



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง

พฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินในพื้นที่ อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์ ที่มีผลต่อการพิบัติ
ของลาดดิน

Mechanical Behaviour of Soil in Laplae Area of Uttaradit Province with
Applications to Landslide

นามผู้วิจัย

นางสาวจิตติมา เทพพานิช

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์อภินิติ โชติสังกาศ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์วรากร ไม้เรียง, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทรวงกูร, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่

เดือน

พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

พฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินในพื้นที่ อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์ ที่มีผลต่อ
การพิบัติของลาดดิน

Mechanical Behaviour of Soil in Laplae Area of Uttaradit Province with
Applications to Landslide

โดย

นางสาวจิตติมา เทพพานิช

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จิตติมา เทพพานิช 2553: พฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินในพื้นที่ อำเภอลับแล
จังหวัดอุตรดิตถ์ ที่มีผลต่อการพิบัติของลาดดิน ปริญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
(วิศวกรรมโยธา) สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์อภินิติ โชติสังกาศ, Ph.D. 214 หน้า

การพิบัติของลาดดินบริเวณพื้นที่จังหวัดอุตรดิตถ์ ในปี 2549 มีลักษณะการพิบัติในระดับต้น โดยเกิดในพื้นที่ที่มีลักษณะทางธรณีวิทยาเป็นหินตะกอน ปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดการพิบัติเกิดจาก ปริมาณน้ำฝนที่ตกหนักและติดต่อกันยาวนาน จากเหตุการณ์ดังกล่าวนำไปสู่การเตรียมพร้อม รับภัย ด้วยการศึกษาดูสาเหตุ และพฤติกรรมของการพิบัติของลาดดิน โดยอาศัยปัจจัยเฉพาะในพื้นที่ ซึ่งการวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของการพิบัติของลาดดิน ในพื้นที่ตำบลแม่พูล อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์ ทั้งจากข้อมูลการตรวจวัดพฤติกรรมของลาดดินในสนาม คุณสมบัติทางกายภาพของดิน ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงเฉือนทั้งที่อิ่มตัวด้วยน้ำและไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงเฉือนต่อจำนวนรอบของการเป็ยกสลับแห้งซึ่งบ่งชี้ถึงระดับการผุพัง เพื่อประเมินเสถียรภาพของลาดดิน และการทดสอบคุณสมบัติความอุ้มน้ำของดินที่ไม่อิ่มตัว ด้วยน้ำ จากผลการทดสอบดังกล่าว นำไปสู่การวิเคราะห์การไหลซึมแบบ 1 มิติ และวิเคราะห์ เสถียรภาพของลาดดินแบบลาดดินอนันต์

ผลจากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนต่อจำนวนรอบของการเป็ยกสลับแห้ง พบว่า เมื่อเพิ่มจำนวนรอบของการเป็ยกสลับแห้ง ค่าความเชื่อมั่นมีค่าลดลงจนกระทั่งเริ่มคง ซึ่งมี ลักษณะคล้ายกับค่ากำลังรับแรงเฉือนคงค้าง จึงสรุปได้ว่า การผุพังของดินส่งผลให้ค่าความเชื่อมั่นของดินลดลง การทดสอบคุณสมบัติความอุ้มน้ำของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ได้แก่ เส้นอัตราลักษณะ และฟังก์ชันสัมพันธ์ความชื้นน้ำ สามารถหาได้จากการทดสอบด้วยวิธี Continuous Measurement เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองการไหลซึม สำหรับการวิเคราะห์การไหลซึมและการวิเคราะห์ลาดดินอนันต์ พบว่า สาเหตุหลักของการพิบัติของลาดดินเกิดจากปัจจัยร่วมกัน ของค่าแรงดันน้ำที่เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากปริมาณน้ำฝน ค่ากำลังที่ลดลงเนื่องจากการผุพังของชั้นดิน สภาพการระบายน้ำด้านล่างในชั้นหิน และความหนาของชั้นดิน ซึ่งความเข้าใจถึงค่าพารามิเตอร์ และปัจจัยของการพิบัติของลาดดินจะนำไปสู่การพัฒนาาระบบเตือนภัยที่มีประสิทธิภาพต่อไป

ลายมือชื่อนิติติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Jitima Tapparnich 2010: Mechanical Behaviour of Soil in Laplae Area of Uttaradit Province with Applications to Landslide. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Mr. Apiniti Jotisankasa, Ph.D. 214 pages.

Numerous shallow slope failures took place in residual soils derived from sedimentary rock formation of Uttaradit province, Northern Thailand in 2005, due to prolonged and intense rainfall. In this study, mechanical behaviour of soils and slope behaviour in Laplae Area of Uttaradit Province were investigated, such as field measurement of pore water pressure, slope movement, soil property, shear behaviour as well as water retention, in order to understand the slope failure mechanism. Fully saturated consolidated-drained (CD) as well as suction-monitored direct shear tests have been performed on undisturbed samples collected from depths of 0.3-1 m. A miniature tensiometer has been used for suction measurement during these tests. In addition, influence of number of drying/wetting cycles on saturated shear strength is investigated. Also studied are unsaturated soil property functions including hydraulic conductivity function and soil water characteristic curve. These test results are used in seepage and stability analysis using Finite Element 1D and Infinite Slope methods.

The test results of drying/wetting influence shear strength shows that when increasing drying/wetting cycles, shear strength (cementation) of soil decreased until reaching a value similar to a residual shear strength. It is summarised that the weathering of soil decreased its cementation and cohesion. The seepage finite element analysis also confirm the accuracy of the continuous method for k-function and SWCC measurement. The major slope destabilization mechanism is found to be a combination of pore water pressure increase, material degradation, impeded drainage layer and critical thickness of soil. Understanding these parameters of slope failure leads to a better development of the warning system.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อ.ดร.อภินิติ โชติสังกาศ ประธานกรรมการที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์วารกร ไม้เรียง กรรมการที่ปรึกษาสาขาวิชาเอก ที่ดูแลเอาใจใส่
และให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จ
สมบูรณ์ และเป็นแบบอย่างแก่ผู้วิจัยตลอดมา กราบขอบพระคุณ รศ.ดร. ชวเลข วณิชเวทิน และ
อ.ดร. อัครพัฒน์ สว่างสุริย์ ที่ได้ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอกราบ
ขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมปฐพีทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็น
ประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนจากสภาวิจัยแห่งชาติ และขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ Geotech และพี่ๆ
ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานรากทุกท่านที่ได้ให้กำลังใจ คำแนะนำและให้ความ
ช่วยเหลือในการทำวิจัย ขอขอบคุณนายวสันต์ สุทธิบูรณ์ นายนรินทร์ หรรษชัยนันท์ นายวุฒชาติ
วิชาโชค และนายวิญญูพงศ์ พอลิตะ ที่ได้คำปรึกษาแนะนำวิธีการทดสอบ การทำเครื่องมือใน
งานวิจัยนี้ อีกทั้งยังเป็นคณะวิจัยในการปฏิบัติงานภาคสนาม และขอขอบคุณพื้นที่ศึกษาที่ได้รับ
ความอนุเคราะห์จากคุณลุงลิ สังก้าว เจ้าของพื้นที่สวนศรีแก้ว ในตำบลแม่พูล อำเภอลับแล จังหวัด
อุตรดิตถ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณครอบครัว ที่ได้อบรม สั่งสอน ให้กำลังใจ และเน้นในเห็น
ถึงความสำคัญของการเรียนมาโดยตลอด

จิตติมา เทพพานิช

พฤษภาคม 2553

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
ขอบเขตการวิจัย	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และสถานที่	51
การดำเนินงานวิจัย	54
การรวบรวมข้อมูลพื้นฐานเบื้องต้น	56
การปฏิบัติงานในภาคสนาม	79
การปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการ	89
ผลและวิจารณ์	100
ผลจากการรวบรวมข้อมูลพื้นฐาน	100
ผลการปฏิบัติงานในภาคสนาม	102
ผลการปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการ	111
การวิเคราะห์แบบจำลองและสรุปผลการวิเคราะห์	140
สรุปและข้อเสนอแนะ	170
สรุปผลการวิจัย	170
ข้อเสนอแนะ	173
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	174
ภาคผนวก	179
ภาคผนวก ก ผลการตรวจวัดแรงดันน้ำและการทดสอบในสนาม	180
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบพฤติกรรมของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ	187
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	214

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ชนิดของดินตะกอน(Transported Soil)	5
2	การจำแนกระดับผุพังของดิน	7
3	การจำแนกประเภทการเคลื่อนพังของลาด โดยวิธีของ Varnes (1978)	48
4	ความเสียหายที่เกิดจากเหตุการณ์น้ำท่วม-ดินถล่ม	57
5	พารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือน	115
6	พารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนของการทดสอบเปียกสลับแห้ง	119
7	ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ลดลง จากการจำลองสภาพการผุพังของดิน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย	151
8	กรณีการพิบัติ สำหรับลาดชันที่มีมุมเอียง 45 องศา	169
ตารางผนวกที่		
ก1	การปรับเทียบค่าแรงดันน้ำ(โวลต์) ที่อ่านได้จากมัลติมิเตอร์และข้อความจากโทรศัพท์มือถือ	181
ก2	ผลการตรวจวัดค่าแรงดันน้ำเฉลี่ยแต่ละวันในสนาม	182
ข1	ผลการสอบเทียบเครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์ เซนเซอร์ 1	188
ข2	ผลการสอบเทียบเครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์ เซนเซอร์ 2	189
ข3	ผลการสอบเทียบเครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์ เซนเซอร์ 3	190
ข4	ผลการสอบเทียบเครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์ เซนเซอร์ 4	191

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	วัฏจักรทางธรณีวิทยา	4
2	การแบ่งชั้นดินตามการผุพังของดินเกิดในที่	6
3	วัฏจักรของน้ำ	8
4	แผนภาพแสดงชั้นน้ำใต้ดิน	9
5	แบบจำลองภาพตัดขวางของชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำภายใต้การเปลี่ยนแปลง ของสภาพแวดล้อม	10
6	ส่วนประกอบของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ	11
7	แบบจำลองการเกิดคาปิลลารี	13
8	เส้นออตตลิกษณ์ (Soil-water characteristic curve)	16
9	กระบวนการระบายน้ำและเปียกน้ำภายใต้สภาวะดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ	17
10	ผลการทดสอบซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ α กับคิกริความ อิ่มตัวด้วยน้ำ	19
11	ระนาบการพิบัติของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ	20
12	ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นออตตลิกษณ์และเส้นขอบเขตกำลังรับแรงเฉือนของ ดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ	21
13	แนวทางการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อทำนายค่าฟังก์ชันคุณสมบัติของดิน ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ	22
14	อุปกรณ์การทดสอบ Instantaneous Profile Methods	28
15	แสดงค่าแรงดูดตามความยาวของตัวอย่างดินด้วยอัตราการไหลเข้าของน้ำที่ แตกต่างกัน 3 แบบ	29
16	Shape factor สำหรับการทดสอบ Variable Head Tests	31
17	ส่วนประกอบของอุปกรณ์วัดค่าแรงดูดเมทริกซ์(Tensiometer)	32
18	ความหลากหลายและการพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าแรงดูดเมทริกซ์(Tensiometer)	33
19	รูปร่างของผิวเคลื่อนพังเป็นมวลดินในลักษณะเป็นแผ่นบางๆ	38
20	การไหลของน้ำผ่านตัวกลางดินลูกบาศก์	41
21	ตัวอย่างการเคลื่อนพังของลาด โดยวิธีของ Varnes	49

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	ปัจจัยที่ใช้ในการวิเคราะห์ดินถล่มจากงานวิจัย 19 เรื่องทั่วโลก	50
23	ขั้นตอนดำเนินการวิจัย	55
24	เหตุการณ์น้ำท่วม-ดินถล่ม เมื่อวันที่ 21-23 พฤษภาคม พ.ศ. 2549	57
25	รูปแบบของการเกิดดินถล่ม	59
26	หินโคลนแทรกสลับชั้นกับหินดินดานบริเวณบ้านแม่พูล	61
27	หินดินดานกึ่งหินชนวน	62
28	ขอบเขตอำเภอในพื้นที่จังหวัดอุตรดิตถ์	62
29	ขอบเขตตำบลในพื้นที่อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์	64
30	ลักษณะภูมิประเทศ	65
31	ความลาดชันตามค่ามุมเอียง	66
32	ข้อมูลธรณีวิทยา	67
33	แผนที่สภาพการใช้ประโยชน์ที่ดิน	69
34	แผนที่กลุ่มชุดดิน	71
35	แผนที่ลักษณะภูมิประเทศกับตำแหน่งรอยการเกิดดินถล่ม	73
36	ความลาดชันตามค่ามุมเอียง	74
37	ตำแหน่งรอยการเกิดดินถล่มภายใต้การใช้ประโยชน์ที่ดินที่แตกต่างกัน	76
38	ข้อมูลธรณีวิทยา	77
39	ทิศทางด้านลาด	78
40	เครื่องวัดน้ำฝน	80
41	รูปแบบ Tensiometer ที่ใช้ในสนาม	81
42	เครื่องวัดมุมเอียง (KU-Inclinometer)	82
43	การติดตั้งเครื่องวัดมุมเอียง (KU-Inclinometer)	82
44	บ่อสังเกตการณ์ (Observation well)	83
45	คู่มือการเก็บข้อมูลและส่งสัญญาณอัตโนมัติ	84
46	องค์ประกอบของอุปกรณ์เก็บข้อมูลและส่งสัญญาณอัตโนมัติ	84
47	ลักษณะการทำงานของอุปกรณ์เก็บข้อมูลและส่งสัญญาณอัตโนมัติ	85

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
48	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาอัตราการไหลซึมในสนาม	87
49	ภาพรวมการทดสอบการหาอัตราการไหลซึมในสนามด้วยวิธี Double-Ring Infiltrometer	88
50	ขั้นตอนการทดสอบการหาอัตราการไหลซึมในสนามด้วยวิธี Variable Head Tests	89
51	ชั้นดินภายหลังจากการเปิดหน้าดิน	90
52	อุปกรณ์เงื่อนไขตรงแบบวัดค่าแรงตึงและ KU-Tensiometer	91
53	รูปแบบ Tensiometer ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ	93
54	ขั้นตอนการทดสอบหาเส้นอัตราลักษณะของดิน ด้วยวิธี Point-Wise Measurement	96
55	การติดตั้งเครื่องมือของการทดสอบหาเส้นอัตราลักษณะ ด้วยวิธี Continuous Measurement	98
56	ขั้นตอนการทดสอบหาเส้นอัตราลักษณะของดิน ด้วยวิธี Continuous Measurement	99
57	พื้นที่ศึกษาบริเวณสะพานห้วยแม่พูล 2 และมีการใช้ประโยชน์พื้นที่เป็นไม้ผล ผสม บริเวณเนินเขา	100
58	ภูเขาด้านบนที่มีลักษณะเป็นป่าโปร่งและต้นไผ่กระจายอยู่ทั่วบริเวณ	101
59	พื้นที่ศึกษาจากเหตุการณ์การเกิดดินถล่ม ในเดือนพฤษภาคม 2549	101
60	เครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมของลาดดินเพื่อเก็บข้อมูลในสนาม	102
61	ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมของลาดดินในสนาม	103
62	ผลการตรวจวัดพฤติกรรมของลาดดินในสนาม	105
63	ค่าแรงดันน้ำตามความลึกที่ระดับติดตั้งที่ 5 ในช่วงเวลาที่ความเข้มของน้ำฝน มีค่าสูงที่สุด	106
64	การเอียงของลาดดินและปริมาณน้ำฝน	107
65	ตำแหน่งบ่อขุดสำรวจที่ 1 และ 2	108

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
66	บ่อขุดสำรวจ (Test Pit) และการแบ่งลักษณะชั้นดินในสนาม นิชามโดย Little (1969) ในพื้นที่ไม้ผลผสม	109
67	บ่อขุดสำรวจ (Test Pit) และการแบ่งลักษณะชั้นดินในสนาม นิชามโดย Little (1969) ในพื้นที่ป่าไผ่	110
68	พฤติกรรมการไหลซึมในสนาม	111
69	ผลการทดสอบการกระจายขนาดของเม็ดดิน	112
70	Plasticity Chart	113
71	คุณสมบัติพื้นฐานของดิน	113
72	เส้นการพิบัติของตัวอย่างดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ	115
73	ลักษณะของรากต้นไม้	116
74	พฤติกรรมรับแรงเฉือนของตัวอย่างดิน ที่ระดับความลึก 0.9 เมตร ที่ค่าแรงคูดต่างๆ ในการทดสอบการเฉือนตรงแบบวัดค่าแรงคูด ที่หน่วยแรงกระทำตั้งฉาก 16 กิโลปาสกาล	117
75	ผลการทดสอบการเฉือนตรงจากตัวอย่างดินที่ผ่านการเปียกสลับแห้ง	118
76	ผลการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนปลอดภัยและค่าแรงคูดน้ำ ของตัวอย่างดิน ที่ระดับความลึกและความชื้นต่างๆ	120
77	ผลการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนปลอดภัยและค่าแรงคูดน้ำ ของตัวอย่างดิน ที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้ง 5 และ 10 ครั้ง	121
78	แสดงผลการวัดค่าแรงคูดเมทริกซ์ ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับผิวดิน	122
79	แสดงผลการวัดค่าแรงคูดรวม ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับผิวดิน	123
80	ผลการทดสอบหาเส้นอัตราคูดของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับผิวดิน	123
81	ผลการทดสอบหาเส้นอัตราคูดของตัวอย่างดินทั้งบริเวณไม้ผลผสม และป่าไผ่ที่ระดับความลึกต่างๆ ด้วยวิธี Point-Wise Measurement	124

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
82	ความสัมพันธ์ของค่าแรงคูณเมตริกซ์กับเวลา จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ของกระบวนการแห้ง ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม่ผลผสม ที่ระดับผิวดิน	125
83	ความสัมพันธ์ของค่าความชื้นชลศาสตร์กับเวลา เมื่อพิจารณาความชื้นชลศาสตร์ 3 รูปแบบ จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ของกระบวนการแห้ง ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม่ผลผสม ที่ระดับผิวดิน	126
84	ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ของกระบวนการแห้ง ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม่ผลผสม ที่ระดับผิวดิน	126
85	ผลการทดสอบเส้นอัตราถักด้วยวิธี Continuous Measurement ของกระบวนการแห้งเปรียบเทียบกับวิธี Point-Wise Measurement ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม่ผลผสม ที่ระดับผิวดิน	127
86	ค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของดิน จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ในกระบวนการแห้ง ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม่ผลผสม ที่ระดับผิวดิน พิจารณาจากค่าความชื้นชลศาสตร์เฉลี่ย	128
87	ค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของดิน จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ในกระบวนการแห้ง ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม่ผลผสม ที่ระดับผิวดิน ซึ่งพิจารณาจากค่าความชื้นชลศาสตร์ 3 รูปแบบ	129
88	ความสัมพันธ์ของค่าแรงคูณเมตริกซ์กับเวลา จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ของกระบวนการเปียก ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม่ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร	131
89	ความสัมพันธ์ของค่าความชื้นชลศาสตร์(i) กับเวลา จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ของกระบวนการเปียก ของตัวอย่างดิน ในพื้นที่ไม่ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร	131

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
90	ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ของกระบวนการเปียก ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร	132
91	ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ด้วยวิธี Continuous Measurement ของกระบวนการเปียก เปรียบเทียบกับวิธี Point-Wise Measurement ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร	132
92	ค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของดิน เมื่อพิจารณาจากค่าลาดชันศาสตร์ 3 แบบในแต่ละตำแหน่งของการวัดค่าแรงดูดเมทริกซ์จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ในกระบวนการเปียก ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร	134
93	ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ของกระบวนการเปียก ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร	135
94	ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ด้วยวิธี Continuous Measurement ของกระบวนการเปียก เปรียบเทียบกับวิธี Point-Wise Measurement ของตัวอย่างดินพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร	136
95	ค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของดิน จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ในกระบวนการเปียก ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร	137
96	ค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของดิน จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ทั้งในกระบวนการเปียกและแห้ง ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร	137
97	แสดงการกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์ที่สภาวะต่างๆ	138
98	แสดงผลการทดสอบ Continuous Measurement เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์การไหลซึม ในกระบวนการแห้ง	139

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
99	แสดงผลการทดสอบ Continuous Measurement เปรียบเทียบกับ ผลการวิเคราะห์การไหลซึม ในกระบวนการเปียก	140
100	หน้าตัดแบบจำลองการวิเคราะห์การไหลซึมแบบ 1 มิติ เมื่อพิจารณาความลึก ของหน้าตัดชั้นดิน 2 เมตร	142
101	หน้าตัดแบบจำลองการวิเคราะห์การไหลซึมแบบ 1 มิติ เมื่อพิจารณาความลึก ของหน้าตัดชั้นดิน 0.5 เมตร	142
102	Soil-Water Characteristic Curve	143
103	Hydraulic Conductivity Function	144
104	ผลการตรวจวัดค่าแรงดันน้ำที่ตรวจวัดได้ในสนาม วันที่ 25 สิงหาคม 2551	146
105	การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์และผลการตรวจวัดค่าแรงดันน้ำในสนาม ทั้งในสภาวะการไหลคงที่และการไหลที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา	147
106	แสดงการกำหนดขอบเขตล่างของแบบจำลอง 2 ลักษณะ	149
107	แสดงผลการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำฝนที่ค่าความชื้น 50 มิลลิเมตร/ ชั่วโมง ระยะเวลา 2 ชั่วโมง และยอมให้มีการเจ็มนองของน้ำที่ผิวดิน (Allow surface water)	152
108	แสดงผลการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำฝนที่ค่าความชื้น 50 มิลลิเมตร/ ชั่วโมง ระยะเวลา 2 ชั่วโมง และไม่ยอมให้มีการเจ็มนองของน้ำที่ผิวดิน (No Surface water)	153
109	ผลการวิเคราะห์การไหลซึมตามความลึกของแบบจำลองชั้นดินความลึก 2 เมตรที่ระยะเวลาต่างๆ เมื่อกำหนดให้ขอบเขตล่างของแบบจำลองเป็น แบบไม่มีการไหลซึม	154
110	ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยตามความลึกซึ่งวิเคราะห์โดยใช้ค่ากำลังรับ แรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบตามแต่ละความลึก	155
111	ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยตามความลึก เมื่อพิจารณากำลังที่ลดลงจาก การผุพังของดิน เมื่อวิเคราะห์โดยลดค่าความเชื่อมแน่นลง 10 เปอร์เซ็นต์ จากค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่ได้จากการทดสอบการเฉือนตรง	156

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
112	ผลการวิเคราะห์การไหลซึมตามความลึกของแบบจำลองชั้นดินความลึก 2 เมตรที่ระยะเวลาต่างๆ เมื่อกำหนดให้ขอบเขตล่างของแบบจำลอง มีลักษณะการไหลซึมอย่างอิสระ	157
113	ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยตามความลึกซึ่งวิเคราะห์โดยใช้ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบตามแต่ละความลึก เมื่อกำหนดให้ขอบเขตล่างของแบบจำลองมีลักษณะการไหลซึมอย่างอิสระ	158
114	ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยตามความลึก เมื่อพิจารณากำลังที่ลดลงจากการสุฟ่งของดิน วิเคราะห์โดยลดค่าความเชื่อมแน่นลง 10 เปอร์เซ็นต์ และกำหนดให้ขอบเขตล่างมีลักษณะการไหลซึมอย่างอิสระ	159
115	ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยตามความลึก เมื่อพิจารณากำลังที่ลดลงจากการสุฟ่งของดิน วิเคราะห์โดยลดค่าความเชื่อมแน่นลง 20 เปอร์เซ็นต์ และกำหนดให้ขอบเขตล่างมีลักษณะการไหลซึมอย่างอิสระ	159
116	ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยตามความลึก เมื่อพิจารณากำลังที่ลดลงจากการสุฟ่งของดิน วิเคราะห์โดยลดค่าความเชื่อมแน่นลง 30 เปอร์เซ็นต์ และกำหนดให้ขอบเขตล่างมีลักษณะการไหลซึมอย่างอิสระ	160
117	ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยตามความลึก เมื่อพิจารณากำลังที่ลดลงจากการสุฟ่งของดิน วิเคราะห์โดยลดค่าความเชื่อมแน่นลง 40 เปอร์เซ็นต์ และกำหนดให้ขอบเขตล่างมีลักษณะการไหลซึมอย่างอิสระ	160
118	ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยตามความลึก เมื่อพิจารณากำลังที่ลดลงจากการสุฟ่งของดิน วิเคราะห์โดยลดค่าความเชื่อมแน่นลง 50 เปอร์เซ็นต์ และกำหนดให้ขอบเขตล่างมีลักษณะการไหลซึมอย่างอิสระ	161
119	ผลการวิเคราะห์การไหลซึมตามความลึกของแบบจำลองชั้นดินความลึก 0.5 เมตร ที่ระยะเวลาต่างๆ เมื่อกำหนดให้ขอบเขตล่างของแบบจำลองเป็นแบบไม่มีกรไหลซึม	162

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
120	ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยตามความลึกซึ่งวิเคราะห์โดยใช้ค่ากำลังรับแรง เฉือนที่ได้จากการทดสอบตามแต่ละความลึก เมื่อวิเคราะห์การไหลซึมแบบ กำหนดให้ขอบเขตล่างไม่มีการไหลซึม	163
121	ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยตามความลึก เมื่อพิจารณากำลังที่ลดลงจากการ ผุพังของดิน เมื่อวิเคราะห์โดยลดค่าความเชื่อมั่นแน่นลง 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อ วิเคราะห์การไหลซึมแบบกำหนดให้ขอบเขตล่างไม่มีการไหลซึม	164
122	ผลการวิเคราะห์การไหลซึมตามความลึกของแบบจำลองชั้นดินความลึก 0.5 เมตรที่ระยะเวลาต่างๆ เมื่อกำหนดให้ขอบเขตล่างของแบบจำลองมีลักษณะ การไหลซึมอย่างอิสระ	165
123	ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยตามความลึก ซึ่งวิเคราะห์โดยใช้ค่ากำลังรับแรง เฉือนที่ได้จากการทดสอบตามความลึก เมื่อวิเคราะห์การไหลซึมแบบ กำหนดให้ขอบเขตล่างมีลักษณะการไหลซึมอย่างอิสระ	165
124	ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยตามความลึก เมื่อพิจารณากำลังที่ลดลงจากการ ผุพังของดิน วิเคราะห์โดยลดค่าความเชื่อมั่นแน่นลง 70 เปอร์เซ็นต์ เมื่อ วิเคราะห์การไหลซึมแบบกำหนดให้ขอบเขตล่างมีลักษณะการไหลอย่าง อิสระ	166
125	ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยตามความลึก เมื่อพิจารณากำลังที่ลดลงจากการ ผุพังของดิน วิเคราะห์โดยลดค่าความเชื่อมั่นแน่นลง 80 เปอร์เซ็นต์ เมื่อวิเคราะห์ การไหลซึมแบบกำหนดให้ขอบเขตล่างมีลักษณะการไหลอย่างอิสระ	167
ภาพผนวกที่		
ก1	การเปรียบเทียบเทียบค่าแรงดันน้ำ	181
ข1	การสอบเทียบเครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์ เซนเซอร์ 1	188
ข2	การสอบเทียบเครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์ เซนเซอร์ 2	189
ข3	การสอบเทียบเครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์ เซนเซอร์ 3	190

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า	
ข4	การสอบเทียบเครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์ เซนเซอร์ 4	191
ข5	แสดงผลการวัดค่าแรงคูเมทริกซ์ ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับผิวดิน	192
ข6	แสดงผลการวัดค่าแรงคูรวม ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับผิวดิน	192
ข7	ผลการทดสอบหาเส้นอัตราลักษณะ ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับผิวดิน	193
ข8	แสดงผลการวัดค่าแรงคูเมทริกซ์ ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับ 0.3 เมตร	193
ข9	แสดงผลการวัดค่าแรงคูรวม ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับ 0.3 เมตร	194
ข10	ผลการทดสอบหาเส้นอัตราลักษณะ ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับ 0.3 เมตร	194
ข11	แสดงผลการวัดค่าแรงคูเมทริกซ์ ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร	195
ข12	แสดงผลการวัดค่าแรงคูรวม ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร	195
ข13	ผลการทดสอบหาเส้นอัตราลักษณะ ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร	196
ข14	แสดงผลการวัดค่าแรงคูเมทริกซ์ ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับ 1 เมตร	196
ข15	แสดงผลการวัดค่าแรงคูรวม ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับ 1 เมตร	197
ข16	ผลการทดสอบหาเส้นอัตราลักษณะ ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับ 1 เมตร	197

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ข17	แสดงผลการวัดค่าแรงคูดเมทริกซ์ ของตัวอย่างดินในพื้นที่ป่าไผ่ ที่ระดับผิวดิน	198
ข18	แสดงผลการวัดค่าแรงคูดรวม ของตัวอย่างดินในพื้นที่ป่าไผ่ ที่ระดับผิวดิน	198
ข19	ผลการทดสอบหาเส้นอัตราลักษณ์ ของตัวอย่างดินในพื้นที่ป่าไผ่ ที่ระดับผิวดิน	199
ข20	ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ด้วยวิธี Continuous Measurement ของกระบวนการแห้ง เปรียบเทียบกับวิธี Point-Wise Measurement ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับผิวดิน	200
ข21	ค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของดิน จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ในกระบวนการแห้ง ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับผิวดิน	200
ข22	ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ของกระบวนการแห้ง ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับผิวดิน	201
ข23	ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ด้วยวิธี Continuous Measurement ของกระบวนการแห้ง เปรียบเทียบกับวิธี Point-Wise Measurement ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับ 0.3 เมตร	202
ข24	ค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของดิน จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ในกระบวนการแห้ง ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับ 0.3 เมตร	202
ข25	ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ของกระบวนการแห้ง ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับ 0.3 เมตร	203
ข26	ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ด้วยวิธี Continuous Measurement ของกระบวนการแห้ง เปรียบเทียบกับวิธี Point-Wise Measurement ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร	204

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ข27	ค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดิน จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ในกระบวนการแห้ง ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม่ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร	204
ข28	ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ของกระบวนการแห้ง ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม่ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร	205
ข29	ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ด้วยวิธี Continuous Measurement เปรียบเทียบกับวิธี Point-Wise Measurement ในกระบวนการแห้งของทั้งสองตัวอย่างดิน ในพื้นที่ป่าไผ่ ที่ระดับผิวดิน	206
ข30	ค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดิน จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ในกระบวนการแห้ง ของตัวอย่างดินในพื้นที่ป่าไผ่ ที่ระดับผิวดิน	206
ข31	ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ในกระบวนการแห้ง ของตัวอย่างดินในพื้นที่ป่าไผ่ ที่ระดับผิวดิน	207
ข32	ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ด้วยวิธี Continuous Measurement ในกระบวนการเปียก เปรียบเทียบกับวิธี Point-Wise Measurement ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม่ผลผสม ที่ระดับผิวดิน	208
ข33	ค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดิน จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ในกระบวนการเปียก ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม่ผลผสม ที่ระดับผิวดิน	208
ข34	ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ของกระบวนการเปียก ตัวอย่างดินในพื้นที่ไม่ผลผสม ที่ระดับผิวดิน	209

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ข35	ค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดิน จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ทั้งกระบวนการเปียกและแห้ง ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับผิวดิน	210
ข36	ผลการทดสอบเส้นอัตราถักด้วยวิธี Continuous Measurement ของกระบวนการเปียก เปรียบเทียบกับวิธี Point-Wise Measurement ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร	211
ข37	ค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดิน จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ในกระบวนการเปียก ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร	211
ข38	ค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดิน จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ทั้งในกระบวนการเปียกและแห้ง ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร	212
ข39	ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ของกระบวนการเปียก ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร	212

พฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินในพื้นที่ อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์ ที่มีผลต่อการพิบัติของลาดดิน

Mechanical Behaviour of Soil in Laplae Area of Uttaradit Province with Applications to Landslide

คำนำ

เหตุการณ์ภัยพิบัติน้ำท่วม-ดินถล่มเป็นภัยธรรมชาติที่นับวันจะเกิดขึ้นบ่อยครั้งและมีความรุนแรงมากขึ้น ส่งผลกระทบโดยตรงต่อชีวิตความเป็นอยู่ของประชาชน ดังเช่น เหตุการณ์น้ำท่วม-ดินถล่มครั้งรุนแรง ในเดือนพฤษภาคม 2549 ทำให้หลายจังหวัดในภาคเหนือ ได้รับความเสียหายต่อชีวิต ทรัพย์สิน และสภาพจิตใจของชาวบ้านที่อยู่ในพื้นที่เสี่ยงภัย ปัจจุบันมีหลายหน่วยงานที่เข้ามาช่วยเหลือ ให้ความรู้ในการเฝ้าระวัง เพื่อให้ผู้นำท้องถิ่น แจ้งเตือนภัยให้กับประชาชนในพื้นที่เสี่ยงภัย โดยจะติดตามตรวจวัดระดับน้ำ และปริมาณน้ำฝนในพื้นที่ซึ่งเป็นวิธีการเตือนภัยที่ใช้กันอยู่ แต่การเตือนภัยดังกล่าวนี้ มิได้พิจารณาถึงปัจจัยของพื้นที่ร่วมด้วย นำไปสู่การพัฒนาระบบการเตือนภัยที่ใช้การวิเคราะห์ปัจจัยจำเพาะในพื้นที่ ซึ่งมีการทดสอบทั้งในสนาม ห้องปฏิบัติการ และติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมในสนามเพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์การไหลซึมและเสถียรภาพของลาดดินได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

งานวิจัยนี้ศึกษาการทดสอบเพื่อให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ เนื่องจากเป็นงานวิจัยแรกๆ ของประเทศไทย ที่มีการศึกษาพฤติกรรมทางด้านกลศาสตร์ของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ การทดสอบเส้นอัตรลักษณะ (Soil-Water Characteristic Curve) และฟังก์ชันสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำ (Hydraulic Conductivity Function) ซึ่งพารามิเตอร์ดังกล่าวมีความสำคัญมากในการวิเคราะห์การไหลซึม เนื่องจากปริมาณน้ำฝนที่ตกลงสู่ชั้นดิน จากนั้นศึกษาคุณสมบัติพื้นฐาน ค่ากำลังรับแรงเฉือนและอิทธิพลของการผูกพันที่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือน อีกทั้งนำปัจจัยดังกล่าวร่วมในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินอนันต์ นำไปสู่ข้อสรุปของปัจจัยที่ทำให้เกิดน้ำท่วม-ดินถล่ม

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานและพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินซึ่งพบในพื้นที่ อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์ ทั้งในสภาวะอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่มีผลต่อการพิบัติของลาดดิน
2. ศึกษาอิทธิพลจากการเปียกสลับแห้งที่มีต่อกำลังรับแรงเฉือนเพื่อประเมินเสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่ ซึ่งบ่งชี้ถึงระดับการผุพัง
3. ศึกษาปัจจัยที่ก่อให้เกิดดินถล่ม โดยประเมินพฤติกรรมการไหลซึม จากการใช้แบบจำลองเพื่อศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำ และการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินจากคุณสมบัติด้านกำลังของดินเมื่อมีค่าความชื้นเปลี่ยนแปลงไป อีกทั้งศึกษาค่ากำลังของดินที่ลดลงเนื่องจากอิทธิพลการผุพังของชั้นดิน

ขอบเขตการวิจัย

1. พื้นที่ศึกษาเป็นตัวแทนลักษณะการใช้ประโยชน์พื้นที่แบบไม่ผลผสม ในตำบลแม่พูล อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์ โดยทำการติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมในสนาม ได้แก่ เครื่องวัดน้ำฝน เครื่องวัดแรงดันน้ำและแรงดูดในดิน เครื่องวัดการเคลื่อนตัว รวมไปถึงการศึกษาพฤติกรรม การไหลซึมในสนามโดยการตรวจวัดและเก็บตัวอย่างดินเพื่อทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดินในบริเวณพื้นที่คัดเลือกดังกล่าว
2. ศึกษากำลังรับแรงเฉือนของดินเฉพาะวิธี Multi-Stage Consolidated Drained Direct Shear Test สำหรับดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ และ Single-Stage Consolidated Drained Direct Shear Test สำหรับดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือน หน่วยแรงประสิทธิผล หน่วยแรงรวม แรงดูดเมทริกซ์ และอิทธิพลของจำนวนรอบของการเปียกสลับแห้งของดินที่มีต่อกำลังรับแรงเฉือน
3. วิเคราะห์การไหลซึมของน้ำฝนด้วยวิธี Finite Element แบบ 1 มิติ
4. ประเมินเสถียรภาพลาดดินในทางวิศวกรรมแบบลาดดินอนันต์(Infinite Slope)

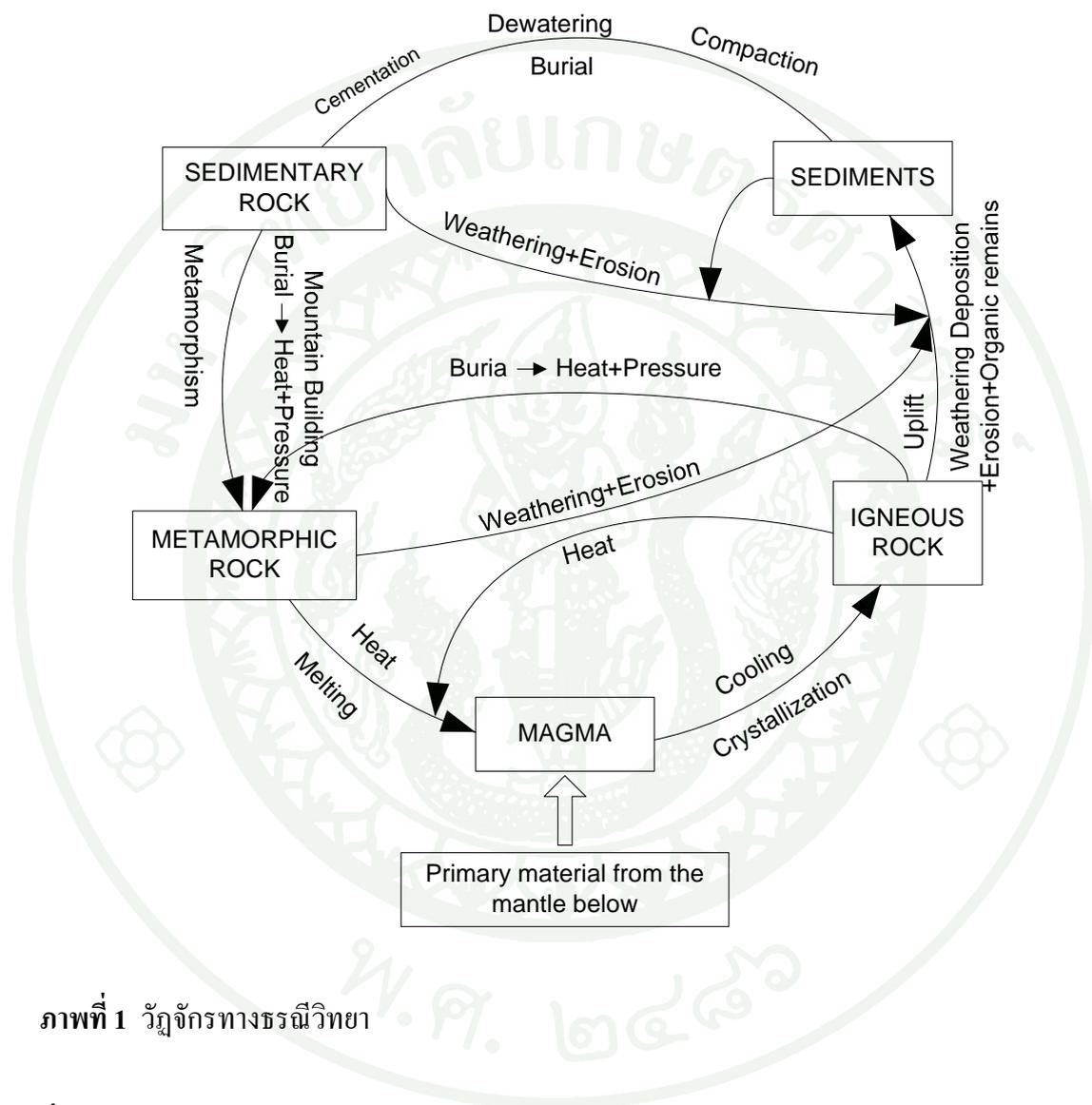
การตรวจเอกสาร

การกำเนิดของดิน

ดิน หมายถึง สารที่อยู่บริเวณผิวโลกซึ่งอยู่ในสภาพที่ไม่แข็งแรง (Unconsolidated) ประกอบด้วย เม็ดดิน (Soil Grain) สารอินทรีย์ (Organic) น้ำ และอากาศ ซึ่งอาจจะมีน้ำหนักแน่น หรือไม่แน่น ขึ้นอยู่กับชนิดของดินที่เป็นองค์ประกอบ เม็ดดินส่วนมากมีขนาดเล็กกว่า 300 มิลลิเมตร เกิดจากการสีกกร่อนและการย่อยสลายผุพังของหิน ซึ่งกระบวนการผุพังที่เกิดขึ้นกับหินและดิน เกิดจากผลของการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ด้วยกระบวนการ Mechanical Disintegration ซึ่งเป็นกระบวนการหลักในการย่อยสลายหินทางกายภาพ เกิดจากการกระทำของกระแสน้ำ คลื่น แรงโน้มถ่วง และการเปลี่ยนแปลงจากปฏิกิริยาทางเคมีในดิน ทำให้เกิดสารประกอบทางเคมี เช่น พวกสารเคมีเชื่อมแน่น (Chemical Cementation Agent) ออกไซด์ของเหล็ก และคาร์บอนेट ที่มีความสำคัญต่อพฤติกรรมด้านกำลังรับแรงเฉือนและการทรุดตัวของดิน สุรนัทร (2540)

ขบวนการกำเนิดดินเป็นส่วนหนึ่งของวัฏจักรทางธรณีวิทยา (Geological Cycle) ดังภาพที่ 1 เริ่มต้นจากแมกมา (Magma) ซึ่งเป็นสารประกอบซิลิเกตที่หลอมเหลวอยู่ภายใต้เปลือกโลกและมีอุณหภูมิสูงมาก จึงมีความร้อนและความดัน เมื่อแมกมาเคลื่อนตัวมาใกล้ผิวโลก โดยเคลื่อนขึ้นมาตามรอยแตกร้าวของเปลือกโลก ถ้าแมกมาเย็นตัวและแข็งตัวกลายเป็นหินอยู่ภายใต้เปลือกโลก เรียกว่าหินอัคนี (Igneous Rock) ที่เย็นตัวในเปลือกโลก (Intrusive Rock) ถ้าแมกมาเกิดประทุออกมาสู่เปลือกโลก เรียกว่า ลาวา เมื่อลาวาเย็นตัวจะแข็งกลายเป็นหินอัคนีที่เย็นตัวนอกเปลือกโลก (Extrusive Rock) หินอัคนีเมื่อสัมผัสกับบรรยากาศจะเกิดการผุพังทั้งทางกายภาพและทางเคมี ทำให้หินอัคนีแตกออกเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อยหรือเป็นเศษดินและหิน พวกเศษดินหรือหินจะถูกกระบวนการพัดพา (Transportation Process) ต่างๆ พัดพาพวกเศษดินและเศษหิน (Weathering Products) มารวมตัวกันเรียกว่า ตะกอน (Sediments) ถ้าตะกอนที่มาทับถมกันอยู่ได้รับอิทธิพลจากการทับถมจนเกิดกระบวนการเชื่อมประสานจับตัวแน่น (Lithification) ทำให้ตะกอนเหล่านี้กลายเป็นหินเรียกว่า หินชั้น (Sedimentary Rock) และหินชั้นเองก็จะสัมผัสกับบรรยากาศเกิดการผุพังกลายเป็นตะกอนอีกได้เช่นกัน ถ้าหินอัคนีและหินชั้นถ้าได้รับความร้อนและความดันหรือกระบวนการเปลี่ยนแปลง (Metamorphism) ทำให้หินดั้งเดิมคือหินอัคนีและหินชั้นเปลี่ยนแปลงไปเป็นหินชนิดใหม่ เรียกว่า หินแปร (Metamorphic Rock) และหินแปรนี้ก็อาจจะผุพังเมื่อสัมผัสกับบรรยากาศกลายเป็นตะกอน

ได้อีกเช่นกัน หินทั้ง 3 ชนิดถ้าได้รับความร้อนสูงๆ ก็จะหลอมเหลว กลายเป็นแมกมาใหม่ได้และแมกมาที่มีความดันมากๆ ก็จะไหลขึ้นมาสู่เปลือกโลกหรือปะทุออกมาสู่เปลือกโลกอีก เป็นวัฏจักรวนเวียนอยู่เช่นนี้เรื่อยไป



ภาพที่ 1 วัฏจักรทางธรณีวิทยา

ที่มา: Rogers *et al.*(1990)

การจำแนกชนิดของดินแยกตามการกำเนิดดิน

ชนิดของดินแยกตามกำเนิดของดินสามารถจำแนกได้ 2 ชนิด คือ

1. ดินเกิดในที่ (Residual Soils) เป็นดินที่เกิดจากการสลายของหิน โดยมีน้ำเป็นสารละลายหลัก การชะละลายมีดีกรีสูงจากผิวดินลงสู่ความลึกด้านล่าง ที่ผิวดินจึงมีเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่าเม็ดดินชั้นล่างซึ่งอาจมีหินกรวดที่ยังผุสลายไม่สมบูรณ์รวมอยู่ด้วย และหลังจากเป็นดินแล้วดินชนิดนี้ยังอยู่ที่เดิม

2. ดินตกตะกอนจากการพัดพา (Sedimented Soils, Transported Soils) เป็นดินที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของเม็ดดินจากแหล่งกำเนิดไปอีกที่หนึ่ง โดยอาศัยตัวกลางต่างๆ เช่น น้ำ ลม ธารน้ำแข็ง และเมื่อกระแสการพัดของน้ำลดลง เม็ดดินจะตกตะกอนทับถมเป็นเวลานาน เกิดเป็นชั้นดินชนิดของดินตกตะกอนจากการพัดพาแบ่งได้ตามกลไกของการพัดพาและสถานที่ของการตกตะกอนได้ แสดงในตารางที่ 1

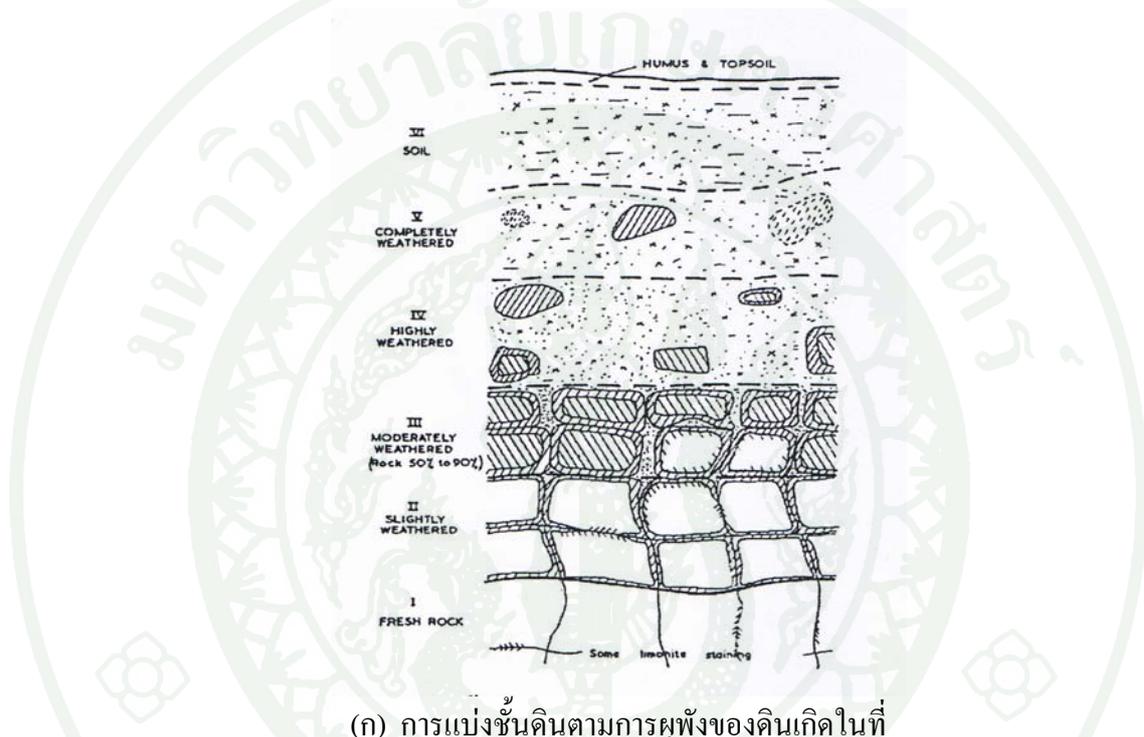
ตารางที่ 1 ชนิดของดินตะกอน(Transported Soil)

กลไกของการพัดพา	สถานที่หรือกลไกการตกตะกอน	ชนิดของดินเรียกตามธรณีวิทยา
น้ำ (Fluvial)	ทะเลสาบ	Lacustrine
	แม่น้ำ ลำธาร	Alluvial
	น้ำทะเล	Marine
น้ำแข็ง (Glacial)	ธารน้ำแข็ง	Till, Moraine
ลม (Aeolian)	ลมและแรงโน้มถ่วง	Loess และ Sand Dune
แรงโน้มถ่วง (Colluvial)	แรงโน้มถ่วง	Talus, Landslide, Hillwash

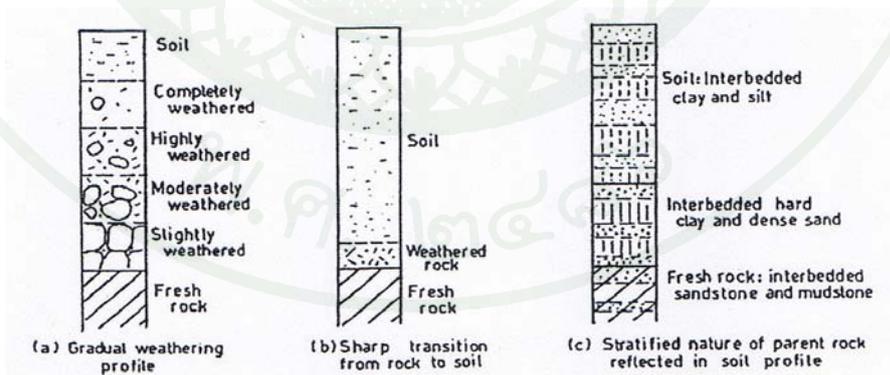
ที่มา: สุรฉัตร (2540)

การจำแนกระดับความผุพังของดิน

การจำแนกระดับความผุพังด้วยวิธี Weather Profile เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากสามารถแบ่งเป็นชั้นตามระดับความผุพัง พื้นฐานในการจำแนกแบบนี้มาจากการจำแนกดินที่ผุพังจากหินแกรนิต ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงรูปแบบสำหรับดินที่ผุพังจากหินชั้นและหินแปร (Little, 1969) แสดงดังภาพที่ 2 และตารางที่ 2



(ก) การแบ่งชั้นดินตามการผุพังของดินเกิดในที่



(ข) เปรียบเทียบการแบ่งชั้นดินตามการผุพังของดินเกิดในที่

ภาพที่ 2 การแบ่งชั้นดินตามการผุพังของดินเกิดในที่

ที่มา: Little (1969); Wesley (1988)

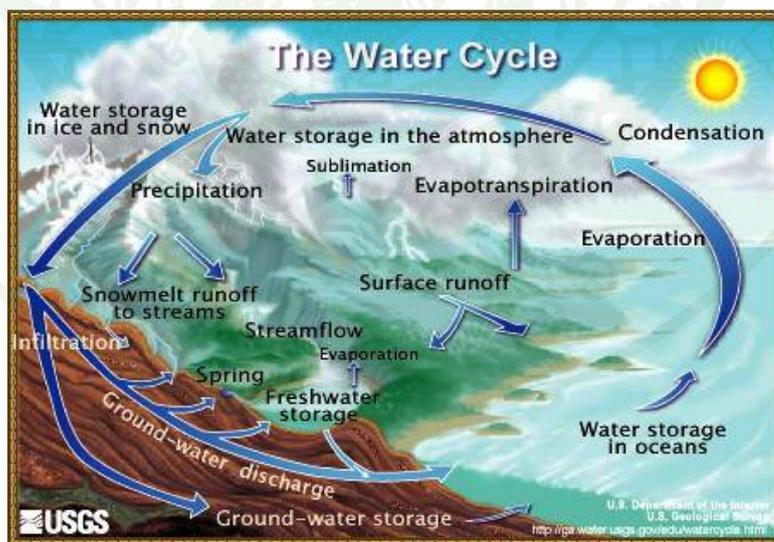
ตารางที่ 2 การจำแนกระดับผุพังของดิน

Grade	Degree of Decomposed	ลักษณะในสนาม	คุณสมบัติทางวิศวกรรม
VI	Soil	ไม่เป็นเนื้อหิน ตามเนื้อดินมีซากพืช ซากสัตว์และรากไม้	- ไม่สามารถรองรับฐานรากสิ่งก่อสร้างและอาคารได้ - ถูกกัดเซาะได้ง่าย
V	Completely Weathered	หินถูกย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ แต่ยังคงสภาพรูปร่างลักษณะอยู่ในส่วนของหิน Granite ดั้งเดิม, Feldspars ดั้งเดิม เมื่อย่อยสลายอย่างสมบูรณ์จะกลายเป็น Clay minerals ไม่สามารถกลับคืนเป็นแท่งได้ด้วยวิธี Ordinary Rotary Drilling	- สามารถขุดด้วยมือและแตกออกได้โดยไม่ต้องใช้การระเบิด - ไม่สามารถรองรับฐานรากของเขื่อนคอนกรีตหรือโครงสร้างขนาดใหญ่ได้ - ไม่สามารถตัดลาดดินให้มีความสูงชันได้
IV	Highly Weathered	หินซึ่งผุโดยการผุพังมีขนาดใหญ่ปานกลาง สามารถบิบบและขี้แตกได้ด้วยมือ บางครั้งเก็บมาเป็นก้อนได้โดยการขุดอย่างระมัดระวัง มีคราบของ Limonite มีหินน้อยกว่า 50%	- คล้ายเกรด V แต่รองรับฐานรากสำหรับเขื่อนดินได้ - มีหินก้อนใหญ่ปรากฏบ้างไม่แน่นอน
III	Moderately Weathered	ทั้งหมดมีการผุพังอย่างมากมาย โดยกำลังของหินก้อนใหญ่(เช่น แท่งหินขนาด NX) ไม่สามารถบิบบแตกได้โดยมือ บางทีมีคราบของ Limonite มีหินอยู่ประมาณ 50-90 %	- การขุดยาก ส่วนมากใช้รถ Bulldozer ช่วยและอาจต้องใช้ระเบิด - สามารถใช้เป็นชั้นวางฐานรากโครงสร้างคอนกรีตขนาดเล็กและเขื่อนหินทิ้ง
II	Slightly Weathered	การผุพังส่วนมากอยู่ตามผิวหินที่มีคราบ Limonite เล็กน้อย บางทีมีการผุพังของ Felspars ใน Granite กำลังของหินมีค่าใกล้เคียงกับ Fresh Rock	- ต้องใช้ระเบิดในการขุดสามารถรองรับฐานรากของเขื่อนคอนกรีต - มีค่าการซึมน้ำสูงตามรอยแตก บางทีมีค่าความซึมน้ำมากกว่าโซนด้านบน
I	Fresh Rock	Fresh Rock อาจมีคราบ Limonite บางๆ ตามรอยแตกที่เพิ่งเกิดการผุพัง	- คราบ Limonite จะบ่งบอกถึงการไหลซึมของน้ำตามรอยแตก - ฐานรากของสิ่งก่อสร้างได้ทุกชนิด

ที่มา: Little (1969)

วัฏจักรอุทกวิทยา

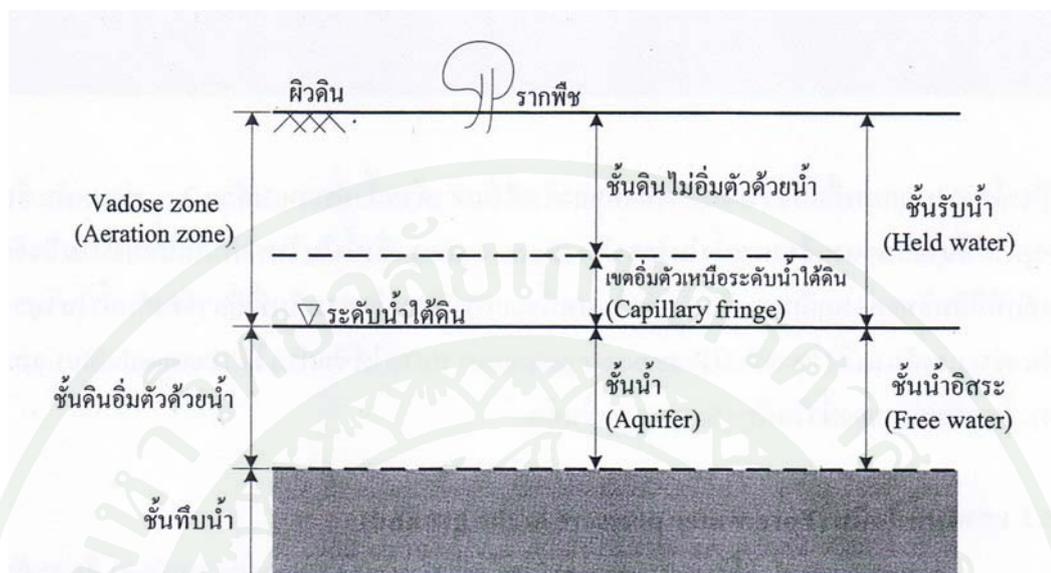
วัฏจักรอุทกวิทยาเป็นขบวนการที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ ที่ทำให้ปริมาณน้ำในมวลดินเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นสาเหตุให้ระดับความอืดตัวในมวลดินมีการเปลี่ยนแปลง ขบวนการต่างๆ ในวัฏจักร แสดงดังในภาพที่ 3 เมื่อไอน้ำในบรรยากาศมีปริมาณมากก็จะตกลงพื้นดินและแหล่งน้ำต่างๆ ในรูปของน้ำค้าง ฝน หิมะ ฯลฯ รวมเรียกว่าหยาดน้ำฟ้า (Precipitation) น้ำบางส่วนตกค้างตามใบไม้ ใบหญ้าและต้นพืชที่ปกคลุมดินอยู่ (Interception) เมื่อน้ำส่วนนี้ได้รับแสงแดดก็จะกลายเป็นไอรเหย (Evaporation) ขึ้นสู่บรรยากาศ ส่วนที่ตกลงพื้นดิน จะซึมผ่านผิวดิน (Infiltration) ทำให้ดินบริเวณใกล้ผิวดินอืดตัวด้วยน้ำ และจะซึมลงไปใต้ดิน (Percolation) ด้วยแรงดึงดูดของโลก โดยน้ำในดินบริเวณใกล้ผิวดินจะกลับขึ้นชั้นบรรยากาศ โดยการระเหยและการคายน้ำของพืช (Transpiration) น้ำที่ซึมลึกลงไปใต้ดิน ซึมลงไปจนถึงแหล่งน้ำใต้ดิน (Ground water resource) และอาจถูกดูดมาใช้โดยพืชหรือไหลขึ้นผิวดินในรูปของน้ำพุ (Spring) หรือไหลออกสู่แม่น้ำ ลำธาร โดยปริมาณน้ำที่ไหลก็จะเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล ถ้าปริมาณน้ำที่ตกจากบรรยากาศสู่พื้นดินมีปริมาณมาก จะเกิดน้ำบางส่วนไหลไปตามผิวดิน (Overland flow หรือ Surface runoff) ไหลลงสู่แม่น้ำ ลำธาร และออกสู่ทะเล บางส่วนเกิดการระเหยจากแหล่งน้ำดังกล่าวกลับขึ้นสู่บรรยากาศเป็นวัฏจักรต่อไป



ภาพที่ 3 วัฏจักรของน้ำ

ที่มา: United States Geological Survey (USGS)

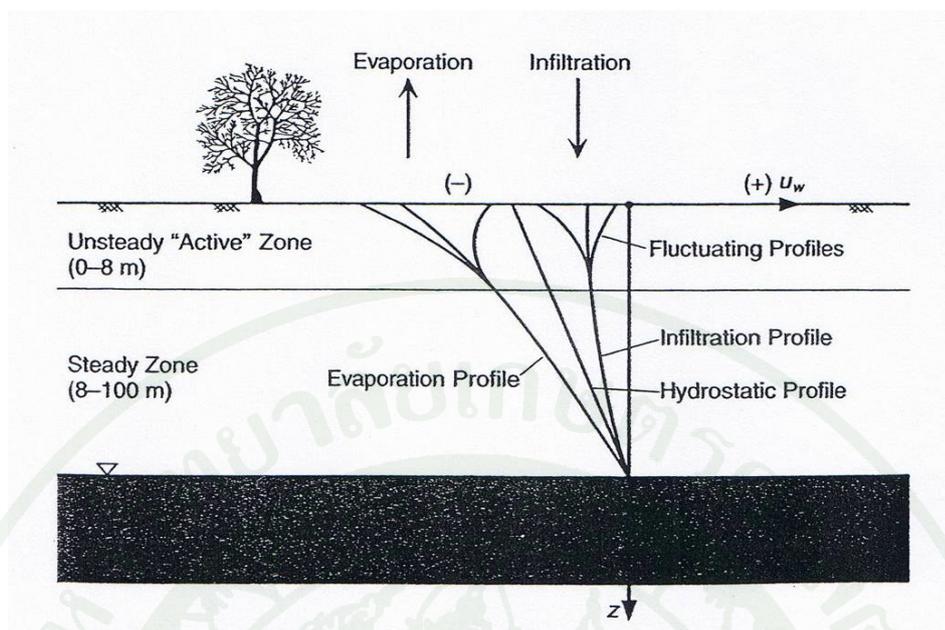
ทฤษฎีพื้นฐานดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ



ภาพที่ 4 แผนภาพแสดงชั้นน้ำใต้ดิน

ที่มา: สุเชษฐ์ (2551)

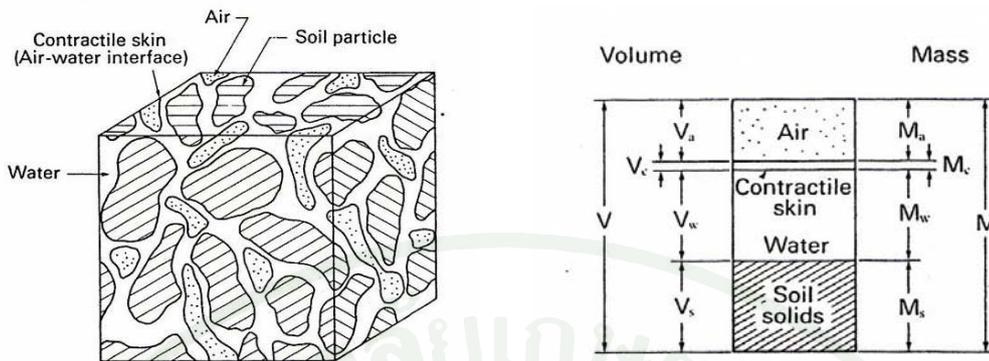
ในสภาวะธรรมชาติ แบ่งชั้นดินเป็น 2 ชั้น ดังภาพที่ 4 ได้แก่ ชั้นดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำอยู่ภายใต้ระดับน้ำใต้ดินจะมีความสัมพันธ์กับลักษณะทางภูมิประเทศ ลักษณะของชั้นดิน และการปรับสมดุลของกลไกทางธรรมชาติที่มีการเพิ่มหรือเคลื่อนย้ายน้ำภายใต้พื้นดิน สำหรับชั้นดินที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดินขึ้นไปจนถึงระดับผิวดิน มีชื่อเรียกว่า Vadose zone หรือ Aeration zone ในชั้นนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนย่อย คือ ส่วนแรกจะเป็นดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated zone) นั่นคือ โพรงดินจะประกอบด้วยน้ำและอากาศ ความชื้นในดินชั้นนี้จะแปรเปลี่ยนมาก โดยขึ้นกับวัฏจักรอุทกวิทยา หรือจากการระเหย-คายน้ำ การดูดซึมของรากพืช เหล่านี้เป็นกลไกสำคัญตามธรรมชาติที่มีผลต่อชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ส่วนที่สองเป็นส่วนที่น้ำใต้ดินถูกดึงดูดขึ้นมาด้วยแรงคาปิลลารี (Capillary force) แรงดันน้ำใน โพรงดินจะมีค่าน้อยกว่าแรงดันบรรยากาศ จึงทำให้ดินในชั้นนี้อิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งเรียกว่าเขตอิมตัวเหนือระดับน้ำใต้ดิน (Capillary fringe) (สุเชษฐ์, 2551)



ภาพที่ 5 แบบจำลองภาพตัดขวางของชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำภายใต้การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม

ที่มา: Lu and Likos (1960)

หรืออาจแบ่งหน้าตัดชั้นดินตามการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำในโพรงดิน โดยแบ่งชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำเป็นสองชั้น คือ ชั้น Unsteady Zone หรือ Active Zone เป็นชั้นที่ได้รับอิทธิพลจากสภาพฤดูกาลและสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา โดยมีความลึกตั้งแต่ชั้นผิวดินถึงจุดที่ค่าแรงดันมีค่าคงที่ภายใต้สภาวะสถิต (Hydrostatic) และถัดลงมาเป็นชั้นการไหลคงที่ (Steady Zone) ซึ่งมีความลึกจนกระทั่งถึงระดับน้ำใต้ดิน ค่าแรงดันมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับเวลา ซึ่งเมื่อเกิดการระเหยของน้ำออกจากชั้นดินหรือเกิดการไหลซึมของน้ำลงสู่ดิน ชั้นดินนั้นจะปรับให้เข้าสู่สภาวะสมดุล ตั้งเส้นแรงดันน้ำ Evaporation profile, Infiltration profile ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 6 ส่วนประกอบของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

ที่มา: Fredlund and Rahardjo (1993)

ชั้นดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำจะมีความแตกต่างกับชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ เนื่องจากดินที่อิ่มตัวนั้น ประกอบด้วย 2 เฟส คือ ของแข็ง (เม็ดดิน) และของเหลว (น้ำ) หรือเป็นดินที่แห้งอย่างสมบูรณ์ ประกอบด้วยของแข็ง (เม็ดดิน) และก๊าซ(อากาศ) สำหรับดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำประกอบด้วย 4 เฟส ดังภาพที่ 6 คือ ของแข็ง (เม็ดดิน) ของเหลว (น้ำ) ก๊าซ (อากาศ) และ Contractile Skin ซึ่งเป็นชั้นรอยต่อระหว่างน้ำกับอากาศ ทำให้ดินมีค่าแรงดึงผิวและเป็นส่วนช่วยเพิ่มหน่วยแรงประสิทธิผลให้กับมวลดิน ความสัมพันธ์ของสัดส่วนแรงดันน้ำและอากาศในดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงจำนวนของเฟสน้ำและอากาศซึ่งเกิดขึ้นภายใต้กระบวนการทางธรรมชาติ เช่น ฝนตก, การระเหย หรือภายใต้กระบวนการที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การชลประทาน หรือการเปลี่ยนแปลงสภาวะภายใต้ขอบเขตเดิม เช่น การที่ระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าปกติ มีผลกระทบโดยตรงกับหน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่จุดสัมผัสระหว่างเม็ดดิน

แรงดูดในดิน (Soil Suction)

แรงดูดโดยรวม (Total Suction) เป็นพลังงานที่ใช้ในการดึงน้ำออกจากมวลดินในสถานะไอน้ำ โดยเป็นผลรวมของ Matric Suction และ Osmotic Suction ดังสมการที่ (1)

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi \tag{1}$$

เมื่อ	$(u_a - u_w)$	คือ	Matric Suction
	u_a	คือ	แรงดันอากาศ
	u_w	คือ	แรงดันน้ำ
	π	คือ	Osmotic Suction

Richard (1965) อธิบายว่าค่าแรงดูดในดินหรือแรงดูดโดยรวมสามารถวัดจากความดันไอของน้ำในดิน และจากความสัมพันธ์ทางด้าน Thermodynamic ระหว่างค่าแรงดูดในดินและความดันไอของน้ำในดิน สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\psi = - \left[\frac{RT}{v_{w0} \omega_v} \right] \cdot \ln \left(\frac{\bar{u}_v}{u_{v0}} \right) \quad (2)$$

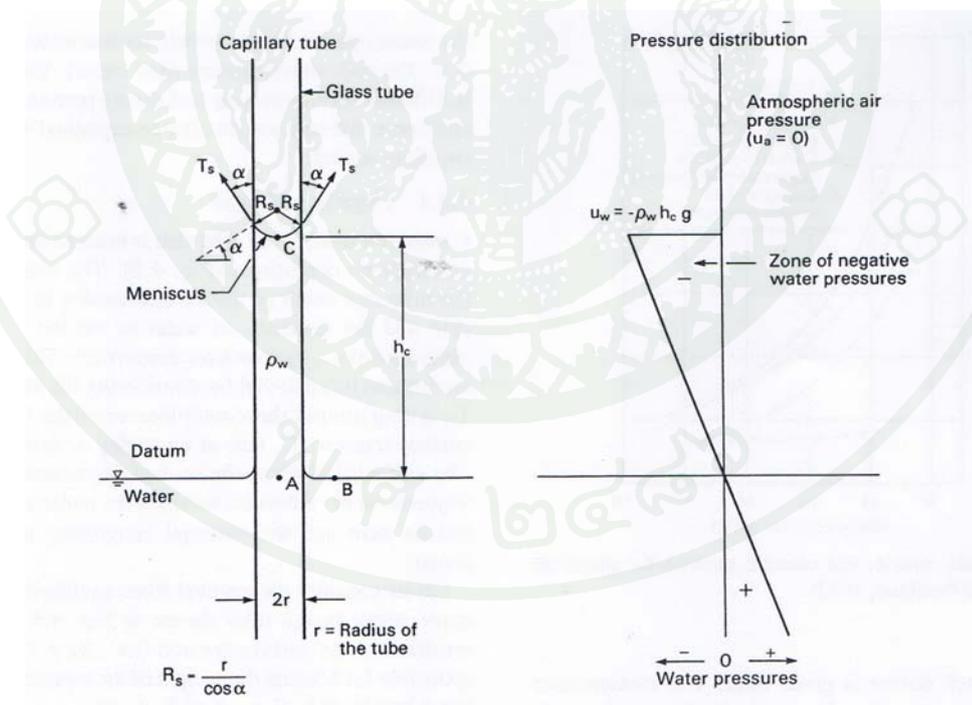
เมื่อ	ψ	คือ	แรงดูดโดยรวม (kPa)
	R	คือ	ค่าคงที่ของก๊าซ มีค่าเท่ากับ $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
	T	คือ	อุณหภูมิสัมบูรณ์ มีค่าเท่ากับ $273.16 + t^\circ \text{ (}^\circ\text{K)}$
	t°	คือ	อุณหภูมิ ($^\circ\text{C}$)
	v_{w0}	คือ	ปริมาตรจำเพาะของน้ำหรือส่วนกลับของค่าความหนาแน่นของน้ำ $(1/\rho_w), (\text{m}^3/\text{kg})$
	ρ_w	คือ	ความหนาแน่นของน้ำมีค่าเท่ากับ $998 \text{ kg}/\text{m}^3$ ที่เวลา $t^\circ = 20^\circ\text{C}$
	ω_v	คือ	Molecular Mass ของไอน้ำ มีค่าเท่ากับ $18.016 \text{ kg}/\text{kmol}$
	\bar{u}_v	คือ	ความดันไอน้ำ (kPa)
	u_{v0}	คือ	ความดันไอน้ำอิ่มตัวของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน (kPa)
	$\frac{\bar{u}_v}{u_{v0}}$	คือ	ค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ (Relative Humidity, RH, %)

ซึ่งการวัดความดันไอน้ำในดินนั้น ใช้เครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity Sensor) โดยเครื่องมือวัดนั้นไม่จำเป็นต้องสัมผัสกับดิน เพียงแต่วัดไอน้ำในดินที่ส่งผ่านความชื้นไปยังไอน้ำในเครื่องมือวัด

ค่าแรงดูดเมทริกซ์ (Matric Suction) หรือ Capillary เป็นแรงดูดเนื่องจากแรงดึงผิวของน้ำในดิน ($u_a - u_w$) หรือพลังงานที่ใช้ในการดึงน้ำออกจากมวลดินในสถานะที่ไม่มีภาวะหยาบของน้ำ โดยดึงน้ำจากมวลดินในสถานะของเหลว Matric Suction มีความสัมพันธ์กับขนาดของเม็ดดิน ขนาดของช่องว่างและค่าความอึดตัว เครื่องมือวัดต้องสัมผัสกับน้ำในดินได้เป็นอย่างดี เพื่อให้ น้ำในดินส่งผ่านกับน้ำในเครื่องมือวัดได้ เช่น เครื่องมือวัดศักย์แรงดูด (Tensiometer)

ค่าแรงดูดออสโมติก (Osmotic Suction) เป็นแรงดูดเนื่องจากสารละลายที่ละลายในน้ำในดิน โดย Osmotic Suction มีผลกับปริมาณสารละลายเกลือในดิน และนำมาพิจารณาน้อย ในสถานะของดินที่ไม่อึดตัวด้วยน้ำ เนื่องจากเมื่อปริมาณความชื้นเปลี่ยนแปลง ค่า Osmotic Suction มีการเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อเทียบกับค่า Matric Suction การวัดค่ากระทำโดยวัดความเหนียวไฟฟ้า ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความเข้มข้นของสารละลายเกลือ

แรงดึงผิวน้ำในดิน (Surface Tension)



ภาพที่ 7 แบบจำลองการเกิดคาปิลลารี

ที่มา: Fredlund and Rahardjo (1993)

การที่ชั้นดินที่ไม่อึดตัวด้วยน้ำมีค่าแรงดันน้ำในโพรงดินมีค่าลบหรือเป็นค่าแรงดูด เนื่องจากค่าแรงดึงผิวของโพรงช่องว่างในดินในชั้นของ Contractile Skin โดยเปรียบโพรงช่องว่างในดินกับรัศมีของหลอดแก้วเล็กที่จุ่มลงไปใต้อากาศใต้น้ำ ดังภาพที่ 7 จะเห็นได้ว่าระดับน้ำในหลอดแก้วจะสูงกว่าระดับน้ำในภาชนะ และเมื่อพิจารณาสมดุลของแรงดึงผิวรอบขอบ Meniscus จะมีค่าเท่ากับแรงเนื่องจากน้ำหนักของน้ำในคอลัมน์ซึ่งมีความสูงเท่ากับ h_c ดังสมการ (3)

$$2\pi r T_s \cos \alpha = \pi r^2 h_c \rho_w g \quad (3)$$

เมื่อ	r	คือ	รัศมีของหลอดแก้ว
	T_s	คือ	แรงดึงผิวของน้ำ
	α	คือ	contact angle
	h_c	คือ	ความสูงของน้ำในหลอดแก้ว
	g	คือ	ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

จากสมการที่ (4) ค่าแรงคาปิลลารีจึงขึ้นอยู่กับค่าแรงดึงผิวและขนาดของหลอดแก้ว ในที่นี้คือโพรงเม็ดดิน ซึ่งยิ่งหลอดแก้วมีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็ก ความแตกต่างของระดับน้ำในหลอดแก้วกับระดับน้ำในภาชนะก็จะมากขึ้น เช่นเดียวกันกับขนาดของเม็ดดินและโพรงช่องว่างในดินเมื่อมีค่าลดลง แรงคาปิลลารีจะมีค่าสูงขึ้นหรือความดันน้ำเป็นลบมากขึ้น ดังนั้นดินเหนียวจึงมีแรงคาปิลลารีมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับดินชนิดอื่น

$$h_c = \frac{2T_s}{\rho_w g R_s} \quad (4)$$

เมื่อ R_s คือ รัศมีความโค้งของ meniscus มีค่าเท่ากับ $(r / \cos \alpha)$

สำหรับค่า Contact Angle ที่เกิดขึ้นระหว่าง Contractile Skin ในน้ำสะอาดกับหลอดแก้วมีค่าเท่ากับ $0 (\alpha = 0)$ ดังนั้นค่ารัศมีความโค้ง (R_s) จึงมีค่าเท่ากับรัศมีของหลอด (r) ความสูงคาปิลลารีของน้ำสะอาดจึงมีค่าดังสมการที่ (5)

$$h_c = \frac{2T_s}{\rho_w g r} \quad (5)$$

เมื่อพิจารณาจุด A, B และ C ดังภาพที่ 7 ในสภาวะสมดุลภายใต้สภาพสถิตย์(Hydrostatic) จุด A, B และ C มีค่า Hydraulic Heads เท่ากับ 0 เมื่อตำแหน่งของจุด A และ B เป็นตำแหน่งอ้างอิง ค่าแรงดันน้ำที่จุด A และ B มีค่าเท่ากับ 0 ส่วนที่จุด C อยู่ที่ระดับความสูง h_c จากตำแหน่งอ้างอิง ดังนั้น ค่าความดันน้ำในโพรงดิน (Pressure Head) ที่จุด C จึงมีค่าเป็นลบ และสามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ (6)

$$u_w = -\rho_w g h_c \quad (6)$$

แสดงให้เห็นว่า ค่าแรงดันน้ำเหนือจุด A (ระดับน้ำบาดาล) ในหลอดคาปิลารีมีค่าเป็นลบ และอยู่ภายใต้สภาวะแรงดึง และค่าแรงดันน้ำที่ระดับต่ำกว่าจุด A จะมีค่าเป็นบวกในสภาวะของแรงดันสถิตย์(Hydrostatic) เมื่อพิจารณาที่จุด C ในสภาวะบรรยากาศ ($u_a = 0$) แรงดันน้ำมีค่าเป็นลบ ($u_w = -\rho_w g h_c$) ดังนั้นค่าแรงดูดเมตริกซ์ ($u_a - u_w$) ที่จุด C จึงมีค่าดังสมการที่ (7) และสามารถแสดงค่าแรงดูดเมตริกซ์ในเทอมของค่าแรงดึงผิว ได้ตามสมการที่ (8) ดังนี้

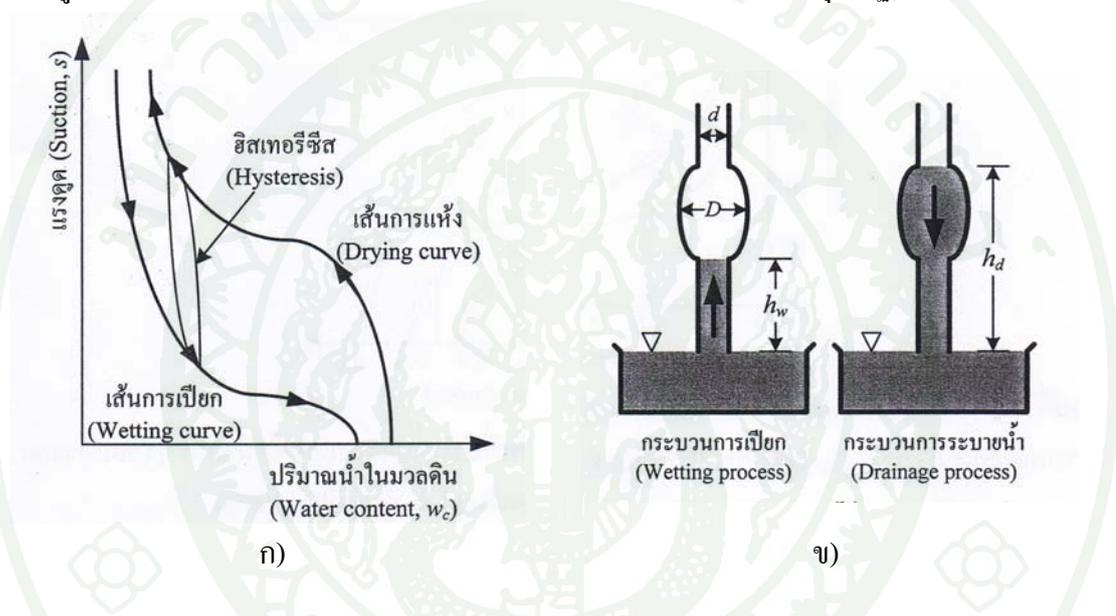
$$(u_a - u_w) = \rho_w g h_c \quad (7)$$

$$(u_a - u_w) = \frac{2T_s}{R_s} \quad (8)$$

เส้นอรรถลักษณะ (Soil-Water Characteristic Curve)

ดินประกอบไปด้วยโพรงที่มีขนาดต่างกัน การระบายน้ำออกจากโพรงดินส่งผลให้มีแรงดันคาปิลารี (Capillary pressure) หรือค่าแรงดูดเมตริกซ์ที่ไม่เท่ากัน โดยเส้นอรรถลักษณะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดูด (Suction, $u_a - u_w$) กับปริมาณน้ำในมวลดินหรือดีกรีความอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยเส้นอรรถลักษณะจะประกอบด้วย 2 เส้น คือ เส้นการแห้ง, Desorption process หรือ Drying curve จะแสดงถึงพฤติกรรมของดินเมื่อปริมาณน้ำในมวลดินลดลงซึ่งเป็นผลมาจากการระบายน้ำหรือการระเหยของน้ำออกจากมวลดิน ส่งผลให้แรงดูดเพิ่มขึ้น และเส้นการเปียก, Adsorption process หรือ Wetting curve แสดงพฤติกรรมของดินเมื่อปริมาณน้ำในมวลดินเพิ่มขึ้น โดยเป็นผลมาจากการเติมน้ำเข้าสู่มวลดิน (Infiltration) ส่งผลทำให้แรงดูดลดลง และเส้นอรรถลักษณะทั้งสองเส้นนี้จะไม่ซ้อนทับกัน ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรม Hysteresis โดยปริมาณน้ำที่ยังกักเก็บไว้ในดินได้ในระหว่างกระบวนการแห้งจะมีค่ามากกว่าการ Adsorbed ของดินที่ค่าแรงดูดเดียวกัน

ในกระบวนการเปียกน้ำ ดังภาพที่ 8(ก) พฤติกรรมแบบนี้อาจจะอธิบายโดยแบบจำลองขวดหมึก (Ink-bottle model) กล่าวคือ ขวดหมึกที่มีขนาดประมาณหลอดคาปิลารีประกอบด้วยพื้นที่หน้าตัดที่แตกต่างกัน 2 บริเวณซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง d และ D ตามลำดับ เมื่อน้ำไหลขึ้นหรือกระบวนการเปียกน้ำ ความสูงคาปิลารี (Capillary height) จะถูกควบคุมด้วยเส้นผ่านศูนย์กลาง d ดังนั้นระดับน้ำจะขึ้นสูงเท่ากับขอบล่างของขวดหมึก h_w ในทางตรงกันข้ามเมื่อน้ำไหลลงหรือกระบวนการระบายน้ำเกิดขึ้น ความสูงคาปิลารี (Capillary height) จะถูกควบคุมด้วยเส้นผ่านศูนย์กลาง d เหมือนกัน แต่ระดับน้ำจะลดต่ำลงเท่ากับขอบบนของขวดหมึก h_d ดังภาพที่ 8(ข) ดังนั้นเส้นการแห้งจะอยู่เหนือเส้นการเปียก เมื่อพิจารณาที่ระดับปริมาณความชื้นที่เท่ากัน (สุเชษฐ์, 2551)

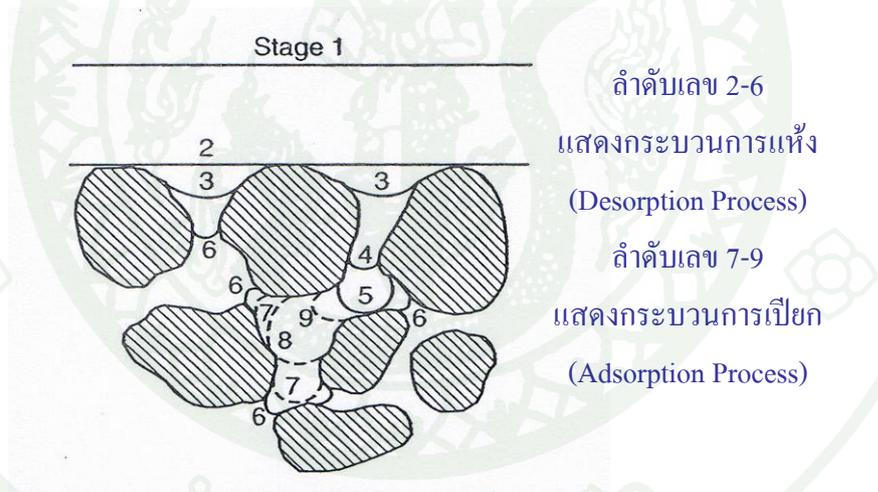


ภาพที่ 8 เส้นอัตรลักษณ์ (Soil-water characteristic curve)

- ก) วัฏจักรการระบายน้ำและเปียกน้ำ (Cycle of drainage and wetting) หรือฮิสเทอรีซิส (Hysteresis)
- ข) แบบจำลองขวดหมึก (Ink-bottle model)

ที่มา: สุเชษฐ์ (2551)

Childs (1969) อธิบายเพิ่มเติมถึงพฤติกรรม Ink-Bottle Hyteresis ดังภาพที่ 9 แสดงสมมุติฐานภาพตัดขวางของตัวอย่างดิน จากสถานะเริ่มต้นที่ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ที่ตำแหน่ง 1 ตรงบริเวณรอยต่อของน้ำและอากาศที่ระดับเหนือพื้นผิวของดิน แรงดันน้ำจะมีค่าตามความสูงของน้ำ (Hydrostatic) ตำแหน่งที่ 2-6 แสดงถึงตำแหน่งของรอยต่อของน้ำกับอากาศในกระบวนการระบายน้ำที่เพิ่มขึ้น ค่าแรงดันน้ำจะมีค่าเข้าสู่ค่าลบเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณน้ำในช่องว่างของตัวอย่างดินลดน้อยลง ค่าแรงดันน้ำที่มีค่าเป็นลบจะเรียกว่าค่าแรงดูดเมทริกซ์ ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นกับความโค้งของรอยต่อระหว่างน้ำกับอากาศ เส้นประในตำแหน่งที่ 7 ถึง 9 แทนรอยต่อของน้ำกับอากาศภายหลังผ่านกระบวนการเปียกน้ำ รอยต่อของน้ำและอากาศจะเพิ่มมากขึ้นตามโครงสร้างของช่องว่างในบริเวณที่ใกล้กัน เช่น ตำแหน่งที่ 8 และ 9 จนเต็มช่องว่าง ความโค้งของน้ำภายในช่องว่างนี้จึงลดลง ส่งผลต่อค่าแรงดูดที่ลดลงภายใต้สภาวะสมดุล จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าตำแหน่งการเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นในกระบวนการเปียกน้ำจะน้อยกว่าตำแหน่งการลดลงของปริมาณความชื้นในกระบวนการระบายน้ำเมื่อค่าแรงดูดเท่ากัน



ภาพที่ 9 กระบวนการระบายน้ำและเปียกน้ำภายใต้สภาวะดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Childs, 1969)

ที่มา: Lu and Likos (1960)

หน่วยแรงประสิทธิผลในมวลดินของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

Terzaghi (1936) พิจารณาถึงหลักการสมดุลระหว่างหน่วยแรง โดยพิจารณาว่าเมื่อมีหน่วยแรงภายนอกกระทำ หน่วยแรงจะส่งผ่านในเนื้อดินผ่านผิวสัมผัสของเม็ดดิน ซึ่งมีผลต่อความแข็งแรงของมวลดินโดยตรง อีกส่วนหนึ่งรับโดยน้ำและอากาศในรูปของความดันน้ำในโพรงดิน ซึ่งเป็นหน่วยแรงที่ไม่มีผลโดยตรงต่อความแข็งแรงของมวลดิน ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงดังกล่าวแสดงได้ดังสมการที่ (9)

$$\sigma = \sigma' + u \quad (9)$$

เมื่อ	σ	คือ	หน่วยแรงรวม
	σ'	คือ	หน่วยแรงประสิทธิผล
	u	คือ	ความดันน้ำในโพรง

Bishop (1959) คัดแปลงสมการหน่วยแรงประสิทธิผลในดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำของ Terzaghi โดยเพิ่มเติมค่าแรงดันน้ำด้านลบ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อมวลดินอิ่มตัวด้วยน้ำจะเกิดแรงดันน้ำด้านบวกขึ้น ทำให้ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลลดลง ในทางตรงกันข้าม เมื่อมวลดินเกิดการระบายน้ำจะทำให้แรงดันน้ำด้านลบสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้ค่าแรงดึงผิวที่เกิดขึ้นจึงเพิ่มค่าแรงประสิทธิผลและดึงให้เม็ดดิน grains ขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งสมการสำหรับดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ แสดงดังนี้

Net normal stress Suction Stress

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (10)$$

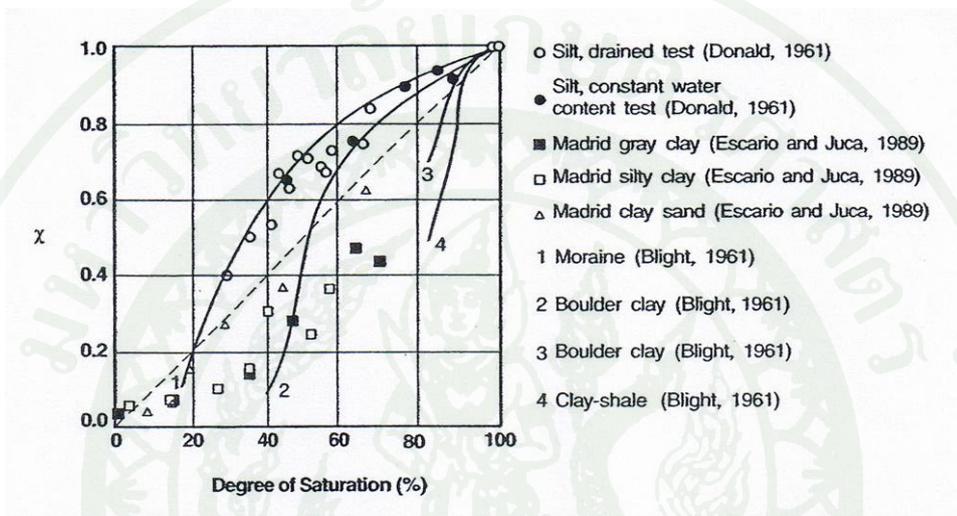
เมื่อ

u_a คือ แรงดันอากาศในช่องว่าง (สภาวะธรรมชาติ u_a มีค่าเป็น 0)

u_w คือ แรงดันน้ำในช่องว่าง

χ คือ Effective stress parameter ซึ่งขึ้นอยู่กับคีกรีความอิ่มตัวด้วยน้ำหรือแรงดูดเมทริกซ์

ซึ่งพจน์ของ $(\sigma - u_a)$ เป็นตัวแทนของหน่วยแรงตั้งฉากสุทธิ และพจน์ $\chi(u_a - u_w)$ แทนหน่วยแรงระหว่างเม็ดดินที่เกิดเนื่องจากค่าแรงดูด สิ่งสำคัญสำหรับการหาค่า χ คือการวัด ค่าแรงดูดเมทริกซ์และหน่วยแรงรวมในการทดสอบ Triaxial หรือการเนียนตรง ภาพที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า χ และคิกริความอิ่มตัวด้วยน้ำ สำหรับดินแต่ละชนิด ซึ่งค่า χ มีค่าอยู่ระหว่าง 0 (เมื่อตัวอย่างดินอยู่ในสภาวะแห้งอย่างสมบูรณ์) ถึง 1 (เมื่อตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ)



ภาพที่ 10 ผลการทดสอบซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ χ กับคิกริความอิ่มตัวด้วยน้ำ

ที่มา: Lu and Likos (1960)

กำลังรับแรงเฉือนของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

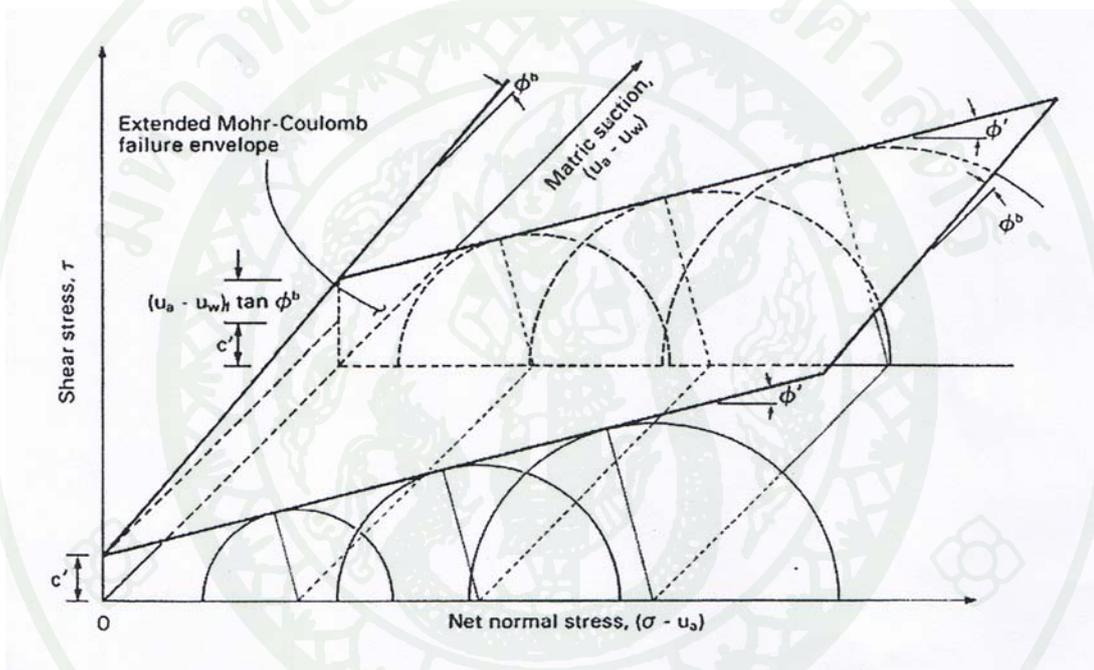
Fredlund *et al.* (1978) ได้อธิบายเพิ่มเติมถึงพฤติกรรมกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือน แรงดูด และหน่วยแรงตั้งฉาก ดังสมการที่(11) และแสดงระนาบการพิบัติดังภาพที่ 11 ดังนี้

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)_f \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \tag{11}$$

เมื่อ c' คือ ค่าแรงยึดเหนี่ยวที่ค่าแรงดูดเมทริกซ์และหน่วยแรงกระทำตั้งฉากสุทธิมีค่าเป็นศูนย์

$(\sigma - u_a)_f$	คือ	หน่วยแรงกระทำตั้งฉากสุทธิบนระนาบการพัง
ϕ'	คือ	ค่ามุมเสียดทานภายในซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าหน่วยแรงกระทำตั้งฉากสุทธิที่เปลี่ยนแปลงไป
$(u_a - u_w)_f$	คือ	ค่าแรงดูดเมทริกซ์ขณะเกิดการพิบัติ
ϕ^b	คือ	ค่ามุมเสียดทานภายในซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าแรงดูดเมทริกซ์

ซึ่งจากสมการดังกล่าว สามารถแสดงระนาบการพิบัติดังภาพที่ 11

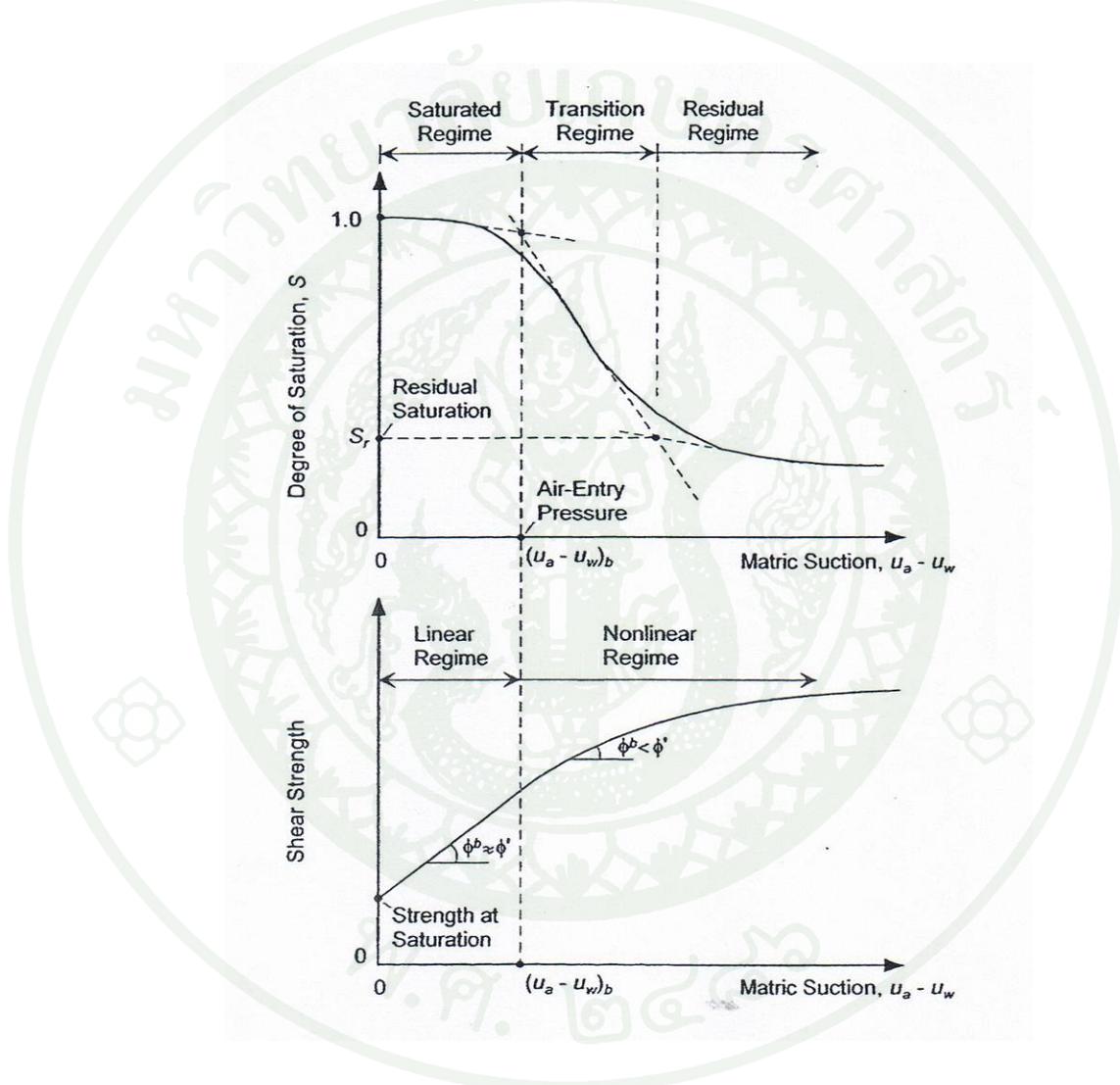


ภาพที่ 11 ระนาบการพิบัติของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

ที่มา: Fredlund and Morgenstern (1977)

จากการทดสอบ (เช่น Gan *et al.*, 1988; Escario *et al.*, 1989; Vanapalli *et al.*, 1996) แสดงให้เห็นว่า ค่ามุม ϕ^b เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นที่ค่าแรงดูดเมทริกซ์สูงจะมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเส้นตรง ซึ่งพบว่าเส้นขอบเขตกำลังรับแรงเฉือนจะไม่เป็นเส้นตรงเมื่อมีค่าแรงดูดเมทริกซ์ที่สูงขึ้นมีลักษณะสอดคล้องกับพฤติกรรมของเส้นอัตราค้ำย ดังภาพที่ 12 แสดงถึงเส้นอัตราค้ำยตามเส้นการแห้ง (Drying Curve) ในช่วงที่ค่าแรงดูดเมทริกซ์มีค่าต่ำหรือค่าแรงดูดมีค่าน้อยกว่าค่าแรงดันของอากาศที่สามารถจะเข้าสู่ช่องว่างภายในมวลดิน (Air-Entry

Pressure) ได้ ช่องว่างในมวลดินนั้นยังคงอึดด้วยน้ำ เส้นขอบเขตกำลังรับแรงเฉือนจะเป็นเส้นตรง และค่า ϕ^b จะมีค่าเท่ากับค่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ') ส่วนตำแหน่งที่ถัดจากค่า Air-Entry Pressure จะมีพฤติกรรมที่ไม่เป็นเส้นตรง ตามลักษณะการระบายน้ำในช่องว่างของเม็ดดิน ถ้าการระบายน้ำยังเกิดขึ้นต่อเนื่อง จะเกิดการลดลงของปริมาณน้ำภายในช่องว่างระหว่างเม็ดดินอย่างรวดเร็ว ส่งผลถึงค่าแรงตึงผิวของน้ำระหว่างเม็ดดินที่สูงขึ้น นำไปสู่ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่มากขึ้นด้วย



ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นอัตราเฉือนและเส้นขอบเขตกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ไม่อึดด้วยน้ำ (ดัดแปลงจาก Vanapalli *et al.*, 1996)

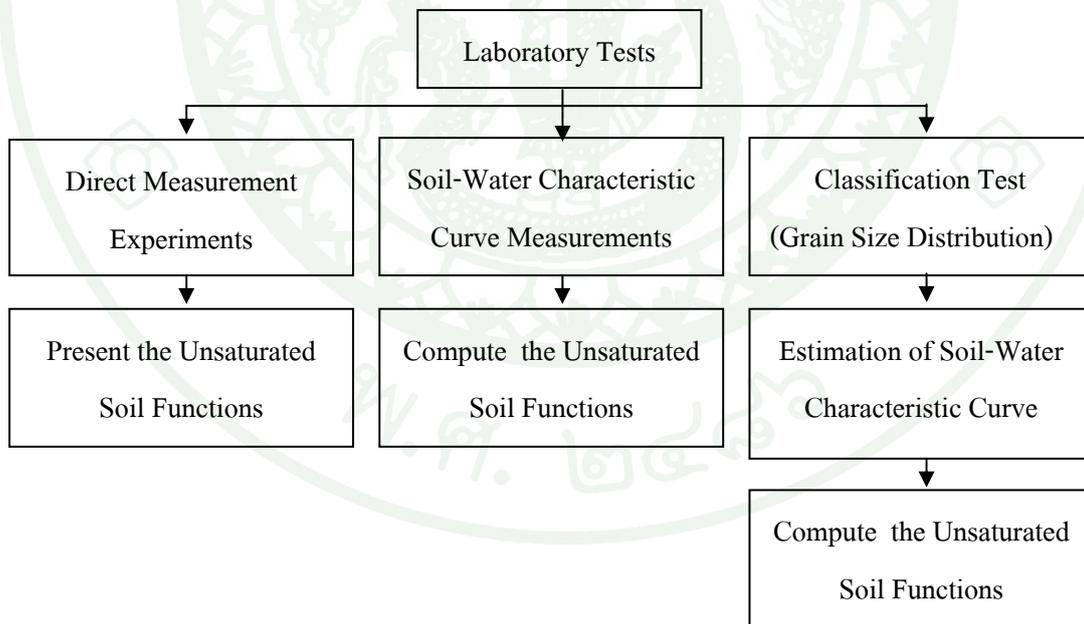
ที่มา: Lu and Likos (1960)

การหาค่าฟังก์ชันคุณสมบัติของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำทั้งวิธีทางตรงและวิธีทางอ้อม

Fredlund *et al.* (1997) อธิบายการหาค่าฟังก์ชันคุณสมบัติของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated Soil Property Function) สำหรับใช้ในการจำลองเชิงตัวเลขของดินทั้งในสถานะอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวด้วยน้ำในทางวิศวกรรม ซึ่งฟังก์ชันคุณสมบัติของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ได้แก่

1. ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำกับค่าแรงคูดในดิน (Hydraulic Conductivity Function)
2. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความอุ้มน้ำกับค่าแรงคูดในดิน (Soil-Water Characteristic Curve)
3. ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนกับค่าแรงคูดในดิน

สามารถหาค่าฟังก์ชันคุณสมบัติของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำได้ตามแนวทาง ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 แนวทางการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาค่าฟังก์ชันคุณสมบัติของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

ที่มา: Fredlund *et al.* (1997)

การประมาณค่าเส้นอัตราลักษณะ

Arya and Paris. (1981) สร้าง โมเดลเพื่อทำนายเส้นอัตราลักษณะของดินจากเส้นการกระจายตัวของขนาดเม็ดดิน ค่าความหนาแน่นแห้ง (Bulk Density) และความหนาแน่นของเม็ดดิน (Particle Density) โดยค่าความชื้นโดยปริมาตร (Volumetric Water Content) และค่าแรงดูดในดิน (Soil Water Pressure) สามารถหาได้ดังนี้

1. การหาค่าความชื้นโดยปริมาตร

ทำการแบ่งเส้นการกระจายตัวของขนาดเม็ดดินสะสม โดยแบ่งเป็น n ส่วน ซึ่งมีสมมุติฐานว่าเม็ดดินในแต่ละขนาดรวมกันเป็นกลุ่ม และเมื่อรวมแต่ละขนาดของเม็ดดินทั้งหมดเข้าด้วยกัน จะมีค่าเท่ากับค่าความหนาแน่นแห้งที่วัดจากตัวอย่างดินในสภาพธรรมชาติ ซึ่งความเป็นจริงของสภาพธรรมชาติ เม็ดดินไม่ได้แยกกันในแต่ละเม็ดดินขนาดเดียวกัน แต่มีการกระจายตัวอย่างอิสระ ซึ่งสมมุติฐานนี้สามารถอธิบายถึงปริมาตรของช่องว่างได้

การคำนวณปริมาตรช่องว่างซึ่งมีความสัมพันธ์กับสัดส่วนในแต่ละขนาดดังนี้

$$V_{v_i} = \left(\frac{W_i}{\rho_p} \right) e; i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

เมื่อ	V_{v_i}	คือ	ปริมาตรช่องว่างต่อมวลตัวอย่างดินหนึ่งหน่วย ในแต่ละช่วงของขนาดเม็ดดิน i ช่วง
	W_i	คือ	มวลของดินต่อหนึ่งหน่วยตัวอย่างในแต่ละช่วงของขนาดเม็ดดิน i ช่วง
	ρ_p	คือ	ความหนาแน่นของเม็ดดิน (Particle Density)
	e	คือ	อัตราส่วนช่องว่าง

ค่าของ W_i ได้จากเส้นการกระจายตัวของขนาดเม็ดดิน ความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์เม็ดดินสะสมหารด้วย 100 ผลของการรวมค่า W_i มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งค่าอัตราส่วนช่องว่างสามารถหาได้จากสมการที่ (13) ดังนี้

$$e = \left(\frac{\rho_p - \rho_b}{\rho_b} \right) \quad (13)$$

เมื่อ ρ_b คือ ค่าความหนาแน่นแห้ง (Bulk Density) ที่วัดจากตัวอย่างธรรมชาติ

ปริมาตรช่องว่าง (V_{v_i}) ในแต่ละขนาดเม็ดดินนำมารวมสะสม เพื่อพิจารณาว่าที่สามารถเติมลงไปได้ ซึ่งค่าความชื้นโดยปริมาตร (Volumetric Water Content, θ_{v_i}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (14)

$$\theta_{v_i} = \frac{\sum_{j=1}^{j=i} V_{v_j}}{V_b}; i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

เมื่อ θ_{v_i} คือ ค่าความชื้นโดยปริมาตร แทนปริมาตรช่องว่างที่มีขนาดช่องว่างใหญ่ที่สุดตรงขอบเขตบนของแต่ละช่วงของขนาดเม็ดดิน i ช่วง
 V_b คือ ปริมาตรตัวอย่างทั้งก้อนต่อตัวอย่างดินหนึ่งหน่วย ซึ่งหาค่าจาก

$$V_b = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} W_i}{\rho_b} = \frac{1}{\rho_b}; i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

ค่าความชื้นโดยปริมาตร ที่แทนกึ่งกลางของช่วงขนาดของเม็ดดินซึ่งสามารถประมาณได้ตามสมการที่ (16) (เมื่อความกว้างของแต่ละช่วงของขนาดเม็ดดินสั้น)

$$\theta_{v_i}^* = \frac{(\theta_{v_i} + \theta_{v_{i+1}})}{2} \quad (16)$$

เมื่อ $\theta_{v_i}^*$ คือ ค่าความชื้นโดยปริมาตร (Volumetric Water Content) เฉลี่ย แทนปริมาตรของช่องว่างที่มีขนาดของช่องว่างใหญ่ที่สุดตรงจุดกึ่งกลางของแต่ละช่วงของขนาดเม็ดดิน

2. ค่าแรงคูดในดิน(Soil Water Pressure)

สามารถหาได้จากสมมุติฐาน

2.1 ปริมาตรของดินได้จากการรวมขนาดของทรงกลมที่มีขนาดเดียวกันซึ่งกำหนดโดยรัศมีของเม็ดดินเฉลี่ยในแต่ละช่วง

2.2 ปริมาตรของช่องว่างสามารถประมาณจาก Uniform-Size Cylindrical Capillary Tubes ซึ่งรัศมีมีความสัมพันธ์กับรัศมีเฉลี่ยของเม็ดดินในแต่ละช่วง จากสมมุติฐานที่กล่าวมานี้จึงใช้เป็นหลักความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างและรัศมีของเม็ดดิน

ถ้ามวลของเม็ดดินในแต่ละช่วงของขนาดเม็ดดิน i ช่วง แทนด้วยเม็ดดินทรงกลม n_i เม็ดดิน และรูปแบบปริมาตรช่องว่างแทนด้วยลักษณะช่องว่างทรงกระบอก ดังสมการที่ (17) และ (18)

$$V_{p_i} = \frac{n_i 4\pi R_i^3}{3} = \frac{W_i}{\rho_p} \quad (17)$$

และ

$$V_{v_i} = \pi r_i^2 h_i = \left(\frac{W_i}{\rho_p} \right) e \quad (18)$$

เมื่อ	V_{p_i}	คือ	ปริมาตรรวมของดินทั้งหมด
	R_i	คือ	รัศมีของเม็ดดินเฉลี่ย
	r_i	คือ	รัศมีช่องว่างเฉลี่ย
	h_i	คือ	ความยาวของช่องว่างทั้งหมด

หารสมการที่ (18) ด้วยสมการที่ (17) จะได้

$$\frac{r_i^2}{R_i^3} = \frac{4n_i e}{3h_i} \quad (19)$$

การรวมเม็ดดินเข้าด้วยกันให้ประมาณค่า h_i เท่ากับจำนวนของเม็ดดินที่วางตัวตามแนวความยาวของช่องว่าง ด้วยเหตุนี้ การรวมเม็ดดินที่มีลักษณะทรงกลมในแต่ละขนาดเข้าด้วยกัน ความยาวของ h_i จะมีค่าเท่ากับ $n_i 2R_i$ ดินในธรรมชาติค่า h_i จะขึ้นกับรูปร่างของเม็ดดิน ขนาด และตำแหน่งการวางตัวในมวลดิน ซึ่งในความเป็นจริงเม็ดดินมีรูปร่าง Nonspherical ความยาวของแต่ละเม็ดดินมีค่ามากกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของวงกลม ส่งผลให้ จำนวนเม็ดดินทรงกลมรัศมี R_i จะมีค่ามากกว่า n_i จึงแทนจำนวนเม็ดดินด้วย n_i^α เมื่อ α มีค่ามากกว่า 1 ความยาวของช่องว่างทั้งหมด h_i จะมีค่าเท่ากับ $n_i^\alpha 2R_i$

แทน h_i ในสมการที่ (19) ได้

$$r = R_i \left[\frac{4en_i^{(1-\alpha)}}{6} \right]^{1/2} \quad (20)$$

ค่าของ n_i ในสมการที่ (19) สามารถหาได้จากสมการที่ (17) และ α หาได้จาก Empirically

รัศมีของช่องว่างที่หาได้ จะสามารถหาค่าแรงดันน้ำในดินได้ โดยหาจากสมการ Capillarity

$$\psi_i = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho_w g r_i} \quad (21)$$

เมื่อ	ψ_i	คือ	ค่าแรงดันน้ำในดิน
	γ	คือ	ค่าแรงตึงผิวของน้ำ
	θ	คือ	Contact Angle
	ρ_w	คือ	ความหนาแน่นของน้ำ
	g	คือ	ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
	r_i	คือ	รัศมีของช่องว่าง

ค่าแรงตึงผิวและค่าความหนาแน่นของน้ำมีค่าขึ้นกับอุณหภูมิ ขณะที่ค่า Contact Angle อาจจะเปลี่ยนแปลงขึ้นกับ Organic Content ของดิน

Van Genuchten (1980) เสนอการปรับ Fitting Curve ของเส้นอัตรลักษณ์ที่ได้จากการทดสอบ ดังนี้

$$\Theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right]^m \quad (22)$$

เมื่อ	Θ	คือ	ค่า Effective Saturation หรือ Normalized Volumetric Water Content ซึ่งมีค่า	$\Theta = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)}$
	θ_s	คือ	Volumetric Water Content at Saturated	
	θ_r	คือ	Residual Volumetric Water Content	
	α, n, m	คือ	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับแก้เส้นโค้ง โดย	$m = 1 - \frac{1}{n}$
	ψ	คือ	ค่าศักย์แรงดูด เซนติเมตร	

การทดสอบหาค่า Hydraulic Conductivity Function

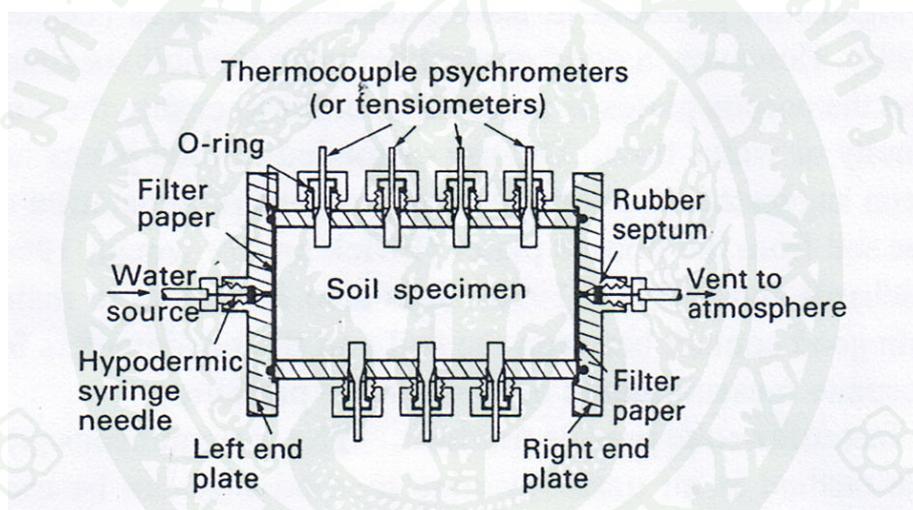
การทดสอบในห้องปฏิบัติการสามารถทดสอบได้หลายวิธี โดยแบ่งเป็น 2 แบบ คือ การทดสอบแบบการไหลคงที่ (Steady-State Method) และการทดสอบแบบอัตราการไหลไม่คงที่ (Unsteady-State Method) หรือเรียกว่า Instantaneous Profile Methods ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. Steady-State Method

เป็นวิธีที่ใช้หาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านด้วยน้ำโดยมีค่า Hydraulic head gradient, ค่าแรงดูดเมทริกซ์ และปริมาณความชื้น ตลอดทั้งตัวอย่างดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าคงที่ซึ่งเป็นสภาวะเริ่มต้น ในสภาวะนี้อัตราการไหลของน้ำเข้าสู่ตัวอย่างดินจะมีค่าเท่ากับอัตราการไหลออก จากตัวอย่างดิน ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านด้วยน้ำ (k_w) จะสัมพันธ์กับค่าแรงดูดเมทริกซ์หรือปริมาณความชื้นนั้นๆ ซึ่งการทดลองสามารถทำซ้ำที่ค่าแรงดูดเมทริกซ์หรือปริมาณความชื้นที่แตกต่างกัน และทดสอบได้ทั้งตัวอย่างดินบดอัดและตัวอย่างดินที่เก็บแบบคงสภาพ

2. Instantaneous Profile Methods

การทดสอบ Instantaneous Profile Methods(IPM) ทดสอบด้วยการไหลที่ไม่คงที่สามารถทดสอบได้ทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนาม วิธีการทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงได้หลายแบบ กระบวนการเปียกทำการทดสอบโดยให้น้ำไหลเข้าสู่ตัวอย่างดิน หรือในกระบวนการแห้ง การไหลของน้ำจะไหลออกจากตัวอย่างดิน การทดสอบในห้องปฏิบัติการเริ่มทดสอบโดย Richards and Weeks (1953) จากนั้นมีผู้พัฒนาเรื่อยมา เช่น Watson (1966), Hamilton *et al.* (1981), Daniel (1983), Meerdink *et al.* (1996), Chiu and Shackelford (1998) ซึ่งทดสอบได้กับตัวอย่างดิน Remolded หรือตัวอย่างดินที่เก็บแบบไม่ถูกรบกวน

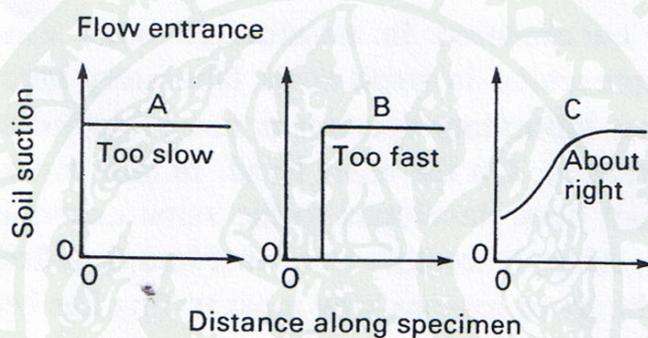


ภาพที่ 14 อุปกรณ์การทดสอบ Instantaneous Profile Methods (Hamilton *et al.* 1981)

ที่มา: Fredlund and Rahardjo (1993)

การทดสอบของ Hamilton *et al.*(1981) แสดงดังภาพที่ 14 โดยสภาพเริ่มต้นค่าแรงดูดเมตริกซ์ในตัวอย่างดินจะต้องอยู่ในสภาพสมดุล โดยในกระบวนการเปียก จะปล่อยให้ น้ำไหลเข้าสู่ตัวอย่างดิน และควบคุมอัตราการไหลของน้ำผ่านทางช่องเล็กๆ ของเข็มฉีดยา น้ำจะกระจายทั่วทั้งหน้าตัดตัวอย่างดินเนื่องจากมีกระดาษกรองหลายๆ ชั้น ช่วยในการกระจายน้ำ ขณะที่อีกด้านหนึ่งเป็นช่องอากาศเพื่อให้การทดลองอยู่ในสภาวะบรรยากาศ การไหลของน้ำจะเกิดในแนวนอนเนื่องจากผลของศักย์ความดันน้ำ และไม่สนใจผลของการไหลเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก โดย Hamilton *et al.* (1981) วัดค่าศักย์แรงดันน้ำ (Pressure Head) ระหว่างการไหลของน้ำที่ไม่คงที่ ซึ่ง

ตลอดความยาวของกระบอกวัดการไหลซึมจะมีช่องสำหรับติดตั้ง Tensiometers หรือ Psychrometers โดย Tensiometers ใช้วัดค่าแรงดูดเมตริกซ์น้อยกว่าประมาณ 90 กิโลปาสกาลและ Psychrometers ใช้วัดค่าแรงดูดประมาณ 100-8,000 กิโลปาสกาล และจากภาพที่ 15 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดูดตามความยาวของตัวอย่างดินทรงกระบอกด้วยอัตราการไหลเข้าของน้ำที่แตกต่างกัน 3 แบบ อัตราการไหลเข้าควรอยู่ในช่วงของ 0.2-5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวัน (Daniel, 1983) เมื่อได้ค่าแรงดูดสามารถหาค่าปริมาณความชื้นจากเส้นอัตรลักษณ์ ซึ่งอัตราการไหลคำนวณได้จากการเปลี่ยนแปลงความชื้น โดยปริมาตร, θ และการเปลี่ยนแปลงของค่า Hydraulic Head Gradient และ Flow Rate จะนำมาคำนวณค่า Coefficient of Permeability ได้



ภาพที่ 15 แสดงค่าแรงดูดตามความยาวของตัวอย่างดินด้วยอัตราการไหลเข้าของน้ำที่แตกต่างกัน 3 แบบ (Daniel, 1983)

ที่มา: Fredlund and Rahardjo(1993)

การประมาณค่า Hydraulic Conductivity Function

Jackson (1972) เสนอการประมาณหาค่า k -function จากเส้นอัตรลักษณ์ (SWCC) โดยใช้สมมุติฐานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำและการกระจายช่องว่างประสิทธิภาพ (Effective Pore Size Distribution) ในดิน โดยฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของดินจะขึ้นอยู่กับโอกาสทางสถิติที่ช่องว่างคู่ต่างๆ จะต่อเนื่องกันในระนาบใดๆ การคำนวณทำได้โดยแบ่งความพรุนของดินออกเป็นส่วนๆ ที่มีขนาดช่องว่าง (Pore Size, r) ต่างๆกัน จะสามารถคำนวณความน่าจะเป็นที่ช่องว่างในแต่ละขนาดจะสัมผัสกันและยอมให้น้ำผ่านได้ ซึ่งช่องว่างที่มีขนาดเล็ก และมีจำนวนมาก ก็มีโอกาสที่ช่องว่างจะต่อเนื่องกันมากขึ้น ดังสมการที่ (23)

$$K_i = K_s \left(\frac{\theta_i}{\theta_s} \right)^c \frac{\sum_{j=i}^m [(2j+1-2i) \times \psi_j^{-2}]}{\sum_{j=1}^m [(2j-1) \times \psi_j^{-2}]} \quad (23)$$

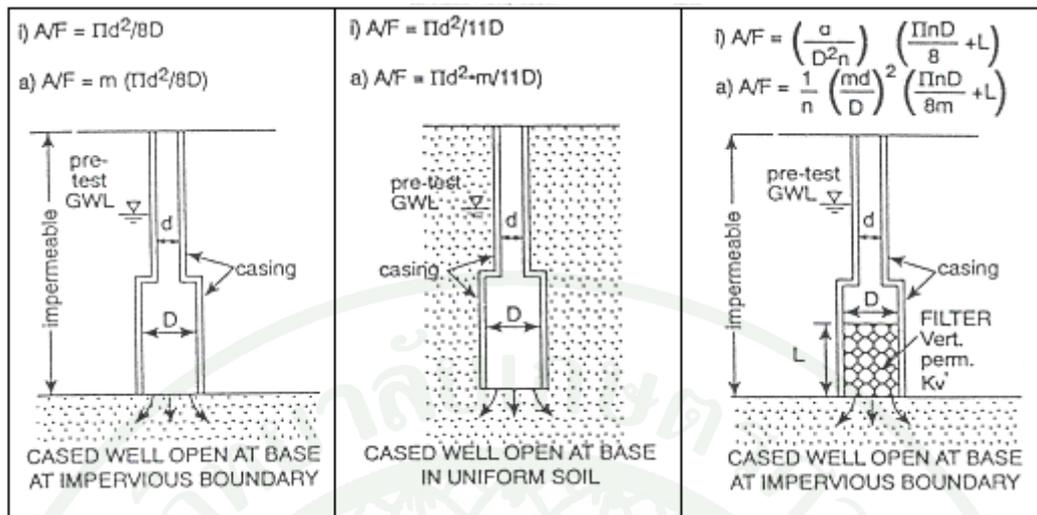
เมื่อ	K_i	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำที่ความชื้น θ_i
	K_s	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำที่สถานะอิ่มตัว
	m	คือ	จำนวน increment ของ θ โดยแบ่งตั้งแต่สถานะอิ่มตัว $\theta_s = n$ จนถึงสถานะแห้งสนิท $\theta = 0$
	ψ_i	คือ	ค่า suction head(m,cm) ที่จุดกึ่งกลางของ θ -increment
	i	คือ	ดัชนีบ่งชี้ถึงขนาดของช่องว่าง (pore size class)
	j	คือ	ดัชนีสำหรับคำนวณอนุกรม
	c	คือ	ค่าแฟกเตอร์ปรับแก้ 0-4/3 (ทั่วไปใช้เท่ากับ 1)

Hvorslev (1951) อธิบายการคำนวณหาอัตราการไหลซึมของดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำในสนามด้วยวิธี Variable Head Tests ที่มีลักษณะของ Shape Factor ที่แตกต่างกัน โดยสามารถคำนวณหาค่า k ได้จากสมการที่ (24) ดังนี้

$$k = \frac{A}{FT} \quad (24)$$

เมื่อ	A	คือ	พื้นที่หน้าตัดของ Standpipe
	F	คือ	ค่า Shape Factor
	T	คือ	Basic Time Lag
	k	คือ	Isotropic Permeability

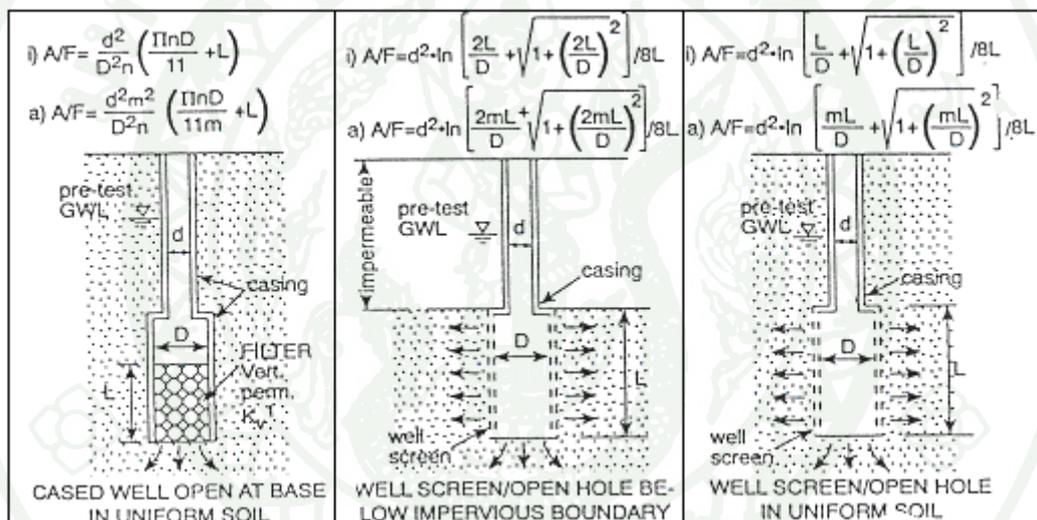
ซึ่ง A/F สามารถหาได้ดังภาพที่ 16 ตามลักษณะของ Shape Factor สำหรับการทดสอบ Variable Head Tests



Shape Factor 1

Shape Factor 2

Shape Factor 3



Shape Factor 4

Shape Factor 5

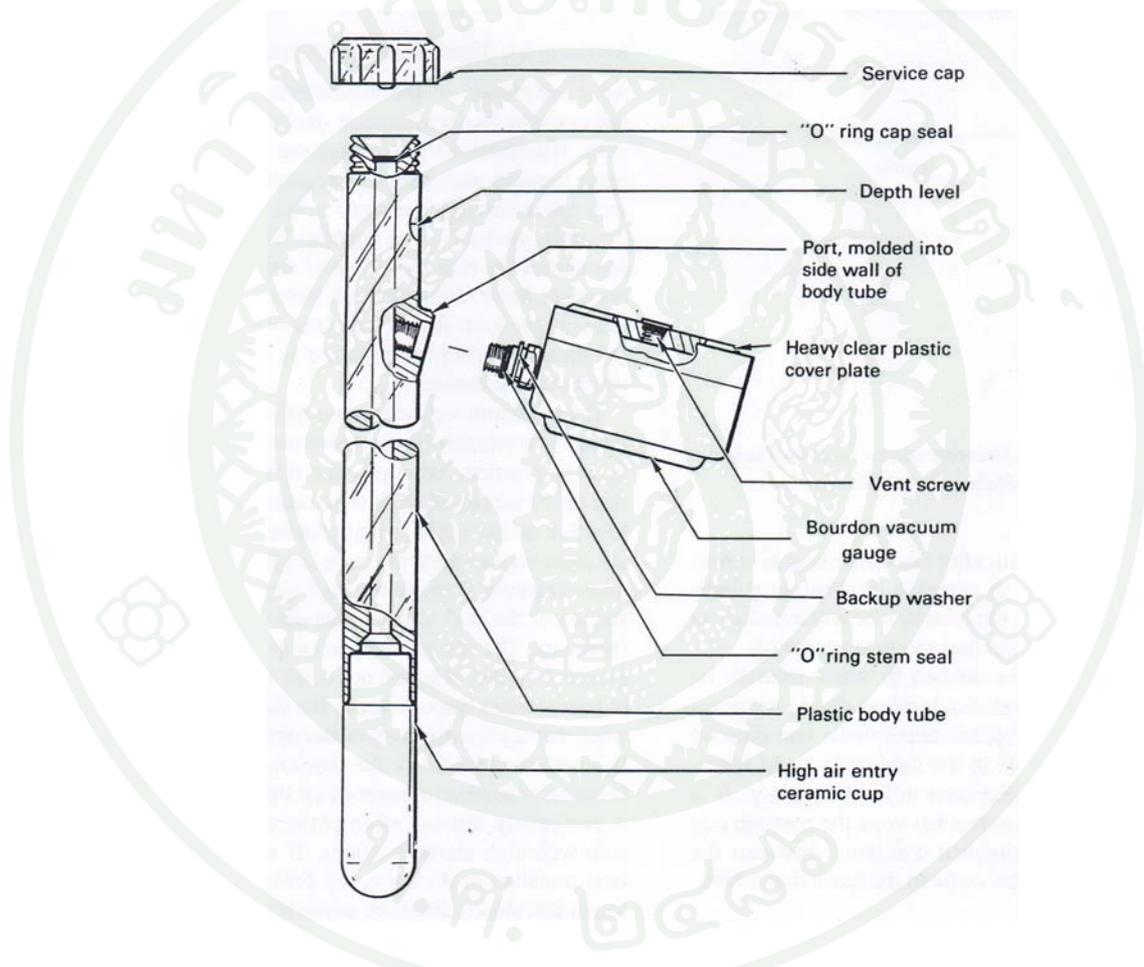
Shape Factor 6

ภาพที่ 16 Shape factor สำหรับการทดสอบ Variable Head Tests

ที่มา: Hvorslev (1951)

เครื่องมือวัดศักย์แรงดูด

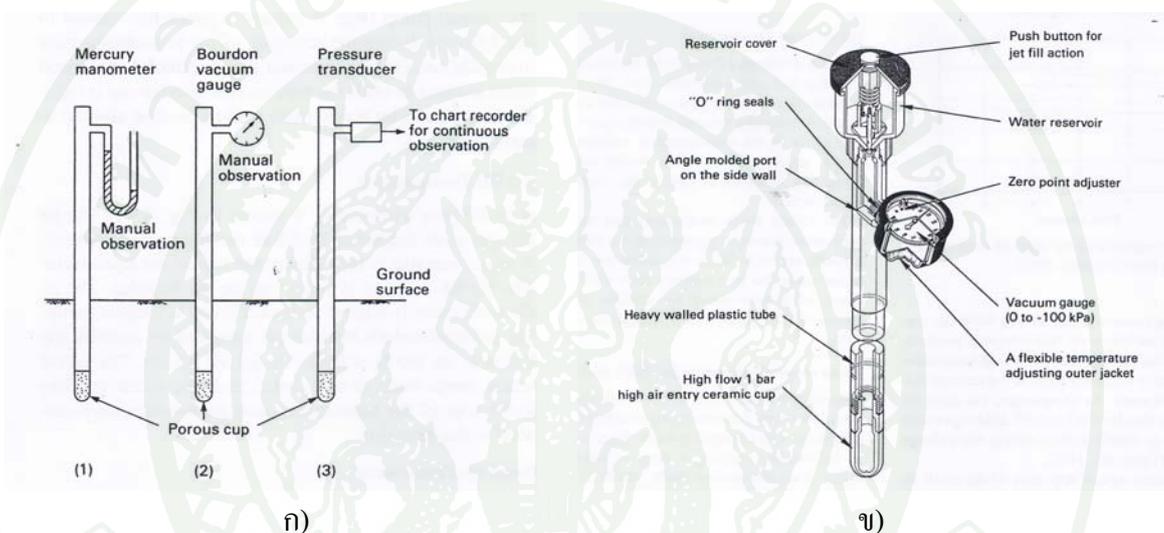
การวัดค่าแรงดันน้ำด้านลบในดินด้วยวิธีทางตรง มี 2 วิธี คือ Tensiometer และ Axis-Translation Apparatus ซึ่งข้อดีของ Tensiometer สามารถใช้ได้ทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนาม สำหรับ Axis-Translation Apparatus สามารถใช้ได้เพียงในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ในที่นี้จะอธิบายถึงแต่เฉพาะ Tensiometer ซึ่งได้นำมาใช้ในงานวิจัยนี้



ภาพที่ 17 ส่วนประกอบของอุปกรณ์วัดค่าแรงดูดเมทริกซ์(Tensiometer)

ที่มา: Fredlund and Rahardjo (1993)

Tensiometer เป็นอุปกรณ์วัดแรงดูดเมทริกซ์ ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญ ดังภาพที่ 17 คือ ถ้วยหินพรุนเซรามิกที่ต่อเชื่อมกับหลอดพลาสติกและอุปกรณ์รับรู้ (Sensor) ภายในบรรจุน้ำที่ปราศจากฟองอากาศ ซึ่งถ้วยหินพรุนเซรามิกจะเป็นตัวกลางระหว่างค่าแรงดันน้ำด้านลบที่เกิดขึ้นในดินและอุปกรณ์รับรู้ เมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล น้ำใน Tensiometer จะมีค่าแรงดันน้ำด้านลบ เช่นเดียวกับแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นในดิน และส่งผ่านค่าแรงดันน้ำสู่อุปกรณ์รับรู้ได้ โดยสามารถวัดค่าแรงดูดเมทริกซ์ถึงค่าประมาณ 90 กิโลปาสคาล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่า Air entry value ของถ้วยหินพรุนเซรามิกด้วย



ภาพที่ 18 ความหลากหลายและการพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าแรงดูดเมทริกซ์ (Tensiometer)

ที่มา: Fredlund and Rahardjo (1993)

ความหลากหลายของอุปกรณ์วัดค่าแรงดูดเมทริกซ์ ซึ่งมีความแตกต่างกันของอุปกรณ์รับรู้ เช่น Mercury Manometer, Bourdon Vacuum Gauge, Pressure Transducer ดังภาพที่ 18ก) และมีการพัฒนาเป็น Jet Fill-Type Tensiometer แสดงในภาพที่ 18ข) โดยด้านบนของ Tensiometer จะกักเก็บน้ำไว้เพื่อไล่ฟองอากาศที่สะสมอยู่ใน Tensiometer เมื่อกดปุ่มด้านบนของ Jet Fill-Type Tensiometer ฟองอากาศจะเคลื่อนสู่แหล่งกักเก็บน้ำด้านบน ซึ่งใช้กลไกคล้ายกับปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump)

การพัฒนา Tensiometer ในประเทศไทย

อิทธิสุนทร (2532) ได้พัฒนา Tensiometer และใช้ในการวัดความชื้นของดินด้านการเกษตร เพื่อการให้น้ำพืชอย่างมีประสิทธิภาพ

อภินิติ และวิษณุพงศ์ (2551) ประยุกต์เซ็นเซอร์วัดแรงดันชนิดเทคโนโลยีระดับจุลภาค (MEMs) มาใช้ทำให้เซ็นเซอร์มีขนาดเล็ก ประยุกต์ใช้ในการทดลองได้หลากหลายและสะดวก ในการอ่านค่าอัตโนมัติแบบต่อเนื่อง โดยสามารถใช้งานได้ดีในช่วงค่าแรงดูดตั้งแต่ 0- 90 กิโลปาสคาล และพัฒนาเครื่องมือ Psychrometer ประกอบไปด้วยคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์ชนิดวัด ความชื้นสัมพัทธ์และเทอร์มิสเตอร์เพื่อวัดอุณหภูมิ ซึ่งสามารถนำค่าทั้งสองไปคำนวณเป็นค่าแรง ดูดรวม (Total suction) ได้ โดยเหมาะสำหรับวัดค่า Total suction ตั้งแต่ 1,000 ถึง 1,000,000 กิโลปาสคาล ซึ่งนำมาใช้ในงานวิจัยนี้

หลักการวิเคราะห์ความมั่นคง

วรากร (2542) หลักการที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินนั้น โดยปกติใช้วิธีการ พิจารณา “สมดุลจำกัดของมวลดิน” (Limit Equilibrium) วิธีนี้มีสมมติฐานว่า “ณ ช่วงเวลาที่เกิด การเคลื่อนพังพอดิ ในขณะที่มวลดินอยู่ในสภาวะสมดุล” การวิเคราะห์เริ่มต้นด้วยการสมมติ รูปแบบ ลักษณะของผิวการเคลื่อนพังว่าเป็นแบบใด เช่น เส้นตรง วงกลม โค้งก้นหอย รูปหลาย เหลี่ยม ฯลฯ แล้วทำการคำนวณแรงต้านทานที่เพียงพอทำให้เกิดความสมดุลของมวลดินที่พิบัติ หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างกำลังของดินต่อหน่วยแรงต้านทานขณะสมดุล ซึ่งเรียกว่า “อัตราส่วนความปลอดภัย” (Factor of Safety, F.S.) แล้วทำการทดลองสุ่มหาค่าของ อัตราส่วนความปลอดภัย โดยการเปลี่ยนลักษณะหรือตำแหน่งของผิวการเคลื่อนพังที่น่าจะหรือมี โอกาสเกิดขึ้นไปเรื่อยๆ จนพบค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่น้อยที่สุด โดยอาจทราบลักษณะการพัง ได้แน่นอน โดยการทำการสำรวจในสนามเพื่อหาตำแหน่งที่แท้จริงได้

คำนิยามของอัตราส่วนปลอดภัย หรือตัวประกอบความปลอดภัย คือ อัตราส่วนของกำลัง รับน้ำหนักของดินบนผิวเคลื่อนต่อหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงในพื้นที่ผิวเดียวกัน ซึ่งสามารถเขียนเป็น สมการได้ง่ายๆ ดังนี้

$$F.S. = \frac{\text{ShearStrength}}{\text{ShearStress}} = \frac{\tau_f}{\tau} \quad (25)$$

โดย τ_f คือ กำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของมวลดินหรือหินบนผิวเคลื่อน ซึ่งตามทฤษฎีของ Mohr-Coulomb แล้วจะมีค่าเท่ากับ $c + \sigma \tan \phi$
 τ คือ หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจริงซึ่งเพียงพอทำให้มวลนั้นสมดุล

สำหรับการพิบัติในลักษณะจำเพาะต่างๆ เช่น ผิวเคลื่อนเป็นส่วนโค้งของวงกลม อัตราส่วนปลอดภัยอาจหมายถึง อัตราส่วนของโมเมนต์รอบจุดศูนย์กลาง ก็ได้เช่น

$$F.S. = \frac{\text{ResistingMoment}}{\text{DrivingMoment}} \quad (26)$$

ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว ขั้นตอนในการวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดิน โดย "Limit Equilibrium" ทำได้ดังนี้

1. สมมุติหรือสันนิษฐานลักษณะของพิบัติหรือผิวการเคลื่อนพัง
2. คำนวณแรงต้านทานที่เพียงพอทำให้เกิดความสมดุลของมวลดินที่พิบัติ และมวลดินมีแรงต้านที่ผิวการเคลื่อนพังตามทฤษฎีของ Mohr-Coulomb
3. เปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างกำลังของดินต่อหน่วยแรงต้านทานขณะสมดุล ซึ่งเรียกว่า "อัตราส่วนปลอดภัย"(Factor of Safety, F.S.)
4. โดยการเปลี่ยนลักษณะหรือผิวการเคลื่อนพังที่น่าจะมีโอกาสเกิดขึ้นไปเรื่อยๆ จนพบค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่น้อยที่สุด ซึ่งควรเป็นลักษณะการพิบัติที่น่าจะเกิดขึ้นมากที่สุด และหาค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่ควรเป็น

วิธีการวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดิน

การวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดินทำได้หลาย โดยวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์กันกันอย่างแพร่หลาย คือ Block Analysis วิธีวิเคราะห์ลาดอนันต์ (Method of Infinite Slope), Taylor Method, วิธีโมเมนต์, วิธี Ordinary Method of Slices, วิธี Simplified Bishop และ Wedge Method

การวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดินควรมีความสอดคล้องกับลักษณะการพิบัติของลาดดิน โดยการพิบัติของลาดดิน แบบ Translational Slide ที่มีรูปร่างของผิวเคลื่อนพังที่มีลักษณะเป็นแผ่นบาง เลื่อนลงตามผิวลาด และความหนาของชั้นดินที่เคลื่อนน้อยกว่า 1 ใน 10 ของความยาวของมวลดินที่เคลื่อนพัง วิธีการที่เหมาะสมจะเลือกใช้วิธี Method of Infinite Slope โดยพิจารณาว่าผิวเคลื่อนวางตัวขนานกับผิวของลาดดิน และอาจเป็นดินแข็ง หรือมีการไหลของน้ำขนานกับผิวลาดก็ได้ ซึ่งแต่ละกรณีสามารถเขียน Free Body และ Force Diagrams ดังภาพที่ 19 เมื่อพิจารณาสมดุลของแรงที่ขนานกับผิวเคลื่อน เปรียบเทียบระหว่างแรงต้านทาน (Strength) และแรงจุดลง (Stress) จะสามารถหาอัตราส่วนปลอดภัยได้ดังสมการที่ 29 ถึงสมการที่ 33

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{\gamma h \cos \beta}{b \sec \beta} = \gamma h \cos^2 \beta \quad (27)$$

$$\tau = \frac{T}{A} = \frac{\gamma h \sin \beta}{b \sec \beta} = \gamma h \sin \beta \cos \beta \quad (28)$$

สำหรับทราย เมื่อ $\tau_f = \sigma \tan \phi = \gamma h \cos^2 \beta \tan \phi$

บนลาดดินแข็ง

$$F.S. = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{\gamma h \cos^2 \beta \tan \phi}{\gamma h \sin \beta \cos \beta} \quad (29)$$

$$F.S. = \frac{\tan \phi}{\tan \beta} \quad (30)$$

บนลาดดินที่มีการไหลของน้ำขนานกับผิวลาด

$$F.S. = \frac{\gamma_b}{\gamma_{sat}} \cdot \frac{\tan \bar{\phi}}{\tan \beta} \quad (31)$$

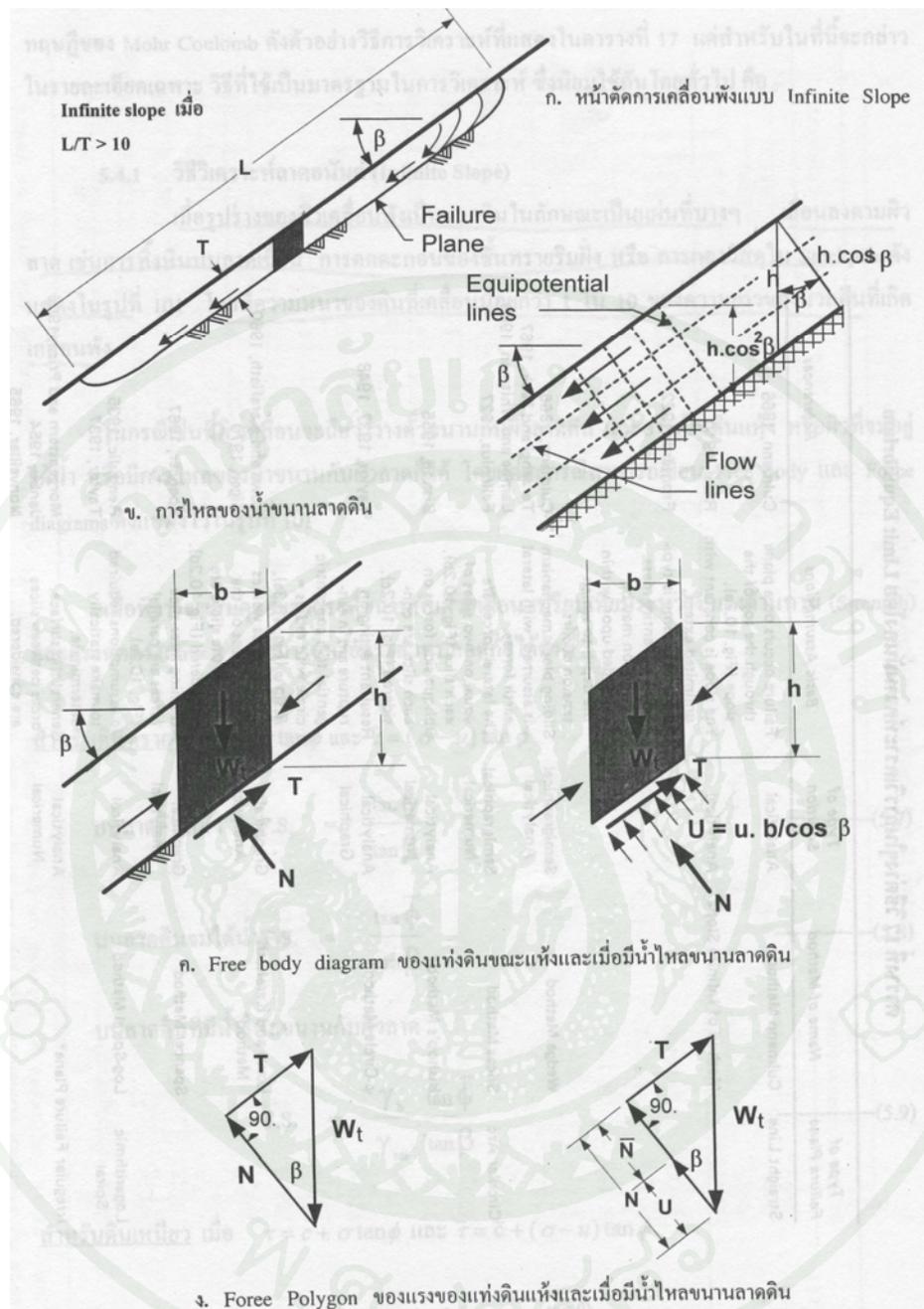
สำหรับดินเหนียว เมื่อ $\tau = c + \sigma \tan \phi$ และ $\bar{\tau} = \bar{c} + (\sigma - u) \tan \phi$

บนลาดดินแห้ง

$$F.S. = \frac{c}{\gamma h \sin \beta \cos \beta} + \frac{\tan \phi}{\tan \beta} \quad (32)$$

บนลาดดินที่มีการไหลของน้ำขนานกับผิวลาด

$$F.S. = \frac{\bar{c}}{\gamma h \sin \beta \cos \beta} + \frac{\gamma_b}{\gamma_{sat}} \frac{\tan \bar{\phi}}{\tan \beta} \quad (33)$$



ภาพที่ 19 รูปร่างของผิวเคลื่อนพังเป็นมวลดินในลักษณะเป็นแผ่นบางๆ

ที่มา: วรากร (2546)

ในกรณีที่ดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ สามารถพิจารณาค่าสัดส่วนความปลอดภัยดังสมการที่ (34)

$$F = \frac{c' + (\gamma \cdot z \cos^2 \beta) \cdot \tan \phi' - u_w \cdot \tan \phi^b}{\gamma \cdot z \sin \beta \cdot \cos \beta} \quad (34)$$

เมื่อ	c'	คือ	ความเชื่อมแน่นประสิทธิผล
	γ	คือ	ความหนาแน่นของดิน
	β	คือ	มุมของลาดชัน
	u_w	คือ	แรงดันน้ำในช่องว่าง
	ϕ'	คือ	มุมของกำลังเฉือนเนื่องจากหน่วยแรงตั้งฉากสุทธิ ($\sigma - u_a$)
	ϕ^b	คือ	มุมของกำลังเฉือนเนื่องจากแรงดูด (เมื่อ $u_w > 0, \phi^b = \phi'$)

ทฤษฎีพื้นฐานการไหลซึมของน้ำผ่านดิน

Darcy (1856) ได้ทดลองการไหลของน้ำผ่านแท่งทราย เพื่อหาค่าสูญเสียพลังงานของการไหลผ่านแท่งทราย และการติดตั้ง Piezometers ที่ระยะห่างกันตามแนวการไหล L พบว่า อัตราการไหลผ่านวัสดุพรุน (Porous Media) เป็นสัดส่วน โดยตรงกับค่าการสูญเสียพลังงาน (Head Loss, h_1) และเป็นสัดส่วนผกผันกับความยาวของเส้นทางการไหล โดยพลังงานรวมของระบบเป็นดังสมการพลังงานของ Bernoulli Equation แสดงในสมการที่ (35) (Philip and Wayne, 1998)

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_1 \quad (35)$$

เมื่อ	P	คือ	ศักย์ของน้ำ
	γ	คือ	ความหนาแน่นของน้ำ
	v	คือ	ความเร็วของการไหลซึม
	z	คือ	ศักย์ของความสูง
	h_1	คือ	ค่าการสูญเสียของพลังงาน

เมื่อพิจารณาการไหลซึมผ่านวัสดุพรุนที่หน้าตัดใดๆ ของการไหล พบว่าค่าความแตกต่างของศักย์น้ำรวม (Total Head) ของสองหน้าตัด เมื่อพิจารณาจากระดับฐาน (Datum) เดียวกัน จะมีค่าเท่ากับการสูญเสียพลังงาน โดยค่าศักย์น้ำรวมประกอบด้วย ศักย์ความดันของน้ำ (Pressure Head) ศักย์ความเร็วของการไหล (Velocity Head) และศักย์ความสูง (Elevation Head)

เนื่องจากความเร็วของการไหลผ่านตัวกลางพรุนมีค่าต่ำมาก ดังนั้นค่าศักย์ความเร็ว ($v^2 / 2g$) ของการไหลในสมการของ Bernoulli Equation จึงไม่นำมาพิจารณา ดังนั้นการสูญเสียพลังงานจะแสดงได้ในสมการที่ (36)

$$h_1 = \left(\frac{P_1}{\gamma} + z_1 \right) - \left(\frac{P_2}{\gamma} + z_2 \right) \quad (36)$$

ค่าการสูญเสียพลังงานนั้นเป็นอิสระกับค่าความลาดเอียงของแท่งทราย Darcy จึงให้ความสัมพันธ์ของอัตราการไหล ค่าการสูญเสียพลังงานและระยะทางการไหลเป็นสัดส่วนของค่าคงที่ K เรียกว่า Hydraulic Conductivity หรือ Permeability หรือภายหลังเรียกว่า ค่าความซึม น้ำ แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวในสมการที่ เรียกว่า กฎของดาร์ซี

$$V = \frac{Q}{A} = K \frac{dh}{dL} \quad (37)$$

และอัตราการเปลี่ยนแปลงของศักย์น้ำรวมต่อระยะทางการไหล เรียกว่า ความลาดของเส้นระดับน้ำหรือความลาดชันทางชลศาสตร์ (Hydraulic Gradient, i)

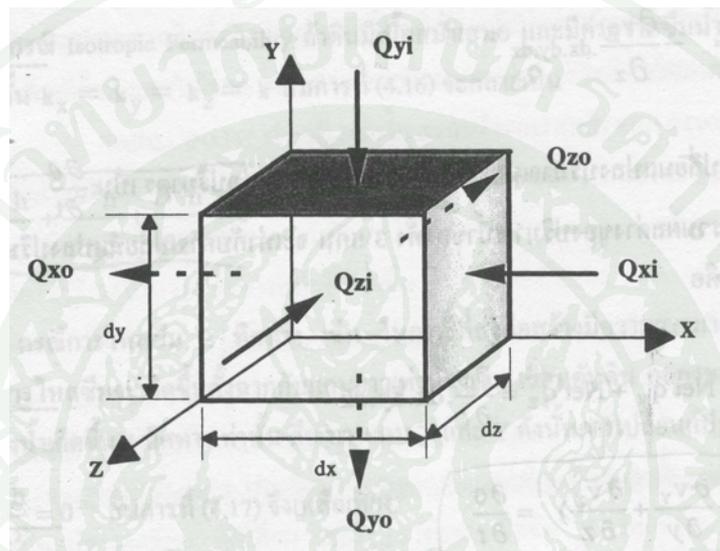
$$i = \frac{dh}{dL} = \frac{h_1}{L} \quad (38)$$

เมื่อน้ำมีความดันหรือระดับต่างกันระหว่างจุด 2 จุดในดิน ก็จะมีการไหลของน้ำผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดดินในมวลดิน ความสามารถที่น้ำไหลซึมผ่านดินได้นี้เรียกว่า ค่าความซึมน้ำ (k) โดยการไหลซึมของน้ำผ่านดิน แรงดันหรือระดับน้ำก็จะสูญเสียไปเพราะแรงเสียดทานของผิวช่องเม็ดดินความเร็วของการไหลของน้ำในดิน ตามกฎของดาร์ซี ดังสมการที่ (39)

$$v = ki \quad (39)$$

สมการพื้นฐานของการไหลของน้ำผ่านตัวกลางพรุน

เมื่อพิจารณาการไหลซึมเข้าออกผ่านตัวกลางพรุนใดๆ โดยดูจากมวลที่ตัดออกเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ ทรงลูกบาศก์ ซึ่งแต่ละด้านมีความกว้าง dx dy dz ตามลำดับ และสมมติให้น้ำไหลเข้าจากแกนบวกไปออกทางแกนลบ ดังภาพที่ 20 (วรากร, 2546)



ภาพที่ 20 การไหลของน้ำผ่านตัวกลางดินลูกบาศก์

ที่มา: วรากร(2546)

ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าในทิศทางแกน x เท่ากับ

$$q_{xi} = v_x \cdot dy \cdot dz \quad (40)$$

ปริมาณน้ำที่ไหลออกในทิศทางแกน x เท่ากับ

$$q_{xo} = \left(v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} \cdot dx \right) dy \cdot dz \quad (41)$$

ผลต่างของปริมาณน้ำที่ไหลเข้าและออกสุทธิในแกน x มีค่าเท่ากับ

$$q_{x(net)} = q_{xi} - q_{xo} \quad (42)$$

$$q_{x(net)} = -\frac{\partial v_x}{\partial x} dx \cdot dy \cdot dz \quad (43)$$

ในทำนองเดียวกัน ผลต่างของปริมาณน้ำในแกน y และ z เขียนได้ดังนี้

$$q_{y(net)} = -\frac{\partial v_y}{\partial y} dx \cdot dy \cdot dz \quad (44)$$

$$q_{z(net)} = -\frac{\partial v_z}{\partial z} dx \cdot dy \cdot dz \quad (45)$$

ถ้าให้การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินลูกบาศก์ต่อเวลาต่อปริมาตรเป็น $\frac{\partial \theta}{\partial t}$ และรวมผลต่างของปริมาณน้ำของทั้ง 3 แกน จะเท่ากับการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นในมวลดินดังนี้คือ

$$q_{x(net)} + q_{y(net)} + q_{z(net)} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad (46)$$

$$-\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}\right) = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (47)$$

กรณีที่มีการไหลซึมเป็นการไหลแบบคงที่ (Steady State Flow) คือปริมาณน้ำที่ผ่านเข้าและออกจากวัสดุในช่วงเวลาหนึ่งจะมีอัตราเท่ากัน จึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในมวลดินเมื่อเทียบกับเวลา นั่นคือ $\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0$

$$\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}\right) = 0 \quad (48)$$

จากกฎของดาร์ซี ($v = ki$) นำมาประยุกต์กับความเร็วของการไหลซึมทางด้านแกน x, y, z จะได้ว่า

$$v_x = k_x \frac{\partial h}{\partial x}, v_y = k_y \frac{\partial h}{\partial y}, v_z = k_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (49)$$

แทนค่าสมการที่ (49) ลงในสมการที่ (50) จะได้ว่า

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (50)$$

สมการที่ เรียกว่า "Laplace's Equation" ของการไหลแบบสม่ำเสมอ 3 ทิศทาง

ในกรณีที่ดินมีความสม่ำเสมอ คุณสมบัติความซึมน้ำเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic Permeability) $k_x = k_y = k_z$ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (51)$$

สำหรับกรณีที่มีการไหลซึม 2 ทิศทาง เนื่องจากสิ่งก่อสร้างมีความยาวมากเมื่อเทียบกับความกว้าง และการไหลซึมจะเกิดขึ้นตั้งฉากกับแกนยาวเท่านั้น ดังนั้นจะเกิดการไหล 2 ทิศทางเท่านั้น คือ แกน x และ y การเปลี่ยนแปลงแกน z จึงไม่มี ทำให้ $\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$ แสดงดังสมการที่ (52)

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (52)$$

วิธีวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำ

การวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำในทางคณิตศาสตร์ เป็นการแก้สมการ Laplace's Equation เพื่อให้ได้ค่าศักย์ของน้ำ ณ ตำแหน่งต่างๆ บนพื้นที่การไหลใดๆ ดังสมการที่ (53) โดยในการหาผลเฉลยมีอยู่ด้วยกันหลายวิธีคือ

$$h = f(x, y) \quad (53)$$

1. การแก้สมการโดยตรงทางคณิตศาสตร์(Exact Solution) เป็นการใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ในการแก้สมการ Laplace's Equation เพื่อหาคำตอบที่แท้จริง ซึ่งในปัจจุบันวิธีนี้ไม่เป็นที่นิยม เพราะมีวิธีการยุ่งยาก และไม่สามารถนำประโยชน์จากคอมพิวเตอร์มาช่วยได้มากนัก
2. การใช้วิธีเลขจำนวน(Numerical Method) เป็นวิธีการที่นำเครื่องคอมพิวเตอร์มาช่วยในการคำนวณ ด้วยเทคนิคของ Relaxation, Finite Element, Finite Differences เป็นต้น โดยการแบ่งขอบเขตของปัญหาออกเป็นพื้นที่ส่วนย่อยๆ และกำหนดค่าของขอบเขตเริ่มต้นให้ใกล้เคียงสภาพความเป็นจริง หาค่าศักย์ของน้ำที่ตำแหน่งต่างๆ โดยสมมุติค่าและปรับค่าขงแต่ละพื้นที่ย่อยๆ ที่แบ่ง และขยับไปจนทั่วพื้นที่การไหลทั้งหมดโดยให้ค่าที่ปรับแล้วอยู่ในค่ากำหนดที่ยอมรับได้ โดยในปัจจุบันนิยมนำวิธี Finite Element มาประยุกต์ใช้กับปัญหาทางด้านวิศวกรรม เพราะสามารถวิเคราะห์ปัญหาที่มีเงื่อนไขซับซ้อนได้เป็นอย่างดี
3. วิธี Electrical Analogy เนื่องจากความคล้ายคลึงกันของการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านแผ่นกึ่งตัวนำ และการไหลซึมของน้ำผ่านตัวกลางพรุน จึงใช้การไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านแผ่นความต้านทานที่มีพื้นที่เหมือนพื้นที่การไหลซึมผ่านของน้ำ และวัดศักย์ของน้ำโดยวัดค่าความต่างศักย์ด้วยโวลต์มิเตอร์
4. วิธีใช้แบบจำลอง เป็นการจำลองการไหลน้ำ โดยการย่ออัตราส่วนลงมาเพื่อทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เช่น แบบจำลองถึงทราย ด้วยการฉีดน้ำสีซึ่งไม่กระจายตัวในน้ำ ลงในตำแหน่งต่างๆ แนวของสีที่ไหลไปตามน้ำจะแทนเส้น Flow Lines และแบบจำลองน้ำมัน โดยนำหลักการการไหลของของเหลวที่มีความหนืดมากๆ ให้ไหลผ่านช่องว่างระหว่างแผ่นแก้วที่มีรูปร่างจำลองของสิ่งก่อสร้างที่ทึบน้ำที่มีช่องว่างขนาดเล็ก
5. วิธีใช้ Flownets เขียนด้วยมือ เป็นวิธีการที่ต้องอาศัยความชำนาญและเข้าใจถึงคุณสมบัติของ Flownets อย่างดี โดยการเขียนเส้นกราฟแสดงศักย์รวมที่เท่ากัน (Equipotential Lines) และเส้นกราฟที่ตั้งฉากกัน จะแสดงทิศทางการไหลของน้ำ (Flow Lines)

การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นการแก้ปัญหา โดยมีสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขของขอบเขต ค่าผลเฉลยแม่นยำ (Exact solution) ของปัญหาดังกล่าวจะประกอบด้วยค่าต่างๆ ทั้งหมดนับเป็นจำนวนอนันต์ค่า ซึ่งการหาค่าผลเฉลยแม่นยำในทางปฏิบัติจะทำได้ยากหรือทำไม่ได้ ดังนั้นจึงทำการเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านั้นมาเป็นค่าโดยประมาณที่มีจำนวนที่นับได้ (Finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยชิ้นส่วนเล็กๆ หรือเรียกว่าเอลิเมนต์ (Elements)

ปราโมทย์ (2537) วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ ทั้งหมด 6 ขั้นตอน ดังนี้

1. การแบ่งขอบเขตรูปร่างลักษณะของปัญหาที่ต้องการที่จะหาผลลัพธ์นั้นออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ โดยขอบเขตดังกล่าวเป็นขอบเขตของปัญหาชนิดต่างๆ กัน เช่น อุณหภูมิและความร้อน ศักย์น้ำรวม
2. การเลือกฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์ (Element Interpolation Functions) ในแต่ละเอลิเมนต์ประกอบด้วยจุดต่อ (Node) ซึ่งเป็นตำแหน่งของตัวไม่รู้ค่า (Nodal Unknowns) โดยการใช้ฟังก์ชันประมาณ เพื่อหาค่าในตำแหน่งต่างๆ ภายในเอลิเมนต์
3. สร้างสมการของเอลิเมนต์ (Element Equations) ที่เป็นคุณสมบัติของเอลิเมนต์ที่อาจมีลักษณะและขนาดที่แตกต่างกันให้สมการของเอลิเมนต์เหมาะสมกับลักษณะของปัญหา โดยขั้นตอนนี้เป็นหัวใจสำคัญของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์
4. นำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกัน ก่อให้เกิดระบบสมการ (System of Simultaneous Equations) ซึ่งเป็นการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบรวมเข้าด้วยกันก่อให้เกิดเป็นรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหา
5. ทำการประยุกต์เงื่อนไขของขอบเขต (Boundary Conditions) ลงในระบบสมการ แล้วแก้สมการเพื่อหาค่าตัวแปรไม่รู้ค่าที่จุดต่อหรือเรียกว่าตัวแปรหลัก

6. เมื่อทำการแก้สมการเพื่อหาค่าตัวแปรไม่ทราบค่าที่จุดต่อได้แล้ว สามารถนำค่าตัวแปรหลักไปทำการหาค่าตัวแปรอื่นๆ ที่ต้องการได้เช่นเมื่อรู้ความเร็วของของไหลก็สามารถนำไปคำนวณหาปริมาณอัตราการไหลทั้งหมดได้

ปัญหาการไหลซึมของของไหลในงานวิศวกรรมมีความซับซ้อน ดังนั้นวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึงเป็นวิธีการในการช่วยแก้ปัญหาได้ ประกอบกับคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันมีประสิทธิภาพสูงทำให้นำมาช่วยในการหาผลเฉลยของปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้สะดวกและรวดเร็ว

สำหรับการวิเคราะห์การไหลแบ่งเป็น 2 แบบ คือแบบคงที่ (Steady Flow) เป็นการไหลที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา และแบบไม่คงที่ (Transient Flow) ด้วยค่าความชื้นน้ำ แรงดันน้ำและปริมาณน้ำฝนเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งจะมีพฤติกรรมเป็นแบบดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งต้องอาศัยความสัมพันธ์ของเส้นอัตตลักษณ์ (Soil-Water Characteristic Curve) และความสัมพันธ์ของค่าการไหลซึมของน้ำที่เปลี่ยนแปลงตามค่าแรงคูด เรียกว่า Permeability Function โดยจะขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ดังวิธีการทดสอบข้างต้น

รูปแบบการพิบัติของลาดดิน

การศึกษารูปแบบหรือลักษณะการพิบัติของลาดดินนั้น มีความสำคัญอย่างมากเพราะเป็นปัจจัยสำคัญในการที่จะนำมาใช้พิจารณาเลือกใช้ทฤษฎีวิเคราะห์เสถียรภาพในการคำนวณหาค่าอัตราส่วนปลอดภัย การจำแนกรูปแบบการพิบัติของลาดดินมีการพิจารณาศึกษากันอย่างกว้างขวาง โดยมีองค์ประกอบที่ใช้ในการจำแนกหลายชนิด เช่น ประเภทของดินหรือหิน ความชันของลาดรูปร่างของผิวการเคลื่อนพัง อัตราการเคลื่อนตัว เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีที่ใช้ในการจำแนกต่างก็มีหลักการและเหตุผลที่แตกต่างกัน

Varnes (1978) อธิบายการจำแนกรูปแบบของการพิบัติในรายงานของ Transportation Research Board, Special Report 176 Landslides; Analysis and Control ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งเป็นที่นิยมค่อนข้างกว้างขวางเนื่องจากมีรูปในลักษณะสามมิติที่สามารถประกอบคำอธิบายให้เข้าใจได้ง่าย โดยพิจารณาจากรูปแบบการเคลื่อนตัว ชนิดของวัสดุและอัตราการเคลื่อนที่ เป็นปัจจัยหลัก ดังแสดงในภาพที่ 21 ทั้งยังแบ่งชนิดของวัสดุที่เกี่ยวข้องออกเป็น 3 ประเภทคือ ดิน ดินปนหิน และหิน Varnes (1978) ได้จำแนกประเภทของการพิบัติออกเป็น 6 ประเภทหลักๆ คือ

1. การร่วงหล่น (Falls) เป็นการพิบัติในลักษณะที่ขึ้นส่วนของมวลดินหรือหิน แยกออกจากชั้นส่วนหลักแล้วร่วงหล่นอย่างอิสระหรือตกลงมาตามแนวลาดที่มีความชันสูง หรือร่วงหล่นลงมาจากจุดยอด เช่น หน้าผา เป็นต้น มีอัตราการเคลื่อนตัวเร็วมาก (1 เมตร/วินาที ถึงมากกว่า 100 เมตร/วินาที) โดยชั้นส่วนที่ร่วงหล่นอาจจะเป็นก้อนเดี่ยวๆ หรือเป็นกลุ่มของมวลวัสดุก็ได้

2. แบบกลิ้งไปข้างหน้า (Topples) หรือการล้มคะมำ เป็นการพิบัติที่เกิดการเคลื่อนตัวไปข้างหน้าของมวลวัสดุ เช่น หินหรือดิน ที่เกิดการเอียงตัว โดยที่มวลวัสดุนั้นยังไม่เกิดการพังทลายก่อนเกิดการล้มคะมำ เมื่อมวลวัสดุล้มคะมำลงแล้วจะหมุนตัวลงสู่ลาดอย่างรวดเร็ว การล้มคะมำนี้จะเกิดขึ้นเนื่องจาก มวลวัสดุที่มีความแข็งแรงมากวางตัวอยู่เหนือมวลวัสดุที่มีความแข็งแรงน้อยกว่า เมื่อมวลวัสดุเกิดการผุร่อนตามระยะเวลา มวลวัสดุชั้นล่างจะเกิดการผุร่อนมากกว่ามวลวัสดุชั้นบนจึงทำให้เกิดการล้มคะมำขึ้น

3. แบบเลื่อนไถล (Slides) เป็นการพิบัติที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของมวลวัสดุ เช่น หินหรือมวลดิน ผ่านแนวระนาบที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุด (รับแรงเฉือนได้น้อยที่สุด) อัตราเคลื่อนตัวอยู่ในช่วง 0.06 เมตร/ปี ถึง 0.3 เมตร/นาที่ โดยชนิดของการเลื่อนไถลแบ่งเป็น 2 แบบดังนี้

3.1 แบบ Rotational Slides แนวของการพิบัติจะมีลักษณะเป็นส่วน โค้งของวงกลม (Circular Arc) ซึ่งแนวของส่วน โค้งนี้อาจจะตัดที่ผิวหน้าของลาด (Slope Failure) หรือตัดที่ผิวล่างของลาด (Toe Failure) หรือตัดลึกลงไปใต้ฐานความลาดของดิน (Base Failure) ก็ได้โดยทั่วไปมักเกิดในสภาพชั้นดินเนื้อเดียว (Homogeneous soil) และในสภาพของงานคันดินหรือดินถมบนชั้นดินอ่อน

3.2 แบบ Translational Slides แนวของการพิบัติไม่เป็นส่วน โค้งของวงกลม (Noncircular Arc) แต่จะมีแนวของการพิบัติเกือบจะอยู่ในแนวระนาบ (Near – Planar) โดยทั่วไปทิศทางของการเคลื่อนที่จะถูกจำกัดไปตามระนาบของผิวดินอ่อนหรือผิวระนาบที่เป็น Fault หรือ Joint เป็นต้น

4. แบบเคลื่อนตัวขยายตัวไปด้านข้าง (Lateral spreads) มีลักษณะของการเคลื่อนตัวเป็นการขยายตัวด้านข้างของมวลวัสดุ การเคลื่อนที่แบบนี้มักพบในดินประเภท Sensitive Silt and Clay ที่มีการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นทันทีทันใดด้วยอัตราการเคลื่อนที่ระหว่าง 3×10^{-5} เมตร/วินาที แต่ถ้าพบในชั้นหิน อัตราการเคลื่อนที่จะน้อยกว่า 3×10^{-9} เมตร/วินาที

5. แบบไหล (Flows) มักพบในวัสดุที่ไม่มีการยุบอัดตัว เช่น ก้อนหิน กรวด ทราย และเม็ดดิน โดยจะไหลลงตามแนวลาดเอียงของเชิงเขาเป็นฝิวขนานกับผิวน้ำของลาดที่มีความชันสูง โดยมีอัตราการเคลื่อนตัว 0.3 เมตร/นาที่ ถึงมากกว่า 3 เมตร/นาที่

6. แบบผสม (Complex) มีลักษณะของการเคลื่อนตัวที่ประกอบด้วยหลายรูปแบบรวมกัน เช่น การเคลื่อนพังที่ประกอบด้วย Rock Slide, Rock fall และ Debris เป็นต้น

ตารางที่ 3 การจำแนกประเภทการเคลื่อนพังของลาดโดยวิธีของ Varnes (1978)

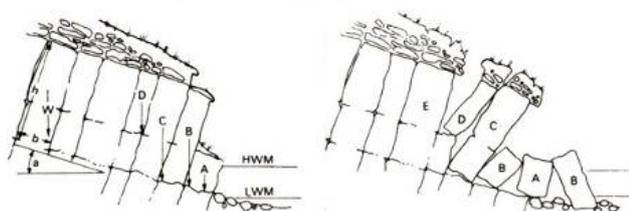
TYPE OF MOVEMENT		TYPE OF MATERIAL		
		BEDROCK	DEBRIS (coarse soil and rocks)	EARTH (fine soil)
I	FALLS	Rock fall	Debris fall	Earth fall
II	TOPPLES	Rock topple	Debris topple	Earth topple
III	SLIDES	ROTATIONAL	Rock slump	Debris slump
		TRANSLATIONAL	a. rock block slide	Debris side
			b. rock slide	
IV	SPREADS	Rock spread		Earth lateral spread
V	FLOW	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		

ที่มา: Varnes (1978)

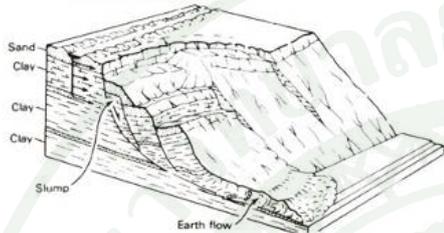
ROCK FALL, extremely rapid



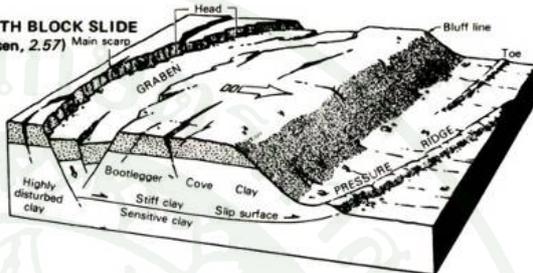
ROCK TOPPLE (de Freitas and Wetters, 2.37).



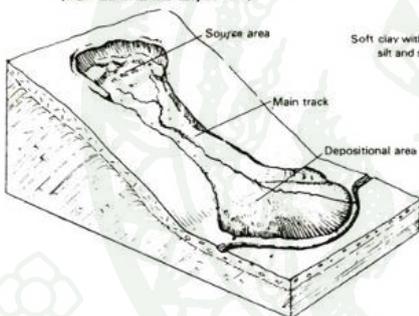
SLUMP-EARTH FLOW



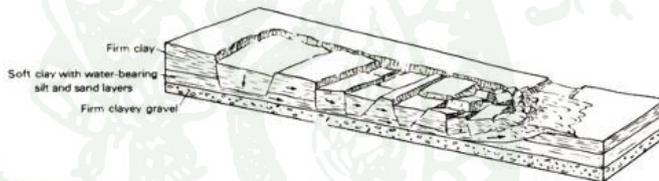
EARTH BLOCK SLIDE (Hansen, 2.57)



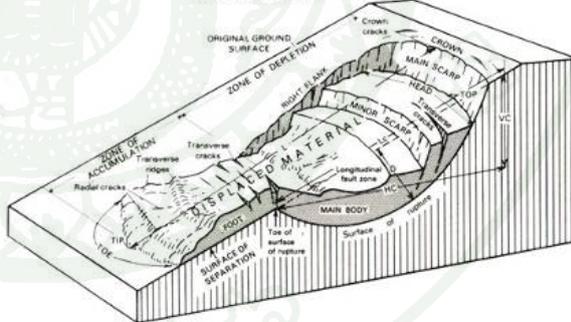
EARTH FLOW, very slow to rapid (Záruba and Menci, 2.193)



EARTH LATERAL SPREAD, very rapid



SLUMP-EARTH FLOW

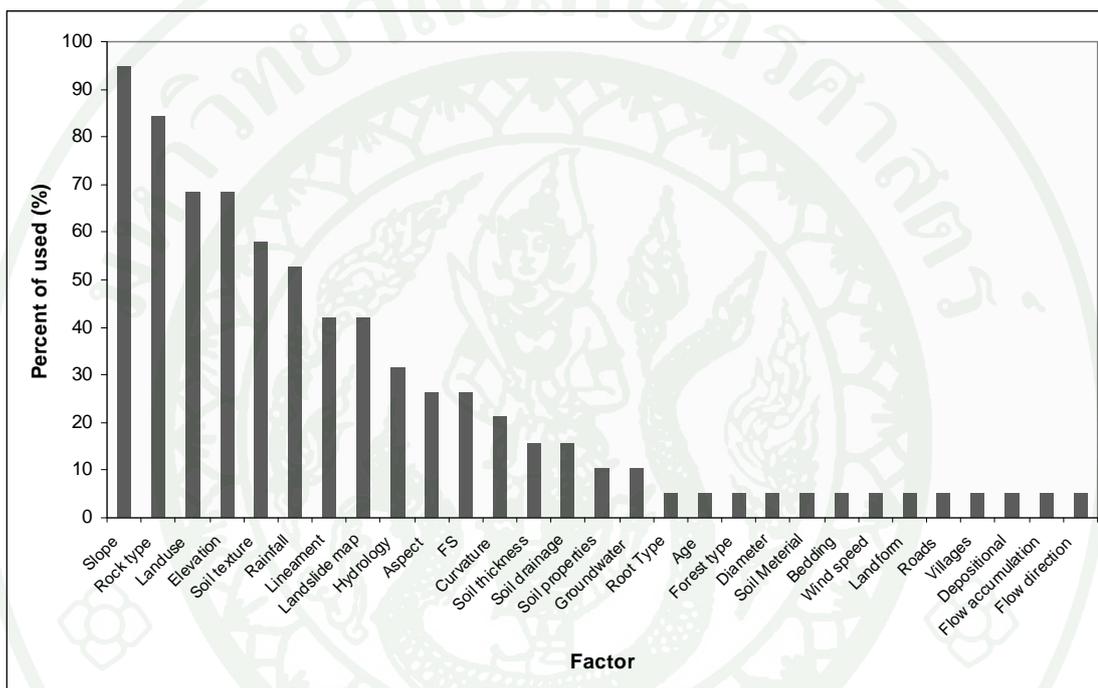


ภาพที่ 21 ตัวอย่างการเคลื่อนพังของลาดโดยวิธีของ Varnes

ที่มา: Varnes (1978)

ปัจจัยที่ใช้ในการวิเคราะห์ดินถล่ม

สุทธิศักดิ์ และคณะ(2551) ได้รวบรวมเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจำนวน 19 เรื่อง แล้วจัดลำดับตามสถิติของปัจจัยที่ใช้ในการพิจารณาเพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุของการเกิดดินถล่ม ดังภาพที่พบว่า 5 ปัจจัยหลักที่ใช้ในการพิจารณาการเกิดดินถล่ม ได้แก่ ความลาดชัน ชนิดของหิน การใช้ประโยชน์ที่ดิน ระดับความสูงของพื้นที่ และชนิดของดิน



ภาพที่ 22 ปัจจัยที่ใช้ในการวิเคราะห์ดินถล่มจากงานวิจัย 19 เรื่องทั่วโลก

ที่มา: กรมพัฒนาที่ดิน (2547); บรรพต (2548); บุญชูบ (2544); สราวุธ (2539); ศูนย์วิจัยป่าไม้ (2537); สมบัติ (2548); สุเทพ (2546); ท้ายทิพย์ (2544); ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก (2550); Pungsuwan (2006); Pantanahiran (2001); Zolfaghari (2008), Donati (2002); Saro Lee (2004); Turrini (1998); Lana (2004); Ruff (2008); Neuhäuser (2007)

อุปกรณ์และสถานที่

อุปกรณ์

อุปกรณ์และสถานที่ในการวิจัยครั้งนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนตามลักษณะของงาน คือ การปฏิบัติงานในภาคสนาม และการปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการ

การปฏิบัติงานในภาคสนาม

อุปกรณ์

1. การเก็บตัวอย่างดินคงสภาพ
 - 1.1. ตุ่มน้ำหน้สำหรับตอกเก็บตัวอย่าง
 - 1.2. กระบอเก็บตัวอย่าง
 - 1.3. PVC
2. การติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมในสนาม
 - 2.1. เครื่องมือวัดแรงดันน้ำ/แรงดูดน้ำในดิน (KU-Tensiometer)
 - 2.2. เครื่องมือวัดมุมเอียง
 - 2.3. เครื่องวัดน้ำฝน
 - 2.4. บ่อสังเกตการณ์
 - 2.5. อุปกรณ์บันทึกข้อมูลและส่งสัญญาณอัตโนมัติชนิดไร้สาย
3. เครื่องมือการทดสอบอัตราการไหลซึมที่ผิวดิน ด้วยวิธี Double-Ring Infiltrometer
 - 3.1. ทรงกระบอโลหะกลวง 2 ขนาด
 - 3.2. กระบอบรรจุน้ำ (Mariotte Tubes)
4. เครื่องมือการทดสอบอัตราการไหลซึมที่ระดับความลึกต่างๆ ด้วยวิธี Variable Head Tests

- 4.1. เซนเซอร์วัดแรงคั้นชนิด Single Silicon Piezoresistive
- 4.2. นาฬิกาจับเวลา

สถานที่

พื้นที่สวนศรีแก้ว ตำบลแม่พูล อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์

การปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการ

อุปกรณ์

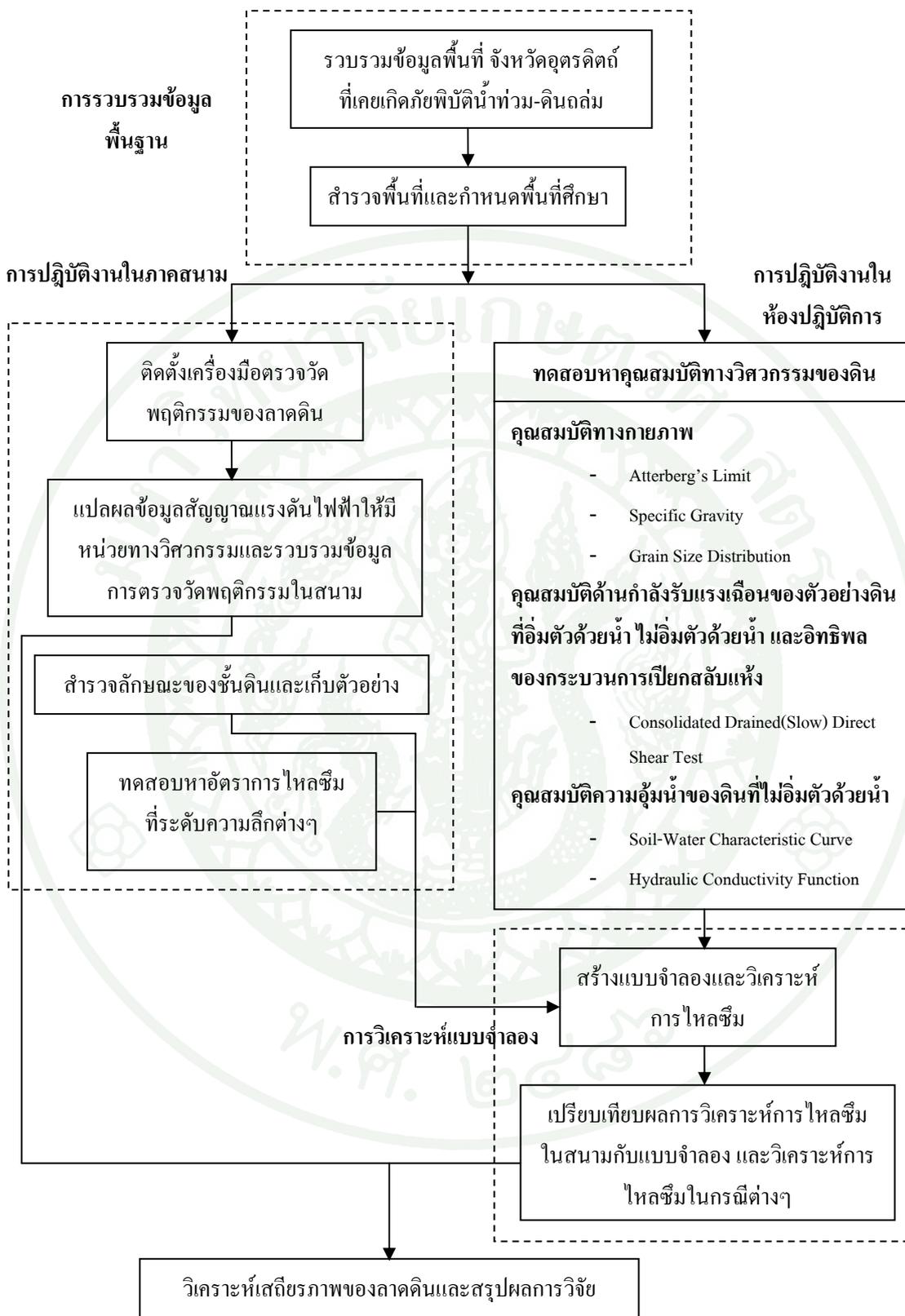
1. ชุดเครื่องมือการทดสอบ จัดจำกัดความชื้นเหลวของดิน (Atterberg's Limit Test) ตามมาตรฐาน ASTM D4318-98
2. ชุดเครื่องมือการทดสอบ ความถ่วงจำเพาะของดิน (Specific Gravity Test) ตามมาตรฐาน ASTM D854-98
3. ชุดเครื่องมือทดสอบ การกระจายตัวของเม็ดดิน (Grain Size Distribution Test) ตามมาตรฐาน ASTM D422-63
4. ชุดเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (Direct Shear Test) ตามมาตรฐาน ASTM D3080-90
5. เครื่องมือวัดแรงคั้นน้ำ/แรงคุดน้ำในดิน (KU-Tensiometer)
6. ตาชั่งแบบบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ
7. เครื่องคอมพิวเตอร์
8. โปรแกรม FEM สำหรับวิเคราะห์การไหลซึม

สถานที่

1. ห้องวิจัยนวัตกรรมทางวิศวกรรมปฐพี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
2. ห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
3. ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
4. ห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ขั้นสูง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การดำเนินงานวิจัย

จากแผนการวิจัยดังกล่าวที่ 23 สามารถแบ่งขั้นตอนการวิจัยออกเป็นกลุ่มของการดำเนินงานวิจัยได้ 4 กลุ่ม คือ การรวบรวมข้อมูลพื้นฐาน เป็นการศึกษาและรวบรวมข้อมูลในพื้นที่ที่เกิดภัยพิบัติดินถล่ม โดยเฉพาะข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์ซึ่งมีประโยชน์มากในการศึกษาภาพรวมของพื้นที่ นำไปสู่ข้อสรุปในแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดดินถล่ม เพื่อการเข้าสำรวจพื้นที่และการกำหนดพื้นที่ศึกษา การปฏิบัติงานในภาคสนาม ทำการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมในลาดดิน สำรวจลักษณะชั้นดิน เก็บตัวอย่างดิน และทดสอบพฤติกรรมการไหลซึมในสนาม การปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการ ทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติด้านกำลังรับแรงเฉือน โดยทดสอบทั้งในสภาวะอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ อีกทั้งทดสอบกำลังรับแรงเฉือนจากอิทธิพลของกระบวนการเปียกสลับแห้ง เนื่องจากกระบวนการผุพังของดิน สำหรับคุณสมบัติของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำนั้น ทำการทดสอบคุณสมบัติทางด้านความอุ้มน้ำและการไหลซึมของน้ำผ่านตัวอย่างดิน ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญสำหรับการวิเคราะห์การไหลซึม และกลุ่มสุดท้าย คือ การวิเคราะห์แบบจำลอง ทำการสร้างแบบจำลองของชั้นดินตามลักษณะชั้นดินที่ได้มีการสำรวจและใช้ค่าพารามิเตอร์ของพฤติกรรมความอุ้มน้ำและการไหลซึมจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการและภาคสนามเพื่อวิเคราะห์การไหลซึม เปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดพฤติกรรมในสนามซึ่งเป็นการวิเคราะห์ในสภาวะเริ่มต้น และวิเคราะห์การไหลซึมเมื่อพิจารณาความเข้มข้นน้ำฝนที่ทำให้เกิดดินถล่มในกรณีต่างๆ เพื่อพิจารณาเสถียรภาพของลาดดิน แล้วจึงนำมาสรุปผลการวิจัยถึงปัจจัยที่ก่อให้เกิดน้ำท่วม-ดินถล่ม



ภาพที่ 23 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

1. การรวบรวมข้อมูลพื้นฐานเบื้องต้น

การรวบรวมข้อมูลพื้นฐานเบื้องต้น เป็นการรวบรวมข้อมูลจากเหตุการณ์การเกิดภัยพิบัติน้ำท่วม-ดินถล่มและข้อมูลพื้นฐานด้านสารสนเทศภูมิศาสตร์ เพื่อการคัดเลือกและกำหนดตำแหน่งพื้นที่ศึกษา

1.1 การรวบรวมข้อมูลจากเหตุการณ์การเกิดภัยพิบัติน้ำท่วม-ดินถล่ม

จากเหตุการณ์อุทกภัยและโคลนถล่มในจังหวัดบริเวณภาคเหนือตอนล่าง 5 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดอุตรดิตถ์ สุโขทัย แพร่ น่านและลำปาง เมื่อวันที่ 21-23 พฤษภาคม พ.ศ. 2549 ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่ฝนตกหนักผิดปกติในพื้นที่เดิมเป็นเวลา(ประมาณ 1 สัปดาห์) เนื่องมาจากหย่อมความกดอากาศต่ำพาดผ่านประเทศไทย ทำให้มีฝนตกปรอยๆสลับกับตกหนักต่อเนื่องหลายวัน ทำให้ดินในพื้นที่เชิงเขาหมดขีดความสามารถในการอุ้มน้ำ เมื่อมีฝนระลอกใหญ่ตกเพิ่มเติมลงมาทั้งวันทั้งคืนในวันที่ 22 พฤษภาคม พ.ศ. 2549 พื้นที่บางส่วนพังทลายลงมาในรูปของโคลนพร้อมกับต้นไม้ไหลลงมาทับถมบ้านเรือนประชาชน โดยเฉพาะบ้านเรือนที่ตั้งอยู่บริเวณหุบเขา และตัดเส้นทางคมนาคมในหลายพื้นที่ ดังภาพที่ 24 ก่อให้เกิดความเสียหายแก่ชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนจำนวนมาก สรุปได้ดังตารางที่ 4 เหตุการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นตั้งแต่ช่วงสี่ทุ่มของวันที่ 22 พฤษภาคม จนกระทั่ง ฝนได้หยุดตกในช่วงเช้ามืดของวันที่ 23 พฤษภาคม แต่น้ำป่าก็ยังมีไหลออกจากภูเขาและท่วมขังกินพื้นที่บริเวณกว้างในพื้นที่แม่น้ำน่านฝั่งซ้ายของจังหวัดอุตรดิตถ์ ทำให้อำเภอลับแลและตัวจังหวัดอุตรดิตถ์ต้องจมน้ำกว่าสองเมตร ซึ่งผลกระทบความเสียหายไม่ต่ำกว่า 308,615,331 บาท (ข้อมูลจาก DDPM, 2006)



ภาพที่ 24 เหตุการณ์น้ำท่วม-ดินถล่ม เมื่อวันที่ 21-23 พฤษภาคม พ.ศ. 2549

ที่มา: ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก

ตารางที่ 4 ความเสียหายที่เกิดจากเหตุการณ์น้ำท่วม-ดินถล่ม(DDPM, 2006)

จังหวัด	อำเภอ	จำนวนคนตาย	จำนวนคนที่สูญหาย	ความเสียหายของสิ่งปลูกสร้าง	
				ทั้งหมด	บางส่วน
อุตรดิตถ์	ลับแล	23	4		
	ท่าปลา	29	24		
	เมือง	23			
	รวม	75	28	483	3478
สุโขทัย	ศรีสัชนาลัย	6	1		
	ศรีสำโรง	1			
	รวม	7		89	156
แพร่	เมือง	5		135	345
น่าน				1	
ลำปาง					
	รวมทั้งหมด	87	29	708	3979

ADPC(2006) แบ่งลักษณะการพิบัติ 4 รูปแบบจากการสำรวจพื้นที่ในจังหวัด
อุตรดิตถ์และสุโขทัย ดังนี้

1. การเลื่อนไหลของลาดดินในระดับตื้น (Shallow earth slips)
2. การกัดเซาะทางน้ำ (Gully erosion)
3. การพังทลายของลาดชันจากการตัดถนนหรือสร้างบ้านเรือน (Failures of cuttings behind the houses or roadside cuttings)
4. การพังทลายของลาดดินจากการกัดเซาะบริเวณตีนเขาทำให้เสถียรภาพของลาดดินลดลง (Slope or bank failures due to erosion of the foothill and destabilization of upslope area)

โดยรูปแบบที่เกิดการพิบัติมากที่สุด คือ การเลื่อนไหลของลาดดินในระดับตื้น คิดเป็นสัดส่วนประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ของการพิบัติทั้งหมด ซึ่งแนวการพิบัติจะอยู่ระหว่างชั้นดินที่ผุพังในที่อยู่ชั้นหิน คือที่ระดับความลึกประมาณ 0.40-1 เมตร ADPC (2006) ให้เหตุผลว่า พื้นที่ที่เกิดการพิบัติเป็นพื้นที่ที่มีพืชปกคลุมน้อยหรือพืชที่ปกคลุมนั้นมีระบบรากที่ไม่ยึดเกาะมวลดิน เช่น ต้นกล้วย ป่าไผ่ และพื้นที่นั้นมีลักษณะภูมิประเทศเป็นเนินเขาที่มีลาดชันอยู่ในช่วง 25-45 องศา



ภาพที่ 25 รูปแบบของการเกิดดินถล่ม

- ก) การเลื่อนไหลของลาดดินในระดับตื้น
- ข) การกัดเซาะทางน้ำ
- ค) การพังทลายของลาดชันจากการตัดถนนหรือสร้างบ้านเรือน
- ง) การพังทลายของลาดดินจากการกัดเซาะบริเวณดินเขาทำให้เสถียรภาพของลาดดินลดลง

ที่มา: ADPC (2006)

กรมทรัพยากรธรณี(2549) สรุปผลการตรวจสอบพื้นที่ที่เกิดดินถล่มในพื้นที่จังหวัดอุดรดิตถ์ โดยใช้ข้อมูลจากการสำรวจภาคสนามและการแปลความหมายจากภาพถ่ายดาวเทียม ซึ่งถ่ายภาพเมื่อวันที่ 26 พฤษภาคม 2549 ดังนี้

1. พื้นที่ที่ประสบภัยดินถล่ม เกิดใน 3 อำเภอ คือ อำเภอลับแล อำเภอท่าปลา และอำเภอเมือง เกิดดินถล่มรวมทั้งสิ้น 1,478 แห่ง
2. สาเหตุเนื่องจากสภาพธรณีวิทยาเป็นหินดินดาน หินถ้ำภูเขาไฟ และหินตะกอนชนิดหินโคลน ซึ่งผุพังได้ง่ายและให้ชั้นดินหนา ประกอบกับสภาพพื้นที่เป็นพื้นที่ป่าโปร่ง และ

พื้นที่ปลูกไม้ผล ภูเขามีความลาดชันสูง (ประมาณ 55 องศา) ปริมาณน้ำฝนที่อำเภอถ้ำแลวัด ได้ 330 มิลลิเมตร(ปริมาณฝนที่ตกใน 24 ชั่วโมง วัดเมื่อวันที่ 23 พฤษภาคม 2549 เวลา 07.00 น.)

3. สภาพความเสียหาย

- อำเภอถ้ำแล พบรอยดินถล่มตามแนวภูเขา บริเวณพื้นที่สำรวจ บ้านผามือบ ตำบลแม่พูล และตำบลน่านกกก จำนวน 604 แห่ง บริเวณที่ถูกน้ำท่วมคิดเป็นพื้นที่ 12.05 ตร.กม.

- อำเภอท่าปลา พบรอยดินถล่มตามแนวภูเขา บริเวณ พื้นที่สำรวจบ้านน้ำต๊ะ บ้านน้ำรี ตำบลน้ำหมั้น จำนวน 551 แห่ง บริเวณที่ถูกน้ำท่วมคิดเป็นพื้นที่ 4.38 ตร.กม.

- อำเภอเมือง พบรอยดินถล่มตามแนวภูเขา บริเวณ พื้นที่สำรวจ บ้านไฮ้อ้า บ้านน้ำไคร้ ตำบลดำนานาขาม จำนวน 323 แห่ง บริเวณที่ถูกน้ำท่วมคิดเป็นพื้นที่ 7.50 ตร.กม.

และเนื่องจากสภาพพื้นที่เป็นหุบเขา ทำให้น้ำไหลหลากลงมาจากเขาและท่วมอย่างรวดเร็ว และมีสิ่งก่อสร้างที่สร้างขวางทางน้ำ เช่น บ้านเรือนที่ปลูกใกล้ทางน้ำ สะพาน ถนน เป็นต้น ทำให้ระดับน้ำสูงกว่าระดับน้ำปกติประมาณ 5 เมตร

ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2549) ได้เข้าสำรวจพื้นที่ที่เกิดดินถล่ม ในตำบลแม่พูล อำเภอถ้ำแล จังหวัดอุตรดิตถ์ พบลักษณะธรณีวิทยาชนิดหินในพื้นที่ประกอบด้วย 2 ลักษณะ ได้แก่ หินโคลน (Mudstone) แทรกสลับชั้นกับหินดินดาน (Shale) และหินดินดานกึ่งหินชนวน (Slaty Shale) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. หินโคลน(Mudstone) แทรกสลับชั้นกับหินดินดาน(Shale)

ปรากฏทั่วไปในพื้นที่ศึกษา โดยหินโคลน (Mudstone) มีสีน้ำตาลเหลือง น้ำตาลแดง แทรกสลับชั้นกับหินดินดาน (Shale) สีน้ำตาลเหลือง น้ำตาลแดง ดังภาพที่ 26 แสดงลักษณะเป็นชั้นบางถึงหนาสลับกัน บางบริเวณพบมีการแทรกตัวในชั้นหินของสายแร่ควอร์ต (Quartz Vein) ความหนาแน่นของรอยแตกสูง ระดับการผุพังปานกลางถึงสูง มีการวางชั้นหินอยู่ในแนว

ตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ เอียงเทไปทางด้านตะวันตกเฉียงเหนือและตะวันออกเฉียงใต้สลับกัน (แสดงการคดโค้งของชั้นหิน) มุมการเอียงเทค่อนข้างชัน



ภาพที่ 26 หินโคลนแทรกสลับชั้นกับหินดินดานบริเวณบ้านแม่พูล

ที่มา: ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก (2551)

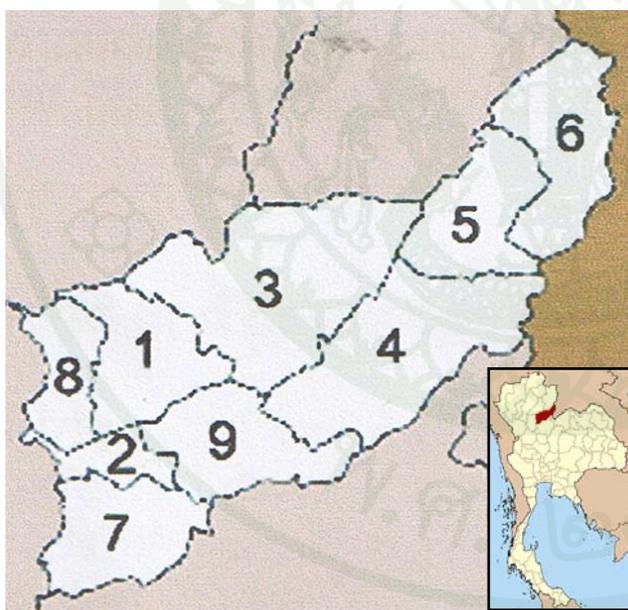
2. หินดินดานกึ่งหินชนวน(Slaty Shale)

ปรากฏเด่นชัดบริเวณน้ำตกแม่พูล เป็นหินตะกอนกึ่งแปรสภาพที่เกิดจากกระบวนการแปรสภาพโดยแรงกระทำหรือการแปรสภาพพลวัต (Dynamic Metamorphism) ทำให้เกิดลักษณะเป็นหินดินดานกึ่งหินชนวน เนื้อหินมีลักษณะมันวาว สีดำ น้ำตาลดำถึงเทาดำ ดังภาพที่ 27 โดยทั่วไปหินมีสภาพความแข็งแรงดี มีการวางชั้นหินอยู่ในแนวตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ (ตั้งฉากกับการไหลของน้ำตกแม่พูล) มุมการเอียงเทค่อนข้างชัน



ภาพที่ 27 หินดินดานกึ่งหินชนวน

ที่มา: ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก(2551)



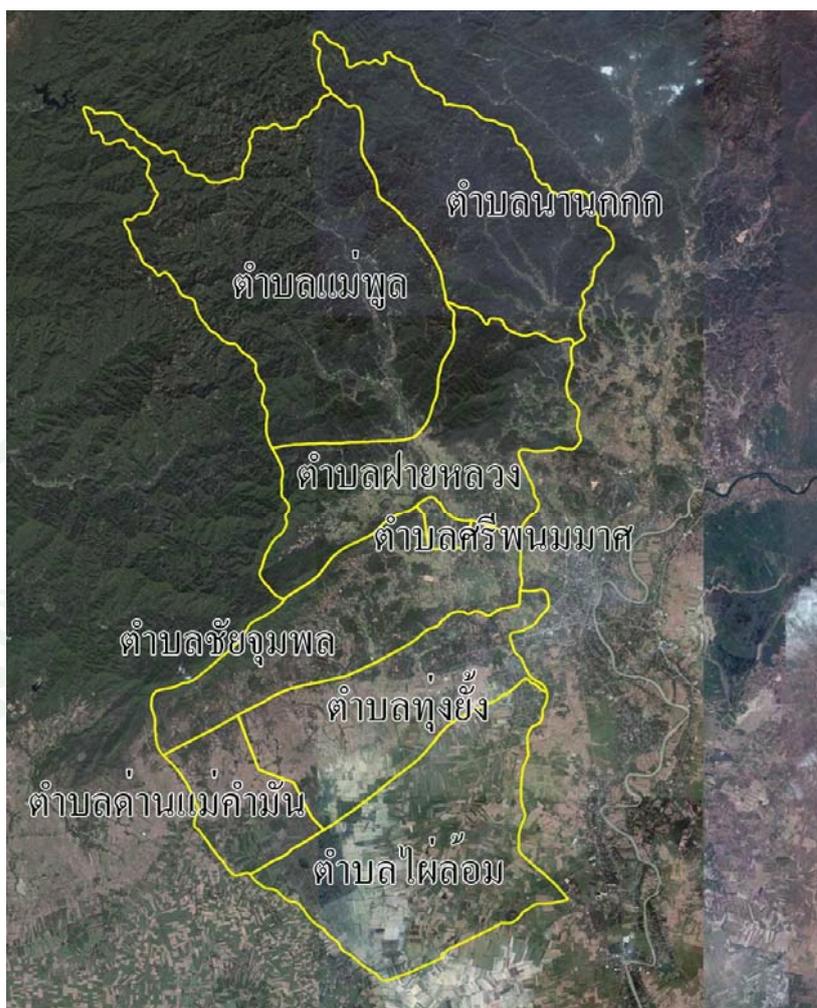
1. อำเภอเมือง
2. อำเภอตรอน
3. อำเภอท่าปลา
4. อำเภอน้ำปาด
5. อำเภอฟากท่า
6. บ้านโคก
7. อำเภอพิชัย
8. อำเภอลับแล
9. อำเภอทองแสนขัน

ภาพที่ 28 ขอบเขตอำเภอในพื้นที่จังหวัดอุตรดิตถ์

ที่มา: ADPC(2006)

ดังข้อสรุปที่กล่าวมาข้างต้น พื้นที่ที่ได้รับผลกระทบมากที่สุดบริเวณหนึ่ง คือ พื้นที่ในอำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์ ดังภาพที่ 28 มีอาณาเขตครอบคลุมพื้นที่ 506.02 ตารางกิโลเมตร ลักษณะภูมิประเทศเป็นพื้นที่ราบลุ่มทางตอนใต้ ค่อนข้างสูงชันทางตอนกลางและมีลักษณะเป็นพื้นที่สูงชันและภูเขาทางตอนเหนือและตะวันตกของพื้นที่ ดังภาพที่ 29 ซึ่งแบ่งลักษณะพื้นที่ให้ชัดเจนดังนี้

1. บริเวณตอนเหนือ ในเขตพื้นที่ตำบลฝายหลวง ตำบลแม่พูล และตำบลน่านกกก พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นภูเขาที่ไม่สูงมากนัก ยกเว้นทางตอนเหนือสุดของตำบลแม่พูลที่ติดต่อกับอำเภอเด่นชัย จังหวัดแพร่ ภูเขามีสภาพสูงมากเป็นแหล่งต้นน้ำลำธารหล่อเลี้ยงพืชผลในอำเภอลับแลตลอดปี บริเวณนี้จะมีที่ราบระหว่างภูเขาเพียงเล็กน้อย
2. บริเวณตอนกลาง ในเขตพื้นที่ตำบลชัยจุมพล เทศบาลตำบลศรีพนมมาศและบางส่วนของตำบลฝายหลวงมีลักษณะพื้นที่เป็นลอนคลื่นสูงๆ ต่ำๆ บริเวณที่เนินจะเป็นที่ตั้งบ้านเรือนที่อยู่อาศัย ส่วนที่ราบเป็นที่ทำการเพาะปลูก
3. บริเวณตอนใต้ ในพื้นที่ตำบลไผ่ล้อม ตำบลทุ่งยั้ง และตำบลด่านแม่คำมันเป็นที่ราบและที่ราบลุ่มอันกว้างใหญ่เหมาะสำหรับการทำนา และทางตะวันตกเฉียงใต้ของอำเภอในท้องที่ตำบลไผ่ล้อม ตำบลทุ่งยั้ง และตำบลด่านแม่คำมันมีบึงใหญ่เนื้อที่ประมาณ 6,800 ไร่ เรียกว่า บึงมาย เป็นแหล่งน้ำสำคัญของบริเวณดังกล่าว



ภาพที่ 29 ขอบเขตตำบลในพื้นที่อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์

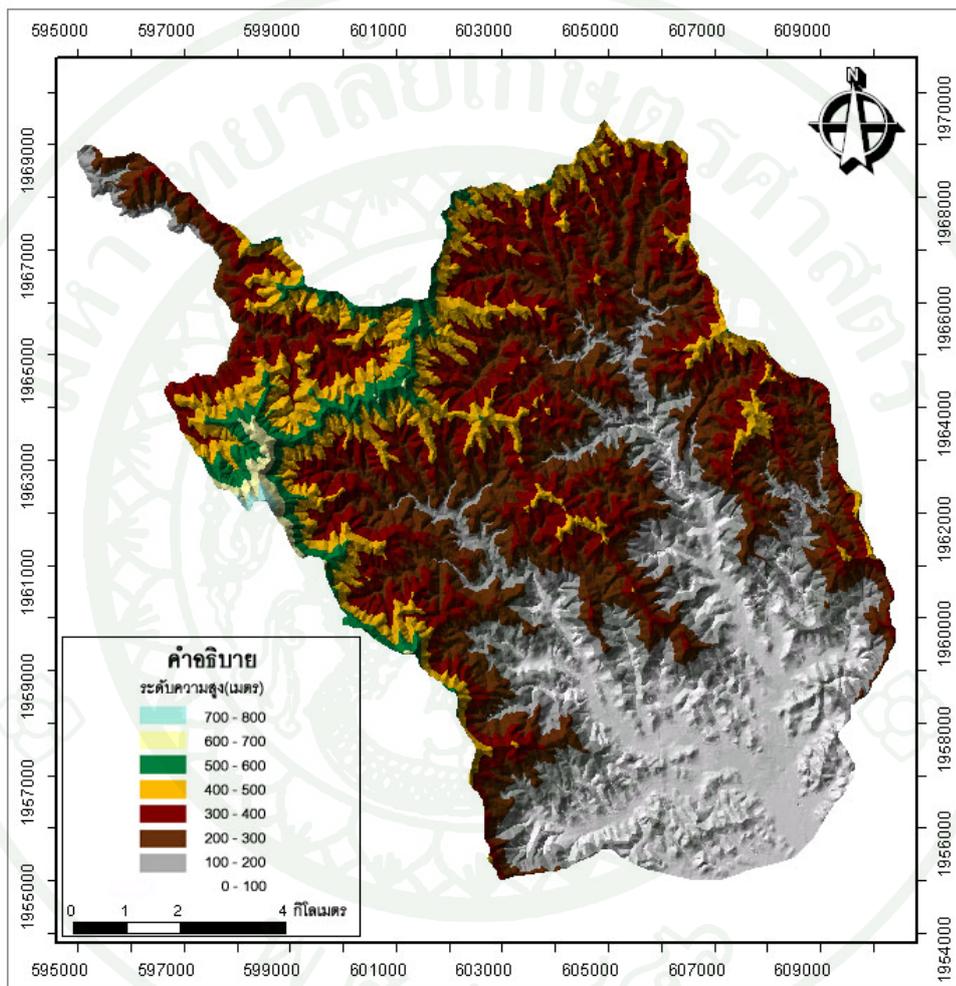
ที่มา: Googleearth.com

1.2 ข้อมูลพื้นฐานด้านสารสนเทศภูมิศาสตร์ของพื้นที่ศึกษา

จากที่กล่าวมาข้างต้น พื้นที่ทางตอนเหนือของอำเภอลับแลมีลักษณะภูมิประเทศเป็นภูเขาและเป็นแหล่งต้นน้ำ ได้แก่ น้ำตกแม่พูล อีกทั้งเป็นพื้นที่ที่เคยเกิดภัยพิบัติน้ำท่วม-ดินถล่มมาก่อน จึงพิจารณาพื้นที่ในตำบลแม่พูล ให้เป็นพื้นที่ที่เหมาะสมแก่การคัดเลือกพื้นที่ศึกษา และจากการรวบรวมเอกสารและงานวิจัยของสุทธิศักดิ์และคณะ(2551) พบว่า ปัจจัยหลักที่ใช้ในการพิจารณาการเกิดดินถล่ม 5 ปัจจัยแรก ได้แก่ ความลาดชันตามค่ามุมเอียง ชนิดของหิน การใช้ประโยชน์ที่ดิน ระดับความสูงของพื้นที่ และชนิดของดิน จึงนำปัจจัยดังกล่าวมาพิจารณาโดยใช้ข้อมูลพื้นฐาน

ด้านสารสนเทศภูมิศาสตร์ ในพื้นที่ตำบลแม่พูล อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์ (ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก, 2551) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- ลักษณะภูมิประเทศ (Topography)



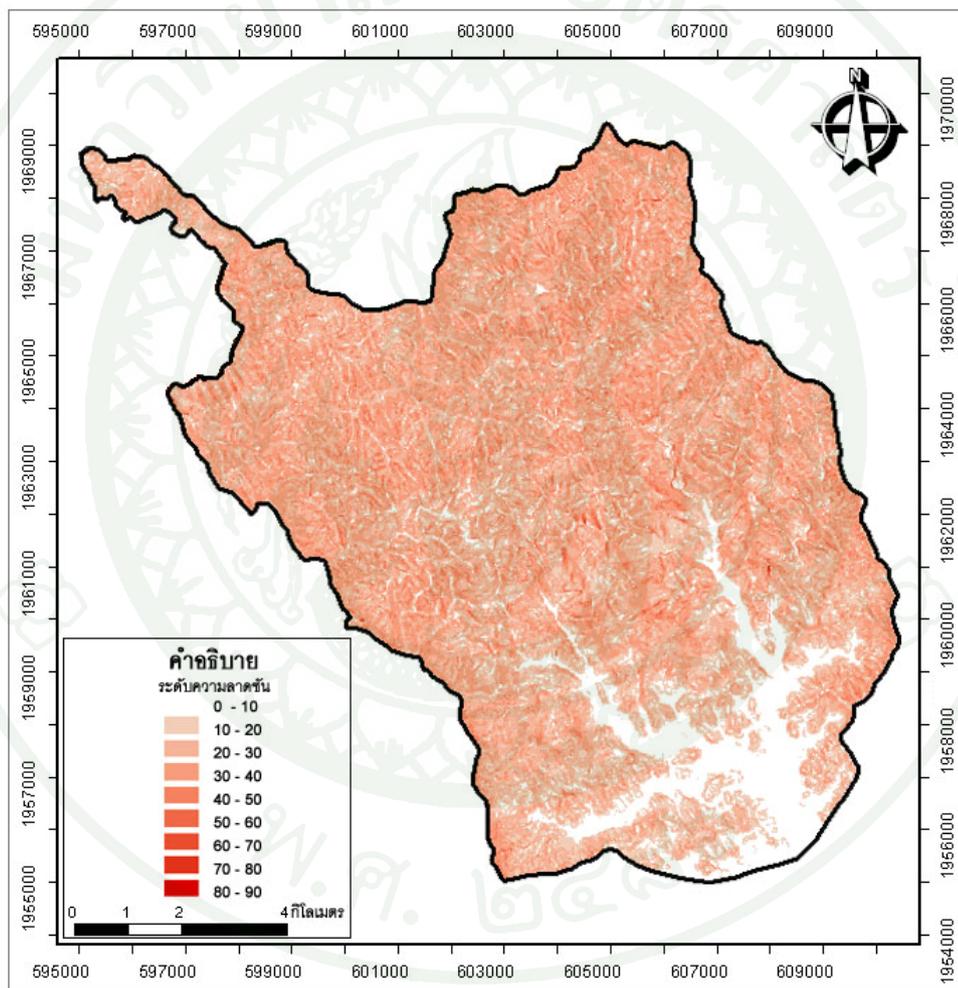
ภาพที่ 30 ลักษณะภูมิประเทศ

ที่มา: กรมพัฒนาที่ดิน (2551)

ตำบลแม่พูล ดังภาพที่ 30 อยู่บริเวณตอนเหนือของอำเภอลับแล ประกอบด้วยภูเขาสูงชันทางด้านทิศตะวันตก และทิศตะวันตกเฉียงเหนือ มียอดเขาที่สำคัญ คือ ดอยกั้วมะแง อยู่ทางด้านทิศตะวันตก มีระดับความสูง 863 เมตรเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง สภาพพื้นที่ส่วนใหญ่เป็น

เนินสูงๆ ต่ำ ๆ บริเวณที่เนินเป็นที่ตั้งของบ้านเรือนที่อยู่อาศัย ส่วนพื้นที่ราบ เล็กน้อยระหว่างเนิน เป็นที่ทำการเพาะปลูก ทางตอนเหนือมีภูเขาสูงเป็นแหล่งน้ำลำธารหล่อเลี้ยงพืชผล ในอำเภอลับแล ได้ตลอดปี มีแหล่งน้ำที่สำคัญคือ ลำคลองแม่พร่อง มีความยาวประมาณ 30 กิโลเมตร ไหลผ่าน พื้นที่อำเภอลับแลตลอดจากตอนเหนือ ไปสู่อำเภอทางตอนใต้ของอำเภอ

- ความลาดชันตามค่ามุมเอียง (Slope angle)

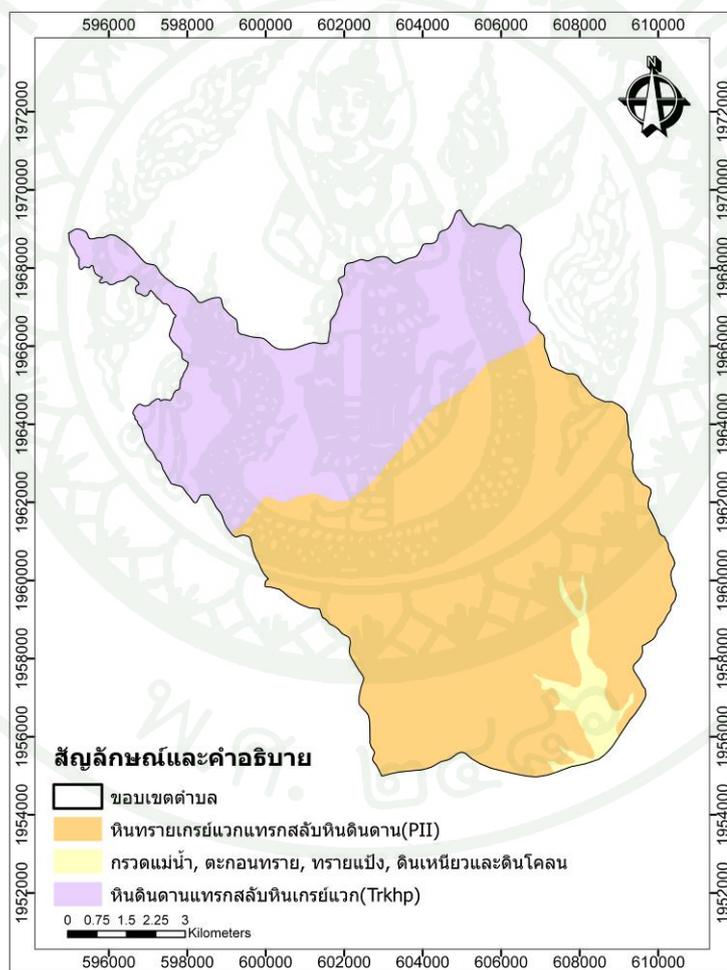


ภาพที่ 31 ความลาดชันตามค่ามุมเอียง

ที่มา: ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก (2551)

ความลาดชันของตำบลแม่พูน ดังภาพที่ 31 มีความลาดชันของพื้นที่ส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 20-30 องศา สภาพภูมิประเทศโดยรวมจะมีความลาดเทตามร่องเขา และตามการไหลของลำน้ำ ดังนั้นในฤดูฝน ถ้าฝนตกชุกในบริเวณร่องเขาที่น้ำฝนไหลมารวมกัน และชั้นหินของพื้นที่เป็นหินน้ำซึมผ่านได้ยากด้วยแล้ว น้ำที่ไหลบ่าหน้าดินจะมีปริมาณมากและมีความเร็วสูงความสามารถในการกัดชะพังทลายของน้ำจึงมีมาก นับว่าเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดน้ำท่วมแผ่นดินถล่มบริเวณนั้น

- ลักษณะทางธรณีวิทยา (Geology)



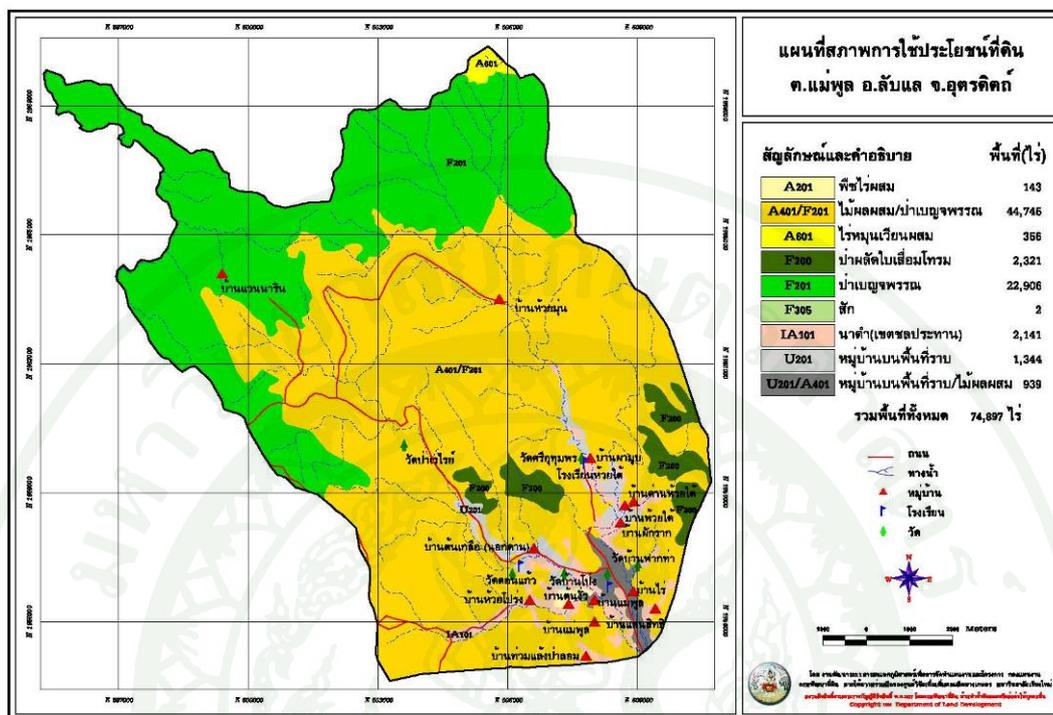
ภาพที่ 32 ข้อมูลธรณีวิทยา

ที่มา: กรมทรัพยากรธรณี (2528)

ลักษณะทางธรณีวิทยาในพื้นที่ตำบลแม่พูล จังหวัดอุตรดิตถ์ แบ่งตามกรมทรัพยากรธรณี(2528) ออกเป็น 3 ส่วนหลัก ดังภาพที่ 32 ดังนี้

1. ตะกอนที่ราบสะสมตัวโดยทางน้ำ ตะกอนกรวด ทราย ดินสะสมตามร่องน้ำและที่ราบน้ำท่วมถึงทางตอนล่างของพื้นที่
2. หินกรวดหินลับแล อยู่บริเวณทางตอนกลางของพื้นที่มีลักษณะเป็นหินทรายเกรย์แกก สีเทา และเทาแกมเขียว เนื้อละเอียด แทรกสลับด้วยหินดินดานหรือหินโคลน แสดงแนวแตกเรียบชัดเจน ตอนกลางถึงบนแทรกด้วยผนังแทรกชั้นของหินแอนดีไซต์ เนื้อบะซอลต์หนา 1-1.5 เมตร ตอนล่างหินกรวดมนสลับกับหินปูนชั้นบาง และหินเชิร์ตชั้นบางขนาด 1-1.5 เซนติเมตรสลับชั้นกับหินโคลน พบซากดึกดำบรรพ์ จำพวกเรดิโอลาเรีย
3. หินที่อยู่ในหมวดหินเขาพลึงทางตอนบนของพื้นที่ มีลักษณะเป็นหินดินดานหรือหินโคลน สีเทา สีเทาดำ แสดงแนวชั้นบาง สลับด้วยหินทรายเกรย์แกก แสดงแนวแตกเรียบชัดเจน และหินทรายเกรย์แกกสลับด้วยหินโคลนบางบริเวณ หินโคลนสลับหินเชิร์ต และหินเชิร์ตชั้นบาง โดยทั่วไป ขนาด 1 เซนติเมตร พบซากดึกดำบรรพ์จำพวกเรดิโอลาเรีย

- การใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land use)



ภาพที่ 33 แผนที่สภาพการใช้ประโยชน์ที่ดิน

ที่มา: กรมพัฒนาที่ดิน (2545)

การใช้ประโยชน์ที่ดินของตำบลแม่พูล ภาพที่ 33 ประกอบไปด้วยประเภทการใช้ประโยชน์หลัก 5 ชนิด คือ

1) ป่าเบญจพรรณ (Mixed deciduous forest) เป็นป่าผลัดใบในฤดูแล้งพร้อมกันทั้งต้นและจะเริ่มผลิใบใหม่ในต้นฤดูฝน ในแต่ละพื้นที่ที่จะผลัดใบไม่พร้อมกันแล้วแต่สภาพแวดล้อม มีใบค่อนข้างโปร่ง เป็นประเภทป่าไม้ที่พบมากที่สุดบริเวณทิศตะวันตกเฉียงเหนือของพื้นที่นี้ ซึ่งส่วนมากจะมีไม้สักปะปนอยู่ด้วย ส่วน ไม้พื้นล่างจะเป็นพวกไผ่ พบปะปนกระจายอยู่ทั่วไป

2) ไร่หมุนเวียนผสม (Mixed swidden cultivation) ไร่หมุนเวียนผสม คือการทำไร่ผสมผสาน โดยปลูกทั้งข้าว พริก และพืชผักหลายชนิดบนแปลงบริเวณเชิงเขา พบมากที่สุดบริเวณทิศเหนือของพื้นที่

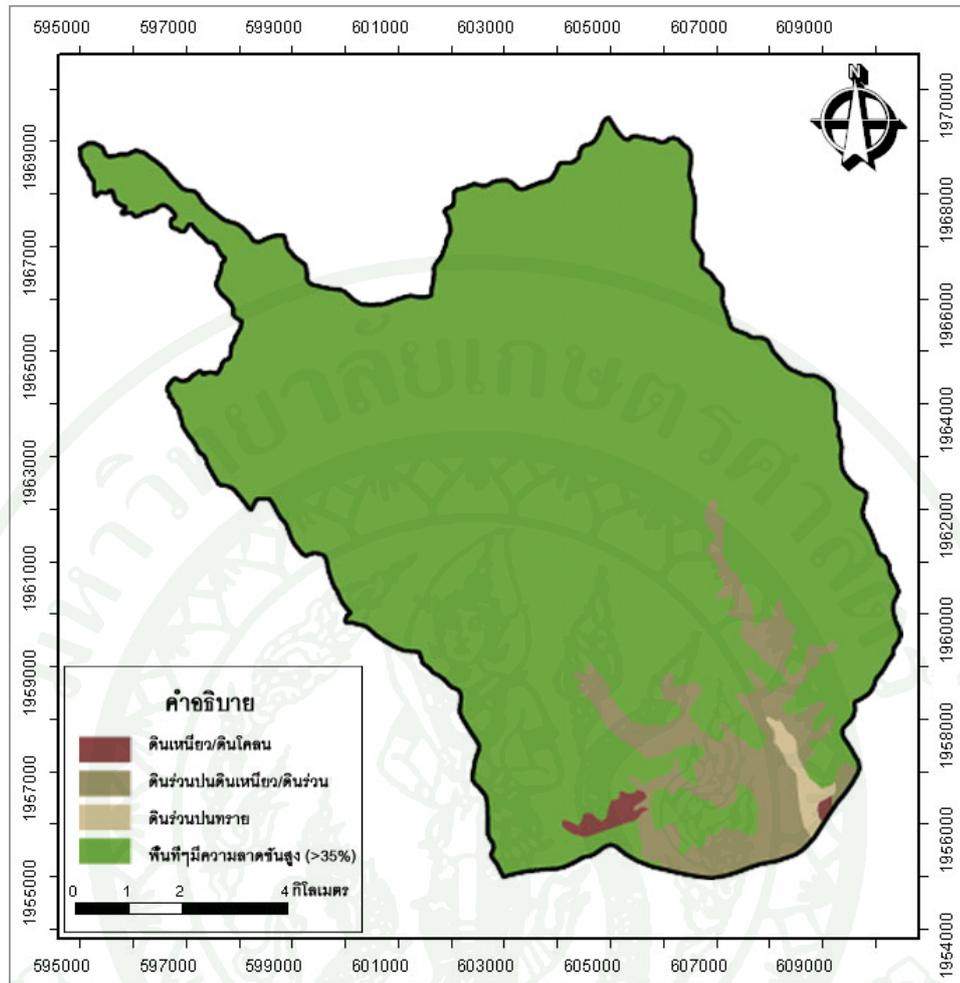
3) ไม้ผลผสม (Mixed orchards) คือ การปลูกไม้ผลในบริเวณพื้นที่ที่เป็นภูเขาไม่สูงมากนัก แต่ไหล่เขามีความลาดชัน ซึ่งในพื้นที่นี้จะพบการทำไม้ผลมาก บริเวณพื้นที่เนินเขาที่ต้นไม้ปกคลุมหนาแน่น และบริเวณที่เป็นที่อยู่อาศัยก็ได้มีการปลูกพืชสวนผลไม้อย่างหนาแน่นเช่นกัน ไม้ผลที่พบมากได้แก่ ทุเรียน ลองกอง ลางสาด กาแฟ

4) นาดี (Transplanted paddy field) พื้นที่ทำนาในบริเวณตำบลแม่พูน พบมากในบริเวณที่ราบใกล้ลำน้ำ และสองฝั่งถนน นอกจากนี้ยังพบการปลูกหอมแดง หอมหัวใหญ่ และพริกชนิดต่างๆ ในบริเวณข้างเคียงด้วย

5) พื้นที่อยู่อาศัย (Urban and built-up land) เนื่องจากประชากรมีอาชีพเกษตรกรเป็นส่วนใหญ่ คือ ทำนา ทำไร่ และทำสวนผลไม้ บริเวณที่ตั้งหมู่บ้านจึงอยู่ตามสองฝั่งถนน

- คุณลักษณะของดิน (Soil characteristics)

เป็นข้อมูลเนื้อดินที่อธิบายชนิดของดิน ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงลักษณะการระบายน้ำ และอุ้มน้ำของมวลดิน อันส่งผลต่อศักยภาพการเกิดดินถล่ม



ภาพที่ 34 แผนที่กลุ่มชุดดิน

ที่มา: กรมพัฒนาที่ดิน(2545)

ลักษณะดินของตำบลแม่พูน ประกอบไปด้วยลักษณะดิน 4 ชนิด คือ

1. ดินลึกร่วนเหนียว หรือร่วนเหนียวปนทรายแป้ง (Clayey loam and loam) การระบายน้ำค่อนข้างเร็ว สภาพพื้นที่ราบเรียบหรือค่อนข้างราบเรียบ ความลาดชันน้อยกว่า 2%
2. ดินลึกร่วนเหนียว สีแดง น้ำตาล หรือเหลือง (Clayey and mud) การระบายน้ำดี สภาพพื้นที่ที่ดอนเป็นลูกคลื่นลอนลาดเล็กน้อยถึงเนินเขา ความลาดชัน 2-35%

3. ดินลึก เป็นดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง (Sandy loam) การระบายน้ำดีถึงดีปานกลาง สภาพพื้นที่ที่ค่อนข้างเรียบถึงลูกคลื่นลอนลาด ความลาดชัน 1-12%

4. ทุกชุดดินที่พบบนสภาพพื้นที่ที่มีความลาดชันมากกว่า 35% (Slope complex) ดินมีลักษณะแตกต่างกันไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับชนิดของหินต้นกำเนิด สภาพภูมิอากาศ พืชพรรณ สภาพพื้นที่ และระยะเวลาในการพัฒนาของดิน

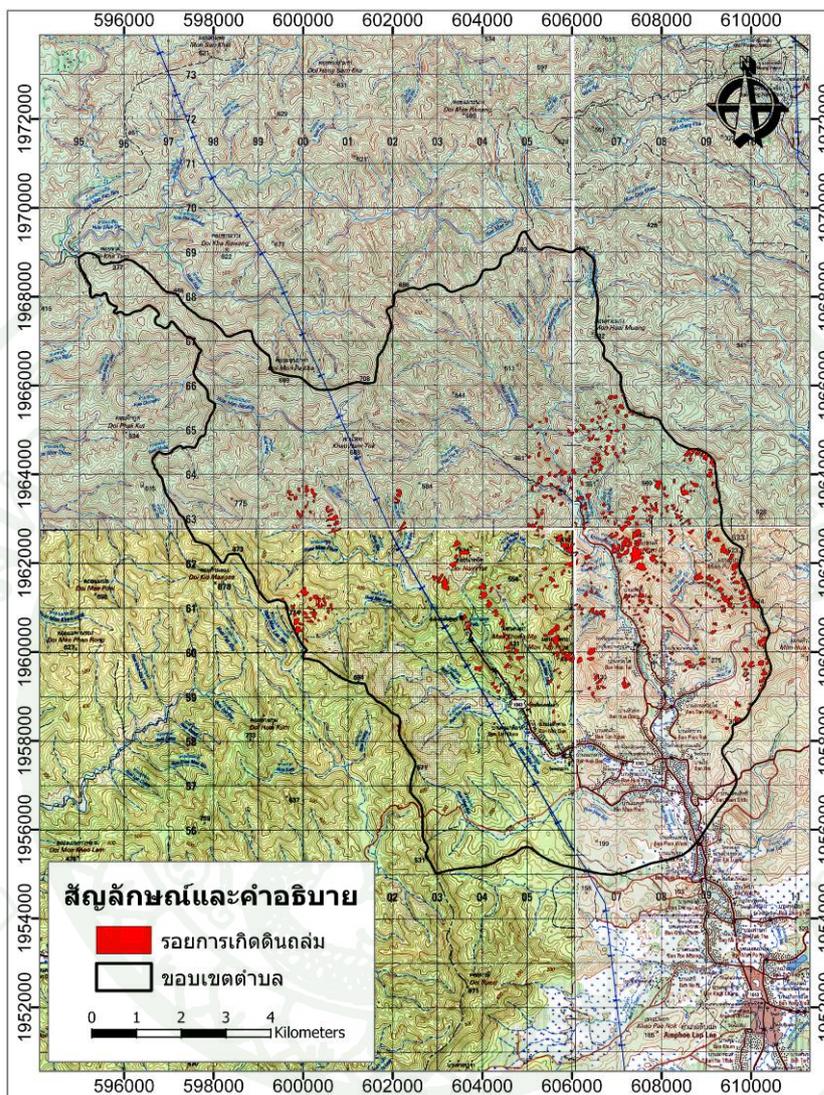
- ความเข้มน้ำฝน (Rainfall intensity)

จากข้อมูลสถิติน้ำฝนย้อนหลังค่าเฉลี่ยคาบ 30 ปี (ค.ศ.1970-ค.ศ.2000) ของกรมอุตุนิยมวิทยา ปริมาณน้ำฝนในเขตตำบลแม่พูน มีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยทั้งปี 1150.35 มิลลิเมตร / ปี เดือนที่มีฝนตกมากที่สุด คือเดือน กันยายน มีฝนตกเฉลี่ย 245.50 มิลลิเมตร

1.3 การพิจารณาข้อมูลพื้นฐานด้านสารสนเทศภูมิศาสตร์ร่วมกับตำแหน่งการพิบัติของลาดดินในอดีต

การคัดเลือกพื้นที่ศึกษา ทำการใช้ข้อมูลพื้นฐานด้านสารสนเทศภูมิศาสตร์ประกอบในการคัดเลือกพื้นที่ศึกษา เนื่องจากการกำหนดพื้นที่ศึกษานั้น จำเป็นต้องศึกษาความเกี่ยวข้องในแต่ละปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดดินถล่มในพื้นที่ จึงศึกษาปัจจัยเหล่านั้นร่วมกับตำแหน่งรอยการเกิดดินถล่มในอดีต เช่น ความลาดชันตามค่ามุมเอียง ลักษณะทางธรณีวิทยา ประโยชน์การใช้ที่ดิน ลักษณะภูมิประเทศ ทิศด้านลาด เป็นต้น เพื่อที่จะสามารถกำหนดพื้นที่ศึกษาให้เป็นตัวแทนของข้อมูลในพื้นที่ที่เคยเกิดดินถล่ม โดยนำแหล่งข้อมูลการแปลตำแหน่งรอยการเกิดดินถล่มจากภาพถ่ายดาวเทียมของกรมทรัพยากรธรณีมาซ้อนทับกับข้อมูลพื้นฐานด้านสารสนเทศภูมิศาสตร์ ดังนี้

- ลักษณะภูมิประเทศ



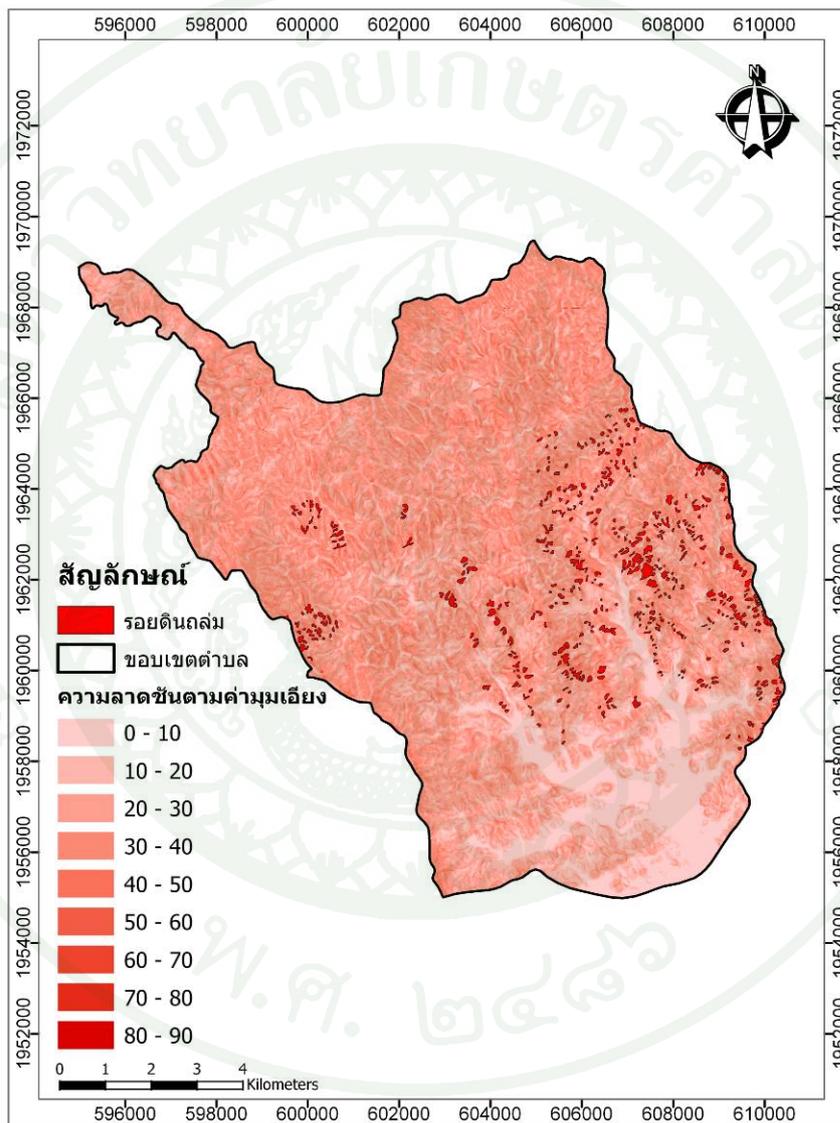
ภาพที่ 35 แผนที่ลักษณะภูมิประเทศกับตำแหน่งรอยการเกิดดินถล่ม

ที่มา: ดัดแปลงจากกรมแผนที่ทหาร(2546)

ลักษณะภูมิประเทศกับตำแหน่งรอยการเกิดดินถล่ม พบว่า รอยรอยการเกิดดินถล่ม อยู่บริเวณตอนกลางของพื้นที่ เมื่อคิดสัดส่วนพื้นที่ของการเกิดดินถล่มต่อความสูงตามลักษณะของ ภูมิประเทศที่อันตรายภาคชั้นละ 100 เมตรจากระดับน้ำทะเลปานกลาง ช่วงตั้งแต่ค่า 100-700 เมตร

พบว่ามามีค่า 1.279, 5.919, 5.603, 6.069, 6.546, 4.662 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่า ค่าระดับเส้น
ชั้นความสูงตั้งแต่ค่า 200 เมตรจากระดับน้ำทะเลปานกลางขึ้นไป มีผลมากต่อการเกิดดินถล่ม

- ความลาดชันตามค่ามุมเอียง



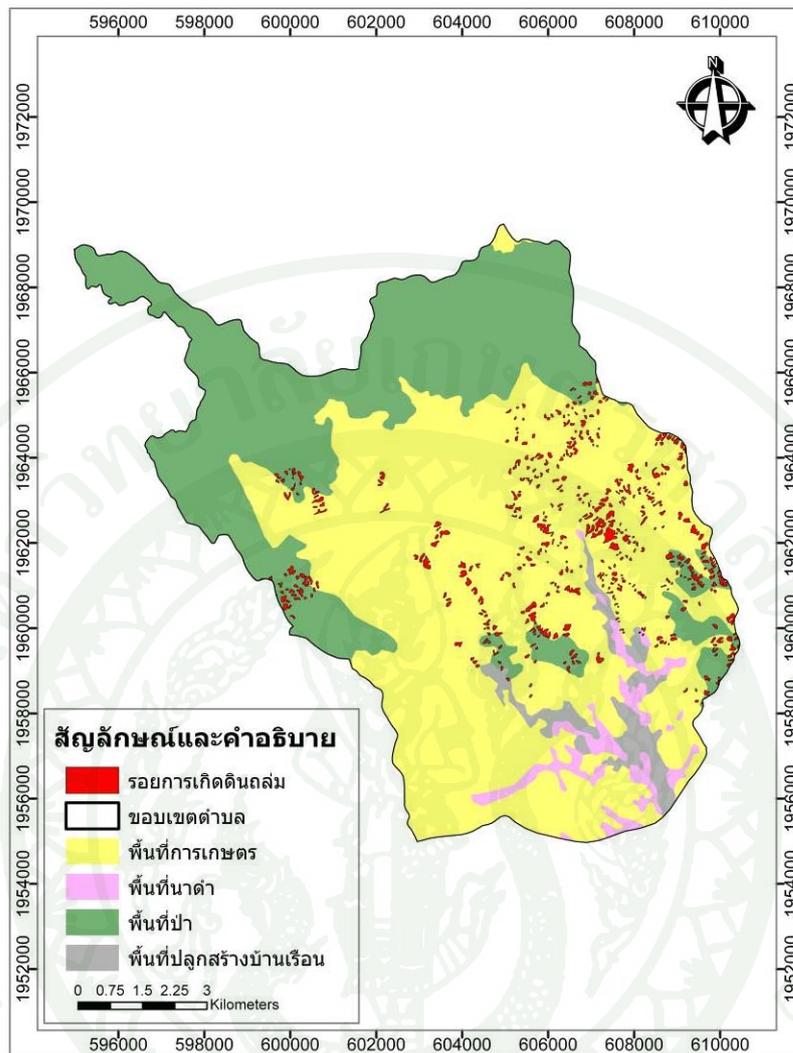
ภาพที่ 36 ความลาดชันตามค่ามุมเอียง

ที่มา: ดัดแปลงจากศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก (2551)

จากตำแหน่งรอยการเกิดดินถล่มนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลความลาดชันตามค่ามุมเอียง ซึ่งแบ่งความลาดชันตามค่ามุมเอียง ออกเป็น 4 ช่วง ได้แก่ 0-20, 21-40, 41-60, 61-78 องศา เมื่อคิดค่าสัดส่วนพื้นที่การเกิดดินถล่มต่อพื้นที่ในช่วงความลาดชันนั้นๆ มีค่า 1.564, 5.243, 7.205, 43.993 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ช่วงของความลาดชันตามค่ามุมเอียงตั้งแต่ 20 องศาขึ้นไป เริ่มส่งผลต่อการเกิดดินถล่ม และในช่วง 61-78 องศา ซึ่งมีความลาดชันมาก มีการเกิดดินถล่มสูง เนื่องจากเป็นพื้นที่บริเวณยอดเขา ซึ่งได้รับน้ำเป็นบริเวณแรก ทำให้ชั้นดินเกิดการอิ่มตัวก่อน และเมื่อฝนตกอย่างต่อเนื่อง จึงก่อให้เกิดการพิบัติในที่สุด

- ประโยชน์การใช้พื้นที่

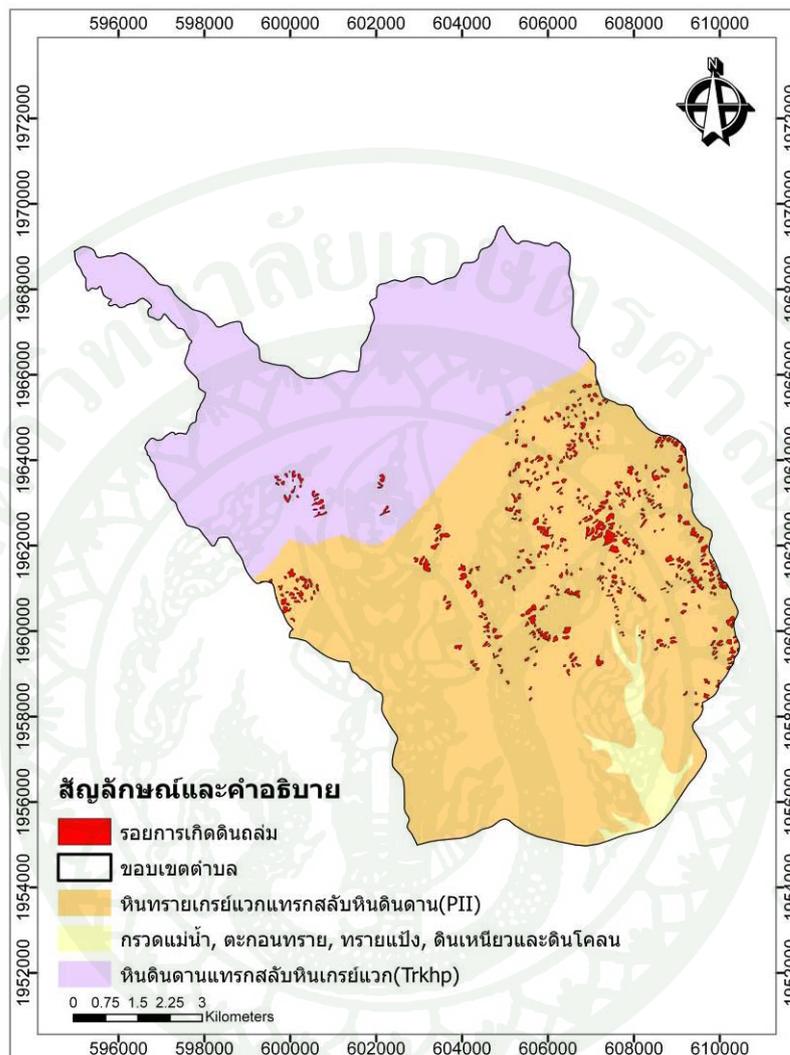
จากข้อมูลแผนที่สภาพการใช้ประโยชน์ที่ดิน ของกรมพัฒนาที่ดิน แบ่งประโยชน์การใช้พื้นที่ออกเป็น พืชไร่ผสม ไม้ผลผสม ไร่มุมนเวียนผสม ป่าผลัดใบเสื่อมโทรม ป่าเบญจพรรณ สัก นาดำ หมูบ้านบนพื้นที่ราบ จึงนำข้อมูลดังกล่าวจัดรวมกลุ่มใหม่เพื่อแทนสภาพการใช้ประโยชน์ที่ดิน 4 รูปแบบ คือ พื้นที่การเกษตร พื้นที่นาดำ พื้นที่ป่า พื้นที่ปลูกสร้างบ้านเรือนบนพื้นที่ราบ โดยพื้นที่ทางการเกษตร จะรวมพื้นที่พืชไร่ผสม ไม้ผลผสม ไร่มุมนเวียนผสมเข้าด้วยกัน และรวมพื้นที่ป่าผลัดใบเสื่อมโทรม ป่าเบญจพรรณ สัก แทนสภาพของพื้นที่ป่า ดังภาพที่ 37 พบว่าค่าสัดส่วนของพื้นที่การเกิดดินถล่มต่อพื้นที่การใช้ประโยชน์แบบต่างๆ ได้แก่ พื้นที่การเกษตร พื้นที่นาดำ พื้นที่ป่า พื้นที่ปลูกสร้างบ้านเรือน คิดเป็น 3.036, 0.084, 1.531, 0.174 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งพบว่าพื้นที่รอยดินถล่มส่วนใหญ่มีลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินเป็นแบบพื้นที่การเกษตรมากที่สุด



ภาพที่ 37 ตำแหน่งรอยการเกิดดินถล่มภายใต้การใช้ประโยชน์ที่ดินที่แตกต่างกัน

ที่มา: ดัดแปลงจากกรมพัฒนาที่ดิน(2545)

- ลักษณะทางธรณีวิทยา

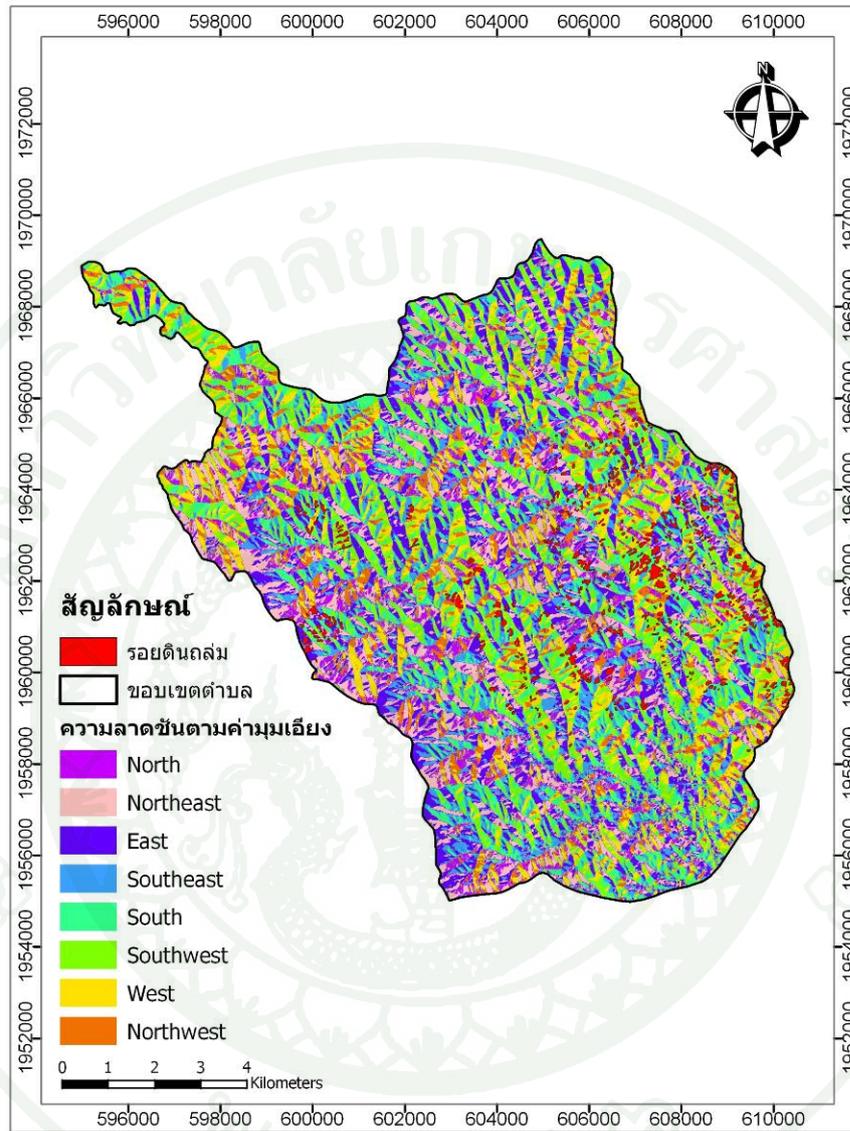


ภาพที่ 38 ข้อมูลธรณีวิทยา

ที่มา: คัดแปลงจากกรมทรัพยากรธรณี(2528)

เมื่อพิจารณาค่าแห่งรอยการเกิดดินถล่มกับลักษณะทางธรณีวิทยา ที่มี 3 ลักษณะ พบว่า ค่าสัดส่วนของพื้นที่การเกิดดินถล่มต่อพื้นที่ของลักษณะทางธรณีวิทยาแบบต่างๆ ได้แก่ หินทรายเกรย์แวกแทรกสลับหินดินดาน(PII) กรวดแม่น้ำ ทรายแป้ง และหินดินดานแทรกสลับหินทรายแวก (Trkhp) มีค่า 3.632, 0.016, 0.387 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งลักษณะทางธรณีวิทยาที่เป็นหินทรายเกรย์แวกแทรกสลับหินดินดานพบตำแหน่งรอยการเกิดดินถล่มมากที่สุด

- ทิศทางด้านลาด



ภาพที่ 39 ทิศทางด้านลาด

ที่มา: คัดแปลงจากศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก (2551)

เมื่อพิจารณาค่าสัดส่วนของพื้นที่การเกิดดินถล่มต่อพื้นที่การเกิดดินถล่มต่อพื้นที่ตามทิศทางด้านลาด ได้แก่ ทิศเหนือ ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ทิศตะวันออก ทิศตะวันออกเฉียงใต้ ทิศใต้ ทิศตะวันตกเฉียงใต้ ทิศตะวันตก ทิศตะวันตกเฉียงเหนือ คิดเป็น 1.327, 1.643, 2.089, 2.353, 3.352, 3.975, 3.749, 2.553 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ พบว่า ทิศด้านลาดที่เกิดการพิบัติส่วนใหญ่ คือ ด้านทิศตะวันตกเฉียงใต้และทิศตะวันตก

จากข้อมูลสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ข้างต้น ทำให้สรุปได้ว่า พื้นที่ที่เกิดดินถล่มสูง เกิดในพื้นที่ที่มีความสูงมากกว่า 200 เมตรจากระดับน้ำทะเลปานกลาง มีความลาดชันมากกว่า 20 องศา ประโยชน์การใช้พื้นที่เป็นพื้นที่ทางการเกษตร ลักษณะทางธรณีวิทยาเป็นทรายกร่อยแวกแทรกสลับบินดินดาน(PII) และมีทิศด้านลาดทางทิศตะวันตกเฉียงใต้และทิศตะวันตก จึงนำข้อมูลดังกล่าวมาใช้พิจารณาในการเลือกพื้นที่ศึกษา

2. การปฏิบัติงานในภาคสนาม

การปฏิบัติงานในภาคสนาม กระทำในพื้นที่ศึกษาที่ได้คัดเลือกไว้ แบ่งการทำงานออกเป็น 3 ส่วน คือ การติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมของลาดดิน ซึ่งอธิบายถึงรายละเอียดของเครื่องมือวัดพฤติกรรมที่นำมาติดตั้งในสนาม การสำรวจลักษณะของชั้นดินและการเก็บตัวอย่างดิน และการทดสอบพฤติกรรมการไหลซึมในสนาม โดยหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการและขั้นตอนของแต่ละส่วนของการทำงาน ซึ่งผลของการปฏิบัติงานในภาคสนามนั้นจะกล่าวต่อไปในหัวข้อผลและวิจารณ์ หน้า 102 ซึ่งการทำงานของขั้นตอนต่างๆ มีรายละเอียดดังนี้

2.1 การติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมของลาดดิน

เนื่องจากการพิบัติของลาดดิน เกิดจากปริมาณน้ำฝนที่ตกสะสมซึมลงสู่ชั้นดิน ค่าแรงดันน้ำในดินมีค่าสูงขึ้น กำลังรับแรงเฉือนของมวลดินลดน้อยลง ส่งผลให้ค่าความปลอดภัยหรือเสถียรภาพของลาดดินลดลง และเกิดการเคลื่อนตัวของมวลดินในที่สุด ดังนั้น การติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมจึงมีความสำคัญในการเก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อดินถล่มและหาความสัมพันธ์ต่อกัน ได้แก่ เครื่องวัดน้ำฝน (Rain Gauge) เพื่อบันทึกปริมาณน้ำฝนรายวันและน้ำฝนรายนาที่ เครื่องมือวัดศักย์แรงคูดน้ำหรือแรงดันน้ำในดิน (Tensiometer/ Piezometer)

เครื่องวัดมุมเอียง (Inclinometer) เพื่อสังเกตพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวด้านข้างของมวลดิน และ
 บ่อสังเกตการณ์ (Observation Well) เพื่อวัดระดับน้ำใต้ดินที่ด้านดินลาด ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- เครื่องวัดน้ำฝน (Rain Gauge)

เครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดก (Tipping Bucket) ดังรูปที่ 40 ใช้หลักการของแกน
 กระดก โดยมีถ้วยสำหรับรองรับน้ำฝน 2 ส่วน ที่สามารถรองรับน้ำฝนได้ 0.01 นิ้วหรือ 0.25
 มิลลิเมตรต่อการกระดกหนึ่งครั้ง กระดกสลับไปมา และมีหน่วยความจำในการบันทึกข้อมูลน้ำฝน
 เป็นค่าปริมาณน้ำฝนต่อวัน และปริมาณน้ำฝนต่อนาที



ภาพที่ 40 เครื่องวัดน้ำฝน

ที่มา: www.rainwise.com

- เครื่องมือวัดศักย์แรงดันน้ำในดิน (Tensiometer)

เครื่องมือวัดศักย์แรงดันน้ำในดิน (Tensiometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าแรงดัน
 เมตริกของมวลดิน โดยสามารถวัดค่าแรงดันได้ตั้งแต่ 0-90 กิโลปาสคาล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 โดย อภินิติและวิษณุพงษ์ (2551ก.) ได้พัฒนาเครื่องมือ Tensiometer โดยประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์วัด
 แรงดันชนิด Single Silicon Piezoresistive ที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้
 เทคโนโลยีระดับจุลภาค (MEMs technology) เข้ามาใช้เพื่อให้เครื่องมือมีขนาดเล็ก เรียกว่า
 KU-Tensiometer ทั้งนี้สามารถทำหน้าที่เป็นพิโซมิเตอร์ เพื่อวัดแรงดันน้ำด้านบวกได้เช่นกัน ดัง
 ภาพที่ 41ก) และประยุกต์เครื่องวัดความชื้นในดินที่ใช้ในงานเกษตร (อิทธิสุนทร, 2532) ร่วมกับ

เซ็นเซอร์วัดแรงดันชนิดเทคโนโลยีระดับจุลภาค (MEMs) เพื่อให้สามารถอ่านค่าอัตโนมัติแบบต่อเนื่องได้ ดังภาพที่ 41) องค์ประกอบหลักๆ ของ Tensiometer คือ กระจาเปาะเซรามิกหรือแผ่นหินปูน กระจาเปาะน้ำ และเซ็นเซอร์วัดแรงดัน (MEMs) หรือเกจสุญญากาศ หลักการ คือภายใน กระจาเปาะน้ำ Tensiometer จะมีน้ำอยู่เต็มปราศจากอากาศ เมื่อติดตั้งในชั้นดิน น้ำในกระจาเปาะจะปรับตัวจนมีแรงดันน้ำสมดุลกับน้ำในมวลดิน และมีค่าแรงคูดเท่ากับแรงคูดของน้ำในมวลดิน การติดตั้ง Tensiometer โดยใช้สว่านมือ (Hand Auger) เจาะลงไปถึงระดับความลึกที่ต้องการ ติดตั้งปลอก PVC-Casing และนำ KU-Tensiometer ปักลงในดิน ควรให้ Tensiometer สัมผัสแนบกับเม็ดดินได้ดี ทดสอบโดยกดเบาๆ ที่ปลายท่อของ Tensiometer ถ้าโวลต์มิเตอร์มีค่าสูงขึ้น แสดงว่า Tensiometer นั้นสัมผัสกับชั้นดินแล้ว ทำการปกคลุม Casing ด้านบนด้วยซิลิโคนเพื่อป้องกันน้ำที่จะไหลลงสู่ท่อจากด้านบน



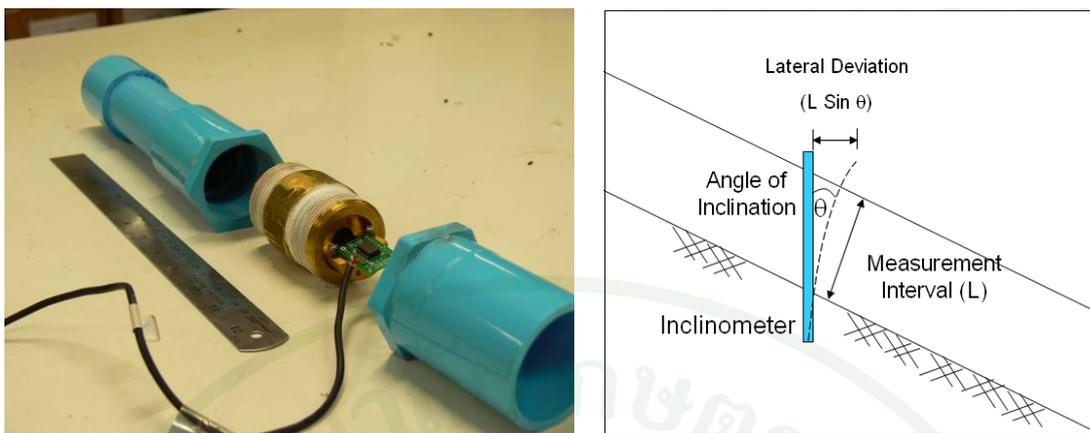
ก)

ข)

ภาพที่ 41 รูปแบบ Tensiometer ที่ใช้ในสนาม

- เครื่องมือวัดมุมเอียง (Inclinometer)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดการเคลื่อนที่ของมวลดินในแนวราบโดยอาศัยการเอียงที่เอียงทำมุมกับแนวตั้งของท่อ PVC ซึ่งฝังลงไปดินจนถึงชั้นหินแข็ง ซึ่งประกอบด้วยเซ็นเซอร์วัดมุมเอียง และตัวท่อ PVC ดังภาพที่ 42 โดยทำการติดตั้งปลายท่อฝังลงในชั้นดินหรือหินแข็ง ดังภาพที่ 43 และวัดการเอียงโดยเซ็นเซอร์ซึ่งติดตั้งกับท่อ PVC โดยจะอ่านค่าการเอียงตัวและส่งสัญญาณออกมาเป็นความดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถนำมาใช้เพื่อการเตือนภัยหากมวลดินเริ่มมีการเคลื่อนตัวและทำการแจ้งเตือนภัยได้ทันท่วงที



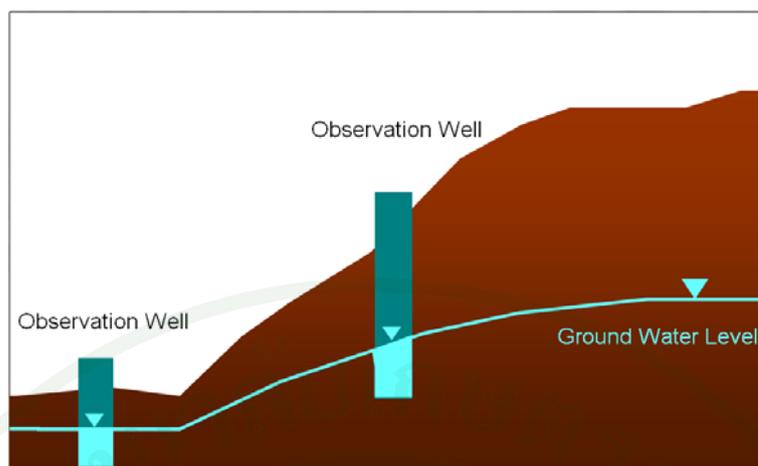
ภาพที่ 42 เครื่องวัดมุมเอียง (KU-Inclinometer)



ภาพที่ 43 การติดตั้งเครื่องวัดมุมเอียง (KU-Inclinometer)

- บ่อสังเกตการณ์ (Observation Well)

บ่อสังเกตการณ์ติดตั้งเพื่อสำรวจความลึกของระดับน้ำใต้ดิน ผลที่ได้จากการวัดสามารถนำมากำหนดขอบเขตระดับน้ำที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลซึมของลาดดินได้ ดังภาพที่ 44



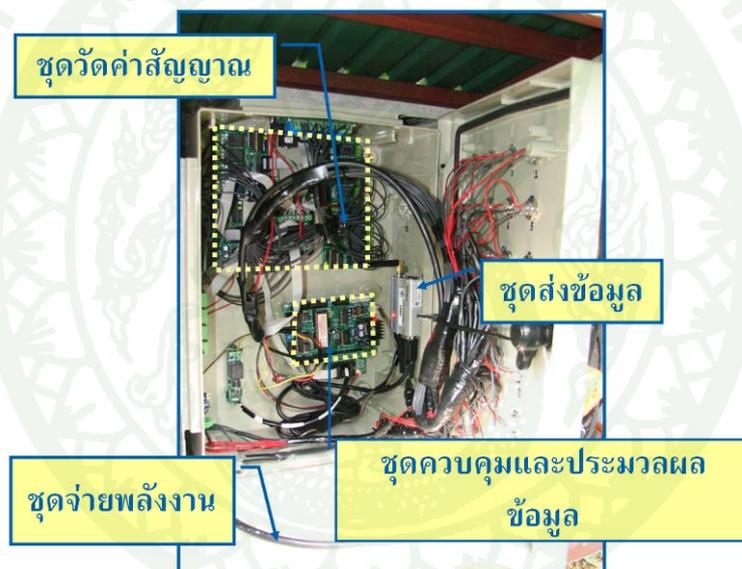
ภาพที่ 44 บ่อสังเกตการณ์ (Observation well)

- อุปกรณ์บันทึกข้อมูล และส่งสัญญาณอัตโนมัติชนิดไร้สาย

การบันทึกข้อมูลตรวจวัดพฤติกรรมดินถล่มในอดีต โดยระบบของภินิณีและวิษณุพงศ์ (2551) เป็นการบันทึกข้อมูลรายวันจากการตรวจวัดเครื่องมือโดยบุคคลากรในพื้นที่ ดังนั้นพฤติกรรมตรวจวัดที่ได้จึงไม่สามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาสั้นๆ เช่น การเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำเนื่องจากปริมาณน้ำฝนที่มีค่ามากขึ้นเพียงช่วง 15-30 นาที ดังนั้นภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยนายวิษณุพงศ์ พอลิละ จึงพัฒนาต่อยอดอุปกรณ์เก็บข้อมูลและส่งสัญญาณอัตโนมัติ ดังภาพที่ 45 เพื่อเก็บข้อมูลจากเครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรม ได้แก่ เครื่องมือวัดมุมเอียง (Inclinometer) และเครื่องมือวัดศักย์แรงดันน้ำในดิน (Tensiometer) ให้ได้ข้อมูลที่ละเอียดมากขึ้น เป็น 30 นาทีต่อ 1 ชุดข้อมูล โดยการส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าด้วยระบบไร้สาย (Wireless) เป็นรูปแบบของข้อความสั้น (SMS) มายังโทรศัพท์มือถือ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะถูกแปลผลต่อไปให้เป็นข้อมูลที่มีหน่วยทางวิศวกรรม



ภาพที่ 45 ตู้อุปกรณ์เก็บข้อมูลและส่งสัญญาณอัตโนมัติ



ภาพที่ 46 องค์ประกอบของอุปกรณ์เก็บข้อมูลและส่งสัญญาณอัตโนมัติ

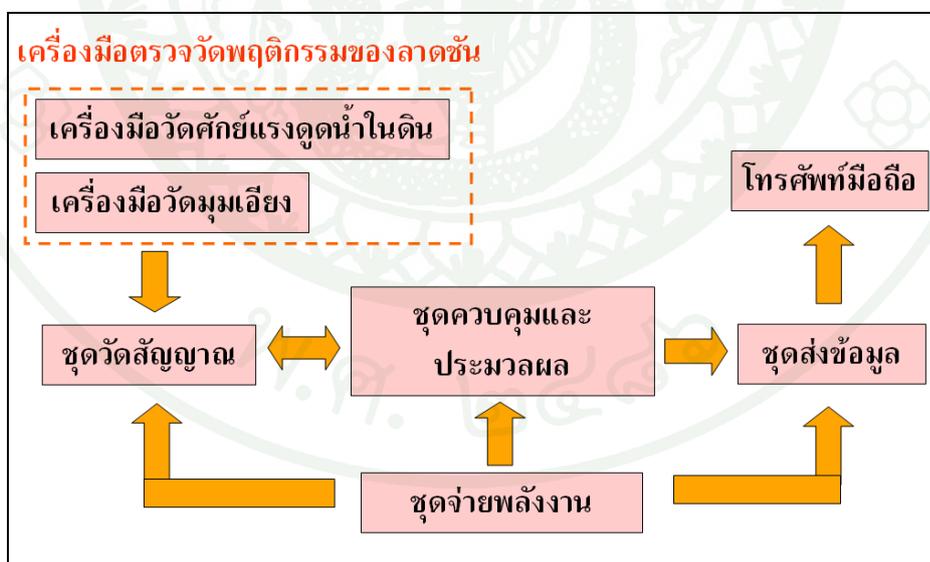
องค์ประกอบของอุปกรณ์เก็บข้อมูลและส่งสัญญาณอัตโนมัติ แบ่งตามลักษณะการทำงานออกเป็น 4 ส่วน ดังภาพที่ 46 และมีลักษณะการทำงาน ดังภาพที่ 47 ดังนี้

1. ชุดจ่ายพลังงาน ระบบนี้ใช้ไฟฟ้า 12V ซึ่งประยุกต์ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าจากไฟฟ้าบ้าน 220V แปลงเป็น 12V DC ในกรณีที่ไฟฟ้าขัดข้องจะทำการจ่ายไฟฟ้าโดยใช้แบตเตอรี่สำรอง

2. ชุดวัดค่าสัญญาณ จะทำการวัดค่าสัญญาณจากเครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรม ได้แก่ ค่าจากเครื่องมือวัดมุมเอียง (Inclinometer) และเครื่องมือวัดศักย์แรงกดในดิน (Tensiometer) ซึ่งมีสัญญาณทั้งหมด 23 ช่องสัญญาณ แบ่งเป็นสัญญาณจากเครื่องมือวัดศักย์แรงกดในดิน 11 ช่องสัญญาณ และสัญญาณจากเครื่องมือวัดมุมเอียง 12 ช่องสัญญาณ

3. ชุดควบคุมและประมวลผล ได้แก่ อุปกรณ์ MCS51 Microcontroller ซึ่งทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงานทั้งหมด ลักษณะการทำงานจะเป็นการอ่านค่าสัญญาณจากชุดวัดสัญญาณ เมื่อถึงช่วงเวลาที่กำหนด ในที่นี้ คือ ทุก 30 นาที และส่งข้อมูลทันที โดยส่งค่าที่วัดได้ 4 ค่าสัญญาณต่อหนึ่งครั้งของการส่งข้อมูลไปยังชุดส่งข้อมูล และเมื่อมีการส่งข้อมูล ชุดควบคุมและประมวลผลจะย้อนกลับไปยังชุดวัดสัญญาณเพื่ออ่านค่าจากชุดวัดสัญญาณที่เหลือ จนกระทั่งครบทั้ง 23 ช่องสัญญาณ

4. ชุดส่งข้อมูล ได้แก่ อุปกรณ์ GSM Module ทำหน้าที่ส่งข้อมูลในรูปแบบของข้อความ โดยใช้เครือข่าย AIS เข้าสู่โทรศัพท์มือถือ ซึ่งการส่งข้อความหนึ่งครั้งจะได้รับ 4 ช่องสัญญาณ ดังนั้นในทุก 30 นาที จะได้รับ 6 ข้อความเข้าสู่โทรศัพท์มือถือ



ภาพที่ 47 ลักษณะการทำงานของอุปกรณ์เก็บข้อมูลและส่งสัญญาณอัตโนมัติ

2.2 การสำรวจลักษณะของชั้นดินและการเก็บตัวอย่าง

- การเปิดหลุมสำรวจและจำแนกชั้นดิน

ทำการสำรวจด้วยวิธีการเปิดหลุมทดสอบ (Test Pit) สำรวจลักษณะของชั้นดิน (Soil Profile) และการจำแนกชนิดดินทางวิศวกรรมปฐพีด้วยสายตา ตามนิยาม Little (1969) วัดความหนาของชั้นดินแต่ละชั้น บันทึกเป็น Soil Logging และบันทึกภาพชั้นดิน

- การเก็บตัวอย่างดินและหินผุ

การเก็บตัวอย่างดินแบ่งเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ ตัวอย่างดินไม่คงสภาพ (Disturbed Sample) เป็นดินที่ใช้เป็นตัวแทนของชั้นดินโดยรวมได้ (Representative Sample) เฉพาะการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Property) ของชั้นดิน และตัวอย่างดินคงสภาพ (Undisturbed Sample) ที่อาจเป็นดินหรือหินผุ โดยเก็บมาสำหรับการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินและการทดสอบคุณสมบัติของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยใช้เครื่องมือเก็บตัวอย่าง KU-Miniature Sampler ซึ่งออกแบบมาสำหรับเก็บตัวอย่างดินและหินในพื้นที่ดินถล่ม โดยเฉพาะ (วารสารและคณะ, 2549) โดยสามารถใช้เครื่องมือนี้กับหินผุที่มีความแข็งไม่มากประเภท Highly Weathered Rock และใช้ได้เป็นอย่างดีกับหินที่มีระดับผุพังมาก (Completely Weathered Rock) และมีดินเหนียวปนอยู่ ชุดอุปกรณ์เก็บตัวอย่างจะประกอบด้วย กระจบอกเก็บตัวอย่าง แกนเหล็กตอกและตุ้มน้ำหนัก โดยกระจบอกเก็บตัวอย่างเป็นทรงกระจบอกเหล็กกล้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว สูง 2 นิ้ว มีค่า Area Ratio 18%

2.3 การทดสอบพฤติกรรมการไหลซึมในสนาม (Infiltration Rate of Soils in Field)

ทำการทดสอบอัตราการไหลซึมในสนามด้วยวิธีการทดสอบ Double-Ring Infiltrometer สำหรับการหาอัตราการไหลที่ผิวดิน และทดสอบ Variable Head Tests สำหรับการหาอัตราการไหลที่ระดับความลึกต่างๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.3.1 การทดสอบการหาอัตราการไหลซึมในสนามด้วยวิธี Double-Ring Infiltrometer

การทดสอบการหาอัตราการไหลซึมในสนามด้วยวิธี Double-Ring Infiltrometer ตามมาตรฐาน ASTM D3385 เพื่อศึกษาอัตราการไหลซึมของดินที่ระดับผิวดิน วิธีการทดสอบนี้ เหมาะสำหรับดินที่มีอัตราการไหลมากกว่า 1×10^{-7} เมตร/วินาที เครื่องมือการทดสอบนี้ประกอบด้วย Infiltrometer Rings ซึ่งเป็นกระบอกโลหะ 2 ขนาด ดังภาพที่ 48ก) ที่ตั้งทนต่อการตอกใช้งานและ ทนต่อการผุกร่อนจากการสัมผัสของไหล ขอบด้านล่างของกระบอกมีลักษณะคม เพื่อให้ง่ายต่อ การตอกลงดิน มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 300 และ 600 มิลลิเมตร ความสูงประมาณ 500 มิลลิเมตร และกระบอกบรรจุน้ำ (Mariotte Tubes) ที่มีขีดวัดปริมาตร 2 กระบอกเพื่อวัดการไหล ผ่านของของเหลวในระหว่างการทดสอบ ควรมีปริมาตรอย่างน้อย 3,000 มิลลิลิตร ดังภาพที่ 48ข) โดยทำการจับเวลาและอ่านปริมาตรน้ำของ Mariotte Tubes ที่ต่อสายยางเข้าสู่กระบอกโลหะขนาด เล็ก เพื่อทราบถึงอัตราการไหลซึมภายใน Infiltrometer Rings ดังภาพที่ 49



ก) Double Ring



ข) Mariotte Bottle

ภาพที่ 48 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาอัตราการไหลซึมในสนาม



ภาพที่ 49 ภาพรวมการทดสอบการหาอัตราการไหลซึมในสนามด้วยวิธี Double-Ring Infiltrometer

2.3.2 การทดสอบการหาอัตราการไหลซึมในสนามด้วยวิธี Variable Head Tests

การทดสอบหาอัตราการไหลซึมในสนามด้วยวิธี Variable Head Tests ค่าความซึมที่ได้เป็นค่าที่มีความละเอียดน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการทดสอบ Double-Ring Infiltrometer แต่เนื่องจากสภาพการทำงานในสนาม เป็นพื้นที่ลาดชัน จึงไม่สามารถทำการขุดบ่อสำรวจ (Test Pit) เพื่อทำการทดสอบ Double-Ring Infiltrometer ในทุกระดับความลึกที่ต้องการได้

การทดสอบหาอัตราการไหลซึมในสนามด้วยวิธี Variable Head Tests ทำภายหลังการติดตั้งและใช้งานเครื่องมือวัดศักย์แรงดันในดินเป็นเวลา 4 เดือน ซึ่งผ่านช่วงฤดูฝนและเข้าสู่ฤดูแล้ง จึงทำการถอนเครื่องมือวัดขึ้นมา เพื่อตรวจสอบสภาพของเครื่องมือวัดดังกล่าว พบว่าเครื่องมือวัดศักย์แรงดันในดินบางตัวกระเปาะน้ำแห้ง เนื่องจากดินในระดับความลึกนั้นมีสภาพแห้งมาก ซึ่งมีค่าแรงดันในดินมากกว่า 90 กิโลปาสกาล และจากเครื่องมือวัดศักย์แรงดันในดินที่ถูกถอนขึ้นมา ซึ่งจะมี Casing ค้างอยู่ และส่วนปลายท่อจะมีหลุมที่เกิดจากการติดตั้งหัวเครื่องมือวัดศักย์แรงดันในดิน ดังนั้นจึงทำการทดสอบ Variable Head Tests ในท่อดังกล่าว ซึ่งลักษณะของ Shape Factor ตรงกับ Shape Factor 5 (Hvorslev, 1951) ทดสอบโดยห่ออนุอุปกรณ์เครื่องวัดแรงดันชนิด Single Silicon Piezoresistive ลงไปที่ก้นหลุมวัดค่าเริ่มต้นดังภาพที่ 50ก) และ 50ข) ห่ออนุเซนเซอร์ลงไปใน Casing จากนั้นเติมน้ำให้เต็ม Casing ดังภาพที่ 50ค) และทำการจับเวลา เพื่อบันทึกค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไป



ภาพที่ 50 ขั้นตอนการทดสอบการหาอัตราการไหลซึมในสนามด้วยวิธี Variable Head Tests

- ก) อุปกรณ์วัดแรงดัน (คลุมผ้าเพื่อป้องกันเศษดินเข้าสู่เซนเซอร์)
- ข) หย่อนอุปกรณ์วัดแรงดันและวัดค่าเริ่มต้น
- ค) เติมน้ำลงใน Casing

3. การปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบดินในห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วย การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ เพื่อหาคุณสมบัติพื้นฐานที่เป็นตัวแทนของลาดดินธรรมชาติ คุณสมบัติด้านกำลังรับแรงเฉือน และคุณสมบัติความอุ้มน้ำของดินที่ไม่อุ้มตัวด้วยน้ำ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

การทดสอบทางกายภาพทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติพื้นฐานของดิน การจำแนกชนิดของดิน ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะเป็นตัวแทนของลาดดินธรรมชาติ โดยมีการทดสอบ ดังนี้

- ทดสอบ จีคจำกัดความขึ้นเหลวของดิน(Atterberg's Limit Test) ตามมาตรฐาน ASTM D4318-98
- ทดสอบ ความถ่วงจำเพาะของดิน(Specific Gravity Test) ตามมาตรฐาน ASTM D854-98
- ทดสอบ การกระจายตัวของเม็ดดิน(Grain Size Distribution Test) ตามมาตรฐาน ASTM D422-63

3.2 คุณสมบัติด้านกำลังรับแรงเฉือน

การประเมินพฤติกรรมด้านกำลังรับแรงเฉือนของดิน ได้เลือกใช้วิธีการทดสอบเฉือนตรง ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของการพิบัติชนิดลาดดินอนันต์ในพื้นที่ โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 แบบตามวัตถุประสงค์ของการทดสอบ คือ การทดสอบหาคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนและหน่วยแรงประสิทธิผลในสภาวะที่ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ คุณสมบัติด้านกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือน หน่วยแรงประสิทธิผล และค่าแรงคอเมทริกซ์ สุดท้ายคือการทดสอบหาคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงเฉือนของดินในสภาวะเปียกสลับแห้ง มีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองสภาพการผุพังของชั้นหินผุเมื่อมีการเปิดหน้าดินเพื่อทำการก่อสร้าง เช่น การตัดถนนผ่านบริเวณภูเขา หรือการขุดเพื่อนำดินไปใช้ประโยชน์ ดังภาพที่ 51 ทำให้ชั้นหินบริเวณนั้นถูกเปิดและได้รับผลกระทบจากสภาพภูมิอากาศ ซึ่งแต่ละการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้



ภาพที่ 51 ชั้นดินหลังจากการเปิดหน้าดิน

ที่มา: ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก

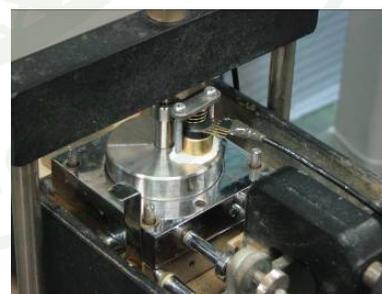
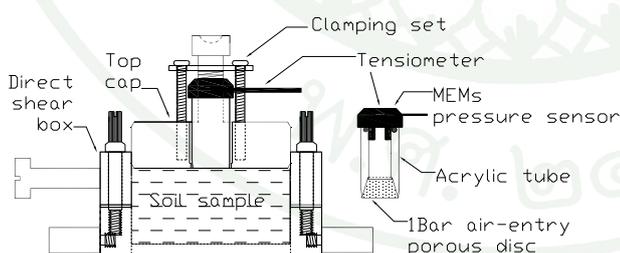
3.2.1 การทดสอบหาคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ

การทดสอบหาลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ทำการทดสอบกับตัวอย่างดินที่เก็บแบบคงสภาพ จากบ่อสำรวจที่ 1 ที่ระดับความลึก 0.9 เมตร และจากบ่อสำรวจ

ที่ 2 ที่ระดับความลึกผิวดิน, 0.3, 0.8, 1 เมตร ในพื้นที่ไม้ผลผสม และตัวอย่างดินที่ระดับผิวดิน ในพื้นที่ป่าไผ่ ด้วยวิธี Multi-Stage Consolidated Drained(Slow) Direct Shear Test ตามมาตรฐาน ASTM D3080-90 ที่มีอัตราการเงื่อนไขตัวอย่างเท่ากับ 0.05 มิลลิเมตร/นาที่ ใช้หน่วยแรงกระทำตั้งฉาก 0.16, 0.32, 0.64 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร (หรือประมาณ 16, 32, 64 กิโลปาสกาล) ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าใกล้เคียงและครอบคลุมน้ำหนักกดทับในสนาม ทำให้ได้พารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนของดิน (c', ϕ')

3.2.2 การทดสอบหาคคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินไม่อิ่มน้ำ ได้เลือกใช้อุปกรณ์เงื่อนไขตรงแบบตัดแปลงร่วมกับ KU-Tensiometer ดังภาพที่ 52 เพื่อสามารถวัดค่าแรงดูดในระหว่างการเงื่อนไขได้ (Jotisankasa and Mairaing, 2010) โดยทำการเงื่อนไขตัวอย่างด้วยวิธี Single-Stage Consolidated Drained(Slow) Direct Shear Test ที่อัตราการเงื่อนไขตัวอย่างเท่ากับ 0.05 มิลลิเมตร/นาที่ และหน่วยแรงตั้งฉาก 16 กิโลปาสกาลหน่วยแรงเดียว เพื่อให้สอดคล้องกับน้ำหนักกดทับจากสภาพจริงในสนาม และทดสอบกับตัวอย่างดินจากบ่อสำรวจที่ 1 ที่ระดับความลึก 0.9 เมตร โดยเปลี่ยนแปลงค่าแรงดูดกับตัวอย่างดินด้วยวิธีพรมน้ำหรือตากตัวอย่างให้แห้งก่อนทดสอบในอุปกรณ์เงื่อนไขตรง ซึ่งช่วงของค่าแรงดูดที่ใช้ในการทดสอบนั้น พิจารณาจากช่วงของค่าแรงดูดที่ตรวจพบในสนาม คือ ที่ค่าแรงดูด 2, 10, 30, 57 กิโลปาสกาล



ภาพที่ 52 อุปกรณ์เงื่อนไขตรงแบบวัดค่าแรงดูดและ KU-Tensiometer

ที่มา: Jotisankasa and Mairaing (2010)

3.2.3 การทดสอบหาคคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงเฉือนของดินในสภาวะเปียกสลับแห้ง

สำหรับการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินในสภาวะเปียกสลับแห้ง ทำการจำลองสภาวะรุนแรงที่สุดของสภาพความชื้นและอุณหภูมิที่มีผลต่อการผุพัง โดยใช้ตัวอย่างดินชั้นหินผุที่ระดับความลึก 1 เมตร นำมาแช่น้ำประมาณ 2-3 วันโดยมีน้ำหนักกดทับ 1 กิโลกรัม เพื่อป้องกันการบวมตัวและฟุ้งกระจายของตัวอย่างดิน จนกระทั่งดินอิ่มตัวด้วยน้ำ จากนั้นนำดินเข้าสู่ตูบที่อุณหภูมิ 105 องศา เป็นเวลา 1 วัน ถือเป็น 1 รอบของการเปียกสลับแห้ง และทำการทดสอบหาลำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำด้วยวิธี Multi-Stage Consolidated Drained (Slow) Direct Shear Test ตามมาตรฐาน ASTM D3080-90 ที่มีอัตราการเฉือนตัวอย่างเท่ากับ 0.05 มิลลิเมตร/นาที ใช้หน่วยแรงกระทำตั้งฉาก 0.16, 0.32, 0.64, 1.28 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร (หรือประมาณ 16, 32, 64, 128 กิโลปาสกาล) ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าใกล้เคียงและครอบคลุมน้ำหนักกดทับในสนาม ทำให้ได้พารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนของดิน (c' , ϕ') ของตัวอย่างดินที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งที่ 2, 5, 10, 20 รอบ

3.3 คุณสมบัติความอุ้มน้ำของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

คุณสมบัติความอุ้มน้ำของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ประกอบด้วย เส้นอรรถลักษณะ (Soil-Water Characteristic Curve) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นโดยปริมาตรของดินกับค่าแรงดูดในดิน และฟังก์ชันสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำ (Hydraulic Conductivity Function) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำกับค่าแรงดูดในดิน ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้มีความสำคัญในการนำไปใช้เพื่อวิเคราะห์แบบจำลองการไหลซึม โดยในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ คือ KU-Tensiometer และอธิบายถึงวิธีการและขั้นตอนการทดสอบเพื่อหาคคุณสมบัติความอุ้มน้ำของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

3.3.1 KU-Tensiometer ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

KU-Tensiometer ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการนั้นจะมี 2 รูปแบบ ดังภาพที่ 53 เพื่อให้เหมาะสมกับการติดตั้งในแต่ละการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งรูปแบบ 53ก) ใช้ในการวัดค่าแรงดูดเมทริกซ์ในการทดสอบหาเส้นอัตราลักษณ์ด้วยวิธี Point-Wise Measurement โดยติดตั้งผ่านทางด้านบนของฝาพีวีซี ค่าแรงดูดเมทริกซ์ที่วัดได้จะเป็นตัวแทนของค่าแรงดูดเมทริกซ์ในมวลดินทั้งก้อน ภายหลังจากการบ่ม ซึ่งมีปริมาณน้ำสม่ำเสมอทั้งตัวอย่างดิน ส่วนรูปแบบ 53ข) ใช้ในการวัดค่าแรงดูดเมทริกซ์ในการทดสอบหาเส้นอัตราลักษณ์ด้วยวิธี Continuous Measurement เหมาะที่จะติดตั้งด้านข้างของตัวอย่างดิน เนื่องจาก Tensiometer มีขนาดเล็กและตัวอย่างดินถูกรบกวนน้อยในขณะที่ติดตั้งเครื่องมือ ซึ่ง KU-Tensiometer ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการนั้นจะมีองค์ประกอบและหลักการทำงานเช่นเดียวกับ KU-Tensiometer ที่ใช้ในสนาม ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น



ภาพที่ 53 รูปแบบ Tensiometer ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

3.3.2 การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติความอุ้มน้ำของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

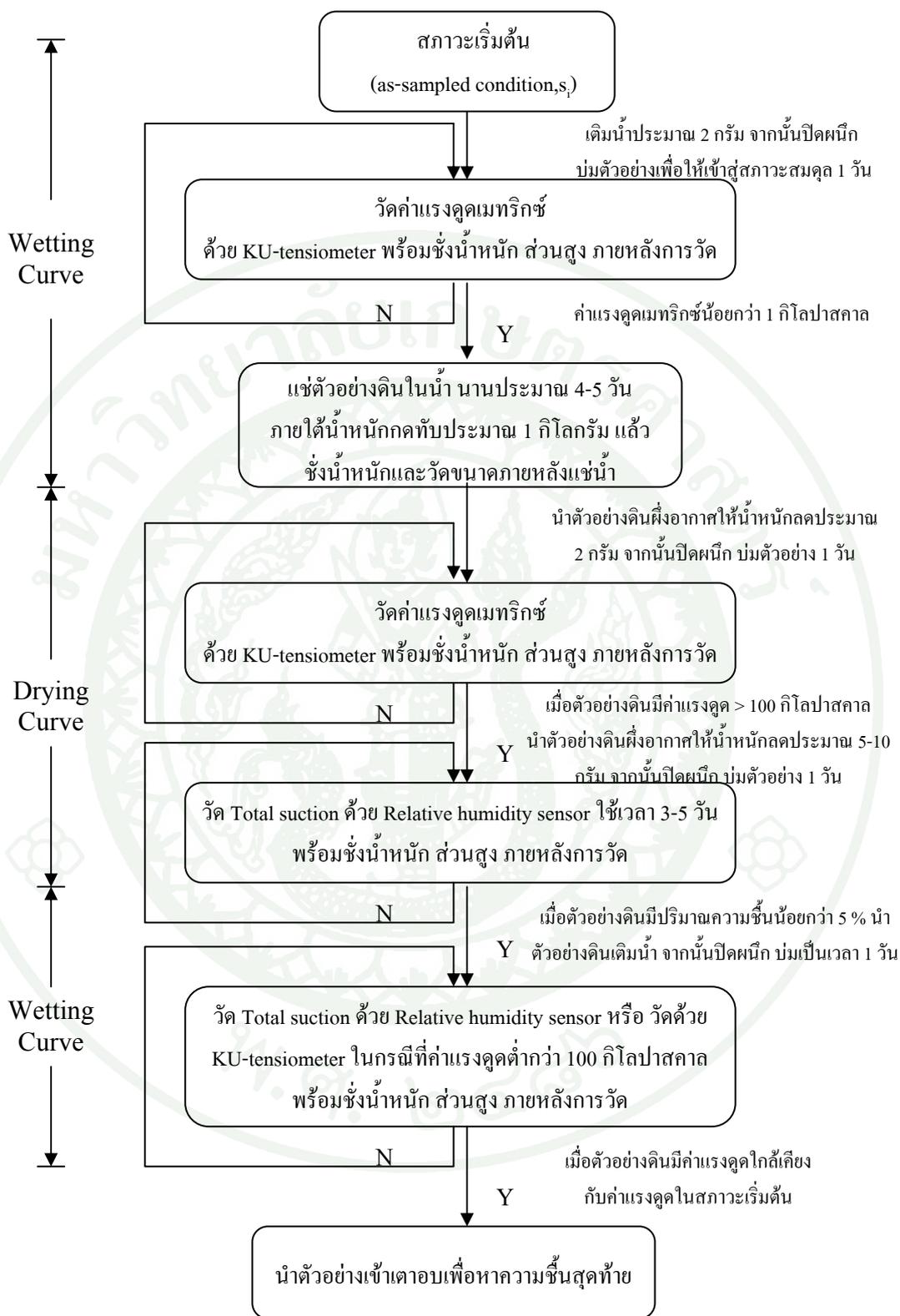
คุณสมบัติความอุ้มน้ำของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ จะประกอบด้วยเส้นอัตราลักษณ์ (Soil-Water Characteristic, SWCC) และฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดิน (Permeability Function) ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวนี้ ได้จากการทดสอบหาเส้นอัตราลักษณ์ของดิน 2 วิธีด้วยกัน ได้แก่ วิธี Point-Wise Measurement คือ การวัดค่าแรงดูดเมทริกซ์ในแต่ละครั้งของตัวอย่างดินภายหลังการ

เปลี่ยนแปลงค่าความชื้น และทำการผึ่งตัวอย่างเพื่อบ่มให้ปริมาณน้ำในดินมีความชื้นสม่ำเสมอ กันทั้งตัวอย่างดิน จากนั้นวัดค่าแรงดูด จนกระทั่งค่าที่วัดได้อยู่ในสภาวะสมดุล และวิธี Continuous Measurement คือ การวัดค่าแรงดูดเมทริกซ์ตลอดเวลาของการทดสอบ ในระหว่างที่ตัวอย่างดินมีการเปลี่ยนแปลงสภาพความชื้น ซึ่งวิธีนี้นอกจากจะสามารถหาเส้นอัตรลักษณ์ได้แล้ว ยังสามารถหาค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินได้อีกด้วย รายละเอียดมีดังนี้

3.3.2.1 การทดสอบหาเส้นอัตรลักษณ์ของดินด้วยวิธี Point-Wise Measurement

การทดสอบหาเส้นอัตรลักษณ์ของดิน ประกอบด้วย เส้นการเปียก (Wetting curve) ทดสอบโดยเพิ่มน้ำให้กับตัวอย่างดินและเส้นการแห้ง (Drying curve) ทดสอบด้วยการนำตัวอย่างดินไปผึ่งแดด ซึ่งจะกระทำตามขั้นตอน ดังภาพที่ 54 เริ่มต้นทำการเตรียมตัวอย่างดินที่เก็บแบบคงสภาพจากสนาม ตัดแต่งให้ผิวหน้าของตัวอย่างดินมีความสม่ำเสมอ เพื่อให้ KU-Tensiometer สามารถสัมผัสกับผิวดิน ได้เป็นอย่างดี และหาค่าความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่างดิน ชั่งน้ำหนัก วัดขนาดและส่วนสูงเริ่มต้น จากนั้นใช้ฐานอลูมิเนียมที่มีน้ำหนักประมาณ 1 กิโลกรัม รองด้านล่างตัวอย่างดิน และครอบด้านบนด้วยฝาพีวีซี ปิดผนึกด้วยเทปพันสายไฟ แล้วบ่มตัวอย่างดินในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 20 °C เป็นเวลา 1 วัน เพื่อให้ตัวอย่างดินเข้าสู่สภาวะสมดุล มีความชื้นสม่ำเสมอทั้งตัวอย่างดิน ค่าแรงดูดเมทริกซ์ที่วัดได้จาก KU-Tensiometer จะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากในขั้นตอนของการวัดค่าและใช้เวลาในการวัดค่าแรงดูดเมทริกซ์ที่เร็วขึ้นด้วยสภาวะนี้ถือเป็นสภาวะเริ่มต้น ภายหลังจากการบ่ม นำตัวอย่างดินมาวัดค่าแรงดูดเมทริกซ์ด้วย KU-Tensiometer โดยติดตั้งเซ็นเซอร์ผ่านช่องด้านบนของฝาพีวีซี ใช้ระยะเวลาในการวัดค่าแรงดูดเมทริกซ์ประมาณ 2-3 ชั่วโมงเป็นอย่างน้อย หรือจนกว่าค่าแรงดูดเมทริกซ์ที่วัดได้มีค่าคงที่ ภายหลังจากการวัดค่าแรงดูดแต่ละครั้งจะต้องทำการวัดขนาด ส่วนสูง และชั่งน้ำหนักตัวอย่างดิน เพื่อให้ทราบการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตัวอย่างดินตลอดการทดสอบ จากนั้นเพิ่มน้ำประมาณ 2 กรัม โดยสเปรย์น้ำกระจายทั่วทั้งหน้าตัดของตัวอย่างดิน ปิดผนึกตัวอย่างดิน ทำการบ่มโดยใช้ระยะเวลา 1 วัน แล้วทำการวัดค่าแรงดูดเมทริกซ์ กระทำซ้ำจนกระทั่งตัวอย่างดินมีค่าแรงดูดเมทริกซ์น้อยกว่า 1 กิโลปาสคาล ซึ่งค่าที่วัดได้ในช่วงนี้ คือค่าของเส้นการเปียกที่ต้องอาศัยการเพิ่มน้ำ จากนั้นนำตัวอย่างดินแช่น้ำ ประมาณ 4-5 วัน ตัวอย่างดินจะอยู่ในสภาวะใกล้อิ่มตัวด้วยน้ำ แล้วจึงชั่งน้ำหนักพร้อมวัดขนาด ส่วนสูง ขั้นตอนหลังจากนี้จะเป็นการวัดค่าในช่วงของเส้นการแห้ง โดยนำตัวอย่างดินผึ่งแดดประมาณ 30 นาที น้ำหนักน้ำในตัวอย่างดินจะลดลงประมาณ 2 กรัม ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของดินแต่ละตัวอย่างดิน นำตัวอย่างดินปิดผนึกแล้วนำไปบ่มใช้ระยะเวลา 1 วัน จากนั้นนำมาวัดค่าแรงดูด

เมทริกซ์ จนกว่าค่าแรงคูดเมทริกซ์ที่วัดได้มีค่าคงที่ กระทำซ้ำจนกระทั่งตัวอย่างดินมีค่าแรงคูดเมทริกซ์มากกว่า 100 กิโลปาสกาล จะเปลี่ยนการใช้ KU-Tensiometer มาใช้เซนเซอร์วัดความชื้นสัมพัทธ์ (Psychrometer) แทน เนื่องจากสามารถวัดค่าแรงคูดได้ในช่วง 500-100,000 กิโลปาสกาลได้ กระทำการลดน้ำหนักของตัวอย่างดิน จนกระทั่งตัวอย่างดินมีค่าความชื้น (w) น้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ จะทำการเพิ่มน้ำให้กับตัวอย่างดิน บ่มและวัดค่าแรงคูด เพื่อให้ได้ค่าของเส้นการเปียกที่ยังขาดหายไป ให้บรรจบกับสถานะเริ่มต้นของการทดสอบ ขั้นตอนสุดท้ายนำตัวอย่างดินเข้าเตาอบเพื่อหาความชื้นสุดท้าย และเปรียบเทียบความชื้น (w) ที่ได้จากการทดสอบกับความชื้นที่ได้จากการคำนวณตลอดทั้งการทดสอบจะมีค่าใกล้เคียงกัน ระยะเวลาต่างๆ ในขั้นตอนของการทดสอบนี้ เหมาะสมกับลักษณะของชนิดดินที่เป็นดินทรายแป้งหรือดินทรายปนดินตะกอน ซึ่งเป็นตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้ สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามชนิดของตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบ จากการทดสอบนี้ จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงคูดกับความชื้น โดยปริมาตรหรือดีกรีความอิ่มตัวด้วยน้ำ คือ เส้นอรรถลักษณะ (Soil-Water Characteristic, SWCC) นั้นเอง



ภาพที่ 54 ขั้นตอนการทดสอบหาเส้นอัตรดักกษณ์ของดิน ด้วยวิธี Point-Wise Measurement

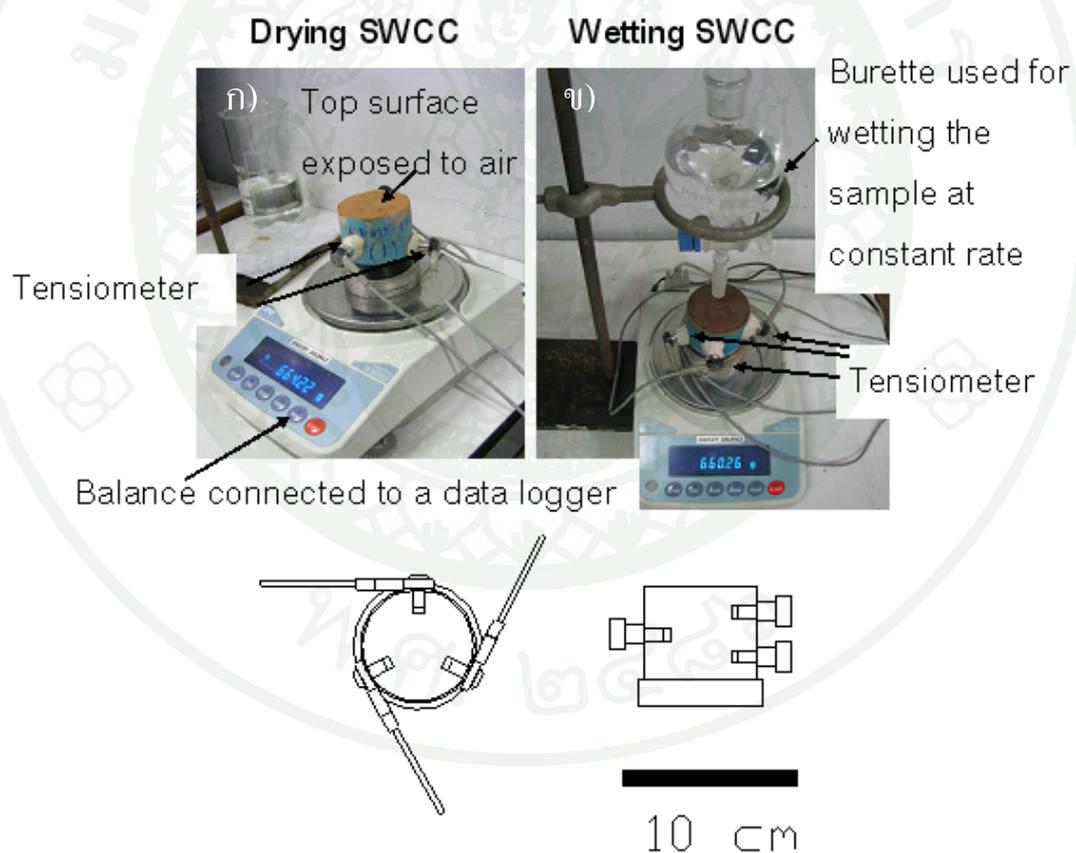
ที่มา: อภินิติ (2550)

3.3.2.2. การทดสอบหาเส้นอัตราลักษณ์ของดินด้วยวิธี Continuous Measurement

เป็นวิธีการทดสอบหาเส้นอัตราลักษณ์ของดินที่กระทำการทดสอบอย่างต่อเนื่อง โดยวัดค่าแรงดูดเมทริกซ์ในระหว่างที่ตัวอย่างดินมีการเปลี่ยนแปลงสภาพความชื้นและบันทึกค่าน้ำหนักตามเวลา ซึ่งการทดสอบหาเส้นการเปียก(Wetting Curve) กระทำโดยเพิ่มน้ำให้กับตัวอย่างดิน จากสภาพเริ่มต้นที่ตัวอย่างดินมีค่าแรงดูดเมทริกซ์ประมาณ 90 กิโลปาสกาล และเส้นการแห้ง (Drying Curve) ทดสอบด้วยการนำตัวอย่างดินปล่อยให้มีการระเหย จากสภาวะเริ่มต้นที่ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ การเตรียมตัวอย่างดินกระทำได้เหมือนกับ การทดสอบหาเส้นอัตราลักษณ์วิธี Point-Wise Measurement ต่างกันที่ด้านบนของตัวอย่างดิน ไม่ต้องครอบด้วยฝาพีวีซี แต่วางกระดาษกรองและแผ่นหินพรุนแทน จากนั้นคว่ำอุปกรณ์ทั้งหมด แช่ลงในน้ำประมาณ 4-5 วัน เพื่อให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยน้ำจะซึมผ่านทางแผ่นหินพรุน และกระดาษกรองทางด้านล่าง ซึ่งมีน้ำหนักกดทับด้านบนของตัวอย่างดินประมาณ 1 กิโลกรัม เพื่อป้องกันการบวมตัวและฟุ้งกระจายของตัวอย่างดิน จากนั้นติดตั้ง KU-Tensiometer จำนวน 3 เซนเซอร์ที่ตำแหน่งบน กลางและล่าง เข้าไปในตัวอย่างดินตามแต่ละระดับความสูง ดังภาพที่ 55ก) แล้ววางลงบนตาชั่งที่สามารถส่งข้อมูลเข้าสู่คอมพิวเตอร์ และเก็บบันทึกค่าได้ ดังนั้นชุดเก็บข้อมูลจะบันทึกการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดูด ค่าน้ำหนัก และเวลา จนกระทั่งค่าแรงดูดที่วัดได้มีค่าอยู่ในช่วง 90-100 กิโลปาสกาล ซึ่งถ้าค่าแรงดูดมีค่ามากกว่านี้จะเกินประสิทธิภาพของ KU-Tensiometer ใช้ระยะเวลาประมาณ 2-3 วัน นำตัวอย่างดินวัดขนาดและความสูงภายหลังการทดสอบ แล้วนำชุดข้อมูลที่ถูกบันทึกไว้มาแปรผล ซึ่งผลจากการระเหยของน้ำออกจากมวลดิน ในขั้นตอนนี้ทำให้ได้ข้อมูลของเส้นการแห้ง ส่วนการทดสอบเพื่อหาเส้นการเปียก กระทำโดยนำตัวอย่างดินเดิมที่มีค่าแรงดูดประมาณ 90-100 กิโลปาสกาล นำไปบ่มใช้เวลาประมาณ 1 วัน เพื่อให้เกิดความสมดุลของความชื้นในตัวอย่างดินและเป็นสภาพเริ่มต้นของกระบวนการเติมน้ำ จากนั้นติดตั้งเซนเซอร์ทั้ง 3 ตำแหน่งเช่นเดิม รอจนกระทั่งค่าแรงดูดที่เซนเซอร์วัดได้เริ่มมีค่าคงที่ ควรมีค่าประมาณ 80-95 กิโลปาสกาลของเซนเซอร์ในแต่ละระดับ ถือเป็นสภาวะสมดุลเริ่มต้นของการทดสอบเส้นการเปียก โดยใช้ระยะเวลาทำให้เกิดสมดุลประมาณ 10 นาที ในระหว่างนี้พยายามปิดผิวหน้าของตัวอย่างดินไว้ เพื่อให้ตัวอย่างดินอยู่ในสภาวะสมดุลและเกิดการระเหยน้อยที่สุด วางตัวอย่างดินที่ติดตั้ง KU-Tensiometer แล้ววางบนตาชั่ง และเริ่มการหยดน้ำจากบิวเรต ชนิดกรวยแยก ดังภาพที่ 55ข) ซึ่งควบคุมความเร็วในการไหลของน้ำในช่วง 0.001-0.014 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งถ้าใช้ความเร็วในการไหลของน้ำช้ากว่านี้ อิทธิพลของการระเหยจะเข้ามามีผลในการทดสอบมากขึ้น เนื่องจากการทดสอบนี้เป็นระบบเปิด ซึ่งไม่สามารถควบคุมการระเหยของน้ำได้

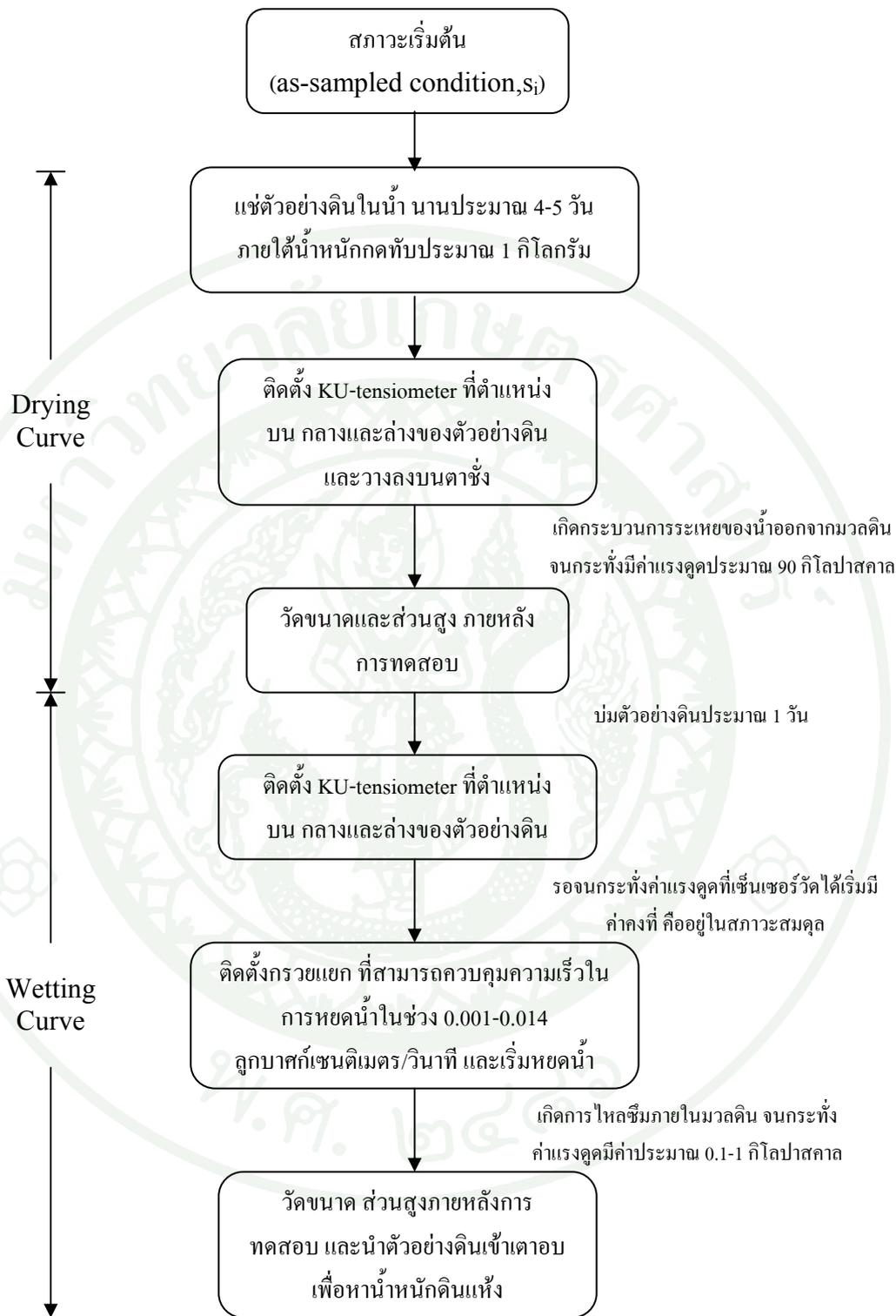
และเก็บบันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่าแรงตึงผิว ค่าน้ำหนัก และเวลา จนกระทั่งค่าแรงตึงผิวที่วัดได้มีค่าประมาณ 0.1-1 กิโลปาสกาล ซึ่งใช้ระยะเวลาอยู่ในช่วง ½ -3 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับการควบคุมความเร็วในการไหลของน้ำ จากนั้นนำตัวอย่างดินวัดขนาด ความสูง และชั่งน้ำหนักตัวอย่างดินภายหลังจากการถอดเซนเซอร์ เพื่อให้ทราบน้ำหนักของเซนเซอร์ขณะติดตั้งอยู่กับตัวอย่างดินนำไปสู่การหาค่าน้ำหนักของตัวอย่างดินในระหว่างการทดสอบ และนำตัวอย่างดินเข้าสู่ตู้อบเพื่อหาน้ำหนักดินแห้ง ซึ่งสามารถสรุปขั้นตอนการทดสอบได้ดังภาพที่ 56

การทดสอบนี้ การเก็บบันทึกข้อมูลของเส้นการแห้งจะเก็บข้อมูลเป็นรายนาที่ แต่สำหรับเส้นการเปียก ซึ่งใช้เวลาในการทดสอบเพียง 30 นาที ควรเก็บบันทึกข้อมูลเป็นรายวินาที เพื่อให้ได้การเปลี่ยนแปลงที่มีความละเอียด



ภาพที่ 55 การติดตั้งเครื่องมือของการทดสอบหาเส้นอัตราลักษณ์ ด้วยวิธี Continuous Measurement

- ก) กระบวนการแห้ง
- ข) กระบวนการเปียก



ภาพที่ 56 ขั้นตอนการทดสอบหาเส้นอัตรัดลักษณะของดิน ด้วยวิธี Continuous Measurement

ผลและวิจารณ์

1. ผลจากการรวบรวมข้อมูลพื้นฐาน

ผลการวิจัยแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ตามการดำเนินการวิจัย ซึ่งประกอบด้วย ตำแหน่งพื้นที่ศึกษาจากการรวบรวมข้อมูลพื้นฐานและการคัดเลือกพื้นที่ กลุ่มของผลการปฏิบัติงานในภาคสนาม ซึ่งอธิบายถึงตำแหน่งของการติดตั้งเครื่องมือและผลการตรวจวัดพฤติกรรมของลาดดิน, การจำแนกชั้นดินด้วยสายตาในสนาม การเก็บตัวอย่างดิน ผลการทดสอบพฤติกรรมการไหลซึมในสนาม และกลุ่มผลการปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติ โดยในแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

ตำแหน่งพื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาตั้งอยู่ในเขตตำบลแม่พูล อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์ ห่างจากน้ำตกแม่พูล ประมาณ 100 เมตร (อยู่บริเวณสะพานห้วยแม่พูล 2) ดังภาพที่ 57 สภาพพื้นที่เป็นหุบเขา อยู่ในตำแหน่งของต้นน้ำ ซึ่งจะเป็นแหล่งกำเนิดของเหตุการณ์การเกิดน้ำท่วม-ดินถล่ม มีความลาดชัน ประมาณ 26 องศา การใช้ประโยชน์พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นสวนผลไม้จำพวกทุเรียน ลางสาด ลองกอง เหนือถัดขึ้นไปบนภูเขาที่มีความลาดชันสูง มีลักษณะของป่าโปร่ง มีไม้พื้นล่างเป็นไม้จำพวกไผ่ พบปะปนกระจายอยู่ทั่วไป ดังภาพที่ 58



ภาพที่ 57 พื้นที่ศึกษบริเวณสะพานห้วยแม่พูล 2 และมีการใช้ประโยชน์พื้นที่เป็นไม้ผลผสมบริเวณเนินเขา



ภาพที่ 58 ภูเขาด้านบนที่มีลักษณะเป็นป่าโปร่งและต้นไม้กระจายอยู่ทั่วบริเวณ

ซึ่งบริเวณพื้นที่ศึกษานี้เป็นพื้นที่ที่เคยได้รับผลกระทบจากการเกิดดินถล่มมาแล้วในอดีตเมื่อเดือนพฤษภาคม 2549 เนื่องจากการพัดพาของตะกอนดินและหินมาทับถมเป็นลักษณะของ Colluvium อยู่บริเวณเนินเขาและร่องรอยการสะสมตัวของชั้นตะกอนยังคงปรากฏให้เห็นอย่างชัดเจน ดังภาพที่ 59

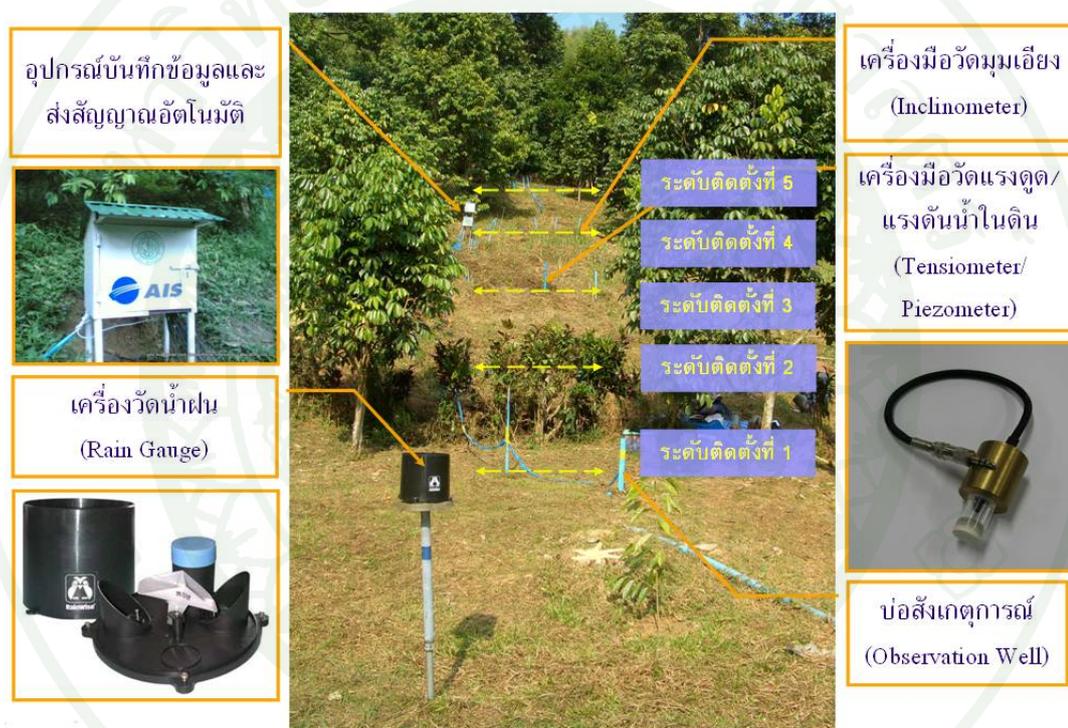


ภาพที่ 59 พื้นที่ศึกษาจากเหตุการณ์การเกิดดินถล่ม ในเดือนพฤษภาคม 2549

2. ผลการปฏิบัติงานในภาคสนาม

ผลการปฏิบัติงานในภาคสนาม แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ตำแหน่งของการติดตั้งเครื่องมือและผลการตรวจวัดพฤติกรรมของลาดดิน ลักษณะของชั้นดินจากการสำรวจบ่อจุดและเก็บตัวอย่างดิน และผลการทดสอบพฤติกรรมการไหลซึมในสนาม

2.1 ตำแหน่งของการติดตั้งเครื่องมือและผลการตรวจวัดพฤติกรรมของลาดดิน

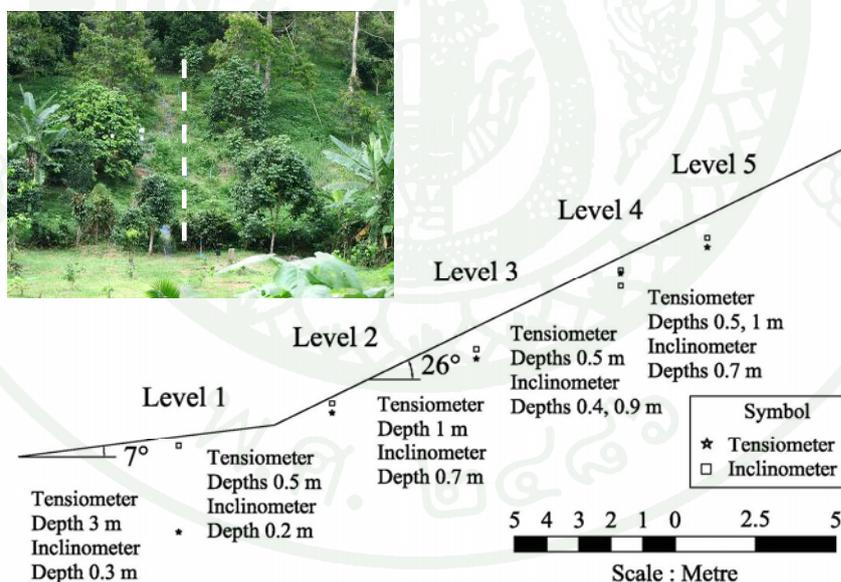


ภาพที่ 60 เครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมของลาดดินเพื่อเก็บข้อมูลในสนาม

2.1.1 ตำแหน่งของการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมของลาดดิน

การติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมลาดดินบริเวณพื้นที่คัดเลือกที่ลาดชันเชิงเขา แบ่งเป็น 5 ระดับด้วยกันตามตำแหน่งบนลาดดิน ดังภาพที่ 60 ซึ่งทุกระดับจะทำการติดตั้งเครื่องมือวัดศักย์แรงดูดน้ำหรือแรงดันน้ำในดิน (Tensiometer/Piezometer) และเครื่องมือวัดมุมเอียง (Inclinometer) ที่ความลึกต่างๆกัน ดังแสดงในภาพที่ 61 โดยบริเวณระดับติดตั้งที่ 1 ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดมุมเอียงที่ปลายท่อฝังลงไปที่ระดับความลึก 0.6 เมตร โดยตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์วัด

มูมเอียงจะอยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของท่อ คืออยู่ที่ระดับความลึก 0.3 เมตร (I1) และเครื่องมือวัดศักย์แรงดันน้ำในดินที่ความลึก 3 เมตร (T1) และติดตั้งบ่อสังเกตการณ์ (OW1) บริเวณระดับติดตั้งที่ 2 ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดมูมเอียงที่ปลายท่อฝังลงไปทีระดับความลึก 0.4 เมตร โดยตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์อยู่ที่ระดับความลึก 0.2 เมตร (I2) และเครื่องมือวัดศักย์แรงดันน้ำในดินที่ความลึก 0.5 เมตร (T2) บริเวณระดับติดตั้งที่ 3 ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดมูมเอียงที่ปลายท่อฝังลงไปทีระดับความลึก 1.4 เมตร โดยตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์อยู่ที่ระดับความลึก 0.7 เมตร (I3) และเครื่องมือวัดศักย์แรงดันน้ำในดินที่ความลึก 1 เมตร (T3) บริเวณระดับติดตั้งที่ 4 ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดมูมเอียงที่ปลายท่อฝังลงไปทีระดับความลึก 0.8, 1.8 เมตร โดยติดตั้งเซนเซอร์ที่ระดับความลึก 0.4, 0.9 เมตร ตามลำดับ (I4) และเครื่องมือวัดศักย์แรงดันน้ำในดินที่ความลึก 0.5 เมตร (T4) บริเวณระดับติดตั้งที่ 5 ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดมูมเอียงที่ปลายท่อฝังลงไปทีระดับความลึก 1.4 เมตร โดยติดตั้งเซนเซอร์ที่ระดับความลึก 0.7 เมตร (I5) เครื่องมือวัดศักย์แรงดันน้ำในดินที่ความลึก 0.5, 1 เมตร (T5) และติดตั้งบ่อสังเกตการณ์ (OW2) เครื่องวัดน้ำฝน (RG) จะติดตั้งบริเวณพื้นที่โล่งด้านหน้าลาดชันที่ทำการศึกษา โดยติดตั้งบนเสาเหล็กที่ระดับความสูง 1 เมตร



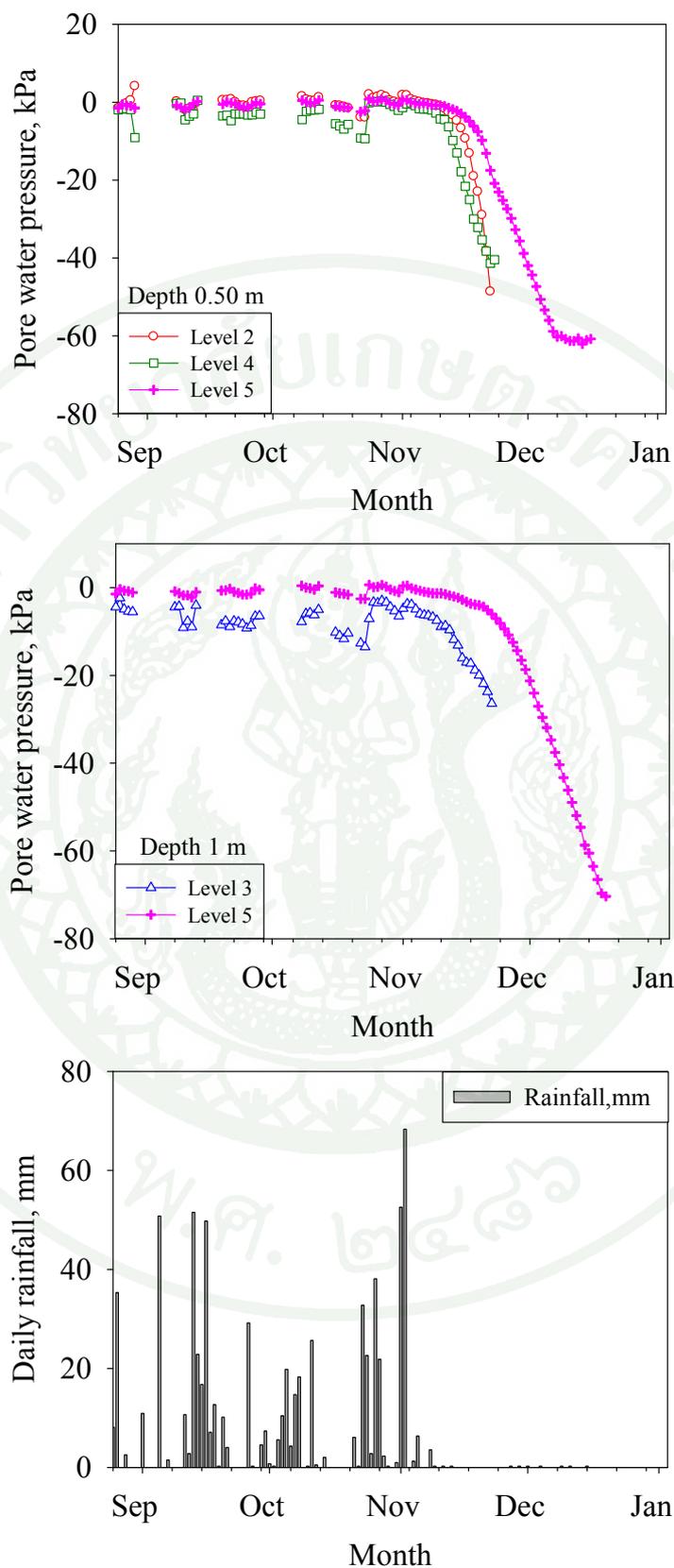
ภาพที่ 61 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมของลาดดินในสนาม

2.1.2 ผลการตรวจวัดพฤติกรรมของลาดดิน

ข้อมูลการตรวจวัดพฤติกรรมของลาดดิน โดยทำการตรวจวัดเป็นเวลา 4 เดือน ตั้งแต่วันที่ 25/8/2008-3/1/2009 ประกอบด้วย ผลการตรวจวัดค่าแรงดันน้ำ และผลการตรวจวัดจากเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัว ดังนี้

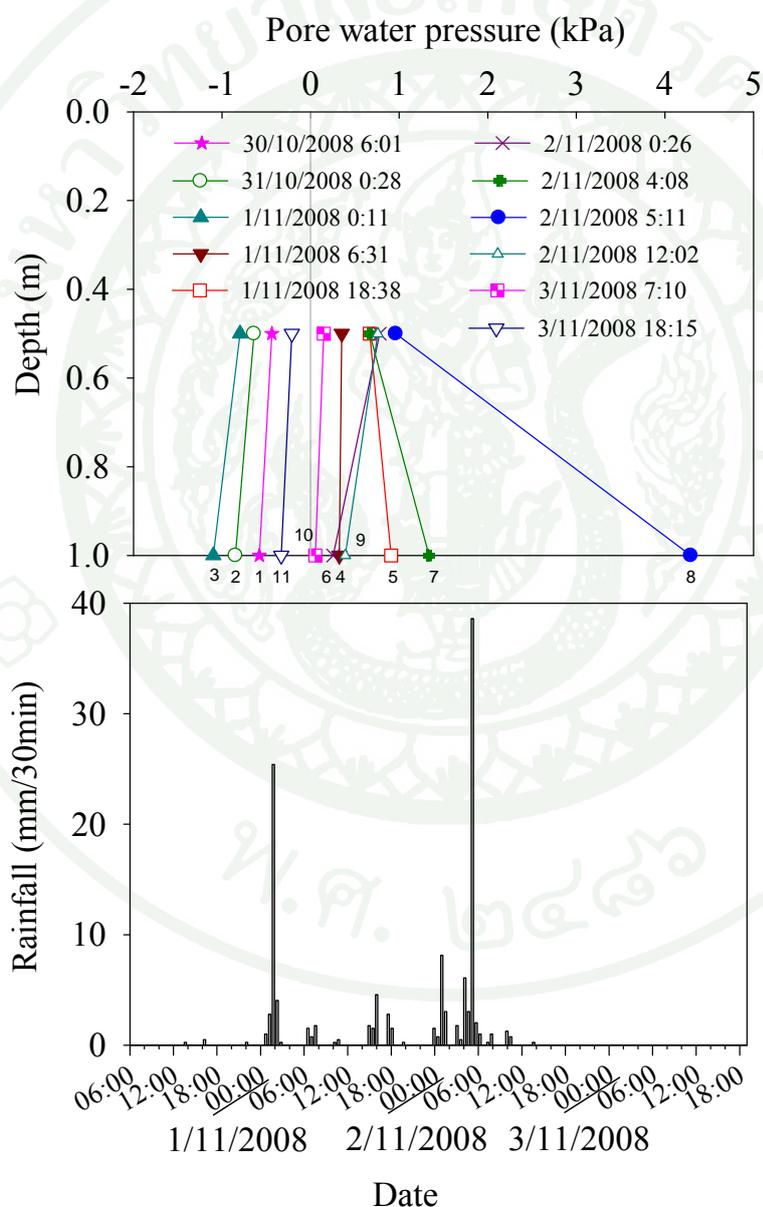
- ผลการตรวจวัดค่าแรงดันน้ำ

การตรวจวัดค่าแรงดันน้ำ พบว่าค่าแรงดันน้ำในลาดดินมีการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณน้ำฝนและระดับความลึกของชั้นดินนั้นๆ ดังภาพที่ 62 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำ คือ เมื่อฝนตก ปริมาณน้ำซึมลงดินมากขึ้น แรงดันน้ำจึงค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งค่าแรงดันน้ำมีค่ามากที่สุดประมาณ 0 กิโลปาสกาลในช่วงที่มีการตกของฝน และจะมีค่าลดลงจนมีค่าเป็นลบคือเกิดเป็นค่าแรงดูดเมทริกขึ้นในช่วงที่ฝนหยุดตกเข้าสู่ฤดูแล้ง



ภาพที่ 62 ผลการตรวจวัดพฤติกรรมของลาดดินในสนาม

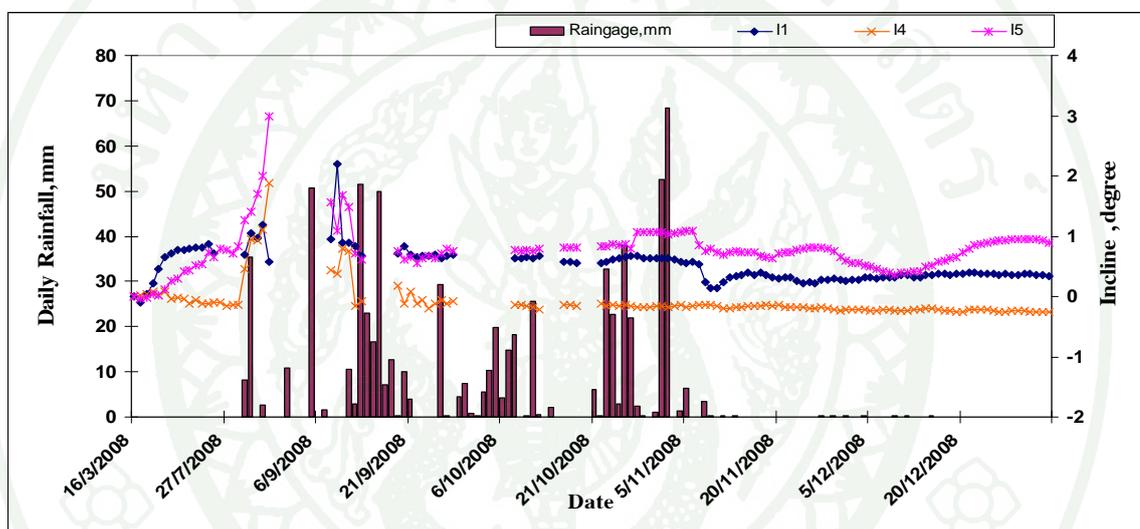
เมื่อพิจารณาค่าแรงดันน้ำตามความลึก ที่ตำแหน่งติดตั้งที่ 5 ในช่วงเวลาที่ความชื้นของน้ำฝนสูงที่สุด ระหว่างวันที่ 1/11/2008-3/11/2008 โดยมีอัตราการความชื้นสูงสุดของฝน 68 มิลลิเมตร/วัน ในวันที่ 2/11/2008 จากภาพที่ 63 พบว่า ค่าแรงดันน้ำตามความลึกเริ่มเปลี่ยนแปลง จากค่าแรงดันน้ำเป็นลบจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจนมีค่าเป็นบวกเท่ากับ 4.292 กิโลปาสคาล ที่ระดับ 1 เมตร ในวันที่ 2/11/2008 เวลา 5:11 ซึ่งมีค่าอัตราการความชื้นน้ำฝน 38.6 มิลลิเมตร/30 นาที ซึ่งค่าแรงดันน้ำนี้ ถือเป็นขอบเขตบนในการเก็บข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดในสนามครั้งนี้



ภาพที่ 63 ค่าแรงดันน้ำตามความลึกที่ระดับติดตั้งที่ 5 ในช่วงเวลาที่ความชื้นของน้ำฝนมีค่าสูงที่สุด

- ผลการตรวจวัดจากเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัว

การเอียงของลาดดินที่วัดได้จากเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัว ดังภาพที่ 64 พบว่าการเอียงมีลักษณะมุมเอียงที่ค่อยๆเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งมีค่ามุมเอียงประมาณ 1 องศา จากกราฟในช่วงวันที่ 7/9/2008-10/9/2008 พบว่าลักษณะค่าของมุมเอียงเพิ่มขึ้นและลดลงกลับมาสู่ค่าเดิม แสดงให้เห็นว่าเมื่อฝนเริ่มตก มวลดินที่เคยอยู่อย่างหลวมๆ รอบเครื่องมือวัดมุมเอียง เคลื่อนเข้าหา Casing ทำให้รอบๆบริเวณเครื่องมือวัดมุมเอียงแน่นขึ้น และกลับมาสู่ค่าเดิม และยังไม่มีอาการบ่งชี้ว่ามวลดินมีการเคลื่อนตัวลงมาอย่างเด่นชัด



ภาพที่ 64 การเอียงของลาดดินและปริมาณน้ำฝน

2.2 ลักษณะของชั้นดินจากการสำรวจบ่อขุดและเก็บตัวอย่างดิน



ภาพที่ 65 ตำแหน่งบ่อขุดสำรวจที่ 1 และ 2

การสำรวจลักษณะชั้นดินของพื้นที่ศึกษา ทำการขุดบ่อสำรวจ (Test Pit) ใน 2 พื้นที่ คือ บริเวณไม้ผลผสม และป่าไผ่ เพื่อเป็นตัวแทนลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินที่พบมากใน ตำบลแม่พูล อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์ โดยพื้นที่ไม้ผลผสมเป็นที่ลาดเชิงเขา มีความชันประมาณ 26 องศา ซึ่งเป็นบริเวณเดียวกับบริเวณของการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมของลาดดิน ถัดลงมา มีการสะสมตัวของตะกอน Colluvium บริเวณตีนเขา มีความลาดชันประมาณ 7 องศา และการขุดบ่อสำรวจในพื้นที่นี้ ทำการขุด 2 ตำแหน่ง แสดงตำแหน่งบ่อสำรวจที่ 1 และ 2 ดังภาพที่ 65

รายละเอียดของชั้นดินตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงชั้นดินตามลักษณะเนื้อดินและสี (Little, 1969) ดังภาพที่ 66 จากบ่อสำรวจที่ 1 พบว่า ชั้นผิวดิน (Top Soil) มีความหนาประมาณ 0.05 เมตร มีรากพืชจำพวกหญ้าปกคลุม ดินมีสีน้ำตาลเข้ม ในชั้นถัดลงมาเป็นชั้นดินที่ผูกพันอยู่กับที่ (Residual Soil) มีความหนาประมาณ 0.25 เมตร ชั้นดินมีสีเหลืองและมีรากไม้แทรกอยู่บ้าง และชั้นดินที่ลึกลงไปจาก 0.30 เมตร เป็นชั้นหินผูกพันอย่างสมบูรณ์ ที่มีระดับความผูกพันอยู่ที่ระดับ 5 ซึ่งชั้นดินมีลักษณะเนื้อดินที่ยังคงแสดงให้เห็น โครงสร้างเดิมของหินต้นกำเนิดและมีหินที่ยังผูกพันไม่สมบูรณ์ปนอยู่บ้าง สำหรับการตอกเก็บตัวอย่างทำการเก็บตัวอย่างในชั้นดินที่เป็นรอยต่อระหว่างชั้นหินระดับ 5 กับ

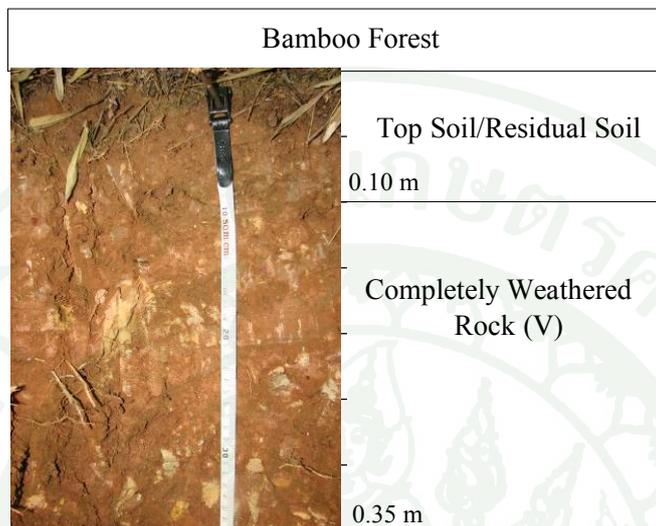
ชั้นหินผุระดับ 4 ที่ระดับความลึก 0.9 เมตร และบ่อสำรวจที่ 2 ทำการขุดจนถึงระดับความลึกประมาณ 1.5 เมตร ได้แก่ ชั้นผิวดิน(Top Soil) ที่ระดับผิวดินจนถึงระดับความลึก 0.20 เมตร ลักษณะดินมีสีน้ำตาลเข้ม เนื่องจากมีสารอินทรีย์ในดินมาก มีรากพืช และรูพรุนมากกว่าที่ความลึกอื่นๆ ถัดมาเป็นชั้นดินที่ผุพังอยู่กับที่ (Residual Soil) ซึ่งเกิดจากหินที่ผุพังอย่างสมบูรณ์ ระดับความลึกตั้งแต่ 0.20-0.45 เมตร ดินมีลักษณะเป็นทรายแป้ง มีสีน้ำตาลอ่อน ไม่พบโครงสร้างหินเดิมที่ชัดเจน และชั้นหินผุพังอย่างสมบูรณ์ (Completely Weathered Rock) ตั้งแต่ระดับความลึก 0.45-1 เมตร พบว่า ประกอบด้วยหินโคลนและหินดินดาน ชั้นดินมีสีน้ำตาลอ่อนกว่าชั้นดินข้างบน จึงทำการเก็บตัวอย่างที่ระดับผิวดิน, 0.3, 0.8 และ 1 เมตร ตามลำดับ เพื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติตามลักษณะชั้นดิน

Test Pit 1		Test Pit 2	
	0.05 m Top Soil		0.00 - 0.20 m 0.20 m Top Soil
	Residual Soil (VI)		0.20 - 0.45 m Residual Soil (VI)
	0.30 m		0.45 m
	Completely		0.45 - 0.90 m Completely
	Weathered Rock (V)		0.90 - 1.00 m Weathered Rock (V)
	0.90 m		1.00 m
Highly	1.00 - 1.50 m Highly		
Weathered Rock (IV)	1.50 m	Weathered Rock (IV)	
1.50 m		1.50 m	

ภาพที่ 66 บ่อขุดสำรวจ (Test Pit) และการแบ่งลักษณะชั้นดินในสนาม นิยาม โดย Little (1969) ในพื้นที่ไม่ผลผสม

และบริเวณป่าไผ่ ซึ่งอยู่บริเวณภูเขาถัดขึ้นไปจากพื้นที่ไม่ผลผสม ทำการขุดสำรวจลักษณะชั้นดินในระดับตื้น เพื่อพิจารณาลักษณะของหน้าดินในพื้นที่ป่าไผ่ ดังภาพที่ 67 พบชั้นผิวดินและชั้นดินที่ผุพังอยู่กับที่ มีความหนาของชั้นดินบางประมาณ 0.10 เมตร และพบชั้นหินผุพังอย่างสมบูรณ์ (Completely Weathered Rock) ในระดับตื้นกว่าในพื้นที่ไม่ผลผสม ซึ่งเริ่มพบที่ระดับความลึก 0.10 เมตร โดยพบโครงสร้างเดิมของหินต้นกำเนิดคือ หิน โคลนและหินดินดาน

และมีหินที่ยังผุพังไม่สมบูรณ์ปนอยู่บ้าง และเก็บตัวอย่างที่ระดับผิวดิน เพื่อนำไปทดสอบถึง ความอุ้มน้ำในมวลดิน และคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงเฉือน

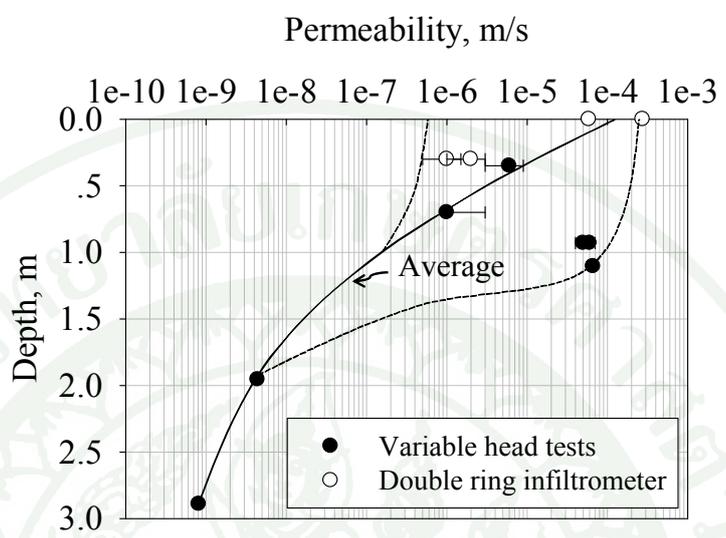


ภาพที่ 67 บ่อขุดสำรวจ (Test Pit) และการแบ่งลักษณะชั้นดินในสนาม นิยาม โดย Little (1969) ในพื้นที่ป่าไผ่

2.3. ผลการทดสอบพฤติกรรมการไหลซึมในสนาม

จากผลการทดสอบการไหลซึมในสนามด้วยวิธีการทดสอบ Double-Ring Infiltrometer เพื่อหาอัตราการไหลซึมที่ผิวดิน และทดสอบ Variable Head Tests (Borehole Test) เพื่อหาอัตราการไหลซึมที่ระดับความลึกต่างๆ ซึ่งผลการทดสอบพฤติกรรมการไหลซึมในสนามแสดงดังภาพที่ 68 พบว่า ช่วงระดับความลึกที่ 0.25-1.20 เมตร ค่าความชื้นน้ำอยู่ในช่วงที่กว้าง จึงแบ่งการพิจารณาออกเป็น 3 เส้น ได้แก่ เส้นขอบเขตล่าง เส้นค่าเฉลี่ย และเส้นขอบเขตบน เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ในแบบจำลองการไหลซึมต่อไป และจากการทดสอบดังกล่าว พบว่าที่อัตราการไหลซึมที่ผิวดินจะมีค่ามากและลดลงตามความลึก โดยที่ความลึกประมาณ 3 เมตร จะมีค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมน้อยกว่าค่าบริเวณผิวดินถึง 1,000 ถึง 100,000 เท่า ทั้งนี้ลักษณะการลดลงของสัมประสิทธิ์การไหลซึมลงตามความลึกนี้ ได้มีนักวิจัยจากนานาประเทศอาทิ Vaughan (1985) และ Jotisankasa et al. (2008) พบว่าเป็นลักษณะที่ก่อให้เกิดระดับน้ำใต้ดินเสมือน (Perched water

table) หรือ แรงดันน้ำด้านบวกขึ้นได้ อันเป็นตัวการทำให้ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลและกำลังเฉือนลดลงบริเวณรอยต่อระหว่างดินและหินนั่นเอง



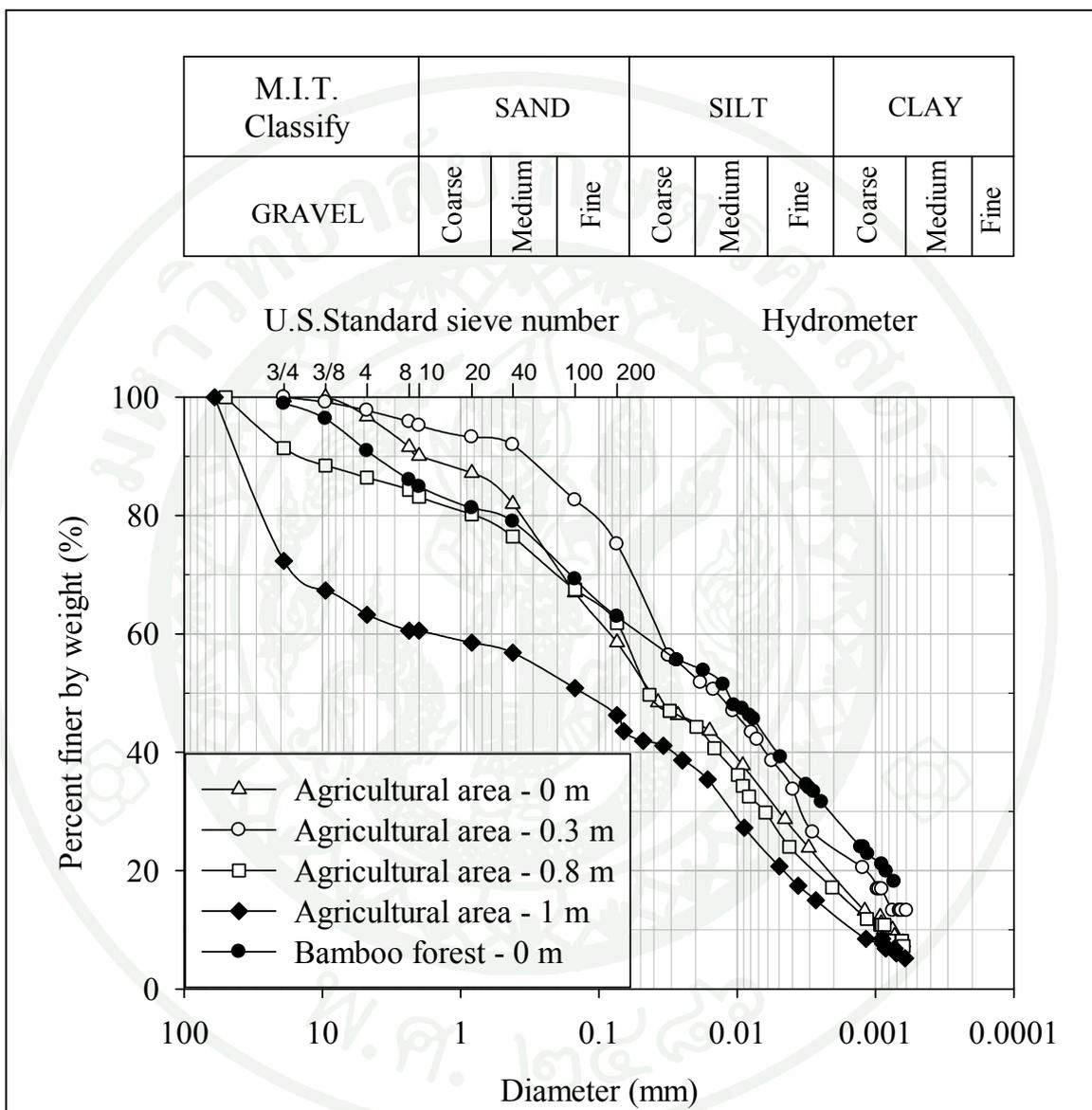
ภาพที่ 68 พฤติกรรมการไหลซึมในสนาม

3. ผลการปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการ

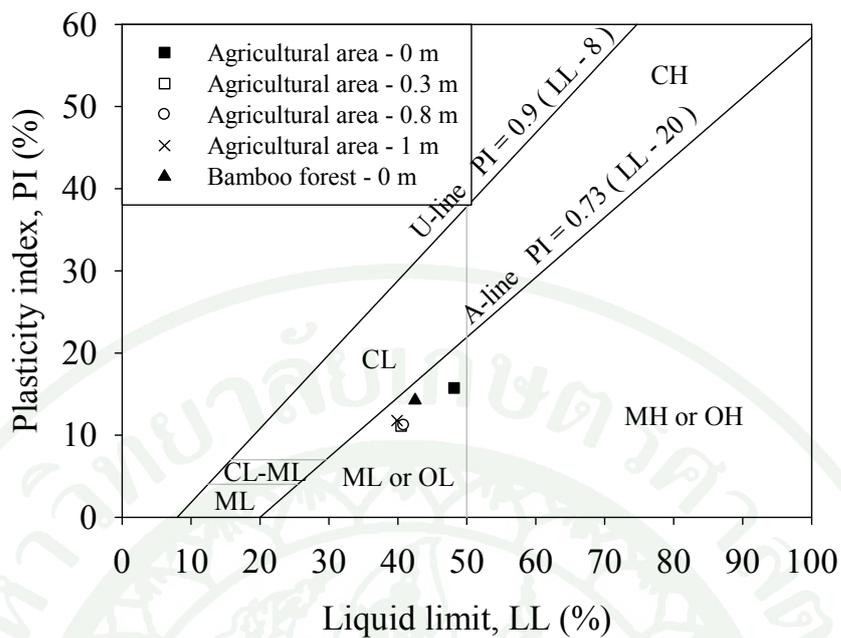
3.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดิน

จากผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างดินแปรสภาพ (Disturbed Sample) บริเวณพื้นที่ไม่ผลผสม จากบ่อสำรวจที่ 2 สามารถจำแนกประเภทของดินตามระบบ Unified Soil Classification โดยพิจารณาจากผลการทดสอบการกระจายขนาดของเม็ดดิน (Grain Size Distribution Curve) และ Plasticity Chart ดังภาพที่ 69 และ 70 ตามลำดับ พบว่า ชั้นดินเม็ดละเอียดตั้งแต่ระดับผิวดินจนถึงความลึก 0.9 เมตร สามารถจำแนกประเภทของดินได้เป็นดินทรายแป้งที่มีค่าความเหนียวต่ำ (ML) และดินเม็ดหยาบในระดับความลึก 0.9-1.5 เมตร ซึ่งจำแนกได้เป็นดินทรายที่มีตะกอนทรายปน (SM) มีเปอร์เซ็นต์ของกรวด (Gravel) มากที่สุด คือร้อยละ 39.45 เมื่อพิจารณาค่า Plastic Index (P.I.) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงให้เห็นถึงความเหนียวของดิน พบว่าระดับผิวดินมีค่าพลาสติกชี้ตัวมากที่สุด และมีอัตราส่วนช่องว่างมากที่สุดเช่นกัน โดยมีผลการทดสอบสรุปได้ดังภาพที่ 71 สำหรับตัวอย่างดินที่เก็บแบบแปรสภาพ ที่ระดับผิวดินในพื้นที่ป่าไผ่ สามารถจำแนกประเภทของดินได้เป็นดินทรายแป้งที่มีค่าความเหนียวต่ำ (ML) ซึ่งค่า Plasticity Index (P.I.) มีค่า

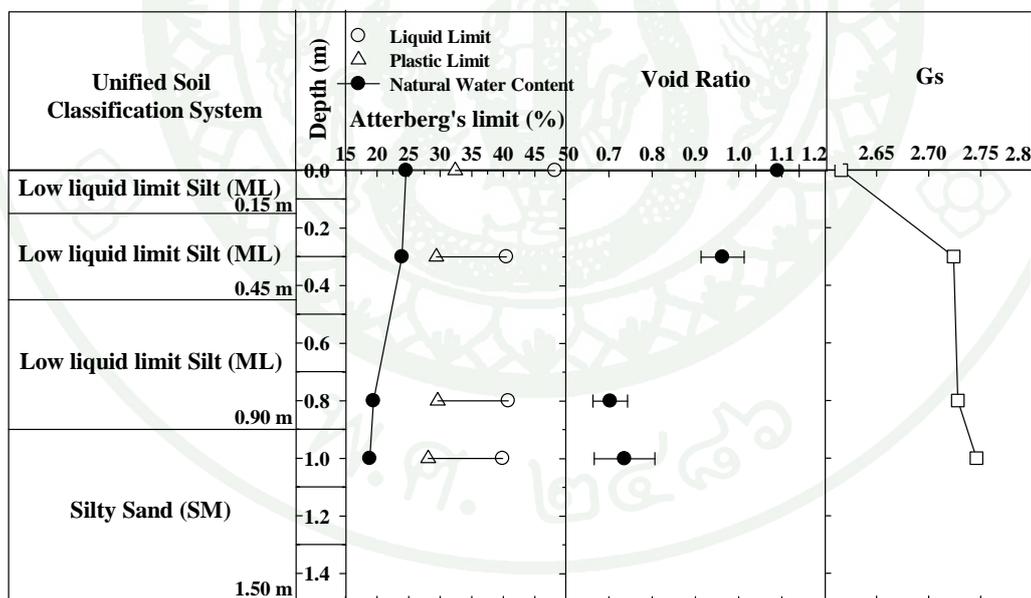
ใกล้เคียงกับตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม คือมีค่าพิกัดพลาสติก(PL) พิกัดเหลว(LL) และ Plastic Index เท่ากับ 28.27, 42.5, 14.23 ตามลำดับ



ภาพที่ 69 ผลการทดสอบการกระจายขนาดของเม็ดดิน



ภาพที่ 70 Plasticity Chart



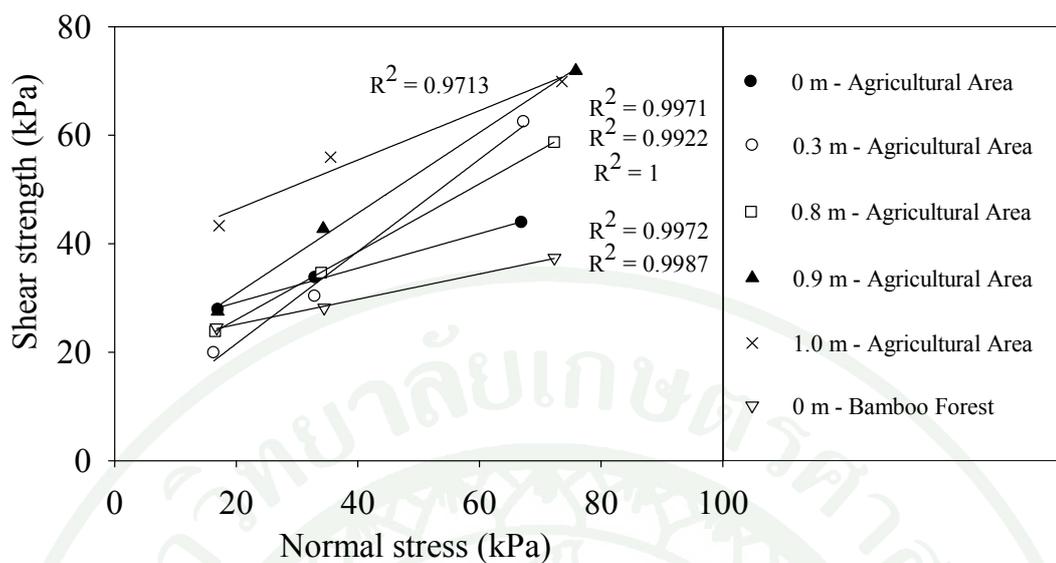
ภาพที่ 71 คุณสมบัติพื้นฐานของดิน

3.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงเฉือน

ในหัวข้อนี้จะแสดงผลการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินทั้งสถานะอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ อีกทั้งคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงเฉือนของดินในสถานะเปียกสลับแห้ง ซึ่งเป็นการจำลองสภาพการผุพังของชั้นดิน และสุดท้ายประเมินเสถียรภาพของลาดดินเมื่อพิจารณาสภาพการผุพังของลาดดินร่วมด้วย ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

3.2.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงเฉือนของดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ

จากผลการทดสอบการเฉือนตรงของดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำแบบ Multi-Stage Consolidated Drained (Slow) Direct Shear Test ที่หน่วยแรงกระทำตั้งฉากประมาณ 16, 32, 64 กิโลปาสคาล ดังภาพที่ 72 พบว่า ค่ากำลังของดินที่ระดับความลึก 1 เมตรในพื้นที่ไม่ผลผสมมีค่ากำลังรับแรงเฉือนมากที่สุด เนื่องมาจากชั้นดินระดับนี้มีลักษณะเป็นหินผุ ซึ่งมีค่าความเชื่อมประสาน (Cementation) ระหว่างเม็ดดินอยู่สูง ดังตารางที่ 5 และที่ระดับผิวดินของพื้นที่ไม่ผลผสมและป่าไผ่มีค่าความเชื่อมแน่นรองลงมา เนื่องจากผิวดินมีรากไม้ช่วยยึดเกาะผิวดินไว้ เมื่อพิจารณา กำลังรับแรงเฉือนของทุกระดับความลึก พบว่า ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ระดับความลึก 0.3 เมตรมีค่าน้อยที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบการใช้ประโยชน์ที่ดินต่างกัน ได้แก่ พื้นที่ไม่ผลผสมและพื้นที่ป่าไผ่ จากผลการทดสอบของตัวอย่างดินที่ระดับผิวดินของทั้งสองบริเวณ พบว่าพื้นที่ป่าไผ่มีค่ากำลังรับแรงเฉือนต่ำกว่าตัวอย่างดินในพื้นที่ไม่ผลผสม เนื่องจากลักษณะของรากต้นไม้ที่มีลักษณะเป็นรากฝอยจำนวนมาก ทำให้ดินมีความพรุนสูงกว่าในพื้นที่ไม่ผลผสม ดังภาพที่ 73 ซึ่งตรงกับค่าความพรุนที่พิจารณาจากตัวอย่างดินที่เก็บแบบคงสภาพของพื้นที่ป่าไผ่และพื้นที่ไม่ผลผสม ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.569, 0.521 ตามลำดับ



ภาพที่ 72 เส้นการพิบัติของตัวอย่างดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ

ตารางที่ 5 พารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือน

ประโยชน์การใช้พื้นที่	ความลึก (เมตร)	พารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือน		
		c' (กิโลปาสกาล)	ϕ' (องศา)	ϕ^b (องศา)
สวนไม้ผลผสม	0	22.81	17.62	-
	0.3	4.55	40.39	-
	0.8	7.62	47.53	-
	0.9	13.68	32.05	27.72
	1.0	37.24	24.47	-
ป่าไผ่	0	20.45	13.11	-

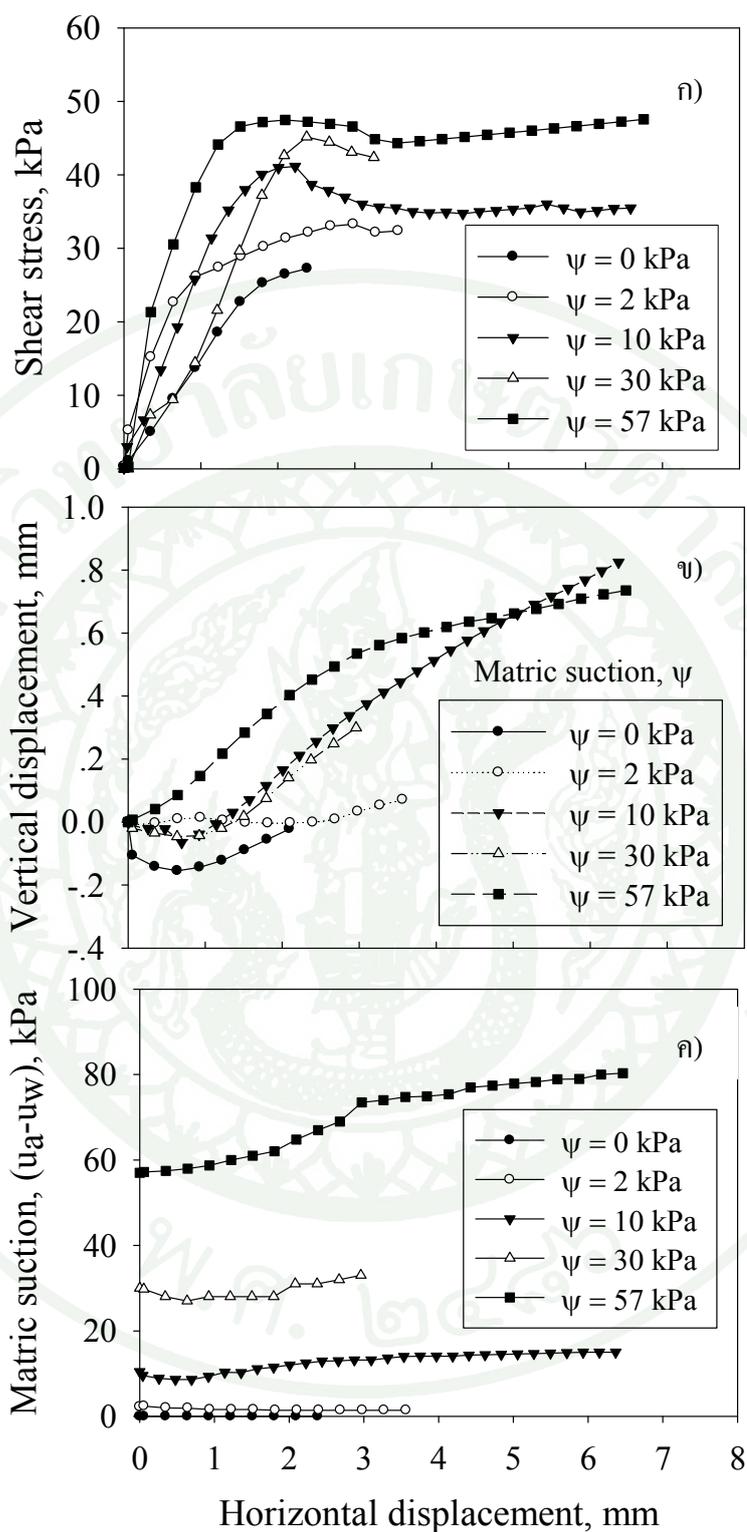
หมายเหตุ 1 ksc = 100 kPa



ภาพที่ 73 ลักษณะของรากต้นไม้

3.2.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

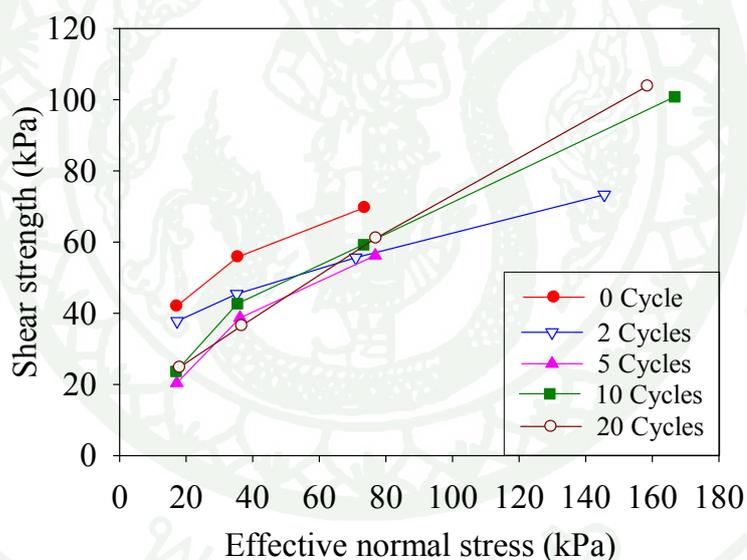
จากผลการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ จะได้ความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือน ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลและค่าแรงคูมเมตริกซ์ที่ 0, 2, 10, 30, 57 กิโลปาสกาล พบว่า ตัวอย่างดินที่มีค่าแรงคูมเมตริกซ์มาก จะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินมีค่ามากเช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 74ก) โดยช่วงแรกเมื่อเริ่มการเฉือนตัวอย่างดิน จะทรุดตัวลงก่อน โดยค่าแรงคูมเมตริกซ์จะลดลงเล็กน้อย จากนั้นตัวอย่างดินจะเริ่มขยายมากขึ้น และค่าแรงคูมเมตริกซ์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อตัวอย่างดินเฉือนผ่านช่วงค่ากำลังสูงสุด ดังภาพที่ 74ข) และ 74ค) ซึ่งได้พารามิเตอร์มุมเฉือนกำลังของดินไม่อิ่มน้ำ (ϕ^b) เท่ากับ 27.72° ดังตารางที่ 5



ภาพที่ 74 พฤติกรรมรับแรงเฉือนของตัวอย่างดิน ที่ระดับความลึก 0.9 เมตร ที่ค่าแรงดูดต่างๆ ในการทดสอบการเฉือนตรงแบบวัดค่าแรงดูด ที่หน่วยแรงกระทำตั้งฉาก 16 กิโลปาสกาล

3.2.3 ผลการทดสอบหาคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงเฉือนของดินในสภาวะเปียกสลับแห้ง

การทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงเฉือนของดินในสภาวะเปียกสลับแห้ง จำนวน 2, 5, 10, 20 รอบ โดยเปรียบเทียบผลการทดสอบการเฉือนตรงกับตัวอย่างดินที่ไม่ถูกรบกวน (0 Cycle) จากภาพที่ 75 พบว่า เมื่อตัวอย่างดินผ่านการเปียกสลับแห้ง จะส่งผลให้ค่าความเชื่อมั่นของดินลดลง และเมื่อเพิ่มจำนวนรอบของการเปียกสลับแห้ง เป็น 5, 10, 20 รอบ พบว่า ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินจะมีลักษณะคล้ายกับค่ากำลังรับแรงเฉือนคงค้าง (Residual Strength) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อจำนวนรอบของการเปียกสลับแห้งเพิ่มขึ้น โดยค่าความเชื่อมั่นที่ลดลงนั้น มีค่าลดลงถึง 60 เปอร์เซ็นต์ แสดงค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 6 จากการทดสอบดังกล่าวจึงสามารถสรุปได้ว่า การผุพังของหินผุส่งผลให้ค่าความเชื่อมั่นลดลง



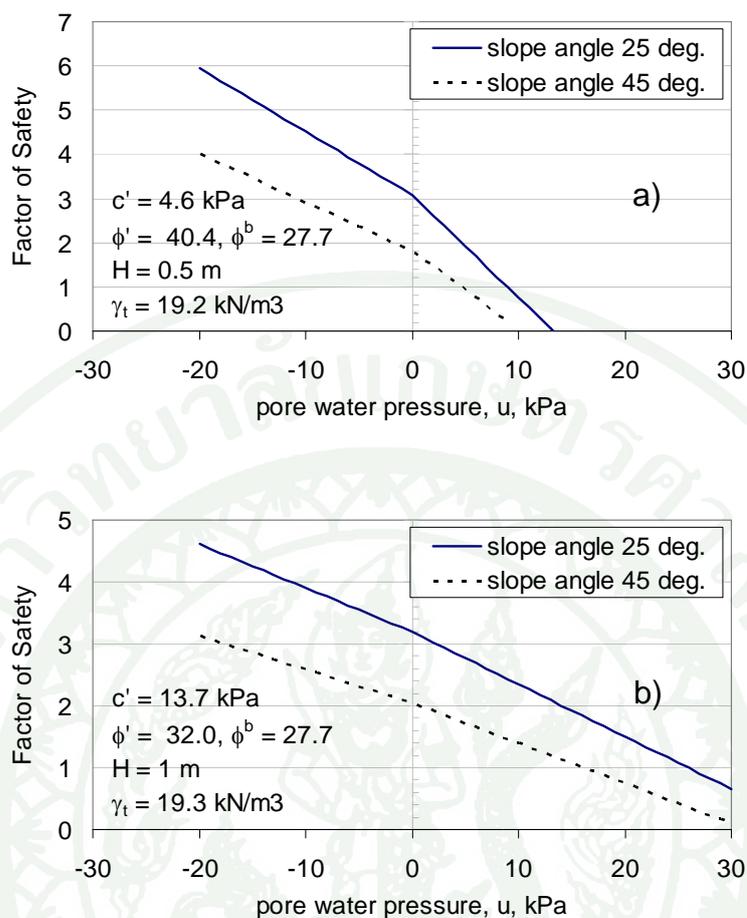
ภาพที่ 75 ผลการทดสอบการเฉือนตรงจากตัวอย่างดินที่ผ่านการเปียกสลับแห้ง

ตารางที่ 6 พารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนของการทดสอบเปียกสลับแห้ง

จำนวนรอบของ การเปียกสลับแห้ง	c' (กิโลปาสกาล)	ϕ' (องศา)
0	37.2	24.5
2	34.9	15.1
5	13.5	29.9
10	20.9	26.0
20	15.9	29.3

3.2.4 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเมื่อพิจารณาสภาพการผุพังของลาดดินจากอิทธิพลของการเปียกสลับแห้ง

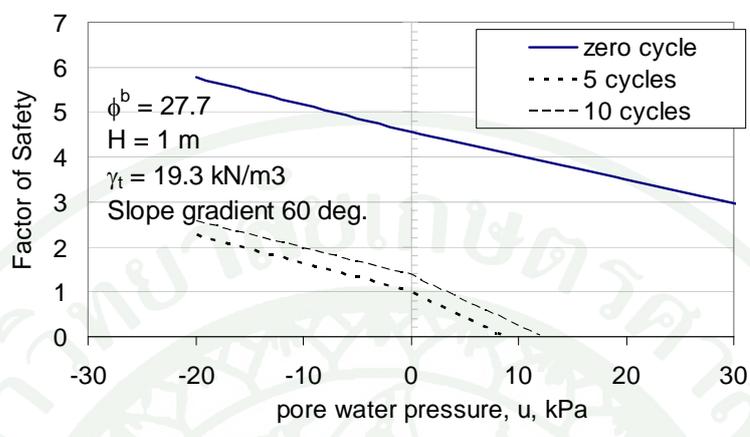
การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดชันใช้วิธีการวิเคราะห์แบบลาดอนันต์ (Infinite Slope) ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการพิบัติแบบการเคลื่อนแนวระนาบ (Translational Slides) ของพื้นที่อ.ลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์ โดยในการวิเคราะห์จะใช้ความลึกของการพิบัติเท่ากับ 0.5 และ 1 เมตร มีค่าความชัน 25, 45 และ 60 องศา พิจารณาว่าเป็นตัวแทนของสภาพภูมิประเทศที่สูงชันในพื้นที่จังหวัดอุตรดิตถ์ที่เกิดเหตุการณ์น้ำท่วมดินถล่ม และใช้พารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินที่ระดับความลึก 0.3 เมตรในการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัยที่มีความลึกของการพิบัติเท่ากับ 0.5 เมตร และใช้พารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินที่ระดับความลึก 0.8 เมตรในการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัยที่มีความลึกของการพิบัติเท่ากับ 1 เมตร สำหรับกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ จะใช้ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนและค่าแรงคอสมัทริกซ์ที่ระดับความลึก 0.9 เมตร ในส่วนของการพิจารณาอิทธิพลของการเปียกสลับแห้ง จะนำค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่กระทำการเปียกสลับแห้งจำนวน 5 และ 10 ครั้ง มาร่วมพิจารณาด้วย



ภาพที่ 76 ผลการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนปลอดภัยและค่าแรงดันน้ำ ของตัวอย่างดินที่ระดับความลึกและความชันต่างๆ

จากผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 76 แสดงการเปลี่ยนแปลงระหว่างค่าสัดส่วนความปลอดภัยและค่าแรงดันน้ำ สำหรับลาดดินที่มีแนวการพิบัติที่ความลึก 0.5 และ 1 เมตร ที่ความชัน 25 และ 45 องศา พบว่า ที่ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1 ค่าแรงดันน้ำมีค่าเป็นบวกในลาดดินทั้งสองความชัน ซึ่งเป็นแรงดันน้ำที่ก่อให้เกิดการพิบัติของลาดนั่นเอง และเมื่อพิจารณาผลกระทบของการเปียกสลับแห้งต่อเสถียรภาพของลาด ดังภาพที่ 77 โดยพิจารณาลาดที่ความชัน 60 องศาพบว่า ค่าแรงดันน้ำที่ส่งผลให้เกิดการพิบัติหรือเมื่อค่าสัดส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1 มีค่าเข้าใกล้ค่า 0 หรืออาจมีค่าน้อยกว่านั้นเมื่อมีความผูกพันของชั้นดินมากขึ้น เมื่อพิจารณาจำนวนรอบของกระบวนการเปียกสลับแห้ง 5 และ 10 รอบ ซึ่งแสดงถึงเสถียรภาพของลาดดินที่ลดลงเมื่อดินเกิดการเปียกสลับแห้งและสูญเสียความเชื่อมประสานนั่นเอง อาจกล่าวได้ว่าที่จุดพิบัติของลาดดินซึ่งผูกพันอย่างมากจากสภาวะเปียกสลับแห้ง และมีความลาดชันมาก (> 60 องศา) แรงดันน้ำในลาดดินนั้น

อาจไม่จำเป็นต้องมีค่าเกินศูนย์ ลาดดินก็อาจจะเกิดการพิบัติได้แม้มีแรงดันน้ำค่าลบหรือเป็นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ



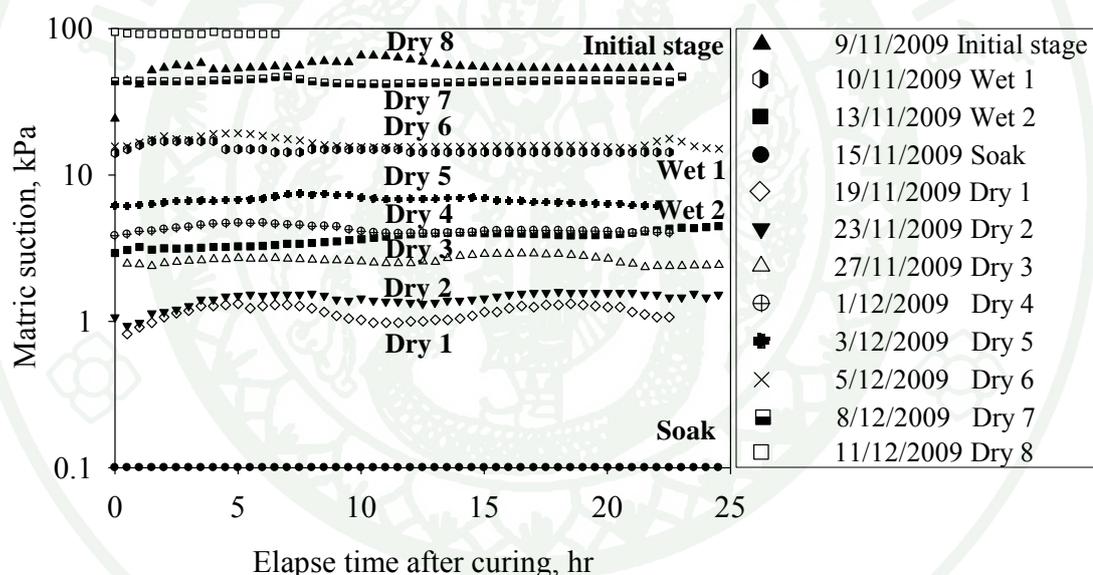
ภาพที่ 77 ผลการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนปลอดภัยและค่าแรงดันน้ำ ของตัวอย่างดินที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้ง 5 และ 10 ครั้ง

3.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติความชุ่มน้ำของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

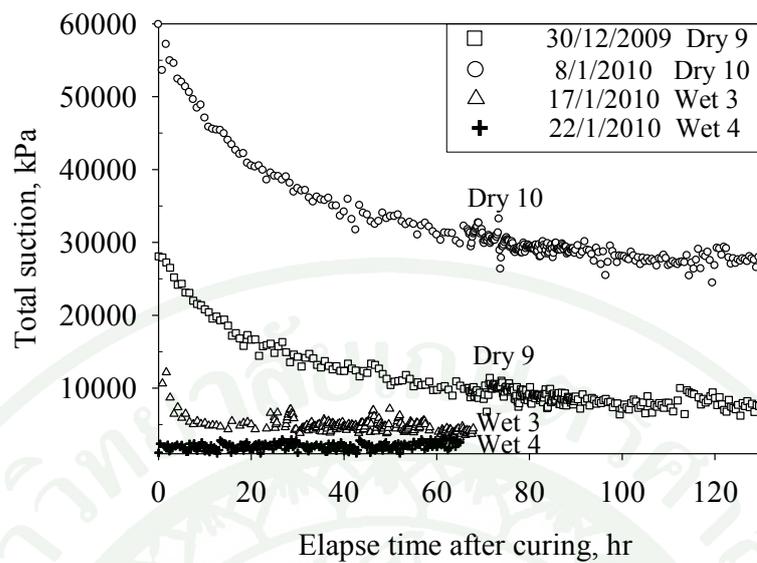
3.3.1 การทดสอบหาเส้นอัตรลักษณ์ของดินด้วยวิธี Point-Wise Measurement

ผลการทดสอบหาเส้นอัตรลักษณ์ (Soil-Water Characteristic Curve) ด้วยวิธี Point-Wise Measurement ในที่นี้จะกล่าวรายละเอียดการทดสอบของตัวอย่างดินบริเวณไม้ผลผสมที่ระดับผิวดิน แสดงดังภาพที่ 78 ถึงภาพที่ 80 ซึ่งผลการทดสอบในแต่ละตัวอย่างดินจะประกอบด้วย 3 ภาพ ได้แก่ ผลของการวัดค่าแรงดูดเมทริกซ์ที่มีค่าแรงดูดตั้งแต่ 0-100 กิโลปาสกาล ผลของการวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์หรือค่าแรงดูดรวมวัดค่าได้ในช่วง 500-100,000 กิโลปาสกาล และผลการทดสอบของเส้นอัตรลักษณ์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ จากสภาวะเริ่มต้นที่ตัวอย่างดินมีค่าแรงดูด 53.5 กิโลปาสกาล (Initial Stage) เพิ่มน้ำให้กับตัวอย่างดิน ทำให้ค่าแรงดูดของตัวอย่างดินลดลง มีค่าเท่ากับ 14.3, 2.3 กิโลปาสกาล ถือเป็นจุดการทดสอบของกระบวนการเปียก (Wetting Curve) ที่ 1 และ 2 ตามลำดับ จากนั้นนำตัวอย่างดินไปแช่น้ำ เพื่อให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งมีค่าแรงดูดประมาณ 0.1 กิโลปาสกาล คือที่สภาวะ Soak หลังจากนั้นทำให้ตัวอย่างดินแห้งขึ้น ค่าแรงดูดจะเพิ่มสูงขึ้น โดยมีค่าแรงดูดเมทริกซ์ เท่ากับ 0.9, 1, 2.5, 4, 6.2, 15.9, 44, 92 กิโลปาสกาล เมื่อใช้ KU-Tensiometer ในการวัดค่า และวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์หรือค่าแรงดูดรวมจากเครื่องมือ

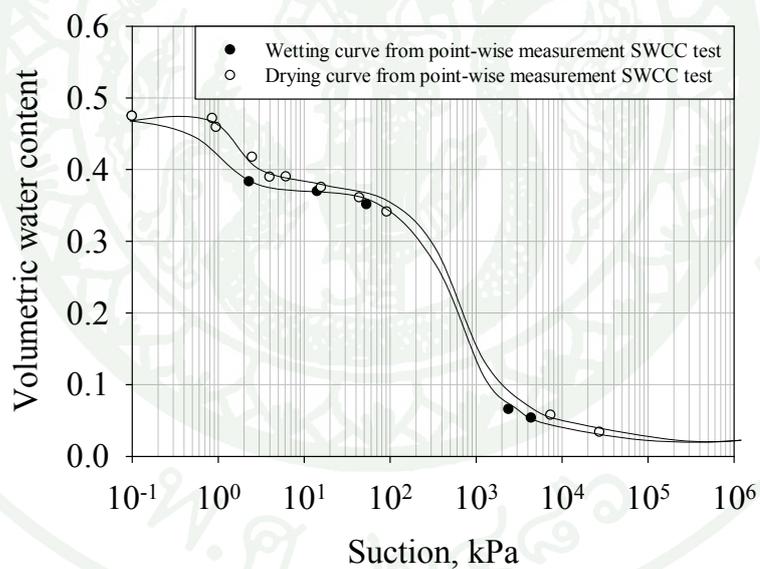
Psychrometer มีค่าเท่ากับ 7400, 27500 กิโลปาสกาล ซึ่งเป็นจุดการทดสอบของเส้น Drying Curve 1-10 ตามลำดับ ดังภาพที่ 78 และ 79 จนกระทั่งตัวอย่างดินมีค่าปริมาณความชื้น(w) น้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ จึงทำการเติมน้ำ เพื่อให้ได้จุดทดสอบของ Wetting Curve ที่ 3 และ 4 ซึ่งมีค่าแรงดูด 4400, 2400 กิโลปาสกาล กลับสู่ตำแหน่งเริ่มต้นของการทดสอบ จากผลการทดสอบดังกล่าว นำมาลากเส้นกราฟที่เหมาะสมกับผลการทดสอบ ดังภาพที่ 80 ซึ่งมีลักษณะของกราฟแบบ Bimodal หรือมีการโค้งของเส้นกราฟแบบ Double S Curve เช่นเดียวกับผลการทดสอบเส้นอัตรลักษณ์ของตัวอย่างดินในพื้นที่จังหวัดตาก(Jotisankasa and Mairaing, 2009) สำหรับการนำค่าของเส้นอัตรลักษณ์ไปใช้ในการวิเคราะห์นั้น จะนำข้อมูลของจุดที่ได้จากการทดสอบไปใช้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงไม่คำนึงถึงการเลือกใช้สมการ Fitting Curve ใดๆ ซึ่งผลการทดสอบหาเส้นอัตรลักษณ์ที่ระดับความลึกอื่นๆ แสดงรายละเอียดของผลการทดสอบในภาคผนวก ข)



ภาพที่ 78 แสดงผลการวัดค่าแรงดูดเมทริกซ์ ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับผิวดิน

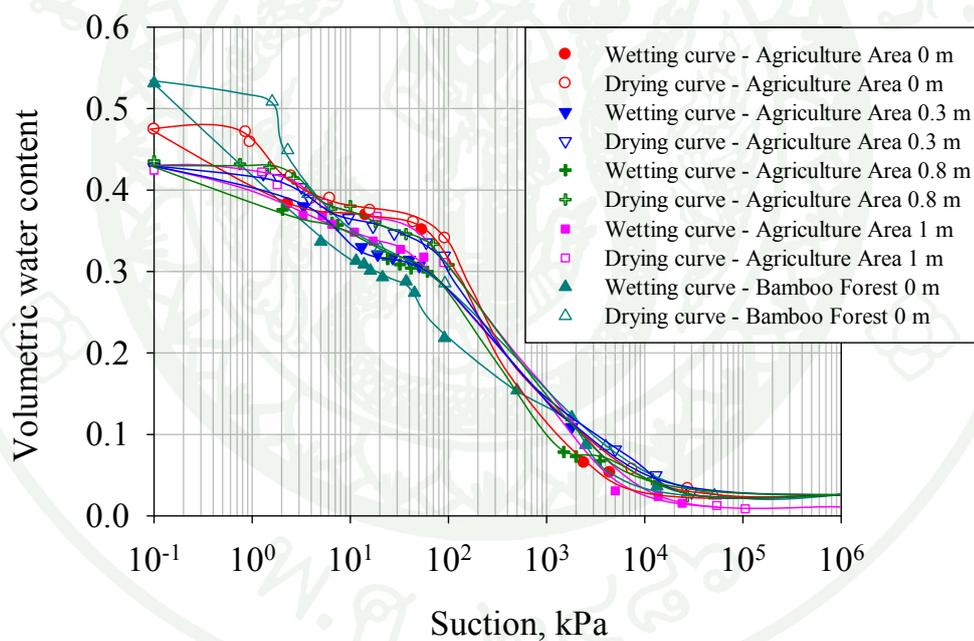


ภาพที่ 79 แสดงผลการวัดค่าแรงดูดรวม ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับผิวดิน



ภาพที่ 80 ผลการทดสอบหาเส้นอัตรลักษณ์ ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับผิวดิน

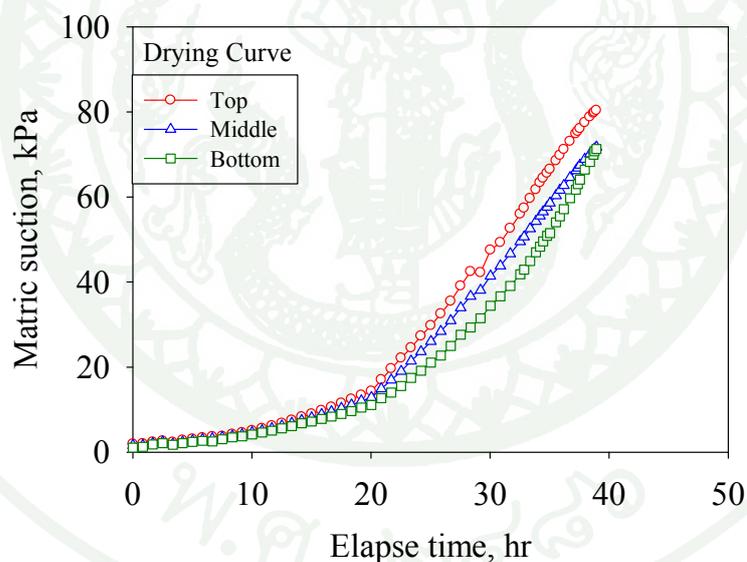
จากผลการทดสอบหาเส้นอรรถลักษณะของตัวอย่างดินทั้งบริเวณ ไม้ผลผสมและป่าไผ่ที่ระดับความลึกต่างๆ ดังภาพที่ 81 พบว่า ตัวอย่างดินจากบริเวณ ไม้ผลผสม ที่ระดับความลึก 0.3, 0.8, 1 เมตร เส้นกราฟจะมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาค่าความพรุนจากผลการทดสอบ คือที่ค่า ศักรีความอึมตัวด้วยน้ำเท่ากับ 1 ค่าแรงคั้นน้ำมีค่าเท่ากับ 0 หรือมีค่าแรงดูดเมื่อพล็อตใน log scale มีค่า 0.1 กิโลปาสกาล ค่าความชื้นโดยปริมาตรจะมีค่าเท่ากับค่าความพรุนของตัวอย่างดิน ($\theta = nSr$) พบว่า ตัวอย่างดินที่ระดับผิวดิน บริเวณป่าไผ่ มีค่าความพรุนมากที่สุด รองลงมา คือ ตัวอย่างดินบริเวณ ไม้ผลผสม ที่ระดับผิวดิน และที่ระดับ 0.3, 0.8 และ 1 เมตร มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่ง ค่าความพรุนจากการทดสอบในช่วงที่ตัวอย่างดินอึมตัวด้วยน้ำ มีค่าศักรีความอึมตัวด้วยน้ำ ประมาณ 0.89-0.93 มีค่าความพรุนเท่ากับ 0.521, 0.476, 0.476, 0.471 ของตัวอย่างดินที่ระดับผิวดิน, 0.3, 0.8, 1 เมตร ตามลำดับ ในพื้นที่บริเวณ ไม้ผลผสม และมีค่าความพรุนเท่ากับ 0.569 ที่ระดับผิวดิน ในพื้นที่ป่าไผ่



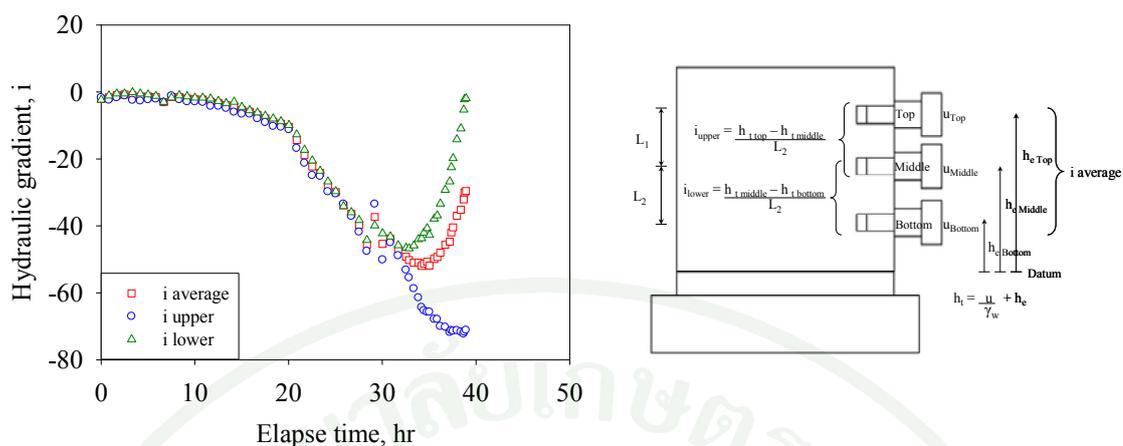
ภาพที่ 81 ผลการทดสอบหาเส้นอรรถลักษณะของตัวอย่างดินทั้งบริเวณ ไม้ผลผสมและป่าไผ่ที่ระดับความลึกต่างๆ ด้วยวิธี Point-Wise Measurement

3.3.2 การทดสอบหาเส้นอรรถลักษณะของดินด้วยวิธี Continuous Measurement

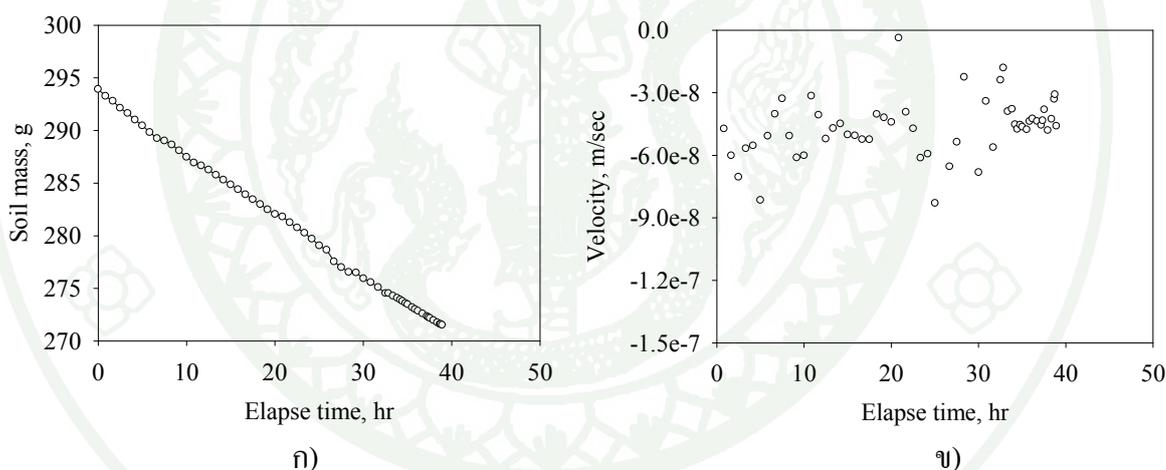
ผลการทดสอบหาเส้นอรรถลักษณะ (Soil-Water Characteristic Curve) ด้วยวิธี Continuous Measurement แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนเช่นเดียวกับวิธี Point-Wise Measurement คือ กระบวนการแห้ง ซึ่งเป็นการนำตัวอย่างดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำแล้วปล่อยให้มีการระเหย ขณะที่มีการบันทึกข้อมูลค่าแรงดูดและน้ำหนักในระหว่างการทดสอบที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ทำให้ได้ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ค่าแรงดูด ค่าความชื้นชลศาสตร์(i) ค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ค่าคิกริความอิ่มตัวด้วยน้ำ ความชื้น โดยปริมาตร อัตราการระเหย และค่าความชื้นน้ำ โดยทำการทดสอบกับตัวอย่างดินที่ระดับผิวดิน, 0.3, 0.8 เมตร ของพื้นที่ไม้ผลผสม และที่ระดับผิวดินของพื้นที่ป่าไผ่ ในที่นี้ยกตัวอย่างผลการทดสอบของตัวอย่างดินที่ระดับผิวดินของพื้นที่ไม้ผลผสม สำหรับผลการทดสอบของตัวอย่างดินที่ระดับอื่นๆ แสดงผลการทดสอบในภาคผนวกที่ ข)



ภาพที่ 82 ความสัมพันธ์ของค่าแรงดูดเมตริกซ์กับเวลา จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ของกระบวนการแห้ง ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับผิวดิน



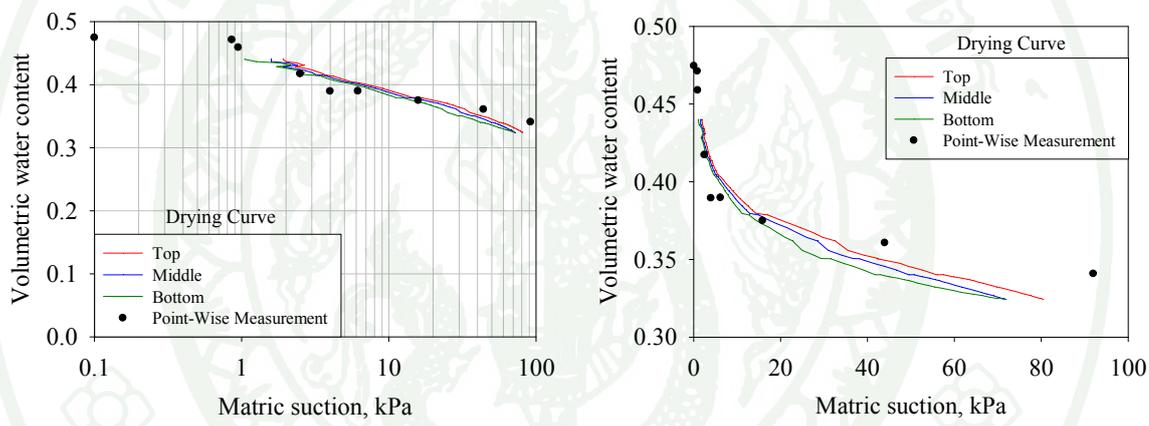
ภาพที่ 83 ความสัมพันธ์ของค่าความชันชลศาสตร์กับเวลา เมื่อพิจารณาค่าความชันชลศาสตร์ 3 รูปแบบ จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ของกระบวนการแห้ง ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม่ผลผสม ที่ระดับผิวดิน



ภาพที่ 84 ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ของกระบวนการแห้ง ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม่ผลผสม ที่ระดับผิวดิน
 ก) ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักกับเวลา
 ข) ความสัมพันธ์ของค่าความเร็วในการไหลของน้ำในตัวอย่างดินกับเวลา

จากภาพที่ 82 เห็นได้ว่าเมื่อตัวอย่างดินถูกปล่อยให้มีการระเหย ค่าแรงดูดในตัวอย่างดินจะค่อยๆ มีค่าสูงขึ้น ใกล้เคียงกัน ทั้ง 3 เซนเซอร์ จากความสัมพันธ์ของค่าแรงดูดกับเวลาดังกล่าว ทำให้ทราบความสัมพันธ์ของความชันชลศาสตร์ (i) กับเวลา ซึ่งสามารถหาค่าได้ 3 ค่าด้วยกัน คือ ค่าความชันชลศาสตร์เฉลี่ย (i average) พิจารณาจากเซนเซอร์ทั้งตำแหน่งบน กลาง และล่าง, ค่าความชันชลศาสตร์ของเซนเซอร์ตำแหน่งบนและกลาง (i upper) และค่าความชัน

พลศาสตร์ของเซนเซอร์ตำแหน่งกลางและล่าง (i lower) โดยค่าความชื้นพลศาสตร์ทั้งสามค่าจะแสดงดังภาพที่ 83 ซึ่งจะมีค่าลดลงและมีค่าอยู่ในช่วงค่าลบ สอดคล้องกับการไหลของน้ำจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนที่มีค่าศักย์ของน้ำที่ต่ำกว่า สำหรับความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักกับเวลา จะมีค่าลดลง ดังภาพที่ 84ก) เนื่องจากเป็นกระบวนการที่น้ำระเหยออกจากมวลดิน และค่าความเร็วในการระเหยของน้ำในตัวอย่างดินในพื้นที่ไม่ผลผสม ที่ระดับผิวดินจึงมีค่าอยู่ในช่วง $-3e^{-8}$ ถึง $-7e^{-8}$ เมตร/วินาที ดังภาพที่ 84ข) เมื่อพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดูดเมทริกซ์กับความชื้นโดยปริมาตร จะได้เส้นอัตรคัลกษณ์ที่เป็นเส้นการแห้ง (Drying Curve) และพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดูดเมทริกซ์และค่าความชื้นน้ำ จะได้ค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของดินที่เกิดจากกระบวนการแห้งเช่นกันดังภาพที่ 85 และ 86 ตามลำดับ

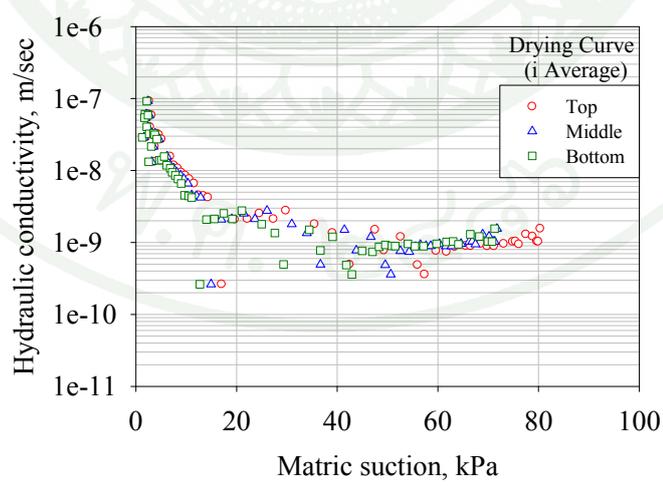


ภาพที่ 85 ผลการทดสอบเส้นอัตรคัลกษณ์ Continuous Measurement ของกระบวนการแห้งเปรียบเทียบกับวิธี Point-Wise Measurement ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม่ผลผสม ที่ระดับผิวดิน

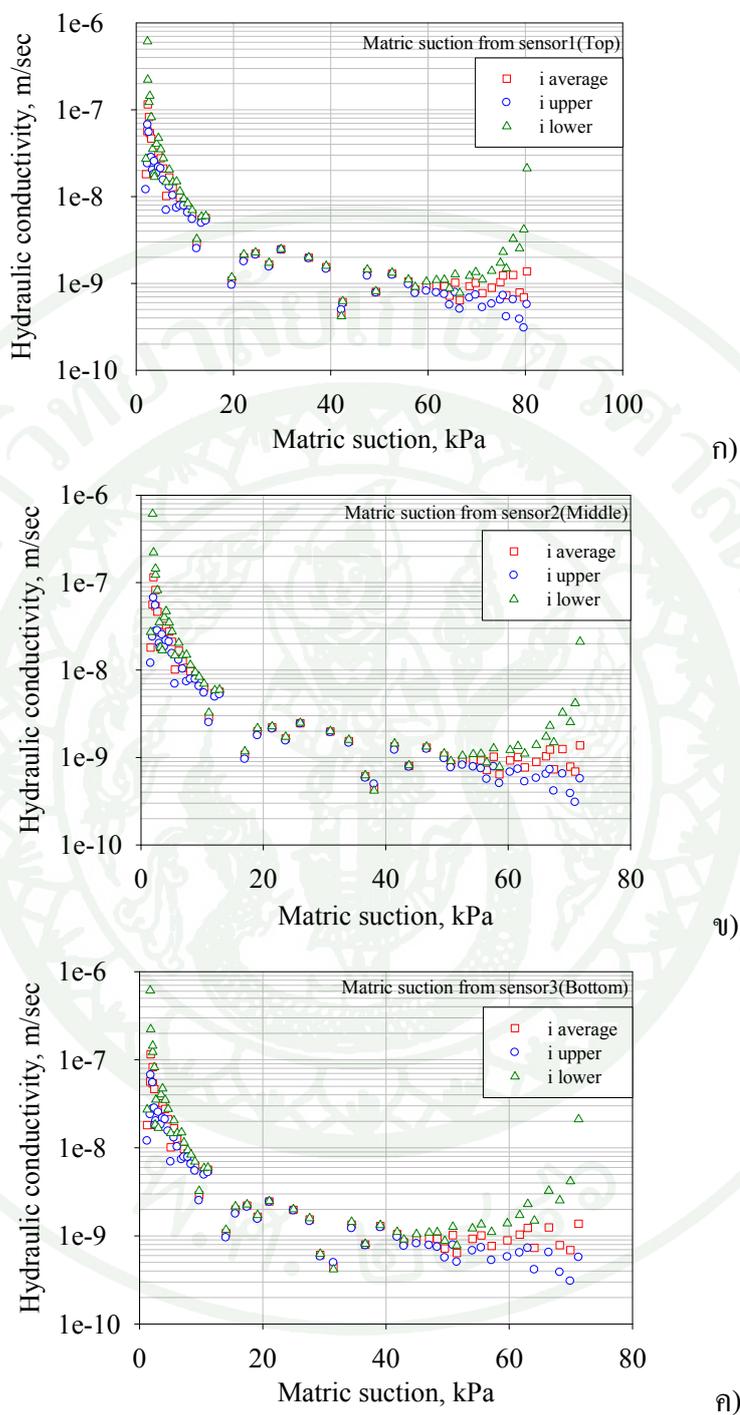
จากเส้นอัตรคัลกษณ์ดังแสดงดังภาพที่ 85 พบว่า ผลการทดสอบ Continuous Measurement เปรียบเทียบกับผลการทดสอบ Point-Wise Measurement ของกระบวนการแห้ง (Drying Curve) ของทั้งสองตัวอย่างดิน ที่เก็บตัวอย่างในบริเวณและระดับความลึกเดียวกัน คือ บริเวณพื้นที่ไม่ผลผสม ที่ระดับผิวดิน มีค่าใกล้เคียงกันมาก หรือมีความแตกต่างกันประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ โดยเส้นทั้ง 3 เส้นในภาพแสดงผลการทดสอบด้วยวิธี Continuous Measurement และจุดในภาพดังกล่าวจะแสดงผลการทดสอบด้วยวิธี Point-Wise Measurement จากผลการทดสอบที่ใกล้เคียงกัน แสดงถึงข้อดีของวิธี Continuous Measurement ที่ใช้ระยะเวลาในการทดสอบน้อยประมาณ 3 วันต่างจากการทดสอบ Point-Wise Measurement ซึ่งใช้ระยะเวลาในการทดสอบ

ประมาณ 10-25 วัน(นับจำนวนวันเฉพาะการทดสอบช่วงของเส้นการแห้ง และการวัดค่าแรงดูด ในช่วง 0-100 กิโลปาสกาล อีกทั้งขึ้นอยู่กับความละเอียดของการทดสอบแบบ Point-Wise Measurement)

สำหรับค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของตัวอย่างดินบริเวณป่าไผ่ ที่ระดับผิวดิน จากค่าความชื้นชลศาสตร์ที่มี 3 ค่า ส่งผลให้ค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของดินมี 3 ค่า เช่นเดียวกัน คือ ที่ค่าความชื้นชลศาสตร์เป็นค่าเฉลี่ยของตำแหน่งบน กลาง และล่างของเซนเซอร์ (i average), ค่าความชื้นชลศาสตร์พิจารณาเฉพาะตำแหน่งบนถึงกลางของเซนเซอร์ (i upper) และ ค่าลาดชลศาสตร์พิจารณาเฉพาะตำแหน่งกลางถึงล่างของเซนเซอร์ (i lower) จากภาพที่ 86 แสดงค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของดิน ที่ใช้ค่าความชื้นชลศาสตร์เป็นค่าเฉลี่ย พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำ อยู่ในช่วง $1e^{-7}$ ถึง $8e^{-9}$ เมตร/วินาที ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงสูงในช่วงค่าแรงดูดประมาณ 0-20 กิโลปาสกาล และค่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำเริ่มคงที่เมื่อค่าแรงดูดมีค่าสูงขึ้นหรือดินมีความชื้นน้อย การไหลของน้ำในดินจะมีการไหลผ่านฟิล์มน้ำ บางๆที่เกาะรอบอนุภาคดินแบบ Film Flow ซึ่งเป็นการไหลที่ช้ามาก และเมื่อเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของดิน เมื่อพิจารณาจากค่าลาดชลศาสตร์ที่ต่างกัน ในแต่ละตำแหน่งของเซนเซอร์ที่ติดตั้งในการทดสอบ คือตำแหน่งบน กลาง และล่าง ดังภาพที่ 87ก), 87ข) และ 87ค) ตามลำดับ พบว่า ค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของดินมีค่าใกล้เคียงกัน แม้ว่าจะใช้ค่าความชื้นชลศาสตร์ที่ต่างกัน



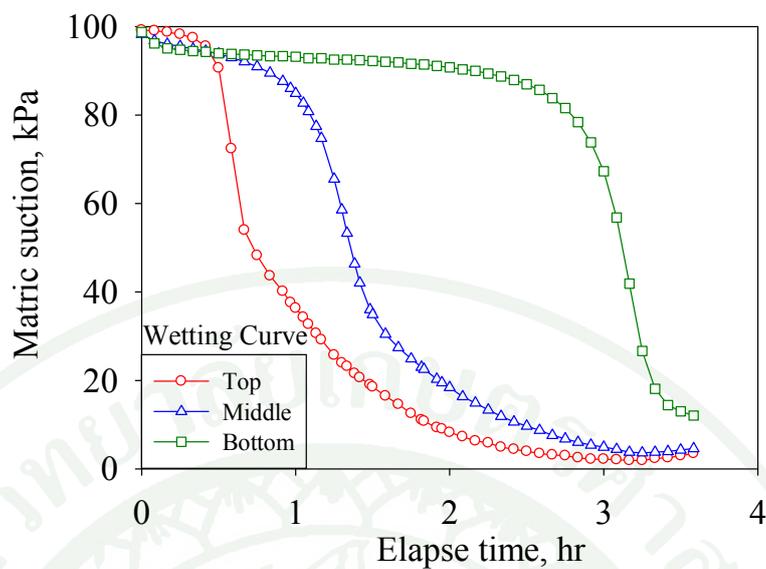
ภาพที่ 86 ค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของดิน จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ในกระบวนการแห้ง ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับผิวดิน พิจารณาจากค่าความชื้นชลศาสตร์เฉลี่ย



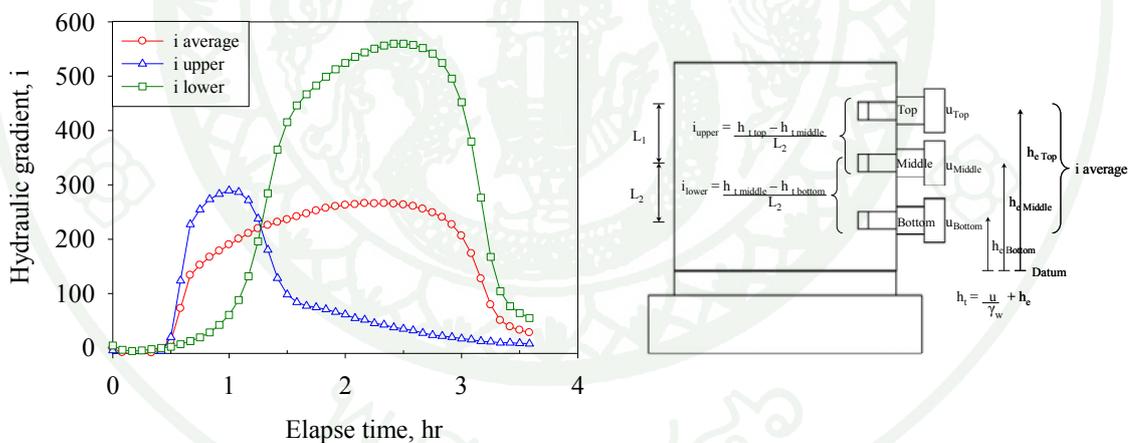
ภาพที่ 87 ค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดิน จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ในกระบวนการแห้ง ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับผิวดิน ซึ่งพิจารณาจาก ค่าความชื้นชลศาสตร์ 3 รูปแบบ

สำหรับการทดสอบในกระบวนการเป็ยกเป็นการเพิ่มน้ำให้กับตัวอย่างดิน โดยจะสามารถคำนวณความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ เช่นเดียวกับกระบวนการแห้ง ซึ่งผลการทดสอบของตัวอย่างดินที่ระดับความลึก 0.8 เมตร ของพื้นที่ไม่ผลผสม พบว่า จากตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์ทั้ง 3 ระดับ เมื่อพิจารณาค่าแรงคูดเมทริกซ์ตามเวลาของทั้งสามเซนเซอร์ พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าแรงคูดเมทริกซ์กับเวลา ดังภาพที่ 88 มีความแตกต่างของช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าแรงคูดเมทริกซ์ของเซนเซอร์ที่ตำแหน่งบน กลาง และล่าง เป็นผลเนื่องมาจากการใช้ระยะเวลาในการไหลของน้ำจากด้านบนไหลลงไปถึงเซนเซอร์ที่ระดับล่าง ใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง ในขณะที่เซนเซอร์ตำแหน่งบนและกลางใช้ระยะเวลาประมาณ 0.5, 1.5 ชั่วโมง ก่อนที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงคูดเมทริกซ์ และการเปลี่ยนแปลงนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลา 30 นาที เมื่อหยคน้ำลงสู่ตัวอย่างดินด้วยความเร็วของการไหลของน้ำ 0.001 ลูกบาศก์เซนติเมตร/วินาที

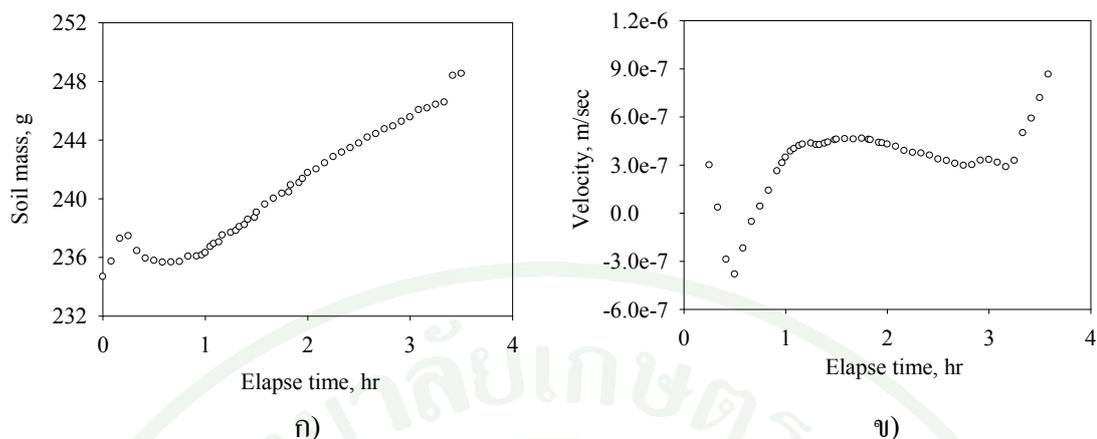
สำหรับค่าความชื้นชลศาสตร์ เมื่อพิจารณา 3 ค่า คือ ค่าความชื้นชลศาสตร์เฉลี่ย โดยพิจารณาจากเซนเซอร์ทั้งตำแหน่งบน กลางและล่าง (i average), ค่าความชื้นชลศาสตร์ของเซนเซอร์ตำแหน่งบนและกลาง (i upper) และค่าความชื้นชลศาสตร์ของเซนเซอร์ตำแหน่งกลางและล่าง (i lower) โดยค่าความชื้นชลศาสตร์ทั้งสามค่าแสดงดังภาพที่ 89 พบว่า มีลักษณะโค้งคว่ำและมีความแตกต่างกันของค่าความชื้นชลศาสตร์ 3 แบบ โดยเมื่อมีการเพิ่มน้ำให้กับตัวอย่างดิน ทำให้เกิดการไหลของน้ำสู่ด้านล่างของตัวอย่างดินที่มีค่าศักย์ของน้ำที่ต่ำกว่า ค่าความชื้นชลศาสตร์จึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น และค่อยๆลดลง ภายหลังจากเซนเซอร์ที่ตำแหน่งสุดท้ายที่สนใจเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงคูดเมทริกซ์ เช่น เมื่อพิจารณาค่าลาดชลศาสตร์เฉลี่ย (i average) ค่าลาดชลศาสตร์จะเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเซนเซอร์ที่ตำแหน่งบนเริ่มมีค่าแรงคูดเมทริกซ์ลดลงหรือน้ำเริ่มซึมลงไปถึงเซนเซอร์ที่ตำแหน่งนั้น เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที และค่าลาดชลศาสตร์เริ่มมีค่าลดลงเมื่อเซนเซอร์ที่ตำแหน่งล่างเริ่มมีค่าแรงคูดเมทริกซ์ลดลงหรือน้ำเริ่มไหลซึมลงไปถึงเซนเซอร์ที่ตำแหน่งล่าง เมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง ดังภาพที่ 88 และ 89 เมื่อพิจารณาภาพที่ 90ก) แสดงความสัมพันธ์ของมวลดินกับเวลาที่มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากจากปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น และค่าความเร็วการไหลของน้ำเฉลี่ยมีค่าอยู่ในช่วง $3e^{-7}$ ถึง $6e^{-7}$ เมตรต่อวินาที ดังภาพที่ 90ข)



ภาพที่ 88 ความสัมพันธ์ของค่าแรงดูดเมทริกซ์กับเวลา จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ของกระบวนการเปียก ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม่ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร



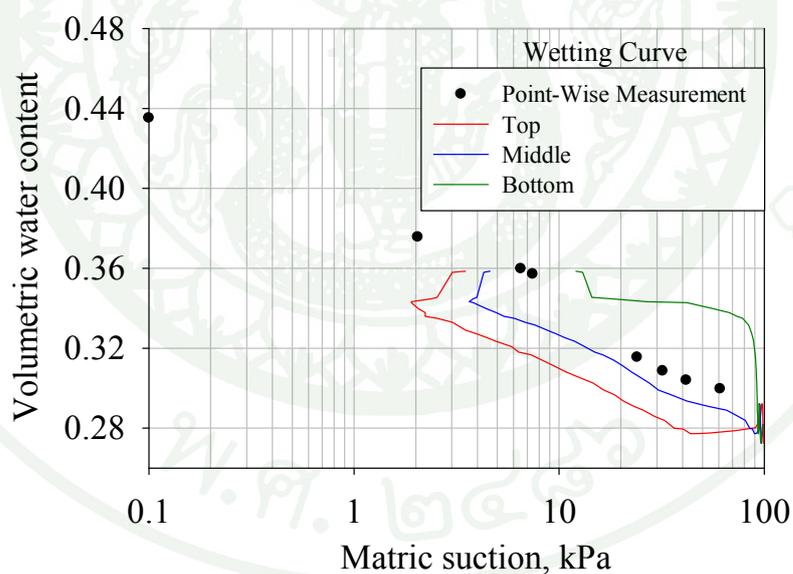
ภาพที่ 89 ความสัมพันธ์ของค่าความชันชลศาสตร์(i) กับเวลา จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ของกระบวนการเปียก ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม่ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร



ภาพที่ 90 ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ของกระบวนการเปียก ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม่ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร

ก) ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักกับเวลา

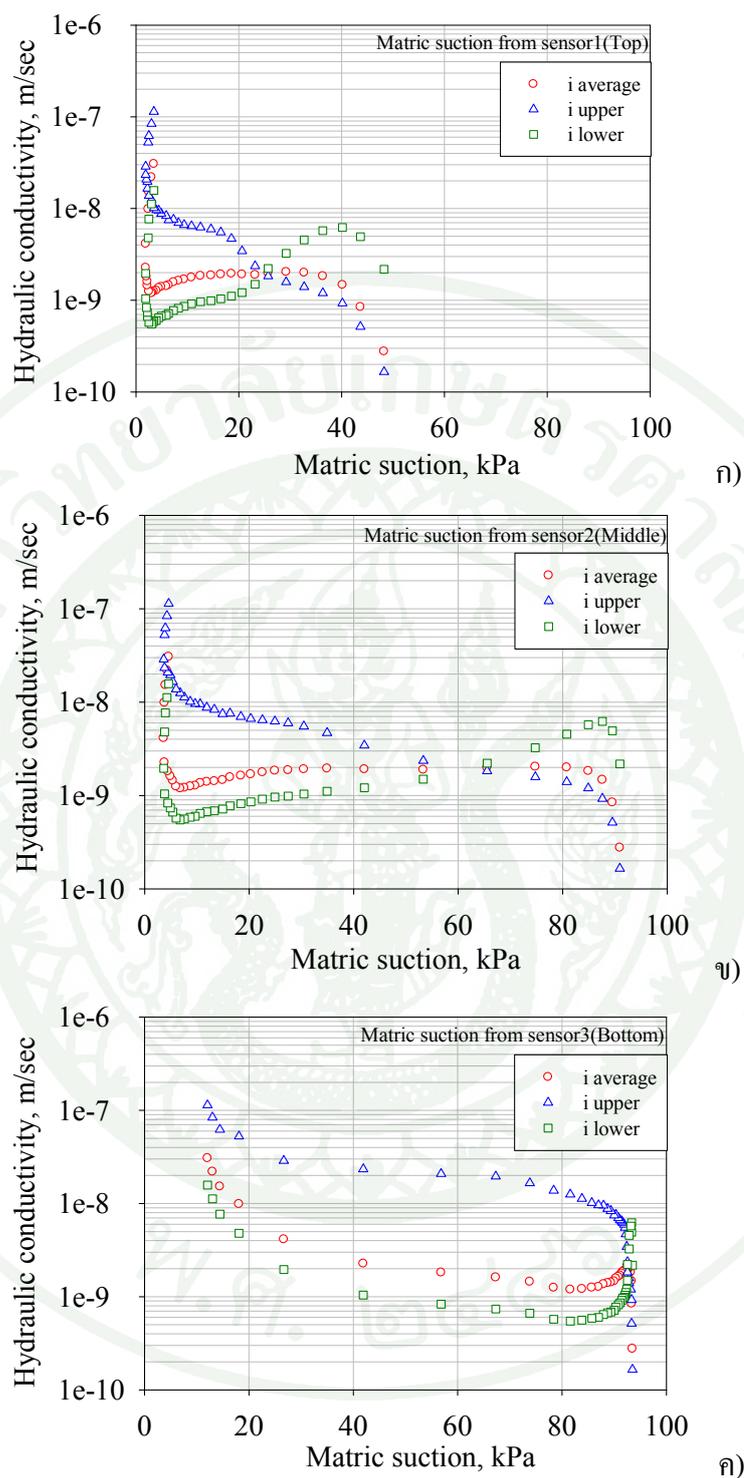
ข) ความสัมพันธ์ของค่าความเร็วในการไหลของน้ำในตัวอย่างดินกับเวลา



ภาพที่ 91 ผลการทดสอบเส้นอรรถลักษณะด้วยวิธี Continuous Measurement ของกระบวนการเปียก เปรียบเทียบกับวิธี Point-Wise Measurement ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม่ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร

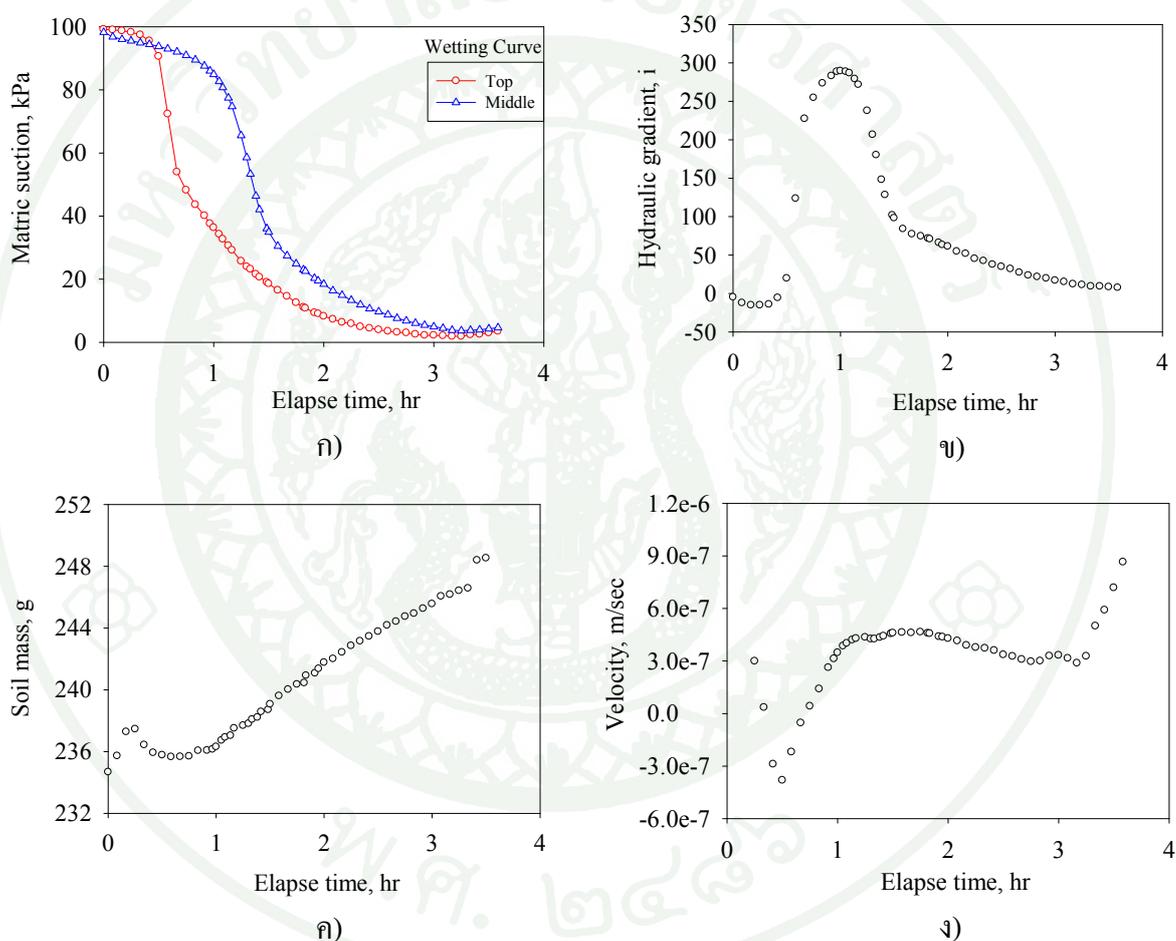
ผลเส้นอัตตลักษณ์ของการทดสอบ Continuous Measurement ในกระบวนการเป็ยก มีลักษณะเส้นกราฟที่ต่างกัน 3 เส้น เนื่องจาก lag time ตามกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดูดเมทริกซ์กับเวลา และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบหาเส้นอัตตลักษณ์ในแต่ละวิธี เมื่อเส้นกราฟทั้งสามเส้นแสดงผลของการทดสอบด้วยวิธี Continuous Measurement และจุดแสดงผลของการทดสอบ Point-Wise Measurement ของกระบวนการเป็ยก พบว่า เส้นกราฟตำแหน่งบนและกลางกับจุดการทดสอบมีลักษณะความลาดชันที่สอดคล้องกัน และมีความแตกต่างของค่าความชันโดยปริมาตรประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์ สำหรับเส้นกราฟในตำแหน่งล่างมีความไม่สอดคล้องกับผลการทดสอบแบบจุด ดังภาพที่ 91 ทั้งนี้แนะนำให้ใช้ค่าแรงดูดจากเซนเซอร์ตัวกลางในการประมาณค่าเส้นอัตตลักษณ์เนื่องจากมีความสอดคล้อง

ผลการทดสอบฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินในกระบวนการเป็ยก ดังภาพที่ 92 จากค่าความชันชลศาสตร์ที่แตกต่างกัน 3 แบบ ได้แก่ ค่าความชันชลศาสตร์เฉลี่ย (i average), ค่าความชันชลศาสตร์ของเซนเซอร์ตำแหน่งบนและกลาง (i upper) และค่าความชันชลศาสตร์ของเซนเซอร์ตำแหน่งกลางและล่าง (i lower) เมื่อพิจารณาค่าความชันชลศาสตร์ในแต่ละตำแหน่งของการติดตั้งเซนเซอร์ที่ตำแหน่งบน กลาง และล่าง พบว่า มีความแตกต่างกันของค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน เช่น การคำนวณค่าความชันชลศาสตร์เฉลี่ย ใช้วิธี Linear Regression จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ของน้ำและระยะทางของการไหลของน้ำทั้งสามจุดตรวจวัด ซึ่งในการทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ของน้ำในแต่ละตำแหน่งอย่างรวดเร็ว และมีลักษณะไม่เป็นเส้นตรง คือ ในขณะที่เซนเซอร์ที่ตำแหน่งบนอิมตัวด้วยน้ำ ที่ตำแหน่งกลางและล่างยังมีค่าแรงดูดเมทริกซ์ที่มีค่าสูง ค่าความชันชลศาสตร์ที่คำนวณได้ จึงเป็นค่าเฉลี่ยซึ่งไม่เป็นตัวแทนที่เหมาะสมในการนำไปคำนวณหาค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน



ภาพที่ 92 ค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของดิน เมื่อพิจารณาจากค่าลาดชันศาสตร์ 3 แบบในแต่ละตำแหน่งของการวัดค่าแรงดูดเมทริกซ์จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ในกระบวนการเปียก ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม่ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร

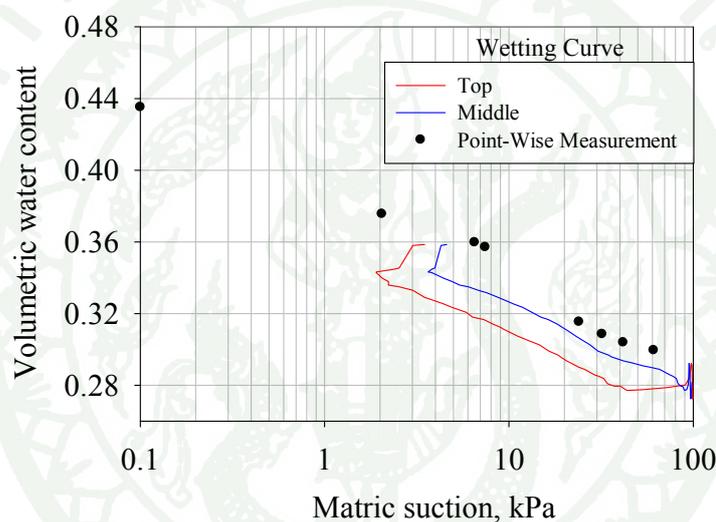
ดังนั้นข้อควรระวังในการวิเคราะห์ผลของการทดสอบ Continuous Measurement ในกระบวนการเปียก คือ การเลือกใช้ค่าความชื้นศาสตร์ เนื่องจากมีความต่างของค่าความชื้นศาสตร์ ในเบื้องต้นนี้ แนะนำให้เลือกพิจารณาเฉพาะเซนเซอร์ที่ตำแหน่งบนและกลาง ซึ่งมีความใกล้เคียงกันของการลดลงของค่าแรงดูดเมทริกซ์ ดังภาพที่ 93ก) จากการพิจารณาพบว่ามีความน่าเชื่อถือของข้อมูลมากขึ้น เมื่อใช้ค่าความชื้นศาสตร์ที่ตำแหน่งเซนเซอร์บนและกลาง (i upper) เท่านั้น ซึ่งมีความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ ดังภาพที่ 93



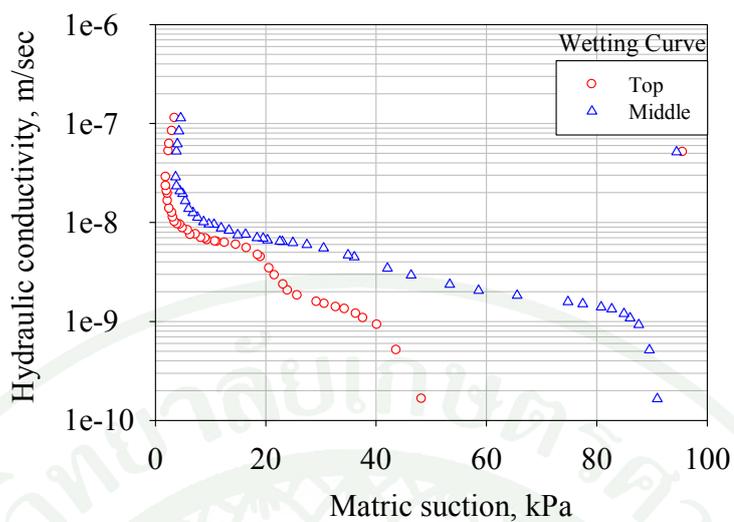
ภาพที่ 93 ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ของกระบวนการเปียก ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม่ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร

- ก) ความสัมพันธ์ของค่าแรงดูดกับเวลา
- ข) ความสัมพันธ์ของค่าความชื้นศาสตร์(i upper) กับเวลา
- ค) ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักกับเวลา
- ง) ความสัมพันธ์ของค่าความเร็วในการไหลของน้ำในตัวอย่างดินกับเวลา

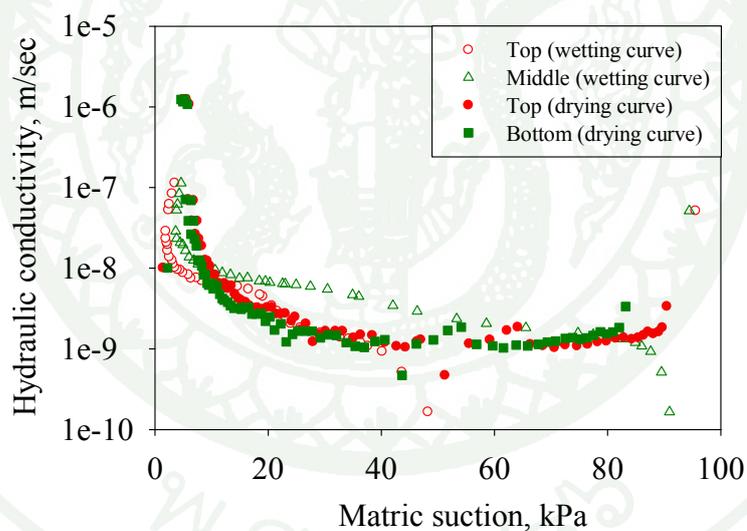
จากภาพที่ 94 และ 95 แสดงผลของเส้นอัตราลักษณ์และค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของดิน ซึ่งมีค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของดินมีค่าอยู่ในช่วง $1e^{-9}$ ถึง $1e^{-7}$ และเมื่อพิจารณาค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของดินทั้งกระบวนการเปียกและแห้ง พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 96 จึงสรุปได้ว่าในกระบวนการเปียก การเลือกใช้ค่าความชันชลศาสตร์นั้น มีผลต่อค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำ ดังนั้น ควรเลือกใช้ค่าความชันชลศาสตร์ที่เป็นตัวแทนของลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดูดในช่วงเวลาใกล้เคียงกัน ในงานวิจัยนี้ จึงเลือกใช้ค่าความชันชลศาสตร์ของตำแหน่งบนและกลาง (i upper) ในการหาค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำดังกล่าว สำหรับผลการทดสอบที่ระดับความลึกอื่นๆ จะแสดงในภาคผนวก ข)



ภาพที่ 94 ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ด้วยวิธี Continuous Measurement ของกระบวนการเปียกเปรียบเทียบกับวิธี Point-Wise Measurement ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม่ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร



ภาพที่ 95 ค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดิน จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ในกระบวนการเปียก ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม่ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร

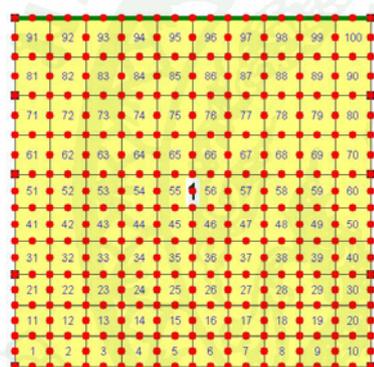


ภาพที่ 96 ค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดิน จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ทั้งในกระบวนการเปียกและแห้ง ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม่ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร

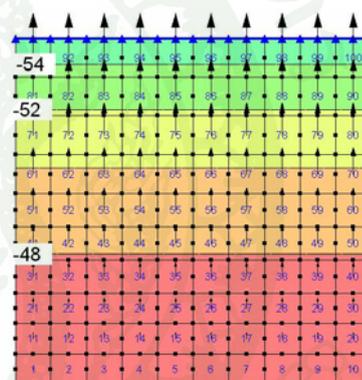
3.3.3 การวิเคราะห์การไหลซึมเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ Continuous

Measurement

การวิเคราะห์การไหลซึมด้วยวิธี Finite Element แบบ 1 มิติ เปรียบเทียบกับผลการทดสอบ Continuous Measurement ของตัวอย่างดินบริเวณป่าไผ่ ที่ระดับผิวดิน ซึ่งนำค่า Soil-Water Characteristic Curve และ Hydraulic Conductivity Function ที่ได้จากการทดสอบดังกล่าว นำมาใช้ในการวิเคราะห์ โดยวิเคราะห์ทั้งกระบวนการแห้งและกระบวนการเปียกน้ำ ซึ่งการวิเคราะห์ในกระบวนการแห้ง จากสถานะเริ่มต้นที่ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำในสถานะสมดุลตลอดทั้งตัวอย่าง จึงกำหนดให้ค่า Pressure Head มีค่า 0 เมตร (ค่าแรงดูดมีค่า 0 กิโลปาสกาล) ตลอดทั้งตัวอย่าง ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ในสภาวะการไหลคงที่ (Steady) ดังภาพที่ 97ก)



ก)



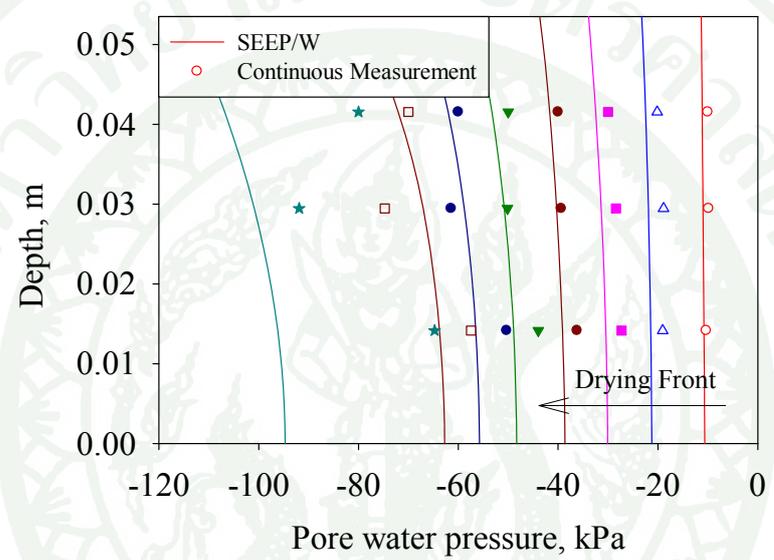
ข)

ภาพที่ 97 แสดงการกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์ที่สถานะต่างๆ

- ก) สภาวะการไหลคงที่
- ข) สภาวะที่การไหลเปลี่ยนแปลงตามเวลา

การวิเคราะห์สภาวะการไหลที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient) ดังภาพที่ 97ข) ทำการกำหนดขอบเขตด้านบน เพื่อจำลองกระบวนการแห้งซึ่งมีการระเหยของน้ำ ให้มีค่าอัตราการระเหยออก (q) เท่ากับ $-5.85e^{-8}$ เมตร/วินาที และใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์เท่ากับระยะเวลาของการทดสอบจริง พบว่า ผลการวิเคราะห์การไหลซึมมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดูดเมทริกซ์ที่เรียกว่า การทดสอบ เนื่องจากในสถานะเริ่มต้นที่มวลดินอิ่มตัวด้วยน้ำนั้น น้ำในมวลดินยังไม่เกิดอัตราการระเหย ซึ่งต้องใช้ระยะเวลาช่วงหนึ่งเพื่อให้ตัวอย่างดินมีอัตราการระเหยที่คงที่ (q) ตามขอบเขตด้านบนที่กำหนด จึงทำการกำหนดสถานะเริ่มต้นใหม่ ในสภาวะที่ตัวอย่างดินนั้นเริ่มมีอัตราการ

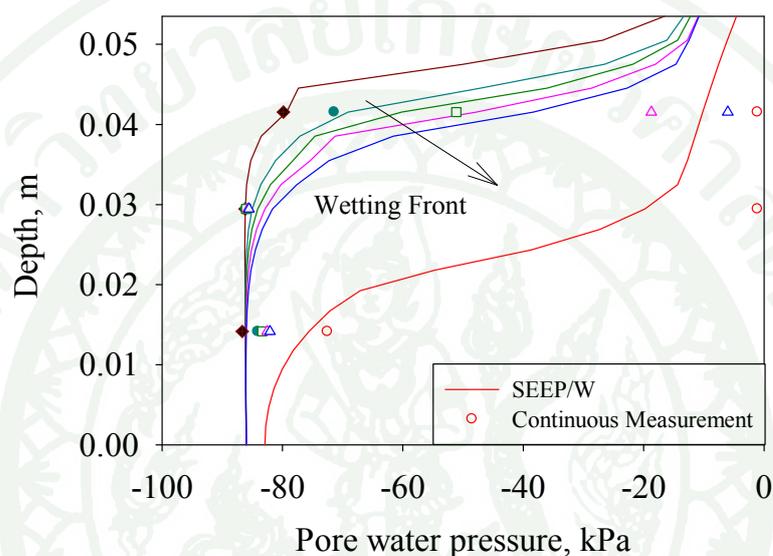
ระเหยคงที่ คือ กำหนดให้สภาวะเริ่มต้นมีค่า Pressure Head เท่ากับ -0.5 เมตร (ค่าแรงดูดประมาณ 5 กิโลปาสกาล) พิจารณาค่า Pressure Head จากผลการทดสอบที่ตัวอย่างดินเริ่มมีอัตราการระเหยคงที่ ถือเป็นสภาวะเริ่มต้น สำหรับการวิเคราะห์สภาวะการไหลซึมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient) ในกระบวนการแห้ง ทำการกำหนดขอบเขตบนเช่นเดิม โดยให้มีอัตราการระเหยออก (q) เท่ากับ $-5.85e^{-8}$ เมตร/วินาที ซึ่งผลการวิเคราะห์มีความสอดคล้องกันกับผลการทดสอบ Continuous Measurement ดังภาพที่ 98



ภาพที่ 98 แสดงผลการทดสอบ Continuous Measurement เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์การไหลซึม ในกระบวนการแห้ง

การวิเคราะห์การไหลซึมในกระบวนการเปียก จากสภาวะเริ่มต้นที่ตัวอย่างดินมีค่าแรงดูดประมาณ 80-90 กิโลปาสกาล และมีความสมดุลตลอดทั้งตัวอย่าง ซึ่งค่าเริ่มต้นของการทดสอบ Continuous Measurement ในกระบวนการเปียก มีค่าแรงดูดเมทริกซ์ 86 กิโลปาสกาล จึงกำหนดขอบเขตด้านบนของแบบจำลองให้มีค่า Pressure Head เท่ากับ -8.77 เมตรตลอดทั้งตัวอย่าง ในสภาวะการไหลคงที่ (Steady) สำหรับการวิเคราะห์สภาวะการไหลที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient) กำหนดขอบเขตด้านบน เพื่อจำลองกระบวนการเปียกน้ำ จากการทดสอบที่ทำการเพิ่มน้ำให้ตัวอย่างดินด้วยอัตราการไหลเข้า (q) เท่ากับ $4.7e^{-6}$ เมตร/วินาที และใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์เท่ากับระยะเวลาของการทดสอบจริง แสดงผลการทดสอบดังภาพที่ 99 จากผลการวิเคราะห์การไหลซึมดังกล่าว แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องระหว่างผลการวิเคราะห์การไหลซึมโดยใช้

แบบจำลอง และผลการไหลซึมจากการทดสอบ Continuous Measurement ในห้องปฏิบัติการ ทั้งในกระบวนการแห้งและกระบวนการเปียกน้ำ ซึ่งการเปรียบเทียบผลการไหลซึมดังกล่าว บ่งชี้ถึงความใกล้เคียงของการกำหนดขอบเขตในแบบจำลองและการทดสอบ ทั้งในสถานะเริ่มต้นที่มีการไหลซึมคงที่และสถานะการไหลที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เพื่อนำไปสู่การกำหนดขอบเขตของการวิเคราะห์การไหลซึมที่ซับซ้อนมากขึ้น



ภาพที่ 99 แสดงผลการทดสอบ Continuous Measurement เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์การไหลซึม ในกระบวนการเปียก

4. การวิเคราะห์แบบจำลองและสรุปผลการวิเคราะห์

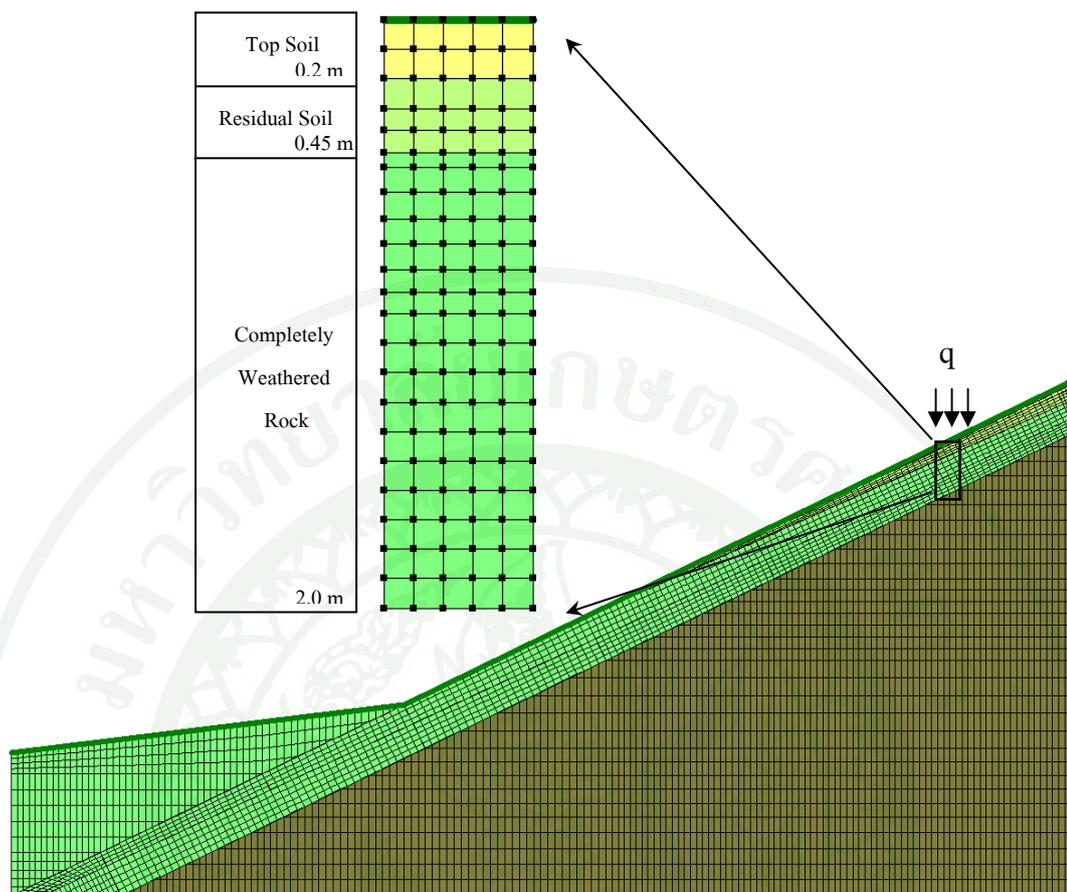
ส่วนนี้เป็นการวิเคราะห์การไหลซึมด้วยวิธี Finite Element ซึ่งมีขอบเขตการวิเคราะห์แบบ 1 มิติ ประกอบด้วย 2 หัวข้อใหญ่ โดยในหัวข้อแรกจะกล่าวถึงวิธีการวิเคราะห์การไหลซึมและเสถียรภาพของลาดดิน ซึ่งจะประกอบด้วย การสร้างแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์การไหลซึม โดยแบ่งชั้นดินตามลักษณะชั้นดินจากการขุดสำรวจในสนาม การนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการมาใช้ในการวิเคราะห์ และวิธีการวิเคราะห์การไหลซึมโดยจะพิจารณาทั้งสถานะเริ่มต้นและสถานะการตกของฝนที่มีค่าความเข้มข้นน้ำฝนที่ทำให้เกิดดินถล่ม อีกทั้งพิจารณาสภาพการระบายน้ำด้านล่างของชั้นหินที่ต่างกันร่วมด้วย และกล่าวถึงวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ในหัวข้อที่สองจะเป็นการสรุปผลการวิเคราะห์การไหลซึมและเสถียรภาพของลาดดิน

ร่วมกัน เนื่องจากผลการวิเคราะห์การไหลซึมนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นในดิน ส่งผลโดยตรงต่อกำลังรับแรงเฉือนและเสถียรภาพความปลอดภัยของลาดดิน ซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินนั้น พิจารณากำลังของดินทั้งที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการและพิจารณากำลังของดินที่ลดลงเนื่องจากการผุพังของดิน มีรายละเอียดดังนี้

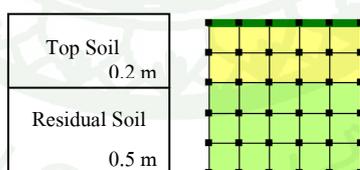
4.1 วิธีการวิเคราะห์การไหลซึมและเสถียรภาพของลาดดิน

4.1.1 แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์การไหลซึม

แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์การไหลซึม ทำการพิจารณาหน้าตัดชั้นดิน 2 ระดับความลึก ได้แก่ ความลึกของหน้าตัดชั้นดิน 2 เมตร และความลึกของหน้าตัดชั้นดิน 0.5 เมตร ซึ่งเป็นช่วงความลึกของการพิบัติที่เกิดในพื้นที่จังหวัดอุดรดิตถ์ ที่มีลักษณะการพิบัติในระดับตื้น เมื่อพิจารณาความลึกของหน้าตัดชั้นดิน 2 เมตร โดยความกว้างของชั้นดินไม่มีผล เนื่องจากพิจารณาการไหลแบบหนึ่งมิติ ซึ่งการแบ่งชั้นดินในการวิเคราะห์แบบจำลองนั้น พิจารณาตามลักษณะชั้นดินจากบ่อสำรวจที่ 2 โดยแบ่งชั้นดินออกเป็น 3 ชั้น ได้แก่ ชั้นผิวดินตั้งแต่ความลึก 0-0.2 เมตร ชั้นดินผุพังในที่ที่ระดับความลึก 0.2-0.45 เมตร และชั้นหินที่ผุพังอย่างสมบูรณ์ที่ระดับความลึก 0.45-2 เมตร แสดงดังภาพที่ 100 และการพิจารณาความลึกของหน้าตัดชั้นดิน 0.5 เมตร โดยกำหนดให้พื้นที่หน้าตัดชั้นดินกว้าง 0.5 เมตรเช่นกัน ลักษณะชั้นดินแบ่งเป็น 2 ชั้น ได้แก่ ชั้นผิวดินตั้งแต่ความลึก 0-0.2 เมตร ชั้นดินผุพังในที่ที่ระดับความลึก 0.2-0.5 เมตร ดังภาพที่ 101



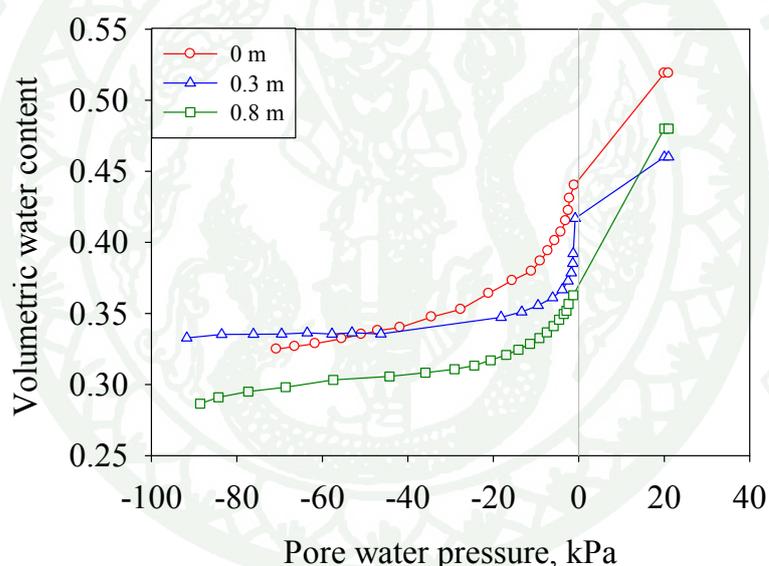
ภาพที่ 100 หน้าตัดแบบจำลองการวิเคราะห์การไหลซึมแบบ 1 มิติ เมื่อพิจารณาความลึกของหน้าตัดชั้นดิน 2 เมตร



ภาพที่ 101 หน้าตัดแบบจำลองการวิเคราะห์การไหลซึมแบบ 1 มิติ เมื่อพิจารณาความลึกของหน้าตัดชั้นดิน 0.5 เมตร

การวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำฝนที่ตกลงสู่ชั้นดินนั้น มีพารามิเตอร์ที่สำคัญ คือ คุณสมบัติความอุ้มน้ำของดินที่ไม่อุ้มตัวด้วยน้ำ ประกอบด้วยเส้นออตตลักษณะซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้น โดยปริมาตรกับค่าแรงดูดในดิน (Soil-Water Characteristic Curve) และฟังก์ชันสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำและค่าแรงดูดในดิน

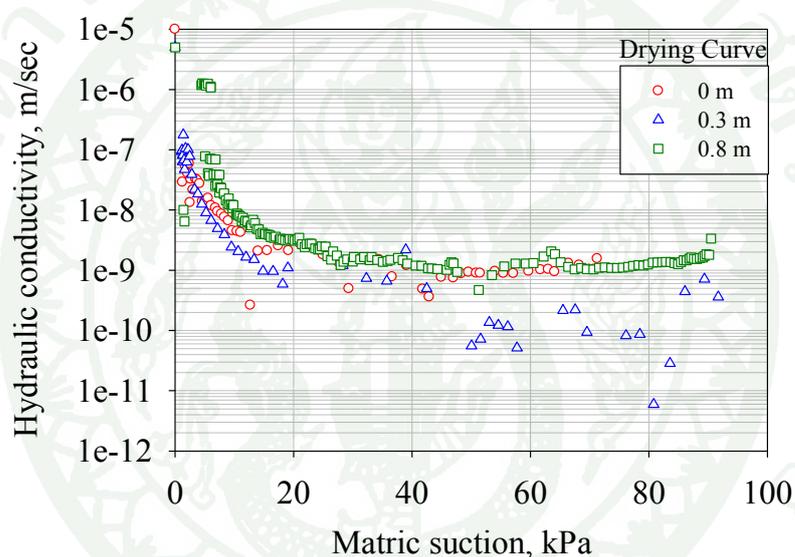
(Hydraulic Conductivity Function) ซึ่งทั้งสองตัวแปรหาได้จากผลการทดสอบหาเส้นอัตราลักษณ์ด้วยวิธี Continuous Measurement สำหรับการวิเคราะห์การไหลซึมนี้ เลือกใช้ผลการทดสอบจากกระบวนการแห้ง (Drying Curve) แทนที่จะใช้ผลการทดสอบจากกระบวนการเปียก ซึ่งมีความสอดคล้องกับสภาพจริงเนื่องจากมีการไหลซึมของน้ำฝนที่ตกลงสู่ชั้นดิน แต่จากผลการทดสอบด้วยวิธี Continuous Measurement ของกระบวนการเปียก ยังมีความแตกต่างจากผลการทดสอบ Point-Wise Measurement อยู่ ในที่นี้จึงนำผลการทดสอบของกระบวนการแห้งซึ่งมีความสอดคล้องของผลการทดสอบทั้งสองวิธีมากกว่ามาใช้ในการวิเคราะห์แทน โดยนำผลการทดสอบฟังก์ชันสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำที่ระดับความลึก 0, 0.3, 0.8 เมตร ให้เป็นตัวแทนในแต่ละชั้นดิน คือ ชั้นผิวดิน ชั้นดินผุ พังในที่ และชั้นหินที่ผุพังอย่างสมบูรณ์ ตามลำดับ ซึ่งค่าคุณสมบัติความอุ้มน้ำของดินที่ไม่อุ้มน้ำด้วยน้ำที่นำมาใช้ในแบบจำลองแสดงดังภาพที่ 102 และ 103



ภาพที่ 102 Soil-Water Characteristic Curve

จากภาพที่ 102 แสดงเส้นอัตราลักษณ์ จากผลการทดสอบการหาเส้นอัตราลักษณ์ด้วยวิธี Continuous Measurement ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้น โดยปริมาตรและค่าแรงดันน้ำด้านลบหรือค่าแรงดูดเมตริกซ์ สำหรับการวิเคราะห์การไหลซึมนั้น ควรกำหนดค่าแรงดันน้ำด้านลบที่ทำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (อภินิธิและอัครพัฒน์, 2551) โดยจากการทดสอบเมื่อค่าแรงดูดเมตริกซ์มีค่าเข้าใกล้ค่าศูนย์ ตัวอย่างดินนั้นมีค่าดีกรีความอิ่มตัวด้วยน้ำประมาณ 0.8-0.9 แสดงว่าตัวอย่างดินยังมีช่องว่างที่น้ำสามารถเข้าไปได้อีก จึงต้องกำหนดค่าแรงดันน้ำด้านลบ ดังกล่าว คล้ายกับการเพิ่มแรงดันเพื่อให้สามารถเข้าสู่ช่องว่างภายในตัวอย่างดิน

ได้ และพิจารณาค่าความชื้น โดยปริมาตรจากค่าความพรุน เมื่อตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ($\theta = nSr$) ค่าดัชนีความอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าเท่ากับ 1 ทำให้ค่าความชื้น โดยปริมาตรมีค่าเท่ากับค่าความพรุนของตัวอย่างดินในการทดสอบ Continuous Measurement ซึ่งการเพิ่มค่าแรงดันน้ำด้านบนนี้ส่งผลให้มีความสอดคล้องของผลการวิเคราะห์การไหลซึมและผลจากเครื่องมือวัดแรงดันน้ำ/แรงคูดน้ำที่ติดตั้งในสนามมากขึ้น เช่นเดียวกับค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำ ควรใช้ผลการทดสอบค่าความชื้นน้ำเมื่อตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำร่วมด้วย ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ค่าความชื้นน้ำที่ได้จากการทดสอบในสนาม ที่ระดับทดสอบต่างๆ กัน ได้แก่ ที่ระดับความลึก 0, 0.3, 0.8 และมีค่าความชื้นน้ำประมาณ $1e^{-5}$, $5e^{-6}$, $5e^{-6}$ เมตร/วินาที ตามลำดับ ดังภาพที่ 103



ภาพที่ 103 Hydraulic Conductivity Function

4.1.2 การวิเคราะห์การไหลซึม

จากแบบจำลองหน้าตัดชั้นดินดังกล่าว นำมาวิเคราะห์การไหลซึมซึ่งแบ่งออกเป็น 2 สถานะ คือ สถานะการไหลคงที่ (Steady State) และสถานะการไหลที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient Analysis) สำหรับสถานะการไหลคงที่ (Steady State) เป็นการศึกษาลักษณะการไหลซึมโดยใช้อัตราความเข้มข้นของน้ำฝนเฉลี่ยต่อเดือน เพื่อใช้เป็นสถานะเริ่มต้น (Initial Condition) ของการไหลที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา และสถานะการไหลที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient Analysis) จะพิจารณาการตกของฝนในช่วงเวลาต่างๆ ดังนั้นการวิเคราะห์การไหลซึม

จึงแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การวิเคราะห์การไหลซึมในสภาวะเริ่มต้น โดยวิเคราะห์ทั้งสภาวะการไหลคงที่และสภาวะการไหลที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเทียบเคียงกับผลการตรวจวัดในสนาม เพื่อให้แบบจำลองมีสภาวะใกล้เคียงกับสภาวะที่เกิดขึ้นจริงในสนาม และการวิเคราะห์การไหลซึมเมื่อพิจารณาความเข้มข้นน้ำฝนที่ทำให้เกิดดินถล่ม โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1.2.1 การวิเคราะห์การไหลซึมในสภาวะเริ่มต้น

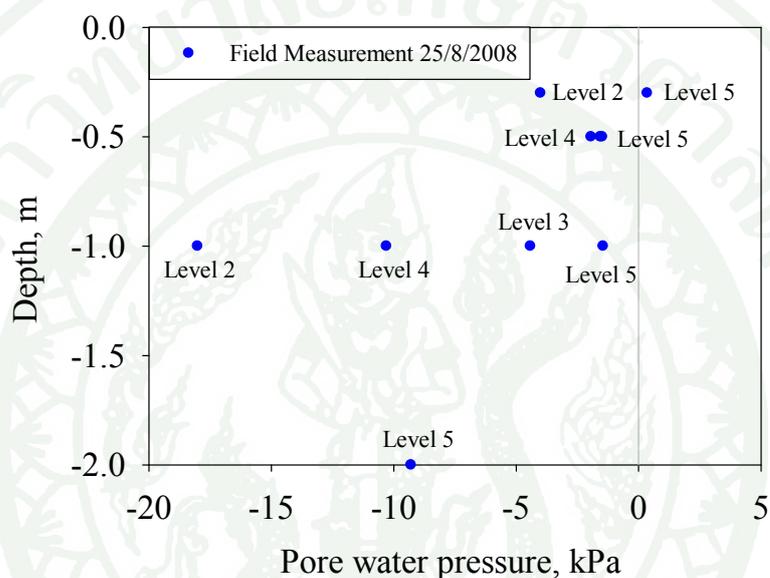
การวิเคราะห์การไหลซึมในสภาวะเริ่มต้น จะวิเคราะห์การไหลซึมทั้งแบบคงที่และแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา เพื่อนำผลการวิเคราะห์เทียบเคียงกับผลการตรวจวัดจากเครื่องมือวัดแรงดันน้ำ/แรงดูดน้ำในดินที่ติดตั้งในสนาม เพื่อให้มั่นใจว่าแบบจำลองสามารถทำนายพฤติกรรมได้ใกล้เคียงกับในสนาม และใช้การวิเคราะห์การไหลซึมแบบคงที่เป็นสภาวะเริ่มต้นของการวิเคราะห์การไหลซึมเมื่อพิจารณาอัตราความเข้มข้นน้ำฝนที่ทำให้เกิดดินถล่ม

- การวิเคราะห์การไหลซึมแบบคงที่(Steady State)

การวิเคราะห์การไหลแบบคงที่ เนื่องจากเป็นสภาวะเริ่มต้นของการวิเคราะห์การไหลซึม และนำไปสู่การวิเคราะห์สภาวะการไหลที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาในกรณีอื่นๆ ดังนั้นการกำหนดขอบเขตของสภาวะเริ่มต้นนี้จึงมีความสำคัญอย่างมาก โดยใช้ค่าที่ตรวจวัดได้ในสนามร่วมพิจารณาในการกำหนดขอบเขตสภาวะเริ่มต้น ซึ่งพิจารณาค่าที่ตรวจวัดได้ในสนามของวันที่ 25 สิงหาคม 2551 ภายหลังจากการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมในสนามเป็นระยะเวลา 1 วัน ซึ่งเป็นระยะเวลาเพียงพอที่จะให้อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำ/แรงดูดน้ำในดิน(Tensiometer) ปรับสภาพให้อยู่ในสภาวะที่สมดุลกับชั้นดินได้ และอุปกรณ์วัดแรงดันน้ำ/แรงดูดน้ำในดินทุกตัวอยู่ในสภาพที่ใช้งานได้ ซึ่งมีรายละเอียดของการกำหนดขอบเขตดังนี้

1. กำหนดขอบเขตบนให้มีการไหลซึมลงที่อัตราคงที่ (Unit flux, q) ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับอัตราความเข้มข้นของน้ำฝนเฉลี่ย ที่ตรวจวัดได้ในพื้นที่ศึกษา ช่วงฤดูฝน มีค่าประมาณ 300 มิลลิเมตร/เดือน ($1.077e^{-7}$ เมตร/วินาที)
2. การกำหนดขอบเขตด้านข้างของหน้าตัดดินเป็นลักษณะทึบน้ำ (No Flow) เนื่องจากกำหนดให้การไหลเป็นแบบหนึ่งมิติ

3. กำหนด Pressure Head ด้านล่างสุดของหน้าตัดดินจากค่าผลการตรวจวัดเครื่องมือวัดแรงดันน้ำ/แรงดูดน้ำที่ติดตั้งในสนามที่ระดับความลึก 2 เมตร แสดงดังภาพที่ 104 ซึ่งเป็นผลการตรวจวัดตามความลึกของทุกระดับการติดตั้งเครื่องมือในวันที่ 25 สิงหาคม 2551 และมีค่าแรงดูดประมาณ 9 กิโลปาสกาล จึงกำหนดขอบเขตด้านล่างด้วย Pressure Head ให้มีค่าเท่ากับ -0.9 เมตร

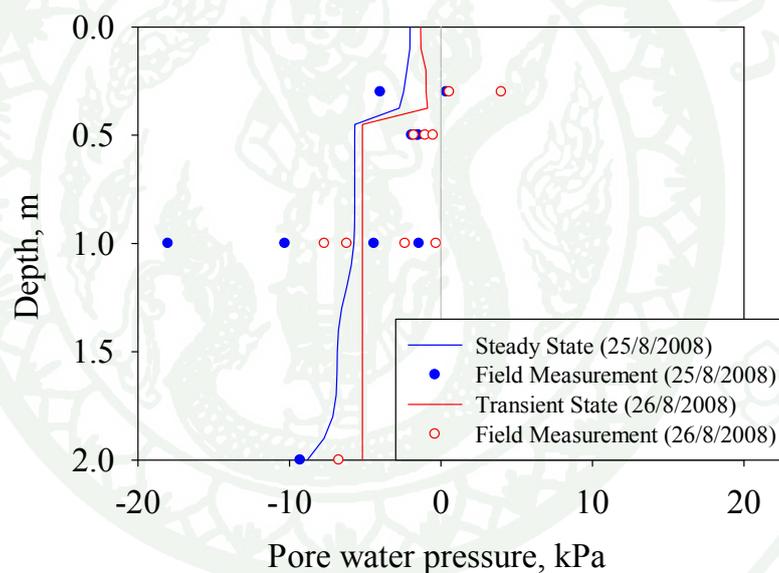


ภาพที่ 104 ผลการตรวจวัดค่าแรงดันน้ำที่ตรวจวัดได้ในสนาม วันที่ 25 สิงหาคม 2551

- การวิเคราะห์การไหลซึมแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient Analysis)

การไหลซึมแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient Analysis) จะพิจารณาการตกของฝนในช่วงเวลาหลังจากสภาวะเริ่มต้น 1 วัน เมื่อวันที่ 26 สิงหาคม 2551 มีฝนตกลงมาและมีค่าปริมาณน้ำฝนรายวันเท่ากับ 35 มิลลิเมตร/วัน ซึ่งเป็นค่าที่ตรวจวัดได้จริงในสนาม จึงกำหนดขอบเขตบนให้มีค่า Unit Flux (q) เท่ากับ $4.086e^{-7}$ เมตร/วินาที และกำหนดให้ผิวด้านบนของหน้าตัดดินมีค่าแรงดันน้ำได้ไม่เกินศูนย์ เนื่องจากไม่เกิดสภาพเจ็มนองของน้ำบนลาดดิน ส่วนขอบเขตล่างกำหนดให้อยู่ในสภาวะระบายน้ำอิสระ (Unit Gradient)

จากการวิเคราะห์การไหลซึมแบบคงที่ และแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยพิจารณาการตกของฝน 1 วัน เทียบเคียงกับผลการตรวจวัดในสนาม ผลของการวิเคราะห์การไหลซึมในสภาวะการไหลคงที่เปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดค่าแรงดันน้ำ/แรงดูดน้ำในสนาม ของวันที่ 25 สิงหาคม 2551 เนื่องจากเป็นสภาวะเริ่มต้นของการตรวจวัดพฤติกรรมในสนาม พบว่าค่าแรงดันน้ำมีความสอดคล้องกัน ดังภาพที่ 105 สภาวะการไหลคงที่นี้จะใช้เป็นสภาวะเริ่มต้นของการวิเคราะห์การไหลซึมแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลาเมื่อพิจารณาฝนที่ตกในพื้นที่ศึกษาในวันที่ 26 สิงหาคม 2551 ซึ่งค่าน้ำฝนรายวันที่ตรวจวัดได้ในสนามมีค่าเท่ากับ 35 มิลลิเมตร/วัน (Unit Flux (q) เท่ากับ $4.086e^{-7}$ เมตร/วินาที) ผลการวิเคราะห์พบว่าค่าแรงดันน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นและสอดคล้องกันทั้งผลการวิเคราะห์การไหลซึมและผลการตรวจวัดในสนาม ดังนั้นสภาวะเริ่มต้นที่กำหนดดังกล่าวจึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการนำไปวิเคราะห์ต่อไป



ภาพที่ 105 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์และผลการตรวจวัดค่าแรงดันน้ำในสนาม ทั้งในสภาวะการไหลซึมแบบคงที่และการไหลซึมแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา

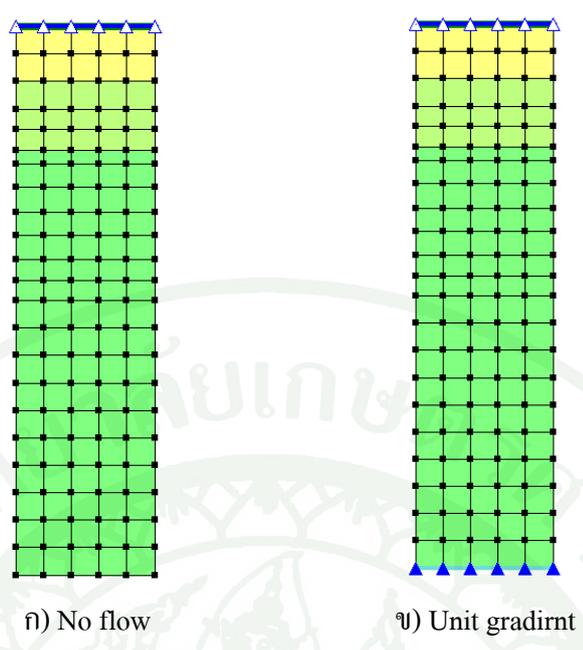
4.1.2.2 การวิเคราะห์การไหลซึมเมื่อพิจารณาความเข้มข้นน้ำฝนที่ทำให้เกิดดินถล่ม

การกำหนดสภาพขอบเขตของการวิเคราะห์การไหลซึมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เมื่อพิจารณาความเข้มข้นน้ำฝนที่ก่อให้เกิดดินถล่ม จากเครื่องวัดน้ำฝนที่ติดตั้งในพื้นที่ใกล้เคียงกับพื้นที่ที่เกิดดินถล่ม ในจังหวัดอุดรดิตถ์ สามารถเก็บข้อมูลน้ำฝนรายวันในช่วงเหตุการณ์

การเกิดน้ำท่วม-ดินถล่มตั้งแต่วันที่ 18-22 พฤษภาคม 2549 มีค่าปริมาณน้ำฝนเท่ากับ 7.9, 0, 14.5, 120.4, 263.7 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากคำบอกเล่าของชาวบ้าน ซึ่งกล่าวว่ามีฝนตกปรอยๆ ติดต่อกันเป็นเวลานาน และมีฝนตกหนักเป็นระยะเวลาประมาณ 2-3 ชั่วโมง จึงเกิดเหตุการณ์ดินถล่มดังกล่าว จึงพิจารณาปริมาณน้ำฝนที่ 120.4 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นปริมาณน้ำฝนเพิ่มขึ้นจากฝนที่ตกปรอยๆ ในช่วงแรก ซึ่งเป็นค่าประมาณ 50 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง และจากผลการตรวจวัดปริมาณน้ำฝนในพื้นที่ศึกษา พบว่าอัตราความเข้มของน้ำฝนสูงสุดมีค่า 38.6 มิลลิเมตร/30 นาที อีกทั้งสอดคล้องกับความเข้มของน้ำฝนที่ก่อให้เกิดดินถล่มในเกาะฮ่องกงในระดับสูงมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อฝนตกติดต่อกันเกิน 5 ชั่วโมง (Kay, 1998) โดยกำหนดขอบเขตดังนี้

1. สภาพขอบเขตบน(Top Boundary Condition) ของการวิเคราะห์แบบ Transient Analysis กำหนดให้มีฝนตกที่ความเข้ม 50 มิลลิเมตร/ชั่วโมง (Unit Flux (q) เท่ากับ 1.39×10^{-5} เมตร/วินาที) และพิจารณาผิวด้านบนของหน้าตัดดิน 2 รูปแบบคือ ยอมให้มีการเจ็มนองของน้ำบนลาดดิน(แรงดันน้ำที่ผิวด้านบนของหน้าตัดดินมีค่ามากกว่าศูนย์ได้หรือน้ำสามารถเอ่อบนลาดดินได้) และไม่ยอมให้มีสภาพเจ็มนองของน้ำบนลาดดิน (แรงดันน้ำที่ผิวด้านบนของหน้าตัดดินจะมีค่าไม่เกินศูนย์)

2. สภาพขอบเขตล่าง กำหนดขอบเขตล่าง 2 ลักษณะ เพื่อพิจารณาปัจจัยของการพิบัติ เนื่องจากสภาพการระบายน้ำด้านล่างในชั้นหิน คือ แบบไม่มีการไหล (No Flow) เพื่อจำลองลักษณะชั้นดินที่บริเวณด้านล่างเป็นชั้นหินทึบ ดังภาพที่ 106ก) และแบบปล่อยให้มีการไหลอย่างอิสระ (Unit Gradient) เนื่องจากจำลองลักษณะชั้นดินที่มีความต่อเนื่องกันหรือหินสามารถระบายน้ำได้ดีและน้ำสามารถไหลซึมลงสู่ด้านล่างของชั้นดินและหินได้ ดังภาพที่ 106ข)



ภาพที่ 106 แสดงการกำหนดขอบเขตล่างของแบบจำลอง 2 ลักษณะ

สำหรับการวิเคราะห์การไหลซึมจะกล่าวร่วมกับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในหัวข้อ 4.2 เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นในดินของการวิเคราะห์การไหลซึม มีผลโดยตรงต่อเสถียรภาพความปลอดภัยของลาดดิน เพื่อให้เข้าใจถึงปัจจัยต่างๆ ของการพิบัติ โดยจะกล่าวต่อไป ภายหลังจากหัวข้อวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ซึ่งอธิบายถึงสมการในการวิเคราะห์และรายละเอียดของกำลังรับแรงเฉือนที่นำมาใช้วิเคราะห์ ดังนี้

4.1.3 วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

การเปลี่ยนแปลงความชื้นในดิน จากสภาวะที่ดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ส่งผลให้ค่าแรงดันน้ำและกำลังรับแรงเฉือนเปลี่ยนแปลงไป ตามความสัมพันธ์ระหว่างเส้นอัตราลักษณะและเส้นขอบเขตกำลังรับแรงเฉือน (Lu and Likos, 1960) การที่ค่าแรงดันน้ำเพิ่มขึ้นทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนมีค่าลดลง ส่งผลต่อเสถียรภาพของลาดดิน โดยฝนที่ตกหนักในระยะเวลาสั้นๆ จะส่งผลให้ดินอิ่มตัวจากการไหลซึมของน้ำผิวดิน เกิดเป็นระดับน้ำใต้ดินเสมือนและแรงดันน้ำมีค่าบวก ส่วนกรณีฝนตกน้อยๆ ในระยะเวลานาน จะทำให้ระดับน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้น (นงลักษณ์และวารากร, 2546) ซึ่งจะช่วยให้ค่าส่วนความปลอดภัยลดลง (Uplift Pressure) ทำให้ค่าสัดส่วนความปลอดภัยลดลงนั้น ในกรณีพื้นที่ศึกษา นี้ ระดับน้ำใต้ดินของลาดดินในพื้นที่ศึกษาอยู่ในระดับต่ำ และการพิบัติส่วน

ใหญ่เกิดในระดับดิน ซึ่งเกิดจากการที่น้ำฝนซึมลงสู่ชั้นดิน และเพิ่มค่าแรงดันน้ำในดินให้สูงขึ้น การพิบัติจะขนานไปกับลาดดิน (Infinite Slope) ซึ่งมีความเหมาะสมในการใช้วิธีวิเคราะห์แบบลาดอนันต์ ตามลักษณะการพิบัติที่เกิดขึ้นจริงในพื้นที่ศึกษา

$$F = \frac{c' + (\gamma \cdot z \cos^2 \beta) \cdot \tan \phi' - u_w \cdot \tan \phi^b}{\gamma \cdot z \sin \beta \cdot \cos \beta} \quad (54)$$

เมื่อ	c'	คือ	ความเชื่อมแน่นประสิทธิผล
	γ	คือ	ความหนาแน่นเปียกของดิน
	β	คือ	ความชันของลาดดิน ซึ่งกำหนดให้มีค่า 45 องศา
	u_w	คือ	แรงดันน้ำในช่องว่าง (ค่าติดลบ)
	ϕ'	คือ	มุมของกำลังเฉือนเนื่องจากหน่วยแรงตั้งฉากสุทธิ ($\sigma - u_a$)
	ϕ^b	คือ	มุมของกำลังเฉือนเนื่องจากแรงคูด (เมื่อ $u_w > 0$, $\phi^b = \phi'$)
	z	คือ	ความลึกของแนวการพังทลาย

จากผลการวิเคราะห์การไหลซึมที่ทราบผลของค่าแรงดันน้ำ สามารถนำไปใช้ประเมินค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินอนันต์ ร่วมกับผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน โดยพิจารณาความลาดชันที่ 45 องศา และใช้สมการของลาดดินอนันต์ (Infinite Slope) ดังสมการที่ 54 (Fredlund and Rahardjo, 1993) ร่วมกับค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างดินที่ระดับความลึก 0.7 เมตร และค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ 2 ลักษณะ ได้แก่ ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบการเฉือนตรงในแต่ละชั้นดิน และค่ากำลังรับแรงเฉือนเมื่อจำลองสภาพการสุ่งของชั้นดิน มีรายละเอียดดังนี้

แบบแรก ใช้ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบการเฉือนตรงที่ระดับ 0, 0.3, 0.8 เมตรเป็นตัวแทนของชั้นผิวดิน, ชั้นดินสุ่งในที่ และชั้นหินที่สุ่งอย่างสมบูรณ์ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาหน้าตัดชั้นดินที่มีความลึก 2 เมตร สำหรับหน้าตัดชั้นดินที่มีความลึก 0.5 เมตรจะใช้ผลการทดสอบการเฉือนตรงที่ระดับ 0, 0.3 เมตรเป็นตัวแทนของชั้นผิวดิน, ชั้นดินสุ่งในที่เช่นเดียวกัน

สำหรับแบบที่สอง คือ การใช้ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่มีค่าลดลง เนื่องจากจำลองสภาพการผุพังของชั้นดิน ซึ่งจากการศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงเฉือนของดินในสภาวะเปียก สลับแห้ง พบว่า การผุพังของชั้นดินส่งผลให้ค่าความเชื่อมั่นแน่นของดินลดลง จากเหตุผลดังกล่าวจึงนำมาร่วมพิจารณาในการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย กระทำโดยลดค่าความเชื่อมั่นแน่นของดินตลอดหน้าตัดชั้นดิน 10-80 เปอร์เซ็นต์ของค่าความเชื่อมั่นแน่นที่ได้จากการทดสอบการเฉือนตรงที่ระดับ 0, 0.3, 0.8 เมตร ดังตารางที่ 7 จากนั้นพิจารณาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยตามความลึกที่เวลาต่างๆ และเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจากค่ากำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดิน 2 ลักษณะดังกล่าว เพื่อพิจารณาปัจจัยของการพิบัติที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกำลังที่ลดลงจากการผุพังของดิน

ตารางที่ 7 ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ลดลง จากการจำลองสภาพการผุพังของดิน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย

Depth (m)	ϕ'	c'	Degree of Weathering(Reduced c')							
			10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
0	17.6	22.8	20.52	18.24	15.96	13.68	11.4	9.12	6.84	4.56
0.3	40.4	4.6	4.14	3.68	3.22	2.76	2.3	1.84	1.38	0.92
0.8	32.0	13.7	12.33	10.96	9.59	8.22	6.85	5.48	4.11	2.74

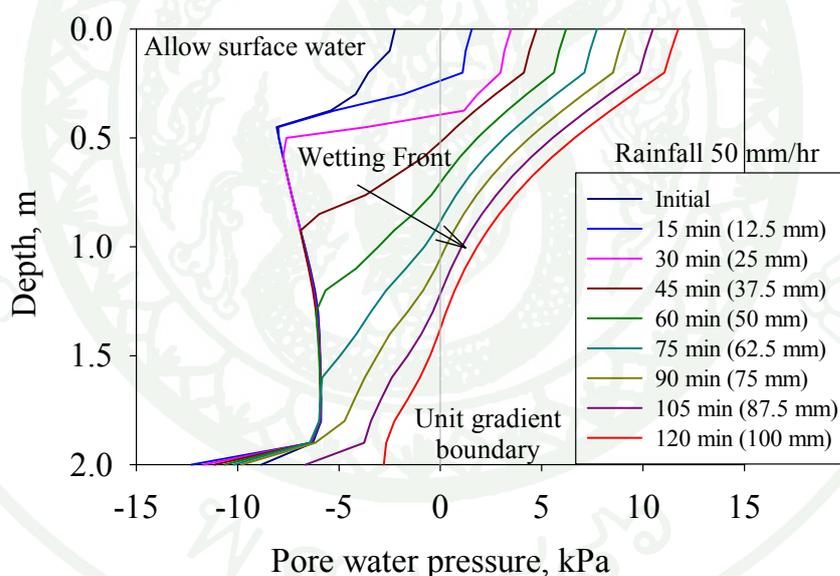
4.2 ผลการวิเคราะห์การไหลซึมและเสถียรภาพของลาดดิน

4.2.1 ผลการวิเคราะห์การไหลซึมและเสถียรภาพของลาดดินเมื่อพิจารณาอัตราความชุ่มน้ำฝนที่ทำให้เกิดดินถล่ม ของแบบจำลองหน้าตัดชั้นดินที่มีความลึก 2 เมตร

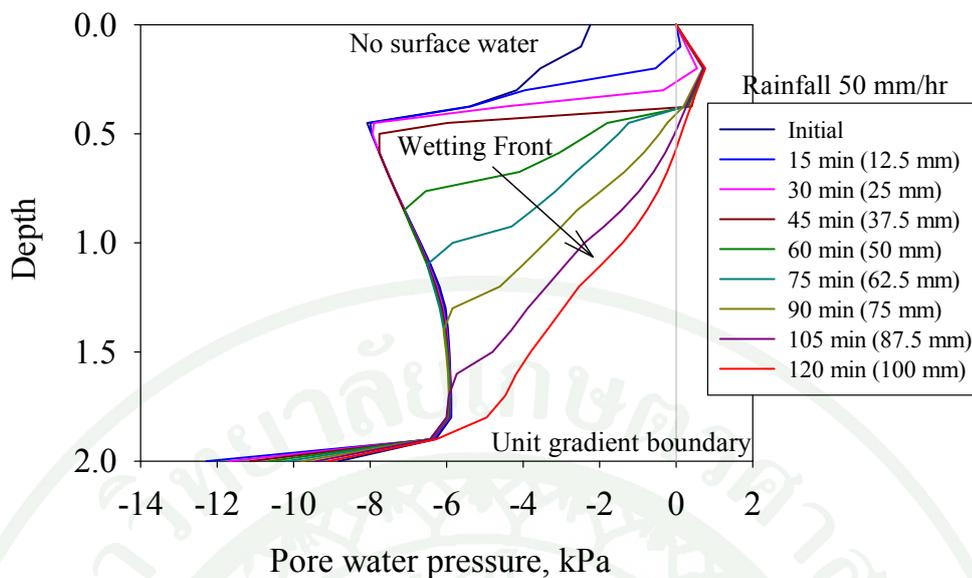
4.2.1.1 การวิเคราะห์โดยพิจารณาขอบเขตบนให้มีลักษณะยอมให้มีสภาพเจิ่งนองและไม่มีสภาพเจิ่งนองของน้ำบนลาดดิน

เมื่อวิเคราะห์การไหลซึมแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยพิจารณาความชุ่มน้ำฝนที่ทำให้เกิดดินถล่ม มีค่า 50 มิลลิเมตร/ชั่วโมง(Unit Flux(q) เท่ากับ 1.39×10^{-5} เมตร/วินาที) วิเคราะห์เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากการกำหนดขอบเขตบน 2 ลักษณะที่ยอมให้มี (Allow surface water) และไม่มีสภาพเจิ่งนองของน้ำบนลาดดิน (No surface water) พบว่า การตกของฝน

ทำให้มีน้ำค่อยๆซึมลงสู่ชั้นดิน ส่งผลให้มีค่าแรงดันน้ำสูงขึ้น จนกระทั่งเริ่มมีค่าแรงดันน้ำเป็นบวก และการที่ยอมให้มีน้ำเจือนองบนลาดดินของการตกของฝนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ดังภาพที่ 107 ค่าแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นที่ผิวดินมีค่าประมาณ 12 กิโลปาสกาล เปรียบเสมือนกับมีระดับน้ำสูงประมาณ 1.2 เมตร ซึ่งเป็นไปไม่ได้ในสภาพที่เกิดขึ้นจริงในพื้นที่ลาดเชิงเขา ส่วนผลการวิเคราะห์โดยไม่ให้มีการเจือนองของน้ำบนลาดดิน ค่าแรงดันน้ำมากที่สุดที่เกิดขึ้นมีค่า 0.406 กิโลปาสกาลที่ระดับความลึก 0.38 เมตร ซึ่งสอดคล้องกับความเป็นจริงมากกว่าการกำหนดขอบเขตบนแบบยอมให้มีน้ำเจือนองบนลาดดินดังกล่าวข้างต้น แต่การวิเคราะห์ในรูปแบบนี้อาจถูกจำกัดค่าแรงดันน้ำที่ระดับผิวดินให้มีค่าแรงดันน้ำเป็น 0 ดังภาพที่ 108 ซึ่งค่าแรงดันน้ำในช่วงผิวดินที่ถูกจำกัดนี้ไม่ได้ส่งผลต่อเสถียรภาพของลาดดิน จะเห็นได้จากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ดังภาพที่ 110 ช่วงของผิวดินนี้มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยสูง ผลมาจากการที่ผิวดินมีค่าความเชื่อมั่นแน่นอยู่สูง ดังนั้นในการวิเคราะห์การไหลซึมต่อไปในงานวิจัยนี้จะกำหนดขอบเขตบนแบบไม่ให้มีการเจือนองของน้ำบนลาดดิน



ภาพที่ 107 แสดงผลการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำฝนที่ค่าความเข้ม 50 มิลลิเมตร/ชั่วโมง ระยะเวลา 2 ชั่วโมง และยอมให้มีการเจือนองของน้ำที่ผิวดิน(Allow surface water)

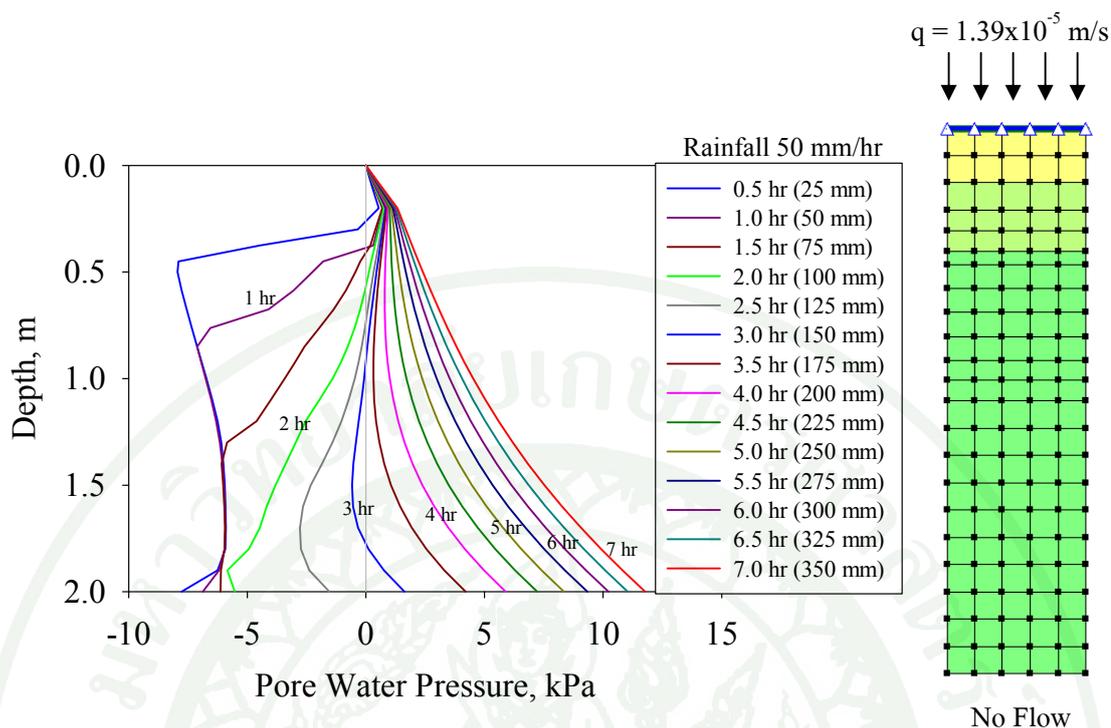


ภาพที่ 108 แสดงผลการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำฝนที่ค่าความเข้ม 50 มิลลิเมตร/ชั่วโมง ระยะเวลา 2 ชั่วโมง และไม่ยอมให้มีการเจ็มนองของน้ำที่ผิวดิน (No Surface water)

4.2.1.2 การวิเคราะห์การไหลซึมโดยพิจารณาขอบเขตล่างให้มี 2 ลักษณะ คือ การกำหนดขอบเขตล่างแบบไม่มีการไหลซึม (No Flow) และแบบให้มีการไหลซึมอย่างอิสระ (Unit Gradient) ซึ่งมีรายละเอียดของผลการวิเคราะห์ดังนี้

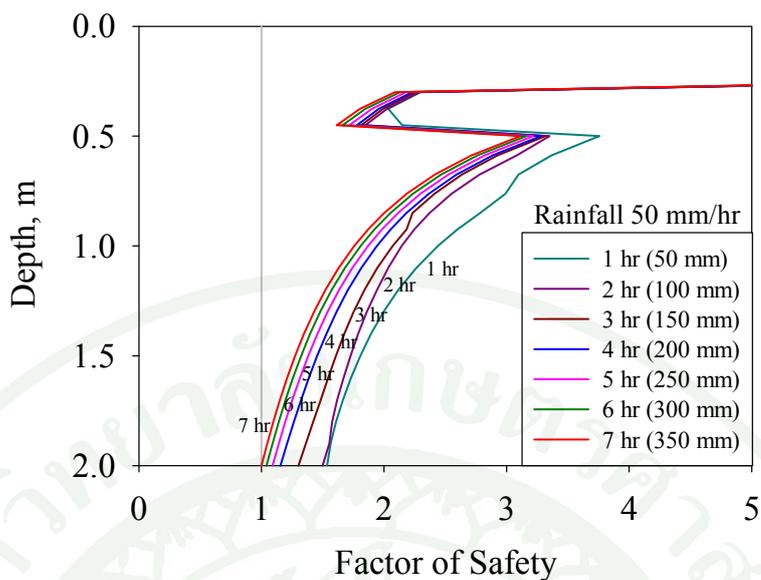
- การวิเคราะห์การไหลซึมโดยกำหนดขอบเขตล่างของแบบจำลองเป็นแบบไม่มีการไหลซึม(No Flow)

จากผลการวิเคราะห์โดยกำหนดขอบเขตล่างของแบบจำลองเป็นแบบไม่มีการไหลซึม เนื่องจากจำลองลักษณะชั้นดินด้านล่างเป็นชั้นหินทึบ เมื่อให้ฝนตกลงสู่หน้าตัดดิน ด้วยอัตราความเข้มของน้ำฝน เท่ากับ 50 มิลลิเมตร/ชั่วโมง เป็นเวลา 7 ชั่วโมง พบว่า ลักษณะการไหลซึมตามความลึกของชั้นดินมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ดังภาพที่ 109 และ เนื่องจากการไหลของน้ำที่ไม่สามารถไหลซึมลงสู่ชั้นดินหรือหินด้านล่างได้ ทำให้ค่าแรงดันน้ำในดินเพิ่มสูงขึ้นที่ระดับความลึก 2 เมตร ซึ่งมีค่าแรงดันน้ำเท่ากับ 11.78 กิโลปาสกาล



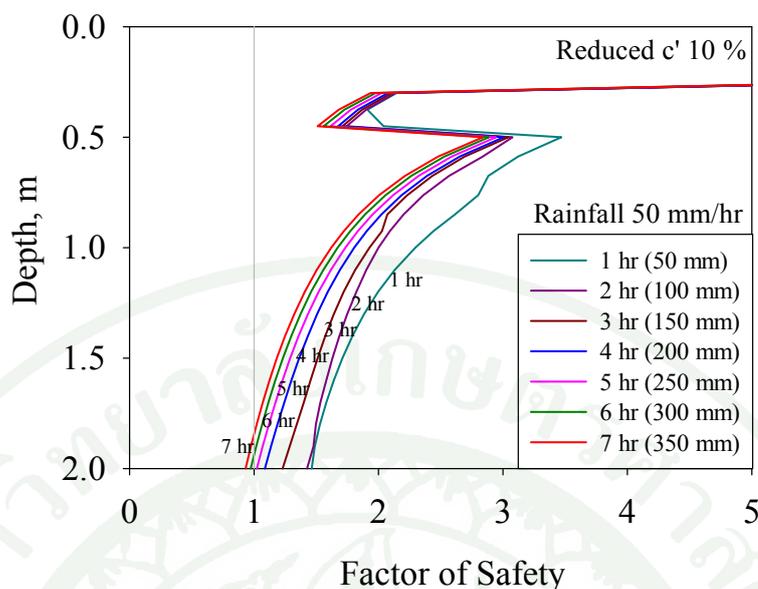
ภาพที่ 109 ผลการวิเคราะห์การไหลซึมตามความลึกของแบบจำลองชั้นดินความลึก 2 เมตรที่ระยะเวลาต่างๆ เมื่อกำหนดให้ขอบเขตล่างของแบบจำลองเป็นแบบไม่มีการไหลซึม

เมื่อพิจารณาเสถียรภาพของลาดดินจากค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่ได้จากการทดสอบการเฉือนตรงของตัวอย่างดิน ทั้งในสถานะแรงดันน้ำด้านบวกและด้านลบ นำมาใช้ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety) ตามความลึก โดยใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธี Infinite Slope และกำหนดให้อัตราส่วนความปลอดภัยของพื้นที่ลาดชันเท่ากับ 1.0 เป็นสถานะในการพิบัติของลาดดิน พบว่า การพิบัติจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อฝนตกลงมาด้วยอัตราความเข้มของฝน 50 มิลลิเมตร/ชั่วโมงเป็นเวลา 7 ชั่วโมง หรือมีปริมาณน้ำฝนที่ตกลงมาเท่ากับ 350 มิลลิเมตร โดยเกิดการพิบัติบริเวณความลึก 2 เมตร ดังภาพที่ 110



ภาพที่ 110 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยตามความลึกซึ่งวิเคราะห์โดยใช้ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบตามแต่ละความลึก

สำหรับการพิจารณากำลังที่ลดลงจากการผุพังของดิน โดยพิจารณากำลังรับแรงเฉือนที่ทำการลดค่าความเชื่อมั่นลง 10 เปอร์เซ็นต์จากผลการทดสอบการเฉือนตรงของตัวอย่างดินตามระดับความลึกต่างๆ พบว่า เมื่อกำหนดให้หน้าตัดชั้นดินมีค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ลดลง ส่งผลให้การพังทลายเร็วขึ้น โดยจะเริ่มเกิดการพังทลายเมื่อฝนตกด้วยอัตราความเข้มน้ำฝน 50 มิลลิเมตร/ชั่วโมง เป็นระยะเวลาประมาณ 5 ชั่วโมง หรือมีปริมาณน้ำฝนที่ตกลงมาเท่ากับ 250 มิลลิเมตร โดยเกิดการพังทลายบริเวณความลึก 2 เมตรเช่นกัน ดังภาพที่ 111

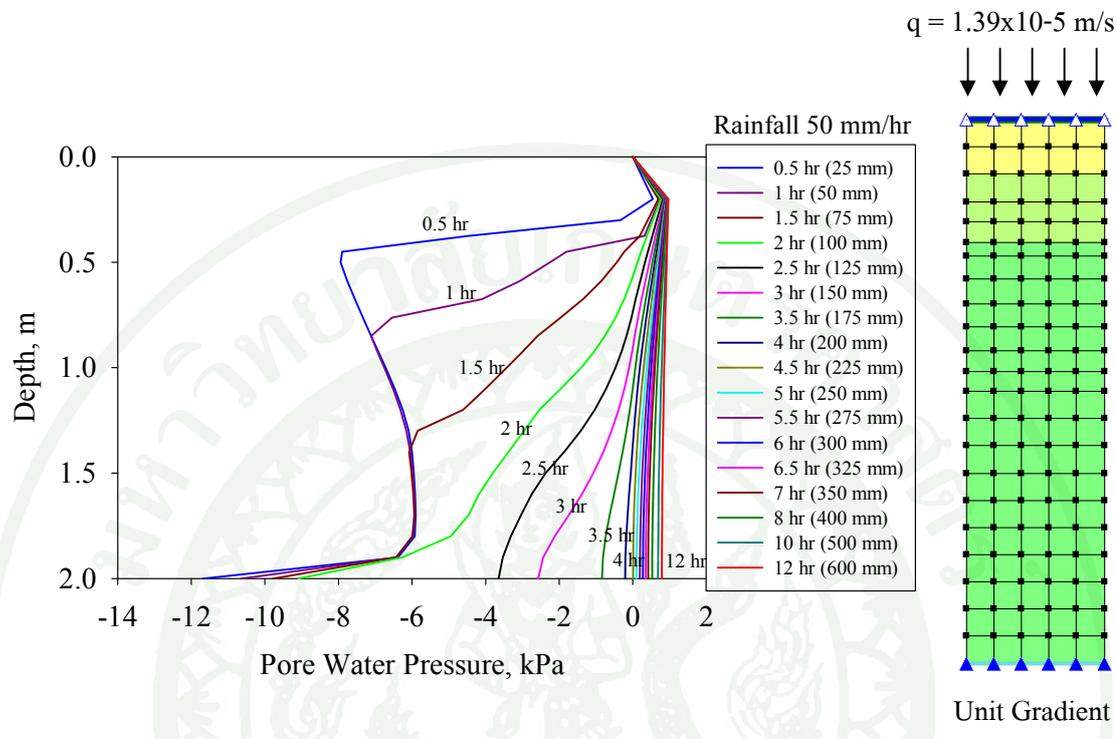


ภาพที่ 111 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยตามความลึก เมื่อพิจารณาค่าตั้งที่ลดลงจากการผุพังของดิน เมื่อวิเคราะห์โดยลดค่าความเชื่อมแน่นลง 10 เปอร์เซ็นต์จากค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่ได้จากการทดสอบการเฉือนตรง

- การวิเคราะห์การไหลซึมโดยกำหนดขอบเขตล่างของแบบจำลองให้มีการไหลซึมอย่างอิสระ (Unit Gradient)

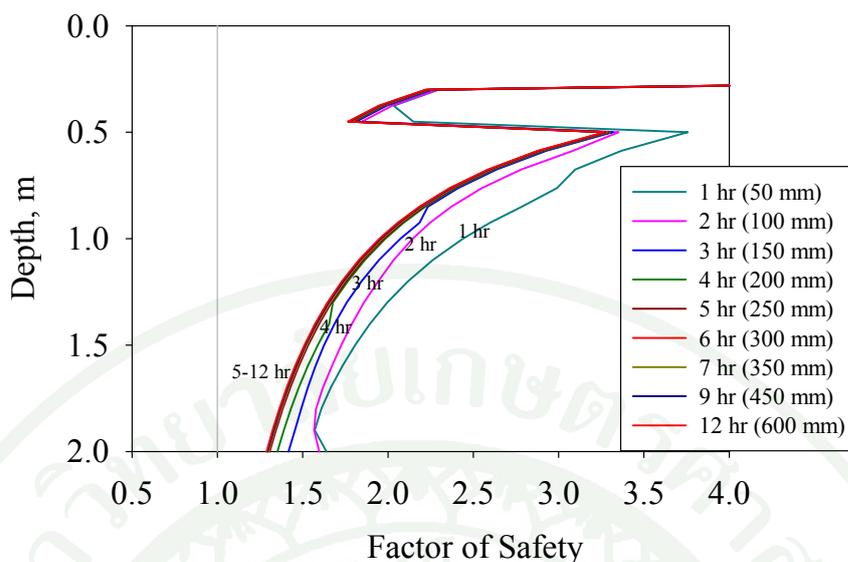
จากผลการวิเคราะห์การไหลซึมโดยกำหนดขอบเขตล่างของแบบจำลองให้มีการไหลซึม (Unit Gradient) พบว่า ค่าแรงดันน้ำตามความลึกของชั้นดินมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป จากฝนที่ตกลงมาด้วยอัตราความเข้มเฉลี่ย 50 มิลลิเมตร/ชั่วโมง เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง พบว่าค่าแรงดันน้ำในดินมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนในช่วงแรกของการตกของฝน คือ ตั้งแต่ฝนเริ่มตกจนกระทั่งฝนตกลงมาใช้ระยะเวลา 4 ชั่วโมงหรือปริมาณน้ำฝนที่ตกลงมาเท่ากับ 200 มิลลิเมตร และค่าแรงดันน้ำจะเพิ่มขึ้นน้อยลงในช่วงเวลาดังกล่าวตั้งแต่ 4 ถึง 12 ชั่วโมงต่อมา ดังภาพที่ 112 เนื่องจากการจำลองชั้นดินที่มีความต่อเนื่องกันหรือหินสามารถระบายน้ำได้ดี ทำให้น้ำสามารถไหลซึมลงสู่ด้านล่างของชั้นดินและหิน ได้ที่ระดับความลึกมากกว่า 2 เมตรได้ ค่าแรงดันน้ำที่เพิ่มขึ้นจึงไม่มากนัก โดยที่ระดับความลึก 2 เมตร มีค่าแรงดันน้ำเท่ากับ 0.79 กิโลปาสกาล เมื่อฝนตกใช้ระยะเวลา 12 ชั่วโมงหรือปริมาณน้ำฝนที่ตกลงมาเท่ากับ 600 มิลลิเมตร และเมื่อเปรียบเทียบการกำหนดขอบเขตล่างต่างกันที่ระยะเวลาการตกของฝนเท่ากันคือ 7 ชั่วโมง พบว่า การวิเคราะห์การไหลซึมโดยกำหนดขอบเขตล่างแบบไม่มีการไหลจะมีค่าแรงดันน้ำเกิดขึ้นสูง โดยมีค่าแรงดัน

น้ำเท่ากับ 11.78 กิโลปาสกาล ในขณะที่การกำหนดขอบเขตล่างแบบปล่อยให้มีการไหลอย่างอิสระ มีค่าแรงดันน้ำเพียง 0.41 กิโลปาสกาล เมื่อพิจารณาที่ระดับความลึก 2 เมตรเท่ากัน



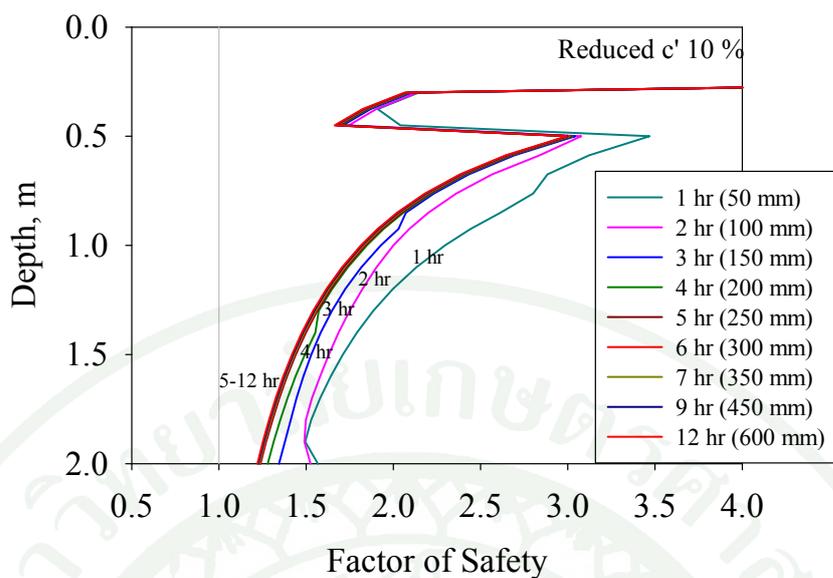
ภาพที่ 112 ผลการวิเคราะห์การไหลซึมตามความลึกของแบบจำลองชั้นดินความลึก 2 เมตรที่ระยะเวลาต่างๆ เมื่อกำหนดให้ขอบเขตล่างของแบบจำลองมีลักษณะการไหลซึมอย่างอิสระ

ผลการประเมินหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดิน พบว่า ค่าอัตราส่วนปลอดภัยมีค่าลดลงอย่างชัดเจนในช่วงของการเริ่มตกของฝนจนกระทั่งฝนตกเป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมงหรือปริมาณน้ำฝนที่ตกลงมามีค่าเท่ากับ 250 มิลลิเมตร และค่าอัตราส่วนปลอดภัยจะเริ่มมีค่าใกล้เคียงกันตั้งแต่ช่วงระยะเวลาการตกของฝนเท่ากับ 5 ชั่วโมงเป็นต้นไป ซึ่งค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ระดับความลึก 2 เมตร มีค่าเท่ากับ 1.307, 1.303, 1.299, 1.294, 1.289 เมื่อระยะเวลาการตกของฝน 5, 6, 7, 9, 12 ชั่วโมง ตามลำดับ และจากการพิบัติของลาดดินซึ่งกำหนดให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของพื้นที่ลาดชันที่มีค่าเท่ากับ 1.0 จากภาพที่ 113 พบว่า ลาดดินมีความปลอดภัยแม้กระทั่งลาดดินนั้นได้รับฝนที่มีอัตราความเข้ม 50 มิลลิเมตร/ชั่วโมง เป็นระยะเวลายาวนานติดต่อกัน 12 ชั่วโมงหรือมีปริมาณน้ำฝนที่ตกลงมามีค่าเท่ากับ 600 มิลลิเมตร

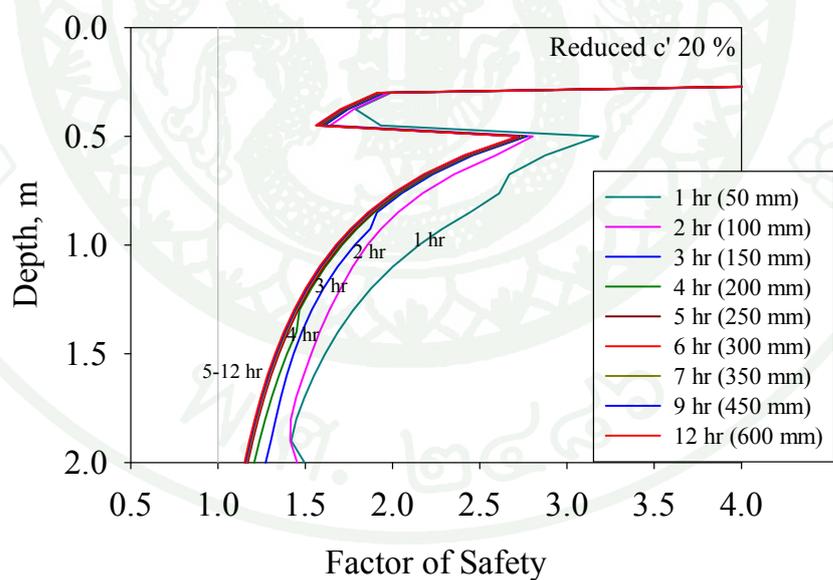


ภาพที่ 113 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยตามความลึกซึ่งวิเคราะห์โดยใช้ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบตามแต่ละความลึก เมื่อกำหนดให้ขอบเขตล่างของแบบจำลองมีลักษณะการไหลซึมอย่างอิสระ

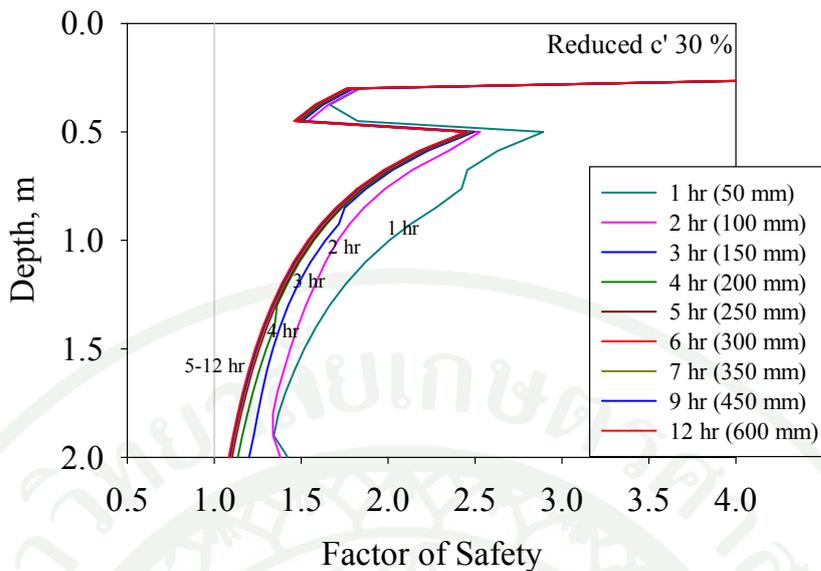
จากการกำหนดให้ขอบเขตล่างของแบบจำลองมีลักษณะการไหลซึมอย่างอิสระ เมื่อพิจารณาร่วมกับกำลังรับแรงเฉือนที่ลดลงจากการผุพังของดิน ซึ่งการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัย จะใช้ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ลดค่าความเชื่อมแน่นลง 10, 20, 30, 40, 50 เปอร์เซ็นต์ของผลการทดสอบการเฉือนตรง แสดงดังภาพที่ 114 ถึงภาพที่ 118 สังเกตว่าเส้นกราฟอัตราส่วนความปลอดภัยจะค่อยๆ ขยับมาทางด้านซ้ายมากขึ้นหรือมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ลดลง ซึ่งเมื่อลดค่าความเชื่อมแน่นลง 10, 20, 30, 40 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินมีค่าลดต่ำลงเมื่อดินเกิดการผุพังมากขึ้นและลาดดินมีความปลอดภัยแม้กระทั่งมีฝนตกด้วยอัตราความเข้ม 50 มิลลิเมตร/ชั่วโมง เป็นระยะเวลาการตกของฝนต่อเนื่องกัน 12 ชั่วโมงหรือมีปริมาณน้ำฝน 600 มิลลิเมตร แต่เมื่อลดค่าความเชื่อมแน่นลง 50 เปอร์เซ็นต์ ลาดดินจะเกิดการพิบัติที่ระดับความลึก 2 เมตร เมื่อฝนตกเป็นเวลา 4 ชั่วโมงหรือมีปริมาณน้ำฝนที่ตก 200 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 118



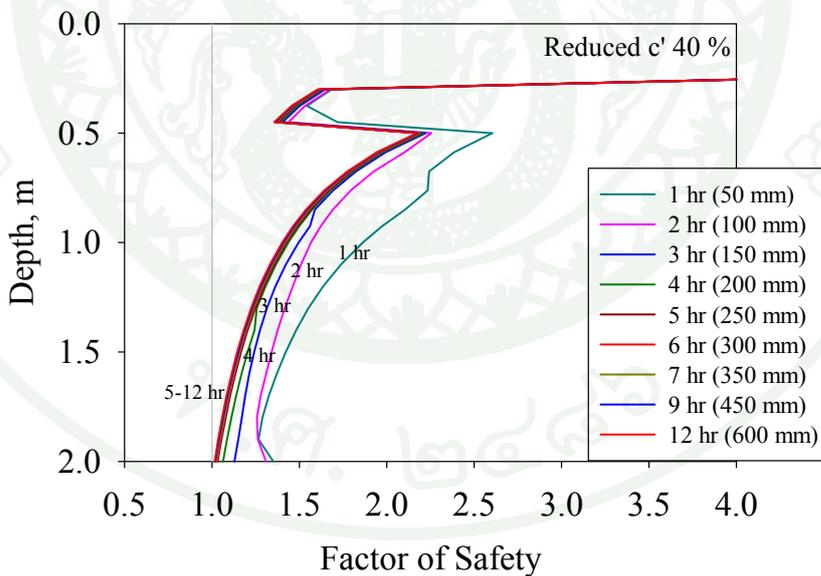
ภาพที่ 114 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยตามความลึก เมื่อพิจารณากำลังที่ลดลงจากการผุพังของดิน วิเคราะห์โดยลดค่าความเชื่อมแน่นลง 10 เปอร์เซ็นต์ และกำหนดให้ขอบเขตล่างมีลักษณะการไหลซึมอย่างอิสระ



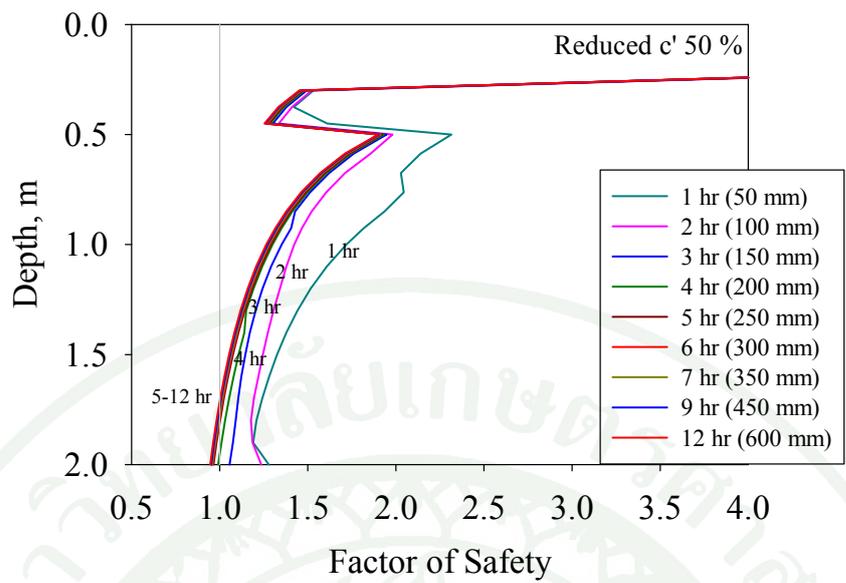
ภาพที่ 115 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยตามความลึก เมื่อพิจารณากำลังที่ลดลงจากการผุพังของดิน วิเคราะห์โดยลดค่าความเชื่อมแน่นลง 20 เปอร์เซ็นต์ และกำหนดให้ขอบเขตล่างมีลักษณะการไหลซึมอย่างอิสระ



ภาพที่ 116 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยตามความลึก เมื่อพิจารณากำลังที่ลดลงจากการเผื้องของดินวิเคราะห์โดยลดค่าความเชื่อมแน่นลง 30 เปอร์เซ็นต์ และกำหนดให้ขอบเขตล่างมีลักษณะการไหลซึมอย่างอิสระ



ภาพที่ 117 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยตามความลึก เมื่อพิจารณากำลังที่ลดลงจากการเผื้องของดินวิเคราะห์โดยลดค่าความเชื่อมแน่นลง 40 เปอร์เซ็นต์ และกำหนดให้ขอบเขตล่างมีลักษณะการไหลซึมอย่างอิสระ



ภาพที่ 118 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยตามความลึก เมื่อพิจารณากำลังที่ลดลงจากการผุพังของดินวิเคราะห์โดยลดค่าความเชื่อมแน่นลง 50 เปอร์เซ็นต์ และกำหนดให้ขอบเขตล่างมีลักษณะการไหลซึมอย่างอิสระ

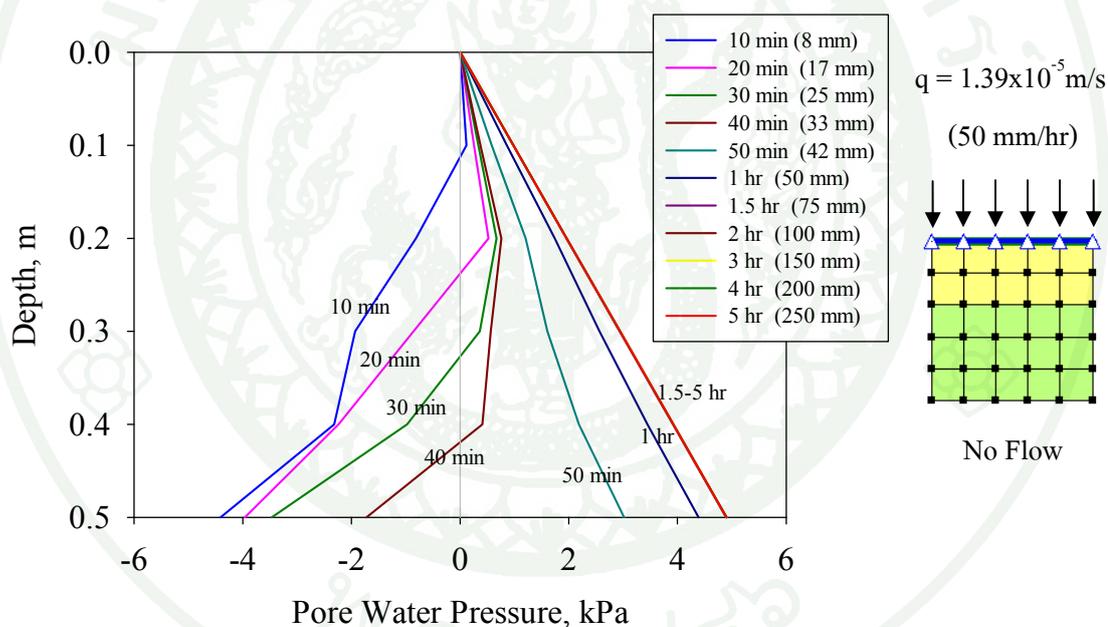
4.2.2 ผลการวิเคราะห์การไหลซึมและเสถียรภาพของลาดดินเมื่อพิจารณาอัตราความชุ่มน้ำฝนที่ทำให้เกิดดินถล่ม ของแบบจำลองหน้าตัดชั้นดินที่มีความลึก 0.5 เมตร

จากการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัยข้างต้นจะเห็นได้ว่า ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะมีค่าน้อย 2 ระดับความลึกด้วยกัน คือ เกิดการพิบัติที่ระดับความลึก 2 เมตร แสดงดังผลการวิเคราะห์แบบจำลองหน้าตัดชั้นดินที่มีความลึก 2 เมตร ที่ได้ทำการวิเคราะห์แล้วในหัวข้อ 4.2.1 และที่ระดับความลึกประมาณ 0.45 เมตร เนื่องมาจากที่ระดับความลึก 0.2-0.45 เมตรใช้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินผุพังในที่ที่ระดับความลึก 0.3 เมตร ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงเฉือนที่น้อยที่สุด จากผลการทดสอบการเหนียวตรงบริเวณบ่อสำรวจที่ 2 ที่มีประโยชน์การใช้พื้นที่แบบไม่ผลพสมนำไปสู่การพิจารณาแบบจำลองที่เป็นตัวแทนลักษณะของชั้นดินที่มีความหนาของชั้นดินน้อยและกำหนดให้ชั้นดินมีความลึก 0.5 เมตร โดยพิจารณาอัตราความชุ่มน้ำฝนที่ทำให้เกิดดินถล่ม (50 มิลลิเมตร/ชั่วโมง) และกำหนดขอบเขตล่างของแบบจำลอง 2 ลักษณะเช่นกัน คือ การจำลองลักษณะชั้นดินด้านล่างเป็นชั้นหินที่ระดับความลึก 0.5 เมตร โดยกำหนดขอบเขตล่างแบบไม่มีการไหลซึม (No Flow) และการจำลองชั้นดินที่มีความต่อเนื่องกันหรือหินสามารถระบายน้ำได้ดี

โดยกำหนดขอบเขตล่างแบบให้มีการไหลซึมอย่างอิสระ (Unit Gradient) ซึ่งมีรายละเอียดของผลการวิเคราะห์ดังนี้

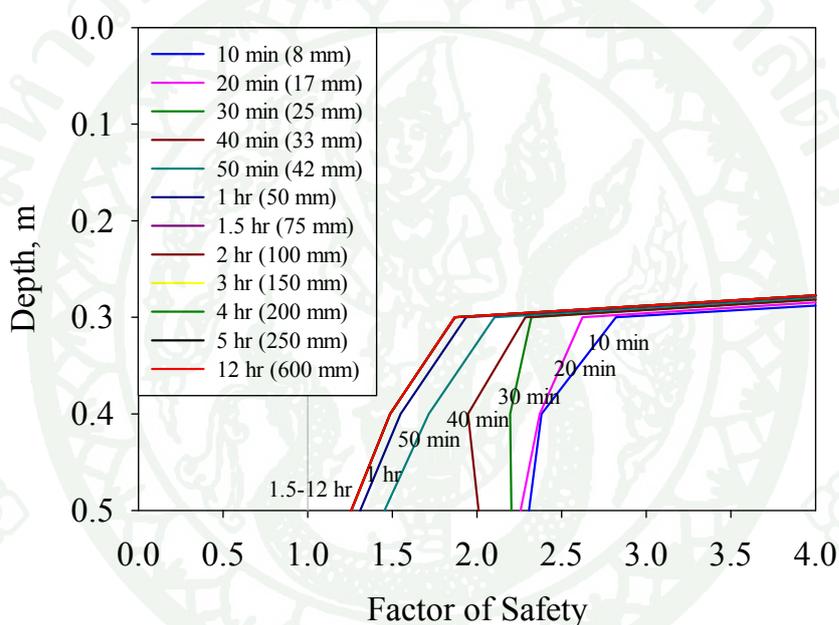
- ผลการวิเคราะห์การไหลซึมโดยกำหนดขอบเขตล่างของแบบจำลองเป็นแบบไม่มีการไหลซึม (No Flow)

เมื่อจำลองให้ฝนตกที่อัตราความเข้มของฝนเท่ากับ 50 มิลลิเมตร/ชั่วโมง ตกลงสู่ชั้นดินที่มีความลึก 0.5 เมตร และชั้นดินหรือหินด้านล่างนั้นมีลักษณะที่บีบอัดน้ำ ค่าแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นในชั้นดินนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามความลึก ภายในระยะเวลา 1 ชั่วโมง และค่าแรงดันน้ำจะเริ่มมีค่าคงที่ตั้งแต่ช่วงเวลา 1.5-5 ชั่วโมง ดังภาพที่ 119 โดยค่าแรงดันน้ำที่เกิดขึ้น เมื่อฝนตกเป็นระยะเวลา 1.5-5 ชั่วโมง ที่ระดับความลึก 0.5 เมตร มีค่าเท่ากับ 4.90 กิโลปาสกาล

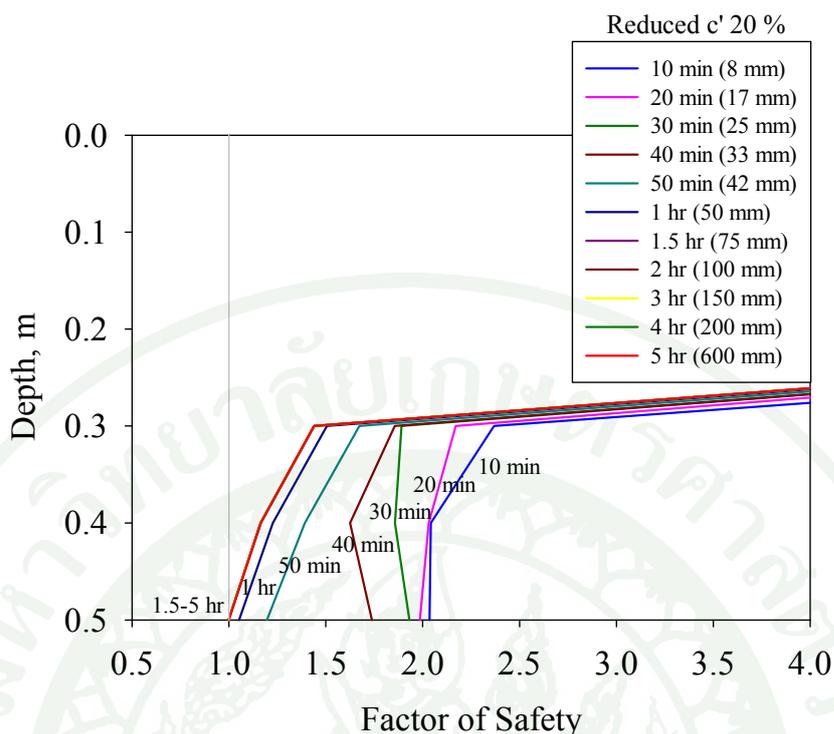


ภาพที่ 119 ผลการวิเคราะห์การไหลซึมตามความลึกของแบบจำลองชั้นดินความลึก 0.5 เมตรที่ระยะเวลาต่างๆ เมื่อกำหนดให้ขอบเขตล่างของแบบจำลองเป็นแบบไม่มีการไหลซึม

สำหรับการพิจารณาค่าอัตราส่วนปลอดภัย พบว่าค่าอัตราส่วนปลอดภัยมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลา 1 ชั่วโมง และอัตราส่วนความปลอดภัยจะเริ่มมีค่าคงที่ที่ระยะเวลา 1.5-12 ชั่วโมง โดยมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยที่สุดที่ระดับความลึก 0.5 เมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.26 ดังภาพที่ 120 และเมื่อพิจารณากำลังรับแรงเฉือนที่ลดลงจากการผุพังของดิน โดยใช้ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ลดค่าความเชื่อมั่นลง 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่า เกิดการพิบัติที่ระดับความลึก 0.5 เมตร ซึ่งมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 0.99 กิโลปาสกาล เมื่อมีฝนตกที่อัตราความเข้ม 50 มิลลิเมตร/ชั่วโมง เป็นระยะเวลา 1.5 ชั่วโมง (90 นาที) หรือมีปริมาณน้ำฝนที่ตก 75 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 121



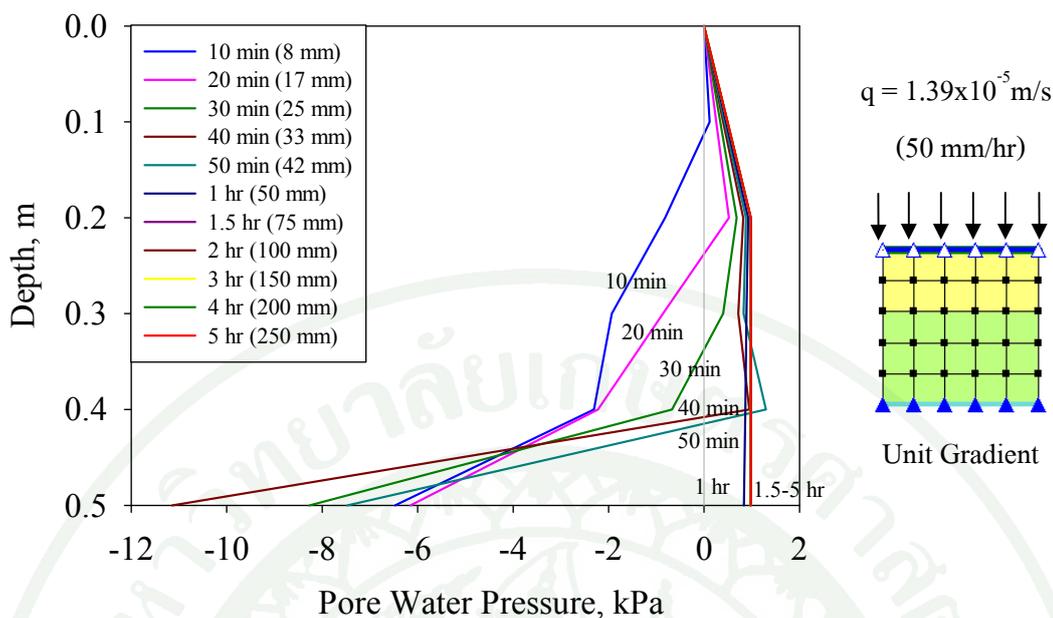
ภาพที่ 120 ค่าอัตราส่วนปลอดภัยตามความลึกซึ่งวิเคราะห์โดยใช้ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบตามแต่ละความลึก เมื่อวิเคราะห์การไหลซึมแบบกำหนดให้ขอบเขตล่างไม่มีการไหลซึม



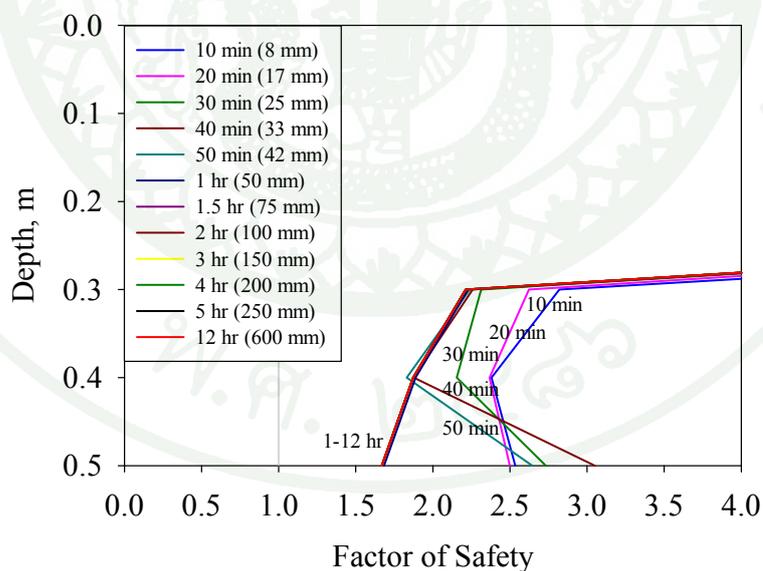
ภาพที่ 121 ค่าอัตราส่วนปลอดภัยตามความลึก เมื่อพิจารณากำลังที่ลดลงจากการยุบตัวของดิน เมื่อวิเคราะห์โดยลดค่าความเชื่อมแน่นลง 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อวิเคราะห์การไหลซึมแบบ กำหนดให้ขอบเขตล่างไม่มีการไหลซึม

- ผลการวิเคราะห์การไหลซึม โดยกำหนดขอบเขตล่างของแบบจำลองให้มีการไหลซึมอย่างอิสระ (Unit Gradient)

ผลการวิเคราะห์การไหลซึม โดยกำหนดขอบเขตล่างของแบบจำลองให้มีการไหลซึมอย่างอิสระ เมื่อพิจารณาความลึกชั้นดิน 0.5 เมตร โดยกำหนดให้ชั้นดินด้านล่างสามารถระบายน้ำได้ จากการวิเคราะห์ พบว่า ช่วงระดับความลึกผิวดินถึง 0.4 เมตร จะมีค่าแรงดันน้ำเพิ่มสูงขึ้น และที่ระดับความลึก 0.4 ถึง 0.5 เมตร ค่าแรงดันน้ำมีความเปลี่ยนแปลงเนื่องจากสภาพการระบายน้ำได้ของชั้นดิน ในช่วงระยะเวลาที่ฝนเริ่มตกจนกระทั่ง 50 นาทีหรือมีปริมาณน้ำฝนที่ตก 42 มิลลิเมตร และค่าแรงดันน้ำเริ่มมีค่าคงที่ในช่วงเวลา 1.5 ชั่วโมงหรือมีปริมาณฝนที่ตก 75 มิลลิเมตร เป็นต้นไป ดังภาพที่ 122

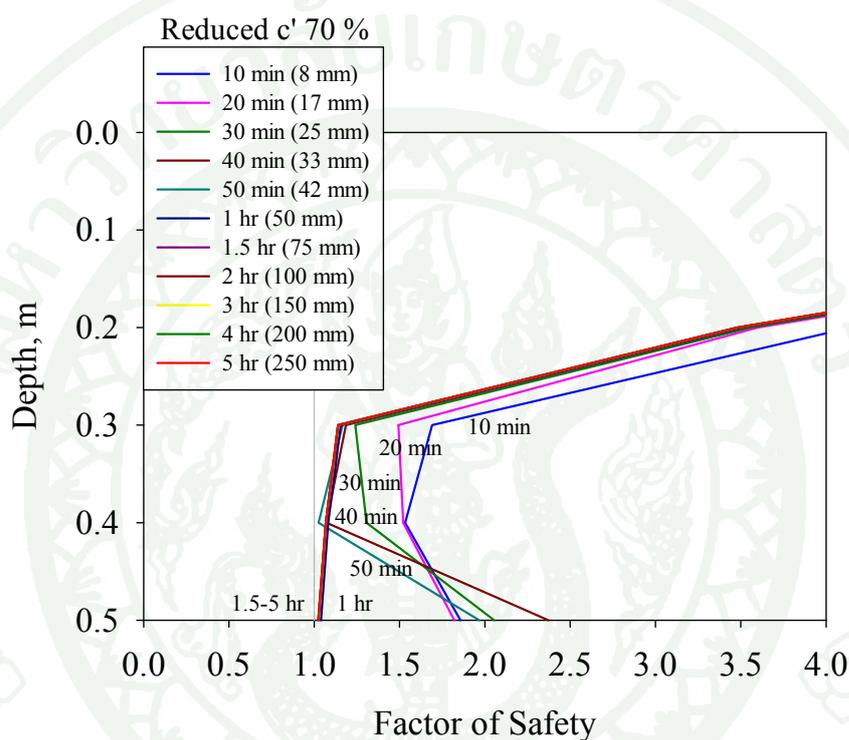


ภาพที่ 122 ผลการวิเคราะห์การไหลซึมตามความลึกของแบบจำลองชั้นดินความลึก 0.5 เมตร ที่ระยะเวลาต่างๆ เมื่อกำหนดให้ขอบเขตล่างของแบบจำลองมีลักษณะการไหลซึมอย่างอิสระ



ภาพที่ 123 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยตามความลึกซึ่งวิเคราะห์โดยใช้ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบตามความลึก เมื่อวิเคราะห์การไหลซึมแบบกำหนดให้ขอบเขตล่างมีลักษณะการไหลซึมอย่างอิสระ

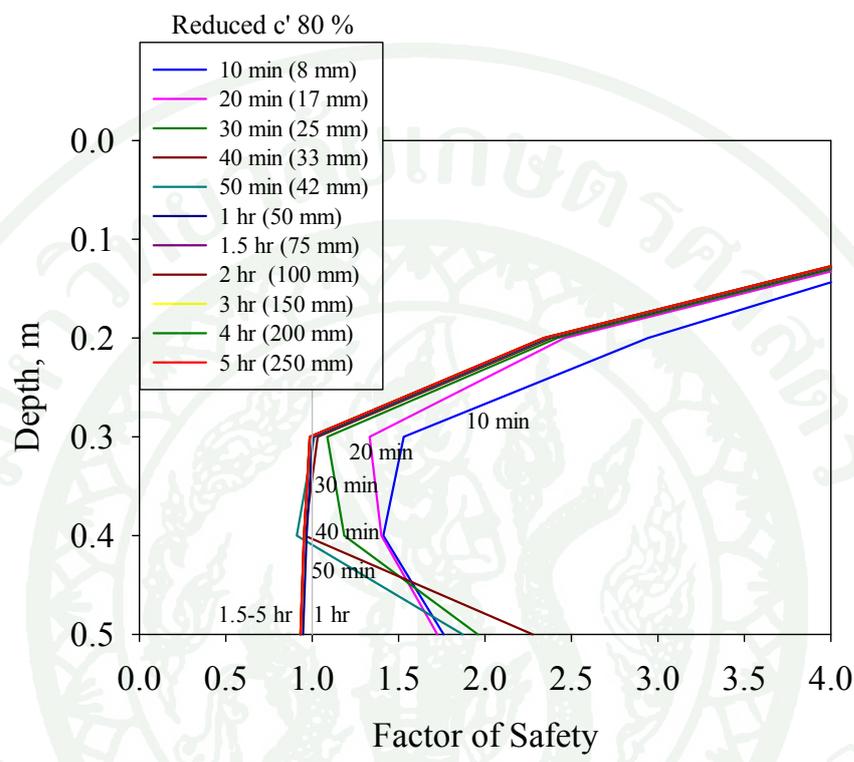
สำหรับการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนปลอดภัย พบว่า ลาดดินมีความปลอดภัย แม้กระทั่งได้รับปริมาณน้ำฝน 600 มิลลิเมตรหรือมีฝนตกด้วยอัตราความเข้ม 50 มิลลิเมตร/ชั่วโมง เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง จากภาพที่ 123 พบว่า ที่ระดับความลึก 0.4 ถึง 0.5 เมตร เมื่อระยะเวลาการตกของฝน 30 ถึง 50 นาที ค่าสัดส่วนความปลอดภัยมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากค่าแรงดันน้ำที่ได้จากการวิเคราะห์การไหลซึมมีค่าเป็นลบ



ภาพที่ 124 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยตามความลึก เมื่อพิจารณากำลังที่ลดลงจากการผุพังของดิน วิเคราะห์โดยลดค่าความเชื่อมแน่นลง 70 เปอร์เซ็นต์ เมื่อวิเคราะห์การไหลซึมแบบกำหนดให้ขอบเขตล่างมีลักษณะการไหลอย่างอิสระ

เมื่อพิจารณากำลังกำลังรับแรงเฉือนที่ลดลงจากการผุพังของดิน โดยทำการลดค่าความเชื่อมแน่นลง 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 เปอร์เซ็นต์ พบว่า เมื่อลดค่าความเชื่อมแน่นลงไป ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ ลาดดินยังคงมีความปลอดภัย ดังภาพที่ 124 จนกระทั่งค่าความเชื่อมแน่นลดลง 80 เปอร์เซ็นต์ จึงเริ่มเกิดการพิบัติที่ระดับความลึก 0.4 เมตร ซึ่งมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 0.957 เมื่อฝนตกต่อเนื่องกันเป็นระยะเวลา 40 นาที และเมื่อเวลาผ่านไปมากกว่า 1.5 ชั่วโมง (90 นาที) จะเกิดแนวการพิบัติที่ตั้งแต่ระดับความลึก 0.3 ลงไปถึง 0.5 เมตร ดังภาพที่ 125 ซึ่งในกรณีนี้ มีความเป็นไปได้เล็กน้อย เนื่องจากการพิบัติของลาดดินนั้นจะเกิดเมื่อตัวอย่างดินมีการลดลงของ

ค่าความเชื่อมั่นอย่างมาก(ประมาณ 80%) สภาพชั้นดินนั้นแทบจะมีสภาพคล้ายดินทรายที่ไม่มี
ความเชื่อมั่นอยู่เลย ซึ่งการผูกพันเช่นนี้ไม่สามารถพบในสภาพจริงได้ การสรุปผลจึงไม่นำกรณีนี้
ร่วมพิจารณา



ภาพที่ 125 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยตามความลึก เมื่อพิจารณากำลั่งที่ลดลงจากการผูกพันของดิน
วิเคราะห์โดยลดค่าความเชื่อมั่นลง 80 เปอร์เซ็นต์ เมื่อวิเคราะห์การไหลซึมแบบ
กำหนดให้ขอบเขตล่างมีลักษณะการไหลอย่างอิสระ

จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าว จะเห็นได้ว่า ปัจจัยที่ทำให้เกิดน้ำท่วม-ดินถล่มนั้น
ประกอบด้วย ค่าปริมาณน้ำฝน ค่ากำลั่งที่ลดลงเนื่องจากการผูกพันของดิน สภาพการระบายน้ำ
ด้านล่างในชั้นหิน และความหนาของชั้นดิน ซึ่งสามารถเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ได้ดังนี้

- ปริมาณน้ำฝนที่ก่อให้เกิดการพิบัติจากการวิเคราะห์การไหลซึมของ
แบบจำลองหน้าตัดดิน
ที่มีความลึก 2 เมตรเมื่อชั้นหินด้านล่างทึบน้ำ และวิเคราะห์เสถียรภาพของลาด
ดิน โดยใช้ค่ากำลั่งรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งค่าปริมาณน้ำฝนที่ทำให้เกิดการพิบัติ

(ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1) มีค่า 350 มิลลิเมตร สอดคล้องกับเกณฑ์ที่ชาวบ้านใช้เตือนภัย เมื่อปริมาณน้ำฝนมากกว่า 200 มิลลิเมตร

- ค่ากำลังที่ลดลงเนื่องจากการสู้งของดิน จากผลการวิเคราะห์การไหลซึมของแบบจำลอง

หน้าตัดดินที่มีความลึก 2 เมตร ชั้นดินหรือหินด้านล่างสามารถระบายน้ำได้อย่างอิสระ การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินใช้ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบ และกำลังรับแรงเฉือนที่ลดค่าความเชื่อมั่นลง 10, 20, 30, 40, 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่า 1.29, 1.23, 1.16, 1.09, 1.03, 0.96 ตามลำดับ เมื่อมีปริมาณฝนที่ตก 350 มิลลิเมตร หรือมีฝนตกด้วยอัตราความเข้มข้นน้ำฝน 50 มิลลิเมตร/ชั่วโมง เป็นเวลา 7 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่า การลดลงของค่าความเชื่อมั่นนั้นส่งผลให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าลดลงคิดเป็น 5.27, 10.55, 15.82, 21.09, 26.37 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

- สภาพการระบายน้ำด้านล่างในชั้นหิน จากการวิเคราะห์แบบจำลองการไหลซึม 2 ลักษณะ

ได้แก่ การกำหนดลักษณะชั้นดินด้านล่างเป็นชั้นหินทึบ และการกำหนดชั้นดินหรือหินที่สามารถระบายน้ำได้ดี เมื่อพิจารณาแบบจำลองหน้าตัดดินที่มีความลึก 2 เมตรและปริมาณน้ำฝนที่ตกมีค่า 350 มิลลิเมตรหรือมีฝนตกด้วยอัตราความเข้มข้นน้ำฝน 50 มิลลิเมตร/ชั่วโมง เป็นเวลา 7 ชั่วโมง พบว่า เมื่อชั้นดินด้านล่างเป็นชั้นหินทึบ ค่าแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นมีค่า 11.78 กิโลปาสกาล และลาดดินเกิดการพิบัติพอดี เนื่องจากค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 1 ในขณะที่การวิเคราะห์แบบจำลองที่กำหนดชั้นดินหรือหินสามารถระบายน้ำได้ ลาดดินนั้นมีค่าแรงดันน้ำที่ระดับความลึก 2 เมตร เท่ากับ 0.41 กิโลปาสกาล และมีความปลอดภัยของลาดดินเมื่อค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 1.29

- ความหนาของชั้นดิน จากการวิเคราะห์การไหลซึมของแบบจำลองหน้าตัดดินที่มีความลึก 2 เมตร และ 0.5 เมตร และชั้นหินด้านล่างทึบน้ำ พบว่า เมื่อเวลา 7 ชั่วโมง หน้าตัดชั้นดินที่มีความลึก 2 เมตร มีค่าแรงดันน้ำเท่ากับ 11.78 กิโลปาสกาล ซึ่งเกิดการพิบัติพอดี และมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1 ในขณะที่หน้าตัดชั้นดินที่มีความลึก 0.5 เมตร ชั้นดินเกือบมีสภาพ

อิมตัวด้วยน้ำเนื่องจากที่ระดับผิวดินมีค่าแรงดันน้ำเป็นศูนย์และเพิ่มขึ้นตามความลึกจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 4.9 กิโลปาสกาล ที่ระดับความลึกของชั้นดินเท่ากับ 0.5 เมตร แต่ลาดดินยังไม่เกิดการพิบัติเนื่องจากค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 1.26

สามารถสรุปเป็นตารางกรณีการเกิดการพิบัติ ดังตารางที่ 8 เมื่อสภาพเริ่มต้นของชั้นดินที่ระดับความลึก 0.5, 2 เมตร มีค่าแรงดันน้ำ -4, -9 กิโลปาสกาล ตามลำดับ หรือมีค่าคิกริความอิมตัวด้วยน้ำประมาณ 0.79-0.84 จากสภาพเริ่มต้นของการตรวจวัดในสนาม

ตารางที่ 8 กรณีการพิบัติ สำหรับลาดชันที่มีมุมเอียง 45 องศา

พิจารณาความลึกของหน้าตัดชั้นดิน (เมตร)	อัตราความชื้นน้ำฝน	การระบายน้ำของชั้นดินหรือชั้นหินด้านล่าง (No Flow/Unit Gradient)	การผุพัง (เปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าแรงยึดเหนี่ยว)*	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำฝนสะสม (มิลลิเมตร)	ความลึกของการพิบัติ (เมตร)	ค่าแรงดันน้ำที่ความลึกของการพิบัติ (กิโลปาสกาล)
2	50 มิลลิเมตร/ชั่วโมง	ที่บ้น้ำ (No Flow)	0	7	350	2	11.78
		สามารถระบายน้ำได้ (Unit Gradient)	0	ไม่เกิดการพิบัติแม้กระทั่งฝนตกติดต่อกันเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมงหรือปริมาณน้ำฝนที่ตกลงมาเท่ากับ 600 มิลลิเมตร และเกิดค่าแรงดันน้ำสูงสุดมีค่า 0.79 กิโลปาสกาล ที่ความลึก 2 เมตร			
		50	4	200	2	-0.20	
0.5 (ชั้นดินที่มีความหนาแน่น)	50 มิลลิเมตร/ชั่วโมง	ที่บ้น้ำ (No Flow)	0	ลาดดินมีความปลอดภัยแม้กระทั่งฝนตกติดต่อกันเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมงหรือปริมาณน้ำฝนที่ตกลงมาเท่ากับ 600 มิลลิเมตร และเกิดค่าแรงดันน้ำสูงสุดมีค่า 4.9 กิโลปาสกาล ที่ความลึก 0.5 เมตร			
		20	1.5	75	0.5	4.9	
		สามารถระบายน้ำได้ (Unit Gradient)	0	ลาดดินมีความปลอดภัยแม้กระทั่งฝนตกติดต่อกันเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมงหรือปริมาณน้ำฝนที่ตกลงมาเท่ากับ 600 มิลลิเมตร และเกิดค่าแรงดันน้ำสูงสุดมีค่า 0.98 กิโลปาสกาล ที่ความลึก 0.5 เมตร			

* การผุพัง แสดงเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าแรงยึดเหนี่ยว = 0 % (ไม่ผุพัง), $c' = c'_{int act}$

เปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าแรงยึดเหนี่ยว = 50 % (ผุพังปานกลาง), $c' = c'_{int act} / 2$

เปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าแรงยึดเหนี่ยว = 100 % (ผุพังมาก), $c' = 0$

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

1. พฤติกรรมทางกลศาสตร์ที่สำคัญของดินที่มีอิทธิพลต่อการพิบัติในระดับตื้นของดินที่ผุพังจากหินตะกอนในพื้นที่จังหวัดอุดรดิตถ์ ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินมีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึก โดยดินที่ความลึก 1 เมตรจะมีค่าความเชื่อมั่นมากที่สุด เนื่องจากเป็นค่าความเชื่อมนประสาน (Cementation) ของชั้นหินผุ และที่ระดับผิวดินของทั้งพื้นที่สวนไม้ผลผสมและป่าไผ่ จะมีค่าความเชื่อมั่นรองลงมา เนื่องจากมีรากพืชช่วยยึดเกาะเม็ดดินไว้ และที่ระดับ 0.3 เมตรของพื้นที่สวนไม้ผลผสมมีค่ากำลังรับแรงเฉือนน้อยที่สุด

2. ผลของกำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบเปียกสลับแห้ง เมื่อเพิ่มจำนวนรอบของการเปียกสลับแห้ง 2, 5, 10, 20 รอบ พบว่า การลดลงของค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินมีลักษณะคล้ายกับค่ากำลังรับแรงเฉือนคงค้าง (Residual Strength) และเมื่อจำนวนรอบของการเปียกสลับแห้งเท่ากับ 20 รอบ ค่าความเชื่อมั่นมีค่าลดลงถึง 60 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากการทดสอบนี้สามารถสรุปได้ว่าการผุพังของดินส่งผลให้ค่าความเชื่อมั่นลดลง

3. การทดสอบหาเส้นอัตราลักษณะสามารถทดสอบได้ 2 วิธี ได้แก่ วิธี Point-Wise Measurement ซึ่งเป็นการวัดค่าแรงจุดเมทริกซ์ในแต่ละครั้งภายหลังจากการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้น และวัดค่าแรงจุดในขณะที่ตัวอย่างดินมีความชื้นสมดุลตลอดทั้งตัวอย่าง ซึ่งวิธีนี้ใช้ระยะเวลาในการทดสอบทั้งเส้นการแห้งและเส้นการเปียกประมาณ 1-1½ เดือน ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับความละเอียดของจำนวนจุดทดสอบด้วย วิธีที่สอง ได้แก่ วิธี Continuous Measurement ซึ่งเป็นการวัดค่าแรงจุดเมทริกซ์ตลอดเวลาของการทดสอบ ในระหว่างที่ตัวอย่างดินมีการเปลี่ยนแปลงสภาพความชื้น โดยวิธีนี้นอกจากสามารถหาเส้นอัตราลักษณะได้แล้ว ยังสามารถหาฟังก์ชันสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินได้อีกด้วย และใช้เวลาในการทดสอบน้อยกว่า โดยใช้ระยะเวลาในการทดสอบทั้งเส้นการแห้งและเส้นการเปียกประมาณ 5 วัน และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณะของทั้งสองวิธี ทั้งเส้นการแห้งและเส้นการเปียก พบว่า มีความสอดคล้องกัน ความแตกต่างของผลการทดสอบอยู่ในช่วง 2-5 เปอร์เซ็นต์ สำหรับค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธี Continuous Measurement นั้น พบว่าการเลือกใช้ค่าความชื้นชลศาสตร์มีผลโดยตรงต่อค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำ โดยเฉพาะเส้นการเปียก เนื่องจากมีความแตกต่างของค่า

ความชันชลศาสตร์ 3 แบบ ได้แก่ ค่าความชันชลศาสตร์เฉลี่ย (i average) ที่พิจารณาค่าศักย์ของน้ำจากเซนเซอร์ทั้งตำแหน่งบน กลางและล่าง, ค่าความชันชลศาสตร์ของเซนเซอร์ตำแหน่งบนและกลาง (i upper) และค่าความชันชลศาสตร์ของเซนเซอร์ตำแหน่งกลางและล่าง (i lower) ซึ่งจากการทดสอบและเปรียบเทียบการใช้ค่าความชันชลศาสตร์แต่ละแบบ สรุปได้ว่าการวิเคราะห์เส้นการเบี่ยงนั้น ควรใช้ค่าความชันชลศาสตร์ของเซนเซอร์ตำแหน่งบนและกลาง ซึ่งเป็นตัวแทนในการคำนวณค่าความชันชลศาสตร์ ด้วยวิธี Linear Regression ของค่าแรงคูลูเมตริกซ์ที่มีค่าลดลงในเวลาใกล้เคียงกันของเซนเซอร์ทั้งสองตำแหน่ง สำหรับการวิเคราะห์เส้นการเบี่ยงนั้น ให้ใช้ค่าความชันชลศาสตร์เฉลี่ย เนื่องจากค่าความชันชลศาสตร์ในแต่ละแบบมีความใกล้เคียงกัน

4. ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลซึม ได้แก่ เส้นอัตราลักษณะ และค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำ ควรพิจารณาในกรณีที่ตัวอย่างดินอยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำและมีแรงดันน้ำค่าบวกพร้อมด้วย โดยจะส่งผลให้เกิดความสอดคล้องกันของผลการวิเคราะห์การไหลซึมและผลจากเครื่องมือวัดแรงดันน้ำ/แรงคูลูน้ำที่ติดตั้งในสนามมากขึ้น โดยเส้นอัตราลักษณะที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้น โดยปริมาตรและค่าแรงดันน้ำด้านลบหรือค่าแรงคูลูเมตริกซ์ ควรกำหนดค่าแรงดันน้ำด้านบวกที่ทำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (อภินิติและอัคคพัฒน์, 2551) คล้ายกับการเพิ่มแรงดันเพื่อให้ น้ำสามารถเข้าสู่ช่องว่างภายในตัวอย่างดินได้ จากผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณะ พบว่า เมื่อค่าแรงดันน้ำมีค่าเข้าใกล้ค่าศูนย์ ตัวอย่างดินมีค่าดัชนีความอิ่มตัวด้วยน้ำประมาณ 0.8-0.9 แสดงว่าตัวอย่างดินนั้นยังคงมีช่องว่างที่น้ำสามารถเพิ่มเข้าไปได้อีก จึงควรพิจารณาค่าแรงดันน้ำที่ทำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำคู่กับการพิจารณาค่าความชื้น โดยปริมาตรจากค่าความพรุน ($\theta = nSr$) เนื่องจากดัชนีความอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าเท่ากับ 1 เช่นเดียวกับค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำ ควรใช้ผลการทดสอบค่าความซึมน้ำเมื่อตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำร่วมด้วย ซึ่งอาจเป็นผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการหรือการทดสอบในสนาม สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ผลการทดสอบค่าความซึมน้ำเมื่อตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำในสนามร่วมพิจารณากับผลการทดสอบค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำ

5. การวิเคราะห์การไหลซึม เมื่อฝนตกลงมาด้วยอัตราความเข้มของฝน 50 มิลลิเมตร/ ชั่วโมง เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และพิจารณาสภาพขอบเขตบน (Top Boundary Condition) ของหน้าตัดดิน 2 ลักษณะ คือ ยอมให้มีการเจ็มนองของน้ำบนลาดดิน (แรงดันน้ำที่ผิวด้านบนของหน้าตัดดินมีค่ามากกว่าศูนย์ได้หรือน้ำสามารถเอ่อบนลาดดินได้) และไม่ยอมให้มีสภาพเจ็มนองของน้ำบนลาดดิน (แรงดันน้ำที่ผิวด้านบนของหน้าตัดดินจะมีค่าไม่เกินศูนย์) พบว่า ค่าแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นที่ผิวดิน

เมื่อวิเคราะห์การไหลซึมของขอบเขตบนที่ยอมให้มีการเจ็มนองของน้ำบนลาดดิน มีค่าแรงดันน้ำสูงประมาณ 12 กิโลปาสคาล ซึ่งไม่สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงที่มีน้ำเอ่อบนลาดดิน โดยมีความสูงของน้ำเท่ากับ 1.2 เมตร แต่สำหรับการวิเคราะห์การไหลซึมของขอบเขตบนที่ไม่ยอมให้มีสภาพเจ็มนองของน้ำบนลาดดินมีความเหมาะสม สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงมากกว่า โดยมีค่าแรงดันน้ำมากที่สุดเท่ากับ 0.406 กิโลปาสคาล ที่ระดับความลึก 0.38 เมตร จึงกำหนดขอบเขตบนของแบบจำลองแบบไม่ยอมให้มีสภาพเจ็มนองของน้ำบนลาดดิน ไปใช้ในการวิเคราะห์ในกรณีต่างๆ ต่อไป

6. การวิเคราะห์การไหลซึม เมื่อพิจารณาสภาพขอบเขตล่างของหน้าตัดดิน 2 ลักษณะ คือ แบบไม่มีการไหลซึมเนื่องจากด้านล่างเป็นชั้นหินทึบ และแบบให้มีการไหลซึมอย่างอิสระเนื่องจากชั้นดินหรือหินด้านล่างสามารถระบายน้ำได้ พบว่า ค่าแรงดันน้ำเมื่อพิจารณาด้านล่างเป็นชั้นหินทึบ มีค่าแรงดันน้ำด้านบวกสูงกว่าเมื่อพิจารณาให้ขอบเขตล่างมีการไหลซึมอย่างอิสระ ซึ่งมีค่า 11.78, 0.41 กิโลปาสคาล ตามลำดับ ที่ระดับความลึก 2 เมตร เมื่อฝนตกลงมาด้วยอัตราความเข้มของฝน 50 มิลลิเมตร/ชั่วโมง เป็นเวลา 7 ชั่วโมง หรือมีค่าปริมาณน้ำฝน 350 มิลลิเมตร และเกิดการพิบัติของลาดดินที่มีขอบเขตล่างเป็นชั้นหินทึบน้ำ ในขณะที่ขอบเขตล่างแบบไหลซึมอย่างอิสระมีความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดิน แม้กระทั่งฝนตกลงมาเท่ากับ 600 มิลลิเมตร หรือฝนตกด้วยอัตราความเข้ม 50 มิลลิเมตร/ชั่วโมง และตกติดต่อกันเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง ดังนั้นสภาวะขอบเขตล่างที่สอดคล้องกับการพิบัติของลาดดินในพื้นที่ จึงมีลักษณะเป็นชั้นหินทึบน้ำหรือการวิเคราะห์ขอบเขตล่างแบบไม่มีการไหลซึม

7. การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน พบว่า การพิบัติของลาดดินนั้นเกิดจากปัจจัยร่วมกันของค่าปริมาณน้ำฝน ค่ากำลังที่ลดลงเนื่องจากการผุพังของดิน สภาพการระบายน้ำด้านล่างในชั้นหิน และความหนาของชั้นดิน โดยพบว่า ค่าปริมาณน้ำฝนที่ทำให้เกิดการพิบัติมีค่า 350 มิลลิเมตร (จากการวิเคราะห์แบบจำลองหน้าตัดดินที่มีความลึก 2 เมตรและชั้นหินด้านล่างทึบน้ำ) ค่ากำลังที่ลดลงเนื่องจากการผุพังของดิน จะส่งผลให้ค่าสัดส่วนความปลอดภัยและเสถียรภาพของลาดดินลดลง สำหรับสภาพการระบายน้ำด้านล่างในชั้นหิน พบว่า การที่ชั้นหินด้านล่างมีลักษณะทึบน้ำ จะส่งผลให้มีค่าแรงดันน้ำด้านบวกสูงขึ้น และเกิดการพิบัติของลาดดินเร็วกว่าเมื่อชั้นดินหรือหินด้านล่างสามารถระบายน้ำได้อย่างอิสระ โดยจะเกิดการพิบัติของลาดดินที่ระดับความลึก 2 เมตร เมื่อฝนตกลงมาด้วยอัตราความเข้มของฝน 50 มิลลิเมตร/ชั่วโมงเป็นเวลา 7 ชั่วโมง (วิเคราะห์การไหลซึมโดยกำหนดขอบเขตล่างแบบทึบน้ำ) ในขณะที่ลาดดินซึ่งมีขอบเขตล่างแบบสามารถระบาย

น้ำได้อย่างอิสระ เสถียรภาพของลาดดินยังมีความปลอดภัย แม้กระทั่งฝนตกเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง และปัจจัยเนื่องจากความหนาของชั้นดิน พบว่า หน้าตัดชั้นดินที่มีความลึกมากกว่ามีโอกาสเกิดการพิบัติมากกว่า เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์การไหลซึมของแบบจำลองหน้าตัดชั้นดินที่มีความลึก 0.5 และ 2 เมตร เมื่อกำหนดชั้นหินด้านล่างที่บีบน้ำ พบว่า เมื่อเวลา 7 ชั่วโมง หน้าตัดชั้นดินที่มีความลึก 2 เมตร จะเกิดการพิบัติพอดี ในขณะที่หน้าตัดชั้นดินที่ระดับความลึก 0.5 เมตร ชั้นดินเกือบมีสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยที่ระดับผิวดินมีค่าแรงดันน้ำเป็นศูนย์และเพิ่มขึ้นตามความลึก จนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 4.9 กิโลปาสกาล ที่ระดับความลึกของชั้นดินเท่ากับ 0.5 เมตร แต่ลาดดินยังไม่เกิดการพิบัติ และมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 1.26

ข้อเสนอแนะ

1. การเลือกพื้นที่ในการเก็บตัวอย่างดินควรเลือกพื้นที่บริเวณใกล้กับแหล่งที่เคยเกิดการพิบัติมาแล้วในอดีต เนื่องจากพบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนในพื้นที่ศึกษา เป็นพื้นที่ที่ไม่ได้เกิดการพิบัติในอดีตมีค่ากำลังรับแรงเฉือนที่สูง ซึ่งจะดีกว่าถ้าทราบกำลังรับแรงเฉือนของดินที่เกิดการพิบัติ เพื่อนำไปวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัยที่แม่นยำมากขึ้น
2. การทดสอบหาเส้นอัตราลึกลับด้วยวิธี Continuous Measurement ของเส้นการเปียก ควรให้น้ำกระจายลงสู่หน้าตัดดินอย่างสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดดิน ป้องกันการระเหยและการไหลซึมตามด้านข้างของกระบอกพีวีซี ซึ่งการทดสอบในกระบวนการเปียกควรติดตั้งเครื่องมือวัดศักย์แรงดันในตำแหน่งที่มีความห่างน้อยลง เนื่องจากจะไม่เกิดความต่างผลของค่าศักย์แรงดันมากเกินไปและควรวัดเปอร์เซ็นต์ความชื้นในแต่ละตำแหน่งด้วย ซึ่งจะทำให้ผลการทดสอบสอดคล้องกับวิธี Point-Wise Measurement มากขึ้น
3. ค่าความชื้นน้ำเมื่อตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำควรทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการร่วมด้วย
4. ค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำที่ได้จากการทดสอบหาเส้นอัตราลึกลับด้วยวิธี Continuous Measurement ควรมีการเปรียบเทียบกับผลจากการประมาณค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำ เพื่อพิจารณาความสอดคล้องของค่าดังกล่าว

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมทรัพยากรธรณี. 2528. แผนที่ธรณีวิทยาตำบลแม่พูล อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์. กอง
ธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี. กรุงเทพฯ.

กรมทรัพยากรธรณี. 2549. แผนที่ธรณีวิทยาตำบลแม่พูล อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์. กอง
ธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี. กรุงเทพฯ.

กรมแผนที่ทหาร. 2546. แผนที่ตำบลแม่พูล อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์.

กรมพัฒนาที่ดิน. 2545. แผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินตำบลแม่พูล อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์.

กรมพัฒนาที่ดิน. 2551. แผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินตำบลแม่พูล อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์.

ทิพย์มณี เชียงทอง. 2552. พฤติกรรมด้านกำลังทางวิศวกรรมของดินถล่มในจังหวัดภูเก็ต.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นงลักษณ์ ไทยเจียมอารีย์. 2547. เสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่ลุ่มน้ำก้อโดยใช้คุณสมบัติทาง
วิศวกรรม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บรรพต กุลสุวรรณ. 2548. การศึกษาพฤติกรรมการบีบตัวของลาดดินในพื้นที่ต้นน้ำของลุ่มน้ำย่อย
แม่น้ำจันทบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปราโมทย์ เดชะอำไพ. 2537. ไฟไนท์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แห่ง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

วรากร ไม้เรียง. 2546. วิศวกรรมเขื่อนดิน. พิมพ์ครั้งที่ 3. ไลบรารี นาย, กรุงเทพฯ.

- ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมและฐานราก. 2552. รายงานวิจัยฉบับสุดท้ายโครงการการศึกษาพฤติกรรมการเกิดน้ำท่วม-ดินถล่มในพื้นที่ต้นแบบเพื่อสร้างแบบจำลองสำหรับกำหนดเกณฑ์และวิธีการในการเตือนภัย. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง. 2551. ปฐพีกลศาสตร์:หลักการพื้นฐาน. ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์. 2540. วิศวกรรมปฐพี. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.
- อิทธิสุนทร นันทกิจ. 2532. การใช้วัสดุดินเผาภายในประเทศเพื่อประกอบเครื่องมือวัดความชื้นในดินแบบ Tensiometer. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ครั้งที่ 28. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- อภินิติ โชติสังกาศ และ วิษณุพงศ์ พอลิละ, 2551ก. การพัฒนาเครื่องมือวัดศักย์แรงดันน้ำในดิน. การประชุมวิชาการครั้งที่ 46. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- อภินิติ โชติสังกาศ และ วิษณุพงศ์ พอลิละ, 2551ข. การพัฒนาระบบตรวจวัดพฤติกรรมดินถล่ม. การประชุมวิชาการเทคโนโลยี และนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- อภินิติ โชติสังกาศ และ อัครพัฒน์ สว่างสุริย์. 2551. การประยุกต์ใช้ความรู้ทางกลศาสตร์ของดินไม่อิ่มน้ำสำหรับงานเสถียรภาพของลาดดิน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยศรีปทุม ร่วมกับวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, ชลบุรี.
- อภินิติ โชติสังกาศ. 2551. รายงานวิจัยโครงการการศึกษาพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินไม่อิ่มน้ำในประเทศไทย. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, กรุงเทพฯ.

ADPC-Asian Disaster Preparedness Center (2006). Rapid assessment, Flashflood and landslide disaster in the provinces of uttaradit and sukhothai, northern Thailand, May 2006.

Arya, L. M., and J. F. Paris. (1981). A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data, pp. 1023-1030. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 45:1023-1030.

Bishop, A. W. 1959. The principle of effective stress, pp. 859-863. **Teknisk Ukeblad I Samarbeide Med Teknikk.** Oslo, Norway.

Childs, E.C. 1969. **Soil Water Phenomena.** Wiley-Interscience, New York.

Daniel, D. E. 1983. Permeability test for unsaturated soil, **Geotechnical Testing Journal.** 6(2): 81-86.

Fredlund, D.G. and H. Rahardjo. 1993. **Soil Mechanics for Unsaturated Soils.** John Wiley & Sons, Inc., New York.

Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., and Widger, R. A. 1978. Shear strength of unsaturated Soils. **Canadian Geotechnical Journal.**, 15, No. 3, 313-321.

Fredlund, D.G. and N.R. Morgenstern. 1977. Stress State Variable for Unsaturated Soils. **ASCE J. Geotech. Eng. Div.** GT5, Vol.103:447-466.

Fredlund, M. D., G.W. Wilson and Fredlund, D. G. (1997). Indirect Procedures to Determine Unsaturated Soil Property Functions. **Proceedings of the 50th Canadian Geotechnical Conference Golden Jubilee Conference Ottawa, Ontario, Canada, October 20-22**

- Hamilton, J. M., Daniel, D. E., and Olson, R. E. 1981. **Measurement of hydraulic conductivity of partially saturated soils**. Permeability and Groundwater Contaminant Transport. ASTM STP 746, T.F. Zimmie and C.O. Riggs, eds., ASTM, Philadelphia, pp. 182-196.
- Hvorslev, M.J. 1951. Time-lag and soil permeability in groundwater observations. **Bulletin No.36**, US Waterways Experiment Station. Vicksburg, Miss., USA
- Jackson, R. A. 1972. On the calculation of hydraulic conductivity. **Soil Science Society of American Proceedings**. 36, 380-383.
- Jotisankasa, A., Kulsuwan, B., Toll, D., and Rahardjo, H. 2008. Studies of rainfall-induced landslide in Thailand and Singapore, pp.901-907. **1st European Conference on Unsaturated Soils**. Organized by Durham University and University of Glasgow, UK
- Jotisankasa, A. and Mairing, W. 2010. Suction-monitored direct shear testing of residual soils from landslide-prone areas, Vol. 136. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, No. 3, March 1, 2010.
- Kay, J.N. 1998. Rainfall-landslide relationship update. **Proceedings of the annual seminar on slope engineering** . Hong Kong, Rotterdam.
- Little, A.L. 1969. The engineering classification of residual tropical soils. **In Proc. Spec. Session on Eng. Props. Lateritic Soils 7th Conf.** SMFE, Mexico City : 1-10.
- Lu, N. & Likos, W.J. 1960. **Unsaturated soil mechanics**. Wiley, New York.
- Philip, B.B. and C.H. Wayne. 1998. **Hydrology and Floodplain Analysis**. Addison-Wesley publishing Company, United States of America.

- Richard, B.G. 1965. Measurement of the free energy of soil moisture by the Psychrometric technique using Thermistors. In *Moisture Equilibrium and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas*, **A Symp.** Australia, Butterworths : 39-46.
- Rogers, W. B., Yngvar W. I., Timothy D. M., and Richard E. N. 1990. New York State Geological Highway Map. Albany, NY: Geological Survey/New York State Museum, Leaflet no. 28.
- Terzaghi, K. 1925. *Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage*. อ้างโดย สุรฉัตร สัมพันธ์ราษฎร์. **วิศวกรรมปฏิพิ.** วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ. 333 หน้า.
- Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D.E., and Clifton, A. W. 1996. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. **Canadian Geotechnical Journal**, 33, 379-392.
- Varnes, D.J. 1978. Slope movement : types and processes, pp. 11-33. In *Landslides. Analysis and Control*, **Transportation Research Board Report 176**. National Academy of Sciences, Washington, D.C
- Vaughan, P.R. 1985. Pore pressures due to infiltration into partly saturated slopes, Vol. 2. Proc. **1st International Conference on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic soils**. Brazil.
- Wesley, L.D. 1988. Engineering classification of residual soils. pp.77-84. **Proc. Of the second int.confrence on geomachanics in Tropical soils**, Singapore.

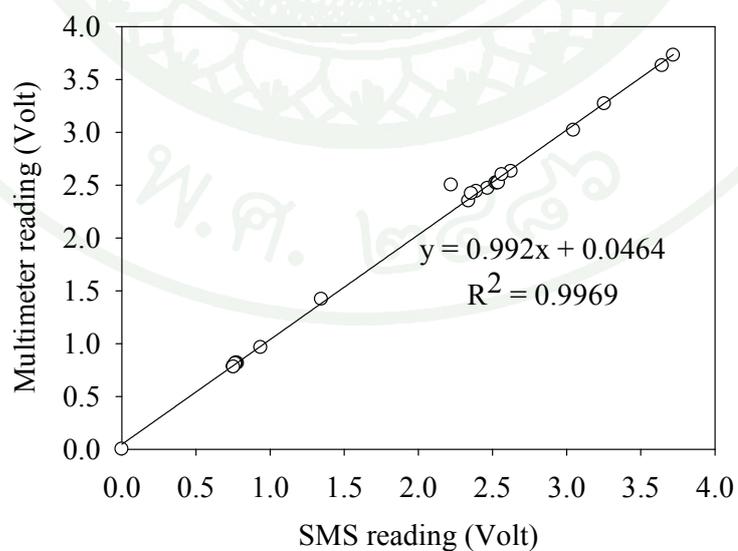




ภาคผนวก ก
ผลการตรวจวัดแรงดันน้ำและการทดสอบในสนาม

ตารางผนวกที่ ก1 การเปรียบเทียบค่าแรงดันน้ำ(โวลต์) ที่อ่านได้จากมัลติมิเตอร์และข้อความจากโทรศัพท์มือถือ

No.	Read Out		No.	Read Out	
	Multimeter (Volt)	SMS. (Volt)		Multimeter (Volt)	SMS. (Volt)
1	0.962	0.937	12	2.52	2.522
2	3.73	3.72	13	2.52	2.533
3	0.781	0.752	14	2.63	2.625
4	0.813	0.779	15	2.35	2.339
5	0.818	0.773	16	1.42	1.346
6	0.785	0.754	17	2.5	2.222
7	3.27	3.254	18	2.52	2.539
8	0.81	0.766	19	2.44	2.391
9	3.63	3.644	20	2.6	2.563
10	0.779	0.754	21	2.42	2.358
11	2.47	2.467	22	3.02	3.046



ภาพผนวกที่ ก1 การเปรียบเทียบค่าแรงดันน้ำ

ตารางผนวกที่ ก2 ผลการตรวจวัดค่าแรงดันน้ำเฉลี่ยแต่ละวันในสนาม

DATE (M/D/Y)	RAINFALL (mm/day)	PORE WATER PRESSURE (AVERAGE) (kPa)					
		1	3	5	6	9	16
		T1-3m	T2-0.5m	T3-1m	T4-0.5m	T5-0.5m	T5-1m
8/25/2008	8.128	16.494	-1.564	-4.414	-1.938	-1.478	-1.446
8/26/2008	35.306	11.873	-1.039	-2.367	-1.788	-0.523	-0.318
8/27/2008	0	11.976	-0.298	-4.888	-1.634	-0.844	-0.717
8/28/2008	2.54	12.235	0.495	-5.417	-1.878	-0.949	-0.803
8/29/2008	0	9.920	4.157	-5.516	-9.063	-1.452	-1.119
8/30/2008	0	-	-	-	-	-	-
8/31/2008	0	-	-	-	-	-	-
9/1/2008	10.922	-	-	-	-	-	-
9/2/2008	0	-	-	-	-	-	-
9/3/2008	0	-	-	-	-	-	-
9/4/2008	0	-	-	-	-	-	-
9/5/2008	50.8	-	-	-	-	-	-
9/6/2008	0	-	-	-	-	-	-
9/7/2008	1.524	-	-	-	-	-	-
9/8/2008	0	13.423	0.201	-4.414	-0.343	-0.843	-0.849
9/9/2008	0	13.640	-0.684	-4.276	-0.206	-1.353	-1.274
9/10/2008	0	13.450	-1.931	-9.125	-4.510	-1.835	-1.775
9/11/2008	10.668	12.897	-1.669	-7.661	-3.574	-1.431	-1.765
9/12/2008	2.794	13.442	-1.936	-8.944	-3.006	-0.323	-2.228
9/13/2008	51.562	13.532	0.054	-4.040	0.493	0.163	-0.995
9/14/2008	22.86	-	-	-	-	-	-
9/15/2008	16.764	-	-	-	-	-	-
9/16/2008	49.784	-	-	-	-	-	-
9/17/2008	7.112	-	-	-	-	-	-
9/18/2008	12.7	-	-	-	-	-	-
9/19/2008	0.254	18.423	0.536	-8.508	-3.489	-0.509	-0.682
9/20/2008	10.16	17.762	0.532	-7.609	-3.370	0.041	-0.601
9/21/2008	4.064	17.492	0.752	-8.905	-4.729	-0.189	-0.270

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

DATE (M/D/Y)	RAINFALL (mm/day)	PORE WATER PRESSURE (AVERAGE) (kPa)					
		1	3	5	6	9	16
		T1-3m	T2-0.5m	T3-1m	T4-0.5m	T5-0.5m	T5-1m
9/22/2008	0	17.324	0.067	-7.626	-2.978	-0.348	-0.957
9/23/2008	0	17.978	-0.792	-7.844	-3.001	-0.994	-1.209
9/24/2008	0	17.133	-0.874	-8.290	-2.993	-1.323	-1.604
9/25/2008	0	17.534	-1.027	-9.247	-3.263	-1.241	-1.578
9/26/2008	29.21	18.043	-0.005	-8.631	-3.240	-0.753	-1.423
9/27/2008	0.254	19.025	0.259	-6.517	-2.554	-0.087	-0.146
9/28/2008	0	18.624	0.395	-6.445	-3.036	-0.412	-0.512
9/29/2008	4.572	-	-	-	-	-	-
9/30/2008	7.366	-	-	-	-	-	-
10/1/2008	0.762	-	-	-	-	-	-
10/2/2008	0.254	-	-	-	-	-	-
10/3/2008	5.588	-	-	-	-	-	-
10/4/2008	10.414	-	-	-	-	-	-
10/5/2008	19.812	-	-	-	-	-	-
10/6/2008	4.318	-	-	-	-	-	-
10/7/2008	14.732	-	-	-	-	-	-
10/8/2008	18.288	22.369	1.518	-7.785	-4.497	0.442	0.403
10/9/2008	0	22.096	0.714	-5.947	-2.337	0.017	0.024
10/10/2008	0.254	20.221	0.387	-5.740	-1.977	-0.213	-0.159
10/11/2008	25.654	20.242	0.373	-6.239	-2.012	-0.147	-0.443
10/12/2008	0.508	21.199	1.265	-4.994	-1.828	0.551	0.362
10/13/2008	0	-	-	-	-	-	-
10/14/2008	2.032	-	-	-	-	-	-
10/15/2008	0	-	-	-	-	-	-
10/16/2008	0	21.460	-0.791	-10.173	-5.531	-1.014	-1.100
10/17/2008	0	21.311	-0.899	-10.952	-6.082	-1.177	-1.325
10/18/2008	0	21.425	-1.165	-11.681	-6.872	-1.309	-1.424
10/19/2008	0	21.748	-1.471	-10.397	-5.689	-1.412	-1.626

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

DATE (M/D/Y)	RAINFALL (mm/day)	PORE WATER PRESSURE (AVERAGE)					
		(kPa)					
		1	3	5	6	9	16
		T1-3m	T2-0.5m	T3-1m	T4-0.5m	T5-0.5m	T5-1m
10/20/2008	0	-	-	-	-	-	-
10/21/2008	6.096	-	-	-	-	-	-
10/22/2008	0.254	21.415	-3.856	-12.643	-9.187	-2.422	-2.531
10/23/2008	32.766	21.575	-3.928	-13.533	-9.340	-2.197	-2.569
10/24/2008	22.606	23.759	1.999	-7.091	-0.140	0.792	0.636
10/25/2008	2.794	25.194	1.063	-3.322	0.176	0.209	0.114
10/26/2008	38.1	25.680	1.414	-3.511	0.087	0.322	0.192
10/27/2008	21.844	26.865	1.835	-2.983	0.328	0.783	0.598
10/28/2008	2.286	27.668	1.397	-3.378	0.021	0.479	0.225
10/29/2008	0.254	27.420	0.450	-4.428	-0.567	-0.263	-0.443
10/30/2008	0	27.167	0.130	-5.313	-1.060	-0.510	-0.746
10/31/2008	1.016	27.001	-0.201	-6.500	-2.045	-0.747	-1.050
11/1/2008	52.578	28.144	1.837	-4.767	-1.378	0.526	0.357
11/2/2008	68.326	29.634	1.771	-3.697	-0.452	0.568	0.493
11/3/2008	0	29.241	0.757	-3.873	-0.147	0.021	-0.138
11/4/2008	1.27	28.928	0.365	-4.890	-0.885	-0.238	-0.428
11/5/2008	6.35	28.574	0.074	-5.992	-1.680	-0.464	-0.713
11/6/2008	0	28.409	-0.181	-6.251	-1.743	-0.183	-0.957
11/7/2008	0	28.210	-0.248	-6.335	-1.708	-0.532	-1.133
11/8/2008	3.556	28.079	-0.518	-6.725	-2.011	-0.738	-1.312
11/9/2008	0.254	28.087	-0.650	-7.483	-2.771	-0.758	-1.310
11/10/2008	0	27.781	-1.080	-8.905	-4.257	-0.821	-1.308
11/11/2008	0.254	27.688	-1.576	-8.694	-4.454	-1.003	-1.471
11/12/2008	0	27.233	-2.527	-9.650	-6.304	-1.442	-1.791
11/13/2008	0.254	27.121	-3.329	-11.832	-9.826	-1.835	-2.028
11/14/2008	0	26.880	-4.699	-13.158	-12.975	-2.231	-2.291
11/15/2008	0	26.775	-6.646	-16.018	-17.843	-2.915	-2.757
11/16/2008	0	26.691	-9.286	-17.028	-21.583	-3.768	-3.218

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

DATE (M/D/Y)	RAINFALL (mm/day)	PORE WATER PRESSURE (AVERAGE)					
		(kPa)					
		1	3	5	6	9	16
		T1-3m	T2-0.5m	T3-1m	T4-0.5m	T5-0.5m	T5-1m
11/17/2008	0	26.495	-13.121	-17.263	-25.015	-4.839	-3.663
11/18/2008	0	26.792	-18.999	-18.814	-29.996	-6.192	-3.871
11/19/2008	0	26.970	-22.943	-19.968	-32.158	-7.543	-3.981
11/20/2008	0	27.064	-28.951	-21.896	-35.340	-9.793	-4.369
11/21/2008	0	26.679	-38.153	-23.731	-38.247	-13.162	-5.092
11/22/2008	0	26.563	-48.592	-26.380	-41.339	-17.522	-5.991
11/23/2008	0	26.429	-30.998	*	-40.439	-20.824	-7.017
11/24/2008	0	26.149	*	*	*	-23.044	-8.131
11/25/2008	0	26.090	*	*	*	-25.162	-9.368
11/26/2008	0	26.289	*	*	*	-27.355	-10.827
11/27/2008	0.254	26.268	*	*	*	-29.843	-12.481
11/28/2008	0	25.960	*	*	*	-32.718	-14.321
11/29/2008	0.254	26.525	*	*	*	-35.658	-16.551
11/30/2008	0	26.101	*	*	*	-38.828	-18.661
12/1/2008	0.254	25.488	*	*	*	-41.971	-21.254
12/2/2008	0	25.663	*	*	*	-44.393	-24.043
12/3/2008	0	25.372	*	*	*	-47.341	-26.998
12/4/2008	0.254	25.591	*	*	*	-50.647	-29.572
12/5/2008	0	25.782	*	*	*	-53.373	-31.897
12/6/2008	0	25.700	*	*	*	-56.026	-34.703
12/7/2008	0	25.458	*	*	*	-58.826	-37.601
12/8/2008	0	25.016	*	*	*	-60.245	-40.327
12/9/2008	0.254	24.910	*	*	*	-60.025	-43.269
12/10/2008	0	24.550	*	*	*	-60.824	-46.173
12/11/2008	0.254	24.039	*	*	*	-61.293	-48.954
12/12/2008	0	23.802	*	*	*	-61.315	-51.933
12/13/2008	0	23.330	*	*	*	-60.615	-54.607
12/14/2008	0	22.692	*	*	*	-62.131	-58.688

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

DATE (M/D/Y)	RAINFALL (mm/day)	PORE WATER PRESSURE (AVERAGE) (kPa)					
		1	3	5	6	9	16
		T1-3m	T2-0.5m	T3-1m	T4-0.5m	T5-0.5m	T5-1m
12/15/2008	0.254	23.763	*	*	*	-61.110	-60.479
12/16/2008	0	24.144	*	*	*	-60.778	-63.487
12/17/2008	0	24.134	*	*	*	*	-66.488
12/18/2008	0	24.074	*	*	*	*	-69.643
12/19/2008	0	15.957	*	*	*	*	-70.326
12/20/2008	0	2.882	*	*	*	*	*

หมายเหตุ - การส่งสัญญาณข้อมูลขัดข้อง

* เกิดความสามารถของเซ็นเซอร์ที่จะรับได้ เริ่มมีฟองอากาศภายในเซ็นเซอร์ และ
 ภายหลังวันที่ 20/12/2008 เซ็นเซอร์ถูกถอนขึ้นมาเพื่อใช้ Casing ทำการทดสอบ
 Borhole test



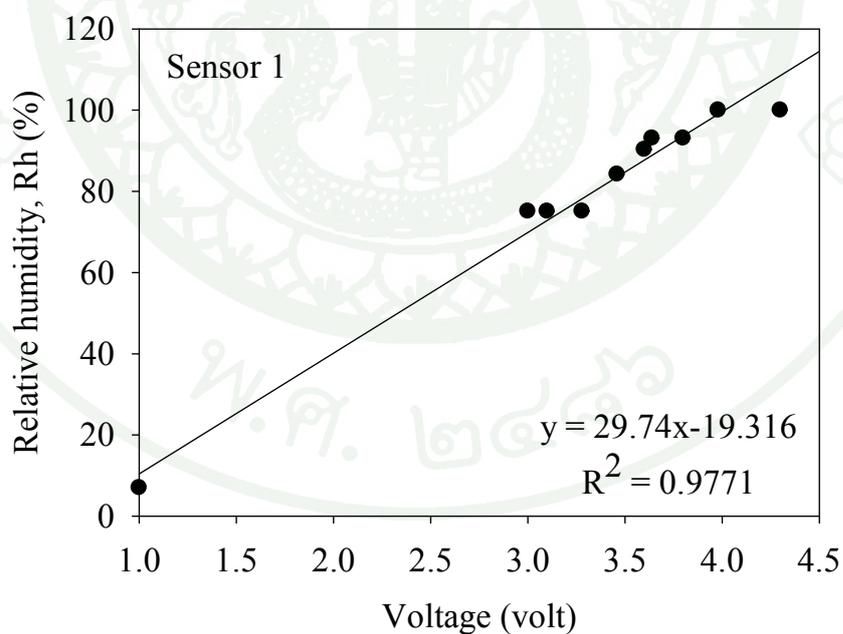
ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบพฤติกรรมของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

- การสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงคูดน้ำในดิน(Tensiometer)
- เส้นอัตราลักษณ์ (SWCC)
- พฤติกรรมการไหลซึม (K-Function)

ตารางผนวกที่ ข1 ผลการสอบเทียบเครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์ เซนเซอร์ 1

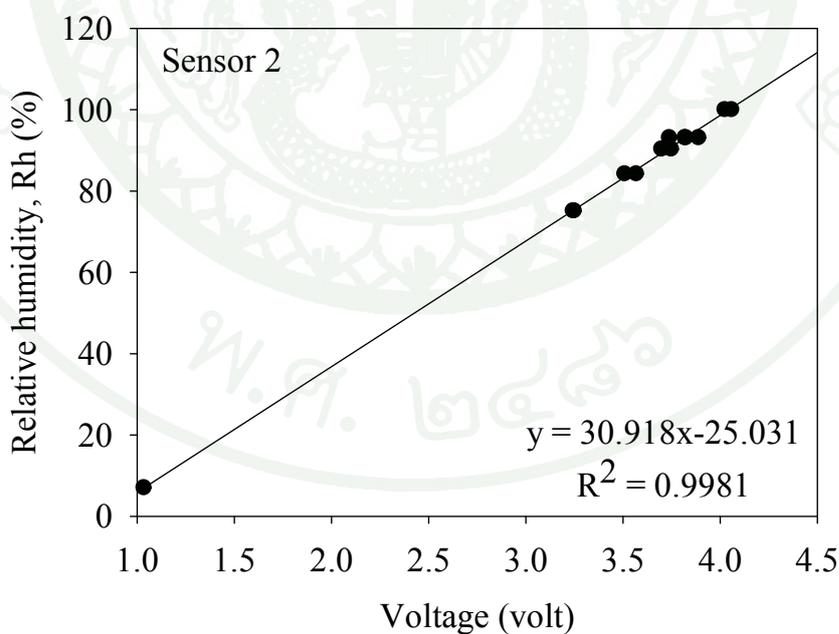
DATE (M/D/Y)	SUBSTANCE	Rh (%)	VOLTAGE (Volt)	ERROR
6/3/2008	NaCl (sat)	75.1	3.1	0.02
6/9/2008	KCl (sat)	84.2	3.46	0.02
6/12/2008	BaCl ₂ ·H ₂ O (sat)	90.3	3.6	0.02
6/18/2008	NaCl 2M	93.1	3.64	0.02
6/24/2008	Distilled Water	100	3.98	0.02
6/30/2008	NaOH (sat)	7	1	0
7/7/2008	NaCl (sat) 2 nd	75.1	3	0
9/28/2009	NaCl 2M 2 nd	93.1	3.8	0.02
10/2/2009	Distilled Water 2 nd	100	4.3	0.01
10/7/2009	NaCl (sat) 2 nd	75.1	3.28	0.01



ภาพผนวกที่ ข1 การสอบเทียบเครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์ เซนเซอร์ 1

ตารางผนวกที่ ข2 ผลการสอบเทียบเครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์ เซนเซอร์ 2

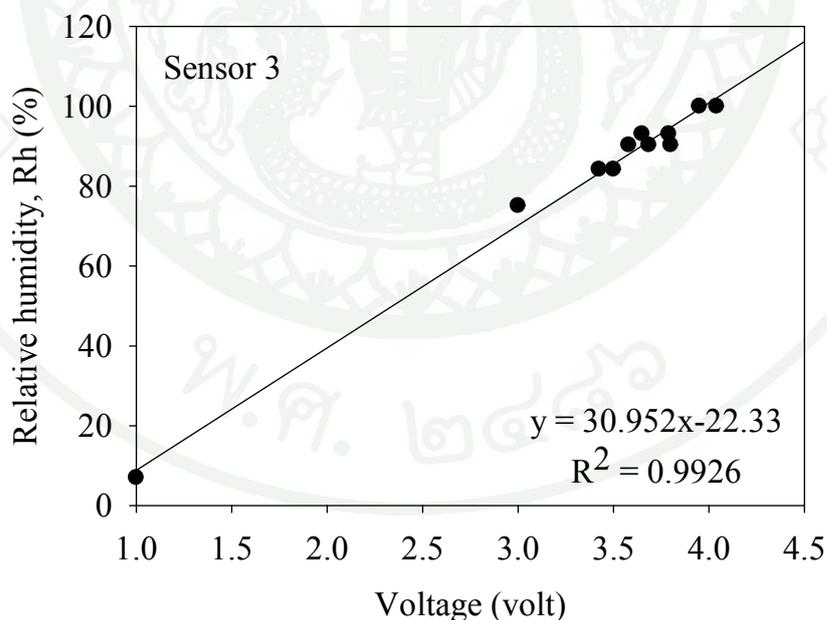
DATE (M/D/Y)	SUBSTANCE	Rh (%)	VOLTAGE (Volt)	ERROR
3/6/2008	KCl (sat)	84.2	3.57	0.025
3/11/2008	NaCl (sat)	75.1	3.25	0.05
3/18/2008	NaOH (sat)	7	1.036	0.01
3/20/2008	NaCl (sat) 2 nd	75.1	3.245	0.005
3/21/2008	KCl (sat) 2 nd	84.2	3.51	0.02
3/24/2008	BaCl ₂ ·H ₂ O (sat)	90.3	3.7	0.03
3/26/2008	NaCl 2M	93.1	3.74	0.01
4/1/2008	Distilled Water	100	4.025	0.025
4/3/2008	NaCl 2M 2 nd	93.1	3.825	0.025
4/7/2008	BaCl ₂ ·H ₂ O (sat) 2 nd	90.3	3.75	0.04
9/28/2009	NaCl 2M 2 nd	93.1	3.82	0.01
10/2/2009	Distilled Water 2 nd	100	4.06	0
10/7/2009	NaCl 2M 3 rd	93.1	3.88	0.02



ภาพผนวกที่ ข2 การสอบเทียบเครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์ เซนเซอร์ 2

ตารางผนวกที่ ข3 ผลการสอบเทียบเครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์ เซนเซอร์ 3

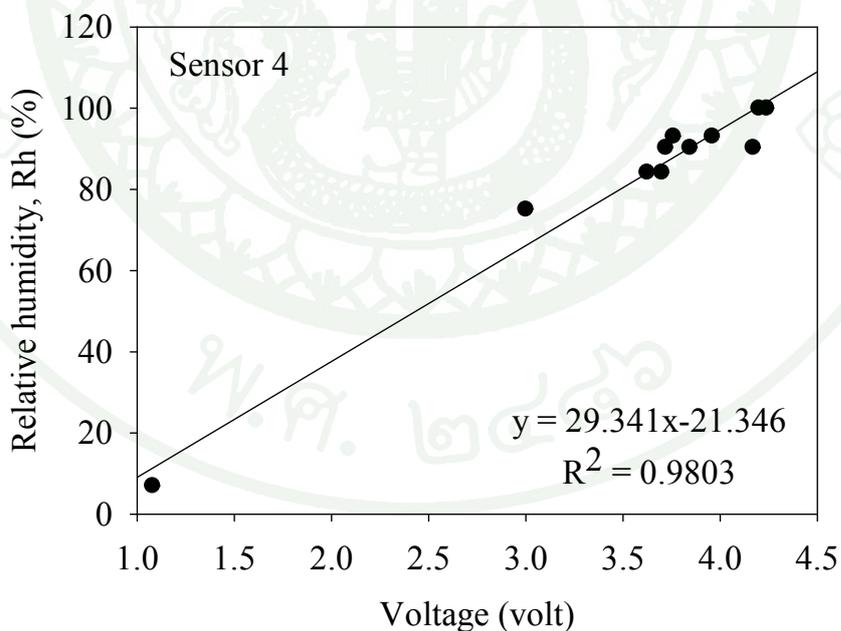
DATE (M/D/Y)	SUBSTANCE	Rh (%)	VOLTAGE (Volt)	ERROR
6/3/2008	KCl (sat)	84.2	3.425	0.025
6/9/2008	BaCl ₂ ·H ₂ O (sat)	90.3	3.58	0.01
6/12/2008	NaCl 2M	93.1	3.65	0.02
6/18/2008	Distilled Water	100	3.95	0.01
6/24/2008	NaOH (sat)	7	1	0
6/30/2008	NaCl (sat)	75.1	3	0.01
7/7/2008	KCl (sat) 2 nd	84.2	3.5	0.02
9/28/2009	BaCl ₂ ·H ₂ O (sat) 2 nd	90.3	3.685	0.01
10/2/2009	NaCl 2M 2 nd	93.1	3.79	0
10/7/2009	Distilled Water 2 nd	100	4.04	0.01



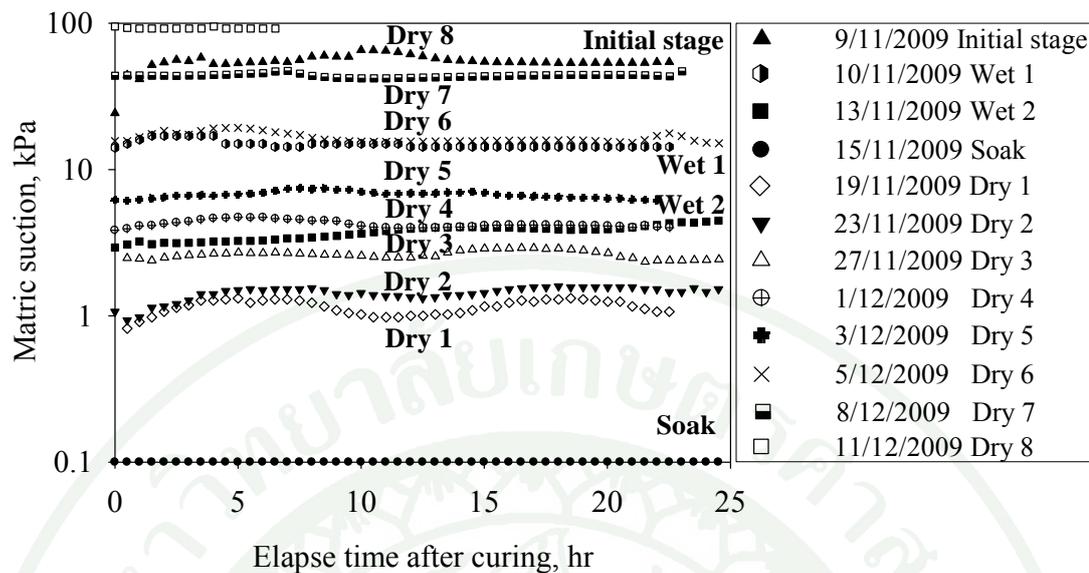
ภาพผนวกที่ ข3 การสอบเทียบเครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์ เซนเซอร์ 3

ตารางผนวกที่ ข4 ผลการสอบเทียบเครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์ เซนเซอร์ 4

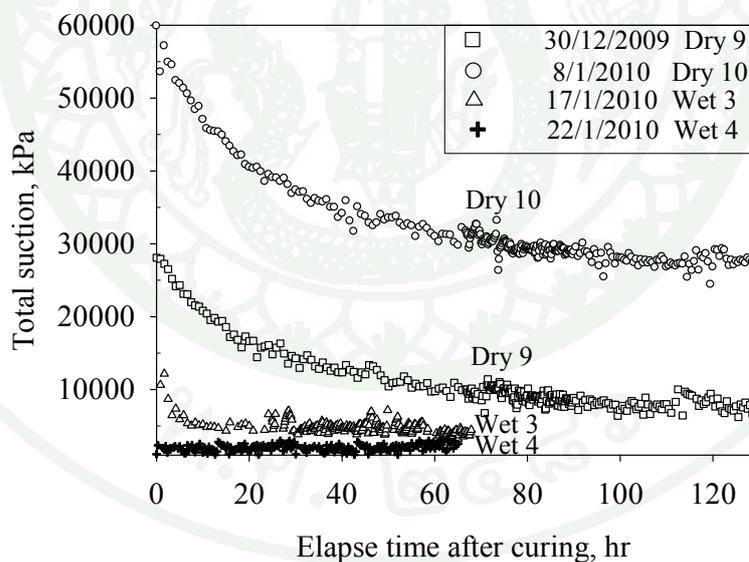
DATE (M/D/Y)	SUBSTANCE	Rh (%)	VOLTAGE (Volt)	ERROR
6/3/2008	KCl (sat)	84.2	3.625	0.025
6/9/2008	BaCl ₂ ·H ₂ O (sat)	90.3	3.72	0.02
6/12/2008	NaCl 2M	93.1	3.76	0.02
6/18/2008	Distilled Water	100	4.2	0.01
6/24/2008	NaOH (sat)	7	1.08	0.01
6/30/2008	NaCl (sat)	75.1	3	0.01
7/7/2008	KCl (sat) 2 nd	84.2	3.7	0.01
9/28/2009	BaCl ₂ ·H ₂ O (sat) 2 nd	90.3	3.845	0.01
10/2/2009	NaCl 2M 2 nd	93.1	3.96	0.01
10/7/2009	Distilled Water 2 nd	100	4.24	0.01



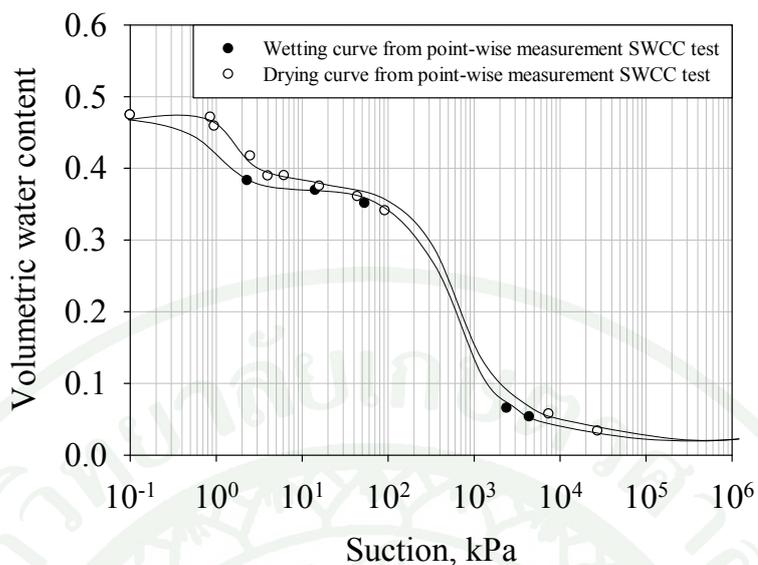
ภาพผนวกที่ ข4 การสอบเทียบเครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์ เซนเซอร์ 4



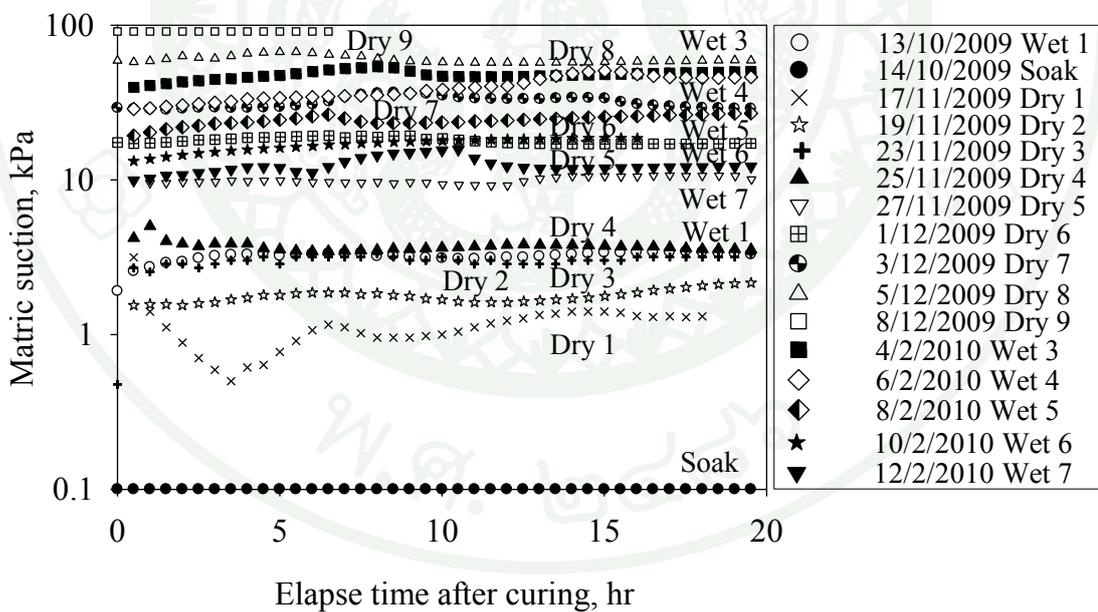
ภาพผนวกที่ ข5 แสดงผลการวัดค่าแรงดูดเมทริกซ์ ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับผิวดิน



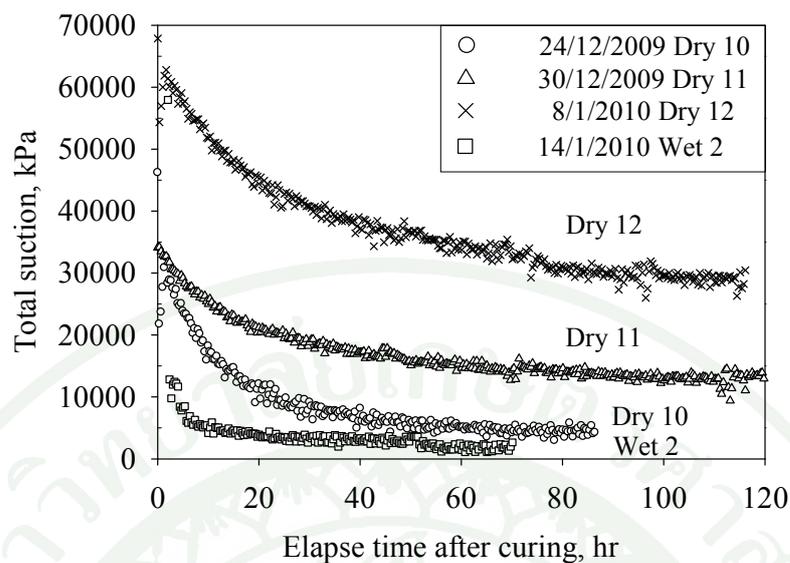
ภาพผนวกที่ ข6 แสดงผลการวัดค่าแรงดูดรวม ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับผิวดิน



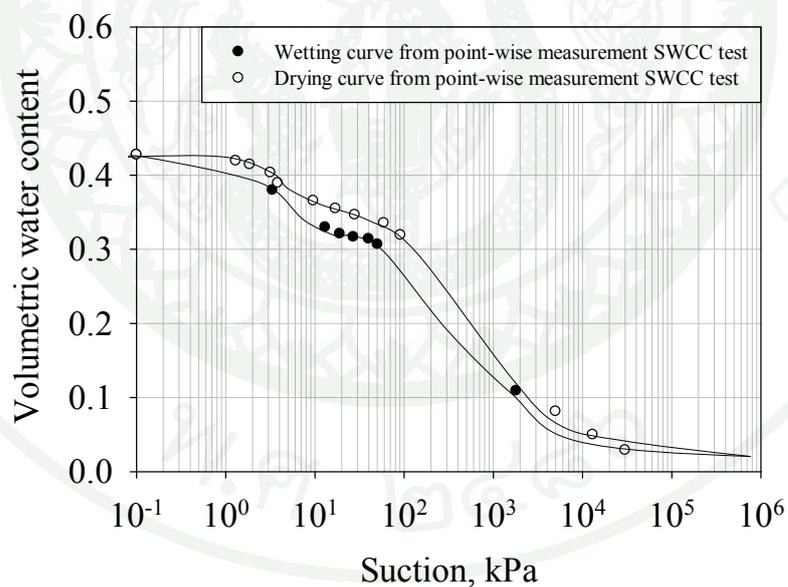
ภาพผนวกที่ ข7 ผลการทดสอบหาเส้นอัตราลักษณ์ ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม
ที่ระดับผิวดิน



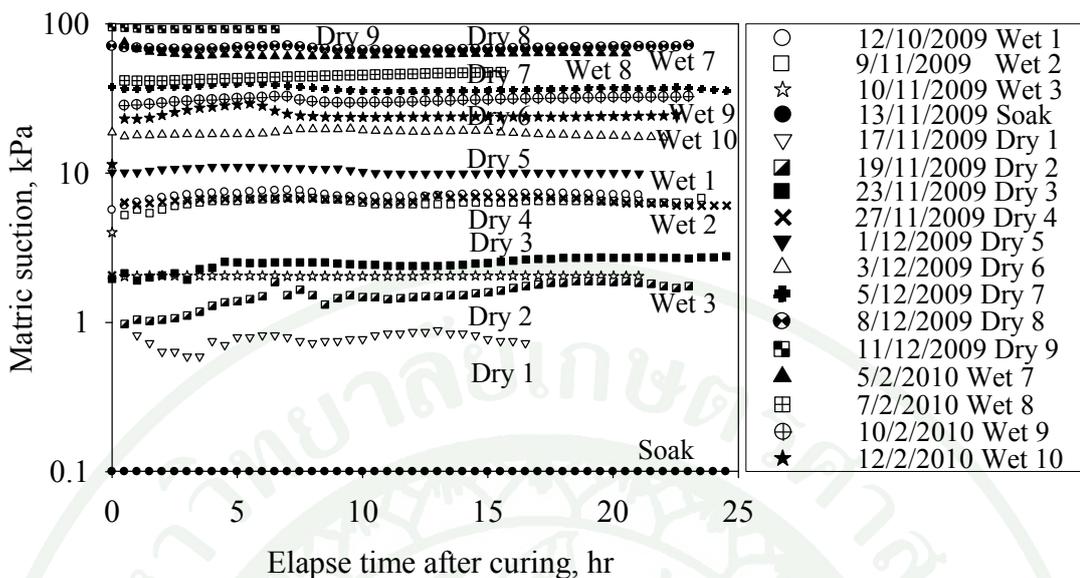
ภาพผนวกที่ ข8 แสดงผลการวัดค่าแรงดูดเมทริกซ์ ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม
ที่ระดับ 0.3 เมตร



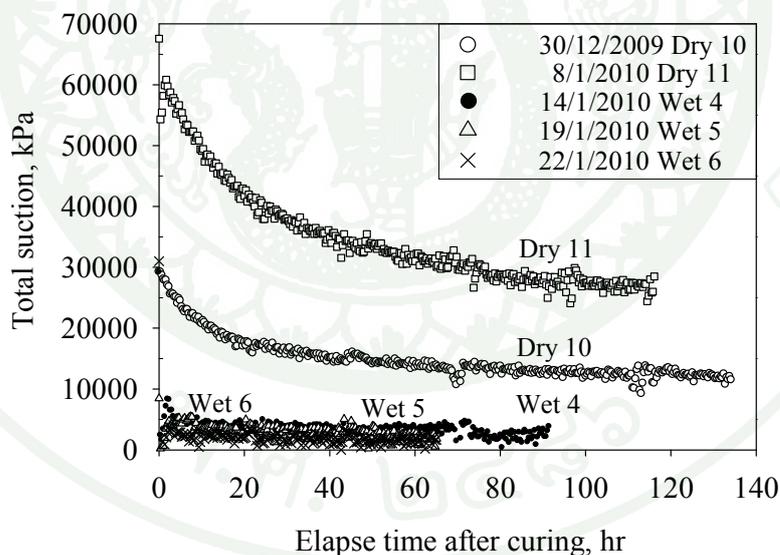
ภาพผนวกที่ ๙ แสดงผลการวัดค่าแรงดูดรวม ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม
ที่ระดับ 0.3 เมตร



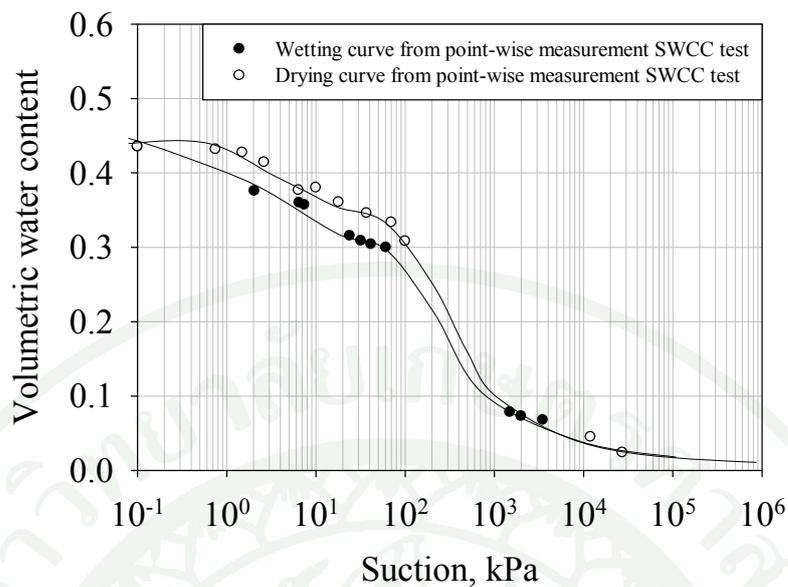
ภาพผนวกที่ ๑๐ ผลการทดสอบหาเส้นอัตราลักษณ์ ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม
ที่ระดับ 0.3 เมตร



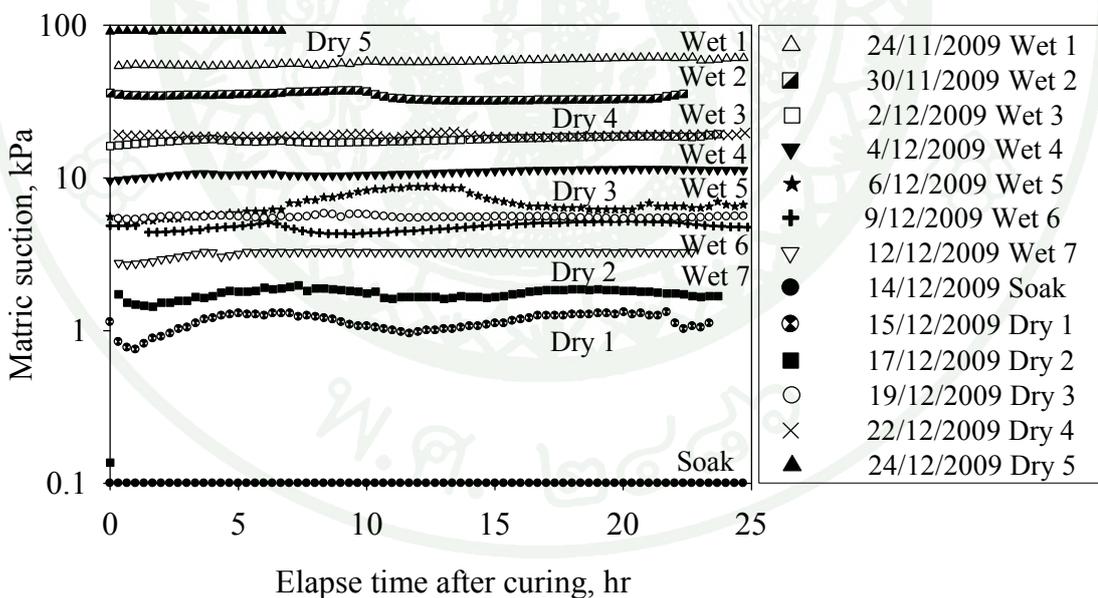
ภาพผนวกที่ ข11 แสดงผลการวัดค่าแรงดูดเมทริกซ์ ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร



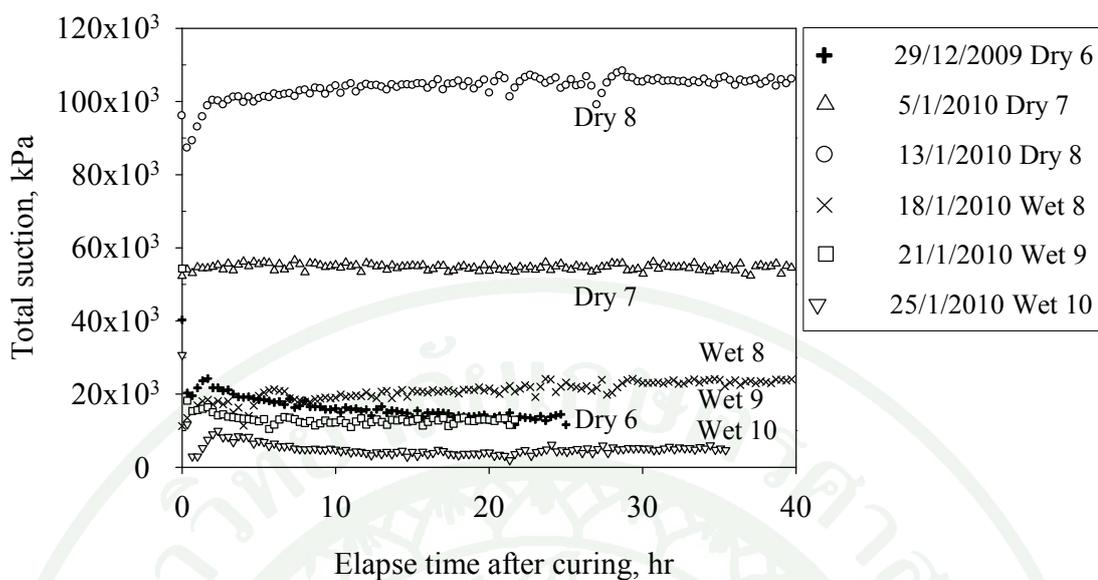
ภาพผนวกที่ ข12 แสดงผลการวัดค่าแรงดูดรวม ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร



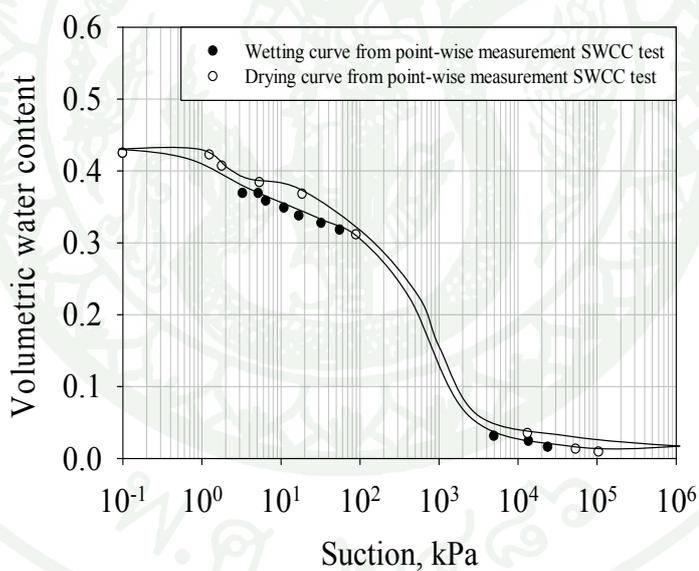
ภาพผนวกที่ ข13 ผลการทดสอบหาเส้นอัตราลักษณ์ ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร



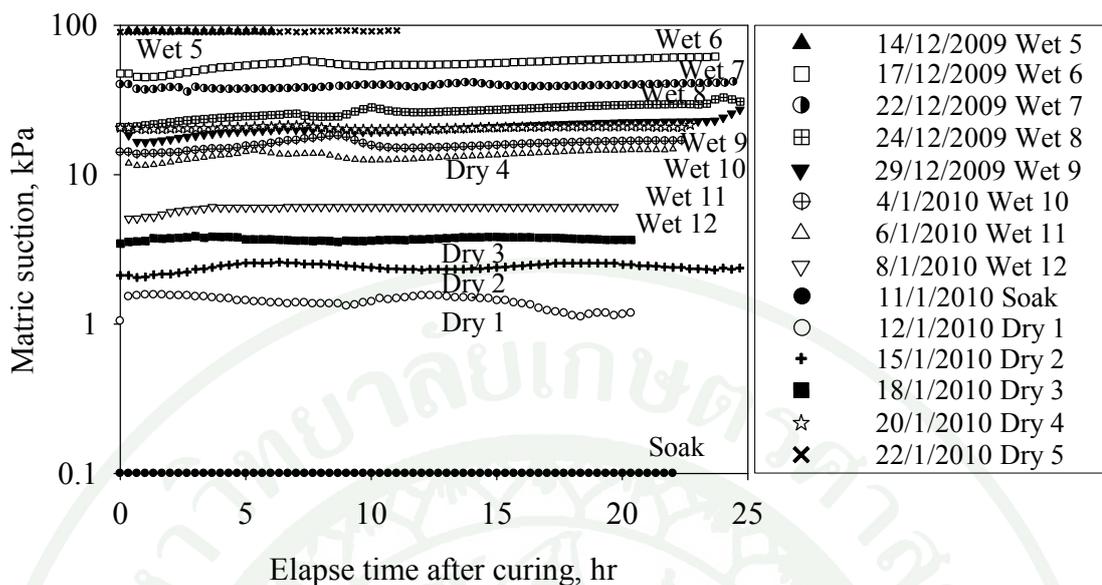
ภาพผนวกที่ ข14 แสดงผลการวัดค่าแรงดูดเมทริกซ์ ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับ 1 เมตร



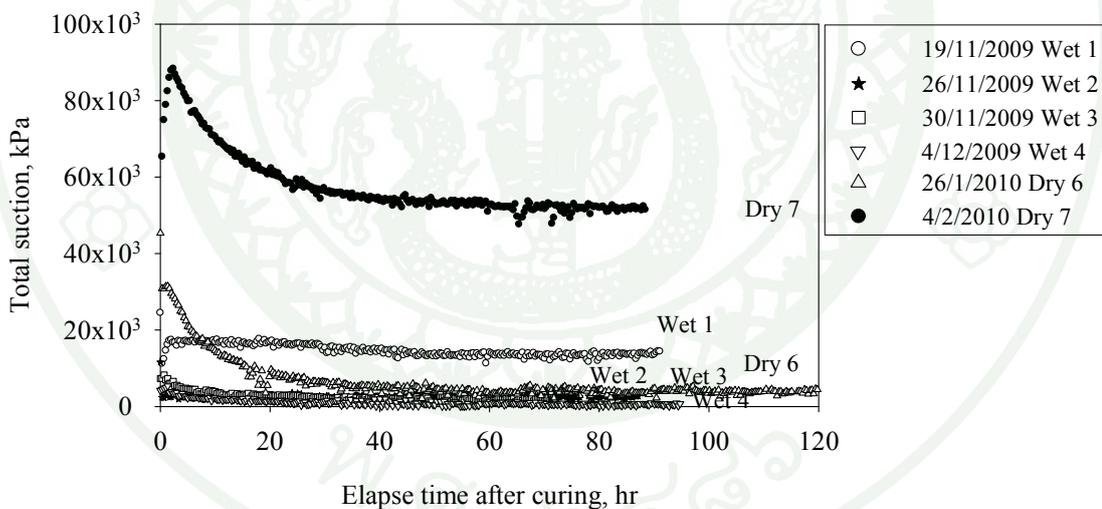
ภาพผนวกที่ ข15 แสดงผลการวัดค่าแรงดูดรวม ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับ 1 เมตร



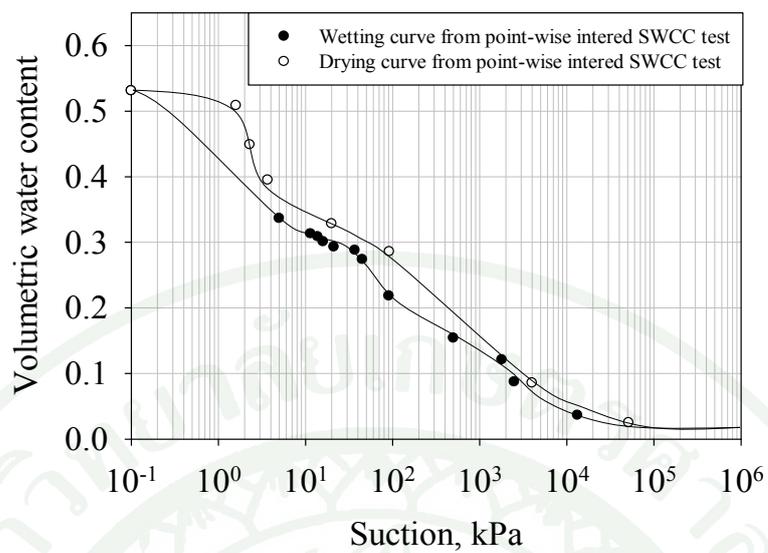
ภาพผนวกที่ ข16 ผลการทดสอบหาเส้นอัตราถักกษณ์ ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับ 1 เมตร



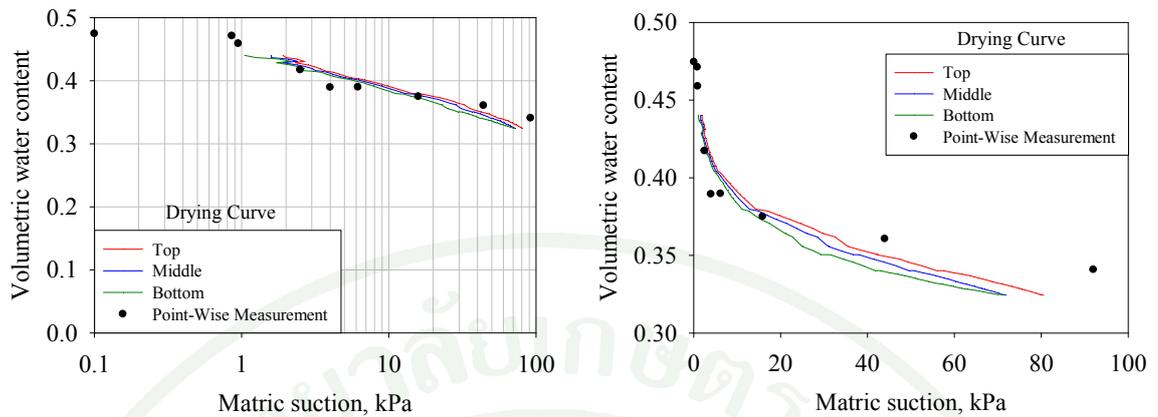
ภาพผนวกที่ ข17 แสดงผลการวัดค่าแรงดูดเมทริกซ์ ของตัวอย่างดินในพื้นที่ป่าไผ่ ที่ระดับผิวดิน



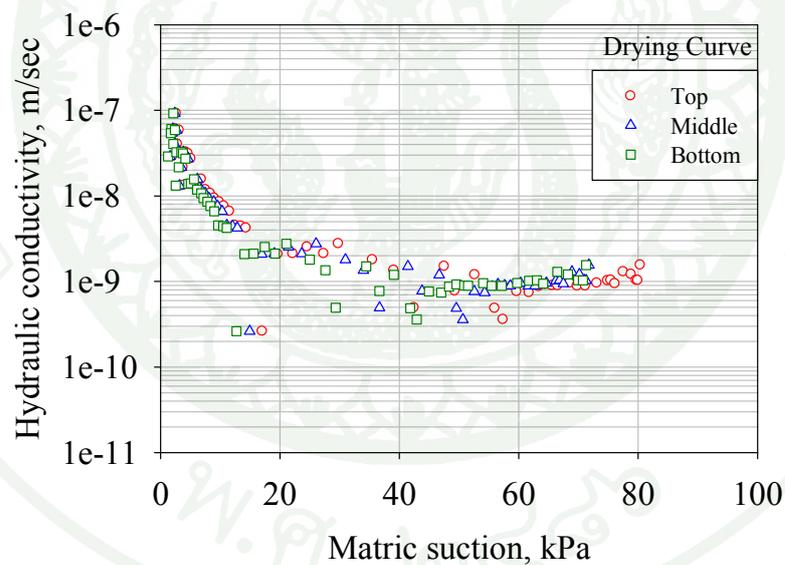
ภาพผนวกที่ ข18 แสดงผลการวัดค่าแรงดูดรวม ของตัวอย่างดินในพื้นที่ป่าไผ่ ที่ระดับผิวดิน



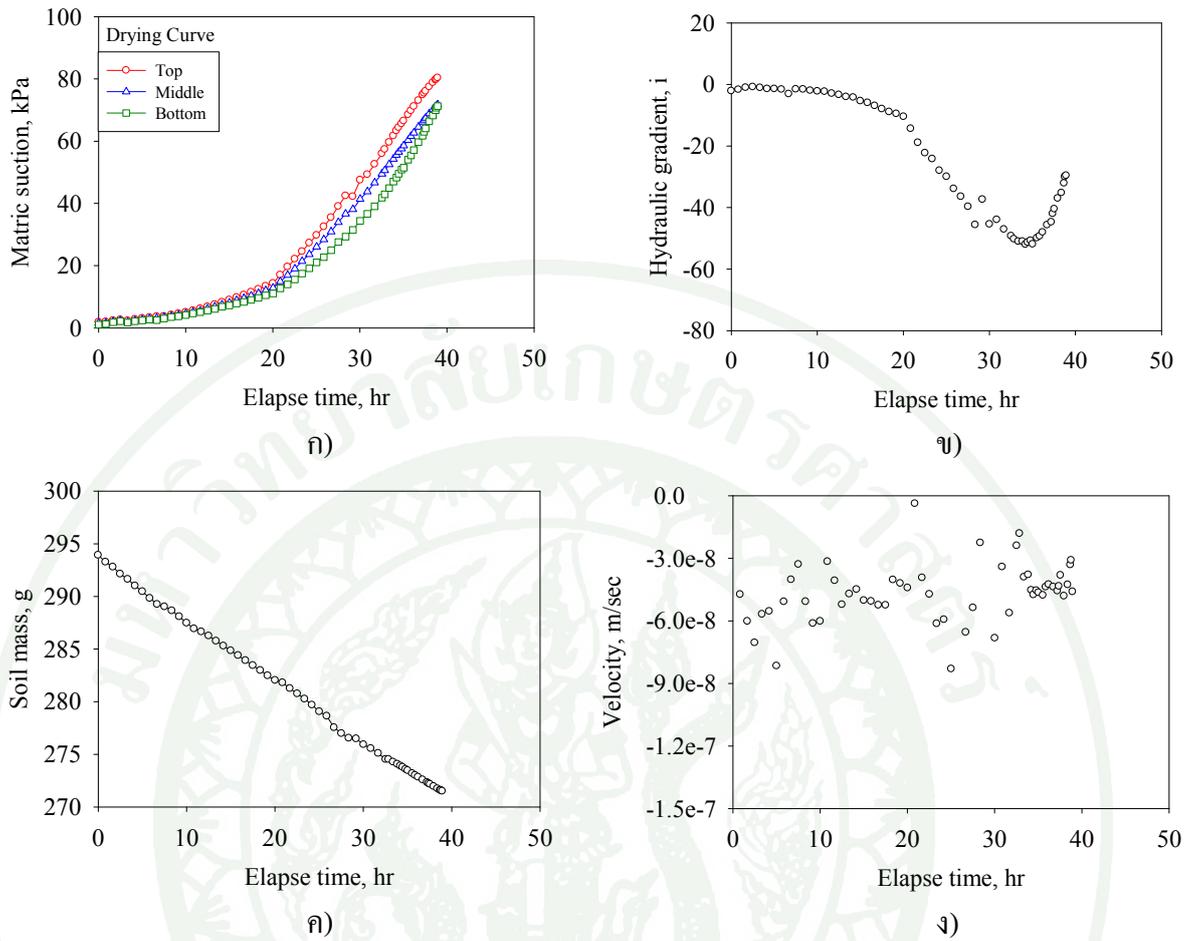
ภาพผนวกที่ ข19 ผลการทดสอบหาเส้นอัตราลักษณ์ ของตัวอย่างดินในพื้นที่ป่าไผ่ ที่ระดับผิวดิน



ภาพผนวกที่ ข20 ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ด้วยวิธี Continuous Measurement ของ กระทบการแห้ง เปรียบเทียบกับวิธี Point-Wise Measurement ของตัวอย่างดิน ในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับผิวดิน



ภาพผนวกที่ ข21 ค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของดิน จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ในกระทบการแห้ง ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับ ผิวดิน



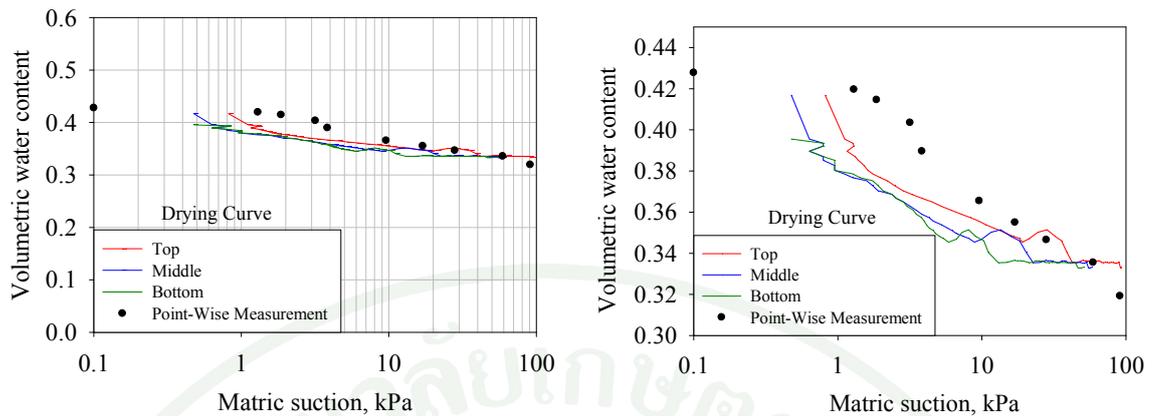
ภาพผนวกที่ ข22 ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ของกระบวนการแห้ง ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม่ผลผสม ที่ระดับผิวดิน

ก) ความสัมพันธ์ของค่าแรงดูดกับเวลา

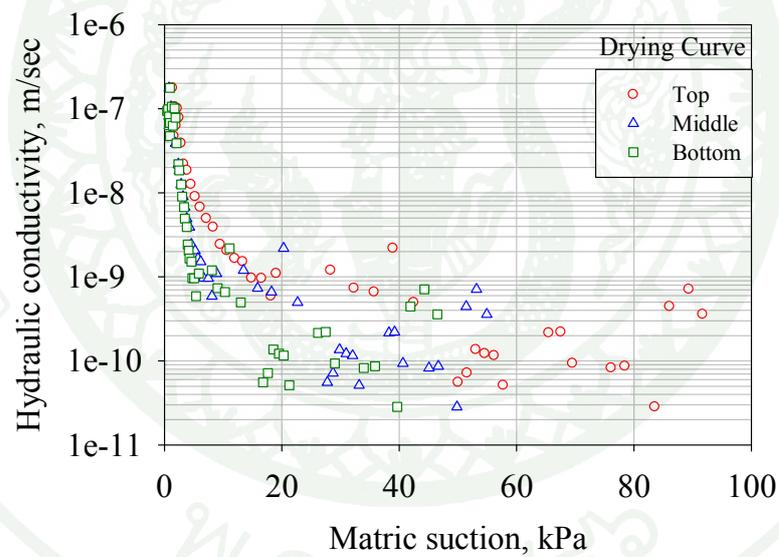
ข) ความสัมพันธ์ของค่าความชันชลศาสตร์(i average) กับเวลา

ค) ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักกับเวลา

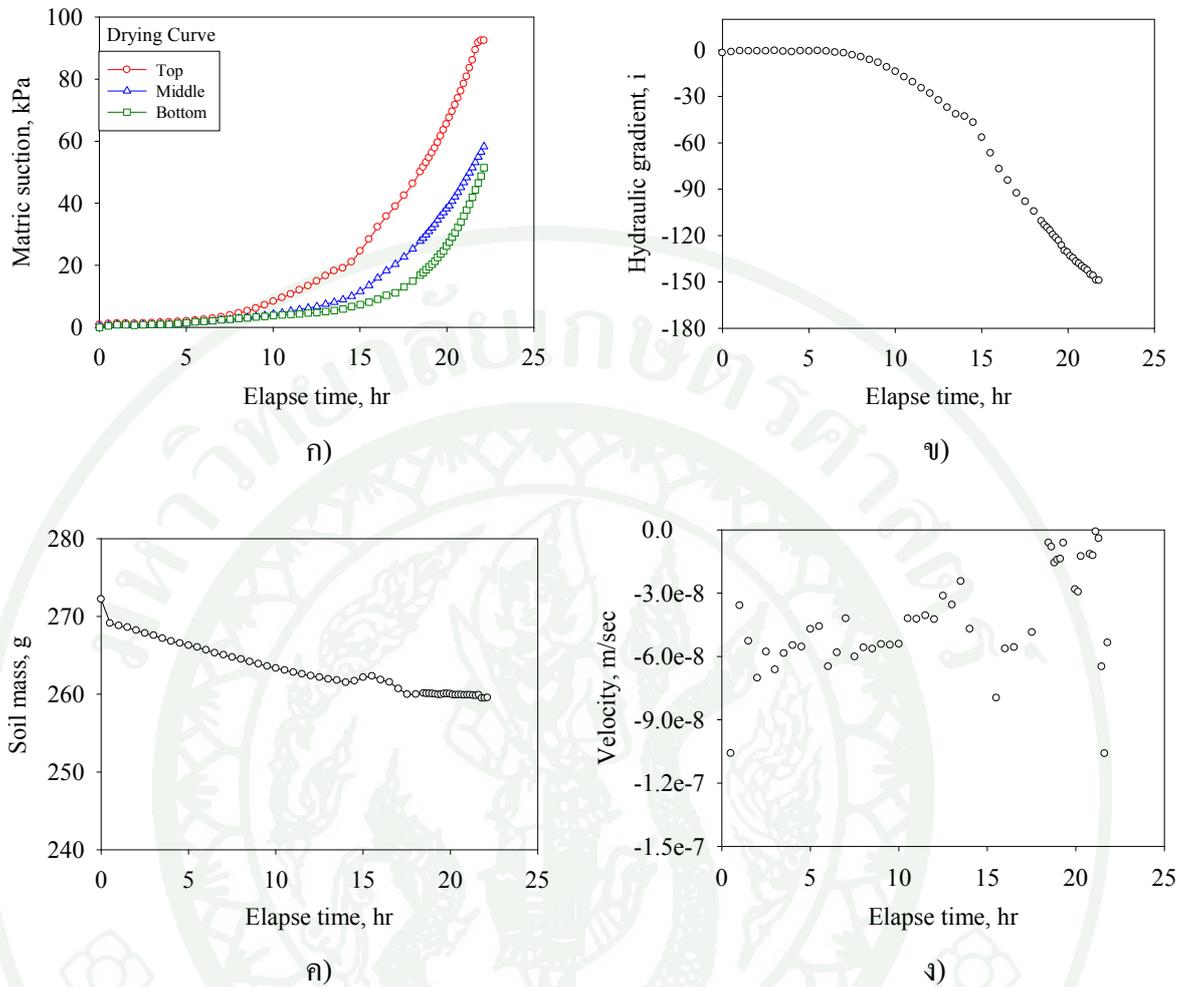
ง) ความสัมพันธ์ของค่าความเร็วในการไหลของน้ำในตัวอย่างดินกับเวลา



ภาพผนวกที่ ข23 ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ด้วยวิธี Continuous Measurement ของ ระยะเวลาการแห้ง เปรียบเทียบกับวิธี Point-Wise Measurement ของตัวอย่างดิน ในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับ 0.3 เมตร

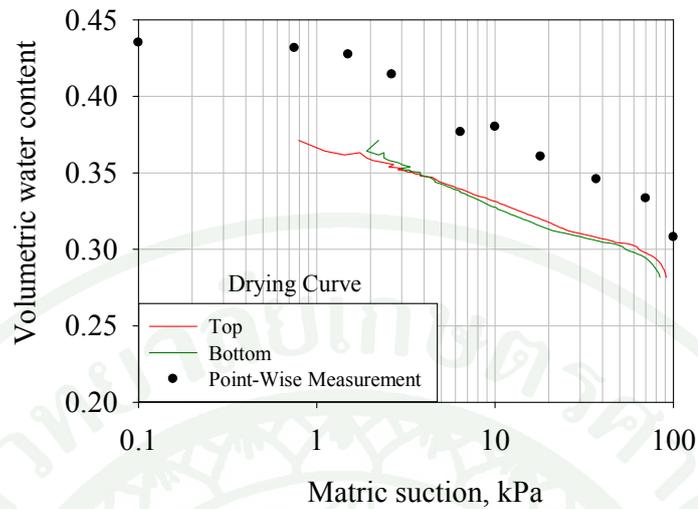


ภาพผนวกที่ ข24 ค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของดิน จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ในระยะเวลาการแห้ง ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับ 0.3 เมตร

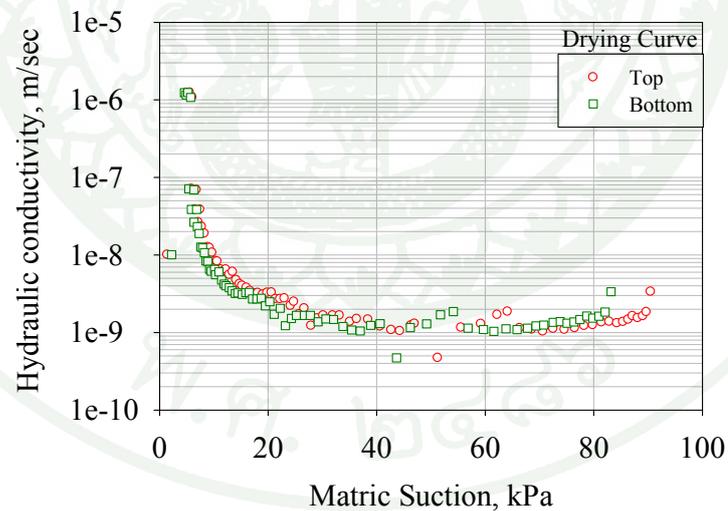


ภาพผนวกที่ ข25 ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ของกระบวนการแห้ง ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม่ผลผสม ที่ระดับ 0.3 เมตร

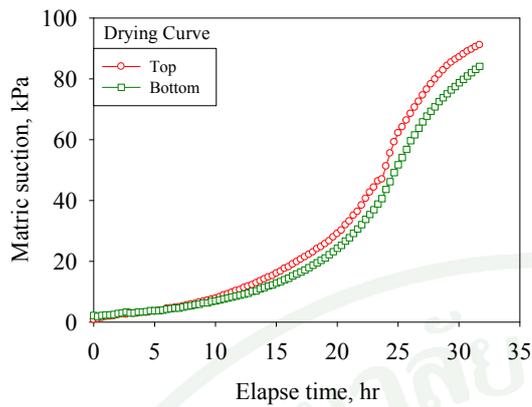
- ก) ความสัมพันธ์ของค่าแรงดูดกับเวลา
- ข) ความสัมพันธ์ของค่าความชันชลศาสตร์(i average) กับเวลา
- ค) ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักกับเวลา
- ง) ความสัมพันธ์ของค่าความเร็วในการไหลของน้ำในตัวอย่างดินกับเวลา



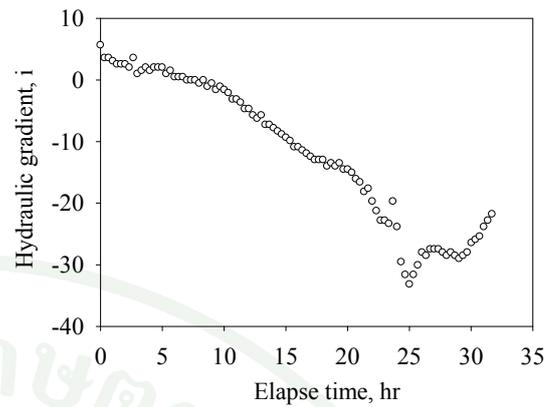
ภาพผนวกที่ ข26 ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ด้วยวิธี Continuous Measurement ของ ระยะเวลาการแห้ง เปรียบเทียบกับวิธี Point-Wise Measurement ของตัวอย่างดิน ในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร



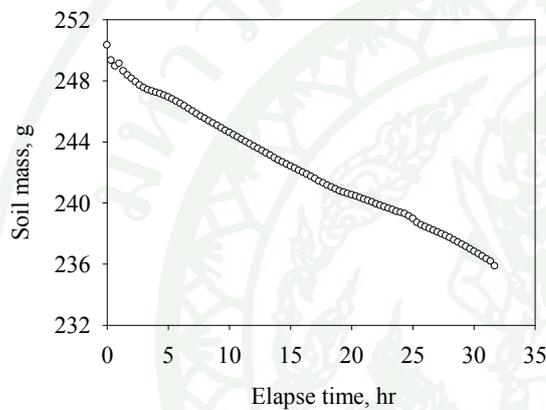
ภาพผนวกที่ ข27 ค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดิน จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ในระยะเวลาการแห้ง ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร



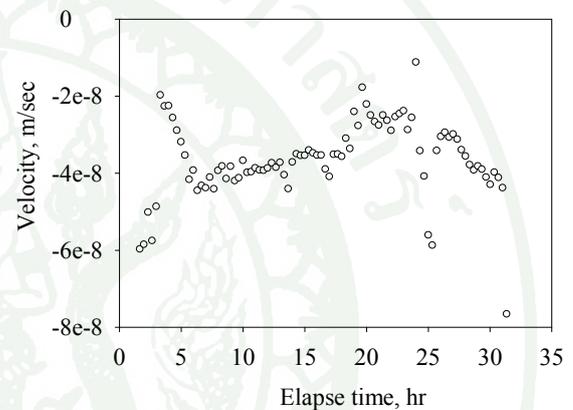
ก)



ข)



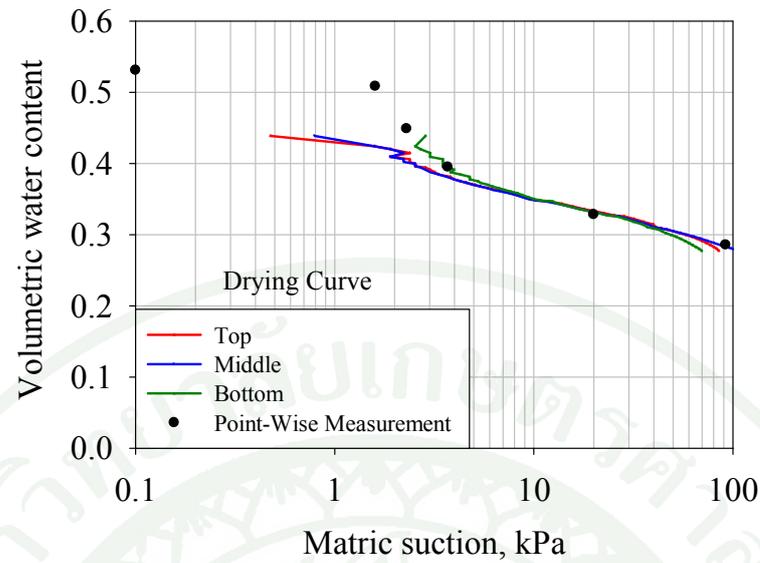
ค)



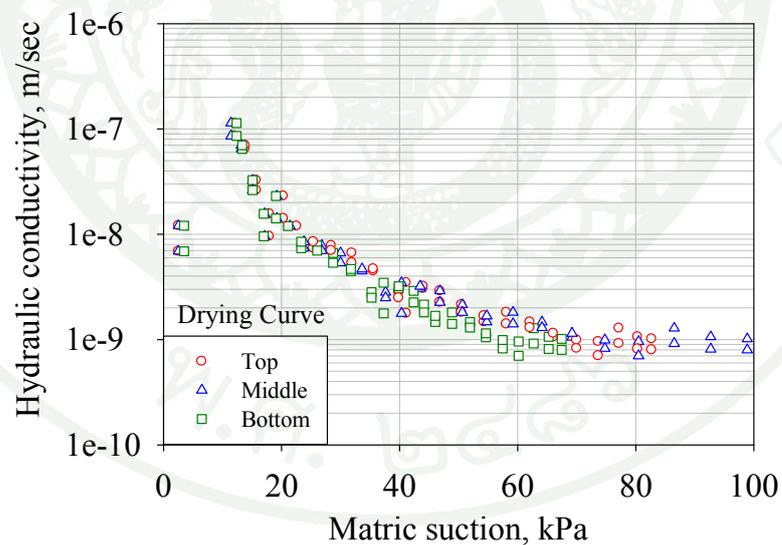
ง)

ภาพผนวกที่ ข28 ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ของกระบวนการแห้ง ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม้ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร

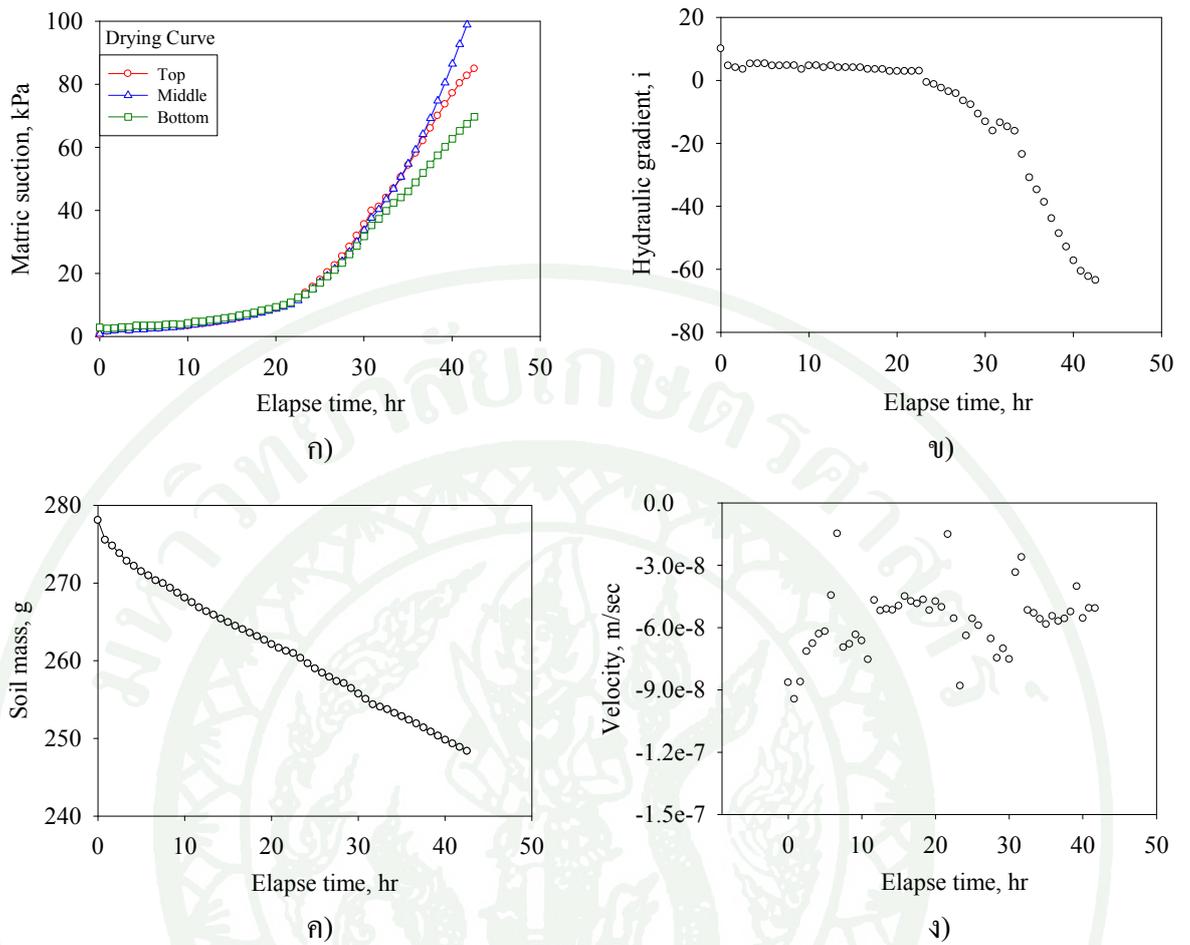
- ก) ความสัมพันธ์ของค่าแรงดูดกับเวลา
- ข) ความสัมพันธ์ของค่าความชันชลศาสตร์(i average) กับเวลา
- ค) ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักกับเวลา
- ง) ความสัมพันธ์ของค่าความเร็วในการไหลของน้ำในตัวอย่างดินกับเวลา



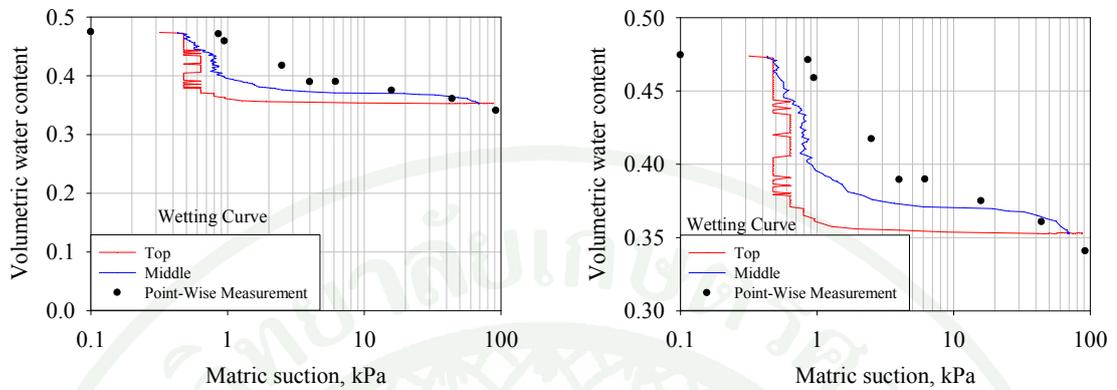
ภาพผนวกที่ ข29 ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ด้วยวิธี Continuous Measurement เปรียบเทียบกับวิธี Point-Wise Measurement ในกระบวนการแห้งของตัวอย่างดินในพื้นที่ป่าไผ่ ที่ระดับผิวดิน



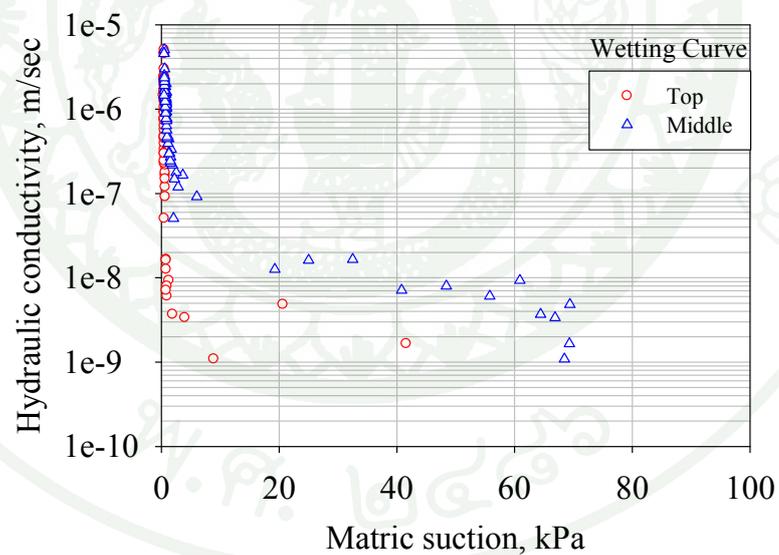
ภาพผนวกที่ ข30 ค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของดิน จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ในกระบวนการแห้ง ของตัวอย่างดินในพื้นที่ป่าไผ่ ที่ระดับผิวดิน



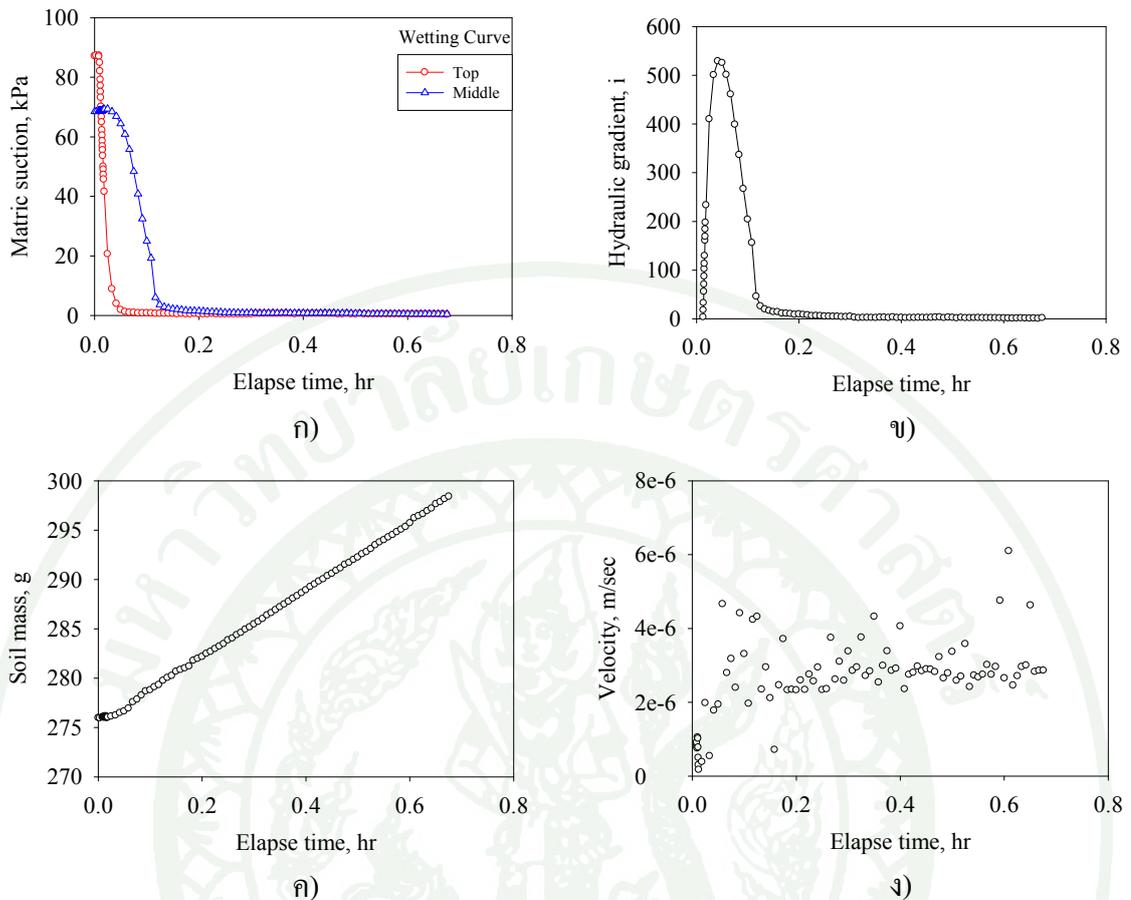
- ภาพผนวกที่ ข31** ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ในกระบวนการแห้ง ของตัวอย่างดินในพื้นที่ป่าไผ่ ที่ระดับผิวดิน
- ก) ความสัมพันธ์ของค่าแรงดูดเมทริกซ์กับเวลา
 - ข) ความสัมพันธ์ของค่าความชันชลศาสตร์(i average) กับเวลา
 - ค) ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักดินกับเวลา
 - ง) ความสัมพันธ์ของค่าความเร็วในการระเหยของน้ำในตัวอย่างดินกับเวลา



ภาพผนวกที่ ข32 ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณ์ด้วยวิธี Continuous Measurement ในกระบวนการเปียก เปรียบเทียบกับวิธี Point-Wise Measurement ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม่ผลผสม ที่ระดับผิวดิน

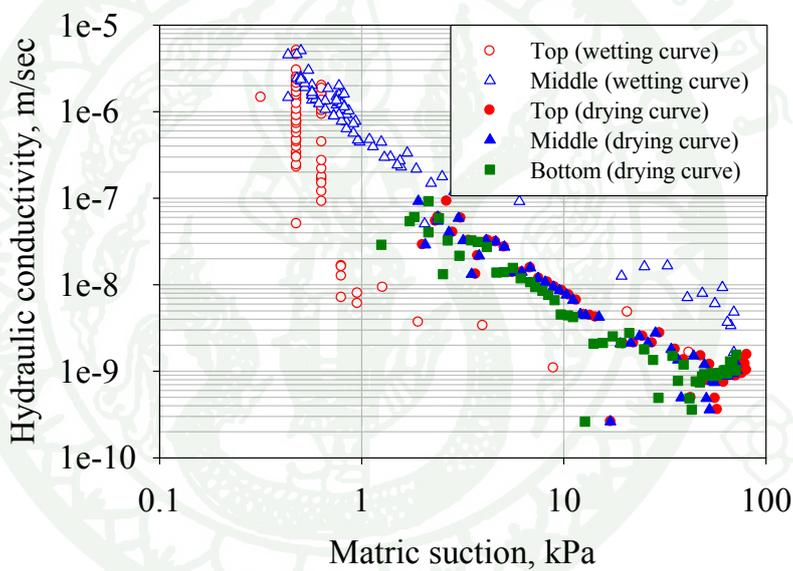
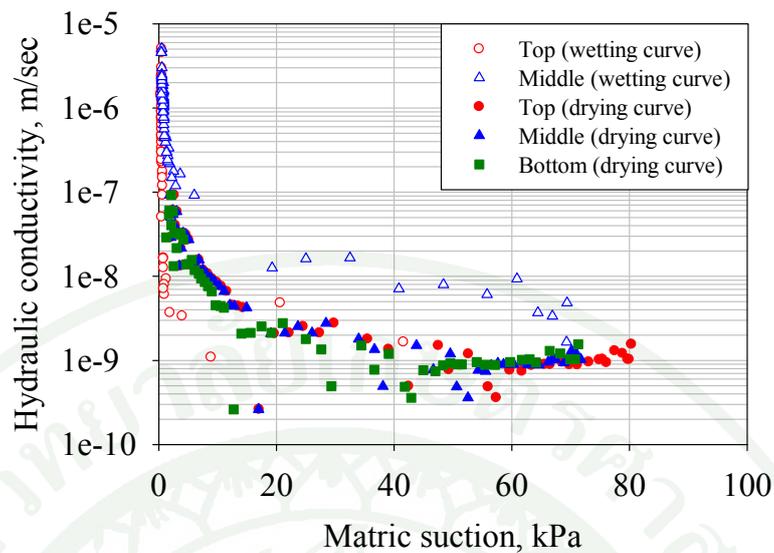


ภาพผนวกที่ ข33 ค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของดิน จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ในกระบวนการเปียก ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม่ผลผสม ที่ระดับผิวดิน

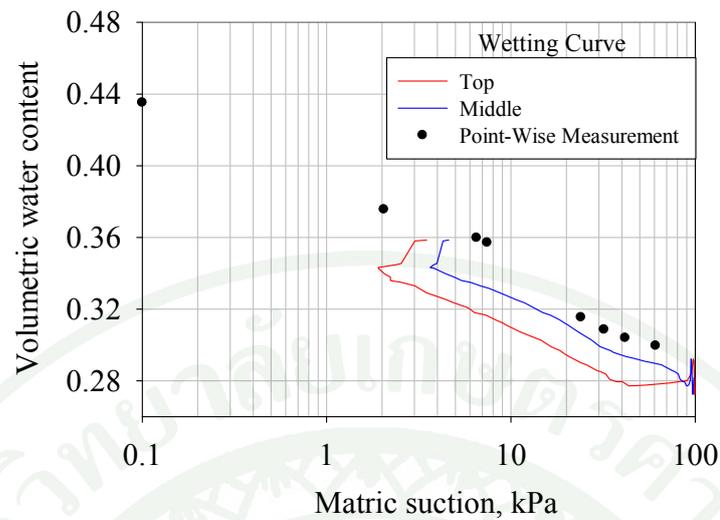


ภาพผนวกที่ ข34 ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ของกระบวนการเปียก ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม่ผลผสม ที่ระดับผิวดิน

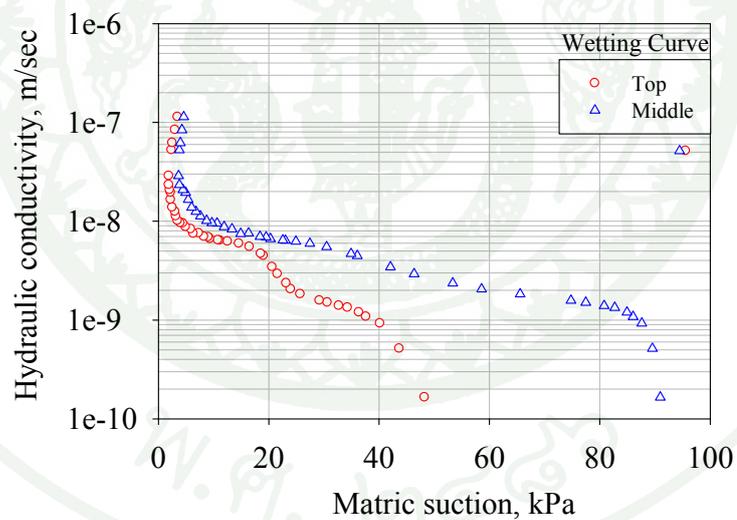
- ความสัมพันธ์ของค่าแรงดูดกับเวลา
- ความสัมพันธ์ของค่าความชันชลศาสตร์(i_{upper}) กับเวลา
- ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักกับเวลา
- ความสัมพันธ์ของค่าความเร็วในการไหลของน้ำในตัวอย่างดินกับเวลา



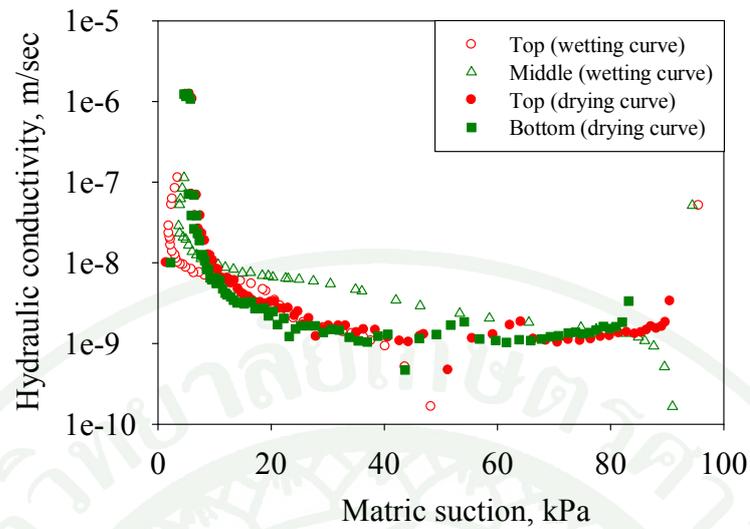
ภาพผนวกที่ ข35 ค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของดิน จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ทั้งกระบวนการเปียกและแห้ง ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม่ผลผสมที่ระดับผิวดิน



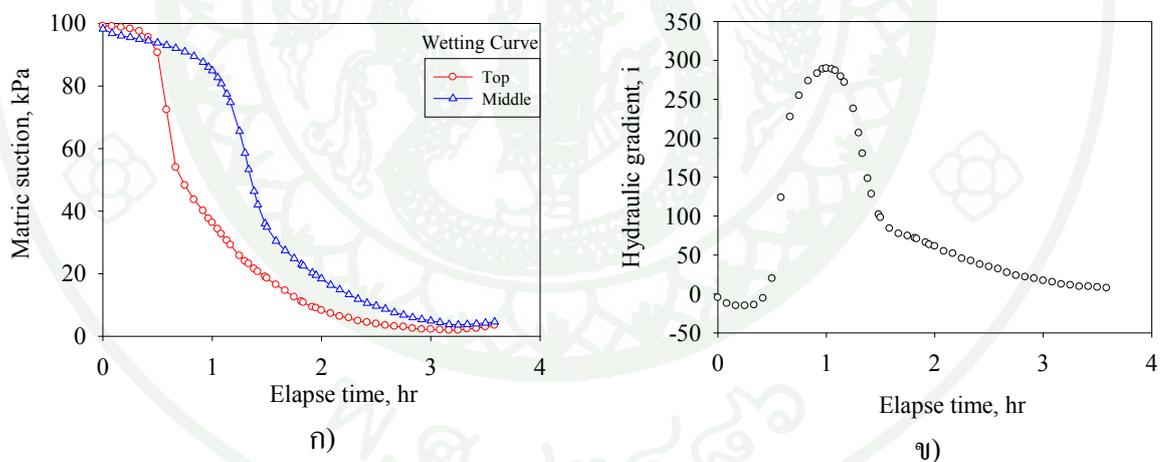
ภาพผนวกที่ ข36 ผลการทดสอบเส้นอัตราถักด้วยวิธี Continuous Measurement ของกระบวนการเปียก เปรียบเทียบกับวิธี Point-Wise Measurement ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม่ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร



ภาพผนวกที่ ข37 ค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดิน จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ในกระบวนการเปียก ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม่ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร

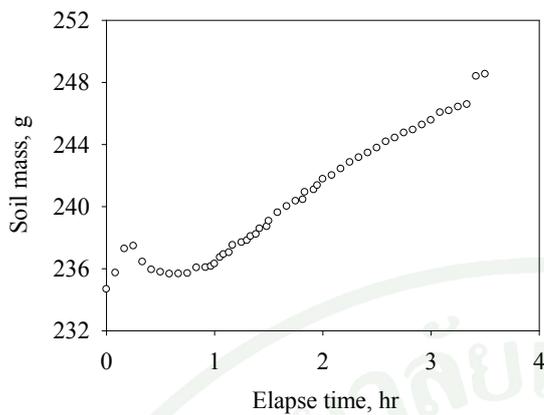


ภาพผนวกที่ ข38 ค่าฟังก์ชันสัมพันธ์การซึมผ่านของดิน จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ทั้งในกระบวนการเปียกและแห้ง ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม่ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร

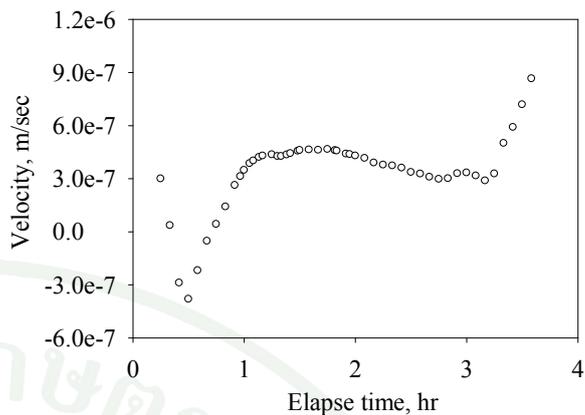


ภาพผนวกที่ ข39 ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ จากผลการทดสอบ Continuous Measurement ของกระบวนการเปียก ของตัวอย่างดินในพื้นที่ไม่ผลผสม ที่ระดับ 0.8 เมตร

- ก) ความสัมพันธ์ของค่าแรงดูดกับเวลา
- ข) ความสัมพันธ์ของค่าความชันชลศาสตร์(i_{upper}) กับเวลา
- ค) ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักกับเวลา
- ง) ความสัมพันธ์ของค่าความเร็วในการไหลของน้ำในตัวอย่างดินกับเวลา

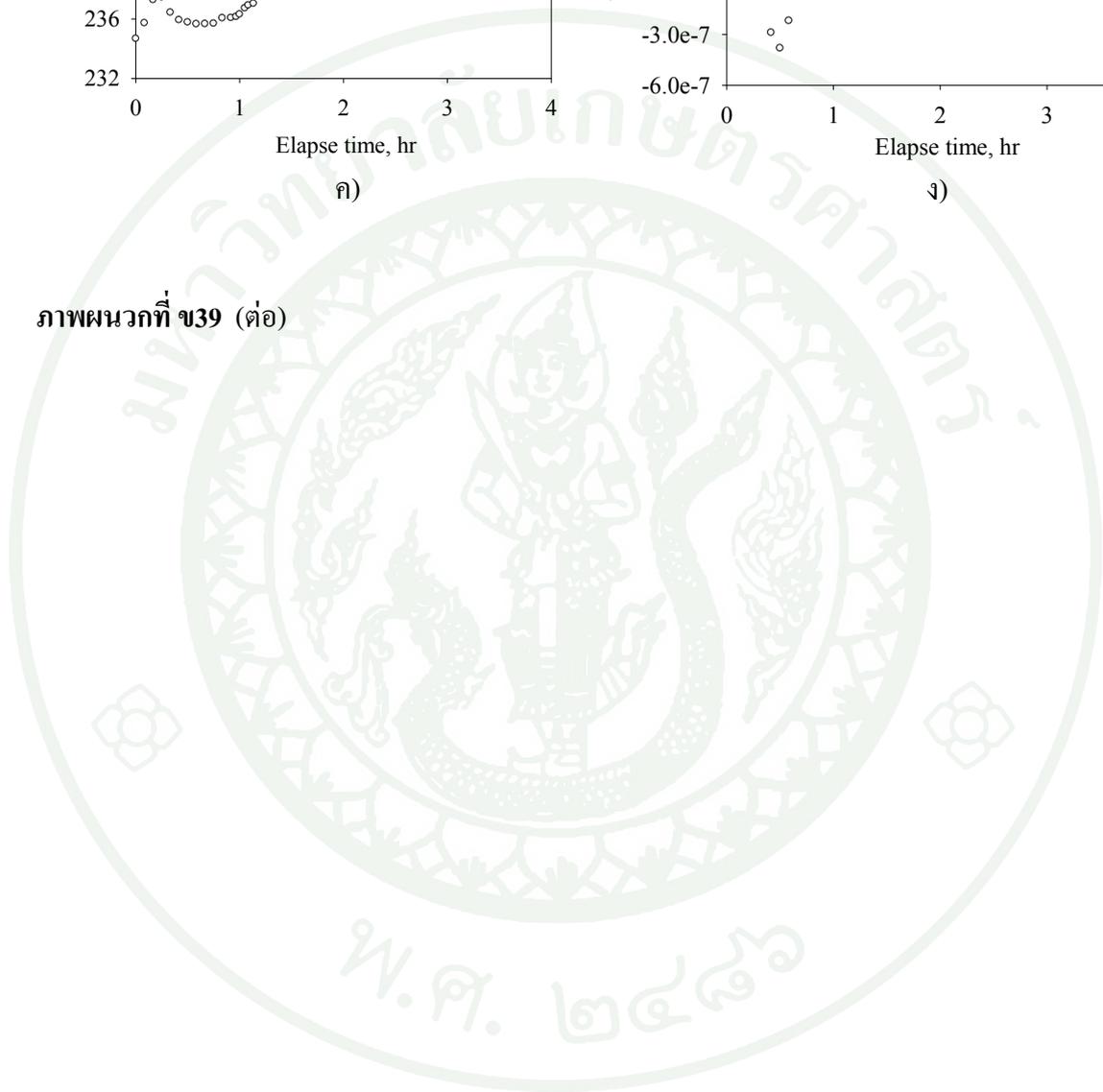


ก)



ง)

ภาพผนวกที่ ข39 (ต่อ)



ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อสกุล	จิติมา เทพพานิช
เกิดวันที่	วันที่ 25 มกราคม 2528
สถานที่เกิด	จังหวัดราชบุรี
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-