การชะลอมลสารในชั้นดินปกคลุมหลุมซึมภายใต้สภาวะน้ำท่วมขัง

นางสาวนันทณัฐ ศรีไพรวรรณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-533-380-8

POLLUTANT RETARDATION IN SOIL COVER OF SEEPAGE PITS UNDER FLOODING CONDITIONS

Miss Nanthanat Sripraiwan

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

Suranaree University of Technology

Academic Year 2004

ISBN 974-533-380-8

การชะลอมลสารในชั้นดินปกคลุมหลุมซึมภายใต้สภาวะน้ำท่วมขัง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.สุดจิต ครุจิต)
ประธานกรรมการ

(อ. ดร.จรียา ยิ้มรัตนบวร)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร)
กรรมการ

(อ. ดร.นเรศ เชื้อสุวรรณ)
กรรมการ

(รศ. น.ท. ดร.สราวุฒิ สุจิตจร)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

นันทณัฐ ศรีไพรวรรณ : การชะลอมลสารในชั้นดินปกคลุมหลุมซึมภายใต้สภาวะน้ำท่วมขัง (POLLUTANT RETARDATION IN SOIL COVER OF SEEPAGE PITS UNDER FLOODING CONDITIONS) อาจารย์ที่ปรึกษา : อ. ดร.จรียา ยิ้มรัตนบวร, 109 หน้า. ISBN 974-533-380-8

เหตุการณ์น้ำท่วมขังที่เกิดขึ้นในประเทศไทยเกิดจากการการวางแผนการระบายน้ำที่ไม่เหมาะสมเป็นหลัก จะเกิดการแพร่กระจายของเชื้อโรคจากหลุมซึม โดยน้ำเสียจากหลุมซึมจะแพร่ซึมผ่านชั้นดินออกมารวมกับน้ำผิวดินที่ท่วมขังเหนือพื้นที่ในสภาวะน้ำท่วมขัง ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดโรคขึ้นกับคนที่มีโอกาสจะสัมผัสกับน้ำนั้นได้ วิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยการเลือกชนิดของดินที่นำมาทำเป็นชั้นดินปกคลุมบริเวณหลุมซึมที่เหมาะสม การศึกษาวิจัยได้ทำการศึกษาชนิดของดินทั้งหมด 8 ชนิด โดยทำการวัดลักษณะสมบัติทางกายภาพและประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษในน้ำเสียจากหลุมซึมของดินชนิดต่างๆ จากนั้นนำมาประเมินชนิดของดินและความหนาของชั้นดินที่เหมาะสมในการนำมาทำเป็นชั้นดินปกคลุมบริเวณหลุมซึมและเปรียบเทียบโอกาสที่จะก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคในสภาวะน้ำท่วมขัง

ผลการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพของดินแต่ละชนิด พบว่า ส่วนประกอบของดิน, ค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน, ความหนาแน่นแห้ง, ค่าอัตราส่วนช่องว่าง, ค่าความพรุน, ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน และขนาดเฉลี่ยของเม็ดดิน มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษในน้ำจากหลุมซึมของดินชนิดต่างๆ โดยประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษของดินจะแปรผันตามระยะเวลาเก็บกักน้ำในชั้นดินและค่าความถ่วงจำเพาะของดิน แต่เป็นปฏิภาคผกผันกับอัตราการไหลและค่าอัตราส่วนช่องว่าง, ค่าความพรุน, ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านและขนาดเฉลี่ยของเม็ดดิน จากการศึกษาพบว่าชนิดของดินที่มีส่วนประกอบเป็นดินเหนียว จะมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัด Total coliforms และ Fecal coliforms ในการประเมินความหนาของชั้นดิน พบว่า ดินเหนียวต้องการความหนาของชั้นดินที่เหมาะสมในการนำมาทำเป็นชั้นดินปกคลุมบริเวณหลุมซึมน้อยที่สุดเท่ากับ 0.43 m และดินทรายหยาบต้องการความหนาของชั้นดินเท่ากับ 20.44 m เมื่อทำการประเมินโอกาสที่จะก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคภายใต้สภาวะน้ำท่วมขัง พบว่าดินทรายหยาบเป็นดินที่มีโอกาสที่จะก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคสูงที่สุดและต่ำที่สุดในดินเหนียว

สาขาวิชา <u>วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม</u> ลายมือชื่อนักศึกษา ____________________

ปีการศึกษา 2547 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ____________________

NANTHANAT SRIPRAIWAN : POLLUTANT RETARDATION IN SOIL COVER OF SEEPAGE PITS UNDER FLOODING CONDITIONS. THESIS ADVISOR : JAREEYA YIMRATTANABOVORN, Ph.D., 109 PP.

ISBN 974-533-380-8

Unsuitable water drainage planning thoughtfully causes a flooding in several areas of Thailand. Flood can subsequently cause wastewater with pathogenic micro-organisms passing from seepage pits. The micro-organisms will percolate to topsoil and mix with water under flooding conditions. These conditions will be harmful to human health if people come to contact with flooding water contained pathogenic micro-organisms. To minimize this problem is to use suitable soil cover of seepage pits under flooding conditions. Eight different types of soil were studied and measured physical characteristics, pollutants removal efficiency from wastewater of seepage pits. Experimented Data were used for evaluating suitable soil type and its thickness as a material covering seepage pits and comparing the possible health risk under flooding conditions. Results suggested that soil component, specific gravity, dry density, void ratio, porosity, permeability coefficient and average size of each soil have effects on pollutants removal efficiency. Wastewater from seepage pits increased with retention time of soil layer and specific gravity of the soil. However it decreased as flow rate, void ratio, porosity, permeability coefficient and average size of each soil increased. Clay had the highest removal efficiency for total coliforms and fecal coliforms. The suitable thickness of clay as soil cover of seepage pits was as least 0.43 m while coarse sand required as much as 20.44 m. The risk of causing diseases were highest for coarse sand.

School of Environmental Engineering Student's Signature _______________

Acadamic Year 2004 Advisor's Signature _______________

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ อย่างดียิ่งทั้งในด้านวิชาการและการดำเนินงานวิจัย อันได้แก่

- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

- อาจารย์ ดร.จรียา ยิ้มรัตนบวร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

- อาจารย์ ดร.สุดจิต ครุจิต กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

- อาจารย์ ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

- อาจารย์ ดร.นเรศ เชื้อสุวรรณ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

- คุณมานพ จรโคกกรวด และพี่ๆที่อาคารศูนย์เครื่องมือ 5 และ 2 ที่อำนวยความสะดวกในการทดลองวิจัย

- อาจารย์ และเพื่อนบัณฑิตศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจเสมอมา

- เพื่อนบัณฑิตศึกษาที่ให้กำลังใจและช่วยเหลือในการศึกษาและการทำวิจัยมาโดยตลอด

ท้ายนี้ขอกราบขอพระคุณ คุณพ่อปราโมทย์ คุณแม่ละมุล และพี่ณัฐนันท์ ศรีไพรวรรณ ที่ให้การอบรมเลี้ยงดู และส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีมาตลอดในอดีต จนทำให้ผู้เขียนประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

นันทณัฐ ศรีไพรวรรณ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .... ก

บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) .... ข

กิตติกรรมประกาศ .... ค

สารบัญ .... ง

สารบัญตาราง .... ซ

สารบัญรูป .... ฎ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .... ฑ

บทที่

1 บทนำ 1

1.1 ความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 3

2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 ลักษณะของสิ่งปฏิกูล 4

2.1.1 ปริมาณละส่วนประกอบของสิ่งปฏิกูล 5

2.1.2 ลักษณะน้ำเสียจากระบบหลุมซึม 6

2.2 ลักษณะของส้วมที่ใช้ในประเทศไทย 9

2.3 กลไกการทำงานของระบบหลุมซึม 9

2.3.1 ส่วนประกอบของระบบหลุมซึม 9

2.3.2 หลักการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการซึมน้ำใต้ผิวดินโดยระบบหลุมซึม 13

2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการซึมน้ำใต้ผิวดินโดยระบบหลุมซึม 18

2.4 ลักษณะของดินที่ใช้ปกคลุมบริเวณหลุมซึม 20

2.4.1 ลักษณะสมบัติทางกายภาพ 21

2.4.2 ชนิดของดินและความหนาของชั้นดิน 24

2.5 การประเมินโอกาสที่จะก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรค 27

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3 การดำเนินการวิจัย 28
3.1 การจำแนกชนิดของดินที่ใช้ในการทดลอง 28
3.2 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพของดิน 31
3.2.1 ส่วนประกอบของดิน 31
3.2.2 ความหนาแน่นแห้ง 31
3.2.3 ค่าความถ่วงจำเพาะ 31
3.2.4 ค่าอัตราส่วนช่องว่างและค่าความพรุน 32
3.2.5 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน 32
3.3 การศึกษาสารติดตาม 32
3.4 การเตรียมตัวอย่างดิน 34
3.5 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งและประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษของดิน 35
3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล 35
3.6.1 วิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพของดิน 35
3.6.2 วิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษของดิน 35
3.6.3 ประเมินปัจจัยเชิงวิศวกรรมที่เหมาะสม 35
3.6.4 เปรียบเทียบโอกาสที่จะก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรค 36
3.7 สถานที่ทำการวิจัย 37
3.7.1 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างดิน 36
3.7.2 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี 36
3.7.3 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางชีววิทยา 37
3.8 ระยะเวลาในการศึกษาวิจัย 37
3.9 ตัวแปรที่ทำการวิจัย 37
4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล 38
4.1 ลักษณะสมบัติทางกายภาพของดิน 38
4.1.1 ส่วนประกอบของดิน 38

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.2 ค่าความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นของดิน..40
4.1.3 ความถ่วงจำเพาะ..40
4.1.4 อัตราส่วนช่องว่างและค่าความพรุน..42
4.1.5 สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน..42
4.1.6 ขนาดเฉลี่ยของเม็ดดิน..42
4.2 ระยะเวลาเก็บกักเฉลี่ยของดิน..43
4.3 ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้ง..45
4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษของดิน..45
4.4.1 ค่าของแข็งทั้งหมด, ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดและค่าของแข็งละลายทั้งหมด47
4.4.2 ค่า COD..48
4.4.3 ค่าความขุ่น..49
4.4.4 จุลินทรีย์..50
4.5 การประเมินชนิดของดินและความหนาของชั้นดินที่เหมาะสม..51
4.6 โอกาสที่จะก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรค..53
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..55
5.1 สรุปผลการทดลอง..55
5.2 ข้อเสนอแนะ..56
เอกสารอ้างอิง..57
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก ข้อมูลการกระจายตัวของเม็ดดิน..60
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดสอบการบดอัดตัวอย่างดิน..73
ภาคผนวก ค ข้อมูลความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน..82
ภาคผนวก ง ข้อมูลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน..93
ภาคผนวก จ ผลการศึกษาสารติดตามเพื่อหาระยะเวลาเก็บกักของตัวอย่างดิน..95
ภาคผนวก ฉ ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งและประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษของดิน..104
ภาคผนวก ช ผลการทดสอบทางสถิติ..107

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ประวัติผู้เขียน 109

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 ปริมาณของสิ่งปฏิกูลที่ปล่อยออกมาจากร่างกายในแต่ละวัน....5
2.2 ส่วนประสอบของสิ่งปฏิกูลที่ปล่อยออกมาจากร่างกายในแต่ละวัน....5
2.3 ลักษณะของน้ำเสียจากส้วมจากบ้านพักอาศัยในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล....6
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและความชื้นที่เหมาะสม....22
2.5 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินชนิดต่างๆ....24
2.6 Minimal Infective Doses สำหรับเชื้อโรคและปริสิตบางชนิด....27
3.1 การจำแนกดินเม็ดละเอียดโดยวิธีการทดสอบด้วยมือ (Mannual Test)....30
3.2 ข้อกำหนดวัสดุของการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพของดิน....31
3.3 วิธี/เครื่องมือวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งจากบ่อเกรอะ....34
3.4 ตัวแปรที่ทำการศึกษา....37
4.1 ประเภทและส่วนประกอบของตัวอย่างดิน....39
4.2 ผลการศึกษาค่าความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม....41
4.3 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างดิน....41
4.4 อัตราการไหลและระยะเวลาเก็บกักน้ำของตัวอย่างดินแต่ละชนิด....43
4.5 ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้ง....45
4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษของตัวอย่างดินแต่ละชนิด....46
4.7 ปัจจัยที่ใช้ในการประเมินความหนาของชั้นดินปกคลุมบริเวณหลุมซึม....51
4.8 การประเมินความหนาของชั้นดิน....52
4.9 การประเมินโอกาสที่จะก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรค....53
1 ก ผลการทดลองโดยวิธีตะแกรงร่อนของดินทรายหยาบ....61
2 ก ผลการทดลองโดยวิธีตะแกรงร่อนของดินทรายคละ....62
3 ก ผลการทดลองโดยวิธีตะแกรงร่อนของดินทรายละเอียด....63
4.1 ก ผลการทดลองโดยวิธีตะแกรงร่อนของดินพื้นที่....64
4.2 ก ผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฮโดรมิเตอร์ของดินพื้นที่....64

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

5.1 ก ผลการทดลองโดยวิธีตะแกรงร่อนของดินทรายหยาบ + ดินเหนียว 66
5.2 ก ผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฮโดรมิเตอร์ของดินทรายหยาบ + ดินเหนียว....67
6.1 ก ผลการทดลองโดยวิธีตะแกรงร่อนของดินทรายคละ + ดินเหนียว....68
6.2 ก ผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฮโดรมิเตอร์ของดินทรายคละ + ดินเหนียว 68
7.1 ก ผลการทดลองโดยวิธีตะแกรงร่อนของดินทรายละเอียด + ดินเหนียว 69
7.2 ก ผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฮโดรมิเตอร์ของดินทรายละเอียด + ดินเหนียว....70
8.1 ก ผลการทดลองโดยวิธีตะแกรงร่อนของดินเหนียว....71
8.2 ก ผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฮโดรมิเตอร์ของดินเหนียว 71
1 ข ผลการทดสอบการบดอัดสำหรับดินทรายหยาบ 74
2 ข ผลการทดสอบการบดอัดสำหรับดินทรายคละ....75
3 ข ผลการทดสอบการบดอัดสำหรับดินทรายละเอียด 76
4 ข ผลการทดสอบการบดอัดสำหรับดินพื้นที่....77
5 ข ผลการทดสอบการบดอัดสำหรับดินทรายหยาบ + ดินเหนียว 78
6 ข ผลการทดสอบการบดอัดสำหรับดินทรายคละ + ดินเหนียว....79
7 ข ผลการทดสอบการบดอัดสำหรับดินทรายละเอียด + ดินเหนียว 80
8 ข ผลการทดสอบการบดอัดสำหรับดินเหนียว....81
1 ค ผลการทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของดินทรายหยาบ 83
2 ค ผลการทดลองการหาค่าความถ่วงจำเพาะของดินทรายคละ....85
3 ค ผลการทดลองการหาค่าความถ่วงจำเพาะของดินทรายละเอียด 86
4 ค ผลการทดลองการหาค่าความถ่วงจำเพาะของดินพื้นที่....87
5 ค ผลการทดลองการหาค่าความถ่วงจำเพาะของดินทรายหยาบ + ดินเหนียว 88
6 ค ผลการทดลองการหาค่าความถ่วงจำเพาะของดินทรายคละ + ดินเหนียว 89
7 ค ผลการทดลองการหาค่าความถ่วงจำเพาะของดินทรายละเอียด + ดินเหนียว....90
8 ค ผลการทดลองการหาค่าความถ่วงจำเพาะของดินเหนียว 91
9 ค ผลการทดสอบการบดอัดสำหรับดินเหนียว....92
1 ง ผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของตัวอย่างดิน 94

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

1 จ ผลการศึกษาสารติดตามสำหรับดินทรายหยาบ....96
2 จ ผลการศึกษาสารติดตามสำหรับดินทรายคละ....97
3 จ ผลการศึกษาสารติดตามสำหรับดินทรายละเอียด....98
4 จ ผลการศึกษาสารติดตามสำหรับดินพื้นที่....99
5 จ ผลการศึกษาสารติดตามสำหรับดินทรายหยาบ + ดินเหนียว....100
6 จ ผลการศึกษาสารติดตามสำหรับดินทรายคละ + ดินเหนียว....101
7 จ ผลการศึกษาสารติดตามสำหรับดินทรายละเอียด + ดินเหนียว....102
8 จ ผลการศึกษาสารติดตามสำหรับดินเหนียว....103
1 ฉ ค่าตัวแปรของการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษของดินชนิดต่าง ๆ....105
2 ฉ ผลการทดสอบทางสถิติ One - Sample Test....107
1 ช ผลการทดสอบทางสถิติ Paired Samples Correlations....109

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 กลไกการกำจัดตะกอนแบบการติดค้างบนชั้นดิน 14

2.2 กลไกการกำจัดตะกอนแบบการตกตะกอน 14

2.3 กลไกการกำจัดตะกอนแบบการเบียดเข้าหาสารกรอง 15

2.4 กลไกการกำจัดตะกอนแบบแรงยึดติด 17

2.5 กลไกการกำจัดตะกอนแบบการจับตัว 18

2.6 แบบมาตรฐานบ่อเกรอะ - หลุมซึมของเทศบาล, สุขาภิบาล, องค์การบริหารส่วนจังหวัดและเมืองพัทยา 19

3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลอง 29

3.2 แผนผังการทดสอบสัมประสิทธิ์การซึมผ่านโดยวิธีระดับน้ำแปรเปลี่ยน 33

4.1 ผลการศึกษาการกระจายตัวของเม็ดดิน 39

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นที่ได้จากการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน 42

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ NaCl กับเวลาของการศึกษาสารติดตาม 44

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ NaCl กับเวลาของการศึกษาสารติดตาม 44

4.5 ประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษของตัวอย่างดินชนิดต่าง ๆ 46

4.6 ประสิทธิภาพการกำจัด TS, TSS และ TDS ของอย่างดิน 47

4.7 ประสิทธิภาพการกำจัด COD ของตัวอย่างดิน 48

4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของตัวอย่างดิน 49

4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์ของตัวอย่างดิน 50

1 ก การกระจายของเม็ดดินสำหรับดินทรายหยาบ 61

2 ก การกระจายของเม็ดดินสำหรับดินทรายคละ 62

3 ก การกระจายของเม็ดดินสำหรับดินทรายละเอียด 63

4 ก การกระจายของเม็ดดินสำหรับดินพื้นที่ 66

5 ก การกระจายของเม็ดดินสำหรับดินทรายหยาบ + ดินเหนียว 67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

6 ก การกระจายของเม็ดดินสำหรับดินทรายคละ + ดินเหนียว....69
7 ก การกระจายของเม็ดดินสำหรับดินทรายละเอียด + ดินเหนียว....70
8 ก การกระจายของเม็ดดินสำหรับดินเหนียว....72
1 ข ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาหนาแน่นแห้งและความชื้นสำหรับดินทรายหยาบ....74
2 ข ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาหนาแน่นแห้งและความชื้นสำหรับดินทรายคละ....75
3 ข ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาหนาแน่นแห้งและความชื้นสำหรับดินทรายละเอียด....76
4 ข ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาหนาแน่นแห้งและความชื้นสำหรับดินพื้นที่....77
5 ข ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาหนาแน่นแห้งและความชื้น
สำหรับดินทรายหยาบ + ดินเหนียว....78
6 ข ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาหนาแน่นแห้งและความชื้น
สำหรับดินทรายคละ + ดินเหนียว....79
7 ข ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาหนาแน่นแห้งและความชื้น
สำหรับดินทรายละเอียด + ดินเหนียว....80
8 ข ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาหนาแน่นแห้งและความชื้นสำหรับดินเหนียว....81
1 ค การสอบเทียบขวดแก้วฟลาซเบอร์ 1....84
2 ค การสอบเทียบขวดแก้วฟลาซเบอร์ 2....84
1 จ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น NaCl กับเวลาของการศึกษาสารติดตาม
สำหรับตัวอย่างดินทรายหยาบ....96
2 จ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น NaCl กับเวลาของการศึกษาสารติดตาม
สำหรับตัวอย่างดินทรายคละ....97
3 จ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น NaCl กับเวลาของการศึกษาสารติดตาม
สำหรับตัวอย่างดินทรายละเอียด....98
4 จ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น NaCl กับเวลาของการศึกษาสารติดตาม
สำหรับตัวอย่างดินพื้นที่....99
5 จ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น NaCl กับเวลาของการศึกษาสารติดตาม
สำหรับตัวอย่างดินทรายหยาบ + ดินเหนียว....100

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

6 จ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น NaCl กับเวลาของการศึกษาสารติดตาม
สำหรับตัวอย่างดินทรายคละ + ดินเหนียว 101
7 จ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น NaCl กับเวลาของการศึกษาสารติดตาม
สำหรับตัวอย่างดินทรายละเอียด + ดินเหนียว...102
8 จ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น NaCl กับเวลาของการศึกษาสารติดตาม
สำหรับตัวอย่างดินเหนียว 103

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

COD	= ความต้องการออกซิเจนเชิงเคมี (Chemical Oxygen Demand)
TS	= ของแข็งทั้งหมด (Total Solids)
TSS	= ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids)
TDS	= ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total Dissolved Solids)
BOD	= ความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (Biochemical Oxygen Demand)
C/N ratio	= อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน
N	= ไนโตรเจน
C	= คาร์บอน
pH	= ค่าความเป็นกรด-ด่าง
TKN	= ไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็น (Total Kjeldahl Nitrogen)
PO_4^{2-}	= ฟอสเฟต (Phosphate)
FOG	= Fat, Oil & Grease
N_2	= ก๊าซไนโตรเจน
NH_3	= แอมโมเนีย
E. Coli	= *Eschericia Coli*
ETEC	= Enterotoxigenic
EPEC	= Enteropathogenic
EHEC	= Enterohemorhagic
CH_4	= มีเทน
CO_2	= คาร์บอนไดออกไซด์
NH_4	= แอมโมเนียม
H_2S	= ไฮโดรเจนซัลไฟด์
MPN	= Most Probable Number
η_s	= สัมประสิทธิ์การตกตะกอน
ρ_s	= ความหนาแน่นของของแข็ง
ρ_f	= ความหนาแน่นของของเหลว

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

d_p	= ขนาดอนุภาค
g	= ค่าสัมประสิทธิ์แรงโน้มถ่วง
μ	= สัมประสิทธิ์ความหนืด
v	= ความเร็วของการตกตะกอน
η_I	= สัมประสิทธิ์การเบียดเข้าหาสารกรอง
d_c	= ขนาดอนุภาคที่เบียดเข้าหาสารกรอง (collector diameter)
η_D	= สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย
k	= ค่าคงที่ของ Boltzmann
T	= อุณหภูมิ
η_T	= สัมประสิทธิ์การกำจัดอนุภาครวม
n	= จำนวนอนุภาคต่อปริมาตรก่อนการกรอง
n_0	= จำนวนอนุภาคต่อปริมาตรหลังการกรอง
f	= ค่าคงที่ของการกรองที่อนุภาคขนาดต่างๆ (collision factor)
H	= ความหนาของชั้นดิน
R	= ขนาดอนุภาค
G_s	= ค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน
ρ_d	= ค่าความหนาแน่นแห้งของดิน
ρ_w	= ความหนาแน่นของน้ำ
ρ_d	= ค่าความหนาแน่นแห้งของดิน
n	= ค่าความพรุนของดิน
ε	= ค่าอัตราส่วนช่องว่างในดิน
d_m	= ขนาดเฉลี่ยของเม็ดดิน
K_T	= ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดิน
μ	= ความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ
ρ	= ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ
g	= ค่าสัมประสิทธิ์แรงโน้มถ่วง
V	= ความเร็วของการไหลซึม
υ	= ความเร็วทางกายภาพ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

i	$= \frac{\Delta h}{\Delta l}$ ความชันทางชลศาสตร์
t	= ระยะเวลาการเคลื่อนที่มลสารผ่านชั้นดิน
C	= ความเข้มข้นของมลสารหลังออกจากระบบ
C_0	= ความเข้มข้นของมลสารก่อนเข้าสู่ระบบ
x	= ช่วงความยาวของการไหลซึม
Δl	= ช่วงความยาวของการไหลซึม
Re_p	= Reynold Number
d_m	= ขนาดเม็ดดินโดยเฉลี่ย
D	= สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย
C_{in}	= ความเข้มข้นมลสารที่เข้าสู่ระบบ
C_{eff}	= ความเข้มข้นมลสารที่ออกจากระบบ
MID	= Minimal Infective Dose
L	= ความลึกประสิทธิผล
ρ_t	= ค่าความหนาแน่นรวม
ρ_d	= ค่าความหนาแน่นแห้ง
w	= ปริมาณความชื้น
g/cap.day	= กรัมต่อคน-วัน
billion cells/cap.day	= พันล้านเซลล์ต่อคน-วัน
g/day	= กรัมต่อวัน
kg/day	= กิโลกรัมต่อวัน
liter/cap.day	= ลิตรต่อคน-วัน
g	= กรัม
kg	= กิโลกรัม
mg/L	= มิลลิกรัมต่อลิตร
°C	= องศาเซลเซียส
mm/min	= มิลลิเมตรต่อนาที
μm	= ไมโครเมตร

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

cm	= เซนติเมตร
m	= เมตร
mL	= มิลลิลิตร
hr	= ชั่วโมง
kg COD/m^3.day	= กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร-วัน
kg BOD/day	= กิโลกรัมบีโอดีต่อวัน
kg COD/day	= กิโลกรัมซีโอดีต่อวัน
m^2	= ตารางเมตร
kg/m^3	= กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
cm/s^2	= เซนติเมตรต่อวินาทีกำลังสอง
m/s	= เมตรต่อวินาที
K	= องศาเคลวิน
g/cm^3	= กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
cm/s	= เซนติเมตรต่อวินาที
s	= วินาที
cm^2/s	= ตารางเซนติเมตรต่อวินาที
mm	= มิลลิเมตร
g/cm.s	= กรัมต่อเซนติเมตร-วินาที

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ปัญหาการขาดแคลนน้ำที่เกิดขึ้นในประเทศไทย ส่งผลกระทบถึงการพัฒนาทางเศรษฐกิจและสังคมรวมถึงกระทบต่อความมั่นคงของชาติ แม้ว่าในปี พ.ศ. 2538 เป็นต้นมา ปริมาณน้ำจะมีมากขึ้นแต่ในช่วงฤดูแล้งยังเกิดปัญหาการขาดแคลนน้ำขึ้นอย่างต่อเนื่อง (วินัย วีระวัฒนานนท์, 2540) แต่ในทางตรงกันข้ามในบางพื้นที่ก็ยังเกิดปัญหาน้ำท่วมขึ้นอย่างสม่ำเสมอทั้งในพื้นที่เมืองและชนบท ซึ่งสาเหตุหลักของการเกิดเหตุการณ์น้ำท่วมคือ การขาดการวางแผนการระบายน้ำที่เหมาะสม เช่น ในช่วงปลายฤดูฝนซึ่งมีพายุดีเปรสชั่นได้พัดพาเอาฝนมาตกเป็นจำนวนมากเป็นเหตุให้มีปริมาณน้ำมากเกินความสามารถในการรองรับของเขื่อน จึงต้องมีการระบายน้ำออกสู่ระบบระบายน้ำตามธรรมชาติ เป็นผลให้น้ำในแม่น้ำ คู คลองต่าง ๆมีระดับน้ำสูงขึ้นจนเกิดการไหลท่วมเข้าสู่พื้นที่พักอาศัยและพื้นที่ทำการเกษตรกรรมของประชาชนในบริเวณนั้น จนก่อให้เกิดปัญหาน้ำท่วมขังอยู่นานนับเดือน ส่วนปัญหาน้ำท่วมที่เกิดขึ้นในพื้นที่เมืองนั้น เกิดจากปัญหาระบบระบายน้ำของเมืองไม่สามารถระบายน้ำจำนวนมากได้ทันทำให้เกิดน้ำท่วมขังตามพื้นที่ต่างๆส่งผลกระทบต่อประชาชนที่อาศัยอยู่ในบริเวณนั้น แม้ว่าระยะเวลาที่น้ำท่วมขังในเขตพื้นที่เมืองจะไม่ยาวนานเท่าในเขตพื้นที่ชนบท แต่ผลกระทบที่เกิดขึ้นจะส่งผลต่อกลุ่มคนที่กว้างกว่า เนื่องจากจำนวนประชากรในเขตเมืองมีความหนาแน่นกว่าในพื้นที่ชนบท ปัญหาที่เกิดตามมาจากเหตุการณ์น้ำท่วม คือเกิดการแพร่กระจายของเชื้อโรคจากระบบกำจัด และบำบัดสิ่งปฏิกูลในสภาวะน้ำท่วมขังซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดโรคอหิวาต์, ไข้รากสาด, บิด, อุจจาระร่วงและอาหารเป็นพิษ รวมถึงโรคพยาธิต่างๆเป็นต้น แหล่งที่มาของเชื้อโรคเหล่านี้คือ หลุมซึม เนื่องจากเมื่อเกิดเหตุการณ์น้ำท่วมขึ้น น้ำในหลุมซึมจะแพร่ซึมผ่านชั้นดินออกมารวมกับน้ำผิวดินที่ท่วมขังเหนือพื้นที่ และเป็นสาเหตุทำให้เกิดการแพร่กระจายของเชื้อโรคจากหลุมซึมมาสู่คนที่มีโอกาสจะสัมผัสกับน้ำนั้นได้

จากปัญหาที่กล่าวมา วิธีการหนึ่งซึ่งสามารถแก้ไขปัญหานี้ ทำได้โดยการเลือกชนิดของดินที่นำมาเป็นชั้นดินปกคลุมบริเวณหลุมซึมที่เหมาะสม โดยมีการศึกษาในด้านต่างๆ ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของดินที่นำมาทำเป็นชั้นดินปกคลุมบริเวณหลุมซึม ได้แก่ ส่วนประกอบของดิน, ความหนาแน่นแห้ง, ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน, ค่าอัตราส่วนช่องว่างและค่าความพรุน, ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน และขนาดเฉลี่ยของเม็ดดิน และประสิทธิภาพการกำจัด

มลพิษของดินชนิดต่างๆ จากนั้นนำมาประเมินชนิดของดินและความหนาของชั้นดินที่เหมาะสมในการนำมาทำเป็นชั้นดินปกคลุมบริเวณหลุมซึม และทำการเปรียบเทียบโอกาสที่จะก่อให้เกิดความเสี่ยงน้อยที่สุดต่อการเกิดโรคในสภาวะน้ำท่วมขังโดยพิจารณาจากความเข้มข้นมลสาร และจำนวนจุลินทรีย์ที่ซึมผ่านออกจากชั้นดินปกคลุมบริเวณหลุมซึม เพื่อนำข้อมูลต่างๆที่ได้จากการวิจัยไปเป็นปัจจัยในการเลือกดินที่เหมาะสมกับการนำไปทำเป็นชั้นดินปกคลุมบริเวณหลุมซึม เพื่อป้องกันโอกาสเสี่ยงของมนุษย์ต่อการเกิดโรคที่เกิดจากน้ำท่วมขังได้ การเลือกดินที่มีลักษณะสมบัติและความหนาของชั้นดินที่เหมาะสม จะเป็นวิธีการป้องกันเชื้อโรคจากสิ่งปฏิกูลไม่ให้มีการแพร่กระจายต่อไปสู่สิ่งแวดล้อมซึ่งอาจทำให้เกิดโรคกับผู้ที่มีโอกาสสัมผัสและได้รับเชื้อนั้นเข้าสู่ร่างกายได้

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษของดินชนิดต่างๆที่เหมาะสมในการนำมาทำเป็นชั้นดินปกคลุมบริเวณหลุมซึม

1.2.2 เพื่อศึกษาความหนาของชั้นดินที่เหมาะสมในการนำมาทำเป็นชั้นดินปกคลุมบริเวณหลุมซึมที่ก่อให้เกิดโอกาสที่จะมีความเสี่ยงน้อยที่สุดต่อการเกิดโรคในสภาวะน้ำท่วมขัง

1.2.3 เพื่อทำการเปรียบเทียบโอกาสที่จะก่อให้เกิดความเสี่ยงทางสุขภาพต่อการเกิดโรคโดยระบบหลุมซึมระหว่างดินชนิดต่าง ๆ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพของดิน คือ ส่วนประกอบของดิน, ความหนาแน่นแห้ง, ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน, ค่าอัตราส่วนช่องว่างและค่าความพรุน, ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านและขนาดเฉลี่ยของเม็ดดิน รวมทั้งประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษของดินชนิดต่างๆ เพื่อใช้ประเมินหาชนิดของดินและความหนาของชั้นดินที่เหมาะสมในการนำมาทำเป็นชั้นดินปกคลุมบริเวณหลุมซึม และทำการเปรียบเทียบโอกาสที่จะก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคจากระบบหลุมซึมระหว่างดินชนิดต่าง ๆ

การศึกษาวิจัยนำน้ำตัวอย่างซึ่งเป็นน้ำเสียส่วนใสที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นจากบ่อเกรอะ ของหอพักสุรนิเวศ 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมาโดย แบ่งการทดลองเป็น 8 ชุด ตามชนิดของตัวอย่างดิน ได้แก่ ดินทรายหยาบ, ดินทรายคละ (ดินทรายหยาบ + ดินทรายละเอียด), ดินทรายละเอียด, ดินพื้นที่, ดินทรายหยาบ + ดินเหนียว, ดินทรายคละ + ดินเหนียว, ดินทรายละเอียด + ดินเหนียว และดินเหนียว เพื่อนำไปหาประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษของตัวอย่างดินชนิดต่าง ๆ ในด้าน COD, TS, TSS, TDS, Turbidity, Total coliforms และ Fecal coliforms แล้ว

นำผลการทดลองประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษของดินมาประเมินโอกาสที่จะก่อให้เกิดความเสี่ยงน้อยที่สุดต่อการเกิดโรคในสภาวะน้ำท่วมขัง

ข้อมูลจากผลการทดลอง สามารถใช้เลือกชนิดของดินที่เหมาะสมในการนำมาทำเป็นชั้นดินปกคลุมบริเวณหลุมซึมได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นการป้องกันโอกาสที่จะก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคจากระบบหลุมซึมในสภาวะน้ำท่วมขังได้

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลักษณะของสิ่งปฏิกูล

2.1.1 ปริมาณและส่วนประกอบของสิ่งปฏิกูล

Salvato (1982) ให้นิยามว่า สิ่งปฏิกูลคือของเสียที่ปล่อยออกมาจากร่างกายโดยมีอัตราการปล่อยสิ่งปฏิกูลเท่ากับ 27 g/cap.day (น้ำหนักแห้ง) หรือ 100-200 g/cap.day (น้ำหนักเปียก) มี Fecal coliforms 2,000 billion cells/cap.day และมี *E. Coli* 400 billion cells/cap.day

รายละเอียดในเรื่องปริมาณของสิ่งปฏิกูลนั้นยังไม่ได้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวางนัก Feachem et al. (1983) และ De Anne et al. (1981) ศึกษาปริมาณของสิ่งปฏิกูลที่ปล่อยออกมาจากร่างกาย โดยมีปริมาณเท่ากับ 100 – 400 g/day สำหรับอุจจาระ และ 1.0 – 1.3 kg/day สำหรับปัสสาวะ (ตารางที่ 2.1) Man (1976) พบว่าชาวแอฟริกาปล่อยอุจจาระออกมามีน้ำหนักเฉลี่ย 400 g/cap.day และปัสสาวะประมาณ 1,200 g/cap.day โดยรวมแล้วปล่อยสิ่งปฏิกูลออกมาประมาณ 1,600 g/cap.day ซึ่งเขากล่าวว่าความแปรผันของปริมาณมีความเกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายอย่างได้แก่ การบริโภคอาหาร การใช้น้ำ สุขภาพอนามัยและอุปนิสัยในการชำระล้างหลังการถ่าย

McGarry (1976) ได้ศึกษาว่าชาวจีนปล่อยอุจจาระออกมาประมาณ 2 liter/cap.day โดยรวมถึงน้ำที่ใช้ชำระล้างลงสู่ถังเก็บกักสิ่งปฏิกูลด้วย Feachem et al. (1983)ศึกษาพบว่าชาวยุโรปและแอฟริกาเหนือมีอัตราการปล่อยสิ่งปฏิกูลเท่ากับ 100-200 g/cap.day (น้ำหนักเปียก) ขณะที่ประเทศกำลังพัฒนามีอัตราการปล่อยสิ่งปฏิกูลเท่ากับ 130-520 g/cap.day (น้ำหนักเปียก)

ส่วนประกอบของอุจจาระและปัสสาวะประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ถึง 88-97 % และ 65-85% ตามลำดับ โดยค่า C/N ratio ในอุจจาระมีค่าเท่ากับ 6-10 ขณะที่ปัสสาวะจะค่าเท่ากับ 1 (ตารางที่ 2.2) พัฒนา มูลพฤกษ์ (2541) พบว่าสิ่งปฏิกูลส่วนใหญ่ประกอบด้วย น้ำ และสารอินทรีย์ นอกจากนั้น ยังมีสาร อนินทรีย์ ได้แก่ ไนโตรเจน, ฟอสฟอรัส, โพแทสเซียมและสารอื่น ๆ ความแตกต่างของส่วนประกอบในสิ่งปฏิกูลในแต่ละคนหรือแต่ละเชื้อชาติ มีความแตกต่างกันออกไป McGarry (1976) รายงานว่าในอุจจาระมีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบอยู่ประมาณร้อยละ 5-7 และในปัสสาวะมีไนโตรเจนอยู่ประมาณร้อยละ 18 ส่วน Kubo และ Sigiki (1977) ได้ศึกษาหาส่วนประกอบของสิ่งปฏิกูลของคนญี่ปุ่นพบว่า มีค่า BOD สูงถึง 12,000 mg/L

ตารางที่ 2.1 ปริมาณของสิ่งปฏิกูลที่ปล่อยออกมาจากร่างกายในแต่ละวัน

ส่วนประกอบ	อุจจาระ	ปัสสาวะ
น้ำหนักเปียกต่อคนต่อวัน	100-400 g	1.0-1.31 kg
น้ำหนักแห้งต่อคนต่อวัน	30-60 g	50-70 g
ความชื้น	70-85 %	93-96 %

หมายเหตุ จาก Sanitation and Desease Health Aspect of Excreta and Wastewater Management

โดย Feachem et al. , 1983, Wiley, Chichester.

จาก Night-Soil Composting โดย DeAnne et al. , 1981, Water and Telecommunications Department, World Bank.

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบของสิ่งปฏิกูลที่ปล่อยออกมาจากร่างกายในแต่ละวัน

ส่วนประกอบโดยประมาณ	อุจจาระ	ปัสสาวะ
	(% น้ำหนักแห้ง)	(% น้ำหนักแห้ง)
สารอินทรีย์	88-97	65-85
ไนโตรเจน (N)	5.0-7.0	15-19
ฟอสฟอรัส (as P_2O_5)	3.0-5.4	2.5-5.0
โพแทสเซียม (as K_2O)	1.0-2.5	3.0-4.5
คาร์บอน (C)	44-55	11-17
แคลเซียม (as CaO)	4.5	4.5-6.0
อัตราส่วน C/N	6-10	1
BOD_5 ต่อคนต่อวัน	15-20 g	10 g

หมายเหตุ จาก Sanitation and Desease Health Aspect of Excreta and Wastewater Management ,

โดย Feachem et al. , 1983, Wiley, Chichester.

2.1.2 ลักษณะน้ำเสียจากระบบหลุมซึม

ธงชัย พรรณสวัสดิ์และคณะ (2530) ศึกษาปริมาณน้ำเสียจากส้วมของบ้านพักอาศัยในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลมีส่วนประกอบดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ลักษณะของน้ำเสียจากส้วมจากบ้านพักอาศัยในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล

ลักษณะ	ปริมาณ
pH	7.71
COD, mg/L	1,474
BOD, mg/L	702
TKN, mg/L	300
PO_4^{-2}, mg/L	24
SS, mg/L	559
FOG, mg/L	538

หมายเหตุ จาก น้ำเสียชุมชนและปัญหามลภาวะทางน้ำในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล , พิมพ์ครั้งที่1, โดย ธงชัย พรรณสวัสดิ์และคณะ, 2530, สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย : กรุงเทพมหานคร.

Metcalf และ Eddy (1991) ศึกษาพบว่าลักษณะของน้ำเสียจากระบบหลุมซึมมีสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆได้แก่ ของแข็งแขวนลอย, สารอินทรีย์, ไนโตรเจน, ฟอสฟอรัสและจุลินทรีย์

2.1.2.1 ของแข็งแขวนลอย

ของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียที่ไหลผ่านชั้นดินสามารถถูกกำจัด หรือแยกออกจากน้ำเสียได้ โดยอาศัยการตกตะกอน, กรองผ่านชั้นดินและชั้นหิน พบว่าน้ำเสียมักจะอุดตันบริเวณผิวชั้นบนของพื้นที่ในกรณีที่เป็นร่องหรือพื้นซึมน้ำ ส่วนกรณีที่เป็นหลุมซึมน้ำส่วนที่มักจะอุดตันก่อนคือบริเวณโดยรอบของหลุม ดังนั้นจึงต้องออกแบบให้ระบบสามารถลดปัญหาดังกล่าวให้มากที่สุด Parsons and Abrahams (1992) กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับการตกตะกอนว่า ความเร็วของน้ำจะลดลงถ้าอัตราการตกตะกอนเพิ่มขึ้น และการเพิ่มขึ้นของการกระจายทำให้เกิดการชนกันและการตกตะกอนเพิ่มขึ้น

2.1.2.2 สารอินทรีย์

สารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสีย สามารถกำจัดได้โดยอาศัยกระบวนการทางชีวภาพแบบให้อากาศ คือพวกจุลินทรีย์ที่เกาะอยู่ตามรากพืช และตามผิวเม็ดดินต่างๆโดยจะอาศัย

ออกซิเจนจากบรรยากาศดำรงชีวิตอยู่และจะทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย และการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบไม่ให้อากาศก็มี บางส่วนเกิดในชั้นดินบ้างแต่มีไม่มาก ดังนั้นควรคำนึงถึงปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในระบบ คือ ปริมาณออกซิเจนถ่ายเทเข้าสู่ระบบ ต้องมีมากกว่าประมาณออกซิเจนที่ต้องการใช้ในระบบ

2.1.2.3 ฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสในน้ำเสียจะถูกกำจัดในรูปของสารอินทรีย์ฟอสเฟต สารโพลีฟอสเฟต และสารออร์โธฟอสเฟต การกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียด้วยวิธีการซึมน้ำใต้ผิวดินโดยระบบหลุมซึมนี้สามารถกำจัดได้โดยหลักการดูดซับ แต่อาจมีปัญหาเกิดการอิ่มตัวของปริมาณฟอสฟอรัสบริเวณชั้นดินบางบริเวณได้ (ประวรดา โภชนจันทร์, 2543)

2.1.2.4 ไนโตรเจน

ไนโตรเจนในน้ำเสียมักจะอยู่ในรูปสารอินทรีย์ไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจน วิธีการซึมน้ำใต้ผิวดินโดยระบบหลุมซึมนี้สามารถกำจัดสารไนโตรเจนในน้ำเสียได้ซึ่งจะใช้กระบวนการตกตะกอน, การกรอง และการระเหย โดยจะออกมาในรูปของแก๊สไนโตรเจน(N_2)และแก๊สแอมโมเนีย (NH_3) และพืชสามารถนำสารไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียและไนเตรทมาใช้ และในรูปของสารไนเตรทที่ซึมลงไปในดิน

2.1.2.5 จุลินทรีย์

จุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนมากับสิ่งปฏิกูลเป็นสาเหตุของการเกิดโรคระบบทางเดินอาหารเป็นส่วนใหญ่ ฉะนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการสกัดกั้นจุลินทรีย์จากสิ่งปฏิกูลเพื่อไม่ให้มีการแพร่กระจายต่อไปสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งจะทำให้มีโอกาสที่จะเกิดโรคกับผู้ที่มีโอกาสสัมผัสได้ การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการซึมน้ำใต้ผิวดิน โดยระบบหลุมซึมสามารถกำจัดจุลินทรีย์ต่างๆ ได้ผลค่อนข้างดี โดยอาศัยการดัก, การดูดซับ, การกรอง, การตกตะกอน รวมถึงกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ (Metcalf & Eddy, 1991)

การมีชีวิตและประสิทธิภาพการแพร่เชื้อของจุลินทรีย์ในน้ำ จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและจุลินทรีย์ส่วนมากสามารถมีชีวิตได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 5°C และจะตายอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงกว่า 40°C การดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ยังขึ้นอยู่กับสิ่งมีชีวิตอื่นๆในน้ำที่อาจเป็นตัวแข่งขันหรือเป็นผู้ล่าก็ได้ จุลินทรีย์สามารถมีชีวิตอยู่ในน้ำที่สะอาดได้นานกว่าในน้ำที่สกปรก และอาจมีชีวิตอยู่ได้นานที่สุดถ้ามีจุลินทรีย์เพียงชนิดเดียวอาศัยอยู่ (ศุวศา กานตวนิชกูร, 2529)

Fecal coliforms เป็นจุลินทรีย์ที่พบว่าปนเปื้อนในแหล่งน้ำทั่วไป สามารถมีชีวิตอยู่ได้หลายปีภายใต้สภาวะที่เหมาะสม สำหรับโคลิฟอร์มโดยเฉพาะ *E. Coli* สามารถเจริญได้ในน้ำสกปรกแต่จะค่อย ๆตายลงในที่สุด และมักไม่สามารถมีชีวิตอยู่ได้นานกว่า 50 วัน สำหรับที่

อุณหภูมิ 20-30 °C อาจมีชีวิตได้นานที่สุดประมาณ 20 วัน (ศุวศา กานตวนิชกูร, 2529) Talaro (1996) ศึกษาพบว่า *E. Coli* มีอัตราการเคลื่อนที่ในน้ำมีค่าเท่ากับ 1 mm/min

โดยปกติแล้วจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ จะไม่สามารถเคลื่อนที่ไปโดยตัวของมันเองได้ ต้องมีตัวกลางนำพาไป เช่น น้ำหรือดิน การเคลื่อนที่ของจุลินทรีย์ในดินนั้นจะไปได้ไกลมากน้อยเท่าใดนั้นมีองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องหลายอย่าง ได้แก่ ชนิดของดิน, ความพรุนของดิน, อุณหภูมิและความชื้นในดิน,ปริมาณของน้ำฝนที่ตกลงมาบนพื้นผิวดิน, อาหารของจุลินทรีย์รวมทั้งชนิดและปริมาณจุลินทรีย์ ดังนั้น ถ้าเป็นดินเหนียวจุลินทรีย์จะถูกนำไปโดยน้ำได้ไม่ไกลมากนัก แต่ถ้าเป็นพวกกรวด,หินปูน, หิน, ดินเหนียวแห้งที่มีรอยแตก หรือดินที่มีความพรุนสูงจะทำให้จุลินทรีย์ถูกน้ำพาไปได้ไกล (พัฒนา มูลพฤกษ์, 2541)

แบคทีเรียในกลุ่มจีนัส *E. Coli*

Escherichia Coli เป็นแบคทีเรียแกรมลบ รูปร่างเซลล์เป็นท่อนสั้นที่มีขนาด 1.1-1.5 x 2.0-6.0 μm (Bell and Kyriakides, 1998) เซลล์มักอยู่เดี่ยวๆหรืออาจพบอยู่เป็นคู่ สามารถเคลื่อนที่ได้โดยแฟลกเจลลาที่ยื่นออกมารอบเซลล์พบเชื้อได้ทั่วไปในลำไส้ของสัตว์เลือดอุ่นและในธรรมชาติโดยเฉพาะในดินและน้ำ จึงใช้เป็นดัชนีบ่งชี้ (microorganism indicator) ด้านสาธารณสุข

โดยปกติ *E. Coli* มีทั้งสายพันธุ์ที่ทำให้เกิดโรคทางเดินอาหารกับคนและสายพันธุ์ที่ไม่ก่อให้เกิดโรคเพียงแต่อาศัยอยู่ในลำไส้ใหญ่ ส่วนกลุ่มหรือสายพันธุ์ที่ก่อให้เกิดโรคมักจะมีการสร้างสารพิษซึ่งสามารถแบ่งได้ดังนี้

Enterotoxigenic (ETEC) *E. Coli*

ก่อให้เกิดอาการคลื่นไส้ ท้องร่วง หรือเกิดโรคที่เรียกว่า Gastroenteritis มีระยะเวลาก่อโรค 12-72 ชม.

Enteropathogenic (EPEC) *E. Coli*

พบว่ามีประชากรประมาณ 2-8 % ของ *E. Coli* ทั้งหมดในแหล่งน้ำธรรมชาติก่อให้เกิดอาการท้องร่วงเช่นเดียวกัน มีระยะเวลาก่อโรคประมาณ 1-6 วัน

Enterohemorhagic (EHEC) *E. Coli*

สารพิษก่อให้เกิดการอักเสบของลำไส้ใหญ่และมีโลหิตออกมา อุจจาระร่วง และยังมีผลต่อการทำงานของไต ซึ่งทำให้ไตวายได้ มักพบในผู้ป่วยที่เป็นเด็กและคนชรา มีระยะเวลาก่อโรคประมาณ 3-8 วัน สายพันธุ์ที่สำคัญและมีการแพร่ระบาดมากคือสายพันธุ์ O157:H7

การระบาดของโรคระบบทางเดินอาหารเนื่องจาก *E. Coli* โดยโรคซึ่งเกิดจาก EPEC มีรายงานการระบาดน้อยมากจากทั่วโลก (Eley, 1992a) สำหรับ ETEC ที่ทำให้เกิดโรค

อุจจาระร่วง (Traveller’s diarrhea) ซึ่งมักเกิดกับนักท่องเที่ยว และมักเกิดกับผู้ที่เดินทางจากที่ที่มีมาตรฐานทางสุขอนามัยสูงไปยังที่ที่มีสุขอนามัยต่ำ ส่วนรายงานการระบาดของโรคอาหารเป็นพิษที่เกิดขึ้นเนื่องจาก EHEC นั้นมีบ้างทั้งในทวีปอเมริกา ยุโรปและเอเชีย ในสหรัฐอเมริกาพบการระบาดครั้งแรกในปี ค.ศ. 1982 (Eley, 1992c) จากนั้นก็มีรายงานการระบาดในแคนาดาและญี่ปุ่น เชื้อชนิดที่พบว่าเป็นสาเหตุสำคัญของโรคคือ O157:H7

2.2 ลักษณะของส้วมที่ใช้ในประเทศไทย

ระบบส้วมซึมเป็นระบบที่ใช้กับชุมชนในเมือง มีราคาถูก ประเทศไทยเริ่มใช้ระบบนี้ตั้งแต่เริ่มศตวรรษที่ 17 (ปรีดา แย้มเจริญวงศ์, 2534) ระบบส้วมซึมนี้จะมีโถส้วมคล้ายคอห่านจึงมักเรียกว่าส้วมคอห่าน วางอยู่บนปากหลุม มี 2 ลักษณะ คือแบบชักโครกและแบบตักน้ำราด ระบบส้วมซึมจะประกอบด้วย 2 ถัง คือ ถังเกรอะซึ่งเป็นถังแรกสำหรับการตกตะกอนพวกของแข็ง อาจทำด้วยคอนกรีตหรือก่ออิฐฉาบปูนทำให้น้ำซึมผ่านไม่ได้ และน้ำใสส่วนบนจะล้นมายังถังที่สองซึ่งเรียกว่าหลุมซึม เพื่อซึมออกสู่ดินบริเวณโดยรอบ

ส้วมซึมสามารถสร้างในบริเวณอาคารได้ เพราะไม่มีกลิ่นรบกวน โดยวางตัวส้วมแบบคอห่านไว้บนถังส้วม ทำให้มีสภาพเป็น water seal โดยจะให้มีน้ำขังอยู่ภายในโถส้วมลึกประมาณ 1.25-3.75 cm ซึ่งสามารถกันกลิ่นและแมลงได้ แต่ไม่ควรใช้ส้วมซึมในบริเวณที่ดินไม่ซึมน้ำหรืออยู่ใกล้กับแหล่งน้ำใช้เพราะน้ำจากถังเก็บกักจะซึมเข้าสู่แหล่งน้ำได้

2.3 กลไกการทำงานของระบบหลุมซึม

2.3.1 ส่วนประกอบของระบบหลุมซึม

การบำบัดและกำจัดสิ่งปฏิกูล มีวัตถุประสงค์ เพื่อทำการเก็บกัก, ทำลายและป้องกันการแพร่กระจายของเชื้อโรคที่ปนเปื้อนมากับสิ่งปฏิกูล โดยใช้ดินเป็นตัวกลางกำจัดสารแขวนลอยและทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ตลอดจนทำการเปลี่ยนสภาพของเสียในสิ่งปฏิกูลให้อยู่ในสภาพที่ปลอดภัยต่อการแพร่กระจายของเชื้อโรค และไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของสิ่งมีชีวิตหรือทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ เช่น คุณภาพน้ำผิวดิน, น้ำใต้ดินหรือมลพิษทางดิน หลังจากนั้นจึงทำการกำจัดทิ้งหรืออาจนำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่น เช่น นำไปทำปุ๋ยหรือทำเชื้อเพลิง

การซึมน้ำใต้ผิวดินโดยระบบหลุมซึมจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ บ่อเกรอะสำหรับการกำจัดน้ำเสียขั้นต้น และพื้นที่สำหรับซึมน้ำหรือเป็นหลุมซึม สำหรับกำจัดน้ำเสียส่วนใสที่ไหลมาจากบ่อเกรอะ ซึ่งทั้งสองส่วนนี้จะอยู่ใต้ผิวดิน (ศุวศา กานตวนิชกูร, 2529)

ถังเกรอะ เป็นส่วนที่รองรับอุจจาระหรือน้ำเสีย อาจทำด้วยคอนกรีตหรือก่ออิฐฉาบปูน ทำให้น้ำซึมผ่านไม่ได้ เป็นถังที่มีท่อระบายอากาศ เนื่องจากการหมักภายในถังอาจเกิดก๊าซชีวภาพขึ้น ถังนี้ทำหน้าที่สำคัญ 3 ประการคือ

- แยกส่วนที่เป็นของแข็งออกจากส่วนที่เป็นน้ำโดยเฉพาะของแข็งส่วนที่ตกตะกอนง่าย ซึ่งจะตกตะกอนลงไปอยู่ส่วนล่างของถัง ทำให้จำนวนของแข็งที่ปนอยู่ในน้ำนั้นลดลงได้อีกส่วนหนึ่ง

- ทำให้เกิดกระบวนการทางชีววิทยา โดยพวกจุลินทรีย์ที่ปนอยู่ในอุจจาระและน้ำเสียนั้น ส่วนมากเป็นพวก Anaerobic Bacteria จะช่วยย่อยสลายสารอินทรีย์โดยที่ไม่ต้องใช้ออกซิเจนอิสระ จึงถูกเรียกว่า septic ซึ่งทำให้มีก๊าซหลายอย่างเกิดขึ้น เช่น มีเทน (CH_4), คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), แอมโมเนีย (NH_3), ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และอื่นๆ แล้วแต่ส่วนประกอบของของเสีย ขบวนการทางชีววิทยานี้ก็จะช่วยทำให้ปริมาณของแข็งโดยเฉพาะอย่างยิ่งของแข็งส่วนที่แขวนลอย และพวกที่ละลายปนอยู่บางส่วนถูกย่อยสลายกลายสภาพไปเป็นสารอนินทรีย์และตกตะกอนลงไปอยู่ส่วนล่างของถังเป็นการทำให้น้ำเสียนั้นสะอาดขึ้นได้อีกส่วนหนึ่ง

- ทำหน้าที่เก็บกักสลัดจ์ (sludge) และกากฟองสลัดจ์ (scum) ได้แก่ตะกอนที่เกิดขึ้นและกองสะสมอยู่ส่วนล่างของถัง ส่วนกากฟองสลัดจ์นั้น ก็คือส่วนที่เป็นไขมันซึ่งลอยอยู่ส่วนบนของผิวน้ำ กากฟองส่วนนี้ย่อยสลายได้ยาก หากปล่อยออกไปก็จะทำให้ระบบบำบัดในขั้นที่สองเกิดการเสียหายได้ กากฟองส่วนที่เก็บกักอยู่ในถังนี้นานๆเข้าจะถูกย่อยสลาย และตกตะกอนลงสู่ส่วนล่างของถังเช่นเดียวกันกับของแข็งส่วนอื่นๆ แต่ต้องใช้เวลานานมาก

หน้าที่ที่กล่าวมาทั้ง 3 ประการนั้นได้ช่วยทำให้ส่วนที่เป็นน้ำที่ไหลออกไปจากถังซึ่งเรียกว่า effluent มีความสะอาดขึ้นกว่าเดิม แต่ก็ยังไม่อยู่ในขั้นที่ปลอดภัยเพียงพอที่จะปล่อยออกไปสู่สภาพแวดล้อมได้ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการบำบัดในขั้นตอนที่สองต่อไป

น้ำในส่วนที่เรียกว่า effluent นี้มีวิธีการกำจัดหลายวิธีเช่นการทำระบบซึมน้ำใต้ผิวดิน, การกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter) , ระบบบ่อผึ่ง (Oxidation pond) และส้วมแบบเติมอากาศ ประเทศไทยนิยมบำบัดน้ำเสียส่วนใสจากถังเกรอะด้วยการซึมน้ำใต้ผิวดิน โดยให้น้ำซึมออกสู่ดินรอบ ๆ ระบบนี้น้ำที่ซึมออกมายังมีสารอินทรีย์ที่ยังย่อยสลายไม่สิ้นสุดและมีเชื้อโรคปนอยู่ด้วย แต่ก็เป็นระบบที่ปราศจากกลิ่น, ก่อสร้างง่าย, ราคาถูกและไม่ต้องดูแลมาก

หลุมซึม

เมื่อมีการใช้ส้วม จำเป็นต้องใช้น้ำในการชำระสิ่งปฏิกูลและขับดันสิ่งปฏิกูลให้ลงสู่หลุมโดยใช้น้ำประมาณ 1-3 ลิตรเป็นอย่างน้อย (ศุวศา กานตวนิชกูร, 2529) เมื่อสิ่งปฏิกูลตกลงสู่

หลุมเก็บกัก ส่วนที่เป็นหลุมเก็บกักสิ่งปฏิกูลอาจสร้างเป็นหลุมเดียวหรือสองหลุม ถ้าสร้างเป็นหลุมเดียวต้องใช้วัสดุที่กรุผนังหลุมที่ให้น้ำซึมออกได้ และรอบๆผนังต้องกรุด้วยกรวดหรืออิฐหักกว้างประมาณ 20 cm โดยรอบเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการอุดตันบริเวณรอบ ๆหลุม (ปรีดา แย้มเจริญวงศ์, 2534) และถ้าใช้เป็นสองหลุมต้องให้หลุมแรกป้องกันการซึมเข้าออกของน้ำ ส่วนหลุมที่สองนั้นทำเช่นเดียวกับกรณีหลุมเดียว

หลุมซึมทำหน้าที่รับน้ำที่ไหลออกมาจากส่วนแรกน้ำบางส่วนจะไหลซึมออกไปรอบๆหลุม และจุลินทรีย์ที่ติดออกไปจะถูกกรองโดยดินรอบบริเวณหลุม ส่วนสารอินทรีย์ที่ไหลออกไปกับของเหลวนี้ จะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในดินรอบบริเวณหลุมนั้น ส่วนของแข็งที่ตกตะกอนอยู่ภายในหลุมก็จะเกิดการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ

จิตเทพ ประสิทธิ์อยู่ศีล (2534) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการลด Coliform bacteria ในน้ำเสียจากถังเกรอะโดยใช้เครื่องกรองไร้ออกซิเจนที่มีตัวกลางครึ่งถังจม โดยใช้กระบอก พี.วี.ซี.ใสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 inch มีความสูง 2.50 m บรรจุโรลม้วนผมพลาสติกทำหน้าที่เป็นตัวกลางกรอง มีความสูงของชั้นตัวกลางกรองเท่ากับ 1.26 m โดยทดลองกำจัดน้ำเสียความเข้มข้นต่ำมีค่า COD เฉลี่ย 147 mg/L มีปริมาณ Total coliforms ในน้ำเฉลี่ย 1.54 X 10^7 MPN/100 mL ที่ระยะเวลากักเก็บน้ำ 12, 24, 48 และ 72 hr Hydraulic loading 0.27, 0.18, 0.07 และ 0.06 kg COD/m^3.day ตามลำดับ พบว่าประสิทธิภาพในการลด Total coliforms ร้อยละ 88, 96, 98 และ 99 ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการลด COD ได้ร้อยละ 61, 71, 72 และ 74 ตามลำดับ โดยที่ประสิทธิภาพในการลด Total coliforms และ COD ในน้ำเสียมากกว่าร้อยละ 50 เกิดขึ้นที่ระดับความสูงของตัวกลางกรองมากกว่า 0.45 m ขึ้นไป

ชูโชติ สุทธิบริบาล (2538) ทำการศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียจากบ้านพักอาศัย โดยระบบถังเกรอะ ถังกรองไร้อากาศร่วมกับถังทรายกรอง เพื่อศึกษาค่าการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ และเพื่อศึกษาความสามารถในการลด Total coliforms ของถังทรายกรอง ระบบบำบัดน้ำเสียต้นแบบประกอบด้วย ถังเกรอะ, ถังกรองไร้อากาศ, ถังตกตะกอน และถังทรายกรอง ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 m ภายในบรรจุชั้นของทรายหยาบไม่คัดขนาดสูง 0.3 m ปล่อยน้ำเสียเข้าสู่ระบบแล้วทิ้งไว้ 3 เดือนเพื่อให้ระบบปรับความสมบูรณ์

ผลการศึกษาพบว่าปริมาณน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบเฉลี่ย 148.4 liter/cap.day อัตราการรับสารอินทรีย์เฉลี่ย 0.15 kg BOD/day หรือ 0.29 kg COD/day น้ำเสียที่ผ่านระบบค่าของ BOD, COD, SS เฉลี่ยเท่ากับ 41.04, 95.40 และ 8.75 mg/L ตามลำดับ ปริมาณ Total coliforms เฉลี่ย 10^5 MPN/100 ml pH เฉลี่ย 8.0 และอุณหภูมิเฉลี่ย 27°C ประสิทธิภาพทั้งระบบในการลด BOD, COD, SS และ Total coliforms มีค่าเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ 75.91, 75.27, 98.25 และ 95.24 ตามลำดับ

จุมพล ขุนอ่อน (2539) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากบ้านพักอาศัยด้วยระบบถังเกรอะ-ถังกรองไร้อากาศสำเร็จรูป โดยระบบประกอบด้วยถังเกรอะและถังกรองไร้อากาศอยู่ในใบเดียวกัน โดยมีปริมาตรรวม 1,570 liter บรรจุตัวกลางที่มีความสูงและพื้นที่ผิว 3 ขนาดคือ ความสูง 65 cm พื้นที่ผิว 38.25 m^2 , ความสูง 40 cm พื้นที่ผิว 25.50 m^2 และ ความสูง 25 cm พื้นที่ผิว 12.75 m^2 มีระยะเวลาเก็บกัก 38 hr

พบว่าความสูงและพื้นที่ผิวของชั้นตัวกลาง มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการลด BOD และ SS ได้ โดยระบบที่มีความสูงของชั้นตัวกลาง 65 cm พื้นที่ผิว 38.25 m^2 มีประสิทธิภาพในการลด BOD, SS, Oil & Grease, TDS และ Sulfideได้ร้อยละ 76, 86, 83, 13 และ 7 ตามลำดับ โดยลักษณะน้ำทิ้งจากระบบส่วนใหญ่ได้มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง ยกเว้น Oil & Grease และ Sulfide ส่วนระบบที่มีความสูงของชั้นตัวกลาง 40 cm พื้นที่ผิว 25.50 m^2 มีประสิทธิภาพร้อยละ 49, 76, 82, 15 และ 16 ตามลำดับ สุดท้ายคือความสูงของชั้นตัวกลาง 25 cm พื้นที่ผิว 12.75 m^2 มีประสิทธิภาพร้อยละ 45, 73, 82, 15 และ 11 ตามลำดับ ซึ่งใน 2 ระบบหลังมีค่า BOD, SS, Oil & Grease และ Sulfide เกินกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง

ศุภชัย บุษราคัม (2537) ศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งจากถังเกรอะโดยระบบท่อซึมร่วมกับถังทรายกรอง เพื่อหาประสิทธิภาพของระบบท่อซึมร่วมกับทรายกรองในการลดค่า COD, BOD และ SS ของน้ำทิ้งที่ออกมาจากถังเกรอะ ทรายกรองมีค่า effective size 0.45 และ 0.20 mm ค่า uniformity เท่ากับ 2 ทรายกรองแต่ละขนาดกำหนดให้มีความหนา 60 cm และ 75 cm จากผลการศึกษาพบว่า effective size และ uniformity มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด COD, BOD และ SS โดยมีผลการทดลองดังนี้

แบบจำลองที่ 1 ท่อซึมร่วมกับทรายกรอง effective size 0.45 mm ความหนาชั้นทรายกรอง 60 cm มีประสิทธิภาพการลด COD, BOD และ SS ได้ร้อยละ 76.13, 75.24 และ 62.99 ตามลำดับ

แบบจำลองที่ 2 ท่อซึมร่วมกับทรายกรอง effective size 0.45 mm ความหนาชั้นทรายกรอง 75 cm มีประสิทธิภาพการลด COD, BOD และ SS ได้ร้อยละ 88.32, 89.61 และ 88.15 ตามลำดับ

แบบจำลองที่ 3 ท่อซึมร่วมกับทรายกรอง effective size 0.20 mm ความหนาชั้นทรายกรอง 60 cm มีประสิทธิภาพการลด COD, BOD และ SS ได้ร้อยละ 78.92, 76.78 และ 87.56 ตามลำดับ

แบบจำลองที่ 4 ท่อซึมร่วมกับทรายกรอง effective size 0.20 mm ความหนาชั้นทรายกรอง 75 cm มีประสิทธิภาพการลด COD, BOD และ SS ได้ร้อยละ 86.81, 88.55 และ 88.43 ตามลำดับ

พบว่า การทั้ง 4 แบบจำลอง สามารถลดค่า COD, BOD และ SS ได้ต่ำกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง

2.3.2 หลักการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการซึมน้ำใต้ผิวดินโดยระบบหลุมซึม

การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการซึมน้ำใต้ผิวดินโดยระบบหลุมซึมจะมีความสัมพันธ์กับคุณลักษณะของดินและผลของกลไกการกำจัดมลสาร เมื่อน้ำเสียถูกระบายลงสู่ดินสารประกอบบางอย่างอาจผ่านสู่น้ำใต้ดิน ถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์และส่วนอื่นจะค้างที่เม็ดดิน กลไกการบำบัดน้ำเสียโดยระบบหลุมซึมสามารถแบ่งได้ 3 กลไก คือ กลไกทางกายภาพ, กลไกทางเคมีกายภาพและกลไกทางชีวภาพ

2.3.2.1 กลไกทางกายภาพ

เมื่อน้ำเสียไหลผ่านช่องว่างของดิน อนุภาคสารแขวนลอยจะถูกกำจัดด้วยการกรอง ความสามารถกำจัดสารแขวนลอยนั้นขึ้นกับขนาดของอนุภาค, ขนาดของดิน, ความหนาของชั้นดิน และอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำ ยิ่งถ้าอัตราภาระทางชลศาสตร์สูง และดินหยาบ อนุภาคต่าง ๆ จะเคลื่อนที่ไปได้ไกลและเร็ว กลไกทางกายภาพจะอาศัยหลักกลศาสตร์มาอธิบายซึ่งมีกลไกอยู่ 4 แบบ (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2539) ดังนี้

การติดค้างบนชั้นดิน (Straining) คือการที่อนุภาคติดค้างอยู่บนชั้นดิน โดยจะติดค้างอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดินคือเม็ดดินมี 2 แบบ ได้แก่ แบบที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าช่องว่างระหว่างเม็ดดินและแบบที่มีขนาดของอนุภาคเล็กกว่าช่องว่างระหว่างเม็ดดินแสดงดังรูปที่ 2.1

การตกตะกอน (Sedimentation) คืออนุภาคตกลงบนเม็ดดินภายในชั้นดิน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาคเป็นสำคัญ เนื่องจากถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่จะทำให้เกิดการตกตะกอนเร็วกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ซึ่งมีความสัมพันธ์การกำจัดอนุภาคด้วยกลไกการตกตะกอนดังสมการที่ 2.1 (Yao et al., 1971) และแสดงดังรูปที่ 2.2 จาก Stoke's law

$$\eta_S = \frac{(\rho_s - \rho_f) d_p^2 g}{18 \mu v} \tag{2.1}$$

โดยที่ η_s = สัมประสิทธิ์การตกตะกอน

ρ_s = ความหนาแน่นของของแข็ง, kg/m^3

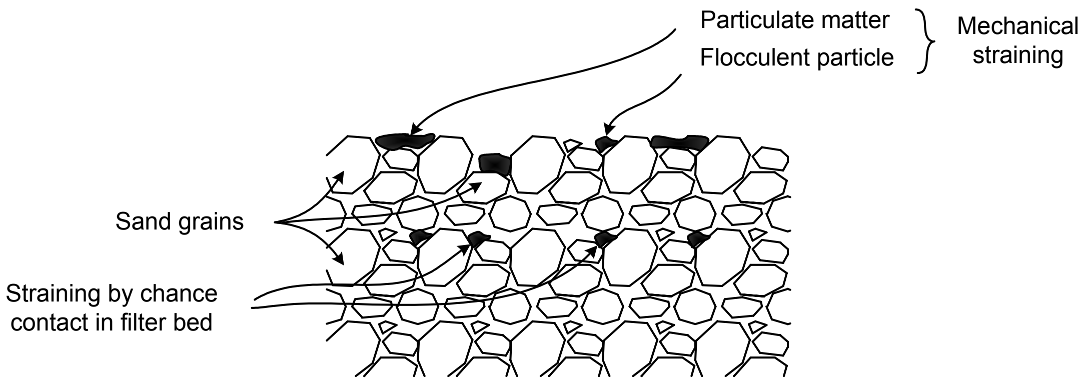
ρ_f = ความหนาแน่นของของเหลว, kg/m^3

d_p = ขนาดอนุภาค, μm

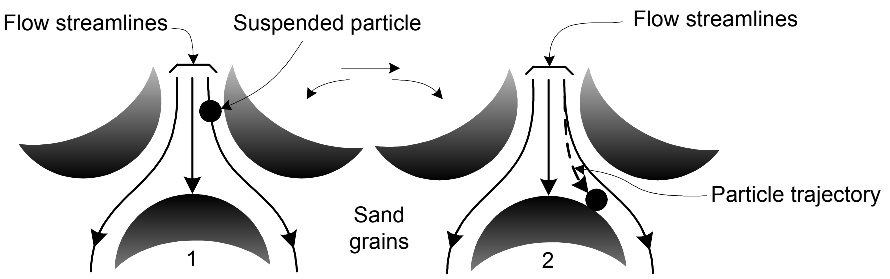
g = ค่าสัมประสิทธิ์แรงโน้มถ่วง, cm/s^2

μ = สัมประสิทธิ์ความหนืด

v = ความเร็วของการตกตะกอน, m/s



รูปที่ 2.1 กลไกการกำจัดตะกอนแบบการติดค้างบนชั้นดิน (Metcalf & Eddy, 1991)



รูปที่ 2.2 กลไกการกำจัดตะกอนแบบการตกตะกอน (Metcalf & Eddy, 1991)

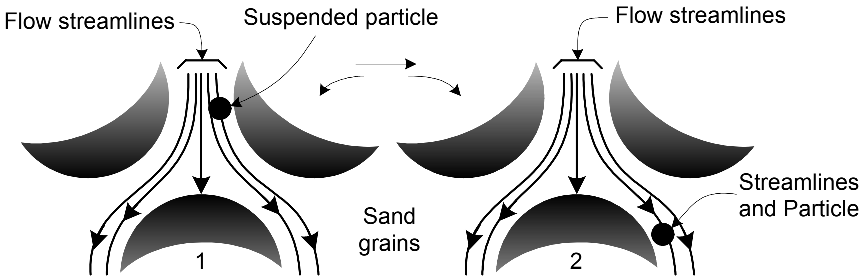
การเบียดเข้าหาสารกรอง (Interception) คือการที่อนุภาคเคลื่อนที่ไปในทิศทางแนวเดียวกับกระแสน้ำ และอนุภาคเหล่านี้จะเคลื่อนที่ไปพบกับผิวของเม็ดดิน ซึ่งมีความสัมพันธ์การกำจัดตะกอนด้วยกลไกการเบียดเข้าหาสารกรองดังสมการที่ 2.2 (Yao et al., 1971) แสดงดังรูปที่ 2.3

$$\eta_I = \frac{3}{2}\left(\frac{d_p}{d_c}\right)^2 \qquad (2.2)$$

โดยที่ η_I = สัมประสิทธิ์การเบียดเข้าหาสารกรอง

d_p = ขนาดอนุภาค, μm

d_c = ขนาดอนุภาคที่เบียดเข้าหาสารกรอง (collector diameter), μm



รูปที่ 2.3 กลไกการกำจัดตะกอนแบบการเบียดเข้าหาสารกรอง (Metcalf & Eddy, 1991)

การแพร่กระจาย (Diffusion) คืออนุภาคที่มีขนาดเล็กจะเกิดการเคลื่อนที่อย่างอิสระด้วยแรงของการชนกันของอนุภาค ซึ่งมีความสัมพันธ์การกำจัดอนุภาคด้วยกลไกนี้ดังสมการ 2.3 (Yao et al.,1971)

$$\eta_D = 0.9\left(\frac{kT}{\mu d_p d_c v}\right)^{2/3} \qquad (2.3)$$

โดยที่ η_D = สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย

k = ค่าคงที่ของ Boltzmann

T = อุณหภูมิ, K

μ = สัมประสิทธิ์ความหนืด

d_p = ขนาดอนุภาค, μm

d_c = ขนาดอนุภาคที่เบียดเข้าหาสารกรอง (collector diameter), μm

v = ความเร็วของการตกตะกอน, m/s

Yao et al. (1971) ได้ทำการศึกษากลไกการกำจัดอนุภาคมีค่าการกำจัดอนุภาครวมดังสมการที่ 2.4

$$\eta_T = \eta_S + \eta_I + \eta_D \tag{2.4}$$

โดยที่ η_T = สัมประสิทธิ์การกำจัดอนุภาครวม

η_s = สัมประสิทธิ์การตกตะกอน

η_I = สัมประสิทธิ์การเบียดเข้าหาสารกรอง

η_D = สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย

Weber(1972) ได้กล่าวว่ากลไกทางกายภาพมีประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาครวมดังสมการที่ 2.5

$$\frac{n}{n_0} = \exp .\left[\frac{-3f\eta_T(1-\varepsilon)H}{4R}\right] \tag{2.5}$$

โดยที่ n = จำนวนอนุภาคต่อปริมาตรก่อนการกรอง,No./100 mL

n_0 = จำนวนอนุภาคต่อปริมาตรหลังการกรอง,No./100 mL

f = ค่าคงที่ของการกรองที่อนุภาคขนาดต่าง ๆ (collision factor)

η_T = สัมประสิทธิ์การกำจัดอนุภาครวม

ε = ความพรุนของชั้นดิน

H = ความหนาของชั้นดิน, m

R = ขนาดอนุภาค, μm

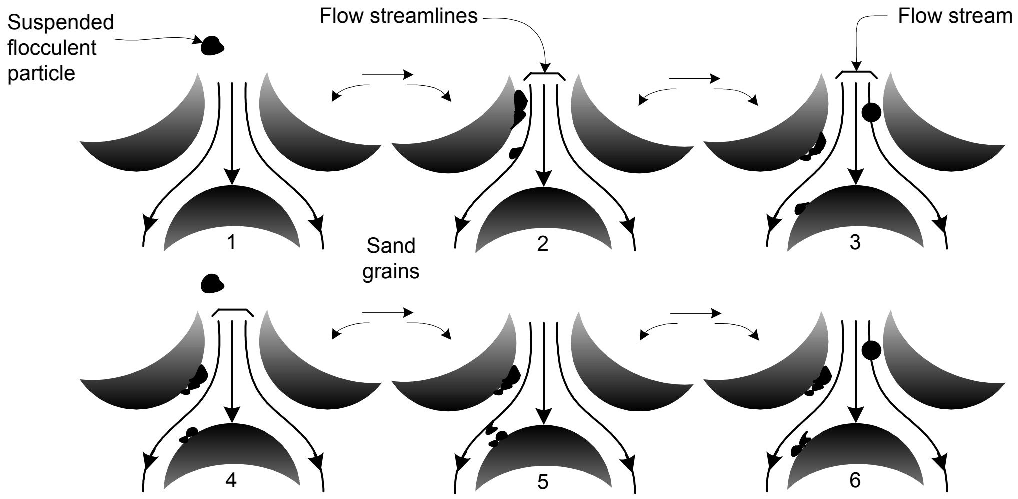
2.3.2.2 กลไกทางเคมีกายภาพ

กลไกของการกรองน้ำที่เกิดจากทางเคมีกายภาพ จะมีการทำงานได้ดีกว่ากลไกของการกรองน้ำที่เกิดจากทางกายภาพเพียงอย่างเดียว เพราะการกรองนี้เกิดขึ้นได้เกือบทั่วทั้งชั้นกรองทำให้ประสิทธิภาพในการใช้สารกรองมีมาก กลไกของการกรองแบบนี้ต้องอาศัยหลักฟิสิกส์มาอธิบาย โดยสมการแบ่งออกได้ 4 แบบ ดังนี้

การดูดติดผิวทางเคมี (Chemical adsorption) คือการดูดติดผิวที่อาศัยการยึดเหนี่ยวทางเคมี โดยจะมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นในการดูดติดผิวระหว่างอนุภาคกับสารกรอง การดูดติดผิวแบบนี้จะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อมีอุณหภูมิสูง เพราะว่าปฏิกิริยาทางเคมีจะเกิดได้เร็วขึ้น เมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น

แรงยึดติด (Adhesion forces) คือแรงที่ทำให้อนุภาครวมกลุ่มติดแน่นกับผิวของสารกรองที่อนุภาคนี้ไหลผ่านมาพบ แต่เนื่องจากแรงเซาะน้ำที่เกิดจากการไหลของน้ำผ่านชั้นกรองได้เซาะพวกอนุภาคบางส่วน ก่อนที่อนุภาคส่วนนี้จะเกาะติดแน่นบนผิวสารกรอง และทำให้น้ำไหลพาอนุภาคนี้คลื่อนผ่านชั้นกรองลงไปลึกขึ้นจนอาจหลุดออกจากชั้นกรอง และไหลไป

ปนกับน้ำที่ผ่านระบบแล้ว ซึ่งจะเป็นผลให้ทำน้ำที่ผ่านระบบแล้วมีปริมาณอนุภาคมากขึ้น รูปที่ 2.4 แสดงกลไกการกำจัดตะกอนแบบแรงยึดติด โดยขั้นตอนที่ 1-2 น้ำได้พาอนุภาคมาติดบนสารกรอง ขั้นตอนที่ 3-6 อนุภาคติดบนผิวสารกรองและเพิ่มขนาดของอนุภาค



รูปที่ 2.4 กลไกการกำจัดตะกอนแบบแรงยึดติด (Metcalf & Eddy, 1991)

การจับตัว (Coagulation-Flocculation) คือ การเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งทำให้อนุภาคต่าง ๆ ในน้ำได้มีโอกาสเกาะตัวซึ่งกันและกัน ทำให้อนุภาคเหล่านี้มีขนาดใหญ่ขึ้น และจะมีผลให้เกิดการดักอนุภาคโดยสารกรองในชั้นกรองได้ แสดงดังรูปที่ 2.5 โดยขั้นตอนที่ 1 น้ำได้พาอนุภาคมา ขั้นตอนที่ 2 อนุภาคมีการเกาะตัวกัน และขั้นตอนที่ 3 อนุภาคเกาะตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้สารกรองสามารถกรองอนุภาคนั้นได้

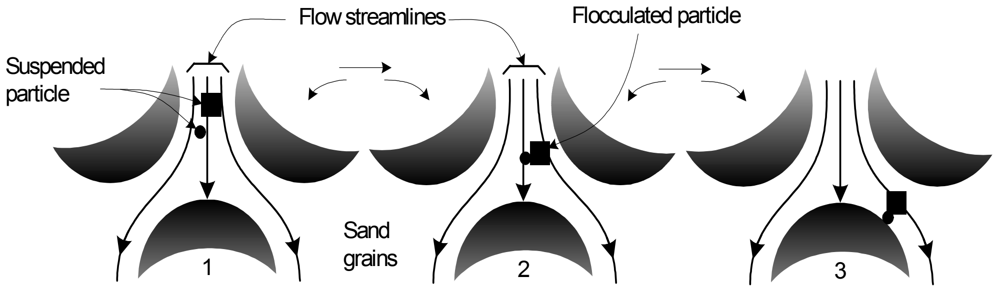
การดูดติดผิวทางกายภาพ (Physical adsorption) คือ การดูดติดผิวที่อาศัยแรงต่าง ๆยึดเหนี่ยวไม่ให้หลุดออกจากกันระหว่างอนุภาคกับสารกรอง การดูดติดผิวแบบนี้จะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อมีอุณหภูมิต่ำ การดูดติดผิวทางกายภาพจะประกอบด้วยแรง 3 ลักษณะ ได้แก่ Electrostatic forces, Electrokinetic forces และ Van der Waals forces

2.3.2.3 กลไกทางชีวภาพ

การเปลี่ยนรูปของชีวภาพที่เกิดในดิน จะรวมถึงการย่อยสลายสารอินทรีย์ เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์ ถูกเปลี่ยนจากสารอินทรีย์ไปเป็นสารอนินทรีย์ ซึ่งพืชสามารถนำไปใช้ได้ โดยมีกลไกการควบคุมปริมาณไนโตรเจนในน้ำเสียที่ระบายลงสู่ดินคือ การสูญเสียแก๊สไนโตรเจน (Volatilization และ Denitrification) และการเคลื่อนที่ของไนโตรเจนโดยการดูดซึมของพืช และออกซิเจนที่ผิวดินจะต้องซึมลงไปในชั้นดิน โดยผ่านช่องว่างระหว่างเม็ด

ดินทำให้พวกจุลินทรีย์ต่างๆ ได้เติบโตอยู่ภายในชั้นดิน ซึ่งจะลดขนาดของช่องว่างที่อยู่ภายในชั้นกรอง และทำให้เกิดการดักอนุภาคโดยชั้นดินได้ รวมทั้งทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยจุลินทรีย์ที่เกาะอยู่ตามผิวของเม็ดดิน

ตะกอนและน้ำทิ้งที่ออกจากบ่อเกรอะเป็นน้ำสกปรกมีจุลินทรีย์ BOD และ NH_3-N สูง ไม่ควรจะปล่อยลงแหล่งน้ำสาธารณะหรือพื้นดินโดยตรงจึงจำเป็นต้องทำการบำบัดเสียก่อนเพื่อไม่ให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพอนามัยและคุณภาพสิ่งแวดล้อม วิธีที่ดีที่สุดคือ วิธีการซึมน้ำใต้ผิวดิน ถ้าไม่มีปัญหาเรื่องน้ำใต้ดิน เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ราคาถูกและใช้ได้นาน ตำแหน่งที่เหมาะสมควรเป็นบริเวณที่ดินมีการซึมน้ำได้ดี ระดับน้ำใต้ดินต่ำและชั้นดินลึกพอสมควร



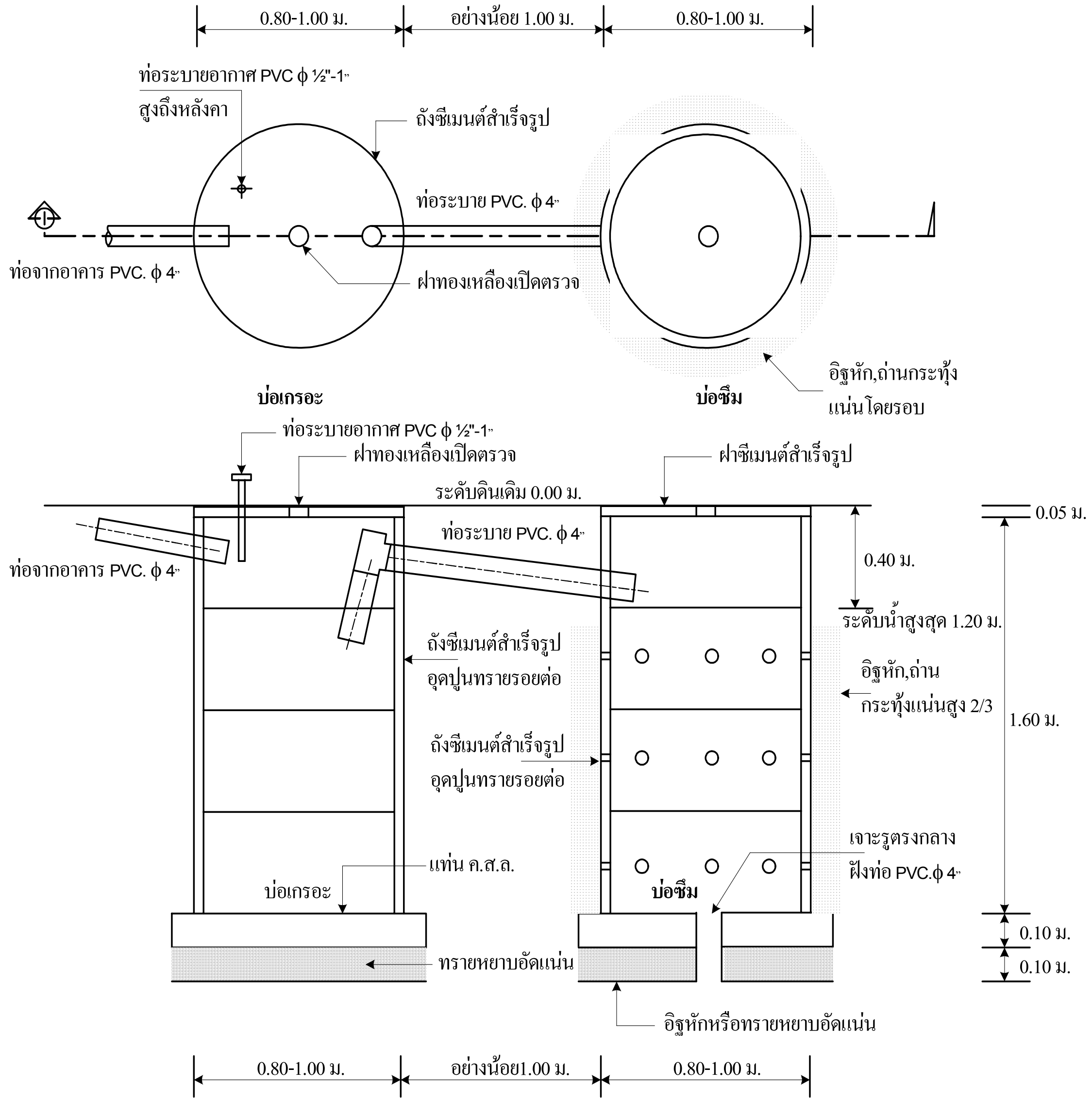
รูปที่ 2.5 กลไกการกำจัดตะกอนแบบการจับตัว(Metcalf & Eddy, 1991)

2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการซึมน้ำใต้ผิวดินโดยระบบหลุมซึม

ระบบซึมน้ำใต้ผิวดินที่ใช้กันอยู่มี 3 แบบคือ ร่องซึมน้ำ, พื้นซึมน้ำและหลุมซึมน้ำ ในประเทศไทยจะใช้การซึมน้ำใต้ผิวดินโดยระบบหลุมซึมน้ำเป็นส่วนใหญ่ โดยที่ผนังของหลุมซึมนิยมใช้วงขอบคอนกรีตที่มีความพรุน หรือก่ออิฐไม่ฉาบปูน ล้อมรอบกรุด้วยกรวดหรืออิฐหักเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ ¾-2½ inch หนา 15–30 cm (พัฒนา มูลพฤกษ์, 2541) ซึ่งจะช่วยให้รับการซึมได้ดีขึ้น ไม่ต้องยารอยต่อในระดับที่ต่ำกว่าท่อน้ำเข้า รูปแบบของหลุมซึมที่ถูกต้องนั้น ต้องทำเป็น 2 หลุมเป็นอย่างน้อย ดังรูปที่ 2.6 วางห่างกันอย่างน้อย 1 m เพื่อให้มีพื้นที่รับการซึมได้มากพอซึ่งจะทำให้พื้นดินบริเวณโดยรอบนั้นไม่เกิดการอิ่มตัวได้ง่าย และก้นบ่อต้องอยู่ห่างจากระดับน้ำใต้ดินไม่น้อยกว่า 0.90–1.20 m และต้องสร้างในบริเวณที่ดินมีอัตราการซึมน้อยกว่า 30 min/inch และห่างจากแหล่งน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคอย่างน้อย 15 m ฝาปิดหลุมควรมีช่องปิด-เปิด ได้เพื่อการตรวจสอบหรือแก้ไขเมื่อมีเหตุทำให้ระบบซึมขัดข้อง ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบหลุมซึมมีดังต่อไปนี้

การเลือกตำแหน่งสำหรับการซึมน้ำใต้ผิวดินโดยระบบหลุมซึม

ระบบนี้จะทำงานได้ดีขึ้นอยู่กับความสามารถของดินที่จะดูดซึมน้ำไว้ได้ รวมทั้งไวรัส, การกรองแบคทีเรีย และของเสียอื่นๆ จำเป็นต้องมีการทดสอบการดูดซึมของดิน, ระดับน้ำใต้ดินความลึกของชั้นดินและชั้นหิน ชนิดของความลาดเอียงจะบอกถึงปัญหาของการระบายน้ำที่อาจเกิดขึ้น และยังเป็นตัวช่วยพาน้ำทิ้งออกจากบ่อเกรอะได้ดี ในบริเวณที่ดินเป็นชั้นทรายที่ตื้นอยู่เหนือชั้นดินเหนียว ความลาดเอียงจะเป็นตัวช่วยให้ระบบทำงานได้ดีขึ้น (Salvato, 1982)



รูปที่ 2.6 แบบมาตรฐานบ่อเกรอะ-หลุมซึมของเทศบาล, สุขาภิบาล
องค์การบริหารส่วนจังหวัดและเมืองพัทยา

ขีดความสามารถในการกรองอนุภาคของชั้นดิน

ปัญหาของระบบการซึมน้ำใต้ผิวดินมักเกิดจากการออกแบบก่อสร้าง และการดูแลรักษาไม่ดีหรือภาระบรรทุกทางน้ำสูงเกินไป หรือเกิดจากชั้นดินโดยจะพบว่าดินไม่สามารถทำความสะอาดน้ำจากบ่อเกรอะได้อีกต่อไป ผลจากการสำรวจความล้มเหลวของระบบพบว่า กลไกทางฟิสิกส์และชีวภาพเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการอุดตันของช่องว่างเม็ดดินในพื้นที่ซึมน้ำ มากกว่าการทำลายสภาพหรือการอัดแน่นของดินขณะก่อสร้าง สาเหตุของการอุดตันของดินที่เป็นไปได้ มีดังนี้

- การอุดตันในช่องว่างของเม็ดดินทางฟิสิกส์โดยเศษของแข็งในน้ำจากถังเกรอะ
- การอุดตันในช่องว่างของเม็ดดินทางชีวภาพ โดยจุลินทรีย์ในอุจจาระและผลผลิตของมันหรือการทำลายโครงสร้างของดิน โดยปฏิกิริยาทางชีววิทยาเอง
- การอุดตันในช่องว่างของเม็ดดินทางเคมี โดยการบวมตัวของเม็ดดินเอง

ระบบการซึมน้ำใต้ผิวดินอาจเกิดการอุดตันขึ้นได้เมื่อใช้ไปนานๆ เนื่องจากสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ต่าง ๆจะไปอุดตันช่องว่างของดิน วิธีการแก้ไขทำได้โดยการปล่อยน้ำเป็นระยะๆ พื้นที่มีน้ำขังเนื่องจากดินไม่สามารถซึมน้ำได้ดีจะสามารถฟื้นสภาพได้ด้วยการปล่อยให้ซึมแล้วพักเป็นระยะหรืองดใช้เป็นการชั่วคราว เพื่อให้สิ่งสะสมอยู่นั้นถูกย่อยสลายไปมากๆแล้วก็สามารถใช้งานต่อไปได้อีก หรือควรจะมีระบบการซึมน้ำใต้ผิวดินสำรองเพื่อเอาไว้ใช้สลับกันไป (ศุวศา กานตวนิชกูร, 2529)

แม้ในน้ำสะอาดก็พบว่าเกิดการอุดตันของช่องว่างระหว่างเม็ดดินได้ จากปฏิกริยาการแลกเปลี่ยนอิออนและการเคลื่อนย้ายของดินละเอียด และในสภาพที่ไร้อากาศก็สามารถกระตุ้นให้เกิดการอุดตันได้ เนื่องจากมีการสะสมสารในดินไปสู่การเกิดเฟอรัสซัลไฟด์ ซึ่งจะอุดช่องว่างของดินและลดการซึมน้ำในดิน บางครั้งก็เกิดจากการอุดตันของแบคทีเรีย และพบว่าน้ำเสียซึ่งมีเศษขยะซึ่งมีคาร์บอนสูงจะทำให้เกิดการอุดตันได้มากกว่าน้ำที่ไม่มีสารเหล่านี้

2.4 ลักษณะของดินที่ใช้ปกคลุมบริเวณหลุมซึม

ชนิดของดินส่งผลถึงลักษณะสมบัติทางกายภาพของดิน ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ, ความหนาแน่นแห้ง, อัตราส่วนช่องว่าง, ค่าความพรุน, ขนาดเฉลี่ยและค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดิน โดยลักษณะสมบัติทางกายภาพเหล่านี้ มีผลทำให้ความสามารถในการกำจัดมลพิษของดินแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกันออกไปดังนั้นในการเลือกดินมาปกคลุมบริเวณหลุมซึมในสภาวะน้ำท่วมขังจึงมีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาชนิดของดินและความหนาของชั้นดินเป็นหลัก เพื่อเป็นการลดโอกาสที่เชื้อโรคจากระบบหลุมซึมจะปนเปื้อนกับน้ำผิวดินในสภาวะน้ำท่วมขัง และก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคกับผู้คนที่เข้าใกล้ได้น้อยที่สุด ลักษณะสมบัติทางกายภาพที่พิจารณาในงานวิจัยได้แก่

2.4.1 ลักษณะสมบัติทางกายภาพ

2.4.1.1 ความถ่วงจำเพาะ

วัฒนา ธรรมมงคล และวินิต ช่อวิเชียร (2532) กล่าวว่าดินมีส่วนประกอบของอากาศ น้ำ และเม็ดดิน เม็ดดินที่เป็นส่วนประกอบในดินจะประกอบด้วยแร่ธาตุชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกัน จะมีค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินต่างชนิดไป ค่าความถ่วงจำเพาะของดินเหนียวมีค่าประมาณ 2.680-2.720 ส่วนค่าความถ่วงจำเพาะของทรายซึ่งมีค่าประมาณ 2.650 เนื่องจากดินเหนียวมีส่วนประกอบของแร่ธาตุหลายชนิดซึ่งหนักกว่าควอทซ์ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของทรายทั่วไปจึงทำให้ดินเหนียวมีค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่าดินทราย

ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินมีความสำคัญมาก ในการคำนวณหาค่าต่าง ๆ ในสถานะความสัมพันธ์ขององค์ประกอบของดิน เช่น ความพรุน อัตราส่วนช่องว่างในดิน (สถาพร คูวิจิตรจารุ, 2541) ซึ่งส่งผลโดยตรงถึงความสามารถในกำจัดมลพิษของดิน การคำนวณค่าความถ่วงจำเพาะของดิน, G_s แสดงตามสมการที่ 2.6

$$G_s = \frac{W_s \times G_T}{(W_2 + W_s) - W_1} \tag{2.6}$$

โดยที่ G_s = ค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน

W_s = น้ำหนักตัวอย่างดินที่ทดลอง อบแห้ง, g

W_2 = น้ำหนักขวด + น้ำที่อุณหภูมิทดสอบ (อ่านค่าจากโค้งสอบเทียบที่อุณหภูมิทดสอบ), g

W_1 = น้ำหนักขวดแก้ว + น้ำ + ดิน ที่ทำการทดสอบ, g

G_T = องค์ประกอบแก้ปรับค่าอุณหภูมิที่ทำการทดลองจาก 4° C

2.4.1.2 ความหนาแน่นแห้ง

Wang and Huang (1985) กล่าวว่าความสามารถในการซึมน้ำของดินจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการบดอัด โดยถ้าร้อยละของการบดอัดสูงจะทำให้ความสามารถในการซึมน้ำลดลง Krutov and Kovslev (1997) ได้ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและความชื้นของดินชนิดต่าง ๆ คือ ดินทรายหยาบปานกลาง, ดินตะกอนปนดินเหนียวและดินทรายปนดินเหนียวโดยได้ทำการทดลองที่อัตราส่วนการผสมดินทั้งหมด 3 ค่า และ Kcom = 0.95 ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2.4 การคำนวณค่าความหนาแน่นแห้ง (Dry Density) ของตัวอย่างดิน, ρ_d แสดงตามสมการที่ 2.7

$$\rho_d = \frac{W_s}{V} \tag{2.7}$$

โดยที่ ρ_d = ค่าความหนาแน่นแห้งของดิน, g/cm^3

W_s = น้ำหนักดินแห้งที่ใช้ทดลอง, g

V = ปริมาตรของกระบอกใส่ตัวอย่าง, cm^3

ตารางที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งและความชื้นที่เหมาะสม

ชนิดของดิน	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด $(\rho_d \max)$ ton/m^3	ความหนาแน่นออกแบบ (ρ_{dn}) ton/m^3	ความชื้นที่เหมาะสม (%)
ดินทรายหยาบปานกลาง	1.89	1.8	10
ดินตะกอนปนดินเหนียว	1.95	1.85	12
ดินทราย : ดินเหนียว			
75% : 25%	2.05	1.95	19
50% : 50 %	2.12	2.02	8
25% : 75 %	2.02	1.92	10

หมายเหตุ จาก "Soil Compaction and Permeability Prediction Models.", โดย Wang, M.C., Huang, C.C., 1985, Journal of Environmental Engineering. Vol.110 : 1063-1083.

2.4.1.3 อัตราส่วนช่องว่าง

อัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio) คืออัตราส่วนของปริมาตรช่องว่างต่อปริมาตรเม็ดดิน การคำนวณอัตราส่วนช่องว่างในดิน, ε แสดงตามสมการที่ 2.8

$$\varepsilon = \frac{G_s . \rho_w}{\rho_d} - 1 \tag{2.8}$$

โดยที่ ε = ค่าอัตราส่วนช่องว่างในดิน

G_s = ค่าความถ่วงจำเพาะของดิน

ρ_w = ความหนาแน่นของน้ำ, g/cm^3

ρ_d = ค่าความหนาแน่นแห้งของดิน, g/cm^3

2.4.1.4 ค่าความพรุน

ความพรุน (Porosity) คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของช่องว่างระหว่างเม็ดดินต่อปริมาตรทั้งหมดในชั้นดินโดยที่ความพรุนมีมากขึ้นเท่าใดการไหลซึมก็ยิ่งดีขึ้นหรือเร็วขึ้นการคำนวณค่าความพรุน, n แสดงตามสมการที่ 2.9

$$n = \frac{\varepsilon}{1+\varepsilon} \tag{2.9}$$

โดยที่ n = ค่าความพรุนของดิน

ε = ค่าอัตราส่วนช่องว่างในดิน

2.4.1.5 ขนาดเฉลี่ยของเม็ดดิน

Freeze and Cherry (1979) ได้กล่าวถึงสมการ Kozeny - Carman ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน, ค่าอัตราส่วนช่องว่างในดิน, ขนาดเม็ดดินโดยเฉลี่ย, d_m และคุณสมบัติบางประการของน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ ไว้ดังสมการที่ 2.10

$$d_m = \sqrt{180 \cdot K_T \cdot \left(\frac{\mu}{\rho g}\right) \cdot \left[\frac{\left(1-\varepsilon^2\right)}{\varepsilon^3}\right]} \tag{2.10}$$

โดยที่ d_m = ขนาดเฉลี่ยของเม็ดดิน, cm

K_T = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดิน, cm/s

μ = ความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ, g/cm . s

ρ = ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ, g/cm^3

g = ค่าสัมประสิทธิ์แรงโน้มถ่วง, cm/s^2

ε = อัตราส่วนช่องว่างในดิน

2.4.1.6 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

สถาพร คูวิจิตรจารุ (2542) กล่าวถึงการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านโดยวิธีระดับน้ำแปรเปลี่ยน แสดงดังสมการที่ 2.11 ซึ่งเป็นสมการที่พัฒนามาจากสมการของ Darcy

$$K_T = \frac{2.3a \cdot L}{60A \cdot (\Delta t)} \log \frac{h_0}{h_1} \tag{2.11}$$

โดยที่ K_T = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดิน, cm/s
a = พื้นที่หน้าตัดหลอดวัดน้ำ, cm^2
L = ความยาวของตัวอย่างดินในกระบอก, cm
A = พื้นที่หน้าตัดของกระบอกตัวอย่างดิน, cm^2
Δt = เวลาที่ทำการทดลองปล่อยให้ระดับน้ำตกจาก ระดับ h_0 ถึง h_1 , s
h_0 = ระยะจากผิวน้ำท้ายน้ำข้างล่างถึงระดับเริ่มทดลอง, cm
h_1 = ระยะจากผิวท้ายน้ำข้างล่างถึงระดับเสร็จการทดลอง, cm

Wang and Haung (1985) กล่าวไว้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ไม่ว่าจะเป็นความหนาแน่นของดิน ความชื้น ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำ อัตราส่วนช่องว่าง ค่าความพรุน และส่วนประกอบและโครงสร้างของดิน ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในดินต่างชนิดกันจะแตกต่างกันไป แสดงได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินชนิดต่าง ๆ

ชนิดของดิน	สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน cm/s	คุณสมบัติการระบายน้ำ
กรวด	มากกว่า 1	สูง
ทราย	$10^{-1} – 10^{-3}$	ปานกลาง
ทรายเม็ดละเอียด, ตะกอนทรายหยาบ	$10^{-3} – 10^{-5}$	ต่ำ
ทรายเม็ดป่น, ตะกอนทราย	$10^{-5} – 10^{-7}$	ต่ำมาก
ดินเหนียว	น้อยกว่า 10^{-7}	ซึมผ่านได้ยากมาก

หมายเหตุ จาก ปฐพีกลศาสตร์, พิมพ์ครั้งที่ 1. โดย สถาพร คูวิจิตรจารุ, 2542, รุ่งแสงการพิมพ์: กรุงเทพฯ
จาก ปฐพีกลศาสตร์, พิมพ์ครั้งที่ 6. โดย วัฒนา ธรรมมงคล, 2532, ม.ป.พ. : กรุงเทพฯ.
จาก กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม, โดย มณเฑียร กังศศิเทียม, 2539, สมาคมศิษย์เก่าวิศวกรรมชลประทาน ในพระบรมราชูปถัมภ์

2.4.2 ชนิดของดินและความหนาของชั้นดิน

งานวิจัยได้ทำการประเมินชนิดของดินและความหนาของชั้นดินในการนำมาทำเป็นชั้นดินปกคลุมบริเวณหลุมซึมที่เหมาะสมที่จะก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคกับผู้คนที่เข้าใกล้ในสภาวะน้ำท่วมขังให้น้อยที่สุด

2.4.2.1 ความเร็วการไหลซึมและความเร็วกายภาพ

Freeze and Cherry (1979) กล่าวว่า การไหลซึมของน้ำผ่านดินเป็นแบบการไหลช้าๆ ไปตามช่องว่างระหว่างเม็ดดิน โดยที่ความเร็วของการไหลซึมของน้ำสามารถเขียนเป็นสมการตามกฎของ Darcy ได้ดังสมการที่ 2.12 และสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของการไหลซึมกับความเร็วทางกายภาพ แสดงได้ดังสมการที่ 2.13

$$V = ki = k\left(\frac{\Delta h}{\Delta l}\right) \tag{2.12}$$

โดยที่ V = ความเร็วของการไหลซึม, m/s

k = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดิน, m/s

i = $\frac{\Delta h}{\Delta l}$ ความชันทางชลศาสตร์

Δh = ความต่างระดับของน้ำในช่วงความยาวของการไหลซึม, m

Δl = ช่วงความยาวของการไหลซึม, m

$$\upsilon = \frac{V}{\varepsilon} \tag{2.13}$$

โดยที่ υ = ความเร็วทางกายภาพ, m/s

V = ความเร็วของการไหลซึม, m/s

ε = ค่าอัตราส่วนช่องว่างในดิน

2.4.2.2 ระยะเวลาการเคลื่อนที่ของมลสาร

ระยะเวลาของการเคลื่อนที่ของมลสารผ่านชั้นดินเข้าไปในชั้นน้ำ, t หาได้จากสมการที่ 2.14

$$t = \frac{\Delta l}{\upsilon} \tag{2.14}$$

โดยที่ t = ระยะเวลาการเคลื่อนที่มลสารผ่านชั้นดิน, s

Δl = ช่วงความยาวของการไหลซึม, m

υ = ความเร็วทางกายภาพ, m/s

2.4.2.3 สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย

เมื่อคำนวณขนาดเม็ดดินโดยเฉลี่ยดังสมการที่ 2.10 แล้ว จากนั้นได้ทำการหา Reynolds number $\left(\mathrm{Re}_p\right)$ ดังสมการที่ 2.15 เพื่อใช้ในการหาสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย, D ดังสมการที่ 2.16

$$\mathrm{Re}_p = d_m \upsilon \frac{\rho}{\mu} \tag{2.15}$$

$$D = 1.8\left(\frac{\mu}{\rho}\right)\mathrm{Re}_p^{1.25} \tag{2.16}$$

โดยที่ Re_p = Reynolds Number
d_m = ขนาดเม็ดดินโดยเฉลี่ย, cm
υ = ความเร็วทางกายภาพ, m/s
ρ = ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ, g/cm^3
μ = ความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ, g/cm . s
D = สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย, cm^2/s

2.4.2.4 ความหนาของชั้นดิน

Crank (1956) เมื่อแหล่งกำเนิดเป็น 1 มิติซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดต่อเนื่องและระบบยังไม่เข้าสู่สภาวะคงที่ สามารถพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดมลสารของชั้นดินได้จากสมการที่ 2.17

$$\frac{C}{C_0} = \left[erfc\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)\right] \tag{2.17}$$

โดยที่ $erfc$ = Complementary Error Function
C = ความเข้มข้นของมลสารหลังออกจากระบบ, mg/L
C_0 = ความเข้มข้นของมลสารก่อนเข้าสู่ระบบ, mg/L
x = ช่วงความยาวของการไหลซึม, cm
D = สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย, cm^2/s
t = ระยะเวลาการเคลื่อนที่ของมลสาร, s

2.5 การประเมินโอกาสที่จะก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรค

การเกิดโรคในร่างกายมนุษย์มีองค์ประกอบ 3 ประการ ได้แก่ เชื้อโรค, ผู้รับเชื้อ และปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม ตัวที่ก่อให้เกิดโรคได้แก่ แบคทีเรีย, เชื้อรา, โปรโตซัว, พยาธิ และไวรัส ผู้รับเชื้อจะมีปัจจัยในการรับเชื้อแตกต่างกันไปตาม ภูมิคุ้มกันโรคของร่างกาย, เพศ, อายุและเชื้อชาติ และปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม ได้แก่ ระดับความเป็นอยู่ทางด้านสังคมและเศรษฐกิจ, อาหาร, สุขอนามัยส่วนบุคคล, อุณหภูมิ และความชื้น

ตัวที่ทำให้เกิดโรคจะมีความรุนแรงของโรค ขึ้นอยู่กับค่าประมาณการได้รับต่ำสุดที่ก่อให้เกิดโรคขึ้นกับร่างกายมนุษย์ (Minimal Infective Doses : MID) และความสามารถที่เชื้อโรคจะดำรงชีพอยู่ได้ในสิ่งแวดล้อม (Bitton, 1994) โดยค่า MID จะแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของเชื้อโรค แสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 Minimal Infective Doses สำหรับเชื้อโรคและปรสิตบางชนิด

Organism	Minimal Infective Doses
Salmonella spp.	10^4 to 10^7
Shigella spp.	10^1 to 10^2
Escherichia coli	**10^6 to 10^8**
Vibrio cholerae	10^3
Giardia lamblia	10^1 to 10^2 cysts
Cryptosporidium	10^1 cysts
Entamoeba coli	10^1 cysts
Ascaris	1-10 eggs
Hepatitis A virus	1-10 PFU

หมายเหตุ จาก Wastewater Microbiology , โดย Bitton Gabriel, 1994, A John Wiley & Sons, INC. New York

บทที่ 3
การดำเนินการวิจัย

ในการศึกษาวิจัยลักษณะสมบัติทางกายภาพและประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษรวมถึงชนิดของดิน และความหนาของชั้นดินชนิดต่างๆ เพื่อนำมาทำเป็นชั้นดินปกคลุมบริเวณหลุมซึมที่เหมาะสมในเชิงวิศวกรรมศาสตร์และเชิงสุขภาพ มีขั้นตอนการดำเนินการ ดังแสดงในรูปที่ 3.1

3.1 การจำแนกชนิดของดินที่ใช้ในการทดลอง

การจำแนกชนิดของดินแบบเอกภาพ (USC, Unified Soil Classification) โดยอ้างอิงมาตรฐาน ASTM D 2487 – 98 เป็นหลัก เป็นการจำแนกดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียด ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะเนื้อดิน (Textural Characteristics) และขนาดของเม็ดดิน โดยมีวิธีการจำแนกด้วยตาเปล่า (Visual) ร่วมกับการทดสอบด้วยมือ (Mannual Test) แบบง่ายๆ (มาตรฐาน ASTM D 2488 – 93) โดยกำหนดให้ดินเม็ดหยาบ เป็นตัวอย่างดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 น้อยกว่าร้อยละ 50 ส่วนดินเม็ดละเอียด ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่าร้อยละ 50

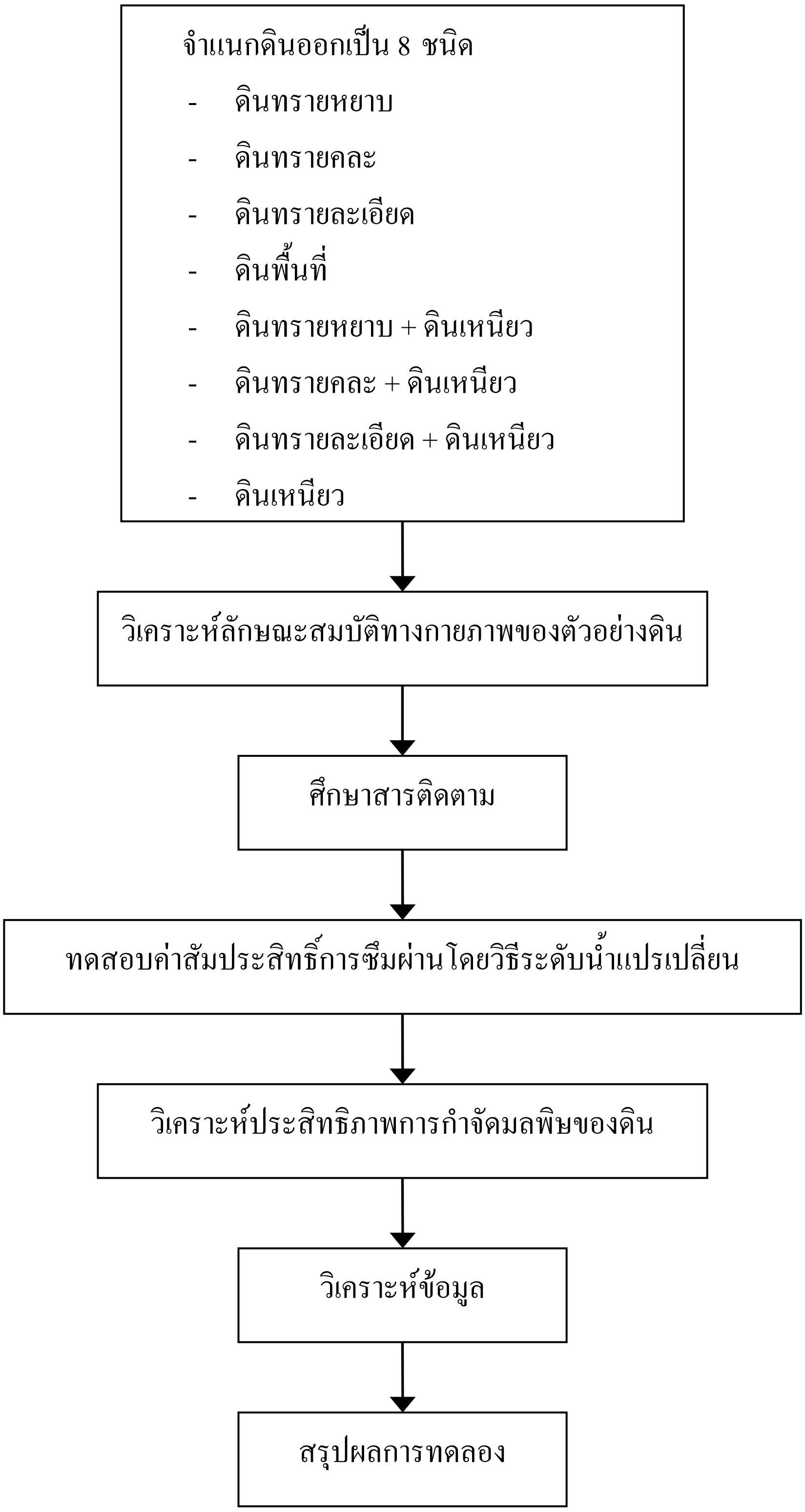
การจำแนกดินเม็ดหยาบทำได้โดยใช้ขนาดและความคละของเม็ดดินเป็นเกณฑ์ โดยการใช้ตะแกรงร่อน (มาตรฐาน ASTM D-421) ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดและน้ำหนักของดินที่ค้างและผ่านตะแกรงเบอร์ต่าง ๆ โดยมีหลักเกณฑ์ดังต่อไปนี้

ทรายหยาบ (Coarse Sand) ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และค้างตะแกรงเบอร์ 10 (2 mm $<$ ขนาดอนุภาค $<$ 4.75 mm)

ทรายหยาบปานกลาง (Medium Sand) ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และค้างตะแกรงเบอร์ 40 (0.425 mm $<$ ขนาดอนุภาค $<$ 4.75 mm)

ทรายละเอียด (Fine Sand) ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 และค้างตะแกรงเบอร์ 200 (0.075 mm $<$ ขนาดอนุภาค $<$ 0.425 mm)

การจำแนกดินเม็ดละเอียด ซึ่งหมายถึง ดินตะกอนและดินเหนียวนอกจากจะพิจารณาเพียงลักษณะเนื้อดินและขนาดของเม็ดดินแล้ว จะต้องพิจารณาคุณสมบัติอื่นประกอบด้วย คุณสมบัติที่พิจารณาแสดงดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลอง

ตารางที่ 3.1 การจำแนกดินเม็ดละเอียดโดยใช้วิธีการทดสอบด้วยมือ (Mannual Test)

การทดลอง	ปฏิกิริยา / ผลลัพท์	
	ดินตะกอน	ดินเหนียว
กำลังแห้ง (Dry Strength)	ไม่มี, ต่ำถึงปานกลาง	สูงถึงสูงมาก
ปฏิกิริยาต่อการสั่น (Dilatancy)	ไว	ไม่มีถึงช้า
ความเหนียว (Toughness)	ต่ำถึงปานกลาง	ปานกลางถึงสูง
พลาสติกซิตี้ (Plasticity)	ไม่มีพลาสติกซิตี้ถึงปานกลาง	ปานกลางถึงสูง
การตกตะกอน (Sediment)	เร็ว	ช้า

<u>หมายเหตุ</u> จาก <u>ทดลองปฐพีกลศาสตร์,</u> พิมพ์ครั้งที่1.โดยสถาพร คูวิจิตรจารุ, 2541, รุ่งแสงการพิมพ์: กรุงเทพฯ

การทดลองครั้งนี้ได้กำหนดการแบ่งชุดของตัวอย่างดิน เพื่อให้ครอบคลุมและสอดคล้องกับวัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย โดยจะมีทั้งหมด 8 ชุดตามชนิดและขนาดของเม็ดดินซึ่งได้แก่

1. ดินทรายหยาบหมายถึงดินทรายหยาบปานกลาง (0.425 mm <ขนาดอนุภาค<4.75 mm)

2. ดินทรายคละ หมายถึง ดินทรายหยาบ + ดินทรายละเอียด (0.075 mm <ขนาดอนุภาค <4.75 mm)

3. ดินทรายละเอียด (0.075 mm <ขนาดอนุภาค < 0.425 mm)

4. ดินพื้นที่ หมายถึง ดินบริเวณอาคารศูนย์เครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา

5. ดินทรายหยาบ + ดินเหนียว

6. ดินทรายคละ + ดินเหนียว

7. ดินทรายละเอียด + ดินเหนียว

8. ดินเหนียว หมายถึงดินจาก อ. ด่านเกวียน จ. นครราชสีมา

อัตราส่วนของดินแต่ละชนิดที่มีการนำมาผสมรวมกันคือ 50% : 50% โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ทำให้ได้ความหนาแน่นแห้งของตัวอย่างดินสูงที่สุด เป็นเหตุให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินผสมมีค่าต่ำที่สุด (Krutov and Kovalev, 1997)

3.2 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพของดิน

ในการศึกษาวิจัยได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างดินทั้ง 8 ชนิด โดยจะทำการศึกษา ส่วนประกอบของดิน, ความหนาแน่นแห้ง, ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน, ค่าอัตราส่วนช่องว่างและค่าความพรุน, ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านและขนาดเฉลี่ยของเม็ดดิน โดยอ้างอิงข้อกำหนดวัสดุ ASTM เป็นหลัก ดังแสดงในตารางที่ 3.2

คุณสมบัติของน้ำจะอ้างอิงที่อุณหภูมิ 25°C โดยที่ความหนาแน่นน้ำ 0.99797 g/cm^3 และความหนืดของน้ำ 0.0089 g/cm.s

ตารางที่ 3.2 ข้อกำหนดวัสดุของการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพของดิน

ประเภทของการทดสอบ	ข้อกำหนดวัสดุ ASTM
ทดสอบด้วยตะแกรงร่อนร่วมกับการวิเคราะห์โดยไฮโดรมิเตอร์	D-421, D-422
ค่าความถ่วงจำเพาะ	D-854
การบดอัด (เพื่อหาความหนาแน่นแห้ง)	D-558, D-698, D-1557
ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านโดยวิธีระดับน้ำแปรเปลี่ยน	D-2434-68 (2000)

3.2.1 ส่วนประกอบของดิน

การศึกษาการกระจายตัวของเม็ดดินทำโดยวิธีการทดสอบด้วยตะแกรงร่อนสำหรับดินเม็ดหยาบ ส่วนดินเม็ดละเอียดทดสอบด้วยการวิเคราะห์โดยไฮโดรมิเตอร์ สำหรับดินที่ประกอบด้วยดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียดปนกัน การทดสอบจะทำโดยใช้ตะแกรงร่อนร่วมกับการวิเคราะห์โดยไฮโดรมิเตอร์ วิธีการทดสอบดังกล่าวจะได้ข้อมูลส่วนประกอบของตัวอย่างดินทั้ง 8 ชนิด จากนั้นทำการจำแนกชนิดของดินโดยใช้แผนภูมิแบบสามเหลี่ยม (Rose, 1924) ซึ่งประกอบด้วยแกนขนาดเม็ดดิน 3 แกน คือ แกนทราย (Sand) แกนดินตะกอน (Silt) และแกนดินเหนียว (Clay) เพื่อจำแนกชนิดของดินตามลักษณะการกระจายตัวของเม็ดดิน

3.2.2 ความหนาแน่นแห้ง

ค่าความหนาแน่นแห้ง เป็นค่าที่หาได้มาจากการทดสอบการบดอัดตัวอย่างดินที่ปริมาณความชื้นต่าง ๆ (ตามข้อกำหนดวัสดุ แสดงดังตารางที่ 3.2)

3.2.3 ค่าความถ่วงจำเพาะ

ตัวแปรหลักในการหาความถ่วงจำเพาะของดิน คือน้ำหนักของขวดแก้วเมื่อมีน้ำอยู่เต็ม ซึ่งเป็นค่าไม่คงที่และเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ สามารถหาได้จากการสอบเทียบขวดแก้ว

จำเป็นต้องทราบน้ำหนักนี้ที่อุณหภูมิที่ทำการเติมของผสมระหว่างน้ำและดินในขวดแก้ว เพื่อใช้ในการคำนวณตามสมการที่ 2.6 ซึ่งการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินมีหลักการคือจะต้องทำการหาปริมาตรของเม็ดดินที่ทดลองด้วยวิธีการแทนที่น้ำ ตามหลักการของอาร์คีมีดิส โดยกฎข้อหนึ่งว่า เมื่อมวลสารจมลงในน้ำ ปริมาตรน้ำที่ล้นออกมาจะมีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของมวลสารนั้น (ตามข้อกำหนดวัสดุ แสดงดังตารางที่ 3.2)

3.2.4 ค่าอัตราส่วนช่องว่างและค่าความพรุน

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองคือ ค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน, ค่าความหนาแน่นแห้งของตัวอย่างดินและค่าความหนาแน่นของน้ำเพื่อใช้ในการคำนวณตามสมการที่ 2.8 และ 2.9 (ตามข้อกำหนดวัสดุ แสดงดังตารางที่ 3.2)

3.2.5 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

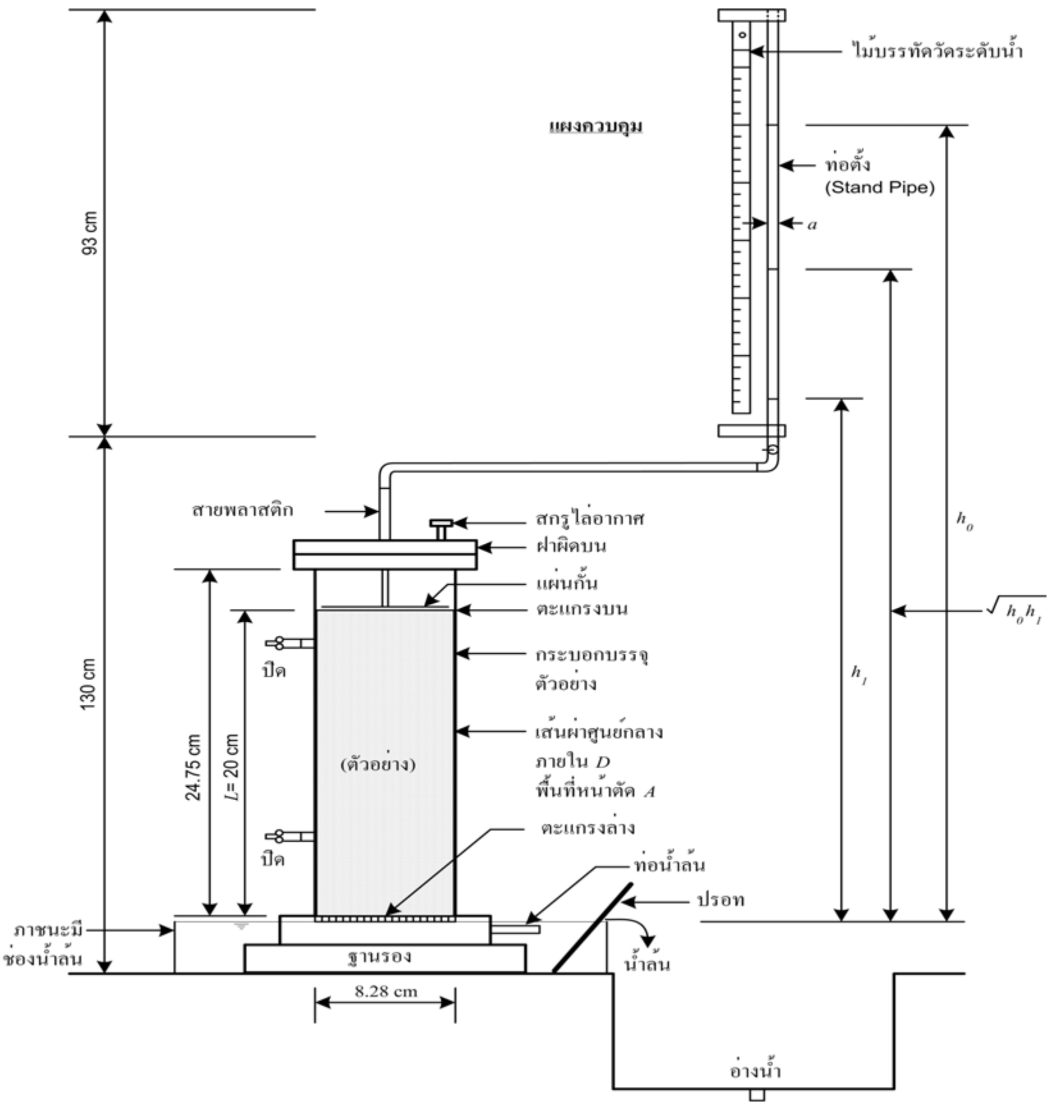
การทดสอบสัมประสิทธิ์การซึมผ่านโดยวิธีระดับน้ำแปรเปลี่ยน ทำโดยการปล่อยให้ระดับน้ำในท่อตั้งไหลผ่านตัวอย่างดิน ระดับในท่อตั้งที่ลดลงสามารถวัดปริมาณและความดันน้ำที่กระทำต่อตัวอย่างดินได้ รูปแบบของเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.2 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินทั้ง 8 ชุดการทดลอง ทำการทดลองชุดละ 3 ครั้ง โดยนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินชนิดต่าง ๆ

3.3 การศึกษาสารติดตาม

การศึกษาสารติดตาม (Tracer Study) เพื่อหาระยะเวลาเก็บกักน้ำที่แท้จริงของดินแต่ละชนิดในกระบอกทดสอบ โดยมีวิธีการดังต่อไปนี้คือ ภายในกระบอกทดสอบบรรจุตัวอย่างดินบดอัดหนา 20 cm การทดลองใช้วิธีการแบบ slug feed โดยใส่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 1,000 mg/L

จากการทดลองได้เลือกความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์จากการทดลองในดินเหนียว โดยเลือกความเข้มข้นเริ่มต้นที่ทำให้ความเข้มข้นที่ออกจากระบบมีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์เพียงพอต่อการตรวจวัดและมีความเข้มข้นมากกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ในน้ำประปา ซึ่งพบว่ามีคลอไรด์ 28.14 mg/L และความเข้มข้นของคลอไรด์ในน้ำกลั่น มีค่า 9.35 mg/L และสามารถทำการตรวจวัดความเข้มข้นได้ภายในระยะเวลาที่เหมาะสม ดังนั้นความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้ทดสอบได้มีค่าเท่ากับ 1,000 mg/L

จากนั้นทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น NaCl กับเวลา พบว่ากราฟมีลักษณะเป็น F-curve (Levenspiel, 1972 และ Freeze และ Cherry,1979) กล่าวคือ เมื่อเริ่มทดลองความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ออกมาจะมีค่าน้อย เนื่องจากในช่วงเริ่มต้นคลอไรด์ยังไหลไม่ถึงจุดออก และเมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นจะเพิ่มตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงจุดที่ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ออกมามีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นเริ่มต้น ระยะเวลาเก็บกักน้ำของดินในกระบอกทดสอบสามารถหาได้จากเวลาที่อัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ออกจากระบบกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์มีค่าใกล้เคียง หรือเข้าใกล้ 1



รูปที่ 3.2 แผนผังการทดสอบสัมประสิทธิ์การซึมผ่านโดยวิธีระดับน้ำแปรเปลี่ยน

3.4 การเตรียมตัวอย่างดิน

ในการศึกษาวิจัยได้ทำการเตรียมตัวอย่างทดสอบด้วยการบดอัดดิน เพื่อนำมาหาค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) และค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) ซึ่งเป็นจุดที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำที่สุดในแต่ละตัวอย่างดิน และสามารถนำมาคำนวณหาน้ำหนักดินแห้งที่ใช้บรรจุลงในกระบอกทดสอบ และค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่ใช้กับตัวอย่างดินแต่ละประเภทได้โดยได้ทำการบดอัดตัวอย่างทดสอบแบบพลศาสตร์ (Static Compression) ซึ่งใช้การบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Compaction) กับตัวอย่างดินทั้ง 8 ประเภท โดยจะอ้างอิงข้อกำหนดวัสดุ ASTM D-558, D-698 และ D-1557

3.5 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งและประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษของดิน

น้ำตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาวิจัยได้แก่ น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นจากบ่อเกรอะของหอพักสุรนิเวศ 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งทั้งก่อนและหลังการกรองผ่านตัวอย่างดินในแต่ละชุดการทดลองโดยเก็บแบบจ้วงตัก (Grab Sampling)

ตัวแปรที่วิเคราะห์ได้แก่ COD, TS, TSS, TDS, Turbidity, Total coliforms, Fecal coliforms, pH และอุณหภูมิ วิธีการ/เครื่องมือวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำ แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 วิธี/เครื่องมือวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งจากบ่อเกรอะ

ลักษณะน้ำทิ้ง	วิธี/เครื่องมือวิเคราะห์
COD (mg/L)	Dichromate Open Reflux, Titrimetric Method
TS (mg/L)	Gravimetric Analysis
TSS (mg/L)	Gravimetric Analysis
TDS (mg/L)	Gravimetric Analysis
Turbidity (NTU)	Turbidimeter (1)
Total Coliforms (No./100 mL)	Membrane Filter Technique
Fecal Coliforms (No./100 mL)	Membrane Filter Technique
ความเป็นกรด – ด่าง (pH)	pH meter (2)
อุณหภูมิ (Temperature) (°C)	Thermometer

<u>หมายเหตุ</u> : Standard Methods (APHA et al., 1992)

เครื่องมือที่ใช้ (1) HACH 2100N Turbidimeter, (2) HACH One Laboratory pH meter

3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

นำผลการทดลองมาวิเคราะห์ผลต่าง ๆได้ดังต่อไปนี้

3.6.1 วิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพของดิน

ได้แก่ ส่วนประกอบของดิน, ค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน, ความหนาแน่นแห้ง, ค่าอัตราส่วนช่องว่าง, ค่าความพรุน, ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านและขนาดเฉลี่ยของเม็ดดินโดยคำนวณตามสมการ 2.6-2.11

3.6.2 วิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษของดิน

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ผล เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษของดินทั้ง 8 ประเภท ตัวแปรที่วิเคราะห์คือ COD, TS, TSS, TDS, Turbidity, Total coliforms และ Fecal coliforms ก่อนและหลังการซึมผ่านชุดดินแต่ละชุด การคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษของดินตามแสดงสมการต่อไปนี้

$$\left(\frac{C_{in} - C_{eff}}{C_{in}}\right) \times 100 \tag{3.1}$$

โดยที่ C_{in} = ความเข้มข้นมลสารที่เข้าสู่ระบบ , mg/L

C_{eff} = ความเข้มข้นมลสารที่ออกจากระบบ , mg/L

3.6.3 ประเมินชนิดของดินและความหนาของชั้นดินที่เหมาะสม

ทำการประเมินชนิดของดินและความหนาของชั้นดินที่เหมาะสมที่จะนำมาทำเป็นชั้นดินปกคลุมบริเวณหลุมซึม ที่ก่อให้เกิดโอกาสที่จะมีความเสี่ยงน้อยที่สุดต่อการเกิดโรคในสภาวะน้ำท่วมขัง จากผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพของดิน นำมาคำนวณหาค่าความเร็วทางกายภาพ, ระยะเวลาในการเคลื่อนที่ของมลสาร, Reynolds Number และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย โดยใช้สมการที่ 2.13-2.16 แล้วนำผลที่ได้จากการคำนวณดังกล่าว มาประเมินความหนาของชั้นดินที่เหมาะสมโดยใช้สมการที่ 2.17 ดังต่อไปนี้

$$\frac{C}{C_0} = \left[erfc\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \right]$$

โดยที่ $erfc$ = Complementary Error Function

C = ความเข้มข้นของมลสารหลังออกจากระบบ, mg/L
ได้แก่ค่า COD ที่ผ่านมาตรฐานน้ำผิวดินประเภทที่ 2 มีค่าเท่ากับ 2.5 mg/L

C_0 = ความเข้มข้นของมลสารก่อนเข้าสู่ระบบ, mg/L

x = ช่วงความยาวของการไหลซึม, cm

D = สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย, cm^2/s

t = ระยะเวลาการเคลื่อนที่ของมลสาร, s

3.6.4 เปรียบเทียบโอกาสที่จะก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรค

สภาวะน้ำท่วมขังเป็นสภาวะที่มีโอกาสที่จะก่อให้เกิดการแพร่กระจายของเชื้อโรคจากระบบหลุมซึมออกมาปนเปื้อนกับน้ำผิวดินได้ ซึ่งจะทำให้ผู้คนที่เข้าใกล้มีโอกาสสัมผัสกับเชื้อโรคเหล่านั้น และเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดโรคขึ้นกับร่างกาย

การประเมินเพื่อเปรียบเทียบโอกาสที่จะก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคโดยระบบหลุมซึมนั้น จะทำโดยอ้างอิงจากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยโคลิฟอร์มแบคทีเรียที่พิจารณาคือ Fecal coliforms ชนิด *Escherichia coli* ซึ่งมีค่า MID (ค่าประมาณการได้รับต่ำสุดที่ก่อให้เกิดโรคในร่างกาย) เท่ากับ 10^6-10^8 (Bitton, 1994) ทำการเปรียบเทียบปริมาณ Fecal coliforms ในน้ำตัวอย่างที่ออกจากระบบซึ่งใช้ดินแต่ละชนิดเป็นตัวกลางในการกำจัดมลพิษกับค่า MID โดยจะกำหนดให้ปริมาณ Fecal coliforms เริ่มต้นที่เข้าสู่ระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $6.355\text{x}10^6$ No./100 mL สำหรับดินทุกชนิด ส่วนปริมาณ Fecal coliforms ที่ออกจากระบบสามารถคำนวณได้จากผลการทดลองประสิทธิภาพการกำจัด Fecal coliforms ของดินแต่ละชนิด

จากนั้นหาอัตราส่วนระหว่างปริมาณ Fecal coliforms ที่ออกจากระบบของดินแต่ละชนิดกับค่า MID ถ้า $\frac{C_{eff}}{MID} \geq 1$ สามารถกล่าวได้ว่ามีโอกาสที่จะก่อให้เกิดความเสี่ยงในการเกิดโรค แต่ถ้า $\frac{C_{eff}}{MID} < 1$ หมายความว่า ปริมาณเชื้อโรคที่ได้รับสัมผัสไม่ก่อให้เกิดความเสี่ยงในการเกิดโรค

3.7 สถานที่ทำการวิจัย

สถานที่ทำการทดลองทั้งหมดกระทำภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา โดยแยกการวิเคราะห์ตามห้องปฏิบัติการดังต่อไปนี้

3.7.1 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพของดิน

ทำการศึกษาวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ อาคารศูนย์เครื่องมือ 5

3.7.2 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี

ทำการศึกษาวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาคารศูนย์เครื่องมือ 5

3.7.3 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางชีววิทยา

ทำการศึกษาวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการจุลชีววิทยา อาคารศูนย์เครื่องมือ 2

3.8 ระยะเวลาในการศึกษาวิจัย

1 กรกฎาคม ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ. 2546

3.9 ตัวแปรที่ทำการวิจัย

ตัวแปรที่ทำการวิจัยได้แบ่งการพิจารณาออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ตัวแปรอิสระ, ตัวแปรควบคุมและตัวแปรตาม แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ทำการศึกษา

ตัวแปรอิสระ (Independent Variable)	ตัวแปรควบคุม (Control Variable)	ตัวแปรตาม (Dependent Variable)
อัตราการไหลของน้ำเสีย	- ขนาดของกระบอกทดสอบ - ขนาดของท่อตั้ง - ความหนาชั้นดินในกระบอก - ชนิดของดิน - อัตราส่วนการผสมดิน - ชนิดของน้ำทิ้งที่ใช้ทดลอง	- ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้ง ได้แก่ COD, TS, TSS, TDS, Turbidity Total coliforms Fecal coliforms - ลักษณะสมบัติทางกายภาพของดิน ได้แก่ ส่วนประกอบของดิน ความหนาแน่นแห้ง ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน ค่าอัตราส่วนช่องว่าง ค่าความพรุน ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ขนาดเฉลี่ยของเม็ดดิน

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ลักษณะสมบัติทางกายภาพของดิน

ในการวิจัยได้ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างดินทั้ง 8 ชนิด ได้แก่ ส่วนประกอบของดิน, ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน, ความหนาแน่นแห้ง, อัตราส่วนช่องว่าง, ค่าความพรุน, สัมประสิทธิ์การซึมผ่านและขนาดเฉลี่ยของเม็ดดิน

4.1.1 ส่วนประกอบของดิน

การศึกษาการกระจายตัวของเม็ดดินโดยใช้วิธีการทดสอบด้วยตะแกรงร่อนและการวิเคราะห์โดยไฮโดรมิเตอร์ แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่าสามารถจำแนกตัวอย่างดินออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ ตามลักษณะการกระจายตัวของเม็ดดินโดยดูจากขนาดของเม็ดดินเป็นหลักได้ดังต่อไปนี้

กลุ่มที่ 1 เม็ดดินส่วนใหญ่มีขนาด 0.075 - 0.85 mm ได้แก่ ดินทรายหยาบ, ดินทรายคละ และดินทรายละเอียด (รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 1 ก - 3 ก ภาคผนวก ก)

กลุ่มที่ 2 เม็ดดินส่วนใหญ่มีขนาด 0.00121 - 4.75 mm ได้แก่ ดินพื้นที่, ดินทรายหยาบ + ดินเหนียว, ดินทรายคละ + ดินเหนียว และดินทรายละเอียด + ดินเหนียว (รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4 ก - 7 ก ภาคผนวก ก)

กลุ่มที่ 3 เม็ดดินส่วนใหญ่มีขนาด 0.00117 - 0.425 mm ได้แก่ ดินเหนียว (รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 8 ก ภาคผนวก ก)

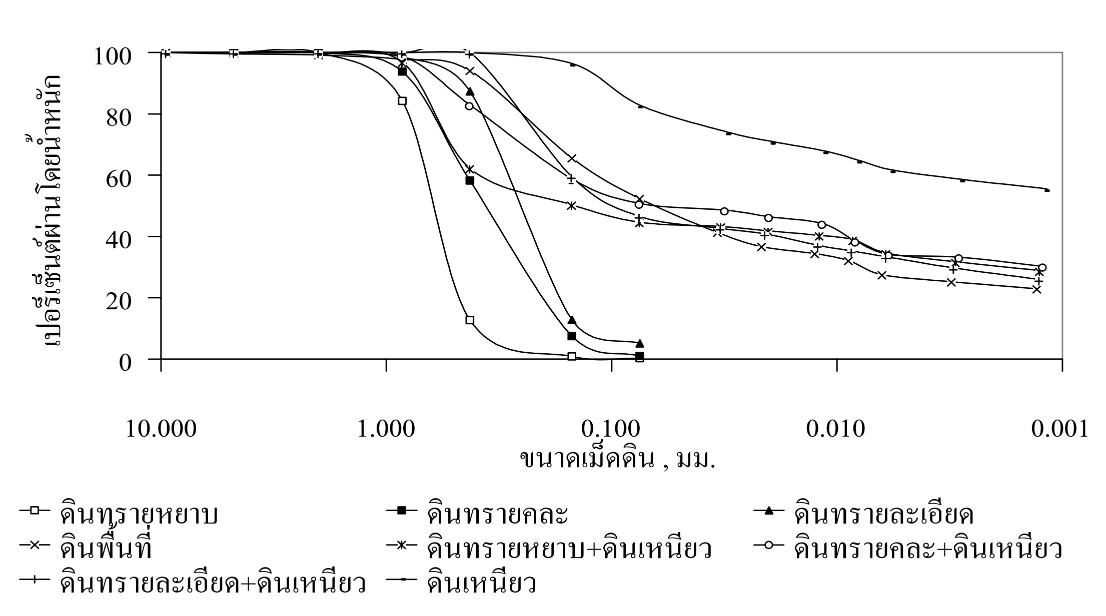
จากข้อมูลการกระจายตัวของเม็ดดินทำให้ทราบส่วนประกอบของตัวอย่างดินทั้ง 8 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และเมื่อนำมาจำแนกชนิดของดินโดยใช้แผนภูมิแบบสามเหลี่ยมพบว่าดินตัวอย่างที่ทำการศึกษาสามารถจำแนกออกเป็น 4 ประเภทตามชื่อเรียก ดังต่อไปนี้

กลุ่มที่ 1ดินประเภท Sand ได้แก่ดินทรายหยาบ, ดินทรายคละและดินทรายละเอียด

กลุ่มที่ 2 ดินประเภท Clay - Sand ได้แก่ ดินพื้นที่

กลุ่มที่ 3 ดินประเภท Sandy Clay ได้แก่ ดินทรายหยาบ + ดินเหนียว, ดินทรายคละ + ดินเหนียว, ดินทรายละเอียด + ดินเหนียว

กลุ่มที่ 4 ดินประเภท Clay ได้แก่ ดินเหนียว



รูปที่ 4.1 ผลการศึกษาการกระจายตัวของเม็ดดิน

ตารางที่ 4.1 ประเภทและส่วนประกอบของตัวอย่างดิน

ชนิดของตัวอย่างดิน	ประเภทของดิน	ส่วนประกอบในดิน (%)			
		กรวด	ดินทราย	ดินตะกอน	ดินเหนียว
ดินทรายหยาบ	Sand	0.33	83.81	15.86	0.00
ดินทรายคละ	Sand	0.28	75.74	23.98	0.00
ดินทรายละเอียด	Sand	0.45	68.72	30.83	0.00
ดินพื้นที่	Clay - Sand	0.31	39.22	32.06	28.41
ดินทรายหยาบ + ดินเหนียว	Sandy Clay	0.54	35.77	29.24	34.45
ดินทรายคละ + ดินเหนียว	Sandy Clay	0.50	33.47	27.35	38.68
ดินทรายละเอียด + ดินเหนียว	Sandy Clay	0.83	31.63	25.85	41.70
ดินเหนียว	Clay	0.00	19.54	15.97	64.49

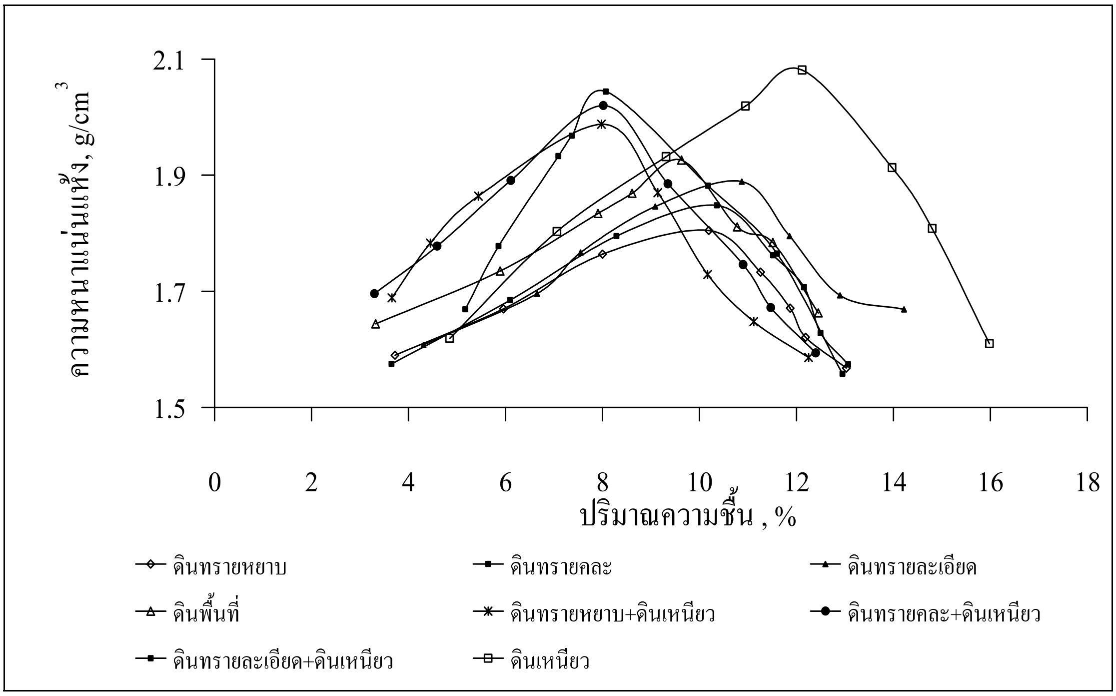
หมายเหตุ : ประเภทของดิน เรียกชื่อตามการจำแนกประเภทของดินแบบสามเหลี่ยม (Rose, 1924)

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่า จากวิธีการจำแนกดินทั้ง 2 วิธี ให้ผลการทดลองสนับสนุนกันคือ ดินพื้นที่จัดอยู่ระหว่างประเภทของกลุ่มดินทราย และกลุ่มดินเหนียว (รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.1)

4.1.2 ค่าความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นของดิน

ธนากร นาเชียงใต้ (2541) ได้ทำการเตรียมตัวอย่างทดสอบด้วยดินบดอัดผสม โดยทดสอบแบบ static compression ที่จุด maximum dry density และ optimum moisture content ตามกราฟที่ได้จากการบดอัดแบบมาตรฐาน ในแต่ละชุดของดินผสม พบว่า เมื่อปริมาณทรายเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ maximum dry density เพิ่มขึ้น และ optimum moisture content ลดลง

จากผลการทดสอบการบดอัดตัวอย่างดิน สามารถนำผลทดสอบมาวิเคราะห์หาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของตัวอย่างดินทั้ง 8 ชนิดดังตารางที่ 1 ข - 8 ข (ภาคผนวก ข)หลังจากนั้นนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของดินแต่ละชนิดได้ ดังรูปที่ 4.2 และที่จุดนี้สามารถนำมาคำนวณน้ำหนักดินแห้งที่ใช้บรรจุลงในกระบอกทดสอบได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้น
ที่ได้จากการทดสอบการบดอัดมาตรฐาน

4.1.3 ความถ่วงจำเพาะ

จากผลการทดลองค่าความถ่วงจำเพาะของตัวอย่างดินชนิดต่างๆ ดังแสดงในตาราง 1 ค - 8 ค (ภาคผนวก ค) นำมาหาค่าเฉลี่ยของค่าความถ่วงจำเพาะ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งพบว่า

ตารางที่ 4.2 ผลการศึกษาค่าความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม

ชนิดของดิน	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (g/cm^3)	ความชื้นที่เหมาะสม %	น้ำหนักดินแห้ง * (g)
ดินทรายหยาบ	1.81	10.19	2,141.90
ดินทรายคละ	1.85	10.36	2,196.31
ดินทรายละเอียด	1.89	10.87	2,255.41
ดินพื้นที่	1.93	9.63	2,273.87
ดินทรายหยาบ + ดินเหนียว	1.99	7.98	2,311.74
ดินทรายคละ + ดินเหนียว	2.02	8.02	2,349.82
ดินทรายละเอียด + ดินเหนียว	2.04	8.07	2,378.84
ดินเหนียว	2.08	12.12	2,512.66

หมายเหตุ : * คิดเป็นกรัม (g) ต่อ ปริมาตรดินในกระบอกสูง 20 cm (1,076.91 cm^3)

ตารางที่ 4.3 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างดิน

ชนิดของดิน	ความถ่วงจำเพาะ	อัตราส่วนช่องว่าง	ความพรุน	สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน cm/s	ขนาดเฉลี่ยเม็ดดิน cm
ดินทรายหยาบ	2.600	0.436	0.304	4.39E-04	2.65E-03
ดินทรายคละ	2.615	0.411	0.291	1.14E-04	1.50E-03
ดินทรายละเอียด	2.622	0.384	0.278	5.63E-05	1.18E-03
ดินพื้นที่	2.629	0.361	0.265	2.67E-06	2.84E-04
ดินทรายหยาบ + ดินเหนียว	2.642	0.325	0.245	6.62E-07	1.68E-04
ดินทรายคละ + ดินเหนียว	2.657	0.312	0.238	4.90E-07	1.55E-04
ดินทรายละเอียด + ดินเหนียว	2.685	0.310	0.237	3.00E-07	1.22E-04
ดินเหนียว	2.709	0.298	0.230	1.10E-07	7.88E-05

หมายเหตุ : อุณหภูมิน้ำ 25 °C

ความหนาแน่นน้ำ 0.99707 g/cm^3

ความหนืดน้ำ 0.0089 g/cm.

ดินทรายหยาบ, ดินทรายคละ, ดินทรายละเอียด, ดินพื้นที่, ดินทรายหยาบ + ดินเหนียว, ดินทรายคละ + ดินเหนียว, ดินทรายละเอียด + ดินเหนียว และดินเหนียว มีค่าความถ่วงจำเพาะเรียงลำดับจากน้อยไปมาก โดยที่ดินทรายหยาบมีความถ่วงจำเพาะต่ำที่สุด เท่ากับ 2.600 และดินเหนียวมีความถ่วงจำเพาะสูงที่สุด เท่ากับ 2.709 ส่วนดินพื้นที่มีความถ่วงจำเพาะระหว่างกลุ่มดินทรายและกลุ่มดินเหนียวเท่ากับ 2.629

4.1.4 อัตราส่วนช่องว่างและความพรุน

ข้อมูลการวิเคราะห์ค่าความถ่วงจำเพาะ, ค่าความหนาแน่นแห้งและลักษณะสมบัติของน้ำ สามารถนำมาคำนวณค่าอัตราส่วนช่องว่างและค่าความพรุนของดินแต่ละชนิด จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า ค่าความพรุนแปรผันตามค่าอัตราส่วนช่องว่างโดยมีค่าเรียงลำดับจากมากไปน้อย ดังนี้ ดินทรายหยาบ, ดินทรายคละ, ดินทรายละเอียด, ดินพื้นที่, ดินทรายหยาบ+ดินเหนียว, ดินทรายคละ+ดินเหนียว, ดินทรายละเอียด+ดินเหนียว และดินเหนียว โดยดินที่จัดอยู่ในกลุ่มดินทรายมีค่าอัตราส่วนช่องว่างและค่าความพรุนมากกว่ากลุ่มดินเหนียว ส่วนดินพื้นที่ มีค่าอัตราส่วนช่องว่างและค่าความพรุนระหว่างกลุ่มดินทรายและกลุ่มดินเหนียว

4.1.5 สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

จากผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของตัวอย่างดินชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 ง - 8 ง (ภาคผนวก ง) นำมาหาค่าเฉลี่ยค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของตัวอย่างดินแต่ละชนิด ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินเรียงลำดับจากมากไปน้อย ดังนี้ ดินทรายหยาบ, ดินทรายคละ, ดินทรายละเอียด, ดินพื้นที่, ดินทรายหยาบ+ดินเหนียว, ดินทรายคละ+ดินเหนียว, ดินทรายละเอียด+ดินเหนียว และดินเหนียว โดยที่ดินทรายหยาบมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินสูงที่สุด เท่ากับ 4.39E-04 cm/s และดินเหนียวมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินต่ำที่สุด เท่ากับ 1.10E-07 cm/s ส่วนดินพื้นที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านระหว่างกลุ่มดินทรายและกลุ่มดินเหนียว จะเห็นได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านแปรผันตามค่าอัตราส่วนช่องว่างและค่าความพรุน

4.1.6 ขนาดเฉลี่ยของเม็ดดิน

ข้อมูลการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนช่องว่าง, ค่าความพรุน, ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านและลักษณะสมบัติของน้ำ สามารถนำมาคำนวณหาขนาดเฉลี่ยของเม็ดดินแต่ละชนิด จากตารางที่ 4.3 พบว่า ถ้าชนิดของดินมีค่าอัตราส่วนช่องว่าง, ค่าความพรุนและค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสูง จะมีขนาดเฉลี่ยของเม็ดดินใหญ่ จะเห็นได้ว่า ดินทรายหยาบมีขนาดเฉลี่ยของเม็ดดินใหญ่ที่สุด เท่ากับ 2.65E-03 cm และดินเหนียวมีขนาดเฉลี่ยของเม็ดดินเล็กที่สุด เท่ากับ 7.88E-05 cm ส่วนดินพื้นที่มีขนาดเฉลี่ยของเม็ดดินระหว่างกลุ่มดินทรายและกลุ่มดินเหนียว

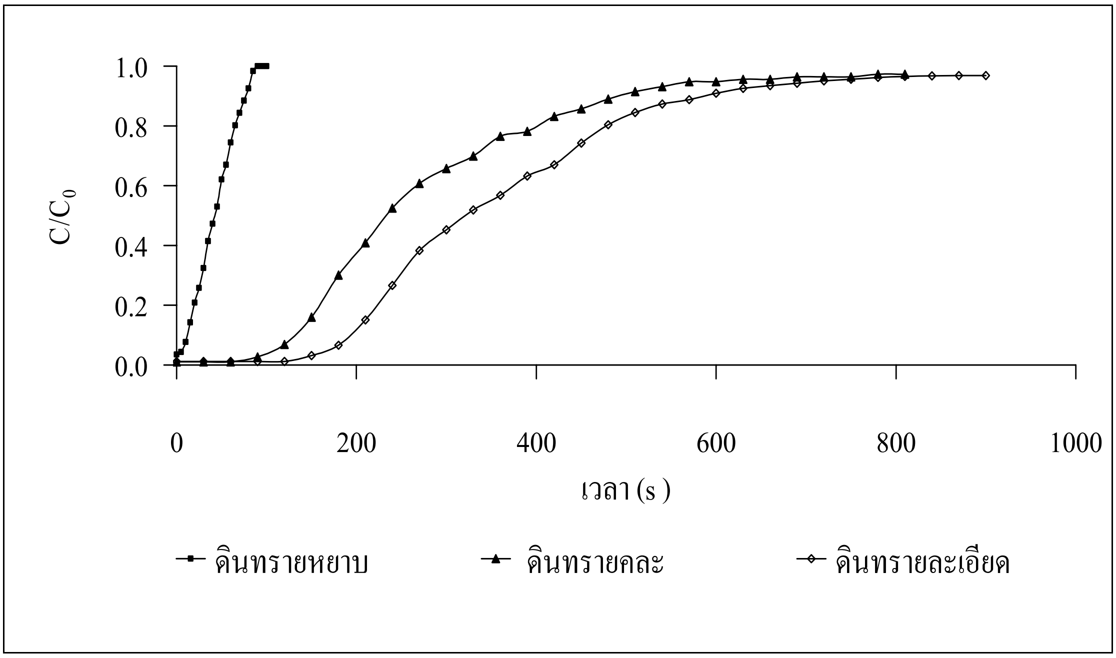
4.2 ระยะเวลาเก็บกักเฉลี่ยของดิน

ผลการศึกษาระยะเวลาเก็บกักเฉลี่ยของดินแต่ละชนิดที่บรรจุในกระบอกทดสอบ ซึ่งศึกษาจากการศึกษาสารติดตาม แสดงดังตารางที่ 1 จ - 9 จ (ภาคผนวก จ) พบว่าตัวอย่างดินแต่ละชนิดมีระยะเก็บกักน้ำดังแสดงในตารางที่ 4.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น NaCl กับเวลา แสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 พบว่ามีลักษณะเป็น F-curve โดยมีระยะเวลาเก็บกักน้ำเฉลี่ยเรียงลำดับจากน้อยไปมาก ดังนี้ ดินทรายหยาบ, ดินทรายคละ, ดินทรายละเอียด, ดินพื้นที่, ดินทรายหยาบ+ดินเหนียว, ดินทรายคละ+ดินเหนียว, ดินทรายละเอียด+ดินเหนียว และดินเหนียว โดยที่ดินทรายหยาบมีระยะเวลาเก็บกักเฉลี่ยน้อยที่สุด เท่ากับ 2 นาที 36 วินาที และดินเหนียวมีระยะเวลาเก็บกักเฉลี่ยมากที่สุด เท่ากับ 3 วัน 3 ชั่วโมง 29 นาที 24 วินาที ส่วนดินพื้นที่มีระยะเวลาเก็บกักเฉลี่ยระหว่างกลุ่มดินทรายและกลุ่มดินเหนียวเท่ากับ 4 ชั่วโมง 43 นาที 26 วินาที

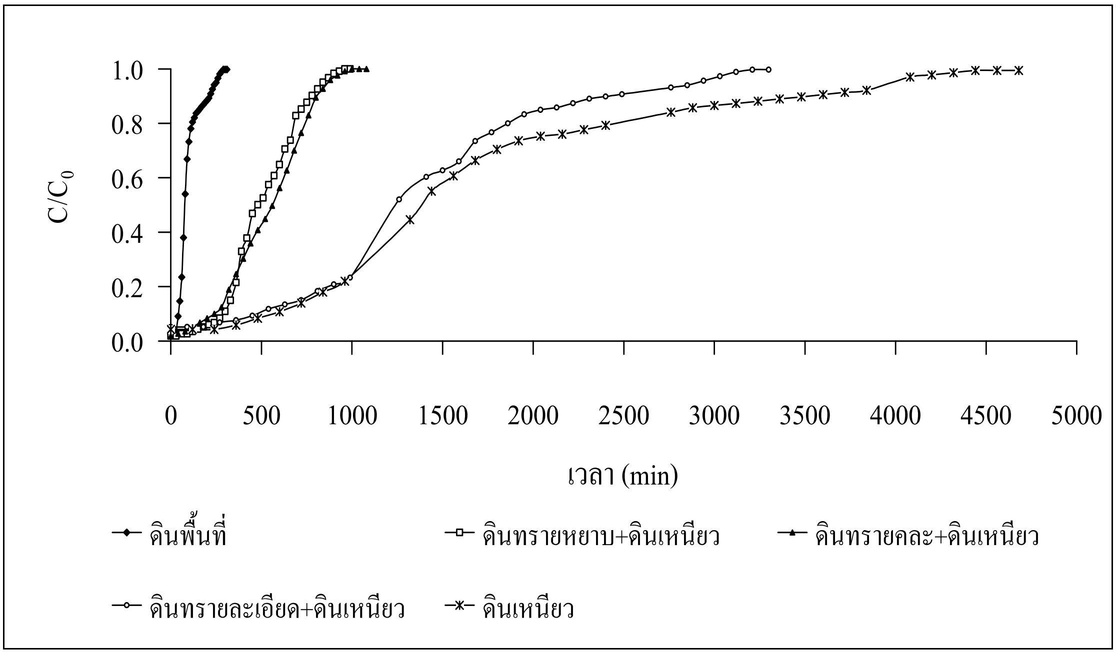
จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าระยะเวลาเก็บกักเฉลี่ยแปรผันตามความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน แต่มีความสัมพันธ์เป็นปฏิภาคผกผันกับอัตราการไหลและลักษณะสมบัติทางกายภาพของดิน ได้แก่ ค่าอัตราส่วนช่องว่าง, ค่าความพรุน, สัมประสิทธิ์การซึมผ่านและขนาดเฉลี่ยของเม็ดดิน

ตารางที่ 4.4 อัตราการไหลและระยะเวลาเก็บกักน้ำของตัวอย่างดินแต่ละชนิดในกระบอกทดสอบ

ชนิดของดิน	อัตราการไหล cm^3/s	ระยะเวลาเก็บกักน้ำ day-hour-minute-second
ดินทรายหยาบ	7.978	0-0-2-36
ดินทรายคละ	1.861	0-0-9-10
ดินทรายละเอียด	0.876	0-0-12-17
ดินพื้นที่	0.055	0-4-43-26
ดินทรายหยาบ + ดินเหนียว	0.015	0-15-29-6
ดินทรายคละ + ดินเหนียว	0.011	0-16-32-42
ดินทรายละเอียด + ดินเหนียว	0.007	2-6-4-48
ดินเหนียว	0.002	3-3-29-24



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น NaCl กับเวลาของการศึกษาสารติดตาม



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น NaCl กับเวลาของการศึกษาสารติดตาม

4.3 ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้ง

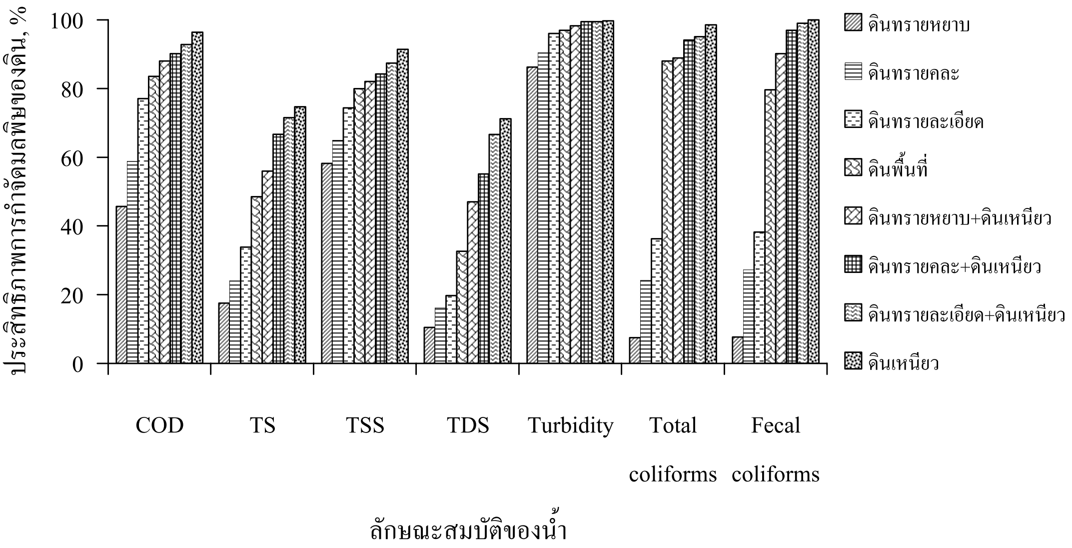
ผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นจากบ่อเกรอะ ของหอพักสุรนิเวศ 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา แสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าคุณภาพของน้ำทิ้งมีค่าคุณสมบัติต่างๆเกินมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน โดยเฉพาะคุณภาพน้ำทางแบคทีเรียซึ่งหากน้ำทิ้งนี้ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพน้ำก่อนที่น้ำจะไหลซึมรวมกับน้ำผิวดินในสภาวะน้ำท่วมขัง ย่อมทำให้มีโอกาสที่จะก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคจากระบบหลุมซึม

ตารางที่ 4.5 ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นจากบ่อเกรอะ หอพักสุรนิเวศ 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คุณสมบัติ	ค่าเฉลี่ย
TS (mg/L)	595
TSS (mg/L)	146
TDS (mg/L)	449
COD (mg/L)	430
Turbidity (NTU)	85
Total coliforms (MPN/100 mL)	1.77E+08
Fecal coliforms (MPN/100 mL)	6.17E+06
ความเป็นกรด-ด่าง	7
อุณหภูมิ ($^{\circ}$C)	25

4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษของดิน

การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษของดินตัวอย่างทั้ง 8 ชนิด โดยดูจากลักษณะสมบัติของน้ำดังต่อไปนี้ COD, TS, TSS, TDS, Turbidity, Total coliforms และ Fecal coliforms ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.6 พบว่า



รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษของตัวอย่างดินชนิดต่าง ๆ

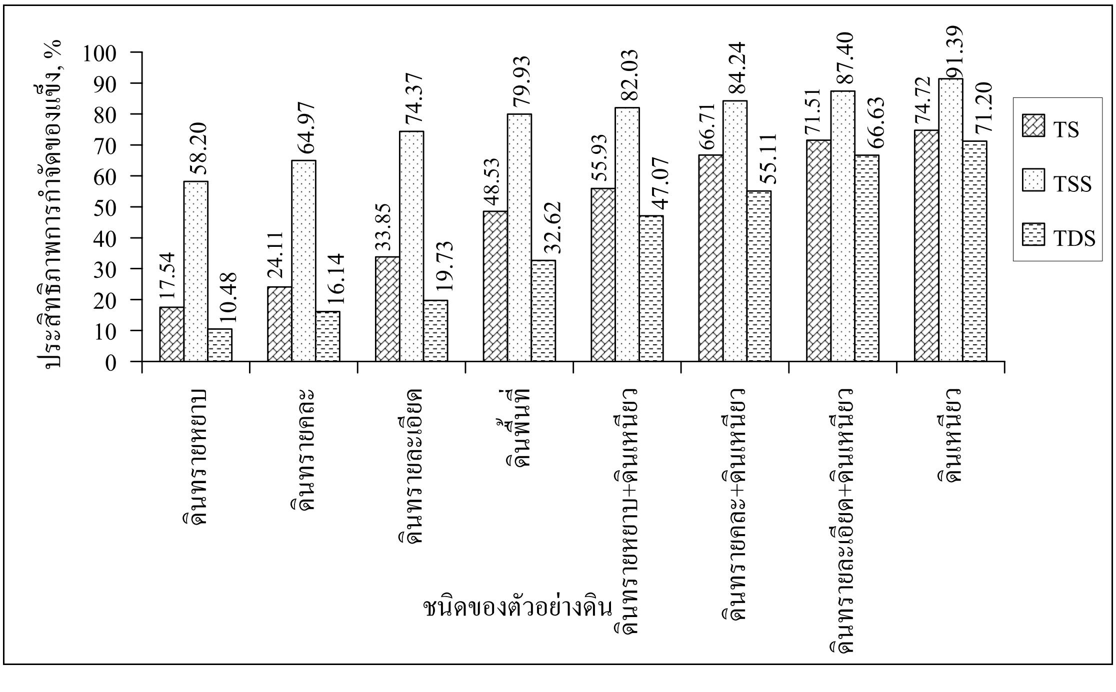
ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษของตัวอย่างดินแต่ละชนิด

ลักษณะสมบัติของน้ำ	ประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษของตัวอย่างดิน (%)							
	ดินทรายหยาบ	ดินทรายคละ	ดินทรายละเอียด	ดินพื้นที่	ดินทรายหยาบ + ดินเหนียว	ดินทรายคละ + ดินเหนียว	ดินทรายละเอียด + ดินเหนียว	ดินเหนียว
TS	17.54	24.11	33.85	48.53	55.93	66.71	71.51	74.72
TSS	58.20	64.97	74.37	79.93	82.03	84.24	87.40	91.39
TDS	10.48	16.14	19.73	32.62	47.07	55.11	66.63	71.20
COD	45.68	58.77	77.05	83.57	88.00	90.14	92.83	96.40
Turbidity	86.20	90.44	96.02	96.94	98.25	99.46	99.49	99.68
Total coliforms	7.51	24.14	36.26	88.03	88.90	94.12	95.06	98.56
Fecal coliforms	7.66	27.24	38.25	79.61	90.17	96.99	98.99	99.99

4.4.1 ค่าของแข็งทั้งหมด (TS), ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) และของแข็งละลายทั้งหมด (TDS)

จากผลการทดลองซึ่งแสดงในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.6 พบว่าดินเหนียวมีประสิทธิภาพการกำจัด TS, TSS และ TDS สูงที่สุด คือ 74.72, 91.39 และ 71.20 % ตามลำดับ และต่ำที่สุดในดินทรายหยาบ เท่ากับ 17.54, 58.20 และ 10.48 % ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าวพบว่าประสิทธิภาพการกำจัด TS, TSS และ TDS ของดินชนิดต่าง ๆ จะมีความสัมพันธ์กับลักษณะสมบัติทางกายภาพของดิน เช่น ความถ่วงจำเพาะ, ค่าอัตราส่วนช่องว่าง, ค่าความพรุน, สัมประสิทธิ์การซึมผ่านและขนาดเฉลี่ยของเม็ดดิน เช่น ตัวอย่างดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสูง จะมีประสิทธิภาพการกำจัด TS, TSS และ TDS ลดลง และพบว่าดินที่มีอัตราการไหลช้าและมีระยะเวลาเก็บกักนาน จะมีประสิทธิภาพการกำจัด TS, TSS และ TDS สูงกว่าดินที่มีอัตราการไหลเร็วและมีระยะเวลาเก็บกักน้อยกว่า ดังนั้นประสิทธิภาพการกำจัด TS, TSS และ TDS จะแปรผกผันกับค่าอัตราการไหล แต่จะแปรผันตามระยะเวลาเก็บกักในชั้นดิน และขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติทางกายภาพของดิน

จากผลการทดลองที่ได้ เมื่อนำไปทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติโดยการทดสอบ t-test ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัด TS, TSS และ TDS ของดินทั้ง 8 ชนิด พบว่ามีผลแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ตามตารางที่ 1 ฉ - 2 ฉ (ภาคผนวก ฉ)

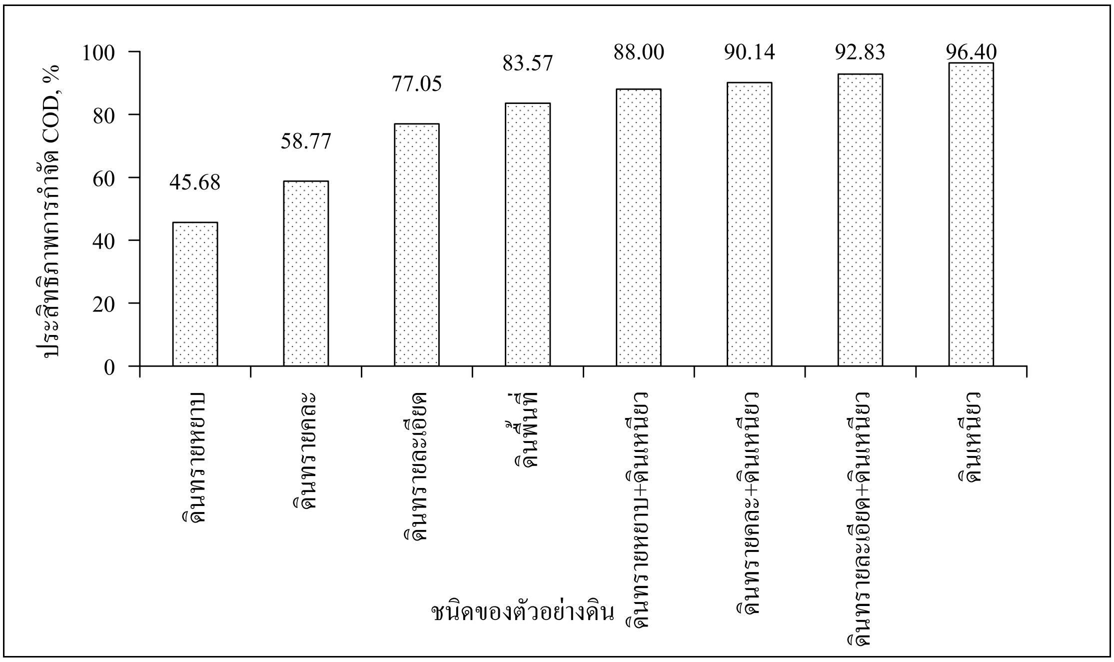


รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการกำจัด TS, TSS และ TDS ของตัวอย่างดิน

4.4.2 ซีโอดี (COD)

จากผลการทดลองซึ่งแสดงในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 พบว่าดินเหนียวประสิทธิภาพการกำจัด COD สูงที่สุด คือ 96.40 % และต่ำที่สุดในดินทรายหยาบ เท่ากับ 45.68 % ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าวพบว่าประสิทธิภาพการกำจัด COD ของดินชนิดต่าง ๆ จะมีความสัมพันธ์กับลักษณะสมบัติทางกายภาพของดิน เช่น ความถ่วงจำเพาะ, ค่าอัตราส่วนช่องว่าง, ค่าความพรุน, สัมประสิทธิ์การซึมผ่านและขนาดเฉลี่ยของเม็ดดิน เช่น ดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสูง จะมีประสิทธิภาพการกำจัด COD ลดลง และพบว่าดินที่มีอัตราการไหลช้าและมีระยะเวลาเก็บกักนาน จะมีประสิทธิภาพการกำจัด COD สูงกว่าดินที่มีอัตราการไหลเร็วและมีระยะเวลาเก็บกักน้อยกว่า ดังนั้นประสิทธิภาพการกำจัด COD จะแปรผกผันกับค่าอัตราการไหล แต่จะแปรผันตามระยะเวลาเก็บกักในชั้นดินและขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติทางกายภาพของดิน

จากผลการทดลองที่ได้เมื่อนำไปทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติโดยการทดสอบ t-test ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัด COD ของดินทั้ง 8 ชนิด พบว่า มีผลแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ตามตารางที่ 1 ฉ - 2 ฉ (ภาคผนวก ฉ) และเมื่อพิจารณาจากกราฟในรูปที่ 4.7 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด COD ของตัวอย่างดินที่มีดินเหนียวเป็นส่วนประกอบเช่น ดินพื้นที่, ดินทรายหยาบ + ดินเหนียว, ดินทรายคละ + ดินเหนียว, ดินทรายละเอียด + ดินเหนียวและดินเหนียว มีค่ามากกว่า 80 %

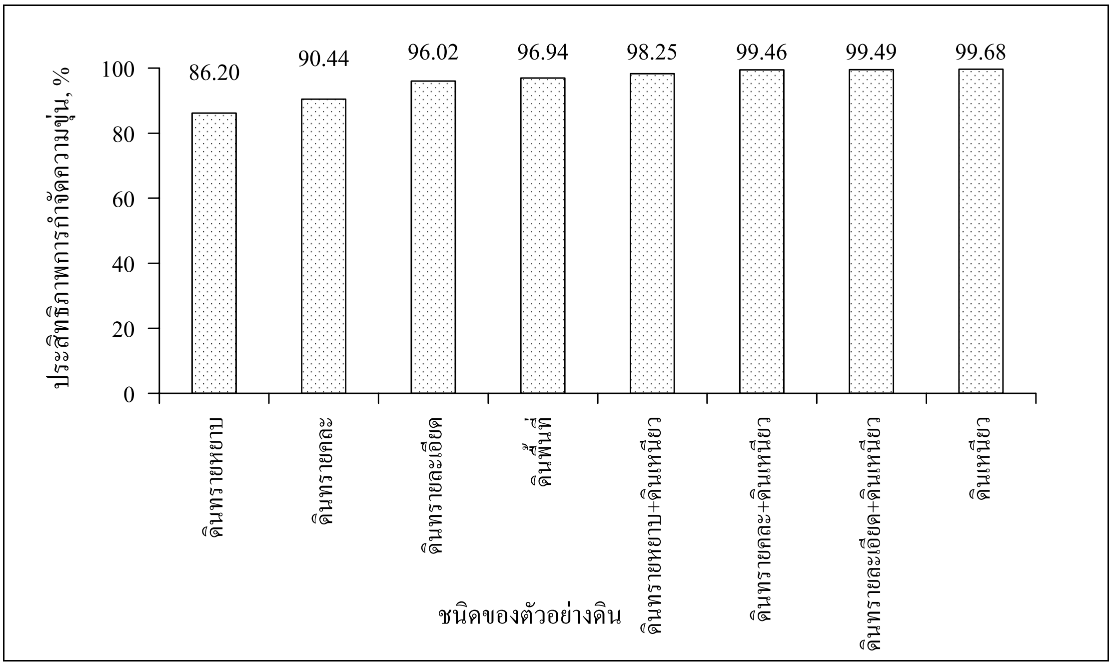


รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการกำจัด COD ของตัวอย่างดิน

4.4.3 ความขุ่น (Turbidity)

จากผลการทดลองซึ่งแสดงในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.8 พบว่าดินเหนียวมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงที่สุด คือ 99.68 % และต่ำที่สุดในดินทรายหยาบ เท่ากับ 86.20 % ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าว พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของดินชนิดต่าง จะมีความสัมพันธ์กับลักษณะสมบัติทางกายภาพของดิน เช่น ความถ่วงจำเพาะ, ค่าอัตราส่วนช่องว่าง, ค่าความพรุน, สัมประสิทธิ์การซึมผ่านและขนาดเฉลี่ยของเม็ดดิน เช่น ตัวอย่างดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสูง จะมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นลดลง และพบว่าดินที่มีอัตราการไหลช้าและมีระยะเวลาเก็บกักนาน จะมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงกว่าดินที่มีอัตราการไหลเร็ว และมีระยะเวลาเก็บกักน้อยกว่า ดังนั้นประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นจะแปรผกผันกับค่าอัตราการไหล แต่จะแปรผันตามระยะเวลาเก็บกักในชั้นดิน และขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติทางกายภาพของดิน

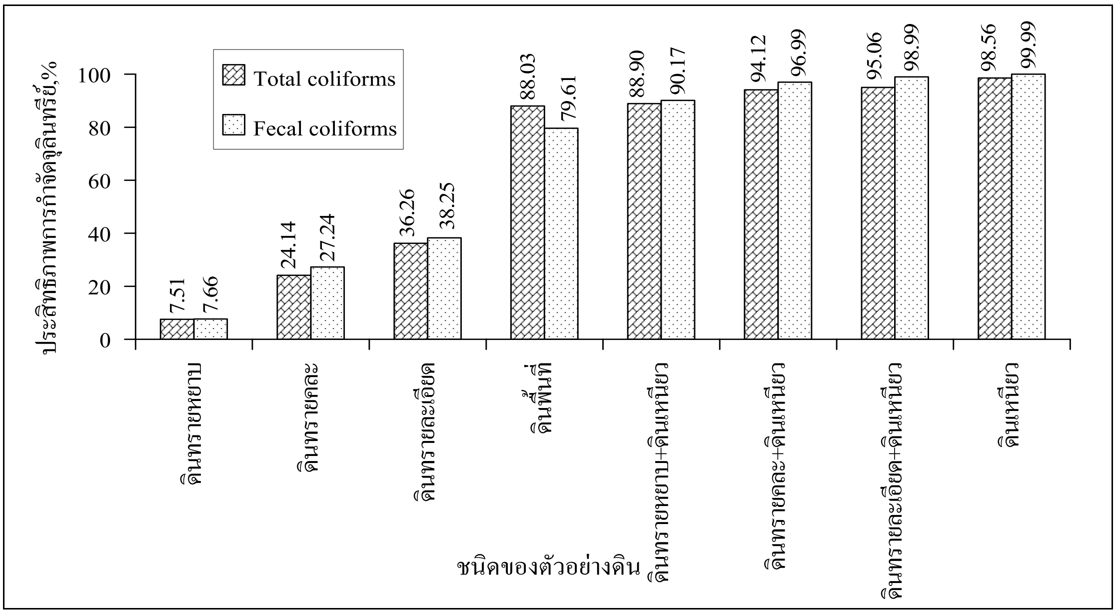
จากผลการทดลองที่ได้ เมื่อนำไปทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติโดยการทดสอบ t-test ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของดินทั้ง 8 ชนิด พบว่า มีผลแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ตามตารางที่ 1 ฉ - 2 ฉ (ภาคผนวก ฉ)



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของตัวอย่างดิน

4.4.4 จุลินทรีย์

จากผลการทดลองซึ่งแสดงในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.9 พบว่าดินเหนียวมีประสิทธิภาพการกำจัด Total coliforms และ Fecal coliforms สูงที่สุด คือ 98.56 และ 99.99 % ตามลำดับ และต่ำที่สุดในดินทรายหยาบ เท่ากับ 7.51 และ 7.66 % ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าวพบว่าประสิทธิภาพการกำจัด Total coliforms และ Fecal coliforms ของดินชนิดต่าง ๆ จะมีความสัมพันธ์กับลักษณะสมบัติทางกายภาพของดิน เช่น ความถ่วงจำเพาะ, ค่าอัตราส่วนช่องว่าง, ค่าความพรุน, สัมประสิทธิ์การซึมผ่านและขนาดเฉลี่ยของเม็ดดิน และพบว่าดินที่มีอัตราการไหลช้าและมีระยะเวลาเก็บกักนาน จะมีประสิทธิภาพการกำจัด Total coliforms และ Fecal coliforms สูงกว่าดินที่มีอัตราการไหลเร็วและมีระยะเวลาเก็บกักน้อยกว่า ดังนั้นประสิทธิภาพการกำจัด Total coliforms และ Fecal coliforms จะขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติทางกายภาพของดิน โดยจะแปรผกผันกับค่าอัตราการไหลแต่จะแปรผันตามระยะเวลาเก็บกักในชั้นดิน และส่วนประกอบของดินเหนียวมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด Total coliforms และ Fecal coliforms โดยพบว่า เมื่อตัวอย่างดินมีปริมาณดินเหนียวเป็นส่วนประกอบในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด Total coliforms และ Fecal coliforms จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเกือบ 3 เท่าของตัวอย่างดินซึ่งไม่มีดินเหนียวเป็นส่วนประกอบได้แก่ ตัวอย่างดินทรายหยาบ, ดินทรายคละและดินทรายละเอียด (ดังแสดงในตารางที่ 4.1) ซึ่งอาจเนื่องมาจากค่าอัตราส่วนช่องว่างและค่าความพรุนของดินเหนียวจะมีขนาดที่เล็กกว่าส่วนประกอบของดินชนิดอื่นจึงสามารถกำจัด Coliform bacteria ได้ดีกว่า



รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์ของตัวอย่างดิน

จากผลการทดลองที่ได้ เมื่อนำไปทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติโดยการทดสอบ t-test ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัด Total coliforms และ Fecal coliforms ของดินทั้ง 8 ชนิด พบว่ามีผลแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ตามตารางที่ 1 ฉ - 2 ฉ (ภาคผนวก ฉ)

4.5 การประเมินชนิดของดินและความหนาของชั้นดินที่เหมาะสม

ในการศึกษาวิจัยได้ทำการประเมินชนิดของดินและความหนาของชั้นดินที่นำมาใช้ปกคลุมบริเวณหลุมซึม ซึ่งปัจจัยที่นำมาใช้ในการประเมินความหนาของชั้นดินแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ปัจจัยที่ใช้ประเมินความหนาของชั้นดินปกคลุมบริเวณหลุมซึม

ชนิดของดิน	อัตราการไหล cm^3/s	ความเร็วการไหลซึม cm/s	ความเร็วกายภาพ cm/s	$Re_p^{1.25}$	ขนาดเม็ดดิน cm	สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย cm^2/s
ดินทรายหยาบ	7.978	1.48E-01	4.88E-01	4.66E-02	2.81E-03	7.49E-04
ดินทรายคละ	1.861	3.46E-02	1.19E-01	5.88E-03	1.52E-03	9.45E-05
ดินทรายละเอียด	0.876	1.63E-02	5.86E-02	2.15E-03	1.18E-03	3.45E-05
ดินพื้นที่	0.055	1.02E-03	3.86E-03	3.26E-05	2.84E-04	5.23E-07
ดินทรายหยาบ + ดินเหนียว	0.015	2.69E-04	1.10E-03	5.07E-06	1.68E-04	8.14E-08
ดินทรายคละ + ดินเหนียว	0.011	1.99E-04	8.37E-04	3.45E-06	1.55E-04	5.54E-08
ดินทรายละเอียด + ดินเหนียว	0.007	1.26E-04	5.34E-04	1.75E-06	1.24E-04	2.82E-08
ดินเหนียว	0.002	4.46E-05	1.94E-04	3.93E-07	7.88E-05	6.32E-09

<u>หมายเหตุ</u> COD = 2.5 mg/L จาก มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2 ตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติฉบับที่ 8 (พ.ศ.2537)

การประเมินความหนาของชั้นดินในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้เลือกใช้ค่า COD เป็นตัวแทนในการแพร่กระจายของมลสาร แทนค่า Total coliforms และ Fecal coliforms ซึ่งเป็นลักษณะสมบัติที่สำคัญของน้ำทิ้งจากบ่อเกรอะที่สามารถใช้ประเมินความเสี่ยงในเชิงสุขภาพได้ดีกว่า แต่เนื่องจากไม่สามารถคาดคะเนพฤติกรรม การแพร่กระจายของเชื้อจุลินทรีย์ดังกล่าวในชั้นดินได้แน่นอน ดังนั้น จึงได้นำผลการทดลองของน้ำทิ้งที่ซึมผ่านชั้นดินชนิดต่างๆในกระบอกทดสอบ มาวิเคราะห์หาขนาดของความสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่างค่า COD กับ Total coliforms และ Fecal coliforms พบว่ามีขนาดความสัมพันธ์ เท่ากับ 0.914 และ 0.919 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 1 ช (ภาคผนวก ช) ดังนั้นจากการศึกษาครั้งนี้ จึงเลือกใช้ค่า COD เป็นตัวแทนในการประเมินความหนาของชั้นดินปกคลุมบริเวณหลุมซึม

จากตารางที่ 4.8 พบว่าความหนาของชั้นดินซึ่งทำให้น้ำที่ซึมผ่านชั้นดินชนิดต่างๆออกมาสามารถมีคุณภาพผ่านมาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินประเภทที่ 2 ตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติฉบับที่ 8(พ.ศ.2537)โดยดินเหนียวต้องการความหนาของชั้นดินน้อยที่สุดคือ 0.43 m รองลงมาคือดินทรายละเอียด + ดินเหนียวหนา 0.70 m และดินทรายหยาบต้องการความหนาของชั้นดินสูงสุดคือ20.44 m ส่วนดินชนิดอื่นจากการประเมินจะมีความหนาอยู่ในช่วง 10.58-0.88 m

ตารางที่ 4.8 การประเมินความหนาของชั้นดิน

ชนิดของดิน	ความหนาชั้นดิน (m)
ดินทรายหยาบ	20.44
ดินทรายคละ	10.58
ดินทรายละเอียด	7.84
ดินพื้นที่	1.81
ดินทรายหยาบ + ดินเหนียว	0.99
ดินทรายคละ + ดินเหนียว	0.88
ดินทรายละเอียด + ดินเหนียว	0.70
ดินเหนียว	0.43

4.6 การประเมินโอกาสที่จะก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรค

เมื่อนำผลการทดลองปริมาณ Fecal coliforms ที่ออกจากระบบสำหรับดินแต่ละชนิดมาวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อทำการเปรียบเทียบโอกาสที่จะก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคโดยมีการกำหนดค่าปริมาณ Fecal coliforms เริ่มต้นที่เข้าสู่ระบบสำหรับดินทุกชนิดเท่ากันคือ 6.355×10^6 No./100 mL และมีปริมาณ Fecal coliforms ของดินแต่ละชนิดที่ออกจากระบบแสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 การประเมินโอกาสที่จะก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรค

ชนิดของดิน	ประสิทธิภาพการกำจัด Fecal coliforms* (%)	ปริมาณ Fecal coliforms ที่ออกจากระบบ, C_{eff} (No./100 mL)	$\frac{C_{eff}}{MID}$
ดินทรายหยาบ	7.66	5.87E+06	5.87
ดินทรายคละ	27.24	4.62E+06	4.62
ดินทรายละเอียด	38.25	3.92E+06	3.92
ดินพื้นที่	79.61	1.30E+06	1.30
ดินทรายหยาบ + ดินเหนียว	90.17	6.25E+05	0.63
ดินทรายคละ + ดินเหนียว	96.99	1.91E+05	0.19
ดินทรายละเอียด + ดินเหนียว	98.99	6.42E+04	0.06
ดินเหนียว	99.99	635.50	6.36E-04

<u>หมายเหตุ</u> ความหนาชั้นดิน 20 cm

MID ของ Fecal coliforms เท่ากับ 10^6-10^8 (Bitton, 1994)

* จากการทดลอง รายละเอียดแสดงตามตารางที่ 4.6

จากตารางที่ 4.9 พบว่าค่า $\frac{C_{eff}}{MID} \geq 1$ ในดินทรายหยาบ, ดินทรายคละ, ดินทรายละเอียด และดินพื้นที่ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5.87, 4.62, 3.92 และ 1.30 ตามลำดับ แสดงว่า ที่ความหนาของชั้นดิน 20 cm ปริมาณ Fecal coliforms ที่ออกจากระบบของดินทั้ง 4 ชนิดนี้ มีโอกาสที่จะก่อให้เกิดความเสี่ยงในการเกิดโรค และพบว่าค่า $\frac{C_{eff}}{MID} < 1$ ดินทรายหยาบ+ดินเหนียว, ดินทรายคละ + ดินเหนียว, ดินทรายละเอียด + ดินเหนียว และดินเหนียว แสดงว่า ที่ความหนาของชั้นดิน 20 cm ปริมาณ Fecal coliforms ที่ออกจากระบบไม่ก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรค

จากผลการประเมินโอกาสที่จะก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคจากระบบหลุมซึมในสภาวะน้ำท่วมขัง พบว่า ดินทรายหยาบเป็นดินที่มีโอกาสที่จะก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคสูงที่สุดและดินเหนียวมีโอกาสที่จะก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคต่ำที่สุด และพบว่าในดินที่มีอัตราส่วนปริมาณดินเหนียวในตัวอย่างดินสูงขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษของดินจะมีค่ามากขึ้น และมีโอกาสที่จะก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคน้อยลงกว่า 3 เท่าของตัวอย่างดินที่ไม่มีดินเหนียวเป็นส่วนประกอบ (แสดงดังตารางที่ 4.9) ดังนั้นการเลือกชนิดของดินที่เหมาะสมในการนำมาทำเป็นชั้นดินปกคลุมบริเวณหลุมซึมควรมีการศึกษาเพิ่มเติม เพื่อทราบถึงอัตราส่วนการผสมระหว่างปริมาณดินชนิดต่างๆกับดินเหนียวเพื่อเพิ่มค่าประสิทธิภาพในการกำจัดจุลินทรีย์ของดินที่จะนำมาทำเป็นชั้นดินปกคลุมบริเวณหลุมซึมและเพื่อช่วยลดโอกาสที่จะก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรค

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดสอบตัวอย่างดินทั้ง 8 ชนิด ที่จะนำมาทำเป็นชั้นดินปกคลุมบริเวณหลุมซึมโดยแบ่งตามชนิดและขนาดของเม็ดดิน ได้แก่ ตัวอย่างดินทรายหยาบ, ดินทรายคละ (ดินทรายหยาบ + ดินทรายละเอียด), ดินทรายละเอียด, ดินพื้นที่, ดินทรายหยาบ + ดินเหนียว, ดินทรายคละ + ดินเหนียว, ดินทรายละเอียด + ดินเหนียว และดินเหนียว โดยน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาวิจัยเป็นน้ำเสียที่ได้รับการบำบัดขั้นต้นจากบ่อเกรอะ โดยทำการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพของดิน ได้แก่ ส่วนประกอบของดิน, ค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน, ความหนาแน่นแห้ง, ค่าอัตราส่วนช่องว่าง, ค่าความพรุน, ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านและขนาดเฉลี่ยของเม็ดดิน และหาประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษของดินชนิดต่างๆ จากนั้นนำมาประเมินชนิดของดินและความหนาของชั้นดินที่เหมาะสมในการนำมาทำเป็นชั้นดินปกคลุมบริเวณหลุมซึม และทำการเปรียบเทียบโอกาสที่จะก่อให้เกิดความเสี่ยงน้อยที่สุดต่อการเกิดโรคในสภาวะน้ำท่วมขัง โดยพิจารณาจากความเข้มข้นมลสารและจำนวนจุลินทรีย์ที่ออกจากระบบซึ่งได้แก่ Fecal coliforms

ส่วนการประเมินชนิดของดินและความหนาของชั้นดิน พบว่าความหนาของชั้นดินเหนียวที่เหมาะสมในการนำมาทำเป็นชั้นดินปกคลุมบริเวณหลุมซึม ต้องการความหนาของชั้นดินน้อยที่สุดคือ 0.43 m และดินทรายหยาบต้องการความหนาของชั้นดินสูงสุดคือ 20.44 m ในทางปฏิบัติเมื่อต้องการเลือกดินเหนียวเพื่อนำมาทำเป็นชั้นดินปกคลุมบริเวณหลุมซึมสามารถทำได้โดย ใช้ดินเหนียวปกคลุมจากขอบล่างของวงขอบซีเมนต์วงบนสุดเป็นความหนา 0.43 m และจากเส้นรอบวงของวงขอบซีเมนต์เป็นวงกว้างเท่ากับ 0.43 m เป็นต้น และเมื่อทำการประเมินโอกาสที่จะก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคในระบบหลุมซึมภายใต้สภาวะน้ำท่วมขัง พบว่าดินทรายหยาบเป็นดินที่มีโอกาสที่จะก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคสูงที่สุด และดินเหนียวมีโอกาสที่จะก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคต่ำที่สุด และพบว่าเมื่อดินมีอัตราส่วนของดินเหนียวในตัวอย่างดินเพิ่มขึ้นจะสามารถลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคได้

ส่วนการประเมินชนิดของดินและความหนาของชั้นดิน พบว่าความหนาของชั้นดินเหนียวที่เหมาะสมในการนำมาทำเป็นชั้นดินปกคลุมบริเวณหลุมซึม ต้องการความหนาของชั้นดินน้อยที่สุดคือ 0.43 m และดินทรายหยาบต้องการความหนาของชั้นดินสูงสุดคือ 20.44 m ในทางปฏิบัติเมื่อ

ต้องการเลือกดินเหนียว เพื่อนำมาทำเป็นชั้นดินปกคลุมบริเวณหลุมซึม สามารถทำได้โดยใช้ดินเหนียวปกคลุมจากขอบล่างของวงขอบซีเมนต์วงบนสุดเป็นความหนา 0.43 m และจากเส้นรอบวงของวงขอบซีเมนต์เป็นวงกว้างเท่ากับ 0.43 m เป็นต้น และเมื่อทำการประเมินโอกาสที่จะก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคในระบบหลุมซึมภายใต้สภาวะน้ำท่วมขัง พบว่าดินทรายหยาบเป็นดินที่มีโอกาสที่จะก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคสูงที่สุด และดินเหนียวมีโอกาสที่จะก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคต่ำที่สุด และพบว่าเมื่อดินมีอัตราส่วนของดินเหนียวในตัวอย่างดินเพิ่มขึ้นจะสามารถลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรทำการศึกษาเพื่อหาส่วนประกอบและอัตราส่วนการผสมดินที่เหมาะสม เพื่อทำให้ชั้นดินมีประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษดีที่สุดและสามารถนำไปใช้ในเชิงปฏิบัติได้ เนื่องจากการทดลอง พบว่าเมื่ออัตราส่วนปริมาณดินเหนียวในตัวอย่างดินสูงขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษของตัวอย่างดินจะมากขึ้นโดยเฉพาะประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์(Total coliforms และ Fecal coliforms) และจะลดโอกาสที่จะก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคลง

5.2.2 ควรมีการศึกษาถึงระยะเวลาการอุดตันของตัวอย่างดิน เพื่อหาระยะเวลาการใช้งานจริงของชั้นดินที่เหมาะสมและให้ประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษสูงสุด

5.2.3 การเลือกดินมาใช้เป็นชั้นดินปกคลุมบริเวณหลุมซึมจึงไม่ควรเลือกใช้ดินทรายหยาบ เพราะจะใช้ความหนามากจึงไม่สะดวกในทางปฏิบัติแต่สามารถเพิ่มอัตราส่วนดินเหนียวลงไปเพื่อลดความหนาของชั้นดินลงได้

เอกสารอ้างอิง

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. (2539). **การบำบัดน้ำเสีย.**พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร. : สำนักพิมพ์มิตรนราการพิมพ์.

จิตเทพ ประสิทธิ์อยู่ศีล(2534). **ประสิทธิภาพการลดโคลิฟอร์มแบคทีเรียในน้ำเสียจากถังกรอะโดยใช้เครื่องกรองไร้ออกซิเจนที่มีตัวกลางครึ่งถังจม.** วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สาขาวิทยาศาสตร์(วิศวกรรมสุขาภิบาล). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

จุมพล ขุนอ่อน (2539). **การบำบัดน้ำเสียจากบ้านพักอาศัยด้วยระบบถังเกรอะ - ถังกรองไร้อากาศสำเร็จรูป.** วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สุขาภิบาลสิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยมหิดล.

ชูโชติ สุทธิบริบาล (2538). **ประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียจากบ้านพักอาศัยโดยระบบถังเกรอะถังกรองไร้อากาศร่วมกับถังทรายกรอง.** วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สาขาวิทยาศาสตร์(อนามัยสิ่งแวดล้อม). มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ธงชัย พรรณสวัสดิ์และคณะ(2530). **น้ำเสียชุมชนและปัญหามลภาวะทางน้ำในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล.**(พิมพ์ครั้งที่1). สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย:กรุงเทพมหานคร.

ประวรดา โภชนจันทร์. (2543). **การเปลี่ยนแปลงของฟอสฟอรัสในดินจากการบำบัดน้ำเสียในระบบกรองน้ำเสียด้วยหญ้าของระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนเทศบาลเมืองเพชรบุรี**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร

ปรีดา แย้มเจริญวงศ์ (2534). **คู่มือปฏิบัติการสุขาภิบาล : การกำจัดอุจจาระและน้ำเสียสำหรับอาคารที่พักอาศัยและสถานประกอบการ.** (พิมพ์ครั้งที่2). ขอนแก่นการพิมพ์: ขอนแก่น.

พัฒนา มูลพฤกษ์. (2541). **อนามัยสิ่งแวดล้อม.** พิมพ์ครั้งที่ 2. เอ็น.เอส.แอล.พริ้นติ้ง:กรุงเทพ.

มณเฑียร กังศศิเทียม (2539). **กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม.** สมาคมศิษย์เก่าวิศวกรรมชลประทานในพระบรมราชูปถัมภ์

วินัย วีระวัฒนานนท์ (2540). **วิกฤตสิ่งแวดล้อมทางตันแห่งการพัฒนา : ฉบับปรับปรุงเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน.** (พิมพ์ครั้งที่ 2).เรือนแก้วการพิมพ์: กรุงเทพฯ.

วัฒนา ธรรมมงคล และวินิต ช่อวิเชียร (2532). **ปฐพีกลศาสตร์.** (พิมพ์ครั้งที่ 6). (ม.ป.พ.):กรุงเทพฯ.

ศุภชัย บุษราคัม (2537). **การบำบัดน้ำทิ้งจากถังเกรอะโดยระบบท่อซึมร่วมกับทรายกรอง.** วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยมหิดล.

ศุวศา กานตวนิชกูร. (2529). **การจัดการสิ่งขับถ่ายในประเทศที่กำลังพัฒนา.** เชียงใหม่

สถาพร คูวิจิตรจารุ (2541). **ทดลองปฐพีกลศาสตร์.** (พิมพ์ครั้งที่1) รุ่งแสงการพิมพ์: กรุงเทพฯ

สถาพร คูวิจิตรจารุ (2542). **ปฐพีกลศาสตร์.** (พิมพ์ครั้งที่1) รุ่งแสงการพิมพ์: กรุงเทพฯ

หนึ่ง เตียอำรุง (2542). **บทบาทของแบคทีเรียในสิ่งแวดล้อม.** สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ. สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

หนึ่ง เตียอำรุง (2542). **ปฏิบัติการจุลชีววิทยาสิ่งแวดล้อม.** สาขาชีววิทยา. สำนักวิชาวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

APHA, AWWA and WPCF. (1992). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.** (18th Edition) American Public Health Association. Washington D.C.

America Society for Testing and Materials. (2000). **Annual book of ASTM Standard.** (37th Edition) West conshohocker. USA.

Bitton, Gabriel.(1994). **Wastewater Microbiology.** A John Wiley & Sons, INC. New York.

Bell, Chris and Kyriakides, Alec. (1998). **E. Coli.** T.J.International Ltd,Padstow, Cornwall. Great Britain.

Crank , J. (1956). **The Mathematics of Diffusion.** Oxford University Press, Oxford. 347 pp.

DeAnne S. Julius, Charled G. Gunnerson and Hillel I. Shuval. (1981). **Night - Soil Composting.** Transportation, Water and Telecommunications Department, World Bank.

Eley, A. R. (1992a). Toxic bacterial food poisoning. In A. R. Eley(ed.) **Microbial Food Poisoning.** London: Chapman & Hall. pp 15-36

Eley, A. R. (1992c). Other bacterial pathogens. In A. R. Eley (ed.) **Microbial Food Poisoning.** London: Chapman & Hall. Pp 57-72

Feachem, R. G., Bradley, D. J., Garelick, H., and Mara, D. D. (1983). **Sanitation and Desease-Health Aspect of Excreta and Wastewater Management.** Wiley. Chichester.

Freeze, Allan R. and Cherry, Jonn A.(1979). **Groundwater.** Englewood Cliffs, N.J:Prentice-Hall International, Inc., America.

Gotaas, H.B. (1956). **Composting : Sanitary Disposal and Reclamation of Organic Wastes.** WHO Monograph Series No.31. World Health Organization. Geneva.

Levenspiel, O.(1972). **Chemical Reaction Engineering.** (2nd ed.). New York.: Wiley International.

Louvar, Joseph F. and Louvar, B. Diane. (1998). **Health and Environmental Risk Analysis.** Upper Saddle River, N.J:Prentice-Hall International, Inc., America.

Masters, Gilbert M. (1996) **Introduction to Environmental and Science.** (2nd Edition) Upper Saddle River, N.J:Prentice-Hall International, Inc., America.

Medcalf & Eddy, Inc.(1991). **Wastewater Engineering-Treatment, Disposal, and Reuse.** (3rd Edition) MaGraw-Hill. Singapore.

Parsons, Anthony J. and Abrahams, Athol D. (1992). **Overland Flow.** London.: University College London Press.

Polprasert, Chongrak. (1996). **Organic Waste Recycling:technology and management.** (2nd Edition) John Wiley & Sons, Inc., Chichester.

Rose, A.C.(1924). **Practical Field Test for Subgrade Soils**. Public Roads 5, No.6, pp 10-15.

Salvato, Joseph A., Jr. (1982). **Environmental Engineering and Sanitation.** (3rd Edition) John Wiley & Sons, Inc., New York.

Sterritt, R.M. and Lester, J.N. (1988). **Microbiology for Environmental and Public Health Engineers.** E. & F.N. Spon, New York.

Talaro Kathleen and Talaro Arthur. (1996). **Microbiology. Wm.C. Brown,**Toronto.

Wang, M.C., Huang, C.C. (1985). Soil Compaction and Permeability Prediction Models. **Journal of Environmental Engineering.** Vol.110 : 1063-1083

Weber, Walter J., Jr. (1972) **Physicochemical Processes for Water Quality Control.** New York : Wiley.

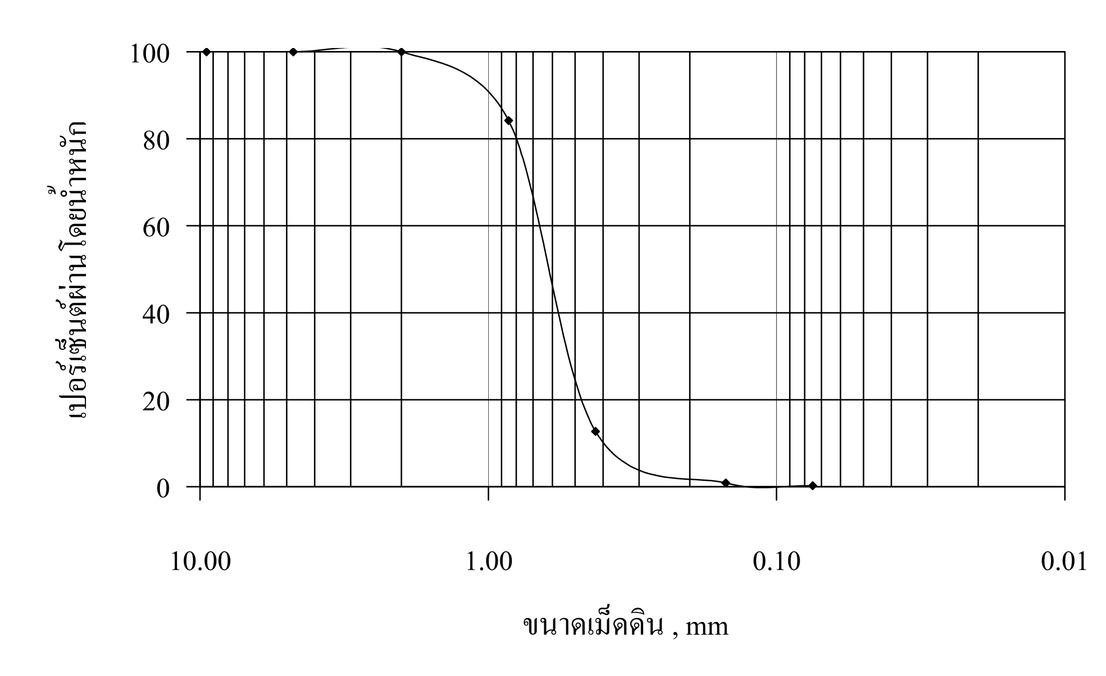
Yao, K.M., Habibian, M.T., and O'Melia, C.R. (1971). Water and Wastewater Filtration. **Environmental Science and Technology.** Vol.5 : 1105-1112

ภาคผนวก ก
ข้อมูลการกระจายตัวของเม็ดดิน
ทดสอบโดยวิธีตะแกรงร่อนและการวิเคราะห์โดยไฮโดรมิเตอร์

ตารางที่ 1 ก ผลการทดลองโดยวิธีตะแกรงร่อนของดินทรายหยาบ

หมายเลข No. ของตะแกรง	เส้นผ่านศูนย์กลางรูของตะแกรง (mm)	ร้อยละดินค้างตะแกรงสะสม (%)	เปอร์เซ็นต์ดินผ่านตะแกรงโดยน้ำหนัก (%)
3/8	9.50	0.00	100.00
4	4.75	0.00	100.00
10	2.00	0.00	100.00
20	0.85	15.81	84.19
40	0.43	87.25	12.75
100	0.15	99.12	0.88
200	0.08	99.74	0.26
Pan	< 0.08	100.00	0.00

หมายเหตุ : Pan หมายถึง ภาชนะที่ใช้รองส่วนล่างสุดของชุดทดสอบตะแกรงร่อน

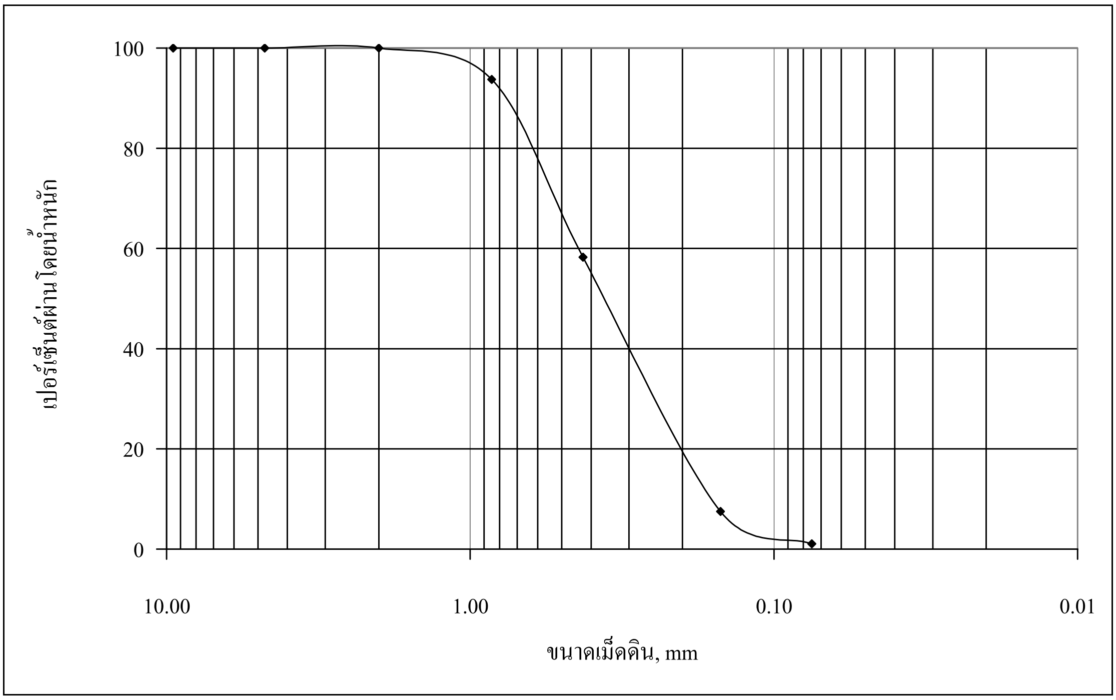


รูปที่ 1 ก การกระจายของเม็ดดินสำหรับดินทรายหยาบ

ตารางที่ 2 ก ผลการทดลองโดยวิธีตะแกรงร่อนของดินทรายคละ

หมายเลข No. ของตะแกรง	เส้นผ่านศูนย์กลางรูของตะแกรง (mm)	ร้อยละดินค้างตะแกรงสะสม (%)	เปอร์เซ็นต์ดินผ่านตะแกรงโดยน้ำหนัก (%)
3/8	9.50	0.00	100.00
4	4.75	0.00	100.00
10	2.00	0.00	100.00
20	0.85	6.24	93.76
40	0.43	41.75	58.26
100	0.15	92.50	7.50
200	0.08	98.93	1.07
Pan	< 0.08	100.00	0.00

หมายเหตุ : Pan หมายถึง ภาชนะที่ใช้รองส่วนล่างสุดของชุดทดสอบตะแกรงร่อน

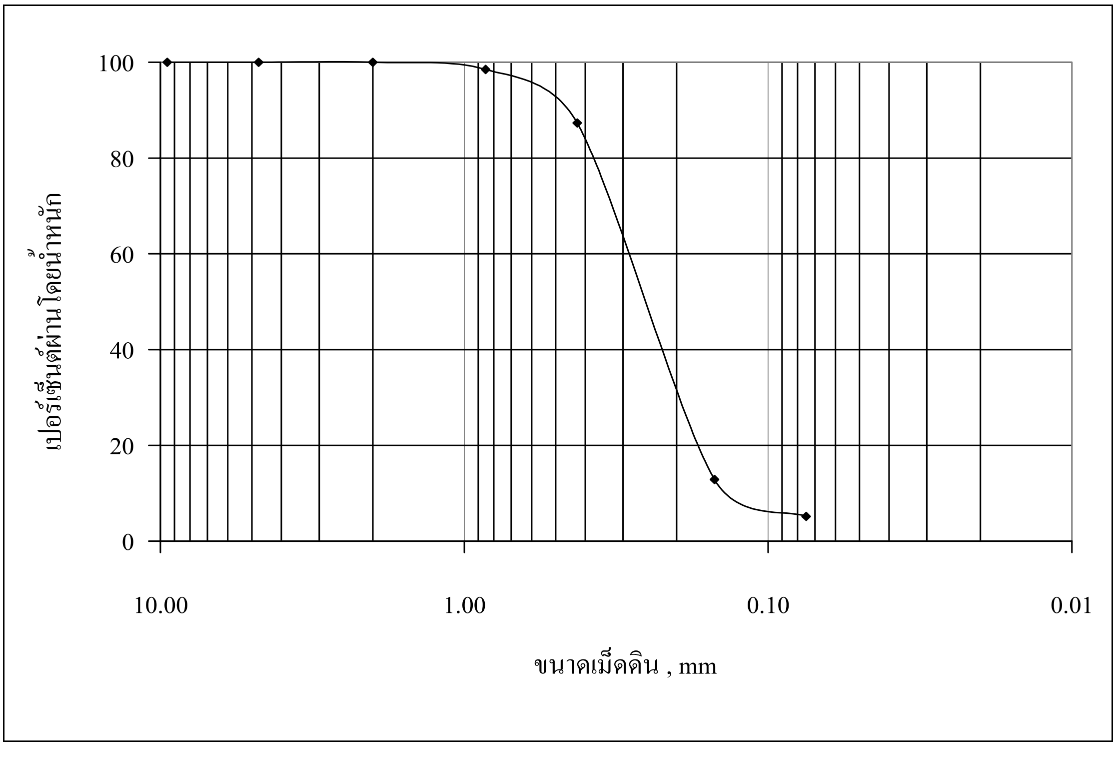


รูปที่ 2 ก การกระจายของเม็ดดินสำหรับดินทรายคละ

ตารางที่ 3 ก ผลการทดลองโดยวิธีตะแกรงร่อนของดินทรายละเอียด

หมายเลข No. ของตะแกรง	เส้นผ่านศูนย์กลางรูของตะแกรง (mm)	ร้อยละดินค้างตะแกรงสะสม (%)	เปอร์เซ็นต์ดินผ่านตะแกรงโดยน้ำหนัก (%)
3/8	9.50	0.00	100.00
4	4.75	0.00	100.00
10	2.00	0.00	100.00
20	0.85	1.49	98.51
40	0.43	12.67	87.33
100	0.15	87.13	12.87
200	0.08	94.83	5.17
Pan	< 0.08	100.00	0.00

หมายเหตุ : Pan หมายถึง ภาชนะที่ใช้รองส่วนล่างสุดของชุดทดสอบตะแกรงร่อน



รูปที่ 3 ก การกระจายของเม็ดดินสำหรับดินทรายละเอียด

ตารางที่ 4 ก ผลการจำแนกชนิดของดินแบบสามเหลี่ยม สำหรับตัวอย่างดินพื้นที่

ตารางที่ 4.1 ก ผลการทดลองโดยวิธีตะแกรงร่อนของดินพื้นที่

หมายเลข No. ของตะแกรง	เส้นผ่านศูนย์กลางรูของตะแกรง (mm)	ร้อยละดินค้างตะแกรงสะสม (%)	เปอร์เซ็นต์ดินผ่านตะแกรงโดยน้ำหนัก (%)
3/8	9.50	0.00	100.00
4	4.75	0.45	99.55
10	2.00	0.83	99.17
20	0.85	2.25	97.75
40	0.43	5.97	94.03
100	0.15	34.44	65.56
200	0.08	47.64	52.36
Pan	< 0.08	100.00	0.00

หมายเหตุ : Pan หมายถึง ภาชนะที่ใช้รองส่วนล่างสุดของชุดทดสอบตะแกรงร่อน

ตารางที่ 4.2 ก ผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฮโดรมิเตอร์ของดินพื้นที่

t min	ค่าที่อ่านได้จาก hydrometer	อุณหภูมิ °C	ความลึกประสิทธิผล L (1) (cm)	ค่าคงที่ k (2)	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเม็ดดิน (3) (mm)	ร้อยละของดินส่วนที่วัดความหนาแน่นของสารแขวนลอย (4) (%)
2	9.0	28.5	14.8	0.012456	0.034	41.31
5	8.0	28.5	15.0	0.012456	0.022	36.72
15	7.5	28.5	15.1	0.012456	0.013	34.43
30	7.0	28.5	15.2	0.012456	0.009	32.13
60	6.0	29.0	15.3	0.012382	0.006	27.54
250	5.5	29.5	15.4	0.012667	0.003	25.25
1440	5.0	28.5	15.5	0.012456	0.001	22.95

หมายเหตุ :

(1) ค่าของความลึกประสิทธิผลคำนวณจากสมการ

$$L = L_1 + \frac{1}{2}\left(L_2 - \frac{V_B}{A}\right)$$

โดยที่ L = ความลึกประสิทธิผล (cm)

L_1 = ความยาวที่วัดจากจุดกึ่งกลางของกระเปาะถึงจุดที่อ่านค่าบนไฮโดรมิเตอร์ (10.5 cm)

L_2 = ความยาวของกระเปาะไฮโดรมิเตอร์ (cm) = 2.3 cm

V_B = ปริมาตรของกระเปาะไฮโดรมิเตอร์ (cm^3) = 67 cm^3

A = พื้นที่หน้าตัดของกระบอกตกตะกอน (cm^2) = 27.8 cm^2

(2) $k =$ ค่าคงที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของสารแขวนลอยและค่าความถ่วงจำเพาะของอนุภาคเม็ดดิน ในสารแขวนลอย

(3) $$D = k\sqrt{\frac{L}{T}}$$

โดยที่ D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเม็ดดิน (mm)

L =ระยะทางจากผิวของสารแขวนลอยจนถึงระดับที่ไฮโดรมิเตอร์วัดค่าความหนาแน่นของสารแขวนลอย (cm)

t = ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มตกตะกอนจนกระทั่งทำการอ่านค่าจากไฮโดรมิเตอร์ (min)

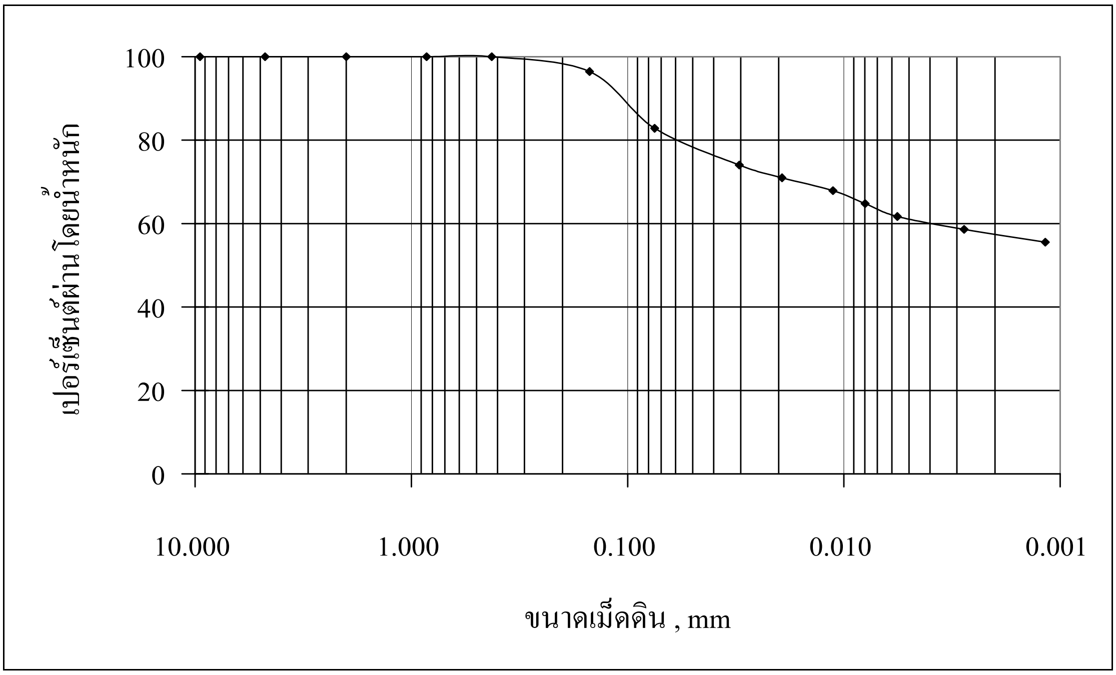
(4) $$P = \frac{Ra}{M} \times 100$$

โดยที่ P = เปอร์เซ็นต์ของดินส่วนซึ่งไฮโดรมิเตอร์วัดความหนาแน่นของสารแขวนลอย

R = ค่าที่อ่านได้จากไฮโดรมิเตอร์

a = ค่าปรับแก้ค่าที่อ่านได้จากไฮโดรมิเตอร์ 152H ขึ้นกับค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน

M = น้ำหนักตัวอย่างอบแห้งที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยไฮโดรมิเตอร์



รูปที่ 4 ก การกระจายของเม็ดดินสำหรับตัวอย่างดินพื้นที่

ตารางที่ 5 ก ผลการจำแนกชนิดของดินแบบสามเหลี่ยม สำหรับตัวอย่างดินทรายหยาบ + ดินเหนียว

ตารางที่ 5.1 ก ผลการทดลองโดยวิธีตะแกรงร่อนของดินทรายหยาบ + ดินเหนียว

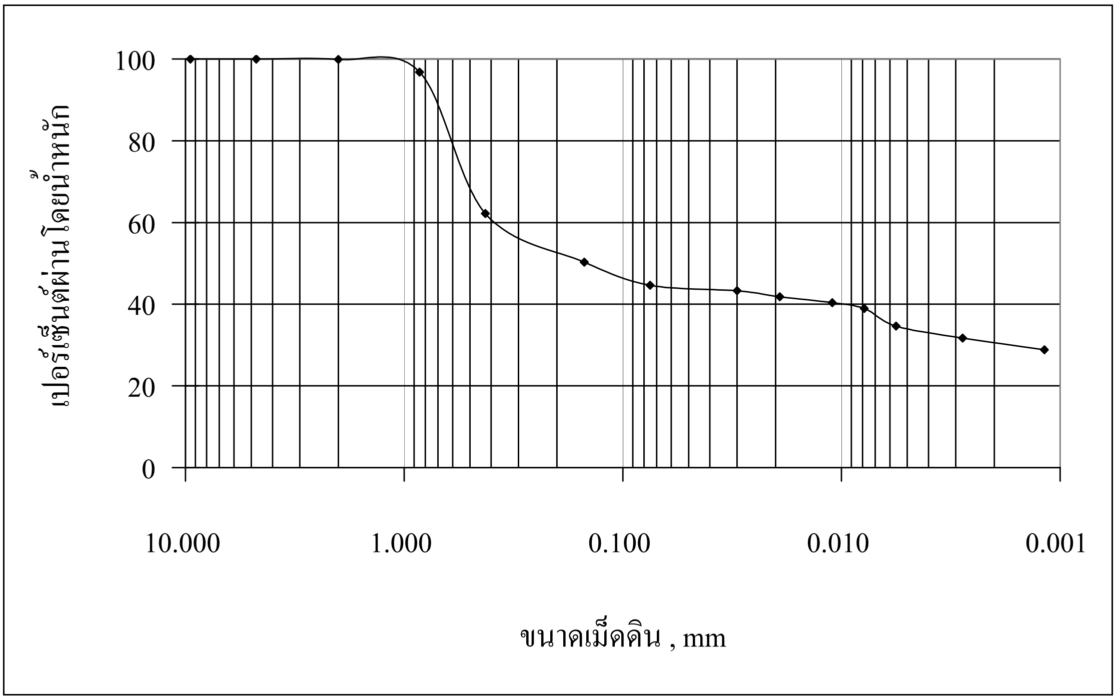
หมายเลข No. ของตะแกรง	เส้นผ่านศูนย์กลางรูของตะแกรง (mm)	ร้อยละดินค้างตะแกรงสะสม (%)	เปอร์เซ็นต์ดินผ่านตะแกรงโดยน้ำหนัก (%)
3/8	9.50	0.00	100.00
4	4.75	0.00	100.00
10	2.00	0.08	99.93
20	0.85	3.18	96.82
40	0.43	37.83	62.17
100	0.15	49.69	50.31
200	0.08	55.36	44.64
Pan	< 0.08	100.00	0.00

หมายเหตุ : Pan หมายถึง ภาชนะที่ใช้รองส่วนล่างสุดของชุดทดสอบตะแกรงร่อน

ตารางที่ 5.2 ก ผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฮโดรมิเตอร์ของดินทรายหยาบ + ดินเหนียว

t min	ค่าที่อ่านได้จาก hydrometer	อุณหภูมิ °C	ความลึกประสิทธิผล *L* (1) (cm)	ค่าคงที่ *k* (2)	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเม็ดดิน (3) (mm)	ร้อยละของดินส่วนที่วัดความหนาแน่นของสารแขวนลอย (4) (%)
2	15.0	28.5	13.8	0.012401	0.033	43.27
5	14.5	28.5	13.9	0.012401	0.020	41.83
15	14.0	29.0	14.0	0.012330	0.012	40.39
30	13.5	29.0	14.1	0.012330	0.008	38.95
60	12.0	29.0	14.3	0.012330	0.006	34.62
250	11.0	29.5	14.5	0.012265	0.003	31.73
1440	10.0	28.5	14.7	0.012401	0.001	28.85

หมายเหตุ : (1), (2), (3) และ (4) เช่นเดียวกับตารางที่ 4.2 ก



รูปที่ 5 ก การกระจายของเม็ดดินสำหรับตัวอย่างดินทรายหยาบ + ดินเหนียว

ตารางที่ 6 ก   ผลการจำแนกชนิดของดินแบบสามเหลี่ยม สำหรับดินทรายคละ + ดินเหนียว

ตารางที่ 6.1 ก ผลการทดลองโดยวิธีตะแกรงร่อนของดินทรายคละ + ดินเหนียว

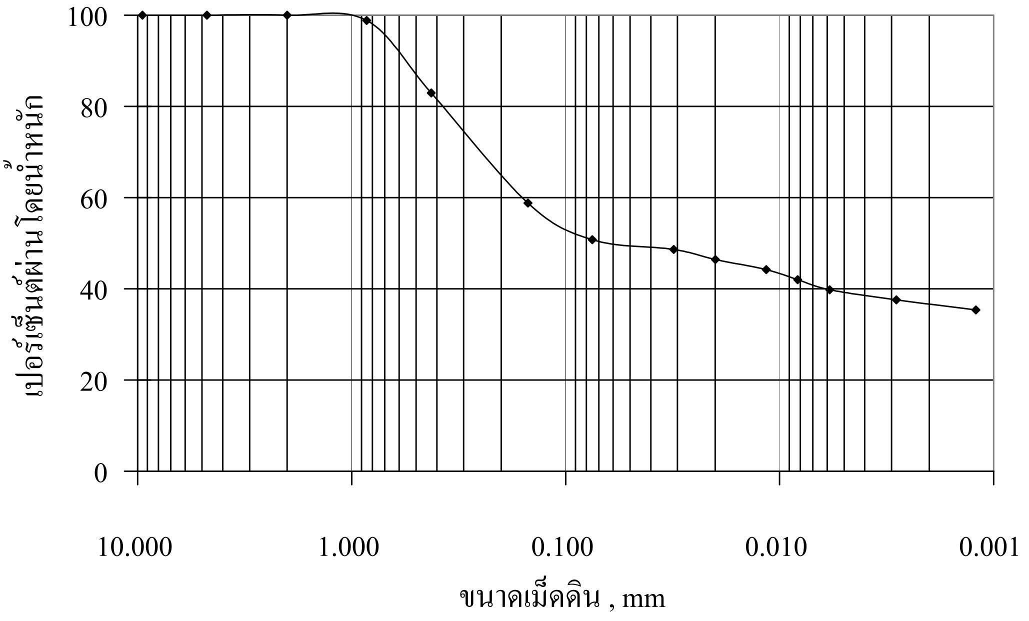
หมายเลข No. ของตะแกรง	เส้นผ่านศูนย์กลางรูของตะแกรง (mm)	ร้อยละดินค้างตะแกรงสะสม (%)	เปอร์เซ็นต์ดินผ่านตะแกรงโดยน้ำหนัก (%)
3/8	9.50	0.00	100.00
4	4.75	0.00	100.00
10	2.00	0.01	99.99
20	0.85	1.18	98.83
40	0.43	17.09	82.91
100	0.15	41.19	58.81
200	0.08	49.24	50.76
Pan	< 0.08	100.00	0.00

หมายเหตุ : Pan หมายถึง ภาชนะที่ใช้รองส่วนล่างสุดของชุดทดสอบตะแกรงร่อน

ตารางที่ 6.2 ผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฮโดรมิเตอร์ของดินทรายคละ + ดินเหนียว

t min	ค่าที่อ่านได้จาก hydrometer	อุณหภูมิ °C	ความลึกประสิทธิผล L (1) (cm)	ค่าคงที่ k (2)	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเม็ดดิน (3) (mm)	ร้อยละของดินส่วนที่วัดความหนาแน่นของสารแขวนลอย (4) (%)
2	22.0	28.0	12.7	0.012413	0.031	48.63
5	21.0	28.0	12.9	0.012413	0.020	46.42
15	20.0	28.0	13.0	0.012413	0.012	44.21
30	19.0	28.0	13.2	0.012413	0.008	42.00
60	18.0	28.0	13.3	0.012413	0.006	39.79
250	17.0	29.0	13.5	0.012275	0.003	37.58
1440	16.0	28.0	13.7	0.012413	0.001	35.36

หมายเหตุ : (1), (2), (3) และ (4) เช่นเดียวกับตารางที่ 4.2 ก



รูปที่ 6 ก การกระจายของเม็ดดินสำหรับตัวอย่างดินทรายคละ + ดินเหนียว

ตารางที่ 7 ผลการจำแนกชนิดของดินแบบสามเหลี่ยม สำหรับดินทรายละเอียด+ ดินเหนียว

ตารางที่ 7.1 ก ผลการทดลองโดยวิธีตะแกรงร่อนของดินทรายละเอียด + ดินเหนียว

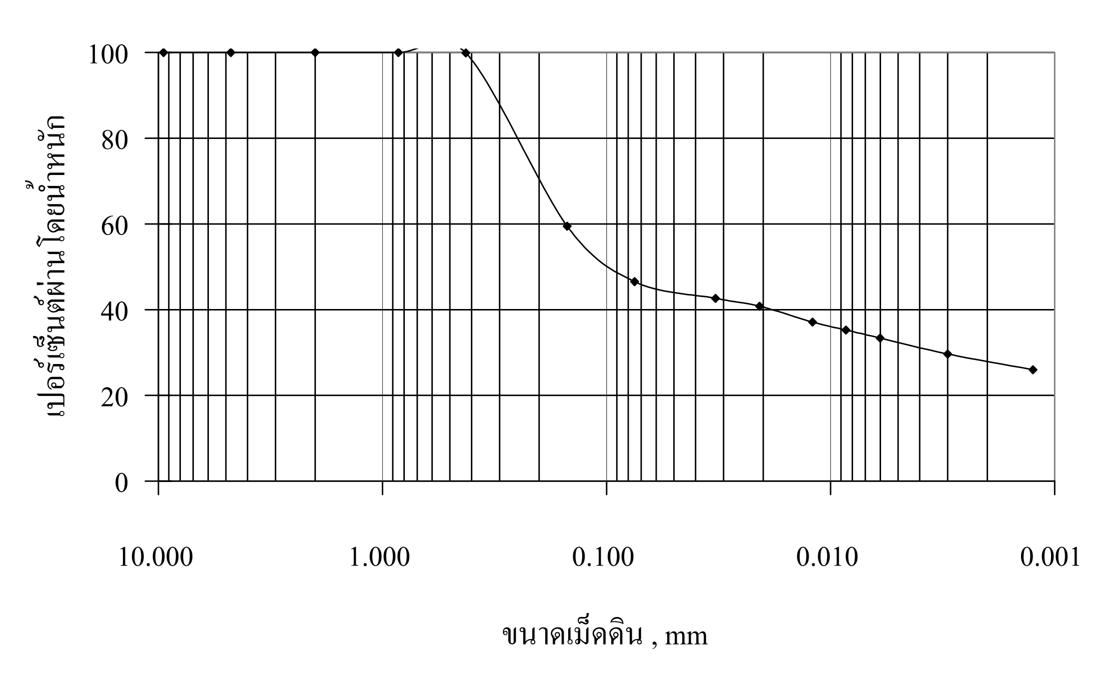
หมายเลข No. ของตะแกรง	เส้นผ่านศูนย์กลางรูของตะแกรง (mm)	ร้อยละดินค้างตะแกรงสะสม (%)	เปอร์เซ็นต์ดินผ่านตะแกรงโดยน้ำหนัก (%)
3/8	9.50	0.00	100.00
4	4.75	0.00	100.00
10	2.00	0.00	100.00
20	0.85	0.00	100.00
40	0.43	0.10	99.90
100	0.15	40.52	59.48
200	0.08	53.47	46.53
Pan	< 0.08	100.00	0.00

หมายเหตุ : Pan หมายถึง ภาชนะที่ใช้รองส่วนล่างสุดของชุดทดสอบตะแกรงร่อน

ตารางที่ 7.2 ผลการวิเคราะห์โดยไฮโดรมิเตอร์ของดินทรายละเอียด + ดินเหนียว

t min	ค่าที่อ่านได้จาก hydrometer	อุณหภูมิ °C	ความลึกประสิทธิผล L (1) (cm)	ค่าคงที่ k (2)	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเม็ดดิน (3) (mm)	ร้อยละของดินส่วนที่วัดความหนาแน่นของสารแขวนลอย (4) (%)
2	11.5	29.0	14.4	0.012174	0.033	42.66
5	11.0	29.0	14.5	0.012174	0.021	40.80
15	10.0	29.0	14.7	0.012174	0.012	37.09
30	9.5	29.0	14.75	0.012174	0.009	35.24
60	9.0	29.5	14.8	0.012109	0.006	33.38
250	8.0	29.5	15.0	0.012109	0.003	29.68
1440	7.0	29.0	15.2	0.012174	0.001	25.97

หมายเหตุ : (1), (2), (3) และ (4) เช่นเดียวกับตารางที่ 4.2 ก



รูปที่ 7 ก การกระจายของเม็ดดินสำหรับตัวอย่างดินทรายละเอียด + ดินเหนียว

ตารางที่ 8 ก ผลการจำแนกชนิดของดินแบบสามเหลี่ยม สำหรับดินเหนียว

ตารางที่ 8.1 ก ผลการทดลองโดยวิธีตะแกรงร่อนของดินเหนียว

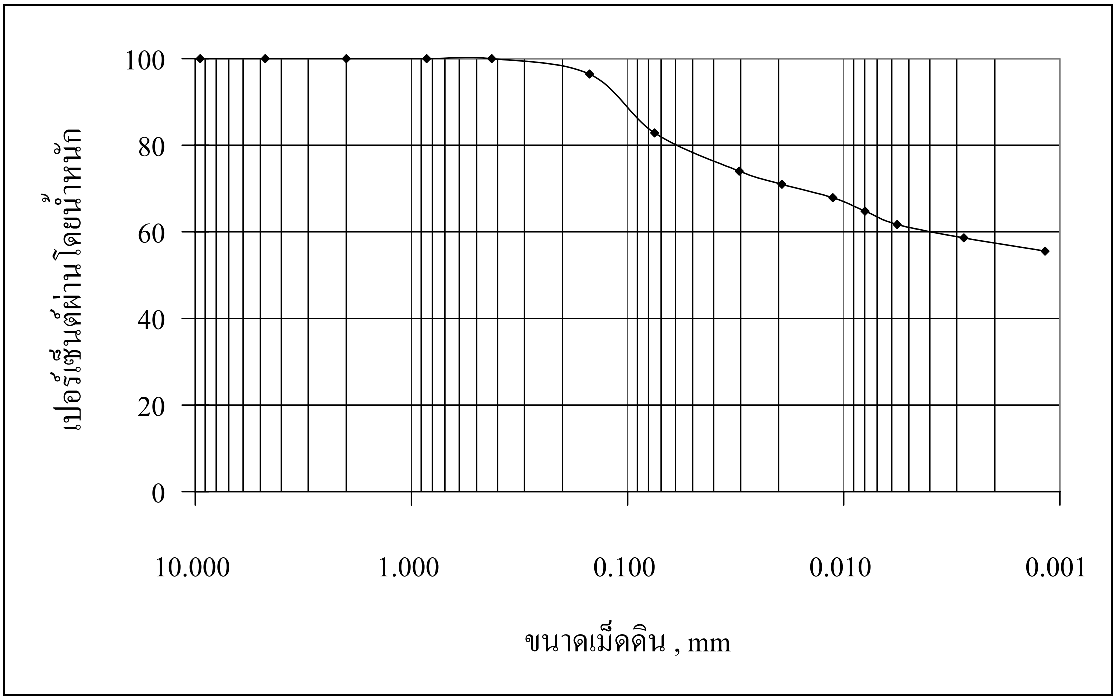
หมายเลข No. ของตะแกรง	เส้นผ่านศูนย์กลางรูของตะแกรง (mm)	ร้อยละดินค้างตะแกรงสะสม (%)	เปอร์เซ็นต์ดินผ่านตะแกรงโดยน้ำหนัก (%)
3/8	9.50	0.00	100.00
4	4.75	0.00	100.00
10	2.00	0.00	100.00
20	0.85	0.00	100.00
40	0.43	0.01	99.99
100	0.15	3.55	96.45
200	0.08	17.17	82.83
Pan	< 0.08	100.00	0.00

หมายเหตุ : Pan หมายถึง ภาชนะที่ใช้รองส่วนล่างสุดของชุดทดสอบตะแกรงร่อน

ตารางที่ 8.2 ก ผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฮโดรมิเตอร์ของดินเหนียว

t min	ค่าที่อ่านได้จาก hydrometer	อุณหภูมิ °C	ความลึกประสิทธิผล L (1) (cm)	ค่าคงที่ k (2)	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเม็ดดิน (3) (mm)	ร้อยละของดินส่วนที่วัดความหนแน่นของสารแขวนลอย (4) (%)
2	24.0	28.0	12.4	0.012219	0.030	74.05
5	23.0	28.0	12.5	0.012219	0.019	70.96
15	22.0	28.0	12.7	0.012219	0.011	67.88
30	21.0	28.5	12.9	0.012154	0.008	64.79
60	20.0	28.5	13.0	0.012154	0.006	61.71
250	19.0	29.0	13.2	0.012089	0.003	58.62
1440	18.0	28.0	13.3	0.012219	0.001	55.53

หมายเหตุ : (1), (2), (3) และ (4) เช่นเดียวกับตารางที่ 4.2 ก



รูปที่ 8 ก การกระจายของเม็ดดินสำหรับตัวอย่างดินเหนียว

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดสอบการบดอัดตัวอย่างดิน

ตารางที่ 1 ข ผลการทดสอบการบดอัดสำหรับตัวอย่างดินทรายหยาบ

Container No.	1	2	3	4	5	6	7	8
น้ำหนักโมล, g	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0
น้ำหนักดินเปียก+โมล, g	5,372.3	5,499.1	5,617.2	5,680.6	5,632.5	5,593.3	5,545.4	5,502.0
น้ำหนักดินเปียก,g	1,544.3	1,671.1	1,789.2	1,852.6	1,804.5	1,765.3	1,717.4	1,674.0
ปริมาณความชื้น	2.82	5.96	7.40	8.66	10.27	11.87	12.19	13.03
ค่าความหนาแน่นรวม	1.64	1.77	1.90	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77
ค่าความหนาแน่นแห้ง	1.59	1.67	1.76	1.81	1.73	1.67	1.62	1.57

หมายเหตุ :

$$\rho_t = \frac{w}{v} \qquad \rho_d = \frac{100\rho_t}{(100+w)}$$

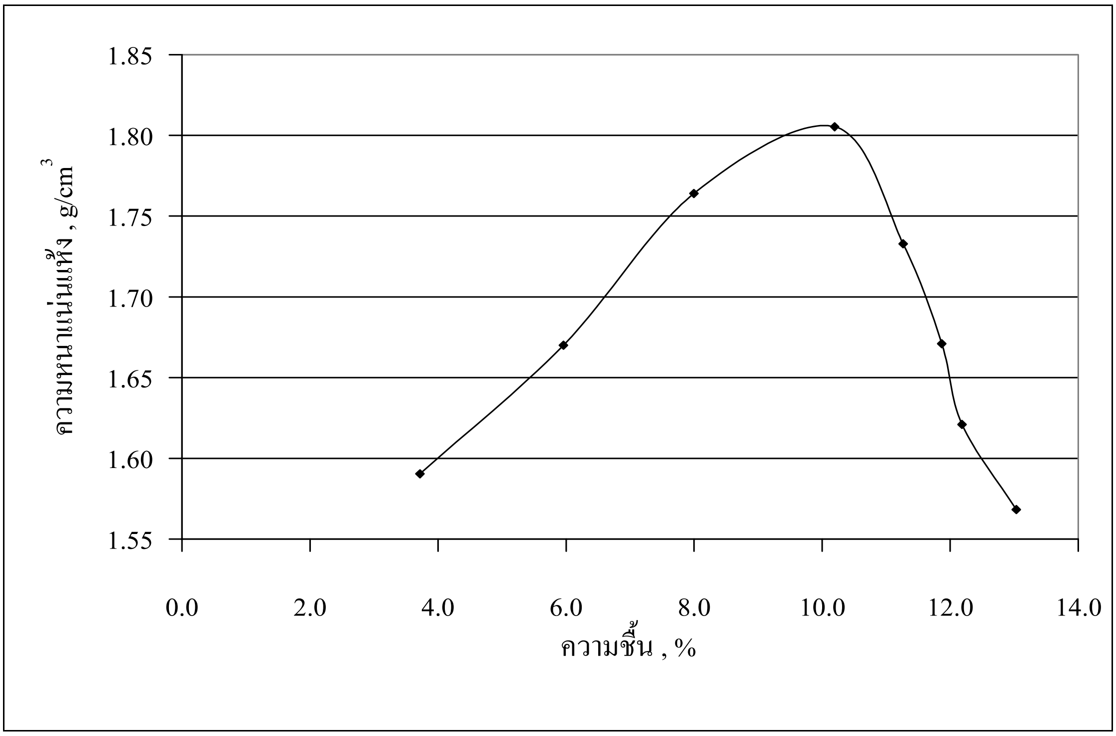
โดยที่ ρ_t = ค่าความหนาแน่นรวม, g/cm^3

w = น้ำหนักดินเปียก

v = ปริมาตรแบบหล่อ, cm^3 = 944.376 cm^3

โดยที่ ρ_d = ค่าความหนาแน่นแห้ง, g/cm^3

w = ปริมาณความชื้น



รูปที่ 1 ข ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและความชื้นสำหรับตัวอย่างดินทรายหยาบ

ตารางที่ 2 ข ผลการทดสอบการบดอัดสำหรับตัวอย่างดินทรายคละ

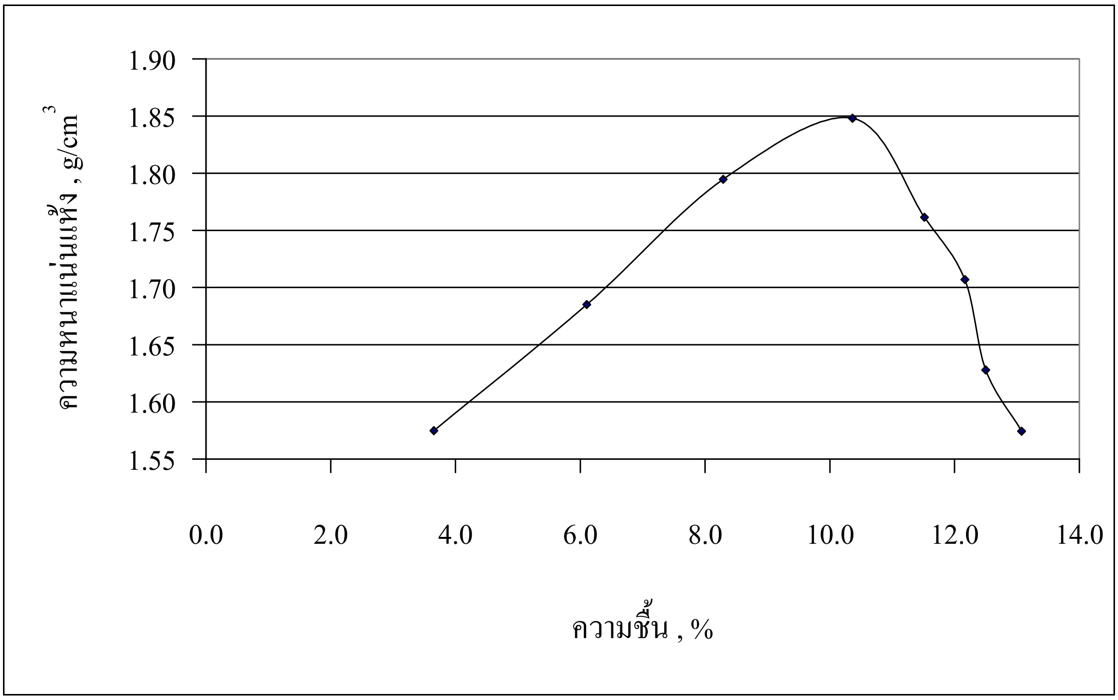
Container No.	1	2	3	4	5	6	7	8
น้ำหนักโมล, g	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0
น้ำหนักดินเปียก+โมล, g	5,369.6	5,516.5	5,663.4	5,754.1	5,683.2	5,636.1	5,557.6	5,509.2
น้ำหนักดินเปียก,g	1,541.6	1,688.5	1,835.4	1,926.1	1,855.2	1,808.1	1,729.6	1,681.2
ปริมาณความชื้น	3.65	6.10	8.29	10.36	11.52	12.16	12.50	13.07
ค่าความหนาแน่นรวม	1.63	1.79	1.94	2.04	1.96	1.92	1.83	1.78
ค่าความหนาแน่นแห้ง	1.58	1.69	1.80	1.85	1.76	1.71	1.63	1.57

หมายเหตุ :

$$\rho_t = \frac{w}{v} \qquad\qquad \rho_d = \frac{100\rho_t}{(100+w)}$$

โดยที่ ρ_t = ค่าความหนาแน่นรวม, g/cm^3
w = น้ำหนักดินเปียก
v = ปริมาตรแบบหล่อ, cm^3 = 944.376 cm^3

โดยที่ ρ_d = ค่าความหนาแน่นแห้ง, g/cm^3
w = ปริมาณความชื้น



รูปที่ 2 ข ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและความชื้นสำหรับตัวอย่างดินทรายคละ

ตารางที่ 3 ข ผลการทดสอบการบดอัดสำหรับตัวอย่างดินทรายละเอียด

Container No.	1	2	3	4	5	6	7	8
น้ำหนักโมล, g	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0
น้ำหนักดินเปียก+โมล, g	5,411.6	5,536.7	5,622.8	5,730.0	5,806.2	5,686.1	5,557.6	5,509.2
น้ำหนักดินเปียก,g	1,583.6	1,708.7	1,794.8	1,902.0	1,978.2	1,858.1	1,729.6	1,681.2
ปริมาณความชื้น	4.31	6.68	7.55	9.09	10.87	9.59	8.17	6.66
ค่าความหนาแน่นรวม	1.68	1.81	1.90	2.01	2.10	1.97	1.83	1.78
ค่าความหนาแน่นแห้ง	1.61	1.70	1.77	1.85	1.89	1.80	1.69	1.67

หมายเหตุ :

$$\rho_t = \frac{w}{v} \qquad\qquad \rho_d = \frac{100\rho_t}{(100+w)}$$

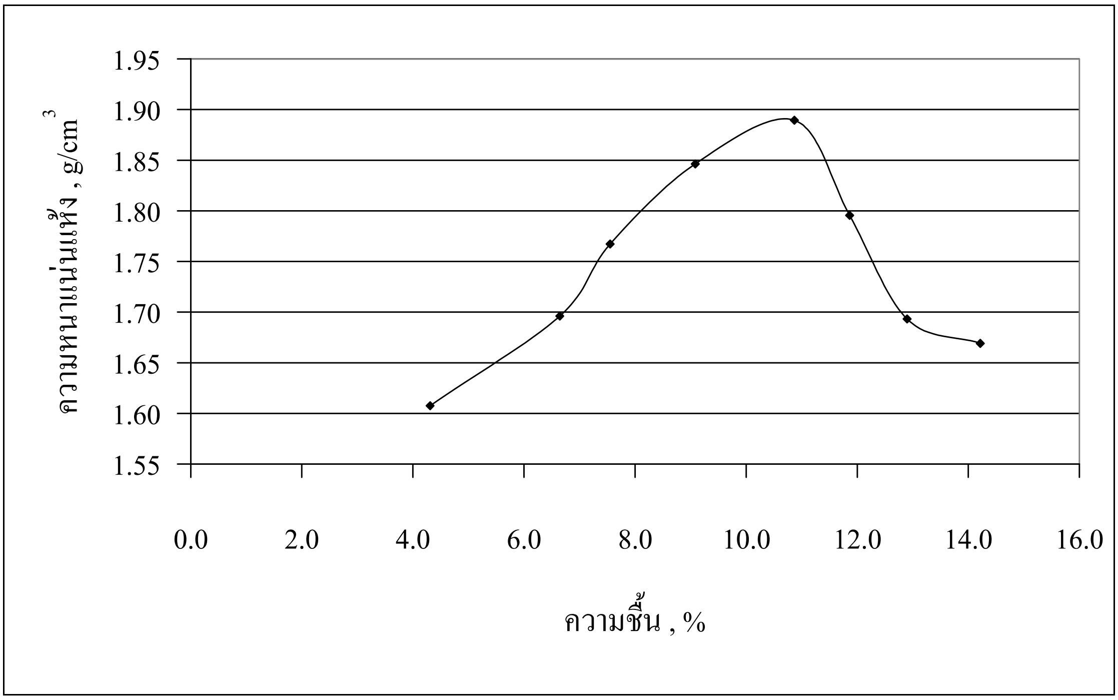
โดยที่ ρ_t = ค่าความหนาแน่นรวม, g/cm^3

w = น้ำหนักดินเปียก

v = ปริมาตรแบบหล่อ, cm^3 = 944.376 cm^3

โดยที่ ρ_d = ค่าความหนาแน่นแห้ง, g/cm^3

w = ปริมาณความชื้น



รูปที่ 3 ข ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและความชื้นสำหรับตัวอย่างดินทรายละเอียด

ตารางที่ 4 ข ผลการทดสอบการบดอัดสำหรับตัวอย่างดินพื้นที่

Container No.	1	2	3	4	5	6	7	8
น้ำหนักโมล, g	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0
น้ำหนักดินเปียก+โมล, g	5,432.3	5,563.4	5,697.2	5,756.8	5,822.5	5,683.6	5,614.2	5,460.3
น้ำหนักดินเปียก,g	1,604.3	1,735.4	1,869.2	1,928.8	1,994.5	1,855.6	1,786.2	1,632.3
ปริมาณความชื้น	3.32	5.89	7.91	9.30	9.63	8.50	6.05	3.92
ค่าความหนาแน่นรวม	1.70	1.84	1.98	2.04	2.11	1.97	1.89	1.73
ค่าความหนาแน่นแห้ง	1.64	1.74	1.83	1.87	1.93	1.81	1.78	1.66

หมายเหตุ :

$$\rho_t = \frac{w}{v} \qquad\qquad \rho_d = \frac{100\rho_t}{(100+w)}$$

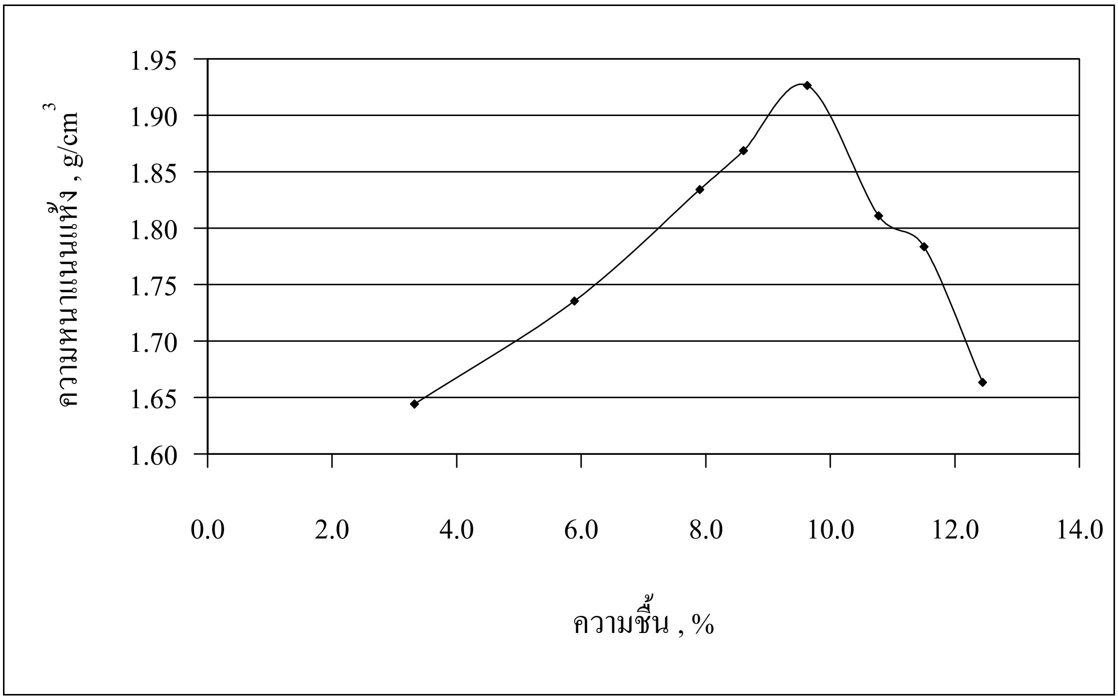
โดยที่ ρ_t = ค่าความหนาแน่นรวม, g/cm^3

w = น้ำหนักดินเปียก

v = ปริมาตรแบบหล่อ, cm^3 = 944.376 cm^3

โดยที่ ρ_d = ค่าความหนาแน่นแห้ง, g/cm^3

w = ปริมาณความชื้น



รูปที่ 4 ข ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและความชื้นสำหรับตัวอย่างดินพื้นที่

ตารางที่ 5 ข ผลการทดสอบการบดอัดสำหรับตัวอย่างดินทรายหยาบ + ดินเหนียว

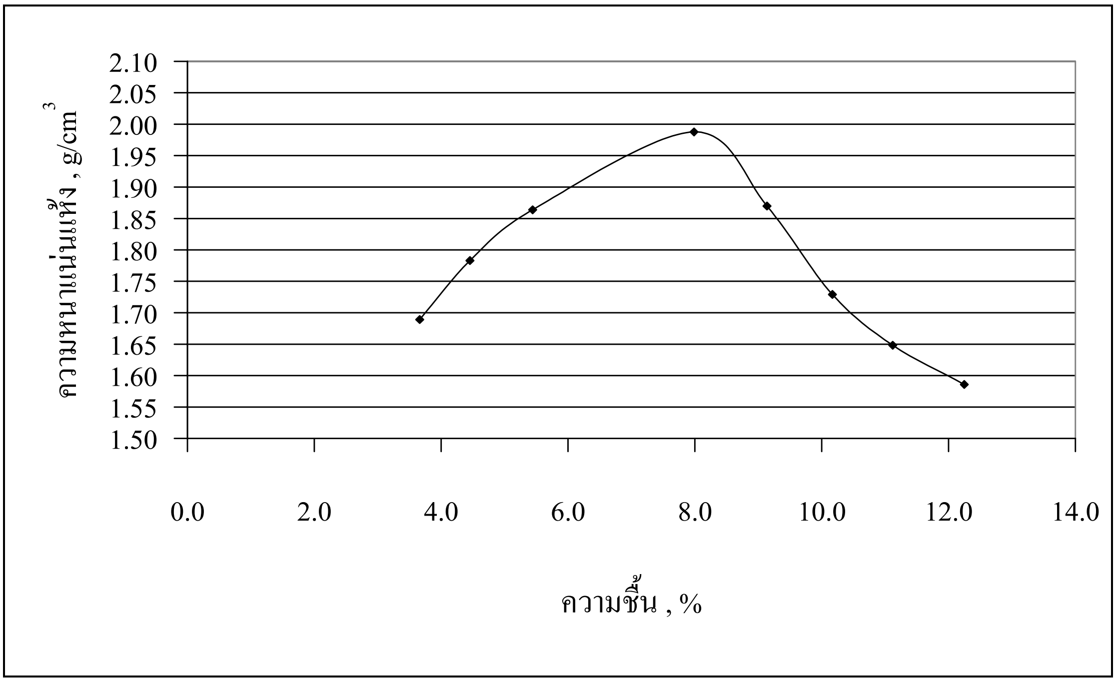
Container No.	1	2	3	4	5	6	7	8
น้ำหนักโมล, g	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0
น้ำหนักดินเปียก+โมล, g	5,481.6	5,586.7	5,702.8	5,855.0	5,746.2	5,616.1	5,557.6	5,509.2
น้ำหนักดินเปียก,g	1,653.6	1,758.7	1,874.8	2,027.0	1,918.2	1,788.1	1,729.6	1,681.2
ปริมาณความชื้น	3.66	4.45	6.52	7.98	8.63	9.51	11.12	12.25
ค่าความหนาแน่นรวม	1.75	1.86	1.99	2.15	2.03	1.89	1.83	1.78
ค่าความหนาแน่นแห้ง	1.69	1.78	1.86	1.99	1.87	1.73	1.65	1.59

หมายเหตุ :

$$\rho_t = \frac{w}{v} \qquad\qquad \rho_d = \frac{100\rho_t}{(100+w)}$$

โดยที่ ρ_t = ค่าความหนาแน่นรวม, g/cm^3
w = น้ำหนักดินเปียก
v = ปริมาตรแบบหล่อ, cm^3 = 944.376 cm^3

โดยที่ ρ_d = ค่าความหนาแน่นแห้ง, g/cm^3
w = ปริมาณความชื้น



รูปที่ 5 ข ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและความชื้น
สำหรับตัวอย่างดินทรายหยาบ +ดินเหนียว

ตารางที่ 6 ข ผลการทดสอบการบดอัดสำหรับตัวอย่างดินทรายคละ + ดินเหนียว

Container No.	1	2	3	4	5	6	7	8
น้ำหนักโมล, g	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0
น้ำหนักดินเปียก+โมล, g	5,482.5	5,583.8	5,722.9	5,889.0	5,774.4	5,656.7	5,587.8	5,519.8
น้ำหนักดินเปียก,g	1,654.5	1,755.8	1,894.9	2,061.0	1,946.4	1,828.7	1,759.8	1,691.8
ปริมาณความชื้น	3.30	4.59	6.11	8.02	9.35	10.90	11.47	12.40
ค่าความหนาแน่นรวม	1.75	1.86	2.01	2.18	2.06	1.94	1.86	1.79
ค่าความหนาแน่นแห้ง	1.70	1.78	1.89	2.02	1.89	1.75	1.67	1.59

หมายเหตุ :

$$\rho_t = \frac{w}{v} \qquad \qquad \rho_d = \frac{100\rho_t}{(100+w)}$$

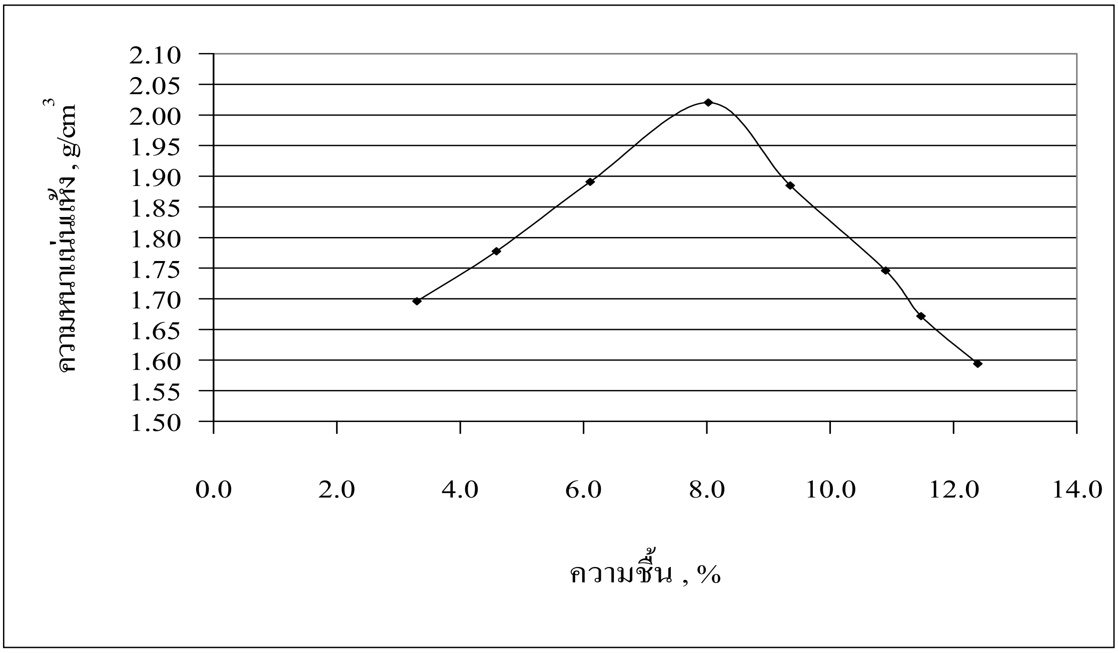
โดยที่ ρ_t = ค่าความหนาแน่นรวม, g/cm^3

w = น้ำหนักดินเปียก

v = ปริมาตรแบบหล่อ, cm^3 = 944.376 cm^3

โดยที่ ρ_d = ค่าความหนาแน่นแห้ง, g/cm^3

w = ปริมาณความชื้น



รูปที่ 6 ข ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและความชื้น

สำหรับตัวอย่างดินทรายคละ + ดินเหนียว

ตารางที่ 7 ข ผลการทดสอบการบดอัดสำหรับตัวอย่างดินทรายละเอียด + ดินเหนียว

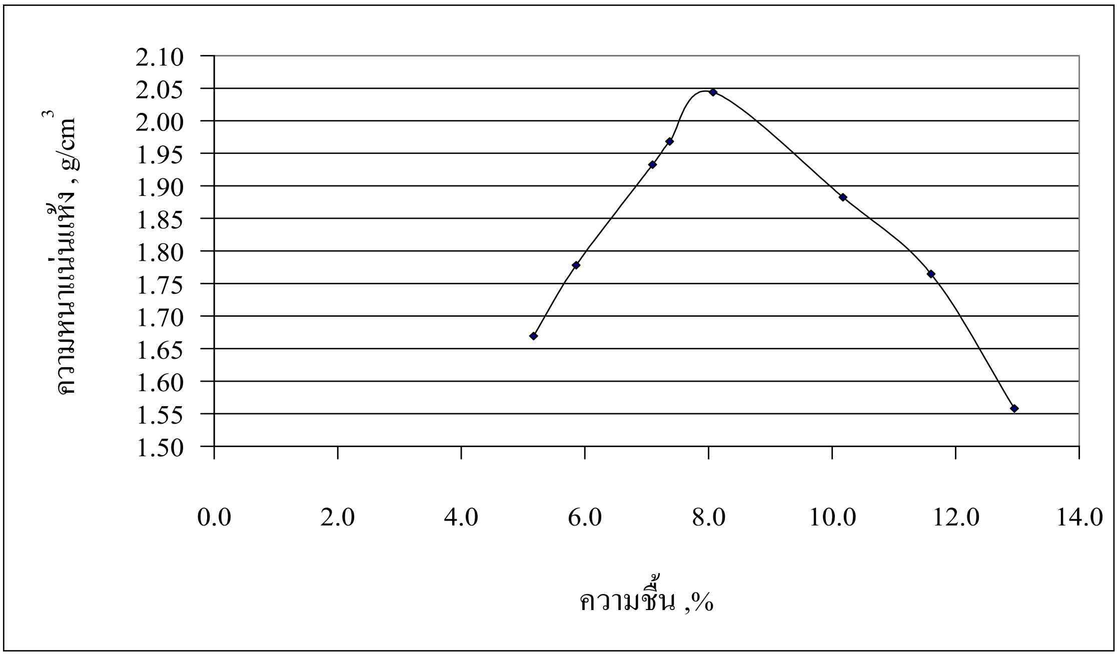
Container No.	1	2	3	4	5	6	7	8
น้ำหนักโมล, g	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0
น้ำหนักดินเปียก+โมล, g	5,485.8	5,584.4	5,782.6	5,823.6	5,913.8	5,786.7	5,687.8	5,489.8
น้ำหนักดินเปียก,g	1,657.8	1,756.4	1,954.6	1,995.6	2,085.8	1,958.7	1,859.8	1,661.8
ปริมาณความชื้น	5.71	4.59	7.09	7.37	8.07	10.18	11.60	12.95
ค่าความหนาแน่นรวม	1.76	1.86	2.07	2.11	2.21	2.07	1.97	1.76
ค่าความหนาแน่นแห้ง	1.67	1.78	1.93	1.97	2.04	1.88	1.77	1.56

หมายเหตุ :

$$\rho_t = \frac{w}{v} \qquad\qquad \rho_d = \frac{100\rho_t}{(100+w)}$$

โดยที่ ρ_t = ค่าความหนาแน่นรวม, g/cm^3
w = น้ำหนักดินเปียก
v = ปริมาตรแบบหล่อ, cm^3 = 944.376 cm^3

โดยที่ ρ_d = ค่าความหนาแน่นแห้ง, g/cm^3
w = ปริมาณความชื้น



รูปที่ 7 ข ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและความชื้น
สำหรับตัวอย่างดินทรายละเอียด + ดินเหนียว

ตารางที่ 8 ข ผลการทดสอบการบดอัดสำหรับตัวอย่างดินเหนียว

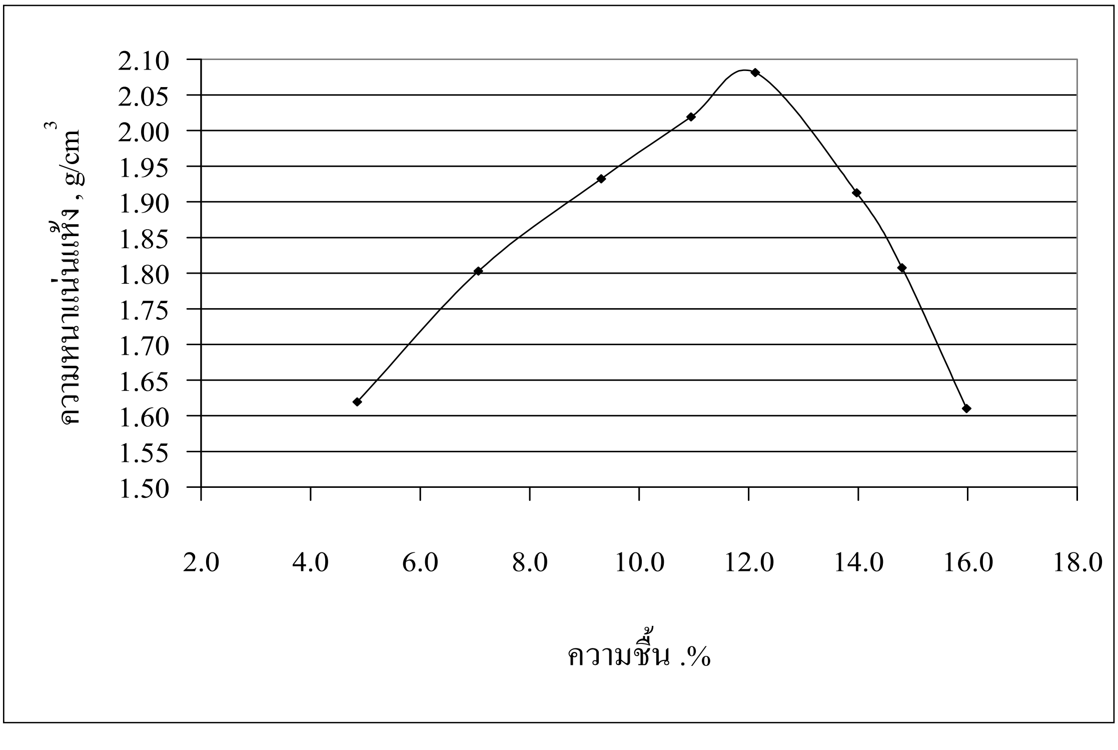
Container No.	1	2	3	4	5	6	7	8
น้ำหนักโมล, g	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0	3,828.0
น้ำหนักดินเปียก+โมล, g	5,431.5	5,650.7	5,822.6	5,943.6	6,031.8	5,886.6	5,787.6	5,591.4
น้ำหนักดินเปียก,g	1,603.5	1,822.7	1,994.6	2,115.6	2203.8	2,058.6	1,959.6	1,763.4
ปริมาณความชื้น	4.85	7.06	9.31	10.95	12.12	13.97	14.80	15.98
ค่าความหนาแน่นรวม	1.70	1.93	2.11	2.24	2.33	2.18	2.08	1.87
ค่าความหนาแน่นแห้ง	1.62	1.80	1.93	2.02	2.08	1.91	1.81	1.61

หมายเหตุ :

$$\rho_t = \frac{w}{v} \qquad\qquad \rho_d = \frac{100\rho_t}{(100 + w)}$$

โดยที่ ρ_t = ค่าความหนาแน่นรวม, g/cm^3
w = น้ำหนักดินเปียก
v = ปริมาตรแบบหล่อ, cm^3 = 944.376 cm^3

โดยที่ ρ_d = ค่าความหนาแน่นแห้ง, g/cm^3
w = ปริมาณความชื้น



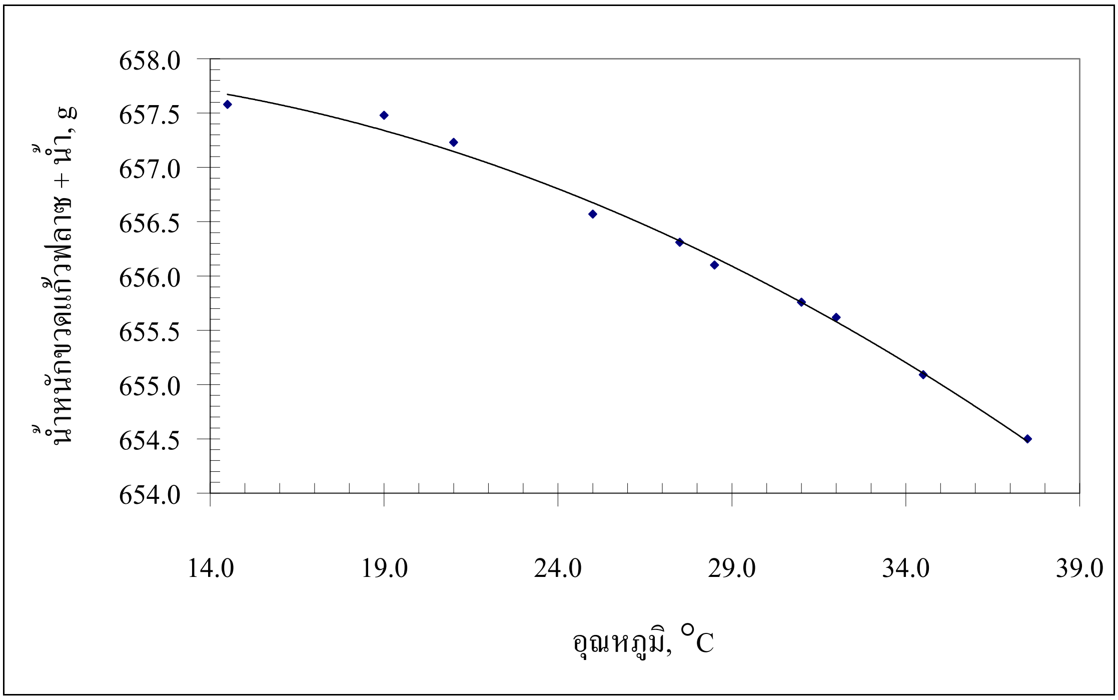
รูปที่ 8 ข ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและความชื้นสำหรับตัวอย่างดินเหนียว

ภาคผนวก ค

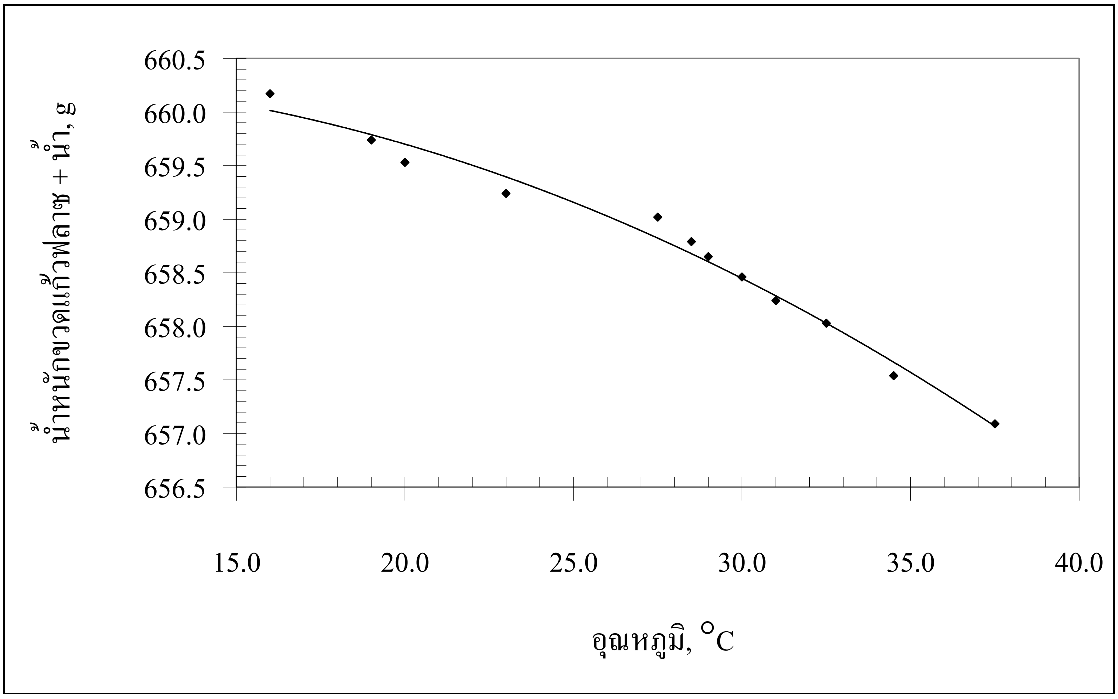
ข้อมูลความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน

ตารางที่ 1 ค การสอบเทียบขวดแก้วฟลาซ

ขวดเบอร์ 1 ความจุ 500 cm^3		
ครั้งที่	น้ำหนักขวดแก้วฟลาซ + น้ำ , g	อุณหภูมิ , °C
1	654.50	37.5
2	655.09	34.5
3	655.62	32.0
4	655.76	31.0
5	656.10	28.5
6	656.31	27.5
7	656.57	25.0
8	657.23	21.0
9	657.48	19.0
10	657.58	14.5
ขวดเบอร์ 2 ความจุ 500 cm^3		
ครั้งที่	น้ำหนักขวดแก้วฟลาซ + น้ำ , g	อุณหภูมิ , °C
1	657.09	37.5
2	657.54	34.5
3	658.03	32.5
4	658.24	31.0
5	658.46	30.0
6	658.65	29.0
7	658.79	28.5
8	659.02	27.5
9	659.24	23.0
10	659.53	20.0
11	659.74	19.0
12	660.17	16.0



รูปที่ 1 ค การสอบเทียบขวดแก้วฟลาซเบอร์ 1



รูปที่ 2 ค การสอบเทียบขวดแก้วฟลาซเบอร์ 2

ตารางที่ 2 ค ผลการทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของตัวอย่างดินทรายหยาบ

เบอร์ขวดแก้ว		1		2	
1	Temperature , T ($^{\circ}$C)	24.50	21.00	27.00	22.50
2	Weight of flask + water + soil , W_1 (g)	687.50	687.75	689.81	690.51
3	Weight of flask + water (From Calib.) , W_2 (g)	656.70	657.15	658.90	659.43
4	Weight of dry soil + Container (g)	672.48	672.48	664.75	664.75
5	Weight of container (g)	622.51	622.51	614.62	614.62
6	Weight of dry soil, W_s (g)	49.97	49.97	50.13	50.13
7	Specific Gravity of Water at t $^{\circ}$C , G_T	0.9972	0.9980	0.9965	0.9977
8	Specific Gravity of Soil	2.599	2.575	2.599	2.625
ค่าเฉลี่ย G_s สำหรับแต่ละขวดแก้ว		2.587		2.612	
ค่าเฉลี่ย G_s		**2.600**			

หมายเหตุ : ค่าความถ่วงจำเพาะคำนวณจากสมการ 2.6

$$G_s = \frac{W_s \times G_T}{(W_2 + W_s) - W_1}$$

โดยที่ W_s = น้ำหนักตัวอย่างดินที่ทดลองอบแห้ง, g

W_2 = น้ำหนักขวด + น้ำที่อุณหภูมิทดสอบ (อ่านค่าจากโค้งสอบเทียบที่อุณหภูมิทดสอบ), g

W_1 = น้ำหนักขวดแก้ว + น้ำ + ดิน ที่ทำการทดสอบ, g

G_T = องค์ประกอบแก้ปรับค่าอุณหภูมิที่ทำการทดลองจาก 4°C

ตารางที่ 3 ค ผลการทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของตัวอย่างดินทรายคละ

เบอร์ขวดแก้ว		1		2	
1	Temperature , T ($^{\circ}$C)	30.00	23.00	31.00	27.00
2	Weight of flask + water + soil , W_1 (g)	686.76	687.76	689.21	689.79
3	Weight of flask + water (From Calib.) , W_2 (g)	655.90	656.93	658.29	658.90
4	Weight of dry soil + Container (g)	652.58	652.58	672.17	672.17
5	Weight of container (g)	602.77	602.77	622.23	622.23
6	Weight of dry soil, W_s (g)	49.81	49.81	49.94	49.94
7	Specific Gravity of Water at t $^{\circ}$C , G_T	0.9957	0.9976	0.9954	0.9965
8	Specific Gravity of Soil	2.617	2.618	2.614	2.612
ค่าเฉลี่ย G_s สำหรับแต่ละขวดแก้ว		2.618		2.613	
ค่าเฉลี่ย G_s		**2.615**			

หมายเหตุ : ค่าความถ่วงจำเพาะคำนวณจากสมการ 2.6

$$G_s = \frac{W_s \times G_T}{(W_2 + W_s) - W_1}$$

โดยที่ W_s = น้ำหนักตัวอย่างดินที่ทดลองอบแห้ง, g

W_2 = น้ำหนักขวด + น้ำที่อุณหภูมิทดสอบ (อ่านค่าจากโค้งสอบเทียบที่อุณหภูมิทดสอบ), g

W_1 = น้ำหนักขวดแก้ว + น้ำ + ดิน ที่ทำการทดสอบ, g

G_T = องค์ประกอบแก้ปรับค่าอุณหภูมิที่ทำการทดลองจาก 4°C

ตารางที่ 4 ค ผลการทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของตัวอย่างดินทรายละเอียด

เบอร์ขวดแก้ว		1		2	
1	Temperature , T ($^{\circ}$C)	30.50	26.50	30.50	26.50
2	Weight of flask + water + soil , W_1 (g)	686.64	687.47	689.50	690.22
3	Weight of flask + water (From Calib.) , W_2 (g)	655.84	656.47	658.38	658.94
4	Weight of dry soil + Container (g)	650.86	650.86	653.53	653.53
5	Weight of container (g)	600.86	600.86	603.38	603.38
6	Weight of dry soil, W_s (g)	50.00	50.00	50.15	50.15
7	Specific Gravity of Water at t $^{\circ}$C , G_T	0.9956	0.9967	0.9956	0.9967
8	Specific Gravity of Soil	2.593	2.623	2.624	2.649
ค่าเฉลี่ย G_s สำหรับแต่ละขวดแก้ว		2.608		2.636	
ค่าเฉลี่ย G_s		**2.622**			

หมายเหตุ : ค่าความถ่วงจำเพาะคำนวณจากสมการ 2.6

$$G_s = \frac{W_s \times G_T}{(W_2 + W_s) - W_1}$$

โดยที่ W_s = น้ำหนักตัวอย่างดินที่ทดลองอบแห้ง, g

W_2 = น้ำหนักขวด + น้ำที่อุณหภูมิทดสอบ (อ่านค่าจากโค้งสอบเทียบที่อุณหภูมิทดสอบ), g

W_1 = น้ำหนักขวดแก้ว + น้ำ + ดิน ที่ทำการทดสอบ, g

G_T = องค์ประกอบแก้ปรับค่าอุณหภูมิที่ทำการทดลองจาก 4°C

ตารางที่ 5 ค ผลการทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของตัวอย่างดินพื้นที่

เบอร์ขวดแก้ว		1		2	
1	Temperature , T ($^{\circ}$C)	28.00	24.00	27.00	27.00
2	Weight of flask + water + soil , W_1 (g)	683.75	684.17	686.70	687.43
3	Weight of flask + water (From Calib.) , W_2 (g)	656.25	656.33	658.90	658.90
4	Weight of dry soil + Container (g)	660.45	663.84	660.03	664.27
5	Weight of container (g)	616.14	619.02	615.10	618.46
6	Weight of dry soil, W_s (g)	44.31	44.82	44.93	45.81
7	Specific Gravity of Water at t $^{\circ}$C , G_T	0.9963	0.9973	0.9965	0.9965
8	Specific Gravity of Soil	2.626	2.632	2.614	2.642
ค่าเฉลี่ย G_s สำหรับแต่ละขวดแก้ว		2.629		2.628	
ค่าเฉลี่ย G_s		**2.629**			

หมายเหตุ : ค่าความถ่วงจำเพาะคำนวณจากสมการ 2.6

$$G_s = \frac{W_s \times G_T}{(W_2 + W_s) - W_1}$$

โดยที่ W_s = น้ำหนักตัวอย่างดินที่ทดลองอบแห้ง, g

W_2 = น้ำหนักขวด + น้ำที่อุณหภูมิทดสอบ (อ่านค่าจากโค้งสอบเทียบที่อุณหภูมิทดสอบ), g

W_1 = น้ำหนักขวดแก้ว + น้ำ + ดิน ที่ทำการทดสอบ, g

G_T = องค์ประกอบแก้ปรับค่าอุณหภูมิที่ทำการทดลองจาก 4°C

ตารางที่ 6 ค ผลการทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของตัวอย่างดินทรายหยาบ + ดินเหนียว

เบอร์ขวดแก้ว		1		2	
1	Temperature , T (^{o}C)	29.00	21.00	30.00	21.00
2	Weight of flask + water + soil , W_1 (g)	687.81	688.69	685.58	686.88
3	Weight of flask + water (From Calib.) , W_2 (g)	656.10	657.14	658.45	659.60
4	Weight of dry soil + Container (g)	656.98	656.98	670.57	670.57
5	Weight of container (g)	606.20	606.20	626.87	626.87
6	Weight of dry soil, W_s (g)	50.78	50.78	43.70	43.70
7	Specific Gravity of Water at t ^{o}C , G_T	0.9960	0.9980	0.9957	0.9980
8	Specific Gravity of Soil	2.652	2.635	2.626	2.656
ค่าเฉลี่ย G_s สำหรับแต่ละขวดแก้ว		2.644		2.641	
ค่าเฉลี่ย G_s		**2.642**			

หมายเหตุ : ค่าความถ่วงจำเพาะคำนวณจากสมการ 2.6

$$G_s = \frac{W_s \times G_T}{(W_2 + W_s) - W_1}$$

โดยที่ W_s = น้ำหนักตัวอย่างดินที่ทดลองอบแห้ง, g

W_2 = น้ำหนักขวด + น้ำที่อุณหภูมิทดสอบ (อ่านค่าจากโค้งสอบเทียบที่อุณหภูมิทดสอบ), g

W_1 = น้ำหนักขวดแก้ว + น้ำ + ดิน ที่ทำการทดสอบ, g

G_T = องค์ประกอบแก้ปรับค่าอุณหภูมิที่ทำการทดลองจาก 4^{o}C

ตารางที่ 7 ค ผลการทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของตัวอย่างดินทรายคละ + ดินเหนียว

เบอร์ขวดแก้ว		1		2	
1	Temperature , T (°C)	32.00	26.50	27.00	23.00
2	Weight of flask + water + soil , W_1 (g)	686.99	687.75	686.98	687.71
3	Weight of flask + water (From Calib.) , W_2 (g)	655.58	656.45	658.59	659.40
4	Weight of dry soil + Container (g)	670.02	670.02	661.97	661.97
5	Weight of container (g)	619.88	619.88	616.58	616.58
6	Weight of dry soil, W_s (g)	50.14	50.14	45.39	45.39
7	Specific Gravity of Water at t °C , G_T	0.9951	0.9967	0.9965	0.9976
8	Specific Gravity of Soil	2.664	2.653	2.661	2.651
ค่าเฉลี่ย G_s สำหรับแต่ละขวดแก้ว		2.658		2.656	
ค่าเฉลี่ย G_s		**2.657**			

หมายเหตุ : ค่าความถ่วงจำเพาะคำนวณจากสมการ 2.6

$$G_s = \frac{W_s \times G_T}{(W_2 + W_s) - W_1}$$

โดยที่ W_s = น้ำหนักตัวอย่างดินที่ทดลองอบแห้ง, g

W_2 = น้ำหนักขวด + น้ำที่อุณหภูมิทดสอบ (อ่านค่าจากโค้งสอบเทียบที่อุณหภูมิทดสอบ), g

W_1 = น้ำหนักขวดแก้ว + น้ำ + ดิน ที่ทำการทดสอบ, g

G_T = องค์ประกอบแก้ปรับค่าอุณหภูมิที่ทำการทดลองจาก 4°C

ตารางที่ 8 ค ผลการทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของตัวอย่างดินทรายละเอียด + ดินเหนียว

เบอร์ขวดแก้ว		1		2	
1	Temperature , T ($^{\circ}$C)	34.00	27.00	29.00	23.00
2	Weight of flask + water + soil , W_1 (g)	688.35	689.42	688.77	689.75
3	Weight of flask + water (From Calib.) , W_2 (g)	655.20	656.40	658.60	659.40
4	Weight of dry soil + Container (g)	673.82	673.82	674.33	674.33
5	Weight of container (g)	621.27	621.27	626.18	626.18
6	Weight of dry soil, W_s (g)	52.55	52.55	48.15	48.15
7	Specific Gravity of Water at t $^{\circ}$C , G_T	0.9944	0.9965	0.9960	0.9976
8	Specific Gravity of Soil	2.694	2.681	2.667	2.699
ค่าเฉลี่ย G_s สำหรับแต่ละขวดแก้ว		2.687		2.683	
ค่าเฉลี่ย G_s		**2.685**			

หมายเหตุ : ค่าความถ่วงจำเพาะคำนวณจากสมการ 2.6

$$G_s = \frac{W_s \times G_T}{(W_2 + W_s) - W_1}$$

โดยที่ W_s = น้ำหนักตัวอย่างดินที่ทดลองอบแห้ง, g

W_2 = น้ำหนักขวด + น้ำที่อุณหภูมิทดสอบ (อ่านค่าจากโค้งสอบเทียบที่อุณหภูมิทดสอบ), g

W_1 = น้ำหนักขวดแก้ว + น้ำ + ดิน ที่ทำการทดสอบ, g

G_T = องค์ประกอบแก้ปรับค่าอุณหภูมิที่ทำการทดลองจาก 4°C

ตารางที่ 9 ค ผลการทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของตัวอย่างดินเหนียว

เบอร์ขวดแก้ว		1		2	
1	Temperature , T (^{o}C)	31.00	26.00	32.00	25.50
2	Weight of flask + water + soil , W_1 (g)	684.93	685.45	687.07	688.16
3	Weight of flask + water (From Calib.) , W_2 (g)	655.75	656.53	658.10	659.10
4	Weight of dry soil + Container (g)	644.40	644.40	649.16	649.16
5	Weight of container (g)	598.35	598.35	603.38	603.38
6	Weight of dry soil, W_s (g)	46.05	46.05	45.78	45.78
7	Specific Gravity of Water at t ^{o}C , G_T	0.9954	0.9968	0.9951	0.997
8	Specific Gravity of Soil	2.717	2.680	2.710	2.730
ค่าเฉลี่ย G_s สำหรับแต่ละขวดแก้ว		2.698		2.720	
ค่าเฉลี่ย G_s		**2.709**			

หมายเหตุ : ค่าความถ่วงจำเพาะคำนวณจากสมการ 2.6

$$G_s = \frac{W_s \times G_T}{(W_2 + W_s) - W_1}$$

โดยที่ W_s = น้ำหนักตัวอย่างดินที่ทดลองอบแห้ง, g

W_2 = น้ำหนักขวด + น้ำที่อุณหภูมิทดสอบ (อ่านค่าจากโค้งสอบเทียบที่อุณหภูมิทดสอบ), g

W_1 = น้ำหนักขวดแก้ว + น้ำ + ดิน ที่ทำการทดสอบ, g

G_T = องค์ประกอบแก้ปรับค่าอุณหภูมิที่ทำการทดลองจาก 4^{o}C

ภาคผนวก ง
ข้อมูลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

ตารางที่ 1 ง ผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของตัวอย่างดิน

ชนิดของดิน ค่าตัวแปร	ดินทราย หยาบ	ดินทราย คละ	ดินทราย ละเอียด	ดินพื้นที่	ดินทราย หยาบ + ดิน เหนียว	ดินทราย คละ + ดิน เหนียว	ดินทราย ละเอียด + ดิน เหนียว	ดิน เหนียว
h_0 , cm	149.44	149.62	148.12	144.59	149.69	149.24	148.50	142.81
h_1 , cm	62.03	59.62	58.12	112.79	120.69	120.04	129.24	127.47
$\log\frac{h_0}{h_1}$	0.38	0.40	0.41	0.11	0.09	0.09	0.06	0.05
Δt , s	4.76	19.28	39.55	222.19	775.96	1057.49	1109.18	2465.07
K_T , cm/s	4.39E-04	1.14E-04	5.63E-05	2.67E-06	6.62E-07	4.90E-07	3.00E-07	1.10E-07

หมายเหตุ : ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคำนวณจากสมการ 2.11

$$K_t = \frac{2.3a \cdot L}{60A \cdot (\Delta t)} \log \frac{h_0}{h_1}$$

โดยที่ a = พื้นที่หน้าตัดหลอดวัดน้ำ, cm^2 (0.385 cm^2)

L = ความยาวของตัวอย่างดินในกระบอก, cm (20 cm)

A = พื้นที่หน้าตัดของกระบอกตัวอย่างดิน, cm^2 (53.85 cm^2)

Δt = เวลาที่ทำการทดลองปล่อยให้ระดับน้ำตกจาก ระดับ h_0 ถึง h_1 , s

h_0 = ระยะจากผิวน้ำท้ายน้ำข้างล่างถึงระดับเริ่มทดลอง, cm

h_1 = ระยะจากผิวท้ายน้ำข้างล่างถึงระดับเสร็จการทดลอง,cm

ภาคผนวก จ

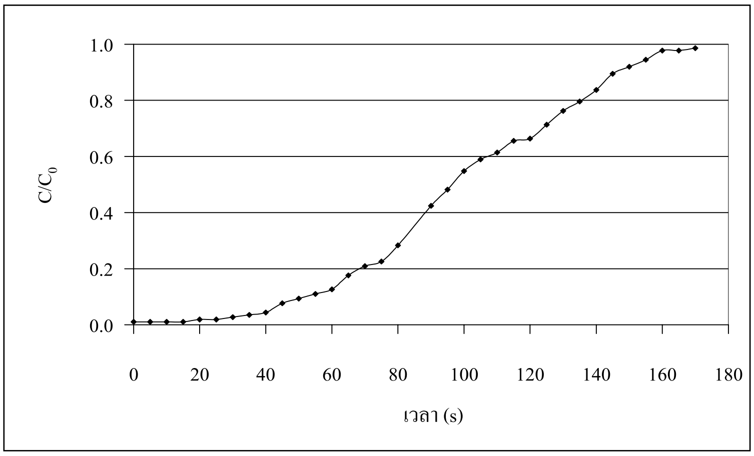
ผลการศึกษาสารติดตามเพื่อหาระยะเวลาเก็บกักของตัวอย่างดิน

ตารางที่ 1 จ ผลการศึกษาสารติดตามเพื่อหาระยะเวลาเก็บกัก สำหรับตัวอย่างดินทรายหยาบ

เวลา (s)	ความเข้มข้น NaCl (mg/L)	C_{eff} / C_0	เวลา (s)	ความเข้มข้น NaCl	C_{eff} / C_0
0	10.72	0.01	90	423.09	0.42
5	10.72	0.01	95	480.83	0.48
10	10.72	0.01	100	546.81	0.55
15	10.72	0.01	105	588.04	0.59
20	18.97	0.02	110	612.78	0.61
25	18.97	0.02	115	654.02	0.66
30	27.22	0.03	120	662.27	0.66
35	35.46	0.04	125	711.75	0.71
40	43.71	0.04	130	761.24	0.76
45	76.70	0.08	135	794.23	0.80
50	93.20	0.09	140	835.47	0.84
55	109.69	0.11	145	893.20	0.90
60	126.19	0.13	150	917.94	0.92
65	175.67	0.18	155	942.68	0.94
70	208.66	0.21	160	975.67	0.98
75	225.16	0.23	165	975.67	0.98
80	282.89	0.28	170	983.92	0.99

หมายเหตุ : C_0 คือความเข้มข้นเริ่มต้นของ NaCl = 997.94 mg/L

C_{eff} คือความเข้นข้น NaCl ที่ออกจากระบบ



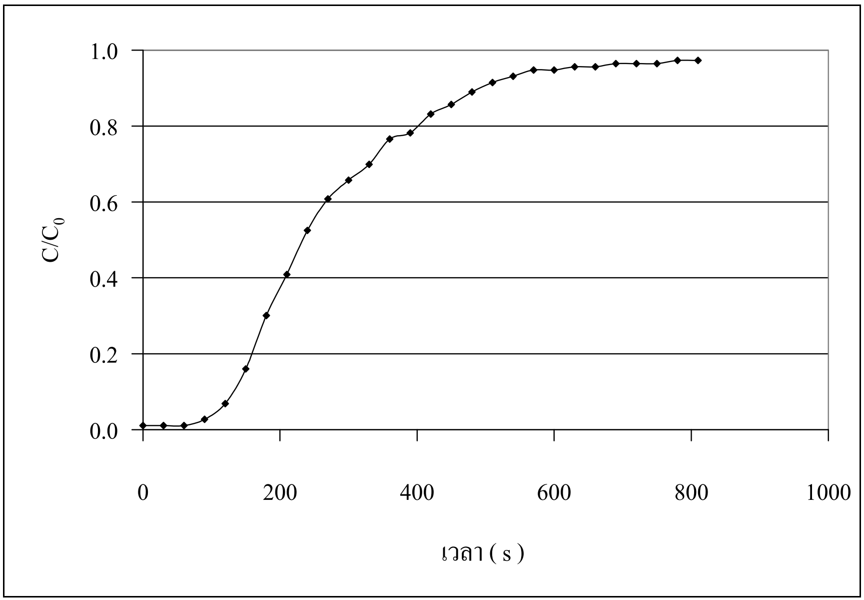
รูปที่ 1 จ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น NaCl กับเวลาของการศึกษาสารติดตาม สำหรับตัวอย่างดินทรายหยาบ (Q = 7.978 cm^3/s)

ตารางที่ 2 จ ผลการศึกษาสารติดตามเพื่อหาระยะเวลาเก็บกัก สำหรับตัวอย่างดินทรายคละ

เวลา (s)	ความเข้มข้น NaCl (mg/L)	C_{eff}/C_0	เวลา (s)	ความเข้มข้น NaCl	C_{eff}/C_0
0	10.72	0.01	420	827.22	0.83
30	10.72	0.01	450	851.96	0.86
60	10.72	0.01	480	884.95	0.89
90	27.22	0.03	510	909.69	0.91
120	68.45	0.07	540	926.19	0.93
150	159.18	0.16	570	942.68	0.95
180	299.38	0.30	600	942.68	0.95
210	406.60	0.41	630	950.93	0.96
240	522.06	0.52	660	950.93	0.96
270	604.54	0.61	690	959.18	0.96
300	654.02	0.66	720	959.18	0.96
330	695.26	0.70	750	959.18	0.96
360	761.24	0.77	780	967.43	0.97
390	777.73	0.78	810	967.43	0.97

หมายเหตุ : C_0 คือความเข้มข้นเริ่มต้นของ NaCl = 994.64 mg/L

C_{eff} คือความเข้นข้น NaCl ที่ออกจากระบบ



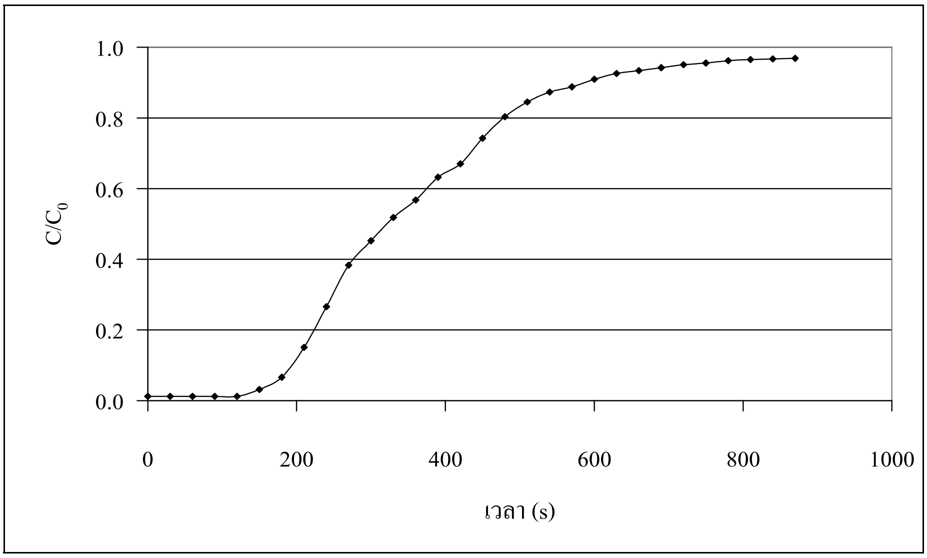
รูปที่ 2 จ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น NaCl กับเวลาของการศึกษาสารติดตาม สำหรับตัวอย่างดินทรายคละ (Q= 1.861 cm^3/s)

ตารางที่ 3 จ ผลการศึกษาสารติดตามเพื่อหาระยะเวลาเก็บกัก สำหรับตัวอย่างดินทรายละเอียด

เวลา (s)	ความเข้มข้น NaCl (mg/L)	C_{eff} / C_0	เวลา (s)	ความเข้มข้น NaCl	C_{eff} / C_0
0	12.04	0.01	450	742.76	0.74
30	12.04	0.01	480	803.80	0.80
60	12.04	0.01	510	845.03	0.85
90	12.04	0.01	540	873.07	0.87
120	12.04	0.01	570	887.92	0.89
150	31.84	0.03	600	909.36	0.91
180	66.47	0.07	630	925.86	0.93
210	150.60	0.15	660	934.11	0.93
240	266.06	0.27	690	942.35	0.94
270	383.18	0.38	720	950.60	0.95
300	452.45	0.45	750	955.55	0.96
330	518.43	0.52	780	962.15	0.96
360	567.92	0.57	810	965.45	0.97
390	632.25	0.63	840	967.10	0.97
420	670.19	0.67	870	968.74	0.97

หมายเหตุ : C_0 คือความเข้มข้นเริ่มต้นของ NaCl = 1000.08 mg/L

C_{eff} คือความเข้นข้น NaCl ที่ออกจากระบบ



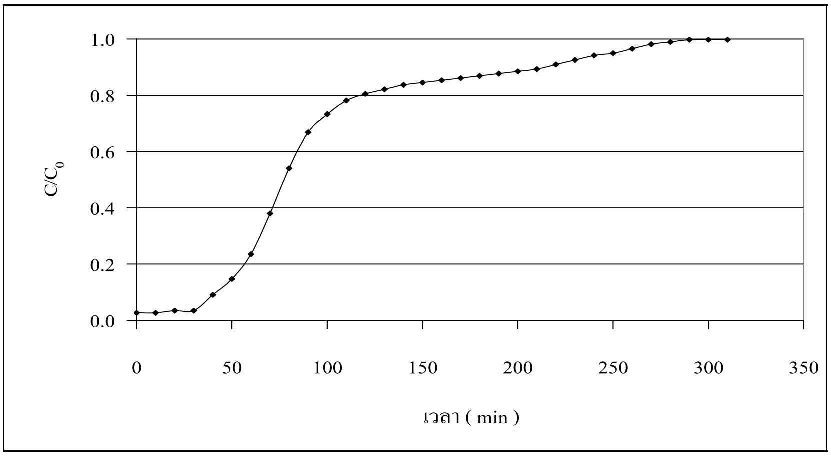
รูปที่ 3 จ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น NaCl กับเวลาของการศึกษาสารติดตาม สำหรับตัวอย่างดินทรายละเอียด(Q = 0.876 cm^3/s)

ตารางที่ 4 จ ผลการศึกษาสารติดตามเพื่อหาระยะเวลาเก็บกัก สำหรับตัวอย่างดินพื้นที่

เวลา (min)	ความเข้มข้น NaCl (mg/L)	C_{eff} / C_0	เวลา (min)	ความเข้มข้น NaCl (mg/L)	C_{eff} / C_0
0	27.22	0.03	160	876.70	0.85
10	27.22	0.03	170	884.95	0.86
20	35.46	0.03	180	893.20	0.87
30	35.46	0.03	190	901.45	0.88
40	93.20	0.09	200	909.69	0.89
50	150.93	0.15	210	917.94	0.89
60	241.65	0.24	220	934.44	0.91
70	390.10	0.38	230	950.93	0.93
80	555.05	0.54	240	967.43	0.94
90	687.01	0.67	250	975.67	0.95
100	752.99	0.73	260	992.17	0.97
110	802.48	0.78	270	1008.66	0.98
120	827.22	0.80	280	1016.91	0.99
130	843.71	0.82	290	1025.16	1.00
140	860.21	0.84	300	1025.16	1.00
150	868.46	0.85	310	1025.16	1.00

หมายเหตุ : C_0 คือความเข้มข้นเริ่มต้นของ NaCl = 1027.63 mg/L

C_{eff} คือความเข้นข้น NaCl ที่ออกจากระบบ



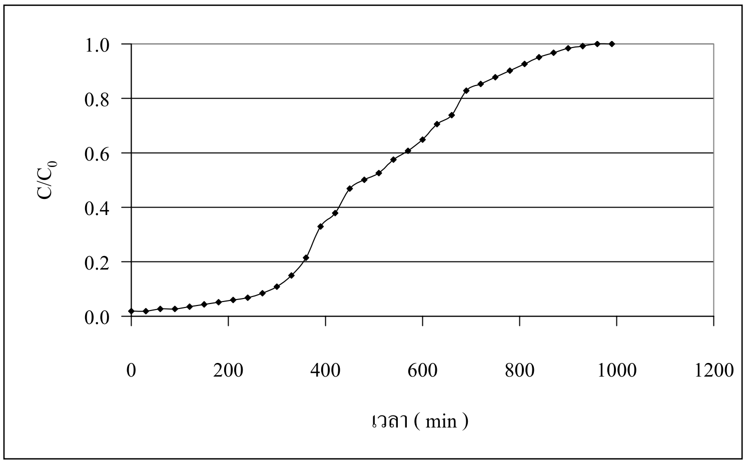
รูปที่ 4 จ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ NaCl กับเวลาของการศึกษาสารติดตาม สำหรับตัวอย่างดินพื้นที่ (Q = 0.055 cm^3/s)

ตารางที่ 5 จ ผลการศึกษาสารติดตามเพื่อหาระยะเวลาเก็บกัก สำหรับตัวอย่างดินทรายหยาบ + ดินเหนียว

เวลา (min)	ความเข้มข้น NaCl (mg/L)	C_{eff} / C_0	เวลา (min)	ความเข้มข้น NaCl (mg/L)	C_{eff} / C_0
0	18.97	0.02	510	530.31	0.53
30	18.97	0.02	540	579.80	0.57
60	27.22	0.03	570	612.78	0.61
90	27.22	0.03	600	654.02	0.65
120	35.46	0.04	630	711.75	0.71
150	43.71	0.04	660	744.74	0.74
180	51.96	0.05	690	835.47	0.83
210	60.21	0.06	720	860.21	0.85
240	68.45	0.07	750	884.95	0.88
270	84.95	0.08	780	909.69	0.90
300	109.69	0.11	810	934.44	0.93
330	150.93	0.15	840	959.18	0.95
360	216.91	0.22	870	975.67	0.97
390	332.37	0.33	900	992.17	0.98
420	381.86	0.38	930	1000.41	0.99
450	472.58	0.47	960	1008.66	1.00
480	505.57	0.50	990	1008.66	1.00

หมายเหตุ : C_0 คือความเข้มข้นเริ่มต้นของ NaCl = 1008.66 mg/L

C_{eff} คือความเข้นข้น NaCl ที่ออกจากระบบ



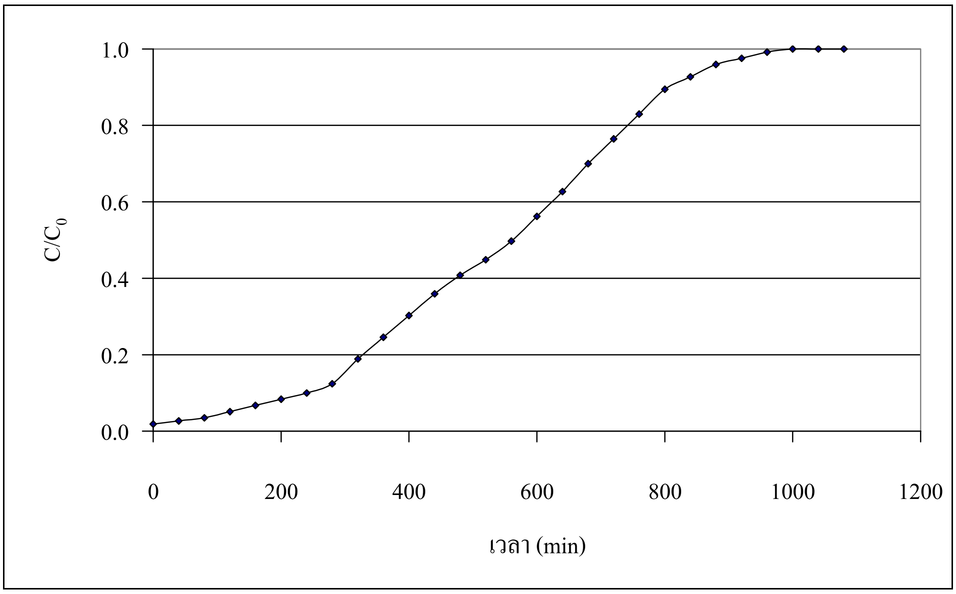
รูปที่ 5 จ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ NaCl กับเวลาของกาเศึกษาสารติดตาม สำหรับตัวอย่างดินทรายหยาบ+ดินเหนียว (Q = 0.015 cm^3/s)

ตารางที่ 6 จ ผลการศึกษาสารติดตามเพื่อหาระยะเวลาเก็บกัก สำหรับตัวอย่างดินทรายคละ + ดินเหนียว

เวลา (min)	ความเข้มข้น NaCl (mg/L)	C_{eff}/C_0	เวลา (min)	ความเข้มข้น NaCl (mg/L)	C_{eff}/C_0
0	18.97	0.02	560	505.57	0.50
40	27.22	0.03	600	571.55	0.56
80	35.46	0.03	640	637.53	0.63
120	51.96	0.05	680	711.75	0.70
160	68.45	0.07	720	777.73	0.76
200	84.95	0.08	760	843.71	0.83
240	101.44	0.10	800	909.69	0.89
280	126.19	0.12	840	942.68	0.93
320	192.17	0.19	880	975.67	0.96
360	249.90	0.25	920	992.17	0.98
400	307.63	0.30	960	1008.66	0.99
440	365.36	0.36	1000	1016.91	1.00
480	414.85	0.41	1040	1016.91	1.00
520	456.08	0.45	1080	1016.91	1.00

หมายเหตุ : C_0 คือความเข้มข้นเริ่มต้นของ NaCl = 1016.91 mg/L

C_{eff} คือความเข้มข้น NaCl ที่ออกจากระบบ



รูปที่ 6 จ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ NaCl ของการศึกษาสารติดตาม

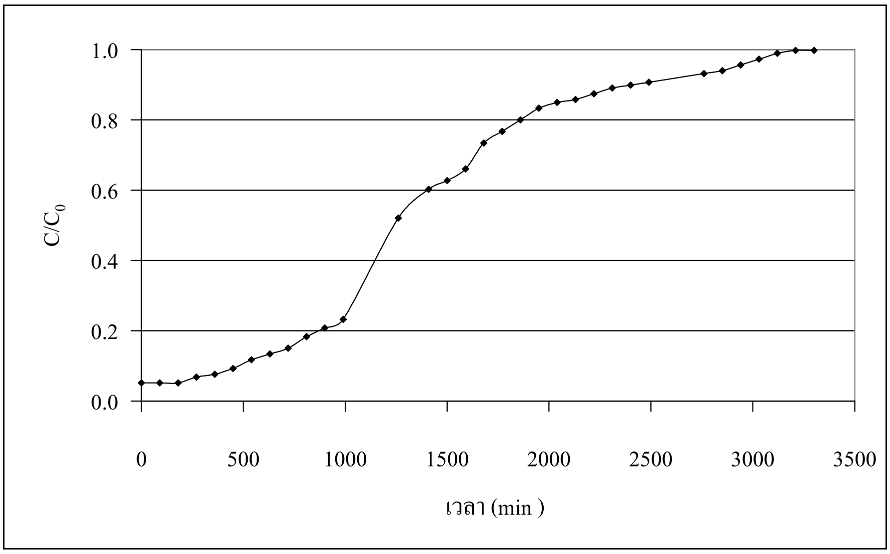
สำหรับตัวอย่างดินทรายคละ + ดินเหนียว (Q = 0.011 cm^3/s)

ตารางที่ 7 จ ผลการศึกษาสารติดตามเพื่อหาระยะเวลาเก็บกัก สำหรับตัวอย่างดินทรายละเอียด + ดินเหนียว

เวลา (min)	ความเข้มข้น NaCl (mg/L)	C_{eff} / C_0	เวลา (min)	ความเข้มข้น NaCl (mg/L)	C_{eff} / C_0
0	51.96	0.05	1770	769.49	0.77
90	51.96	0.05	1860	802.48	0.80
180	51.96	0.05	1950	835.47	0.83
270	68.45	0.07	2040	851.96	0.85
360	76.70	0.08	2130	860.21	0.86
450	93.20	0.09	2220	876.70	0.87
540	117.94	0.12	2310	893.20	0.89
630	134.43	0.13	2400	901.45	0.90
720	150.93	0.15	2490	909.69	0.91
810	183.92	0.18	2760	934.44	0.93
900	208.66	0.21	2850	942.68	0.94
990	233.40	0.23	2940	959.18	0.96
1260	522.06	0.52	3030	975.67	0.97
1410	604.54	0.60	3120	992.17	0.99
1500	629.28	0.63	3210	1000.41	1.00

หมายเหตุ : C_0 คือความเข้มข้นเริ่มต้นของ NaCl = 1002.89 mg/L

C_{eff} คือความเข้นข้น NaCl ที่ออกจากระบบ



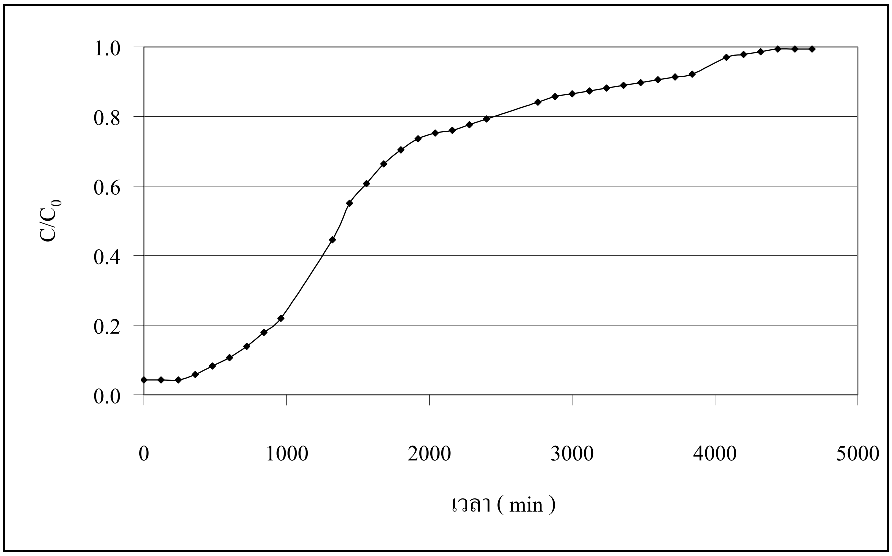
รูปที่ 7 จ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ NaCl กับเวลาของการศึกษาสารติดตาม สำหรับตัวอย่างดินทรายละเอียด+ดินเหนียว (Q = 0.007 cm^3/s)

ตารางที่ 8 จ ผลการศึกษาสารติดตามเพื่อหาระยะเวลาเก็บกัก สำหรับตัวอย่างดินเหนียว

เวลา (min)	ความเข้มข้น NaCl (mg/L)	C_{eff} / C_0	เวลา (min)	ความเข้มข้น NaCl (mg/L)	C_{eff} / C_0
0	43.71	0.04	2280	794.23	0.78
120	43.71	0.04	2400	810.72	0.79
240	43.71	0.04	2760	860.21	0.84
360	60.21	0.06	2880	876.70	0.86
480	84.95	0.08	3000	884.95	0.87
600	109.69	0.11	3120	893.20	0.87
720	142.68	0.14	3240	901.45	0.88
840	183.92	0.18	3360	909.69	0.89
960	225.16	0.22	3480	917.94	0.90
1320	456.08	0.45	3600	926.19	0.91
1440	563.30	0.55	3720	934.44	0.91
1560	621.03	0.61	3840	942.68	0.92
1680	678.76	0.66	4080	992.17	0.97
1800	720.00	0.70	4200	1000.41	0.98
1920	752.99	0.74	4320	1008.66	0.99

หมายเหตุ : C_0 คือความเข้มข้นเริ่มต้นของ NaCl = 1022.68 mg/L

C_{eff} คือความเข้นข้น NaCl ที่ออกจากระบบ



รูปที่ 8 จ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ NaCl กับเวลาของการศึกษาสารติดตาม สำหรับตัวอย่างดินเหนียว (Q = 0.002 cm^3/s)

ภาคผนวก ฉ
ผลการวิเคราะห์คุณภาพและประสิทธิภาพการกำจัดน้ำทิ้งของดิน

ตารางที่ 1 ฉ ค่าตัวแปรของการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษของดินชนิดต่าง ๆ

ตัวแปร		ชนิดของดิน							
		ทราย หยาบ	ทราย คละ	ทราย ละเอียด	ดิน พื้นที่	ทราย หยาบ + ดิน เหนียว	ทราย คละ + ดิน เหนียว	ทราย ละเอียด + ดิน เหนียว	ดิน เหนียว
อัตราการไหล (cm^3/s)		7.978	1.861	0.876	0.055	0.015	0.011	0.007	0.002
COD	C_0 (mg/L)	296.31	329.11	474.96	662.39	685.86	389.10	420.92	306.10
	C_{eff} (mg/L)	160.95	135.68	109.01	108.83	82.30	38.37	30.18	11.03
	%Removal	45.68	58.77	77.05	83.57	88.00	90.14	92.83	96.40
TS	C_0 (mg/L)	567.56	536.44	690.67	724.44	517.33	715.56	496	508.00
	C_{eff} (mg/L)	468.00	407.11	456.89	372.89	228.00	238.22	141.33	128.44
	%Removal	17.54	24.11	33.85	48.53	55.93	66.71	71.51	74.72
TSS	C_0 (mg/L)	84.00	87.56	178.44	243.56	131.11	284.89	116.44	88.44
	C_{eff} (mg/L)	35.11	30.67	45.73	48.89	23.56	44.89	14.67	7.62
	%Removal	58.20	64.97	74.37	79.93	82.03	84.24	87.40	91.39
TDS	C_0 (mg/L)	483.56	448.89	512.22	480.89	386.22	430.67	379.56	419.56
	C_{eff} (mg/L)	432.89	376.44	411.16	324.00	204.44	193.33	126.67	120.83
	%Removal	10.48	16.14	19.73	32.62	47.07	55.11	66.63	71.20
Tur.	C_0 (mg/L)	85.02	82.66	97.42	119.70	82.54	105.64	55.29	48.69
	C_{eff} (mg/L)	11.73	7.91	3.88	3.66	1.44	0.57	0.28	0.16
	%Removal	86.20	90.44	96.02	96.94	98.25	99.46	99.49	99.68
TC	C_0 (mg/L)	1.73E+08	1.74E+08	1.82E+08	1.57E+08	1.73E+08	1.82E+08	1.86E+08	2.04E+08
	C_{eff} (mg/L)	1.60E+08	1.32E+08	1.16E+08	9.38E+06	1.92E+07	1.07E+07	9.19E+06	2.94E+06
	%Removal	7.51	24.14	36.26	94.03	88.90	94.12	95.06	98.56
FC	C_0 (mg/L)	7.57E+06	6.02E+06	5.70E+06	5.64E+06	7.19E+06	7.10E+06	5.60E+06	6.02E+06
	C_{eff} (mg/L)	6.99E+06	4.38E+06	3.52E+06	1.15E+05	7.07E+05	2.14E+05	5.63E+04	73.10
	%Removal	7.66	27.24	38.25	97.96	90.17	96.99	98.99	99.99

ตารางที่ 2 ฉ ผลการทดสอบทางสถิติ One – Sample Test

พารามิเตอร์	t	df	Sig.(2-tailed)
COD(mg/L)	8.465	8	0.000
TS(mg/L)	5.490	8	0.001
TSS(mg/L)	10.760	8	0.000
TDS(mg/L)	4.382	8	0.002
Turbidity(NTU)	16.552	8	0.000
Total Coliforms (No./100mL)	4.396	8	0.002
Fecal Coliforms	4.423	8	0.002
(No./100mL)			

ภาคผนวก ช

ผลการทดสอบทางสถิติ

(Correlation)

ตารางที่ 1 ช ผลการทดสอบทางสถิติ Paired Samples Correlations

พารามิเตอร์	N	Correlation	Sig.
Pair 1 COD (mg/L) & total coliforms (No./100 mL)	8	0.914	0.001
Pair 1 COD (mg/L) & fetal coliforms (No./100 mL)	8	0.919	0

ประวัติผู้เขียน

นางสาวนันทณัฐ ศรีไพรวรรณ เกิดเมื่อวันที่ 23 ธันวาคม พ.ศ. 2522 เริ่มเข้าศึกษาในระดับปริญญาตรี ในสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2540 และสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2543 ภายหลังจากสำเร็จการศึกษาจึงได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ในสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2544