

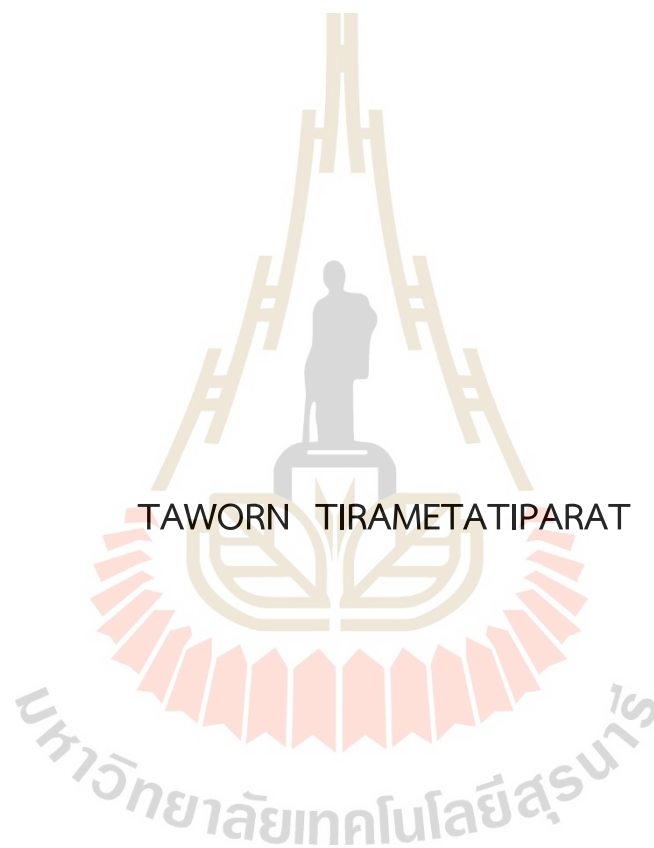
การศึกษาพฤติกรรมการซึมของน้ำฝนในลาดดินเนื้อเดียวกัน  
และลาดดินไม่เป็นเนื้อเดียวกันที่เกิดจากพืชปกคลุมดิน  
และผลกระทบด้านเสถียรภาพ



นายถาวร ชีรเมธาพิรัตน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ขนส่ง และทรัพยากรธรณี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2564

RAINWATER INFILTRATED BEHAVIORS OF HOMOGENEOUS AND  
VEGETATED SLOPES AND THE CONSEQUENT STABILITY




A Thesis submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Doctor of Philosophy of Engineering Civil, Transportation  
Engineering and Geo-Resources Engineering  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2021

การศึกษาพฤติกรรมการซึมของน้ำฝนในลาดดินเนื้อเดียวกัน  
และลาดดินไม่เป็นเนื้อเดียวกันที่เกิดจากพืชปกคลุมดิน  
และผลกระทบด้านเสถียรภาพ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ศ. ดร.พานิช วุฒิพิภักษ์)

ประธานกรรมการ



(ศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

กรรมการ



(รศ. ดร.เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์)

กรรมการ



(Dr. Menglim Hoy)

กรรมการ



(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ถาวร ธีรเมธาพิรัตน์ : การศึกษาพฤติกรรมการซึมของน้ำฝนในลาดดินเนื้อเดียวกันและลาดดินไม่เป็นเนื้อเดียวกันที่เกิดจากพืชปกคลุมดินและผลกระทบต่อเสถียรภาพ (RAINWATER INFILTRATED BEHAVIORS OF HOMOGENEOUS AND VEGETATED SLOPES AND THE CONSEQUENT STABILITY) อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร. อวีรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์, 112 หน้า.

คำสำคัญ: ดินรากลึก/ความรุนแรงฝนสุทธิ/ความชื้นสุดท้ายของระยะการซึม

การวิบัติของลาดดินแบบเลื่อนไถลตามระนาบ เป็นหนึ่งในรูปแบบการวิบัติที่มีความสำคัญ เนื่องจากการวิบัติที่มีโอกาสพัฒนาเป็นการไหลซึ่งจะทำให้มวลดินจะเคลื่อนตัวได้ไกลและเร็วขึ้นอย่างมาก การจะเข้าใจพฤติกรรมของลาดดินได้ดีจำเป็นต้องเข้าใจในพฤติกรรมการซึมของน้ำในลาดดินที่มีความซับซ้อน เนื่องจากการไหลในสถานะที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการซึมของน้ำฝนทั้งลาดดินเนื้อเดียว และลาดดินที่มีพืชปกคลุม โดยทำการทดสอบการซึมของน้ำฝนทั้งในดินเนื้อเดียว ด้วยการทดสอบการไหลแบบหนึ่งมิติ และทดสอบการซึมแบบสองมิติในกล่องลาดดินสำหรับลาดดินที่มีพืชปกคลุม ทั้งนี้ ในการทดสอบจะทำการจำลองความรุนแรงของฝนที่แตกต่างกันเพื่อให้ผลทดสอบมีความคลุมทั้งความรุนแรงฝนน้อยกว่าและมากกว่าค่าความซึมผ่านได้ของลาดดิน ผลการศึกษา พบว่า ในลาดดินเนื้อเดียวปรากฏระนาบเปียกอย่างชัดเจน และความชื้นหลังระนาบเปียกจะเป็นฟังก์ชันกับค่าดัชนีการซึม ( $i/k_s$ ) และพบว่า ความรุนแรงฝน มีอิทธิพลต่อความลึกของระนาบวิบัติในระนาบดินที่ไม่มีความเชื่อมั่น นอกจากนี้ ยังพบว่า ความเชื่อมั่นประสิทธิผล ( $c'$ ) เพียงเล็กน้อยสามารถลดอิทธิพลของความรุนแรงฝนต่อความลึกของระนาบวิบัติได้ สำหรับในลาดดินที่มีพืชปกคลุมพบว่าพฤติกรรมการซึมของน้ำฝนเปลี่ยนไปจากลาดดินเนื้อเดียวอย่างชัดเจน กล่าวคือไม่พบระนาบเปียกในลาดดินที่มีพืชปกคลุม นอกจากนี้ ยังพบการไหลด้านข้างอย่างเด่นชัดในช่วงความชื้นต่ำในฝนที่มีความรุนแรงน้อยกว่าค่าความซึมผ่านได้ของลาดดินบริเวณรากพืช และพบว่า หากความรุนแรงฝนที่กระทำต่อลาดดินมีขนาดน้อยกว่าค่าความซึมผ่านได้ของลาดดินบริเวณรากพืช ความชื้นสูงสุดระหว่างกระบวนการซึมของน้ำฝนยังสามารถประมาณได้จากค่าดัชนีการซึม ( $i/k_s$ ) แต่หากความรุนแรงฝนที่กระทำต่อลาดดินมีขนาดสูงกว่า ค่าความซึมผ่านได้ของลาดดินบริเวณรากพืช ความชื้นสูงสุดระหว่างกระบวนการซึมของน้ำฝนมีค่าสูงกว่าที่ได้จากการประมาณจากค่าดัชนีการซึม ( $i/k_s$ ) ทำให้ค่าเสถียรภาพของลาดดินที่แท้จริงจะมีค่าต่ำกว่าการประมาณผ่านการประมาณความชื้นพอสมควร

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนักศึกษา 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 





TAWORN TIRAMETATIPARAT : RAINWATER INFILTRATED BEHAVIORS OF  
HOMOGENEOUS AND VEGETATED SLOPES AND THE CONSEQUENT STABILITY.  
THESIS ADVISOR : PROF. AVIRUT CHINKULKIJNIWAT, Ph.D., 112 PP.

Keyword: Root-Soil/Net Rainfall Intensity/Infiltrated Water Content

Rainfall-induced shallow landslides are known to be extremely dangerous since the sliding mass can propagate quickly and travel far from the source. Although the sliding mechanism in sloping ground is simple to understand, the problem may be complicated by unsaturated transient water flow. This thesis focused flow behavior of rainwater in unsaturated sloping ground both homogeneous slope and vegetated slope. A series of laboratory experiments was conducted to examine the critical hydrological states so that assessment of slope stability under rainfall condition can be performed. For homogeneous slope, a unique relationship between infiltrated water content and infiltration index ( $i/k_s$ ) was formulated. Sequential stability analysis provided insights into the stability of slopes subjected to variations in soil properties, slope angles and rainfall intensities, and the consequent variation in the depth of the failure plane, vital in landslide risk assessment, was determined through this analysis. The variation of rainfall intensity was found to strongly affect the depth of the failure plane in cohesionless sloping ground. Furthermore, the influence of rainfall intensity on the depth of the failure plane may be alleviated by a small magnitude of cohesive strength. As for the vegetated slope, clear wetting front was not found in the vegetated slope, either root soil and bare soil located below the root soil. Whenever the rainfall intensity is not greater than the permeability of root soil, the final magnitude of infiltrated rainwater is still based on  $i/k_s$ . However, the heavy rainfall of greater than the permeability of root soil could induced preferential flow resulting in the greater infiltrated water content than that approximated from  $i/k_s$ . Accordingly, the factor of safety (FS) against infinite sliding could be lower than that calculated from water content approximated from  $i/k_s$ .

School of Civil Engineering  
Academic Year 2021

Student's Signature   
Advisor's Signature 

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิทยานิพนธ์

ศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เมตตาให้การอบรม สั่งสอน ชี้แนะและช่วยเหลือในการทำการศึกษาค้นคว้า ตลอดจนให้คำแนะนำในการเขียน และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ศาสตราจารย์ ดร.พานิช วุฒิพิทักษ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้การแนะนำ คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางการเขียน และช่วยตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข รองศาสตราจารย์ ดร.เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ Dr. Menglim Hoy คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิที่กรุณาให้คำแนะนำ และตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

อาจารย์ ดร.สมใจ ยุบลชิต อาจารย์เสริมศักดิ์ ดิยะแสงทอง อาจารย์ชลธิชา จีบตะคุ และคุณชนาธิป ศุภทธาน รวมถึงบุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิศวกรรมปฐพี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทดสอบทางห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอบคุณบุคคลในครอบครัว เพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ที่ช่วยเหลือและให้กำลังใจ

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาที่ให้การอุปการะ อบรมเลี้ยงดูส่งเสริมการศึกษา จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

ถาวร ชีรเมธาพิพัทธ์

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ญ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>2 ปรัชญ์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 บทนำ.....	4
2.2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.2.1 ความชื้นดิน (Soil moisture).....	4
2.2.2 แรงดึงดูดน้ำในดิน (Soil suction or Total suction, $\Psi$ ).....	5
2.2.3 พฤติกรรมการซึมของน้ำและทฤษฎีการไหลของน้ำในดิน.....	6
2.2.4 พฤติกรรมเชิงอุทกวิทยาของลาดดินที่มีพืชปกคลุม.....	9
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
<b>3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>28</b>
3.1 บทนำ.....	28
3.2 วิธีการทดสอบการซึมของน้ำฝนในดินเนื้อเดียวกัน.....	28
3.2.1 การเลือกและเตรียมดินตัวอย่าง.....	30
3.2.2 การสร้างแบบจำลองแห่งดินการซึมและชุดกำเนิดน้ำฝน.....	33

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า	
3.2.3	อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นและการสอบเทียบ.....	36
3.2.4	ขั้นตอนการทดสอบการซึมของน้ำฝนในห้องปฏิบัติการ.....	39
3.2.5	การคำนวณเสถียรภาพลาดดิน.....	40
3.3	วิธีการทดสอบการซึมของน้ำฝนในลาดดินที่มีพืชปกคลุมดิน.....	42
3.3.1	การเตรียมดินตัวอย่าง.....	44
3.3.2	การสร้างแบบจำลองลาดดินที่มีพืชปกคลุมดินและชุดกำเนิดน้ำฝน.....	53
3.3.3	การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นและการสอบเทียบ.....	57
3.3.4	ขั้นตอนการทดสอบการซึมของน้ำฝนในห้องปฏิบัติการ.....	59
<b>4</b>	<b>การวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผล.....</b>	<b>62</b>
4.1	บทนำ.....	62
4.2	ผลการทดสอบการซึมในแท่งดินเนื้อเดียว.....	62
4.2.1	พฤติกรรมการซึมในดินแท่งดินทดสอบ (Column test).....	62
4.2.2	ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินเนื้อเดียวกัน.....	68
4.2.3	ค่าความลึกวิกฤติ.....	72
4.2.4	สรุปอภิปรายผล.....	74
4.3	ผลการทดสอบการซึมในลาดดินที่มีพืชปกคลุมดิน.....	75
4.3.1	พฤติกรรมการซึมในกล่องลาดดินที่มีพืชปกคลุมดิน.....	75
4.3.2	ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินรากพืช.....	82
4.3.3	สรุปอภิปรายผล.....	86
<b>5</b>	<b>บทสรุป.....</b>	<b>88</b>
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	88
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	89
5.2.1	ข้อเสนอแนะสำหรับการใช้ผลงานวิจัย.....	89
5.2.2	ข้อเสนอแนะงานวิจัยต่อไป.....	89
	รายการอ้างอิง.....	90
	ภาคผนวก.....	97
	ประวัติผู้เขียน.....	112

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการทดสอบการซึมแบบหนึ่งมิติในแท่งดินเนื้อเดียวกัน.....	31
3.2	โปรแกรมการทดสอบการซึมแบบหนึ่งมิติในแท่งดิน.....	40
3.3	คุณสมบัติของดินและวัสดุที่ใช้ในการทดสอบการซึมแบบสองมิติในกล่องลาดดิน.....	51
3.4	คุณสมบัติของรากพืชในกล่องลาดดิน.....	52
3.5	โปรแกรมการทดสอบการซึมแบบสองมิติในกล่องลาดดินที่มีพืชปกคลุม.....	61
4.1	ค่าความชื้นสุดท้ายของขั้นตอนการซึม.....	81



## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	หลักการของดาร์ซี.....	7
2.2	อัตราการไหลเข้าและออกจากปริมาตรควบคุม.....	8
2.3	สภาพทั่วไปของชั้นดินและหินของลาดดินที่มีพีชปกคลุม.....	10
2.4	การเกิดน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินในพื้นที่ป่า.....	12
2.5	การวิเคราะห์แบบลาดอนันต์ (Infinite slope).....	14
2.6	การเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำกับชั้นดินภายใต้การเปลี่ยนแปลงอัตราน้ำเข้า-ออกบริเวณผิวดิน โดย Fredlund (1996).....	16
2.7	แบบจำลองการซึม.....	17
2.8	ความสัมพันธ์ระหว่างการซึมและการไหลผิวดิน.....	18
2.9	แบบจำลองลาดดินและแบบจำลองน้ำฝน.....	18
2.10	แสดงการวิบัติของลาดดินตะกอนปนทราย.....	19
2.11	แสดงการวิบัติของลาดดินทราย.....	19
2.12	แสดงช่วงเวลาการวิบัติของลาดดิน.....	20
2.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงฝนกับปริมาณความชื้น.....	21
2.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความปลอดภัยกับความลึก.....	21
2.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกวิกฤตกับดัชนีการซึม.....	22
2.16	แบบจำลองการซึม.....	23
2.17	กราฟแสดงค่าแรงดันน้ำตามความลึกของดินในแบบจำลองแบบ 1 มิติและ 2 มิติ.....	23
2.18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันน้ำกับความลึกของดินที่เวลาการซึมของน้ำฝน 1 ชั่วโมงและ 24 ชั่วโมง.....	24
2.19	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำตามฤดูกาลในลาดดินที่มีพีชปกคลุม.....	25
2.20	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นผ่านได้ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำและความลึกจำแนกตามอัตราส่วนปริมาตรรากพืช.....	26
2.21	การลดลงของค่าอัตราส่วนความปลอดภัยตามความลึกของลาดดินที่มีพีชปกคลุมอันเนื่องมาจากผลตอบสนองเชิงอุทกวิทยา.....	26



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
2.22	การลดลงของค่าอัตราส่วนความปลอดภัยตามความลึกของลาดดินที่มีรากพืช อันเนื่องมาจากอิทธิพลของ Preferential flow.....	27
3.1	ผังการดำเนินงานวิจัยพฤติกรรมการซึมของน้ำฝนในแท่งดินเนื้อเดียวกัน.....	29
3.2	ดินตัวอย่างที่ใช้ทดสอบการซึมแบบ 1 มิติ.....	31
3.3	คุณสมบัติแท่งดินทดสอบตามขนาดเม็ดดิน ค่าความชื้นและแรงดึงดูดแมทริก.....	32
3.4	แสดงรายละเอียดของแบบจำลองการซึมในแท่งดินทดสอบ (Column test).....	33
3.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความรุนแรงฝนกับความดันน้ำ.....	35
3.6	แผนผังและภาพถ่ายของแบบจำลองแท่งดินและระบบน้ำฝน.....	36
3.7	หัววัดความชื้นในดิน (TDR probe).....	37
3.8	เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) รุ่น Em 50.....	37
3.9	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นที่ได้จากการคำนวณกับที่ได้จากหัววัดความชื้น.....	38
3.10	การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินอนันต์ที่เป็นดินเนื้อเดียวกันในสภาวะฝนตก.....	42
3.11	ผังการดำเนินงานวิจัยพฤติกรรมการซึมของน้ำฝนในลาดดินที่มีพืชปกคลุม.....	44
3.12	ดินตัวอย่างที่ใช้ทดสอบการซึมในกล่องลาดดินที่มีพืชปกคลุม.....	46
3.13	ภาพตัวอย่างดินรากพืชและรากพืช.....	46
3.14	การเตรียมตัวอย่างดินรากพืชในกระบอกพีวีซี.....	47
3.15	การทดสอบหาเส้นคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดินรากพืช.....	48
3.16	การทดสอบหาเส้นคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดินเปล่า.....	49
3.17	การทดสอบหาความซึมผ่านได้ของชั้นดินที่มีรากพืชและชั้นดินเปล่า.....	50
3.18	จำแนกตามขนาดและการกระจายเม็ดดิน.....	52
3.19	เส้นคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดินและวัสดุทดสอบ.....	52
3.20	เส้นคุณลักษณะการซึม.....	53
3.21	รายละเอียดของกล่องลาดดินทดสอบการซึม (Slope box test).....	55
3.22	แผนผังและภาพถ่ายของกล่องลาดดินที่มีพืชปกคลุมและชุดกำเนิดน้ำฝน.....	56
3.23	ความสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงฝนกับความดันน้ำ.....	57
3.24	อุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดิน.....	58

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.25	ค่าความชื้นที่ได้จากการคำนวณกับค่าความชื้นที่อ่านได้จากตัววัดความชื้น สำหรับดินที่มีรากพืช (Root-soil) และดินเปล่า (Bare soil).....	59
3.26	ลักษณะสภาพผิวหน้าลาดดินจำลองแต่ละชุดทดสอบ.....	61
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของแท่งดินร่วนปนทราย (SM column) ในแต่ละค่าความรุนแรงฝนที่แตกต่างกัน.....	63
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลาตามความลึกของแท่งดินทราย ปนดินตะกอน (SP-SM column) ในแต่ละค่าความเข้มฝนที่แตกต่างกัน.....	64
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของแท่งดินทรายปนดินตะกอน (SP-SM column) ในแต่ละค่าความรุนแรงฝนที่แตกต่างกัน.....	65
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลาตามความลึกของแท่งดินทราย ปนดินตะกอน (SP-SM column) ในแต่ละค่าความเข้มที่แตกต่างกัน.....	66
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นหลังระเหยความชื้นและความรุนแรงฝนของ ดินร่วนปนทราย (SM) และดินทรายปนดินตะกอน (SP-SM).....	68
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความปลอดภัยกับความลึกระเหยความชื้น ที่ค่าความรุนแรงฝน และมุมลาดชันลาดดินต่าง ๆ.....	70
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความปลอดภัยกับความลึกระเหยความชื้น ในลาดดินที่ค่าความรุนแรงฝน และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของดิน.....	71
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความลึกวิกฤตต่อค่าความหนาของลาดดิน (Normalized Critical depth, $Z_{cr} / Z_r$ ) กับค่าดัชนีการซึม ( $i/k_s$ ) ที่ผันแปรกับ ค่าดัชนีเสถียรภาพ ( $A$ ) และค่าพารามิเตอร์กำลังดิน ( $c'$ และ $\phi'$ ) และพารามิเตอร์ ของ van Genuchten ( $\alpha$ และ $n$ ) ที่แตกต่างกัน.....	73
4.9	การเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นตามความลึกของลาดดินในชุดทดสอบที่ 1 (ผิวหน้าลาดดินมีใบพืชปกคลุม) เปรียบเทียบตามตำแหน่งของลาดดิน.....	77
4.10	เปรียบเทียบผลการทดสอบชุดที่ 1 กับการทดสอบชุดที่ 2 ที่ความรุนแรงฝน 110, 170 และ 230 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง.....	78
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นกับเวลาของลาดดินตอนกลาง.....	80
4.12	เส้นขอบเขตค่าอัตราส่วนความปลอดภัยประมาณการ.....	83
4.13	เปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจากผลทดสอบกับเส้นขอบเขต.....	85

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$c'$	=	effective cohesion of soil
$FS$	=	safety factor
$G$	=	weight of soil above the depth of failure plane
$H_b$	=	thickness of the bare soil zone
$H_r$	=	thickness of the root-soil zone
$i$	=	rainfall intensity
$k_{sat}$	=	saturated permeability of soil
$k_{eb}$	=	equivalent permeability of soil
$k_b$	=	permeability of the bare soil zone
$k_r$	=	permeability of the root-soil zone
$n$	=	rate of water extraction from the soil once the air entry has been exceeded
$S_e$	=	effective saturation
$S_{eb}$	=	effective saturation behind wetting front
$S_r$	=	degree of saturation
$u_a$	=	pore air pressure
$u_w$	=	pore water pressure
$u_{wi}$	=	initial pore water pressure
$Z_w$	=	vertical depth at failure plane
$Z_{cr}$	=	critical depth
$Z_t$	=	total depth of soil layer
$\alpha$	=	air-entry value of soil
$\beta$	=	slope angle
$\gamma_s$	=	unit weight of soil
$\gamma_R$	=	unit weight of plant-root
$\gamma_w$	=	unit weight of water
$\gamma_{sat}$	=	total unit weight

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$\gamma_{dry}$	=	dry unit weight
$\theta$	=	volumetric water content
$\theta_e$	=	effective volumetric water content
$\theta_f$	=	infiltrated water content
$\theta_{fc}$	=	volumetric water content at field capacity
$\theta_w$	=	volumetric water content
$\theta_{wi}$	=	initial volumetric water content
$\theta_r$	=	residual volumetric water content
$\theta_{sat}$	=	saturated volumetric water content
$\theta_{wb}$	=	volumetric water content behind wetting front
$\sigma'$	=	effective stress
$\sigma^s$	=	suction stress
$\sigma_n$	=	total normal stress
$\tau$	=	shear strength of unsaturated soil
$\phi'$	=	internal soil friction angle
$\chi$	=	coefficient of effective stress
$\psi_{max}$	=	maximum pressure head
$i/k_s$	=	infiltration index
$\tan \phi' / \tan \beta$	=	stability index

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ดินถล่ม (Landslide) เนื่องมาจากฝนตกเป็นภัยธรรมชาติที่มักพบได้บ่อยทั่วโลก และส่งผลกระทบต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชน (Yumuang 2006; Guzzeti et al. 2008) ในบรรดาดินถล่มประเภทต่าง ๆ ที่มีกลไกการเกิดมาจากน้ำฝนที่ซึมลงดิน พบว่า เป็นประเภทดินถล่มระดับตื้น (Shallow landslide) พบมากที่สุด (Trustrum et al. 1999) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง หากฝนตกหนักอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน จะก่อให้เกิดตะกอนไหล (Debris flow) ซึ่งเป็นอันตรายอย่างมาก และสร้างความเสียหายได้เป็นบริเวณกว้าง (Gabet and Mudd 2006; Postance et al. 2018) รูปแบบของดินถล่มระดับตื้น ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นลึกลงไปจากผิวหน้าดินเพียงไม่กี่เมตร โดยน้ำฝนที่ซึมลงดินจะทำให้กำลังของดินลดลง และเพิ่มน้ำหนักในมวลดินให้มากขึ้น จนทำให้มวลดินเกิดการวิบัติและเคลื่อนตัวเลื่อนไถลลงมาตามแนวระนาบลาดเอียง (Translational slope failure) จากผลการศึกษากลไกการเหนี่ยวนำของน้ำฝนที่ซึมลงสู่ลาดดินที่เป็นดินเนื้อเดียว (Homogeneous soil) จนเกิดการวิบัติของลาดดิน นั้น สามารถแบ่งกระบวนการหลักออกเป็น 2 ระยะ (Li et al. 2013; Chinkulkijniwat et al. 2016; Yubonchit et al. 2016; Naidu et al. 2018) คือ ระยะการซึม (Infiltration phase) และระยะการอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation phase) โดยระยะการซึมเป็นการซึมลงสู่ลาดดินของน้ำฝนด้วยระนาบความชื้น (Wetting front) ทำให้เกิดโซนชุ่มน้ำ (Wetting zone) ที่ระดับความลึกต่าง ๆ ที่เป็นกลไกสำคัญทำให้เกิดระนาบวิบัติ (Failure plane) ของลาดดิน ในระยะการซึมนี้นี้ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการวิบัติของลาดดินที่สำคัญ ได้แก่ ความชันของลาดดิน (Slope angle) ความรุนแรงฝน (Rainfall intensity) และคุณสมบัติของดิน (Soil properties) ส่วนระยะการอิ่มตัวด้วยน้ำ เมื่อน้ำฝนซึมลงไปสะสมที่ชั้นดินที่บดน้ำ (Impermeable interface) จะเกิดการเพิ่มระดับสูงชันของน้ำใต้ดินและระนาบวิบัติจะเกิดขึ้นตรงแนวรอยต่อระหว่างชั้นดินและชั้นที่บดน้ำ

อย่างไรก็ตามผลการวิจัยนี้มีข้อจำกัดเฉพาะในลาดดินที่เป็นทราย หรือดินเม็ดหยาบที่ไม่มีค่าความเชื่อมแน่น (Cohesionless sandy soil) เพียงดินชนิดเดียว ยังไม่ครอบคลุมถึงดินชนิดอื่น ๆ ที่พบในลาดดินธรรมชาติซึ่งมักจะเป็นดินที่มีค่าความเชื่อมแน่นของเม็ดดิน (Cohesive soil) อีกทั้งในธรรมชาติมักพบลาดดินที่มีพืชปกคลุมทำให้เนื้อดินมีรากพืชชอนไช (Plant root soil) ซึ่งเป็น

ลาดดินที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Non homogeneous soil) พฤติกรรมการซึมในสภาวะรับน้ำฝนของลาดดินที่มีพืชปกคลุมดินนี้อาจจะแตกต่างจากลาดดินเนื้อเดียวกัน

ดังนั้น การวิจัยนี้ จึงทำการศึกษาพฤติกรรมการซึมเพิ่มเติมจากผลงานของ Chinkulkijniwat et al. (2016) ในดินเนื้อเดียวกันให้ครอบคลุมดินชนิดอื่น ๆ ที่พบในลาดดินธรรมชาติ รวมทั้งศึกษาพฤติกรรมการซึมของน้ำฝนในลาดดินไม่เป็นเนื้อเดียวกันที่เกิดจากพืชปกคลุมดิน เพื่อนำข้อมูลพฤติกรรมการซึมไปวิเคราะห์หาผลกระทบต่อค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการซึมของน้ำฝนในดินเนื้อเดียวกันที่มีค่าความชื้นแน่นระหว่างเม็ดดิน และในดินไม่เป็นเนื้อเดียวกันที่เกิดจากพืชปกคลุมดิน

1.2.2 เพื่อรวบรวมพฤติกรรมการซึมของน้ำฝนมาวิเคราะห์เพื่อหาผลกระทบต่อค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดิน

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาในห้องปฏิบัติการ โดยการสร้างแบบจำลองการซึมของน้ำฝนในแท่งดินทดสอบ (Column test) ที่เป็นดินเนื้อเดียวกัน (Homogeneous soil) และแบบจำลองการซึมของน้ำฝนในลาดดินที่มีพืชปกคลุม (Vegetation slope box test) ซึ่งเนื้อดินชั้นบนจะมีรากพืชซ่อนไขลักษณะเนื้อดินจึงไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous soil) มีรายละเอียดขอบเขตงานวิจัย ดังนี้

1.3.1 แบบจำลองแท่งดินทดสอบการซึมดินเนื้อเดียวกัน (Homogeneous soil-column infiltration test model) โดยสร้างแบบจำลองเป็นท่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 700 มิลลิเมตร และชุดกำเนิดน้ำฝน (Rainfall simulator) โดยใช้ความรุนแรงฝนค่าต่าง ๆ ติดตั้งเครื่องมือวัดความชื้นตามความลึก สำหรับตัวอย่างดินที่นำมาใช้ในการทดสอบจะใช้ดินทรายที่มีส่วนละเอียดปนจำนวน 2 ประเภท คือ ดินร่วนปนทราย (Silty sandy soil, SM) และดินทรายปนดินตะกอน (Poorly graded soil with silty, SP-SM) ผลการทดสอบพฤติกรรมการซึมนำไปวิเคราะห์ผลกระทบต่อค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินเนื้อเดียว เม็ดหยาบที่มีค่าความชื้นแน่นของเม็ดดิน

1.3.2 แบบจำลองกล่องลาดดินทดสอบการซึมที่มีพืชปกคลุมเนื้อดินไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous soil-vegetation slope box infiltration test model) โดยการสร้างแบบจำลองเป็นกล่องลาดดินสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีขนาดกว้าง 200 มิลลิเมตร ยาว 1500 มิลลิเมตร และ สูง 720 มิลลิเมตร แบ่งกล่องลาดดินเป็น 3 ตอนคือ ตอนบน (Top section) ตอนกลาง (Middle section) และตอนล่าง (Lower section) เพื่อติดตั้งตัววัดความชื้นตามความลึกของกล่อง



ลาดดิน แต่ละตอน ภายในบรรจุดินทรายตัวอย่างที่จะใช้ในการทดสอบ (Poorly graded soil, SP) และ ปลุกพืชบนผิวหน้าลาดดินให้เจริญเติบโตเต็มที่ ศึกษาพฤติกรรมการซึมโดยให้ความรุนแรงฝนที่แตกต่างกัน กำหนดเงื่อนไขสภาพผิวหน้าลาดดินทั้งในสถานะที่มีใบพืชปกคลุม (Surface with leaves) และไม่มีใบพืชปกคลุม (Surface without leaves) ผลการทดสอบพฤติกรรมการซึมนำไปวิเคราะห์ผลกระทบต่อค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินที่มีพืชปกคลุมดิน

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้จะป็นองค์ความรู้เพิ่มเติมเพื่อใช้อธิบายให้เข้าใจถึงอิทธิพลของความรุนแรงฝนต่อพฤติกรรมการซึมของน้ำฝนในดินเนื้อเดียวกันที่มีค่าความชื้นแน่นของเม็ดดิน และการซึมในลาดดินไม่เป็นเนื้อเดียวกันที่เกิดจากพืชปกคลุมดิน เพื่อนำข้อมูลพฤติกรรมการซึมไปวิเคราะห์ผลกระทบต่อค่าอัตราส่วนความปลอดภัย เพื่อช่วยในการประเมินเสถียรภาพลาดดินที่สอดคล้องกับพฤติกรรมการซึมของน้ำฝนในลาดดินที่ใกล้เคียงกับธรรมชาติได้มากยิ่งขึ้น



## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์เรื่อง การศึกษาพฤติกรรมการซึมของน้ำฝนในลาดดินเนื้อเดียวกันและลาดดินไม่เป็นเนื้อเดียวกันที่เกิดจากพืชปกคลุมดินและผลกระทบด้านเสถียรภาพนี้ ได้รวบรวมทฤษฎีเกี่ยวกับน้ำในดินและดินรากพืช สำหรับการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้รวบรวมเนื้อหาให้ครอบคลุมประเด็นเนื้อหาเกี่ยวกับเสถียรภาพลาดดินภายใต้สภาวะรับน้ำฝน การตอบสนองของลาดดินต่อกระบวนการทางอุทกวิทยา ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการซึมของน้ำภายในลาดดินและแบบจำลองทางกายภาพของลาดดิน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับน้ำในดินและดินรากพืช

##### 2.2.1 ความชื้นดิน (Soil moisture)

ความชื้นดิน หมายถึง น้ำทั้งที่อยู่ในสถานะของเหลวและไอน้ำในดิน ส่วนคำว่าน้ำในดิน (Soil water) หมายถึง เฉพาะน้ำในสถานะของเหลวในดิน ตามปกติความชื้นในดินจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำฝน อัตราการระเหยของน้ำ และความจุน้ำของดิน (Field of capacity of water) ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของเนื้อดิน เช่น ดินทรายจะมีความจุน้ำของดินต่ำสุด ส่วนดินเหนียวจะมีความจุน้ำสูงสุด ทั้งนี้ เนื้อดินที่มีความหยาบจะยอมให้น้ำผ่านได้ง่ายกว่าเนื้อดินที่ละเอียด การแสดงปริมาณความชื้นดินโดยน้ำหนักเป็นการเปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักของความชื้นในดินกับน้ำหนักของดินอบแห้ง วิธีที่ง่ายและตรงที่สุดที่จะหาน้ำหนักของความชื้นและน้ำหนักดินอบแห้งคือ การชั่งน้ำหนักดินขณะชื้น และหลังจากอบแห้งแล้ว จะได้ค่าความแตกต่างของน้ำหนักที่ได้จากการชั่งทั้งสองครั้งนี้คือ ค่าน้ำหนักความชื้นดิน น้ำหนักดินอบแห้งคือ น้ำหนักดินที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 95-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนมีน้ำหนักคงที่ ปริมาณความชื้นดินโดยน้ำหนัก สามารถแสดงเป็นสัดส่วนของน้ำหนักความชื้นต่อน้ำหนักดินอบแห้งโดยตรง เช่น กรัม/กรัม อาจแสดงเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก (Gravimetric moisture content,  $w$ ) ก็ได้ร้อยละโดยน้ำหนักคือ สัดส่วนของน้ำหนักความชื้นคิดเป็นร้อยละของน้ำหนักดินอบแห้ง

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (2.1)$$

โดยที่	$w$	คือ	ความชื้นดินโดยน้ำหนัก, %
	$W_w$	คือ	น้ำหนักน้ำ
	$W_s$	คือ	น้ำหนักดินแห้ง

นอกจากจะคิดความชื้นดินโดยน้ำหนักแล้ว ยังสามารถคิดเป็นร้อยละของปริมาตรน้ำได้ด้วย เรียกว่า ความชื้นโดยปริมาตร (Volumetric moisture content,  $\theta$ ) หมายถึง ปริมาตรน้ำที่มีอยู่ในดินต่อปริมาตรทั้งหมดของดิน ซึ่งตัวอย่างดินที่นำมาหาความชื้นโดยปริมาตรเป็นตัวอย่างชุดเดียวกันกับตัวอย่างดินที่ใช้หาความชื้นโดยน้ำหนัก สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.2 (Scott, 2000)

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} \times 100 = w \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \quad (2.2)$$

เมื่อ	$\theta$	คือ	ความชื้นดินโดยปริมาตร, %
	$V_w$	คือ	ปริมาตรน้ำ
	$V_t$	คือ	ปริมาตรทั้งหมดของตัวอย่างดิน
	$\gamma_d$	คือ	หน่วยน้ำหนักของดินรวม
	$\gamma_w$	คือ	หน่วยน้ำหนักของน้ำ

การวัดความชื้นโดยปริมาตรยังสามารถวัดด้วยอุปกรณ์วัดความชื้นทางไฟฟ้า (Electrical method) ได้ด้วย แบ่งวิธีการหาความชื้นออกเป็น 3 วิธีคือ (1) Time Domain Reflectometer method : TDR (2) Frequency Domain Reflectometer method : FDR และ (3) Amplitude Domain Reflectometer method : ADR โดยเสียบหัวอ่านความชื้น (Probe) เข้าไปในเนื้อดิน จะแสดงผลค่าความชื้นออกมาเป็นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Topp et al., 1980) แต่อย่างไรก็ตาม การวัดความชื้นในดินด้วยหัววัดความชื้นมักจะถูกจำกัดด้วยชนิดของดิน ปริมาณความเค็ม และความหนาแน่นของดิน ดังนั้น เมื่อใช้หัววัดความชื้นในดินจำเป็นจะต้องสอบเทียบอุปกรณ์ก่อน เพราะความเค็มจะทำให้ค่าความชื้นที่วัดได้มีปริมาณมากเกินความเป็นจริง (Inoue et al., 2008)

### 2.2.2 แรงดึงดูดน้ำในดิน (Soil suction or Total suction, $\Psi$ )

แรงดึงดูดน้ำในดินคือ แรงดูดยึดที่ดินมีกับน้ำที่อยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคดินซึ่งจะมีค่ามากขึ้นเมื่อความชื้นในดินลดลงและเมื่อช่องว่างระหว่างอนุภาคดินมีขนาดเล็กลง น้ำในช่องว่างดินที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดินจะอยู่ใต้สภาวะแรงดึงดูดที่เรียกว่า แรงดึงดูดแมทริก หรือ แรงคาพิลลารี (Matric or Capillary suction,  $(u_a - u_w)$ ) และแรงดึงดูดออสโมติก (Osmotic suction,  $\pi$ ) คือ ความสามารถในการดูดน้ำเข้าหาตัวเองของดิน ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของสารละลาย

เกลือของน้ำในดิน โดยดินที่มีสารละลายเกลือปนอยู่มากความสามารถในการดูดน้ำเข้าหาตัวเอง จะได้มากด้วย (Fredlund and Rahardjo, 1993) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.3 โดยที่  $u_a$  คือ แรงดันอากาศในช่องว่างดิน และ  $u_w$  คือ แรงดันน้ำในดิน

$$\Psi = (u_a - u_w) + \pi \quad (2.3)$$

แรงดึงดูดเมทริก หรือแรงคาพิลลารีสามารถหาได้ด้วยการใช้หม้อแรงดัน (Pressure plate) ตามมาตรฐาน ASTM D6836-02 ทดสอบหาค่าแรงคาพิลลารี เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้น และแรงดึงดูดเมทริก หรือแรงคาพิลลารี (Soil Water Characteristic Curve : SWCC)

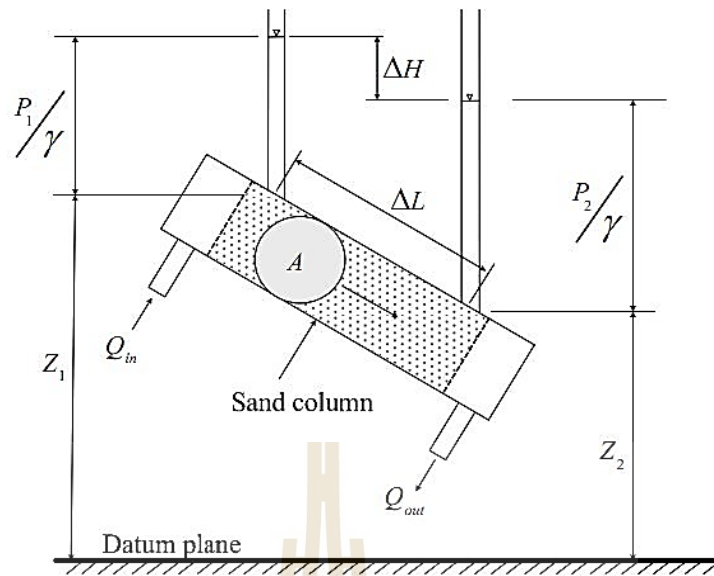
### 2.2.3 พฤติกรรมการซึมของน้ำและทฤษฎีการไหลของน้ำในดิน

การซึมของน้ำ (Infiltration) เป็นการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายนอกผิวดินเข้าสู่ชั้นดิน ด้วยอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของโลก โดยสิ่งที่มีอิทธิพลต่อการซึมของน้ำลงดิน สามารถสรุปได้ ดังนี้ (1) อัตราการตกของน้ำฝน หรือความลึกของน้ำที่ซังบนผิวดิน (2) ความสามารถในการรับน้ำของดิน (3) ปริมาณความชื้นในดินขณะเริ่มต้น (4) ความลาดชันและความขรุขระของผิวดิน (5) คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน และ (6) คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำ ส่วนการไหลของน้ำในดินอธิบายได้ด้วย สมการดาร์ซี-บัคกิงแฮม (Darcy-buckingham equation) เป็นการเคลื่อนที่ของน้ำผ่านวัสดุพรุนด้วยค่าความแตกต่างเฮดของน้ำ แสดงดังรูปที่ 2.1 โดยอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำ ( $Q$ ) มีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่หน้าตัดของการเคลื่อนที่ ( $A$ ) และค่าแตกต่างระหว่างเฮดของน้ำที่บริเวณเข้าและออก ( $\Delta H$ ) และเป็นสัดส่วนผกผันกับระยะทางที่เคลื่อนที่ ( $\Delta L$ ) ดังสมการต่อไปนี้

$$Q = KA \frac{\Delta H}{\Delta L} \quad (2.4)$$

เมื่อพิจารณาอัตราการไหลของน้ำต่อหน่วยพื้นที่ ( $q$ ) จะได้

$$q = \frac{Q}{A} = K \frac{\Delta H}{\Delta L} \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.1 หลักการของดาร์ซี (ศุภสิทธิ์ คนใหญ่, 2552)

เรียกสมการที่ 2.5 ว่ากฎของดาร์ซี (Darcy's law) ซึ่งใช้กับการไหลของน้ำในตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำ กรณีการไหลในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ Buckingham (1907) ได้ประยุกต์ใช้กฎของดาร์ซีสำหรับการไหลในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำมีรูปสมการ คือ

$$q = -K_u i \quad (2.6)$$

เมื่อ  $i$  คือ ความลาดชันของดาร์ซี ( $\Delta H / \Delta L$ ) และ  $K_u$  คือ สภาพนำไหลศาสตร์ของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความชื้นของดิน ( $\theta$ ) หรือเฮดแรงดัน ( $h_p$ ) เขียนได้เป็น

$$K_u = K(\theta) \quad (2.7)$$

หรือ

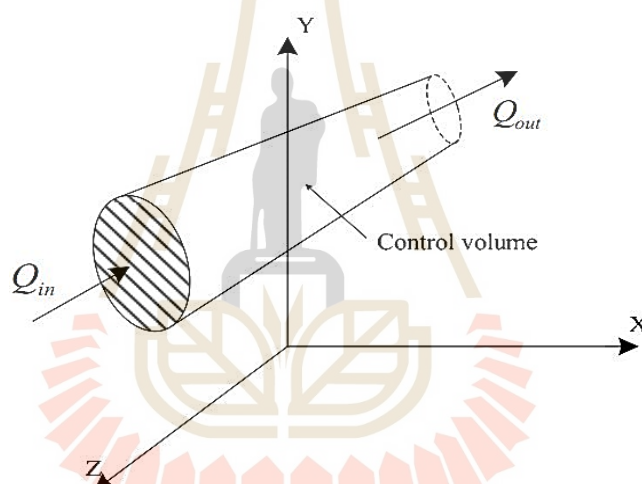
$$K_u = K(h_p) \quad (2.8)$$

สมการริชาร์ดส์ (Richards equation) จากกฎทรงมวลซึ่งกล่าวว่า สสารยอมไม่สูญหาย นั้น ในปริมาตรควบคุม (Control volume) อัตราไหลเข้าของมวลน้ำลบด้วยอัตราการไหลออกต้องเท่ากับอัตรา การเพิ่มขึ้นของมวลในปริมาตรควบคุม ถ้าพิจารณาว่ามวลนี้ คือ น้ำซึ่งเป็นของเหลวที่ กดอัดไม่ได้ (Incompressible fluid) พิจารณาปริมาตรแทนมวล ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ดังรูปที่ 2.2

ในช่วงระยะเวลา  $\Delta t$  สมการริชาร์ดส์เป็นสมการสำหรับการเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางพรุนหรือดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ เมื่ออยู่ในสถานะไม่คงตัว (Unsteady flow) และเป็นสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation) ลำดับที่สอง (Second-order) แบบพาราโบลิก (Parabolic) ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) เมื่อเขียนในรูปการไหลใน 3 มิติจะได้

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial H}{\partial z} \right) \quad (2.9)$$

โดยที่  $K$  คือ ฟังก์ชันของความชื้นหรือเฮดความดัน  
 $H$  คือ เฮดทางชลศาสตร์



รูปที่ 2.2 อัตราการไหลเข้าและออกจากปริมาตรควบคุม (ศุภสิทธิ์ คนใหญ่, 2552)

ในมวลดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดินจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดิน (Soil-Water characteristic, SWC) ซึ่งเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของดินในสถานะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดินเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเชิงปริมาตร (Volumetric moisture content,  $\theta_w$ ) กับแรงดึงดูดแมทริก (Matric suction,  $u_a - u_w$ ) กล่าวคือ เมื่อแรงดึงน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินเพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ความชื้นในดินมีค่าลดลง ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองของ van Genuchten (van Genuchten, 1980) ดังนี้



$$S_e = \frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r} = \left\{ \frac{1}{1 - [\alpha(u_a - u_w)]^n} \right\}^{1-\frac{1}{n}} \quad (2.10)$$

โดยที่  $S_e$  คือ ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำประสิทธิผล (Effective degree of saturation)

$\theta_r$  คือ ความชื้นเชิงปริมาตรที่สภาวะหยุดนิ่ง (Residual volumetric moisture content)

$\theta_{sat}$  คือ ความชื้นเชิงปริมาตรที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated volumetric moisture content)

$\alpha$  คือ พารามิเตอร์ของแบบจำลองที่บ่งบอกค่าแรงดันน้ำ ณ จุดที่อากาศเริ่มเข้าไปในมวลดิน (Air-Entry pressure)

$n$  คือ พารามิเตอร์ของแบบจำลองที่บ่งบอกอัตราการลดลงของความชื้นเชิงปริมาตรกับแรงดึงน้ำ หลังจากที่อากาศเริ่มเข้าไปในมวลดิน

เมื่อทำนายคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดินได้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของดินในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำก็สามารถทำนายได้เช่นเดียวกัน โดยอาศัยแบบจำลองของ van Genuchten-Mualem model (Mualem, 1976) ดังนี้

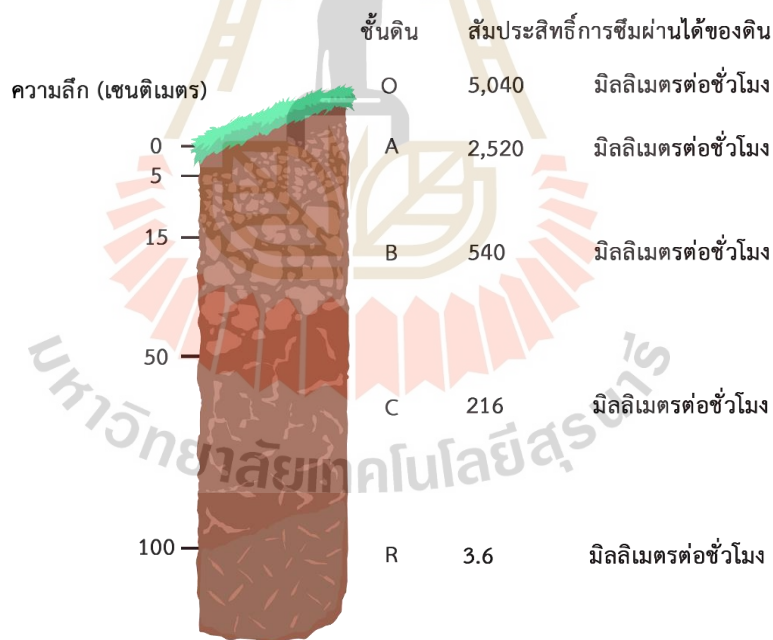
$$k(h) = k_s \frac{\left\{ 1 - [\alpha(u_a - u_w)]^{n-1} \left( 1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n \right)^{\frac{1}{n-1}} \right\}^2}{\left\{ 1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n \right\}^{\frac{1-n}{2}}} \quad (2.11)$$

เมื่อ  $k_s$  คือ สัมประสิทธิ์ความซึมผ่านได้ของดินที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ

## 2.2.4 พฤติกรรมเชิงอุทกวิทยาของลาดดินที่มีพีชปกคลุม

พฤติกรรมการตอบสนองเชิงอุทกวิทยาของลาดดินที่มีพีชปกคลุมขึ้นอยู่กับความสามารถในการรับน้ำฝน และการระบายน้ำของลาดดิน นั้น องค์ประกอบของดินในลาดดินจึงเป็นตัวบ่งชี้รูปแบบพฤติกรรมการตอบสนองเชิงอุทกวิทยาของลาดดิน เริ่มตั้งแต่ลักษณะทางธรณีวิทยาของชั้นดินต้นกำเนิด โดยมาจากกระบวนการผุพังของหินในพื้นที่ลาดทำให้เกิดเป็นชั้นดินหลายชั้นวางซ้อนกันบนหินต้นกำเนิด (รูปที่ 2.3) ดินแต่ละชั้นมีความสามารถในการรับน้ำฝน และระบายน้ำออกจากชั้นดินที่แตกต่างกัน ดังนี้

- **ดินชั้น O** หรือที่เรียกว่าชั้นดินอินทรีย์คือ ชั้นที่มีการสะสมอินทรีย์วัตถุที่เกิดจากการย่อยสลายซากพืชและซากสัตว์ โดยมาจากพืชเป็นหลัก เช่น ใบไม้ กิ่งไม้ หญ้า และพืชอื่น ๆ เป็นชั้นดินที่มีความสามารถในการระบายน้ำสูงที่สุด
- **ดินชั้น A** หรือดินชั้นบนคือ ชั้นดินที่ประกอบด้วยอินทรีย์วัตถุที่ย่อยสลายแล้วผสมคลุกเคล้าอยู่กับแร่ธาตุในดินและมักมีสีคล้ำ
- **ดินชั้น B** หรือดินชั้นรอง เป็นชั้นที่ดินผสมกับแร่ธาตุและตะกอนขนาดเล็ก โดยเฉพาะอย่างยิ่งแร่ธาตุจำพวกเหล็กและอลูมิเนียมที่ถูกน้ำชะล้างลงมาจากดินชั้น A โดยทั่วไปดินชั้นนี้将有ความหนามากที่สุดและสีของดินจะขึ้นอยู่กับสีของแร่ธาตุที่ผสมอยู่
- **ชั้น C** หรือชั้นวัตถุต้นกำเนิด เป็นชั้นที่หินเกาะกันแบบหลวม ๆ ประกอบไปด้วยหินและแร่ที่กำลังจะผุพัง
- **หินชั้น R** เป็นชั้นหินพื้นฐาน หรือชั้นหินต้นกำเนิดที่แข็งและยังไม่ผุพัง จึงมีความสามารถในการระบายน้ำต่ำมาก



รูปที่ 2.3 สภาพทั่วไปของชั้นดินและหินของลาดดินที่มีพืชปกคลุม  
(ดัดแปลงจาก Sidle and Ochiai 2006 )

ความสามารถในการระบายน้ำของดินชั้นบนสุดมีความสำคัญอย่างมากในการควบคุมการเกิดน้ำผิวดิน และน้ำใต้ดิน ซึ่งสามารถจำแนกออกเป็น 2 เงื่อนไขหลักตามปริมาณความรุนแรงฝนที่ตกลงในพื้นที่ ดังนี้

### 1) ความรุนแรงฝนเกินความสามารถในการระบายน้ำของดิน

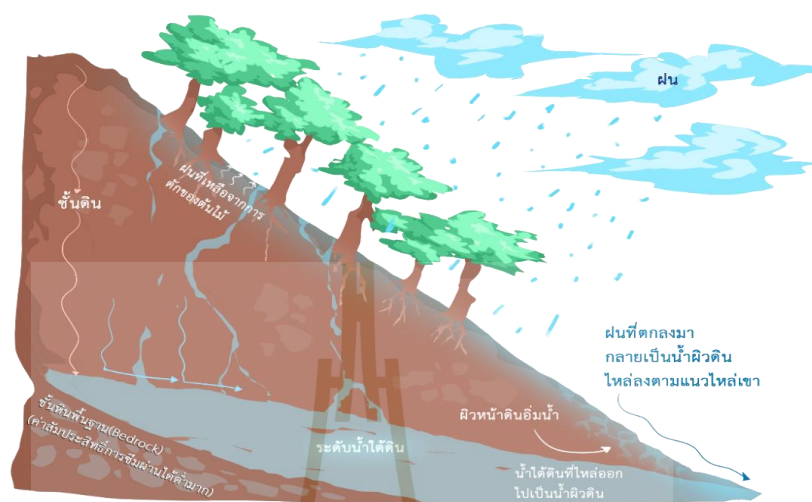
เมื่อฝนตกตามเงื่อนไขนี้ ฝนที่ตกในช่วงแรกสามารถซึมลงดินได้อย่างรวดเร็วเนื่องจากหน้าดินชั้นบนยังแห้งอยู่ และเมื่อหน้าดินมีการสะสมน้ำจนดินเข้าสู่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ ฝนที่ตกลงบนหน้าดินดังกล่าว จะแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ซึมลงสู่ชั้นดิน และส่วนที่ไหลไปตามผิวดิน น้ำฝนทั้งสองส่วนนี้จะถูกควบคุมด้วยปริมาณน้ำฝนและความสามารถในการระบายน้ำของดิน เมื่อหน้าดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ฝนสามารถซึมลงสู่ชั้นดินได้สูงสุดเท่ากับความสามารถในการระบายน้ำของดิน เช่น เมื่อฝนตกด้วยความรุนแรงเท่ากับ 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง บนพื้นที่ที่ดินมีความสามารถในการระบายน้ำได้เท่ากับ 3 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง น้ำฝนจำนวน 3 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงจะซึมลึกลงไปในชั้นดินและสะสมเป็นน้ำใต้ดิน ฝนส่วนที่เหลือจำนวน 7 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง เป็นส่วนที่เกินความสามารถในการระบายน้ำของดินจะกลายเป็นน้ำไหลไปตามผิวดิน

การเกิดน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินภายใต้เงื่อนไขนี้ ส่วนใหญ่เกิดขึ้นในพื้นที่ที่ดินมีความสามารถในการระบายน้ำต่ำ เช่น เขตพื้นที่ชุมชนที่มีความหนาแน่นของสิ่งปลูกสร้าง พื้นที่ที่ดินมีองค์ประกอบของอนุภาคเม็ดละเอียดสูง พื้นที่ที่มีการปรับดินให้มีความแน่นมาก และพื้นที่ที่มีการตัดไม้ทำลายป่าเพื่อทำกิจกรรม เป็นต้น เมื่อดินในพื้นที่ลาดมีความสามารถในการระบายน้ำต่ำ น้ำผิวดินสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วแม้จะมีฝนตกเพียงช่วงระยะเวลาสั้น เสี่ยงต่อปัญหาน้ำไหลกัดเซาะหน้าดินและการวิบัติของลาดดินระดับต้น รวมทั้งปัญหาน้ำป่าไหลหลากด้วย

### 2) ความรุนแรงฝนไม่เกินความสามารถในการระบายน้ำของดิน

กรณีนี้มักพบในพื้นที่ที่ดินชั้นบนมีความสามารถในการระบายน้ำสูง เช่น ในพื้นที่ป่าธรรมชาติ เนื่องจากมีการทับถมของอินทรีย์วัตถุเป็นจำนวนมาก ดินจึงมีความร่วนซุยและระบายน้ำได้ดี อีกทั้งต้นไม้ยังช่วยดักน้ำฝนไว้ที่ใบและลำต้น เมื่อเกิดฝนตกติดต่อกันยาวนาน น้ำฝนทั้งหมดที่เหลือจากการดักของต้นไม้จะซึมลงสู่ชั้นดิน และเมื่อน้ำฝนซึมลงไปจนถึงรอยต่อระหว่างชั้นดินและหินต้นกำเนิด จะเกิดน้ำใต้ดินตามแนวรอยต่อไหลไปยังบริเวณด้านท้ายของลาดดิน (Toe) กลายเป็นระดับน้ำใต้ดินชั่วคราวขึ้นที่ด้านท้ายของลาดดิน ระดับน้ำใต้ดินชั่วคราวนี้จะยกตัวสูงขึ้นเรื่อย ๆ ตามปริมาณน้ำฝนที่ยังตกต่อเนื่องจนระดับน้ำใต้ดินยกตัวถึงระดับผิวดิน ผิวดินบริเวณนั้นจึงเข้าสู่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งเป็นสภาวะที่ดินไม่ยอมให้น้ำซึมลงไปได้อีก การยกตัวของระดับน้ำใต้ดินชั่วคราวด้านท้ายของลาดดิน (รูปที่ 2.4) ส่งผลให้กำลังรับแรงเฉือนของดินด้านท้ายลาดดินลดลง จึงมักพบการเกิดดินถล่ม โดยมีจุดเริ่มวิบัติที่บริเวณด้านท้ายของลาดดิน และหากมีการก่อสร้าง หรือ มีโครงสร้างมาขัด

ขวางทางน้ำไหล เช่น ถนน ที่พักอาศัย น้ำใต้ดินจะมีการสะสมที่บริเวณดังกล่าว แทนที่จะไปสะสมที่ด้านท้ายของลาดดิน เป็นการเร่งเวลาให้เกิดดินถล่มได้เร็วขึ้น



รูปที่ 2.4 การเกิดน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินในพื้นที่ป่า  
(อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ (บรรณาธิการ), 2561)

### 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โดยปกติดินถล่มที่เกิดขึ้นในประเทศไทยส่วนใหญ่จะมีปริมาณน้ำฝนเป็นตัวกระตุ้นหลัก โดยน้ำจะมีการซึมผ่าน (Infiltration) ลงสู่ลาดดิน เมื่อความชื้นในมวลดินสูงขึ้น จากทฤษฎีของ หน่วยแรง ประสิทธิภาพจะพบว่าความแข็งแรงของดินจะลดลงตามความชื้นในมวลดินที่เพิ่มขึ้นและ น้ำเป็นตัวที่ทำให้คุณสมบัติของดินที่มีสถานะเป็นของแข็งสามารถเปลี่ยนไปเป็นของไหลได้ ดังนั้น สิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณาเมื่อทำการศึกษาค้นคว้าหาการเกิดดินโคลนถล่ม คือ พฤติกรรม การซึมของน้ำฝนในลาดดินและผลกระทบต่อเสถียรภาพของลาดดินจากการซึมของน้ำฝน

#### 1) เสถียรภาพของลาดดินภายใต้สภาวะรับน้ำฝน

การศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินได้มีการศึกษาต่อเนื่องมาเป็นระยะเวลายาวนานและมีวิธีการวิเคราะห์หลายวิธี เช่น Slope stability charts โดย Janbu (1968) และ Duncan et al. (1987), Force equilibrium methods โดย Lowe และ Karafiath (1955) และ Corps of Engineers (1982), Ordinary method of slices โดย Fellenius (1927), Janbu's generalized procedure of slices โดย Janbu (1968), Bishop's Modified Method โดย Bishop (1955) และ Morgenstern and price's method โดย Morgenstern and Price (1965) เป็นต้น วิธีวิเคราะห์ที่กล่าวมานี้เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพ

ของลาดดินที่เรียกว่า Limit equilibrium method โดยทำการประเมินเสถียรภาพของลาดดินเป็นค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of safety,  $FS$ )

Sorbino and Nicotera (2012) ได้ทำการศึกษากลไกของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ในเหตุการณ์ดินโคลนถล่มที่มีการวิบัติแบบไหล (Flow landslides) โดยทำการศึกษากับ ลาดดินที่เป็นดินเม็ดหยาบ เนื่องจากมีการตอบสนองต่อน้ำฝนอย่างรวดเร็ว เพราะไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน และมีความรุนแรงในการวิบัติมากกว่าลาดดินที่เป็นดินเม็ดละเอียด งานวิจัยนี้ได้ชี้ให้เห็นว่าการเกิดดินโคลนถล่มจะประกอบด้วย 2 สถานะ คือ สถานะวิบัติ (Failure stage) และสถานะหลังการวิบัติ (Post-failure) สำหรับสถานะวิบัติจะเกิดภายใต้การตอบสนองต่อปริมาณน้ำฝนของลาดดิน ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำ (Pore pressure) ในมวลดิน ส่งผลให้เกิดการลดลงของหน่วยแรงประสิทธิผลในมวลดิน จนกระทั่งสถานะของหน่วยแรงเข้าสู่สถานะวิบัติและภายหลังสถานะวิบัติ หากน้ำไม่สามารถระบายออกจากลาดดินได้ทัน จะมีการพัฒนาสถานะวิบัติไปสู่การเกิดการวิบัติแบบไหล

การวิบัติตามระนาบ (Translational slide) เป็นการวิบัติที่พบบ่อย ก่อนเกิดการวิบัติแบบไหล โดยจะเป็นการเลื่อนไถลลงมาตามระนาบการเคลื่อนที่มีลักษณะค่อนข้างตรงและขนานกับลาดดิน การวิบัตินี้จะวิบัติในระดับตื้นถึงแม้ว่าชั้นดินจะมีความหนาแน่นหรือแน่นก็ตาม โดยปกติแล้วจะเกิดขึ้นในพื้นที่ที่มีความลาดชันสูง (Steep slope) สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยวิธี Limit Equilibrium ที่สอดคล้องกับการวิบัติรูปแบบนี้จะนิยมใช้วิธีลาดดินอนันต์ (Infinite slope) โดย Skempton and Delory (1957) ดังตัวอย่างงานวิจัย เช่น Xie et al. (2004), Lu and Godt (2008), Cho (2009), Ma et al. (2011), Santos et al. (2011), Eichenberger et al. (2013) เป็นต้น วิธีการวิเคราะห์นี้จะเป็นการประเมินเสถียรภาพของลาดดินตามสมการที่ 2.12 ดังนี้

$$FS = \frac{\tau_R}{\tau_M} = \frac{c' + \sigma'_n \tan \phi'}{\tau_M} \quad (2.12)$$

โดยที่  $\sigma'_n$  คือ หน่วยแรงตั้งฉากประสิทธิผล (Effective normal stress)

$c'$  คือ หน่วยแรงยึดเกาะประสิทธิผลของดิน (Effective cohesion intercept)

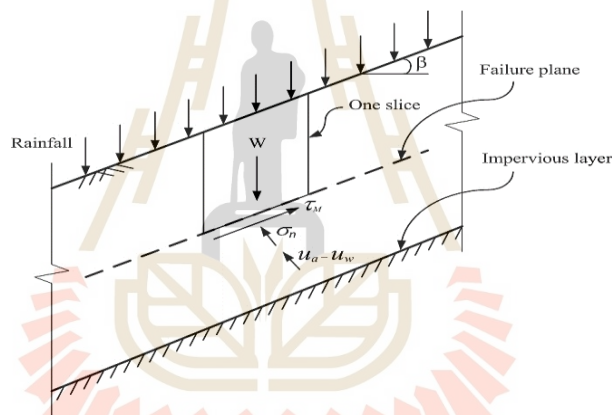
$\phi'$  คือ มุมเสียดทานภายในประสิทธิผลของดิน (Friction angle)

สมการที่ 2.12 จะนำมาใช้ประเมินค่าอัตราส่วนความปลอดภัยด้วยวิธีลาดดินอนันต์ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ในลาดดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ แต่หากมีการประยุกต์ใช้กับลาดดินที่ตอบสนองต่อน้ำฝน ดังรูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงเสถียรภาพของลาดดินจะสอดคล้องกับการซึมของ

น้ำฝนลงสู่ชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ดังนั้น กำลังรับแรงเฉือนของดิน ( $\tau_R$ ) จึงต้องพิจารณาเป็นกำลังรับแรงเฉือนในสถานะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ และสามารถพิจารณาตาม Bishop (1959) ได้เสนอให้มีการใช้หน่วยแรงประสิทธิผล (Bishop's Effective Stress,  $\sigma'$ ) สำหรับดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ดังนี้

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (2.13)$$

- โดยที่  $\sigma$  คือ หน่วยแรงรวม (Total stress)  
 $u_a$  คือ แรงดันอากาศในช่องว่างเม็ดดิน (Air pressure)  
 $u_w$  คือ แรงดันน้ำในช่องว่างเม็ดดิน (Water pressure)  
 $\chi$  คือ ค่าคงตัวของ Bishop จะสัมพันธ์กับระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (Degree of saturation) หรือความชื้น (Moisture content) ในมวลดิน



รูปที่ 2.5 การวิเคราะห์แบบลาดดินอนันต์ (Infinite slope)

ดังนั้น อัตราส่วนความปลอดภัยในลาดดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ จะเป็นดังนี้

$$FS = \frac{c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + \chi(u_a - u_w) \tan \phi'}{\tau_M} \quad (2.14)$$

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในสถานะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำแบบลาดดินอนันต์ตามสมการที่ 2.14 นี้ นอกจากจะใช้พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกำลังของดินแล้ว จะเห็นได้ว่าในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ จะมีความซับซ้อนในการวิเคราะห์มากขึ้น เนื่องจากการรวมผลกระทบที่เป็นปัจจัยกระตุ้นทางอุทกวิทยา ประกอบด้วย ความรุนแรงฝน และอัตราการระเหยเข้าร่วมด้วยกล่าวคือ ในพจน์ของค่าแรงดึงดูดแมทริก  $\chi(u_a - u_w)$  ในสมการที่ใช้วิเคราะห์ซึ่งเป็นพจน์ที่สอดคล้องกับ

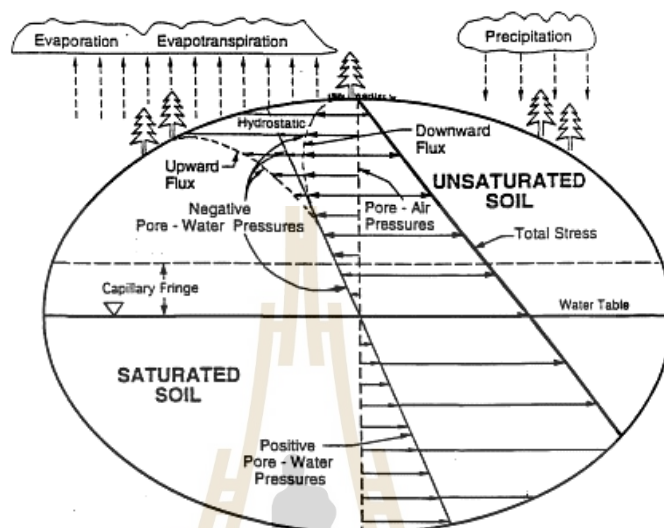


การเปลี่ยนแปลงแรงดึงดูดน้ำและความชื้นในลาดดิน อีกทั้งยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดินแต่ละชนิด และเวลาที่ตอบสนองด้วย เช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำวิธีอื่น ๆ ดังนั้น สำหรับการวิบัติของลาดดินอนันต์เนื่องจากฝน จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องศึกษาให้เข้าใจถึงการตอบสนองอุทกวิทยาของลาดดิน เพื่อให้สามารถทำนายเหตุการณ์ดินโคลนถล่มได้อย่างแม่นยำ และนำไปสู่ระบบการเตือนภัยล่วงหน้าดินโคลนถล่มที่ช่วยลดการสูญเสียชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนในพื้นที่เสี่ยงภัยได้มากยิ่งขึ้น

## 2) การตอบสนองของลาดดินต่อกระบวนการทางอุทกวิทยา

เมื่อฝนตกน้ำฝนจะซึมลงสู่ชั้นดิน ทำให้ความชื้นในดินมีค่าสูงขึ้น ผลที่ตามมาคือ มวลดินเกิดการสูญเสียหน่วยแรงที่เรียกว่า แรงดึงดูดน้ำแมทริก (Suction) ซึ่งเป็นหน่วยแรงที่เกิดจากปรากฏการณ์คาพิลลารี (Capillary) และทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินจากแรงดึงผิวของน้ำ Fredlund (1996) ได้แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดึงดูดน้ำแมทริกตาม ความลึกของชั้นดินที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงอัตราน้ำเข้า-ออก (Water flux) บริเวณผิวดินที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางอุทกวิทยา ดังรูปที่ 2.6 เมื่อชั้นดินถูกแบ่งออกเป็นสองโซนคือ ชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated zone) จะอยู่เหนือจากระดับน้ำใต้ดินและชั้นดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated zone) ที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน เมื่ออยู่ในสภาวะสมดุล (Equilibrium) และไม่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราน้ำเข้า-ออกบริเวณผิวดิน แรงดันน้ำตลอดชั้นดินจะเป็นแรงดันน้ำสถิตย (Hydrostatic pressure) ซึ่งเป็นสภาวะเริ่มต้น (Initial condition) ของแรงดันน้ำในชั้นดิน ภายใต้สภาวะนี้ในโซนอิ่มตัวด้วยน้ำแรงดันน้ำจะมีค่าเป็นบวก ในขณะที่โซนไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะมีค่าเป็นลบ หลังจากนั้น เมื่อมีการไหลจากน้ำฝนซึมลงสู่ชั้นดิน ในโซนดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะเกิดการเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำในโพรงเม็ดดิน เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความชื้นในชั้นดิน โดยในทางกลับกันหากอัตราน้ำเข้า-ออกบริเวณผิวดินเท่ากับอัตราการระเหยจะทำให้ชั้นดินในโซนไม่อิ่มตัวด้วยน้ำมีแรงดึงดูดน้ำแมทริกเพิ่มขึ้นจากการเปลี่ยนแรงดันน้ำในโพรงเม็ดดินดังกล่าว ในกระบวนการซึมที่เกิดขึ้นจะเห็นได้ว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราน้ำเข้า-ออกที่ผิวดิน ภายในชั้นดินจะเกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำจากสภาวะเริ่มต้นซึ่งเป็นสภาวะสมดุล ส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเสถียรภาพของลาดดินตามไปด้วย โดยเฉพาะในช่วงที่เกิดฝน เพราะฉะนั้นน้ำฝนที่ซึมลงดินจะทำให้แรงดันน้ำเพิ่มขึ้นในโซนไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงภายใต้ระยะเวลาอันสั้น ดังนั้น จึงเรียกได้ว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำภายใต้สภาวะการซึมแบบไม่คงที่ขึ้นกับเวลา (Transient seepage) สอดคล้องกับเหตุการณ์ดินโคลนถล่มที่จะเกิดขึ้นในช่วงระหว่างพายุฝน หรือหลังจากพายุฝนไม่นาน การวิเคราะห์การซึมแบบไม่คงที่ขึ้นกับเวลา ทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดิน และแรงดันน้ำที่สัมพันธ์กับทั้งการเปลี่ยนแปลงเวลาและความหนาชั้นดินด้วย ซึ่งสามารถนำไปรวมกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินวิธีต่างๆ และจะทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความปลอดภัยกับเวลาตาม

ความลึกของชั้นดินด้วยเช่นเดียวกัน ตัวอย่างการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่สอดคล้องกับการไหลแบบไม่คงที่ที่ศึกษาโดย Ma et al., (2011), Santoso et al., (2011) และ Xie et al., (2004)



รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำกับชั้นดินภายใต้การเปลี่ยนแปลงอัตราน้ำเข้า-ออก บริเวณผิวดิน โดย Fredlund (1996)

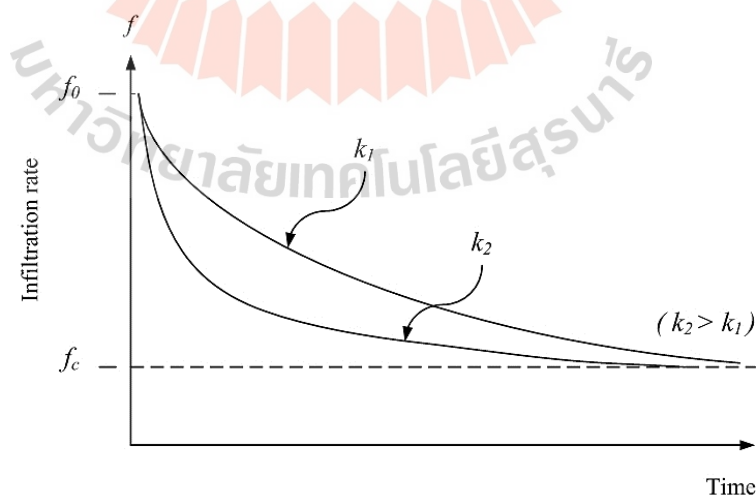
### 3) ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมกรรมการซึมของน้ำภายในลาดดิน

จากการสรุปรงานวิจัย Green and Ampt (1911), Horton (1933), Ng and Shi (1998b), Ng et al. (2001), Kim (2004), Zhan and Ng (2004), Cho (2009), Shama and Nakaraki (2010), Rahardjo et al. (2001), Ma et al. (2011), Rahardjo et al. (2010), Kassim et al., (2012) และ Kim et al., (2012) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ การซึมของดิน ทั้งวิธีคำนวณเชิงวิเคราะห์ (Analytical method) และวิธีคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical method) สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกรรมการซึมของน้ำภายในลาดดิน สามารถแบ่งได้เป็น 4 ปัจจัยหลัก คือ 1) ปัจจัยทางด้านรูปร่างของลาดดิน (Geometry), 2) ปัจจัยที่เกิดจากคุณสมบัติของเม็ดดินแต่ละชนิดภายในลาดดิน (Internal factors), 3) ปัจจัยกระตุ้นภายนอก (External factors), และ 4) ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขต (Initial and boundary conditions) โดยพบว่าปัจจัยที่มีความสำคัญมากที่สุดคือ ปัจจัยกระตุ้นภายนอกที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทางอุทกวิทยา คือ ความรุนแรงของปริมาณฝนในพื้นที่ (Rainfall intensity) ช่วงเวลาในการเกิดพายุฝนตก (Rainfall duration) และอัตราการระเหย (Evaporation rate) อย่างไรก็ตามงานวิจัย

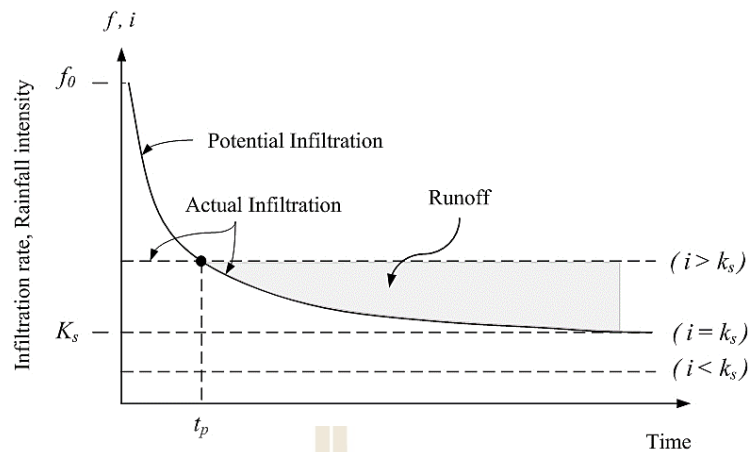
ก่อนหน้ามิได้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยเหล่านี้อย่างเจาะจง เป็นเพียงการนำเอาปัจจัยมาแสดงให้เห็นถึงผลกระทบ ผ่านผลที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขและวิธีคำนวณเชิงวิเคราะห์เท่านั้น

ในทางอุทกวิทยา เหตุการณ์ที่เกิดฝนตกลงสู่พื้นดิน สามารถแยกย่อยได้หลายกระบวนการตามหลักการสมดุลน้ำ (Water runoff) ภายในปริมาตรควบคุม (Control volume) ได้แก่ การไหลออกที่ผิวดิน (Surface runoff) การไหลออกใต้ผิวดิน (Subsurface runoff) และการระเหยซึ่งกระบวนการย่อยเหล่านี้ถือเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก การที่จะศึกษาปัจจัยกระตุ้นภายนอกจึงควรคำนึงถึงปัจจัยย่อยเหล่านี้ด้วยเช่นกัน

Horton (1933) ทำการศึกษาวิจัยและได้เสนอแบบจำลองอย่างง่าย ในการอธิบายความสามารถในการซึมน้ำของดินกับเวลา ดังรูปที่ 2.7 โดยความสามารถในการซึม ( $f$ ) ของดินจะลดลงตามระยะเวลาที่เกิดฝน จากความสามารถในการซึมเริ่มต้น ( $f_0$ ) จนกระทั่งมีค่าคงที่เมื่อความสามารถในการซึมมีค่าใกล้เคียงกับความสามารถในการซึมสุดท้ายของดิน ( $f_c$ ) สามารถประมาณให้มีค่าเท่ากับค่าความซึมผ่านได้ของดินในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ จากแบบจำลองการซึมข้างต้น สามารถใช้แยกฝนที่ตกลงสู่พื้นดินออกเป็นการซึมและการไหลบนผิวดิน ดังรูปที่ 2.8 สมมติให้ความรุนแรงฝน ( $i$ ) มีค่าคงที่ เมื่อฝนตกที่เวลาต่ำกว่า  $t_p$  ความสามารถในการซึมของดินจะมีค่าเท่ากับ ความรุนแรงฝน ในขณะที่เมื่อเวลาในการตกของฝนมีค่ามากกว่า  $t_p$  ความรุนแรงฝนจะสูงกว่าความสามารถในการซึมของดิน จึงทำให้เกิดการไหลบนผิวดินขึ้น ซึ่งจุดที่เวลาฝนตกมีค่าเท่ากับ  $t_p$  จะเรียกว่าเวลาที่เกิดน้ำขัง (Ponding time) ในขณะเดียวกันหากความรุนแรงฝนมีค่าต่ำกว่าความสามารถในการซึมสุดท้ายของดิน จะไม่มีการไหลบนผิวดินเกิดขึ้น



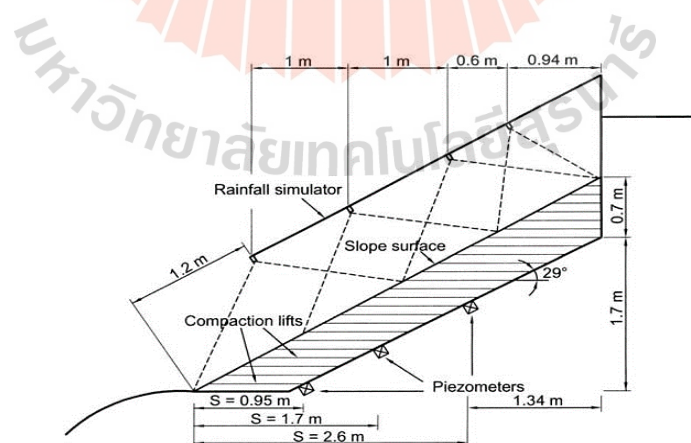
รูปที่ 2.7 แบบจำลองการซึม (Philip, 1957)



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการซึมและการไหลผิวดิน

#### 4) แบบจำลองกายภาพของลาดดิน

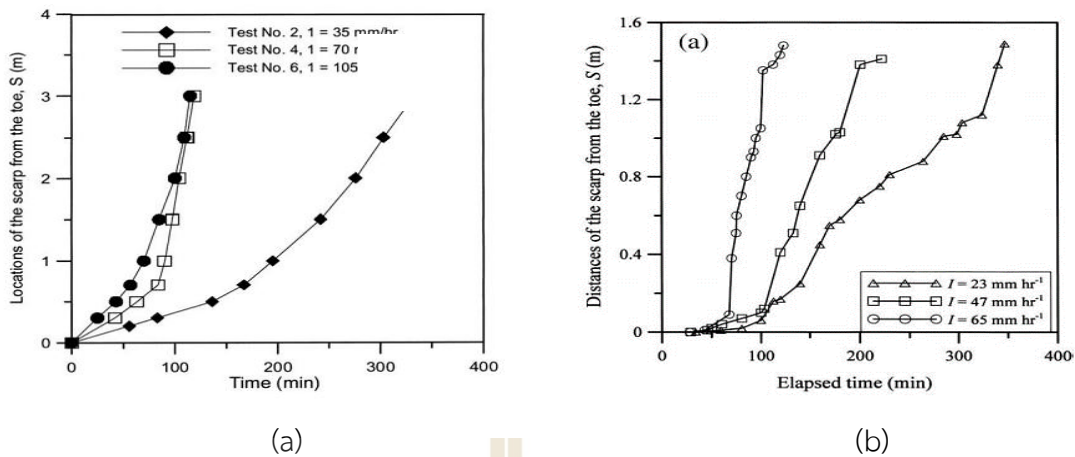
Huang et al., (2008, 2009, and 2010) ได้ทำการศึกษาการวิบัติของลาดดินต้นตามแนวระนาบ โดยมีการจำลองลาดดินขนาดใหญ่ ลักษณะแสดงดังรูปที่ 2.9 ทำการทดสอบลาดดินในสภาวะรับน้ำฝนและมีการเปลี่ยนแปลงค่าความรุนแรงฝน พบว่าการวิบัติของลาดดินเกิดขึ้นในสองช่วงคือ เกิดขึ้นในช่วงปลายของลาดดิน และเกิดขึ้นที่ตอนกลางของลาดดินในเวลาต่อมา ดังแสดงในรูปที่ 2.10 และ 2.11 อีกทั้ง ยังได้ศึกษาผลของความรุนแรงฝนกับเวลาที่เกิดการวิบัติของลาดดิน โดยค่าความรุนแรงฝนสูงจะส่งผลให้เกิดการวิบัติของลาดดินเร็วกว่า ค่าความรุนแรงฝนต่ำ ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.9 แบบจำลองลาดดินและแบบจำลองน้ำฝน (Huang et al., 2009)





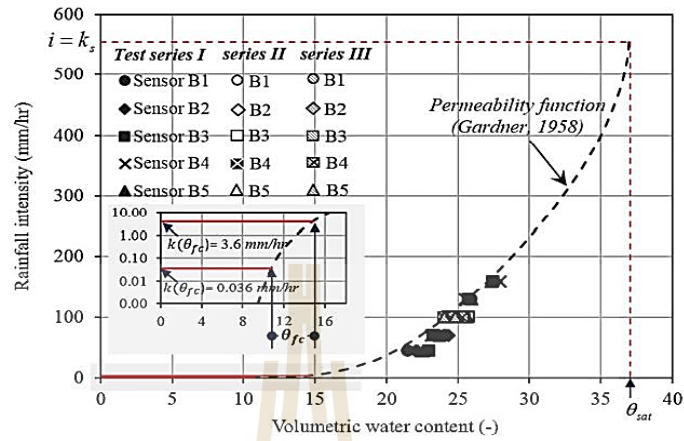


รูปที่ 2.12 แสดงช่วงเวลาการวิบัติของลาดดิน (a) ลาดดินตะกอนปนทราย (Huang et al., 2009)  
(b) ลาดดินทราย (Huang et al., 2010)

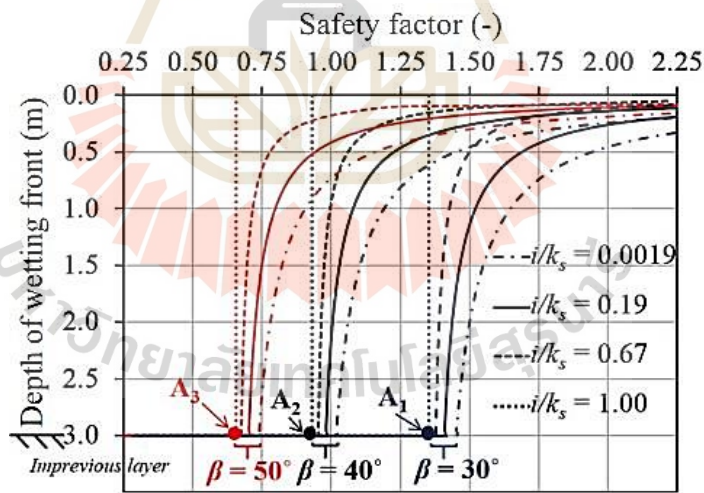
Chinkulkijniwat et al. (2016) ทำการวิจัย และศึกษาการตอบสนองทางกายภาพ และอุทกวิทยาของลาดดินตื้น ด้วยแบบจำลองทางกายภาพการซึม 2 มิติ ภายใต้สภาวะรับน้ำฝนในรูปแบบต่าง ๆ โดยใช้ดินทราย (SP) ในการทดสอบ จากการศึกษาพบว่า การตอบสนองของลาดดินแบ่งออกเป็นสองเฟส คือ เฟสการซึมและเฟสการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดิน เมื่อพิจารณาในช่วงเฟสการซึม ช่วงเวลาที่เท่ากันปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของความรุนแรงฝน ดังแสดงในภาพที่ 2.13 แต่จะไม่ขึ้นกับค่าความชันของลาดดินและปริมาณความชื้นเริ่มต้น อิทธิพลของความรุนแรงฝนมีผลต่อค่าความชื้นทั้งสองเฟส ซึ่งการวิบัติของลาดดินตื้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทด้วยกัน ขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนระหว่างมุมเสียดทานภายในเม็ดดินกับค่ามุมลาดชันของลาดดิน หรือค่าดัชนีสถียรภาพ ( $\tan \phi' / \tan \beta$ ) กล่าวคือ 1) ถ้าลาดดินมีความชันน้อย ( $\tan \phi' / \tan \beta \geq 1.0$ ) รูปแบบการวิบัติจะอยู่ตามแนวรอยต่อระหว่างชั้นดินกับชั้นที่บีบน้ำ (Along the impervious layer mode) ในขณะที่ 2) ลาดดินที่มีความชันมาก ( $\tan \phi' / \tan \beta \leq 0.9$ ) รูปแบบการวิบัติจะเป็นการวิบัติระดับตื้นใกล้ ๆ ผิวดิน (Shallow depth mode) ส่วนลาดดินมีความชันปานกลาง ( $1.0 > \tan \phi' / \tan \beta > 0.9$ ) รูปแบบการวิบัติจะเป็นการวิบัติช่วงเปลี่ยนผ่าน (Transitional mode) ซึ่งความลึกกระบวนการวิบัติ ( $z_f$ ) อาจเกิดขึ้นได้หลายระนาบความลึกตลอดชั้นดิน จะเห็นได้ว่าการวิบัติของลาดดินตื้นที่มีความชันสูงอาจเกิดขึ้นในช่วงเฟสการซึม ขณะที่ลาดดินที่มีความชันต่ำอาจเกิดการวิบัติที่เฟสการอิ่มตัวด้วยน้ำช่วงที่มีการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดิน ลาดดินที่มีความชันสูงตำแหน่งของระนาบวิบัติสามารถเกิดขึ้นที่ความลึกใด ๆ จากชั้นที่บีบน้ำถึงผิวลาดดินจะขึ้นอยู่กับเสถียรภาพ และดัชนีการซึม ( $i/k_s$ ) ซึ่งผลกระทบของอิทธิพล ความรุนแรงฝนต่อค่าอัตราส่วนความปลอดภัย ดังแสดงในรูปที่ 2.14 โดยเสถียรภาพของลาดดินจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความลึกของระนาบความชื้นที่เคลื่อนตัวลงในดิน สำหรับดัชนีการซึมที่มีค่าน้อยกว่า 1.0 (น้ำฝน



สามารถซึมลงลาดดินได้หมด จึงไม่มีน้ำฝนส่วนเกินที่ซึมลงไม่ได้ที่จะกลายเป็นน้ำไหลหลากบนผิวหน้าลาดดิน



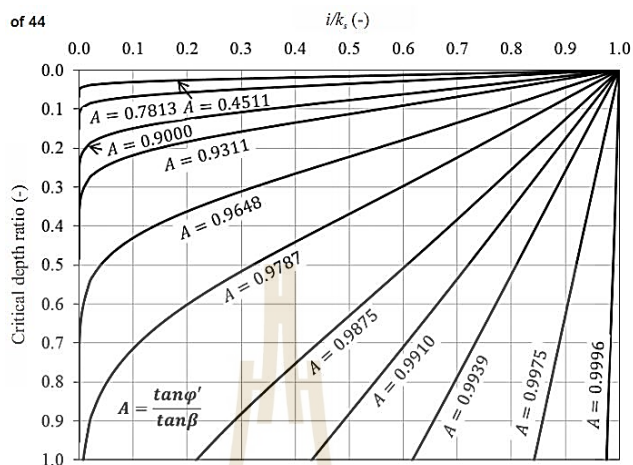
รูปที่ 2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงฝนกับปริมาณความชื้น (Chinkulkijniwat et al., 2016)



รูปที่ 2.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความปลอดภัยกับความลึก (Chinkulkijniwat et al., 2016)

รูปที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกวิกฤติ ดัชนีการซึม และดัชนีเสถียรภาพ โดยกราฟความลึกวิกฤติแสดงความลึกของลาดดินที่มีโอกาสเกิดระนาบวิบัติในช่วงเฟสการซึมของน้ำฝน แต่การไข้มีข้อจำกัดอยู่แค่ในกรณีที ลาดดินเป็นดินทราย ( $c' = 0$  kPa) เท่านั้น โดย

ในธรรมชาติแล้ว เป็นเรื่องยากที่จะพบลาดดินทรายเพียงอย่างเดียว โดยอาจเป็นลาดดินเม็ดหยาบที่มี ส่วนละเอียดปน หรือลาดดินที่มีพืชปกคลุม



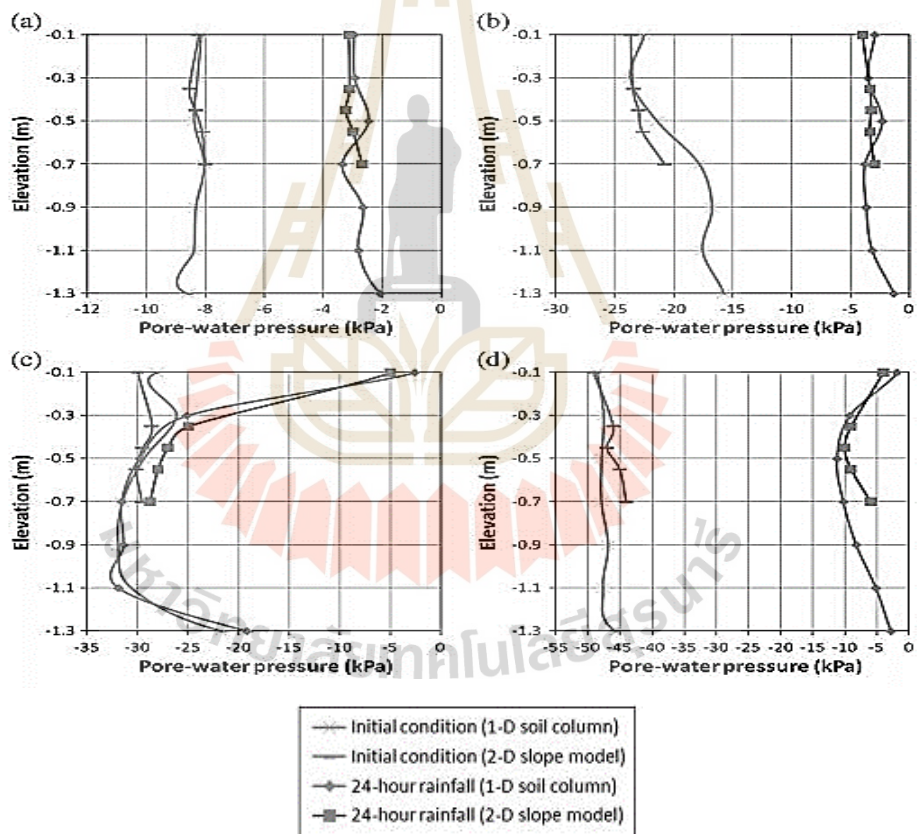
รูปที่ 2.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกวิกฤติกับดัชนีการซึม (Chinkulkijniwat et al., 2016)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาพฤติกรรมการซึมของน้ำฝนในลาดดินต่างชนิดกัน (Heterogeneous soil slope) และลาดดินที่มีพืชปกคลุมดิน (Vegetation soil slope) ที่น่าสนใจมีดังต่อไปนี้

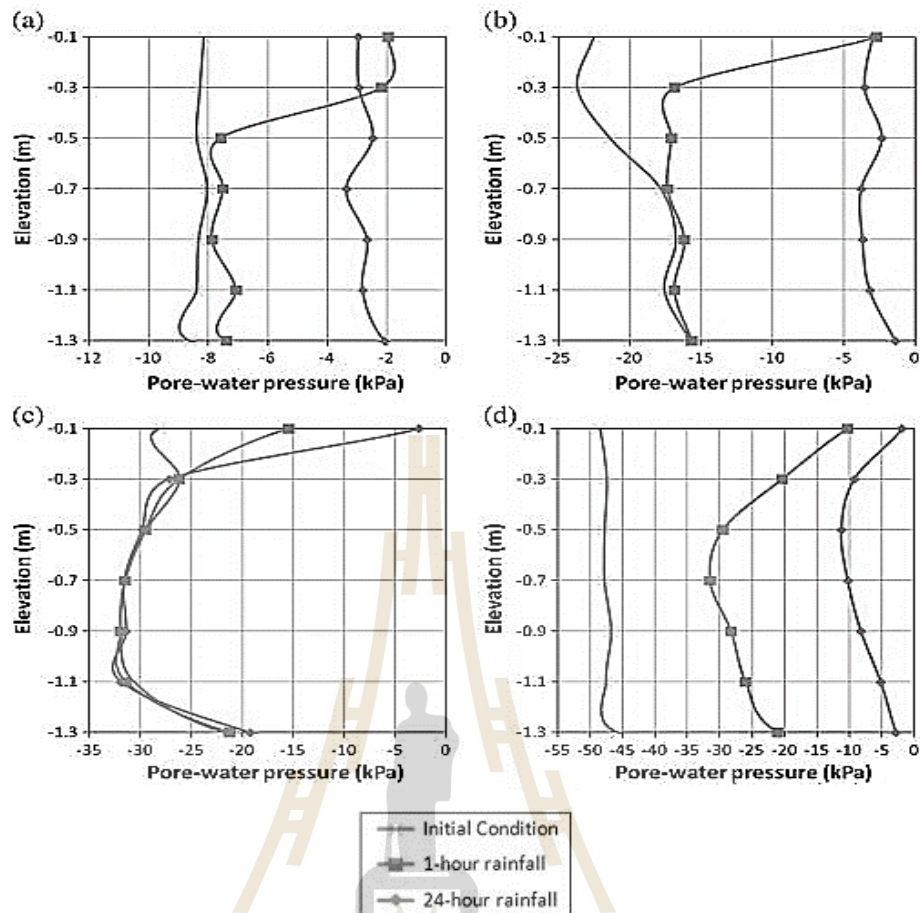
Lee et al. (2011) ทำการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองต่อน้ำฝนของลาดดิน โดยการจำลองการซึมแบบ 1 มิติในแท่งดิน (Column test) และ 2 มิติในกล่องลาดดิน (Slope box test) แสดงดังรูปที่ 2.16 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการซึมของน้ำฝนลงสู่ลาดดินแล้ววัดค่าแรงดึงดูดแมทริก (Suction) เปรียบเทียบกันระหว่างแบบจำลองทั้งสองแบบซึ่ง พบว่า ผลการทดสอบพฤติกรรมการซึมของน้ำฝนในดินเนื้อเดียวกันทั้งในแบบจำลองการซึม 1 มิติและ 2 มิติแสดงพฤติกรรมการซึมที่เหมือนกันดังแสดงในรูปที่ 2.17 ในขณะที่พฤติกรรมการซึมของน้ำฝนในดินไม่เป็นเนื้อเดียวกัน พฤติกรรมการซึมในแท่งดินมีความแตกต่างกับการซึมในกล่องลาดดิน แสดงผลด้วยค่าแรงดันน้ำในลาดดินที่ 1 ชั่วโมงเทียบกับเวลาที่ 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 2.18 และยังพบว่าในลาดดินไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยที่ลาดดินชั้นล่างมีค่าการซึมผ่านน้อยกว่าลาดดินชั้นบน น้ำฝนที่ซึมจากลาดดินชั้นบนสู่ลาดดินชั้นล่างจะมีการไหลไปตามระนาบของรอยระหว่างชั้นดิน หรือมีการไหลด้านข้าง (Lateral flow) เกิดขึ้น



รูปที่ 2.16 แบบจำลองการซึม (a) แบบ 1 มิติ และ (b) แบบ 2 มิติ (Lee, 2011)



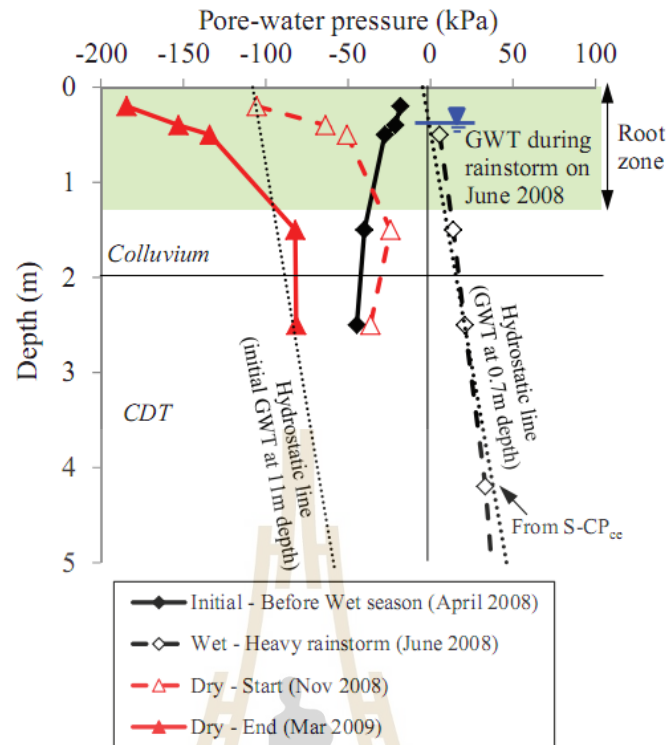
รูปที่ 2.17 กราฟแสดงค่าแรงดันน้ำตามความลึกของดินในแบบจำลองการซึมแบบ 1 มิติและ 2 มิติ (Lee et al., 2011)



รูปที่ 2.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันน้ำกับความลึกของดิน ที่เวลาการซึมของน้ำฝน 1 ชั่วโมงและ 24 ชั่วโมง (Lee et al., 2011)

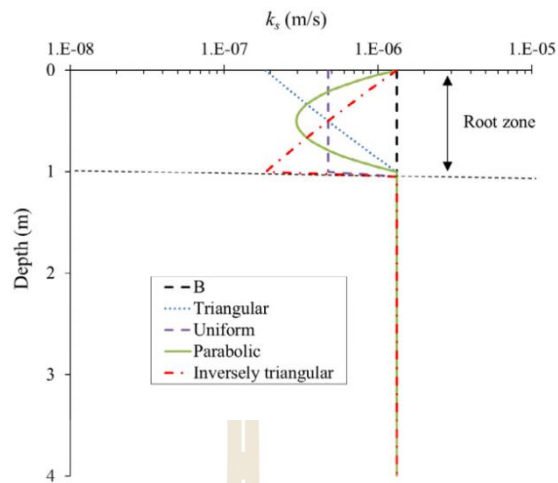
A.K. Leung และ C.W.W. Ng (2013) ได้ศึกษาการไหลของน้ำใต้ดินและการคายน้ำของพืชในลาดดินที่มีพืชปกคลุม พบว่า ระดับน้ำใต้ดินในฤดูฝนเพิ่มสูงขึ้นที่ระดับความลึก 0.70 เมตร และแรงดันน้ำในเม็ดดินเป็นบวก ในขณะที่ในฤดูแล้งระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ระดับความลึก 1.00 เมตร แรงดันน้ำในเม็ดดินเป็นลบ และจะลดลงอย่างมากถึง -200 กิโลปาสคาล (kPa) ในลาดดินที่มีรากพืช อิทธิพลของพืชปกคลุมลาดดินจะช่วยดูดน้ำและคายน้ำ หรือที่เรียกว่า การคายระเหย (Evapotranspiration, ET) ที่สามารถช่วยเพิ่มแรงดึงดูดเมตริกให้แก่ลาดดินเพิ่มสูงขึ้นกว่าในชั้นดินที่ไม่มีรากพืชได้สูงถึง 200% แสดงดังรูปที่ 2.19



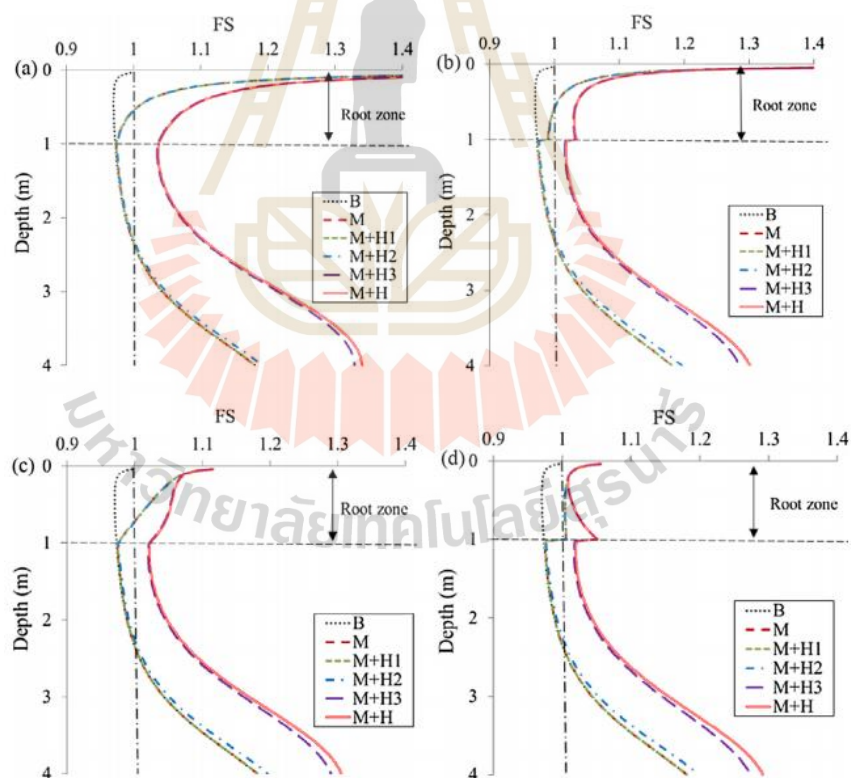


รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำตามฤดูกาลในลาดดินที่มีพืชปกคลุม  
(A.K. Leung and C.W.W.Ng, 2013)

Ni et al. (2018) ได้ศึกษาแบบจำลองที่มีพืชปกคลุมภายใต้สถานการณ์ฝนตก 24 ชั่วโมงที่ส่งผลต่อเสถียรภาพลาดดิน โดยได้จำแนกชนิดการกระจายตัวของรากพืชตามระดับความลึก (อัตราส่วนปริมาตรรากพืช) ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความซึมผ่านได้ของดิน (Permeability,  $k$ ) ออกเป็น 4 ลักษณะคือ Triangular, Uniform Parabolic และ Inversely triangular แสดงดังรูปที่ 2.20 และหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of safety,  $FS$ ) ตามความลึกที่เป็นผลมาจากพฤติกรรมตอบสนองเชิงกล การดูดและคายน้ำของพืช การเปลี่ยนแปลงความชื้นในดิน ค่าความซึมผ่านได้ของดินตามอัตราส่วนปริมาตรรากพืช และรวมอิทธิพลทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 2.21 พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อเสถียรภาพลาดดินที่มีพืชปกคลุมคือ ค่าความซึมผ่านได้ของดินในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำตามอัตราส่วนปริมาตรรากพืช เนื่องจากให้เส้นโค้งการลดลงของค่า  $FS$  ใกล้เคียงกับอิทธิพลจากตัวแปรทั้งหมดนั่นเอง



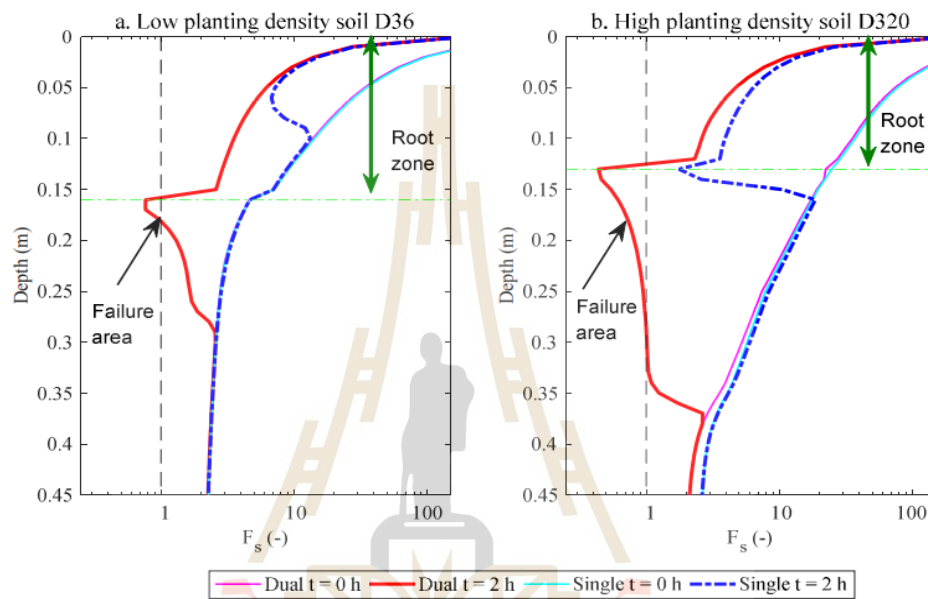
รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความซึมผ่านได้ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำและความลึกจำแนกตามอัตราส่วนปริมาตรรากพืช (Ni et al., 2018)



รูปที่ 2.21 การลดลงของค่าอัตราส่วนความปลอดภัยตามความลึกของลาดดินที่มีพืชปกคลุมอันเนื่องมาจากผลตอบสนองเชิงอุทกวิทยา (Ni et al., 2018)



Shao et al. (2017) ศึกษาการซึมของน้ำฝนในดินรากพืชโดยพิจารณาให้ดินรากพืชมีโพรงสองระบบ (Dual porosity) แล้วนำผลการคำนวณความชื้นไปวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินพบว่า ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่คำนวณโดยใช้ระบบนี้จะให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ต่ำกว่าการคำนวณโดยพิจารณาให้ดินมีโพรงระบบเดียว (Single porosity) รวมทั้งระนาบวิบัติจะกินพื้นที่กว้างกว่าการพิจารณาดินเป็นโพรงระบบเดียว แสดงดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 การลดลงของค่าอัตราส่วนความปลอดภัยตามความลึกของลาดดินที่มีรากพืชขึ้นเนื่องมาจากอิทธิพลของ Preferential flow (Shao et al., 2017)

จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาเป็นการศึกษาพฤติกรรมการซึมในลาดดินเม็ดหยาบที่ไม่มีแรงยึดเกาะระหว่างเม็ดดินเพียงชนิดเดียว ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษากฎการซึมของน้ำฝนในดินเม็ดหยาบที่มีส่วนละเอียดปนเพิ่มเติมอีก 2 ชนิดคือ ดินร่วนปนทราย (Silty sand, SM) และดินทรายปนดินตะกอน (Poorly graded sandy soil with silt, SP-SM) เพื่อเปรียบเทียบผลของพารามิเตอร์ดินที่เปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากส่วนละเอียดในเนื้อดินนี้ว่าจะส่งผลกระทบต่อค่าอัตราส่วนความปลอดภัยอย่างไรบ้าง และยังมีประโยชน์ในการพัฒนากราฟความลึกวิกฤติให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นโดยครอบคลุมถึงลาดดินเม็ดหยาบที่มีแรงยึดเกาะระหว่างเม็ดดินเพิ่มเติมด้วย นอกจากนี้ยังจะศึกษาเพิ่มเติมถึงอิทธิพลของพืชปกคลุมหน้าลาดดินต่อพฤติกรรมการซึมของน้ำฝนซึ่งรากพืชจะทำให้ลักษณะของลาดดินไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (แบ่งเป็นชั้นดินรากพืชและชั้นดินเปล่า) เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการซึมของชั้นดินรากพืชและดินเปล่า รวมทั้งผลกระทบต่อเสถียรภาพลาดดินด้วย

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 บทนำ

ในการดำเนินงานศึกษาพฤติกรรมการซึมของน้ำฝนในลาดดินเนื้อเดียวกันและลาดดินไม่เนื้อเดียวกันที่เกิดจากพืชปกคลุมดินและผลกระทบด้านเสถียรภาพนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อขยายผลการศึกษาของ Chinkulkijniwat et al. (2016) ที่ได้ศึกษาพฤติกรรมการซึมของน้ำฝนในลาดดินทราย (Poorly graded sandy soil, SP) ซึ่งเป็นดินที่ไม่มีส่วนละเอียดปนและไม่มีค่าความเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงขยายผลโดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 การทดสอบดังนี้

1) การทดสอบการซึมของน้ำฝนในดิน 2 ชนิดคือ ดินร่วนปนทราย (Silty sand, SM) ซึ่งเป็นดินที่มีค่าความเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดินและดินทรายปนดินตะกอน (Poorly graded sandy soil with silt, SP-SM) ซึ่งเป็นดินเม็ดหยาบที่มีส่วนละเอียดปน โดยดินทั้งสองชนิดนี้เป็นดินเนื้อเดียวกัน จึงได้ออกแบบจำลองการซึมแบบ 1 มิติผ่านแท่งดินทดสอบ (Column test)

2) การทดสอบการซึมของน้ำฝนในลาดดินทรายที่ไม่เนื้อเดียวกันที่เกิดจากพืชปกคลุมดิน โดยปลูกพืชบนผิวหน้าลาดดินเพื่อทำให้ดินชั้นบนเป็นดินรากพืช (Root-soil zone) และดินชั้นล่างเป็นดินเปล่า (Bare soil zone) จึงออกแบบจำลองการซึมแบบ 2 มิติผ่านกล่องลาดดินที่มีพืชปกคลุมดิน (Vegetation slope box test)

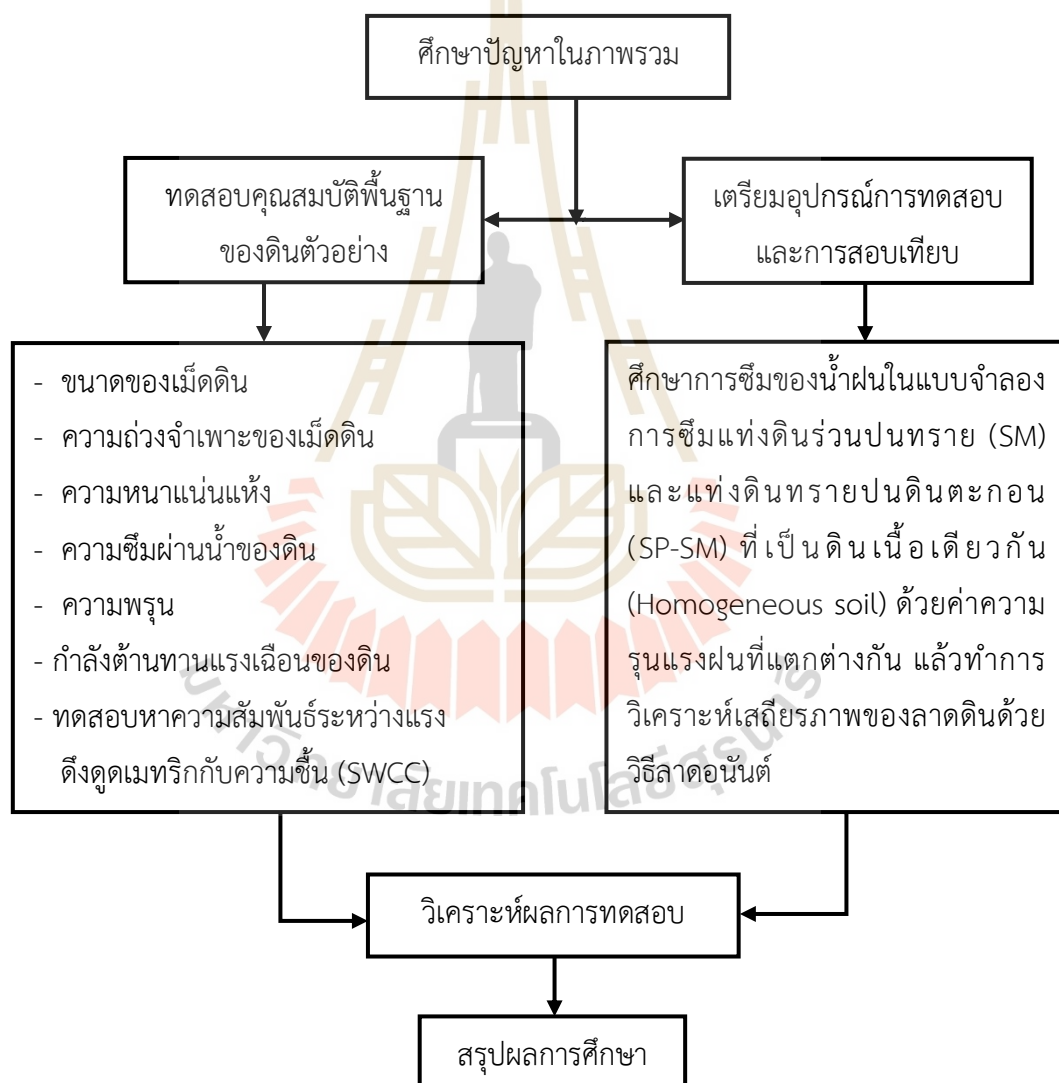
ทั้งสองการทดสอบจำลองฝนด้วยชุดกำเนิดฝน แล้วทำการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินที่ระดับต่าง ๆ ภายใต้สภาวะความรุนแรงของฝนที่แตกต่างกัน ผลการศึกษานี้จะช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมการซึมของน้ำฝนในลาดดินที่มีค่าความเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน ลาดดินเม็ดหยาบที่มีส่วนละเอียดปน และลาดดินที่มีพืชปกคลุมดินที่ใกล้เคียงกับลาดดินในธรรมชาติมากขึ้น แล้วนำข้อมูลพฤติกรรมการซึมมาวิเคราะห์ร่วมกับคุณสมบัติพื้นฐานของดินที่ส่งผลกระทบต่อค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดิน เพื่อประโยชน์ในการเสนอแนวทางการป้องกันการวิบัติของลาดดินต้นได้อย่างเหมาะสม

#### 3.2 วิธีการทดสอบการซึมของน้ำฝนในดินเนื้อเดียวกัน

วิธีการดำเนินการวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.1 งานวิจัยนี้ประกอบด้วยสองส่วนหลัก ดังนี้

1) ส่วนแรก เป็นการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยการสร้างแบบจำลองการซึมแบบ 1 มิติ หรือ แท่งดินทดสอบ และสร้างแบบจำลองน้ำฝน พร้อมติดตั้งเครื่องมือวัดติดตามกระบวนการไหลซึมของ น้ำฝน ซึ่งจะนำไปสู่การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินทันทีภายใต้สภาวะรับน้ำฝนต่อไป

2) ส่วนที่สอง เป็นการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรปัจจัยคุณสมบัติดินว่าส่งผลต่อค่าอัตราส่วน ความปลอดภัยของลาดดินโดยการแปรผันค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความเชื่อมแน่น (Cohesive strength,  $c'$ ) ค่ามุมเสียดทานภายใน (Frictional angle,  $\phi'$ ) พารามิเตอร์  $\alpha$  และ  $n$  ของ van Genuchten (VG)



รูปที่ 3.1 ผังการดำเนินงานวิจัยพฤติกรรมกรรมการซึมของน้ำฝนในแท่งดินเนื้อเดียวกัน

### 3.2.1 การเลือกและเตรียมดินตัวอย่าง

ดินที่ใช้ในการทดสอบมี 2 ชนิดคือ

1) ดินร่วนปนทราย (Silty sand, SM) เป็นดินตัวอย่างที่เก็บมาจากหมู่บ้านคลองสะท้อน ตำบลวังหมี่ อำเภอลำลูกกา จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งเป็นพื้นที่ตั้งของสถานีเตือนภัย ระบบเตือนภัยน้ำหลากดินถล่มระดับเฝ้าระวัง โดยเก็บตัวอย่างดินแบบรบกวนตัวอย่างขณะเก็บ (Disturbed) ที่ระดับความลึก 1 เมตร แสดงดังรูปที่ 3.2(a) เป็นลักษณะเนื้อดินร่วนปนทรายที่บ้านคลองสะท้อน ที่ถูกนำมาใช้ทดสอบ

2) ดินสังเคราะห์ (Synthetic soil) เป็นดินตัวอย่างที่ได้จากการผสมดินขึ้นมาใหม่ระหว่างดินร่วนปนทราย จากอำเภอลำลูกกา จังหวัดนครราชสีมา (SP) เพื่อให้ได้ดินทรายเป็นดินตะกอน (Poorly graded sandy soil with silt, SP-SM) โดยใช้อัตราส่วนผสมระหว่างทรายและดินร่วนปนทรายที่ 70 : 30 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 3.2(b) เป็นลักษณะตัวอย่างดินสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดสอบ

ทำการวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่าง โดยทำการกระจายขนาดของเม็ดดิน (Particle size distribution) ด้วยการทดสอบร่อนผ่านตะแกรง (Sieve analysis) และการทดสอบไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer) ตามมาตรฐาน ASTM D 422-63 และจำแนกด้วยระบบ Unified Soil Classification ตามมาตรฐาน ASTM D 2487-69 หาค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific gravity of soil) ตามมาตรฐาน ASTM D 854 หาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านได้ของดินในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ (Permeability) ตามมาตรฐาน ASTM D 2434-68 หาค่าความหนาแน่นแห้ง (Dry density) ตามมาตรฐาน ASTM D 698-70 หากำลังรับแรงเฉือนของดินด้วยการทดสอบแรงเฉือนตรง (Direct Shear Test) แบบเฉือนแห้งโดยดินที่ใช้ทดสอบมีค่าความชื้นเป็นศูนย์ ตามมาตรฐาน ASTM D 3080-04 และทดสอบหาเส้นคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดิน (SWCC) โดยวิธีหม้อแรงดันตามมาตรฐาน ASTM D 6836-02 แสดงคุณสมบัติของดินตัวอย่างตามตารางที่ 3.1 และจำแนกขนาดและการกระจายของเม็ดดิน และเส้นคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดิน แสดงในรูปที่ 3.3

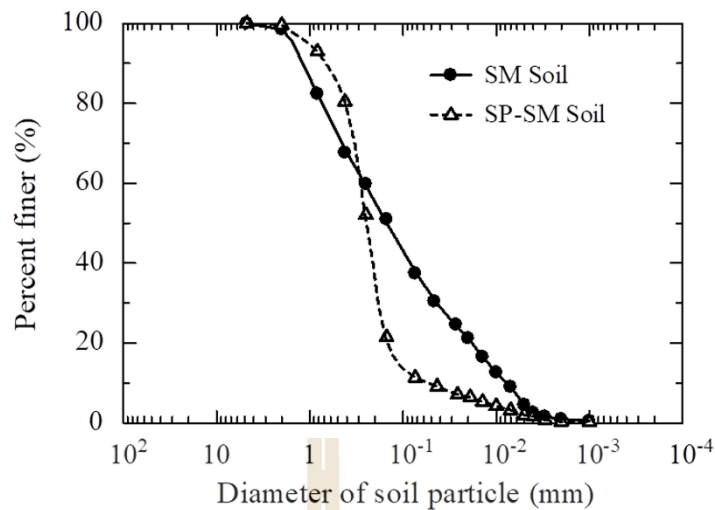
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการทดสอบการซึมแบบหนึ่งมิติในแท่งดินเนื้อเดียวกัน

Soli properties	Sandy loam	Silty sand
USCS	SM	SP-SM
Clay (Dia.= 0.002 mm.), %	2	1
Silt (Dia.= 0.002-0.05 mm.), %	36	10
Sand (Dia.= 0.05-2.0 mm.), %	62	89
Specific gravity, $G_s$	2.59	2.62
Dry density, $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.64	1.75
Porosity, $\eta$	0.350	0.323
Saturated permeability, $k_s$ (mm/hr)	15	65
Internal Friction Angle, $\phi'$ (°)	30	36
Cohesion, $c'$ (kPa)	5	0

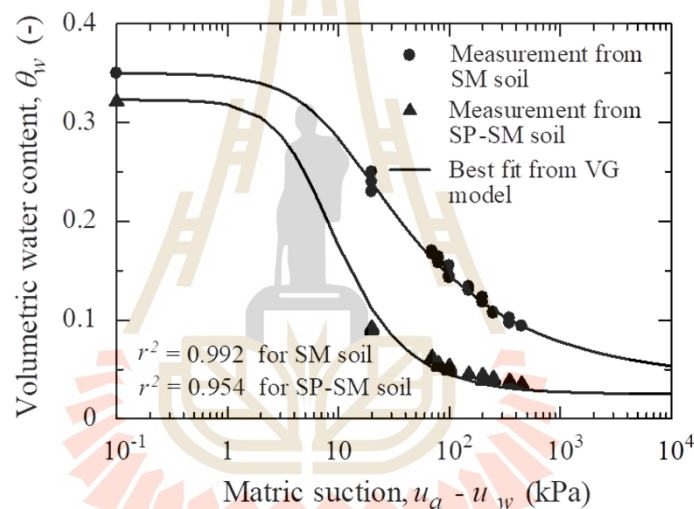


รูปที่ 3.2 ดินตัวอย่างที่ใช้ทดสอบการซึมแบบ 1 มิติ

- (a) ดินร่วนปนทรายบ้านคลองสะท้อน อำเภอวังน้ำเขียว  
 (b) ดินทรายปนดินตะกอนสังเคราะห์ (Synthetic soil)



(a)



(b)

รูปที่ 3.3 คุณสมบัติทางดินทดสอบตามขนาดเม็ดดิน ค่าความชื้นและแรงดึงดูดเมทริก

(a) แสดงการจำแนกขนาดและการกระจายของเม็ดดิน

(b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงดูดเมทริกกับความชื้นดิน (SWCC)

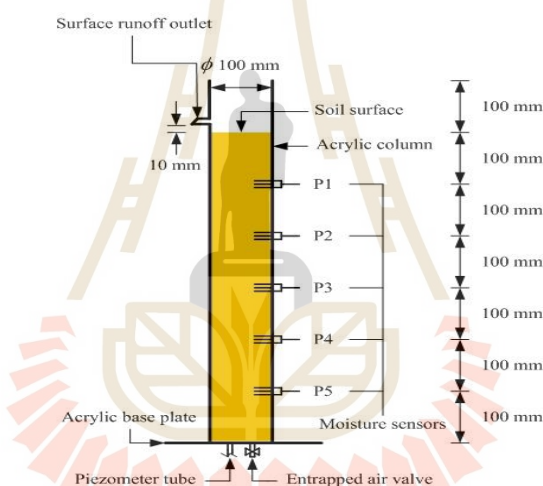
ของดินร่วนปนทราย (SM) และดินทรายปนดินตะกอน (SP-SM)

### 3.2.2 การสร้างแบบจำลองแห่งดินการซึมและชุดกำเนิดน้ำฝน

แบบจำลองมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกเพื่อใช้บรรจุดินตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดสอบเป็นแห่งดินทดสอบการซึม (Column test) ทำด้วยอะคริลิกใสเพื่อให้ง่ายต่อมองเห็น และสังเกตพฤติกรรมการซึมของน้ำฝน มีความหนา 5 มิลลิเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 100 มิลลิเมตร และสูง 700 มิลลิเมตร ฐานของแบบจำลองทำจากแผ่นอะคริลิกใสหนา 10 มิลลิเมตร



ขนาด 300 x 300 มิลลิเมตร ด้านข้างด้านหนึ่งของท่ออะคริลิกเจาะรูขนาดกว้าง 3 มิลลิเมตร สูง 30 มิลลิเมตร จำนวน 5 รู มีระยะห่างจากฐาน 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิเมตร ตามลำดับ เพื่อใช้ในการติดตั้งตัววัดความชื้น (TDR probes) และอีกด้านหนึ่งของท่อถูกเจาะรูขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร เพื่อติดตั้งท่อระบายน้ำขังที่ผิวดิน (Surface runoff outlet) ที่ระดับเหนือผิวดิน 10 มิลลิเมตร ที่ฐานด้านล่างเจาะรูขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จำนวน 2 รู โดยรูแรกเพื่อติดตั้งตัววัดระดับน้ำใต้ดิน (Piezometer) ด้วยท่อใยสไปลายเปิดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ไว้สังเกตการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำใต้ดิน และรูที่สอง ทำการติดตั้งวาล์วระบายอากาศเพื่อไล่อากาศที่อยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดินขณะที่น้ำซึมผ่านแท่งดินทดสอบ ที่พื้นล่างภายในแบบจำลองใช้แผ่นจีโอเทคไทล์ (Geotextile) วางไว้ทำหน้าที่กันไม่ให้เม็ดดินที่ใช้ในการทดสอบไหลออกมาทางท่อระบายอากาศ ซึ่งได้แสดงรายละเอียดของแบบจำลองแท่งดินทดสอบไว้ในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงรายละเอียดของแบบจำลองการซึมในแท่งดินทดสอบ (Column test)

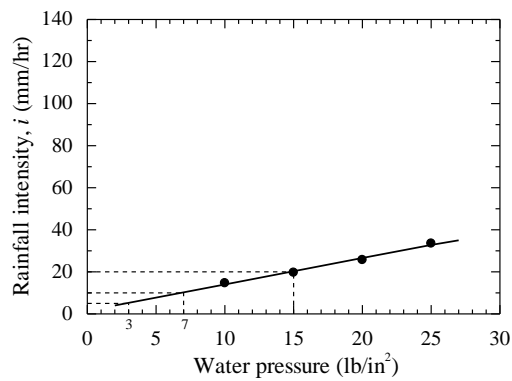
สำหรับชุดกำเนิดน้ำฝน ประกอบไปด้วย ถังเก็บน้ำที่มีความจุขนาด 2000 ลิตร ป้อนน้ำแบบความดันคงที่ วาล์วควบคุมการไหลของน้ำ มาตรวัดความดันน้ำ ท่อพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร และในท่อพีวีซีที่ติดตั้งหัวสเปรย์จำนวน 1 หัวสำหรับปล่อยน้ำฝนจำลองวางอยู่เหนือกระบอกแท่งดินทดสอบที่ระยะ 300, 400 และ 800 มิลลิเมตร ทำให้ได้ค่าปริมาณความรุนแรงฝนอยู่ในช่วงระหว่าง 5 ถึง 120 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงใช้ความดันอยู่ในช่วงระหว่าง 3 ถึง 25 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เมื่อทำการทดสอบจะเลือกระยะห่างของหัวสเปรย์ถึงปลายขอบท่ออะคริลิกที่สามารถให้ค่าปริมาณความรุนแรงฝนที่ต้องการได้ และทำการสอบเทียบความสัมพันธ์ของความรุนแรงฝน โดยใช้กระป๋อง 1 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร วางไว้ด้านบนของ

แบบจำลองขณะที่ปล่อยน้ำฝนเพื่อวัดปริมาณน้ำฝนกับเวลา นำมาพล็อตกราฟสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความรุนแรงฝนกับความดันของน้ำที่อ่านได้จากเกจวัดแรงดันน้ำ ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.5 จากผลการสอบเทียบความสม่ำเสมอของปริมาณน้ำฝนในช่วงของปริมาณความรุนแรงฝนทั้งหมดสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของความสม่ำเสมอ ( $C_u$ ) ได้จากสมการที่ 3.1

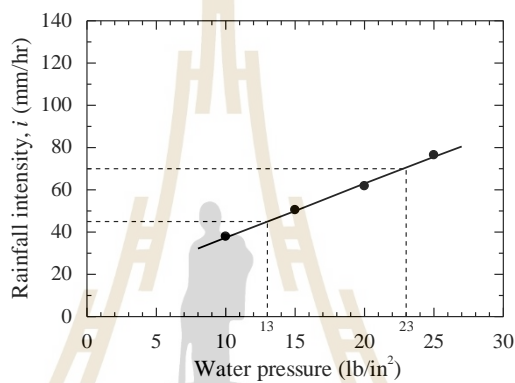
$$C_u = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N I_i - I_m}{\sum_{i=1}^N I_i} \quad (3.1)$$

เมื่อ	$N$	คือ	จำนวนกระป๋องที่ใช้ทดสอบ
	$I_i$	คือ	ปริมาณความรุนแรงฝนที่วัดได้ของแต่ละกระป๋อง
	$I_m$	คือ	ปริมาณความรุนแรงฝนเฉลี่ยที่วัดได้ของทุกกระป๋อง

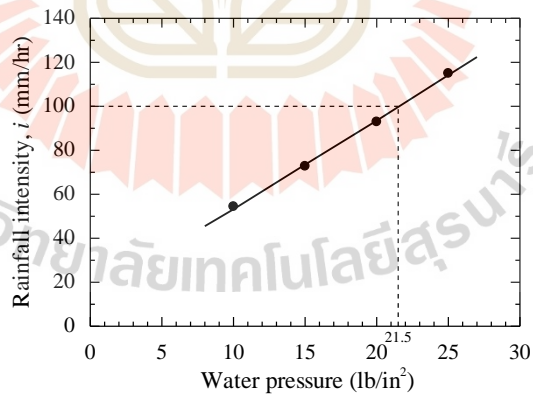
ได้ค่า  $C_u$  เท่ากับ 93, 94, 94, 96, 97 และ 98% สำหรับการจำลองความรุนแรงฝนที่ 5, 10, 20, 45, 70 และ 100 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งค่า  $C_u$  อยู่ในช่วง 90-99% แสดงว่าแบบจำลองน้ำฝนนี้มีความน่าเชื่อถือที่จะนำมาใช้ในการทดสอบได้ โดยแผนผังของแบบจำลองการทดสอบและภาพถ่ายของแบบจำลองทางกายภาพการซึม 1 มิติ แสดงดังรูปที่ 3.6



(a)

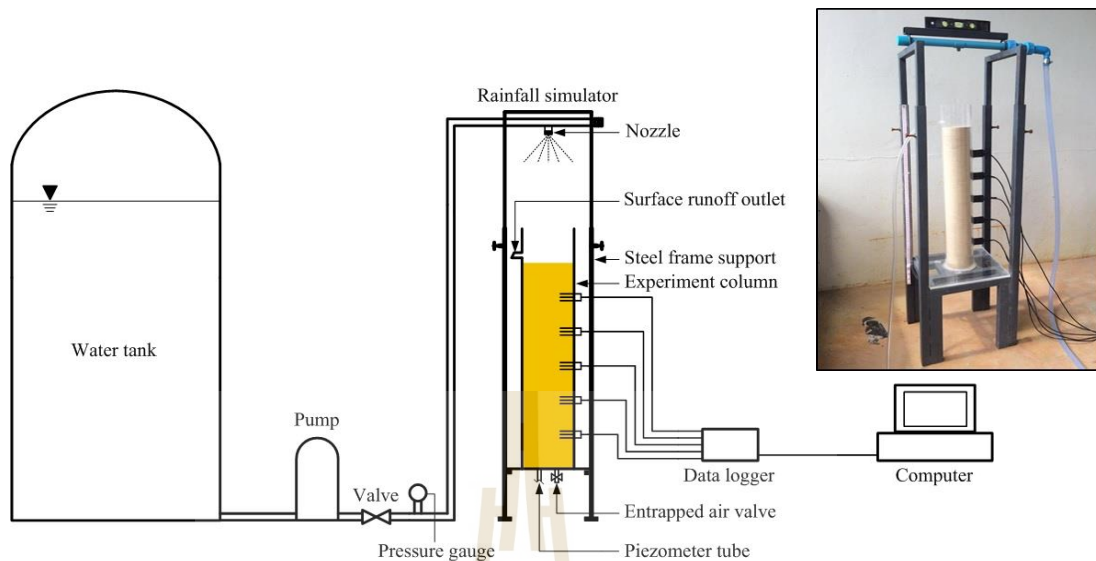


(b)



(c)

- รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความรุนแรงฝนกับความดันน้ำ
- (a) ที่ความรุนแรงฝน 5, 10, และ 20 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง
- (b) ที่ความรุนแรงฝน 45 และ 70 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง
- (c) ที่ความรุนแรงฝน 100 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง



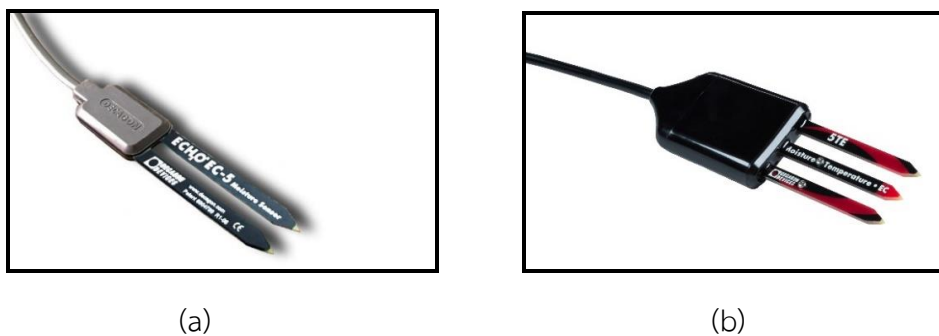
รูปที่ 3.6 แผนผังและภาพถ่ายของแบบจำลองแท่งดินและชุดกำเนิดน้ำฝน

### 3.2.3 อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นและการสอบเทียบ

#### 1) ตัววัดความชื้น (Time Domain Reflectometry (TDR) Probe)

ตัววัดความชื้นมีลักษณะเป็นขาสีขาว หัววัดความชื้นรุ่น EC-5 และหัววัดรุ่น 5TE แสดงดังรูปที่ 3.7 เป็นอุปกรณ์ที่สามารถวัดความชื้นโดยอาศัยหลักการความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขาสีขาวที่เกิดจากการไหลของกระแสไฟฟ้าซึ่งแปรผันตามปริมาณความชื้นในดิน

เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) รุ่น Em 50 แสดงดังรูปที่ 3.8 มีช่องสำหรับต่อเข้ากับสายของหัววัด 5 ช่อง สามารถกำหนดระยะเวลาในการวัดค่าได้ ตั้งแต่ 1 นาทีต่อครั้ง จนถึง 24 ชั่วโมงต่อครั้ง โดยมีโปรแกรมสำเร็จรูปที่ทำงานในรูปแบบปฏิบัติการบน Windows ลงบนคอมพิวเตอร์ ข้อมูลที่ได้จากเครื่องบันทึกข้อมูลจะแสดงค่าความชื้นเชิงปริมาตร (Volumetric water content,  $\theta'$ )



รูปที่ 3.7 หัววัดความชื้นในดิน (TDR probe) (a) หัววัด รุ่น EC-5 (b) หัววัด รุ่น 5ET



รูปที่ 3.8 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) รุ่น Em 50

## 2) การสอบเทียบตัววัดความชื้น

ค่าปริมาณความชื้นที่ได้จากตัววัดความชื้นจะต้องได้รับการสอบเทียบกับดินที่ใช้ในการทดสอบก่อน ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- 1) บดอัดดินตัวอย่างลงในแบบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร ให้ได้ความหนาแน่นตามต้องการ
- 2) ฝังตัววัดความชื้นลงไปดินที่บดอัดเรียบร้อยแล้ว
- 3) วัดความชื้นด้วยหัววัด และบันทึกค่าความชื้นที่วัดได้ ( $\theta'$ )
- 4) เก็บตัวอย่างดินนำไปอบเพื่อหาความชื้นโดยน้ำหนัก ( $w$ )
- 5) คำนวณความชื้นเชิงปริมาตรที่ถูกต้อง ( $\theta$ ) ด้วยการวิเคราะห์แบบจำลองส่วนประกอบของดิน (Phase diagram analysis)
- 6) ทำซ้ำข้อที่ 1 ถึง 5 โดยมีการเพิ่มน้ำลงในดินเพื่อแปรผันความชื้น

เมื่อทำการสอบเทียบหัววัดแล้ว นำข้อมูลที่ได้ไปสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเชิงปริมาตรที่ได้จากหัววัดความชื้น ( $\theta'$ ) ความชื้นโดยน้ำหนักในมวลดิน ( $w$ ) และความชื้นเชิงปริมาตรที่ถูกต้อง ( $\theta$ ) เพื่อปรับแก้ค่าความชื้น รูปที่ 3.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นที่ได้จากการคำนวณกับค่าความชื้นที่อ่านได้จากหัววัดความชื้น พบว่า ค่าความชื้นที่ได้จากสมการกับค่าที่อ่านได้จากหัววัดความชื้นมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้น จึงต้องมีการปรับแก้ค่าความชื้นที่ได้จากหัววัดความชื้น เพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากสมการ โดยดินวังน้ำเขียวหรือดินร่วนปนทราย (Silty sand, SM) ปรับแก้จากสมการที่ 3.2 สำหรับหัววัดความชื้นแบบสองขารุ่น EC-5 และสมการที่ 3.3 สำหรับหัววัดความชื้นแบบสามขารุ่น 5ET สำหรับดินสังเคราะห์ (SP-SM) ปรับแก้จากสมการที่ 3.4 สำหรับหัววัดความชื้นแบบสองขารุ่น EC-5 และสมการที่ 3.5 สำหรับหัววัดความชื้นแบบสามขารุ่น 5ET

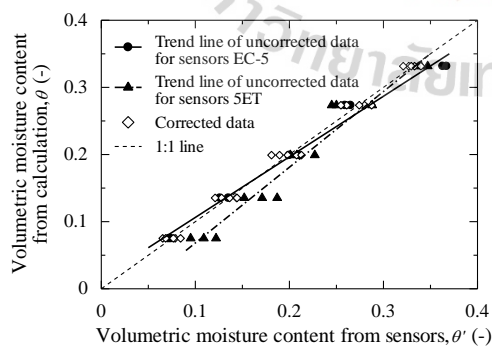
$$\theta = 0.9500 \theta' + 0.0082 \quad (3.2)$$

$$\theta = 1.2233 \theta' - 0.0649 \quad (3.3)$$

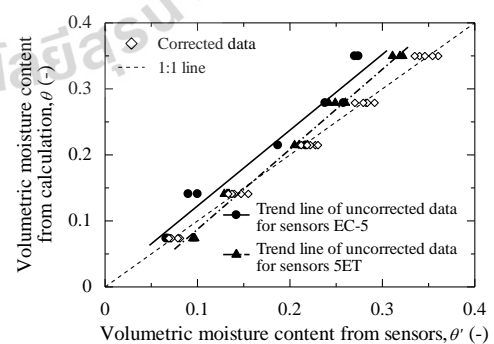
$$\theta = 1.1838 \theta' + 0.0006 \quad (3.4)$$

$$\theta = 1.3002 \theta' - 0.0544 \quad (3.5)$$

เมื่อ  $\theta'$  คือ ค่าความชื้นเชิงปริมาตรที่ได้จากหัววัดความชื้น



(a)



(b)

รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นที่ได้จากการคำนวณกับที่ได้จากหัววัดความชื้น

(a) ดินวังน้ำเขียว, SM (b) ดินสังเคราะห์, SP-SM



### 3.2.4 ขั้นตอนการทดสอบการซึมของน้ำฝนในห้องปฏิบัติการ

นำดินตัวอย่างที่จะใช้ทดสอบทั้งหมดฝั่งลมให้แห้งเป็นเวลา 20 วัน ทำการบดอัดดินลงในท่ออะคริลิกใสทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 700 มิลลิเมตร ให้ได้แห้งดินมีความสูง 600 มิลลิเมตร โดยบดอัดดินทีละชั้น แต่ละชั้นให้มีความหนาประมาณ 60 มิลลิเมตร ควบคุมน้ำหนักบดอัดในแต่ละชั้นเพื่อให้ได้แห้งดิน (Column test) ที่มีหน่วยน้ำหนักแห้งอยู่ระหว่าง 1.64 และ 1.75 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับแห้งดินทดสอบดินร่วนปนทราย (SM) และดินทรายปนดินตะกอน (SP-SM) ตามลำดับ จากนั้นติดตั้งตัววัดความชื้น (Probes) เข้ากับรูที่อยู่ทางด้านข้างของกระบอกดินที่ระดับ 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิเมตรจากฐานของแบบจำลองและต่อสายเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) พร้อมทั้งติดตั้งระบบจำลองน้ำฝนไว้เหนือแห้งดินทดสอบ เมื่อระบบต่างๆ พร้อมใช้งานแล้ว จึงปล่อยน้ำฝนจำลองให้น้ำซึมลงสู่แห้งดินทดสอบ ตัววัดความชื้นจะเริ่มเก็บข้อมูลความชื้นเชิงปริมาตรของดินทุก ๆ 2 นาทีจนดินในแบบจำลองอิ่มตัวด้วยน้ำ และระดับน้ำที่ไหลออกทางท่อวัดระดับน้ำได้ดินขึ้นสูงเท่ากับระดับผิวดินทดสอบเป็นอันเสร็จสิ้นการทดสอบ

เงื่อนไขการทดสอบการซึมผ่านในแห้งดินทดสอบเพื่อที่จะศึกษาการตอบสนองต่อความชื้นของดิน เวลาการซึมของปริมาณน้ำฝน และการเกิดน้ำข้างบนผิวดิน ใช้ดินตัวอย่าง 2 ชนิด แต่ละชนิดจะทำการทดสอบชนิดละ 5 การทดสอบ ในแต่ละการทดสอบกำหนดค่าปริมาณความรุนแรงฝน (Rainfall intensity,  $i$ ) ที่แตกต่างกัน โดยในแต่ละชุดการทดสอบได้จำลองปริมาณความรุนแรงฝนให้ครอบคลุมในช่วงที่ต่ำกว่า ไกล่เคียง และสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดินในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated permeability,  $k_s$ ) กำหนดความรุนแรงฝนสำหรับดินร่วนปนทราย (SM) คือ 5, 10, 20, 45 และ 70 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง และความรุนแรงฝนสำหรับดินทรายปนดินตะกอน (SP-SM) คือ 10, 20, 45, 70 และ 100 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง โปรแกรมการทดสอบ การซึมในแห้งดินเนื้อเดียวกัน แสดงไว้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 โปรแกรมการทดสอบการซึมแบบหนึ่งมิติในแท่งดิน

Experiment No.	Soil Type	Dry Density, $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Rainfall, $i$ (mm/hr)	Infiltration index, $i/k_s$
1	SM	1.64	5	0.333
2	SM	1.64	10	0.667
3	SM	1.64	20	1.333
4	SM	1.64	45	3.000
5	SM	1.64	70	4.667
6	SP-SM	1.75	10	0.154
7	SP-SM	1.75	20	0.308
8	SP-SM	1.75	45	0.692
9	SP-SM	1.75	70	1.077
10	SP-SM	1.75	100	1.538

### 3.2.5 การคำนวณเสถียรภาพลาดดิน

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินด้วยวิธี Limit-equilibrium แสดงหน้าตัดของลาดดินอนันต์ในสภาวะฝนตก โดยระนาบวิบัติของลาดดินระดับตื้นเกิดขึ้นในแนวขนานกับผิวหน้าของลาดดิน ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย ( $FS$ ) หาได้จากค่าอัตราส่วนระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงเฉือน (Shear strength resistance,  $\tau_R$ ) ต่อค่ากำลังเฉือนเนื่องจากการเลื่อนไหลเคลื่อนตัวของมวลดิน (Mobilized shear strength,  $\tau_M$ ) ในแนวระนาบเดียวกัน

โดยทั่วไปแล้วสภาพลาดดินในธรรมชาติจะไม่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ ดังนั้น ในการวิจัยครั้งนี้ จึงคำนวณค่ากำลังต้านแรงเฉือนของลาดดินได้ตามทฤษฎีภายใต้เงื่อนไขการวิบัติของมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb failure criteria) ในสภาวะดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ตามแนวคิดของ Lu and Griffiths (2004) และ Lu and Likos (2006) ตามสมการที่ 3.6 ดังต่อไปนี้

$$\tau_R = c' + [(\sigma - u_a) - \sigma^s] \tan \varphi' \quad (3.6)$$

โดยที่  $c'$  คือ ค่าเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดินประสิทธิผล (Effective cohesion)  
 $\varphi'$  คือ ค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผล (Effective frictional angle)

$\sigma$	คือ	ค่าความเค้นหรือค่าหน่วยแรงตั้งฉากรวม (Total normal stress)
$u_a$	คือ	ค่าแรงดันอากาศในเม็ดดิน (Pore-air pressure) และ
$\sigma^s$	คือ	ค่าหน่วยแรงดึงดูด (Suction stress) ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการที่ 3.7 (Lu and Griffiths 2004; Lu and Likos 2006) ดังนี้

$$\sigma^s = -\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r} (u_a - u_w) = -S_e (u_a - u_w) \quad (3.7)$$

โดยที่ $\theta_w$	คือ	ค่าความชื้นในดิน (Volumetric water content)
$\theta_r$	คือ	ค่าความชื้นคงเหลือในดิน (Residual volumetric water content)
$\theta_{sat}$	คือ	ค่าความชื้นในดินสภาวะดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated volumetric water content)

ด้วยเหตุนี้ค่าหน่วยแรงดึงดูดในเม็ดดิน (Soil suction stress) จึงมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างค่าแรงดันอากาศในโพรงเม็ดดินกับค่าแรงดันน้ำในเม็ดดิน ( $u_a - u_w$ ) คูณกับระดับค่าตีกีรีของความอิ่มตัว ด้วยน้ำประสิทธิผล (Effective degree of saturation,  $S_e$ ) ดังนั้น ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย ( $FS$ ) ของลาดดินอนันต์ตามรูปที่ 3.10 สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการที่ 3.8

$$FS = \frac{\tau_R}{\tau_M} = \frac{c' + [(\sigma - u_a) - \sigma^s] \tan \phi'}{W \sin \beta \cos \beta} \quad (3.8)$$

โดยที่ $\beta$	คือ	ค่ามุมลาดเอียงของลาดดิน (Slope angle)
$W$	คือ	ค่าน้ำหนักดินในชิ้นส่วนหน้าตัดที่พิจารณา (Weight of the soil slice)

เนื่องจากว่า  $W = \gamma Z_w$ ,  $\sigma = \gamma Z_w \cos^2 \beta$  และ  $u_a = 0$  ในสภาวะความดันบรรยากาศ (Atmospheric pressure) จึงสามารถแปลงรูปสมการที่ 3.8 นำมาเขียนใหม่เป็นสมการที่ 3.9 (Duncan and Wright, 2005) ดังนี้

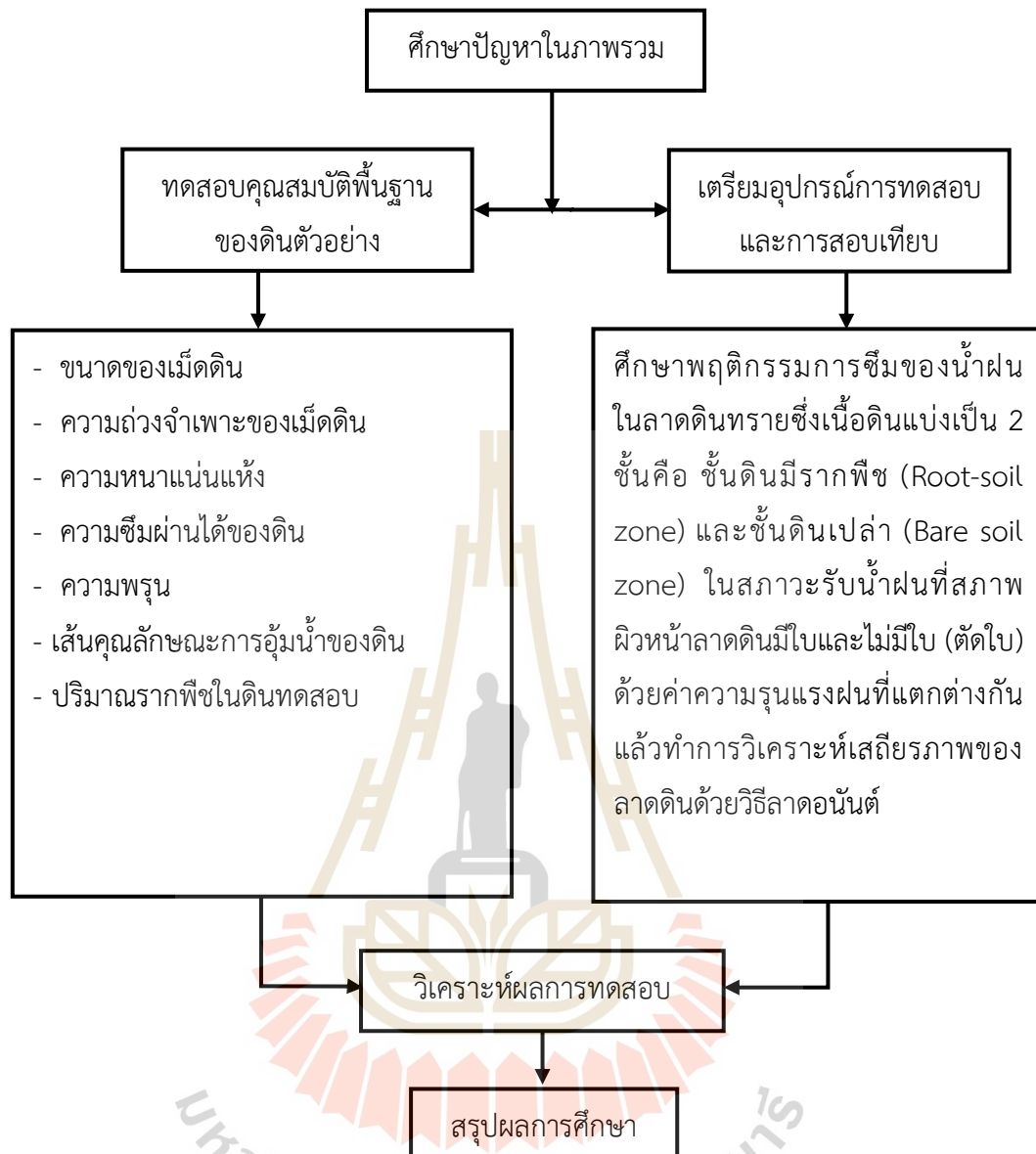
$$FS = \frac{c' + [\gamma Z_w \cos^2 \beta - \sigma^s] \tan \phi'}{\gamma Z_w \sin \beta \cos \beta} = \frac{c' - \sigma^s \tan \phi'}{\gamma Z_w \sin \beta \cos \beta} + \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \quad (3.9)$$



1) ส่วนแรกเป็นการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเปล่าและดินรากพืช ได้แก่ ขนาดของเม็ดดิน ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน ความหนาแน่นแห้ง ความชื้นผ่านได้ของดิน ความพรุน ทดสอบหาเส้นคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดิน ปริมาณรากพืชในดิน และดัชนีใบพืชปกคลุมดิน เป็นต้น

2) ส่วนที่สองเป็นการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยการสร้างแบบจำลองทางกายภาพการซึมใน 2 มิติ ด้วยกล่องลาดดินที่มีพืชปกคลุมหน้าดิน (Vegetation slope box test) ซึ่งลาดดินจะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous soil) ควบคุมรากพืชที่ความหนาแน่นรากค่าหนึ่ง และเงื่อนไขการทดสอบทั้งในสภาพหน้าลาดดินมีใบพืชปกคลุมและไม่มีใบพืชปกคลุม ขณะปลูกพืชและทำการทดสอบกำหนดค่ามุมลาดชันของลาดดิน (Slope angle,  $\beta$ ) คงที่เท่ากับ 20 องศาไว้ตลอดเวลา นั่นคือ รากพืชจะซ่อนไว้ในแนวตั้งตามธรรมชาติของพืชที่เจริญเติบโตในพื้นที่ลาดเอียง พร้อมทั้งสร้างแบบจำลองน้ำฝนให้ความรุนแรงต่างกัน 3 ค่าให้ได้ 1 ค่าที่น้อยกว่าค่าความชื้นผ่านได้ของดินรากพืช และให้ได้ 2 ค่าที่มากกว่าค่าความชื้นผ่านได้ของดินรากพืช และติดตั้งเครื่องมือวัดการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินตามความลึกทั้งตำแหน่งตอนบน ตอนกลางและตอนล่างของลาดดินจำลองนี้ เป็นการวิเคราะห์พฤติกรรมการณ์การซึมของน้ำฝนในลาดดินที่มีพืชปกคลุมดินที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพลาดดินบนหลักการลาดดินอนันต์ โดยสมมติค่าหน่วยแรงดึงของรากพืชเท่ากับ 1.0 กิโลปาสกาล เพื่อบูรณาการความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับการวิบัติของลาดดินที่มีพืชปกคลุมดินถล่มแบบตื้นภายใต้สภาวะรับน้ำฝน

เพื่อที่จะทราบถึงอิทธิพลของใบพืชคลุมหน้าลาดดินที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการณ์การซึมของน้ำฝน จึงได้ทำการทดสอบการซึมสำหรับเปรียบเทียบผลแบ่งเป็น 2 ชุดการทดสอบ (Series) โดยชุดการทดสอบที่ 1 (Test series I) กำหนดให้สภาพผิวหน้าลาดดินใบพืชปกคลุมดิน (Surface slope with leaves) และชุดการทดสอบที่ 2 (Test series II) กำหนดให้สภาพผิวหน้าลาดดินไม่มีใบพืชปกคลุมดิน (Surface slope without leaves)



รูปที่ 3.11 ผังการดำเนินงานวิจัยพฤติกรรมการซึมของน้ำฝนในลาดดินที่มีพืชปกคลุม

### 3.3.1 การเตรียมดินตัวอย่าง

ดินที่ใช้ในการทดสอบเป็นดินทราย (Poorly graded sand, SP) จากนั้น นำมาบดอัดในกล่องลาดดินทดสอบ โดยบดอัดดินทีละชั้นเป็น แต่ละชั้นให้มีความหนาประมาณ 6 เซนติเมตร ควบคุมน้ำหนักบดอัดในแต่ละชั้นไม่ให้น้ำหนักเกินไปเพื่อให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของรากพืช โดยควบคุมความชื้นบดอัดด้านแห้ง (Dry site) ที่ร้อยละ 8 ให้ได้ลาดดินที่มีหน่วยน้ำหนักแห้ง 1.72 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรหรือ 16.9 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร (ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ( $\gamma_{d\max}$ ) เท่ากับ 1.87 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ( $w_{opt}$ ) เท่ากับร้อยละ



12) ในการจำลองลาดดินทรายที่มีพืชปกคลุมดิน (Vegetation slope box test) จะทำการปลูกพืชที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีในดินทรายที่ไม่อุ้มน้ำและยังมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ และมีความยาวของรากไม่มากเพื่อให้เนื้อดินลาดดินไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous soil) ประกอบด้วยเนื้อดิน 2 ชั้นคือ ชั้นดินที่มีรากพืช (Root-soil zone) และชั้นเนื้อดินไม่มีรากพืช (Bare soil zone) โดยมีรายการละเอียดการเตรียมลาดดินที่มีพืชปกคลุมดิน ดังนี้

1) **ดินทรายที่มีรากพืช (Root-soil)** เป็นดินในลาดดินจำลองที่ได้จากการปลูกหญ้ามาเลเซีย (Carpet grass) ชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Axonopus compressus* (Swartz) Beauv. บนผิวหน้าลาดดิน เหตุผลที่เลือกหญ้ามาเลเซียเพราะว่าเป็นหญ้าที่ปลูกง่าย สามารถเจริญเติบโตได้ในดินทราย และยังคงควบคุมตัวแปรสำคัญที่ใช้ทดสอบได้เป็นอย่างดี ได้แก่ ความยาวราก (Root length) ความหนาแน่นราก (Root density) และค่าดัชนีใบปกคลุมผิวหน้าลาดดิน (Leaves area index, RAI) ซึ่งเป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการซึมของน้ำฝนสู่ลาดดิน การปลูกในกล่องลาดดินทำโดยนำลำต้นส่วนยอดหญ้ากล้าพันธุ์หญ้ามาเลเซียที่บริเวณข้อปล้องมีตุ่มรากจำนวนมาก มาปักชำลงในลาดดินทราย ระยะห่างสม่ำเสมอประมาณ 2 เซนติเมตร ด้านบนกล่องลาดดินคลุมด้วยตาข่ายพรางแสงแดด ลดการคายน้ำของพืชป้องกันการเฉื่อยเฉา ส่วนด้านข้างกล่องลาดดินพันด้วยตาข่ายพรางแสงแดด ประมาณ 2-3 ชั้นเพื่อไม่ให้แสงแดดรบกวนการงอกของราก (เพราะรากพืชมีพฤติกรรมหนีแสงแดด) จะช่วยให้รากและใบพืชเจริญเติบโตมีความหนาแน่นรากและใบปกคลุมสม่ำเสมอทั่วลาดดินทดสอบ ทำการรดน้ำทุกวัน และให้ปุ๋ยน้ำทุกสัปดาห์ และเพื่อให้รากขนไชลงแนวตั้งเช่นเดียวกับลาดดินธรรมชาติ ดังนั้นตลอดช่วงเวลา 3 เดือนที่เพาะปลูกเลี้ยงหญ้าจะปรับความลาดชันของแบบจำลองให้ลาดดินเอียงทำมุมเท่ากับ 20 องศาตลอดเวลา เมื่อรากเจริญเติบโตเต็มที่ จึงเริ่มทำการทดสอบชุดการซึมที่ค่าความรุนแรงฝนต่าง ๆ ในสภาพผิวหน้าลาดดินมีใบพืชปกคลุม (Surface with leaves) ก่อน จากนั้นทำการตัดใบทิ้ง แล้วจึงทดสอบการซึมในสภาพผิวหน้าลาดดินไม่มีใบพืช (Surface without leaves) แสดงการเตรียมกล่องลาดดินที่มีพืชปกคลุมดิน ดังรูปที่ 3.12

2) **ดินเปล่า (Bare soil)** เป็นดินเปล่าใต้ดินรากพืชที่นำมาจากกล่องลาดดินที่มีพืชปกคลุมดินหลังเสร็จสิ้นทุกการทดสอบแล้ว



รูปที่ 3.12 ดินตัวอย่างที่ใช้ทดสอบการซึมในกล่องลาดดินที่มีพืชปกคลุมดิน

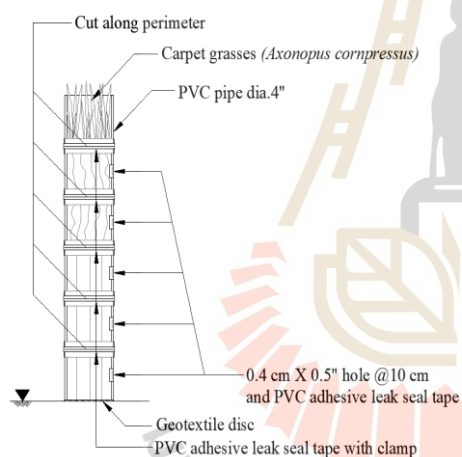
เพื่อสะดวกในการหาคุณสมบัติของดินรากพืช จึงทำการเตรียมตัวอย่างดินในลักษณะเดียวกันทุกประการ โดยปลูกพืชในกระบอกพีวีซี (Polyvinyl Chloride, PVC) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4 นิ้ว (10.16 เซนติเมตร) จำนวน 10 กระบอกโดยทำการบดอัดให้น้ำและปุ๋ยเหมือนกล่องลาดดินทุกประการ นอกจากนี้ก่อนทำการทดสอบได้นำรากพืชจากกระบอกพีวีซีมาทำการหาความแน่นของรากพืชและตรวจสอบกับความแน่นของรากพืชในกล่องลาดดินทั้งลาดดินตอนบน ตอนกลางและตอนล่าง เพื่อให้แน่ใจว่าดินรากพืชในกล่องลาดดินกับดินรากพืชในกระบอกพีวีซีแสดงตัวอย่างดังรูปที่ 3.13 มีความแน่นรากใกล้เคียงกันมากที่สุด การเตรียมตัวอย่างดินรากพืชและดินเปล่าในกระบอกพีวีซีมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



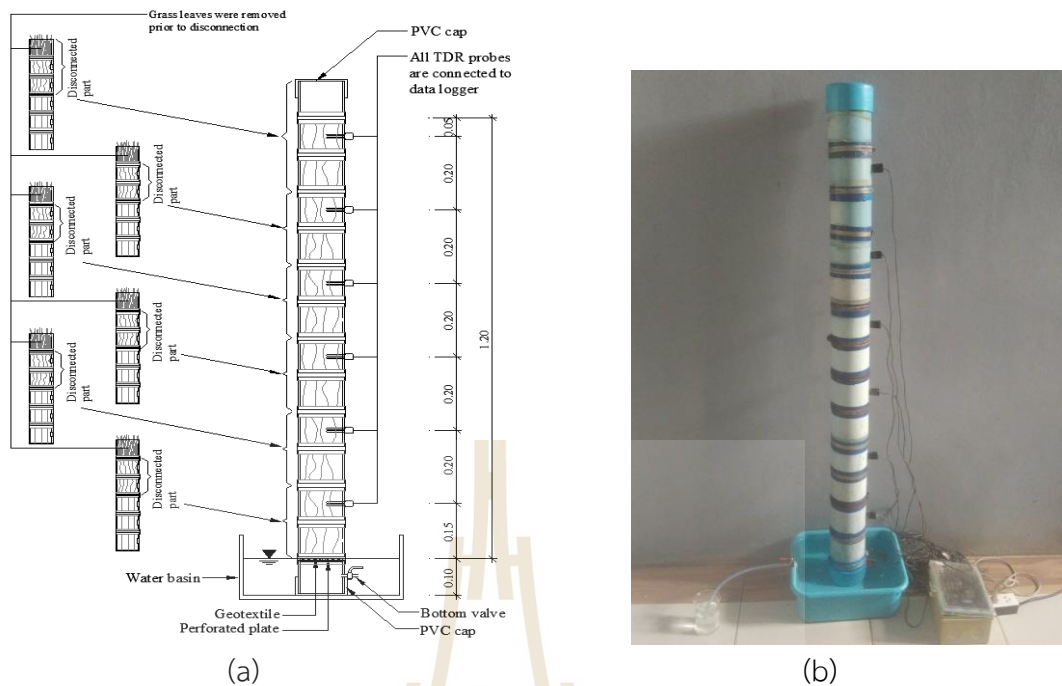
รูปที่ 3.13 ภาพตัวอย่างดินรากพืชและรากพืช

(1) การเตรียมตัวอย่างดินในกระบอกพีวีซีสำหรับทดสอบหาเส้นคุณลักษณะ การอุ้มน้ำของดินรากพืช เตรียมโดยหั่นกระบอกพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้วเป็นท่อน ๆ ละ 10 เซนติเมตร กึ่งกลางของแต่ละท่อนเจาะรูสี่เหลี่ยมขนาดความกว้าง 0.4 เซนติเมตร ความยาว 0.5 นิ้ว

(ประมาณ 13 เซนติเมตร) สำหรับไว้เสียบหัวอ่านความชื้น (Time domain reflectometry (TDR) probe) นำท่อนพีวีซีมาเรียงต่อกันสูง 60 เซนติเมตร (6 ท่อน) ปิดรูเจาะและแนวรอยต่อด้วยผ้าเทปกาวกันน้ำ (Leak seal tape) แล้วล็อกแนวรอยต่อแต่ละท่อนด้วยสายรัดท่อ (Horse clamp) เพื่อป้องกันการเคลื่อนหลุดขณะบดอัดดินหรือเมื่อต้องการขนย้าย จากนั้น นำท่อพีวีซีที่ประกอบเสร็จแล้ววางบนแผ่นหินพรุน (Porous stone) บดอัดดินทรายเป็นชั้น ๆ ลงในกระบอกรูปพีวีซีจนกระทั่งได้ความหนาชั้นดิน 50 เซนติเมตร เมื่อปลูกหญ้ามาเลเซียจนเจริญเติบโตเต็มที่แล้วพบว่าความยาวรากพืชยาวประมาณ 22 เซนติเมตรจึงทำการหั่นเอาเฉพาะท่อนบน 2 ท่อน (20 เซนติเมตร) มาเรียงต่อกัน แสดงการเตรียมตัวอย่างดินรากพืชและการทดสอบหาเส้นคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดินรากพืช ดังรูปที่ 3.14 และ รูปที่ 3.15 ตามลำดับ โดยตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 3 วันจึงอ่านค่าความชื้นจากหัวอ่านความชื้น TDR probes ที่ระดับความสูง 15, 35, 55, 75, 95 และ 115 เซนติเมตรจากระดับผิวน้ำ



รูปที่ 3.14 การเตรียมตัวอย่างดินรากพืชในกระบอกรูปพีวีซี (a) ภาพวาด และ (b) ภาพถ่ายตัวอย่างดินสำหรับแยกตัดดินที่มีรากพืชออกมาทดสอบ



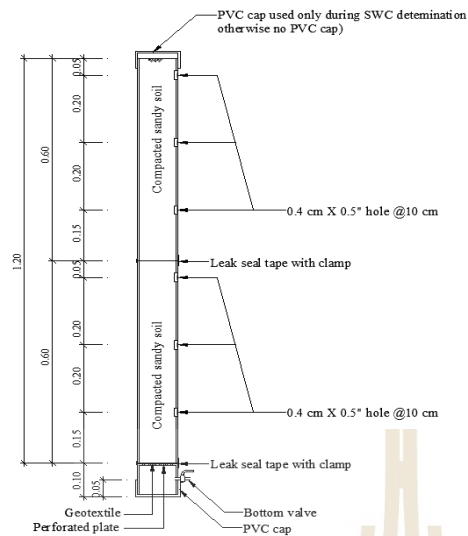
รูปที่ 3.15 การทดสอบหาเส้นคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดินรากพืช

(a) ภาพวาดการแยกตัวอย่างดินรากพืชออกมาประกอบเตรียมการทดสอบ

(b) ภาพถ่ายการทดสอบหาเส้นคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดินรากพืช

(2) การเตรียมตัวอย่างดินในกระบอกพีวีซีสำหรับทดสอบหาเส้นคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดินเปล่า เมื่อเสร็จสิ้นทุกการทดสอบแล้ว นำตัวอย่างดินเปล่าที่อยู่ใต้โซนดินรากพืช ในกล่องลาดดินมาบดอัดใส่ในกระบอกพีวีซีที่เจาะรูด้านข้างกระบอกไว้สำหรับเสียบหัววัดความชื้น TDR probe จำนวน 2 กระบอก ๆ ละ 60 เซนติเมตรนำมาเรียงต่อกัน แล้วนำไปทดสอบหาเส้นคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดินเปล่าเช่นเดียวกับดินรากพืช แสดงการเตรียมตัวอย่าง และภาพการทดสอบ หาเส้นคุณลักษณะของดินเปล่า ดังรูปที่ 3.16





รูปที่ 3.16 การทดสอบหาเส้นคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดินเปล่า

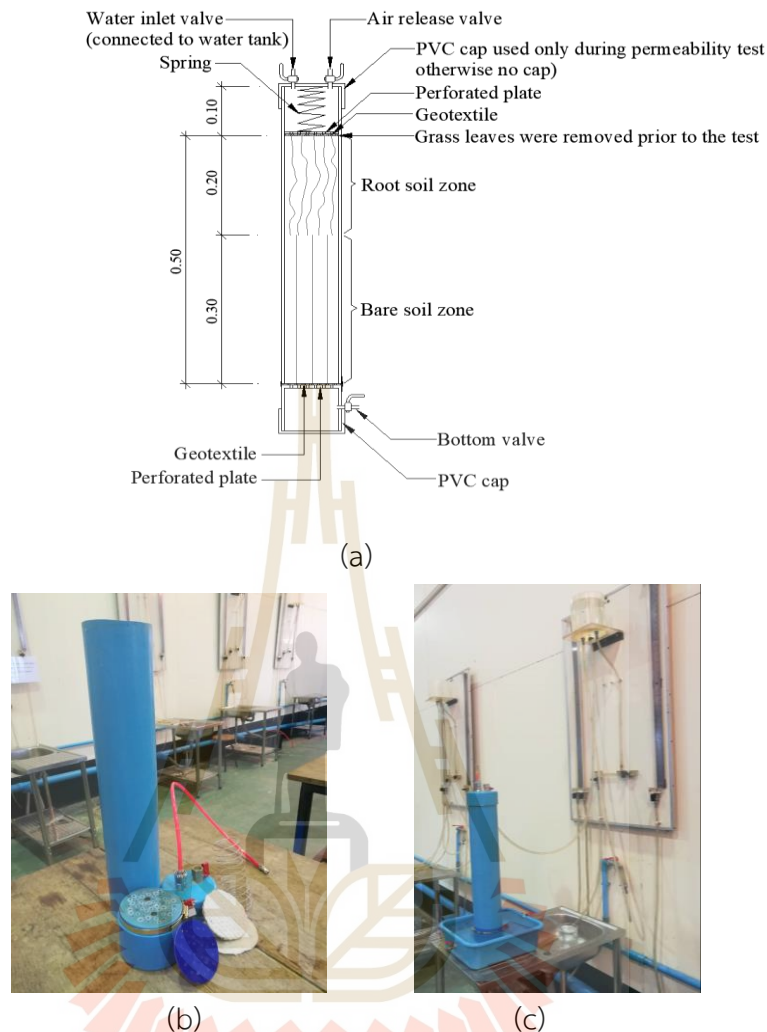
(a) ภาพวาดการเตรียมตัวอย่างดินเปล่า

(b) ภาพถ่ายการทดสอบหาเส้นคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดินเปล่า

(3) ตัวอย่างดินในกระบอกพีวีซีสำหรับหาค่าความซึมผ่านได้ของดินรากพืชและดินเปล่า เตรียมโดยหั่นกระบอกพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้วเป็นท่อนยาว 60 เซนติเมตร แล้วนำตัวอย่างดินรากพืชและดินเปล่าจากการทดสอบเส้นคุณลักษณะรากพืชใส่ลงในชุดอุปกรณ์ หาค่าความซึมผ่านได้ของชั้นดิน แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 3.17 โดยทดสอบหาความซึมผ่านได้ของดินที่มีรากพืชและดินเปล่าด้วยวิธีเฮดคงที่ (Constant head permeability test) และคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านได้ของชั้นดินในสภาวะอุ้มน้ำด้วยน้ำที่เนื้อดินแตกต่างกันแยกเป็นชั้นดิน 2 ชั้น (Layers) ได้จากการคำนวณกลับด้วยการวัดผลทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านได้ของชั้นดินทั้งสองชั้น (Equivalent permeability,  $k_{eq}$ ) ตามสมการที่ 3.11

$$k_{eq} = \frac{H_r + H_b}{\frac{H_r}{k_r} + \frac{H_b}{k_b}} \quad (3.11)$$

เมื่อ $H_r$	คือ	ความหนาของชั้นดินที่มีรากพืช
$H_b$	คือ	ความหนาของชั้นดินเปล่า
$k_r$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านได้ของชั้นดินที่มีรากพืช
$k_b$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านได้ของชั้นดินเปล่า



รูปที่ 3.17 การทดสอบหาความซึมผ่านได้ของชั้นดินที่มีรากพืชและชั้นดินเปล่า

(a) ภาพวาด (b) ภาพถ่ายชุดอุปกรณ์ (c) การทดสอบหาค่าความซึมผ่านได้

หลังการทดสอบการซึมครบทุกชุดการทดสอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว ทำการเก็บตัวอย่างดินจากห้องทดสอบลาดดินตอนบน (Upper slope) ตอนกลาง (Middle slope) และตอนล่าง (Lower slope) เพื่อตรวจสอบความแน่นรากก่อนและหลังทดสอบ หาคคุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่างทั้งชั้นดินที่มีรากพืช (Root-soil) และชั้นดินที่ไม่มีรากพืช (Bare soil) สำหรับยืนยันผลการวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่างที่ได้จากกระบอกพีวีซี ได้แก่ การกระจายของอนุภาค (Particle size distribution) ด้วยการทดสอบร่อนผ่านตะแกรง (Sieve analysis) และการทดสอบไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer) ตามมาตรฐาน ASTM D 422-63 และจำแนกด้วยระบบ Unified Soil Classification ตามมาตรฐาน ASTM D 2487-69 โดยการคำนวณร้อยละของเม็ดดินเป็นกลุ่มต่าง ๆ



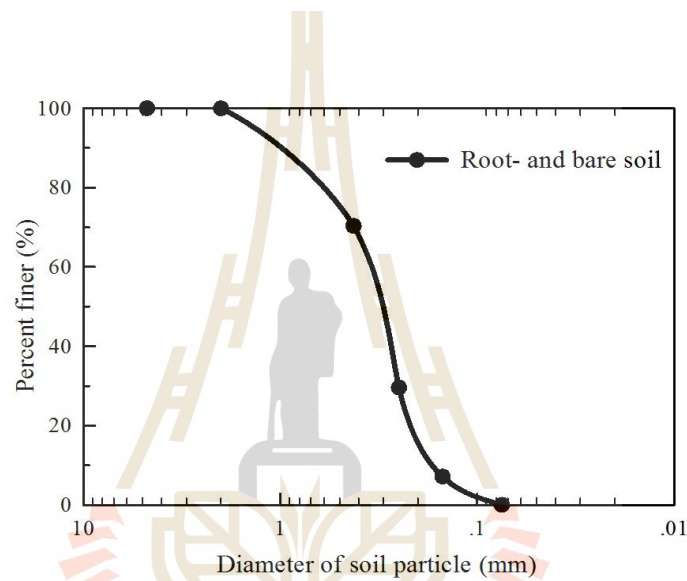
ได้แก่ ทราย (Sand) ทรายแป้ง (Silt) และดินเหนียว (Clay) หาค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific gravity of soil) ตามมาตรฐาน ASTM D 854-14 หาค่าความหนาแน่นแห้ง (Dry density) ตามมาตรฐาน ASTM D 698-70 แสดงคุณสมบัติทั้งหมดของดินตัวอย่าง และวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการซึมในกล่องลาดดิน ตามตารางที่ 3.3 รวมทั้งคุณสมบัติพื้นฐานของรากพืช แสดงในตารางที่ 3.4 การจำแนกขนาดและการกระจายของเม็ดดิน เส้นคุณลักษณะการอุ้มน้ำของวัสดุทดสอบ หาเส้นคุณลักษณะการซึม แสดงดังรูปที่ 3.18, 3.19 และ 3.20 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของดินและวัสดุที่ใช้ในการทดสอบการซึมแบบสองมิติในกล่องลาดดิน

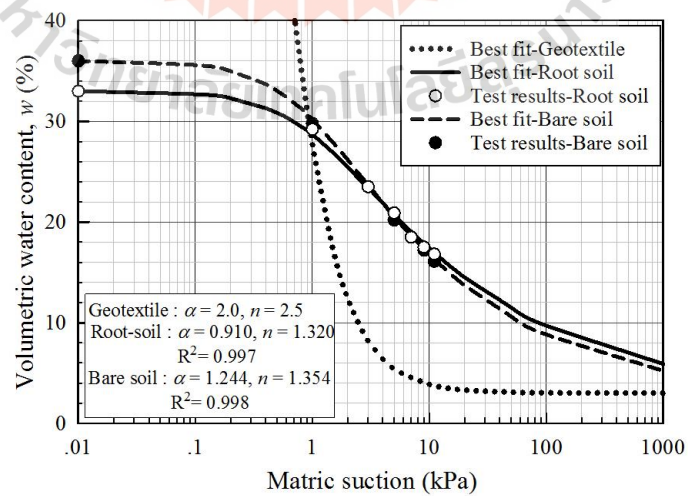
Material properties	Root-soil	Bare soil	Geotextile
Soil type (USCS Classification)	SP	SP	-
Clay (Dia.= 0.002 mm.), %	0	0	-
Silt (Dia.= 0.002-0.05 mm.), %	7.1	7.1	-
Sand (Dia.= 0.05-2.0 mm.), %	92.9	92.9	-
Dry unit weight, $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	17.1	16.9	-
Specific gravity, $G_s$	2.69	2.69	-
Hydrologic parameters			
Saturated permeability, $k_s$ (m/sec)	$3.90 \times 10^{-5}$	$9.70 \times 10^{-5}$	$3.70 \times 10^{-3}$
Saturated volumetric water content, $\theta_{sat}$	0.33	0.36	0.80
Residual volumetric water content, $\theta_r$	0.025	0.023	0.03
Fitting parameter, $\alpha$ (kPa <sup>-1</sup> )	0.910	1.047	2.00
Fitting parameter, $n$	1.320	1.354	2.50

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของรากพืชในกล่องลาดดิน

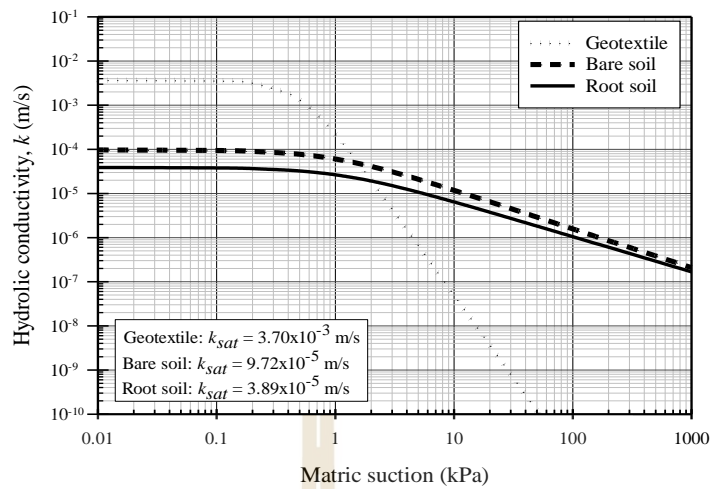
Root properties	Value/Texture
Root of carpet grass ( <i>A. compressus</i> (Swartz) Beau.)	
Wet unit weight (Root bulk density), $\gamma_R$ (g/cm <sup>3</sup> )	0.731
Dry unit weight (Root tissue density), $\gamma_{dR}$ (g/cm <sup>3</sup> )	0.133
Wet roots in soil by weight (%)	0.94
Wet roots in soil by volume (%)	2.35



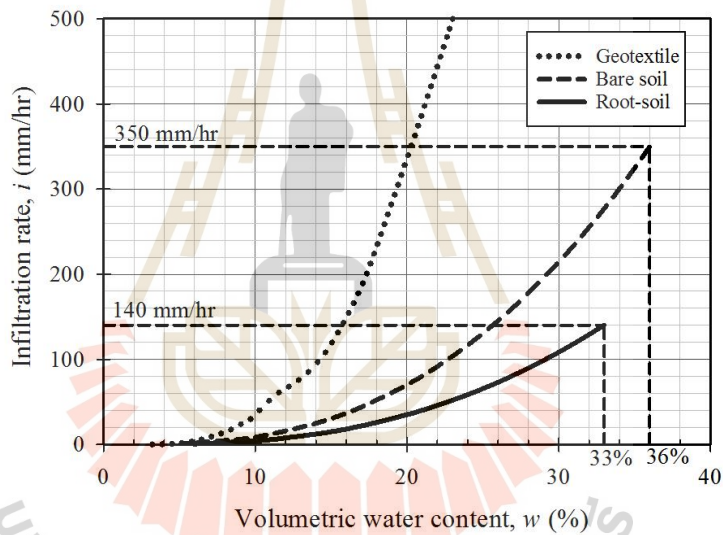
รูปที่ 3.18 จำแนกตามขนาดและการกระจายเม็ดดิน



รูปที่ 3.19 เส้นคุณลักษณะการอุ้มน้ำของดินและวัสดุทดสอบ



(a)



(b)

รูปที่ 3.20 เส้นคุณลักษณะการซึม

(a) ความสัมพันธ์ระหว่างความซึมผ่านได้ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำกับแรงดึงดูดเมทริก

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความซึมผ่านได้ของดินกับความชื้นดิน ( $k$ -function)

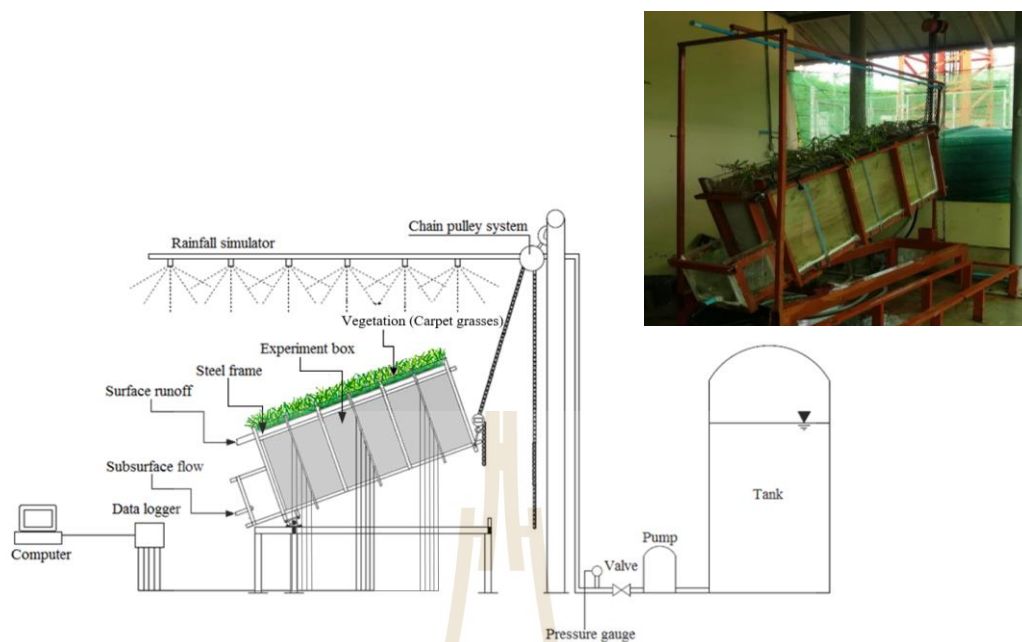
### 3.3.2 การสร้างแบบจำลองลาดดินที่มีพืชปกคลุมดินและชุดกำเนิดน้ำฝน

#### 1) รายละเอียดของแบบจำลองลาดดินที่มีพืชปกคลุม

รายละเอียดของแบบจำลองลาดดิน ประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นกล่องทดสอบสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อใช้บรรจุดินตัวอย่างที่จะใช้ในการทดสอบ ซึ่งทำด้วยอะคริลิกใสมีความหนา

15 มิลลิเมตร เพื่อให้่ายต่อการมองเห็นและสังเกตพฤติกรรมการซึมของน้ำฝนอย่างชัดเจน มีขนาดกว้าง 200 มิลลิเมตร ยาว 1,500 มิลลิเมตรและสูง 1,000 มิลลิเมตร ด้านข้างอีกด้านหนึ่งของกล่องทดสอบเจาะรูขนาด 9 มิลลิเมตรในแต่ละส่วนของกล่องทดสอบ (ส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่าง) ส่วนละ 5 รู รวมทั้งหมด 15 รู มีระยะห่างจากพื้นกล่อง 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิเมตรตามลำดับ เพื่อติดตั้งตัววัดความชื้น ส่วนผนังกล่องตอนปลายด้านหนึ่งเป็นแผ่นคอนกรีตพูนหุ้มด้วยจีโอเทคไทล์หนา 50 มิลลิเมตร สูง 600 มิลลิเมตรและกว้าง 210 มิลลิเมตรกั้นไว้เพื่อให้ น้ำในลาดดินสามารถไหลซึมออกได้ ตัวกล่องลาดดินมีโครงเหล็กรัดตัวเพื่อป้องกันการแอ่นตัวหรือการเคลื่อนของอะคริลิก เพื่อไม่ให้เกิดการรั่วซึมของน้ำและโครงกล่องทดสอบจะเชื่อมต่อกับฐานด้วยเพลลาเพื่อใช้ในการปรับเปลี่ยนองศาความลาดชันของลาดดิน เพื่อที่จะตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดิน พื้นของกล่องทดสอบจะเจาะรูขนาด 10 มิลลิเมตร 3 รู มีระยะห่างจากปลายของลาดดิน 350, 750 และ 1125 มิลลิเมตรตามลำดับ โดยติดตั้งตัววัดระดับน้ำใต้ดิน (Pizometer) ด้วยท่อพลาสติกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตรเพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงและบันทึกค่าของระดับน้ำใต้ดินที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ ยังติดตั้งวาล์วอีก 3 ตัวที่ด้านล่างของกล่องทดสอบใกล้ ๆ กับตัววัดระดับน้ำใต้ดินสำหรับไล่อากาศที่อยู่ในลาดดินขณะที่น้ำกำลังซึมลงสู่ลาดดินที่อาจทำให้เกิดการฝังตัวของฟองอากาศเป็นสาเหตุให้ค่าความชื้นคลาดเคลื่อนได้ หลังจากใส่ดินตัวอย่างบดอัดในกล่องทดสอบแล้วทำการปรับระดับกล่องทดสอบให้มีมุมลาดชัน เท่ากับ 20 องศาข้างไว้ พร้อมปลูกหญ้ามาเลเซียที่ผิวหน้า ลาดดิน และเนื่องจากกล่องทดสอบเป็นอะคริลิกใส แสงแดดอาจรบกวนการเจริญเติบโตของรากพืชได้ จึงต้องใช้ตาข่ายพรางแสงแดด พันรอบกล่องทดสอบ ดูแลหญ้าเจริญเติบโตโดยให้น้ำและปุ๋ยนานประมาณ 3 เดือนจนหญ้าที่ปลูกเจริญเติบโตเต็มที่ จึงจะเริ่มทำการทดสอบ ซึ่งได้แสดงรายละเอียดของกล่องทดสอบอะคริลิก หรือกล่องลาดดินทดสอบการซึม (Slope box test) ไว้ในรูปที่ 3.21 แผนผังและภาพถ่ายกล่องลาดดินทดสอบการซึมที่มีพืชปกคลุมดิน (Vegetation slope box test) แสดงดังรูปที่ 3.22





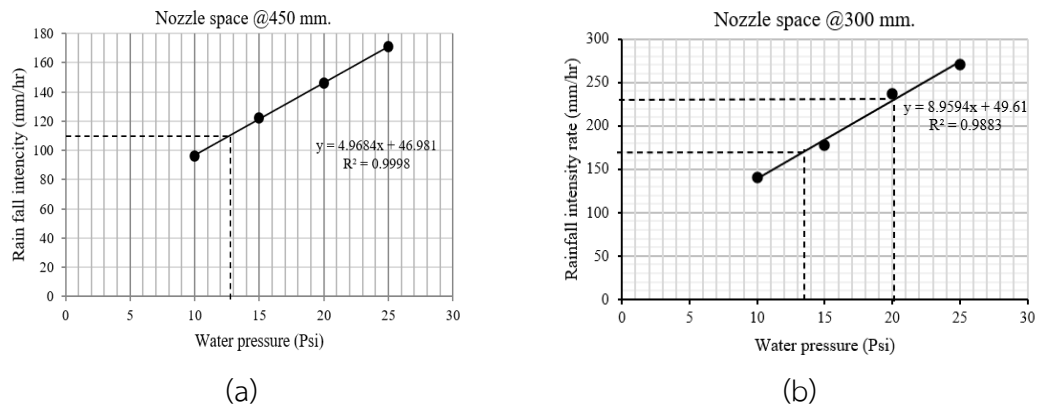
รูปที่ 3.22 แผนผังและภาพถ่ายของกล่องลาดดินที่มีพืชปกคลุมและชุดกำเนิดน้ำฝน

## 2) รายละเอียดของชุดกำเนิดน้ำฝน

ชุดกำเนิดน้ำฝนจะถูกติดตั้งไว้เหนือกล่องลาดดิน ประกอบไปด้วย ถังเก็บน้ำที่มีความจุขนาด 2,000 ลิตร ป้อนน้ำแบบความดันคงที่ วาล์วควบคุมการไหลของน้ำ มาตรวัดความดันน้ำท่อพลาสติกพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร และหัวสเปรย์ขนาดเล็กที่เจาะฝังเข้าไปในท่อพลาสติกพีวีซีด้วยระยะห่างเท่า ๆ กัน โดยที่น้ำจะถูกปั๊มจากถังเก็บน้ำซึ่งจะมีวาล์วปรับแรงดันเพื่อควบคุมปริมาณน้ำเข้าไปในท่อพลาสติกที่ติดตั้งหัวสเปรย์พ่นละอองน้ำคล้ายกับน้ำฝนตกลงมาสู่กล่องลาดดิน

การคำนวณปริมาณน้ำฝน จะใช้ท่อพลาสติกพีวีซีติดตั้งหัวสเปรย์ปล่อยน้ำฝนหลายหัว ที่ระดับความสูงคงที่ค่าหนึ่งอยู่เหนือกล่องลาดดิน กำหนดระยะห่างของหัวสเปรย์น้ำฝนที่ติดตั้งเข้ากับท่อน้ำพลาสติกพีวีซีอย่างสม่ำเสมอจำนวน 2 ท่อน โดยท่อนแรกหัวสเปรย์มีระยะห่าง 300 มิลลิเมตร และท่อนที่สองหัวสเปรย์มีระยะห่าง 450 มิลลิเมตรใช้ความดันน้ำอยู่ในช่วงระหว่าง 10 ถึง 25 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จะได้ค่าความรุนแรงฝนอยู่ในช่วงระหว่าง 100 ถึง 250 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง เมื่อทำการสอบเทียบหา ค่าความรุนแรงฝนที่ต้องการ ได้แก่ ความรุนแรงฝน 110, 170 และ 230 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง จะต้องใช้ความดันน้ำที่ 12.9, 13.4 และ 20.1 ปอนด์ต่อตารางนิ้วตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 3.23





รูปที่ 3.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงฝนกับความดันน้ำ

(a) ทดสอบที่ความรุนแรงฝน 110 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

(b) ทดสอบที่ความรุนแรงฝน 170 และ 230 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

เพื่อให้แน่ใจว่าแบบจำลองน้ำฝนทั้งสองระบบให้น้ำฝนเทียมที่มีความสม่ำเสมอทั่วกัน ทั้งกล่องลาดดิน จึงได้ทดสอบหาค่าความสม่ำเสมอของความรุนแรงฝนโดยใช้กระป๋อง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร วางไว้ด้านบนของกล่องลาดดินเพื่อวัดปริมาณน้ำฝน แล้วนำข้อมูลมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของความสม่ำเสมอ ( $C_u$ ) ได้จากสมการที่ 3.1 จากผลการสอบเทียบความสม่ำเสมอของปริมาณน้ำฝนในช่วงความรุนแรงฝนที่ต้องการทั้งหมด พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของความสม่ำเสมอเท่ากับ 95, 96 และ 97% สำหรับความรุนแรงฝน 110, 170 และ 230 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงระหว่าง 90-99% แสดงให้เห็นว่าชุดกำเนิดน้ำฝนนี้มีความน่าเชื่อถือที่จะนำมาใช้ในการทดสอบได้

### 3.3.3 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นและการสอบเทียบ

#### 1) อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น

อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น ประกอบด้วย หัววัดความชื้น (Probe) รุ่น SUT v1.0 (อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์, 2559) แสดงดังรูปที่ 3.24(a) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถวัดค่าความชื้นด้วยหัวอ่านความชื้น Time domain reflectometry โดยอาศัยหลักการความต่างศักย์ไฟฟ้า และเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) แสดงดังรูปที่ 3.24(b) ที่มีช่องสำหรับต่อเข้ากับหัววัดความชื้นรวมกัน 15 ช่อง สามารถกำหนดระยะเวลาในการวัดค่าได้ ตั้งแต่ 1 นาทีต่อครั้ง จนถึง 24 ชั่วโมงต่อครั้ง โดยมีโปรแกรมสำเร็จรูปที่ทำงานในรูปแบบปฏิบัติการบน Windows ลงบนคอมพิวเตอร์ ข้อมูลที่ได้จากเครื่องบันทึกข้อมูลจะแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของความชื้นเชิงปริมาตร ( $\theta^v$ ) มีหน่วยเป็น มิลลิโวลท์ (mV)



(a)



(b)

รูปที่ 3.24 อุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดิน

(a) หัววัดความชื้นดิน (TDR probe)

(b) เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger)

## 2) การสอบเทียบตัววัดความชื้น

ค่าความชื้นที่ได้จากตัววัดความชื้นจะต้องได้รับการสอบเทียบกับดินที่ใช้ในการทดสอบก่อน ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- 1) นำตัวอย่างดินเปล่า (Bare soil) ที่เก็บมาจากกล่องลาดดิน หลังการทดสอบ มาบดอัดในแบบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร
- 2) ฝังตัววัดความชื้นลงไป在地ตัวอย่าง
- 3) วัดความชื้นด้วยหัววัด และบันทึกค่าความชื้นที่วัดได้ ( $\theta'$ )
- 4) เก็บตัวอย่างดินนำไปอบเพื่อหาความชื้นโดยน้ำหนัก ( $w$ )
- 5) คำนวณหาค่าความชื้นเชิงปริมาตรที่ถูกต้อง ( $\theta$ ) โดยใช้การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของดิน (Phase analysis)

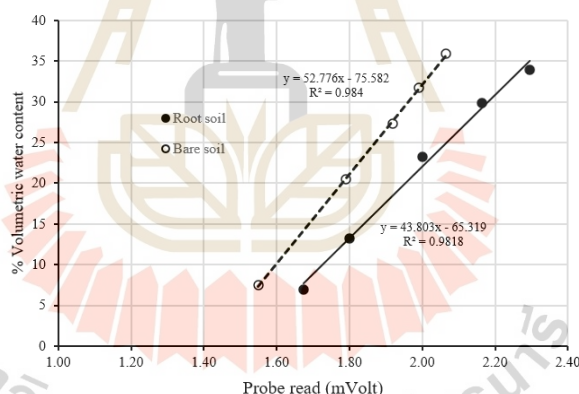
- 6) ทำซ้ำข้อที่ 1 ถึง 5 โดยมีการเติมน้ำลงในดินเพื่อแปรผันความชื้น

7) ทำซ้ำตามขั้นตอนที่ 1-6 โดยเปลี่ยนเป็นดินตัวอย่างที่มีรากพืช (Root soil) ที่นำมาจากกล่องลาดดิน โดยแยกเอารากพืชออกก่อนนำดินไปอบแห้ง เพื่อให้ได้ความชื้นที่อยู่ในช่องว่างเม็ดดินและรากที่แท้จริง

8) เมื่อทำการสอบเทียบหัววัดแล้ว นำข้อมูลที่ได้ไปสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเชิงปริมาตรที่ได้จากหัววัดความชื้น ( $\theta'$ ) ความชื้นโดยน้ำหนักในมวลดิน ( $w$ ) และความชื้นเชิงปริมาตรที่ถูกต้อง ( $\theta$ ) เพื่อปรับแก้ค่าความชื้น โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นที่ได้จากการคำนวณกับค่าความชื้นที่อ่านได้จากหัววัดความชื้น สำหรับดินที่มีรากพืช (Root-soil zone) และดินที่ไม่มีรากพืช (Bare soil zone) แสดงดังรูปที่ 3.25 จะได้สมการเทียบค่าหัวอ่านความชื้นตามสมการที่ 3.12 และ 3.13 ตามลำดับ ดังนี้

$$\theta = 43.803\theta' - 65.319 ; R^2 = 0.9818 ; (\text{Root soil zone}) \quad (3.12)$$

$$\theta = 52.776\theta' - 75.582 ; R^2 = 0.984 ; (\text{Bare soil zone}) \quad (3.13)$$



รูปที่ 3.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นที่ได้จากการคำนวณกับค่าความชื้นที่อ่านได้จากหัววัดความชื้น สำหรับดินที่มีรากพืช (Root-soil) และดินเปล่า (Bare soil)

### 3.3.4 ขั้นตอนการทดสอบการซึมของน้ำฝนในห้องปฏิบัติการ

หลังจากเตรียมกล่องลาดดินที่มีพืชปกคลุมดิน (Vegetation slope box test) ประมาณ 2 เดือน จึงเริ่มทำการติดตั้งหัววัดความชื้นเข้ากับรูที่อยู่ด้านข้างกล่องทดสอบ โดยแบ่งลาดดินออกเป็น 3 ตอนคือ ลาดดินตอนบน (Top section) ตอนกลาง (Middle section) และตอนล่าง (Lower section) ฝังหัววัดความชื้นด้านข้างกล่องทดสอบลาดดินจำลอง ตามระดับความลึกทุก 10 เซนติเมตร ตอนละ 5 ตัว รวมทั้งหมด 15 ตัวคือ ตัวที่ T1 ถึง T5 (ลาดดินตอนบน) ตัวที่ M1

ถึง M5 (ลาดดินตอนกลาง) และตัวที่ L1 ถึง L5 (ลาดดินตอนล่าง) ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 3.23(a) เป็นการฝังหัวอ่านความชื้นทิ้งไว้ในกล่องลาดดินทดสอบอีก 1 เดือน ดูแลรดน้ำ ให้อุ่นน้ำตามปกติ เพื่อให้ชั้นดินปรับคืนสภาพเดิมหลังจากถูกรบกวนขณะติดตั้งหัวอ่านความชื้น เมื่อพืชเจริญเติบโตเต็มที่แล้ว รोजนครบ 3 เดือนตามกำหนดจึงนำดาข่ายพรางแสงแดดออก สังเกตรากหญ้าขนไชลงลึกประมาณ 22 เซนติเมตร งดรดน้ำพืชเป็นเวลา 3 วันก่อนเริ่มทำการทดสอบพฤติกรรมกรการซึมของกล่องลาดดินที่มีพืชปกคลุม

เงื่อนไขการทดสอบการซึมในกล่องลาดดินได้รับการออกแบบเพื่อที่จะศึกษาผลของความรุนแรงฝนในการตอบสนองต่อความชื้นของลาดดินที่มีพืชปกคลุม ซึ่งมีทั้งหมด 2 ชุดทดสอบ โดยชุดทดสอบแรกมี 3 การทดสอบ จะใช้ค่าปริมาณความรุนแรงฝนที่แตกต่างกันในการทดสอบคือ 110, 170 และ 230 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง เป็นค่าความรุนแรงฝน (Rainfall intensity,  $i$ ) ที่ได้เปรียบเทียบกับค่าความซึมผ่านได้ของดินที่สถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated permeability,  $k_s$ ) ของชั้นลาดดินที่มีรากพืช (Root soil zone) กล่าวคือ เป็นค่าที่ต่ำกว่า ( $i < k_s$ ) และค่าที่สูงกว่า ( $i > k_s$ ) ค่าความซึมผ่านได้ของชั้นดินที่มีรากพืช กำหนดค่ามุมลาดชันของลาดดินจำลองเท่ากับ 20 องศาในที่ต่างๆ การทดสอบ โดยชุดทดสอบแรก (Test series I) กำหนดเงื่อนไขผิวหน้าลาดดินให้มีใบพืชปกคลุม คำนวณหาค่าดัชนีพื้นที่ใบ (Leaf area index, LAI) ด้วยวิธีวิเคราะห์ภาพถ่ายดิจิทัล (Image analysis) มีค่าเท่ากับ 0.778 ในขณะที่ชุดทดสอบที่สอง (Test series II) กำหนดเงื่อนไขสภาพผิวหน้าลาดดินถูกตัดใบพืชทิ้ง จำนวน 3 การทดสอบที่ใช้ความรุนแรงฝนในการทดสอบคือ 110, 170 และ 230 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงเช่นเดียวกัน ลักษณะสภาพผิวหน้าลาดดินจำลองแต่ละชุดทดสอบ แสดงดังรูปที่ 3.26 รวมทั้งสองชุดการทดสอบมีทั้งหมด 6 การทดสอบ ทุกการทดสอบให้อยู่ในสถานะจำลองเหตุการณ์ ฝนตกอย่างสม่ำเสมอคงที่และต่อเนื่อง (Steady state Rainfall period) เป็นระยะเวลาในการทดสอบนาน 4 ชั่วโมง ติดตามการเปลี่ยนแปลงความชื้นในลาดดินขณะทำการทดสอบด้วยหัวอ่านความชื้น บันทึกค่าความชื้นแบบอัตโนมัติทุกๆ 2 นาทีเก็บข้อมูลแบบตอบสนองทันทีและตลอดเวลา (Real time) ตามระดับความลึก เก็บข้อมูลไว้ในชุดบันทึกข้อมูล โดยสรุปเงื่อนไขการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางการทดสอบที่ 3.5

หลังเสร็จสิ้นแต่ละการทดสอบจะเปิดวาล์วระบายน้ำใต้ดินออกจากลาดดิน และเฝ้าติดตามการลดลงของความชื้น (Redistribution) ในลาดดินทดสอบด้วย TDR probes ทั้ง 15 ตัว รोजนกระทั่งค่าความชื้นที่อ่านได้ต่ำกว่า 0.10 โดยไม่ต้องรดน้ำหญ้าหลังการทดสอบประมาณ 3 วัน จึงเริ่มการทดสอบในลำดับถัดไป

ตารางที่ 3.5 โปรแกรมการทดสอบการซึมแบบสองมิติในกล่องลาดดินที่มีพืชปกคลุม

Test Series	Rainfall intensity, $i$ (mm/hr)	Infiltration index, $i/k_s$		Vegetation leaves surface (LAI=0.778)
		Root-soil	Bare soil	
I	110	0.786	0.314	With leaves
	170	1.214	0.486	With leaves
	230	1.643	0.657	With leaves
II	110	0.786	0.314	Without leaves
	170	1.214	0.486	Without leaves
	230	1.643	0.657	Without leaves

Remark : Slope angle,  $\beta = 20^\circ$

$k_s$  Root-soil zone = 140 mm/hr

$k_s$  Bare soil zone = 350 mm/hr



(a)



(b)

รูปที่ 3.26 ลักษณะสภาพผิวหน้าลาดดินจำลองแต่ละชุดทดสอบ

(a) ผิวหน้าลาดดินมีใบพืชปกคลุม ชุดทดสอบที่ 1

(b) ผิวหน้าลาดดินไม่มีใบพืชปกคลุม ชุดทดสอบที่ 2



## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผล

#### 4.1 บทนำ

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์พฤติกรรมกรรมการซึมของน้ำฝนในลาดดินเนื้อเดียวกันที่เป็นดินร่วนปนทราย (SM) ที่มีค่าความเชื่อมแน่น (Cohesive soil) และในดินทรายปนดินตะกอน (SP-SM) ซึ่งเป็นดินเม็ดหยาบที่มีส่วนละเอียดปน (Fine fraction) แสดงด้วยผลการทดสอบการซึมแบบ 1 มิติในแท่งดินเนื้อเดียวกัน (Column test) ส่วนผลการทดสอบและการวิเคราะห์พฤติกรรมกรรมการซึมของน้ำฝนในลาดดินที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันนั้นได้จำลองลาดดินด้วยดินทราย (SP) ที่มีพืชปกคลุมผิวหน้าลาดดิน แสดงด้วยผลการทดสอบการซึมแบบ 2 มิติในกล่องลาดดินที่มีพืชปกคลุมดิน (Vegetation slope box test) ผลการทดสอบการซึมทั้ง Column test และ Vegetation slope box test นำมาวิเคราะห์หาผลกระทบต่อเสถียรภาพของลาดดินต้น รายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.2 ผลการทดสอบการซึมในแท่งดินเนื้อเดียวกัน

##### 4.2.1 พฤติกรรมการซึมในดินแท่งดินทดสอบ (Column test)

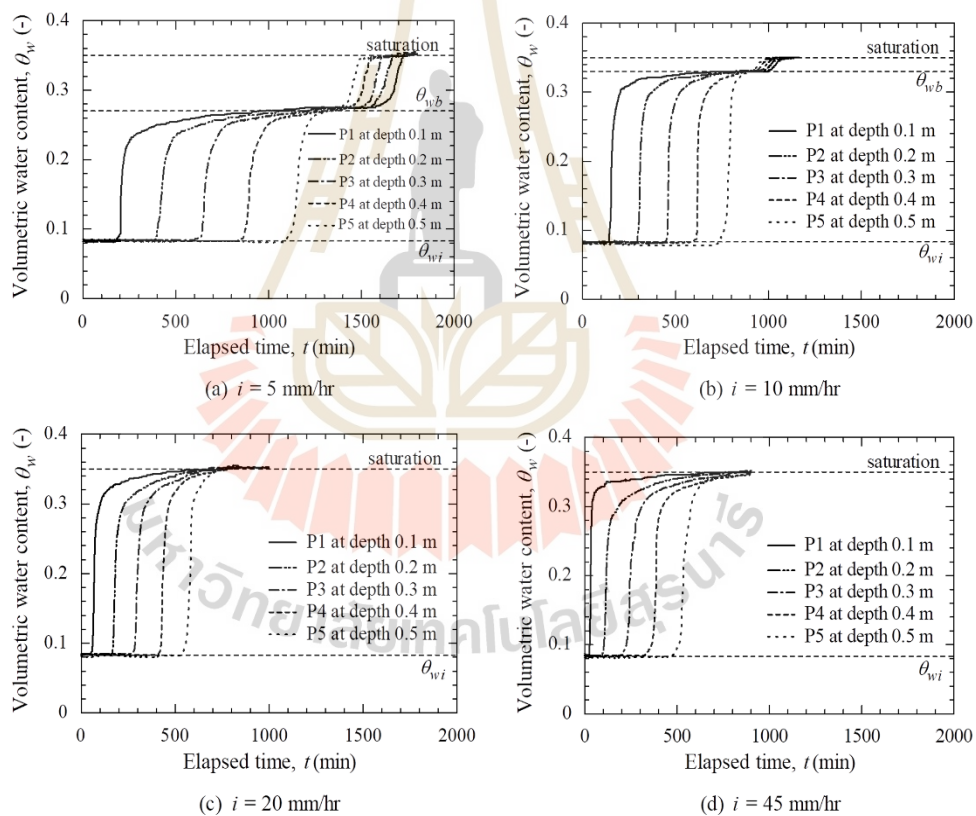
เมื่อจำลองน้ำฝนตกให้แท่งดินทดสอบ SM และ SP-SM column แล้วบันทึกการเปลี่ยนแปลงปริมาตรความชื้นด้วยอุปกรณ์วัดความชื้น (TDR probes) ที่ติดตั้งในแท่งดินทดสอบจำนวน 5 ตัว (P1, P2, P3, P4 และ P5) ที่ระดับความลึก 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิเมตรจากผิวหน้าแท่งดินทดสอบ ตามลำดับ ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลทดสอบดังนี้

รูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรความชื้น ( $\theta_w$ ) กับเวลาของแท่งดินร่วนปนทราย (SM column) ในแต่ละค่าความรุนแรงฝนที่แตกต่างกัน จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในแท่งดินขึ้นอยู่กับค่าความรุนแรงฝน ( $i$ ) สามารถจำแนกรูปแบบพฤติกรรมการซึมของแท่งดินทดสอบได้ด้วยอัตราค่าดัชนีการซึม ( $i/k_s$ ) ในกรณี  $i/k_s < 1.0$  ในช่วงแรกของระยะการซึม (Infiltration phase) นั้น ค่าความชื้นจะค่อย ๆ เพิ่มสูงขึ้นจากค่าความชื้นเริ่มต้น ( $\theta_{wi}$ ) อย่างรวดเร็ว จนถึงค่าความชื้นสูงสุดที่เรียกว่า ค่าความชื้นหลังระนาบความชื้น ( $\theta_{wb}$ ) และเมื่อ  $\theta_{wb}$  ซึมลงไปถึงชั้นที่บ้น้ำ ด้านล่างสุดของแท่งดินทดสอบ จะเริ่มเกิดการสะสมตัวของความชื้นเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ จนเกือบถึงค่าความชื้นสภาวะดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ( $\theta_{sat} = 0.35$ ) ระยะนี้เรียกว่า ระยะการอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation phase) ในขณะที่กรณี  $i/k_s \geq 1.0$  การเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นในแท่งดินทดสอบจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วกว่าในกรณี



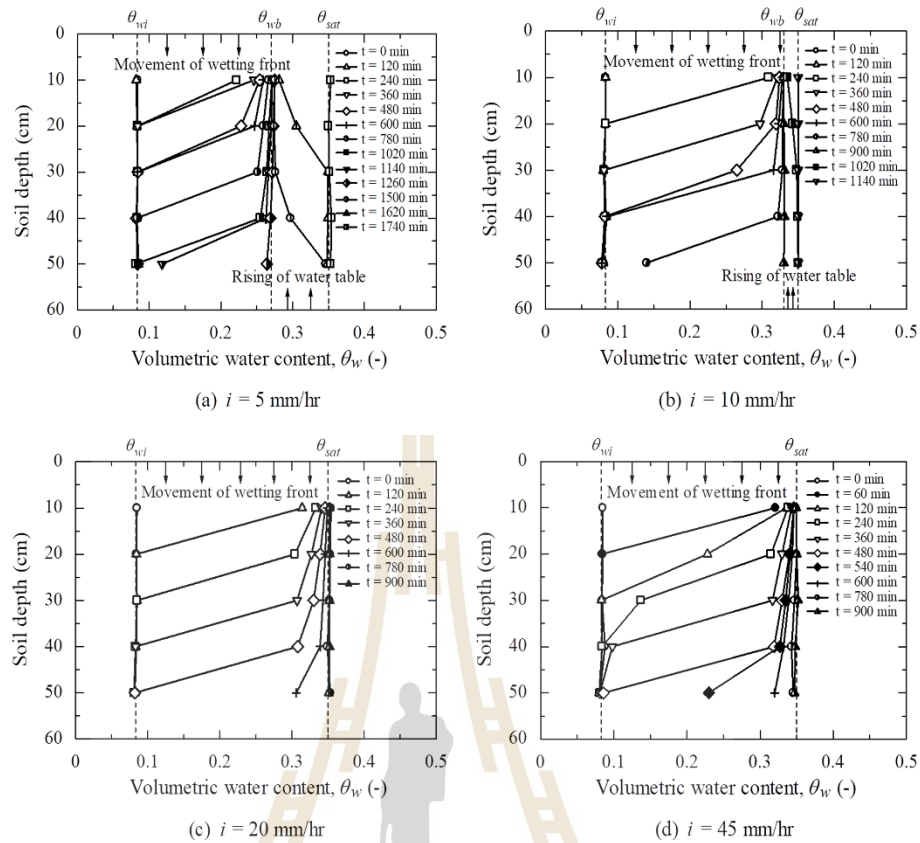
$i/k_s < 1$  และยังให้ค่า  $\theta_{wb}$  ที่สูงกว่า โดยเฉพาะหากค่าดัชนีการซึมสูงๆ จะไม่ปรากฏค่า  $\theta_{wb}$  ให้เห็น โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นจาก  $\theta_{wi}$  จะเข้าสู่ค่า  $\theta_{sat} = 0.35$  ในทันที

รูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลาของแท่งดินทรายปนดินตะกอน (SP-SM column) ที่ปริมาณความรุนแรงฝนแตกต่างกัน พบว่า มีรูปแบบพฤติกรรมการณ์การซึมคล้ายกับรูปแบบพฤติกรรมการณ์การซึมของแท่งดินทดสอบร่วนปนทราย (SM column) แต่ช่วงระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของตัววัดความชื้นแต่ละตัวมีการตอบสนองที่เร็วกว่า นั่นคือ น้ำฝนสามารถซึมลงในแท่งดินทรายปนดินตะกอนได้ดีกว่าในแท่งดินร่วนปนทราย ทั้งนี้เป็นเพราะว่าดินทรายปนดินตะกอนมีค่าความซึมผ่านได้ของดินในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ ( $k_s = 65$  mm/hr) สูงกว่าค่าความซึมผ่านได้ของดินทรายปนดินตะกอนในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ ( $k_s = 15$  mm/hr)



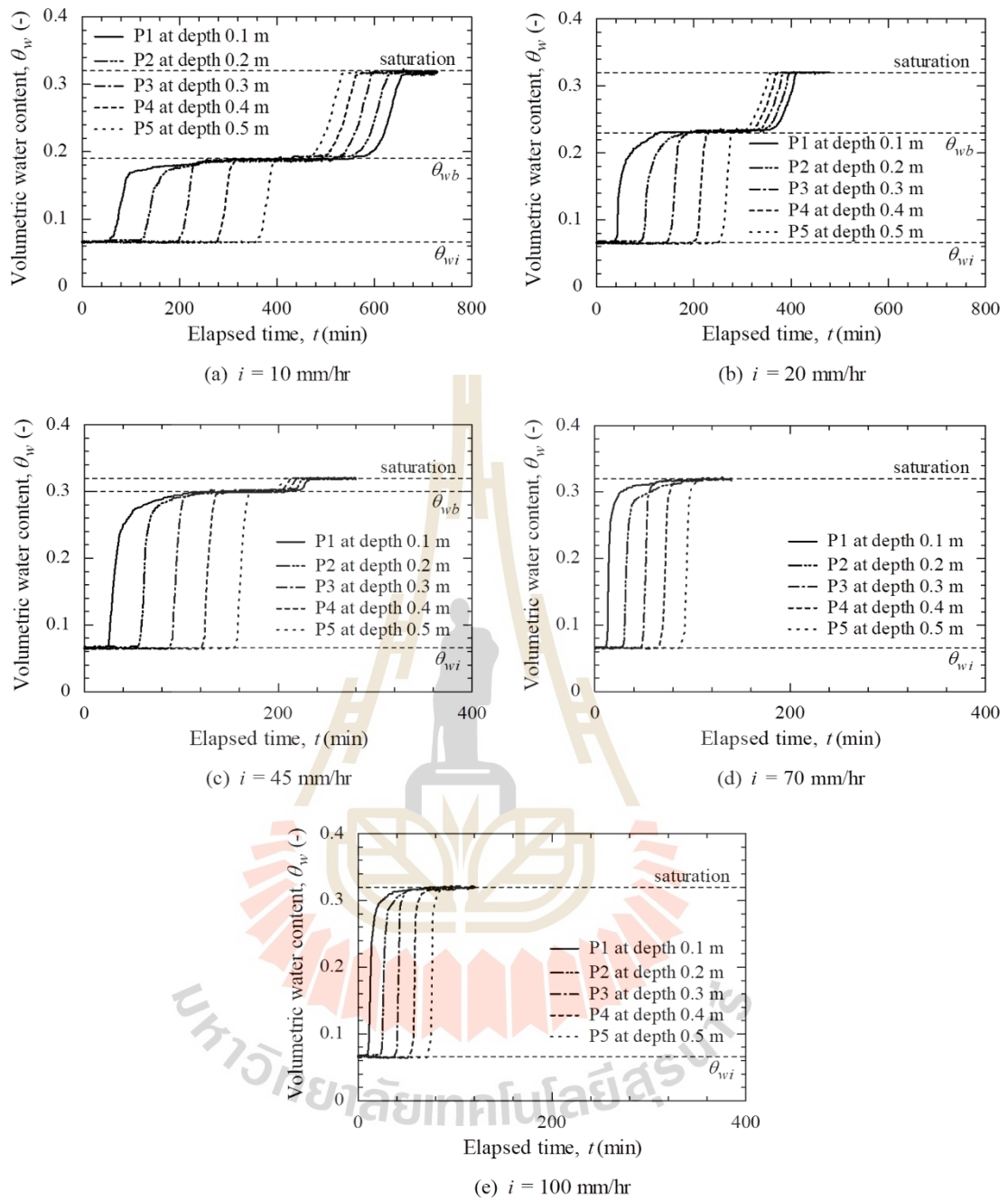
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของแท่งดินร่วนปนทราย (SM column) ในแต่ละค่าความรุนแรงฝนที่แตกต่างกัน

- (a) ความรุนแรงฝน 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง    (b) ความรุนแรงฝน 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง  
(c) ความรุนแรงฝน 20 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง    (d) ความรุนแรงฝน 45 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง



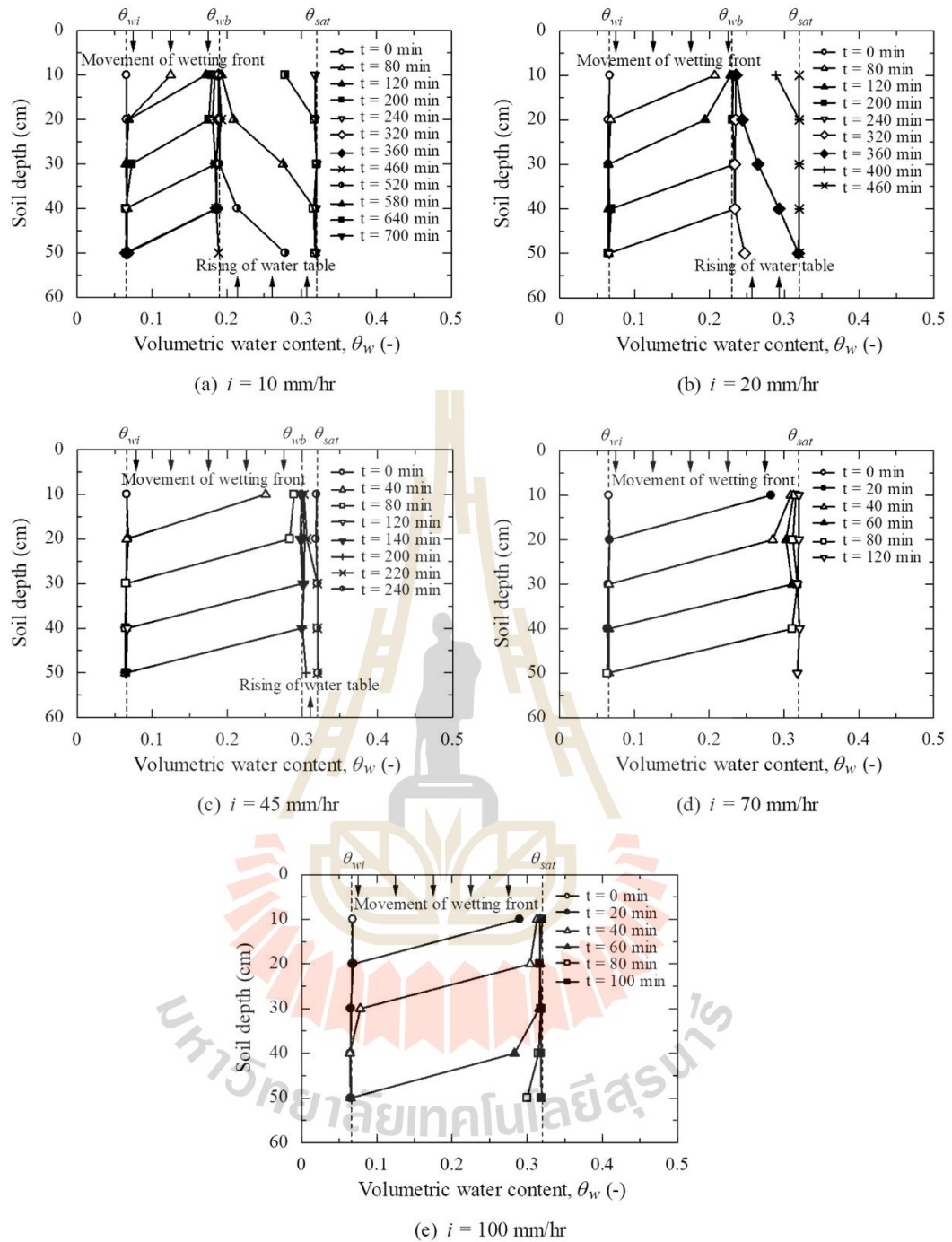
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลา ตามความลึกของแท่งดินร่วนปนทราย (SM column) ในแต่ละค่าความรุนแรงฝนที่แตกต่างกัน

- (a) ความรุนแรงฝน 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง (b) ความรุนแรงฝน 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง  
 (c) ความรุนแรงฝน 20 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง (d) ความรุนแรงฝน 45 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของแท่งดินทรายปนดินตะกอน (SP-SM column) ในแต่ละค่าความรุนแรงฝนที่แตกต่างกัน

- (a) ความรุนแรงฝน 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง (b) ความรุนแรงฝน 20 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง  
 (c) ความรุนแรงฝน 45 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง (d) ความรุนแรงฝน 70 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง  
 (e) ความรุนแรงฝน 100 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลา ตามความลึกของ  
แท่งดินทรายปนดินตะกอน (SP-SM column) ที่ค่าความรุนแรงฝนที่แตกต่างกัน

- (a) ความรุนแรงฝน 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง (b) ความรุนแรงฝน 20 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง  
(c) ความรุนแรงฝน 45 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง (d) ความรุนแรงฝน 70 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง  
(e) ความรุนแรงฝน 100 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

จากผลการทดสอบการซึมในช่วงค่าความรุนแรงฝนน้อยกว่าค่าความซึมผ่านได้ของดินที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ หรือค่าดัชนีการซึมน้อยกว่า  $1 (i/k_s < 1.0)$  พฤติกรรมการตอบสนองเชิงอุทกวิทยาของแท่งดินทดสอบที่อยู่ในระยะช่วงการเกิดกระบวนการซึม (Infiltration phase) จะให้ค่าความชื้นสูงสุดที่เรียกว่า ค่าความชื้นหลังระนาบความชื้น (Water content behind the wetting front,  $\theta_{wb}$ ) แต่ยังมีค่าต่ำกว่าค่าความชื้นที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated volumetric water content,  $\theta_{sat}$ ) สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $\theta_{wb}$  กับ  $i/k_s$  ในดินทรายตามสมการที่ 4.1 (Chinkulkijniwat et al., 2016)

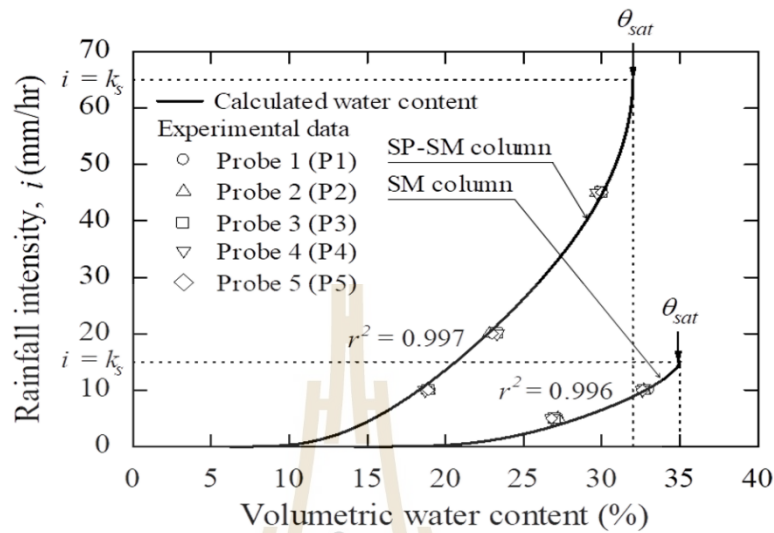
$$S_{eb} = \frac{\theta_{wb} - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r} = \left\{ \frac{1}{1 + [-\ln(i/k_s)]^n} \right\}^{1-1/n} \quad (4.1)$$

โดยที่	$S_{eb}$	คือ ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำประสิทธิผลที่ความชื้นหลังระบบความชื้น (Effective degree of water content behind the wetting front)
	$\theta_{wb}$	คือ ปริมาตรความชื้นหลังระนาบความชื้น (Water content behind the wetting front)
	$\theta_r$	คือ ปริมาตรความชื้นที่สภาวะหยุดนิ่ง (Residual volumetric water content)
	$\theta_{sat}$	คือ ปริมาตรความชื้นที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated volumetric water content)
	$\alpha$	คือ พารามิเตอร์ของแบบจำลองที่บ่งบอกค่าแรงดันน้ำ ณ จุดที่อากาศเริ่มเข้าไปในมวลดิน (Air-Entry pressure)
	$n$	คือ พารามิเตอร์ของแบบจำลองที่บ่งบอกอัตราการลดลงของปริมาณความชื้นกับแรงดันน้ำ หลังจากที่อากาศเริ่มเข้าไปในมวลดิน

และจากผลการศึกษาของ Lee et al. (2011), Chinkulkijniwat et al. (2016) และ Wu et al. (2017) พบว่า ค่า  $\theta_{wb}$  ไม่ได้ขึ้นอยู่กับมุมลาดชันของลาดดิน ดังนั้น จึงสามารถนำผลการทดสอบการซึม 1 มิติในแท่งดินทดสอบนี้ มาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\theta_{wb}$  และค่า  $i$  ของลาดดินทั้งดิน SM และลาดดิน SP-SM ได้ ซึ่งมีผลการทดสอบจำนวน 10 และ 15 การทดสอบตามลำดับ ที่ได้จากการวัดค่าความชื้นตามความลึกของแท่งดินทดสอบด้วยหัวอ่านความชื้น จำนวน 5 ตัวในแต่ละชุดการทดสอบของค่าความรุนแรงฝนต่าง ๆ และตรวจสอบค่าด้วยพารามิเตอร์ของ van Genuchten จากตารางที่ 3.2 มาแทนค่าในสมการที่ 4.1 พบว่า ผลการทดสอบกับค่าที่ได้จากสมการที่ 4.1



มีความสอดคล้องสัมพันธ์กันอย่างสมบูรณ์ โดยให้ค่า  $r^2 = 0.996$  และ  $0.997$  สำหรับแท่งดินทดสอบ SM และ SP-SM column ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นหลังระนาบความชื้นและความรุนแรงฝนของดินร่วนปนทราย (SM) และดินทรายปนดินตะกอน (SP-SM)

#### 4.2.2 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินเนื้อเดียวกัน

รูปแบบการวิบัติที่พบบ่อยในการเกิดการวิบัติแบบไหลคือ การวิบัติตามแนวระนาบ โดยแนวระนาบวิบัติจะอยู่ในระดับตื้นและยาวนานไปกับผิวหน้าลาดดิน ด้วยเหตุนี้ จึงทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยวิธีลาดดินอนันต์ (Infinite slope analysis) โดยค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of safety,  $FS$ ) ที่น้อยที่สุด จะอยู่ลึกลงไปในลาดดินในขอบเขตโซนดินเปียกที่น้ำฝนซึมลงไปถึง และจากชนิดของดินที่นำมาทำการทดสอบการซึมในแท่งดินทดสอบนี้เป็นดินเม็ดหยาบที่มีส่วนละเอียดปน ซึ่งพฤติกรรมของการซึมในแท่งดินทดสอบนี้จะนำไปสู่การวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินเนื้อเดียวกันเม็ดหยาบที่มีส่วนละเอียดปนด้วย โดยดินร่วนปนทราย (SM) นั้นถึงแม้ว่าจะไม่แสดงให้เห็นแนวระนาบความชื้นในโซนดินเปียกชัดเจนนัก แต่โซนดินเปียกก็มีค่าความชื้นใกล้เคียงกับค่าความชื้นหลังระนาบความชื้น ( $\theta_{wb}$ ) ดังนั้น ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ จึงได้กำหนดให้ค่าความชื้นสูงสุดในโซนดินเปียกมีค่าเท่ากับค่า  $\theta_{wb}$  และคำนวณค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of safety,  $FS$ ) ของแนวระนาบความชื้นนั้น ๆ ซึ่งค่า  $FS$  นี้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการพิจารณาการซึมลงดินในแนวตั้งและดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ตามสมการ 4.1 และหาค่าหน่วยแรงดึงดูด (Suction stress,  $\sigma'_s$ ) ได้จากสมการที่ 3.7 เมื่อทำการรวมสมการที่ 3.10 เข้ากับสมการที่ 4.1



จะได้ค่าแรงดึงดูดแมทริก (Suction) ที่ตำแหน่งระนาบความชื้น ซึ่งแทนค่าด้วย  $(u_a - u_w)_b$  ตามสมการที่ 4.2

$$(u_a - u_w)_b = -\frac{1}{\alpha} \ln(i/k_s) \quad (4.2)$$

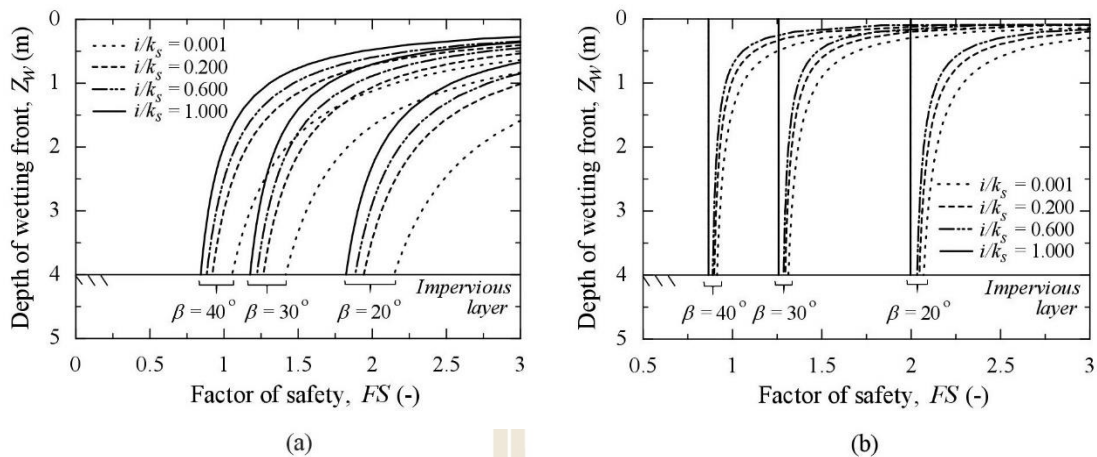
เนื่องจากว่าค่า  $\theta_{wb}$  สามารถประมาณค่าได้จากสมการที่ 4.1 ค่าหน่วยแรงดึงดูดที่ตำแหน่งระนาบความชื้นสามารถเขียนดังสมการที่ 4.3

$$\sigma'_s = \left[ -\frac{1}{\alpha} \ln(i/k_s) \right] \left[ \frac{1}{1 + [-\ln(i/k_s)]^n} \right]^{1-1/n} \quad (4.3)$$

นำค่า  $\sigma'_s$  ที่ทำได้จากสมการที่ 4.3 มาแทนค่าลงในสมการที่ 3.9 ก็จะได้ค่า  $FS$  ที่ระดับความลึกในแนวตั้งของระนาบความชื้น (Depth of the wetting front's advance,  $Z_w$ ) ดังสมการที่ 4.4

$$FS = \frac{c' + [\gamma Z_w \cos^2 \beta - \sigma'_s] \tan \phi'}{\gamma Z_w \sin \beta \cos \beta} = \frac{c' - \sigma'_s \tan \phi'}{\gamma Z_w \sin \beta \cos \beta} + \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \quad (4.4)$$

รูปที่ 4.6(a) และ 4.6(b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วน ความปลอดภัย ( $FS$ ) กับความลึกระนาบความชื้นในแนวตั้ง ( $Z_w$ ) ที่ค่าความรุนแรงฝน ( $i$ ) และ ค่ามุมลาดชันของลาดดิน ( $\beta$ ) ต่าง ๆ ของลาดดินร่วนปนทราย (Silty sand, SM) และลาดดินทรายปน ดินตะกอน (Poorly graded sand with silt, SP-SM) ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ พบว่า ค่าดัชนีการซึม ( $i/k_s$ ) ที่เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ค่า  $FS$  ลดลงเร็วขึ้นตามความลึก  $Z_w$  นอกจากนี้ ยังพบว่าในลาดดิน SP-SM มีอัตราการลดลงของค่า  $FS$  ที่มากกว่าดิน SM และที่ระดับลึกสุดซึ่งค่า  $FS$  ต่ำสุดนั้น ในลาดดิน SP-SM จะได้ค่า  $FS$  ของทุก ๆ ค่าของ  $i/k_s$  และ  $\beta$  จะอยู่ในช่วงค่าที่แคบกว่าในลาดดิน SM



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความปลอดภัยกับความลึกจากความชื้นที่ค่าความรุนแรงฝน และมุมลาดชันลาดดินต่าง ๆ

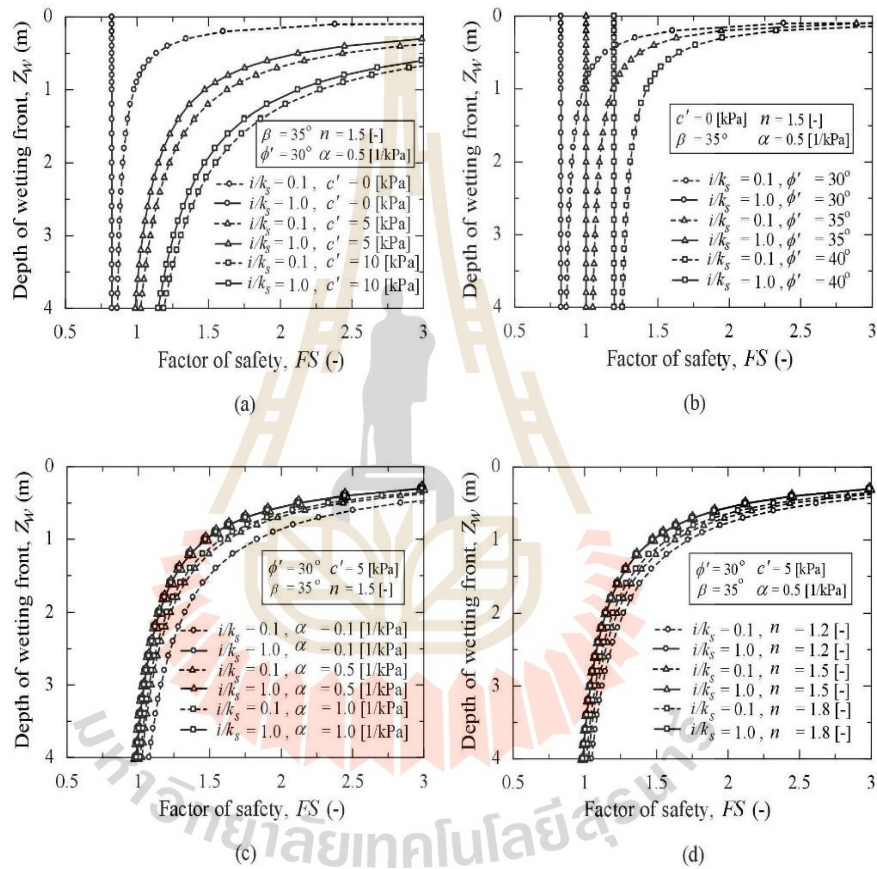
(a) ในลาดดินร่วนปนทราย (Silty sand, SM)

(b) ในลาดดินทรายปนดินตะกอน (Poorly graded sand with silt, SP-SM)

ในการศึกษาอิทธิพลด้านตัวแปรปัจจัยคุณสมบัติดินว่า มีอิทธิพลต่อค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินหรือไม่ อย่างไรนั้น ได้พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $FS$  กับ  $Z_w$  โดยแปรผันค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความเชื่อมแน่นเม็ดดินประสิทธิผล (Effective cohesive strength,  $c'$ ) ค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผล (Effective frictional angle,  $\phi'$ ) พารามิเตอร์หน่วยแรงดึงดูดแมทริก  $\alpha$  และ  $n$  ของ van Genuchten (VG) แสดงดังรูปที่ 4.7(a) ถึง 4.7(d)

โดยรูปที่ 4.7(a) และ 4.7(b) แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง  $FS$  กับ  $Z_w$  โดยแปรผันค่าพารามิเตอร์กำลังของดิน (Strength parameter) คือ ค่าความเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดินประสิทธิผล (Effective cohesion,  $c'$ ) และค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผล (Effective frictional angle,  $\phi'$ ) แสดงผลตามสัญลักษณ์เส้นกราฟที่บ่งชี้ค่าดัชนีการซึม ( $i/k_s$ ) สูง และเส้นกราฟประสำหรับค่า  $i/k_s$  ต่ำ พบว่า ค่ากรณีที่มีค่า  $i/k_s$  ต่ำจะให้ค่า  $FS$  สูงกว่า รูปที่ 2.41(a) แสดงให้เห็นชัดเจนว่าดินที่มีค่า  $c'$  ที่ต่ำกว่า จะทำให้ค่า  $FS$  ลดลงตามความลึก  $Z_w$  อย่างรวดเร็ว ในขณะที่ดินที่มีค่า  $\phi'$  ที่แตกต่างกันนั้นไม่มีผลใด ๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $FS$  กับ  $Z_w$  เพียงแต่ให้เส้นกราฟจะขยับไปด้านข้างเท่านั้น แสดงดังรูปที่ 2.31(b) ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าค่า  $c'$  ที่ต่ำกว่า จะทำให้ค่า  $FS$  ลดลงตามความลึก  $Z_w$  ได้มากกว่า

รูปที่ 4.7(c) และ 4.7(d) แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง  $FS$  กับ  $Z_w$  โดยแปรผันพารามิเตอร์ค่าแรงดึงจุดเมทริกที่เริ่มดึงจุดอากาศเข้ามาในโพรงเม็ดดิน (Air entry value,  $\alpha$ ) และค่าอัตราน้ำไหลออกจากโพรงเม็ดดินเมื่อมีแรงดึงจุดเมทริกเกินกว่าค่า Air entry value,  $n$  ของ van Genuchten (VG) แสดงผลด้วยสัญลักษณ์เส้นกราฟที่บ่งชี้สำหรับค่าดัชนีการซึม ( $i/k_s$ ) สูง และเส้นกราฟประสำหรับค่า  $i/k_s$  ต่ำ พบว่า ในค่ากรณีที่ค่า  $i/k_s \geq 1.0$  (กราฟเส้นทึบ) ตัวแปรพารามิเตอร์  $\alpha$  และ  $n$  ไม่มีผลใด ๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของ  $FS$  กับ  $Z_w$  แต่อย่างใด



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความปลอดภัยกับความลึกกระบวนการความชื้น  
ในลาดดินที่ค่าความรุนแรงฝน และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของดิน

- (a) พารามิเตอร์ความเชื่อมแน่น (Cohesive strength)
- (b) พารามิเตอร์มุมเสียดทานภายใน (Frictional angle)
- (c) พารามิเตอร์  $\alpha$  ของ van Genuchten
- (d) พารามิเตอร์  $n$  ของ van Genuchten

### 4.2.3 ค่าความลึกวิกฤติ

ความลึกวิกฤติ (Critical depth,  $Z_{cr}$ ) คือ ความลึกของแนวระนาบวิบัติในแนวตั้ง ที่ให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 1 พอดี สามารถหาค่าความลึกวิกฤติ ได้จากสมการที่ 4.5 ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าค่าความลึกวิกฤตินี้ถูกนำมาใช้ในเครื่องมือวัดแรงเสียดทานดินกล่อม

$$Z_{cr} = \frac{c'}{\gamma(1-A)\sin\beta\cos\beta} - \frac{\sigma'_s \tan\phi'}{\gamma(1-A)\sin\beta\cos\beta} \quad (4.5)$$

โดยที่  $Z_{cr}$  คือ ความลึกวิกฤติที่ทำให้ค่า  $FS = 1$  พอดี

$A$  คือ ดัชนีเสถียรภาพ (Stability index) มาจากค่าอัตราส่วนระหว่างค่ามุมเสียดทานภายในของดินต่อค่ามุมลาดชันของลาดดิน ( $\tan\phi' / \tan\beta$ )

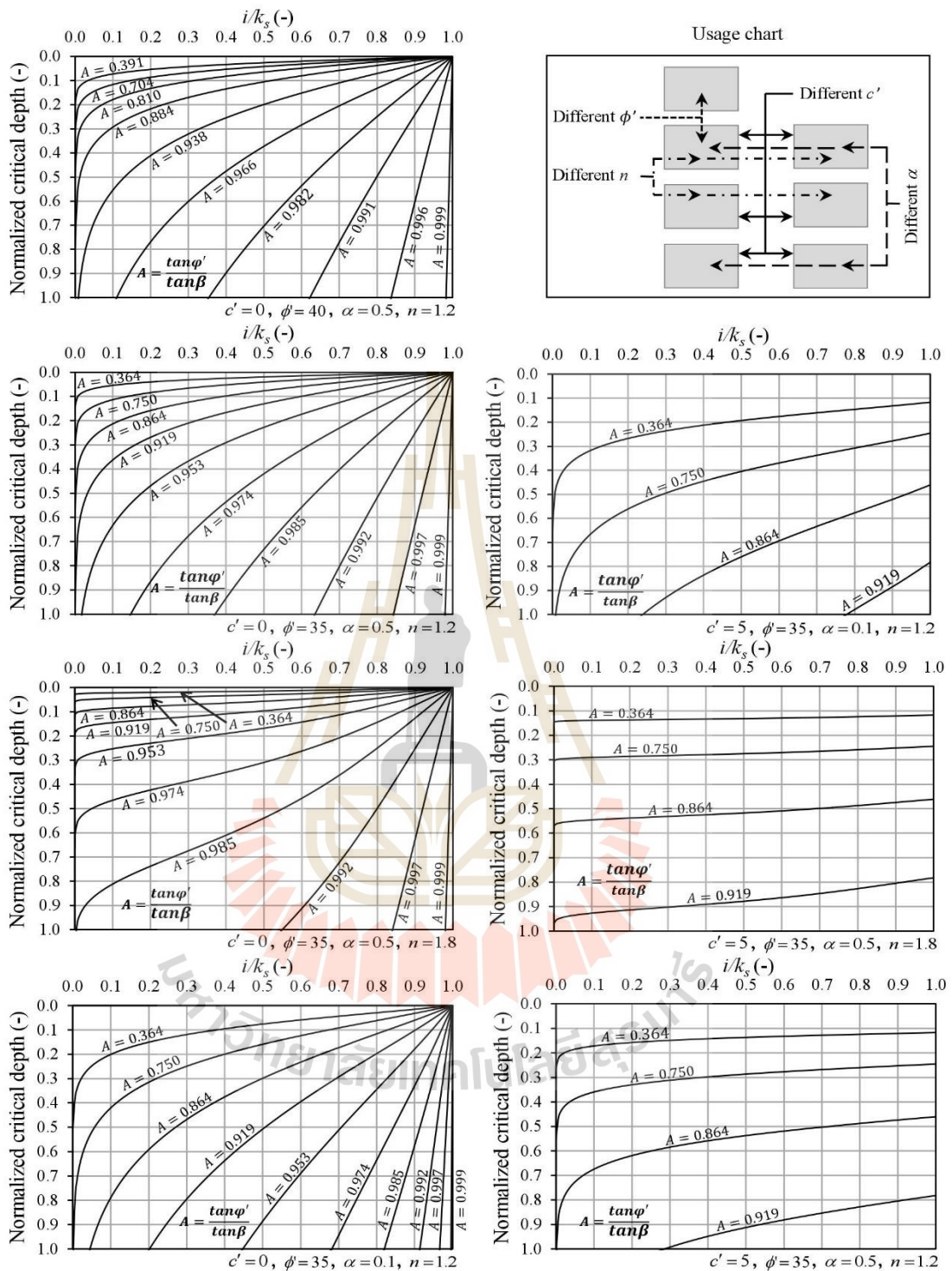
และเพื่อความสะดวกแก่การนำค่าความลึกวิกฤติไปใช้งาน จึงได้ทำการ Normalized ค่าความลึกวิกฤตินี้ด้วยค่าความหนาของชั้นดินทั้งหมดของลาดดินนั้น ๆ ( $Z_t$ ) เมื่อทำการ Normalized ค่า  $Z_{cr}$  ในสมการที่ 4.5 ด้วยค่าความหนาของชั้นลาดดิน ( $Z_t$ ) จะได้ค่าอัตราส่วนความลึกวิกฤติต่อค่าความหนาของลาดดิน ( $Z_{cr} / Z_t$ ) ตามสมการที่ 4.6

$$\frac{Z_{cr}}{Z_t} = \frac{c'}{\gamma Z_t (1-A)\sin\beta\cos\beta} - \frac{\sigma'_s \tan\phi'}{\gamma Z_t (1-A)\sin\beta\cos\beta} \quad (4.6)$$

รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความลึกวิกฤติต่อค่าความหนาของลาดดิน (Normalized Critical depth,  $Z_{cr} / Z_t$ ) กับค่าดัชนีการซึม ( $i / k_s$ ) โดยแปรผันค่าตัวแปรดัชนีเสถียรภาพ ( $A$ ) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์กำลังดิน ( $c'$  และ  $\phi'$ ) และพารามิเตอร์ของ van Genuchten ( $\alpha$  และ  $n$ ) จะเห็นได้ว่าทุกๆ แผนภูมิความสัมพันธ์แสดงให้เห็นว่า ลาดดินที่มีความลาดชันสูง หรือที่มีค่าดัชนีเสถียรภาพต่ำ (ค่า  $A$  ต่ำ) ระบายสมบัติของลาดดินจะเกิดขึ้นในระดับตื้น ๆ (ค่า  $Z_{cr} / Z_t$  ต่ำ)

ในลาดดินเม็ดหยาบ (ดินไม่มีค่าความชื้นแน่น) ที่มีความลาดชันปานกลางซึ่งมีมุมชันของลาดดินสูงกว่าค่ามุมเสียดทานภายในของดินเพียงเล็กน้อย หรือมีค่าดัชนีเสถียรภาพใกล้เคียงกับ 1 จะมีการเลื่อนตัวลงของค่า  $Z_{cr} / Z_t$  อย่างรวดเร็วตามการเพิ่มขึ้นของค่าความรุนแรงฝน ในขณะที่ในลาดดินที่มีค่าความชื้นแน่นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่า  $Z_{cr} / Z_t$  น้อยกว่าเมื่อเพิ่มค่าความรุนแรงฝนถึงแม้ว่าลาดดินเม็ดหยาบที่มีส่วนละเอียดปนจะมีค่าความชื้นแน่นต่ำเพียงค่า  $c' = 5 \text{ kPa}$  ก็ตาม จะมีการตอบสนองต่อค่าดัชนีการซึมค่อนข้างน้อย





รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความลึกวิกฤตต่อค่าความหนาของลาดดิน (Normalized Critical depth,  $Z_{cr}/Z_t$ ) กับค่าดัชนีการซึม ( $i/k_s$ ) ที่ผันแปรกับค่าดัชนีเสถียรภาพ ( $A$ ) และค่าพามิเตอร์กำลังดิน ( $c'$  และ  $\phi'$ ) และพารามิเตอร์ของ van Genuchten ( $\alpha$  และ  $n$ ) ที่แตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาพารามิเตอร์ของ van Genuchten โดยที่ค่า  $\alpha$  (Air entry value) ที่สูงกว่าจะหมายถึง ค่าแรงดึงดูดเมทริกที่เริ่มดึงดูดอากาศ (Air entry suction) และน้ำ (Water entry suction) เข้ามาในโพรงเม็ดดินจะมีค่าต่ำกว่า ส่วนค่า  $n$  ที่สูงแสดงถึงว่าในเนื้อดินมีการกระจายอยู่ของโพรงช่องว่างระหว่างเม็ดดินจำนวนมาก หรือเนื้อดินมีความพรุนสูง นั่นหมายถึงแรงดึงดูดเมทริกจะลดลงน้อยมากถึงเม็ดดินจะมีค่าความชื้นสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้ ดินเม็ดหยาบ (Coarse grain soil) จึงมีค่า  $\alpha$  และ  $n$  สูงกว่าดินเม็ดละเอียด (Fine grain soil) โดยค่า  $\alpha$  ที่สูงขึ้นจะทำให้ค่า  $Z_{cr}/Z_t$  อยู่ในระดับต่ำกว่า ส่วนค่า  $n$  ที่สูงขึ้นค่า  $Z_{cr}/Z_t$  จะอยู่ในระดับที่ต่ำกว่า (เส้นปาน) ซึ่งอิทธิพลของ ค่า  $\alpha$  และ  $n$  จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า  $Z_{cr}/Z_t$  ที่ชัดเจนมากกว่าในลาดดินที่มีความเชื่อมแน่น

#### 4.2.4 สรุปอภิปรายผล

ผลการศึกษาพฤติกรรมการณ์การซึมของน้ำฝนในดินเนื้อเดียวที่มีส่วนละเอียดปน ได้ออกแบบจำลองการทดสอบการซึมในห้องปฏิบัติการแบบ 1 มิติในแท่งดินทดสอบ (Column test) โดยใช้ แท่งดินร่วนปนทราย (Silty sand, SM) และแท่งดินทรายปนดินตะกอน (Poorly graded sand with silt, SP-SM) แท่งดินทดสอบได้ถูกติดตั้งเครื่องมือวัดการตอบสนองเชิงอุทกวิทยาตามความลึก 5 ระดับ เพื่อนำมาวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินต้นด้วยวิธีลาดดินอนันต์ ภายใต้สภาวะรับน้ำฝนที่ค่าความรุนแรงฝนต่าง ๆ สรุปได้ดังนี้

1) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\theta_{wb}$  และค่า  $i/k_s$  เป็นไปอย่างมีเอกภาพสมบูรณ์ในทิศทางเดียวกันทั้งในแท่งดินทดสอบ SM และ SP-SM column ที่เป็นดินเม็ดหยาบที่มีส่วนละเอียดเจือปนในเนื้อดิน

2) อิทธิพลของพารามิเตอร์กำลัง (Strength parameter) ได้แก่ ค่าความเชื่อมแน่นเม็ดดินประสิทธิผล (Effective cohesive strength,  $c'$ ) และค่ามุมเสียดภายในเม็ดดินประสิทธิผล (Effective internal frictional angle,  $\phi'$ ) มีอิทธิพลอย่างมากต่อการลดลงของค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of safety,  $FS$ ) ตามความลึกแนวตั้งของลาดดินที่มีสาเหตุมาจากการเคลื่อนตัวของโซนดินเปียก (Wetting front's advance) ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์ของ van Genuchten ( $\alpha, n$ ) มีผลต่อค่า  $FS$  น้อยกว่า

3) ลาดดินที่มีค่าดัชนีการซึมเท่ากัน ในลาดดินที่มีค่าพารามิเตอร์กำลัง  $c'$  และ  $\phi'$  ต่ำกว่า จะเกิดระนาบวิกฤติในระดับที่ต่ำกว่าในลาดดินที่มีค่าพารามิเตอร์กำลัง  $c'$  และ  $\phi'$  สูงกว่า

4) ในลาดดินที่ไม่มีค่าความเชื่อมแน่นเม็ดดิน และมีความลาดชันอยู่ระดับน้อยถึงระดับปานกลาง หรือลาดดินมีมุมลาดชันที่ไม่มากเกินไปกว่าค่ามุมเสียดทานภายในของดิน ปัจจัยที่ส่งผลต่อการวิกฤติของลาดดินระดับต้น คือ ค่าความชื้นผ่านได้ของดินในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated



permeability,  $k_s$ ) และค่าความรุนแรงฝน (Rainfall intensity,  $i$ ) ที่นำมาเทียบค่าเป็นค่าดัชนีการซึม นั่นเอง

สรุปได้ว่าส่วนละเอียดที่เจือปนอยู่ในดินเม็ดหยาบที่ทำให้ลาดดินมีค่าความชื้นแน่นเป็นการเพิ่มกำลังดินให้สามารถช่วยลดอิทธิพลของความรุนแรงฝนที่ส่งผลต่อการลดลงของค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของแนวระนาบวิบัติในลาดดินได้ดีกว่าลาดดินที่ไม่มีค่าความชื้นแน่น กล่าวคือ ความชื้นแน่นเม็ดดินช่วยเพิ่มเสถียรภาพลาดดินต้นในสภาวะฝนตกได้ด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าค่าพารามิเตอร์กำลังดิน  $c'$  และ  $\phi'$  มีอิทธิพลต่อค่าเสถียรภาพลาดดินต้นในสภาวะฝนตกมากกว่าค่าพารามิเตอร์ของ van Ganuchten  $\alpha$  และ  $n$

### 4.3 ผลการทดสอบการซึมในลาดดินที่มีพืชปกคลุมดิน

เนื่องจากว่าลาดดินตอนบน (Top section) มีค่าความหนาแน่นรากต่อปริมาตรดิน (Root density) น้อยกว่าลาดดินตอนอื่น ๆ อีกทั้งอยู่ตอนบนสุดที่เป็นขอบเขตกล่องทดสอบ (Boundary) จึงไม่สามารถนำข้อมูลผลการทดสอบมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกันได้ ดังนั้น สำหรับการทดสอบชุดที่ 1 จึงนำเสนอผลการทดสอบเฉพาะในลาดดินตอนกลาง (Middle section) กับลาดดินตอนล่าง (Lower section) เท่านั้น สำหรับการทดสอบที่ 2 นั้น เนื่องจากว่าเกิดความเสียหายของหัวอ่านความชื้นจำนวนมาก ทำให้ผู้วิจัยตัดสินใจใช้หัวอ่านความชื้นที่ยังใช้งานได้มาติดตั้งเฉพาะตอนกลาง (Middle section) ของกล่องลาดดินเท่านั้น

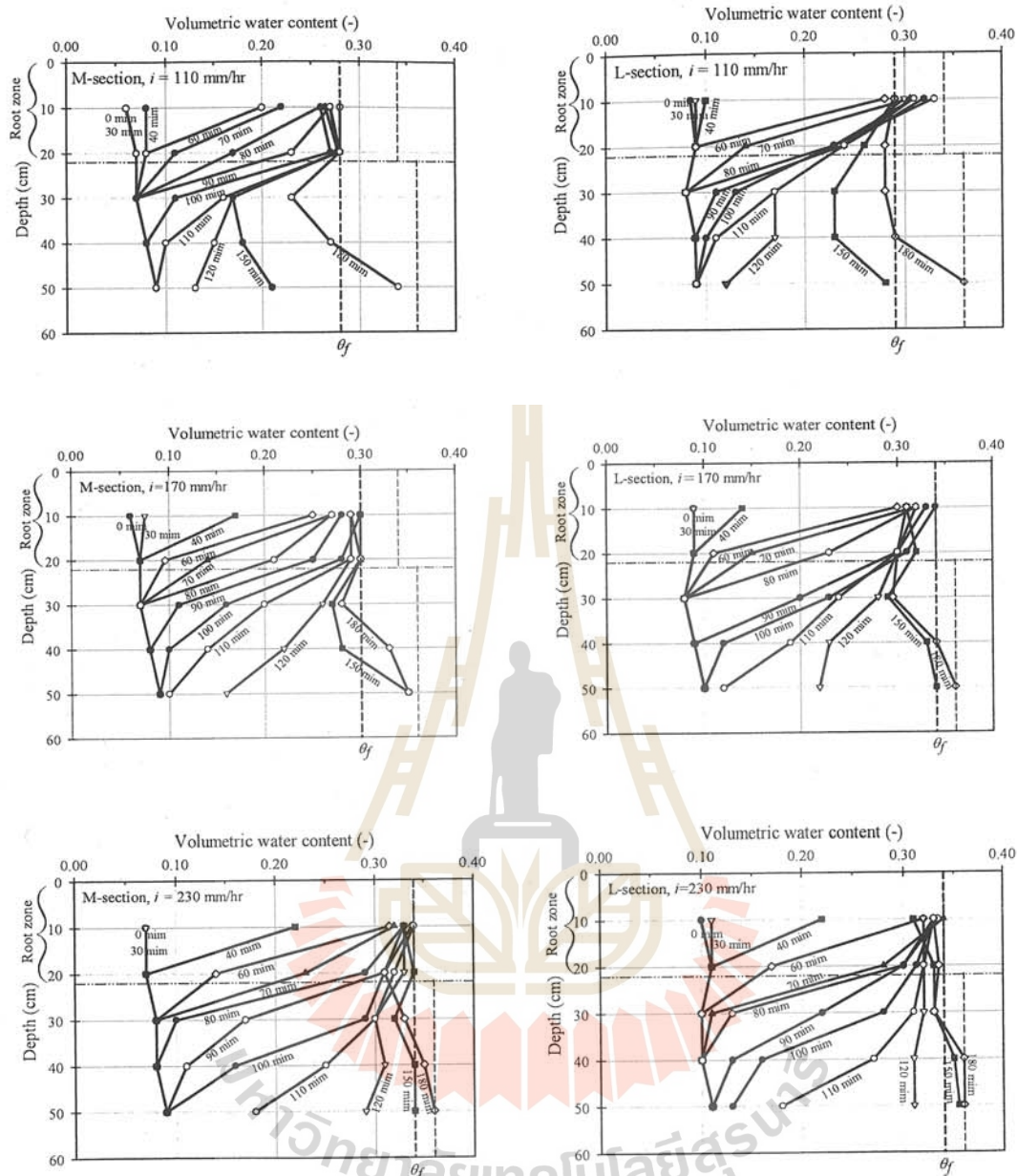
#### 4.3.1 พฤติกรรมการซึมในกล่องลาดดินที่มีพืชปกคลุมดิน (Vegetation slope box test)

รูปที่ 4.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นตามความลึกของลาดดินใน ชุดทดสอบที่ 1 เปรียบเทียบการซึมระหว่างหน้าตัดลาดดินตอนกลาง (M-section) กับหน้าตัดลาดดินตอนล่าง (L-section) พบว่า การเปลี่ยนแปลงความชื้นตามความลึกไม่มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด ไปที่ความชื้นสุดท้ายของขั้นตอนการซึมของน้ำฝน ( $\theta_f$ ) ในกรณีที่ความชื้นแสดงระนาบเปียกอย่างชัดเจน ดังเช่นที่ปรากฏในลาดดินเนื้อเดียวกัน เราจะเรียกความชื้นนี้ว่า ความชื้นหลังระนาบเปียก ( $\theta_{wb}$ ) ซึ่งแตกต่างจากผลการทดสอบในลาดดินเนื้อเดียวของ Chinkulkijniwat et al. (2016) และ Chinkulkijniwat et al. (2019) ที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นตามความลึกเกิดขึ้นทันทีทันใดและปรากฏค่าความชื้นหลังระนาบเปียกชัดเจนและมีค่าคงที่ตลอดการทดสอบ และยังพบว่าในดินเปล่าได้ดินรากพืชก็ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นแบบทันทีทันใดเช่นกัน ทั้งนี้ สันนิษฐานว่าการเปลี่ยนแปลงความชื้นแบบเป็นช่วงกว้างที่น่าจะเป็นเพราะว่าทั้งดินรากพืชและดินเปล่าได้ชั้นดินรากพืชมีช่วงการเปลี่ยนแปลง แรงดึงน้ำและความชื้นในเส้นคุณลักษณะการอุ้มน้ำกว้าง การเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นแบบผันผวนสังเกตได้ชัดเจนในลาดดินตอนล่างที่ระดับความลึก 10 เซนติเมตรจากผิวหน้า

ลาดดินที่ค่าความรุนแรงฝน 110 และ 170 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง เนื่องจาก อิทธิพลของการไหลออกด้านข้าง (Lateral flow) และตรงปลายกล่องทดสอบที่หุ้มผนังกล่องทดสอบด้วย Geotextile เกิด Capillary barrier อันเนื่องมาจากความแตกต่างระหว่างความชื้นผ่านได้ในดินรากพืชและ geotextile

พฤติกรรมการซึมของน้ำฝนในลาดตอนกลางกับลาดดินตอนล่างที่แตกต่างกัน สะท้อนให้เห็นถึงอิทธิพลของการไหลด้านข้าง โดยน้ำฝนที่ซึมลงในแนวตั้งแล้วยังจะไหลออกด้านข้างจากลาดดินตอนกลางไปยังลาดดินตอนล่างด้วย (การซึม 2 มิติ) ซึ่งอิทธิพลจากการไหลด้านข้างจะเห็นเด่นชัดในการทดสอบที่ความรุนแรงฝนเท่ากับ 110 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบผลการทดสอบชุดที่ 1 ผิวหน้าลาดดินมีใบพืชปกคลุม (Test series I-with leaves) กับผลการทดสอบชุดที่ 2 ผิวหน้าลาดดินไม่มีใบพืชปกคลุม (Test series II-without leaves) จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าใบพืชที่ปกคลุมหน้าลาดดินมีส่วนช่วยดักจับปริมาณน้ำฝนที่จะตกลงสู่หน้าลาดดินได้ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ใบพืชช่วยลดค่าความรุนแรงฝนที่จำลองสู่หน้าลาดดินให้ลดน้อยลงเหลือเป็นค่าความรุนแรงฝนสุทธิ (Net rainfall intensity) กลไกการดักจับน้ำฝนของใบพืชจะเห็นได้ชัดเจนในการทดสอบที่ค่าความรุนแรงฝนเท่ากับ 110 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงโดยช่วยลดทั้งค่าความชันการซึมสูงสุดของจุดพักตัวและลดอัตราการซึมของน้ำฝนลงสู่ลาดดินด้วย ในขณะที่การทดสอบที่ค่าความรุนแรงฝนเท่ากับ 230 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงซึ่งสูงกว่าค่าความชื้นผ่านได้ของชั้นดินที่มีรากพืชอย่างมาก กลไกการดักจับของใบพืชจะช่วยชะลออัตราการซึมของน้ำฝนในลาดดินเท่านั้น แต่ไม่สามารถลดค่าความชันสุดท้ายของชั้นตอนการซึมของน้ำฝนได้



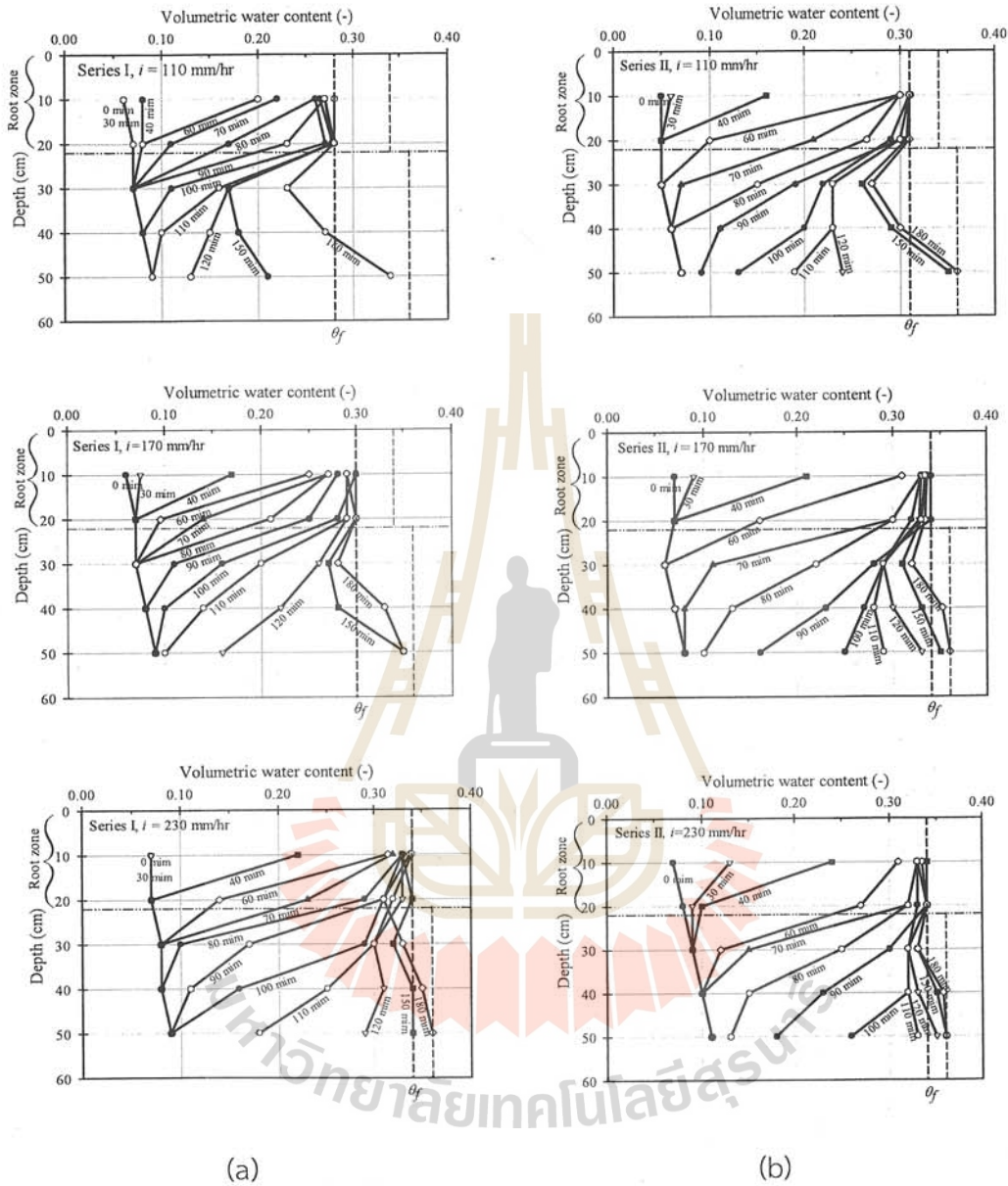
(a)

(b)

รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นตามความลึกของลาดดินในชุดทดสอบที่ 1 (ผิวน้ำลาดดินมีใบพืชปกคลุม) เปรียบเทียบตามตำแหน่งของลาดดิน

(a) หน้าตัดลาดดินตอนกลาง (M-section)

(b) หน้าตัดลาดดินตอนล่าง (L-section)



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบผลการทดสอบชุดที่ 1 กับการทดสอบชุดที่ 2 ที่ความรุนแรงฝน 110, 170 และ 230 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

(a) ผีพหน้าลาดดินมีใบพืชปกคลุม (With leaves)

(b) ผีพหน้าลาดดินไม่มีใบพืชปกคลุม (Without leaves)

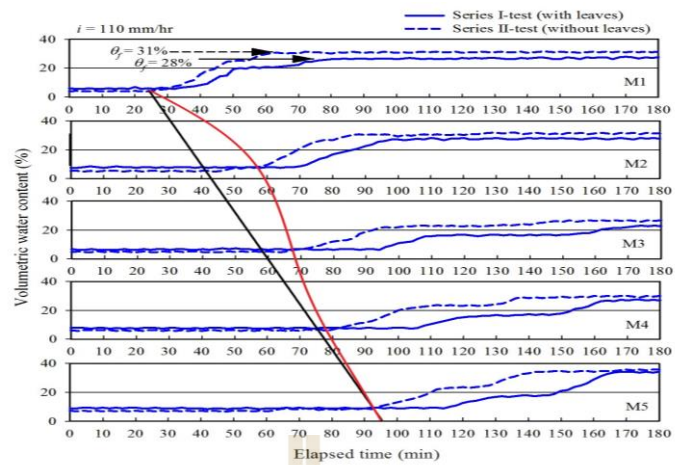


รูปที่ 4.11(a), 4.11(b) และ 4.11(c) แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นตามเวลาที่อ่านค่าได้จากหัวอ่านความชื้นในลาดดินตอนกลาง ของผลการทดสอบชุดที่ 1 (มีใบ-กราฟเส้นทึบ) และผลการทดสอบชุดที่ 2 (ตัดใบ-กราฟเส้นประ) ที่ค่าความรุนแรงฝน 110, 170 และ 230 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง จุดสูงสุดของเส้นกราฟแสดงถึงค่าความชื้นสุดท้ายของขั้นตอนการซึม ( $\theta_f$ ) โดยที่ทุกผลการทดสอบพบว่า ค่าความชื้นจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามเวลา ไม่เพิ่มขึ้นทันทีทันใด และยังพบว่า ค่าความชื้นสุดท้ายของขั้นตอนการซึมจะแปรผันตามค่าความรุนแรงฝนสุทธิด้วย

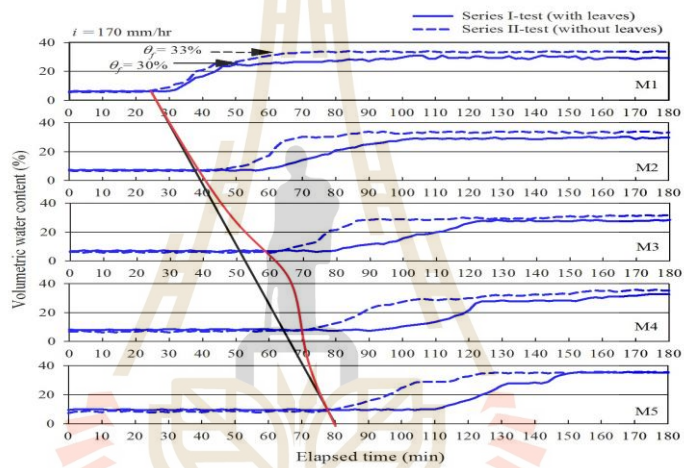
เส้นตรงทึบสีดำที่ลากทแยงจากจุดที่ค่าความชื้นเริ่มเพิ่มสูงขึ้นตามเวลาจากตัววัดความชื้น M1 และ M5 จะให้ค่าความชื้นที่แสดงถึงอัตราการซึมของน้ำฝนเฉลี่ยในลาดดิน โดยพิจารณาจากค่าความชื้นของเส้นสีดำจากผลการทดสอบชุดที่ 2 (ตัดใบ) ซึ่งไม่มีการดักจับน้ำฝนลงสู่ลาดดิน ถ้าเส้นมีความชันมากแสดงว่ามีค่าอัตราการซึมเฉลี่ยมาก พบว่าที่ค่าความรุนแรงฝน 170 และ 230 จะมีอัตราการซึมเฉลี่ยมากกว่าการทดสอบที่ค่าความรุนแรงฝน 110 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ในขณะที่ค่าความรุนแรงฝน 170 กับ 230 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงจะมีอัตราการซึมเฉลี่ยเท่ากัน ซึ่งความรุนแรงฝนดังกล่าวมีค่ามากกว่าความซึมผ่านได้ของดินรากพืช

เส้นโค้งทึบสีแดงที่ลากเชื่อมจุดที่ค่าความชื้นเริ่มเพิ่มสูงขึ้นตามเวลาของ ตัววัดความชื้นแต่ละตัว แสดงการหน่วงของการซึมที่ตำแหน่งต่างๆ โดยที่ค่าความรุนแรงฝน 110 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงมีการหน่วงของการซึมที่หัวอ่านความชื้น M2, M3 และ M4 สันนิษฐานว่าเป็นผลมาจากไหลด้านข้าง (Lateral flow) อันเป็นผลจากความลาดของค่าแรงดึงดูดแมทริก (Suction gradient) ที่สภาวะความชื้นต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่าการหน่วงที่ตำแหน่ง M3 และ M4 มีค่าลดลงอันเป็นผลจากความชื้นเริ่มต้นที่ตำแหน่ง M4 มีค่ามากกว่าที่ M3 และที่ M3 มากกว่า M2 สำหรับความรุนแรงฝนที่ 170 และ 230 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงพบว่าการหน่วงของการซึมมีค่าลดลงตามความรุนแรงฝนที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าเมื่อความรุนแรงฝนเพิ่มขึ้น การซึมในแนวตั้งมีอิทธิพลสูงขึ้น

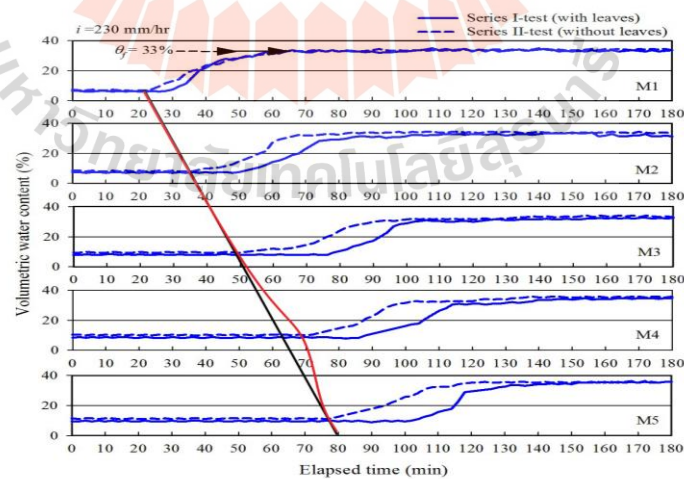




(a)



(b)



(c)

รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นกับเวลาของลาดดินตอนกลาง  
(a) ที่ความรุนแรงฝน 110 (b) 170 และ (c) 230 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

ค่าความชื้นสุดท้ายของขั้นตอนการซึม ( $\theta_f$ ) ของชั้นดินที่มีรากพืชที่อ่านค่าได้จาก หัววัดความชื้น M1 และ M2 ส่วนค่าความชื้นสุดท้ายของขั้นตอนการซึมของชั้นดินเปล่าที่อ่านได้จาก หัววัดความชื้น M3, M4 และ M5 ของทั้งชุดการทดสอบชุดที่ 1 (มีใบ) และการทดสอบชุดที่ 2 (ตัดใบ) ที่ค่าความรุนแรงฝน 110, 170 และ 230 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ส่วนค่าความชื้นสุดท้ายของ ขั้นตอนการซึมที่ประมาณการนั้น สามารถคำนวณหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความรุนแรงฝน และค่าความชื้นดิน ( $k$ -function) ของชั้นดินนั้นๆ การทดสอบที่ค่าความรุนแรงฝน 110 มิลลิเมตร ต่อชั่วโมงจะอ่านได้ค่าความชื้นสุดท้ายของขั้นตอนการซึมเท่ากับ 31% และ 24% ของชั้นดินรากพืช และชั้นดินเปล่าตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับความชื้นที่ประมาณจาก  $k$ -function คือ 31.1% และ 23.5% ของชั้นดินรากพืชและชั้นดินเปล่าตามลำดับซึ่งมีค่าสอดคล้องกันอย่างมาก อย่างไรก็ตามการ ทดสอบที่ความรุนแรงฝน 170 และ 230 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงซึ่งตามทฤษฎีจะให้ค่าความรุนแรงฝน สุทธิ (Net rainfall intensity) ที่ซึมสู่ลาดดินไม่เกินค่าความซึมผ่านได้ของชั้นดินรากพืชซึ่งเท่ากับ 140 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงจะได้ค่าความชื้นสุดท้ายของขั้นตอนการซึมที่อ่านได้จากการทดสอบแตกต่าง จากค่าประมาณการอย่างมาก ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความชื้นสุดท้ายของขั้นตอนการซึม

Test	Root soil (%)		Bare soil (%)	
	Measured $\theta_f$	Approximated $\theta_f$	Measured $\theta_f$	Approximated $\theta_f$
I/110	27	-	17	-
I/170	30	-	28	-
I/230	34	-	32	-
II/110	31	31.1	24	23.5
II/170	33	33.0	29	25.7
II/230	33	33.0	32	25.7

Note: Due to rainfall interception, net rainfall intensity was not equal to the applied rainfall. Hence, approximation of  $\theta_f$  in the test series I was not considered.

การที่ค่าความชื้นที่อ่านได้จากการทดสอบด้วยความรุนแรงฝน 170 และ 230 มิลลิเมตร ต่อชั่วโมงมีค่าสูงกว่าที่ประมาณการอย่างมากนี้เป็นผลมาจากอิทธิพลของ preferential flow path ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Xu et al (2011) ที่พบว่าในสภาวะฝนตกหนักจะกระตุ้นให้เกิด

preferential flow ในชั้นดินรากพืช ทำให้น้ำฝนซึมไหลจากชั้นดินรากพืชลงสู่ชั้นดินเปล่าด้านล่างได้รวดเร็วมากยิ่งขึ้น จนทำให้ค่าความชื้นของดินชั้นโซนใต้รากพืชเพิ่มสูงขึ้น

#### 4.3.2 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินรากพืช

ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินที่มีชั้นดินที่แตกต่างกัน หาได้จากสมการที่ 4.7 โดยคำนวณจากพฤติกรรมกรรมกรซึมของน้ำฝนในลาดดินสภาพผิวหน้าไม่มีพืชปกคลุม (ตัดใบ) ที่ลาดดินเอียงทำมุม 20 องศา อ่านค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นตามเวลาและความลึก กำหนดค่าพารามิเตอร์กำลังดินของดินเม็ดหยาบและพารามิเตอร์ van Genuchten (VG) ตามตารางที่ 3.3 สมมติการยึดเกาะเนื่องจากรากพืชเท่ากับ 1.0 kPa จะทำให้ชั้นดินรากพืชมีค่าความเชื่อมแน่นเม็ดดินประสิทธิผล (Effective cohesion,  $c'$ ) เพิ่มเติมเข้ามาในพจน์ที่ 2 ของสมการที่ 4.7 เนื่องจากในลาดดินที่มีพืชปกคลุม ความรุนแรงฝนสุทธิตจะมีค่าแตกต่างจากความรุนแรงฝนที่กระทำต่อหน้าลาดดิน ทำให้เกิดความยุ่งยากในการหาความรุนแรงฝนสุทธิ ดังนั้นเพื่อให้สามารถดำเนินการเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนความปลอดภัยที่ได้จากการอ่านความชื้นโดยตรงกับอัตราส่วนความปลอดภัยที่ได้จากการประมาณความชื้นด้วยความรุนแรงฝนสุทธิกับ  $k$ -function ด้วยเหตุนี้จึงใช้การคำนวณอัตราส่วนความปลอดภัยจากความชื้นที่อ่านจากการทดสอบชุดที่ 2 (ตัดใบ)

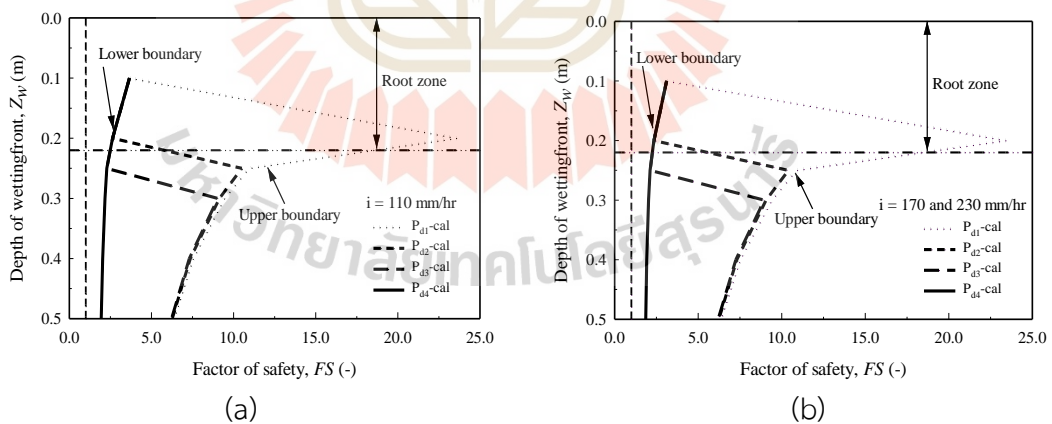
$$FS(z) = \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} + \frac{c' - \sigma^s \tan \phi'}{G \sin \beta \cos \beta} \quad (4.7)$$

- เมื่อ  $FS(z)$  คือ ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ความลึก  $z$  ใต้ลาดดินที่มีพืชปกคลุมดิน
- $c'$  คือ ค่าหน่วยแรงยึดเกาะของเม็ดดินประสิทธิผล (Effective soil cohesion)
- $\phi'$  คือ ค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผลของดิน (Effective soil frictional angle)
- $\beta$  คือ มุมลาดชันของลาดดินทดสอบ (Slope angle) ในทุกการทดสอบกำหนดให้  $\beta = 20^\circ$
- $\sigma^s$  คือ ค่าหน่วยแรงดึงดูด (Suction stress) หาได้จากสมการที่ 3.7 และ 3.10
- $G$  คือ น้ำหนักดินที่กดทับอยู่เหนือระนาบวิถีในแนวตั้งที่ความลึก  $z$  สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ ตามสมการที่ 4.8

$$G = \int_0^z (\gamma_s + \gamma_w \theta) dz \quad (4.8)$$

- เมื่อ  $\gamma_s$  คือ ค่าน้ำหนักดินแห้งต่อปริมาตร (Unit weight of dry soil)  
 $\gamma_w$  คือ ค่าน้ำหนักน้ำต่อปริมาตร (Unit weight of water)  
 $\theta$  คือ ค่าความชื้นในดิน (Volumetric water content)

รูปที่ 4.12 แสดงค่าอัตราส่วนความปลอดภัยตามความลึกจากสมมติฐานการซึมของน้ำฝนด้วยค่าความชื้นที่ประมาณการได้จากค่าความรุนแรงฝนสุทธิและ  $k$ -function ของลาดดินที่มีพืชปกคลุมดินสภาพผิวหน้าลาดดินไม่มีใบพืช (ตัดใบ) ที่ค่าความรุนแรงฝน 110, 170 และ 230 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง แต่ละเส้นแสดงเส้นค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่เกิดจากระนาบความชื้นซึมถึงชั้นความลึกต่างๆในลาดดิน เกิดเป็นช่วงค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของค่าความชื้นที่เพิ่มสูงขึ้นจากความชื้นจุดเริ่มต้นถึงความชื้นสุดท้ายของชั้นตอนการซึมระหว่างเส้นขอบเขตบน (Upper  $FS$  boundary line) และเส้นขอบเขตล่าง (Upper  $FS$  boundary line) ทั้งนี้ เส้นขอบเขตค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของค่าความรุนแรงฝน 170 และ 230 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงจะเป็นเส้นเดียวกันเพราะว่าน้ำฝนซึมลงสู่ลาดดินด้วยค่าความรุนแรงฝนสุทธิที่เท่ากันซึ่งไม่เกินค่าความซึมผ่านได้ของลาดดินรากพืช



รูปที่ 4.12 เส้นขอบเขตค่าอัตราส่วนความปลอดภัยประมาณการ

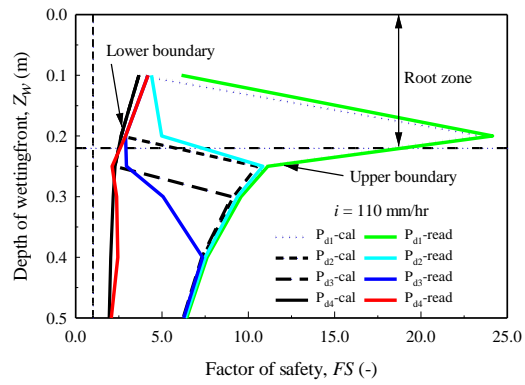
(a) ค่าความรุนแรงฝน 110 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

(b) ค่าความรุนแรงฝน 170 และ 230 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

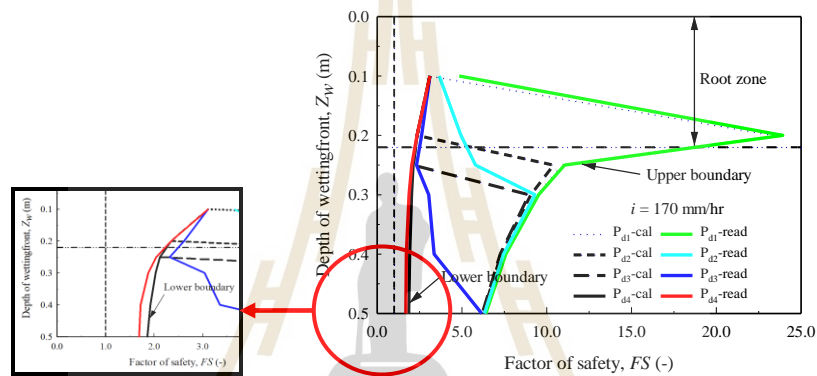
รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความปลอดภัยซึ่งคำนวณจากค่าความชื้นในลาดดินที่มีพืชปกคลุม สภาพผิวหน้าลาดดินไม่มีใบพืช (ตัดใบ) ที่อ่านค่าได้จากผลการทดสอบ (เส้นสีต่างๆ) กับค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ประมาณจาก  $k$ -function (เส้นสีดำ) ตามเวลาที่น้ำฝนซึมลงสู่ลาดดินที่ระดับความลึกต่างๆ ที่ค่าความรุนแรงฝน 110, 170 และ 230 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง พบว่าที่ค่าความรุนแรงฝน 110 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงจะมีเส้นขอบเขตของอัตราส่วนความปลอดภัยตรงกัน แต่การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนอัตราความปลอดภัยจะไม่เกิดแบบทันทีทันใด ดังที่ได้จากการนำความชื้นจากการประมาณด้วย  $k$ -function ไปคำนวณอัตราส่วนความปลอดภัย ในขณะที่การทดสอบที่ค่าความรุนแรงฝนสูงๆ ที่ 170 และ 230 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงจะได้ขอบเขตอัตราส่วนความปลอดภัยจากผลการทดสอบ (เส้นสีต่างๆ) ไม่สอดคล้องกันกับค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่คำนวณจากความชื้นที่แปลงมาจาก  $k$ -function (เส้นสีดำ) โดยเฉพาะที่ขอบเขตล่างเส้นสีจะให้ขอบเขตอัตราส่วนความปลอดภัยที่ต่ำกว่าเส้นสีดำ เป็นเพราะผลจากการเกิดการไหลแบบ preferential flow ทำให้เกิดค่าความชื้นสุดท้ายของชั้นตอนการซึมสูงกว่าค่าความชื้นที่ประมาณการจาก  $k$ -function

ดังนั้น ในการคำนวณหาอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินที่มีพืชปกคลุมดินภายใต้สภาวะฝนตกหนัก หากใช้ค่าความชื้นในลาดดินที่ประมาณการจาก  $k$ -function ด้วยค่าความรุนแรงฝนสุทธิเพียงอย่างเดียว โดยไม่ได้คำนึงถึงอิทธิพลการเกิด preferential flow จะได้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่สูงกว่าความเป็นจริง (Overestimation) นอกจากนี้ ยังพบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นบริเวณกว้างทำให้ระนาบวิบัติจะมีลักษณะเป็นบริเวณมากกว่า เป็นแนวระนาบวิบัติที่สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Shoa et al. (2017)

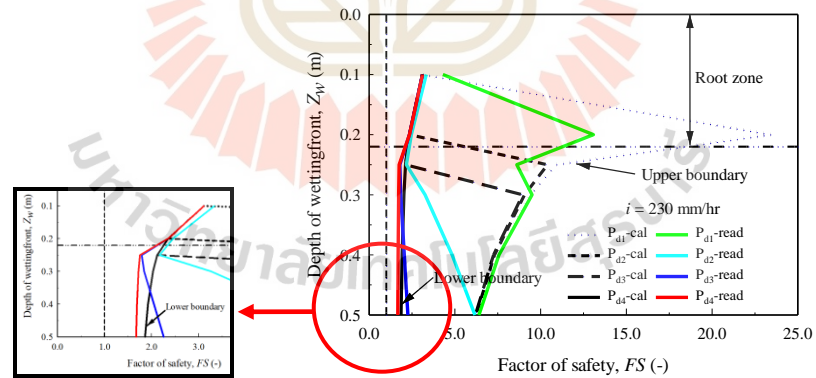




(a)



(b)



(c)

รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจากผลทดสอบกับเส้นขอบเขต  
 (a) ค่าความรุนแรงฝน 110 (b) 170 และ (c) 230 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

### 4.3.3 สรุปอภิปรายผล

ผลการศึกษาพฤติกรรมการณ์การซึมของน้ำฝนในลาดดินไม่เป็นเนื้อเดียวกันที่เกิดจากพืชปกคลุมดินในห้วงปฏิบัติการ ด้วยแบบจำลองกล่องลาดดินที่ปลูกพืชที่ผิวหน้าลาดดินจะได้ชั้นดินที่แตกต่างกันคือ ชั้นดินรากพืช และชั้นดินเปล่าที่รากพืชขนไชลงไปไม่ถึง ภายใต้สภาวะรับน้ำฝนที่ค่าความรุนแรงฝนต่าง ๆ กำหนดเงื่อนไขสภาพผิวหน้าลาดดินให้มีใบพืชปกคลุมหน้าดินและไม่มีใบพืชปกคลุม เพื่อประเมินการดักจับของใบพืชที่ส่งผลต่อค่าความรุนแรงฝนสุทธิที่ซึมสู่หน้าลาดดินพร้อมติดตามการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นที่ระดับความลึกต่าง ๆ ตามเวลา ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการณ์การซึมที่ได้จากผลทดสอบ สามารถนำไปวิเคราะห์หาผลกระทบต่อค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินต้นได้ สรุปผลการศึกษา ดังนี้

1) การซึมของน้ำฝนภายใต้ความรุนแรงฝนต่ำ (ไม่สูงกว่าค่าความซึมผ่านได้ของดินชั้นที่มีรากพืช) และดินมีความชื้นเริ่มต้นต่ำ พฤติกรรมการณ์การซึมจะได้รับอิทธิพลจากความลาดแรงดึงดูดแมทริก (Suction gradient) โดยน้ำฝนจะซึมลงในแนวตั้ง พร้อมกับไหลด้านข้าง (Lateral flow) จึงทำให้อัตราการซึมลงในแนวตั้งช้ากว่าการซึมภายใต้ความรุนแรงฝนสูง

2) ผลของการไหลด้านข้างทำให้เกิดการพักตัว (Lag) ของระนาบความชื้น (Wetting front) ดังนั้น ในการจำลองการไหลในดินรากพืช (Root-soil zone) จำเป็นต้องใช้การจำลองด้วย 2D model เมื่อความรุนแรงฝนต่ำ (ไม่สามารถใช้การจำลองด้วย 1D model เช่น Hydrus มาทำนายการซึมได้)

3) การไหลด้านข้างและการพักตัวของระนาบความชื้นจะลดลง เมื่อลาดดินที่มีพืชปกคลุมดิน (Vegetation soil slope) ได้รับน้ำฝนที่มีความรุนแรงฝนสูงมากขึ้น

4) ในสภาวะฝนตกหนัก (Heavy rainfall) เกินขีดจำกัดการดักจับของใบพืชคลุมดินหน้าลาดดินชั้นบนที่เนื้อดินรากพืช (Root-soil zone) จะได้รับความรุนแรงฝนสุทธิ (Net rainfall intensity) สูงขึ้นด้วย สามารถทำให้เกิดการไหลแบบ preferential flow ส่งผลให้ความชื้นสุดท้ายของระยะการซึม (Infiltrated water content,  $\theta_f$ ) ในชั้นดินเปล่า (Bare soil zone) ที่อยู่ใต้ชั้นดินรากพืชจะมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการประมาณด้วย  $k$ -function และความแตกต่างนี้มีมากขึ้นเมื่อความรุนแรงฝนสูงขึ้น

5) การซึมของน้ำฝนในลาดดินที่มีพืชปกคลุมดินจะแสดงความชื้นสุดท้ายของระยะการซึม ( $\theta_f$ ) เสมอ ไม่ว่าจะเป็นการซึมแบบโซนแคบ (Sharp wetting front) หรือการซึมแบบโซนกว้าง (No clear wetting front) หรือการซึมแบบมี preferential flow ในสภาวะฝนตกหนัก

6) ที่ค่าความรุนแรงฝนต่ำซึ่งไม่สูงเกินค่าความซึมผ่านได้ของชั้นดินที่มีรากพืช ( $i < k$ ) และไม่เกิด preferential flow สามารถประมาณความชื้นในลาดดินได้จาก  $k$ -function แม้ว่าการซึมนั้นจะไม่ปรากฏระนาบความชื้นที่ชัดเจน (No clear wetting front) ก็ตาม

7) ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่คำนวณได้จากพฤติกรรมการณ์ซึมของน้ำฝนในลาดดินที่มีพืชปกคลุมดินสอดคล้องกับขอบเขตอัตราส่วนความปลอดภัยที่ประมาณการได้จาก  $k$ -function เมื่อความรุนแรงฝนสุทธิไม่เกินค่าความซึมผ่านได้ของดินรากพืชเท่านั้น

8) ในสภาวะฝนตกหนักที่ค่าความรุนแรงฝนสุทธิสูงกว่าค่าความซึมผ่านได้ของดินรากพืช อิทธิพลของ preferential flow path จะทำให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยไม่สอดคล้องกับขอบเขตอัตราส่วนความปลอดภัยที่ประมาณการได้จาก  $k$ -function โดยให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ต่ำกว่าค่าขอบเขตล่างของค่าอัตราส่วนความปลอดภัย และแนวระนาบวิบัติเป็นบริเวณกว้างกว่า



## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาพฤติกรรมการซึมของน้ำฝนในแท่งดินเนื้อเดียวกันและในลาดดินที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันที่เกิดจากพืชปกคลุมดินผ่านแบบจำลองการทดสอบการซึมในห้องปฏิบัติการ โดยนำเสนอผลการวิจัยออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นผลการทดสอบการซึมในแท่งดินทดสอบ (Column test) โดยใช้แท่งดินร่วนปนทราย (Silty sand, SM) และแท่งดินทรายปนดินตะกอน (Poorly graded sand with silt, SP-SM) ซึ่งเป็นการศึกษาพฤติกรรมการซึมของน้ำฝนในดินเนื้อเดียวกัน (Homogeneous soil) ส่วนที่สองเป็นผลทดสอบการซึมในลาดดินทดสอบที่มีพืชปกคลุมดิน (Vegetation slope box test) โดยใช้ดินทราย (Poorly graded sand, SP) มาบดอัดในกล่องลาดดินแล้วปลูกพืชคลุมดินที่ผิวหน้าลาดดิน และให้กล่องลาดดินที่มีพืชปกคลุมดินมีความชันคงที่เท่ากับ 20 องศาตลอดการทดสอบ แบบจำลองทดสอบทั้งสองส่วนได้ติดตั้งเครื่องมือวัดความชื้นตามความลึก 5 ระดับ นอกจากนี้ ในกล่องลาดดินที่มีพืชปกคลุมติดตั้งหัวอ่านค่าความชื้นดินทั้ง 3 ตอนของกล่องลาดดินทดสอบคือ ตอนบน ตอนกลางและตอนล่างของกล่องลาดดิน เพื่อนำมาข้อมูลพฤติกรรมการซึมของน้ำฝนมาวิเคราะห์ผลกระทบต่อเสถียรภาพลาดดินด้วยวิธีลาดดินอนันต์ ภายใต้สภาวะรับน้ำฝนค่าความชื้นฝนต่าง ๆ ซึ่งสรุปผลการวิจัยได้ ดังนี้

1) ผลการศึกษาพฤติกรรมการซึมในแท่งดินเนื้อเดียวกันพบว่า ค่าความชื้นหลังระนาบความชื้น (Volumetric water content behind the wetting front,  $\theta_{wb}$ ) ขึ้นอยู่กับค่าดัชนี การซึม (Infiltration index,  $i/k_s$ ) โดยค่า  $\theta_{wb}$  จะแปรผันตามค่า  $i/k_s$

2) การซึมในดินเนื้อเดียวกันจะปรากฏระนาบความชื้นซึ่งเป็นการเคลื่อนตัวลงของโซน ดินเปียก (Wetting front's advance) ชัดเจน ในขณะที่การซึมในดินที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันจะ ไม่ปรากฏระนาบความชื้นที่ชัดเจน (No clear wetting front) แต่จะปรากฏค่าความชื้นระยะสุดท้ายของการซึม (Infiltrated water content,  $\theta_f$ ) ที่สัมพันธ์กับค่าดัชนีการซึม เมื่อค่า  $i/k_s < 1$

3) ในลาดดินที่มีพืชปกคลุมดิน เนื้อดินจะแยกชั้นเป็นชั้นดินที่มีรากพืช (Root-soil zone) และชั้นดินเปล่า (Bare soil zone) จะพบพฤติกรรมการซึมแบบ 2 มิติ โดยการซึมจะได้รับอิทธิพลจากความลาดแรงดึงน้ำ (Suction gradient) ทำให้เกิดการไหลด้านข้างอย่างชัดเจนในสภาวะลาดดินรับน้ำฝนที่มีความรุนแรงน้อยกว่าค่าความซึมผ่านได้ของดินรากพืช

4) การคำนวณหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินที่เป็นดินเนื้อเดียวกันสามารถใช้ความสัมพันธ์อัตราการซึมกับความชื้นดิน หรือ  $k$ -function ประมาณการได้ถูกต้องแม่นยำ ในขณะที่ในลาดดินที่มีพืชปกคลุมในสภาวะฝนตกหนักซึ่งจะได้รับอิทธิพลของ Preferential flow path ทำให้ดินใต้ชั้นรากพืชมีค่าความชื้นสูงกว่าค่าประมาณการด้วย  $k$ -function การคำนวณหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยโดยไม่คำนึงถึงอิทธิพลของ Preferential flow path จะได้อัตราส่วนความปลอดภัยที่สูงกว่าความเป็นจริง

5) การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินที่มีพืชปกคลุมดินไม่สอดคล้องกับขอบเขตอัตราส่วนความปลอดภัยประมาณจาก  $k$ -function จะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นบริเวณกว้างทำให้ระนาบวิบัติมีลักษณะเป็นบริเวณมากกว่าเมื่อค่าความรุนแรงฝนสูงขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

### 5.2.1 ข้อเสนอแนะสำหรับการใช้ผลงานวิจัย

ในการเพิ่มเสถียรภาพของลาดดินต้น ควรปรับปรุงลาดดินเม็ดหยาบให้มีส่วนผสมของส่วนละเอียดที่จะไปช่วยเพิ่มค่าความเชื่อมั่นของเม็ดดินในลาดดินให้มีเสถียรภาพเพิ่มขึ้นได้ และการรักษาพืชพันธุ์ที่เจริญเติบโตปกคลุมหน้าลาดดินในคงอยู่ในทุก ๆ ฤดูกาลจะช่วยเสริมเสถียรภาพลาดดินโดยใบพืชและรากจะช่วยลดอิทธิพลความรุนแรงของฝนที่จะซึมลงสู่ลาดดินได้ และเป็นวิธีธรรมชาติที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

### 5.2.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยต่อไป

ควรทำการศึกษาอิทธิพลของพืชปกคลุมดินที่มีต่อพฤติกรรมการตอบสนองเชิงกลด้วยระบบรากผสมผสานทั้งระบบรากหยั่งลึกและรากหยั่งตื้น ได้แก่ ระบบผสมผสานระหว่างหญ้าแฝกและกระถินเทพา (พานิช วุฒิพฤษ, 2551) รวมทั้งออกแบบการศึกษาในภาคสนามหรือลาดดินที่มีอยู่ในธรรมชาติ โดยนำผลวิเคราะห์ทั้งพฤติกรรมการตอบสนองเชิงกลและเชิงอุทกวิทยามาประเมินเสถียรภาพลาดดินต้น เพื่อให้ได้ผลการทำนายค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น



## รายการอ้างอิง

- ศุภสิทธิ์ คนใหญ่. 2552. การพัฒนาวิธีการวัดค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำและมวลสารในดินเค็มที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต). มหาวิทยาลัยขอนแก่น. ขอนแก่น.
- พานิช วุฒิพิภุภษ. (2551). คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่เสริมโดยระบบรากพืชแบบผสมผสานสำหรับงานป้องกันลาดชันดิน (กรณีศึกษารากกระถินเทพาและหญ้าแฝก). กรุงเทพฯ : สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
- อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ . (2559). การประเมินความลึกที่เหมาะสมต่อการติดตั้งเครื่องมือวัดเพื่อเตือนภัยเบื้องต้นสำหรับดินโคลนถล่มแบบตื้นเนื่องจากฝน. กรุงเทพมหานคร : ฐานข้อมูลโครงสร้างพื้นฐานภาครัฐด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ (บรรณาธิการ). (2561). รู้ทันภัยพิบัติจากดินถล่ม. มุลนิธิพลังที่ยั่งยืน. 136 น.
- ASTM (1999). **Standard Test Method for Classification of Soils For Engineering Purposes.** ASTM D2487-69, Book of ASTM Standards, Vol. 04.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa., 1999.
- ASTM (1999). **Standard Test Methods for Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using a Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, and/or Centrifuge,** ASTM D6836-02, Book of ASTM Standards, Vol. 04.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa., 1999.
- ASTM (1999). **Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions.** ASTM D3080-04, Book of ASTM Standards, Vol. 04.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa., 1999.
- Buckingham, E. (1907). **Studies on the movement of soil moisture.** Bulletin 38. USDA Bureau of Soils, Washington, DC.
- Cascini, L., Cuomo, S. and Guida, D. (2008). **Typical source areas of May 1998 flow-like mass movements in the Campania region, Southern Italy.** Engineering Geology, Vol. 96, pp. 107-125.

- Chaminda G.P.K. (2006). **Real-time prediction of rain-induced embankment by minimum measurements with back-analysis for SWCC parameters.** The University of Tokyo Japan.
- Chinkulkijniwat, A., Yubonchit, S., Horpibulsuk, S., et al. (2016). **Hydrological responses and stability analysis of shallow slopes with cohesionless soil subjected to continuous rainfall.** Canadian Geotechnical Journal, Vol. 53, No. 12, pp. 2001–2013.
- Fredlund D.G. and Morgenstern N.R. (1977). **Stress State Variables for Unsaturated Soils.** ASCE, Journal of Geotechnical Engineering Division, Vol.103, No.5, pp. 447-466.
- ASTM (1999). **Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard.** ASTM D698-70, Book of ASTM Standards, Vol. 04.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa., 1999.
- ASTM (1999). **Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.** ASTM D422-63, Book of ASTM Standards, Vol. 04.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa., 1999.
- ASTM (1999). **Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head).** ASTM D2434-68, Book of ASTM Standards, Vol. 04.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa., 1999.
- ASTM (1999). **Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer.** ASTM D854-14, Book of ASTM Standards, Vol. 04.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa., 1999.
- Bishop, A.W. (1955). **The use of slip circle in the stability analysis of slopes.** Geotechnique, Vol. 5, No. 1, pp. 7-17.
- Bishop, A.W. (1959). **The principle of effective stress.** Teknisk Ukeblad, 106(39), pp. 859-863.
- Buckingham, E. (1907). **Studies on the movement of soil moisture.** Bulletin 38. USDA Bureau of Soils, Washington, DC.

- Chinkulkijniwat, A., Yubonchit, S., Horpibulsuk, S., et al. (2016). **Hydrological responses and stability analysis of shallow slopes with cohesionless soil subjected to continuous rainfall.** Canadian Geotechnical Journal, Vol. 53, No. 12, pp. 2001–2013.
- Chinkulkijniwat, A., Tirametatiparat, T., Supotayan, C., et al. (2019). **Stability characteristics of shallow landslide triggered by rainfall.** Journal of Mountain Science, Vol.16, No.9, pp. 2171–2183.
- Cho, S.E. (2009). **Infiltration analysis to evaluate the surficial stability of two-layered slopes considering rainfall characteristics.** Engineering Geology, Vol. 105, No. 1-2, pp. 32-43.
- Corps of Engineers. (1982). **Slope stability manual EM-1110-2-1902,** Washington, DC: Department of the Army, Office of the Chief of Engineers.
- Ducan, J.M., Buchignani, A.L. and Marius, D.W. (1987). **An engineering manual for slope stability studies.** Virginia : Department of Civil Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, March.
- Duncan J.M., Wright, S.G. (2005). **Soil strength and slope stability.** Scitech Book News, Portland, Vol. 29, No.4, pp. 297.
- Eichenberger, J., Ferrari, A. and Laloui, L. (2013). **Early warning thresholds for partially saturated slopes in volcanic ashes.** Computers and Geotechnics, Vol. 49, pp. 79–89.
- Fellenius, W. (1927). **Erdstatische berechnungen mitreibung und koresion,** Ernest Berlin.
- Fredlund, D.G. (1996). **The Emergence of Unsaturated Soil Mechanics.** The Fourth Spencer J. Buchanan Lecture, College Station, Texas, A & M University Press, pp. 39.
- Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1993). **Soil mechanics for unsaturated soils.** Wiley, New York.
- Gabet, E. J. and Mudd, S. M. (2006). **The mobilization of debris flows from shallow landslides.** Geomorphology, Vol. 74, pp. 207-218.
- Green, W.H. and Ampt, G.A. (1911). **Studies on soil physics, part I, the flow of air and water through soils.** Journal of Agriculture Science., Vol.4, No.1, pp.1-24.

- Guzzeti, F., Peruccacci, S., Rossi, M. and Stark, C. P. (2008). **The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update.** *Landslides*, Vol. 5, pp. 3–17.
- Horton, R.E. (1933). **The role of infiltration in the hydrological cycle.** *Transactions of the American Geophysical Union*, Vol. 4, pp. 446-460.
- Huang, C.-C., Lo, C.-L., Jang, J.-S., Hwu, L.K. (2008). **Internal soil moisture response to rainfall-induced slope failures and debris discharge.** *Engineering Geology*, Vol. 101, pp. 134-145.
- Huang, C.-C., Ju, Y.J., Lee, J.L., Hwu, L.K. (2009). **Internal soil moisture and piezometric responses to rainfall-induced shallow slope failures.** *Journal of Hydrology*, Vol. 370, pp. 39-51.
- Huang, C.-C. and Yuin, S.C. (2010). **Experimental investigation of rainfall criteria for shallow slope failures.** *Geomorphology*, Vol. 120, pp. 326-338.
- Inoue, M., Ould Ahmed, B.A., Saito, T. and Irshad, M. (2008). **Comparison of Twelve Dielectric Moisture Probes for Soil Water Measurement under Saline Conditions.** *American Journal of Environmental Sciences*, Vol.4 , No.4 , pp. 367-372.
- Janbu, N. (1968). **Slope stability computations.** *Soil Mechanics and Foundation Engineering Report*, The Technical University of Norway, Trondheim, Norway.
- Kassim, A., Gofar, N., Lee, L.M. and Rahardjo, H. (2012). **Modeling of suction distributions in an unsaturated heterogeneous residual soil slope.** *Engineering Geology*, Vol. 131-132, pp. 70-82.
- Kim, J., Jeong, S., Park, S. and Sharma, J. (2004). **Influence of rainfall-induced wetting on the stability of slopes in weathered soils.** *Engineering Geology*, Vol.75, pp. 251-262.
- Kim, J., Jeong, S. and Regueiro, R.A. (2012). **Instability of partially saturated soil slopes due to alteration of rainfall pattern.** *Engineering Geology*, Vol. 147-148, 28-36.
- Leung, A.K. and Ng C.W.W. (2013). **Analyses of groundwater flow and evapotranspiration in a vegetated soil slope.** *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 50, pp. 1204-1218.

- Lee, L.M., Kassim, A. and Gofar, N. (2011). **Performances of two instrumented laboratory models for the study of rainfall infiltration into unsaturated soils.** *Engineering Geology*, Vol. 117, No. 1–2, pp. 78–89.
- Li W.C., Lee L.M., Cai H., et al. (2013). **Combined roles of saturated permeability and rainfall characteristics on surficial failure of homogeneous soil slope.** *Engineering Geology*, Vol. 153, pp. 105-113.
- Lowe, J. and Karafiath, L., (1955). **Stability of earth dams upon drawdown. Proceedings of the 1st Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, Meccxigo City, pp. 537-552.
- Lu, N., and Griffiths, D.V. (2004). **Profiles of Steady-State Suction Stress in Unsaturated Soils.** *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* *Engineering Geology*, Vol. 130, No. 10, 106301076.
- Lu, N., and Godt, J. (2008). **Infinite slope stability under steady unsaturated seepage conditions.** *Water Resources Research*, Vol. 44, No. 11, pp. 1-13.
- Lu N. and Likos W.J. (2006). **Suction Stress Characteristic Curve for Unsaturated Soil.** *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* *Engineering Geology*, Vol. 132, No. 2, pp.131-142.
- Ma, K.-C., Tan, Y.-C. and Chen, C.-H. (2011). **The influence of water retention curve hysteresis on the stability of unsaturated soil slopes.** *Hydrological Processes*, Vol. 25, No. 23, pp. 3563-3574.
- Morgenstern, N.R. and Price, V.E. (1965). **The analysis of the stability of general slip surfaces.** *Geotechnique*, Vol. 15, No. 1, pp. 79-93.
- Mualem Y. (1976). **A new model predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media.** *Water Resources Research*, Vol. 12, pp. 513-522.
- Ng, C.W.W. and Shi, Q. (1998b). **A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage.** *Computer and Geotechnics*, Vol. 22, No.1, pp. 1-28.
- Ng, C.W.W., Wang, B. and Tung Y.K. (2001). **Three-dimensional numerical investigation of groundwater responses in an unsaturated slope subjected to various rainfall patterns.** *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 38, pp. 1049-1062.



- Ni, J.J., Leung, A.K., Ng, C.W.W. and Shao, W. (2018). **Modelling hydro-mechanical reinforcements of plants to slope stability**. *Computers and Geotechnics*, Vol. 95, pp. 99-109.
- Postance B., Hillier J., Dijkstra T., et al. (2018). **Comparing threshold definition techniques for rainfall induced landslides: a national assessment using radar rainfall**. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 43, pp. 553–560.
- Rahardjo, H., Li, X.W., Toll, D.G. and Leong, E.C. (2001). **The effect of antecedent rainfall on slope stability**. *Journal of Geotechnical and Geological Engineering*. Special Issue of Unsaturated and Collapsible Soils, G19, pp. 371-399.
- Rahardjo, H., Satyanaga, A., Leong, E.C. and Ng, Y.S. (2010). **Effects of groundwater table position and soil properties on stability of slope during rainfall**. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.136, No. 11, pp. 1555-1564.
- Santoso, A.M., Phoon, K.K. and Quek, S.T. (2011). **Effect of soil spatial variability on rainfall-induced landslides**. *Computers and Structures*, Vol. 89, pp. 893-900.
- Shama, R.H. and Nakaraki, H. (2010). **Numerical model and flume experiments of single-and two-layered hill slope flow related to slope failure**. Vol.7, pp. 425-432.
- Shao, W., Ni, J., Leung, A., Su, Ye., and Ng., C.W.W. (2017). **Analysis of plant root-induced preferential flow and pore water pressure variation by a dual-permeability model**. *Canadian Geotechnical Journal*, 17 July 2017.  
<https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0629>
- Scott, H.D. (2000). **Soil physics : agricultural and environmental applications**. Ames : Iowa State University Press.
- Slide, R. C. and Ochiai, H. (2006). **Landslides: Process, Prediction, and Land Use**. *Water Resources Monograph*, Vol. 18. Washington, DC: American Geographical Union.
- Skempton, A.W. and Delory. F.A. (1957). **Stability of natural slopes in London clay**. In *Proceedings of the international conference on soil mechanics and foundation engineering*, Vol. 4. London II, pp. 378-381.

- Sorbino, G. and Nicotera, M.V. (2012). **Unsaturated soil mechanics in rainfall-induced flow landslides**. Engineering Geology (Article in press).
- Topp, G.L., Davis, J.L. and Annan, A.P. (1980). **Electromagnetic determination of soil water content : Measurement in coaxial transmission lines**. Water resource. Res.16, pp. 574-582.
- Trustrum, N. A., Gomez, B., Page, M. J., et al. (1999). **Sediment production, storage and output : The relative role of large magnitude events in steep land catchments**. Vol. 115, pp. 71-86.
- Van Genuchten, M.T. (1980). **A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil**. Soil Science Society of America Journal, Vol. 44, pp. 892-898.
- Wu L.Z., Zhou, Y. and Sun P. (2017). **Laboratory characterization of rainfall-induced loess slope failure**. Catena, Vol. 150, pp. 1-8.
- Xie, M., Esaki, T. and Cai, M. (2004). **A time-space based approach for mapping rainfall-induced shallow landslide hazard**. Environmental Geology, Vol. 46, pp. 840-850.
- Xu, Q., Wan, X., Jiang, C., and Liu, S. (2011). **Effects of rainfall on soil moisture and water movement in a subalpine dark coniferous forest in southwestern China**. 96<sup>th</sup> ESA Annual Convention 2011, December 2012, Hydrological Processes, Vol. 26, No. 25, doi:10.1002/hyp.8400
- Yubonchit S., Chinkulkijniwat A., Horpibulsuk S., et al. (2016). **Influence factors involving rainfall-induced shallow slope failure: numerical study**. International Journal of Geomechanics, Vol. 17, No. 7 : 04016158
- Yumuang, S. (2006). **2001 debris flow and debris flood in Nam Ko area, Phetchabun province, central Thailand**. Environ. Geol., Vol. 51, No. 4, pp. 545-564.
- Zhan, T.L.T. and Ng, C.W.W. (2004). **Analytical analysis of rainfall infiltration mechanism in saturated soils**. International Journal of Geomechanics, Vol. 4, No. 1, pp. 273-284.

ภาคผนวก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่









มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Chinkulkijniwat A., Tirametatarat T., Supotayan C., et al. (2019). **Stability characteristics of shallow landslide triggered by rainfall**. Journal of Mountain Science, Vol. 16, No. 9. <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5523-7>



## Stability characteristics of shallow landslide triggered by rainfall

**Avirut CHINKULKIJNIWAT**\*  <https://orcid.org/0000-0003-4905-7991>;  e-mail: avirut@sut.ac.th  
**Taworn TIRAMETATIPARAT**<sup>1</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-5027-5537>; e-mail: D5840519@g.sut.ac.th  
**Chanathip SUPOTAYAN**<sup>1</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-8289-4666>; e-mail: ch.supotayan@gmail.com  
**Somjai YUBONCHIT**<sup>2</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-3434-9537>; e-mail: d5540150@g.sut.ac.th  
**Suksun HORPIBULSUK**<sup>1</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-1965-8972>; e-mail: suksun@g.sut.ac.th  
**Rattana SALEE**<sup>1</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-5411-399X>; e-mail: saleerattana6155@gmail.com  
**Panich VOOTTIPRUEX**<sup>3</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-9474-2915>; e-mail: pnv@fte.kmutnb.ac.th

\* Corresponding author

<sup>1</sup> School of Civil Engineering, Center of Excellence in Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

<sup>2</sup> Department of Civil Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

<sup>3</sup> Department of Teacher Training in Civil Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok 10800, Thailand

**Citation:** Chinkulkijniwat A, Tirametiparat T, Supotayan C, et al. (2019) Stability characteristics of shallow landslide triggered by rainfall. Journal of Mountain Science 16(9). <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5523-7>

© Science Press, Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS and Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2019

**Abstract:** Rainfall-induced shallow landslides are known to be extremely dangerous since the sliding mass can propagate quickly and travel far from the source. Although the sliding mechanism in sloping ground is simple to understand, the problem may be complicated by unsaturated transient water flow. The flow behavior of rainwater in unsaturated sloping ground and the consequent factor of safety must be clearly understood to assess slope stability under rainfall conditions. A series of laboratory experiments was conducted to examine the critical hydrological states so that assessment of slope stability under rainfall condition can be performed. Based on the test results, a unique relationship between critical hydrological states, rainfall intensity, and soil properties was formulated. Sequential stability

analysis provided insights into the stability of slopes subjected to variations in soil properties, slope angles and rainfall intensities, and the consequent variation in the depth of the failure plane, vital in landslide risk assessment, was determined through this analysis. The variation of rainfall intensity was found to strongly affect the depth of the failure plane in cohesionless sloping ground. Furthermore, the influence of rainfall intensity on the depth of the failure plane may be alleviated by a small magnitude of cohesive strength. The results of this study will reinforce knowledge of landslide behavior and help to improve mitigation measures in susceptible areas.

**Keywords:** Shallow landslides; Rainfall; Failure depth

**Received:** 12-Apr-2019

**Revised:** 23-May-2019

**Accepted:** 25-Jun-2019



**Notation**

$\alpha$	van Genuchten parameter
$\beta$	Steepness angle of the slope
$\gamma$	Soil unit weight
$\gamma_d$	Dry unit weight
$\theta_r$	Water content at residual state
$\theta_w$	Volumetric water content
$\theta_{sat}$	Water content at saturated state
$\theta_{wb}$	Volumetric water content behind the wetting front
$\theta_{wi}$	Initial volumetric water content
$c'$	Cohesion
$\phi'$	Soil frictional angle
$\sigma'_s$	Suction stress
$A$	Stability index
$G_s$	Specific gravity of soil particles
$LL$	Liquid limit
$PL$	Plastic limit
$PI$	Plasticity index
$S_e$	Effective degree of saturation
$Z$	Depth at $FS$ calculation
$Z_{cr}$	Depth at $FS$ equal to 1.0.
$Z_t$	Soil layer thickness
$Z_w$	Depth at the advance of wetting front
$i$	Rainfall intensity
$k_s$	Soil permeability at saturation state
$n$	van Genuchten parameter
$u_a$	Pore air pressure
$u_w$	Pore water pressure
$r^2$	Coefficient of determination

**Introduction**

Rainfall-induced landslides are natural disasters that are encountered in many parts of the world and they always result in massive destruction and loss of human life (Yumuang 2006; Guzzetti et al. 2008). Among the various types of landslides, shallow landslides present a special danger since they can potentially initiate debris flow (Trustum et al. 1999), particularly when rainfall continues after the initiation of the failure. The huge scale of damage caused by shallow landslides has been reported in the literature (Gabet and Mudd 2006; Postance et al. 2018). Shallow landslides are

typically translational slope failures that involve the upper few meters of unconsolidated surficial material. Recent reports (Li et al. 2013; Chinkulkijniwat et al. 2016; Yubonchit et al. 2016; Naidu et al. 2018) have concluded that, for rainfall-induced translational slides in terrains of homogeneous soil, the sliding failure can be categorized as occurring in two major phases: the infiltration phase and the saturation phase. In the infiltration phase, rainwater infiltrates the sloping ground advancing the wetting zone. If the failure takes place in this phase, the failure plane can occur at any depth depending on factors such as the slope angle, rainfall intensity, and soil properties. The saturation phase takes place during the rising of the water table, which initially occurs after rainwater reaches the impermeable interface. In this phase, the failure plane occurs only at the impervious interface.

The ability to predict the depth of the failure plane is vital when assessing slope stability during a rainfall event. A number of reports (Shimoma et al. 2002; Chaminda 2006; Tohari et al. 2007) found that slope failure is initiated at the slope toe since the fully saturated condition of soil at this position results in the development of excessive positive pore water pressure. However, their findings were based on homogeneous soil slopes, where the dominant failure mode will be a circular or noncircular sliding failure. Although the danger of shallow landslides has been recognized, reports that focused on the depth of the failure plane in shallow landslides have been limited in number (Tsai et al. 2008; Li et al. 2013; Ali et al. 2014; Chinkulkijniwat et al. 2016) and few attempted a rigorous understanding of the stability characteristics of shallow landslides.

Chinkulkijniwat et al. (2016) were among the few to attempt a characterization of the stability of shallow landslides that took multiple factors into account. They conducted a series of artificial rainwater infiltration tests and introduced a mathematical model to approximate the magnitude of water content in sloping ground subjected to a certain magnitude of rainfall intensity. This approximated water content was used to create a profile of the factor of safety of a sloping terrain subjected to various magnitudes of rainfall intensity. Subsequently, they developed a critical depth chart based on relationships between the

depth of the failure plane, the rainfall intensity and the steepness of various slopes. The stability of shallow slopes was then characterized via the critical depth chart and, using this chart, the possible depth of the failure plane was comprehensively defined. They reported that the depth of the failure plane can be determined from the soil frictional angle ( $\phi$ ), the soil saturated permeability ( $k_s$ ), the steepness of the slope ( $\beta$ ), and the rainfall intensity ( $i$ ). However, the conclusions of Chinkulkijniwat et al. (2016) were limited to cohesionless sandy soil possessing no fine fraction. Soils in mountainous terrain typically possess both a certain amount of fine fraction and either intrinsic cohesive strength or apparent cohesive strength, especially due to plant roots, which reinforce soil by their tensile strength and adhesion properties to form enclosed root matrix systems that give soil additional apparent cohesion (Tosi 2007; Burylo et al. 2011). Failure characteristics of these soils might well differ from those of cohesionless sandy soil.

To further knowledge of the stability characteristics of sloping grounds, this study extends the work of Chinkulkijniwat et al (2016) to soils that contain a certain amount of fine fraction and possess cohesive strength. The work extended the analysis of the critical depth charts for various soil types so that a comparison among the stability characteristics of different soils could be thoroughly interpreted. The study began with a series of laboratory tests to clarify the hydrological behavior of the studied soils and, based on the conclusions drawn for hydrological behavior, continued by analyzing the stability of the soils using the infinite slope model under various rainfall intensities. Results from this study will reinforce related research that seeks to design landslide mitigation measures.

### 1 Hydrological State at the Wetting Front

For a ponded surface, the maximum water content during the infiltration phase is equal to the saturated water content, Green and Ampt (1911). However, in the case of an unponded surface, although Mein and Larson (1973) and Chu (1978) elaborated the model proposed by Green and Ampt (1911), they did not clearly elaborate the maximum

magnitude of water content during the infiltration process, which in the present work is termed water content behind the wetting front,  $\theta_{wb}$ . Mostly, the saturated water content was assumed without consideration of rainfall intensity and soil hydrological properties. Chinkulkijniwat et al. (2016) reported a unique relationship between  $\theta_{wb}$  and the infiltration index ( $i/k_s$ ), defined as the rainfall intensity ( $i$ ) over the saturated soil permeability ( $k_s$ ), regardless of the slope gradient and initial water content. However, their report was based only on test results from a cohesionless sand, which were considered to have distinct (or sharp) wetting front characteristics. In this work, the relationship between  $\theta_{wb}$  and  $i/k_s$  found in Chinkulkijniwat et al. (2016) was further validated with two soils that possessed a certain amount of fine fraction. Furthermore, the water content ( $\theta_w$ ) profile of studied soils that possessed a certain amount of fine fraction was revisited to test the validity of the proposed sharp wetting front boundary during various rainfall intensities.

#### 1.1 Laboratory tests and experimental setup

The two soils used in this study contained a certain amount of fine fraction. The soil water characteristic (SWC) curve of the studied soils was determined in accordance with the ASTM D6836-02. The air-dried soils were compacted to the retainer rings placed on a saturated ceramic plate in the pressure chamber. Saturation state was acquired by spraying water from above the soil specimens. After being encapsulated, the airtight pressure chamber was subjected to a specific air pressure in order to push the water out of the specimens. The air pressure was kept constant until no more water was released from the chamber. The specimens were then placed into the oven to determine their water content. The above procedures were repeated for various magnitudes of air pressure. The dataset between air pressure and soil water content was used to plot the SWC curve of the studied soils. Shear strength parameters were determined from the direct shear test (ASTM D3080). Each studied soil was compacted to three identical density specimens. Direct shear testing was conducted under three normal stress levels of 50, 100 and 200 kPa with a 1 mm/min displacement rate. The strength

parameters ( $\phi'$ ,  $c'$ ) were acquired from the peak shear stress values of shear stress-horizontal displacement plots.

A series of infiltration tests were carried out in a one-dimensional column to simulate infiltration processes in the studied soils, which were later classified as SM and SM-SP soils. Figure 1 shows the schematic diagram, dimensions and a photograph of the one-dimensional soil infiltration test apparatus. The apparatus consisted of a rainfall simulator, a steel frame and an experiment column. The experiment column was made from an acrylic tube 100 mm in diameter and 1000 mm in height. An impervious acrylic plate 15 mm thick was used as the base of the experiment column. Five holes of 5 mm diameter were made in the column 100, 200, 300, 400, and 500 mm from the base. These were for the installation of moisture sensor probes. To ensure homogeneity, 7728 grams of SM soil and 8247 grams of SP-SM soil were dried in air before being layered into the standing pipe column. Ten compacted layers 60 mm thick were put in place to create a column of soil 0.6 m high. The unit weight of the SM soil and SP-SM soil columns was 16.4 kN/m<sup>3</sup> and 17.5 kN/m<sup>3</sup>, respectively. Five moisture sensor probes (Decagon 5TE, Decagon Devices Inc. (2007-2010)) and a piezometer were then installed. The piezometer was placed in the base of the column. An open valve was also placed in base of the column close to the piezometer to prevent the

occurrence of trapped air during the tests. Rainwater infiltration tests were conducted by assigning the desired intensities of rainfall to the experiment column. The desired rainfall intensities were assigned through a well-calibrated rainfall simulator comprising a water tank, a constant water pressure pump, a pressure gauge, a plastic pipe, a control valve, and a fine spray nozzle placed in the plastic pipe.

The experimental program is summarized in Table 1. The magnitudes of rainfall intensity used in the experiment were determined by the saturated permeability of the studied soils. Rainfall intensities of 5, 10, 20, and 45 mm/hr were assigned to the SM column, whose saturated permeability was 15 mm/hr ( $k_{sat} = 4.167 \times 10^{-6}$  m/sec  $\approx$  15 mm/hr). Rainfall intensities of 10, 20, 45, 70 and 100 mm/hr were applied to the SP-SM column, whose saturated permeability was 65 mm/hr ( $k_{sat} = 1.806 \times 10^{-5}$  m/sec  $\approx$  65 mm/hr). These variations were applied to demonstrate the hydrological responses under three rainfall conditions: rainfall intensity lower than the soil saturated permeability ( $i < k_s$ ), rainfall intensity approaching the soil saturated permeability ( $i \approx k_s$ ), and rainfall intensity greater than the soil saturated permeability ( $i > k_s$ ). In each rainfall test, rainfall was applied until the steady state was reached. The

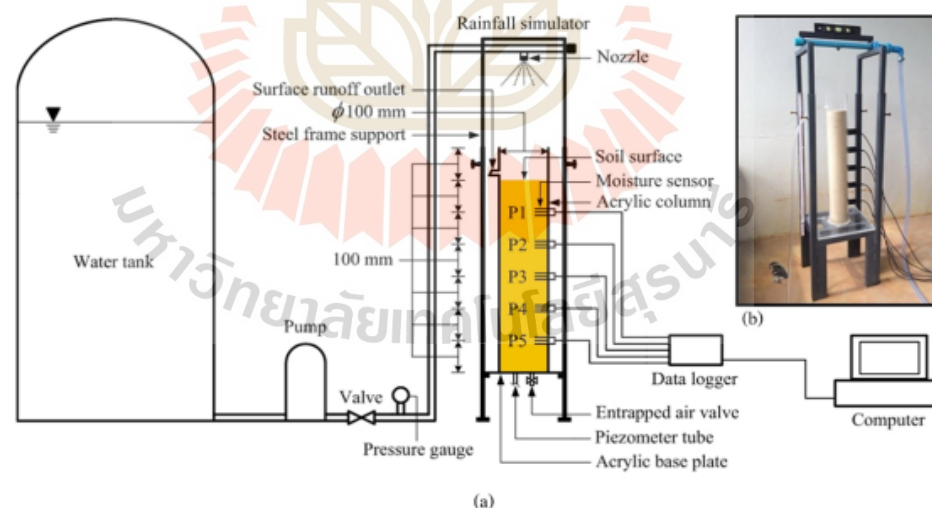


Figure 1 Schematic diagram (a) and photograph (b) of one-dimensional soil column apparatus used in this study.



onset of the steady state was indicated when the values for water content remained constant at all moisture sensors.

**1.2 Test results**

The grain-size distribution and SWC curves of the studied soils are respectively presented in Figures 2(a) and 2(b). Atterberg's limits, specific gravity of the soil ( $G_s$ ), strength parameters ( $\phi'$ ,  $c'$ ), and the saturated permeability ( $k_s$ ) are given in Table 2. The studied soils were classified, according to Unified Soil Classification (ASTM D2487), as silty sand (SM) and poorly graded sand with silt (SP-SM). The fine fractions were about 40% for the SM soil and about 10% for the SP-SM soil. The SWC test data were fit using the van Genuchten (VG) equation (van Genuchten 1980) written in Eq. (1) as,

$$S_e = \frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r} = \left\{ \frac{1}{1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n} \right\}^{1-1/n} \quad (1)$$

where  $S_e$  is the effective degree of saturation,  $\theta_w$  is water content,  $\theta_r$  is water content at residual state,  $\theta_{sat}$  is water content at saturated state,  $u_a - u_w$  is matric suction, which is the difference between pore air pressure ( $u_a$ ) and pore water pressure ( $u_w$ ), and  $\alpha$  and  $n$  are VG parameters relating to the inverse of air-entry pressure, and pore size distribution, respectively. The validated VG parameters for the tested soils are given in Table 2.

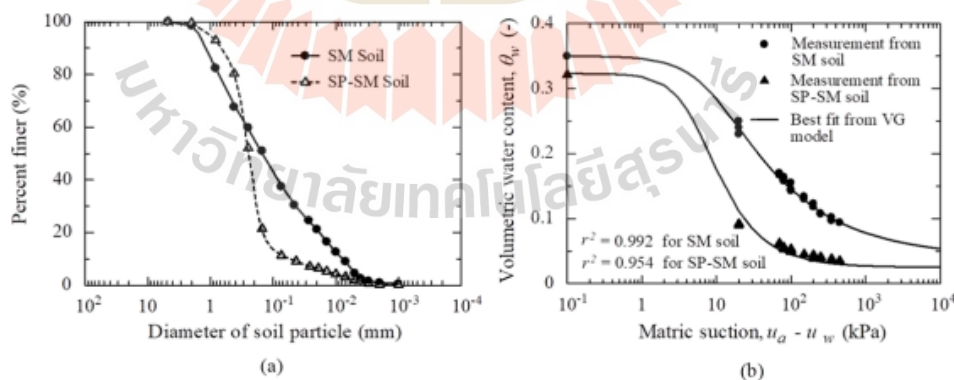
**Table 1** Infiltration tests in one-dimensional column conducted in this study

Soil property	Value	
Soil type (USCS classification)	SM	SP-SM
% Clay	2	1
% Silt	36	10
% Sand	62	89
Atterberg's limits		
Liquid limit, $LL$ (%)	19.80	NP
Plastic limit, $PL$ (%)	14.95	NP
Plasticity index, $PI$ (%)	4.85	NP
Specific gravity, $G_s$	2.59	2.62
Dry unit weight, $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	16.4	17.5
Soil hydrologic parameters		
Saturated permeability, $k_s$ (mm/hr)	15	65
Saturated volumetric water content, $\theta_{sw}$	0.350	0.323
Residual volumetric water content, $\theta_r$	0.040	0.025
Fitting parameter, $\alpha$ (kPa <sup>-1</sup> )	0.112	0.186
Fitting parameter, $n$	1.445	1.798
Soil strength parameters		
Internal friction angle, $\phi'$ (°)	30	36
Cohesion, $c'$ (kPa)	5	0

**Table 2** Summary of properties of soils used in this study

Experiment No.	Soil used	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$i$ (mm/hr)	$i/k_s$
1	SM	16.4	5	0.333
2	SM	16.4	10	0.667
3	SM	16.4	20	1.333
4	SM	16.4	45	3.000
5	SP-SM	17.5	10	0.154
6	SP-SM	17.5	20	0.308
7	SP-SM	17.5	45	0.692
8	SP-SM	17.5	70	1.077
9	SP-SM	17.5	100	1.538

**Notes:**  $\gamma_d$ , dry unit weight;  $i$ , rainfall intensity;  $k_s$ , saturated permeability;  $i/k_s$ , infiltration index.

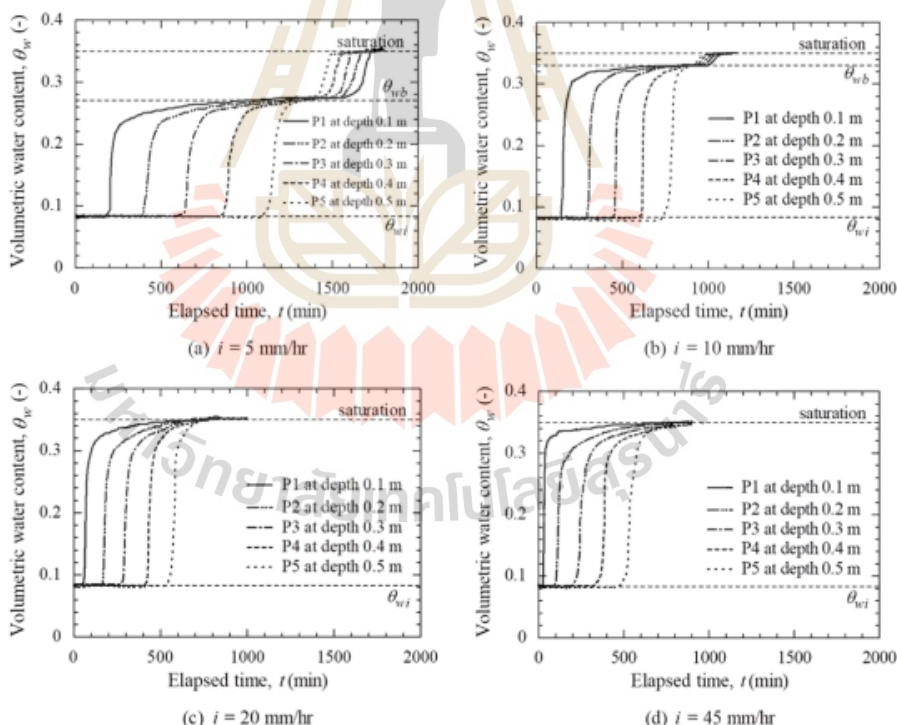


**Figure 2** Properties of silty sand (SM) and poorly graded sand with silt (SP-SM) soils used in this study (a) grain size distribution curves and (b) soil water characteristic curves. ( $r^2$ , coefficient of determination.)

Figures 3 and 4 respectively present the time series plots of  $\theta_w$  and the development of the  $\theta_w$  profile in the SM column subjected to various rainfall intensities. Test results obtained from the SP-SM column (Figures 5 and 6) were similar to those from the SM column. The  $\theta_w$  responses clearly depended on the magnitude of rainfall intensity and could be classified according to the  $i/k_s$  ratio. When  $i/k_s < 1.0$ , the response of  $\theta_w$  could be categorized into infiltration and saturation phases. In the infiltration phase, the volumetric water content increased from its initial value ( $\theta_{wi}$ ) to the maximum volumetric moisture content, known as the volumetric water content behind the wetting front ( $\theta_{wb}$ ).

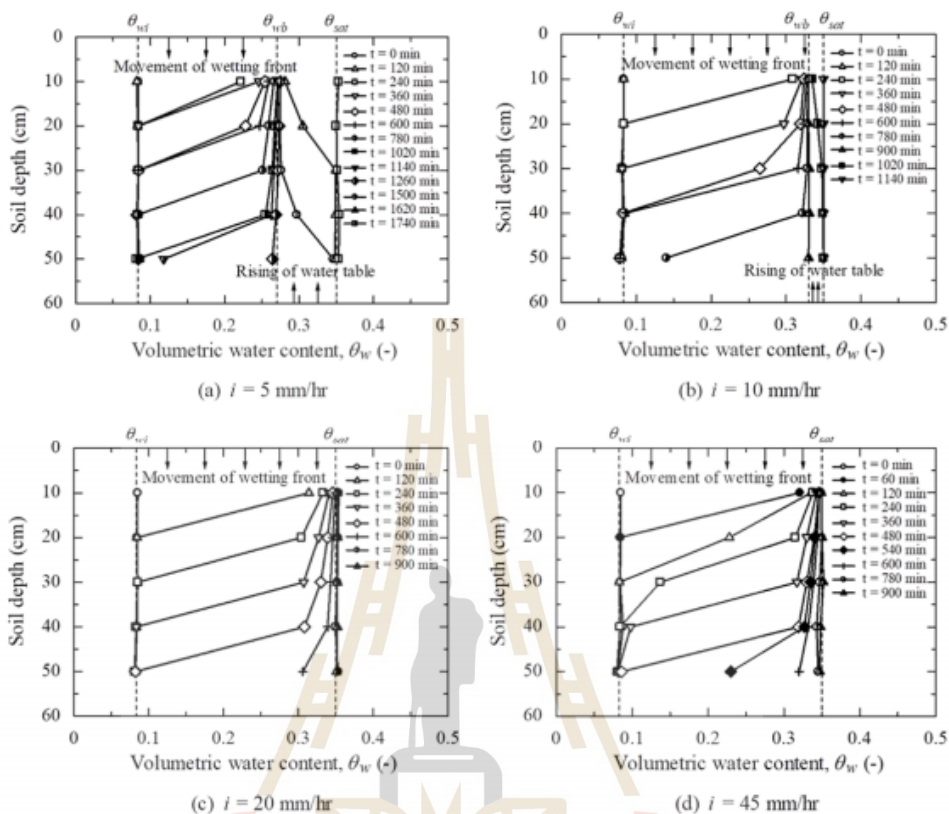
Figure 6 presents the  $\theta_w$  profile in the SM-SP soil. The value of  $\theta_w$  changed from  $\theta_{wi}$  to  $\theta_{wb}$  within two consecutive probes, which implied the presence of a sharp wetting front. The  $\theta_w$  profile in

SM soil (Figure 4) showed that the  $\theta_w$  increased immediately from  $\theta_{wi}$  to an intermediate magnitude of  $\theta_w$  before slightly increasing again to a final value of  $\theta_{wb}$ . These results indicated that the wetting front in the SM soil was not as distinct as it was in the SM-SP soil, although the various values of  $\theta_w$  in the wet zone were very close to  $\theta_{wb}$ . Soon after the wetting front reached the impervious bottom, the saturation phase began as  $\theta_w$ , the volumetric water content, increased from  $\theta_{wb}$  to the saturated water content ( $\theta_{sat} = 0.35$ ). This increase in water content corresponded to the rising of the water table. When  $i/k_s \geq 1.0$ ,  $\theta_w$  increased from  $\theta_{wi}$  to  $\theta_{sat} = 0.35$  since water started infiltrating into the soil column. Once the void spaces were fully filled with water, no further increment of  $\theta_w$  was observed.



**Figure 3** Time series plots of volumetric water content ( $\theta_w$ ) in the silty sand (SM) column for various magnitudes of rainfall intensity ( $i$ ).





**Figure 4** Development of volumetric water content ( $\theta_w$ ) profile in the silty sand (SM) column for various magnitudes of rainfall intensity ( $i$ ).

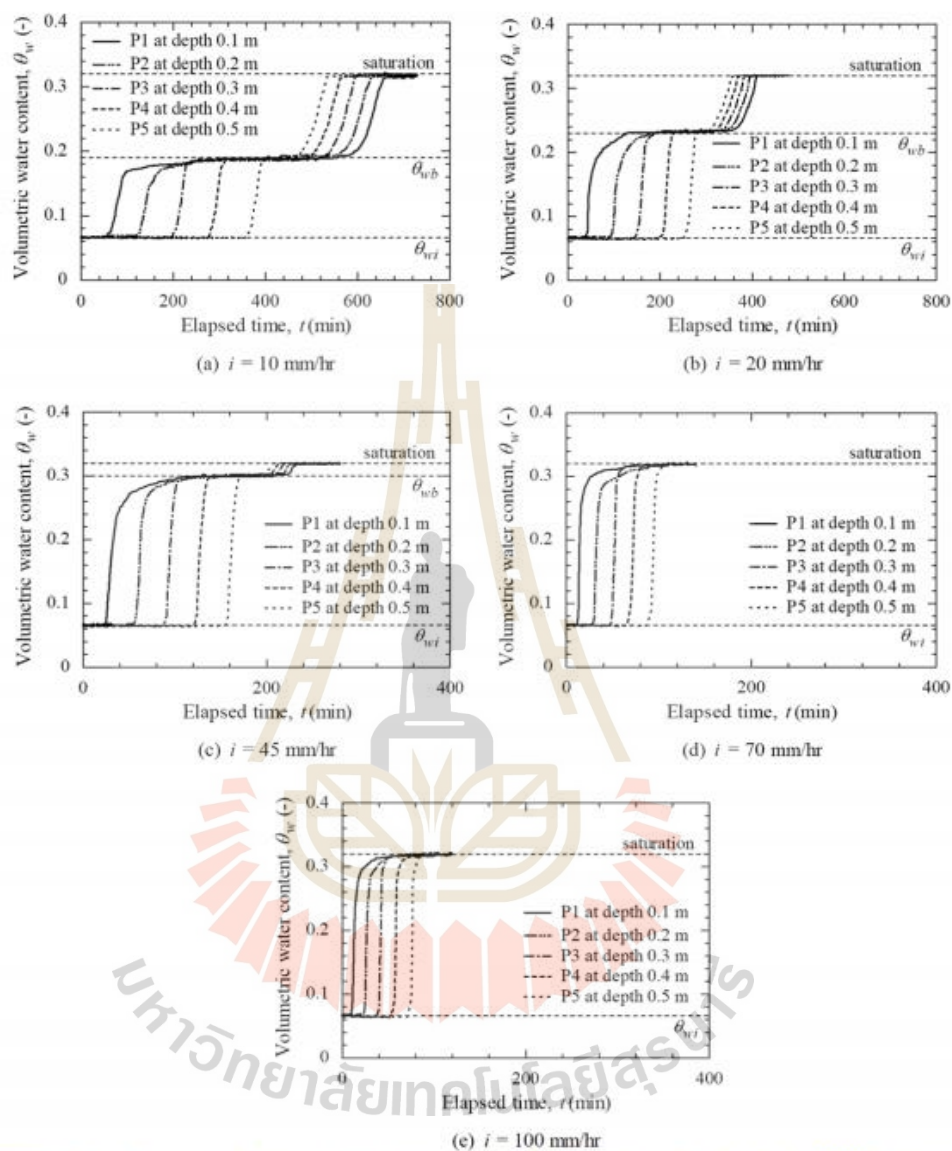
### 1.3 Water Content behind the Wetting Front

As long as rainfall intensity is lower than the soil saturated permeability, the maximum water content during the infiltration process, namely the water content behind the wetting front ( $\theta_{wb}$ ), will be lower than the saturated water content. The unique relationship between  $\theta_{wb}$  and  $i/k_s$  in sandy soil was reported in Chinkulkijniwat et al. (2016) and modelled as

$$S_{eb} = \frac{\theta_{wb} - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r} = \left\{ \frac{1}{1 + [-\ln(i/k_s)]^p} \right\}^{1-1/n} \quad (2)$$

However, Chinkulkijniwat et al. (2016) validated this model only for a cohesionless sandy soil. Since previous research works (Lee et al. 2011;

Chinkulkijniwat et al. 2016; Wu et al. 2017) revealed that the magnitude of  $\theta_{wb}$  does not depend on the slope angle, we validated Eq. (2) with test data from a one-dimensional infiltration test. Figure 7 presents the relationship found in this study between  $\theta_{wb}$  and  $i$  for SM and SP-SM soils. There were 16 and 15 measurements taken in SM and SM-SP soils, respectively. The measured values, taken from 5 TRD probes at each rainfall intensity, were close to each other in both soils, which indicates a unique water content for a particular soil at a given rainfall intensity. Using the van Genuchten parameter values reported in Table 1, the measurements fitted well with Eq. (2), giving an  $r^2$  of 0.996 and 0.997 for the SM and SP-SM soils, respectively. Therefore, Eq. (2) is valid for the soils studied, which had a certain amount of fine fraction.

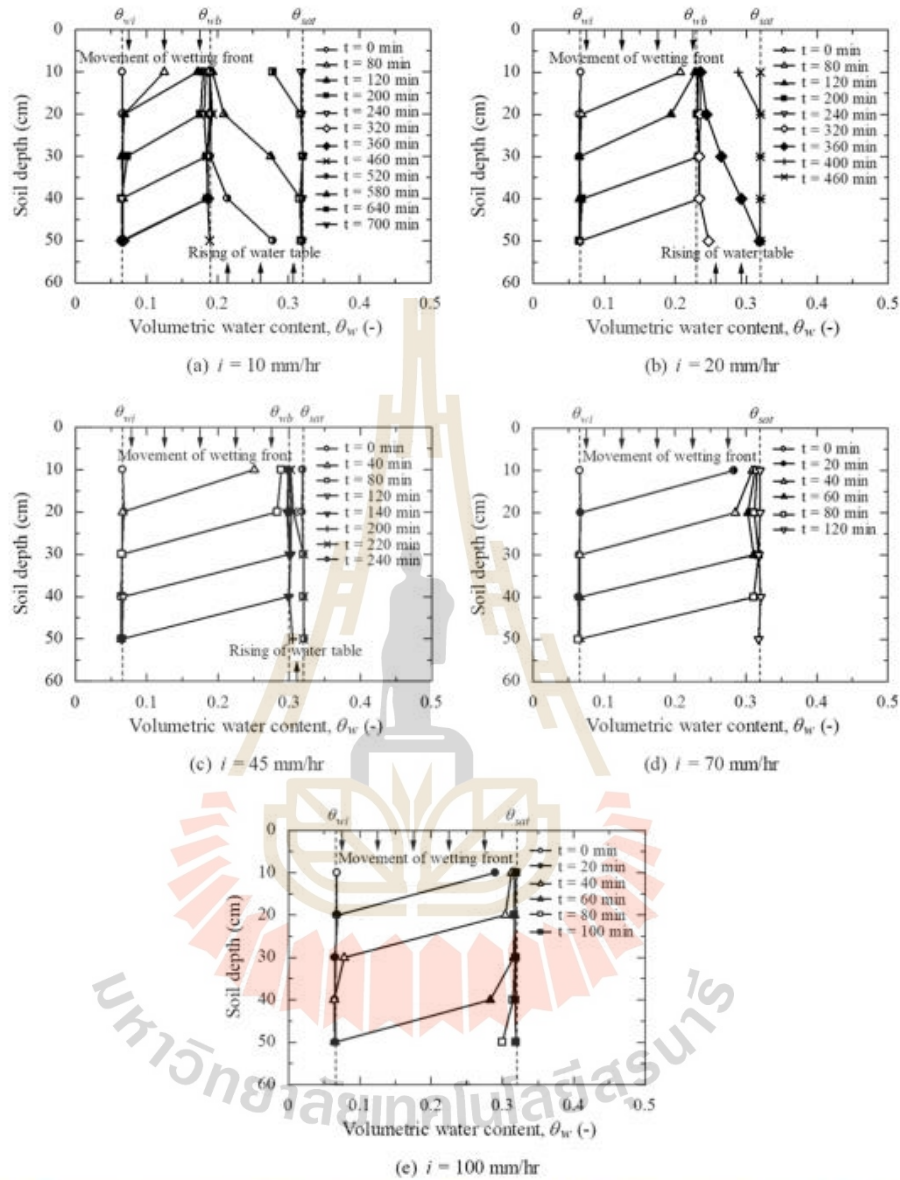


**Figure 5** Time series plots of volumetric water content ( $\theta_w$ ) in the poorly graded sand with silt (SP-SM) column for various magnitudes of rainfall intensity ( $i$ ).

## 2 Analysis of Shallow Landslides

### 2.1 FS at the depth of wetting front's advance

In shallow landslides triggered by rainfall infiltration, the failure has a small depth to length ratio and forms a failure plane parallel to the slope surface. Therefore, infinite slope analysis is

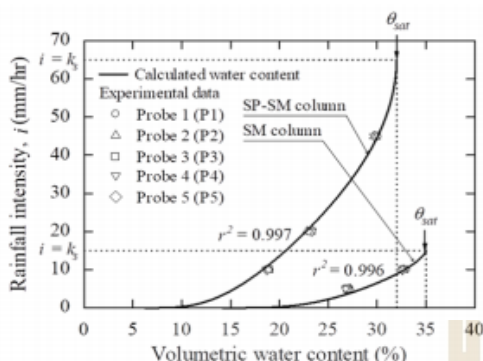


**Figure 6** Development of volumetric water content ( $\theta_w$ ) profile in the poorly graded sand with silt (SP-SM) column for various magnitudes of rainfall intensity ( $i$ ).

justified when assessing the stability of a shallow landslide. The minimum  $FS$  is calculated from the depth of wetting penetration. Although the  $\theta_w$  profile in SM soil did not exhibit a sharp wetting

front, the value of  $\theta_w$  in the wet zone varied very close to  $\theta_{wb}$ . Therefore, for the sake of simplicity, this study assumes a magnitude of water content in





**Figure 7** Relationship between volumetric water content behind wetting front ( $\theta_w$ ) and rainfall intensity ( $i$ ) for silty sand (SM) and poorly graded sand with silt (SP-SM) soils. ( $r^2$ , coefficient of determination)

the wet zone equal to  $\theta_w$ , and hence the minimum  $FS$  is at the wetting front.

The  $FS$  under vertical seepage and unsaturated conditions is written as (Duncan and Wright 2005)

$$FS = \frac{c' + [\gamma Z \cos^2 \beta - \sigma'_s] \tan \phi'}{\gamma Z \sin \beta \cos \beta} \quad (3)$$

$$= \frac{c' - \sigma'_s \tan \phi'}{\gamma Z \sin \beta \cos \beta} + \frac{\tan \phi'}{\tan \beta}$$

where  $\gamma$  is the unit weight of soil above the wetting front,  $Z$  is the particular depth where  $FS$  is being calculated,  $c'$  is effective cohesion,  $\phi'$  is the effective frictional angle,  $\beta$  is the inclined angle of the slope, and  $\sigma'_s$  is suction stress (Lu and Griffiths 2004; Lu and Likos 2006) defined as

$$\sigma'_s = -\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r} (u_a - u_w) = -S_e (u_a - u_w) \quad (4)$$

Combining Eq. (2) with Eq. (1), the suction at the wetting front (expressed as  $(u_a - u_w)_b$ ) is

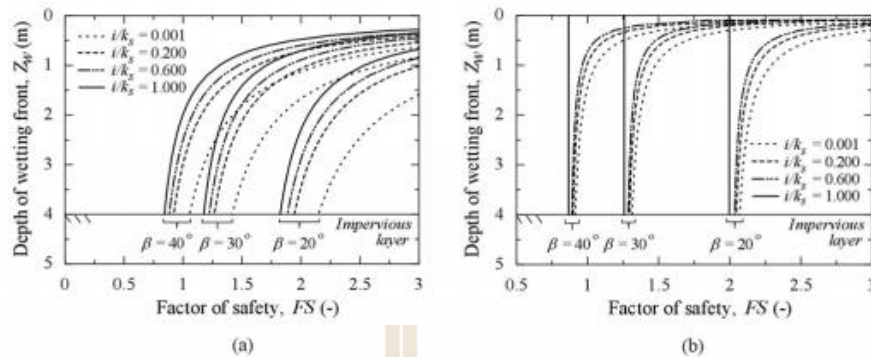
$$(u_a - u_w)_b = -\frac{1}{\alpha} \ln(i/k_s) \quad (5)$$

Since  $\theta_w$  can be approximated using Eq. (2), the suction stress at the wetting front can be written as

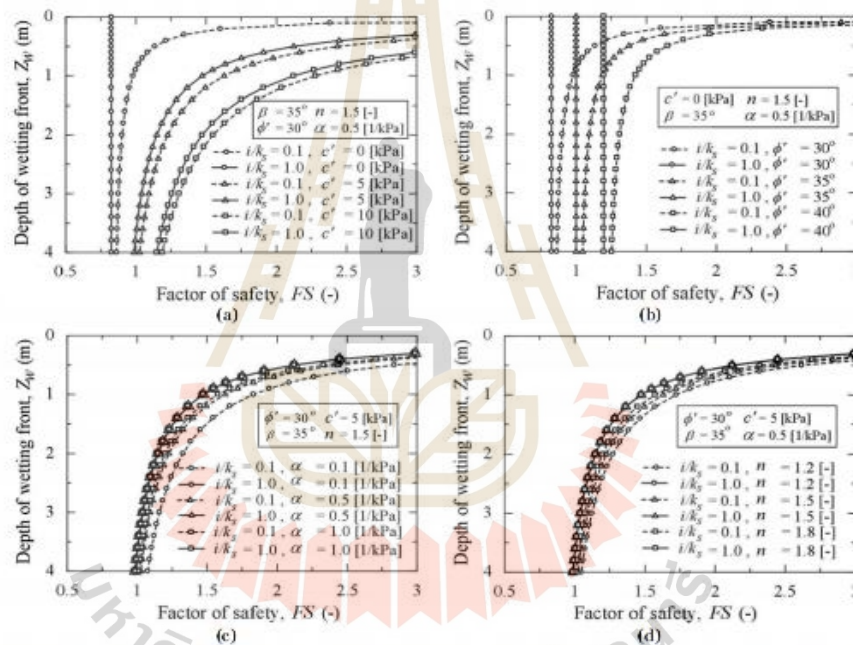
$$\sigma'_s = \left[ -\frac{1}{\alpha} \ln(i/k_s) \right] \left[ \frac{1}{1 + [-\ln(i/k_s)]^n} \right]^{1-1/n} \quad (6)$$

and, therefore, the magnitude of  $FS$  at the depth of the wetting front's advance,  $Z_w$ , can be calculated by substituting Eq. (3) for the expression of  $\sigma'_s$  in Eq. (6). Figures 8a and 8b respectively present the change of  $FS$  with the wetting front's advance  $Z_w$ , namely the  $FS - Z_w$  plot, in SM and SP-SM soils for slopes of various gradients subjected to various magnitudes of infiltration index ( $i/k_s$ ). In the SP-SM soil, at every value of  $i/k_s$ , the magnitude of  $FS$  decreased very rapidly with  $Z_w$ , and then leveled off to become asymptotic at the lower limit. In the SM soil, the reduction in  $FS$  was slower than in the SP-SM soil. This result suggests that when a wetting front advances at shallow depths, the  $FS$  value in SM soil will be higher than the  $FS$  value in SP-SM soil.

To investigate the influence of soil properties on the above mentioned characteristics, graphs of  $FS$  against  $Z_w$  were plotted using varying soil parameters. Figures 9a – 9d present the change of  $FS$  with  $Z_w$  for various values of the parameters  $c'$ ,  $\phi'$ ,  $\alpha$ , and  $n$ . The variation of the parameters  $c'$  and  $\phi'$  is presented through lines of different symbols (Figures 9a and 9b), while the variation of the infiltration index is presented through different types of lines (full and dashed lines). At any particular depth of the wetting front's advance,  $Z_w$ , the lower the infiltration index was, the greater the  $FS$  was. Figure 9a shows clearly that cohesive strength governs the shape of the  $FS - Z_w$  plot: the lower the cohesive strength, the sharper the reduction of  $FS$  with increasing depth. Thus, the  $FS$  value reached the asymptote earlier in soil of a lower cohesive strength than in soil of a higher cohesive strength. With regard to the soil frictional angle, the plots reveal that this factor played no role in the shape of the  $FS - Z_w$  plot, changes in the value of the soil frictional angle only resulted in a sideways shift of the plot.



**Figure 8**  $FS-Z_w$  plots for various magnitudes of infiltration index  $i/k_s$  and inclined angle of the slope  $\beta$  in (a) silty sand (SM) soil and (b) poorly graded sand with silt (SP-SM) soil.



**Figure 9** The  $FS-Z_w$  plots for various values of the parameters: (a) cohesive strength  $c'$ , (b) soil frictional angle  $\phi'$ , (c) van Genuchten (VG) parameter  $\alpha$ , and (d) VG parameter  $n$ .

Figures 9c and 9d present the  $FS-Z_w$  plots produced by varying the van Genuchten parameters  $\alpha$  and  $n$ , respectively. When  $i/k_s \geq 1.0$  (full lines), changes of  $\alpha$  and  $n$  did not affect the  $FS-Z_w$  plot since the magnitude of  $\theta_{wb}$  was equal to the saturated water content and, hence, suction stress, which is a function of the van

Genuchten parameter  $\alpha$ , and  $n$  was completely eliminated. When  $i/k_s < 1.0$  (dash lines), changes in the van Genuchten parameters had less effect on the  $FS-Z_w$  plots than the strength parameters did. The greater  $\alpha$  and  $n$  values yielded  $FS-Z_w$  plots with smaller curvatures. Therefore, with identical strength parameters, a



sloping ground possessing greater  $\alpha$  and  $n$  values might exhibit a lower  $FS$  at the depth of the wetting front  $Z_w$ , particularly when advancing at shallow depths.

## 2.2 Analysis of critical depth

The critical depth is the depth at which a failure plane is likely to occur and it can be approximated by taking  $FS$  to equal 1.0 in Eq. (3). After rearranging the equation, the critical depth can be expressed as

$$Z_{cr} = \frac{c'}{\gamma(1-A)\sin\beta\cos\beta} - \frac{\sigma'_s \tan\phi'}{\gamma(1-A)\sin\beta\cos\beta} \quad (7)$$

where  $A$  is the stability index, expressed as  $\tan\phi'/\tan\beta$ , and  $Z_{cr}$  is the critical depth or the depth at which  $FS$  is equal to 1.0. Understanding the critical depth characteristic is vital for landslide mitigation and prevention measures, stability reinforcements and the installation of monitoring devices for landslide early warning systems. To characterize the depth of the failure plane, we analyzed a normalized critical depth as a ratio of the critical depth to the depth of the sloping ground ( $Z_i$ ), as expressed in Eq. (8),

$$\frac{Z_{cr}}{Z_i} = \frac{c'}{\gamma Z_i(1-A)\sin\beta\cos\beta} - \frac{\sigma'_s \tan\phi'}{\gamma Z_i(1-A)\sin\beta\cos\beta} \quad (8)$$

Figure 10 presents the relationships between the normalized critical depth ( $Z_{cr}/Z_i$ ) and the infiltration index ( $i/k_s$ ) with various magnitudes of stability index ( $A$ ) for different values of strength parameters ( $c'$  and  $\phi'$ ) and van Genuchten parameters ( $\alpha$  and  $n$ ). All the plots of  $Z_{cr}/Z_i$  against  $i/k_s$  indicate that steep slopes (low  $A$  values) yield critical planes at shallow depths (small values of  $Z_{cr}/Z_i$ ). In cohesionless sloping ground, particularly moderately sloping ground where the gradient was little greater than the soil frictional angle, the critical depth was very

sensitive to the rainfall intensity ( $i/k_s$ ). In cohesive soil, on the other hand, the critical depth was less sensitive to the rainfall intensity. Even a small value of cohesive strength ( $c' = 5$  kPa) in sloping ground could reduce the sensitivity of the critical depth to rainfall intensity.

A higher  $\alpha$  value represents a lower air entry suction, and hence water entry suction. A larger  $n$  value represents a more uniform pore size distribution resulting in less suction loss with increments of water content. Typically, coarse grain soil possesses higher  $\alpha$  and  $n$  values than fine grain soil. The plots of  $Z_{cr}/Z_i$  against  $i/k_s$  indicate that, for a given  $i/k_s$  in sloping ground with larger  $n$  and  $\alpha$  values, the failure plane should occur at a shallower depth. For cohesive sloping ground, the plot of  $Z_{cr}/Z_i$  against  $i/k_s$  does not change much with  $n$  and  $\alpha$  values, whereas the same plot for cohesionless sloping ground does change. For cohesionless sloping ground, larger values of  $n$  and  $\alpha$  clearly result in a flatter plot of  $Z_{cr}/Z_i$  against  $i/k_s$ .

## 3 Conclusions

To verify the unique relationship between  $\theta_{wb}$  and  $i/k_s$ , presented in Chinkulkijniwat et al. (2016), a series of one-dimensional infiltration tests was conducted with silty sand (SM) and poorly graded sand with silt (SP-SM). The stability of these soils in shallow slopes under various rainfall conditions was analyzed. The following conclusions can be made based on this research:

- The unique relationship between  $\theta_{wb}$  and  $i/k_s$  can be formulated either in sandy soil or in soil with a certain amount of fine fraction.
- Strength parameters play a more important role than VG parameters in the variation of  $FS$  with the depth of the wetting front's advance.
- For a given  $i/k_s$ , lower values of the strength parameters  $c'$  and  $\phi'$  result in failure planes at shallower depths.
- In cohesionless sloping ground having a gradient close to the soil frictional angle, when the rainfall intensity approaches the value of the soil saturated permeability, the variation of rainfall

intensity plays the major role in the eventual depth of the failure plane.

A little cohesive strength in sloping ground can reduce the influence of rainfall intensity on the depth of a potential failure plane.

Given two soils with identical strength parameters, the more uniformly grained soil which possesses the greater  $\alpha$  and  $n$  values, tends to fail at a shallower depth.

## References

- Ali A, Huang J, Lyamin AV, et al. (2014) Simplified quantitative risk assessment of rainfall-induced landslides modelled by infinite slopes. *Engineering Geology* 179: 102-116. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.06.024>
- Burylo M, Hudek C, Rey F (2011) Soil reinforcement by the roots of six dominant species on eroded mountainous marly slopes (Southern Alps, France). *Catena* 84: 70-78. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.09.007>
- Chaminda GPK (2006) Real-time prediction of rain-induced embankment by minimum measurements with back-analysis for SWCC parameters. The University of Tokyo Japan.
- Chinkulkijniwat A, Yubonchit S, Horpibulsak S, et al. (2016) Hydrological responses and stability analysis of shallow slopes with cohesionless soil subjected to continuous rainfall. *Canadian Geotechnical Journal* 53(12): 2001-2013. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0143>
- Chu ST (1978) Infiltration during an unsteady rain. *Water Resources Research* 17(3): 461-466. <https://doi.org/10.1029/WR014i003p00461>
- Duncan JM, Wright SG (2005) Soil strength and slope stability. *Scitech Book News; Portland* 29(4): 297.
- Gabet EJ, Mudd SM (2006) The mobilization of debris flows from shallow landslides. *Geomorphology* 74: 207-218. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.08.013>
- Green WH, Ampt CA (1911) Studies on soil physics: flow of air and water through soils. *Journal of Agriculture Science* 4: 1-24. <https://doi.org/10.1017/S0021859600001441>
- Guzzetti F, Peruccacci S, Rossi M, et al. (2008) The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update. *Landslides* 5: 3-17. <https://doi.org/10.1007/s10346-007-0112-1>
- Lee LM, Kassim A, Gofar N (2011) Performances of two instrumented laboratory models for the study of rainfall infiltration into unsaturated soils. *Engineering Geology* 117: 78-89. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.10.007>
- Li WC, Lee LM, Cai H, et al. (2013) Combined roles of saturated permeability and rainfall characteristics on surficial failure of homogeneous soil slope. *Engineering Geology* 153: 105-113. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.11.017>
- Lu N, Griffiths DV (2004) Profiles of steady-state suction stress in unsaturated soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 130(10): 1063-1076. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:10\(1063\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:10(1063))
- Lu N, Likos WJ (2006) Suction stress characteristic curve for unsaturated soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 132(2): 131-142. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:2\(131\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:2(131))
- Mein RG, Larson CL (1973) Modeling infiltration during a steady min. *Water Resources Research* 9(2): 384-394. <https://doi.org/10.1029/wr009i002p00384>
- Naidu S, Sajinkumar KS, Oommen T, et al. (2018) Early warning system for shallow landslides using rainfall threshold and slope stability analysis. *Geoscience Frontiers* 9(6): 1871-1882. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2017.10.008>
- Postance B, Hillier J, Dijkstra T, et al. (2018) Comparing threshold definition techniques for rainfall induced landslides: a national assessment using radar rainfall. *Earth Surface Processes and Landforms* 43: 553-560. <https://doi.org/10.1002/esp.4202>
- Shimoma S, Orense R, Honda T, et al. (2002) Model tests on slope failures caused by heavy rainfall. International Congress "INTERPRAEVENT 2002" in the Pacific Rim - Matsumoto, Japan. 2: 547-557.
- Tohari A, Nishigaki M, Komatsu M (2007) Laboratory rainfall-induced slope failure with moisture content measurement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 133(5): 575-587. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:5\(575\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:5(575))
- Tosi M (2007) Root tensile strength relationships and their slope stability implications of three shrub species in the northern Apennines (Italy). *Geomorphology* 87: 268-283. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.09.019>
- Trustrum NA, Gomez B, Page MJ (1999) Sediment production, storage and output: The relative role of large magnitude events in steepland catchments. *Schweizerbart and Borntraeger science publishers* 115: 71-86. <https://doi.org/10.1127/zfjgsuppl/115/1999/71>
- Tsai TL, Chen HE, Yang, JC (2008) Numerical modeling of minstorm-induced shallow landslides in saturated and unsaturated soils. *Environmental Geology* 55(6): 1269-1277. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-3075-1>
- van Genuchten MT (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. *Soil Science Society of America Journal* 44: 615-628. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Wu LZ, Zhou Y, Sun P (2017) Laboratory characterization of rainfall-induced loess slope failure. *Catena* 150: 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.11.002>
- Yubonchit S, Chinkulkijniwat A, Horpibulsak S, et al. (2016). Influence factors involving rainfall-induced shallow slope failure: numerical study. *International Journal of Geomechanics* 17(7): 04016158. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000865](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000865)
- Yumuang S (2006) 2001 debris flow and debris flood in Nam Ko area, Phetchabun province, central Thailand. *Environmental Geology* 51(4): 545-564. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0351-9>

## ประวัติผู้เขียน

นายถาวร ธีรเมธาธิพัรัตน์ เกิดเมื่อวันที่ 14 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2513 เริ่มศึกษาในระดับการศึกษาขั้นพื้นฐานชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนบ้านปรางค์ (ราษฎร์สามัคคี) และชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนโชคชัยสามัคคี อำเภอโชคชัย จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา (เกียรตินิยมอันดับ 1) มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นผู้ได้รับใบอนุญาตประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ทำงานเป็นวิศวกรที่ปรึกษาบริษัทรับเหมาก่อสร้างเอกชน

ปี พ.ศ. 2558 เข้ารับการศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ขนส่งและทรัพยากรธรณี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยได้รับทุนการศึกษาจากแหล่งวิจัยภายนอก (ทุน OROG) ขณะศึกษาได้ร่วมเป็นผู้ช่วยวิจัยกับคณะอาจารย์ผู้เชี่ยวชาญศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านนวัตกรรมเพื่อการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี งานที่ปรึกษาโครงการจัดทำแผนพัฒนารวมทางหลวงชนบทประจำปี

ผลงานวิจัย : ร่วมคณะวิจัยและจดอนุสิทธิบัตร ประเภทสิ่งประดิษฐ์ชื่อ ชุดทดสอบการทะลุทะลวงแบบพกพา (Portable Cone Penetrometer) ในปี พ.ศ. 2562 ร่วมสัมมนาวิชาการและนำเสนอบทความ ชื่อเรื่อง Influences of rainfall on shallow slope failures ในงานสัมมนา World landslide Forum ครั้งที่ 4 ณ เมืองลูบลียานา (Ljubljana) สาธารณรัฐสโลวีเนีย (Slovenia) เมื่อวันที่ 29 พฤษภาคม – 2 มิถุนายน พ.ศ. 2560 ร่วมคณะวิจัย และเผยแพร่ผลงานในวารสารนานาชาติ Journal of Mountain Science ปี พ.ศ. 2562 เรื่อง Stability characteristics of shallow landslide triggered by rainfall