



การศึกษาปริมาณน้ำฝนวิกฤตเพื่อการเตือนภัยลาดดินพิบัติ

: กรณีศึกษา ต.คลองทราย อ.นาทวี จ.สงขลา

**Study of Critical Cumulative Rainfall for Landslide Warning : A Case Study of  
Klongsai Subdistrict, Nathawi District, Songkhla Province**

ธนพจน์ จิรชนานูวงศ์

**Tanaphot Jiratananuvong**

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Master of Engineering in Civil Engineering**

**Prince of Songkla University**

**2560**

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การศึกษาปริมาณน้ำฝนวิกฤตเพื่อการเตือนภัยลาดดินพิบัติ

: กรณีศึกษา ต.คลองทราย อ.นาทวี จ.สงขลา

**Study of Critical Cumulative Rainfall for Landslide Warning : A Case Study of  
Klongsai Subdistrict, Nathawi District, Songkhla Province**

ธนพจน์ จิรชนานูวงศ์

**Tanaphot Jiratananuvong**

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Master of Engineering in Civil Engineering**

**Prince of Songkla University**

**2560**

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์                      การศึกษาปริมาณน้ำฝนวิกฤตเพื่อการเตือนภัยลาดดินพิบัติ : กรณีศึกษา  
 ต.คลองทราย อ.นาทวี จ.สงขลา

ผู้เขียน                                      นายธนพจน์ จิรชนานวงศ์

สาขาวิชา                                    วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมธรณีเทคนิค)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	คณะกรรมการสอบ
..... (รองศาสตราจารย์ ดร.ธนิต เถлимยานนท์)	.....ประธานกรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพล อารีย์กุล)
	.....กรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.ธนิต เถлимยานนท์)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	
..... (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนันท์ ชุบอุปการ)	.....กรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนันท์ ชุบอุปการ)
	.....กรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.คณพล ตันนโยภาส)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
 ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา  
 (วิศวกรรมธรณีเทคนิค)

.....  
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)  
 คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ชนิด เถลิงยานนท์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนนท์ ชูบุญการ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ.....

(นายธนพจน์ จิรธนาวงศ์)

นักศึกษา



(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ  
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายธนพจน์ จิรนนางค์)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาปริมาณน้ำฝนวิกฤตเพื่อการเตือนภัยลาดดินพิบัติ : กรณีศึกษา ต.คลองทราย อ.นาทวี จ.สงขลา
ผู้เขียน	นายชนพจน์ จิรชนานวงศ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมธรณีเทคนิค)
ปีการศึกษา	2559

### บทคัดย่อ

การพิบัติของลาดดินเนื่องจากฝนตกหนักในประเทศไทยได้สร้างความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินเป็นอย่างมากงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการเกิดลาดดินพิบัติ ในพื้นที่เสี่ยงของจังหวัดสงขลา โดยได้เลือกศึกษาพฤติกรรมการพิบัติของลาดดินในพื้นที่บ้านโคกลูกหมี่ ตำบลคลองทราย อำเภอนาทวี จังหวัดสงขลา ซึ่งมีการเกิดลาดดินพิบัติในวันที่ 1 มกราคม 2555 โดยมีการสำรวจตำแหน่งที่มีการพิบัติของลาดดินในพื้นที่ ทำการทดสอบภาคสนาม และทดสอบในห้องปฏิบัติการ ข้อมูลที่ได้ถูกนำไปสร้างแบบจำลองลาดดินพิบัติ เพื่อศึกษากลไกที่น้ำฝนทำให้ลาดดินเกิดการพิบัติ โดยการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำในมวลดินด้วยหลักการไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element) และวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน โดยวิธี Bishop's simplified method ผลการศึกษา พบว่าลาดดินบริเวณพื้นที่ศึกษายาว 197.71 เมตร หนา 0.80 – 1.20 เมตร และมีมุมลาดเอียงประมาณ 28 องศา ผลการจำลองจากเหตุการณ์ฝนตกระหว่างวันที่ 29 ธันวาคม 2554 ถึงวันที่ 2 มกราคม 2555 ในบริเวณพื้นที่ศึกษา พบว่าเมื่อลาดดินมีปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตถึง 310 มิลลิเมตร ส่งผลให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำกว่า 1 และเกิดลาดดินพิบัติ ซึ่งสอดคล้องกับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจริง ผลการจำลองการเกิดลาดดินถล่มในหลายรูปแบบ ถูกนำเสนอในรูปแบบกราฟปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤต (Critical Cumulative Rainfall, CCR) และแผนที่ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเตือนภัยลาดดินพิบัติในบริเวณพื้นที่ศึกษาได้

**คำหลัก :** เสถียรภาพของลาดดิน, คุณสมบัติทางวิศวกรรม, กำลังรับแรงเฉือน, ไฟไนต์อีลิเมนต์, ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤต

<b>Thesis Title</b>	Study of Critical Cumulative Rainfall for Landslide Warning : A Case Study of Klongsai Subdistrict, Nathawi District, Songkhla Province
<b>Author</b>	Mr. Tanaphot Jiratananuvong
<b>Major Program</b>	Civil Engineering (Geotechnical Engineering)
<b>Academic Year</b>	2016

### ABSTRACT

In Thailand, rainfall-triggered landslides have caused economic difficulties and even loss of life. This study focuses on a landslide prone area of Songkhla province. A selected study area was Baan Koklukmee, Klongsai subdistrict, Nathawi district, Songkhla province, where a landslide took place on January 1<sup>st</sup>, 2012. Ground surveying, field testing, and laboratory testing were conducted to collect necessary data for development of a numerical landslide model. Seepage analysis of rainwater through the slope was conducted using finite element method. Slope stability analysis was conducted to assess the factor of safety of the failed slope using Bishop's simplified method. Study results show that the landslide site was 197.71 m long, 0.8 – 1.2 m thick with approximate inclined angle of 28 degrees. Simulation results of the actual rainfall event from December 29<sup>th</sup>, 2011 to January 2<sup>nd</sup>, 2012 indicate that while the critical cumulative rainfall exceeded 310 mm, the corresponding factor safety of the slope was less than unity and landslide occurred. The simulation results can truly be depicted the actual landslide, thus the developed landslide model can be effectively used for computing the critical cumulative rainfalls for several landslides and rainfall conditions. Accordingly, a series of critical cumulative rainfall graphs and maps were constructed. They can be used for landslide warning purposes in the study area.

**Keywords:** Slope stability, Engineering property, Shear strength, Rainfall, Finite element, Critical cumulative rainfall

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธนิต เถลิงยานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักและ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนันท์ ชูอุปการ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา คำชี้แนะแนวทางในการดำเนินงานวิจัยนี้ แก่ผู้วิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนศึกษีกันกุฎิและทุนอุดหนุนการวิจัย ทำให้สามารถดำเนินงานวิจัยผ่านมาได้ ด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ สิ่งสำคัญที่สุดที่ทำให้มีข้าพเจ้าในวันนี้ พระคุณของบิดามารดา กำลังใจและความช่วยเหลือจากสมาชิกทุกคนในครอบครัว เป็นสิ่งที่สำคัญที่ผลักดันจนข้าพเจ้าสำเร็จการศึกษา ซึ่งข้าพเจ้าจะระลึกถึงบุคคลเหล่านี้อยู่ในใจตลอดไป

ธนพจน์ จิรธนานุวงศ์

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(12)
รายการภาพประกอบ	(14)
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ</b>	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>1 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 ดินและคุณสมบัติของดิน	4
2.1.1 ดินที่กำเนิดอยู่กับที่ (Residual Soil)	5
2.1.2 ดินที่เกิดจากการพัดพา (Transported Soil)	5
2.1.3 กระบวนการซึมลงดิน (Infiltration Process)	7
2.1.4 ทฤษฎีพื้นฐานการไหลซึมของน้ำผ่านดิน	9
2.1.5 ความชื้นน้ำของดิน	11
2.1.6 ทฤษฎีกำลังรับแรงเฉือนของดิน	11
2.1.7 ทฤษฎีหน่วยแรงประสิทธิผล	13
2.1.8 ทฤษฎีกำลังของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ	16
2.1.9 ทฤษฎีแรงดึงน้ำในดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ	18
2.1.10 การประมาณเส้นอัตราภัยของดิน	21
2.1.11 การเก็บตัวอย่างดิน	27
2.1.12 การทดสอบกำลังของดิน	29
2.2 การเกิดดินถล่ม	34
2.2.1 การเกิดดินถล่มในภาคใต้ของประเทศไทย	34
2.2.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการพิบัติของลาดดิน	36
2.2.3 รูปแบบการพิบัติของลาดดิน	37

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.4 รูปแบบการประเมินพื้นที่เสี่ยงภัยจากการพิบัติของลาดดิน	42
2.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน	42
2.3.1 การวิเคราะห์ลาดดินแบบอนันต์	46
2.3.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยวิธี Bishop's Simplified Method	47
2.4 การวิเคราะห์ค่าปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตของลาดอนันต์ (Critical Cumulative Rainfall)	49
2.5 การวิเคราะห์ค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (Antecedent Precipitation Index, API)	50
2.6 ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์กับการพัฒนาแผนที่เสี่ยงภัยธรณีพิบัติ (GIS)	51
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	54
<b>3 วิธีดำเนินงานวิจัย</b>	
3.1 การรวบรวมข้อมูลเบื้องต้น	61
3.1.1 การรวบรวมข้อมูลพื้นฐาน	61
3.1.2 รวบรวมข้อมูลการเกิดลาดดินพิบัติและพื้นที่เสี่ยงต่อการพิบัติของลาดดิน	62
3.2 การสำรวจพื้นที่และการเก็บตัวอย่างดิน	63
3.2.1 การออกสำรวจภาคสนามเบื้องต้น	63
3.2.2 การสำรวจพื้นที่เก็บตัวอย่างและการสำรวจทางธรณีวิทยา	63
3.2.3 การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ	65
3.2.4 การเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพ	66
3.3 การทดสอบตัวอย่างดินภาคสนามและในห้องปฏิบัติการ	66
3.3.1 การทดสอบคุณสมบัติดินในภาคสนาม	67
3.3.2 การทดสอบคุณสมบัติดินทางกายภาพ	68
3.3.3 การทดสอบคุณสมบัติดินทางวิศวกรรม	69
3.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน	71
3.4.1 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองไฟไนท์อิเลเมนต์	71
3.4.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำในมวลดิน	72
3.4.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน	73
3.4.4 การวิเคราะห์ลาดดินอนันต์ (Infinite Slope)	74

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตเพื่อการเตือนภัย	74
3.6 การจัดทำแผนที่ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตโดยใช้เทคนิคการซ้อนทับของข้อมูล สารสนเทศทางภูมิศาสตร์	75
<b>4 ผลการศึกษาและการอภิปรายผล</b>	
4.1 ผลการออกสำรวจภาคสนามเบื้องต้น	76
4.1.1 ที่ตั้งและขอบเขต	76
4.1.2 สภาพภูมิประเทศ	78
4.1.3 สภาพภูมิอากาศ	78
4.1.4 ลักษณะทางธรณีวิทยา	79
4.1.5 พื้นที่การเกิดลาดดินพิบัติในจังหวัดสงขลา	81
4.1.6 การกำหนดบริเวณพื้นที่ศึกษา	82
4.2 ผลการสำรวจพื้นที่และการทดสอบคุณสมบัติของดินภาคสนาม	83
4.2.1 ผลการสำรวจทางธรณีวิทยา	85
4.2.2 การทดสอบหากล้างรับน้ำหนักของดินด้วยวิธีการเจาะหยั่งแบบเบา	85
4.2.3 การทดสอบค่าการซึมน้ำของดินด้วยวิธี Double – Ring Infiltrometer Test	86
4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติของดินในห้องปฏิบัติการ	87
4.3.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติดัชนีของดิน	87
4.3.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติดินทางวิศวกรรม	89
4.3.3 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์คุณสมบัติกับระดับความอิ่มตัวของดิน	93
4.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตที่ทำให้ลาดดินเกิดการพิบัติ	96
4.4.1 พารามิเตอร์กำลังเฉือนของดินที่ใช้ในการวิเคราะห์	98
4.4.2 ผลการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำในมวลดิน	101
4.4.3 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยวิธีของ Bisop	104
4.4.4 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยวิธีลาดอนันต์ (Infinite Slope)	106
4.5 การพัฒนาค่าปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตเพื่อการเตือนภัย	112
4.6 ผลการจัดทำแผนที่ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตโดยใช้ข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์	115

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 สรุปผลการวิจัย	121
5.2 ข้อเสนอแนะ	124
<b>บรรณานุกรม</b>	125
<b>ภาคผนวก</b>	131
ก ผลการทดสอบการหาค่ากำลังรับน้ำหนักของดินในสนามด้วยวิธีหยั่งแบบเบา	132
ข ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านดินด้วยวิธี Double-Ring Infiltrometer Test	136
ค ผลการทดสอบ Multi - Stage Direct Shear Test (Slow Test @ 5 Load) แบบอัดตัวคายน้ำ – เนื้อแบบระบายของตัวอย่างดินที่ความชื้นธรรมชาติ และที่ความชื้นต่างๆ	138
ง ข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายชั่วโมง ณ สถานีวัดน้ำฝน ตชด. ค่ายท่านมูข่วงระหว่างวันที่ 29 ธันวาคม 2554 ถึงวันที่ 1 มกราคม 2555	162
จ ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยโปรแกรม GeoStudio V 2012 สำหรับจัดทำแผนที่ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตที่ทำให้ลาดดินพิบัติ	165
<b>การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์ ก</b>	
การเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการครั้งที่ 1	169
<b>ประวัติผู้เขียน</b>	176



## รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ชนิดของดินตะกอน (Sedimented soil) ตามกลไกการพัดพา (สุรฉัตร, 2540)	6
2.2 จำแนกประเภทของดินตามมาตรฐาน Unified Soil Classification System (USCS)	7
2.3 อัตราส่วนการเก็บตัวอย่างดินและประสิทธิภาพการเก็บตัวอย่างดิน	28
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง N กับความแข็งแรงของดินทราย (Meyerhof, 1956)	30
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง N กับความแข็งแรงของดินเหนียว (Terzaghi และ Peck, 1967)	31
2.6 เหตุการณ์การเกิดลาดดินพิบัติในพื้นที่ภาคใต้ระหว่างปี พ.ศ. 2531 – 2550	35
2.7 ตัวแปรที่ส่งผลต่อกำลังต้านทานการพิบัติและกำลังที่ทำให้เกิดการพิบัติของลาดดิน (Terzaghi, 1925)	45
2.8 วิธีการคำนวณค่าอัตราส่วนความปลอดภัยโดยวิธีต่างๆ	45
2.9 คลาสและชั้นของข้อมูลในการสร้างแผนที่เสี่ยงธรณีพิบัติ (Chau et al., 2004)	53
2.10 การให้ค่าถ่วงน้ำหนักและค่าคะแนนในแต่ละปัจจัย (ศิวศักดิ์, 2553)	56
2.11 ระดับความเสี่ยงภัยดินถล่มจากการประมวลผลด้วยสมการ Landslide index (ศิวศักดิ์, 2553)	57
2.12 พื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่มในกลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลาและพื้นที่เชื่อมโยงปี พ.ศ. 2554 (ศิวศักดิ์, 2553)	58
3.1 ช่วงระดับความอิ่มตัวของดินตัวอย่างที่ใช้ทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดิน	70
4.1 เหตุการณ์ดินพิบัติที่เกิดขึ้นในพื้นที่จังหวัดสงขลา ระหว่าง พ.ศ. 2553 – พ.ศ. 2555	81
4.2 ความลาดชัน ความสูง บริเวณส่วนบน และส่วนล่างของลาดดิน	85
4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของลาดดินที่เกิดการพิบัติ	89
4.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของลาดดินด้วยวิธี Multi - Stage Direct Shear Test ที่ระดับความชื้นต่างๆ	91
4.5 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในระบบ 3 แกนจากดินตัวอย่างของลาดพิบัติ	93

### รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.6 คุณสมบัติและเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) สำหรับแบบจำลองวิเคราะห์การไหลซึม (a.) Material properties, (b.) Boundary condition	97
4.7 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในระบบ 3 แกน ซึ่งเสนอโดย Fredlund (1993)	98
4.8 ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤติ บริเวณตำแหน่งต่างๆ ของลาดดินพิบัติ	112
4.9 ผลการวิเคราะห์ความชื้นฝน และค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินต่ำสุด	114
4.10 การจำแนกชั้นสีของแผนที่มีปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤต (CCR)	116
4.11 ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤต ของพื้นที่ศึกษาบ้าน โศกภูกหมี่ ตำบลคลองทราย อำเภอนาทวี จังหวัดสงขลา	116
4.12 พื้นที่ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตของพื้นที่ศึกษาบ้าน โศกภูกหมี่ ตำบลคลองทราย อำเภอนาทวี จังหวัดสงขลา	117

## รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า
1.1 ภาพแสดงสถิติยอดผู้เสียชีวิต ผู้ได้รับบาดเจ็บ และความถี่ (สุทธิศักดิ์, 2550)	1
1.2 ภาพแสดงมูลค่าความเสียหายจากการเกิดลาดดินพิบัติ (สุทธิศักดิ์, 2550)	1
1.3 เหตุการณ์ธรณีพิบัติในเดือนมกราคม พ.ศ. 2555 ในพื้นที่ ต.คลองทราย อ.นาทวี จ.สงขลา	2
2.1 แผนภาพแสดงวัฏจักรทางธรณีวิทยา ( <a href="http://canadianrockhound.com">http://canadianrockhound.com</a> )	4
2.2 แผนภาพแสดงการแบ่งชั้นดินตามการผุพังแปรสภาพของดินอยู่กับที่	5
2.3 แผนภาพแสดงการแบ่งดินตามลักษณะการคละ (Holtz and Kovacs, 1981)	6
2.4 แผนภาพแสดงกระบวนการซึมลงดินแยกตามปริมาณความชื้นในดิน (Adaped from Hillel, 1982)	8
2.5 ภาพแสดงกระบวนการเปลี่ยนแปลงความชื้นโดยการซึมลงดิน (ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก, 2555)	8
2.6 ภาพแสดงการสูญเสียพลังงานของการไหลในแท่งทราย ( <a href="http://interpore.org">http://interpore.org</a> )	9
2.7 ภาพแสดง Non - Linear Mohr – Coulomb failure envelope (Goodman, 1980)	12
2.8 ภาพแสดงรูปแบบการพิบัติ (วิศิษฐ์, 2540)	14
2.9 ภาพแสดงรูปลักษณะเส้นแรงค้ำน้ำในมวลดิน (Fredlund and Rahardjo, 1993)	16
2.10 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Matric suction กับ Cohesion (Fredlund and Rahardjo, 1993)	17
2.11 ภาพแสดงการเปรียบเทียบปรากฏการณ์คาพิลลารีระหว่างเม็ดดิน และหลอดคาพิลลารี (Janssen and Dempsey, 1980)	19
2.12 ภาพแสดงแรงค้ำและแรงตึงผิวบริเวณ Contractile skin (Fredlund and Rahardjo, 1993)	20
2.13 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นในมวลดิน และค่าแรงดึงดูรวม (Sillers et al., 2001)	21
2.14 ภาพแสดงความสัมพันธ์ของเส้นอัตราณ์ (Fredlund and Xing, 1994)	22
2.15 ภาพชุดเก็บตัวอย่างดิน KU – minature sampling (วารากร และคณะ, 2548)	28
2.16 ภาพแสดงเครื่องเจาะชนิดมือหมุน (Hand Auger) ( <a href="http://denichsoiltest.com">http://denichsoiltest.com</a> )	29

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.17 ภาพแสดงเครื่องมือทดสอบด้วยวิธีหยั่งเบา (Kunzelstab penetration test) (EGAT, 1980)	31 32
2.18 ภาพแสดงเครื่องมือทดสอบ Double – Ring infiltrometer test ( <a href="http://FAO.org">http://FAO.org</a> )	32
2.19 ภาพแสดงเครื่องมือทดสอบ Direct shear test (Indraratna et al., 2009)	37
2.20 ภาพแสดงรูปแบบการพังถล่มแบบการร่วงหล่น (Falls) (Highland and Bobrowsky, 2008)	38
2.21 ภาพแสดงรูปแบบการพังถล่มแบบการล้มคว่ำ (Topples) (Highland and Bobrowsky, 2008)	38
2.22 ภาพแสดงรูปแบบการพังถล่มแบบการเลื่อนไถลแบบหมุน (Rotational slide) (Highland and Bobrowsky, 2008)	38
2.23 ภาพแสดงรูปแบบการพังถล่มแบบการเลื่อนไถลแบบระนาบ (Translation slide) (Highland and Bobrowsky, 2008)	39
2.24 ภาพแสดงรูปแบบการพังถล่มแบบการเคลื่อนตัวออกด้านข้าง (Lateral spread) (Highland and Bobrowsky, 2008)	39
2.25 ภาพแสดงรูปแบบการพังถล่มแบบการคืบตัวของมวลดิน (Soil creep) (Highland and Bobrowsky, 2008)	40
2.26 ภาพแสดงรูปแบบการพังถล่มแบบการไหลแบบกองเศษหิน (Debris flow) (Highland and Bobrowsky, 2008)	40
2.27 ภาพแสดงรูปแบบการพังถล่มแบบการไหลแบบถล่ม (Avalanche flow) (Highland and Bobrowsky, 2008)	41
2.28 ภาพแสดงรูปแบบการพังถล่มแบบการไหลแบบดินไหล (Earth flow) (Highland and Bobrowsky, 2008)	41
2.29 ภาพแสดงการพังถล่มแบบลาดอนันต์ (Infinite slope) (บรรพต, 2548)	46
2.30 ภาพแสดงการวิเคราะห์ด้วยวิธี Bishop's simplified method (Das, 1994)	47
2.31 ภาพแสดงกราฟของค่า $m_{\alpha(n)}$ สำหรับสมการของ Bishop (Das, 1994)	48
2.32 แผนภาพแรง (Free body diagram) ของแท่งดินสำหรับลาดอนันต์ (บรรพต, 2548)	48

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.33 ภาพแสดงขอบเขตน้ำฝนวิกฤต (Okada et al., 1992)	49
2.34 ภาพแสดงส่วนประกอบของมวลดิน (วรวัชร, 2552)	50
2.35 ภาพแสดงลักษณะข้อมูล Vector สำหรับการซ้อนทับข้อมูล (Chau et al., 2004)	52
2.36 แผนที่ระดับความเสี่ยงภัยดินถล่มในกลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลาและพื้นที่เชื่อมโยงปี พ.ศ. 2554 (สิวศักดิ์, 2553)	59
2.37 แผนที่หมู่บ้านและพื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่มในกลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลาและพื้นที่เชื่อมโยงปี พ.ศ. 2554 (สิวศักดิ์, 2553)	60
3.1 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	62
3.2 ภาพแสดงการเปิดหลุมสำรวจดิน (a.) ตำแหน่งบนของแนวพืด (TM) (b.) ตำแหน่งล่างของแนวพืด (BM)	64
3.3 ภาพแสดงลาดดินพืด ตำแหน่งเก็บตัวอย่างดิน และตำแหน่งทดสอบภาคสนาม	64
3.4 ภาพแสดงตัวอย่างดินคงสภาพ (a.) ที่เก็บได้จาก KU – Miniature sampler (b.) ตัวอย่างดินคงสภาพเมื่อคั่นออกจากกระบอกเก็บตัวอย่าง	65
3.5 ภาพแสดงตัวอย่างดินแปลงสภาพ (a.) และ (b.) จากตำแหน่งส่วนล่างของลาดดิน (BM)	66
3.6 ภาพแสดงการทดสอบค่าการซึมผ่านของดินด้วยวิธี Double – Ring infiltrometer test ณ ตำแหน่งส่วนบนของลาดดิน (TM)	68
3.7 ภาพแสดงตัวอย่างทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของลาดดินในห้องปฏิบัติการ (a.) ภาพแสดงตัวอย่างดินในการทดสอบหาความชื้นในมวลดิน (b.) ภาพแสดงตัวอย่างดินทดสอบหาขนาดผละของเม็ดดินโดยวิธี Wet seive	68
3.8 ภาพแสดงขั้นตอนวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน	72
4.1 แผนที่แสดงตำแหน่งพื้นที่ศึกษาลาดดินพืด (กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, 2550)	77
4.2 แผนที่แสดงความสูงของพื้นที่ศึกษาอำเภอนาทวี จังหวัดสงขลา	78
4.3 แผนที่ธรณีวิทยา จังหวัดสงขลา (กรมทรัพยากรธรณี, 2550)	80

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 แผนที่ 1 : 50,000 แสดงตำแหน่งพื้นที่เกิดลาดดินพิบัติ บริเวณบ้าน โศกภูกลมณี	82
4.5 ภาพแสดงตำแหน่งสำรวจลาดดินพิบัติ บริเวณบ้าน โศกภูกลมณี (a.), (b.), (c.), (d.) และ (e.) ที่สอดคล้องกับตำแหน่งที่ได้แสดงในรูปที่ 4.4	83
4.6 ภาพแสดงความลาดชัน (Slope profile) ที่ได้จากการสำรวจ	84
4.7 ภาพตัดขวางบริเวณพื้นที่ศึกษา	84
4.8 ภาพแสดงหิน และดินจากการสำรวจพื้นที่ภาคสนาม (a.) ภาพแสดงตัวอย่างหินกรวดมน บริเวณล่างของลาดพิบัติ (b.) ภาพแสดงตัวอย่างหินทราย บริเวณบนของลาดพิบัติ (c.) ภาพแสดงตัวอย่างดิน บริเวณล่างของลาดพิบัติ	85
4.9 ภาพแสดงผลการทดสอบด้วยวิธีการเจาะแบบหยั่งเบา	86
4.10 ภาพแสดงตัวอย่างดินแข็งจากตำแหน่งส่วนบนของลาดดิน (TM) (a.) และ (b.)	86
4.11 ภาพแสดงผลการทดสอบด้วยวิธีการทดสอบความซึมผ่าน (Double – Ring infiltrometer test)	87
4.12 การทดสอบการกระจายตัวของดินตัวอย่าง (Grain size distribution curve)	88
4.13 ผลการจำแนกชนิดของดินตัวอย่าง โดย Plasticity chart	89
4.14 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินตัวอย่างตามระดับความอิ่มตัว (S) (a.) ส่วนบนของลาดดิน (TM), (b.) ส่วนกลางของลาดดิน (MM) และ (c.) ส่วนล่างของลาดดิน (BM)	92
4.15 ภาพความสัมพันธ์ระหว่าง Max shear stress, Normal stress และ Degree of saturation ของตัวอย่างดินบริเวณส่วนบนของลาดพิบัติ (TM) (a.) ความสัมพันธ์แบบ Linear plane (b.) ความสัมพันธ์แบบ Logarithm plane	94
4.16 ภาพความสัมพันธ์ระหว่าง Max shear stress, Normal stress และ Degree of saturation ของตัวอย่างดินบริเวณส่วนกลางของลาดพิบัติ (MM) (a.) ความสัมพันธ์แบบ Linear plane (b.) ความสัมพันธ์แบบ Logarithm plane	94
4.17 ภาพความสัมพันธ์ระหว่าง Max shear stress, Normal stress และ Degree of saturation ของตัวอย่างดินบริเวณส่วนล่างของลาดพิบัติ (BM) (a.) ความสัมพันธ์แบบ Linear plane (b.) ความสัมพันธ์แบบ Logarithm plane	94

### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 ภาพแสดงเส้นอัตรลักษณ์ของน้ำในดินตัวอย่าง (SWCC)	95
4.19 Permeability Function ของลาดดินที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลซึม	96
4.20 ภาพแสดงแบบจำลอง Finite element สำหรับการวิเคราะห์	97
4.21 ภาพความสัมพันธ์ระหว่าง Max shear stress, Normal stress และ Matrix suction ของตัวอย่างดินบริเวณส่วนบนของลาดพิบัติ (TM)	99
4.22 ภาพความสัมพันธ์ระหว่าง Max shear stress, Normal stress และ Matrix suction ของตัวอย่างดินบริเวณส่วนกลางของลาดพิบัติ (MM)	99
4.23 ภาพความสัมพันธ์ระหว่าง Max shear stress, Normal stress และ Matrix suction ของตัวอย่างดินบริเวณส่วนล่างของลาดพิบัติ (BM)	100
4.24 ภาพแสดงปริมาณน้ำฝนรายชั่วโมงจากสถานีวัดน้ำฝน ตชด.ค่ายท่านมูข ที่ใช้ในการวิเคราะห์การพิบัติของลาดดิน (วันที่ 29 ธันวาคม 2554 ถึงวันที่ 2 มกราคม 2555)	101
4.25 ภาพแบบจำลองของลาดดินพิบัติด้วยโปรแกรม GeoStudio V2012 ฟังก์ชัน SEEP/W	103
4.26 ผลการจำลองการไหลซึมของน้ำฝนในลาดดิน Section A – A (a.)ภาพความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric water content กับ Elevation (b.)ภาพความสัมพันธ์ระหว่าง Pore - water pressure กับ Elevation	103
4.27 ผลการจำลองการไหลซึมของน้ำฝนในลาดดิน Section B – B (a.)ภาพความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric water content กับ Elevation (b.)ภาพความสัมพันธ์ระหว่าง Pore - water pressure กับ Elevation	103
4.28 ผลการจำลองการไหลซึมของน้ำฝนในลาดดิน Section C – C (a.)ภาพความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric water content กับ Elevation (b.)ภาพความสัมพันธ์ระหว่าง Pore - water pressure กับ Elevation	104
4.29 ผลการจำลองการไหลซึมของน้ำฝนในลาดดิน Section D – D (a.)ภาพความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric water content กับ Elevation (b.)ภาพความสัมพันธ์ระหว่าง Pore - water pressure กับ Elevation	104

### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.30	ภาพปริมาณน้ำฝนรายชั่วโมงปริมาณน้ำฝนสะสมเปรียบเทียบกับค่าอัตราส่วนความปลอดภัย	105
4.31	ภาพแสดง Critical slice surface ของลาดพิบัติ Step Time 78	106
4.32	ภาพแสดงการวิเคราะห์ลาดอนันต์ (Infinite slope) กรณีระดับน้ำอยู่ใต้ดินอยู่ลึกมาก	108
4.33	ภาพแสดงการวิเคราะห์ลาดอนันต์ (Infinite slope) กรณีระดับน้ำอยู่ผิวดิน	109
4.34	แผนภูมิ (Chart) ปริมาณน้ำฝนสะสมรายชั่วโมง สำหรับพื้นที่ศึกษา	113
4.35	ภาพแผนที่แสดงปริมาณน้ำฝนวิกฤติของพื้นที่ศึกษาบ้าน โศกภูกลมี่ ตำบลคลองทราย อำเภอนาทวี จังหวัดสงขลา กรณีฝนตกหนัก ความหนาชั้นดิน 1.00 เมตร	118
4.36	ภาพแผนที่แสดงปริมาณน้ำฝนวิกฤติของพื้นที่ศึกษาบ้าน โศกภูกลมี่ ตำบลคลองทราย อำเภอนาทวี จังหวัดสงขลา กรณีฝนตกหนัก ความหนาชั้นดิน 2.00 เมตร	118
4.37	ภาพแผนที่แสดงปริมาณน้ำฝนวิกฤติของพื้นที่ศึกษาบ้าน โศกภูกลมี่ ตำบลคลองทราย อำเภอนาทวี จังหวัดสงขลา กรณีฝนตกหนักมาก ความหนาชั้นดิน 1.00 เมตร	119
4.38	ภาพแผนที่แสดงปริมาณน้ำฝนวิกฤติของพื้นที่ศึกษาบ้าน โศกภูกลมี่ ตำบลคลองทราย อำเภอนาทวี จังหวัดสงขลา กรณีฝนตกหนักมาก ความหนาชั้นดิน 2.00 เมตร	119
4.39	ภาพแผนที่แสดงปริมาณน้ำฝนวิกฤติของพื้นที่ศึกษาบ้าน โศกภูกลมี่ ตำบลคลองทราย อำเภอนาทวี จังหวัดสงขลา กรณีฝนตกหนักมากๆ ความหนาชั้นดิน 1.00 เมตร	120
4.40	ภาพแผนที่แสดงปริมาณน้ำฝนวิกฤติของพื้นที่ศึกษาบ้าน โศกภูกลมี่ ตำบลคลองทราย อำเภอนาทวี จังหวัดสงขลา กรณีฝนตกหนักมากๆ ความหนาชั้นดิน 2.00 เมตร	120

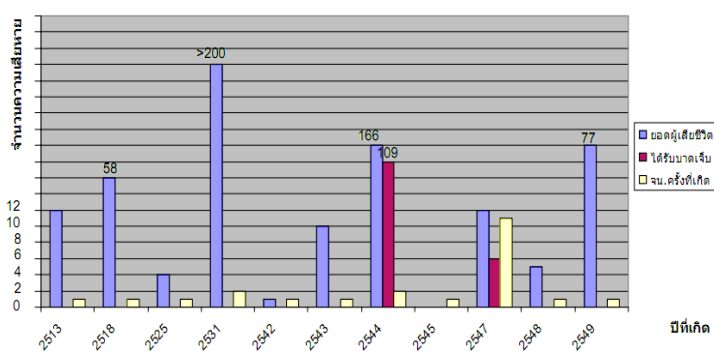


## บทที่ 1

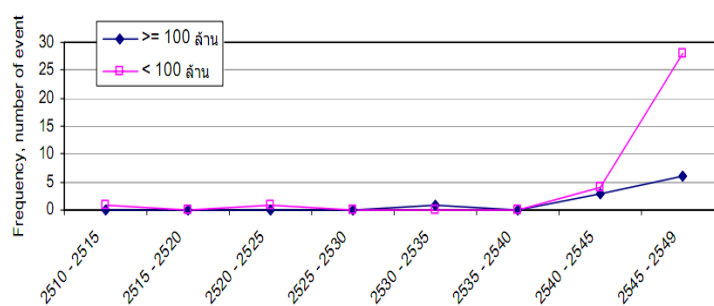
### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ลาดดินพิบัติถือเป็นหนึ่งในภัยพิบัติธรรมชาติที่รุนแรง และก่อให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชน ลักษณะของพื้นที่ที่เสี่ยงต่อการเกิดลาดดินพิบัติ ได้แก่ บริเวณพื้นที่สูงชัน หรือที่ราบเชิงเขา สำหรับประเทศไทยนั้น ปัญหาลาดดินพิบัติเกิดขึ้นต่อเนื่องเป็นระยะเวลาหลายปี เมื่อพิจารณาจากเหตุการณ์ลาดดินพิบัติ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2540 ในรูปที่ 1.1 จนถึงปัจจุบันพบว่าสถิติยอดผู้เสียชีวิต และได้รับบาดเจ็บ รวมถึงมูลค่าความเสียหายต่อทรัพย์สินอันเกิดจากลาดดินพิบัติมีแนวโน้มสูงขึ้น ทั้งในด้านของความถี่ ความรุนแรง และความเสียหาย โดยสรุปมียอดผู้เสียชีวิตจากการเกิดธรณีพิบัติตั้งแต่ปี 2540 – 2549 เป็นจำนวน 534 คน มูลค่าความเสียหายรวมอยู่ที่ 4,585.6 ล้านบาท (สุทธิศักดิ์, 2550) นอกจากนี้ ในรูปที่ 1.2 ยังแสดงให้เห็นมูลค่าความเสียหายจากเหตุการณ์ธรณีพิบัติตั้งแต่ปี 2545 จนถึงปี 2550 ซึ่งเห็นได้ว่า ลักษณะของเส้นกราฟเพิ่มสูงขึ้นอย่างก้าวกระโดด อนุมานได้ว่า ในการเกิดลาดดินพิบัติแต่ละครั้งมีแนวโน้มของความรุนแรงที่เพิ่มสูงขึ้น



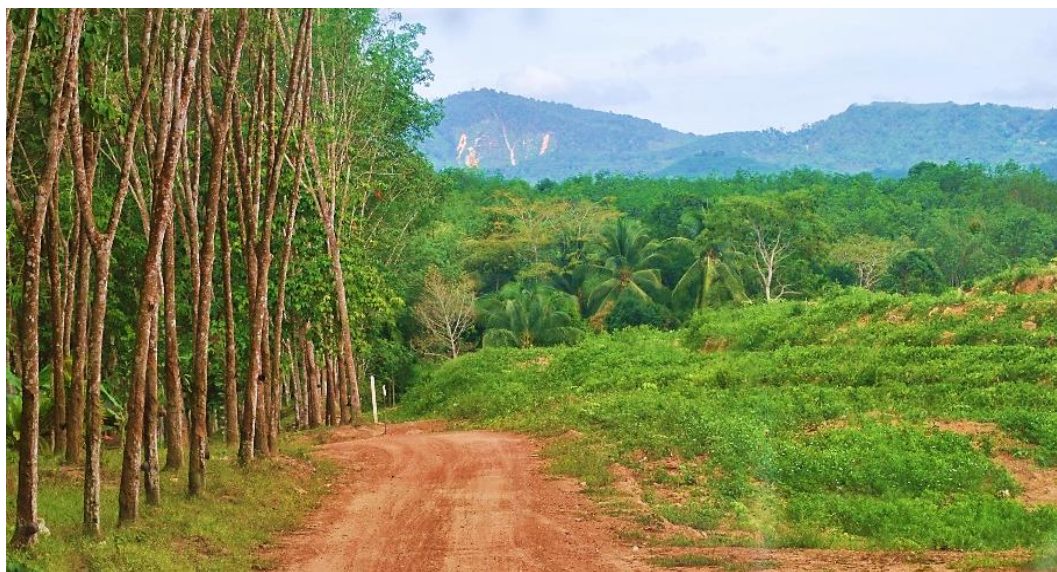
รูปที่ 1.1 ภาพแสดงสถิติยอดผู้เสียชีวิต และผู้ได้รับบาดเจ็บ (สุทธิศักดิ์, 2550)



รูปที่ 1.2 ภาพแสดงมูลค่าความเสียหายจากการเกิดลาดดินพิบัติ (สุทธิศักดิ์, 2550)

จากกรณีเหตุการณ์ลาดดินพิบัติ เมื่อวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2555 ในพื้นที่ ต.คลองทราย อ.นาทวี จ.สงขลา ดังแสดงในรูปที่ 1.3 ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวมีฝนตกสะสมต่อเนื่อง 3 วัน สามารถตรวจวัดได้ 344 มิลลิเมตร เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้สร้างความเสียหายต่อทรัพย์สิน และพื้นที่ทางการเกษตรเป็นอย่างมาก ทั้งนี้ในบริเวณพื้นที่ดังกล่าวไม่เคยเหตุการณ์ลาดดินพิบัติ ในลักษณะดังกล่าวมาก่อน (ข้อมูลจากประชาชนในพื้นที่) ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งหมายเพื่อหามาตรการป้องกัน และบรรเทาการเกิดเหตุการณ์ลาดดินพิบัติ โดยทำการวิเคราะห์หลักไถ่ที่น้ำฝนทำให้เกิดลาดดินพิบัติโดยใช้แบบจำลอง

การศึกษาครั้งนี้เป็นกรณีศึกษาพื้นที่ ต.คลองทราย อ.นาทวี จ.สงขลา โดยศึกษาปริมาณน้ำฝน การไหลซึมของน้ำลาดดิน การลดลงของกำลังของดินเนื่องจากปริมาณน้ำฝน เสถียรภาพของลาดดิน เพื่อประเมินปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤต (Critical cumulative rainfall, CCR) โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นปัจจัย (หรือข้อมูลสนับสนุน) ในการทำแผนที่ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตสำหรับใช้ในการเตือนภัยล่วงหน้า



รูปที่ 1.3 เหตุการณ์ลาดดินพิบัติในเดือนมกราคม พ.ศ. 2555 ในพื้นที่ ต.คลองทราย อ.นาทวี จ.สงขลา

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อวิเคราะห์สาเหตุ และลักษณะการพิบัติของลาดดิน เนื่องจากน้ำฝน
- 1.2.2 เพื่อพัฒนาค่าปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤต (Critical cumulative rainfall, CCR) ของพื้นที่ศึกษาที่สามารถนำไปใช้ในการเตือนภัยลาดดินพิบัติล่วงหน้า
- 1.2.3 เพื่อจัดทำแผนที่ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤต (Critical cumulative rainfall map) ของพื้นที่ศึกษา

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 พื้นที่ศึกษาระดับบ้านโคกลูกหมี ต.คลองทราย อ.นาทวี จ.สงขลา
- 1.3.2 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินคงสภาพใช้วิธี Multi - Stage direct shear test โดยทดสอบแบบระบายน้ำ
- 1.3.3 การวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำในมวลดินใช้หลักการไฟไนท์อิลิเมนต์และใช้วิธีลิมิตความสมดุลสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน
- 1.3.4 แผนที่ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤต มีการใช้คุณสมบัติทางวิศวกรรม และกำลังรับแรงเฉือน ของลาดดินประยุกต์ร่วมกัน

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

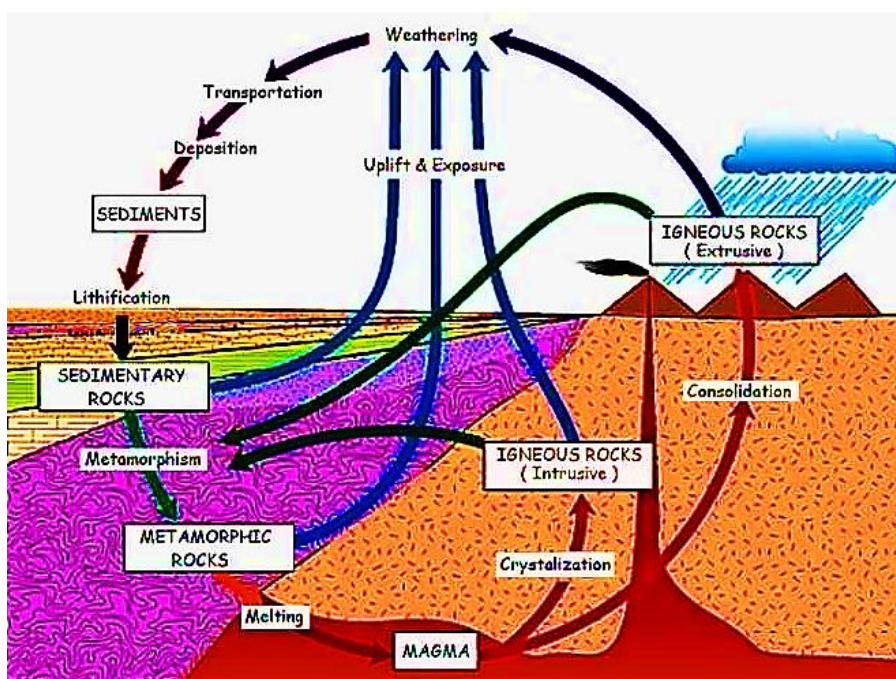
- 1.4.1 สามารถอธิบายถึงลักษณะของการเกิดลาดดินพิบัติเนื่องจากปัจจัยปริมาณน้ำฝนในพื้นที่ศึกษาได้
- 1.4.2 สามารถประเมินความปลอดภัยของลาดดินในสภาวะปกติ และในสภาวะวิกฤตในพื้นที่ศึกษาได้ โดยอ้างอิงข้อมูลจากการศึกษาปัจจัยจากปริมาณน้ำฝนที่ส่งผลกระทบต่อ การพิบัติของลาดดิน
- 1.4.3 สามารถอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำในมวลดินที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางด้านการรับแรงเฉือน
- 1.4.4 สามารถจัดทำแผนที่ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเตือนภัยได้

## บทที่ 2

### แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ดินและคุณสมบัติของดิน

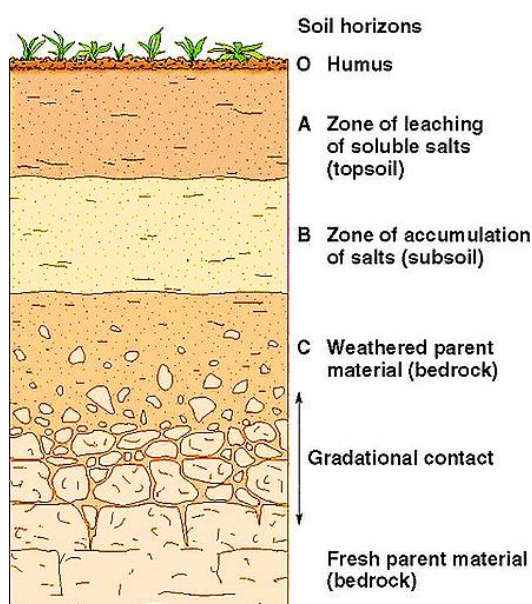
ดิน หมายถึง สารหรือวัสดุบนพื้นผิวโลก ซึ่งอยู่ในสภาพไม่ยึดติดกันแน่น และไม่แข็งแรง (Uncemented and Unconsolidate materials) ซึ่งประกอบด้วย อินทรีย์สาร และอนินทรีย์สารเหนือชั้นหินแข็ง (Bed rock) มีขนาดต่างๆ ละเอียดกว่าส่วนมากจะมีขนาดเล็กกว่า 300 มิลลิเมตร โดยดินจะมีลักษณะจำเพาะที่แตกต่างออกจากกันโดยเป็นผลจากระบวนการกำเนิดดินซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของวัฏจักรธรณีวิทยา ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยมีหินต้นกำเนิด คือ หินอัคนี เมื่อได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิ ความชื้น ความดัน แรงดึงดูดของโลก ปฏิกริยาทางเคมี และการถูกพัดพา ทำให้มีกระบวนการเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพเป็นดิน ซึ่งจะประกอบด้วย เม็ดดิน (Soil mass) น้ำ อากาศ เป็นต้น ซึ่งส่วนผสมที่ต่างกัันสามารถจำแนกดินตามลักษณะการเกิดเป็น 2 ชนิด คือ



รูปที่ 2.1 แผนภาพวัฏจักรธรณีวิทยา (<http://canadianrockhound.com>)

### 2.1.1 ดินที่กำเนิดอยู่กับที่ (Residual Soil)

Residual Soil เป็นดินที่เกิดจากการแปรสภาพ เนื่องจากการการผุพังของหินอัคนีจากสภาพแวดล้อม (Weathering) และเกิดการตกตะกอนทับถม โดยที่ไม่ได้มีการเคลื่อนย้ายหรือถูกนำพาไปที่อื่น ลักษณะเด่นของดินประเภทนี้ จะมีความหนาไม่มากนัก และมีดินเม็ดละเอียด อยู่บริเวณผิวหน้าของชั้นดิน จากนั้นขนาดของเม็ดดินจะใหญ่ขึ้นตามระดับความลึก (ชินะวัฒน์, 2545) ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงการแบ่งชั้นดินตามการผุพังแปรสภาพของดินอยู่กับที่

### 2.1.2 ดินที่เกิดจากการพัดพา (Transported Soil)

ดินที่เกิดจากการนำพา (Transported soil) เป็นดินที่เกิดจากการแปรเปลี่ยนจากการผุพัง (Weathering) แล้วถูกพัดพาโดยอาศัยตัวกลาง เช่น ลม น้ำ แรงโน้มถ่วง และธารน้ำแข็ง เป็นต้น ไปตกตะกอนทับถมในสถานที่ต่างๆ เกิดเป็นชั้นของดิน ด้วยสาเหตุการเกิดที่ต่างต่างกันจึงทำให้มีคุณสมบัติของดินแต่ละสถานที่แตกต่างกันด้วย ซึ่งสามารถแบ่งชนิดของดินตามกลไกของการพัดพา และสถานที่ของการเกิดได้ ดังตารางที่ 2.1 โดยดินที่เกิดจากการตกตะกอนเรียกอีกชื่อหนึ่งได้ว่า ดินตะกอน (Sedimented soil) (สุรฉัตร, 2540)

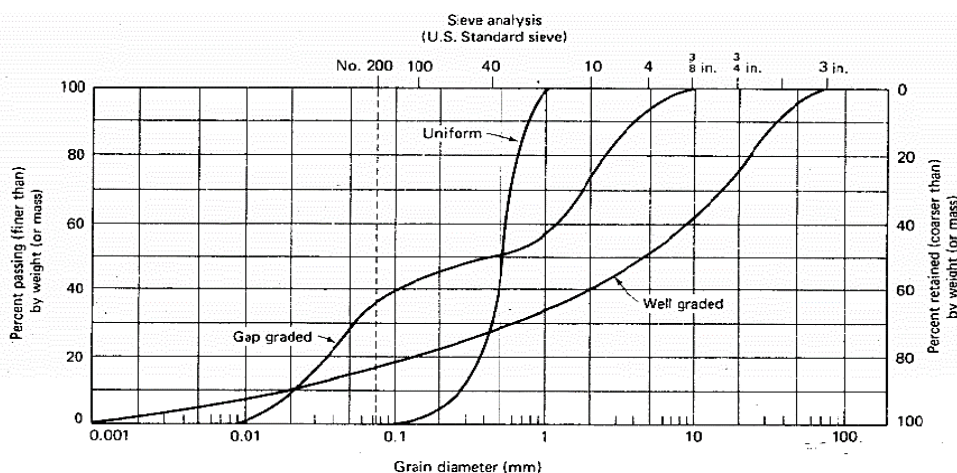


ตารางที่ 2.1 ชนิดของดินตะกอน (Sedimented soil) ตามกลไกการพัดพา (สุรฉัตร, 2540)

กลไกของการพัดพา	สถานที่หรือกลไกการตกตะกอน	ชนิดของดินเรียกตามธรณีวิทยา
น้ำ (Fluvial)	ทะเลสาบ	Lacustrine
	แม่น้ำ ลำธาร	Alluvial
	น้ำทะเล	Marine
น้ำแข็ง (Glacial)	ธารน้ำแข็ง	Till, moraine
ลม (Aeolian)	ลม และแรงโน้มถ่วง	Loess, Sand dune
แรงโน้มถ่วง (Gravity)	แรงโน้มถ่วง	Talus, Landslide, Hillwash

นอกจากสามารถจำแนกชนิดของดินตามลักษณะการเกิดแล้ว ยังสามารถจำแนกชนิดของดินตาม ลักษณะการคละกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และตารางที่ 2.2 ซึ่งสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ตามหลักวิศวกรรม คือ

- 1) ดินขนาดเม็ดคละกันดี (Well grade soil) หมายถึง ดินที่มีขนาดคละกันอย่างเหมาะสม
- 2) ดินขนาดเม็ดคละกันไม่ดี (Poorly grade soil) แบ่งได้เป็น
  - ก) ดินขนาดเม็ดสม่ำเสมอ (Uniformed grade soil) หมายถึง ดินที่มีขนาดคละเม็ดเดียวกันเป็นส่วนใหญ่
  - ข) ดินขนาดเม็ดขาดช่วง (Gap grade soil) หมายถึง ดินที่มีเม็ดดินขนาดใหญ่และเล็ก แต่ขนาดปานกลางน้อยมากหรือแทบไม่มีเลย หรือขาดขนาดใดขนาดหนึ่งไป (สถาพร, 2545)



รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงการแบ่งดินตามลักษณะการคละ (Holtz and Kovacs, 1981)

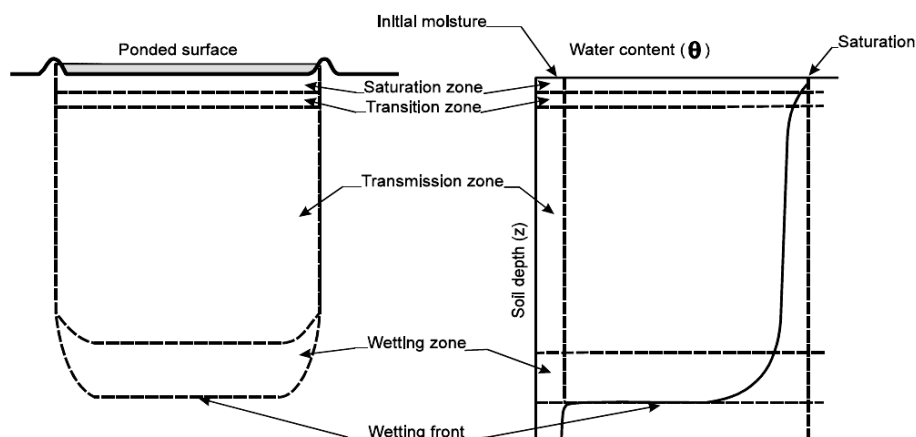
ตารางที่ 2.2 จำแนกประเภทของดินตามมาตรฐาน Unified Soil Classification System (USCS)

Criteria for assigning group symbol				Group Symbol	
Coarse – grained soils	Gravel	Clean Gravel	$C_u \geq 4$ and $1 \leq C_c \leq 3$	GW	
	More than 50 %	Less than 5 % fines	$C_u < 4$ and/or $1 > C_c > 3$	GP	
	of coarse fraction	Gravel with fines	$PI < 4$ or plots below A - Line	GM	
More than 50 % of	retain on No.4	More than 12 %	$PI > 7$ and/or plots above A - Line	GC	
		fines			
retained on No. 200	Sand	Clean Sand	$C_u \geq 6$ and $1 \leq C_c \leq 3$	SW	
	50% or more of	Less than 5 % fines	$C_u < 6$ and/or $1 > C_c > 3$	SP	
	coarse fraction	Sand with fines	$PI < 4$ or plots below A - Line	SM	
	passes No.4 seive	More than 12 %	$PI > 7$ and/or plots above A - Line	SC	
Fine – grained soils	Silt and Clays	Inorganic	$PI < 4$ or plots below A - Line	CL	
			$PI > 7$ and/or plots above A - Line	ML	
	than 50	Organic	$(LL - \text{oven dried}) / (LL - \text{oven dried})$	OL	
	50 % or more passes		$< 0.75$		
	No. 200 seive	Silt and Clays	Inorganic	$PI$ plots on or above A - Line	CH
				$PI$ plots below A - Line	MH
or more		Organic	$(LL - \text{oven dried}) / (LL - \text{oven dried})$	OH	
Highly Organic Soils	Primarily organic matter, dark in color, and organic order			Pt	

### 2.1.3 กระบวนการซึมลงดิน (Infiltration Process)

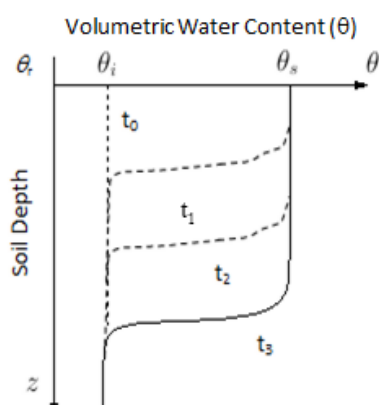
กระบวนการซึมลงสู่ดินเริ่มขึ้นเมื่อมีน้ำตกลงสู่ผิวดิน และแทรกซึมจากชั้นผิวดินผ่านลงสู่ดินชั้นล่างด้วยแรงดึงจากความชื้น จนกระทั่งมวลดินอิ่มตัวด้วยน้ำ จากนั้นอิทธิพลเนื่องจากแรงดึงดูดของโลกทำให้น้ำไหลซึมลึกกลงไปในชั้นดิน ซึ่งสามารถแบ่งแบ่งชั้นดินตามปริมาณความชื้นของดินได้เป็น 4 ส่วน

- 1) Saturation Zone หมายถึง ส่วนที่อยู่บนสุดบริเวณใกล้ผิวดิน
  - 2) Transmission Zone หมายถึง ส่วนที่น้ำไหลผ่านชั้นดินในขณะที่ดินยังไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยตลอดหน้าตัดจะมีความชื้นใกล้เคียงกัน
  - 3) Wetting Zone หมายถึง ส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นตลอดความลึก ซึ่งความชื้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึก
  - 4) Wetting Front หมายถึง ส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นอย่างรวดเร็ว
- กระทั่งเปียกชุ่มน้ำ ซึ่งชั้นนี้สามารถแยกแยะระหว่างดินเปียกกับดินแห้งได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงกระบวนการซึมลงดินแยกตามปริมาณความชื้นในดิน  
(Adaped from Hillel, 1982)

Green Amp (1911) เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับพิจารณาการไหลซึม (Infiltration) โดยกำหนดให้ดินมีคุณสมบัติเป็นวัสดุเนื้อเดียวกัน (Homogenous material) พื้นที่ที่ฝนเริ่มตกจะเริ่มเข้าสู่กระบวนการซึมลงสู่ดิน โดยให้ดินมีค่าอัตราการไหลซึม (Hydraulic conductivity,  $k$ ) เท่ากับความเข้มของปริมาณน้ำที่ตกลงมา แต่จะไม่มากกว่าค่าอัตราการไหลซึมของดินขณะอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated hydraulic conductivity,  $k_{sat}$ ) และปริมาณน้ำในมวลดินจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับความลึก ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยในช่วงเริ่มต้นเวลา  $t_0$  ปริมาณน้ำในดินจะมีค่าเป็น  $\theta_i$  เท่ากันตลอดทั้งความลึก จากนั้นเมื่อเริ่มเข้าสู่กระบวนการไหลซึมปริมาณน้ำในดินจะมีค่าเป็น  $\theta_s$  โดยจะเริ่มจากบริเวณผิวดินจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปดินก็เริ่มเข้าสู่  $\theta_s$  ตามระดับความลึกลงของดิน

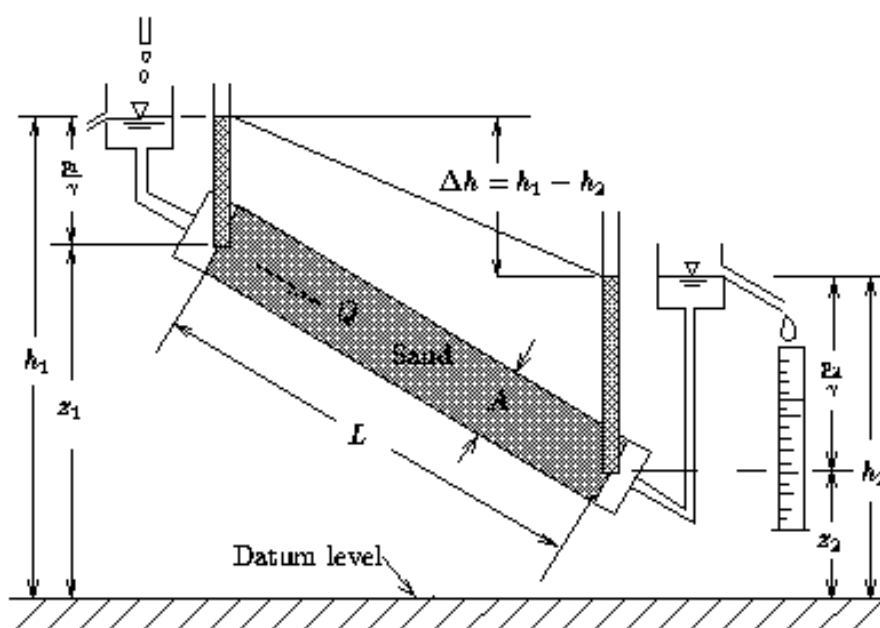


รูปที่ 2.5 ภาพแสดงกระบวนการเปลี่ยนแปลงความชื้นโดยการซึมลงดิน  
(ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก, 2555)



### 2.1.4 ทฤษฎีพื้นฐานการไหลซึมของน้ำผ่านดิน

Henri Darcy (1856) ได้ทดลองการไหลของน้ำผ่านแท่งทราย Darcy ได้ค้นพบอัตราการไหลผ่านวัสดุพรุน (Porous media) ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าการสูญเสียพลังงาน (Head loss,  $h$ ) และสัดส่วนผกผันกับความยาวของเส้นทางการไหล ดังแสดงในรูปที่ 2.6 แสดงการทดสอบเพื่อหาค่าการสูญเสียพลังงานของการไหลผ่านแท่งทราย และทำการติดตั้ง Piezometers ที่ระยะห่างกันตามแนวการไหล  $L$  โดยพลังงานรวมของระบบเป็นสมการพลังงานของ Bernoulli equation ดังสมการที่ 2.1 (Philip and Wayne, 1988)



รูปที่ 2.6 ภาพแสดงการสูญเสียพลังงานของการไหลในแท่งทราย (<https://interpore.org>)

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + h_1 \quad (2.1)$$

โดยที่	$P_{1,2}$	=	ศักย์ความดันของน้ำ
	$\gamma$	=	หน่วยน้ำหนักของน้ำ
	$v_{1,2}$	=	ความเร็วของการไหลซึม
	$Z_{1,2}$	=	ศักย์ของความสูง
	$h_{1,2}$	=	ค่าการสูญเสียของพลังงาน

พิจารณาการไหลซึมผ่านวัสดุพรุนที่หน้าตัดใดๆ ของการไหล พบว่าค่าความแตกต่างของศักย์น้ำรวม (Total head) ของหน้าตัดทั้งสองเมื่อพิจารณาจากระดับฐาน หรือระดับอ้างอิง (Datum) เดียวกัน จะมีค่าเท่ากับการสูญเสียพลังงาน ซึ่งค่าศักย์น้ำรวม ประกอบด้วย ศักย์ความดันของน้ำ (Pressure head,  $P$ ) ศักย์ความเร็วของการไหล (Velocity,  $\frac{v^2}{2g}$ ) และศักย์ความสูง (Elevation head,  $Z$ )

เนื่องจากความเร็วของการไหลผ่านตัวกลางพรุนมีค่าต่ำมาก ดังนั้น ค่าศักย์ความเร็ว  $\frac{v^2}{2g}$  ของการไหลในสมการของ Bernoulli equation จึงไม่นำมาพิจารณา ดังนั้นค่าการสูญเสียพลังงานสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.3

$$h_1 = \left( \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 \right) - \left( \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 \right) \quad (2.2)$$

ค่าการสูญเสียพลังงานนั้นเป็นอิสระกับค่าความลาดเอียงของแท่งทราย Darcy จึงให้ความสัมพันธ์ของอัตราการไหล ค่าการสูญเสียพลังงานและระยะทางการไหลเป็นส่วนหนึ่งของค่าคงที่  $k$  เรียกว่า *Hydraulic conductivity* หรือ *Permeability* หรือภายหลังเรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำ มาแสดงถึงความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.3 เรียกว่า *กฎของดาร์ซี*

$$v = \frac{Q}{A} = k \frac{dh}{dL} \quad (2.3)$$

โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงของศักย์น้ำรวมต่อระยะทางการไหล เรียกว่า ความลาดของเส้นระดับน้ำหรือความลาดชันทางชลศาสตร์ (Hydraulic gradient,  $i$ ) ดังสมการที่ 2.4

$$i = \frac{dh}{dL} = \frac{h_1}{L} \quad (2.4)$$

### 2.1.5 ความชื้นน้ำของดิน

เมื่อมีความดันหรือระดับต่างกันระหว่าง 2 จุดในดิน จะทำให้มีการไหลซึมของน้ำผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดดินในมวลดิน ความสามารถในการไหลซึมของน้ำผ่านดินนี้ เรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำ ( $k$ ) โดยการไหลซึมของน้ำผ่านดิน แรงดันหรือระดับน้ำก็สูญเสียไป เพราะแรงเสียดทานของผิวระหว่างช่องว่างของเม็ดดินกับความเร็วการไหลของน้ำในดิน ดังสมการที่ 2.5 ซึ่งเป็นไปตามกฎของดาร์ซี

$$v = ki \quad (2.5)$$

โดยที่

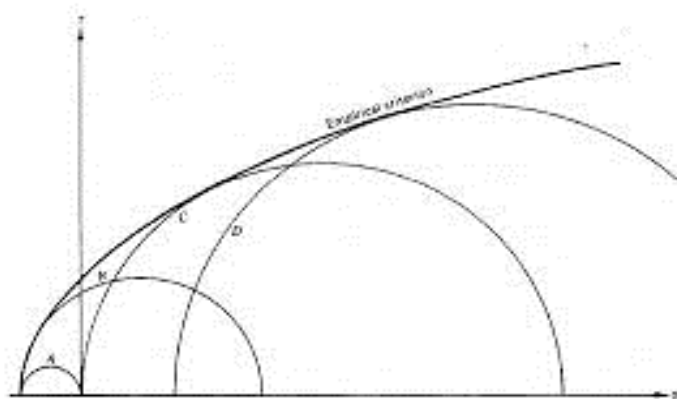
- $v$  = ความเร็วของการไหลซึม
- $k$  = สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำ
- $i$  = ความลาดชันทางชลศาสตร์

### 2.1.6 ทฤษฎีกำลังรับแรงเฉือนของดิน

กำลังรับแรงเฉือนของดิน หมายถึง หน่วยแรงเฉือนสูงสุด (Maximum shear stress) บนระนาบการพังของดินขณะเกิดการพิบัติ หรือเป็นหน่วยแรงเฉือนสูงสุดที่คงอยู่บนระนาบใดๆ ในมวลดิน เมื่อดินได้รับแรงเฉือนกระทำจนเกินกำลังจะรับได้ ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวนั้น หมายถึงเกิดการพิบัติจากแรงเฉือน

เมื่อมีแรงมากระทำมวลดิน เช่น น้ำหนักจากดินชั้นบนที่กดทับ หรือมีแรงภายนอกมากระทำ มวลดินจะออกแรงต้านเพื่อรักษาสมดุลของแรงในมวลดินเอาไว้ และเมื่อแรงที่มากกระทำมีค่าเพิ่มขึ้นจนมวลดินไม่สามารถต้านทานแรงที่มากกระทำได้ หรืออาจกล่าวได้ว่าแรงที่มากกระทำมีค่ามากกว่าหน่วยแรงเฉือนในดินมวลดิน (Shear stress,  $\tau$ ) มวลดินก็จะเกิดการเคลื่อนตัวหรือเกิดการพิบัติ (Failure) ซึ่งการพิบัติจะมีลักษณะเกิดขึ้นเป็นระนาบของมวลดินแยกจากกัน ระนาบที่เกิดการพิบัตินี้ คือ ระนาบที่มวลดินสามารถต้านทานแรงเฉือนได้ต่ำที่สุด

Coulomb (18 B.E.) วิศวกรชาวฝรั่งเศสได้ค้นพบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนกับหน่วยแรงตั้งฉากที่ระนาบใดๆของมวลดินในรูปของสมการเชิงเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.7 แสดงขอบเขตการพิบัติของมวลดิน ซึ่งสามารถเขียนได้ในรูปของหน่วยแรงรวมดังสมการที่ 2.6



รูปที่ 2.7 ภาพแสดง Non – Linear Mohr – Coulomb failure envelope (Goodman, 1980)

$$\tau_{ff} = \sigma_{ff} \tan \phi + c \quad (2.6)$$

โดยที่	$\tau_{ff}$	=	กำลังรับแรงเฉือนบนระนาบการพิบัติ
	$\sigma_{ff}$	=	หน่วยแรงกดทับบนระนาบการพิบัติ
	$\phi$	=	มุมเสียดทานภายในมวลดิน
	$c$	=	ค่าการยึดเกาะระหว่างเม็ดดิน

ค่าความต้านทานแรงเฉือนของดิน (Shearing resistance) ประกอบด้วย 2 องค์ประกอบ ได้แก่ มุมเสียดทานภายในมวลดิน (Angle of internal friction) และค่าการยึดเกาะระหว่างเม็ดดิน (Cohesion) โดยค่าความต้านทานแรงเฉือนของดินจะขึ้นอยู่กับลักษณะความหยาบของเม็ดดิน และปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในมวลดิน ซึ่งดินเม็ดหยาบ (Cohesionless soil) จะไม่มีการยึดเกาะ แต่มีอัตราส่วนของน้ำหนักต่อพื้นที่ผิวของเม็ดดินมากกว่าดินเม็ดละเอียด จึงส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงเฉือนของดินขึ้นกับมุมเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดิน และความหนาแน่นของมวลดิน สำหรับดินเม็ดละเอียด (Cohesive soil) จะมีอัตราส่วนของน้ำหนักต่อพื้นที่ผิวของเม็ดดินน้อยจึงส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงเฉือนของดินขึ้นกับการยึดเกาะระหว่างเม็ดดินซึ่งเป็นผลเนื่องจากแรงทางประจุไฟฟ้า และความหนาแน่นของมวลดิน

### 2.1.7 ทฤษฎีหน่วยแรงประสิทธิผล

สถานะสมดุลของดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated soil) เมื่อมีแรงจากภายนอกกระทำดินจะส่งผลให้เกิดหน่วยแรงส่วนหนึ่งรับโดยบริเวณที่สัมผัสกับเม็ดดิน (Effective stress) อีกส่วนหนึ่งจะรับโดยความดันของน้ำในมวลดิน (Pore – water pressure,  $u_w$ ) โดยให้ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงรวม และความดันของน้ำในมวลดินที่จุดใดๆ ในมวลดินว่า “Total stress” ดังสมการที่ 2.7 (Terzaghi, 1925)

$$\sigma = \sigma' + u_w \quad (2.7)$$

โดยที่

- $\sigma$  = หน่วยแรงรวมตามแนวแกน (Total stress)
- $\sigma'$  = หน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress)
- $u_w$  = แรงดันน้ำในโพรงของมวลดิน (Pore – water pressure)

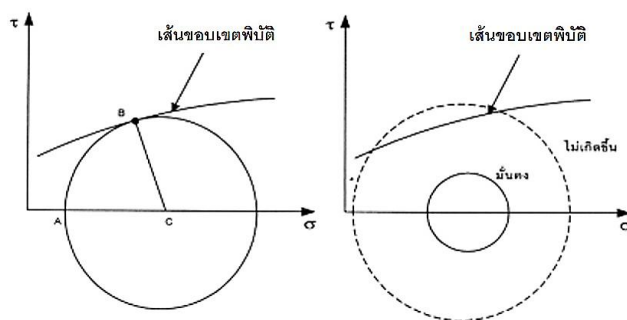
ดินเม็ดหยาบหน่วยแรงประสิทธิผล อาจมีความหมายได้ว่าเป็นหน่วยแรงที่เกิดขึ้นระหว่างเม็ดดิน ส่วนในดินเม็ดละเอียดนั้นหน่วยแรงประสิทธิผล จะหมายถึง ผลของของหน่วยแรงที่เกิดขึ้น ร่วมกับปฏิกิริยาทางเคมีของธาตุในมวลดินเม็ดละเอียดและสามารถเขียนในรูปของหน่วยแรงประสิทธิผล ได้ดังสมการ 2.8 (Terzaghi, 1967)

$$\tau_{ff} = (\sigma_f - u_w)_f \tan \phi' + c' \quad (2.8)$$

โดยที่

- $\tau_{ff}$  = กำลังรับแรงเฉือนบนระนาบการพิบัติ
- $(\sigma_f - u_w)_f$  = หน่วยแรงกดทับประสิทธิผลบนระนาบการพิบัติ
- $\sigma_{ff}$  = หน่วยแรงกดทับบนระนาบการพิบัติ
- $u_{wf}$  = แรงดันน้ำในโพรงของมวลดินบนระนาบการพิบัติ
- $\phi'$  = มุมเสียดทานภายในมวลดินประสิทธิผล
- $c'$  = ค่าการยึดเกาะระหว่างเม็ดดินประสิทธิผล

การพิบัติของมวลดินมักมีพฤติกรรมไปตามหรือใกล้เคียงกับพฤติกรรมที่คาดคะเนโดยกฎการพิบัติที่เสนอโดย Mohr and Coulomb โดยกำหนดไว้ว่า มวลดินจะเริ่มการถึงการพิบัติเมื่อวงกลมของมอร์แทนที่สภาพของหน่วยแรงในมวลดินสัมผัสกับเส้นขอบเขตการพิบัติ (Failure envelope) ดังแสดงในรูป 2.8



รูปที่ 2.8 ภาพแสดงรูปแบบการพิบัติ (วิศิษฐ์, 2540)

เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงในมวลดิน ย่อมจะมีความดันน้ำเกิดขึ้นในมวลดินด้วย (Pore – water pressure,  $u_w$ ) เมื่อทำการแยกค่าความดันน้ำในมวลดินออกจะคงเหลือเพียงแต่หน่วยแรงที่ส่งผ่านระหว่างเม็ดดินเท่านั้น เรียกว่า หน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress,  $\sigma'$ ) ทั้งนี้ความดันน้ำในมวลดินดังกล่าวส่งผลให้กำลังของดินลดต่ำลง เนื่องจากความดันของน้ำในมวลดินจะส่งผลให้เม็ดดินลอยตัวขึ้น และมุมเสียดทานระหว่างเม็ดดินต่ำลง แต่เนื่องจากในทางปฏิบัติบางครั้งยากที่จะสามารถคำนวณค่าความดันน้ำได้ถูกต้องจึงมีการคิดผนวกรวมเข้าไปซึ่งกำลังของดินดังกล่าวเรียกว่าหน่วยแรงรวม (Total stress,  $\sigma$ ) โดยการทดสอบมวลดินจะต้องจำลองการทดสอบให้เสมือนหรือใกล้เคียงกับสภาพที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ ซึ่งจะเป็นการหาหน่วยแรงประสิทธิผล โดยไม่จำเป็นต้องทราบค่าความดันน้ำที่เกิดขึ้นในมวลดินแต่อย่างใด

การเลือกใช้ค่ากำลังเฉือนของดินในการวิเคราะห์ทางปฐพีกลศาสตร์แบ่งลักษณะการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ลักษณะ คือ วิเคราะห์ด้วยวิธีหน่วยแรงรวม (Total stress,  $\sigma$ ) และวิเคราะห์ด้วยวิธีหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress,  $\sigma'$ ) สำหรับค่ากำลังของมวลดินที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินจะแบ่งเป็น 3 ลักษณะคือ

1.  $S_u$  หรือ Undrained shear strength สำหรับดินเหนียวอิ่มตัวและมีการก่อสร้างโดยเร็วหรือพิบัติแบบทันทีทันใด ( $\phi = 0$  Condition)
2.  $c_u$ ,  $\phi_u$  หรือ Total strength สำหรับดินชั้นไม่อิ่มตัวและไม่ทราบความดันน้ำ
3.  $c'$ ,  $\phi'$  หรือ Effective strength สำหรับดินอิ่มตัวสามารถทราบความดันน้ำ และมีความดันน้ำเข้าสู่สภาพสมดุลหรือมีน้ำไหลผ่านคงที่ (วรากร, 2542)

### 2.1.8 ทฤษฎีกำลังของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

Biot (1941) ได้เริ่มเสนอทฤษฎีการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated soil) โดยได้เสนอทฤษฎีการระบายน้ำของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Theory of consolidation for unsaturated Soil) จากนั้น (Croney et al., 1985) ได้นำเสนอสมการหน่วยแรงประสิทธิผลสำหรับดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ดังสมการที่ 2.9

$$\sigma' = \sigma - \beta' u_w \quad (2.9)$$

โดยที่  $\beta'$  = พารามิเตอร์แรงค้ำในมวลดิน (Bounding factor)

Bishop (1951) ได้นำเสนอสมการหน่วยแรงประสิทธิผลสำหรับดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ดังสมการที่ 2.10 ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าไม่สามารถหาความสัมพันธ์ของปริมาณที่เปลี่ยนแปลงไป กับหน่วยแรงประสิทธิผลในดินทั่วไป (นงลักษณ์, 2546)

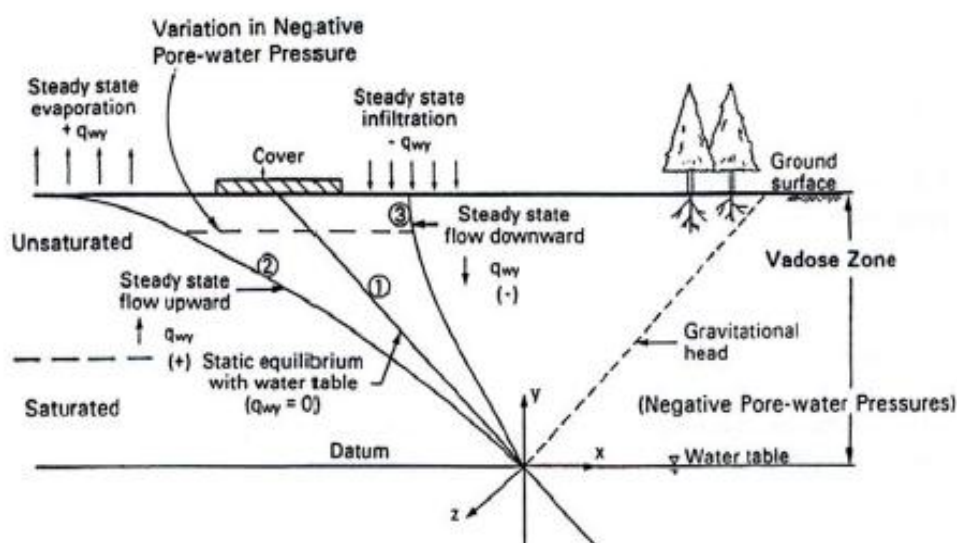
$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (2.10)$$

โดยที่  $u_a$  = แรงดันอากาศในมวลดิน (Pore – air pressure)  
 $\chi$  = พารามิเตอร์เกี่ยวเนื่องกับระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (Parameter related to degree of saturated soil)  
 $\chi = 1$  เมื่อมวลดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated soil)  
 $\chi = 0$  เมื่อ มวลดินแห้ง (Dry soil)

Coleman (1962) ได้เสนอแนะให้มีการใช้หน่วยแรงลด (Reduce stress variable) เป็น  $(\sigma_1 - u_a)$ ,  $(\sigma_3 - u_a)$ , และ  $(u_w - u_a)$  แทนหน่วยแรงในแกน (Axial load), แรงดันด้านข้าง (Confining pressure) และแรงดันน้ำ (Pore – water pressure) ในการทดสอบแบบสามแกน (Triaxial test) ซึ่งจะสามารถนำไปหาความสัมพันธ์ของปริมาณในตัวแปรเกี่ยวเนื่องกับหน่วยแรงที่เปลี่ยนแปลงในดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำได้

สภาพพื้นดินโดยธรรมชาติ ประกอบด้วย ชั้นดินต่างๆ ที่วางตัวซ้อนทับกันลงไปจากผิวดิน (Ground surface) และมีระดับน้ำใต้ดิน (Ground water table) วางตัวอยู่ ทำให้มวลดินที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดินเต็มไปด้วยน้ำซึ่งเรียกดินบริเวณดังกล่าวว่าดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated

soil) ซึ่งจะส่งผลให้แรงดันน้ำในมวลดินของดินบริเวณดังกล่าวมีค่าเป็นบวก ส่วนมวลดินที่อยู่เหนือกว่าระดับน้ำใต้ดิน (Vadose zone) จะมีด้วยกัน 2 ส่วน คือ ดินที่อิ่มตัวด้วยดินเนื่องจากแรงดึงผิวของน้ำ (Capillary saturated soil) และดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated soil) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 แสดงถึง หากไม่มีการเปลี่ยนแปลงของน้ำจากการระเหย หรือการการซึมลงมาจะทำให้ระดับน้ำใต้ดินคงที่ดังเส้นที่ (1) หากมีการสูญเสียน้ำเนื่องจากการระเหยจะเป็นดังเส้นที่ (2) และหากมีน้ำเติมลงมาจาก การซึมก็จะแสดงดังเส้นที่ (3) ซึ่งทั้ง 3 กรณี ล้วนส่งผลให้แรงดันน้ำมีค่าเป็นลบทั้งสิ้น



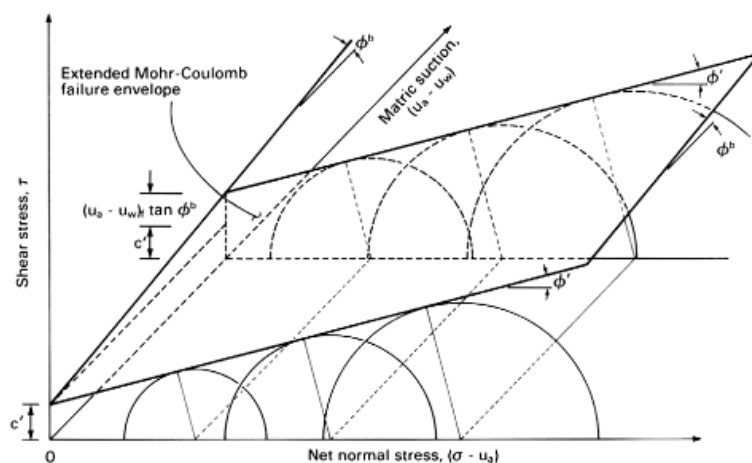
รูปที่ 2.9 ภาพแสดงลักษณะเส้นแรงดันน้ำในมวลดิน (Fredlund and Rahardjo, 1993)

Fredlund (1993) ได้เสนอว่าดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated soil) จะประกอบด้วย แรงดันของน้ำ และแรงดันอากาศดังสมการที่ 2.11 โดยมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่ง  $\phi^b$  เป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงดูดเมทริกซ์ (Matric suction,  $\psi$ ,  $u_a - u_w$ ) กับค่าการยึดเกาะระหว่างเม็ดดินประสิทธิผล (Cohesion,  $c'$ ) เมื่อแรงดึงดูดเมทริกซ์มีค่ามากขึ้น  $\phi^b$  ก็จะมีค่ามากขึ้นด้วย และในกรณีที่ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ  $\phi^b = \phi'$  ซึ่งจะได้เช่นเดียวกับสมการที่ 2.6

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (2.11)$$

โดยที่  $\phi^b$  = มุมความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนของดินและแรงดึงดูดเมทริกซ์ที่เพิ่มขึ้น,  $(u_a - u_w)$





รูปที่ 2.10 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Matric suction กับ Cohesion (Fredlund and Rahardjo, 1993)

Vanapali et al. (1996) ได้เสนอสมการการดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated soil) โดยการใช้สมการเส้นอัตรลักษณ์ (Soil-water characteristic curve) และใช้พารามิเตอร์หน่วยแรงประสิทธิภาพ ( $c', \phi'$ ) เนื่องจากสมการที่ 2.11 ให้ค่า  $\phi^b$  เป็นค่าคงที่ซึ่งส่งผลให้ในช่วงดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำมีกำลังรับแรงเฉือนของดินสูงทุกช่วงความชื้น แต่ในสภาพความเป็นจริงแล้วจะแปรเปลี่ยนตามค่าระดับความอิ่มตัวในมวลดิน (Degree of saturation,  $S_r$ ) ดังสมการที่ 2.12

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \left[ \left( \frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan \phi' \right] \quad (2.12)$$

โดยที่  $\theta_w$  = ปริมาณน้ำในดินโดยปริมาตร  
 $\theta_s$  = ปริมาณน้ำในดินโดยปริมาตรที่ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ  
 $\theta_r$  = ปริมาณน้ำค้างค้างในดินโดยปริมาตร

### 2.1.9 ทฤษฎีแรงดึงน้ำในดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

ทฤษฎีเกี่ยวกับแรงดึงน้ำในมวลดิน (Soil suction) ได้เริ่มถูกพัฒนาโดย Road Research Laboratory (1948) ประเทศอังกฤษ อธิบายกลไกของแรงดึงน้ำในมวลดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำในปัญหาทางวิศวกรรม และในการประชุม The Soil Mechanics Symposium เรื่อง Moisture Equilibrium and Moisture Change in Soil โดยได้เสนอถึงวิธีการหาปริมาณแรงดึงน้ำในมวลดินที่มีการอ้างอิงจากวิธี Thermodynamic Context ซึ่งวิธีนี้ได้การยอมรับในทางวิศวกรรมปฐพี (Aitchison, 1965)

Edlefsen and Anderson (1943) ได้เสนอว่าแรงดึงน้ำทั่วไป หมายถึง สภาวะพลังงานอิสระของน้ำในดิน จากนั้น ในปี ค.ศ. 1965 ได้อธิบายว่าพลังงานอิสระของน้ำในมวลดินนั้นสามารถวัดได้ในรูปแบบความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) จากความสัมพันธ์ของหลักพลศาสตร์ (Thermodynamic) ระหว่างแรงดึงน้ำในดิน หรือพลังงานอิสระของน้ำในดิน และแรงดันน้ำบางส่วน สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.13 และเมื่ออากาศมีอุณหภูมิ 20 °C (อุณหภูมิอากาศในสภาวะปกติ) จะสามารถเขียนสมการ ได้ดังสมการที่ 2.14

$$\psi = -\frac{RT}{v_{w_0} \omega_v} \ln\left(\frac{\bar{u}_v}{u_{v_0}}\right) \quad (2.13)$$

$$\psi = -(135,022) \ln\left(\frac{\bar{u}_v}{u_{v_0}}\right) \quad (2.14)$$

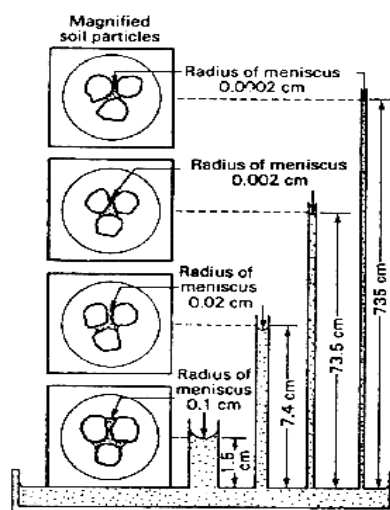
โดยที่	$\psi$	=	แรงดึงน้ำในดิน (Soil Suction, <i>kPa</i> )
	$R$	=	ค่าคงที่ของก๊าซ (8.31423 <i>J/mol · K°</i> )
	$T$	=	อุณหภูมิสัมบูรณ์ ( <i>K°</i> )
	$v_{w_0}$	=	ส่วนกลับของความหนาแน่นของน้ำ ( <i>m<sup>3</sup>/kg</i> )
	$\bar{\omega}_v$	=	น้ำหนักของไอน้ำ (18.016 <i>kg/kmol</i> )
	$\bar{u}_v$	=	แรงดันไอน้ำบางส่วน ( <i>kPa</i> )
	$u_{v_0}$	=	แรงดันไอน้ำที่ชุ่มน้ำ ( <i>kPa</i> )

Aitchison (1965) ได้อธิบายถึงสมการที่ 2.14 ว่าค่าแรงดึงดูดในดินโดยรวม (Total suction,  $\psi$ ) ประกอบด้วยกัน 2 องค์ประกอบ คือ Matric suction และ Osmotic suction ซึ่งให้รายละเอียดไว้ดังนี้

1) แรงดึงดูดเมทริกซ์ (Matric suction) หมายถึง ค่าที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับน้ำเข้าหาเม็ดดิน หรือแรงที่ยึดน้ำไว้กับเม็ดดิน ค่าแรงดึงดูดเมทริกซ์นี้แปรผกผันกับปริมาณความชื้นในดิน เช่น ในกรณีที่น้ำอยู่ในสภาวะสถิตย์ (Hydrostatic) น้ำในช่องว่างดินที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน (Ground water table) จะอยู่ภายใต้สภาวะแรงดึง (Tension) จากน้ำหนักของน้ำด้านล่าง แรงดึงหรือแรงดูดนี้เรียกว่าแรงดูดเมทริกซ์ (Matric suction,  $\psi$ ) ซึ่งมีด้วยกัน 2 ส่วน ได้แก่

ก) การดูดซับ (Adsorption) เป็นการดูดซับของน้ำบนอนุภาคของเม็ดดิน โดยซึ่งเกิดจากแรงระหว่างประจุที่มีขั้วของ โมเลกุลของน้ำ การดูดซับประเภทนี้จะเกิดขึ้นในขณะที่ มวลดินมีความชื้นค่อนข้างต่ำ หรือเกิดขึ้นได้ในกรณีที่ดินมีอนุภาคประจุถูกดูดซับอยู่ ซึ่งประจุ เหล่านั้นจะดูดซับน้ำเอาไว้

ข) คาพิลลาริตี (Capillarity) เป็นการดูดซึมน้ำเนื่องจากแรงดึงดูดเชื่อม แน่นของน้ำ (Cohesion) และแรงยึดเกาะกันระหว่างน้ำกับอนุภาคของเม็ดดิน (Adhesion) ซึ่งปรากฏการณ์ นี้สามารถทดลองได้จากการนำหลอดขนาดเล็กจุ่มลงในน้ำจะสังเกตเห็นว่า มีน้ำสามารถไหลขึ้นไป ในหลอดได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 และยังสามารถสังเกตได้ว่าผิวน้ำของหลอดจะมีลักษณะโค้งเว้า ลงไปในน้ำ ซึ่งความเว้าดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับขนาดของหลอด และระดับความสูงของน้ำในหลอด ซึ่งสามารถเทียบกับดินได้ว่าดินมีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วไปในเม็ดดิน และช่องว่าง ระหว่างเม็ดดิน แม้ว่าดินจะขาดความต่อเนื่องแต่ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถนำมาใช้ได้กับดิน



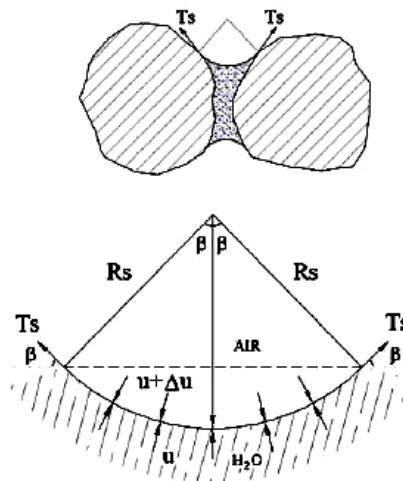
รูปที่ 2.11 ภาพแสดงการเปรียบเทียบปรากฏการณ์คาพิลลาริตีระหว่างเม็ดดิน และหลอดคาพิลลาริตี (Janssen and Dempsey, 1980)

2) แรงดึงดูดผ่านช่อง (Osmotic suction) เป็นแรงดึงดูดผ่านช่องเป็นส่วน ประกอบของพลังงานอิสระของแรงดึงดูด ซึ่งเป็นแรงดึงแรงดึงดูดเนื่องจากสารละลายของเกลือที่ ละลายอยู่ในดิน ค่าแรงดึงดูดผ่านช่องนี้จะแปรผกผันกับปริมาณสารละลายของเกลือในดิน ซึ่งแรง ดังกล่าวนี้จะมีผลต่อดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unstaturated soil) ดังนั้น ค่าแรงดึงรวมในมวลดิน (Total suction) จึงเป็นพลังงานอิสระของแรงดึงดูด ซึ่งเกิดจากค่า แรงดึงดูดเมทริกซ์ (Matric suction) และ แรงดึงดูดผ่านช่อง (Osmotic suction) (Fredlund, 1993) ดังสมการที่ 2.15

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi \quad (2.15)$$

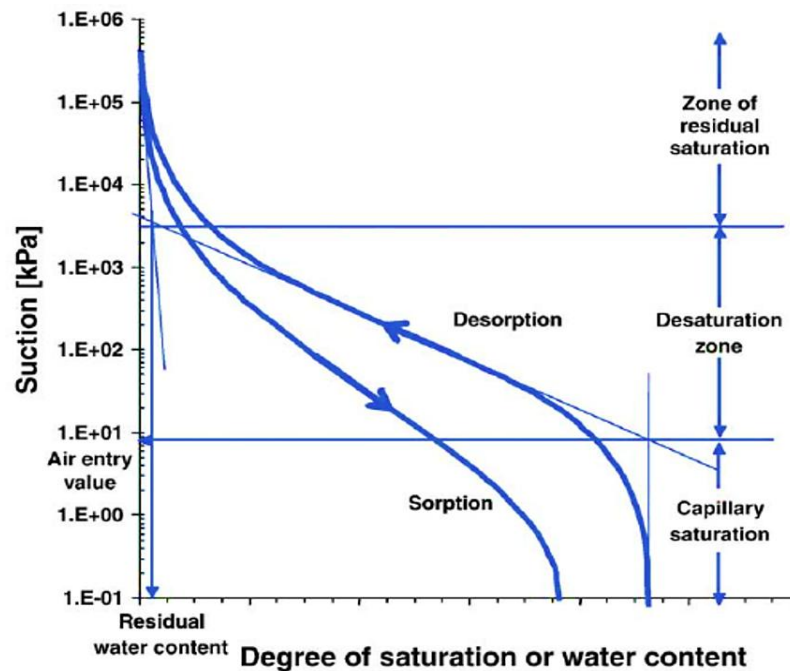
โดยที่  $\pi$  = แรงดึงดูดผ่านช่อง (Osmotic suction)

Fredlund (1993) ได้อธิบายความแตกต่างระหว่าง Saturated soil กับ Unsaturated soil มีด้วยกัน 2 ส่วน คือ ส่วนประกอบของดินกับแรงดันของน้ำ และแรงดันอากาศในมวลดิน ซึ่งบริเวณผิวของ Contractile skin จะเกิดผลต่างระหว่างแรงดันอากาศและแรงดันน้ำภายในมวลดิน หรือที่เรียกว่า Matric suction,  $(u_a - u_w)$  ซึ่งค่าความแตกต่างนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณน้ำในมวลดิน ซึ่งจะส่งผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของดินดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ภาพแสดงแรงดันและแรงดึงผิวบริเวณ Contractile skin (Fredlund and Rahardjo, 1993)

ปริมาณความชื้น และระดับอิ่มตัวด้วยน้ำของมวลดิน (Degree of saturation) ที่เปลี่ยนแปลงส่งผลกระทบต่อแรงดันอากาศในเม็ดดิน (Pore – air pressure) และแรงดันน้ำในมวลดิน (Pore – water pressure) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ที่แสดงความสัมพันธ์ของระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ และค่าแรงดึงดูดรวม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณความชื้นจะมีผล โดยตรงกับความต้านทานแรงเฉือนของดิน



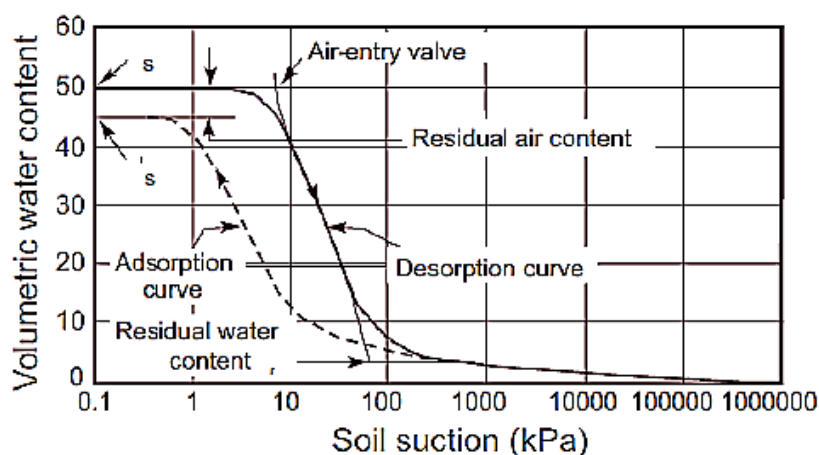
รูปที่ 2.13 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นในมวลดินและค่าแรงดึงดูรวม (Sillers et al., 2001)

### 2.1.10 การประมาณเส้นอัตราลักษณ์ของดิน

การประมาณสมการเส้นอัตราลักษณ์ของน้ำในดิน (Soil-water characteristic curve, SWCC) โดยใช้รูปแบบของสมการ Grain size distribution curve นั้นเริ่มต้นโดย van Genuchten (1980) เสนอว่าเป็นคุณสมบัติการซึมน้ำของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งอยู่ในรูปความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำในมวลดิน โดยปริมาณน้ำในมวลดินโดยปริมาตร (Volumetric water content) กับแรงดึงดูคของน้ำในมวลดิน (Matric suction) การวิเคราะห์การไหลบนลาดดิน เนื่องจากน้ำฝนเป็นการวิเคราะห์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและจากดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำมีพฤติกรรมที่ซับซ้อน เพื่อให้ผลที่ได้มีความแม่นยำ จึงสามารถนำความสัมพันธ์ของเส้นอัตราลักษณ์มาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา โดยเส้นอัตราลักษณ์และสมการการไหลซึม (Permeability function, PF) สามารถทดสอบหาค่าได้ในสนาม และในห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะให้ความแม่นยำที่สูงขึ้น แต่วิธีนี้จะใช้เวลานานในการทดสอบและยังมีค่าใช้จ่ายสูง ทั้งนี้ยังมีผู้วิจัยหลายท่านได้เสนอวิธีประมาณค่าจากคุณสมบัติของดินทางกายภาพโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ เป็นวิธีที่ให้ค่าตัวแปรซึ่งมีความถูกต้องน้อยกว่าการทดสอบจริง แต่สามารถนำไปใช้ได้อย่างรวดเร็ว

### 1) การประมาณค่าเส้นอรรถลักษณะของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

Fredlund and Xing (1994) ได้เสนอว่าเส้นอรรถลักษณะของน้ำในมวลดินสามารถประมาณได้จากขนาดของเม็ดดินและความหนาแน่นของดินโดยสมมติว่าเม็ดดินเป็นทรงกลมและ Metric suction เท่ากับ Capillary force ซึ่งจะให้ผลดีกับดินเม็ดหยาบโดยเฉพาะดินทราย (Sand) ดินตะกอนทราย (Silt) และดินเหนียว (Clay) ที่มีช่วงแรงดูดของดินอยู่ระหว่าง 0 – 1,000,000 กิโลปาสกาล (kPa) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 โดยสมการของ Soil- water characteristic curve เขียนได้ดังสมการ 2.16 และ 2.17 (Fredlund, 1994)



รูปที่ 2.14 ภาพแสดงความสัมพันธ์ของเส้นอรรถลักษณะ (Fredlund and Xing, 1994)

$$\Theta(\psi, a, n, m) = C(\psi) \frac{\Theta_s}{\left[ \ln(e + (\psi/a)^n) \right]^m} \quad (2.16)$$

$$\Theta(d) = C(\psi) = \frac{100}{\ln \left[ e + \left( \frac{a}{d} \right)^n \right]^m} \quad (2.17)$$

เมื่อ

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln(1 + (\frac{\psi}{\psi_r}))}{\ln(1 + \frac{1,000,000}{\psi_r})}$$

และ

$$a = \psi_i \quad m = 3.67 \ln\left(\frac{\Theta_s}{\Theta_i}\right) \quad n = \frac{1.31^{m+1}}{m\theta_s} 3.72s\psi_i \quad S = \frac{\Theta_i}{\ln(\frac{\psi}{\psi_i})}$$

โดยที่	$C(\psi)$	=	Correction function
	$\Theta_i$	=	ปริมาณน้ำในมวลดิน โดยปริมาตรที่จุดเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟ (Inflection point)
	$\psi_i$	=	แรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric suction) ที่จุดเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟ (Inflection point)
	$\Theta_s$	=	ปริมาณน้ำในดินโดยปริมาตรที่คืนอ้อมตัวด้วยน้ำ
	$\psi_r$	=	แรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric suction) ที่ Residual
	$a$	=	ตัวแปรกำหนดจุดเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟด้านบน
	$n$	=	ตัวแปรกำหนดจุดที่กราฟมีความชันสูงสุด
	$m$	=	ตัวแปรกำหนดจุดเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟด้านล่าง
	$s$	=	ความชันของ (Tangent line)

Aubertin et al. (2003) ได้เสนอวิธีการประมาณเส้นอัตรลักษณ์ซึ่งพัฒนาจากวิธีการของ Holtz and Kovac (1981) โดยสมการเริ่มต้นจากความสัมพันธ์ของ Degree of saturation และค่า Volumetric water content ซึ่งสมการดังกล่าว ประกอบด้วย 2 องค์ประกอบ ซึ่งองค์ประกอบแรกเป็นองค์ประกอบจากปริมาณน้ำในมวลดินที่ทำให้ให้เกิด Capillary force ซึ่งเป็นแรงดันน้ำติดลบที่มีค่าน้อยมาก องค์ประกอบสองเกิดจากการเปลี่ยนแปลง Volumetric water content ซึ่งจะทำให้เกิดค่าแรงดันน้ำติดลบที่มีค่ามาก ซึ่งทั้งสององค์ประกอบจะขึ้นอยู่กับค่าความพรุนของเม็ดดิน และขนาดของเม็ดดิน ดังสมการที่ 2.18

$$S_r = \frac{\Theta_w}{n} = S_c + S_a^*(1 - S_c) \quad (2.18)$$

เมื่อ	$S_a^*$	=	$(1 - S_c) + 1$
โดยที่	$S_r$	=	ระดับความอ้อมตัวในมวลดิน (Degree of saturation)
	$\Theta_w$	=	ปริมาณน้ำในดินโดยปริมาตร (Volumetric water content)
	$n$	=	ความพรุนในมวลดิน (Porosity)
	$S_c$	=	ระดับความอ้อมตัวในมวลดินจากแรงคาพิลลารี (Capillary force)
	$S_a^*$	=	ระดับความอ้อมตัวในมวลดินจากแรงยึดเกาะกัน (Adhesion force)

Adhesion force เป็นแรงที่มีองค์ประกอบหลักจากพื้นผิวของน้ำบนเม็ดดินซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่ทำให้ค่าแรงดึงน้ำในมวลดินมีค่าติดลบ และลักษณะขนาดของเม็ดดิน รวมถึงความพรุนของดินที่ยังเป็นองค์ประกอบสนับสนุนให้ Adhesion force และ Capillary force มีองค์ประกอบหลักจากปริมาณช่องว่างของเม็ดดิน ดังสมการที่ 2.19 และ 2.20

$$S_a = aC_\psi \frac{\left(\frac{h_{co}}{\psi_n}\right)^{2/3}}{e^{1/3}\left(\frac{\psi}{\psi_n}\right)^{1/6}} \quad (2.19)$$

$$S_c = 1 - \left[\left(\frac{h_{co}}{\psi}\right)^2 + 1\right]^m \exp\left[-m\left(\frac{h_{co}}{\psi}\right)^2\right] \quad (2.20)$$

เมื่อ

$$h_{co} = \frac{b(cm^2)}{eD_{10}(cm)} = \frac{\zeta w_L^{1.75}}{e}$$

$$b(cm^2) = \frac{0.75}{1.17 \log C_u + 1}$$

$$\psi_r = 0.86 \left(\frac{\zeta}{e}\right)^{1/2} w_L^{1.74}$$

โดยที่

$a$	=	พารามิเตอร์ปรับเส้นโค้ง (Curve fitting parameter)
$\psi$	=	ค่าแรงดึงน้ำในมวลดิน
$\psi_n$	=	ค่าแรงดึงน้ำในมวลดินเริ่มต้น
$e$	=	อัตราส่วนช่องว่างในมวลดิน
$h_{co}$	=	ความสูงของ Capillary rise (cm) ที่เกิดขึ้นในดิน
$D_{10}$	=	ขนาดของเม็ดดิน (cm) ที่ผ่านตะแกรง 10 เปอร์เซนต์ ได้จากการกระจายตัวของเม็ดดิน (Grain – size distribution curve)
$C_u$	=	สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Coefficient of uniformity)
$w_L$	=	ขีดจำกัดเหลว (Liquid limit, %)
$\zeta$	=	ค่าคงที่จากการประมาณ = 402.2 cm <sup>2</sup>



## 2) การประมาณค่าความสามารถในการไหลซึมของน้ำในมวลดิน

ความสามารถในการไหลซึมของน้ำในมวลดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะขึ้นอยู่กับค่าแรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric suction) และสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำในมวลดิน (Hydraulic conductivity) ในสถานะที่แรงดึงของน้ำเปลี่ยนไป จะมีความสัมพันธ์กับเส้นอัตรลักษณ์ของน้ำในมวลดิน ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความซึมผ่านมีค่าเปลี่ยนไปตามความสัมพันธ์ ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถหาได้จากการทดสอบ หรือหาได้จากการประมาณค่าทางสมการคณิตศาสตร์ ซึ่งได้มีหลายท่านได้จำลองไว้ดังนี้

Brook and Corey (1964) ได้นำเสนอสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณ โดยการแบ่งเส้นอัตรลักษณ์ของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ และหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำในดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำดังสมการที่ 2.21 และ 2.22

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left( \frac{S_b}{S} \right)^\lambda \quad (2.21)$$

$$k_r = \frac{k(S)}{k_s} = \Theta^{3+2/\lambda} \quad (2.22)$$

โดยที่	$S$	=	$\psi$ = แรงดึงน้ำในมวลดิน
	$\theta$	=	ปริมาณน้ำในดินโดยปริมาตร ณ จุดที่พิจารณา
	$\theta_r$	=	ปริมาณน้ำในดินโดยปริมาตร ที่สถานะความชื้นคงค้าง
	$\theta_s$	=	ปริมาณน้ำในดินโดยปริมาตร ที่สถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ
	$k_r$	=	สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำสัมพัทธ์
	$k(S)$	=	สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำ ณ จุดที่พิจารณา
	$k_s$	=	สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำที่สถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ
	$S_b$	=	ค่าแรงดึงจุด ณ Air entry
	$\lambda$	=	ความชันของกราฟ Soil- water characteristic curve เมื่อดินแห้งเกินจุด Air entry

van Genuchten (1980) ได้เสนอสมการความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำในดินโดยปริมาตร (Volumetric water content) และสมการการไหลซึมของน้ำในมวลดินจากค่าการไหลซึมของน้ำในมวลดิน กับค่าแรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric Suction) ดังสมการที่ 2.23 และ 2.24

$$\Theta_w = \Theta_r + \frac{\Theta_s - \Theta_r}{\left[1 + \left(\frac{\Psi}{a}\right)^n\right]^m} \quad (2.23)$$

$$k_w = k_s \frac{\left[1 - (a\Psi^{(n-1)})(1 + (a\Psi^n)^{-m})\right]^p}{\left[\left(1 + a\Psi^n\right)^m\right]^2} \quad (2.24)$$

โดยที่	$\Theta_w$	=	ปริมาณน้ำในดินโดยปริมาตร
	$\Theta_s$	=	ปริมาณน้ำในดินโดยปริมาตรที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ
	$\Psi$	=	แรงดึงน้ำในดิน
	$k_w$	=	สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำ (m/s)
	$k_s$	=	สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ (m/s)

Fredlund et al. (1994) ได้เสนอสมการการไหลซึมของน้ำที่คำนวณจากค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำในมวลดิน กับความสัมพันธ์ของ Volumetric water content ดังสมการที่ 2.25

$$k_w = k_s \frac{\sum_{i=j}^N \frac{\Theta(e^y) - \Theta(\psi) \Theta'(e^{y_i})}{e^{y_i}}}{\sum_{i=j}^N \frac{\Theta(e^y) - \Theta_s(\psi) \Theta'(e^{y_i})}{e^{y_i}}} \quad (2.25)$$

โดยที่	$k_w$	=	สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำแรงดันน้ำติดลบ (m/s)
	$k_s$	=	สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ (m/s)
	$y$	=	ตัวแปรจำลองรูปแบบลอการิทึมของแรงดันน้ำในดิน
	$\Theta$	=	ปริมาณน้ำในดินโดยปริมาตร
	$\Theta_s$	=	ปริมาณน้ำในดินโดยปริมาตรที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ
	$\Theta'$	=	ปริมาณน้ำในดินโดยปริมาตรเริ่มต้นของสมการ
	$i$	=	ค่าตั้งต้นระหว่างช่วง $j$ ถึง $N$
	$j$	=	ค่าสุดท้ายของสมการแรงดันน้ำในดิน
	$\psi$	=	แรงดึงน้ำในดิน

### 2.1.11 การเก็บตัวอย่างดิน

#### 1) การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ (Undisturbed Sample)

ตัวอย่างดินคงสภาพ (Undisturbed sample) หมายถึง ตัวอย่างดินที่เก็บจากภาคสนามโดยพยายามรักษาองค์ประกอบ และ โครงสร้างของดินให้เหมือนสภาพจริงกับภาคสนาม ได้แก่ ตัวอย่างดินเก็บโดยวิธีกระบอบบาง, การเก็บตัวอย่างดินโดยวิธีกระบอบลูกสูบ เป็นต้น จากนั้นจึงใช้ซีเมนต์ หรือกระดาษฟลอยด์ปิดหุ้มไว้เพื่อเป็นการป้องกันการระเหยของน้ำในมวลดิน จากนั้นจึงทำการขนส่งอย่างระมัดระวัง ตัวอย่างดินชนิดนี้จะใช้สำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม ได้แก่ การทดสอบการอัดตัวการคายน้ำ, การทดสอบแรงอัดสามแกน และการทดสอบการซึมผ่านได้ของน้ำ เป็นต้น

การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินในบางครั้งไม่สามารถทำการทดสอบได้โดยตรง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความซับซ้อนในกระบวนการทดสอบหรืออุปกรณ์เครื่องมือในการทดสอบไม่สามารถเคลื่อนย้ายนำไปทดสอบในสนามได้จึงต้องทำการเก็บตัวอย่างดินเพื่อมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ได้คิดค้นอุปกรณ์ชุดเก็บตัวอย่างดิน ซึ่งมีชื่อเรียกว่า KU – miniature sampler มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.15 เพื่อใช้สำหรับเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ (Undisturbed soil sampling) ลักษณะชุดเก็บตัวอย่างเป็นกระบอบคล้ายกับกระบอบเก็บตัวอย่างเปลือกบาง (Thin wall tube) หลักการของชุดเก็บตัวอย่างนี้ คือ การใช้ตุ้มน้ำหนักตอกเหล็กทรงกระบอบที่มีความบาง ซึ่งทนต่อแรงกระแทกตกลงไปในดินเพื่อตัดดินรอบๆ ตัวอย่างให้ขาด จากนั้นจึงหมุนกระบอบเพื่อให้ตัวอย่างดินขาดออกจากกันกับดินด้านล่าง ขนาดของกระบอบสำหรับเก็บตัวอย่างต้องมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในพอดีกับขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของกล่องเฉือน (Shear box) ทั้งนี้เพื่อลดปัญหาตัวอย่างดินเสียหายขณะแต่งตัวอย่างดินให้ได้ขนาด

ระดับการรบกวนดินตัวอย่างสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.26–2.28 ตัวอย่างดินที่จัดว่าเป็นตัวอย่างดินคงสภาพก็ต่อเมื่อมีค่าอัตราส่วนพื้นที่น้อยกว่า หรือเท่ากับ 10% และมีอัตราส่วนช่องว่างภายในมีค่าน้อยกว่า 1% ค่าอัตราส่วนการเก็บตัวอย่างดินจะสามารถบอกถึงประสิทธิภาพการเก็บตัวอย่างดินดังตารางที่ 2.3

$$A_r(\%) = \frac{D_0^2 - D_i^2}{D_i^2} \times 100 \quad (2.26)$$

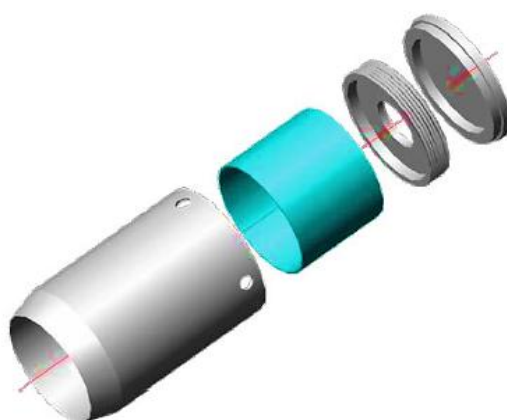
$$C_r(\%) = \frac{D_i - D_e}{D_i} \times 100 \quad (2.27)$$

$$L_r(\%) = \frac{L_a}{L_i} \times 100 \quad (2.28)$$

โดยที่	$D_0$	=	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอกของกระบอกเก็บตัวอย่าง
	$D_i$	=	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายในของกระบอกเก็บตัวอย่าง
	$D_e$	=	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่จุดปลายของกระบอกเก็บตัวอย่าง
	$L_a$	=	ความยาวของตัวอย่างดินที่เก็บได้จริง
	$L_i$	=	ความยาวของตัวอย่างดินที่ควรเก็บได้
	$A_r$	=	อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัด (Area ratio)
	$C_r$	=	อัตราส่วนช่องว่างภายใน (Inside clearance ratio)
	$L_r$	=	อัตราส่วนการเก็บตัวอย่าง (Recovery ratio)

ตารางที่ 2.3 อัตราส่วนการเก็บตัวอย่างดินและประสิทธิภาพการเก็บตัวอย่างดิน

$L_r(\%)$	ประสิทธิภาพ
< 25	แย่มาก
26 – 50	แย่
51 – 75	พอใช้
76 – 90	ดี
> 90	ดีเยี่ยม



รูปที่ 2.15 ภาพชุดเก็บตัวอย่างดิน KU – miniature sampling (วรากร และคณะ, 2548)

## 2) การเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพ (Disturbed Sample)

การเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพ (Disturbed sample) เป็นการเก็บตัวอย่างดิน เพื่อต้องการหาคุณสมบัติทางกายภาพของดิน และทราบความเปลี่ยนแปลงของลักษณะของชั้นดินตามความลึก ในการเก็บตัวอย่างแบบแปลงสภาพนี้จะทำการเก็บตลอดทั้งความลึกเท่าที่ความสามารถของเครื่องมือจะทำการเก็บได้ เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพ คือ เครื่องเจาะชนิดมือหมุน (Hand auger) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 จากนั้นจึงนำตัวอย่างที่เก็บได้บรรจุใส่ถุงหรือภาชนะพร้อมนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการตามรายละเอียดหัวข้อ 2.1.12



รูปที่ 2.16 ภาพแสดงเครื่องเจาะชนิดมือหมุน (Hand auger) (<http://denichsoiltest.com>)

### 2.1.12 การทดสอบกำลังของดิน

การทดสอบกำลังของดินสามารถทำการทดสอบได้ทั้งในสนามและในห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้การทดสอบในสนามจะเป็นการทดสอบดินเพื่อให้ได้ค่าที่เป็นจริงที่สุด ส่วนการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะทดสอบในกรณีที่มีค่าตัวแปรและเงื่อนไขบางอย่างที่ซับซ้อนไม่สามารถทดสอบในสนามได้ เช่น การควบคุมความชื้น การระบายน้ำ หรือระยะเวลาที่ยาวนานในการทดสอบ เป็นต้น การทดสอบกำลังของดินสามารถแบ่งได้ ดังนี้

#### 1) การทดสอบกำลังของดินในสนาม

ก) การทดสอบด้วยวิธีการเจาะแบบหยั่งเบา (Kunzelstab penetration test)  
การทดสอบด้วยวิธีการเจาะแบบหยั่งเบา Kunzelstab penetration test หรือวิธี Light ram sounding test ตามมาตรฐาน DIN 4904 เป็นวิธีการหยั่งทดสอบชั้นดินในสนามโดยใช้แรงกระแทกส่งแท่งทดสอบผ่านชั้นดินลงไปซึ่งแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของแท่งทดสอบสามารถใช้ประมาณค่ากำลัง

และความหนาของชั้นดิน โดยจะไม่เกิดแรงเสียดทานขึ้นที่ก้านเจาะ เนื่องจากหัวห้อย (Cone head) มีขนาดใหญ่กว่าก้านเจาะ โดยหัวเจาะจะเป็นรูปกรวยปลายแหลมทำมุม 60 องศา มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ก้านเจาะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร ค้อนตอกหนัก 10 กิโลกรัม มีระยะยก 50 เซนติเมตร ทำการทดสอบโดยนับจำนวนครั้งของการตอกทุกระยะ 20 เซนติเมตร (blows/20 cm.) ดังแสดงในรูปที่ 2.17 เครื่องมือชนิดนี้จะใช้ได้กับดินทรายหรือดินปนกรวด (Cohesionless soil) ถึงแม้จะมีดินเหนียวหรือดินร่วนปนอยู่บ้างก็สามารถใช้ได้ การทดสอบด้วยวิธี Kunzelstab ยังสามารถแบ่งแยกค่าความแข็งแรงของดินได้ ดังตารางที่ 2.4 และตารางที่ 2.5 ซึ่งแรงต้านการเคลื่อนที่ของแท่งทดสอบสามารถใช้ประมาณค่ากำลังและความหนาของชั้นดิน โดยผลของการทดสอบที่ได้นี้จะทำให้ทราบสมบัติทางกายภาพของชั้นดินในเบื้องต้น

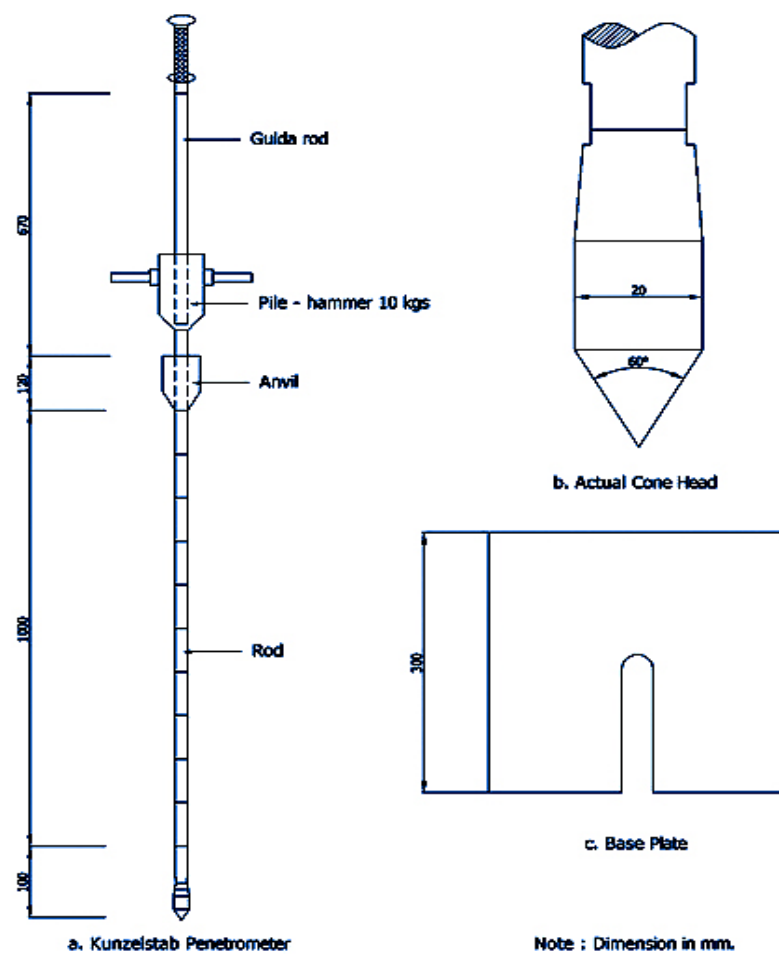
ข) การทดสอบความซึมผ่าน (Double – Ring infiltrometer test) เป็นการทดสอบหาค่าอัตราการซึมของน้ำในมวลดิน ตามมาตรฐาน ASTM 3385 – 03 ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบแบบควบคุมความสูงของน้ำ (Constant head) ซึ่งเป็นการทดสอบหาค่าอัตราการซึมของชั้นดินในสนาม โดยการทดสอบ จะประกอบด้วย ถังทรงกระบอกปลายเปิดทั้ง 2 ด้าน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 เซนติเมตร และ 30 เซนติเมตร โดยจะทำการตอกทั้งทรงกระบอกทั้งสองให้จมลงในดิน โดยให้ตอกถึงภายในจมลงในดิน 10 เซนติเมตร และภายนอกจมลงในดิน 15 เซนติเมตร จากนั้นจึงเริ่มทำการเติมน้ำลงในถังภายนอก และภายในโดยให้ระดับน้ำในถังสูงจากผิวดินประมาณ 7.5 เซนติเมตร โดยถังทั้ง 2 จะต้องทำการต่อเข้ากับถังจ่ายน้ำแยกจากกัน โดยถังจ่ายน้ำจะต้องมีมาตรวัดสำหรับวัดปริมาณน้ำที่ใช้ในการเติม ดังแสดงในรูปที่ 2.18 โดยให้ทำการวัดระดับน้ำที่ของถังทั้ง 2 ตามระยะเวลา 15, 30, 45, 60, 90, 120 นาที จากนั้นให้ทำการวัดทุกๆ ชั่วโมง โดยให้ทำการควบคุมระดับน้ำในถังทั้ง 2 ให้คงที่ด้วยการให้มีความสูงเท่ากันอยู่เสมอ

ตารางที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง N กับความแข็งแรงของดินทราย (Meyerhof, 1956)

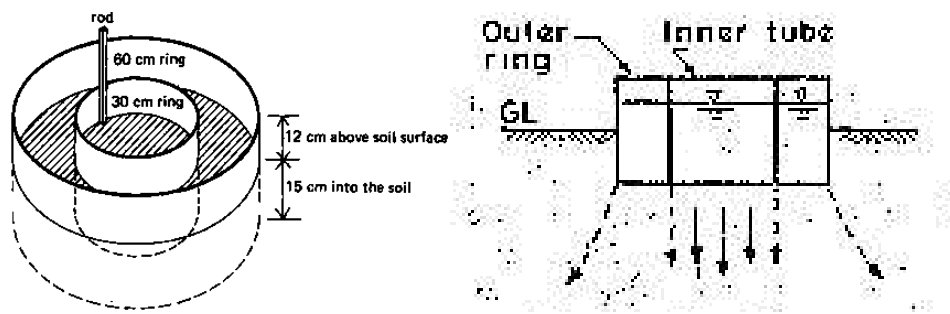
N (blows/ft)	KPT (EGAT) (blows/20 cm)	Angle of internal friction, $\phi$ (degree)	Relative density
0 – 4	0 – 6	25 – 30	very loose
4 – 10	6 – 18	27 – 32	loose
10 – 30	18 – 55	30 – 35	medium
30 – 50	55 – 92	35 – 40	dense
>50	> 92	38 - 45	very dense

ตารางที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง N กับความแข็งแรงของดินเหนียว (Terzaghi และ Peck, 1967)

N (blows/ft)	KPT (EGAT) (blows/20 cm)	Unconfined compressive strength		Consistency
		$Q_u$ (T/m <sup>2</sup> )		
< 2	0 – 3	< 2.5		very soft
2 – 4	3 – 6	2.5 – 5.0		soft
4 – 8	6 – 14	5.0 – 10.0		medium stiff
8 – 15	14 – 27	10.0 – 20.0		stiff
15 – 30	27 – 55	20.0 – 40.0		very stiff
> 30	> 55	> 40.0		hard



รูปที่ 2.17 ภาพแสดงเครื่องมือทดสอบด้วยวิธีหยั่งเบา (Kunzelstab penetration test) (EGAT, 1980)



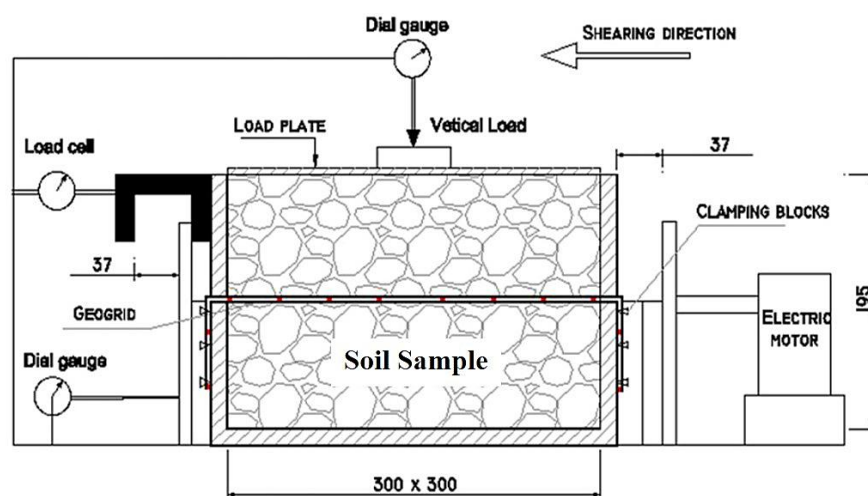
รูปที่ 2.18 ภาพแสดงเครื่องมือทดสอบ Double – Ring infiltrometer test (<http://FAO.org>)

## 2) การทดสอบกำลังของดินในห้องปฏิบัติการ

### ก) การทดสอบแบบการเฉือนตรง (Direct Shear Test, ASTM D 3080)

เป็นการทดสอบหาค่ากำลังเฉือนของดินทรายและดินเหนียวคงสภาพ ตัวอย่างดินจะถูกบังคับให้บีบอัดในแนวที่คาดการณ์ได้ ซึ่งโดยปกติจะอยู่ที่กึ่งกลางดิน

ในการทดสอบแบบการเฉือนตรง (Direct shear test) จะกระทำโดยใส่ตัวอย่างดินไว้ใน Shear box และใส่ Normal load กระทำในแนวตั้งกับตัวอย่างดินและทำการเฉือนตัวอย่างดินที่บรรจุอยู่ในกล่องใส่ตัวอย่างดิน พร้อมทั้งตรวจสอบการเคลื่อนที่ของตัวอย่างดิน ทั้งในแนวตั้งและแนวราบดังแสดงในรูปที่ 2.19 รูปร่างของกล่องใส่ตัวอย่างดินขณะทดสอบอาจมีหลายรูปร่าง เช่น สี่เหลี่ยมวงกลมเพื่อสะดวกในการหาพื้นที่หน้าตัดและเพื่อความเหมาะสมกับสภาพและชนิดของดินที่นำมาทดสอบ แต่ในการทดสอบนั้นพื้นที่หน้าตัดของแนวเฉือนจะไม่คงที่ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของ Shear box



รูปที่ 2.19 ภาพแสดงเครื่องมือทดสอบ Direct shear test (Indraratna et al., 2009)



ข) การทดสอบ Multi-Stage Direct Shear Test, ASTM D3080-98

ในทดสอบการเฉือนตรง (Direct shear test) โดยทั่วไปจะต้องใช้ตัวอย่างในการทดสอบอย่างน้อย 3 ตัวอย่าง (Conventional test) เพื่อหาความสัมพันธ์ในรูปของ Mohr-Coulomb envelope ซึ่งจะได้พารามิเตอร์กำลังเฉือน (Shear strength parameter  $c$ ,  $\phi$ ) แต่ในวิธี Multi - Stage direct shear test, MSDT เป็นวิธีที่สามารถหาพารามิเตอร์เหล่านี้ได้โดยใช้ตัวอย่างดินเพียงตัวอย่างเดียวโดยทดสอบเฉือนตัวอย่างดินจนเกือบถึงจุดสูงสุด (Peak stress) อย่างน้อย 3-4 น้ำหนักกดทับ (Normal load) วิธีการทดสอบแบบนี้เหมาะสมกับตัวอย่างที่มีความแปรปรวนสูงซึ่งวิธีนี้ให้ค่า  $c$ ,  $\phi$  ที่น่าเชื่อถือกว่าในกรณีการทดสอบแบบปกติธรรมดา และในกรณีที่มิตัวอย่างน้อยวิธีนี้ก็ยังสามารถทดสอบให้ได้ค่า Shear strength parameter ( $c$ ,  $\phi$ ) ซึ่งสามารถทำการทดสอบแบบ Consolidated drained test เป็นการทดสอบที่มีการใส่ น้ำหนักเพื่อบีบตัวอย่างดินให้เกิดการคลายน้ำแล้วทำการเฉือนตัวอย่างด้วยอัตราเฉือนที่ช้ามากกว่าอัตราการคลายน้ำ ซึ่งสามารถคำนวณอัตราการคลายน้ำได้ตาม ASTM D 3080

Taylor (1950) และ Fleming (1952) เป็นผู้ที่ประสบความสำเร็จในการนำ Multi-Stage test หาค่า Shear strength parameter ( $c$ ,  $\phi$ ) ของดินไม่อิ่มตัว (Unsaturated soil) Kenney and Watson (1961) ได้ทดสอบ Triaxial แบบ Multi - Stage ของดินอิ่มตัว เปรียบเทียบกับแบบการทดสอบธรรมดา พบว่าค่า Shear strength parameter ( $c$ ,  $\phi$ ) ใกล้เคียงกันมาก ส่วน Lumb (1964) ทดสอบ Multi-Stage triaxial ในดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated soil) เปรียบเทียบกับแบบการทดสอบธรรมดา พบว่าค่า Shear strength parameter ( $c$ ,  $\phi$ ) แทบไม่แตกต่างกันเลย บุญรอด (2532) ได้ทำการทดสอบกำลังของดินตัวเชื่อมห้วยปะทาว พบว่าในการทดสอบดินด้วยการทดสอบ Triaxial แบบ Conventional จะให้ค่าสูงกว่าแบบ Multi-Stage อยู่เล็กน้อยเฉลี่ยประมาณ 10% และได้ทำการทดสอบ Direct shear กับ Triaxial เปรียบเทียบกัน พบว่าค่า Shear strength parameter ( $c$ ,  $\phi$ ) ของ Direct shear test ให้ค่าต่ำกว่าเล็กน้อย

## 2.2 การเกิดดินถล่ม

โสภณ (2515) การเกิดดินถล่มในประเทศไทย เกิดขึ้นมานานหลายพันปีมาแล้ว ซึ่งมีหลักฐานจากรอยตะกอนรูปพัด (Alluvium fan) ที่พบได้บริเวณปลายลำน้ำที่มีอายุน้อย และมีความลาดชันสูง เช่น ลุ่มน้ำปิง วัง ยม นาน ในภาคเหนือ, ลุ่มแม่น้ำตาปีในภาคใต้, ลุ่มแม่น้ำป่าสักในภาคกลาง และลุ่มน้ำปราจีนบุรีในภาคตะวันออก เป็นต้น กล่าวว่าการเกิดลาดดินถล่มในประเทศไทยนั้นไม่ค่อยเป็นประเด็นที่ตระหนักมากนักในอดีต เนื่องจากไม่ได้ส่งผลกระทบต่อประชาชน เพราะประชาชนส่วนมากจะอาศัยอยู่ในพื้นที่ราบลุ่มภาคกลาง การเกิดถล่มมักเกิดขึ้นในช่วงฤดูฝน โดยเฉพาะไหล่ทางทางภาคเหนือ และภาคตะวันตก

### 2.2.1 การเกิดดินถล่มในภาคใต้ของประเทศไทย

จากการศึกษาพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดลาดดินพิบัติ ได้แก่ 1) พื้นที่ที่มีการใช้ประโยชน์จากบริเวณที่มีความลาดชันสูง และ 2) พื้นที่บริเวณเชิงเขาทางผ่านของทางน้ำจากเทือกเขาสูง ซึ่งเมื่อพิจารณาจากลักษณะภูมิประเทศภาคใต้ของประเทศไทย พบว่า ภาคใต้มีลักษณะทางธรณีวิทยาที่เสี่ยงต่อการเกิดธรณีพิบัติสูงมาก เมื่อพิจารณาจาก 2 ปัจจัย ได้แก่ (วารากร, 2548)

- 1) การวางตัวของเทือกเขานครศรีธรรมราช
- 2) พื้นที่ภาคใต้นั้นอยู่ภายใต้อิทธิพลของลมมรสุม 2 ฤดู คือ ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ที่พัดพามาจากมหาสมุทรอินเดีย และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือพัดพามาจากทะเลจีนใต้

จากลักษณะของภูมิประเทศและภูมิอากาศส่งผลให้พื้นที่ภาคใต้เป็นแนวรับอิทธิพลของลมมรสุมทั้ง 2 ฤดู ก่อให้เกิดฝนตกชุกตลอดทั้งปี พื้นที่บริเวณเทือกเขาที่มีความลาดชันสูงจึงเป็นพื้นที่รับปริมาณน้ำฝนและเป็นทางน้ำฝนไหลผ่าน หรือทางน้ำหลาก ซึ่งปริมาณน้ำฝนส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของลาดดิน การที่ภาคใต้มีสภาพอากาศเป็นแบบฝนตกชุกตลอดทั้งปี ทำให้เป็นพื้นที่รับน้ำฝนในปริมาณมาก ส่งผลให้เสถียรภาพของลาดดินต่ำ และมีความเสี่ยงต่อการเกิดลาดดินพิบัติสูง

จากข้อมูลการเกิดเหตุการณ์ลาดดินพิบัติทางภาคใต้ของกรมทรัพยากรธรณี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2531 ถึง 2553 เป็นหลักฐานที่ยืนยันได้ว่า ลักษณะปัจจัยทางภูมิศาสตร์และธรณีวิทยา ดังที่กล่าวไปข้างต้น เป็นปัจจัยที่ส่งผลให้ภาคใต้เป็นพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดเหตุการณ์ลาดดินพิบัติ ทั้งยังเป็นหลักฐานที่แสดงให้เห็นถึงมูลค่าความเสียหายจากภัยลาดดินพิบัติที่เกิดขึ้นแก่ชีวิต ทรัพย์สิน และเศรษฐกิจของประเทศ เช่น ดังเช่นตัวอย่างเหตุการณ์ลาดดินพิบัติในพื้นที่ อ.ขนอม จ.นครศรีธรรมราช ซึ่งเกิดขึ้นถึงสองครั้ง คือ ช่วงปลายปี 2531 และปลายปี 2553 มีสาเหตุเกิดจากการที่มีฝนตกหนัก

และต่อเนื่องหลายวัน ประกอบกับลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่ ทำให้ดินเกิดการทรุดตัวและถล่ม จนเกิดเส้นทางโคลนยาวกว่า 7 กม. กว้าง 15-20 ม. และผลจากความรุนแรงของเหตุการณ์ลาดดิน พับติสองครั้งนี้ส่งผลให้มีจำนวนผู้เสียชีวิตมากกว่า 300 คน รวมมูลค่าความเสียหายมากกว่า 700 ล้านบาท (กรมทรัพยากรธรณี, 2553) ข้อมูลจากตารางที่ 2.6 ซึ่งสรุปเหตุการณ์การเกิดลาดดินพิบัติที่เกิดขึ้นในพื้นที่ภาคใต้ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2531 – 2550 ยังแสดงให้เห็นถึงความถี่ที่เพิ่มขึ้นและความจำเป็นในการเร่งศึกษามาตรการป้องกันและบรรเทาความเสียหายที่เกิดจากลาดดินพิบัติ กล่าวโดยสังเขป ได้ว่า การเกิดลาดดินพิบัติจะเกิดขึ้นในช่วงเดือนสิงหาคม-ธันวาคม ซึ่งเป็นช่วงฤดูฝนที่พื้นที่ภาคใต้ มีฝนตกชุกและเผชิญกับลมมรสุมหนักที่สุดในรอบปี และจำนวนการเกิดลาดดินพิบัติจะเกิดขึ้นซ้ำมากกว่า 1 ครั้งในพื้นที่เดิม ซึ่งพื้นที่ดังกล่าวมีลักษณะทางธรณีวิทยาตรงกับปัจจัยพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดลาดดินพิบัติสูง ดังอธิบายข้างต้น (สุทธิศักดิ์, 2550)

ตารางที่ 2.6 เหตุการณ์การเกิดลาดดินพิบัติในพื้นที่ภาคใต้ ระหว่างปี พ.ศ. 2531 – 2550

เดือน/ปี	สถานที่
พฤศจิกายน 2531	อ.พิปูน จ.นครศรีธรรมราช
พฤศจิกายน 2531	อ.ลานสะกา จ.นครศรีธรรมราช
ตุลาคม 2544	ต.ป่าตอง อ.กระบุรี จ.ภูเก็ต
ตุลาคม 2547	ต.เขาคราม อ.เมือง จ.กระบี่
ตุลาคม 2547	ต.อ่าวนาง อ.เมือง จ.กระบี่
ธันวาคม 2547	อ.ธารโต จ.ยะลา
ธันวาคม 2548	อ.บะนังสะตาร จ.ยะลา
สิงหาคม 2549	ต.คลองสก อ.ตะกั่วป่า จ.พังงา
สิงหาคม 2549	ต.หล่มสัก อ.ตะกั่วป่า จ.พังงา
สิงหาคม 2549	ต.กะทู้ อ.เมือง จ.ภูเก็ต
กันยายน 2549	ต.บ้านส้อง อ.เวียงสระ จ.สุราษฎร์ธานี
มกราคม 2550	อ.นาหม่อม จ.สงขลา

## 2.2.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการพิบัติของลาดดิน

การพิบัติของลาดดินจะเกิดขึ้นพร้อมๆ กับอุทกภัยจะเกิดขึ้นได้จากสาเหตุสองกลุ่มใหญ่ คือ กลุ่มแรกเป็นปัจจัยทางธรรมชาติที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่น ฝนตกหนัก การผุพังตามธรรมชาติของหิน ความลาดชันของภูมิประเทศ เป็นต้น ส่วนกลุ่มที่สองเป็นปัจจัยที่มนุษย์ทำให้เกิดขึ้นเอง เช่น การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ป่าเป็นพื้นที่เกษตร โดยรูปแบบของการเกิดลาดดินพิบัติขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศ ลักษณะทางธรณีวิทยาและปฐพีวิทยาของชั้นดินและชั้นหิน

การเกิดลาดดินพิบัติในประเทศไทยเกิดจาก 4 ปัจจัยหลัก ได้แก่ สภาพธรณีวิทยา สภาพภูมิประเทศ ปริมาณน้ำฝน และสภาพสิ่งแวดล้อม (สมใจ และวันเพ็ญ, 2551)

1) สภาพธรณีวิทยา ลักษณะทางธรณีวิทยาที่มีผลต่อการเกิดธรณีพิบัติขึ้นขึ้นกับชนิดของหิน โครงสร้างทางธรณีวิทยา และการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในเนื้อดิน และลักษณะกายภาพของชั้นหิน

ก) ชนิดของหิน หินต่างชนิดกันจะมีอัตราการผุพังต่างกัน ให้ดินต่างชนิดกัน และความหนาแตกต่างกัน เช่น หินแกรนิต มีอัตราการผุพังสูง เมื่อผุพังแล้วจะให้ชั้นดินทรายร่วนหรือดินทรายปนดินเหนียวและให้ชั้นดินหนา หินภูเขาไฟ มีอัตราการผุพังสูงใกล้เคียงกับหินแกรนิต เมื่อผุพังให้ชั้นดินร่วนปนดินเหนียวหรือดินเหนียวและให้ชั้นดินหนา หินดินดาน-หินโคลน เมื่อผุพังจะให้ชั้นดินเหนียวหรือดินเหนียวปนทรายและให้ชั้นดินที่มีความหนาน้อยกว่าหินแกรนิต เป็นต้น

ข) โครงสร้างทางธรณีวิทยา มีผลต่อการผุพังของหิน โดยหินที่มีรอยแตกมาก และอยู่ในเขตรอยเลื่อน โดยเฉพาะรอยเลื่อนมีพลังจะมีอัตราการผุพังสูง เนื่องจากมีช่องว่างให้น้ำและอากาศผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ง่าย ชั้นหินจึงผุพังรวดเร็วกว่าบริเวณอื่น รวมทั้งชั้นหินที่ถูกกระทำจนเกิดการวางตัวในแนวตั้งจะส่งผลให้เกิดการผุพังได้เร็วขึ้น ชั้นหินที่ถูกแทรกดันด้วยหินอัคนี หรือบริเวณที่มีพุน้ำร้อนและแหล่งแร่จากสายน้ำแร่ร้อน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในเนื้อหินจะทำให้ชั้นหินมีอัตราการผุพังสูงยิ่งขึ้น

2) สภาพภูมิประเทศ ลักษณะการวางตัวของโครงสร้างชั้นหินและจากการผุพังที่แตกต่างกันของชั้นหิน ทำให้แต่ละพื้นที่มีสภาพภูมิประเทศแตกต่างกัน สภาพภูมิประเทศที่ทำให้เกิดธรณีพิบัติได้ง่าย ได้แก่ พื้นที่ที่มีความลาดชันสูง หรือมีทางน้ำคดเคี้ยวจำนวนมาก นอกจากนี้ยังพบว่า ลักษณะภูมิประเทศที่เป็นร่องเขาด้านหน้ารับน้ำฝน และบริเวณที่เป็นหุบเขากว้างใหญ่สลับซับซ้อน แต่มีลำน้ำหลักเพียงสายเดียวจะมีโอกาสเกิดธรณีพิบัติได้ง่ายกว่าบริเวณอื่น

3) ปริมาณน้ำฝน ลาดดินพิบัติจะเกิดขึ้นเมื่อฝนตกหนักหรือตกติดต่อกันเป็นเวลานานและน้ำไหลซึมลงไปชั้นดินจนกระทั่งชั้นดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ความดันของน้ำในดินเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นการเพิ่มความดันในช่องว่างของเม็ดดิน โดยน้ำจะเข้าไปแทนที่ในช่องว่างของเม็ดดิน ทำให้

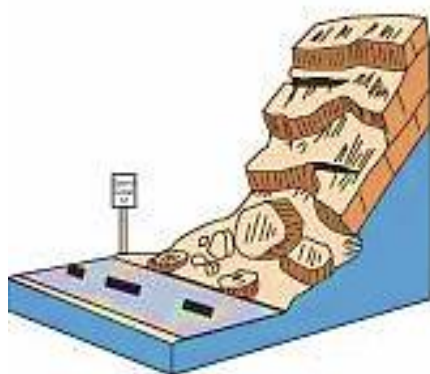
แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินลดลง ส่งผลให้ชั้นดินมีกำลังรับแรงเฉือนลดลง ถ้าหากปริมาณน้ำในมวลดินเพิ่มขึ้นจนระดับน้ำในชั้นดินสูงขึ้นมาที่ระดับผิวดินจะเกิดการไหลบนผิวดินและกัดเซาะหน้าดินลาดดินจะเริ่มมีการเคลื่อนตัวและเกิดการพิบัติในที่สุด

4) สภาพสิ่งแวดล้อม พื้นที่เกิดธรณีพิบัติจะอยู่ในพื้นที่ภูเขาสูงชัน พบว่าส่วนใหญ่มีการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน ได้แก่ การทำเกษตรในพื้นที่สูงหรือบริเวณเชิงเขา การตัดถนนผ่านไหล่เขาสูงชัน การตัดไหล่เขาสร้างบ้านเรือนที่อยู่อาศัย หรือการปลูกสร้างสิ่งก่อสร้างกีดขวางทางน้ำ เป็นต้น

### 2.2.3 รูปแบบการพิบัติของลาดดิน

การจำแนกชนิดของการพิบัติของลาดดินและการพังทลายของลาดเขามีวิธีการจำแนกตามรูปแบบการพิบัติและปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น ความเร็วและกลไกในการเคลื่อนที่ ชนิดของตะกอน รูปร่างของร่องรอยการพิบัติ และปริมาณของน้ำที่เข้ามาเกี่ยวข้องในกระบวนการพิบัติของลาดดิน ซึ่งการจำแนกชนิดของการพิบัติของลาดดินที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ การจำแนกที่เสนอโดย Varnes (1975) อาศัยหลักการจำแนกตามชนิดของวัสดุที่พังทลายลงมา (Type of material) และตามลักษณะการเคลื่อนที่ (Type of movement) ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ ดังนี้

1) การร่วงหล่น (Falls) เป็นการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วลงมาตามลาดเขาหรือหน้าผาสูงชัน โดยอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของโลก หรืออาจเกิดจากการตกอย่างอิสระและมีการกลิ้งลงมาตามลาดเขาพร้อมด้วยโดยมีน้ำมาเกี่ยวข้องน้อย หรือไม่มีส่วนเกี่ยวข้อง ดังนั้นตะกอนดินหรือหินที่พังทลายลงมาจะสะสมกันอยู่บริเวณเชิงเขาหรือหน้าผา ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ภาพแสดงรูปแบบการพิบัติแบบการร่วงหล่น (Falls) (Highland and Bobrowsky, 2008)

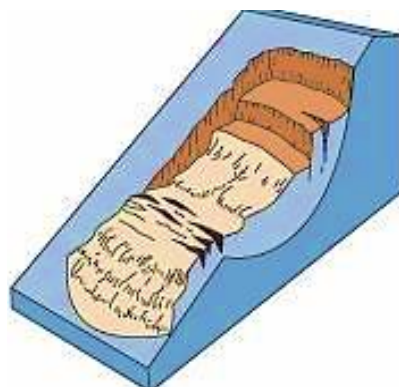
2) การล้มคว่ำ (Topples) เป็นการเคลื่อนที่โดยการหมุนหรือล้มคว่ำลงมาตามลาดเขา เป็นรูปแบบของการเคลื่อนตัวต่อเนื่องกลายเป็นแบบร่วงหล่น (Falls) หรือแบบเลื่อนไถล (Slides) ได้ต่อไป มักพบบริเวณเชิงหน้าผาดินหรือหินที่มีรอยแตกแยกมาก โดยกระบวนการพิบัติมีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง หรือ ไม่มีส่วนเกี่ยวข้อง ดังแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ภาพแสดงรูปแบบการพิบัติแบบการล้มคว่ำ (Topples) (Highland and Bobrowsky, 2008)

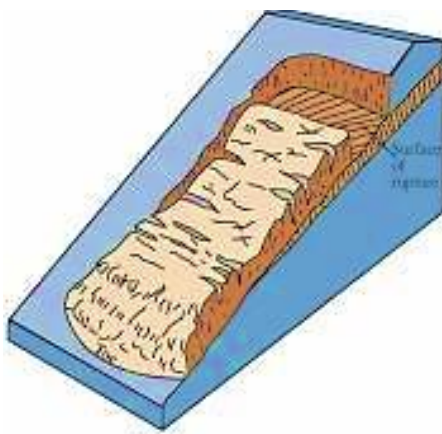
3) การเลื่อนไถล (Slides) การพิบัติชนิดนี้มีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องเสมอ สามารถจำแนกตามลักษณะของระนาบการเคลื่อนที่ได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

ก) การเลื่อนไถลแบบหมุน (Rotational slide) เป็นการเลื่อนไถลของวัตถุลงมาตามระนาบของการเคลื่อนที่มีลักษณะโค้งครึ่งวงกลมคล้ายช้อน (Spoon shaped) ทำให้มีการหมุนตัวของวัตถุขณะเคลื่อนที่เป็นไปอย่างช้าๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.22 โดยลักษณะดังกล่าวมักเกิดขึ้นในบริเวณที่ดินเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous material) เช่น บริเวณที่มีชั้นดินหนามากหรือดินที่นำมาถม เป็นต้น



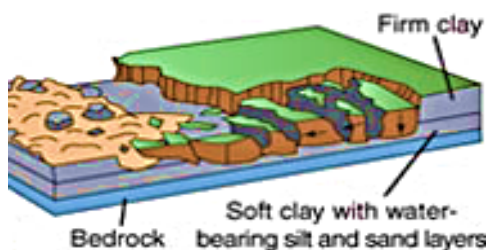
รูปที่ 2.22 ภาพแสดงรูปแบบการพิบัติแบบการเลื่อนไถลแบบหมุน (Rotational slide) (Highland and Bobrowsky, 2008)

ข) การเลื่อนไถลแบบระนาบ (Translational slide) เป็นการเลื่อนไถลลงมา มีลักษณะเป็นระนาบตรง ซึ่งทั่วไปเป็นการเคลื่อนที่ตามระนาบของโครงสร้างทางธรณีวิทยา เช่น ตามระนาบแนวแตก (Joint) ระนาบทิศทางการวางตัวของชั้นหิน (Bed) และรอยต่อระหว่างชั้นดินและหินดังแสดงในรูปที่ 2.23



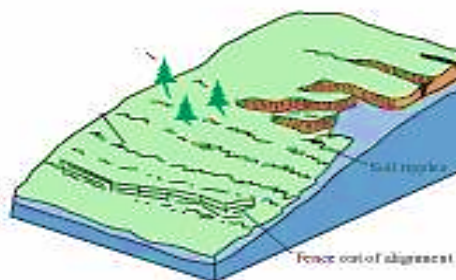
รูปที่ 2.23 ภาพแสดงรูปแบบการพิบัติแบบการเลื่อนไถลแบบระนาบ (Translation slide) (Highland and Bobrowsky, 2008)

4) การเคลื่อนตัวออกทางด้านข้าง (Lateral spread) โดยส่วนมากจะเกิดบนพื้นราบหรือพื้นที่ที่มีความลาดชันน้อย ซึ่งชั้นดิน จะประกอบด้วย ตะกอนขนาดละเอียดมาก การเกิดส่วนมากจะเกี่ยวข้องกับกระบวนการไหลลงของดิน (Liquefaction) จะเกิดกับชั้นตะกอนละเอียดที่อิ่มตัวด้วยน้ำและมีพฤติกรรมเหมือนของไหล เนื่องจากได้รับแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวหรือเกิดจากการที่มีชั้นหินหรือชั้นดินที่แข็ง และไม่อุ้มน้ำวางตัวทับอยู่บนชั้นดินที่อุ้มน้ำเมื่อชั้นดินที่อุ้มน้ำถูกทับด้วยน้ำหนักที่มากก็จะทำให้ไหลออกด้านข้าง และชั้นดินและชั้นหินที่อยู่ด้านบนแตกออกและยุบตัวลงดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ภาพแสดงรูปแบบการพิบัติแบบการเคลื่อนตัวออกด้านข้าง (Lateral spread) (Highland and Bobrowsky, 2008)

5) การคืบตัวของมวลดิน (Soil creep) เป็นการเคลื่อนที่ของมวลดินอย่างช้าๆ เนื่องจากกระบวนการสูญเสียแรงต้านทานการไหลของชั้นดินส่งผลให้เกิดแรงผลักดันให้ชั้นดินมีการเคลื่อนตัวอย่างช้าๆ แต่ไม่มากพอที่จะทำให้เกิดการพังทลายของมวลดิน ซึ่งหลักฐานที่ใช้ในการสังเกต คือ แนวรั้วหรือกำแพง หรือต้นไม้ที่ขึ้นในบริเวณนั้นมีการเอียงตัวหรือบิดเบี้ยวไปจากเดิมดังแสดงในรูปที่ 2.25

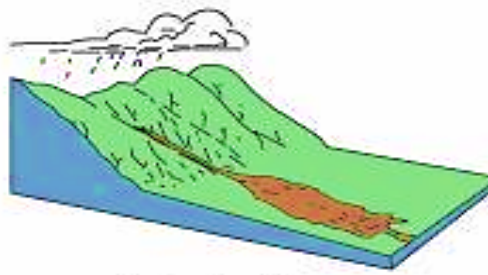


รูปที่ 2.25 ภาพแสดงรูปแบบการพิบัติแบบการคืบตัวของมวลดิน (Soil creep)

(Highland and Bobrowsky, 2008)

6) การไหล (Flows) เป็นลักษณะการพิบัติของลาดดินที่มีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องมากที่สุด โดยน้ำจะทำให้ตะกอนมีลักษณะเป็นของไหลและเคลื่อนที่ไปบนพื้นระนาบของลาดดินลงไปกองทับถมกันที่ด้านล่างของลาดเขาหรือเชิงเขาตะกอนอาจเคลื่อนที่ไปได้เป็นระยะทางไกลและมีความเร็วในการเคลื่อนที่อาจสูงมากถ้าลาดเขามีความชันสูง ทั้งนี้การพิบัติชนิดนี้ยังสามารถแบ่งตามชนิดของตะกอนได้เป็น 4 ชนิด ดังนี้

ก) การไหลแบบกองเศษหิน (Debris flow) ตะกอนที่ไหลลงมาจะมีอนุภาคหลายขนาดปะปนกัน และมักเกิดขึ้นตามทางน้ำเดิมที่มีอยู่แล้วหรือบนร่องเล็กๆ บนลาดเขา โดยมีน้ำเป็นส่วนประกอบ ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็นน้ำฝนที่ตกอย่างหนักเป็นตัวกลางพัดพาเอาตะกอนดินและหินรวมถึงซากต้นไม้ต้นหญ้าไหลมารวมกันก่อนที่จะไหลลงมากองทับถมกันบริเวณที่ราบเชิงเขาในลักษณะของเนินตะกอนรูปพัดหน้าหุบเขาดังแสดงในรูปที่ 2.26

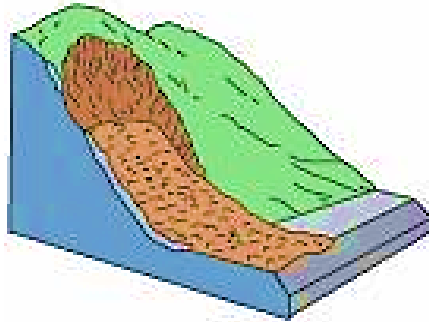


รูปที่ 2.26 ภาพแสดงรูปแบบการพิบัติแบบการไหลแบบกองเศษหิน (Debris flow)

(Highland and Bobrowsky, 2008)



ข) การไหลแบบถล่ม (Avalanche flow) เป็นการเคลื่อนที่ลงมาตามลาดเขา โดยมวลดิน จะประกอบด้วย ตะกอนหลากหลายขนาดปนกันและมีขนาดของร่องรอยการพิบัติที่ใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 ภาพแสดงรูปแบบการพิบัติแบบการไหลแบบถล่ม (Avalanche flow)  
(Highland and Bobrowsky, 2008)

ค) การไหลแบบดินไหล (Earth flow) เป็นการเคลื่อนที่ของมวลดินซึ่งประกอบด้วย ตะกอนขนาดละเอียดจำพวกดินเหนียวดินทรายแป้งตามพื้นที่ที่มีความลาดชันไม่มากนัก ดังแสดงในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 ภาพแสดงรูปแบบการพิบัติแบบการไหลแบบดินไหล (Earth flow)  
(Highland and Bobrowsky, 2008)

ง) การไหลแบบโคลนไหล (Mud flow) มีกระบวนการเกิดเช่นเดียวกับแบบกองเศษหิน (Debris flow) แต่แตกต่างกันที่ขนาดของตะกอนแบบโคลนไหล (Mud flow) จะมีขนาดเล็กกว่าตะกอนของแบบกองเศษหิน คือ ประกอบไปด้วย ตะกอนดินและมีน้ำเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ

### 2.2.4 รูปแบบการประเมินพื้นที่เสี่ยงภัยจากการพิบัติของลาดดิน

วรากร (2542) ได้เสนอวิธีการประเมินพื้นที่เสี่ยงภัยจากการพิบัติของลาดดินจะเป็นกิจกรรมลำดับขั้นที่จะต้องดำเนินการเพื่อการคัดเลือกพื้นที่เสี่ยงภัย อาจทำได้ด้วยวิธีดังต่อไปนี้ เรียงลำดับจากง่าย มีความถูกต้องน้อยไปสู่วิธีที่ทำได้ยาก ใช้เวลามาก แต่มีความถูกต้องและเป็นประโยชน์มากกว่า

- 1) วิธีทางธรณีสัณฐาน (Geomorphology method) โดยการวิเคราะห์จากลักษณะภูมิประเทศ ร่องน้ำ และลาดเขา
- 2) วิธีดัชนีปัจจัยร่วม (Weighted factor index) โดยการนำปัจจัยที่เกิดจากธรรมชาติและมนุษย์กระทำมาจัดจำแนกลำดับความรุนแรงและให้น้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัย แล้วคิดออกมาเป็นคะแนนรวม เพื่อจัดลำดับความรุนแรงหรือโอกาสเสี่ยงในแต่ละพื้นที่ วิธีนี้ต้องปรับแก้ความสำคัญของปัจจัยต่างๆ ให้เข้ากับเหตุการณ์ที่เคยเกิดขึ้น
- 3) วิธีทางธรณีเทคนิค (Geotechnical engineering method) โดยการสำรวจและทดสอบคุณสมบัติทางธรณีวิทยาและวิศวกรรมปฐพีของชั้นดินและหิน ร่วมกับอิทธิพลของความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไป แล้ววิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดินและหินจากรูปแบบทางกลศาสตร์ เพื่อหาระดับความมั่นคง
- 4) วิธีการวิเคราะห์ความเสี่ยง (Risk analysis method) โดยการดำเนินการต่อจากวิธีที่ 2 และ 3 โดยการศึกษาทางสถิติของโอกาสที่จะเกิดการพิบัติและผลเสียหายทางด้านเศรษฐกิจและสังคมที่จะเกิดขึ้นตามมา

### 2.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน (Slope stability) ได้มีการพัฒนาต่อเนื่องตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันซึ่งแต่ละวิธีต่างมีสมมติฐานข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน ซึ่งในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินนั้นเป็นการศึกษาปัญหา ทั้งจากลาดดินธรรมชาติ (Natural slope) และลาดดินที่มนุษย์สร้างขึ้น (Man – Made slope) ในการพิบัติของลาดดินแต่ละแบบนั้นจะมีรูปแบบของการพิบัติของลาดดินที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งในการวิเคราะห์บางวิธีเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะของผิวเคลื่อนพังเป็นเส้นตรง (Slip surface) บางวิธีเหมาะกับการวิเคราะห์การพิบัติเคลื่อนพังเป็นแบบโค้งวงกลม เป็นต้นซึ่งแต่ละวิธีล้วนมาจากพื้นฐานหลักการวิธีลิมิตความสมดุล (Limit equilibrium) แล้วทำการคำนวณอัตราส่วนเปรียบเทียบระหว่างกำลังของดินต่อหน่วยแรงต้านทานขณะสมดุล ซึ่งเรียกว่า “อัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of safety, F.S.)”

คำนิยามของอัตราส่วนปลอดภัย คือ อัตราส่วนของกำลังรับน้ำหนักของดินบนผิวเคลื่อนต่อหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงในพื้นที่ผิวเดียวกัน ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังสมการที่ 2.29 สำหรับผิวพิบัติเป็นแนวตรง และ 2.30 สำหรับผิวพิบัติเป็นส่วนโค้งของวงกลมอัตราส่วนความปลอดภัย คือ อัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ต้านการพิบัติต่อโมเมนต์ที่เกิดจากน้ำหนักของมวลดิน ซึ่งการพิจารณาว่าจะใช้สมการใดในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินนั้นควรตั้งสมมติฐานของการพิบัติ ซึ่งรูปแบบการพิบัติที่จะใช้สำหรับสันนิษฐานการพิบัติได้สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ดังนี้

1) ลาดดินพิบัติแบบลาดอนันต์ (Infinite Slope)

เป็นการพิบัติของลาดดินอย่างต่อเนื่องและเกิดขึ้นขยายในวงกว้าง โดยค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวของการพังทลายตามแนวลาดต่อความลึกที่ดินอาจพังทลายได้มีค่ามากกว่าหนึ่ง เช่น ลาดดินที่พังทลายเนื่องจากการหลากของน้ำ (Earth flow) โดยการเกิดจะกินพื้นที่เป็นบริเวณกว้างมาก แต่ความลึกของดินที่พังทลายจะไม่มากนัก

2) ลาดดินพิบัติแบบไม่ต่อเนื่องหรือลาดดินพิบัติแบบจำกัด (Finite Slope)

เป็นการพิบัติของลาดดินในบริเวณพื้นที่ที่จำกัด โดยค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวของการพังทลายตามแนวลาดต่อความลึกที่ดินอาจพังทลายได้มีค่าน้อยกว่าสามในสอง ลักษณะที่เกิดขึ้นจะเป็นส่วนโค้งของวงกลม ซึ่งมีสาเหตุมาจากแรงโน้มถ่วงของโลก แรงซึมของน้ำ การกัดกร่อนของผิวลาด เนื่องจากการไหลของน้ำ การลดลงของระดับน้ำหน้าลาดดิน และผลจากการเกิดแผ่นดินไหว

$$F.S. = \frac{\text{Resisting force}}{\text{Driving force}} = \frac{F_R}{F_D} = \frac{F_R / A}{F_D / A} = \frac{\tau_f}{\tau} \quad (2.29)$$

$$F.S. = \frac{\text{Resisting moment}}{\text{Driving moment}} = \frac{M_R}{M_D} \quad (2.30)$$

โดยที่	$\tau_f$	=	กำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของมวลดินซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีกำลังรับแรงเฉือนของดิน
	$\tau$	=	หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจริง
	$A$	=	พื้นที่ที่พิจารณา
	$F_R$	=	แรงต้านการพิบัติ
	$F_D$	=	แรงขับที่ทำให้เกิดการพิบัติ
	$M_R$	=	โมเมนต์ต้านที่เกิดจากกำลังรับแรงเฉือนของดิน
	$M_D$	=	โมเมนต์ขับที่เกิดจากน้ำหนักของมวลดิน

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินโดยวิธีลิมิตความสมดุล (Limit equilibrium)

ประกอบด้วย

- 1) สมมติ หรือสันนิษฐานลักษณะของการพิบัติ หรือผิวการเคลื่อนพัง
- 2) กำหนดแรงต้านทานที่เพียงพอทำให้เกิดความสมดุลของมวลดินที่พิบัติ
- 3) เปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of safety, F.S.)
- 4) เปลี่ยนลักษณะ หรือผิวการเคลื่อนพิบัติที่น่าจะมีโอกาสเกิดขึ้นไปเรื่อยๆ

จนพบค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งควรหาลักษณะการพิบัติที่น่าจะเกิดขึ้นมากที่สุด และค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ควรเป็น

เสถียรภาพของลาดดินทางวิศวกรรมจัดอยู่ในรูปแบบอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of safety) ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างแรงต้านทาน (Resisting force) ต่อแรงขับ (Driving force) โดยแรงขับหลักที่ทำให้ดินเกิดการเคลื่อนตัวลงมาตามแนวลาด คือ แรงโน้มถ่วงของโลกที่กระทำต่อมวลดิน ส่วนแรงต้านทานเป็นตัวป้องกันไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัว โดยจะมีทิศตรงข้ามกับแรงขับ ซึ่งแรงต้านทานหลัก คือ กำลังเหนือนของดินซึ่งเป็นฟังก์ชันของการยึดเกาะกันของดิน (Cohesion) และมุมเสียดทานภายในของเม็ดดิน (Internal friction angle) ตัวแปรที่ส่งผลให้ค่ากำลังต้านทานเกิดการพิบัติและกำลังที่ทำให้เกิดการพิบัติได้แสดงไว้ดังตารางที่ 2.7 Terzaghi (1925) ค่าเสถียรภาพจะลดลงเมื่อแรงขับมากขึ้นหรือแรงต้านทานลดลง จนเมื่อแรงขับมากกว่าแรงต้านก็จะเกิดการพิบัติของลาดดิน แรงเหนือนในดินที่ลดลง (Shear strength reduction) เป็นปัจจัยที่ทำให้แรงต้านทานของมวลดินลดต่ำลง โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

- 1) กำลังของแรงเหนือนที่ลดลงชั่วคราว สาเหตุมาจากการเพิ่มขึ้นของน้ำในมวลดิน ซึ่งเกี่ยวเนื่องกับสถานะที่ฝนตกและระดับน้ำใต้ดินที่สูงขึ้น ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นทำให้การยึดเกาะกันระหว่างเม็ดดินลดลง เพราะน้ำจะเข้าไปทำลายแรงดึงผิวของอากาศในดิน โดยกำลังของดินที่ลดลงตามความชื้นที่เพิ่มขึ้น แต่กำลังของแรงเหนือนมีโอกาสจะกลับมาเพิ่มอีกครั้ง เมื่อปริมาณน้ำในมวลดินลดลงตามลำดับ

- 2) กำลังเหนือนที่ลดลงถาวร เมื่อดินมีแรงกระทำเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนเกินกำลังต้านทานสูงสุด (Peak strength) ซึ่งจะทำให้ค่ากำลังรับแรงเหนือนของดินลดลงเรื่อยๆ ในขณะที่ดินเคลื่อนตัวในระนาบพิบัติ จนกระทั่งเหลือแรงต้านทานที่น้อยที่สุด ซึ่งแรงต้านทานที่เหลือนั้นเกิดจากการที่โครงสร้างเดิมถูกทำลายเนื่องจากการเคลื่อนตัวของลาดดินในระนาบพิบัติจึงทำให้เม็ดดินเกิดการเรียงตัวกันใหม่

ตารางที่ 2.7 ตัวแปรที่ส่งผลต่อกำลังต้านทานการพิบัติและกำลังที่ทำให้เกิดการพิบัติของลาดดิน  
(Terzaghi, 1925)

ตัวแปรความสัมพันธ์ (เพิ่มขึ้น)	กำลังต้านทานการพิบัติ	กำลังที่ทำให้เกิดการพิบัติ
หน่วยน้ำหนักของมวลดิน	ลดลง	เพิ่มขึ้น
แรงดันน้ำ	ลดลง	เพิ่มขึ้น
การซึมน้ำของดิน	ลดลง	เพิ่มขึ้น
ระดับการอิ่มตัวของน้ำในมวลดิน	ลดลง	เพิ่มขึ้น
แรงเชื่อมแน่นของดิน	เพิ่มขึ้น	ลดลง
แรงเสียดทานระหว่างเม็ดดิน	เพิ่มขึ้น	ลดลง

โดยสรุปการแก้สมการสมดุลของระบบเพื่อหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยนั้นมีหลายวิธีด้วยกันที่เป็นที่นิยมในปัจจุบัน ซึ่งแต่ละวิธีนั้นมีความแตกต่างกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.8 และแยกเป็นประเด็นหลักๆ ได้ ดังนี้

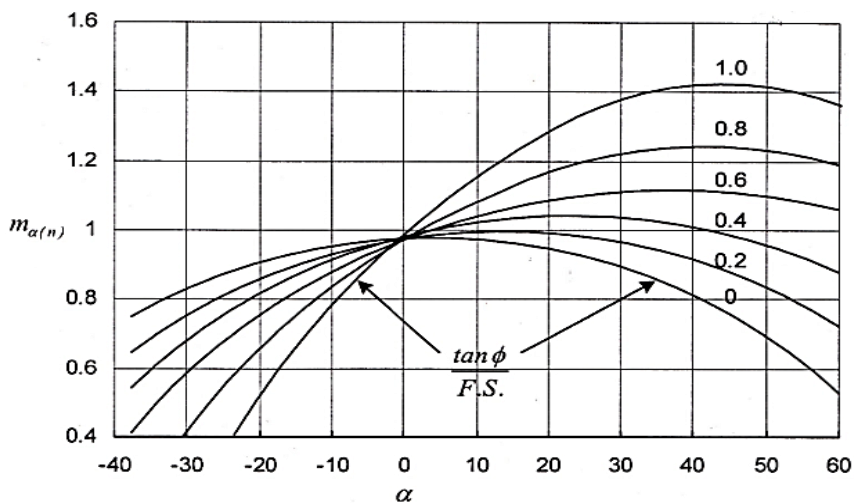
- 1) ความแตกต่างในการเลือกใช้สมการสมดุล
- 2) ความไม่แน่นอนในการพิจารณาแรงระหว่างเม็ดดิน
- 3) ข้อจำกัดที่ไม่ทราบแน่นอนในกรณีการพิบัติแบบไม่เป็นส่วนโค้งวงกลม

ตารางที่ 2.8 วิธีการคำนวณค่าอัตราส่วนความปลอดภัยโดยวิธีต่างๆ

วิธีการวิเคราะห์	การพิจารณาสมดุล			แรงด้านข้างของมวลดิน
	สมดุลแรง		สมดุล โมเมนต์	
	แนวราบ	แนวตั้ง		
Ordinary Method	-	✓	✓	ไม่พิจารณาแรงระหว่างมวลดิน
Simplified Bishop Method	-	✓	✓	ไม่พิจารณาแรงเฉือนระหว่างมวลดิน
Simplified Janbu Method	✓	✓	-	ไม่พิจารณาแรงเฉือนระหว่างมวลดิน
Spencer Method	✓	✓	✓	แรงเฉือนระหว่างมวลดินคงที่ตลอดลาดดิน
Morgenstern – Price Method	✓	✓	✓	กำหนดรูปแบบแรงเฉือนระหว่างมวลดินได้



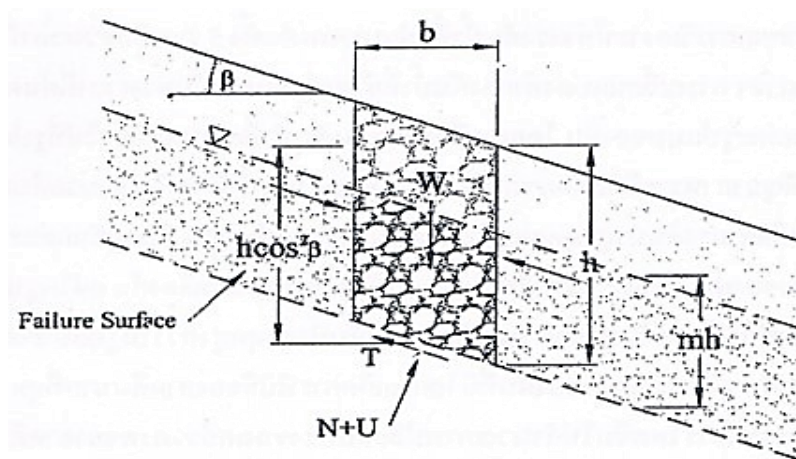




รูปที่ 2.31 ภาพแสดงกราฟของค่า  $m_{\alpha(n)}$  สำหรับสมการของ Bishop (Das, 1994)

บรรพต (2548) ได้เสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดอนันต์ (Infinite Slope) โดยพิจารณาระนาบพืดจากรูปที่ 2.32 ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.33 และมีสมมติฐาน ดังนี้

- 1) วิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินโดยใช้แบบจำลองแรงเฉือนประสิทธิผล
- 2) ปริมาณความชื้นมีค่าสม่ำเสมอตลอดหน้าตัด
- 3) วิเคราะห์เปรียบเทียบกรณีที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน และกรณีที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำมากๆ



รูปที่ 2.32 แผนภาพแรง (Free body diagram) ของแท่งดินสำหรับลาดอนันต์ (บรรพต, 2548)

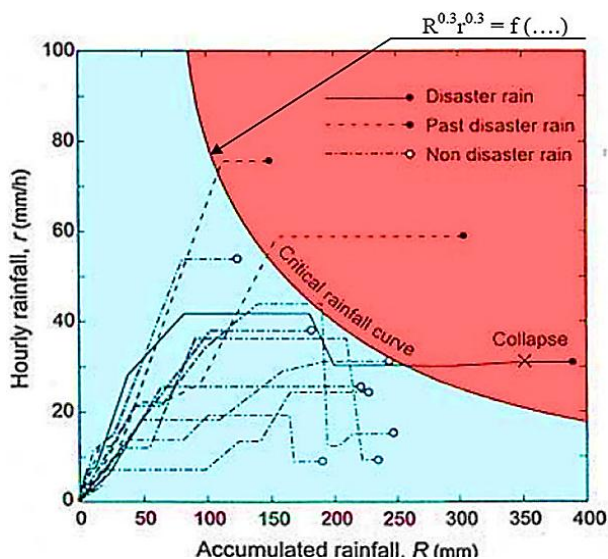
$$FS = \frac{c' + h \cos^2 \beta \tan \phi' [(1-m)\gamma' + m(\gamma_{sat} - \gamma_w)] + \ln(S_r) \tan \alpha}{h \sin \beta \cos \beta [(1-m)\gamma' + m\gamma_{sat}]} \quad (2.33)$$



โดยที่	$c'$	=	แรงยึดเหนี่ยวของมวลดินประสิทธิผล
	$h$	=	ความลึกของลาดแนวการพิบัติ
	$\beta$	=	มุมเอียงของลาดดิน
	$\phi'$	=	มุมเสียดทานภายในของดิน
	$m$	=	อัตราส่วนความลึกระดับน้ำใต้ดินเหนือแนวพิบัติกับความลึกของแนวพิบัติ
	$\gamma_m$	=	หน่วยน้ำหนักขึ้นของดิน
	$\gamma'$	=	หน่วยน้ำหนักประสิทธิผลของดิน
	$\gamma_{sat}$	=	หน่วยน้ำหนักของดินอิ่มตัวของดิน
	$\alpha$	=	มุมความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนและระดับความอิ่มตัวในมวลดิน (Constant parameter)

## 2.4 การวิเคราะห์ค่าปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตของลาดอนันต์ (Critical Cumulative Rainfall)

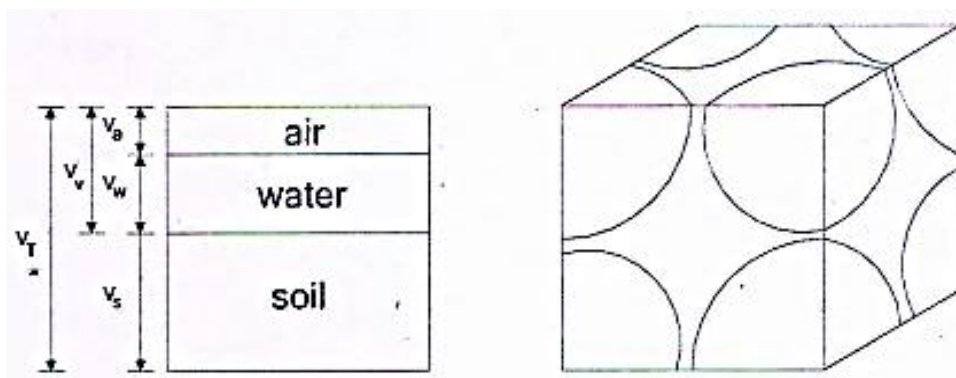
Okada et al. (1992) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝน และการพิบัติของลาดดินมาสร้างขอบเขตน้ำฝนวิกฤต (Critical rainfall) เพื่อใช้ในการเตือนภัยสำหรับการพิบัติของลาดดิน โดยใช้หลักสถิติจากฐานข้อมูลการเกิดพิบัติ, ปริมาณน้ำฝน, ลักษณะของลาดดิน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังแสดงในรูปที่ 2.33 โดยใช้เส้นน้ำฝนวิกฤต (Critical rainfall curve) แบ่งขอบเขตระหว่างปริมาณน้ำฝนรายชั่วโมง และปริมาณน้ำฝนสะสมที่สอดคล้องกันที่ทำให้เกิด และไม่เกิดลาดดินพิบัติ



รูปที่ 2.33 ภาพแสดงขอบเขตน้ำฝนวิกฤต (Okada et al., 1992)

## 2.5 การวิเคราะห์ค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (Antecedent Precipitation Index, API)

วรวัชร (2552) ได้เสนอว่าค่า *API* มีความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับความอิ่มตัวในมวลดิน, ปริมาณช่องว่างในมวลดิน หรือความพรุนของมวลดิน และความหนาของชั้นดิน จากความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ของมวลดินนั้นสามารถหาค่าปริมาณน้ำในมวลดิน หรือ *API* ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.34 และดังสมการที่ 2.34– 2.41



รูปที่ 2.34 ภาพแสดงส่วนประกอบของมวลดิน (วรวัชร, 2552)

$$\text{ความพรุน (Porosity);} \quad n = \frac{V_v}{V_T} \quad (2.34)$$

$$V_v = nV_T \quad (2.35)$$

$$\text{Volumetric water content;} \quad \theta = \frac{V_w}{V_T} \quad (2.36)$$

$$V_w = \theta V_T \quad (2.37)$$

$$\text{ระดับความอิ่มตัวในมวลดิน;} \quad S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad (2.38)$$

$$S_r = \frac{\theta V_T}{nV_T} \quad (2.39)$$

$$\text{หรือ} \quad \theta = nS_r \quad (2.40)$$

$$\text{สามารถหาค่า } API \text{ ได้ว่า;} \quad API = nS_r H \quad (2.41)$$

โดยที่	$V_v$	=	ปริมาตรช่องว่างในมวลดิน
	$V_T$	=	ปริมาตรรวมของมวลดิน
	$V_w$	=	ปริมาตรของน้ำในมวลดิน
	$\theta$	=	ปริมาณน้ำในดินโดยปริมาตร
	$n$	=	ความพรุนของดิน (Porosity)
	$S_r$	=	ระดับความอิ่มตัวในมวลดิน (Degree of Saturation, %)
	$H$	=	ความหนาของชั้นดิน (m)
	$API$	=	ดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (mm)

## 2.6 ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์กับการพัฒนาแผนที่เสี่ยงภัยธรณีพิบัติ (GIS)

Zaruba and Menzl (1982) ได้เสนอสมการ Landslide index ซึ่งขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการเกิดลาดดินพิบัติ ดังสมการที่ 2.42 ซึ่งจากสมการดังกล่าวชี้ให้เห็นได้ว่าสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแผนที่เสี่ยงภัยพิบัติด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) โดยการกำหนดค่าของคะแนนแต่ละปัจจัยที่ผลต่อการเกิดธรณีพิบัติ

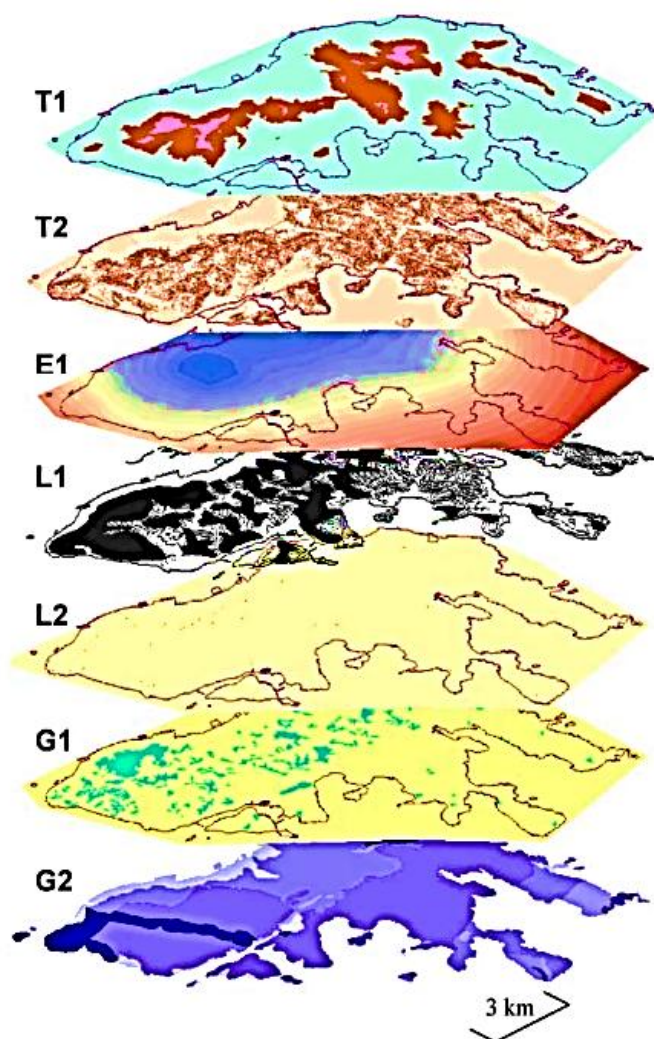
### *Landslide Index*

$$= (Rr + Rw) + (RUrRUw) + (SrSw) + (LrLw) + (DFrDFw) + (ArAw) + (HrHw) \quad (2.42)$$

โดยที่

<i>Landslide Index</i>	=	ระดับโอกาสที่จะเกิดดินถล่ม โดยเป็นค่าคะแนนรวมของแต่ละปัจจัย
$R$	=	ปัจจัยปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย
$RU$	=	ปัจจัยชุดหน่วยหิน
$S$	=	ปัจจัยความลาดชันของพื้นที่
$L$	=	ปัจจัยการใช้ที่ดิน
$DF$	=	ปัจจัยระยะห่างจากรอยเลื่อน
$A$	=	ปัจจัยทิศทางการรับน้ำฝน
$H$	=	ปัจจัยระดับความสูงของพื้นที่จากระดับน้ำทะเล
$r$	=	ค่าคะแนนของปัจจัยต่างๆ
$w$	=	ค่าถ่วงน้ำหนักของปัจจัยต่างๆ

Chau et al. (2004) ได้เสนอสมการ Hazard index ดังสมการที่ 2.43 ซึ่งขึ้นกับปัจจัย 7 ปัจจัย ได้แก่ ระดับความสูง มุมลาดชันของลาดดิน กลุ่มหินฐาน กลุ่มดินตะกอน (การสะสมดิน ตะกอน) การเกิดเหตุการณ์ลาดดินพิบัติในอดีต ศักย์น้ำท่า และความเข้มฝนรายเดือน ตามลำดับได้ เพื่อใช้สำหรับการซ้อนทับของข้อมูล (Overlay) ในการสร้างแผนที่เสี่ยงลาดดินพิบัติดังตารางที่ 2.9 และในรูปที่ 2.35



รูปที่ 2.35 ภาพแสดงลักษณะข้อมูล Vector สำหรับการซ้อนทับข้อมูล (Chau et al., 2004)

ตารางที่ 2.9 คลาสและชั้นของข้อมูลในการสร้างแผนที่เสี่ยงธรณีพิบัติ (Chau et al., 2004)

Category	Layer (j)
Terrain	Elavation
	Slope angle
Geology	Lithology
	Soil deposit
Landslide	Past events
	Potential Runout
Environment	Rainfall

$$Hazard(x) = F(x) \sum_{j=1}^7 [W_j H_{ji}(x)] / \sum_{j=1}^7 W_j \quad (2.43)$$

โดยที่

- $Hazard(x)$  = ดัชนีโอกาสเกิดลาดดินพิบัติของแต่ละ Pixel ( $\leq 1.00$ )
- $j$  = ชั้นข้อมูล
- $i$  = คลาสข้อมูล
- $W_i$  = ค่าน้ำหนักของข้อมูล
- $H_{ij}$  = ดัชนีธรณีพิบัติ

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิเคราะห์การพิบัติของลาดดินมีผู้ให้ความสนใจ และศึกษาด้านนี้กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากในปัจจุบันมีเหตุการณ์การพิบัติของลาดดินถี่ขึ้น และแต่ละครั้งยังมีความรุนแรงที่สูงขึ้นซึ่งสร้างความเสียหายต่อเศรษฐกิจ และชีวิตของประชากร โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

สุทธิศักดิ์ และคณะ (2550) ได้ทำการศึกษาการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดิน เพื่อสนับสนุนการเตือนภัยดินถล่มจากฝนตกหนัก โดยทำการศึกษาเพื่อประเมินโอกาสการเกิดดินถล่มในพื้นที่ต่างๆ ด้วยวิธีการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนสำหรับงานดินถล่ม 2 วิธี คือ KU-Multi state direct shear test: KU-MSDS และ Strength reduction index: SRI การทดสอบดินเพื่อประเมินศักยภาพการเกิดดินถล่มของดินนั้น มุ่งเน้นศึกษาสภาวะการเกิดดินถล่มในสภาวะฝนตก วิธีการทดสอบได้ออกแบบให้ศึกษาพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงเฉือน และอัตราส่วนช่องว่างเมื่อความชื้นเพิ่ม ขึ้น โดยเก็บตัวอย่างคงสภาพของดินมาจากชุดหินกลุ่มต่างๆ ทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือนตรงเพื่อหาคุณสมบัติการลดลงของกำลังรับแรงเฉือนเมื่อดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ที่เรียกกันว่า SRI ใช้ตัวอย่างดิน 2 สภาวะ อันได้แก่ สภาวะตามความชื้นในธรรมชาติ (Unsoaked) และสภาวะเมื่อนำดินแช่น้ำ (Soaked)รวมเป็น 1 การทดสอบและการทดสอบ KU-MSDS ทดสอบ โดยวิธี Multi-Stage ในแต่ละตัวอย่างและเปลี่ยนแปลงความชื้นทั้งหมด 3 ตัวอย่างรวมเป็น 1 ชุดการทดสอบผลการทดสอบ SRI พบว่าดินมาจากหินแกรนิตมีร้อยละการลดลงของกำลังรับแรงเฉือนอยู่ระหว่างร้อยละ 10 ถึง 50 ดินมาจากหิน โคลนและหินดินดานมีร้อยละการลดลงที่ค่อนข้างกระจายตัวระหว่างร้อยละ 20 ถึง 70 สำหรับดินที่มาจากหินทรายมีร้อยละการลดลงมากกว่าร้อยละ 50 ผลการทดสอบ KU-MSDS ได้ว่าเมื่อระดับความอิ่มตัวเพิ่มมากขึ้นค่า Shear stress ของดินจะมีค่าลดลงซึ่งเป็นสาเหตุการพิบัติของลาดดินส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในช่วงที่มีฝนตกหนักจากผลการทดสอบ SRI แสดงให้เห็นว่าการยุบตัวในดินบางประเภทส่งผลให้กำลังรับแรงเฉือนเปลี่ยนไปและวิธีการทดสอบแบบ SRI TEST เหมาะสำหรับการทดสอบในพื้นที่กว้าง เพื่อหาแนวโน้มการลดลงของกำลังรับแรงเฉือนของดินเมื่อความชื้นเปลี่ยนแปลงผลการทดสอบ KU-MSDS นอกจากจะได้ผลการทดสอบที่ละเอียดมากขึ้นยังมีนัยสำคัญในการนำมาใช้เตือนภัยดินถล่มเนื่องจากฝนตกหนักได้ต่อไป

นงลักษณ์ (2547) ได้ทำการศึกษาเสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่ลุ่มน้ำก้อ โดยใช้คุณสมบัติทางวิศวกรรม โดยทำการศึกษาเพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของน้ำฝน ด้วยการใช้การวิเคราะห์พฤติกรรมกรไหลของน้ำฝนลงชั้นดิน ซึ่งวิเคราะห์โดยหลักการ Finite element การสำรวจประกอบด้วยการสำรวจภูมิประเทศและการสำรวจชั้นดิน การสำรวจภูมิประเทศทำได้โดยการสำรวจด้วยกล้องสำรวจ เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของภูมิประเทศหรือระดับพื้นผิวของ

ลาดดิน การสำรวจดินประกอบด้วยการสำรวจชั้นดินด้วยการทำ Test pit การทดสอบค่าความชื้นน้ำ การทดสอบการหยั่งชั้นดินด้วย Kunzelstab penetration test โดยลักษณะชั้นดินมีความหนา 1-4 เมตร และได้เก็บตัวอย่างดินคงสภาพสำหรับการทดสอบแรงเฉือนด้วยวิธีเฉือนตรง (Direct shear test) พบว่ากำลังรับแรงเฉือนของดินลดลงเมื่อระดับความอิ่มตัวเพิ่มขึ้น โดยช่วงค่าความอิ่มตัวที่ 15-60 % มีปริมาณน้ำในดินน้อยค่าทำให้ Shear strength parameter ( $c, \phi$ ) มีค่าสูงและได้วิเคราะห์การไหลซึม ในสภาวะการไหลแบบคงที่ (Steady) และสภาวะการไหลที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient) สภาวะ การไหลแบบคงที่จะใช้น้ำฝนเฉลี่ยตลอดทั้งปี ส่วนอีกสภาวะใช้น้ำฝนที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งมีรูปแบบ น้ำฝน 5 รูปแบบ คือ 1, 3, 5, 10 และ 14 วัน โดยวิเคราะห์รอบปีการเกิดซ้ำที่ 5, 10, 20, 50 และ 100 ปี ผลการวิเคราะห์การไหลซึมของรูปแบบน้ำฝน พบว่ารูปแบบน้ำฝนและปริมาณความเข้มของน้ำฝน มีผลต่อการเคลื่อนตัวของระดับน้ำและความชื้นซึ่งส่งผลโดยตรงต่อเสถียรภาพ ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ ใช้วิธีลาดดินอนันต์ (Infinite slope) วิเคราะห์ลาดดินที่มีกำลังรับแรงเฉือนเปลี่ยนแปลงตามความชื้น ในดินที่ได้โดยผลการวิเคราะห์จะเป็นเสถียรภาพแบบจุดทำให้ทราบการเปลี่ยนแปลงค่าความมั่นคง ของลาดดิน (F.S.) ของแต่ละจุดส่วนการวิเคราะห์แบบ Circular failure เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพ โดยรวมและเป็นตัวแทนของทั้งลาดดิน จากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถกำหนด เส้นขอบเขตน้ำฝนวิกฤตที่มีค่าความมั่นคงของลาดดิน (F.S.) เท่ากับ 1 จากความเข้มฝนเฉลี่ยต่อวัน และน้ำฝนสะสมของรูปแบบน้ำฝนที่ใช้วิเคราะห์ในช่วง 1-14 วัน ได้

Fausto (2004) การเกิดลาดดินถล่มและน้ำหลากที่เมืองอิมพีเรีย (Imperia) ประเทศ อิตาลี ในช่วงเดือนพฤศจิกายน 2543 บัจจัยสำคัญมาจากภูมิประเทศเป็นพื้นที่ลาดชันและฝนตก ติดต่อกันเป็นเวลานาน ซึ่งจากข้อมูลที่รวบรวมได้ พบว่าในช่วงเดือนตุลาคม ถึงเดือนพฤศจิกายน มีปริมาณน้ำฝนมากกว่า 1,000 มิลลิเมตร และในวันที่ 24 พฤศจิกายน 2543 มีปริมาณน้ำฝนมากกว่า 180 มิลลิเมตร ทำให้บริเวณดังกล่าวเกิดการพิบัติของลาดดินมากกว่าหนึ่งพันแห่งเป็นผลให้ถนน บ้านเรือน พื้นที่เกษตรกรรมได้รับความเสียหาย และจากการศึกษาเพิ่มเติมพบว่าลาดดินถล่มเกิดขึ้นหลังจากมี พายุฝนในพื้นที่ โดยมีปริมาณความเข้มข้นของน้ำฝนประมาณ 8 ถึง 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง และจาก ข้อสรุปของการศึกษา พบว่าน้ำฝนที่ซึมลงในดินเป็นสาเหตุให้ลาดดินสูญเสียกำลังต้านทานจนทำ ให้เกิดการพิบัติของลาดดินในลักษณะที่เป็นทั้งการพิบัติแบบดินและการพิบัติแบบลึก

Chien Yuan (2005) การเกิดลาดดินถล่มและน้ำหลากที่ภูเขาเทน ไถเอี้ย (Tenliao) ได้หวัน ในช่วงเดือนพฤศจิกายน 2543 มีบัจจัยสำคัญมาจากภูมิประเทศเป็นพื้นที่ลาดชัน และมีดิน ตะกอนสะสม นอกจากนี้ในพื้นที่ดังกล่าวนี้มีประวัติการเกิดการพิบัติของลาดดินหลายครั้ง ประกอบ กับฝนตกติดต่อกันในปริมาณมากต่อเนื่องเป็นเวลาหลายวัน เป็นเหตุให้บริเวณดังกล่าวเกิดการพิบัติ ของลาดดินและน้ำท่วม ส่งผลให้ถนน บ้านเรือน พื้นที่เกษตรกรรมได้รับความเสียหาย จากผลการศึกษา

พบว่าน้ำฝนที่ซึมลงในดินทำให้ลาดดินสูญเสียกำลังต้านทานจนทำให้เกิดการพังทลาย โดยลักษณะการพังทลายของลาดดินมีทั้งที่เป็นพังทลายแบบดินและการพังทลายแบบลึก

ศิวศักดิ์ (2553) การศึกษาพื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่มในพื้นที่ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลาโดยการวิเคราะห์ด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) ด้วยสมการที่เสนอโดย Zaruba and Menzl (1982) มีการกำหนดชั้นข้อมูล (Class) ค่าคะแนนของปัจจัย (Rating) และค่าถ่วงน้ำหนักของปัจจัย (Weighting) เพื่อประเมินพื้นที่ที่มีโอกาสเกิดแผ่นดินถล่มในลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา (จังหวัดสงขลา จังหวัดพัทลุง จังหวัดนครศรีธรรมราช) และจังหวัดเชียงใหม่ (จังหวัดสตูล และจังหวัดตรัง) ดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 การให้ค่าถ่วงน้ำหนักและค่าคะแนนในแต่ละปัจจัย (ศิวศักดิ์, 2553)

ปัจจัย (Parameter)	ประเภทข้อมูล (Class)	ค่าคะแนนของ ประเภทข้อมูล (rating)	ค่าถ่วงน้ำหนัก ของปัจจัย (weighting = w)
1. ปริมาณน้ำฝนรายวัน สูงสุด (Rainfall - $R$ )	มากกว่า 200 มม.	5	6
	150 – 200 มม.	4	
	150 – 100 มม.	3	
	50–100 มม.	2	
	น้อยกว่า 50 มม.	1	
2. ชุดหน่วยหิน (Rock unit - $RU$ )	หินแกรนิตหินไนส์	6	5
	หินปูนตะกอนไม่แข็งตัว	5	
	หินทราย	4	
	หินดินดานหินทรายแป้ง	3	
	หินตะกอนคาร์บอเนต	2	
3. ความลาดชันของพื้นที่ (Slope - $S$ )	หินภูเขาไฟ	1	4
	มากกว่า $45^\circ$	3	
	$30 - 45^\circ$	2	
	$15 - 30^\circ$	1	
4. การใช้ที่ดิน (Landuse - $L$ )	น้อยกว่า $15^\circ$	0	3
	ไม่ใช่ประโยชน์จากพื้นที่	3	
	ป่าเสื่อมโทรม	2	
	ป่าสมบูรณ์	1	



ตารางที่ 2.10 (ต่อ) การให้ค่าถ่วงน้ำหนักและค่าคะแนนในแต่ละปัจจัย (ศิริศักดิ์, 2553)

ปัจจัย (Parameter)	ประเภทข้อมูล (Class)	ค่าคะแนนของ ประเภทข้อมูล (rating)	ค่าถ่วงน้ำหนัก ของปัจจัย (weighting = w)
5. ระยะห่างจากจาก รอยเลื่อน (Distance fault - <i>DF</i> )	มากกว่า 1,000 เมตร	3	2
	1,000 – 2,000 เมตร	2	
	มากกว่า 2,000 เมตร	1	
6. ทิศทางการรับน้ำฝน (Aspect - <i>A</i> )	ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ	3	1
	ทิศตะวันตกเฉียงใต้	2	
	ทิศทางอื่นๆ	1	
	ที่ราบ	0	
7. ระดับความสูงของพื้นที่ จากระดับน้ำทะเล (High - <i>H</i> )	สูงกว่า 1,500 เมตร	3	1
	1,000– 1,5000 เมตร	2	
	500– 1,000 เมตร	1	
	ต่ำกว่า 500 เมตร	0	

การวิเคราะห์หาพื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่มในพื้นที่ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา และจังหวัด  
เชื่อมโยง โดยใช้ปัจจัย (Parameter) ต่างๆ ได้แก่ ปริมาณน้ำฝนรายวันสูงสุด, ชุดหน่วยหิน, ความลาดชัน  
ของพื้นที่ การใช้ที่ดิน, ระยะห่างจากรอยเลื่อน, ทิศทางการรับน้ำฝน และระดับความสูงของพื้นที่  
โดยได้กำหนดช่วงของค่าดัชนีแผ่นดินถล่ม (Landslide index) โดยคำนวณจากค่าต่ำสุดและค่าสูงสุด  
ของค่าดัชนีแผ่นดินถล่มของปี พ.ศ. 2554 พ.ศ. 2568 พ.ศ. 2605 และ พ.ศ. 5631 และหารด้วย 4 ซึ่ง  
เป็นจำนวนระดับความเสี่ยงภัยดินถล่ม โดยค่าคะแนนจะแบ่งออกเป็น 4 ช่วง ดังตารางที่ 2.11

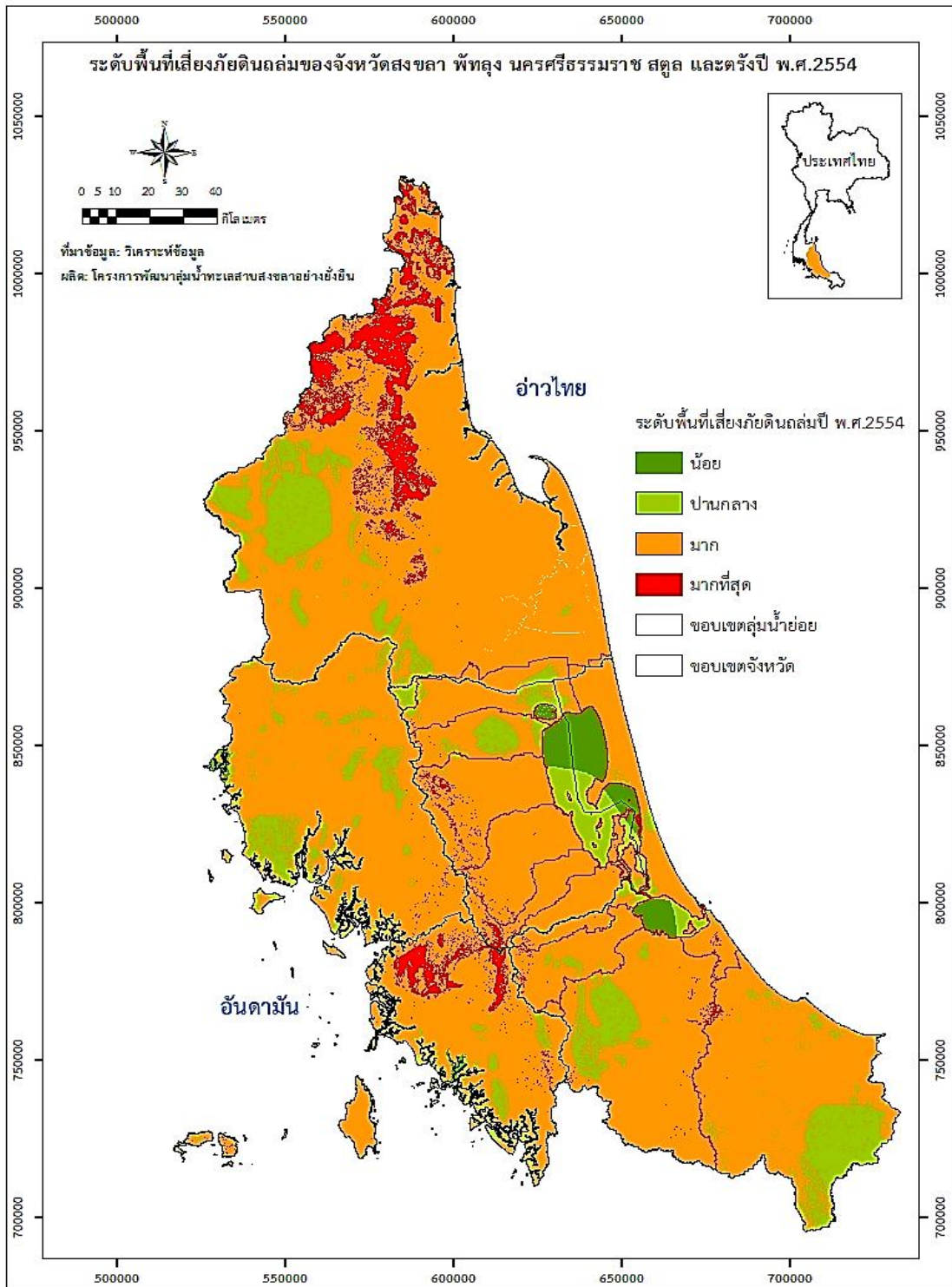
ตารางที่ 2.11 ระดับความเสี่ยงภัยดินถล่มจากการประมวลผลด้วยสมการ Landslide index  
(ศิริศักดิ์, 2553)

ระดับความเสี่ยงภัยดินถล่ม	ระดับคะแนน
น้อย	10 – 30
ปานกลาง	30 – 50
มาก	50 – 70
มากที่สุด	70–90

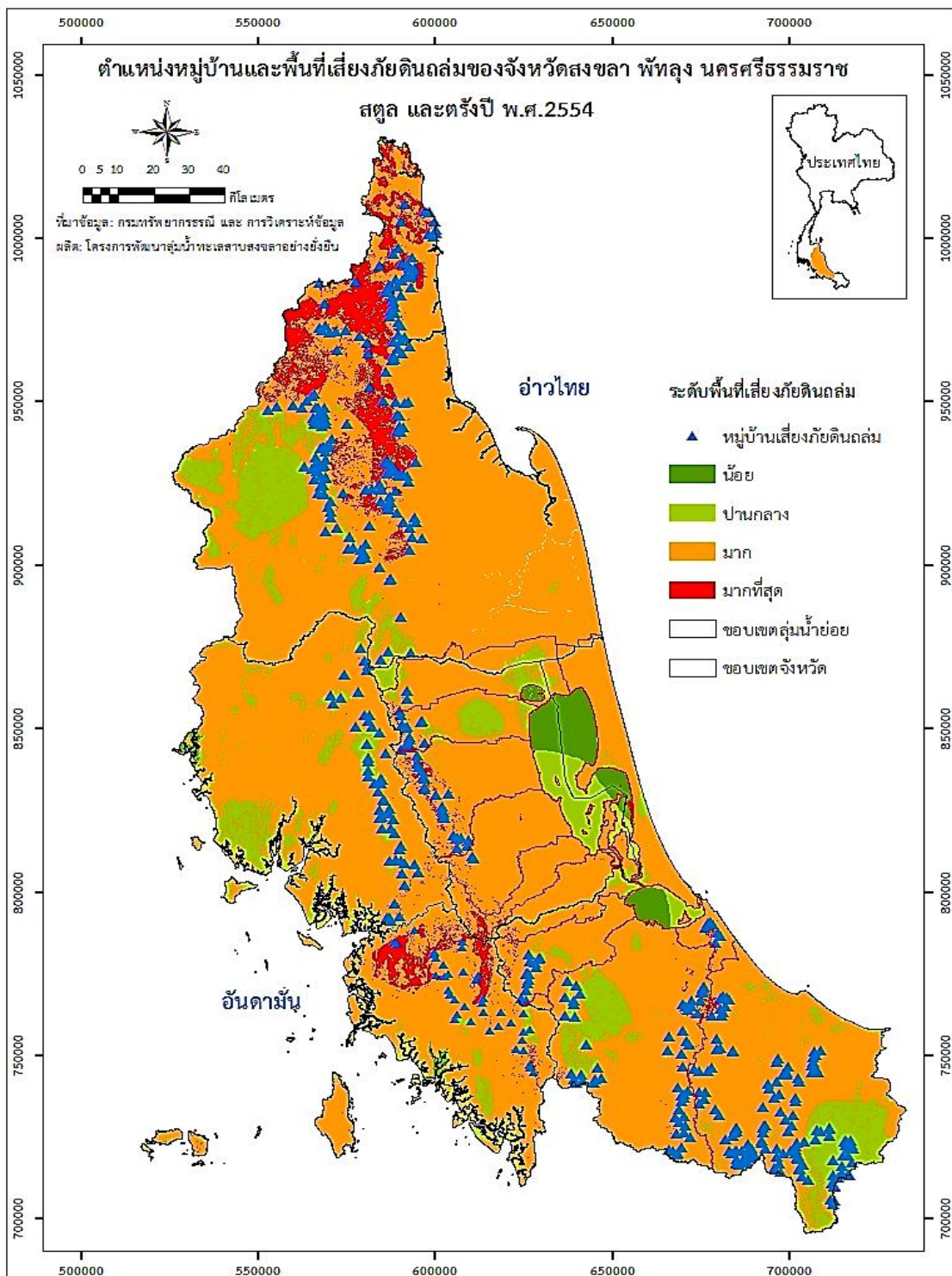
สำหรับจังหวัดที่มีพื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่ม “ระดับมากที่สุด” ได้แก่ จังหวัดนครศรีธรรมราช รองลงมา ได้แก่ จังหวัดสตูล จังหวัดพัทลุง จังหวัดสงขลา และจังหวัดตรัง ตามลำดับ ดังตารางที่ 2.12 และดังแสดงในรูปที่ 2.37 และจากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์หาพื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่มด้วยดัชนี ดินถล่มกับหมู่บ้านเสี่ยงภัยดินถล่มจากการเก็บรวบรวมข้อมูลของกรมทรัพยากรธรณี กรมการปกครอง กระทรวงมหาดไทย กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งหมู่บ้านเสี่ยงภัยดินถล่มตกอยู่ในบริเวณพื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่ม (สีแดงและสีส้ม) (ดังแสดงในรูปที่ 2.36) โดยหมู่บ้านในพื้นที่ลุ่มน้ำและพื้นที่เชื่อมโยงที่มีพื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่ม “ระดับมากที่สุด” มีจำนวนหมู่บ้าน ดังนี้ จังหวัดสงขลามี 65 หมู่บ้าน จังหวัดพัทลุงมี 40 หมู่บ้าน จังหวัดนครศรีธรรมราชมี 180 หมู่บ้าน จังหวัดสตูลมี 38 หมู่บ้าน และจังหวัดตรังมี 49 หมู่บ้าน

ตารางที่ 2.12 พื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่มในลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลาและพื้นที่เชื่อมโยงปี พ.ศ. 2554 (สิวศักดิ์, 2553)

จังหวัด	ระดับพื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่มปี พ.ศ. 2554 (ไร่)				รวม
	ระดับ น้อย	ระดับ ปานกลาง	ระดับ มาก	ระดับ มากที่สุด	
ตรัง	16,225.8	421,133.27	2,427,103.51	7,628.14	2,872,090.74
นครศรีธรรมราช	0	594,157.68	4,815,063.38	761,761.15	6,170,982.21
พัทลุง	100,185	368,957.33	1,877,255.06	64,479.16	2,410,876.30
สงขลา	252,710	763,373.39	3,789,104.18	33,292.31	4,838,479.89
สตูล	18,090	167,176.86	1,391,918.70	180,441.67	1,757,627.24
<b>รวม</b>	<b>387211</b>	<b>2,314,798.53</b>	<b>14,300,444.83</b>	<b>1,047,602.43</b>	<b>18,050,056.38</b>



รูปที่ 2.36 แผนที่ระดับความเสี่ยงภัยดินถล่มในกลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลาและพื้นที่เชื่อมโยงปี พ.ศ. 2554 (สิวกศักดิ์, 2553)



รูปที่ 2.37 แผนที่หมู่บ้านและพื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่มในกลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลาและพื้นที่เชื่อมโยงปี พ.ศ. 2554 (ศึกศักดิ์, 2553)

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยการศึกษาปริมาณน้ำฝนวิกฤตเพื่อการเตือนภัยลาดดินพิบัติ : กรณีศึกษา ต.คลองทราย อ.นาทวี จ.สงขลา จำเป็นต้องมีความรู้และเข้าใจหลักปฐพีกลศาสตร์ การพิบัติของลาดดิน และการนำข้อมูลทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องมาประยุกต์ใช้ ซึ่งประกอบด้วย ขั้นตอน และรายละเอียดจำนวนมาก ทั้งนี้เพื่อให้เข้าใจภาพรวมของวิธีการดำเนินงานวิจัย จึงได้แบ่งการดำเนินงานวิจัยออกเป็น 6 ขั้นตอนหลักๆ ประกอบด้วย การรวบรวมข้อมูลเบื้องต้น, การออกสำรวจพื้นที่ และการเก็บตัวอย่างดิน, การทดสอบตัวอย่างดินภาคสนามและในห้องปฏิบัติการ, การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน, การวิเคราะห์ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตสะสมเพื่อการเตือนภัย และการจัดทำแผนที่ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตโดยใช้เทคนิคการซ้อนทับของข้อมูลสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1

#### 3.1 การรวบรวมข้อมูลเบื้องต้น

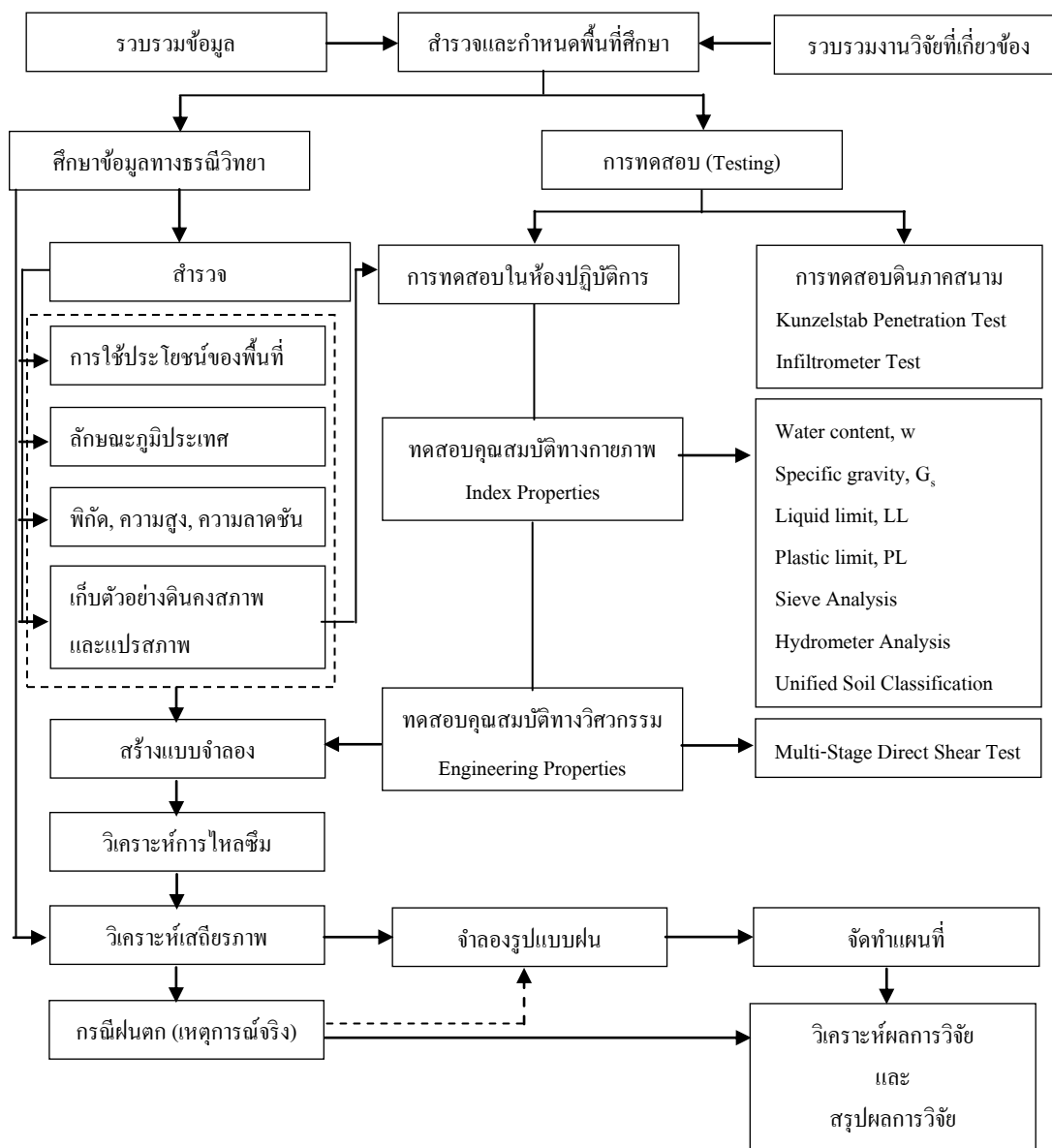
การรวบรวมข้อมูลการสำรวจเบื้องต้นในงานวิจัยนี้ ได้ทำการรวบรวมข้อมูลจากการสำรวจของกรมทรัพยากรธรณี สำนักงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยจังหวัดสงขลา กรมอุตุนิยมวิทยา และข้อมูลจากประชาชนในพื้นที่ประสบภัย ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการแบ่งขั้นตอนในการรวบรวมข้อมูลเบื้องต้น ได้แก่ การรวบรวมข้อมูลพื้นฐาน การรวบรวมข้อมูลการเกิดดินถล่ม และพื้นที่เสี่ยงต่อการพิบัติของลาดดิน สามารถแสดงรายละเอียดได้ ดังนี้

##### 3.1.1 การรวบรวมข้อมูลพื้นฐาน

การรวบรวมข้อมูลพื้นฐาน ซึ่งพื้นที่ศึกษาเบื้องต้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการเลือกพื้นที่จังหวัดสงขลา เป็นพื้นที่ศึกษาได้ทำการรวบรวมข้อมูลพื้นฐานต่างๆ ได้แก่ ข้อมูลที่ตั้งและขอบเขตข้อมูลสภาพภูมิอากาศ ข้อมูลสภาพภูมิประเทศ ข้อมูลลักษณะทางธรณีวิทยา และข้อมูลพื้นที่การเกิดดินถล่มในจังหวัดสงขลา ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะใช้เป็นข้อมูลในการวางแผนสำหรับเลือกพื้นที่ในการสำรวจภาคสนาม รวมทั้งยังสามารถลดขอบเขตงานวิจัยให้เหลือเพียง อำเภอนาทวี จังหวัดสงขลา สำหรับใช้เป็นพื้นที่ศึกษาดังแสดงในรายละเอียดต่อไป

### 3.1.2 รวบรวมข้อมูลการเกิดลาดดินพิบัติและพื้นที่เสี่ยงต่อการพิบัติของลาดดิน

การรวบรวมข้อมูลการเกิดลาดดินพิบัติ พื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดลาดดินพิบัติ และข้อมูลด้านความเสียหายในพื้นที่จังหวัดสงขลา ได้รวบรวมข้อมูลจากสำนักงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยจังหวัดสงขลา กรมอุตุนิยมวิทยา และข้อมูลจากประชาชนในพื้นที่ประสบภัย



รูปที่ 3.1 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 3.2 การสำรวจพื้นที่และการเก็บตัวอย่างดิน

การสำรวจพื้นที่และการเก็บตัวอย่างดิน สำหรับทางธรณีเทคนิคเพื่อการวิจัยเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญ และมีรายละเอียดที่ซับซ้อนในงานวิจัยนี้ จึงได้ทำการแบ่งออกเป็นขั้นตอนหลัก 4 ขั้นตอน ได้แก่ การออกสำรวจภาคสนามเบื้องต้น การสำรวจพื้นที่เก็บตัวอย่างและการสำรวจทางธรณีวิทยา การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ การเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพ สามารถแสดงรายละเอียดได้ ดังนี้

#### 3.2.1 การออกสำรวจภาคสนามเบื้องต้น

จากการรวบรวมข้อมูลพื้นฐานต่างๆแล้วเสร็จได้ประสานงานร่วมลงสำรวจพื้นที่กับสำนักงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยจังหวัดสงขลา เพื่อรวบรวมสภาพพื้นที่ศึกษาจริงเบื้องต้นมาจำแนกระดับความต้องการของข้อมูล โดยพิจารณาจาก ความลาดชัน ชนิดหิน ลักษณะการพิบัติ ความเสียหาย ขนาดของพื้นที่ รวมถึงความสามารถในการขนส่งนำอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการสำรวจเข้าพื้นที่ศึกษา เป็นตัวกำหนดในการเลือกพื้นที่ศึกษาซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการเลือกพื้นที่บ้าน โศกภูหมี ต.คลองทราย อำเภอนาทวี จังหวัดสงขลา

#### 3.2.2 การสำรวจพื้นที่เก็บตัวอย่างและการสำรวจทางธรณีวิทยา

การสำรวจพื้นที่เพื่อเก็บตัวอย่างดินและการสำรวจทางธรณีวิทยาสำหรับงานลาดดินพิบัตินั้นเป็นขั้นตอนที่สามารถทำได้พร้อมกันในการสำรวจพื้นที่ศึกษา และนำข้อมูลที่ได้จากการสำรวจมาใช้ในออกแบบการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

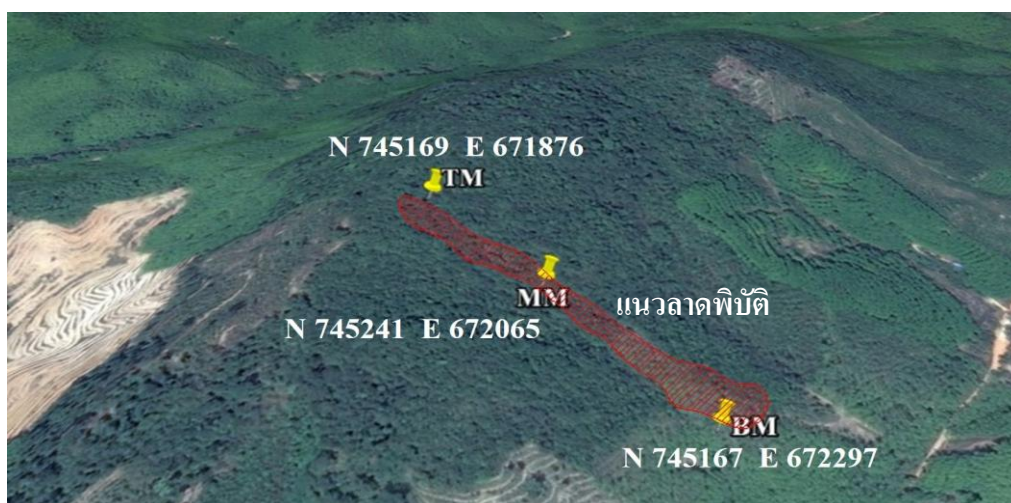
1) เปิดหลุมสำรวจดิน (Test pits) การเปิดหลุมสำรวจดินบนลาดดินพิบัตินั้นทำการเลือกตำแหน่งจากบริเวณที่ดินมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับแนวลาดพิบัติจนสามารถใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลได้ โดยได้ทำการคัดเลือกจากพื้นที่บริเวณด้านข้างของลาดพิบัติซึ่งเป็นตำแหน่งที่ดินคงอยู่ในสภาพธรรมชาติเช่นเดิมก่อนเกิดการพิบัติ และในบริเวณพื้นที่ใกล้เคียงดังกล่าวยังสามารถใช้สำหรับทำทดสอบดินภาคสนาม และเก็บตัวอย่างดิน ผลจากการเปิดหลุมสำรวจดินสามารถนำมาจำแนกชั้นดินได้ด้วยตาเปล่า (Vision inspection) ซึ่งจะนำมาใช้สำหรับการวางแผนเก็บตัวอย่างดินคงสภาพที่ใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และทำการเก็บตัวอย่างดินสำหรับความชื้นของดินในชั้นนั้นๆ สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการเลือกเปิดหลุมสำรวจ ณ บริเวณส่วนบนของลาดดิน (TM) ส่วนกลางของลาดดิน (MM) และส่วนล่างของลาดดิน (BM) รวม 3 จุด ที่เกิดการพิบัติ ดัง



แสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งสามารถเปิดหลุมสำรวจได้ถึงระดับความลึกประมาณ 1.00 – 1.40 เมตร (ถึงระดับหิน ไม่สามารถเปิดหลุมสำรวจต่อได้) ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 ภาพแสดงการเปิดหลุมสำรวจดิน (a.) ตำแหน่งบนของแนวพิบัติ (TM)  
(b.) ตำแหน่งล่างของแนวพิบัติ (BM)



รูปที่ 3.3 ภาพแสดงลาดดินพิบัติ ตำแหน่งเก็บตัวอย่างดิน และตำแหน่งทดสอบภาคสนาม

2) การเก็บตัวอย่างดิน ในการเก็บตัวอย่างดินบริเวณพื้นที่ศึกษาเป็นขั้นตอนที่สำคัญเพื่อใช้สำหรับการทดสอบหาคุณสมบัติดัชนี (Index property) และคุณสมบัติทางวิศวกรรม (Engineering property) ซึ่งจะได้ทำการเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพ และแบบคงสภาพ ตลอดทั้งความลึกที่สามารถเก็บได้จากในแต่ละจุดสำรวจ การเก็บตัวอย่างดินจะทำการเก็บจากบริเวณที่ลาดดินมีสภาพใกล้เคียงกับแนวลาดดินที่เกิดการพิบัติ ดังนั้น บริเวณส่วนบนของลาดดิน (TM) 7 หลุมเก็บตัวอย่าง ส่วนกลางของลาดดิน (MM) 3 หลุมเก็บตัวอย่าง และส่วนล่างของลาดดิน (BM) 3 หลุมเก็บตัวอย่าง เพื่อนำตัวอย่างดินที่ได้มาเป็นตัวแทนของลาดดินพิบัติ ตามรายละเอียดหัวข้อ 2.1.11



3) การทดสอบภาคสนาม ในการทดสอบดินภาคสนามนั้นเป็นขั้นตอนที่ การทดสอบ เพื่อให้ทราบถึงคุณลักษณะของชั้นดินในสภาวะแวดล้อมธรรมชาติของลาดดินก่อนที่จะ เกิดเหตุการณ์พิบัติของลาดดิน แต่เนื่องจากการทดสอบดังกล่าวนี้ทำได้ยากลำบากเนื่องจากเส้นทาง ในการขนส่งเครื่องมือไปยังจุดที่ต้องการทดสอบ ทำให้การทดสอบดังกล่าวสามารถเลือกทำได้บาง ตำแหน่งเท่านั้น ได้แก่ ทำการทดสอบหากำลังรับน้ำหนักของดินด้วยวิธีการเจาะแบบหยั่งเบา (Kunzelstab penetration test, KPT) บริเวณส่วนบนของลาดดิน (TM) ส่วนกลางของลาดดิน (MM) ส่วนล่างของลาดดิน (BM) และทำการทดสอบค่าการซึมน้ำของดินด้วยวิธี Double – Ring infiltrometer test บริเวณส่วนบนของลาดดิน ทั้งนี้ในการทดสอบจำเป็นต้องทำการทดสอบอย่างระมัดระวังเพื่อให้ ข้อมูลที่ได้มีความถูกต้องสูง เนื่องจากมีปัจจัยจากสภาพแวดล้อมที่ไม่สามารถควบคุมได้ ซึ่งใน การทดสอบนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดในการทดสอบตามรายละเอียดหัวข้อ 3.3.1

### 3.2.3 การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ

การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ (Undisturbed sample) จากดินบริเวณพื้นที่ ศึกษา โดยทำเลือกตำแหน่งบริเวณใกล้เคียงกับแนวลาดพิบัติที่ยังคงสภาพแวดล้อมเดิมก่อนเกิดการพิบัติ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการแบ่งลาดดินออกเป็น 3 ส่วน และทำการเก็บตัวอย่างดินจากทั้ง 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนบนของลาดดิน พิกัด N 745169 E 671876 ที่ความสูงประมาณ 271 เมตร ส่วนกลางของลาดดิน พิกัด N 745241 E 672065 ที่ความสูงประมาณ 184 เมตร และส่วนล่างของลาดดิน พิกัด N 745167 E 672297 ที่ความสูงประมาณ 41 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งการเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพจะ ทำการเก็บทุกๆ ระดับความลึก 20 เซนติเมตร ตลอดความลึกที่สามารถเก็บตัวอย่างได้ โดยใช้ชุด เก็บตัวอย่างดิน KU – Miniature sampler ซึ่งตัวอย่างดินที่ได้จะนำไปใช้สำหรับการทดสอบหา คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ภาพแสดงตัวอย่างดินคงสภาพ (a.) ที่เก็บได้จาก KU – Miniature sampler (b.) ตัวอย่างดินคงสภาพเมื่อดันออกจากกระบอกเก็บตัวอย่าง

### 3.2.4 การเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพ

การเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพ (Disturbed sample) สามารถเก็บได้พร้อม กับขั้นตอนการเปิดหลุมสำรวจ จากการใช้เครื่องเจาะ ชนิดมือหมุน (Hand auger) โดยตำแหน่งที่ทำการเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพจะทำบริเวณใกล้เคียงกับตำแหน่งที่เก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพ เพื่อให้ข้อมูลดินที่ได้มีความสอดคล้องกัน ซึ่งตัวอย่างดินที่ได้จะนำไปใช้สำหรับทดสอบหาคุณสมบัติ ดัชนี และจำแนกกลุ่มชนิดของดินดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ภาพแสดงตัวอย่างดินแปลงสภาพ (a.) และ (b.) จากตำแหน่งส่วนล่างของลาดดิน (BM)

### 3.3 การทดสอบตัวอย่างดินภาคสนามและในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบตัวอย่างดินภาคสนาม และในห้องปฏิบัติการ เป็นการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติต่างๆ ของดิน โดยมีจุดมุ่งหมายสำหรับการสร้างแบบจำลองลักษณะลาดดินที่ใช้ในการวิเคราะห์ เสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่นั้นๆ การวิเคราะห์เสถียรภาพจำเป็นต้องใช้ข้อมูลจากคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินสำหรับการวิเคราะห์ ดังนั้นข้อมูลเหล่านี้จึงมีความสำคัญ ต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินอย่างมาก ซึ่งการทดสอบดินภาคสนามนี้จะเป็นการทดสอบ ตามสภาพจริงสามารถทดสอบได้จากบริเวณใกล้เคียงของพื้นลาดดินที่เกิดการพิบัติที่ยังคงสภาพเดิม อยู่ และการทดสอบดินในห้องปฏิบัติการนั้นเป็นการทดสอบเสมือนจริงจึงจำเป็นต้องควบคุมตัวแปร ต่างๆ ให้คล้ายคลึงกับสภาพจริง โดยวิธีการทดสอบมี ดังนี้

### 3.3.1 การทดสอบคุณสมบัติดินในสนาม

การทดสอบคุณสมบัติของดินในภาคสนามเป็นการทดสอบดินตามสภาพจริงสามารถทดสอบได้ในขณะที่ดินยังคงสภาพเดิมตามธรรมชาติซึ่งสามารถทำได้หลังจากขั้นตอนทำการเลือกพื้นที่ศึกษาแล้วเสร็จ งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบดินในสนามดังนี้ ได้แก่ การทดสอบหาค่ากำลังรับน้ำหนักของดินด้วยวิธีการเจาะแบบหยั่งเบา และการทดสอบค่าการซึมน้ำของดินด้วยวิธี Double – Ring infiltrometer test ตามรายละเอียดหัวข้อ 2.1.12 ซึ่งได้เลือกตำแหน่งในการทำการทดสอบบริเวณใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ทำการเก็บตัวอย่างดิน เพื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาใช้ในการสร้างแบบจำลองวิเคราะห์การไหลซึม และวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

#### 1) การทดสอบหาค่ากำลังรับน้ำหนักของดินด้วยวิธีการเจาะแบบหยั่งเบา

การทดสอบหาค่ากำลังรับน้ำหนักของดินด้วยวิธีการเจาะแบบหยั่งเบา (Kunzelstab penetration test, KPT) ซึ่งผลการทดสอบที่ได้สามารถเปรียบเทียบกับการทดสอบด้วยวิธี Standard penetration test (SPT) ทำให้สามารถคำนวณประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุดของดิน (Bearing capacity) และมุมเสียดทานภายใน (Friction angle) โดยผลการทดสอบที่ได้จะทำให้ทราบถึงค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนที่ได้จะเป็นค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength) และลักษณะของชั้นดินเบื้องต้น การทดสอบจะทดสอบ ณ ตำแหน่งใกล้เคียงกับลาดแนวพิบัติที่ยังคงสภาพเดิม ณ บริเวณส่วนบนของลาดดิน (TM) ส่วนกลางของลาดดิน (MM) และส่วนล่างของลาดดิน (BM) ที่เกิดการพิบัติ รวมทั้งสิ้น 6 ตำแหน่ง เพื่อจะใช้เป็นข้อมูลลักษณะของชั้นดินในการสร้างแบบจำลอง

#### 2) การทดสอบค่าการซึมน้ำของดินด้วยวิธี Double – Ring Infiltrometer Test

การทดสอบค่าการซึมน้ำของดินด้วยวิธี Double – Ring infiltrometer test เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าอัตราการซึมผ่านของน้ำในมวลดิน ( $k_{sat}$ ) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบบริเวณส่วนบนของลาดดิน (TM) ที่เกิดการพิบัติ โดยหลักการของการทดสอบนี้จะทำการรักษาปริมาณน้ำในทรงกระบอกทั้งสองให้คงที่ตลอดเวลาที่ทำการทดสอบ ด้วยการเติมน้ำลงไปจนถึงทรงกระบอกทั้งสองพร้อมจับเวลาที่น้ำใช้เวลาในการแทรกซึมลงดิน น้ำที่เติมลงไปจนถึงทั้งสองจะเท่ากับน้ำที่ซึมลงในดินในช่วงเวลานั้น ซึ่งการเติมน้ำในถังทั้งสองจะทำการเติมแยกจากกันตามรายละเอียดหัวข้อ 2.1.12 ซึ่งก็คือ ความสัมพันธ์ของความซึมน้ำของดิน การทดสอบความซึมน้ำนี้สามารถได้ดังแสดงในรูปที่ 3.6



**รูปที่ 3.6** ภาพแสดงการทดสอบค่าการซึมน้ำของดินด้วยวิธี Double – Ring infiltrometer test  
(a.) และ (b.) ณ ตำแหน่งส่วนบนของลาดดิน (TM)

### 3.3.2 การทดสอบคุณสมบัติดินทางกายภาพ

จากการเก็บตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพ ณ บริเวณส่วนบน ส่วนกลาง และ ส่วนล่างของลาดดินที่เกิดการพิบัติ ซึ่งได้จากการเปิดหลุมสำรวจ และจากการเจาะสำรวจโดยใช้เครื่องเจาะสำรวจชนิดมือหมุน เพื่อทดสอบคุณสมบัติดัชนีของลาดดิน สำหรับการจำแนกชนิดดิน และหาคุณสมบัติพื้นฐานของดิน เพื่อเป็นตัวแทนของข้อมูลลาดดินในสภาวะธรรมชาติ การทดสอบหาคุณสมบัติดัชนี ประกอบด้วย การทดสอบหาความชื้นในมวลดิน (ASTM D 2216 - 98) การทดสอบหาขีดจำกัดเหลว และขีดจำกัดพลาสติก (ASTM D 4318 - 93) การทดสอบความถ่วงจำเพาะ (ASTM D 854 - 02) การทดสอบหาขนาดคละของเม็ดดินโดยวิธี Wet Sieve, Hydrometer test (ASTM D 422) และการจำแนกดินแบบ USCS (Unified Soil Classification System) (ASTM D 2487) ดังแสดงในรูปที่ 3.7



**รูปที่ 3.7** ภาพแสดงตัวอย่างทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของลาดดินในห้องปฏิบัติการ  
(a.) ภาพแสดงตัวอย่างดินในการทดสอบหาความชื้นในมวลดิน  
(b.) ภาพแสดงตัวอย่างดินทดสอบหาขนาดคละของเม็ดดิน โดยวิธี Wet sieve

### 3.3.3 การทดสอบคุณสมบัติดินทางวิศวกรรม

ตัวอย่างดินแบบคงสภาพที่เก็บจากบริเวณส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่างของลาดดินที่เกิดการพิบัติ ถูกทำการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของลาดดินด้านกำลังรับแรงเฉือนของดินด้วยวิธีการเฉือนตรงแบบ Multi - Stage direct shear test, MSDT โดยการทดสอบเป็นแบบอัดตัวคายน้ำ - เฉือนช้า (Consolidated - Slow test) ตามรายละเอียดหัวข้อ 2.1.12 ในงานวิจัยนี้ใช้อัตราเร็วในการเฉือนซึ่งสัมพันธ์กับการระบายน้ำของตัวอย่างดินประมาณ 0.06 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งสามารถคำนวณการปริมาตรทรุดตัวของตัวอย่างดินที่ใช้ทำการทดสอบตาม ASTM D 3080 (สมการที่ 3.1 และ 3.2) เพื่อไม่ให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกินในตัวอย่างดิน ซึ่งอัตราเร็วที่ใช้ในการเฉือนควรอยู่ในช่วง 0.007 - 0.600 มิลลิเมตรต่อนาที ได้มีการทดสอบที่ระดับความอิ่มตัวในมวลดินช่วง 0 - 100 % (Degree of Saturation) โดยทำการเพิ่ม - ลด ความชื้นของตัวอย่างดิน ทั้งนี้ก่อนการทำการทดสอบการเฉือนตัวอย่างดินต้องทำการอัดตัวคายน้ำของดินตัวอย่างที่จะทำการทดสอบโดยใส่ น้ำหนักกดทับ ( $\sigma'_v$ ) จนกระทั่งตัวอย่างดินทรุดตัวแล้วเสร็จ (หยุดนิ่ง) จึงเริ่มทำการทดสอบการเฉือนตัวอย่างดินโดยวิธี Multi - Stage การเฉือนดินตัวอย่างจะเฉือนจนเกือบถึงจุดพิบัติ แล้วทำการลดน้ำหนัก (Unloading) โดยทำการทดสอบซ้ำแบบนี้ 3 - 5 รอบ โดยให้มีการเพิ่มน้ำหนักกดทับแบบเท่าตัวในแต่ละรอบที่ทำการทดสอบเฉือนตัวอย่าง ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ออกแบบไว้ ดังนี้  $\sigma'_v$ ,  $2\sigma'_v$ ,  $4\sigma'_v$ ,  $8\sigma'_v$  และ  $16\sigma'_v$  รวมทั้งสิ้น 5 น้ำหนักกดทับ (Load) ต่อตัวอย่าง

$$t_f = 12.7t_{100} \quad (3.1)$$

$$t_f = 50t_{50} \quad (3.2)$$

โดย  $t_f$  = อัตราการเฉือนตัวอย่าง  
 $t_{100}$  = เวลาที่ใช้ในการคลายน้ำจนคาดว่าไม่เกิดการทรุดตัว (Head, 1985)  
 $t_{50}$  = เวลาที่ใช้ในการคลายน้ำ 50 % ของการทรุดตัว (ASTM D 3080)

การเพิ่ม - ลด ความชื้นในตัวอย่างดินที่ทำการทดสอบในงานวิจัยนี้ได้ทำการควบคุมระดับความอิ่มตัวด้วยวิธีการเพิ่มความชื้น (Wetting) ซึ่งสามารถทำได้โดยการพ่นน้ำให้กับดินอย่างแล้วบ่มทิ้งไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง เพื่อให้ดินตัวอย่างมีความชื้นสม่ำเสมอเท่ากันตลอดทั้งก้อน และวิธีการลดความชื้น ให้ใช้สารดูดความชื้น หรือ Silica gel ช่วยในการลดปริมาณความชื้น ซึ่งการเพิ่ม - ลด ความชื้นในตัวอย่างดินนั้นสามารถควบคุม และตรวจสอบได้จาก การชั่งน้ำหนักของดินก่อน

และหลังการเพิ่ม – ลดความชื้นเสมอ ระดับความอิ่มตัวของดินตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบในงานวิจัยนี้แสดงได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ช่วงระดับความอิ่มตัวของดินตัวอย่างที่ใช้ทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดิน

Station	Depth (m)	Degree of Saturation (%)							
		0 – 20	20 – 40	40 – 50	50 – 60	60 – 70	70 – 80	80 – 90	90 – 100
TM	0.25, 0.50	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MM	0.25, 0.50	✓	*	✓	✓	✓	✓	✓	✓
BM	0.25, 0.50	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

หมายเหตุ \* ไม่สามารถควบคุมความชื้นในช่วงที่กำหนดได้

จากการทดสอบหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของลาดดินด้านกำลังรับแรงเฉือนของดินด้วยวิธีการเฉือนตรงแบบ Multi - Stage direct shear test ที่ระดับความอิ่มตัวในมวลดินต่างๆ ดังตารางที่ 3.1 ค่าระดับความชื้นในมวลดินมีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของดิน ซึ่งสามารถแสดงได้โดยการสร้างความสัมพันธ์เชิงระนาบ 3 มิติของ กำลังต้านทานแรงเฉือนสูงสุดของดิน (Maximum of shear strength) หน้วยน้ำหนักกดทับ (Normal stress) และระดับความอิ่มตัวในมวลดิน ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ ดังสมการที่ 3.3 – 3.4 (บรรพต, 2548)

$$\tau' = a + bS + \alpha\sigma \quad (3.3)$$

$$\tau' = a + b \ln S + \alpha\sigma \quad (3.4)$$

โดยที่  $\tau$  = กำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของดิน ( $kPa$ )  
 $a, b, \alpha$  = พารามิเตอร์ควบคุมสมการกำลังรับแรงเฉือน  
 $S$  = ระดับความอิ่มตัวในมวลดิน (Degree of saturation, 0 - 1)

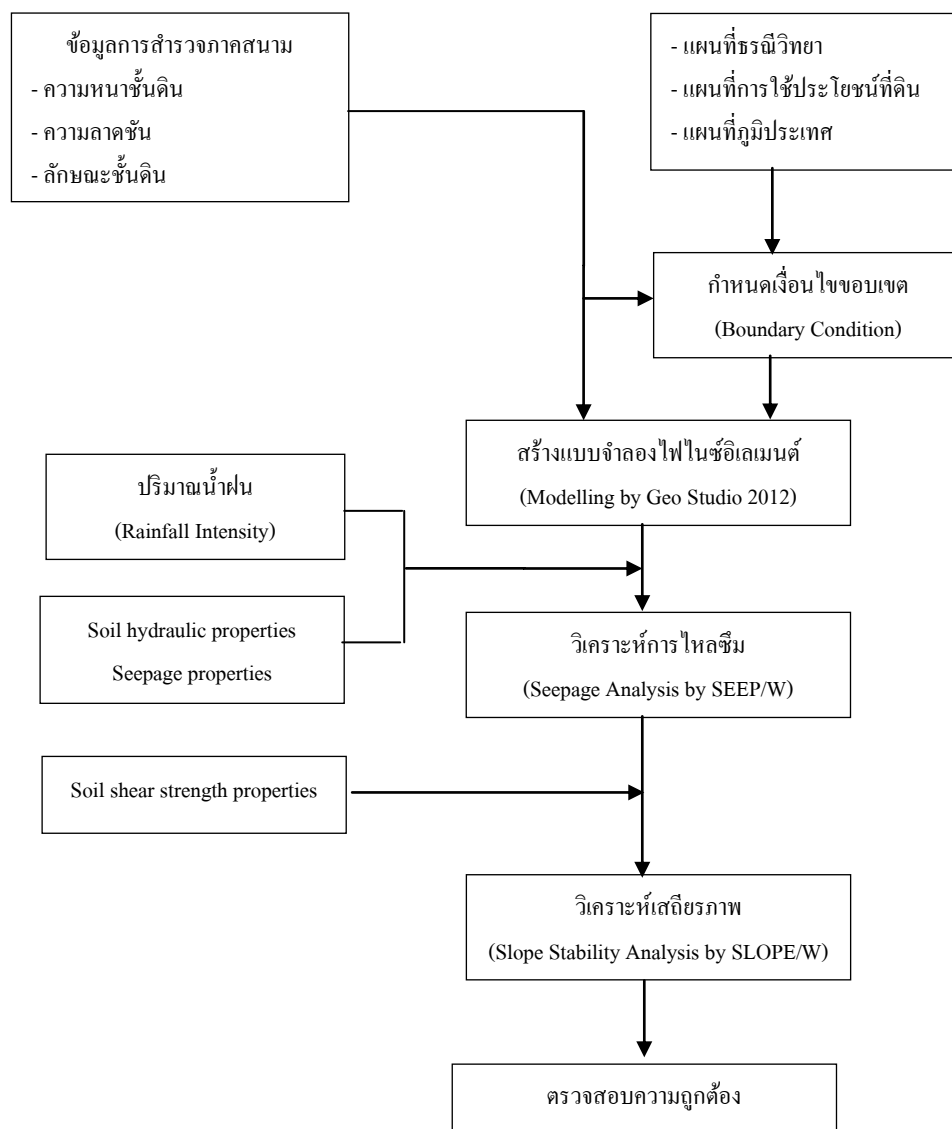
### 3.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

ในงานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเนื่องจากปริมาณน้ำฝน ซึ่งเป็นปัจจัยกระตุ้นหลักให้ลาดดินเกิดการสูญเสียเสถียรภาพ การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินสามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการการสร้างแบบจำลอง ขั้นตอนวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำในมวลดิน และขั้นตอนวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน โดยขั้นตอนการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในงานวิจัยนี้ได้ทำ 2 วิธี ได้แก่ วิธีลาดดินอนันต์ (Infinite slope) และวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ (Finite element) วิธีลาดดินอนันต์โดยการคำนวณมือ (Manual calculation) งานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม Geo Studio V 2012 สำหรับการวิเคราะห์ด้วยหลักการวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ ซึ่งสามารถสรุปขั้นตอนได้ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินสามารถนำไปใช้ในการคำนวณปริมาณน้ำฝนสะสมสำหรับสร้างแผนที่เสี่ยงภัยธรณีพิบัติได้

#### 3.4.1 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนต์

การสร้างแบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนต์ (Finite element modeling) เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำในมวลดิน และการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินนั้นทำได้โดยสร้างหน้าตัดความหนา ความลาดชันของชั้นดินให้สอดคล้องกับสภาพชั้นดินที่ได้จากการสำรวจดินภาคสนาม คุณสมบัติด้านวิศวกรรมของลาดดินได้จากการทดสอบ และสมการทางคณิตศาสตร์โดยกำหนดให้มีสมมติฐาน ดังนี้

- 1) องค์ประกอบบนลาดดิน แบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของชั้นดิน และ ส่วนของชั้นหิน มีคุณสมบัติด้านการไหลซึมของดินคงที่ตลอดความลึกของชั้นดิน ตลอดทั้งลาดดิน และชั้นหินกำหนดให้เป็นชั้นที่บ้น้ำ และแข็งแรงมาก (ไม่มีการพิบัติในชั้นหิน)
- 2) ชั้นดินมีคุณสมบัติความชื้นน้ำต่อเนื่อง (Continuum permeability) ไม่ขึ้นกับทิศทาง (Isotropic permeability) และไม่เปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากน้ำหนักที่กดทับ
- 3) การไหลของซึมของน้ำเป็นแบบ 2 มิติ แบบมีขอบเขตจำกัด (Confined flow)
- 4) ปริมาณน้ำฝนตกกระจายสม่ำเสมอเท่ากันตลอดทั้งหน้าตัด
- 5) ปริมาณน้ำในมวลดินเพิ่มได้จากปริมาณน้ำฝนที่ตกบนลาดดินเท่านั้น
- 6) การกำหนดระดับน้ำใต้ดิน (Ground water table) กำหนดให้อยู่ระดับที่ลึกมาก ซึ่งสอดคล้องกับผลสำรวจพื้นที่ศึกษา



รูปที่ 3.8 ภาพแสดงขั้นตอนวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

### 3.4.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำในมวลดิน

การวิเคราะห์การไหลซึม (Seepage analysis) ของน้ำในมวลดิน เนื่องจากปัจจัยปริมาณน้ำฝนที่กระตุ้นให้เกิดลาดดินพิบัติสำหรับงานวิจัยนี้ทำได้ โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element) ในการวิเคราะห์การพิบัติของลาดดินในพื้นที่ศึกษาโดยวิเคราะห์ในรูปแบบแปรเปลี่ยนตามเวลา (Transient simulation) ระหว่างวันที่ 29 ธันวาคม พ.ศ. 2554 ถึงวันที่ 2 มกราคม พ.ศ. 2555



การประมาณเส้นอรรถลักษณะของน้ำในดิน (Soil - water characteristic curve, SWCC) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดูดน้ำในมวลดิน (Matric Suction,  $\psi$ ) และปริมาณน้ำในดินโดยปริมาตร (Volumetric water content,  $\theta$ ) ในงานวิจัยนี้ได้ใช้สมการที่เสนอโดย Auerbin (2003) (สมการที่ 2.18 – 2.20) ซึ่งเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ความสัมพันธ์การกระจายตัวของเม็ดดิน (Grain size distribution curve) ในการประมาณค่าแรงดูดน้ำในมวลดิน และทำการตรวจสอบความถูกต้องของเส้นอรรถลักษณะของน้ำในดินที่ได้โดยไปทำการเปรียบเทียบกับเส้นอรรถลักษณะของน้ำในดินที่ได้จากฐานข้อมูลดิน (Unsaturated Soil Hydraulic Database, UNSODA)

ความสามารถในการไหลซึมของน้ำในมวลดิน (Permeability function, PF) เป็น ความสัมพันธ์ระหว่างระหว่างแรงดันน้ำในมวลดิน (Matric suction,  $\psi$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำในมวลดิน ( $k$ ) งานวิจัยนี้ได้ใช้สมการที่เสนอโดย van Genuchten (1980) (สมการที่ 2.23 – 2.24) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์โดยใช้ความสัมพันธ์จากพารามิเตอร์ (Parameter) ที่ได้จากเส้นอรรถลักษณะของน้ำในมวลดิน และค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำในมวลดิน ( $k$ ) โดยค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำในมวลดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ( $k_{sat}$ ) ที่ใช้ในการศึกษานี้ได้จากการทดลองด้วยวิธีการทดสอบความซึมผ่านของน้ำในมวลดิน (Double – Ring infiltrometer test)

การวิเคราะห์การไหลซึมในงานวิจัยได้แบ่งเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ การวิเคราะห์การไหลซึมเนื่องจากลาดดินพิบัติ ณ วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2555 ซึ่งกำหนดให้ลาดดินรับน้ำฝนแบบแปรเปลี่ยนตามเวลาที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาดังกล่าว (ระหว่างวันที่ 29 ธันวาคม พ.ศ. 2554 ถึงวันที่ 2 มกราคม พ.ศ. 2555) และการวิเคราะห์การไหลซึมเพื่อศึกษาความสามารถในการรับ – ระบายน้ำฝนที่ตกลงบนลาดดิน ซึ่งกำหนดให้รับค่าความเข้มฝนคงที่ โดยปริมาณน้ำฝนสะสมที่ได้จากการวิเคราะห์ซึ่งทำให้ลาดดินเกิดการการพิบัติ หรือทำให้ลาดดินสูญเสียเสถียรภาพ (อัตราส่วนความปลอดภัยน้อยกว่า 1.000) ในช่วงเวลาที่พิจารณา เรียกว่า “ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤต (Critical cumulative rainfall)”

### 3.4.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเลือกใช้วิธี Bishop's simplified method โดยใช้โปรแกรม Geo Studio V 2012 ฟังก์ชัน SLOPE/W เพื่อแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงเสถียรภาพของลาดดินเมื่อมีปริมาณน้ำฝนตกลงสู่ลาดดินในแต่ละช่วงเวลา (Step by Step) โดยใช้สมการที่เสนอโดย Vanapli et al. (1996) (สมการที่ 2.12) และผลจากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดิน (Multi - Stage direct shear test, MSDT) ในการกำหนดกำลังเฉือนของลาดดิน สำหรับการวิเคราะห์กำลัง

รับแรงเฉือนของดิน ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินจะใช้ผลจากการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำในมวลดินในรูปของค่าปริมาณความชื้นในมวลดินที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากฝนที่ตกลงสู่ลาดดิน และทำให้ดินมีกำลังลดลง ซึ่งผลการวิเคราะห์เสถียรภาพประกอบด้วยอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of safety, F.S.), อัตราส่วนความปลอดภัยต่ำสุด (Minimum factor of safety) , Critical slip surface และแผนภาพอิสระ (Free body diagram, FBD) กับ เวลา (Step time) โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะต้องมีความสอดคล้องกับข้อมูลภาคสนาม ได้แก่ ช่วงเวลาที่ลาดดินเกิดการพิบัติ ตำแหน่งที่ลาดดินเริ่มพิบัติ เป็นต้น ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้อง และความเหมาะสมของแบบจำลองก่อนที่จะนำแบบจำลองดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์สำหรับรูปแบบน้ำฝนอื่นๆ ต่อไป

#### 3.4.4 การวิเคราะห์ลาดดินอนันต์ (Infinite Slope)

ในการวิเคราะห์ลาดดินอนันต์ (Infinite slope) ด้วยวิธีลิมิตความสมดุล (Limit equilibrium) เป็นการวิเคราะห์พื้นฐานของลาดดิน ตามรายละเอียดหัวข้อ 2.3 ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์การพิบัติแบบลาดดินพิบัติต่อเนื่อง สำหรับคำนวณหาค่าปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤต (Critical cumulative rainfall, CCR) โดยกำหนดให้ระดับน้ำใต้ดินอยู่ระดับต่ำมาก ซึ่งค่าดังกล่าวได้จากขั้นตอนการสำรวจภาคสนามเบื้องต้น ซึ่งไม่พบระดับน้ำใต้ดินของลาดแนวพิบัติ

#### 3.5 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตเพื่อการเตือนภัย

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤต (Critical cumulative rainfall, CCR) สามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณี 1) กรณีศึกษาลาดดินพิบัติจริง 2) กรณีประยุกต์สำหรับจัดทำแผนที่ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตของบริเวณพื้นที่ศึกษา งานวิจัยนี้ได้นำโปรแกรม Geo Studio V 2012 มาประยุกต์ใช้งาน โดยใช้ฟังก์ชัน SEEP/W โดยทำการวิเคราะห์ในรูปแบบแปรเปลี่ยนตามเวลา (Transient simulation) สำหรับการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำในดินซึ่งทำให้ระดับความชุ่มชื้นในมวลดินเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งกำหนดให้ความเข้มฝนตกลงสู่ลาดดินลงที่ที่ระดับความเข้มของฝนต่างๆ โดยใช้คุณสมบัติของดินได้จากการทดสอบภาคสนาม และในห้องปฏิบัติการ

1) กรณีศึกษาลาดดินพิบัติจริง กำหนดให้ใช้ลักษณะของลาดดินที่ได้จากการสำรวจภาคสนาม โดยทำการแปรเปลี่ยนปริมาณความเข้มฝนตกลงสู่ลาดดินในรูปแบบความเข้มฝนคงที่ต่างๆ แล้วทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยฟังก์ชัน SLOPE/W เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่ระดับอัตราส่วนความปลอดภัยต่างๆ ซึ่งสามารถแสดงผลได้ในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มฝน และปริมาณน้ำฝนสะสมรายชั่วโมง และอัตราส่วนความปลอดภัย

2) กรณีประยุกต์สำหรับจัดทำแผนที่ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตของบริเวณพื้นที่ศึกษา โดยกำหนดให้ใช้ความหนาของลาดดิน 1.0 และ 2.0 เมตร ทุกๆ ชุดของความลาดชันของลาดดิน โดยใช้ปริมาณความเข้มฝนตกลงสู่ลาดดินคงที่ ได้แก่ กรณีฝนตกหนัก 2.5 มิลลิเมตร/ชั่วโมง (55 mm/day), กรณีฝนตกหนักมาก 5.0 มิลลิเมตร/ชั่วโมง (110 mm/day) และกรณีฝนตกหนักมากๆ 10.0 มิลลิเมตร/ชั่วโมง (220 mm/day) จากนั้นวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยฟังก์ชัน SLOPE/W เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่ระดับอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.00 ซึ่งปริมาณน้ำฝนดังกล่าว หมายถึง “ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤต, CCR” ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของแต่ละความเข้มฝนได้ดังสมการที่ 3.5

$$CCR = aH + b\beta + c \quad (3.5)$$

โดยที่	$CCR$	=	ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤต (mm)
	$a, b, c$	=	พารามิเตอร์ควบคุมสมการปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤต
	$H$	=	ความหนาของชั้นดิน (m)
	$\beta$	=	มุมเอียงของลาดดิน (degree)

### 3.6 การจัดทำแผนที่ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตโดยใช้เทคนิคการซ้อนทับของข้อมูลสารสนเทศทางภูมิศาสตร์

การจัดทำแผนที่ปริมาณน้ำฝนวิกฤตโดยการนำคุณสมบัติทางวิศวกรรมของลาดดินมาประยุกต์รวม ทำได้โดยการใช้ค่าปริมาณน้ำฝนวิกฤตจากความสัมพันธ์ (สมการที่ 3.5) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางวิศวกรรมของลาดดินระหว่างความหนาของชั้นดิน ( $H$ ) และมุมเอียงของลาดดิน ( $\beta$ ) ในพื้นที่ศึกษา โดยค่ามุมลาดเอียง ( $\beta$ ) สามารถประยุกต์หาได้จากการแปลความแผนที่ Digital elevation model (DEM) ของบริเวณพื้นที่ศึกษา งานวิจัยนี้ได้โปรแกรม ArcGIS 10.2 ร่วมกับการใช้เทคนิคการซ้อนทับของข้อมูล (Overlay analysis) ในการจัดทำแผนที่ ซึ่งสามารถแสดงผลลัพธ์ในรูปแบบปริมาณน้ำฝนวิกฤต (CCR) ได้ ดังนี้

- ก.) กรณีฝนตกหนักสำหรับ พื้นที่ศึกษาที่มีความหนาของลาดดิน 1.0 เมตร
- ข.) กรณีฝนตกหนักมากสำหรับ พื้นที่ศึกษาที่มีความหนาของลาดดิน 1.0 เมตร
- ค.) กรณีฝนตกหนักมากๆ สำหรับ พื้นที่ศึกษาที่มีความหนาของลาดดิน 1.0 เมตร
- ง.) กรณีฝนตกหนักสำหรับ พื้นที่ศึกษาที่มีความหนาของลาดดิน 2.0 เมตร
- จ.) กรณีฝนตกหนักมากสำหรับ พื้นที่ศึกษาที่มีความหนาของลาดดิน 2.0 เมตร
- ช.) กรณีฝนตกหนักมากๆ สำหรับ พื้นที่ศึกษาที่มีความหนาของลาดดิน 2.0 เมตร

## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผลการศึกษาได้แบ่งออกเป็น 6 ส่วนหลัก ประกอบด้วย ผลการออกสำรวจภาคสนามเบื้องต้น, ผลการสำรวจพื้นที่และทดสอบคุณสมบัติของดินภาคสนาม, ผลการทดสอบคุณสมบัติของดินในห้องปฏิบัติการ, ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตที่ทำให้ลาดดินเกิดการพิบัติ, การพัฒนาค่าปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตเพื่อการเตือนภัยและผลการจัดทำแผนที่ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตของพื้นที่ศึกษา โดยใช้ข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

#### 4.1 ผลการออกสำรวจภาคสนามเบื้องต้น

การสำรวจพื้นที่มีจุดมุ่งหมายเพื่อรวบรวมข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นนำไปสู่การเลือกพื้นที่ศึกษา ณ บ้านโคกลูกหมี่ ตำบลคลองทราย อำเภอนาทวี จังหวัดสงขลา อันได้แก่ ที่ตั้งและขอบเขต, สภาพภูมิประเทศ, สภาพภูมิอากาศ, ลักษณะทางธรณีวิทยา, พื้นที่การเกิดลาดดินพิบัติในจังหวัดสงขลา และพื้นที่เสี่ยงภัยลาดดินพิบัติ จังหวัดสงขลา ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

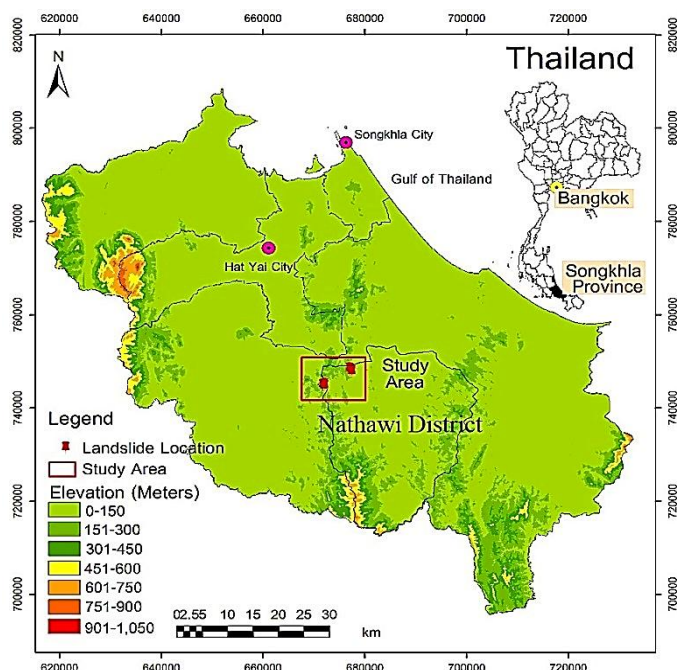
##### 4.1.1 ที่ตั้งและขอบเขต

งานวิจัยนี้ได้ทำการเลือกพื้นที่ศึกษาเป็นพื้นที่เกิดการพิบัติของลาดดินซึ่งมีตำแหน่งการพิบัติของลาดดินที่พิกัด N745169, E671876 ถึง N745167, E672297 ซึ่งเป็นพื้นที่ส่วนหนึ่งจากหลายๆ ตำแหน่งที่เกิดลาดดินพิบัติใน อำเภอนาทวี จังหวัดสงขลา ห่างจากอำเภอนาทวี ทางทิศตะวันตกประมาณ 20 กิโลเมตร โดยพื้นที่อำเภอนาทวีมีขอบเขต ดังนี้ ทิศเหนือติดกับอำเภอจะนะ ทิศตะวันออกติดกับอำเภอเทพา และสะบ้าย้อย ทิศใต้ติดกับรัฐเคะห์ ประเทศมาเลเซีย ทิศตะวันตกติดกับอำเภอสะเดา ดังแสดงในรูปที่ 4.1



#### 4.1.2 สภาพภูมิประเทศ

ลักษณะภูมิประเทศโดยทั่วไปของพื้นที่ศึกษามีลักษณะเป็นพื้นที่สูงชันและที่ราบเชิงเขา พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นป่าดงดิบ สวนยางพารา และพื้นที่สำหรับเกษตรกรรมเป็นหลัก มีความสูง 100 - 790 เมตร (จากระดับน้ำทะเลปานกลาง) โดยทิศใต้เป็นเทือกเขาสันกาลาศีรี และทิศตะวันตกเป็นลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภา และมีอุทยานแห่งชาติเขาน้ำค้างทางทิศใต้ มีลักษณะเป็นป่าดงดิบ ขนาด 212 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 34.2 ของพื้นที่อำเภอนาทวี) ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แผนที่แสดงความสูงของพื้นที่ศึกษาอำเภอนาทวี จังหวัดสงขลา

#### 4.1.3 สภาพภูมิอากาศ

จังหวัดสงขลาอยู่ภายใต้อิทธิพลลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือในช่วงเดือนตุลาคมถึงเดือนธันวาคม ซึ่งเกิดจากลมเย็นและแห้งพัดจากประเทศจีน ปกคลุมประเทศไทย ทำให้ภาคต่างๆ ตั้งแต่ภาคกลางขึ้นไปมีอากาศหนาว แต่ภาคใต้รวมถึงสงขลามีฝนตกชุก เพราะลมมรสุมดังกล่าวพัดผ่านอ่าวไทยจึงหอบไอน้ำไปตกเป็นฝนทั่วไป นอกจากนั้นยังมีลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้พัดผ่านมหาสมุทรอินเดีย ในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงเดือนสิงหาคม จึงหอบไอน้ำมาด้วย แต่เนื่องจากสภาพภูมิประเทศมีเทือกเขารกตัดกั้นกระแสลมไว้ทำให้พื้นที่จังหวัดสงขลา มีฝนตกน้อยกว่าด้านตะวันตก เช่น จังหวัดสตูล และตรัง ซึ่งเป็นด้านรับลมมรสุมโดยตรง (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2550)

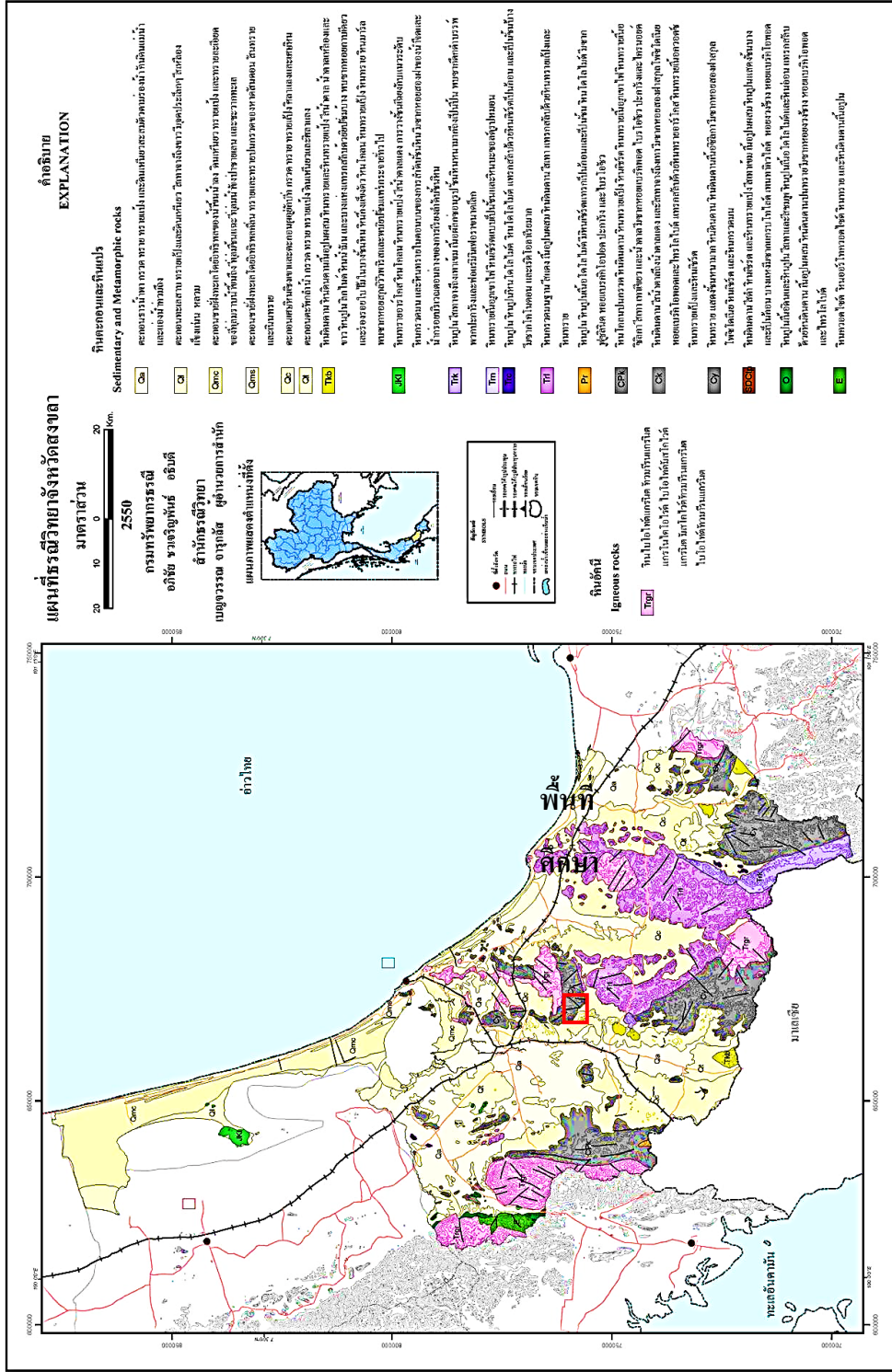
ตำบลคลองทราย ซึ่งเป็นพื้นที่ศึกษาลาดดินพิบัติในครั้งนี้มีสภาพอากาศเป็นแบบมรสุมเมืองร้อนมีฤดูกาลเพียง 2 ฤดู คือ ฤดูฝน และฤดูร้อน โดยรับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ระหว่างเดือนพฤษภาคมถึงเดือนสิงหาคม และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือเป็นหลักระหว่างเดือนตุลาคม ถึงเดือนธันวาคม จึงทำให้มีฝนตกชุกตลอดปีเฉลี่ย ประมาณ 2,000 มิลลิเมตรต่อปี โดยในเดือนตุลาคม พฤศจิกายน และธันวาคม มีฝนเฉลี่ยเท่ากับ 225.80, 249.21 และ 196.94 มิลลิเมตรต่อเดือน ตามลำดับ

#### 4.1.4 ลักษณะทางธรณีวิทยา

พื้นที่ส่วนใหญ่ของจังหวัดสงขลามีลักษณะเป็นที่ราบลุ่ม แอ่งขนาดใหญ่รอบๆ ทะเลสาบสงขลา มีที่ราบซึ่งเกิดจากการเคลื่อนตัวทำให้โครงสร้างลักษณะแบบฮอร์ส และกราเบน (Horst & Graben) ซึ่งมีองค์ประกอบของหินตะกอน หินแปร (Sedimentary and Metamorphic rock) ซึ่งจะพบหินยุคคาร์บอนิเฟอรัส (Carboniferous) วางตัวตามแนวเหนือใต้ หินยุคเพอร์เมียน (Permian) มักโผล่ตามที่ราบอำเภอรัตนภูมิ ตอนใต้ของอำเภอสะบ้าย้อย หินยุคไทรแอสซิก (Triassic) มักพบในพื้นที่อำเภอนาทวีและหินอัคนี (Igneous rock) ยุคครีเทเชียส (Cretaceous) และยุคไทรแอสซิก มักพบอยู่บริเวณพื้นที่อำเภอนาหม่อม อำเภอจะนะ อำเภอเมือง และอำเภอเทพา เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3

สภาพธรณีวิทยาของพื้นที่ บ้าน โกลูกภูมิ ตำบลคลองทราย อำเภอนาทวี จังหวัดสงขลา จากแผนที่ธรณีวิทยา พบว่าโดยทั่วไปในพื้นที่ส่วนใหญ่ ประกอบด้วย กลุ่มหินแกรนิต Trgr (ประกอบด้วย หินไบโอไทต์ ทัวมารินแกรนิต แกรโนไดโอไรต์ ไบโอไทต์มีสโคไวต์แกรนิต มีสโคไวต์ทัวมารินแกรนิต และไบโอไทต์ทัวมารินแกรนิต) และกลุ่มหินอัคนี (Igneous rock) มีมุมลาดเทของหินที่ 24° และ 35° และยังประกอบด้วย หินตะกอน และหินแปร (Sedimentary rock) ได้แก่ หินกรวดมน หินทราย หินทรายแป้ง หินโคลน หินดินดานสีเทาแกมเขียวสีน้ำตาล พบซากดาโอเนลลาโพซิโคเนีย และร่องรอยของซากแอมโมไนต์ ยุคไทรแอสซิก (Triassic) เป็นหลัก ซึ่งเกิดจากการแปรสภาพ เพราะการแทรกซอนของหินแกรนิตยุคครีเทเชียส (Cretaceous) และตะกอนดิน Colluvial ที่ทับถม





รูปที่ 4.3 แผนที่ธรณีวิทยา จังหวัดสงขลา (กรมทรัพยากรธรณี, 2550)



#### 4.1.5 พื้นที่การเกิดดินลาดดินพิบัติในจังหวัดสงขลา

จากการรวบรวมข้อมูลเหตุการณ์การลาดดินพิบัติในจังหวัดสงขลา ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2553 – พ.ศ. 2555 ได้เกิดเหตุการณ์ลาดดินพิบัติทั้งสิ้น 8 เหตุการณ์ ครอบคลุมพื้นที่ 8 อำเภอ ได้แก่ อำเภอสงขลา อำเภอสะบ้าย้อย อำเภอสิงหนคร อำเภอนาทวี อำเภอกระแสสินธุ์ อำเภอรัตนภูมิ และอำเภอนาหม่อม มีผู้เสียชีวิตทั้งสิ้น 11 ราย ได้รับความเสียหาย 15 หลังคาเรือน (กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย, 2555) ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงตารางที่ 4.1

เหตุการณ์ลาดดินพิบัติที่เกิดขึ้นในพื้นที่จังหวัดสงขลาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2553 – พ.ศ. 2555 สาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากปัจจัยเนื่องจากปริมาณน้ำฝนเป็นหลัก ซึ่งมีฝนตกต่อเนื่องกันเป็นเวลาหลายวัน หรือฝนตกหนักมากในช่วงเวลาไม่กี่วัน จนกระทั่งทำให้ลาดดินนั้นไม่สามารถแบกรับน้ำหนักได้จึงเป็นเหตุให้เกิดการพิบัติลงมา และยังมีปัจจัยหลักจากการกระทำมนุษย์ที่เป็นปัจจัยกระตุ้นให้เกิดลาดดินพิบัติได้ง่ายยิ่งขึ้น โดยเฉพาะการขุดหน้าดินบริเวณเชิงเขาออกเพื่อใช้สำหรับทำการเกษตรหรือสร้างบ้านเรือน ทำให้ดินมีความสามารถในการรับแรงต้านทานลดลงจนกระทั่งลาดดินพิบัติ ทั้งนี้ผู้วิจัยได้เลือกพื้นที่ ตำบลคลองทราย อำเภอนาทวี เป็นพื้นที่ศึกษาตัวอย่างสำหรับงานวิจัย เนื่องจากพื้นที่บริเวณบ้าน โคนกลุ่กหมี่เกิดเหตุดินพิบัติหลายตำแหน่งในช่วงเวลาใกล้เคียงกัน ทั้งทั้งหุบเขา กอปรกับการเก็บข้อมูลจากประชาชนในพื้นที่ทำให้ทราบว่าในพื้นที่ดังกล่าวไม่เคยเกิดเหตุดินพิบัติมาก่อน

ตารางที่ 4.1 เหตุการณ์ดินพิบัติที่เกิดขึ้นในพื้นที่จังหวัดสงขลา ระหว่าง พ.ศ. 2553 – พ.ศ. 2555

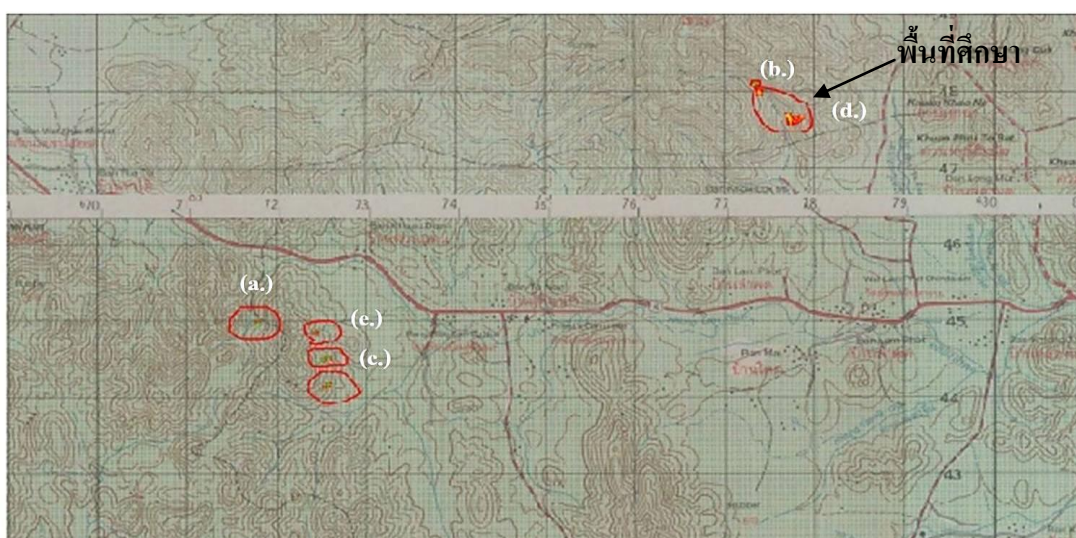
ลำดับ	วันที่เกิดเหตุ	สถานที่เกิดเหตุ				สาเหตุ
		ชื่อหมู่บ้าน	หมู่	ตำบล	อำเภอ	
1	1 พ.ย. 2553	บ้านสวนจันทร์	7	หัวเขา	สิงหนคร	มีการขุดดินถมที่สำหรับสร้างบ้านเรือน และเกิดฝนตกหนักจากพายุดีเปรสชัน
2	28 พ.ย. 2553		3	นาหม่อม	นาหม่อม	ฝนตกหนักต่อเนื่องกันหลายวัน
3	1 ธ.ค. 2553			ชะแล้	สิงหนคร	ฝนตกหนักต่อเนื่องกันหลายวัน ทำให้เกิดดินไหลปิดทับเส้นทางเข้าออกวัดภูตบรรพต
4	18 ธ.ค. 2554	บาโรย		บาโรย	สะบ้าย้อย	ฝนตกหนักต่อเนื่องกันหลายวัน
5	6 ม.ค. 2554			บ่อยาง	เมืองสงขลา	ฝนตกหนักและมีลมกรรโชกแรงต่อเนื่องกันหลายวัน

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) เหตุการณ์ดินพิบัติที่เกิดขึ้นในพื้นที่จังหวัดสงขลา ระหว่าง พ.ศ. 2553 – พ.ศ. 2555

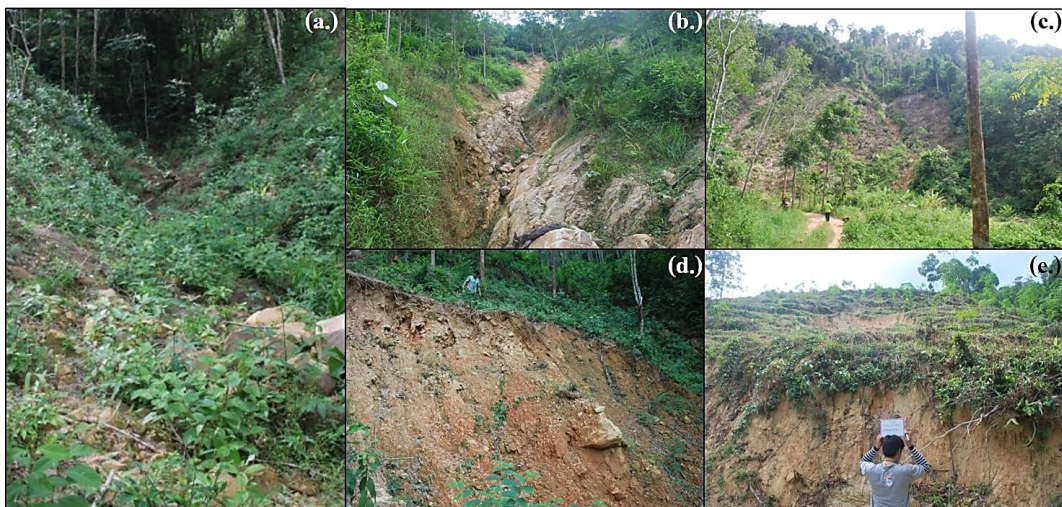
ลำดับ	วันที่เกิดเหตุ	สถานที่เกิดเหตุ				สาเหตุ
		ชื่อหมู่บ้าน	หมู่	ตำบล	อำเภอ	
6	7 ธ.ค. 2554	แหลมเจ้า	1	เกาะใหญ่	กระเสถินธุ์	มีการขุดดินถมที่สำหรับสร้างบ้านเรือน และเกิดฝนตกหนักต่อเนื่องนาน 3 วัน
7	2 ม.ค. 2555	ควนดินแดง	5	เขาพระ	รัตภูมิ	ฝนตกหนักต่อเนื่องกันหลายวัน เนื่องจากมีร่องความกดอากาศต่ำปกคลุมทั่วภาคใต้
8	2 ม.ค. 2555	คลองทราย	3	คลองทราย	นาทวี	ฝนตกหนักต่อเนื่องกันหลายวัน เนื่องจากมีร่องความกดอากาศต่ำปกคลุมทั่วภาคใต้

#### 4.1.6 การกำหนดบริเวณพื้นที่ศึกษา

งานวิจัยนี้ได้เลือกพื้นที่ศึกษา บ้าน โกลกภูมิ ตำบลคลองทราย อำเภอนาทวี จังหวัดสงขลา โดยทำการเลือกจากการสำรวจตำแหน่งที่เกิดลาดดินพิบัติที่เกิดขึ้นระหว่างวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2554 ถึงวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2555 ซึ่งในช่วงวันเวลาดังกล่าวได้เกิดเหตุลาดดินพิบัติในพื้นที่ไม่น้อยกว่า 10 ตำแหน่ง และเลือกตำแหน่ง N 745169 E 671876 ถึง N 745167 E 672297 สำหรับเป็นพื้นที่เก็บตัวอย่าง และทดสอบคุณสมบัติของดิน เพื่อใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลพื้นที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5 ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของพื้นที่ที่ได้จากการสำรวจพื้นที่การเกิดลาดดินพิบัติใน อำเภอนาทวี จังหวัดสงขลา ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับเลือกเป็นตัวแทนของข้อมูลในพื้นที่ได้



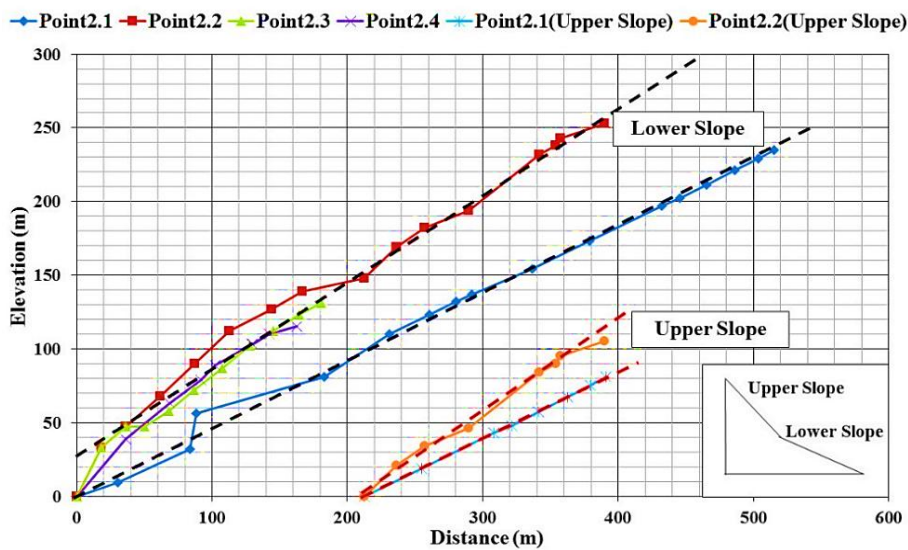
รูปที่ 4.4 แผนที่ 1 : 50,000 แสดงตำแหน่งพื้นที่เกิดลาดดินพิบัติ บริเวณบ้าน โกลกภูมิ



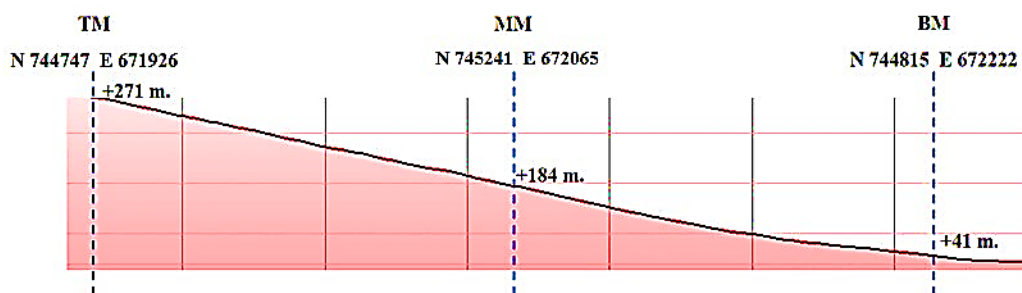
**รูปที่ 4.5** ภาพแสดงตำแหน่งสำรวจลาดดินพิบัติ บริเวณบ้าน โลกอุกหมี (a.), (b.), (c.), (d.) และ (e.) ที่สอดคล้องกับตำแหน่งที่ได้แสดงในรูปที่ 4.4

#### 4.2 ผลการสำรวจพื้นที่และการทดสอบคุณสมบัติของดินภาคสนาม

ผลการสำรวจพื้นที่ภาคสนาม ณ บริเวณพื้นที่พิกัด ละติจูด N 745169 , E 671876 ถึง N 745167 , E 672297 พบว่าลาดดินมีลักษณะแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ ลาดดินด้านบน (Upper slope) มีความลาดชันระหว่าง 24.10 – 32.01 องศาและลาดดินด้านล่าง (Lower slope) มีความลาดชันระหว่าง 24.44 – 32.16 องศา และระดับความสูงสูงสุดประมาณ 271 เมตร (รทก.) ความกว้างแนวลาดพิบัติ ประมาณ 5 – 15 เมตร และลาดยาว 315.2 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7 และตารางที่ 4.2 ลักษณะการพิบัติที่เกิดขึ้น ณ วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2555 ช่วงเวลาประมาณ 06:00 น. (เป็นข้อมูลที่ได้จากการสอบถามจากประชาชนในพื้นที่) เป็นแบบลาดอนันต์ (Infinite slope) ประเภท Translation slide เป็นการเลื่อนไถลตามระนาบของหินฐาน (Bedrock) ลาดดินพิบัติ ความหนาของชั้นดิน เท่ากับ 0.80 - 2.00 เมตร (ได้จากทดสอบภาคสนามดังจะกล่าวในรายละเอียดข้อ 4.2.2) จากข้อมูลสำรวจเบื้องต้นพื้นที่ดังกล่าวพบว่าไม่เคยเกิดลาดดินพิบัติ และเป็นการพิบัติหลายๆ ตำแหน่งในบริเวณใกล้เคียง มีมุมลาดชันที่ไม่มากเกินไป สามารถขนส่งอุปกรณ์สำหรับการสำรวจทดสอบภาคสนามได้ จึงทำให้เลือกพื้นที่ดังกล่าวเป็นพื้นที่ศึกษา ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียด ดังนี้



รูปที่ 4.6 ภาพแสดงความลาดชัน (Slope profile) ที่ได้จากการสำรวจ



รูปที่ 4.7 ภาพตัดขวางบริเวณพื้นที่ศึกษา

ตารางที่ 4.2 ความลาดชัน ความสูง บริเวณส่วนบน และส่วนล่างของลาดดิน

Slope	Max. Slope (Degree)	Min. Slope (Degree)	Average Slope (Degree)	Average Height (m.)
Upper Slope	32.01	24.10	28.06	93.0
Lower Slope	30.16	24.44	27.30	130.5



#### 4.2.1 ผลการสำรวจทางธรณีวิทยา

ผลการสำรวจด้านธรณีวิทยาในพื้นที่ศึกษา พบว่าลักษณะทางธรณีวิทยาที่ได้จากการสำรวจมีความสอดคล้องกับข้อมูลแผนที่ทางธรณีวิทยา (รูปที่ 4.3) ซึ่งพื้นที่ดังกล่าว ประกอบด้วย หินทราย (Sandstone) บริเวณส่วนบนของภูเขาที่เกิดลาดดินพิบัติหินกรวดมน (Conglomerate) บริเวณส่วนล่างเป็นหินหลัก ดังแสดงในรูปที่ 4.8

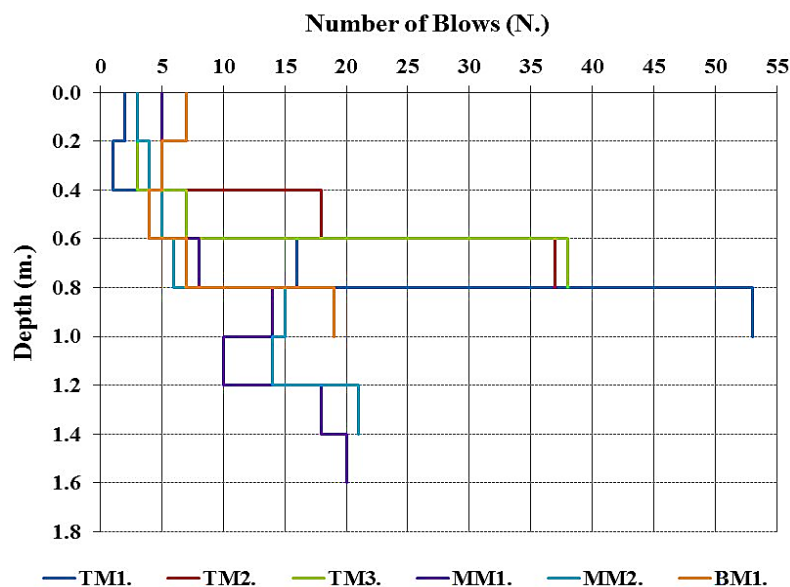


รูปที่ 4.8 ภาพแสดงหิน และดินจากการสำรวจพื้นที่ภาคสนาม

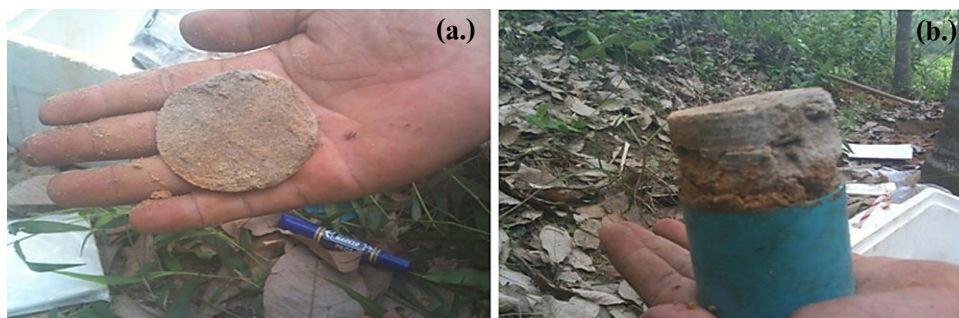
- (a.) ภาพแสดงตัวอย่างหินกรวดมน บริเวณล่างของลาดพิบัติ
- (b.) ภาพแสดงตัวอย่างหินทราย บริเวณบนของลาดพิบัติ
- (c.) ภาพแสดงตัวอย่างดิน บริเวณล่างของลาดพิบัติ

#### 4.2.2 ผลการทดสอบหาค่าลึกรับน้ำหนักของดินด้วยวิธีการเจาะหยั่งแบบเบา

การทดสอบหาค่าลึกรับน้ำหนักของดินด้วยวิธีการเจาะหยั่งแบบเบาในสนาม ได้ทำการแบ่งพื้นที่ศึกษา เพื่อทำการทดสอบออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนบนของลาดดิน (TM., N 745169 E 671876) ส่วนกลางของลาดดิน (MM., N 745241 E 672065) และส่วนล่างของลาดดิน (BM., N 745167 E 672297) สามารถแสดงผลการทดสอบทั้ง 3 ส่วน ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกับจำนวนครั้งในการตอกของลูกตุ้ม ดังแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าลาดดินในสภาพธรรมชาติของพื้นที่ศึกษามีความลึกประมาณ 0.80 – 1.80 เมตรจากนั้นจึงเปลี่ยนเป็นชั้นหินซึ่งสามารถนำจำนวนครั้งที่ได้จากการตอกของลูกตุ้มมาคำนวณหาความสามารถในการรับน้ำหนักของดิน ดังภาคผนวก ก (ตารางที่ ก.1) ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการเปิดหลุมสำรวจดิน ตามรายละเอียดหัวข้อ 3.2.2 ผลการเก็บตัวอย่างดินโดยใช้เครื่องเจาะชนิดมือหมุน ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งสามารถเก็บดินแข็งได้จากชั้นดังกล่าว และยังสอดคล้องกับความหนาของแนวลาดดินที่เกิดการพิบัติ ซึ่งมีความลึกตั้งแต่ 1.0 เมตรเป็นต้นไป



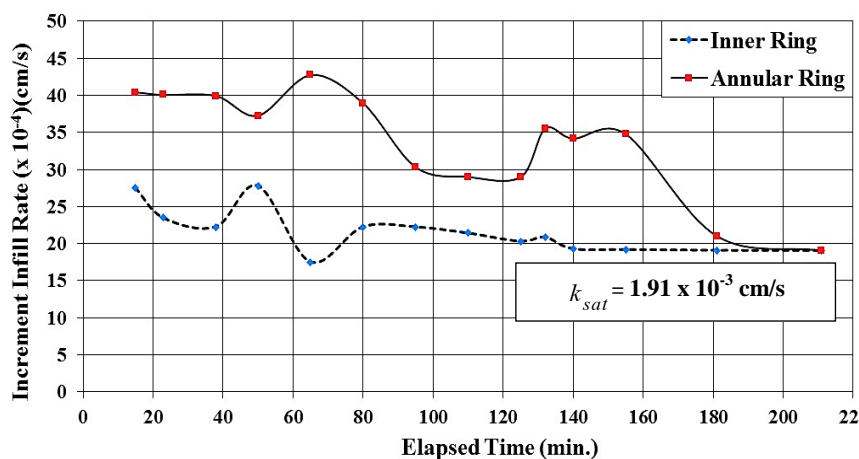
รูปที่ 4.9 ภาพแสดงผลการทดสอบด้วยวิธีการเจาะแบบหยั่งเบา



รูปที่ 4.10 ภาพแสดงตัวอย่างดินแข็งจากตำแหน่งส่วนบนของลาดดิน (TM) (a.) และ (b.)

#### 4.2.3 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของดินด้วยวิธี Double – Ring Infiltrometer Test

การทดสอบหาค่าการซึมผ่านของดินมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการซึมผ่านหรือการระบายน้ำของลาดดิน ในงานวิจัยนี้ได้เลือกทำการทดสอบด้วยวิธี Double – Ring infiltrometer test ณ บริเวณส่วนบนของลาดดินใกล้เคียงกับแนวลาดพิบัติที่ยังคงสภาพเดิมของลาดดิน โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลซึมกับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และดังภาคผนวก ค. (ตารางที่ ค.1) ซึ่งพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินเมื่ออิ่มตัว ( $k_{sat}$ ) ในบริเวณนี้มีค่าเท่ากับ  $1.91 \times 10^{-3}$  เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของทรายละเอียด หรือตะกอนทราย



รูปที่ 4.11 ภาพแสดงผลการทดสอบด้วยวิธีการทดสอบความซึมผ่าน  
(Double – Ring infiltrometer test)

#### 4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติของดินในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบคุณสมบัติของดินในห้องปฏิบัติการสามารถแบ่งการทดสอบที่ได้จากตัวอย่างดินที่เก็บได้จากภาคสนามทั้ง 3 ตำแหน่ง (ส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่าง) ได้แก่ ตัวอย่างดินแบบคงสภาพ (Undisturbed sample) สำหรับทดสอบหาคุณสมบัติดัชนีเพื่อจำแนกชนิดดิน และตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพ (Disturbed sample) สำหรับหาคุณสมบัติทางวิศวกรรม ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

##### 4.3.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติดัชนีของดิน

การทดสอบคุณสมบัติดัชนีของดิน ได้ใช้ตัวอย่างดินแบบแปลงสภาพในการทำการทดสอบ ประกอบด้วย การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของดิน (Specific gravity,  $G_s$ ) การทดสอบการกระจายตัวของเม็ดดิน (Grain size distribution) การทดสอบขีดจำกัดแอดเทอร์เบิร์ก (Atterberg's limit) ประกอบด้วย ค่าพิกัดเหลว (Liquid limit, LL) พิกัดพลาสติก (Plastic limit, PL) และการจำแนกชนิดดินแบบเอกภาพ (Unified Soil Classification System, USCS) ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังแสดงในรูปที่ 4.12 – 4.13 และตารางที่ 4.3 มีรายละเอียด ดังนี้

##### 1) ผลการทดสอบดินตำแหน่งส่วนบนของลาดดิน (TM)

ผลการทดสอบคุณสมบัติดัชนีของลาดดินบริเวณตำแหน่งส่วนบนของลาดดินที่เกิดการพิบัติ พบว่าตัวอย่างดินช่วงความลึกระหว่าง 0.00 – 0.20 เมตร จำแนกได้เป็นทรายผสมดินเหนียว (Clayey sand, SC) มีค่าถ่วงจำเพาะของดิน 2.63 ค่าขีดจำกัดเหลว 26.50 % ค่าขีด

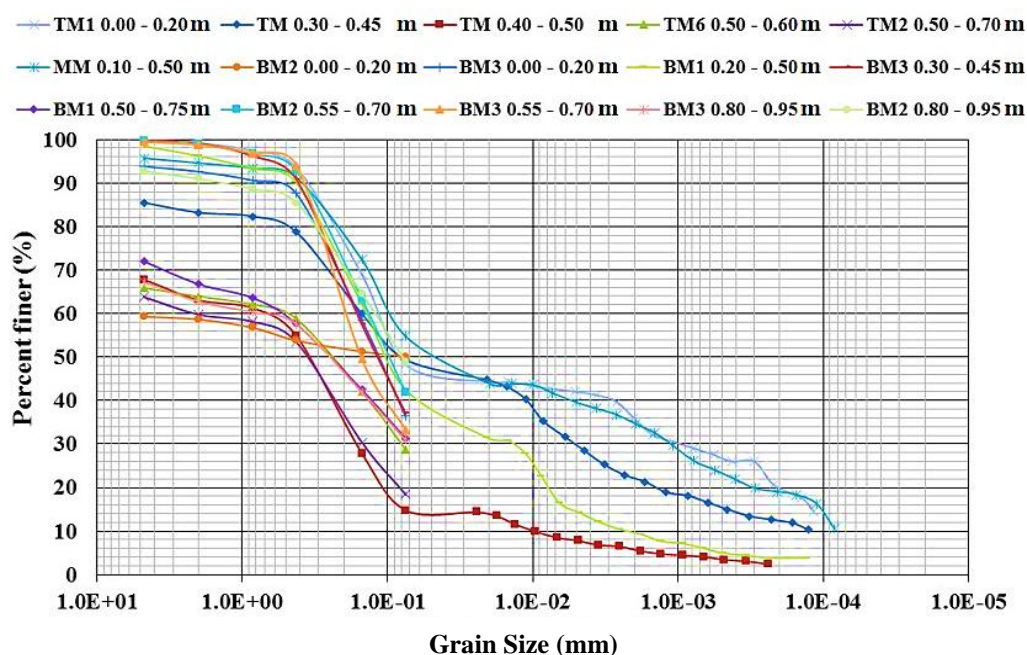
จำกัดพลาสติก 19.41 % ค่าดัชนีพลาสติก 7.09 และเปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 48.27 % และดินชั้นล่างลงไปจนถึงชั้นหินผุเป็นทรายผสมทรายแป้ง (Silty sand, SM) มีค่าถ่วงจำเพาะของดิน 2.63 – 2.64 ค่าขีดจำกัดเหลว 16.66 - 17.99 % ค่าขีดจำกัดพลาสติก 15.44 – 16.66 % ค่าดัชนีพลาสติก 0.59 – 2.55 และเปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรง เบอร์ 200 14.76 – 49.41 %

### 2) ผลการทดสอบดินตำแหน่งส่วนกลางของลาดดิน (MM)

ผลการทดสอบคุณสมบัติดัชนีของลาดดินบริเวณตำแหน่งส่วนกลางของลาดดินที่เกิดการพิบัติ พบว่าตัวอย่างดินช่วงความลึกระหว่าง 0.00 – 0.40 เมตร จำแนกได้เป็นดินเหนียวและทรายแป้ง ที่มีค่าพิภักความเหลวต่ำ (Clay and Silt low plasticity, CL –ML) มีค่าถ่วงจำเพาะของดิน 2.62 ค่าขีดจำกัดเหลว 19.13 % ค่าขีดจำกัดพลาสติก 14.83 % ค่าดัชนีพลาสติก 4.30 และเปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 54.77 %

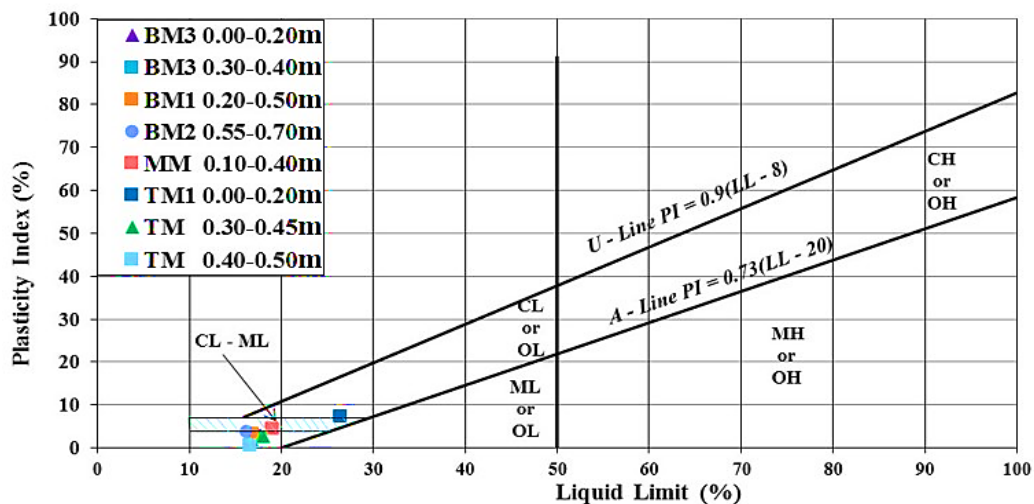
### 3) ผลการทดสอบดินตำแหน่งส่วนล่างของลาดดิน (BM)

ผลการทดสอบคุณสมบัติดัชนีของลาดดินบริเวณตำแหน่งส่วนล่างของลาดดินที่เกิดการพิบัติ พบว่าตัวอย่างดินช่วงความลึกระหว่าง 0.00 – 0.70 เมตร สามารถอนุมานได้ว่าเป็นดินกลุ่มทรายแป้ง (Silty sand, SM) เหมือนกันตลอดทั้งความลึก เนื่องจากมีคุณสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกัน ได้แก่ ค่าถ่วงจำเพาะของดิน 2.63 - 2.64 ค่าขีดจำกัดเหลว 16.27 – 17.25 % ค่าขีดจำกัดพลาสติก 12.63 – 17.25 % ค่าดัชนีพลาสติก 1.96 – 3.64 และเปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 36.33 – 42.52 %



รูปที่ 4.12 การทดสอบการกระจายตัวของดินตัวอย่าง (Grain size distribution curve)





รูปที่ 4.13 ผลการจำแนกชนิดของดินตัวอย่างโดย Plasticity chart

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของลาดดินที่เกิดการพิบัติ

ตำแหน่ง	ความลึก	$G_s$	P.200 (%)	Atterberg's Limit			USCS
				Liquid Limit (%)	Plastic Limit (%)	Plastic Index (%)	
ส่วนบน	0.00 – 0.20	2.63	48.27	26.50	19.41	7.09	SC
	0.30 – 0.45	2.64	49.41	17.99	15.44	2.55	SM
	0.40 – 0.50	2.63	14.76	16.66	16.07	0.59	SM
ส่วนกลาง	0.10 – 0.40	2.62	54.77	19.13	14.83	4.30	CL – ML
	0.00 – 0.20	2.63	36.33	16.73	14.77	1.96	SM
ส่วนล่าง	0.20 – 0.50	2.63	42.52	16.89	13.74	3.15	SM
	0.30 – 0.40	2.63	37.06	17.25	14.68	2.57	SM
	0.55 – 0.70	2.64	41.88	16.27	12.63	3.64	SM

#### 4.3.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติดินทางวิศวกรรม

ผลการทดสอบคุณสมบัติดินทางวิศวกรรมในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน (Shear strength) ด้วย Multi - Stage direct shear test ซึ่งมีรูปแบบการทดสอบแบบอัดตัวคายน้ำ - ระบายน้ำ โดยทำการทดสอบที่ระดับความชื้นหลายระดับ ซึ่งมีการควบคุมความชื้นให้คงที่ขณะทำการทดสอบ ตามรายละเอียดหัวข้อ 3.3.3 และทำการทดสอบดินตัวอย่าง

จากบริเวณส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่างของลาดดินผลการทดสอบ Multi - Stage direct shear test ในภาพรวมสามารถแสดงผลการทดสอบในรูปแบบของ Failure envelop ของดินตามทฤษฎี Mohr – Coulomb สำหรับหาค่า Effective shear strength parameter ( $c'$  และ  $\phi'$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าจากการทดสอบ Multi - Stage direct shear test ช่วงระดับระดับความอิ่มตัวของดินด้วยน้ำช่วง 70 - 100 เปอร์เซ็นต์ (%) จะให้ค่า  $c'$  และ  $\phi'$  ที่ต่ำมากและจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อดินมีค่าระดับความอิ่มตัวต่ำลดลง หรือกล่าวอีกนัยได้ว่าเมื่อดินแห้งขึ้นจะทำให้  $c'$  และ  $\phi'$  มีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.4 ซึ่งเป็นไปตามพฤติกรรมของกลุ่มทรายปนดินเหนียวและกลุ่มทรายแป้งรายละเอียดผลการทดสอบได้แสดงในภาคผนวก ค. มีรายละเอียด ดังนี้

1) ผลการทดสอบ Multi - Stage direct shear test ของดินบริเวณส่วนบนของลาดดินที่เกิดการพิบัติ พบว่า  $\phi'$  จะมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 27.37 องศา ที่ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ 88.71% สูงสุดเท่ากับ 36.55 องศา ที่ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ 63.02% ค่า  $c'$  ต่ำสุดเท่ากับ 0.00 kPa. ที่ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ 88.71% และสูงสุดที่เท่ากับ 58.22 kPa. ที่ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ 34.23%

2) ผลการทดสอบ Multi - Stage direct shear test ของดินบริเวณส่วนกลางของลาดดินเกิดการพิบัติ พบว่า  $\phi'$  จะมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 28.92 องศา ที่ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ 85.82% สูงสุดเท่ากับ 35.72 องศา ที่ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ 7.10% ค่า  $c'$  ต่ำสุดเท่ากับ 2.70 kPa. ที่ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ 85.82 % และสูงสุดที่เท่ากับ 37.94 kPa. ที่ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ 7.10%

3.) ผลการทดสอบ Multi - Stage direct shear test ของดินบริเวณส่วนล่างของลาดดินเกิดการพิบัติ พบว่าที่ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ 69.70% จะให้ค่า  $\phi'$  ต่ำที่สุดเท่ากับ 29.10 องศา สูงสุดที่ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ 43.50% จะให้ค่า  $\phi'$  เท่ากับ 36.35 องศา และที่ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ 88.07% จะให้ค่า  $c'$  ต่ำสุดเท่ากับ 2.64 kPa. สูงสุดที่ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ 11.84% จะให้ค่า  $c'$  เท่ากับ 51.83 kPa.

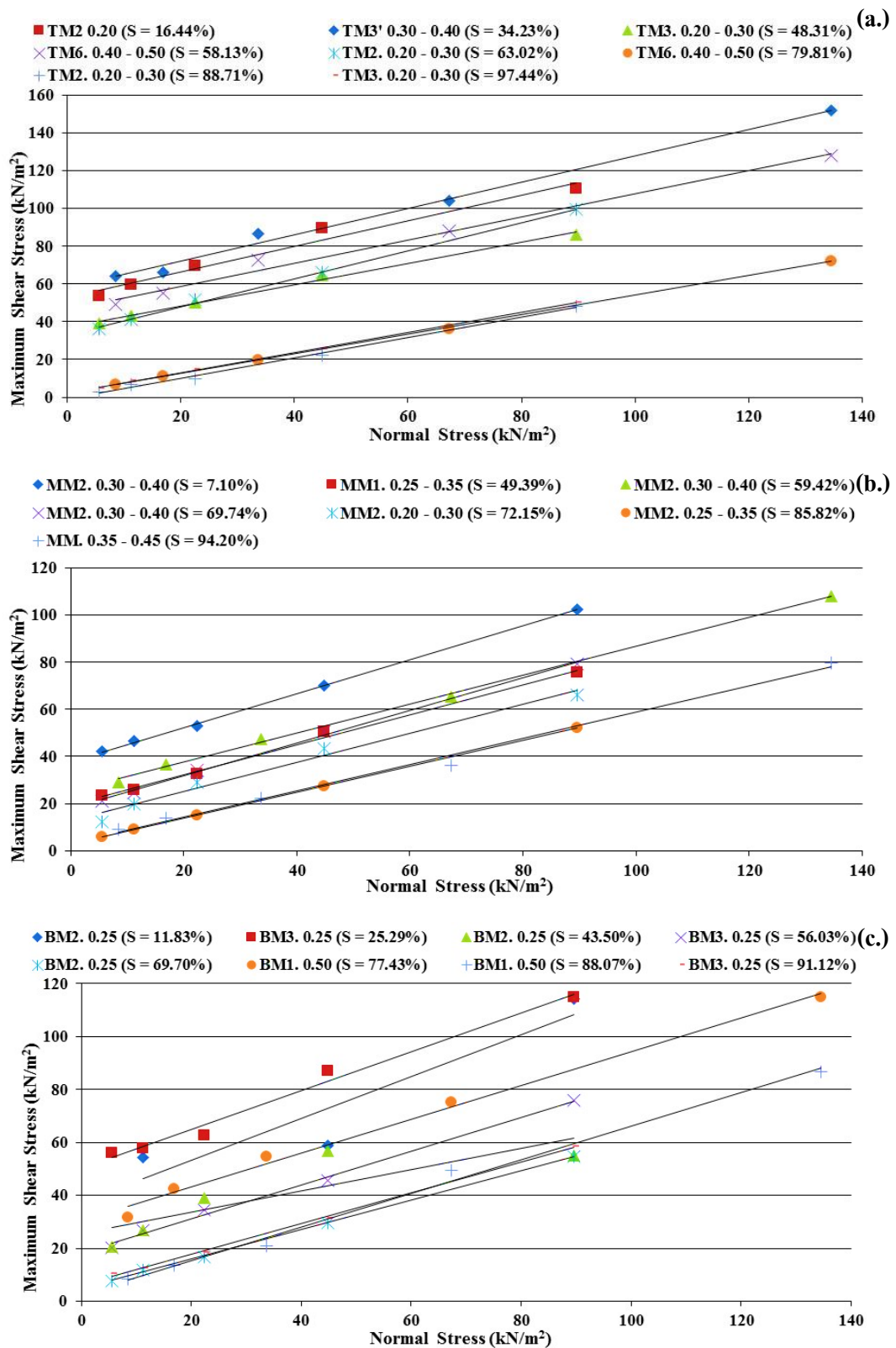
3) ผลการทดสอบ Multi - Stage direct shear test ของดินบริเวณส่วนล่างของลาดดินเกิดการพิบัติ พบว่า  $\phi'$  จะมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 29.10 องศา ที่ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ 69.70% สูงสุดเท่ากับ 36.35 องศา ที่ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ 43.50% ค่า  $c'$  ต่ำสุดเท่ากับ 2.64 kPa. ที่ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ 88.07 % และสูงสุดที่เท่ากับ 51.83 kPa. ที่ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ 11.84%

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของลาดดินด้วยวิธี Multi - Stage Direct Shear Test ที่ระดับความชื้นต่างๆ

Sta	Parameter	Degree of Saturation (%)									
		0.00 - 20.00	20.00 - 40.00	40.00 - 50.00	50.00 - 60.00	60.00 - 70.00	70.00 - 80.00	80.00 - 90.00	90.00 - 100.00		
Top	$c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	16.44	34.23	48.31	58.13	63.02	79.81	88.71	97.44		
	$\phi'$ (Deg.)	53.11	58.22	37.28	46.73	33.26	2.25	0.00	2.49		
	$c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	33.97	34.91	29.25	31.39	36.55	27.37	28.22	28.08		
Middle	$c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	MM 0.2 - 0.3 m		MM 0.2 - 0.3 m	MM 0.3 - 0.4 m	MM 0.3 - 0.4 m	MM2 0.2 - 0.3	MM 0.2 - 0.3 m	MM 0.3 - 0.4 m		
	$\phi'$ (Deg.)	7.10	NA	49.39	59.42	69.74	72.15	85.82	94.20		
	$c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	37.94	NA	18.49	25.32	17.77	12.64	2.70	3.37		
Bottom	$c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	35.72		32.32	31.52	34.83	31.68	28.92	29.06		
	$\phi'$ (Deg.)	BM 0.25 m	BM 0.25 m	BM 0.25 m	BM 0.25 m	BM 0.25 m	BM 0.50 m	BM 0.50 m	BM 0.25 m		
	$c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	11.84	25.29	43.50	56.03	69.70	77.43	88.07	91.12		
	$\phi'$ (Deg.)	51.83	50.33	19.41	18.39	4.77	30.57	2.64	6.14		
	$\phi'$ (Deg.)	35.33	36.21	36.35	32.57	29.10	32.55	32.43	30.05		

หมายเหตุ  $c'$  = Effective cohesion (kPa.),  $\phi'$  = Effective internal friction angle (Degree), S = Degree of Saturation (%)

NA ไม่สามารถวัดความชื้นได้ในช่วงที่กำหนดสำหรับการทดสอบได้



รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินตัวอย่างตามระดับความอิ่มตัว (S) (a.) ส่วนบนของลาดดิน (TM), (b.) ส่วนกลางของลาดดิน (MM) และ c.) ส่วนล่างของลาดดิน (BM)

### 4.3.3 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติกับระดับความอิ่มตัวของดิน

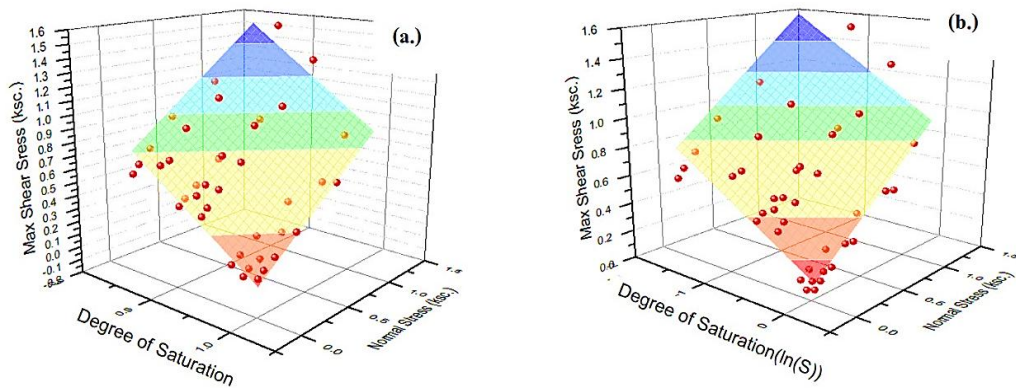
#### ก) ความสัมพันธ์ของ Shear Strength Parameter

หน่วยแรงเฉือนสูงสุด (Maximum shear stress,  $\tau_{max}$ ) มีค่าดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับค่าระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของดิน หน่วยน้ำหนักกดทับ (Normal stress,  $\sigma$ ) และระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของดิน (Degree of saturation, S) (สมการที่ 3.3 และ 3.4) ดังแสดงในรูปที่ 4.15 – 4.17 ซึ่งพบว่าค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุด ( $\tau_{max}$ ) จะเพิ่มขึ้นเมื่อหน่วยน้ำหนักกดทับ ( $\sigma$ ) เพิ่มขึ้น และค่าระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของดิน (S) ลดลง

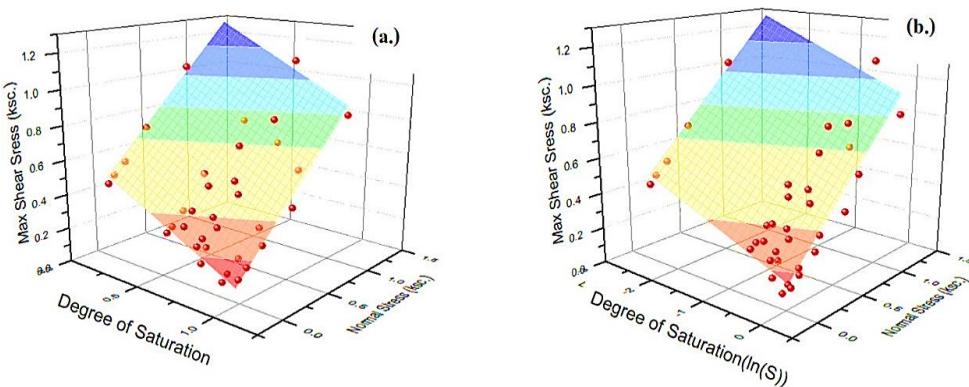
การวิเคราะห์ความสัมพันธ์  $\tau_{max}$ ,  $\sigma$  และ S ระบบ 3 แกน โดยกำหนดให้แกน X เป็นค่าระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของดิน แกน Y เป็นค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดและแกน Z เป็นค่าหน่วยน้ำหนักกดทับ ซึ่งสามารถสรุปความสัมพันธ์ได้ ดังตารางที่ 4.5 พบว่าการหาความสัมพันธ์ในรูปแบบ Linear plane จะให้ค่า R - square ที่สูงกว่ารูปแบบ Logarithm plane ซึ่งมุม (Parameter,  $\alpha$ ) ระหว่างค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุด ( $\tau_{max}$ ) และค่าระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของดิน (S) สามารถแปลงค่าในรูปเชิงมุมสำหรับนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในระบบ 3 แกนจากดินตัวอย่างของลาดพิบัติ

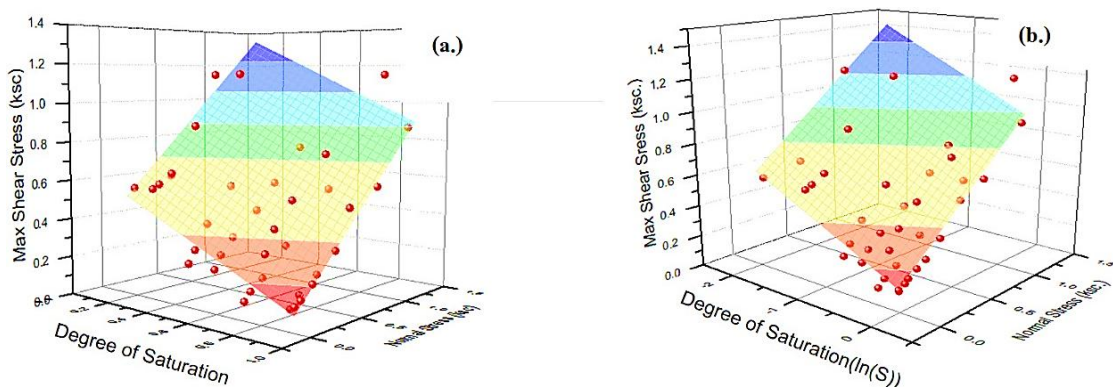
Location	Model	Equation	R <sup>2</sup>
Top (TM)	Linear	$\tau_{max} = 0.8254 + 0.6252\sigma - 0.8911S$	0.8914
	Log	$\tau_{max} = 0.0442 + 0.6403\sigma - 0.3749\ln(S)$	0.8029
Middle (MM)	Linear	$\tau_{max} = 0.4687 + 0.6236\sigma - 0.4784S$	0.9583
	Log	$\tau_{max} = 0.0765 + 0.6185\sigma - 0.1393\ln(S)$	0.9119
Bottom (BM)	Linear	$\tau_{max} = 0.5380 + 0.6483\sigma - 0.5599S$	0.8162
	Log	$\tau_{max} = 0.0501 + 0.6353\sigma - 0.2411\ln(S)$	0.8160



**รูปที่ 4.15** ภาพความสัมพันธ์ระหว่าง Max shear stress, Normal stress และ Degree of saturation ของตัวอย่างดินบริเวณส่วนบนของลาดพิบัติ (TM) (a.) ความสัมพันธ์แบบ Linear plane (b.) ความสัมพันธ์แบบ Logarithm plane



**รูปที่ 4.16** ภาพความสัมพันธ์ระหว่าง Max shear stress, Normal stress และ Degree of saturation ของตัวอย่างดินบริเวณส่วนกลางของลาดพิบัติ (MM) (a.) ความสัมพันธ์แบบ Linear plane (b.) ความสัมพันธ์แบบ Logarithm plane

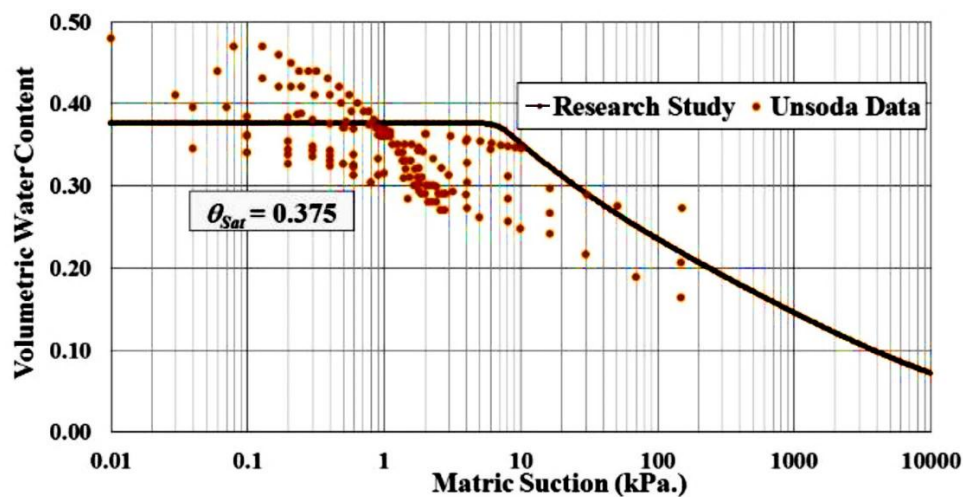


**รูปที่ 4.17** ภาพความสัมพันธ์ระหว่าง Max shear stress, Normal stress และ Degree of saturation ของตัวอย่างดินบริเวณส่วนล่างของลาดพิบัติ (BM) (a.) ความสัมพันธ์แบบ Linear plane (b.) ความสัมพันธ์แบบ Logarithm plane

### ข) Soil Water Characteristic Curve (SWCC)

การวิเคราะห์คุณสมบัติของดินในรูปแบบเส้นอรรถลักษณะของน้ำในดิน (Soil- water characteristic curve, SWCC) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดูด (Matric suction) และ ปริมาณน้ำในดินโดยปริมาตร (Water volumetric content) งานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการประมาณทางคณิตศาสตร์ จากความสัมพันธ์ของ Grain size distribution curve ได้แก่ ปริมาณน้ำในดินโดยปริมาตรที่ดินอิ่มตัว,  $D_{10}$ ,  $D_{60}$  และ Liquid limit มีค่า  $0.375 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ,  $0.01 \text{ mm.}$ ,  $9 \text{ mm.}$  และ  $19.134\%$  ตามลำดับ โดยใช้สมการซึ่งเสนอโดย Auberdin (2003) และ Fredlund and Xing (1994)

เพื่อให้เส้นอรรถลักษณะของน้ำในดินที่ได้จากสมการที่เสนอโดย Auberdin (2003) ให้มีความถูกต้องมากขึ้นงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบ Soil - water characteristic curve ที่ได้กับฐานข้อมูลดิน (Unsaturated Soil Hydraulic Database, USDA) กลุ่มดินรูปแบบ Loam ซึ่งเป็นกลุ่มดินชนิดเดียวกับลาดดินพิบัติของพื้นที่ศึกษาสำหรับปรับแก้เส้นอรรถลักษณะของน้ำในดินโดยการใช้ Grain size distribution curve เป็นเกณฑ์ในการปรับแก้ พบว่าเส้นอรรถลักษณะของน้ำในมวลดินมีค่า Air entry suction  $6.5 \text{ kPa}$ , Residual water content  $0.065 \text{ m}^3/\text{m}^3$  และช่วงการเปลี่ยนแปลงของ Desorption curve มีลักษณะแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับฐานข้อมูลดิน (USDA) กลุ่มดิน Loam ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดสอบภาคสนามดังแสดงในรูปที่ 4.18

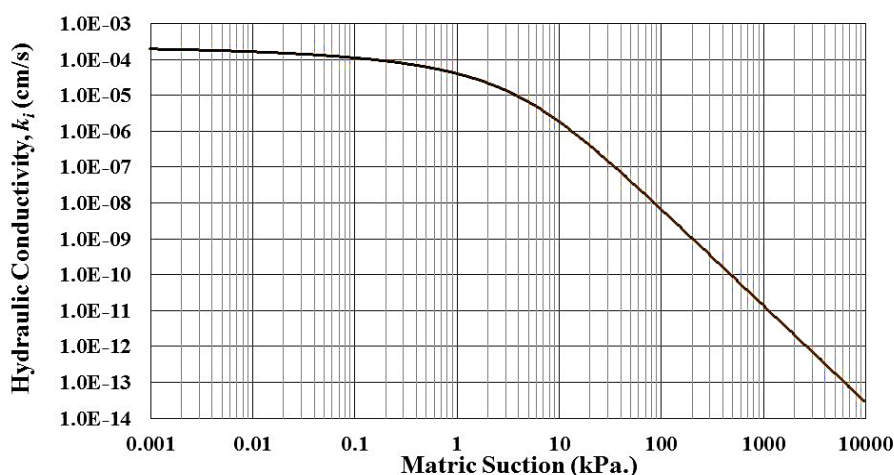


รูปที่ 4.18 ภาพแสดงเส้นอรรถลักษณะของน้ำในดินตัวอย่าง (SWCC)



### ค) Permeability Function (PF)

การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์การไหลซึมของน้ำในมวลดิน เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Matric suction และค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำในมวลดิน งานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการประมาณทางคณิตศาสตร์ซึ่งเสนอโดย van Genuchten (1980) (สมการ 2.24) ซึ่งใช้ความสัมพันธ์กับเส้นอัตราคัมภ์ของน้ำในดิน โดยกำหนดให้ค่าความซึมผ่านของน้ำในมวลดินของดินอิ่มตัวด้วยน้ำ  $k_{sat}$  มีค่า  $1.91 \times 10^{-3}$  เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งได้จากการทดสอบภาคสนามด้วยวิธี Double-Ring infiltrometer test ผลการวิเคราะห์ได้แสดงในรูปที่ 4.19 พบว่าค่าความซึมผ่านของน้ำในมวลดินมีการลดลงเมื่อ Matric suction อยู่ในช่วงระหว่าง 6.5 – 10,000 kPa. กล่าวคือ เมื่อ Matric suction มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความซึมผ่านของน้ำในมวลดินมีค่าลดลง

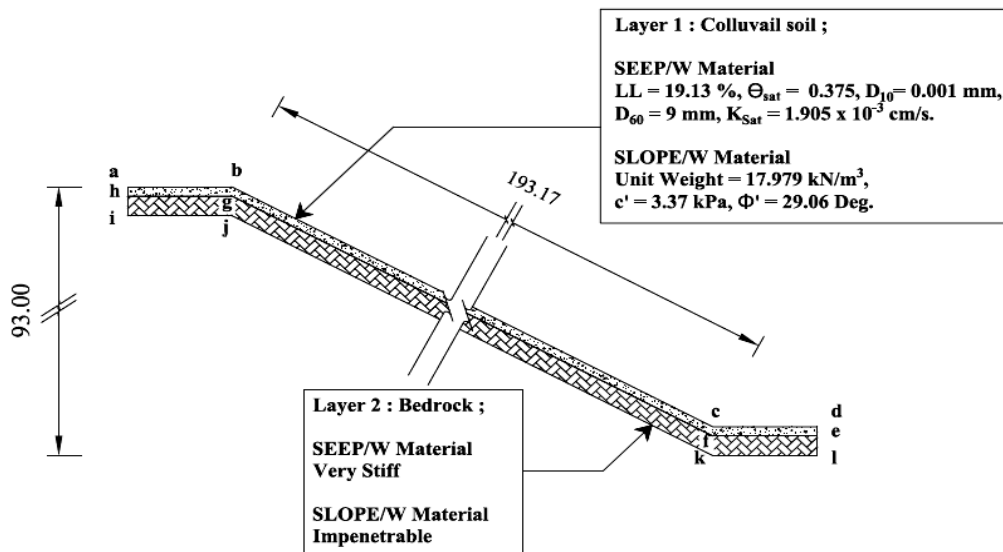


รูปที่ 4.19 Permeability Function ของลาดดินที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลซึม

#### 4.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำฝนวิกฤตที่ทำให้ลาดดินเกิดการพิบัติ

การสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์กำหนดให้ชั้นดินมีความลาดชัน 28.06 องศา ลาดยาว 197.71 เมตร มีความหนา 1.40 เมตร และอีลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยมขนาด  $0.15 \times 0.15$  เมตร รวมทั้งสิ้น 13,877 node, 12,352 element และกำหนดให้ไม่มีการพิบัติในชั้นหินและน้ำไม่สามารถซึมผ่านได้ การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) น้ำฝนที่ตกลงบนผิวลาดดินให้กระจายทั่วลาดดินอย่างสม่ำเสมอ (Rainfall,  $q = I_R$ ) ฝั่งขวากำหนดให้น้ำสามารถไหลออกได้อย่างอิสระ (Unit gradient,  $i$ ) ฝั่งซ้ายและล่างของแบบจำลองกำหนดให้น้ำไม่สามารถไหลเข้าหรือออกได้ (No flow,  $Q = 0$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4.20 และตารางที่ 4.6





รูปที่ 4.20 ภาพแสดงแบบจำลอง Finite element สำหรับการวิเคราะห์

ตารางที่ 4.6 คุณสมบัติและเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) สำหรับแบบจำลองวิเคราะห์การไหลซึม

(a) Material properties

Material	Input Parameter
1. Soil	$\theta_{Sat} = 0.375 \text{ m}^3/\text{m}^3$ $D_{10} = 0.001 \text{ mm.}, D_{60} = 9 \text{ mm.}$ $LL = 19.134 \%$ $K_{Sat} = 1.913 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$
2. Bed rock	$K = 0$

(b) Boundary condition

Material	Station	Boundary
1. Soil	ab, bc, cd	Rainfall ( $q = I_R$ )
	ah, hg, gf, fe	No flow ( $Q = 0$ )
	de	Unit gradient ( $i$ )
	e	Pressure head ( $P = 0$ )
2. Bed rock	hi, ij, jk, kl, le	No Flow ( $Q = 0$ )

#### 4.4.1 พารามิเตอร์กำลังเฉือนของดินที่ใช้ในการวิเคราะห์

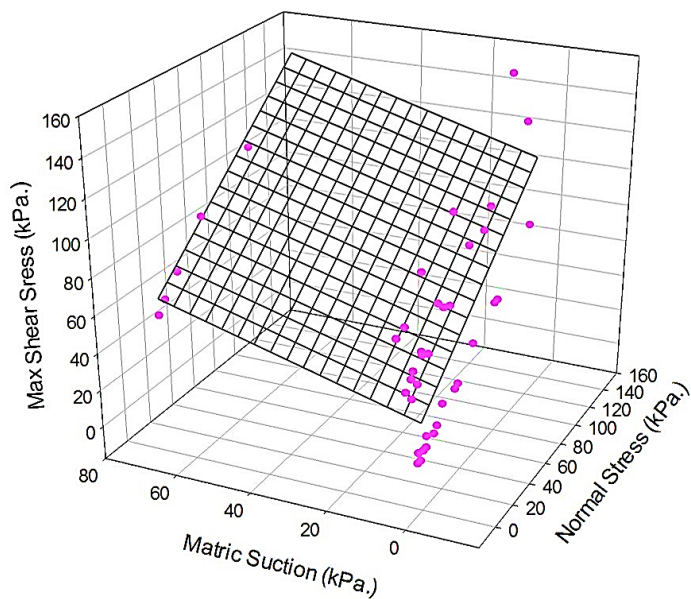
จากการวิเคราะห์ตัวอย่างดินจากลาดดินพิบัติกรณีศึกษาบริเวณบ้าน โลกลูกหมี่ ตำบลคลองทราย อำเภอนาทวี จังหวัดสงขลา งานวิจัยนี้ได้ใช้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์จากการประมาณเส้นอัตราเฉือนของดิน (รูปที่ 4.18) ประยุกต์ร่วมกับการวิเคราะห์กำลังรับแรงเฉือนของดินตามรายละเอียดหัวข้อ 2.1.8 และเป็นไปดังสมการที่ 2.11 ซึ่งเสนอโดย Fredlund (1993) สำหรับวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระบบ 3 แกน กำหนดให้แกน X เป็นค่า Matric suction, แกน Y เป็นค่า หน่วยแรงเฉือนสูงสุด (Maximum shear stress,  $\tau_{\max}$ ) และแกน Z เป็นค่า หน่วยน้ำหนักกดทับ (Normal stress,  $\sigma$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4.21–4.23

เมื่อดินมีค่า Matric suction ลดลงอันเนื่องมาจากปัจจัยปริมาณน้ำฝนที่ตกสะสมส่งผลให้กำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของดินลดลง ( $\tau_{\max}$ ) จากปัจจัยดังกล่าวสามารถหาความสัมพันธ์ในรูปแบบระนาบ (Linear plane) จากตำแหน่งดินทั้ง 3 บริเวณ ได้แก่ ส่วนบน, ส่วนกลาง และ ส่วนล่างของลาดดินดังตารางที่ 4.7 พบว่าจากตัวอย่างดินส่วนบน (TM) และส่วนล่าง (BM) ที่นำมาทดสอบมีค่า R – square ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ข้อมูลจากตำแหน่งส่วนกลาง (MM) ซึ่งมีค่า R – square สูงสุดเป็นตัวแทนของข้อมูลที่น่าไปใช้ในการวิเคราะห์การพิบัติของลาดดิน อีกทั้งการเลือกใช้ข้อมูลจากตำแหน่งกลางของลาดดินยังมีความสอดคล้องกับการเกิดการพิบัติของลาดดินจริงซึ่ง ณ บริเวณตำแหน่งกลางเป็นตำแหน่งเริ่มของการพิบัติของลาดดิน (ข้อมูลดังกล่าวได้รับจากการสอบถามประชาชนในพื้นที่ศึกษา)

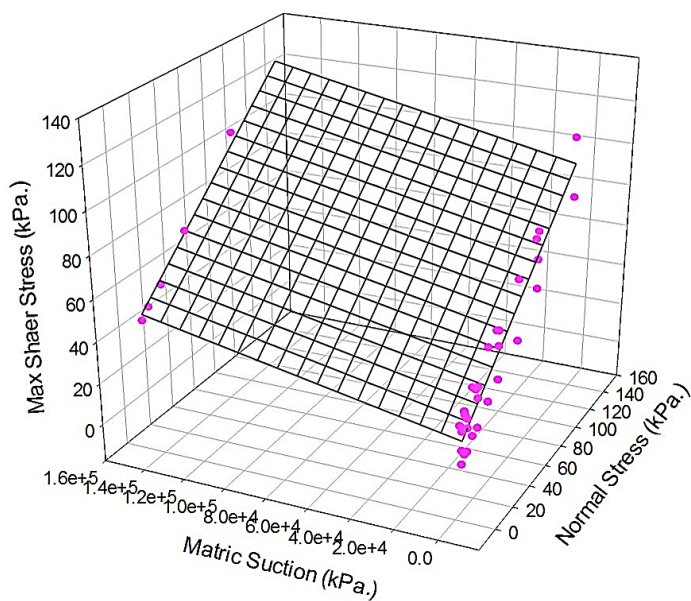
ทั้งนี้การวิเคราะห์กำหนดให้ ความถ่วงจำเพาะของดิน 2.63, มุมเสียดทานภายใน ( $\phi'$ ) 29.06 องศา, ค่าการยึดเกาะระหว่างเม็ดดิน ( $c'$ ) 3.37 kPa. และค่าหน่วยน้ำหนักของดินที่ความชื้นธรรมชาติ  $17.979 \text{ kN/m}^3$  ซึ่งได้จากการทดสอบคุณสมบัติดัชนี และทางวิศวกรรมของตัวอย่างดินที่ตำแหน่งส่วนกลางของลาดดิน

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในระบบ 3 แกน ซึ่งเสนอโดย Fredlund (1993)

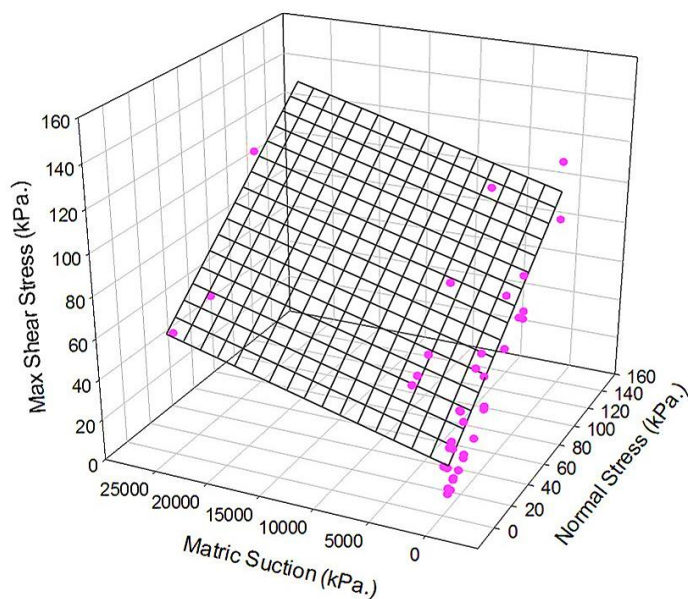
Equation	$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b$			
	$c'$	$\tan \phi'$	$\tan \phi^b$	R-Square
ส่วนบน (TM)	20.03	0.656	0.5477	0.5876
ส่วนกลาง (MM)	13.21	0.613	0.0002	0.8668
ส่วนล่าง (BM)	18.02	0.613	0.0013	0.6883



รูปที่ 4.21 ภาพความสัมพันธ์ระหว่าง Max shear stress, Normal stress และ Matrix suction ของตัวอย่างดินบริเวณส่วนบนของลาดพิบัติ (TM)

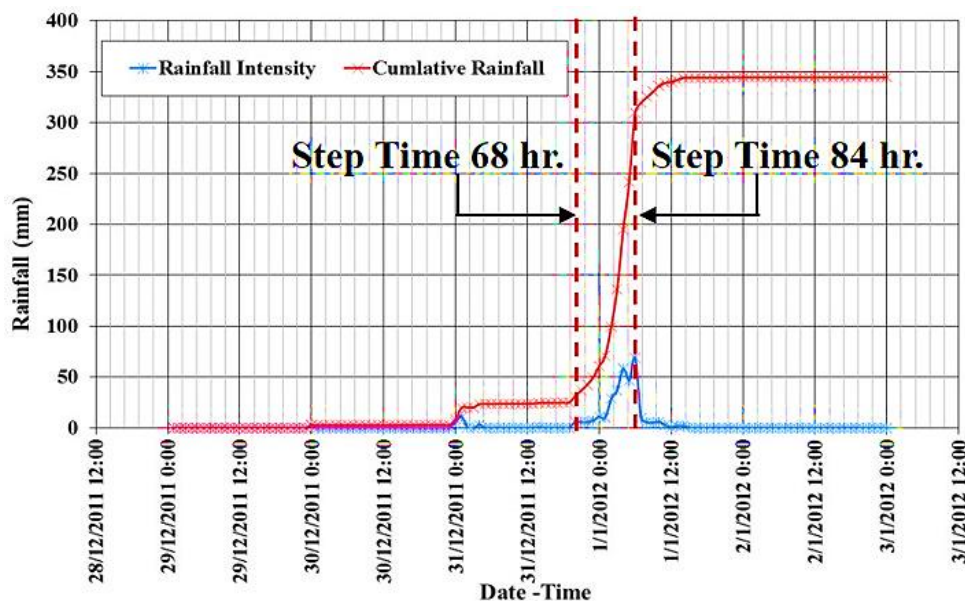


รูปที่ 4.22 ภาพความสัมพันธ์ระหว่าง Max shear stress, Normal stress และ Matrix suction ของตัวอย่างดินบริเวณส่วนกลางของลาดพิบัติ (MM)



**รูปที่ 4.23** ภาพความสัมพันธ์ระหว่าง Max shear stress, Normal stress และ Matrix suction ของตัวอย่างดินบริเวณส่วนล่างของลาดพิบัติ (BM)

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำฝนวิกฤตที่ทำให้ลาดดินเกิดการพิบัติในงานวิจัยนี้ได้ใช้หลักการวิเคราะห์เสถียรภาพ 2 หลักการ ได้แก่ การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยวิธีลิมิตความสมดุล และการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน โดยใช้หลักการไฟไนท์อีลิเมนต์สำหรับวิเคราะห์การไหลซึม ซึ่งทั้ง 2 หลักการมีหลักการวิเคราะห์และสมมติฐานที่แตกต่างกัน (รายละเอียดหัวข้อ 3.4) โดยปริมาณน้ำฝนที่ใช้ในการวิเคราะห์ใช้ข้อมูลปริมาณน้ำรายชั่วโมงจากสถานีวัดน้ำฝนตชด. ถ่ายทำน मुख ระหว่างวันที่ 29 ธันวาคม 2554 ถึงวันที่ 2 มกราคม 2555 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เกิดการพิบัติของลาดดิน โดยสถานีวัดน้ำฝน ตชด. ถ่ายทำน मुख มีระยะห่างจากตำแหน่งเกิดลาดดินพิบัติเป็นระยะทาง 6.5 กิโลเมตร ดังภาคผนวก ง. และแสดงในรูปที่ 4.24 ซึ่งสามารถแสดงผลการวิเคราะห์อย่างละเอียดได้ ดังนี้



รูปที่ 4.24 ภาพแสดงปริมาณน้ำฝนรายชั่วโมงจากสถานีวัดน้ำฝน ตชด. ค่ายท่านมุข ที่ใช้ในการวิเคราะห์ การพิบัติของลาดดิน (วันที่ 29 ธันวาคม 2554 ถึงวันที่ 2 มกราคม 2555)

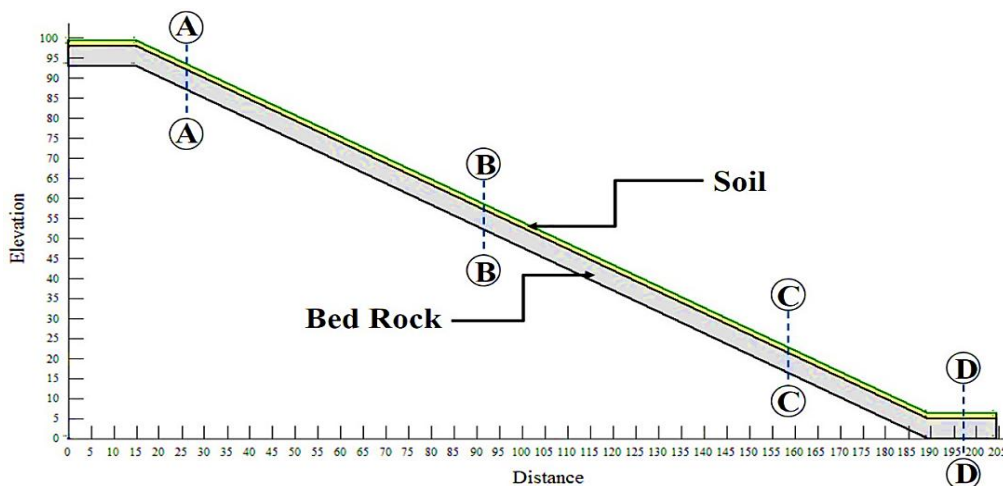
#### 4.4.2 ผลการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำในมวลดิน

การวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำในมวลดินจำเป็นต้องการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเนื่องจากปริมาณน้ำฝนที่ตกลงสู่ลาดดินจะส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการรับน้ำหนักของดินงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม Geo Studio V2012 ฟังก์ชัน SEEP/W ซึ่งสามารถแสดงผลของแบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.25 โดยทำการวิเคราะห์แบบแปรเปลี่ยนตามเวลา (Transient) โดยมีเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) ที่ว่าระดับน้ำใต้ดินอยู่ระดับลึกมาก

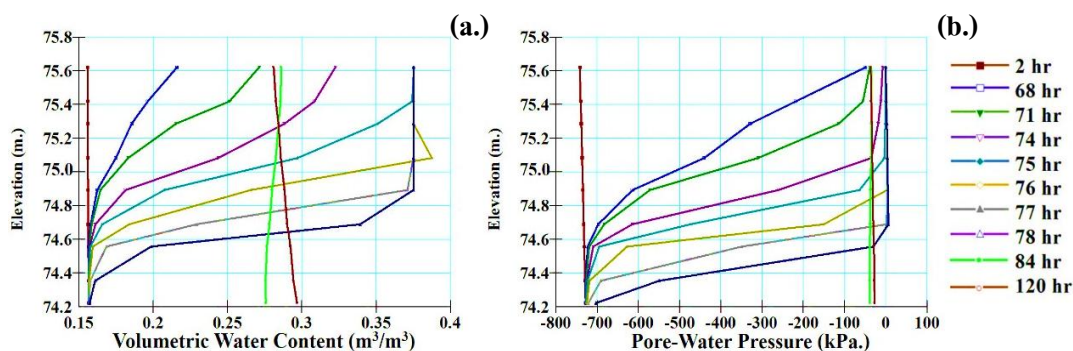
ผลจากการวิเคราะห์โดยการพิจารณาแนวตัดของแบบจำลองลาดดินพิบัติเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในดินโดยปริมาตร (Volumetric water content,  $\theta$ ) กับระดับของดินตามความลึก (Elevation) แสดงในรูปที่ 4.26 – 4.29(a.) จากสภาพดินธรรมชาติก่อนฝนตกเกิดเหตุการณ์ฝนทิ้งช่วงเป็นเวลานานจึงทำให้สภาพดินค่อนข้างแห้ง มีค่า  $\theta = 0.15$  และเมื่อเกิดเหตุการณ์ฝนตกหนักต่อจึงทำให้ค่า  $\theta$  เพิ่มขึ้นตามเวลาและความลึก โดยลาดดินอิมตัวด้วยน้ำจนกระทั่ง  $\theta = 0.375$  และเมื่อพิจารณาแต่ละบริเวณแนวตัดที่ระดับความลึกจากผิวดินเท่ากัน ณ เวลาเดียวกัน (Time step) พบว่าลาดดินที่อยู่ตำแหน่งต่ำกว่าจะมีค่า  $\theta$  มากกว่า ซึ่งเป็นการชี้ให้เห็นว่าน้ำในลาดดินมีการไหลจากด้านบน (แนวตัด A-A) ไปยังด้านล่าง (แนวตัด D-D) ทำให้เกิดการเอ่อขึ้นของน้ำจากด้านล่างที่ใกล้กับเชิงเขา (Toe) ของด้านล่างมากกว่าด้านบน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าดินด้านบนจะมีความชื้นในมวลดินน้อยกว่าดินด้านล่าง

สำหรับรูปที่ 4.26 – 4.29 (b.) ค่าแรงดันน้ำตามความลึกและเวลาก่อนฝนตก (ดินแห้ง) ลาดดินมีแรงดูด (Suction) หรือแรงดันน้ำเป็น “ลบ (-)” แล้วค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งเป็น “บวก (+)” โดยเริ่มเปียกก่อนจากผิวดิน และค่อยๆ ถัดลงด้านล่างในลักษณะของ “Wetting front” จนกระทั่งดินอึดตัวทั้งหน้าตัด โดยลาดดินจะเริ่มอึดตัวจากตำแหน่งล่าง (BM) ของลาดดินที่ Step time 76 แล้วขึ้นไปจนถึงกระทั่งถึงตำแหน่งกลางของลาดดิน (MM) บริเวณแนวตัด B-B (Step time 84) ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อปริมาณน้ำฝนตกลงสู่ลาดดินทำให้ลาดดินเกิดรับน้ำ และระบายน้ำไปพร้อมกัน แต่เนื่องจากการระบายน้ำที่ได้ช้ากว่าปริมาณน้ำที่ลาดดินรับมาจากปริมาณน้ำฝนจึงทำให้เกิดการอึดตัวด้วยน้ำของลาดดินมีพฤติกรรมอึดตัวจากส่วนล่างขึ้นไปส่วนบน และยังพบว่าเมื่อฝนหยุดตกทำให้ลาดดินไม่มีการรับน้ำจึงส่งผลให้เกิดการระบายน้ำของลาดดินบริเวณส่วนล่างของลาดดินโดยพิจารณาได้จากระดับความชื้นในมวลดินจะเริ่มลดลงผิวดินลงสู่ระดับชั้นถัดไป (Step time 84 - 120)

จากการวิเคราะห์โดยการพิจารณาแนวตัดของแบบจำลองลาดดินพิบัติ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำ กับความลึกของดินดังแสดงในรูปที่ 4.26 – 4.29 (b.) พบว่าเมื่อลาดดิน ณ ตำแหน่งใด ที่มีระดับความอึดตัวด้วยน้ำสูงขึ้นจะทำให้ค่าแรงดันน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย หรือสามารถกล่าวอีกนัยได้ว่าเมื่อดินแห้ง (หรือมีค่าระดับความอึดตัวด้วยน้ำต่ำ) มีค่าแรงดันน้ำมีเป็นลบ และยังพบว่าค่าแรงดันน้ำที่เป็นลบมีค่าสูงมากเนื่องจากการวิเคราะห์โดย Geo Studio V 2012 ฟังก์ชัน SEEP/W มีการพิจารณาระดับความสูงจากระดับอ้างอิง หรือระดับน้ำใต้ดิน (Initial ground water table) ร่วมด้วยในการวิเคราะห์แรงดันน้ำในมวลดิน (งานวิจัยนี้มีการวิเคราะห์แบบไม่แปรเปลี่ยนตามเวลาหรือแบบคงที่ พบว่าลาดดินดังกล่าวมีระดับน้ำใต้ดินอยู่ลึกมาก จึงไม่นำระดับน้ำใต้ดินดังกล่าวมาเป็นเงื่อนไขเริ่มต้นสำหรับการวิเคราะห์แบบแปรเปลี่ยนตามเวลา) เมื่อพิจารณาหน้าตัดของลาดดิน พบว่า ณ ส่วนบนของลาดดิน (TM) บริเวณแนวตัด A-A มีค่าแรงดันน้ำติดลบสูงสุด เนื่องจากมีความชื้นในดินน้อยกว่าแนวตัดอื่นๆ ( $\theta$  มีค่าน้อยลง) จึงส่งผลให้แรงดันน้ำในมวลดินติดลบเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาส่วนล่างของลาดดินบริเวณแนวตัด C-C, D-D พบว่าค่าแรงดันน้ำมีค่าเป็น 0 จากผิวดินและเพิ่มขึ้นเป็นบวกตามระดับความลึกของชั้นดินจนกระทั่งมากที่สุดที่ PWP มีค่า 13.886 kPa. และยังชี้ให้เห็นว่าบริเวณดังกล่าวมีการเอ่อล้นออกของน้ำเนื่องจากปริมาณน้ำไม่สามารถระบายได้ทัน

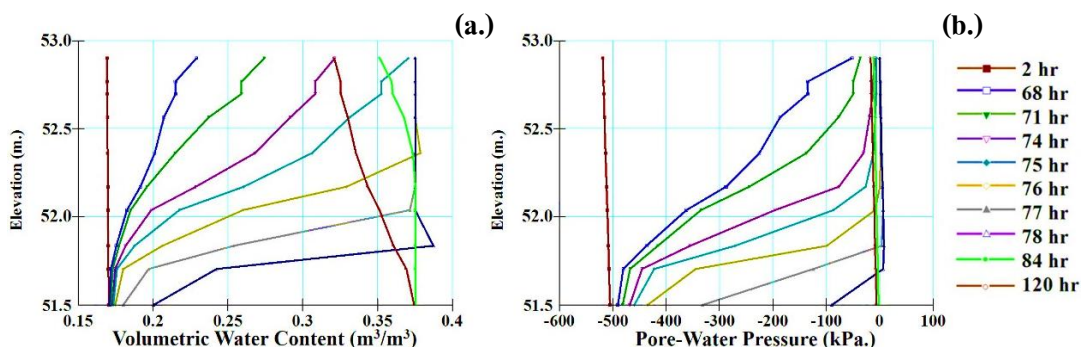


รูปที่ 4.25 ภาพแบบจำลองของลาดดินพีชิตด้วยโปรแกรม Geo Studio V2012 ฟังก์ชัน SEEP/W



รูปที่ 4.26 ผลการจำลองการไหลซึมของน้ำฝนในลาดดิน Section A – A

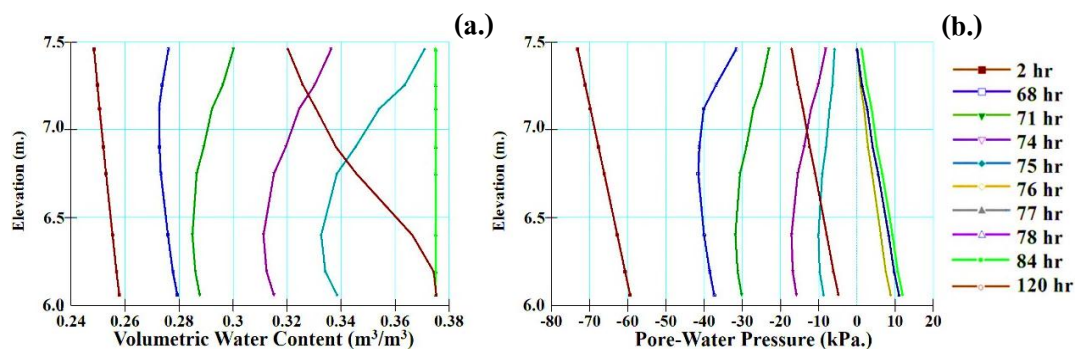
- (a.) ภาพความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric water content กับ Elevation
- (b.) ภาพความสัมพันธ์ระหว่าง Pore- water pressure กับ Elevation



รูปที่ 4.27 ผลการจำลองการไหลซึมของน้ำฝนในลาดดิน Section B – B

- (a.) ภาพความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric water content กับ Elevation
- (b.) ภาพความสัมพันธ์ระหว่าง Pore- water pressure กับ Elevation

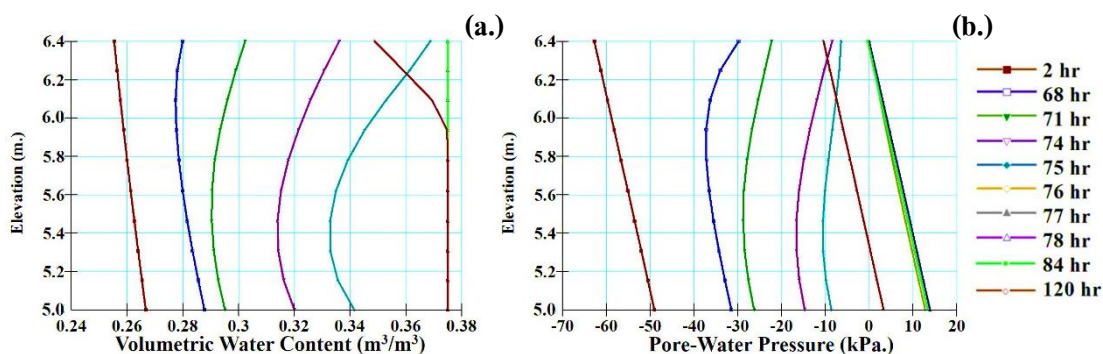




รูปที่ 4.28 ผลการจำลองการไหลซึมของน้ำฝนในลาดดิน Section C – C

(a.) ภาพความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric water content กับ Elevation

(b.) ภาพความสัมพันธ์ระหว่าง Pore- water pressure กับ Elevation



รูปที่ 4.29 ผลการจำลองการไหลซึมของน้ำฝนในลาดดิน Section D – D

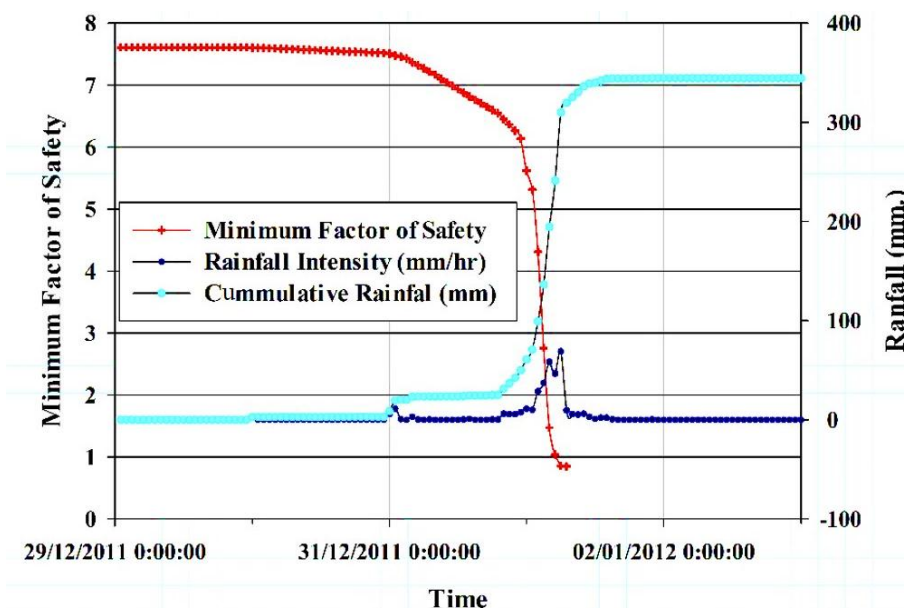
(a.) ภาพความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric water content กับ Elevation

(b.) ภาพความสัมพันธ์ระหว่าง Pore- water pressure กับ Elevation

#### 4.4.3 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยวิธีของ Bishop

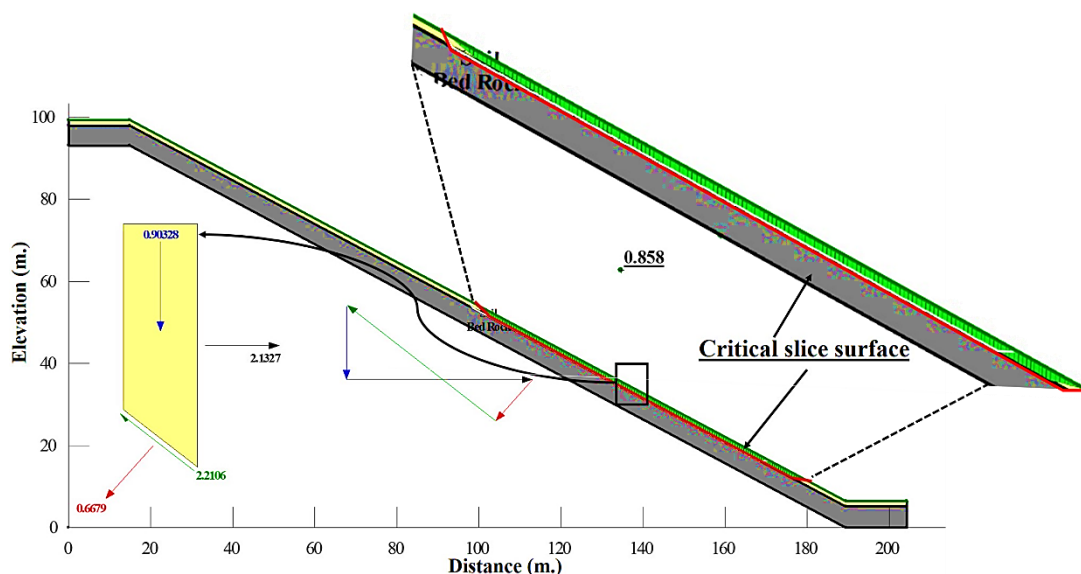
การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในงานวิจัยนี้ได้ทำการใช้วิธี Bishop's simplified method ตามทฤษฎีลิมิตความสมดุล (Limit equilibrium) ด้วยโปรแกรม Geo Studio V2012 ฟังก์ชัน SLOPE/W โดยแบ่งดินในการวิเคราะห์เป็น 150 Slice และใช้คุณสมบัติของดินที่ได้จากทดสอบในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ หน่วยน้ำหนักของดิน,  $c'$  และ  $\phi'$  มีค่า 17.919 kN/m<sup>3</sup>, 3.37 kPa และ 29.06° ตามลำดับ กำหนดให้กำลังรับแรงเฉือนของดินแปรเปลี่ยนไปตามปริมาณน้ำหรือความชุ่มชื้นในมวลดินซึ่งเชื่อมโยงจากฟังก์ชัน SEEP/W แบบ Step by Step ตามสมการของ Vanapali et al. (1996) ซึ่งผลการคำนวณสามารถแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำสุดกับเวลาดังแสดงในรูปที่ 4.30





รูปที่ 4.30 ภาพปริมาณน้ำฝนรายชั่วโมงปริมาณน้ำฝนสะสมเปรียบเทียบกับค่าอัตราส่วนความปลอดภัย

ในรูปที่ 4.30 จากการวิเคราะห์โดยใช้ปริมาณน้ำฝนที่ตกลงสู่ลาดดินระหว่างวันที่ 29 ธันวาคม 2554 ถึงวันที่ 2 มกราคม 2555 พบว่าลาดดินในสภาวะธรรมชาติมีเสถียรภาพสูงมากซึ่งให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำสุด (Minimum factor of safety, F.S.) เท่ากับ 7.608 และจะเริ่มลดลงอย่างรวดเร็ว (Step time 68 – Step time 84) เมื่อปริมาณน้ำฝนที่ตกลงสู่ลาดดินเรื่อยๆ จนกระทั่งมีปริมาณน้ำฝนสะสม 310 มิลลิเมตร จึงทำให้ลาดดินเกิดการพิบัติ (F.S. < 1.000) ณ วันที่ 1 มกราคม 2555 เวลา 6:00 น. (Step time 78) โดยพบว่ามีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำสุดที่ 0.858 ณ บริเวณตำแหน่งส่วนล่างของแบบจำลอง ทั้งนี้สามารถเขียนแผนภาพแรง (Free body diagram, FBD) ของ Critical slipsurface ได้โดยมีความกว้าง (Slice width), หนักร้ำหนักดินชื้น (Weight of soil moisture), หนักร้ำหนักปกติ (Base normal force), กำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน (Shear strength at failure plane) และหนักร้ำหนักกระทำ (Right side normal force) มีค่า 0.57714 เมตร, 0.90328 kN, 0.6679 kN, 2.2106 kN และ 2.1327 kN ตามลำดับ โดยสามารถแสดงได้เป็นรูปปิดหลายเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 ภาพแสดง Critical slice surface ของลาดพิบัติ Step time 78

#### 4.4.4 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยวิธีลาดอนันต์ (Infinite Slope)

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ค่าปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤต (Critical cumulative rainfall, CCR) มาประยุกต์ใช้ในการเตือนภัยซึ่งสามารถทำได้ โดยการวิเคราะห์จากความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาของชั้นดิน (Soil thickness, H), ค่าความพรุน(Porosity, n), และระดับความอิ่มตัวในมวลดิน (Degree of saturation, S) ในหัวข้อ 2.5 วรรษ์ (2552) ได้แสดงให้เห็นว่าค่า  $API = nSH$  (สมการที่ 2.41) อย่างไรก็ตามการนำค่า  $API$  ไปใช้ในการเตือนภัย พบว่ามีอุปสรรคหลายประการ เช่น ปัญหาในการเลือกใช้ค่าตัวคูณลด ( $K$ ) ดังแสดงในสมการที่ 4.1 เนื่องจากค่า ( $K$ ) ขึ้นกับปัจจัยหลายประการ เช่น ความชื้นในอากาศ เป็นต้น ทำให้การใช้ค่า  $API$  มีความไม่แน่นอนไปด้วย

$$API_t = K \times API_{t-1} + P_t \quad (4.1)$$

- โดยที่  $API_t$  = ดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน ณ เวลาใดๆ ( $t$ ) (mm)  
 $API_{t-1}$  = ดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดินของเวลาก่อนหน้า ( $t-1$ ) (mm)  
 $K$  = ค่าตัวคูณลด ณ เวลาใดๆ  
 $P_t$  = ค่าปริมาณน้ำฝน ณ เวลาใดๆ ( $t$ ) (mm)

ในทางตรงกันข้ามค่าปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤต (CCR) สามารถตรวจวัดได้โดยง่าย ชาวบ้านสามารถตรวจวัดเองได้ เหมาะสำหรับใช้เป็นค่าปริมาณน้ำฝนที่ใช้ในการเตือนภัย อย่างไรก็ตามค่า CCR ไม่จำเป็นต้องเท่ากับค่า API เนื่องจากปริมาณน้ำฝนที่ตกหรือ CCR ไม่จำเป็นต้องมีค่าเท่ากับปริมาณน้ำในมวลดิน (API) ทั้งนี้ฝนที่ตกอาจกลายเป็น Runoff บ้าง ระบายไปบ้าง ในการศึกษาครั้งนี้เนื่องจากชั้นดินมีค่า  $K$  ค่อนข้างสูงจึงอนุมานได้ว่า ฝนที่ตกลงมาไหลเข้าไปดินทั้งหมด และ  $CCR \approx API$  หรือสามารถเขียนได้ว่า ดังแสดงในสมการที่ 4.2 (บรรพต, 2548)

$$CCR \approx API = nSH \quad (4.2)$$

โดยที่	$CCR$	= ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤต (Critical cumulative rainfall, mm)
	$API$	= ดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดิน (mm)
	$n$	= ความพรุนของดิน (Porosity)
	$S$	= ระดับความอิ่มตัวในมวลดิน (Degree of saturation, %)
	$H$	= ความหนาของชั้นดิน (m)

การวิเคราะห์ค่าปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตของลาดอนันต์ (CCR) งานวิจัยนี้ได้ใช้หลักการทฤษฎีกำลังของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ร่วมกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ด้วยหลักการลิมิตความสมดุล (Limit equilibrium) โดยพิจารณาลาดพิบัติเป็นแบบลาดอนันต์ (Infinite slope) โดยสามารถแบ่งลาดพิบัติได้เป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีระดับน้ำใต้อยู่ที่ระดับลึกมาก และกรณีระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ระดับผิวดินซึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.32–4.33 และดังสมการที่ 4.3–4.8 ตามลำดับ ซึ่งมีสมมติฐาน ดังนี้

- 1) การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินจะทำการวิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress analysis)
- 2) ปริมาณน้ำฝนที่ตกบนลาดดินกระจายสม่ำเสมอตลอดความยาวลาดดิน และไม่เกิดการสูญเสียด่าง
- 3) ลาดดินมีความชื้นสม่ำเสมอเท่ากันตลอดทั้งหน้าตัด
- 4) การแบ่งชั้นดินแบ่งออกเป็น 2 ชั้น คือ ชั้นดินที่มีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั้งหน้าตัด (Homogeneous material) และชั้นหินซึ่งมีความแข็งแรงมาก

จากสมการที่ 2.29;

$$F.S. = \frac{\text{Resisting force}}{\text{Driving force}} = \frac{F_R}{F_D} = \frac{F_R/A}{F_D/A} = \frac{\tau_f}{\tau}$$

แรงต้านการพิบัติ;

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' - S \tan \alpha \quad (4.3)$$

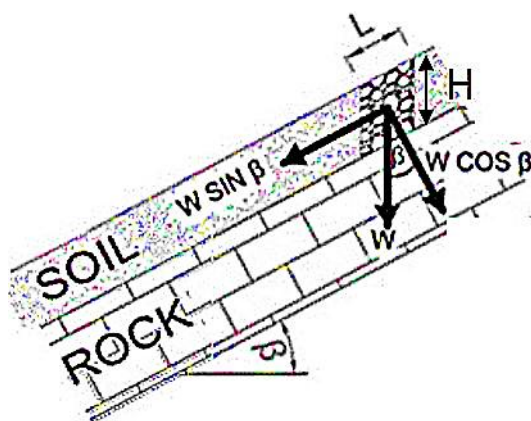
ความพรุน;

$$n = \frac{e}{1+e} \quad (4.4)$$

จะได้;

$$CCR = \frac{e}{1+e} SH \quad (4.5)$$

ก) กรณีระดับน้ำใต้ดินอยู่ระดับลึกมาก



รูปที่ 4.32 ภาพแสดงการวิเคราะห์ลาดอนันต์ (Infinite slope) กรณีระดับน้ำอยู่ใต้ดินอยู่ลึกมาก

จาก

$$\tau = \frac{W \sin \beta}{A} = \frac{\gamma H L \sin \beta}{L(1)} = \gamma H \sin \beta$$

$$F.S. = \frac{c' + \sigma' \tan \phi' - S \tan \alpha}{\gamma H \sin \beta}$$

$$F.S. = \frac{c' + \gamma H \cos \beta \tan \phi' - S \tan \alpha}{\gamma H \sin \beta}$$

$$F.S. = \frac{\cos \beta \tan \phi'}{\sin \beta} = \frac{c' - S \tan \alpha}{\gamma H \sin \beta}$$

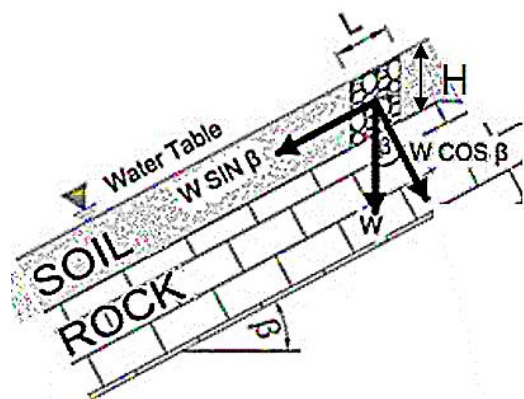
$$F.S. \sin \beta - \cos \beta \tan \phi' = \frac{c' - S \tan \alpha}{\gamma H}$$

$$H = \frac{c' - S \tan \alpha}{(F.S. \sin \beta - \cos \beta \tan \phi') \gamma}$$

จะได้

$$CCR = \frac{Se}{1+e} \left[ \frac{c' - S \tan \alpha}{\gamma_d \left(1 + \frac{e}{G_s}\right) (F.S. \sin \beta - \cos \beta \tan \phi')} \right] \quad (4.6)$$

ข) กรณีระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน



รูปที่ 4.33 ภาพแสดงการวิเคราะห์ห้ลาดอนันต์ (Infinite slope) กรณีระดับน้ำอยู่ผิวดิน

จาก

$$\tau = \frac{W \sin \beta}{A} = \frac{\gamma_{sat} H L \sin \beta}{L} = \gamma_{sat} H \sin \beta$$

$$F.S. = \frac{c' + \sigma' \tan \phi' - S \tan \alpha}{\gamma_{sat} H \sin \beta}$$

$$F.S. = \frac{c' + (\gamma_{sat} - \gamma_w) H \cos \beta \tan \phi' - S \tan \alpha}{\gamma_{sat} H \sin \beta}$$

$$F.S. \gamma_{sat} H \sin \beta = c' + \gamma_{sat} H \cos \beta \tan \phi' - \gamma_w H \cos \beta \tan \phi' - S \tan \alpha$$

$$c' - S \tan \alpha = H [F.S. \gamma_{sat} \sin \beta - \gamma_{sat} \cos \beta \tan \phi' + \gamma_w \cos \beta \tan \phi']$$

$$H = \frac{c' - S \tan \alpha}{F.S. \gamma_{sat} \sin \beta - \gamma_{sat} \cos \beta \tan \phi' + \gamma_w \cos \beta \tan \phi'}$$

จะได้

$$CCR = \frac{Se}{1+e} \left[ \frac{c' - S \tan \alpha}{F.S. \gamma_{sat} \sin \beta - \gamma_{sat} \cos \beta \tan \phi' + \gamma_w \cos \beta \tan \phi'} \right] \quad (4.7)$$

หรือ

$$CCR = \frac{Se}{1+e} \left[ \frac{c' - S \tan \alpha}{\gamma_d \left( 1 + \frac{e}{G_s} \right) [F.S. \sin \beta - \cos \beta \tan \phi'] + \gamma_w \cos \beta \tan \phi'} \right] \quad (4.8)$$

- โดยที่
- $CCR$  = ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤต (Critical cumulative rainfall, mm)
- $S$  = ระดับความอิ่มตัวในมวลดิน (Degree of saturation, 0 - 1)
- $H$  = ความหนาของชั้นดิน (m)
- $e$  = อัตราส่วนช่องว่างในมวลดิน (Void ratio)
- $G_s$  = ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลดิน (Specific gravity)
- $c'$  = แรงยึดเหนี่ยวของมวลดินประสิทธิผล (Effective cohesion)
- $\phi'$  = มุมเสียดทานภายในของดินประสิทธิผล (Effective internal friction angle)
- F.S. = ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of safety)
- $\gamma_{sat}$  = หน่วยน้ำหนักดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Wet unit weight of soil)
- $\gamma_d$  = หน่วยน้ำหนักดินแห้ง (Dry unit weight of soil)
- $\gamma_w$  = หน่วยน้ำหนักน้ำ (Unit weight of water)
- $\beta$  = มุมลาดดิน (Slope angle)
- $\alpha$  = มุมความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนและระดับความอิ่มตัวในมวลดิน (Constant parameter)

จากการพิจารณาลักษณะของลาดดินที่มีความยาว 193.17 เมตร และชั้นดินมีความหนาระหว่าง 1.0 -1.4 เมตร ซึ่งลักษณะของลาดดินดังกล่าวสามารถวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินได้ด้วยวิธีลาดอนันต์ (Infinite slope) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพิจารณาถึงกรณีระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน หรือดินในลาดดินอึดตัวด้วยน้ำทั้งหมดซึ่งเป็นกรณีวิกฤตที่สุดที่ทำให้ลาดดินพิบัติ (Worst case) โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤต (CCR), ค่าระดับความอึดตัวของน้ำในมวลดิน (S), ความพรุนของดิน (n), ความหนาของชั้นดิน (H) และอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 0.80, 1.00 และ 1.20 ทั้งนี้เมื่อนำสมการที่ 4.6 และสมการที่ 4.8 มาประยุกต์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ 4.9 การวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้มีเงื่อนไขที่สำคัญ คือ ปริมาณน้ำฝนที่ตกลงสู่ลาดดินจะไม่มี การสูญเสีย และคุณสมบัติกำลังรับแรงเฉือนของดินจะไม่พิจารณาปัจจัยจากแรงดันน้ำในมวลดิน

$$CCR = \frac{\left[ c' - \frac{FS \cdot G_s \cdot \gamma_w \cdot H \cdot \sin \beta}{1 + e} \right] + \left[ \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \right] \left[ \frac{G_s}{1 + e} \right] \gamma_w \cdot H \cdot \sin \beta}{FS \cdot \gamma_w \cdot \sin \beta - \left[ \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \right] \gamma_w \cdot \sin \beta + \left[ \frac{(1 + e) \tan \alpha}{e \cdot H} \right]} \quad (4.9)$$

ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตโดยใช้สมการที่ 4.9 และพิจารณาค่า F.S. = 0.8, 1.0 และ 1.2 สามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 4.8 เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.00 ซึ่งเป็นค่าปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตที่ทำให้ลาดดินเกิดการพิบัติ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 389.71 – 405.99 มิลลิเมตร ค่าดังกล่าวนี้มีค่าไม่แตกต่างจากผลการตรวจวัดปริมาณน้ำฝนจริงจากสถานีวัดน้ำฝน ตชด. ค่ายท่านมูข และผลการวิเคราะห์ที่ใช้หลักการไฟไนท์อีลิเมนต์ (FE) ในการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำในลาดดินร่วมกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

ค่าปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตที่ได้จากวิธีลาดอนันต์ด้วยหลักการลิมิตความสมดุลมีค่าสูงกว่าปริมาณน้ำฝนที่ตรวจวัดในช่วงระหว่างวันที่ 29 ธันวาคม 2554 ถึงวันที่ 2 มกราคม 2555 ซึ่งมีค่าปริมาณน้ำฝนสะสม 344.44 มิลลิเมตร และสูงกว่าค่าปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตที่ได้จากการการใช้หลักการไฟไนท์อีลิเมนต์ในการวิเคราะห์การไหลซึมของลาดดินร่วมกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่ 310 มิลลิเมตร สาเหตุเกิดเนื่องจากการวิเคราะห์ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตจากวิธีลาดอนันต์ด้วยหลักการลิมิตความสมดุลไม่พิจารณาแรงดันน้ำในมวลดินซึ่งเป็นปัจจัยหลักสำหรับการรับกำลังของดิน แต่การวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำในลาดดินด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ร่วมกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินมีการพิจารณาแรงดันน้ำในมวลดิน จึงทำให้ลาดดินสามารถรับกำลังเฉือนได้ต่ำกว่า และให้ค่าปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตสูงกว่า

ตารางที่ 4.8 ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤต บริเวณตำแหน่งต่างๆ ของลาดดินพิบัติ

ตำแหน่ง	มุมลาดดิน ( $\beta$ ) (Degree)	ความหนาของชั้นดิน ( $H$ ) (m)	ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤต(CCR, mm)		
			FS. = 0.80	FS. = 1.00	FS. = 1.20
ส่วนบน (TM)	31.22	0.9	398.93	389.71	380.58
ส่วนกลาง(MM)	27.83	1.4	421.41	405.99	390.80
ส่วนล่าง (BM)	24.44	1.0	398.82	382.04	371.35

#### 4.5 การพัฒนาค่าปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตเพื่อการเตือนภัย

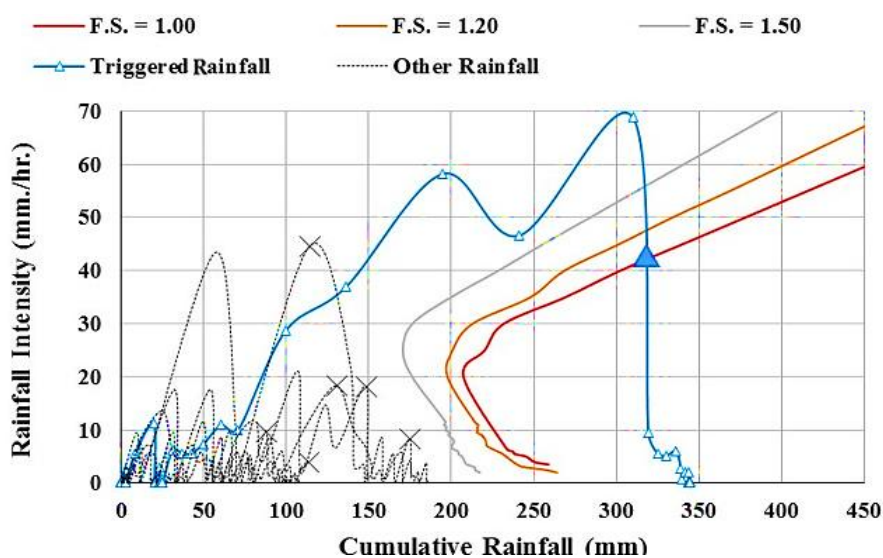
การพัฒนาค่าปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตเพื่อการเตือนภัยที่ได้จากในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำในลาดดินโดยใช้หลักการไฟไนต์อีลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม Geo Studio V2012 ฟังก์ชัน SEEP/W โดยกำหนดให้ปริมาณน้ำฝนที่ตกลงสู่ลาดดินเป็นรูปแบบฝนคงที่ และทำการวิเคราะห์การไหลซึมแบบแปรเปลี่ยนตามเวลา (Transient simulation) ร่วมกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินโดยวิธี Bishop's simplified method ด้วยฟังก์ชัน SLOPE/W โดยทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำฝนสะสมที่ทำให้ลาดดินพิบัติ (อัตราส่วนความปลอดภัย, F.S. = 1.00)

ผลจากการวิเคราะห์พบว่าเมื่อนำค่าปริมาณน้ำฝนที่ตกลงที่ และปริมาณน้ำฝนตกสะสมรายชั่วโมงที่ระดับค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) เท่ากับ 1.00, 1.20 และ 1.50 ดังแสดงในตารางที่ 4.9 ซึ่งได้ทำการปรับค่า (Varies) ความเข้มปริมาณน้ำฝนคงที่จาก 2.5 – 70.0 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง พบว่าค่าอัตราส่วนความปลอดภัยแปรผกผันตามปริมาณน้ำฝนสะสมรายชั่วโมง หรือกล่าวอีกนัยได้ว่า เมื่อมีปริมาณน้ำฝนสะสมสูงจะทำให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำลงและที่ความเข้มปริมาณน้ำฝนคงที่ต่ำกว่า 2.5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ลาดดินจะไม่พิบัติไม่ว่าจะใช้เวลามากเท่าไร เนื่องจากความเข้มปริมาณน้ำฝนที่ตกลงบนลาดดินนั้นไม่มากพอทำให้ลาดดินสามารถระบายน้ำได้ทัน

ผลจากตารางที่ 4.9 สามารถนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำฝนที่ตกลงที่ และปริมาณน้ำฝนตกสะสมรายชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.34 สามารถทำการตรวจสอบความถูกต้องพบว่าจากการวิเคราะห์ปริมาณน้ำฝนระหว่างวันที่ 29 ธันวาคม 2554 ถึงวันที่ 2 มกราคม 2555 (เส้นสีน้ำเงิน, Triggered Rainfall) ตัดกับเส้นกราฟปริมาณน้ำฝนสะสมที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.00 (เส้นสีแดง, F.S. = 1.00) มีความสอดคล้องกับเหตุการณ์ลาดดินพิบัติ ณ วันที่ 1 มกราคม 2555 เวลา 6:00 น. (เป็นข้อมูลที่ได้จากการสอบถามจากประชาชนในพื้นที่) ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่า 0.858 และเมื่อพิจารณาข้อมูลน้ำฝนในอดีต (เส้นประ, Other Rainfall) ยังพบว่าไม่มีเหตุการณ์ใดที่ทำให้เส้นกราฟน้ำฝนมีค่าสัมพันธ์กับเส้นกราฟน้ำฝนที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัย 1.00 (เส้นสีแดง F.S. = 1.00) ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลในอดีตที่ว่า ลาดดินดังกล่าวไม่



เคยเกิดลาดดินพิบัติมาก่อน (เป็นข้อมูลที่ได้จากการสอบถามจากประชาชนในพื้นที่) ดังนั้นกราฟปริมาณน้ำฝนสะสมรายชั่วโมงดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการเตือนภัยได้เมื่อมีเหตุการณ์ปริมาณน้ำฝนสะสมเข้าสู่เส้นอัตราส่วนความปลอดภัย 1.50 และ 1.00 ตามลำดับในอนาคตได้ แต่ทั้งนี้กราฟดังกล่าวสามารถใช้ได้เฉพาะบริเวณพื้นที่ศึกษาเท่านั้นอันเนื่องจากปัจจัยทางกายภาพ และคุณสมบัติทางวิศวกรรมของลาดดิน



รูปที่ 4.34 แผนภูมิ (Chart) ปริมาณน้ำฝนสะสมรายชั่วโมง สำหรับพื้นที่ศึกษา

ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้น และค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินต่ำสุด

Time (hr)	อัตราส่วนความปลอดภัยต่ำสุด (Minimum Factor of Safety, F.S)										
	2.5	5.0	10.0	15.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	Triggerd
0 (Initial)	7.424	7.437	7.562	7.426	7.419	7.417	7.417	7.417	7.417	7.417	7.425
3	7.584	7.584	7.497	7.453	7.405	4.146	4.146	4.146	4.146	4.146	7.608
6	7.530	7.495	7.055	4.391	1.675	<b>1.483</b>	<b>1.482</b>	<b>1.482</b>	<b>1.482</b>	<b>1.482</b>	7.608
9	7.425	7.171	4.915	2.890	<b>1.412</b>	<b>0.893</b>	<b>0.890</b>	<b>0.890</b>	<b>0.890</b>	<b>0.890</b>	7.608
12	7.235	5.173	2.708	1.866	<b>0.878</b>	0.830	0.830	0.830	0.830	0.830	7.608
15	6.952	4.109	2.180	<b>1.210</b>	0.826	0.818	0.818	0.818	0.818	0.818	7.608
18	6.567	3.545	1.731	<b>0.819</b>	0.816	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	7.608
21	5.768	3.066	1.410	0.816	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	7.608
24	4.760	2.637	<b>1.132</b>	0.816	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	7.603
27	4.314	2.303	<b>0.823</b>	0.816	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	7.595
30	3.981	2.077	0.818	0.816	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	7.584
33	3.629	1.909	0.816	0.816	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	7.573
36	3.324	1.765	0.816	0.816	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	7.561
39	3.055	1.627	0.816	0.816	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	7.549
42	2.825	1.508	0.816	0.816	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	7.538
45	2.628	1.301	0.817	0.816	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	7.526
48	2.476	1.332	0.816	0.816	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	7.507
51	2.347	1.172	0.818	0.816	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	7.430
54	2.229	0.916	0.817	0.816	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	7.269
57	2.136	0.827	0.817	0.816	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	7.101
60	2.035	0.823	0.817	0.816	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	6.932
63	1.956	0.829	0.816	0.816	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	6.763
66	1.884	0.931	0.816	0.816	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	6.600
69	1.819	<b>1.095</b>	0.816	0.816	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	6.366
72	1.758	<b>0.827</b>	0.816	0.816	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	5.621
75	1.701	0.820	0.816	0.816	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	2.761
78	1.644	0.821	0.817	0.816	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	0.858
81	1.590	0.821	0.817	0.816	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	0.929
84	1.546	0.821	0.816	0.816	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	1.130
87	1.495	0.821	0.817	0.816	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	1.431
90	1.422	0.821	0.817	0.816	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	1.486
93	1.386	0.821	0.818	0.816	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	1.496
96	1.338	0.820	0.818	0.816	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	1.492
99	1.222	0.823	0.816	0.816	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	0.815	1.503

หมายเหตุ\*\*\*RIT = ความเข้มข้นที่ตกลงสู่ลาดดิน (Rainfall Intensity, mm/hr)

#### 4.6 ผลการจัดทำแผนที่ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตโดยใช้ข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์

การจัดทำแผนที่ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตโดยใช้ข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์ งานวิจัยได้ใช้วิธีการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำในมวลดินร่วมกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยโปรแกรม Geo Studio V2012 โดยกำหนดให้ปริมาณน้ำฝนตกแบบคงที่ ซึ่งแบ่งเป็น 3 กรณี ได้แก่ ฝนตกหนักให้ความเข้มข้น 2.5 มิลลิเมตร/ชั่วโมงหรือ 55 มิลลิเมตร/วัน, ฝนตกหนักมากให้ความเข้มข้น 5.0 มิลลิเมตร/ชั่วโมงหรือ 110 มิลลิเมตร/วันและฝนตกหนักมากๆ ให้ความเข้มข้น 10.0 มิลลิเมตร/ชั่วโมงหรือ 240 มิลลิเมตร/วัน ค่าปริมาณน้ำฝนวิกฤต (CCR) จากการปรับค่า (Varies) ความหนาของชั้นดิน ( $H$ ) และมุมลาดดิน ( $\beta$ ) ต่างๆ ได้แสดงในภาคผนวก จ ซึ่งได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.10 – 4.12 ตามลำดับ

$$\text{กรณีฝนตกหนัก} \quad CCR = 138.60H - 6.46\beta + 269.66 \quad (4.10)$$

$$\text{กรณีฝนตกหนักมาก} \quad CCR = 134.58H - 4.96\beta + 208.32 \quad (4.11)$$

$$\text{กรณีฝนตกหนักมากๆ} \quad CCR = 122.11H - 4.96\beta + 222.52 \quad (4.12)$$

โดยที่	$CCR$	=	ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤต (mm)
	$H$	=	ความหนาของชั้นดิน (m)
	$\beta$	=	มุมลาดดิน (Degree)

จากข้อมูลการสำรวจพื้นที่ศึกษา บ้านโคกลูกหมี่ ตำบลคลองทราย อำเภอนาทวี จังหวัดสงขลา คิดเป็นพื้นที่ 24.6791 ตารางกิโลเมตร และมีความหนาของชั้นดินระหว่าง 1.00 -2.00 เมตร ณ บริเวณภูเขาที่มีการเกิดลาดดินพิบัติงานวิจัยได้จัดทำแผนที่ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤต (CCR) โดยกำหนดให้ชั้นดินมีความหนา 1.00 และ 2.00 เมตร และกำหนดให้แผนที่แสดงสีของชั้นปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤต ดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 การจำแนกชั้นสีของแผนที่ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤต (CCR)

น้ำฝนสะสมวิกฤต (CCR, mm)	สี
น้อยกว่า 200 มิลลิเมตร	สีแดง
200 – 250 มิลลิเมตร	สีชมพู
250 – 300 มิลลิเมตร	สีแสด
300 – 350 มิลลิเมตร	สีเหลือง
มากกว่า 350 มิลลิเมตร	สีเทา

ผลจากการจัดทำแผนที่ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.35 – 4.40 และสรุปได้ดังตารางที่ 4.11 – 4.12 พบว่ามุลาดดินมีผลต่อปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤต ซึ่งมุลาดดินที่มีค่ามากจะให้ค่าปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตต่ำ และมุลาดดินที่มีค่าน้อยจะให้ค่าปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตสูง อีกทั้งความหนาของลาดดินยังมีผลต่อค่าปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤต กล่าวคือ ความหนาของลาดดินที่มีค่ามากจะให้ค่าปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตสูงกว่าความหนาของลาดดินที่มีค่าน้อย ซึ่งชี้ให้เห็นได้ว่ากรณีฝนตกหนักมากๆ ความหนาของชั้นดิน 1.00 เมตรจะส่งผลให้เกิดพื้นที่วิกฤตสูงสุด (ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตน้อยสามารถทำให้ลาดดินพิบัติได้) และกรณีฝนตกหนัก ความหนาของชั้นดิน 2.00 เมตร ชี้ให้เห็นว่าพื้นที่วิกฤตจะเกิดในช่วงปริมาณฝนสะสมมากกว่า 350 มิลลิเมตร จึงจะทำให้ลาดดินพิบัติ ซึ่งผลดังกล่าวยังสอดคล้องกับกรณีศึกษาที่มีการพิบัติจริง ณ วันที่ 1 มกราคม 2555 ดังแสดงในข้อ 4.4 ดังนั้นแผนที่ดังกล่าวจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับเตือนภัยลาดดินพิบัติในพื้นที่ได้

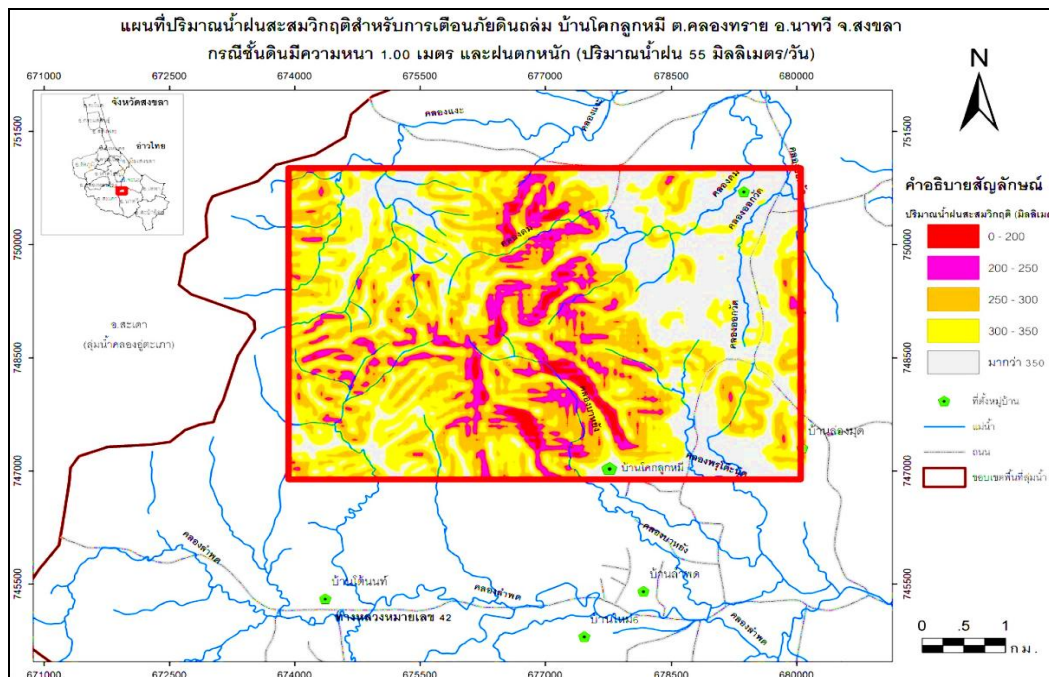
ตารางที่ 4.11 ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤต ของพื้นที่ศึกษาบ้าน โลกอุกหมี ตำบลคลองทราย อำเภอนาทวี จังหวัดสงขลา

ความหนาของลาดดิน (m)	ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤต (CCR, mm.)					
	ฝนตกหนัก		ฝนตกหนักมาก		ฝนตกหนักมากๆ	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
1.00	111.94	311.22	115.39	268.39	117.12	270.12
2.00	250.54	449.69	249.97	402.98	239.23	392.24

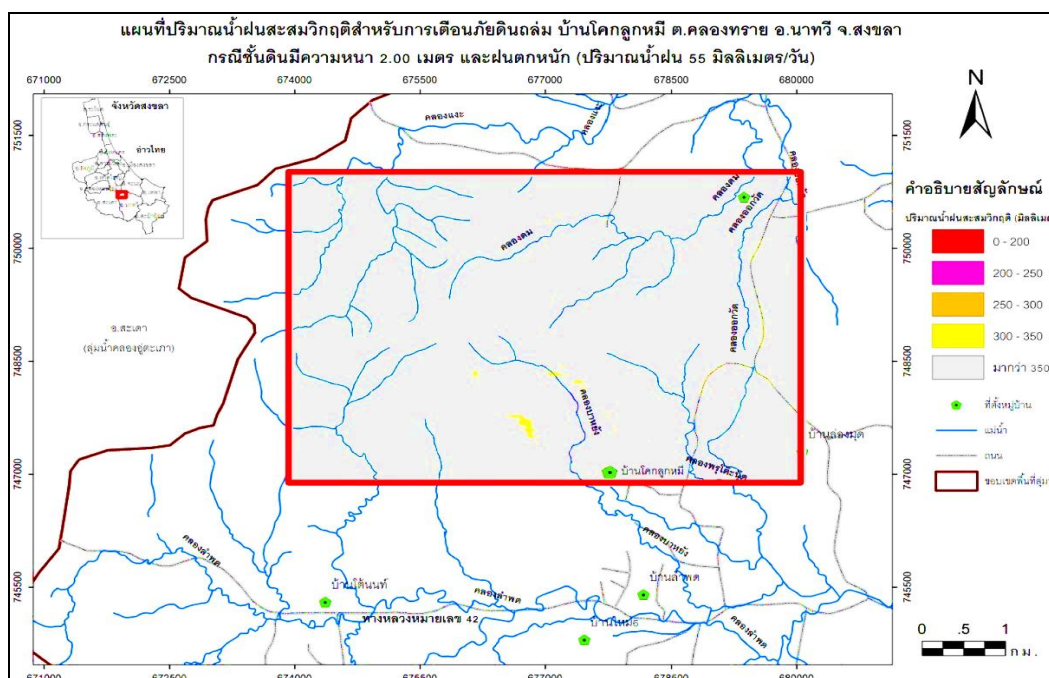
ตารางที่ 4.12 พื้นที่ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตของพื้นที่ศึกษาบ้าน โศกภูหมี ตำบลคลองทราย อำเภอนาทวี จังหวัดสงขลา

กรณี	CCR (mm)	พื้นที่ตามปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤต (ตารางกิโลเมตร)					รวม
		< 200	200 - 250	250 - 300	300 - 350	300 >	
ฝนตกหนัก และความหนาชั้นดิน 1.00 ม.		1.3277 (5.38%)	1.8040 (7.31%)	5.4269 (21.09%)	7.4408 (30.15%)	8.6797 (35.17%)	24.6791 (100%)
ฝนตกหนัก และความหนาชั้นดิน 2.00 ม.		- (0.00%)	- (0.00%)	0.0568 (0.23%)	0.0321 (0.13%)	24.5879 (99.63%)	24.6791 (100%)
ฝนตกหนักมาก และความหนาชั้นดิน 1.00 ม.		0.7354 (2.98%)	6.7177 (27.22%)	2.9738 (12.05%)	8.1268 (32.93%)	6.1254 (24.82%)	24.6791 (100%)
ฝนตกหนักมาก และความหนาชั้นดิน 2.00 ม.		- (0.00%)	- (0.00%)	0.6515 (2.64%)	1.9225 (7.79%)	1.2710 (5.15%)	24.6791 (100%)
ฝนตกหนักมากๆ และความหนาชั้นดิน 1.00 ม.		1.7670 (7.16%)	6.1871 (25.07%)	7.2754 (29.48%)	9.4497 (38.29%)	- (0.00%)	24.6791 (100%)
ฝนตกหนักมากๆ และความหนาชั้นดิน 2.00 ม.		0.7478 (3.03%)	1.0958 (4.44%)	5.6194 (22.77%)	8.0281 (32.53%)	9.1881 (37.23%)	24.6791 (100%)

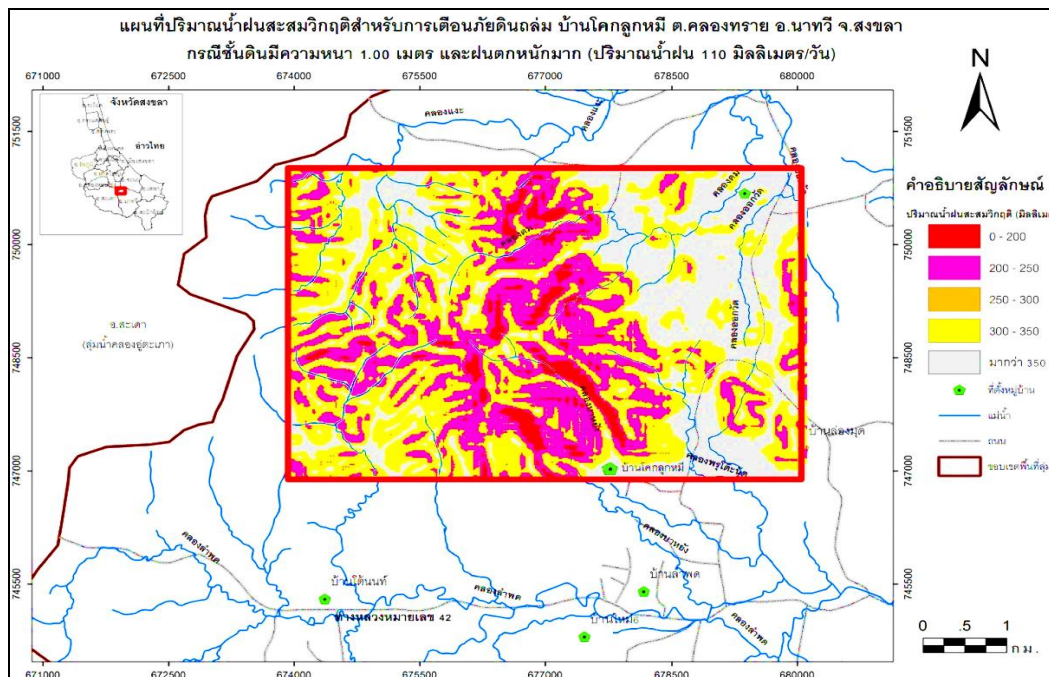
หมายเหตุ \*\*\*< 200 พื้นที่สีแดง, 200 - 250 พื้นที่สีชมพู, 250 - 300 พื้นที่สีส้ม, 300 - 350 พื้นที่สีเหลือง, 300 > พื้นที่เทา



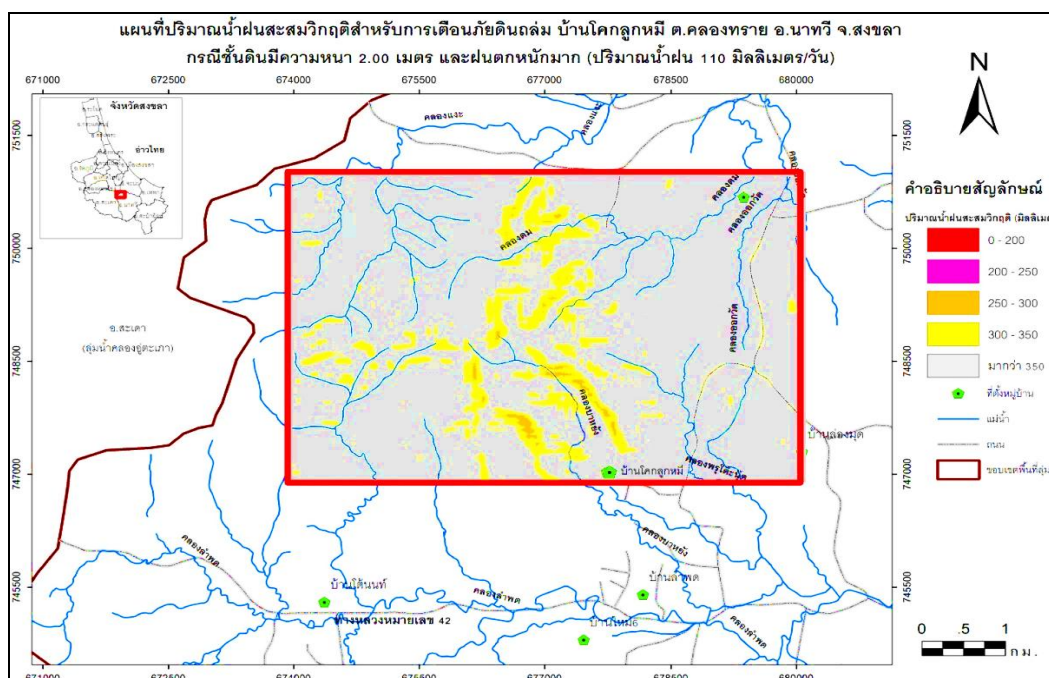
รูปที่ 4.35 ภาพแผนที่แสดงปริมาณน้ำฝนวิกฤติของพื้นที่ศึกษาบ้าน โลกลูกหมี่ ตำบลคลองทราย อำเภอนาทวี จังหวัดสงขลา กรณีฝนตกหนัก ความหนาชั้นดิน 1.00 เมตร



รูปที่ 4.36 ภาพแผนที่แสดงปริมาณน้ำฝนวิกฤติของพื้นที่ศึกษาบ้าน โลกลูกหมี่ ตำบลคลองทราย อำเภอนาทวี จังหวัดสงขลากรณีฝนตกหนัก ความหนาชั้นดิน 2.00 เมตร

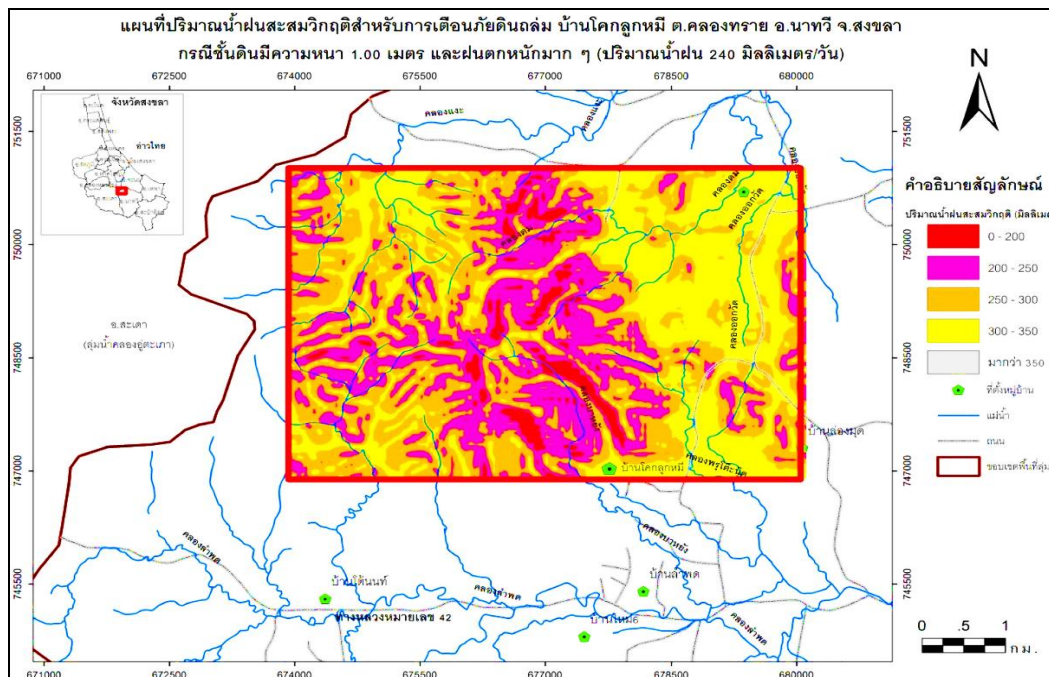


รูปที่ 4.37 ภาพแผนที่แสดงปริมาณน้ำฝนวิกฤติของพื้นที่ศึกษาบ้าน โลกภูหมี่ ตำบลคลองทราย อำเภอนาหว้า จังหวัดสงขลา กรณีฝนตกหนักมาก ความหนาชั้นดิน 1.00 เมตร

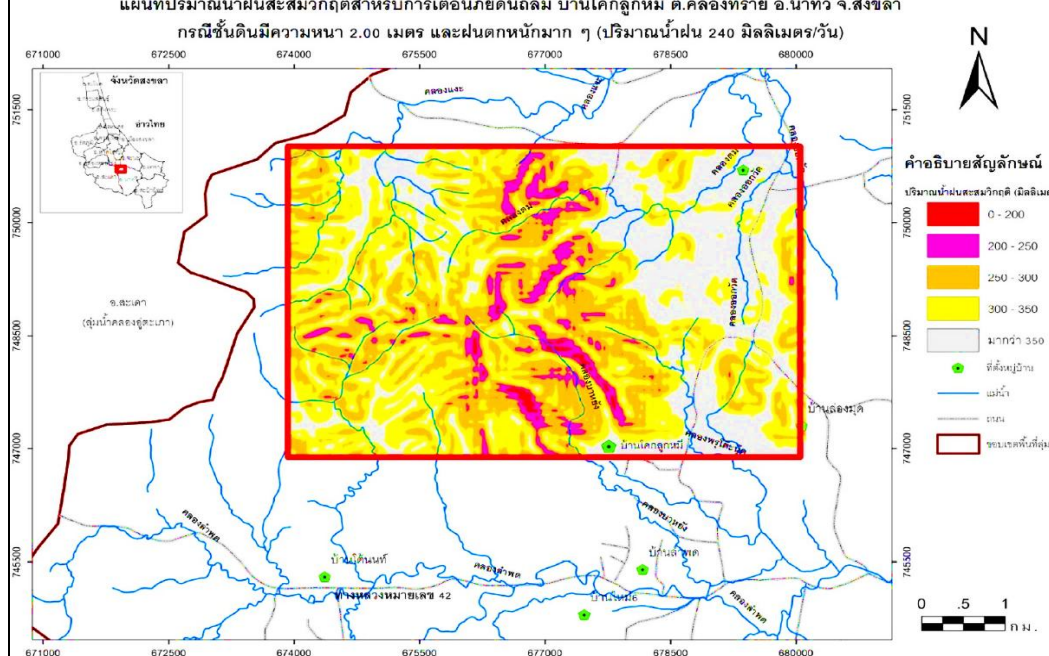


รูปที่ 4.38 ภาพแผนที่แสดงปริมาณน้ำฝนวิกฤติของพื้นที่ศึกษาบ้าน โลกภูหมี่ ตำบลคลองทราย อำเภอนาหว้า จังหวัดสงขลา กรณีฝนตกหนักมาก ความหนาชั้นดิน 2.00 เมตร





รูปที่ 4.39 ภาพแผนที่แสดงปริมาณน้ำฝนวิกฤติของพื้นที่ศึกษาบ้าน โกลูกหมี ตำบลคลองทราย อำเภอนาทวี จังหวัดสงขลา กรณีฝนตกหนักมากๆ ความหนาชั้นดิน 1.00 เมตร



รูปที่ 4.40 ภาพแผนที่แสดงปริมาณน้ำฝนวิกฤติของพื้นที่ศึกษาบ้าน โกลูกหมี ตำบลคลองทราย อำเภอนาทวี จังหวัดสงขลา กรณีฝนตกหนักมากๆ ความหนาชั้นดิน 2.00 เมตร



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาปริมาณน้ำฝนวิกฤตเพื่อการเตือนภัยลาดดินพิบัติ กรณีศึกษา ตำบลคลองทราย อำเภอนาทวี จังหวัดสงขลา ประกอบด้วย การศึกษาการพิบัติของลาดดินพิบัติบริเวณบ้าน โศกภูงหมี่ เนื่องจากปัจจัยจากปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤต รวมถึงการจัดทำแผนที่น้ำฝนสะสมวิกฤตของพื้นที่ศึกษา ซึ่งสามารถสรุปงานวิจัยได้ ดังนี้

1. ลาดดินที่เกิดการพิบัติเนื่องจากฝนตกหนักในวันที่ 1 มกราคม 2555 ซึ่งถูกใช้เป็นพื้นที่ศึกษา ตั้งอยู่บริเวณบ้าน โศกภูงหมี่ หมู่ที่ 6 ตำบลคลองทราย อำเภอนาทวี จังหวัดสงขลา พิกัดตำแหน่ง N 745169 E 671876 ถึง N 745167 E 672297 มีความลาดชันระหว่าง 24.10 - 32.01 องศา บริเวณส่วนบนของลาดดินพิบัติมีความสูงประมาณ 93.0 เมตร และบริเวณส่วนล่างของลาดดินพิบัติมีความสูงประมาณ 130.5 เมตร โดยพื้นที่ดังกล่าวเป็นสวนยางพารา และมีความหนาของชั้นดินค่อนข้างน้อย ประกอบกับมีลักษณะเป็นดินหลวมทำให้เอื้อต่อการพิบัติของลาดดิน
2. การพิบัติของลาดดินเนื่องจากปริมาณน้ำฝนที่ตกสะสมในพื้นที่ทำให้เกิดการพิบัติแบบลาดอนันต์ (Infimite Slope) สันนิษฐานว่าการพิบัติเริ่มจากบริเวณตำแหน่งลาดดินส่วนบน จากนั้นน้ำหนักดินรวมสะสมจากส่วนบนที่พิบัติกระทำต่อลาดดินส่วนล่างจนไม่สามารถรับน้ำหนักได้ทำให้เกิดการพิบัติต่อเนื่องลงมา
3. ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของดินภาคสนามบริเวณใกล้เคียงกับลาดพิบัติ แบ่งการทดสอบเป็น 3 บริเวณ ได้แก่ ส่วนบนของลาดดิน ส่วนกลางของลาดดิน และส่วนล่างของลาดดิน พบว่าทั้งลาดดินมีลักษณะชั้นดินใกล้เคียงกัน โดยมีลักษณะเป็นดินหลวมตั้งแต่ผิวดินจนถึงความลึกประมาณ 0.8 – 1.2 เมตร และเปลี่ยนเป็นชั้นหินผุซึ่งมีความหนาประมาณ 0.2 เมตร จึงเปลี่ยนชั้นหิน และพบว่าความหนาของชั้นดินที่เกิดการพิบัติมีค่าประมาณ 1.0 เมตร

4. ผลการทดสอบค่าการซึมน้ำของดินด้วยวิธี Double – Ring infiltrometer test ได้ทำการทดสอบ ณ บริเวณส่วนบนของลาดดินที่เกิดการพิบัติมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในมวลดิน  $1.9 \times 10^{-3}$  เซนติเมตรต่อวินาที อยู่ในช่วงของสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในมวลดินประเภทของทรายละเอียด หรือตะกอนทราย ซึ่งสอดคล้องกับผลจำแนกชนิดของดินลาดพิบัติ

5. ผลการจำแนกของชนิดของดินบริเวณลาดดินพิบัติด้วยวิธี Unified Soil Classification System (USCS) พบว่าดินบริเวณส่วนบนของลาดดินสามารถจำแนกว่าตั้งแต่ผิวดินถึงระดับความลึก 0.2 เมตร มีลักษณะเป็นทรายปนดินเหนียว (SC) จากนั้นลักษณะดินจะมีลักษณะเป็นทรายปนตะกอนทราย (SM) บริเวณส่วนกลางของลาดดินจำแนกได้เป็นดินเหนียวมีพิถัคความเหลวต่ำตะกอนทราย มีพิถัคความเหลวต่ำ (CL – ML) และบริเวณส่วนล่างของลาดดินจำแนกได้เป็นทรายปนตะกอนทราย (SM)

6. ผลการทดสอบดินทางกายภาพของลาดดินพิบัติพบว่า ดินทั้ง 3 บริเวณ มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.63 มีเม็ดดินผ่านตะแกรง #200 อยู่ในช่วงระหว่าง 36.33 % - 54.77 % ค่าพิถัคเหลวช่วงระหว่าง 16.27% – 26.50 % ค่าพิถัคพลาสติกช่วงระหว่าง 12.63 % – 19.41 % และค่าดัชนีความเป็นพลาสติกช่วงระหว่าง 0.59 – 7.09

7. ผลการทดสอบการหาค่าลึงรับแรงเฉือนด้วยวิธีการเฉือนตรง (Multi – Stage direct shear test, MSDT) ที่ระดับความอิมตัวด้วยน้ำต่างๆ พบว่าตัวอย่างดินที่ได้จากการทดสอบทั้ง 3 บริเวณ ได้แก่ บริเวณส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่างของลาดดินพิบัติ เมื่อดินอิมตัวด้วยน้ำจะทำให้ค่า  $c' = 2.49$  kPa.,  $\phi' = 28.08$  องศา  $c' = 3.37$  kPa.,  $\phi' = 29.06$  องศา และ  $c' = 6.14$  kPa.,  $\phi' = 30.05$  องศา ตามลำดับ

8. ผลการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤต (Critical cumulative rainfall, CCR) ด้วยการพิจารณาเสถียรภาพของลาดดินแบบลาดอนันต์ โดยใช้หลักการทฤษฎีกำลังของดินไม่อิมตัวด้วยน้ำ ร่วมกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ด้วยหลักการลิมิตความสมดุล พบว่าค่าปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตที่วิเคราะห์ได้จะมีค่าระหว่าง 382.04 – 405.99 มิลลิเมตร ซึ่งสูงกว่าค่าปริมาณน้ำฝนสะสมที่ตกได้ในพื้นที่จริงระหว่างวันที่ 29 ธันวาคม 2554 ถึงวันที่ 2 มกราคม 2555 ซึ่งมีค่า 344.44 มิลลิเมตร

9. ผลการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤต (Critical cumulative rainfall, CCR) โดยการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำฝนด้วยหลักการไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite element, FE) และวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินโดยวิธี Bishop's simplified method พบว่ามีค่าปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤต 310 มิลลิเมตร ทำให้ลาดดินพิบัติวันที่ 1 มกราคม 2555 เวลา 6:00 น. ซึ่งสอดคล้องกับเหตุการณ์จริงที่เกิดการพิบัติ

10. การจัดทำแผนที่ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาพื้นที่ตำบลคลองทราย อำเภอนาทวี จังหวัดสงขลา คิดเป็นพื้นที่ 24.6791 ตารางกิโลเมตร โดยแบ่งการพิจารณาเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ กรณีฝนตกหนัก (2.5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง), กรณีฝนตกหนักมาก (5.0 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง) และกรณีฝนตกหนักมากๆ (10.0 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง) ซึ่งแบ่งความของชั้นดินเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีชั้นดินมีความหนา 1.00 เมตร และกรณีชั้นดินมีความหนา 2.00 เมตร สำหรับมุมลาดเอียงต่างๆ พบว่า กรณีฝนตกหนัก (2.5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง), ลาดดินที่มีความหนา 1.00 เมตรจะให้ช่วงปริมาณน้ำฝนวิกฤตระหว่าง 111.94 – 311.22 มิลลิเมตร และลาดดินที่มีความหนา 2.00 เมตรจะให้ช่วงปริมาณน้ำฝนวิกฤตระหว่าง 250.54 – 449.69 มิลลิเมตร, กรณีฝนตกหนักมาก (5.0 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง) ลาดดินที่มีความหนา 1.00 เมตรจะให้ช่วงปริมาณน้ำฝนวิกฤตระหว่าง 115.39 – 268.39 มิลลิเมตร และลาดดินที่มีความหนา 2.00 เมตรจะให้ช่วงปริมาณน้ำฝนวิกฤตระหว่าง 249.97 – 402.98 มิลลิเมตร, กรณีฝนตกหนักมากๆ (10.0 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง) ลาดดินที่มีความหนา 1.00 เมตรจะให้ช่วงปริมาณน้ำฝนวิกฤตระหว่าง 117.12 – 270.12 มิลลิเมตร และลาดดินที่มีความหนา 2.00 เมตรจะให้ช่วงปริมาณน้ำฝนวิกฤตระหว่าง 239.23 – 392.24 มิลลิเมตร

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการทดสอบตัวอย่างดินด้วยวิธีเนียนตรง (Multi – Stage direct shear test, MSDT) ในงานวิจัยนี้ได้ใช้หน่วยน้ำหนักกดทับ 5 หน่วยน้ำหนัก (Load) ได้แก่  $\sigma'_{vo}$ ,  $2\sigma'_{vo}$ ,  $4\sigma'_{vo}$ ,  $8\sigma'_{vo}$  และ  $16\sigma'_{vo}$  ซึ่งผลการทดสอบให้ Failure envelop ที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรงและได้ค่า  $R^2 > 0.9$  ซึ่งมีค่าความน่าเชื่อถือที่สูงมาก ดังนั้นเพื่อเป็นการลดขั้นตอน และเวลาของการทดสอบ MSDT ในการทดสอบดินกลุ่มดังกล่าวจึงสามารถทดสอบโดยใช้หน่วยน้ำหนักกดทับเพียง 3 หน่วยน้ำหนักก็เพียงพอได้ ซึ่งยังให้ค่า  $R^2 > 0.9$

2. ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเมื่อพิจารณากำลังรับน้ำหนักแรงเฉือนของดิน พบว่าสมการ  $\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \left[ \left( \frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan \phi' \right]$  ซึ่งเสนอโดย Vanapali et al. (1996) จะให้ผลที่สอดคล้องกับการเกิดการพังทลายจริงมากกว่าสมการ  $\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b$  ซึ่งเสนอโดย Fredlund (1993) โดยสมมติฐานของ Fredlund (1993) ที่กล่าวว่า  $\phi^b$  มีค่าคงที่นั้นไม่สอดคล้องกับผลการศึกษาในครั้งนี้

3. สำหรับการศึกษารั้ววิเคราะห์การไหลซึมของน้ำในมวลดินต้องกำหนดขอบเขตระดับน้ำใต้ดินตอนเริ่มต้นด้วยว่า “ระดับน้ำใต้ดินอยู่ในระดับที่ลึกเพียงพอที่ให้ค่า  $\theta$  ตามธรรมชาติ” และการพังทลายของลาดดินเกิดจากปริมาณน้ำฝนสะสมที่ตกลงสู่ลาดดิน

## บรรณานุกรม

- กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย. (2555). **ข้อมูลเหตุการณ์ดินถล่มในจังหวัดสงขลา.** กรุงเทพมหานคร: กระทรวงมหาดไทย.
- กรมทรัพยากรธรณี. (2528). **ข้อมูลลักษณะทางธรณีวิทยาในพื้นที่จังหวัดสงขลา.** กรุงเทพมหานคร: กระทรวงทรัพยากร ธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- กรมทรัพยากรธรณี. (2550). **แผนที่ธรณีวิทยาจังหวัดสงขลา.** กรุงเทพมหานคร: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- กรมทรัพยากรธรณี. (2552). **บันทึกเหตุการณ์ดินถล่มและความเสียหายที่เกิดขึ้นระหว่างปี พ.ศ. 2531-2554.** กรุงเทพมหานคร: กระทรวงทรัพยากร ธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- กรมทรัพยากรธรณี. (2554). **ข้อมูลพื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่มในพื้นที่จังหวัดสงขลา.** กรุงเทพมหานคร: กระทรวงทรัพยากร ธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- กรมทรัพยากรธรณี. (2554). **คู่มือป้องกันธรณีพิบัติภัยจากดินถล่มและบัญชีรายชื่อหมู่บ้านเสี่ยงภัยดินถล่มภาคใต้.** กรุงเทพมหานคร: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- กรมอุตุนิยมวิทยา. (2550). **ข้อมูลภูมิอากาศจังหวัดสงขลา.** [Online] Available: [http://www.marine.tmd.go.th/thai/tus\\_type/songkhla.html](http://www.marine.tmd.go.th/thai/tus_type/songkhla.html). [15 ธันวาคม 2556].
- กรมอุตุนิยมวิทยา. (2555). **ข้อมูลน้ำฝนของพื้นที่จังหวัดสงขลา.**
- ชินะวัฒน์ มุกตพันธุ์. (2545). **ปฏิพิทลศาสตร์.** พิมพ์ครั้งที่ 8. หน่วยสารบรรณ, งานบริหารและธุรการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ชนิด เถลิมนานนท์ และชนันท์ ชูบุอุปการ. (2557). **การประเมินพื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่มและพัฒนาระบบเตือนภัย พื้นที่จังหวัดสงขลา.** โครงการความร่วมมือเพื่อการพัฒนาเชิงพื้นที่จังหวัดสงขลาแบบสร้างสรรค์. สงขลา: สำนักงานประสานงานวิจัยอุตสาหกรรมและชุมชน สำนักงานวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- นงลักษณ์ ไทโรเจียมอารีย์. (2547). **เสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่ลุ่มน้ำก้อโดยใช้คุณสมบัติทางวิศวกรรม.** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- บรรพต กุลสุวรรณ. (2548). **การศึกษาพฤติกรรมการพิบัติของลาดดินในพื้นที่ต้นน้ำของลุ่มน้ำย่อยแม่น้ำจันทบุรี.** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- พงษ์ศักดิ์ วิทวัสชุติกุล และวารินทร์ จิระสุขทวีกุล. (2548). การหาค่า **Antecedent Precipitation Index (API)** เพื่อการเตือนอุทกภัยและดินถล่ม. สถานีวิจัยลุ่มน้ำห้วยหินลาด. เอกสารเผยแพร่ที่ 3/2548.
- วรการ ไม้เรียง. (2542). **วิศวกรรมเขื่อนดิน**. ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและโครงการซ่อมแซมและปรับปรุงเขื่อนมูลบน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร.
- วรการ ไม้เรียง และบรรบต กุลสุวรรณ. (2542). **สถานการณ์และปัญหาแผ่นดินถล่มในประเทศไทย**. EIT-JAPAN-AIT Joint Workshop 2005, Geo-Risk Engineering and Management. กรุงเทพมหานคร.
- วรวัชร ตอวิวัฒน์. (2552). **แบบจำลอง API วิฤติเพื่อการเตือนภัยดินถล่มสำหรับดินที่เกิดจากการสลายของหินผา ที่ตั้งในประเทศไทย**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วิศิษฐ์ อยู่ยงวัฒนา. (2540). **ปฐพีกลศาสตร์**. ปทุมธานี: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรังสิต.
- ศูนย์ข้อมูลประเทศไทย. (2554). **ข้อมูลทั่วไปของตำบลคลองทราย อำเภอนาทวี จังหวัดสงขลา**. [Online] Available: <http://songkhla.kapook.com>. [10 ธันวาคม 2556].
- ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานรากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. (2555). **งานศึกษาพัฒนาระบบแบบจำลองเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการเฝ้าระวังและแจ้งเตือนภัยพื้นที่ภาคใต้และภาคเหนือ**. ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก. (2556). **ข้อมูลปริมาณน้ำฝนที่สถานี ตชด. ค่ายท่านมูก ต.เขามิเกียรติ อ.สะเดา จ.สงขลา**. กรมอุตุนิยมวิทยา.
- ศิวศักดิ์ วานิชรักษ์. (2553). **รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการพัฒนาลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลาอย่างยั่งยืน**. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สถานีวิจัยสารสนเทศภูมิศาสตร์. (2553). **แผนที่แสดงปริมาณน้ำฝนรวมตลอดปี เฉลี่ย 30 ปี ในพื้นที่ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา**. คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สถาพร คูวิจิตรจารุ. (2541). **ทดลองปฐพีกลศาสตร์**. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ไลบรารีนายพัลลภซึ่ง.
- สถาพร คูวิจิตรจารุ. (2545). **ปฐพีกลศาสตร์**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ไลบรารีนายพัลลภซึ่ง.
- สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์. (2550). **การเตือนภัยดินถล่มโดยอาศัยค่าปริมาณน้ำฝน**. การประชุมวิชาการเรื่อง ภัยพิบัติที่กำลังรุนแรงขึ้น. 12 มิถุนายน 2550. สถาบันพัฒนากรมชลประทาน.

- สุทธิศักดิ์ ศรีถัมภ์, บรรพต กุลสุวรรณ และวรวีร์ ตอวิวัฒน์. (2550). การวิเคราะห์ค่า API วิกฤติ เพื่อใช้เตือนภัยดินถล่มจากฝนตกหนัก. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12. 2-4 พฤษภาคม 2550. โรงแรมอมรินทร์ลากูน จังหวัดพิษณุโลก.
- สุทธิศักดิ์ ศรีถัมภ์, วรวีร์ ตอวิวัฒน์ และบรรพต กุลสุวรรณ. (2550). การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเพื่อสนับสนุนการเตือนภัยดินถล่มจากฝนตกหนัก. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12. 2-4 พฤษภาคม 2550. โรงแรมอมรินทร์ลากูน จังหวัดพิษณุโลก.
- โสภณ หะวานนท์, รักษาติ สุขสำราญ และมงคล ไช้มุกด์. (2538). การศึกษาลักษณะโครงสร้างและผลผลิตของป่าชายเลนที่ผ่านการทำไม้ในท้องที่จังหวัดระนอง. กลุ่มพัฒนาป่าชายเลนและป่าพรุ. ส่วนวิจัยเศรษฐกิจและพัฒนากิจการจัดการป่าไม้. สำนักวิชาการป่าไม้. กรมป่าไม้.
- สมใจ เย็นสบาย และวันเพ็ญ อ่วมใจบุญ. (2551). การเฝ้าระวังดินถล่ม. การประชุมวิชาการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 1. 3-5 กันยายน 2551. ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทคบางนา กรุงเทพมหานคร. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- สุรฉัตร สัมพันธ์ราษฎร์. (2540). วิศวกรรมปลูฟิ. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. กรุงเทพมหานคร.
- Aitchison, G.D. (1965). **Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils Beneath Cover Areas**. Statement of the Review Panel, Engineering Concepts of Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils. Butterworth, London, pp. 7-22.
- American Society for Testing Materials. (1989). Standard Method for Field Vane Shear Test in Cohesive Soil (D2573-72 (1978)). **Annual Book of Standard**, 4.08, ASTM, Philadelphia, 308-310.
- Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussiere, B., and Chapuis, R.P. (2003). A model to predict the water retention curve from Basic geotechnical properties. **Canadian Geotechnical Journal**, 40(6), 1104-1122.
- Biot, M.A., (1941). General theory of three-dimensional consolidation. **Journal of Applied Physics**, 12, 155-164.
- Bishop, A.W. (1959). The Principal of Effective Stress. Lecture delivered in Oslo, Norway, in 1955; **Published in Teknisk Ukeblad**, 106, No 39, 859-863.
- Brooks, R. H. and Corey, A. T., (1964). **Hydraulic properties of porous media**. Hydrology Paper Colorado State University Fort Collins Colorado, No 3.

- Chau, K.T., Sze, Y.L., Fung, M.K. Wong, W.Y., Fong, E.L. and Chan, L.C.P. (2004). Landslide hazard analysis for Hong Kong using landslide inventory and GIS. The Hong Kong Polytechnic University. **China. Computer and Geosciences**, 30, 429-443
- Chien-Yuan C., et. Al., (2005). Analysis of time-varying rainfall infiltration induced landslide. **Environmental Geology**, Vol. 48, pp 466-479.
- Coleman J.D. (1962). Stress-Strain relations for partially saturated soils. **Géotechnique**, 12(4), 348-350.
- Collin, A., (1846). **Experimental Investigation on Sliding of Clay Slope**. Paris. (Translated (1956). by W.R. Schriver, Univ. of Toronto Press).
- Croney D., Coleman J.D. and Bridge P.M. (1952). **The suction of moisture held in soils and other porous materials**. Tech. Paper, Road Research Board 24, London.
- Darcy, H., (1857). **Research Experimental Relative an Movement de l' Eaudans les Tuyaux**. Mallet-Bachelier, Paris.
- Das, B.M., (1994). **Principles of Geotechnical Engineering**. Southern Illinois University at Carbondale, USA.
- Edlefsen, N.E. and A.B.C. Anderson. (1943). **Thermodynamics of soil moisture**. Hilgardia. 298 p.
- EGAT. (1980). **Subsoil Investigation for 230 KV Banpong 2 – Srinagarins**. Transmission Line.
- Fausto G., et al., (2004). Landslides triggered by the 23 November 2000 rainfall event in the Imperia Province. Western Liguria, Italy. **Engineering geology**, 73, 229-245.
- Fleming, H.D. (1952). Undrained triaxial compression tests on a decomposed pyllite. In First Australia New Zealand Conf. Soil Mech. And Found. **Eng. Australia**, 112-122.
- Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1993). **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**. John Wiley & Son. New York, 515 p.
- Fredlund, D.G. and Xing, A. (1994). Equations for the soil water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, 31, 521-532.
- Goodman, R.E., Shi, Gen-Hua., and Boyle, W. (1982). **Calculation of support for hard, jointed rock using the keyblock principal**. Proc. 23rd U.S. Symposium on Rock Mechanics (AIME/SME, New York), 347-373.



- Green, W.H., and Ampt, G.A. (1911). Studies on soil physics. I. The flow of air and water through soils. **J. Agric. Sci**, 4, 1-24
- Hillel, D. (1982). **Introduction to soil physics**. Academic Press, New York.
- Highland, L.M. and Bobrowsky, Peter. (2008). **The landslide handbook-A guide to understanding landslides: Reston**. Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 p.
- Holtz, R.D., and Kovacs, W.D. (1981). **An introduction to geotechnical engineering**. Prentice Hall, NJ, pp. 733.
- Indraratna, B., Ngo, N.T., and Rujikiatkamjorn, C., (2011). Behavior of geogrid-reinforced ballast under various levels of fouling. **Geotextiles and Geomembranes**, 29, 311-322
- Janssen, D.J. and B.J. Dempsey. (1980). **Soil-Moisture Properties of Subgrade Soils**. presented at the 60<sup>th</sup> Annu. Transportation Res. Board Meeting, Washington, DC.
- Kenny, T.C. and Watson, G.H., (1961). Multiple-Stage Triaxial Test for Determining  $c'$  and  $\phi'$  of Saturated Soils. in **Proceedings of the Fifth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dunod, Paris**, pp. 191-195.
- Linsley, R.K., Kohler, M.A. & Paulhus, J.L.H. (1949). **Applied Hydrology**. First Edition, McGraw-Hill Book company, Inc., New York, 689 p.
- Lumb, P., (1964). **The Multi-Stage Triaxial Test on Undisturbed Soils**. Civil Engineering Public Work Review, 59 p.
- Meyerhof, G.G. (1956). Penetration Tests and Bearing Capacity of Cohesionless Soils. **ASCE**, 82, 1-19.
- Okada, K., Sugiyama, T., Muraishi, H. and Noguchi, T. (1992). Statistical estimating method of railway embankment damage due to rainfall. In **Proceeding of JSCE**, No. 448/III-19, pp. 25-34.
- Philip, B.B. and C.H. Wayne. (1988). **Hydrology and Floodplain Analysis**. Addison-Wesley publishing company, United State of America.
- Sillers, W.S., Fredlund, D.G., and Zakerzadeh, N. (2001). Mathematical attributes of some soil-water characteristic models. **Geotech. Geologic. Eng.**, 19, 243-283.
- Taylor, D.W. (1950). A triaxial shear investigation on a partially saturated soil. In **ASTM. Spec. Tech. Pub**, 106, 180-191.

- Terzaghi, K. (1925). **Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage**. Franz Deuticke, Leipzig-Vienna.
- Terzaghi, K. and R. B. Peck. (1967). **Soil Mechanics in Engineering Practice**. John Wiley & Sons. New York, 729 p.
- Van Genuchten, M. Th., (1980). A closed-form equation for prediction the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 44, 92-898.
- Vanapalli, S.K., Fredlund D.G., Pufahl, D.E. and Clifton, A.W. (1996). Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. **Canadian Geotechnical Journal**, 33, 79-392.
- Varnes, D. J. (1975). Slope movements in the western United States. in **Mass Wasting: Geoabstracts, Norwich**, 1-17.
- Zaruba, Q., and Menzl, V. (1982). **Landslide and their Control**. Elsevier, Amsterdam.

#### เอกสารอ้างอิงอิเล็กทรอนิกส์

เข้าถึงได้จาก : <https://universe-review.ca>

เข้าถึงได้จาก : <https://interpore.org>

เข้าถึงได้จาก : <http://www.denichsoiltest.com>

เข้าถึงได้จาก : <http://maps.google.com>

เข้าถึงได้จาก : <http://www.FAO.org>

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก  
ผลการทดสอบการหาค่ากำลังรับน้ำหนักของดินในสนามด้วยวิธีหยั่งเบา  
**Kunzelstab Penetration Test (KPT)**

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของดินในสนามด้วยวิธีหั้งเบา

Station.	Boring No.	Depth (m.)	Blow Count (N)	Q <sub>all</sub> (for Sand) (ksc.)	Q <sub>all</sub> (for Clay) (ksc.)
Top	TM 1	0.0	-	*	*
		0.2			
		0.2	2	0.00	1.99
		0.4			
		0.4	1	0.00	1.25
		0.6			
		0.6	5	0.92	3.81
		0.8			
		0.8	16	7.96	10.85
		1.0			
		1.0	53	31.64	34.53
		1.2			
	TM 2	0.0	-	*	*
		0.2			
		0.2	3	0.00	2.53
		0.4			
		0.4	3	0.00	2.53
		0.6			
		0.6	18	9.24	12.13
		0.8			
		0.8	37	21.40	24.29
		1.0			
	TM 3	0.0	-	*	*
		0.2			
		0.2	3	0.00	2.53
		0.4			
		0.4	3	0.00	2.53
		0.6			

หมายเหตุ \* คือ ฝิวดิน หรือหน้าดินซึ่งมีอินทรีย์วัตถุสูง (Loam) ที่ถูกรบกวนสูงจึงไม่นำมาใช้ในการพิจารณา

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของดินในสนามด้วยวิธีหยั่งเบา

Station.	Boring No.	Depth (m.)	Blow Count (N)	Q <sub>all</sub> (for Sand) (ksc.)	Q <sub>all</sub> (for Clay) (ksc.)	
Top	TM 1	0.6	7	2.20	5.09	
		0.8				
		0.8	38	22.04	24.93	
		1.0				
Middle	MM 1	0.0	-	*	*	
		0.2				
		0.2	5	0.92	3.81	
		0.4				
		0.4	5	0.92	3.81	
		0.6				
		0.6	4	0.28	3.17	
		0.8				
		0.8	8	2.84	5.73	
		1.0				
		1.0	14	6.68	9.57	
		1.2				
		1.2	10	4.12	7.01	
		1.4				
		1.4	18	9.24	12.13	
		1.6				
	1.6	20	10.52	13.41		
	1.8					
		MM 2	0.0	-	*	*
			0.2			
			0.2	3	0.00	2.53
			0.4			
			0.4	4	0.28	3.17
			0.6			

หมายเหตุ \* คือ ฝิวดิน หรือหน้าดินซึ่งมีอินทรีย์วัตถุสูง (Loam) ที่ถูกรบกวนสูงจึงไม่นำมาใช้ในการพิจารณา

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของดินในสนามด้วยวิธีหยั่งเบา

Station.	Boring No.	Depth (m.)	Blow Count (N)	Q <sub>all</sub> (for Sand) (ksc.)	Q <sub>all</sub> (for Clay) (ksc.)
Middle	MM 2	0.6	5	0.92	3.81
		0.8			
		0.8	6	1.56	4.45
		1.0			
		1.0	15	7.32	10.21
		1.2			
		1.2	14	6.68	9.57
		1.4			
		1.4	21	11.16	14.05
		1.6			
Bottom	BM 1	0.0	-	*	*
		0.2	7	2.20	5.09
		0.2			
		0.4	5	0.92	3.81
		0.4			
		0.6	4	0.28	3.17
		0.6			
		0.8	7	2.20	5.09
		0.8			
		1.0	19	9.88	12.77
		1.0			
		1.2			

หมายเหตุ \* คือ ฝิวดิน หรือหน้าดินซึ่งมีอินทรีย์วัตถุสูง (Loam) ที่ถูกรบกวนสูงจึงไม่นำมาใช้ในการพิจารณา

**ภาคผนวก ข**

**ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านดินด้วยวิธี Double-Ring Infiltrometer Test**



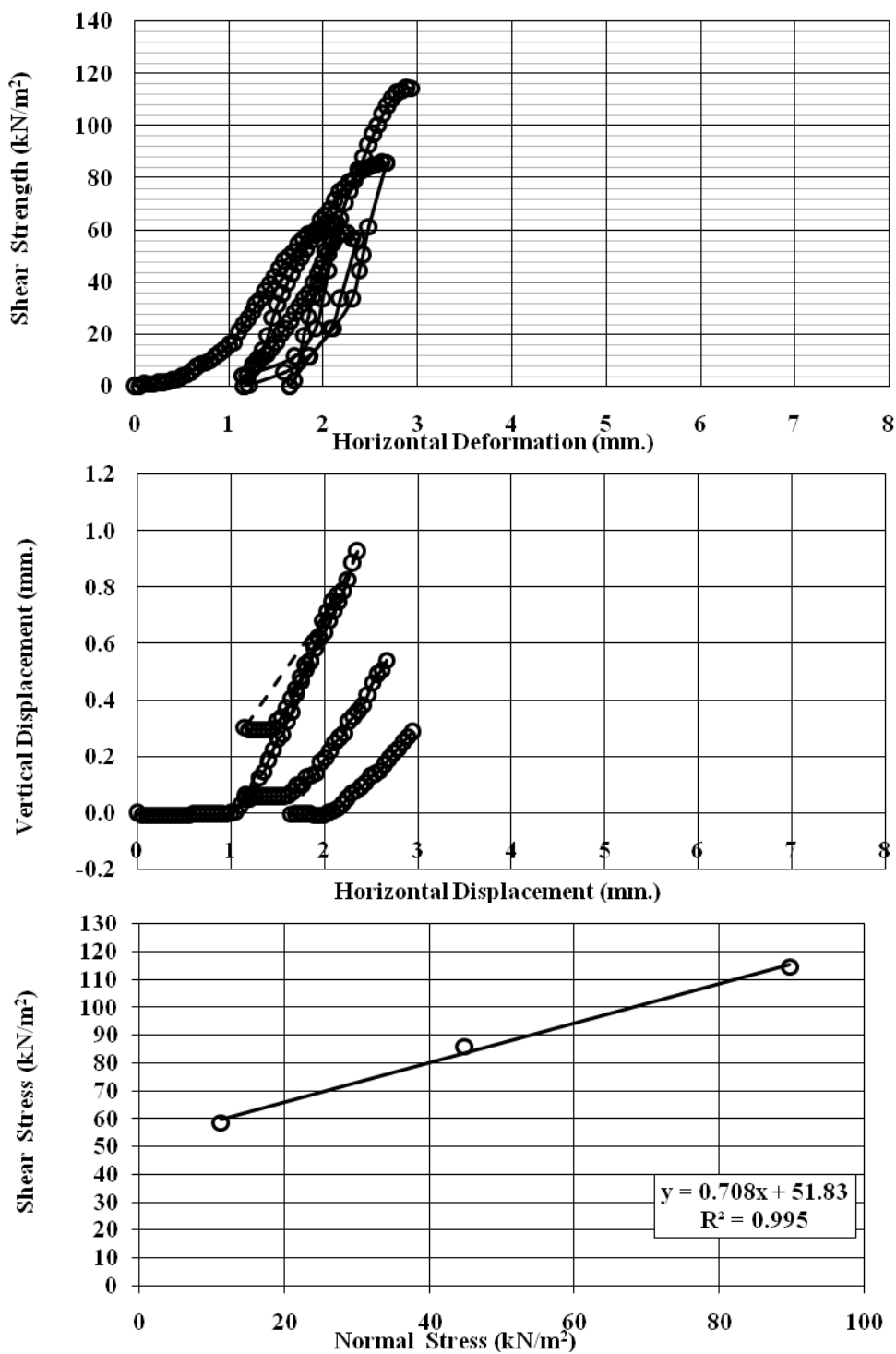
รายละเอียดแสดงผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของดิน ด้วยวิธี Double - Ring infiltrometer test ณ บริเวณด้านบน (TM) ของลาดดินใกล้ตำแหน่งการพิบัติ แสดงดังตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของดินด้วยวิธี Double-Ring Test

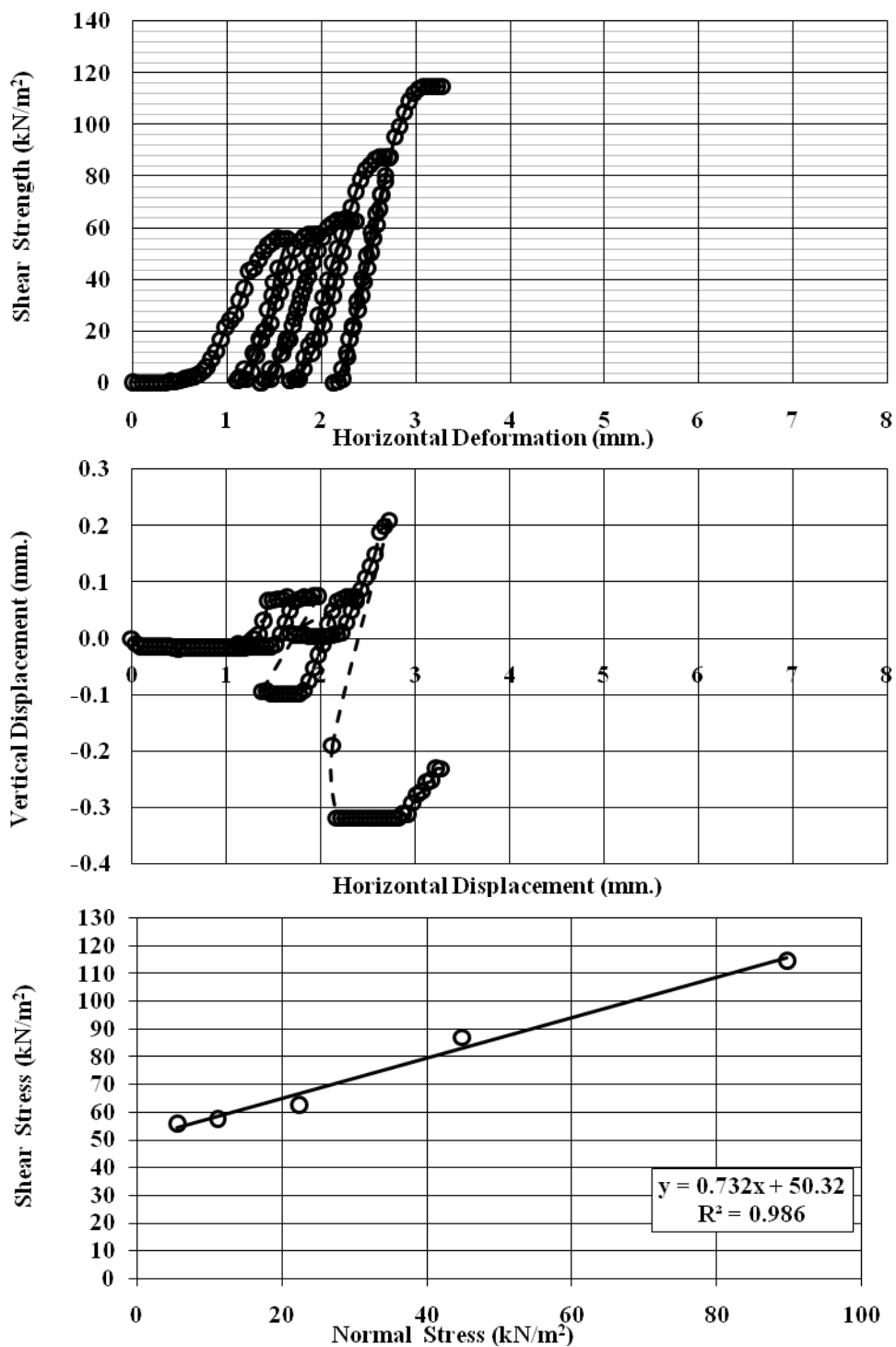
Start	Time	Elapsed	Elapsed	Flow Reading				Increment Infill Rate		Remark
		Time	Time	Inner Ring		Annular Space		Inner	Annular	
	End	(Duration)	(Total)	Reading	Flow	Reading	Flow			
hr : min	min	min	cm.	cm <sup>3</sup> .	cm.	cm <sup>3</sup> .	cm/sec (x 10 <sup>-4</sup> )	cm/sec (x 10 <sup>-4</sup> )		
Start	12:40	15	15	1.0	1,752.3	6.7	7,661.6	27.539	40.422	
End	12:55			10.0		31.1				
Start	12:55	8	23	10.9	796.5	31.1	4,050.6	23.471	40.070	
End	13:03			15.4		44.0				
Start	13:08	15	38	18.2	1,416.0	2.4	7,567.4	22.254	39.925	Annular fill
End	13:23			26.2		26.5				
Start	13:23	12	50	26.2	1,416.0	26.5	5,652.0	27.817	37.274	
End	13:35			32.5		44.5				
Start	13:39	15	65	35.8	1,115.1	10.7	8,101.2	17.525	42.741	Annular fill
End	13:54			43.8		36.5				
Start	14:02	15	80	0.5	1,416.0	1.5	7,379.0	22.254	38.931	Inner and Annular fill
End	14:17			8.5		25.0				
Start	14:17	15	95	8.5	1,416.0	25.0	5,746.2	22.254	30.317	
End	14:32			16.2		43.3				
Start	14:39	15	110	19.7	1,362.9	4.0	5,495.0	21.419	28.991	Annular fill
End	14:54			27.3		21.5				
Start	14:54	15	125	27.3	1,292.1	21.5	5,495.0	20.306	28.991	
End	15:09			34.6		39.0				
Start	15:17	7	132	38.6	619.5	10.0	3,140	20.863	35.499	Annular fill
End	15:24			42.1		20.0				
Start	15:24	8	140	42.1	654.9	20.0	3,454.0	19.298	34.168	
End	15:32			45.8		31.0				
Start	15:45	15	155	1.0	1,221.3	1.0	6,594.0	19.194	34.789	Inner and Annular fill
End	16:00			7.9		22.0				
Start	16:00	26	181	7.9	2,106.3	22.0	6,908.0	19.097	21.027	
End	16:26			19.8		44.0				
Start	16:30	30	211	19.0	2,424.9	1.0	7,222.0	19.055	19.051	Annular fill
End	17:00			32.7		24.0				

**ภาคผนวก ค**

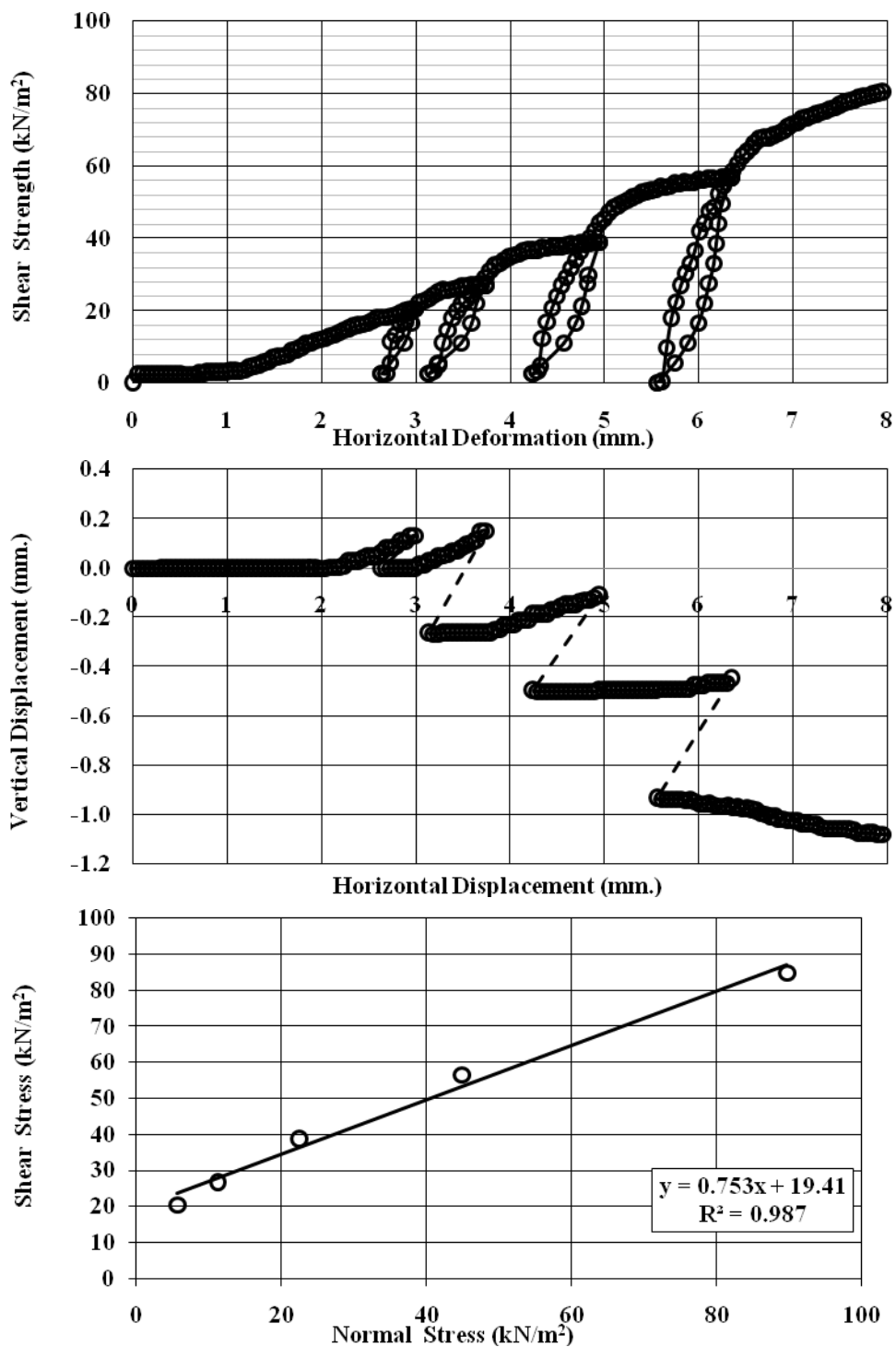
**ผลการทดสอบ Multi- Stage Direct Shear Test (Slow Test @ 5 Load)  
แบบอัดตัวคายน้ำ-เงื่อนไขแบบระบายน้ำของตัวอย่างดินที่ความชื้นธรรมชาติ  
และที่ความชื้นต่างๆ**



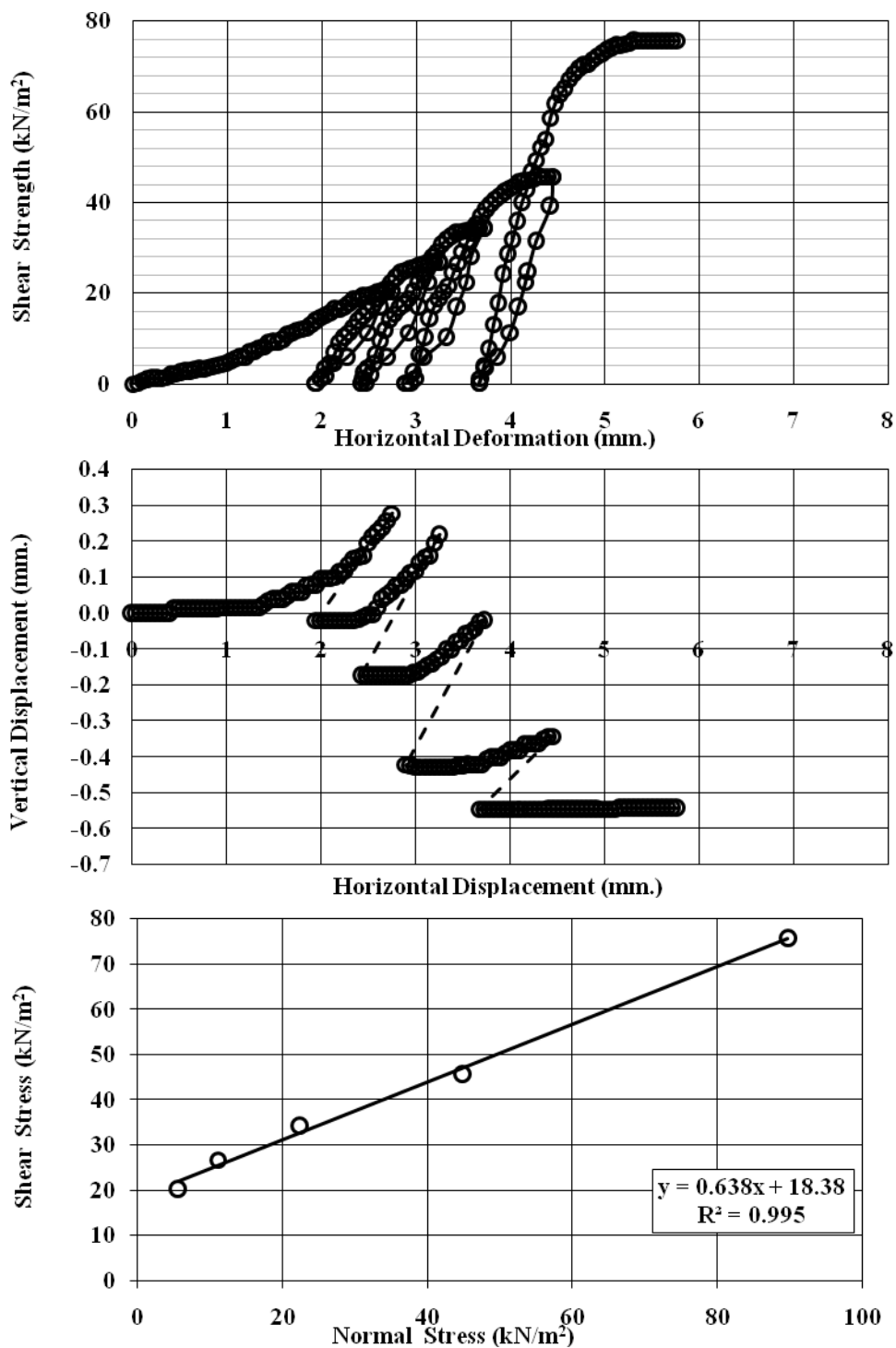
รูปที่ ค-1 กราฟของตัวอย่างดินตำแหน่ง BM 2 ระดับความลึก 0.25 เมตร ความชัน 11.84 % แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement  
 b) Vertical displacement - Horizontal displacement  
 c) Shear stress – Normal stress



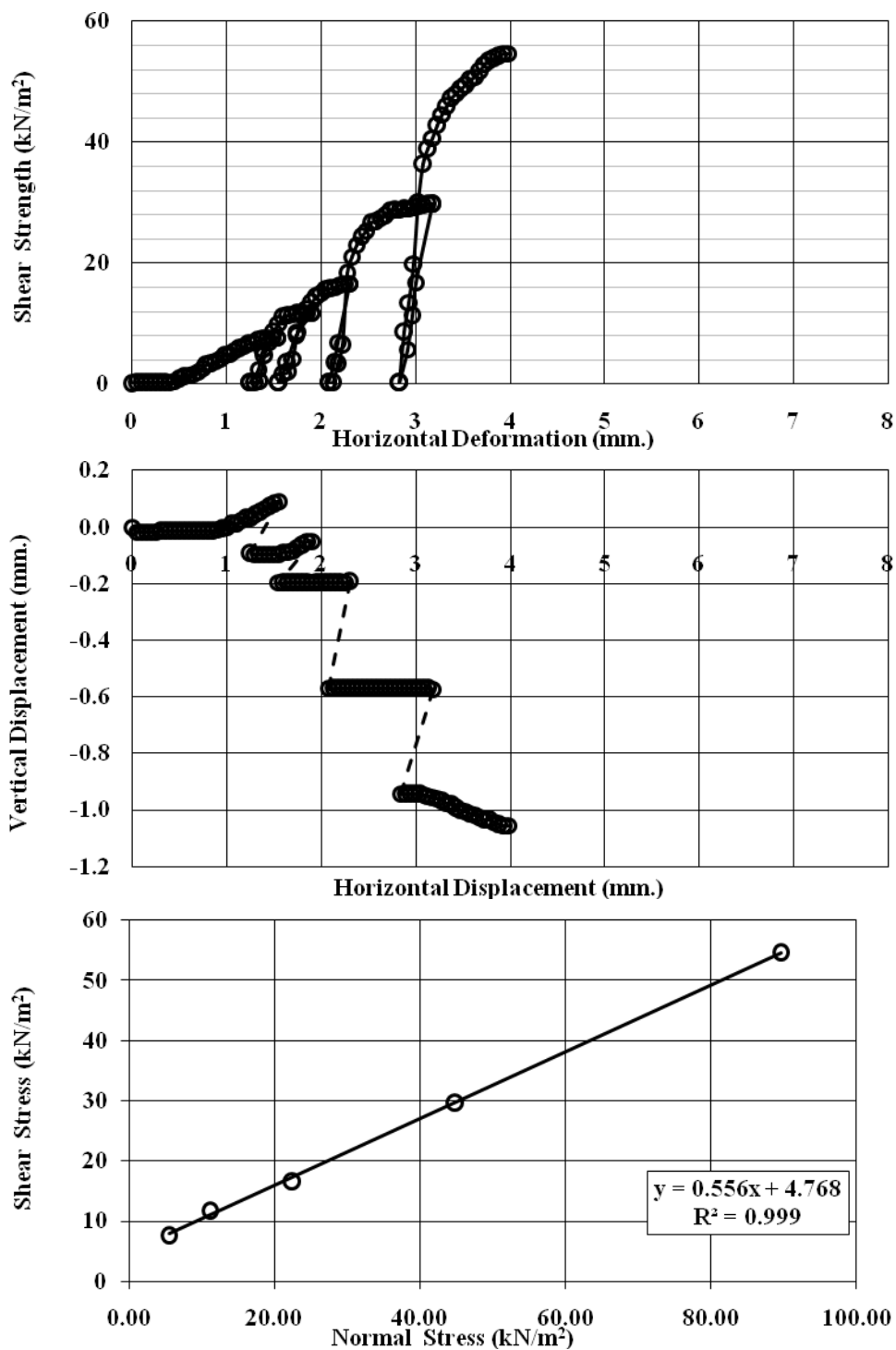
รูปที่ ก-2 กราฟของตัวอย่างดินตำแหน่ง BM 3 ระดับความลึก 0.25 เมตร ความชื้น 25.29 % แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement  
b) Vertical displacement - Horizontal displacement  
c) Shear stress – Normal stress



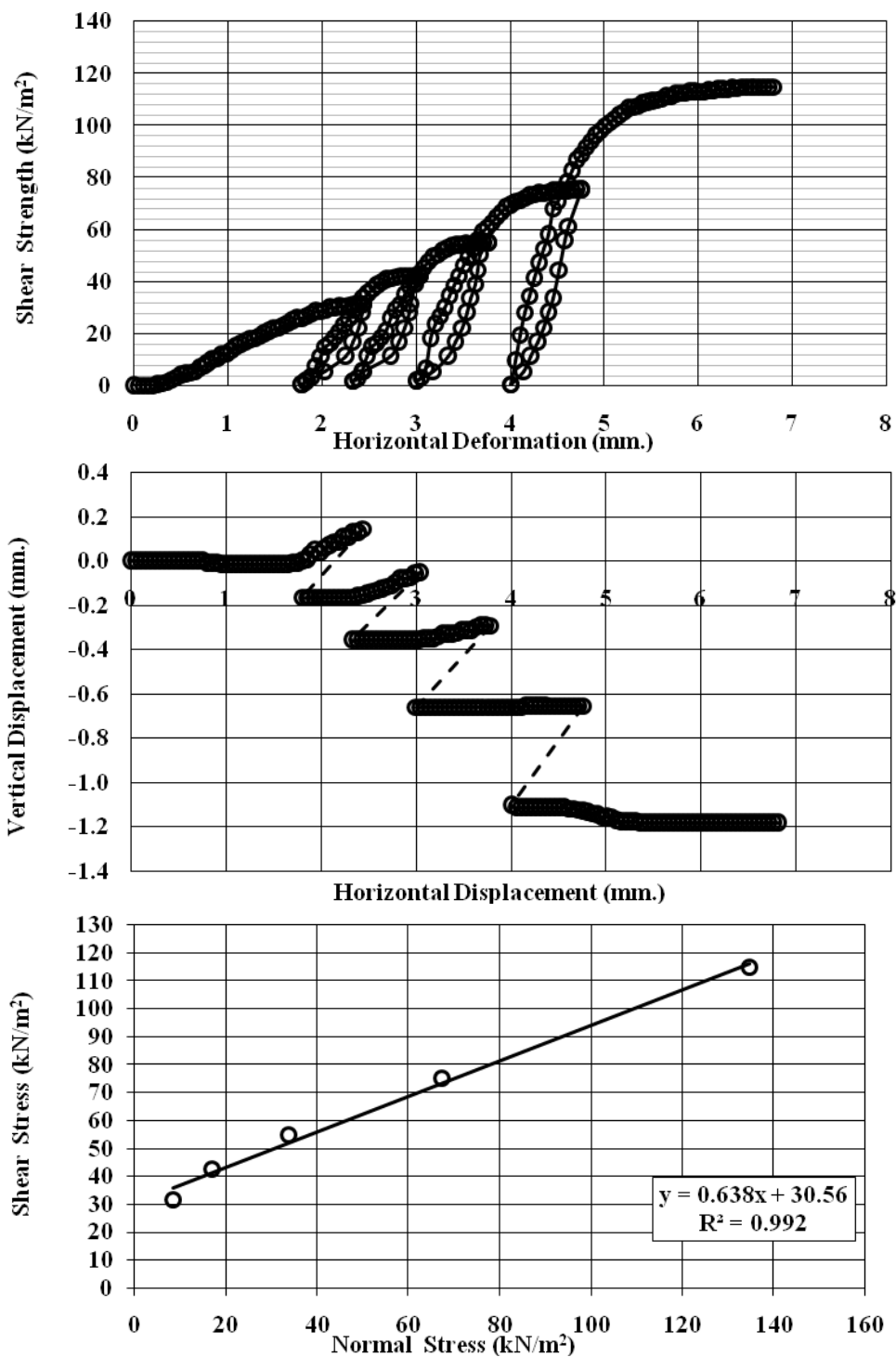
รูปที่ ค-3 กราฟของตัวอย่างดินตำแหน่ง BM 2 ระดับความลึก 0.25 เมตร ความชื้น 43.50 % แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement  
b) Vertical displacement - Horizontal displacement  
c) Shear stress – Normal stress



รูปที่ ๓-๔ กราฟของตัวอย่างดินตำแหน่ง BM 3 ระดับความลึก 0.25 เมตร ความชื้น 56.03 % แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement  
b) Vertical displacement - Horizontal displacement  
c) Shear stress – Normal stress

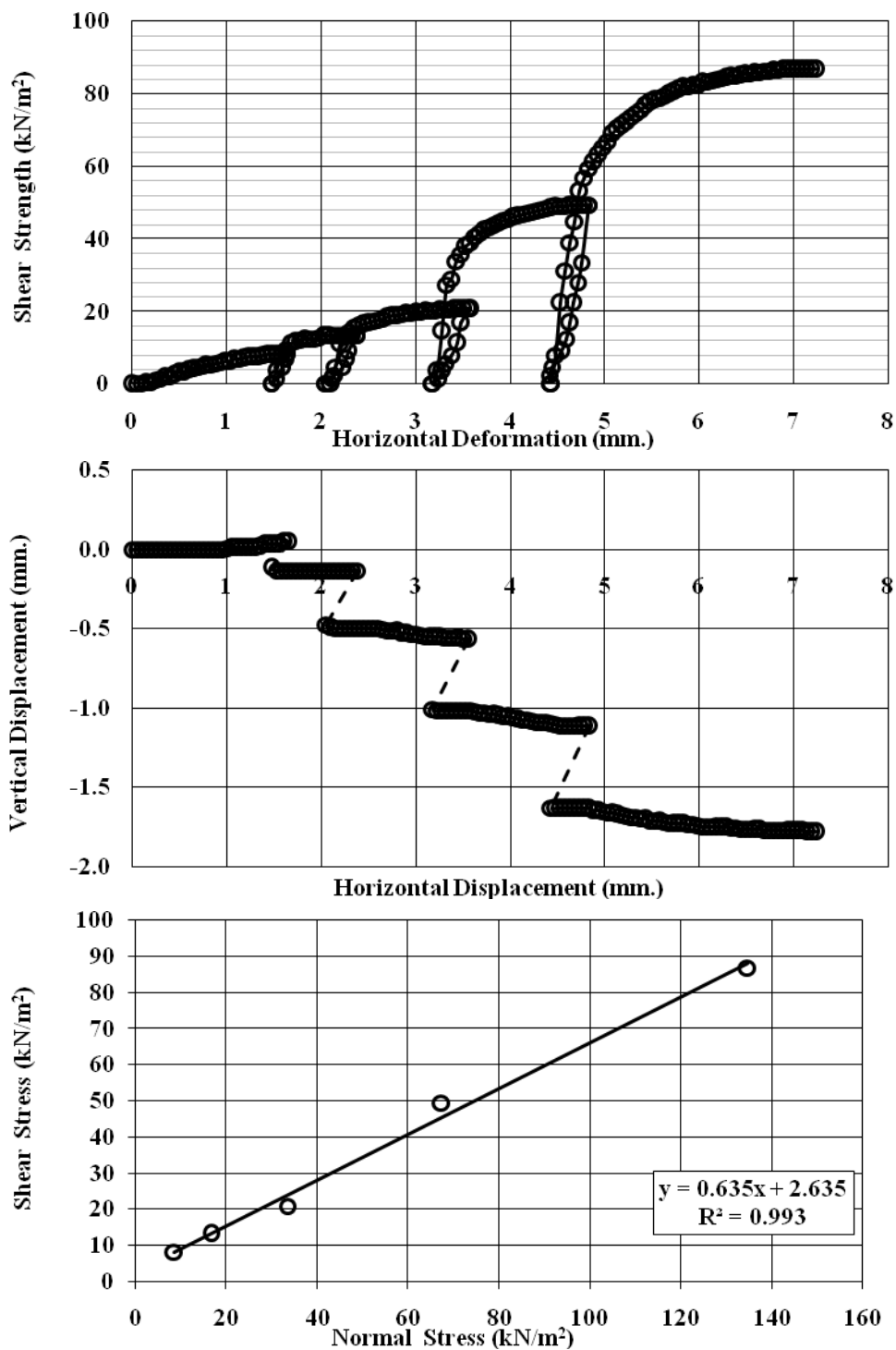


รูปที่ ค-5 กราฟของตัวอย่างดินตำแหน่ง BM 2 ระดับความลึก 0.25 เมตร ความชื้น 69.70 % แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement  
b) Vertical displacement - Horizontal displacement  
c) Shear stress – Normal stress

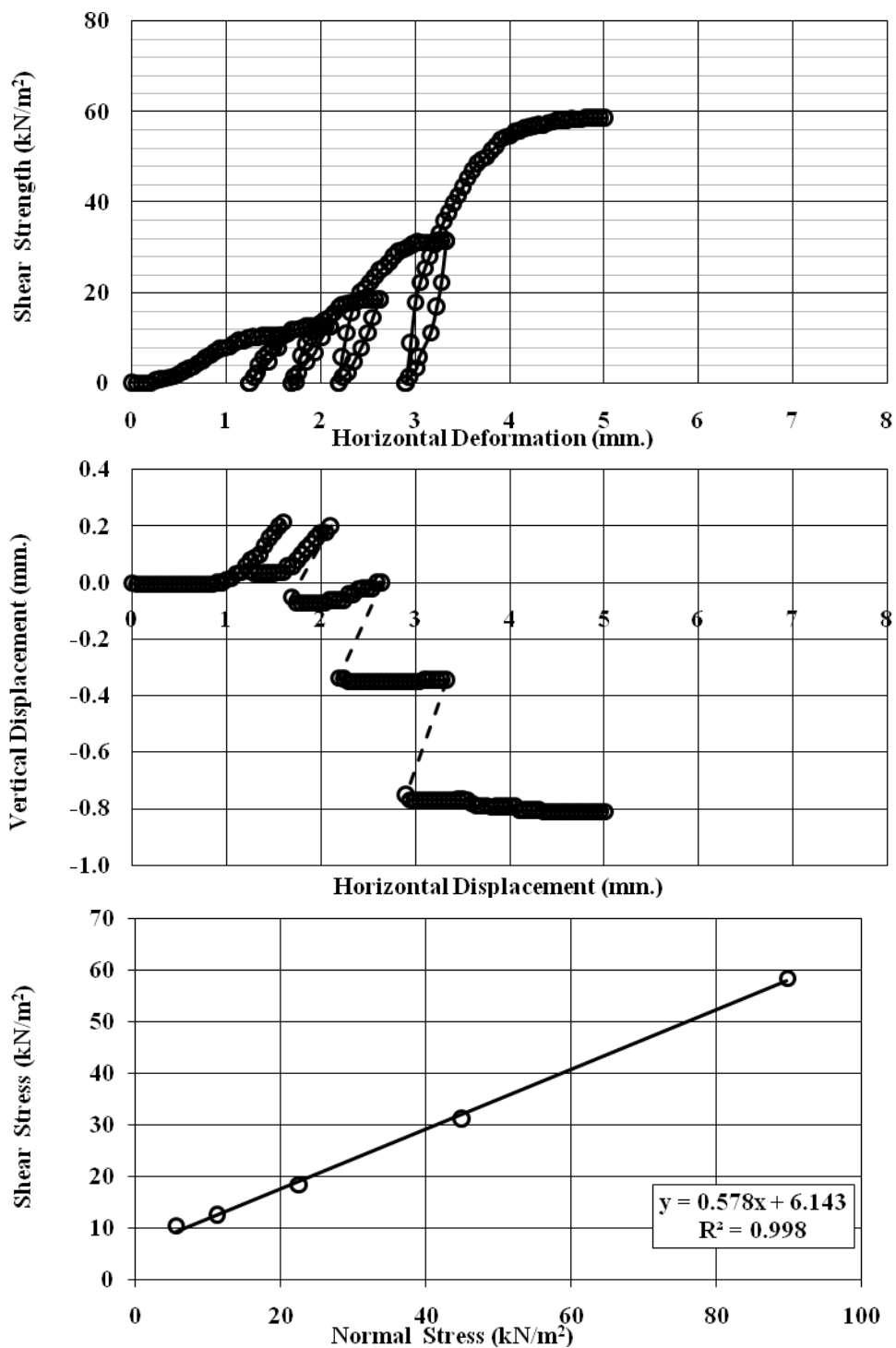


รูปที่ ๓-๖ กราฟของตัวอย่างดินตำแหน่ง BM 1 ระดับความลึก 0.50 เมตร ความชื้น 77.43 % แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement  
b) Vertical displacement - Horizontal displacement  
c) Shear stress – Normal stress

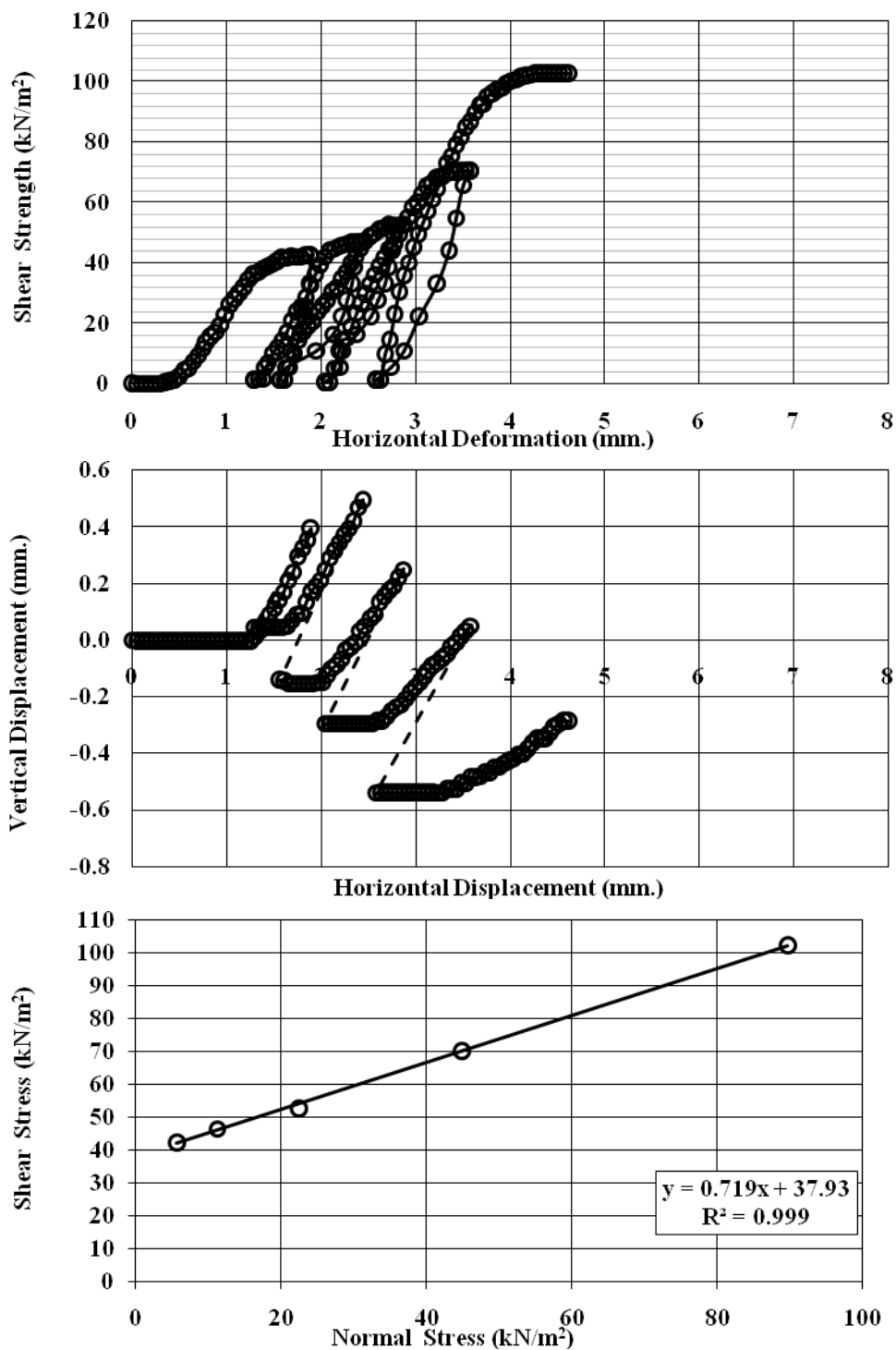




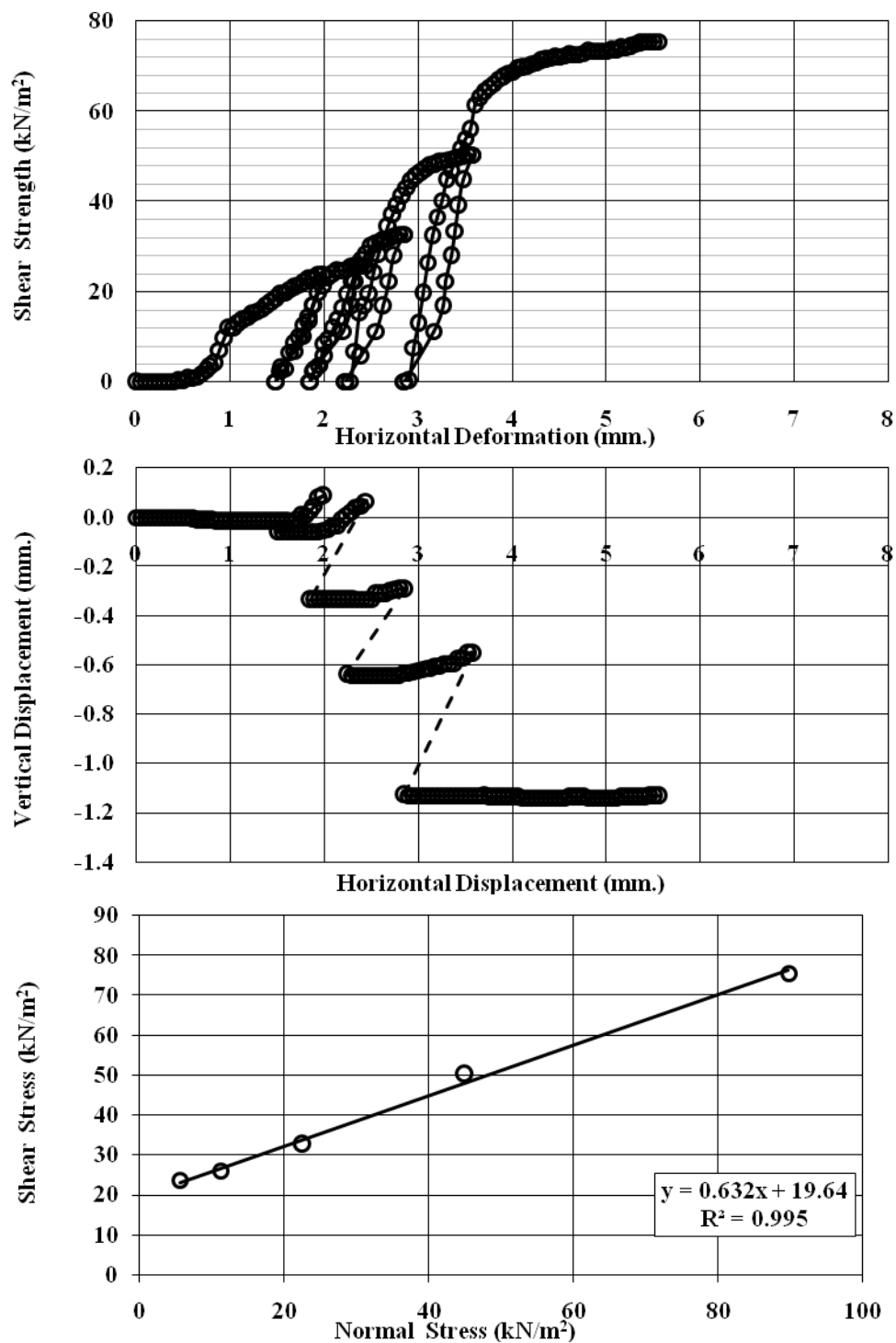
รูปที่ ค-7 กราฟของตัวอย่างดินตำแหน่ง BM 1 ระดับความลึก 0.50 เมตร ความชื้น 88.07 % แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement  
b) Vertical displacement - Horizontal displacement  
c) Shear stress – Normal stress



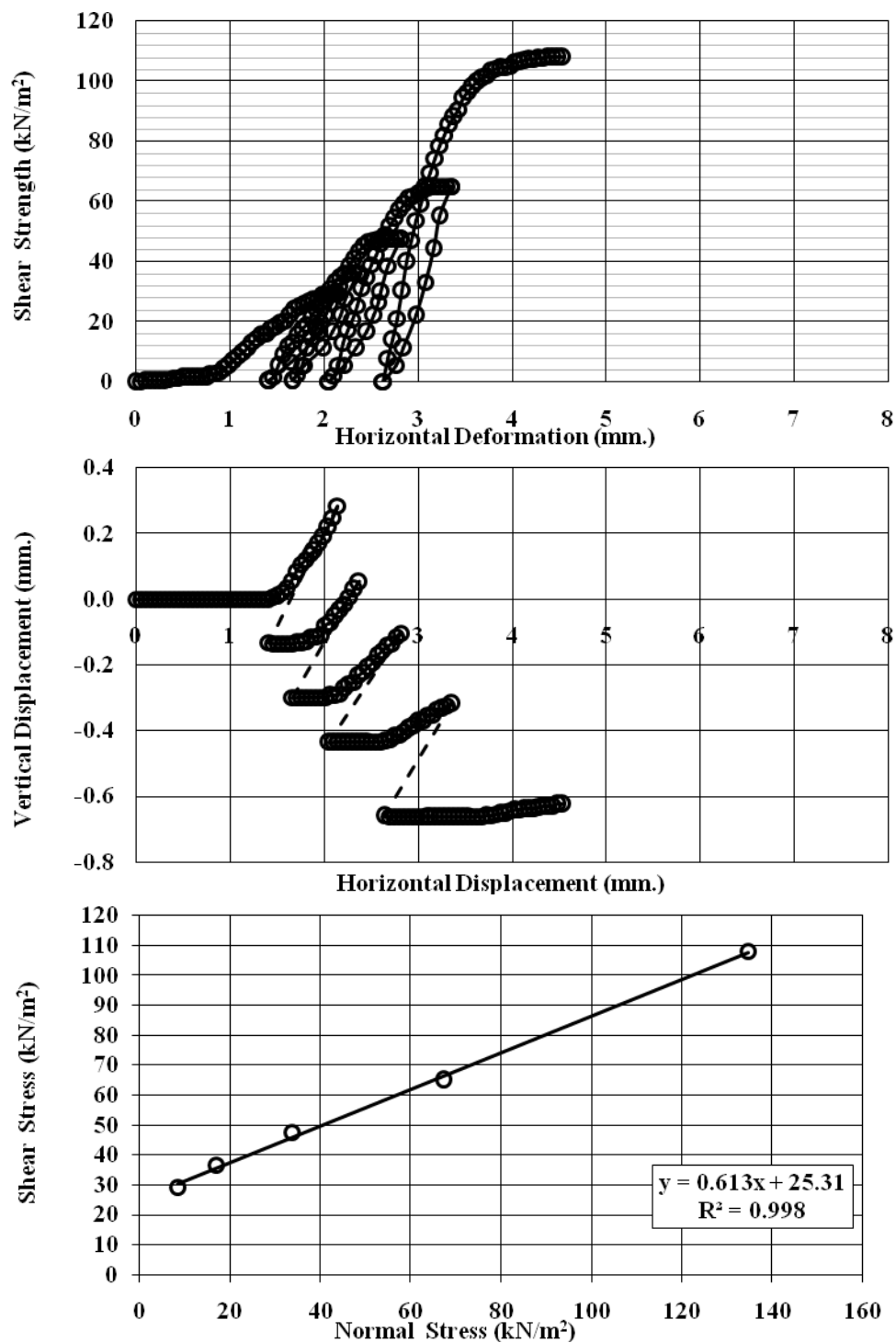
รูปที่ ๘-8 กราฟของตัวอย่างดินตำแหน่ง BM 3 ระดับความลึก 0.25 เมตร ความชื้น 91.12 % แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement  
b) Vertical displacement - Horizontal displacement  
c) Shear stress – Normal stress



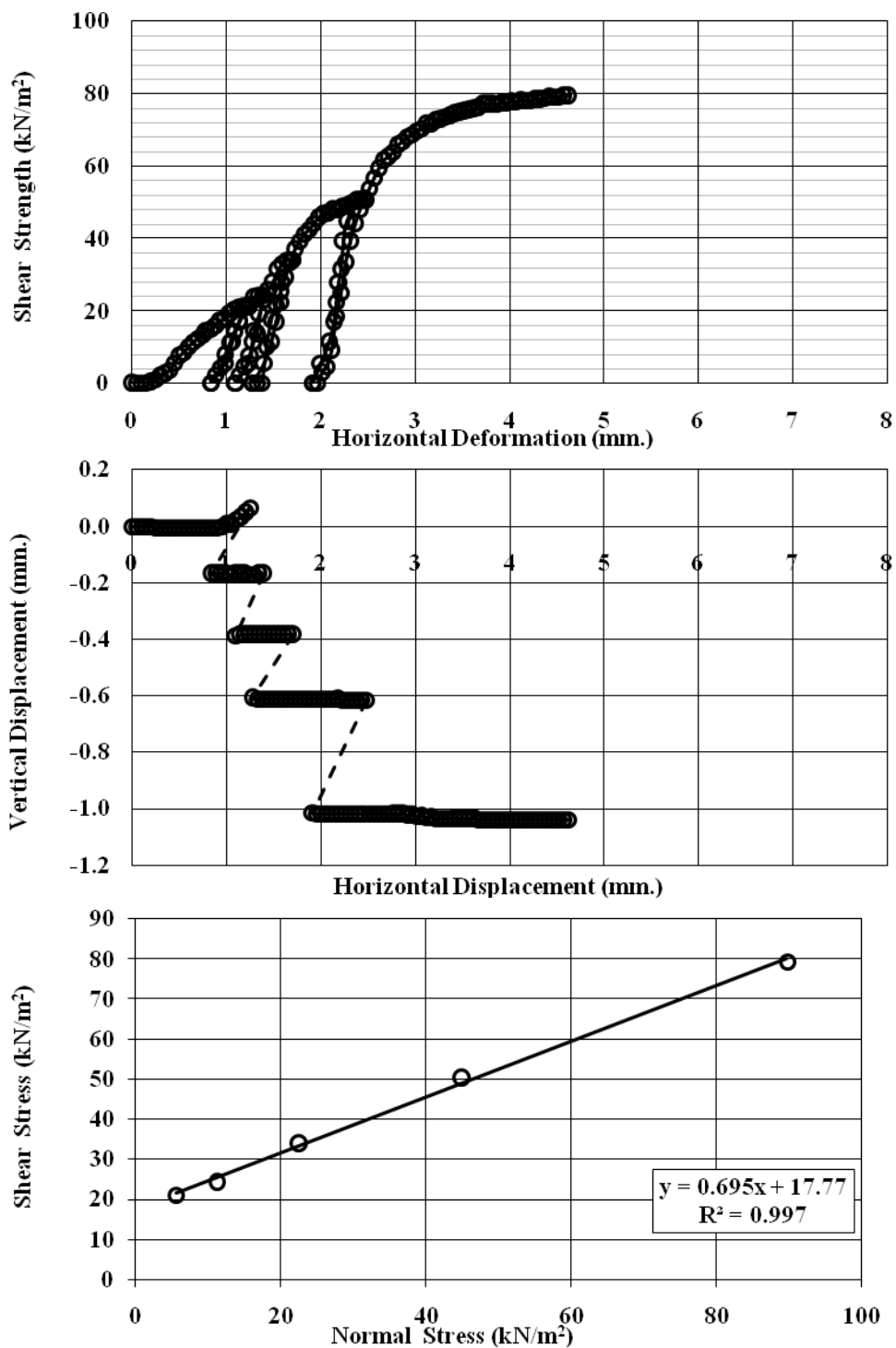
รูปที่ ๙-๑ กราฟของตัวอย่างดินตำแหน่ง MM 2 ระดับความลึก 0.25 เมตร ความชื้น 7.10 % แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement  
b) Vertical displacement - Horizontal displacement  
c) Shear stress – Normal stress



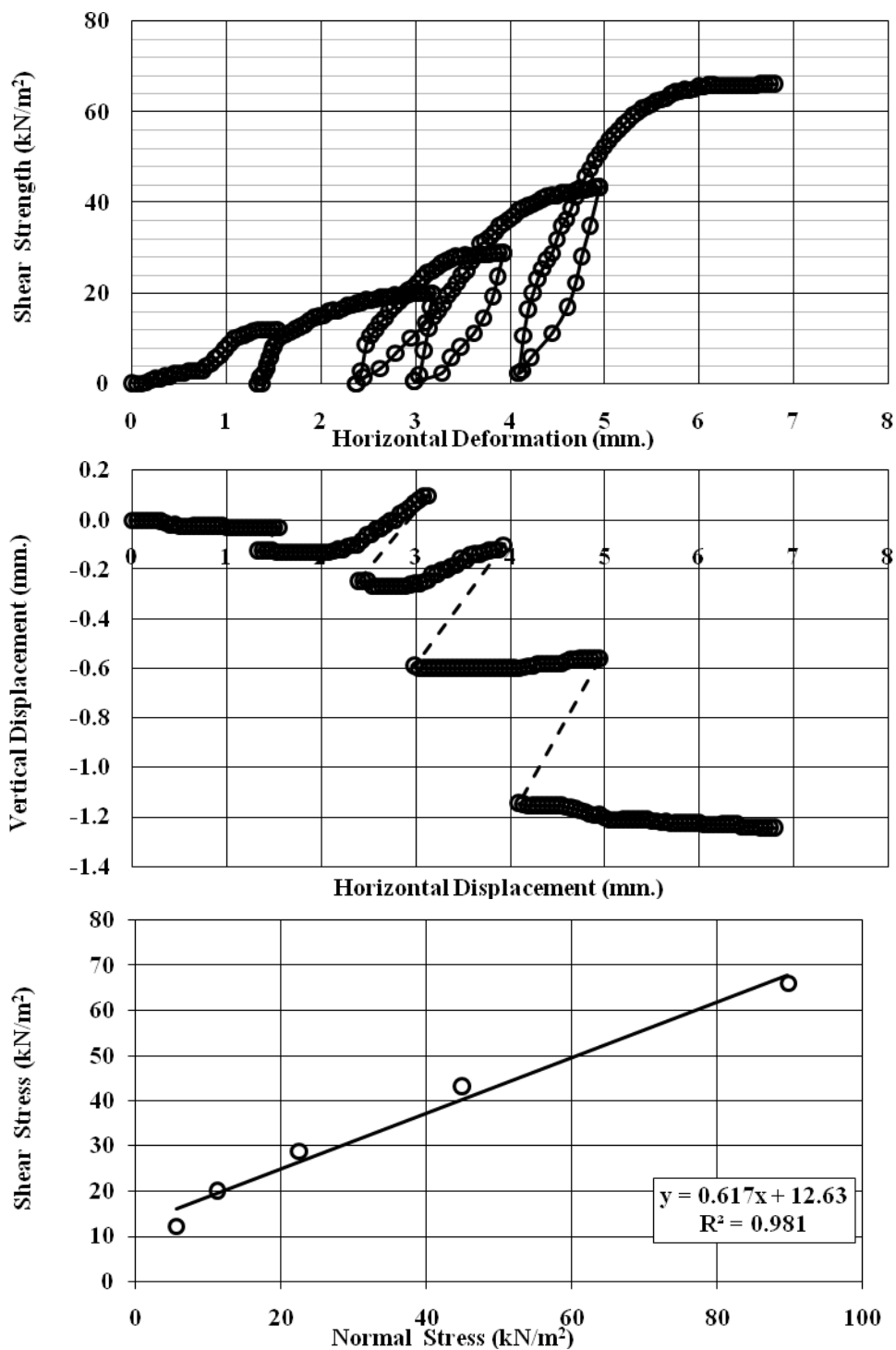
รูปที่ ค-10 กราฟของตัวอย่างดินตำแหน่ง MM 1 ระดับความลึก 0.25 เมตร ความชื้น 49.39 % แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement  
b) Vertical displacement - Horizontal displacement  
c) Shear stress – Normal stress



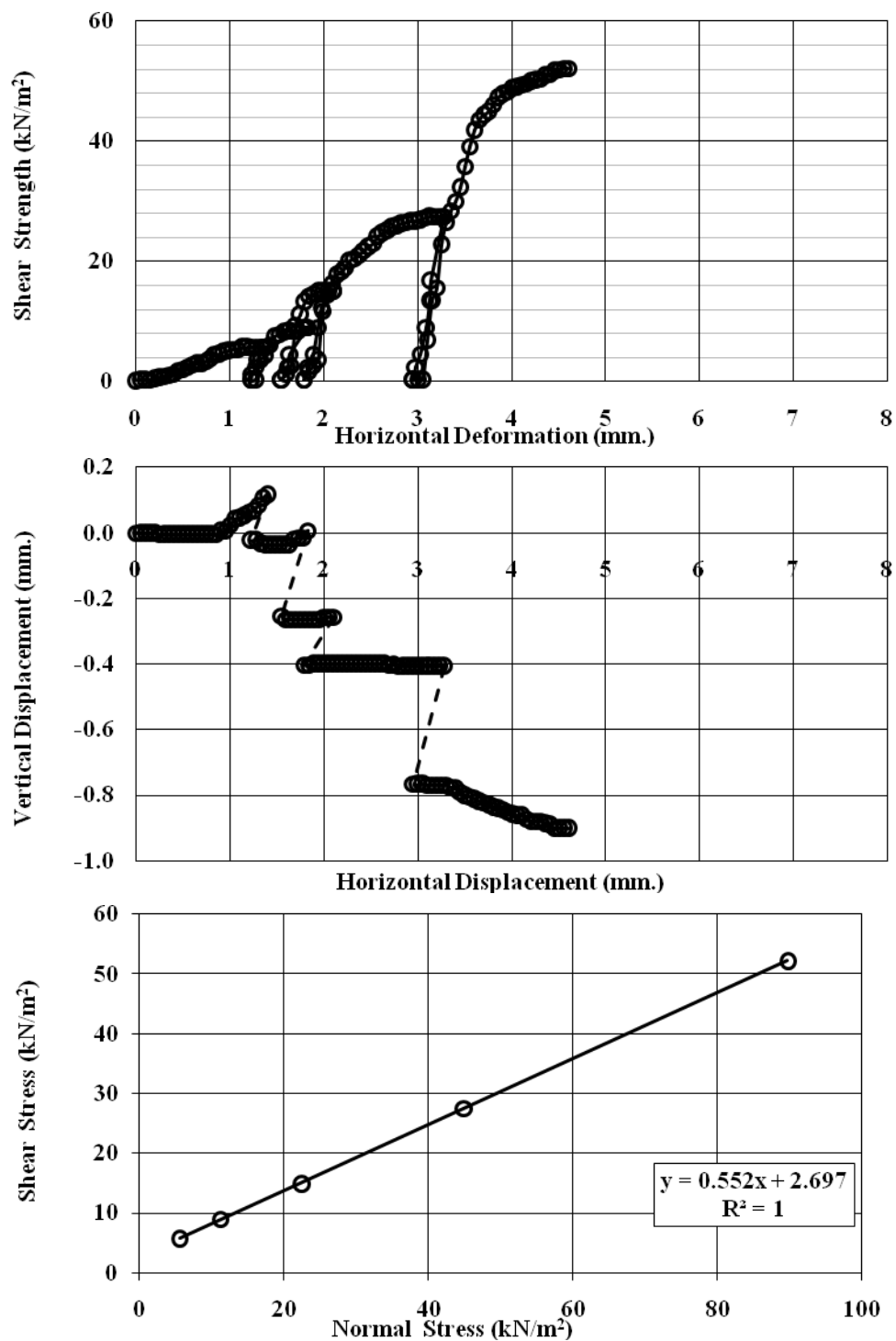
รูปที่ ก-11 กราฟของตัวอย่างดินตำแหน่ง MM 2 ระดับความลึก 0.50 เมตร ความชื้น 59.42 % แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement  
b) Vertical displacement - Horizontal displacement  
c) Shear stress – Normal stress



รูปที่ ค-12 กราฟของตัวอย่างดินตำแหน่ง MM 2 ระดับความลึก 0.50 เมตร ความชื้น 69.74 % แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement  
b) Vertical displacement - Horizontal displacement  
c) Shear stress – Normal stress

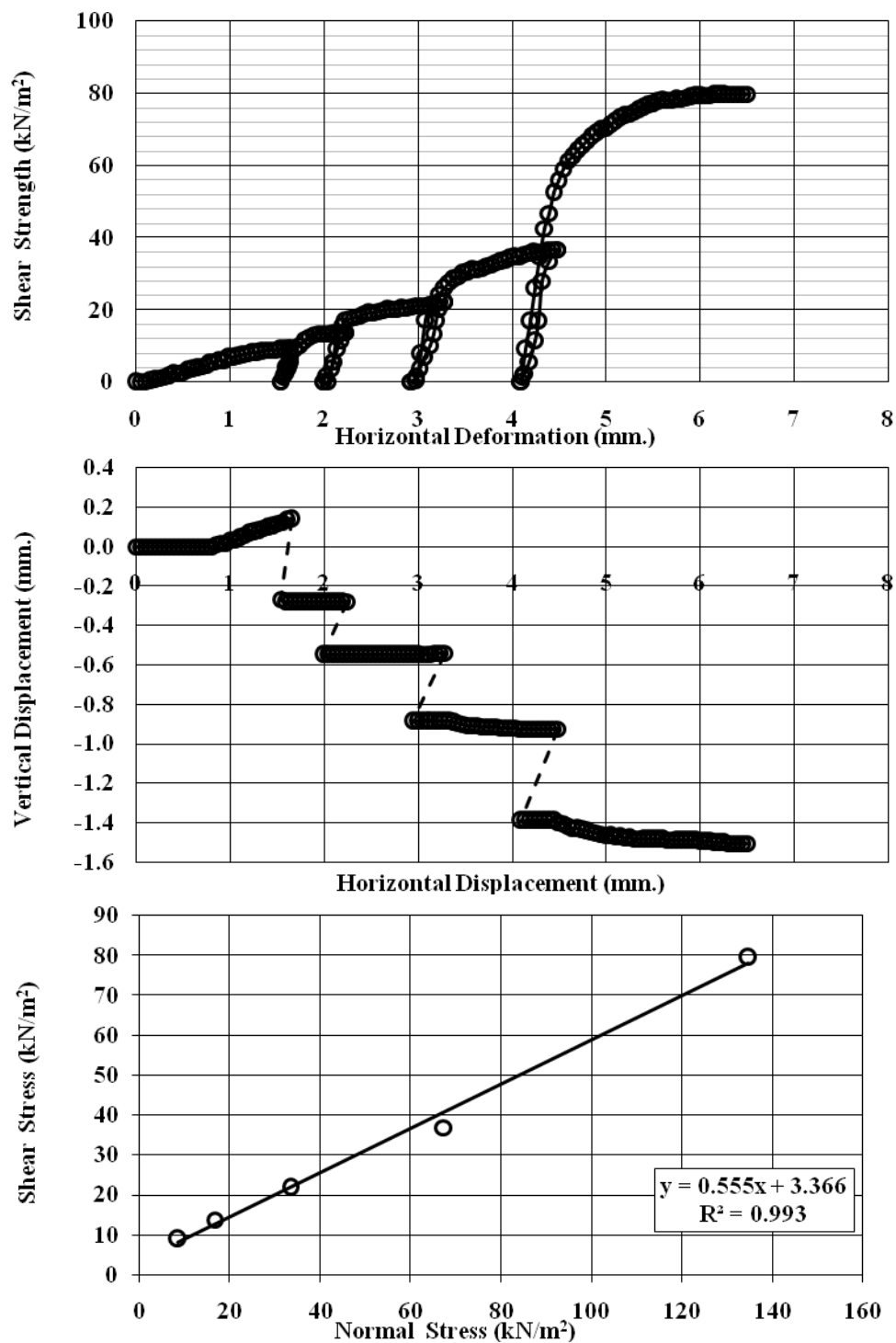


รูปที่ ค-13 กราฟของตัวอย่างดินตำแหน่ง MM 2 ระดับความลึก 0.25 เมตร ความชื้น 72.15 % แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement  
b) Vertical displacement - Horizontal displacement  
c) Shear stress – Normal stress

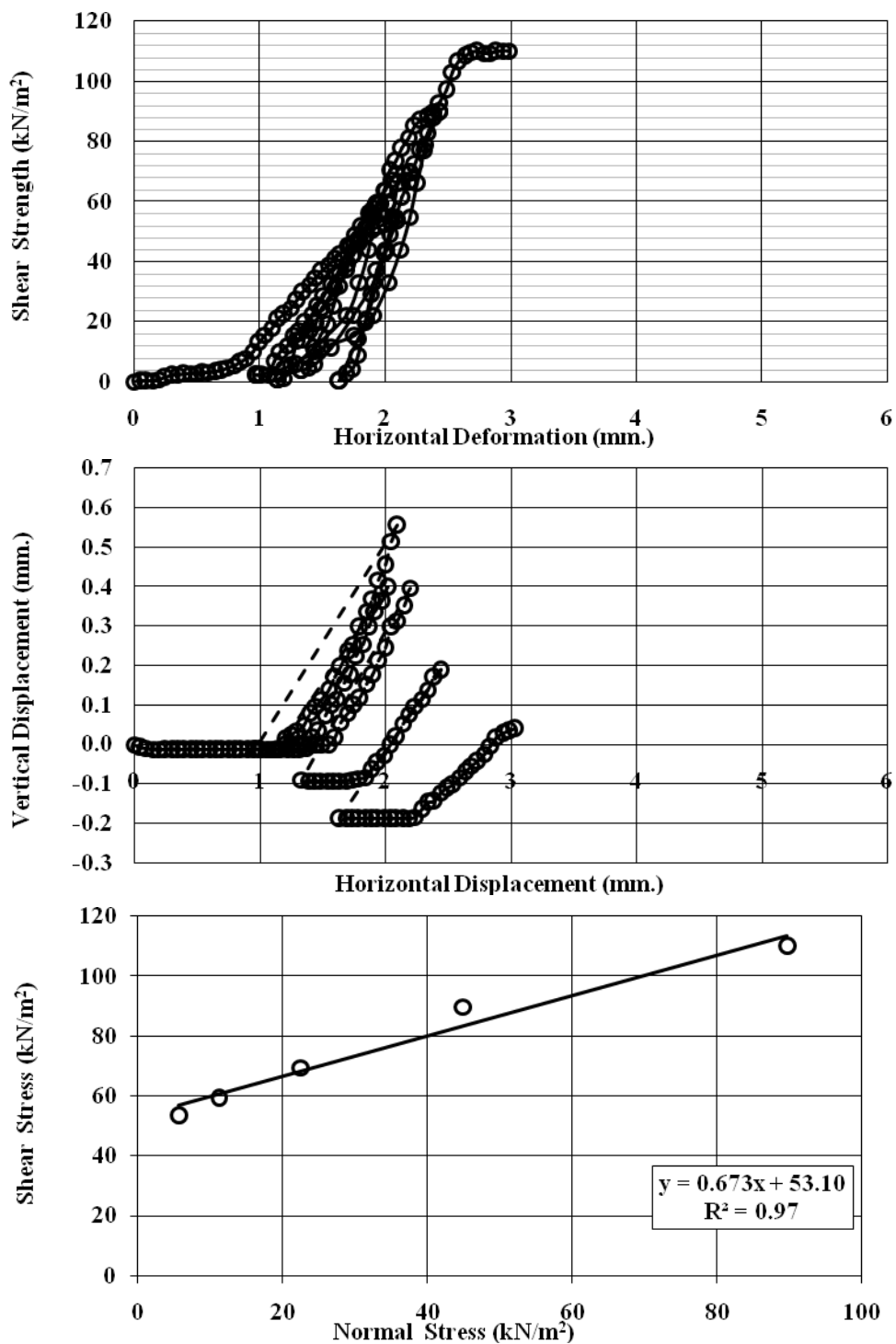


รูปที่ ค-14 กราฟของตัวอย่างดินตำแหน่ง MM 1 ระดับความลึก 0.25 เมตร ความชื้น 85.82 % แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement  
b) Vertical displacement - Horizontal displacement  
c) Shear stress – Normal stress

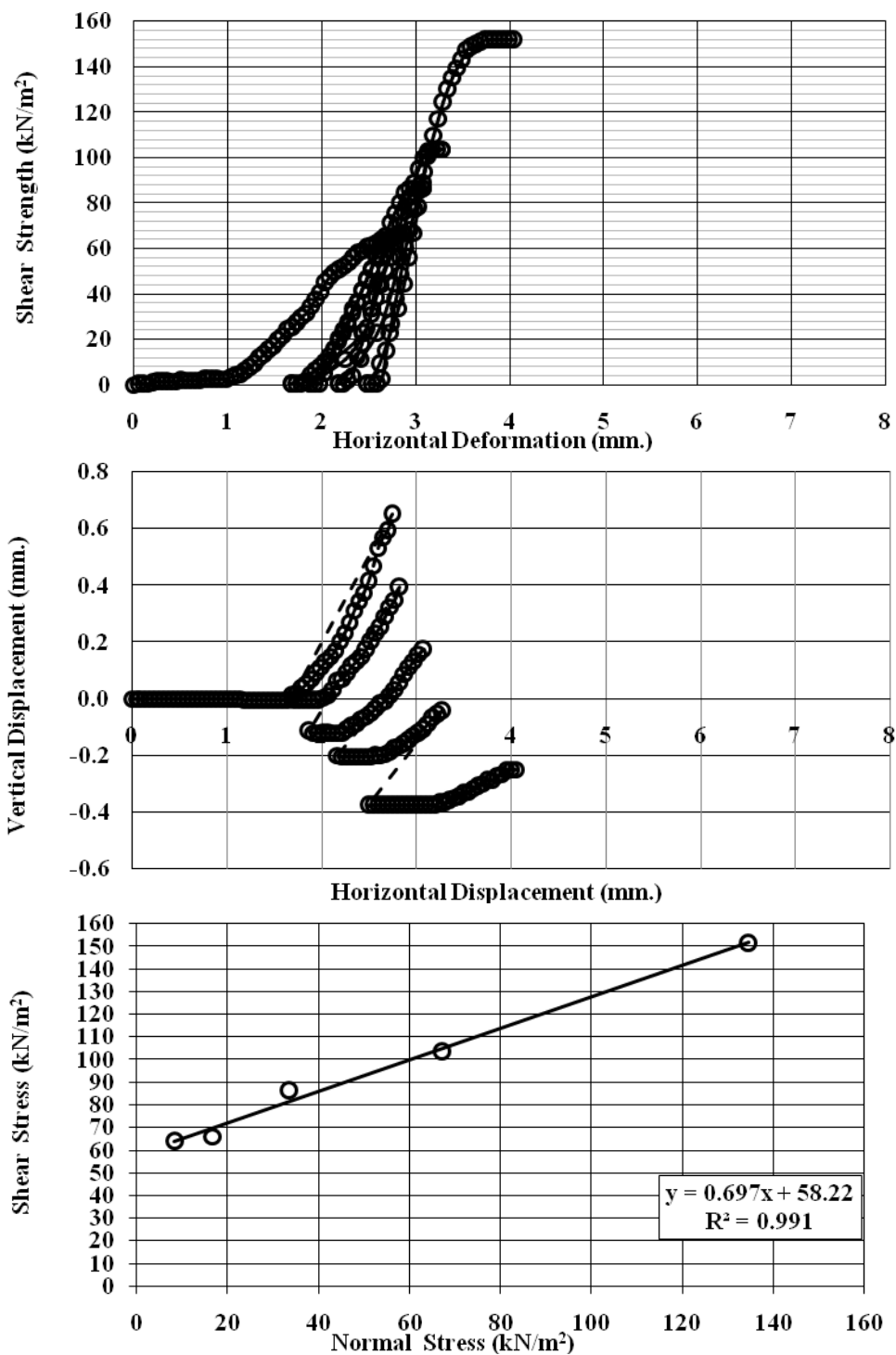




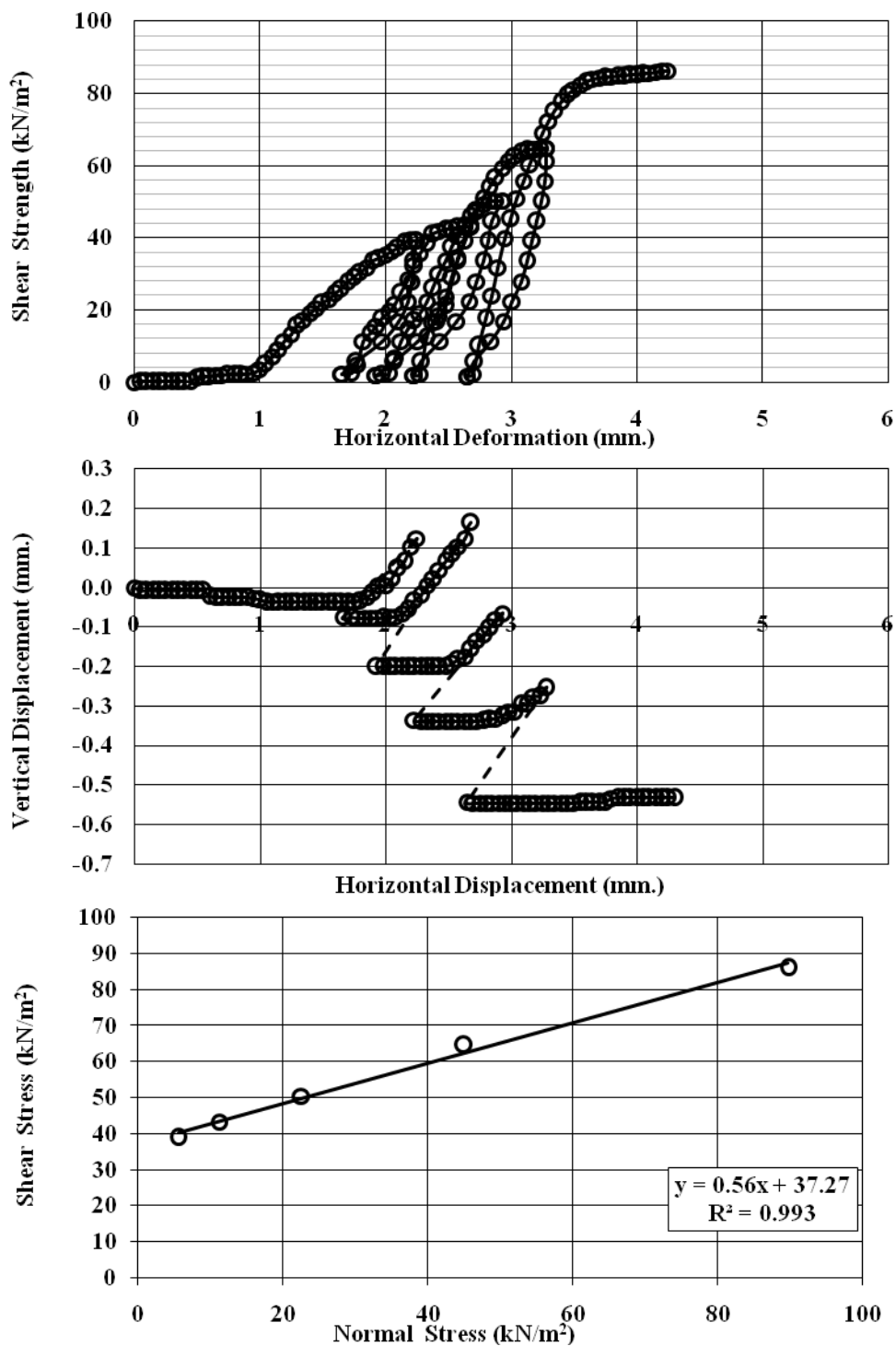
รูปที่ ค-15 กราฟของตัวอย่างดินตำแหน่ง MM ระดับความลึก 0.50 เมตร ความชื้น 94.20 % แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement  
b) Vertical displacement - Horizontal displacement  
c) Shear stress – Normal stress



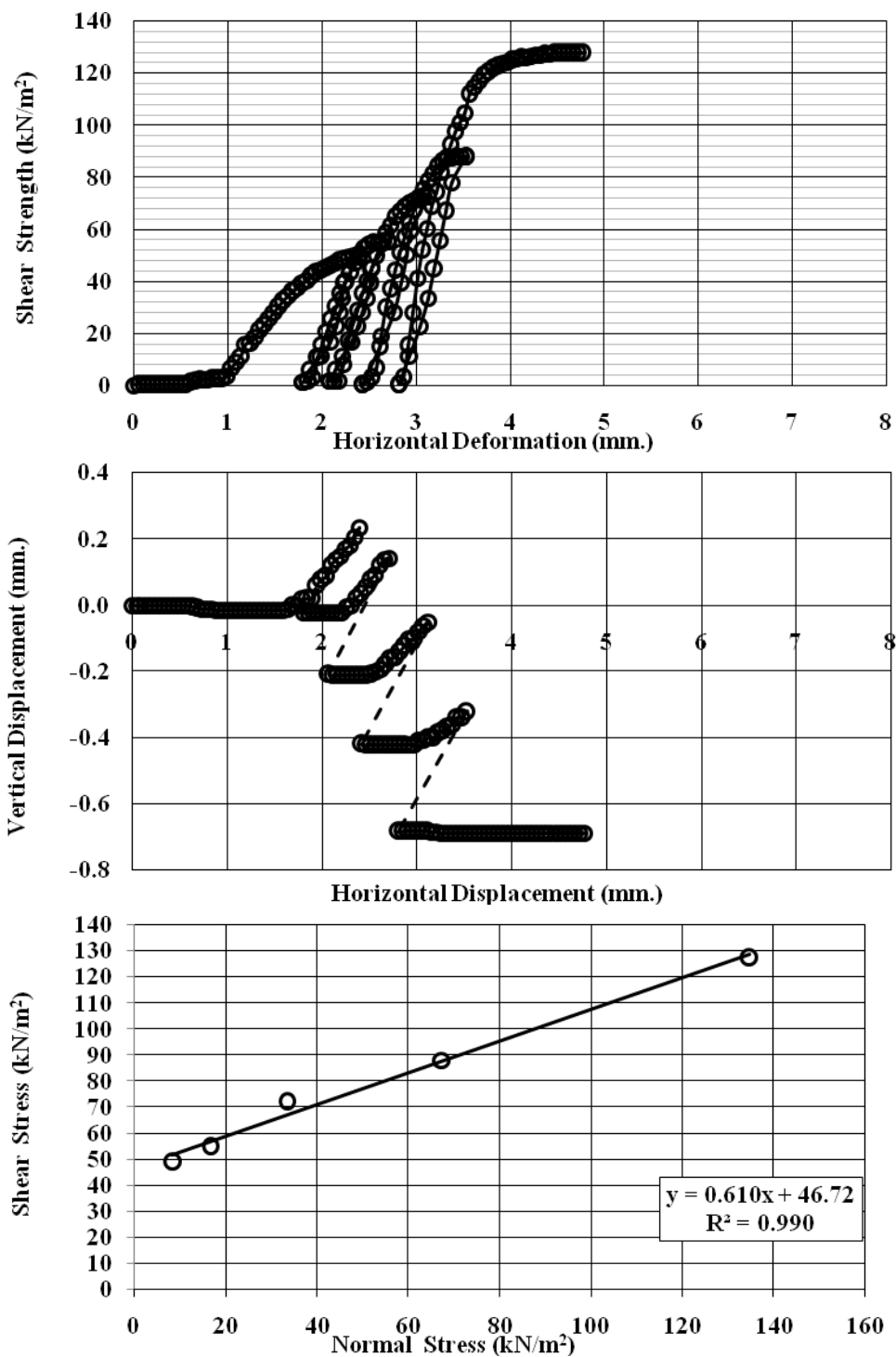
รูปที่ ก-16 กราฟของตัวอย่างดินตำแหน่ง TM 2 ระดับความลึก 0.25 เมตร ความชื้น 16.44 % แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement  
b) Vertical displacement - Horizontal displacement  
c) Shear stress – Normal stress



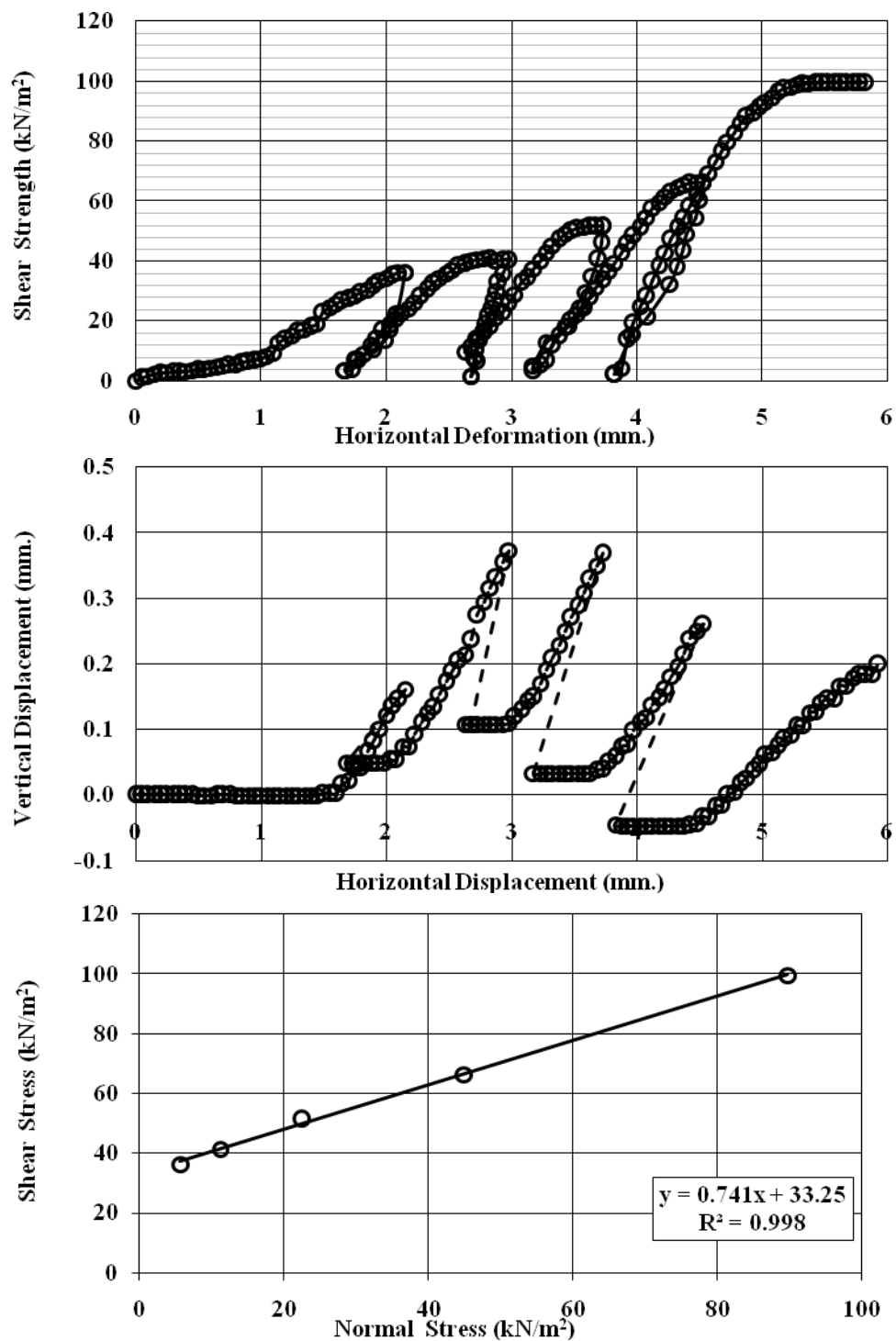
รูปที่ ค-17 กราฟของตัวอย่างดินตำแหน่ง TM 3 ระดับความลึก 0.50 เมตร ความชื้น 34.23 % แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement  
b) Vertical displacement - Horizontal displacement  
c) Shear stress – Normal stress



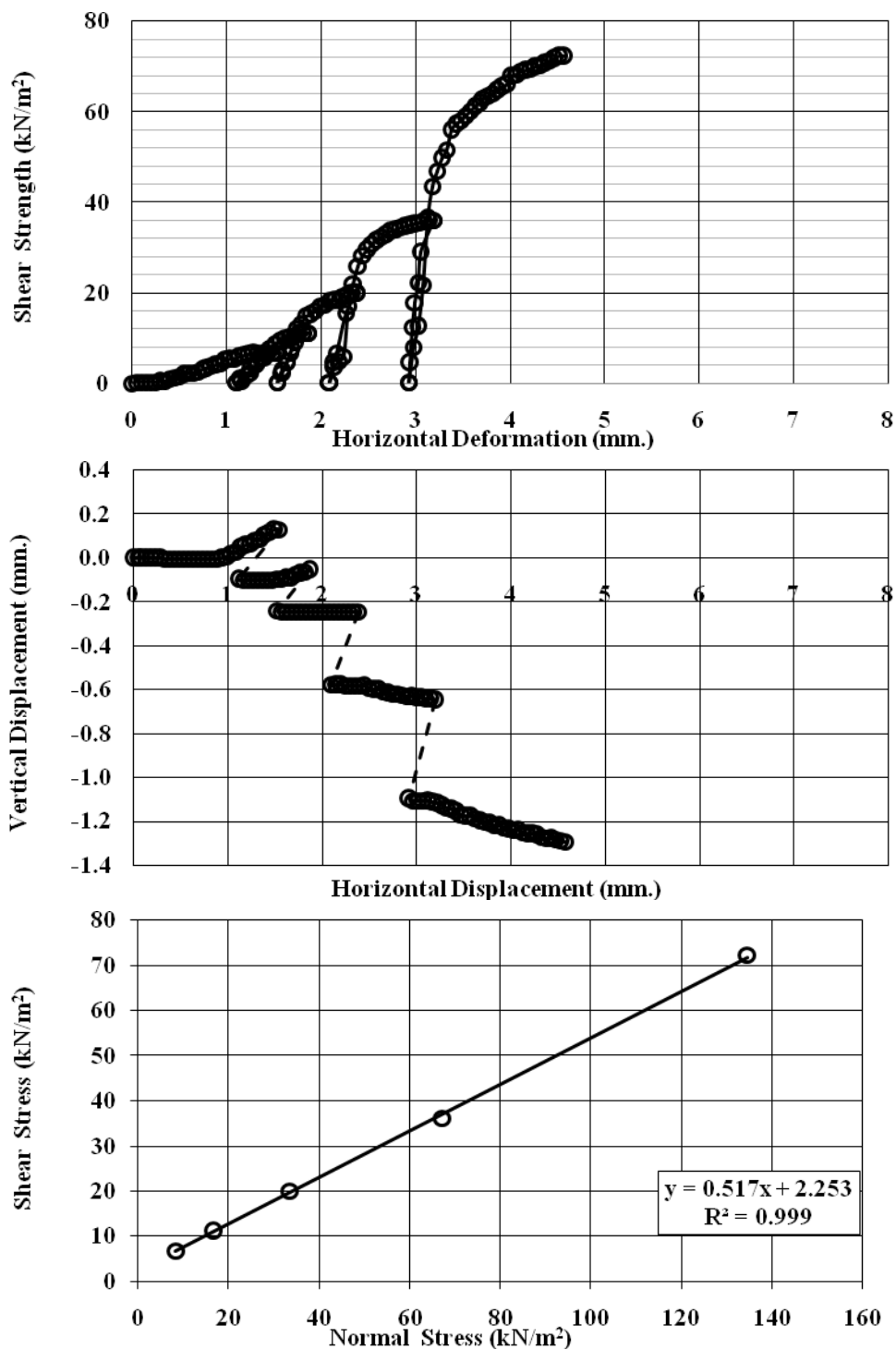
รูปที่ ค-18 กราฟของตัวอย่างดินตำแหน่ง TM 3 ระดับความลึก 0.25 เมตร ความชื้น 48.31 % แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement  
b) Vertical displacement - Horizontal displacement  
c) Shear stress – Normal stress



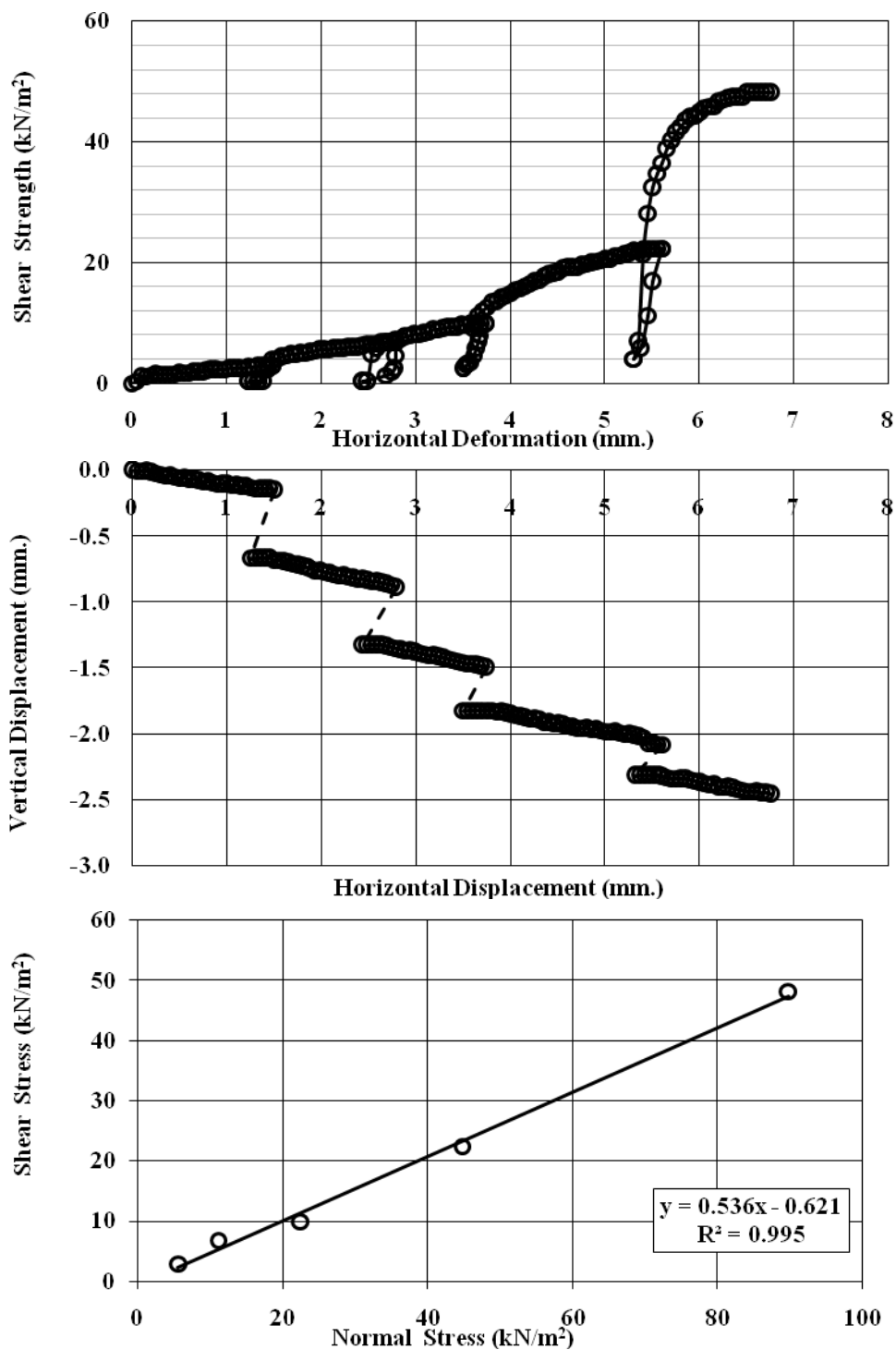
รูปที่ ค-19 กราฟของตัวอย่างดินตำแหน่ง TM 6 ระดับความลึก 0.50 เมตร ความชื้น 58.13 % แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement  
b) Vertical displacement - Horizontal displacement  
c) Shear stress – Normal stress



รูปที่ ค-20 กราฟของตัวอย่างดินตำแหน่ง TM 2 ระดับความลึก 0.25 เมตร ความชื้น 63.02 % แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement  
b) Vertical displacement - Horizontal displacement  
c) Shear stress – Normal stress

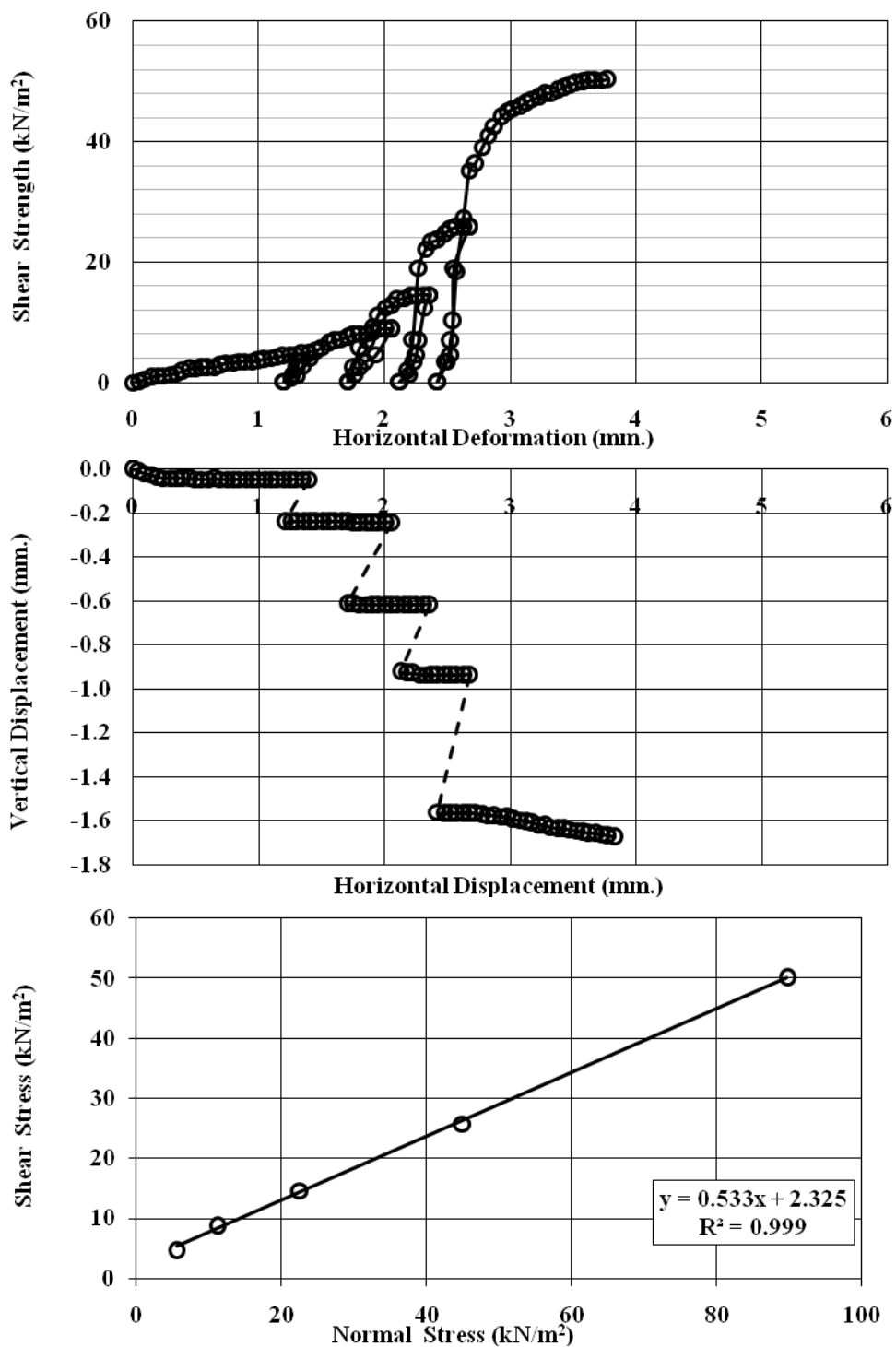


รูปที่ ค-21 กราฟของตัวอย่างดินตำแหน่ง TM 6 ระดับความลึก 0.50 เมตร ความชื้น 79.81 % แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement  
b) Vertical displacement - Horizontal displacement  
c) Shear stress – Normal stress



รูปที่ ค-22 กราฟของตัวอย่างดินตำแหน่ง TM 2 ระดับความลึก 0.25 เมตร ความชื้น 88.71 % แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement  
b) Vertical displacement - Horizontal displacement  
c) Shear stress – Normal stress





รูปที่ ค-23 กราฟของตัวอย่างดินตำแหน่ง TM 3 ระดับความลึก 0.25 เมตร ความชื้น 97.44 % แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) Shear strength – Horizontal displacement  
b) Vertical displacement - Horizontal displacement  
c) Shear stress – Normal stress

ภาคผนวก ง

ข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายชั่วโมง ณ สถานีวัดน้ำฝน ตชด. ค่ายท่านมูข  
ช่วงระหว่างวันที่ 29 ธันวาคม 2554 – 1 มกราคม 2555

รายละเอียดข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายชั่วโมง ณ สถานีวัดน้ำฝน ตชด. ค่ายท่านมูข  
ช่วงระหว่างวันที่ 29 ธันวาคม 2554 ถึง 1 มกราคม 2555 แสดงดังตาราง ง.1

ตารางที่ ง.1 ข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายชั่วโมง ณ สถานีวัดน้ำฝน ตชด. ค่ายท่านมูข ในช่วงระหว่าง  
วันที่ 29 ธันวาคม 2554 ถึง 1 มกราคม 2555

วัน เดือน ปี	เวลา	ปริมาณน้ำฝน	ปริมาณน้ำฝน	วัน เดือน ปี	เวลา	ปริมาณน้ำฝน	ปริมาณน้ำฝน
		(mm.)	สะสม (mm.)			(mm.)	สะสม (mm.)
29 ธ.ค. 2554	00:00	0.0	0.0	30 ธ.ค. 2554	00:00	2.6	2.6
	01:00	0.0	0.0		01:00	0.0	2.6
	02:00	0.0	0.0		02:00	0.0	2.6
	03:00	0.0	0.0		03:00	0.0	2.6
	04:00	0.0	0.0		04:00	0.0	2.6
	05:00	0.0	0.0		05:00	0.0	2.6
	06:00	0.0	0.0		06:00	0.0	2.6
	07:00	0.0	0.0		07:00	0.0	2.6
	08:00	0.0	0.0		08:00	0.0	2.6
	09:00	0.0	0.0		09:00	0.0	2.6
	10:00	0.0	0.0		10:00	0.0	2.6
	11:00	0.0	0.0		11:00	0.0	2.6
	12:00	0.0	0.0		12:00	0.0	2.6
	13:00	0.0	0.0		13:00	0.0	2.6
	14:00	0.0	0.0		14:00	0.0	2.6
	15:00	0.0	0.0		15:00	0.0	2.6
	16:00	0.0	0.0		16:00	0.2	2.8
	17:00	0.0	0.0		17:00	0.0	2.8
	18:00	0.0	0.0		18:00	0.0	2.8
	19:00	0.0	0.0		19:00	0.0	2.8
	20:00	0.0	0.0		20:00	0.0	2.8
	21:00	0.0	0.0		21:00	0.0	2.8
	22:00	0.0	0.0		22:00	0.0	2.8
	23:00	0.0	0.0		23:00	0.0	2.8

ตารางที่ ง.1 (ต่อ) ข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายชั่วโมง ณ สถานีวัดน้ำฝน ตชด. ค่ายท่านมูข ในช่วง  
ระหว่างวันที่ 29 ธันวาคม 2554 ถึง 1 มกราคม 2555

วัน เดือน ปี	เวลา	ปริมาณน้ำฝน	ปริมาณน้ำฝน	วัน เดือน ปี	เวลา	ปริมาณน้ำฝน	ปริมาณน้ำฝน
		(mm.)	สะสม (mm.)			(mm.)	สะสม (mm.)
31ธ.ค. 2554	00:00	5.6	8.4	1ม.ค. 2555	00:00	11.0	60.8
	01:00	11.2	19.6		01:00	10.0	70.8
	02:00	0.6	20.2		02:00	28.6	99.4
	03:00	0.0	20.2		03:00	37.0	136.4
	04:00	3.0	23.2		04:00	58.2	194.6
	05:00	0.2	23.4		05:00	46.6	241.2
	06:00	0.0	23.4		06:00	68.8	310.0
	07:00	0.2	23.6		07:00	9.4	319.4
	08:00	0.0	23.6		08:00	5.6	325.0
	09:00	0.0	23.6		09:00	5.2	330.2
	10:00	0.0	23.6		10:00	6.0	336.2
	11:00	0.0	23.6		11:00	2.8	339.0
	12:00	0.0	23.6		12:00	0.8	339.8
	13:00	0.2	23.8		13:00	2.0	341.8
	14:00	0.8	24.6		14:00	2.0	343.8
	15:00	0.0	24.6		15:00	0.4	344.2
	16:00	0.0	24.6		16:00	0.0	344.2
	17:00	0.0	24.6		17:00	0.0	344.2
	18:00	0.2	24.8		18:00	0.0	344.2
	19:00	0.2	25.0		19:00	0.0	344.2
	20:00	6.2	31.2		20:00	0.0	344.2
	21:00	5.6	36.8		21:00	0.0	344.2
	22:00	5.6	42.4		22:00	0.2	344.4
	23:00	7.4	49.8		23:00	0.0	344.4

**ภาคผนวก จ**

**ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยโปรแกรม GeoStudio V 2012  
สำหรับจัดทำแผนที่ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตที่ทำให้ลาดดินพิบัติ**

ตารางที่ จ.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตด้วยโปรแกรม GeoStudio V 2012 ที่ให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย 1.000

No.	ความหนา H (m)	มุมลาดเอียง $\beta$ (Degree)	ความชันฝน 2.5 mm/hr (55 mm/d)		ความชันฝน 5.0 mm/hr (110 mm/d)		ความชันฝน 10.0 mm/hr (240mm/d)	
			ความชันฝนสะสม (CCR, mm)	Step Time (Hr.)	ความชันฝนสะสม (CCR, mm)	Step Time (Hr.)	ความชันฝนสะสม (CCR, mm)	Step Time (Hr.)
1	1	15	***F.S. = 1.883***		***F.S. = 1.763***		***F.S. = 1.733***	
2	1	20	***F.S. = 1.310***		***F.S. = 1.307***		***F.S. = 1.304***	
3	1	25	***F.S. = 1.058***		***F.S. = 1.054***		***F.S. = 1.051***	
4	1	30	241.46	96.6	178.65	35.7	186.16	18.6
5	1	35	209.16	83.7	162.99	32.6	167.32	16.7
6	1	40	176.86	70.7	145.51	29.1	157.57	15.8
7	1	45	144.56	57.8	138.43	27.7	139.25	13.9
8	1.2	15	***F.S. = 1.617***		***F.S. = 1.616***		***F.S. = 1.612***	
9	1.2	20	***F.S. = 1.213***		***F.S. = 1.212***		***F.S. = 1.209***	
10	1.2	25	301.48	120.6	226.89	45.4	238.97	23.9
11	1.2	30	269.18	107.7	208.76	41.8	211.67	21.2
12	1.2	35	236.88	94.8	196.96	39.4	194.67	19.5
13	1.2	40	204.58	81.8	180.54	36.1	175.89	17.6
14	1.2	45	172.28	68.9	160.97	32.2	156.56	15.7

หมายเหตุ \*\*\*F.S. = x.xxx\*\*\* = ลาดดินไม่เกิดการพิบัติ และให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำสุด (Minimum Factor of Safety) มีค่า x.xxx

ตารางที่ จ.1 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตด้วยโปรแกรม GeoStudio V 2012 ที่ให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย 1.000

No.	ความหนา H (m)	มุมลาดเอียง β (Degree)	ความเข้มฝน 2.5 มม/hr (55 มม/d)		ความเข้มฝน 5.0 มม/hr (110 มม/d)		ความเข้มฝน 10.0 มม/hr (240 มม/d)	
			ความเข้มฝนสะสม (CCR, มม)	Step Time (Hr.)	ความเข้มฝนสะสม (CCR, มม)	Step Time (Hr.)	ความเข้มฝนสะสม (CCR, มม)	Step Time (Hr.)
15	1.4	15	***F.S. = 1.539***	***F.S. = 1.533***	***F.S. = 1.527***			
16	1.4	20	***F.S. = 1.148***	***F.S. = 1.146***	***F.S. = 1.142***			
17	1.4	25	329.20	131.7	262.79	52.6	259.51	26.0
18	1.4	30	296.90	118.8	242.65	48.5	241.86	24.2
19	1.4	35	264.60	105.8	226.72	45.3	216.99	21.7
20	1.4	40	232.30	92.9	198.32	39.7	193.96	19.4
21	1.4	45	200.00	80.0	172.83	34.6	174.40	17.4
22	1.6	15	***F.S. = 1.432***	***F.S. = 1.426***	***F.S. = 1.416***			
23	1.6	20	***F.S. = 1.079***	***F.S. = 1.068***	***F.S. = 1.055***			
24	1.6	25	356.92	142.8	296.72	59.3	294.09	29.4
25	1.6	30	324.62	129.8	278.88	55.8	257.52	25.8
26	1.6	35	292.32	116.9	254.66	50.9	231.57	23.2
27	1.6	40	260.02	104.0	224.67	44.9	218.75	21.9
28	1.6	45	227.72	91.1	230.74	46.1	191.92	19.2

หมายเหตุ \*\*\*F.S. = x.xxx\*\*\* = ค่าคินไม่เกิดการพิบัติ และให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำสุด (Minimum Factor of Safety) มีค่า x.xxx

ตารางที่ จ.1 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำฝนสะสมวิกฤตด้วยโปรแกรม GeoStudio V 2012 ที่ให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย 1.000

No.	ความหนา H (m)	มุมลาดเอียง $\beta$ (Degree)	ความชัน 2.5 mm/hr (55 mm/d)		ความชัน 5.0 mm/hr (110 mm/d)		ความชัน 10.0 mm/hr (240mm/d)	
			ความชันสะสม (CCR, mm)	Step Time (Hr.)	ความชันสะสม (CCR, mm)	Step Time (Hr.)	ความชันสะสม (CCR, mm)	Step Time (Hr.)
29	1.8	15	***F.S. = 1.432***		***F.S. = 1.426***		***F.S. = 1.416***	
30	1.8	20	***F.S. = 1.079***		***F.S. = 1.068***		***F.S. = 1.055***	
31	1.8	25	384.64	153.9	335.82	67.2	326.51	32.7
32	1.8	30	352.34	140.9	313.03	62.6	305.27	30.5
33	1.8	35	320.04	128.0	285.65	57.1	260.58	26.1
34	1.8	40	287.74	115.1	247.07	49.4	244.57	24.5
35	1.8	45	255.44	102.2	207.41	41.5	210.00	21.0
36	2	15	***F.S. = 1.491***		***F.S. = 1.392***		***F.S. = 1.378***	
37	2	20	***F.S. = 1.055***		***F.S. = 1.041***		***F.S. = 1.026***	
38	2	25	412.36	164.9	372.18	74.4	358.70	35.9
39	2	30	380.06	152.0	347.47	69.5	338.83	33.9
40	2	35	347.76	139.1	307.65	61.5	297.85	29.8
41	2	40	315.46	126.2	256.45	51.3	260.70	26.1
42	2	45	283.16	113.3	217.38	43.5	226.60	22.7

หมายเหตุ \*\*\*F.S. = x.xxx\*\*\* = ลาดดิน ไม่เกิดการพิบัติ และให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำสุด (Minimum Factor of Safety) มีค่า x.xxx



การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์ ก  
**Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development – Geotec Hanoi 3<sup>rd</sup>,**  
**24 – 25 November 2016. Hanoi. Vietnam**

## Analysis of a rainfall-triggered landslide and determination of critical cumulative rainfall for landslide warning in Southern Thailand

Tanaphot Jiratananuvong

*Songkla University, Songkhla, Thailand. E-mail: tanaphot.j@gmail.com*

Tanit Chalermyanont

*Songkla University, Songkhla, Thailand. E-mail: tanit246@gmail.com*

Tanan Chub-Uppakarn

*Songkla University, Songkhla, Thailand. E-mail: tanan2284@gmail.com*

*Keywords:* landslide, early warning, critical cumulative rainfall, Songkhla.

**ABSTRACT:** Increase in soil moisture due to heavy rainfall is the main factor that reduces shear strength of the soil and triggers landslide. This research aimed to study an effect of rainfall on soil moisture and stability of a natural slope in Songkhla province, southern Thailand. The slope experienced landslide on January 1<sup>st</sup>, 2012, where a cumulative rainfall of more than 344 mm was measured. A finite element model was developed for landslide analysis using GeoStudio software. Seepage simulation and slope stability analysis were conducted to assess the failure mechanism of the landslide. Simulation result indicates that landslide occurred when the accumulative rainfall exceeding 310 mm, which was practically similar to the measured rainfall. Based on the slope model established, a critical cumulative rainfall chart was generated and can be used for landslide warning purpose.

### 1. INTRODUCTION

Landslide is a geotechnical hazard that causes agricultural problem, economic difficulty, and even loss of life. Landslide risk is the result of several factors such as land use, soil type, slope angle, and rainfall. The most important factor that triggers landslide is the amount of rainfall (Zhang and Tang, 2011). Different rainfall intensity and pattern significantly affects the cumulative rainfall that triggers landslide (Guzzetti et al., 2007). The cumulative rainfall can be used for landslide early warning purpose.

On New Year day of 2012, several landslides took place in a mountainous area of Natawee district, Songkhla province, southern Thailand (Figure 1). The landslides caused by two-day heavy rainfall with cumulative rainfall exceeding

344 mm (Chalermyanont and Chub-Uppakarn, 2014). The heavy rainfall transformed stiff and unsaturated soils into soft and saturated soils that, in turn, reducing the stability of the slope until failure occurred. The objectives of this study were: 1) to access the failure mechanism of the rainfall-triggered landslide by conducting seepage and slope stability analyses and 2) to use the appropriate slope model obtained from the analyses to develop a rainfall intensity-cumulative rainfall chart that can be used for landslide early warning purpose. The seepage analysis was conducted by developing finite element-based seepage model (Seep/W), while, the slope stability analysis was based on limit equilibrium method (Slope/W). Both Seep/W and Slope/W are package modules in GeoStudio 2012 software (GEO-SLOPE International Ltd.).

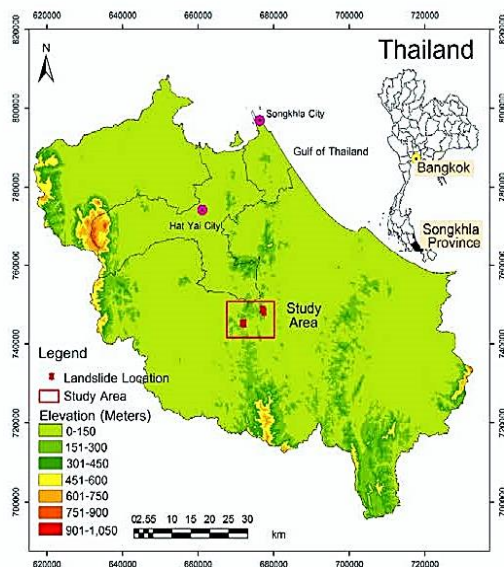


Figure 1. Topographical map showing landslide study area, Songkhla province, southern Thailand.

## 2. SITE DESCRIPTION

The study area is the mountainous area in Natawee district, Songkhla province, southern Thailand (Figure 1). Geologically, the bedrock of the study area consists of Triassic sedimentary rocks including sandstone, mudstone, and siltstone. Top soil is colluvial lying above the bedrock is silty sand, classified as SM according to the unified soil classification system (USCS) with thickness ranging from 1.0 to 2.0 m.

Because of the heavy rainfall from December 31<sup>st</sup>, 2011 to January 1<sup>st</sup>, 2012, landslides occurred at more than ten locations within the study area. The site study landslide is shown in Figures 2. It can be seen that the landslide failure occurred at the contact between soil and rock such that v-shape bedrock is evident in Figure 2a. The colluvial soil above bedrock was completely detached and moving downward along the streambed. The crown of the landslide was almost at the ridge of the mountain (Figure 2b). Distance from crown to toe was measured as 193 m. Width of the landslide ranged from 5 to 10 m with 1.0 to 2.5 m deep. Previous investigation by Chalermyanont and Chup-Uppakarn (2014) reveals index and engineering properties of the colluvial soil that caused landslide. Specific gravity ( $G_s$ ), liquid limit ( $LL$ ), plasticity index ( $PI$ ), saturated volumetric water content ( $\theta$ ) of the soil were 2.63, 19.13%, 4.3%, and 0.375, respectively. Hydraulic

conductivity of the soil was  $1.91 \times 10^{-3}$  cm/s. Multi-stage direct shear (MSDS) test (ASTM D-3080) was conducted to assess the shear strength of the soil. Mohr-Coulomb failure envelopes (Figure 3), obtained from the MSDS test indicate that the effective cohesion ( $c'$ ) and internal friction angle ( $\phi'$ ) of the soil were 3.37 kPa and 29.06 degrees, respectively.



Figure 2. A selected site for landslide analysis; (a) picture of landslide site; (b) aerial view of the landslide site.

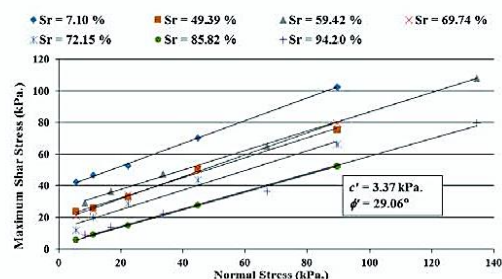


Figure 3. Multi - stage direct shear test results for determination of shear strength parameters of colluvial soil in the study site.

## 3. FINITE ELEMENT MODELLING

The landslide was modelled using finite element based software (GeoStudio v. 2012) as shown graphically in Figure 4. The model consisted of two layers; colluvial soil and bedrock with slope of 28 degrees. The soil was 1.4 m thick. Hydraulic and shear strength properties used in the model were described in the previous section and shown



in Figure 4. The bedrock was modelled to be very stiff and impermeable, the slope failure only occurred within the soil and soil-rock interface. Boundary conditions of the model are tabulated in Table 1. Rainfall boundary was set only at the ground surface. No flow boundary was used at the ridge and beneath bedrock layer. Water was allowed to drain out at the toe of the model which was modelled using a unit gradient boundary.

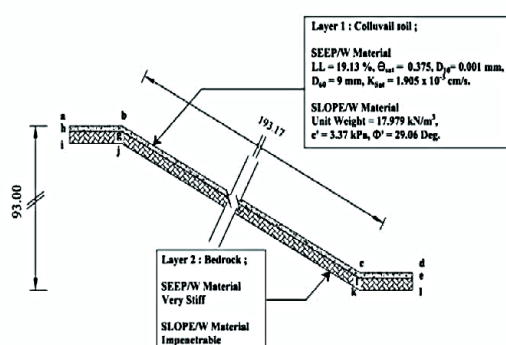


Figure 4. A finite element model for landslide analysis.

Table 1 Model boundary conditions.

Material	Boundary*	Boundary type
1. Soil	ab, bc, cd	Rainfall ( $q$ )
	ah	No Flow ( $Q = 0$ )
	de	Unit gradient ( $i$ )
2. Bed Rock	hi, ij, jk, kl, le	No Flow ( $Q = 0$ )

\* Boundary locations according to Figure 4.

To simulate transient seepage and reduction of shear strength during wetting, a soil water characteristic curve (SWCC) and a permeability function were needed. The SWCC exhibits relationship between matric suction and volumetric water content of the soil. In this study, the SWCC was obtained empirically using soil index properties following an equation proposed by Aubertin et al. (2003). The index properties used were;  $D_{10} = 0.001$  mm,  $D_{60} = 9$  mm,  $\theta_s = 0.375$ , and  $LL = 19.13\%$ . The computed SWCC is shown graphically in Figure 5a. The SWCC was validated by comparing with SWCCs of similar soil types acquired from UNSODA (Unsaturated Soil Hydraulic Database, USDA). As seen in Figure 5a, the computed SWCC compared fairly well with the acquired SWCCs. Correspondingly, a permeability function (Figure 5b), which explains the relationship between the matric suction and hydraulic conductivity was computed using the SWCC just obtained following an equation proposed by van Genuchten (1980).

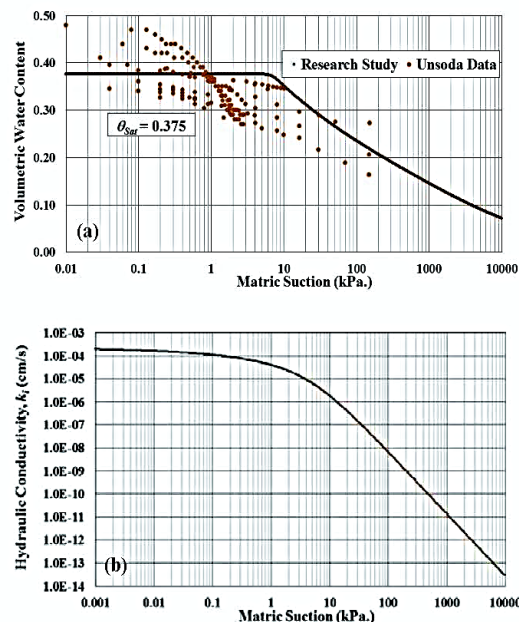


Figure 5. Soil properties used in finite element analysis: (a) soil water characteristic curve (SWCC); (b) permeability function.

## 4. RESULTS AND DISCUSSION

### 4.1 Seepage Analysis

A transient seepage simulation was conducted using Seep/w module. Measured rainfall data from December 29<sup>th</sup>, 2011 to January 2<sup>nd</sup>, 2012 were used as input rain into the model with total of 120 time steps (i.e., a time step = 1 hr). Simulation results are shown in Figures 6. Figure 6a is a time series plot of volumetric water content profile. Before raining, the volumetric water content was 0.19. During raining, the volumetric water content increased while the wetting front moved downward. The soil layer was fully saturated at time step of 78 when the volumetric water content for the whole depth of soil exceeded 0.375. When the rain stopped, seeping water was drained out of the soil and the volumetric water content decreased. As shown in Figure 6a, the volumetric water content profiles for the time steps of 84 and 120 moved back to the left (e.g., decreasing of volumetric water content).

Likewise, the pore water pressure of the soil increased with increasing volumetric water content (Figure 6b). The pore water pressure changed with time from negative to positive values when the soil transformed from unsaturation to saturation, which, in turn, reduced its shear strength proportionally.

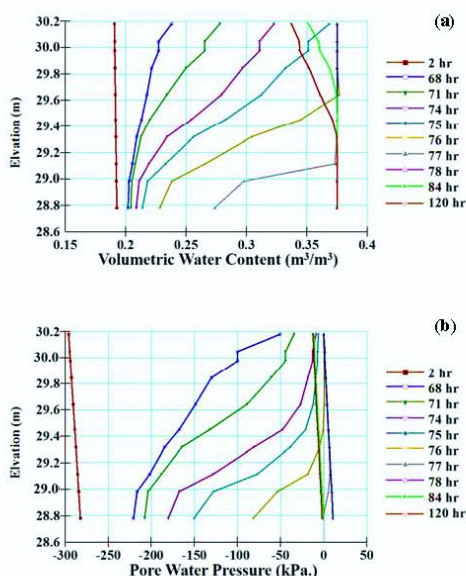


Figure 6. Typical seepage simulation results: (a) volumetric water content profiles; (b) pore water pressure profiles.

#### 4.2 Slope Stability Analysis

Stability of the slope was assessed by conducting slope stability analysis using Bishop's simplified method. A model for computing soil shear strength with respect to soil suction by Vanapalli et al. (1996) was used in computing shear strength of the unsaturated soil. Factor of safety ( $FS$ ) for every time steps was computed using Slope/W module. The  $FS$  was computed for both unsaturated-and-firm conditions (e.g., at early time steps) and saturated-and-soft conditions (e.g., at late time steps after the heavy rain). Computed  $FS$  values according to the time steps are illustrated in Figure 7. As expected, the  $FS$  values were high (i.e., as high as 7.61) when the soil was as its natural state. However, after the slope was poured by the heavy rain on December 31<sup>st</sup>, 2011,  $FS$  values reduced drastically. The slope failed with corresponding  $FS$  of 0.858 when the cumulative rainfall exceeded 310 mm at time step 78.

The critical slip surface computed to have minimum  $FS$  of 0.858 and caused the landslide is shown Figure 8. It can be examined from this figure that the slope failure occurred initially at the bottom part near the toe. Consequently, the upper part of slope near the crown lost its supporting soil mass and moved downward. Detailed seepage

simulation results support the aforementioned statement. Because of the fact that the slope was very long and thin and the bedrock was essentially impermeable, thus, drainage took place only at the toe. For heavy rainfall, high seeping water through the toe was observed in seepage simulation. Practically, high seeping water usually erodes the soil particles along with it. Loss of soil mass due to erosion at the toe, in this study, was hypothetically believed to be another cause that helped triggering the landslide.

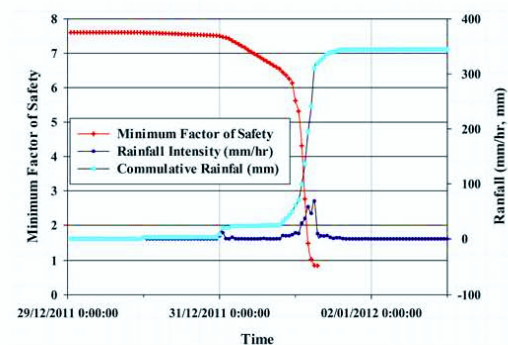


Figure 7. Rainfall intensity, cumulative rainfall, and computed factor of safety of the slope.

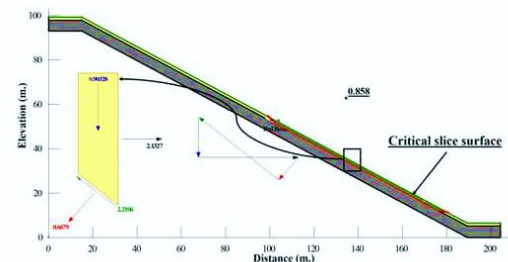


Figure 8. Critical slip surface of the slope.

#### 4.3 Critical cumulative rainfall for landslide warning

For landslide warning purpose, a chart showing critical cumulative rainfall was developed (Figure 9). In developing this chart, the slope model and all setting parameters previously described were used. Rainfall intensity, however, was set to be constant for each run. Transient seepage simulation and slope stability analysis were conducted and the  $FS$  was computed. The cumulative rainfall associated with the failed slope (i.e., computed  $FS = 1.0$ ) was defined as critical cumulative rainfall. Relationships between cumulative rainfall and rainfall intensity are shown in Figure 9. It can be



seen that the critical cumulative rainfall is not a constant value but it varies with rainfall intensity.

To show how the chart can be used in landslide warning purpose, a series of rainfall events observed in the study area were plotted on Figure 9. The dotted lines show several rainfall events that actually did not cause the landslide. These lines do not cross the critical cumulative rainfall line (red line with  $FS=1.0$ ). On the contrary, the blue line (the rainfall event that triggered landslide) crosses the critical cumulative rain fall line at the cumulative rainfall of 310 mm. In summary, the critical cumulative rainfall chart has been proved to be effectively used for landslide warning. However, this chart was developed and validated using only single landslide event. More monitoring rainfall and landslide data from the study area are needed to improve the validity of the chart.

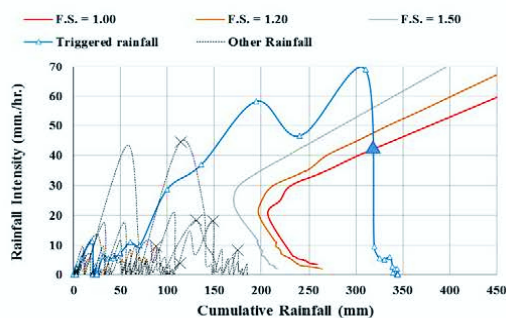


Figure 9. A cumulative rainfall chart for landslide warning of the study area

## 5. CONCLUSIONS

A rainfall-triggered landslide in Songkhla province, southern Thailand due to the heavy rainfall from December 31<sup>st</sup>, 2011 to January 1<sup>st</sup>, 2012, was investigated. The failed slope was about 28 degree consisting of 1.4-thick colluvial overlying the sedimentary bedrock. A finite element model was developed and transient seepage simulation and slope stability analysis were conducted to assess the failure mechanism of the landslide. Simulation results revealed that as the volumetric water content of the soil increased, the soil shear strength decreased which, in turn, reduced the stability of the slope. The slope failed when computed FS was less than unity and accumulative rainfall exceeded 310 mm. This accumulative rainfall was fairly well corresponded to the observed rainfall that actually triggered landslide. A critical cumulative rainfall chart was developed for landslide warning purpose

for the study area. The chart was proved to be effective on landslide warning.

## 6. ACKNOWLEDGEMENT

Partial support of this study was jointly funded by Prince of Songkhla University and the Thailand Research Fund under a creative area-based collaborative research development project for Songkhla province, Grant no. PSU-TRF\_ABC5501. This support is gratefully acknowledged.

## 7. REFERENCES

- Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussiere, B., and Chapuis, R.P. (2003). A model to predict the water retention curve from Basic geotechnical properties. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(6): 1104-1122.
- Chalermyanont, T. and Chup-Uppakarn, T., (2014) Landslide risk assessment and development of warning system in Songkhla province. Final Report, The Thailand Research Fund, 145p. (in Thai).
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., and Stark, C.P. (2007). Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 98(3), 239-267.
- Van Genuchten, M. Th., (1980). A closed - form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898.
- Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., Pufahl, D.E., and Clifton, A.W. (1996). Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. *Canadian Geotechnical Journal*, 33: 379-392.
- Zhang, L.L., Zhang, J., Zhang, L.M., and Tang, W.H. (2011). Stability analysis of rainfall-induced slope failure: a review. *Geotechnical Engineering*, 164(GE5): 299-316.



**FECON**



# CERTIFICATE OF ATTENDANCE

**TANAPHOT JIRATANANUVONG**

**attended**

*The 3<sup>rd</sup> International Conference GEOTEC HANOI on Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development*  
held on 24-25 November 2016 at JW Marriott Hotel in Hanoi, Vietnam.

**Dr. Phung Duc Long**  
Chairman of Scientific Committee

**Mr. Pham Viet Khoa**  
Chairman of Organizing Committee

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายธนพจน์ จิรธนานุวงศ์  
 รหัสประจำตัวนักศึกษา 5510120040  
 วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2554

## ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนศึกษยก้นกฏิ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีการศึกษา 2555 – 2556  
 ทุนสนับสนุน โครงการวิจัย การประเมินพื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่มจังหวัดสงขลาเพื่อการเตือนภัย :  
 กรณีศึกษา ต.คลองทราย อ.นาทวี, โครงการความร่วมมือเพื่อการพัฒนาเชิงพื้นที่จังหวัดสงขลาแบบ  
 สร้างสรรค์ (MOU ม.อ. – สกว.) 2556 - 2559

## การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Tanaphot Jiratananuvong, Tanit Chalermyanont and Tanan Chub-Uppakarn. (2016). Analysis of a  
 Rainfall-Triggered Landslide and Determination of Critical Rainfall for Landslide  
 Warning in Southern Thailand. Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development  
 – Geotec Hanoi 3<sup>rd</sup>, 24 – 25 November 2016. Hanoi. Vietnam., P. 1129.