



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)  
ปริญญา

วิศวกรรมโยธา สาขา วิศวกรรมโยธา  
สาขา ภาควิชา

เรื่อง พฤติกรรมด้านกำลังทางวิศวกรรมของดินถล่มในจังหวัดภูเก็ต

Strength of Landslide Behaviors in Phuket Province

นามผู้วิจัย นางสาวทิพย์มณี เชียงทอง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ ( รองศาสตราจารย์วารกร ไม้เรียง, Ph.D. )

กรรมการ ( รองศาสตราจารย์ประทีป ดวงเดือน, M.Eng. )

กรรมการ ( รองศาสตราจารย์ไยอนงค์ ทิมสุวรรณ, Ph.D. )

กรรมการ ( รองศาสตราจารย์ชวเลข วณิชเวทิน, Ph.D. )

หัวหน้าภาควิชา ( รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทรวงกุล, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญจนา ชีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

พฤติกรรมด้านกำลังทางวิศวกรรมของดินถล่มในจังหวัดภูเก็ต

Strength of Landslide Behaviors in Phuket Province

โดย

นางสาวทิพย์มณี เชียงทอง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2552

ทิพย์มณี เชียงทอง 2552: พฤติกรรมด้านกำลังทางวิศวกรรมของดินถล่มในจังหวัดภูเก็ต  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชา  
วิศวกรรมโยธา ปรธานกรรมการที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์วรากร ไม้เรียง, Ph.D.  
190 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมทางวิศวกรรมของลาดดินถล่มในพื้นที่จังหวัดภูเก็ต โดยการ  
สำรวจและเก็บตัวอย่างดินมาทำการทดสอบหาลำรับแรงของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ พร้อมทั้งติดตั้ง  
อุปกรณ์สนาม “Tensiometer” สำหรับตรวจวัดแรงดึงน้ำในมวลดินที่ความลึกต่าง ๆ ของลาดดินใน  
พื้นที่ต้นแบบกมลาและป่าตอง เพื่อนำผลการตรวจวัดมาวิเคราะห์พฤติกรรมที่เปลี่ยนแปลงไปใน  
สภาวะฝนต่าง ๆ และวิเคราะห์การไหลซึมของปริมาณฝนลงสู่ลาดดินโดย Finite Element Method  
ซึ่งเชื่อมโยงไปถึงเสถียรภาพของลาดดินที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณฝนที่ตก เพื่อให้เกิดประโยชน์  
กับประชาชนในพื้นที่และง่ายในการใช้งานจึงประยุกต์ผลลัพธ์ที่ได้ให้แสดงในรูปของกราฟปริมาณ  
ฝนวิกฤติ (Critical Rainfall Envelope) สำหรับใช้เตือนภัยลาดดินถล่มในพื้นที่จังหวัดภูเก็ต

ผลการวิจัยพบว่า ลาดดินที่มีโอกาสเกิดการพิบัติมีความลึก 0.60 - 1.30 เมตร เป็นดินชั้น B  
horizon ที่มีการสะสมของตะกอนดินเหนียวและมีปริมาณน้ำในมวลดินมากกว่าชั้นอื่น ๆ โดยที่  
ระดับความอิ่มตัววิกฤติของน้ำ 92 % ทำให้เกิดการพิบัติโดยมีอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดิน  
เท่ากับ 1.00 ในการสร้างเส้นปริมาณฝนวิกฤติ (Critical Rainfall Envelope) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์  
ระหว่างปริมาณฝนในวันที่พิจารณากับปริมาณฝนสะสม 4 วัน ก่อนหน้าวันที่พิจารณา โดยลาดดินที่  
ใช้เป็นความลาดเอียงวิกฤติมีค่าเท่ากับ 24.5 องศา และกำหนดให้มีระดับการเตือนภัย 3 ระดับ คือ  
ระดับเฝ้าระวัง (Alert) ระดับแจ้งเตือน (Alarm) และระดับอพยพ (Action) แต่ละระดับการเตือนภัย  
เมื่อกำนวณจากแบบจำลองแล้วจะมีอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.40, 1.20 และ 1.00 ตามลำดับ

---

ลายมือชื่อนิติ

---

ลายมือชื่อประธานกรรมการ

Thipmanee Chaingtong 2009: Strength of Landslide Behaviors in Phuket Province.  
Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of  
Civil Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Warakorn Mairiang, Ph.D.  
190 pages.

This research aims to study the engineering behaviors of the landslide in Phuket Province. The soil conditions were investigated and the samples were collected for unsaturated strength determination. Moreover, the “Tensiometer” was installed at several depths on soil slope for the pilot area (Kamala and Patong Districts) to measure the matric suction in the soil. Then, the data was analysed to see infiltration behaviors due to rainfall. Finite Element Method is used to analyse infiltration on soil slope. Then, the degree of saturation relates to soil strength and stability on soil slope due to particular rainfall patterns were calculated. The result shows that the Critical Rainfall Envelope can be used for warning to the people on the area.

The study found that the soil slope has potential of failure at the depth of 0.60 - 1.30 m. This soil layer is known as “B horizon” which is the accumulation of fine particles and high degree of saturation. The soil saturation of 92% which causes the unstable slope of factor safety of 1.00. The suggested Critical Rainfall Envelope showed the relationship between the trigger rainfall on that day and the accumulated rainfall on the previous four days. The critical soil slope is 24.5 degrees. Three warning levels, namely alert, alarm and action levels are proposed. After the analysis from the model, the safety of factors at each warning levels are 1.40, 1.20 and 1.00 respectively are established.

---

Student’s signature

---

Thesis Advisor’s signature

## กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้รับความกรุณา ความเมตตาจากรองศาสตราจารย์วารกร ไหมเรียง ซึ่งได้ให้ความรู้ คำแนะนำและเป็นกำลังใจในการทำงานมาโดยตลอด รวมทั้งเป็นแบบอย่างในการทำงานและการดำเนินชีวิตให้กับข้าพเจ้า รองศาสตราจารย์ ประทีป ดวงเดือน, รองศาสตราจารย์โยนงค์ ทิมสุวรรณ, รองศาสตราจารย์ชวเลข วัฒนวิทิน และรองศาสตราจารย์ชัยวัฒน์ ขยันการนาวิ อาจารย์ผู้แทนบัณฑิต ที่ได้ให้คำปรึกษา ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ นอกจากนี้ยังขอขอบคุณอาจารย์ กิตติศักดิ์ แก้วสามเรือน และอาจารย์เฉลิมชัย ตระกูลศุภวงศ์ ที่อำนวยความสะดวกในการระหว่างการทำงานวิจัยในห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์ หัวหน้าศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ในการเอื้อเฟื้อสถานที่วิจัย คุณนิภา คุณศิริลักษณ์ คุณมนันยา และเจ้าหน้าที่ของศูนย์วิจัยทุกท่าน ในการให้ความช่วยเหลือและข้อแนะนำในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณนงลักษณ์ คุณบรรพต คุณองอาจ อาจารย์บุญชัย คุณสันติ คุณรัฐธรรม คุณปณต คุณชิโนรส คุณก้องรัฐ คุณเอกพงษ์ คุณอิสสรียา คุณจิตติพร คุณพรสวัสดิ์ คุณยุทธลักษณ์ คุณฉัตรชัย คุณพรหมนาถ คุณปิยพงศ์ คุณสุรชัย คุณสมพร คุณจิรานูวัฒน์ คุณกนกวรรณ คุณณัฐพล คุณภาณุ คุณสมศักดิ์ คุณวิษณุพงศ์ รวมถึงเพื่อนๆ และพี่ๆ และน้องนิสิตปริญญาโท ตลอดจนผู้เกี่ยวข้องในการวิจัยนี้ที่ไม่ได้เอ่ยนามทุกท่าน สำหรับความช่วยเหลือในการสำรวจพื้นที่ดินถล่ม รวมไปถึงคำแนะนำและกำลังใจ ในการทำงานให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณอนุเทพ กรรมการบริหารบริษัท ปัญญา คอนซัลแตนท์ จำกัด คุณวรวิฑูริ คุณอนุสรณ์ คุณสำเร็จ คุณบรรจง คุณอภิศักดิ์ คุณจินดา คุณเสาวคนธ์ คุณพรพรรณ คุณองอาจ คุณภัสดา แผนกออกแบบ 1 (Dam) รวมทั้งเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ในบริษัททุกท่าน ที่ได้ให้ความสนับสนุนในการทำงานวิจัย และเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้ามาโดยตลอด

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่และคุณพี่ ที่ได้ให้การสนับสนุนในการเรียนและการทำงานวิจัยนี้

ทิพย์มณี เชียงทอง

พฤศจิกายน 2551

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	85
อุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัย	85
วิธีดำเนินงานวิจัย	87
ผลและวิจารณ์	101
สรุปผลการวิจัย	164
ข้อเสนอแนะ	167
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	168
ภาคผนวก	172
ภาคผนวก ก ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม	173
ภาคผนวก ข กราฟปริมาณน้ำฝนวิกฤติ (Critical Rainfall Envelope) กับปริมาณ ฝนในอดีต	182
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	190

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การเกิดน้ำหลากและลาดดินถล่มที่รุนแรงในประเทศไทย	13
2	การจำแนกประเภทการเคลื่อนพังของลาดโดยวิธีของ Varnes (1978)	18
3	ปัจจัยของพืชปกคลุมลาดดินที่มีผลต่อเสถียรภาพความลาด	21
4	อุปกรณ์ที่ใช้ในการหา Total, Matric และ Osmotic Suction	35
5	การเปรียบเทียบการทดสอบ Direct shear Test กับ Triaxial Test	57
6	ความสัมพันธ์ระหว่าง $N$ กับความแข็งแรงของดินเม็ดหยาบ	66
7	แสดงปริมาณฝนและจำนวนวันฝนตกในแต่ละเดือน	79
8	จำนวนตัวอย่างดินของพื้นที่ต้นแบบหาดกมลา	94
9	จำนวนตัวอย่างดินของพื้นที่ต้นแบบหาดป่าตอง	94
10	คุณสมบัติของตัวอย่างดินบริเวณพื้นที่ต้นแบบหาดกมลา (KML)	108
11	คุณสมบัติของตัวอย่างดินบริเวณพื้นที่ต้นแบบป่าตอง (PT)	109
12	กลุ่มตัวอย่างดินจากพื้นที่ต้นแบบหาดกมลาและหาดป่าตอง	110
13	ผลการทดสอบกำลังรับแรงของดิน แบบ Conventional Direct Shear ที่ความชื้นธรรมชาติ	111
14	ผลการทดสอบกำลังรับแรงของดิน แบบ Multi-stage Direct Shear ที่ระดับความอิ่มตัวต่าง ๆ	112
15	การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการสมมติค่าความชื้นน้ำของดิน	126
16	การแบ่งค่าความชื้นน้ำของดินเป็นกรณีต่าง ๆ	127
17	แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์การไหลซึมเพื่อให้ได้ค่าความชื้นของของชั้นดิน	128
18	โอกาสเกิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของฝนในแต่ละรูปแบบช่วงปี ค.ศ. 1981 ถึง 2003	135
19	ปริมาณฝนสูงสุดที่คาบความถี่ของการเกิดต่าง ๆ (หน่วยเป็น มม.)	136
20	รูปแบบน้ำฝนสำหรับการวิเคราะห์การไหลซึมของปริมาณฝน	137
21	อัตราส่วนปลอดภัย (FS.) ของลาดดินที่ระดับความอิ่มตัวของน้ำในมวลดินต่าง ๆ	140
22	แสดงความลาดเอียงเป็นองศาของพื้นที่ในจังหวัดภูเก็ต	145
23	แสดงความลาดเอียงของพื้นที่ที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ	147
24	การให้คะแนนการประเมินความสูญเสีย	153

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
25	แสดงค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ระดับความเชื่อมั่นต่าง ๆ	156
26	ข้อมูลที่ใช้ในการพล็อตกราฟปริมาณฝนวิกฤติ	162

## สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	วิจัยกรทางธรณีวิทยา	5
2	ขบวนการผุพังของ Granitic Rock	8
3	Weathering profile ของดินแกรนิต	10
4	แผนที่พื้นที่เสี่ยงภัยต่อลาดดินถล่มของประเทศไทย	14
5	แสดงแผนที่พื้นที่ที่มีโอกาสเกิดแผ่นดินถล่มจังหวัดภูเก็ต	15
6	รูปแบบการพิบัติของลาดดิน	17
7	ตัวอย่างอัตราการเคลื่อนตัวของลาดดินเทียบกับปริมาณน้ำฝนสะสม 10 วัน จากการ ศึกษาที่ Honolulu	19
8	ค่าความชันต่ำสุดของการเกิดแต่ละรูปแบบการพิบัติ	20
9	ปัจจัยต่างๆ ของพืชที่มีผลต่อเสถียรภาพความลาด	22
10	ลักษณะเส้นระดับน้ำของชั้นดินทั่วไป	25
11	สถานะต่าง ๆ ของน้ำและอากาศในดิน	26
12	ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ $\chi$ กับ Degree of Saturation	28
13	กฎการวิบัติของ Mohr และ Coulomb	30
14	ความสัมพันธ์ของการวิบัติของดินในรูปแบบของ Unsaturated Soil	32
15	Total Suction and its component	34
16	แสดงค่าแรงดูดโดยรวม, Matric Suction, Osmotic Suction ของดิน Glacial Till	34
17	หลักการของ High air entry ceramic disks โดย Kelvin 's Capillary Model	36
18	แสดงรายละเอียดของ Tensiometer	37
19	แสดงชนิดของ Tensiometer	38
20	การติดตั้ง Tensiometer ในลาดดิน Weathered Granite	38
21	บ่อสำรวจที่ใช้ในการติดตั้ง Tensiometer ในสนาม	39
22	Matric Suction ตามความลึกของบ่อสำรวจ ณ เวลาต่าง ๆ	39
23	Axis-Translation สำหรับวัดค่า Matric Suction	40
24	ความสัมพันธ์ของ Water Content กับ Matric Suction	41
25	การวัดค่า Negative Pore Water Pressure โดยการใช้ AGWA-II Sensor	42

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
26	การวัดค่า Suction Head ตามความลึกระหว่างผ่นตก	43
27	การวัดปริมาณ Water Content ตามความลึกระหว่างผ่นตก	43
28	วัฏจักรของน้ำ	45
29	แสดงการกระจายตัวของน้ำในดิน	46
30	การเปลี่ยนแปลงระดับความอืดตัวในมวลดิน	47
31	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความอืดตัวของดินกับค่า Matric Suction	47
32	Lumb Wetting Front	50
33	Bodman and Cole Wettint front	50
34	การไหลของน้ำผ่านตัวกลางทรงลูกบาศก์	51
35	Direct Shear Test	56
36	กราฟทางเดินของหน่วยแรงจาก Multi-Stage Triaxial Test	60
37	Stress-Strain Curve ทดสอบ โดย Multi-Stage Triaxial Test	61
38	แสดงเครื่องมือทดสอบ Kunzelstab Penetration Test	64
39	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการตอกและกำลังของดิน	65
40	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง N (SPT) และค่า $\phi$ โดยประมาณ	65
41	ลักษณะข้อมูลแบบ Vector และ Raster	70
42	ภาพ 3 มิติแสดงลักษณะภูมิประเทศของ จ. ภูเก็ต	72
43	ลักษณะภูมิประเทศและพื้นที่รับน้ำของชุมชน กมลา ป่าตอง และกะรน	73
44	แผนที่การใช้ที่ดิน บริเวณอ่าวกมลา อ่าวป่าตอง และอ่าวกะรน จังหวัดภูเก็ต	75
45	ลักษณะทางธรณีวิทยาบริเวณพื้นที่ฝั่งตะวันตกของเกาะภูเก็ต	77
46	สถิติน้ำฝนในช่วงเดือนตุลาคม	80
47	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	88
48	การติดตั้ง Tensiometer สำหรับวัดแรงดึงน้ำในมวลดิน	90
49	แสดงอุปกรณ์ต่าง ๆ ของ Raingauge with Datalogger	91
50	การติดตั้ง Raingauge with Datalogger บริเวณข้างเคียงพื้นที่ดินแบบ	92
51	การติดตั้ง Inclinometer บริเวณพื้นที่ดินแบบหาดป่าตอง	93

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
52	การเก็บตัวอย่างดินคงสภาพ	95
53	การทดสอบดินในสนามด้วยวิธี Kunzelstab Penetrometer Test	96
54	หน้าตัดแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์การไหลซึม	99
55	ตำแหน่งที่ตั้งของพื้นที่ดินแบบ	102
56	ลักษณะพื้นที่ดินแบบบริเวณไหล่เขาเหนือหาดกมลา (KML)	103
57	ลักษณะพื้นที่ดินแบบบริเวณไหล่เขาเหนือหาดป่าตอง (PT)	103
58	ผลการหั่งทดสอบชั้นดินของพื้นที่เหนือหาดกมลา (KML)	104
59	ผลการหั่งทดสอบชั้นดินของพื้นที่เหนือหาดป่าตอง (PT)	105
60	การตรวจวัดการเคลื่อนที่ของลาดดินด้วย Inclinomater บริเวณพื้นที่หาดป่าตอง	106
61	แสดงลักษณะชั้นดินในบริเวณพื้นที่ดินแบบหาดกมลา	109
62	แสดงลักษณะชั้นดินในบริเวณพื้นที่ดินแบบหาดป่าตอง	110
63	ผลการทดสอบกำลังรับแรงของดิน แบบ Conventional Direct Shear ที่ความชื้นธรรมชาติ	111
64	ผลการทดสอบ Direct shear ของตัวอย่างดินในพื้นที่ดินแบบหาดกมลา ในรูปแบบ 3 แกน	112
65	ผลการทดสอบ Direct shear ของตัวอย่างดินในพื้นที่ดินแบบหาดป่าตอง ในรูปแบบ 3 แกน	113
66	ผลการตรวจวัดค่าแรงดึงน้ำในมวลดินกับปริมาณ $W_n$ ของพื้นที่ดินแบบหาดกมลา	114
67	ผลการตรวจวัดค่าแรงดึงน้ำในมวลดินกับปริมาณ $W_n$ ของพื้นที่ดินแบบหาดป่าตอง	115
68	การเปลี่ยนแปลงระดับความอิ่มตัวของน้ำในมวลดินในเดือนต่าง ๆ	117
69	การเปลี่ยนแปลงระดับความอิ่มตัวและแรงดึงน้ำในมวลดิน ตามความลึกของดินในเดือนต่าง ๆ	119
70	การเปลี่ยนแปลงความชื้นในดิน ณ เวลาต่าง ๆ	121
71	หน้าตัดแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์การไหลซึม	122
72	Soil water characteristic curve ของดินในชั้นต่าง ๆ	123
73	การกระจายตัวของเม็ดดินเทียบกับตัวอย่างดินในหาดป่าตอง	124

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
74	Permeability function ของดิน Glacial Till (Compacted)	124
75	Permeability function ของตัวแปรต่าง ๆ สำหรับการวิเคราะห์ย้อนกลับ	126
76	การจัดกลุ่มที่สนใจตามปริมาณฝนเฉลี่ยรายเดือนตั้งแต่ปี ค.ศ. 1981 ถึง 2003	129
77	การจัดกลุ่มที่สนใจตามปริมาณฝนเฉลี่ยรายเดือนปี ค.ศ. 2004 (ปีที่ทำการติดตามผลในสนาม)	129
78	กรณีศึกษาที่น่าสนใจ และมีรูปแบบการไหลซึมใกล้เคียงกับในสนาม	130
79	ปริมาณฝนในช่วงเวลาที่สนใจ(นำมาวิเคราะห์)	131
80	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นจากในสนามและจากวิธีไฟไนท์อิเลิเมนต์	132
81	รูปแบบการตกของฝน	134
82	หน้าตัดแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน	139
83	การเปลี่ยนแปลงของระดับความอิ่มตัวของน้ำในมวลดินในเดือนต่าง ๆ ตามความลึกในชั้นดิน	142
84	ภาพ 3 มิติแสดงลักษณะภูมิประเทศของ จ. ภูเก็ต	144
85	ความลาดเอียงของพื้นที่ในจังหวัดภูเก็ต	146
86	ความลาดเอียงของพื้นที่ในจังหวัดภูเก็ตเป็นองศา ที่มีผลกับเสถียรภาพของลาดดิน	146
87	ความลาดเอียงของพื้นที่ในจังหวัดภูเก็ต (พื้นที่เป็น %)	147
88	แสดงช่วงความลาดชันต่าง ๆ (Grid ขนาด 50 x 50)	149
89	การซ้อนทับ Contour ที่มีระดับ น้อยกว่า 40 ม.รทก. บนพื้นที่ที่มีความลาดชันต่าง ๆ	150
90	การซ้อนทับ Contour ที่มีระดับ 40 – 80 ม.รทก. บนพื้นที่ที่มีความลาดชันต่าง ๆ	151
91	การซ้อนทับ Contour ที่มีระดับมากกว่า 80 ม.รทก. บนพื้นที่ที่มีความลาดชันต่าง ๆ	151
92	การซ้อนทับชุมชนอยู่อาศัยและเศรษฐกิจบนพื้นที่ที่มีความลาดชันต่าง ๆ	152
93	การซ้อนทับทางน้ำ (Stream line) บนพื้นที่ที่มีความลาดชันต่าง ๆ	153
94	แสดงการเปลี่ยนแปลงระดับความอิ่มตัวของน้ำในมวลดินในช่วงเวลาต่าง ๆ	155
95	แสดงอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินเมื่อเกิดฝนตกติดต่อกัน	157
96	แสดงกราฟปริมาณฝนวิกฤติของลาดดินในจังหวัดภูเก็ต	158

### สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
97	แสดงปริมาณการไหลซึมลงสู่ใต้ผิวดินของน้ำฝน	159
98	การปรับแก้กราฟปริมาณฝนวิกฤติ	159
99	กราฟปริมาณฝนวิกฤติ (Critical Rainfall Envelope) สำหรับใช้เดือนกษัตริณถล่ม	160
100	แสดงตัวอย่างปริมาณฝนที่ตกในพื้นที่จำนวน 4 ลูก	161
101	แสดงตัวอย่างการใช้กราฟปริมาณฝนวิกฤติ	162
<b>ภาพผนวกที่</b>		
ข1	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝนในปี 1998 และกราฟปริมาณน้ำฝนวิกฤติ (Critical Rainfall Envelope)	183
ข2	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝนในปี 1999 และกราฟปริมาณน้ำฝนวิกฤติ (Critical Rainfall Envelope)	184
ข3	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝนในปี 2000 และกราฟปริมาณน้ำฝนวิกฤติ (Critical Rainfall Envelope)	185
ข4	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝนในปี 2001 และกราฟปริมาณน้ำฝนวิกฤติ (Critical Rainfall Envelope)	186
ข5	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝนในปี 2002 และกราฟปริมาณน้ำฝนวิกฤติ (Critical Rainfall Envelope)	187
ข6	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝนในปี 2003 และกราฟปริมาณน้ำฝนวิกฤติ (Critical Rainfall Envelope)	188
ข7	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝนในปี 2004 และกราฟปริมาณน้ำฝนวิกฤติ (Critical Rainfall Envelope)	189

## พฤติกรรมด้านกำลังทางวิศวกรรมของดินถล่มในจังหวัดภูเก็ต

### Strength of Landslide Behaviors in Phuket Province

#### คำนำ

ในช่วง 10 - 20 ปีที่ผ่านมา ประเทศไทยได้รับความเสียหายจากการพิบัติของลาดดินเป็นมูลค่ามหาศาล ทั้งพื้นที่อยู่อาศัย, พื้นที่การเกษตร และพื้นที่สาธารณะต่าง ๆ การพิบัติของลาดดินนั้นจะเกิดบนพื้นที่ที่มีภูมิประเทศสูงชัน มีการบุกรุกทำลายป่า ประกอบกับมีปริมาณน้ำฝนมาก เช่น การเกิดการพิบัติของลาดดินที่บริเวณอุทยานแห่งชาติเขาลง ปลายปี 2531 บริเวณพื้นที่รอยต่อระหว่าง จ.นครศรีธรรมราช กับ จ.สุราษฎร์ธานี ในพื้นที่นี้มีการบุกรุกเข้าไปทำพืชสวน ประกอบกับเป็นช่วงปลายปีซึ่งมีน้ำฝนตกมาก ความรุนแรงของการพิบัติของลาดดินและอุทกภัยในครั้งนี้ ทำให้มีผู้เสียชีวิต 356 คน และมูลค่าความเสียหายไม่ต่ำกว่า 7 พันล้านบาท ยังมีการพิบัติของลาดดินอีกเป็นจำนวนมาก ไม่ว่าจะเป็นพื้นที่ในภาคเหนือ ภาคใต้ และภาคตะวันออก

ในพื้นที่ที่เกิดการพิบัติหน่วยงานต่างๆ ของรัฐบาลได้เข้าไปช่วยเหลือ ทั้งการจัดสรรที่อยู่อาศัย พื้นที่สำหรับประกอบอาชีพ และในด้านวิศวกรรมได้มีการดำเนินการแก้ไข เพื่อป้องกันลาดดิน และสร้างฝายและเขื่อนป้องกันน้ำหลาก ส่วนในด้านงานการป้องกันและระบบเตือนภัย ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการลดความเสี่ยงต่อการสูญเสียชีวิตและทรัพย์สิน รวมทั้งการประเมินพื้นที่เสี่ยงต่อการพิบัติของลาดดิน จากสาเหตุในการพิบัติฯ ซึ่งประกอบไปด้วย สาเหตุจากธรรมชาติ ได้แก่ปัจจัยทางภูมิประเทศ ความลาดชัน และปัจจัยทางดิน อีกสาเหตุคือ สาเหตุจากมนุษย์ ได้แก่กิจกรรมในเปลี่ยนแปลงลาดดิน ข้อมูลที่ใช้ในการประเมินพื้นที่เสี่ยงต่อการพิบัติลาดดินนั้น จำเป็นต้องศึกษาพฤติกรรมของการเกิดการพิบัติของลาดดิน รวมทั้งลักษณะทางธรณีวิทยา ลักษณะภูมิประเทศ กำลังรับแรงของดิน และคุณสมบัติทางกายภาพของดิน ประกอบกับความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเทียบกับปริมาณน้ำในมวลดิน

ปริมาณน้ำเป็นปัจจัยที่สามารถใช้ในการประเมินความเสี่ยงเพื่อเตือนภัยจากลาดดินถล่มได้ โดยน้ำฝนไหลแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ไหลลงดินกับไหลไปตามลาดดิน ส่วนที่ไหลไปตามลาด

ดินจะกัดเซาะหน้าดินทำให้ลาดดินมีความชันขึ้น ส่วนน้ำที่ไหลซึมลงดินจะทำให้กำลังของดินลดลง เนื่องจากแรงดันน้ำในมวลดิน งานวิจัยเกี่ยวกับการประเมินเสถียรภาพลาดดินกับความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำถือว่าเป็นยุคแรกๆของประเทศไทย เนื่องจากมีความสำคัญน้อยในอดีต จึงไม่มีงานวิจัยจริงๆ เหมือนในต่างประเทศที่มีความสูญเสียมหาศาลในแต่ละครั้งที่เกิดการพิบัติ งานวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับกำลังรับแรงเฉือนของดิน เพื่อประเมินเสถียรภาพลาดดิน และหาแนวทางในการเตือนภัยจากการเกิดแผ่นดินถล่มในจังหวัดภูเก็ต

## วัตถุประสงค์

1. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบีบตัวของลาดดิน
2. ศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดิน ที่มีผลต่อเสถียรภาพของลาดดินบริเวณหาดกมลาและหาดป่าตอง จังหวัดภูเก็ต
3. วิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินที่มีผลมาจากคุณสมบัติดินที่เปลี่ยนแปลงไปตามความชื้นในมวลดิน
4. ติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรม การเปลี่ยนแปลงแรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric Suction) กับความชื้นในมวลดินที่มีอิทธิพลต่อกำลังของดิน
5. หาแนวทางในการเตือนภัยจากการเกิดแผ่นดินถล่ม

## ขอบเขตการวิจัย

1. พื้นที่ในการศึกษาวิจัยบริเวณหาดกมลา และหาดป่าตอง อำเภอกะทู้ จังหวัดภูเก็ต
2. ทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินด้วยวิธี Multi-Stage Consolidated Drained Direct Shear Test (KU\_MDS)
3. หาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ และปัจจัยที่เกี่ยวข้อง
4. ประเมินเสถียรภาพลาดดิน โดยพิจารณาปัจจัยทางด้านวิศวกรรมปฐพีเท่านั้น

## การตรวจเอกสาร

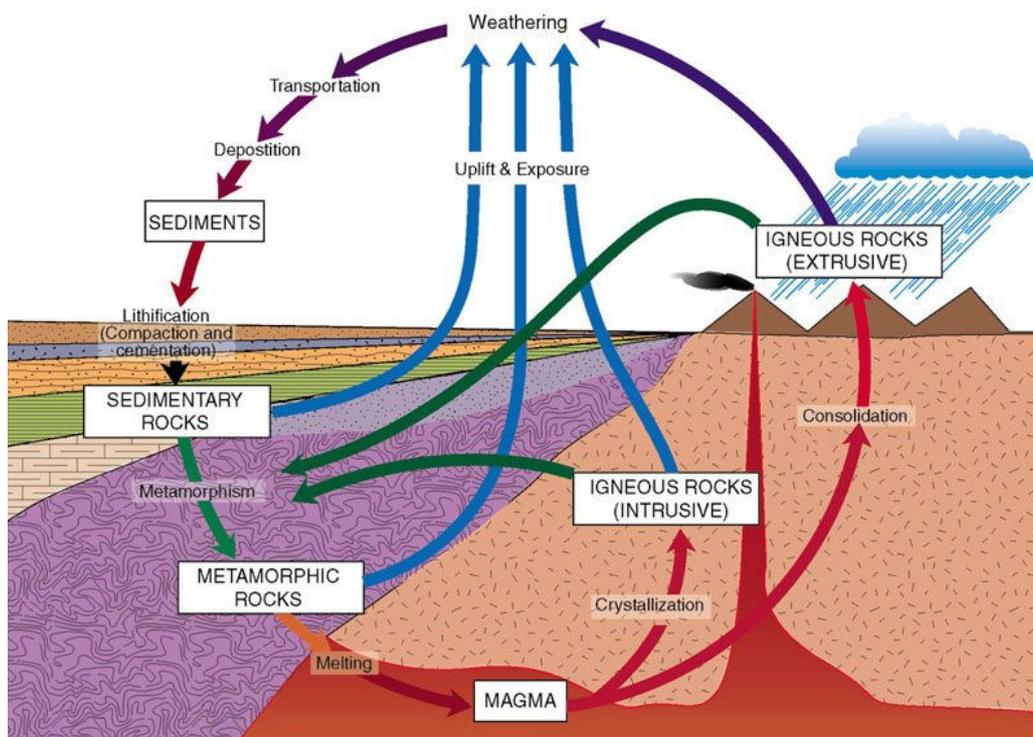
### การกำเนิดดิน

ดิน หมายถึง วัสดุที่สลายจากหินต้นกำเนิดที่อยู่บนผิวโลกซึ่งอยู่ในสภาพไม่เชื่อมแน่นเป็นเนื้อเดียว (Unconsolidated) ประกอบไปด้วย เม็ดดิน น้ำอากาศ และสารอินทรีย์ เม็ดดินส่วนมากมีขนาดเล็กกว่า 300 มิลลิเมตร เม็ดดินเกิดจากการย่อยสลายผุพังของหิน เม็ดดินจึงประกอบด้วยแร่ธาตุและสารเคมี

ในความหมายของดินทางวิศวกรรมมีความหมายกว้างมาก แต่สามารถกล่าวรวม ๆ ได้ว่า หมายถึง วัสดุที่มีขนาดคละต่าง ๆ ทั้งอินทรีย์สาร และอนินทรีย์สารที่อยู่เหนือชั้นหินแข็ง (Bed Rock) โดยวัสดุนี้จะเป็นเม็ดแยกจากกันโดยน้ำหรืออากาศ ขบวนการกำเนิดดินเป็นส่วนหนึ่งของวัฏจักรทางธรณีวิทยาโดยมีหินต้นกำเนิดของวัฏจักรคือหินอัคนี ผลของการแตกตัวและแยกสลายของหินหลัก (Parent rock) ทำให้เกิดเป็นดินเรียกว่าดินที่กำเนิดอยู่กับที่ (Residual soil) และบางส่วนได้ถูกพัดพาไปด้วยตัวกลางเช่น น้ำ ลมหรือน้ำแข็ง แล้วเกิดการตกตะกอนทับถมเป็นดินเรียกว่าดินที่เกิดจากการพาของตัวกลาง (Transportation soil) เมื่อดินนั้นถูกความร้อนและความดันอัดกลายเป็นหินชั้น หรือหินแปร หินชั้นและหินแปรอาจสลายตัวกลายเป็นดินได้อีกดังภาพที่ 1

ดินอนินทรีย์สารมีจุดกำเนิดมาจากหินหลักต่อไปนี้

1. หินอัคนี (Igneous rock) เกิดจากการแข็งตัวของลาวา หรือหินเหลวจากใต้ดิน
2. หินชั้น (Sedimentary rock) เกิดจากการตกตะกอนเป็นชั้นๆ ของหินต่างๆ เนื่องจากการพาของตัวกลาง เช่น น้ำ หรือ ลม เป็นต้น
3. หินแปร (Metamorphic rock) เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และหรือความดัน ทำให้หินอัคนีหรือหินชั้นเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและแร่ธาตุไปจากเดิม



ภาพที่ 1 วัฏจักรทางธรณีวิทยา

### กระบวนการผุพังของหิน (Weathering Rock)

กระบวนการผุพังของหิน คือกระบวนการผุพังทั้งทางกายภาพและเคมีที่เกิดกับหินใกล้ผิวโลก เมื่อหินเหล่านั้นมีส่วนที่โผล่ขึ้นมาสัมผัสกับอากาศ น้ำ หรือสิ่งมีชีวิต (ทวีศักดิ์ และ ชาญ , 2522 )

#### 1. กระบวนการผุพังทางกายภาพ (Mechanical Weathering)

ขบวนการทำลายทางกายภาพจะทำให้หินแตกออกเป็นก้อนเล็กกลวง โดยอาจไม่หลุดออกจากกัน หรืออาจจะกลายเป็นเศษหินวางตัวอยู่บนหินเดิมก็ได้ การทำลายทางกายภาพที่สำคัญมี 4 ชนิด คือ

1.1 Frost wedging and frost heaving เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงจากน้ำเป็นน้ำแข็ง ทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้นจึงเกิดแรงดันในเนื้อหิน ซึ่งเป็นผลมาจากน้ำที่ไหลซึมในเนื้อหินเกิดการแข็งตัว

1.2 Exfoliation & spheroidal weathering เป็นลักษณะการแตกของหินเนื่องจากการขยายตัวซึ่งเกิดขึ้นเมื่อหินที่อยู่ส่วนบนและได้เคยกดทับส่วนล่างอยู่ถูกทำลายไป

1.3 Thermal effect อุณหภูมิที่แตกต่างกันมากๆ ทำให้ส่วนเปลือกนอกของหินที่ได้รับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแตกได้เนื่องจากการขยายตัวและการหดตัวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

1.4 Mechanical work รากของพืชและการดำรงชีวิตของสัตว์บางชนิดจะเป็นผลให้เกิดการผุพังและแตกตัวของหินได้

## 2. กระบวนการผุพังทางเคมี (Chemical Weathering)

ขบวนการทำลายทางเคมีเป็นการทำลายอันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาที่สลับซับซ้อนของน้ำ ออกซิเจน คาร์บอน ไดออกไซด์ และกรด ซึ่งเกิดจากสิ่งมีชีวิต ปฏิกิริยาเคมีจะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของแร่เดิมให้กลายเป็นแร่ใหม่โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและส่วนประกอบ ปฏิกิริยาเคมีจะเกิดขึ้นได้ดีเพียงใดขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ 3 ประการใหญ่ๆ คือ

2.1 พื้นที่ผิวของหินต่อปริมาตร เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีจะเกิดขึ้นได้เมื่อสารละลายสัมผัสกับหิน ถ้าพื้นที่ผิวมากก็มีโอกาสจะเกิดปฏิกิริยาได้มากและรวดเร็ว

2.2 ส่วนประกอบของแร่เดิม ซึ่งเป็นส่วนประกอบของหินเกิดขึ้นที่อุณหภูมิและความดันสูงกว่าพื้นโลกมาก เมื่ออยู่ในบริเวณผิวโลกก็ย่อมจะเกิดความไม่สมดุล แต่ที่เกิดในอุณหภูมิและความดันสูงๆ จะถูกทำลายได้เร็วที่สุด

2.3 สภาพภูมิอากาศ การเกิดการทำลายทางเคมีต้องอาศัยน้ำเป็นส่วนสำคัญดังนั้นในบริเวณที่มีความชื้นสูงย่อมเกิดการทำลายได้ดี และถ้าหากมีอากาศร้อนด้วยก็ช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น ดังนั้นในบริเวณที่มีภูมิอากาศร้อนจะเป็นบริเวณที่เกิดการทำลายทางเคมีได้ดีที่สุด

## การจำแนกชนิดดินแยกตามกำเนิดดิน

ชนิดของดินแยกตามกำเนิดของดินสามารถจำแนกออกได้สองชนิดคือ

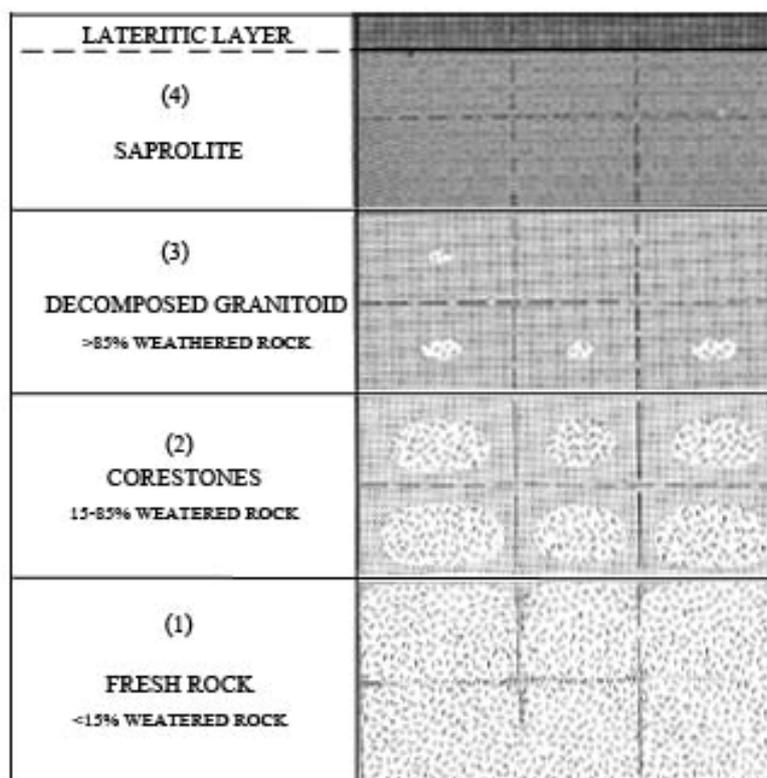
1. Residual Soil เป็นดินที่เกิดจากการสลายเนื่องจากเกิด Weathering และเกิดการตกตะกอนทับถมอยู่ที่เดิม โดยรูปร่างและส่วนประกอบของดิน ตลอดจนความหนาของ Residual Soil ขึ้นอยู่กับชนิดของหินและการเกิด Weathering

2. Transported Soil เป็นดินชนิดที่หลังจากเกิดการที่หินถูก Weathering แล้วดินเหล่านี้ถูกพัดพาไปตกตะกอนที่อื่น สิ่งที่ทำให้ดินถูกพัดพาได้แก่ แรงโน้มถ่วง (Gravity) ลม (Wind) น้ำ และธารน้ำแข็ง (Glacial) และการพัดพาอาจเกิดจากกลไกดังกล่าวหลายชนิดรวมกันก็ได้

## ขบวนการผุพังของ Granitic Rock

Philip (1977) กล่าวว่าโดยปกติแล้ว Granitic จะเกิดการแตกสลายได้ยาก ดังนั้นในบริเวณภูเขาต่าง ๆ มันจึงเป็นส่วนที่เหลือจากการกัดเซาะของน้ำฝน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเกิดการผุพังทางเคมี ฟิสิก ซึ่จะ จากน้ำฝนหรือแผ่นดินไหว จะทำให้ Granitic มีกำลังรับแรงต่ำลงและเป็นชนวนเหตุให้เกิดการเคลื่อนพังขึ้น แร่ที่ได้จากการผุพัง ได้แก่ Plagioclase Feldspar, Biotite, Potassium Feldspar, Muscovite และ Quartz โดย Biotite เป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดขบวนการผุพังของ Granitic โดยได้ทำการแบ่งขบวนการในการผุพังของ Granitic Rock เป็น 4 Stage ดังภาพที่ 2

Fresh Rock ในขั้นนี้มีการผุพังของหินน้อยกว่า 15 % รูปแบบในการพิบัติที่เกิดเป็นแบบ Rockfall, RockSlides หรือ Block Glides โดยขึ้นอยู่กับมุมด้านทานแรงเฉือนของหิน แรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผล และแรงดันน้ำในบริเวณรอยแตก (Terzaghi, 1962b) ในการผุพังของ Decomposed Granite จะทำให้แรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผลลดลง ในขณะที่ Void Ratio จะเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการไหลซึมของน้ำใต้ดิน และเกิดแรงดันน้ำในบริเวณรอยแตกของหิน (La Grand, 1949)



ภาพที่ 2 ขบวนการผุพังของ Granitic Rock

ที่มา: Philip (1977)

Corestones ในชั้นนี้มีการผุพังของหิน 15-85 % จากรอยแตกของหินในลักษณะที่เป็น Block หรือจาก Fresh Rock ก้อนใหญ่ ๆ รูปแบบในการพิบัติเป็นแบบ Rockfall Avalanches ซึ่งทำให้เกิดหายนะในหลายพื้นที่ เช่นในประเทศเปรู ตาย 70,000 คน เนื่องจากการเกิดแผ่นดินไหวในปี 1970

Decomposed Granitoid เกิดการผุพังของหินมากกว่า 85 % เป็นการแตกสลายจนเป็นดินเม็ดหยาบ โดยปรกติแล้วพายุฝนเป็นตัวการที่ทำให้เกิดการพิบัติใน Decomposed Granitoid ซึ่งมีรูปแบบการพิบัติเป็น Debris Flow และ Debris Avalanches Decomposed Granitoid เป็นตัวทำให้ความหนาแน่นและกำลังรับแรงเฉือนลดลง (Matsou and others, 1968) Decomposed Granitoid ที่อิ่มตัวด้วยน้ำจะไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค และมุมเสียดทานภายในจะขึ้นอยู่กับขนาดของเม็ดดิน แต่ในการออกแบบจะใช้  $35^\circ$  (Lumb, 1962; Gonsior and Gardmer, 1971)

Saprolite เป็นขั้นสุดท้ายของขบวนการผุพัง ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของ Void Ratio รูปแบบการพิบัติเป็นแบบ Slump หรือ Rotational Slides ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำมีผลกระทบกับกำลังรับแรงของดินชนิดนี้เป็นอย่างมาก โดยใน Saprolite ที่เป็นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated Soil) จะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคสูงกว่า  $2,000 \text{ g/cm}^2$  และจะเป็นศูนย์เมื่อเป็นดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated Soil) (Lumb, 1965)

### การจำแนกลักษณะการเกิดของดินแกรนิต

ขบวนการทำลายที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติทั้งทางกายภาพ และทางเคมีที่มีต่อหินจนกลายเป็นสภาพเป็นดิน เป็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และใช้เวลานานเป็นจำนวนนับล้านปีจนลักษณะเป็นดินชั้นล่าง ซึ่งในพื้นที่แต่ละพื้นที่จะประกอบไปด้วยชั้นดินหลาย ๆ ชั้น ในแต่ละชั้นจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไปตั้งแต่ชั้นผิวดินลงไปจนถึงชั้นที่เป็นหินต้นกำเนิด (Parent rock) ความแตกต่างของชั้นดินนี้เกิดขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของสิ่งต่าง ๆ ที่สำคัญมีอยู่ 5 ประการ (ทวิศักดิ์ และชาญ, 2522)

ลักษณะของหินเดิมซึ่งเป็นต้นกำเนิด

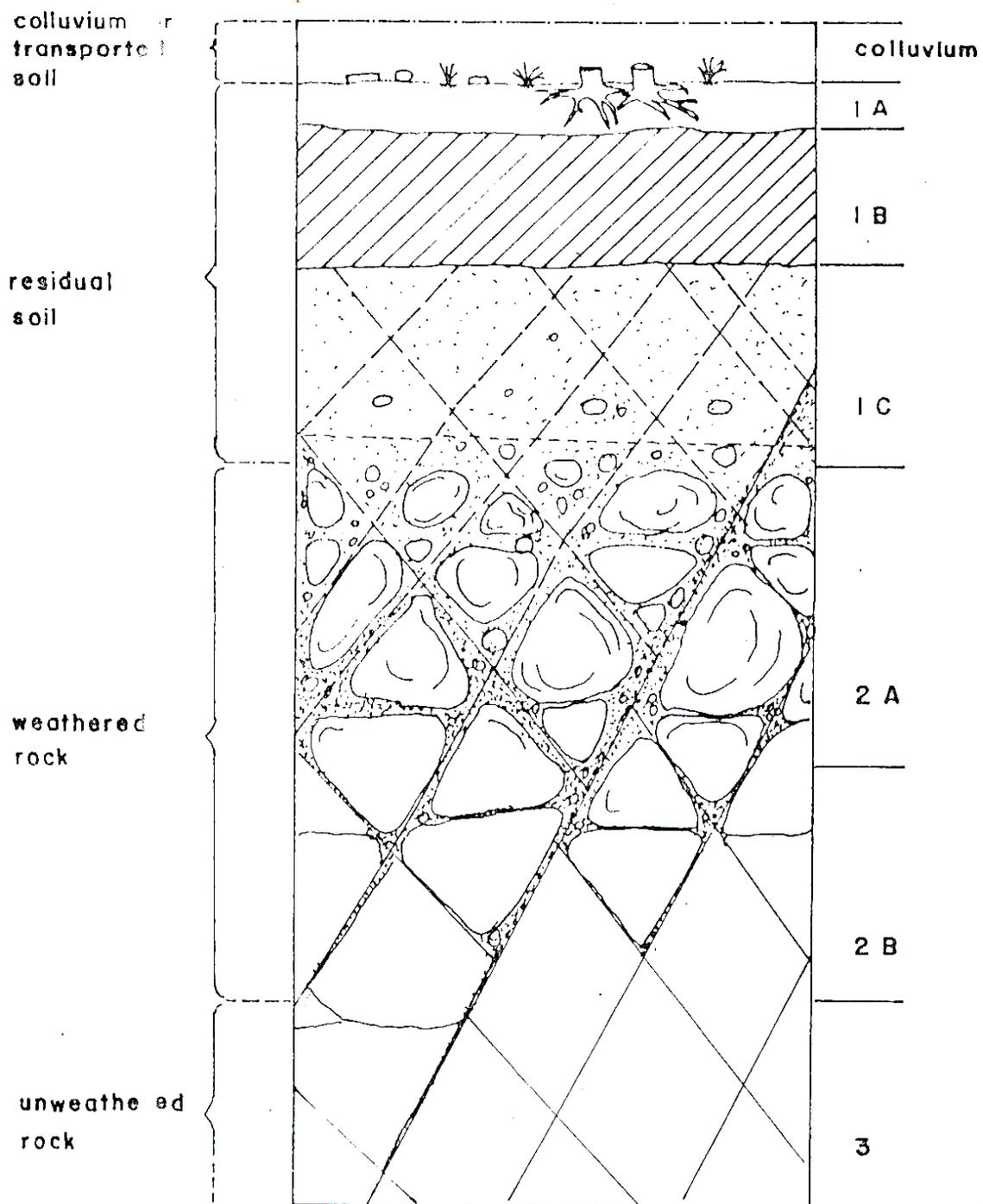
สภาพภูมิอากาศ

สารอินทรีย์

ระยะเวลา

สภาพภูมิประเทศ

Weathering profile ของดินแกรนิตแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนกว้าง ๆ คือ residual soil, weathered rock และ unweathered rock ในแต่ละชั้นยังแบ่งย่อยออกไปอีกตามคุณสมบัติของดิน โดยพิจารณาจากลักษณะของเม็ดดิน ขนาดเม็ดดิน สี ความชื้นและส่วนประกอบของดินที่หลงเหลือจากการเกิดการทำลายตามธรรมชาติ (Deere and Patton, 1971) ซึ่งมีลักษณะดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 Weathering profile ของดินแกรนิต

ที่มา: Deere and Patton (1971)

ในชั้นดินที่เกิดผุพังกับที่ (residual soil) ซึ่งเป็นดินชั้นบนสุด ได้มีการแบ่งย่อยออกเป็น 3 โซน (Zone) คือ 1A, 1B และ 1C

โซน 1A เป็นชั้นดินที่ประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีการสลายตัวแล้ว ในส่วนบนจะมีรากไม้และรากหญ้าปะปนกันอยู่มาก สภาพของดินในชั้นนี้มีการสลายตัวที่รุนแรงมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากกรดที่ปะปนมากับน้ำฝนถูกเก็บสะสมไว้และปริมาณของออกซิเจนสูงมาก ผลจากการถูกทำลายจะทำให้ดินที่ลักษณะเป็นส่วนละเอียดและสารละลายที่สะสมอยู่ถูกล้างลงสู่ชั้นที่ต่ำกว่า

โซน 1B เป็นโซนของการตกค้างของดินที่ถูกชะล้างลงมาจากชั้นบน ทำให้ดินในโซนนี้มีสีเข้ม และมีส่วนที่ประกอบของดินที่เป็นมวลละเอียด ลักษณะของดินส่วนใหญ่มีการเปลี่ยนแปลงไปมากแล้วจึงไม่สามารถที่จะเห็นลักษณะและรูปร่าง ตลอดจนโครงสร้างของหินเดิมได้ชัดเจน

โซน 1C ในโซนนี้จะปรากฏให้เห็นลักษณะของโครงสร้างของหินเดิมได้ค่อนข้างชัดเจน แม้ว่าลักษณะโดยทั่วไปจะเป็นดินมากกว่าหิน แต่ยังปรากฏร่องรอยของการแตกและระนาบของหินเดิมให้เห็นชัดเจน อีกทั้งองค์ประกอบบางส่วนของดินเช่นแร่ควอตซ์ยังคงหลงเหลืออยู่ ส่วนแร่เฟลด์สปาร์ได้มีการเปลี่ยนแปลงสภาพไปเป็นแร่ดินเหนียว (clay mineral) หมดแล้ว ส่วนที่สำคัญในการแบ่งชั้นของโซนนี้ออกจากชั้นที่ต่ำกว่า คือ การพิจารณาจากปริมาณของเนื้อหินซึ่งมีลักษณะเป็นก้อนหินเล็ก ๆ (core stone) ซึ่งกำหนดให้ดินในโซน 1C นี้มีปริมาณของเนื้อหินน้อยกว่าร้อยละ 10 โดยปริมาตร

ในชั้นหินผุ (Weathered rock) เป็นชั้นของหินที่มีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นเพียงบางส่วนเท่านั้น โดยสภาพส่วนใหญ่ยังมีลักษณะที่เป็นหินมากกว่าเป็นดิน ในชั้นนี้แบ่งออกเป็นสองโซน คือ 2A และ 2B

โซน 2A เป็นโซนที่จัดอยู่ในช่วงหัวเลี้ยวหัวต่อที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากลักษณะของหินไปเป็นดิน หรืออาจจะเรียกว่าจัดอยู่ในชั้นตอนที่มีการสลายตัวของหินสูง (highly weathered) หรือในชั้นตอนที่มีการสลายตัวของหินพอสมควร (moderately weathered) โดยช่วงของดินที่อยู่ในโซนนี้กว้างมาก ซึ่งรวมเอาส่วนที่ยังมีการหลงเหลือของเนื้อหินตั้งแต่ร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 90 โดยปริมาตร ลักษณะส่วนใหญ่ของดินในชั้นนี้จะประกอบไปด้วยกรวดหยาบและ

ทรายหยาบเป็นส่วนใหญ่ โดยดินในชั้นนี้มักจะก่อให้เกิดปัญหาทางวิศวกรรมมากที่สุด เนื่องจากเป็นช่วงที่กว้างและมีวัสดุที่มีความแตกต่างกันมาก

โซน 2B ในโซนนี้ลักษณะส่วนใหญ่จะเป็นหินที่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย สามารถสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงที่ผิวหน้าของหินตามระนาบและรอยแตกทั่วไป ซึ่งหินที่อยู่ในโซนนี้จะอยู่ในสภาพที่มีความแข็งแรงลดลง มีคุณลักษณะในด้านความซึมได้ของน้ำสูงขึ้นอันเป็นผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรในบางส่วนที่มีการจัดโครงสร้างใหม่ของหิน และจากการขยายตัวของรอยแตกของหินที่มีขึ้นในขบวนการที่เกิดความเค้นภายในและการสึกกร่อน

ในชั้นของหินดั้งเดิม (Unweathered rock) ซึ่งจัดเป็นโซนที่ 3 เป็นชั้นที่อยู่ล่างสุดและถือว่าหินในชั้นนี้ยังไม่ได้ผ่านขบวนการทำลายตามธรรมชาติที่เกิดขึ้น

### การเกิดลาดดินถล่ม

ลาดดินถล่มเป็นภัยพิบัติอย่างหนึ่ง เมื่อเกิดขึ้นแล้วจะทำให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สิน รวมทั้งความสูญเสียทางเศรษฐกิจได้ ซึ่งความเสียหายที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความรุนแรงของการเกิดลาดดินถล่ม

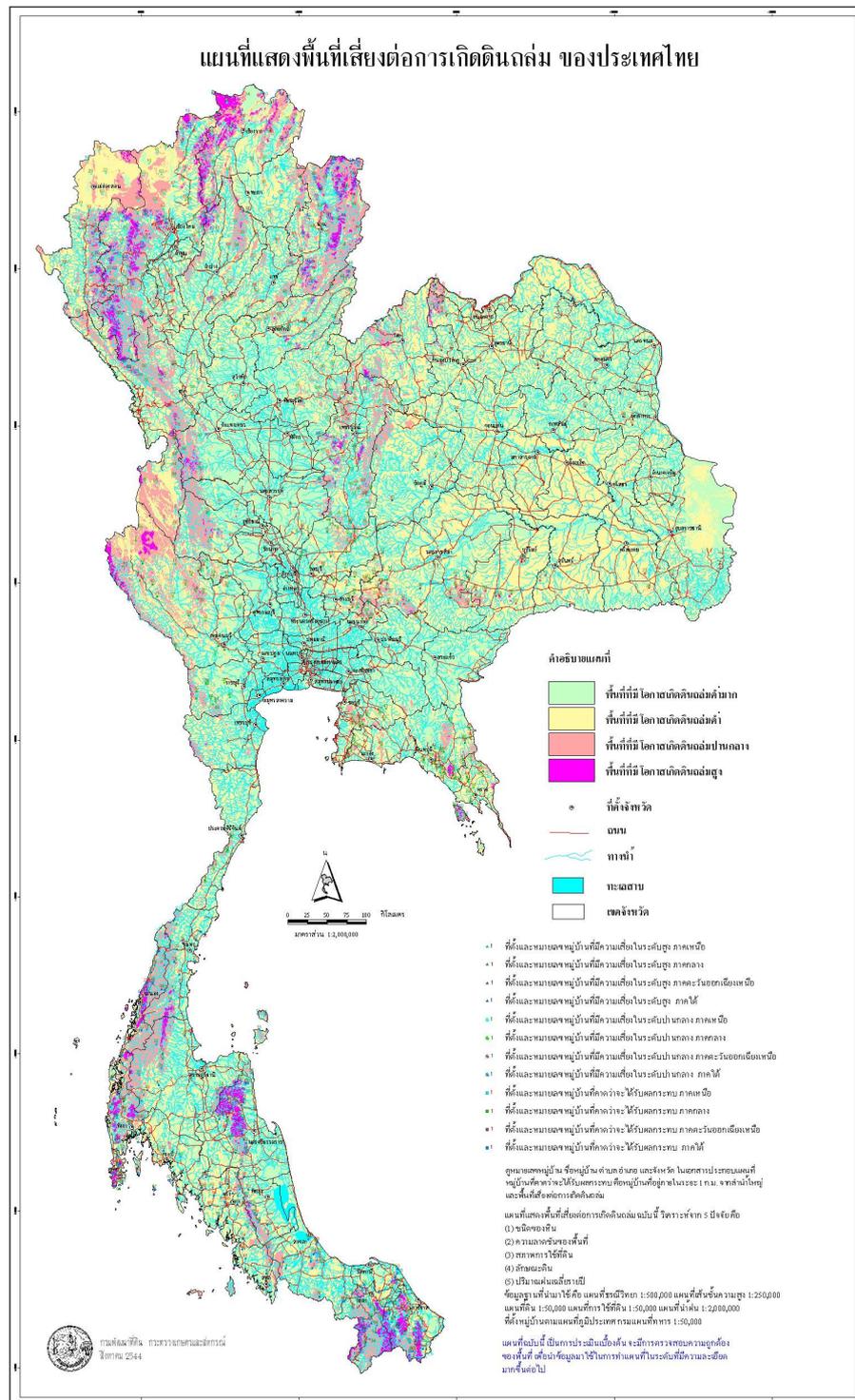
ข้อมูลจาก Landslide hazard team report (2000) ซึ่งได้ประเมินความเสียหายเนื่องมาจากลาดดินถล่มทั่วโลก พบว่าทำให้คนเสียชีวิต 1,000 คน และทรัพย์สินสูญเสียบริเวณประมาณ 10,000–20,000 ล้านดอลลาร์สหรัฐต่อปี และหลายประเทศได้มีการรวบรวมข้อมูลอย่างมีระบบเช่นกัน ตัวอย่างเช่นในสหรัฐอเมริกา ซึ่งสามารถประเมินค่าความเสียหายได้ปีละ มากกว่า 1,000 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ในประเทศอิตาลี ปีละประมาณ 1,140 ล้านดอลลาร์สหรัฐ

สำหรับประเทศไทย การเกิดลาดดินถล่มและน้ำหลากที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อประชาชน มีมานานแล้ว และมีแนวโน้มจะเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของประชากร และความต้องการใช้ที่ดิน ทำให้มีการอพยพของราษฎรเข้าไปอยู่ในที่ซึ่งเคยเกิดลาดดินถล่มในอดีต หรือเป็นบริเวณที่มีโอกาสเกิดลาดดินถล่มขึ้นได้ โดยสามารถรวบรวมเหตุการณ์ที่เคยเกิดได้ดังตารางที่ 1 และในภาพที่ 4 แสดงแผนที่พื้นที่เสี่ยงภัยต่อการเกิดแผ่นดินถล่มของประเทศไทยของกรมพัฒนาที่ดิน โดยศึกษาจากปัจจัยทางธรณีวิทยา ความชัน และการใช้ประโยชน์ของที่ดิน

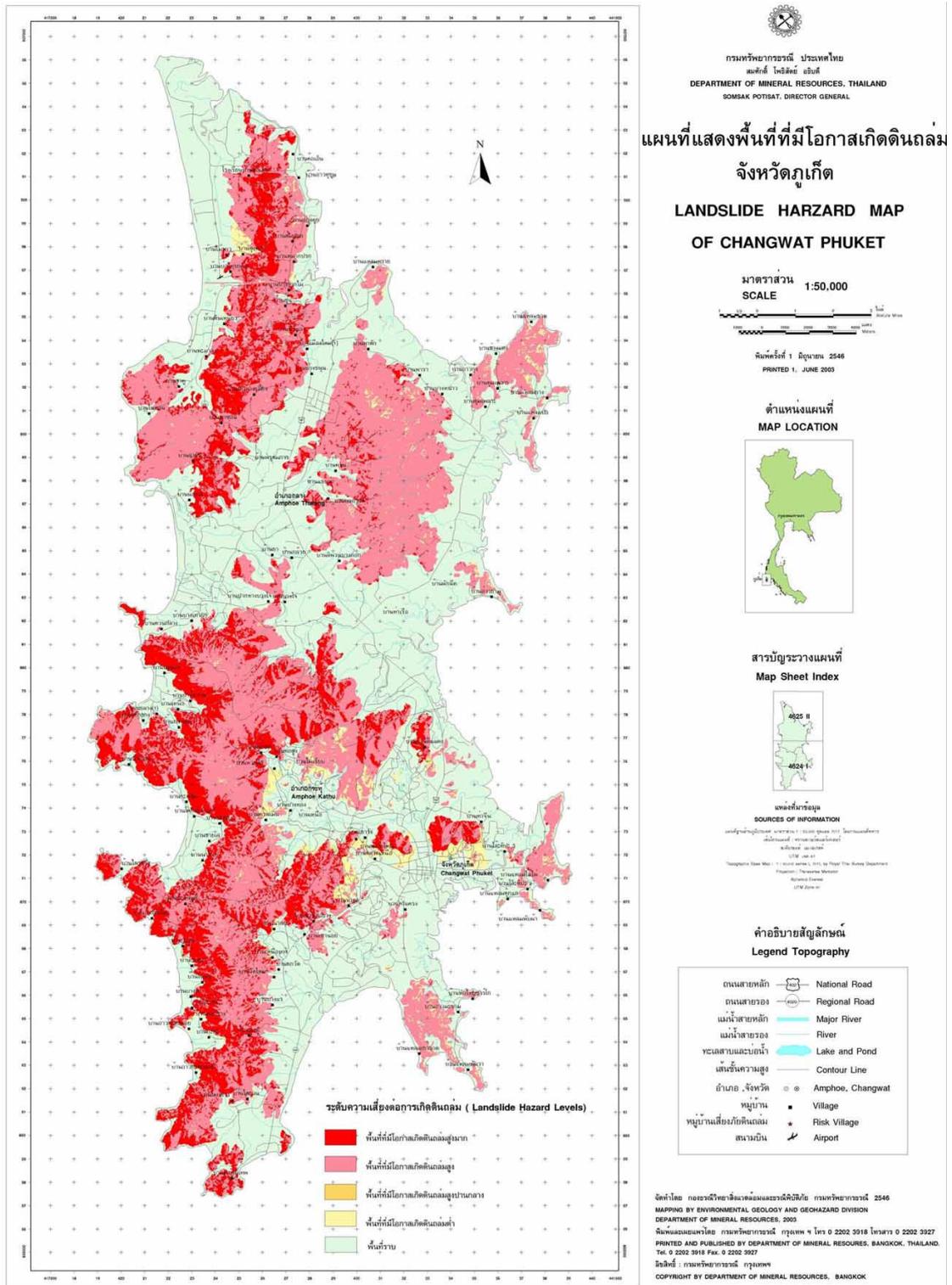
สำหรับจังหวัดภูเก็ต ซึ่งมีลักษณะเป็นเกาะอยู่ทางภาคใต้ของประเทศไทย มีพื้นที่โดยรอบประกอบด้วยภูเขา ทะเลและหาดทราย ก็ได้รับผลกระทบจากการเกิดลาดดินถล่มด้วยเช่นกัน เนื่องจากภูมิประเทศส่วนใหญ่เป็นภูเขา และมีฝนตกชุก ดังที่มีรายงานความเสียหายเมื่อเดือนตุลาคม 2544 ซึ่งการเกิดลาดดินถล่มนี้เป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการรบกวนสมดุลทางธรรมชาติ ซึ่งในปัจจุบันเนื่องจากมีประชากรมากขึ้นทั้งประชากรในพื้นที่ และนักท่องเที่ยว รวมทั้งการขยายตัวทางเศรษฐกิจ จึงมีความต้องการในการใช้ที่ดินเพิ่มมากขึ้นจนมีการเข้าไปใช้พื้นที่บริเวณที่มีโอกาสเกิดลาดดินถล่มสูงได้ อีกทั้งการพัฒนาพื้นที่บริเวณเชิงเขาบางแห่งก็อาจมีผลทำให้โอกาสเกิดลาดดินถล่มเพิ่มสูงขึ้นได้ และเมื่อเกิดฝนตกหนักก็จะทำให้บริเวณดังกล่าวเกิดลาดดินถล่มได้ ภาพที่ 5 แสดงแผนที่พื้นที่ที่มีโอกาสเกิดแผ่นดินถล่มจังหวัดภูเก็ต ซึ่งจัดทำโดยกองธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อมและธรณีพิบัติภัย กรมทรัพยากรธรณี 2546

#### ตารางที่ 1 การเกิดน้ำหลากและลาดดินถล่มที่รุนแรงในประเทศไทย

เวลา	สถานที่	ความเสียหายต่อชีวิต
พฤศจิกายน 2513	อ.ทับสะแก จ.ประจวบคีรีขันธ์	12 ราย
มกราคม 2518	อ.ร้อนพิบูลย์ จ.นครศรีธรรมราช	58 ราย
ธันวาคม 2525	กิ่งอ.ศรีบรรพต จ.พัทลุง	4 ราย
พฤศจิกายน 2531	อ.พิปูน จ.นครศรีธรรมราช	> 200 ราย
พฤศจิกายน 2531	อ.ลานสะกา จ.นครศรีธรรมราช	12 ราย
สิงหาคม 2542	อ.เขาคิชฌกูฏ จ. จันทบุรี	1 ราย
กันยายน 2543	อ.หล่มสัก และ อ.เมือง จ.เพชรบูรณ์	10 ราย
พฤษภาคม 2544	อ.วังชัน จ.แพร่	มากกว่า 30 ราย
สิงหาคม 2544	อ.หล่มสัก จ.เพชรบูรณ์	มากกว่า 100 ราย
พฤษภาคม 2547	อ.แม่แจ่ม จ.เชียงใหม่	1 ราย
พฤษภาคม 2547	อ.แม่ระมาด จ. ตาก	5 ราย
กรกฎาคม 2547	อ.แม่เฒ่า จ.เชียงใหม่	1 ราย
ตุลาคม 2547	อ.เมือง จ.กระบี่	3 ราย



ภาพที่ 4 แผนที่พื้นที่เสี่ยงภัยต่อลาดดินถล่มของประเทศไทย  
ที่มา: กรมพัฒนาที่ดิน (2545)



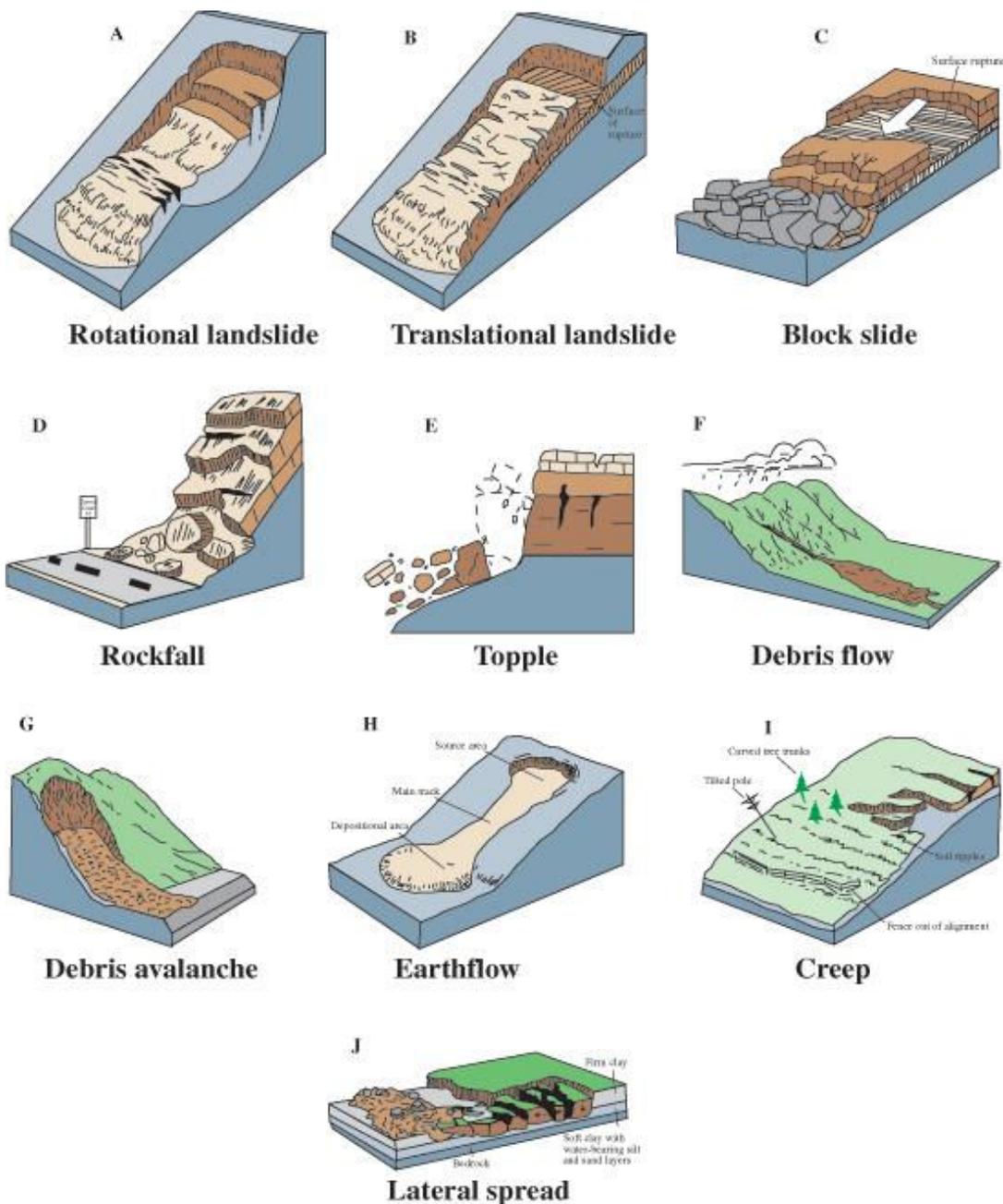
ภาพที่ 5 แสดงแผนที่พื้นที่ที่มีโอกาสเกิดแผ่นดินถล่มจังหวัดภูเก็ต  
 ที่มา: กองธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อมและธรณีพิบัติภัย กรมทรัพยากรธรณี (2546)

## รูปแบบการพิบัติของลาดดิน

รูปแบบการพิบัติของลาดดินมีส่วนสำคัญในการพิจารณาใช้ทฤษฎีสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพเพื่อหาค่าอัตราส่วนปลอดภัยและวิธีการแก้ไขปรับปรุง รูปแบบการพิบัติได้มีการจำแนกตามชนิดของวัตถุที่พัง ลักษณะการพัง ความเร็วในการเคลื่อนตัว ลักษณะทางธรณี และปริมาณของวัตถุที่เคลื่อนพัง Varnes, Hutchinson and EPOCH (The European Commission Environment Programme) ได้จำแนกรูปแบบการพิบัติของลาดดินสามารถแบ่งการพิบัติออกเป็น 6 ประเภท และมีรูปประกอบดังภาพที่ 6

1. การร่วงหล่น (Falls) เป็นรูปแบบของการเคลื่อนตัวของมวลวัสดุที่เป็นกลุ่มก้อนหรือเป็นก้อนหินร่วงหล่นลงมาจากหน้าผา มีอัตราการเคลื่อนที่มากกว่า  $3 \times 10^{-3}$  m./sec.
2. แบบกลิ้งไปข้างหน้า (Topples) เป็นรูปแบบของการเคลื่อนตัวต่อเนื่องกลายเป็นแบบร่วงหล่น (Falls) หรือแบบเลื่อนไถล (Slides) ได้ต่อไป
3. แบบเลื่อนไถล (Slides) เป็นรูปแบบของการเคลื่อนพังของมวลวัสดุในรูปแบบของการเลื่อน
4. แบบเคลื่อนตัวขยายตัวไปด้านข้าง (Lateral spreads) มีลักษณะของการเคลื่อนตัวเป็นการขยายตัวด้านข้างของมวลวัสดุ การเคลื่อนที่แบบนี้มักพบในดินประเภท Sensitive Silt and Clay ที่มีการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นทันทีทันใดด้วยอัตราการเคลื่อนที่ระหว่าง  $3 \times 10^{-5}$  m./sec. แต่ถ้าพบในชั้นหิน อัตราการเคลื่อนที่จะน้อยกว่า  $3 \times 10^{-9}$  m./sec.
5. แบบไหล (Flows) การเคลื่อนตัวแบบไหล มักพบในวัสดุที่ไม่มีการยุบอัดตัว มีลักษณะการเคลื่อนตัวในรูปแบบของการไหลของของเหลวที่มีความหนืดขนานกับแนวลาดเดิม
6. แบบ Complex มีลักษณะของการเคลื่อนตัวที่ประกอบด้วยหลายรูปแบบรวมกัน เช่น รูปแบบของการเคลื่อนพังเป็นแบบ Complex ที่ประกอบด้วย Rock Slide, Rock fall และ Debris Flow เป็นต้น

Varnes (1978) อธิบายการจำแนกรูปแบบของการพิบัติในรายงานของ Transportation Research Board, Special Report 176 “Landslides; Analysis and Control” ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งเป็นที่นิยมค่อนข้างกว้างขวาง ทั้งยังแบ่งชนิดของวัสดุที่เกี่ยวข้องออกเป็น 3 ประเภทคือ ดิน ดินปนหินและหิน



ภาพที่ 6 รูปแบบการพิบัติของลาดดิน  
ที่มา: United States Geological Survey (USGS)

ตารางที่ 2 การจำแนกประเภทการเคลื่อนพังของลาดโดยวิธีของ Varnes (1978)

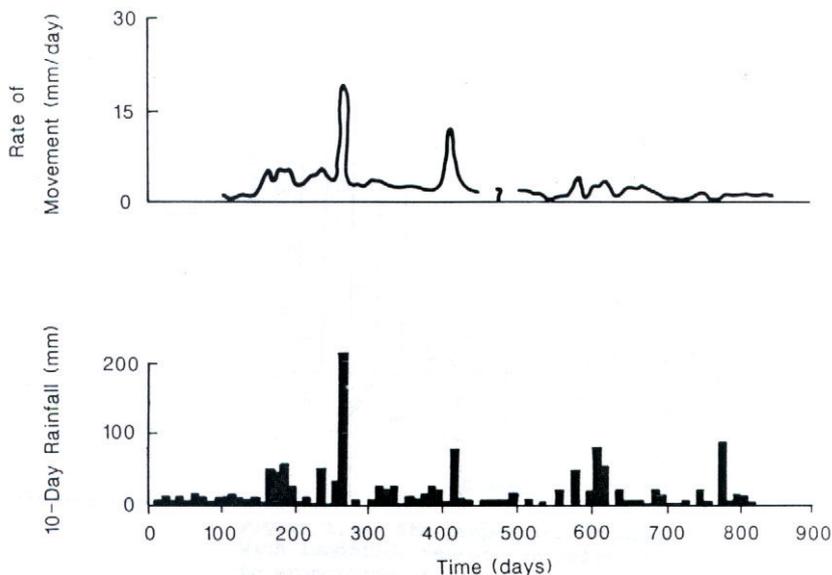
TYPE OF MOVEMENT		TYPE OF MATERIAL		
		BEDROCK	DEBRIS (coarse soil and rocks)	EARTH (fine soil)
I	FALLS	rock fall	debris fall	earth fall
II	TOPPLES	rock topple	debris topple	earth topple
III	SLIDES	ROTATIONAL	rock slump	debris slump
		TRANSLATIONAL	a. rock block slide b. rock slide	debris slide
IV	SPREADS	rock spread		earth lateral spread
V	FLOWS	bedrock flow	a. debris flow	a. wet sand flow
			b. debris avalanche	b. rapid earth flow
			c. block stream	c. earth flow
			d. solifluction	d. loess flow
			e. soil creep	e. dry sand flow
VI	COMPLEX	combination of above movement		

### ปัจจัยที่ทำให้เกิดการพิบัติของลาดดิน และผลต่อรูปแบบการพิบัติแบบต่างๆ

ปัจจัยที่ทำให้เกิดการพิบัติของลาดดิน มีทั้งปัจจัยภายในที่ทำให้ค่าความแข็งแรงของดินลดลง และปัจจัยภายนอกที่ทำให้ค่าหน่วยแรงในดินเพิ่มขึ้น ซึ่งประกอบด้วยปัจจัย (Walker and Fell, 1987) ดังต่อไปนี้

#### สภาพอากาศ (Climate)

สภาพอากาศที่มีผลมากที่สุดในการทำให้เกิดการเคลื่อนพังของลาดดิน คือ สภาพฝนตก โดยพิจารณาจากปริมาณน้ำฝนทั้งปริมาณของน้ำฝนที่สะสมในช่วงเวลานาน และปริมาณของน้ำฝนในช่วงเวลาสั้นที่เกิดจากพายุหรือฝนตกหนัก ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ตัวอย่างอัตราการเคลื่อนตัวของลาดดินเทียบกับปริมาณน้ำฝนสะสม 10 วัน จากการศึกษานี้ที่ Honolulu

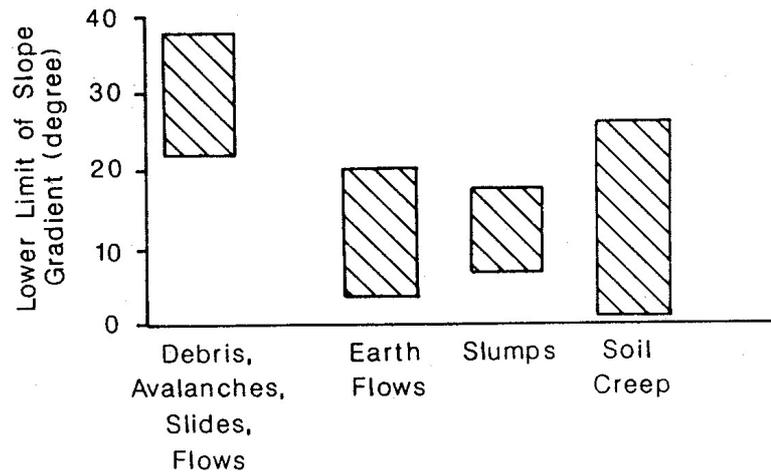
ที่มา: Alonso (1976)

## 2. ความชันของลาดดิน (Slope)

โดยทั่วไป พบว่าลาดดินมีความชันมากขึ้น แนวโน้มที่จะเกิดการพิบัติก็จะมากขึ้น Crozier *et al.* (1980) พบว่า การพิบัติเริ่มเกิดขึ้นใน London clay เมื่อความชันมีค่าเท่ากับ 10 องศา ใน Mangawhara ประเทศนิวซีแลนด์ เมื่อความชันมีค่าเท่ากับ 17 องศา, Pilgrim and Conacher (1974) พบว่าการพิบัติของลาดดินแบบ Flows เริ่มเกิดขึ้นใน Chittering Valley ของ Western Australia เมื่อความชันมีค่ามากกว่า 15 องศา, Rice *et al.* (1969) พบว่า ในสภาพภูมิอากาศปกติ การพิบัติเริ่มเกิดขึ้นในแถบเทือกเขาของ Southern California เมื่อความชันมีค่าเท่ากับ 38 องศา แต่จะเริ่มเกิดขึ้นที่ความชันเท่ากับ 31 องศา ในกรณีที่เกิดฝนตกหนัก จากสภาพเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1969 เป็นต้น

นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยที่สามารถกำหนดค่าต่ำสุดของความชันที่จะเกิดแต่ละรูปแบบของการพิบัติของลาดดิน ได้แก่ Sidle *et al.* (1985) ได้จัดทำกราฟแสดงค่าต่ำสุดของความชันที่จะเกิดรูปแบบการพิบัติดังแสดงในภาพที่ 8, Blong (1974) พบว่า ใน Mangawhara ประเทศนิวซีแลนด์

การพังทลายแบบ Slides เกิดขึ้นเมื่อความชันมีค่าระหว่าง 17 องศา ถึงค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 30 องศา คิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 26.8 องศา การพังทลายแบบ Flows เกิดขึ้นเมื่อมีความชันมากขึ้น คือมีค่าอยู่ระหว่าง 25 องศา ถึง มากกว่าหรือเท่ากับ 40 องศา คิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 31 องศา



ภาพที่ 8 ค่าความชันต่ำสุดของการเกิดแต่ละรูปแบบการพังทลาย  
ที่มา: Sidle *et al.* (1985)

### 3. สภาพพืชปกคลุมลาดดิน (Vegetation)

O' Loughlin (1974), Gray and Leiser (1982), Sidle *et al.* (1985), and Greenway (1987) ได้เสนอผลกระทบต่อความไม่เสถียรภาพของลาดจากสภาพพืชปกคลุมลาด ทั้งในด้านชลศาสตร์ (Hydrological Factors) และด้านกลศาสตร์ (Mechanical Factors) ในการยึดเหนี่ยวดินให้มีความแข็งแรงมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 3 และ ภาพที่ 9

### ตารางที่ 3 ปัจจัยของพืชปกคลุมลาดดินที่มีผลต่อเสถียรภาพความลาด

#### ด้านชลศาสตร์

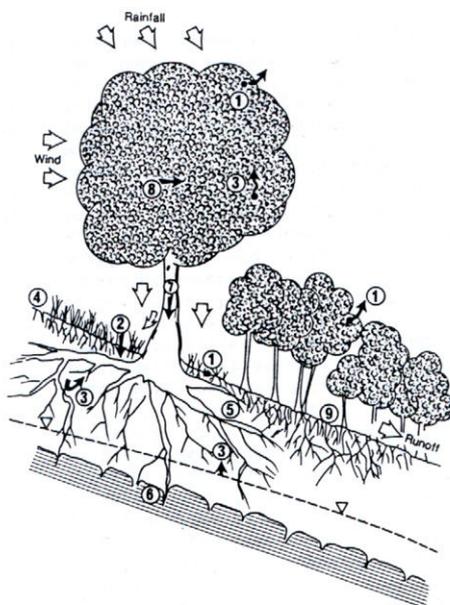
ปัจจัยของพืชปกคลุมลาดดิน	ผลต่อเสถียรภาพ
1. พืชจะช่วยดูดน้ำจากผิวดินทำให้น้ำซึมลงดินน้อยลง	เพิ่มเสถียรภาพ
2. การกระจายของรากพืชทำให้น้ำซึมได้ดีขึ้น	ลดเสถียรภาพ
3. รากพืชจะดูดความน้ำในดิน ซึ่งเป็นการลดแรงดันน้ำ	เพิ่มเสถียรภาพ
4. การสูญเสียความชื้นของดิน ทำให้ดินแห้ง แดก น้ำจึงสามารถซึมลงดินได้มากขึ้น	ลดเสถียรภาพ

#### ด้านกลศาสตร์

ปัจจัยของพืชปกคลุมลาดดิน	ผลต่อเสถียรภาพ
5. การผสมกันของรากพืชเป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับดิน	เพิ่มเสถียรภาพ
6. รากพืชที่อยู่ในระดับลึกจะช่วยยึดเกาะกับดินชั้นที่มีความแข็งแรง	เพิ่มเสถียรภาพ
7. น้ำหนักของต้นไม้จะเพิ่มแรงที่ทำให้เกิดการพิบัติ หรืออาจช่วยเพิ่มแรงด้านการพิบัติ	ลดเสถียรภาพ/เพิ่มเสถียรภาพ
8. ลมที่ปะทะกับต้นไม้จะเป็นการเพิ่มแรงที่ทำให้เกิดการพิบัติ	ลดเสถียรภาพ
9. การยึดเกาะของรากพืชจะช่วยทำให้การพัดพาหน้าดินเป็นไปได้ยากขึ้น	เพิ่มเสถียรภาพ

#### 4. ทิศทางและที่ตั้งของลาดดิน

ทิศทางการวางตัวของลาดดินมีผลต่อการพิบัติเช่นกัน โดยด้านที่ต้องปะทะกับลมและฝนจะมีโอกาสเกิดการพิบัติได้มากกว่า ส่วนด้านที่อยู่ในแนว ตะวันออก-ตะวันตก จะได้รับแสงแดดน้อยกว่าในแนว เหนือ-ใต้ การระเหยของน้ำจึงมีน้อยกว่า ซึ่งจะมีผลต่อระดับน้ำใต้ดิน



ภาพที่ 9 ปัจจัยต่างๆ ของพืชที่มีผลต่อเสถียรภาพความลาด  
ที่มา: Greenway (1987)

#### 5. ความสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว (Earthquakes)

ความสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว ทำให้เกิดการพิบัติของลาดดินได้ใน 3 แนวทางคือ

ก. ทำให้เกิดแรงในแนวราบและแนวตั้งในมวลดิน โดยเฉพาะแรงในแนวราบที่อาจจะ  
มีค่ามากกว่า  $0.5g$  (ค่า  $g$  เป็นอัตราเร่งของแรงโน้มถ่วง)

ข. การสั่นสะเทือนเป็นแบบซ้ำๆ (Rapid repeated loading) ทำให้แรงดันของน้ำใน  
ช่องว่างของมวลดินเพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลทำให้ค่าความแข็งแรงของดินลดลง และจะทำให้เกิด  
Liquefaction เป็นผลต่อเนื่องต่อไป

ค. ความสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว อาจจะทำให้ความเชื่อมั่นระหว่างเม็ดดินถูก  
ทำลายและส่งผลให้ลดค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน

นอกจากนี้ ยังมีการพิจารณารูปแบบการพิบัติของลาดดินที่อาจเกิดขึ้นจากขนาดความสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว ตามที่ Keefer (1984) และ Sidle *et al.* (1985) ได้สรุปรูปแบบจากขนาดน้อยที่สุดถึงมากที่สุดไว้ว่า

ก. รูปแบบ Rock falls, Rock slides, Soil falls, Soil slides เกิดขึ้นเมื่อขนาดความสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวมีค่าน้อยที่สุด

ข. รูปแบบ Slumps, Earthflows เกิดขึ้นเมื่อขนาดความสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวมีค่ามากขึ้น

ค. รูปแบบ Lateral spreads, Debris flows เกิดขึ้นเมื่อขนาดความสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวมีค่ามากที่สุด

## 6. ลักษณะทางธรณีวิทยา

ลักษณะทางธรณีวิทยาของแต่ละพื้นที่ มีอิทธิพลสำคัญมากต่อการเกิดพิบัติของลาด (Moser and Hohensinn, 1983; Popescu, 1996; Vaunat *et al.*, 1996) ซึ่งได้แก่

ก. ชนิดของดินที่เกิดจากการกัดกร่อนแตกสลายของหิน (Weathered rocks) เช่น ดินเหนียว ซึ่งเกิดจาก Claystones, Mudstones, Shales, และ Basalts จะทำให้เกิดความไม่เสถียรภาพของลาดดินได้มากกว่าดินชนิด Sandy soils ซึ่งเกิดจาก Sandstones ดินเกิดจากการกัดกร่อนของหิน Granite เป็นกลุ่ม Silty sand, Clayey sand soils จะทำให้เกิดความไม่เสถียรภาพของลาดดิน

ข. ความแตกต่างของความชื้นน้ำในดินที่เกิดจากการผุกร่อนของหิน (Weather rocks) และในดินที่เป็น Residual soils ซึ่งเป็นชั้นดินด้านล่าง โดยพบว่า Residual soils มีความชื้นน้ำต่ำกว่าดินที่เกิดจากการผุกร่อนของหิน แรงดันน้ำจากการไหลของน้ำในดินอาจจะเกิดขึ้นและทำให้เกิดความไม่เสถียรภาพของลาดดิน เช่น Residual soil ของหินแกรนิต มีลักษณะอุ้มน้ำได้ดี ซึ่งเป็นปัญหาทำให้เกิดการพิบัติได้ โดยเฉพาะในช่วงฝนตกชุก (Brand *et al.*, 1984) เป็นต้น

ค. สภาพโครงสร้างทางธรณีวิทยา แบบ Fold และ Foliation ซึ่งมีค่าความแข็งแรงต่ำ การเลื่อนระหว่างชั้นดินหรือหินจะเกิดขึ้น โดยเฉพาะระหว่างชั้น Claystones และ Sandstones จะเกิดการเลื่อนขึ้นในชั้น Claystones

### ทฤษฎีหน่วยแรงประสิทธิผลของดินไม่อิ่มตัว

ในสภาวะสมดุลของดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated Soil) เมื่อมีหน่วยแรงภายนอกกระทำ หน่วยแรงส่วนหนึ่งรับโดยบริเวณที่สัมผัสเม็ดดิน (Effective stress) อีกส่วนรับด้วยแรงดันของน้ำในมวลดิน (Pore pressure,  $u_w$ ) โดยให้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงรวมและความดันในโพรงที่จุดใดๆ ในมวลดินว่า Total stress (Terzaghi, 1925)

$$\sigma = \bar{\sigma} + u_w \quad (1)$$

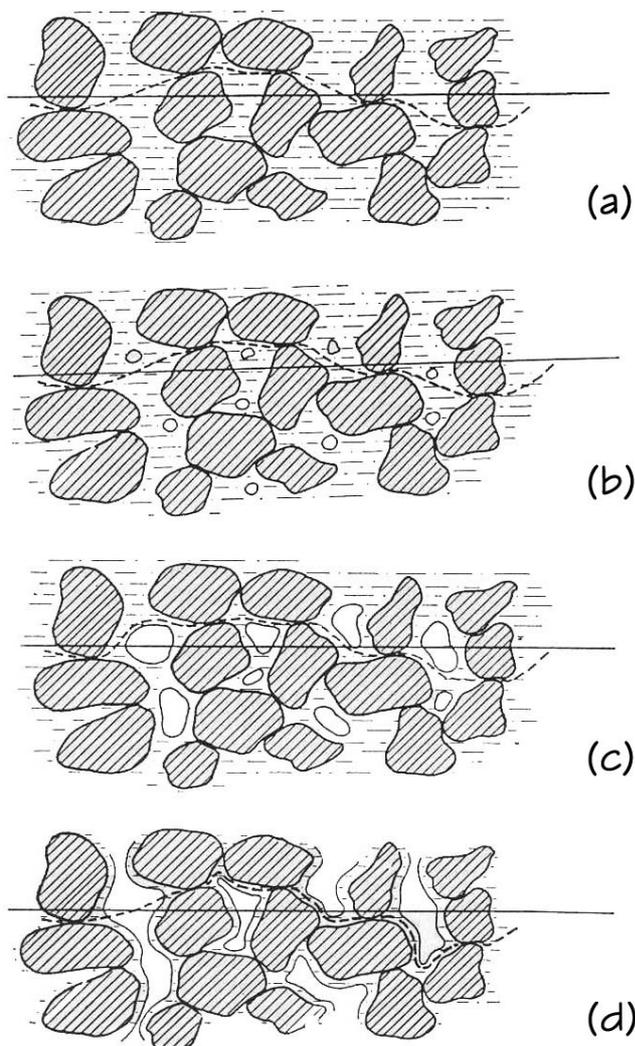
โดยที่	$\sigma$	=	หน่วยแรงรวมในแนวตามแกน (Total Normal Stress)
	$\bar{\sigma}$	=	หน่วยแรงประสิทธิผล (Effective normal Stress)
	$u_w$	=	แรงดันน้ำในโพรง (Pore-Water Pressure)

ดินเม็ดหยาบหน่วยแรงประสิทธิผล อาจหมายความว่า เป็นหน่วยแรงที่เกิดขึ้นระหว่างเม็ดดิน ส่วนในดินเม็ดละเอียดหน่วยแรงประสิทธิผลจะรวมถึงผลของหน่วยแรงที่เกิดจากประจุไฟฟ้าและปฏิกิริยาทางเคมีของธาตุในดินเม็ดละเอียด

ในกรณีที่ดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated Soil) ดินจะมีหน่วยแรงประสิทธิผลเพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงดึงผิวของส่วนที่สัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำ ที่เรียกว่า Contractile Skin (Fredlund, 1993) เช่นในกรณี การตัดลาดดินที่สูงชันแต่ก็ไม่เกิดการพังทลาย แม้ว่าไม่มีระบบค้ำยันหรือการปรับปรุงคุณภาพดิน และถ้าพิจารณาชั้นดินในสภาวะปกติดังในภาพที่ 10 จะเห็นได้ว่าดินในช่วงเหนือระดับน้ำใต้ดินมีทั้งอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว เรียกว่าช่วง Vadose zone จะมีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับการไหลของน้ำจากภายนอก ซึ่งระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงนี้เองจะส่งผลถึงกำลังรับแรงของดิน



ในภาพที่ 11 เป็นการอธิบายในลักษณะของภาพประกอบ ของสถานะต่าง ๆ ที่มี ความสัมพันธ์กับน้ำและอากาศในดิน ซึ่งจะสามารถอธิบายความแตกต่างของดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated Soil) และดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated Soil) ได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 11 สถานะต่าง ๆ ของน้ำและอากาศในดิน

- ใน Pore Fluid มีน้ำเท่านั้น; แรงดันน้ำเป็นบวก
- ใน Pore Fluid มีน้ำและฟองอากาศขนาดเล็ก; แรงดันน้ำเป็นบวก
- ใน Pore Fluid มีน้ำและฟองอากาศขนาดใหญ่ขึ้น; แรงดันน้ำเป็นลบ
- ใน Pore Fluid มีน้ำและฟองอากาศขึ้นบ้างและโพรงอากาศอยู่ที่ชั้นบรรยากาศ; แรงดันน้ำเป็นลบ

ที่มา: Jennings (1960)

การศึกษาเกี่ยวกับดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated Soil) เริ่มตั้งแต่ ประมาณปี 1941 โดย Biot ได้เสนอทฤษฎีเกี่ยวกับการระบายน้ำของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Theory of consolidation for an Unsaturated Soil) และได้มีการศึกษาโดย Croney *et al.* (1958) เจ้าหน้าที่ของ Roads Research Laboratory ได้เสนอสมการหน่วยแรงประสิทธิผลสำหรับดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

$$\bar{\sigma} = \sigma - \bar{\beta} u_w \quad (2)$$

โดยที่  $\bar{\beta}$  = พารามิเตอร์แรงดึงในมวลดิน (Bonding Factor)

Bishop (1959) ได้เสนอสมการหน่วยแรงประสิทธิผลสำหรับดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ และเป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลาย ว่า

$$\bar{\sigma} = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (3)$$

โดยที่  $u_a$  = แรงดันอากาศในมวลดิน (Pore-Air Pressure)  
 $u_w$  = แรงดันน้ำ (Pore Water Pressure)  
 $\chi$  = พารามิเตอร์ที่สัมพันธ์กับระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ  
 (Parameter related to Degree of Saturated of Soil)

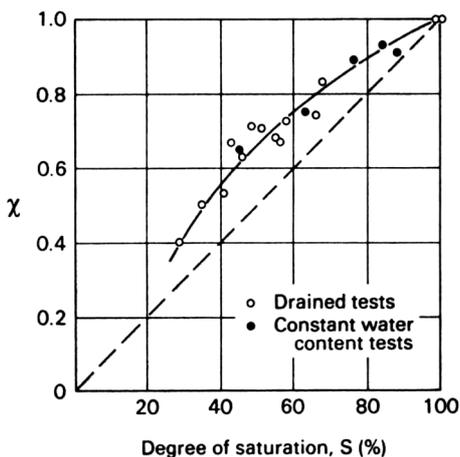
ค่า  $\chi = 1$  เมื่อ ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated Soil) และ จะเท่ากับ 0 เมื่อเป็นดินแห้ง (Dry Soil)

Donald (1961) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของ  $\chi$  กับ ระดับความอิ่มตัว (Degree of Saturation) ในดินทรายแป้ง (Cohesionless Silt) และ Blight (1961) ศึกษาในดินบดอัด (Compacted Soil) ได้ผล ดังภาพที่ 12 พบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นลักษณะเฉพาะของดินแต่ละชนิด

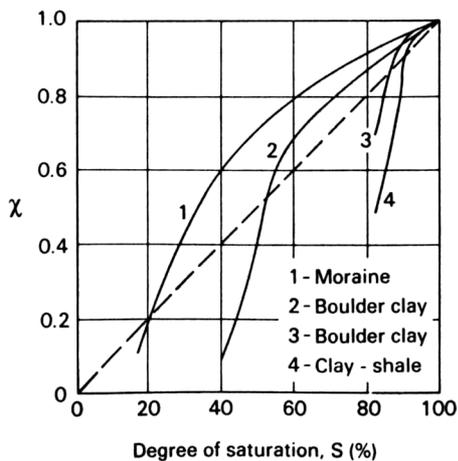
Aitchison (1961) เสนอสมการขึ้นที่ การประชุม Conference on Pore Pressure Suction in Soils ที่ London ว่า

$$\bar{\sigma} = \sigma + \psi P'' \tag{4}$$

โดยที่  $P''$  = Pore-Water Pressure deficiency  
 $\psi$  = ค่าพารามิเตอร์ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0-1



ดิน Cohesionless Silt (Donald, 1961)



ดิน Compacted Soil (Blight, 1961)

ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์  $\chi$  กับ Degree of Saturation

Jenning (1961) ก็ได้เสนอสมการหน่วยแรงประสิทธิผลขึ้นด้วยในการประชุมเดียวกัน ว่า

$$\bar{\sigma} = \sigma + \beta P'' \tag{5}$$

โดยที่  $P''$  = Negative Pore-Water Pressure ใช้ค่าบวก  
 $\beta$  = ค่าพารามิเตอร์ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0-1

สมการทั้ง 4 ที่ได้กล่าวมานั้น เป็นสมการที่อยู่ในลักษณะเดียวกัน คือถ้าค่า Pore-air Pressure เท่ากันแล้ว  $\beta = \chi = \bar{\psi} = \beta$  ซึ่งแรงดัน ( $P''$ ) ที่ใช้ในสมการเป็นแรงดันอากาศภายนอก (External Air Pressure) ยกเว้นสมการของ Bishop ที่มีความสัมพันธ์ของหน่วยแรงรวม (Total Normal Stress), แรงดันน้ำในมวลดิน (Pore-Water Pressure) และแรงดันอากาศในมวลดิน (Pore-Air Pressure)

Bishop and Blight (1963) ได้เสนอแนวคิดที่ว่า สมการหน่วยแรงประสิทธิผลของดินไม่อิ่มตัว ควรอยู่ในรูปของหน่วยแรงที่เปลี่ยนแปลง เรียกว่า Matric suction

Richards (1966) ได้เสนอสมการหน่วยแรงประสิทธิผล ในรูปของ Matric Suction ซึ่งต่างจากของ Bishop and Blight โดยเรียกว่า  $h_m$  และเพิ่มตัวแปร Solute Suction ขึ้นมาอีก ดังแสดงในสมการว่า

$$\bar{\sigma} = \sigma - u_a + \chi_m (h_m + u_a) + \chi_s (h_s + u_a) \quad (6)$$

โดยที่	$\chi_m$	=	Effective stress parameter for Matric Suction
	$h_m$	=	Matric Suction
	$\chi_s$	=	Effective stress parameter for Solute Suction
	$h_s$	=	Solute Suction

Matyas and Radhakrishna (1968) แนะนำโดยใช้หลักการ State Parameters ( $\sigma - U_a$ ) และ  $(u_a - u_w)$  ในการอธิบายเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated Soil)

Aitchison (1965, 1973) ได้เสนอสมการหน่วยแรงประสิทธิผล โดยปรับปรุงจากสมการของ Richards (1966) ว่า

$$\bar{\sigma} = \sigma + \chi_m P''_m + \chi_s P''_s \quad (7)$$

โดยที่	$P''_m$	=	Matric Suction, $(u_a - u_w)$
	$P''_s$	=	Solute Suction
	$\chi_m$ and $\chi_s$	=	Soil Parameters

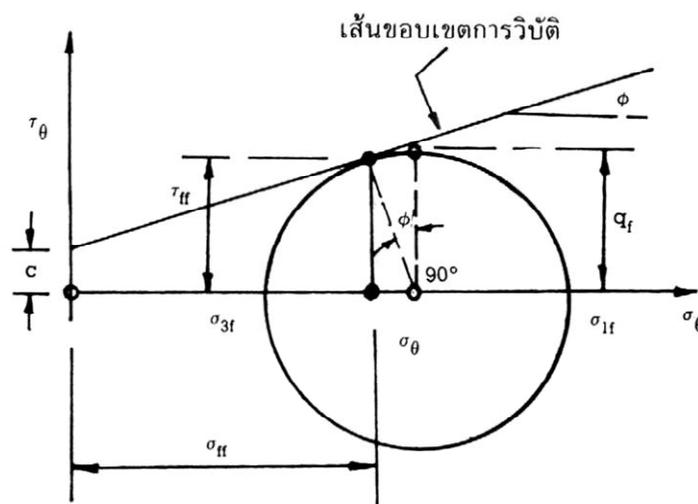
### ทฤษฎีกำลังรับแรงเฉือนของดิน

กำลังรับแรงเฉือนของดิน หมายถึง หน่วยแรงเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress) บนระนาบการพังของดินขณะเกิดการวิบัติ หรือเป็นหน่วยแรงเฉือนสูงสุดที่คงอยู่บนระนาบใดๆ ในมวลดิน เมื่อดินได้รับแรงเฉือนกระทำจนเกินกำลังจะรับได้ ทำให้เกิดการเคลื่อนตัว นั่นหมายถึงเกิดการวิบัติจากแรงเฉือน

การวิบัติของมวลดินมักมีพฤติกรรมไปตามหรือใกล้เคียงกับพฤติกรรมที่คาดคะเนโดยกฎการวิบัติที่เสนอโดย Mohr และ Coulomb กฎของ Mohr และ Coulomb กำหนดไว้ว่า มวลดินจะถึงการวิบัติเมื่อวงกลมของมอร์ที่ให้แทนสภาพของหน่วยแรงในมวลดินสัมผัสกับเส้นขอบเขตการวิบัติ (Failure Envelope) ของ Mohr และ Coulomb ดังภาพที่ 13 ซึ่งจะได้สมการว่า

ในรูปของหน่วยแรงรวม 
$$\tau_{ff} = \sigma_{ff} \tan \phi + c \quad (8)$$

และในรูปของหน่วยแรงประสิทธิผล 
$$\tau_{ff} = \sigma'_{ff} \tan \phi' + c' \quad (9)$$



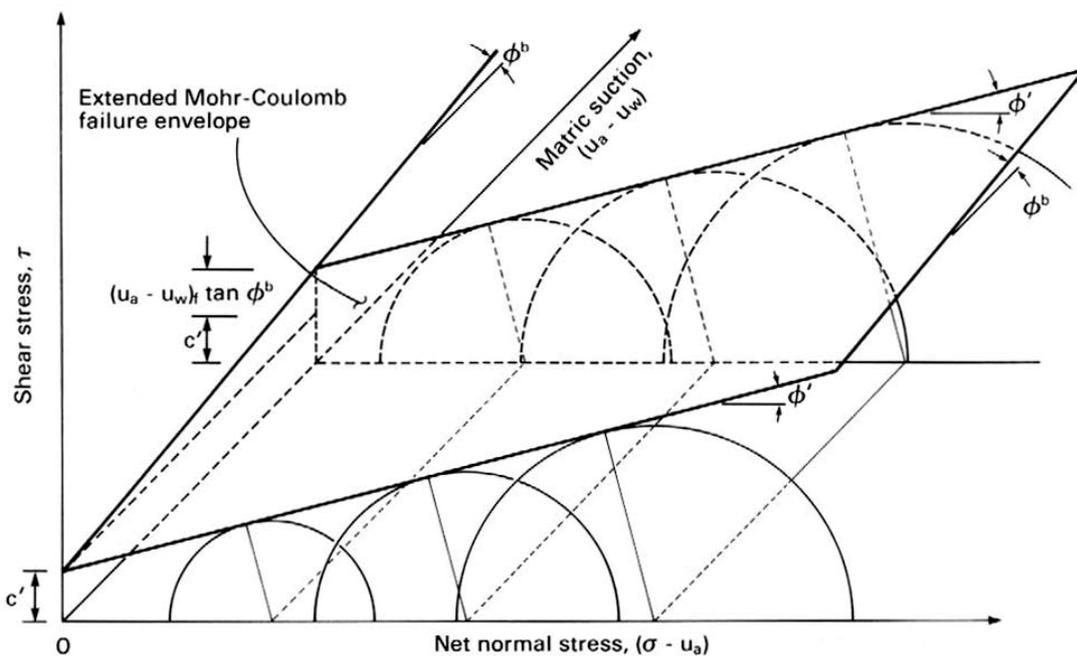
ภาพที่ 13 กฎการวิบัติของ Mohr และ Coulomb

การเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงในมวลดินเมื่อเกิดขึ้นแล้ว จะมีแรงดันน้ำ (Pore pressure,  $u_w$ ) เกิดขึ้นในมวลดินด้วยและถ้าสามารถวัดค่าหรือคาดการณ์ค่าของความดันน้ำได้แน่นอน จึงอาจแยกหน่วยแรงที่เกิดจากความดันน้ำออกไป ให้คงเหลือแต่หน่วยแรงที่ส่งผ่านระหว่างเม็ดดินหรือเนื้อดินเท่านั้น ซึ่งเรียกว่า หน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress,  $\bar{\sigma}$ ) ทั้งนี้เพราะแรงดันน้ำในมวลดินไม่ก่อให้เกิดกำลังแต่อย่างใด หากแต่จะลดกำลังเสียดทานของดิน โดยเกิดแรงลอยตัว ยกเม็ดดินขึ้นไป และมุมเสียดทานของน้ำเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงมีเฉพาะหน่วยแรงประสิทธิผลเท่านั้นที่ทำให้เกิดกำลังหรือหน่วยแรงต้านทานได้ แต่ในทางปฏิบัติบางครั้งทำได้ยากมากที่จะคำนวณค่าความดันน้ำให้ถูกต้อง ในบางกรณีที่ไม่สามารถทราบค่าความดันน้ำได้ชัดเจน เช่น การบรรทุกน้ำหนักโดยเร็ว มวลดินไม่อิ่มตัว ความดันน้ำเกิดจากการบดอัด เป็นต้น จึงอาจผนวกความดันน้ำที่เกิดขึ้นเข้าไปในกำลังของดินเลย ซึ่งเรียกว่า หน่วยแรงรวม (Total stress,  $\sigma$ ) ซึ่งจะต้องทำการทดสอบโดยให้มวลดินมีสภาพความชื้น อัตราการบรรทุกน้ำหนัก และสภาพอื่นๆ เหมือนกับที่เกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้างจริง และคาดการณ์ความดันน้ำที่ควรเกิดขึ้นในตัวอย่างดินที่กำลังทดสอบให้ใกล้เคียงกับสภาพที่จะเกิดขึ้นจริงในสนาม ซึ่งจะปลดหน่วยแรงประสิทธิผลไปโดยอัตโนมัติ โดยไม่จำเป็นต้องทราบค่าความดันน้ำที่เกิดขึ้นในมวลดินแต่อย่างใด

Fredlund (1978) พบว่าในกรณีดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated Soil) จะมีเทอมที่ประกอบด้วยแรงดันของน้ำและอากาศ ในสมการที่ 10 โดยมีความสัมพันธ์กันในเชิงเส้นตรง ดังภาพที่ 14 โดยที่  $\phi_b$  เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Matric Suction กับ Cohesion ( $c'$ ) คือถ้ายังมีค่า Matric Suction มากขึ้นค่า  $\phi_b$  ก็จะมากขึ้นด้วย และในกรณีที่ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated Soil) แล้ว  $u_a = u_w$  ซึ่งก็จะได้สมการในรูปของสมการหน่วยแรงประสิทธิผลดังสมการที่ 11

$$\text{ดินไม่อิ่มตัว} \quad \tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (10)$$

$$\text{ดินอิ่มตัว} \quad \tau_{ff} = \sigma'_{ff} \tan \phi' + c' \quad (11)$$



ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ของการบิดของดินในรูปแบบของ Unsaturated Soil

ที่มา: Fredlund (1993)

### การวัดแรงดูดในดิน

แรงดูด คือแรงดันในโพรงของดินที่เป็นลบ

Aitchison (1965) ได้อธิบายส่วนประกอบของแรงดูดในดิน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความชื้นในอากาศโดยทั่วไปเรียกว่า แรงดูดโดยรวม (Total Suction) แรงดูดโดยรวมประกอบด้วย 2 องค์ประกอบคือ Matrix Suction และ Osmotic Suction ซึ่งมีค่าต่างๆมีค่าจำกัดความดังนี้

Matrix หรือ Capillary ได้จากการวัดแรงดันน้ำในสภาวะสมดุลของน้ำในดิน เทียบกับแรงดันน้ำในสภาวะสมดุลของสารละลายที่เป็นองค์ประกอบของน้ำในดิน

Osmotic หรือ Solute ได้จากการวัดแรงดันน้ำในสภาวะสมดุลของสารละลายที่เป็นองค์ประกอบของน้ำในดิน เทียบกับแรงดันน้ำในสภาวะสมดุลของน้ำบริสุทธิ์

Total Suction หรือ Free Energy ได้จากการวัดแรงดันน้ำในสถานะสมดุลของน้ำในดิน เทียบกับแรงดันน้ำในสถานะสมดุลของสารละลายที่เป็นองค์ประกอบของน้ำบริสุทธิ์

จากที่กล่าวมาสามารถอธิบายได้ว่า Total Suction ขึ้นอยู่กับพลังงานอิสระของน้ำในดิน ในขณะที่ Matric Suction และ Osmotic Suction เป็นองค์ประกอบของพลังงานอิสระนั้น โดยมีสมการ

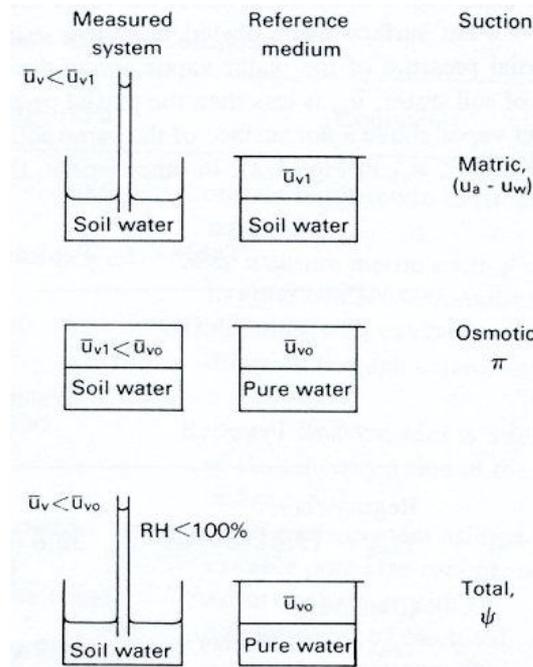
$$\Psi = (u_a - u_w) + \pi \quad (12)$$

เมื่อ	$(u_a - u_w)$	=	Matric Suction
	$u_a$	=	แรงดันอากาศ
	$u_w$	=	แรงดันน้ำ
	$\pi$	=	Osmotic Suction

ในภาพที่ 15 ได้อธิบาย Total, Matric และ Osmotic Suction เทียบกับพลังงานอิสระของน้ำในดิน โดย Matric Suction เป็นความสัมพันธ์ของ Capillary ที่สูงขึ้นจากแรงตึงผิวของน้ำ ซึ่งเป็นผลจากการกระทำระหว่างอนุภาคของแรงบนอนุภาคของ Contractile Skin

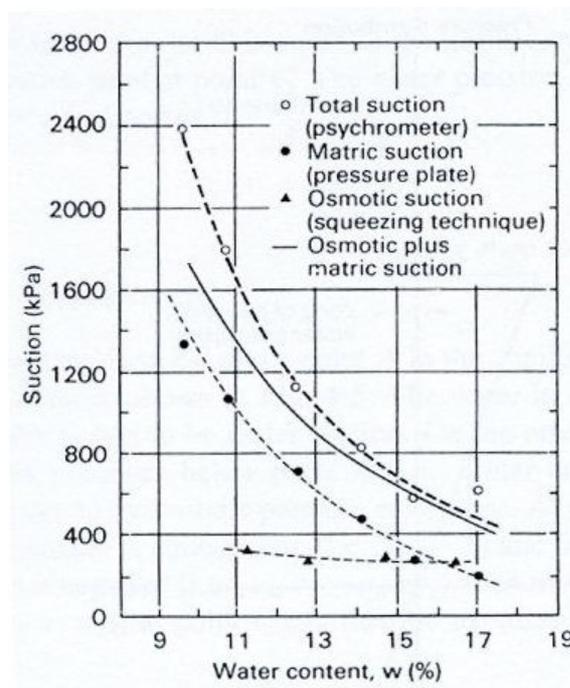
Krahn and Fredlund (1972) ได้เสนอว่าส่วนค่าแรงดูด Osmotic เป็นผลเนื่องจากสารละลายที่เจือจางในน้ำในดิน (ส่วนมากเป็นเกลือ) ทำให้เกิดแรงดูดชนิดนี้ ซึ่งมีผลการหาค่า Matric Suction & Osmotic Suction ของดินบดอัด (สำหรับ Subgrade ที่สร้างในจังหวัด Saskatchewan แคนาดา) ซึ่งดิน Regina Clay มีค่า LL = 78% และ PL = 31% Glacial Till มีค่า LL = 34% และ PL = 17% ซึ่งแสดงดังภาพที่ 16 เป็นค่าที่ได้จากการวัดอย่างอิสระที่ Initial Water Content หลาย ๆ ค่า และแสดงให้เห็นว่าค่า Matric Suction รวมกับ Osmotic Suction มีค่าใกล้เคียงกับ แรงดูดโดยรวม (Total Suction)

มีอุปกรณ์หลายชนิดที่ใช้ในการหาค่าแรงดูดในดิน ดังแสดงในตารางที่ 4 ดังนี้



ภาพที่ 15 Total Suction and its component

ที่มา: Aitchison (1965)



ภาพที่ 16 แสดงค่าแรงดูดโดยรวม, Matric Suction, Osmotic Suction ของดิน Glacial Till

ที่มา: Krahn and Fredlund (1972)

ตารางที่ 4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการหา Total, Matric และ Osmotic Suction

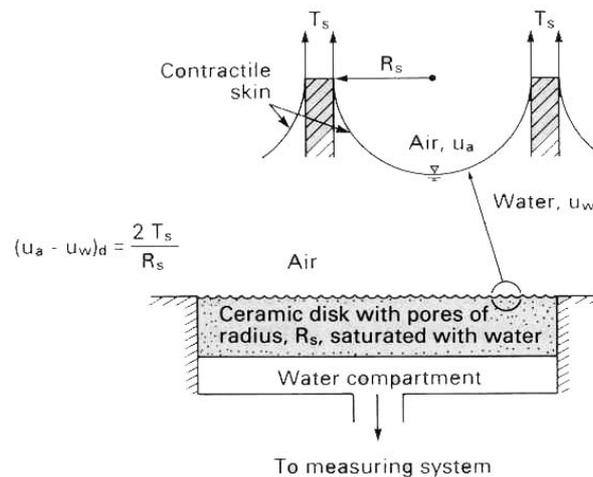
Name of Device	Suction Component	Range (kPa)	Comments
	Measured		
Psychrometers	Total	100~8000	อุณหภูมิคงที่
Filter paper	Total	(Entire range)	อาจวัด Matric Suction ได้
Tensiometer	Negative pore-water pressures or Matric Suction ; $U_a = 0$	0-90	ยากที่อากาศจะผ่านเข้าไปในกระเปาะดินเผา
Null-type pressure plate (axis translation)	Matric	0-1500	ค่าที่วัดขึ้นอยู่กับ air entry value
Thermal conductivity sensors	Matric	0~400+	เป็นการวัดค่าทางอ้อม
Pore fluid squeezer	Osmotic	(Entire range)	ใช้กับ Psychrometer หรือ Electrical conductivity

#### การวัดแรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric Suction)

แรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric Suction) สามารถวัดได้ทั้งวิธีทางตรงและทางอ้อม โดยเป็นค่าที่ได้จากแรงดันอากาศลบด้วย Negative pore water pressure High air entry ceramic disks ถูกใช้ในการวัดค่าแรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric Suction) ด้วยวิธีทางตรง โดยให้ค่า Negative Pore Water Pressure ส่วน Porous Sensors ถูกใช้ในการวัดค่าด้วยวิธีทางอ้อม โดยคุณสมบัติทางไฟฟ้าและอุณหภูมิ ทำให้ได้ Water Content และสามารถแปลงค่าที่ได้ให้เป็น Matric Suction ได้

High air entry ceramic disks เป็นระบบที่มีช่องว่างเล็ก ๆ ขนาดเท่า ๆ กัน ทำหน้าที่เป็นตัวกรองระหว่างอากาศและน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 17 โดยทั่วไปทำจาก Ceramic ที่มีแร่ Kaolin เป็นองค์ประกอบ และต้องทำให้ Disk อิ่มตัวด้วยน้ำ อากาศจะไม่สามารถผ่าน Disk ไปได้ เนื่องจาก Contractile Skin ด้านทานการไหลผ่านของอากาศด้วยแรงดึงผิวของน้ำ โดย Contractile Skin ทำหน้าที่เหมือนตัวกรองบาง ๆ เชื่อมประสานด้วยช่องว่างเล็ก ๆ กับผิวของ Ceramic Disk

ความแตกต่างระหว่างแรงดันอากาศเหนือ Contractile Skin กับแรงดันน้ำใต้ Contractile Skin เป็นค่าที่แสดงถึงแรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric Suction)



ภาพที่ 17 หลักการของ High air entry ceramic disks โดย Kelvin 's Capillary Model

การวัดค่าด้วยวิธีทางตรง

มีอุปกรณ์ 2 ชนิด ที่ใช้ในการหาแรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric Suction) ด้วยวิธีทางตรง คือ Tensiometer และ Axis-Translation Apparatus ซึ่งจะทำได้ค่า Negative Pore Water Pressure

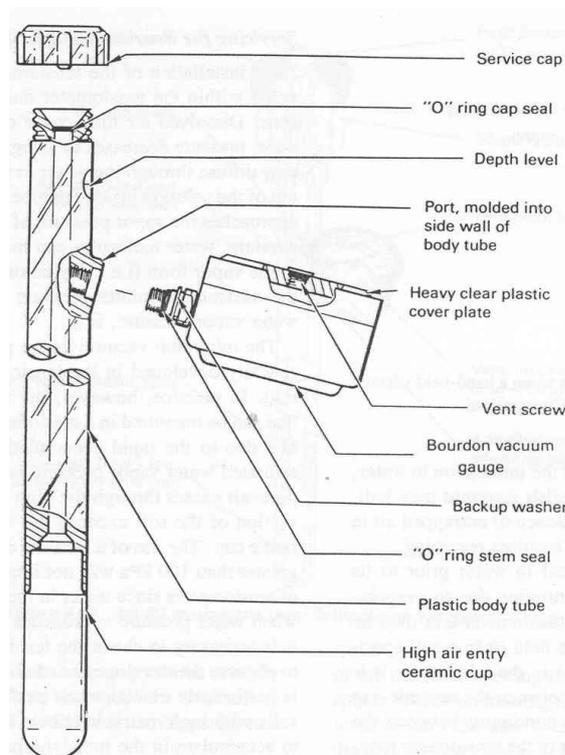
#### 1. Tensiometer

Tensiometer เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่า Negative Pore Water Pressure ในดิน ด้วยระบบ High Air Entry Disks โดย Porous Ceramic Cup (กระเปาะดินเผา) ที่ถูกเชื่อมต่อกับ อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแรงดัน ผ่านทางท่อพลาสติกกลวงเล็ก ท่อและกระเปาะดินเผาจะถูกเติมด้วย น้ำที่ไล่ฟองอากาศออกจนหมดแล้ว และในการใช้งานต้องนำกระเปาะดินเผาใส่ลงในหลุมที่จะเตรียมไว้ จนกระทั่งกระเปาะสัมผัสกับดินได้ดี

ในสภาวะสมดุลระหว่างดินและระบบวัดค่า น้ำใน Tensiometer จะมีแรงดันเป็นลบ เท่ากับแรงดันของน้ำในดิน ซึ่งสามารถวัดค่าได้ถึงลบ 90 kPa ขึ้นอยู่กับ Air Entry Value ของ ทรายละเอียดดินเหนียว และค่าที่ได้ก็จะเท่ากับ แรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric Suction) เมื่อแรงดันอากาศ อยู่ที่ Atmospheric ( $u_a = 0$ ) ในภาพที่ 18 แสดงรายละเอียดของ Tensiometer ของ Soil Moisture Equipment Corporation และภาพที่ 19 แสดงชนิดของ Tensiometer

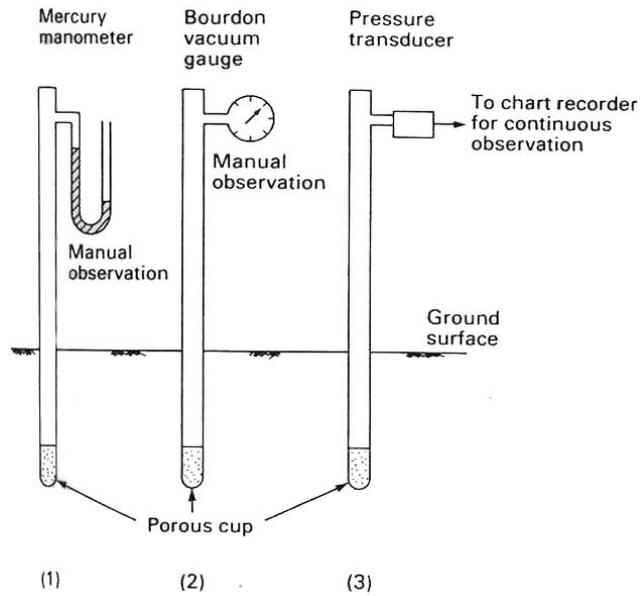
การติดตั้ง Tensiometer ในสนาม Tensiometer ถูกใช้ในการวัดค่า Negative Pore Water Pressure ในงานทางวิศวกรรมปฐพีอย่างแพร่หลาย ดังตัวอย่างที่กล่าวโดย Sweeney (1982) ดังนี้

ลาดดินที่ประกอบด้วยดินชั้น Colluvium หนา 5-6 เมตร วางอยู่บน Deep Weathered Granite ดังภาพที่ 20 มีการติดตั้งบ่อสำรวจที่ทำจาก Caisson Ring คอนกรีต 2 บ่อ ดังแสดงใน ภาพที่ 21 ซึ่งในแต่ละ Caisson Ring มีรูเปิดสำหรับติดตั้ง Tensiometer ตามความลึกของบ่อสำรวจ

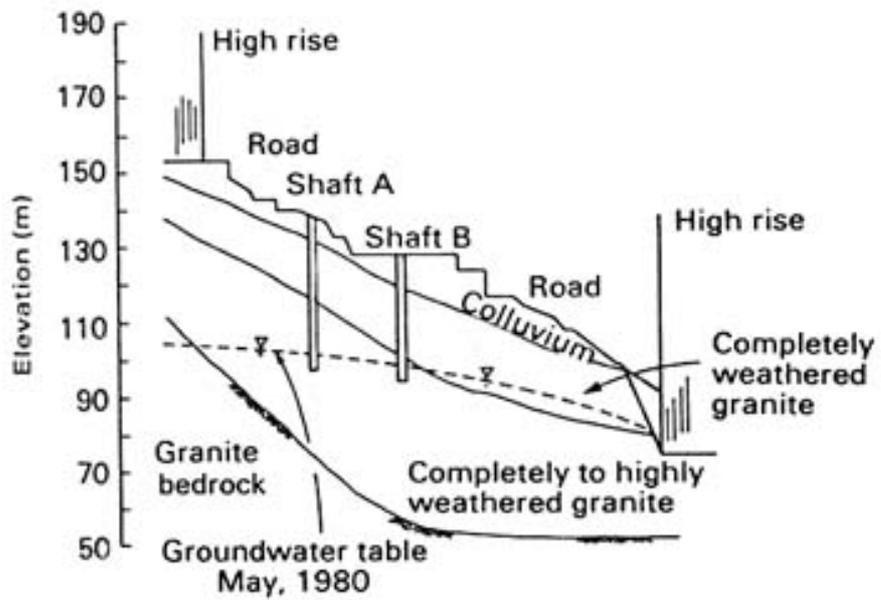


ภาพที่ 18 แสดงรายละเอียดของ Tensiometer

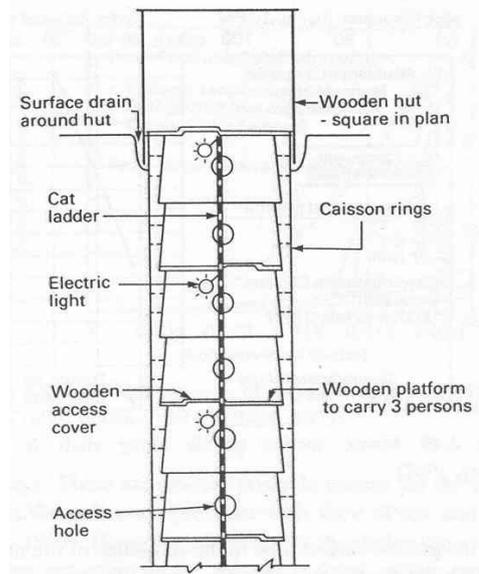
ที่มา: Soil Moisture Equipment Corporation



ภาพที่ 19 แสดงชนิดของ Tensiometer  
ที่มา: Morrison (1983)

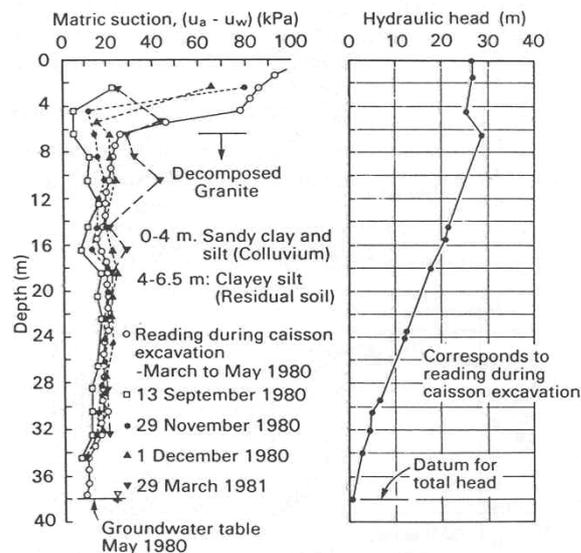


ภาพที่ 20 การติดตั้ง Tensiometer ในลาดดิน Weathered Granite  
ที่มา: Sweeney (1982)



ภาพที่ 21 บ่อสำรวจที่ใช้ในการติดตั้ง Tensiometer ในสนาม  
ที่มา: Sweeney (1982)

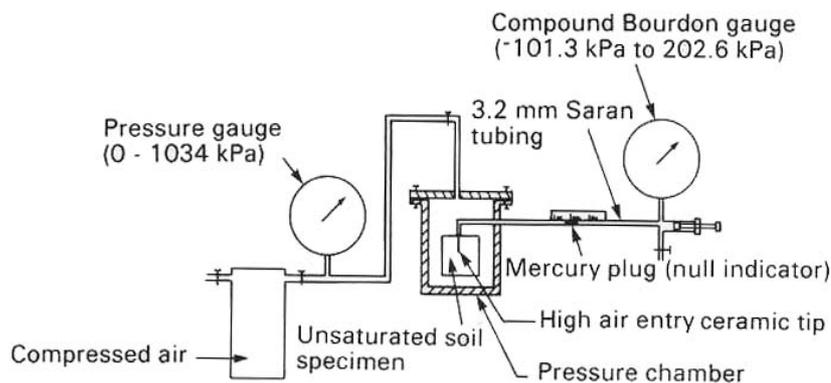
ในภาพที่ 22 แสดงให้เห็นผลที่ได้จากการวัดแรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric Suction) ซึ่งแสดงในเทอมของ Matric Suction และ Hydraulic Head ตามความลึกของบ่อสำรวจ จะเห็นว่าที่ความลึกใกล้ผิวดินมีการเปลี่ยนแปลง Matric Suction มากที่สุด และ Hydraulic Head จะค่อย ๆ ลดลงไปยังระดับน้ำใต้ดิน แสดงให้เห็นถึง Unsaturated Zone



ภาพที่ 22 Matric Suction ตามความลึกของบ่อสำรวจ ณ เวลาต่าง ๆ  
ที่มา: Sweeney (1982)

## 2. Axis-Translation Technique

Hilf (1956) ได้เสนอเทคนิค Axis-Translation ในเบื้องต้น ซึ่งสามารถวัดค่าได้ทั้ง ตัวอย่างที่ถูกบดอัดแล้ว และตัวอย่างที่ยังไม่ถูกรบกวน (Undisturbed) ดังภาพที่ 23



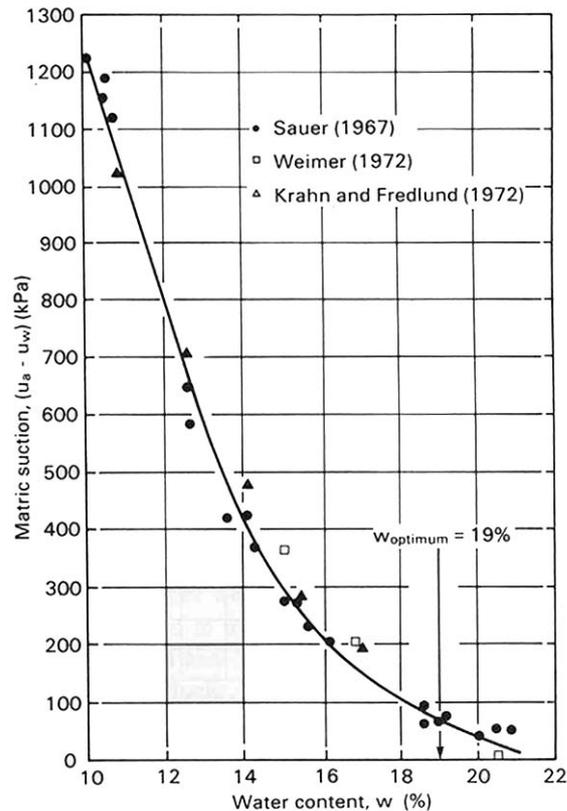
ภาพที่ 23 Axis-Translation สำหรับวัดค่า Matric Suction

ที่มา: Hilf (1956)

ตัวอย่างดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated Soil) ถูกวางในหม้อความดันระบบปิด และให้ความดันอากาศในหม้ออัดความดัน ก็สามารถวัด Negative Pore Water Pressure ได้ ทำให้ได้ Matric Suction ในดิน ( $u_a - u_w$ )

Hilf (1956) ได้กล่าวว่า เมื่อทำการเพิ่มแรงดันอากาศ แรงดันน้ำก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้แรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric Suction) มีค่าคงที่

นักวิจัยหลายท่านยอมรับกับเทคนิคนี้ ว่ามีความเหมาะสมและให้ข้อมูลที่น่าเชื่อถือได้ โดยการแสดงความสัมพันธ์ของ Water Content กับ Matric Suction ของดินที่ถูกบดอัดแล้ว ดังภาพที่ 24



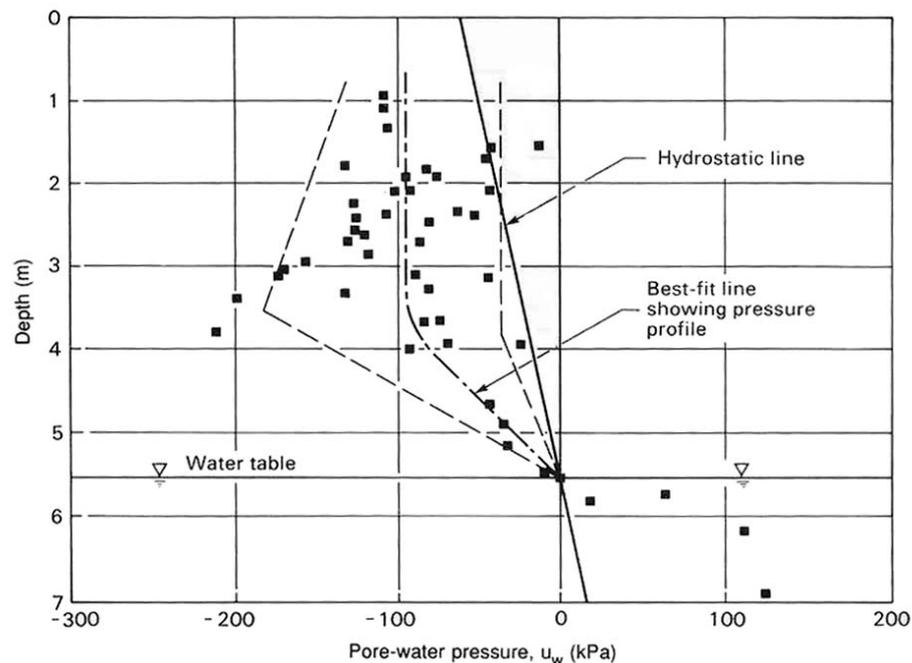
ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ของ Water Content กับ Matric Suction

### การวัดค่าด้วยวิธีทางอ้อม

การหาค่าแรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric Suction) ด้วยวิธีทางอ้อมนี้ จะใช้ Porous Block เป็นตัว Sensor โดยสามารถใช้วัสดุได้หลากหลายชนิด เช่น โนลอน ไฟเบอร์กลาส แก้ว ยิปซัม เซรามิก และโลหะ ซึ่ง Porous Block นี้ใช้คุณสมบัติทางไฟฟ้าและอุณหภูมิทำให้ได้ Water Content แล้วนำมาผ่านขบวนการปรับแก้ จึงจะได้ Matric Suction

Thermal Conductivity Sensor นำถือว่าเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ดีกว่าอากาศ ดังนั้นถ้า Thermal Conductivity Sensor ในดินเพิ่ม จะทำให้ Water Content ในดินเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งก็จะมีผลกับ Degree of Saturation ในดินด้วย และก็จะถูกปรับแก้ให้ได้ Matric Suction ในดิน

Sattler *et al.* (1990) ได้เสนอผลจากการวัด Matric Suction ในห้องทดลองด้วยดิน Winnipeg Clay โดยการใช้ AGWA-II Sensor ดังภาพที่ 25 จากผลลัพธ์ที่ได้ชี้ให้เห็นว่า Negative Pore Water Pressure เป็นศูนย์ ที่ระดับน้ำใต้ดิน และเป็นลมนอนเส้น Hydrostatic Line เหนือระดับน้ำใต้ดิน



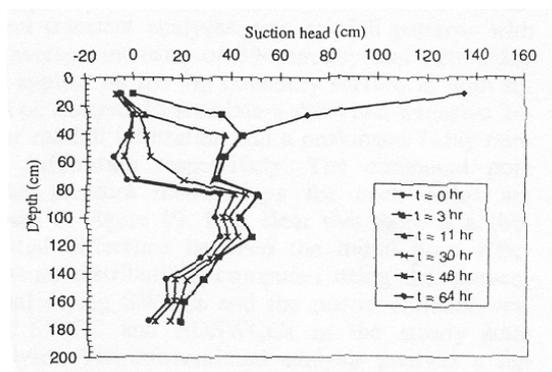
ภาพที่ 25 การวัดค่า Negative Pore Water Pressure โดยการใช้ AGWA-II Sensor  
ที่มา: Sattler *et al.* (1990)

### ผลกระทบของปริมาณการไหลซึมต่อแรงดึงน้ำในมวลดิน

ในดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated Soil) ปริมาณการไหลซึมของฝนมีอิทธิพลต่อแรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric Suction) เป็นอย่างมาก ทำให้ต้องมีการเฝ้าสังเกตการณ์อย่างละเอียด

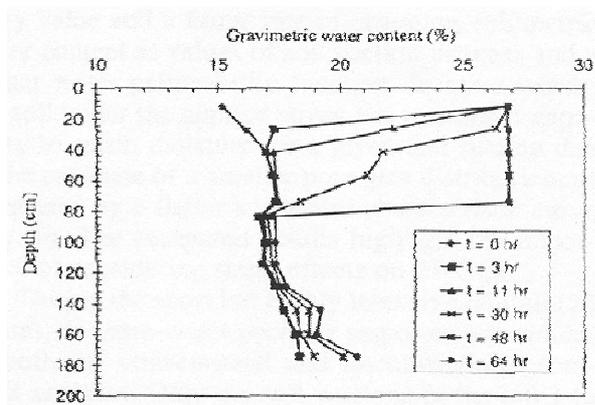
Zhang *et al.* (1997) ได้ทำการเฝ้าสังเกตการณ์พฤติกรรมของการไหลซึมของปริมาณฝนต่อแรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric Suction) เป็นเวลา 64 ชั่วโมง โดยการใช้ Tensiometer เป็นอุปกรณ์วัดแรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric Suction) ในสนาม ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 26 และ 27 จะเห็นว่าในระยะเวลา 64 ชั่วโมง ปริมาณการไหลซึมของฝนทำลายแรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric Suction)

ได้จนถึงความลึก 80 เซนติเมตร คังจะเห็นได้จากค่าแรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric Suction) มีค่าเท่ากับ 0 และปริมาณ Water Content มีค่าเท่ากับ 27 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 26 การวัดค่า Suction Head ตามความลึกระหว่างฝนตก

ที่มา: Zhang *et al.* (1997)



ภาพที่ 27 การวัดปริมาณ Water Content ตามความลึกระหว่างฝนตก

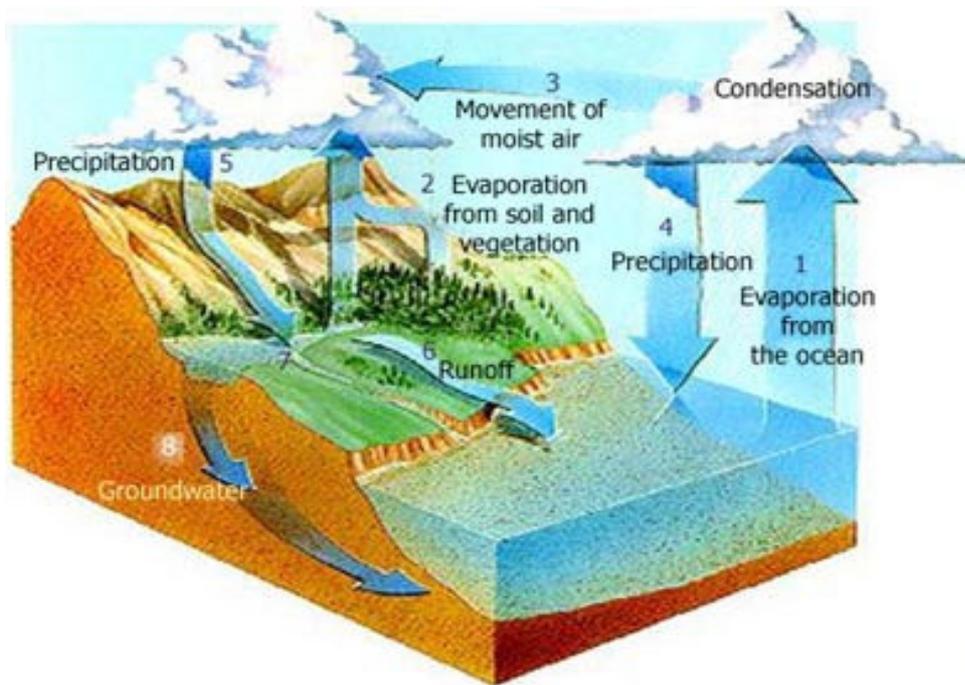
ที่มา: Zhang *et al.* (1997)

Rahardjo (1996) กล่าวว่า แรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric Suction) จะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาแห้ง และจะลดลงในช่วงเวลาเปียก จะเกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric Suction) สูงในบริเวณใกล้ผิวดิน ซึ่งเป็นส่วนแรกที่ได้รับผลกระทบจากการไหลซึมของปริมาณฝน และขนาดของการเปลี่ยนแปลงจะลดลงตามความลึกของดิน

### ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความอิ่มตัวของน้ำกับกำลังต้านทานในมวลดิน

น้ำฝนนับว่าเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งที่กระตุ้นให้เกิดการพังของลาดดิน เมื่อน้ำฝนไหลซึมลงดินทำให้แรงดันน้ำในดินเปลี่ยนไป จากเดิมที่แรงดันน้ำในลาดดินเป็นลบก็จะเพิ่มขึ้น ๆ จนกลายเป็นศูนย์ เมื่อแรงดันน้ำที่เป็นลบเริ่มหายไปกำลังรับแรงเฉือนในดินก็จะลดลง จนกระทั่งแรงดันดินมากกว่าแรงต้านก็จะเกิดการเคลื่อนพังของลาดดิน Fredlund (1979), Brand (1981), Chinniah (1994), Fourie (1996) และ Rahardjo (2000) พบว่าลาดดินถล่มส่วนมากมีสาเหตุมาจากการไหลซึมของน้ำฝนและพฤติกรรมของดินเป็นแบบดินไม่อิ่มตัว ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพควรวิเคราะห์บนพื้นฐานของดินไม่อิ่มตัวคือ ค่าความชื้นน้ำและความชื้นในดินเปลี่ยนแปลงตามแรงดันน้ำที่เป็นลบนั่นก็คือ Matric Suction ( $u_a - u_w$ ) ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับแรงดันน้ำที่เป็นลบเรียกว่า Soil-water characteristic curve ซึ่งสามารถทดสอบได้ด้วย Pressure plate test, Tensiometer หรือประมาณได้จากสมการ Grain size distribution curve (Fredlund and Xing, 1994) นอกจากการวิเคราะห์ต้องอยู่บนพื้นฐานของพฤติกรรมของดินไม่อิ่มตัวแล้วรูปแบบของน้ำฝนยังส่งผลต่อเสถียรภาพของลาดดินด้วย

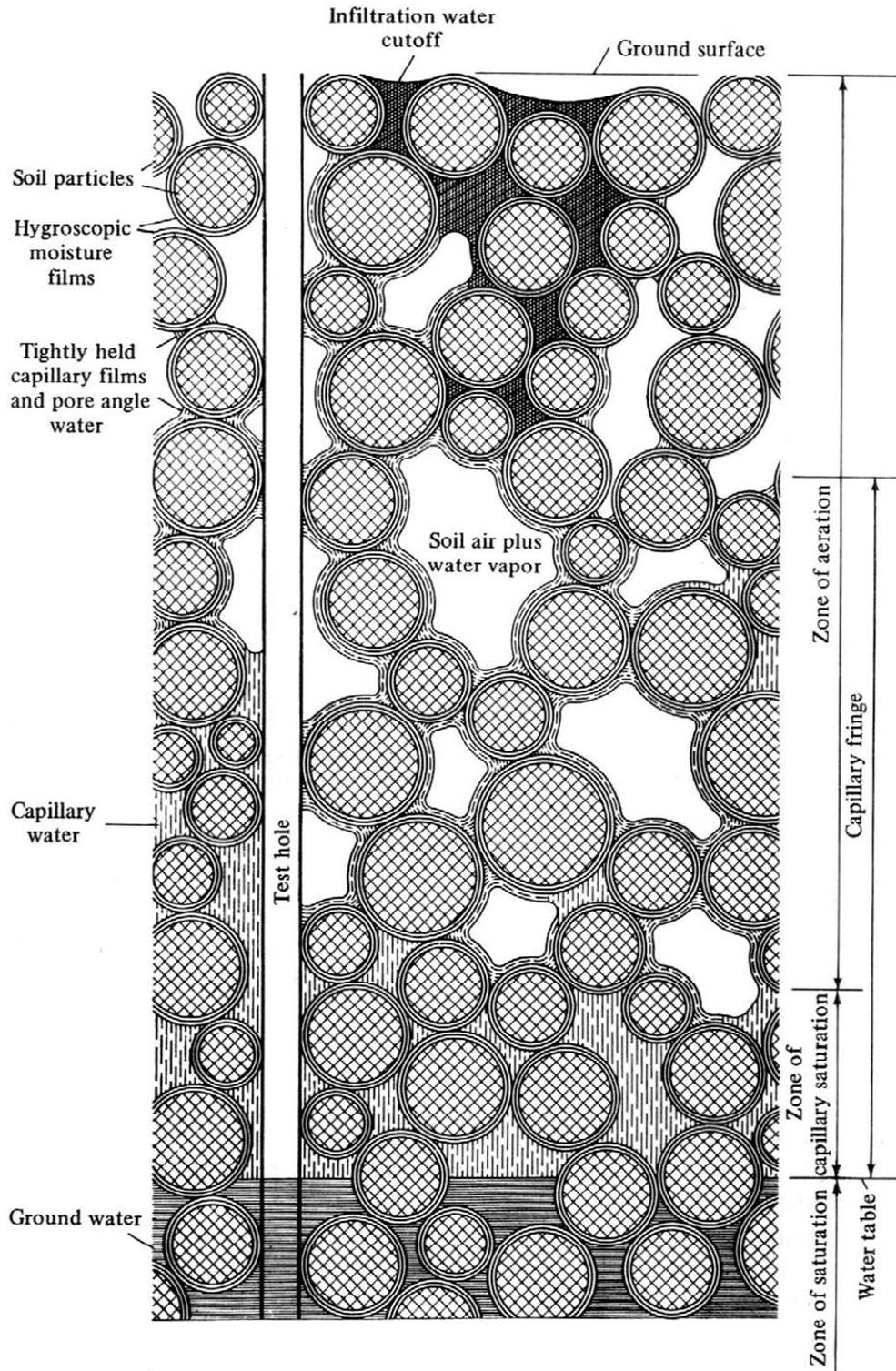
การเกิดและหมุนเวียนของน้ำตั้งแต่ กระบวนการระเหย (Evaporation) การกลั่นตัวของไอน้ำ (Precipitation) และการไหลซึมของน้ำและการไหลบนผิวดิน (Infiltration and Runoff) เป็นกระบวนการที่ส่งผลต่อความชื้นในดิน ดังแสดงในภาพที่ 28 ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล โดยปริมาณน้ำฝนเป็นปัจจัยหลักในการเพิ่มปริมาณน้ำในมวลดิน เมื่อฝนตกน้ำจะไหลแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ น้ำที่ไหลซึมลงดิน (Infiltration) และ น้ำที่ไหลที่ผิวดิน (Surface Run off) โดยปริมาณน้ำทั้ง 2 ส่วนจะขึ้นอยู่กับค่าความชื้นน้ำของดิน ปริมาณน้ำที่ไหลที่ผิวดินทำให้เกิดการกัดเซาะหน้าดิน ทำให้ความชันของลาดดินมากขึ้นเสถียรภาพก็ลดลงด้วย ปริมาณการกัดเซาะหน้าดินนั้นขึ้นอยู่กับอัตราความเร็วในการไหลของน้ำและปริมาณน้ำ ซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยการระบายและการปลูกพืชคลุมดิน ส่วนปริมาณน้ำที่ไหลซึมลงดิน (Infiltration) ก็จะไหลรวมกันในดินเรียกว่า Subsurface runoff ในภาพที่ 29 แสดงการกระจายตัวของน้ำในดิน โดยแบ่งเป็น zone ต่างๆ คือ Saturation zone, Capillary saturation, Aeration zone และ Capillary fringe ในกรณีที่มีดินมีความชื้นเดิมน้อยมาก อัตราการซึมลงในดินจะสูงมาก แต่เมื่อดินอิ่มตัวอัตราการซึมก็จะลดลงทันทีเช่นกัน โดยน้ำที่ไหลซึมลงดินนี้จะไปเพิ่มระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของดิน



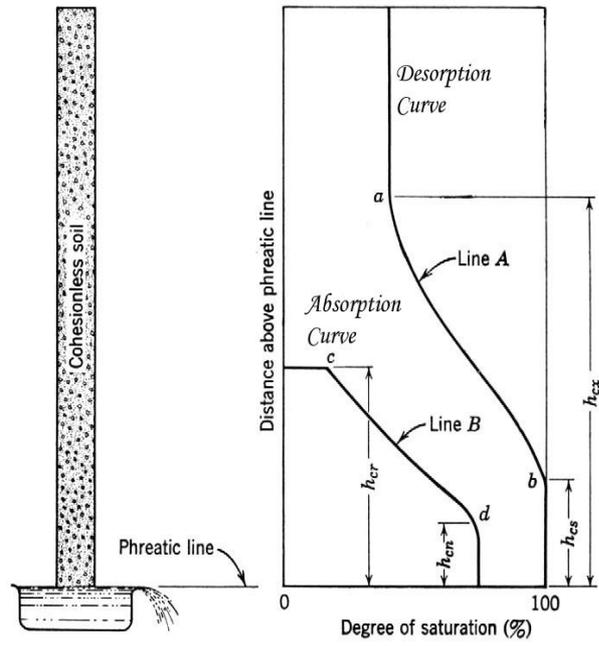
ภาพที่ 28 วัฏจักรของน้ำ

ลักษณะการไหลของน้ำในดินสามารถมองได้ 2 รูปแบบคือ น้ำไหลจากผิวดินลงตามแรงโน้มถ่วงของโลก และน้ำที่ไหลขึ้นเนื่องจากแรงดึงผิวของเม็ดดิน ที่เรียกว่า Capillarity โดยการไหลทั้ง 2 แบบ ให้ระดับความอิ่มตัวไม่เท่ากัน (Lambe, 1969) ดังแสดงในภาพที่ 30 เส้น A แทนการไหลจากผิวดินเริ่มจากดินที่อิ่มตัวแล้วปล่อยให้ น้ำไหลลง เรียกว่า Desorption Curve ส่วนเส้น B แทนการไหลขึ้นเนื่องจาก Capillarity โดยเริ่มจากดินแห้ง ซึ่งระดับดินที่อิ่มตัวของดินจะต่ำกว่าของแบบ เส้น A เรียกว่า Absorption Curve ในดินปกติที่ปริมาณความชื้นของดินช่วงหน้าฝน พฤติกรรมจะเป็นแบบ Desorption และในช่วงหน้าแล้งจะเกิดการไหลขึ้น (Capillarity) หรือ Absorption (Spangler and Handy, 1973)

ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (Degree of Saturation) มีความสำคัญต่อหน่วยแรงในมวลดิน ทั้ง Pore-Water และ Pore-Air Pressure จากภาพที่ 31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำกับ Suction ซึ่งความสัมพันธ์นี้ส่งผลให้เห็นว่า ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำก็มีความสัมพันธ์กำลังรับแรงเฉือน

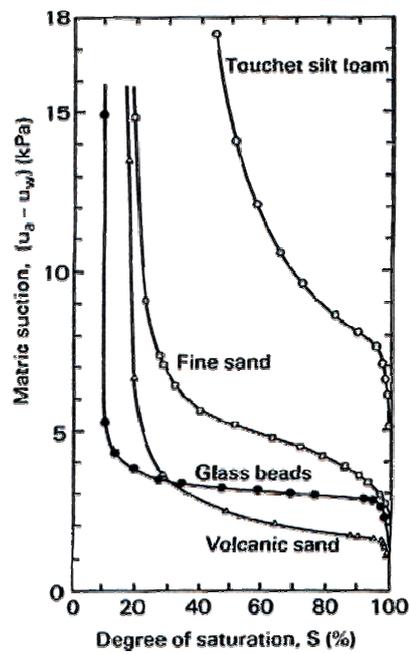


ภาพที่ 29 แสดงการกระจายตัวของน้ำในดิน  
 ที่มา: Spangler and Handy (1973)



ภาพที่ 30 การเปลี่ยนแปลงระดับความอิ่มตัวในมวลดิน

ที่มา: Lambe (1969)



ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความอิ่มตัวของดินกับค่า Matric Suction

ที่มา: Fredlund (1993)

### การวิเคราะห์ฝนแบบความเข้ม-ช่วงเวลา-รอบปีการเกิดซ้ำ

การวิเคราะห์ฝนแบบความเข้ม-ช่วงเวลา-รอบปีการเกิดซ้ำ (Intensity-Duration-Return Period) คือวิธีการวิเคราะห์ฝนเฉพาะจุดหรือสถานีโดยใช้ข้อมูลฝนที่ได้บันทึกไว้อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานานหลายปี เพื่อนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของฝน ที่ช่วงเวลาที่ฝนตกและความถี่ของการเกิดฝน ซึ่งการวิเคราะห์ลักษณะนี้ทำให้ทราบความรุนแรงของฝน โดยดูจากความถี่และรอบปีการเกิดซ้ำ เพื่อการนำไปประเมินปริมาณน้ำท่วมสูงสุด เพื่อการออกแบบระบบระบายน้ำหรืออาคารชลศาสตร์

วรารุช (2539) ความถี่หมายถึง โอกาสความน่าจะเป็นที่ฝนในปีใดๆ จะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าฝนที่พิจารณา ส่วนรอบปีการเกิดซ้ำหมายถึงค่าเฉลี่ยของระยะเวลาระหว่างเหตุการณ์ที่ฝนจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าฝนที่พิจารณา โดยการวิเคราะห์ใช้หลักทางสถิติจากข้อมูลที่ได้บันทึกไว้ โดยการแจกแจงความถี่ของน้ำฝนมีฟังก์ชันที่ใช้อยู่มากมาย แต่ที่นิยมใช้มีอยู่ 3 ฟังก์ชันคือ ฟังก์ชันกัมเบล (Gumbel) ฟังก์ชันล็อกนอร์มอล 2 พารามิเตอร์ (Two-Parameter Lognormal) และ ฟังก์ชันล็อกเพียร์ชันประเภทสาม (Log Pearson Type III)

Sabur (1982) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็น คือ ฟังก์ชันกัมเบล ฟังก์ชันล็อกนอร์มอล 2 พารามิเตอร์ ฟังก์ชันเพียร์ชันประเภทสาม และฟังก์ชันล็อกเพียร์ชันประเภทสาม กับข้อมูลของประเทศไทย ได้แนะนำให้การแจกแจงด้วยฟังก์ชันกัมเบลกับการวิเคราะห์น้ำท่วมสำหรับประเทศไทย โดยฟังก์ชันกัมเบลที่ใช้ในการคำนวณขนาดน้ำฝนคือ

$$Q_{Tr} = \bar{Q} - 0.45S_Q - 0.7797S_Q \ln \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{Tr} \right) \right] \quad (13)$$

โดยที่	$Q_{Tr}$	=	ขนาดน้ำฝนที่มีรอบปีการเกิดซ้ำ $Tr$ ปี
	$\bar{Q}$	=	น้ำฝนเฉลี่ย
	$S_Q$	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของน้ำฝน

ฝนที่ตกในแต่ละลูกจะมีรูปแบบหรือการแจกแจงที่แตกต่างกัน การวิเคราะห์รูปแบบของฝนจะนำไปรวมกับการวิเคราะห์ความเข้ม-ช่วงเวลา-รอบปีการเกิดซ้ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลของการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำฝนผ่านมวลดิน โดยในการหารูปแบบของฝนที่แจกแจงตามเวลาจากข้อมูลฝนแต่ละลูกนำมาคำนวณให้มีปริมาณฝนรวมเท่ากับหนึ่งหน่วยความลึกและเวลาที่ฝนตกเท่ากับหนึ่งหน่วยเวลา แล้วทำการเปรียบเทียบฝนในแต่ละลูกเพื่อจัดแบ่งรูปแบบของน้ำฝน

นงลักษณ์ (2546) ได้ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่ ต.น้ำก้อ อ.หล่มสัก จ. เพชรบูรณ์ ที่ช่วงเวลาในการตกของฝน 1, 3, 5, 10 และ 14 วันและรอบปีการเกิดซ้ำ 5, 10, 20, 50, 100 และ 1000 ปี พบว่าช่วงเวลาที่มีฝนตกและรอบปีการเกิดซ้ำมีผลกับเสถียรภาพของลาดดิน

บรรพต (2547) ศึกษาถึงพฤติกรรมการพิบัติของลาดดินในพื้นที่ต้นน้ำของกลุ่มน้ำย่อยแม่น้ำจันทบุรี โดยใช้ช่วงเวลาในการตกของฝน 1, 2, 3, 5 และ 10 วัน ที่คาบความถี่ของการเกิด (Return Period) 5, 10, 20, 50, 100 และ 200 ปี มาวิเคราะห์การไหลซึมและเสถียรภาพของลาดดิน พบว่ารูปแบบการตกของฝน ช่วงเวลาที่ฝนตกและรอบปีการเกิดซ้ำมีผลกับการไหลซึมและเสถียรภาพของลาดดิน

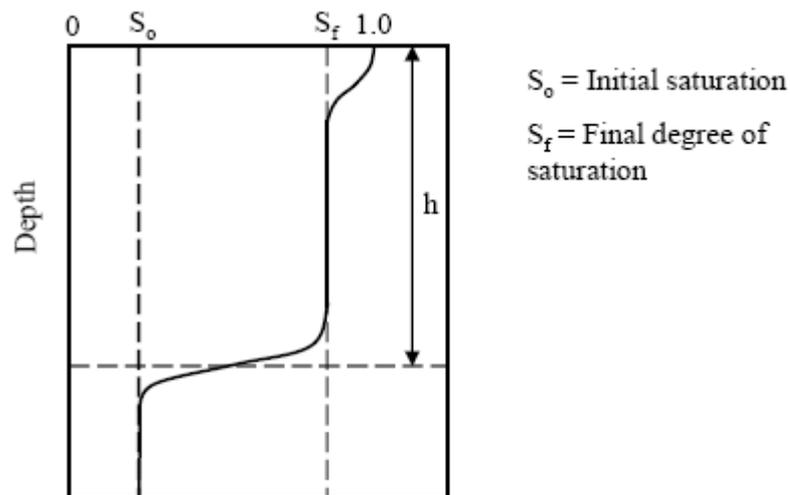
### ทฤษฎีพื้นฐานการไหลซึมของน้ำผ่านดิน

#### กระบวนการในการไหลซึมของน้ำฝน(Infiltration Process)

Lumb (1962a) กล่าวว่า ภายใต้สภาวะการไหลซึม (Infiltration condition) ดินจะอิ่มตัวด้วยน้ำอย่างเต็มที่ด้วยความลึกที่น้อยมากจากผิวดิน จากนั้นระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของดินจะต่ำลงไปที่ Wet value ซึ่งมีค่า 80 ถึง 90 % และระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของดินจะคงค่านี้จนกระทั่งถึง Wetting Front ที่ซึ่งระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของดินต่ำลงอย่างรวดเร็วจนถึงค่าเริ่มต้น ดังภาพที่ 32

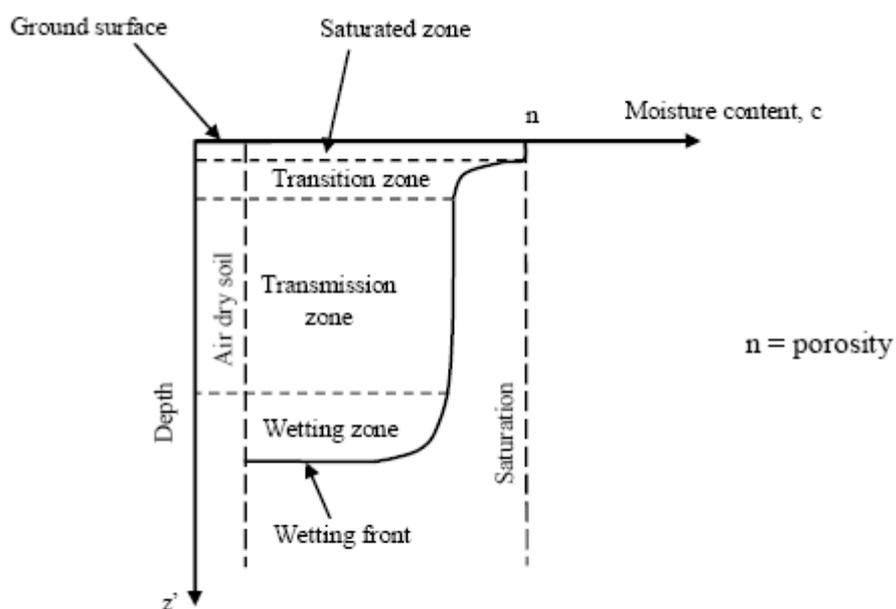
Bear (1972) and Youngs (1957) อ้างคำพูดของ Bodman and Colman (1943) ว่าความลึกของช่วง Saturated zone ประมาณ 1.50 เซนติเมตร จากผิวดิน ลึกลงไปเป็นช่วง Transmission zone ซึ่งเป็นช่วงที่น้ำในมวลดินมีค่าคงที่โดยประมาณ และมีระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของดินประมาณ 80 % จนถึง Wetting zone ที่ซึ่งระดับน้ำในมวลดินต่ำลงอย่างรวดเร็ว แล้ว Wetting Front ซึ่ง

แสดงถึงขอบเขตของปริมาณน้ำที่แพร่เข้าไปในมวลดิน “represent the visible limit of moisture penetration into the soil” ดังภาพที่ 33



ภาพที่ 32 Lumb Wetting Front

ที่มา: Lump (1962)



ภาพที่ 33 Bodman and Cole Wetting front

ที่มา: Bear (1972)

### ความซึมผ่านของดิน (Soil Permeability)

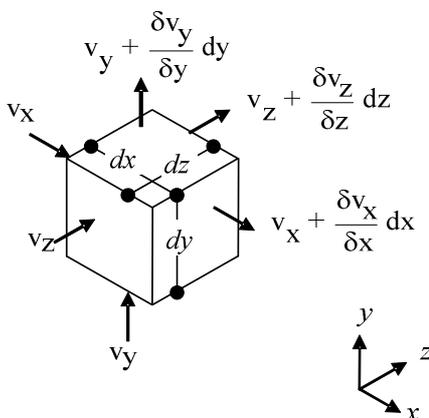
เมื่อน้ำมีความดันหรือระดับต่างกันระหว่าง 2 จุดในดิน ก็จะมีการไหลของน้ำผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดดินในมวลดิน ความสามารถที่น้ำไหลซึมผ่านดินได้นี้เรียกว่า ค่าความซึมผ่าน ( $k$ ) โดยการไหลซึมของน้ำผ่านดิน แรงดันหรือระดับน้ำก็จะสูญเสียไปเพราะแรงเสียดทานของผิวช่องเม็ดดิน ความเร็วของการไหลของน้ำในดิน ดังสมการที่ (14) ตามกฎของดาร์ซี (Darcy)

$$v = ki \quad (14)$$

โดยที่	$v$	=	ความเร็วของการไหลซึม
	$k$	=	สัมประสิทธิ์ของความซึมได้ (Coefficient of Permeability)
	$i$	=	ความลาดชันทางชลศาสตร์

### สมการพื้นฐานของการไหลของน้ำผ่านตัวกลางพรุน

เมื่อพิจารณาการไหลซึมเข้าออกผ่านตัวกลางพรุนใดๆ โดยดูจากมวลที่ตัดออกเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ ทรงลูกบาศก์ ซึ่งแต่ละด้านมีความกว้าง  $dx$   $dy$   $dz$  ตามลำดับ และสมมติให้น้ำไหลเข้าจากแกน  $x$  ไปออกทางแกน  $z$  ดังภาพที่ 34 (วรากร, 2542)



ภาพที่ 34 การไหลของน้ำผ่านตัวกลางทรงลูกบาศก์

ที่มา: Fethi (2000)

ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าทิศทางแกน x

$$q_{xi} = v_x dydz \quad (15)$$

ปริมาณน้ำที่ไหลออกทิศทางแกน x

$$q_{xo} = \left( v_x + \frac{\delta v_x}{\delta x} dx \right) dydz \quad (16)$$

ผลต่างของปริมาณน้ำที่เข้าและออกหรือปริมาณการไหลสุทธิในทิศทางแกน x เท่ากับ

$$q_{xnet} = q_{xi} - q_{xo} \quad (17)$$

$$= - \frac{\delta v_x}{\delta x} dx dy dz$$

ในทำนองเดียวกันปริมาณการไหลสุทธิในทิศทางแกน y และ z เป็น

$$q_{ynet} = - \frac{\delta v_y}{\delta y} dx dy dz \quad (18)$$

$$q_{znet} = - \frac{\delta v_z}{\delta z} dx dy dz \quad (19)$$

กำหนดให้การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำ ต่อเวลา ต่อปริมาตร มีค่าเท่ากับ  $\frac{\delta \theta}{\delta t} dx dy dz$

ดังนั้นปริมาณการไหลสุทธิทั้ง 3 แกน จะเท่ากับการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นในมวลดินทั้งหมดได้ว่า

$$q_{xnet} + q_{ynet} + q_{znet} = \frac{\delta \theta}{\delta t} dx dy dz \quad (20)$$

$$-\left(\frac{\delta v_x}{\delta x} + \frac{\delta v_y}{\delta y} + \frac{\delta v_z}{\delta z}\right) = \frac{\delta \theta}{\delta t} \quad (21)$$

เมื่อการไหลซึมเป็นการไหลแบบคงที่ (Steady State Flow) คือปริมาณน้ำที่ผ่านเข้าและออกจากวัสดุในช่วงเวลาหนึ่งจะมีอัตราเท่ากัน นั่นคือ  $\frac{\delta \theta}{\delta t} = 0$

$$\frac{\delta v_x}{\delta x} + \frac{\delta v_y}{\delta y} + \frac{\delta v_z}{\delta z} = 0 \quad (22)$$

จากกฎของ Darcy ความเร็วของการไหลซึมในทิศทางแกน x, y และ z จะได้

$$v_x = k_x \frac{\delta h}{\delta x}$$

$$v_y = k_y \frac{\delta h}{\delta y}$$

$$v_z = k_z \frac{\delta h}{\delta z} \quad (23)$$

เมื่อแทนค่า  $v_x$ ,  $v_y$  และ  $v_z$  ลงในสมการที่ (22) จะได้

$$k_x \frac{\delta^2 h}{\delta x^2} + k_y \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} + k_z \frac{\delta^2 h}{\delta z^2} = 0 \quad (24)$$

ในกรณีคุณสมบัติความซึมน้ำเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic Permeability)  $k_x = k_y = k_z$  สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ Laplace's Equation ได้

$$\frac{\delta^2 h}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta z^2} = 0 \quad (25)$$

ส่วนกรณีการไหลซึมที่เกิดขึ้น เป็นแนวยาวมากเมื่อเทียบกับความกว้างตั้งฉากกันแนวยาว จะถือว่าการไหลซึมเกิดขึ้น 2 ทิศทางเท่านั้น ในทิศทางแกน  $x$  และ  $y$  การเปลี่ยนแปลงทางแกน  $z$  จึงไม่มีคือ  $\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$  และสมการที่ (25) เหลือเพียง

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (26)$$

### การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นการแก้ปัญหา โดยมีสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขของขอบเขต ค่าผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) ของปัญหาดังกล่าวจะประกอบด้วยค่าต่างๆ ทั้งหมดนับเป็นจำนวนอนันต์ค่า ซึ่งการหาค่าผลเฉลยแม่นยำตรงในทางปฏิบัติจะทำได้ยากหรือทำไม่ได้ ดังนั้นจึงทำการเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านั้นมาเป็นค่าโดยประมาณที่มีจำนวนที่นับได้ (Finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยชิ้นส่วนเล็กๆ หรือเรียกว่าเอลิเมนต์ (Elements)

ปราโมทย์ (2537) วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ ทั้งหมด 6 ขั้นตอน ดังนี้

1. การแบ่งขอบเขตรูปร่างลักษณะของปัญหาที่ต้องการที่จะหาผลลัพธ์นั้นออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ โดยขอบเขตดังกล่าวเป็นขอบเขตของปัญหาชนิดต่างๆ กัน เช่น อุณหภูมิและความร้อน ศักย์น้ำรวม
2. การเลือกฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์ (Element Interpolation Functions) ในแต่ละเอลิเมนต์จะประกอบด้วยจุดต่อ (Node) ซึ่งเป็นตำแหน่งของตัวไม่รู้ค่า (Nodal Unknowns) โดยการใช้ฟังก์ชันประมาณ เพื่อหาค่าในตำแหน่งต่างๆ ในภายในเอลิเมนต์

3. สร้างสมการของเอลิเมนต์ (Element Equations) ที่เป็นคุณสมบัติของเอลิเมนต์ที่อาจมีลักษณะและขนาดที่แตกต่างกัน ให้สมการของเอลิเมนต์เหมาะสมกับลักษณะของปัญหา โดยในขั้นตอนนี้เป็นหัวใจสำคัญของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

4. นำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกันเข้าก่อให้เกิดระบบสมการ (System of Simultaneous Equations) ซึ่งเป็นการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบรวมเข้าด้วยกันก่อให้เกิดเป็นรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหา

5. ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ลงในระบบสมการ แล้วแก้สมการเพื่อหาค่าตัวแปรไม่รู้ค่าที่จุดต่อหรือเรียกว่าตัวแปรหลัก

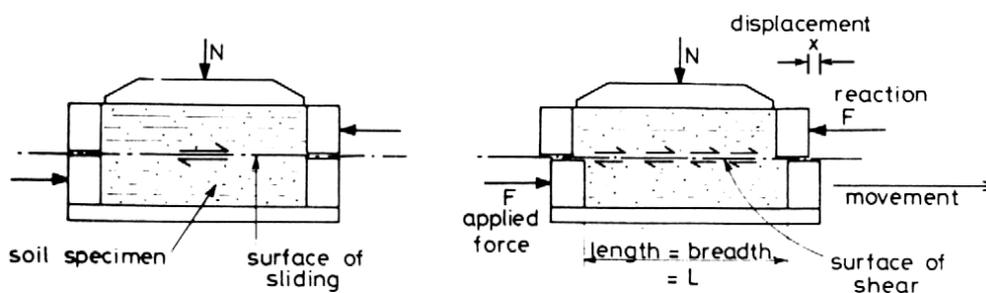
6. เมื่อทำการแก้สมการเพื่อหาค่าตัวแปรไม่ทราบค่าที่จุดต่อได้แล้ว สามารถนำค่าตัวแปรหลักไปทำการหาค่าตัวแปรอื่นๆที่ต้องการได้เช่นเมื่อรู้ความเร็วของของไหลก็สามารถนำไปคำนวณหาปริมาณอัตราการไหลทั้งหมดได้

ปัญหาการไหลซึมของของไหลในงานวิศวกรรมมีความซับซ้อน ดังนั้นวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึงเป็นวิธีการในการช่วยแก้ปัญหาได้ ประกอบกับคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันมีประสิทธิภาพสูงทำให้นำมาช่วยในการหาผลเฉลยของปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้สะดวกและรวดเร็ว

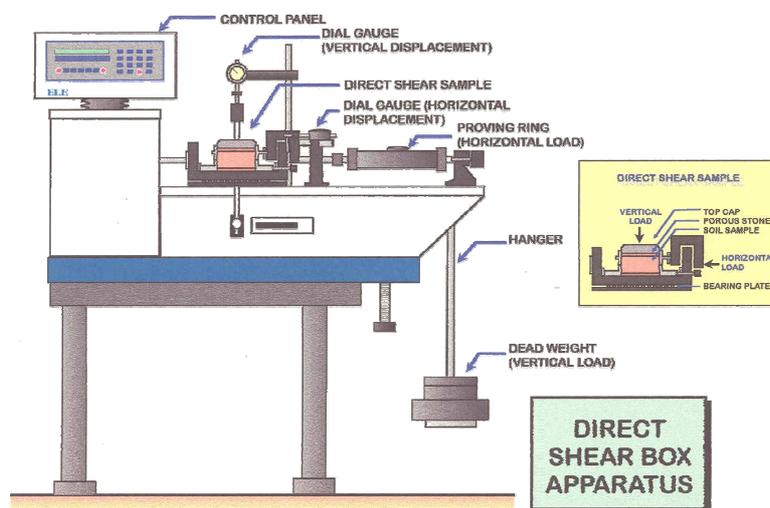
สำหรับการวิเคราะห์การไหลแบ่งเป็น 2 แบบ คือแบบคงที่ (Steady Flow) เป็นการไหลที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา และแบบไม่คงที่ (Transient Flow) โดยค่าความชื้นน้ำ แรงดันน้ำและปริมาณน้ำฝนเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งจะมีพฤติกรรมเป็นแบบดินไม่อิ่มตัว โดยค่าความชื้นเปลี่ยนแปลงตามแรงดันน้ำ เรียกว่า Soil-Water Characteristic Curve และค่าความการไหลซึมของน้ำเปลี่ยนแปลงตามแรงดันน้ำ เรียกว่า Permeability Function โดยความสัมพันธ์ของ Soil-Water Characteristic Curve และ Permeability Function จะขึ้นอยู่กับดินแต่ละชนิด สามารถหาได้โดยทำการทดสอบ Pressure Plate test และ Unsaturated Permeability Test นอกจากการทดสอบแล้วความสัมพันธ์ของ Soil-Water Characteristic Curve ยังประมาณได้จากสมการของ Grain Size Distribution Curve (Fredlund and Xing, 1994) และประมาณ Permeability Function ได้จาก Soil-Water Characteristic Curve (Fredlund, 1997)

### การทดสอบกำลังของดิน

การทดสอบในห้องปฏิบัติการจะเป็นการทดสอบดินที่ไม่ต้องการสภาพสมจริงในสนาม หรือไม่สามารถทดสอบในสนามได้ เนื่องจากอุปกรณ์ในการทดสอบมีมากหรือมีขั้นตอนในการทดสอบยุ่งยาก จึงจำเป็นต้องจำลองให้มีความใกล้เคียงมากที่สุด โดยขึ้นอยู่กับคุณภาพของตัวอย่างดิน และอุปกรณ์ในการทดสอบ ซึ่งการทดสอบเกี่ยวกับกำลังของดินของลาดดินทั่วไป (Residual Soil) นิยมทดสอบ Direct Shear Test ทั้งแบบ Field Direct Shear และ Direct Shear Box Test และการทดสอบ Triaxial Test (Blight, 1997 ; Geotechnical Control Office, 2000) โดยมีระบบการถ่ายแรงดังภาพที่ 35 และในการทดสอบทั้ง 2 วิธีมี ข้อดี , ข้อเสีย และข้อจำกัดแตกต่างกันดังตารางที่ 5



(ก.) แรงที่กระทำในการทดสอบ Direct Shear Test



(ข.) เครื่องมือการทดสอบ Direct Shear

ภาพที่ 35 Direct Shear Test

ที่มา: Blight (1997)

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบการทดสอบ Direct shear Test กับ Triaxial Test

Direct Shear Test	Triaxial Test
<p>ข้อดี</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- หลักการและวิธีการทดสอบง่าย</li> <li>- สามารถทดสอบในช่วงค่า Strain มากๆ เพื่อหา Residual Strength</li> <li>- ใช้เวลาในการระบายน้ำน้อย เนื่องจากเส้นทางการระบายสั้น</li> <li>- เตรียมตัวอย่างได้ง่ายกว่า Triaxial Test</li> </ul>	<p>ข้อดี</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- สามารถควบคุมการไหลของน้ำและวัด Pore Pressure ได้</li> <li>- แรงที่เกิดในตัวอย่างมีความสม่ำเสมอ กว่า Direct Shear Test</li> <li>- สามารถวัดเปลี่ยนแปลงปริมาตรตัวอย่างได้</li> </ul>
<p>ข้อเสียและข้อจำกัด</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- การควบคุมการระบายน้ำได้ยาก</li> <li>- ไม่สามารถวัด Pore Pressure ได้</li> <li>- แรงที่เกิดในตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ</li> <li>- กรณีตัวอย่างดินเม็ดละเอียดทำให้อิ่มตัวด้วยน้ำไม่ได้ เนื่องจากไม่สามารถใส่ Back Pressure ได้</li> </ul>	<p>ข้อเสียและข้อจำกัด</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ไม่สามารถใส่แรง Intermediate Principal Stress ได้ โดยต้องทดสอบเป็นแบบ Plane Strain</li> <li>- ทิศทางของ Principal Stress ไม่สามารถเปลี่ยนได้</li> <li>- แรงที่กระทำกับตัวอย่างบริเวณหัวท้ายของตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ</li> </ul>

ที่มา: Blight (1997)

#### การทดสอบ Direct Shear Test

การทดสอบ Direct Shear Test เป็นวิธีการทดสอบกำลังของดินในยุคแรกๆ ตั้งแต่ ค.ศ. 1846 โดย Alexandre Collin วิศวกรชาวฝรั่งเศส และได้มีการพัฒนาโดยการเปลี่ยนขนาดและกำหนดการทดสอบมาตรฐาน ทั้งขนาด และอัตราการการทดสอบ ปัจจุบันการทดสอบ Direct Shear Test มี 3 แบบ คือ Shear Box Test, Vane Shear Test, Ring Shear Test โดยในที่นี้กล่าวถึง Shear Box Test เท่านั้น

## Shear Box Test

การทดสอบ Shear Box Test สามารถทดสอบได้ 3 แบบ คือ

1. Quick Test เป็นการทดสอบด้วยอัตราเร็วค่อนข้างเร็ว โดยที่ Pore Water Pressure ยังไม่สามารถระบายได้ ซึ่งเป็นการจำลองการพังแบบ Undrained ปกติจะทดสอบดินที่มีค่าความชื้นน้ำต่ำ การทดสอบนี้จะได้กำลังรับแรงเฉือนเป็น Undrained Shear Strength ( $C_u$ )

2. Consolidated Undrained Test เป็นการทดสอบด้วยอัตราเร็วค่อนข้างเร็ว เหมือน Quick Test แต่มีการใส่น้ำหนักเพื่อบีบให้เกิดการคลายน้ำ ก่อนทำการเฉือนตัวอย่าง เพื่อหา Mohr-Coulomb Envelope) และกำลังรับแรงเฉือน ( $\tau = C_c + \sigma \tan \phi$ )

3. Consolidated Drained Test เป็นการทดสอบที่มีการใส่น้ำหนักเพื่อบีบให้เกิดการคลายน้ำ แล้วเฉือนตัวอย่างด้วยอัตราเร็วที่ช้ามาก โดยคำนวณจากอัตราการคลายน้ำ

$$t_f = 12.7 \times t_{100} \quad (27)$$

โดย  $t_f$  = อัตราการเฉือนตัวอย่าง  
 $t_{100}$  = เวลาที่ใช้ในการคลายน้ำจนคาดว่าไม่เกิดการทรุดตัว  
 (Head, 1982)

$$t_f = 50 t_{50} \quad (28)$$

$t_{50}$  = เวลาที่ใช้ในการคลายน้ำ 50 % ของการทรุดตัว (ASTM D3080)

Cheung et al. (1988) พบว่าอัตราการเฉือนในช่วง 0.007 – 0.6 mm./S ค่ากำลังที่ได้ไม่แตกต่างกัน Ho and Fredlund (1982) เสนอให้ใช้อัตราการทดสอบจากการ Consolidated ที่ 95% และอัตราการเฉือนโดยทั่วไปอยู่ที่ประมาณ 0.001% Strain per Minute

### Multi-Stage Direct Shear Test

ในการทดสอบ Direct Shear ทั่วไป ใช้ตัวอย่างในการทดสอบอย่างน้อย 3 ตัวอย่าง (Conventional Test) เพื่อหาความสัมพันธ์ในรูปแบบ Mohr-Coulomb Envelope จะได้ Shear Strength Parameter ( $c$ ,  $\phi$ ) แต่มีวิธีที่สามารถหาพารามิเตอร์เหล่านี้ได้โดยใช้เพียงแค่ตัวอย่างเดียว ทดสอบโดยเลื่อนตัวอย่างจนเกือบถึงจุดวิกฤติของในแต่ละ Normal Load อย่างน้อย 3-4 Normal Load วิธีการทดสอบแบบนี้เหมาะสมกับตัวอย่างที่มีความแปรปรวนสูงซึ่งวิธีนี้ให้ค่า  $c$ ,  $\phi$  ที่น่าเชื่อถือกว่าในกรณีการทดสอบแบบปกติธรรมดา และในกรณีที่มีตัวอย่างน้อยวิธีนี้ก็ยังสามารถทดสอบให้ได้ค่า Shear Strength Parameter

Taylor (1950) and Fleming (1952) เป็นผู้ที่ประสบความสำเร็จในการนำ Multi-Stage Test หาค่า Shear Strength Parameter ( $c$ ,  $\phi$ ) ของดินไม่อิมตัวด้วยน้ำ Kenny and Watson (1961) ได้ทดสอบ Triaxial แบบ Multi-Stage ของดินอิมตัว เปรียบเทียบกับแบบการทดสอบธรรมดา พบว่าค่า Shear Strength parameter ( $c$ ,  $\phi$ ) ใกล้เคียงกันมาก ส่วน Lumb (1964) ทดสอบ Multi-Stage Triaxial ในดินไม่อิมตัวด้วยน้ำ เปรียบเทียบกับแบบการทดสอบธรรมดา พบว่าค่า Shear Strength Parameter แทบจะไม่แตกต่างกันเลย บุญรอด (2532) ได้ทำการทดสอบกำลังของดินตัวเชื่อมห้วยปะทาว พบว่าในการทดสอบดินด้วยการทดสอบ Triaxial แบบ Conventional จะให้ค่าสูงกว่าแบบ Multi-Stage อยู่เล็กน้อยเฉลี่ยประมาณ 10 % และได้ทำการทดสอบ Direct Shear กับ Triaxial เปรียบเทียบกันพบว่า ค่า Shear Strength parameter ของ Direct Shear Test ให้ค่าต่ำกว่าเล็กน้อย

บุญรอด (2532) พบว่าข้อสำคัญในการทดสอบ Multi-Stage Test คือจุดเปลี่ยน Confining Pressure ดังนั้นต้องพิจารณา Failure Criteria หลากๆประการประกอบกัน คือ

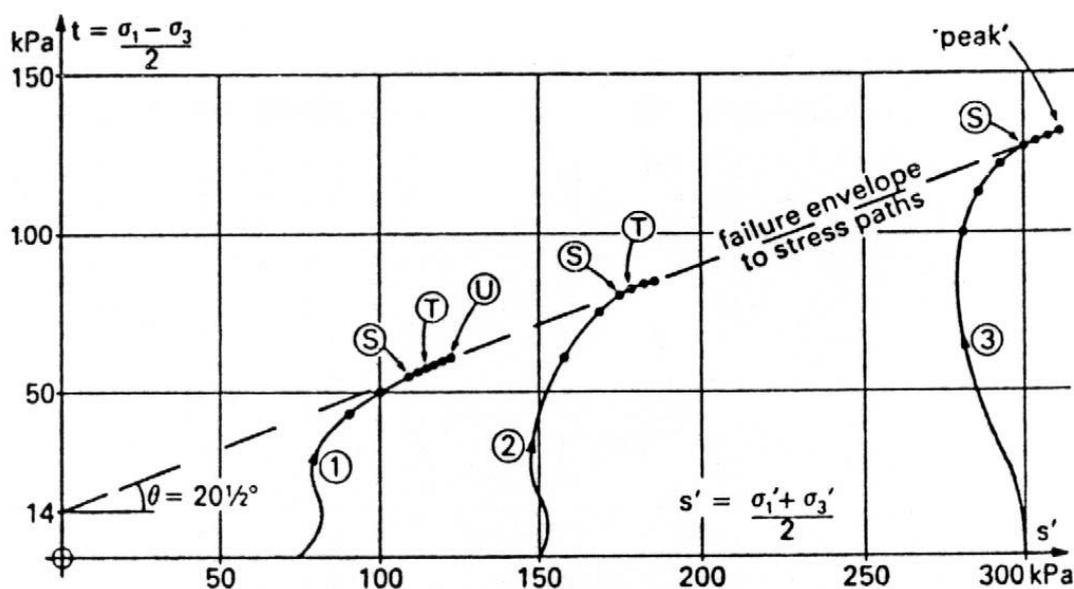
1. การพังที่สามารถสังเกตได้ เช่น เกิดแนวเฉือนพังขึ้นในตัวอย่าง
2. เกิดความเค้นสูงสุด (Maximum Deviator Stress) หรือเกิดการเบนราบลงของกราฟระหว่างความเค้น และความเครียด

3. เกิดการเคลื่อนตัวถึงค่าความเครียดที่กำหนดไว้ สำหรับ Plastic Soil ใช้ความเครียดที่ 16% , 18% และ 20% สำหรับช่วงที่ 1 , 2 และ 3

4. Principal Stress Ratio ( $\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3}$ ) ใน CU test สำหรับดินประเภท Overconsolidated ค่าของ  $\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3}$  จะมีค่าสูงสุดก่อนที่จะเกิดความเค้นสูงสุด

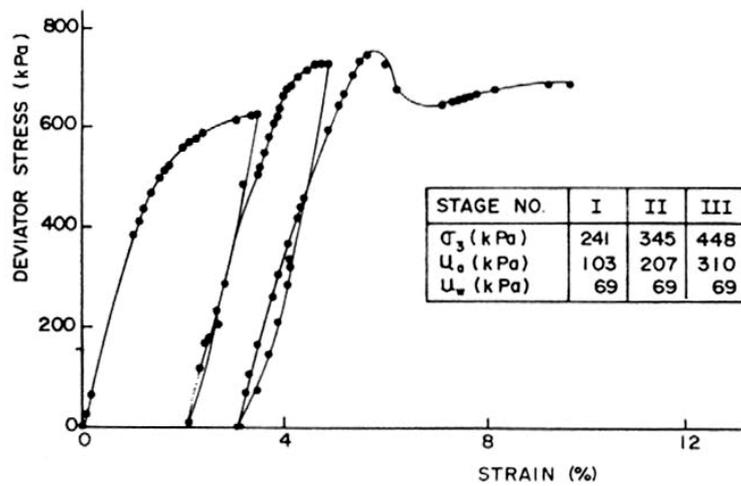
5. Excess Pore Pressure จะมีค่าสูงสุดใกล้เคียงกัน เมื่อ  $\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3}$  มีค่าสูงสุด

6. การพิจารณา Effective Stress Path (ภาพที่ 36) Watson และ Kirwan (1962) ได้เขียนกราฟระหว่าง  $P'$  ,  $q'$  และลาก Failure Envelope จะเห็นได้ว่าในช่วงที่ 1 ค่า  $\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3}$  เกิดสูงสุดที่จุด S การทดสอบดำเนินต่อไปจนถึงจุด U โดยทางเดินของ Stress เป็นไปตาม Failure Envelope เมื่อเป็นเช่นนี้ในช่วงที่ 1 (รวมถึงช่วงต่อไปด้วย) การทดสอบสามารถหยุดได้ ณ จุด T จากนั้นทำการเพิ่ม Confining Pressure สำหรับช่วงต่อไปได้ ทำให้ไม่จำเป็นจะต้องทดสอบจนเกิด Deformation ที่มากเพื่อให้ถึงค่าความเค้นสูงสุด (Maximum Deviator Stress)

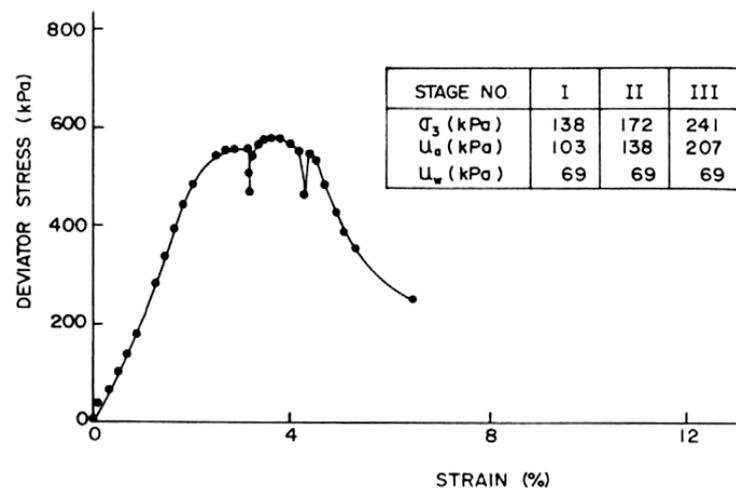


ภาพที่ 36 กราฟทางเดินของหน่วยแรงจาก Multi-Stage Triaxial Test

Ho and Fredlund (1982) ได้ทำการทดสอบ Multi-Stage Triaxial Test ของดิน Unsaturated Soil พบว่าการทดสอบ Multistage แบบ Cyclic Loading ให้ผลที่ดีกว่าแบบ Sustained Loading เนื่องจากตัวอย่างยังคงสภาพในช่วง Elastic อยู่ และไม่ถูกแรงกระทำจนเกิดการ Creep ในระหว่างการ Consolidated ดังภาพที่ 37 และพบว่าการ Unload แบบเร็วจะดีกว่าแบบช้า เพราะไม่เกิดการ Creep



(ก.) Stress-Strain Curve ทดสอบโดย Multi-Stage Cyclic loading Triaxial Test



(ข.) Stress-Strain Curve ทดสอบโดย Multi-Stage Sustained loading Triaxial Test

ภาพที่ 37 Stress-Strain Curve ทดสอบโดย Multi-Stage Triaxial Test

### การทดสอบการหยังความแข็งแรงของชั้นดิน โดยวิธี Kunzelstab Penetration Test

Kunzelstab Penetration Test หรือวิธี Light Ram Sounding Test เป็นวิธีการหยังทดสอบชั้นดินในสนาม โดยใช้แรงกระแทกส่งแท่งทดสอบผ่านชั้นดินลงไป ซึ่งแรงต้านการเคลื่อนที่ของแท่งทดสอบสามารถใช้ประมาณค่ากำลัง และความหนาของชั้นดิน ผลการทดสอบที่ได้ จะทำให้ทราบคุณสมบัติทางกายภาพของชั้นดินในเบื้องต้น โดยเป็นการหาค่ากำลังของดินทางอ้อม

วิธีการหยังทดสอบนี้สามารถนำไปใช้ได้อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งใช้การสำรวจดินเบื้องต้นสำหรับการออกแบบเสาไฟฟ้า ซึ่งวิธีนี้สามารถเคลื่อนย้ายได้ง่ายเนื่องจากมีน้ำหนักเบาจึงเหมาะกับบริเวณภูเขาสูง ป่ารก หรือบริเวณที่ห่างจากถนนมากๆ วิธีนี้ทำได้อย่างรวดเร็วและประหยัดกว่าการเจาะสำรวจ แม้แต่ชั้นดินที่บางจนการเจาะสำรวจไม่สามารถแยกได้ อย่างชัดเจน ผลของการหยังก็ยังสามารถบอกให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของชั้นดินนั้นได้ จึงได้นำการทดสอบนี้ไปทำการทดสอบลักษณะของชั้นดินในบริเวณพื้นที่ที่เกิดการพิบัติของลาดดิน

Kunzelstab Penetration Test เป็นการทดสอบกำลังต้านทานที่ปลายของหัวหยัง (Cone Head) โดยไม่เกิดแรงเสียดทาน ขึ้นที่ก้านเจาะ เนื่องจากหัวเจาะมีขนาดใหญ่กว่าก้านเจาะ กล่าวคือหัวเจาะรูปกรวยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ก้านเจาะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร ค้อนตอกหนัก 10 กิโลกรัม มีระยะยก 50 เซนติเมตร ทำการทดสอบโดยนับจำนวนครั้งของการตอกทุกระยะ 20 เซนติเมตร (Blows/20 cm.) ดังแสดงดังภาพที่ 38 และนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ดังนี้ (EGAT.,1980)

1. คำนวณค่า Standard Penetration Resistance (SPT) ดังนี้

$$SPT = 0.539(KPT + 0.954) \quad (29)$$

หรือใช้ Chart ดังภาพที่ 39

2. คำนวณค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุด (Ultimate Bearing Capacity) ดังนี้

$$Q_s = 0.064(N'-3.57) K_{sc. \text{ for Sand}} \quad (30)$$

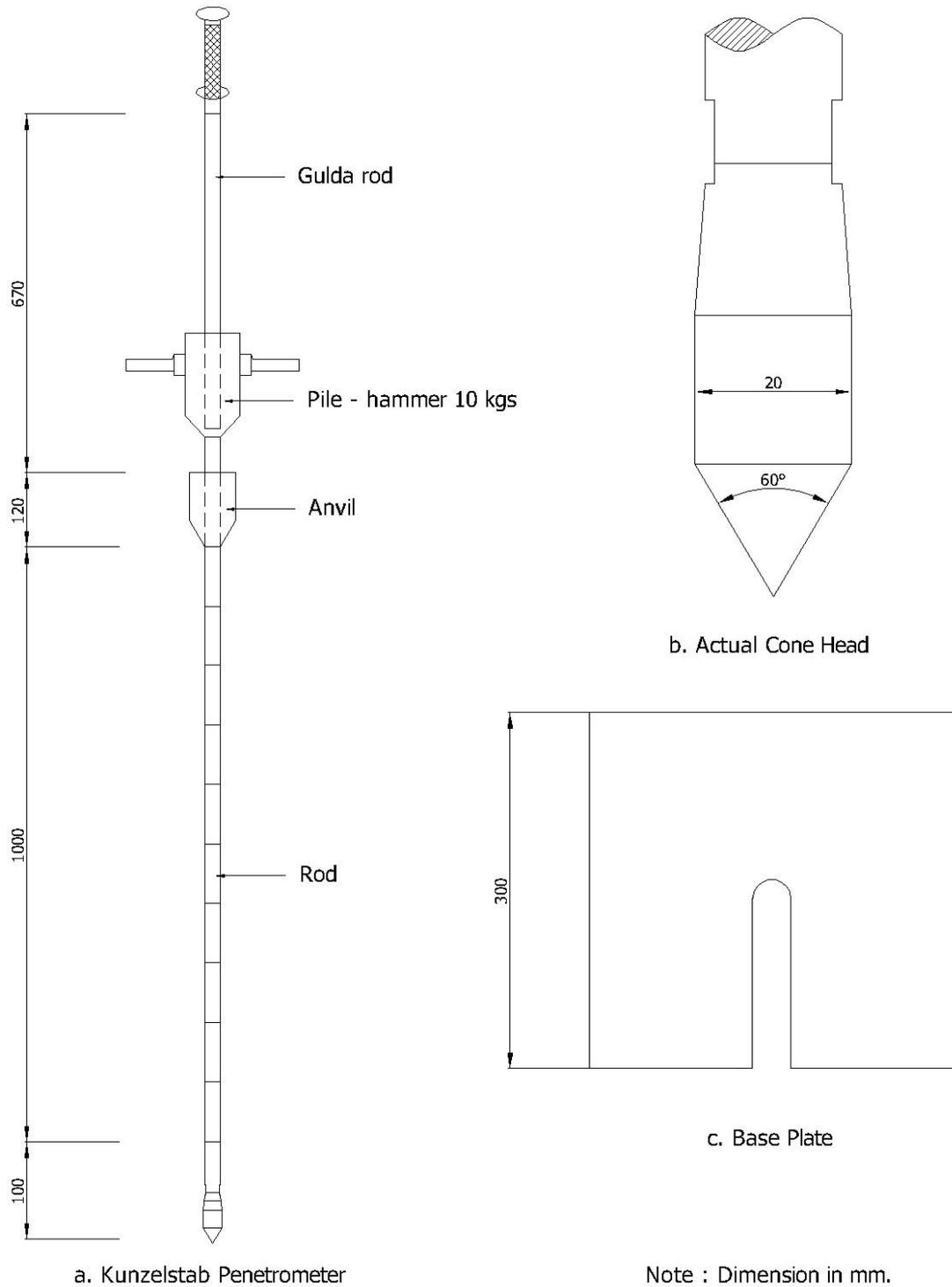
$$Q_c = 0.034(N'+0.954) K_{sc} \text{ for Clay} \quad (31)$$

$$N' = 15+0.5(N-15) \text{ เมื่อ } N > 15$$

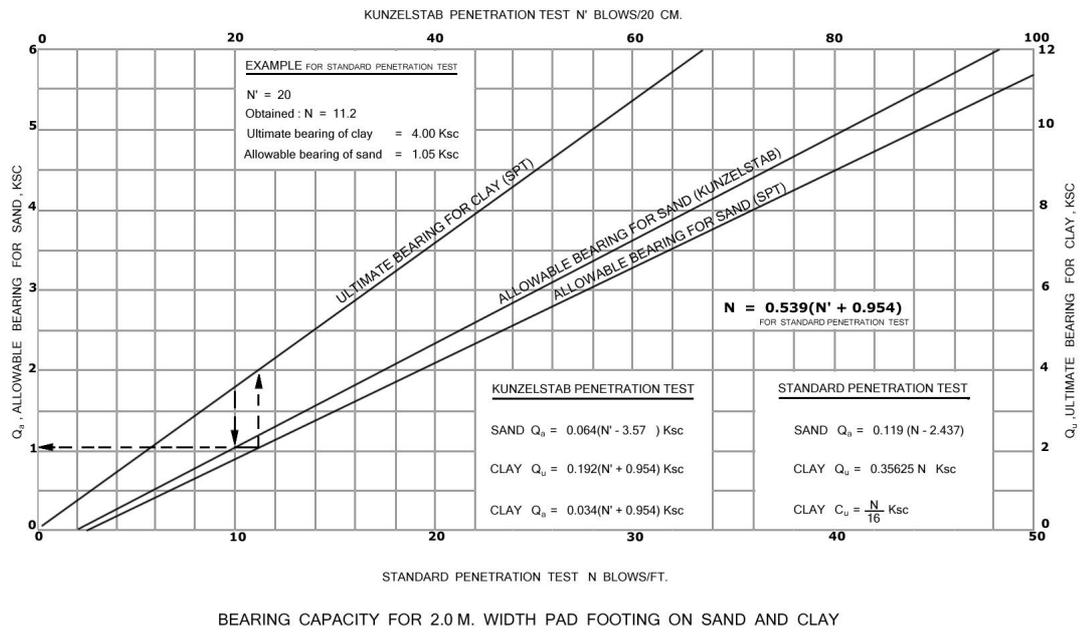
$$= N \quad \text{เมื่อ } N < 15$$

หรือใช้ Chart ดังภาพที่ 39

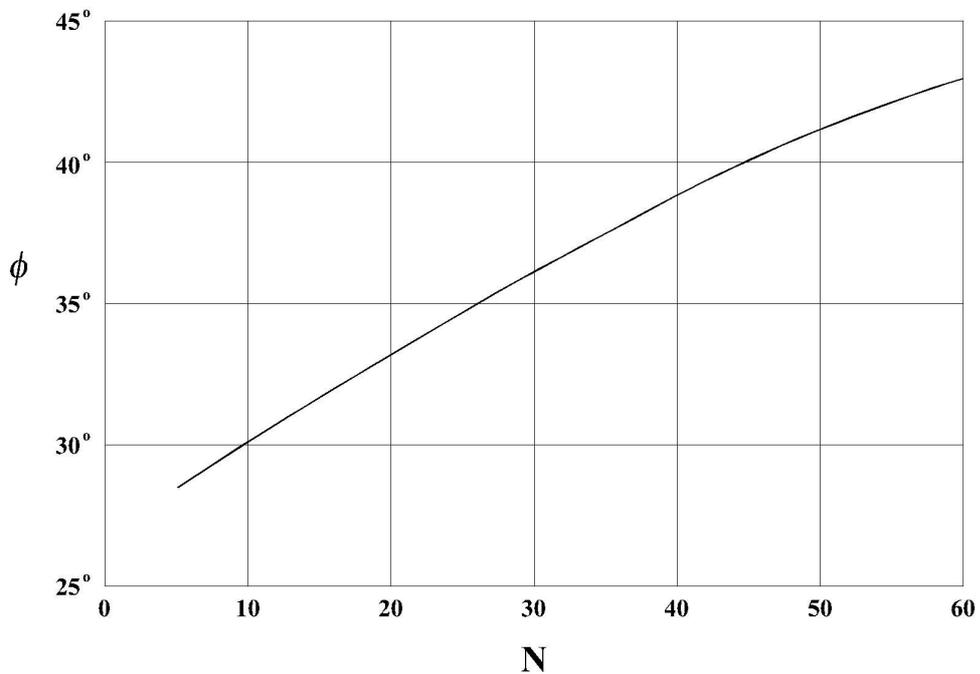
3. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า Standard Penetration Tests กับ ค่ามุมเสียดทาน  
ภายในดังแสดงดังภาพที่ 40



ภาพที่ 38 แสดงเครื่องมือทดสอบ Kunzelstab Penetration Test  
ที่มา: EGAT (1980)



ภาพที่ 39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการตอกและกำลังของดิน  
 ที่มา: EGAT (1980)



ภาพที่ 40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง N (SPT) และค่า  $\phi$  โดยประมาณ  
 ที่มา: Peck, Hanson and Thornburn (1973)

วิธีการหยั่งทดสอบนี้สามารถนำไปใช้ได้อย่างกว้างขวาง ซึ่งวิธีนี้สามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย เนื่องจากมีน้ำหนักเบาจึงเหมาะกับบริเวณภูเขาสูง ป่ารก หรือบริเวณที่ห่างจากถนนมากๆ วิธีนี้ทำได้อย่างรวดเร็วและประหยัดกว่าการเจาะสำรวจ ผลของการหยั่งก็ยังสามารถบอกให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของชั้นดินนั้นได้ โดย Terzaghi and Peck (1967) ได้เสนอตารางในการแปลค่าการตอกทดสอบไปเป็นค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบ Unconfined compressive strength, ( $Q_u$ ) ดังในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง N กับความแข็งแรงของดินเม็ดหยาบ

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

ที่มา: Meyerhof (1956)

### หลักการทั่วไปของการวิเคราะห์ความมั่นคง

วรากร (2542) กล่าวว่าหลักการที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินนั้น โดยปกติใช้วิธีการพิจารณา “สมดุลจำกัดของมวลดิน” (Limit Equilibrium) วิธีนี้มีสมมติฐานว่า “ ณ ช่วงเวลาที่เกิดการเคลื่อนพังพอดิ ในขณะนั้นมวลดินอยู่ในสภาวะสมดุล” การวิเคราะห์เริ่มต้นด้วยการสมมติรูปแบบลักษณะของผิวการเคลื่อนพัง ว่าเป็นแบบใด เช่น เส้นตรง วงกลม โค้งก้นหอย รูปหลายเหลี่ยม ฯลฯ แล้วทำการคำนวณแรงต้านทานที่เพียงพอทำให้เกิดความสมดุลของมวลดินที่พิบัติ หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างกำลังของดินต่อหน่วยแรงต้านทานขณะสมดุล ซึ่งเรียกว่า “อัตราส่วนความปลอดภัย” (Factor of Safety, FS.) แล้วทำการทดลองสุ่มหาค่าของอัตราส่วนความปลอดภัย โดยการเปลี่ยนลักษณะหรือตำแหน่งของผิวการเคลื่อนพังที่น่าจะหรือมี

โอกาสเกิดขึ้นไปเรื่อยๆ จนพบค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่น้อยที่สุด โดยอาจทราบลักษณะการพังได้แน่นอน โดยการทำการสำรวจในสนามเพื่อหาตำแหน่งที่แท้จริงได้

คำนิยามของอัตราส่วนปลอดภัย หรือตัวประกอบความปลอดภัย คือ อัตราส่วนของกำลังรับน้ำหนักของดินบนผิวเคลื่อนต่อหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงในพื้นที่ผิวเดียวกัน ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ง่ายๆ ดังนี้

$$FS. = \frac{\text{Shear Strength}}{\text{Shear Stress}} = \frac{\tau_f}{\tau} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \text{โดย } \tau_f &= \text{กำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของมวลดินหรือหินบนผิวเคลื่อน} \\ &\text{ซึ่งตามทฤษฎีของ Mohr - Coulomb แล้วจะมีค่าเท่ากับ} \\ &c + \sigma \tan \phi \\ \tau &= \text{หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจริงซึ่งเพียงพอทำให้มวลดินนั้นสมดุล} \end{aligned}$$

สำหรับการพิบัติในลักษณะจำเพาะต่างๆ เช่น ผิวเคลื่อนเป็นส่วนโค้งของวงกลม อัตราส่วนปลอดภัยอาจหมายถึง อัตราส่วนของโมเมนต์รอบจุดศูนย์กลาง ก็ได้เช่น

$$\begin{aligned} FS. &= \frac{\text{โมเมนต์ที่เกิดจากกำลังรับแรงเฉือนของดินต้านทานการพิบัติ}}{\text{โมเมนต์ที่เกิดจากน้ำหนักมวลดินที่จะทำให้พิบัติ}} \\ FS. &= \frac{M_R}{M_D} \quad (33) \end{aligned}$$

ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว ขั้นตอนในการวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดิน โดย “Limit Equilibrium” ทำได้ดังนี้

1. สมมุติหรือสันนิษฐานลักษณะของพิบัติหรือผิวการเคลื่อนพัง
2. คำนวณแรงต้านทานที่เพียงพอทำให้เกิดความสมดุลของมวลดินที่พิบัติ
3. เปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างกำลังของดินต่อหน่วยแรงต้านทานขณะสมดุล ซึ่งเรียกว่า “อัตราส่วนปลอดภัย” (Factor of Safety, FS.)

4. โดยการเปลี่ยนลักษณะหรือผิวการเคลื่อนพังที่น่าจะหรือมีโอกาสเกิดขึ้นไปเรื่อยๆ จนพบค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่น้อยที่สุด ซึ่งควรเป็นลักษณะการพิบัติที่น่าจะเกิดขึ้นมากที่สุด และหาค่า FS. ที่ควรเป็น

ความแข็งแรงของดินและหินที่จะใช้ในการวิเคราะห์ความมั่นคงของวัสดุทางธรณี (ดินและหิน) มีหลักการระบุความแข็งแรงและลักษณะการวิเคราะห์ได้ 2 ลักษณะ (วรากร, 2542) คือ วิเคราะห์ด้วยหน่วยแรงรวม (Total Stress Analysis) และ วิเคราะห์ด้วยหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress Analysis) ทั้งนี้เนื่องจากดินหรือหินมักจะมีน้ำหรือความชื้นหรือน้ำอยู่ภายในมวลดิน เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงขึ้นในมวลดินจึงอาจทำให้มีการเพิ่มหรือลดแรงดันน้ำในมวลดิน ซึ่งมีผลต่อกำลังประสิทธิผลของมวลดินตามสมการของ Mohr - Coulomb ที่กล่าวไว้ในส่วนของ ทฤษฎีกำลังรับแรงเฉือนของดิน (Shear Strength Theory)

#### ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (GIS)

ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ หรือระบบ GIS (Geographic Information Systems) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ (Spatial Data) ซึ่งข้อมูลจะเป็นคุณลักษณะต่างๆ ที่ถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบที่มีความสัมพันธ์เชื่อมโยงกันและกัน หรือกล่าวว่าเป็นกระบวนการของการใช้คอมพิวเตอร์ ฮาร์ดแวร์ (Hardware) ซอฟต์แวร์ (Software) ข้อมูลทางภูมิศาสตร์ (Geographic Data) และการออกแบบ (Personnel Design) ในการเสริมสร้างประสิทธิภาพในการจัดเก็บข้อมูล การปรับปรุงข้อมูล และการวิเคราะห์ข้อมูล โดยสามารถแสดงผลของข้อมูลให้อ้างอิงตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ได้

องค์ประกอบของระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ ประกอบด้วยส่วนหลัก 4 ประการคือ

1. Data Input เป็นการนำเข้าข้อมูลต่างๆ เช่นข้อมูลแผนที่ ข้อมูลจากภาคสนามและข้อมูลจากเครื่องบันทึก เป็นต้น

2. Geographic Database เป็นฐานข้อมูลที่ใช้เก็บข้อมูล โดยลักษณะของข้อมูลที่จัดเก็บสามารถแบ่งได้เป็น ข้อมูลเชิงพื้นที่ (Spatial Data) และข้อมูลที่ไม่อยู่ในรูปเชิงพื้นที่ (Non-Spatial Data)

3. Transformation หรือ Data Analysis การวิเคราะห์ข้อมูล โดยการนำข้อมูลเชิงพื้นที่มาเชื่อมต่อกันตามเงื่อนไข โดยมีความสัมพันธ์กับข้อมูลที่ไม่อยู่ในรูปเชิงพื้นที่ด้วย

4. Data Display เป็นการแสดงผลข้อมูลซึ่งอาจจะเป็นตัวเลขหรือข้อมูลภาพ

ลักษณะของข้อมูลในระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

ข้อมูล (Data) คือ ค่าจากการสังเกต ค่าจากการจดบันทึกคุณสมบัติต่างๆ ของวัตถุ แล้วนำมาวิเคราะห์และตรวจสอบ ข้อมูลที่แปลความหมายแล้วเรียกว่า Information หรือสารสนเทศเช่น การหาค่าเฉลี่ย ความแปรปรวน เป็นต้น โดยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์สามารถแบ่งประเภทข้อมูลออกเป็น 2 ประเภทคือ

1. ข้อมูลเชิงพื้นที่ (Spatial Data) เป็นข้อมูลที่สามารถอ้างอิงกับตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ (Geo Referenced) ทางภาคพื้นดิน ข้อมูลเชิงพื้นที่ที่สามารถแสดงสัญลักษณ์ได้ 3 รูปแบบคือ

1.1 จุด (Point) เป็นลักษณะของตำแหน่ง ซึ่งอธิบายถึงตำแหน่งที่ตั้งของข้อมูล

1.2 เส้น (Line) เป็นลักษณะของข้อมูลแบบจุดที่วางเรียงต่อเนื่องกันเป็นข้อมูลเส้น โดยรูปร่างของเส้นอธิบายถึงลักษณะต่างๆ ของข้อมูลด้วยความกว้าง ความยาว เช่น ถนน แม่น้ำ เป็นต้น

1.3 พื้นที่ หรือ รูปหลายเหลี่ยม (Polygons) เป็นลักษณะขอบเขตพื้นที่ที่เกิดจากข้อมูลแบบเส้นต่อเนื่องกันเป็นรอบปิด เช่น ขอบเขตของพื้นที่ป่าไม้ขอบเขตจังหวัด เป็นต้น

2. ข้อมูลที่ไม่อยู่ในเชิงพื้นที่ หรือ ข้อมูลเชิงคุณลักษณะ (Non-Spatial Data) เป็นข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะ (Attributes) ต่างๆ ในข้อมูลเชิงพื้นที่นั้นๆ

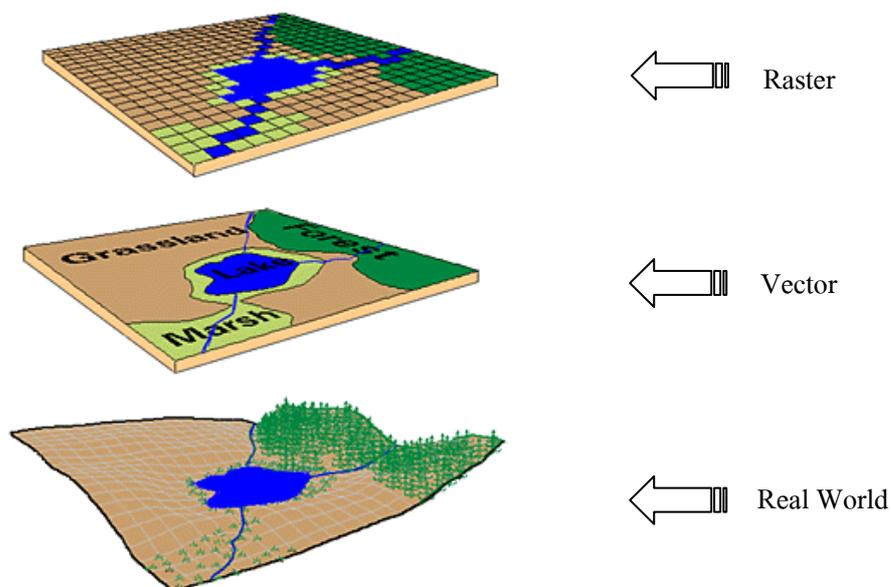
การจัดเก็บข้อมูลเชิงพื้นที่ คือการนำกลุ่มสัญลักษณ์แทนสิ่งต่างๆ บนพื้นที่จริงในแผนที่ดิจิทัลซึ่งจะต้องประกอบด้วยข้อมูลเชิงพื้นที่และข้อมูลเชิงคุณลักษณะ โดยที่ข้อมูลเชิงพื้นที่จะ

แทนลักษณะทางภูมิศาสตร์ต่างๆ ส่วนข้อมูลเชิงคุณลักษณะเป็นรายละเอียดคุณสมบัติของข้อมูลเชิงพื้นที่ ที่ทั่วไปแล้วข้อมูลเชิงเรามี 2 ประเภทคือ

1. Vector Representation เป็นลักษณะของจุด เส้น และพื้นที่ เพื่อแทนพิกัดตำแหน่งต่างๆ ทางภูมิศาสตร์ โดยการแยกความแตกต่างของข้อมูลออกจากกันได้โดยชื่อหรือรหัสหมายเลขของข้อมูลเชิงคุณลักษณะ

2. Raster or Grid Representation จะมีลักษณะข้อมูลเชิงพื้นที่เป็น ตาราง (Grid Cell) ที่มีขนาดเท่ากันเรียงกันอย่างมีระบบจากซ้ายไปขวา จากบนลงล่าง โดยแต่ละหน่วยของตารางเรียกว่า พิกเซล (Pixel) ซึ่งแต่ละพิกเซลจะแทนด้วยข้อมูลเชิงคุณลักษณะ 1 ค่าเท่านั้น

ลักษณะของข้อมูลเชิงคุณลักษณะและข้อมูลเชิงพื้นที่ จะมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นไปได้ทั้งในแบบต่อเนื่อง (Continuous) และแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete) เช่น แผนที่ภูมิประเทศ ที่แสดงเส้นระดับความสูงที่มีความสัมพันธ์กันอย่างต่อเนื่อง และจำนวนประชากรที่อาศัยอยู่ในแต่ละเส้นระดับความสูง จะมีความสัมพันธ์ในลักษณะที่ไม่ต่อเนื่อง



ภาพที่ 41 ลักษณะข้อมูลแบบ Vector และ Raster

ที่มา: ESRI (1994)

## ลักษณะทั่วไปและการเกิดแผ่นดินถล่มในพื้นที่จังหวัดภูเก็ต

ลักษณะทั่วไปและการเกิดแผ่นดินถล่มในพื้นที่จังหวัดภูเก็ต จากข้อมูลในรายงานการตรวจสอบข้อเท็จจริงเกี่ยวกับสาเหตุการเกิดอุทกภัยในพื้นที่อำเภอกะทู้ จังหวัดภูเก็ต ปี พ.ศ.2544 เป็นดังนี้

### ลักษณะพื้นที่

จังหวัดภูเก็ตตั้งอยู่ทางทิศตะวันตกของภาคใต้ด้านชายฝั่งทะเลอันดามัน มหาสมุทรอินเดีย เป็นเกาะที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย มีเนื้อที่โดยรวม ประมาณ 543.3 ตารางกิโลเมตร มีอาณาเขตติดต่อกับจังหวัดพังงาทางด้านทิศเหนือ นอกนั้นล้อมรอบด้วยทะเลอันดามัน

จังหวัดภูเก็ต มีเขตการปกครองส่วนภูมิภาค แบ่งออกเป็น 3 อำเภอ 17 ตำบล 103 หมู่บ้าน และมีองค์การปกครองส่วนท้องถิ่น 3 รูปแบบ คือ องค์การบริหารส่วนจังหวัด (1 อบจ.) เทศบาล (6 เทศบาล) และองค์การบริหารส่วนตำบล (13 อบต.)

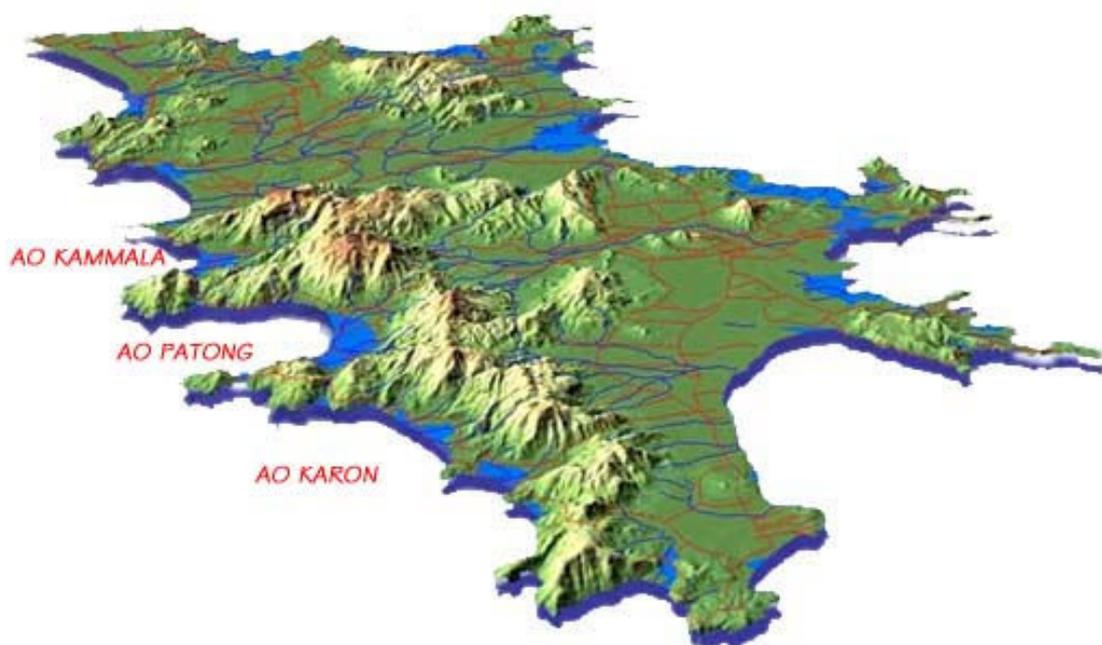
พื้นที่ส่วนใหญ่ ร้อยละ 77 เป็นภูเขาซึ่งวางตัวอยู่ทางด้านทิศตะวันตกเป็นส่วนใหญ่มีพื้นที่ราบระหว่างเชิงเขาต่อเชื่อมกับหาดทราย จึงเป็นพื้นที่ท่องเที่ยวที่สำคัญเป็นส่วนใหญ่ เช่น หาดบางเทา หาดกมลา หาดป่าตอง หาดกะรน หาดกะตะ เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 42

พื้นที่รับน้ำที่เกี่ยวข้องกับเหตุการณ์อุทกภัยปี พ.ศ.2544 ซึ่งแสดงในภาพที่ 43 ได้แก่

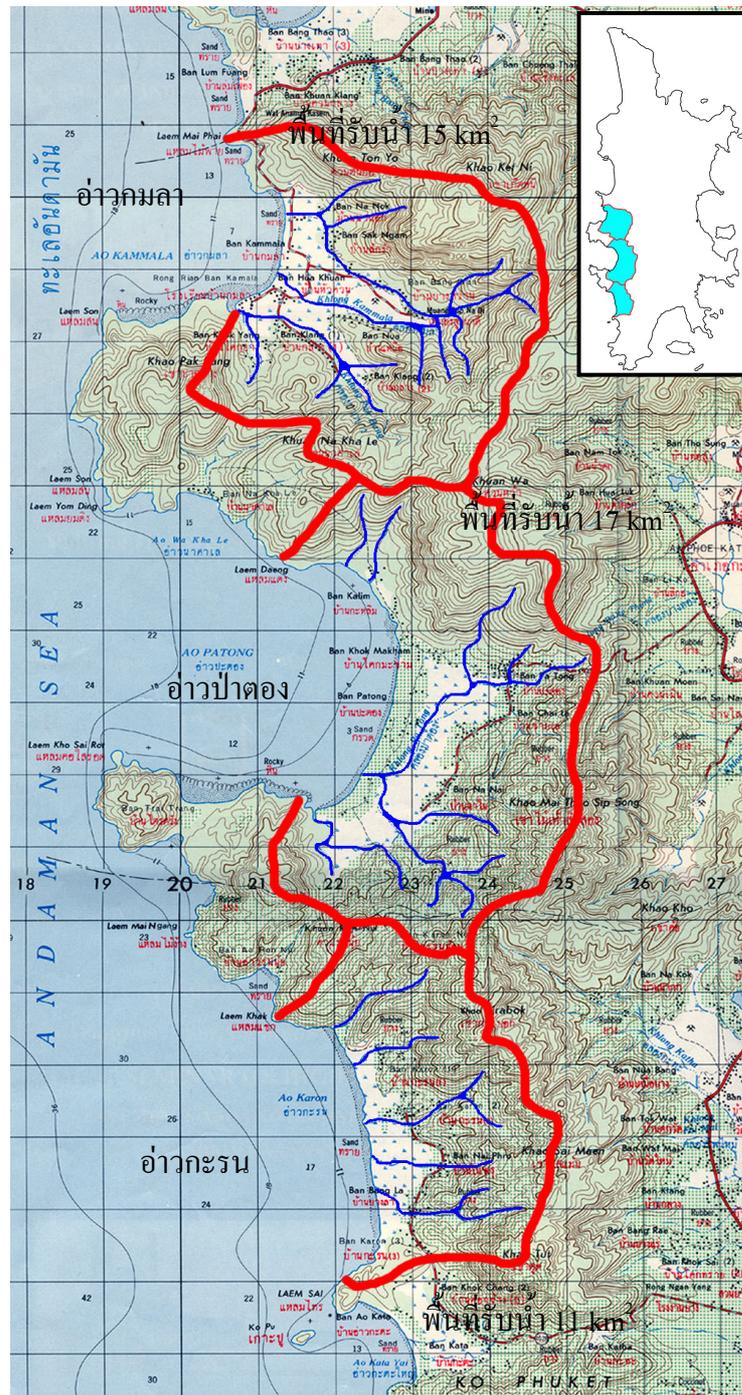
1. พื้นที่รับน้ำหาดกมลา เป็นพื้นที่ราบล้อมด้วยภูเขา สูงประมาณ 300-500 เมตรจากระดับน้ำทะเลปานกลาง (ม.รทก.) มีพื้นที่ทั้งหมด 15 ตร.กม. พื้นที่ตอนบนของเขาก่อนเคยมีการทำเหมืองแร่ดีบุกและมีลำน้ำสำคัญ คือ คลองปากบาง และคลองกมลา เป็นลำน้ำสายสั้น ยาวประมาณ 3-5 กม. ตำบลกมลา เคยเป็นหมู่บ้านชาวประมงมุสลิม เป็นพื้นที่ปิด ต่อมาเมื่อมีถนนสายกมลา ป่าตอง เชื่อมต่อกับอ่าวป่าตอง จึงมีการตั้งถิ่นฐานเพิ่มขึ้น และเปิดเป็นสถานที่ท่องเที่ยวแหล่งใหม่ขึ้น

2. พื้นที่รับน้ำหาดป่าตอง ประกอบด้วยพื้นที่ราบกว้างประมาณ 1 ถึง 1.5 กม. ยาวตามแนวหาดป่าตอง ล้อมรอบด้วยควนหัวทางด้านเหนือ เขาไม้เท้าสิบสองด้านทิศตะวันออกและควนรนนุ้ย มีพื้นที่ทั้งหมด 17 ตร.กม. ลำน้ำสายสำคัญได้แก่ คลองป่าตอง ยาวประมาณ 3.5 กม. นอกจากนั้น ยังมีลำน้ำย่อยๆ ยาว 1-1.5 กม. พื้นที่ราบชายหาดป่าตองขณะนี้เป็นที่พัฒนาเป็นแหล่งท่องเที่ยวขนาดใหญ่ที่สุดของภูเก็ต ประกอบด้วย อาคาร โรงแรม ร้านอาหาร และสถานที่ท่องเที่ยวหนาแน่น

3. พื้นที่รับน้ำหาดกะรน ประกอบด้วยพื้นที่ราบกว้างประมาณ 0.5 ถึง 1.0 กม. ยาวไปตามแนวหาดประมาณ 3 กม. ล้อมรอบด้วย ควนรนนุ้ยทางด้านทิศเหนือ เขากระบะบอก เขาไสเม้น และเขาตูดทางด้านทิศตะวันออก ทางใต้มีพื้นที่ต่อเชื่อมไปทางหาดกะตะมีพื้นที่ลุ่มน้ำทั้งหมด 11 ตร.กม. ทั้งสามหาดดังกล่าวในปัจจุบันมีถนนเชื่อมต่อถึงกันหมดโดยทางรถยนต์



ภาพที่ 42 ภาพ 3 มิติแสดงลักษณะภูมิประเทศของ จ. ภูเก็ต  
ที่มา: ศูนย์วิจัยภูมิสารสนเทศเพื่อประเทศไทย



ขอบเขตพื้นที่รับน้ำ  
แม่น้ำ

ภาพที่ 43 ลักษณะภูมิประเทศและพื้นที่รับน้ำของชุมชน กมลา ป่าตอง และกระรน

## การใช้ประโยชน์ที่ดิน

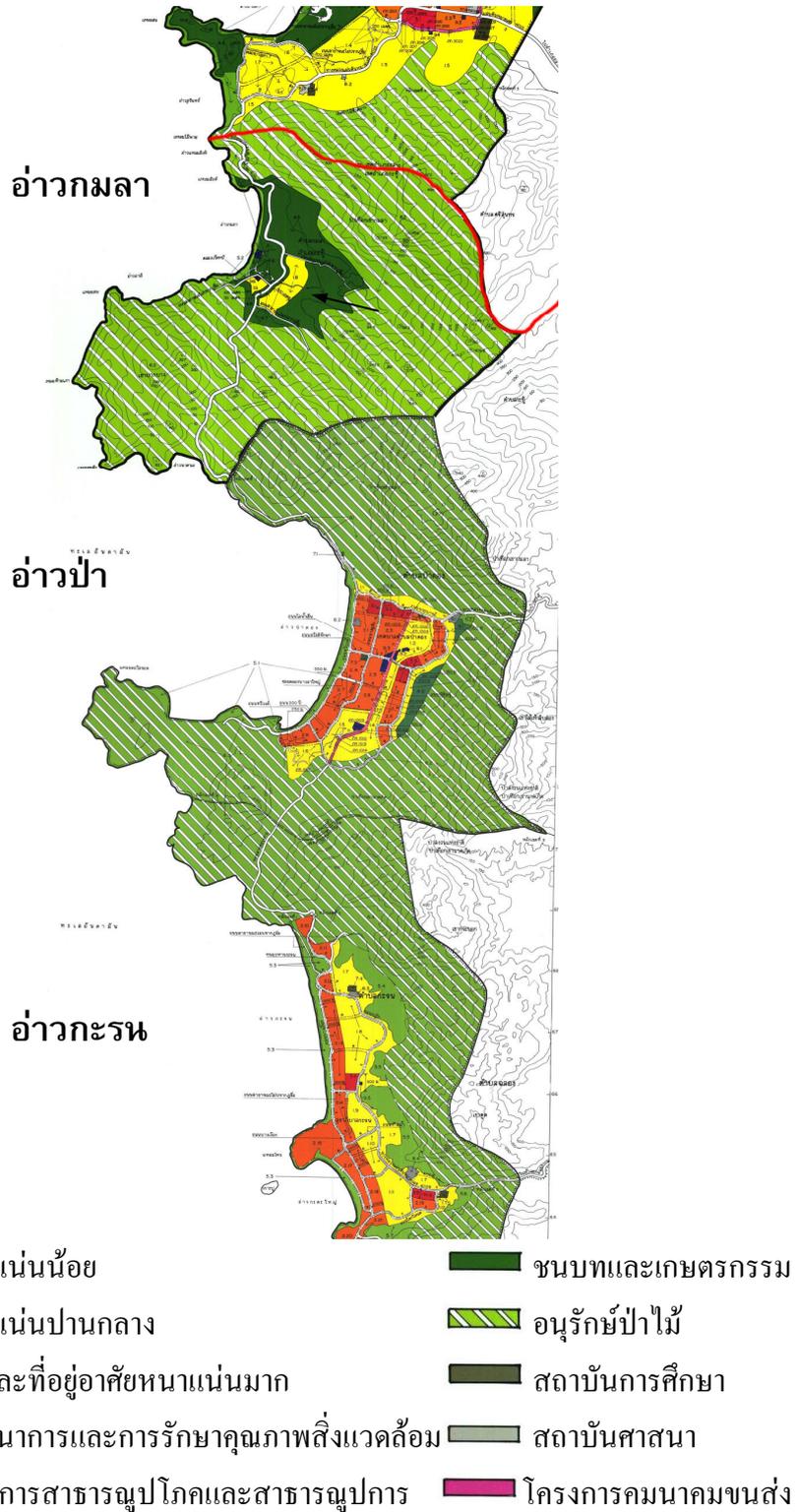
1. พื้นที่ราบ เนื่องจากการท่องเที่ยวในจังหวัดภูเก็ตมีการขยายตัวอย่างมากในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา และได้รับผลกระทบจากการถดถอยของสภาพเศรษฐกิจของประเทศน้อยกว่าที่อื่นๆ เนื่องจากมีรายได้จากนักท่องเที่ยวต่างชาติเป็นหลัก ดังนั้นพื้นที่ราบระหว่างภูเขาจนถึงชายทะเล จึงถูกพัฒนาเป็นสถานที่เกี่ยวกับกิจกรรมการท่องเที่ยว เช่น โรงแรม หมู่บ้านตากอากาศ บ้านพักอาศัย ศูนย์การค้า อาคารพาณิชย์ ร้านอาหาร สถานบันเทิง เป็นต้น การขยายตัวของสถานที่ต่างๆ ดังกล่าวในยุคแรกๆ ไม่มีผังแม่บท จนเมื่อเกิดปัญหาต่างๆ ตามมาจึงได้มีการศึกษาและวางผังเมืองตลอดจนระบบสาธารณูปโภคตามมาภายหลัง ดังผังเมืองรวมแสดงในภาพที่ 44

2. พื้นที่เชิงเขาและไหล่เขา ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่เกษตรกรรม ปลูกยางพาราและไม้ผล พื้นที่ส่วนที่เป็นป่าเสื่อมโทรมที่มอบให้ ส.ป.ก. 25,575 ไร่ และ ส.ป.ก. ส่งมอบพื้นที่ที่ไม่เหมาะสมทำการเกษตรคืนกรมป่าไม้ 4,095 ไร่ คงเหลือพื้นที่ป่า 8,120 ไร่ (ข้อมูลจากสำนักงานจังหวัดภูเก็ต, มกราคม 2545)

ในปัจจุบันมีการแผ้วถางป่าและสวนผลไม้เพื่อก่อสร้างบ้านพักตากอากาศ พัฒนาแหล่งท่องเที่ยวใหม่ และตัดถนนเข้าสู่พื้นที่ไหล่เขาในระดับที่สูงขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากเป็นสถานที่ซึ่งเป็นที่ต้องการของนักท่องเที่ยว ในการชมทิวทัศน์ทะเลและชุมชนจากระดับสูง และมีบรรยากาศป่าเขา

## ลักษณะทางธรณีวิทยาและปฐพีวิทยา

ลักษณะทางธรณีวิทยา บริเวณที่เกิดอุทกภัยและดินถล่มอยู่ทางด้านตะวันตกของจังหวัดภูเก็ต บริเวณอ่าวกมลา อ่าวป่าตอง และอ่าวกะรน ลักษณะของอ่าวเหล่านี้จะอยู่ระหว่างหัวแหลมและเว้าโค้งเข้าไปในแผ่นดิน มีหาดทรายอยู่ตรงกลาง เรียกว่า หาดก้นอ่าว (Pocket beach) หาดทรายลักษณะนี้จะต่อเนื่องกับพื้นที่ลาดเขาและภูเขาด้านใน และมักจะมีที่ลุ่มหรือ lagun ขนานกับหาดทรายแนวนอกสุดที่ติดกับทะเล ซึ่งทางน้ำบนภูเขาจะไหลผ่านที่ลุ่มและหาดทรายเหล่านี้เข้าสู่ทะเล



ภาพที่ 44 แผนที่การใช้ที่ดิน บริเวณอ่าวมลา อ่าวป่าตอง และอ่าวกระหน จังหวัดภูเก็ต

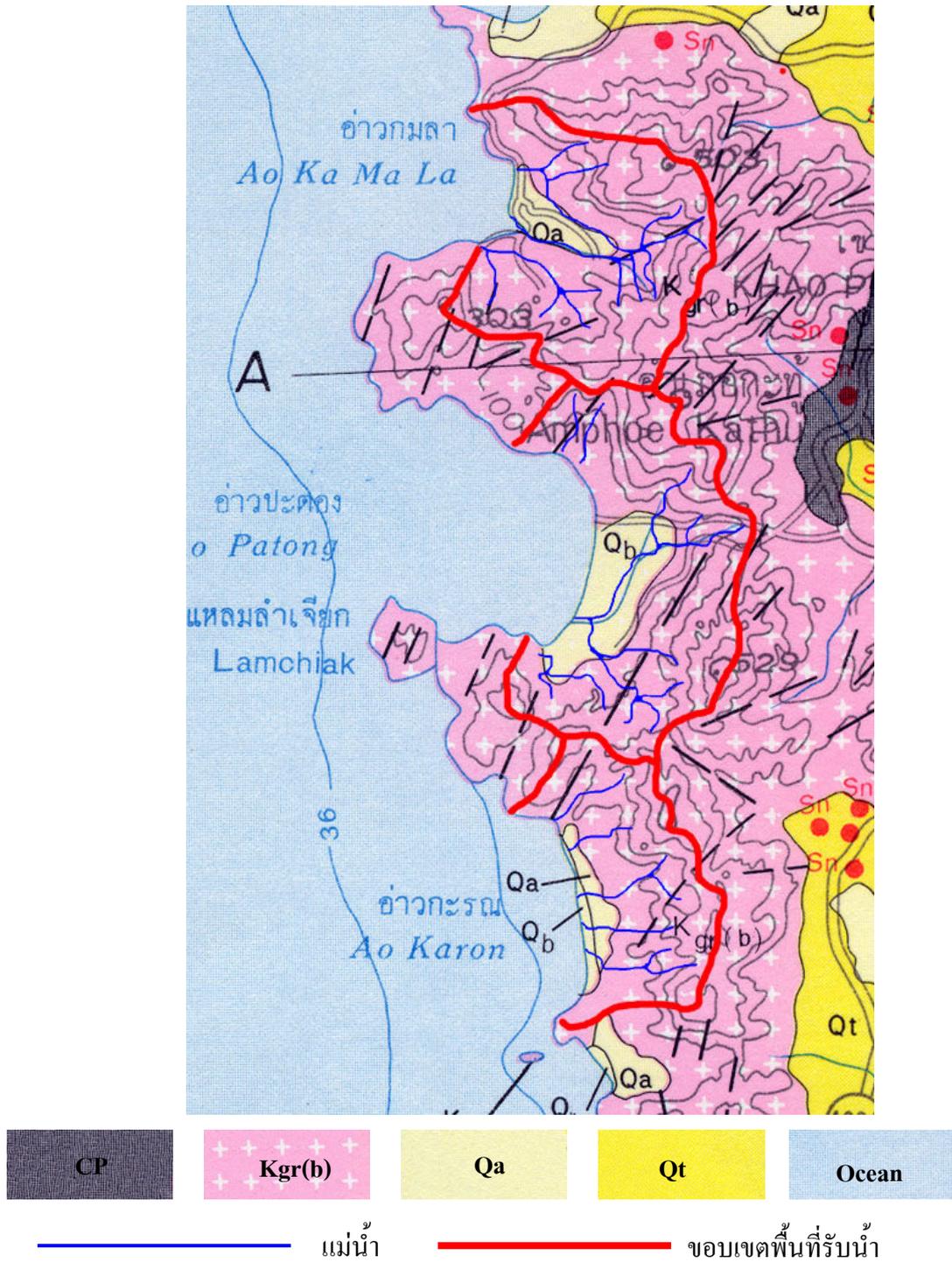
จากแผนที่ธรณีวิทยาระวางภูเก็ต มาตราส่วน 1:250,000 กรมทรัพยากรธรณี (2528) ดังแสดงในภาพที่ 45 พบว่าพื้นที่ส่วนใหญ่ถูกปกคลุมด้วยหินชุด Kgr (b) หินชุดนี้เป็นหินแกรนิตชนิดไบโอไทต์แกรนิต ยุคครีเทเชียส มีเนื้อหยาบและมักจะมีลักษณะเป็นดอก หรือเห็นเป็นแท่งของแร่เฟลสปา หินแกรนิตเมื่อผุจะแตกออกเป็นกาบ ร่อนออกเป็น แผ่นหนา และจะเหลือหินเนื้อสดอยู่ตรงกลาง มีลักษณะกลมมน และถ้าผุไปนานๆ จะเปลี่ยนสภาพเป็นตะกอนทรายหยาบปนกับดินเหนียว ซึ่งน้ำจะชะล้างให้พังทลายได้ง่าย หินแกรนิตเป็นหินชนิดเดียวที่พบทางฝั่งตะวันตกของเกาะภูเก็ต ทั้งในพื้นที่ภูเขา หัวแหลมและชายทะเล โดยเฉพาะในพื้นที่ภูเขา หินแกรนิตที่อยู่ตอนบนจะผุพังมาก

นอกจากนี้ยังพบหินชุด  $Q_1$  เป็นตะกอนที่ยังไม่แข็งตัวเป็นหิน ประกอบด้วย กรวด ทราย และเศษหินเชิงเขาเป็นตะกอนที่เกิดขึ้นในยุคหลังสุดทางธรณีวิทยา เรียกว่า ยุคควอเทอร์นารี เกิดจากการกัดเซาะผุพังของหินในบริเวณนั้น

ส่วนบริเวณชายหาดจะพบตะกอนชุด  $Q_a$   $Q_b$  ตะกอนกลุ่มนี้จัดเป็นตะกอนที่เกิดขึ้นหลังสุด โดยตะกอน  $Q_a$  เป็นกรวดทรายและดินเหนียวที่เกิดจากน้ำพัดพามาตามลาดเขาและลำน้ำ ส่วนมากจะอยู่ใกล้ภูเขา ส่วนตะกอน  $Q_b$  เป็นตะกอนที่เกิดจากการสะสมตัวจากน้ำทะเล ประกอบด้วย ตะกอนทรายในบริเวณหาดทราย ทรายปนดินเหนียวในบริเวณที่ลุ่มหลังหาดหรือลากูน และดินเหนียว ทรายแป้ง และซากไม้ผุ ในบริเวณที่ราบน้ำขึ้นถึงป่าชายเลน

สำหรับลักษณะดินในบริเวณพื้นที่ จากการสำรวจและจำแนกดิน โดยกองสำรวจและจำแนกดิน กรมพัฒนาที่ดิน พบว่า บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำทั้ง 3 แห่ง มีลักษณะดินที่สำคัญ ดังนี้

พื้นที่ราบ โดยส่วนใหญ่เป็นดินที่เกิดจากตะกอนน้ำพัดพามาทับถม มีเนื้อดินปานกลาง ได้แก่ ดินร่วนปนทราย ดินร่วนเหนียวปนทราย เป็นดินลึกมาก มีการระบายน้ำค่อนข้างเร็ว มีสีพื้นเป็นสีน้ำตาลปนเทา และมีจุดประสีน้ำตาลปนเหลือง มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ ปฏิกริยาดินเป็นกรดจัดถึงกรดแก่ (pH 4.5-5.5)



ภาพที่ 45 ลักษณะทางธรณีวิทยาบริเวณพื้นที่ฝั่งตะวันตกของเกาะภูเก็ต  
 ที่มา: กรมทรัพยากรธรณี (2528)

พื้นที่เชิงเขาและภูเขา เป็นดินที่เกิดจากการสลายตัวของหินแกรนิต เนื้อดินเป็นกลุ่มดินเนื้อละเอียด ได้แก่ ดินเหนียวปนทรายหยาบ เป็นดินลึกมาก (มากกว่า 1.5 เมตร) ดินมีการระบายน้ำดี และมีความสามารถในการอุ้มน้ำต่ำ มีสีน้ำตาล สีนํ้าตาลปนเหลือง หรือสีแดงปนเหลือง ดินมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ ปฏิกริยาดินเป็นกรดจัดถึงกรดแก่ (pH 4.5-5.5) การยึดตัวของดินปานกลาง มักพบหินแกรนิตโผล่กระจายจัดกระจายเป็นหย่อมๆ ประมาณ 1-5 % ของพื้นที่ และสภาพพื้นที่ที่มีความลาดชันสูง (มากกว่า 20%) ดินมีโอกาสเกิดการชะล้างพังทลายหรือเกิดการถล่มของดินสูง

## สภาพภูมิอากาศและปริมาณน้ำฝน

### 1. สภาพภูมิอากาศ

ภูมิอากาศของจังหวัดภูเก็ต มีลักษณะแบบพื้นที่ในเขตศูนย์สูตร ซึ่งอยู่ในเขตอิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ มีอากาศร้อนชื้นตลอดปี อุณหภูมิโดยเฉลี่ยตลอดปี อยู่ในช่วง  $28^{\circ}\text{C} - 32^{\circ}\text{C}$  มี 2 ฤดู คือ ฤดูฝน และฤดูร้อน แต่ละฤดูมีระยะเวลาดังนี้

ฤดูฝน	เริ่มตั้งแต่เดือนเมษายน ถึง เดือนพฤศจิกายน
ฤดูร้อน	เริ่มตั้งแต่เดือนธันวาคม ถึง เดือนมีนาคม

### 2. ปริมาณน้ำฝน

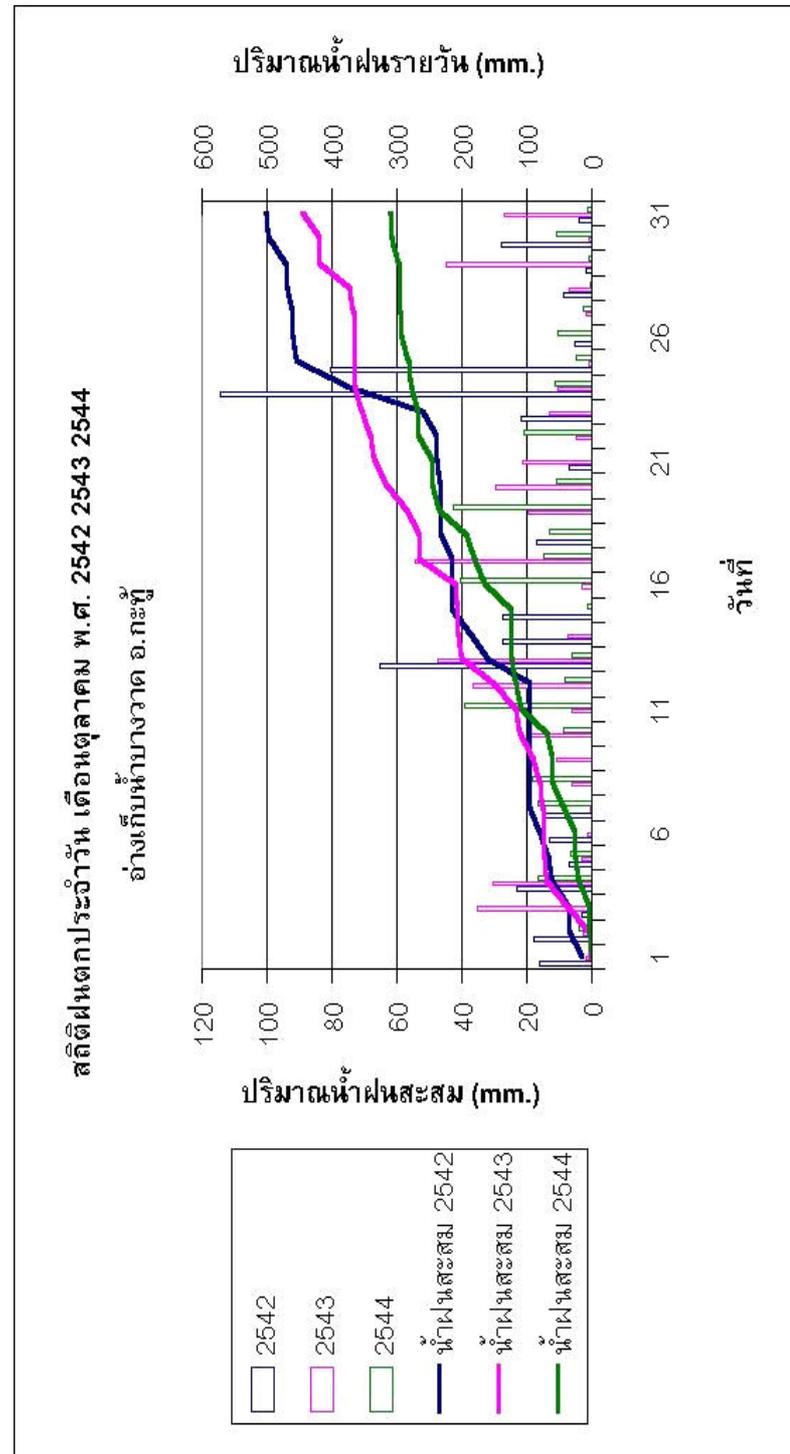
จากข้อมูลการวัดน้ำฝนที่สถานีอ่างเก็บน้ำบางวาด อำเภอกะทู้ ในช่วง ปี พ.ศ.2534 ถึง พ.ศ.2544 มีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยทั้งปีประมาณ 2,662.2 มิลลิเมตร จำนวนวันฝนตกเฉลี่ยทั้งปี 180 วัน ปริมาณฝนเฉลี่ยรายเดือน แสดงได้ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 แสดงปริมาณฝนและจำนวนวันฝนตกในแต่ละเดือน

เดือน	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	รวม
ปริมาณ ฝนเฉลี่ย (มม.)	44.2	57.3	105.1	177.6	283.2	240.0	279.4	334.2	457.4	386.6	222.3	74.9	2,662.2
จำนวน วันฝน ตก (วัน)	4.1	3.3	5.8	12.3	21.5	18.7	20.2	21.7	24.4	23.8	16.0	8.4	180.2

ที่มา: โครงการชลประทานภูเก็ต จังหวัดภูเก็ต (2534-2544)

สำหรับเดือนตุลาคม ซึ่งถือถือว่าเป็นช่วงที่ฝนตกชุกเดือนหนึ่งในรอบปี จากข้อมูลสถิติที่  
อ่างเก็บน้ำบางวาด อำเภอกะทู้ ซึ่งอยู่ใกล้บริเวณที่เกิดอุทกภัยมากที่สุด พบว่าตั้งแต่ปี พ.ศ.2542-  
2544 จะมีปริมาณฝนสะสมทั้งเดือน อยู่ในช่วง 300-500 มม. โดยในปี 2544 ที่เกิดเหตุการณ์นั้นมีฝน  
ตกหนักในวันที่ 11,16 และ 19 เป็นปริมาณฝน 39.1, 40.6 และ 42.5 มม. ตามลำดับ แต่ปริมาณฝน  
สะสมทั้งเดือนยังน้อยกว่าที่เกิดขึ้นในปี พ.ศ.2542 และ 2543 ดังภาพที่ 46



ภาพที่ 46 สถิติน้ำฝนในช่วงเดือนตุลาคม

## ลักษณะการเกิดแผ่นดินถล่มและความเสียหายในพื้นที่จังหวัดภูเก็ตปี พ.ศ. 2544

### 1. การเกิดอุทกภัยและแผ่นดินถล่ม

ได้มีการบันทึกเหตุการณ์การเกิดดินถล่มในวันที่ 16 ตุลาคม 2544 เมื่อเวลาประมาณ 12.00 น. ได้เกิดน้ำป่าไหลบ่าทะลักเข้าท่วมบ้านเรือนราษฎรในตำบลป่าตอง ตำบลกะทู้ ตำบลกมลา อำเภอกะทู้ และตำบลกระรน อำเภอเมือง จังหวัดภูเก็ต และเกิดลาดดินถล่มลงมาตามบริเวณไหล่ทางปิดขวางถนนเส้นทางสายกมลา-ป่าตอง และอีกหลายจุดในตำบลกะทู้ โดยก่อนหน้าวันที่เกิดเหตุ ได้มีฝนตกลงมาติดต่อกันตั้งแต่ต้นเดือนตุลาคม 2544 เมื่อผู้ว่าราชการจังหวัดภูเก็ตสั่งการให้ตรวจสอบข้อเท็จจริงพบว่า พื้นที่เกิดน้ำไหลบ่าและดินถล่มเกิดขึ้นในเทือกเขากมลา พื้นที่ส่วนใหญ่ปลูกยางพาราและไม้ผล ที่มีการตัดถนนลูกรังจำนวนหลายเส้นทางเข้าไปในพื้นที่ดังกล่าว เชื่อมโยงถึงกัน ทำให้เป็นเส้นทางน้ำไหลมาสู่พื้นที่ต่ำอย่างรวดเร็ว และมีการก่อสร้างฝายกักเก็บน้ำขนาดเล็กในพื้นที่สวนผลไม้และสวนยาง เมื่อเกิดฝนตกหนักไม่สามารถรองรับการไหลบ่าของน้ำ ทำให้ฝายกั้นน้ำพังทลายลงมา

### 2. ความเสียหายของพื้นที่น้ำท่วมและแผ่นดินถล่ม

#### ก. สาธารณูปโภค

1. อำเภอถลาง น้ำท่วมน้ำท่วมหมู่ที่ 2, 3, 5 ตำบลเชิงทะเล ความเสียหายเล็กน้อย
2. อำเภอกะทู้ น้ำท่วมหมู่ที่ 6 ตำบลกมลา ถนนทุกสายในเขตเทศบาลตำบลป่าตอง หมู่ที่ 6 ตำบลกะทู้ (บ้านสี่กั๊ก, บ้าน ไม้เรียบ) และดินถล่ม ตั้งแต่เวลา 16.00 น. ของวันที่ 17 ตุลาคม 2544 บริเวณถนนสายกมลา-ป่าตอง ช่วงเนินเขานาคบุรี ลาดดินถล่มลงมาปิดขวางถนนเป็นระยะทางยาวประมาณ 50 เมตร สูง 5 เมตร รถยนต์ไม่สามารถผ่านไปมาได้ เสาไฟฟ้าหักและโค่นล้ม 5 ต้น สะพานคอนกรีตภายในหมู่บ้าน (หมู่ที่ 5 ตำบลกมลา) ถูกน้ำกัดเซาะ คอสะพานขาด ไม่สามารถสัญจรไปมาได้
3. อำเภอเมืองภูเก็ต น้ำท่วมในเขตเทศบาลตำบลกระรน ความสูงประมาณ 1 เมตร บริเวณหน้าโรงแรมถาวรปาร์มบีช จนถึงโรงแรมอาเคเดีย และบริเวณถนนปลูก

4. โครงการชลประทานบางวาด ฝ่ายบ้านบางหวาน หมู่ที่ 1 ตำบลกมลา อำเภอกะทู้ ดินทับถมบริเวณอาคาร หินก่อและดินถมบดอัดแน่นด้านท้ายน้ำเสียหาย บริเวณตัวฝายดินและหินจากภูเขาถล่มลงมา สวนผลไม้และถนนเข้าสู่หัวงานฝายได้รับความเสียหาย รวมทั้งอาคารท่อพักรับน้ำ บริเวณอ่างเก็บน้ำบางวาด กม. 2+515 อาคารด้านท้ายน้ำที่เป็นหินก่อ และดินถมถูกน้ำกัดเซาะเสียหาย ไม่สามารถใช้งานได้ ทางโครงการส่งเจ้าหน้าที่ไปสำรวจความเสียหายของอาคารเพื่อตั้งงบประมาณดำเนินการต่อไป

#### 5. ถนนทางหลวงสายต่างๆดังนี้

ทางหลวงหมายเลข 4028 ตอนคลอง-กะรน ระหว่าง กม. 8+450 – กม. 8+550 ระดับน้ำประมาณ 20 ซม. การจราจรผ่านได้ คับทางพังทลาย และเสาไฟฟ้าหักโค่นล้ม 10 ต้น

ถนนเลียบชายหาดกะรน ระดับน้ำประมาณ 1 เมตร การจราจรผ่านไม่ได้

ทางหลวงหมายเลข 4029 ตอนกะทู้-ป่าตอง ระดับน้ำประมาณ 50 ซม. การจราจรผ่านได้ 1 ช่องทาง

ทางหลวงหมายเลข 4233 ตอน หาดสุรินทร์-หาดราไวย์ คับทางพังทลาย ระหว่าง กม. 6+825 ด้านซ้ายทาง และเสาไฟฟ้าของการไฟฟ้าภูเก็ตล้ม จำนวน 1 ต้น การจราจรผ่านได้ 1 ช่องทาง

#### ข. ราษฎรที่ประสบภัยและความเสียหาย

อำเภอกะทู้ ราษฎรได้รับความเดือดร้อน 3,300 คน 1,010 ครัวเรือน รวมประมาณ ความเสียหาย 355,500 บาท

#### 3. การตรวจสอบพื้นที่ของคณะอนุกรรมการฯ

คณะอนุกรรมการตรวจสอบข้อเท็จจริงเกี่ยวกับสาเหตุการเกิดอุทกภัยในพื้นที่ จังหวัดภูเก็ตปี 2544 ได้เดินทางไปตรวจพื้นที่และข้อเท็จจริง เมื่อวันที่ 18 มกราคม 2545 มีรายละเอียดดังนี้

- จุดที่ 1 ตำบลป่าตอง อำเภอเกาะทุ่ง
- จุดที่ 2 ตำบลกมลา อำเภอเกาะทุ่ง

#### 4. ข้อวินิจฉัยของคณะอนุกรรมการตรวจสอบข้อเท็จจริงฯ

##### ก. สาเหตุทางธรรมชาติ

1. ปริมาณน้ำฝนที่ตกต่อเนื่องจากวันที่ 11-19 ตุลาคม 2544 รวม 9 วัน เป็นปริมาณฝนสะสม 165.2 มม. ซึ่งไม่ถือว่าเป็นฝนตกหนักผิดปกติ เมื่อเปรียบเทียบกับเดือนเดียวกันในปี พ.ศ. 2542 และ 2543 ในขณะที่ภูมิประเทศของหาดกมลา หาดป่าตอง และหาดกะรน เป็นที่ราบเชิงเขาและที่ราบชายฝั่งทะเล ซึ่งต้องรับน้ำจากเทือกเขาโดยรอบผ่านคลองธรรมชาติสายสั้นๆ ลงสู่ทะเล หากไม่มีสิ่งกีดขวางใดๆ ก็จะสามารถระบายลงสู่ทะเลได้อย่างรวดเร็ว

2. ลักษณะดินที่เกิดจากหินแกรนิตจะประกอบด้วยทรายและดินเหนียวเคลือบโดยรอบ เมื่อมีความชื้นสูงขึ้น ดินเหนียวจะอุ้มน้ำทำให้เสียความแข็งแรงและเกิดถล่มได้ง่ายดังเช่นที่เคยเกิดที่บริเวณเขาหลวง จ.นครศรีธรรมราช เมื่อปี พ.ศ. 2531

##### ข. สาเหตุปัจจัยที่เกิดจากการกระทำของคน

ในกรณีของภูเก็ตถือได้ว่าการเปลี่ยนแปลงสภาพทางธรรมชาติโดยคน เป็นสาเหตุหลักของการเกิดอุทกภัยและดินถล่ม ดังข้อมูลที่ได้รับทราบจากทางจังหวัดและการตรวจพื้นที่ของคณะอนุกรรมการ ซึ่งประกอบด้วยปัจจัยต่างๆ ได้แก่

1. มีการก่อสร้างอาคารบ้านเรือนและรีสอร์ทบนภูเขาเป็นจำนวนมาก ทั้งที่ก่อสร้างในพื้นที่มีเอกสิทธิ์ และที่ดินของรัฐ ทำให้ประสิทธิภาพการซึมน้ำฝนของป่าไม้ลดลง เกิดน้ำไหลผิวดินมากขึ้น

2. มีการก่อสร้างถนนบนภูเขาสูงเป็นจำนวนมาก ซึ่งถนนเหล่านี้ไปขวางทางน้ำที่เกิดจากฝนตกทำให้น้ำไม่สามารถไหลกระจายไปตามพื้นดินได้ตามปกติ น้ำจึงมารวมตัวกันเป็นแนวกระแสน้ำที่ไหลลงจากภูเขาอย่างรุนแรงและมีการกัดเซาะตามมา

3. มีการทำการเกษตรทั้งสวนยางพารา และพืชสวนอื่นๆ บนภูเขาทั้งในส่วนที่เป็นที่ดินในเขต สปก. และเขตป่าไม้ ทำให้สภาพพื้นดิน โลงเตียน ไม่มีต้นไม้ใหญ่ยึดเกาะผิวดิน เมื่อฝนตกหนักจึงทำให้เกิดการกัดเซาะผิวดิน และไหลจากภูเขาลงพื้นล่างอย่างรวดเร็วและรุนแรง

4. มีการขุดอ่างเก็บน้ำขนาดเล็กบนภูเขา เพื่อเป็นแหล่งน้ำสำหรับการเกษตร และใช้สำหรับอาคารบ้านเรือน ตลอดจนรีสอร์ทที่เป็นจำนวนมากที่อาจไม่ได้มาตรฐานทางวิชาการ เมื่อฝนตกหนักจนน้ำล้นอ่างและน้ำได้กัดเซาะปีกฝายหรือขอบอ่างเก็บน้ำจนทำให้อ่างเก็บน้ำจนทำให้อ่างเก็บน้ำพังทลายลงมา

5. มีการก่อสร้างถนนและถมคลอง ตลอดจนลำรางในบริเวณพื้นที่ตั้งแต่เชิงเขาจนถึงชายทะเลเป็นจำนวนมาก เมื่อน้ำฝนไหลลงมาจากภูเขาเป็นจำนวนมากจึงไม่สามารถระบายออกไปที่ใดได้ จึงทำให้ท่วมบ้านเรือนที่ตั้งอยู่พื้นราบตามแนวทางน้ำไหลผ่านนั้น

6. มีการก่อสร้างถนนบนไหล่เขามีพื้นที่เขตทางแคบ ไม่มีการสร้างไหล่ถนนและตัดความลาดเอียงเชิงเขาที่ลาดเพียงพอ ทำให้ขอบถนนบริเวณที่เป็นเชิงเขามีลักษณะสูงชัน เมื่อฝนตกหนักจึงทำให้เกิดการพังทลายของดินแล้วไหลลงมาปิดถนน

7. มีการก่อสร้างระบบบำบัดน้ำเสียซึ่งวัสดุอุปกรณ์ ตลอดจนการก่อสร้างไม่เรียบร้อยทำให้กีดขวางเส้นทางน้ำไหล ทำให้น้ำไม่สามารถไหลได้สะดวก จึงไหลบ่าท่วมพื้นที่โดยรอบ

## อุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของลาดดินถล่มเนื่องจากฝนตกหนักในจังหวัดภูเก็ต โดยการศึกษาเสถียรภาพของลาดดินในธรรมชาติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในมวลดินเนื่องจากการไหลซึมของฝนที่ตกในพื้นที่ ดังนั้นในการดำเนินงานวิจัยจึงแบ่งการทำงานออกเป็นกลุ่มหลัก ๆ ซึ่งประกอบด้วย กลุ่มการดำเนินงานในภาคสนาม กลุ่มการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และกลุ่มการวิเคราะห์ข้อมูลด้านการไหลซึมและความมั่นคงของลาดดิน รวมถึงการสรุปผลงานวิจัยเพื่อนำไปใช้งาน

### อุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัย

เนื่องจากงานวิจัยนี้มีขั้นตอนในการทำงานหลายด้าน ทั้งการทำงานในพื้นที่ที่เกิดลาดดินถล่ม การทดสอบในห้องปฏิบัติการรวมถึงการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ ดังนั้นอุปกรณ์และสถานที่ในการดำเนินงานวิจัยจึงแบ่งออกตามกลุ่มงานดังที่ได้กล่าวไว้ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### กลุ่มการดำเนินงานในภาคสนาม

##### อุปกรณ์

- 1.1 อุปกรณ์เก็บตัวอย่างดินคงสภาพ (KU-mini sampler)
- 1.2 เครื่องมือทดสอบการหยั่งชั้นดิน (Kunzelstab Penetration test)
- 1.3 กล้องสำรวจ Theodolite
- 1.4 GPS
- 1.5 Tensiometer
- 1.6 Raingauge with Datalogger
- 1.7 Inclinator

##### สถานที่วิจัย

พื้นที่ต้นแบบไหลเขาเหนือหาดกมลา และหาดป่าตอง อำเภอกระทุ้ง จังหวัดภูเก็ต

## กลุ่มการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

### อุปกรณ์

- 2.1 ชุดเครื่องมือทดสอบ ชีดจำกัดความชื้นเหลวของดิน (Atterberg's Limit Test) ตาม ASTM D4318-98
  - 2.2 ชุดเครื่องมือทดสอบ ความถ่วงจำเพาะของดิน (Specific Gravity Test) ตาม ASTM D854-98
  - 2.3 ชุดเครื่องมือทดสอบ การกระจายตัวของเม็ดดิน (Grain Size Distribution Test) ตาม ASTM D422-63
  - 2.4 ชุดเครื่องมือทดสอบหาแรงเฉือน (Direct Shear Test) ตาม ASTM D3080-90
- พร้อมชุดอุปกรณ์ LVDT
- 2.5 เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์

### สถานที่วิจัย

ห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

## กลุ่มการวิเคราะห์ข้อมูล

### อุปกรณ์

- 3.1 โปรแกรม FEM สำหรับวิเคราะห์การไหลซึม
- 3.2 โปรแกรม Arcview GIS

### สถานที่วิจัย

ห้องปฐพีกลศาสตร์ชั้นสูง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

## วิธีดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนหลักของการวิจัย แสดงในภาพที่ 47 ซึ่งมีรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

### กลุ่มการดำเนินงานในภาคสนาม

#### การรวบรวมข้อมูลพื้นฐานเบื้องต้น

ในการดำเนินงานวิจัยนี้ การรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากข้อมูลที่ได้จะใช้ในการวางแผนการดำเนินงาน รวมถึงการกำหนดขอบเขตของงานทั้งหมดด้วย โดยได้ทำการรวบรวมข้อมูลในด้านต่าง ๆ ดังนี้

1. ลักษณะภูมิประเทศจากแผนที่ 1:50,000 ของกรมแผนที่ทหาร
2. ภาพถ่ายทางอากาศจังหวัดภูเก็ต
3. ลักษณะทางธรณีวิทยา และชนิดกลุ่มดิน ในบริเวณฝั่งตะวันตกของจังหวัดภูเก็ต จากแผนที่ธรณีวิทยาระวางภูเก็ต มาตราส่วน 1:250,000 กรมทรัพยากรธรณี (2528)
4. ข้อมูลน้ำฝนจากสถานีวัดน้ำฝน 564201 จังหวัดภูเก็ต ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1981 จนถึงปี 2004
5. ข้อมูลการพิบัติของลาดดินในจังหวัดภูเก็ต

จากการรวบรวมข้อมูลพื้นฐานเบื้องต้น ทั้งลักษณะทางธรณีวิทยา ข้อมูลการพิบัติของลาดดิน บ่งชี้ได้ว่าทางด้านตะวันตกของจังหวัดภูเก็ตในบริเวณหาดกมลา หาดป่าตอง และหาดกระตะกระรน เป็นพื้นที่ที่น่าสนใจในการกำหนดเป็นพื้นที่ต้นแบบในการศึกษาสำหรับงานวิจัยนี้



ภาพที่ 47 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

## การสำรวจพื้นที่เบื้องต้น

เมื่อได้ศึกษาและรวบรวมข้อมูลต่าง ๆ แล้ว การสำรวจพื้นที่เบื้องต้นเป็นการยืนยันข้อมูลเหล่านั้น โดยคุณลักษณะการเกิดลาดดินถล่ม ชนิดของกลุ่มดิน รวมถึงการสอบถามชาวบ้านถึงลักษณะการตกของฝนก่อนการเกิดการพิบัติของลาดดิน เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวางแผนการทำงานในขั้นต่อไป

## พื้นที่ต้นแบบ

ในงานวิจัยนี้ เน้นการศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงของลาดดินที่มีโอกาสเกิดการถล่ม ดังนั้นการคัดเลือกพื้นที่ต้นแบบจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากพื้นที่ต้นแบบเป็นเสมือนตัวแทนของพื้นที่ที่มีโอกาสเกิดการพิบัติของลาดดิน และใช้ในการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมของลาดดิน เพื่อศึกษาและติดตามผลการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรมของลาดดิน พร้อมด้วยการเก็บตัวอย่างดินและนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ หน้าที่เหล่านี้เพื่อให้ได้คุณสมบัติในด้านต่าง ๆ ของดินที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป

## การตรวจวัดในสนาม

ภายหลังจากการคัดเลือกพื้นที่ต้นแบบ จึงทำการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมของลาดดินในสนาม อันได้แก่ การติดตั้ง Tensiometer, Rain gauge with datalogger และ Inclinator อุปกรณ์เหล่านี้ใช้สำหรับการติดตามการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำในมวลดินซึ่งมีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกำลังรับแรงในรูปแบบของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ และยังทำหน้าที่ติดตามการตกของฝนซึ่งมีผลกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในมวลดิน และการติดตามเคลื่อนตัวของลาดดินในช่วงเวลาต่าง ๆ

การเก็บข้อมูลจากการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมในสนามเป็นสิ่งที่ต้องทำต่อเนื่อง หลังจากการติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ แล้วเสร็จเป็นระยะเวลาประมาณ 14 เดือน (ตามกำหนดเวลาในการทำงานวิจัย) โดยความถี่ในการเก็บข้อมูลต่าง ๆ นั้นไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับชนิดและความสามารถในการทำงานของเครื่องมือต่าง ๆ

## 1. Tensiometer

Tensiometer เป็นเครื่องมือวัดแรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric Suction) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้กำลังรับแรงของดินเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำในมวลดิน ซึ่งเกิดจากการตกของฝน และการเปลี่ยนแปลงของกำลังรับแรงของดินนี้ก็เป็นผลให้เกิดการพืดของลาดดินได้

ดินในแต่ละระดับความลึกมีปริมาณน้ำในมวลดินไม่เท่ากัน เนื่องจากคุณสมบัติด้านกายภาพและด้านการไหลซึมของดินมีความแตกต่างกัน จึงจำเป็นต้องทำการติดตั้ง Tensiometer ไว้ที่ระดับความลึกต่าง ๆ ในบ่อสังเกตการณ์ (Observation Pit) ในทั้งสองพื้นที่ดินแบบ พร้อมทั้งเปรียบเทียบข้อมูลที่ตรวจวัดได้กับข้อมูลน้ำฝนที่ได้ทำการติดตั้งเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนอัตโนมัติ (Raingauge with Datalogger) พร้อมกันไว้ที่อาคารถาวรใกล้เคียงกับพื้นที่ดินแบบ ภาพที่ 48 แสดงการติดตั้ง Tensiometer ในบ่อสังเกตการณ์



ภาพที่ 48 การติดตั้ง Tensiometer สำหรับวัดแรงดึงน้ำในมวลดิน

การเก็บข้อมูล Tensiometer ในสนาม ใช้วิธีการอ่านข้อมูลจาก Gauge ที่อยู่บริเวณส่วนบนของตัว Tensiometer ซึ่งข้อมูลที่อ่านได้เป็นค่าแรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric suction) โดยกำหนดให้ใช้ระยะเวลา 3 วัน ต่อการอ่านข้อมูล 1 ครั้ง เนื่องจากข้อจำกัดในการจ้างแรงงานในพื้นที่ทำงาน พร้อมกันนี้ต้องทำการเก็บตัวอย่างดินเพื่อหาปริมาณความชื้น ณ ตำแหน่งความลึกต่าง ๆ ของ Tensiometer ด้วย

ข้อมูลที่ได้จากการทำงานข้างต้นนี้ เป็นข้อมูลที่แสดงความสัมพันธ์ของ Soil water characteristic curve (กำลังรับแรงที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณน้ำในมวลดิน)

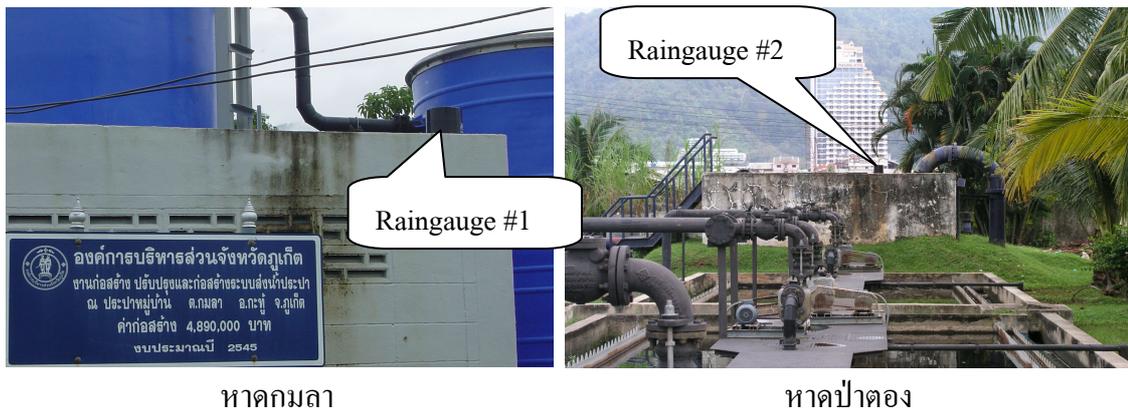
## 2. Raingauge with Datalogger

Raingauge เป็นอุปกรณ์สำหรับใช้วัดปริมาณน้ำฝนซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดลาดดินถล่มในทุก ๆ พื้นที่ โดยค่าที่วัดได้ทำให้ทราบถึงรูปแบบของการตกของฝนที่ก่อให้เกิดปัญหาดังกล่าว Raingauge ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นชนิดที่สามารถบันทึกปริมาณฝนได้เป็นรายนาที่ ด้วย Datalogger ที่บรรจุภายในตัว Raingauge (ภาพที่ 49) สามารถบันทึกข้อมูลได้มากติดต่อกันเป็นระยะเวลาประมาณ 1 ปี ทำให้ทราบถึงรูปแบบการตกของฝนได้อย่างชัดเจน และนำมาใช้วิเคราะห์หาสาเหตุการเกิดแผ่นดินถล่มได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 49 แสดงอุปกรณ์ต่าง ๆ ของ Raingauge with Datalogger

ในการติดตั้ง Raingauge with Datalogger นั้น จะต้องทำการติดตั้งในพื้นที่ที่โล่ง ไม่มีสิ่งกีดขวางการตกของน้ำฝนที่จะทำให้การเก็บข้อมูลมีการผิดพลาดได้ ดังแสดงในภาพที่ 50



ภาพที่ 50 การติดตั้ง Rain gauge with Datalogger บริเวณข้างเคียงพื้นที่ต้นแบบ

การเก็บข้อมูลใช้วิธีการ Download ข้อมูลลงคอมพิวเตอร์จาก Datalogger ได้ โดยจากการวางแผนงานวิจัยใช้ระยะเวลา 6 เดือน เก็บข้อมูล 1 ครั้ง

### 3. Inclinator

Inclinator ใช้สำหรับตรวจวัดการเคลื่อนตัวของลาดดินที่เกิดขึ้น ณ ความลึกต่าง ๆ ข้อมูลการเคลื่อนตัวของชั้นดินที่ได้นี้เป็นข้อมูลที่บ่งชี้ให้เห็นแนวโน้มของการพิบัติได้เป็นอย่างดี

ภาพที่ 51 แสดงการติดตั้ง Inclinator ซึ่งประกอบด้วยท่อ PVC เส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว ติดตั้งโดยการเจาะดินด้วยสว่านมือ (Hand Auger) ลงไปจนถึงชั้นดินที่แข็งพอที่จะไม่เคลื่อนตัวเมื่อเกิดการพิบัติ ช่องว่างของหลุมเจาะกับท่อ PVC ต้องถูกอัดแน่นด้วยทรายและซีเมนต์ เพื่อให้มั่นใจว่าท่อ PVC ที่ฝังไว้จะไม่หลวมคลอนได้ เวลาตรวจวัดการเคลื่อนตัวของชั้นดิน จะทำโดยการหย่อนหัววัดลงไปในทิศทางและทุกๆ ช่วงความลึกที่ต้องการวัดค่าการเคลื่อนตัวของชั้นดินสัมพันธ์กับปลายท่อ PVC ที่ต้องมั่นใจว่าเป็นจุดที่ยึดแน่น ไม่เคลื่อนที่ตามชั้นดิน



ภาพที่ 51 การติดตั้ง Inclinometer บริเวณพื้นที่ดินแบบหาดป่าตอง

ในงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดในการทำงาน ทำให้มีอุปสรรคไม่สามารถติดตั้ง Inclinometer ได้ในพื้นที่ดินแบบหาดกมลาเนื่องจากลักษณะดินเป็นดินเหนียวปนกรวด การเจาะดินด้วยสว่านมือทำได้ยากมาก และการติดตั้ง Inclinometer ในพื้นที่ดินแบบหาดป่าตองที่ลักษณะดินเป็นดินเหนียวปนทราย สามารถเจาะดินได้ความลึกประมาณ 3.50 เมตรซึ่งยังไม่ถึงชั้นดินแข็งแต่ข้อมูลที่ได้น่าจะเป็นประโยชน์สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลการเคลื่อนตัวของดินได้ โดยระยะเวลาในการเก็บข้อมูลเดือนละ 1 ครั้ง

#### การเก็บตัวอย่างพร้อมทดสอบคุณสมบัติดินในสนาม

ในการขุดบ่อสังเกตการณ์ (Observation Pit) เพื่อติดตั้ง Tensiometer นั้นได้ทำการเก็บตัวอย่างดินเพื่อนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการไปพร้อม ๆ กัน โดยการจำแนกชั้นดินด้วยสายตา ในขณะที่ขุดบ่อและเก็บตัวอย่างที่ระดับความลึกต่าง ๆ พร้อมด้วยการทดสอบ Pocket penetration test สำหรับพื้นที่ดินแบบทั้ง 2 แห่ง ได้ทำการเก็บตัวอย่างดิน 2 บริเวณด้วยกัน คือ บริเวณบ่อสังเกตการณ์ (Observation Pit) และบริเวณของลาดดินถล่ม โดยมีจำนวนตัวอย่างดังในตารางที่ 8 และ ตารางที่ 9

ตารางที่ 8 จำนวนตัวอย่างดินของพื้นที่ต้นแบบหาดกมลา

บ่อสังเกตการณ์ (Observation pit)	Depth (m)				
	0.40	0.80	1.20	2.00	2.80
จำนวนตัวอย่าง Undisturbed	15 PVC		15 PVC		
จำนวนตัวอย่าง Disturbed	2 kg	2 kg	2 kg	2 kg	2 kg
แนวขุดเปิดลาดดิน	Depth (m)				
	2.00	5.00R	5.00L	13.00	
จำนวนตัวอย่าง Undisturbed	15 PVC	15 PVC	15 PVC	15 PVC	
จำนวนตัวอย่าง Disturbed	2 kg	2 kg	2 kg	2 kg	

ตารางที่ 9 จำนวนตัวอย่างดินของพื้นที่ต้นแบบหาดป่าตอง

บ่อสังเกตการณ์ (Observation pit)	Depth (m)							
	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	
จำนวนตัวอย่าง Undisturbed	15 PVC							
จำนวนตัวอย่าง Disturbed	2 kg	2 kg	2 kg	2 kg	2 kg	2 kg	2 kg	
แนวลาดพิบัติดิน	Depth (m)							
	1.80	4.00	7.00	10.00				
จำนวนตัวอย่าง Undisturbed	15 PVC	15 PVC	15 PVC	15 PVC				
จำนวนตัวอย่าง Disturbed	2 kg	2 kg	2 kg	2 kg				

ในการเก็บตัวอย่างเพื่อทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ นั้น แบ่งการเก็บตัวอย่างดินเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นตัวอย่างคงสภาพ (Undisturbed Sample) สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน และ ตัวอย่างแปรสภาพ (Disturbed sample) สำหรับการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆ

ในส่วนที่เป็นตัวอย่างคงสภาพ (Undisturbed samples) ทำการเก็บตัวอย่างดินด้วย กระจบอกเก็บตัวอย่าง KU-mini sampler ภายในเป็น PVC ทรงกระจบอกมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว

สูง 2 นิ้ว หนา 1.40 มม. ลักษณะของอุปกรณ์เก็บตัวอย่าง PVC บรรจุอยู่ในกระบอกลูก Stainless Steel ออกแบบมาเพื่อเก็บตัวอย่างคงสภาพ (Undisturbed Sample) คล้ายการเก็บตัวอย่างด้วยกระบอกลูกเก็บตัวอย่างเปลือกบาง มีค่า Area Ratio 13% กระบอกลูกเก็บตัวอย่างลักษณะนี้ได้ออกแบบเป็นพิเศษ เพื่อความสะดวกในการนำตัวอย่างดินมาทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในห้องปฏิบัติการแบบ Direct shear Test แล้วทำการจัดเก็บตัวอย่างดินโดยการเคลือบ wax และห่อด้วยพลาสติกกันกระแทกในกล่องโฟม เพื่อให้เกิดการสะท้อนให้น้อยที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 52 และส่วนที่เป็นตัวอย่างแปรสภาพ (Disturbed Samples) เพื่อความสะดวกและประหยัดเวลาในการเก็บตัวอย่าง จะเก็บตัวอย่างดินประมาณตัวอย่างละ 2 กิโลกรัมในถุงพลาสติก เพื่อใช้ในการทดสอบสมบัติขั้นพื้นฐานต่าง ๆ ของดิน เช่น Atterberg 's Limit, Specific Gravity, Gradation Test, Sieve Analysis



ภาพที่ 52 การเก็บตัวอย่างดินคงสภาพ

การทดสอบคุณสมบัติดินในสนาม ทำการทดสอบด้วยการหยั่งชั้นดินด้วย Kunzelstab Penetrometer Test หรือวิธี Light Ram Sounding Test อ้างอิงมาตรฐาน DIN 4094 (Swedish Geotechnical Institute) ในบริเวณใกล้เคียงกับบ่อสังเกตการณ์ ที่ความสูงต่าง ๆ ของหน้าตัดพื้นที่ต้นแบบ เพื่อให้ได้กำลังรับแรงของดินที่ความลึกต่าง ๆ โดยการทดสอบจะมีระยะยกของค้อน 50 เซนติเมตร แล้วนับจำนวนครั้งของการตอกทุกระยะ 20 เซนติเมตร (blows/20 cm.) ดังแสดงในภาพที่ 53 วิธีการหยั่งทดสอบนี้สามารถนำไปใช้ได้อย่างกว้างขวาง ซึ่งวิธีนี้สามารถเคลื่อนย้ายได้ง่ายเนื่องจากมีน้ำหนักเบาจึงเหมาะกับบริเวณภูเขาสูง ป่ารก หรือบริเวณที่ห่างจากถนนมากๆ วิธีนี้ทำได้อย่างรวดเร็วและประหยัดกว่าการเจาะสำรวจ ผลของการหยั่งก็ยังสามารถบอกให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของชั้นดินนั้นได้



ภาพที่ 53 การทดสอบดินในสนามด้วยวิธี Kunzelstab Penetrometer Test

### กลุ่มการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบดินในห้องปฏิบัติการ แบ่งตามขั้นตอนการเก็บตัวอย่างดินเป็น 2 ส่วน คือ ดินจากการเก็บตัวอย่างในขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์สนาม และดินจากบ่อสังเกตการณ์ที่เก็บขณะอ่านข้อมูลจาก Tensiometer ซึ่งเป็นการติดตามผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นของลาดดินจากพื้นที่ต้นแบบทั้ง 2

### การทดสอบดินจากการเก็บตัวอย่างในสนาม

การทดสอบดินในห้องปฏิบัติการสำหรับดินจากการเก็บตัวอย่างในสนามนี้ เป็นการทดสอบดินจากการเก็บตัวอย่างในขณะที่ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดพฤติกรรมในสนาม ทั้งตัวอย่างคงสภาพ (Undisturbed samples) และตัวอย่างแปรสภาพ (Disturbed samples) โดยมีรายละเอียดการทดสอบดังนี้

## 1. การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพทดสอบเพื่อการจำแนกดิน และการกระจายขนาดเม็ดดินที่เกิดจากการพิบัติของลาดดิน เพื่อหาคุณสมบัติพื้นฐานของดินเพื่อเป็นตัวแทนของลาดดินธรรมชาติ โดยมีการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ดังนี้

- 1.1 ทดสอบ Atterberg's Limit (ASTM D4318)
- 1.2 ทดสอบความถ่วงจำเพาะ (ASTM D854)
- 1.3 ทดสอบความชื้น (ASTM D2216)
- 1.4 ทดสอบขนาดคละของดิน (ASTM D422)

## 2. การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม

การทดสอบหาคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงเฉือนของดินด้วยวิธี Direct Shear Test แบบ Consolidated Drained โดยในการทดสอบจะแบ่งเป็น 2 แบบคือ การทดสอบโดยทั่วไปปกติที่เรียกว่า Conventional และแบบที่สองเป็นการทดสอบแบบ KU-MDS (Multi-stage direct shear test) ซึ่งการทดสอบนี้เหมาะกับกรณีที่มีตัวอย่างมีจำนวนน้อยและตัวอย่างดินไม่สม่ำเสมอ

### การทดสอบดินจากการติดตามผลการเปลี่ยนแปลงความชื้น

การทดสอบดินจากการติดตามผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นในมวลดินเป็นสิ่งที่มีความสำคัญในงานวิจัยนี้ ที่ทำการศึกษาดินในกลุ่มของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated soil) โดยการมุ่งเน้นงานภาคสนามสำหรับการศึกษาความสัมพันธ์ของแรงดึงน้ำในมวลดิน (Matrix suction) และความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในสภาพธรรมชาติ ซึ่งมีผลให้เกิดการพิบัติของลาดดินในธรรมชาติ

ในการติดตามผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นในมวลดิน เมื่อทำการติดตั้ง Tensiometer ที่ระดับความลึกต่าง ๆ ในบ่อสังเกตการณ์แล้ว จะทำการเจาะช่องเล็ก ๆ ที่ระดับเดียวกันกับ Tensiometer สำหรับเก็บตัวอย่างดินมาทดสอบหาปริมาณความชื้น โดยในขณะที่เก็บตัวอย่างจะอ่านค่าจาก Tensiometer ไปพร้อม ๆ กัน เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องของอุปกรณ์การทดสอบในพื้นที่

ต้นแบบ จึงใช้วิธีการชั่งน้ำหนักตัวอย่างดินทันทีหลังการเก็บตัวอย่างในพื้นที่ต้นแบบ และทำการส่งตัวอย่างดินไปทดสอบหาปริมาณความชื้นในห้องปฏิบัติการ

ผลลัพธ์ที่ได้จากการติดตามผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นและข้อมูลจากการอ่านค่าจาก Tensiometer สามารถแสดงได้ในรูปของ Soil water characteristic curve ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีความสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลซึมด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

### กลุ่มการวิเคราะห์ข้อมูล

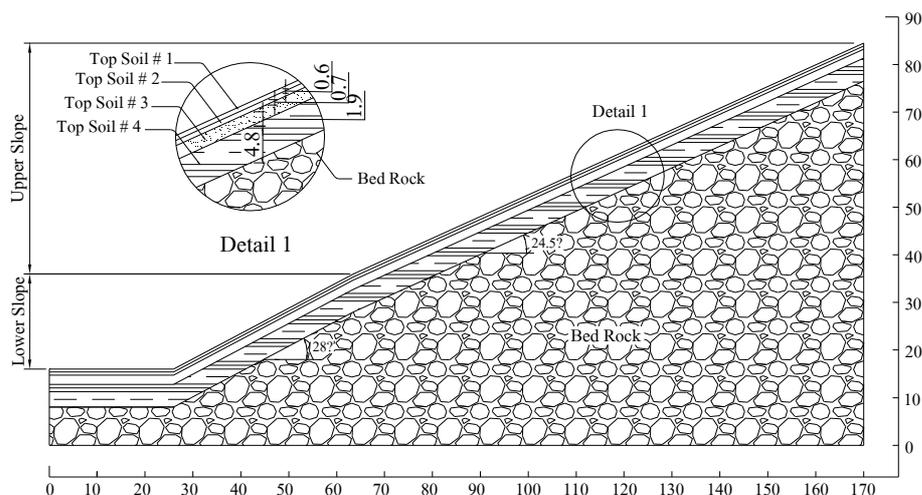
#### การวิเคราะห์ข้อมูลจากการติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมลาดดิน

เนื่องจากการติดตั้งอุปกรณ์สนามทั้ง 3 ชนิด (Tensiometer, Rain gauge with datalogger และ Inclinator) มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน และผลจากการตรวจวัดนี้ยังเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่เชื่อมโยงไปถึงการพิบัติของลาดดินได้ โดยทำให้ทราบถึงการเคลื่อนตัวของลาดดินและกำลังรับแรงที่เปลี่ยนแปลงไปอันเนื่องมาจากปริมาณฝนที่ตก

#### การวิเคราะห์การไหลซึมของลาดดิน

การวิเคราะห์การไหลซึมของลาดดิน เป็นการศึกษาลักษณะการไหลซึมของปริมาณฝนในระยะเวลาต่าง ๆ ที่ระดับความลึกที่แตกต่างกัน ซึ่งเมื่อนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน จะทำให้ทราบถึงปริมาณน้ำในมวลดินที่ทำให้ดินเกิดการพิบัติได้ โดยข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่สำคัญแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ และปริมาณฝนที่ตกในพื้นที่

แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ ประกอบด้วย หน้าตัดแบบจำลอง และข้อมูลชั้นดิน โดยหน้าตัดแบบจำลองได้จากการสำรวจภูมิประเทศด้วยกล้อง Theodolite การทดสอบในสนาม และในห้องปฏิบัติการ ดังแสดงในภาพที่ 54 และในส่วนของข้อมูลชั้นดินก็ประกอบไปด้วย Soil water characteristic curve ของดินในชั้นต่าง ๆ ที่ได้จากการติดตั้งและเก็บข้อมูลด้วย Tensiometer และ Permeability function ได้จากการเทียบเคียงจากผลการทดสอบดินที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับดินตัวอย่าง



ภาพที่ 54 หน้าตัดแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์การไหลซึม

ในส่วนของปริมาณฝนที่ใช้ในการวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือปริมาณฝนคงที่ตลอดเวลา (Steady State) ทำการวิเคราะห์เพื่อใช้เป็นปริมาณน้ำตั้งต้นในมวลดิน และรูปแบบน้ำฝนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient) โดยทำการวิเคราะห์การไหลซึมที่ความเข้มต่างๆ (Intensity) กับปริมาณฝนที่รอบปีการเกิดซ้ำต่างๆ (Return Period) และช่วงเวลาที่ฝนตก (Duration) โดยจะมีสมมุติฐานสำหรับการวิเคราะห์การไหลซึมดังนี้

1. การแบ่งชั้นดินแบ่งเป็น 5 ชั้นคือ ดินชั้นที่ 1 ดินชั้นที่ 2 ดินชั้นที่ 3 ดินชั้นที่ 4 และชั้นหิน โดยมีค่า Soil-Water Characteristic Curve เป็นไปตามที่ทำการตรวจวัดในบ่อสังเกตการณ์ และรูปแบบ Permeability Function เหมือนกันตลอดความลึกของแต่ละชั้นดินเนื่องจากการกระจายตัวของเม็ดดินมีลักษณะใกล้เคียงกัน
2. ชั้นดินและหินมีคุณสมบัติความซึมผ่านแบบต่อเนื่อง (Continuum Permeability) ที่มีค่าเท่ากันไม่ขึ้นกับทิศทาง (Isotropic Permeability)
3. การไหลเป็นแบบ Unconfined Flow
4. หน้าตัดของการวิเคราะห์เป็นแบบ Plan Strain โดยพิจารณาการไหลเพียง 2 มิติ
5. ปริมาณน้ำฝนกระจายสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัด
6. บริเวณด้านบนของลาดดินกำหนดให้เป็นยอดเขา ( $Q=0$ )

## การวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดิน

การวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดิน ทำโดยวิธีวิเคราะห์แบบลาดอนันต์ (Infinite Slope) เพื่อหาค่าความปลอดภัย (Factor of Safety) ของพื้นที่ลาดชัน ที่เปลี่ยนแปลงไปตามระดับความอิ่มตัวของน้ำในมวลดินที่มีอิทธิพลจากน้ำฝน และการไหลซึมในมวลดิน

## การประยุกต์ใช้งานในพื้นที่

ในการประยุกต์ใช้งานในพื้นที่จังหวัดภูเก็ตนั้น จะทำการสร้างกราฟปริมาณฝนวิกฤติ (Critical rainfall envelope) เพื่อใช้สำหรับการตรวจสอบเสถียรภาพของลาดดินเมื่อเกิดฝนตกโดยการใช้ปริมาณฝนเป็นตัวบ่งชี้ ข้อดีของการประยุกต์ใช้วิธีนี้คือ ง่ายในการใช้งานและการทำความเข้าใจ ผู้ใช้ไม่ต้องมีความรู้ทางด้านวิศวกรรมก็สามารถตรวจสอบเองได้โดยการจดบันทึกข้อมูลฝนทุกวัน และผู้ใช้อยังสามารถใช้เตือนภัยหรือเตรียมตัวล่วงหน้าก่อนเกิดลาดดินถล่มได้อีกด้วย โดยการพิจารณาตรวจสอบปริมาณฝนที่ตกในวันที่พิจารณากับปริมาณฝนสะสมในวันก่อนหน้า ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่า การพังทลายของลาดดินเกิดจากปริมาณฝนสะสมไม่เกิดขึ้นในพื้นที่ทันที ภายหลังจากฝนตกหนัก

## ผลและวิจารณ์

ผลและวิจารณ์แบ่งออกเป็นกลุ่มงานใหญ่ ๆ 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มการดำเนินงานในภาคสนาม กลุ่มการทดสอบในห้องปฏิบัติการและกลุ่มการวิเคราะห์ข้อมูล โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

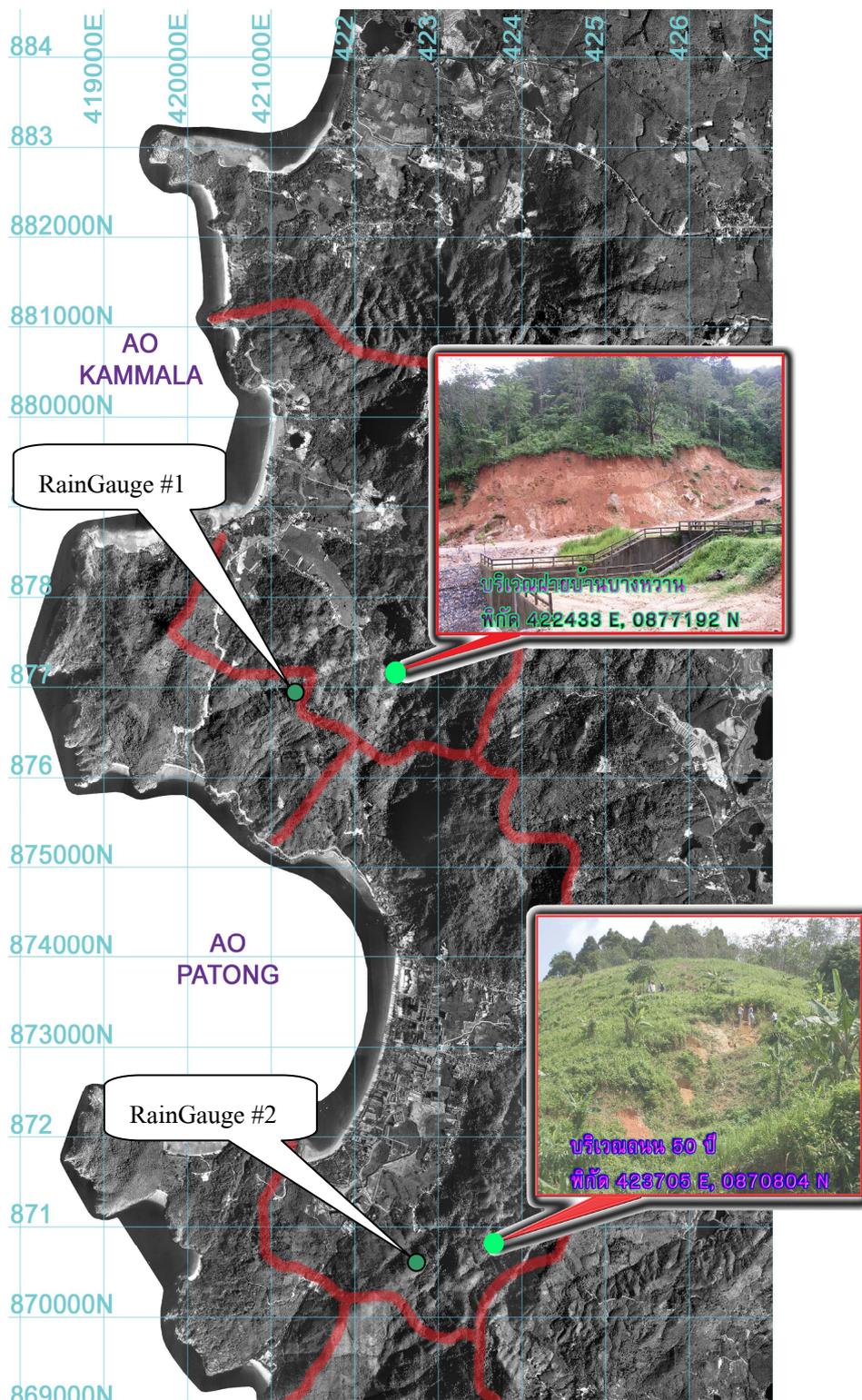
### กลุ่มการดำเนินงานในภาคสนาม

#### พื้นที่ต้นแบบ

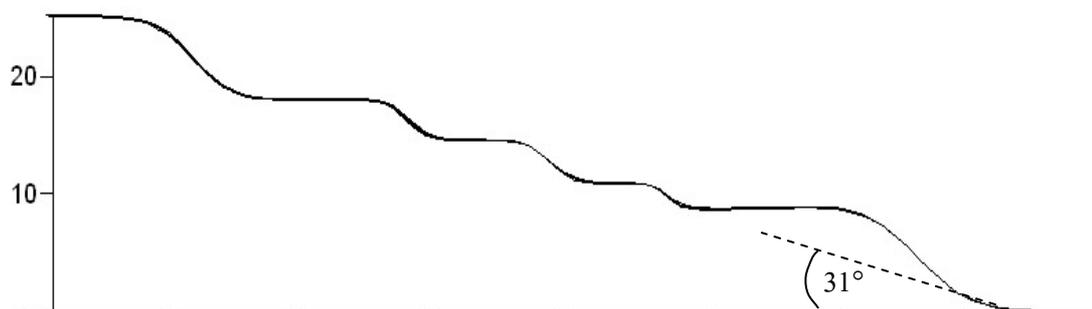
พื้นที่ต้นแบบที่ทำการคัดเลือกไว้มี 2 พื้นที่ โดยพิจารณาจากพื้นที่ที่คาดว่าเคยเกิดแผ่นดินถล่มขึ้นมาก่อนในอดีต และมีโอกาสที่จะเกิดลาดดินถล่มได้หากเกิดฝนตกหนัก ตำแหน่งที่ตั้งแสดงในภาพที่ 55 มีรายละเอียดดังนี้

1. บริเวณไหล่เขาเหนือหาดกมลา ช้างฝายน้ำล้นบ้านบางหวาน ตำบลกมลา เขตอำเภอเกาะทุ่ง จังหวัดภูเก็ต ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการขุดเปิดหน้าดิน เพื่อนำดินไปใช้ในการก่อสร้างฝายทดน้ำบ้านบางหวาน ในบริเวณนี้บางจุดเกิดการพิบัติเนื่องจากการขุดเปิดหน้าดินและการพิบัติของลาดธรรมชาติที่อยู่ทางด้านเหนือน้ำขึ้นไปจากฝนตกหนักปี พ.ศ. 2544 ลักษณะพื้นที่โดยทั่วไปเป็นป่าไผ่ยางพารา ลักษณะดินแบ่งเป็น 2 ชั้น คือส่วนบนประมาณ 1.50 เมตร เป็นดินเหนียวมีกรวดผสม และถัดจากนั้นลงไปเป็นดินทรายสีน้ำตาล มีความลาดชันประมาณ 31 องศา ดังแสดงในภาพที่ 56

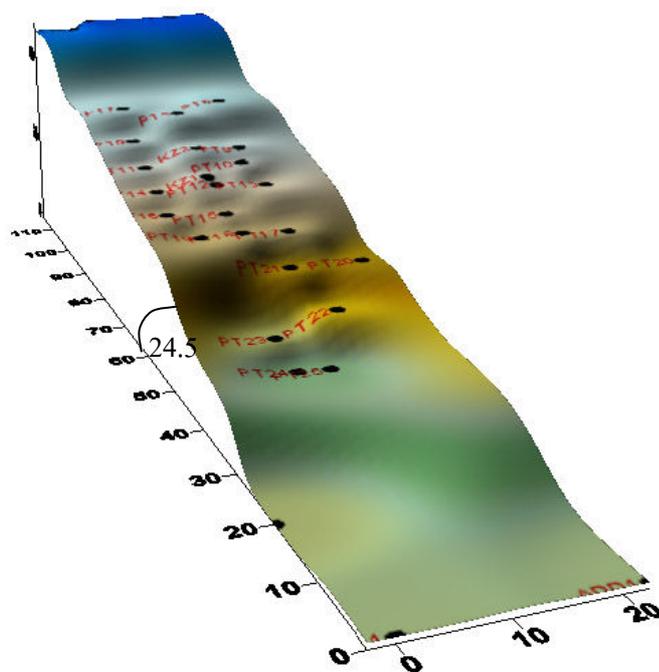
2. บริเวณไหล่เขาเหนือหาดป่าตอง ริมถนนห้าสิบปี ตำบลป่าตอง เขตอำเภอเกาะทุ่ง จังหวัดภูเก็ต ในบริเวณลาดเขานี้มีบางส่วนเกิดการพิบัติของลาดดินแล้ว และยังหลงเหลือร่องรอยของการพิบัติอยู่ ลักษณะภูมิประเทศมีดินไม่เล็ก ๆ ขึ้นปกคลุมทั่วบริเวณ และลักษณะดินจะเห็นว่าส่วนบนเป็นดินเหนียวปนทรายมีไมก้าเป็นแผ่นเล็ก ๆ ปนอยู่เล็กน้อย ถัดจากส่วนนี้เป็นดินทรายสีน้ำตาล คล้าย Granitics Soil มีความลาดชันของพื้นที่ประมาณ 24.5 องศา ดังภาพที่ 57



ภาพที่ 55 ตำแหน่งที่ตั้งของพื้นที่ต้นแบบ



ภาพที่ 56 ลักษณะพื้นที่ดินแบบบริเวณไหล่เขาเหนือหาดกมลา (KML)

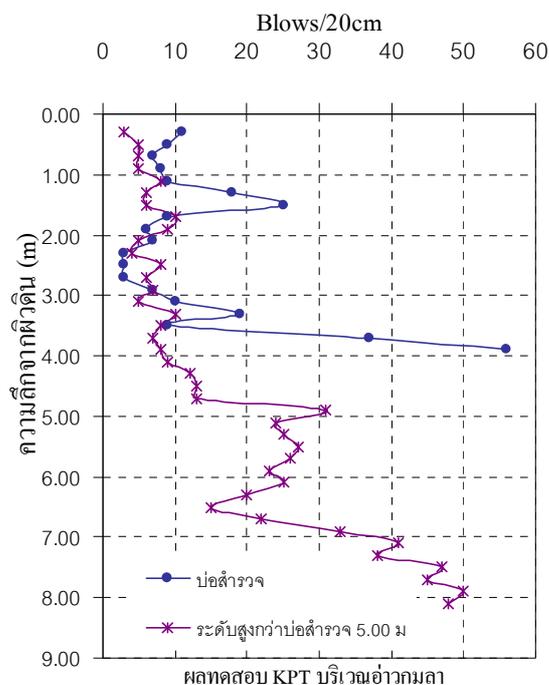


ภาพที่ 57 ลักษณะพื้นที่ดินแบบบริเวณไหล่เขาเหนือหาดป่าตอง (PT)

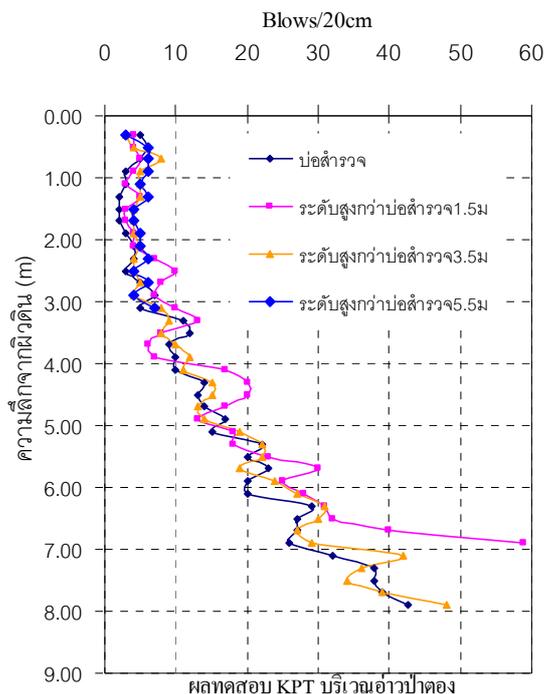
### การหยั่งทดสอบ Kunzelstab Penetrometer

การทดสอบ Kunzelstab Penetration หรือวิธี Light Ram Sounding Test เป็นวิธีการหยั่งทดสอบชั้นดินในสนามโดยใช้แรงกระแทกส่งแท่งทดสอบผ่านชั้นดินลงไป ซึ่งแรงต้านการเคลื่อนที่ของแท่งทดสอบสามารถใช้ประมาณค่ากำลังและความหนาของชั้นดินได้

การสำรวจโดยการหยั่งชั้นดินใน 2 พื้นที่ต้นแบบ ซึ่งยากที่จะนำอุปกรณ์ขนาดใหญ่เข้าในพื้นที่ ทำให้เลือกใช้ Kunzelstab Penetration Test สามารถทำการหยั่งทดสอบได้จนถึงความลึกประมาณ 8-9 เมตร มีผลการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 58 และ ภาพที่ 59



ภาพที่ 58 ผลการหยั่งทดสอบชั้นดินของพื้นที่เหนือหาดกมลา (KML)



ภาพที่ 59 ผลการหยังทดสอบชั้นดินของพื้นที่เหนือหาดป่าตอง (PT)

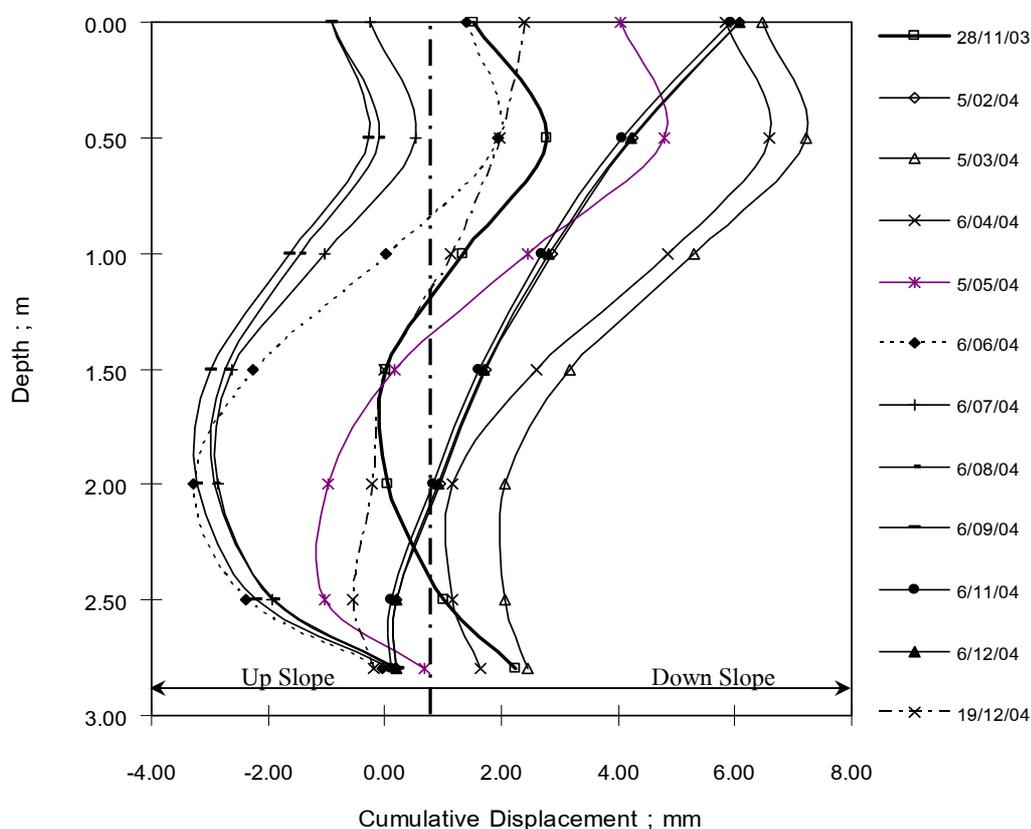
- ผลการหยังทดสอบในพื้นที่เหนืออ่าวกมลา พบชั้นดินหลวมมากถึงหลวม (Very Loose to Loose) อยู่ชั้นบนจนถึงความลึกประมาณ 2.50 เมตร มีค่า KPT  $\approx 3 - 10$  blows/20cm และพบชั้นดินแน่นปานกลาง (Medium) ที่ความลึกประมาณ 5.00 เมตรลงไป
- ผลการหยังทดสอบในพื้นที่เหนืออ่าวป่าตอง พบชั้นดินหลวมมากถึงหลวม (Very Loose to Loose) จากผิวดินจนถึงความลึกที่ประมาณ 2.00 เมตร (KPT  $\approx 3-8$  blows/20cm) และดินมีความแน่นขึ้นเรื่อยๆ ตามความลึก

จากผลการทดสอบ KPT สามารถนำมาพิจารณาความแข็งแรงของชั้นดินได้ว่า ในส่วนบนของลาดดินพบชั้นดินหลวมมากถึงหลวมอยู่ที่ความลึกประมาณ 1.00-2.00 เมตร ด้านล่างของลาดดินไม่พบชั้นหินที่ชัดเจน แต่ลาดดินมีแนวโน้มแข็งแรงมากขึ้นเมื่อชั้นดินลึกมากขึ้น บริเวณพื้นที่อ่าวกมลา ผลการทดสอบแสดงให้เห็นผลการหยังที่อาจพบชั้นหินลอยเป็นช่วงๆ ที่ไม่สามารถทดสอบลงไปได้ ผลการหยังนี้เป็นผลการทดสอบด้านกำลังของดินแบบเป็นช่วงๆ ตามความลึกสามารถใช้ประกอบกับผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในห้องปฏิบัติการของตัวอย่างดินที่ถูกเก็บแบบไม่ถูกรบกวนด้วยกระบอกเปลือกบางได้

เมื่อนำกำลังที่ได้ผลการทดสอบมาพิจารณาเพื่อให้เชื่อมโยงถึงการพิบัติของลาดดิน พบว่าลาดดินในช่วงความลึกไม่เกิน 2.50 เมตร มีโอกาสที่จะเกิดการพิบัติสูง เนื่องจากเป็นชั้นดินที่มีกำลังรับแรงต่ำกว่าชั้นอื่น ๆ ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลการพิบัติในสนาม

### การตรวจวัดการเคลื่อนตัวของลาดดินด้วย Inclinometer

ผลการติดตามตรวจวัดการเคลื่อนตัวของลาดดินในพื้นที่ต้นแบบ (Training Area) บริเวณหาดป่าตอง ด้วย Inclinometer ได้แสดงไว้ในภาพที่ 60



ภาพที่ 60 การตรวจวัดการเคลื่อนตัวของลาดดินด้วย Inclinometer บริเวณพื้นที่หาดป่าตอง

จากการติดตามการเคลื่อนตัวของลาดดินด้วยการติดตั้ง Inclinometer ได้ทำการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของลาดดินเป็นเวลาประมาณ 1 ปี โดยเริ่มทำการติดตั้ง Inclinometer ตั้งแต่วันที่ 28 เดือนพฤศจิกายน ค.ศ. 2003 ถึงวันที่ 19 เดือนธันวาคม ค.ศ. 2004 พบว่า จากการตรวจวัดการเคลื่อนที่ตลอดระยะเวลา ลาดดินมีการเคลื่อนที่ทั้งหมดประมาณ 8 มม. ซึ่งนับว่าน้อยมากเมื่อ

เทียบกับระยะเวลาทั้งหมดประมาณ 1 ปีของการติดตามผล แต่ถ้ามาดูในรายละเอียดของการเคลื่อนตัวเป็นรายเดือน พบว่ามีความน่าสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากตั้งแต่เริ่มต้นติดตามผลจนถึงเดือน 9 ซึ่งเป็นช่วงฤดูร้อน ฝนตกน้อย ลักษณะกราฟการเคลื่อนตัวเป็นไปในทิศทางเดียวกัน และมีการเคลื่อนตัวออกจากลาดดินประมาณ 8 ม.ม. และจากกราฟในเดือน 11 จนถึงเดือน 12 ช่วงฤดูฝน ลาดดินมีการเคลื่อนตัวเข้าหาลาดดินประมาณ 5 ม.ม. ซึ่งนับว่าผิดปกติมาก แต่เมื่อนำมาทำการวิเคราะห์อย่างละเอียดแล้วพบว่า มีข้อจำกัดบางประการในการใช้ Hand Auger พร้อมทั้งความหนาแน่นของดิน ทำให้สามารถติดตั้ง Inclinator ได้ความลึกประมาณ 2.80 เมตร ซึ่งอาจไม่มากพอสำหรับให้ที่ปลาย PVC เป็นจุดยึดแน่น ทำให้ข้อมูลการเคลื่อนตัวของดินในสนามมีข้อบกพร่องบ้างบางประการ แต่สามารถสรุปได้ดังนี้ ในช่วงฤดูร้อน ลาดดินมีการเคลื่อนตัวอยู่ในช่วงต้นทำให้พบการเคลื่อนที่ดังที่กล่าวมาแล้ว แต่ในช่วงฤดูฝน ลาดดินมีการเคลื่อนที่ในระดับลึกกว่าที่ปลายท่อ PVC กราฟจึงมีลักษณะเหมือนการเคลื่อนตัวกลับเข้าหาลาดดิน

การติดตั้ง Inclinator ในงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเริ่มต้นสำหรับการตรวจวัดพฤติกรรม การเคลื่อนตัวของลาดดิน จึงยังคงมีข้อผิดพลาดบางประการ และถูกจำกัดด้วยลักษณะทาง ธรณีวิทยาของลาดดินทำให้ข้อมูลที่ได้ยังไม่สามารถนำมาใช้ในการตรวจวัดและวิเคราะห์ผลได้ อย่างมีประสิทธิภาพเพียงพอ

### การทดสอบคุณสมบัติของดินในห้องปฏิบัติการ

ผลการทดสอบคุณสมบัติของดินทั้งทางด้านกายภาพและด้านวิศวกรรม ใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการวิเคราะห์การไหลซึมและเสถียรภาพของลาดดิน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างดินที่ได้จากการสำรวจ มีวัตถุประสงค์เพื่อ จำแนกชนิดของดิน และนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมต่อไป โดย ประกอบด้วยการทดสอบ

1. Natural Water Content
2. Atterberg's limits

3. Specific gravity
4. Unit weight
5. Grain-size distribution

ผลการทดสอบตัวอย่างดินบริเวณพื้นที่ดินแบบหาดกมลา สรุปได้ดังตารางที่ 10 และผลการทดสอบตัวอย่างดินบริเวณพื้นที่ดินแบบหาดป่าตอง สรุปได้ดังตารางที่ 11

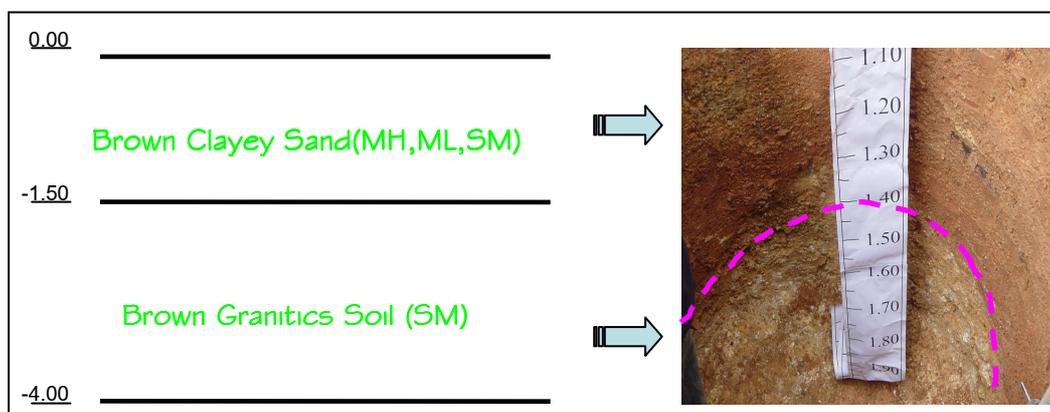
จากข้อมูลในตารางทั้งสอง พบว่าชั้นดินในพื้นที่ดินแบบหาดกมลาและหาดป่าตอง แบ่งได้เป็น 2 ชั้นดิน และมีลักษณะทางกายภาพใกล้เคียงกัน โดยในชั้นแรกมีลักษณะเป็นดินเหนียวปนทรายมีค่า PI ประมาณ 10 - 15 % และดินในชั้นที่ 2 มีลักษณะเป็น Granitics Soil (Completely decomposed granite) เป็นดิน Non Plastic ค่า Specific Gravity ประมาณ 2.65 และ  $\gamma_t$  ประมาณ 1.75 t/m<sup>3</sup> ใกล้เคียงกันทั้ง 2 ชั้น ดังภาพที่ 61 และ ภาพที่ 62

ตารางที่ 10 คุณสมบัติของตัวอย่างดินบริเวณพื้นที่ดินแบบหาดกมลา (KML)

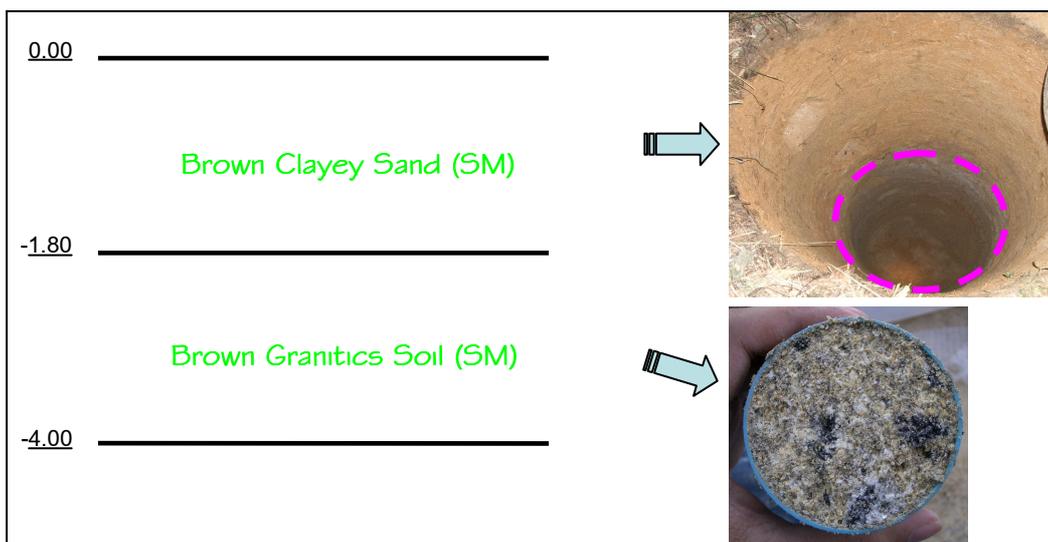
Samples	Depth m	Soil Description	USCS	Atterberg's Limits			Specific Gravity	$\gamma_t$ (t/m <sup>3</sup> )	Wn %
				LL	PL	PI			
บริเวณบ่อสังเกตการณ์									
KML_0.40T1Well	0.4	Brown Clayey Sand	MH	54.15	35.10	19.05	2.62		30.39
KML_0.80T2Well	0.8	Brown Clayey Sand	ML	47.04	31.59	15.44	2.61	1.78	24.38
KML_1.20T3Well	1.2	Red Brown Clayey Sand	SM	36.80	27.01	9.79	2.63		
KML_2.00T4Well	2.0	Brown Granitics Soil	SM	29.43	26.65	2.79	2.61	1.85	25.07
KML_2.80T5Well	2.8	Brown Granitics Soil	SM		Non Plastic		2.64		
บริเวณแนวตัดลาดดิน									
KML_2.00Cliff	2.0	Red Sand	SM	30.73	26.86	3.87	2.64	1.51	24.53
KML_5.00RCliff	5.0	Red Sand	SM		Non Plastic		2.63	1.62	30.57
KML_5.00LCliff	5.0	Red Sand	SM		Non Plastic		2.62	1.6	27.41
KML_13.00Cliff	13.0	Brown Sand	SM		Non Plastic		2.63	1.73	21.19

ตารางที่ 11 คุณสมบัติของตัวอย่างดินบริเวณพื้นที่ต้นแบบป่าตอง (PT)

Samples	Depth m	Soil Description	USCS	Atterberg's Limits			Specific Gravity	$\gamma_t$ (t/m <sup>3</sup> )	W <sub>n</sub> %
				LL	PL	PI			
บริเวณบ่อสังเกตการณ์									
PT_1.00Well	1.0	Brown Clayey Sand	SM	44.60	33.18	11.42	2.67		
PT_1.30Well	1.3	Brown Clayey Sand	SM	40.15	27.63	12.52	2.65		
PT_2.00Well	2.0	Brown Clayey Sand	SM	37.62	31.86	5.75	2.66		
PT_2.50Well	2.5	Brown Granitics Soil	SM	35.33	32.36	2.97	2.64		
PT_3.00Well	3.0	Brown Granitics Soil	SM	31.75	28.60	3.15	2.64	1.64	25.72
PT_3.50Well	3.5	Brown Granitics Soil	SM		Non Plastic		2.63		
PT_4.00Well	4.0	Brown Granitics Soil	SM		Non Plastic		2.65		
บริเวณลาดพิบัติดิน									
PT_1.80LS	1.8	Brown Clayey Sand	SM	44.29	32.05	12.24	2.64	1.78	25.41
PT_4.00LS	4.0	Brown Sand	SM	35.69	29.28	6.40	2.65	1.64	21.85
PT_7.00LS	7.0	Red Brown Sand	SM		Non Plastic		2.65	1.47	23.37
PT_10.00LS	10.0	Red Brown Sand	SM		Non Plastic		2.66	1.52	19.46



ภาพที่ 61 แสดงลักษณะชั้นดินในบริเวณพื้นที่ต้นแบบหาดกมลา



ภาพที่ 62 แสดงลักษณะชั้นดินในบริเวณพื้นที่ต้นแบบหาดป่าตอง

#### การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม

จากการทดสอบดินในห้องปฏิบัติการและในสนาม ทั้งด้านคุณสมบัติด้านกายภาพเบื้องต้น ได้แบ่งตัวอย่างดินออกเป็น 2 กลุ่ม ตามพื้นที่คือ พื้นที่ต้นแบบหาดกมลา (KML) และพื้นที่ต้นแบบหาดป่าตอง (PT) ดังตารางที่ 12 เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการคัดเลือกตัวอย่างดินมาทำการทดสอบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม

ตารางที่ 12 กลุ่มตัวอย่างดินจากพื้นที่ต้นแบบหาดกมลาและหาดป่าตอง

Location	Depth (m)	USCS	Atterberg's Limits			$\gamma_t$ ( $t/m^3$ )	Gs
			LL	PL	PI		
KML01	0 - 1.50	ML	47.04	31.59	15.44	1.800	2.612
KML02	1.50 - 8.00	SM	Non Plastic			1.779	2.607
PT01	0 - 1.80	SM	43.01	30.95	12.06	1.653	2.646
PT02	1.80 - 8.00	SM	35.10	30.53	4.57	1.667	2.638

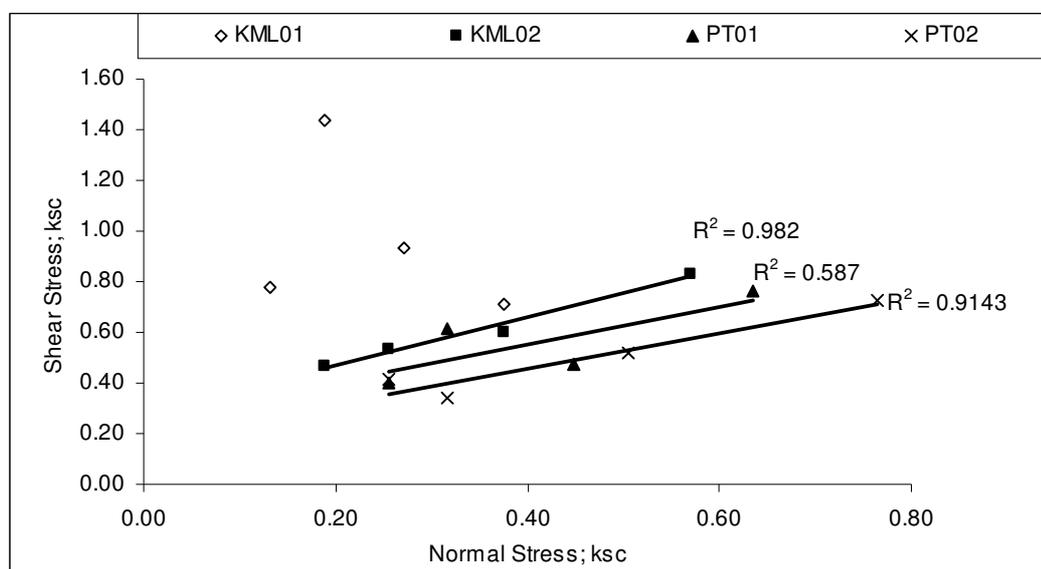
การทดสอบ Direct shear Test แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การทดสอบที่ความชื้นเริ่มต้น (Conventional Direct Shear Test) และการทดสอบที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้น แบบ Multi-stage

Direct Shear Test การทดสอบที่สภาพความชื้นเริ่มต้น พบว่าตัวอย่างดินมีความแปรปรวนสูงทำให้ตัดสินใจใช้การทดสอบที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นแบบ Multi-stage Direct Shear Test (KU\_MDS) โดยมีผลการทดสอบ Direct shear ที่สภาพความชื้นธรรมชาติดังตารางที่ 13 และค่า C และ  $\phi$  ได้มาจาก Mohr diagram ในภาพที่ 63

ตารางที่ 13 ผลการทดสอบกำลังรับแรงของดิน แบบ Conventional Direct Shear ที่ความชื้นธรรมชาติ

Location	C; ksc	$\phi$	Wn %
KML01	*	*	20.263
KML02	0.277	43.52	22.250
PT01	0.260	36.27	18.010
PT02	0.182	34.75	20.217

หมายเหตุ \* = ผลการทดสอบมีความแปรปรวนสูง ไม่สามารถหาค่าได้



ภาพที่ 63 ผลการทดสอบกำลังรับแรงของดิน แบบ Conventional Direct Shear ที่ความชื้นธรรมชาติ

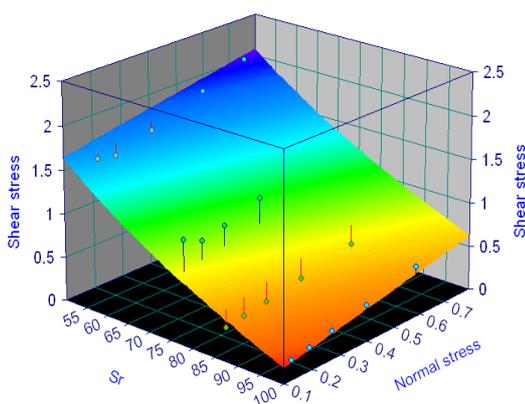
ในส่วนของการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้น แบบ Multi-stage Direct Shear โดยแสดงผลในรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์ความอิ่มตัวของน้ำในมวลดินกับค่า C และ  $\phi$  ซึ่งแสดงในตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ผลการทดสอบกำลังรับแรงของดิน แบบ Multi-stage Direct Shear ที่ระดับความอิ่มตัวต่าง ๆ

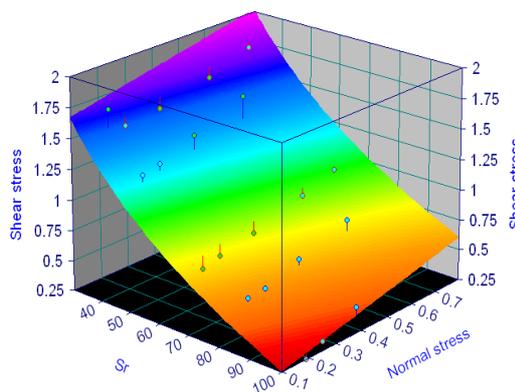
Location	Percent of Saturation (Sr)															
	30		40		50		60		70		80		90		100	
	c	$\phi$	c	$\phi$	c	$\phi$	c	$\phi$	c	$\phi$	c	$\phi$	c	$\phi$	c	$\phi$
KML01	*	*	*	*	1.30	50.03	*	*	0.99	43.96	0.23	31.46	*	*	0.12	37.67
KML02	1.60	29.35	1.08	40.72	*	*	0.54	32.70	*	*	0.42	34.27	*	*	0.00	47.38
PT01	1.08	13.64	0.61	33.91	0.35	33.96	0.20	34.38	0.15	35.20	0.05	36.94	*	*	0.00	33.76
PT02	0.40	33.36	*	*	0.29	35.07	*	*	*	*	0.16	36.64	0.06	41.46	0.00	37.35

หมายเหตุ \* = ตัวอย่างดิน Fail ขณะทำการทดสอบ ไม่สามารถหาค่าได้

ผลการทดสอบสามารถนำเสนอในรูปแบบ 3 แกน ของค่ากำลังรับแรงเฉือน (shear stress) หน่วยแรงกด (normal load) และ เปอร์เซ็นต์ความอิ่มตัวของน้ำ (% saturation) ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงเฉือนที่ลดลงไปเมื่อตัวอย่างดินมีความอิ่มตัวมากขึ้น ผลการทดสอบแสดงในภาพที่ 64 และภาพที่ 65

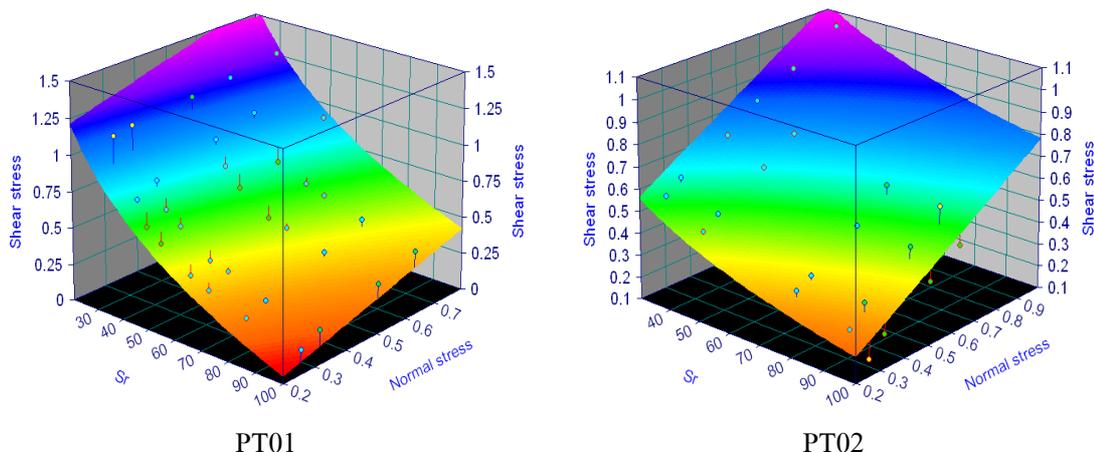


KML01



KML02

ภาพที่ 64 ผลการทดสอบ Direct shear ของตัวอย่างดินในพื้นที่ดินแบบหาดกมลา ในรูปแบบ 3 แกน



ภาพที่ 65 ผลการทดสอบ Direct shear ของตัวอย่างดินในพื้นที่ดินแบบหาดป่าตอง ในรูปแบบ 3 แกน

การลดลงของกำลังรับแรงเฉือนเมื่อมวลดินมีความอิ่มตัวเพิ่มขึ้นหรือเมื่อมวลดินสูญเสียแรงดึงน้ำในมวลดิน สามารถอธิบายได้โดย ค่า C (Cohesion) ในแต่ละผลการทดสอบจะมีค่าน้อยลงเมื่อดินอิ่มตัวมากขึ้นจนมีค่าใกล้ศูนย์ ที่ค่าความอิ่มตัวเข้าสู่ 100% เนื่องจากน้ำเข้าไปอยู่ในช่องว่างมากขึ้นแล้วไหลเชื่อมต่อกัน ทำให้ Surface Tension ถูกทำลายเป็นผลให้ค่า Cohesions ลดลง ซึ่งปรากฏการณ์นี้เปรียบเสมือนเมื่อมวลดินบนลาดเขาสูญเสียค่าแรงดึงน้ำนี้เมื่อต้องรับกับปริมาณฝนที่มากขึ้น ดังนั้นเมื่อสามารถพัฒนาระบบตรวจวัดแรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric Suction) หรือความอิ่มตัวของน้ำในมวลดินได้อย่างแม่นยำ ก็สามารถทราบกำลังรับแรงเฉือนที่ลดลง อันเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดเขา ซึ่งเป็นการนำไปสู่ระบบการเตือนภัยที่มีประสิทธิภาพต่อไป

ความสัมพันธ์ของค่า Shear stress, Normal stress และ Degree of saturation โดยใช้ความสัมพันธ์ในแกนของ Degree of saturation อยู่ในรูปของ Ln และทำการฟิตสมการได้ดังสมการที่ 34 -37 ดังนี้

$$\text{KML01} \quad \tau = 9.775 + 0.632\sigma - 2.097\ln(S) \quad r^2 = 0.909 \quad (34)$$

$$\text{KML02} \quad \tau = 5.609 + 0.494\sigma - 1.173\ln(S) \quad r^2 = 0.968 \quad (35)$$

$$\text{PT01} \quad \tau = 3.246 + 0.618\sigma - 0.720\ln(S) \quad r^2 = 0.937 \quad (36)$$

$$\text{PT02} \quad \tau = 1.398 + 0.707\sigma - 0.287\ln(S) \quad r^2 = 0.972 \quad (37)$$

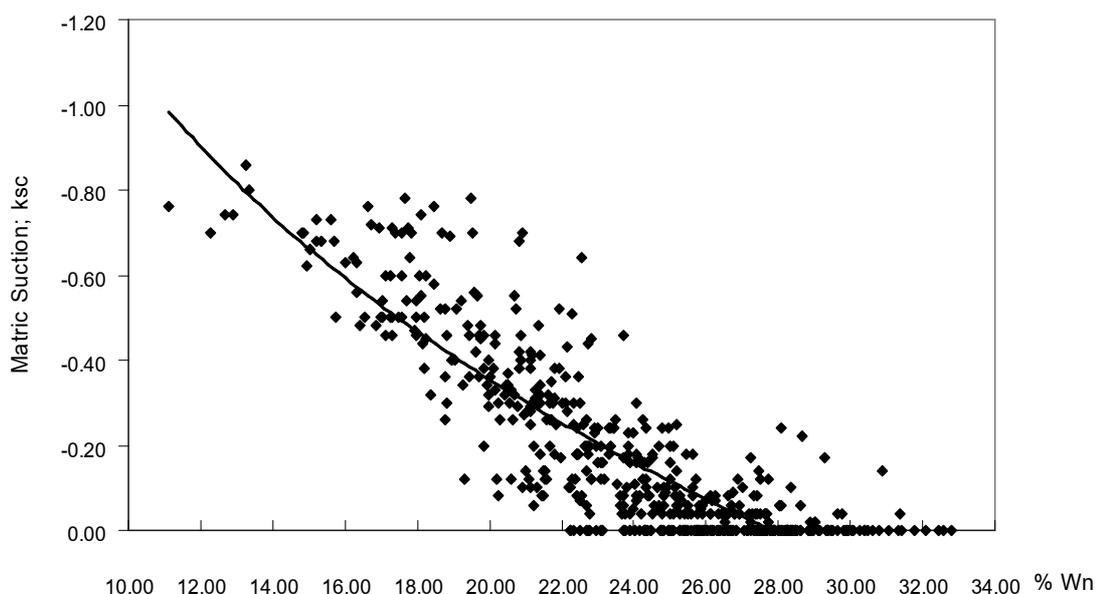
## กลุ่มการวิเคราะห์ข้อมูล

### การตรวจวัดในสนาม

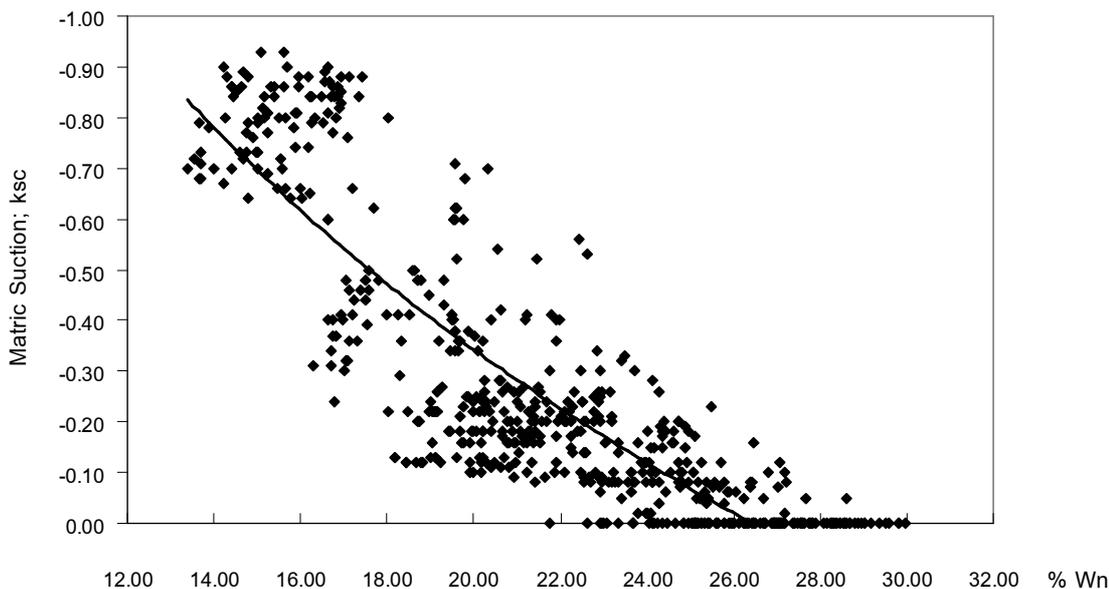
จากการคัดเลือกพื้นที่ต้นแบบเพื่อใช้เป็นตัวแทนของพื้นที่ในการศึกษาพฤติกรรมของลาดดินที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณน้ำในมวลดินเนื่องจากปริมาณฝนที่แตกต่างกันในแต่ละฤดูกาล โดยทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดพฤติกรรมในสนาม เพื่อใช้เป็นเครื่องมือหลักในการตรวจวัดพฤติกรรมของลาดดิน และยังทำการเก็บตัวอย่างดินมาทำการวัดปริมาณน้ำในมวลดิน พร้อมด้วยการเก็บข้อมูลปริมาณน้ำฝน ซึ่งข้อมูลต่าง ๆ เหล่านี้สามารถนำมาทำการวิเคราะห์พฤติกรรมเบื้องต้นของดินเนื่องจากปริมาณฝนได้ ทำให้เห็นถึงพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำในมวลดิน ที่มีผลมาจากปริมาณฝน ซึ่งเป็นสาเหตุของการถล่มของลาดดิน

#### 1. ความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำและแรงดึงน้ำในมวลดิน

เมื่อนำผลการตรวจวัดปริมาณน้ำและการอ่านข้อมูลแรงดึงน้ำในมวลดินจาก Tensiometer มาตรวจสอบ พบว่าแรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric Suction) กับ Water Content มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันดังแสดงในภาพที่ 66 และ ภาพที่ 67



ภาพที่ 66 ผลการตรวจวัดค่าแรงดึงน้ำในมวลดินกับปริมาณ  $W_n$  ของพื้นที่ต้นแบบหาดกมลา



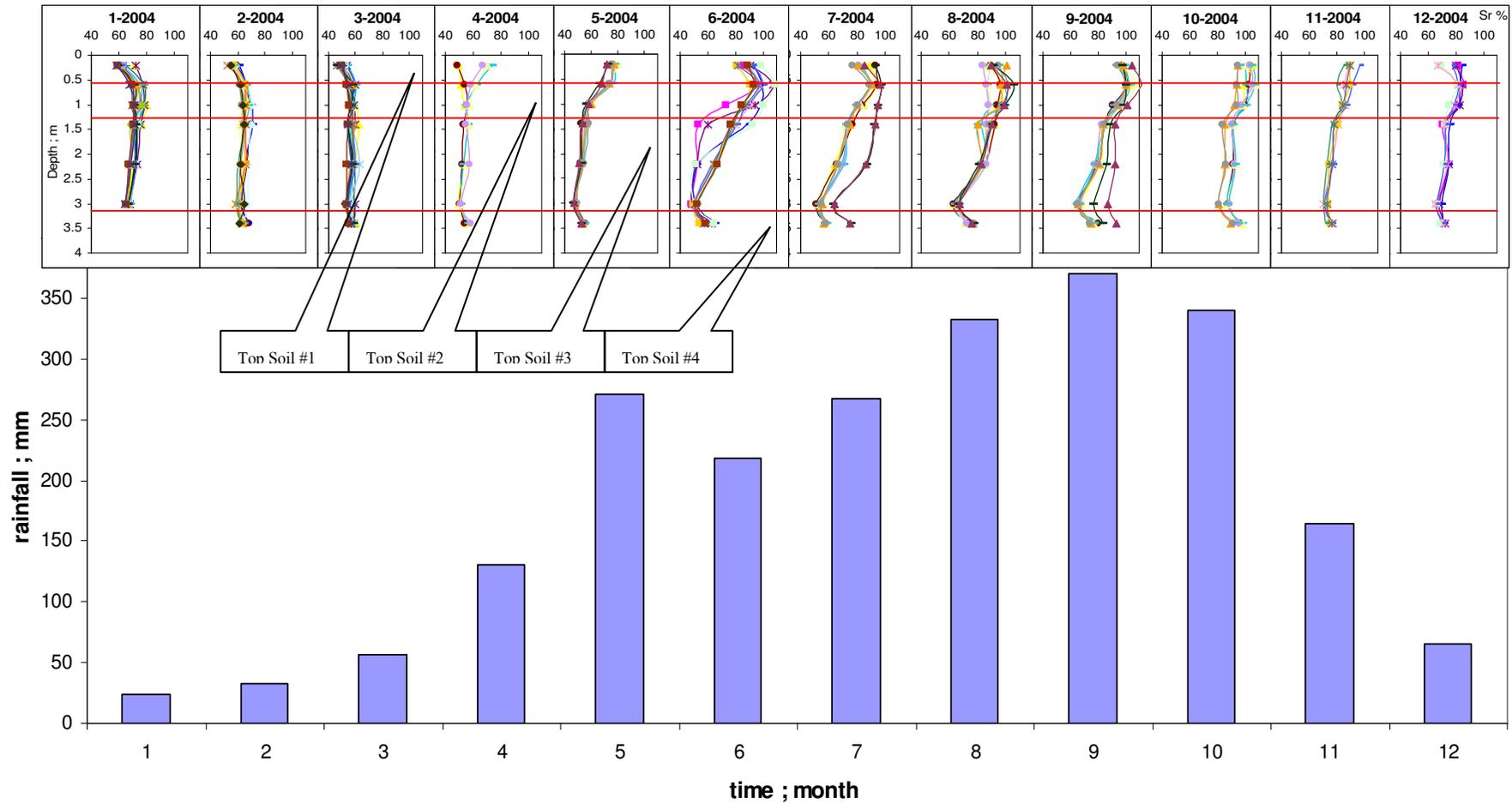
ภาพที่ 67 ผลการตรวจวัดค่าแรงดึงน้ำในมวลดินกับปริมาณ  $W_n$  ของพื้นที่ดินแบบหาดป่าตอง

จากภาพทั้งสอง พบว่าค่าแรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric Suction) กับ Water Content ที่เปลี่ยนแปลงมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญคือ ปริมาณความชื้นในมวลดิน ( $W_n$ ) มีค่าสูง จะทำให้แรงดึงน้ำในมวลดินมีค่าต่ำลง จนเป็นศูนย์ที่ปริมาณความชื้นในมวลดินอยู่ระหว่าง 27-28 % ซึ่งสามารถเชื่อมโยงไปถึงความสัมพันธ์ของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated Soil) ได้ โดยมวลดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะมีกำลังรับแรงเฉือนลดต่ำที่สุดเมื่อค่าแรงดึงน้ำในมวลดินมีค่าเป็นศูนย์

## 2. การเปลี่ยนแปลงระดับความอิ่มตัวของน้ำในมวลดินในรอบปี

ในการศึกษาถึงพฤติกรรมของดินตามความลึกต่าง ๆ ทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงระดับความอิ่มตัวของน้ำในมวลดินในรูปแบบที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน และเป็นไปในทิศทางเดียวกันในแต่ละเดือนตามปริมาณฝนที่ตก โดยดินในระดับตื้น ๆ จะมีการเปลี่ยนแปลงระดับความอิ่มตัวของน้ำในมวลดินได้รวดเร็วกว่าดินในระดับที่ลึกกว่าตามลักษณะและรูปแบบในการตกของปริมาณฝน ซึ่งเป็นผลมาจากความสามารถในการซึมน้ำของดิน ดังภาพที่ 68 จะเห็นว่าระดับความอิ่มตัวของน้ำในมวลดินในเดือนที่ 3 มีค่าน้อยกว่าเดือนอื่น ๆ ตลอดทั้งความลึก ถึงแม้ว่าปริมาณฝนในเดือนนี้จะมากกว่าในเดือนที่ 1 และ 2 ก็ตาม ทั้งนี้เนื่องจากในเดือนที่ 1 และ 2 ได้รับอิทธิพลของปริมาณฝนและระดับความอิ่มตัวจากเดือนก่อนหน้า ทำให้ยังไม่สลายไปในทันที แต่จะค่อย ๆ เคลื่อนตัวลงไปตามความลึกของดิน จนมาถึงในเดือนที่ 3 ถึงแม้จะมีปริมาณฝนที่มากกว่าในเดือน

ที่ 1 และ 2 แต่ยังไม่มากพอที่จะทำให้ระดับความอิ่มตัวสูงขึ้น ขณะเดียวกันยังมีการเคลื่อนตัวของน้ำลงไปตามความลึกอยู่ เหตุนี้ทำให้ระดับความอิ่มตัวของน้ำในมวลดินในเดือนที่ 3 น้อยที่สุดในรอบปี และในเดือนที่ 10 ก็เช่นกันคือมีระดับความอิ่มตัวของน้ำในมวลดินมากที่สุดตลอดทั้งหน้าตัด ถึงแม้ว่าปริมาณฝนจะน้อยกว่าในเดือนที่ 9 ก็ตาม ซึ่งสามารถอธิบายด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น และทำให้เดือนที่ 10 นี้มีระดับความอิ่มตัวสูงมากเกือบตลอดความลึก และส่งผลให้กำลังรับแรงของดินต่ำตามไปด้วย ตามทฤษฎีของดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated soil) ทำให้เดือนนี้เป็นเดือนที่วิกฤตที่สุดและมีผลให้เกิดการสูญเสียดังกล่าวและเกิดลาดดินถล่มได้หากมีฝนตกหนักมาเป็นแรงกระตุ้นร่วมกับความชื้นที่สะสมไว้แล้วจากเดือนก่อน



ภาพที่ 68 การเปลี่ยนแปลงระดับความอืดตัวของน้ำในมวลดินในเดือนต่างๆ

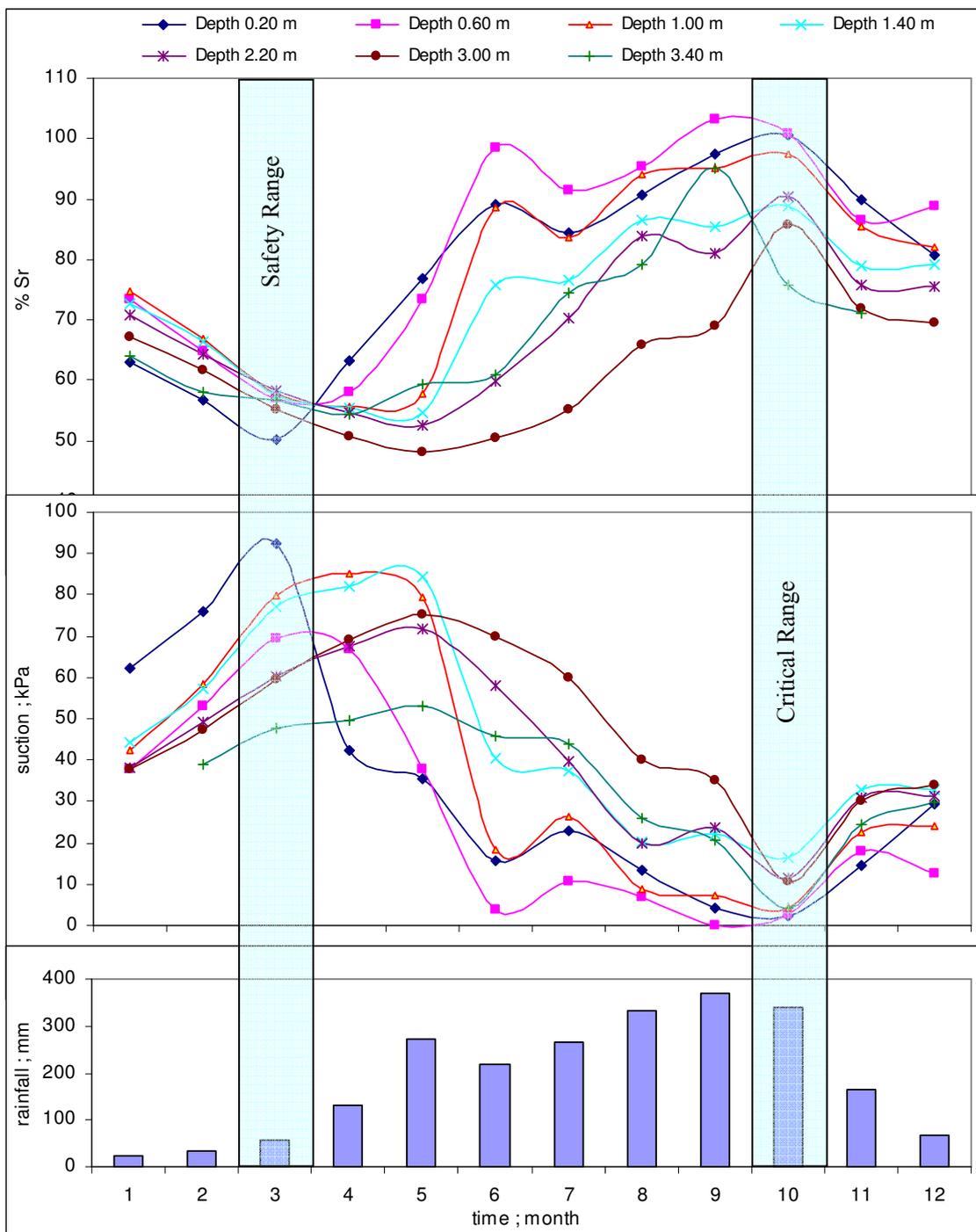
ในเดือนที่ 4 เริ่มมีปริมาณฝนตกมากขึ้นทำให้ดินในชั้นที่ 1 มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มระดับความอืดตัวมากขึ้น เดือนที่ 5 ปริมาณฝนที่ตกมากกว่าเดือนที่ 3 มากทำให้ดินในชั้นที่ 2 เพิ่มระดับความอืดตัวมากขึ้น จนถึงเดือนที่ 6 ปริมาณน้ำในดินเคลื่อนตัวมาจนถึงดินในชั้นที่ 3 ผนวกกับปริมาณฝนในเดือนที่ 5 ที่มีปริมาณมากกว่าเดือนก่อนหน้ามาก ทำให้ดินในชั้นที่ 1 และ 2 มีอัตราการเพิ่มระดับความอืดตัวมากกว่าในเดือนอื่น ๆ และเดือนที่ 8 ผลจากค่าความชื้นน้ำของดิน ทำให้ปริมาณน้ำมีการเคลื่อนตัวมาถึงดินในชั้นที่ 4 เริ่มมีการเพิ่มระดับความอืดตัวของน้ำในมวลดินมากขึ้น

### 3. พฤติกรรมของระดับความอืดตัว และแรงดึงน้ำในมวลดิน

ในการเก็บข้อมูลจาก Tensiometer และวัดระดับความอืดตัวของน้ำในมวลดินควบคู่กันไป ในบ่อสำรวจ ทำให้เห็นถึงความสัมพันธ์จากผลของข้อมูลที่ได้ทั้งสอง และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับปริมาณฝน ทำให้สามารถอธิบายถึงความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ดียิ่งขึ้น จากภาพที่ 69 เป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงของระดับความอืดตัวและแรงดึงน้ำในมวลดินตามความลึกของดินในเดือนต่าง ๆ

จะเห็นว่าระดับความอืดตัว และแรงดึงน้ำในมวลดินมีการเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณฝนที่ตกในแต่ละเดือน คือถ้ามีปริมาณฝนมากขึ้นจะส่งผลให้ระดับความอืดตัวของน้ำมีค่าสูงขึ้น และแรงดึงน้ำในมวลดินก็จะน้อยลงตามไปด้วย

ระดับความอืดตัวของน้ำในมวลดินในเดือนที่ 3 มีค่าน้อยเกือบตลอดความลึก จะส่งผลให้แรงดึงน้ำในมวลดินมีค่าสูงมากด้วย เช่นเดียวกันกับเดือนที่ 10 ที่มีระดับความอืดตัวของน้ำในมวลดินสูงตลอดความลึก และส่งผลให้แรงดึงน้ำในมวลดินมีค่าต่ำตามไปด้วย เหตุนี้ทำให้เสถียรภาพของลาดดินในเดือนที่ 3 มีค่าสูงที่สุด และเดือนที่ 10 มีค่าต่ำที่สุดในรอบปี และเดือนที่ 10 มีโอกาสเกิดแผ่นดินถล่มมากที่สุดถ้ามีปริมาณฝนกระตุ้นมากพอ ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลการถล่มของลาดดินในจังหวัดภูเก็ตที่ได้มีการบันทึกไว้ พบว่าเดือนที่ 10 นี้เองเป็นเดือนที่เกิดลาดดินถล่มมากที่สุด ซึ่งก็สามารถยืนยันความถูกต้องของข้อมูลเบื้องต้นได้ และทำให้การวิเคราะห์หาค่าความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น



ภาพที่ 69 การเปลี่ยนแปลงระดับความอิ่มตัวและแรงดึงน้ำในมวลดิน ตามความลึกของดินในเดือนต่าง ๆ

## การวิเคราะห์การไหลซึม

การพิบัติของลาดดินมักเกิดขึ้นในขณะที่เกิดฝนตกหนัก ดังนั้นการวิเคราะห์การไหลซึมของปริมาณฝนในลาดดินจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากการไหลซึมของฝนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในมวลดิน โดยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นในมวลดินทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric Suction) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีผลกับกำลังรับแรง และเสถียรภาพของลาดดินด้วยเช่นกัน

### 1. การสร้างแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์การไหลซึมนั้น นอกจากการกำหนดปริมาณฝนที่ตกในช่วงเวลาต่าง ๆ แล้ว สิ่งที่สำคัญอีกสิ่งหนึ่งก็คือการกำหนดหน้าตัดแบบจำลอง ซึ่งจะบ่งบอกว่าหน้าตัดที่ใช้ทำการวิเคราะห์ประกอบด้วยดินที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันอย่างไร เพื่อใช้เป็นตัวแทนลาดดินในจังหวัดภูเก็ต

#### - การแบ่งชั้นดินในการวิเคราะห์การไหลซึม

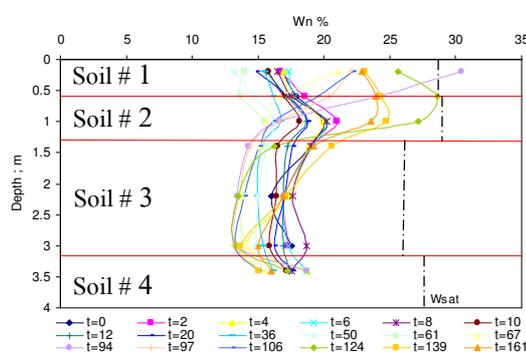
ในการแบ่งชั้นดินเพื่อวิเคราะห์การไหลซึมจะใช้ข้อมูลจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณ Water content และ Degree of saturation ของดิน ณ เวลาต่าง ๆ ในการตัดสินใจเลือก เนื่องจากข้อมูลดังกล่าวเป็นข้อมูลจากสภาพจริงในสนาม ประกอบกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ จึงถือได้ว่ามีความน่าเชื่อถือ จากภาพที่ 70 พบว่าลักษณะการไหลซึมของปริมาณน้ำฝนในชั้นดินมีความแตกต่างกันในแต่ละความลึก ทำให้สามารถแบ่งดินเป็นชั้นต่าง ๆ ตามลักษณะความชื้นน้ำของดินได้ 4 ชั้น ดังนี้

ดินชั้นที่ 1 (Soil # 1) ลึก 0 ถึง 0.60 เมตร เป็นชั้นที่มีปริมาณความชื้นแปรผันในทันทีเมื่อฝนตกหรือแดดออก เนื่องจากเป็นดินส่วนบนระยะทางในการไหลซึมสั้นกว่าดินในชั้นอื่น ๆ และมีช่วงของการเปลี่ยนแปลงความชื้นมาก และจากผลของการทดสอบดินในห้องปฏิบัติการ พบว่ามีค่า PI สูงกว่าดินในชั้นอื่น ๆ ด้วยเช่นกัน ดังในตารางที่ 11

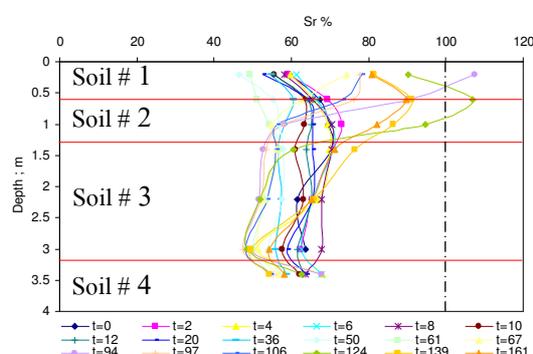
ดินชั้นที่ 2 (Soil # 2) ลึก 0.60 ถึง 1.30 เมตร เป็นชั้นที่มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นเร็วรองลงมาจากดินชั้นที่ 1 และมีช่วงของการเปลี่ยนแปลงความชื้นมากกว่าในดินชั้นที่ 1 ซึ่งเป็นการแสดงคุณลักษณะของดินชนิด Weathering Soil ในชั้น B horizon คือ เป็นชั้นที่ถูกชะล้างตะกอนเม็ดละเอียดจากดินในชั้นบนลงมาสะสม ทำให้มีดินเหนียวสะสมอยู่ในชั้นนี้มาก

ดินชั้นที่ 3 (Soil # 3) ลึก 1.30 ถึง 3.20 เมตร เป็นชั้นที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นในลักษณะเดียวกันทั้งชั้นและอยู่ในช่วงแคบ ๆ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ที่พบว่าม็อดูลัสของทรายอยู่สูงกว่าในดินชั้นที่ 1 และ 2

ดินชั้นที่ 4 (Soil # 4) ลึก 3.20 ถึง 3.40 เมตร เนื่องจากข้อจำกัดดินเปิดบ่อทดสอบที่ไม่สามารถทำได้ลึกมากนักทำให้สามารถเก็บตัวอย่างได้เพียงที่ความลึก 3.40 เมตร แต่จากผลการทดสอบดินในชั้นนี้มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นแตกต่างจากดินชั้นที่ 3 จึงจะแบ่งดินในความลึกนี้จนถึงชั้นหินให้มีการไหลซึมเป็นอีกลักษณะหนึ่ง ซึ่งจะทำการตรวจสอบอีกในชั้นของการวิเคราะห์การไหลซึม



ก. การเปลี่ยนแปลง Water content

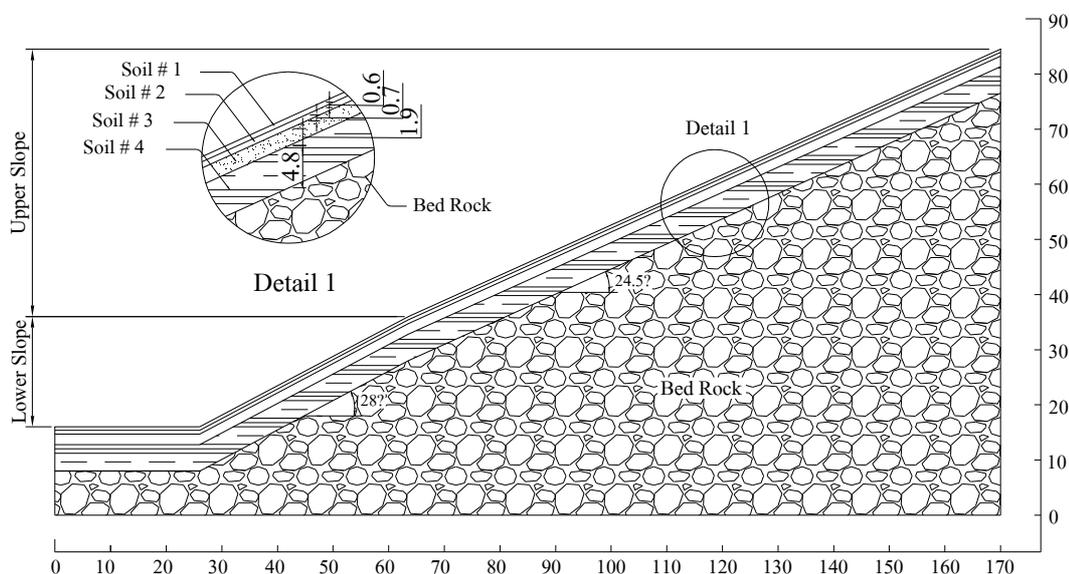


ข. การเปลี่ยนแปลง Degree of Saturation

ภาพที่ 70 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในดิน ณ เวลาต่าง ๆ

ในการแบ่งชั้นดินดังกล่าว ทำให้เกิดหน้าตัดแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลซึมดังภาพที่ 71 และจากการสำรวจสภาพภูมิประเทศทำให้แบ่งความลาดชันของพื้นที่ได้เป็น 2 ส่วน คือ ความลาดชันตอนบน (Upper slope) มีความลาดเอียง 24.5 องศา และความลาดชันตอนล่าง (Lower slope) มีความลาดเอียง 28 องศา เมื่อพิจารณาผลการทดสอบ KPT ซึ่งเป็นการ

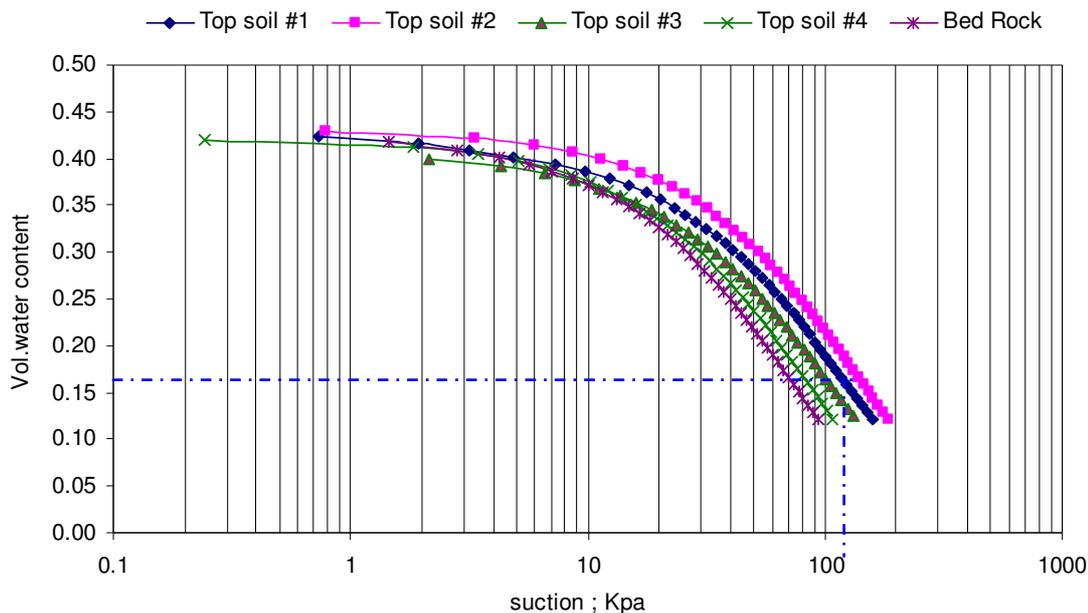
ทดสอบกำลังรับแรงของดิน พบว่าในชั้นดินมีความลึก 8 เมตร และถัดไปเป็นชั้นหิน (Bed Rock) ในชั้นดินนี้ได้แบ่งเป็นชั้นย่อย ๆ ตามลักษณะการไหลซึมได้เป็น 4 ชั้น ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว



ภาพที่ 71 หน้าตัดแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์การไหลซึม

- Soil water characteristic curve

Soil water characteristic curve (SWCC) เป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและแรงดึงน้ำในมวลดิน จากการวิจัยนี้ได้ทำการตรวจวัดโดยการติดตั้ง Tensiometer ในบ่อทดสอบ โดยข้อมูลที่ได้สามารถเชื่อมโยงถึงกำลังรับแรงในสถานะความชื้นต่าง ๆ ของดิน ดังภาพที่ 72 จากกราฟ Soil water characteristic curve พบว่าดินชั้นที่ 2 มีพฤติกรรมคล้ายมีดินจำพวกดินเหนียวอยู่มากกว่าในชั้นอื่น ๆ คือที่ปริมาณความชื้นหนึ่ง ดินเหนียวจะมีแรงดึงน้ำในมวลดินสูงกว่าในดินเม็ดหยาบ และในชั้นดินอื่น ๆ ค่า SWCC ก็มีความสอดคล้องกับคุณลักษณะของดิน ข้อมูลเหล่านี้เป็นอีกส่วนหนึ่งที่ช่วยยืนยันแนวคิดการแบ่งชั้นดินข้างต้นได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 72 Soil water characteristic curve ของดินในชั้นต่าง ๆ

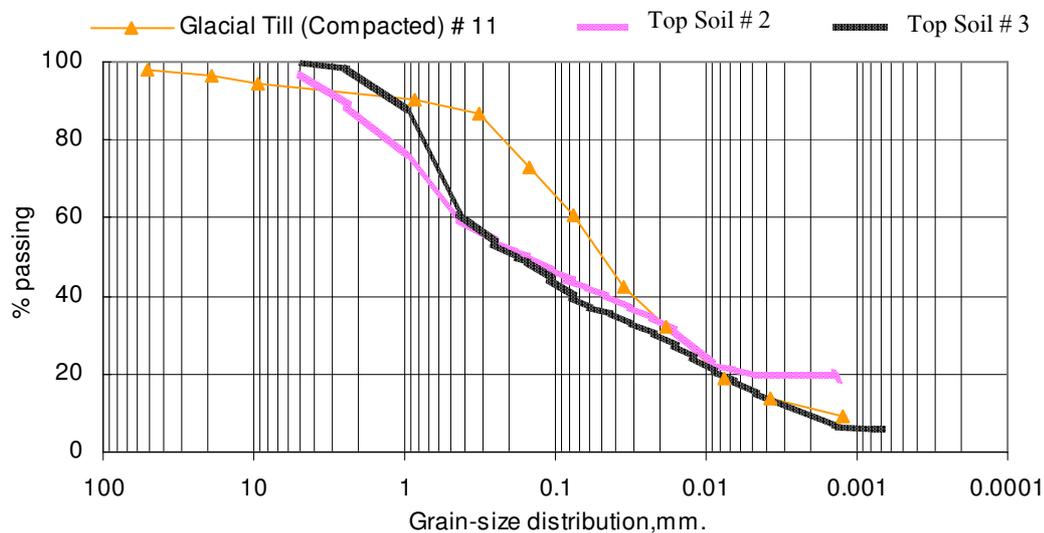
- รูปแบบ Permeability Function

Permeability function เป็นค่าที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นน้ำกับแรงดึงน้ำในมวลดินในช่วงของดินที่มีระดับความอิ่มตัวต่าง ๆ ซึ่งสามารถเชื่อมโยงไปถึงปริมาณน้ำในมวลดินได้ โดยในดินไม่อิ่มตัวช่องว่างระหว่างเม็ดดินจะมีฟองอากาศอยู่ซึ่งจะคอยสกัดกั้นการไหลของน้ำทำให้น้ำไหลซึมผ่านไม่สะดวกน้ำจึงไหลช้ากว่าในดินอิ่มตัว

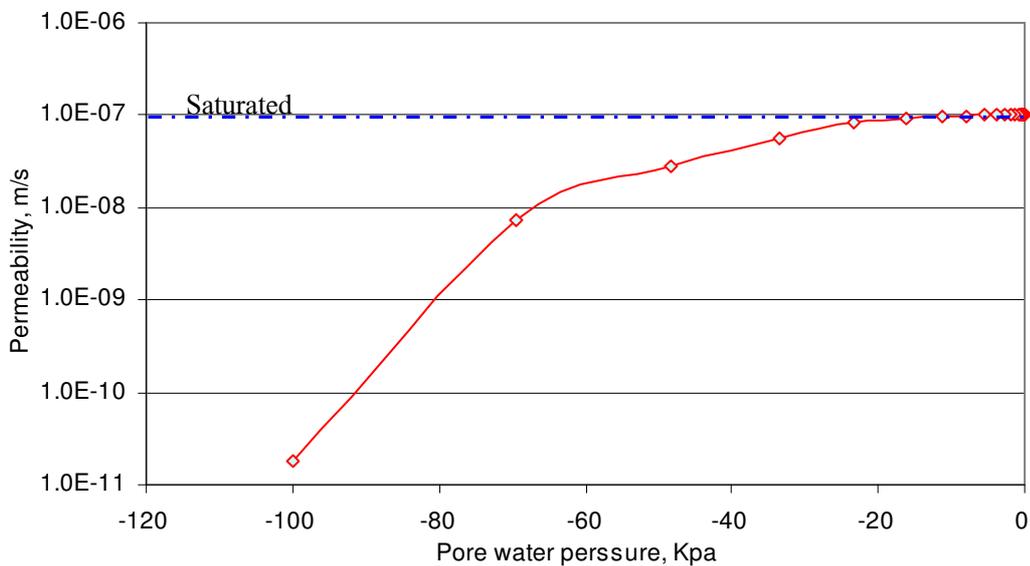
การหา Permeability function ของดินไม่อิ่มตัวจากการทดสอบทำได้ยากมากและมีความแปรปรวนสูง ดังนั้นจึงใช้วิธีการเทียบเคียงกับดินที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน จากข้อมูล Permeability function ของดินต่าง ๆ ที่ได้รวบรวมไว้ใน Geoslope (2002) โดยวิธีการเทียบเคียงกับการกระจายตัวของเม็ดดิน

ในการตรวจสอบการกระจายตัว พบว่ารูปแบบการกระจายตัวของดินมีลักษณะเหมือนกันตลอดทั้งความลึกของชั้นดิน ดังนั้นจึงเลือกใช้ Permeability function ที่เหมือนกันตลอดทั้งความลึก และเมื่อเทียบเคียงการกระจายตัวของเม็ดดินแล้ว เลือกใช้ดิน Glacial Till

(Compacted) Function # 11 ดังภาพที่ 73 และมีค่า Permeability function ที่มีค่าความชื้นน้ำของดินอิ่มตัวที่  $1 \times 10^{-7}$  m/s ดังภาพที่ 74



ภาพที่ 73 การกระจายตัวของเม็ดดินเทียบกับตัวอย่างดินในหาค่าต่ออง



ภาพที่ 74 Permeability function ของดิน Glacial Till (Compacted)

แม้ว่ารูปแบบการประมาณค่า Permeability Function จะเหมือนกันตลอดทั้งความลึก แต่เมื่อนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับลักษณะการไหลซึมประกอบกับ SWCC ของแต่ละชั้นดิน พบว่าลาดดินมีความซึมน้ำในแต่ละชั้นดินแตกต่างกัน จึงต้องทำการหาค่าความซึมน้ำของชั้นดินให้ถูกต้องด้วยวิธีการวิเคราะห์ย้อนกลับ (Back Analysis) ที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลจริงที่ได้บันทึกไว้ในสนามก่อน

#### - การหาค่าความซึมน้ำของชั้นดิน

เมื่อได้แบ่งชั้นดินออกเป็นชั้นย่อย ๆ ตามการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำในมวลดิน ทำให้ทราบว่าลักษณะการไหลซึมของน้ำในแต่ละชั้นดินไม่เท่ากัน แต่มีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องซึ่งกันและกัน จากการติดตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในมวลดินในสนามเป็นระยะเวลาประมาณ 14 เดือน ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการซึมน้ำของดินในแต่ละชั้น โดยดินในชั้นที่ 1 มีความซึมน้ำมากกว่าดินในชั้นที่ 2 ซึ่งเป็นชั้น B horizon ที่ตื้นกว่าดินในชั้นที่ 1 และ 3 และดินในชั้นที่ 4 มีความตื้นกว่าดินในชั้นที่ 3 ทำให้ได้ช่วงของความซึมน้ำตามคุณสมบัติของดินในแต่ละชั้นดังนี้

ดินชั้นที่ 1 มีความซึมน้ำอยู่ในช่วง  $10^{-4} - 10^{-6}$  m/s

ดินชั้นที่ 2 มีความซึมน้ำอยู่ในช่วง  $10^{-6} - 10^{-8}$  m/s

ดินชั้นที่ 3 มีความซึมน้ำอยู่ในช่วง  $10^{-5} - 10^{-7}$  m/s

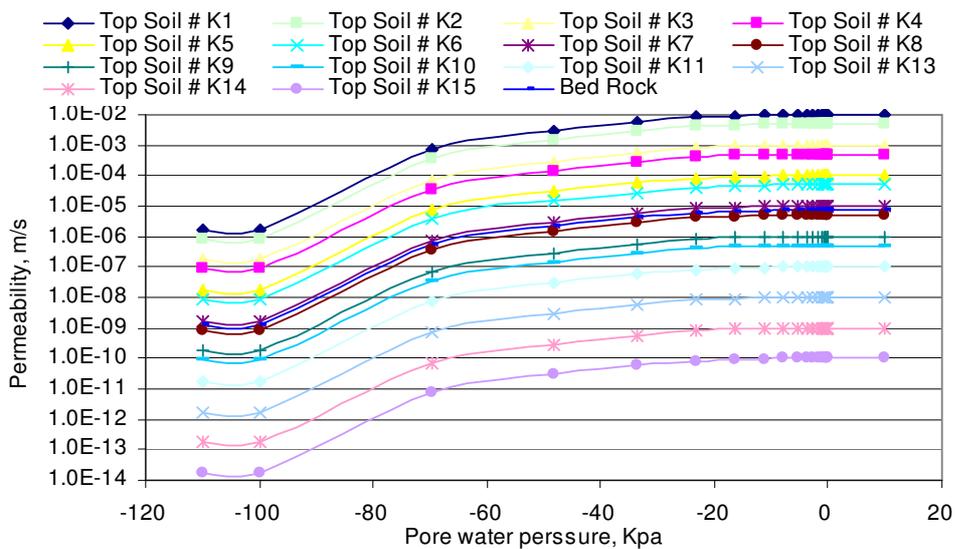
ดินชั้นที่ 4 มีความซึมน้ำอยู่ในช่วง  $10^{-7} - 10^{-8}$  m/s

เพื่อให้ได้ลักษณะการไหลซึมที่ใกล้เคียงกับสภาพจริงของดินแต่ละชั้น จะทำการสมมติการไหลซึมของดินเป็นกรณีต่าง ๆ แล้วนำมาทำการวิเคราะห์ย้อนกลับตรวจสอบกับการไหลซึมจริงในสนาม แล้วเลือกค่าการไหลซึมของกรณีที่มีความถูกต้องมากที่สุด

ในการวิเคราะห์จะทำการกำหนดตัวแปรเป็น K1 ถึง K15 แทนการไหลซึมของดิน อิมตัวตั้งแต่  $1 \times 10^{-2}$  m/s ถึง  $1 \times 10^{-10}$  m/s เพื่อให้งานในการอ้างอิง ดังตารางที่ 15 โดยมี Permeability function ดังภาพที่ 75 และกำหนดค่าการซึมน้ำของดินในแต่ละชั้นเป็นกรณีต่าง ๆ ดังตารางที่ 16

ตารางที่ 15 การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการสมมติค่าความชื้นน้ำของดิน

K sat	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
	1.00E-02	5.00E-03	1.00E-03	5.00E-04	1.00E-04	5.00E-05	1.00E-05	5.00E-06
K sat	K9	K10	K11	K12	K13	K14	K15	
	1.00E-06	5.00E-07	1.00E-07	7.23E-06	1.00E-08	1.00E-09	1.00E-10	



ภาพที่ 75 Permeability function ของตัวแปรต่าง ๆ สำหรับการวิเคราะห์ห้อนกลับ

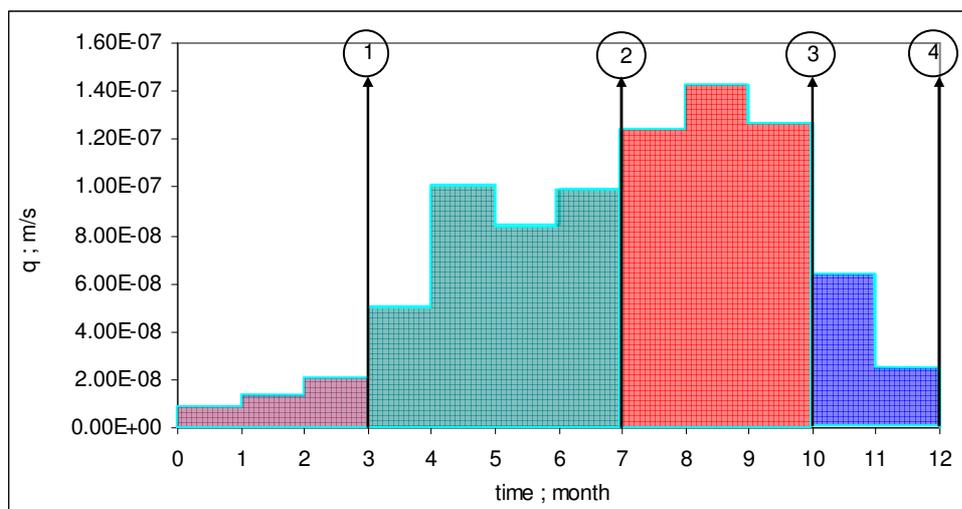
ตารางที่ 16 การแบ่งค่าความชื้นน้ำของดินเป็นกรณีต่าง ๆ

case	K Function				
	Soil # 1	Soil # 2	Soil # 3	Soil # 4	Bed Rock
1	K3	K5	K3	K7	K12
2	K3	K5	K3	K7	K6
3	K3	K5	K4	K7	K12
4	K3	K7	K3	K5	K12
5	K3	K7	K3	K7	K12
6	K5	K7	K3	K5	K12
7	K5	K7	K5	K7	K12
8	K3	K7	K5	K7	K12
9	K3	K9	K5	K7	K12
10	K3	K9	K7	K9	K12
11	K5	K9	K5	K7	K12
12	K5	K9	K5	K9	K12
13	K5	K9	K7	K9	K12
14	K7	K9	K7	K9	K12
15	K7	K9	K5	K9	K12
16	K7	K11	K7	K9	K12
17	K7	K11	K7	K5	K12
18	K7	K11	K9	K11	K12
19	K7	K11	K8	K11	K12
20	K9	K11	K9	K11	K12
21	K9	K13	K9	K13	K12
22	K9	K13	K11	K13	K12
23	K9	K13	K11	K14	K12
24	K9	K14	K11	K14	K12
25	K11	K13	K11	K13	K12
26	K11	K14	K11	K15	K12
27	K11	K14	K13	K15	K12
28	K11	K15	K11	K15	K12
29	K7	K13	K11	K13	K12
30	K7	K11	K9	K13	K12
31	K5	K9	K7	K11	K12
32	K7	K9	K7	K11	K12
33	K7	K9	K7	K13	K12
34	K7	K9	K8	K13	K12
35	K5	K11	K9	K11	K12
36	K7	K9	K6	K13	K12
37	K7	K9	K6	K11	K12
38	K7	K9	K8	K11	K12

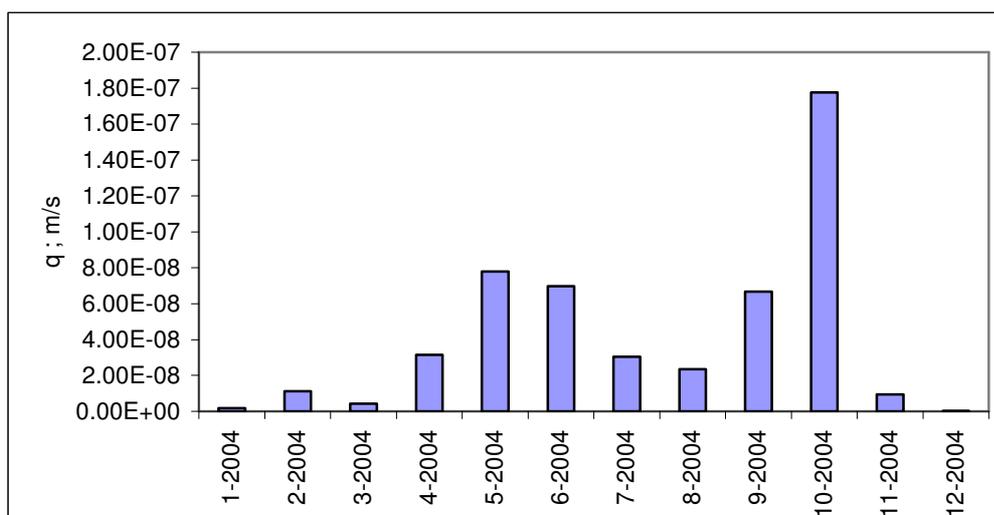
เมื่อกำหนดค่าการไหลซึมของดินในชั้นต่าง ๆ แล้ว ในการวิเคราะห์การไหลซึมด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาค่าความชื้นน้ำของชั้นดิน โดยวิธีการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 17 ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เพื่อหาความชื้นของดินเทียบเคียงกับข้อมูลจริงที่ได้ทำการบันทึกไว้ โดยการเริ่มจากข้อมูลที่หายไปแล้วค่อย ๆ วิเคราะห์ให้ละเอียดขึ้นเรื่อย ๆ จนสามารถเทียบเคียงกับข้อมูลจริงได้ ปริมาณฝนเฉลี่ย 24 ปี ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1981 ถึง 2003 ในชั้นตอนที่ 1 เท่ากับ  $6.33 \times 10^{-8}$  m/s ปริมาณฝนเฉลี่ยรายเดือน 24 ปี ในชั้นตอนที่ 2 แสดงในภาพที่ 76 ปริมาณฝนเฉลี่ยรายเดือน ในปี 2004 ในชั้นตอนที่ 3 แสดงในภาพที่ 77 เมื่อวิเคราะห์เสร็จสิ้นชั้นตอนที่ 3 แล้ว พบว่ามีค่าความชื้นน้ำของชั้นดินใกล้เคียงกับข้อมูลในสนามอยู่ 7 กรณี คือกรณีที่ 18, 20, 31, 32, 33, 36 และ 37 ดังแสดงในภาพที่ 78 ในขั้นนี้เป็นการคัดเลือกเบื้องต้นเพื่อให้ได้ข้อมูลที่แคบลงในการบ่งชี้ค่าความชื้นน้ำของชั้นดิน และในชั้นตอนที่ 4 นำกรณีเหล่านี้มาทำการเปรียบเทียบโดยการจำลองสถานการณ์การตกของฝนจริงในช่วงเวลาที่นำเสนอ เพื่อเป็นการวิเคราะห์ที่มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น และเห็นการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในมวลดินได้อย่างชัดเจน ได้เลือกช่วงเวลาและปริมาณฝนที่สนใจ (กรณี Transient) ดังแสดงในภาพที่ 79 โดยมีปริมาณความชื้นตั้งต้น (กรณี Initial) ณ เวลาสิ้นเดือนที่ 3 คือวันที่ 31 มีนาคม ค.ศ. 2004 และผลที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในมวลดินในสนามและจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ทั้ง 7 กรณี ดังแสดงในภาพที่ 80

ตารางที่ 17 แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์การไหลซึมเพื่อให้ได้ค่าความชื้นของของชั้นดิน

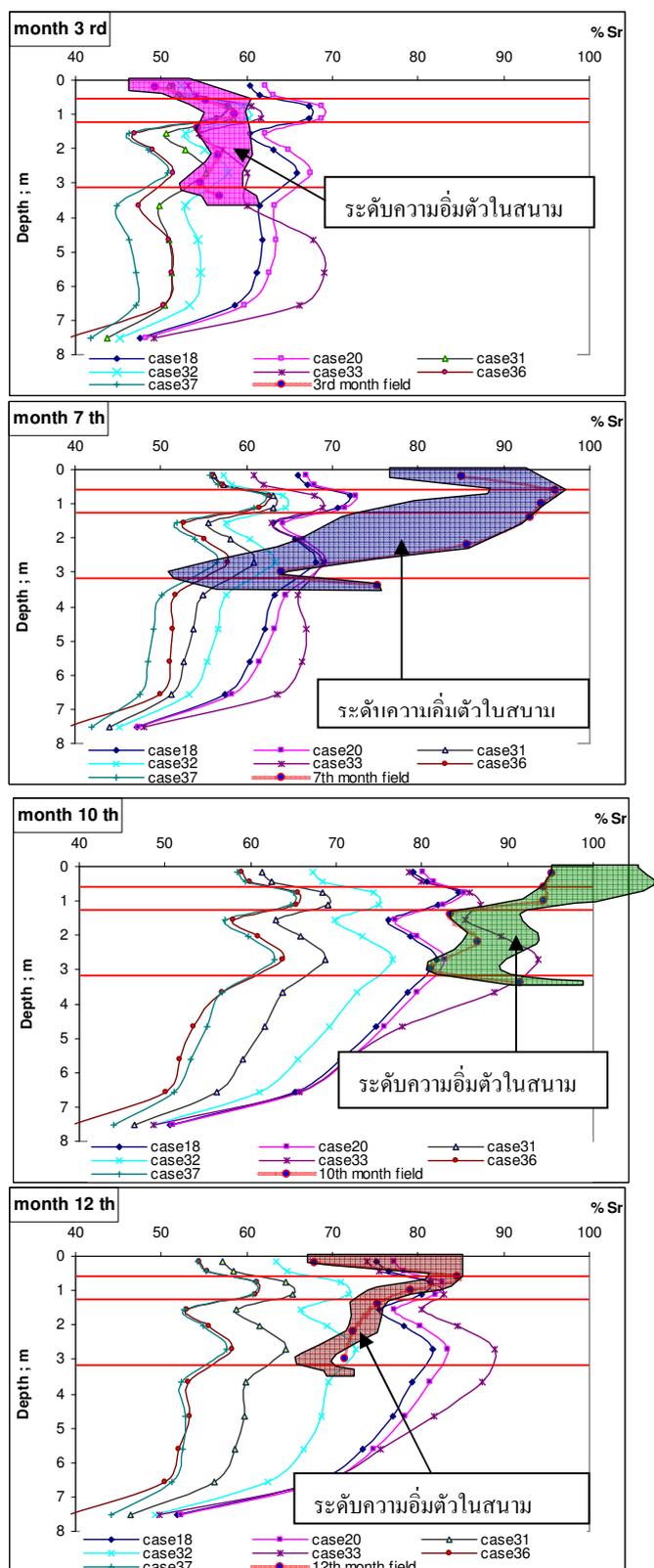
ชั้นตอนที่	รูปแบบการวิเคราะห์		ข้อมูลฝนที่ใช้	หมายเหตุ
	Steady Stage	Transient Stage		
1	√		ปริมาณฝนเฉลี่ย 24 ปี	
2		√	ปริมาณฝนเฉลี่ยรายเดือน 24 ปี	วิเคราะห์ซ้ำ ๆ กัน เป็นเวลา 20 ปี
3		√	ปริมาณฝนเฉลี่ยรายเดือน ปี 2003	
4		√	ปริมาณฝนช่วงที่สนใจ	



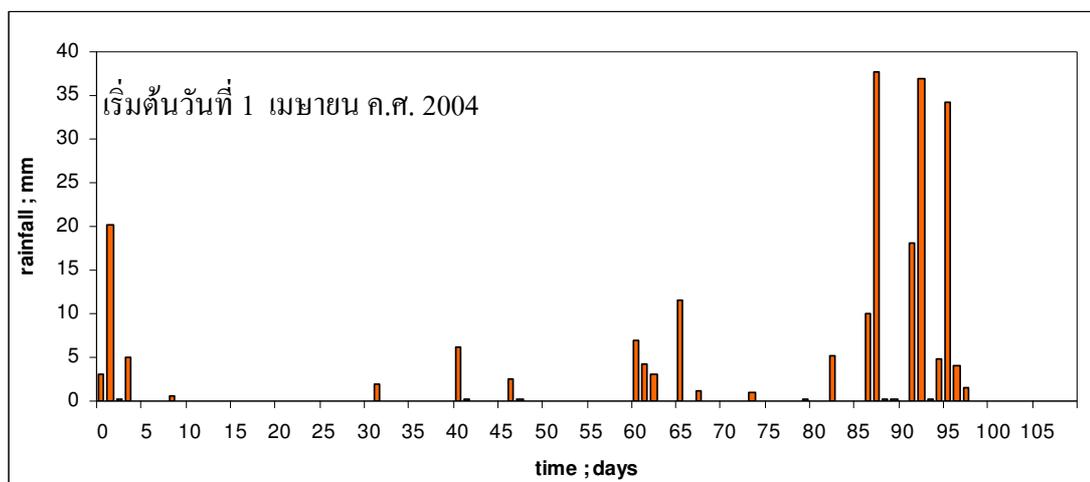
ภาพที่ 76 การจัดกลุ่มที่สนใจตามปริมาณฝนเฉลี่ยรายเดือนตั้งแต่ปี ค.ศ. 1981 ถึง 2003



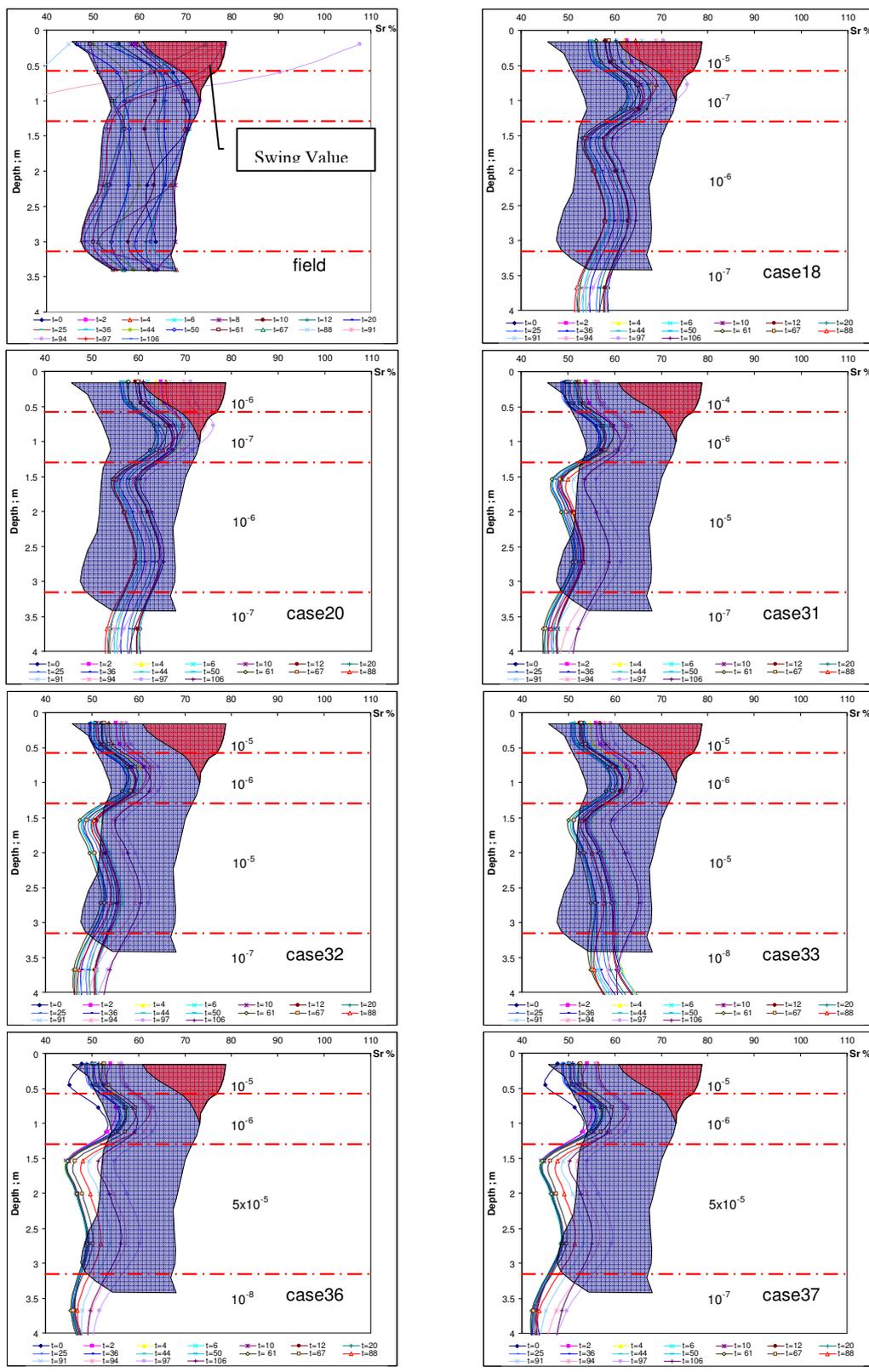
ภาพที่ 77 การจัดกลุ่มที่สนใจตามปริมาณฝนเฉลี่ยรายเดือนปี ค.ศ. 2004 (ปีที่ทำการติดตามผลในสนาม)



ภาพที่ 78 กรณีศึกษาที่น่าสนใจ และมีรูปแบบการไหลซึ่มใกล้เคียงกับในสนาม



ภาพที่ 79 ปริมาณฝนในช่วงเวลาที่สนใจ (นำมาวิเคราะห์)



ภาพที่ 80 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นจากในสนามและจากวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์

จากการวิเคราะห์กรณีทั้ง 7 สามารถเลือกกรณีของความชื้นน้ำที่มีความเหมาะสม และสอดคล้องกับสภาพจริงในสนามได้ คือกรณีที่ 20 เนื่องจากมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงความชื้นของดินแต่ละชั้นใกล้เคียงกับผลที่ได้จากในสนามมากที่สุด ทำให้สามารถสรุปได้ว่าดินในหน้าตัดที่ทำการวิเคราะห์มีค่าความชื้นน้ำ ดังนี้

ดินชั้นที่ 1 มีความชื้นน้ำ  $1 \times 10^{-6}$  m/s

ดินชั้นที่ 2 มีความชื้นน้ำ  $1 \times 10^{-7}$  m/s

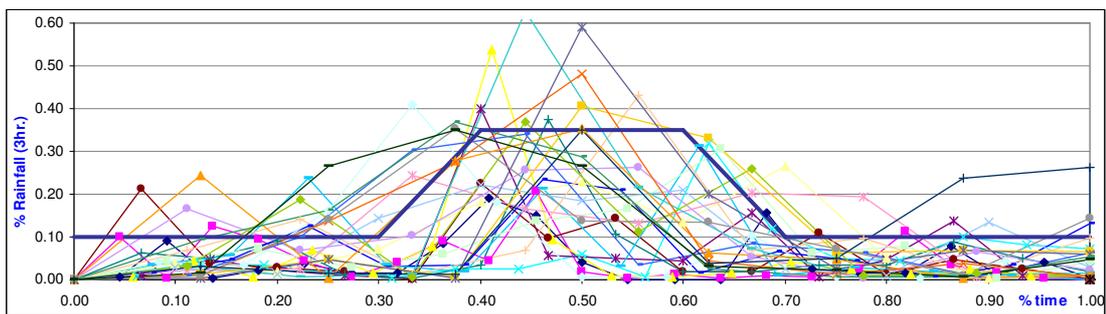
ดินชั้นที่ 3 มีความชื้นน้ำ  $1 \times 10^{-6}$  m/s

ดินชั้นที่ 4 มีความชื้นน้ำ  $1 \times 10^{-7}$  m/s

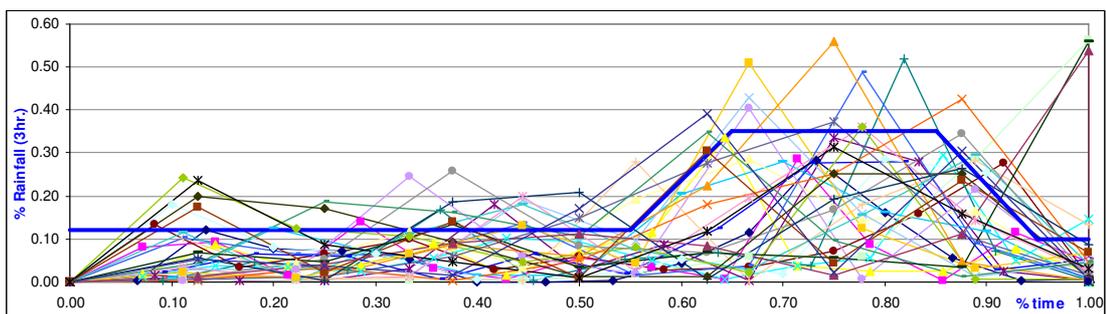
ผลของความชื้นน้ำที่ได้จากการวิเคราะห์นี้แสดงถึงคุณสมบัติของดินจำพวกดินตะกอนทราย ที่มีค่าความชื้นน้ำอยู่ในช่วง  $1 \times 10^{-5}$  ถึง  $1 \times 10^{-7}$  m/s ซึ่งตรงกับผลจากการทดสอบคุณสมบัติของดินในห้องปฏิบัติการที่ได้แบ่งดินตามระบบ USCS ได้เป็นดินในกลุ่ม SC และ SM และตรงกับผลที่ได้ทำการประเมินตามการแบ่งชั้นดินในเบื้องต้น ทำให้ผลที่ได้มีความน่าเชื่อถือ และสอดคล้องกับผลการทดสอบในสนามมาก

## 2. การวิเคราะห์รูปแบบการตกของฝน

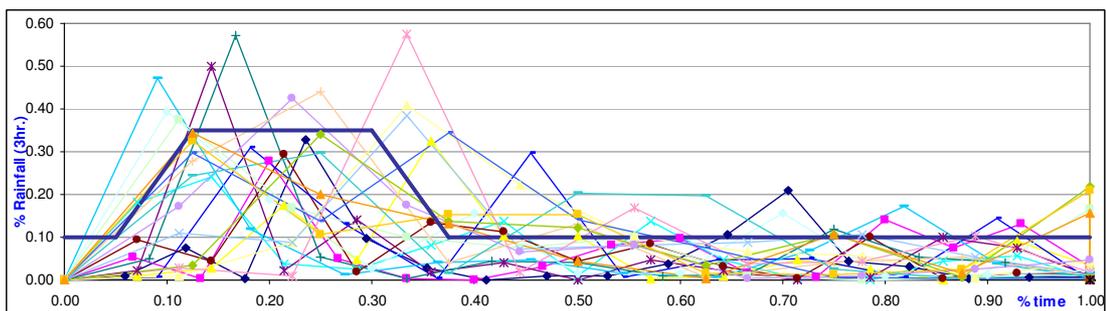
ในการวิเคราะห์การไหลซึมที่ทำให้เกิดการพิบัติของลาดดิน รูปแบบการตกของฝน เป็น อีกสิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญนอกเหนือจากคุณสมบัติของดินที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น จึงนำลักษณะการตกของฝนตามสภาพการเกิดจริงในพื้นที่จังหวัดภูเก็ต ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1981 จนถึงปี 2004 ที่สถานีวัดน้ำฝน 564201 มาวิเคราะห์หารูปแบบการตกของฝน ซึ่งได้จากการเปรียบเทียบปริมาณฝนและช่วงเวลาที่ฝนตกแล้วจำแนกเป็นรูปแบบของฝนในแบบต่าง ๆ ได้เป็น 5 รูปแบบ (บรรพต, 2547) ดังภาพที่ 81 และตารางที่ 18 แสดงโอกาสเกิดเป็นเปอร์เซ็นต์ในแต่ละรูปแบบของฝนเปรียบเทียบ โดยให้ช่วงเวลากการตกเป็น 100%



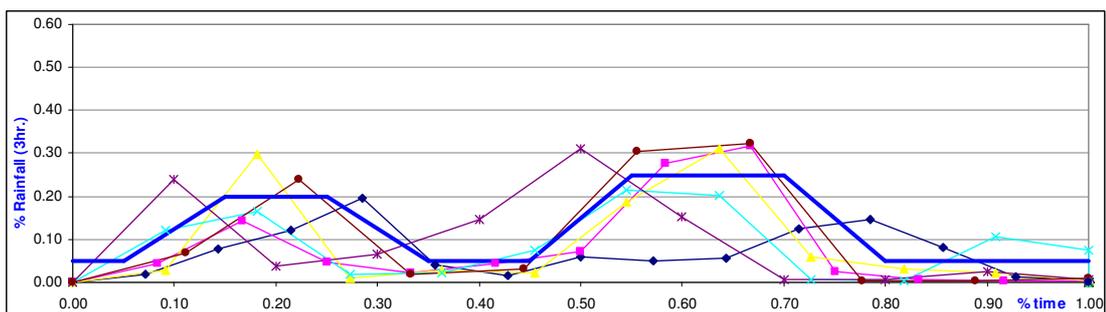
ก. รูปแบบการตกที่ 1



ข. รูปแบบการตกที่ 2

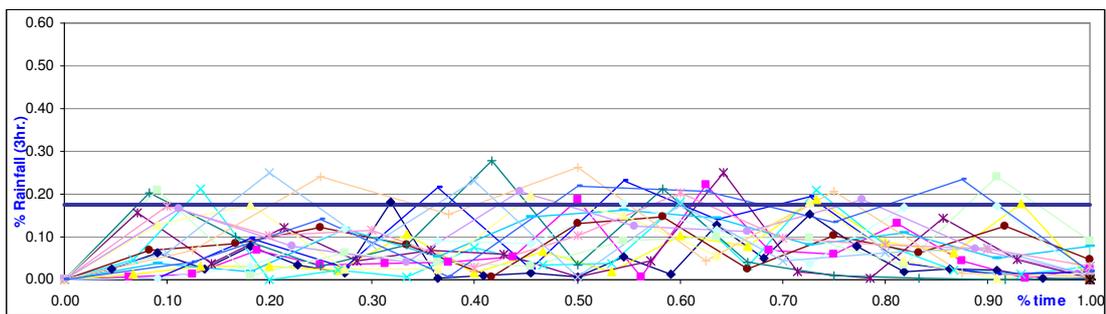


ค. รูปแบบการตกที่ 3

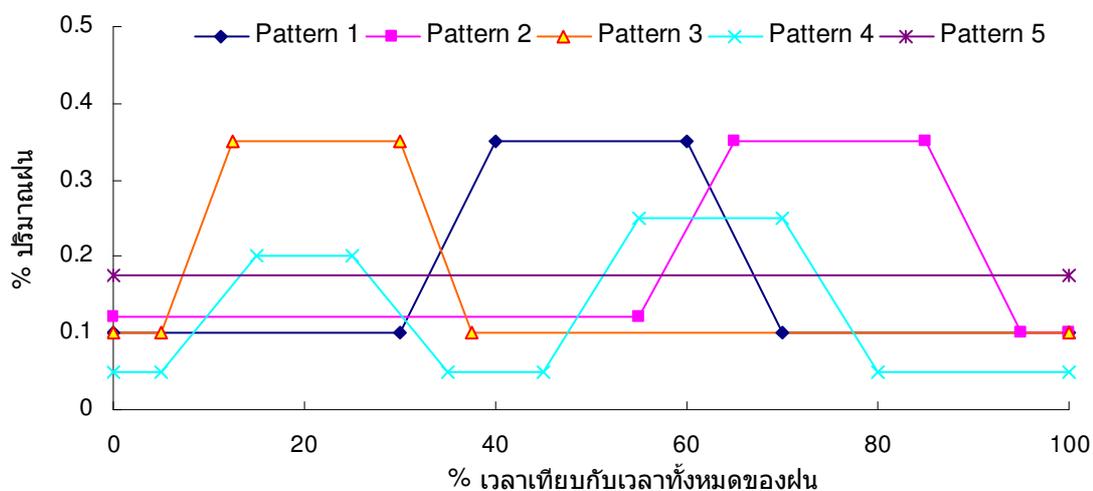


ง. รูปแบบการตกที่ 4

ภาพที่ 81 รูปแบบการตกของฝน



จ. รูปแบบการตกที่ 5



ฉ. เปรียบเทียบแต่ละรูปแบบการตกของฝน

ภาพที่ 81 (ต่อ)

ตารางที่ 18 โอกาสเกิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของฝนในแต่ละรูปแบบช่วงปี ค.ศ. 1981 ถึง 2003

รูปแบบการตกของฝน	Pattern 1	Pattern 2	Pattern 3	Pattern 4	Pattern 5	รวม
โอกาสในการเกิด, %	26.21	31.07	20.39	5.83	16.50	100

ผลจากการวิเคราะห์รูปแบบของฝนที่ตก สามารถสรุปได้เป็น 5 รูปแบบด้วยกัน คือ

รูปแบบที่ 1 ช่วงฝนที่มีความเข้มสูงอยู่ตรงกลางของช่วงเวลาที่ตก

รูปแบบที่ 2 ช่วงฝนที่มีความเข้มสูงอยู่ทางด้านขวาของช่วงเวลาที่ตก

รูปแบบที่ 3 ช่วงฝนที่มีความเข้มสูงอยู่ทางด้านซ้ายของช่วงเวลาที่ตก

รูปแบบที่ 4 ความเข้มฝนหนักเบาสลับกันของช่วงเวลาที่ตก

รูปแบบที่ 5 ความเข้มฝนคงที่ตลอดช่วงเวลาที่ตก

จากรูปแบบในการตกของฝนทั้งหมดนี้ จะทำการเลือกรูปแบบที่วิกฤตมาทำการวิเคราะห์การไหลซึมของปริมาณฝน 2 รูปแบบ คือ รูปแบบที่ 2 และรูปแบบที่ 1 เนื่องจากมีโอกาสในการเกิดมากที่สุดเป็น 2 อันดับแรก และมีความน่าสนใจจากการที่มีความเข้มของปริมาณฝนสูงอยู่ตรงกลางของช่วงเวลาที่ตก และรูปแบบที่ 2 ซึ่งเป็นรูปแบบที่มีโอกาสทำให้ลาดดินสูญเสียเสถียรภาพได้มากที่สุด (บรรพต, 2547)

### 3. การวิเคราะห์ปริมาณฝนสูงสุดที่คาบความถี่ของการเกิด

การหาปริมาณฝนสูงสุดที่คาบความถี่ของการเกิด(Return period) ต่าง ๆ เพื่อเป็นการนำไปใช้ในการวิเคราะห์การไหลซึมซึ่งส่งผลต่อเสถียรภาพของลาดดิน โดยได้จากการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยปริมาณฝนสูงสุดในช่วงเวลา 1, 2, 3, 5, 7 และ 10 วัน ที่คาบความถี่ของการเกิด 2,5, 10, 20, 50, 100 และ 200 ปี โดยการแจกแจงความถี่ด้วยวิธีของกัมเบล ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 19

ตารางที่ 19 ปริมาณฝนสูงสุดที่คาบความถี่ของการเกิดต่าง ๆ (หน่วยเป็น มม.)

ช่วงเวลาการตกของฝน (Duration), วัน	คาบความถี่ของการเกิด (Return period), ปี						
	2	5	10	20	50	100	200
1	114.02	161.99	198.28	234.57	282.54	318.83	355.11
2	153.03	196.35	229.12	261.90	305.22	337.99	370.76
3	176.95	234.96	278.85	322.73	380.75	424.63	468.52
5	215.59	281.80	331.88	381.97	448.18	498.27	548.36
7	255.25	320.43	369.74	419.04	484.23	533.53	582.84
10	298.02	377.83	438.21	498.59	578.40	638.78	699.16

จากปริมาณฝนสูงสุดที่ค่าความถี่ของการเกิด(Return period) ต่าง ๆ เมื่อนำไปรวมกับรูปแบบการตกของฝนทั้งสอง และแบ่งช่วงเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Time step) เป็นช่วงละ 12 ชั่วโมง จำนวนช่วงเวลาที่ขึ้นอยู่กับระยะเวลาการตกของฝน ทำให้มีกรณีศึกษาทั้งหมด 1600 กรณี ดังแสดงในตารางที่ 20

ตารางที่ 20 รูปแบบน้ำฝนสำหรับการวิเคราะห์การไหลซึมของปริมาณฝน

Rainfall Pattern	Duration, Day	Return Period, year					Time Step	Time Step Option,hr	Study Case
		2	5	20	100	200			
1	1	√	√	√			12	12	36
	2	√	√	√	√		16	12	64
	3	√	√	√	√		20	12	80
	5	√	√	√	√		30	12	120
	7	√	√	√	√	√	40	12	200
	10	√	√	√	√	√	60	12	300
2	1	√	√	√			12	12	36
	2	√	√	√	√		16	12	64
	3	√	√	√	√		20	12	80
	5	√	√	√	√		30	12	120
	7	√	√	√	√	√	40	12	200
	10	√	√	√	√	√	60	12	300
								sum	1600

## การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

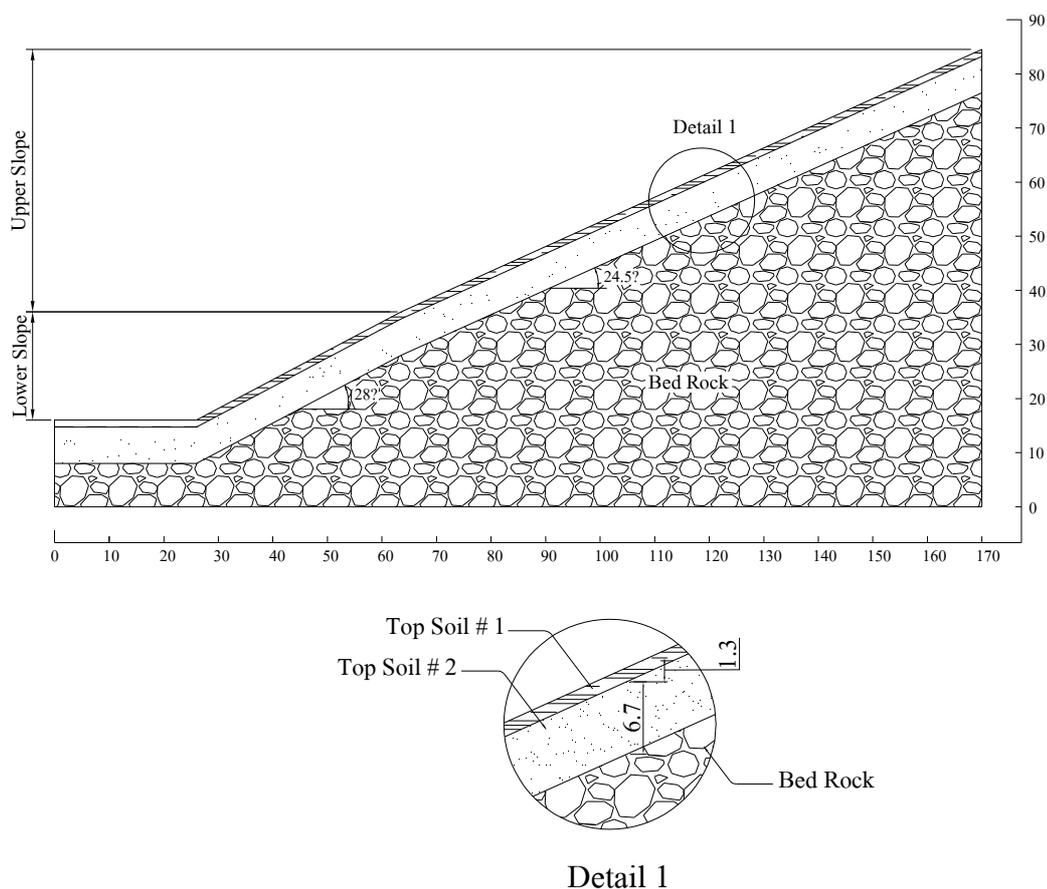
เสถียรภาพของลาดดินเป็นตัวบ่งชี้ถึงการพังทลายที่จะเกิดขึ้น ถ้าลาดดินนั้นขาดเสถียรภาพก็จะหมายถึงการพังทลายที่จะเกิดขึ้นตามมา ในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยวิธี Infinite slope ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ตามสภาพที่เกิดขึ้นจริงในสนาม คือเป็นการพังทลายในลักษณะการเคลื่อนพัง และจะนำผลจากเสถียรภาพที่ได้มาสร้างเส้นขอบเขตปริมาณฝนวิกฤติ (Critical rainfall envelope) เพื่อใช้ในการเตือนภัยที่จะเกิดขึ้นจากปริมาณฝนที่จะทำให้ลาดดินขาดเสถียรภาพจนเกิดการพังทลายได้

จากการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน พบว่าปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อเสถียรภาพของลาดดิน คือ กำลังรับแรงของดิน ระดับความอิ่มตัวของน้ำในมวลดิน และความลาดเอียงของพื้นที่ ดังนั้นในการวิเคราะห์เสถียรภาพต้องมีการพิจารณาการแบ่งชั้นดินตามกำลังรับแรงให้เหมาะสม เนื่องจากกำลังรับแรงนี้เป็นตัวบ่งชี้ถึงการพังทลายที่จะเกิดขึ้นในชั้นดินได้หรือไม่ และในการวิเคราะห์ดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำในมวลดิน (Unsaturated soil) ระดับความอิ่มตัวของน้ำในมวลดินมีผลกับเสถียรภาพของลาดดินมาก โดยดินที่มีระดับความอิ่มตัวของน้ำในมวลดินสูงจะมีเสถียรภาพต่ำกว่าดินที่มีระดับน้ำในมวลดินต่ำกว่า ความลาดเอียงของพื้นที่ที่มีผลกับเสถียรภาพของลาดดินเช่นกัน ดินที่มีความลาดเอียงสูงจะมีเสถียรภาพต่ำกว่าดินที่มีความลาดเอียงต่ำกว่าที่ระดับความอิ่มตัวของน้ำในมวลดินเท่ากัน จากที่ได้กล่าวมานี้จะเห็นว่าปัจจัยต่าง ๆ มีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องซึ่งกันและกัน ดังนั้นในการวิเคราะห์ต้องมีการพิจารณาให้เหมาะสม และเปรียบเทียบกับสิ่งที่เกิดขึ้นจริงในสนามควบคู่กันไปด้วยเพื่อให้ได้ผลที่มีความเป็นไปได้มากที่สุด

### 1. แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในสนามนั้น ได้แบ่งความลาดชันของดินในสนามตามสภาพภูมิประเทศได้เป็น 2 ส่วน เช่นเดียวกับการวิเคราะห์การไหลซึม คือ ความลาดชันตอนบน (Upper slope) มีความลาดเอียง 24.5 องศา และความลาดชันตอนล่าง (Lower slope) มีความลาดเอียง 28 องศา และได้แบ่งกำลังของดินส่วนบนออกเป็น 2 ชั้น คือ ดินส่วนบนชั้นที่ 1 และดินส่วนบนชั้นที่ 2 โดยกำลังของดินส่วนบนในชั้นที่ 1 นั้น ได้รวมเอาการแบ่งดินตามการไหลซึมในดินส่วนบนชั้นที่ 1 และ 2 ไว้ และกำลังของดินส่วนบนในชั้นที่ 2 ได้รวมเอาการแบ่งดินตาม

การไหลซึมในดินส่วนบนชั้นที่ 3 และ 4 เข้าไว้ ซึ่งพิจารณาจากการทดสอบกำลังของดินในสนาม การติดตามผลของแรงดันน้ำในมวลดินในความลึกต่าง ๆ ของชั้นดิน และการทดสอบดินทางด้าน ภายภาพในห้องปฏิบัติการ ดังภาพที่ 82



ภาพที่ 82 หน้าตัดแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

## 2. เสถียรภาพของลาดดินในสนาม

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในสนาม พบว่าการเปลี่ยนแปลงระดับความอิ่มตัวของน้ำในมวลดินมีผลกระทบต่อเสถียรภาพของลาดดินเป็นอย่างมาก นั่นแสดงว่าปริมาณฝนที่ตกในพื้นที่สามารถทำให้เกิดการพิบัติของลาดดินได้เช่นกัน ดังแสดงในตารางที่ 21

ตารางที่ 21 อัตราส่วนปลอดภัย (FS.) ของลาดดินที่ระดับความอิ่มตัวของน้ำในมวลดินต่าง ๆ

Sr ; %	Depth ; cm							
	30	60	95	130	180	225	300	800
	Soil # 1				Soil # 2			
Upper slope (24.5 Degree)								
30	43.88	22.62	14.78	11.17	5.27	4.52	3.78	2.39
35	37.94	19.65	12.91	9.80	4.88	4.21	3.55	2.30
40	32.80	17.08	11.29	8.61	4.54	3.94	3.34	2.22
45	28.27	14.81	9.85	7.57	4.24	3.70	3.16	2.16
50	24.21	12.78	8.57	6.63	3.97	3.49	3.00	2.10
55	20.54	10.95	7.42	5.78	3.73	3.29	2.86	2.04
60	17.19	9.28	6.36	5.01	3.51	3.12	2.72	1.99
65	14.11	7.73	5.38	4.30	3.30	2.95	2.60	1.95
70	11.26	6.31	4.48	3.64	3.12	2.80	2.49	1.90
75	8.60	4.98	3.64	3.03	2.94	2.66	2.38	1.86
80	6.12	3.74	2.86	2.46	2.78	2.53	2.29	1.83
82	5.17	3.26	2.56	2.24	2.71	2.48	2.25	1.81
84	4.24	2.80	2.27	2.02	2.65	2.43	2.21	1.80
86	3.34	2.35	1.98	1.81	2.59	2.38	2.18	1.79
88	2.45	1.90	1.70	1.61	2.53	2.34	2.14	1.77
90	1.59	1.47	1.43	1.41	2.48	2.29	2.11	1.76
92	0.74	1.05	1.16	1.21	2.42	2.25	2.07	1.75
94	-0.09	0.63	0.90	1.02	2.37	2.20	2.04	1.73
96	-0.90	0.23	0.64	0.84	2.31	2.16	2.01	1.72
98	-1.69	-0.17	0.39	0.65	2.26	2.12	1.98	1.71
100	-2.47	-0.56	0.15	0.47	2.21	2.08	1.95	1.70
Lower slope (28 Degree)								
30	39.87	20.52	13.39	10.10	4.71	4.04	3.36	2.09
35	34.47	17.82	11.68	8.85	4.36	3.75	3.15	2.01
40	29.79	15.48	10.20	7.77	4.05	3.50	2.96	1.94
45	25.66	13.41	8.90	6.82	3.77	3.29	2.80	1.88
50	21.97	11.57	7.73	5.96	3.53	3.09	2.65	1.83
55	18.63	9.90	6.68	5.19	3.31	2.91	2.52	1.78
60	15.58	8.37	5.72	4.49	3.11	2.75	2.40	1.73
65	12.78	6.97	4.83	3.84	2.92	2.61	2.29	1.69
70	10.18	5.67	4.01	3.24	2.75	2.47	2.18	1.65
75	7.76	4.46	3.25	2.68	2.59	2.34	2.09	1.61
80	5.50	3.33	2.53	2.16	2.44	2.22	2.00	1.58
82	4.63	2.90	2.26	1.96	2.39	2.18	1.96	1.57
84	3.79	2.48	1.99	1.77	2.33	2.13	1.93	1.56
86	2.96	2.06	1.73	1.58	2.28	2.09	1.90	1.54
88	2.16	1.66	1.48	1.39	2.22	2.05	1.87	1.53
90	1.37	1.27	1.23	1.21	2.17	2.00	1.84	1.52
92	0.60	0.88	0.98	1.03	2.12	1.96	1.81	1.51
94	-0.15	0.50	0.75	0.86	2.07	1.92	1.78	1.50
96	-0.89	0.14	0.51	0.69	2.02	1.88	1.75	1.49
98	-1.61	-0.23	0.29	0.52	1.98	1.85	1.72	1.48
100	-2.32	-0.58	0.06	0.36	1.93	1.81	1.69	1.46

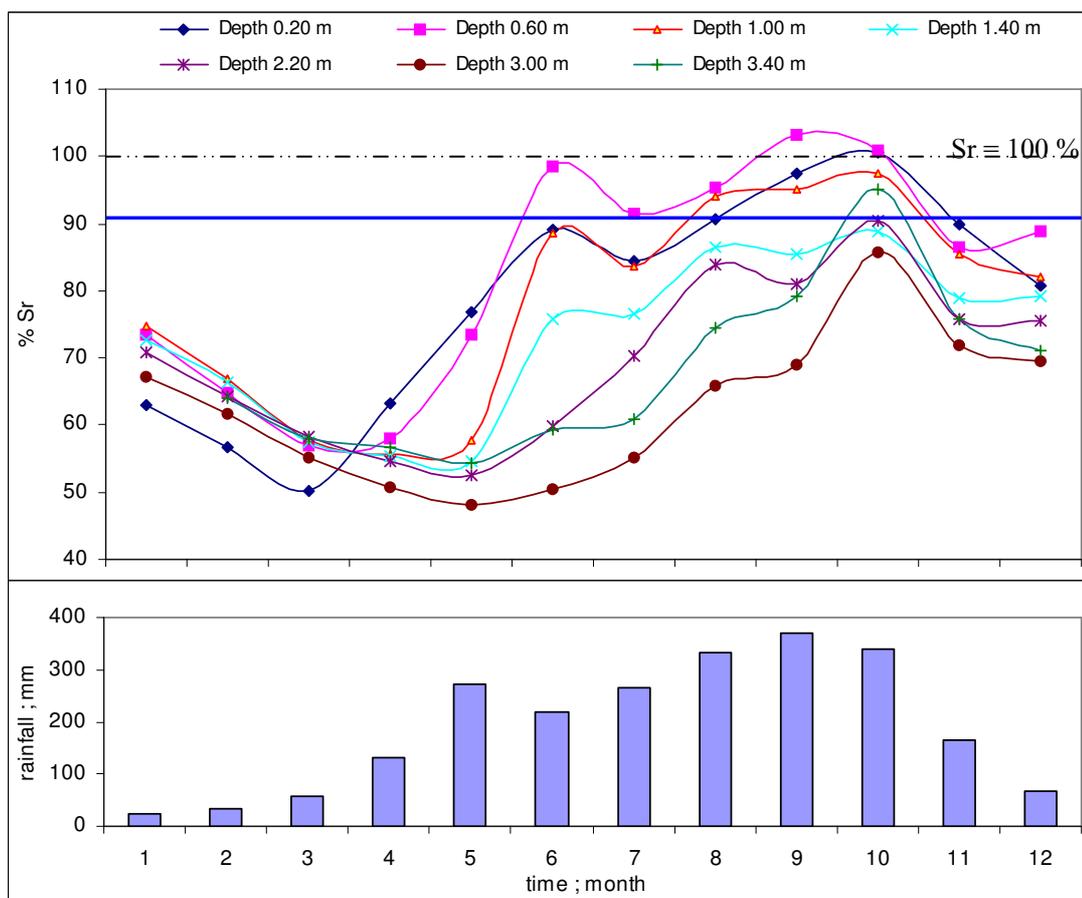
เมื่อดินมีระดับความอิ่มตัวของน้ำในมวลดินน้อย จนถึงดินมีความอิ่มตัวเต็มที่ ( $S_r = 100\%$ ) ที่ความลึกต่าง ๆ ของดินในชั้นที่ 1 (0 – 1.30 เมตร) ดินมีโอกาที่จะเกิดการสูญเสียน้ำ เสถียรภาพ (ถ้าให้  $FS. = 1$  เป็นดินที่มีเสถียรภาพพอดี) แต่ในดินในชั้นที่ 2 (1.30 – 8.00 เมตร) นั้น  $FS$  ของลาดดินมากกว่า 1 เสมอ ไม่ว่าดินจะมีระดับความอิ่มตัวเท่าใดก็ตาม นั่นแสดงว่าดินในชั้นที่ 2 มีความแข็งแรงมากกว่าดินในชั้นที่ 1 และดินในชั้นที่ 1 เท่านั้นที่มีโอกาที่จะเกิดการพิบัติได้ ซึ่งตรงกับสภาพจริงในพื้นที่จริงในจังหวัดภูเก็ตที่มีการพิบัติเป็นดินในระดับตื้น ๆ ที่ความลึกประมาณ 1.00 ถึง 1.50 เมตร

ดินในชั้นที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับความอิ่มตัวของน้ำในมวลดิน เสถียรภาพของลาดดินมีการเปลี่ยนแปลงสูง และแปรผกผันกับระดับความอิ่มตัวของระดับน้ำในมวลดิน ซึ่งต่างกับดินในชั้นที่สองที่มีการเปลี่ยนแปลงเสถียรภาพของลาดดินน้อยมาก

ความลาดเอียงของลาดดินเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อเสถียรภาพเช่นกัน โดยดินที่มีความลาดเอียงค้ำเช่นความลาดเอียงตอนล่าง (28 องศา) จะมีเสถียรภาพต่ำกว่าดินที่มีความลาดเอียงน้อยกว่าค้ำเช่นดินในความลาดเอียงตอนบน (24.5 องศา) ที่ระดับความอิ่มตัวของน้ำในมวลดินที่เท่ากัน

และที่ระดับความอิ่มตัวของน้ำในมวลดินอยู่ในช่วง 91 – 94 % สำหรับความลาดเอียงตอนบน และช่วง 91 – 92 % สำหรับความลาดเอียงตอนล่าง จึงจะเกิดการเคลื่อนพังได้ นั่นแสดงว่า ถ้ามีปริมาณฝนมากพอที่จะทำให้เกิดการพิบัติและดินมีการเปลี่ยนแปลงระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากันที่ความลึกเดียวกัน ลาดดินตอนล่างจะเกิดการพิบัติก่อนลาดดินตอนบน

ในการวิจัยได้ทำการสำรวจการเปลี่ยนแปลงของระดับความอิ่มตัวของน้ำในมวลดินในเดือนต่าง ๆ ตามความลึกของดิน ดังภาพที่ 83



ภาพที่ 83 การเปลี่ยนแปลงของระดับความอืดตัวของน้ำในมวลดินในเดือนต่าง ๆ ตามความลึกในชั้นดิน

เมื่อนำการติดตามค่าระดับความอืดตัวของน้ำในมวลดิน มาทำการเปรียบเทียบกับ การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน จะเห็นว่าที่ความลึก 0.20, 0.60 และ 1.00 เมตร มีระดับความอืดตัวของน้ำในมวลดินสูงกว่า 90 % ตั้งแต่เดือนที่ 8 จนถึงเดือนที่ 10 ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเสถียรภาพของลาดดินในตารางที่ 21 แล้ว ดินในชั้นต่าง ๆ เหล่านี้น่าจะมีการพิบัติเกิดขึ้นแล้ว แต่ในสภาพจริงในสนามยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่ต้องนำมาพิจารณาควบคู่กันไปด้วย เช่น รากของพืชในบริเวณที่ทำการสำรวจ ก็จะช่วยเสริมเสถียรภาพของลาดดินได้ หรือความแปรปรวนของการเก็บข้อมูล ก็อาจบอกได้ว่าดินในชั้นต่าง ๆ เหล่านี้มีความแข็งแรงมากกว่าที่ทำการวิเคราะห์ แต่ในเดือนที่ 10 ก็มีโอกาสสูงที่จะเกิดการพิบัติได้ เนื่องจากดินในชั้นที่ต่ำกว่า 1.00 เมตร มีระดับความอืดตัวของน้ำในมวลดินสูงมาก เมื่อมีปริมาณฝนที่มากพอก็จะทำให้เกิดการพิบัติได้

## แนวทางการประยุกต์ใช้งาน

สิ่งที่คาดหวังที่จะได้ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คือผลที่ถูกต้องน่าเชื่อถือและสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นแนวทางการเตือนภัยดินถล่มในพื้นที่จังหวัดภูเก็ตได้จริง ดังนั้นจึงนำผลที่ได้มาเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้งาน เพื่อให้ง่ายในการแสดงผลและประชาชนในพื้นที่สามารถใช้งานได้จริง โดยการสร้างกราฟปริมาณฝนวิกฤติ (Critical Rainfall Envelope)

กราฟปริมาณฝนวิกฤติ (Critical Rainfall Envelope) เป็นกราฟที่ใช้สำหรับการเตือนภัยลาดดินถล่ม โดยใช้ปริมาณฝนที่ตกในพื้นที่เป็นตัวบ่งชี้ กราฟปริมาณฝนวิกฤติสร้างจากความสัมพันธ์ของปริมาณฝนที่ตกในวันที่พิจารณา กับปริมาณฝนตกสะสมก่อนหน้าตามจำนวนวันที่ได้ทำการคัดเลือกไว้ นอกจากนี้ยังมีตัวแปรที่สำคัญอีกสิ่งหนึ่งคือการคัดเลือกความลาดเอียงวิกฤติมาใช้เป็นตัวแทนของพื้นที่จังหวัดภูเก็ต ดังนั้นในการสร้างกราฟปริมาณฝนวิกฤติจึงต้องทำการคัดเลือกตัวแปรต่าง ๆ ให้มีความน่าเชื่อถือและสามารถใช้เป็นตัวแทนของลาดดินในจังหวัดภูเก็ตได้

### 1. ความลาดเอียงของพื้นที่ในจังหวัดภูเก็ต

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญกับการเปลี่ยนแปลงเสถียรภาพได้แก่ความลาดเอียงของพื้นที่ ในขั้นนี้ จะทำการศึกษาและพิจารณาถึงความลาดเอียงของพื้นที่ในจังหวัดภูเก็ต เพื่อใช้ในการตัดสินใจเลือกความลาดเอียงที่จะมาทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

จังหวัดภูเก็ตมีพื้นที่ประมาณ 543.30 ตารางกิโลเมตร และประกอบไปด้วยพื้นที่ราบ และพื้นที่ที่มีความลาดเอียงในองศาต่าง ๆ มากมาย ดังภาพที่ 84 และตารางที่ 22

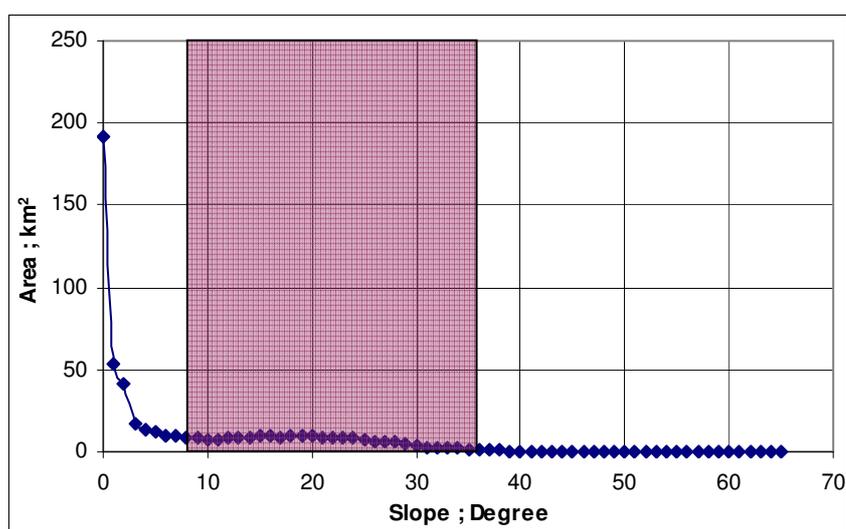


ภาพที่ 84 ภาพ 3 มิติแสดงลักษณะภูมิประเทศของ จ. ภูเก็ต  
ที่มา: ศูนย์วิจัยภูมิสารสนเทศเพื่อประเทศไทย

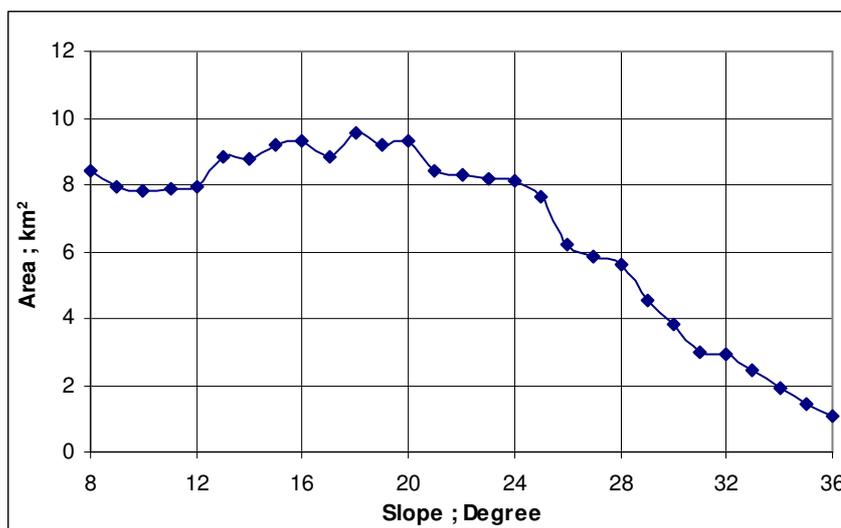
ตารางที่ 22 แสดงความลาดเอียงเป็นองศาของพื้นที่ในจังหวัดภูเก็ต

Slope deg	Area km <sup>2</sup>	Area %	Slope deg	Area km <sup>2</sup>	Area %	Slope deg	Area km <sup>2</sup>	Area %
0	191.18	35.191	22	8.29	1.526	44	0.11	0.020
1	53.30	9.811	23	8.21	1.511	45	0.09	0.017
2	40.74	7.499	24	8.12	1.494	46	0.08	0.014
3	17.09	3.146	25	7.63	1.405	47	0.04	0.007
4	13.66	2.515	26	6.21	1.143	48	0.01	0.001
5	11.61	2.138	27	5.88	1.082	49	0.02	0.004
6	10.06	1.851	28	5.61	1.033	50	0.06	0.011
7	9.38	1.726	29	4.52	0.832	51	0.03	0.005
8	8.43	1.552	30	3.83	0.704	52	0.05	0.009
9	7.97	1.467	31	2.99	0.550	53	0.01	0.002
10	7.81	1.437	32	2.93	0.540	54	0.02	0.004
11	7.86	1.448	33	2.47	0.455	55	0.00	0.000
12	7.97	1.467	34	1.91	0.351	56	0.02	0.004
13	8.84	1.628	35	1.42	0.262	57	0.00	0.000
14	8.78	1.615	36	1.05	0.194	58	0.00	0.000
15	9.17	1.689	37	0.77	0.142	59	0.00	0.000
16	9.31	1.714	38	0.66	0.122	60	0.00	0.000
17	8.84	1.628	39	0.56	0.103	61	0.00	0.000
18	9.56	1.760	40	0.51	0.095	62	0.00	0.000
19	9.17	1.688	41	0.21	0.039	63	0.00	0.000
20	9.31	1.714	42	0.27	0.050	64	0.00	0.000
21	8.43	1.552	43	0.17	0.032	65	0.02	0.003

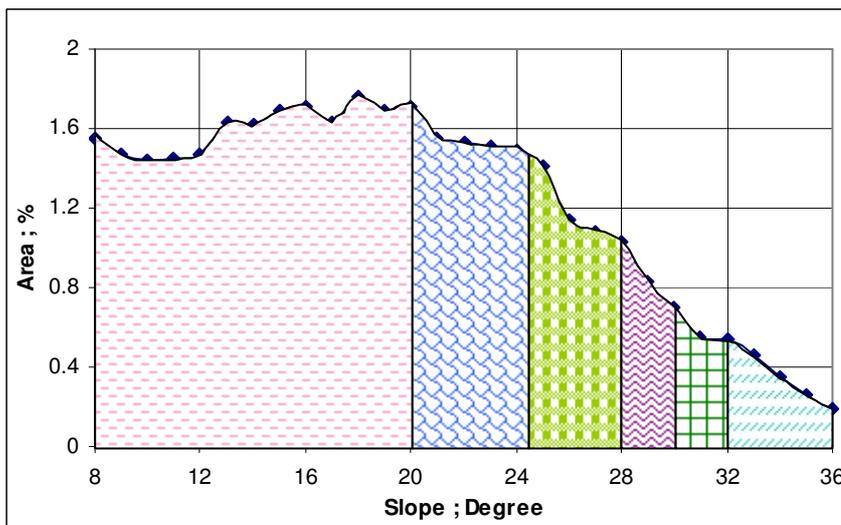
จากตารางที่ 22 นำมาพล็อตกราฟ เพื่อให้เห็นถึงปริมาณพื้นที่และความลาดเอียงเป็นองศาของพื้นที่ทั้งจังหวัด ดังภาพที่ 85 และนำมาวิเคราะห์ให้ละเอียดขึ้นในพื้นที่ที่มีความลาดเอียงที่มีผลกับเสถียรภาพของลาดดิน ดังภาพที่ 86 และภาพที่ 87



ภาพที่ 85 ความลาดเอียงของพื้นที่ในจังหวัดภูเก็ต



ภาพที่ 86 ความลาดเอียงของพื้นที่ในจังหวัดภูเก็ตเป็นองศา ที่มีผลกับเสถียรภาพของลาดดิน



ภาพที่ 87 ความลาดเอียงของพื้นที่ในจังหวัดภูเก็ต (พื้นที่เป็น %)

ในการวิเคราะห์หน้าตัดแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพที่แบ่งความลาดเอียงของพื้นที่เป็นความลาดเอียงตอนบน (24.5 องศา) และความลาดเอียงตอนล่าง (28 องศา) ประกอบกับการพิจารณาความลาดเอียงของพื้นที่ในจังหวัดภูเก็ต จึงแบ่งความลาดเอียงของพื้นที่เพิ่มอีกเป็น 30 และ 32 องศา เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินต่อไป ส่วนความลาดเอียงของพื้นที่ในช่วง 0 – 20 องศา นั้นจากข้อมูลการพิบัติในอดีตและการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินพบว่ามีโอกาสเกิดลาดดินถล่มน้อยมาก ส่วนความลาดเอียงที่มากกว่า 32 องศา เมื่อวิเคราะห์เสถียรภาพมีโอกาสเกิดการพิบัติสูงแต่ตามสภาพธรณีวิทยาและการสำรวจภาคสนามพบว่ามีลักษณะเป็นหิน โผล่เนื่องจากดินชั้นบนได้เกิดการพิบัติไปแล้วในอดีต จึงไม่นำความลาดเอียงที่มากกว่า 32 องศา มาเป็นตัวแทนในการวิเคราะห์เสถียรภาพ แสดงการแบ่งความลาดชันเป็นช่วง ๆ ดังตารางที่ 23

ตารางที่ 23 แสดงความลาดเอียงของพื้นที่ที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ

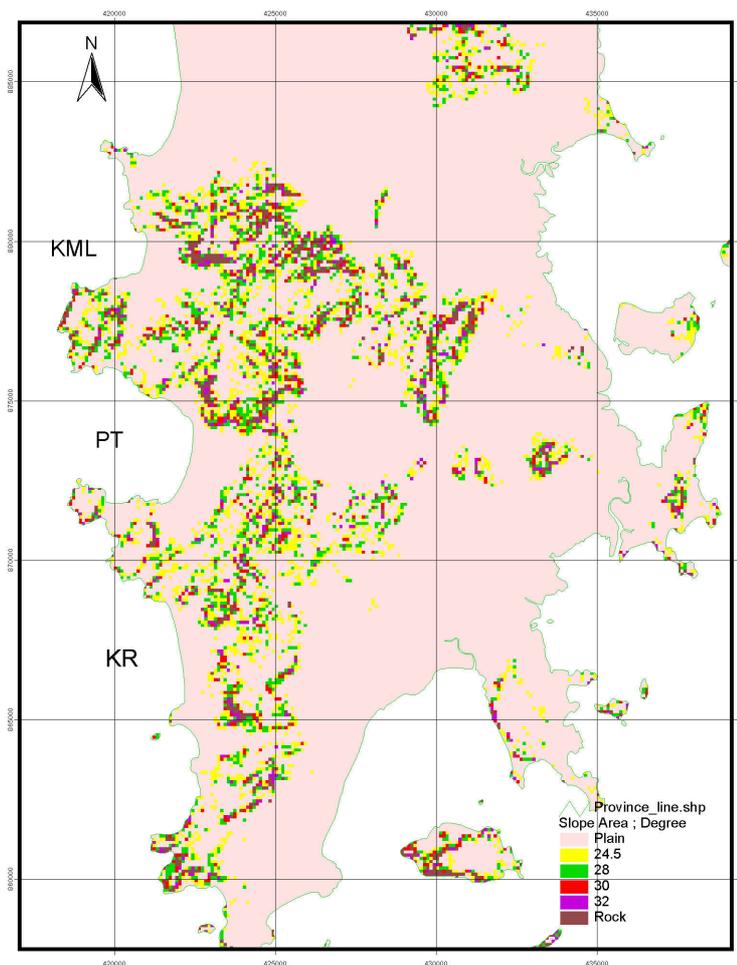
Slope value ; Degree	0 - 20	20 - 24.5	24.5 - 28	28 - 30	30 - 32	32 - 65	Sum
Slope critical value; Degree	-	24.5	28	30	32	-	
Area ; %	84.68	6.75	4.00	1.54	1.09	1.94	100

## 2. การคัดเลือกความลาดเอียงวิกฤติ

ความลาดเอียงของพื้นที่ที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินประกอบด้วย 4 ช่วง คือ 24.5 28 30 และ 32 องศา แต่ในขั้นการสร้าง Critical Rainfall Envelope เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเตือนภัยนั้น ควรคัดเลือกความลาดเอียงที่มีความเหมาะสมและทำให้เกิดความเสียหายกับชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนในพื้นที่จังหวัดภูเก็ตโดยรวมมากที่สุดมาเป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ ซึ่งเรียกว่าความลาดเอียงวิกฤติ โดยใช้วิธีการประเมินคะแนนความสูญเสียที่จะเกิดขึ้นกับความลาดเอียงต่าง ๆ แล้วเลือกความลาดชันที่มีคะแนนมากที่สุดซึ่งมีโอกาสเกิดความสูญเสียทั้งชีวิตและทรัพย์สินมาเป็นตัวแทนในการสร้าง Critical Rainfall Envelope

การประเมินคะแนนความสูญเสียใช้วิธีการพิจารณาจากปัจจัยที่มีผลกระทบกับความเสียหายที่จะเกิดขึ้น 4 ประการ ได้แก่ พื้นที่ กฎกระทรวง ชุมชน และทางน้ำ ประกอบกัน แล้วจึงให้คะแนนความเสียหายที่มีโอกาสเกิดขึ้นกับความลาดเอียงใด ๆ โดยถ้าปัจจัยใดมีผลกระทบของภัยพิบัติมากเกิดขึ้นที่ความลาดเอียงใดจะให้คะแนนเต็ม 10 และลดหลั่นลงมาตามโอกาสเกิด โดยการใช้ GIS (โปรแกรม Arcview GIS) ช่วยในการพิจารณาให้คะแนน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. พื้นที่ ทำการประเมินให้คะแนนความสูญเสียที่จะเกิดขึ้น จากความลาดเอียงที่มีปริมาณพื้นที่มากแสดงว่าหากเกิดลาดดินถล่มความลาดเอียงนั้นมีโอกาสเกิดความเสียหายสูงกว่าความลาดเอียงอื่น ๆ จึงให้คะแนนความสูญเสียสูง ในการให้คะแนนนั้นใช้วิธีการแบ่งช่วงความลาดชันต่าง ๆ แล้ววัดปริมาณพื้นที่ ดังแสดงในภาพที่ 88 พบว่าช่วงความลาดชัน 24.5 องศา มีพื้นที่มากกว่าช่วงความลาดชันอื่น ๆ โดยมีพื้นที่เป็น 6.75 % (36.67 ตารางกิโลเมตร) ของพื้นที่ทั้งหมด จึงให้คะแนน 10 คะแนน และความลาดชันอื่น ๆ ให้คะแนนลดหลั่นลงไปตามปริมาณพื้นที่



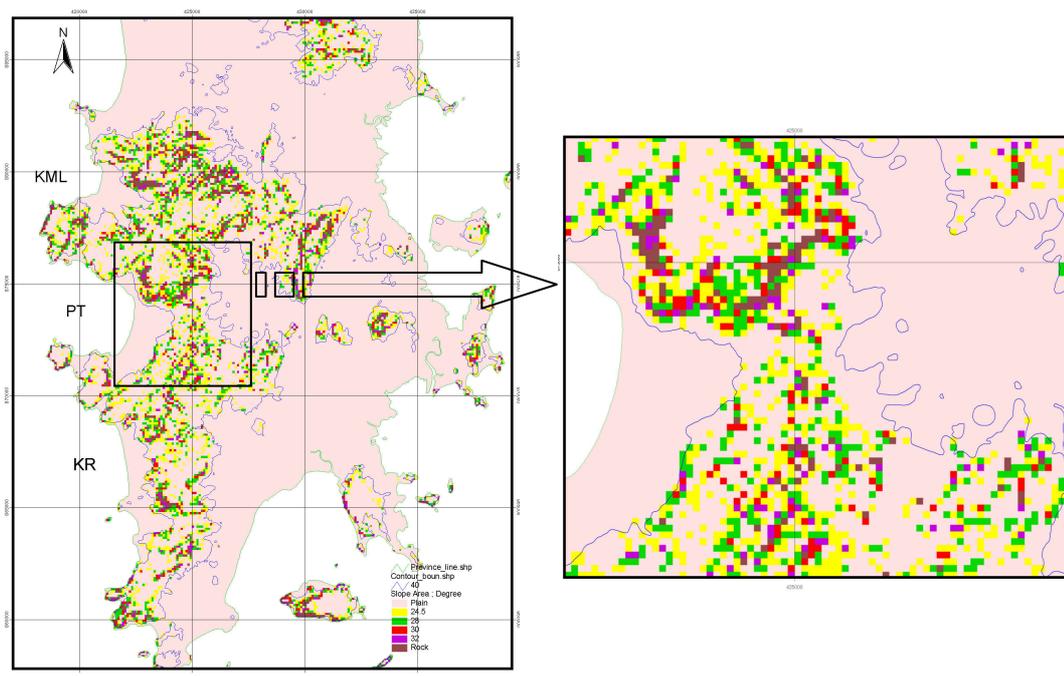
ภาพที่ 88 แสดงช่วงความลาดชันต่าง ๆ (Grid ขนาด 50 x 50)

2. ประกาศกระทรวง (ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดเขตพื้นที่และมาตรการการคุ้มครองสิ่งแวดล้อม ในบริเวณจังหวัดภูเก็ต พ.ศ. 2540) ดังแสดงในภาคผนวก ก โดยมีรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการเลือกความลาดเอียงวิกฤตดังนี้ พื้นที่ที่มีระดับความสูง 40 – 80 ม.รทก. สามารถสร้างสิ่งปลูกสร้างได้สูงไม่เกิน 8.00 เมตร และพื้นที่ที่มีระดับสูงกว่า 80 ม.รทก. ไม่ให้มีสิ่งปลูกสร้างใดๆ

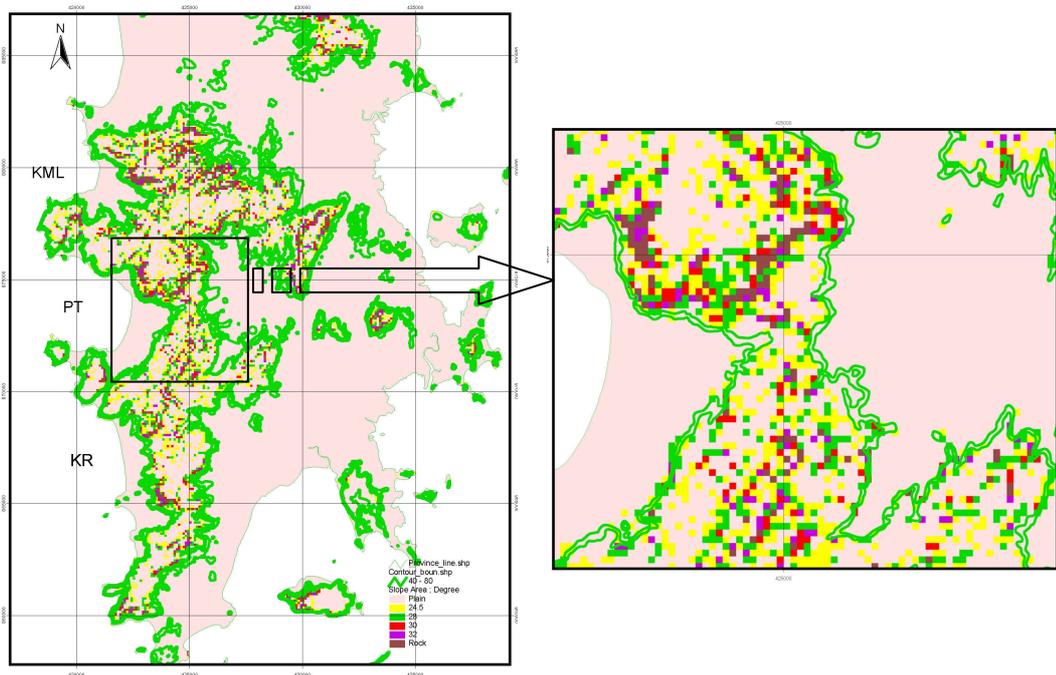
การประเมินให้คะแนนสูญเสียพิจารณาจาก 3 ปัจจัยประกอบกัน คือความลาดเอียง ระดับความสูงและสิ่งปลูกสร้าง โดยให้ทุกความลาดเอียงมีโอกาสเกิดลาดดินถล่มเท่ากันและความลาดเอียงใดจะทำความเสียหายให้กับสิ่งปลูกสร้างได้มากโดยใช้ประกาศกระทรวงเป็นเกณฑ์ในการ

ให้คะแนน จากการซ้อนทับพื้นที่ลาดเอียงกับระดับความสูงต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 89 ถึง ภาพที่ 91 มีรายละเอียดดังนี้

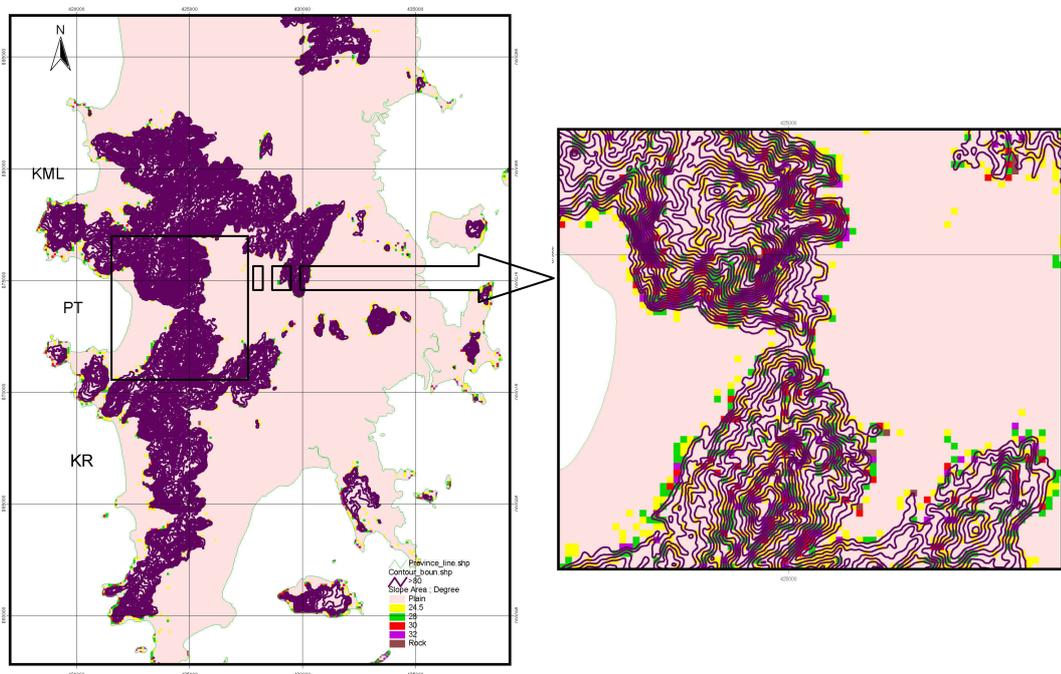
- พื้นที่ที่มีระดับต่ำกว่า 40 ม.รทก. ครอบคลุมความลาดเอียงต่ำกว่า 24.5 องศา (Plain) เป็นส่วนใหญ่
- พื้นที่ที่มีระดับ 40 – 80 ม.รทก. ส่วนใหญ่ซ้อนทับกับความลาดเอียง 24.5 องศา แสดงว่าถ้าเกิดลาดดินถล่มจะเกิดความเสียหายกับอาคารที่มีความสูงไม่เกิน 8.00 เมตร
- พื้นที่ที่มีระดับมากกว่า 80 ม.รทก. ส่วนใหญ่มีความลาดเอียงมากกว่า 24.5 องศา ถ้าเกิดลาดดินถล่มจะไม่ทำให้เกิดความเสียหายเนื่องจากไม่มีสิ่งก่อสร้างใด ๆ



ภาพที่ 89 การซ้อนทับ Contour ที่มีระดับ น้อยกว่า 40 ม.รทก. บนพื้นที่ที่มีความลาดชันต่าง ๆ

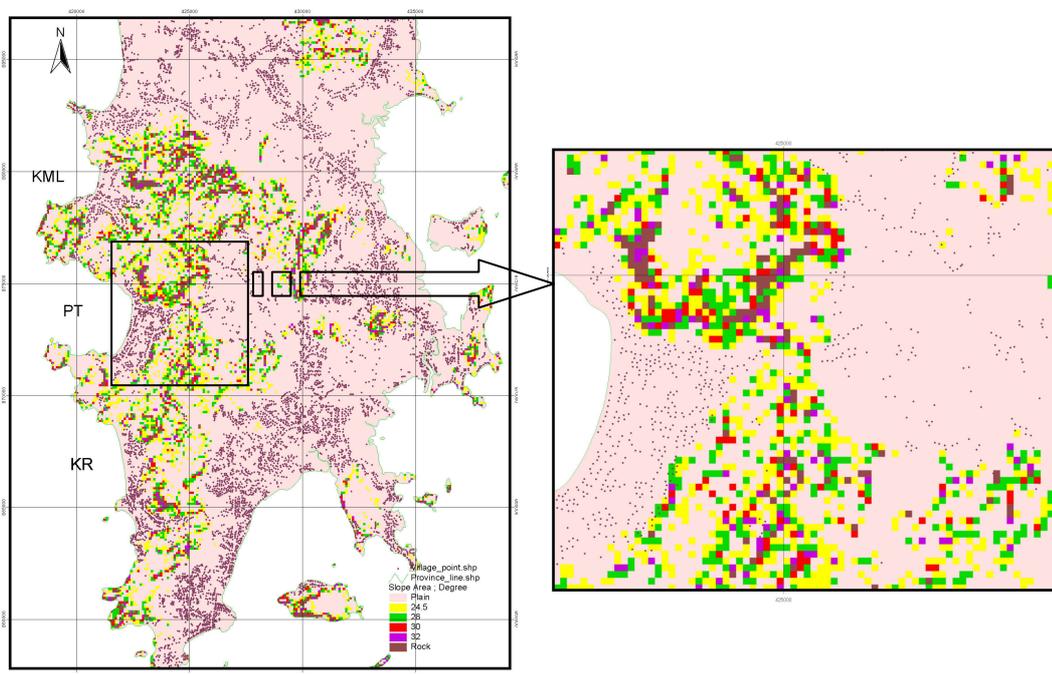


ภาพที่ 90 การซ้อนทับ Contour ที่มีระดับ 40 – 80 ม.รทก. บนพื้นที่ที่มีความลาดชันต่าง ๆ



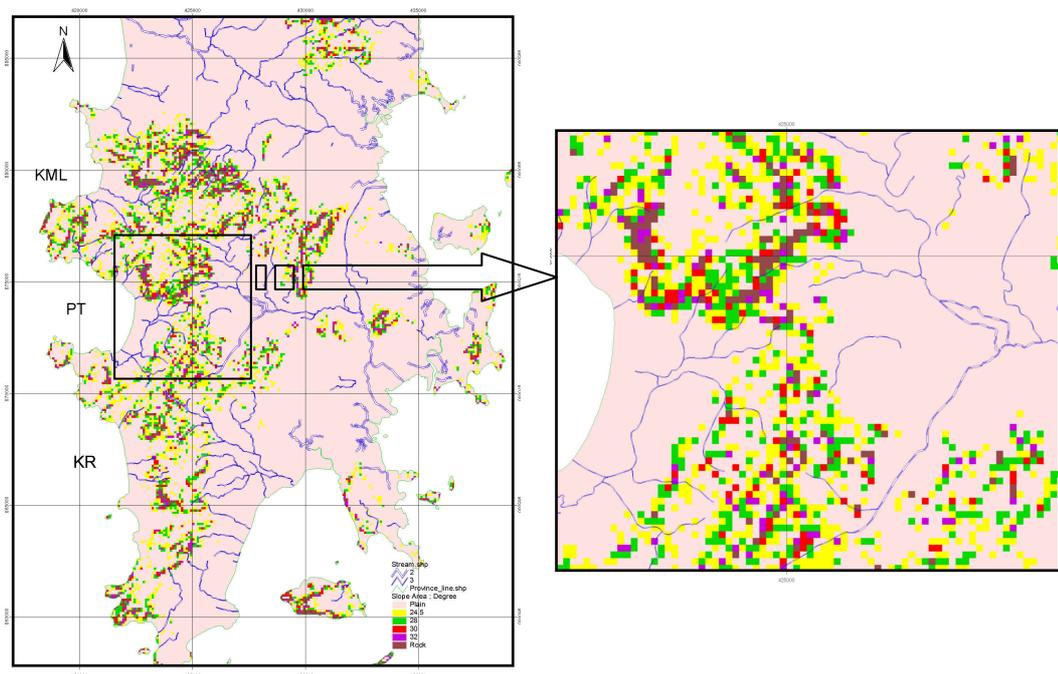
ภาพที่ 91 การซ้อนทับ Contour ที่มีระดับมากกว่า 80 ม.รทก. บนพื้นที่ที่มีความลาดชันต่าง ๆ

3. ชุมชน ทำการประเมินให้คะแนนสูญเสียโดยพิจารณาจาก 2 ปัจจัยประกอบกัน คือ ความลาดเอียง และระยะทางจากแหล่งชุมชน โดยให้ทุกความลาดเอียงมีโอกาสเกิดลาดดิน ถล่มเท่ากันและความลาดเอียงใดที่อยู่ใกล้กับแหล่งชุมชนมากกว่าก็มีโอกาสทำความเสียหายให้กับชุมชนนั้นสูงกว่าด้วย ดังแสดงในภาพที่ 92 พบว่าชุมชนตั้งอยู่บนพื้นที่ที่มีความลาดเอียงน้อยกว่า 24.5 องศา และพื้นที่ที่มีความลาดเอียงมากขึ้นจะอยู่ถัดออกไปจากแหล่งชุมชน เมื่อเกิดลาดดินถล่ม ความลาดเอียง 24.5 องศา มีโอกาสทำความเสียหายให้กับชุมชนมากกว่าความลาดเอียงอื่น



ภาพที่ 92 การซ้อนทับชุมชนอยู่อาศัยและเศรษฐกิจบนพื้นที่ที่มีความลาดชันต่าง ๆ

4. ทางน้ำ เนื่องจากทางน้ำเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญมากที่ทำให้เกิดลาดดินถล่มได้ ดังนั้นหากความลาดเอียงได้อยู่ใกล้ทางน้ำมากย่อมมีโอกาสเกิดลาดดินถล่มได้มากเช่นกัน จึงทำการประเมินคะแนนความสูญเสียจากการซ้อนทับทางน้ำบนความลาดเอียงต่าง ๆ ดังภาพที่ 93 พบว่าทางน้ำอยู่ใกล้กับความลาดเอียงต่าง ๆ ใกล้เคียงกัน เนื่องจากทางน้ำไหลจากร่องน้ำที่อยู่บนยอดเขาลงมาสู่พื้นราบเพื่อไหลลงทะเล คะแนนที่ให้ความลาดเอียงต่าง ๆ จึงใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 93 การซ้อนทับทางน้ำ (Stream line) บนพื้นที่ที่มีความลาดชันต่าง ๆ

ผลการประเมินคะแนนความสูญเสียแสดงในตารางที่ 24 ซึ่งพบว่าช่วงความลาดเอียง 24.5 องศา ได้คะแนนมากที่สุด 36 คะแนน จึงเลือกความลาดเอียง 24.5 องศา มาเป็นตัวแทนความลาดเอียงของพื้นที่จังหวัดภูเก็ตในการสร้างกราฟปริมาณฝนวิกฤติ (Critical Rainfall Envelope)

ตารางที่ 24 การให้คะแนนการประเมินความสูญเสีย

Slope value ; Degree	คะแนนการประเมินความสูญเสีย				รวม
	พื้นที่	ประกาศกระทรวง	ชุมชน	ทางน้ำ	
24.5	10	8	10	8	<b>36.00</b>
28	8	6	9	8	31.00
30	6	5	8	8	27.00
32	5	5	6	7	23.00

### 3. การคัดเลือกอัตราส่วนความปลอดภัย

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน สำหรับจัดทำเส้นปริมาณฝนวิกฤต (Critical rainfall envelope) เพื่อใช้เตือนภัยดินถล่มในพื้นที่จังหวัดภูเก็ตนั้น ได้แบ่งระดับการเตือนภัยเป็น 3 ชั้น คือ ชั้นอพยพ ชั้นแจ้งเตือน และชั้นเฝ้าระวัง โดยใช้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS.) เป็นตัวชี้วัดระดับการเตือนภัยเหล่านั้น ดังนั้นการคัดเลือกอัตราส่วนความปลอดภัยแต่ละระดับการเตือนภัยจึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากเป็นตัวกำหนดความเสี่ยงที่จะเกิดภัยพิบัติกับชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนในพื้นที่

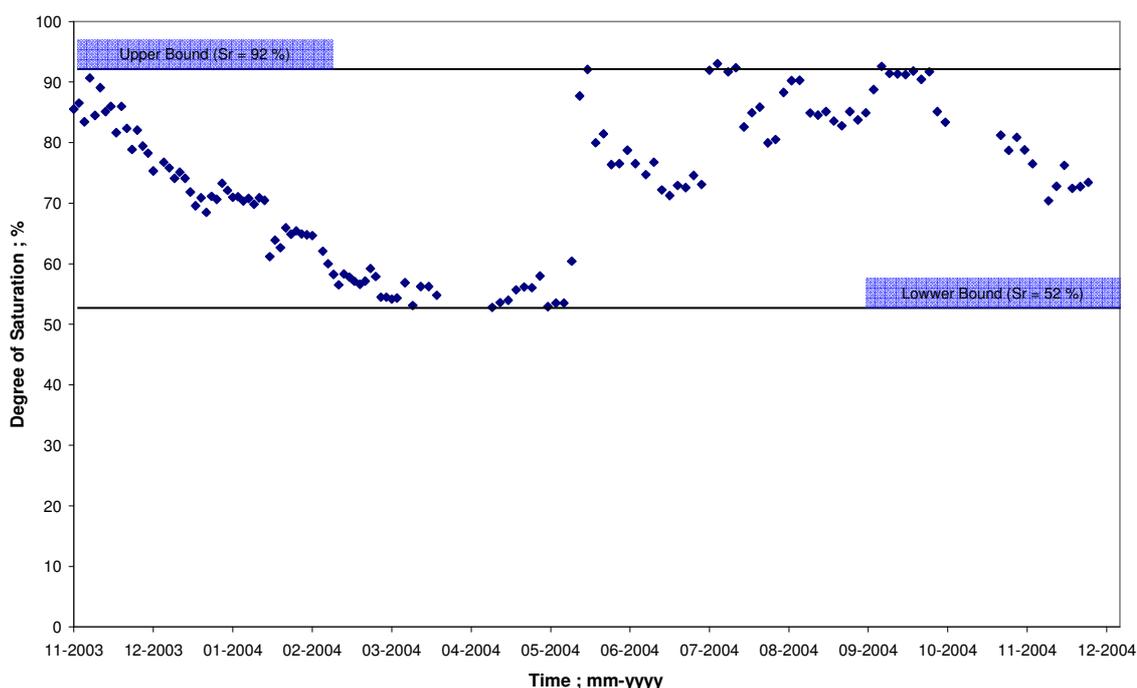
ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS.) สำหรับการเตือนภัยในชั้นอพยพ เลือกใช้ค่า FS. เท่ากับ 1 จากทฤษฎีการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ส่วนในชั้นแจ้งเตือนและชั้นเฝ้าระวังนั้น ต้องทำการคัดเลือกให้เหมาะสมและสอดคล้องกับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจริงในพื้นที่ต่อไป

ระดับการเตือนภัยในชั้นแจ้งเตือนถือเป็นชั้นที่มีความสำคัญมากเนื่องจากในชั้นนี้ จะต้องมีการแจ้งเตือนให้ส่วนราชการและชาวบ้านรับรู้ สำหรับเตรียมการป้องกันภัยพิบัติหรืออพยพไปอยู่ในที่ปลอดภัย ดังนั้นการเลือกค่า FS. จึงต้องมีความระมัดระวังและรอบคอบให้มาก เนื่องจากมีผลกระทบจากความประมาทในความรู้สึกของประชาชน

การวิเคราะห์เลือกอัตราส่วนความปลอดภัยในชั้นเตือนภัยได้ทำการคัดเลือกจาก 2 ปัจจัยประกอบกัน ซึ่งประกอบด้วย โอกาสเกิดของระดับความอึดตัว และค่าอัตราส่วนความปลอดภัย โดยมีรายละเอียดดังนี้

- โอกาสเกิดของระดับความอึดตัว จากการตรวจวัดพฤติกรรมของลาดดินในพื้นที่ต้นแบบ และการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ทำให้ได้ข้อมูลระดับความอึดตัวของน้ำในมวลดินที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาต่าง ๆ โดยทำการติดตามผลเป็นระยะเวลาประมาณ 1 ปี ทั้งฤดูฝนและฤดูแล้ง เพื่อให้เห็นถึงโอกาสที่ลาดดินเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับความอึดตัวของน้ำในมวลดินได้ ดังภาพที่ 94 แสดงให้เห็นว่าลาดดินมีการเปลี่ยนแปลงระดับความอึดตัวอยู่ในช่วง 52% - 92% ถึงแม้ว่าจะอยู่ในช่วงฤดูฝน (เดือนกันยายนถึงเดือนตุลาคม) ระดับความอึดตัวของน้ำในมวลดินก็ยังมีค่าไม่เกิน 92% เนื่องจากในโพรงดินยังคงมีช่องว่างของอากาศอยู่ไม่สามารถรับน้ำให้เต็มช่องว่างในดิน

ได้ ซึ่งในการกำจัดช่องว่างของอากาศนั้นต้องใช้ระยะเวลาพอสมควรและระยะเวลาในช่วงฤดูฝนยังไม่เพียงพอที่จะกำจัดช่องว่างของอากาศออกไป และลักษณะการเปลี่ยนแปลงระดับความอิ่มตัวของน้ำยังสอดคล้องกับ Lumb (1962a) ที่กล่าวว่า ภายใต้สภาวะการไหลซึม (Infiltration condition) ดินจะอิ่มตัวด้วยน้ำอย่างเต็มที่ด้วยความลึกที่น้อยมากจากผิวดิน จากนั้นระดับความอิ่มตัวของน้ำจะต่ำลงไปที่ Wet value ซึ่งมีค่า 80% - 90 %



ภาพที่ 94 แสดงการเปลี่ยนแปลงระดับความอิ่มตัวของน้ำในมวลดินในช่วงเวลาต่าง ๆ

จากข้อมูลข้างต้นทำให้ทราบขีดจำกัดบน (Upper Bound) ของระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของลาดดินในพื้นที่จังหวัดภูเก็ตมีค่าเท่ากับ 92% ซึ่งจากการติดตามผลในพื้นที่ต้นแบบยังไม่เกิดการพิบัติของลาดดินในบริเวณนี้ ดังนั้นถ้าระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของลาดดินสูงกว่าขีดจำกัดบน (92%) ถือว่ามีโอกาสที่จะทำให้เกิดลาดดินถล่มได้ ด้วยเหตุนี้จึงเลือกใช้ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 92% เป็นแนวทางในการเตือนภัยในขั้นแจ้งเตือน

- ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย จากการคัดเลือกระดับความอิ่มตัวของน้ำในมวลดินที่ 92% จึงทำการวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ระดับความอิ่มตัวต่าง ๆ ด้วยวิธี Infinite

slope ผลลัพธ์ที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 25 แสดงให้เห็นว่าที่ระดับความอึมตัวด้วยน้ำในมวลดินที่ 92% ที่ได้คัดเลือกไว้แล้ว มีอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.21 ดังนั้นค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ระดับการเตือนภัยในขั้นแจ้งเตือนขอเลือกใช้เท่ากับ 1.20

ตารางที่ 25 แสดงค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ระดับความอึมตัวต่าง ๆ

Sr ; %	50	60	70	80	84	88	90	92	94	96	98	100
FS.	6.63	5.01	3.64	2.46	2.02	1.61	1.41	1.21	1.02	0.84	0.65	0.47

จากการเลือกค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS.) สำหรับการเตือนภัยในขั้นอพยพและขั้นแจ้งเตือนซึ่งเป็นขั้นที่มีความสำคัญมากนั้น ใช้ค่า FS. เท่ากับ 1.00 และ 1.20 ตามลำดับ สำหรับระดับการเตือนภัยในขั้นเฝ้าระวังซึ่งเป็นช่วงของการติดตามสภาพอากาศและข้อมูลปริมาณน้ำฝนขอเลือกใช้อัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.40

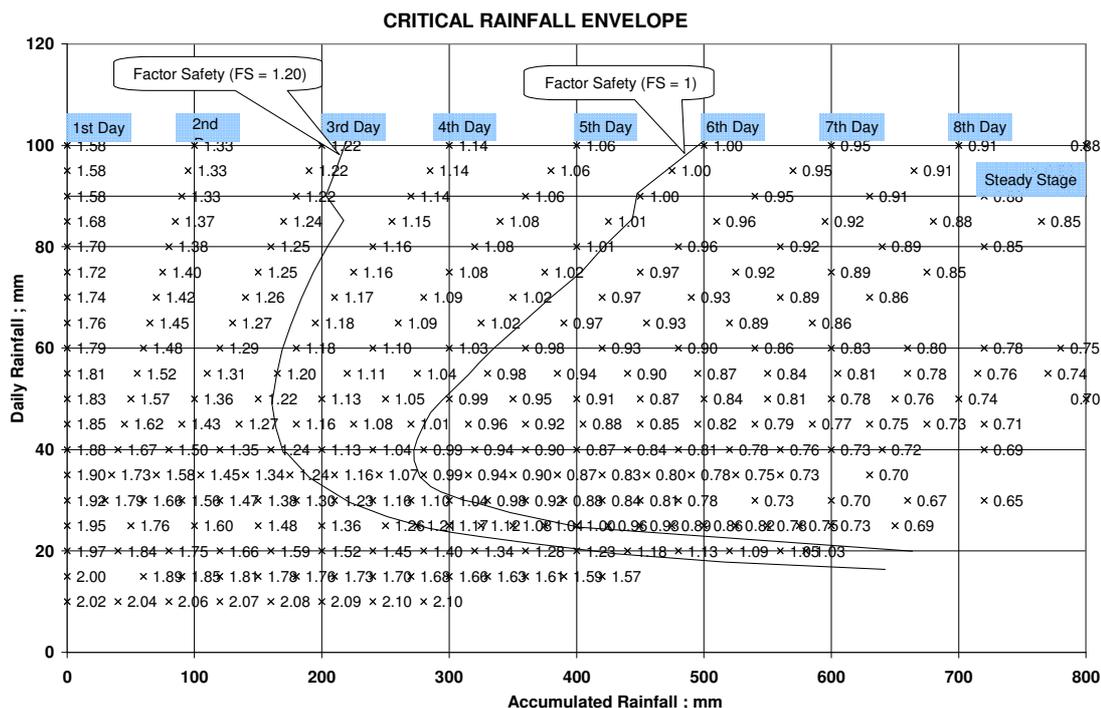
#### 4. การคัดเลือกจำนวนวันสะสม

จำนวนวันที่ฝนตกสะสมก่อนหน้าวันที่พิจารณาเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญในการเตือนภัยดินถล่ม เนื่องจากการที่จะเกิดการถล่มของลาดดินได้นั้นดินต้องมีปริมาณน้ำสะสมในมวลดินมากพอที่จะทำให้กำลังรับแรงของดินลดต่ำลงจนไม่สามารถรับน้ำหนักได้จนเกิดการเคลื่อนพังในที่สุด และปริมาณน้ำสะสมที่กล่าวถึงคือปริมาณฝนที่ตกสะสมก่อนหน้าวันที่พิจารณา ดังนั้นจึงต้องทำการคัดเลือกจำนวนวันสะสมให้สอดคล้องเหมาะสมกับสภาพชั้นดินและกำลังรับแรงของดินให้มากที่สุด

ในการคัดเลือกจำนวนวันที่ฝนตกสะสมก่อนหน้าวันที่พิจารณานั้น จะพิจารณาจากการเตือนภัยในขั้นแจ้งเตือนเป็นหลัก เนื่องจากในการเตือนภัยดินถล่มจะพิจารณาขั้นแจ้งเตือนสำหรับการแจ้งเหตุให้ชาวบ้านทราบเพื่อให้มีเวลาสำหรับจัดเตรียมข้าวของอพยพไปยังสถานที่ปลอดภัยได้

ภาพที่ 95 แสดงอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินเมื่อเกิดฝนตกติดต่อกันหลายวันด้วยปริมาณฝนต่าง ๆ พบว่าลาดดินมีอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำลงเมื่อมีจำนวนวันมากขึ้น เช่น ถ้าฝนตกด้วยปริมาณ 80 มม. ทุกวัน ในวันแรกที่พิจารณาลาดดินมี FS. เท่ากับ 1.70 วันที่ 2 ลาด

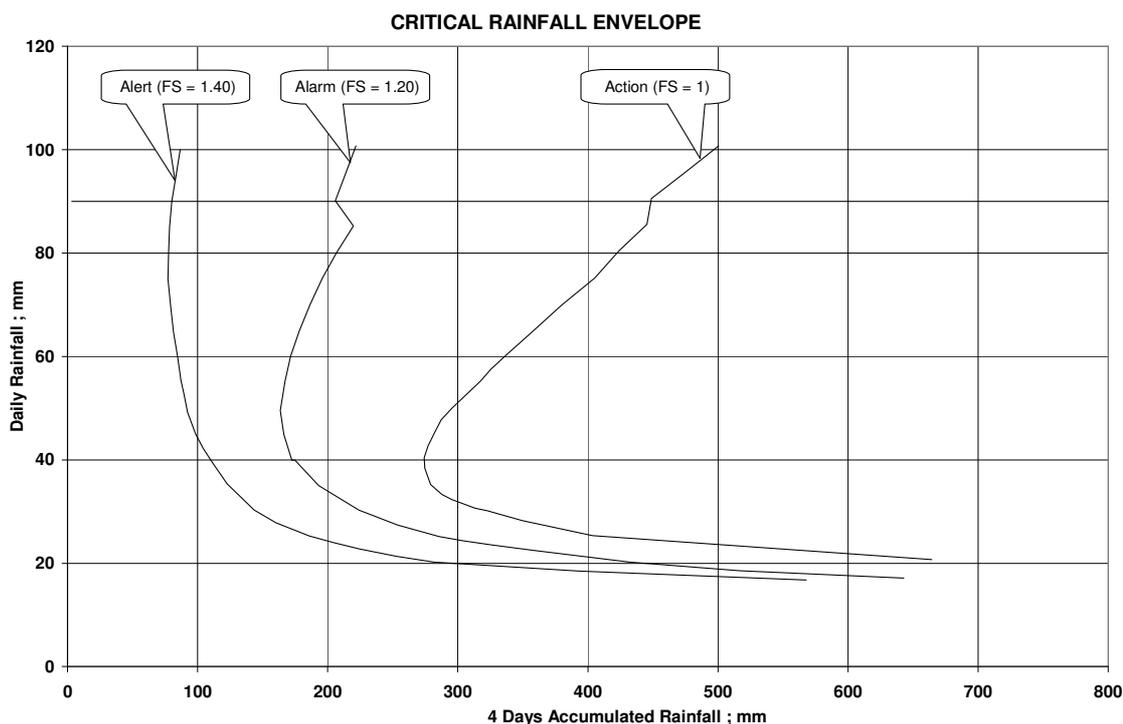
ดินมี FS. เท่ากับ 1.39 วันที่ 3 ถึงวันที่ 7 ลาดดินมี FS. เท่ากับ 1.25, 1.16, 1.00, 1.01 และ 0.96 ตามลำดับ จะเห็นว่าในช่วงวันที่ 3 ถึงวันที่ 4 ลาดดินมี FS. อยู่ในช่วง 1.25 ถึง 1.16 อยู่ในขั้นแข็ง เตือน (FS. = 1.20) และเมื่อพิจารณาที่ปริมาณฝนอื่น ๆ ก็มีลักษณะเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงขอเลือก จำนวนวันสะสมก่อนหน้าวันที่พิจารณาเป็น 4 วัน สำหรับเป็นตัวแทนของลาดดินในจังหวัดภูเก็ต



ภาพที่ 95 แสดงอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินเมื่อเกิดฝนตกติดต่อกัน

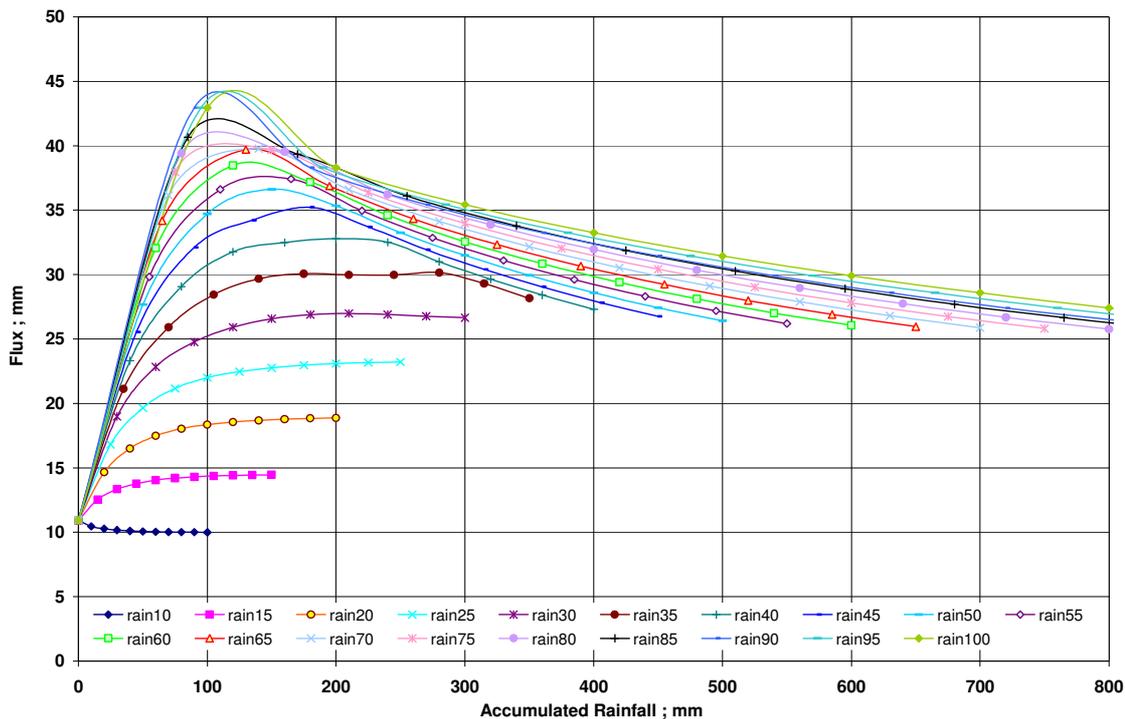
### 5. กราฟปริมาณฝนวิกฤติ (Critical Rainfall Envelope)

เมื่อได้ทำการคัดเลือกปัจจัยต่าง ๆ สำหรับการจัดทำกราฟปริมาณฝนวิกฤติ (Critical Rainfall Envelope) ในพื้นที่จังหวัดภูเก็ตแล้ว จึงทำการสร้างกราฟปริมาณฝนวิกฤติ ดังแสดงในภาพที่ 96

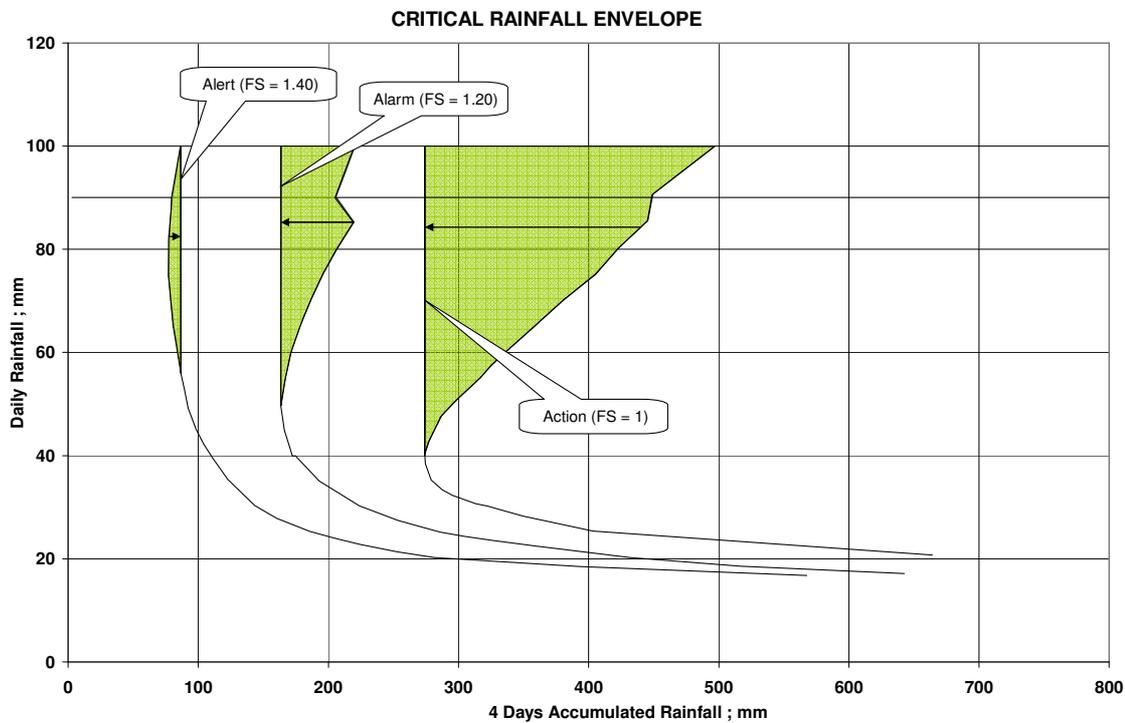


ภาพที่ 96 แสดงกราฟปริมาณฝนวิกฤติของลาดดินในจังหวัดภูเก็ต

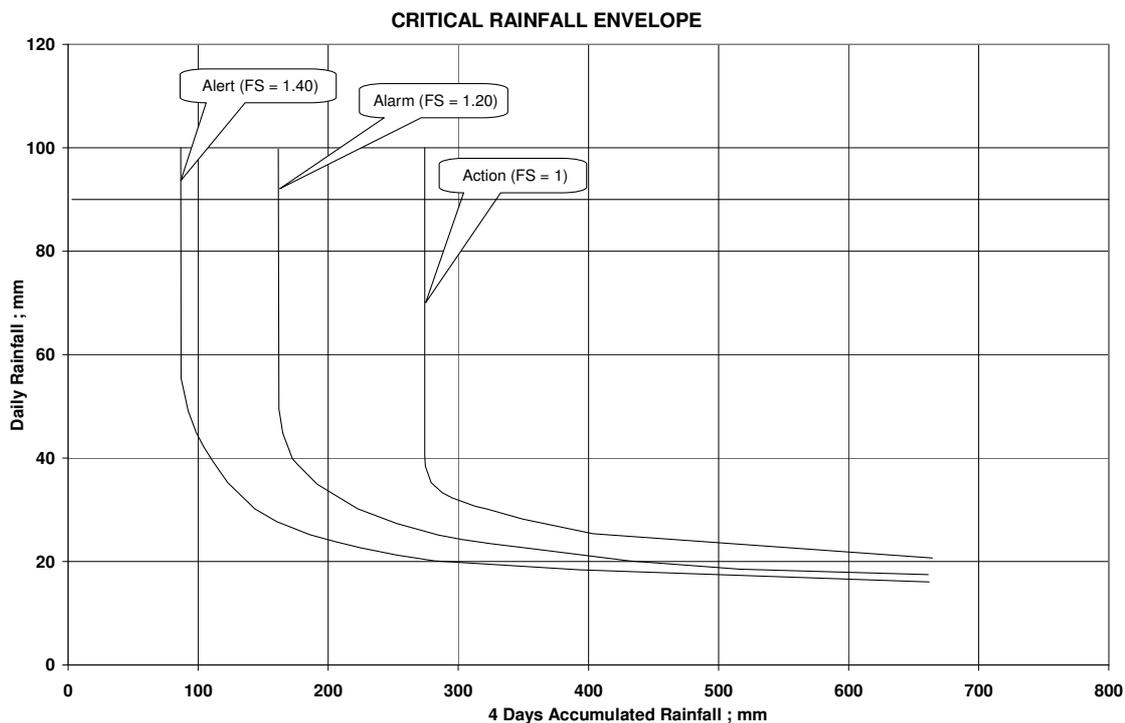
เมื่อพิจารณากราฟปริมาณฝนวิกฤติแล้ว พบว่าสาเหตุที่บริเวณส่วนบนของกราฟ โดยเฉพาะในขั้นวิกฤติ และขั้นแจ้งเตือนมีการโค้งงอเข้าไปด้านปริมาณฝนสะสมมาก ก็เนื่องมาจากปริมาณฝนที่ตกมากส่วนหนึ่งได้กลายเป็นน้ำผิวดิน (Runoff) ไหลไปสู่ที่ต่ำกว่า และที่เหลือก็จะซึมลงไปในดิน (Infiltration) จากอัตราการไหลซึมของดินที่มีความสามารถในการระบายน้ำฝนลงสู่ใต้ผิวดินได้ ดังแสดงในภาพที่ 97 ดังนั้นในการใช้งานเพื่อให้ง่ายในการนำไปใช้ประโยชน์และเตือนภัยดินถล่มในพื้นที่จังหวัดภูเก็ต และยังเป็นส่วนเพื่อความปลอดภัย (Safety) จึงขอปรับแก้กราฟให้ส่วนที่โค้งงอเป็นเส้นตรง ดังภาพที่ 98 เพื่อให้ได้กราฟปริมาณฝนวิกฤติ (Critical Rainfall Envelope) สำหรับใช้เตือนภัยดินถล่มในจังหวัดภูเก็ตดังภาพที่ 99



ภาพที่ 97 แสดงปริมาณการไหลซึมลงสู่ใต้ผิวดินของน้ำฝน



ภาพที่ 98 การปรับแก้กราฟปริมาณฝนวิกฤติ



ภาพที่ 99 กราฟปริมาณฝนวิกฤติ (Critical Rainfall Envelope) สำหรับใช้เตือนภัยดินถล่ม

#### 6. ตัวอย่างการใช้งานกราฟปริมาณฝนวิกฤติ

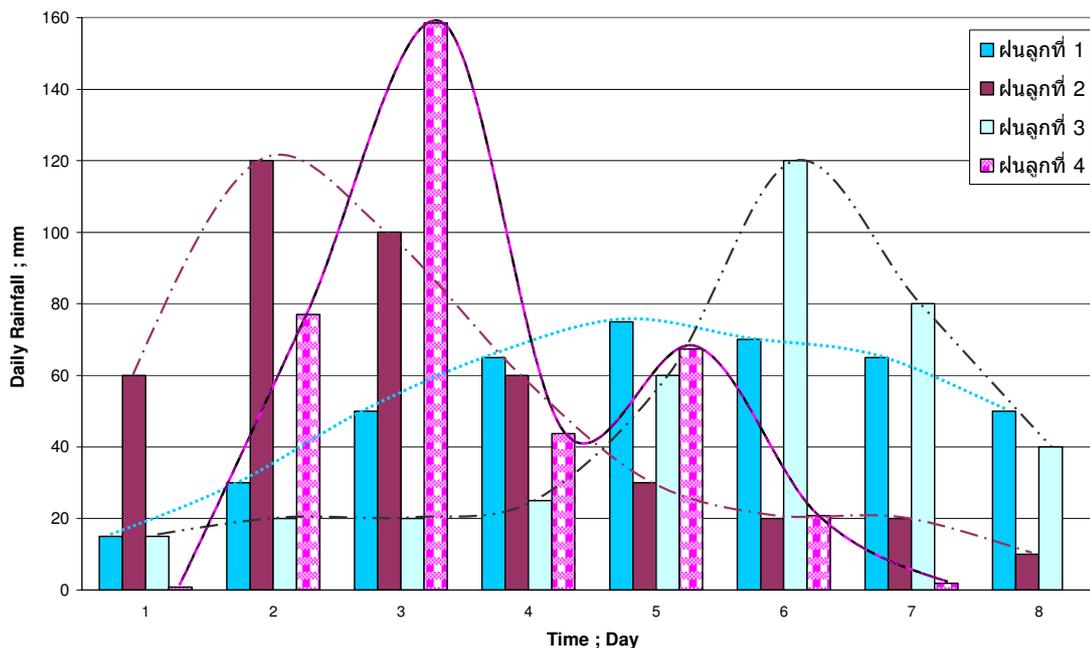
งานวิจัยฉบับนี้ต้องการให้ใช้ประโยชน์จากกราฟปริมาณฝนวิกฤติ (Critical Rainfall Envelope) ในการเตือนภัยดินถล่มในพื้นที่จังหวัดภูเก็ตให้มากที่สุด จึงขอเสนอตัวอย่างการใช้งาน โดยการสมมติให้มีปริมาณฝนตกในพื้นที่จังหวัดภูเก็ตจำนวน 3 ลูก และปริมาณฝนจริงในปี พ.ศ. 2544 อีก 1 ลูก โดยให้มีรูปแบบการตกที่แตกต่างกัน เพื่อให้เห็นลักษณะการพิบัติที่ชัดเจนขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 100 และมีรายละเอียดดังนี้

ฝนลูกที่ 1 มีรูปแบบความเข้มสูงอยู่ตรงกลางของช่วงเวลาที่ตก

ฝนลูกที่ 2 มีรูปแบบความเข้มสูงอยู่ด้านซ้ายของช่วงเวลาที่ตก

ฝนลูกที่ 3 มีรูปแบบความเข้มสูงอยู่ด้านขวาของช่วงเวลาที่ตก

ฝนลูกที่ 4 มีรูปแบบความเข้มสูงอยู่ด้านซ้ายของช่วงเวลาที่ตก เป็นฝนที่ตกจริงในช่วงปลายเดือนกันยายน พ.ศ. 2544 และเกิดลาดดินถล่ม



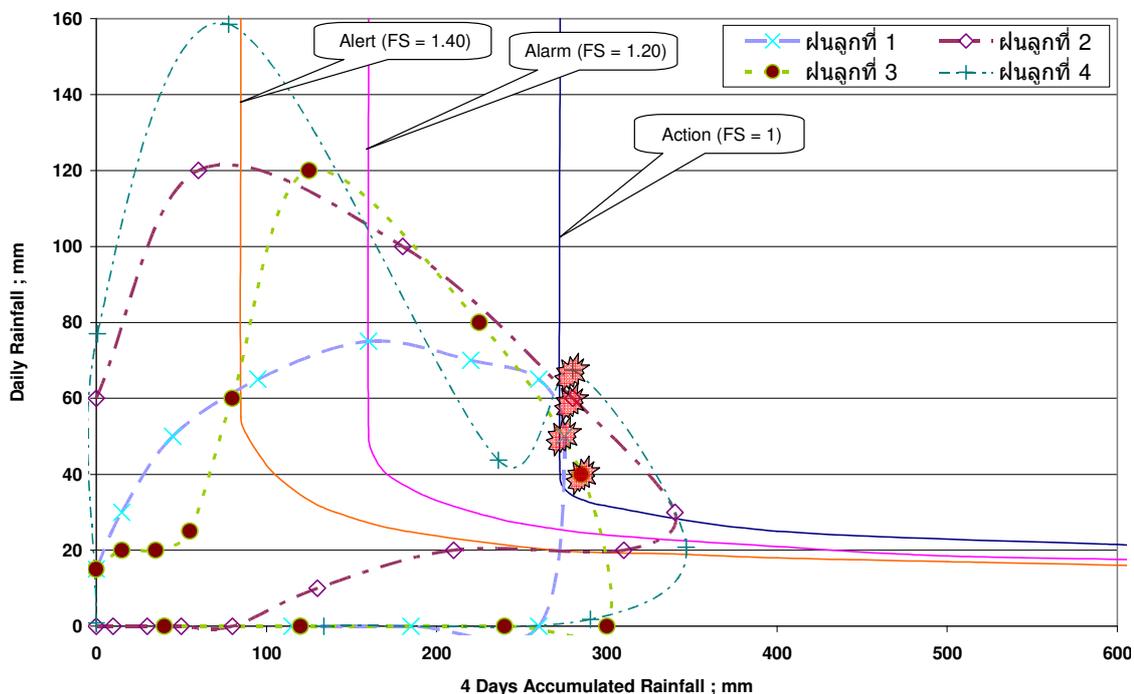
ภาพที่ 100 แสดงตัวอย่างปริมาณฝนที่ตกในพื้นที่จำนวน 4 ลูก

ในการใช้งานสำหรับการเตือนภัย ให้บันทึกปริมาณฝนรายวันและคำนวณหาปริมาณฝนสะสม 4 วันก่อนหน้า ซึ่งเป็นข้อมูลที่ใช้ในการพล็อตค่าสำหรับการเตือนภัยในกราฟปริมาณฝนวิกฤติ ดังแสดงในตารางที่ 26 ฝนลูกที่ 1 วันแรกตกปริมาณ 15 มม. ปริมาณฝนสะสม 4 วันก่อนหน้าเป็น 0 มม. ในวันที่ 2 ตกปริมาณ 30 มม. ทำให้ปริมาณฝนสะสม 4 วันก่อนหน้าเป็น 15 มม. (ปริมาณในวันที่ 1 ที่ฝนตก) วันที่ 3 ตกปริมาณ 50 มม. ทำให้ปริมาณฝนสะสม 4 วันก่อนหน้าเป็น 45 มม. (ปริมาณฝนวันที่ 1 รวมกับวันที่ 2) วันที่ 4 ฝนตกปริมาณ 65 มม. ทำให้ปริมาณฝนสะสม 4 วันก่อนหน้าเป็น 95 มม. (ปริมาณฝนวันที่ 1 รวมกับวันที่ 2 และวันที่ 3) วันที่ 5 ฝนตกปริมาณ 75 มม. ทำให้ปริมาณฝนสะสม 4 วันก่อนหน้าเป็น 160 มม. (ปริมาณฝนวันที่ 1 รวมกับวันที่ 2 วันที่ 3 และวันที่ 4) วันที่ 6 ฝนตกปริมาณ 70 มม. ทำให้ปริมาณฝนสะสม 4 วันก่อนหน้าเป็น 220 มม. (ปริมาณฝนวันที่ 2 รวมกับวันที่ 3 วันที่ 4 และวันที่ 5) ให้บันทึกข้อมูลตามรูปแบบนี้ไปจนกว่าฝนจะหยุดตกหรือมีปริมาณน้อยกว่า 15 มม. ซึ่งไม่ทำให้เกิดการพิบัติของลาดดินได้ พร้อมทั้งนำข้อมูลที่ได้ไปพล็อตในกราฟปริมาณฝนวิกฤติทุกวันที่มีข้อมูล ดังภาพที่ 101 จะเห็นว่า ฝนลูกที่ 1 เมื่อถึงวันที่ 4 จุดที่พล็อตเข้ามาใน Alert Zone สิ่งที่ต้องทำคือการเฝ้าระวัง ตรวจสอบปริมาณฝน ในวันที่ 5 จุดที่พล็อตอยู่ใน Alarm Zone หน่วยราชการที่เกี่ยวข้องต้องทำการแจ้งเตือน

ให้ประชาชนรับรู้สำหรับเตรียมการอพยพ และในวันที่ 8 จุดที่พลีตอยู่ใน Action Zone ภาคดินเกิดการพิบัติแล้ว ถ้าประชาชนยังอยู่ในพื้นที่เสี่ยงภัยอาจเกิดอันตรายได้

ตารางที่ 26 ข้อมูลที่ใช้ในการพลีตกราฟปริมาณฝนวิกฤติ

ฝนลูกที่	Day	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Daily Rainfall ; mm	15	30	50	65	75	70	65	50	0	0	0	0	0
	4 Days Accumulated Rainfall ; mm	0	15	45	95	160	220	260	275	260	185	115	50	0
2	Daily Rainfall ; mm	10	80	100	80	30	10	10	0	0	0	0	0	0
	4 Days Accumulated Rainfall ; mm	0	10	90	190	270	290	220	130	50	20	10	0	0
3	Daily Rainfall ; mm	15	20	20	25	60	80	50	30	20	0	0	0	0
	4 Days Accumulated Rainfall ; mm	0	15	35	55	80	125	185	215	220	180	100	50	20
4	Daily Rainfall ; mm	0.8	77	159	44	67	21	1.8	0					
	4 Days Accumulated Rainfall ; mm	0	0.8	78	236	280	347	290	134	90	23	1.8	0	0



ภาพที่ 101 แสดงตัวอย่างการใช้กราฟปริมาณฝนวิกฤติ

เมื่อพิจารณารูปแบบการตกของฝน จะเห็นว่าฝนทั้ง 4 รูปแบบ หรือ ปริมาณฝนทั้ง 4 ลูก มีโอกาสเกิดลาดดินถล่มได้ มีรายละเอียดดังนี้

ฝนลูกที่ 1 มีความเข้มสูงในวันที่ 5 และเกิดการพิบัติในวันที่ 8 ของการตก  
 ฝนลูกที่ 2 มีความเข้มสูงในวันที่ 2 และเกิดการพิบัติในวันที่ 4 ของการตก  
 ฝนลูกที่ 3 มีความเข้มสูงในวันที่ 6 และเกิดการพิบัติในวันที่ 8 ของการตก  
 ฝนลูกที่ 4 มีความเข้มสูงในวันที่ 3 และเกิดการพิบัติในวันที่ 5 ของการตก

จะเห็นว่าฝนทั้ง 4 ลูก ไม่มีลูกใดเลยที่พิบัติในวันที่ฝนมีความเข้มสูง เนื่องจากการพิบัตินั้นลาดดินต้องใช้ระยะเวลาและปริมาณฝนที่มากพอในการทำให้ปริมาณน้ำสะสมในมวลดิน และเมื่อทำการพล็อตกราฟฝนทั้ง 4 ลูก มีจุดที่เข้ามาอยู่ใน Alert Zone แสดงว่าภายหลังจากการแจ้งเตือนให้ประชาชนทราบเหตุการณ์นั้น มีระยะเวลาในการตัดสินใจอพยพออกจากพื้นที่หรือจัดการแก้ไขปัญหา ไม่ได้เกิดการพิบัติขึ้นในทันทีทันใด ดังนั้นจึงควรใช้กราฟปริมาณฝนวิกฤติ (Critical Rainfall Envelope) ให้เป็นประโยชน์ให้มากที่สุดเพื่อลดการสูญเสียชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนในพื้นที่จังหวัดภูเก็ต

## สรุปผลการวิจัย

การพิบัติของลาดดินในจังหวัดภูเก็ต เกิดจากหลายปัจจัยหลักประกอบกัน ได้แก่ ปริมาณฝนที่ตกในพื้นที่ คุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรมของลาดดิน และความลาดชันของลาดดิน เป็นต้น ซึ่งในการทำงานวิจัยได้ทำการวิเคราะห์ปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้เพื่อประเมินเสถียรภาพของลาดดิน โดยผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ในช่วง 20 ปีที่ผ่านมาการท่องเที่ยวในจังหวัดภูเก็ตมีการขยายตัวอย่างมาก ทำให้มีการใช้ประโยชน์ที่ดินบริเวณไหล่เขามากขึ้น ด้วยเหตุนี้ผู้ใช้ประโยชน์ที่ดินจึงควรคำนึงถึงเรื่องการพิบัติของลาดดินให้มากซึ่งเป็นเหตุให้เกิดความเสียหายแก่ชีวิตและทรัพย์สินได้

2. งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์สำคัญอีกประการหนึ่งคือการหาระบบเตือนภัยในพื้นที่จังหวัดภูเก็ต โดยมีขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยแบ่งเป็น 3 กลุ่มงาน ได้แก่ กลุ่มการปฏิบัติงานในสนาม กลุ่มการปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการ และกลุ่มการวิเคราะห์ข้อมูล

3. ผลจากการตรวจสอบภาคสนาม แสดงให้เห็นว่าลาดดินที่เกิดการพิบัติมีลักษณะเป็นการเคลื่อนพังที่ผิวของลาดดินโดยมีความลึก 1.00 - 1.50 เมตร และค่าความลาดชัน มีค่าในช่วง 20 - 32 องศา ทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินใช้วิธีวิเคราะห์แบบลาดอนันต์ (Infinite slope) เพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะการพิบัติที่เกิดขึ้นจริง

4. การทดสอบคุณสมบัติในพื้นที่ดินแบบ ทราบว่าชั้นดินในพื้นที่ KML และ PT แบ่งได้เป็น 2 ชั้นดิน และมีลักษณะทางกายภาพใกล้เคียงกัน โดยในชั้นแรกมีลักษณะเป็นดินเหนียวปนทรายจำแนกตาม USCS ได้เป็น SM-ML-MH ลึก 0.00 - 1.50 เมตร มีค่า PI ประมาณ 10 - 15 % และดินชั้นที่ 2 มีลักษณะเป็น Granitic Soil (Completely decomposed granite) เป็น SM ลึก 1.50 - 8.00 เมตร เป็นดิน Non Plastic ค่า Specific Gravity ประมาณ 2.65 และ  $\gamma_t$  ประมาณ 1.75 t/m<sup>3</sup> ใกล้เคียงกันทั้ง 2 ชั้นดิน

5. เมื่อเก็บตัวอย่างดินมาทดสอบกำลังรับแรงเฉือนกับค่าความอิ่มตัว ได้ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงเฉือนอยู่ในรูปของ  $\tau = \tau_0 + a\sigma + b \ln(S)$  ( $\tau$  = Shear stress ;  $\sigma$  = Normal stress ;  $\tau_{ksc}$  และ  $S$  = Degree of saturation) มีผลการทดสอบดังนี้

$$\begin{aligned} \text{KML01} & : \quad \tau = 9.775 + 0.632\sigma - 2.097\ln(S) \quad ; \quad r^2 = 0.909 \\ \text{KML02} & : \quad \tau = 5.609 + 0.494\sigma - 1.173\ln(S) \quad ; \quad r^2 = 0.968 \\ \text{PT01} & : \quad \tau = 3.246 + 0.618\sigma - 0.720\ln(S) \quad ; \quad r^2 = 0.937 \\ \text{PT02} & : \quad \tau = 1.398 + 0.707\sigma - 0.287\ln(S) \quad ; \quad r^2 = 0.972 \end{aligned}$$

6. การวัดแรงดึงน้ำในมวลดินโดยการติดตั้ง Tensiometer และเก็บตัวอย่างดินมาทำการวิเคราะห์ พบว่าแรงดึงน้ำในมวลดินมีค่าแปรผกผันกับระดับความอิ่มตัวของน้ำในมวลดิน ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของดินไม่อิ่มตัว

7. การเปลี่ยนแปลงระดับความอิ่มตัวของน้ำในมวลดินที่ความลึกต่าง ๆ พบว่าในช่วงเดือนมีนาคมมีระดับความอิ่มตัวของน้ำในมวลดินน้อยที่สุด และช่วงเดือนตุลาคมมีระดับความอิ่มตัวสูงที่สุดในรอบปี สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณฝนที่ตกในจังหวัดภูเก็ต

8. ระดับความอิ่มตัวของน้ำในมวลดินมีค่าแปรผกผันกับกำลังรับแรงของดิน จึงส่งผลให้ช่วงเดือนตุลาคมมีกำลังรับแรงต่ำที่สุดและเป็นเดือนที่วิกฤตที่สุดที่จะเกิดการสูญเสียเสถียรภาพและเกิดลาดดินถล่มได้ ซึ่งสอดคล้องกับการพิบัติในอดีต

9. การทดสอบหาค่าความชื้นน้ำของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำทำได้ยากมากและมีความแปรปรวนสูง จึงใช้วิธีการวิเคราะห์ย้อนกลับ (Back Analysis) จากการวิเคราะห์การไหลซึมของปริมาณฝนในลาดดิน เนื่องจากมีค่าระดับความอิ่มตัวของลาดดินจากการตรวจวัดในสนาม พบว่าความชื้นน้ำของชั้นดินมีค่าน้อยลงเรื่อย ๆ ตามความลึก ยกเว้นดินชั้นที่ 2 ที่ที่บีนน้ำกว่าดินชั้นที่ 3 ซึ่งแสดงคุณสมบัติของดินชั้น B horizon

10. ผลการวิเคราะห์รูปแบบน้ำฝน จากข้อมูลฝนราย 3 ชั่วโมงที่สถานี 564201 ของฝนที่ตกต่อเนื่องเกิน 24 ชั่วโมง ที่เกิดขึ้นในช่วงฤดูฝน พบรูปแบบของฝน 5 รูปแบบ โดยมีสัดส่วนโอกาสเกิดของฝนในแต่ละรูปแบบเป็นร้อยละ ดังนี้

- รูปแบบของฝน 1. มีความชื้นน้ำฝนสูงอยู่ตรงกลางของช่วงเวลาที่ฝนตก (26.21%)
- รูปแบบของฝน 2. มีความชื้นน้ำฝนสูงอยู่ทางด้านขวาของช่วงเวลาที่ฝนตก (31.07%)
- รูปแบบของฝน 3. มีความชื้นน้ำฝนสูงอยู่ทางด้านซ้ายของช่วงเวลาที่ฝนตก (20.39%)

รูปแบบของฝน 4. มีความเข้มฝนหนักเบาสลับกันในช่วงเวลาที่ฝนตก (5.83%)

รูปแบบของฝน 5. มีความเข้มฝนคงที่ตลอดช่วงเวลาที่ฝนตก (16.50%)

11. ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน การเปลี่ยนแปลงระดับความอิ่มตัวของน้ำในมวลดินมีผลกระทบต่อเสถียรภาพของลาดดินในชั้นที่ 1 (ลึก 0.00 – 1.30 เมตร)ซึ่งมีโอกาสเกิดการพิบัติสูงเมื่อมีระดับความอิ่มตัวมากกว่า 90 % ส่วนดินในชั้นที่ 2 การเปลี่ยนแปลงระดับความอิ่มตัวของน้ำในมวลดินมีผลกระทบน้อยมากเนื่องจากมีกำลังรับแรงสูง

12. การพิบัติของลาดดินจะเกิดขึ้นเมื่อน้ำฝนมีการไหลซึมจนทำให้ระดับความอิ่มตัวสูงพอที่ทำให้ดินมีกำลังรับแรงต่ำเคลื่อนเข้าสู่ Wetting front zone

13. จากการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน พบว่าพื้นที่ที่มีโอกาสเกิดการพิบัติของลาดดินในจังหวัดภูเก็ต มีความลาดชันอยู่ในช่วง 20 – 32 องศา ซึ่งมีพื้นที่ประมาณ 72.69 ตารางกิโลเมตร หรือ 13.38 % ของพื้นที่ทั้งหมด

14. การสร้างเส้นปริมาณฝนวิกฤต (Critical rainfall envelope) เพื่อใช้เตือนภัยดินถล่มในพื้นที่จังหวัดภูเก็ต โดยจำแนกตามค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS.) ในชั้นวิกฤต FS. เท่ากับ 1.00 ขึ้นแจ้งเตือน FS. เท่ากับ 1.20 และขึ้นเฝ้าระวัง FS. เท่ากับ 1.40 ซึ่งมีความเหมาะสมและสอดคล้องกับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจริงในพื้นที่ และเลือกใช้กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณฝนในวันที่ทำการพิจารณา และปริมาณฝนสะสมก่อนหน้าวันที่พิจารณา 4 วัน

15. ในช่วงแรกที่ฝนตกลงสู่ลาดดินจะมีอัตราการไหลซึมสูง และหลังจากนั้นจะค่อย ๆ ต่ำลงจนคงที่ในที่สุด โดยปริมาณฝนที่ตกทั้งหมดส่วนหนึ่งไหลซึมลงสู่ลาดดินและอีกส่วนเป็นน้ำผิว (Runoff)

### ข้อเสนอแนะ

1. ในการตรวจวัดค่า Matric Suction ในสนามควรใช้เครื่องมือที่สามารถตรวจวัดได้ค่าที่สูงพอสำหรับเป็นตัวแทนของดินในพื้นที่
2. ควรมีการทดสอบหาค่า Permeability Function ของตัวอย่างดินในสนาม เนื่องจากเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญในการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำในมวลดิน
3. เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีประโยชน์สำหรับการใช้งาน การเตือนภัยดินถล่มอาจใช้วิธีการตรวจวัดปริมาณฝนเป็นรายชั่วโมง

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมทรัพยากรธรณี. 2546. แผนที่พื้นที่เสี่ยงภัยต่อลาดดินถล่มของจังหวัดภูเก็ต.

กรมแผนที่ทหาร. 2531. แผนที่ภาพถ่ายทางอากาศจังหวัดภูเก็ต 1:50,000.

กรมพัฒนาที่ดิน. 2545. แผนที่พื้นที่เสี่ยงภัยต่อลาดดินถล่มของประเทศไทย.

ทวีศักดิ์ รัมมิ่งคั้งส์ และชาญ ตันติสุกฤต. 2522. ธรณีวิทยาสำหรับวิศวกร. มิตรนราการพิมพ์, กรุงเทพฯ

นงลักษณ์ ไทยเจียมอารีย์. 2547. คุณสมบัติดินทางวิศวกรรมเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่ลุ่มน้ำน้ำก้อ ต.น้ำก้อ อ.หล่มสัก จ.เพชรบูรณ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บรรณพต กุลสุวรรณ. 2548. การศึกษาพฤติกรรมการพิบัติของลาดดินในพื้นที่ต้นน้ำของลุ่มน้ำย่อยแม่น้ำจันทบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บุญรอด คุปดีทัฬหี. 2532. การศึกษาความเหมาะสมของการทดสอบกำลังของดินตัวเชื่อมห้วยปะทาว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วรากร ไม้เรียง. 2542. วิศวกรรมเขื่อนดิน. ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและโครงการซ่อมแซมและปรับปรุงเขื่อนมูลบน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วรากร ไม้เรียง. 2546. โครงการการพัฒนาแผนหลักการจัดการภัยธรรมชาติที่เกี่ยวข้องกับแผ่นดินถล่ม. สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.).

สุรฉัตร สัมพันธรักษ์. 2540. วิศวกรรมปฐพี. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.

- Aitchison, G.D. 1965. Moisture Equilibria and Moisture changes in Soils Beneath Covered Areas. Cited by D.G.Fredlund and H. Rahardjo. **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**. John Wiley & Son,INC., New York.
- Bao, C.G. and C.W.W. Ng. 2000. Some thoughts and studies on the prediction of slope stability in expansive soils. In Rahardjo, Toll and Leong, eds. **Unsaturated Soils for Asia**. Balkema, Rotterdam.: 15-31.
- Biot, M.A.. 1941. General Theory of Three-Dimensional Consolidation. *Cited by* D.G.Fredlund and H. Rahardjo. **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**. John Wiley & Son,INC., New York.
- Bishop, A.W. 1959. The Principal of Effective Stress. *Cited by* D.G.Fredlund and H. Rahardjo. **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**. John Wiley & Son, INC., New York.
- Bishop, A.W. and G.E.Blight. 1963. Some Aspects of Effective Stress in Saturated and Unsaturated Soils. *Cited by* D.G.Fredlund and H. Rahardjo. **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**. John Wiley & Son, INC., New York.
- Blight, G.E.. 1997. Mechanics of Residual Soils. A.A.Balkema, Rotterdam. Brookfield.
- Cheung,. 1988. Direct shear testing of a completely decomposed granite. **Proc. 2nd Int. Conf. Geomechanics in Tropical Soils**, Singapore 1:109-117.
- Fredlund, D.G. and N.R. Morgenstern. 1977. Stress State Variables for Unsaturated Soils. *Cited by* D.G.Fredlund and H. Rahardjo. **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**. John Wiley & Son, INC., New York.

Fredlund, D.G. and H. Rahardjo. 1993. Unsaturated Soils Geotech. Spec. Pub. No.39 American Soc. of Civil Engineers. Proc. of sessions sponsored by the Subcomm. on Unsaturated Soils (Comm. on Soil Properties) and the Comm. on Shallow Foundations of the Geotech. Engineering Division of the American Soc. of Civil Engineers in conjunction with the ASCE Convention in Dallas, Texas, October 24-28, 1993 / *edited by* Sanda L. Houston and Warren K. Wray.

Geotechnical Control Office. 2000. Geotechnical Manual for Slopes. **Government Publications Centre**, Hong Kong.

Hilf, J.W. 1956. An Investigation of Pore –Water Pressure in Compact Cohesive Soil. Ph.D. dissertation, Tech. Memo. **U.S. Dep. Of the Interior, Bureau of Reclamation, Design and Construction Div.**, Denver, Co. No. 654.

Ho, D.Y.F. and Fredlund, D.G. 1982. A Multistage Triaxial Test for Unsaturated Soils. **Geotechnical Testing Journal**, GTJODJ, Vol 5, No.1/2 :18-25.

Jenning, J.E. 1961. A Revised Effective Stress Law for Use in the Prediction of the Behavior of Unsaturated Soils. Cited by D.G.Fredlund and H. Rahardjo. **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**. John Wiley & Son, INC., New York.

Lambe, T.W and R.V. Whitman. 1969. Soil Mechanics. John Wiley& Sons, Inc., New York.

Le Grand, H. E. 1949. Sheet structure, a major factor in the occurrence of ground water in the granites of Georgia.. **Eco- nomic Geology**. 44: 110-118.

Lumb,P. 1964. Multi-stage triaxial tests on undisturbed soils. **Civil Engineering and Public Works Review**, 59: 591-595.

Lumb, P. 1966. The residual soils of Hong Kong. **Geotechnique**. 16, no. 4: 359-360.

- Philip B. Durgin. 1977. Landslides and the weathering of granitic rocks. **Geological Society of America Reviews in Engineering Geology**. Volume III: 127-131.
- Rahardjo, H., M.F. Chang and T.T. Lim. 1996. Stability of residual soil slopes as affected by rainfalls, In Senneset, ed. **Landslides**. Balkema, Rotterdam: 1106-1114.
- Spangler, M.G. and Richard L. Handy. 1973. Soil Engineering. Intext Educational Publishers, London.
- Sweeney, D.J. 1982. Some Insitu Soil Suction Measurements in Hong Kong 's Residual Soil Slope. **In proc. 7<sup>th</sup> Southeast Asia Geotech. Conf. (Hong Kong)**, 1: 91-106.
- Terzaghi, K. 1925. Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage. อ้างโดย สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์. วิศวกรรมปฐพี. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- Varnes, D.J. 1978. Slope movement :types and processes, **In Landslides Analysis and Control**, Transportation Research Board Report 176. National Academy of Sciences, Washington, D.C. : 11-33.
- Wesley, L.D. 1988. Engineering classification of residual soils. Proc. **Of the second in conference on geomachanics in Tropical soils Singapore** : 77-84.
- Zhang, J.F., J.Z. Yang and F.Q. Wang. 1997. Rainfall Infiltration Test for high slope of shiplock in Three Gorge Dam. **Yangtze River Scientific Research Institute, Technical Report (In Chinese)**. No. 97.

ภาคผนวก

**ภาคผนวก ก**

ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม



ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม  
เรื่อง กำหนดเขตพื้นที่และมาตรการคุ้มครองสิ่งแวดล้อม ในบริเวณจังหวัดภูเก็ต  
พ.ศ. 2540

อาศัยอำนาจตามความในมาตรา 45 แห่งพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 รัฐมนตรีว่าการกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม โดยความเห็นชอบของคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ และ โดยได้รับอนุมัติจากคณะรัฐมนตรี เมื่อวันที่ 2 กันยายน พ.ศ. 2540 ออกประกาศกำหนดเขตพื้นที่และมาตรการคุ้มครองสิ่งแวดล้อม ในบริเวณจังหวัดภูเก็ต ดังต่อไปนี้

ข้อ 1 ให้เขตควบคุมอาคารตามพระราชกฤษฎีกาให้ใช้พระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 บังคับในเขตจังหวัดภูเก็ต พ.ศ. 2534 เป็นเขตพื้นที่ที่ให้ใช้มาตรการคุ้มครองสิ่งแวดล้อมตามหลักเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในประกาศนี้

ข้อ 2 ในพื้นที่ตามข้อ 1 ห้ามก่อสร้างอาคาร หรือห้ามดัดแปลงหรือเปลี่ยนการใช้อาคาร ให้เป็นอาคาร ดังต่อไปนี้

(1) โรงงานอุตสาหกรรมทุกประเภทหรือทุกชนิดที่มีปริมาณน้ำทิ้งตั้งแต่ 1,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (ยกเว้นน้ำหล่อเย็น) หรือมีปริมาณความสกปรกของน้ำทิ้งหลังจากระบบบำบัดตั้งแต่ 20 กิโลกรัมต่อวันขึ้นไป และ โรงงานอุตสาหกรรมตามประเภทหรือชนิด ขนาด และข้อกำหนดเพิ่มเติมในบัญชี 1 ท้ายประกาศนี้ เว้นแต่โรงงานที่เป็นการก่อสร้างทดแทนของเดิม ในกรณีที่โรงงานเดิมเกิดความเสียหายเนื่องจากอุบัติเหตุโดยให้ก่อสร้างได้เฉพาะในบริเวณพื้นที่เดิมเท่านั้น และ โรงงานปรับปรุงคุณภาพของเสียรวม

(2) สถานที่บรรจุก๊าซตามกฎหมายว่าด้วยการบรรจุก๊าซปิโตรเลียมเหลว

(3) โรงฆ่าสัตว์ เว้นแต่การก่อสร้างทดแทนของเดิม

(4) สุสานและฌาปนสถานตามกฎหมายว่าด้วยสุสานและฌาปนสถาน เว้นแต่การก่อสร้างทดแทนของเดิม

ข้อ 3 ภายใต้บังคับข้อ 2 ในพื้นที่ตามข้อ 1 การใช้ประโยชน์ในที่ดินประเภท อุตสาหกรรมเฉพาะกิจ และประเภทอุตสาหกรรมและคลังสินค้าตามที่กำหนดไว้ในกฎกระทรวงที่ ออกตามความในกฎหมายว่าด้วยการผังเมือง ในกรณีที่เกี่ยวข้องกับโรงงานอุตสาหกรรม ให้มีโรงงาน อุตสาหกรรมได้ทุกประเภทหรือทุกชนิด ส่วนการใช้ประโยชน์ในที่ดินประเภทอื่น ในกรณีที่เกี่ยวข้องกับโรงงานอุตสาหกรรม ให้มีโรงงานอุตสาหกรรมได้เฉพาะโรงงานจำพวกที่ 1 หรือโรงงาน อุตสาหกรรมตามประเภทหรือชนิด ขนาด และข้อกำหนดเพิ่มเติมในบัญชี 2 ท้ายประกาศนี้เท่านั้น

ข้อ 4 ภายใต้บังคับข้อ 2 และข้อ 3 ในพื้นที่ตามข้อ 1 การก่อสร้างอาคารปศุสัตว์ ให้ เป็นไปตามพื้นที่และหลักเกณฑ์ ดังต่อไปนี้

(1) ในเขตเทศบาลเมืองภูเก็ต เทศบาลตำบลป่าตอง สุขาภิบาลกะรน และองค์การบริหาร ส่วนตำบลมลา ห้ามก่อสร้างอาคารปศุสัตว์

(2) ในเขตสุขาภิบาลเชิงทะเล ให้ก่อสร้างอาคารปศุสัตว์ได้เฉพาะอาคารปศุสัตว์ที่มีพื้นที่ ทุกชั้นในหลังเดียวกันหรือหลายหลังรวมกันไม่เกิน 100 ตารางเมตร

(3) ในพื้นที่นอกเขต (1) และ (2) ให้ก่อสร้างอาคารปศุสัตว์ได้เฉพาะอาคารปศุสัตว์ที่มี พื้นที่ทุกชั้นในหลังเดียวกันหรือหลายหลังรวมกันไม่เกิน 400 ตารางเมตร

อาคารปศุสัตว์ตามวรรคหนึ่งต้องมีระยะห่างจากแนวชายฝั่งทะเลไม่น้อยกว่า 1,000 เมตร และต้องห่างจากแหล่งน้ำสาธารณะหรือบ่อน้ำเพื่อการบริโภคไม่น้อยกว่า 30 เมตร รวมทั้งต้องมีบ่อ กรองและบ่อบำบัดมูลสัตว์และน้ำทิ้ง ตลอดจนต้องมีมาตรการควบคุมการปล่อยทิ้งของเสียให้ เป็นไปตามมาตรฐานของทางราชการด้วย

ข้อ 5 กำหนดให้พื้นที่ตามข้อ 1 เป็นพื้นที่บริเวณที่ 1 บริเวณที่ 2 บริเวณที่ 3 บริเวณที่ 4 บริเวณที่ 5 บริเวณที่ 6 บริเวณที่ 7 และบริเวณที่ 8 ทั้งนี้ ตามแผนที่แผ่นที่ 1 และแผ่นที่ 2 ท้าย ประกาศนี้ ดังต่อไปนี้

บริเวณที่ 1 หมายความว่า พื้นที่ในบริเวณที่วัดจากแนวชายฝั่งทะเลรอบเกาะภูเก็ตเข้าไปใน แผ่นดินเป็นระยะ 50 เมตร รวมทั้งพื้นที่ในเกาะต่างๆ เว้นแต่พื้นที่ในบริเวณที่ 5 บริเวณที่ 6 และ บริเวณที่ 7

บริเวณที่ 2 หมายความว่า พื้นที่ในบริเวณที่วัดจากแนวเขตบริเวณที่ 1 เข้าไปในแผ่นดินเป็น ระยะ 150 เมตร เว้นแต่พื้นที่ในบริเวณที่ 5 บริเวณที่ 6 และบริเวณที่ 7

บริเวณที่ 3 หมายความว่า พื้นที่ที่กำหนดให้เป็นศูนย์ราชการตามมติของคณะรัฐมนตรี และ พื้นที่ในบริเวณที่วัดจากแนวเขตบริเวณที่ 2 เข้าไปในแผ่นดินเป็นระยะ 200 เมตร เว้นแต่พื้นที่ใน บริเวณที่ 5 บริเวณที่ 6 และบริเวณที่ 7

บริเวณที่ 4 หมายความว่า พื้นที่ในเขตเทศบาลเมืองภูเก็ตบางส่วน ดังต่อไปนี้

## (1) เขตอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมศิลปกรรมหรือย่านอาคารเก่า

ด้านเหนือ จนเส้นขนานระยะ 45 เมตร กับศูนย์กลางถนนตีบุก ถนนเทพกระษัตรี ฟากตะวันออก ตำรางสาธารณะไม่ปรากฏชื่อ ฝั่งใต้ คลองบางใหญ่ฝั่งตะวันออก และถนนตีบุกตัดใหม่ ฟากใต้

ด้านตะวันออก จนถนนคนตรี ฟากตะวันออก

ด้านใต้ จดถนนพังงา ฟากเหนือ คลองบางใหญ่ ฝั่งตะวันออก เส้นขนานระยะ 45 เมตร กับศูนย์กลางถนนพังงา เส้นขนานระยะ 45 เมตร กับศูนย์กลางถนนเขาวราช ถนนรัชฎา ฟากใต้ ถนนระนอง ฟากใต้ เส้นขนานระยะ 45 เมตร กับศูนย์กลางถนนเขาวราช และเส้นขนานระยะ 45 เมตร กับศูนย์กลางถนนกระบี่

ด้านตะวันตก จดเส้นตั้งฉากกับถนนกระบี่ที่จุดบรรจบระหว่างถนนสตูล ฟากตะวันตก กับถนนกระบี่ ฟากใต้ และถนนสตูล ฟากตะวันตก

## (2) เขตหนาแน่นมาก

ด้านเหนือ จดถนนกระบี่ ฟากใต้ เส้นตั้งฉากกับถนนกระบี่ที่จุดบรรจบระหว่างถนนสตูล ฟากตะวันตก กับถนนกระบี่ ฟากใต้ เส้นขนานระยะ 45 เมตร กับศูนย์กลางถนนกระบี่ เส้นขนานระยะ 45 เมตร กับศูนย์กลางถนนเขาวราช ถนนระนอง ฟากใต้ ถนนรัชฎา ฟากใต้ เส้นขนานระยะ 45 เมตร กับศูนย์กลางถนนเขาวราช เส้นขนานระยะ 45 เมตร กับศูนย์กลางถนนพังงา คลองบางใหญ่ ฝั่งตะวันออก ถนนพังงา ฟากเหนือ ถนนมนตรี ฟากตะวันตก และถนนหลวงพ่อ ฟากใต้

ด้านตะวันออก จดถนนสุรินทร์ ฟากตะวันตก เส้นขนานระยะ 100 เมตร กับศูนย์กลางถนนพังงา เส้นตั้งฉากกับถนนพังงาที่จุดบรรจบระหว่างถนนพังงา ฟากใต้ กับถนนตลกอุทิศ 2 ฟากตะวันตก ถนนตลกอุทิศ 2 ฟากตะวันตก ถนนชนะเจริญ ฟากใต้ และวงเวียนสุรินทร์

ด้านใต้ จดถนนอ้อมชิมฝ้าย ฟากเหนือ ถนนกระบี่ ฟากเหนือ ถนนพูนผล ฟากเหนือ และถนนบางกอก ฟากเหนือ

ด้านตะวันตก จดถนนปฏิพัทธ์ ฟากตะวันออก

## (3) เขตหนาแน่นสูงมาก

ด้านเหนือ จดเส้นขนานระยะ 100 เมตร กับศูนย์กลางถนนพังงา

ด้านตะวันออก จดถนนสุรินทร์ ฟากตะวันตก

ด้านใต้ จดถนนศรีเสนา ฟากเหนือ ถนนวิรุพงษ์หงษ์หยก ฟากตะวันตก และถนนชนะเจริญ ฟากใต้

ด้านตะวันตก จดถนนตลกอุทิศ 2 ฟากตะวันตก และเส้นตั้งฉากกับถนนพังงา ที่จุดบรรจบระหว่างถนนพังงา ฟากใต้ กับถนนตลกอุทิศ 2 ฟากตะวันตก

บริเวณที่ 5 หมายความว่า พื้นที่ชนบทและเกษตรกรรมตามกฎหมายที่ออกตามความในกฎหมายว่าด้วยการผังเมือง และพื้นที่ที่มีรัศมีโดยรอบเป็นระยะ 100 เมตร นับจากเขตที่ดินของอาคารหรือสถานที่ ดังต่อไปนี้ เว้นแต่พื้นที่ในบริเวณที่ 6 และบริเวณที่ 7

- (1) แนวค่าย (โคกชนะพม่า)
- (2) บ้านพระยาวิจิตรสงคราม
- (3) มัสยิดบ้านบางเทา
- (4) บ้านท้าวเทพกระษัตรี
- (5) วัดฉลอง
- (6) วัดท่าเรือ
- (7) วัดเทพกระษัตรี
- (8) วัดพระทอง
- (9) วัดพระนางสร้าง
- (10) สุเหร่าเกาะบ้านเคียน
- (11) กำแพงเมืองกลางบางโรง
- (12) ศาลหลักเมืองกลางป่าสัก
- (13) ศาลหลักเมืองกลางเมืองใหม่

บริเวณที่ 6 หมายความว่า พื้นที่ที่มีความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางตั้งแต่ 40 เมตร ถึง 80 เมตร

บริเวณที่ 7 หมายความว่า พื้นที่ที่มีความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางเกินกว่า 80 เมตร ขึ้นไป

บริเวณที่ 8 หมายความว่า พื้นที่อื่นนอกจากบริเวณที่ 1 ถึงบริเวณที่ 7

ข้อ 6 ภายใต้บังคับข้อ 2 ข้อ 3 และข้อ 4 ในบริเวณพื้นที่ตามข้อ 5 การก่อสร้างหรือดัดแปลงอาคาร ให้เป็นไปตามหลักเกณฑ์ ดังต่อไปนี้

(1) บริเวณที่ 1 ให้มิได้เฉพาะอาคารที่มีความสูงไม่เกิน 6 เมตร ต้องมีระยะห่างจากแนวชายฝั่งทะเลไม่น้อยกว่า 20 เมตร และต้องมีที่ว่างอันปราศจากสิ่งปกคลุมไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ของพื้นที่ดินที่ขออนุญาตก่อสร้างอาคารนั้น เว้นแต่ในเขตตามกฎหมายที่ออกตามความในกฎหมายว่าด้วยการควบคุมอาคาร ให้อาคารมีความสูงไม่เกิน 5 เมตร และในเขตอุตสาหกรรมตามกฎหมายที่ออกตามความในกฎหมายว่าด้วยการผังเมือง ให้มีที่ว่างอันปราศจากสิ่งปกคลุมไม่น้อยกว่าร้อยละ 40 ของพื้นที่ดินที่ขออนุญาตก่อสร้างอาคารนั้น

(2) บริเวณที่ 2 ให้มิได้เฉพาะอาคารที่มีความสูงไม่เกิน 12 เมตร และต้องมี

ก. ที่ว่างอันปราศจากสิ่งปกคลุมไม่น้อยกว่าร้อยละ 30 ของพื้นที่ดินที่ขออนุญาตก่อสร้างอาคารนั้น สำหรับอาคารที่พักอาศัย

ข. ที่ว่างอันปราศจากสิ่งปกคลุมไม่น้อยกว่าร้อยละ 10 ของพื้นที่ดินที่ขออนุญาตก่อสร้างอาคารนั้น สำหรับอาคารพาณิชย์หรืออาคารอื่น

เว้นแต่กรณีที่ว่าว่างปราศจากสิ่งปกคลุมของอาคารที่อยู่ในเขตตามกฎกระทรวงที่ออกตามความในกฎหมายว่าด้วยการควบคุมอาคาร ให้มีไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 ของพื้นที่ดินที่ขออนุญาตก่อสร้างอาคารนั้น

(3) บริเวณที่ 3 ให้มีได้เฉพาะอาคารที่มีความสูงไม่เกิน 16 เมตร และต้องมี

ก. ที่ว่างอันปราศจากสิ่งปกคลุมไม่น้อยกว่าร้อยละ 30 ของพื้นที่ดินที่ขออนุญาตก่อสร้างอาคารนั้น สำหรับอาคารที่พักอาศัย

ข. ที่ว่างอันปราศจากสิ่งปกคลุมไม่น้อยกว่าร้อยละ 10 ของพื้นที่ดินที่ขออนุญาตก่อสร้างอาคารนั้น สำหรับอาคารพาณิชย์หรืออาคารอื่น

เว้นแต่อาคารและที่ว่างอันปราศจากสิ่งปกคลุมของอาคารที่อยู่ในเขตงานก่อสร้างระบบกำจัดมูลฝอยแบบเตาเผาของเทศบาลเมืองภูเก็ต จังหวัดภูเก็ตให้เป็นไปตามที่เทศบาลเมืองภูเก็ตกำหนด

(4) บริเวณที่ 4

ก. เขตอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมศิลปกรรมหรือย่านอาคารเก่า ให้มีได้เฉพาะอาคารที่มีความสูงไม่เกิน 12 เมตร และต้องมีที่ว่างอันปราศจากสิ่งปกคลุมไม่น้อยกว่าร้อยละ 16 ของพื้นที่ดินที่ขออนุญาตก่อสร้างอาคารนั้น สำหรับอาคารที่จัดให้มีช่องทางเดินด้านหน้าอาคารทะลุถึงอาคารข้างเคียงตามลักษณะสถาปัตยกรรมชิโนโปรตุเกส (จีนผสมโปรตุเกส) ทั้งนี้ ตามรูปแบบที่สภาท้องถิ่นกำหนด หรือต้องมีที่ว่างอันปราศจากสิ่งปกคลุมไม่น้อยกว่าร้อยละ 30 ของพื้นที่ดินที่ขออนุญาตก่อสร้างอาคารนั้น สำหรับอาคารอื่นที่มีได้ลักษณะตามรูปแบบดังกล่าวข้างต้น

ข. เขตหนาแน่นมาก ให้มีได้เฉพาะอาคารที่มีความสูงไม่เกิน 45 เมตร และมีค่าสูงสุดของอัตราส่วนพื้นที่อาคารรวมกันทุกชั้นต่อพื้นที่ดินของอาคารทุกหลังที่ก่อสร้างในที่ดินแปลงเดียวกันไม่เกิน 4 ต่อ 1 และต้องมีที่ว่างอันปราศจากสิ่งปกคลุมไม่น้อยกว่าร้อยละ 30 ของพื้นที่ดินที่ขออนุญาตก่อสร้างอาคารนั้น

ค. เขตหนาแน่นสูงมาก ให้มีได้เฉพาะอาคารที่มีความสูงไม่เกิน 60 เมตร และมีค่าสูงสุดของอัตราส่วนพื้นที่อาคารรวมกันทุกชั้นต่อพื้นที่ดินของอาคารทุกหลังที่ก่อสร้างในที่ดินแปลงเดียวกันไม่เกิน 5 ต่อ 1 และต้องมีที่ว่างอันปราศจากสิ่งปกคลุมไม่น้อยกว่าร้อยละ 30 ของพื้นที่ดินขออนุญาตก่อสร้างอาคารนั้น

(5) บริเวณที่ 5 ให้มีได้เฉพาะอาคารที่มีความสูงไม่เกิน 6 เมตร เว้นแต่สภาพท้องถิ่นมีมติเป็นอย่างอื่น แต่ทั้งนี้ ต้องไม่เกิน 12 เมตร นอกจากนี้ ยังต้องมีที่ว่างอันปราศจากสิ่งปกคลุมไม่น้อยกว่าร้อยละ 30 ของพื้นที่ดินที่ขออนุญาตก่อสร้างอาคารนั้นด้วย

(6) บริเวณที่ 6 ให้มีได้เฉพาะอาคารที่มีความสูงไม่เกิน 8 เมตร และต้องมีที่ว่างที่ปลูกพืชคลุมดินไม่น้อยกว่าร้อยละ 40 ของพื้นที่ดินที่ขออนุญาตก่อสร้างอาคารนั้น เว้นแต่พื้นที่ที่มีความลาดชันเกิน 1:3 (V:H) ห้ามก่อสร้างหรือตัดแปลงอาคารใดๆ

(7) บริเวณที่ 7 ห้ามก่อสร้างหรือตัดแปลงอาคารใดๆ

(8) บริเวณที่ 8 ให้มีได้เฉพาะอาคารที่มีความสูงไม่เกิน 23 เมตร และต้องมีที่ว่างอันปราศจากสิ่งปกคลุมไม่น้อยกว่าร้อยละ 30 ของพื้นที่ดินที่ขออนุญาตก่อสร้างอาคารนั้น เว้นแต่อาคารและที่ว่างอันปราศจากสิ่งปกคลุมของอาคารที่อยู่ในเขตงานก่อสร้างระบบกำจัดมูลฝอยแบบเตาเผาของเทศบาลเมืองภูเก็ต จังหวัดภูเก็ต ให้เป็นไปตามที่เทศบาลเมืองภูเก็ตกำหนด

การวัดความสูงของอาคารในบริเวณที่ 1 ถึงบริเวณที่ 6 และบริเวณที่ 8 ให้วัดจากระดับพื้นดินที่ก่อสร้างถึงส่วนที่สูงสุดของอาคาร เว้นแต่อาคารที่มีความสูงตั้งแต่ 23 เมตรขึ้นไป ให้วัดจากระดับพื้นดินที่ก่อสร้างพื้นคาบฟ้า แต่หากเป็นอาคารที่มีความสูงตั้งแต่ 23 เมตรขึ้นไปที่เป็นอาคารทรงจั่วหรือปั้นหยา ให้วัดจากระดับพื้นดินที่ก่อสร้างถึงยอดผนังของชั้นสูงสุด

ข้อ 7 ในพื้นที่ตามข้อ 1 ห้ามการกระทำหรือประกอบกิจกรรม ดังต่อไปนี้

(1) การทำเหมืองหิน

(2) การขนส่งหรือลำเลียงวัตถุอันตรายโดยใช้ระบบท่อขนส่ง เว้นแต่ในบริเวณที่กำหนดให้เป็นที่ดินประเภทอุตสาหกรรมเฉพาะกิจ และประเภทอุตสาหกรรมและคลังสินค้าตามกฎกระทรวงที่ออกตามความในกฎหมายว่าด้วยการผังเมือง

(3) การถม ปีดกั้น หรือปรับพื้นที่ ซึ่งทำให้แหล่งน้ำสาธารณะตื้นเขินหรือเปลี่ยนทิศทาง

(4) การขุด ถม หรือเปลี่ยนแปลงสภาพธรรมชาติของพื้นที่พรุ

(5) การถมทะเล

(6) การปล่อยทิ้งมลพิษลงสู่แหล่งน้ำหรือทะเล เว้นแต่เป็นกรณีที่ได้ผ่านการบำบัดตามมาตรฐานของทางราชการแล้ว

(7) การเก็บหรือทำลายปะการัง ซากปะการัง หรือหินปะการัง

(8) การจับปลาสวยงาม

(9) การครอบครองปลาสวยงามที่จับได้ภายในเขตพื้นที่ตามข้อ 1

(10) การขุดตัดหรือลอกกรวด หินผุ ดิน ดินลูกรัง หรือทรายบก เพื่อการค้ำบนพื้นที่ที่มีความสูงวัดจากระดับน้ำทะเลปานกลางเกิน 80 เมตร หรือมีความลาดชันเฉลี่ยเกิน 1:3 (V:H) หรือความลาดชันเฉลี่ยเกินร้อยละ 35

(11) การเพาะเลี้ยงกุ้งหรือการขุดบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อการค้า

การกระทำหรือประกอบกิจกรรมตามวรรคหนึ่งที่ได้รับอนุญาตตามกฎหมายอยู่ก่อนวันที่ประกาศนี้ใช้บังคับ ให้ดำเนินการต่อไปได้จนกว่าจะสิ้นกำหนดระยะเวลาที่ได้รับอนุญาต

ข้อ 8 ให้ส่วนราชการ รัฐวิสาหกิจ หรือเอกชนที่จะทำการก่อสร้างอาคารหรือดำเนินการโครงการหรือประกอบกิจการในพื้นที่ตามข้อ 1 เสนอรายงานผลกระทบสิ่งแวดล้อมเบื้องต้นหรือรายงานการวิเคราะห์ผลกระทบ

สิ่งแวดล้อม แล้วแต่กรณี ต่อสำนักงานนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อมตามหลักเกณฑ์ วิธีการ และระเบียบปฏิบัติที่กำหนดในมาตรา 46 แห่งพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 ดังต่อไปนี้

(1) การก่อสร้างอาคาร หรือการดำเนินการ โครงการหรือประกอบกิจการ ดังนี้ ให้จัดทำรายงานผลกระทบสิ่งแวดล้อมเบื้องต้น

ก. โรงงานส่งหรือจำหน่ายพลังงานไฟฟ้า

ข. โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับการผลิตไอน้ำเพื่อการจำหน่าย

ค. โรงแรมหรือสถานที่พักตากอากาศที่มีจำนวนห้องพักตั้งแต่ 10 ห้อง ถึง 79 ห้อง

ง. อาคารอยู่อาศัยรวมตามกฎหมายว่าด้วยการควบคุมอาคารที่มีจำนวนห้องพักตั้งแต่ 10 ห้อง ถึง 79 ห้อง

จ. สถานพยาบาลตามกฎหมายว่าด้วยการควบคุมอาคารที่มีจำนวนห้องพักตั้งแต่ 10 ห้อง ถึง 29 ห้อง

ฉ. การขุดตัดหรือลอกกรวด หินผุ ดิน ดินลูกรัง หรือทรายบก เพื่อการค้า ลึกลงไปจากระดับพื้นดินเดิม

ตั้งแต่ 1.50 เมตรขึ้นไป ในบริเวณพื้นที่ที่มีความลาดชันเฉลี่ยไม่เกิน 1:3 (V:H) หรือความลาดชันเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ 35

(2) การก่อสร้างอาคาร หรือการดำเนินการ โครงการหรือประกอบกิจการ ดังนี้ ให้จัดทำรายงานการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อม

ก. การก่อสร้างอาคาร หรือการดำเนินการ โครงการหรือประกอบกิจการประเภทต่างๆ ใน (1) ยกเว้น ฉ และที่มีขนาดเกินกว่าที่กำหนดไว้ใน (1)

ข. อาคารสูงหรืออาคารขนาดใหญ่พิเศษตามกฎหมายว่าด้วยการควบคุมอาคาร

ค. โรงงานปรับคุณภาพของเสียรวมที่มีขีดความสามารถในการบำบัดน้ำเสียได้ตั้งแต่ 3,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวันขึ้นไป หรือมีปริมาณมูลฝอยตั้งแต่ 50 ตันต่อวันขึ้นไป

ง. โรงงานผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อจำหน่าย

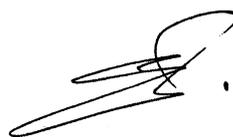
จ. การทำเหมือง

การตัดแปลงหรือเปลี่ยนแปลงการใช้อาคารให้เป็นอาคารตามที่กำหนดไว้ใน (1) และ (2) ต้องดำเนินการตามวรรคหนึ่งด้วย

ข้อ 9 ให้ผู้มีอำนาจหน้าที่เกี่ยวกับการควบคุมอาคารหรือการประกอบกิจการใดๆ ในเขตพื้นที่ตามข้อ 1 ปฏิบัติการให้เป็นไปตามมาตรการคุ้มครองสิ่งแวดล้อม ที่กำหนดไว้ในประกาศนี้

ข้อ 10 ประกาศนี้ให้ใช้บังคับได้มีกำหนดห้าปีนับแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2540 เป็นต้นไป

ประกาศ ณ วันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2540



(นายยิ่งพันธ์ มนะสิการ)

รัฐมนตรีว่าการกระทรวงวิทยาศาสตร์

เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

สำเนาถูกต้อง

*เครือพันธ์ ไบตระกูล*

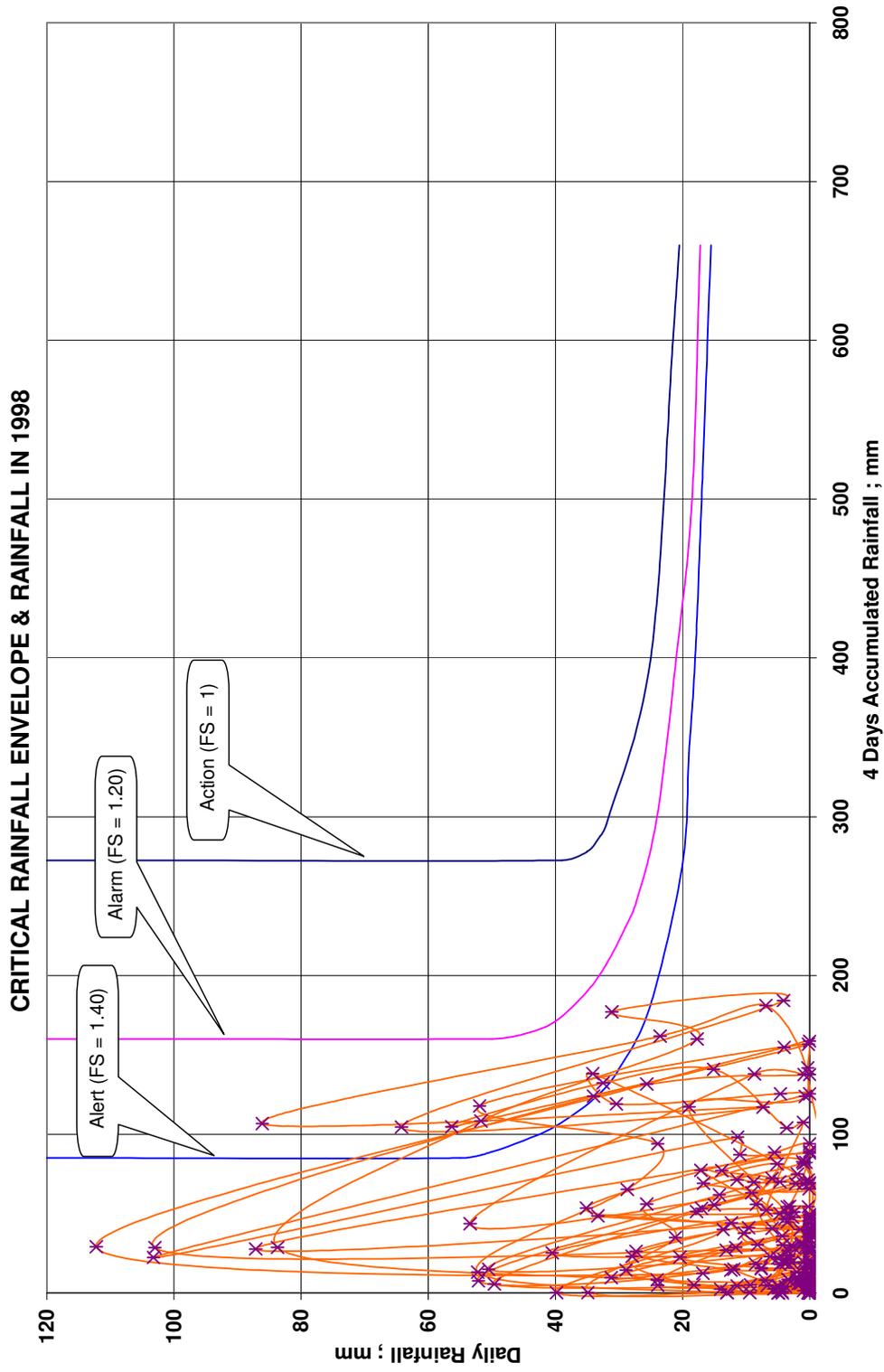
(นางเครือพันธ์ ไบตระกูล)

ผู้อำนวยการกองสิ่งแวดล้อมชุมชนและพื้นที่เฉพาะ

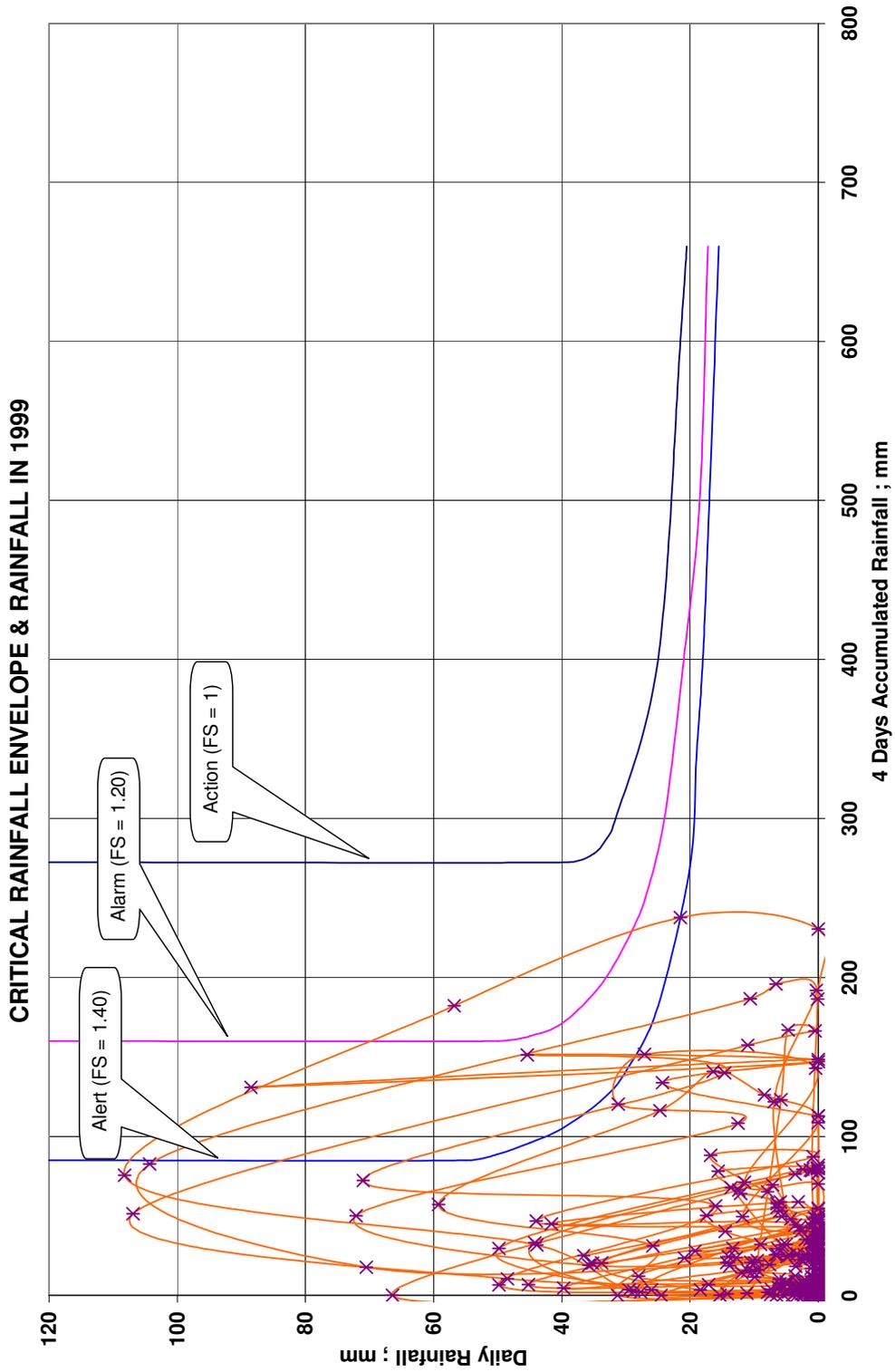
ประกาศในราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป เล่ม 114 ตอนพิเศษ 88 ลงวันที่ 1 ตุลาคม 2540

**ภาคผนวก ข**

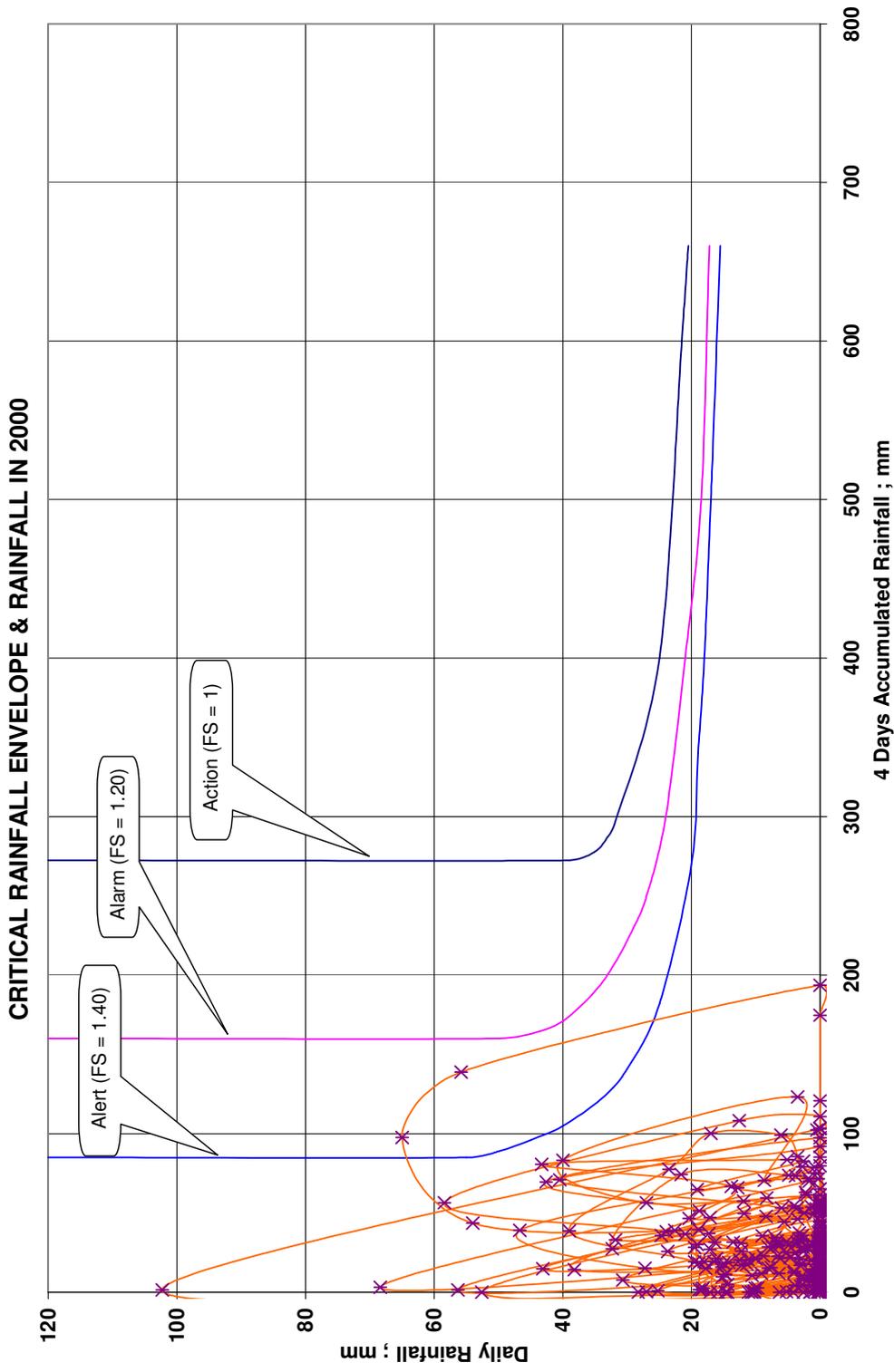
กราฟปริมาณน้ำฝนวิกฤติ (Critical Rainfall Envelope) กับปริมาณฝนในอดีต



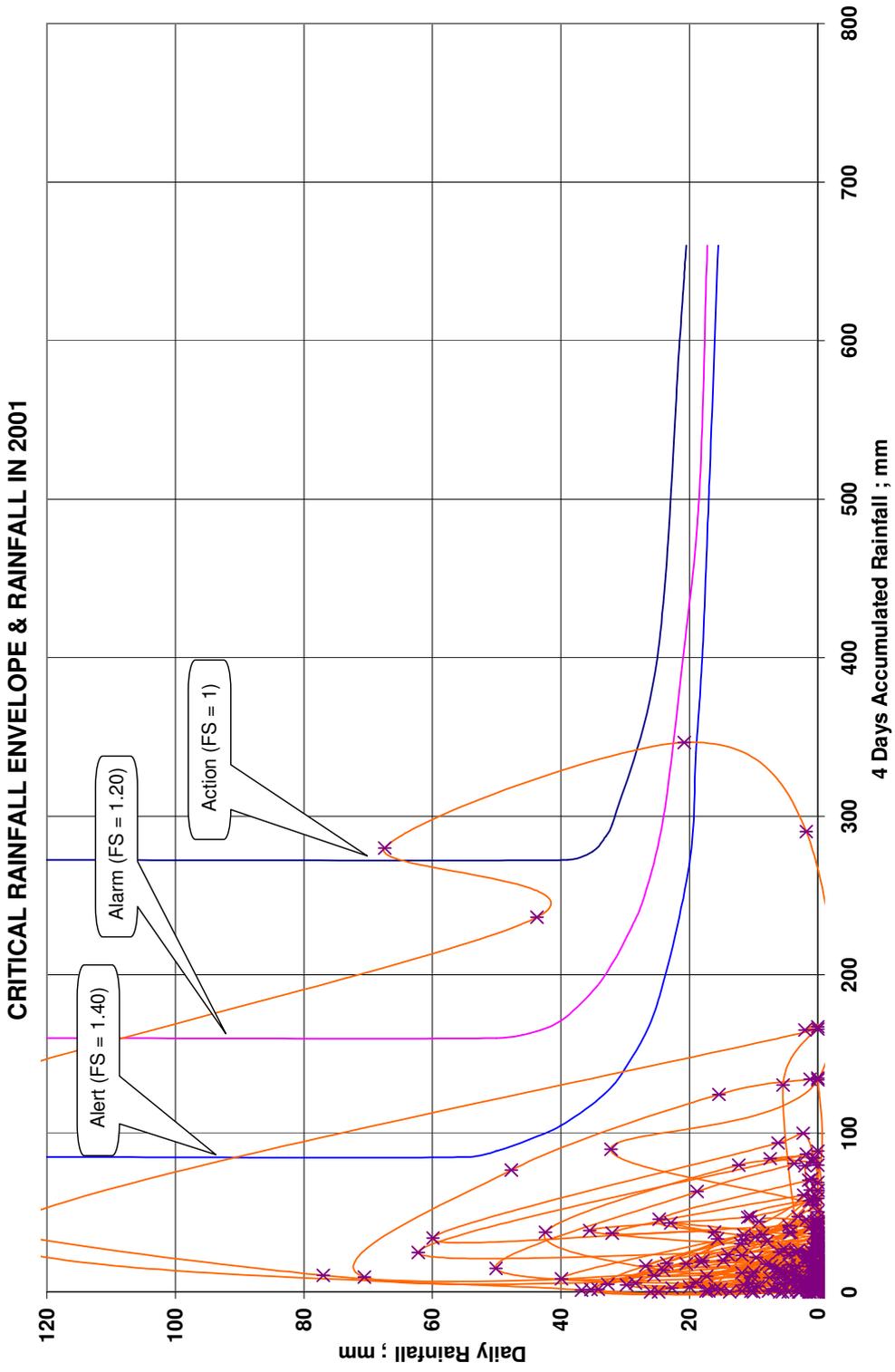
ภาพผนวกที่ ข1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝนในปี 1998 และกราฟปริมาณน้ำฝนวิกฤติ (Critical Rainfall Envelope)



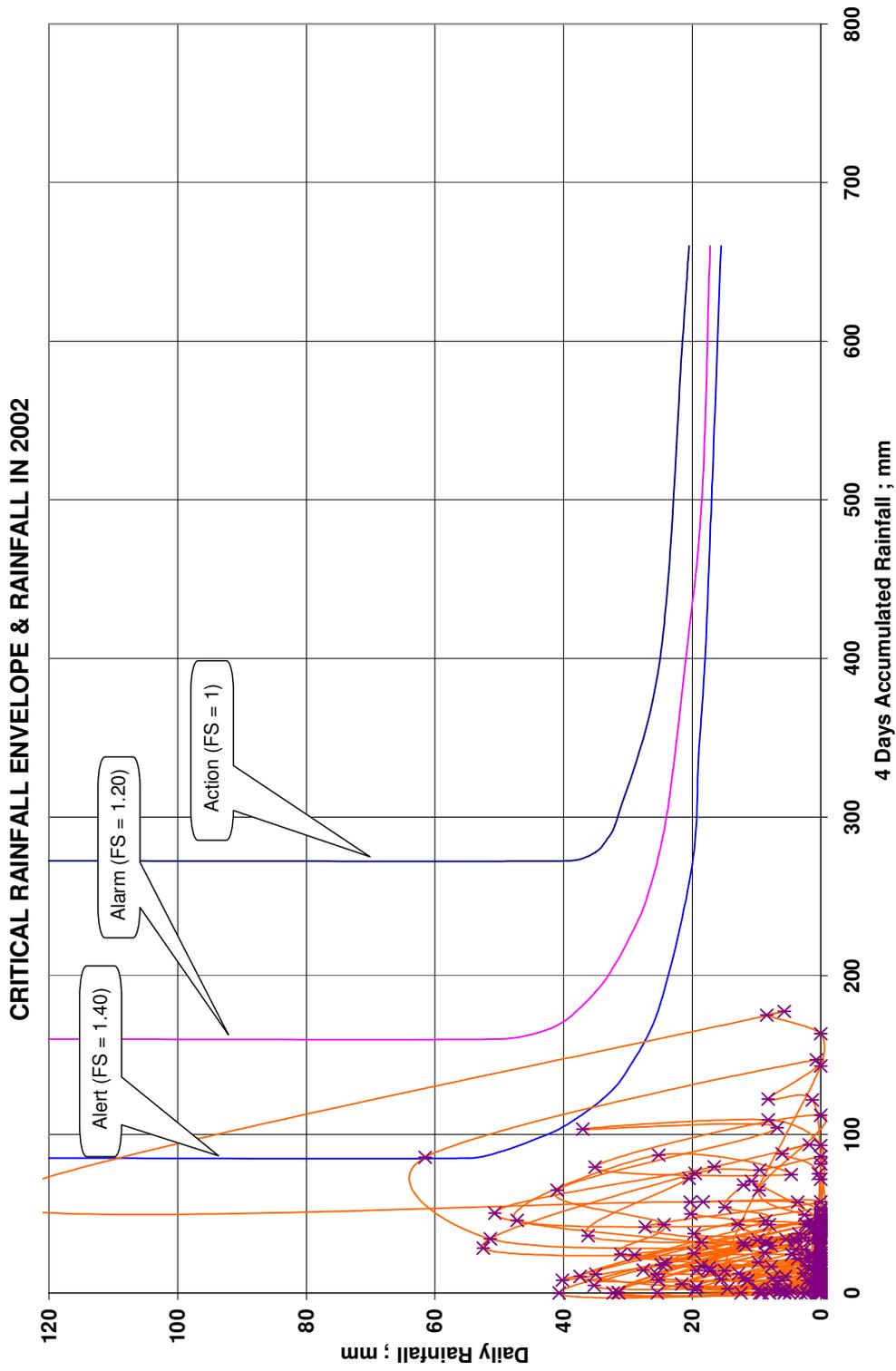
ภาพผนวกที่ ๗2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝนในปี 1999 และกราฟปริมาณน้ำฝนวิกฤติ (Critical Rainfall Envelope)



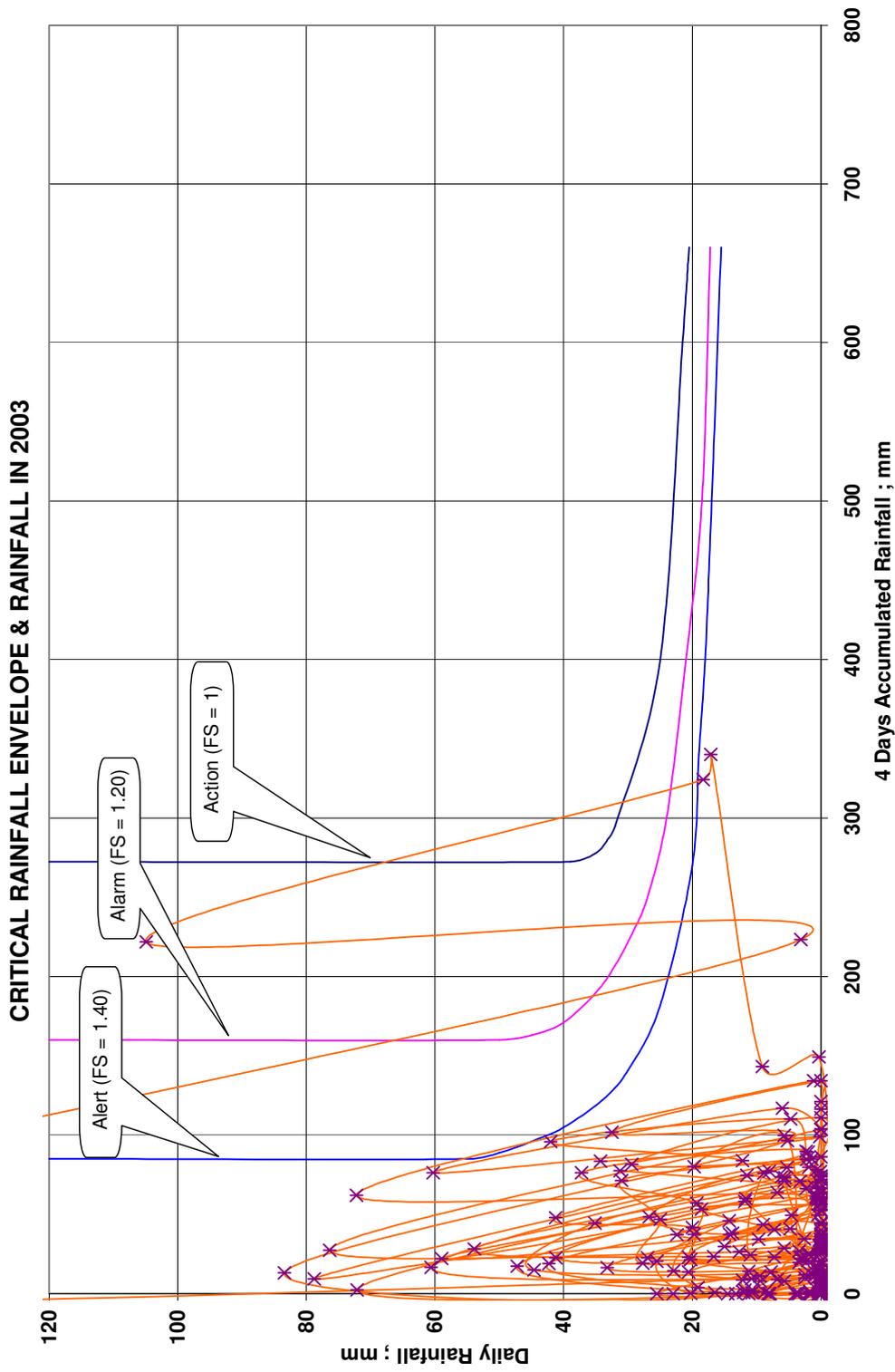
ภาพผนวกที่ ๗3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝนในปี 2000 และกราฟปริมาณน้ำฝนวิกฤติ (Critical Rainfall Envelope)



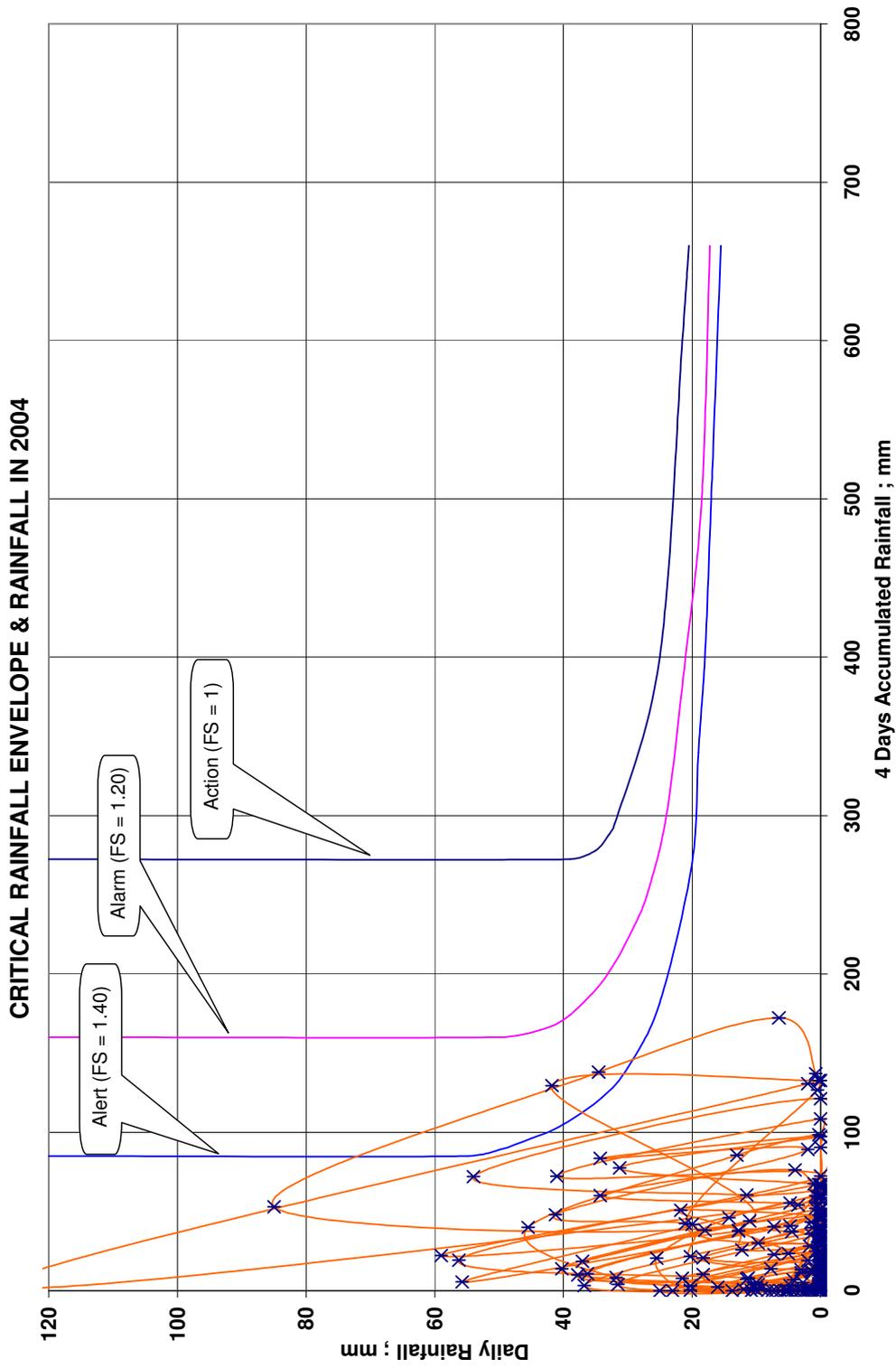
ภาพผนวกที่ ๓4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝนในปี 2001 และกราฟปริมาณน้ำฝนวิกฤติ (Critical Rainfall Envelope)



ภาพผนวกที่ ๗5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝนในปี 2002 และกราฟปริมาณน้ำฝนวิกฤติ (Critical Rainfall Envelope)



ภาพผนวกที่ ๗6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝนในปี 2003 และกราฟปริมาณน้ำฝนวิกฤติ (Critical Rainfall Envelope)



ภาพผนวกที่ ข7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝนในปี 2004 และกราฟปริมาณน้ำฝนวิกฤติ (Critical Rainfall Envelope)

### ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นางสาวทิพย์มณี เชียงทอง
เกิดวันที่	13 พฤศจิกายน 2519
สถานที่เกิด	อำเภอบ้านนา จังหวัดนครนายก
ประวัติการศึกษา	วศ.บ.(ชลประทาน) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วศ.บ.(โยธา) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	วิศวกรโยธา บริษัท ปัญญา คอนซัลแตนท์ จำกัด