโตของหญ้าแฝก	26
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Metric Suction กับเวลา ; ในดินที่ไม่มีหญ้าแฝก (Zone2 1:2 dept 50 cm).....	27
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างVolumetric Water Content กับเวลา; ในดินที่ไม่มีหญ้าแฝก (Zone 2 1:2 dept 50 cm).....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างMetric Suction กับเวลา; ในดินที่มีหญ้าแฝก(Zone3 1:2 dept 100cm).....	28
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างVolumetric Water Content กับเวลา ; ในดินที่มีหญ้าแฝก (Zone3 1:2 dept 100cm).....	28
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric Water Content กับเวลา.....	29
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Metric Suction กับเวลา; ในดินที่มีหญ้าแฝกและดินเปล่าโดยที่เส้นสีส้มคือดินเปล่าและสีน้ำเงินคือดินปลูก โดย Limit ของ Suction Sensor วัดได้สูงสุด 100 kpa..	29
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric Water Content กับเวลา ; ในดินที่ไม่มีหญ้าแฝก (Zone 5 1:1.5 dept 100 cm).....	30
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric Water Content กับเวลา ; ในดินที่ไม่มีหญ้าแฝก (Zone 5 1:1.5 dept 100 cm).....	31
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Metric Suction กับเวลา ; ในดินที่ไม่มีหญ้าแฝก (Zone 5 1:1.5 dept 100 cm).....	31
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric Water Content กับเวลา ; ในดินที่ไม่มีหญ้าแฝก (Zone 5 1:1.5 dept 100 cm).....	32
รูปที่ 4.11 รูปแสดงให้เห็นว่าข้อมูลผิดพลาด.....	32
รูปที่ 4.12 อิทธิพลจากอัตราส่วนช่องว่างต่อเส้นอัตราตั้งของดินเหนียวปนทรายแบ่งบดอัด (Jotisankasa et al.,2009).....	34
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric Water Content กับ Metric Suction; ในดินที่ไม่มีหญ้าแฝกและมีหญ้าแฝก โดย Limit ของ Suction Sensor วัดได้สูงสุด 100 kpa.....	35
รูปที่ 4.14 แสดงตัวอย่างกราฟ SWRC ของดินปลูกพืช Schefflera heptaphylla.....	36
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric Water Content กับ Metric Suction; ในดินที่ดินปลูกพืช Schefflera heptaphylla กับ ดินที่ปลูกหญ้าแฝก.....	36
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric Water Content กับ Metric Suction; ในดินที่ดินปลูกพืช Schefflera heptaphylla กับ Bangkok clay.....	37
รูปที่ 4.17 ภาพตัวอย่างของโปรแกรม Vadose/W.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รูปที่ 5.1 กราฟเปรียบเทียบระหว่างเส้นอัตราลักษณ์ของดินที่ไม่มีรากหญ้าแฝก และดินที่มีรากหญ้าแฝก อายุประมาณ 5 เดือน ด้วยวิธี Van-Genuchten model	38
รูปที่ 6.1 Gradation Curve	41
รูปที่ 6.2 กราฟ Compaction Curve	41
รูปที่ 6.3 กราฟแสดงผลขนาดคละของเม็ดดินตามมาตรฐาน มยผ.	42
รูปที่ 6.4-6.5 กราฟ Raw data แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric Water Content และ Matric Suction กับวันที่ในระดับความลึก 50 ซม. จากผิวดิน ของดินเปล่า ที่มีความชัน 1:1.5.....	42
รูปที่ 6.6-6.7 กราฟ Raw data แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric Water Content และ Matric Suction กับวันที่ในระดับความลึก 100 ซม. จากผิวดิน ของดินที่ปลูกพืช ที่มีความชัน 1:1.5.....	43
รูปที่ 6.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric Water Content กับ Matric Suction ในโซน 2 ของดินเปล่าที่มีความชัน 1:1.5 ที่ผ่านการ Fit curve ด้วย VG's model.....	43
รูปที่ 6.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric Water Content กับ Matric Suction ในโซน 3 ของดินปลูกพืชที่มีความชัน 1:1.5 ที่ผ่านการ Fit curve ด้วย VG's model	44
รูปที่ 6.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric Water Content กับ Matric Suction ในทั้งสองโซน 2 และ 3 ที่ความลึก 50 ซม และ 100 ซม ของดิน ของดินปลูกและดินเปล่า.....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาที่ก่อให้เกิดสภาพความเสื่อมโทรมของทรัพยากรดินตามธรรมชาติส่วนใหญ่คือปัญหาในการพังทลายและการกัดเซาะจากฝนที่ตกลงมาและน้ำที่ไหลบ่าหน้าดินเป็นจำนวนมาก ทำให้สูญเสียดินที่สมบูรณ์ไป บางครั้งยังก่อให้เกิดความเสียหายต่อพื้นที่อยู่อาศัย พื้นที่ทำการเกษตรส่งผลให้ได้ผลผลิตทางการเกษตรลดลง นับเป็นปัญหาที่สำคัญซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินเป็นอย่างมาก ซึ่งปัจจุบันการแก้ไขการชะล้างและพังทลายของลาดดิน นอกจากจะใช้โครงสร้างทางวิศวกรรมเช่น กำแพงกันดินชนิดต่าง ๆ แล้วนั้น การใช้พืชพรรณชนิดต่าง ๆ ร่วมกับโครงสร้างทางวิศวกรรมหรือที่เรียกว่าวิธีชีววิศวกรรม สามารถใช้เพื่อแก้ไขปัญหาการชะล้างพังทลายของลาดดินในระดับต้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังมีคุณสมบัติคล่องกับธรรมชาติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งหญ้าแฝก เนื่องจากหญ้าแฝกมีลักษณะเป็นกอทำให้สามารถลดความเร็วน้ำ ไหลบ่าและดักตะกอนได้ เปรียบได้กับกำแพงที่มีชีวิต ที่สำคัญกว่านั้นลักษณะของรากหญ้าแฝกมีรากหยั่งลึก เปรียบเสมือนเป็นวัสดุเสริมแรงที่ยึดดินไว้เข้าด้วยกัน ส่งผลให้ลาดดินมีเสถียรภาพมากขึ้น

พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวรัชกาลที่ 9 ทรงตระหนักถึงปัญหาที่เกิดขึ้น จึงมีพระราชดำริให้ดำเนินการศึกษาทดลองเกี่ยวกับหญ้าแฝก ซึ่งเป็นพืชที่จะช่วยป้องกันการชะล้างพังทลายของดินและอนุรักษ์ความชุ่มชื้นไว้ในดินได้ เป็นเทคโนโลยีที่สามารถดำเนินการได้เอง ค่าใช้จ่ายไม่สูงมาก จึงได้มีพระมหากรุณาธิคุณพระราชทานพระราชดำริต่าง ๆ เกี่ยวกับหญ้าแฝกต่อเนื่องตลอดมา อย่างไรก็ตามเมื่อวันที่ 25 กรกฎาคม พ.ศ. 2554 พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว ได้พระราชทานพระราชดำริเกี่ยวกับปัญหาดินถล่มและการใช้หญ้าแฝกกับ ดร.สุเมธ ตันติเวชกุล เลขาธิการมูลนิธิชัยพัฒนา และคณะผู้เกี่ยวข้อง โดยมีรับสั่งว่า “ในกรณีทั่ว ๆ ไปให้ใช้ความระมัดระวังในการดำเนินงาน เพราะ แม้กระทั่งหญ้าแฝกซึ่งตามหลักจะป้องกันดินพังทลาย ก็อาจเป็นตัวการให้ดินถล่มได้ เพราะรากเจาะลึกทำให้ดินแตกแยก และนำน้ำลงไป อาจจะเป็นเหตุให้ดินพังทลายเสียเอง”

ซึ่งในการวิจัยนี้ได้เลือกหญ้าแฝกกลุ่ม พันธุ์พระราชทาน (พันธุ์สงขลา 3) ซึ่งเป็นหญ้าแฝกที่มีกอใบสูงรากหยั่งลึก 1-3 เมตร แล้วเหมาะสำหรับปลูกริมตลิ่ง ที่มีน้ำมาก น้ำขัง และสามารถปลูกได้ในทุกสภาวะดินจึงนำหญ้าแฝกชนิดนี้ มาปลูกเพื่อศึกษาอิทธิพลจากการเจริญเติบโตของรากหญ้าแฝกต่ออัตราการไหลซึมของน้ำในดิน และการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทาง Hydraulic ของดิน จากการที่รากหญ้าแฝกเจริญเติบโต นำมาวิเคราะห์ถึงการเปลี่ยนแปลงของดิน เพื่อประยุกต์ใช้ต่อกับงานต่าง ๆ อาทิเช่น การปลูกหญ้าแฝกริมทางลาดที่มีความชันน้อย เพื่อรักษาเสถียรภาพของลาดดิน

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.2 วัตถุประสงค์

- เพื่อศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่า Suction และ Volumetric water content ในดินปลูก และดินเปล่าที่เกิดจากผลของรากหญ้าแฝก
- เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของเส้นอัตราลักษณ์ (SWRC) ของดินเปล่าและดินปลูกจากผลของรากหญ้าแฝก

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. จำลองความชื้นในการปลูกหญ้าแฝกบนคันดิน 1:1.5&1:2 ทั้งหมด 744 ต้น เป็น 6 แถว 31 หลัก บนคันดินแบบปล่อยไปตามธรรมชาติ
2. หญ้าแฝกที่ใช้ในการวิจัย คือ ชนิดลุ่ม พันธุ์สงขลา3 (พันธุ์พระราชทาน)
3. ดินอินทรีย์ จาก นิคมใหม่36 กรุงเทพมหานคร
 - 3.1. มีขนาดคละผ่านตะแกรงเบอร์ 200
 - 3.2. ค่าความหนาแน่นที่ 70% Degree of compaction
4. ศึกษาคุณสมบัติของดินที่มีรากหญ้าแฝก
 - 4.1. Bare Soil Properties.
 - Atterberg Limit ; ASTM D4318 and ASTM D427
 - Grain Size Analysis ; ASTM D422
 - Compaction Test ; ASTM D698-78
 - Field Test ; ASTM C780
 - Specific Gravity ; ASTM D85
 - 4.2. Hydraulic Properties.
 - Soil Suction
 - Volumetric Water Content
 - Soil-Water Retention Curve (SWRC)
5. ศึกษาการไหลซึมแบบปล่อยไปตามธรรมชาติสโลปมากกว่า 1 มิติ
6. เริ่มปลูกหญ้าแฝกเดือนกันยายน 2563

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1. กำหนดหัวข้อของงานวิจัยที่สนใจจะศึกษา
2. กำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตของการทำวิจัย
3. ค้นคว้าข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
4. รวบรวมข้อมูลที่ค้นคว้าได้ และวิเคราะห์มาประยุกต์กับงานวิจัย
5. เปรียบเทียบเครื่องมือ และเตรียมวัสดุ อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่จำเป็นต่อการวิจัย
6. ทำการเก็บ พร้อมวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อปรับแก้ข้อผิดพลาด
7. ประมวลผลข้อมูลทั้งหมด และเปรียบเทียบข้อมูล
8. สรุปผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำหญ้าแฝกไปประยุกต์ใช้กับการเพิ่มเสถียรภาพของลาดดินได้
2. สามารถนำเครื่องมือวัด Soil Suction และ Moisture Content ไปใช้วัดพฤติกรรมของดินในสนามจริงได้ เพื่อใช้ทำนายพฤติกรรมการสูญเสียเสถียรภาพในดิน
3. เข้าใจพฤติกรรมความสัมพันธ์ระหว่าง Soil Suction กับ ปริมาณน้ำในดินที่มีรากหญ้าแฝก ในแต่ละช่วงการเติบโต
4. ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมด้านการไหลซึมและเส้นอัตราลักษณะ (SWRC) ของดินในการเติบโตของรากหญ้าแฝก
5. ทราบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรากในดิน กับ อัตราการไหลซึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 Dr Anthony Kwan, LEUNG, Dr Ankit, GARG, Dr Charles Wang Wai, NG (2015) ผลกระทบของรากพืชต่อการกักเก็บน้ำและการกระตุ้นการดูดในดินปลูก

บทความนี้ได้ทำการทดลอง 2 ชุด ในชุดแรกมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบการมีส่วนร่วมของกลไก M1 ต่อการดูดในดินปลูก โดยนำดินในชุดนี้ที่เป็นดินเปล่าและดินปลูกไปอบแห้งแบบเปียกภายใต้สภาวะที่มีมืด ส่วนกลไก M2 จะถูกกำจัด และในชุดที่สองเป็นการทำซ้ำเหมือนชุดแรกแต่ในสภาวะที่มีแสงเพื่อตรวจสอบการมีส่วนร่วมของกลไก M1 และ M2

มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. ออกแบบกล่อง 8 กล่อง โดยที่ด้านใต้ของแต่ละกล่องจะมีรูระบายน้ำ 9 ช่อง จะแบ่งเป็นกล่องที่เป็นดินเปล่า 2 กล่อง และกล่องที่ทำการปลูกต้นไม้ 6 กล่อง

2. เตรียมดินที่ใช้ในการทดสอบคือ หินแกรนิตที่ย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ (CDG)

3. เลือกชนิดต้นไม้ที่ใช้ในการทดสอบ คือ Schefflera Heptaphylla ซึ่งเป็นพืชที่ใช้กันทั่วไปในการฟื้นฟูระบบนิเวศในเขตกึ่งร้อนชื้นหลายเขต และเนื่องจากความแปรปรวนทำให้ต้นไม้มีคุณสมบัติต่างกัน

4. ทดสอบชุดแรกภายใต้สภาพมืด โดยจะมีกล่องดินเปล่า 1 กล่อง และกล่องที่มีดินปลูกต้นไม้ 3 กล่อง ซึ่งทั้ง 4 กล่องต้องผ่านการทดสอบ 2 ขั้นตอน โดยก่อนการทดสอบจะมีการสร้างการดูดเริ่มต้นที่คล้ายกันของทั้ง 4 กล่อง

1) ผิวดินของแต่ละกล่องจะถูกนำไปลงในบ่อจนกระทั่ง การดูดที่ความลึกของแต่ละกล่องลดลงเป็น 0 kPa และมีการซึมผ่านรูระบายด้านใต้ของแต่ละกล่อง จากนั้นทุกกล่องจะถูกเก็บไว้ในห้องที่มีสภาพบรรยากาศที่เหมือนกัน และเมื่อพบว่ามีการดูดที่ใกล้เคียงกับในตอนเริ่มต้น จะทำการปิดไฟและนำผิวดินของแต่ละกล่องไปที่บ่อที่ระดับน้ำคงที่ 6 มม.เป็นเวลา 1 นาที

2) กล่องทั้งหมดจะถูกเก็บไว้ในห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อศึกษาการดูดกลับหลังขั้นตอนที่ 1 ซึ่งทั้ง 2 ขั้นตอนจะถูกบันทึกการตอบสนองการดูดที่ความลึกในขณะที่เปิดรูระบายได้กล่อง

5. ทดสอบชุดที่สองภายใต้สภาพมีแสง ซึ่งก็จะมีกล่องดินเปล่า 1 กล่อง และกล่องที่มีดินปลูกต้นไม้ 3 กล่อง โดยจะทำการทดลองทั้ง 2 ขั้นตอนเหมือนกับชุดแรก แต่จะเปิดไฟเพื่อควบคุมพลังงานรังสีให้คงที่

6. ทดสอบ Soil Water retention curve (SWRC) โดยการทำให้ดินอิ่มตัวด้วยน้ำหรืออยู่ในสภาพเปียก จากนั้นค่อยๆทำให้ดินอยู่ในสภาพแห้งโดยการอบแห้ง เพื่อนำข้อมูลมาสนับสนุนกลไก M1

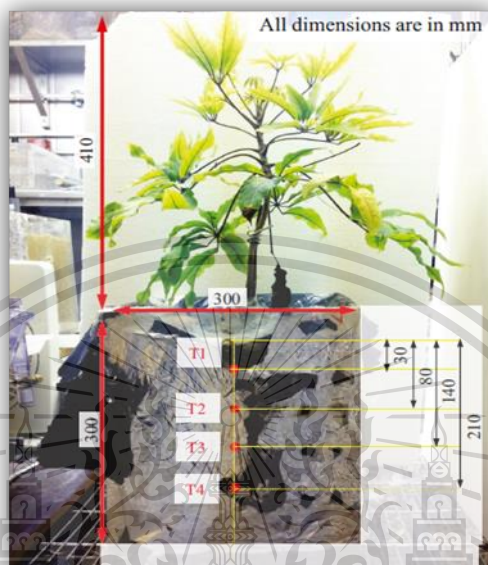
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ค่อยๆทำให้ดินอยู่ในสภาพแห้งโดยการอบแห้ง เพื่อนำข้อมูลมาสนับสนุนกลไก M1

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

7. วัดมวลชีวภาพของตัวอย่างราก โดยการอบแห้งแล้วร่อนบนตะแกรงขนาด 2 มม. และ 0.841 มม. จนไม่มีรากเหลืออยู่บนตะแกรง เพื่อให้เข้าใจกลไก M2
8. สังเกตคุณสมบัติของต้นไม้แต่ละต้น โดยพิจารณาจากการเปรียบเทียบมวลชีวภาพ
9. พิจารณาความสามารถในการกักเก็บน้ำของดินปลูกพืชจากการหาค่า Air-Entry Value (AEV)



รูปที่ 2.1.1 ตัวอย่างความยาวรากขอต้นไม้

ที่มา : วารสาร Engineering Geology (2015)

ผลการทดลองจากการเปรียบเทียบ SWRC ของดินเปล่าและดินที่ปลูกต้นไม้ นั้นแสดงให้เห็นว่า รากกระตุ้นให้ AEV เพิ่มขึ้นจาก 1 ถึง 4 kPa และในสภาพแวดล้อมที่มีเหตุการณ์การดูดที่เพิ่มขึ้นในรากของดินที่ปลูกต้นไม้สูงกว่าในดินเปล่า 100% เมื่อมีเหตุการณ์เปียกเกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมที่มีแสงพบว่าดินที่ปลูกต้นไม้ทำให้มีการดูดที่สูงกว่าดินเปล่า และจากการคำนวณการสูญเสียความชื้นของดินผ่านค่า AET เพียง 1.7% ของปริมาณน้ำทั้งหมดที่ถูกแทรกซึมนั้นชี้ให้เห็นว่าการดูดที่สูงขึ้นอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของ SWRC ที่เกิดจากรากมากกว่าที่จะเกิดจากการระเหยและการดูดซึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.1.2 อภินิติและส่งเสริม (2013) เสถียรภาพของลาดดินที่ปลูกหญ้าแฝกในสภาวะฝนตกแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Stability of Soil Slope with Vetiver Grass Subjected to Rainfall from Numerical Modeling)

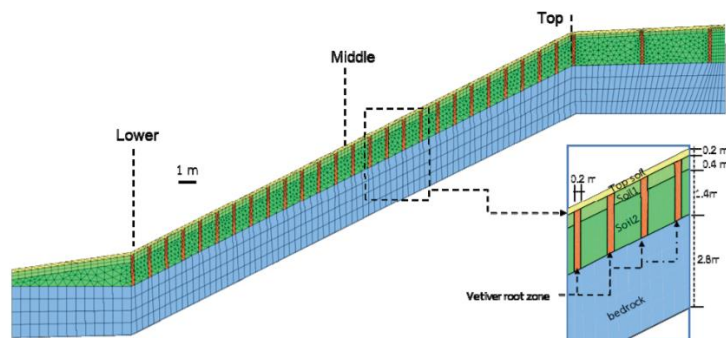
ปัญหาการชะล้างพังทลายของลาดดินและดินถล่มนับวันจะทวีความรุนแรงมากยิ่งขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศของโลกก่อให้เกิดความแปรปรวนของรูปแบบการตกของฝน เช่น ฝนตกหนักในช่วงเวลาสั้น ๆ หรือฝนตกยาวนานติดต่อกันทำให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อม พื้นที่เกษตรกรรม และโครงสร้างพื้นฐานของประเทศ การใช้ประโยชน์ที่ดินมากขึ้นในที่สูงชันก็มีส่วนทำให้ปัญหารุนแรงมากยิ่งขึ้นเช่นกัน การแก้ไขป้องกันปัญหาดินถล่มทางหนึ่งทำได้โดยการปลูกพืชพรรณชนิดต่าง ๆ บนลาด ร่วมกับการใช้โครงสร้างทางวิศวกรรมหรือที่เรียกว่าวิธีชีววิศวกรรม (Soil-Bioengineering/Ecological Engineering) ซึ่งสามารถแก้ไขดินถล่มระดับต้น และการชะล้างพังทลายได้อย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน สอดคล้องกับธรรมชาติที่มีราคาไม่สูงเมื่อเทียบกับการใช้โครงสร้างอื่น ๆ

อย่างไรก็ตาม ในกรณีของหญ้าแฝกซึ่งมีระบบรากลึก และมีความสามารถเจาะทะลุชั้นดินดานได้ การนำน้ำฝนผ่านรากไปสู่ดินด้านล่างอาจส่งผลต่อเสถียรภาพได้ในบางกรณีโดยเฉพาะหากผลบวกจากหญ้าแฝกในด้านการเพิ่มกำลังเฉือนของดิน ถูกหักล้างไปโดยผลลบจากแรงดันน้ำที่เพิ่มขึ้นบริเวณช่องว่างรอบ ๆ หญ้าแฝก ทั้งนี้เมื่อวันที่ 25 กรกฎาคม 2554 พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว ได้พระราชทานพระราชดำริเกี่ยวกับปัญหาดินถล่มและการใช้หญ้าแฝกกับ ดร.สุเมธ ตันติเวชกุล เลขาธิการมูลนิธิชัยพัฒนา และคณะผู้เกี่ยวข้อง โดยมีรับสั่งว่า “ในกรณีทั่ว ๆ ไปให้ใช้ความระมัดระวังในการดำเนินงาน เพราะแม้กระทั่งหญ้าแฝกซึ่งตามหลักจะป้องกันดินพังทลายก็อาจจะเป็นตัวการให้ดินถล่มได้เพราะรากเจาะลึกทำให้ดินแตกแยก และนำน้ำลงไปอาจจะเป็เหตุให้ดินพังทลายเสียเอง”

บทความนี้จึงนำเสนอผลการศึกษาอิทธิพลจากหญ้าแฝกบนลาดดินต่อพฤติกรรมการไหลซึมของน้ำฝนสู่ลาดและเสถียรภาพของลาด โดยอาศัยทฤษฎีกลศาสตร์ของดินไม่อิ่มน้ำ แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ สำหรับวิเคราะห์การไหลซึม และแบบจำลองลิมิตต่ออีควิลิเบรียมสำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพ โดยอาศัยสมบัติของดินที่มีรากหญ้าแฝกและดินในพื้นที่ลาดชันจากงานวิจัยในอดีต โดยเลือกวิเคราะห์ลาดดินสองลักษณะด้วยกัน 1) ลาดดินธรรมชาติมีหน้าดินปกคลุม ความชันประมาณ 26 องศา ซึ่งพบได้ทั่วไปในธรรมชาติ และความชันของลาดที่มักเกิดการพิบัติระดับต้นและโคลนถล่ม 2) ลาดหินผุความชันประมาณ 60 องศา ปราศจากพืชปกคลุม ซึ่งมักเป็นลาดหินตัดในงานวิศวกรรมต่าง ๆ โดยลาดทั้งสองรูปแบบจะวิเคราะห์ทั้งกรณีที่มีการปลูกหญ้าแฝกเป็นแถวตามแนวระดับ และกรณีไม่มีการปลูกหญ้าแฝก เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการไหลซึม แรงดันน้ำ และอัตราส่วนความปลอดภัยของลาด ที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาที่ฝนตกและปริมาณน้ำฝน ดังภาพ 2.1.2

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.1.2 ลักษณะหน้าตัดลาดดินธรรมชาติสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 และ finite element mesh สำหรับวิเคราะห์การไหลซึมกรณีปลูกหญ้าแฝก

ที่มา อภินิติและสงเกียรติ (2013)

ผลการจำลองการไหลซึมของน้ำฝนสะสมสู่ลาดดินและเสถียรภาพของลาด โดยโปรแกรม SEEP/W และ SLOPE/W พบว่า กรณีลาดดินธรรมชาติที่มีความชันประมาณ 26.6 องศา หญ้าแฝกทำให้แรงดันน้ำในโพรงดินเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่การเสริมกำลังของหญ้าแฝกช่วยให้เสถียรภาพโดยรวมของลาดมีค่าสูงขึ้น แต่ในกรณีของลาดหินผุความชันประมาณ 60 องศา ในทางทฤษฎีพบว่าหากรากหญ้าแฝกลงไปถึง 0.8 เมตรจะสามารถนำน้ำลงไปใต้ดินที่ระดับลึกได้มากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้แรงดันน้ำใต้ดินสูงขึ้นและค่าอัตราส่วนความปลอดภัยลดลงประมาณ 10%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.1.3 ฤทธิภูมิ,จิตาภา,ศิริประภา (2019) ผลกระทบของการเจริญเติบโตของรากต่อสมบัติเชิงไฮโดรลิกของดิน(Soil water retention curve and hydraulic conductivity function of vegetated soil)

ลักษณะรากของหญ้าแฝก คือ เป็นระบบรากแก้ว และมีรากที่ยังลึก 1-3 เมตร ซึ่งอาจเสริมแรงในดินทำให้ดินมีคุณสมบัติเชิงกลและเชิงไฮโดรลิกที่เปลี่ยนไป และยังมีลักษณะเป็นกอลช่วยชะลอความเร็วของน้ำ และลดการกัดเซาะที่เกิดบนผิวดิน แต่อย่างไรก็ตาม ด้วยลักษณะของรากหญ้าแฝกที่มีความยาวลึกอาจส่งผลให้อัตราการไหลซึมของน้ำเพิ่มขึ้น และอาจเปลี่ยนค่าความอุ้มน้ำของดิน ซึ่งอาจส่งผลต่อเสถียรภาพของลาดดิน



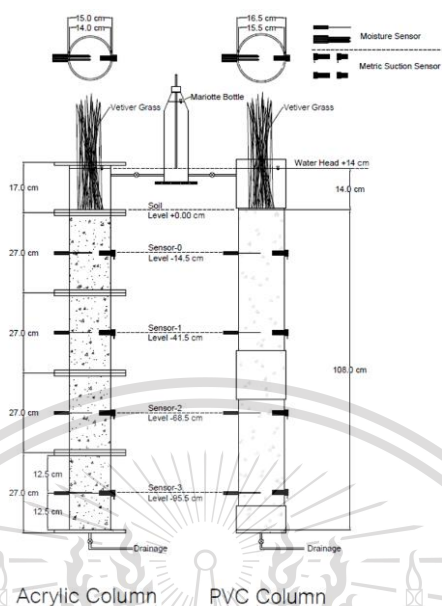
รูปที่ 2.1.3(ก) นำต้นอ่อนไปแช่น้ำ เพื่อให้รากงอก

จากเหตุผลเบื้องต้น บทความนี้จึงเป็นการวิจัยเชิงทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของการเจริญเติบโตของรากต่อสมบัติเชิงไฮโดรลิกของดิน โดยการทดสอบหาเส้นอัตราลักษณะและความชื้นน้ำ ของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ด้วยวิธี Instantaneous Profile Method โดยทดสอบกับดินลูกรัง ที่บดอัดด้วย 80% standard proctor ทดสอบทั้งหมด 8 ตัวอย่าง โดยศึกษารากของหญ้าแฝกกลุ่ม พันธุ์สงขลา3 หรือ พันธุ์พระราชทาน ที่จำลองการปลูกในกระบอกดินที่มีความสูงของดิน 108 ซม. ในเรือนเพาะชำแบบเปิด โดยเริ่มปลูก เดือนพฤศจิกายน 2562 ถึง เมษายน 2563



รูปที่ 2.1.3(ข) ทำการ Saturated ดิน โดยการรักษา

อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสม และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



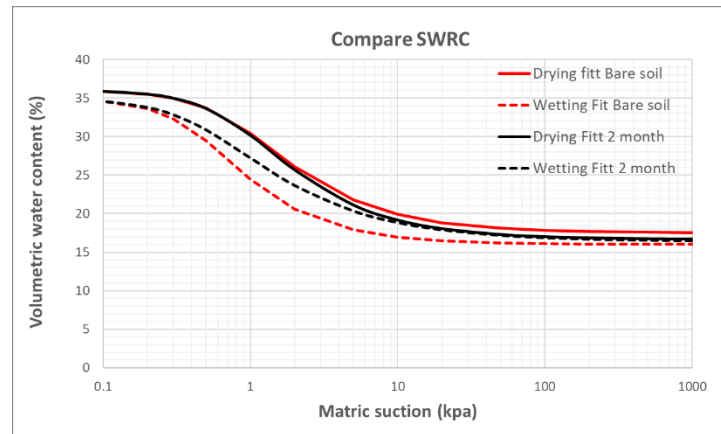
รูปที่ 2.1.3(ค) แบบจำลองกระบอกดิน

ผลการศึกษาเส้นอัตรลักษณ์ของดิน (Soil Water Characteristic Curve) และ อัตราการไหลของน้ำในดินแบบไม่อิ่มตัว (Hydraulic Conductivity) พบว่า เส้นอัตรลักษณ์ของดินที่มีรากหญ้าแฝก จะมีช่วง Hysteresis แคบลงจากดินเดิม ซึ่งคาดว่าเกิดจากอัตราส่วนช่องว่างที่ลดลงจากการชอนไชของราก สรุปได้ว่าสมบัติของดินที่เปลี่ยนไปจากการปลูกหญ้าแฝกในดิน คือ อัตราส่วนช่องว่างในดิน (Void Ratio) ซึ่งส่งผลต่อสมบัติการอุ้มน้ำของดินที่เกิดมาจากการเติบโตของรากหญ้าแฝก และจากค่าอัตราการไหลของน้ำในดินที่มีหญ้าแฝก สังเกตได้ว่าค่า $K_{saturated}$ จะสูงกว่าดินเปล่า และแนวโน้มของค่าอัตราการไหลสูงกว่า ซึ่งอาจเกิดมาจาก Preferential flow ที่เกิดขึ้นจากรากของหญ้าแฝกที่ชอนไชลงไปในแนวดิ่ง แสดงว่ารากของหญ้าแฝกมีผลให้น้ำเข้าสู่ดินได้เร็วมากขึ้น

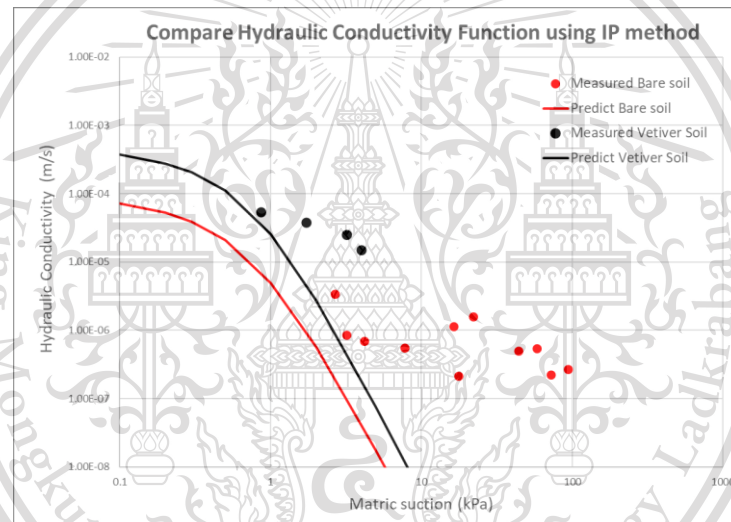
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.1.3(ง) กราฟเปรียบเทียบระหว่างเส้นอัตลักษณ์ของดินที่ไม่มีรากหญ้าแฝก และดินที่มีรากหญ้าแฝกอายุ 2 เดือน ด้วยวิธี Instantaneous Profile Method



รูปที่ 2.1.3(จ) กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างHydraulic Conductivity กับ Metric Suction ของดินที่มีรากหญ้าแฝกอายุ 2 เดือน กับ ดินที่ไม่มีหญ้าแฝก

2.2 คุณสมบัติของราก

2.2.1 ผลของรากต่อดิน

อิทธิพลจากต้นไม้ต่อพฤติกรรมทางชลศาสตร์หรือการไหลของน้ำฝนสู่ดินและเสถียรภาพของดิน

โดยอาศัยทฤษฎีกลศาสตร์ของดินไม่อิ่มน้ำ แบบจำลองคณิตศาสตร์ และสมบัติของดินที่มีรากหญ้าแฝก

สามารถพิจารณาได้หลายด้าน โดยมีทั้งด้านที่อาจส่งผลลบและบวกต่อเสถียรภาพ อาทิเช่น ดินที่มีรากหญ้าแฝกจะมีค่ากำลังเฉือน จากการตักน้ำฝน (Interception) และการดูดน้ำไปใช้ของพืช

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

(Transpiration) จะช่วยลดแรงดันน้ำในโพรงซึ่งเป็นผลดีต่อเสถียรภาพ แต่รากพืชและความขรุขระของผิวดิน (Surface roughness) ที่เพิ่มขึ้นอาจทำให้ดินมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำมากขึ้นและน้ำฝนไหลซึมสู่ด้านล่างได้มากขึ้นซึ่งอาจส่งผลในแง่ลบ อย่างไรก็ตาม ทั้งอินทรีย์วัตถุรากพืชที่ย่อยสลายไป รวมถึงกิจกรรมทางชีวภาพต่าง ๆ (เช่นการขอนไซของไส้เดือน มด ปลวกต่าง ๆ) ที่เกิดขึ้นบริเวณรากพืชก็จะช่วยให้หน้าดินมีช่องว่างที่โปร่งขึ้น เปรียบเสมือนกับมีชั้นฟองน้ำที่มีความพรุนสูง (High porosity) และนำน้ำได้ดี (High permeability) ปกคลุมลาดดินอยู่ในแนวนั้นชั้นหน้าดินที่คล้ายฟองน้ำนี้จะช่วยลดความเร็วของน้ำไหลบ่า (Run-off) และซึมน้ำฝนไว้กับหน้าดินจึงยืด ระยะเวลาก่อนที่จะเกิดน้ำไหลบ่าขึ้นภายหลังจากฝนตก นอกจากนี้ยังอาจป้องกันไม่ให้น้ำไหลซึมลึกลงไปด้านล่างได้โดยน้ำจะไหลออกด้านข้างไปก่อนที่จะไหลซึมสู่ดินชั้นล่าง จากลักษณะฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การไหลซึมในสภาวะไม่อิ่มตัว (Unsaturated permeability function) ของหน้าดิน



รูปที่ 2.2.1 อิทธิพลจากพืชพรรณต่อการไหลของน้ำที่ผิวดิน

2.2.2 หญ้าแฝก

หญ้าแฝก(ชื่อวิทยาศาสตร์: *Chrysopogon zizanioides*) เป็นพืชตระกูลหญ้าที่ขึ้นเป็นกอหนาแน่นอยู่ตามธรรมชาติทั่วทุกภาคของประเทศไทยจากที่ลุ่มถึงที่ดอน สามารถขึ้นได้ดีในดินเกือบทุกชนิด เจริญเติบโตโดยการแตกกอ ไม่เป็นอุปสรรคต่อพืชที่ปลูกข้างเคียง สามารถนำมาปลูกเพื่อการอนุรักษ์ดินและน้ำได้ดี มีระบบรากที่ลึกและมีจำนวนมาก แฝกกระจายลงไปในดินเสมือนกำแพงที่มีชีวิต ทั้งมีลำต้นและกอที่แน่นหนาสามารถลดแรงจากน้ำไหลบ่าได้อย่างดีตั้งแนวพระราชดำริของพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวฯ ซึ่งได้ทรงริเริ่มและสนับสนุนการวิจัยและการประยุกต์ใช้หญ้าแฝกมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2534 เพื่อการอนุรักษ์ดินและน้ำ และป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดดิน หญ้าแฝกที่พบในประเทศไทยจำแนก

ออกได้เป็น 2 ชนิดด้วยกัน คือ หญ้าแฝกกลุ่มและหญ้าแฝกดอน
เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

หญ้าแฝกดอน พบทั่วไปในที่ค่อนข้างแห้งแล้ง สามารถขึ้นได้ในที่แดดจัดและที่ร่มรำไร กอจะเตี้ยกว่าหญ้าแฝกุ่ม ใบหยาบมีไขเคลือบน้อย เมื่อยาวเต็มที่จะโค้งลงคล้ายตะไคร้ หลังปลูกเมื่อตั้งตัวได้แล้ว ต้องการการดูแลน้อยกว่าหญ้าแฝกุ่ม รากหยั่งลึก 80-100 เซนติเมตร เช่น พันธุ์ราชบุรี ประจวบคีรีขันธ์ ร้อยเอ็ด กำแพงเพชร 1 นครสวรรค์ และเลย

หญ้าแฝกุ่ม มีใบและรากยาวกว่าหญ้าแฝกดอน รากหยั่งลึก 100-300 เซนติเมตร เนื้อใบค่อนข้างเนียน มีไขเคลือบมากทำให้มักเจริญเติบโตได้ดีในที่ที่มีความชื้นสูงและในน้ำแช่ขัง ใบชี้ตรง ไม่ชอบที่ร่มรำไร เจริญเติบโตและขยายกอได้อย่างรวดเร็ว แต่ต้องมีการตัดใบจึงจะมีอายุยืนยาว เช่น พันธุ์สุราษฎร์ธานี กำแพงเพชร 2 ศรีลังกา สงขลา 3

จากข้อมูลข้างต้น ในการทดลองจึงเลือกใช้หญ้าแฝกุ่ม เนื่องจากรากสามารถหยั่งลึกได้มากกว่าหญ้าแฝกดอน สามารถเติบโตได้หากในกรณีหน้าฝนแล้วเกิดน้ำแช่ขัง ซึ่งกรมพัฒนาที่ดินได้คัดเลือกหญ้าแฝก โดยการสำรวจ รวบรวมจากสภาพนิเวศวิทยาต่างๆ ทั่วประเทศ จำนวน 122 ตัวอย่าง จากทำการคัดเลือกในเบื้องต้น หญ้าแฝกุ่มที่เหมาะสมทั้งพื้นที่ดินทราย พื้นที่ดินร่วน-เหนียว พื้นที่ดินลูกรัง คือ สายพันธุ์สงขลา 3

2.3 คุณสมบัติพื้นฐานของดิน

2.3.1 ดินอินทรีย์

ดินอินทรีย์มีลักษณะเป็นดินมีการสะสมเศษชิ้นส่วนพืชที่กำลังสลายตัวเกิดขึ้นเป็นชั้นหนามากกว่า 40 เซนติเมตร สภาพพืชพรรณธรรมชาติเป็นป่าพรุ เสม็ด กก และกระจูด เป็นต้น

ปัญหาในชั้นดินอินทรีย์จะมีกรดฮิวมิก ส่วนใต้ชั้นดินอินทรีย์ที่ระดับความลึกประมาณ 80-300 เซนติเมตร เป็นดินเลนตะกอนน้ำทะเลสีเทาปนน้ำเงิน ทำให้ดินมีสภาพเป็นกรดรุนแรงมาก (ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดินน้อยกว่า 4.5) ดินอินทรีย์จึงจัดเป็นดินที่มีศักยภาพในการกลายเป็นดินกรดกำมะถัน นอกจากนี้ดินอินทรีย์จะยุบตัว ดัดไฟง่าย แต่ดัดยาก ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงสภาพพื้นที่โดยการระบายน้ำออกจากพรุมากเกินไป จะทำให้ดินมีสภาพเป็นกรดได้ในภายหลัง และเสี่ยงต่อการเกิดไฟไหม้ ทำให้พื้นที่ใช้ประโยชน์ไม่ได้ การจัดการดินทำได้ลำบากและเสียค่าใช้จ่ายสูง ในขณะเดียวกัน ถ้านำมาปลูกไม้ยืนต้น ต้นไม้ล้มง่าย เนื่องจากดินอินทรีย์มีความสามารถในการรับน้ำหนักได้น้อย

ดินอินทรีย์ส่วนใหญ่พบในบริเวณที่ลุ่มน้ำขังชายฝั่งทะเลของภาคใต้และภาคตะวันออก มีพื้นที่

ประมาณ 344,283 ไร่ ประกอบด้วย กลุ่มดินที่มีชั้นวัสดุอินทรีย์หนา 40-100 เซนติเมตรจากผิวดิน ได้แก่

กลุ่มชุดดินที่ 57 และกลุ่มดินที่มีชั้นวัสดุอินทรีย์หนามากกว่า 100 เซนติเมตรจากผิวดิน ได้แก่ กลุ่มชุดดิน

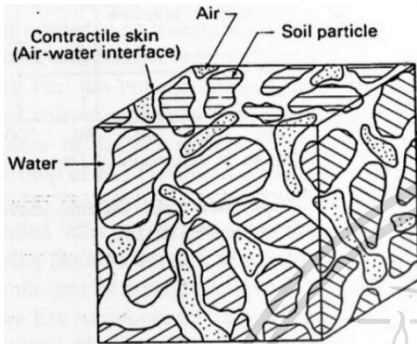
ที่ 58

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.3.2 ดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

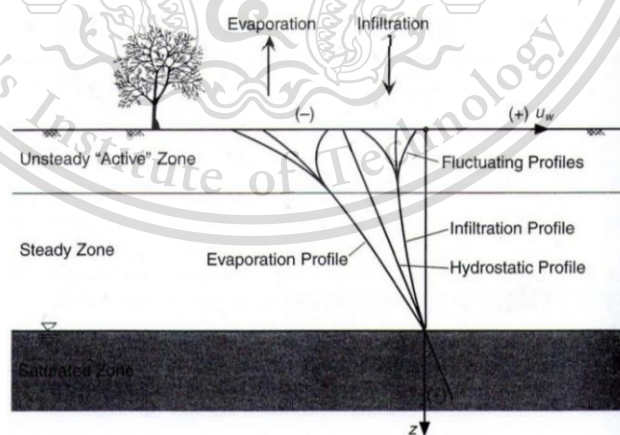
โดยทั่วไปในหนึ่งหน่วยปริมาตร ดินจะประกอบด้วยกันสองส่วน ได้แก่ อนุภาคของตัวเม็ดดินเอง และช่องว่างภายในดิน ในกรณีที่ช่องว่างของดินเต็มไปด้วยน้ำ เรียกดินในส่วนนี้ว่าดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated Soil) กรณีในช่องว่างของดินมีความชื้นบางส่วน และในช่องว่างนั้นมีส่วนที่เป็นอากาศอยู่ด้วย จะเรียกดินส่วนนี้ว่าดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (ภาพที่ 2.3.2(ก))



รูปที่ 2.3.2(ก) ผังแสดงส่วนประกอบของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

ที่มา: Fredlund and Rahardjo (1993)

รูปแบบของแรงดูดเมทริกซ์ในแนวตั้งของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ มีปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดูดที่เกิดขึ้นมีอยู่หลายอย่างด้วยกัน ได้แก่ สมบัติความอุ้มน้ำของดิน ซึ่งประกอบด้วยเส้นอัตราลักษณะของดิน (Soil Water Characteristic Curve) และฟังก์ชันสัมประสิทธิ์ความซึมของดิน (Hydraulic Conductivity Function) ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจาก การไหลซึมและการระเหยของน้ำบริเวณผิวดิน และปัจจัยด้านลักษณะการไหล เช่น ความลึกของระดับน้ำใต้ดิน ปัจจัยที่กล่าวในข้างต้นเป็นผลให้เกิดความแตกต่างของแรงดูดเมทริกซ์ตามความลึก ดังแสดงในภาพที่ 2.3.2(ข)



รูปที่ 2.3.2(ข) แนวคิดของแบบจำลองแรงดูด ของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ที่มาจาก Lu and Likos (2004) มอนูญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.3.3 ปริมาณน้ำในดิน (water content)

มวลดินประกอบด้วยส่วนที่เป็นเม็ดดินหรือมวลของแข็ง ซึ่งเป็นอนุภาคของแร่และอินทรีย์สาร โดยอนุภาคมีรูปร่าง 3 มิติมีผลทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเม็ดดินภายในช่องว่างจะบรรจุด้วยมวลของน้ำ และมวลของอากาศ ซึ่งจะเรียกว่าดินชื้นหรือดินเปียก บางสภาวะช่องว่างระหว่างเม็ดดินอาจมีเฉพาะมวลของน้ำจะเรียกว่าสภาวะอิ่มตัว หรืออาจมีเฉพาะมวลของอากาศจะเรียกว่าอยู่ใน สภาวะดินแห้งการหาปริมาณความชื้นในมวลดินคือการหาอัตราส่วนระหว่างมวลหรือน้ำหนักของน้ำต่อมวลหรือน้ำหนักของเม็ดดินที่มีอยู่ในมวลดิน

ดินตามธรรมชาตินั้นองค์ประกอบของมวลดิน มี 3 ส่วนใหญ่ๆ ส่วนแรกคือส่วนที่เป็นเม็ดดินหรือของแข็ง ส่วนที่สองคือส่วนที่เป็นน้ำหรือของเหลวและส่วนที่สามคือส่วนที่เป็นอากาศหรือก๊าซ ทั้งนี้ดินไม่จำเป็นต้องมีส่วนประกอบครบทั้ง 3 ส่วน อาจจะมีส่วนประกอบเพียง 2 ส่วนก็ได้ขึ้นอยู่กับสถานสภาพของมวลดินเป็นเกณฑ์ดังแสดงส่วนประกอบของมวลดินดังภาพที่ 2.3.3



รูปที่ 2.3.3 แสดงส่วนประกอบของมวลดิน

ที่มา : มานิต ช่วยงาน มิ.ย. 2552

การแสดงปริมาณน้ำในดินที่นิยมทั่วไป มี 3 วิธี

1) ปริมาณความชื้นดินโดยน้ำหนัก(Gravimetric water content)

เป็นค่าเปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักของความชื้นดินกับน้ำหนักของดินอบแห้ง หน่วยวัดอาจแสดง

สัดส่วนของน้ำหนักเป็นกรัมต่อกรัม หรือแสดงเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก (% by weight) ก็ได้ เป็นวิธีที่ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ที่สุดในการหาค่าความชื้นดิน

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$\theta_m = \frac{m_w}{m_s}$$

2) ปริมาณความชื้นดินโดยปริมาตร (volume water content)

เป็นปริมาณความชื้นดินที่เปรียบเทียบระหว่างปริมาตรของความชื้นดินกับปริมาตรดิน หน่วยวัดอาจแสดงเป็น เช่น มิลลิลิตร/มิลลิลิตร หรือ ร้อยละโดยปริมาตร (% by volume) ก็ได้

$$\theta_v = \frac{V_w}{V_b}$$

3) ปริมาณความชื้นดินเป็นความสูงของน้ำ (depth water content)

เป็นการคำนวณจากสัดส่วนหรือร้อยละของความชื้นดินโดยปริมาตรหรือน้ำหนัก โดยจะต้องระบุความลึกของดิน มีหน่วยเช่นเดียวกับหน่วยความสูงของดินที่ใช้ในการคำนวณ เช่น ซม. มิลลิเมตร หรือ นิ้ว เช่น ความชื้นของน้ำในดินที่ตลอดความลึก 50 เซนติเมตร จะมีความสูงเท่ากับ 13 เซนติเมตร เมื่อดินมีปริมาณความชื้น 20% และมีค่าความหนาแน่นรวมของดินเท่ากับ 1.3 กรัมต่อมิลลิลิตร มักใช้ในการคำนวณปริมาณน้ำเพื่อการชลประทาน

$$V_w = \theta_v A z$$

2.3.4 เครื่องมือวัดความชื้นในดิน (Soil Moisture Sensor)

เครื่องมือวัดความชื้นในดิน ดังภาพ 2.9 เป็นเครื่องมือสำหรับอ่านปริมาณความชื้นที่อยู่โดยรอบดิน โดยใช้ก้านทั้งสองหยั่งลงไปในดิน มีความยาวรวมก้าน 12 ซม. ความกว้างฐาน 2.5 ซม. และความกว้างก้านเป็น 2 ซม. ซึ่งจะอ่านค่าความต้านทานเพื่อที่นำไปหาความชื้นในดินได้ ปริมาณน้ำที่มากจะทำให้ดินสามารถนำไฟฟ้าได้ดีเนื่องจากความต้านทานน้อย ขณะที่ถ้าดินนั้นมีปริมาณน้ำน้อยจะทำให้ดินสามารถนำไฟฟ้าได้ไม่ดี เนื่องจากความต้านทานสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.3.4 Soil Moisture Sensor

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการวัดโดยเครื่องมือวัดความชื้นในดินกับปริมาณความชื้นในดินจริงจำเป็นต้องทำการปรับแก้ เนื่องจากมีตัวแปรหลายอย่างที่ส่งผลต่อค่าเช่น ชนิดของดิน อุณหภูมิ และคุณสมบัติการนำไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งสามารถวัดค่าได้ตั้งแต่ 0 - 100 % มีความแม่นยำอยู่ที่ 1 - 2 %

2.3.5 เครื่องมือวัดความดันของน้ำในดิน (Suction sensor)

เครื่องมือวัดความดันของน้ำในดิน ดังภาพ 2.10 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 ซม. และความยาวรวมเซนเซอร์เป็น 5 ซม. ลักษณะของเครื่องมือประกอบด้วยแผ่นเซรามิกสำหรับวัดความดันของน้ำในดิน โดยแผ่นเซรามิกเชื่อมต่อกับเซนเซอร์เพื่อทำการต่อเข้ากับอุปกรณ์เก็บข้อมูล เมื่อนำเซรามิกสัมผัสกับดินที่ต้องการวัดความดันของน้ำในดิน เซนเซอร์จะทำการวัดปริมาณน้ำบนแผ่นเซรามิกและใช้คุณสมบัติการเก็บน้ำของแผ่นเซรามิกเพื่อหาความดันน้ำในดิน ซึ่งสามารถวัดค่าได้ตั้งแต่ 0 - 100 kPa และมีความแม่นยำอยู่ที่ 0.25 kPa



รูปที่ 2.3.5 Suction Sensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

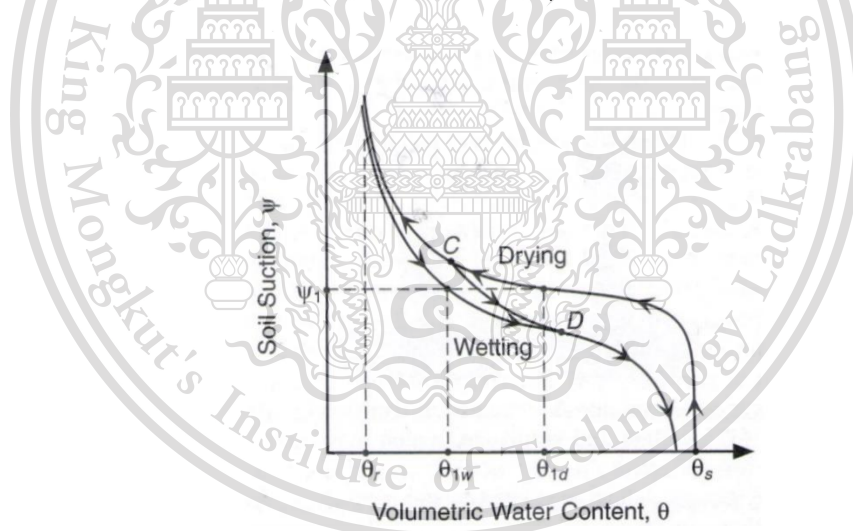
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.3.6 เส้นอรรถลักษณะของดิน (Soil Water Characteristic Curve, SWCC)

เส้นอรรถลักษณะของดิน หรือความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับแรงดูด เป็นสมบัติพื้นฐานของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่สามารถใช้ทำนายพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น กำลังเฉือนของดิน สมบัติการนำความร้อน ยิ่งไปกว่านั้นเส้นอรรถลักษณะยังมีความสำคัญในการนำไปใช้ในการวิเคราะห์แรงดันน้ำที่เกิดขึ้นในดิน อันนำไปสู่การวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัยที่เกิดขึ้นต่อไป

โดยนิยามของเส้นอรรถลักษณะ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของดิน กับแรงดูด (ภาพที่ 2.6) ซึ่งความชื้นสามารถแสดงได้ในหลายรูปแบบ เช่น ระดับความอิ่มตัว (Degree of Saturation) ความชื้นโดยปริมาตร (Volumetric Water Content) หรือความชื้นโดยน้ำหนัก (Gravimetric Water Content) แต่ทั่วไปแล้วนิยมนำเสนอเส้นอรรถลักษณะในรูปแบบความชื้นที่เป็นความชื้นโดยปริมาตร เนื่องจากความสัมพันธ์ที่ได้จำเป็นในการวิเคราะห์การไหลซึมแบบ Transient Flow และความชื้นที่ นิยมนำเสนอมือกรูปแบบหนึ่งคือ ระดับความอิ่มตัว เนื่องจากเส้นอรรถลักษณะที่เป็นความสัมพันธ์ของระดับความอิ่มตัวกับแรงดูด ใช้ในการคำนวณหาค่า Air Entry Value ได้ชัดเจนที่สุด (อภินิติ, 2555)



รูปที่ 2.3.6 เส้นอรรถลักษณะของดิน (Soil Water Characteristic Curve)

ที่มา: Lu and Likos (2004)

เส้นอรรถลักษณะโดยทั่วไปมีความเป็น Hysterisis คือมีกราฟความสัมพันธ์ที่ได้ในสภาวะที่ดินกำลังเปียก (Wetting/Sorption) และในสภาวะที่ดินกำลังแห้ง (Drying/Desorption) ไม่เป็นเส้นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

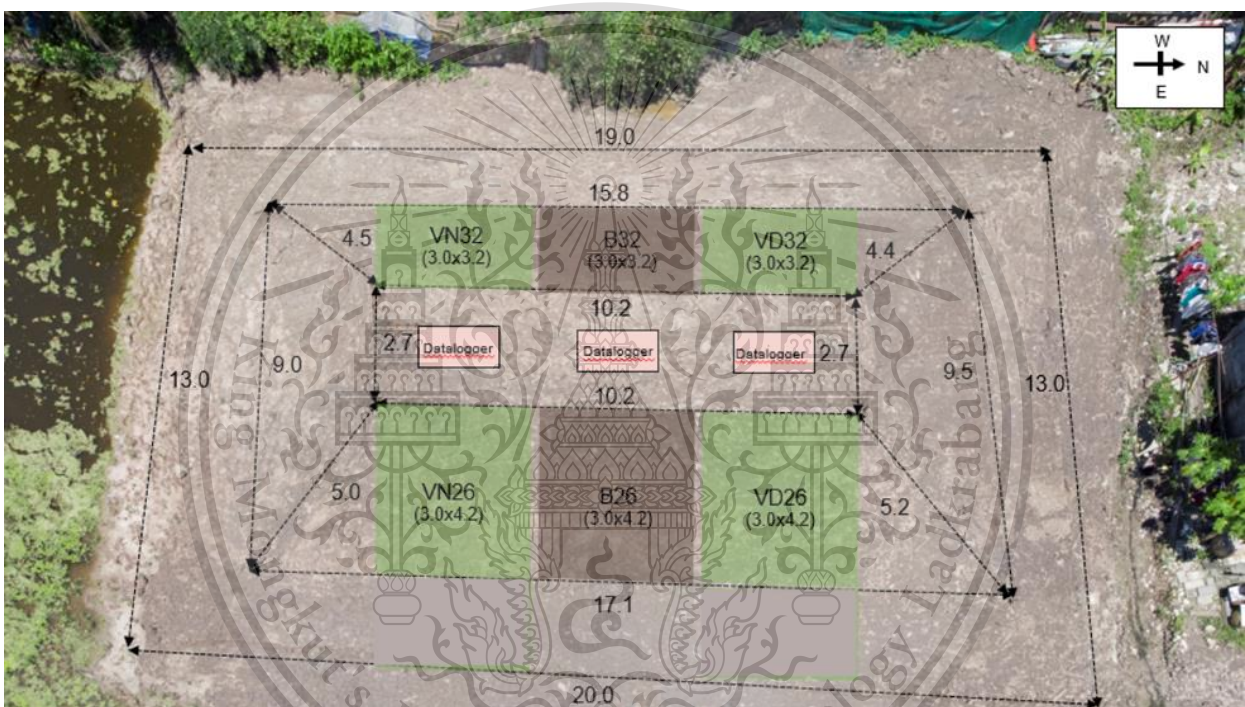
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 การเตรียมคันดิน

3.1.1 การถมดินสร้างสโลป

ทำการถมดินให้มีความชัน 2 ค่า คือ 1 ต่อ 2 และ 1 ต่อ 1.5 โดยคันดินมีขนาดประมาณ 9 เมตร คูณ 17 เมตร แต่ละค่าความชันจะแบ่งพื้นที่เป็น 3 โซน โดยทำการปลูกหญ้าแฝก 2 โซน (โซนที่เป็นสีเขียว) และดินเปล่า 1 โซน (โซนที่สีน้ำตาล) รวมทั้งพื้นที่จะมีโซนปลูกหญ้าแฝกทั้งหมด 4 โซน และโซนดินเปล่า 2 โซน ดังรูป 3.1.1



รูปที่ 3.1.1 รูปภาพคันดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.1.2 การเตรียมดินอินทรีย์

-ทดสอบ Field Density Test โดยใช้ Sand Cone Method



รูปที่ 3.1.2.1 Field Density Test โดยใช้ Sand Cone Method
-ทดสอบ Atterberg Limit



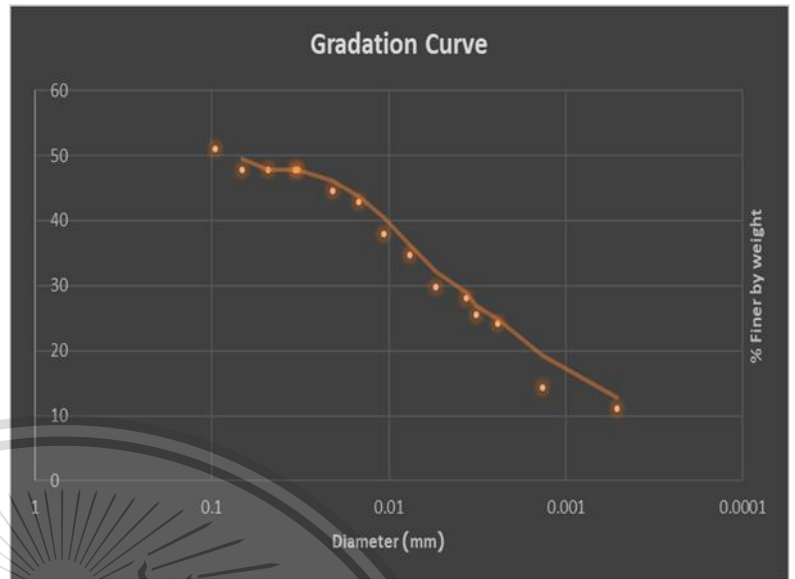
รูปที่ 3.1.2.2 Atterberg Limit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

-ทดสอบ Hydrameter Analysis



รูปที่ 3.1.2.3(ก) Hydrameter Analysis

รูปที่ 3.1.2.3(ข) กราฟ Hydrameter Analysis

-ทดสอบ Specific gravity



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

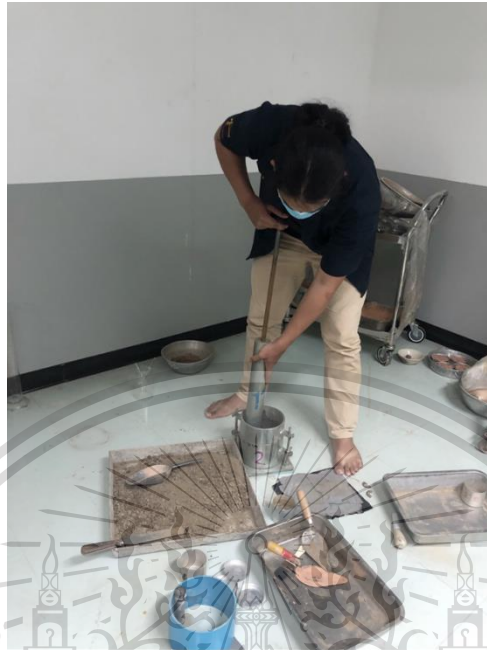
รูปที่ 3.1.2.4 การทดสอบ Specific gravity

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

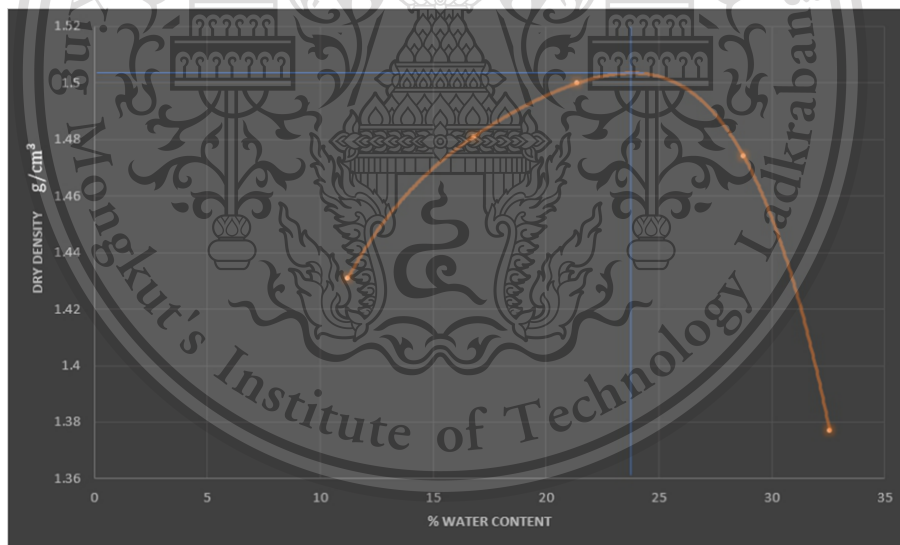
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

-ทดสอบ Compaction Test

- ดินอินทรีย์ที่นำมาใช้ในการวิจัย ขุดมาจาก นิคมใหม่36 กรุงเทพมหานคร



รูปที่ 3.1.2.5 การบดอัดดิน



รูปที่ 3.1.2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Dry Density กับ Water Content

1. นำดินอินทรีย์ไปอบที่ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปร่อนผ่านตะแกรง โดยให้ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ทั้งหมดจำนวน 15 กก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 2 หลังจากนั้น นำดินที่ร่อนผ่านตะแกรงแล้ว ไปทดสอบหาค่าคุณสมบัติดิน ไม่ว่าจะเป็นการใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้ง Grain Size Analysis ; ASTM D-422 (ตามภาคผนวก) เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- Compaction Test ; ASTM D698-78, ASTM D1557-78 (ตามภาคผนวก)
 - Max Dry Density = 1.504 g/cm^3 ที่ OMC = 23.8%
 - 70% Degree of compaction = 1.10 g/cm^3



รูปที่ 3.1.2.9 เตรียมดินโดยการร่อนผ่านตะแกรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

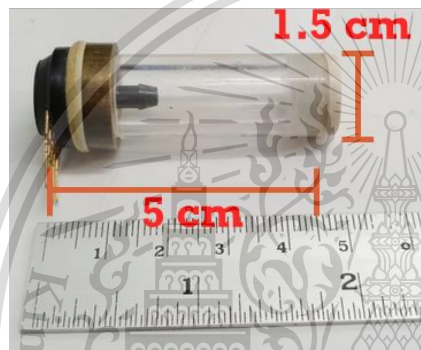
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.2 การเตรียมเครื่องมือ อุปกรณ์และติดตั้ง

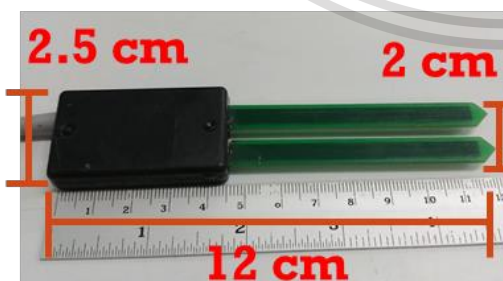
3.2.1 การเตรียม Sensor และ Data logger

- Data logger
 - กล่องสำหรับเก็บข้อมูลที่ได้รับจากเซนเซอร์ 4 ตัว เป็นค่าโวลท์ โดยเก็บข้อมูลทุกๆ 10 วินาที
- Moisture Sensor
 - นำไปคาลิเบตกับดินที่ความหนาแน่นเท่ากับการวิจัย และเพิ่มปริมาณน้ำ 5 ค่า เพื่อสร้างสมการเปรียบเทียบ จากโวลท์ เป็น Volumetric water content (กราฟเปรียบเทียบในภาคผนวก)



รูปที่ 3.2.1(ก) ขนาดเซนเซอร์ Suction รูปที่ 3.2.1(ข) วิธีการคาลิเบตเซนเซอร์ Suction

- Suction Sensor
 - ทำการ Saturated เซรามิค และ เซนเซอร์
 - นำไปคาลิเบต กับ ตัวปั๊มสุญญากาศ วัดค่าความดันขาไปและขากลับ 0-600 mmhg วัดค่าทีละ 100 mmhg เพื่อสร้างสมการเปรียบเทียบ จากโวลท์ เป็น kpa



รูปที่ 3.2.1(ค) ขนาดเซนเซอร์moisture รูปที่ 3.2.1(ง) วิธีการคาลิเบต เซนเซอร์moisture

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

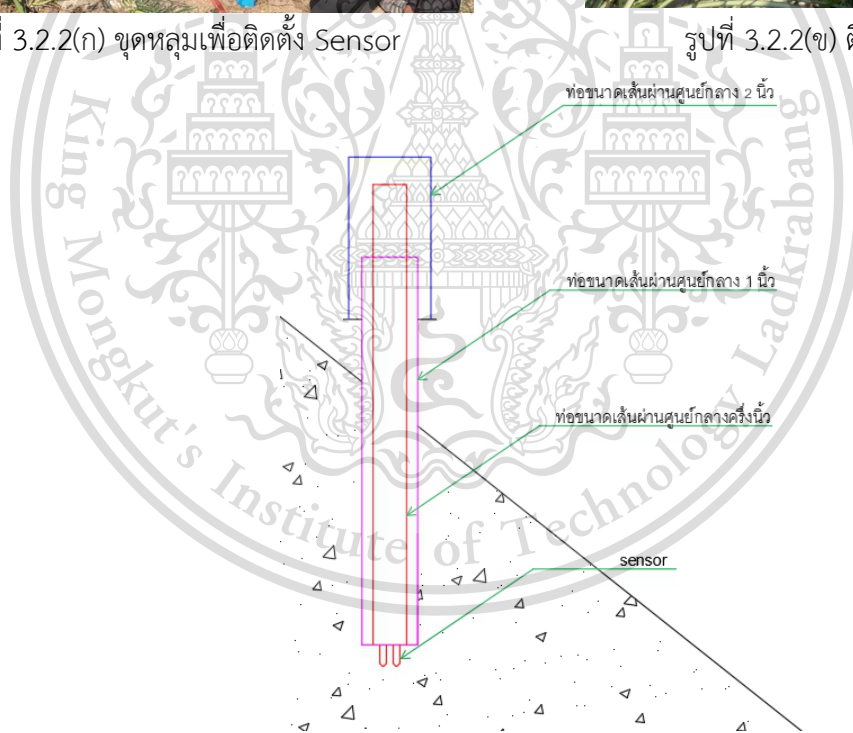
3.2.2 ติดตั้ง Sensor



รูปที่ 3.2.2(ก) ขุดหลุมเพื่อติดตั้ง Sensor



รูปที่ 3.2.2(ข) ติดตั้ง Sensor



รูปที่ 3.2.2(ค) ตำแหน่งการวาง Sensor

3.3 การเตรียมหญ้าแฝกและปลูก

3.3.1 การเตรียมหญ้าแฝก

หญ้าแฝกที่นำมาใช้ในการทดสอบคือสายพันธุ์สงขลา 3 หรือพันธุ์พระราชทาน
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนูญาติเห็นาเบเซบระโยชน์ด้านการค้า
 1. นำหญ้าแฝกต้นอ่อน ไปแช่น้ำ ในที่ร่ม เพื่อให้รากงอกเป็นเวลา 2 คืน
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อแหล่งอื่น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2. นำมาเพาะเลี้ยงในดินปลูก(ดินมูลไส้เดือน) ในโรงเพาะชำแบบเปิด เป็นเวลา 2 อาทิตย์ เพื่อให้รากแข็งแรง
3. นำดินมาคว่ำกระถาง ล้างดินออก เก็บข้อมูลรากเบื้องต้น (ความยาวราก และเส้นผ่านศูนย์กลางราก) จากนั้นคัดต้นที่มีรากที่เยอะและยาว สภาพแข็งแรง ไปปลูกในกระบอกดิน กระบอกละ 2 ต้น เพื่อรอเก็บข้อมูลทางไฮโดรลิกของดินต่อไป



รูปที่ 3.3.1 นำต้นอ่อนไปแช่น้ำ เพื่อให้รากงอก



รูปที่ 3.3.2 อนุบาลในดินมูลไส้เดือน 2 อาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.3.2 การปลูกหญ้าแฝก



รูปที่ 3.3.2.1 นำต้นอ่อนไปปลูกที่ นิมิตรใหม่ 36



รูปที่ 3.3.2.2 ภาพถ่ายจากมุมสูง เพื่อดูการเจริญเติบโตของหญ้าแฝก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

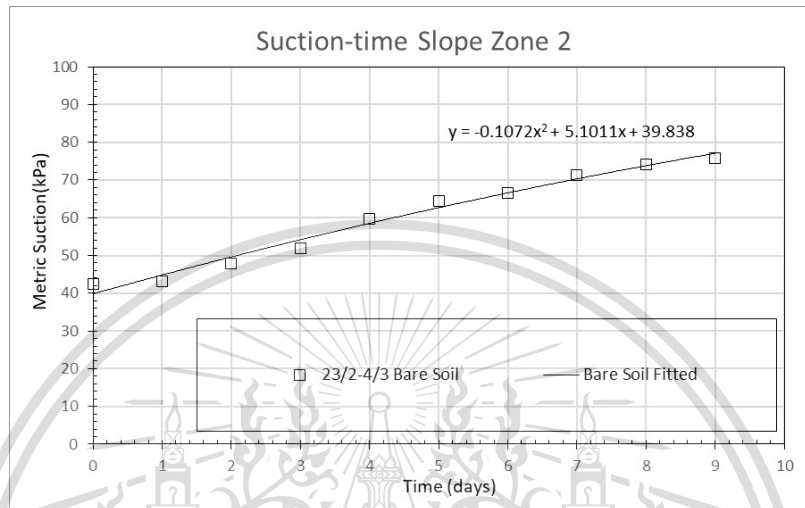
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

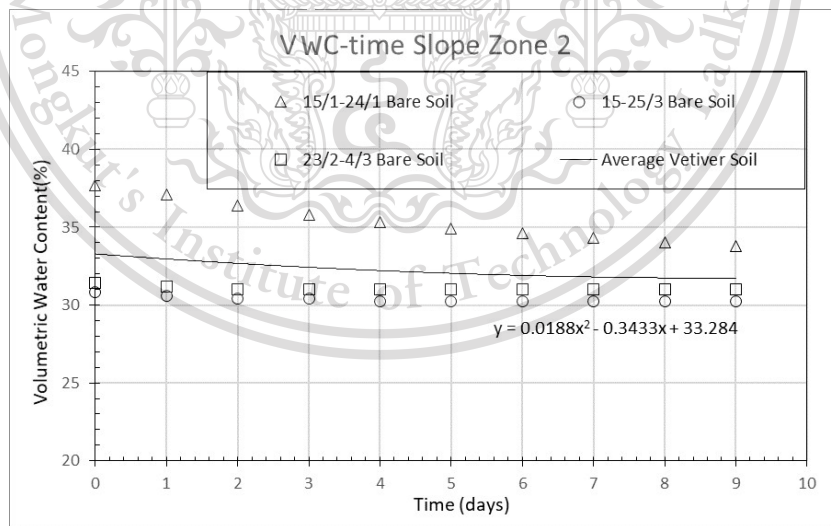
บทที่ 4 ผลการศึกษา

4.1. การเปลี่ยนแปลงของ Metric Suction และ Volumetric Water Content ต่อเวลา

- ดินไม่มีหญ้าแฝก (Zone 2 1:2)



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Metric Suction กับเวลา ; ในดินที่ไม่มีหญ้าแฝก (Zone2 1:2 dept 50 cm)



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric Water Content กับเวลา ; ในดินที่ไม่มีหญ้าแฝก (Zone 2 1:2 dept 50 cm)

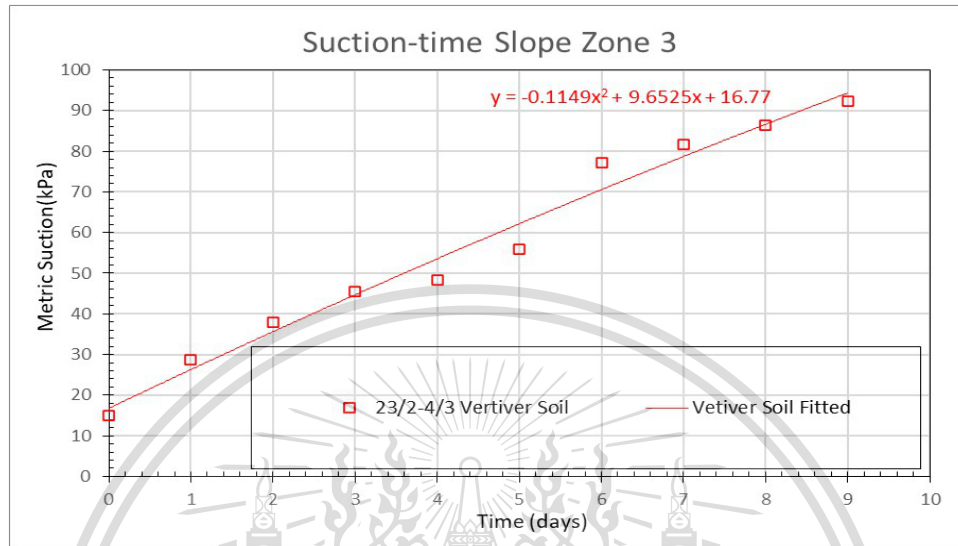
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

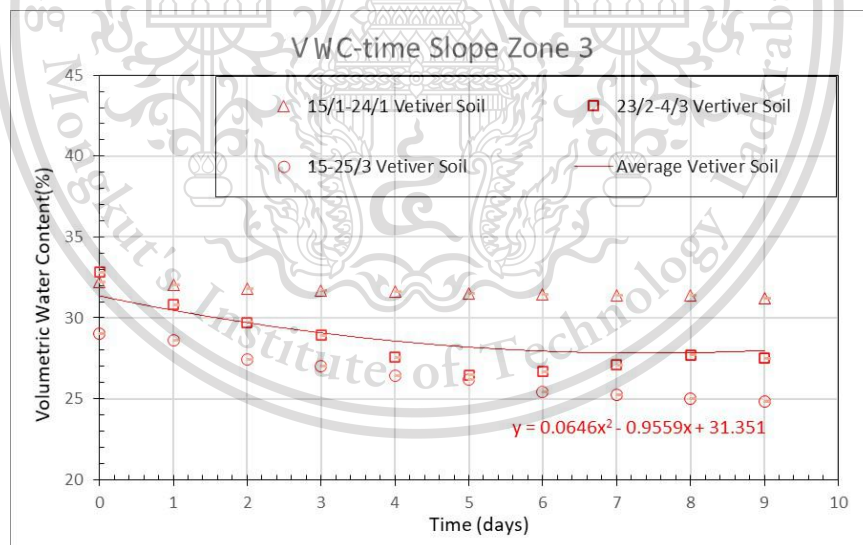
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ในสไลด์ 1ต่อ2 ที่ระดับเซนเซอร์ลึก50เซนติเมตรจากผิวดิน สังเกตได้ว่าค่า Matric Suction เพิ่มขึ้นตามเวลา และ การเปลี่ยนแปลงของค่า ปริมาณน้ำในดินโดยปริมาตร มีค่าลดลงตามเวลา

ดินที่มีหญ้าแฝก เริ่มปลูกเมื่อ 7/9/63 – 6/3/64 (Zone 3 1:2)



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างMetric Suction กับเวลา; ในดินที่มีหญ้าแฝก (Zone3 1:2 dept 100cm)



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างVolumetric Water Content กับเวลา ; ในดินที่มีหญ้าแฝก (Zone3 1:2 dept 100cm)

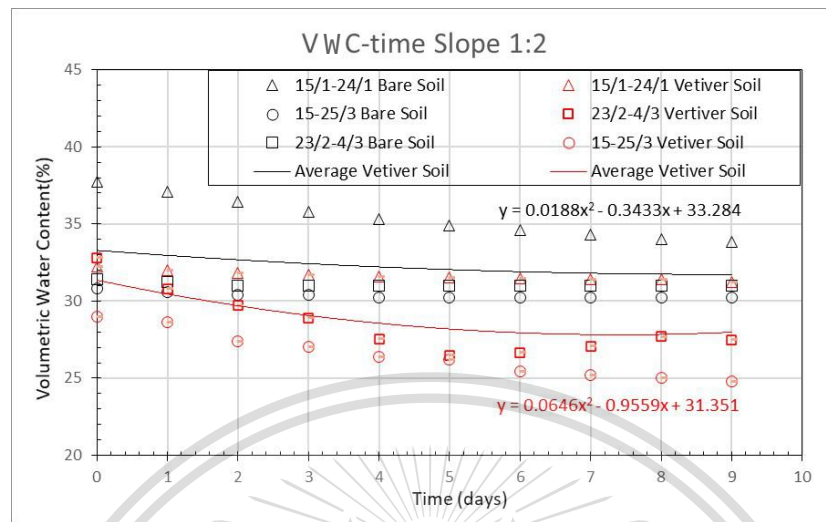
รูปที่ 4.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า Matric Suction ในแต่ละช่วงเวลา รูปที่ 4.4 แสดงการ

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่สามารถนำเนื้อหาไปใช้

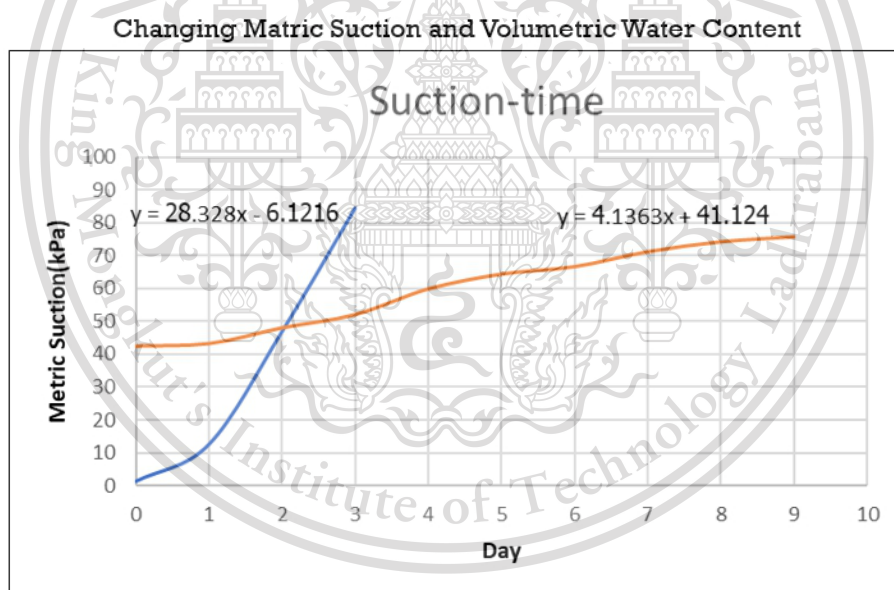
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

อย่างมากตามเวลาเนื่องจากเห็นได้ชัดว่ารากหญ้าแฝกได้ทำการดูดน้ำ และการเปลี่ยนแปลงของค่า ปริมาณน้ำในดินโดยปริมาตร มีค่าลดลงตามเวลา



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric Water Content กับเวลา ; ในดินที่มีหญ้าแฝก และดินเปล่า



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Metric Suction กับเวลา; ในดินที่มีหญ้าแฝกและดินเปล่าโดย ที่เส้นสีส้มคือดินเปล่าและสีน้ำเงินคือดินปลูก โดย Limit ของ Suction Sensor วัดได้สูงสุด 100 kpa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

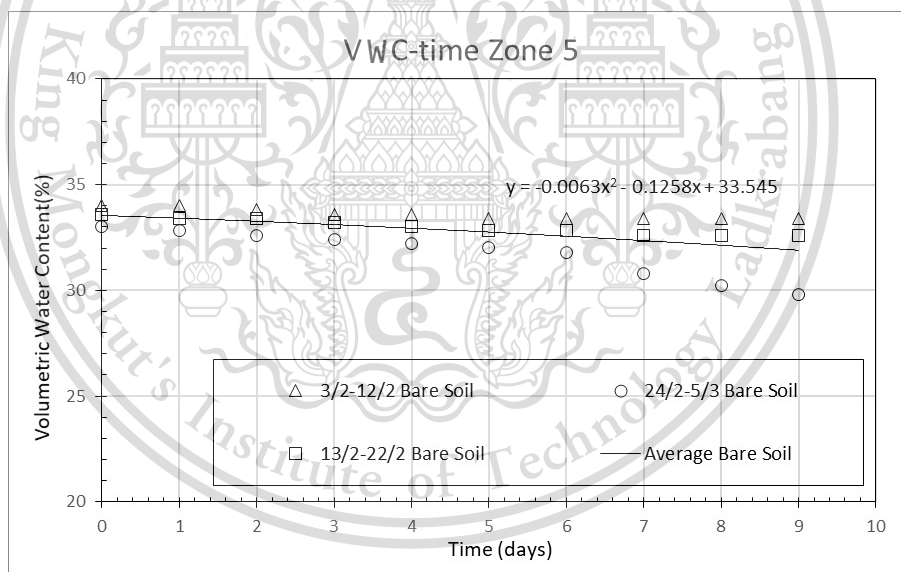
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของSuctionและVWCกับเวลาของทั้งสองโซน

รูปที่ 4.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า Matric Suction ในแต่ละช่วงเวลาของทั้งสองโซน รูปที่ 4.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า ปริมาณน้ำในดินโดยปริมาตร ในแต่ละช่วงเวลาของทั้งสองโซน ซึ่งอยู่ในสไลบ 1ต่อ2 ที่ระดับเซนเซอร์ลึก 50 เซนติเมตร และ 100 เซนติเมตร จากผิวดิน สังเกตจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง metric suction กับวันจะเห็นได้ว่าที่เส้นสัมผัสคือโซนดินเปล่าค่า metric suction (การดูดน้ำในดิน) นั้นค่อยๆเพิ่มขึ้น แต่เส้นสีฟ้าคือโซนดินที่ปลูกหญ้าค่า metric suction เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งสังเกตได้จากค่าความชันของกราฟทั้งสอง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าพืชต้องใช้น้ำในการเจริญเติบโตดินที่มีหญ้ามีการดูดน้ำมาใช้เยอะกว่า ดินที่ไม่ปลูกหญ้า และจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง water content กับวันจะเห็นได้ว่าที่เส้นสัมผัสคือโซนดินเปล่าค่า water content (ความชื้นในดิน) นั้นค่อยๆลดลงแต่เส้นสีฟ้าคือโซนดินที่ปลูกหญ้าค่า water content ลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งสังเกตได้จากค่าความชันของกราฟทั้งสอง ดังนั้น ดินที่มีหญ้ามีความชื้นน้อยกว่าดินที่ไม่ปลูกหญ้า

- ดินไม่มีหญ้าแฝก(Zone 5 1:1.5)

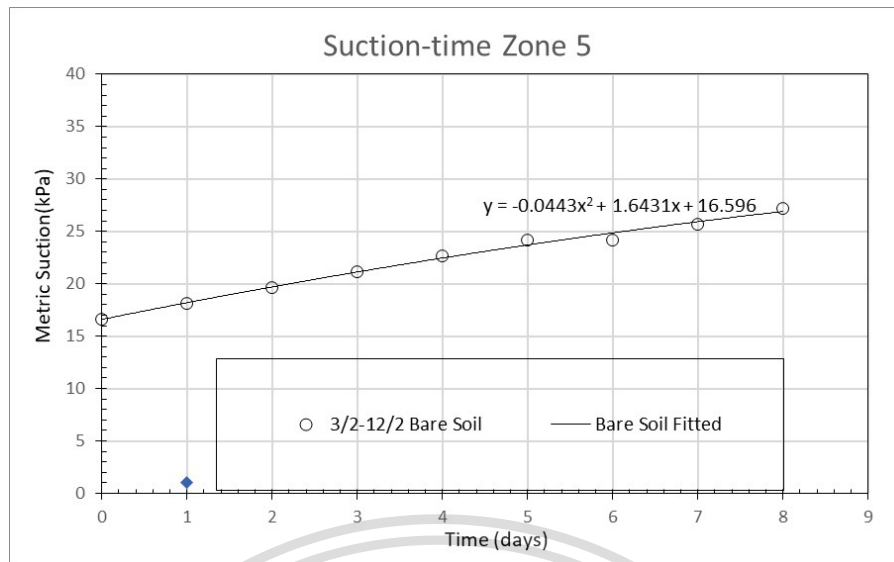


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric Water Content กับเวลา ; ในดินที่ไม่มีหญ้าแฝก (Zone 5 1:1.5 dept 100 cm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

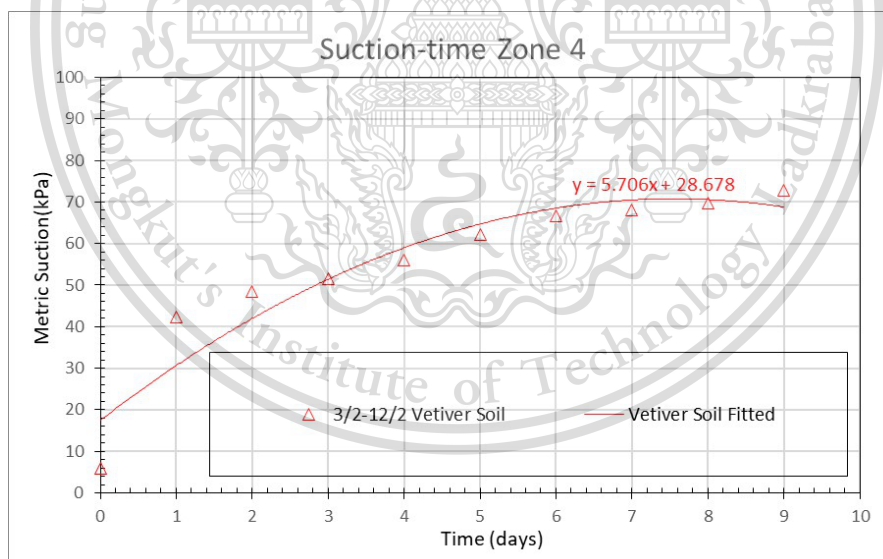
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง metric suction กับเวลา ; ในดินที่ไม่มีหญ้าแฝก (Zone 5 1:1.5 dept 100 cm)

ดินที่มีหญ้าแฝก เริ่มปลูกเมื่อ 7/9/63 – 6/3/64 (Zone 4 1:1.5)

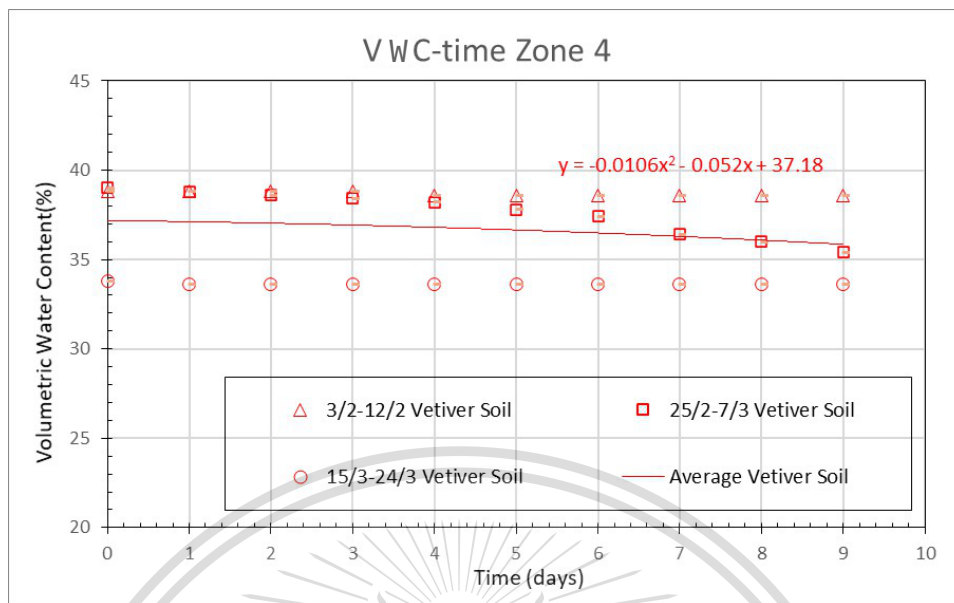


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Metric Suction กับเวลา ; ในดินที่มีหญ้าแฝก (Zone 5 1:1.5 dept 100 cm)

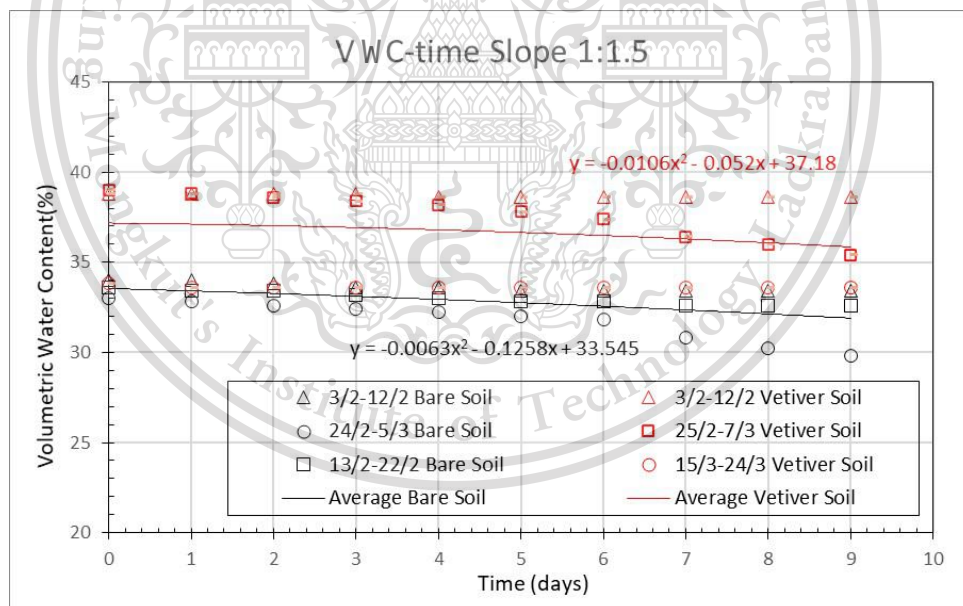
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric Water Content กับเวลา ; ในดินที่ไม่มีหญ้าแฝก (Zone 5 1:1.5 dept 100 cm)



รูปที่ 4.11 รูปแสดงให้เห็นว่าข้อมูลผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของSuctionและVWCกับเวลาของทั้งสองโซน

รูปที่ 4.8 และ 4.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า Matric Suction ในแต่ละช่วงเวลาของทั้งสองโซน รูปที่ 4.7 และ 4.10 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า ปริมาณน้ำในดินโดยปริมาตร ในแต่ละช่วงเวลาของทั้งสองโซน ซึ่งอยู่ในสโลป 1ต่อ1.5 ที่ระดับเซนเซอร์ลึก 100 เซนติเมตร จากผิวดิน สังเกตจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง metric suction กับวันจะเห็นได้ว่าที่เส้นส้มคือโซนดินเปล่าค่า metric suction (การดูดน้ำในดิน) นั้นค่อยๆเพิ่มขึ้น แต่เส้นสีฟ้าคือโซนดินที่ปลูกหญ้าค่า metric suction เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งสังเกตได้จากค่าความชันของกราฟทั้งสอง แต่ค่า water content ของ โซนดินที่ปลูกหญ้านั้น สูงกว่าค่า water content ของดินเปล่า เนื่องจากสภาพอากาศแปรปรวน และตัว sensor ที่เก็บค่ามีปัญหาหลังติดตั้งแล้ว จึงไม่สามารถสรุปผลของข้อมูลที่ได้มาดังรูป

4.2 เส้นอัตลักษณ์ของดิน (SWRC)

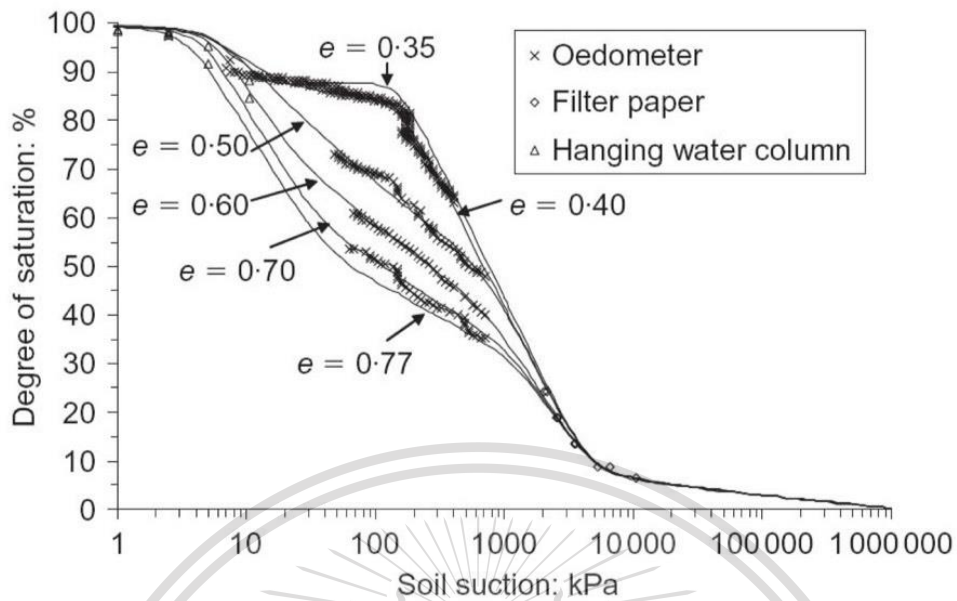
ในส่วนของ effective stress เป็นผลมาจาก soil moisture และ soil suction variation สามารถกำหนดได้โดย suction stress characteristic curve (SSCC) โดยการทดสอบแรงเฉือน ซึ่งงานวิจัยล่าสุดแสดงให้เห็นว่า SSCC สามารถเชื่อมโยงกับ soil-water characteristic curve (SWCC). เอกลักษณ์ของ SSCC ที่กำหนดจากทั้ง shear strength และการทดสอบการกักเก็บความชื้นในดินจะถูกตรวจสอบสำหรับดินหลายแห่งในเกาหลี หลักของ effective stress แสดงให้เห็นโดยแสดงให้เห็นว่า effective stress มีประสิทธิภาพตาม SSCC อธิบายเกณฑ์ failure ที่ไม่ซ้ำกันเช่นเดียวกับเกณฑ์ saturated failure. ค่า SSCC ยังแสดงการคาดการณ์ของ soil-water retention curves ในหลายเปอร์เซ็นต์ และค่า SWCCs ของดินเหล่านี้กำหนดโดยตรงจากการทดสอบ soil moisture retention tests ยังสอดคล้องกับ SSCCs ที่กำหนดโดยตรงจากการทดสอบ triaxial shear-strength tests ด้วยความแตกต่างกันหลาย kPa ดังนั้นเราจะแสดงให้เห็นว่า suction stress characteristic curve หรือ soil-water retention curve เพียงอย่างเดียวสามารถใช้เพื่ออธิบายทั้ง effective stress และ soil-water retention characteristics ของดินที่อิ่มตัว

จากเรื่อง Relationship between the Soil-Water Characteristic Curve and the Suction Stress Characteristic Curve: Experimental Evidence from Residual Soils ของผู้เขียน Seboong Oh, A.M.ASCE; Ning Lu, F.ASCE; Yun Ki Kim; Sung Jin Lee; and Seung Rae Lee, M.ASCE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.12 อิทธิพลจากอัตราส่วนช่องว่างต่อเส้นอัตราลักษณ์ของดินเหนียวปนทรายแป้งบดอัด (Jotisankasa et al.,2009)

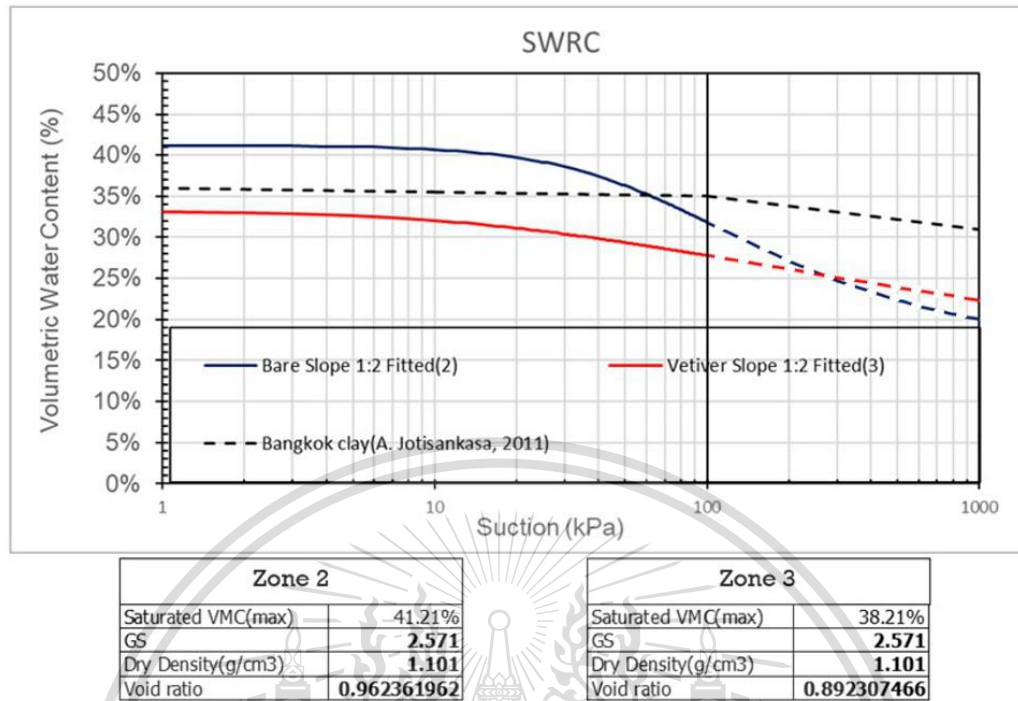
การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนช่องว่างมีผลต่อเส้นอัตราลักษณ์ (SWRC) ในลักษณะเดียวกับน้ำหนักกดทับ (Overburden) นั่นคือ เมื่อค่า e ลดลง (ดินแน่นขึ้น ช่องว่างลดลง) ค่า θ_s (หรือ porosity, $n=e/(1+e)$) มีค่าน้อยลง ทำให้ ค่า Air-entry suction มีค่าสูงขึ้น และความชันของเส้นอัตราลักษณ์ = $(d\theta/d \log s)$, น้อยลงนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- ดินที่มีหญ้าแฝกและดินเปล่า (Zone2 1:2, Zone3 1:2)



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric Water Content กับ Metric Suction ; ในดินที่ไม่มีหญ้าแฝกและมีหญ้าแฝก โดย Limit ของ Suction Sensor วัดได้สูงสุด 100 kpa

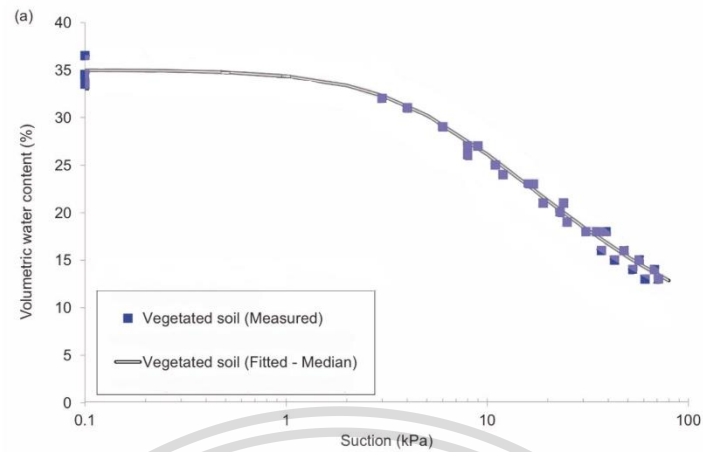
จากรูป 4.13 เป็นกราฟแสดงเส้นอัตราลักษณ์ของดิน ซึ่งบ่งบอกถึงความอุ้มน้ำของดินซึ่งทำการวัดด้วย Metric Suction Sensor และ Gravimetric Water Content Sensor โดย sensor จะทำงานโดยอาศัยหลักการเดินทางของสัญญาณไฟฟ้า ในสายนำสัญญาณว่าจะมีลักษณะเปลี่ยนไปเมื่อคุณสมบัติสายนำสัญญาณเปลี่ยนไป โดรนใช้ดินเป็นส่วนหนึ่งของสายนำสัญญาณ โดยการทำให้ Fit Curve ด้วย Van-Genuchten model และปริมาณน้ำในดินโดยปริมาตรที่ดินอิมตัว โดยประมาณ 35-40% เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันจะสังเกตได้ว่า

- 1.ช่วงที่ดินอิมตัวด้วยน้ำ โชนดินเปล่ามีค่า Volumetric water content มากกว่าโซนที่ปลูกหญ้า เนื่องจากรากหญ้ามมีการดูดซึมน้ำ
- 2.จากราฟจะเห็นว่า Volumetric Water Content ในตอนเริ่มต้นของดินที่ปลูกหญ้ามามีค่าน้อยกว่าดินที่ไม่ปลูกหญ้าเนื่องจากหญ้ามมีการดึงน้ำไปใช้ และเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟ SWRC ที่ดินเปล่าลดลงอย่างรวดเร็วและเส้นSWRCของดินปลูกค่อยๆลดลงช้าๆเนื่องจากในโซนดินปลูกมีหญ้ามซึ่งทำหน้าที่อุ้มน้ำทำให้สามารถรักษาความชื้นได้ดีกว่าดินเปล่า

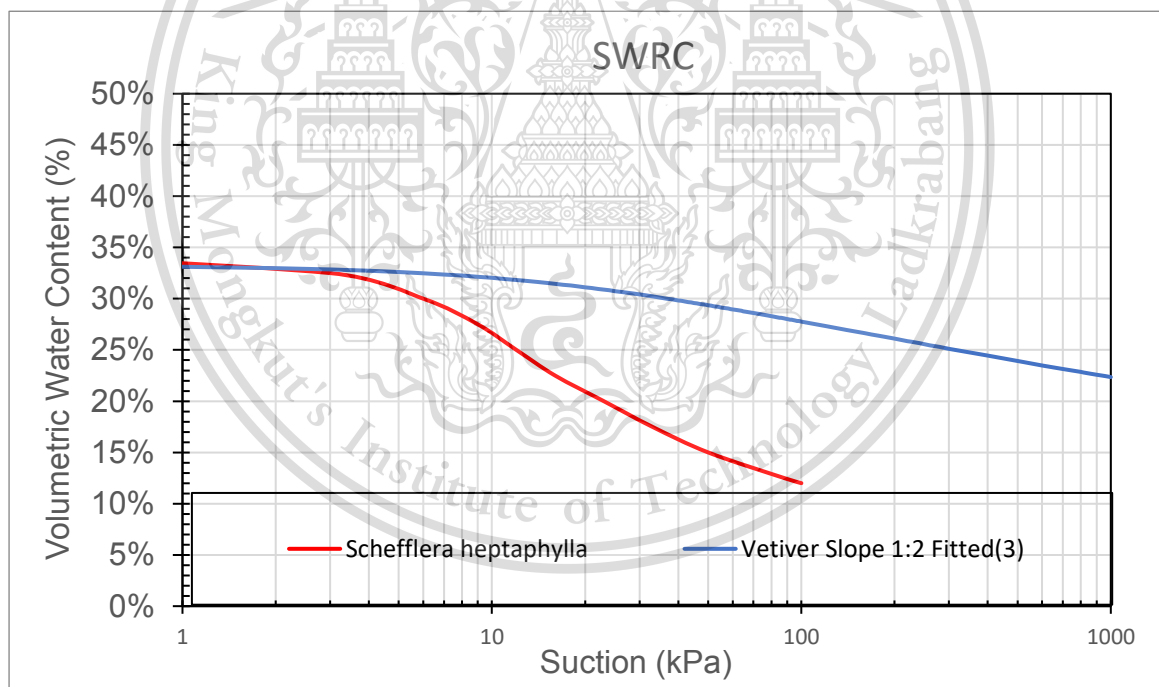
3. การที่เส้น SWRC มีความชันที่สม่าเสมอนั้นหมายความว่าดินมีความคละที่ตึกว่าเพราะเกิดจากรากของ เอกสารนี้ให้หญ้าที่แทรกเข้าไปในดินนี้หรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.14 แสดงตัวอย่างกราฟ SWRC ของดินปลูกพืช Schefflera heptaphylla

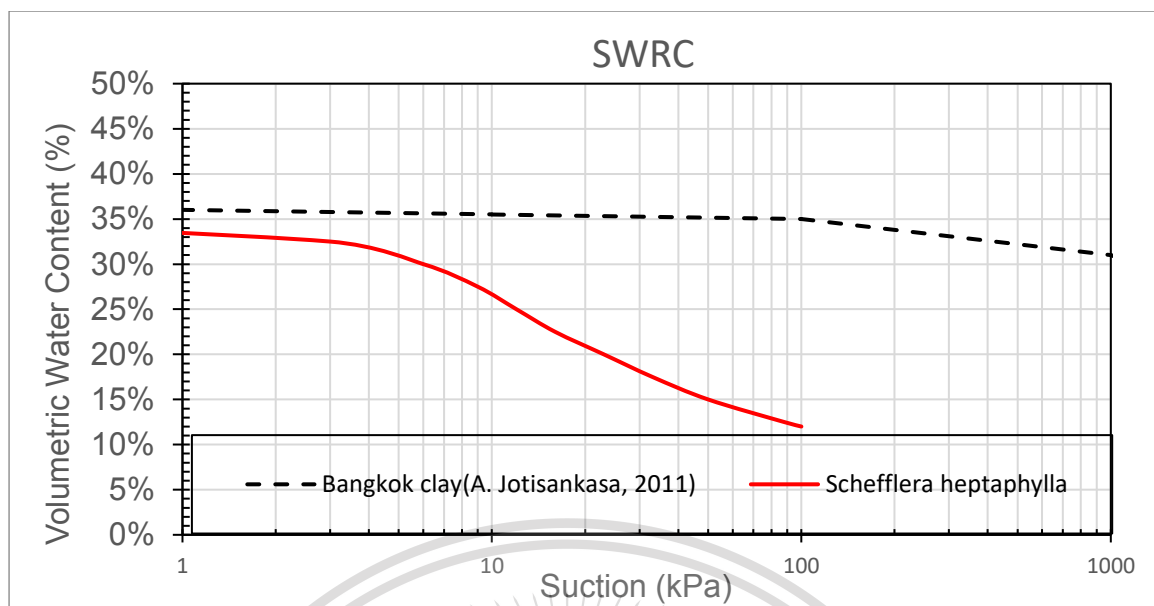


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric Water Content กับ Metric Suction ; ในดินที่ปลูกพืช Schefflera heptaphylla กับ ดินที่ปลูกหญ้าแฝก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric Water Content กับ Metric Suction ; ในดินที่ติดปลูกพืช Schefflera heptaphylla กับ Bangkok clay

4.3 การนำ Soil-Water Retention Curve ไปใช้ต่อ

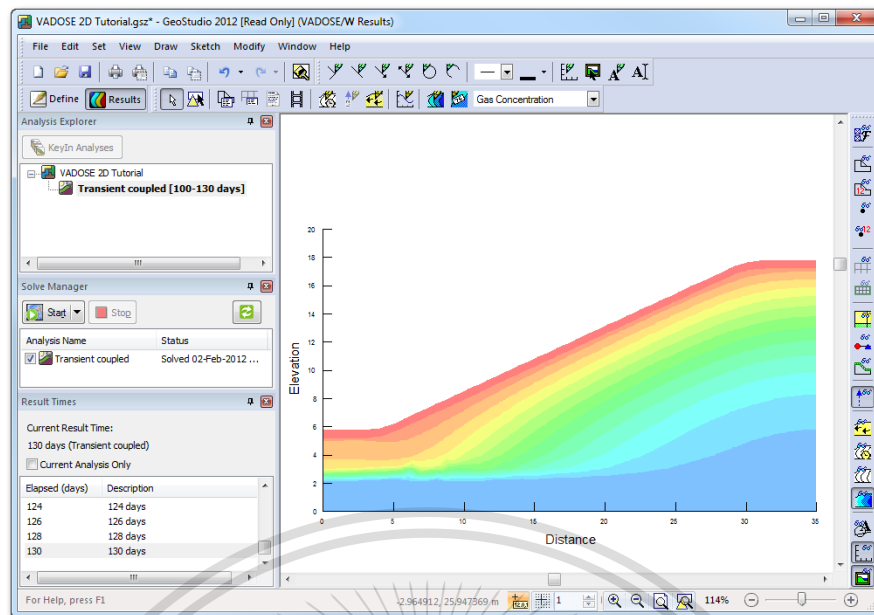
หลังจากที่ได้กราฟ Soil-Water Retention Curve วิศวกรจะนำค่าของ Van Genuchten หรือ พลอตค่า Volumetric Water Content และ Suction ของ SWRC ไปใช้กับโปรแกรม Vadose/W หรือ Hydrus ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มุ่งเน้นไปทาง Geotechnical Engineering ซึ่งโปรแกรมเหล่านี้สามารถใช้ในการ

- การออกแบบและการตรวจสอบประสิทธิภาพของดินชั้นเดียวหรือหลายชั้นครอบคลุมสิ่งอำนวยความสะดวกของเหมืองและของเสียในเขตเทศบาล
- การพัฒนาการกระจาย pore-water pressure ที่ควบคุมด้วยสภาพภูมิอากาศบนเนินเขาธรรมชาติหรือที่มนุษย์สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความเสถียร
- การวัดอัตราการซึมผ่านการระเหยและการคายน้ำที่เกิดจากการเกษตรวิศวกรรมชลประทานหรือระบบธรรมชาติ
- การทำนายการแพร่กระจายและการสลายตัวของออกซิเจนหรือเรดอนผ่านเข็มขัดก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.17 ภาพตัวอย่างของโปรแกรม Vadose/W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 5

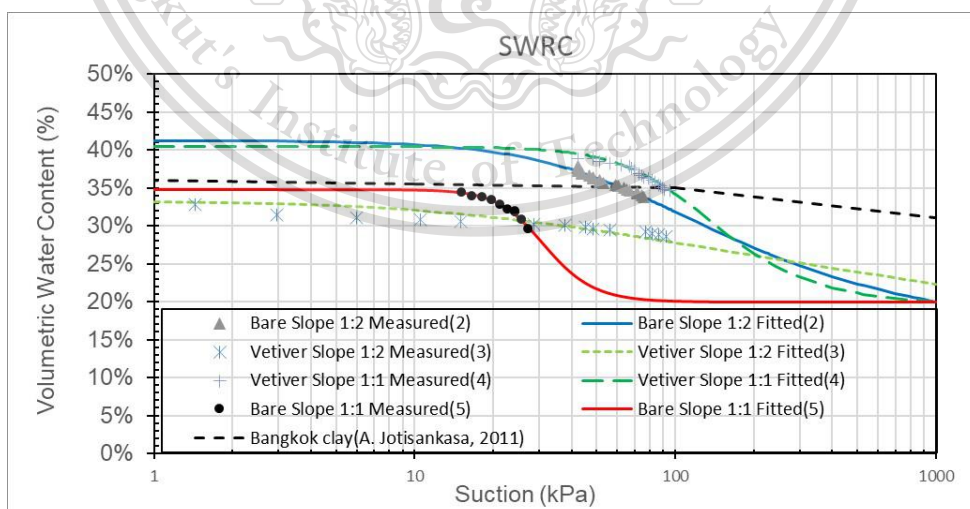
สรุปผลการศึกษา

5.1 บทนำ

จากผลการศึกษาผลกระทบจากการเจริญเติบโตของรากต่อคุณสมบัติเชิงไฮโดรลิกของดิน โดยการทดสอบหาเส้นอัตราลักษณ์และความชื้นน้ำของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ในคันดินที่ปลูกพืชและดินเปล่าในสองความชันคือ 1:1.5 และ 1:2 โดยทดสอบกับดินอินทรีย์ ที่บดอัดด้วย 70% Degree of compaction โดยศึกษารากของหญ้าแฝกกลุ่ม พันธุ์สงขลา 3 หรือพันธุ์พระราชทาน ที่จำลองการปลูกแต่ละค่าความชันจะแบ่งพื้นที่เป็น 3 โซน โดยทำการปลูกหญ้าแฝก 2 โซน และดินเปล่า 1 โซนรวมทั้งพื้นที่จะมีโซนปลูกหญ้าแฝกทั้งหมด 4 โซน และโซนดินเปล่า 2 โซนแบบปล่อยไปตามธรรมชาติ ที่อายุการปลูกประมาณ 5 เดือน โดยมุ่งเน้นศึกษาไปยังโซน 2 และโซน 3 ที่ความชัน 1ต่อ2

5.2 สรุปผลการทดลอง

1. สรุปได้ว่าการเจริญเติบโตของหญ้าแฝกในดินเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดินโดยการลดอัตราส่วนรูพรุน
2. เมื่อรากเพิ่มขึ้นมีการเจริญเติบโตจากรากไปตามดินที่ว่างเปล่า มันจะเปลี่ยนอัตราส่วนรูพรุนและคุณสมบัติซึ่งมีผลต่อเส้นอัตราลักษณ์ของดิน (ยกตัวอย่าง คือ การกักเก็บน้ำในดิน) และคุณสมบัติทางชลศาสตร์ของดิน
3. ดินที่มีหญ้าดีกว่าดินเปล่าในด้านการรักษาความชื้นในดิน เนื่องจากหญ้าช่วยอุ้มน้ำในดิน



รูปที่ 5.1 กราฟเปรียบเทียบระหว่างเส้นอัตราลักษณ์ของดินที่ไม่มีรากหญ้าแฝก และดินที่มีรากหญ้าแฝกอายุประมาณ 5 เดือน ด้วยวิธี Van-Genuchten model

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. การทดสอบนี้ยังจะไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนมากนัก ควรจะมีเวลาในการทดสอบที่มากกว่านี้ เพื่อให้ข้อมูลที่มากขึ้นมาใช้ในการพิจารณา
2. เนื่องจากเซนเซอร์ไม่เหมาะสมกับสภาพการทดลองในโรงงานทำให้ได้ผลออกมาไม่เสถียร ควรจะใช้เซนเซอร์ที่มีความคงทน และเหมาะสมกับโรงงานมากกว่านี้
3. เนื่องจากรากของหญ้าแฝก เป็นสิ่งที่ไม่แน่นอน จึงควรมีการทำตัวอย่างการทดสอบซ้ำ เพื่อหาแนวโน้มของผลการเปลี่ยนแปลง
4. ในการทำการทดลองระยะยาวควรวางวิธีแก้ปัญหาจัดการกับรอยแตกของคันดินเพราะมีผลกระทบต่อค่าที่เก็บมาได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บรรณานุกรม

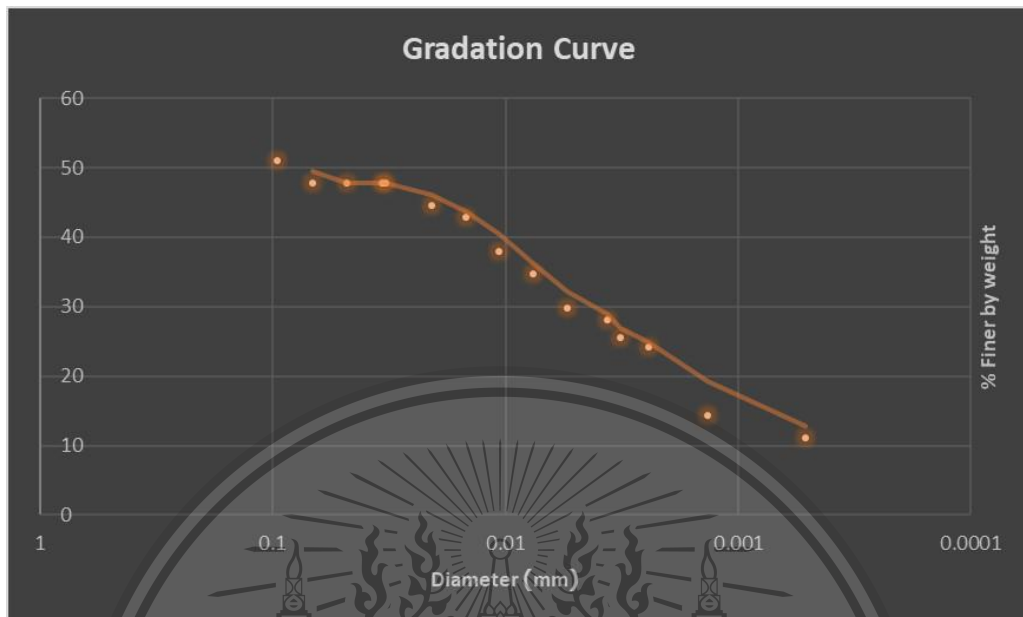
1. Dr Anthony Kwan, LEUNG, Dr Ankit, GARG, Dr Charles Wang
Wai, NG (2015) ผลกระทบของรากพืชต่อการกักเก็บน้ำและการกระตุ้นการดูดในดินปลูก
2. ชีรภัทร์ ศิริรัตนฉัตร 2558: อิทธิพลจากรากหญ้าแฝกต่อสภาวะการไหลซึมของน้ำสู่ลาดและเสถียรภาพของลาด ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
3. ฤทธิภูมิ,จิตาภา,ศิริประภา (2019) ผลกระทบของการเจริญเติบโตของรากต่อสมบัติเชิงไฮดรอลิกของดิน(Soil water retention curve and hydraulic conductivity function of vegetated soil)
4. อภินิติและสงเกียรติ (2013) เสถียรภาพของลาดดินที่ปลูกหญ้าแฝกในสภาวะฝนตกแบบจำลองคณิตศาสตร์(Stability of Soil Slope with Vetiver Grass Subjected to Rainfall from Numerical Modeling)
5. "Influence of Vetiver Roots on Hydraulic Characteristic of Slope and Slope Stability” L. Song , J.H. Li , T. Zhou , D.G. Fredlund © 2017 Elsevier B.V. All rights reserved.
6. Seboong Oh, A.M.ASCE; Ning Lu, F.ASCE; Yun Ki Kim; Sung Jin Lee; and Seung Rae Lee, M.ASCE (2012) Relationship between the Soil-Water Characteristic Curve and the Suction Stress Characteristic Curve: Experimental Evidence from Residual Soils

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

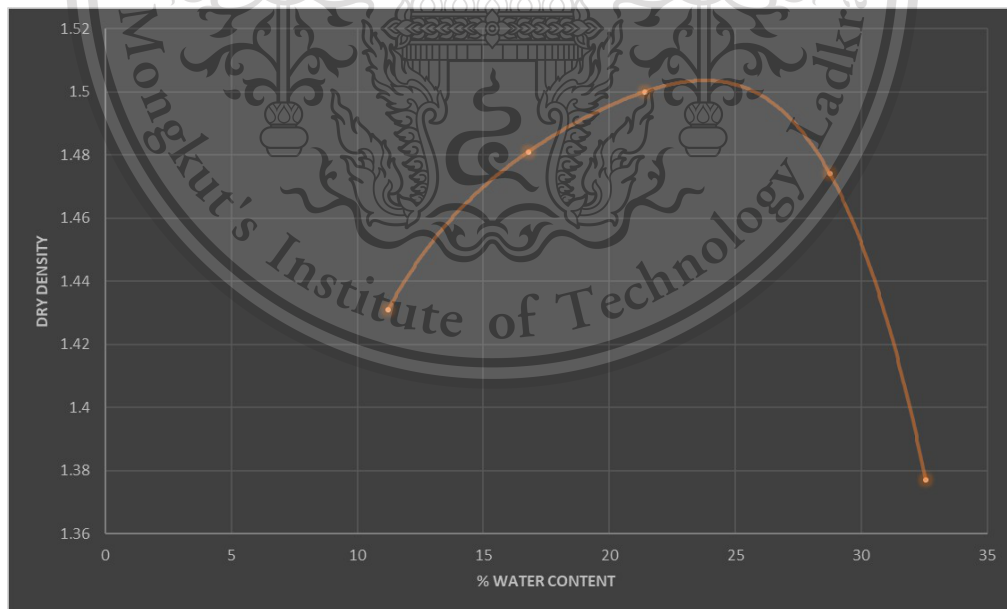
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาคผนวก



รูปที่ 6.1 Gradation Curve

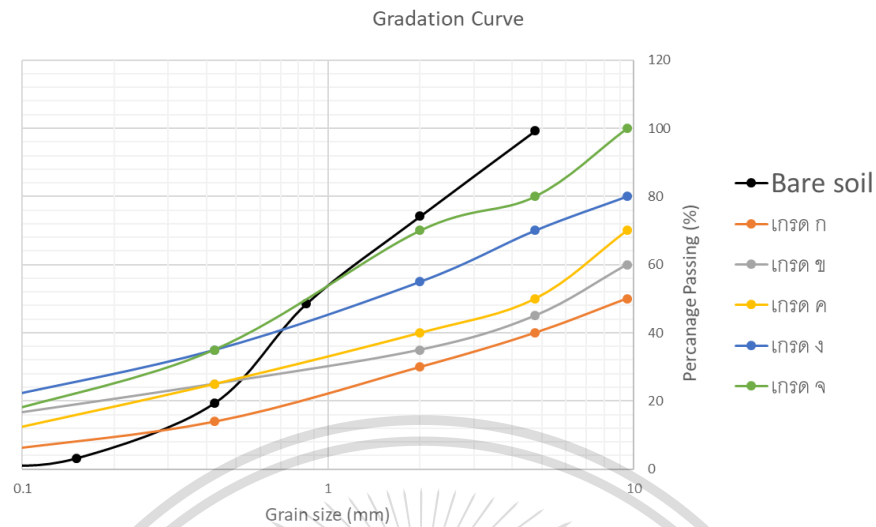


รูปที่ 6.2 กราฟ Compaction Curve

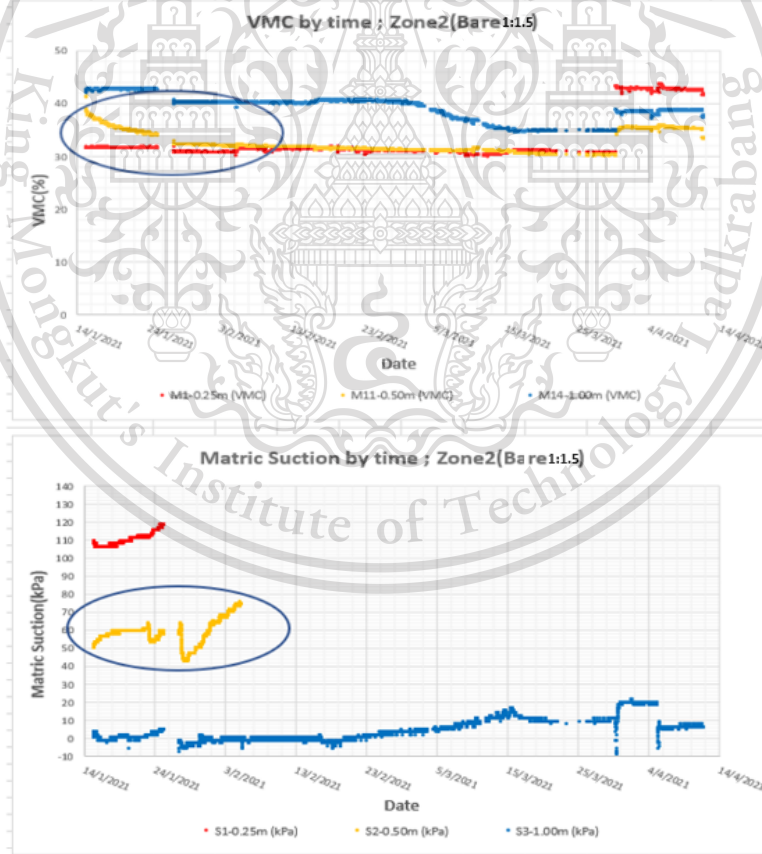
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



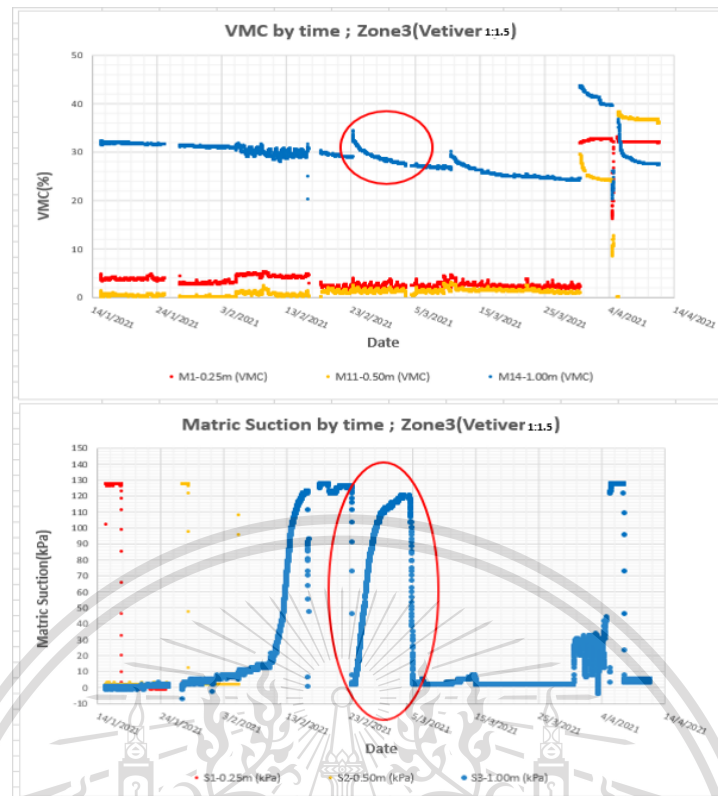
รูปที่ 6.3 กราฟแสดงผลขนาดคละของเม็ดดินตามมาตรฐาน มยผ.



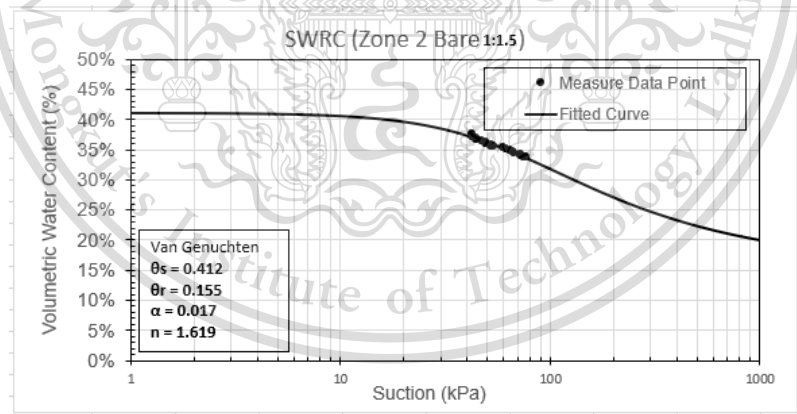
รูปที่ 6.4-6.5 กราฟ Raw data แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric Water Content และ Matric Suction กับวันที่ในระดับความลึก 50 ซม.จากผิวดิน ของดินเปล่า ที่มีความชื้น 1:2 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 6.6-6.7 กราฟ Raw data แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric Water Content และ Matric Suction กับวันที่ในระดับความลึก 100 ซม.จากผิวดิน ของดินที่ปลูกพืช ที่มีความชัน 1:2

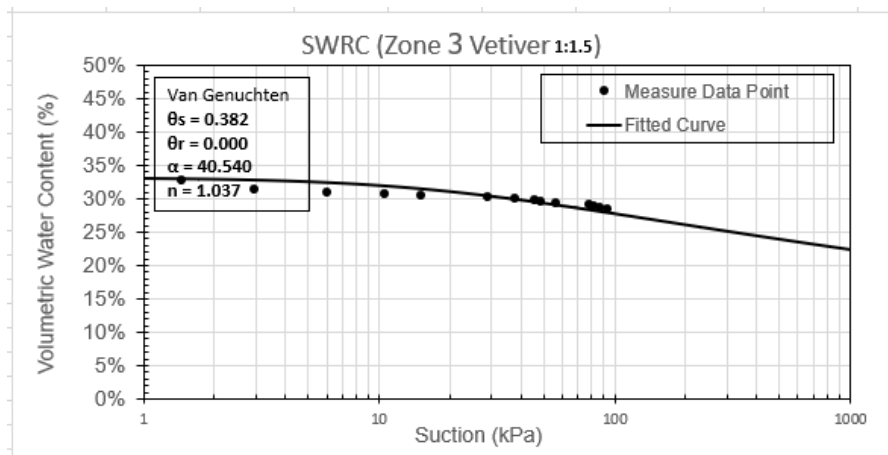


รูปที่ 6.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric Water Content กับ Matric Suction ในโซน 2 ของดินเปล่าที่มีความชัน 1:2 ที่ผ่านการ Fit curve ด้วย VG's model

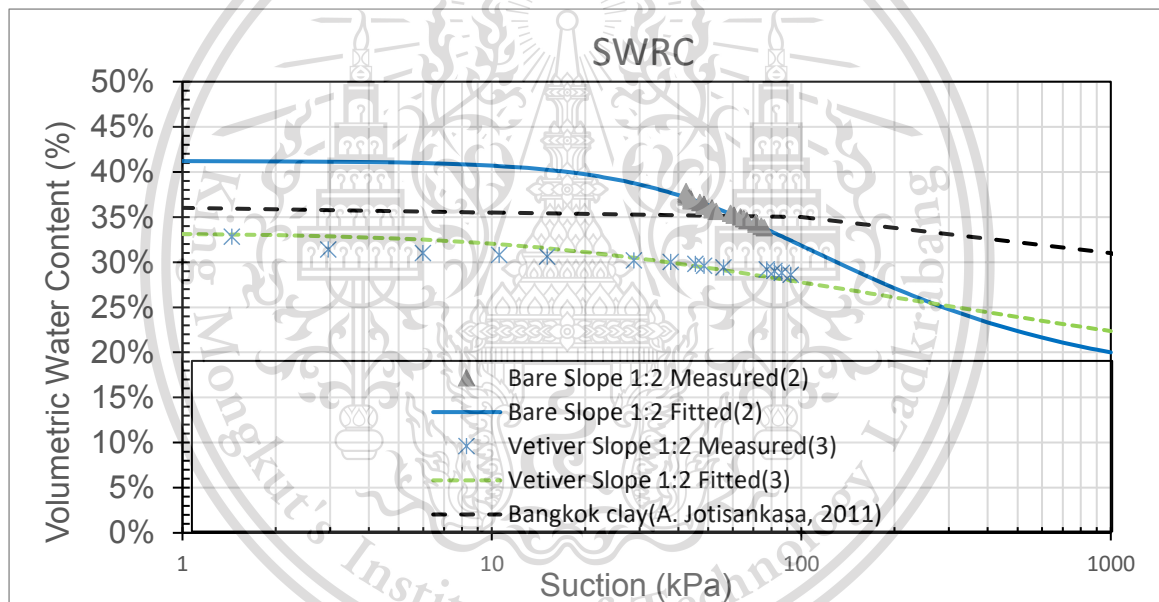
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 6.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric Water Content กับ Matric Suction ในโซน 3 ของดินปลูกพืชที่มีความชัน 1:2 ที่ผ่านการ Fit curve ด้วย VG's model



รูปที่ 6.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric Water Content กับ Matric Suction ในทั้งสองโซน 2 และ 3 ที่ความลึก 50 ซม และ 100 ซม ของดิน ของดินปลูกและดินเปล่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

