



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ)
ปริญญา

วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ

วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การทดลองศึกษารูปแบบของธารน้ำเนื่องจากน้ำไหลบ่าและน้ำใต้ดิน

Experimental Study of Gully Formation by Overland Flow and Groundwater Flow

نامผู้วิจัย นางสาววิชา ไทยสยาม

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อดิษฐ์ พรพรหมินทร์, D.Eng.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรรณดี ไทยสยาม, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณภาพร เปี่ยมสง่า, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สิงสีทจี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การทดลองศึกษารูปแบบของธารน้ำเนื่องจากน้ำไหลบ่าและน้ำใต้ดิน

Experimental Study of Gully Formation by Overland Flow and Groundwater Flow

โดย

นางสาวรวิชา ไทยสยาม

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รวิชา ไทยสยาม 2557: การทดลองศึกษารูปแบบของธารน้ำเนื่องจากน้ำไหลบ่าและน้ำใต้ดิน ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ) สาขาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถชัย พรพรหมินทร์, D.Eng. 137 หน้า

การเกิดธารน้ำสามารถแบ่งตามกระบวนการเป็นการกัดเซาะจากน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน ใน การศึกษานี้ได้วิเคราะห์รูปแบบของธารน้ำเนื่องจากน้ำไหลบ่า โดยทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ถาดทดลองรูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 เซนติเมตร สูง 28.5 เซนติเมตร และใช้ ตัวอย่างทราย 3 ขนาด ซึ่งมีค่า D_{50} เท่ากับ 0.49 , 0.30 และ 0.18 มิลลิเมตรตามลำดับ โดยที่ถาด ทดลองรูปวงกลมสามารถควบคุมการไหลให้อยู่ในแนวรัศมีและไหลระบายออกทางลาดชันรูป วงกลมที่จุดศูนย์กลางถาดได้ ทำให้รูปแบบของธารน้ำมีลักษณะค่อนข้างสมมาตรได้มากกว่าการ ทดลองอื่นๆที่ผ่านมา ในช่วงแรกของการทดลองจะเกิดจากอิทธิพลของน้ำไหลบ่ามากกว่าอิทธิพล ของน้ำใต้ดิน พบว่าลาดชันของขอบวงกลมที่ถูกกัดเซาะยังสามารถคงรูปวงกลมได้สักระยะหนึ่ง ก่อนที่ขอบของลาดชันจะพัฒนาแตกออกเป็นธารน้ำจำนวนมาก ซึ่งระยะช่วงแรกลาดชันของขอบ วงกลมเกิดเสถียรภาพซึ่งมีความสอดคล้องกับทฤษฎีเสถียรภาพของ Mizushima และคณะ (2007) และเมื่อการไหลน้ำไหลบ่าส่วนใหญ่เริ่มหมดไป อิทธิพลของน้ำใต้ดินจะทำให้เกิดการกัดเซาะที่ ฐานของลาดชันส่งผลให้เกิดการพังทลายของธารน้ำ โดยอิทธิพลของน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้นตามขนาด ของทรายที่ใช้

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Ravicha Thaisiam 2014: Experimental Study of Gully Formation by Overland Flow and Groundwater Flow. Master of Engineering (Water Resources Engineering), Major Field: Water Resources Engineering, Department of Water Resources Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Adichai Pornprommin, D.Eng. 137 pages.

Gully initiation can be classified by mechanisms to the erosion by surface water and subsurface water. In this study, gully formation by overland flow was analyzed by using the circular chamber. The experiments were performed in the apparatus chamber of 120 cm diameter and 28.5 cm height. In this study, three types ($D_{50} = 0.49, 0.30$ and 0.86 mm) of uniform-size sand were used. Thus, the flow was controlled in the radial direction and drained to the circular scarp at the center of the chamber. As a result, gully formation in this study was more symmetrical than other previous studies. In the beginning stage of the runs, overland flow is more dominant than groundwater flow. It is found that the eroding scarp can persist its circular shape for some period of time before bifurcation happened and many gullies started developing. This first stage that the scarp was stable reasonably agrees with the stability theory by Mizushima et al. (2007). As the overland flow decreased, groundwater became dominant, caused erosion at the toe of the scarp and induced slope failure. The effects of groundwater increased with larger size of sand.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.อดิษฐ์ พรพรหมินทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ ผศ.ดร.วรรณดี ไทยสยาม ที่ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไข วิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและ มอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป ขอขอบพระคุณ คุณวิโรจน์ ศรีอุฐ์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ ขอขอบพระคุณ ศ.ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้การสนับสนุนห้องปฏิบัติการทดลองปฐพี

คุณประโยชน์อันใดที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอขอบความดีทั้งปวงแต่บิดา มารดา ญาติพี่น้อง ผู้มีพระคุณ คณาจารย์ทุกท่าน และเพื่อนๆ ของข้าพเจ้าทุกท่าน ที่คอยเป็นกำลังใจ และให้คำปรึกษามาโดยตลอด

รวิชา ไทยสยาม
ธันวาคม 2557

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(10)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	46
อุปกรณ์	46
วิธีการ	48
ผลและวิจารณ์	62
สรุปและข้อเสนอแนะ	77
สรุป	77
ข้อเสนอแนะ	78
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	79
ภาคผนวก	82
ภาคผนวก ก การหาขนาดเม็ดดิน (Grain Size Analysis)	83
ภาคผนวก ข การหาขนาดเม็ดดินโดยไฮโดรมิเตอร์ (Grain Size Determination of Hydrometer Analysis)	90
ภาคผนวก ค การหาความซึมผ่านของดิน (Soil Permeability Test)	98
ภาคผนวก ง การศึกษารูปแบบของธารน้ำเนื่องจากน้ำไหลบ่าและน้ำใต้ดิน	106
ภาคผนวก จ ผลการศึกษารูปแบบของธารน้ำเนื่องจากน้ำไหลบ่าและน้ำใต้ดิน	109
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	137

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 ความถ่วงจำเพาะของดิน	24
2 ลักษณะของดินที่มีขนาดคละกันดี	26
3 ประเภทตะกอนตามขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (d)	28
4 ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินชนิดต่างๆ	32
5 ค่าการทดสอบหาขนาดคละของเม็ดทราย	47
6 ค่าการทดสอบหาลักษณะขนาดคละของเม็ดทราย	49
7 ค่าการทดสอบความชื้นน้ำของเม็ดทราย	49
8 จำนวนการทดลอง	51
ตารางผนวกที่	
ก1 การแบ่งชนิดของเม็ดดิน	87
จ1 การคำนวณพื้นที่และความยาวของธารน้ำของตัวอย่างทรายชนิด A-0	116
จ2 การคำนวณพื้นที่และความยาวของธารน้ำของตัวอย่างทรายชนิด B-0	117
จ3 การคำนวณพื้นที่และความยาวของธารน้ำของตัวอย่างทรายชนิด A	118
จ4 การคำนวณพื้นที่และความยาวของธารน้ำของตัวอย่างทรายชนิด B-1	119
จ5 การคำนวณพื้นที่และความยาวของธารน้ำของตัวอย่างทรายชนิด B-2	120
จ6 การคำนวณพื้นที่และความยาวของธารน้ำของตัวอย่างทรายชนิด B-3	121
จ7 การคำนวณพื้นที่และความยาวของธารน้ำของตัวอย่างทรายชนิด C-1	122
จ8 การคำนวณพื้นที่และความยาวของธารน้ำของตัวอย่างทรายชนิด C-2	123
จ9 การคำนวณพื้นที่และความยาวของธารน้ำของตัวอย่างทรายชนิด C-3	124
จ10 ตัวอย่างการคำนวณหาโปรไฟล์น้ำ ด้วยวิธีขั้นบันไดโดยตรง (The direct step method) ที่เวลา 0 วินาที	130
จ11 ตัวอย่างการคำนวณหาโปรไฟล์น้ำ ด้วยวิธีขั้นบันไดโดยตรง (The direct step method) ที่เวลา 1 วินาที	130

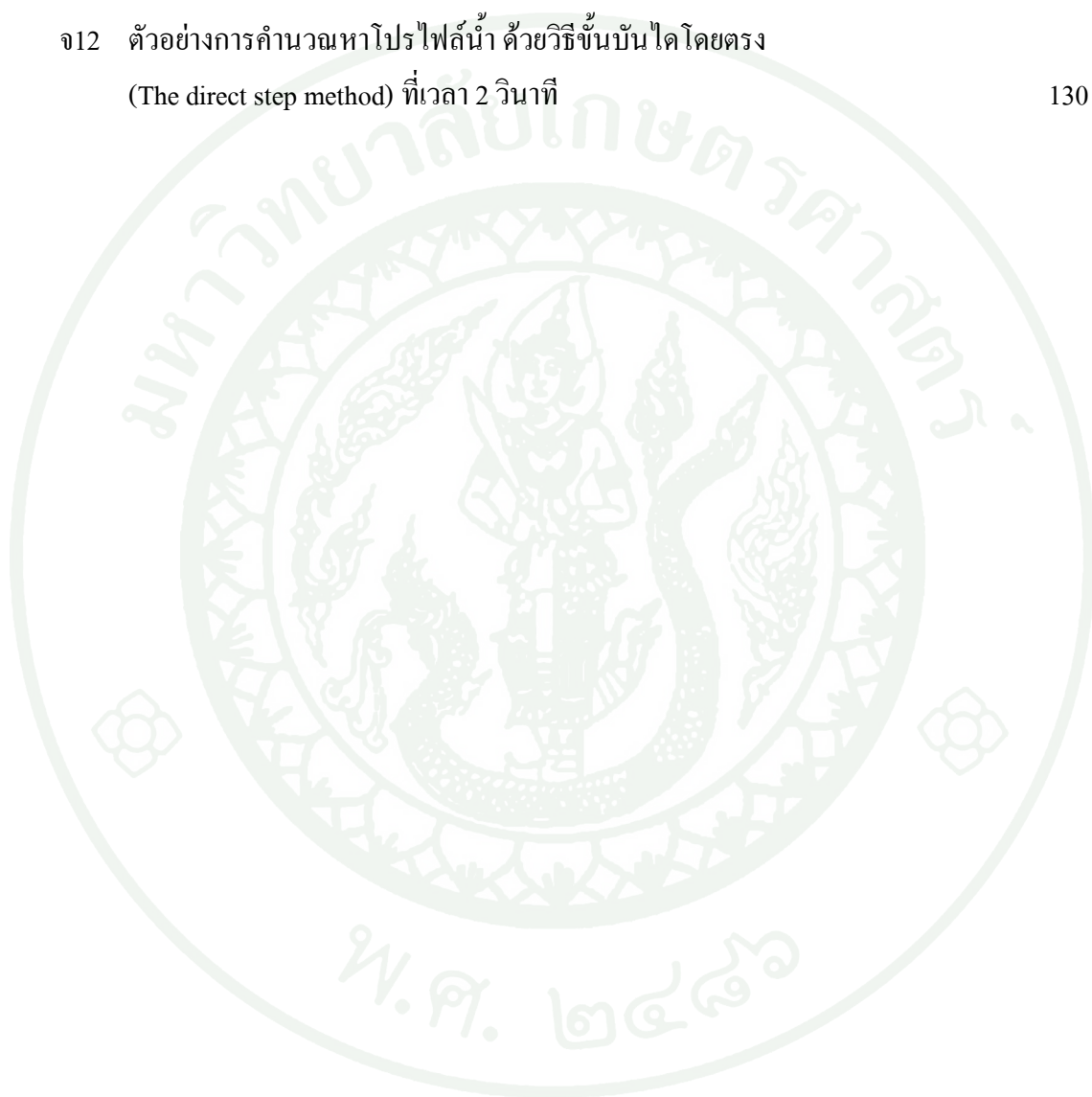
สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่

หน้า

- จ12 ตัวอย่างการคำนวณหาโปรไฟล์น้ำ ด้วยวิธีขั้นบันไดโดยตรง
(The direct step method) ที่เวลา 2 วินาที

130



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ส่วนประกอบที่สำคัญของลำน้ำ	5
2 รูปแบบโครงข่ายลำน้ำ	8
3 พิจารณาระบบที่มีลูกบอลบนพื้นได้รับเพอร์เตอร์เบชัน 3 กรณี (ก) พื้นหลุม (ข) พื้นระนาบ และ (ค) พื้นเนิน	10
4 เพอร์เตอร์เบชันบริเวณขอบลาดชันวงกลม (a) $k = 2$, (b) $k = 3$, (c) $k = 4$ และ (d) $k = 5$	10
5 กระบวนการเบื้องต้นของการเกิดการไหลในทางน้ำ (outlet) จากฝนตก	11
6 ส่วนประกอบของการไหลในลำน้ำหรือน้ำท่า	13
7 เขตน้ำใต้ดิน	18
8 น้ำใต้ดินแบบเปิดและปิด	19
9 ระดับน้ำใต้ดินในฤดูต่างๆ	20
10 เส้นกราฟการกระจายตัวของเม็ดดิน	25
11 ดินที่มีขนาดละเอียด (Well Graded Soil)	26
12 ดินที่มีขนาดเม็ดสม่ำเสมอ (Uniform Graded)	27
13 ดินที่มีขนาดเม็ดขาดช่วง (Skip หรือ Gap Graded)	27
14 การไหลซึมของน้ำในแนวเดียวผ่านแท่งดิน	29
15 การทดสอบความซึมผ่านโดยวิธีความดันคงที่	31
16 การไหลของน้ำใต้ดินแบบ 1 มิติ 2 มิติ และ 3 มิติ	34
17 ความเร็วการไหลซึมบริเวณลาดดิน	36
18 การพังทลายของลาดดินสำหรับดินที่มีความเชื่อมั่น	37
19 ขั้นตอนการกัดเซาะด้วยการไหลซึม	40
20 การแบ่งโซนในการทดลองการกัดเซาะเนื่องจากการไหลซึมแบบสองมิติ	41
21 การแบ่งช่วงเวลาในการพัฒนาของธารน้ำ	42
22 วิธีการศึกษา	47
23 ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีการทดสอบความกวดตันคงที่	50
24 การเตรียมอุปกรณ์กรณีตัวอย่างทราย A-0 และ B-0	52
25 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง	52

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
26	ทรายตัวอย่างที่มีขนาด $D_{50} = 0.49$ มิลลิเมตร (A)	53
27	ทรายตัวอย่างที่มีขนาด $D_{50} = 0.30$ มิลลิเมตร (B)	53
28	ทรายตัวอย่างที่มีขนาด $D_{50} = 0.18$ มิลลิเมตร (C)	54
29	เจาะรูตรงกลางถาดทดลองเพื่อให้ น้ำและเม็ดทรายระบายลงมา	54
30	นำถาดทดลองมาวางบนโต๊ะ	55
31	แบ่งอะคริลิกรูปวงกลม	55
32	เทตัวอย่างทรายให้มีระดับ 5 และ 10 เซนติเมตร	56
33	ปล่อยน้ำในอัตราการไหลที่คงที่	56
34	ดึงแบ่งอะคริลิก	57
35	ทิศทางการไหลของน้ำในแนวรัศมี	57
36	การระบุพิกัดตำแหน่ง (x,y) ในการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลในการทดลอง	58
37	การดิจิทัลข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์ผลการทดลอง	59
38	รัศมีขอบลาดชันวงกลม (R_c)	60
39	รูป top-view ของธารน้ำชนิด A (ก,ข,ค)	63
40	รูป top-view ของธารน้ำชนิด B (ก,ข,ค)	63
41	รูป top-view ของธารน้ำชนิด C (ก,ข,ค)	64
42	ค่ารัศมีลาดชันขอบวงกลมเฉลี่ย (R_{avg}) ของตัวอย่างทรายชนิด A ($D_{50} = 0.49$ มิลลิเมตร)	66
43	ค่ารัศมีลาดชันขอบวงกลมเฉลี่ย (R_{avg}) ของตัวอย่างทรายชนิด B ($D_{50} = 0.30$ มิลลิเมตร)	67
44	ค่ารัศมีลาดชันขอบวงกลมเฉลี่ย (R_{avg}) ของตัวอย่างทรายชนิด C ($D_{50} = 0.18$ มิลลิเมตร)	67
45	การพัฒนาโครงข่ายธารน้ำ ก) 3 ระยะ ของ Gomez และ Mullen (1991)	
	ข) การพัฒนาโครงข่ายธารน้ำใหม่ 4 ระยะ	69
46	ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นวงกลมของธารน้ำกับรัศมีขอบลาดชันวงกลมเฉลี่ย (R_{avg}) ของตัวอย่างทรายชนิด A (ก,ข,ค)	71
47	ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นวงกลมของธารน้ำกับรัศมีขอบลาดชันวงกลมเฉลี่ย (R_{avg}) ของตัวอย่างทรายชนิด B (ก,ข,ค)	72
48	ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นวงกลมของธารน้ำกับรัศมีขอบลาดชันวงกลมเฉลี่ย (R_{avg}) ของตัวอย่างทรายชนิด C (ก,ข,ค)	73

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
49	ความเป็นวงกลมของธารน้ำของตัวอย่างทรายชนิด A ($D_{50} = 0.49$ มิลลิเมตร)	75
50	ความเป็นวงกลมของธารน้ำของตัวอย่างทรายชนิด B ($D_{50} = 0.30$ มิลลิเมตร)	75
51	ความเป็นวงกลมของธารน้ำของตัวอย่างทรายชนิด C ($D_{50} = 0.18$ มิลลิเมตร)	76
ภาพผนวกที่		
ก1	เครื่องเขย่าตะแกรงที่ใช้ในการทดสอบ	85
ก2	การชั่งหาน้ำหนักทรายแห้งหลังจากเข้าเครื่องเขย่าตะแกรง	85
ก3	กราฟการกระจายขนาดเม็ดดิน	86
ก4	การคำนวณหาขนาดเม็ดทรายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ต่างๆ ของตัวอย่างทรายชนิด A	88
ก5	การคำนวณหาขนาดเม็ดทรายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ต่างๆ ของตัวอย่างทรายชนิด B	88
ก6	การคำนวณหาขนาดเม็ดทรายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ต่างๆ ของตัวอย่างทรายชนิด C	88
ก7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของตะแกรงกับเปอร์เซ็นต์ เม็ดทรายที่ผ่านตะแกรงของทรายชนิด A	89
ก8	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของตะแกรงกับเปอร์เซ็นต์ เม็ดทรายที่ผ่านตะแกรงของทรายชนิด B	89
ข1	นำเครื่องกวนดินไฟฟ้าปั่นส่วนผสมดิน	93
ข2	เขย่าส่วนผสม	93
ข3	วัดค่า R ที่เวลาต่างๆ	94
ข4	หลังจากเสร็จการอ่านค่า นำไฮโดรมิเตอร์จุ่มไว้ในกระบอกน้ำเปล่า เพื่อที่จะนำไปวัดที่เวลาต่างๆต่อไป	94
ข5	นำตัวอย่างทรายเทใส่ภาชนะแล้วนำเข้าตู้อบ	95
ข6	ผลของข้อมูล	96

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ข7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของตะแกรงกับเปอร์เซ็นต์ เม็ดทรายที่ผ่านตะแกรงของตัวอย่างทรายชนิด C	97
ค1 นำตัวอย่างทรายมาชั่งน้ำหนัก	100
ค2 นำตัวอย่างทรายมาเทใส่โมล	100
ค3 เครื่องมือการทดสอบค่าความชื้นน้ำ	101
ค4 การติดตั้งโมลในการทดสอบค่าความชื้นน้ำ	101
ค5 การติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดเพื่อหาค่าความชื้นน้ำ	102
ค6 การวัดอัตราการไหลของน้ำที่ไหลซึมผ่านเม็ดทราย	103
ค7 วัดอุณหภูมิของน้ำที่ไหลผ่านเม็ดทราย	103
ค8 การคำนวณหาค่าความชื้นน้ำของเม็ดทรายของตัวอย่างทรายชนิด A	104
ค9 การคำนวณหาค่าความชื้นน้ำของเม็ดทรายของตัวอย่างทรายชนิด B	104
ค10 การคำนวณหาค่าความชื้นน้ำของเม็ดทรายของตัวอย่างทรายชนิด C	105
ง1 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อเก็บข้อมูลในการทดลอง	107
ง2 แถบวัดระดับน้ำ	107
ง3 การปรับภาพที่ถ่ายได้จากกล้อง webcam ด้วยโปรแกรม photoshop	108
ง4 การดิจิทัลข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์ผลการทดลอง	108
จ1 รูปร่างโครงข่ายพัฒนาธารน้ำของตัวอย่างทราย A-0	110
จ2 รูปร่างโครงข่ายพัฒนาธารน้ำของตัวอย่างทราย B-0	110
จ3 รูปร่างโครงข่ายพัฒนาธารน้ำของตัวอย่างทราย A-1	111
จ4 รูปร่างโครงข่ายพัฒนาธารน้ำของตัวอย่างทราย A-2	111
จ5 รูปร่างโครงข่ายพัฒนาธารน้ำของตัวอย่างทราย A-3	112
จ6 รูปร่างโครงข่ายพัฒนาธารน้ำของตัวอย่างทราย B-1	112
จ7 รูปร่างโครงข่ายพัฒนาธารน้ำของตัวอย่างทราย B-2	113
จ8 รูปร่างโครงข่ายพัฒนาธารน้ำของตัวอย่างทราย B-3	113
จ9 รูปร่างโครงข่ายพัฒนาธารน้ำของตัวอย่างทราย C-1	114
จ10 รูปร่างโครงข่ายพัฒนาธารน้ำของตัวอย่างทราย C-2	114
จ11 รูปร่างโครงข่ายพัฒนาธารน้ำของตัวอย่างทราย C-3	115

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
จ12 พื้นที่ธารน้ำที่ถูกกัดเซาะของตัวอย่างทราย A-0 และ B-0	125
จ13 พื้นที่ธารน้ำที่ถูกกัดเซาะของตัวอย่างทราย A	125
จ14 พื้นที่ธารน้ำที่ถูกกัดเซาะของตัวอย่างทราย B	126
จ15 พื้นที่ธารน้ำที่ถูกกัดเซาะของตัวอย่างทราย C	126
จ16 ความยาวเส้นรอบวงที่ถูกกัดเซาะของตัวอย่างทราย A-0 และ B-0	127
จ17 ความยาวเส้นรอบวงที่ถูกกัดเซาะของตัวอย่างทราย A	127
จ18 ความยาวเส้นรอบวงที่ถูกกัดเซาะของตัวอย่างทราย B	128
จ19 ความยาวเส้นรอบวงที่ถูกกัดเซาะของตัวอย่างทราย C	128
จ20 ตัวอย่างการคำนวณหาโปรไฟล์น้ำ ด้วยวิธีขั้นบันไดโดยตรง (The direct step method) ของตัวอย่างทราย B	129
จ21 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำขอบถาด (H_{pan}) กับระดับน้ำที่ความลึกวิกฤติ (H_c) ของตัวอย่างทราย A-0	131
จ22 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำขอบถาด (H_{pan}) กับระดับน้ำที่ความลึกวิกฤติ (H_c) ของตัวอย่างทราย B-0	131
จ23 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำขอบถาด (H_{pan}) กับระดับน้ำที่ความลึกวิกฤติ (H_c) ของตัวอย่างทราย A-1	132
จ24 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำขอบถาด (H_{pan}) กับระดับน้ำที่ความลึกวิกฤติ (H_c) ของตัวอย่างทราย A-2	132
จ25 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำขอบถาด (H_{pan}) กับระดับน้ำที่ความลึกวิกฤติ (H_c) ของตัวอย่างทราย A-3	133
จ26 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำขอบถาด (H_{pan}) กับระดับน้ำที่ความลึกวิกฤติ (H_c) ของตัวอย่างทราย B-1	133
จ27 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำขอบถาด (H_{pan}) กับระดับน้ำที่ความลึกวิกฤติ (H_c) ของตัวอย่างทราย B-2	134
จ28 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำขอบถาด (H_{pan}) กับระดับน้ำที่ความลึกวิกฤติ (H_c) ของตัวอย่างทราย B-3	134

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
จ29 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำขอบถาด (H_{pan}) กับระดับน้ำที่ความลึกวิกฤติ (H_c) ของตัวอย่างทราย C-1	135
จ30 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำขอบถาด (H_{pan}) กับระดับน้ำที่ความลึกวิกฤติ (H_c) ของตัวอย่างทราย C-2	135
จ31 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำขอบถาด (H_{pan}) กับระดับน้ำที่ความลึกวิกฤติ (H_c) ของตัวอย่างทราย C-3	136

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก
h	=	แรงรวมในรูปความสูงน้ำ
i	=	ความลาดของระดับน้ำ
q	=	ปริมาณการไหลของน้ำผ่านพื้นที่หนึ่งหน่วย
r	=	ความพรุน
A	=	พื้นที่หน้าตัด
H	=	ความต่างศักย์ระหว่างเหนือน้ำและท้ายน้ำ
K	=	สัมประสิทธิ์ความซึมผ่านได้
L	=	ความยาวของแนวน้ำไหล
P	=	แรงดันน้ำ
Q	=	ปริมาณการไหล
V	=	ความเร็วของการไหล
γ'	=	หน่วยน้ำหนักของน้ำ
γ_w	=	หน่วยน้ำหนักของดินในสภาพประสิทธิผล
α	=	มุมลาดดิน
ϕ	=	มุมเสียดทานภายในของเม็ดดิน
λ	=	มุมระหว่างทิศทางการไหลของน้ำที่กระทำต่อเม็ดดินกับแรงตั้งฉากที่กระทำต่อเม็ดดิน

การทดลองศึกษารูปแบบของธารน้ำเนื่องจากน้ำไหลบ่าและน้ำใต้ดิน

Experimental Study of Gully Formation by Overland Flow and Groundwater Flow

คำนำ

แม่น้ำและลำน้ำ (River and Stream) จัดเป็นแหล่งน้ำผิวดิน (Surface Water) ที่ไหลอยู่ในธารน้ำ มีต้นกำเนิดมาจากน้ำที่ไหลบนแผ่นดิน ในขณะที่ไหลกระแสน้ำหรือการไหลของลำน้ำบางส่วนอาจถูกกักอยู่บนผิวดินเป็นแหล่งน้ำ และบางส่วนจะมีการกัดเซาะพื้นดินเป็นธารเล็กๆ โดยมากมักจะก่อตัวในพื้นที่ที่มีความลาดชันและมีปริมาณน้ำที่มากพอสมควร เพราะน้ำที่ไหลแรงส่งผลให้มีการกัดเซาะสูง ทำให้ธารน้ำมีระดับความลึกต่างกัน จำนวนของธารน้ำที่ไหลมารวมกันมากขึ้น จนกลายเป็นธารน้ำขนาดใหญ่หรือแม่น้ำ (Channel) แม่น้ำสายหนึ่งๆ มักจะมีลำน้ำ (Stream) สายย่อยเป็นสาขามากมาย สำหรับกระบวนการของทางน้ำ (fluvial process) มีอยู่ 3 ลักษณะได้แก่ การกัดกร่อน (erosion) การพัดพา (transportation) และการทับถม (deposition) กระบวนการของลำน้ำหรือน้ำไหลเป็นตัวการสำคัญในการเปลี่ยนแปลงของผิวโลก แต่จะขึ้นอยู่กับความรุนแรงของกระแสน้ำ ตลอดจนสภาพของดินว่าจะมีโอกาสถูกกระทำมากน้อยเพียงใด ทั้งนี้เนื่องจากธารน้ำจะกัดเซาะหรือทับถมตะกอนขึ้นอยู่กับความจำเป็นในการปรับเพื่อรักษาสมดุลระหว่างปริมาณตะกอนที่ต้องพัดพาไปกับพลังที่ธารน้ำมีอยู่ในการพัดพา

ปรากฏการณ์ของการพัฒนาโครงข่ายธารน้ำเป็นปรากฏการณ์หนึ่งที่มีความซับซ้อน โดยที่ระยะเริ่มต้นของการเกิดธารน้ำและมีระยะห่างที่สม่ำเสมอจะเริ่มจากการไหลรวมไปที่ลาดชัน ธารน้ำที่เกิดใหม่มีการพัฒนาทั้งความยาวและความกว้าง จากนั้นในระยะต่อไปที่บริเวณของหัวธารน้ำ จะเกิดการไหลรวมของน้ำมากขึ้น จนทำให้เกิดการกัดเซาะอย่างรุนแรง เมื่อขนาดของหัวธารน้ำมีขนาดใหญ่พอที่จะสามารถสังเกตเห็นว่าหัวธารน้ำจะพัฒนาแตกออกเป็นมากกว่าหนึ่งธาร เรียกว่า "ธารน้ำแยกออกเป็นสองทาง" กระบวนการเหล่านี้มีการทำซ้ำและจะเกิดโครงข่ายของธารน้ำ

กระบวนการพังทลายของดินจะแบ่งออกเป็น การกัดเซาะด้วยน้ำผิวดิน และการกัดเซาะด้วยน้ำใต้ดิน แต่ในความเป็นจริงการกัดเซาะที่บริเวณใดๆมีโอกาสที่จะเกิดทั้งสองกระบวนการได้



วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษารูปแบบของธารน้ำเนื่องจากน้ำไหลป่าและน้ำใต้ดิน
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของน้ำไหลป่าและน้ำใต้ดินที่ส่งผลต่อรูปแบบของการเกิดธารน้ำ

ขอบเขตการศึกษา

1. รวบรวมข้อมูลและทบทวนผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการเกิดธารน้ำ
2. ทบทวนการศึกษาซึ่งเกี่ยวกับการกัดเซาะจนทำให้เกิดธารน้ำเนื่องจากไหลซึมน้ำใต้ดิน
3. ทำการทดลองน้ำไหลป่าและน้ำใต้ดินโดยใช้ภาคทดลองรูปวงกลม
4. วิเคราะห์การพัฒนาธารน้ำ โดยใช้ทฤษฎีความเป็นวงกลม (Network Circularity) และทฤษฎีเสถียรภาพ (Stability Analysis)

การตรวจเอกสาร

1. แม่น้ำและลำน้ำ

แม่น้ำสายหนึ่งถือกำเนิดจากทางน้ำเล็กๆ เรียกว่า “ธาร” เมื่อสายธารไหลจากเนินเขาลงมา ก็จะมารวมกับลำธารสายอื่นๆ จนกลายเป็นทางน้ำขนาดใหญ่กว่าเดิม เรียกว่า “แม่น้ำ” ขณะที่สายน้ำไหลจากเนินเขาเพื่อไหลลงสู่ทะเล น้ำจะนำพาเอาสิ่งๆ ไปได้ง่ายที่อยู่ในเส้นทางไหลผ่านคิดไปด้วย และด้วยเหตุนี้จึงทำให้สายน้ำคดเคี้ยวไม่เป็นเส้นตรง

1.1 ส่วนประกอบของลำน้ำมีส่วนประกอบต่างๆ ดังต่อไปนี้

1.1.1 ต้นน้ำ (Source) เป็นจุดเริ่มต้นของลำน้ำ อาจเกิดจากตาน้ำหรือน้ำที่ไหลซึมออกมาจากแหล่งน้ำใต้ดิน หรือสัณปันน้ำบนภูเขาก็ได้ ต้นน้ำเป็นบริเวณจุดเริ่มต้นของธารน้ำหรือลำน้ำ ต้นน้ำมักอยู่ในเขตภูเขาหรือพื้นที่สูง

1.1.2 สันปันน้ำ (Divide) เป็นส่วนแบ่งของกลุ่มน้ำ โดยสันปันน้ำเป็นส่วนที่สูงที่สุดของสันเขา เป็นแนวแบ่งการไหลของน้ำผิวดินมาตามความลาดชันของสภาพภูมิประเทศ

1.1.3 กลุ่มน้ำ (River Basin) คือพื้นที่บริเวณที่รองรับน้ำฝนที่ตกลงมาและน้ำฝนดังกล่าวจะไหลมารวมกันที่ลำน้ำ เช่น กลุ่มน้ำเจ้าพระยา หรือส่วนหนึ่งของกลุ่มน้ำภาคเหนือ ได้แก่ กลุ่มน้ำปิง วัง ยม น่าน เป็นต้น

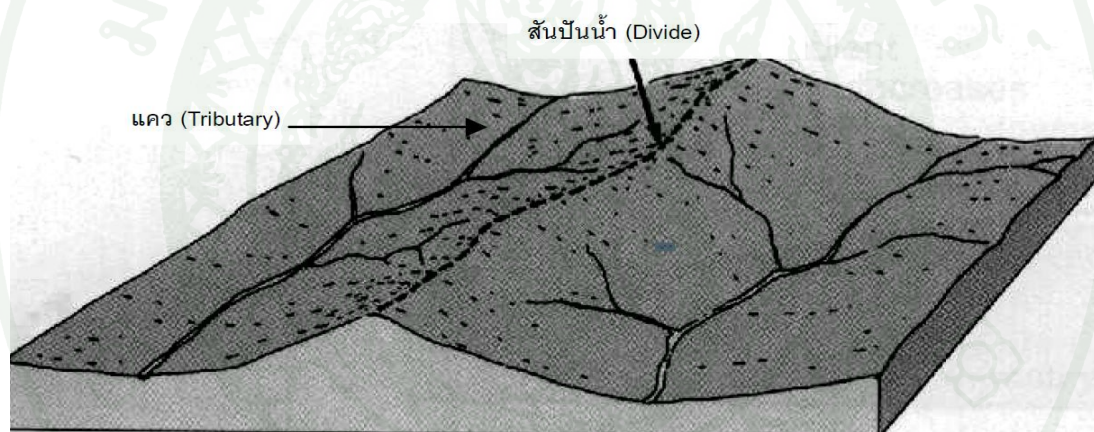
1.1.4 ธารน้ำ (Channel) คือส่วนที่ลึกที่สุดของลำน้ำและเป็นที่รวมของตะกอนขนาดต่างๆ ที่ถูกพัดพา มา และเป็นช่องทางการระบายน้ำลงสู่บริเวณที่ต่ำกว่า

1.1.5 แคว (Tributary) คือลำน้ำสายย่อยที่เป็นสาขาของแม่น้ำที่ไหลลงมาจากต้นน้ำและไหลลงมารวมกันที่ลำน้ำสายหลัก

1.1.6 ลำน้ำสาขา (Distributary) เป็นลำน้ำสายย่อยที่ไหลแตกแยกออกจากลำน้ำสายหลัก ออกไป และไหลลงสู่ทะเลและมหาสมุทร

1.1.7 ปากน้ำ (Mouth) คือบริเวณที่ธารน้ำมาบรรจบกับแหล่งน้ำ เช่น ทะเล หรือบริเวณที่ต่ำที่สุดหรือจุดสิ้นสุดของแม่น้ำ โดยทั่วไประดับของท้องน้ำจะอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำทะเล น้ำทะเลสามารถไหลเข้ามาในธารน้ำได้จึงเกิดการผสมกันระหว่างน้ำจืดและน้ำเค็ม เกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้ตะกอนจับตัวกันเป็นก้อนมีขนาดใหญ่ขึ้นและเกิดการตกทับถมกันบริเวณปากแม่น้ำที่เราเรียกว่า “ดินดอนสามเหลี่ยมปากแม่น้ำ”

จากส่วนประกอบของลำน้ำดังกล่าวทั้งหมดที่กล่าวมาแล้วนั้นเราเรียกว่า ระบบลำน้ำ (River System) ซึ่งระบบลำน้ำบนพื้นโลกจะแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ระบบลำน้ำถาวร (Permanent Stream) ซึ่งมีน้ำแช่แข็งอยู่ตลอดปี และระบบลำน้ำชั่วคราว (Intermittent Stream) จะมีน้ำแช่แข็งอยู่เพียงบางช่วงเวลาเท่านั้น น้ำจะแห้งในฤดูแล้ง



ภาพที่ 1 ส่วนประกอบที่สำคัญของลำน้ำ

ที่มา : Carla (1990)

2. รูปแบบโครงข่ายลำน้ำ (River Network Pattern)

ลุ่มน้ำต่างๆ ของผิวโลกนั้นจะประกอบด้วยโครงข่ายลำน้ำ (Network Patterns) หรือการจัดเรียงตัวของลำน้ำในเชิงพื้นที่ (spatial arrangement of river channels) ซึ่งโครงข่ายลำน้ำนั้นพัฒนาเปลี่ยนแปลงเนื่องจากปัจจัยหลายอย่าง เช่น ลาดชันของพื้นที่ โครงสร้างทางธรณี สภาพภูมิอากาศ ขบวนการต่างๆ บนผิวโลกและเปลือกโลก ดังแสดงในภาพที่ 2 รูปแบบโครงข่ายลำน้ำโดยทั่วไปมีดังต่อไปนี้

2.1 รูปแบบกิ่งไม้ (Dendritic Drainage Pattern) เป็นลักษณะโครงข่ายการระบายน้ำที่ลำน้ำสาขาไหลลงมารวมกันกับลำน้ำสายหลักคล้ายกับกิ่งไม้ มักเกิดขึ้นในบริเวณที่มีสภาพทางธรณีวิทยาเป็นหินแบบเดียวกันมีเนื้อหินสมานแน่น มุมของลำน้ำที่ไหลมาเชื่อมกันมักเป็นมุมแหลม รูปแบบนี้มักพบได้มาก ดังแสดงในภาพที่ 2(a)

2.2 รูปแบบมุมฉาก (Trellis Drainage Pattern) เป็นรูปแบบการระบายน้ำที่ปรากฏบนสภาพทางธรณีวิทยาที่เป็นรอยเลื่อน (Fault) หรือรอยแยก (Joint) ลำน้ำไหลขนานกันมาตามแนวรอยเลื่อนและไหลมารวมกันกับลำน้ำสายหลักเป็นมุมฉากหรือเกือบฉาก ดังแสดงในภาพที่ 2(c)

2.3 รูปแบบตั้งฉาก (Rectangular Drainage Pattern) เป็นรูปแบบการระบายน้ำที่ลำน้ำสาขาย่อยด้วยกันหรือลำน้ำสาขาย่อยกับสายหลักมาบรรจบกันเป็นมุมฉาก นอกจากนี้แนวโค้งของลำน้ำทุกสายในระบบจะเป็นมุมฉากเช่นเดียวกันและจะมีระยะการหักงอของลำน้ำเกือบเท่ากัน ทั้งนี้เนื่องมาจากลักษณะภูมิประเทศ ดังแสดงในภาพที่ 2(d)

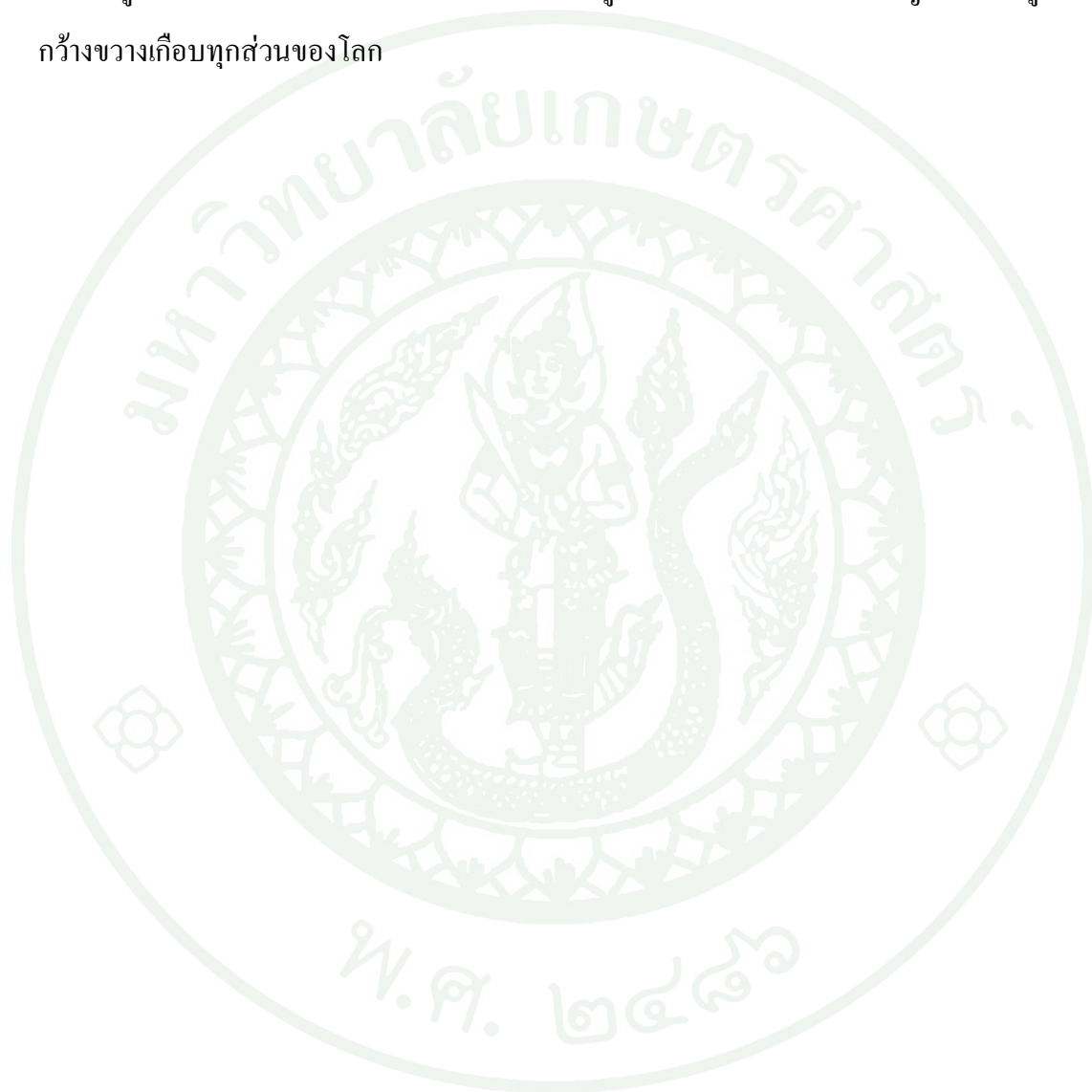
2.4 รูปแบบรัศมี (Radial Drainage Pattern) เป็นการระบายน้ำที่ลำน้ำสายหลักและลำน้ำสาขาจะไหลออกไปทุกทิศทาง จากที่สูง ตอนกลาง เช่น รูปแบบการระบายน้ำที่เกิดขึ้นตามลักษณะภูมิประเทศแบบโดม กรวยภูเขาไฟ หรือเนินเขาที่อยู่อย่างโดดเดี่ยว ดังแสดงในภาพที่ 2(g)

2.5 รูปแบบสับสน (Deranged Drainage Pattern) เป็นการระบายน้ำในบริเวณที่ปกคลุมไปด้วยธารน้ำแข็งที่เกิดขึ้นอย่างไม่มีระเบียบ ทำให้รูปแบบการระบายน้ำสับสน เช่น ระบบการระบายน้ำที่ปรากฏในประเทศฟินแลนด์

2.6 รูปแบบขนาน (Parallel Drainage Pattern) เป็นลักษณะการระบายน้ำของลำน้ำสายหลักและลำน้ำสาขามีทิศทางการไหล ขนานกัน หรือเกือบขนานกันไปในแนวทิศทางเดียวกันตลอด ดังแสดงในภาพที่ 2(b)

2.7 รูปแบบวงแหวน (Annular Drainage Pattern) เป็นระบบการระบายน้ำตามแนวระดับ ซึ่งมีทิศทางไหลของลำน้ำตามรอยแยกของชั้นหินมีลักษณะเป็นส่วนหนึ่งของวงแหวน หรือเกือบเป็นวงแหวน โดยจะไหลไปรวมกันกับลำน้ำสายหลัก เพื่อระบายลงสู่ที่ต่ำต่อไป มักพบรูปแบบการระบายน้ำแบบนี้บริเวณเชิงเขาของลักษณะภูมิประเทศแบบโดม ดังแสดงในภาพที่ 2(e)

อย่างไรก็ตามจากรูปแบบการระบายน้ำทั้งหมดที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น เราอาจไม่พบรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งที่สมบูรณ์ในกลุ่มน้ำสายใดสายหนึ่ง แต่อาจพบส่วนใดส่วนหนึ่งของกลุ่มน้ำหลักเท่านั้น เช่น รูปแบบการระบายน้ำแบบขนาน แบบรัศมี และแบบวงแหวน มักพบอยู่ส่วนใดส่วนหนึ่งในรูปแบบการระบายน้ำแบบกึ่งไม้ ซึ่งถือว่าเป็นรูปแบบการระบายน้ำที่สำคัญและพบอยู่อย่างกว้างขวางเกือบทุกส่วนของโลก





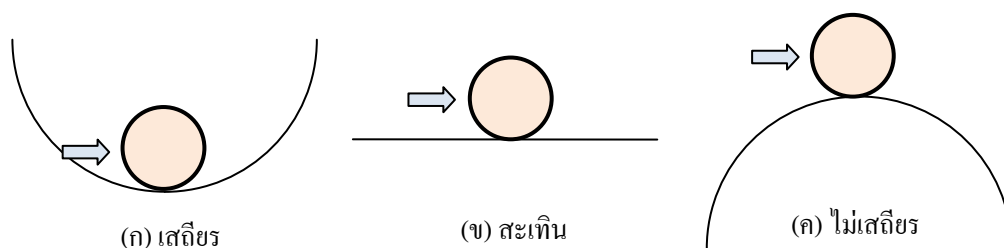
ภาพที่ 2 รูปแบบโครงข่ายลำน้ำ

ที่มา : Dingman (2009)

3. การศึกษาเชิงวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีเสถียรภาพ (Analytical studies using stability theory)

งานวิจัยการศึกษาเชิงวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีเสถียรภาพ (Analytical studies using stability theory) ได้รับความนิยมอย่างมากในช่วงที่การคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical computation) ด้วยคอมพิวเตอร์ยังมีประสิทธิภาพไม่ดีมากนัก เนื่องจากเป็นวิธีทางเดียวที่สามารถเข้าใจและวิเคราะห์สถานการณ์วิทยาของแม่น้ำได้ แต่ผู้วิจัยนั้นจำเป็นต้องมีพื้นฐานทางคณิตศาสตร์มากพอสมควร เนื่องจากพฤติกรรมของสถานการณ์วิทยาของแม่น้ำนั้นโดยทั่วไปจะอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์เชิงย่อย ซึ่งการหาคำตอบแม่นยำตรง (Exact solution) มักเป็นไปได้ไม่ได้ แต่ด้วยเทคนิคกระจายตัวแปรออกเป็นค่าเฉลี่ยและส่วนแกว่งรบกวน ที่เรียกว่า เพอร์เทอร์เบชัน (Perturbation method) เช่นเดียวกับที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปสมการการไหลนาเวียร์-สโตคส์ เป็นสมการเรย์โนลด์ส นั้นทำให้เราสามารถวิเคราะห์แนวโน้มของระบบที่สนใจว่ามีเสถียรภาพหรือไม่ หากมีเพอร์เทอร์เบชันมารบกวน

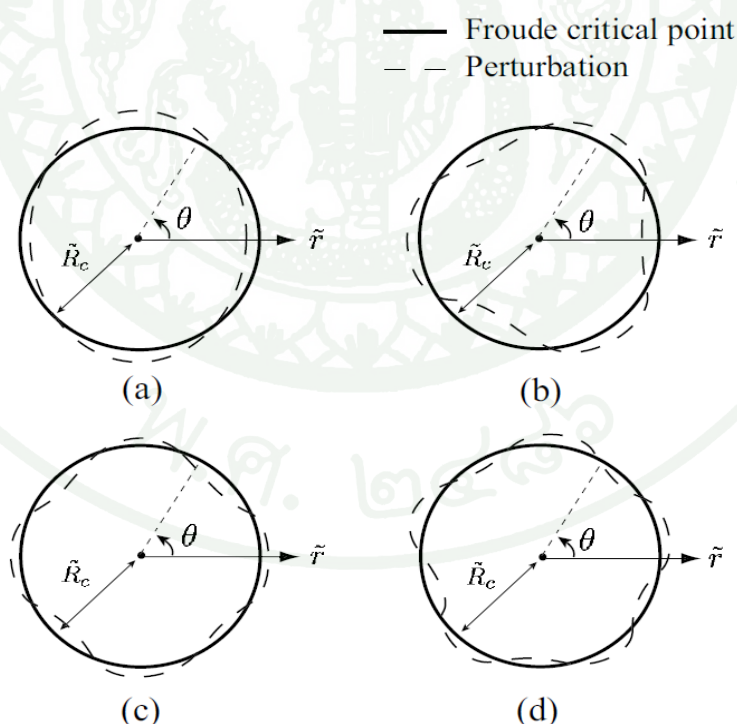
ในภาพที่ 3 สำหรับกรณี 3(ก) เมื่อแรงเพอร์เทอร์เบชันกระทำกับลูกบอล ลูกบอลจะกลิ้งอยู่ในพื้นหลุมและท้ายสุดจะกลับสู่ตำแหน่งเดิม ดังนั้นระบบนี้เป็นระบบที่เสถียร (Stable) สำหรับกรณี 3(ข) เมื่อแรงเพอร์เทอร์เบชันกระทำกับลูกบอล ลูกบอลจะกลิ้งอยู่บนพื้นระนาบ ซึ่งเรียกว่า สะเทิน (Neutral) และกรณีสุดท้าย 3(ค) ลูกบอลจะกลิ้งตกจากพื้นเนิน ดังนั้นจึงเป็นระบบไม่เสถียร (Unstable) ดังนั้นแนวคิดของทฤษฎีเสถียรภาพก็คือ การกระจายตัวแปรต่างๆ ซึ่งจะเกิดส่วนเพอร์เทอร์เบชัน แล้ววิเคราะห์ว่า เสถียรหรือไม่ โดยดูจากการตอบสนองของระบบต่อเพอร์เทอร์เบชันว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากเพอร์เทอร์เบชันนั้นเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างไร ซึ่งเรียกอัตรานี้ว่า Growth rate of perturbation ซึ่งในส่วนต่อไปจะกล่าวถึงงานวิจัยบางส่วนของผู้แต่งที่ใช้ทฤษฎีเสถียรภาพในการวิเคราะห์สถานการณ์วิทยาของแม่น้ำ



ภาพที่ 3 พิจารณาระบบที่มีลูกบอลบนพื้นได้รับเพอร์เทอร์เบชัน 3 กรณี (ก) พื้นหลุม (ข) พื้นระนาบ และ (ค) พื้นเนิน

3.1 การวิเคราะห์รูปแบบธารน้ำ (Gully formation analysis)

Mizushima and Izumi (2007) ได้กำหนดเพอร์เทอร์เบชันบริเวณขอบลาดชันวงกลม ซึ่งจะมีค่า Wave number (k) ที่แตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 4 สำหรับกรณี 4(a) $k=2$ จะทำให้บริเวณขอบลาดชันวงกลมขาดเสถียรภาพ สำหรับกรณี 4(b-d) จะทำให้บริเวณขอบลาดชันวงกลมขาดเสถียรภาพและเกิดธารน้ำแยกออกเป็นสองทาง (bifurcation channel)



ภาพที่ 4 เพอร์เทอร์เบชันบริเวณขอบลาดชันวงกลม (a) $k=2$, (b) $k=3$, (c) $k=4$ และ (d) $k=5$

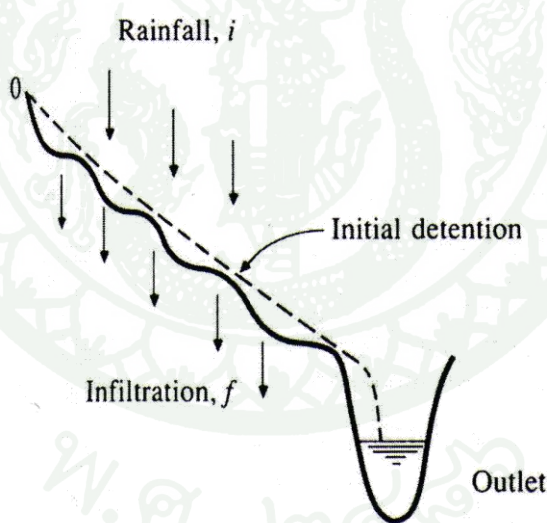
ที่มา : Mizushima and Izumi (2007)

4. นิยามของน้ำผิวดิน

น้ำผิวดิน หมายถึง น้ำที่ถูกเก็บ หรือ ไหลบนผิวโลก ซึ่งการไหลของน้ำผิวดินสามารถแบ่งออกเป็น 2 ขบวนการ คือ

4.1 การไหลบนผิวดิน (overland flow) คือ การไหลแบบมีความลึกเพียงเล็กน้อย แต่มีอาณาบริเวณพื้นที่ที่เกิดการไหลเป็นบริเวณกว้าง เช่น การไหลบ่าของน้ำท่วมบนผิวดินหรือผิวดิน

4.2 การไหลในทางน้ำเปิด (channel flow) หรือน้ำท่า (stream flow) คือ การไหลของน้ำภายในแม่น้ำลำคลอง หรือทางน้ำอื่นๆ รวมถึงทางระบายน้ำ ท่อระบายน้ำและคลองชลประทานที่มนุษย์สร้างขึ้น น้ำในทางน้ำจะมีความลึกน้ำมากกว่าการไหลบนผิวดิน และมีพื้นที่การไหลจำกัดตามความกว้างของทางน้ำนั้นๆ การไหลในทางน้ำเป็นส่วนหลักของการไหลของน้ำจากพื้นดินไปสู่พื้นน้ำ



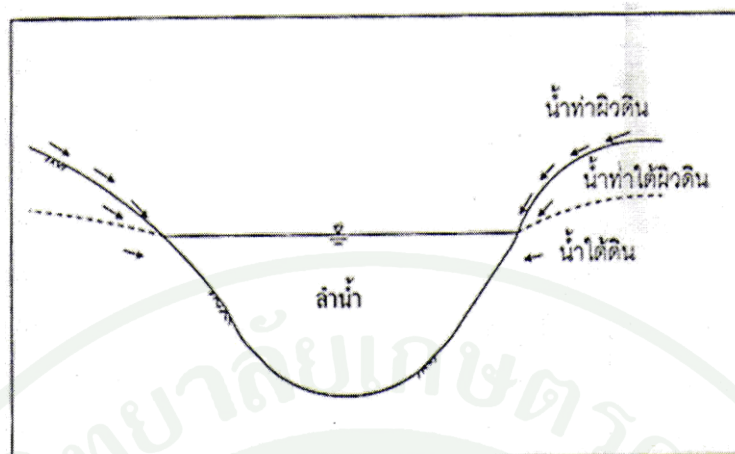
ภาพที่ 5 กระบวนการเบื้องต้นของการเกิดการไหลในทางน้ำ (outlet) จากฝนตก

ที่มา : Chow et al (1988)

กระบวนการเบื้องต้นของการเกิดการไหลในทางน้ำ (outlet) จากฝนตก ดังแสดงในภาพที่ 5 โดยเมื่อเกิดฝนตกบนผิวดิน ในช่วงแรกน้ำจะถูกกักเก็บบนผิวดิน (initial detention) และบางส่วนก็จะซึมลงในผิวดินซึ่งความสามารถในการซึมลงดินขึ้นอยู่กับชนิดของดินและความอิ่มตัวของน้ำในดิน หากปริมาณน้ำบนผิวดินเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เช่น ฝนตกต่อเนื่องจะทำให้น้ำเต็มบริเวณเก็บกักบนผิวดินและเริ่มเกิดการไหลบนผิวดิน (overland flow) โดยทั่วไปน้ำไหลบนผิวดินจากที่สูงลงสู่ที่ต่ำกว่า จะไหลรวมสู่ทางน้ำ โดยทั่วไปทางน้ำจะอยู่ที่ต่ำเกิดจากการไหลรวมของน้ำผิวดิน เนื่องจากเมื่อน้ำไหลรวมกันจะมีพลังงานเพิ่มขึ้นและเกิดการกัดเซาะบริเวณดังกล่าวเป็นธารน้ำและกลายเป็นทางน้ำในที่สุด

อย่างไรก็ตาม ปริมาณน้ำท่า (stream flow) จะประกอบด้วย 3 ส่วน ดังแสดงในภาพที่ 6 สามารถอธิบายได้ ดังนี้

1. น้ำท่าผิวดิน (overland flow) หรือ runoff เนื่องจากการไหลบนผิวดินจะไหลได้รวดเร็วกว่าการไหลในดิน จึงตอบสนองไวหรือช่วงเวลาที่เกิดฝนกับช่วงเวลาที่เกิดปริมาณน้ำท่าเพิ่มขึ้นมีระยะห่างกันน้อย (short time lag) ที่ทำให้เป็นส่วนประกอบหลักของยอดน้ำของน้ำท่า
2. น้ำท่าใต้ดินผิว (interflow หรือ subsurface flow) เป็นการไหลในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัว เกิดจากน้ำซึมลงในดินยังไม่ไหลลึกลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน (percolation) แต่ได้ไหลทางด้านข้างออกสู่ลำน้ำไปก่อน
3. น้ำใต้ดิน (groundwater flow) เป็นการไหลในชั้นดินอิ่มตัว ตอบสนองช้ามากต่อเหตุการณ์ฝนตก ดังนั้นจะค่อยๆ ไหลออกสู่ลำน้ำในลักษณะของการไหลพื้นฐาน (base flow) ซึ่งอาจเกิดขึ้นตลอดปี รวมทั้งในฤดูแล้งที่ไม่มีฝนตกด้วย



ภาพที่ 6 ส่วนประกอบของการไหลในลำน้ำหรือน้ำท่า

ที่มา : กิริติ (2543)

5. การกัดเซาะ (Erosion)

การกัดเซาะของลำน้ำ จากการศึกษาของ จอห์น เพลย์เฟร์ นักธรณีวิทยาชาวอังกฤษ ได้ให้เหตุผลเกี่ยวกับการพัฒนาของลำน้ำ ในปี ค.ศ.1802 ดังนี้ “ลำน้ำทุกสายที่ปรากฏอยู่ทั่วไป จะประกอบด้วยลำน้ำสายหลักมีสาขาแตกแยกออกไป สาขาของลำน้ำแต่ละสายจะมีลุ่มน้ำที่มีขนาดได้สัดส่วนกับขนาดของลำน้ำ และสาขาของลำน้ำทุกสายจะไหลมารวมกันเป็นระบบของลุ่มน้ำ โดยที่ลำน้ำสายเหล่านั้นจะพยายามมีการปรับระดับของท้องน้ำในขณะที่ไหลมาบรรจบกัน ไม่มีลำน้ำสายใดเมื่อไหลมาบรรจบกันแล้วจะมีระดับท้องน้ำไม่เท่ากัน และจะเป็นไปไม่ได้ที่ลุ่มน้ำที่มีลำน้ำไหลผ่านแล้วจะไม่ถูกกระทำจากลำน้ำสายนั้น” จะเห็นได้ว่ากระบวนการกระทำของลำน้ำจะเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา และการทำงานของแม่น้ำที่มีผลต่อพื้นดินสามารถแยกพิจารณาได้ 3 ลักษณะ คือ การกัดเซาะ การนำพา และการทับถม ดังนี้

5.1 การกัดเซาะ (Erosion) หมายถึง การกระทำของลำน้ำต่อท้องน้ำและตลิ่งทั้งสองข้างของลำน้ำ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า กริยาอุทก (Hydraulic Action) แบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ ดังนี้

5.1.1 การครูดไถ (corrasion) เกิดจากการที่ก้อนหิน กรวด หรือทราย ที่แม่น้ำพัดพามาครูดไถ กระแทกกับท้องน้ำ และฝั่งลำน้ำ และครูดไถกันเอง ทำให้เกิดการกัดเซาะในบริเวณดังกล่าว และขนาดของก้อนหิน กรวด จะมีขนาดเล็กลง เรามักสังเกตได้ว่าในลำน้ำที่มีสีขุ่น การกัดกร่อน

แบบครูดไถจะรุนแรงมากกว่าลำน้ำใส เนื่องจากความแตกต่างของกระแสน้ำไหลมีความแรงต่างกัน

5.1.2 การผุตัว (corrosion) เป็นการกระทำของลำน้ำที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีอันเนื่องมาจาก กรดคาร์บอนิก ที่เกิดจากการรวมตัวของน้ำฝนกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ มีผลต่อการกัดกร่อนทำให้ผิวหน้าของหินดินดานผุลง และง่ายต่อการกัดเซาะของลำน้ำต่อไป เช่น บริเวณที่ท้องน้ำเป็นหินปูน ซึ่งจะมีความทนทานต่อการครูดไถแต่มีส่วนประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต เมื่อถูกกัดกร่อนโดยกรดคาร์บอนิกจะผุตัวได้ง่ายขึ้น นับเป็นการผุพังทางเคมี

5.1.3 การสึกกร่อน (attrition) เป็นกระบวนการกระทำสืบเนื่องจากการที่ตะกอนหินดินทราย กลิ้งไปกระทบแตกตัวกับท้องน้ำและข้างลำธารแรงอัดกระแทก (quarrying) นี้สามารถทำให้หินฝั่งสองข้างลำน้ำผุกร่อนได้เป็นจำนวนมาก ขณะเดียวกันหินบริเวณท้องน้ำที่ถูกแรงอัดกระแทกจะแตกตัวออกและถูกน้ำพัดพาไปตามกระแสน้ำ เกิดการครูดไถทำให้มวลหินเหล่านั้นมวลลดเหล็ยมลดลง

5.2 การนำพา (deflation) การนำพาของลำน้ำจะขึ้นอยู่กับขนาดของวัตถุที่น้ำจะสามารถนำพาไปได้ เช่น วัตถุที่มีขนาดใหญ่ ประเภทตะกอนหยาบ จะมีการเคลื่อนที่ไปตามท้องน้ำโดยการกลิ้งหรือกระดอน (saltation) ไปตามการนำพาของกระแสน้ำ วัตถุที่มีขนาดเล็ก เช่น เม็ดทราย และมีความหนาแน่นไม่มากประกอบกับกระแสน้ำแรงจะถูกนำพาให้ลอยไปกับน้ำ จัดเป็นวัตถุพัดพาชนิดแขวนลอย (suspended load) ส่วนประการสุดท้าย คือวัตถุที่สามารถละลายได้จะถูกนำพาไปกับกระแสน้ำ

ดังที่กล่าวมาแล้วว่าการนำพาของลำน้ำจะขึ้นอยู่กับความเร็วของกระแสน้ำซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อการนำพาของลำน้ำ ซึ่งความเร็วของกระแสน้ำจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่อไปนี้

5.2.1 ความลาดเทของท้องน้ำ น้ำจะไหลเร็วขึ้นถ้าท้องน้ำมีความลาดเทมาก และจะไหลช้าเมื่อความลาดเทต่ำ

5.2.2 รูปร่างทางเรขาคณิตและความราบเรียบของท้องน้ำ แม่น้ำสองสาย ถ้ามีปริมาณน้ำเท่ากัน แม่น้ำที่กว้างและตื้นเขินน้ำจะไหลได้ช้ากว่าแม่น้ำที่มีความแคบและลึกกว่า เนื่องจาก

แม่น้ำที่กว้างและตื้นจะมีพื้นที่ที่จะก่อให้เกิดความเสียหายให้ความเร็วของน้ำลดลง และท้องน้ำที่ขรุขระจะมีความเสียหายมากกว่าท้องน้ำที่ราบเรียบ

5.2.3 ปริมาณน้ำ ถ้าปริมาณน้ำมีมากความเร็วของกระแสน้ำจะเพิ่มขึ้น แต่อาจต้องพิจารณาประกอบกับปัจจัยข้างต้นด้วย

อย่างไรก็ตามการเคลื่อนที่ของวัตถุจากการนำพาบนพื้นท้องน้ำจะสัมพันธ์กับความสามารถในการพัดพา ซึ่งขึ้นอยู่กับฤดูกาลด้วย เช่น ฤดูน้ำหลาก ความสามารถในการพัดพาจะมีมากที่สุด

5.3 การทับถม (deposition) การทับถมมักขึ้นอยู่กับกำลังในการนำพาของน้ำ เช่นเดียวกับการกัดกร่อนที่ขึ้นอยู่กับกำลังการพัดพา โดยปกติแม่น้ำจะมีการปรับสมดุลปริมาณของวัตถุที่จะนำพา ปริมาณของวัตถุที่แม่น้ำตอนใดตอนหนึ่งได้รับจากแม่น้ำตอนต้นน้ำ หรือจากบริเวณที่ทำให้ น้ำไม่แน่นอนหรือสม่ำเสมอ การกัดกร่อนและการทับถมวัตถุหรือตะกอนของลำน้ำเป็นวิธีการหนึ่งในการรักษาสมดุลของท้องน้ำที่มีความลาดเทสูง กระแสน้ำไหลแรงและมีกำลังการนำพาสูงเกินกว่าปริมาณวัตถุที่ต้องนำพาแม่น้ำตอนนั้นจะกัดเซาะท้องน้ำเพื่อเพิ่มปริมาณวัตถุ ในเวลาเดียวกันเป็นการลดความลาดเทของท้องน้ำหรือลดความสามารถในการนำพาของน้ำด้วย ตรงกันข้ามตอนใดที่ท้องน้ำมีความลาดเทน้อย แต่มีปริมาณวัตถุที่ต้องนำพามากเกินไป แม่น้ำจะทับถมวัตถุที่ต้องนำพาลงจนพอดีกับกำลังการนำพาของมัน ในเวลาเดียวกันการทับถมจะเพิ่มความลาดเทของท้องน้ำให้สูงขึ้นด้วย ในบริเวณที่ความเร็วของกระแสน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว เช่น เมื่อแม่น้ำไหลลงบริเวณที่มีท้องน้ำกว้างและนิ่ง ได้แก่ ทะเลสาบ มหาสมุทร ความเร็วของกระแสน้ำจะลดลงทันที บริเวณเหล่านี้จะมีการทับถมของวัตถุที่น้ำพัดพามา และตะกอนเช่นเดียวกัน

6. น้ำใต้ดิน (Ground Water)

น้ำใต้ดิน หมายถึง น้ำที่มีอยู่ในชั้นดินบนผิวโลก ขังอยู่ในช่องว่างระหว่างดินและหิน ซึ่งต้นกำเนิดของน้ำใต้ดินจะมาจากน้ำในบรรยากาศและจากน้ำผิวดินต่าง ๆ โดยปกติคุณภาพของน้ำใต้ดินมักมีคุณภาพดี อันเนื่องมาจากการถูกกรองด้วยชั้นดินและหิน แต่อาจมีแร่ธาตุและสารเคมีบางชนิดเจือปนอยู่ในปริมาณมากกว่าน้ำผิวดิน น้ำใต้ดินเป็นส่วนหนึ่งของน้ำฝนที่ตกลงมายังผิวโลก และไหลซึมลงไปตามชั้นดินลงไปถึงชั้นที่น้ำมีการสะสมตัวรวมกัน จึงมีผลทั้งในแง่ของการละลาย การพัดพา การทับถม โดยน้ำใต้ดินมีการกระทำเพียงสองชนิดคือ การกัดเซาะและการทับถม ซึ่งเกิดจากการไหลซึมผ่านชั้นดินและหินลงไป ในบางพื้นที่น้ำใต้ดินจะมีการไหลเหมือนกับน้ำบนผิวดิน เพียงแต่อยู่ลึกจากผิวดินลงไป ซึ่งมักพบเสมอในบริเวณที่เป็นถ้ำ ฤดูกาลก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการพัดพาของน้ำใต้ดิน เนื่องจากมีน้ำหลากมาก ทำให้เกิดการพัดพา การกัดเซาะมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นน้ำใต้ดินจึงถือว่าเป็นกระบวนการระบายน้ำออกจากผิวดินได้อีกแบบหนึ่งเช่นกัน

6.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาณน้ำใต้ดิน

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่ากำเนิดของน้ำใต้ดินจะมาจากน้ำในบรรยากาศ ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการไหลซึมลงดิน โดยจะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้

6.1.1 ช่วงเวลาที่มีฝนตก (Time) หมายถึง ถ้าช่วงเวลาที่มีฝนตกสั้น น้ำจะไหลผ่านผิวดินไปอย่างรวดเร็ว ปริมาณการไหลซึมลงดินของน้ำจะต่ำ และซึมลงได้น้อย แต่ถ้ามีฝนตกเป็นเวลานาน และเบา ๆ อัตราการไหลซึมจะมีมากกว่า

6.1.2 ความลาดชันของพื้นที่ (Slope) ถ้าพื้นที่มีความลาดชันมากน้ำจะไหลไปบนดินมากกว่าที่จะซึมลงดิน

6.1.3 ความพรุนของดินและหิน (Porosity) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของช่องว่างในหินก้อนหนึ่งกับปริมาตรทั้งหมดของหินก้อนนั้น โดยค่าความพรุน แสดงเป็นร้อยละ ขึ้นอยู่กับรูปร่าง ขนาด การวางตัวของหินและเศษแร่ที่ประกอบตัวกันเป็นหิน

6.1.4 ความซึมของดินและหิน (Permeability) หมายถึง ความสามารถในการที่ยอมให้น้ำไหลผ่านหินที่มีความซึมสูง คือ หินที่น้ำไหลผ่านได้เร็ว หรือความซึมขึ้นอยู่กับขนาดของช่องว่าง ไม่ใช่ปริมาตรของช่องว่าง

6.1.5 ปริมาณของต้นไม้ ต้นไม้จะช่วยชะลอการไหลของน้ำผิวดินให้ช้าลง ซึ่งจะช่วยให้ปริมาณน้ำไหลซึมลงดินได้มากขึ้น

6.1.6 ความลาดเทของชั้นหิน ที่น้ำใต้ดินไหลอยู่ น้ำใต้ดินจะไหลได้ดีไปตามชั้นหินที่มีความซึมสูง โดยเฉพาะถ้าชั้นหินที่อยู่ถัดไปมีความแน่นทึบสูง น้ำจะไหลเฉพาะชั้นหินเนื้อนั้น และถ้าชั้นหินมีความลาดเทมากน้ำจะไหลได้เร็ว

6.2 ลักษณะของแหล่งน้ำใต้ดิน

น้ำใต้ดิน หรือ เขตน้ำใต้ดิน (Zone of Subsurface water) แบ่งออกเป็น 2 เขต คือ เขตมีอากาศแทรกในชั้นหิน และเขตอิ่มตัว โดยสามารถพิจารณาได้ดังนี้ ดังแสดงในภาพที่ 7

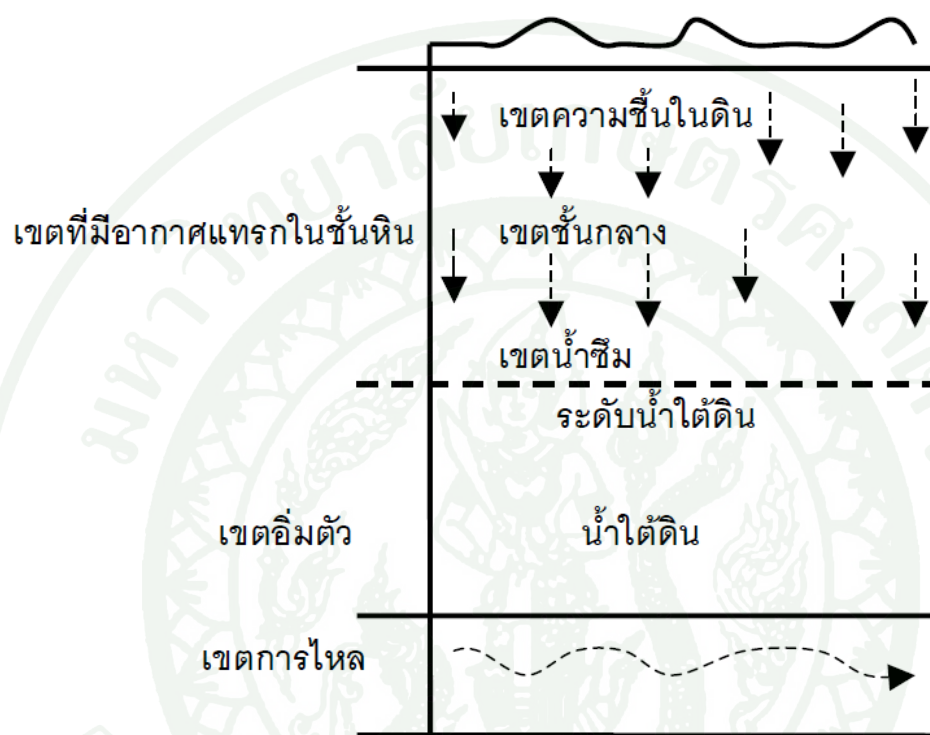
6.2.1 เขตที่มีอากาศแทรกในชั้นหิน (Zone of Aeration)

เป็นเขตที่ปริมาณของน้ำใต้ดินมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เป็นชั้นที่มักอยู่ใต้ผิวดินในระดับตื้น ระดับน้ำจะแปรเปลี่ยนไปตามฤดูกาล เช่น ฤดูแล้งระดับน้ำจะลึกกว่าฤดูฝน จัดเป็นประเภทชั้นให้น้ำแบบเปิด (Unconfined Aquifers) เขตนี้เป็นตอนที่น้ำจากผิวดินไหลผ่านลงสู่เบื้องล่าง โดยเขตนี้เราสามารถแบ่งออกเป็น 3 เขตย่อย คือ

เขตความชื้นในดิน (Belt of Soil Moisture) ซึ่งเป็นบริเวณที่รากพืชหยั่งราก และสามารถดูดซึมน้ำไปใช้ได้ โดยพืชดูดซึมความชื้นจากดิน แล้วปล่อยให้ระเหยกลายเป็นไอสู่บรรยากาศ หรือบางครั้งความชื้นในดินจะระเหยสู่บรรยากาศโดยตรง

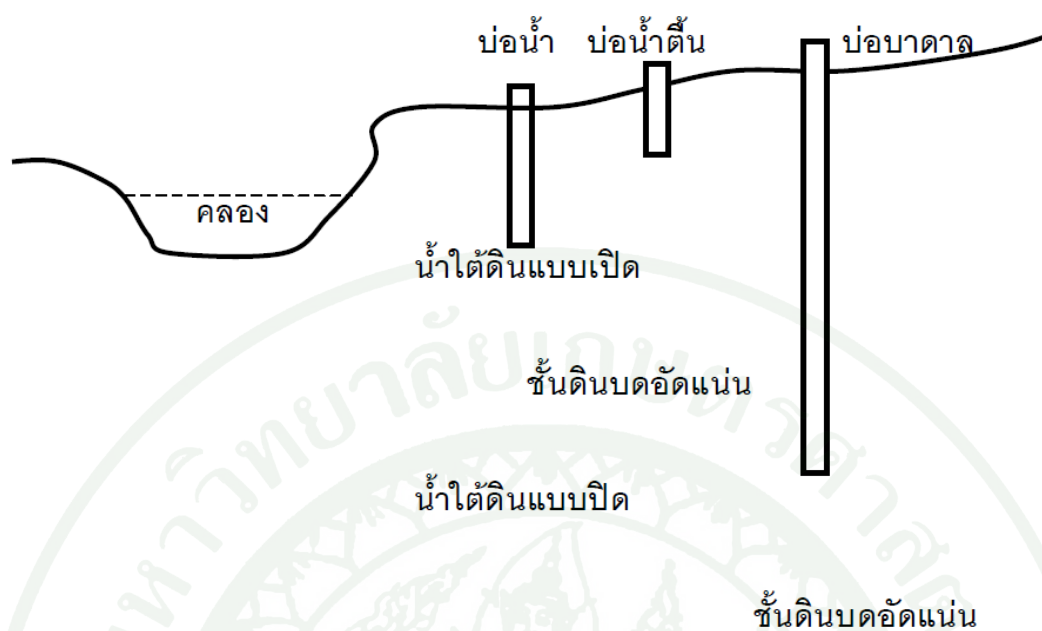
เขตชั้นกลาง อยู่ระหว่างเขตความชื้นในดิน และเขตน้ำซึม น้ำในเขตนี้จะเกาะดินด้วยแรงดึงดูดระหว่างอนุภาค จึงมีการเคลื่อนไหวยของน้ำน้อยมาก เว้นแต่ในระยที่มีปริมาณน้ำฝนมาก ช่วงกลางจึงเป็นทางผ่านของน้ำไปสู่เขตที่ลึกกว่า

เขตน้ำซึม (Capillary Fringe) เป็นบริเวณที่ได้รับน้ำจากเขตอิมตัวมีความหนาตั้งแต่ 2-3 เซนติเมตร ถึง 2-3 เมตร ลักษณะคล้ายกระดาษซับน้ำที่จะมีน้ำจากเขตที่อยู่เบื้องล่างซึมขึ้นมาตามแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของดินหรือหินกับน้ำ



ภาพที่ 7 เขตน้ำใต้ดิน

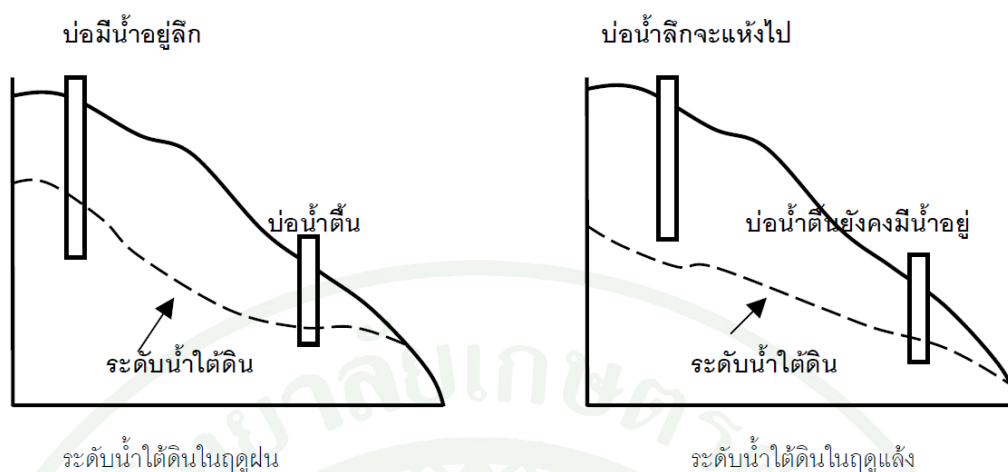
6.2.2 เขตอิมตัว (Zone of Saturation) เป็นเขตที่มีน้ำใต้ดินขังอยู่เต็มทุกช่องว่างในเนื้อดิน เราเรียกน้ำในเขตนี้ว่าเป็นน้ำใต้ดิน โดยยึดระดับบนสุดของระดับน้ำ ณ เขตนี้เป็นระดับน้ำใต้ดิน (Water Table) โดยชั้นดินหรือชั้นหินที่มีปริมาณน้ำมากจนอิมตัวและมีปริมาณมากพอที่พืชสามารถนำขึ้นมาใช้ได้



ภาพที่ 8 น้ำใต้ดินแบบเปิดและปิด

จากภาพที่ 8 ชั้นให้น้ำในเขตอ้อมตัวนี้เราเรียกว่า ชั้นให้น้ำแบบปิด (Confined Aquifers) มักอยู่ในระดับลึก มีชั้นหินหนาปิดปกคลุมด้านบนไว้ ทำให้น้ำในชั้นนี้มีความดัน มลพิษจากพื้นดินไม่สามารถปนเปื้อนลงไปได้ แต่อาจมีแร่ธาตุบางอย่างปะปนอยู่ ชั้นให้น้ำแบบปิดนี้อาจมีหลายชั้นสลับกันไป

6.2.3 ระดับน้ำใต้ดิน (Water Table) คือผิวบนของเขตอ้อมน้ำ จากภาพที่ 8 เราจะเห็นได้ว่าระดับน้ำใต้ดินซึ่งหมายถึงระดับของน้ำใต้ดินที่เกิดขึ้น เนื่องจากการสะสมน้ำใต้ดินที่ไม่อาจซึมต่อไปได้ แต่ระดับน้ำใต้ดินจะไม่คงที่แน่นอน สามารถมีการเปลี่ยนแปลงได้ตามฤดูกาล ดังแสดงในภาพที่ 7 เช่น ในบริเวณภูเขาที่มีฝนตกสม่ำเสมอ ระดับน้ำใต้ดินอาจอยู่ลึก 2-3 เมตร ถึงหลายร้อยเมตรใต้ผิวดิน ส่วนในแถบภูมิอากาศร้อนและแห้งแล้งที่มีฝนตกน้อยและมีการระเหยกลายเป็นไอน้ำมาก ระดับน้ำใต้ดินจะอยู่ลึกมาก ส่วนบริเวณใกล้ลำธารแม่น้ำ ทะเลสาบหรือแหล่งน้ำอื่นๆ ระดับน้ำใต้ดินจะอยู่ใกล้ผิวดินมาก และระดับน้ำใต้ดินจะลาดเอียงใกล้แหล่งน้ำที่อยู่ใกล้มาก



ภาพที่ 9 ระดับน้ำใต้ดินในฤดูต่างๆ

6.3 ชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดิน (Ground water Aquifers)

ชั้นหินอุ้มน้ำ (Aquifers) คือ หิน หรือ ตะกอนที่น้ำบาดาลสามารถซึมผ่านได้ เช่น ชั้นกรวด ทราย เนื่องจากการวางเรียงตัวของเม็ดทรายมีช่องว่างขนาดเล็กๆ กว่าช่องว่างของการเรียงตัวของชั้นกรวด การสะสมตัวของน้ำจึงน้อยกว่า ส่วนหินอัคนีและ หินแปร หินดินดาน เนื้อหินแน่นเกินกว่าจะเป็นชั้นหินอุ้มน้ำ ชั้นหินอุ้มน้ำมี 2 ประเภท ดังนี้

6.3.1 ชั้นหินให้น้ำแบบเปิด (Unconfined Aquifers) เป็นชั้นหินที่มีน้ำบาดาลอยู่ในเขตอิมน้ำ มีระดับผิวน้ำเป็นระดับน้ำใต้ดิน และไหลไปตามแนวของชั้นหิน สำหรับการขุดเจาะบ่อน้ำบาดาล และใช้น้ำจากชั้นหินอุ้มน้ำปกตินี้ ถ้าขุดบ่อน้ำบาดาลตื้นเกินไป มีโอกาสจะขาดแคลนน้ำได้ แต่ถ้าขุดลึกจะได้น้ำใช้ตลอดปี ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของหิน และรอยแตกในเนื้อหิน เช่น ถ้าเป็นหินอัคนีแบบเนื้อสมานแน่น และหินแปร แม้ว่าจะเป็นหินที่ไม่ยอมให้น้ำซึมผ่าน แต่ถ้ามีรอยแตกในหินมากเป็นที่สะสมตัวของน้ำ บ่อน้ำใต้ดินจะมีน้ำใช้ เป็นต้น

6.3.2 ชั้นหินให้น้ำแบบปิด (Confine Aquifer) เป็นชั้นหินให้น้ำภายใต้แรงดัน โดยชั้นหินอุ้มน้ำอยู่ระหว่างชั้นหินเนื้อที่ที่ไม่ยอมให้น้ำซึมผ่าน ประกอบอยู่ทั้งด้านบนและด้านล่าง จัดเป็นชั้นหินที่อยู่ภายใต้ความกดดันอันเนื่องมาจากน้ำหนักของหินที่กดทับ และน้ำหนักของน้ำในชั้นหินเดียวกันที่อยู่ต่างระดับกัน บางครั้งแรงดันมาก เมื่อเจาะจะมีน้ำไหลพุ่งมาเหนือปากบ่อ เรียกว่าบ่อน้ำพุ (Flowing Well) และเนื่องจากน้ำบาดาลจากชั้นหินอุ้มน้ำประเภทนี้มักอยู่ในระดับลึก สามารถนำมาใช้บริโภคได้ แต่อาจมีคุณสมบัติเป็นน้ำกระด้าง เนื่องจากมีปริมาณแร่ธาตุละลายปนอยู่มาก

6.4 ชนิดของหินที่เป็นชั้นหินอุ้มน้ำ

หินทุกชนิดมีความสามารถในการให้น้ำแตกต่างกัน เนื่องจากสภาพทางธรณีวิทยาที่มีความแตกต่างกัน สามารถแยกพิจารณาได้ ดังนี้

6.4.1 หินตะกอน เป็นหินที่ไม่มีการประสานตัวแน่นเป็นหินแข็ง เช่น ตะกอนที่สะสมตัวตามแอ่ง ที่ราบ หุบเขา ธารน้ำ ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ชั้นหินอุ้มน้ำทั่วโลกร้อยละ 90 เป็นพวกตะกอนร่วน เช่น ทราย กรวด และพวกตะกอนเศษหินริมแม่น้ำ เป็นต้น

6.4.2 หินกรวดมน มักมีทรายและเศษหินแทรกระหว่างช่องว่าง หินกรวดขนาดใหญ่จึงอุ้มน้ำไม่ได้ ยกเว้นแต่น้ำที่แทรกตามรอยแตกของหิน และขึ้นอยู่กับ การประสานของเนื้อหินด้วย ถ้าการประสานตัวมีไม่มากอาจจะพอน้ำบ้างไม่มากนัก

6.4.3 หินทราย โดยทั่วไปมีความพรุนและสภาพการซึมน้ำมีมาก เนื่องจากมีความสามารถในการกักเก็บน้ำน้อย ไม่จัดเป็นชั้นหินอุ้มน้ำ แต่น้ำบาดาลที่พบในหินทรายส่วนใหญ่ได้จากรอยแตกและรอยต่อของชั้นหิน ถ้ามีขนาดใหญ่และมีแนวยาวต่อเนื่องกันจะให้น้ำได้มาก

6.4.4 หินดินดาน มีรูพรุนในเนื้อหินมาก แต่ยอมให้น้ำซึมผ่านได้น้อย น้ำจึงไหลผ่านไม่ได้ จึงไม่จัดเป็นชั้นหินอุ้มน้ำ ยกเว้นเนื้อหินดินดานที่มีเนื้อแข็งและเปราะ จึงมีรอยแตกระหว่างเนื้อหินมากพอที่จะดักน้ำบาดาลได้มาก

6.4.5 หินปูน เป็นหินแข็ง เปราะ ที่มีเนื้อสมานแน่น ในบางกรณีเมื่อถูกแรงบีบอัดก็จะเกิดรอยแตกในเนื้อหิน หรือเป็นโพรงระหว่างชั้นหิน ถ้ามีน้ำสะสมตัวอยู่สามารถขุดเจาะนำมาใช้ได้ ดังนั้นน้ำบาดาลจึงเป็นน้ำที่แทรกตัวอยู่ตามโพรงหินปูนมากกว่า

6.4.6 หินแปร หินชนวน และหินชีสต์ เป็นหินที่มีการวางตัวของเนื้อหินเป็นแผ่น มีลักษณะเป็นแผ่นๆ เมื่อถูกแรงบีบอัดให้โค้งงอและแน่น จะทำให้ช่องว่างระหว่างแผ่นมีน้อยมาก จึงมีการสะสมตัวของน้ำน้อย และจากปัญหาความแข็งของชั้นหินจึงยากต่อการขุดเจาะน้ำบาดาลมาก

6.4.7 หินอัคนี เช่น หินแกรนิต เนื้อสมานแน่น ไม่มีความพรุน จึงไม่มีการสะสมตัวของน้ำในเนื้อหิน ยกเว้นแต่ตามรอยแตกของหิน แต่ถ้ามีโพรงอากาศที่เกิดในขณะที่หินมีการเย็นตัวลง อาจเป็นโพรงที่น้ำสะสมตัวอยู่ได้

6.5 การเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดิน

การเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินแบ่งออกเป็น 2 แบบ ดังนี้

6.5.1 การไหลตามแนวดิ่ง ซึ่งเป็นการไหลซึมลงดินตามแนวดิ่ง อัตราการไหลจะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับโครงสร้างของชั้นดินและหินว่ามีช่องว่างในเนื้อหินและความสามารถในการยอมให้น้ำซึมผ่าน

6.5.2 การไหลตามแนวระดับ เป็นการไหลตามแรงโน้มถ่วงของโลก เช่น การไหลจากระดับสูงลงไปสู่ระดับที่ต่ำกว่า อัตราการไหลจะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศ และเนื้อหิน เช่น หินเนื้อละเอียดมากอัตราการไหลของน้ำจะไหลได้ช้ามาก แต่ถ้าไหลผ่านโพรง เช่น ถ้ำ ที่ติดต่อกันเป็นทางยาวน้ำใต้ดินจะไหลได้เร็วพอๆ กับการไหลของน้ำผิวดิน

โดยสรุปอัตราการไหลจะเร็วหรือช้า ขึ้นอยู่กับความพรุนของเนื้อหิน (Porosity) และความสามารถในการยอมให้น้ำซึมผ่านชั้นหิน (Permeability) นอกจากนี้ การยอมให้น้ำไหลซึมผ่านจะเป็นสัดส่วนกับความลึก เนื่องจากมีแรงกดดันสูง และความลาดชันของพื้นที่ด้วยเช่นกัน

7. การคำนวณหน้าข้างการไหล

Chow (1959) การคำนวณหน้าข้างการไหลที่มีการไหลแบบเปลี่ยนแปลงทีละน้อยทำได้โดยการแก้สมการพลวัตของการไหลแบบเปลี่ยนแปลงทีละน้อย วัตถุประสงค์หลักของการคำนวณก็เพื่อหารูปร่างของหน้าข้างการไหล ซึ่งจะกระทำได้ด้วยวิธีต่างๆ ดังต่อไปนี้

ทางน้ำเสมอต้นเสมอปลาย (uniform channel)

7.1 วิธีขั้นบันได (step method) แบ่งออกเป็น 2 วิธีต่อไปนี้

7.1.1 วิธีขั้นบันไดโดยตรง (The Direct Step Method) คือการกำหนดความลึกหาระยะทางโดยวิธีนี้แบ่งทางน้ำออกเป็นช่วงการไหลสั้นๆ แล้วทำการคำนวณทีละขั้นต่อเนื่องกันจากปลายข้างหนึ่งของช่วงการไหลไปยังปลายอีกข้างหนึ่ง วิธีขั้นบันไดโดยตรงนี้ใช้กับทางน้ำแบบพริซึม

7.1.2 วิธีขั้นบันไดแบบมาตรฐาน (The Standard Step Method) คือการกำหนดระยะทางหาความลึก วิธีนี้ใช้ได้กับทางน้ำแบบพริซึมและแบบไม่พริซึม ในการคำนวณหาคำตอบมักจะใช้วิธีการสมมติคำตอบ (trial and error)

7.2 วิธีอินทิเกรตโดยตรง (The Direct Integration Method)

7.3 วิธีโดยประมาณ (The Approximate Method)

7.4 วิธีรีธมาน (The Ruhlmann's Method)

7.5 วิธีโทคมิต (The Tolkmitt's Method)

8. วิธีการทดสอบคุณสมบัติของดิน

8.1 ความถ่วงจำเพาะของดิน

ดินตามธรรมชาติจะประกอบด้วย อากาศ น้ำ และเม็ดดินโดยเม็ดดินจะเกิดจากการรวมตัวกันของแร่ธาตุที่แตกต่างกันออกไปดังนั้นจึงเป็นผลให้ดินในแต่ละพื้นที่ มีความถ่วงจำเพาะต่างกันในขณะที่น้ำจะมีความถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกัน แต่ก็จะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ความถ่วงจำเพาะของดิน คือ อัตราส่วนของน้ำหนักดินต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับดิน ในอุณหภูมิหนึ่ง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่แสดงให้ทราบถึงลักษณะทั่วไปของดินได้ และยังสามารถที่จะนำคุณสมบัตินี้ไปใช้ ในการคำนวณค่าคุณสมบัติอื่นๆ เช่น ความพรุน อัตราส่วนช่องว่างของดิน ระดับความอิ่มตัว ความหนาแน่น เป็นต้น ทั้งยังสามารถนำค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินไปใช้ สำหรับวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดินด้วยวิธีไฮโดรมิเตอร์แบบ 151H ได้ โดยทั่วไปค่าความถ่วงจำเพาะของดินจะมีค่าอยู่ในช่วง 2.60 - 2.80 ถ้าค่าต่ำกว่านี้ก็อาจจะมีพวกอินทรีย์สารหรือพวกธาตุเบาต่างๆปะปนอยู่ และถ้าค่าสูงกว่านี้ก็อาจมีธาตุหนักปะปนอยู่ สำหรับค่าความถ่วงจำเพาะโดยทั่วไปของดินชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความถ่วงจำเพาะของดิน

ชนิดของดิน	ความถ่วงจำเพาะของดิน
ทราย Sand	2.65 - 2.67
ทรายปนดินตะกอน Silt	2.67 - 2.70
ดินเหนียว Inorganic Clay	2.70 - 2.80
ดินที่มีแร่ไมก้าหรือแร่เหล็ก Soil with Mica or Iron	2.75 - 3.00
ดินอินทรีย์ Organic Soil	1.00 - 2.60

8.2 การหาขนาดของเม็ดดินและความกละของเม็ดดิน

การหาขนาดของเม็ดดินและความกละของเม็ดดินสามารถกระทำการทดสอบได้ 3 วิธี ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของดิน คือ Cohesion Soil (เช่น ดินประเภทกรวด , ทราย (Gravel and Silt Sand) หรือ Cohesion Soil (เช่น ดินประเภทดินเหนียว , Clay หรือ Silty Sand)

8.2.1 Sieve Analysis คือ การร่อนดินให้ผ่านช่องตะแกรงที่เหลี่ยมจตุรัสซึ่งรู้ขนาดของช่องตะแกรงที่แน่นอน ขนาดของเม็ดดินที่ได้จากการทดสอบ คือ ขนาดช่องตะแกรงที่ใช้ทดสอบ

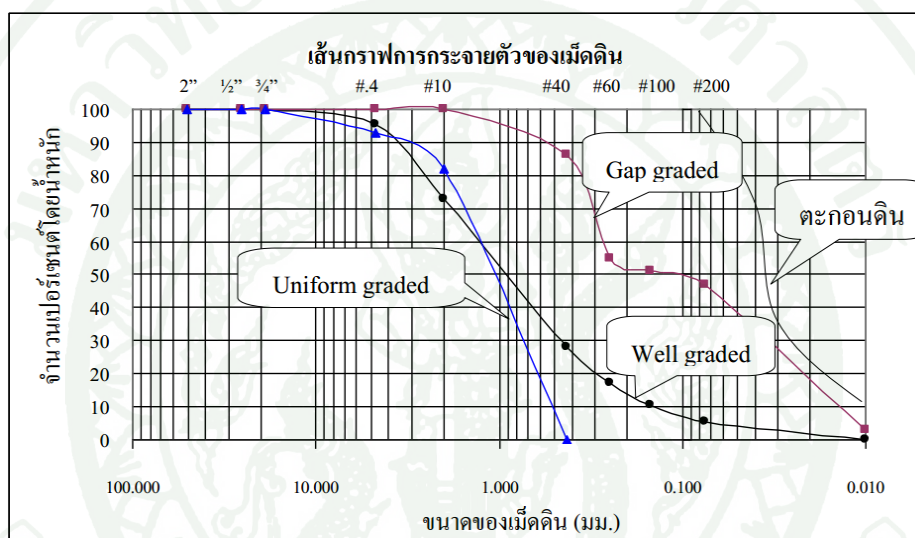
8.2.2 Hydrometer Analysis คือ เป็นการหาขนาดของเม็ดดินโดยอาศัยหลักการของ Stoke and law ซึ่งเป็นสมการเกี่ยวกับความเร็วในการตกตะกอนแบบ Free Fall ของ Sphere ดังนั้นขนาดของเม็ดดิน คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง Sphere ที่มีความหนาแน่นเท่ากันและตกตะกอนด้วยความเร็วเท่ากัน

8.2.3 Combined Analysis คือ การทดสอบทั้ง Sieve Analysis และ Hydrometer Analysis โดยอนุภาคของเม็ดดินที่ใหญ่กว่าตะแกรงเบอร์ 200 หรือใหญ่กว่า 0.074 มม. จะทำการทดสอบด้วย Sieve Analysis ในขณะที่เม็ดดินที่เล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 200 จะทำการทดสอบโดยวิธี Hydrometer Analysis

ในกรณีที่ดินเป็นชนิด Cohesion Soil เช่น Gravel และ Sand จะใช้การทดสอบเฉพาะวิธี Sieve Analysis ถ้าดินเป็นชนิด Cohesion Soil เช่น ดินเหนียวจะใช้วิธีทดสอบ Hydrometer

Analysis หากดินเป็นชนิดระหว่าง Cohesion และ Cohesion Soil เช่น Sand Clay และ Clayey Sand จะใช้การทดสอบแบบ Combined Analysis

การหาการกระจายขนาดของเม็ดดินนั้น ทำโดยการนำผลการทดสอบการหาขนาดของเม็ดดิน (ดินพวกเม็ดหยาบที่ได้จากการวิธีร่อนผ่านตะแกรง และดินพวกเม็ดละเอียดที่ได้จากวิธีตกตะกอนมาเขียนเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเม็ดดิน ที่มีขนาดเล็กกว่าโดยน้ำหนักในกระดาศ Semi-log จะได้กราฟกระจายตัวของเม็ดดิน ดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 เส้นกราฟการกระจายตัวของเม็ดดิน

8.3 ความละเอียดของเม็ดดิน

8.3.1 ดินที่มีขนาดละเอียดได้แก่ดินที่มีขนาดต่างๆตั้งแต่ขนาดใหญ่ไปจนถึงขนาดเล็ก ละเอียดกันอย่างเหมาะสม เส้นกราฟที่เขียนได้จะเป็นเส้นโค้งสม่ำเสมอจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งหรือสามารถหาจากค่า Coefficient of uniformity (C_u) ซึ่งแสดงการกระจายตัวของเม็ดดินว่ามีความสม่ำเสมอได้จากสมการดังนี้

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

โดยที่ D_{60} = ขนาดของเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่า 60%

D_{10} = ขนาดของเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่า 10% เรียกว่า ขนาด
ประสิทธิภาพ (Effective Size)

นอกจากนี้สามารถหาจากความโค้งของเส้นกราฟที่เรียกว่า Coefficient of curvature (C_c)
ซึ่งจะแสดงถึงขนาดคละกัันว่า ขนาดคละกัันดี จะต้องมัลักษณะตามตารางที่ 2 หรือขนาดคละกัันไม่
ดีซึ่งคำนวณได้จาก

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (2)$$

โดยที่ D_{30} = ขนาดของเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่า 30%

ตารางที่ 2 ลักษณะของดินที่มีขนาดคละกัันดี

ชนิดของดิน	C_u	C_c
กรวด	มากกว่า 4	1 – 3
ทราย	มากกว่า 6	1 - 3



ภาพที่ 11 ดินที่มีขนาดคละกัันดี (Well Graded Soil)

ที่มา : มานิต (2552)

8.3.2 ดินที่มีขนาดคละกัันไม่ดี (Poorly Graded Soil) แบ่งได้เป็น 2 ประเภทดังนี้

ก. ดินที่มีขนาดสม่ำเสมอ (uniform Graded) คือ ดินที่มีขนาดเดียวกันเป็นส่วน
ใหญ่ เส้นกราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นในแนวดิ่งขนานแกน y



ภาพที่ 12 ดินที่มีขนาดเม็ดสม่ำเสมอ (Uniform Graded)

ที่มา : มานิต (2552)

ข. ดินที่มีขนาดเม็ดขาดช่วง (Skip หรือ Gap Graded) คือ ดินที่มีขนาดใหญ่หรือขนาดเล็ก ขาดขาดใดขนาดหนึ่งไป เส้นกราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นราบในช่วงที่ขนาดเม็ดดินขาดหายไป



ภาพที่ 13 ดินที่มีขนาดเม็ดขาดช่วง (Skip หรือ Gap Graded)

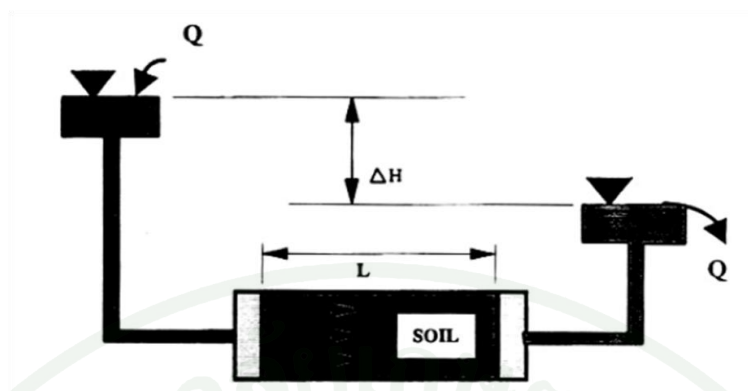
ที่มา : มานิต (2552)

ตารางที่ 3 ประเภทตะกอนตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d)	ประเภทของตะกอน
> 256 mm	ก้อนหินมนใหญ่ (boulder)
64-256 mm	กรวดใหญ่ (cobble)
32-64 mm	กรวดหยาบมาก (very coarse gravel)
16-32 mm	กรวดหยาบ (coarse gravel)
8-16 mm	กรวดขนาดกลาง (medium gravel)
4-8 mm	กรวดละเอียด (fine gravel)
2-4 mm	กรวดละเอียดมาก (very fine gravel)
1-2 mm	ทรายหยาบมาก (very coarse sand)
0.5-1 mm	ทรายหยาบ (coarse sand)
0.25-0.5 mm	ทรายขนาดกลาง (medium sand)
125-250 μm	ทรายละเอียด (fine sand)
62.5-125 μm	ทรายละเอียดมาก (very fine sand)
3.9-62.5 μm	ทรายแป้ง (silt)
< 3.9 μm	ดินเหนียว (clay)
< 1 μm	คอลลอยด์ (colloid)

9. การไหลซึมของน้ำผ่านดิน

โดยธรรมชาติของน้ำมีการไหลจากที่สูงไปสู่ที่ต่ำ หรือจากจุดที่มีความดันสูงไปสู่ความดันต่ำ Darcy (1856) วิศวกรชาวฝรั่งเศสได้แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วในการไหลซึมของน้ำได้ดินซึ่งต่อมาเรียกว่า กฎของดาร์ซี กล่าวว่า ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านตัวกลางพรุนแบบ laminar flow จะเป็นสัดส่วนกับ hydraulic gradient



ภาพที่ 14 การไหลซึมของน้ำในแนวเดียวผ่านแท่งดิน

ที่มา : วรากร (2542)

จากกฎของดาร์ซี ถ้าให้ V = ความเร็วของการไหลซึมของน้ำ

และ i = ความลาดของระดับน้ำ (hydraulic gradient) = $\frac{\Delta H}{L}$

เมื่อ H = ความต่างศักย์ระหว่างเหนือหน้าและท้ายน้ำ

L = ความยาวของแท่งดินในแนวน้ำไหล

ดังนั้น $v \propto i$

หรือ $v = k \cdot i$

โดยที่ k เป็นค่าคงที่ซึ่งแสดงคุณสมบัติของดินที่ให้น้ำไหลผ่าน เรียกว่า hydraulic conductivity หรือ permeability หรือเรียกว่า ค่าความซึม น้ำ หน่วยที่ใช้เป็น เซนติเมตรต่อวินาที (cm/sec)

จากสมการข้างต้น เมื่อพิจารณาหน้าตัดของแท่งดิน เท่ากับ A ดังนั้นปริมาณการไหลต่อเวลาจะเป็น

$$q = v \cdot A = k \cdot i \cdot A$$

เมื่อ พิจารณาเฉพาะช่วงเล็กๆที่มีความยาว dL ปริมาณน้ำจะเป็น

$$q = k \cdot \frac{dH}{dL} \cdot A \quad (3)$$

เมื่อ $\frac{dH}{dL}$ เป็นความชันของเส้นศักย์พัวน้ำ ณ ตำแหน่งที่พิจารณา

10. สัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำ

สัมประสิทธิ์ของการซึมขึ้นอยู่กัส่วนประกอบของชนิดของเม็ดดินอย่างมาก การเก็บตัวอย่างดินมาทดสอบในห้องทดลอง มักให้ผลที่ไม่ดีเท่ากับการทดลองในสนาม เนื่องจากผลของการที่ตัวอย่างถูกรบกวน และการที่ส่วนประกอบของตัวอย่างดินแตกต่างออกไปจากดินในสนาม ตัวประกอบที่มีผลกระทบต่อสัมประสิทธิ์ของการซึม ค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมนั้นขึ้นอยู่กัตัวประกอบหลายอย่างดังนี้

- 1) ความหนืดและความหนาแน่นของของเหลวที่ไหล
- 2) ขนาดและความต่อเนื่องของช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ซึ่งน้ำจะต้องไหลผ่านสิ่งเหล่านี้
 - ขนาดและรูปร่างเม็ดดิน เมื่อดินมีขนาดเม็ดละเอียดมากขึ้น ค่า k จะลดลง
 - อัตราส่วนช่องว่างและความหนาแน่นของดิน
 - การอิ่มตัวด้วยน้ำ
 - โครงสร้างการเรียงตัวของเม็ดดิน
 - เมื่อมีปริมาณของดินเม็ดละเอียดเพิ่มขึ้น ค่า k จะลดลง
- 3) การต่อเนื่องและการเป็นเนื้อเดียวกันของชนิดของดินในธรรมชาติ โดยถ้าชั้นดินมีดินชนิดอื่นปนแทรกอยู่ ดินที่แทรกนี้จะมีส่วนเข้าไปส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมของมวลดินทั้งหมด

10.1 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำในดินในห้องปฏิบัติการ สามารถทำได้ 2 วิธี คือ

10.1.1 วิธีความดันคงที่ (constant head) ในห้องปฏิบัติการ เป็นวิธีที่เหมาะสมกัดินเม็ดหยาบหรือดินที่มีความซึมน้ำสูง โดยดินที่นำมาทดสอบอยู่ใน mold รูปทรงกระบอก มีเสดคงที่ h และมีการรักษาเสดให้คงที่ ด้วยการปรับระดับน้ำจาก water supply ปริมาณน้ำที่ไหลออกมาวัดได้ด้วยทรงกระบอกวัดภายในช่วงเวลา t จากกฎของ Darcy (1856) จะได้ว่า

$$Q = vA = kiA \quad (4)$$

เมื่อ k = ค่าความซึมผ่านของตัวอย่างดิน ซึ่งต้องการทราบ

$$i = \text{ไฮโดรลิก เกรเดียน} = \frac{h}{L}$$

เมื่อแทนค่า i แล้วหาค่า k ในเทอมตัวแปรต่าง ๆ จะได้

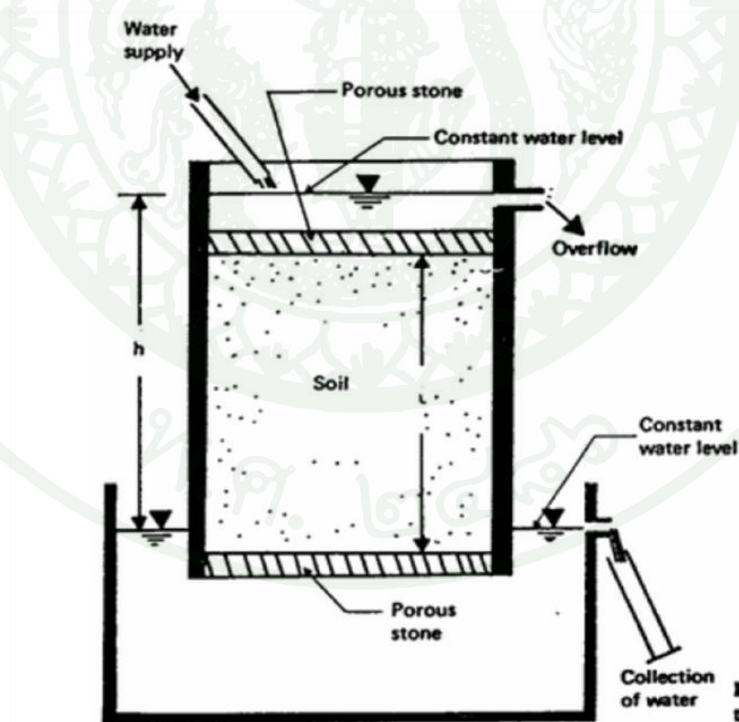
$$k = \frac{h}{L} \frac{QL}{Ah} \quad (5)$$

Q = ปริมาณน้ำที่วัดระหว่างการทดสอบ (ซม.³ / วินาที)

L = ความยาวของตัวอย่างดิน (ซม.)

A = พื้นที่หน้าตัดตัวอย่างดิน (ซม.²)

h = ความต่างของระดับน้ำ (ซม.)



ภาพที่ 15 การทดสอบความซึมผ่านโดยวิธีความดันคงที่

ที่มา : Das (1990)

ตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินชนิดต่างๆ

ชนิดของดิน	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (เซนติเมตร/วินาที)	คุณสมบัติ การระบายน้ำ
กรวด	$1-10^{-2}$	ดี
ทรายหยาบ	$1-10^{-3}$	ดี
ทรายละเอียดและดินตะกอนไม่อัดแน่นดิน	$10^{-3}-10^{-5}$	ปานกลาง
ตะกอนอัดแน่นและดินตะกอนทราย	$10^{-5}-10^{-6}$	เลว
ดินเหนียวปนดินตะกอนและดินเหนียว	$10^{-6}-10^{-9}$	น้ำซึมผ่านได้ยาก

ที่มา: Das (1990) แปล

10.1.2 วิธีความดันน้ำแปรเปลี่ยน (Variable Head หรือ Falling Head) วิธีนี้ สำหรับดินที่มีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านปานกลาง เช่น ทรายละเอียด (Fine Sand) ตะกอนดิน (Silt) บางชนิด ความเหมาะสมของเครื่องมือทดสอบ สำหรับชนิดทรายปานกลางถึงหยาบ (Medium to Coarse Sand) สามารถจะทดสอบด้วยวิธีระดับน้ำคงที่ (Constant Head) ได้แต่ในทางปฏิบัติทรายชนิดนี้มักจะไม่มีค่าจำเป็นที่จะต้องทำการทดสอบการซึมผ่าน เนื่องจากพอจะประมาณค่าได้ และมีค่าสูงการทดสอบที่ปฏิบัติมักจะเป็นการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อสาธิตการปฏิบัติการในห้องทดลองมากกว่าการนำไปใช้จริง ส่วนตัวอย่างดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านปานกลาง เช่น ทรายละเอียดและดินตะกอน สามารถทดสอบด้วยวิธีระดับน้ำแปรเปลี่ยน (Falling Head) ได้

10.2 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำใช้ขนาดเม็ดทราย

ขนาดและรูปร่างของเม็ดดิน (grain size and shape) แท้ที่จริงแล้วค่าความซึมผ่านจะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของช่องว่างระหว่างเม็ดดินมากกว่าแต่คุณสมบัติทั้งสองของมวลดินมีความสัมพันธ์กันอย่างใกล้ชิด เช่น ดินที่มีเม็ดเล็กบางและเป็นแผ่น ช่องว่างที่น้ำซึมผ่านก็มักจะมีลักษณะเช่นเดียวกัน Hazen (1892) ได้เสนอว่าในทรายและกรวด ค่าความซึมผ่านสามารถสัมพันธ์กับขนาดเม็ดดังนี้

$$K = 100 \times (D_{10})^2 \text{ ซม./วินาที} \quad (6)$$

เมื่อ D_{10} = ขนาดเม็ดเมื่อมี 10 เปอร์เซนต์ โดยน้ำหนักเป็นเม็ดที่เล็กกว่าที่ระบุ (ชม.)

Skempton (1969) กล่าวว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความชื้นน้ำของดิน ได้แก่ ขนาดของเม็ดดิน (grain size) และอัตราส่วนช่องว่าง (void ratio) กล่าวได้ว่า ดินที่มีขนาดเม็ดดินเล็กและอัตราส่วนช่องว่างน้อยจะมีค่าความชื้นน้ำต่ำกว่า ดินที่มีขนาดใหญ่และอัตราส่วนช่องว่างมีค่ามาก

ส่วนประกอบทางเคมีของดิน (composition) พบว่ามีผลมากในกรณีที่เป็นดินเหนียว เนื่องจากเกิดการแลกเปลี่ยนไอออน ระหว่างโครงสร้างผลึกในดินเหนียว และพบว่าในดินที่มีการแลกเปลี่ยนไอออนสูงจะมีค่าความชื้นน้ำต่ำ เช่น sodium monmorillonite ซึ่งมีค่าความชื้นน้ำต่ำกว่า 10-7 ชม./วินาที

ลักษณะโครงสร้างของดิน (fabric) โดยจะมีผลต่อค่าความชื้นน้ำของดินเม็ดละเอียดระดับความอิ่มตัวของดิน (degree of saturation) โดยเมื่อระดับความอิ่มตัวของดินยิ่งสูงขึ้น ค่าความชื้นน้ำของดินก็มากขึ้นตามไปด้วย

10.3 เงื่อนไขการไหลของน้ำใต้ดิน

10.3.1 การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน

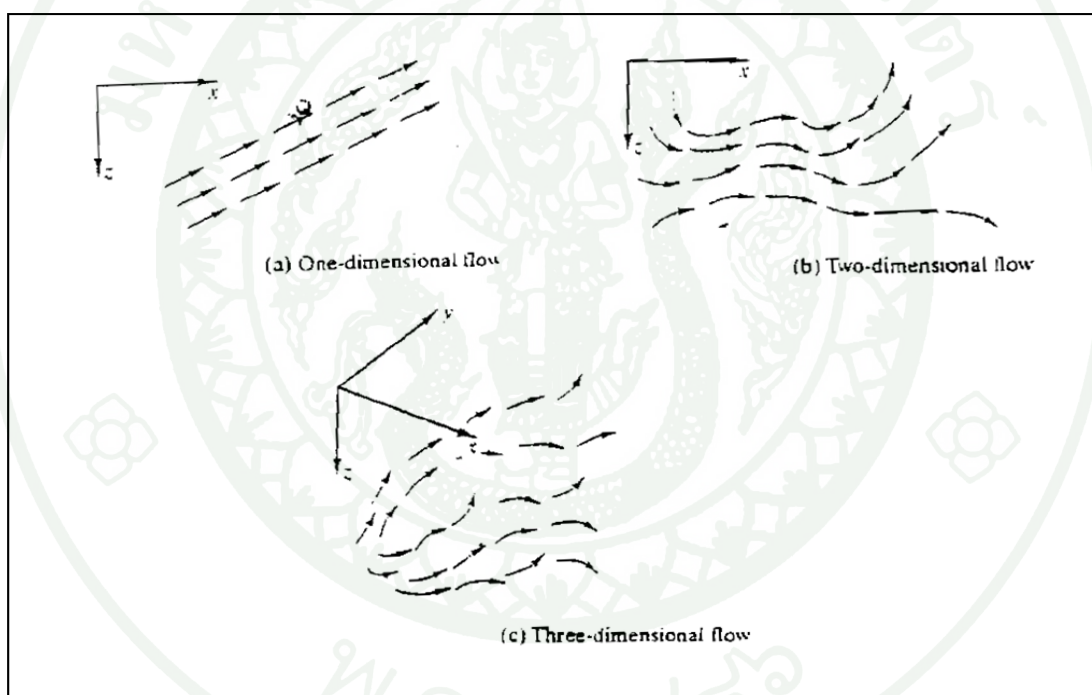
น้ำที่มีการไหลแบบราบเรียบสม่ำเสมอ (laminar Flow) เป็นการไหลที่เกิดขึ้นเมื่อมีความเร็วในการไหลน้อย ส่วนลักษณะการไหลอีกแบบหนึ่งเรียกว่า การไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) จะเกิดขึ้นเมื่อความเร็วการไหลมีค่าสูง และมีโอกาสที่จะทำให้เกิดการหมุนวน ลักษณะการไหลแบบนี้ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานสูง ความเร็วการไหลของน้ำในดินส่วนใหญ่จะต่ำ ซึ่งลักษณะการไหลจะเป็นแบบราบเรียบและสิ่งที่กล่าวข้างต้นเป็นสิ่งสำคัญเพราะการวิเคราะห์ส่วนมากจะกำหนดให้เป็นลักษณะดังกล่าว อย่างไรก็ตาม ดินเม็ดขนาดใหญ่หลายชนิด เช่น ทรายสะอาด ทรายที่มีการจัดเรียงตัวไม่ดี อาจจะมีความเร็วในการไหลผ่านสูงซึ่งทำให้ลักษณะการไหลเป็นแบบปั่นป่วน

10.3.2 การไหลของน้ำใต้ดินแบบ 1 มิติ 2 มิติ 3 มิติ

การไหลแบบ 1 มิติ เวกเตอร์ความเร็วจะอยู่ในลักษณะขนานกันและมีขนาดเท่ากัน ซึ่งน้ำจะไหลไปในแกนเดียวกันและขนานกันเสมอ โดยไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดคงที่

การไหลแบบ 2 มิติ เวกเตอร์ของความเร็วจะถูกจำกัดให้อยู่ในระนาบเดียว แต่ขนาดและทิศทางจะแตกต่างกันในระนาบนั้น การวิเคราะห์ เช่น การไหลของน้ำในดินธรรมชาติตลอดเขื่อนคอนกรีต ซึ่งทำการวิเคราะห์ ซึ่งทำการวิเคราะห์แบบสองมิติในระนาบตั้งขนานกับลำน้ำ

การไหลแบบ 3 มิติ เป็นเงื่อนไขที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปส่วนใหญ่ เวกเตอร์ของความเร็วจะเปลี่ยนแปลงไปในทิศทาง x, y, z



ภาพที่ 16 การไหลของน้ำใต้ดินแบบ 1 มิติ 2 มิติ และ 3 มิติ

ที่มา : Coduto (1998)

การไหลแบบไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและเปลี่ยนแปลงตามเวลา (steady and unsteady flow) ในส่วนของเงื่อนไขที่การไหลไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา หมายถึงเป็นระบบการไหลที่มีความสมดุล ในการวิเคราะห์เกี่ยวกับน้ำใต้ดินเงื่อนไขดังกล่าวจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการไหลคงที่ ในทางตรงกันข้ามเงื่อนไขที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา หรือเรียกว่า transient condition

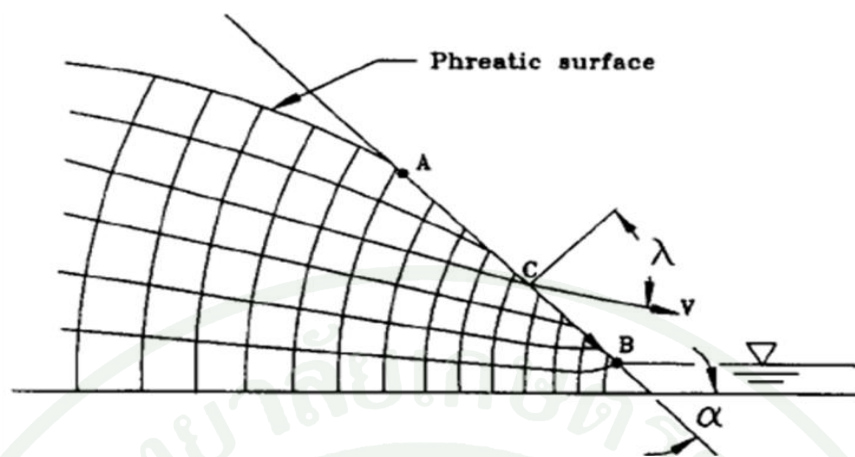
เงื่อนไขดังกล่าวจะเกิดขึ้นเมื่อแรงดันน้ำในดิน ตำแหน่งของระดับน้ำใต้ดิน และอัตราการไหลมีการเปลี่ยนแปลงกับเวลา

10.4 การพังทลายลาดดินเนื่องจากน้ำใต้ดิน

Budhu and Gobin (1996) กล่าวว่า ถ้าการไหลซึมผ่านเม็ดดินจะทำให้เสถียรภาพของลาดดินลดลง สำหรับเม็ดดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น (cohesionless soil) ลาดดินขาดเสถียรภาพขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลซึมของน้ำและมุมลาดดินเป็นสำคัญ มุมลาดดินที่มีค่ามากที่สุด เรียกว่า มุมความเสียดทานภายใน (angle of internal friction) โดยที่ค่าความปลอดภัย (factor of safety) ของการขาดเสถียรภาพของลาดดินจากกฎของคูลอมบ์ คือ

$$F = \frac{[(\gamma'/\gamma_w)\cos\alpha - i\cos\lambda]\tan\phi}{(\gamma'/\gamma_w)\sin\alpha + i\sin\lambda} \quad (7)$$

- เมื่อ
- γ' = หน่วยน้ำหนักน้ำ (กก.นิวตัน/ม³)
 - γ_w = หน่วยน้ำหนักของดินในสภาพประสิทธิผล (กก.นิวตัน/ม³)
 - α = มุมลาดดิน (องศา)
 - ϕ = มุมเสียดทานภายในของเม็ดดิน (องศา)
 - λ = มุมระหว่างทิศทางการไหลของน้ำที่กระทำต่อเม็ดดินกับแรงตั้งฉากที่กระทำต่อเม็ดดิน (องศา)
 - i = ความลาดชลศาสตร์



ภาพที่ 17 ความเร็วการไหลซึมบริเวณลาดดิน

ที่มา : Harr (1962)

จากการพิจารณาโครงข่ายการไหล (flow net) ดังแสดงในภาพที่ 17 บนผิวหน้าการไหลซึม AB ค่า $\theta = 90^\circ$ ที่จุด A และ $\theta = 0^\circ$ ที่จุด B ซึ่ง Harr (1962) ได้แสดงความเร็วของการไหลซึมที่จุด C

$$v = \frac{k \sin \alpha}{\sin \lambda}$$

และจากกฎของดาร์ซีจะได้ว่า

$$i = \frac{\sin \alpha}{\sin \lambda}$$

(8)

แทนสมการที่ 7 ลงในสมการที่ 8 จะได้ว่า

$$F = \frac{[(\gamma' / \gamma_w) \cos \alpha - \sin \alpha \cot \lambda] \tan \phi}{\sin \alpha (\gamma' / \gamma_w + 1)}$$

(9)

10.5 การแบ่งดินในเชิงวิศวกรรม

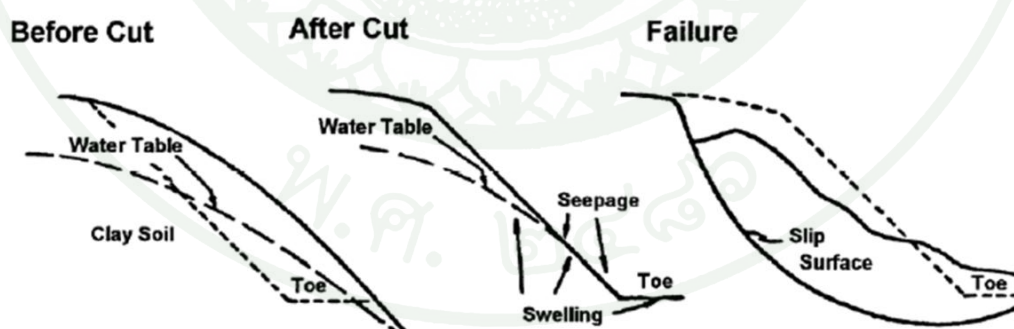
สามารถแบ่งอย่างง่าย ๆ ออกเป็น 2 แบบ คือ ดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น (cohesionless soil) กับดินที่มีความเชื่อมแน่น (cohesive soil)

10.5.1 ดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น

ส่วนใหญ่จะเป็นกรวด ทราย ดินตะกอนซึ่งมักจะมีลักษณะของเม็ดดินเป็นรูปเหลี่ยม (angular particles) มักพบในที่ใกล้ๆ กับหินที่เป็นต้นกำเนิดและลักษณะของเม็ดดินค่อนข้างกลม (rounded particles) มักพบในที่ไกลๆ จากแหล่งกำเนิด ซึ่งเม็ดดินรูปเหลี่ยมจะมีคุณสมบัติต้านทานแรงเฉือนได้ดีกว่า ดินประเภทนี้มีความต้านทานต่อการกัดเซาะเนื่องจากการไหลของกระแสน้ำได้ดีเพราะการยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของเม็ดดินอาศัยเพียงแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคเป็นหลักเท่านั้น

10.5.2 ดินที่มีความเชื่อมแน่น (cohesive soil)

ส่วนใหญ่จะเป็นดินเหนียว (clay soil) ซึ่งเม็ดดินเหนียวมีลักษณะเป็นแผ่นแบนยาว ประกอบด้วยแร่ดินเหนียวจึงทำให้อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักต่อแรงดึงดูดที่ผิวน้อยมาก ทำให้เม็ดดินเหนียวแสดงประจุไฟฟ้าลบออกมาที่บริเวณผิวจึงทำให้มีความสามารถดูดโมเลกุลของน้ำเข้ามารวมได้ทำให้เม็ดดินไม่หลุดออกจากกันได้ง่าย ทำให้ต้านทานต่อการกัดเซาะเนื่องจากการไหลจากกระแสน้ำได้เป็นอย่างดีซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับความชื้นในดิน การพังทลายของดินประเภทนี้จะพบในลักษณะที่มีการเคลื่อนตัวเป็นแนวโค้งรูปอาร์กทรงกระบอกดังภาพที่ 18 เป็นส่วนใหญ่



ภาพที่ 18 การพังทลายของลาดดินสำหรับดินที่มีความเชื่อมแน่น

ที่มา : Yun (2006)

10.6 ลักษณะการพังทลายของลาดดิน

ลักษณะการพังทลายของดินถูกจำแนกเป็นประเภทต่างๆ โดย Varnes (1978) ดังนี้

10.6.1 การร่วงหล่น (falls) เป็นรูปแบบของการเคลื่อนตัวของมวลวัสดุที่เป็นกลุ่มก้อน หรือเป็นก้อนหินร่วงหล่นลงมาจากหน้าผา มีอัตราการเคลื่อนที่มากกว่า 3×10^{-3} ม./วินาที

10.6.2 แบบกลิ้งไปข้างหน้า (topples) เป็นรูปแบบของการเคลื่อนตัวต่อเนื่องกลายเป็นแบบร่วงหล่น (falls) หรือแบบเลื่อนไถล (slides) ได้ต่อไป

10.6.3 แบบเลื่อนไถล (slides) เป็นรูปแบบของการเคลื่อนพังของมวลวัสดุในรูปแบบของการเลื่อน

10.6.4 แบบเคลื่อนตัวขยายตัวไปด้านข้าง (lateral spreads) มีลักษณะของการเคลื่อนตัว เป็นการขยายตัวด้านข้างของมวลวัสดุ การเคลื่อนที่แบบนี้มักพบในดินประเภท sensitive silt and clay ที่มีการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นทันทีทันใดด้วยอัตราการเคลื่อนที่ระหว่าง 3×10^{-3} ม./วินาที แต่ถ้าพบในชั้นหิน อัตราการเคลื่อนที่จะน้อยกว่า 3×10^{-3} ม./วินาที

10.6.5 แบบไหล (flows) การเคลื่อนตัวแบบไหล มักพบในวัสดุที่ไม่มีการยุบอัดตัว มีลักษณะการเคลื่อนตัวในรูปแบบของการไหลของของเหลวที่มีความหนืดขนานกับแนวลาดเดิม

10.6.6 แบบผสม (complex) มีลักษณะของการเคลื่อนตัวที่ประกอบด้วยหลายรูปแบบรวมกัน เช่น รูปแบบของการพังทลายลาดดินเป็นแบบผสมที่ประกอบด้วย rock slide, rock fall และ debris flow

10.7 การเกิดธารน้ำเนื่องจากการกัดเซาะของน้ำใต้ดิน

การพังทลายลาดดินเนื่องจากน้ำใต้ดินเกิดขึ้นจากการไหลของน้ำใต้ดินผ่านเม็ดดิน โดยการไหลของน้ำใต้ดินทำให้เกิดหน่วยแรงเฉือนกระทำกับเม็ดดิน หากหน่วยแรงดังกล่าวมีขนาดสูงเกินกว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของเม็ดดินและแรงดันน้ำใต้ดินในมวลดินสูงจะทำให้เกิดการกัดเซาะเม็ดดินให้ไหลหลุดออกไปจนเป็นโพรง (piping) ก็จะทำให้เกิดการพัดพาเม็ดดินไปยังท้ายน้ำ

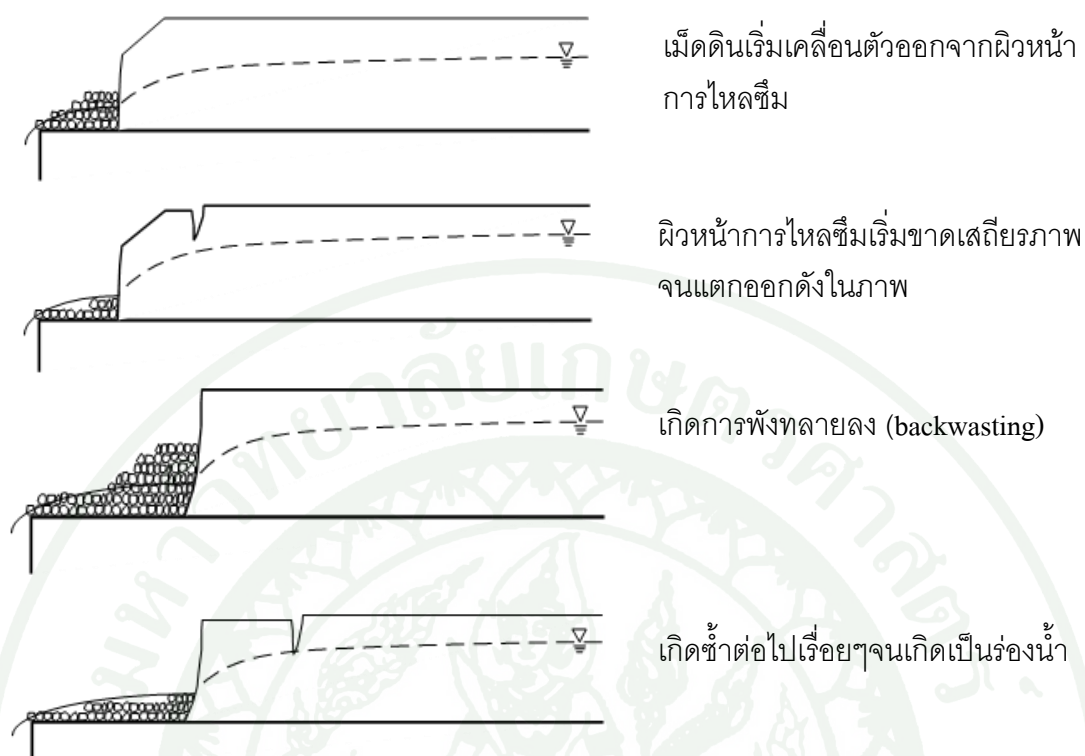
จนเกิดการทับถมของเม็ดดินบริเวณท้ายน้ำ (transport) จนเกิดความขาดเสถียรภาพของผิวลาดดิน ส่งผลให้ดินส่วนบนพังทลายลงมา (failure) ซึ่งลักษณะการพังทลายนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณการไหลซึม (seepage) ของน้ำใต้ดิน ความเร็วของกระแสน้ำใต้ดิน ขนาดและความลาดเอียงของชั้นน้ำใต้ดิน

การกัดเซาะด้วยการไหลซึม (seepage erosion) ถ้าการไหลซึมมีมากพอที่จะทำให้เกิดการกัดเซาะ (erosion) ขึ้นได้ดังนี้

ซึ่งระบบการเกิดการกัดเซาะด้วยการไหลซึมดังกล่าวสามารถที่จะแยกได้เป็น 2 ระบบที่สำคัญดังนี้

1. Groundwater Sapping เกิดขึ้นเมื่อระดับน้ำใต้ดิน (water table) มีระดับมากขึ้นจนเม็ดดินที่ผิวหน้าความลาดชัน (scarp) เกิดการขาดเสถียรภาพระหว่างเม็ดดินเนื่องจากแรงยก (lift force) และแรงผลัก (drag force) ของน้ำใต้ดินทำให้เม็ดดินหลุดออกจากผิวหน้าความลาดชันจนเกิดเป็นธารเล็กๆ (incipient incision)

2. Backwasting เกิดขึ้นเมื่อ groundwater sapping ทำให้ผิวหน้าความลาดชันเป็นธารรอยเล็กๆ ความมีเสถียรภาพของดินหน้าบนจะขาดเสถียรภาพเกิดการพังทลายแล้วสไลด์ตัวลงตามแรงโน้มถ่วงของน้ำหนักเม็ดดินในที่สุด



ภาพที่ 19 ขั้นตอนการกัดเซาะด้วยการไหลซึม

เกษม (2539) อธิบายกระบวนการเกิดการพังทลายของลาดดินแบ่งออกได้ 3 กระบวนการดังนี้

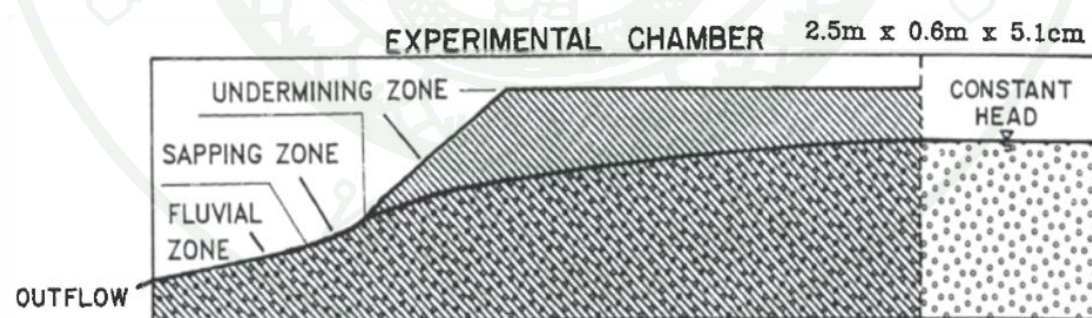
1. การแตกกระจายของเมื่อดิน (detachment) เป็นกระบวนการแรกของการพังทลายที่ทำให้เมื่อดินแตกเป็นอนุภาคนขนาดเล็ก และเมื่อดินขนาดเล็กๆเหล่านี้หลุดกระจายออกไป ซึ่งอาจจะหลุดจากเมื่อดินแล้วกระเด็นออกไปที่อื่น หรืออยู่ใกล้ๆบริเวณที่เกิดนั้นก็ได้

2. การเคลื่อนย้ายเมื่อดิน (transportation) เป็นกระบวนการที่สองของการพังทลายลาดดินสืบต่อจากกระบวนการแรก กล่าวคือ เมื่อเมื่อดินแตกกระจายเป็นอนุภาคนขนาดเล็กกระเด็นไปอุดรูพรุนของดินจะทำให้กระบวนการซึมน้ำผ่านผิวดินลดลง มีผลทำให้มีน้ำไหลผ่านหน้าผิวดินลงสู่ที่ต่ำมากขึ้น แต่อัตราการไหลจะรุนแรงมากขึ้นขึ้นอยู่กับความลาดชันและระยะทางของความลาดชันบริเวณลาดดิน อีกทั้งปริมาณน้ำที่ทำให้เกิดการไหลตามผิวดิน กระบวนการขั้นนี้ นอกจากเป็นการพัดพาขนาดเมื่อดินเล็กๆ ยังมีอิทธิพลทำให้ดินอาจพังทลายโดยกระบวนการขุดผิวดิน (scouring actions) จากน้ำที่ไหลผ่านหน้าผิวดินอีกด้วย

3. การทับถม (deposition) เป็นกระบวนการสุดท้ายของการพังทลายของดิน กล่าวคือเป็นกระบวนการที่อนุภาคดินขนาดต่างๆ ตกตะกอนตามแอ่งน้ำหรือลำธาร สาเหตุอันสำคัญก็คืออัตราความเร็วของกระแสน้ำลดลงและหยุดนิ่ง ทำให้อนุภาคดินขนาดใหญ่ตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก (gravity) ส่วนอนุภาคดินขนาดเล็กก็จะเกาะตัวกันเองด้วยแรงประจุพอมีอนุภาคขนาดใหญ่ที่ทำให้แรงโน้มถ่วงของโลกมีอิทธิพลดึงดูดลงมาได้ แล้วจะตกตะกอนอีกต่อหนึ่ง

Howard and McLane III (1988) ได้ทำการทดลองการไหลซึมเนื่องจากน้ำใต้ดินแบบ 2 มิติ โดยแบ่งพื้นที่การทดลองเป็น 3 เขต

1. Undermining Zone คือ บริเวณนี้ตะกอนจะแห้ง ซึ่งน้ำหนักของตะกอนบริเวณนี้จะทำให้เกิด Backwasting
2. Sapping Zone คือ บริเวณพื้นที่ผิวเล็กๆที่อยู่ท้ายด้านเหนือน้ำของการไหลออกมาของการไหล ซึ่งในบริเวณนี้จะมีการไหลซึมมาก การกัดเซาะจะเกิดขึ้นในบริเวณนี้
3. Fluvial Zone คือ บริเวณที่อยู่ท้ายน้ำจาก sapping zone ไป ซึ่งในบริเวณนี้การไหลซึมจะน้อยและการพัดพาตะกอน (fluvial process) จะเกิดในบริเวณนี้



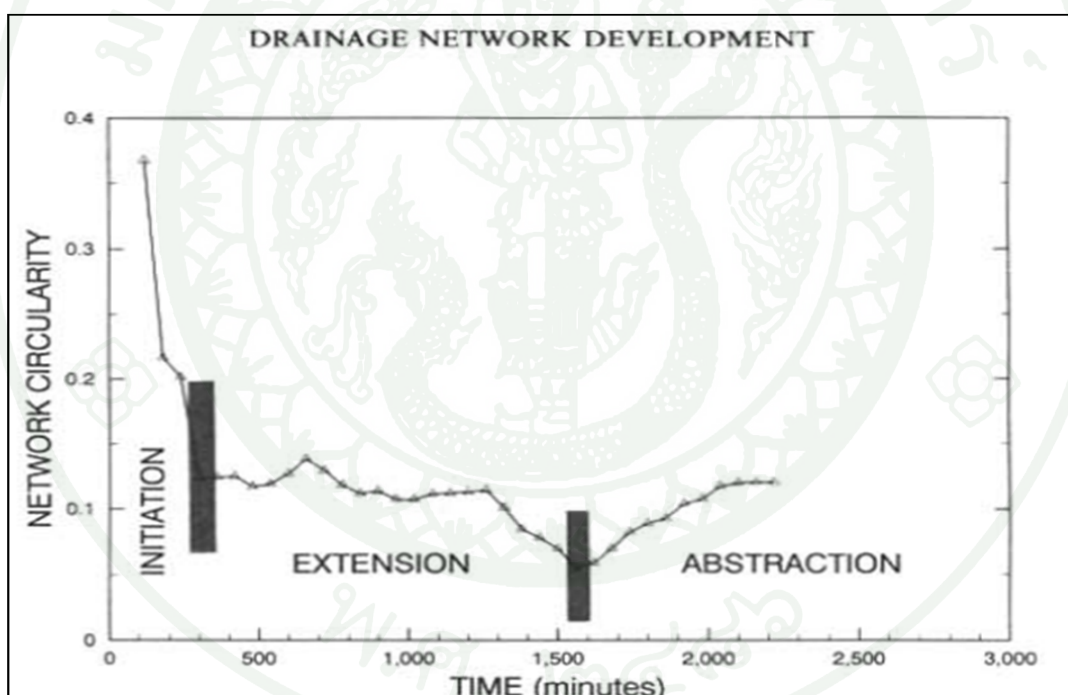
ภาพที่ 20 การแบ่งโซนในการทดลองการกัดเซาะเนื่องจากการไหลซึมแบบสองมิติ

ที่มา : Howard (1988)

Gomez and Mullen (1991) ได้อธิบายการพัฒนาธารน้ำโดยใช้ทฤษฎีความเป็นวงกลม (circularity) โดยที่ค่าความเป็นวงกลมของธารน้ำขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของธารน้ำที่เกิดขึ้นจากการกัดเซาะเนื่องจากการไหลซึมของน้ำใต้ดิน โดยที่ค่าความเป็นวงกลมของธารน้ำต่ำจะทำให้

โอกาสการพัฒนาธารน้ำแยกเป็นสองทางมากขึ้น และแบ่งการพัฒนาโครงข่ายธารน้ำเป็น 3 ระยะ ดังนี้

1. Initiation คือ ระยะที่เกี่ยวข้องกับการขยายแตกออกของธารน้ำอย่างรวดเร็วในตอนต้น
2. Extension คือ ระยะเวลาของการขยายแตกออกทางด้านข้างของธารน้ำและมีการแยกตัวของธารน้ำแยกออกเป็นสองทาง
3. Abstraction คือ ระยะที่เกี่ยวข้องกับการขยายแตกออกของธารน้ำอย่างต่อเนื่อง และเกิดการสลายตัวของธารน้ำ



ภาพที่ 21 การแบ่งช่วงเวลาในการพัฒนาของธารน้ำ

ที่มา : Gomez and Mullen (1991)

ความเป็นวงกลม คือ ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นรอบวงของธารน้ำที่ถูกกัดเซาะกับพื้นที่ของธารน้ำที่ถูกกัดเซาะ

$$\text{Network Circularity} = \frac{A}{\pi \left(\frac{P}{2\pi} \right)^2} \quad (10)$$

เมื่อ $A =$ พื้นที่ธารน้ำที่ถูกกักเซาะ ซม.²

$P =$ ความยาวเส้นรอบวงที่ถูกกักเซาะ ซม.

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Howard and McLane III (1988) ได้ทำการทดลองในอ่างทดลองแบบ 2 มิติ ซึ่งแบ่งเป็น 3 โซน ดังนี้ undermining zone , sapping zone , fluvial zone และนำทฤษฎีความสมดุลของโมเมนต์แรงเพื่อไปประยุกต์ใช้อธิบายรูปแบบและอัตราการเคลื่อนตัวของตะกอนซึ่งเกิดจากการกัดเซาะของชั้นทรายและวิเคราะห์อัตราการสึกกร่อน ซึ่งเป็นการรวมกันระหว่างแบบจำลองการไหลของน้ำใต้ดิน (groundwater flow model) และความสัมพันธ์ของการเคลื่อนตัวของตะกอน (sediment transport relationship) ซึ่งเป็นตะกอนแบบไม่มีความเชื่อมแน่น (cohesionless sediment) ซึ่งความสมดุลของโมเมนต์แรงจะเป็นตัวกำหนดอัตราการกัดเซาะของชั้นดิน จากการทดสอบพบว่าแบบจำลองดังกล่าวมีความสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากห้องปฏิบัติการได้เป็นอย่างดี

Gomez and Mullen (1991) ทำการศึกษาการพัฒนาธารน้ำโดยการกัดเซาะของชั้นทรายบริเวณท้ายน้ำ ความกว้างธารน้ำที่เพิ่มขึ้นและการพังทลายของชั้นทรายในห้องปฏิบัติการโดยการทดลองนี้ใช้ทรายละเอียด (fine sand) ในการทดสอบ โดยควบคุมอัตราการไหลบริเวณด้านเหนือน้ำและความลาดชันของอ่างทดลองพบว่าการพัฒนาธารน้ำจะเกิดขึ้นแบบค่อยเป็นค่อยไป ซึ่งในการศึกษานี้ได้ใช้ความเป็นวงกลม (circularity) ในการอธิบายลักษณะของธารน้ำที่เกิดขึ้น และได้แบ่งลักษณะการพัฒนาโครงข่ายของธารน้ำเป็น 3 ช่วง คือช่วง initiation, extension และ abstraction ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ พบว่าธารน้ำเกิดการแยกเป็นสองทางหลายๆธาร ทำให้พื้นที่และความยาวเส้นรอบวงของธารน้ำเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อเวลาผ่านไปธารน้ำที่แยกตัวออกเกิดพังทลายรวมกลับมาเป็นธารเดียวทำให้พื้นที่ธารน้ำที่ถูกกัดเซาะลดลงส่งผลให้เกิดช่วง abstraction เกิดขึ้น

Izumi and Parker (2000) ได้ทำการศึกษาลักษณะโครงข่ายของธารน้ำโดยจำลองลักษณะการไหลผิวดิน และใช้ดินที่มีความเชื่อมแน่น มาทำการวิเคราะห์ทิศทางการไหลของน้ำในแนวระนาบพิกัด (x,y) ในการศึกษาครั้งนี้ได้นำเสนอรูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงเส้น (linear stability analysis) พบว่าผลของดินที่มีความเชื่อมแน่นจะส่งผลต่อการพังทลายของธารน้ำเป็นหลัก และที่บริเวณความลึกวิกฤต (Froude-critical depth) จะเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดธารน้ำ

Mizushima *et al.* (2007) ได้เสนอกระบวนการพัฒนาของธารน้ำ การแยกของธารน้ำจะแยกออกเป็นสองหรือมากกว่าสองสาขา ลักษณะการพัฒนาของธารน้ำเช่นนี้จะมีโอกาสพัฒนาเกิดขึ้น

ในระยะเริ่มต้น ในการศึกษาครั้งนี้ได้นำเสนอในรูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการเกิดธารน้ำแข็งออกเป็นสองทาง การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงเส้นจะใช้กับความลึกเฉลี่ยของการไหลในสมการเชิงโมเมนตัม และสมการเอกซ์เนอร์ (Exner equation) สำหรับการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของท้องน้ำ การวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ลักษณะธารน้ำที่เกิดขึ้นจะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอนเมื่อเป็นการไหลภายใต้สภาวะวิกฤต โดยที่การแยกธารน้ำออกเป็นสองทางจะมีโอกาสเกิดขึ้นเมื่อน้ำไหลมายังบริเวณหัวธารน้ำลดลง

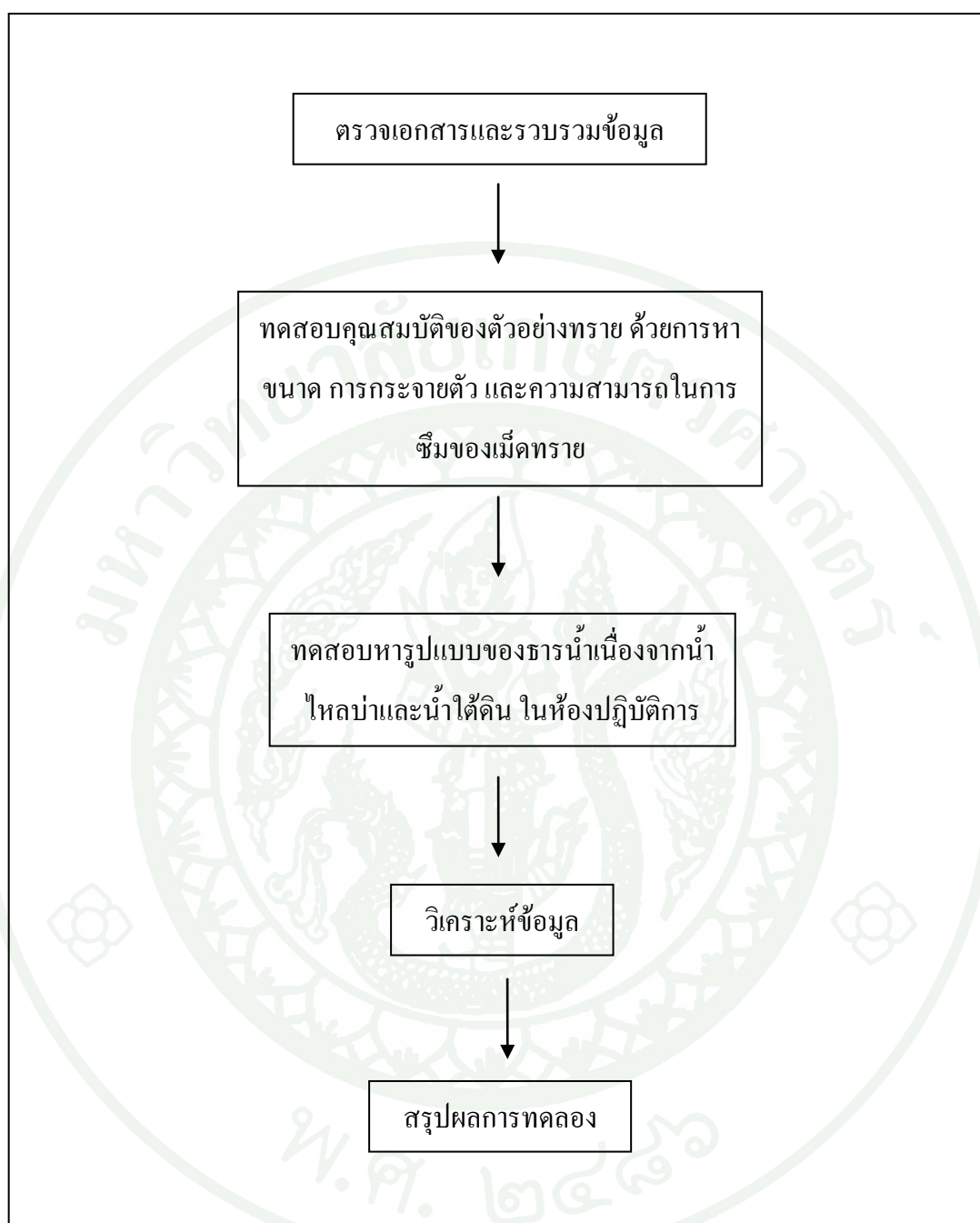
Pornprommin and Izumi (2010) ได้ศึกษาการเริ่มต้นของการเกิดการกัดเซาะด้วยการไหลซึมในท้องตลิ่งและใช้การวิเคราะห์การมีเสถียรภาพเชิงเส้น (linear stability analysis) ในการวิเคราะห์ลักษณะของรูปร่างขอบธารน้ำเนื่องจากการกัดเซาะด้วยการไหลซึม (diffusion-like function) ซึ่งเกี่ยวข้องกับอัตราการถดถอย (retreat rate) โดยทำการทดลองในอ่างทดลองแบบ 3 มิติ และใช้เม็ดพลาสติกสังเคราะห์ในการทดลองและควบคุมอัตราการไหลด้านเหนือหน้าของอ่างทดลอง นอกจากนี้ยังหาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะรูปร่างของชั้นดินที่ถูกกัดเซาะเนื่องจากการไหลซึมกับแรงยกและแรงลาก (driving force) ของน้ำใต้ดิน ซึ่งเป็นรูปแบบสมการเส้นตรง จากการทดลองพบว่าความสูงของชั้นตะกอนเพิ่มขึ้นทำให้การพังทลายลาดดินมีขนาดใหญ่ขึ้นจึงเกิดความกว้างธารน้ำมากขึ้น และความลาดชันสูงขึ้นทำให้การไหลของน้ำใต้ดินไหลไปทางท้ายน้ำมากขึ้นจึงทำให้มีโอกาสเกิดธารน้ำเล็กๆบริเวณท้ายน้ำเกิดขึ้น

Pornprommin *et al.* (2010) ได้ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อวิเคราะห์การกัดเซาะด้วยการไหลซึม (seepage erosion) ซึ่งส่งผลต่อการเกิดรูปร่างลักษณะของธารน้ำ โดยการปรับเปลี่ยนความสูงของชั้นตะกอนและความลาดชันของอ่างทดลองและใช้ทรายซึ่งมีลักษณะเป็นทรายหยาบ จากผลการทดลองพบว่า เมื่อความสูงของชั้นตะกอนเพิ่มขึ้นทำให้เกิดความกว้างของธารน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักตะกอนทำให้แรงลากและแรงยก (driving force) ของน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้นและเมื่อปรับความลาดชันของอ่างทดลองเพิ่มขึ้น พบว่าความกว้างของธารน้ำเพิ่มขึ้นเหมือนกรณีการเพิ่มความสูงของชั้นตะกอน นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นบนความลาดชันเท่ากันทำให้ความกว้างธารน้ำเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่การเกิดธารน้ำแยกเป็นสองทาง (bifurcation) พบว่า เมื่อดทรายหยาบทำให้เกิดธารน้ำแยกเป็นสองทางเกิดขึ้น ซึ่งลักษณะการไหลของน้ำใต้ดินและความต้านทานการพังทลายของชั้นตะกอนของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบมีผลต่อการเกิดธารน้ำแยกเป็นสองทาง ในการทดลองครั้งนี้ได้ตั้งสมมติฐานว่าระดับน้ำใต้ดินสูงขึ้นส่งผลให้เกิดธารน้ำแยกเป็นสองทางมากขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อ่างทดลองรูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 เซนติเมตร สูง 28.5 เซนติเมตร
2. เม็ดทรายขนาด D_{50} เท่ากับ 0.49 , 0.30 และ 0.18 มิลลิเมตร
3. แท่งอะคริลิครูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 28 เซนติเมตร สูง 17.5 เซนติเมตร เพื่อใช้ในการจำลองธารน้ำเริ่มต้น
4. กล้องถ่ายภาพดิจิทัลและอุปกรณ์ตั้งกล้อง
5. เครื่องคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 22 วิธีการศึกษา

วิธีการ

1. ทบทวนเอกสารและรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่ผ่านมา

2. เตรียมชุดเครื่องมือทดสอบโดยได้ดัดแปลงเครื่องมือทดสอบจากภาควิการะเหยของน้ำ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 เซนติเมตร สูง 28.5 เซนติเมตร ซึ่งใช้ในการทดลองรูปแบบของธารน้ำเนื่องจากน้ำไหลเบาและน้ำใต้ดิน

3. ทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่างทราย

3.1 การทดสอบหาขนาดมวลกละของดิน (Sieve Analysis)

การหาขนาดของเม็ดดินโดยวิธีการร่อนตะแกรง จะใช้ตะแกรงที่มีขนาดช่องเปิดแตกต่างกันออกไป การหาขนาดและการกระจายของเม็ดดินอาจทำได้ด้วยกันหลายวิธี แต่ที่นิยมแต่ที่นิยมปฏิบัติกันแพร่หลาย คือ วิธีร่อนผ่านตะแกรง (sieve analysis) มักใช้กับดินที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.075 มม. ขึ้นไป วิธีตกตะกอนโดยใช้ไฮโดรมิเตอร์ หรือหลอดดูด (Pipette) วัดการตกตะกอนเหมาะสมสำหรับเม็ดดินขนาด 0.2 มม. ถึง 0.0002 มม. ทั้งสองวิธีดังกล่าวอาจใช้ร่วมกันในการวิเคราะห์ขนาดของตัวอย่างเดียวกันได้ การทดสอบหาขนาดกละของเม็ดทรายสามารถอ่านได้จากกราฟการกระจายของขนาดเม็ดดิน (grain size distribution curve) ตามภาคผนวก ก ซึ่งผลการทดสอบหาขนาดกละของเม็ดทรายดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าการทดสอบหาขนาดกละของเม็ดทราย

ชนิดของเม็ดทราย	10 เปอร์เซนต์ของเม็ดทราย ที่ผ่านตะแกรง	50 เปอร์เซนต์ของเม็ดทราย ที่ผ่านตะแกรง
A	0.30	0.49
B	0.12	0.30
C	0.07	0.18

ตารางที่ 6 ค่าการทดสอบหาลักษณะขนาดผลของเม็ดทราย

ชนิดของเม็ดทราย	C_u	C_c
A	1.77	1.00
B	3.17	0.88
C	3.29	0.62

จากตารางที่ 6 ค่าการทดสอบหาลักษณะขนาดผลของตัวอย่างทรายทั้ง 3 ชนิด พบว่าค่า C_u มีค่าน้อยกว่า 6 และค่า C_c มีค่าน้อยกว่า 1 จึงสามารถสรุปได้ว่าเม็ดทรายที่มีลักษณะที่มีขนาดผลกันไม่ดี (Poorly Graded) เป็นประเภทเม็ดทรายที่มีขนาดสม่ำเสมอ (Uniform Graded)

3.2 การทดสอบความสามารถในการซึมได้ของเม็ดดิน (Soil Permeability Test)

การทดสอบความสามารถในการซึมได้ของเม็ดดิน โดยใช้วิธีระดับน้ำคงที่ (constant head test) เป็นวิธีที่นิยมใช้ทดลองในดินประเภทกรวด ทราย ดินที่มีตะกอนปนเล็กน้อยหรือไม่มีตะกอนปนเลยมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้ปานกลางถึงสูง ความชื้นน้ำของดินเป็นคุณสมบัติที่สำคัญซึ่งเกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของดินหลายอย่าง เช่น การรั่วซึมของน้ำที่เก็บกัก ความมั่นคงของลาดดิน ซึ่งเกี่ยวข้องกับแรงดันน้ำทั้งน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน อัตราการทรุดตัวของชั้นดินเกิดจากน้ำหนักสิ่งก่อสร้าง ความมั่นคงและปริมาณน้ำที่ไหลเข้าบ่อที่ขุดเพื่อก่อสร้างฐานราก ซึ่งการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านได้ของเม็ดทรายในการศึกษาครั้งนี้ ใช้วิธีความดันคงที่และใช้ขนาดเม็ดทราย จากขั้นตอนการทดลองและผลการทดลองตามภาคผนวก ค ได้ค่าความชื้นน้ำตามภาพตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ค่าการทดสอบความชื้นน้ำของเม็ดทราย

ค่าการทดสอบความชื้นน้ำของเม็ดทราย		
ชนิดของเม็ดทราย	วิธีความกดดันคงที่ (cm/sec)	วิธีใช้น้ำของเม็ดทราย (cm/sec)
A	1.7610	0.0900
B	0.2090	0.0144
C	7×10^{-5}	0.0049

จากผลการคำนวณตารางที่ 7 ค่าความสามารถในการซึมได้ของเม็ดดิน (Soil Permeability Test) ด้วยวิธีความกดดันคงที่กับวิธีความกดดันคงที่ พบว่าเกิดค่าความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณ เป็นเพราะในระหว่างทำการทดสอบ เกิดช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ซึ่งจะเป็ช่องว่างที่เป็นที่อยู่ของน้ำและอากาศภายใน ส่งผลทำให้น้ำที่ระบายออกมานั้นจะมีเม็ดทรายออกมาด้วย ดังแสดงในภาพที่ 23 โดยที่วิธีที่ใช้ขนาดของเม็ดทรายในการคำนวณหาค่าความซึมได้ของเม็ดดินเป็นวิธีที่มีความน่าเชื่อถือกว่าวิธีความกดดันคงที่



ภาพที่ 23 ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีทดสอบความกดดันคงที่

4. การทำการทดลองเพื่อหาความหนาชั้นทรายและความระดับน้ำที่เหมาะสม

ก่อนที่จะเริ่มทำการทดลองนั้นได้ทำการทดลองสำหรับกรณีศึกษาการทดลองเริ่มต้น (Test run) ซึ่งได้กำหนดความหนาชั้นทราย 2 ระดับ คือ ความหนาชั้นทราย 5 เซนติเมตร และ 10 เซนติเมตร เนื่องจากระดับความหนาชั้นทราย 10 เซนติเมตรเป็นความหนาชั้นทรายที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดการพัฒนารูปร่างน้ำได้อย่างชัดเจน และกำหนดระดับน้ำเท่ากับ 17 เซนติเมตร เพราะเป็นระดับน้ำที่สูงที่สุดของถาดการทดลอง สำหรับกรณีศึกษาการทดลองเริ่มต้น (Test run) ผลที่ได้นั้นพบว่า มีลักษณะของรูปร่างน้ำที่ไม่ดี จึงไม่นำมาวิเคราะห์ผลการทดลอง

5. การทดลองรูปแบบของธารน้ำ

การทดลองรูปแบบของธารน้ำเนื่องจากน้ำไหลบ่าและน้ำใต้ดิน โดยจะใช้ทรายตัวอย่างที่มีขนาดสม่ำเสมอ 3 ชนิด คือ ทรายที่มีขนาด $D_{50} = 0.49$ มิลลิเมตร (A) , $D_{50} = 0.30$ มิลลิเมตร (B) และ $D_{50} = 0.18$ มิลลิเมตร (C) ซึ่งได้นำภาควัดการระเหยมาดัดแปลงสำหรับการทดลอง แล้วทำการเจาะรูตรงกลางของภาควัดเพื่อให้สามารถให้น้ำระบายไหลออกได้ จากนั้นได้ทำการปรับแก้ระดับขาตั้งภาควัดให้อยู่ในระดับที่สมดุล โดยได้ทำการทดลองทั้งหมด 11 การทดลอง ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 8

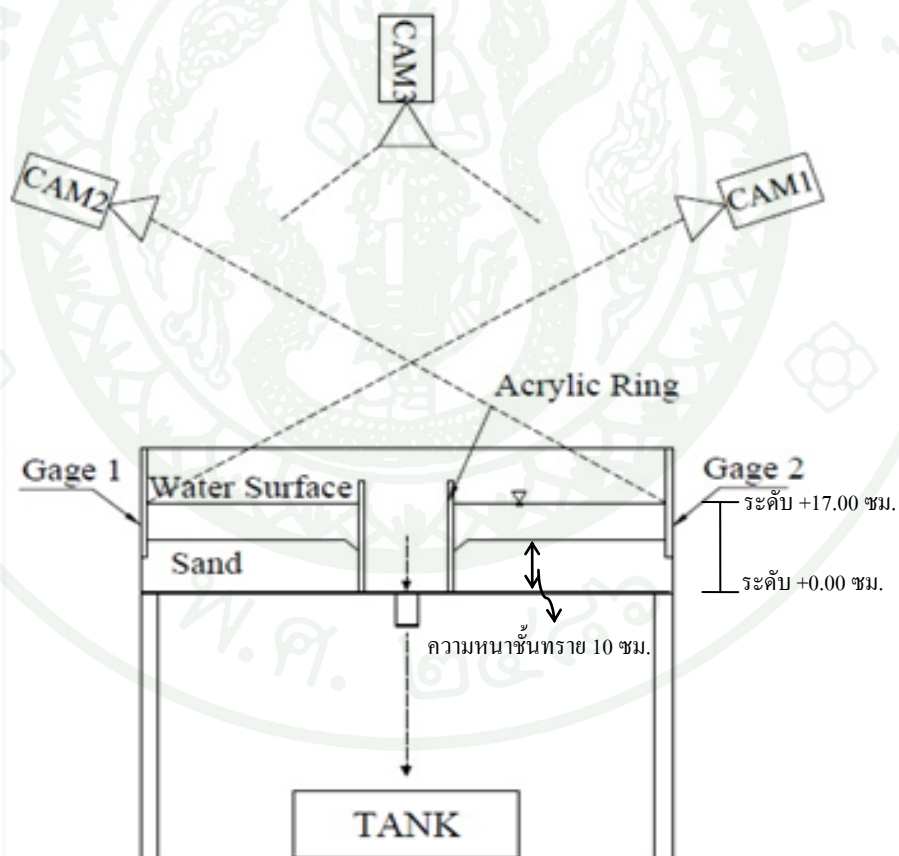
ตารางที่ 8 จำนวนการทดลอง

ชนิด	D_{50}	ความหนาชั้นทราย (ซม.)	ระดับน้ำ (ซม.)	หมายเหตุ
A-0	0.49	10	15	Test run
B-0	0.30			
A-1		10		
A-2	0.49			17
A-3		5		
B-1		10		
B-2	0.30			5
B-3		5		
C-1		10		
C-2	0.18			5
C-3		5		

กรณีศึกษาการทดลองเริ่มต้น (Test run) โดยจะตัวอย่างทรายชนิด A-0 และ B-0 มาทำการทดลอง ซึ่งใช้ภาควัดทดลองแล้วทำการปิดกั้นเพื่อใช้ในการวัดระดับน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 24 ความหนาชั้นทรายและระดับน้ำ จะแสดงในตารางที่ 8 ซึ่งเมื่อสิ้นสุดการทดลองจะไม่นำมาผลใช้ จะแสดงผลการคำนวณกรณี test run ไว้ในภาคผนวก จ



ภาพที่ 24 การเตรียมอุปกรณ์กรณีตัวอย่างทราย A-0 และ B-0



ภาพที่ 25 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง



ภาพที่ 26 ทรายตัวอย่างที่มีขนาด $D_{50} = 0.49$ มิลลิเมตร (A)



ภาพที่ 27 ทรายตัวอย่างที่มีขนาด $D_{50} = 0.30$ มิลลิเมตร (B)



ภาพที่ 28 ทราชตัวอย่างที่มีขนาด $D_{50} = 0.18$ มิลลิเมตร (C)

การทดลองรูปแบบของธารน้ำเนื่องจากน้ำไหลป่า มีขั้นตอนดำเนินการทดลองดังต่อไปนี้

5.1 นำถาดทดลองมาวางบนโต๊ะ โดยให้ความสูงของโต๊ะสามารถทำการทดลองได้สะดวก จากนั้นทำการปรับแก้ระดับของขาตั้งถาดทดลองให้มีระดับสมดุล ดังแสดงในภาพที่ 30 และเจาะรูตรงกลางถาดด้วยท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว และมีความยาว 5 เซนติเมตร เพื่อให้ น้ำไหลและเม็ดทรายระบายลงมาถึงด้านล่าง ดังแสดงในภาพที่ 29



ภาพที่ 29 เจาะรูตรงกลางถาดทดลองเพื่อให้ น้ำและเม็ดทรายระบายลงมา



ภาพที่ 30 นำถาดทดลองมาวางบนโต๊ะ

5.2 ทำการจำลองธารน้ำเริ่มต้นโดยนำแท่งอะคริลิกรูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 28 เซนติเมตร สูง 17.5 เซนติเมตร บริเวณกึ่งกลางถาด โดยที่แท่งอะคริลิกรูปวงกลมจะมีรูเพื่อให้ น้ำสามารถซึมออกมายังชั้นทราย ดังแสดงในภาพที่ 31 จากนั้นทำการเททรายชนิด A และ B ใส่อ่างทดลองโดยให้ระดับชั้นทรายหนา 5 และ 10 เซนติเมตร ทั้งสองชนิด ดังแสดงในภาพที่ 32



ภาพที่ 31 แท่งอะคริลิกรูปวงกลม



ภาพที่ 32 เทตัวอย่างทรายให้มีระดับ 5 และ 10 เซนติเมตร

5.3 ปล่อน้ำบริเวณกึ่งกลางถาดโดยให้มีอัตราการไหลคงที่ ให้มีระดับน้ำเท่ากับ 17 เซนติเมตร จากนั้นทำการตัดฟอง ฟุ้งที่มากับตัวอย่างทรายออก ก่อนที่จะปล่อน้ำนั้นต้องทำการปิดท่อระบายน้ำก่อน ดังแสดงในภาพที่ 33

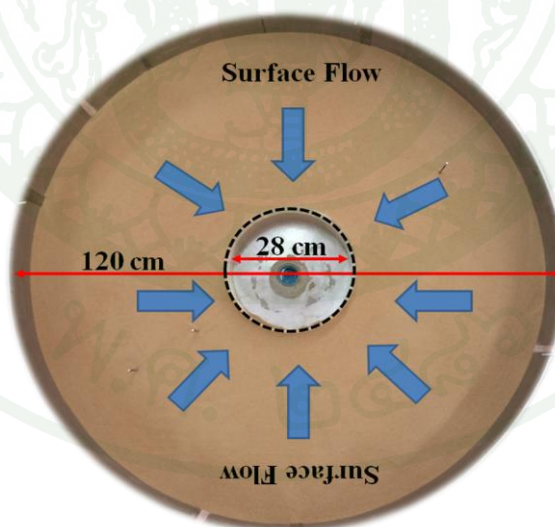


ภาพที่ 33 ปล่อน้ำในอัตราการไหลที่คงที่

5.4 ก่อนที่จะทำการทดลองต้องปรับระดับผิวของชั้นทรายให้มีแนชด์ว่าระดับชั้นทรายมีระดับที่สม่ำเสมอแล้ว จากนั้นค่อยๆทำการดึงแท่งอะคริลิกที่ได้จำลองธารน้ำเริ่มต้นออกอย่างช้าๆ เพื่อให้ความลาดชันธารน้ำมีความสมมาตร ดังแสดงในภาพที่ 34 แล้วทำการเปิดท่อระบายน้ำออก ทิศทางการไหลของน้ำจะไหลในแนวรัศมี ดังแสดงในภาพที่ 35



ภาพที่ 34 ดึงแท่งอะคริลิก



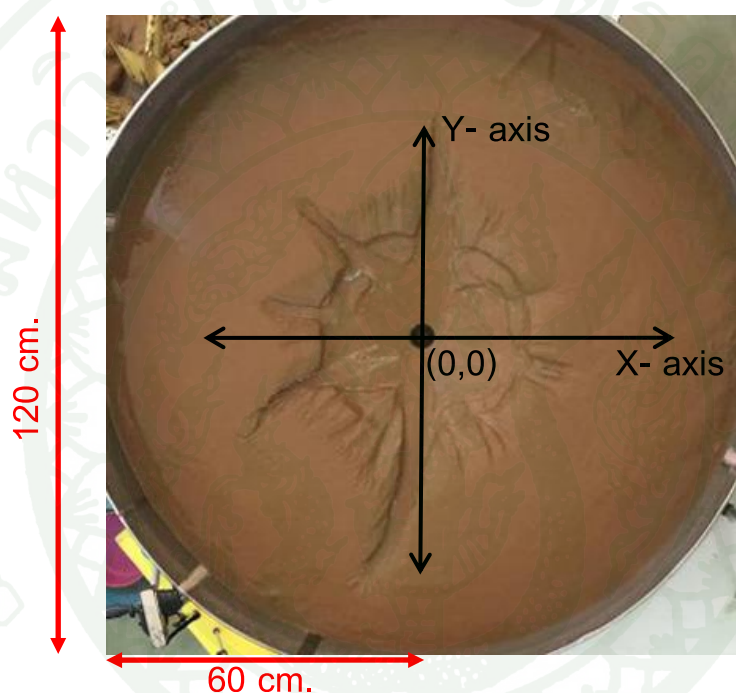
ภาพที่ 35 ทิศทางการไหลของน้ำในแนวรัศมี

5.5 ติดตั้งกล้องวิดีโอ 3 ตัว โดยที่กล้องที่ 1 และ 2 เป็นตำแหน่งของการแถบวัดระดับน้ำ ที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ส่วนกล้องตัวที่ 3 เป็นตำแหน่ง top view ดังแสดงในภาพที่ 25

5.6 เมื่อน้ำระบายลงถึงหมดจึงหยุดทำการทดลองได้

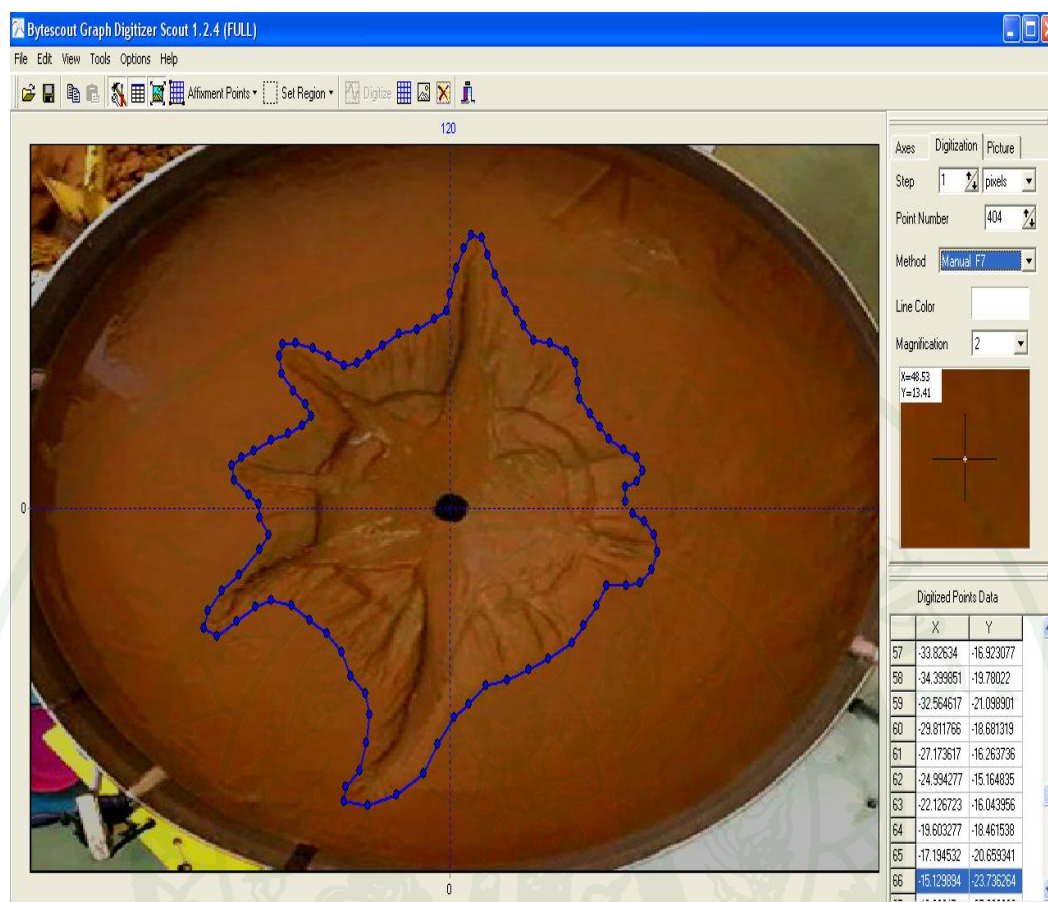
6. วิเคราะห์ผลการทดลอง

6.1 การวิเคราะห์ข้อมูลลักษณะรูปแบบของธารน้ำโดยใช้ระบบพิกัด (x,y) ในการระบุตำแหน่งของการวัดดังแสดงในภาพที่ 36



ภาพที่ 36 การระบุพิกัดตำแหน่ง (x,y) ในการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลในการทดลอง

6.2 ทำการบันทึกภาพการพัฒนาธารน้ำ ต่อจากนั้นนำภาพการเกิดธารน้ำและการพัฒนาธารน้ำทุกๆ 1 วินาที แล้วนำไปปรับภาพและดิจิทัลไทม์ภาพการทดลองดังแสดงในภาพที่ 37 เพื่อวิเคราะห์ลักษณะของรูปแบบธารน้ำ การขยายตัวของขอบลาดชันธารน้ำ ความยาวเส้นรอบวงและพื้นที่ของธารน้ำที่ถูกกักเซาะ ซึ่งนำไปสู่การวิเคราะห์ความเป็นวงกลมของธารน้ำต่อไป



ภาพที่ 37 การดิจิทัลข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์ผลการทดลอง

7. การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์

7.1 ค่ารัศมีขอบลาดชันวงกลมเฉลี่ย (R_{avg}) พิจารณาได้จากเมื่อระดับลดลง ณ จุดหนึ่ง จะสามารถเห็นขอบวงกลมของธารน้ำได้อย่างชัดเจน โดยที่ค่ารัศมีขอบลาดชันวงกลม (R_c) ที่ระดับความลึกวิกฤต (Froude Critical Depth) ดังสมการที่ 11

$$R_{avg} = \frac{\sum d\theta_i R_i}{2\pi} \quad (11)$$

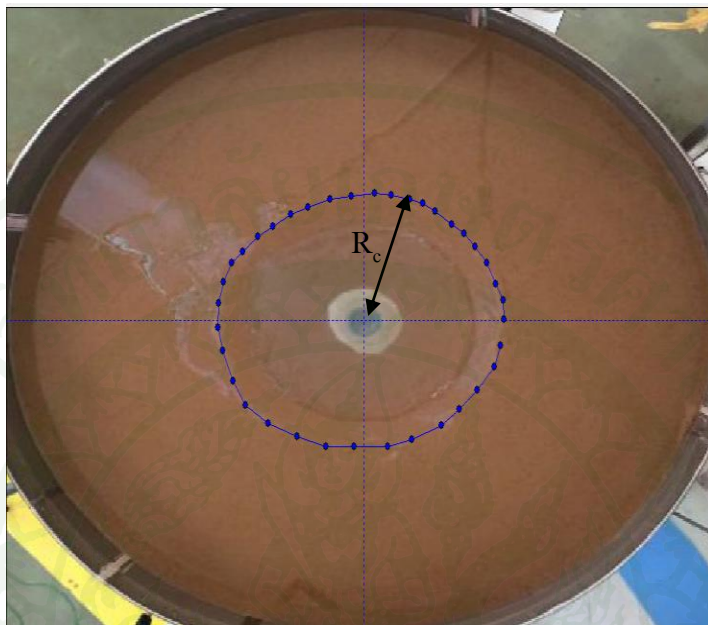
โดยที่

$$R_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$$

และ

$$d\theta_i = \tan^{-1}\left(\frac{x_i}{y_i}\right)$$

เมื่อ

 R_i = รัศมีในแต่ละช่วงเวลา


ภาพที่ 38 รัศมีขอบลาดชันวงกลม (R_c)

7.2 ความเป็นวงกลม (Network Circularity) คือ ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นรอบวงของธารน้ำที่ถูกกักเซาะ (P) กับพื้นที่ของธารน้ำที่ถูกกักเซาะ (A) โดยที่ค่าความเป็นวงกลมจะเท่ากับ 1 และถ้าน้อยกว่า 1 ก็จะทำให้ความเป็นวงกลมของธารน้ำนั้นลดลง ตามทฤษฎีของ Gomez และ Mullen (1991)

สำหรับการทดลองจะคำนวณหาพื้นที่ที่ธารน้ำที่ถูกกักเซาะหาได้จากสมการที่ 12

$$A = \sum \frac{d\theta \times R_{avg,i}^2}{2} \quad (12)$$

และเส้นรอบวงของธารน้ำที่ถูกกักเซาะหาได้จากสมการที่ 13

$$P = \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2} \quad (13)$$

7.3 ระดับความลึกวิกฤต (H_c) ในการคำนวณนั้นจะคำนวณหาจากการค่าระดับน้ำที่ขอบลาด (H_{pan}) และค่ารัศมีขอบลาดชันวงกลม (R_c) เมื่อมีการไหลแบบภายใต้วิกฤต (Subcritical Flow)

โดยที่จะใช้วิธีเบื้องต้นมาประมาณหาค่าด้วยวิธีขั้นบันไดโดยตรง (The direct step method) จะดัง
สมการที่ 14

$$H_c = \sqrt[3]{\frac{q_c^2}{g}} \quad (14)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} H_c &= \text{ระดับความลึกวิกฤต (Froude Critical Depth)} \\ q_c &= \text{อัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วยความกว้างในทิศทางรัศมี} \end{aligned}$$

ค่าพารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ ถ้ามีค่ามากกว่า 5 จะทำให้ลาดชันของ
ขอบวงกลมจะขาดเสถียรภาพและเริ่มเกิดธารน้ำขึ้น คือ

$$\frac{C_f R_c}{H_c} > 5$$

โดยที่

$$C_f = \left[8.1 \left(\frac{H}{K_s} \right)^{1/6} \right]^{-2} \quad (15)$$

เมื่อ

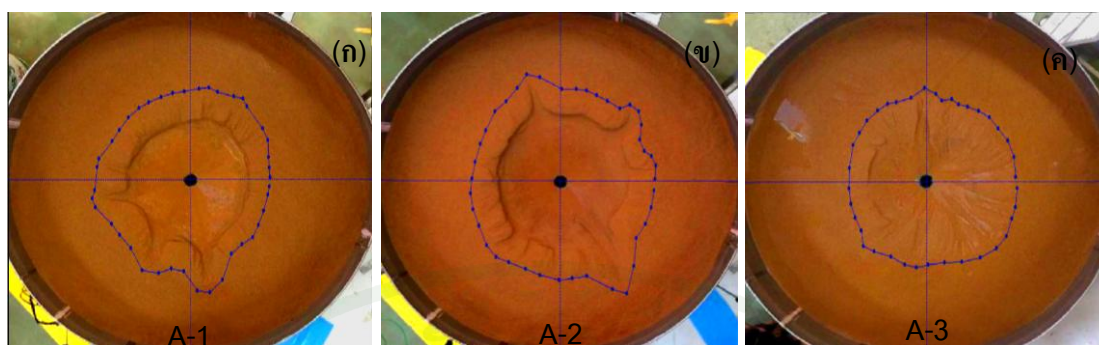
$$\begin{aligned} C_f &= \text{สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของลาด (friction coefficient)} \\ R_c &= \text{รัศมีลาดชันของขอบวงกลมที่ระดับความลึกวิกฤต} \\ H_c &= \text{ระดับความลึกวิกฤต (Froude Critical Depth)} \end{aligned}$$

ผลและวิจารณ์

ในการทำการทดลองมีตัวอย่างทรายทั้งหมด 3 ชนิด คือ ตัวอย่างทรายชนิด A และ B นั้นเป็นทรายที่ไม่มีความเชื่อมแน่น (non-cohesive sand) ตัวอย่างทรายชนิด C เป็นทรายที่มีความเชื่อมแน่น (cohesive sand) ในแต่ละตัวอย่างทรายทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง ครั้งที่ 1 และ 2 จะมีความหนาชั้นทราย 10 เซนติเมตร และครั้งที่ 3 มีความหนาชั้นทราย 5 เซนติเมตร จากการทดลองได้นำผลการทดลองมาวิเคราะห์รูปร่างลักษณะของธารน้ำ รัศมีขอบลาดชันวงกลมเฉลี่ย (R_{avg}) ความยาวเส้นรอบวง พื้นที่ร่องน้ำเพื่อนำไปหาค่าความเป็นวงกลมของธารน้ำ และความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นวงกลมของธารน้ำกับรัศมีขอบลาดชันวงกลมเฉลี่ย (R_{avg}) โดยผลการวิเคราะห์มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

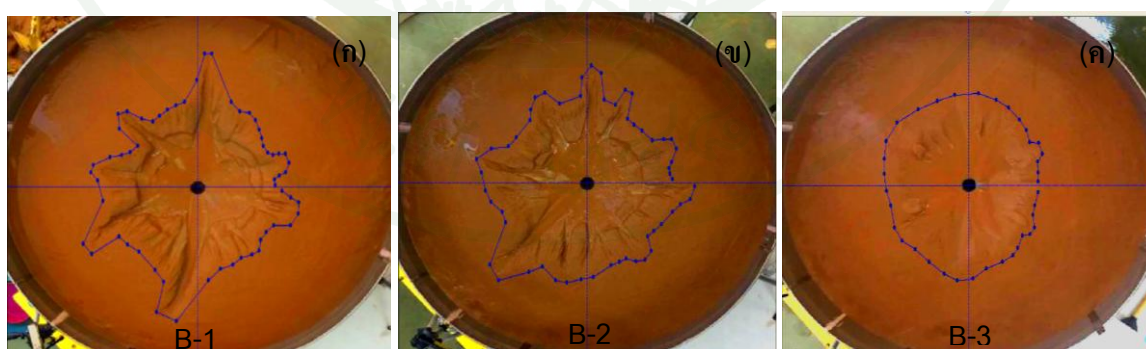
1. รูปร่างลักษณะของธารน้ำ

เมื่อเริ่มทำการทดลอง โดยการดึงแท่งอะคริลิกออก พบว่า ผิวระดับน้ำจะค่อย ๆ ลดลง และเป็นการไหลที่สม่ำเสมอ เนื่องจากการไหลภายในท่อระบายน้ำจะมีลักษณะเป็นการไหลเต็มท่อสังเกตได้ว่าไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนทราย เมื่อระดับน้ำลดลงถึงระดับหนึ่งจะสังเกตเห็นขอบวงกลมอย่างชัดเจนซึ่งเป็นระดับเดียวกันกับชั้นทราย ส่งผลทำให้เกิดเส้นโค้งน้ำดึงดูด (drawdown curve) ตรงบริเวณความลึกวิกฤต (Froude-critical depth) ที่ขอบลาดชันวงกลม และพบการเคลื่อนที่ของตะกอนอยู่ใกล้บริเวณลาดชันในขณะเดียวกันลาดชันจะเริ่มเกิดการขยายตัวและแตกออกทางด้านต้นน้ำ ซึ่งภายในไม่กี่วินาทีพบว่าที่บริเวณลาดชันจะเริ่มเกิดธารน้ำขนาดเล็กจำนวนมาก โดยที่บางธารน้ำที่ยังมีน้ำเหลืออยู่จะเกิดการพัฒนาขยายแตกออกเป็นธารน้ำขนาดใหญ่ เมื่อระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็วและการไหลบ่าของน้ำเริ่มหมดนั้น จะส่งผลทำให้เกิดการไหลซึมเนื่องจากน้ำได้ดินเป็นหลักโดยที่ขอบของลาดชันด้านบนเกิดการพังทลายและบริเวณลาดชันท้ายน้ำจะมีลาดชันที่สูงขึ้น เป็นผลให้ระยะของการพัฒนาของธารน้ำขนาดเล็กจะพัฒนาได้เพียงระยะสั้นๆ ดังนั้นระยะของการพัฒนาธารน้ำกับปริมาณน้ำไหลบ่ามีความสัมพันธ์กัน และเมื่อระดับน้ำลดลงจนหมดพบว่าขอบของลาดชันจะเกิดการพังทลายลดลง โดยที่กระบวนการทั้งหมดทางลักษณะสัญญาณวิทยาจะใช้เวลาประมาณหนึ่งนาทีก และลักษณะที่น่าสนใจที่พบนั้น ตรงบริเวณลาดชันของชั้นทรายทางด้านต้นน้ำจะมีลักษณะเป็นรูปเว้า แต่บริเวณลาดชันทางด้านท้ายน้ำจะมีลักษณะเป็นรูปนูน



ภาพที่ 39 รูป top-view ของธารน้ำชนิด A (ก,ข,ค)

การทดลองของตัวอย่างทรายชนิด A ซึ่งใช้ทรายที่มีขนาด $D_{50} = 0.49$ มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 39 (ก) - (ค) สำหรับกรณี A-1 และ A-2 มีเงื่อนไขในการทดลองเดียวกันคือ ระดับชั้นทรายหนา 10 เซนติเมตร เมื่อระดับน้ำลดลงจะสังเกตเห็นขอบวงกลมอย่างชัดเจนซึ่งเป็นระดับเดียวกันกับชั้นทรายซึ่งจะเป็นวินาทีที่ 0 พบว่าไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอน จากวินาทีที่ 5 เกิดการเคลื่อนที่ของตะกอน เกิดการพัฒนาขยายออกของขอบวงกลมบริเวณลาดชันและเกิดธารน้ำ โดยจะพบว่าการไหลของน้ำผิวดินส่วนใหญ่เริ่มหมดตั้งแต่วินาทีที่ 18 และจะใช้เวลาในการทดลองทั้งหมด 27 วินาที เมื่อสิ้นสุดการทดลองของกรณี A-1 และ A-2 พบว่ามีลักษณะรูปร่างของธารน้ำที่ใกล้เคียงกัน สำหรับกรณี A-3 จะมีระดับชั้นทรายหนา 5 เซนติเมตร พบว่าเกิดการพังทลายที่ไม่ดี เพราะมีความหนาชั้นทรายไม่เพียงพอที่จะทำให้การกัดเซาะและทำให้เกิดธารน้ำ จึงทำให้ไม่สามารถเห็นธารน้ำที่ชัดเจน

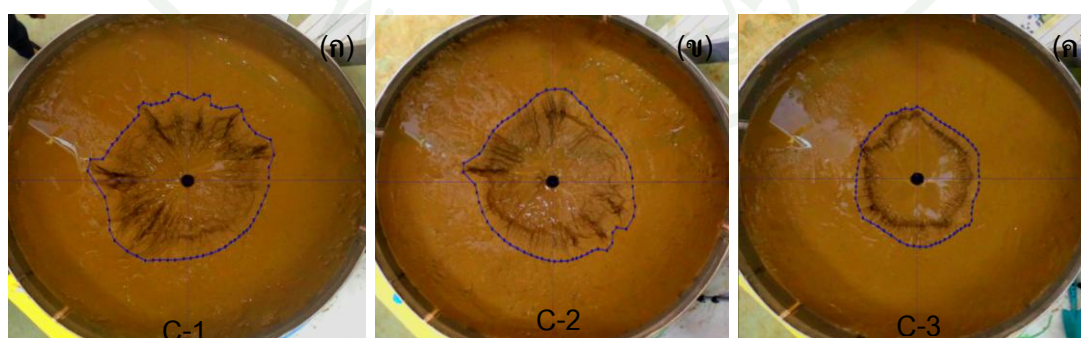


ภาพที่ 40 รูป top-view ของธารน้ำชนิด B (ก,ข,ค)

การทดลองทั้ง 3 ของตัวอย่างทรายชนิด B ซึ่งใช้ทรายที่มีขนาด $D_{50} = 0.30$ มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 40 (ก) - (ค) พบว่ากรณีของ B-1 และ B-2 คือ การทดลองที่มีสภาพเงื่อนไขเริ่มต้น

เหมือนกันจะมีเงื่อนไขในการทดลองเดียวกัน มีจำนวนธารน้ำเกิดขึ้นมากกว่า 7 ธารขึ้นไป โดยที่ธารน้ำจะพัฒนาขยายไปทางด้านต้นน้ำในทิศทางรัศมี และธารน้ำจะมีความสมมาตร และพบว่าผลใช้ระยะเวลาในการการกัดเซาะไหลซึมที่นานกว่าเมื่อเทียบกับตัวอย่างทรายชนิด A และใช้เวลาในการทดลองทั้งหมด 52 วินาที กรณีของ B-3 จะมีระดับชั้นทรายหนา 5 เซนติเมตร พบว่าธารน้ำจะตื้นกว่าและสังเกตได้ไม่ชัดเจน ซึ่งเป็นสิ่งที่ยากที่จะนับจำนวนธารน้ำได้ซึ่งจะมีลักษณะเช่นเดียวกับการทดลองของตัวอย่างทรายชนิด A

จากการเปรียบเทียบตัวอย่างทรายชนิด A และ B ซึ่งเป็นทรายที่ไม่มีความเชื่อมั่นแน่น ตัวอย่างทรายชนิด A ทำให้เกิดการขยายตัวของธารน้ำเร็วและใช้ระยะเวลาในการการกัดเซาะไหลซึมอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับตัวอย่างทรายชนิด B ตัวอย่างทรายชนิด A มีค่าความซึมน้ำ (permeability) มากกว่าตัวอย่างทรายชนิด B เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการพังทลายบริเวณลาดชันพบว่า เกิดลักษณะการพังทลายบริเวณลาดชันที่แตกต่างกัน ลักษณะการพังทลายบริเวณลาดชันของตัวอย่างทรายชนิด A จะมีบริเวณลาดชันที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับตัวอย่างทรายชนิด B เนื่องจากตัวอย่างทรายชนิด A เป็นเม็ดทรายขนาดใหญ่มีเสถียรภาพคงที่ จึงส่งผลให้การไหลซึมของน้ำใต้ดินจะไหลซึมเข้าไปแทรกอยู่ตามช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างเม็ดทราย เกิดแรงเสียดทานของเม็ดทรายที่กระทำต่อน้ำใต้ดินน้อยกว่าเม็ดทรายขนาดเล็ก โดยที่ค่าความซึมน้ำของเม็ดทรายมีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้เม็ดดินหลุดออกมาจากบริเวณลาดชันและเกิดการกัดเซาะบริเวณหัวธารน้ำ ความยาวธารน้ำและความลึกธารน้ำของตัวอย่างทรายชนิด A มีลักษณะที่สูงกว่าและตื้นกว่าเมื่อเทียบกับตัวอย่างทรายชนิด B ตามลำดับ และกรณีของ A-3 และ B-3 จะมีระดับชั้นทรายหนา 5 เซนติเมตร พบว่าการพังทลายที่ไม่ดีเพราะมีความหนาชั้นทรายไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการกัดเซาะและทำให้เกิดธารน้ำ จึงทำให้ไม่สามารถเห็นธารน้ำที่ชัดเจน



ภาพที่ 41 รูป top-view ของธารน้ำชนิด C (ก,ข,ค)

การทดลองของตัวอย่างทรายชนิด C ซึ่งใช้ทรายที่มีขนาด $D_{50} = 0.18$ มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 41 (ก) - (ค) พบว่ากรณีของ C-1 และ C-2 จะมีเงื่อนไขในการทดลองเดียวกันคือ ระดับชั้นทรายหนา 10 เซนติเมตร มีธารน้ำเล็กๆจำนวนมากเกิดขึ้นบริเวณขอบลาดชัน โดยที่เกิดการพังทลายบริเวณลาดชันเนื่องจากผลของน้ำใต้ดินมีลักษณะการพังทลายเป็นส่วนโค้งของวงกลมและเกิดการพังทลายเป็นไปอย่างช้าๆ ซึ่งจะแตกต่างจากตัวอย่างทรายชนิด A และ B เนื่องจากตัวอย่างทรายชนิด C เป็นทรายที่มีความเชื่อมแน่น จึงใช้ระยะเวลาในการการกัดเซาะไหลขีมนานที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างทรายชนิด A และ B ทำให้ความยาวและความลึกของธารน้ำจะพัฒนาไปอย่างช้าๆ สำหรับกรณีของ C-3 จะมีระดับชั้นทรายหนา 5 เซนติเมตร พบว่าเกิดการพังทลายบริเวณลาดชันที่ลึกและมองเห็นได้ชัดเจนเมื่อเทียบกับตัวอย่างทรายชนิดชนิด A และ B

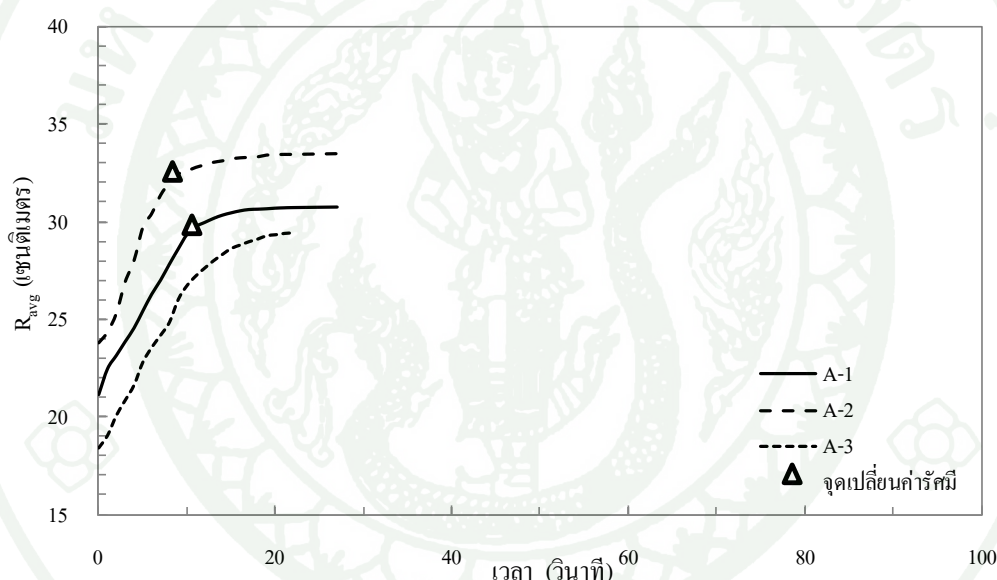
การพัฒนาของธารน้ำของตัวอย่างทรายทั้ง 3 ชนิด โดยพบว่าเม็ดทรายขนาดเล็กให้ความกว้างและความยาวธารน้ำมากกว่าทรายขนาดใหญ่ เหตุเพราะว่าเม็ดทรายขนาดเล็กทำให้เกิดการพังทลายของชั้นทรายมีลักษณะเป็นวงกว้างกว่าเม็ดทรายขนาดใหญ่ อันเนื่องมาจากเมื่อเม็ดทรายขนาดเล็กสัมผัสกับน้ำที่ไหลซึมเนื่องจากน้ำใต้ดินก่อให้เกิดการยึดเกาะกันระหว่างเม็ดทรายทำได้ดีกว่าเม็ดทรายขนาดใหญ่

การไหลซึมของน้ำใต้ดินส่งผลทำให้เกิดการพังทลายบริเวณลาดชัน เมื่อเกิดการพังทลายน้ำใต้ดินสามารถไหลเข้าไปสู่บริเวณหัวธารน้ำได้มากขึ้น จนเกิดการกัดเซาะบริเวณหัวธารน้ำไปทางด้านเหนือ น้ำนอกจากนี้ขนาดของเม็ดทรายเป็นปัจจัยสำคัญต่อการพังทลายบริเวณลาดชันด้วยเช่นกัน โดยพบว่าเม็ดทรายขนาดใหญ่ทำให้เกิดการการพังทลายบริเวณลาดที่ชัน เนื่องจากเม็ดทรายขนาดใหญ่ให้ค่ามุมทรงตัวของเม็ดทรายมากกว่าเม็ดทรายขนาดเล็ก

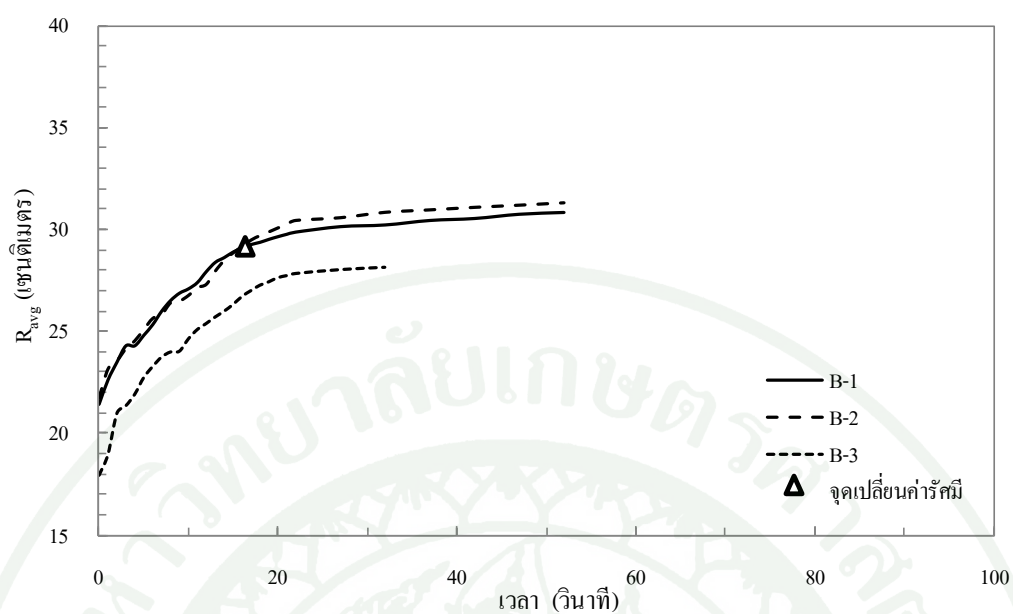
2. รัศมีขอบลาดชันวงกลมเฉลี่ย (R_{avg})

จากการคำนวณหาค่ารัศมีลาดชันขอบวงกลมเฉลี่ยจากมุม (R_{avg}) ซึ่งได้คำนวณดังแสดงในภาพที่ 42 43 และ 44 ของตัวอย่างทรายชนิด A B และ C ตามลำดับ โดยในระยะเริ่มต้นของการทดลองนั้นจะมีค่ารัศมีลาดชันขอบวงกลมเฉลี่ย (R_{avg}) เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง และอย่างรวดเร็ว โดยที่สัญลักษณ์สามเหลี่ยมในกราฟนั้นจะเป็นจุดเปลี่ยนความชันของเส้น จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งจะสามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของขอบลาดชันได้อย่างชัดเจน พบว่าค่า R_{avg} ยังคงเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงแต่เพิ่มขึ้นช้าลงและจะหยุดในช่วงเวลาต่อมา จากการเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นตรงจะเป็นช่วงเวลาที่เกิดขึ้นเมื่อการนำไหลน้ำผิวดินลดลง เมื่อการไหลน้ำผิวดินส่วนใหญ่เริ่มหมดนั้นจะเกิดการกัดเซาะแล้วทำให้เกิดธารน้ำขนาดใหญ่ที่บริเวณลาดชันของขอบวงกลม ซึ่งการ

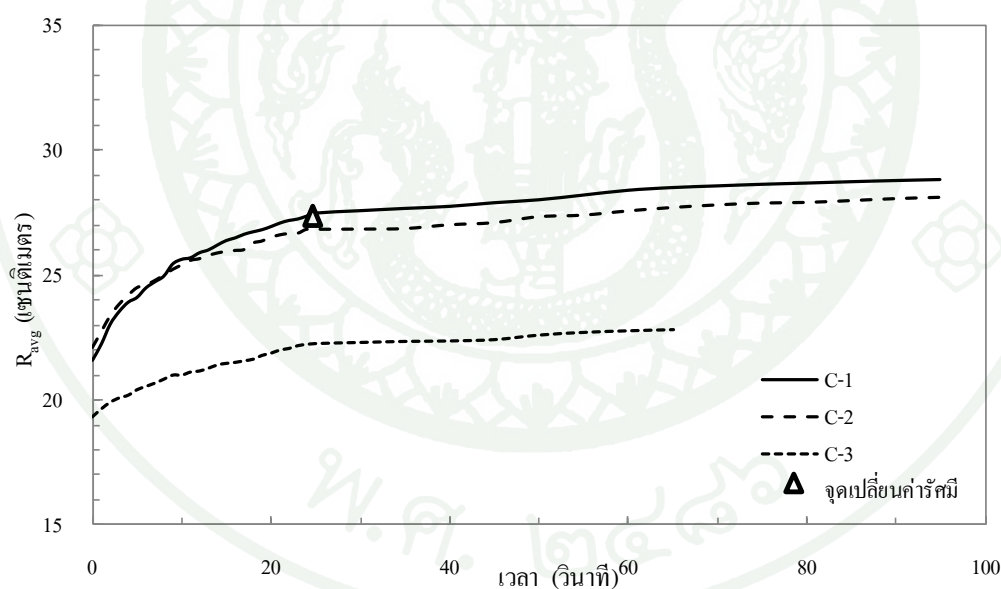
เพิ่มขึ้นของค่ารัศมีลาดชันขอบวงกลมเฉลี่ย (R_{avg}) จะเกิดขึ้นใน กรณีของ B-1 และ B-2 โดยที่จะมีการเพิ่มขึ้นที่เหมือนกัน ค่ารัศมีลาดชันขอบวงกลมเฉลี่ย (R_{avg}) มีค่าประมาณ 20 เซนติเมตรถึง 30 เซนติเมตร และกรณีของ C-1 และ C-2 จะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน ในกรณี B-3 และ C-3 จะมีค่ารัศมีลาดชันขอบวงกลมเฉลี่ย (R_{avg}) ที่น้อยกว่าเนื่องจากความหนาชั้นทรายต้น ดังแสดงในภาพที่ 43 และ 44 ตามลำดับ สำหรับตัวอย่างทรายชนิด A จะใช้เวลาเป็นครึ่งหนึ่งเมื่อเทียบกับตัวอย่างทรายชนิด B และ C และพบว่ากรณี A-1 และ A-2 มีค่ารัศมีเริ่มต้นที่แตกต่างกัน ซึ่งในกรณี A-2 จะมีค่ารัศมีลาดชันขอบวงกลมเฉลี่ย (R_{avg}) เริ่มต้นที่สูงกว่า A-1 เนื่องจากอาจจะเกิดจากความผิดพลาดในการดึงแท่งอะคริลิกในช่วงเริ่มต้นของการทดลอง และกรณี A-3 มีผลเช่นเดียวกันกับ กรณี B-3 และ C-3 คือ จะมีค่ารัศมีลาดชันขอบวงกลมเฉลี่ย (R_{avg}) ที่น้อยกว่าเนื่องจากความหนาชั้นทรายต้น



ภาพที่ 42 ค่ารัศมีขอบลาดชันวงกลมเฉลี่ย (R_{avg}) ของตัวอย่างทรายชนิด A ($D_{50} = 0.49$ มิลลิเมตร)



ภาพที่ 43 ค่ารัศมีขอบลาดชันวงกลมเฉลี่ย (R_{avg}) ของตัวอย่างทรายชนิด B ($D_{50} = 0.30$ มิลลิเมตร)



ภาพที่ 44 ค่ารัศมีขอบลาดชันวงกลมเฉลี่ย (R_{avg}) ของตัวอย่างทรายชนิด C ($D_{50} = 0.18$ มิลลิเมตร)

จากการเปรียบเทียบผลค่ารัศมีสำหรับตัวอย่างทรายชนิด B และ C นั้นพบว่า อัตราส่วนระหว่างรัศมีกับเวลา ตัวอย่างทรายชนิด C เนื่องจากตัวอย่างทรายชนิด C เป็นทรายที่มีความเข้มข้นจึงทำให้ระยะเวลาในการเพิ่มขึ้นของรัศมีนานกว่าตัวอย่างทรายชนิด B

3. พื้นที่ธารน้ำที่ถูกกัดเซาะ

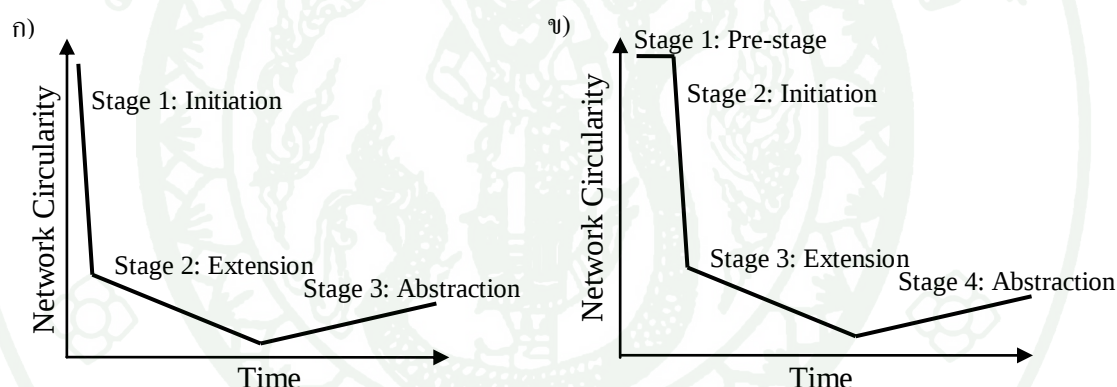
ในการคำนวณหาพื้นที่ธารน้ำที่ถูกกัดเซาะนั้น จะเริ่มคำนวณโดยพิจารณาเมื่อระดับน้ำลดลงมา ณ จุดหนึ่ง ซึ่งจะเป็นจุดที่ทำให้เห็นขอบลาดชันวงกลมที่ชัดเจน ซึ่งสามารถคำนวณหาพื้นที่ธารน้ำที่ถูกกัดเซาะไว้ในตารางผนวกที่ **จ1-4** ของตัวอย่างทรายชนิด A , B และ C ตามลำดับ ตัวอย่างทรายชนิด A จะใช้เวลาเป็นครั้งหนึ่งเมื่อเทียบกับตัวอย่างทรายชนิด B และ C สำหรับตัวอย่างทราย B และ C จากการเริ่มต้นของการทดลองค่าพื้นที่ธารน้ำที่ถูกกัดเซาะจะเท่ากัน และจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งจะเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับค่ารัศมีขอบลาดชันวงกลมเฉลี่ย (R_{avg}) โดยที่ค่าพื้นที่ธารน้ำที่ถูกกัดเซาะอยู่ในช่วงประมาณ 1,500 - 3,000 ซม² ดังแสดงในภาพผนวก **จ12-15**

4. ความยาวเส้นรอบวงที่ถูกกัดเซาะ

ในการคำนวณหาความยาวเส้นรอบวงที่ถูกกัดเซาะนั้น จะมีการคำนวณลักษณะเดียวกันกับการคำนวณหาพื้นที่ธารน้ำที่ถูกกัดเซาะ ซึ่งสามารถคำนวณหาความยาวเส้นรอบวงที่ถูกกัดเซาะไว้ในตารางผนวกที่ **จ1-4** สำหรับตัวอย่างทรายชนิด A จะใช้เวลาเป็นครั้งหนึ่งเมื่อเทียบกับตัวอย่างทรายชนิด B และ C แต่กรณี A-1 และ A -2 จะมีค่าความยาวเส้นรอบวงที่ถูกกัดเซาะที่แตกต่างกัน ซึ่งในกรณี A-2 จะมีค่าความยาวเส้นรอบวงที่ถูกกัดเซาะเริ่มต้นที่สูงกว่า A-1 จากตัวอย่างทรายชนิด B พบว่า ในกรณีของ B-1 และ B-2 จากการเริ่มต้นของการทดลองค่าความยาวเส้นรอบวงที่ถูกกัดเซาะจะเท่ากัน และจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่ใกล้เคียงกัน โดยที่ค่าความยาวเส้นรอบวงที่ถูกกัดเซาะอยู่ในช่วงประมาณ 140 - 280 ซม. ในกรณี B-3 จะมีค่าความยาวเส้นรอบวงที่ถูกกัดเซาะเริ่มต้นที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับ 2 กรณีแรก เนื่องจากมีความหนาชั้นทรายตื้น และสำหรับตัวอย่างทรายชนิด C ซึ่งจะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับตัวอย่างทรายชนิด B ดังแสดงในภาพผนวก **จ16-19**

5. ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นวงกลมของธารน้ำกับรัศมีขอบลาดชันวงกลมเฉลี่ย (R_{avg})

การวิเคราะห์วิวัฒนาการของการพัฒนาโครงข่ายธารน้ำได้นำมาประยุกต์ใช้กับความเป็นวงกลมของธารน้ำ (Network Circularity) ของ Gomez และ Mullen (1991) ดังแสดงในภาพที่ 45 โดยที่ค่าความเป็นวงกลมของธารน้ำจะค่อยๆ พัฒนาในระยะแรก (Pre-Stage) ของการทดลอง ยกเว้นกรณี A-3 และ B-3 ซึ่งมีความหนาชั้นทรายหนา 5 เซนติเมตร ช่วงเริ่มต้นของการทดลองนั้น จะเกิดความน่าสนใจอยู่ที่ว่า แม้ค่ารัศมีขอบลาดชันวงกลมเฉลี่ย (R_{avg}) จะเพิ่มขึ้น แต่บริเวณลาดชันขอบวงกลมหรือธารน้ำเริ่มต้นจะไม่เกิดขึ้น นอกจากนี้ระยะแรก (Pre-Stage) นี้จะไม่เกิดขึ้นกับผลการทดลองของ Gomez และ Mullen (1991) ดังนั้นจึงได้นำเสนอผลของการพัฒนาโครงข่ายธารน้ำใหม่ ดังแสดงในภาพที่ 45(ข) รวมถึงระยะแรก (Pre-Stage) ซึ่งเป็นระยะเริ่มต้นที่ธารน้ำสามารถขยายได้อย่างต่อเนื่อง

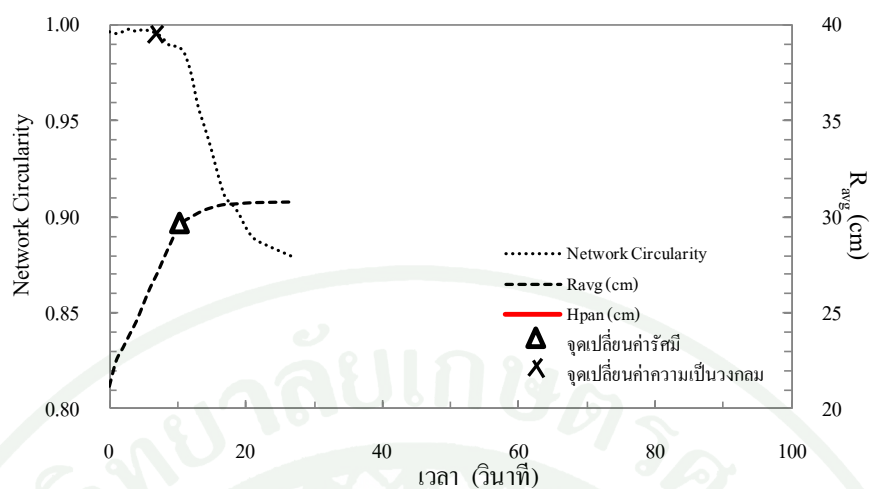


ภาพที่ 45 การพัฒนาโครงข่ายธารน้ำ ก) 3 ระยะ ของ Gomez และ Mullen (1991) ข) การพัฒนาโครงข่ายธารน้ำใหม่ 4 ระยะ

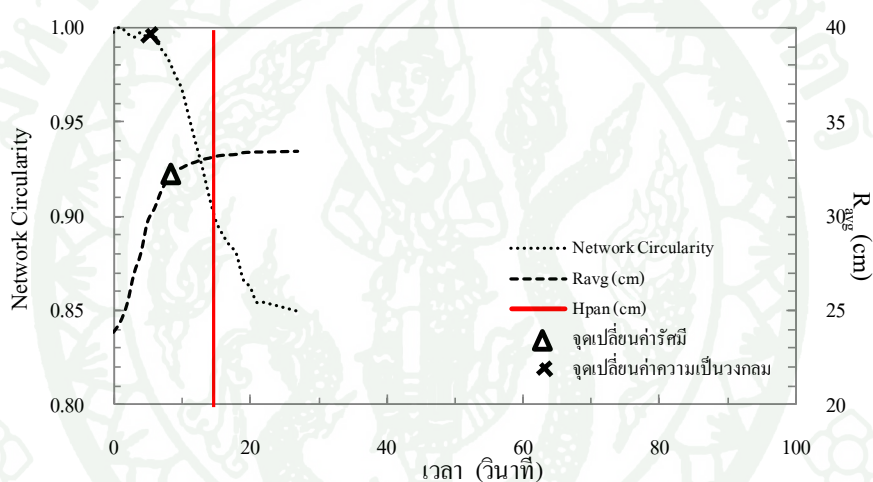
จากความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นวงกลมของธารน้ำกับรัศมีขอบลาดชันวงกลมเฉลี่ย (R_{avg}) ดังแสดงในภาพที่ 46 , 47 และ 48 ของตัวอย่างทรายชนิด A , B และ C ตามลำดับ โดยมีจุดกักบาทในกราฟซึ่งเป็นจุดเป็นความชันระหว่างระยะแรก (Pre-stage) กับระยะสอง (Initiation) จากความสัมพันธ์นั้นสามารถจำแนกการไหลของน้ำผิวดินกับน้ำใต้ดิน ซึ่งใช้ค่าระดับที่ขอบลาด (H_{pan}) มาวัด โดยค่า H_{pan} = ค่าคงที่ที่น้อยที่สุด ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง ซึ่งจะเป็นเส้นสีแดงในกราฟ จะเป็นตัวบ่งบอกถึงเวลาที่การไหลน้ำไหลผิวดินส่วนใหญ่หมด โดยเวลาที่อยู่ก่อนถึงเส้นสีแดงจะเป็นช่วงการไหลของน้ำผิวดิน และเวลาที่อยู่หลังเส้นสีแดงจะเป็นช่วงการไหลของน้ำใต้ดิน

จากการทดลองตัวอย่างทรายชนิด A พบว่า กรณี A-1 และ A-2 ค่าความเป็นวงกลมจะลดลงและระยะแรก (Pre-stage) ก็จะเกิดอยู่ภายในช่วงการไหลของน้ำผิวเป็นหลัก แต่สำหรับกรณี A-3 นั้นไม่สามารถที่จะจำแนกลักษณะการไหลได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 46 สำหรับการทดลองกรณี B-1 และ B-2 จะพบว่า ระยะแรก (Pre-stage) จะเกิดอยู่ภายในช่วงการไหลของน้ำผิวดินเป็นหลัก การไหลของน้ำผิวดินยังไม่หมด เป็นผลทำให้ค่าความเป็นวงกลมของธารน้ำสามารถลงมาได้อีกระยะหนึ่ง ในกรณี B-3 พบค่าความเป็นวงกลมเริ่มต้นลดลงและค่าความเป็นวงกลมสามารถเพิ่มขึ้นด้วยผลของการไหลของน้ำผิวดิน ดังแสดงในภาพที่ 47 ในการทดลองตัวอย่างทรายชนิด C พบว่า ระยะแรก (Pre-stage) จะเกิดอยู่ภายในช่วงการไหลของน้ำใต้ดินเป็นหลัก ดังแสดงในภาพที่ 48

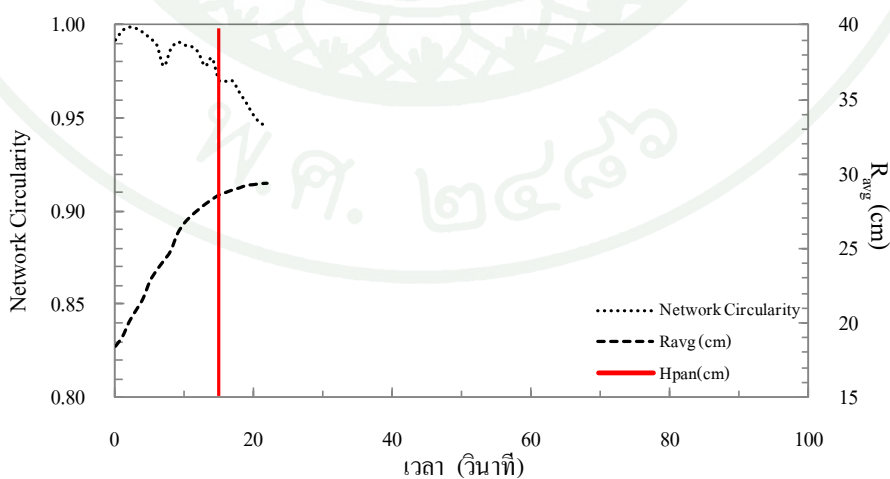
จากการเปรียบเทียบการพัฒนาความเป็นวงกลมของธารน้ำของตัวอย่างทรายทั้ง 3 ชนิด จะพบว่า ระยะแรก (Pre-stage) ของตัวอย่างทรายชนิด A และ B จะเกิดอยู่ภายในช่วงการไหลของน้ำผิวดินเป็นหลัก เนื่องจากทั้งสองตัวอย่างทรายมีลักษณะทรายประเภทเดียว และสำหรับตัวอย่างทรายชนิด C ระยะแรก (Pre-stage) จะมีเกิดอยู่ในช่วงการไหลของน้ำใต้ดินเป็นหลัก เพราะลักษณะทรายมีความเชื่อมั่นแน่นสูง การพัฒนาธารน้ำนั้นจึงพัฒนาไปอย่างช้าๆ และเมื่อทำการทดลองสิ้นสุดระยะสอง (Initiation) จะเกิดอยู่ภายในช่วงการไหลของน้ำใต้ดินเช่นเดียวกัน



ก) ตัวอย่างทรายกรณี A-1 ความหนาชั้นทราย 10 ซม.

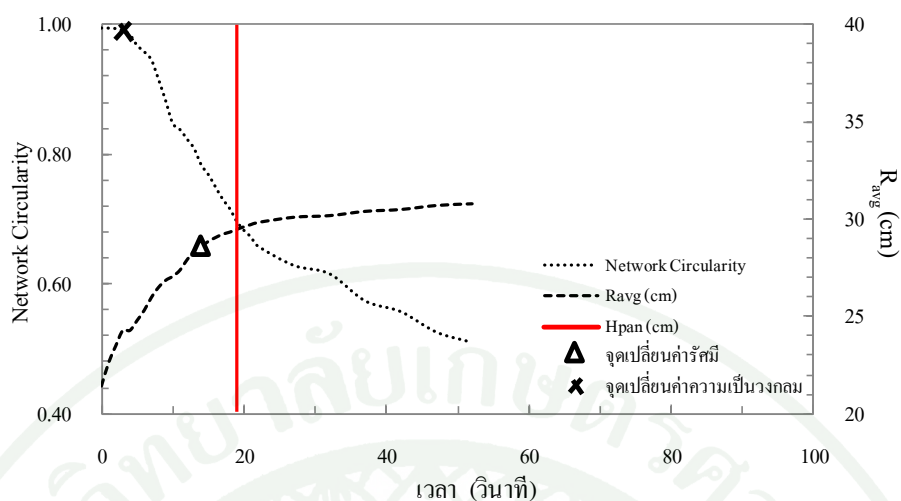


ข) ตัวอย่างทรายกรณี A-2 ความหนาชั้นทราย 10 ซม.

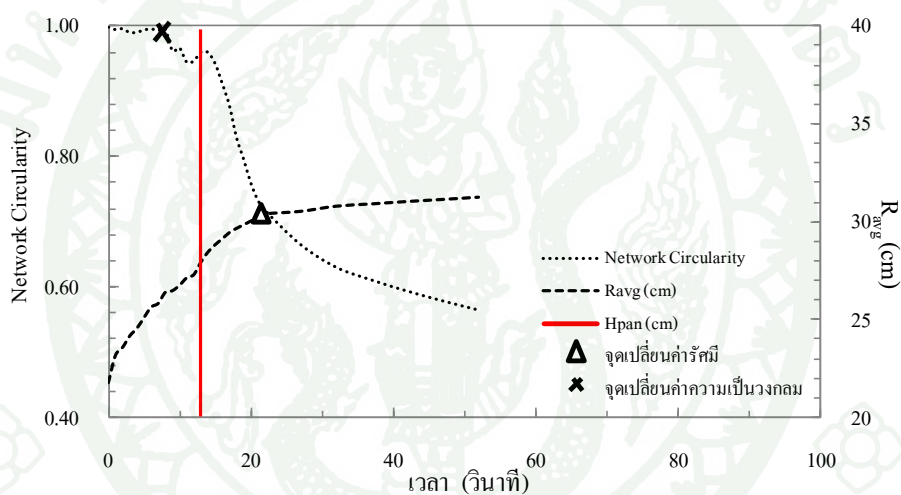


ค) ตัวอย่างทรายกรณี A-3 ความหนาชั้นทราย 5 ซม.

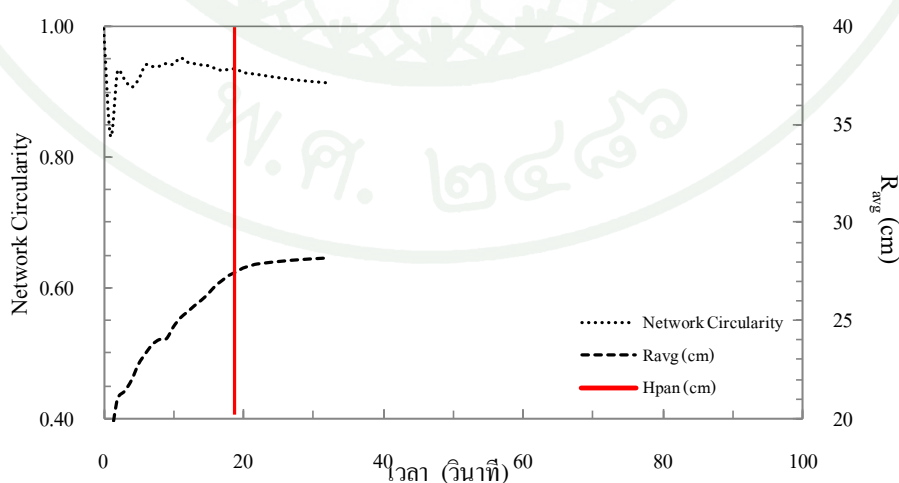
ภาพที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นวงกลมของธารน้ำกับรัศมีขอบลาดชันวงกลมเฉลี่ย (R_{avg}) ของทรายตัวอย่างทรายชนิด A (ก,ข,ค)



ก) ตัวอย่างทรายกรณี B-1 ความหนาชั้นทราย 10 ซม.

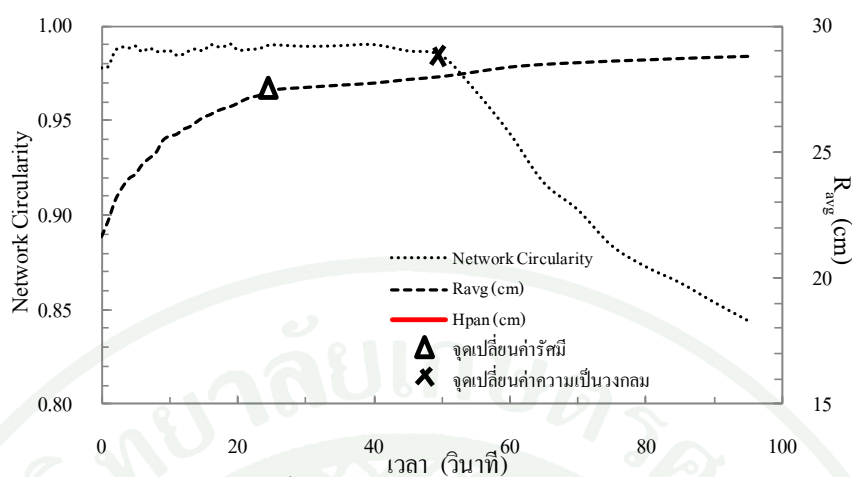


ข) ตัวอย่างทรายกรณี B-2 ความหนาชั้นทราย 10 ซม.

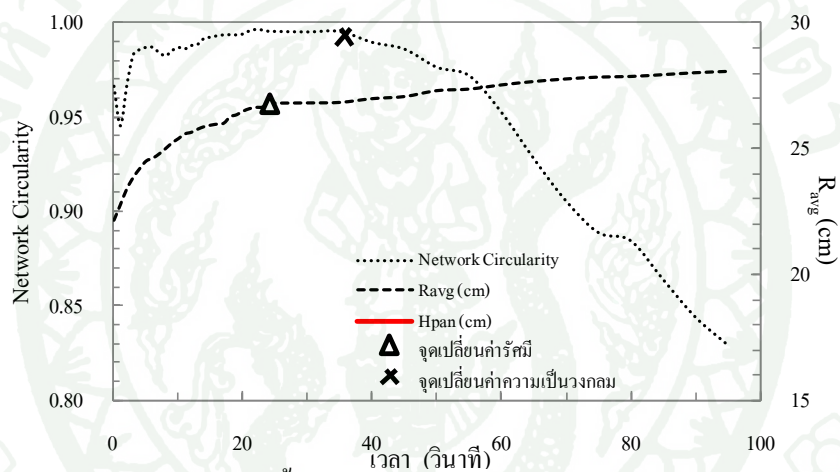


ค) ตัวอย่างทรายกรณี B-3 ความหนาชั้นทราย 5 ซม.

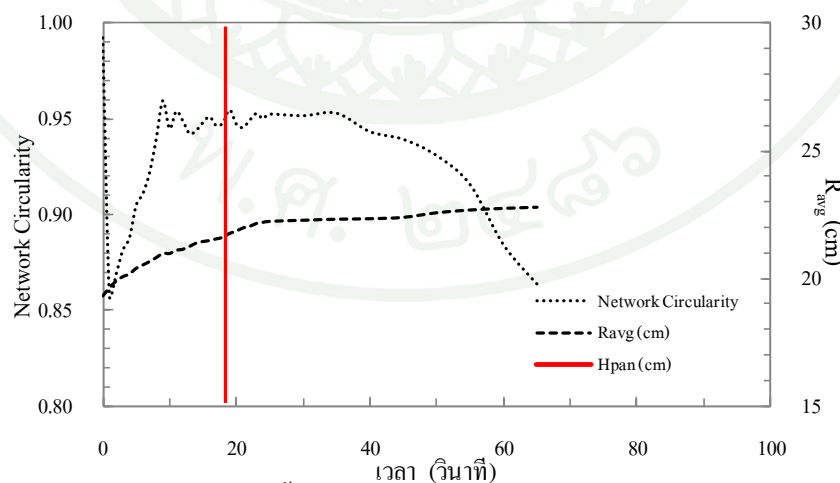
ภาพที่ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นวงกลมของธารน้ำกับรัศมีขอบลาดชั้นวงกลมเฉลี่ย (R_{avg}) ของทรายตัวอย่างทรายชนิด B (ก,ข,ค)



ก) ตัวอย่างทรายกรณี C-1 ความหนาชั้นทราย 10 ซม.



ข) ตัวอย่างทรายกรณี C-2 ความหนาชั้นทราย 10 ซม.



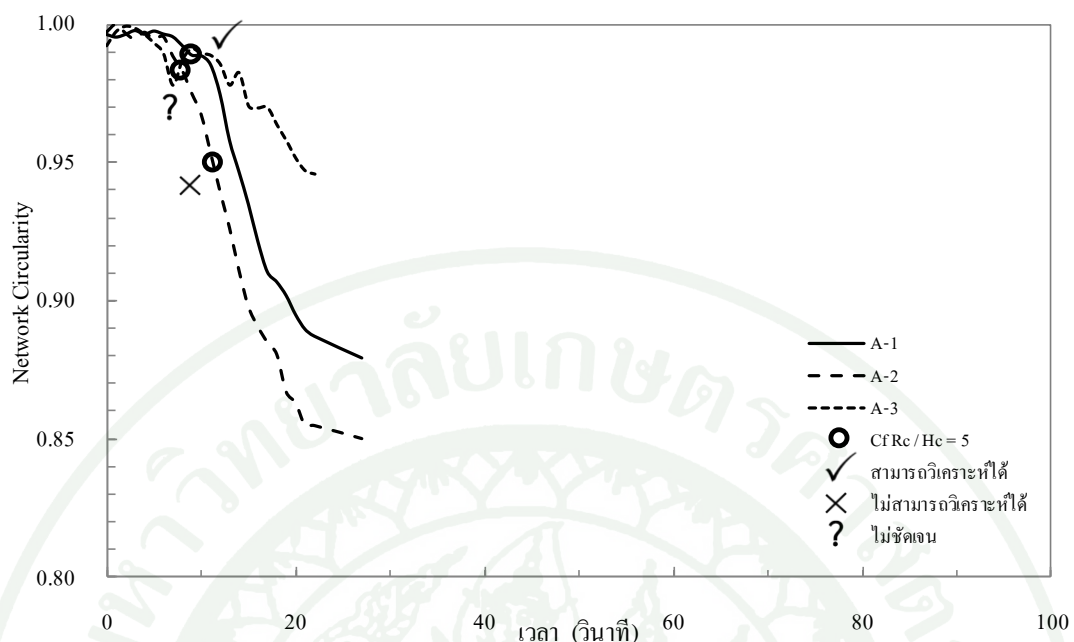
ค) ตัวอย่างทรายกรณี C-3 ความหนาชั้นทราย 5 ซม.

ภาพที่ 48 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นวงกลมของธารน้ำกับรัศมีขอบลาดชันวงกลมเฉลี่ย (R_{avg}) ของทรายตัวอย่างทรายชนิด C (ก,ข,ค)

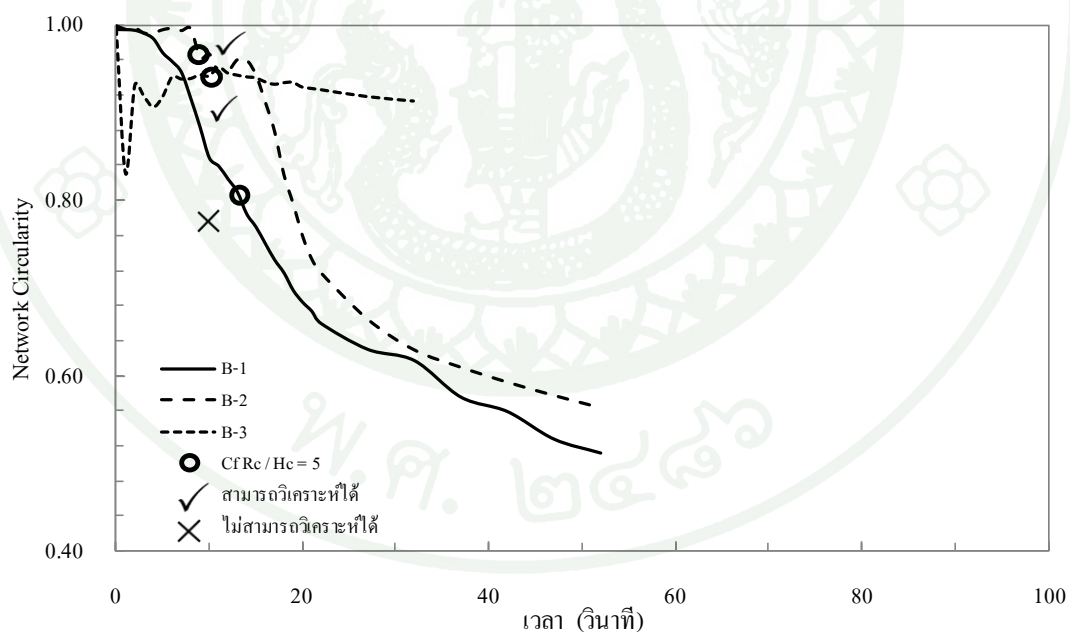
6. ความเป็นวงกลมของธารน้ำ (Network Circularity)

จากกรณี A-1 และ A-2 พบว่าเกิดการพัฒนาโครงข่ายธารน้ำเพียง 2 ระยะ คือ ระยะแรก (Pre-Stage) และ ระยะสอง (Initiation) ดังแสดงในภาพที่ 49 เนื่องจากตัวอย่างทรายชนิด A มีขนาดใหญ่กว่าตัวอย่างทรายชนิด B และ C เป็นผลทำให้การไหลของน้ำหมดอย่างรวดเร็ว สำหรับกรณี B-1 และ B-2 พบว่าเกิดการพัฒนาโครงข่ายธารน้ำเพียง 3 ระยะ คือ ระยะแรก (Pre-Stage) , ระยะสอง (Initiation) และ ระยะสาม (Extension) ดังแสดงในภาพที่ 50 เนื่องจากเส้นของค่าความเป็นวงกลมของธารน้ำไม่ได้มีความชันเพิ่มขึ้น เป็นเพราะว่าจากขั้นตอนการทดลองในครั้งนี้ไม่มีน้ำอย่างต่อเนื่อง ซึ่งน้ำหยุดไหลก่อนที่จะเกิดระยะสี่ (Abstraction) สำหรับกรณี C-1 และ C-2 พบว่าเกิดการพัฒนาโครงข่ายธารน้ำเพียง 2 ระยะ คือ ระยะแรก (Pre-Stage) และ ระยะสอง (Initiation) ดังแสดงในภาพที่ 51 เนื่องจากว่าในระยะเริ่มต้นของการทดลองนั้นขอบวงกลมของลาดชันไม่เสถียรภาพเป็นผลมาจากการซึมของน้ำออกจากแท่งอะคริลิกรูปวงกลม และเมื่อเวลาผ่านไปการไหลของน้ำผิวดินก็ยังคงเกิดขึ้นจึงส่งผลทำให้ค่าความเป็นวงกลมของธารน้ำนั้นจะค่อยๆ กลับมาเสถียรภาพอีกครั้ง แต่อย่างไรก็ตามสำหรับกรณีนี้ไม่มีน้ำไหลอย่างต่อเนื่อง เป็นผลให้การพัฒนาโครงข่ายธารน้ำในระยะอื่นๆ จึงยังไม่เกิดขึ้น

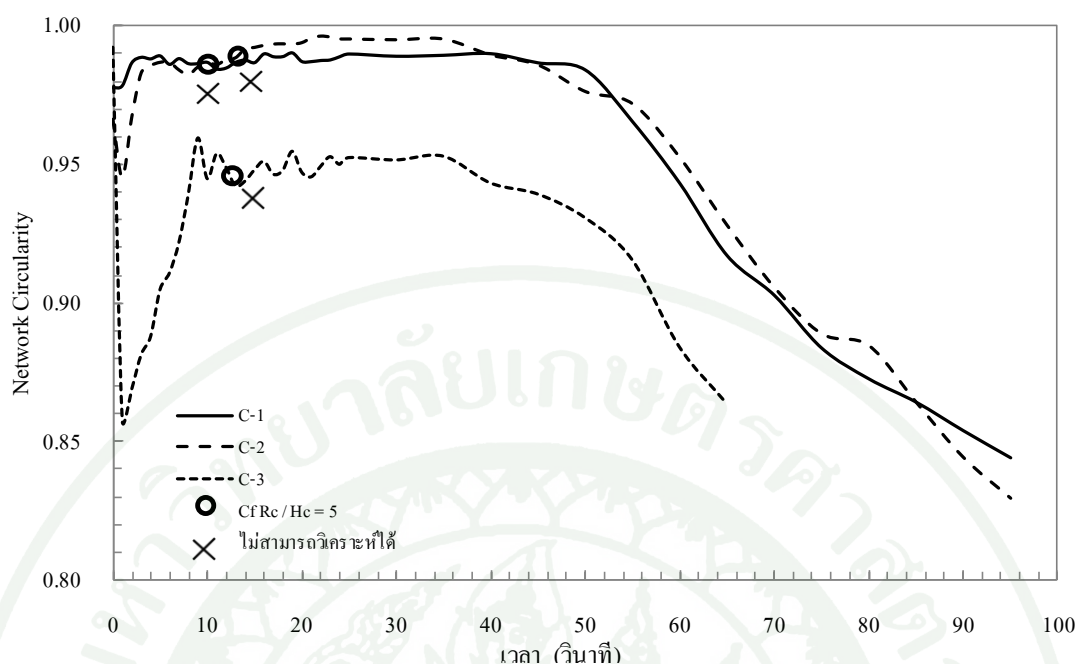
จากกรณี A-3 และ B-3 จะว่ามีรูปแบบของการพัฒนาโครงข่ายธารน้ำที่ไม่ชัดเจน ซึ่งระหว่างทำการทดลองนั้นน้ำที่ไหลลงท่อระบายจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของการไหลภายใต้ความดัน (under-pressure) เป็นการไหลในทางน้ำเปิด (open-channel) กล่าวคือ เมื่อผิวของเหลวอิสระด้านบนสัมผัสกับความดันบรรยากาศ และทำให้ระดับน้ำที่ไหลลงท่อระบายน้ำจะเพิ่มขึ้นกระทั่งน้ำแล้วจะลดลงตามเวลา จากลักษณะการเกิดเช่นนี้เป็นผลทำให้เกิดการไหลของน้ำไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะแตกต่างจากผลของกรณี C-3 เนื่องจากว่าการไหลของน้ำผิวดิน สำหรับกรณีนี้จะเป็นตัวอย่างทรายที่มีขนาดเม็ดทรายที่ละเอียดมาก และทรายมีความเชื่อมแน่นสูง เมื่อเกิดน้ำไหลบ่าส่งผลทำให้น้ำจะพัดพาเอาตะกอนบริเวณลาดชันมาด้วย และส่งผลทำให้การรูปแบบการพัฒนาโครงข่ายของธารน้ำไม่ชัดเจนในระหว่างทำการทดลองสำหรับกรณีความหนาชั้นทรายหนา 5 เซนติเมตร



ภาพที่ 49 ความเป็นวงกลมของธารน้ำ ของทรายตัวอย่างทรายชนิด A ($D_{50} = 0.49$ มิลลิเมตร)



ภาพที่ 50 ความเป็นวงกลมของธารน้ำ ของทรายตัวอย่างทรายชนิด B ($D_{50} = 0.30$ มิลลิเมตร)



ภาพที่ 51 ความเป็นวงกลมของธารน้ำ ของทรายตัวอย่างทรายชนิด C ($D_{50} = 0.18$ มิลลิเมตร)

จากระยะแรก (Pre-Stage) สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีเสถียรภาพเชิงเส้นโดย Mizushima และคณะ (2007) ที่ลาดชันมีเสถียรภาพ โดยได้เสนอค่าพารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ คือ $C_f R_c / H_c$ โดยที่ ค่า C_f คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของลาด (friction coefficient) , R_c คือ รัศมีลาดชันของขอบวงกลมที่ระดับความลึกวิกฤต และ H_c คือ ระดับความลึกวิกฤต ซึ่งถ้าค่า $C_f R_c / H_c > 5$ ลาดชันของขอบวงกลมจะขาดเสถียรภาพและเริ่มเกิดธารน้ำขึ้น จากค่าระดับน้ำที่ขอบลาด (H_{psn}) และค่ารัศมีขอบวงกลมเฉลี่ย (R_c) สามารถคำนวณหาค่า H_c ได้โดยวิธีขั้นบันไดโดยตรง (The direct step method) โดยหาจากการประมาณค่า Drawdown curve ดังนั้นจึงพบว่า $C_f R_c / H_c$ มีค่าต่ำที่จุดเริ่มต้นของการทดลองและจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป จากค่า $C_f R_c / H_c = 5$ ในตัวอย่างทรายตัวอย่างทรายชนิด A , B และ C โดยมีจุดวงกลมดังแสดงในภาพที่ 49, 50 และ 51 ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองนั้นจะสอดคล้องตามทฤษฎีที่ว่าเมื่อค่า $C_f R_c / H_c = 5$ นั้นจะเกิดขึ้นระหว่างการเปลี่ยนความชันของค่าความเป็นวงกลมจากระยะแรก (Pre-stage) กับระยะสอง (Initiation)

สำหรับค่าความเป็นวงกลมของตัวอย่างทรายทั้ง 3 ชนิด ตัวอย่างทรายชนิด A และ B ระยะแรก (Pre-stage) จะสามารถอธิบายด้วยทฤษฎีเสถียรภาพเชิงเส้นได้พอสมควร เนื่องจากช่วงระยะแรก (Pre-stage) นั้นจะเกิดอยู่ภายในช่วงการไหลของน้ำผิวดิน และสำหรับตัวอย่างทรายชนิด C ระยะแรก (Pre-stage) จะไม่สามารถอธิบายด้วยทฤษฎีเสถียรภาพเชิงเส้นได้ เพราะช่วงระยะแรก (Pre-stage) เกิดอยู่ภายในช่วงการไหลของน้ำใต้ดิน

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษารูปแบบของธารน้ำเนื่องจากน้ำไหลบ่าและน้ำใต้ดินโดยใช้ถาตุรูปวงกลมในห้องปฏิบัติการ และได้ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่า

1. เม็ดทรายขนาดใหญ่มีการกักเซาะไหลซึม ความลาดชันท้ายน้ำ มากกว่าเม็ดทรายขนาดเล็ก เมื่อเปรียบเทียบกับความหนาชั้นทรายเดียวกัน ลักษณะของธารน้ำในด้านของความยาวธารน้ำ ความลึกธารน้ำ จะมีระยะสั้นและลึกมากกว่าเม็ดทรายขนาดเล็ก แต่เมื่อสิ้นสุดการทดลองกลับพบว่าเม็ดทรายขนาดเล็กมีจำนวนโครงข่ายพัฒนาธารน้ำมากกว่าเม็ดทรายขนาดใหญ่
2. ผลจากอิทธิพลการไหลซึมของน้ำใต้ดิน (Groundwater Flow) จะส่งผลต่อเม็ดทรายขนาดเล็กมากกว่าเม็ดทรายขนาดใหญ่ โดยที่ผลจากอิทธิพลของการไหลของน้ำไหลบ่า (Overland Flow) นั้นจะส่งผลต่อเม็ดทรายขนาดใหญ่มากกว่าเม็ดทรายขนาดเล็ก
3. แนวคิดของการพัฒนาโครงข่ายธารน้ำด้วยความเป็นวงกลมของ (Network Circularity) ของ Gomes และ Mullen (1991) ได้อธิบายถึงกระบวนการพัฒนาการเกิดธารน้ำ จากการศึกษาค้นคว้านี้ได้พบกระบวนการพัฒนาโครงข่ายธารน้ำระยะใหม่ซึ่งเป็นระยะแรกก่อนที่จะเกิดการพัฒนาที่เรียกว่า ระยะแรก (Pre-stage) โดยจะอธิบายระยะนี้ได้ด้วยทฤษฎีเสถียรภาพเชิงเส้นได้พอสมควร เมื่อมีช่วงการไหลของน้ำผิวดินเพียงอย่างเดียว และจะเกิดธารน้ำเมื่อ $C_f R_c / H_c = 5$ ซึ่งสอดคล้องตามทฤษฎีของ Mizushima และคณะ (2007)

ข้อเสนอแนะ

1. เครื่องมือในการทำวิจัยครั้งนี้ได้ดัดแปลงนำถาดวัดการระเหย ซึ่งต้องทำการปรับแก้และปรับปรุงเครื่องมือหลายจุดจะได้ผลเป็นที่น่าพอใจและผลที่ได้จากการทดลองยังไม่สมบูรณ์เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์
2. จากผลการทดลองนั้นความผิดพลาดในระหว่างการติดตั้งอะคริลิกในช่วงเริ่มต้นของการทดลอง จึงทำให้ผลคำนวณที่ได้มีความคลาดเคลื่อน
3. ก่อนที่จะทำการทดลองควรจะทำให้ค่าความหนาแน่นของทราย เนื่องจากค่าความหนาแน่นของทรายอาจจะทำให้มีผลต่อการเกิดธารน้ำ
4. การทำวิจัยในครั้งนี้เป็นการวิเคราะห์ผลเชิงกายภาพ ซึ่งในอนาคตอาจจะมีการนำไปวิเคราะห์เพิ่มเติม ทำให้ผลการทดลองเป็นที่น่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

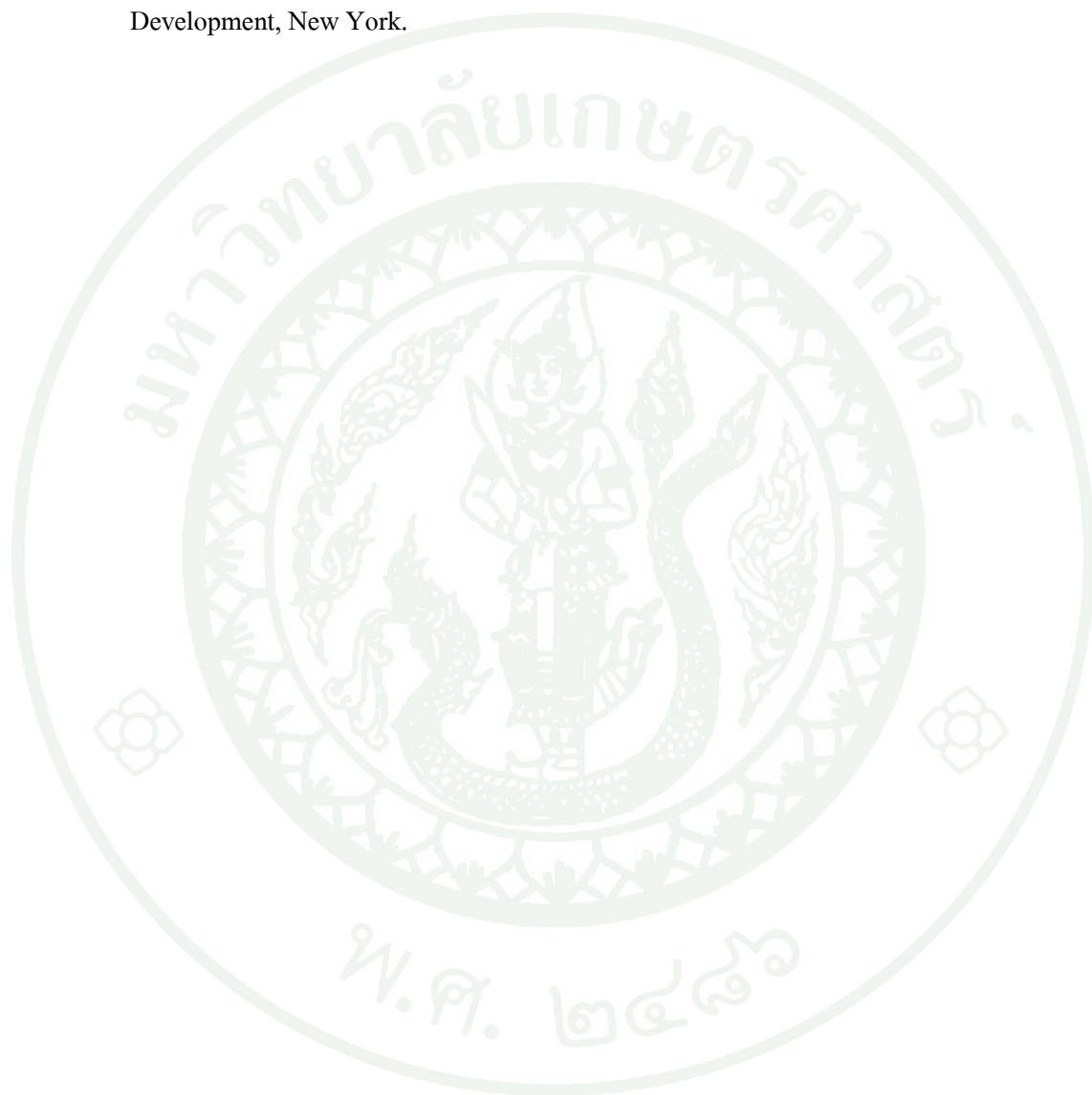
เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กิริติ ลีวัจนกุล. 2543. **อุทกวิทยา**. มหาวิทยาลัยรังสิต, กรุงเทพฯ.
- เกษม จันทร์แก้ว. 2539. **หลักการจัดการลุ่มน้ำ**. ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ชูเกียรติ ทรัพย์ไพศาล. 2527. **การไหลในทางน้ำเปิด**. ฟิสิกส์เซ็นเตอร์การพิมพ์, กรุงเทพฯ.
- พิรพล แก้วนนท์, วรณดี ไทยสยาม และ อติชัย พรพรหมินทร์. 2553. **การเกิดธารน้ำเนื่องจากการกัดเซาะด้วยการไหลซึมแบบสามมิติ**. การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17, 9-11 พฤษภาคม 2555. WRE028: 7 หน้า.
- วรากร ไม้เรียง. 2542. **วิศวกรรมเขื่อนดิน**. ครั้งที่ 2. ไลบรารีเนาย, กรุงเทพฯ.
- Budhu, M. and R. Gobin. 1996. **Slope Instability From Groundwater Seepage**. Hydraulic Engineering 7 (122): 415-417.
- Carla, W. Montgomery 1990. **Fundamentals of Geology**. Northern Illinois University, DeKalb.
- Chow, V.T. 1959. **Open Channal Hydraulics**. McGraw – Hill Inc., New York.
- Chow, V.T., D.R. Maidment and L.W. Mays (eds.). 1998. **Applied hydrology**. McGraw-Hill, New York.
- Coduto, D.P. 1998. **Geotechnical Engineering Principle and Pratices**. Prentice Hall, New Jersey.
- Das, B.M. 1990. **Advanced Soil Mechanic**. McGraw-Hill, Singapore.
- Gomez, B. and Mullen, V. T. 1991. **An experimental study of sapped drainage network development**, Earth Surface Processes and Landforms, 17(5), 465–476.

- Hazen, A. 1892. **Some Physical Properties of Sands and Gravels, with Special Reference to their Use in Filtration**, pp. 539-556. Massachusetts State Board of Health, Massachusetts.
- Harr, M.E. 1962. **Groundwater and Seepage**. McGraw-Hill, New York.
- Howard, A.D. and C. F.McLaneIII. 1988. **Erosion of cohesionless sediment by groundwater seepage**. Water Resources Research 10 (24): 1659–1674.
- Izumi, N. and G. Parker. 2000. **Linear stability analysis of channel inception : downstream-driven theory**. Journal of Fluid Mechanics. Volume 419. September 2000. pp 203-238.
- Izumi, N. and K. Fujii. 2006. **Channelization on plateaus composed of weakly cohesive fine sediment**. Journal of Geophysical Research. VOL. 111. F01012.
- Mizushima, H., Izumi, N. and Parker, G. 2007. **A simple mathematical model of channel bifurcation**. Coastal and Estuarine Morphodynamics. Enschede. NL. 17-21 September 2007.
- Pornprommin, A. And Izumi N., 2010. **Inception of stream incision by seepage erosion**. Journal of Geophysical Research ,VOL. 115, F02022.
- Pornprommin, A., Y.Takeib, A.M.Wubnehb and N.Izumi. 2010. **Channel inception in cohesionless sediment by seepage erosion**. Journal of Hydro-environment Research 4 (3): 232-238.
- Robert, W. Christopherson 1995. **Elemental Geosystems: A Foundation in Physical Geography**. McGraw-Hill Higher Education, Englewood Cliffs.

Varnes, D.J. 1978. **Slope movement types and processes**. Transportation Research Board
Special Report (176): 11-33.

Yun, Z. 2006. **Slope Stability Geotechnical Engineering**. Continuing Education and
Development, New York.







วิธีการทดลอง Grain Size Analysis

1. วัสดุและอุปกรณ์การทดลอง

- 1.1 เม็ดทรายซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0-0.70 มม.
- 1.2 ถาดใส่ตัวอย่าง (mixing pan)
- 1.3 ตะแกรงร่อน (sieve) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ซม.
- 1.4 เครื่องเขย่าตะแกรง (sieve shaker)
- 1.5 เครื่องชั่ง ขนาด 2 กก.อ่านละเอียด 0.1 กรัม
- 1.6 แปลงทำความสะอาดตะแกรงช้อนตักดิน (soil scoop)

2. วิธีการทดลอง

2.1 ทำความสะอาดตะแกรงทั้งหมดด้วยแปลงทำความสะอาด เพื่อป้องกันเศษทรายที่ค้างอยู่บนตะแกรง แล้วชั่งน้ำหนักของตะแกรงแต่ละเบอร์บันทึกค่า (ชั่งน้ำหนักของ pan ด้วย)

2.2 นำตะแกรงมาเรียงซ้อนกัน โดยที่ให้ตะแกรงที่มีขนาดช่องใหญ่อยู่ชั้นบน แล้วเรียงขนาดเล็กลงตามลำดับดังนี้ ตะแกรงเบอร์ 10, 12, 20, 50, 100, 200 และ pan

2.3 นำตัวอย่างทรายที่เตรียมไว้เทใส่ลงในตะแกรงที่เรียงลำดับจากหยาบไปหาละเอียด โดยมีฝาปิดด้านบนและมีถาด (pan) รองด้านล่าง แล้วจึงนำไปเข้าเครื่องเขย่า (sieve shaker) โดยเขย่านานอย่างน้อย 10 นาที ดังแสดงในภาพผนวกที่ ก1

2.4 นำตะแกรงแต่ละเบอร์ไปชั่งน้ำหนัก เพื่อหาค่าน้ำหนักของทรายที่ค้างอยู่บนแต่ละตะแกรงแต่ละเบอร์ ดังแสดงในภาพผนวกที่ ก2

2.5 บันทึกผลและเขียนโค้งกระจาย (semi-log scale) เพื่อหา D_{10} และ D_{50}



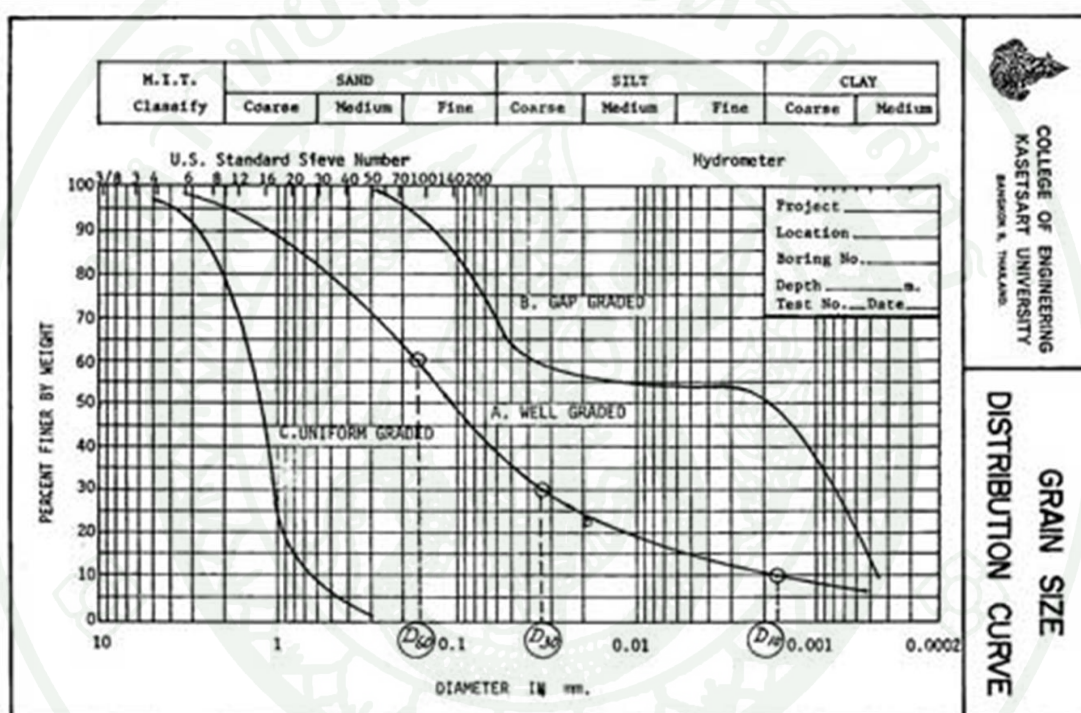
ภาพผนวกที่ ก1 เครื่องเขย่าตะแกรงที่ใช้ในการทดสอบ



ภาพผนวกที่ ก2 การชั่งหาน้ำหนักทรายแห้งหลังจากเข้าเครื่องเขย่าตะแกรง

3. ทฤษฎีการกระจายของขนาดเม็ดดิน

การกระจายของขนาดเม็ดดิน มักแสดงด้วยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเม็ดดิน สเกลลอการิทึม (logarithmic Scale) และเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเม็ดที่มีขนาดเม็ดเล็กกว่าที่ระบุ (percent finer) ซึ่งเรียกว่ากราฟการกระจายของขนาดเม็ดดิน (grain size distribution curve) ดังแสดงในภาพผนวกที่ ก3



ภาพผนวกที่ ก3 กราฟการกระจายขนาดเม็ดดิน

ที่มา: สื่อการสอนปฐพีกลศาสตร์ (2555)

ลักษณะของกราฟการกระจายของขนาดเม็ดดิน แบ่งเป็น 2 จำพวกใหญ่ๆ ด้วยกัน คือ

1. ดินที่มีขนาดเม็ดคละกัันดี (well graded soil) คือดินมีเม็ดขนาดต่างๆ คละกัันดี โดยพิจารณาจากช่วงของกราฟ เรียกว่า coefficient of uniformity
2. ดินที่ไม่มีขนาดเม็ดคละ (poorly graded soil) จะแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

2.1 ดินที่มีขนาดเม็ดขนาดช่วง (gap graded) จะเห็นว่าขนาดระหว่าง 0.0025 ถึง 0.017 มม. หายไป กราฟจึงเป็นเส้นระนาบ

2.2 ดินที่มีเม็ดขนาดเดียว (uniform graded) จะเห็นว่าขนาดของเม็ด ระหว่าง 1.0 - 2.0 มม. มีถึง 55 เปอร์เซ็นต์

ตารางผนวกที่ ก1 การแบ่งชนิดของเม็ดดิน

ชนิดของดิน	ช่วงของขนาดเม็ดดิน (มม.)
หิน	ใหญ่กว่า 75 (3")
กรวดหยาบ	75 – 19 (3/4")
กรวดละเอียด	19 – 4.75 (#4)
ทรายหยาบ	4.75 – 2 (#10)
ทรายปานกลาง	2 – 0.425 (#40)
ทรายละเอียด	0.425 – 0.075 (#200)
ตะกอนทราย	0.075 – 0.005 หรือ 0.002
ดินเหนียว	0.005 หรือ 0.002 – 0.001
แขวนลอย	เล็กกว่า 0.001

ที่มา: พทช (2553)

4. การคำนวณและการแสดงผล

การคำนวณและการแสดงผลการกระจายของขนาดเม็ดดินสามารถคำนวณหาขนาดเม็ดทรายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ต่างๆ โดยใช้ excel ดังแสดงในภาพผนวกที่ ก4, ก5 และ ก6 และนำผลที่ได้ไปทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของตะแกรงกับเปอร์เซ็นต์เม็ดทรายที่ผ่านตะแกรงดังแสดงในภาพผนวกที่ ก7 และ ก8 แล้วอ่านค่า D_{10} และ D_{50} จากกราฟ

				$D_{10} = 0.30$			
				$D_{50} = 0.49$			
Sieve size	Grain Size (mm)	Wt. Sieve + Soil (g)	Wt. Sieve (g)	Wt. soil Retained (g)	Percent Retained (%)	Cumulative Percent	Percent Finer (%)
No.10	1.680	508.9	508.9	0.0	0.00	0.00	100.00
No.12	1.410	513.5	513.5	0.0	0.00	0.00	100.00
No.20	0.840	354.1	353.2	0.9	0.16	0.16	99.84
No.50	0.297	806.6	300.2	506.4	91.50	91.66	8.34
No.100	0.149	326.1	289.1	37.0	6.68	98.34	1.66
No.200	0.074	277.4	270.3	7.1	1.28	99.62	0.38
Pan				2.1	0.38	100.00	0.00
			Sum	553.5	100		

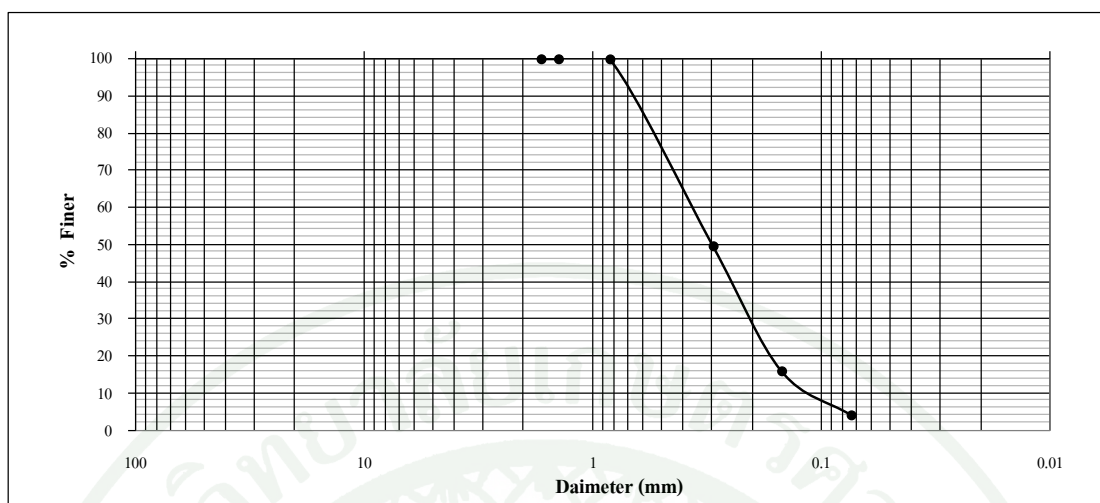
ภาพผนวกที่ ก4 การคำนวณหาขนาดเม็ดทรายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ต่างๆ ของตัวอย่างทรายชนิด A

				$D_{10} = 0.12$			
				$D_{50} = 0.30$			
Sieve size	Grain Size (mm)	Wt. Sieve + Soil (g)	Wt. Sieve (g)	Wt. soil Retained (g)	Percent Retained (%)	Cumulative Percent	Percent Finer (%)
No.10	1.680	508.9	508.9	0.0	0.00	0.00	100.00
No.12	1.410	513.5	513.5	0.0	0.00	0.00	100.00
No.20	0.840	353.3	353.1	0.2	0.03	0.03	99.97
No.50	0.297	572.4	300.2	272.2	50.29	50.32	49.68
No.100	0.149	471.3	289.1	182.1	33.65	83.97	16.03
No.200	0.074	334.4	270.3	64.1	11.85	95.82	4.18
Pan				22.6	4.18	100.00	0.00
			Sum	541.2	100		

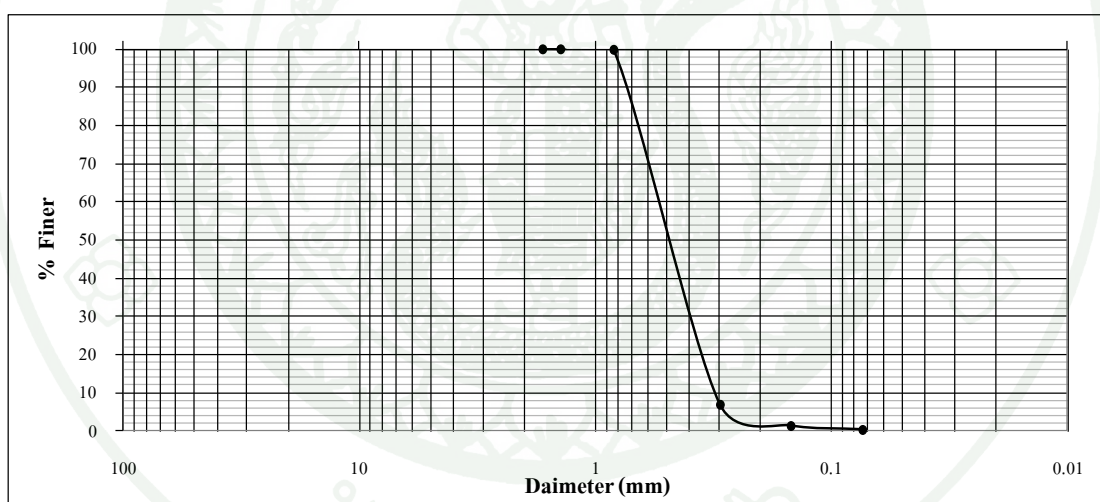
ภาพผนวกที่ ก5 การคำนวณหาขนาดเม็ดทรายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ต่างๆของตัวอย่างทรายชนิด B

				$D_{10} = 0.07$			
				$D_{50} = 0.18$			
Sieve size	Grain Size (mm)	Wt. Sieve + Soil (g)	Wt. Sieve (g)	Wt. soil Retained (g)	Percent Retained (%)	Cumulative Percent Retained (%)	Percent Finer (%)
No.10	1.680	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	100.00
No.12	1.410	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	100.00
No.40	0.420	394.2	315.7	78.4	7.83	7.83	92.17
No.50	0.297	512.2	300.3	212.0	21.16	28.99	71.01
No.100	0.149	555.2	289.2	266.0	26.56	55.55	44.45
No.200	0.074	532.9	270.3	262.6	26.21	81.76	18.24
Pan				182.8	18.24	100.00	0.00
			Sum	1001.7	100		

ภาพผนวกที่ ก6 การคำนวณหาขนาดเม็ดทรายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ต่างๆ ของทรายตัวอย่างชนิด C



ภาพผนวกที่ ก7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของตะแกรงกับเปอร์เซ็นต์เม็ดทรายที่ผ่านตะแกรงของตัวอย่างทรายชนิด A



ภาพผนวกที่ ก8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของตะแกรงกับเปอร์เซ็นต์เม็ดทรายที่ผ่านตะแกรงของตัวอย่างทรายชนิด B

จากกราฟการกระจายของขนาดเม็ดดิน (grain size distribution curve) พบว่าที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดทรายขนาด 0.01-0.30 มม. $D_{10} = 0.12$ และ $D_{50} = 0.30$ มม. แต่ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดทรายขนาด 0.30-0.70 มม. $D_{10} = 0.30$ และ $D_{50} = 0.49$ มม.



ภาคผนวก ข

การหาขนาดเม็ดดินโดยไฮโดรมิเตอร์ (Grain Size Determination of Hydrometer Analysis)

วิธีการทดลอง Grain Size Determination of Hydrometer Analysis

การหาขนาดดินเม็ดละเอียด ด้วยการวิเคราะห์ไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer Analysis) เป็นการวิเคราะห์ขนาดดินที่เม็ดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 200 ซึ่งจะต้องทดสอบภายใต้สมมติฐานที่ว่าเม็ดดินมีขนาดกลม แต่เม็ดดินจริงอาจมีลักษณะแบนทั้งนี้ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์จากการคำนวณ การนำผลการวิเคราะห์ไปใช้จะต้องคำนึงถึงความเป็นจริงข้อนี้ด้วย

1. อุปกรณ์การทดลอง

- 1.1 ตู้บที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้คงที่
- 1.2 เครื่องชั่งที่มีความละเอียด 0.01 กรัม
- 1.3 ภาชนะใส่ตัวอย่าง ภาชนะผสมดิน
- 1.4 อุปกรณ์ผสมดิน
- 1.5 นาฬิกาจับเวลา
- 1.6 Hydrometer ชนิดอ่านค่าความถ่วงจำเพาะ (ASTM 151H) ได้ประมาณ 0.995-1.030 หรืออ่านค่าน้ำหนักเม็ดดินต่อปริมาตร (ASTM 152H) ได้ประมาณ 0-60 กรัม/ลิตร
- 1.7 ผงช่วยให้เม็ดกระจาย (Dispersing Agent) โดยใช้ Sodium Hexa-Metaphosphate
- 1.8 กระบอกไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer Jar) หรือกระบอกตวง (Measuring Cylinder) ขนาด 1000 cm^3 จำนวน 2 ใบ
- 1.9 เทอร์โมมิเตอร์ 0-50 องศาเซลเซียส อ่านได้ละเอียด 0.1-0.5 องศาเซลเซียส

2. วิธีการทดลอง

2.1 เตรียมสารช่วยดินกระจายตัว (Dispersing Agent) ความเข้มข้น 4% โดยผง Sodium Hexa-Metaphosphate มาละลายน้ำ โดยใช้อัตราส่วน 4 กรัม ละลายน้ำ 100 ลบ.ซม. แล้วตั้งทิ้งไว้ โดย ATSM แนะนำว่าควรทิ้งไว้ไม่น้อยกว่า 16 ชั่วโมง

2.2 นำตัวอย่างดินแห้งที่เตรียมไว้ประมาณ 50 กรัม ผสมเข้ากับ สารช่วยเม็ดดินกระจายตัว (4% โดยผง Sodium Hexa-Metaphosphate) โดยใช้เครื่องกวนดินไฟฟ้าปั่นส่วนผสมดินประมาณ 10 นาที แล้วเทลงในกระบอกตกตะกอน ใช้น้ำกลั่นฉีดดินออกจากเครื่องผสมให้หมดแล้วเติมน้ำ จนถึงขีดบอกระดับ 1000 ลบ.ซม.

2.3 ใส่น้ำกลั่นในกระบอกตกตะกอนอีกอันหนึ่ง เพื่อใช้ล้างน้ำโคลนที่อาจติดไฮโดรมิเตอร์ มาหลังจากการวัด (โดยจับที่ก้านไฮโดรมิเตอร์จุ่มลงไปใต้น้ำแล้วหมุนไปมา) และแช่ไฮโดรมิเตอร์ ในระหว่างที่ไม่ใช้วัด

2.4 ใช้จุกยางปิดปากกระบอกตกตะกอนที่มีส่วนผสมดิน แล้วเขย่าส่วนผสมให้เข้ากัน ประมาณ 1 นาที จากนั้นวางลงแล้วเริ่มจับเวลาทันที

2.5 หย่อนไฮโดรมิเตอร์ลงในน้ำโคลนเพื่ออ่านค่า R ที่เวลา 0.25, 0.50, 1 และ 2 นาที ตามลำดับ โดยไม่ต้องยกไฮโดรมิเตอร์ออกขณะที่อ่านค่าตามเวลาดังกล่าว เมื่ออ่านค่าครบแล้วจึงยกไฮโดรมิเตอร์ออกแล้วทำการวัดอุณหภูมิของน้ำโคลนด้วย

2.6 เขย่ากระบอกอีกครั้งตามขั้นตอนข้อที่ 2.4 แล้ววัดค่า R ที่ 2,5,10,20,...นาทีก (เพิ่มระยะเวลาอ่านครั้งต่อไปประมาณ 2 เท่า) จนกระทั่งค่าที่อ่านได้คงที่โดยประมาณจึงหยุดการทดลอง โดยทุกครั้งที่ย่านค่า R ให้วัดอุณหภูมิของส่วนผสมน้ำโคลน หลังจากเสร็จการอ่านค่าแต่ละครั้งให้ยกไฮโดรมิเตอร์ออกไปจุ่มไว้ในกระบอกน้ำเปล่าที่เตรียมไว้และปิดปากกระบอกน้ำโคลนด้วยจุกยาง

2.7 หลังจากการทดสอบเสร็จสิ้นแล้วให้เขย่ากระบอก เทน้ำโคลนออกจากกระบอกใส่ภาชนะ โดยต้องล้างดินที่ก้นกระบอกออกให้หมด แล้วนำไปอบเพื่อหาน้ำหนักของดินแห้ง



ภาพผนวกที่ ข1 นำเครื่องกวนดินไฟฟ้าปั่นส่วนผสมดิน



ภาพผนวกที่ ข2 เขย่าส่วนผสม



ภาพผนวกที่ ข3 วัดค่า R ที่เวลาต่างๆ



ภาพผนวกที่ ข4 หลังจากเสร็จการอ่านค่า นำไฮโดรมิเตอร์จุ่มไว้ในกระบอกน้ำเปล่า เพื่อที่จะนำไปวัดที่เวลาต่างๆต่อไป



ภาพผนวกที่ ข5 นำตัวอย่างทรายเทใส่ภาชนะแล้วนำเข้าตู้อบ

3. การคำนวณและการแสดงผล

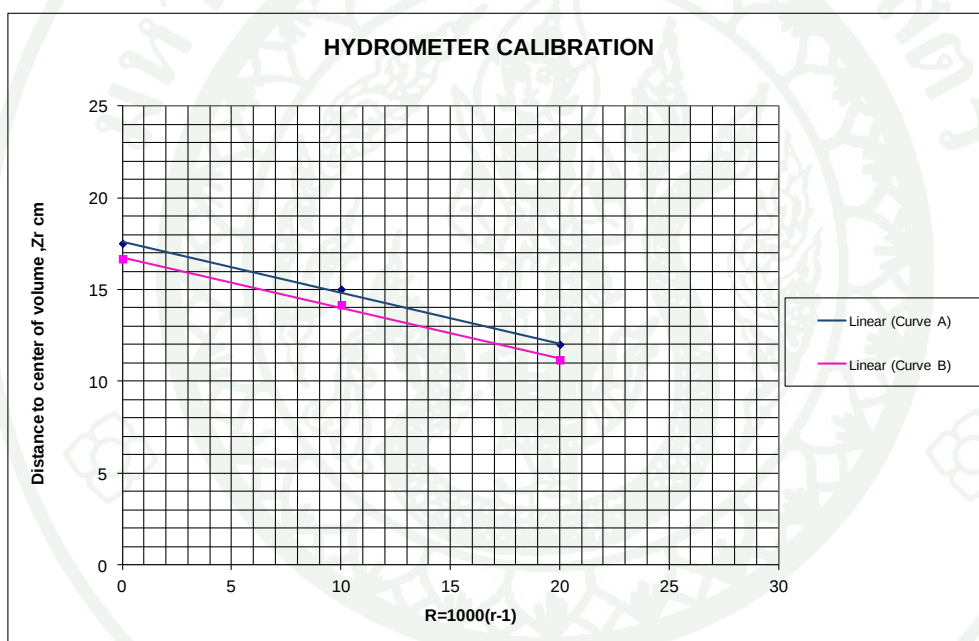
การคำนวณและการแสดงผลการกระจายของขนาดเม็ดดินสามารถคำนวณหาขนาดเม็ดทรายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ต่างๆของตัวอย่างทรายชนิด C พบว่าไม่สามารถที่จะอ่านค่าเปอร์เซ็นต์เม็ดทรายที่ผ่านตะแกรงได้ ดังนั้นจึงต้องทำการหาขนาดดินเม็ดละเอียด ด้วยการวิเคราะห์ไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer Analysis) ใช้ excel ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข6 และนำผลที่ได้ไปทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของตะแกรงกับเปอร์เซ็นต์เม็ดทรายที่ผ่านตะแกรงดังแสดงในภาพผนวกที่ ก7 แล้วอ่านค่า D_{10} และ D_{50} จากกราฟ

Container No.	1
Mass of dry soil for hydrometer analysis ,g	62.35
Mass of dried soil for sample , g	49.67
Type of hydrometer used	151H
Specific gravity of soil (G)	2.7
mount and type of dispersing agent used 125ml of sodiem hexametaphosphate solution (40g/lit)	

sieve No.	Sieve size mm	Mass sieve +soil (g)	Mass sieve (g)	Mass soil Retained (g)	Percent Retained (%)	Cumulative Percent Retained (%)	Percent Finer (%)
10	1.680	0	0	0.00	0.00	0.00	100.000
12	1.410	0	0	0.00	0.00	0.00	100.000
40	0.420	394.18	315.74	78.44	7.83	7.83	92.169
50	0.297	512.21	300.26	211.95	21.16	28.99	71.011
100	0.149	555.19	289.18	266.01	26.56	55.55	44.455
200	0.074	532.86	270.31	262.55	26.21	81.76	18.245
pan	-	447.34	264.58	182.76	18.24	100.00	0.000
sum				1001.71	100.00		

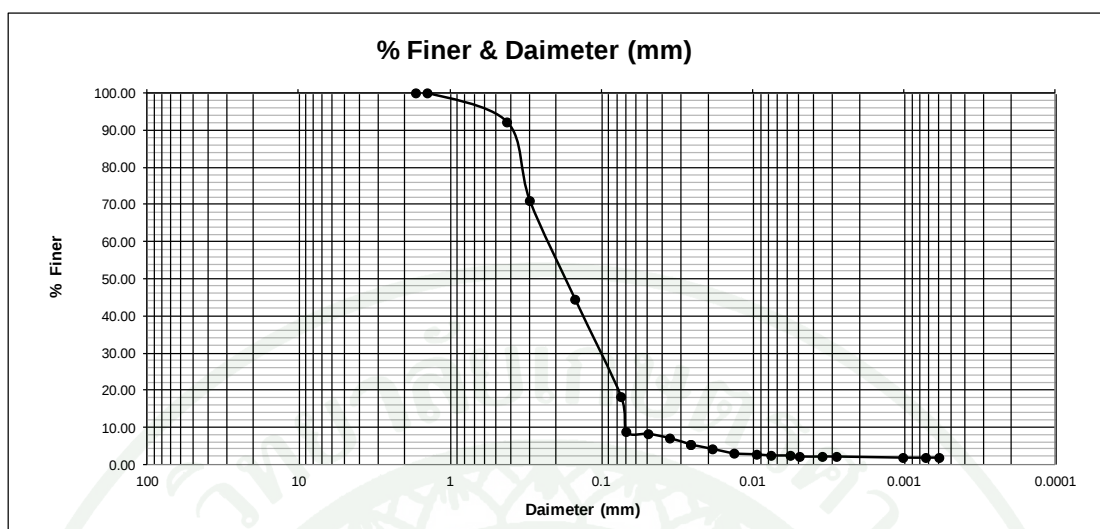
Hydrometer Calibration

r	Li	L	$R=1000(r-1)$	$Zr=Li-(L/2)$	$(Zr - V_H/2A_j)$
1.000	24.500	14	0	17.50	16.65
1.010	22.000	14	10	15.00	14.15
1.020	19.000	14	20	12.00	11.15
Diameter of Hydrometer jar, D			cm	6.72	
Cross-Section Area of Jar, A_j			cm ²	35.47	
Initial Graduated Cylinder Reading, V_1			cm ³	870	
After Hydrometer Immersion Reading V_2			cm ³	930	
Volume of Hydrometer, $V_H=V_1-V_2$			cm ³	60	
Weight of Hydrometer, W_H			g	62.35	
Minimum Hydrometer Reading, r_H				0.980	
Volume of Hydrometer, $V_H=W_H/r_H$			cm ³	63.62	
Plot Curve A: R vs. Zr				First 2 Min. Test	
Plot Curve B: R vs. $(Zr - V_H/2A_j)$				After 2 Min. Test	



Date	time	Elapsed time, T (min)	Actual hydrometer reading	$R=1000(r-1)$	Composite correction R_w	Hydrometer reading with composite correction applied, R	Temperature e (°C)	Effective depth of hydrometer, H (cm) From Curve	Value of K	Diameter of soil particle, D (mm)	N = $K_1(R-R_w)$ %	Percent of soil finer, N' (%)
27/10/2014		0.25	1.0150	15.00	-0.2	15.20	30	13.57	0.01199	0.0684	48.46	8.841
		0.50	1.0140	14.00	-0.2	14.20	30	13.83	0.01199	0.0489	45.27	8.259
		1	1.0120	12.00	-0.2	12.20	30	14.36	0.01199	0.0352	38.89	7.096
		2	1.0090	9.00	-0.2	9.20	30	15.14	0.01199	0.0256	29.33	5.351
	14:02:00	2	1.0090	9.00	-0.2	9.20	30	15.14	0.01199	0.0256	29.33	5.351
		4	1.0070	7.00	-0.2	7.20	30	15.67	0.01199	0.0184	22.95	4.188
		8	1.0050	5.00	-0.2	5.20	30	16.19	0.01199	0.0132	16.58	3.025
		16	1.0045	4.50	-0.2	4.70	30	16.32	0.01199	0.0094	14.98	2.734
		25	1.0040	4.00	-0.2	4.20	30	16.45	0.01199	0.0075	13.39	2.443
		45	1.0040	4.00	-0.2	4.20	30	16.45	0.01199	0.0056	13.39	2.443
	15:02:00	60	1.0035	3.50	-0.2	3.70	30	16.58	0.01199	0.0049	11.80	2.152
	16:02:00	120	1.0035	3.50	-0.2	3.70	30	16.58	0.01199	0.0035	11.80	2.152
	17:02:00	185	1.0035	3.50	-0.2	3.70	30	16.58	0.01199	0.0028	11.80	2.152
28/10/2014	14:02:00	1440	1.0030	3.00	-0.2	3.20	29	16.71	0.01212	0.0010	10.20	1.861
29/10/2014	14:02:00	2880	1.0030	3.00	-0.2	3.20	29	16.71	0.01212	0.0007	10.20	1.861
30/10/2014	14:02:00	4320	1.0030	3.00	-0.2	3.20	29	16.71	0.01212	0.0006	10.20	1.861

ภาพผนวกที่ ข6 ผลของข้อมูล



ภาพผนวกที่ ข7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของตะแกรงกับเปอร์เซ็นต์เม็ดทราย
ที่ผ่านตะแกรงของตัวอย่างทรายชนิด C

จากกราฟการกระจายของขนาดเม็ดดิน (grain size distribution curve) และวิเคราะห์ไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer Analysis) พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของตะแกรงกับเปอร์เซ็นต์เม็ดทรายที่ผ่านตะแกรงของตัวอย่างทรายชนิด C มีค่า $D_{10} = 0.07$ และ $D_{50} = 0.18$ มม.



ภาคผนวก ค

การหาความชื้นน้ำของดิน (Soil Permeability Test)

วิธีการทดลอง Soil Permeability Test

การทดสอบความสามารถในการซึมได้ของเม็ดทราย โดยใช้วิธีระดับน้ำคงที่ (constant head test) เป็นวิธีที่นิยมใช้ทดลองในดินประเภทกรวด ทราย ดินที่มีตะกอนปนเล็กน้อยหรือไม่มีตะกอนปนเลย มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้ปานกลางถึงสูง

1. อุปกรณ์การทดลอง

- 1.1 แผงเครื่องมือทดลองการซึมผ่าน
- 1.2 กระบอกลดสอบการซึมผ่าน (mold)
- 1.3 กระบอกตวง 1000 ซม.³
- 1.4 นาฬิกาจับเวลา
- 1.5 ถังสำรองน้ำ

2. วิธีการทดลอง

2.1 เตรียมตัวอย่างทรายสำหรับทดสอบ ให้นำตัวอย่างดินที่จะทำการทดสอบไปผึ่งแห้งโดยอากาศให้แห้งสนิท นำไปชั่งน้ำหนัก

2.2 วัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงโมล (mold) เพื่อหาพื้นที่หน้าตัดของปริมาตรตัวอย่างทรายแล้วนำวัสดุรองพื้น (ตะแกรง) ใส่เข้าไปในโมลเพื่อป้องกันเม็ดทรายหลุดออกจากโมล



ภาพผนวกที่ ค1 นำตัวอย่างทรายมาชั่งน้ำหนัก



ภาพผนวกที่ ค2 นำตัวอย่างทรายมาเทใส่โมล



ภาพผนวกที่ ค3 เครื่องมือการทดสอบค่าความชื้นน้ำ

2.3 นำตัวอย่างดินที่จะทดสอบซึ่งแห้งสนิทแล้วใส่ในโมลแล้วนำตระแกรงวางหน้าบนของตัวอย่างดินอีกทีเพื่อป้องกันเม็ดดินเคลื่อนตัวออกจากโมล หลังจากนั้นนำฝาครอบปิดโมล โดยล็อกโมลให้แน่นสนิท



ภาพผนวกที่ ค4 การติดตั้งโมลในการทดสอบค่าความชื้นน้ำ

2.4 ประกอบชิ้นส่วนต่างๆเข้ากับตัวโมล ไม่ว่าจะเป็นท่อวัดความดัน ท่อน้ำเข้าและออก



ภาพผนวกที่ ค5 การติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดเพื่อหาค่าความชื้นน้ำ

2.5 ปล่อน้ำเข้าโมลและในขณะเดียวกันก็ระบายอากาศออกโดยใช้วาล์วเปิดปิดซึ่งอยู่ด้านบนของโมลทำให้อากาศที่อยู่ในโมลสามารถระบายออกได้เพราะถ้าไม่ระบายอากาศออกอากาศสามารถเข้าไปแทรกตัวในชั้นดินทำให้การวัดปริมาณน้ำเกิดการผิดพลาดได้ เมื่อระบายอากาศออกหมดแล้ว รอให้ความดันคงที่แล้วจึงทำการวัดปริมาณน้ำที่ผ่านชั้นดินที่นำมาทดสอบ แล้วจับเวลาเป็นวินาทีเมื่อปริมาตรของน้ำเต็มกระบอกตวง (1000 ลบ.ซม.) จดบันทึกเวลาและอุณหภูมิของน้ำ ทำซ้ำกันอย่างน้อย 3 ครั้ง โดยที่ข้อมูลไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก พร้อมทั้งวัดอุณหภูมิของน้ำที่ไหลผ่านเม็ดทราย



ภาพผนวกที่ ค6 การวัดอัตราการไหลของน้ำที่ไหลซึมผ่านเมมเบรน



ภาพผนวกที่ ค7 วัดอุณหภูมิของน้ำที่ไหลผ่านเมมเบรน

3. การคำนวณและการแสดงผล

PERMEABILITY									
Test	1	2	3						
Diameter of soil specimen, D(cm)	7.60	7.60	7.60						
Cross-section area of soil specimen (cm ²)	45.30	45.30	45.30						
Height, H1 (cm)	28.85	28.85	28.85						
Height, H2 (cm)	3.51	3.53	3.38						
Height of specimen, H1-H2 (cm)	25.35	25.33	25.47						
Volume of specimen, (cm ³)	1148.25	1147.35	1153.92						
L	7.805	cm							
Test No.	Trial No. (1)	Head loss, Δh (cm) (2)	Quantity of water discharged, Q (cm ³) (3)	Time, t (s) (4)	Temperature, T (°C) (5)	Permeability at T °C: KT (cm/s) (6)	Ratio of viscosity at T°C/ viscosity at 20 °C (7)	Permeability at 20 °C K ₂₀ (cm/s) (8)=(6)*(7)	Average K ₂₀ (cm/s) (9)
1	1	18.4	1000	3.93	31.5	2.3824	0.7721	1.8395	1.7307
	2	25.2	1000	3.45	31.5	1.9816	0.7721	1.5300	
	3	20.5	1000	3.56	31.5	2.3606	0.7721	1.8226	

Permeability
 Well-sorted gravel 10⁻² to 1 cm/sec
 Well-sorted sands, glacial outwash 10⁻³ to 10⁻¹ cm/sec
 Silty sands, fine sands 10⁻⁵ to 10⁻³ cm/sec
 Silt, sandy silts, clayey sands, till 10⁻⁶ to 10⁻⁴ cm/sec
 Clay 10⁻⁹ to 10⁻⁶ cm/sec

Cr: Some Useful Numbers on the Engineering Properties of Materials (Geologic and Otherwise) GEOL 615 by Stanford University

ภาพผนวกที่ ค8 การคำนวณหาค่าความซึมผ่านของเม็ดทรายของตัวอย่างทรายชนิด A

PERMEABILITY									
Test	1	2							
Diameter of soil specimen, D(cm)	7.60	7.60							
Cross-section area of soil specimen (cm ²)	45.30	45.30							
Height, H1 (cm)	28.85	28.85							
Height, H2 (cm)	3.88	3.66							
Height of specimen, H1-H2 (cm)	24.97	25.19							
Volume of specimen, (cm ³)	1131.26	1141.23							
L	7.805	cm							
Test No.	Trial No. (1)	Head loss, Δh (cm) (2)	Quantity of water discharged, Q (cm ³) (3)	Time, t (s) (4)	Temperature, T (°C) (5)	Permeability at T °C: KT (cm/s) (6)	Ratio of viscosity at T°C/ viscosity at 20 °C (7)	Permeability at 20 °C K ₂₀ (cm/s) (8)=(6)*(7)	Average K ₂₀ (cm/s) (9)
1	1	35	1000	18.03	31	0.2730	0.7801	0.2130	0.2090
	2	36.4	1000	18.00	31	0.2629	0.7801	0.2051	

Permeability
 Well-sorted gravel 10⁻² to 1 cm/sec
 Well-sorted sands, glacial outwash 10⁻³ to 10⁻¹ cm/sec
 Silty sands, fine sands 10⁻⁵ to 10⁻³ cm/sec
 Silt, sandy silts, clayey sands, till 10⁻⁶ to 10⁻⁴ cm/sec
 Clay 10⁻⁹ to 10⁻⁶ cm/sec

Cr: Some Useful Numbers on the Engineering Properties of Materials (Geologic and Otherwise) GEOL 615 by Stanford University

ภาพผนวกที่ ค9 การคำนวณหาค่าความซึมผ่านของเม็ดทรายของตัวอย่างทรายชนิด B

PERMEABILITY											
Test	1										
Diameter of soil specimen, D(cm)	7.60										
Cross-section area of soil specimen (cm ²)	45.30										
Height, H1 (cm)	28.85										
Height, H2 (cm)	3.51										
Height of specimen, H1-H2 (cm)	25.35										
Volume of specimen, (cm3)	1148.25										
Permeability Well-sorted gravel10⁻² to 1 cm/sec Well-sorted sands, glacial outwash10⁻³ to 10⁻¹ cm/sec Silty sands, fine sands10⁻⁵ to 10⁻³ cm/sec Silt, sandy silts, clayey sands, till10⁻⁶ to 10⁻⁴ cm/sec Clay10⁻⁹ to 10⁻⁶ cm/sec											
Cr: Some Useful Numbers on the Engineering Properties of Materials (Geologic and Otherwise) GEOL 615 by Stanford University											
L		7.805		cm							
Test No.	Trial No. (1)	Head loss, Δh (cm) (2)	Quantity of water discharged, Q (cm ³) (3)	Time, t (s) (4)	Temperature, T (°C) (5)	Permeability at T °C: KT (cm/s) (6)	Ratio of viscosity at T°C/ viscosity at 20 °C (7)	Permeability at 20 °C K ₂₀ (cm/s) (8)=(6)^(7)	Average K ₂₀ (cm/s) (9)		
1	1	88	50	109.70	29	0.0009	0.8139	0.0007	7.26E-04		

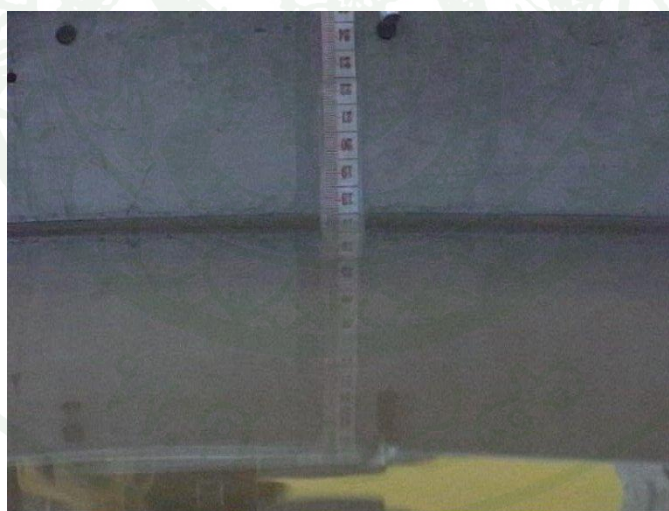
ภาพผนวกที่ ค10 การคำนวณหาค่าความซึมผ่านของเม็ดทรายของตัวอย่างทรายชนิด C

จากการคำนวณพบว่า การทดลองหาค่าความซึมผ่านโดยใช้ขนาดเม็ดทรายนั้นให้ค่า $k(D_{50} = 0.49)$ เท่ากับ 1.7307 ซม./วินาที , $k(D_{50} = 0.30)$ เท่ากับ 0.2090 ซม./วินาที และ $k(D_{50} = 0.18)$ เท่ากับ 0.000726 ซม./วินาทีสำหรับค่า k ที่หาได้จากการทดลองในครั้งนี้จะนำไปวิเคราะห์ต่อไป

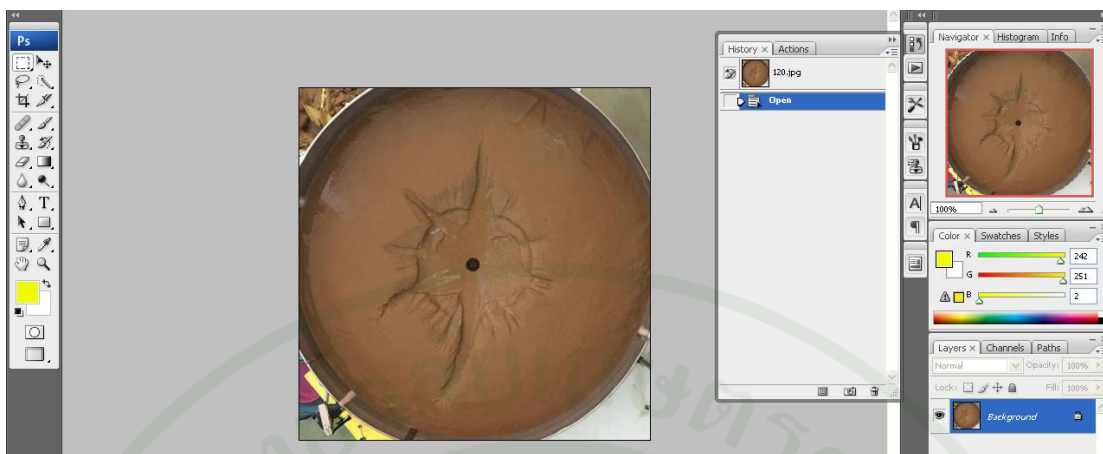




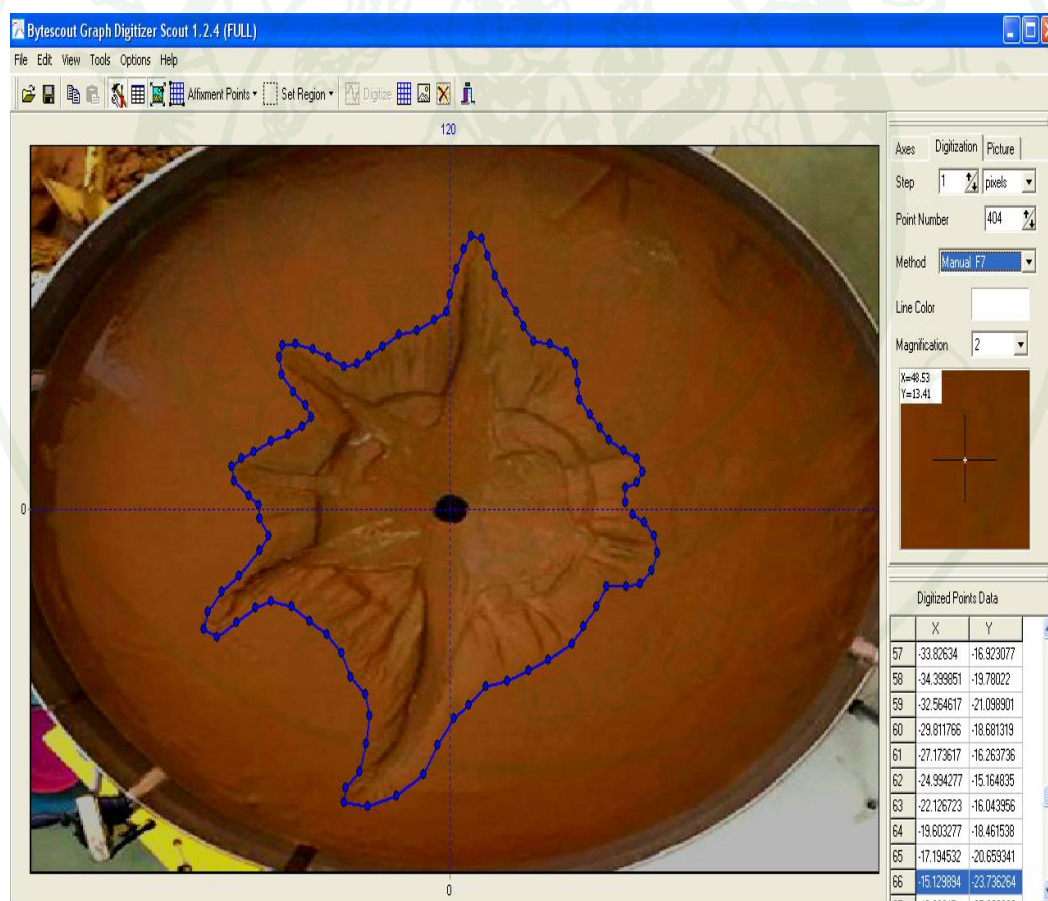
ภาพผนวกที่ ง1 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อเก็บข้อมูลในการทดลอง



ภาพผนวกที่ ง2 แถบวัดระดับน้ำ



ภาพผนวกที่ ง3 การปรับภาพที่ถ่ายได้จากกล้อง webcam ด้วยโปรแกรม photoshop



ภาพผนวกที่ ง4 การดิจิทัลข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์ผลการทดลอง

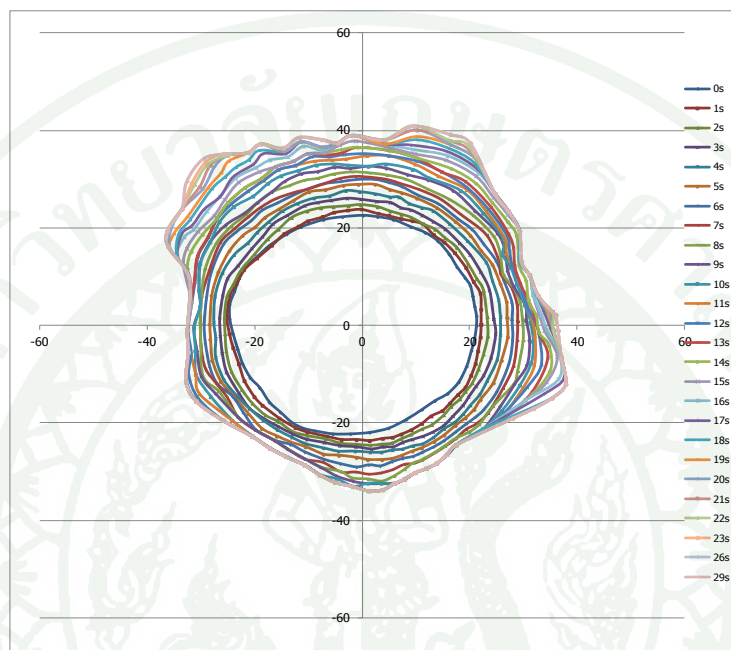


ภาคผนวก จ

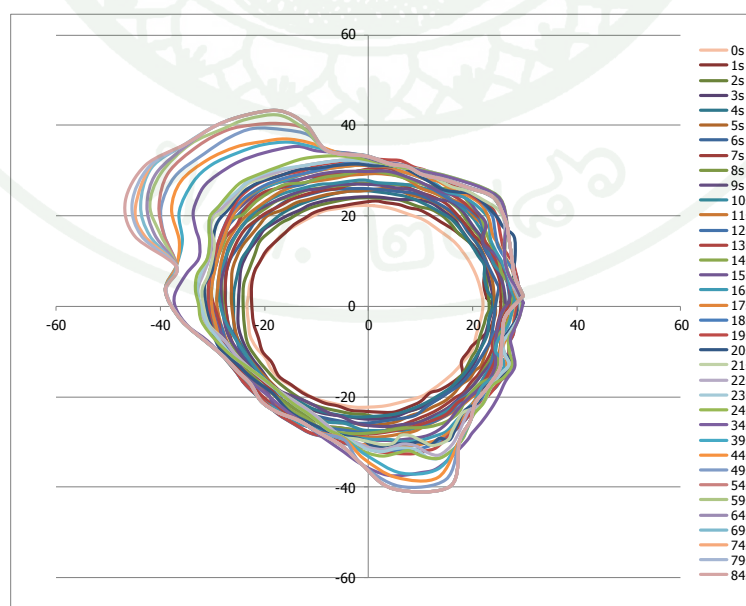
ผลการทดลองศึกษารูปแบบของธารน้ำเนื่องจากน้ำไหลป่าและน้ำใต้ดิน

ผลการทดลอง

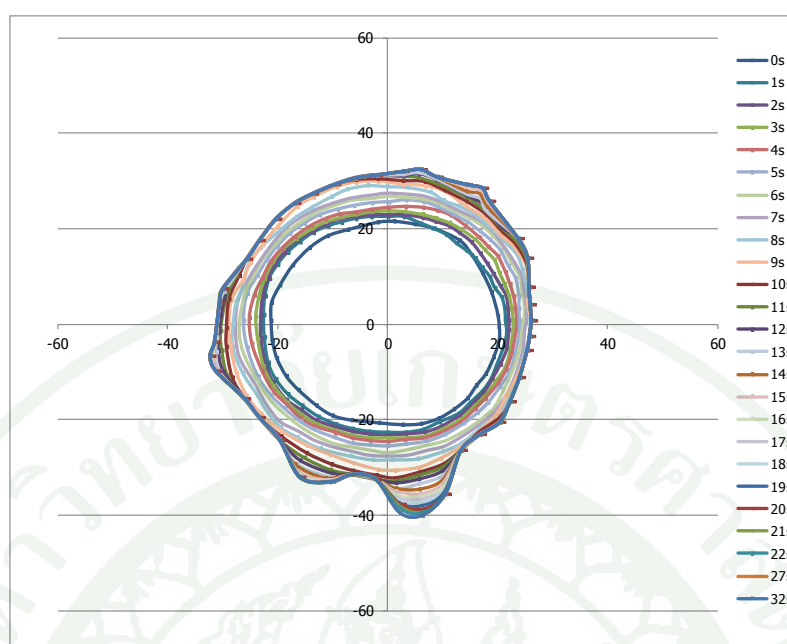
1. ลักษณะรูปร่างธารน้ำ



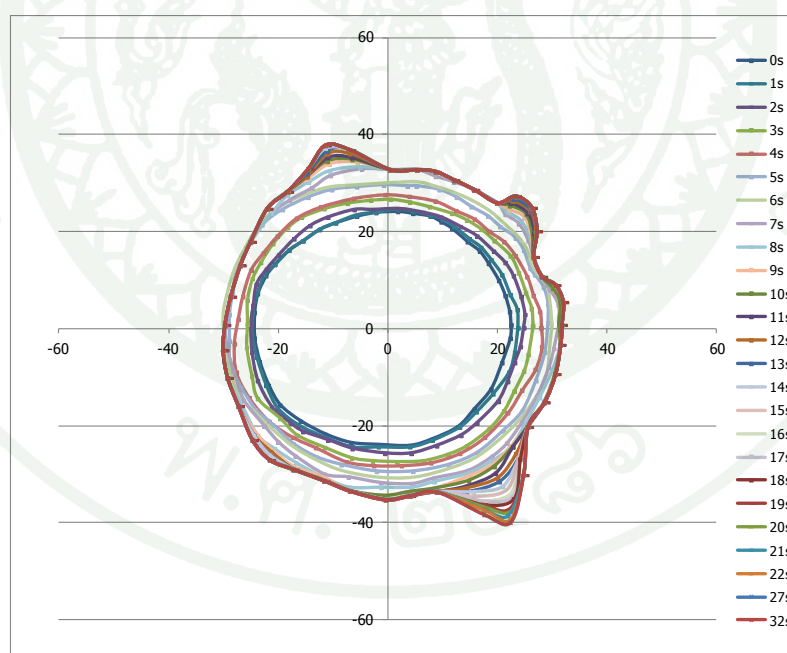
ภาพผนวกที่ จ1 รูปร่างโครงข่ายพัฒนาธารน้ำของตัวอย่างทราย A-0



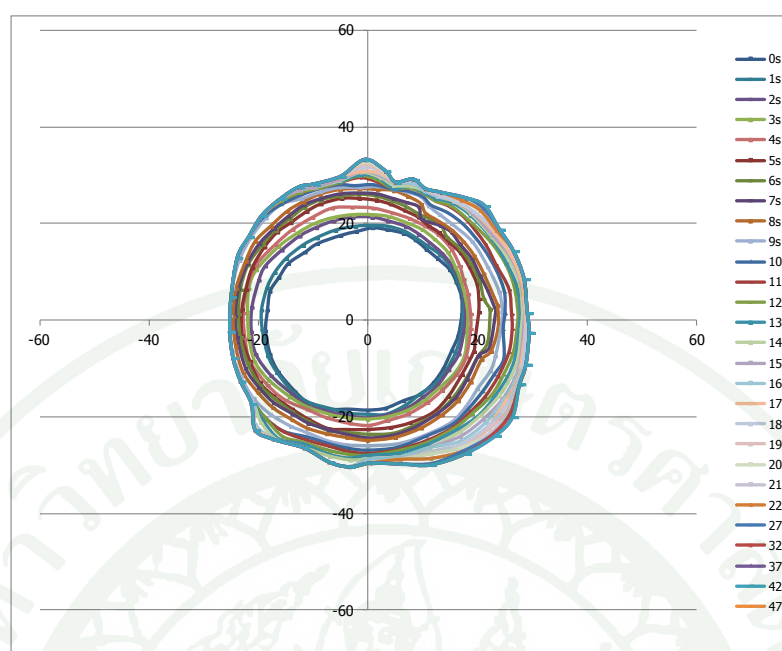
ภาพผนวกที่ จ2 รูปร่างโครงข่ายพัฒนาธารน้ำของตัวอย่างทราย B-0



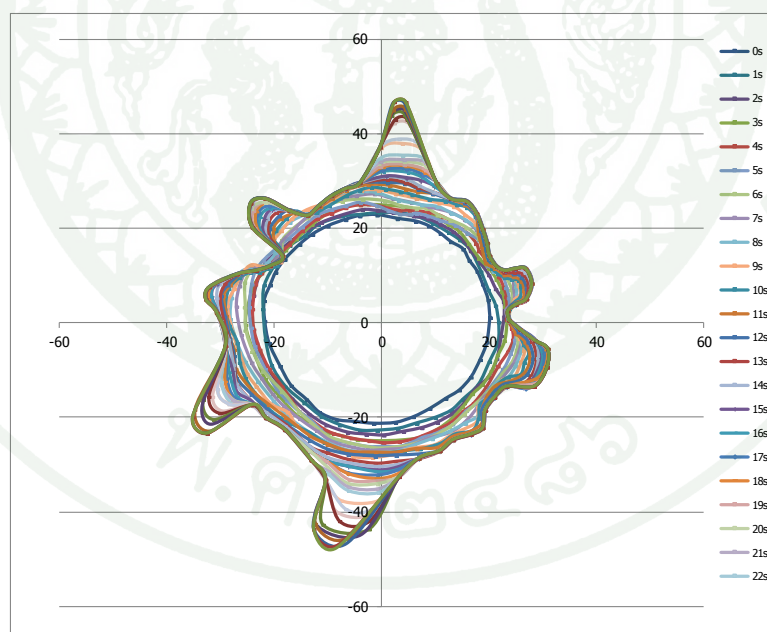
ภาพผนวกที่ จ3 รูปร่างโครงข่ายพัฒนาธารน้ำของตัวอย่างทราย A-1



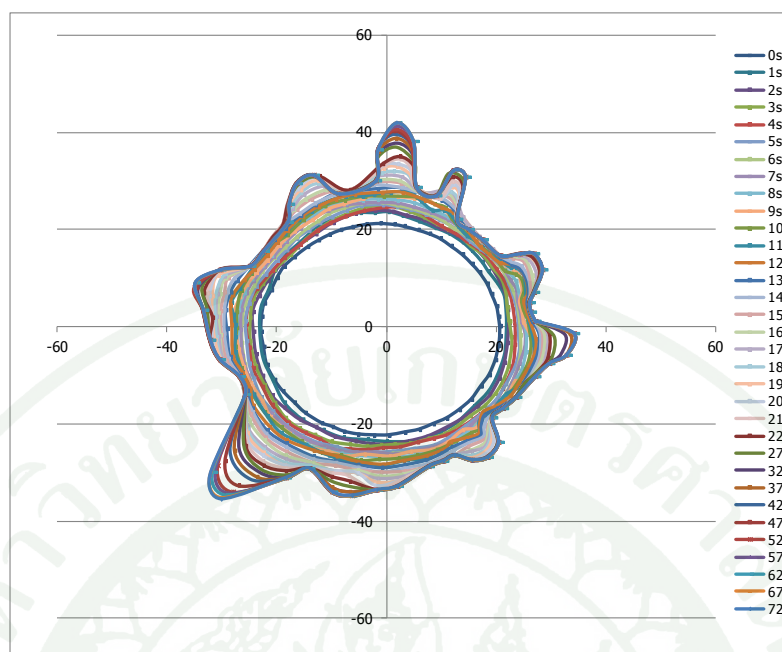
ภาพผนวกที่ จ4 รูปร่างโครงข่ายพัฒนาธารน้ำของตัวอย่างทราย A-2



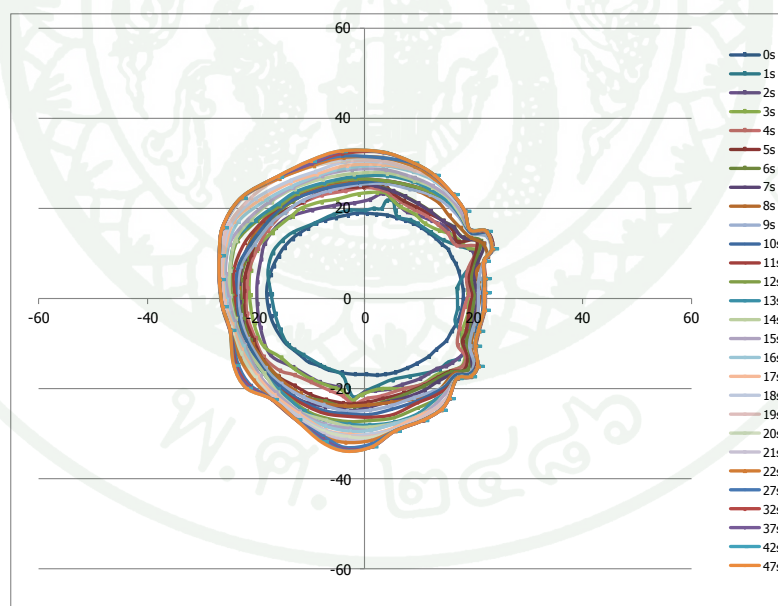
ภาพผนวกที่ จ5 รูปร่างโครงข่ายพัฒนารณำของตัวอย่างทราย A-3



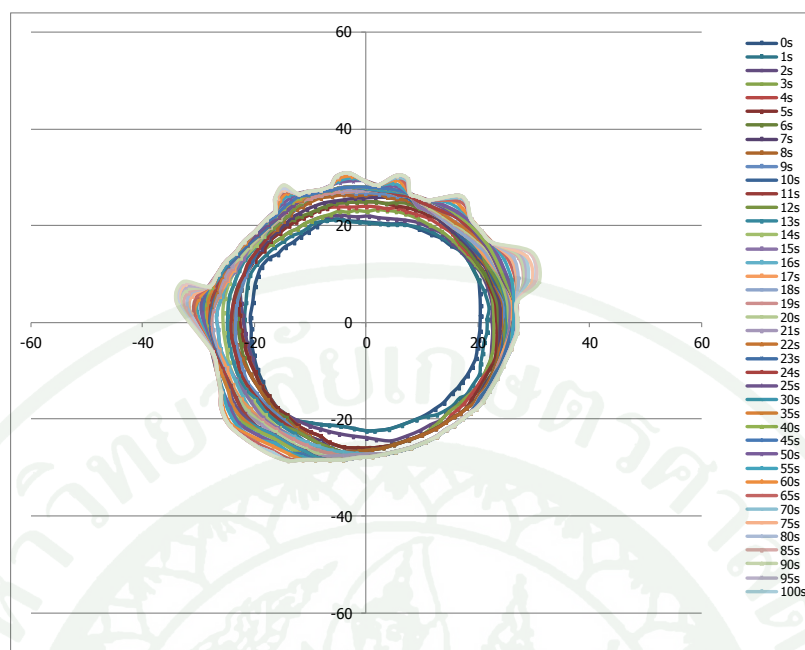
ภาพผนวกที่ จ6 รูปร่างโครงข่ายพัฒนารณำของตัวอย่างทราย B-1



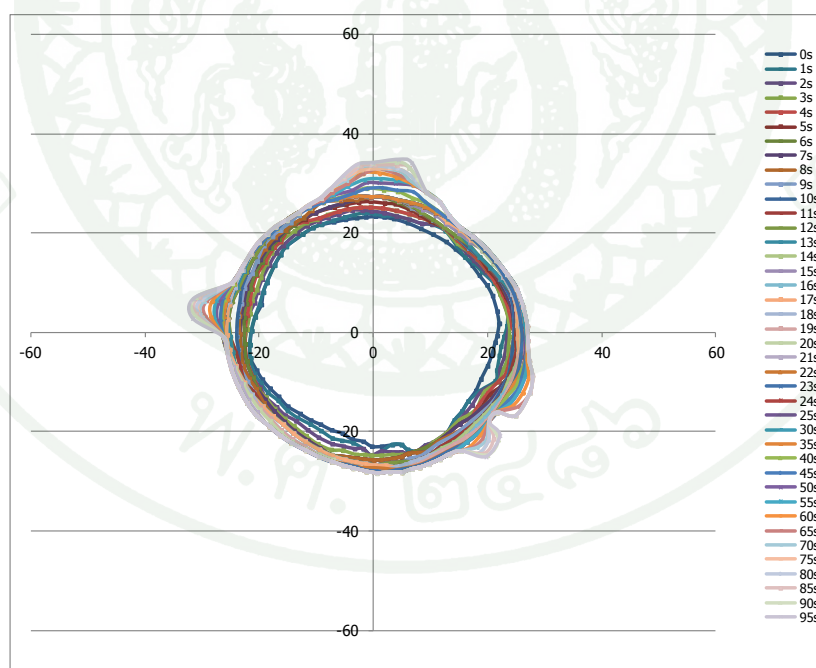
ภาพผนวกที่ จ7 รูปร่างโครงข่ายพัฒนาธารน้ำของตัวอย่างทราย B-2



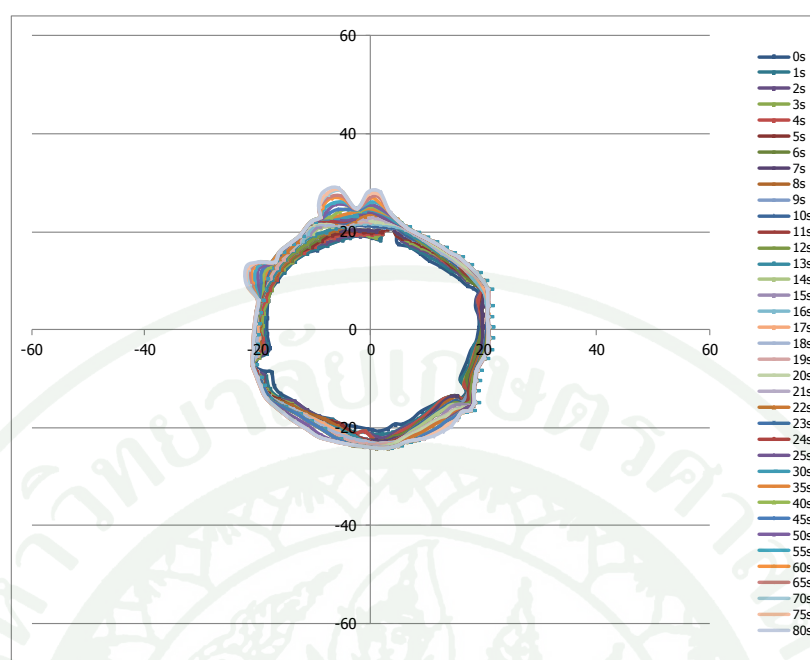
ภาพผนวกที่ จ8 รูปร่างโครงข่ายพัฒนาธารน้ำของตัวอย่างทราย B-3



ภาพผนวกที่ ๑๑ รูปร่างโครงข่ายพัฒนาร้านน้ำของตัวอย่างทราย C-1



ภาพผนวกที่ ๑๑๐ รูปร่างโครงข่ายพัฒนาร้านน้ำของตัวอย่างทราย C-2



ภาพผนวกที่ ๑11 รูปร่างโครงข่ายพัฒนารูปร่างของตัวอย่างทราย C-3

2. พื้นที่ธารน้ำที่ถูกกัดเซาะ

ตารางผนวกที่ จ1 การคำนวณพื้นที่และความยาวของธารน้ำของตัวอย่างทรายชนิด A-0

A-0					
T(s)	A(cm ²)	P(cm)	T(s)	A(cm ²)	P(cm)
0	1606.06	142.58	26	4072.08	240.64
1	1752.87	149.21	29	4072.08	240.64
2	1897.67	154.91			
3	2072.89	161.93			
4	2259.99	169.20			
5	2448.03	175.93			
6	2634.96	182.86			
7	2788.44	188.52			
8	2921.04	193.79			
9	3078.66	199.17			
10	3216.88	203.74			
11	3359.45	207.97			
12	3426.13	210.81			
13	3505.36	214.21			
14	3570.42	216.71			
15	3666.23	220.64			
16	3760.29	225.83			
17	3826.62	228.83			
18	3896.31	231.32			
19	3951.98	234.58			
20	3994.09	236.47			
21	4021.37	237.25			
22	4036.98	238.47			
23	4062.97	239.83			

ตารางผนวกที่ จ2 การคำนวณพื้นที่และความยาวของธารน้ำของตัวอย่างทรายชนิด B-0

B-0					
T(s)	A(cm ²)	P(cm)	T(s)	A(cm ²)	P(cm)
0	1584.93	141.31	39	3517.26	222.22
1	1623.40	144.11	44	3604.28	227.68
2	1820.03	151.98	49	3733.25	234.96
3	1932.39	156.51	54	3807.93	239.30
4	1961.36	157.47	59	3869.53	242.83
5	2101.31	163.38	64	3912.46	245.10
6	2141.83	164.73	69	3941.95	246.81
7	2271.08	169.64			
8	2361.95	173.02			
9	2303.04	171.59			
10	2391.49	175.07			
11	2569.41	181.07			
12	2585.95	183.92			
13	2622.94	184.36			
14	2631.68	185.71			
15	2692.25	188.13			
16	2807.18	191.75			
17	2896.77	193.78			
18	2990.11	196.31			
19	3054.95	198.68			
20	2936.58	200.05			
21	2925.02	200.71			
22	3001.07	203.89			
23	3077.00	205.97			
24	3136.28	207.66			
29	3374.98	215.11			
34	3506.18	221.15			

ตารางผนวกที่ จ3 การคำนวณพื้นที่และความยาวของธารน้ำของตัวอย่างทรายชนิด A

A-1			A-2			A-3		
T(s)	A (cm ²)	P (cm)	T(s)	A (cm ²)	P (cm)	T(s)	A (cm ²)	P (cm)
0	1405.48	133.13	0	1785.62	150.00	0	1069.22	116.37
1	1588.56	141.60	1	1867.94	153.50	1	1144.51	120.09
2	1686.36	145.82	2	2017.66	159.49	2	1273.75	126.56
3	1791.10	150.18	3	2280.14	169.73	3	1373.86	131.49
4	1897.20	154.66	4	2467.07	176.33	4	1478.95	136.58
5	2035.70	160.12	5	2773.54	187.21	5	1641.71	144.12
6	2175.53	165.62	6	2906.05	191.53	6	1749.30	149.05
7	2296.39	170.24	7	3090.29	198.21	7	1842.25	153.85
8	2439.52	175.75	8	3219.35	202.84	8	1944.59	157.34
9	2581.27	181.09	9	3309.66	206.53	9	2130.04	164.34
10	2720.13	185.92	10	3342.79	208.39	10	2247.08	168.93
11	2798.31	188.89	11	3382.74	211.15	11	2330.01	172.08
12	2838.74	191.29	12	3409.75	213.57	12	2398.42	174.87
13	2880.08	194.35	13	3439.63	216.02	13	2464.45	177.94
14	2913.86	196.66	14	3456.48	218.37	14	2521.96	179.60
15	2938.72	198.74	15	3478.91	220.68	15	2577.33	182.68
16	2960.27	200.92	16	3492.15	222.00	16	2609.05	183.86
17	2974.86	202.63	17	3497.68	222.89	17	2641.23	184.98
18	2978.83	203.17	18	3504.35	223.65	18	2666.64	186.47
19	2983.58	203.90	19	3526.26	226.11	19	2698.61	188.15
20	2991.03	204.94	20	3531.23	226.79	20	2708.26	189.11
21	2995.39	205.70	21	3535.57	228.02	21	2721.49	190.02
22	2998.05	206.08	22	3535.57	228.02	22	2726.77	190.32
27	3004.92	207.24	27	3544.97	228.96			

ตารางผนวกที่ ๑๔ การคำนวณพื้นที่และความยาวของธารน้ำของตัวอย่างทรายชนิด B-1

B-1					
T(s)	A (cm ²)	P (cm)	T(s)	A (cm ²)	P (cm)
0	1444.33	135.08	47	3027.97	268.75
1	1607.87	142.53	52	3049.60	273.86
2	1733.59	148.05			
3	1854.67	153.41			
4	1854.09	153.87			
5	1933.05	158.40			
6	2015.55	162.58			
7	2100.71	167.06			
8	2208.81	174.07			
9	2270.95	179.76			
10	2308.09	184.95			
11	2362.46	188.14			
12	2455.71	193.52			
13	2536.30	198.46			
14	2579.40	203.31			
15	2630.47	207.30			
16	2667.86	211.39			
17	2701.47	215.41			
18	2723.33	218.50			
19	2752.60	222.80			
20	2779.15	226.07			
21	2803.36	228.81			
22	2826.24	232.17			
27	2885.13	240.01			
32	2904.59	243.31			
37	2955.09	254.17			
42	2977.78	258.89			

ตารางผนวกที่ จ5 การคำนวณพื้นที่และความยาวของธารน้ำของตัวอย่างทรายชนิด B-2

B-2					
T(s)	A (cm ²)	P (cm)	T(s)	A (cm ²)	P (cm)
0	1490.17	136.91	47	3094.05	259.44
1	1688.03	146.00	52	3122.10	263.83
2	1747.66	148.46			
3	1836.37	152.62			
4	1896.67	155.09			
5	1982.15	158.25			
6	2069.01	161.56			
7	2099.17	162.94			
8	2192.30	166.33			
9	2206.34	169.72			
10	2253.94	171.16			
11	2319.37	175.61			
12	2347.79	176.50			
13	2459.74	179.41			
14	2552.41	182.80			
15	2620.86	186.91			
16	2678.16	192.10			
17	2738.94	197.96			
18	2781.30	205.32			
19	2817.66	210.94			
20	2855.62	217.39			
21	2893.40	222.75			
22	2930.47	226.61			
27	2959.94	236.61			
32	3014.94	245.32			
37	3041.00	250.34			
42	3068.72	255.06			

ตารางผนวกที่ ๖6 การคำนวณพื้นที่และความยาวของธารน้ำของตัวอย่างทรายชนิด B-3

B-3		
T(s)	A (cm ²)	P (cm)
0	1012.75	112.98
1	1137.70	131.14
2	1385.50	136.67
3	1436.20	140.16
4	1517.12	144.97
5	1630.23	149.30
6	1708.45	151.03
7	1776.77	154.20
8	1813.31	155.74
9	1818.90	155.63
10	1910.86	159.63
11	1982.76	161.75
12	2031.04	164.28
13	2084.34	166.63
14	2132.90	168.73
15	2189.46	171.06
16	2257.49	174.10
17	2308.32	176.33
18	2355.67	177.96
19	2387.35	179.12
20	2424.90	181.03
21	2443.23	181.87
22	2462.99	182.74
27	2499.00	184.86
32	2521.08	186.19
37	2527.26	186.57
42	2539.57	187.34

ตารางผนวกที่ จ7 การคำนวณพื้นที่และความยาวของธารน้ำของตัวอย่างทรายชนิด C-1

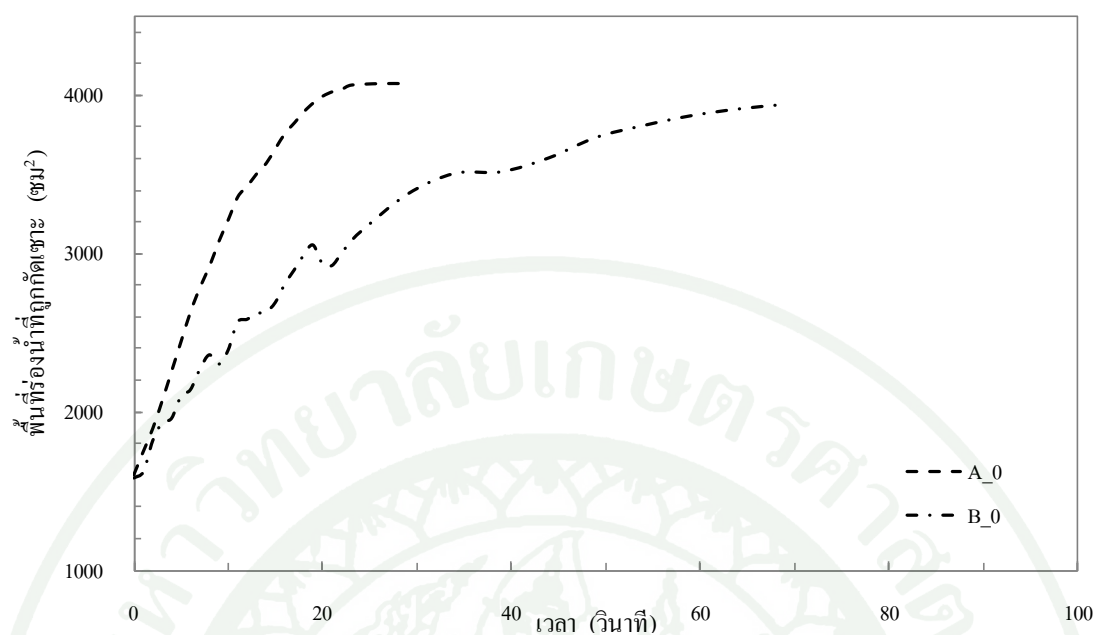
C-1					
T(s)	A (cm ²)	P (cm)	T(s)	A (cm ²)	P (cm)
0	1469.67	137.45	35	2409.70	174.95
1	1558.01	141.47	40	2424.47	175.44
2	1672.08	145.94	45	2450.49	176.67
3	1746.72	149.01	50	2471.62	177.67
4	1801.60	151.38	55	2505.68	180.61
5	1831.38	152.54	60	2540.59	184.00
6	1889.49	155.18	65	2561.35	187.36
7	1926.94	156.55	70	2574.19	189.31
8	1962.84	158.14	75	2586.05	191.78
9	2040.77	161.25	80	2595.19	193.34
10	2069.55	162.35	85	2605.28	194.65
11	2079.79	162.95	90	2614.43	196.17
12	2111.03	164.13	95	2622.03	197.59
13	2129.48	164.68			
14	2160.50	165.81			
15	2190.22	167.02			
16	2207.82	167.42			
17	2232.24	168.43			
18	2248.85	169.05			
19	2262.71	169.46			
20	2283.89	170.52			
21	2308.03	171.42			
22	2326.16	172.06			
23	2335.97	172.40			
24	2355.52	173.02			
25	2376.84	173.72			
30	2393.51	174.40			

ตารางผนวกที่ ๖๘ การคำนวณพื้นที่และความยาวของธารน้ำของตัวอย่างทรายชนิด C-2

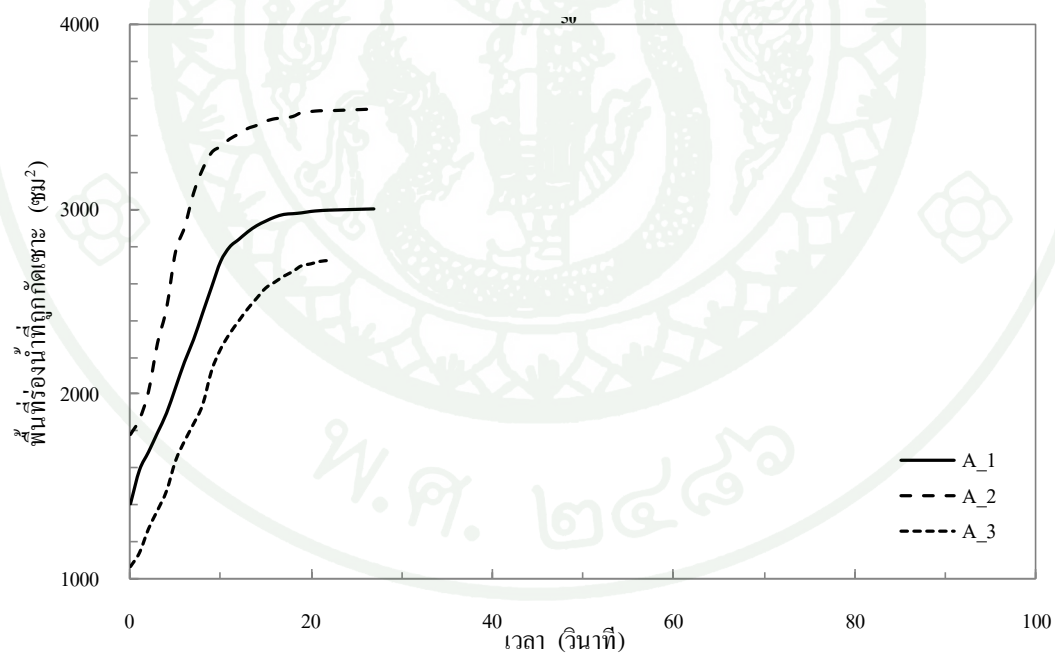
C-2					
T(s)	A (cm ²)	P (cm)	T(s)	A (cm ²)	P (cm)
0	1540.80	141.56	35	2266.46	169.17
1	1629.24	147.17	40	2292.38	170.63
2	1720.45	149.52	45	2307.18	171.49
3	1788.47	151.20	50	2349.13	173.89
4	1842.51	153.27	55	2360.55	174.71
5	1889.24	155.10	60	2391.04	177.62
6	1906.91	155.83	65	2416.23	180.89
7	1933.04	157.11	70	2435.49	183.85
8	1966.67	158.61	75	2449.67	186.11
9	2002.94	159.84	80	2454.79	186.75
10	2031.04	160.83	85	2468.86	189.49
11	2059.90	162.02	90	2484.27	192.31
12	2070.45	162.29	95	2494.86	194.43
13	2090.78	163.03			
14	2106.68	163.39			
15	2116.15	163.71			
16	2123.01	163.91			
17	2128.85	164.10			
18	2170.82	165.70			
19	2184.04	166.21			
20	2207.92	167.07			
21	2224.53	167.56			
22	2232.57	167.81			
23	2234.89	167.92			
24	2261.60	168.98			
25	2261.60	168.98			
30	2263.04	169.06			

ตารางผนวกที่ ๑๑ การคำนวณพื้นที่และความยาวของธารน้ำของตัวอย่างทรายชนิด C-3

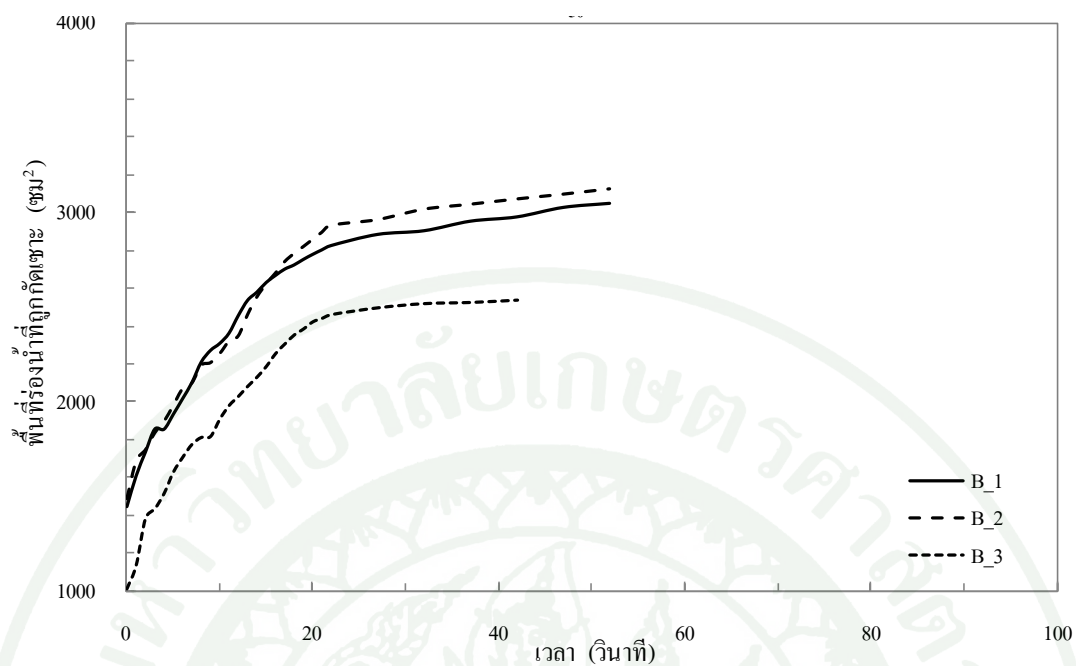
C_3					
T(s)	A (cm ²)	P (cm)	T(s)	A (cm ²)	P (cm)
0	1069.22	116.37	35	1569.89	143.89
1	1214.24	133.41	40	1572.88	144.76
2	1247.08	134.32	45	1580.69	145.43
3	1268.84	134.52	50	1606.98	147.31
4	1282.10	134.72	55	1623.00	149.26
5	1317.12	135.26	60	1633.00	152.37
6	1334.18	135.68	65	1640.40	154.51
7	1351.08	135.72			
8	1364.31	135.11			
9	1385.28	134.70			
10	1385.26	135.74			
11	1401.56	135.89			
12	1407.35	136.53			
13	1422.04	137.73			
14	1439.51	138.44			
15	1447.70	138.53			
16	1453.26	138.58			
17	1462.19	139.34			
18	1470.39	139.63			
19	1491.22	140.11			
20	1503.53	141.24			
21	1521.25	142.20			
22	1529.71	142.31			
23	1545.89	142.80			
24	1552.38	143.30			
25	1557.36	143.35			
30	1563.77	143.71			



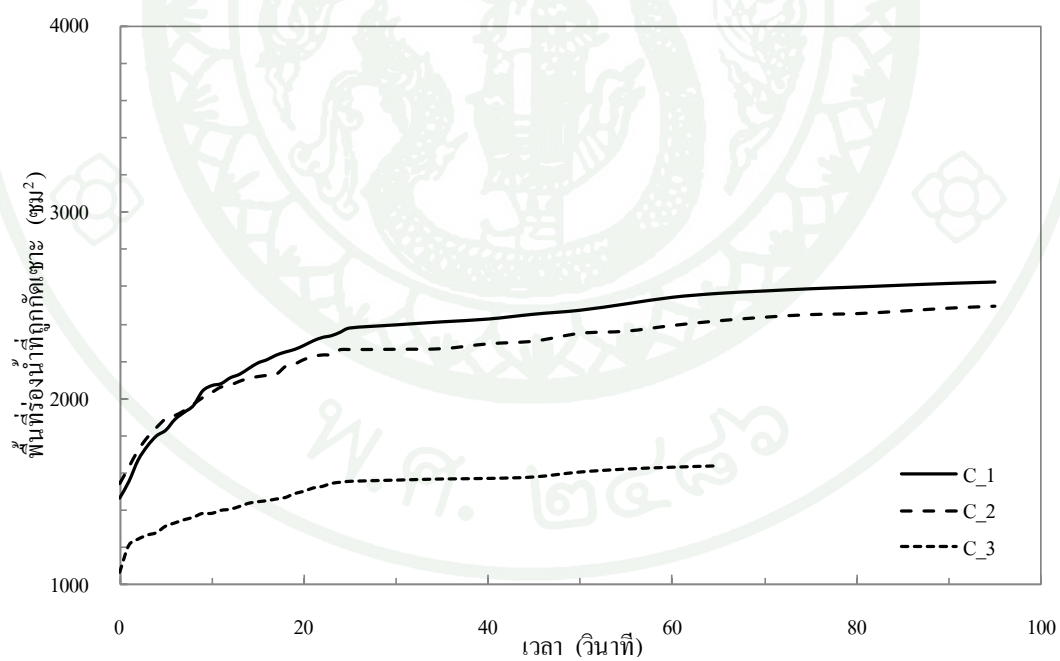
ภาพผนวกที่ จ12 พื้นที่ธารน้ำที่ถูกกักตุนของตัวอย่างทราย A-0 และ B-0



ภาพผนวกที่ จ13 พื้นที่ธารน้ำที่ถูกกักตุนของตัวอย่างทราย A

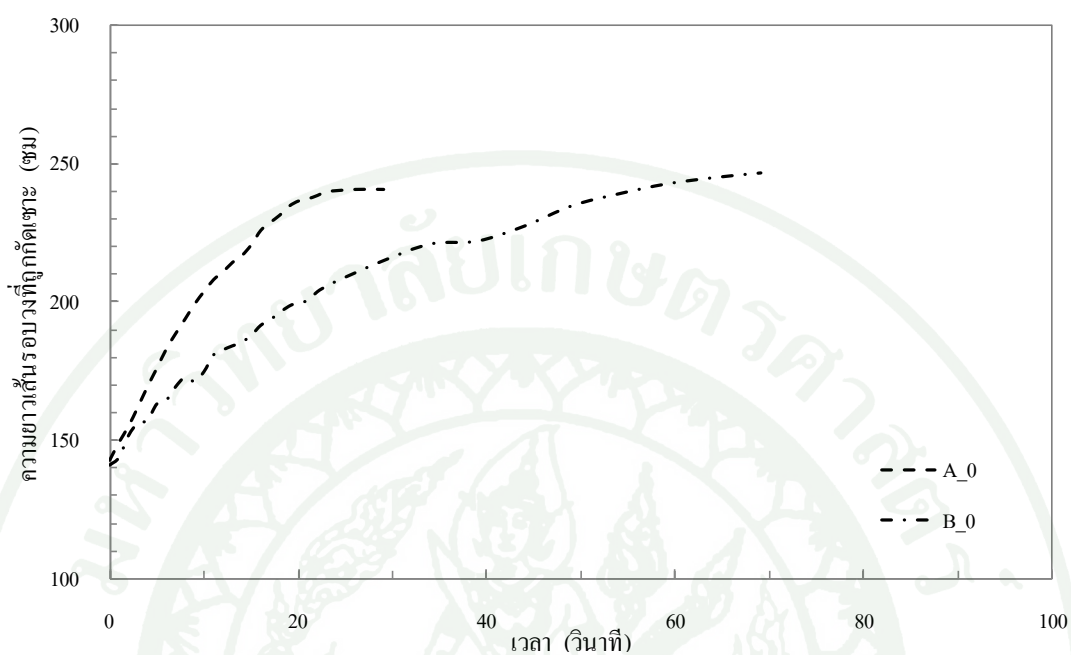


ภาพผนวกที่ จ14 พื้นที่ร่อนน้ำที่ถูกกักตุนของตัวอย่างทราย B

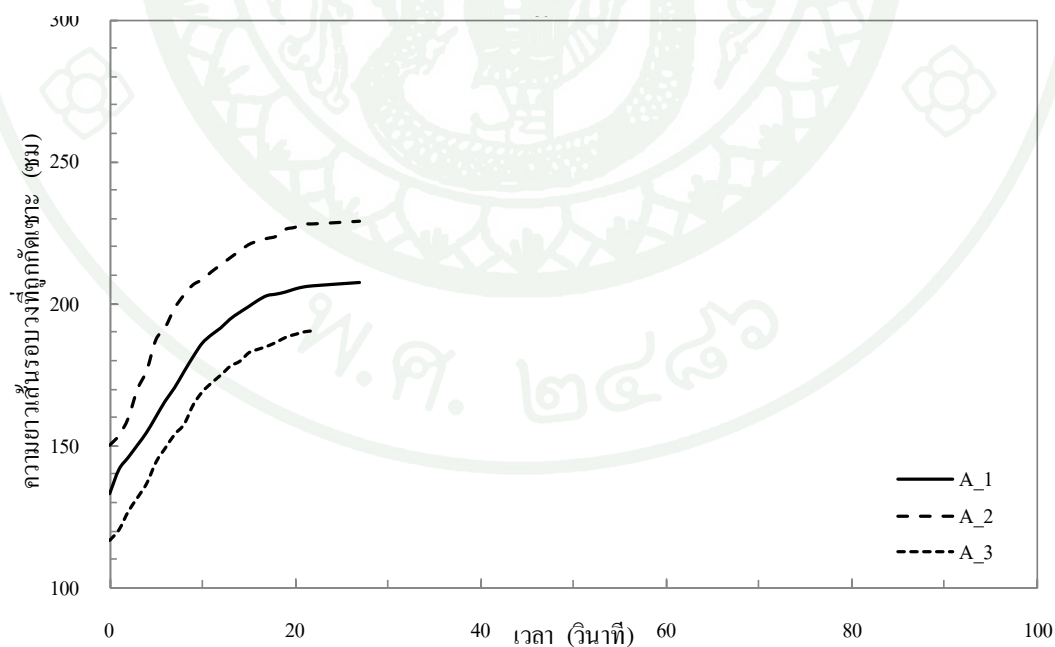


ภาพผนวกที่ จ15 พื้นที่ร่อนน้ำที่ถูกกักตุนของตัวอย่างทราย C

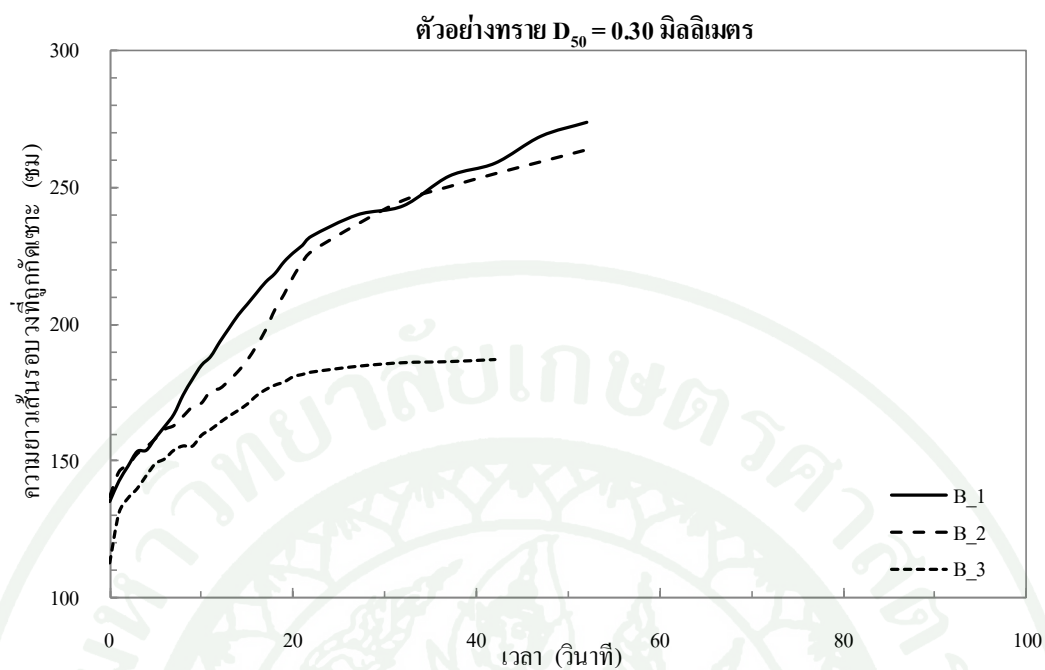
3. ความยาวเส้นรอบวงที่ถูกกัดเซาะ



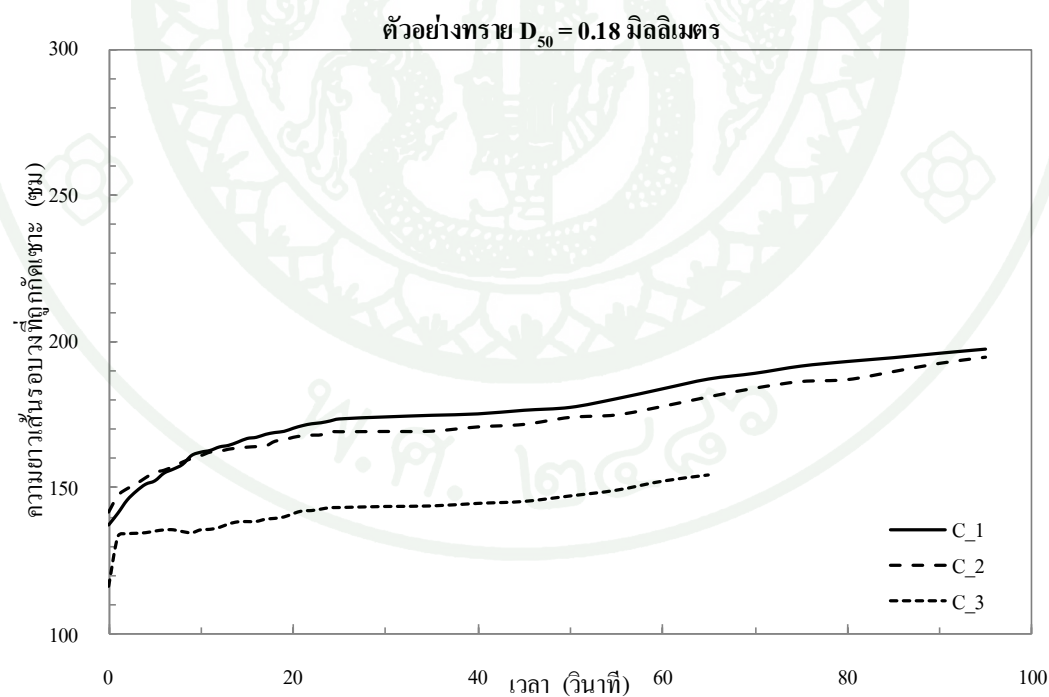
ภาพผนวกที่ จ16 ความยาวเส้นรอบวงที่ถูกกัดเซาะตัวอย่างทราย A-0 และ B-0



ภาพผนวกที่ จ17 ความยาวเส้นรอบวงที่ถูกกัดเซาะของตัวอย่างทราย A



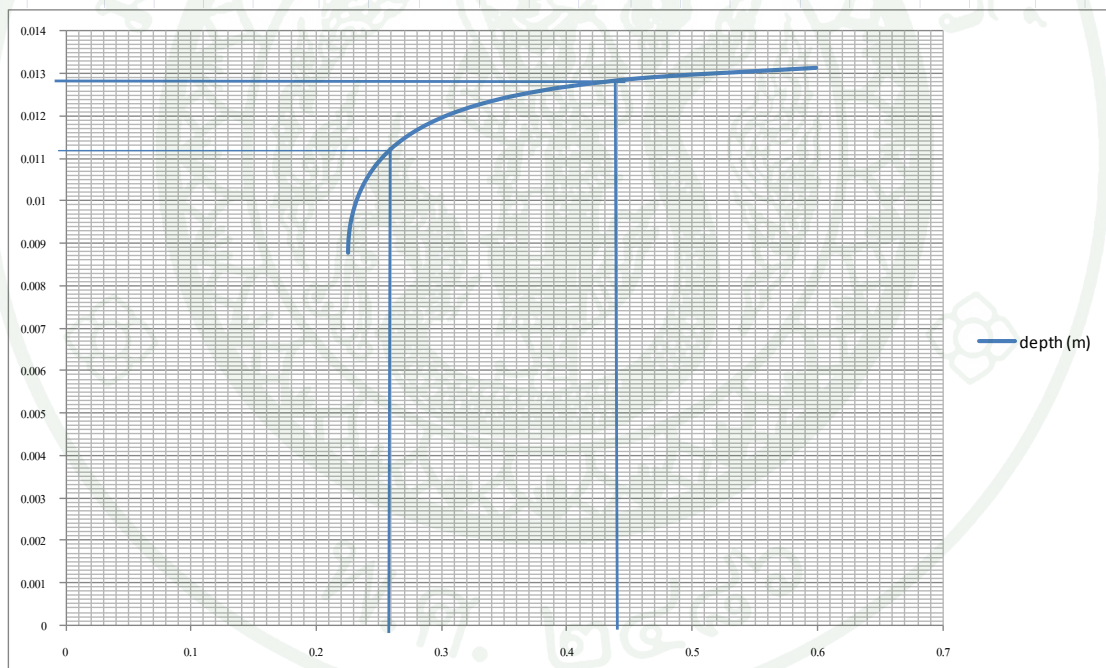
ภาพผนวกที่ จ18 ความยาวเส้นรอบวงที่ถูกกัดเซาะของตัวอย่างทราย B



ภาพผนวกที่ จ19 ความยาวเส้นรอบวงที่ถูกกัดเซาะของตัวอย่างทราย C

4. การหาโปรไฟล์น้ำ ด้วยวิธีขั้นบันไดโดยตรง (The direct step method)

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
alpha		1	rpan		0.6 m	Drain=	0.374961 m							0 min		0.00256875			
ks = alpha*D50		0.3 mm	qc		0.0025691 m ² /s									0.002569141 max		0.002569531			
So		0	hc		0.00876265 m									ที่กลาง		0.002569141			
			hpan		0.0131 m		11.3129	0.0131											
			n		20														
			Dh		0.0002183 m														
			Total Dr		0.37412353 m														
										positive									
Trial Dr	h2	r2	A2	u2	F2	E2	h1	r1	A1	u1	Fr1	E1	DE=E1-E2	havg	uavg	Cf	Dr	error*1000000	
0.000189022	0.008763	0.225039	0.01239	0.29319212	1	0.013144	0.008981	0.225228	0.012709	0.285825	0.962953	0.013145	0.000	0.008872	0.289508708	0.004929	0.00018902	3.57E-06	
0.000583382	0.008981	0.225228	0.012709	0.2858253	0.962953	0.013145	0.0091993	0.225811	0.013052	0.278322	0.92648	0.013147	0.000	0.00909	0.282073441	0.004889	0.00058338	3.55E-05	
0.001006407	0.009199	0.225811	0.013052	0.27832159	0.92648	0.013147	0.0094176	0.226818	0.013421	0.270664	0.890484	0.013151	0.000	0.009308	0.274492615	0.00485	0.00100641	0.00011	
0.00146606	0.009418	0.226818	0.013421	0.27066364	0.890484	0.013151	0.0096359	0.228284	0.013821	0.262833	0.854869	0.013157	0.000	0.009527	0.266748232	0.004813	0.00146606	0.000244	
0.001972266	0.009636	0.228284	0.013821	0.26283282	0.854869	0.013157	0.0098542	0.230256	0.014256	0.254809	0.819539	0.013163	0.000	0.009745	0.258820779	0.004777	0.00197227	0.000461	
0.002537625	0.009854	0.230256	0.014256	0.25480874	0.819539	0.013163	0.0100725	0.232794	0.014733	0.246569	0.784396	0.013171	0.000	0.009963	0.250688761	0.004742	0.00253762	0.000795	
0.003178448	0.010072	0.232794	0.014733	0.24656878	0.784396	0.013171	0.0102908	0.235972	0.015258	0.238087	0.749338	0.01318	0.000	0.010182	0.242328123	0.004708	0.00317845	-7.6E-08	
0.003916266	0.010291	0.235972	0.015258	0.23808746	0.749338	0.01318	0.0105091	0.239889	0.01584	0.229336	0.714257	0.01319	0.000	0.0104	0.23371152	0.004674	0.00391627	-1.5E-07	
0.004780134	0.010509	0.239889	0.01584	0.22933558	0.714257	0.01319	0.0107274	0.244669	0.016491	0.220279	0.679035	0.013201	0.000	0.010618	0.224807378	0.004642	0.00478013	-2.7E-07	
0.005810196	0.010727	0.244669	0.016491	0.22027918	0.679035	0.013201	0.0109457	0.250479	0.017226	0.210878	0.64354	0.013212	0.000	0.010837	0.21557864	0.004611	0.0058102	-4.9E-07	
0.007063431	0.010946	0.250479	0.017226	0.2108781	0.64354	0.013212	0.011164	0.257542	0.018065	0.201084	0.607622	0.013225	0.000	0.011055	0.205981063	0.00458	0.00706343	-8.8E-07	
0.008623237	0.011164	0.257542	0.018065	0.20108402	0.607622	0.013225	0.0113823	0.266166	0.019035	0.190838	0.571103	0.013239	0.000	0.011273	0.195960814	0.00455	0.00862324	-1.6E-06	
0.010616165	0.011382	0.266166	0.019035	0.19083761	0.571103	0.013239	0.0116006	0.276782	0.020174	0.180064	0.533769	0.013253	0.000	0.011491	0.185450999	0.004521	0.01061616	-2.9E-06	
0.013242734	0.011601	0.276782	0.020174	0.18006439	0.533769	0.013253	0.0118189	0.290024	0.021537	0.168668	0.495348	0.013269	0.000	0.01171	0.174366425	0.004493	0.01324273	-5.5E-06	
0.01683795	0.011819	0.290024	0.021537	0.16866846	0.495348	0.013269	0.0120372	0.306862	0.023209	0.156522	0.45549	0.013286	0.000	0.011928	0.162595385	0.004466	0.01683795	-1.1E-05	
0.022000204	0.012037	0.306862	0.023209	0.15652231	0.45549	0.013286	0.0122555	0.328863	0.025324	0.14345	0.413713	0.013304	0.000	0.012146	0.149986024	0.004439	0.0220002	-2.2E-05	
0.029895932	0.012256	0.328863	0.025324	0.14344974	0.413713	0.013304	0.0124738	0.358759	0.028118	0.129195	0.369326	0.013325	0.000	0.012365	0.136322134	0.004412	0.02989593	-4.8E-05	
0.043088125	0.012474	0.358759	0.028118	0.12919453	0.369326	0.013325	0.0126921	0.401847	0.032046	0.113358	0.321255	0.013347	0.000	0.012583	0.121276136	0.004387	0.04308812	-0.00012	
0.068291957	0.012692	0.401847	0.032046	0.11335774	0.321255	0.013347	0.0129104	0.470139	0.038137	0.095253	0.267654	0.013373	0.000	0.012801	0.104305438	0.004362	0.06829196	-0.00032	
0.129023991	0.012911	0.470139	0.038137	0.09525314	0.267654	0.013373	0.0131287	0.599163	0.049425	0.073498	0.204801	0.013404	0.000	0.01302	0.084375809	0.004337	0.12902399	-0.00089	
	0.013129	0.599163	0.049425	0.07349848	0.204801	0.013404													



ภาพผนวกที่ จ20 ตัวอย่างการคำนวณหาโปรไฟล์น้ำ ด้วยวิธีขั้นบันไดโดยตรง (The direct step method) ของตัวอย่างทราย B

ตารางผนวกที่ จ10 ตัวอย่างการคำนวณการหาโปรไฟล์น้ำ ด้วยวิธีขั้นบันไดโดยตรง (The direct-step method) ที่เวลา 0 วินาที

ตำแหน่งที่วัด ระดับน้ำ	ระยะจาก ศูนย์กลาง (ม.)	ระดับน้ำที่วัดได้ (ม.)	ระดับน้ำที่คำนวณได้ (ม.)	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
เสา 1	0.2626	0.0114	0.0112	1.94
เสา 2	0.4416	0.0132	0.0129	1.98
ขอบ	0.6000	0.0133	0.0133	-

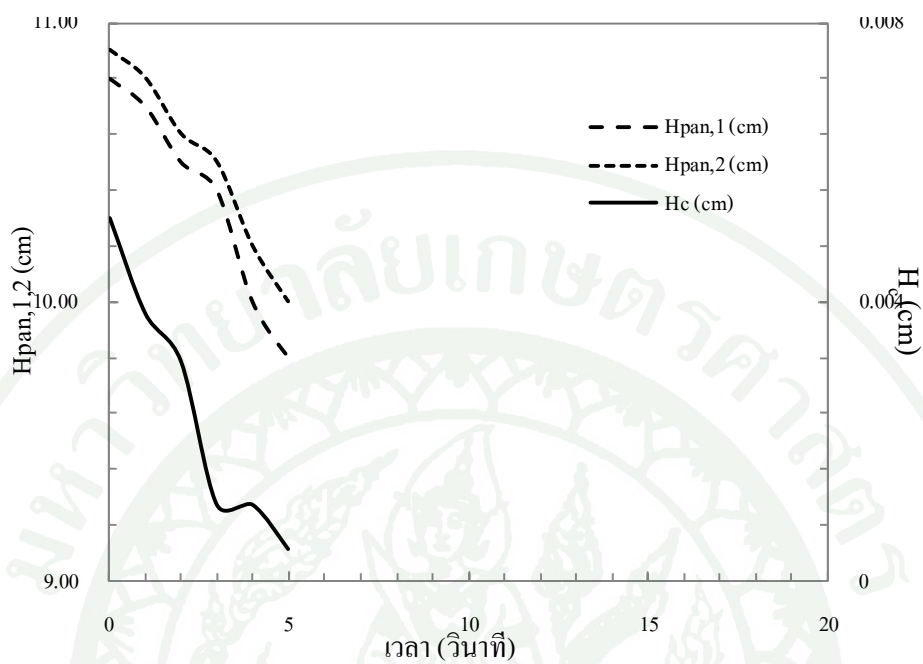
ตารางผนวกที่ จ11 ตัวอย่างการคำนวณการหาโปรไฟล์น้ำ ด้วยวิธีขั้นบันไดโดยตรง (The direct-step method) ที่เวลา 1 วินาที

ตำแหน่งที่วัด ระดับน้ำ	ระยะจาก ศูนย์กลาง (ม.)	ระดับน้ำที่วัดได้ (ม.)	ระดับน้ำที่คำนวณได้ (ม.)	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
เสา 1	0.2626	0.0099	0.0097	2.11
เสา 2	0.4416	0.0115	0.0113	1.87
ขอบ	0.6000	0.0116	0.0116	-

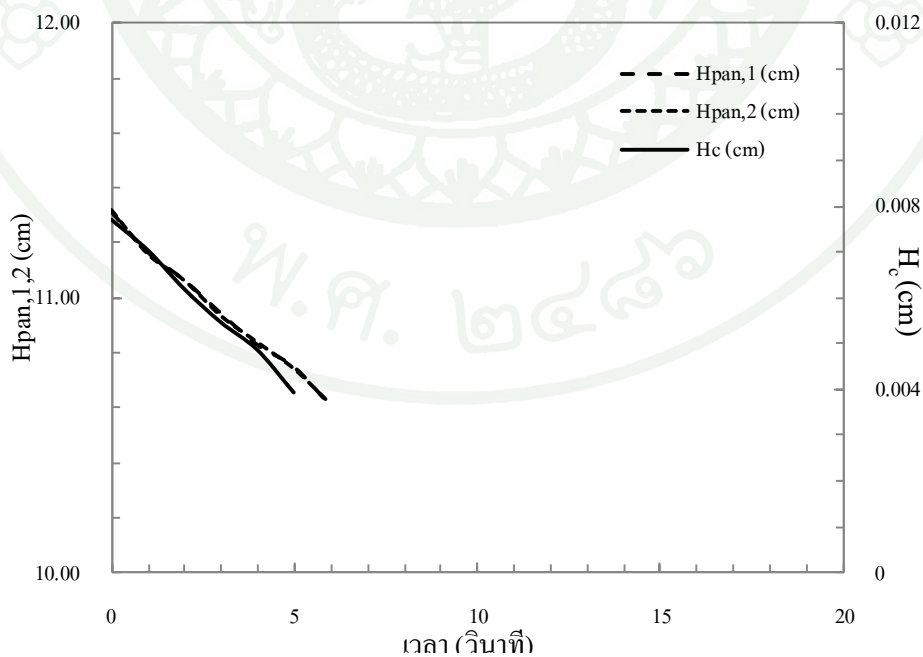
ตารางผนวกที่ จ12 ตัวอย่างการคำนวณการหาโปรไฟล์น้ำ ด้วยวิธีขั้นบันไดโดยตรง (The direct-step method) ที่เวลา 2 วินาที

ตำแหน่งที่วัด ระดับน้ำ	ระยะจาก ศูนย์กลาง (ม.)	ระดับน้ำที่วัดได้ (ม.)	ระดับน้ำที่คำนวณได้ (ม.)	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
เสา 1	0.2626	0.0072	0.0073	1.24
เสา 2	0.4416	0.0090	0.0091	0.77
ขอบ	0.6000	0.0094	0.0094	-

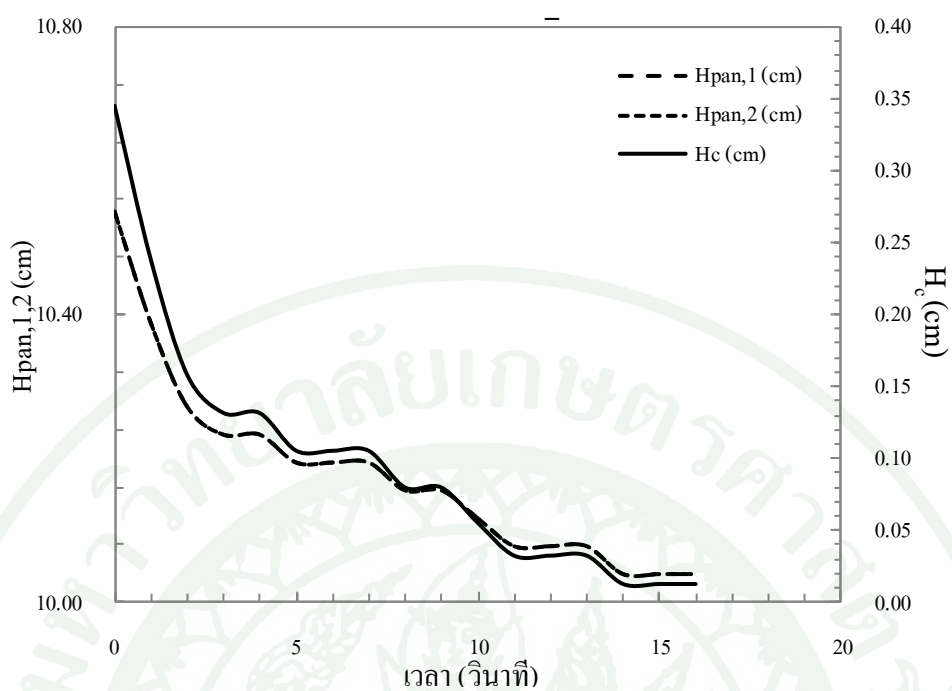
5. ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำขอบถาด (H_{pan}) กับระดับน้ำที่ความลึกวิกฤติ (H_c)



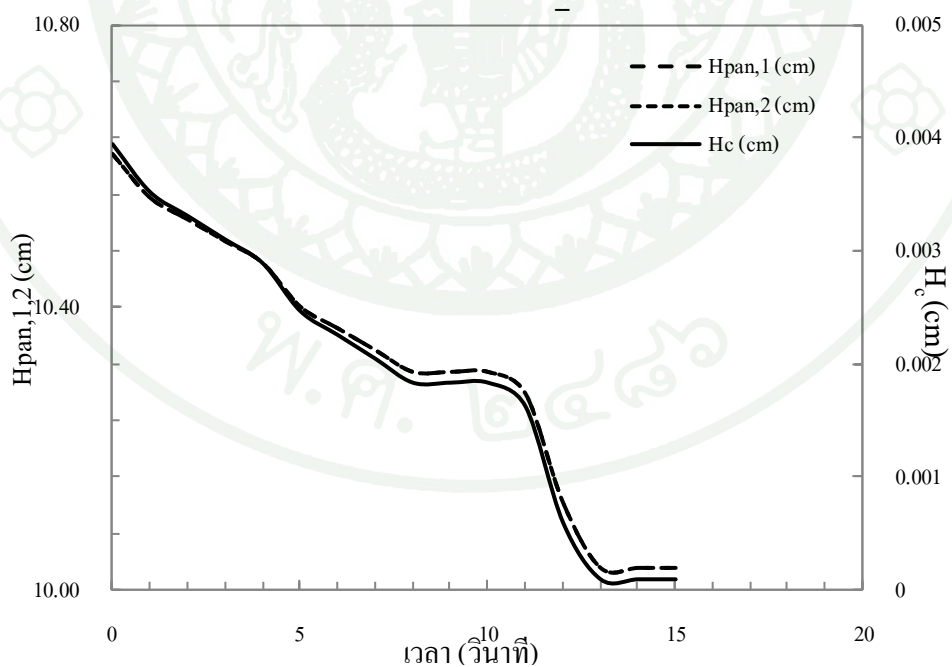
ภาพผนวกที่ จ21 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำขอบถาด (H_{pan}) กับระดับน้ำที่ความลึกวิกฤติ (H_c) ของตัวอย่างทราย A-0



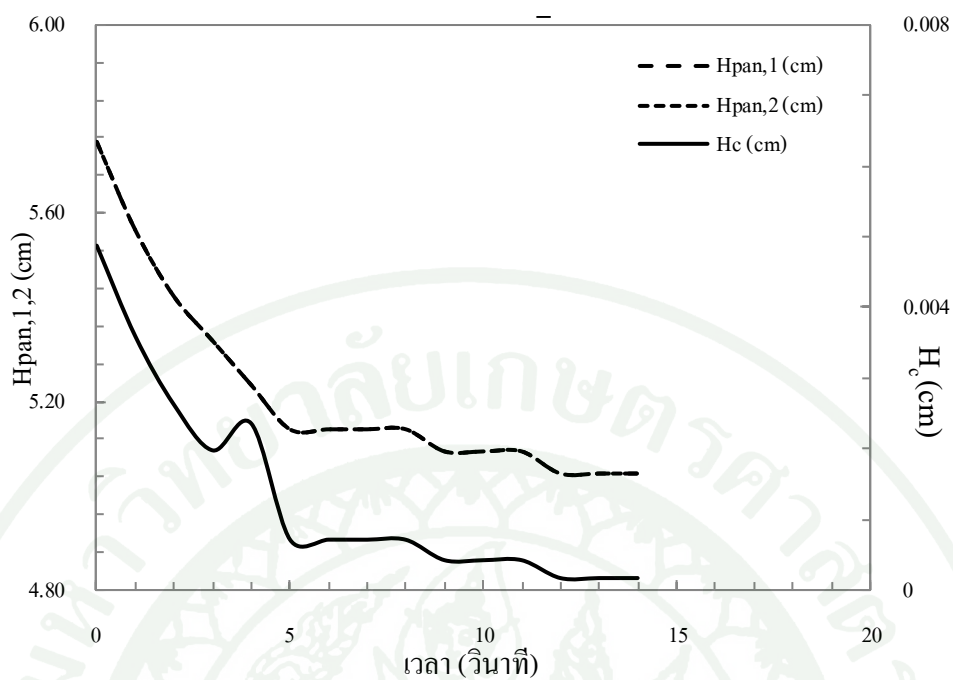
ภาพผนวกที่ จ22 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำขอบถาด (H_{pan}) กับระดับน้ำที่ความลึกวิกฤติ (H_c) ของตัวอย่างทราย B-0



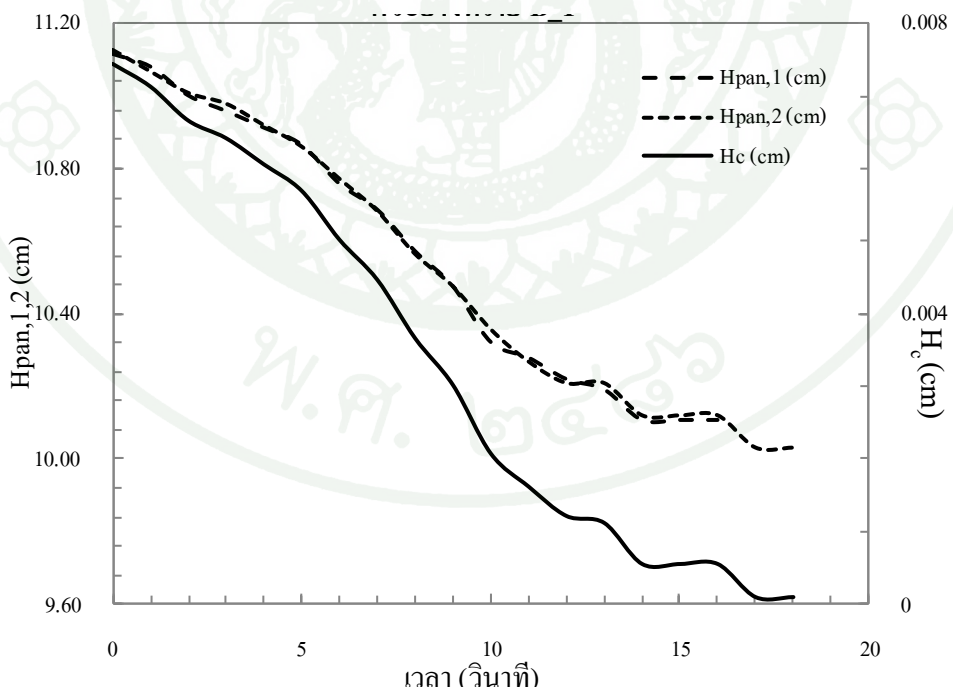
ภาพผนวกที่ จ23 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำขอบถาด (H_{pan}) กับระดับน้ำที่ความลึกวิกฤติ (H_c)
ของตัวอย่างทราย A-1



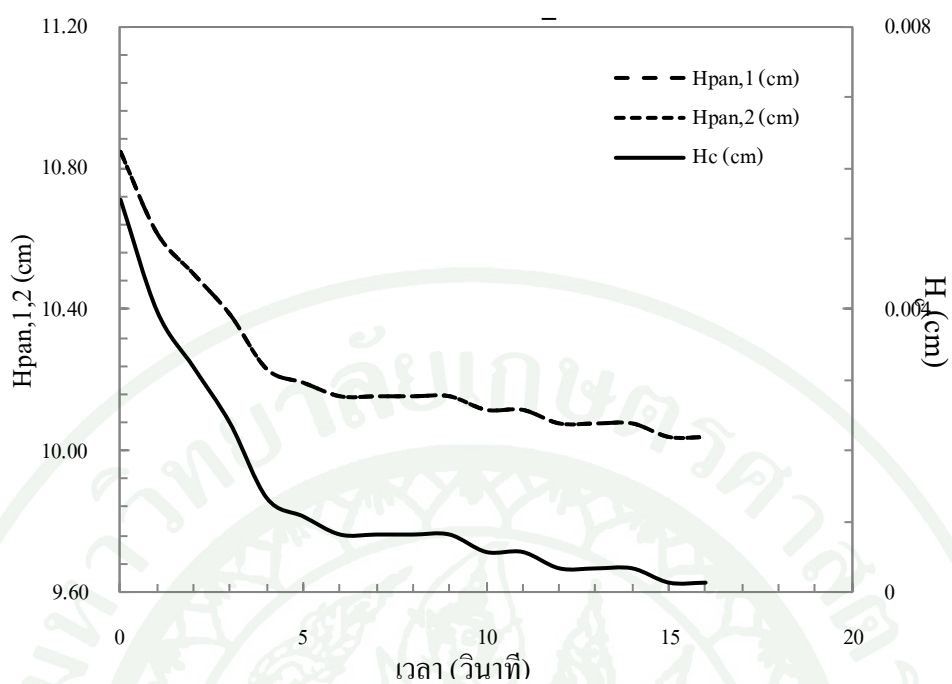
ภาพผนวกที่ จ24 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำขอบถาด (H_{pan}) กับระดับน้ำที่ความลึกวิกฤติ (H_c)
ของตัวอย่างทราย A-2



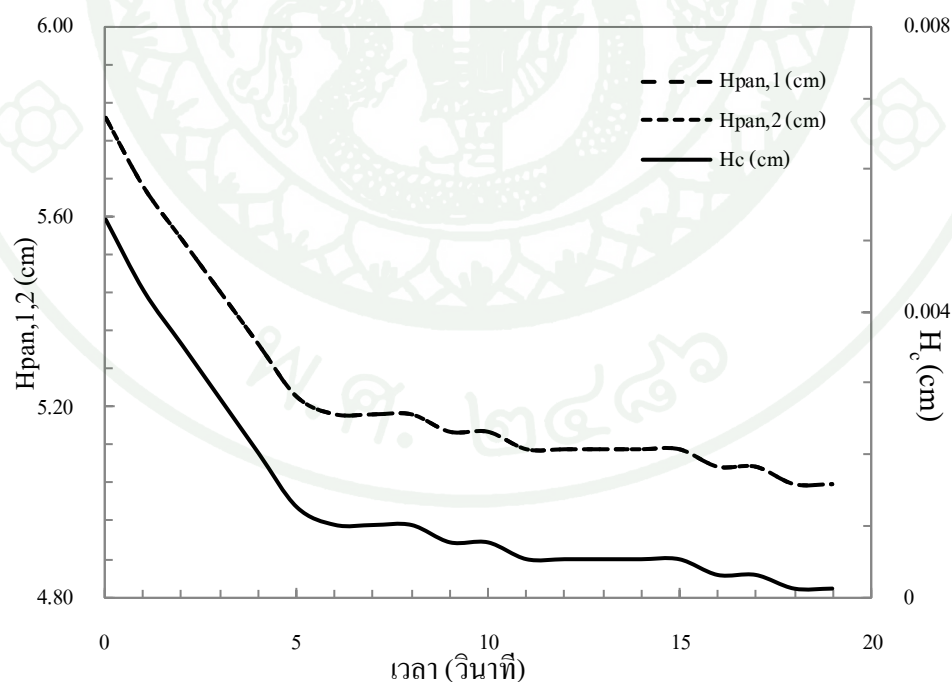
ภาพผนวกที่ จ25 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำขอบถาด (H_{pan}) กับระดับน้ำที่ความลึกวิกฤติ (H_c)
ของตัวอย่างทราย A-3



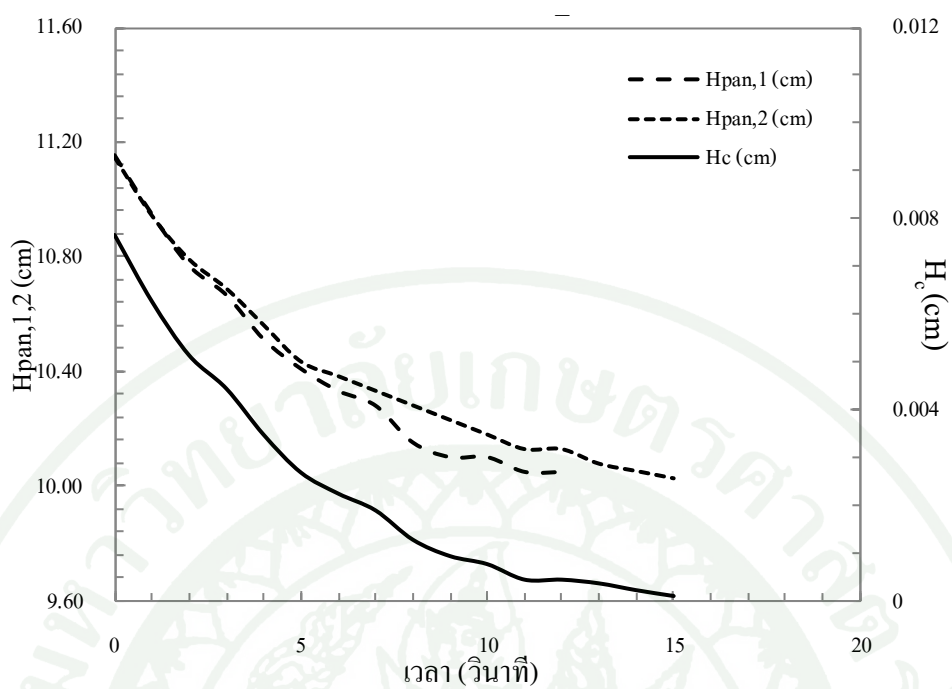
ภาพผนวกที่ จ26 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำขอบถาด (H_{pan}) กับระดับน้ำที่ความลึกวิกฤติ (H_c)
ของตัวอย่างทราย B-1



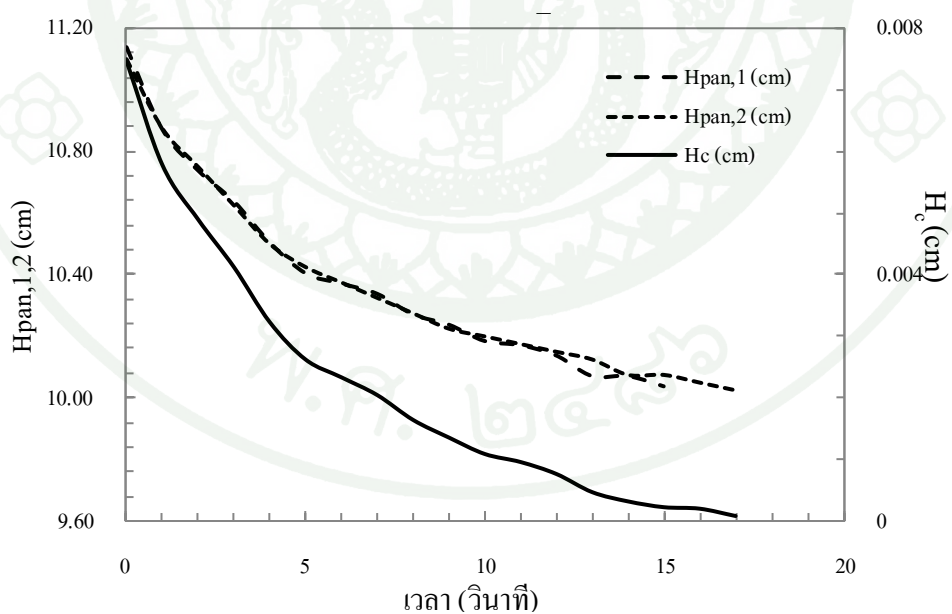
ภาพผนวกที่ จ27 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำขอบถาด (H_{pan}) กับระดับน้ำที่ความลึกวิกฤติ (H_c)
ของตัวอย่างทราย B-2



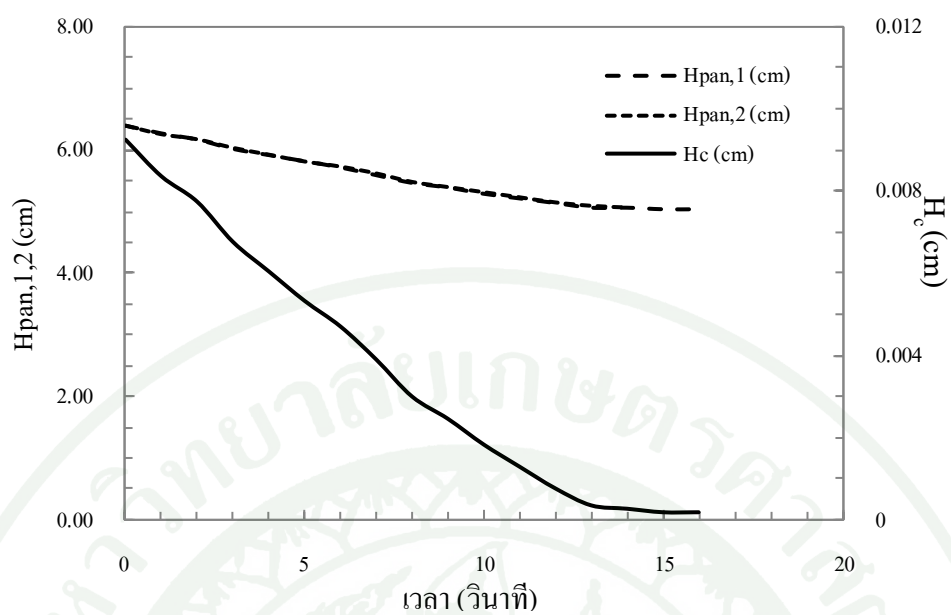
ภาพผนวกที่ จ28 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำขอบถาด (H_{pan}) กับระดับน้ำที่ความลึกวิกฤติ (H_c)
ของตัวอย่างทราย B-3



ภาพผนวกที่ จ29 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำขอบถาด (H_{pan}) กับระดับน้ำที่ความลึกวิกฤติ (H_c) ของตัวอย่างทราย C-1



ภาพผนวกที่ จ30 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำขอบถาด (H_{pan}) กับระดับน้ำที่ความลึกวิกฤติ (H_c) ของตัวอย่างทราย C-2



ภาพผนวกที่ จ31 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำขอบถาด (H_{pan}) กับระดับน้ำที่ความลึกวิกฤติ (H_c)
ของตัวอย่างทราย C-3

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาววิชา ไทยสยาม
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 23 ตุลาคม 2531
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วศ.บ.(วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (พ.ศ. 2553)
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	กำลังศึกษาปริญญาโท
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-



