วิทยานิพนธ์

ผลของความหนาชั้นวัสดุและรูปแบบการป้อนน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยระบบดินและหินเรียงเป็นชั้น

EFFECTS OF MATERIAL DEPTHS AND HYDRAULIC APPLICATION PATTERNS ON TREATMENT EFFICIENCY OF LEACHATE BY ROCK-SOIL LAYERING SYSTEM

นายเอนกประชา แก้วมณี

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2549

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
สาขา	**ภาควิชา**

เรื่อง ผลของความหนาชั้นวัสดุและรูปแบบการป้อนน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยระบบดินและหินเรียงเป็นชั้น

Effects of Material Depths and Hydraulic Application Patterns on Treatment Efficiency of Leachate by Rock-Soil Layering System

นามผู้วิจัย นายเอนกประชา แก้วมณี

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิไล เจียมไชยศรี, D.Tech.Sc.)

กรรมการ .....

(รองศาสตราจารย์ชาติ เจียมไชยศรี, D.Eng.)

กรรมการ .....

(รองศาสตราจารย์เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา .....

(อาจารย์มงคล ดำรงค์ศรี, Dr.Ing.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....

(รองศาสตราจารย์วินัย อาจคงหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่..... **เดือน**..... **พ.ศ.**.....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ผลของความหนาชั้นวัสดุและรูปแบบการป้อนน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยระบบดินและหินเรียงเป็นชั้น

Effects of Material Depths and Hydraulic Application Patterns on Treatment Efficiency of Leachate by Rock-Soil Layering System

โดย

นายเอนกประชา แก้วมณี

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)
พ.ศ. 2549

ISBN 974-16-2933-8

เอนกประชา แก้วมณี 2549: ผลของความหนาชั้นวัสดุและรูปแบบการป้อนน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยระบบดินและหินเรียงเป็นชั้น ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ประธานกรรมการที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิไล เจียมไชยศรี, D.Tech.Sc. 151 หน้า
ISBN 974-16-2933-8

ในการศึกษานี้ได้จำลองระบบดินและหินเรียงเป็นชั้น ที่ประกอบด้วย หินปูน ทราย ดินเหนียว และดินเหนียวปนตะกอน เรียงกันในคอลัมน์จากด้านบนลงล่างตามลำดับ เพื่อใช้ในการบำบัดน้ำชะมูลฝอยที่มีสารอินทรีย์ในรูป บีโอดี และซีโอดี ในช่วง 1,500-2,016 และ 5,011-7,238 มก./ล.ตามลำดับ สารประกอบไนโตรเจนในรูปอินทรีย์ไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจน ในช่วง 41-127 และ 244-392 มก./ล.ตามลำดับ ทำการทดลองต่อเนื่องเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบที่แปรผันความหนาของชั้นวัสดุแต่ละชั้น เท่ากับ 10 20 30 ซม.โดยมีการควบคุมภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ เท่ากับ 5 ซม./วัน และเปลี่ยนรูปแบบการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบสามรูปแบบ คือ ทุกวัน (5 ซม./วัน) ทุกสองวัน (10 ซม./2วัน) และทุกสามวัน (15 ซม./3วัน) นอกจากนี้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์และสารประกอบไนโตรเจน และหาค่าคงที่ของปริมาณสารอาหารที่ทำให้อัตราการย่อยสลายเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราการย่อยสลายสูงสุด (K_s) ในชั้นวัสดุต่างๆผ่านการทดลองแบบกะ

จากผลการทดลอง พบว่า การดูดซับมลสารไม่ใช่กลไกหลักที่เกิดขึ้นในระบบ การเดินระบบต่อเนื่องในการบำบัดน้ำชะมูลฝอย พบว่า ทั้งความหนาของชั้นวัสดุและรูปแบบการป้อนน้ำเสียมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ คือ ประสิทธิภาพแปรผันโดยตรงกับความหนาที่เพิ่มขึ้นของชั้นวัสดุ โดยความหนาของแต่ละชั้นวัสดุ เท่ากับ 30 ซม.ให้ประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อป้อนน้ำเสียทุกสามวัน โดยให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูป บีโอดี และซีโอดี เฉลี่ยร้อยละ 74±3 และ 24±7 ตามลำดับ สารประกอบไนโตรเจนในรูปอินทรีย์ไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจน เฉลี่ยร้อยละ 57±4 และ 68±9 ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าการป้อนน้ำเสียที่มีการเว้นให้ชั้นวัสดุแห้งร่วมด้วยนั้นจะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพและเสถียรภาพดีขึ้นเนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่สามารถเข้าถึงชั้นที่ลึกมากขึ้น โดยมีการกำจัดสูงสุดในชั้นหินปูนและทรายทุกสภาวะการทดลอง จากการวิเคราะห์สมดุลมวล พบว่า ระบบมีการสะสมของสารอินทรีย์และไนโตรเจนทั้งหมดน้อยมาก โดยต่ำกว่า ร้อยละ 3.1 ในทุกสภาวะการทดลอง อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาค่าคงที่ (K_s) ในการย่อยสลายสารอินทรีย์และสารประกอบไนโตรเจนโดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในชั้นวัสดุหลังจากการทดลองแบบต่อเนื่อง พบว่า ชั้นวัสดุของแต่ละคอลัมน์ให้ค่าคงที่ K_s ไม่แตกต่างกัน การตรวจสอบหาสัดส่วนของจุลินทรีย์ชนิดไนตริไฟอิงต่อจุลินทรีย์ทั้งหมดโดยวิธีฟลูออเรสเซนต์อินสิทูไฮบริไดเซชั่น พบว่า ชั้นหินปูนและทรายมีสัดส่วนของจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญสอดคล้องกับประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบไนโตรเจน

_____ / ____ / ____

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่อประธานกรรมการ

Anekpracha Kaewmanee 2006: Effects of Material Depths and Hydraulic Application Patterns on Treatment Efficiency of Leachate by Rock-Soil Layering System. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Wilai Chiemchaisri, D.Tech.Sc. 151 pages.
ISBN 974-16-2933-8

This study aims to investigate the rock-soil layering system (RSLS) performance in treatment landfill leachate.Three soil columns were set-up by layering lime-stones, sand, clay and silty-clay from top down to the bottom.The leachate had BOD and COD concentrations of 1,500-2,016 and 5,011-7,238 mg/L, respectively. The organic and ammonia nitrogen concentrations in the leachate were 41-127 and 244-392 mg/L, respectively. The treatment efficiencies of the RSLS were compared when the depth of each material and hydraulic application pattern (HAP) were varied at 10, 20, 30 cm and 5 cm/d, 10 cm/2d, 15 cm/3d, respectively. In addition, the adsorption and biodegradation studies for organic and nitrogen compound of each material were carried out via batch experiments.

The results showed that the adsorption was not the major mechanism in removals of pollutants in leachate. The continuous study revealed that treatment efficiencies of the RSLS were increased as increase in material depths. The HAP of 15 cm/3d could increase treatment stabilities of all conditions. The highest BOD, COD removals were 74±3 %, and 24±7 %, respectively. For nitrogen, removals of 57±4 %, 68±9 % were found for organic nitrogen and ammonia nitrogen. The wet-dry conditions in HAP of 15 cm/3d could promote high DO in deeper soils especially in sandy soil. The highest removals of those pollutant were found at lime-stone and sand layers. In mass balance studies, few biomass in term of organic and nitrogen compounds (<3.1%) had accumulated in all materials. However, K_s (half-velocity constant) of all materials for organic and nitrogen compounds were insignificant different. The ratios of nitrifying bacteria to all microorganisms examined by fluorescence in-situ hybridization method had increased significantly in lime-stones and sandy soils which correlated with the nitrogen removal efficiencies of the RSLS.

_____ _____ ___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

กราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิไล เจียมไชยศรี ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้ช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนให้คำปรึกษาและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชาติ เจียมไชยศรี กรรมการที่ปรึกษาวิชาเอก และรองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ กรรมการที่ปรึกษาวิชารอง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรกฤษณ์ มหัจฉริยวงศ์ อาจารย์ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาแนะนำและช่วยเหลือในการกำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์และองค์กร SIDA ที่อนุเคราะห์ทุนวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ และคุณพรรณราย เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่กรุณาให้คำแนะนำเกี่ยวกับรายละเอียดเกี่ยวกับเครื่องมือและห้องปฏิบัติการ และขอบคุณคุณตุลา บัวบุญ คุณประพันธ์ เทพสง เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ที่ยังไม่ได้กล่าวถึง สำหรับการให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจ

คุณความดีและประโยชน์ทั้งหลายของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อ ด.ต.เสวียน และคุณแม่อาลัย แก้วมณี อันเป็นที่รักและเคารพสูงสุด รวมถึงน้องสาวซึ่งอยู่เบื้องหลังความสำเร็จครั้งนี้ตลอดมา

เอนกประชา แก้วมณี

ตุลาคม 2549

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์ และอักษรย่อ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
ขอบเขตการศึกษา	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
การตรวจเอกสาร	4
น้ำชะมูลฝอย	4
ดิน	15
ฟลูออเรสเซนต์อินสิทูไฮบริไดเซชัน	21
การดูดซับ	23
การกำจัดไนโตรเจน	28
อุปกรณ์และวิธีการ	34
อุปกรณ์	34
วิธีการ	40
ผลการทดลองและวิจารณ์	51
ความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์และไนโตรเจนในวัสดุต่างๆ	51
ศึกษาความหนาของชั้นวัสดุและรูปแบบการป้อนน้ำเสียที่มีผลต่อระบบดินและหินเรียงเป็นชั้นในการบำบัดน้ำชะมูลฝอย	57
ชั้นดินต่างกันและเมื่อแปรผันรูปแบบการป้อนน้ำเสีย	
การศึกษาอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอนและสารประกอบไนโตรเจน	74

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

สมดุลมวลสารอินทรีย์คาร์บอนและไนโตรเจนในระบบดินและหิน
เรียงเป็นชั้นก่อนสิ้นสุดการทดลอง 76
การทดสอบเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มไนตริไฟอิง 79
สรุปและข้อเสนอแนะ 81
สรุป 81
ข้อเสนอแนะ 83
เอกสารและสิ่งอ้างอิง 84
ภาคผนวก 89

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ส่วนประกอบมูลฝอยชุมชน กรุงเทพมหานคร	9
2	ลักษณะน้ำชะมูลฝอยหลุมฝังกลบอ่อนนุชตามฤดูกาล	10
3	ค่าความสามารถในการซึมผ่านของดินชนิดต่างๆ	17
4	ลักษณะสมบัติบางประการของวัสดุก่อนการทดลอง	36
5	องค์ประกอบมูลฝอยชุมชนแบบเปียก	37
6	ลักษณะของน้ำชะมูลฝอยชุมชน ที่เตรียมจากการหมักขยะมูลฝอย	38
7	สภาวะการทดลองที่แปรผันความหนาของวัสดุในการบำบัดน้ำชะมูลฝอย	41
8	รายละเอียดพารามิเตอร์และความถี่ในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ	41
9	ระยะเวลาสำหรับการทดลองแปรผันรูปแบบการป้อนน้ำเสียเข้าระบบที่สภาวะการทดลองต่างๆ	42
10	รายละเอียดการทดลองอัตราการย่อยสลายไนโตรเจนโดยเอโอบีและเอ็นโอบี	47
11	ลักษณะและคุณสมบัติของโพรบแต่ละชนิด	48
12	พารามิเตอร์วิเคราะห์ดินและน้ำในการทำสมดุลมวล	50
13	ค่าคงที่จากสมการแบบแลงเมียร์และฟรุนดิชอธิบายความสามารถในการดูดซับของวัสดุต่างๆ ต่อสารอินทรีย์คาร์บอนและสารประกอบไนโตรเจน	54

ตารางผนวกที่

ก1	คุณสมบัติของวัสดุบางประการก่อนและหลังการทดลอง	93
ก2	คุณสมบัติน้ำชะมูลฝอยก่อนเข้าสู่ระบบ	94
ก3	คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุก่อน-หลังการทดลอง	94
ข1	ข้อมูลผลการทดลองของซีโอดี คอลัมน์ ซี30	96
ข2	ข้อมูลผลการทดลองของซีโอดี คอลัมน์ ซี20	97
ข3	ข้อมูลผลการทดลองของซีโอดี คอลัมน์ ซี10	98
ข4	ข้อมูลผลการทดลองของบีโอดี คอลัมน์ ซี30	99

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ข5	ข้อมูลผลการทดลองของบีโอดี คอลัมน์ ซี20	100
ข6	ข้อมูลผลการทดลองของบีโอดี คอลัมน์ ซี10	101
ข7	ข้อมูลผลการทดลองของเจลดาร์ลไนโตรเจน คอลัมน์ ซี30	102
ข8	ข้อมูลผลการทดลองของ เจลดาร์ลไนโตรเจน คอลัมน์ ซี20	103
ข9	ข้อมูลผลการทดลองของ เจลดาร์ลไนโตรเจน คอลัมน์ ซี10	104
ข10	ข้อมูลผลการทดลองของอินทรีย์ไนโตรเจน คอลัมน์ ซี30	105
ข11	ข้อมูลผลการทดลองของแอมโมเนียไนโตรเจน คอลัมน์ ซี20	106
ข12	ข้อมูลผลการทดลองของอินทรีย์ไนโตรเจน คอลัมน์ ซี10	107
ข13	ข้อมูลผลการทดลองของแอมโมเนียไนโตรเจน คอลัมน์ ซี30	108
ข14	ข้อมูลผลการทดลองของแอมโมเนียไนโตรเจน คอลัมน์ ซี20	109
ข15	ข้อมูลผลการทดลองของแอมโมเนียไนโตรเจน คอลัมน์ ซี10	110
ข16	ข้อมูลผลการทดลองของไนไตรท์ไนโตรเจน คอลัมน์ ซี30	111
ข17	ข้อมูลผลการทดลองของไนไตรท์ไนโตรเจน คอลัมน์ ซี20	112
ข18	ข้อมูลผลการทดลองของไนไตรท์ไนโตรเจน คอลัมน์ ซี10	113
ข19	ข้อมูลผลการทดลองของไนเตรทไนโตรเจน คอลัมน์ ซี30	114
ข20	ข้อมูลผลการทดลองของไนเตรทไนโตรเจน คอลัมน์ ซี20	115
ข21	ข้อมูลผลการทดลองของ ไนเตรทไนโตรเจน คอลัมน์ ซี10	116
ข22	ข้อมูลผลการทดลองของฟอสฟอรัสทั้งหมด คอลัมน์ ซี30	117
ข23	ข้อมูลผลการทดลองของ ฟอสฟอรัสทั้งหมด คอลัมน์ ซี20	118
ข24	ข้อมูลผลการทดลองของ ฟอสฟอรัสทั้งหมด คอลัมน์ ซี10	119
ข25	ข้อมูลผลการทดลองของแข็งแขวนลอย คอลัมน์ ซี30	120
ข26	ข้อมูลผลการทดลอง ของแข็งแขวนลอย คอลัมน์ ซี20	121
ข27	ข้อมูลผลการทดลองของแข็งแขวนลอย คอลัมน์ ซี10	122
ข28	ข้อมูลผลการทดลองของพีเอช คอลัมน์ ซี30	123
ข29	ข้อมูลผลการทดลองของ พีเอช คอลัมน์ ซี20	124
ข30	ข้อมูลผลการทดลองของ พีเอช คอลัมน์ ซี10	125

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่ **หน้า**

ข31	ข้อมูลผลการทดลองของ ออกซิเจนละลาย คอลัมน์ ซี30	126
ข32	ข้อมูลผลการทดลองของ ออกซิเจนละลาย คอลัมน์ ซี20	127
ข33	ข้อมูลผลการทดลองของ ออกซิเจนละลาย คอลัมน์ ซี10	128
ค1	ข้อมูลผลการดูดซับของ สารอินทรีย์ทั้งหมด โดยวัสดุแต่ละชนิด	130
ค2	ข้อมูลผลการดูดซับของ แอมโมเนียไนโตรเจน โดยวัสดุแต่ละชนิด	132
ค3	ข้อมูลผลการดูดซับของอินทรีย์ไนโตรเจน โดยวัสดุแต่ละชนิด	134
ค4	ข้อมูลผลการดูดซับของ ไนไตรท์ไนโตรเจน โดยวัสดุแต่ละชนิด	136
ค5	ข้อมูลผลการดูดซับของ ไนเตรทไนโตรเจน โดยวัสดุแต่ละชนิด	138
ง1	ผลการทดลองสมดุลมวลสารอินทรีย์ทั้งหมดหลังสิ้นสุดการทดลอง	141
ง2	ผลการทดลองสมดุลมวลไนโตรเจนทั้งหมดหลังสิ้นสุดการทดลอง	142
จ1	ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนที่เหลือจากการย่อยสลาย โดย เฮทเทอโรโทรฟิค คอลัมน์ ซี10	144
จ2	ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนที่เหลือจากการย่อยสลาย โดย เฮทเทอโรโทรฟิค คอลัมน์ ซี30	145
จ3	ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนที่เหลือจากการย่อยสลาย โดย ไนโตรโซโมเนส คอลัมน์ ซี10	146
จ4	ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนที่เหลือจากการย่อยสลาย โดย ไนโตรโซโมเนส คอลัมน์ ซี30	147
จ5	ปริมาณไนเตรทไนโตรเจนที่เกิดจากการย่อยสลาย ไนไตรท์ไนโตรเจน โดย ไนโตรเบคเตอร์ คอลัมน์ ซี10	148
จ6	ปริมาณไนเตรทไนโตรเจนที่เกิดจากการย่อยสลาย ไนไตรท์ไนโตรเจน โดย ไนโตรเบคเตอร์ คอลัมน์ ซี30	149
ฉ1	ปริมาณจุลินทรีย์ไนตริไฟอิ้งต่อจุลินทรีย์ทั้งหมดในคอลัมน์ ซี30	151
ฉ2	ปริมาณจุลินทรีย์ไนตริไฟอิงต่อจุลินทรีย์ทั้งหมดในคอลัมน์ ซี20	151
ฉ3	ปริมาณจุลินทรีย์ไนตริไฟอิงต่อจุลินทรีย์ทั้งหมดในคอลัมน์ ซี10	151

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ลักษณะการเกิดน้ำชะมูลฝอย	4
2	การจำแนกประเภทดิน	16
3	แบบจำลองคอลัมน์ในการทดลอง	39
4	ผังการทดลองแบบต่อเนื่องเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดในระดับความหนาวัสดุต่างกันและแปรผันรูปแบบภาระบรรทุกทางชลศาสตร์	43
5	การหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับของสารประกอบอินทรีย์คาร์บอนและสารประกอบไนโตรเจน	44
6	การทดสอบหาไอโซเทอมการดูดซับสารอินทรีย์คาร์บอนและสารประกอบไนโตรเจน	45
7	ขั้นตอนการตรวจสอบชนิดจุลินทรีย์ด้วยวิธีฟลูออเรสเซนต์อินสิทูไฮบริไดเซชั่น	49
8	การกำจัดสารอินทรีย์ในรูปบีโอดีตามระยะเวลาและการเปลี่ยนรูปแบบการป้อนน้ำเสียของทุกคอลัมน์	58
9	การกำจัดสารอินทรีย์ในรูปบีโอดีแบบสะสมตามระยะเวลาในแต่ละรูปแบบการป้อนน้ำเสียของทุกคอลัมน์	59
10	อัตราการกำจัดสะสมสารอินทรีย์ในรูปบีโอดีต่อวันในแต่ละรูปแบบการป้อนน้ำเสียของแต่ละคอลัมน์	60
11	การกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีตามระยะเวลาและการเปลี่ยนรูปแบบการป้อนน้ำเสียของทุกคอลัมน์	62
12	การกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีแบบสะสมตามระยะเวลาในแต่ละรูปแบบการป้อนน้ำเสียของทุกคอลัมน์	62
13	อัตราการกำจัดสะสมสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีต่อวัน ในแต่ละรูปแบบการป้อนน้ำเสียของแต่ละคอลัมน์	63
14	ปริมาณออกซิเจนละลายโดยเฉลี่ยในการป้อนน้ำเสียทุกวันของแต่ละคอลัมน์	63

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
15	การกำจัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนตามระยะเวลาและการเปลี่ยนรูปแบบการป้อนน้ำเสียของทุกคอลัมน์	65
16	การกำจัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนแบบสะสมตามระยะเวลาในแต่ละรูปแบบการป้อนน้ำเสียของทุกคอลัมน์	66
17	อัตราการกำจัดสะสมสารอินทรีย์ไนโตรเจนต่อวัน ในแต่ละรูปแบบการป้อนน้ำเสียของแต่ละคอลัมน์	66
18	การกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนตามระยะเวลาและการเปลี่ยนรูปแบบการป้อนน้ำเสียของทุกคอลัมน์	68
19	การกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนแบบสะสมตามระยะเวลาในแต่ละรูปแบบการป้อนน้ำเสียของทุกคอลัมน์	68
20	อัตราการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนต่อวัน ในแต่ละรูปแบบการป้อนน้ำเสียของแต่ละคอลัมน์	69
21	ปริมาณออกซิเจนละลายเข้าและออกจากระบบ	71
22	ปริมาณออกซิเจนละลายตามความลึกในคอลัมน์ ซี 30	72
23	ปริมาณออกซิเจนละลายตามความลึกของคอลัมน์ ซี 20	73
24	ปริมาณออกซิเจนละลายตามความลึกของคอลัมน์ ซี 10	73
25	ปริมาณสารอาหารที่ทำให้อัตราการย่อยสลายเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราการย่อยสลายสูงสุด (K_s)	76
26	สมดุลมวลสารอินทรีย์คาร์บอนในแต่ละวัสดุของทุกคอลัมน์	77
27	สมดุลมวลไนโตรเจนในแต่ละวัสดุของทุกคอลัมน์	78
28	สัดส่วนจุลินทรีย์ไนตริไฟอิงในจุลินทรีย์ทั้งหมดก่อนและหลังทดลองของแต่คอลัมน์	79

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ก1	ตัวอย่างวัสดุ หินปูน ทราย ดินเหนียว และดินเหนียวปนตะกอน	91
ก2	ท่อเก็บตัวอย่างน้ำเสียระหว่างชั้นวัสดุ	91
ก3	คอลัมน์จำลองระบบดินและหินเรียงเป็นชั้น	92
ค1	กราฟแบบแลงเมียร์ของสารอินทรีย์ทั้งหมด กับวัสดุต่างๆ	131
ค2	กราฟแบบฟรุนดิชของสารอินทรีย์ทั้งหมด กับวัสดุต่างๆ	131
ค3	กราฟแบบแลงเมียร์ของแอมโมเนียไนโตรเจน กับวัสดุต่างๆ	133
ค4	กราฟแบบฟรุนดิชของแอมโมเนียไนโตรเจน กับวัสดุต่างๆ	133
ค5	กราฟแบบแลงเมียร์ของ อินทรีย์ไนโตรเจน กับวัสดุต่างๆ	135
ค6	กราฟแบบฟรุนดิชของอินทรีย์ไนโตรเจน กับวัสดุต่างๆ	135
ค7	กราฟแบบแลงเมียร์ของ ไนไตรท์ไนโตรเจน กับวัสดุต่างๆ	137
ค8	กราฟแบบฟรุนดิชของ ไนไตรท์ไนโตรเจน กับวัสดุต่างๆ	137
ค9	กราฟแบบแลงเมียร์ของไนเตรทไนโตรเจน กับวัสดุต่างๆ	139
ค10	กราฟแบบฟรุนดิชของไนเตรทไนโตรเจน กับวัสดุ	139

คำอธิบายสัญลักษณ์ และอักษรย่อ

HAP	=	Hydraulic application pattern, รูปแบบภาระทางชลศาสตร์
HLR	=	Hydraulic loading rate, ภาระบรรทุกทางชลศาสตร์
C1	=	Column 10 cm, คอลัมน์บรรจุวัสดุหนา 10 เซนติเมตร
C2	=	Column 20 cm, คอลัมน์บรรจุวัสดุหนา 20 เซนติเมตร
C3	=	Column 30 cm, คอลัมน์บรรจุวัสดุหนา 30 เซนติเมตร
LS	=	Limestone, หินปูน
SA	=	Sand, ทราย
CL	=	Clay, ดินเหนียว
SC	=	Silty clay, ดินเหนียวปนตะกอน
t_{op}	=	Optimum time, ระยะเวลาที่เหมาะสม
บีโอดี	=	Biochemical oxygen demand
ซีโอดี	=	Chemical oxygen demand
ซม.	=	เซนติเมตร
ลบ.ม./วัน	=	ลูกบาศ์กเมตรต่อวัน
ซม./วัน	=	เซนติเมตรต่อวัน
มก./ล.	=	มิลลิกรัมต่อลิตร

ผลของความหนาชั้นวัสดุและรูปแบบการป้อนน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยระบบดินและหินเรียงเป็นชั้น

Effects of Material Depths and Hydraulic Application Patterns on Treatment Efficiency of Leachate by Rock-Soil Layering System

คำนำ

มูลฝอยนับว่าเป็นปัญหาสำคัญในประเทศที่กำลังพัฒนาที่เพิ่มความรุนแรงมากขึ้นในทุกขณะ โดยในปี พ.ศ. 2545 ประเทศไทยมีปริมาณมูลฝอยชุมชนสูงถึง 14.31 ล้านตัน หรือมีประมาณวันละ 39,225 ตัน โดยมีองค์ประกอบแตกต่างกันไป และคาดว่ามีอัตราเพิ่มประมาณร้อยละ 1.2 ต่อปี (กรมควบคุมมลพิษ, 2547) มูลฝอยเหล่านี้หากไม่ได้รับการจัดการอย่างถูกต้องตามหลักวิชาการจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตของประชาชนทุกระดับ และปัญหาในด้านคุณภาพดิน แหล่งน้ำใต้ดิน น้ำผิวดิน ทัศนียภาพ กลิ่นเหม็น เป็นต้น

ในปัจจุบันมูลฝอยได้รับการจัดการอย่างถูกต้องโดยวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการจัดการมูลฝอยของประเทศไทย คือ การฝังกลบมูลฝอยอย่างถูกหลักสุขาภิบาลที่ได้มาตรฐาน ซึ่งจะช่วยป้องกันผลกระทบที่อาจจะเกิดดังกล่าวข้างต้นอย่างไรก็ตามยังมีน้ำชะมูลฝอยเกิดขึ้นจากหลุมฝังกลบมูลฝอยซึ่งอาจแพร่กระจายลงสู่ดิน และแหล่งน้ำ ดังนั้นน้ำชะมูลฝอยที่เกิดขึ้นยังจะต้องทำการบำบัดต่อ เนื่องจากยังมีค่าความสกปรกสูงมาก กลิ่นเหม็นรุนแรง เป็นที่น่ารังเกียจ วิธีการปัจจุบันนิยมใช้การบำบัด โดยใช้บ่อผึ่งซึ่งมีข้อจำกัดด้านการกำจัดสารประกอบในรูปของไนโตรเจนที่ยังคงเหลืออยู่

ในการวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งหาระบบบำบัดที่สามารถบำบัดได้ทั้งสารอินทรีย์คาร์บอนและไนโตรเจนในน้ำชะมูลฝอยโดยอาศัยชั้นดินและเรียงเป็นชั้น ซึ่งเป็นวิธีการบำบัดแบบผสมผสานทางกายภาพ เคมี และชีวภาพที่มีกระบวนการแบบใช้อากาศและกระบวนการไม่ใช้อากาศอยู่ในระบบเดียวกัน จากการศึกษาการบำบัดโดยอาศัยชั้นดินแบบชั้นเดียวซึ่งให้ประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ (Srinoi, 2005; Ou, 1989; Sheu, 1987) นอกจากนี้ระบบบำบัดแบบอาศัยชั้นดินดังกล่าวนี้มีค่าใช้จ่ายต่ำ และยังง่ายต่อการควบคุมดูแลเหมาะสำหรับพื้นที่ที่มีปริมาณมูลฝอยไม่มากนักหรือในแหล่ง

ชุมชนขนาดเล็กที่ไม่ต้องการเทคโนโลยีในการบำบัดมากมายซึ่งในการศึกษาครั้งนี้มุ่งพัฒนาระบบดังกล่าวให้เหมาะสมมากขึ้น โดยในการศึกษานี้ได้ศึกษาผลของความหนาชั้นวัสดุที่ประกอบเป็นชุดดินต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ สารประกอบไนโตรเจน และมลสารอื่นๆ รวมทั้งยังศึกษารูปแบบภาระทางชลศาสตร์ในการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบเพื่อเปรียบเทียบความเหมาะสมของการเดินระบบที่ดีที่สุด

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาประสิทธิภาพของระบบดินและหินเรียงเป็นชั้นในการบำบัดน้ำชะมูลฝอยชุมชนที่ความหนาของดินต่างๆ กัน

2. ศึกษารูปแบบภาระทางชลศาสตร์ที่เหมาะสมของระบบดินและหินเรียงเป็นชั้นในการบำบัดน้ำชะมูลฝอยชุมชน

3. ศึกษาการดูดซับในวัสดุแต่ละชนิดก่อนการทดลอง การย่อยสลายและปริมาณจุลินทรีย์ในกลุ่มไนตริไฟอิงในชั้นวัสดุแต่ละชนิด

ขอบเขตการศึกษา

การศึกษาการบำบัดน้ำชะมูลฝอยชุมชนด้วยระบบดินและหินเรียงเป็นชั้นนี้เพื่อหาองค์ประกอบของระบบและรูปแบบภาระทางชลศาสตร์ที่เหมาะสมดังนี้

1. จำลองระบบดินและหินเรียงเป็นชั้นโดยใช้คอลัมน์สำหรับการทดลองแบบต่อเนื่องที่มีวัสดุ ได้แก่ หินปูน ทราย ดินเหนียว และดินเหนียวปนดินตะกอน เรียงเป็นชั้นโดยกำหนดความหนาของชั้นวัสดุ 3 ระดับ คือ 30 20 และ 10 ซม. ในแต่ละคอลัมน์

2. ในการทดลองใช้น้ำชะมูลฝอยที่ได้จากการจัดเตรียมขึ้นจากการหมักมูลฝอยและทำการทดลองหาระยะเวลาความสามารถของการบำบัดของชั้นดิน ที่ค่าความสกปรกในรูป ซีโอดี อยู่ในช่วง 5,000-7,000 มก.ซีโอดี/ล.

3. ดัชนีที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำชะมูลฝอยประกอบด้วย ออกซิเจนละลาย (DO) บีโอดี (BOD) ซีโอดี (COD) ทีเคเอ็น (TKN) แอมโมเนียไนโตรเจน (NH_3-N) อินทรีย์ไนโตรเจน (Org-N) ไนเตรทไนโตรเจน (NO_2-N) ไนไตรท์ไนโตรเจน (NO_3-N) และฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total PO_4^{-3})

4. ในการทดลองเพื่อหารูปแบบทางชลศาสตร์ในการปล่อยน้ำชะมูลฝอยปริมาณ 5 ซม./วัน เพื่อเข้าสู่คอลัมน์ชั้นดิน โดยปล่อยเข้าสู่ระบบทุกวัน ปล่อยทุกสองวัน และทุกสามวัน ในภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ (hydraulic loading rate) ของน้ำที่เข้าสู่ระบบเท่ากัน

5. การศึกษาแบคทีเรียในชั้นดินหลังการบำบัดแบบต่อเนื่องในกลุ่มไนตริไฟอิงโดยวิธีฟลูออเรสเซนต์อินสิทูไฮบริไดเซชัน (Fluorescence in situ hybridization: FISH)

6. ทำการศึกษาการดูดซับของวัสดุต่างๆที่บรรจุในคอลัมน์จำลองระบบต่อสารอินทรีย์คาร์บอนและสารประกอบไนโตรเจนโดยการทดลองแบบกะ (batch experiment)

7. ทำการทดลองแบบกะเพื่อศึกษาอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์และสารประกอบไนโตรเจนโดยจุลินทรีย์ในวัสดุหลังสิ้นสุดการทดลอง

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

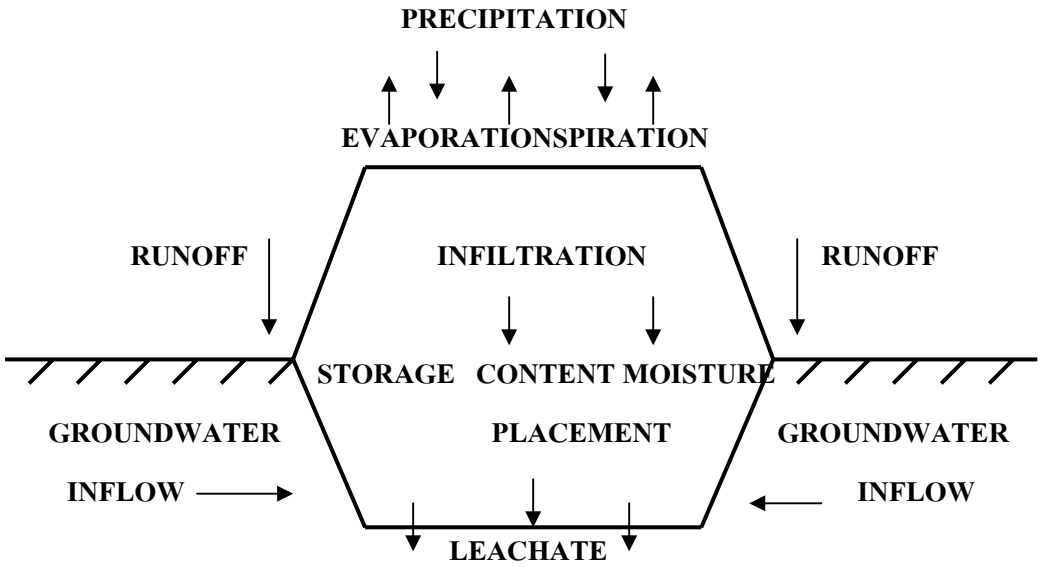
จากการศึกษาในครั้งนี้ผลที่ได้คาดว่าสามารถนำไปประยุกต์เพื่อประกอบในการออกแบบและรูปแบบในการเดินระบบดินและหินเรียงเป็นชั้นเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพมากที่สุด

การตรวจเอกสาร

น้ำชะมูลฝอย

1. การกำเนิดน้ำชะมูลฝอย (Leachate Generation)

น้ำชะมูลฝอย คือ ของเหลวที่เกิดจากการย่อยสลายทางชีวภาพและน้ำฝนที่ซึมผ่านชั้นมูลฝอยในหลุมฝังกลบมูลฝอย ซึ่งชะละลายสิ่งปนเปื้อนต่างๆทั้งสารแขวนลอยและสารละลายต่างๆ ออกมาพร้อมของเหลวนั้น โดยน้ำชะมูลฝอยส่วนใหญ่เกิดจากน้ำฝนที่ตกลงมาบนหลุมฝังกลบ (Lema *et al*, 1988 ; Farquhar ,1978 ; Tchobanoglous *et al*, 1993)



ภาพที่ 1 ลักษณะการเกิดน้ำชะมูลฝอย
ที่มา : ดัดแปลงจาก Farquhar (1978)

น้ำฝนที่ตกลงมาบริเวณหลุมฝังกลบมูลฝอยส่วนหนึ่งที่ไหลไปบนผิวหน้าดินกลายเป็นน้ำที่ผิวดิน (surface runoff) ภายหลังจากที่ผ่านการระเหย การคายน้ำของดินและพืช ส่วนที่เหลือจะถูกเก็บกักไว้ในชั้นดินจนกระทั่งความชื้นที่สะสมเกินความจุสนาม (field capacity) ของดิน น้ำจะซึมลงสู่ชั้นของขยะมูลฝอย ของเหลวที่ซึมลงมานี้จะสะสมอยู่ในชั้นของขยะมูลฝอย จนกระทั่งถึงค่าความจุสนามของมูลฝอย น้ำเหล่านี้จะชะละลายสารต่างๆ ออกจากมูลฝอย และซึมลงไปสะสมตัวที่พื้นล่างของหลุมฝังกลบ เหล่านี้ เรียกว่า น้ำชะมูลฝอย (Dass *et al*,1977) นอกจากนี้แหล่งที่มาของของเหลวที่มาทำให้เกิดน้ำชะมูลฝอยยังมาจากแหล่งอื่นๆ เช่น น้ำใต้ดิน น้ำพุ และของเหลวที่ถูกผลิตขึ้นจากการย่อยสลายของมูลฝอย (Tchobanoglous *et al*, 1993) การย่อยสลายมูลฝอยในหลุมฝังกลบ และลักษณะน้ำชะมูลฝอยจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น องค์ประกอบของมูลฝอย การบดอัดความชื้นของมูลฝอย อุณหภูมิ เป็นต้น การย่อยสลายมูลฝอยเป็นกระบวนการที่ใช้เวลานานและจะเกิดน้ำชะมูลฝอยอย่างต่อเนื่อง

ปัจจัยเบื้องต้นที่มีอิทธิพลต่อการเกิดน้ำชะมูลฝอย คือ สภาพภูมิอากาศบริเวณที่ทำการฝังกลบ สภาพภูมิประเทศ ลักษณะดิน สภาพอุทกธรณีวิทยา ดิน ลักษณะวัสดุกลบทับชั้นสุดท้าย รวมทั้งลักษณะมูลฝอยที่กลบทับ ปริมาณของน้ำชะมูลฝอยจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของน้ำที่ซึมเข้าสู่บริเวณหลุมฝังกลบ ซึ่งจะสัมพันธ์กับปริมาณฝนที่ตก การระเหยกลับและการสูญเสียของน้ำในกรณีอื่นๆ โดยปริมาณของน้ำชะมูลฝอยจะเพิ่มขึ้น ถ้าอัตราการซึมน้ำผ่านชั้นกลบทับ (final cover) สูง

1.1 กระบวนการย่อยสลายของน้ำชะมูลฝอยในหลุมฝังกลบ

การย่อยสลายในหลุมฝังกลบเป็นกระบวนการย่อยสลายแบบชีวภาพแบบไร้อากาศเป็นหลักโดยจะได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และมีเทน (CH_4) (Christensen *et al*, 1992) โดยขั้นตอนในการย่อยสลายประกอบด้วย 5 ขั้นตอนดังนี้ (King and Elassen, 1993)

1) Initial adjustment phase เป็นขั้นแรกของการย่อยสลาย ซึ่งในขั้นนี้จะเป็นการย่อยสลายแบบใช้อากาศ (aerobic condition) เนื่องจากมีออกซิเจนหลงเหลืออยู่ในหลุมฝังกลบ

2) Transition phase เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเมื่อออกซิเจนเริ่มขาดแคลน กำลังจะเกิดสภาพไร้อากาศ (anaerobic condition) ในขั้นนี้จะใช้ไนเตรทและซัลเฟตเป็นแหล่งของออกซิเจนในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ซึ่งได้คาร์บอนที่ย่อยสลายได้ เช่น คาร์โบไฮเดรตโดยผลิตภัณฑ์เป็น กรดอินทรีย์ (organic acid) คาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจน (N_2) และ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ในขั้นตอนที่ 2 นี้ค่า พีเอชของน้ำชะมูลฝอยจะเริ่มลดต่ำลงเนื่องจากการเกิดกรดอินทรีย์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นในกระบวนการย่อยสลาย

3) Acid phase ในขั้นตอนนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนย่อยๆ คือ การเปลี่ยนรูปของสารประกอบที่มีมวลโมเลกุลสูง เช่น ไขมัน โปรตีน เป็นต้น ไปเป็นสารประกอบที่เหมาะสมสำหรับจุลินทรีย์เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานและเซลล์คาร์บอน ถัดไปเป็นขั้นตอนการเปลี่ยนสารประกอบที่ได้จากขั้นตอนแรกไปเป็นสารประกอบที่มีมวลโมเลกุลต่ำประเภทกรด อะซิติก (acitic acid) และสารประกอบที่มีความเข้มข้นต่ำๆของกรดฟูลวิก (fulvic acid) และกรดอินทรีย์ประเภทอื่นๆ ซึ่งการย่อยสลายในขั้นตอนที่ 3 นี้ก๊าซที่เกิดส่วนใหญ่จะเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย จุลินทรีย์ที่มีเกี่ยวข้องในขั้นตอนนี้เรียกว่า facultative bacteria และ obligate anaerobic bacteria ในขั้นตอนนี้ค่าพีเอช จะลดต่ำลงมากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มมากขึ้นของกรดอินทรีย์ และปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนค่าความสกปรกในรูปของบีโอดี ซีโอดี และค่าการนำไฟฟ้า (electroconductivity) ของน้ำชะมูลฝอยจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากพีเอชที่ต่ำจะทำให้ความสามารถในการละลายของกรดอินทรีย์และธาตุอาหารในน้ำชะมูลฝอยดีขึ้น

4) Methane fermentation phase จุลินทรีย์ในขั้นตอนนี้จะเปลี่ยนกรด อะซิติก และก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดจากแบคทีเรียชนิดที่สร้างกรด (acid former) ในขั้นตอนที่ 3 ไปเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการย่อยสลายนี้เป็นจุลินทรีย์ที่สร้างก๊าซมีเทน (methane former) ซึ่งอยู่ได้ในสภาพไร้อากาศเท่านั้น ในขั้นตอนนี้ acid former และ methane former จะทำงานควบคู่กัน โดยอัตราการสร้างกรดจะลดลงเรื่อยๆ ส่งผลให้ค่าพีเอชของน้ำชะมูลฝอยเพิ่มสูงขึ้น ทำให้โลหะหนักละลายน้ำได้น้อยลงส่งผลให้ค่าโลหะหนักในน้ำชะมูลฝอยลดลงด้วย

5) Maturation phase ขั้นตอนสุดท้ายนี้จะเกิดขึ้นภายหลังจากสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แล้ว เมื่อความชื้นยังคงหลงเหลืออยู่ในช่องว่างของมูลฝอย สารอินทรีย์ที่ยังไม่ได้สัมผัสกับความชื้นจะถูกย่อยสลายเปลี่ยนรูปต่อไป ใน

ขั้นตอนนี้อัตราการเกิดก๊าซจะลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากสารอินทรีย์ที่เหลืออยู่เป็นประเภทที่ย่อยสลายยาก ก๊าซที่เกิดส่วนใหญ่ได้แก่ ก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนน้ำชะมูลฝอยจะมีสารฮิวมิก (humic substance) และกรดฟูลวิก เป็นองค์ประกอบ เนื่องจากเป็นสารที่ย่อยสลายได้ยาก

2. <u>ลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอย (Leachate Characteristics)</u>

น้ำชะมูลฝอยเป็นน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง (high strengeth wastewater) ทั้งด้านพีเอช บีโอดี ซีโอดี และโลหะหนัก ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะสมบัติของมูลฝอย ปัจจัยในการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ (abiotic factor) รวมทั้งการออกแบบและดำเนินการฝังกลบมูลฝอย องค์ประกอบของมูลฝอยโดยเฉพาะอย่างยิ่งธรรมชาติของสารอินทรีย์ในมูลฝอย จะส่งผลต่อการย่อยสลายของมูลฝอย ซึ่งมีผลต่อเนื่องถึงคุณภาพของน้ำชะมูลฝอย (Andreottola and Cannas, 1992) ส่วนของความชื้นและออกซิเจนจะมีผลต่อกระบวนการทางชีวะเคมีในหลุมฝังกลบ ในขั้นตอนของการดำเนินการฝังกลบ เช่น การหมุนเวียนน้ำชะมูลฝอย การเติมเชื้อ โดยการใช้ตะกอนที่ผ่านการย่อยสลายมาแล้ว การเติมบัฟเฟอร์ การหมักก่อนฝังกลบ การบดอัด การใช้วัสดุกลบทับ ความหนาของชั้นมูลฝอย เหล่านี้มีผลทั้งทางบวกและทางลบต่อลักษณะของน้ำชะมูลฝอย (Christensen *et al*, 1992) โดยลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอยจากหลุมฝังกลบเป็นดังนี้

2.1 สารประกอบอินทรีย์ (organic compound) องค์ประกอบส่วนใหญ่ในน้ำชะมูลฝอยชุมชนเป็นสารอินทรีย์ ทั้งนี้สารประกอบอินทรีย์ในน้ำชะมูลฝอยจากมูลฝอยชุมชนในหลุมฝังกลบมูลฝอยสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ชนิด

1) สารอินทรีย์จากการย่อยสลายทางชีววิทยาของมูลฝอยชุมชน ซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ เช่น เศษอาหาร กระดาษ และใบไม้ เป็นต้น

2) สารอินทรีย์ที่พบในปริมาณน้อย ซึ่งมาจากมูลฝอยเคมี เช่น คราบน้ำมัน สารละลายต่างๆและยาฆ่าแมลง

Ehrig (1983) ได้ศึกษาค่าความสกปรกของน้ำชะมูลฝอยในช่วง acid phase พบว่าค่าความสกปรกในรูปของซีโอดีจะมีค่าสูง เนื่องจากมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น กรดอินทรีย์และมี

ค่าสัดส่วนของบีโอดีต่อซีโอดี เมื่อเข้าสู่ช่วง methane formation phaseสารอาหารจะเริ่มลดน้อยลง ส่งผลให้ค่าสัดส่วนของบีโอดีต่อซีโอดีลดลง

2.2 ซัลเฟต (sulfate) เมื่อระยะเวลาการฝังกลบของมูลฝอยนานขึ้นพบว่าปริมาณซัลเฟตจะมีค่าลดลง เนื่องจุลินทรีย์จะเปลี่ยนซัลเฟตเป็นซัลไฟด์ (sulfide) ในช่วงก่อนถึงและช่วง methane formation phase จะเหลือปริมาณซัลเฟตเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

2.3 คลอไรด์ (chloride) Ehrig (1983) พบว่าปริมาณคลอไรด์จะเพิ่มปริมาณขึ้นตามระยะอายุของหลุมฝังกลบ จากการตรวจวัดหลุมฝังกลบที่มีอายุมากกว่า 15 ปี อย่างไรก็ตาม Ehrig คาดว่าความเข้มข้นของคลอไรด์จะลดลงในระยะยาวเนื่องจากการชะละลายออกมากับน้ำชะมูลฝอยในช่วงต้นๆ มีจำนวนมาก

ส่วนประกอบมูลฝอยชุมชนของกรุงเทพมหานครแสดงในตารางที่ 1 Pattamapirat (1982) ได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอยในประเทศไทย โดยเก็บตัวอย่างจากหลุมฝังกลบมูลฝอยอ่อนนุชในเวลาที่แตกต่างกัน ได้ลักษณะสมบัติที่แตกต่างกันดังตารางที่ 2

3. <u>การบำบัดน้ำชะมูลฝอย</u>

เนื่องจากความเข้มข้นของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในน้ำชะมูลฝอยที่มีค่าสูง จึงจำเป็นต้องบำบัดก่อนปล่อยออกสู่ธรรมชาติ มลสารที่ต้องบำบัดขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของแต่ละประเทศ โดยทั่วไปมีแนวโน้มที่จะต้องบำบัดมลสารเหล่านี้ คือ สารอินทรีย์ แอมโมเนีย โลหะหนัก และความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ (Christensen *et al*, 1992) การบำบัดน้ำชะมูลฝอยมีหลายวิธี พอสรุปได้ดังนี้ การบำบัดทางชีววิทยาโดยใช้ออกซิเจน การบำบัดทางชีววิทยาโดยไม่ใช้ออกซิเจน การบำบัดทางกายภาพและเคมี การหมุนเวียนคืนลงไปในหลุมฝังกลบ การบำบัดโดยปล่อยลงพื้นดิน

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบมูลฝอยชุมชน กรุงเทพมหานคร (โดยเฉลี่ย)

ส่วนประกอบทางกายภาพ	ปริมาณส่วนประกอบโดยประมาณ 100 เปอร์เซ็นต์								
	2530	2531	2532	2533	2534	2535	2536	2537	เฉลี่ย
1. เผาไหม้ได้	60.61	56.07	61.75	56.06	63.91	63.37	59.30	59.52	60.07
กระดาษ	18.62	14.21	15.71	14.95	19.23	10.80	15.40	13.99	15.36
เสื้อผ้าและเส้นใยทอ	10.23	1.99	6.11	5.44	5.53	4.15	4.50	3.49	5.18
พลาสติก	13.09	12.77	10.76	10.44	16.22	19.10	16.02	20.66	14.88
ซากสิ่งมีชีวิต	8.50	11.95	10.18	7.05	4.78	7.06	4.24	5.89	7.45
ผักและผลไม้	6.82	8.99	12.66	11.12	8.10	18.94	15.76	14.72	12.15
เปลือกและสิ่งห่อหุ้ม	3.01	4.69	5.62	4.13	4.97	1.66	1.21	0.62	3.23
เครื่องหนังและยาง	0.35	1.47	0.71	2.84	5.28	1.66	2.17	0.15	1.82
2. ไม่สามารถเผาได้	14.79	14.20	15.13	16.84	14.20	14.54	7.78	7.75	13.15
เหล็ก	3.27	3.63	3.36	3.78	4.98	1.66	2.52	2.00	3.15
แก้ว	2.84	8.37	4.79	7.18	4.52	10.80	4.65	4.64	6.00
หินและกระเบื้อง	6.86	2.21	6.71	5.88	4.70	2.08	0.61	1.11	4.00
3. อื่นๆ	24.60	29.74	23.12	27.10	21.89	22.09	39.92	32.73	26.78
ทั้งหมด	100	100	100	100	100	100	100	100	100

ที่มา : สำนักรักษาความสะอาด กรุงเทพมหานคร (2538)

ตารางที่ 2 ลักษณะน้ำชะมูลฝอยหลุมฝังกลบอ่อนนุชตามฤดูกาล

Parameter	Unit	Rainy season		Dry season	
		mean	SD	mean	SD
1. Color	Pt-Co	2807	1.41	2870	1.41
2. Temperature	C	ND	—	ND	—
3. Suspended	mg/L	130	0	560	0
4. Turbidity	NTU	141	0	191	1.41
5. Transparency	cm	ND	—	ND	—
6. pH	—	7.48	0	6.97	0
7. DO	mg/L	0.49	0.01	0.27	0
8. COD	mg/L	2744	55.44	2822.4	110.87
9. NO_3-N	mg/L	22.5	0.71	18	0.14
10. Salinity	ppt	1.3	0.14	0.8	0.14
11. Conductivity	ms/cm	2580	1.41	2520	1.41
12. Hardness	mg/L as $CaCO_3$	426	5.66	1275	0
13. Alkalinity	mg/L as $CaCO_3$	1052.5	3.54	937.5	3.54
14. Manganese	ppm	0.496	0.5	0.11	0.5
15. BOD	mg/L	1375	1.1	1450	0
16. Coliform Bacteria					
- Total Coliform Bacteria	MPN/100 mL	$220x10^5$	—	$280x10^5$	—
	Colony/plate	$214x10^5$	—	$293x10^5$	—
-Fecal Coliform Bacteria	MPN/100 mL	$46x10^5$	—	$70x10^5$	—
17. Cadmium	ppm	0.012	14.7	0.007	7.5
18. Mercury	ppm	10.55	1.5	15.2	0.7

หมายเหตุ : ND ไม่สามารถตรวจวัดได้

ที่มา :Pattamaparat (1982)

สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้มุ่งศึกษาการบำบัดน้ำชะมูลฝอยที่อาศัยวัสดุธรรมชาติ เช่น ดิน ทราย และหิน โดยใช้หลักการของการใช้ดินในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การใช้ดินในการบำบัดน้ำเสีย

3.1.1 ประวัติความเป็นมาของการใช้ชั้นดินในการบำบัด

การบำบัดน้ำเสียโดยใช้ชั้นดินมีการปฏิบัติมาตั้งแต่คริสตวรรษที่ 16 และนิยมปฏิบัติกันอย่างแพร่หลายในยุโรป ซึ่งในขณะนั้นเป็นเพียงการปล่อยน้ำเสียให้ท่วมไปบนพื้นดิน หลังจากนั้นได้มีการปรับปรุงวิธีการกำจัดน้ำเสียที่ใช้ดินโดยการขุดให้เป็นร่องแล้วปล่อยให้น้ำไหลไปตามร่องน้ำซึ่งพบว่าพืชผักที่ปลูกในบริเวณดังกล่าวเจริญเติบโตดี ทั้งนี้เนื่องมาจากการสลายตัวของของเสียเป็นผลให้ดินบริเวณนั้นมีความสมบูรณ์ แต่วิธีการดังกล่าวนี้ต้องใช้พื้นที่จำนวนมาก และมีปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็นรบกวน ต่อมาได้มีการวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ดินในระบบ Latham Soil-Filter ซึ่งประกอบด้วยชั้นของดิน 3 ชั้น ในแต่ละชั้นจะปิดทับด้วยถ่านโค้ก วิธีดังกล่าวนี้ลดการใช้พื้นที่ลงถึง 10 เท่า ของวิธีการดั้งเดิมแต่การบำบัดน้ำเสียในระบบนี้มีข้อจำกัดเกี่ยวกับปริมาณการรับค่าภาระ (Loading Rate) ซึ่งสามารถรับค่าภาระได้สูงสุดเพียง 0.05 ม/วัน (Gray, 1989)

3.1.2 วิธีการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ดิน

1) Slow rate irrigation เป็นการรดน้ำสำหรับทางการเกษตรซึ่งอาจใช้วิธีการปล่อยให้ไหลตามพื้นที่อย่างอิสระ วิธีการกระจายน้ำเสียตามร่องน้ำทั่วบริเวณ และวิธีการฉีดพ่นกระจายน้ำเป็นฝอย (Springkler system) น้ำเสียจะมีทั้งการระเหยออกไปเอง ถูกพืชดูดดึงไปใช้ และไหลซึมลงใต้ดิน วิธีการนี้ต้องการพื้นที่ประมาณ 140 – 1400 ไร่ สามารถรับน้ำได้ 0.6 – 6.0 ม./ปี

2) Rapid infiltration percolation น้ำเสียจะมีทั้งระเหยออกไปและไหลผ่านชั้นใต้ดินลงไปจนถึงระดับน้ำใต้ดิน ระบบนี้จะมีการสูบน้ำใต้ดินขึ้นมาเพื่อปล่อยลงบนพื้นที่อีกครั้ง ต้องการพื้นที่ 5 – 140 ไร่ สามารถรับน้ำได้ในอัตรา 6 – 170 ม./ปี

3) Overland flow โดยปล่อยน้ำเสียให้ไหลไปตามพื้นที่ลาดประมาณ 2- 8 เปอร์เซ็นต์ ควรมีการเพาะปลูกในบริเวณที่มีการไหลผ่านของน้ำเสีย ซึ่งทำให้เกิดสภาพต่างๆ คือ การตกตะกอน การกรอง การเกิดปฏิกิริยาชีวเคมี และการดูดซับ ต้องการพื้นที่ประมาณ 40 – 180 ไร่ สามารถรับน้ำเสียได้ 3 – 21 ม./ปี

3.1.3 กลไกการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ดิน

ดินเปรียบเสมือนตัวกรองที่มีชีวิต (living filter)ของระบบนิเวศน์ทั้งนี้เนื่องจากดินมีคุณสมบัติเป็นทั้งตัวกรองทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ (physical, chemical and biological filters) ซึ่งในการบำบัดน้ำเสียจะอาศัยกลไกทั้งทางด้าน กายภาพ เคมี และชีวภาพร่วมกันดังนี้ ทางกายภาพ ได้แก่ การกรอง (filtration) การเจือจาง (dilution) การตกตะกอนตามแรงโน้มถ่วงของโลก (gravitational sedimentation) กลไกทางเคมี ได้แก่ การดูดซับ (adsorption) การทำให้ตกตะกอน (precipitation) กลไกทางชีวภาพ ได้แก่ การเปลี่ยนรูปของสารโดยการกระทำของจุลินทรีย์ (microbial transformation) การดึงดูดไปใช้ของพืช (plant uptake) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) กลไกทางกายภาพ เมื่อน้ำเสียเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างในดินของแข็งแขวนลอยจะถูกกำจัดออกไปโดยการกรอง ประสิทธิภาพในการกรองขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคดิน เนื้อดิน และอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำ หากมีอัตราของแข็งแขวนลอยมากเกินไปอาจทำให้ช่องว่างในดินเกิดการอุดตันได้ และลดอัตราการซาบซึมน้ำของดิน แต่ในระหว่างที่ไม่มีการปล่อยน้ำเสียเข้าสู่ระบบหรือในช่วงพักจะมีการย่อยสลายของของแข็งอินทรีย์ตามธรรมชาติ ทำให้อัตราการซึมซาบน้ำดีขึ้น

2) กลไกทางเคมี ปฏิกิริยาทางเคมีภายในดินมีผลต่อความสามารถในการเคลื่อนที่ของสารประกอบต่างๆ หรือไอออนที่ละลายได้ทำให้สารประกอบบางอย่างที่ตรึงไว้ในดิน กลไกทางเคมีที่สำคัญ ได้แก่ การตกตะกอนทางเคมี (chemical precipitation) และกลไกการดูดซับ (adsorption)โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลไกการดูดซับประจุบวก โดยทั่วไปดินมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกหรือ ซีอีซี(cation exchange capacity: CEC) อยู่ในช่วง10 – 30 เซนติโมล/กิโลกรัม ค่าซีอีซีของดินแต่ละชนิดแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับปริมาณฮิวมัสและแร่ดินเหนียว ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีซีอีซีสูงสุด

3) กลไกทางชีวภาพ กลไกทางชีวภาพที่สำคัญที่เกิดขึ้นในดินในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ การย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในดิน จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการสลายตัวของสารอินทรีย์ ได้แก่พวก เฮเทอโรโทรฟิค (heterotrophic bacteria) คือ พวกที่ต้องการได้รับแหล่งพลังงานและคาร์บอนจากอินทรีย์สารการสลายตัวของสารอินทรีย์ในดินถูกควบคุมโดยปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิ การถ่ายเทอากาศ ความชื้น พีเอช แร่ธาตุต่างๆ และอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนกับไนโตรเจนของสารอินทรีย์ที่ใส่ลงไป โดยน้ำเสีย หรือเรียกว่าสารอินทรีย์ที่เมื่อถูกป้อนเข้าสู่ระบบแบบแอโรบิคแล้วจะเกิดการ ถูกออกซิไดซ์ไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และสารอื่นๆที่มีสถานะออกซิเดชั่นสูง หรือถูกนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ โดยสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียนั้นมีลักษณะแตกต่างกันตามแต่ภูมิประเทศ ประเภทอาหาร และการดำรงชีวิต และวัฒนธรรมของท้องถิ่นนั้น

ออกซิเจนในดินมีความสำคัญต่ออัตราการย่อยสลายของอินทรีย์ไนโตรเจน และผลิตภัณฑ์สุดท้าย เป็นอย่างมาก ในสภาพที่มีออกซิเจน (aerobic) จะเกิดกระบวนการที่เรียกว่า ไนตริฟิเคชัน (nitrification) ทำให้แอมโมเนียซึ่งได้จากการสลายตัวของอินทรีย์ไนโตรเจนถูกออกซิไดส์ไปเป็นไนไตรท์ (NO_2^-) โดยแบคทีเรียไนโตรโซโมเนส (Nitrosomonas spp.) และจากนั้นไนไตรท์ก็จะถูกออกซิไดซ์ต่อไปเป็นไนเตรท (NO_3^-) โดยแบคทีเรียไนโตรเบคเตอร์ (Nitrobacter spp.) ซึ่งกระบวนการดังกล่าวนี้เกิดได้ดีในสภาพที่มีสารอินทรีย์น้อย มีของแข็งแขวนลอยสูง และมีอุณหภูมิสูง (Sorensen and Jorgensen, 1993)

ในสภาพที่ไม่มีออกซิเจน (anaerobic) จะเกิดกระบวนการ ดีไนตริฟิเคชั่น (denitrification) ซึ่งมีความสำคัญต่อการกำจัดไนเตรทออกไปจากแหล่งน้ำโดยไนเตรทจะถูกรีดิวซ์ไปเป็นไนโตรเจนก๊าซซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวนี้อาศัยการทำงานของจุลินทรีย์เช่นกัน และเกิดได้ดีในสภาพที่ดินมีเนื้อละเอียด มีอินทรีย์วัตถุสูง มีน้ำขังอย่างต่อเนื่อง มีพีเอชเป็นกลางหรือเป็นด่างเล็กน้อย และมีอุณหภูมิปานกลางแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องในกระบวนการดีไนตริฟิเคชั่น ได้แก่ แบคทีเรียในสกุล *Psuedomonas , Micrococcus , Bacillus* และ *Achromobacter*

3.2 การใช้ระบบดินชั้นเดียวในการบำบัด

Ou (1989) ทำการทดลองโดยใช้ดินชนิดเดียวบรรจุลงในคอลัมน์โดยใช้น้ำชะมูลฝอยชุมชนจากสถานีกำจัดมูลฝอยอ่อนนุช พบว่าความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปทีโอซี (TOC: total organic carbon) ขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดติดเป็นหลัก ซึ่งแปรผันตรงกับเวลาสัมผัส โดยคอลัมน์ที่บรรจุดินเหนียวจะให้ประสิทธิภาพดีกว่าดินร่วนและดินทราย และพบอีกว่าสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี จะถูกกำจัดโดยการย่อยสลายทางชีวภาพมากกว่ากระบวนการดูดซับซึ่งค่าความสกปรกในรูปซีโอดีนั้นจะถูกกำจัดตลอดแนวความลึกของคอลัมน์ และสำหรับการกำจัดไนโตรเจนโดยใช้ดินนี้พบว่ามีกระบวนการที่ซับซ้อนและมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาทั้งนี้เนื่องจากไนโตรเจนในน้ำชะมูลฝอยมีอยู่หลายลักษณะทั้งในรูป ก๊าซไนโตรเจน สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน แอมโมเนียไนโตรเจน แอมโมเนียมไอออน ไนไตรท์ ไนเตรท ซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปได้ง่าย กลไกที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการนี้ประกอบด้วย มิเนอไลเซชั่น (minerlization) อิมโมบิไลเซชั่น (immobilization) ไนตริฟิเคชั่น ดีไนตริฟิเคชั่น การระเหยของแอมโมเนีย (ammonia volatilization) แอมโมนิฟิเคชั่น (ammonification) การตรึงไนโตรเจน (nitrogen fixation) และการสะสมในเม็ดดิน

3.3 ระบบการจัดเรียงดินหลายชั้น

Booker *et al* (1996) พบว่าซีโอไลท์ที่เพิ่มลงในดินมีความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียเท่ากับ 4.5 มก.ไนโตรเจน/ก. ซีโอไลต์ มีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัส 2.15 ก./กก. คุณสมบัติของซีโอไลต์นอกจากจะทำให้น้ำเสียผ่านระบบได้ทั่วถึงและลดการอุดตันแล้ว ยังมีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดี ซีโอดี ของแข็งแขวนลอย ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสูงขึ้นด้วย (Sakadevan and Bavor , 1998) ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดอาศัยกระบวนการ ดีไนตริฟิเคชัน จะถูกกำจัดโดยปริมาณอินทรีย์คาร์บอน (Isaacs and Henze, 1994) การควบคุมสภาพออกซิเดชันและรีดักชัน ในระบบการจัดเรียงดินหลายชั้นอย่างถูกต้องมีความสำคัญต่อการบำบัดน้ำเสียในส่วนที่มีสภาพออกซิเดชันจะเกิดปฏิกิริยา ไนตริฟิเคชัน ร่วมกับการสลายตัวของสารอินทรีย์ คือ ส่วนของซีโอไลต์และผิวของดินที่ติดกับซีโอไลต์ ในส่วนที่สภาพออกซิเดชันจะเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน คือ ส่วนของชั้นดิน ส่วนขี้เลื่อยและปอแก้ว เป็นแหล่งคาร์บอนให้กับจุลินทรีย์ในการทำปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น (ศุภกาญจน์, 2540)

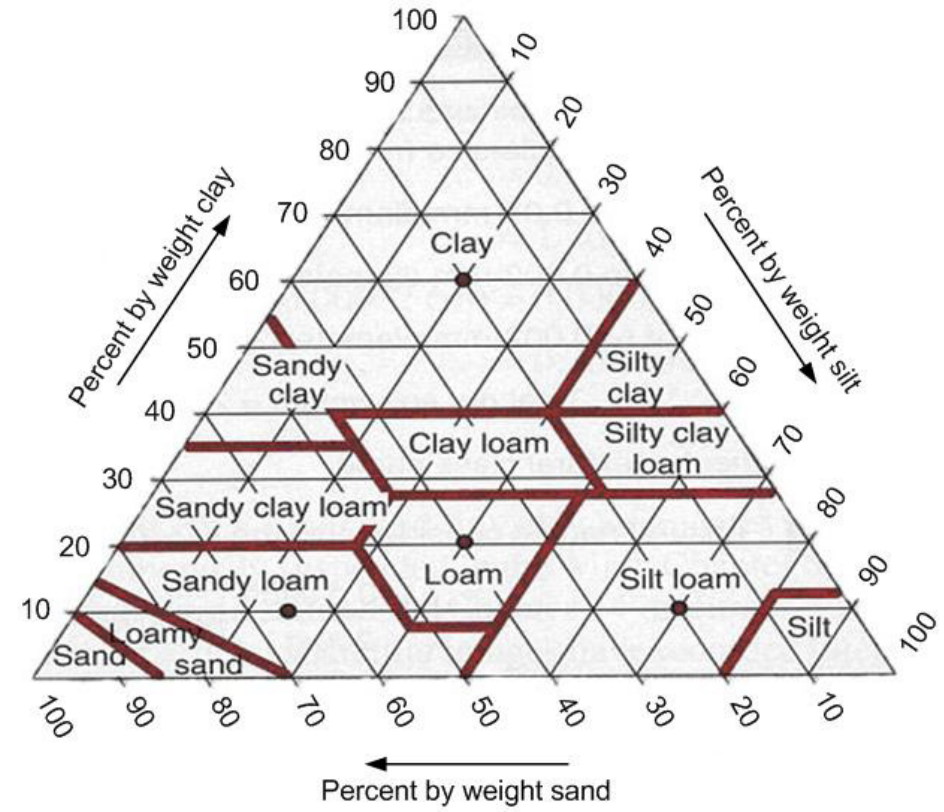
Srinoi (2005) จากการทดลองที่ใช้ระบบดินหลายชั้นซึ่งมีการจัดเรียงจากบนสุดคือ หินปูน ทราย ดินร่วนและดินเหนียวในความหนาแต่ละชั้นที่ 30 ซม. พบว่าให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี ที่ 84% และบีโอดี ที่ 90% สำหรับการกำจัดสารประกอบไนโตรเจนนั้นพบว่าเกิดขึ้นผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชั่น และ ดีไนตริฟิเคชั่น ทำให้เกิดการกำจัดสารประกอบไนโตรเจนได้อย่างสมบูรณ์

ดิน (Soil)

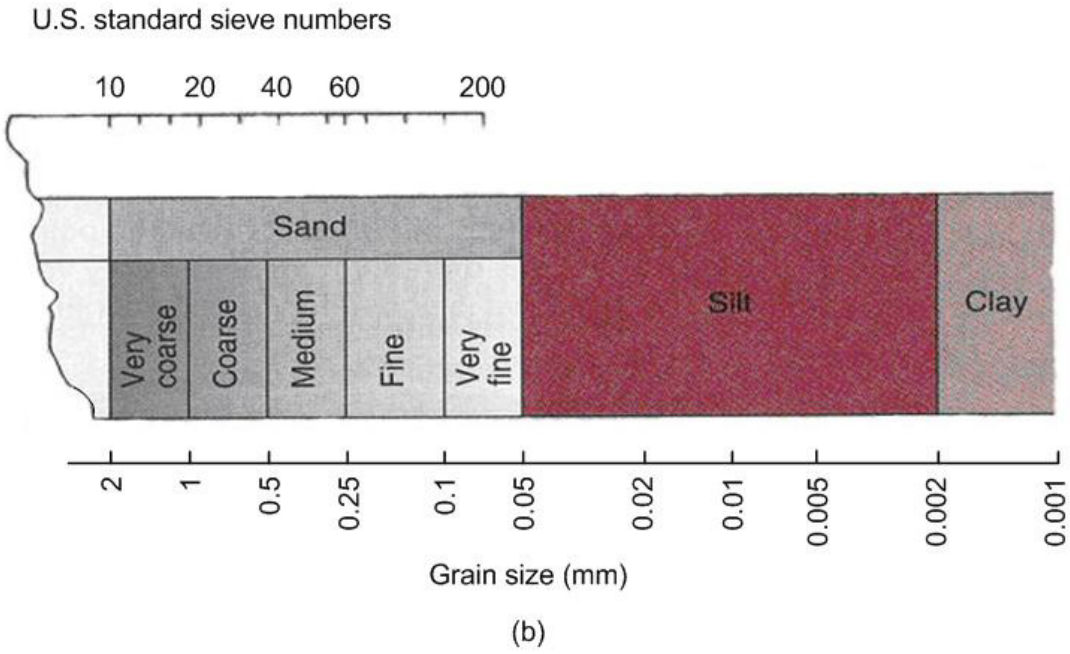
ดิน หมายถึง สิ่งที่เกิดจากการกัดกร่อน ผุพัง และแตกสลายของหินต่างๆ โดยธรรมชาติ ทั้งจากอิทธิพลของดินฟ้าอากาศ อุณหภูมิ ความชื้น แรงดึงดูดของโลก และการเปลี่ยนแปลงทางเคมี แล้วมีการเคลื่อนย้ายพัดพาโดยตัวกลางต่างๆ เช่น ลม น้ำ ธารน้ำแข็ง เป็นต้น นำไปตกตะกอนทับถมในที่ต่างๆ เป็นชั้นดินขึ้นมา ทำให้คุณสมบัติในแต่ละชั้นแต่ละแห่งแตกต่างกันไปไม่เหมือนกัน (มณเฑียร, 2538) ซึ่งดินประกอบด้วยสิ่งที่มีมวลของแข็งขนาดต่างๆ อยู่มากมายซึ่งช่องว่างเหล่านี้จะมีผลต่อคุณสมบัติทางชลศาสตร์ของดิน โดยอาศัยคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน คุณสมบัติทางกายภาพประกอบด้วย ความละเอียด โครงสร้าง และพื้นที่ผิวต่อปริมาตร ส่วนคุณลักษณะทางเคมีประกอบด้วย พีเอช สัดส่วนของดินเหนียวและอินทรีย์สาร การแลกเปลี่ยนประจุ จะมีรายละเอียด ดังนี้

1. การจำแนกประเภทของดิน

ความละเอียดของเนื้อดินและโครงสร้างของดินมีความสำคัญมากทางชลศาสตร์ของดินในแง่ของความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ ดินประกอบด้วยส่วนประกอบต่างๆ ในการแบ่งชนิดของดินนิยมแบ่งตามความละเอียดของเนื้อดิน ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น ดินเหนียว (clay) ดินตะกอน (silt) และดินทราย (sand) การจำแนกประเภทของดินทำได้โดยการหาสัดส่วนเป็นร้อยละโดยน้ำหนักขององค์ประกอบทั้ง 3 ชนิดแล้วนำมาเปรียบเทียบกับรูปสามเหลี่ยมจำแนกประเภทของเนื้อดิน (soil texture triangle) ดังแสดงในภาพที่ 2 (Gardiner, 2001) เมื่อพิจารณาได้แล้วนำมาเปรียบเทียบกับตารางดังกล่าวจะได้ชนิดของเนื้อดิน



(a)



(b)

ภาพที่ 2 การจำแนกประเภทดิน

ที่มา: Gardiner (2001)

2. <u>คุณสมบัติของดิน</u>

2.1 ในการระบายน้ำและการถ่ายเทอากาศ

ดินที่มีเนื้อละเอียดจะมีค่าความสามารถในการระบายน้ำและอากาศไม่ดีแต่สามารถเก็บกักน้ำเอาไว้ได้มาก ตรงกันข้ามกับดินที่มีเนื้อหยาบที่ระบายน้ำและอากาศได้ดี แต่อุ้มน้ำได้น้อย ความสามารถในการระบายน้ำและการถ่ายเทอากาศรวมเรียกว่า ความสามารถในการซึมผ่าน (permeability) ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดและความต่อเนื่องของช่องว่างระหว่างดิน ค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ (water permeability, K) หมายถึง อัตราเร็วในการไหล เนื่องจากหน่วยความลาด ซึ่งจะแปรผันโดยตรงกับความชื้น หากดินมีความชื้นสูง น้ำจะสามารถไหลผ่านได้อย่างรวดเร็ว แต่ถ้าดินมีความชื้นต่ำ น้ำจะไหลไปได้ช้า ในขณะที่ความชื้นในอากาศสูง ดินเนื้อหยาบจะมีความสามารถในการซึมผ่านสูงกว่าเนื้อดินละเอียดเพราะน้ำไหลผ่านช่องขนาดใหญ่ แต่ถ้าดินทั้งคู่มีความชื้นต่ำ น้ำต้องไหลผ่านช่องขนาดเล็กความ สามารถในการซึมผ่านของเนื้อดินหยาบจะต่ำกว่าเนื้อดินละเอียด เนื่องจากความต่อเนื่องของช่อง ขนาดเล็กในดินเนื้อหยาบไม่ดีเท่าเนื้อละเอียด (คณาจารย์ภาคปฐพีวิทยา, 2544) ซึ่งค่าความสามารถในการซึมผ่านของดินชนิดต่างๆ ได้ สรุปดังตารางที่ 3

2.2 ความเป็นกรด-ด่างของดิน

การบอกถึงสภาพความเป็นกรดและด่างของดินนิยมบอกด้วยค่า พีเอช ซึ่งในปัจจุบันสามารถแบ่งสภาพกรดในดิน เป็น 2 ชนิด ได้แก่ สภาพกรดจริง (active acidity) หมายถึงส่วนของไฮโดรเจนไอออนที่ถูกปล่อยอออกมาอยู่ในสารละลายดิน และสภาพกรดแฝง (potential acidity) หมายถึง ไฮโดรเจนไอออนที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ ซึ่งดูดซับอยู่ที่ผิวดิน และอาจจะออกมาสู่สารละลายดินได้ด้วยปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนแคตไอออนเท่านั้น (คณาจารย์ภาคปฐพีวิทยา, 2544)

ตารางที่ 3 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของดินชนิดต่างๆ

ชนิดของดิน	ค่าความสามารถในการซึมผ่าน (มม./วินาที)	คุณสมบัติการระบายน้ำ
กรวด	มากกว่า 10	ดี
ทราย	$10 - 10^{-2}$	ดี
ทรายละเอียด	$10^{-2} - 10^{-4}$	ปานกลาง
ดินตะกอน	$10^{-4} - 10^{-6}$	เลว
ดินเหนียว	น้อยกว่า 10^{-6}	ซึมผ่านยาก

ที่มา : มณเฑียร (2538)

2.3 การแลกเปลี่ยนไอออนบวก (cation exchange)

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออบวกจะเกิดขึ้นกับเฉพาะดินเหนียวเท่านั้น เนื่องจากอนุภาคของดินเหนียวนั้นอยู่ในสภาพของผลึกที่มีไอออนลบ ที่ดูดยึดไอออนบวกไว้ ปัจจัยที่ควบคุมการแลกเปลี่ยนไอออนบวกในดินประกอบด้วย

1) ชนิดของประจุไอออนลบที่ยึดเกาะดินและไอออนบวกที่เข้ามาแทน สำหรับไอออนที่มีความเข้มข้นเท่ากัน พันธะคู่ จะมีความสามารถในการดูดติดดังนั้นพันธะคู่จะเข้ามาแทนที่พันธะเดี่ยวในการแลกเปลี่ยนไอออน ทั้งนี้ขนาดของไอออนก็มีผลต่อการแลกเปลี่ยนซึ่งโดยธรรมชาติของไอออนบวกที่น้ำห่อหุ้มอยู่เสมอ ไอออนขนาดเล็กจะมีชั้นน้ำห่อหนากว่าไอออนขนาดใหญ่ ชั้นน้ำที่ห่อหุ้มอยู่มีผลโดยตรงต่อการยึดเกาะของไอออนกับอนุภาคดินเหนียว

2) ความเข้มข้นของไอออนบวกที่เข้ามาแทนที่ โดยปกติถ้าปริมาณไอออนบวกที่เข้ามาแทนที่มีมากก็จะสามารถไล่ไอออนลบที่เกาะอยู่ที่ผิวหน้าของดินเหนียวได้ง่าย จึงส่งให้ในบางครั้งไอออนที่มีพันธะเดี่ยวสามารถเข้าไปแลกเปลี่ยนไอออนแทนที่ไอออนทีมีพันธะคู่ได้

3) ปริมาณการอิ่มตัว ปริมาณการอิ่มตัวของไอออนบวกบางชนิดที่ดูดซับอยู่ที่ผิวหน้าของดินจะมีอิทธิพลต่อความจุแลกเปลี่ยนไอออนเป็นอย่างมาก เช่น ถ้าเหลือไอออนบวกของแคลเซียมที่ผิวหน้าของดินเหนียวน้อย การที่จะไล่แคลเซียมให้ออกไปจนหมดจากดินเหนียวทำได้ยากมาก ตรงกันข้ามกับไอออนบวกของโซเดียม

4) ไอออนบวกอื่นที่อยู่ร่วมบนผิวหน้าของดินเหนียว ความจุแลกเปลี่ยนไอออนบวก (cation exchange capacity, CEC) หมายถึง ปริมาณของไอออนบวกทั้งหมดที่ดินสามารถดูดเอาไว้ได้ ซึ่งจะบอกในหน่วยเป็น มิลลิอิควิวาเลนซ์ ต่อ 100 กรัมของดิน (meq/100 g) โดยปัจจัยที่จะส่งผลต่อค่าซีอีซีของดินได้แก่ ปริมาณดินเหนียวและอินทรีย์วัตถุที่มีอยู่ในเนื้อดิน นั่นคือ ดินเหนียวร้อยละ 1 จะให้ค่าซีอีซี เท่ากับ 0.5 มิลลิอิควิวาเลนซ์ ต่อ 100 กรัมของดิน ส่วนสารอินทรีย์ร้อยละ 1 จะให้ค่าซีอีซี เท่ากับ 2 มิลลิอิควิวาเลนซ์ ต่อ 100 กรัมของดิน

2.4 การแทรกซึมน้ำ (infiltration)

การแทรกซึมน้ำ หมายถึง การที่น้ำจากนอกดินไหลผ่านขอบเขตระหว่างดินจากภายนอกเข้าไปในมวลดิน ซึ่งจะเกิดทั้งแนวดิ่ง และแนวนอน ปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการแทรกซึมน้ำของดินประกอบด้วย ลักษณะสมบัติของดิน ซึ่งดินเนื้อหยาบที่มีโพรงใหญ่จะมีอัตราการซึมสูงกว่าดินเนื้อละเอียดที่มีช่องว่างเล็ก และระดับความชื้นของดิน โดยดินที่แห้งจะมีอัตราสูงในตอนแรกที่น้ำเริ่มสัมผัสดิน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าความชื้นในดินในตอนเริ่มต้นด้วย เมื่อเวลาผ่านไปอัตราการซึมจะลดต่ำลงเนื่องจากเนื้อดินเหนียวดูดซับเอาไว้และขยายตัวออกทำให้ช่องว่างระหว่างเม็ดดินเล็กลง (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2544)

2.5 การกรองผ่านชั้นดิน

เป็นการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยในน้ำมาไว้บนอนุภาคดิน หรือมาไว้ที่ช่องว่างอนุภาคของดิน กลไกที่เกี่ยวข้องกับการกลไกการเคลื่อนย้ายสารแขวนเข้าหาอนุภาคของดิน (transport mechanism) และกลไกการตกตะกอนและติดค้าง (interception) ซึ่งสารแขวนลอยสามารถเคลื่อนที่เข้าหาอนุภาคดินได้ 2 วิธี คือ การเคลื่อนที่ตามธรรมชาติของสารที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน เป็นการเคลื่อนที่ระดับโมเลกุลที่เกิดจากการแพร่กระจายแบบ บราวเนียน (brownian diffusion) อีกวิธี

ได้แก่ การเคลื่อนที่ตามเส้นทางการไหลของน้ำ กล่าวคือ สารแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน จะเบียดเข้าหาอนุภาคดิน (interception) ขณะที่วิ่งผ่านอนุภาคของดิน ส่วนสารที่มีขนาดใหญ่ จะตกตะกอนในทิศทางที่เคลื่อนที่เข้าหาอนุภาคดิน ซึ่งวิธีที่สองนี้ มีอิทธิพลต่อขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า 1 ไมครอน น้อยมาก (มั่นสิน, 2544)

3. <u>จุลินทรีย์ในดิน</u>

ปริมาณและชนิดของจุลินทรีย์ในดินแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหรือปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดและปริมาณของสารอาหาร ความชื้นในดิน การระบายอากาศ อุณหภูมิ พีเอช สภาวะบางอย่าง เช่น เกิดน้ำท่วม หรือการปรับปรุงดิน เช่น การเติมปุ๋ย (นงลักษณ์ และ ปรีชา, 2544) (สุภมาส, 2539)

3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อจุลินทรีย์ในดิน

1) ความชื้นในดิน เนื่องจากน้ำเป็นองค์ประกอบสำคัญของโปรโตพลาสซึม น้ำจึงควรมีอย่างเพียงพอต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ระดับน้ำหรือความชื้นที่พบมากที่สุด อยู่ในช่วง 50-75 % WHC (water holding capacity)ของดิน

2) การระบายอากาศ น้ำและอากาศในดินต่างอาศัยช่องว่างในดิน ถ้าน้ำมีมากจะมีอากาศน้อย ดังนี้เป็นต้น ดังนั้นอากาศอาจจะเป็นตัวกำหนดชนิดของแบคทีเรียที่มีบทบาทสำคัญในดินได้ เช่น เมื่อสภาพน้ำมาก เกิดการอับอากาศ สภาพเช่นนี้อำนวยต่อกิจกรรมของแบคทีเรียพวกไม่ต้องการออกซิเจนในสภาพน้ำขังเช่น ดินนา ความหลากหลายชนิดของแบคทีเรียจะลดลงอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะอย่างยิ่งพวกต้องการออกซิเจนขณะที่พวกไม่ต้องการออกซิเจนจะเพิ่มจำนวนมากขึ้นอย่างรวดเร็ว

3) อุณหภูมิในดิน อุณหภูมินับเป็นตัวกำหนดความรุนแรง ปริมาณและชนิดของกระบวนการชีวภาพอันสำคัญ จุลินทรีย์แต่ละชนิดต่างก็มีอุณหภูมิพอเหมาะด้วยกันทั้งสิ้น แบคทีเรียอาจแบ่งได้ตามอุณหภูมิดังนี้ (นงลักษณ์ และ ปรีชา, 2544) เมโซไฟล์ (mesophiles)

เจริญเติบโตได้ดีในช่วง 15-45 °ซ ไซโครไฟล์ (psychrophiles) เจริญได้ดีในช่วง ต่ำกว่า 20° ซเทอร์โมไฟล์ (thermophiles) เจริญได้ดีในช่วง 45-65 °ซ

4) อินทรีย์วัตถุ จำนวนประชากรของแบคทีเรียขึ้นอยู่กับปริมาณอินทรียวัตถุในดิน หรือสารอินทรีย์คาร์บอนที่ใส่ลงไปในดิน เช่น ในที่นี้เป็นปริมาณสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสีย พิจารณาค่าบีโอดี จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมากในระยะ 4-5 เดือนแรกของการเน่าสลายของสารอินทรีย์ และจะลดลงเมื่อสารอินทรีย์น้อยลง

5) สภาพ กรด-ด่าง ดินเป็นกรดหรือด่างมาก จะมีจำนวนประชากรแบคทีเรียไม่มากเท่ากับสภาพดินที่เป็นกลาง โดยทั่วไปแล้วยิ่งสภาพ ไฮโดรเจนไอออนในดินมากขึ้นเท่าใดจำนวนแบคทีเรียจะลดลงไปเช่นกัน

6) ธาตุอาหารในดิน นอกจากอินทรีย์คาร์บอนซึ่งเป็นธาตุอาหารแบคทีเรียแล้วการเพิ่มธาตุอาหารอื่นลงไปในดินก็มีบทบาทต่อจำนวนแบคทีเรียเช่นกัน ตัวอย่างเช่นการเติมปุ๋ยไนโตรเจนในดินที่มีธาตุไนโตรเจนอยู่น้อยจะช่วยเพิ่มปริมาณแบคทีเรีย แต่ในบางโอกาสการใส่ปุ๋ยแอมโมเนียทำให้ปริมาณจุลินทรีย์ลดลงทั้งนี้เนื่องมาจากการเกิดออกซิเดชันเนื่องจากแอมโมเนียได้กรดไนตริกโดยการกระทำของจุลินทรีย์บางชนิด

ระดับความลึกของดินก็มีอิทธิพลต่อชนิดและปริมาณของแบคทีเรีย เช่นกัน ระดับความลึกของดินเป็นอิทธิพลรวมของปริมาณอินทรีย์คาร์บอน ปริมาณออกซิเจน ความชื้น ความเป็นกรด-ด่าง ธาตุอาหาร และปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ โดยทั่วไปแล้วจุลินทรีย์ส่วนใหญ่จะลดลงตามระดับความลึกของดิน

<u>ฟลูออเรสเซนต์อินสิทูไฮบริไดเซชัน</u>

เทคนิคการทำ Fluorescent in situ Hybridization หรือ FISH เป็นการตรวจหาชนิดของจุลินทรีย์ที่ได้รับความนิยมและยังมีความแม่นยำจำเพาะต่อจุลินทรีย์นั้นๆโดยการใช้โพรบ (probe) ซึ่งส่วนใหญ่ติดฉลากด้วยสาร fluorophores ที่สามารถคายพลังงานออกมาในรูปของแสงเมื่อดูดซึมหรือกระทบเข้ากับพลังงานสูง เช่น ยูวี นิยมสืบค้นบางส่วนของดีเอ็นเอ (deoxyribonucleic acid;

DNA) หรือยีนบนแท่งโครโมโซม โดยโพรบที่ใช้เป็นได้ทั้งดีเอ็นเอ และ อาร์เอ็นเอ (ribonucleic acids; RNA)

การใช้โพรบ ติดฉลากเข้าจับกับกรด นิวคลิอิกภายในเซลล์ เกิดขึ้นครั้งแรกเมื่อปี 1969 โดยกลุ่มของ Gall และ Pardue (1969)และ John และคณะ (1969) ทั้งสองกลุ่มนี้ใช้โพรบ ที่ติดฉลากด้วยสารรังสี ต่อมาปี 1980 Bauman และคณะได้นำโพรบ มาติดฉลากด้วยสารเรืองแสง (fluorophores) มาแทนการใช้สารรังสีเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างสารรังสีและสารปลอดรังสีที่สามารถเรืองแสงแล้ว สารเรืองแสงจะช่วยให้ทำงานได้สะดวกและรวดเร็วขึ้นสัญญาณ (signal) มีความคมชัดมากขึ้น และมีความคงตัวมากกว่า ในปลายปี คศ.1980 ได้มีการใช้ โพรบหลายประเภทติดฉลากเรืองแสง แต่ที่นิยมใช้ ในงาน FISH เป็น โพรบติดฉลากด้วย biotin หรือ digoxigenin แล้วใช้ avidin หรือ anti-digoxigenin มาเชื่อมต่อกับ fluorescien หรือ rhodamine เข้าจับอีกชั้นหนึ่ง (indirect FISH)เมื่อ fluorescent labele probe เข้าจับกับกรดนิวคลิอิกเป้าหมายแล้วสามารถตรวจหาสัญญาณ fluorescent signal ได้ภายได้ กล้องฟลูออเรสเซ้นต์ (fluorescent microscope) นอกจากนี้ยังสามารถใช้สารเรืองแสง ติดฉลากกับสายของดีเอ็นเอหรืออาร์เอ็นเอ โดยตรง (Direct FISH) โดยอาศัยวิธีทางเอนไซม์ โดยนำสารเรืองแสงติดฉลากเข้าไปกับ 1 โมเลกุลหรือหลายโมเลกุลต่อหนึ่งสายของโพรบ การติดฉลากสารเรืองแสงเข้ากับสายโพรบ โดยตรงมีข้อดี คือ หลังจากผ่านขั้นตอนการ hybridization และการล้าง (washing) แล้วสามารถตรวจหาสัญญาณ ด้วยกล้องฟลูออเรสเซ้นต์ได้ทันที สัญญาณฟลูออเรสเซ้นต์ที่ได้ค่อนข้างอ่อน เป็นเพียง 10-15 % ของวิธีทางอ้อม ที่อาศัย antibody หรือโปรตีน ติดสารเรืองแสงซึ่งสัญญาณชัดเจนกว่าการตรวจหาโดยตรง

แต่ในปัจจุบันการตรวจหาสัญญาณฟลูออเรสเซนต์ จากโพรบ ที่ได้รับการติดฉลากด้วยสารเรืองแสงโดยตรง ไม่เป็นปัญหาอีกต่อไปเนื่องจากมีอุปกรณ์การตรวจจับสัญญาณแสงที่มีความไวสูง เช่น cooled CCD cameras ที่ต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูงเพื่อช่วยในการขยายสัญญาณและประมวลผล การใช้โพรบติดฉลากสารเรืองแสงโดยตรงมีข้อที่ควรระวัง คือ แสงอาจจะอ่อนหรือจางลงในช่วงการทำ hybridization จึงควรหลีกเลี่ยงไม่ให้ reaction mixture กระทบแสงสว่างมากเกินไป

การดูดติดผิว (adsorption)

การดูดติดผิวเป็นการสะสมของสารหนึ่งชนิดหรือมากกว่าที่บริเวณผิวสองสถานะ เช่น ของเหลวและของแข็ง หรือ ก๊าซและของแข็ง โมเลกุลที่สะสมหรือเกาะติดที่ผิว เรียกว่า สารถูกดูดติดผิว (adsorbate) และของแข็งซึ่งมีการเกาะติดที่ผิวเกิดขึ้น เรียกว่า สารดูดติดผิว (adsorbent) ซึ่งสารดูดติดผิวในการบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ (activated carbon), เรซิน (resin), เหล็กออกไซด์ (metal oxide), ไฮดรอกไซด์ และ คาร์บอเนต (hydroxide and carbonate), ดินเหนียว (clay) และของแข็งอื่นๆ ที่แขวนลอยอยู่หรือสัมผัสกับน้ำ (อธิชัย, 2539)

การดูดติดผิวมีบทบาทสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ เนื่องจากสามารถใช้ดูดติดผิวโมเลกุลของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ซึ่งเป็นสาเหตุของกลิ่น สี เชื้อโรค และสารพิษต่างๆ การเกาะติดผิวของโมเลกุลสารอินทรีย์ตามธรรมชาติบนการและเปลี่ยนประจุบนเรซิน และเรซิน เป็นสิ่งที่ใช้เพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ และมีบทบาทมากในการผลิตน้ำประปา เนื่องจากสารถกำจัดมลสารที่เล็กมากซึ่งไม่สามารถกำจัดด้วยวิธีการตกตะกอน หรือการกรองธรรมดา โดยปกติในการกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำเสียนั้นนิยมใช้ ถ่านกัมมันต์ ซึ่งมีพื้นที่ผิวสำหรับให้การดูดซับที่มาก (Frederick, 1990)

การดูดซับเป็นกลไกที่มีความยุ่งยากมากในการวิเคราะห์ จำเป็นต้องอาศัยคณิตศาสตร์ขั้นสูงช่วยในการวิเคราะห์ โดยเฉพาะการดูดซับด้วยดินจะมีความสลับซับซ้อนมาก เพราะดินมีลักษณะและขนาดที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดการวิเคราะห์ที่ยุ่งยาก

1 กลไกการดูดติดผิว (adsorption mechanism)

การดูดติดผิวของสารประกอบอินทรีย์เกิดจากแรงรวมตัว (binding force) หลายชนิดระหว่างโมเลกุลของสารอินทรีย์และพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งแรงทั้งหมดมีแหล่งที่มาจากอันตรกิริยาทางแม่เหล็กไฟฟ้า การดูดติดผิวที่สำคัญแบ่งเป็นสองแบบ คือ การดูดติดผิวทางกายภาพ และการดูดติดผิวทางเคมี โดยการดูดติดผิวของทั้งสองกรณีเกิดเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าใกล้และยึดติดกับผิวของอของแข็งซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดที่ผิวของของแข็ง สามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลสารที่อยู่ในของเหลว ซึ่งความแตกต่างของการดูดติดผิวทางกายภาพและเคมีมีดังนี้

1) การดูดติดผิวทางกายภาพไม่รวมการใช้ร่วมกันหรือ การส่งอิเล็กตรอน ปฏิกิริยาที่เกิดสามารถย้อนกลับได้ (reversible) การคายตัว (desorption) สามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิเดียวกัน แม้ว่าอาจจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ เนื่องจากผลของการแพร่ แต่การดูดติดผิวทางเคมีจะหมายถึงการใช้พันธะทางเคมี และการไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้

2) การดูดติดผิวทางกายภาพจะไม่มีพื้นที่เฉพาะ โมเลกุลที่ถูกดูดติดผิวจะเป็นอิสระในการเข้าไปติดยังพื้นผิว พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดติดผิวสามารถวัดได้จากสารดูดติดผิวในทางตรงข้าม แต่การดูดติดผิวทางเคมีจะมีพื้นที่เฉพาะโมเลกุลที่ถูกดูดติดผิวทางเคมีจะมีพื้นที่ตายตัว

3) ความร้อนที่เกิดจากการดูดติดผิวทางกายภาพมีค่าน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับการดูดติดผิวทางเคมี โดยการดูดติดผิวทางกายภาพจะมีความร้อนเกิดขึ้นสูงสุดประมาณ 20 กิโลแคลลอรี/โมล ในการดูดติดผิวของสารดูดติดผิวที่มีรูพรุนเล็กๆ ส่วนความร้อนในการดูดติดผิวทางเคมีจะอยู่ในช่วง 20-100 กิโลแคลลอรี/โมล ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นสามารถเป็นเกณฑ์ในการแยกประเภทของกระบวนการในการดูดติดผิวได้

การดูดติดผิวทางเคมี มีลักษณะที่สำคัญที่เกิดปฏิกิริยาอันนำมาซึ่งความร้อนที่สูงจากพันธะทางเคมีที่เกิดขึ้น อาทิ การหมุนตัวของอิเล็กตรอน การเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมาจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน และพันธะทางเคมีจากการรวมตัวของสารดูดติดผิวกับสารที่ถูกดูดติดผิว (Faust and Aly, 1987)

การดูดติดผิวทางกายภาพมีผลมาจากแรงวานเดอวาล์ว (van der waals force) ซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของแรงสองชนิด คือ แรงกระจาย และแรงไฟฟ้าสถิตย์ โมเลกุลของสารดูดติดผิวจะยึดติดกันทางกายภาพกับโมเลกุลของสารดูดติดผิว การดูดติดผิวแบบนี้เป็นการดูดติดผิวแบบหลายชั้น กล่าวคือ แต่ละชั้นโมเลกุลจะเกิดอยู่บนชั้นโมเลกุลที่ถูกดูดติดก่อนหน้านี้ โดยจำนวนชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นโมเลกุลของสารที่ถูกดูดติดผิว หรือจำนวนชั้นของโมเลกุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารดูดติดผิวเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการดูดติดผิวทางกายภาพจะเกิดขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญได้แก่ การจัดเรียงตัวของโมเลกุล การกระจาย การเหนี่ยวนำ สำหรับโมเลกุลที่มีขั้วนั้นแรงดึงดูดจะเกิดจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุลซึ่งเป็นแรงดึงดูดที่เกิดจากโมเลกุลที่มีขั้วสองโมเลกุล คือขั้วลบของโมเลกุลหนึ่งกับขั้วบวกของอีกโมเลกุล สำหรับโมเลกุลที่ไม่มีขั้วนั้นการดูดติดผิวจะเกิด

แบบการกระจายตัวหรือเกิดการสั่นของอิเล็กตรอนรอบๆนิวเครียสของอะตอม ทำให้พลังงานของระบบลดลงระบบจึงมีความเสถียรขึ้น ทำให้โมเลกุลสามารถเข้ามาเกาะติดกันได้ (อธิชัย, 2539)

2. <u>สมการการดูดติดผิว (adsorption isotherm)</u>

ในกระบวนการดูดติดผิว ความเข้มข้นของสารละลายจะมีผลต่อตัวถูกละลายบนผิวของของแข็ง เมื่อกระบวนการดูดติดผิวเกิดขึ้น ตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดมีแนวโน้มที่จะคายตัวออกไปสู่สารละลาย จนกระทั่งอัตราของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวมีค่าเท่ากับอัตราการคายออกเข้าสู่สภาวะคงที่ จะเรียกจุดนี้ว่า สมดุลการดูดติดผิว (adsorption equibrium) ที่จุดสมดุลนี้จะไม่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนพื้นผิวของของแข็ง หรือในของเหลว และที่จุดสมดุลนี้จะเป็นลักษณะของระบบทั้งหมด ไม่ว่าจะเป็นตัวถูกละลาย ตัวทำละลาย สารดูดติดผิว อุณหภูมิ พีเอช อื่นๆ ปริมาณการดูดติดผิวที่จุดสมดุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายเพิ่มขึ้น ในการแสดงปริมาณของสารละลายที่ถูกดูดติดผิวที่จุดสมดุลจะเพิ่มขึ้นต่อปริมาณของสารดูดติดผิว เป็นฟังก์ชั่นของความเข้มข้นที่จุดสมดุลในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า ไอโซเทอมการดูดติดผิว (adsorption isotherm) รูปร่างของไอโซเทอมการดูดติดผิวจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการดูดติดผิวและปริมาณของสารที่ถูกดูดติดผิวบนพื้นที่ผิวของสารดูดติดผิว รูปแบบการดูดติดผิวขั้นพื้นฐานมีด้วยกัน 5 แบบ ซึ่งไอโซเทอมแบบที่ 1 มีความสัมพันธ์กับระบบซึ่งการดูดติดผิวเกิดขึ้นเพียงชั้นเดียว ส่วนแบบที่เหลือเป็นรูปแบบการดูดติดผิวของโมเลกุลหลายชั้น โดยทั่วไปในการกำจัดสารปนเปื้อนที่มีอยู่ในน้ำเสียนั้นนิยมใช้ไอโซเทอมตามรูปแบบที่ 1 ไอโซเทอมการดูดติดผิวของสารประกอบมาจากพารามิเตอร์ เช่น ทีโอซี ดีโอซี (dissolve organic carbon) และซีโอดี เป็นต้น ซึ่งสามารถวัดค่าความเข้มข้นของสารได้ แต่เนื่องจากสารประกอบหลายๆ ชนิดในสารผสม ก็จะมีช่วงการดูดติดผิวหลายๆค่าที่เกิดกับสารดูดติดผิว ดังนั้นรูปร่างของไอโซเทอมจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของจำนวนสารประกอบในสารผสม บนผิวของสารที่ถูกดูดติดผิวจะเกิดแรงทางเคมี เช่น พันธะไฮโดรเจน แรงระหว่างขั้ว และแรงวานเดอวาล์ว ถ้าเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับคือ เมื่อสารดูดติดผิวมีสารเกาะจำนวนมากจะเกิดการย้อนกลับไปมาระหว่างผิวและสารละลายซึ่ง เรียกว่า จุดสมดุลในลักษณะที่สำคัญของสารดูดติดผิว คือ ปริมาณการสะสมของสารที่ถูกดูดติดผิว โดยเมื่ออุณหภูมิคงที่ สมดุลของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดติดผิว ต่อหน่วยของสารดูดติดผิว แทนด้วย qe หรือ x/m และสมดุลของความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดติดผิวในสารละลาย แทนด้วย Ce จะเรียกว่า สมการการดูดติดผิว (adsorption isotherm)

โมเดลโดยปกติที่ใช้อธิบายสมดุลการดูดติดผิวของระบบที่มีสารที่ถูกดูดติดผิวหลายชั้น เช่น โมเดลแลงเมียร์ ที่ถูกพัฒนาโดย Butler และ Ockrent โมเดลนี้จะมีพื้นฐานของสมมุติฐานเช่นเดียวกับโมเดลของแลงเมียร์ (langmuir model) ที่ใช้ในการดูดติดผิวแบบชั้นเดียว แม้ว่าโมเดลของแลงเมียร์ที่ใช้อธิบายการดูดติดผิวของสารหลายชั้นจะได้รับความนิยม แต่มีข้อด้อยคือ ยังไม่สามารถคาดการณ์ได้ถูกต้องแม่นยำ Jain และ Snoeyink จึงทำการปรับปรุงโดยใช้สมมุติฐานให้สารที่ถูกดูดติดผิวมีขนาดแตกต่างกัน และมีเพียงสารที่เล็กกว่าเท่านั้นที่จะเข้าไปยังรูพรุนที่เล็กกว่าได้ ดังนั้นกลุ่มฟังชั่นนอลบนพื้นผิวบางชนิดจะถูกดูดติดผิวสารประกอบเพียงชนิดเดียวไม่ใช่ทั้งหมด ซึ่งก็มีโมเดลที่ได้รับการยอมรับว่าสามารถคาดการณ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีก 2 โมเดล คือ โมเดลฟรุนดิช และโมเดล แบท (Weber et al, 1981) แต่ในการทดลองครั้งนี้จะอาศัยโมเดลของแลงเมียร์ และ ฟรุนดิช มาอธิบายการดูดซับโดยมีรายละเอียดของโมเดลดังนี้

1) สมการฟรุนดิช (freundlich adsorption isotherm)

สมการฟรุนดิชเป็นสมการที่ได้จากการทดลองที่มีประโยชน์มาก เพราะสามารถอธิบายการดูดติดผิวได้อย่างแม่นยำ ซึ่งมีสมการดังนี้ (Frederick, 1990)

$$q_e = x/m = K_F.C_e^{1/n} \quad (1)$$

เขียนเป็นสมการเส้นตรงได้ว่า

$$\log x/m = \log K_F + 1/n \log C_e \quad (2)$$

เมื่อ q_e , x/m คือ มวลสารที่ถูกดูดติดผิว ต่อ มวลสารที่ดูดติดผิว (มก./ก.)

Ce คือ ความเข้มของตัวถูกละลายที่จุดสมดุล (มก/ล.)

K_F คือ ความสามารถในการดูดติดผิวของสารที่ดูดติดผิว (มก./ก.)

1/n คือ ฟังก์ชั่นความแข็งแรงในการดูดติดผิว

เมื่อนำค่า x/m และ C_e มาหาค่าในรูปของ log ได้แล้วนำมาสร้างกราฟเส้นตรง โดยความชันของกราฟจะเป็นค่า 1/n และจุดตัดแกน x/m คือ ค่าของ log K_F โดยเมื่อแก้สมการจะได้ค่าคงที่คือค่า K_F นั่นเองซึ่งเมื่อค่า 1/n ที่น้อยลงจะบอกถึงการเพิ่มความแข็งแรงของพันธะการดูดติดผิว และเมื่อ

ค่า 1/n เพิ่มมากขึ้นจะบ่งบอกว่าความสามารถในการดูดติดผิวจะเป็นอิสระต่อค่า C_e นั้นด้วย (Faust and Aly, 1987) สมการฟรุนดิช ไม่สามารถอธิบายได้ทุกช่วงของค่า C_e กรณีที่ค่า C_e เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ x/m จนกระทั่งสารดูดติดผิวถึงจุดอิ่มตัว ที่จุดอิ่มตัว x/m จะมีค่าคงที่จนเป็นอิสระต่อการเพิ่มขึ้น x/m และจุดนั้นสมการฟรุนดิชจะไม่สามารถอธิบายได้ เนื่องจากไม่มีการรองรับใดๆ ที่บอกว่า ข้อมูลการดูดติดผิวจะเหมือนกับสมการฟรุนดิชในทุกความเข้มข้นสารที่น้อยกว่าจุดอิ่มตัว จึงต้องมีการทดลองเพื่อขยายสมการให้ครอบคลุมทุกช่วง จนได้สมการแบบแลงเมียร์

2) สมการแลงเมียร์ (langmuir adsorption isotherm)

สมมุติฐานของแบบจำลองแลงเมียร์ เรียกว่า localized monolayer model คือ โมเลกุลถูกดูดติดผิวอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของสารที่ดูดติดผิว แต่ละโมเลกุลสามารถดูดติดผิวได้โมเลกุลเดียว โดยพื้นที่ของบริเวณที่ดูดติดผิวมีจำนวนที่แน่นอน และพลังงานที่ดูดติดผิวแต่ละบริเวณมีค่าเท่ากัน ซึ่งมีสมการดังนี้

$$q_e = x/m = (a.b.C_e)/(1+b.C_e) \quad (3)$$

โดยเขียนเป็นสมการเส้นตรงได้ว่า

$$m/x = (1/ab.C_e)+(1/a) \quad (4)$$

เมื่อ m/x คือ มวลสารที่ดูดติดผิว ต่อ มวลารที่ถูกดูดติดผิว (มก./ก.)
C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่จุดสมดุล (มก./ล.)
a คือ ค่าคงที่จากการทดลอง
b คือ พลังงานการดูดติดผิว

เมื่อนำมาเขียนกราฟระหว่าง m/x กับ 1/Ce จะได้กราฟเส้นตรง โดย ค่า จุดตัดแกน m/x จะเท่ากับ ค่า 1/a และค่า ความชันของกราฟจะเท่ากับ 1/ab นั้นเองเมื่อแก้สมการที่ได้ออกมาจะได้ค่าคงที่ ที่ต้องการคือ a และ b นั้นเอง (Frederick, 1990)

โดยในการทดลองครั้งนี้เป็นการทดลองการดูดติดผิวของสารอินทรีย์คาร์บอนที่ละลายน้ำ และสารประกอบต่างๆของไนโตรเจน ที่อยู่ในน้ำชะมูลฝอยชุมชนและสารดูดติดผิวคือ วัสดุที่บรรจุลงในระบบดินแบบประดิษฐ์ คือ หินปูน ทราย ดินเหนียว และดินเหนียวปนดินตะกอน โดยอาศัยสมการข้างต้นอธิบายโดยการทดลองสร้างกราฟจากสมการข้างต้นและพิจารณาความเหมาะสมจากค่า R^2 ที่ได้

ไนโตรเจน (Nirogen)

สารประกอบไนโตรเจนในน้ำเสียมีหลายรูป ได้แก่ อินทรีย์ไนโตรเจน ไนเตรท ไนไตรท์ และแอมโมเนียไนโตรเจน ซึ่งการกำจัดไนโตรเจนเหล่านี้สามารถทำได้ทั้งวิธีทางฟิสิกส์ เคมี และชีวภาพ (ธงชัย, 2544)

1. การกำจัดโดยวิธีกายภาพ

1) การไล่โดยอากาศ (air strpping) โดยใช้อากาศเป่าไล่แอมโมเนียไนโตรเจนออกจากน้ำ แต่ไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนและไนเตรทไนโตรเจนได้

2) reverse osmosis โดยใช้แมมเบรน (membrane) สามารถกำจัดไนโตรเจนได้ทุกรูป ประสิทธิภาพขึ้นกับแมมเบรน ที่ใช้

3) การกรอง (filtration) สามารถกำจัดเฉพาะสารอินทรีย์ไนโตรเจนแขวนลอย

2. การกำจัดด้วยวิธีทางเคมี

1) การกำจัดด้วยคลอรีน (chlorination) โดยที่แอมโมเนียจะทำปฏิกิริยากับคลอรีน ทำให้เกิดสารประกอบคลอรามีน แต่จะเป็นผลเสียต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปา เพราะจะทำให้ความต้องการคลอรีนมากขึ้นในกระบวนการ

2) การตกตะกอนทางเคมี (chemical coagulation) เป็นการใช้สารเคมีในการตกตะกอนสารอินทรีย์ไนโตรเจนแต่ไม่สามารถกำจัดสารแอมโมเนียและไนเตรทไนโตรเจนได้

3) การดูดซับโดยถ่าน (carbon adsorption) โดยการใช้ถ่านกัมมันต์ ดูดซับสารอินทรีย์ ไนโตรเจน แต่สามารถกำจัดแอมโมเนียได้การแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange) โดยการใช้ เรซินประจุลบหรือ เรซินประจุบวก สามารถกำจัดไนโตรเจนได้ทุกรูป

3. การกำจัดด้วยวิธีทางชีวภาพ

ปัจจุบันพบว่าการใช้กระบวนการทางชีวภาพเป็นวิธีที่ประหยัดและเหมาะสมที่สุด คือ ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชั่น และ ดีไนตริฟิเคชั่น

3.1 ไนตริฟิเคชั่น ปฏิกิริยา นี้เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชั่น ที่เปลี่ยนรูปของ แอมโมเนีย ไนโตรเจน เป็น ไนเตรทไนโตรเจน โดยจุลินทรีย์ชนิด ที่ใช้ออกซิเจน 2 ตัวหลัก คือ สกุลไนโตรโซโมเนส (*Nitrosomonas*) และ ไนโตรเบคเตอร์ (*Nitrobacter*) ภายใต้สภาวะใช้ออกซิเจน ปฏิกิริยาที่เปลี่ยนจาก แอมโมเนียไนโตรเจน ไปเป็น ไนเตรทไนโตรเจน โดยใช้ไนโตรเบคเตอร์ ดังสมการที่ (5), (6)

Nitrosomonas

$$2NH_4^+ + 3O_2 \longrightarrow 2NO_2^- + 4H^+ + 2H_2O \qquad (5)$$

Nitrobacter

$$2NO_2^- + 3O_2 \longrightarrow 2NO_3^- \qquad (6)$$

เนื่องจาก จุลินทรีย์ในกลุ่มไนตริไฟอิง ได้พลังงานสำหรับการเจริญจากการออกซิเดชันของสารอินทรีย์ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งอยู่ในประเภท chemoautotrophs ดังสมการ สตอยชิโอเมตริก ของไนตริฟิเคชัน มักจะพิจารณาด้านด้านที่ใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน เพียงอย่างเดียว โดยเขียนได้ดังนี้

สมการปฏิกิริยาของไนโตรโซโมเนส

$$55NH_4^+ + 76O_2 + 109HCO_3^- \longrightarrow C_5H_7O_2N + 54NO_2^- + 104H_2CO_3 + 57H_2O \quad (7)$$

สมการปฏิกิริยาของไนโตรเบคเตอร์

$$400NO_2^- + NH_4^+ + 4H_2CO_3 + HCO_3^- + 195O_2 \longrightarrow C_5H_7O_2N + 400NO_3^- + 3H_2O \quad (8)$$

สมการปฏิกิริยารวม

$$NH_4^+ + 1.83O_2 + 1.98HCO_3^- \longrightarrow 0.98NO_3^- + 0.021C_5H_7O_2N + 1.88H_2CO_3 + 1.04H_2O \quad (9)$$

สมการเหล่านี้มีความสำคัญ คือ

1) บอกให้ทราบถึงระดับความต้องการความเป็นด่าง (ไบคาร์บอเนต) สูงมากในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งส่วนใหญ่จะถูกใช้สร้างความเป็นกลาง และส่วนน้อยของไบคาร์บอเนตเหล่านี้จะถูกใช้สร้างเซลล์ใหม่ ซึ่งถ้าน้ำเสียมีระดับความเป็นด่างไม่สูงพอไนตริฟิเคชัน จะถูกชะลอให้เกิดช้าลง

2) สำหรับปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน เซลล์ที่สร้างใหม่ มีค่าน้อยกว่าทำให้การเปลี่ยนแปลงของแบคทีเรีย ไม่ส่งผลกระทบต่อปริมาณออกซิเจนที่ต้องการมาก จึงสามารถคำนวณปริมาณออกซิเจนได้ง่ายจากปริมาณของแอมโมเนียที่ถูกเปลี่ยนเป็นไนเตรท

3) บอกให้ทราบความต้องการออกซิเจน ของแบคทีเรียในการเปลี่ยนแอมโมเนีย เป็นไนไตรท์และเปลี่ยนเป็นไนเตรท

3.2 ดีไนตริฟิเคชั่น เป็นการลดปริมาณไนเตรทด้วยการใช้ไนเตรทเป็นตัวสุดท้ายที่รับอิเล็กตรอนในการออกซิเดชันของสารอินทรีย์คาร์บอน จากลักษณะดังกล่าว ปฏิกิริยานี้จึงจัดว่าเป็น

การหายใจแบบไร้ออกซิเจน (anaerobic respiration) กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน สามารถเกิดขึ้นโดยอาศัยจุลินทรีย์หลายกลุ่มที่มีอยู่ในน้ำเสีย ตัวอย่างของจุลินทรีย์ที่พบมากในน้ำเสีย ได้แก่ achomobacter, aerobacter, alcaligenes, flavobacterium, micrococcus, proteus และ pseudomonas ด้วยเหตุนี้การเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนไนโตรเจนในรูปของไนเตรทเป็นก๊าซไนโตรเจนจึงอาจกระทำได้ไม่ยากนัก

ระบบเอ็มไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูประบบไนเตรทมี 2 ชนิด คือ addimilatory และ dissimilatory ประเภทแรกใช้เปลี่ยนไนเตรทให้เป็นแอมโมเนีย เพื่อใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่และเป็นปฏิกิริยาที่จะเกิดขึ้นเฉพาะในเวลาที่มีไนเตรทเป็นแหล่งไนโตรเจนเพียงอย่างเดียวเท่านั้น การเปลี่ยนรูปไนเตรทด้วยเอ็มไซม์แบบ dissimilatory ทำให้เกิดก๊าซไนโตรเจนและถือว่าเป็นเอ็มไซม์ที่รับผิดชอบในการสร้างปฏิกิริยาการหายใจแบบหนึ่ง ซึ่งตามทฤษฎีแล้วการปรากฏของออกซิเจนจะทำให้อัตราการสร้างระบบเอ็มไซม์ที่เกิดขึ้นช้าลงเมื่อออกซิเจนหมดไปหรือมีอัตราที่น้อยมา (จนไม่เพียงพอที่จุลินทรีย์นำไปใช้) ความกดดันที่เกิดขึ้นจะหายไปทำให้อัตราการสร้างเอ็มไซม์กลับคืนสู่สภาพเดิม อิทธิพลของออกซิเจนที่มีต่ออัตราการทำงานของเอ็มไซม์ขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรีย สำหรับการลดไนเตรทแสดงด้วยสมการดังนี้

$$NO_3^- \longrightarrow NO_2^- \longrightarrow NO \longrightarrow N_2O \longrightarrow N_2$$

ผลของปฏิกิริยา 3 ตัวสุดท้าย คือ NO, N_2O, N_2 ล้วนอยู่ในสภาวะของก๊าซซึ่งอาจจะแยกออกจากระบบได้ทั้งสิ้น แต่การเปลี่ยนไนเตรทให้เป็นก๊าซไนโตรเจนจะเป็นการดีที่สุดหลักเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทั่วไปคือ ถ้าจะให้กระบวนการดีไนตริฟิเคชันเกิดขึ้นได้ดีแล้ว ระดับของออกซิเจนละลายในน้ำควรจะต่ำมากและมีระดับเข้าใกล้ศูนย์ เนื่องจากโดยทั่วไประบบกำจัดน้ำเสียจะมีจุลินทรีย์หลายชนิด ผลของกระบวนการดีไนตริฟิเคชันมักจะเป็นก๊าซไนโตรเจนเป็นส่วนใหญ่

วัตถุประสงค์ของดีไนตริฟิเคชัน คือ การกำจัดสารรับอิเล็กตรอน ซึ่งได้แก่ ไนเตรท ให้กลายเป็นก๊าซไนโตรเจน และอาจจะมีการเติมสารให้อิเล็กตรอนเพื่อสร้างปฏิกิริยาให้เกิดขึ้น สารประกอบที่เหมาะสมในทางปฏิบัติและนิยมใช้มากที่สุดคือ เมทานอล ซึ่งเป็นสารเคมีที่หาได้ง่ายและใช้กันแพร่หลายในราคาที่ไม่แพง

3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการ ไนตริฟิเคชัน

1) ออกซิเจนละลายน้ำ ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำ จะมีผลต่อการเจริญของจุลินทรีย์ ไนตริไฟอิง ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน ตามรายงาน Irvine (1979) การเกิดปฏิกิริยา ไนตริฟิเคชั่น จะต้องมีค่าปริมาณออกซิเจนละลาย มากกว่า 1 มก./ล.

2) อุณหภูมิ ที่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์ในกลุ่ม ไนตริไฟอิง จะอยู่ในช่วงประมาณ 28-36 ซ° และที่ต่ำกว่า 4 ซ° การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จะน้อยมากหรือไม่เลย

3) พีเอช มีผลอย่างมากต่ออัตราการเกิดไนตริฟิเคชัน ค่าพีเอชที่เหมาะสม อยู่ในช่วง 7.5-8.5 ซึ่งเหมาะสมกับทั้งไนโตรโซโมเนส และ ไนโตรเบคเตอร์ นอกจากนี้ Alleman and Ivine (1980) ทำการทดลองพบว่าค่าพีเอชที่ทำให้เกิดไนตริฟิเคชันได้ดีที่สุด คือ พีเอช ที่ 8.3

4) อายุสลัดจ์ที่ใช้อากาศ (aerobic sludge retention time, SRT) มีความสำคัญเพราะจุลินทรีย์ในกลุ่ม ไนตริไฟอิง จะเจริญในสภาวะที่มีออกซิเจนอิสระเท่านั้น จากรายงานของ Argaman (1986) พบว่า ค่าวิกฤต ของ อายุสลัดจ์ที่ใช้อากาศ สำหรับไนตริฟิเคชั่น ที่อุณหภูมิ 13-18.5 °ซ จะมีค่าใกล้เคียงกับ 5 วัน และอุณหภูมิ 25-26 °ซ จะมีค่าประมาณ 2.5 วัน

5) ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนตรไฟอิงจะไวต่อความเข้มข้นสูงๆ ใน สารอาหาร จากการศึกษาของ Alleman (1979) รายงานว่า แอมโมเนียอิสระ 0.6 มก./ลบ. จะยับยั้งการเจริญเติบโตของ ไนโตรเบคเตอร์ ซึ่งเป็นแบคทีเรียในกลุ่มของ ไนตริไฟอิง ทำให้ไม่สามารถได้ตามปกติ

3.5 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดีไนตริฟิเคชั่นออกซิเจนละลายน้ำ โดยสภาพพอดีขาดออกซิเจน ที่สมบูรณ์จำเป็นมากสำหรับดีไนตริฟิเคชั่น ที่เกิดขึ้นดังนั้น ความเข้มข้นของออกซิเจนละลาย ควรมีค่าน้อยมากถึงไม่มีเลยตามรายงาน Ivrvine (1979) การเกิดปฏิกิริยา ดีไนตริฟิเคชั่นได้ต้องมีค่าออกซิเจนละลาย น้อยกว่า 0.5 มก./ล.

1) พีเอช ที่เหมาะสมสำหรับ ดีไนตริฟิเคชั่น จะเปลี่ยนไปตามชนิดของแบคทีเรีย แต่โดยทั่วไปจะมีค่าพีเอชเป็นกลางหรือเป็นด่างเล็กน้อยจะดี แต่อาจจะเกิดได้ในช่วงพีเอชที่กว้างกว่า คือ 4.0-9.5

2) อุณหภูมิ โดยกระบวนการดีไนตริฟิเคชั่น จะไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากกว่า aerobic heterotrophic process โดย ดีไนตริฟิเคชั่น จะเกิดขึ้นระหว่างอุณหภูมิ 0-50 °ซ แต่อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด คือ 40 °ซ

อุปกรณ์และวิธีการ

สำหรับการทดลองครั้งนี้เป็นการศึกษาผลความหนาของชั้นดินและรูปแบบการป้อนน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยระบบดินและหินเรียงเป็นชั้น โดยมีการศึกษาในส่วนของการกำจัดมลสารต่างๆ โดยมีอุปกรณ์และวิธีการ ดังนี้

อุปกรณ์

1. เครื่องมือ

1. เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
2. เครื่องกรองสุญญากาศ
3. ตู้อบ 105 และ 150 °ซ
4. ตู้ บ่มเชื้อ 20 °ซ
5. เครื่องชั่งแบบละเอียด
6. โถสุญญากาศ
7. เครื่องวิเคราะห์ ไนโตรเจน
8. เครื่องวิเคราะห์ซีโอดี
9. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
10. กล้องฟลูออเรสเซนต์
11. ปั๊ม
12. เครื่องเติมอากาศ
13. คอลัมน์อะคริลิค ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว สูง 160 ซม.

2. การเตรียมวัสดุ

วัสดุที่บรรจุลงในคอลัมน์ดิน ได้แก่ หินปูน ทราย ดินร่วน และดินเหนียว มีการเตรียมดังนี้ หินปูนและทรายนำมาล้างด้วยน้ำประปา 3 ครั้ง ผึ่งในที่ร่มจนแห้ง ดินร่วนและดินเหนียวนำมาทุบละเอียดพอสมควรขนาดเล็กกว่า 1 ซม. แล้วนำมาผึ่งในที่ร่มจนแห้งเช่นกัน โดยวัสดุเหล่านี้ได้มีแหล่งที่มาต่างๆ ดังนี้ คือ หินปูน จากตลาดค้าปลาสวยงามและอุปกรณ์ จตุจักร กรุงเทพมหานคร

ทรายซึ่งเป็นทรายสำหรับงานก่อสร้างทั่วไปเป็นทรายละเอียด ดินร่วนจากไร่สุวรรณ อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา และดินเหนียว จากอำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม มีลักษณะสมบัติของวัสดุแสดงในตารางที่ 4

3. <u>การเตรียมน้ำชะมูลฝอยชุมชน</u>

น้ำชะมูลฝอยชุมชนที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ได้จากการหมักขยะมูลฝอยชุมชนตามสัดส่วนมูลฝอยชุมชนดังตารางที่ 5 ซึ่งเตรียมขึ้นในถังพลาสติกขนาด 100 ลิตร โดยใส่มูลฝอย 100 กก. ลงในถังตามสัดส่วนและทำการเติมน้ำประปาในอัตรา 1 ล./วัน เป็นเวลา 1 เดือน และปิดฝาถังให้สนิท หลังจากนั้นทำการตรวจสอบคุณสมบัติของน้ำตัวอย่างเมื่อได้น้ำชะมูลฝอยที่ต้องการแล้วเก็บตัวอย่างน้ำชะมูลฝอยดังกล่าวในตู้เย็นที่ 4 °ซ เพื่อเป็นการรักษาคุณสมบัติของน้ำชะมูลฝอยดังกล่าวให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก (ตารางที่ 6) ทำการเจือจางน้ำชะมูลฝอยด้วยน้ำประปาก่อนเพื่อให้ความเข้มข้นของซีโอดี อยู่ในช่วง 5,000 – 7,000 มก./ล. ก่อนนำไปใช้ในการทดลอง

4. <u>การเตรียมคอลัมน์ดินสำหรับการทดลอง</u>

สำหรับคอลัมน์ดินที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นท่ออะคริลิคใส จำนวน 3 ท่อ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.24 ซม. และมีความสูงแตกต่างกันไป คือ 160 100 และ 60 ซม. ด้านล่างติดตั้งแปลนที่มีท่อรวบรวมน้ำชะมูลฝอยและบรรจุชั้นรองด้วยทรายที่ผ่านการบำบัดแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 3 และต่อท่อระบายน้ำขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ซม. ดังแสดงในภาคผนวกที่ ก2 ที่ระดับแนวรอยต่อทุก 30 , 20 และ 10 ซม. ในแต่ละคอลัมน์ตามลำดับเพื่อเก็บตัวอย่างน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านวัสดุชนิดต่างๆ

ตารางที่ 4 ลักษณะสมบัติบางประการของวัสดุก่อนการทดลอง

Characteristics		Raw Meterial			
		LS	SA	CL	SC
Textures	Clay (%)	4	2	66	50
	Silt (%)	7.1	1.1	24.2	42.2
	Sand (%)	88.9	96.6	9.8	7.8
Water Content (%)		0.002	0.11	0.21	5.6
pH		8.8	8.6	7.1	5.6
CEC (meg/100g)		1	0.9	16.6	14.7
Organic matter (%)		1.6	0	3.8	6.2
Permeability (cm/s)		61.22	6.23×10^{-2}	3.22×10^{-4}	12.2×10^{-5}
Porosity (%)		31.6	31	33	32

หมายเหตุ LS : Limestone, SA : Sand, CL : Clay, SC : Silty Clay

CEC : Cation Exchange Capacity

5. การเก็บตัวอย่าง

การเก็บตัวอย่างน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านการบำบัดแล้วและตามแนวรอยต่อของแต่ละชั้นดินซึ่งเก็บในขวดพลาสติก ขนาด 60 mL ดังภาคผนวกที่ ก2 โดยเก็บจากสายยางที่ต่อจากท่อเก็บน้ำสำหรับตัวอย่างดินบรรจุในถุงพลาสติก และเก็บที่ –20 °ซ เพื่อวิเคราะห์ตัวอย่างทางด้านจุลินทรีย์ (APHA, 1997)

ตารางที่ 5 องค์ประกอบมูลฝอยชุมชนแบบเปียก

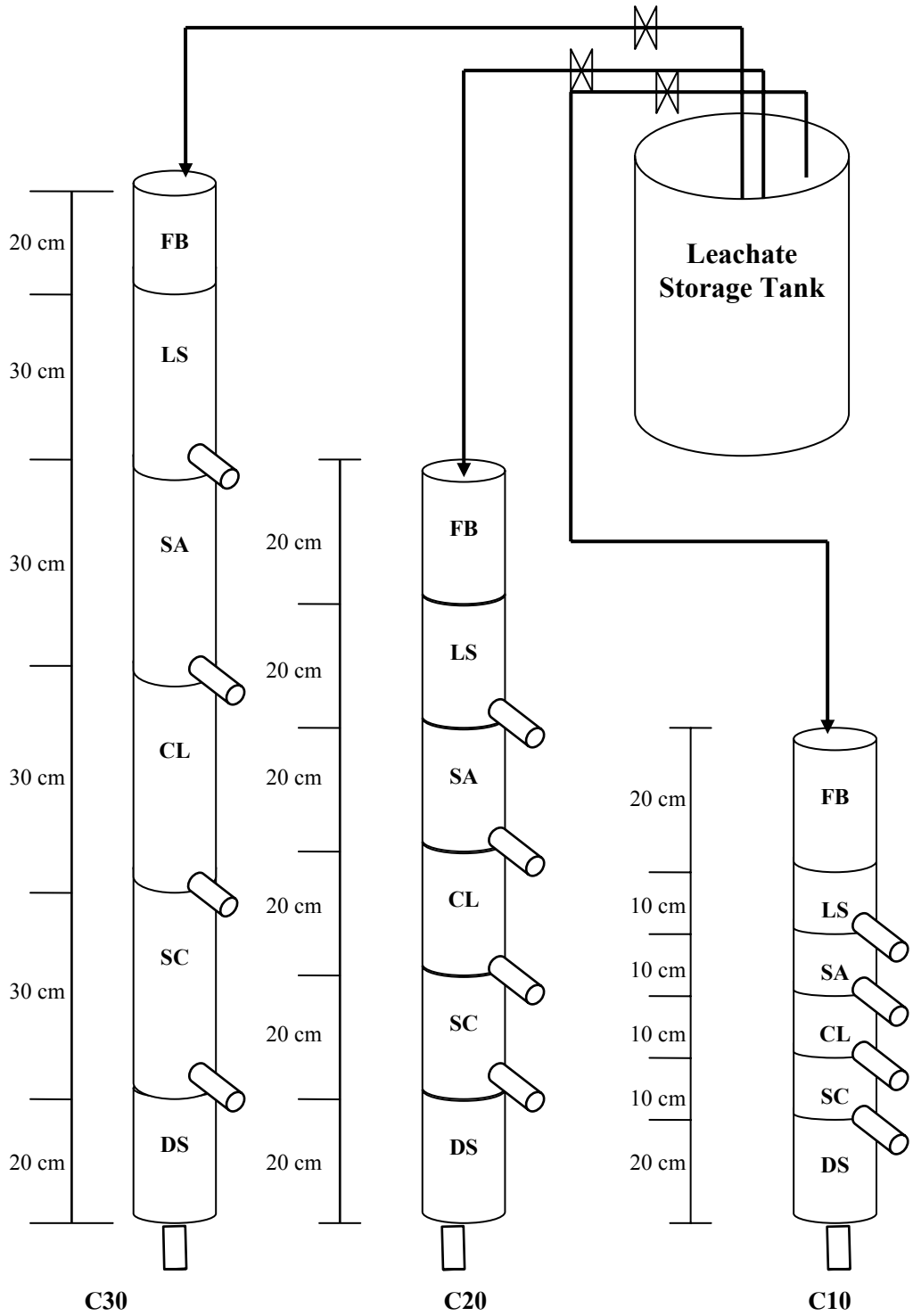
ชนิดมูลฝอย	องค์ประกอบมูลฝอยแบบเปียก (%โดยน้ำหนัก)		
	สถานีมูลฝอยอ่อนนุช	สถานีมูลฝอยหนองแขม	เฉลี่ยอ่อนนุชและหนองแขม
กระดาษ	11.61	11.52	11.58
เสื้อผ้าและสิ่งทอ	2.28	8.58	3.71
พลาสติกและโฟม	23.52	12.36	19.88
ไม้และใบไม้	16	11.52	14.54
เศษอาหาร	33.97	38.68	35.54
หนังและยาง	0	2.47	0.82
โลหะ	2.6	0.82	2
แก้ว	3.18	6.17	4.17
อื่นๆ	6.87	9.88	7.87
ความหนาแน่น(กก./ล.)	0.48	0.3	0.42

หมายเหตุ : อื่นๆ หมายถึงมูลฝอยที่ไม่สามารถแยกประเภทได้ องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นอินทรีย์วัตถุ

ที่มา : ฝ่ายวิจัย กองวิชาการและการวางแผน สำนักรักษาความสะอาด (2538)

ตารางที่ 6 ลักษณะของน้ำชะมูลฝอยชุมชน ที่เตรียมจากการหมักขยะมูลฝอย

พารามิเตอร์	หน่วย	ช่วงค่า
pH	-	5.3-6.8
DO	m/L	0-0.3
BOD	mg/L	4,500-6,000
COD	mg/L	14,400-16,000
TKN	mg/L	655-1,600
NH_3-N	mg/L	450-1,450
NO_3-N	mg/L	0-12
NO_2-N	mg/L	0-9
TP	mg/L	1.5-23
SS	mg/L	800-1,200



FB : Free Board, LS : Limestone, SA : Sand, CL : Clay, SC : Silty Clay, DS : Drainage System

ภาพที่ 3 แบบจำลองคอลัมน์ในการทดลอง

วิธีการ

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการบำบัดน้ำชะมูลฝอยชุมชนด้วยระบบดินและหินเรียงเป็นชั้น ซึ่งจำลองระบบโดยใช้คอลัมน์อะคริลิกใส ที่บรรจุวัสดุทั้ง 4 ชนิด คือ หินปูน ทราย ดินร่วน และดินเหนียว เรียงจากด้านบนลงล่างตามลำดับ ลงในคอลัมน์ให้มีความหนาของทุกวัสดุที่ 30 20 และ 10 ซม. ในแต่ละคอลัมน์ตามลำดับ เพื่อศึกษาความหนาของวัสดุดังกล่าวต่อประสิทธิภาพในการบำบัด หลังจากนั้นทำการศึกษาต่อเนื่องในระบบทดลองเดิมโดยแปรผันรูปแบบภาระทางชลศาสตร์ (hydraulic application pattern: HAP) ในการป้อนน้ำเข้าสู่ระบบ ดังนี้ ป้อนน้ำเข้าทุกวัน ทุกสองวัน และทุกสามวัน โดยควบคุมภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ (hydraulic application rate : HAR) ที่ 5 ซม./วัน ในแต่ละคอลัมน์ และได้ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ โดยอาศัยการทดลองแบบกะ ด้วย ดังนี้

1. การทดลองบำบัดด้วยคอลัมน์ดินแบบต่อเนื่อง (continuous soil column experiments)

ศึกษาความสามารถในการบำบัดน้ำชะมูลฝอยชุมชนด้วยคอลัมน์ดินและหินเรียงเป็นชั้นที่มีระดับความหนาของชั้นวัสดุต่างกัน โดยมีคอลัมน์จำนวน 3 คอลัมน์ที่บรรจุหินปูน ทราย ดินร่วน และดินเหนียว ที่มีความหนาแต่ละชั้นวัสดุเท่ากัน คือ 30 20 และ 10 ซม.ในแต่ละคอลัมน์(ตารางที่ 7) เติมน้ำตัวอย่างน้ำชะมูลฝอยเข้าด้านบนแต่ละคอลัมน์ที่มีภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ เท่ากันคือ 10 ซม./วัน ซึ่งมีความเข้มข้นในรูป ซีโอดีอยู่ในช่วง 5,000-7,000 มก./ล. เก็บน้ำที่ระดับความลึกแต่ละชั้นวัสดุและทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ตามรายละเอียดในตารางที่ 8 ดำเนินการเดินระบบจนกระทั้งระบบมีประสิทธิภาพต่ำโดยพิจารณาจากความสามารถของระบบในการกำจัด COD เหลือโดยประมาณ 30% ซึ่งคาดว่าระบบเกิดการอุดตันทำให้ออกซิเจนไม่สามารถแพร่เข้าสู่ชั้นวัสดุได้ ทำให้กิจกรรมของจุลินทรีย์ลดลง จึงได้ทำการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเดินระบบโดยการเว้นระยะพักการป้อนน้ำเสียโดยคาดว่าระยะเวลาที่พักนั้นจะทำให้เกิดการแพร่กระจายของออกซิเจนเข้าสู่ชั้นวัสดุมากขึ้นโดยทำการทดลองต่อเนื่องเพื่อศึกษาความสามารถในการบำบัดน้ำชะมูลฝอยชุมชนในคอลัมน์ดิน 3 ชนิดเมื่อแปรผันรูปแบบการป้อนน้ำเสีย เข้าสู่ระบบ คือ ป้อนน้ำเข้าทุกวัน ทุกสองวัน และทุกๆสามวัน ตามแสดงรายละเอียดในตารางที่ 9 โดยควบคุม HAR เท่ากันคือ 10 ซม./วัน และความเข้มข้นในรูป ซีโอดี ในช่วง 5,000-7,000 มก./ล. โดยแสดงผังสรุปการทดลองแบบต่อเนื่องในภาพที่ 4

ตารางที่ 7 สภาวะการทดลองที่แปรผันความหนาของวัสดุในการบำบัดน้ำชะมูลฝอย

คอลัมน์	ความหนาของชั้นวัสดุ (ซม.)				ภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ (ซม./วัน)
	หินปูน	ทราย	ดินเหนียว	ดินเหนียวปนดินตะกอน	
C30	30	30	30	30	10
C20	20	20	20	20	10
C10	10	10	10	10	10

ตารางที่ 8 รายละเอียดพารามิเตอร์และความถี่ในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์	ความถี่ในการวิเคราะห์
pH	pH meter	7-10 วัน/ครั้ง
DO	DO meter	7-10 วัน/ครั้ง
BOD	Azide modification	7-10 วัน/ครั้ง
COD	Dichromate close reflux	7-10 วัน/ครั้ง
TKN	Macro Kjeldahl method	7-10 วัน/ครั้ง
NH_3-N	Distillation-titration	7-10 วัน/ครั้ง
NO_3-N	Brucine method	7-10 วัน/ครั้ง
NO_2-N	NED method	7-10 วัน/ครั้ง
TP	Acid digestion-ascorbic Acid	7-10 วัน/ครั้ง
SS	Gravimetric method	7-10 วัน/ครั้ง

หมายเหตุ NED : N-(1-Naphthyl)-Ethylenediamine Dihydrochloride

ที่มา : APHA (1997)

ตารางที่ 9 ระยะเวลาสำหรับการทดลองแปรผันรูปแบบการป้อนน้ำเสียเข้าระบบที่สภาวะการทดลองต่างๆ

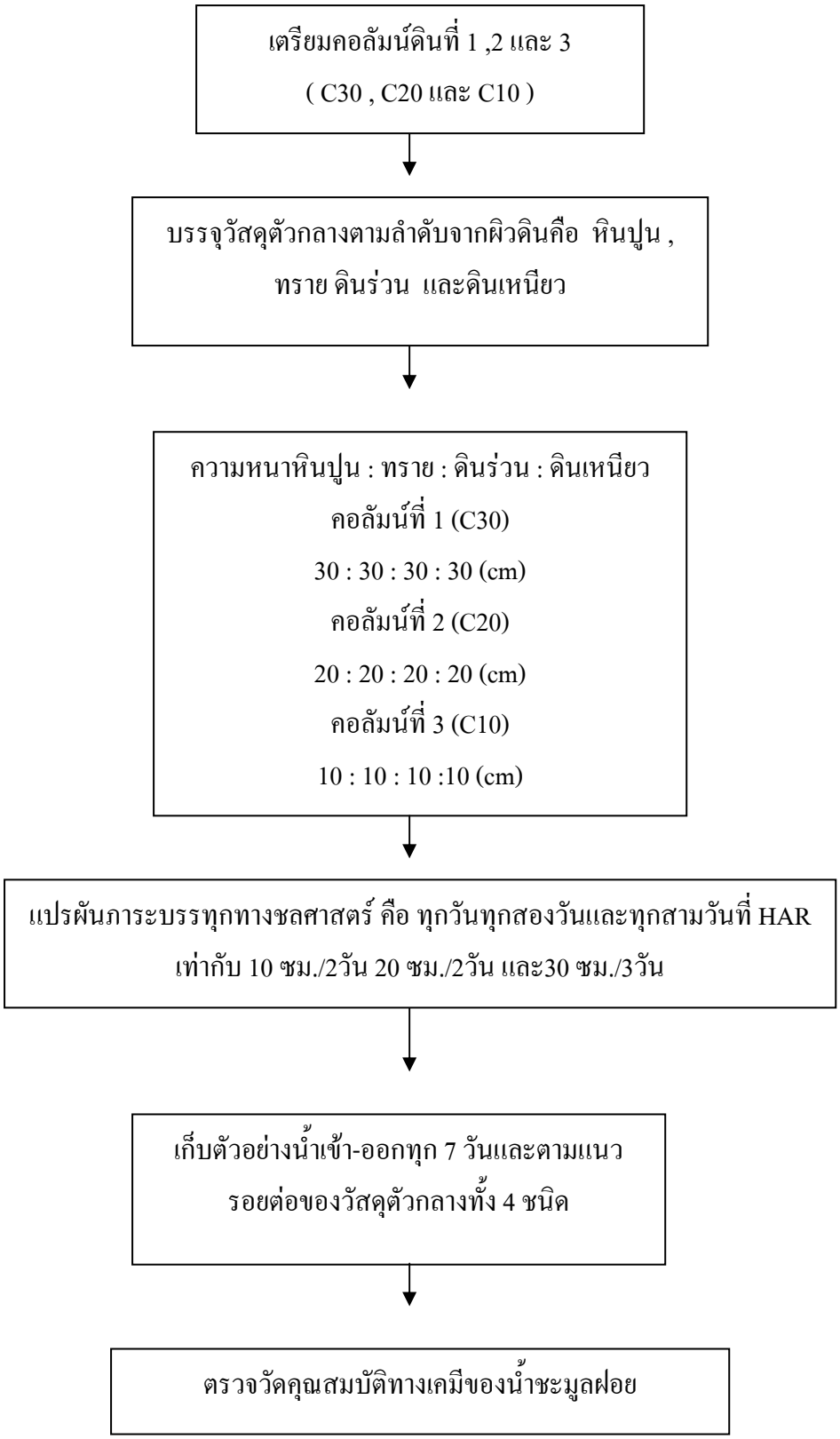
คอลัมน์	ระยะเวลาการเดินระบบที่รูปแบบการป้อนน้ำเข้าระบบ (วัน)		
	ทุกวัน	ทุกสองวัน	ทุกสามวัน
C30	150	–	50
C20	100	50	50
C10	60	90	50

2. การทดลองแบบกะ (batch experiments)

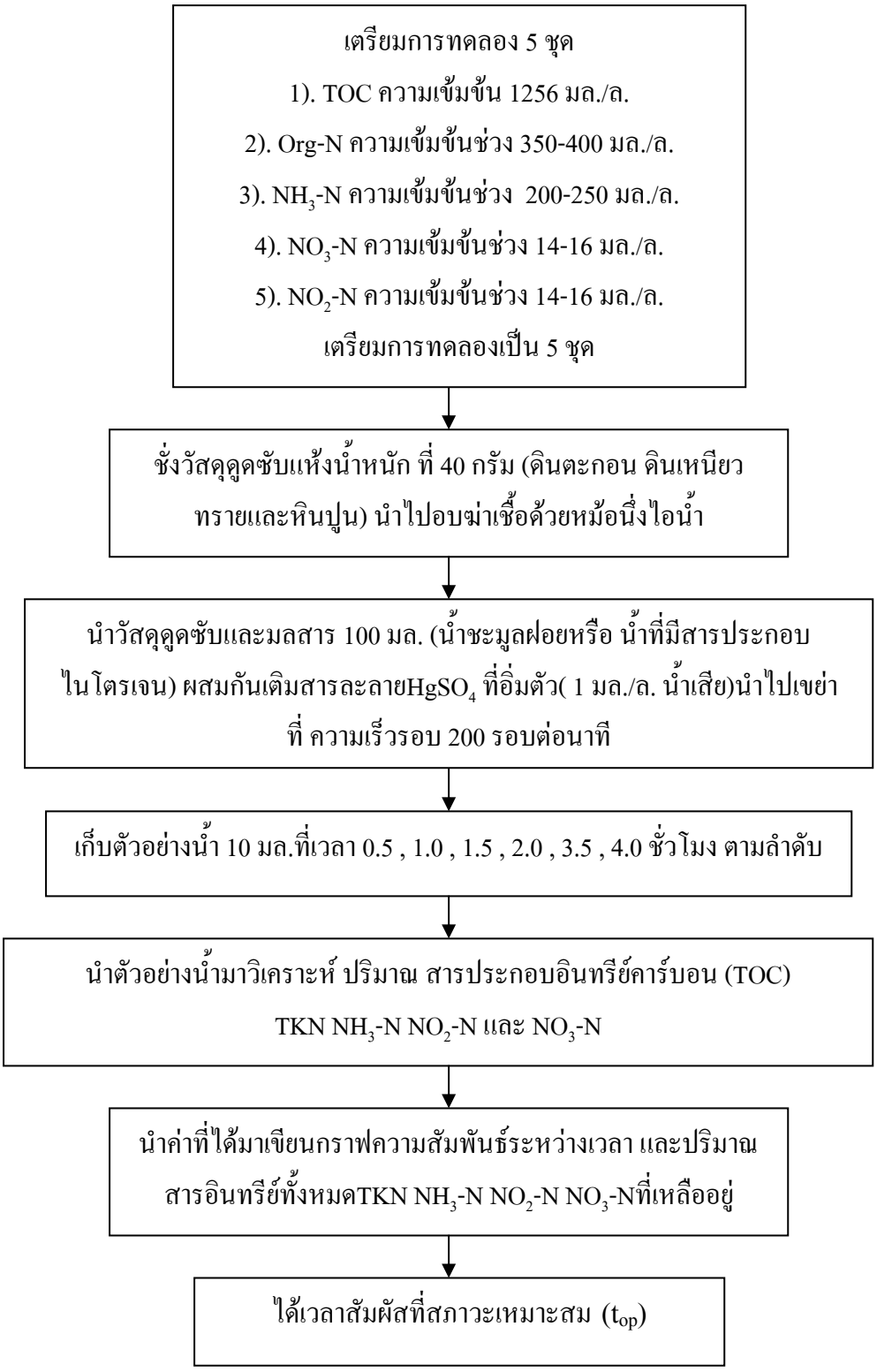
ในการทดลองแบบกะนี้เพื่อศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบดินแบบประดิษฐ์สำหรับการบำบัดน้ำชะมูลฝอยชุมชนโดยมีการทดลอง คือการศึกษาความสามารถในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์คาร์บอนและไนโตรเจน การศึกษาอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอนและไนโตรเจน และการตรวจสอบหาชนิดของกลุ่มจุลินทรีย์ไนตริไฟอิงในวัสดุแต่ละชนิดของแต่ละคอลัมน์ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1 การทดสอบการดูดซับ (adsorption experiments)

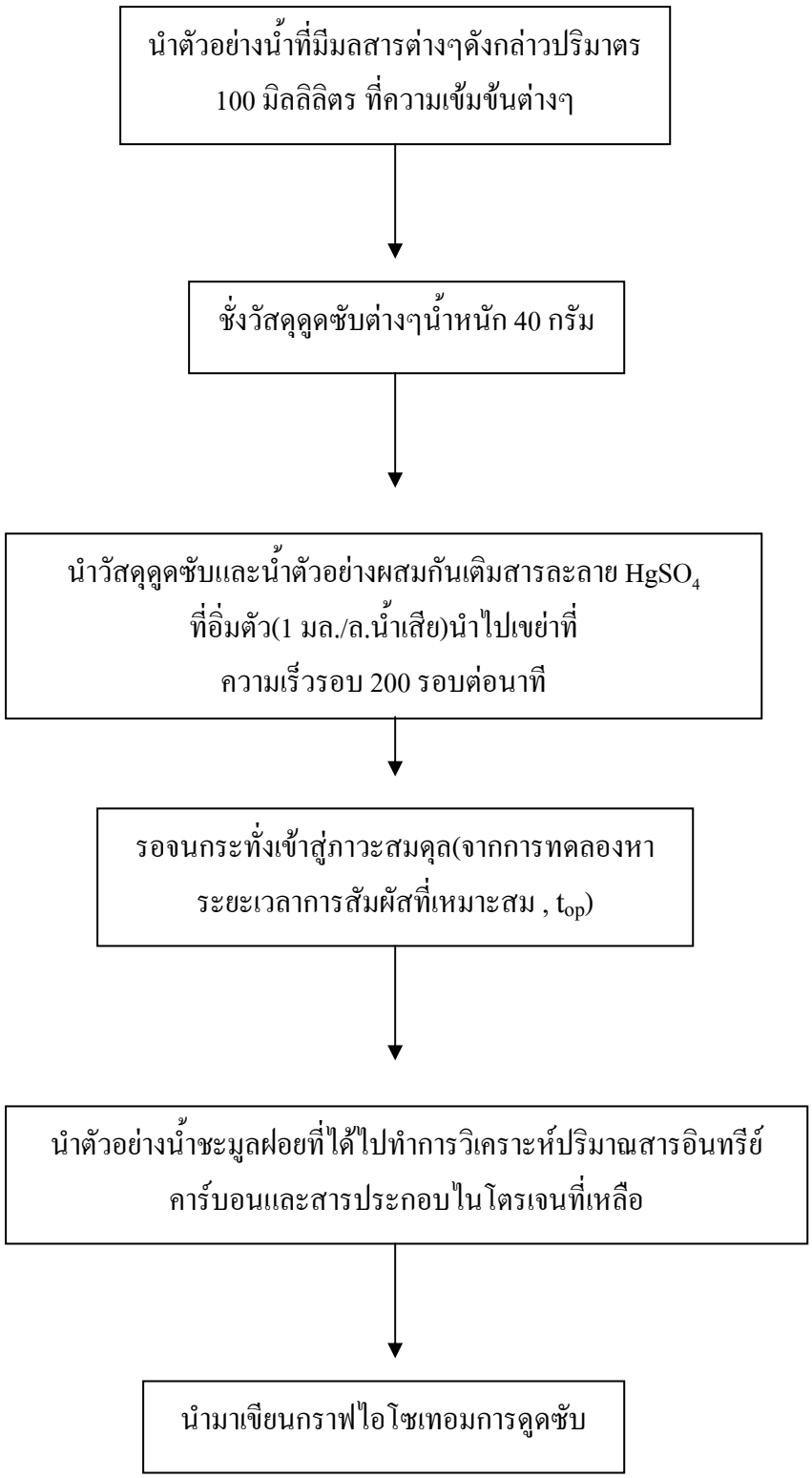
การทดลองเพื่อหาความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์คาร์บอนและสารประกอบไนโตรเจนของวัสดุต่าง ๆ ในที่นี้คือ หินปูน ทราย ดินร่วนและดินเหนียว เป็นการทดสอบการดูดซับของสารละลายอินทรีย์คาร์บอนในรูปของทีโอซี (TOC) สารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียไนโตรเจน อินทรีย์ไนโตรเจน ไนเตรต ไนไตรท์ ซึ่งในตัวดูดซับ(วัสดุ)และสารประกอบที่ถูกดูดซับที่ปรากฏในน้ำชะมูลฝอยชุมชนสำหรับกรณีไนไตร์ท และไนเตรทได้ทำการสังเคราะห์และเติมลงไปในน้ำตัวอย่าง ซึ่งทั้งหมดจะผ่านการอบไอน้ำภายใต้ความดันและเติมสาร $HgSO_4$ ที่อิ่มตัวในสัดส่วน 1 มล.$HgSO_4$/ล. เพื่อฆ่าเชื้อและหยุดวงจรของจุลินทรีย์ที่จะมีผลต่อสารตั้งต้นสำหรับการดูดซับโดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือการทดสอบเพื่อหาระยะเวลาการสัมผัสที่เหมาะสมของแต่ละชนิดตัวดูดซับ ส่วนที่สองเป็นการหาความสามารถในรูปแบบไอโซเทอมการดูดซับซึ่งมีรายละเอียดการทดลองตามภาพที่ 4 และภาพที่ 5 ตามลำดับ



ภาพที่ 4 ผังการทดลองแบบต่อเนื่องเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดในระดับความหนาวัสดุต่างกันและแปรผันรูปแบบภาระบรรทุกทางชลศาสตร์



ภาพที่ 5 การหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับของสารประกอบอินทรีย์คาร์บอนและสารประกอบไนโตรเจน



ภาพที่ 6 การทดสอบหาไอโซเทอมการดูดซับสารอินทรีย์คาร์บอนและสารประกอบไนโตรเจน

2.2 การทดสอบหาอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอนและสารประกอบไนโตรเจน

การศึกษาอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอนและสารประกอบไนโตรเจนในวัสดุต่างๆหลังจากสิ้นสุดการทดลองชนิดต่อเนื่อง คอลัมน์ที่มีความหนา 30 ซม. และคอลัมน์ที่หนา 10 ซม.ในทุกชั้นวัสดุ เพื่อเปรียบเทียบอัตราการย่อยสลายที่เกิดขึ้นระหว่างสองคอลัมน์ข้างต้น ซึ่งทำการทดลองในขวดทดลองที่มีการเติมอากาศและสารอาหารที่เกินพอ โดยสำหรับการย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอนนั้นใช้น้ำชะมูลฝอยชุมชนเป็นแหล่งให้สารอินทรีย์คาร์บอนแต่สำหรับสารประกอบไนโตรเจนได้จากการสังเคราะห์ขึ้นตามรายละเอียดในตารางที่ 10 โดยในแต่ละสารประกอบและแต่ละวัสดุนั้นได้ทำการทดลองแยกกันเป็นชุด ๆ ดังนี้

2.2.1 การย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอน

ทำการทดสอบในขวดทดลองแยกเป็นการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในหินปูนทราย ดินเหนียว และดินเหนียวปนดินตะกอน รวม 4 ชุด และในแต่ละชุดประกอบด้วย 7 ขวดทดลองซึ่งได้ทำการแปรผันความเข้มข้นของสารอินทรีย์คาร์บอนที่มีอยู่ในน้ำชะมูลฝอยในช่วง 75-250 มก./ล. ในวัสดุปริมาณ 70 ก. (น้ำหนักเปียก) หลังจากผสมกันในขวดเติมอากาศด้วยหัวฟู่ให้เกินพอ ปิดขวดด้วยอลูมิเนียมฟลอยด์เพื่อป้องกันจุลินทรีย์จากภายนอก หลังจากนั้นทำการเก็บตัวอย่างตามระยะเวลาทุกๆ 1 ชั่วโมงเป็นเวลา 7 ชั่วโมง

2.2.2 การย่อยสลายสารประกอบไนโตรเจน

การย่อยสลายสารประกอบไนโตรเจนด้วยจุลินทรีย์ในกลุ่มไนตริไฟอิ้งที่มีอยู่ในวัสดุต่างๆนั้น ซึ่งมีอยู่ 2 กลุ่มด้วยกันคือ *Nitrosomonas spp.* และ *Nitrobacter spp.* เนื่องจากจุลินทรีย์ทั้งสองชนิดนี้ออกซิไดซ์สารประกอบไนโตรเจนต่างกัน โดยไนโตรโซโมเนสจะออกซิไดซ์สารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียให้เป็นไนไตรท์ (ammonium oxidizing bacteria : AOB) ดังนั้นสารละลายที่ใช้ในการทดลองจึงใช้สารละลาย $(NH_4)_2SO_4$ (ตารางที่ 10) ในช่วงความเข้มข้นที่ 25-175 มก./ล. ส่วนไนโตรเบคเตอร์ นั้นทำหน้าที่ออกซิไดซ์สารประกอบไนโตรเจนในรูปไนไตรท์เป็นไนเตรท (nitrite oxidizing bacteria : NOB)จึงใช้สารละลาย KNO_2 เป็นแหล่ง NO_2-N (ตารางที่10) ซึ่งทำการแปรผันความเข้มข้นในช่วง 20-140 มก./ล. โดยเตรียมสารละลาย 500 มล. อย่างละ 7 ชุดการทดลอง ที่มีปริมาณน้ำหนักวัสดุเท่ากัน (ดินเหนียวปนดินตะกอน ดินเหนียว ทราย

และหินปูน) คือ 70 ก. เติมอากาศเกินพอในขวดการทดลองและปิดฝาขวดด้วยอลูมิเนียมฟลอยด์เช่นกันหลังจากนั้นเก็บตัวอย่างตามระยะเวลา ทุก ๆ 1 ชั่วโมงเป็นเวลา 7 ชั่วโมง

ตารางที่ 10 รายละเอียดการทดลองอัตราการย่อยสลายไนโตรเจนโดย เอโอบี และ เอ็นโอบี

No.	AOB Activities		NOB Activities	
	$(NH_4)_2SO_4$ Stock medium(ml)	Initial conc.(mg/L)	KNO_2 Stock medium(ml)	Initial conc.(mg/L)
1	0.5	25	2	20
2	1	50	4	40
3	1.5	75	6	60
4	2	100	8	80
5	2.5	125	10	100
6	3	150	12	120
7	3.5	175	14	140

หมายเหตุ : AOB : ammonium oxidizing bacteria (*Nitrosomonas spp.*)

: NOB : nitrite oxidizing bacteria (*Nitrobacter spp.*)

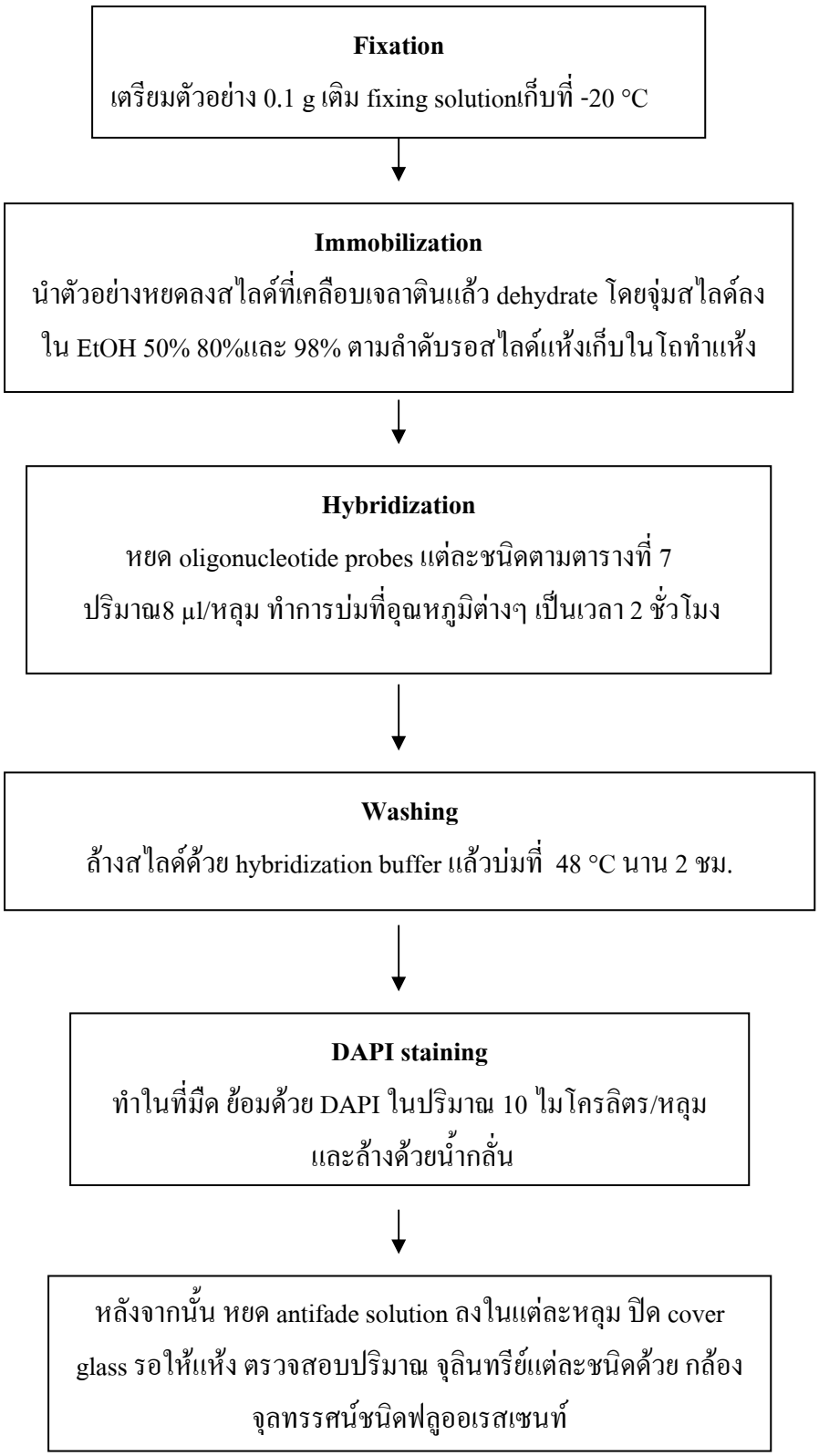
2.3 การทดสอบเชื้อกลุ่มไนตริไฟอิง

ตรวจสอบปริมาณสัดส่วนของจุลินทรีย์ในกลุ่มไนตริไฟอิ้ง กับจุลินทรีย์ทั้งหมดในวัสดุต่างๆหลังสิ้นสุดการทดลองชนิดต่อเนื่องในคอลัมน์ดินโดยใช้วิธี ฟลูออเรสเซนต์อินสีทูไฮบริไดเซชั่น ซึ่งให้ความจำเพาะเจาะจงต่อชนิดของจุลินทรีย์ที่ต้องการได้โดยใช้ โอลิโกนูคริโอไทด์ โพรบ แสดงในตารางที่ 11 ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบแสดงดังภาพที่ 7

ตารางที่ 11 ลักษณะและคุณสมบัติของโพรบแต่ละชนิด

Obligonucleotide Probes	Sequence 5'-3'	Temp, °C	Binding Positions	Microorganisms
Nsm 156	TAT TAG CAC ATC TTT CGAT	50	156-174	*Nitrosomonas spp.*
NIT 3	CCA GTG CTC CAT GCT CCG	60	1032-1052	*Nitrobacter spp.*
DAPI	—	—	—	All microorganisms

หมายเหตุ : DAPI : 4′,6-diamidino-2-phenylindole



ภาพที่ 7 ขั้นตอนการตรวจสอบชนิดจุลินทรีย์ด้วยวิธี ฟลูออเรสเซนต์อินสิทูไฮบริไดเซชั่น

2.4 การศึกษาสมดุลมวลสารอินทรีย์และสารประกอบไนโตรเจน

ศึกษาสมดุลมวลในคอลัมน์ดินแบบประดิษฐ์ในช่วงสุดท้ายของการทดลองในทุกคอลัมน์ในระยะเวลา 14 วัน โดยทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 2 วันสำหรับตัวอย่างน้ำชะมูลฝอย ในส่วนตัวอย่างดินนั้นทำการเก็บในวันแรกและวันที่สิ้นสุดการทดลอง ในทุกชั้นวัสดุ ดังแสดงรายละเอียดการวิเคราะห์ในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 พารามิเตอร์วิเคราะห์ดินและน้ำในการทำสมดุลมวล

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	ความถี่การวิเคราะห์
COD	Dichromate close reflux	ทุก ๆ 2 วัน
TN	Macro kjeldahl method	ทุก ๆ 2 วัน
NH_3-N	Distillation-titration	ทุก ๆ 2 วัน
NO_3-N	Colorimetric method (Brucine)	ทุก ๆ 2 วัน
NO_2-N	Colorimetric method	ทุก ๆ 2 วัน

ที่มา: APHA (1997)

ผลการทดลองและวิจารณ์

การทดลองครั้งนี้เป็นการศึกษาระบบดินและหินเรียงเป็นชั้นสำหรับการบำบัดน้ำชะมูลฝอย ซึ่งระบบดังกล่าวนี้อาศัยกลไกหลายอย่างร่วมกันทั้งทางกายภาพ คือ การกรอง ทางเคมี คือ การดูดซับ และทางกลไกทางชีวภาพ คือ การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ เป็นต้น กลไกเหล่านี้จะทำงานร่วมกันในระบบซึ่งจำลองขึ้นด้วยคอลัมน์พลาสติกชนิดอะคริลิค ที่บรรจุวัสดุ ต่างๆ คือ หินปูน ทราย ดินเหนียว และดินเหนียวปนดินตะกอน จากบนลงล่าง ที่ความหนา 10 20 และ 30 ซม. ในแต่ละคอลัมน์ และแปรผันรูปแบบการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบ คือ ทุกวัน ทุกสองวัน และทุกสามวัน ตามลำดับต่อเนื่องกัน โดยมีภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ ที่ 5 ซม./วัน เท่ากันในทุกชุดการทดลอง โดยน้ำชะมูลฝอยที่ใช้ในการทดลองมีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ ความเข้มข้นของซีโอดี อยู่ในช่วง 5,011-7,238 มก./ล. และบีโอดี อยู่ในช่วง 1,500-2,016 มก./ล. โดยสัดส่วนของ บีโอดีต่อซีโอดี ดังกล่าว เท่ากับ 0.3 โดยเฉลี่ย ซึ่งสัดส่วนดังกล่าวนี้เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำชะมูลฝอยจากหลุมฝังกลบ พบว่ามีลักษณะเช่นเดียวกับน้ำชะมูลฝอยจากหลุมฝังกลบระยะกลาง อยู่ในช่วง 5-10 ปี (Chain and Dewalle, 1976) ในส่วนของไนโตรเจนที่อยู่ในน้ำชะมูลฝอยนั้น ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ อินทรีย์ไนโตรเจน (41-116 มก./ล.) และในรูป แอมโมเนียไนโตรเจน (244-392 มก./ล.) ส่วนคุณลักษณะอื่นๆ ของน้ำชะมูลฝอย ดังตารางผนวก ก2

เนื่องจากกลไกการดูดซับเป็นกลไกหนึ่งในการกำจัดสารประกอบต่างๆ ในการบำบัดน้ำชะมูลฝอยชุมชนด้วยระบบดินและหินเรียงเป็นชั้น ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษากลไกทางเคมี คือ การดูดซับสารอินทรีย์คาร์บอนและสารประกอบไนโตรเจนในวัสดุ ต่างๆ โดยเป็นการทดลองแบบกะ จากนั้นทำการศึกษากลไกทางชีวภาพในคอลัมน์ดินซึ่งเป็นการทดลองแบบต่อเนื่อง ผลการทดลองที่ได้เสนอดังต่อไปนี้

1. การทดลองความสามารถในการดูดซับ (adsorption experiment)

ในการทดลองเพื่อหาความสามารถในการดูดซับของวัสดุต่างๆ กับสารอินทรีย์คาร์บอนและสารประกอบไนโตรเจน ซึ่งอาศัยสมการแบบฟรุนดิช และแบบแลงเมียร์ เพื่ออธิบายความสามารถในการดูดซับ โดยพิจารณาเลือกใช้สมการที่ให้ค่า R^2 ที่มากกว่ามาอธิบาย จากผลการทดลองพบว่าทุกมลสารที่ถูกดูดซับสามารถ อธิบายด้วยสมการแบบฟรุนดิช ยกเว้น ไนไตรท์ไนโตรเจนที่สามารถอธิบายด้วยสมการแบบแลงเมียร์ เนื่องจากให้ค่า R^2 ที่มากกว่า ดังตารางที่ 13

โดยมีรายละเอียดของผลการทดลองการดูดซับสารประกอบต่างๆ ดังนี้

1.1 การดูดซับสารอินทรีย์คาร์บอน

เมื่อทำการศึกษาระยะเวลาการสัมผัสที่เหมาะสมระหว่างวัสดุดูดซับและสารอินทรีย์คาร์บอน โดยใช้วัสดุดูดซับ เท่ากัน คือ 50 ก. (น้ำหนักแห้ง) กับความเข้มข้นของสารอินทรีย์คาร์บอนในน้ำชะมูลฝอยในรูปสารอินทรีย์ละลายน้ำทั้งหมด เท่ากัน คือ 1,256 มก./ล. ซึ่งคิดเป็นซีโอดี เท่ากับ 5,011 มก./ล. หรือ ในรูปบีโอดี เท่ากับ 1,530 มก./ล. ปริมาณ 100 มล. และทำการเก็บตัวอย่างตามระยะเวลา พบว่า ระยะเวลาการสัมผัสที่เหมาะสมของวัสดุดูดซับต่างๆ กับสารอินทรีย์คาร์บอนนั้น เท่ากับ 30 นาที สำหรับ หินปูน ดินเหนียว และดินเหนียวปนดินตะกอน แต่สำหรับทรายนั้น อยู่ที่ 60 นาที เวลาการสัมผัสที่เหมาะสมดังกล่าวนี้ ได้นำไปใช้หาสมการของการดูดซับต่อไป

จากการทดลองหาสมการของการดูดซับ พบว่าสมการแบบฟรุนดิชเหมาะสำหรับการอธิบายการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างวัสดุดูดซับและสารอินทรีย์คาร์บอนในน้ำชะมูลฝอย โดยความสามารถในการดูดซับแสดงได้ด้วย ค่า K_F นั้น ซึ่งพบว่า ดินเหนียวให้ค่าดังกล่าวสูงที่สุด (K_F เท่ากับ 2.58×10^{-30}) ซึ่งหมายความว่า ดินเหนียวมีความสามารถมากที่สุด ตามด้วยดินเหนียวปนตะกอน หินปูน และทราย ตามลำดับ (ตารางที่ 13) นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ดินเหนียวยังมีความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างกันดีที่สุดด้วย เนื่องจากให้ค่า 1/n ที่น้อยที่สุด คือ 8.96 แต่เมื่อพิจารณาการดูดซับที่เกิดขึ้นแล้วดินเหนียวยังมีความสามารถน้อยมาก คาดว่าเนื่องจาก วัสดุดูดซับที่ใช้นั้นเป็นวัสดุในธรรมชาติซึ่งอาจมีการละลายของแร่ธาตุและสารประกอบอื่นๆ ออกมา และในน้ำชะมูลฝอยเองมีองค์ประกอบของมลสารที่ปนเปื้อนอยู่หลายชนิด ทำให้เกิดภาวะการแข่งขันการดูดซับ (adsorption competition) และเข้าสู่สมดุลการดูดซับที่รวดเร็ว ทั้งนี้สารอินทรีย์คาร์บอนที่ทำการวิเคราะห์นั้นอยู่ในรูปสารอินทรีย์คาร์บอนที่ละลายน้ำซึ่งปกติมลสารที่ละลายน้ำได้ดีจะเกิดการดูดซับได้น้อยกว่ามลสารที่ละลายน้ำได้น้อย (เกรียงศักดิ์, 2546)

1.2 การดูดซับสารประกอบไนโตรเจน

สำหรับสารประกอบไนโตรเจนในน้ำชะมูลฝอยนั้นมีอยู่ด้วยกัน 4 รูป คือ อินทรีย์ไนโตรเจน แอมโมเนียไนโตรเจน ไนไตรท์ไนโตรเจน และไนเตรทไนโตรเจน แต่ในส่วนของ

ไนไตรท์และไนเตรทไนโตรเจน นั้นในน้ำชะมูลฝอยมีอยู่น้อยมากจึงต้องทำการเตรียมขึ้นโดยเติมสารละลายที่มีสารประกอบไนโตรเจนในรูปต่างๆ ลงในน้ำชะมูลฝอย โดยการทดลองแบ่งออกเป็น 4 ชุด ผลการทดลองที่ได้แสดงในตารางที่ 13

1.2.1 การดูดซับสารอินทรีย์ไนโตรเจน

ทำการทดลองหาระยะเวลาการสัมผัสที่เหมาะสม โดยใช้วัสดุดูดซับหนัก 50 ก. (น้ำหนักแห้ง) สารอินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำชะมูลฝอยความเข้มข้น 350 มก./ล. ปริมาณ 100 มล.พบว่าระยะเวลาการสัมผัสที่เหมาะสมในทุกวัสดุ เท่ากัน คือ 60 นาที

จากนั้นทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับใช้ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ไนโตรเจนน้ำชะมูลฝอย ในช่วง 350-400 มก/ล. ปริมาณ 100 มล. กับวัสดุดูดซับน้ำหนักต่างๆ กัน เก็บตัวอย่างที่เวลา 60 นาที พบว่าความสามารถในการดูดซับสามารถอธิบายได้ด้วยสมการแบบฟรุนดิช โดยดินเหนียวปนตะกอนมีความสามารถในการดูดซับมากที่สุดซึ่งให้ค่า K_F สูงสุด (8.52×10^{-4}) และยังมีความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างกันมากที่สุดด้วย ($1/n$ เท่ากับ 1.35) อย่างไรก็ตามการดูดซับที่เกิดขึ้นยังคงมีปริมาณต่ำเนื่องจากเกิดการแข่งขันของมลสารต่างๆ ที่อยู่ในน้ำชะมูลฝอยและความไม่บริสุทธิ์ของวัสดุดูดซับที่ใช้

1.2.2 การดูดซับสารแอมโมเนียไนโตรเจน

ทำการทดลองหาระยะเวลาการสัมผัสที่เหมาะสม โดยใช้วัสดุดูดซับหนัก 50 ก. (น้ำหนักแห้ง) สารแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำชะมูลฝอยความเข้มข้น 200-250 มก./ล. ปริมาณ 100 มล.พบว่าระยะเวลาการสัมผัสที่เหมาะสมในทุกวัสดุ เท่ากัน คือ 60 นาที

ตารางที่ 13 ค่าคงที่จากสมการแบบแลงเมียร์และฟรุนดิชอธิบายความสามารถในการดูดซับของวัสดุต่างๆ ต่อสารอินทรีย์คาร์บอนและสารประกอบไนโตรเจน

Texture	TOC					
	Langmuir			Freundlich		
	a	b	R^2	K_F	1/n	R^2
LS	-2702	5.28×10^{-5}	0.96	5.87×10^{-33}	9.56	0.99
SA	-2941	6.16×10^{-5}	0.51	4.30×10^{-44}	9.50	0.94
CL	**-2531**	**1.16×10^{-4}**	**0.77**	**2.58×10^{-30}**	**8.96**	**0.79**
SC	-2421	1.37×10^{-4}	0.87	1.96×10^{-31}	9.36	0.95
Texture	Org-N					
	Langmuir			Freundlich		
	a	b	R^2	K_F	1/n	R^2
LS	-409	3.38×10^{-5}	0.91	6.27×10^{-45}	16.87	0.97
SA	-396	7.51×10^{-5}	0.90	3.53×10^{-31}	11.74	0.93
CL	-485	1.41×10^{-3}	0.92	6.23×10^{-6}	2.12	0.96
SC	-305	3.51×10^{-3}	0.32	**8.52×10^{-4}**	**1.35**	**0.81**
Texture	NH_3-N					
	Langmuir			Freundlich		
	a	b	R^2	K_F	1/n	R^2
LS	-378	1.25×10^{-5}	0.81	1.00×10^{-104}	40.19	0.97
SA	-395	8.83×10^{-5}	0.74	3.81×10^{-24}	9.13	0.82
CL	-438	1.42×10^{-3}	0.90	**4.41×10^{-6}**	**2.21**	**0.92**
SC	-371	1.71×10^{-3}	0.91	**2.46×10^{-6}**	**2.40**	**0.92**

ตารางที่ 13 (ต่อ) ค่าคงที่จากสมการแบบแลงเมียร์และฟรุนดิชอธิบายความสามารถในการดูดซับของวัสดุต่างๆ ต่อสารอินทรีย์คาร์บอนและสารประกอบไนโตรเจน

Texture	NO_2-N					
	Langmuir			Freundlich		
	a	b	R^2	K_F	1/n	R^2
LS	-3.58	2.66×10^{-5}	0.82	9.16×10^{-12}	15.68	0.80
SA	-3.46	3.17×10^{-5}	0.86	1.70×10^{-12}	17.76	0.84
CL	-2.24	8.25×10^{-4}	0.96	**2.57×10^{-5}**	**7.75**	**0.83**
SC	-2.42	3.98×10^{-4}	0.96	4.27×10^{-4}	5.28	0.86
Texture	NO_3-N					
	Langmuir			Freundlich		
	a	b	R^2	K_F	1/n	R^2
LS	-10.38	5.76×10^{-6}	0.90	8.43×10^{-62}	58.22	0.93
SA	-10.29	6.85×10^{-6}	0.88	2.01×10^{-60}	57.12	0.94
CL	-9.61	2.11×10^{-5}	0.67	2.67×10^{-42}	40.80	0.91
SC	-9.09	1.17×10^{-4}	0.89	**3.86×10^{-14}**	**12.63**	**0.94**

หมายเหตุ LS = หินปูน SA = ทราย CL = ดินเหนียว SC = ดินเหนียวปนตะกอน

จากนั้นทำการทดลองเพื่อหาความสามารถในการดูดซับของวัสดุ ต่างๆ ต่อสารแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำชะมูลฝอยที่ความเข้มข้นในช่วง 200-250 มก./ล. และวัสดุดูดซับที่น้ำหนักต่างๆ กันทำการเก็บตัวอย่างที่เวลา 60 นาทีพบว่า ความสามารถในการดูดซับสามารถอธิบายได้ด้วยสมการแบบฟรุนดิช โดยดินเหนียวและดินเหนียวปนตะกอนมีความสามารถในการดูดซับดีที่สุดโดยให้ค่า K_F ใกล้เคียงกัน เท่ากับ 4.41×10^{-6} และ 2.46×10^{-6} ตามลำดับ และยังมีความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างกันสูงสุดใกล้เคียงกันด้วย คือ 1/n เท่ากับ 2.21 และ 2.40 ตามลำดับ แต่ความสามารถที่เกิดขึ้นยังน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่ใช้ในการดูดซับ เช่น ถ่านกัมมันต์ การดูดซับที่เกิดขึ้นยังคงน้อยเนื่องจากเกิดการแข่งขันของมลสารต่างๆ ที่อยู่ในน้ำชะมูลฝอยและความไม่บริสุทธิ์ของวัสดุดูดซับที่ใช้

1.2.3 การดูดซับไนไตรท์ไนโตรเจน

ทำการศึกษาระยะเวลาการสัมผัสที่เหมาะสม โดยใช้วัสดุดูดซับหนัก 50 ก. (น้ำหนักแห้ง) และไนไตรท์ไนโตรเจนที่ทำการเติมลงไปในน้ำชะมูลฝอย ที่ความเข้มข้นในช่วง 14-16 มก./ล. ปริมาณ 100 มล. พบว่าระยะเวลาการสัมผัสที่เหมาะสมระหว่างกัน เท่ากับ 60 นาที

จากนั้นทำการทดลองเพื่อหาความสามารถในการดูดซับของวัสดุดูดซับต่างๆ ต่อไนไตรท์ไนโตรเจน ทำการเก็บตัวอย่างที่เวลา 60 นาที พบว่า ความสามารถในการดูดซับไนไตรท์นั้น สามารถอธิบายได้ด้วยสมการแบบแลงเมียร์ โดยดินเหนียวมีความสามารถมากที่สุด (a เท่ากับ -2.24) และยังมีพลังงานในการดูดติดผิวมากที่สุดด้วย (b เท่ากับ 8.25×10^{-4}) แต่การดูดซับยังเกิดขึ้นน้อยมากเนื่องจากไนไตรท์นั้น มีประจุเป็นลบ และวัสดุในธรรมชาติที่เป็นสารอินทรีย์โดยส่วนใหญ่มีองค์ประกอบเป็นประจุลบเช่นกัน ส่งผลให้เกิดการยึดเกาะระหว่างประจุต่ำ แต่ที่เกิดขึ้นคาดว่าเนื่องจากในวัสดุดูดซับโดยเฉพาะดินเหนียวมีองค์ประกอบบางอย่างที่เป็นประจุบวกอยู่ เช่น Fe^{2+} Al^{2+} (เกรียงศักดิ์, 2546) เป็นต้น

1.2.4 การดูดซับไนเตรทไนโตรเจน

ทำการศึกษาระยะเวลาการสัมผัสที่เหมาะสม โดยใช้วัสดุดูดซับหนัก 50 ก. (น้ำหนักแห้ง) และไนเตรทไนโตรเจนที่ทำการเติมลงไปในน้ำชะมูลฝอย ที่ความเข้มข้นในช่วง 14-16 มก./ล. ปริมาณ 100 มล. พบว่าระยะเวลาการสัมผัสที่เหมาะสมระหว่างกัน เท่ากับ 60 นาที

จากนั้นทำการทดลองเพื่อหาความสามารถในการดูดซับของวัสดุต่างๆ ต่อ ไนเตรทไนโตรเจนนั้น พบว่า สมการแบบฟรุนดิช มีความเหมาะสม สามารถอธิบายการดูดซับที่เกิดขึ้นได้ โดยการดูดซับไนเตรทนั้นเกิดมากที่สุดในวัสดุดูดซับ คือ ดินเหนียวปนตะกอน ซึ่งให้ค่า K_F มากที่สุด (3.86×10^{-14}) และมีความแข็งแรงในการยึดเกาะมากที่สุดด้วย เนื่องจากให้ค่า 1/n น้อยที่สุด (12.63) แต่การดูดซับที่เกิดขึ้นนั้นยังน้อยมาก ด้วยเหตุผลเดียวกับ การดูดซับไนไตรท์ไนโตรเจนที่กล่าวไปข้างต้น

ผลการทดลองการดูดซับที่ได้ข้างต้นเป็นการศึกษาการดูดซับสารประกอบสำคัญในน้ำชะมูลฝอยของวัสดุต่างๆ ที่มีการบรรจุลงในคอลัมน์จำลองระบบดินและหินเรียงเป็นชั้น สำหรับการทดลองแบบต่อเนื่องเพื่อประเมินปริมาณการดูดซับที่จะเกิดขึ้นในคอลัมน์ทั้งนี้เนื่องจาก การดูดซับสารดังกล่าวส่วนใหญ่มีค่าน้อยมากเนื่องจากมลสารที่อยู่ในน้ำชะมูลฝอยที่ใช้ในการทดลองมีความเข้มข้นที่สูงเมื่อเทียบกับปริมาณวัสดุดูดซับ ค่าคงที่ที่ใช้อธิบายความสามารถในการดูดซับจึงต่ำ อย่างไรก็ตามในคอลัมน์จำลองระบบนั้นคาดว่ากลไกการกำจัดสารดังกล่าวด้วยกระบวนการดูดซับนั้นไม่ใช่กลไกหลักที่เกิดขึ้นในระบบ

2.ศึกษาความหนาของชั้นวัสดุและรูปแบบการป้อนน้ำเสียที่มีผลต่อระบบดินและหินเรียงเป็นชั้นในการบำบัดน้ำชะมูลฝอย

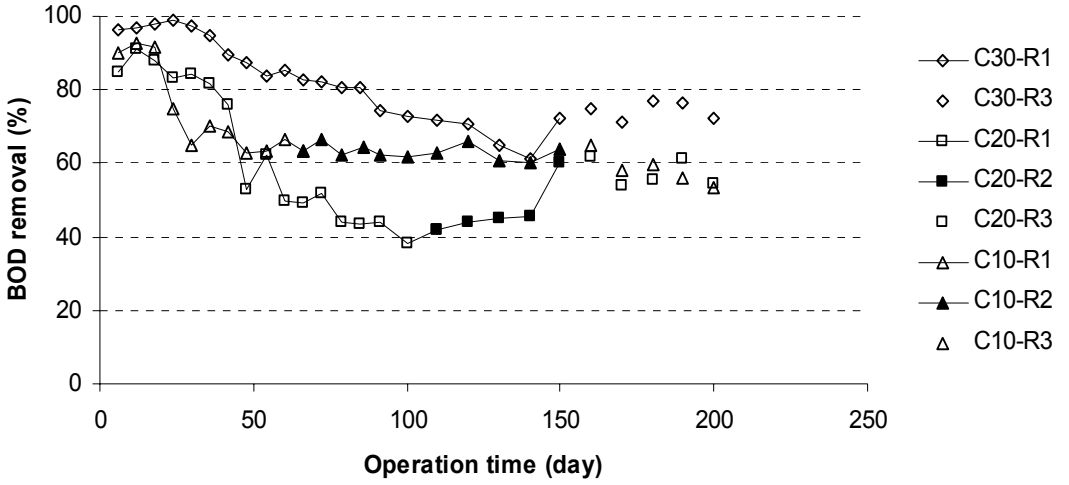
การทดลองแบบต่อเนื่องด้วยระบบดินและหินเรียงเป็นชั้น (rock-soil layering system : RSLS) ที่จำลองขึ้นในคอลัมน์พลาสติก ที่มีความหนาของวัสดุในแต่ละคอลัมน์ต่างๆ กันโดยให้คอลัมน์ที่มีวัสดุแต่ละชั้นหนา 30 ซม. เรียกว่า ซี30 (C30) คอลัมน์วัสดุแต่ละชั้นหนา 20 ซม. เรียกว่า ซี20 (C20) และคอลัมน์ที่มีวัสดุแต่ละชั้นหนา 10 ซม. เรียกว่า ซี10 (C10) โดยทำการป้อนน้ำเสียในรูปแบบต่างกัน คือ ป้อนทุกวัน (run1 :R1) ป้อนทุกสองวัน (run2 : R2) และป้อนทุกสามวัน (run3 : R3) ทำการทดลองต่อเนื่องกันในแต่ละคอลัมน์ โดยทำการเปลี่ยนรูปแบบการป้อนน้ำเสียเมื่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีลดลงเหลือประมาณร้อยละ 20-30 จากนั้นทำการศึกษาอัตราการกำจัดแบบสะสมที่เกิดขึ้นต่อวันในแต่ละรูปแบบการป้อนน้ำเสีย โดยอาศัยข้อมูล การกำจัดสะสม (cumulative removal, g) ในแต่ละรูปแบบการป้อนน้ำเสีย ตามระยะเวลาการทดลองในแต่ละช่วง (time, d) ได้ตามสมการดังนี้

$$\text{อัตราการกำจัดสะสม (g/d)} = \frac{\text{มลสารที่ถูกกำจัดแบบสะสมในแต่ละรูปแบบการป้อนน้ำเสีย (g)}}{\text{ระยะเวลาในแต่ละรูปแบบการป้อนน้ำเสีย (d)}}$$

โดยในคอลัมน์ ซี30 ทำการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการป้อนน้ำเสียเพียงสองแบบ คือ ป้อนทุกวัน และป้อนทุกสามวัน และในคอลัมน์ ซี 20 และ ซี10 ทำการป้อนน้ำเสียทั้งสามรูปแบบ ต่อเนื่องกัน ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

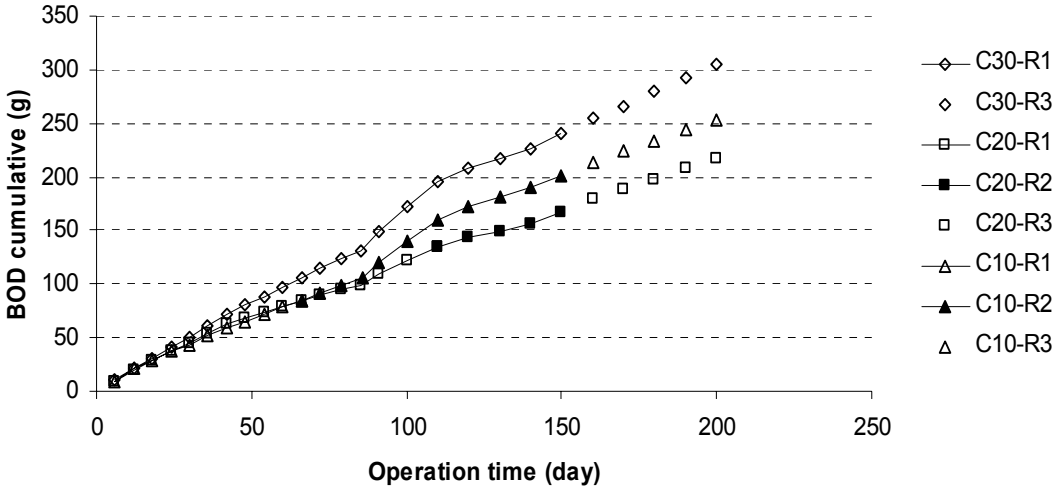
2.1 การบำบัดสารอินทรีย์

สำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของบีโอดี พบว่าการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปดังกล่าวมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการเดินระบบในรูปแบบการป้อนน้ำเสียทุกวัน คือ ในคอลัมน์ ซี10 เมื่อครบ 60 วัน พบว่าระบบมีประสิทธิภาพลดลงจาก 90 เปอร์เซ็นต์ เป็น 66 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปลี่ยนรูปแบบการป้อนน้ำเสียเป็นทุกสองวันระบบยังคงรักษาประสิทธิภาพในการกำจัดได้ในช่วง 42-60 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเปลี่ยนรูปแบบการป้อนน้ำเสียเป็นทุกสามวัน พบว่าระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดดีขึ้น อยู่ในช่วง 53-65 เปอร์เซ็นต์ ในคอลัมน์ ซี20 คล้ายคลึงกับคอลัมน์ ซี10 คือ ในการป้อนน้ำเสียทุกวันประสิทธิภาพการกำจัดมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาเมื่อครบ 100 วัน ประสิทธิภาพของระบบ ลดลงจาก 85 เปอร์เซ็นต์ เป็น 38 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นเมื่อเปลี่ยนรูปแบบการป้อนน้ำเสียเป็นทุกสองวัน และเมื่อเปลี่ยนการป้อนน้ำเสียเป็นทุกสามวัน ระบบสามารถรักษาระดับการกำจัดและดีขึ้นเล็กน้อยอยู่ในช่วง 54-62 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคอลัมน์ ซี30 มีการประสิทธิภาพการกำจัดลดลงตามระยะเวลาเช่นกัน คือ ในรูปแบบการป้อนน้ำเสียทุกวัน เมื่อครบ 140 วันระบบมีประสิทธิภาพลดลงจาก 96 เปอร์เซ็นต์ เป็น 72 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเปลี่ยนรูปแบบการป้อนน้ำเสียทุกสามวัน พบว่า ระบบสามารถรักษาระดับและมีประสิทธิภาพการกำจัดดีขึ้นเล็กน้อยอยู่ในช่วง 71-77 เปอร์เซ็นต์ เห็นได้ว่า การกำจัดมีความเสถียรมากขึ้น ในรูปแบบการป้อนน้ำเสียเข้าระบบทุกสองวัน และรูปแบบการป้อนทุกสามวันประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปบีโอดีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในทุกคอลัมน์ ตามภาพที่ 8



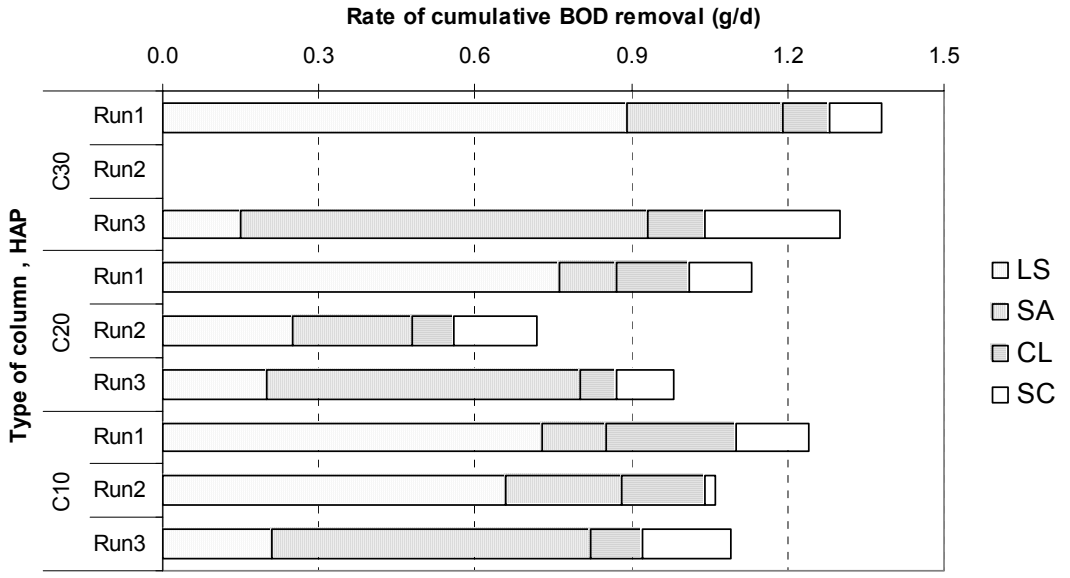
ภาพที่ 8 การกำจัดสารอินทรีย์ในรูปบีโอดีตามระยะเวลาและการเปลี่ยนรูปแบบการป้อนน้ำเสียของทุกคอลัมน์

ทั้งนี้คุณภาพน้ำที่ออกจากคอลัมน์ ซี10 และ ซี20 มีการเปลี่ยนรูปแบบการป้อนน้ำเสียสามแบบ คือ ทุกวัน ทุกสองวัน และทุกสามวัน ต่อเนื่องกัน พบว่า คอลัมน์ ซี10 มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ปล่อยมาจากระบบ อยู่ในช่วง 134-600 มก./ล. (เฉลี่ย 438±204 มก./ล.) 556-652 มก./ล. (เฉลี่ย 665±25 มก./ล.) และ 670-793 มก./ล. (เฉลี่ย 726±53 มก./ล.) ตามลำดับ ในคอลัมน์ ซี20 มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ออกมาจากระบบ อยู่ในช่วง 184-960 มก./ล. (เฉลี่ย 603±306 มก./ล.) 720-970 มก./ล. (เฉลี่ย 863±103 มก./ล.) และ 700-780 มก./ล. (เฉลี่ย 744±29 มก./ล.) ตามลำดับ ในคอลัมน์ ซี30 ที่มีการป้อนน้ำเสียสองรูปแบบ คือ ทุกวัน เป็นทุกสองวัน มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปบีโอดี ที่ปล่อยมา อยู่ในช่วง 15-580 มก./ล. (เฉลี่ย 281±183 มก./ล.) และ 400-485 มก./ล. (เฉลี่ย 446±33 มก./ล.) ตามลำดับ เมื่อคำนวณการกำจัดแบบสะสมตามระยะเวลาในแต่ละคอลัมน์ของทุกรูปแบบการป้อนน้ำเสีย ตามภาพที่ 9 พบว่าการกำจัดมีการสะสมเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเดินระบบแต่สังเกตได้ว่าจากภาพดังกล่าว ความชันของกราฟ ในการสะสมการกำจัดในแต่ละรูปแบบการป้อนน้ำเสียมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อคำนวณอัตราการกำจัดสะสมที่เกิดขึ้นต่อวันในแต่ละรูปแบบการป้อนน้ำเสียของชั้นวัสดุทุกชั้นแต่ละคอลัมน์ ดังภาพที่ 10 พบว่าในแต่ละรูปแบบการป้อนน้ำเสียของแต่ละคอลัมน์นั้นมีแนวโน้มที่ลดลงเล็กน้อยเมื่อเปลี่ยนรูปแบบจากทุกวันเป็นทุกสองวัน แต่เมื่อเปลี่ยนรูปแบบเป็นทุกสามวันพบว่าระบบ มีอัตราการกำจัดสะสมต่อวันที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 9 การกำจัดสารอินทรีย์ในรูปบีโอดีแบบสะสมตามระยะเวลาในแต่ละรูปแบบการป้อนน้ำเสียของทุกคอลัมน์

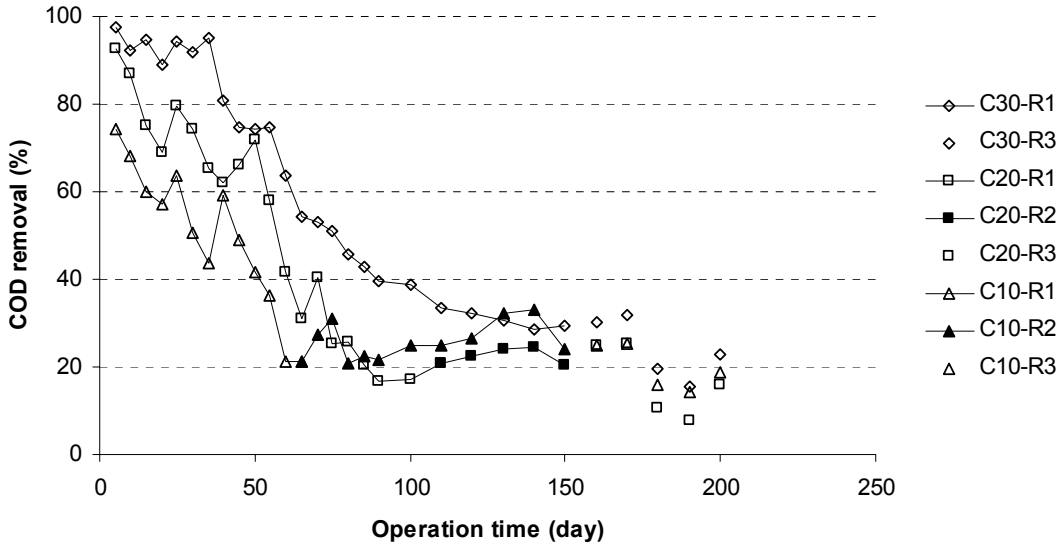
และพบว่า ในคอลัมน์ ซี30 และ ซี10 นั้นเมื่อพิจารณาในรูปแบบการ ป้อนน้ำเสียทุกสามวัน อัตราการกำจัดต่อวันที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างไม่มากนัก คือ 1.30 และ 1.09 ก./วัน ตามลำดับ นอกจากนี้ในรูปแบบการป้อนน้ำเสียทุกวันการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปบีโอดี เกิดขึ้นมากที่สุดในชั้นของหินปูนของทุกคอลัมน์เนื่องจากออกซิเจนในธรรมชาติสามารถแพร่เข้าสู่ชั้นดังกล่าวได้ง่ายเพราะเป็นชั้นบนสุดและมีความพรุนมากที่สุดด้วย แต่เมื่อเปลี่ยนรูปแบบการป้อนน้ำเสียเป็นทุกสามวัน พบว่า ชั้นที่ทำหน้าที่กำจัดสารอินทรีย์ในรูปบีโอดีมากที่สุด คือ ชั้นทราย ดังภาพที่ 10 เนื่องจากเมื่อเว้นระยะการป้อนน้ำเสียทำให้อากาศสามารถแพร่เข้าถึงชั้นของทรายด้วย และสาเหตุที่ทำให้อัตราการกำจัด ไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อเปลี่ยนรูปแบบการป้อนน้ำเสียเนื่องจากสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของบีโอดี นั้นจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ง่ายเมื่อมีปริมาณออกซิเจนละลายที่เพียงพอต่อการทำงานของจุลินทรีย์ (ภาพที่ 14) ซึ่งจะกล่าวในเรื่องออกซิเจนละลายเพิ่มเติมในเรื่องของออกซิเจนละลายในแต่ละชั้นวัสดุต่อไป



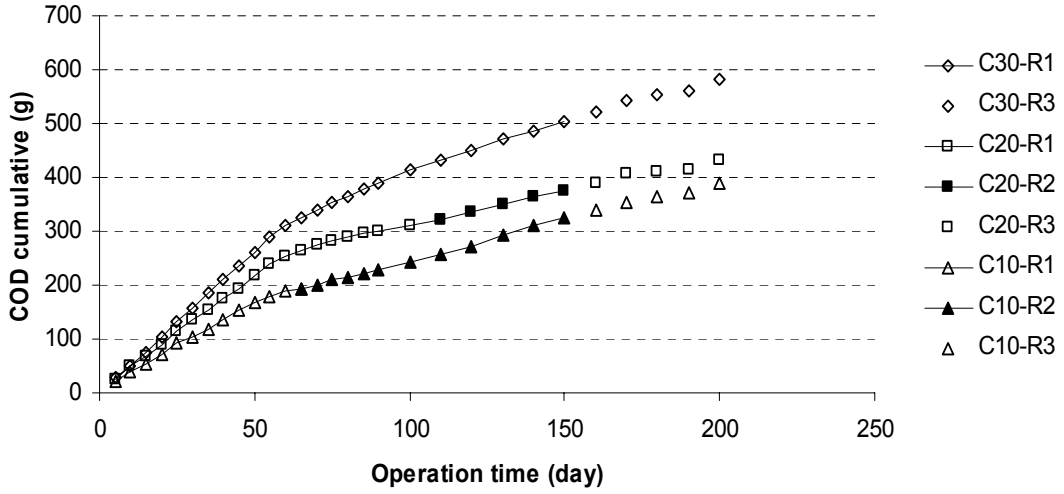
ภาพที่ 10 อัตราการกำจัดสะสมสารอินทรีย์ในรูปบีโอดีต่อวัน ในแต่ละรูปแบบการป้อนน้ำเสียของแต่ละคอลัมน์

สำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี ที่เกิดขึ้นในระบบ ดินและหินเรียงเป็นชั้นทุกคอลัมน์ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการเดินระบบโดยเฉพาะการป้อนน้ำเสียแบบทุกวัน อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพแปรผันโดยตรงกับความหนาของชั้นวัสดุ โดยพบว่า เมื่อครบ 60 วัน คอลัมน์ ซี10 มีประสิทธิภาพลดลงจาก 74 เปอร์เซ็นต์ เป็น 24 เปอร์เซ็นต์

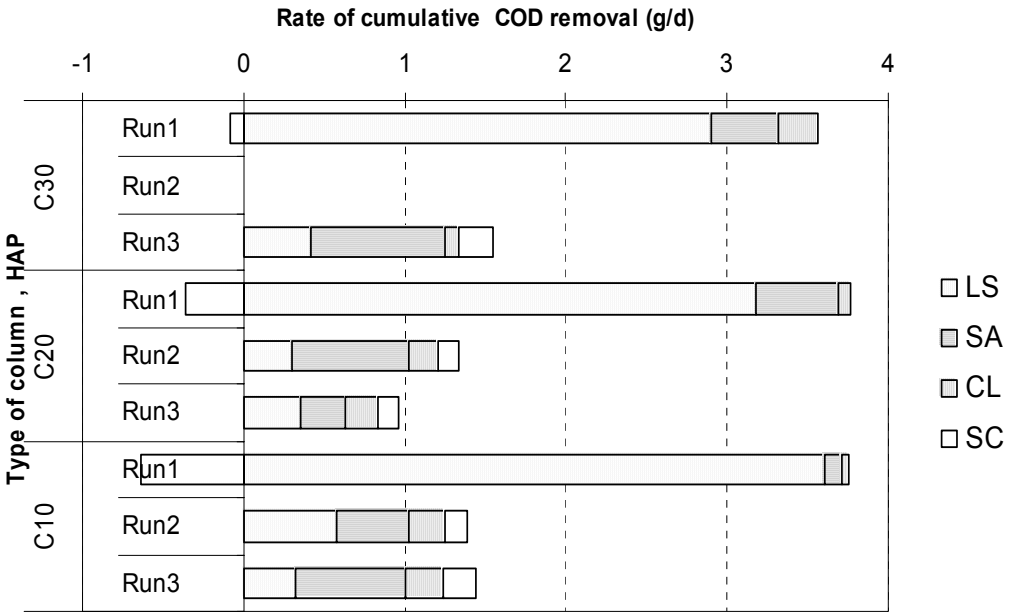
และเมื่อเปลี่ยนรูปแบบการป้อนน้ำเสียเป็นทุกสองวันระบบสามารถคงระดับการกำจัดได้อยู่ในช่วง 21-33 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปลี่ยนรูปแบบการป้อนน้ำเสียเป็นทุกสามวันก็ไม่สามารถทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดดีขึ้นได้ ส่วนในคอลัมน์ ซี20 และ ซี30 มีประสิทธิภาพคล้ายคลึงกับ ซี10 คือ คอลัมน์ ซี20 เมื่อครบ 100 วันประสิทธิภาพของระบบลดลง จาก 93 เปอร์เซ็นต์ เป็น 17 เปอร์เซ็นต์ และคอลัมน์ ซี30 เมื่อครบ 140 วัน ประสิทธิภาพลดลงจาก 98 เปอร์เซ็นต์ เป็น 30 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเปลี่ยนรูปแบบการป้อนน้ำเสียเป็นทุกสองวัน พบว่าระบบมีความเสถียรโดยรักษาระดับการกำจัดได้อยู่ในช่วง 20-24 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเปลี่ยนรูปแบบการป้อนน้ำเสียเป็นทุกสามวัน ทั้งคอลัมน์ ซี 20 และ ซี30 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีไม่ดีขึ้น และลดลงเล็กน้อยในทุกคอลัมน์ ตามภาพที่ 11 หรือกล่าวโดยสรุปได้ว่าคอลัมน์ ซี10 มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ปล่อยมาจากระบบ อยู่ในช่วง 5,400-1,440 มก./ล. (เฉลี่ย 3,003±1,196 มก./ล.) 4,578-3,867 มก./ล. (เฉลี่ย 4,234±223 มก./ล.) และ 4,950-4,212 มก./ล. (เฉลี่ย 4,514±282 มก./ล.)ในการป้อนน้ำเสียทุกวัน ทุกสองวัน และทุกสามวัน ตามลำดับ คอลัมน์ ซี 20 มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ปล่อยออกมา อยู่ในช่วง 4,980-418 มก./ล. (เฉลี่ย 2,783±1,646 มก./ล.) 4,585-4315 มก./ล. (เฉลี่ย 4,508±110 มก./ล.) และ 5,100-4,200 มก./ล. (เฉลี่ย 4,665±321 มก./ล.) ในการป้อนน้ำเสีย ทุกวัน ทุกสองวัน และทุกสามวันตามลำดับ และคอลัมน์ ซี30 มีการเปลี่ยนรูปแบบการป้อนน้ำเสีย จากทุกวันเป็นทุกสามวันเลย เนื่องจาก พบว่า ใช้การป้อนน้ำเสียทุกสองวันไม่สามารถทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้น โดยสรุปได้ว่า ในคอลัมน์ ซี30 มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ปล่อยมา อยู่ในช่วง 4,276-139 มก./ล. (เฉลี่ย 2,205±1,443 มก./ล.) และ 4,700-3,912 มก./ล. (เฉลี่ย 4,269±283 มก./ล.) อย่างไรก็ตามได้พิจารณาการกำจัดแบบสะสมตามระยะเวลาในแต่ละคอลัมน์ แสดงดังภาพที่ 12 สรุปได้ว่า การเพิ่มความหนาของชั้นดินสามารถเพิ่มอัตราการกำจัดซีโอดีโดยรวม และในแต่รูปแบบการป้อนน้ำเสียของแต่ละคอลัมน์นั้นสังเกตได้ว่า ลักษณะความชันของกราฟที่แสดง มีความแตกต่างกันในแต่ละรูปแบบการป้อนน้ำเสีย เมื่อคำนวณหาอัตราการกำจัดสะสมที่เกิดขึ้นต่อวันในแต่ละรูปแบบการป้อนน้ำเสียของแต่ละคอลัมน์ในแต่ละชั้นวัสดุ พบว่า อัตราการกำจัดที่ได้มีความแตกต่างกัน แสดงดังภาพที่ 13



ภาพที่ 11 การกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีตามระยะเวลาและการเปลี่ยนรูปแบบการป้อนน้ำเสียของทุกคอลัมน์

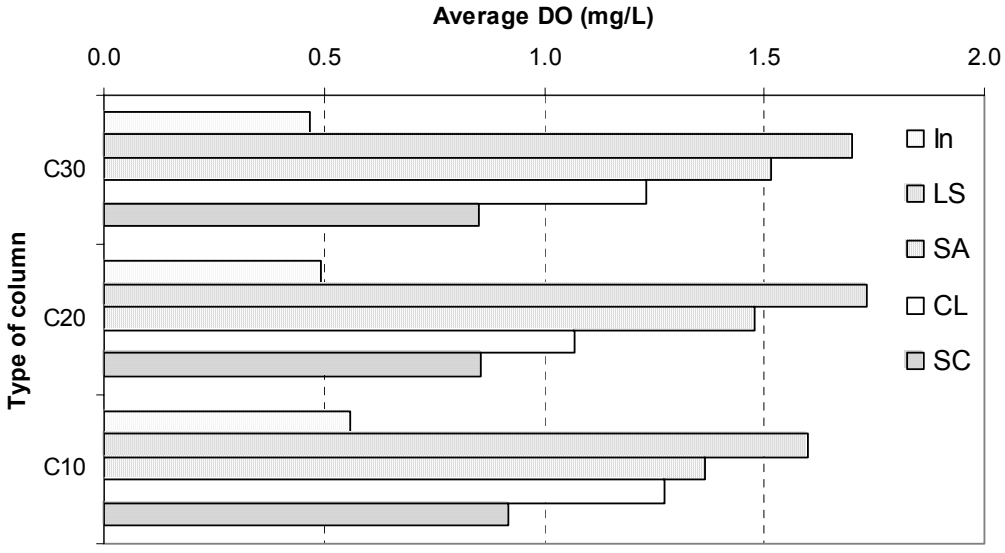


ภาพที่ 12 การกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีแบบสะสมตามระยะเวลาในแต่ละรูปแบบการป้อนน้ำเสียของทุกคอลัมน์



หมายเหตุ LS = หินปูน SA = ทราย CL = ดินเหนียว SC = ดินเหนียวปนตะกอน

ภาพที่ 13 อัตราการกำจัดสะสมสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีต่อวัน ในแต่ละรูปแบบการป้อนน้ำเสียของแต่ละคอลัมน์



ภาพที่ 14 ปริมาณออกซิเจนละลายโดยเฉลี่ยในการป้อนน้ำเสียทุกวันของแต่ละคอลัมน์

โดยสรุปได้ว่า การป้อนน้ำเสียทุกวันของทุกคอลัมน์มีการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีส่วนใหญ่เกิดขึ้นในชั้นของ หินปูนซึ่งเป็นชั้นบนสุดของคอลัมน์เนื่องจาก รูปแบบการป้อนน้ำเสียทุกวันนั้นปริมาณออกซิเจนละลายในชั้นของหินปูนมีปริมาณมากที่สุดทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนโดยแอโรบิค เฮทเทอโรโทรฟิค เกิดขึ้นได้ดี โดยอัตราการกำจัดมีแนวโน้มลดลงตามความลึกที่เพิ่มขึ้นของระบบสอดคล้องกับปริมาณออกซิเจนละลายที่ลดลงตามความลึกของระบบ (ภาพที่ 14)

มีข้อสังเกตว่า ในชั้นของดินเหนียวปนตะกอนการกำจัดซีโอดีติดลบมากขึ้นผกผันกับความหนาของดินซึ่งชี้ให้เห็นว่ามีการย่อยสลายต่ำและมีการชะสารละลายอินทรีย์ออกมาจากวัสดุดังกล่าวร่วมด้วยแต่เมื่อเปลี่ยนรูปแบบการป้อนน้ำเสียเป็นทุกสามวัน (ซี10 และ ซี20) และทุกสามวัน (ซี10, 20, 30) การกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีมีประสิทธิภาพโดยรวมใกล้เคียงกันแต่อัตราการกำจัดลดลงเมื่อเทียบกับการป้อนน้ำเสียทุกวัน คาดว่าเป็นผลสืบเนื่องจากการสะสมสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปซีโอดี ที่เกิดจากการเดินระบบก่อนหน้า

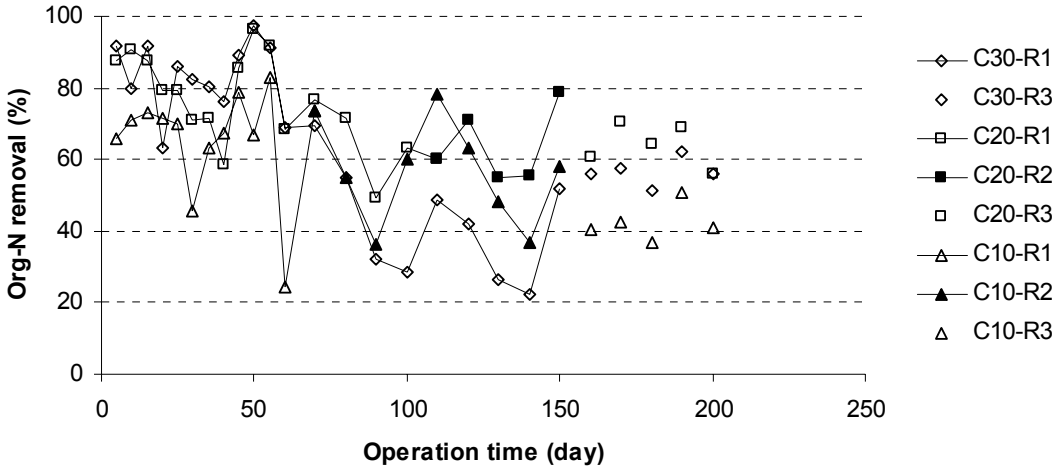
2.2 การบำบัดไนโตรเจน

สำหรับไนโตรเจนที่มีอยู่ในน้ำชะมูลฝอย จะประกอบด้วย อินทรีย์ไนโตรเจน และแอมโมเนียไนโตรเจนเป็นส่วนใหญ่ ที่มีความเข้มข้น 41-127 มก./ล. (เฉลี่ย 83±19 มก./ล.) และ 244-43 มก./ล. (เฉลี่ย 314±43 มก./ล.) ตามลำดับ ส่วนในรูปของ ไนไตรท์และไนเตรทไนโตรเจนนั้นมีปริมาณต่ำมาก คือ 0.6-0.6 มก./ล. และ 0-2.77 มก./ล. ตามลำดับ

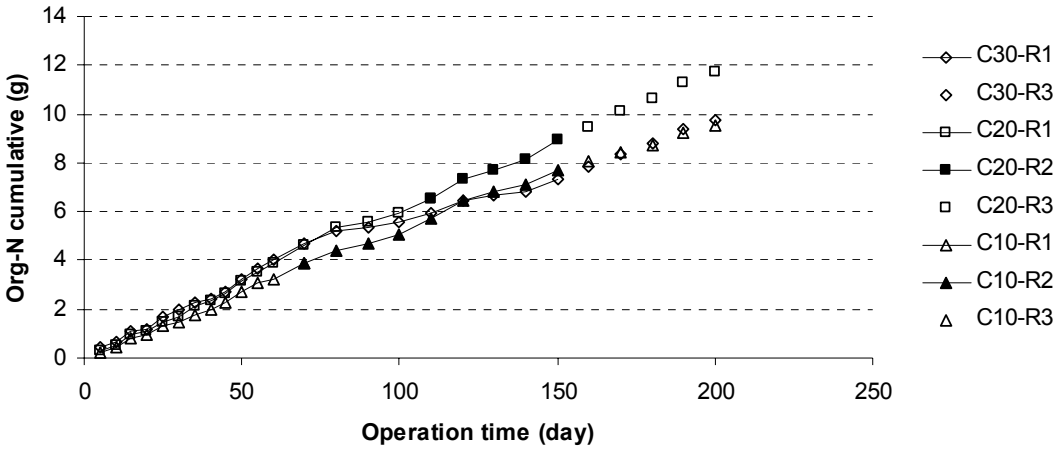
จากผลการทดลอง พบว่า การกำจัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนนั้นมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการเดินระบบโดยมีลักษณะการกำจัดเป็นไปในทางเดียวกันกับการกำจัดบีโอดี ตามภาพที่ 15 โดยคุณภาพน้ำที่ปล่อยออกในคอลัมน์ ซี 30 ที่มีการป้อนน้ำเสียสองรูปแบบ คือ ทุกวันและทุกสองวัน มีสารอินทรีย์ไนโตรเจนอยู่ในช่วง 33-66 มก./ล. (เฉลี่ย 27±20 มก./ล.) และ 32-41 มก./ล. (เฉลี่ย 37±3 มก./ล.) ตามลำดับ ในคอลัมน์ ซี 20 และ ซี 10 ที่มีการป้อนน้ำเสียทั้งสามรูปแบบ คือ ทุกวัน ทุกสองวัน และทุกสามวัน ต่อเนื่องกัน โดยในคอลัมน์ ซี 20 มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ไนโตรเจนที่ปล่อยออกมา อยู่ในช่วง 4-35 มก./ล. (เฉลี่ย 18±10 มก./ล.) 21-36 มก./ล. (เฉลี่ย 32±6 มก./ล.) และ 27-33 มก./ล. (เฉลี่ย 30±2 มก./ล.) ตามลำดับ และในคอลัมน์ ซี 10 อยู่ในช่วง 14-77 มก./ล. (เฉลี่ย 30±18 มก./ล.) 19-53 มก./ล. (เฉลี่ย 37±13 มก./ล.) และ 43-53 มก./ล. (เฉลี่ย 49±4

มก./ล.) ตามลำดับ จากนั้นคำนวณหาทำการกำจัดสะสมที่เกิดขึ้นในแต่ละรูปแบบการป้อนน้ำเสียในแต่ละคอลัมน์ตามระยะเวลาการเดินระบบ (ภาพที่ 16) พบว่า หลังจากวันที่ 80 ของการเดินระบบการกำจัดสะสมสารอินทรีย์ไนโตรเจนในคอลัมน์ ซี20 มีอัตราการสะสมมากที่สุด และเมื่อเดินระบบเป็นระยะเวลา 120 วัน ในคอลัมน์ ซี10 และ ซี20 มีอัตราการกำจัดสะสมไม่แตกต่างกัน คาดว่าเนื่องจากในการกำจัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนในระบบนั้นเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วมาก (น้อยกว่า 1 ชม.) ทำให้ความหนาไม่มีผลมากนักต่อการกำจัดสารอินทรีย์ไนโตรเจน และเมื่อคำนวณอัตราการกำจัดสะสมต่อวัน พบว่า ในคอลัมน์ ซี20 ของการป้อนน้ำเสียทุกวันมีอัตราการกำจัดสะสมต่อวันสูงที่สุดด้วย เนื่องจากกลไกการกำจัดสารอินทรีย์นั้นมีทั้งแบบ ออกซิเดชั่นและรีดักชั่น และคาดว่าระยะเวลาการกักเก็บในระบบของคอลัมน์ ซี20 มีความเหมาะสมกับการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ

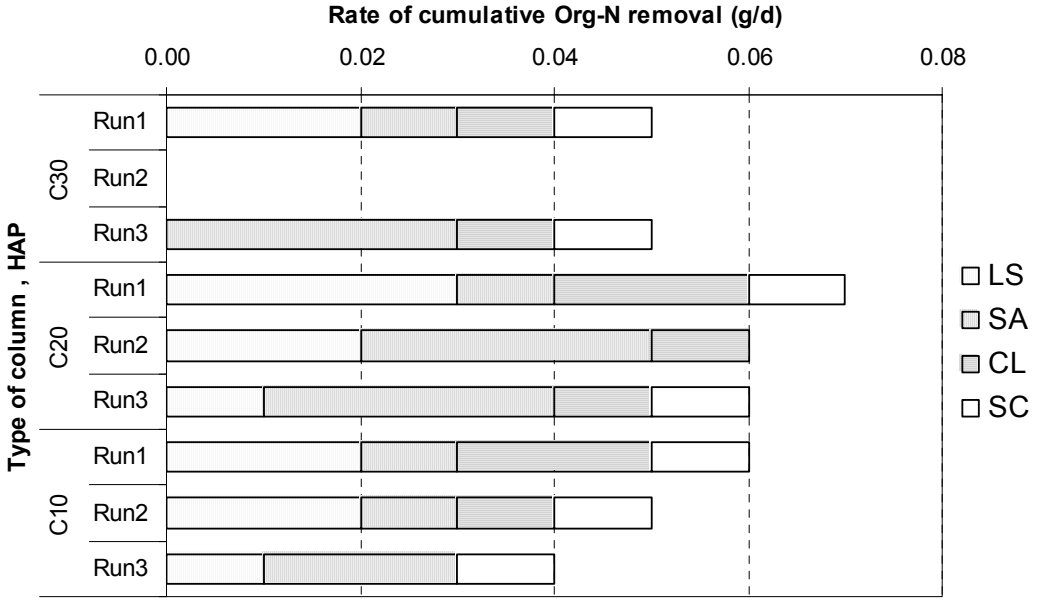
และเมื่อพิจารณาการกำจัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นวัสดุของแต่ละคอลัมน์ พบว่า ระบบมีการกำจัดส่วนใหญ่เกิดขึ้นในชั้นของหินปูนในช่วงการป้อนน้ำเสียทุกวัน เนื่องจากน้ำเสียในระบบจะค้างอยู่ในทุกชั้นของวัสดุการกำจัดจึงเกิดขึ้นในชั้นหินปูนได้แต่เมื่อเปลี่ยนรูปแบบการป้อนน้ำเสียทั้งสามคอลัมน์เป็นทุกสามวันน้ำเสียที่ค้างอยู่ในระบบลดระดับลงทำให้การค้างของน้ำเสียในระบบอยู่ในชั้นต่ำลงการกำจัดจึงเกิดขึ้นมากในชั้นทรายโดยมีเหตุผลคล้ายคลึงกับการกำจัดบีโอดี



ภาพที่ 15 การกำจัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนตามระยะเวลาและการเปลี่ยนรูปแบบการป้อนน้ำเสียของทุกคอลัมน์



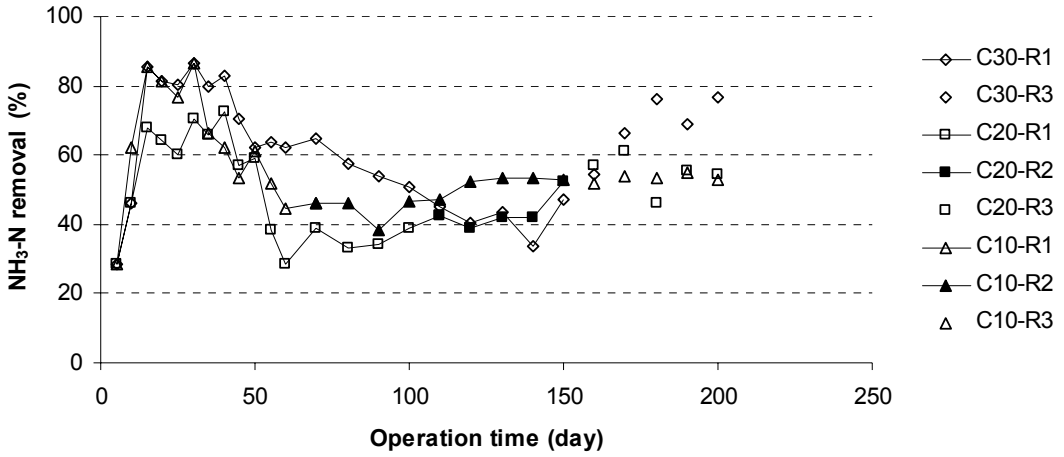
ภาพที่ 16 การกำจัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนแบบสะสมตามระยะเวลาในแต่ละรูปแบบการป้อนน้ำเสียของทุกคอลัมน์



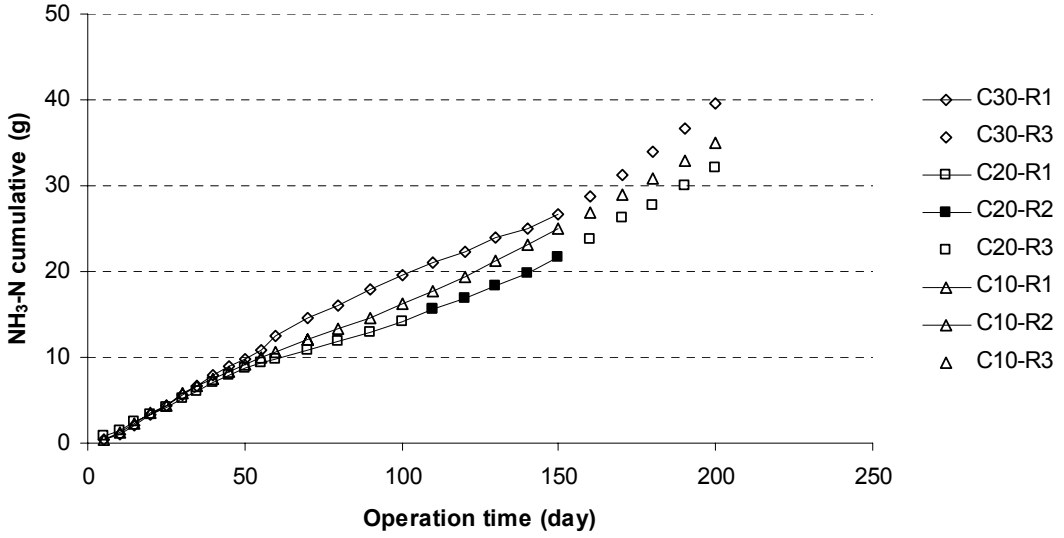
ภาพที่ 17 อัตราการกำจัดสะสมสารอินทรีย์ไนโตรเจนต่อวัน ในแต่ละรูปแบบการป้อนน้ำเสียของแต่ละคอลัมน์

ส่วนการกำจัดไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนีย ด้วยระบบดินและหินเรียงเป็นชั้น พบว่า การกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วง 2 สัปดาห์แรกของการเดินระบบ และคงที่ในช่วงสัปดาห์ที่ 3 หลังจากนั้นลดลงตามระยะเวลาการเดินระบบในรูปแบบการป้อนน้ำ

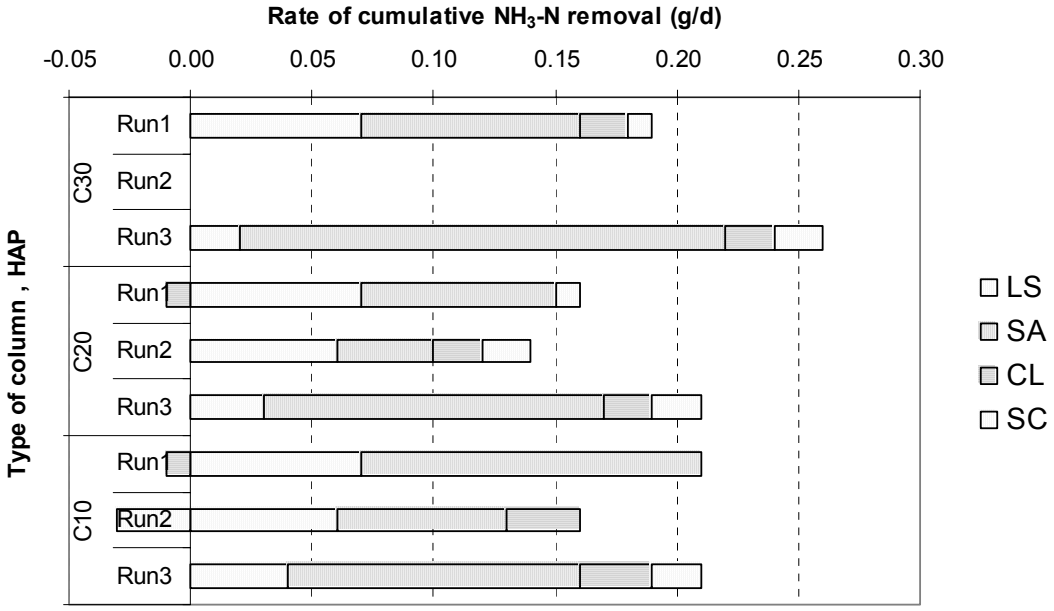
เสียทุกวัน แต่ในแต่ละคอลัมน์เมื่อเปลี่ยนรูปแบบการป้อนน้ำเสียเป็นทุกสองวัน พบว่า ระบบมีความเสถียรในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนมากขึ้นและเมื่อเปลี่ยนเป็นทุกสามวันการกำจัดไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียมีประสิทธิภาพดีขึ้น ตามภาพที่ 18 โดยในคอลัมน์ ซี 30 มีความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจนที่ออกมา อยู่ในช่วง 39-232 มก./ล. (เฉลี่ย 121±60 มก./ล.) และ 84-169 มก./ล. (เฉลี่ย 119±34 มก./ล.) ตามลำดับสำหรับการป้อนน้ำเสียทุกวัน และทุกสองวัน ในคอลัมน์ ซี 20 และ ซี 10 ที่มีการป้อนน้ำเสีย ทุกวัน ทุกสองวัน และทุกสามวันพบว่า ในคอลัมน์ ซี 20 มีความเข้มข้นของสารดังกล่าวที่ปล่อยออกมา คือ 82-207 มก./ล. (เฉลี่ย143±48 มก./ล.) 172-206 มก./ล. (เฉลี่ย 191±14 มก./ล.) และ 153-188 มก./ล. (เฉลี่ย 170±14 มก./ล.) ตามลำดับ ในส่วน ซี 10 มีความเข้มข้นที่ปล่อยออกมา คือ 39-174 มก./ล. (เฉลี่ย 101±46 มก./ล.) 147-192 มก./ล. (เฉลี่ย 168±13 มก./ล.) และ 163-184 มก./ล. (เฉลี่ย 176±8 มก./ล.) ตามลำดับ เมื่อคำนวณหาอัตราการกำจัดสะสมที่เกิดขึ้นในแต่ละรูปแบบการป้อนน้ำเสียในแต่ละคอลัมน์ตามระยะเวลาการเดินระบบ พบว่าจากภาพที่ 19 ความชันของการสะสมมีการเปลี่ยนแปลง แสดงว่า ผลของการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการป้อนน้ำเสียมีผลต่อการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน จากนั้นเมื่อพิจารณาอัตราการกำจัดแบบสะสมต่อวันที่เกิดขึ้น ดังภาพที่ 20 นั้นเห็นได้ว่า ในคอลัมน์ ซี 30 มีอัตราการกำจัดเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปลี่ยนรูปแบบการป้อนน้ำเสียจาก ทุกวัน เป็นทุกสามวัน คือ 0.19 เป็น 0.26 ก./วัน ส่วนในคอลัมน์ ซี 20 และ ซี 10 นั้น พบว่า การเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย คือ เมื่อเปลี่ยนรูปแบบจากทุกวันเป็นทุกสองวัน อัตราการกำจัดต่อวัน ลดลงเล็กน้อย แต่เมื่อเปลี่ยนรูปแบบการป้อนน้ำเสียเป็นทุกสามวัน พบว่า อัตราการกำจัดสะสมต่อวันเพิ่มมากขึ้น และเมื่อพิจารณารูปแบบการป้อนน้ำเสียทุกสามวัน ในคอลัมน์ ซี 30 และ ซี 10 พบว่า มีอัตราการกำจัดไม่แตกต่างกันมากนัก คือ 0.26 และ 0.21 ก./วัน ตามลำดับ คาดว่าเนื่องจากระยะเวลาการเว้นป้อนน้ำเสียทำให้ออกซิเจนแพร่เข้าสู่ชั้นวัสดุได้ง่าย ส่งผลให้การทำงานของจุลินทรีย์ดีขึ้นด้วย และยังพบอีกว่าชั้นวัสดุที่ทำหน้าที่กำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนส่วนใหญ่เกิดขึ้นในชั้นของทราย คาดว่าเนื่องจากจุลินทรีย์ในกลุ่มออโตโทรฟิค เกิดการแข่งขันกับ จุลินทรีย์ในกลุ่ม เฮทเทอโรโทรฟิค ออกซิเจนที่เหลือจึงถูกใช้ในชั้นของทรายสำหรับการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนโดยจุลินทรีย์ในกลุ่มเฮทเทอโรโทรฟิค



ภาพที่ 18 การกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนตามระยะเวลาและการเปลี่ยนรูปแบบการป้อนน้ำเสียของทุกคอลัมน์



ภาพที่ 19 การกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนแบบสะสมตามระยะเวลาในแต่ละรูปแบบการป้อนน้ำเสียของทุกคอลัมน์



ภาพที่ 20 อัตราการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนต่อวัน ในแต่ละรูปแบบการป้อนน้ำเสียของแต่ละคอลัมน์

จากผลการทดลองจากคอลัมน์จำลองระบบดินและหินเรียงเป็นชั้น พบว่า ความหนาของชั้นวัสดุผลต่อการบำบัดน้ำชะมูลฝอยโดยคอลัมน์ ซี30 ซึ่งมีความหนาของแต่ละชั้นวัสดุมากที่สุด คือ 30 ซม. จึงมีประสิทธิภาพมากที่สุด และประสิทธิภาพในการบำบัดนั้นยังลดลงตามระยะเวลาของการเดินระบบ เมื่อเปลี่ยนรูปแบบการป้อนน้ำเสีย พบว่า การการป้อนน้ำเสียทุกสามวัน ระบบมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นและมีความเสถียรมากขึ้นในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปบีโอดี และไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนีย เนื่องจากระบบอาศัยกลไกทางชีวภาพเป็นหลัก มลสารที่ย่อยสลายยาก อย่างเช่น ซีโอดี จึงเป็นข้อกำจัดของระบบนี้

2.3 การบำบัดของแข็งแขวนลอย ฟอสฟอรัส และอื่นๆ

ของแข็งแขวนลอยในน้ำชะมูลฝอยที่เข้าสู่ระบบในทั้งสามคอลัมน์ค่อนข้างสูงอยู่ในช่วง 445-711 มก./ล. (เฉลี่ย 573±69 มก./ล.) เมื่อผ่านเข้าสู่ระบบ พบว่า การกำจัดของแข็งแขวนลอยเกิดขึ้นตลอดความลึกในทุกชั้นวัสดุของทุกคอลัมน์ และมีปริมาณของแข็งแขวนลอยที่ออกมาจากระบบในแต่ละคอลัมน์ ดังนี้ คอลัมน์ซี 30 อยู่ในช่วง 25-170 มก./ล. (เฉลี่ย 83±31 มก./ล.) คอลัมน์ ซี 20 อยู่ในช่วง 60-240 มก./ล. (เฉลี่ย 83±31 มก./ล.) และในคอลัมน์ ซี 10 อยู่ในช่วง 55-210 มก./ล. (เฉลี่ย 137±37 มก./ล.) จะเห็นได้ว่า ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่ออกจากระบบใน

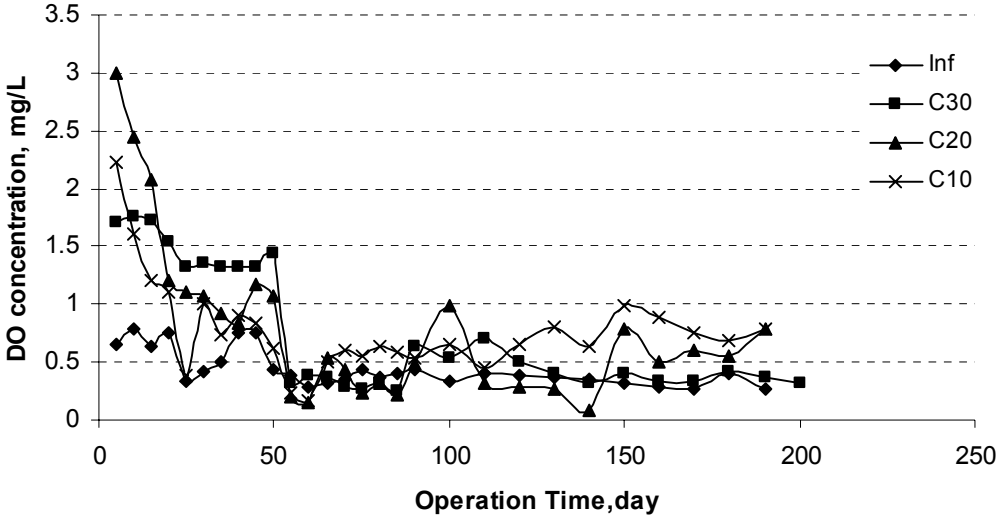
แต่ละคอลัมน์นั้นยังมีอยู่ในปริมาณที่สูงเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (50 มก./ล.)

สำหรับการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำชะมูลฝอยด้วยระบบ ดินและหินเรียงเป็นชั้น พบว่าในน้ำชะมูลฝอยมีปริมาณฟอสฟอรัสก่อนเข้าระบบน้อย คือ อยู่ในช่วง 29.8-81 มก./ล. (เฉลี่ย 15.7±5.6 มก./ล.) เมื่อผ่านเข้าสู่ระบบ ปริมาณฟอสฟอรัสที่ออกมาในแต่ละคอลัมน์มีปริมาณน้อยมาก คือ คอลัมน์ ซี 30 อยู่ในช่วง 0.1-6 มก./ล. (เฉลี่ย 2.6±2 มก./ล.) คอลัมน์ ซี 20 อยู่ในช่วง 0.2-6.1 มก./ล. (เฉลี่ย 3.1±2.2 มก./ล.) และคอลัมน์ ซี 10 อยู่ในช่วง 0.2-11.8 (เฉลี่ย 3.7±2.9 มก./ล.) เห็นได้ว่ามีปริมาณที่น้อย คาดว่า การกำจัดฟอสฟอรัสอาจเกิดขึ้นเนื่องจาก การดูดซับโดยเฉพาะเมื่อน้ำเสียมีพีเอช เป็นกลาง (5-6.8) ซึ่งเป็นสภาวะที่ดีที่สุดที่ฟอสฟอรัสในน้ำชะมูลฝอยจะจับกับ เหล็ก อลูมิเนียม หรือ แมงกานีส ในดิน ทำให้เกิดเป็นตะกอนและตกค้างอยู่ในดิน (Ou,1989) หรืออาจเกิดจากจุลินทรีย์ซึ่งใช้ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับการสร้างเซลล์ของจุลินทรีย์เองทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสลดลงได้ (Metcraf and Eddy, 2003)

พีเอช ในน้ำชะมูลฝอยที่เข้าสู่ระบบจะอยู่ในช่วง 6.05-8.23 มก./ล. (เฉลี่ย 7.01±0.42 มก./ล.) เมื่อผ่านเข้าสู่ระบบในแต่ละคอลัมน์ พบว่า พีเอชในน้ำชะมูลฝอยเกิดการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย คือ คอลัมน์ ซี30 อยู่ในช่วง 6.4-7.9 (เฉลี่ย 7.1±0.5) คอลัมน์ ซี20 อยู่ในช่วง 6.0-8.1 (เฉลี่ย 7.2±0.6) และคอลัมน์ ซี10 อยู่ในช่วง 6.0-7.9 (เฉลี่ย 7.1±0.5) เนื่องจากวัสดุ คือ หินปูน และทรายมีองค์ประกอบของ คาร์บอเนต และ ซิลิกา ตามลำดับ (Sawyer et al, 1994) ซึ่งมีสมบัติเป็นด่างแต่ในน้ำชะมูลฝอยที่เข้าสู่ระบบ มีค่าพีเอชที่ค่อนข้างเป็นด่างอยู่แล้ว จึงทำให้พีเอชที่ผ่านระบบไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ถึงแม้ว่าในระบบจะเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพที่มีการปลดปล่อย ไฮโดรเจนไอออน ออกมาก็ตาม

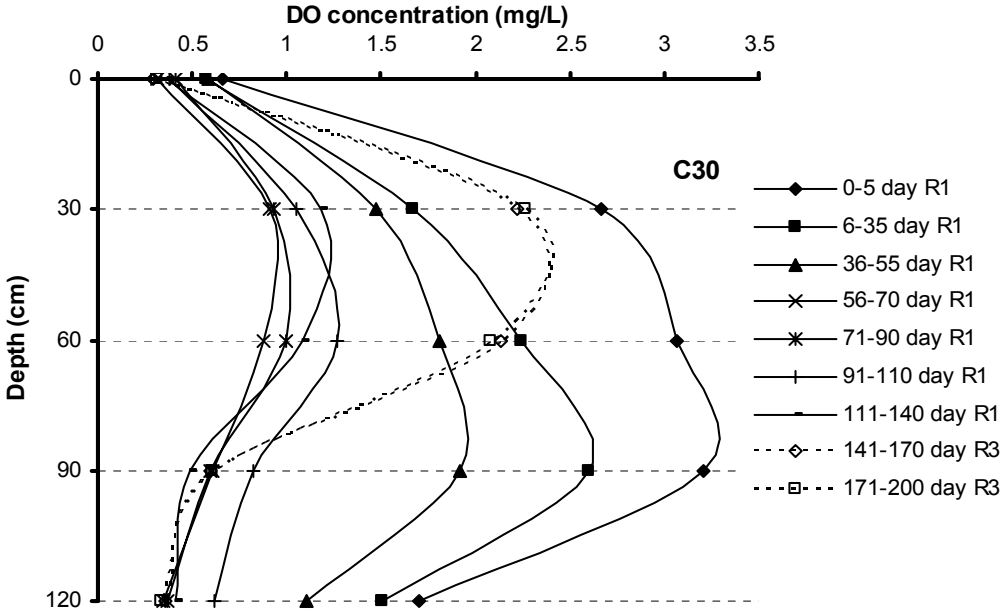
ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำชะมูลฝอยก่อนเข้าสู่ระบบนั้นมีปริมาณต่ำ อยู่ในช่วง 0.21-0.78 มก./ล. (เฉลี่ย 0.44±0.16 มก./ล.) เมื่อเข้าสู่ระบบจากภาพที่ 21 พบว่า ปริมาณออกซิเจนละลายที่ออกจากระบบมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาเดินระบบ และเมื่อพิจารณาปริมาณออกซิเจนละลายของน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านออกจากชั้นวัสดุต่างๆ ในแต่ละคอลัมน์ ในคอลัมน์ ซี 30 จากภาพที่ 22 เห็นได้ว่า ปริมาณออกซิเจนละลายในการเดินระบบที่มีการป้อนน้ำเสียทุกวัน ช่วงแรกจะมีปริมาณสูงที่สุดในชั้นของดินเหนียวคาดว่าเนื่องจากมีปริมาณออกซิเจนที่อยู่ในช่องว่างของวัสดุดังกล่าวก่อนการทดลอง หลังจากนั้นปริมาณออกซิเจนในชั้นดังกล่าวลดลงตามระยะเวลา

จนกระทั่ง พบว่า ปริมาณออกซิเจนละลายพบมากในชั้นของหินปูนและทราย เนื่องจากในชั้นดังกล่าว อยู่ด้านบนของคอลัมน์และยังมีความพรุนมากที่สุดด้วยทำให้ออกซิเจนสามารถเข้าสู่สองชั้นดังกล่าวง่าย แต่เมื่อเดินระบบต่อเนื่องจะมีน้ำชะมูลฝอยเข้าไปแทนช่องว่างในเม็ดดินหรือหินปูน (ท่วมชั้นวัสดุ) ทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลง แต่เมื่อเว้นระยะเวลาการป้อนน้ำเสียโดยป้อนเข้าระบบทุกสามวันในคอลัมน์ ซี 30 จะทำให้น้ำในชั้นวัสดุลดลงปริมาณช่องว่างในวัสดุมากขึ้นออกซิเจนสามารถเข้าสู่ชั้นวัสดุได้ง่ายทำให้ชั้นของหินปูนและทรายมีปริมาณออกซิเจนมากขึ้น ดังภาพที่ 22



ภาพที่ 21 ปริมาณออกซิเจนละลายเข้าและออกจากระบบ

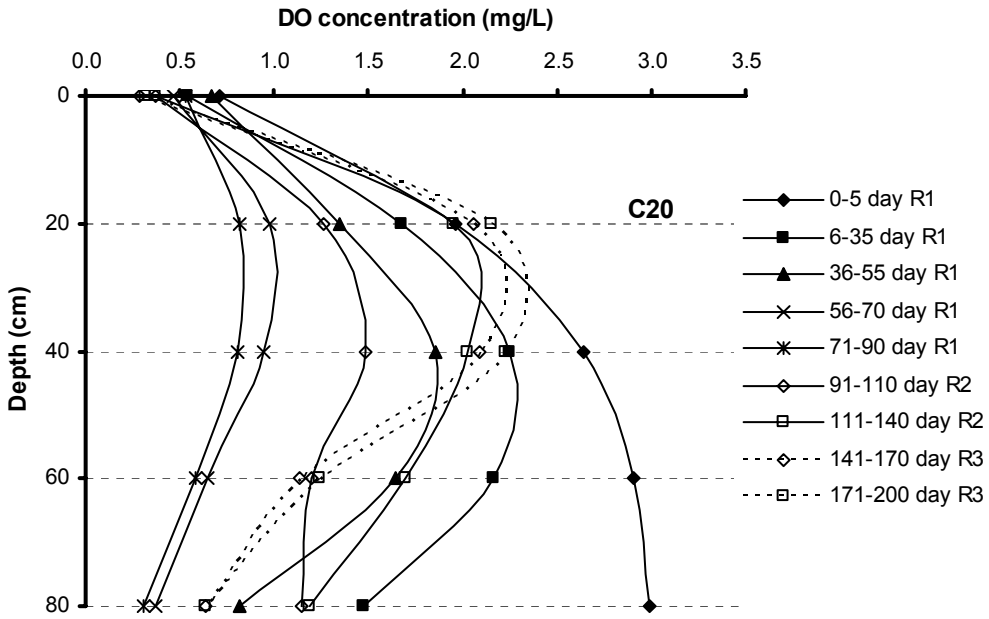
สำหรับในคอลัมน์ ซี 20 และ ซี 10 พบเช่นกันว่าปริมาณออกซิเจนละลายที่ออกจากระบบมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการเดินระบบ เมื่อพิจารณาในชั้นวัสดุพบว่า ปริมาณออกซิเจนละลายในช่วงต้นของการเดินระบบซึ่งมีการป้อนน้ำเสียทุกวันนั้น จะพบออกซิเจนละลายมากในชั้นของดินเหนียวทั้งสองคอลัมน์คาดว่าเนื่องจากออกซิเจนที่มีอยู่เดิมในช่องว่างของชั้นวัสดุดังกล่าว แต่เมื่อเดินระบบต่อเนื่องปริมาณออกซิเจนละลายในชั้นดังกล่าวลดลง ตามภาพที่ 23 และ 24 เนื่องจากน้ำชะมูลฝอยเข้าไปแทนที่ช่องว่างและมีการใช้ออกซิเจนโดยจุลินทรีย์ในชั้นวัสดุเองหลังจากนั้นพบว่าปริมาณออกซิเจนละลายในชั้นดินเหนียวลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อเดินระบบเป็นระยะเวลาหนึ่งพบออกซิเจนละลายมากที่สุดในชั้นของหินปูนและทราย และจะลดลงตามระยะเวลา



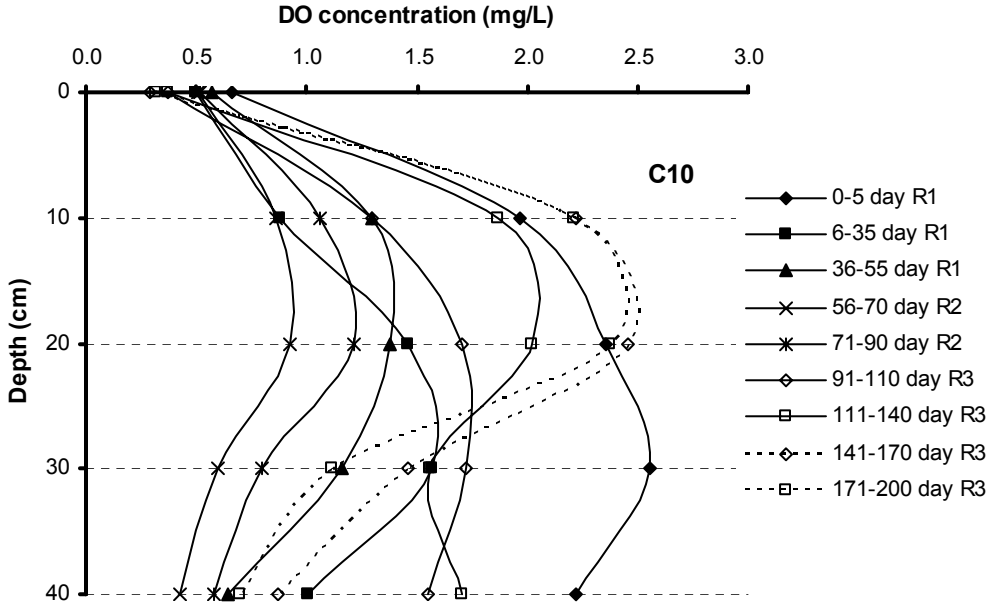
ภาพที่ 22 ปริมาณออกซิเจนละลายตามความลึกในคอลัมน์ ซี 30

ต่อจากนั้นจึงทำการเปลี่ยนรูปแบบการป้อนน้ำเสียที่มีการเว้นระยะเวลาการป้อนน้ำเสียโดยมีรูปแบบ ป้อนน้ำเสียทุกสองวัน และทุกสามวันตามลำดับต่อเนื่องกันในแต่ละคอลัมน์ ทำให้ ปริมาณออกซิเจนของทั้งสองคอลัมน์มีปริมาณเพิ่มขึ้นในชั้นของหินปูนและทราย ดังภาพที่ 23 และ 24 เนื่องจากเมื่อเว้นการป้อนน้ำเสียจะทำให้เกิดช่องว่างในชั้นวัสดุและการแพร่เข้าสู่ชั้นวัสดุของออกซิเจนเกิดง่ายขึ้นด้วย

จากผลการทดลองของออกซิเจนละลายในน้ำชะมูลฝอยเมื่อผ่านออกจากวัสดุต่างๆ ของแต่ละคอลัมน์ เมื่อเดินระบบไปเป็นระยะเวลาหนึ่งปริมาณออกซิเจนละลายจะลดลงตามระยะเวลา ทำให้อัตราการกำจัดสารอินทรีย์ต่อวันในรูปบีโอดีและแอมโมเนียไนโตรเจนลดลงตามระยะเวลาด้วยเนื่องจากการกำจัดสารทั้งสองดังกล่าวอาศัยจุลินทรีย์ที่ต้องการออกซิเจนในการย่อยสลาย แต่เมื่อเปลี่ยนรูปแบบการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบโดยมีรูปแบบ คือ ป้อนทุกสองวัน และทุกสามวัน พบว่าปริมาณน้ำชะมูลฝอยที่ค้างอยู่ในระบบลดลงทำให้เกิดช่องว่างในชั้นวัสดุของ หินปูนและทราย ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนละลายมากขึ้น ทำให้จุลินทรีย์ที่ต้องการออกซิเจน ทั้งกลุ่ม เฮทเทอโรโทรฟิค และ ออโตโทรฟิค สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์และแอมโมเนียไนโตรเจนได้ดีขึ้นด้วยตามลำดับ



ภาพที่ 23 ปริมาณออกซิเจนละลายตามความลึกของคอลัมน์ ซี 20



ภาพที่ 24 ปริมาณออกซิเจนละลายตามความลึกของคอลัมน์ ซี 10

3. การศึกษาอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอนและสารประกอบไนโตรเจน

3.1 การย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอน

สำหรับการทดลองการย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอนในน้ำชะมูลฝอย โดยอาศัยจุลินทรีย์ในกลุ่มเฮทเทอโรโทรฟิค ที่มีอยู่ในแต่ละชั้นวัสดุของคอลัมน์ ซี30 และ ซี10 จากการทดลองแบบต่อเนื่องของระบบดินและหินเรียงเป็นชั้น ทำการทดลองในขวดที่มีการผสมระหว่างวัสดุและน้ำชะมูลฝอยมีการเติมอากาศอย่างเพียง ทำการศึกษาปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนที่ทำให้อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอนเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราการย่อยสลายสูงสุด (K_s) นั่นหมายความ จุลินทรีย์ในวัสดุใดที่ให้ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนสำหรับการย่อยสลายน้อยที่สุดหรือให้ค่า Ks น้อยที่สุดจะมีอัตราการย่อยสลายดีที่สุดนั่นเอง จากการทดลอง พบว่า การย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอนโดยจุลินทรีย์เฮทเทอโรโทรฟิค ในแต่ละชั้นวัสดุนั้นของแต่ละคอลัมน์ ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก คือ จะอยู่ในช่วง 135-167 มก./ล. และ 127-184 มก./ล. ในคอลัมน์ ซี30 และ ซี10 ตามลำดับ ดังภาพที่ 25 คาดว่าเนื่องจากในการทดลองครั้งนี้เป็นการทดลองที่มีการให้สารอินทรีย์คาร์บอนในน้ำชะมูลฝอยและมีการเติมอากาศที่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตและกิจกรรมของจุลินทรีย์ และโดยปกติแล้วจุลินทรีย์ในกลุ่มดังกล่าวจะมีความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์และการเจริญเติบโตที่รวดเร็วเมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสม

ซึ่งการทดลองนี้เมื่อพิจารณาประกอบกับการกำจัดสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์จำลองระบบดินและหินเรียงเป็นชั้น มีความแตกต่างกัน คือ ในคอลัมน์จำลองระบบการกำจัดที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่พบในชั้นหินปูนและทราย แต่จากการทดลองอัตราการย่อยสลายของแต่ละชั้นวัสดุมีความสามารถไม่แตกต่างกัน นั่นคาดว่าเนื่องจากในระบบคอลัมน์นั้นไม่มีการเติมอากาศทำให้อากาศจะเป็นข้อจำกัดในระบบคอลัมน์ดินและหินเรียงเป็นชั้นสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอน

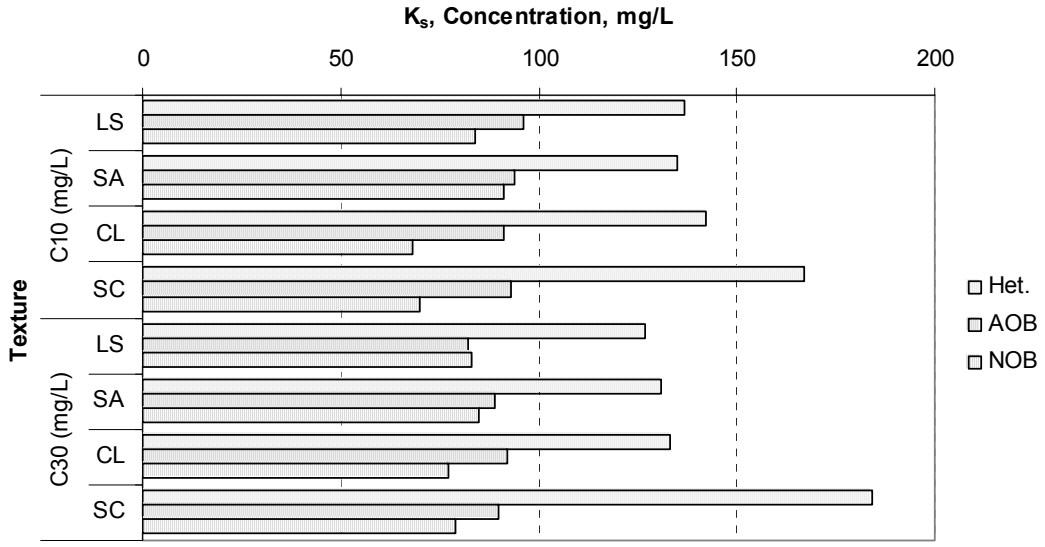
3.2 การย่อยสลายสารประกอบไนโตรเจน

สำหรับการย่อยสลายสารประกอบไนโตรเจนด้วยจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในแต่ละชั้นวัสดุในคอลัมน์ ซี30 และ ซี10 หลังสิ้นสุดการทดลองแบบต่อเนื่องจากคอลัมน์จำลองระบบดินและหินเรียงเป็นชั้น โดยทำการศึกษาสารประกอบไนโตรเจนที่อยู่ในสองรูป คือ แอมโมเนีย และไนไตรท์ โดย

จุลินทรีย์ ไนโตรโซโมเนส และ ไนโตรเบคเตอร์ ตามลำดับ และสารประกอบไนโตรเจนทั้งสองชนิดนั้นทำการสังเคราะห์ขึ้น

จากผลการทดลอง ดังภาพที่ 25 พบว่า ปริมาณสารแอมโมเนียไนโตรเจนที่ทำให้อัตราการย่อยสลายเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราการย่อยสลายสูงสุดนั้นโดยจุลินทรีย์ไนโตรโซโมเนส ทุกชั้นวัสดุของแต่ละคอลัมน์ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก คือ อยู่ในช่วง 91-96 มก./ล. และ 82-92 มก./ล. สำหรับคอลัมน์ ซี10 และ ซี30 ตามลำดับ นั่นหมายความว่า จุลินทรีย์ไนโตรโซโมเนส มีความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน ไม่ต่างกัน ซึ่งการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนที่เกิดขึ้นในคอลัมน์จำลองระบบแบบต่อเนื่อง พบว่า การกำจัดส่วนใหญ่เกิดขึ้นในชั้นของหินปูนและทราย ซึ่งอยู่ด้านบนของระบบและมีปริมาณออกซิเจนมากกว่าชั้นอื่น แสดงให้เห็นว่า ปริมาณออกซิเจนมีความสำคัญมากในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน ด้วยจุลินทรีย์ไนโตรโซโมเนส ในวัสดุธรรมชาติ

สำหรับปริมาณสารไนไตรท์ไนโตรเจนที่ทำให้อัตราการย่อยสลายเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราการย่อยสลายสูงสุด ในแต่ละชั้นวัสดุของแต่ละคอลัมน์ไม่แตกต่างกันมากนัก คือ อยู่ในช่วง 68-91 มก./ล. และ 77-83 มก./ล. สำหรับคอลัมน์ ซี10 และ ซี30 ตามลำดับ แสดงว่าความสามารถของจุลินทรีย์ชนิดนี้เมื่อมีการให้สารอาหารและออกซิเจนที่เพียงพอมีความสามารถในการกำจัดไนไตรท์ไนโตรเจนไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อพิจารณาในการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์จำลองระบบดินและหินเรียงเป็นชั้น พบปริมาณไนไตรท์ไนโตรเจนในน้ำชะมูลฝอยที่เข้าสู่ระบบมีน้อยมาก แสดงว่าไนไตรท์ไนโตรเจนที่จะมีอยู่จะเกิดจากการเปลี่ยนรูปของแอมโมเนียไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบซึ่งเกิดในชั้นหินปูนและทราย แต่ไม่พบไนไตรท์ไนโตรเจนในแต่ละชั้นวัสดุ แสดงว่า สภาวะที่มีอยู่ในระบบทั้งสารอาหารและออกซิเจนนั้นเหมาะสมต่อการเจริญและกิจกรรมของจุลินทรีย์ไนโตรเบคเตอร์ และการเปลี่ยนรูปของแอมโมเนียไนโตรเจนเป็นไนไตรท์ไนโตรเจนจะมีผลต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ชนิดนี้ด้วย



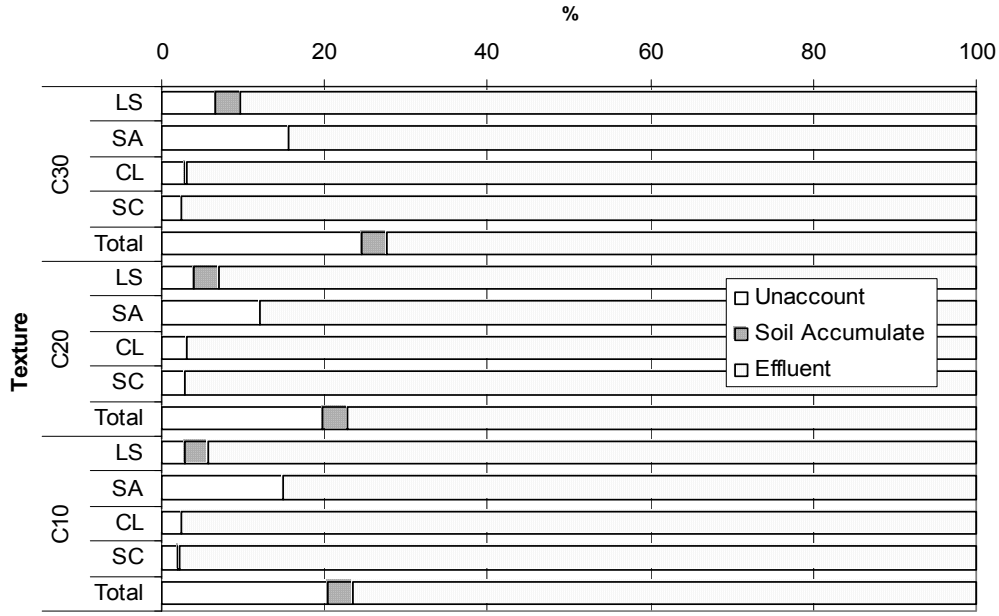
ภาพที่ 25 ค่าคงที่ปริมาณสารอาหารที่ทำให้อัตราการย่อยสลายเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราการย่อยสลาย สูงสุด (K_s)

4. สมดุลมวลสารอินทรีย์และไนโตรเจนในระบบดินและหินเรียงเป็นชั้นก่อนสิ้นสุดการทดลอง

เป็นการศึกษาสมดุลมวลของสารอินทรีย์และไนโตรเจนในระบบก่อนสิ้นสุดการทดลองแบบต่อเนื่องในระบบ ดินและหินเรียงเป็นชั้น ในระยะเวลา 14 วัน โดยเก็บตัวอย่างน้ำชะมูลฝอยวันเว้นวัน และเก็บตัวอย่างดินและหินในวันแรกและวันสุดท้ายของการศึกษา โดยอาศัยสมการดังนี้

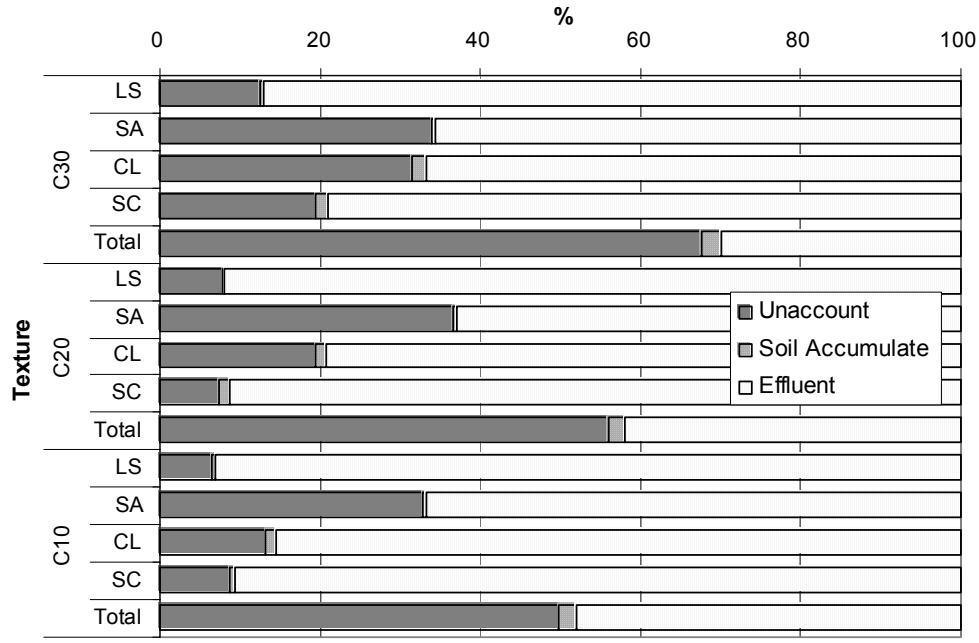
มลสารในน้ำชะมูลฝอยที่เข้าสู่ระบบ (ก.) = มลสารที่ถูกกำจัด (ก.) +
มลสารที่ออกจากระบบ (ก.)

โดยมลสารที่ถูกกำจัดจะศึกษาในส่วนที่อยู่ในรูป ชีวมวล (biomass) ที่มีอยู่บนชั้นวัสดุต่างๆ หรือการสะสมในดิน (soil accumulate) ส่วนมลสารที่ถูกกำจัดที่เหลืออาจจะอยู่ในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ หรือ มีเทน ซึ่งได้ผลการทดลอง ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 26 สมดุลมวลสารอินทรีย์คาร์บอนในแต่ละวัสดุของทุกคอลัมน์

จากภาพที่ 26 แสดงสมดุลมวลสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้น พบว่า เมื่อสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำชะมูลฝอยเข้าสู่ระบบ ระบบจะทำการกำจัดสารอินทรีย์ในแต่ละชั้นวัสดุ ของทุกคอลัมน์ คือ ร้อยละ 24.50 19.80 และ 20.30 ในคอลัมน์ ซี30 20 10 ตามลำดับ เห็นได้ว่าการกำจัดเกิดขึ้นในปริมาณที่ไม่มากนักเนื่องจากเป็นการศึกษาก่อนสิ้นสุดการทดลอง เมื่อพิจารณาในแต่ละชั้นวัสดุ พบว่า การกำจัดเกิดขึ้นในทุกชั้นของวัสดุและเกิดการกำจัดมากที่สุดของชั้นทราย คือร้อยละ 15.60 12.00 และ 14.80 ในคอลัมน์ ซี30 20 10 ตามลำดับ ยังพบอีกว่าการกำจัดที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นวัสดุนั้นมีการสะสมในชั้นวัสดุในรูปของชีวมวลมากที่สุดในชั้นหินปูนของทุกคอลัมน์ ดังนี้ คือร้อยละ 3.10 3.10 และ 2.90 ในคอลัมน์ซี30 20 10 ตามลำดับ เนื่องจากในชั้นของหินปูนเป็นชั้นบนสุดของระบบ ปริมาณสารอินทรีย์ในรูปชีวมวลที่เพิ่มขึ้นคาดว่าเป็นสารอินทรีย์ในรูปตะกอนที่มาจากน้ำชะมูลฝอยเกิดการติดค้างในชั้นดังกล่าวซึ่งเมื่อเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดในแต่ละคอลัมน์เห็นได้ว่าการสะสมในชั้นวัสดุเกิดขึ้นน้อยมาก ส่วนที่เหลือในการถูกกำจัดนั้นจะอยู่ในรูป ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือมีเทน

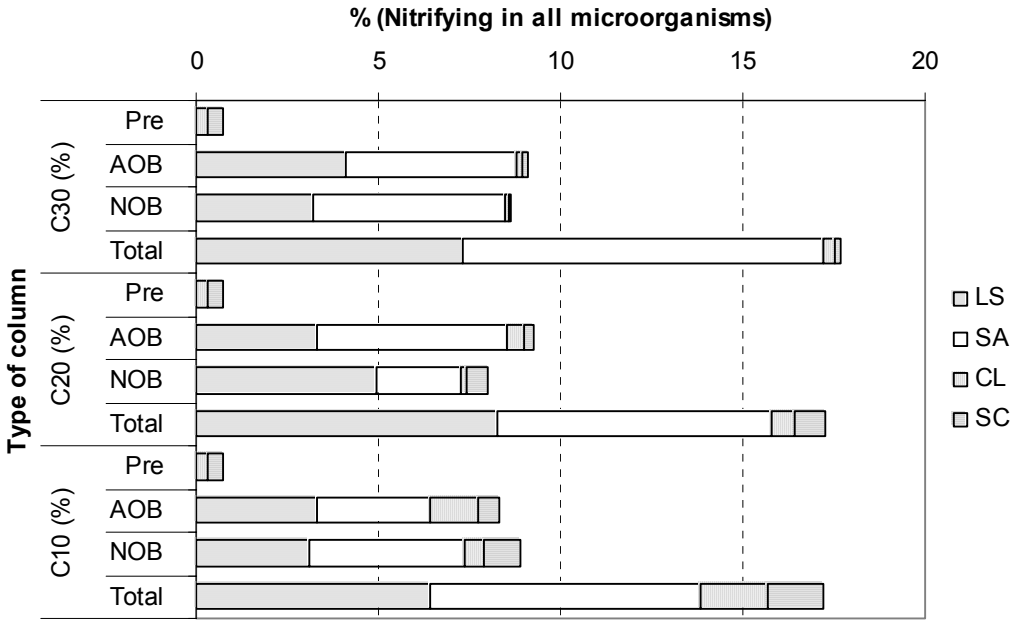


ภาพที่ 27 สมดุลมวลไนโตรเจนในแต่ละวัสดุของทุกคอลัมน์

จากการศึกษาสมดุลมวลไนโตรเจนทั้งหมดที่เกิดขึ้น เมื่อป้อนน้ำชะมูลฝอยที่มีสารประกอบไนโตรเจนเข้าสู่ระบบ พบว่าระบบสามารถกำจัดสารประกอบไนโตรเจนได้ ดังนี้ คือ ร้อยละ 68 56 และ 50 ในคอลัมน์ ซี30 20 และ10 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 27 เห็นได้ว่าการกำจัดที่เกิดขึ้นยังอยู่ในปริมาณที่สูงกว่าการกำจัดสารอินทรีย์เนื่องจากรูปแบบการป้อนน้ำเสียที่ได้กล่าวไปในการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์จำลองระบบ และพบว่าการกำจัดสารประกอบไนโตรเจนเกิดขึ้นในทุกชั้นวัสดุและมากที่สุดในชั้นทราย ดังนี้ คือ ร้อยละ 34 37 และ 33 ในคอลัมน์ ซี30 20 และ 10 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาการกำจัดที่เกิดขึ้น พบว่า ในแต่ละชั้นวัสดุมีการสะสมของสารประกอบไนโตรเจนบนชั้นวัสดุในรูปชีวมวลเกิดขึ้นทุกชั้นในแต่ละคอลัมน์ ดังนี้ คือ ร้อยละ 2.4 2.0 และ 2.20 ในคอลัมน์ ซี30 20 และ 10 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับการกำจัดสารประกอบไนโตรเจนที่ถูกกำจัดในแต่ละคอลัมน์นั้นเกิดขึ้นน้อยมาก และการกำจัดที่เกิดขึ้นนั้นคาดว่าอาจอยู่ในรูปของก๊าซ ไนโตรเจน หรือ แอมโมเนีย

5. การทดสอบเชื้อจุลินทรีย์ในกลุ่ม ไนตริไฟอิง

สำหรับการทดสอบเชื้อในกลุ่ม ไนตริไฟอิง นี้ทำการทดสอบในชั้นวัสดุแต่ละชั้นในแต่ละคอลัมน์ก่อนและหลังการทดลองแบบต่อเนื่อง เพื่อยืนยันการเกิดขึ้นของกระบวนการไนตริฟิเคชัน เพราะในกระบวนการนี้ต้องอาศัยจุลินทรีย์ในกลุ่มดังกล่าว การทดสอบจะอาศัยวิธี ฟลูออเรสเซนต์ อินสิทูไฮบริไดเซชั่น โดยทดสอบหาปริมาณเชื้อ ไนโตรโซโมเนส และ ไนโตรเบคเตอร์ ในปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดในชั้นวัสดุ อาศัย โอลิโกนิคริโอไทด์ โพรบ ที่มีการสังเคราะห์ขึ้นมาให้สามารถจับกับ อาร์เอ็นเอของจุลินทรีย์กลุ่มดังกล่าวได้ เมื่อตรวจสอบสอบผ่านกล้องจุลทรรศน์ชนิดฟลูออเรสเซนต์ จะปรากฏเป็นสีเขียว และจุลินทรีย์ทั้งหมดที่ย้อมด้วย DAPI จะปรากฏเป็นสีฟ้า จากการทดสอบผลที่ได้ พบว่า ก่อนการทดลองปริมาณจุลินทรีย์ในกลุ่ม ไนตริไฟอิง ในปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดนั้นมีปริมาณน้อยมาก ดังภาพที่ 28 คือ ประมาณร้อยละ 0.74 ของจุลินทรีย์ทั้งหมด



หมายเหตุ AOB = ammonium oxidizing bacteria : *Nitrosomonas spp.*

NOB = nitrite oxidizing bacteria : *Nitrobacter spp.*

Total = nitrifying bacteria : *Nitrosomonas spp. + Nitrobacter spp.*

Pre = pre-treatment : *Nitrosomonas spp. + Nitrobacter spp.*

ภาพที่ 28 สัดส่วนจุลินทรีย์ไนตริไฟอิงในจุลินทรีย์ทั้งหมดก่อนและหลังทดลองของแต่คอลัมน์

และพบว่าในส่วนที่มีจุลินทรีย์ในกลุ่มดังกล่าวนั้นอยู่ในชั้นของ ดินเหนียวและดินเหนียวปนตะกอน เนื่องจากในธรรมชาติจุลินทรีย์ในกลุ่มนี้จะมีอยู่แล้ว และในชั้นของ หินปูนและทราย นั้นไม่พบ เนื่องจากวัสดุนี้ในธรรมชาติจะมีสภาวะเป็นด่างและมีอาหารน้อยซึ่งไม่เหมาะต่อการเจริญของจุลินทรีย์ แต่หลังจากเดินระบบต่อเนื่องที่มีการป้อนน้ำชะมูลฝอยเข้าสู่ชั้นวัสดุต่างๆ ในแต่ละคอลัมน์กลับพบว่า ปริมาณของจุลินทรีย์ในกลุ่มไนตริไฟอิง เพิ่มมากขึ้น ดังนี้ ในคอลัมน์ ซี 30 คือ ร้อยละ 17.7 คอลัมน์ ซี 20 คือ ร้อยละ 17.25 และ คอลัมน์ ซี 10 ร้อยละ 17.19 ตามลำดับ เห็นได้ว่าในแต่ละคอลัมน์มีปริมาณของจุลินทรีย์ในกลุ่มดังกล่าวไม่แตกต่างกันมากนัก และเมื่อพิจารณาในชั้นวัสดุต่างๆ พบว่าในชั้นของหินปูน และทราย ในทุกคอลัมน์ มีปริมาณจุลินทรีย์มากขึ้น คาดว่าเนื่องจากได้รับแหล่งอาหารจากน้ำชะมูลฝอยและมีปริมาณของออกซิเจนที่เพียงพอ ในส่วนของชั้นดินเหนียว และดินเหนียวปนตะกอน ถึงแม้ว่าจะได้รับสารอาหารในกลุ่มไนโตรเจนก็ตามแต่เนื่องจากปริมาณออกซิเจนละลายในชั้นวัสดุดังกล่าวมีน้อยจึงไม่เหมาะต่อการเจริญของจุลินทรีย์ในกลุ่มนี้จึงทำให้พบในปริมาณน้อย

เมื่อเปรียบเทียบกับการกำจัดไนโตรเจนที่เกิดขึ้นในคอลัมน์จำลองระบบดินและหินเรียงเป็นชั้น พบว่า มีความสอดคล้องกัน คือ การกำจัดสารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียโดยจุลินทรีย์ไนโตรโซโมเนสเกิดมากที่สุดในชั้นของหินปูนและทรายซึ่งในการทดลองนี้พบเช่นกันว่าปริมาณจุลินทรีย์ไนโตรโซโมเนสมีมากในชั้นหินปูนและทรายด้วยเช่นกัน ส่วนการกำจัดสารประกอบไนโตรเจนในรูปของไนไตรท์อาศัยจุลินทรีย์ไนโตรเบคเตอร์นั้นในการทดลองคอลัมน์จำลองระบบแบบต่อเนื่องนั้น พบปริมาณของไนไตรท์น้อยมากแสดงว่า การกำจัดไนไตรท์เกิดขึ้นได้ดี และพบปริมาณของจุลินทรีย์มากในชั้นของหินปูนและทราย ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณออกซิเจนละลายที่อยู่ในชั้นวัสดุดังกล่าว ซึ่งจะส่งเสริมการเจริญของจุลินทรีย์ในกลุ่มนี้ด้วย

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาระบบดินและหินเรียงเป็นชั้นสำหรับการบำบัดน้ำชะมูลฝอยชุมชนและการศึกษาแบบกะประกอบการศึกษา สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การดูดซับของ หินปูน ทราย ดินเหนียว และดินเหนียวปนตะกอน ต่อสารอินทรีย์คาร์บอนและสารประกอบไนโตรเจนในรูปต่างๆ นั้น พบว่า วัสดุเหล่านี้มีความสามารถน้อยมากในการดูดซับ หรืออาจกล่าวได้ว่า การดูดซับไม่ใช่กลไกหลักในระบบดินและหินเรียงเป็นชั้นสำหรับการกำจัดสารดังกล่าว

2. ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูป บีโอดี อินทรีย์ไนโตรเจน และแอมโมเนียไนโตรเจน ของระบบขึ้นอยู่กับปัจจัยสองประการ คือ ความหนาของชั้นวัสดุ และรูปแบบการป้อนน้ำเสีย โดยสรุปได้ว่า ประสิทธิภาพแปรผันโดยตรงกับความหนาของชั้นวัสดุ ส่วนการป้อนน้ำเสียที่มีการเว้นช่วงให้มีสภาพดินแห้งร่วมด้วย เช่น การป้อนน้ำเสียทุกสามวัน ระบบมีประสิทธิภาพดีขึ้นและเพิ่มความเสถียรของระบบมากขึ้นด้วย

3. ระบบดินและหินเรียงเป็นชั้นมีข้อจำกัดในการบำบัดสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก เช่น การกำจัดซีโอดีในน้ำชะมูลฝอย พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดลดลงตามระยะเวลาการเดินระบบและความหนาของชั้นวัสดุ หรือรูปแบบการป้อนน้ำเสียไม่ได้ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเพิ่มขึ้นมากนัก

4. การกำจัดสารอินทรีย์ในรูป บีโอดีและซีโอดี ด้วยระบบดินและหินเรียงเป็นชั้น การกำจัดเกิดขึ้นตลอดแนวความลึกของทุกชั้นวัสดุ โดยมีประสิทธิภาพรวมที่การป้อนน้ำเสียทุกสามวันในคอลัมน์ ซี30 พบว่า มีความสามารถกำจัดบีโอดีและซีโอดี ดังนี้ คือ ร้อยละ 74±3 และ 24±7 ตามลำดับ

5. การกำจัดไนโตรเจนในรูป อินทรีย์ไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจน ด้วยระบบดินและหินเรียงเป็นชั้นเกิดขึ้นตลอดแนวความลึกของทุกชั้นวัสดุ โดยมีประสิทธิภาพรวมที่มีการป้อน

น้ำเสียทุกสามวันในคอลัมน์ ซี30 พบว่า มีความสามารถกำจัดอินทรีย์ไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจน ดังนี้ คือ ร้อยละ 57±4 และ 68±9 ตามลำดับ

6. จากการทดลองแบบกะในการศึกษาอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอนและสารประกอบไนโตรเจน พบว่า ค่าคงที่ของปริมาณสารอาหารที่อัตราการย่อยสลายเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราการย่อยสลายสูงสุด โดยจุลินทรีย์จากชั้นวัสดุต่างๆ พบว่า เมื่อให้อาหารและออกซิเจนเกินพอจะได้ค่าคงที่สารอินทรีย์และสารประกอบไนโตรเจนไม่แตกต่างกันในแต่ละชั้นวัสดุสำหรับสารอาหารแต่ละชนิด

7. การวิเคราะห์สมดุลมวลของสารอินทรีย์คาร์บอนและไนโตรเจนทั้งหมดก่อนสิ้นสุดการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ พบว่า การสะสมชีวมวลในชั้นวัสดุเกิดขึ้นในระบบน้อยมาก โดย การสะสมของสารอินทรีย์และไนโตรเจนทั้งหมด คือ ร้อยละ 3.2 และ 2.4 ; 3.1 และ 2.0 ; 3.1 และ 2.2 ในคอลัมน์ ซี30 20 และ ซี10 ตามลำดับ

8. ในการหาปริมาณจุลินทรีย์ในกลุ่มไนตริไฟอิงต่อจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด พบว่า จุลินทรีย์ดังกล่าว ปรากฏมากในชั้นของหินปูนและทรายเป็นส่วนใหญ่ โดยปริมาณจุลินทรีย์ในตริไฟอิงต่อจุลินทรีย์ทั้งหมดในแต่ละคอลัมน์ไม่แตกต่างกันมากนัก คือ ร้อยละ 17.7 17.2 และ 17.19 ในคอลัมน์ ซี30 20 และ ซี10 ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองศึกษาระบบดินและหินเรียงเป็นชั้นสำหรับการบำบัดน้ำชะมูลฝอย พบว่ามีสิ่งที่น่าสนใจน่าการศึกษาต่อไป คือ

1. ควรทำการศึกษาระบบดินและหินเรียงเป็นชั้นในการบำบัดน้ำเสียชนิดอื่นๆที่มีค่าสัดส่วน บีโอดีต่อซีโอดีต่ำและน้ำเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนสูง

2. จากการทดลอง พบว่า น้ำชะมูลฝอยที่ผ่านเข้าสู่ระบบเมื่อถูกกำจัดแล้วยังมีมลสารปนเปื้อนอยู่ซึ่งไม่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม จึงแนะนำให้ทำการหมุนเวียนน้ำเข้าสู่ระบบอีกครั้ง หรือ จัดทำระบบบำบัดที่ต่อเนื่องกัน

3. จากการทดลองพบว่า การเปลี่ยนรูปของ อินทรีย์ไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจนเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ แนะนำให้เพิ่มความหนาของชั้นที่ทำหน้าที่เป็นแอโรบิคโซน เพื่อเพิ่มปฏิกิริยาไนตริฟิเคชั่น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2542 . **เกณฑ์ มาตรฐาน และแนวทางการจัดการขยะมูลฝอยชุมชน**. โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว, กรุงเทพ ฯ

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2546. **ของเสียอันตราย.** มหาวิทยาลัยรังสิต, กรุงเทพฯ. 650 น.

คณาจารย์ภาคปฐพีวิทยา. 2544. **ปฐพีวิทยาเบื้องต้น** . มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพ ฯ . 547 น.

ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2544. **การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ.** สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ . 663 น.

นงลักษณ์ สุวรรณพินิจ และ ปรีชา สุวรรณพินิจ. 2544 . **จุลชีววิทยาทั่วไป** . สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 556 น.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศน์. 2544. **วิศวกรรมการประปา เล่ม 2** . สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ. 321 น.

มณเฑียร กังศศิเทียม. 2538. **กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม**. สมาคมศิษย์เก่าชลประทานในพระบรมราชูปถัมภ์, นนทบุรี. 371 น.

ศุภกาญจน์ ล้วนมณี.2540. **การบำบัดน้ำเสียจากโรงอาหารโดยระบบจัดเรียงดินหลายชั้น.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา. 2539. **จุลชีววิทยาของดิน**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ . 55 น.

สำนักรักษาความสะอาด . 2538 . **รายงานสัดส่วนมูลฝอยบ้านเรือนในกรุงเทพมหานคร**. กรุงเทพมหานคร. 25 น.

อธิชัย นพแก้ว. 2539. **การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดติดผิวโลหะหนักจากน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านบ่อกักเก็บ.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

Alleman, J.E. and R.L. Irvine. 1980. **Storage Induce Denitrification Using Sequence Batch Reactor Operation.** Qat.Res. 14:1483-1488

Andreottola, G. and P. Cannas. 1992. Chemical and Biological Characteristics of Landfill Leachate , pp.65-88. In T.H. Chrisensen , R.Cossu and R. Stegman , eds. **Landfilling of Waste : Leachate** . Elsevier Science Publ. Ltd., Essex

APHA , AWWA and WEF. 1997**. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater**. 20th edition. Washington , D.C.

Booker, N.A., E.L. Cooney and A.J. Priestley.1996. **Ammonium Removal from Sewage using Natural Australian Zeolite**. Wat.Sci.Tech. 34:17-24

Sorensen, H. and Jorgensen S.E. 1993. **The Removal of Nitrogen Compound from Wastewater** . Elsevier. Amsterdam. 443 p.

Bauman, J.G.J., Wiegant J, Borst P, Van Duijn P.1980. **A New Method for Fluorescence Microscopical Localization of Specific DNA Sequence by In Situ Hybridization of Fluochrome-Labeled RNA.** Exp. Cell res 128:485-490

Christensen, T.H. and P. Kjeldsen.1989. Basic Chemical Process in Landfill., pp 29-49 In T.H.Christensen,R. Cossu and R. Stegman,eds. **Sanitary Landfilling : Process, Technology and Environmental Impact** . Academic Press Ltd.,London.

Christensen , T.H., P.Kjeldsen and R. Stegman. 1992. Effect of Landfill Management Procedures on Landfill Stabilization and Leachate and Gas Quality, pp.119-138. In T.H.Christensen,R. Cossu and R.Stegman. **Landfilling of Waste : Leachate.** Elsevier Science Publ.Ltd., Essex.

Dass, P., G.R. Tamke and C.M. Stoffel. 1977. **Leachate Production at Sanitary Landfill Site**. J. En. Eng. Div. ASCE. 103 : 981-988

Ehrig , H.J. 1983. Leachate Quality , In T.H. Christensen , R.Cossu and R. Stegman, eds. **Sanitary Landfillings : Process, Technology and Environmental Impact**. Academic Press.Ltd., London. , pp.213-229

Farquhar, G.T. 1978. **Leachate Production and Characterization**. Canadian j. of Civil Engineering 16 :317-325.

Faust, S.D. and O.M. Aly. 1987. **Adsorption Process of Water Treatment**. United of America : Butterworth Publishers, Boston. 509 p.

Frederick, W.P. 1990. **Water Quality and Treatment**. 4th ed . United Stated : McGraw-Hill Inc., New York. 1194 p.

Gall, J.G.and Pardue M.L. 1969 : **Formation and Detection of RNA – DNA Hybrid Moleculesin Cytogical Preparations.** Proc Natl Acad USA. 63:379-383

Gardiner, D.T. 2001. **Soil in Our Environment.** Upper Saddle River, N.J. : Prentice Hall . 624 p.

Gray, N.F. 1989. **Biological of Wastewater Treatment.** Oxford University Press New York, U.S.A. 828 p.

Irvine, R.L. 1979. **Sequence Batch Biological Reactors and Overview.** J.WPCF. 51(2):235-243

Issacs, S.H. and M.Henze. 1994. **Controlled Carbon Source Addition to an Alternating Nitrification-Denitrification Wastewater Treatment Process Including Biological P Removal**.Wat.Res.29 :77-89.

John ,H.A., Brinstiel M.L .and Jones K.W.1969. **RNA-DNA Hybrids at the Cytological Level.** Nature 223: 582-587

King, P.H. and R.E.Elassen. 1993. **Integrated Solid Waste Management**. Consulting Ed. McGraw-Hill, Inc., Singapore. 978 p

Lema, J.M., R. Mendez and R. Blazquez. 1988. **Characteristics of landfill leachate and alternative for their treatment**. In Water, Air and Soil Pollution 40(2) :223-250.

Metcalf and Eddy . 2003. **Wastewater Engineering : Treatment and Reuse**. 4th ed. McGraw-Hill Inc.,New York.

Srinoi, N. 2005. **Leachate Treatment Using Multi-Layer Soil Sysytem**. Master thesis., Kasetsart University, Bangkok. 180 p.

Ou , W.C. 1989. **Soil Column Process for Landfill Leachate Treatment**. Master Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok. 148 p.

Pattamapirat, W. 1982. A **Study of Leachate Characteristics from Soi On-Noot Dumping Site and Its Biological Treatment.** J. of Environmental Research. 11 : 6-23.

Sakadevan, K. and H.J. Bavor. 1998**. Phosphate Adsorption Characteristics of Soil , Slags and Zeolite to be used as Substrates in Constructed Wetland System.** Wat. Res. 32(2) : 393-399.

Sheu, J.H. 1988. **Treatment of Municipal Solid Waste Leachate Using Soil Column Process**. Master's Thesis, Asian Institute of Technology.

Tchobanoglous, G., H. Theisen and S.A. Vigil. 1993. **Integrated Solid Waste Management**. International ed., McGraw-Hill Book Co., Singapore.

Weber, W.J., Jr. 1981. Concept and Principles of Carbon Applications in Wastewater Treatment, pp. 5-28. In W.W. Eckenfelder, Jr. (ed). **International Conference on Application of Adsorption to Wastewater Treatment Proceedings**, Feb. 16-19. Nashvilie, TN : Enviro Press, Inc., United State of America.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างวัสดุ อุปกรณ์และคุณสมบัติบางประการของวัสดุ

ภาพผนวกที่ ก1 ตัวอย่างวัสดุ หินปูน ทราย ดินเหนียว และดินเหนียวปนตะกอน

ภาพผนวกที่ ก2 ท่อเก็บตัวอย่างน้ำเสียระหว่างชั้นวัสดุ

ภาพผนวกที่ ก3 คอลัมน์จำลองระบบดินและหินเรียงเป็นชั้น

ตารางผนวก ก1 คุณสมบัติของวัสดุบางประการก่อนและหลังการทดลอง

Column		Textures			Water Content(%)	pH	CEC(meq/100g)	Oranic matter(%)
		Clay (%)	Silt(%)	Sand(%)				
Raw Meterial	LS	4.0	7.1	88.9	0.02	8.8	1.0	1.6
	SA	2.0	1.1	96.9	0.11	8.6	0.9	0.0
	CL	66.0	24.2	9.8	0.21	7.1	16.6	3.8
	SC	50.0	42.2	7.8	1.20	5.6	14.7	6.2
C30	LS	4.9	5.1	90.0	27.42	7.6	0.1	3.1
	SA	1.9	1.1	97.0	31.24	7.3	1.1	4.9
	CL	67.6	22.4	10.0	3.76	7.6	15.4	6.6
	SC	49.6	40.4	10.0	1.43	7.6	14.4	10.1
C20	LS	3.6	6.3	90.1	17.62	7.6	0.3	2.5
	SA	1.6	1.3	97.1	24.53	7.2	1.1	3.8
	CL	12.0	22.8	12.0	30.30	7.6	15.4	6.2
	SC	10.0	42.8	10.0	26.45	7.4	15.1	7.0
C10	LS	90.1	6.3	90.1	0.76	7.5	0.2	2.1
	SA	97.1	1.3	97.1	8.46	7.1	1.5	3.1
	CL	12.0	22.8	12.0	28.82	8.0	15.8	4.7
	SC	10.0	42.8	10.0	10.72	7.6	14.9	7.5

ตารางผนวก ก2 คุณสมบัติน้ำชะมูลฝอยก่อนเข้าสู่ระบบ

พารามิเตอร์	หน่วย	ช่วงค่า	ค่าเฉลี่ย
พีเอช	—	6.05-8.23	7.00±0.4
ออกซิเจนละลาย	มก./ล.	0.2-0.8	0.4±0.2
บีโอดี	มก./ล.	1,500-2,016	1,704±140
ซีโอดี	มก./ล.	5,011-7,238	5,875±549
ทีเคเอ็น	มก./ล.	287-484	388±55
แอมโมเนียไนโตรเจน	มก./ล.	41-116	83±20
อินทรีย์ไนโตรเจน	มก./ล.	244-392	315±44
ไนไตรท์ไนโตรเจน	มก./ล.	0-6	1±3
ไนเตรทไนโตรเจน	มก./ล.	0-5	1±1
ฟอสฟอรัสทั้งหมด	มก./ล.	8–27	16±5
ของแข็งแขวนลอย	มก./ล.	445-711	573±70

ภาคผนวก ก3 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุก่อน-หลังการทดลอง

Column	Texture	Density (kg/m^3)	Permeability (cm/s)	Porosity (%)	Column	Texture	Density (kg/m^3)	Permeability (cm/s)	Porosity (%)
Pre	LS	1.05	61.22	31.6	C20	LS	—	72	32
	SA	1.48	6.23×10^{-2}	31		SA	—	1.52×10^{-3}	25
	CL	1.46	3.22×10^{-4}	33		CL	—	2.88×10^{-4}	25
	SC	1.51	12.2×10^{-5}	32		SC	—	15×10^{-5}	28
C10	LS	—	62	28	C30	LS	—	68	25
	SA	—	1.22×10^{-3}	29		SA	—	1.75×10^{-3}	24
	CL	—	2.11×10^{-4}	30		CL	—	2.34×10^{-4}	26
	SC	—	12×10^{-5}	30		SC	—	14.3×10^{-5}	23

ภาคผนวก ข

ผลการทดลองจากคอลัมน์จำลองระบบแบบต่อเนื่อง

ตารางผนวกที่ ข1 ข้อมูลผลการทดลองของซีโอดี คอลัมน์ซี30

C30		Depth (cm), (mg/L)				
Run	**Day**	**0**	**30**	**60**	**90**	**120**
	5	5568	696	418	418	139
	10	5290	835	557	418	418
	15	5011	826	550	275	275
	20	6550	1282	854	854	712
	25	5981	1088	952	680	350
	30	5440	1478	1408	1267	450
	35	5914	1531	1253	1114	300
	40	6403	1651	1376	1376	1238
	45	6330	835	696	418	1600
	50	6960	1253	1253	974	1800
	55	7238	974	835	835	1840
1	**60**	6860	2227	974	696	2480
	65	5493	3564	3183	2718	2511
	70	5490	3754	3211	2784	2573
	75	5600	4288	3528	3188	2741
	80	5382	3789	3211	3026	2922
	85	5739	4173	3583	3328	3278
	90	5843	4038	3758	3621	3540
	100	6000	4121	3882	3711	3672
	110	5769	4519	4182	3984	3841
	120	5843	4329	4184	4085	3952
	130	6043	5321	4277	4194	4185
	140	5994	5383	4510	4311	4276
	150	5412	5310	4210	4115	3815
	160	5600	5259	4336	4200	3912
	170	6182	5845	4500	4300	4210
3	**180**	5252	4750	4310	4302	4215
	190	5110	4952	4500	4415	4310
	200	6080	6000	4752	4730	4700

ตารางผนวกที่ ข2 ข้อมูลผลการทดลองของซีโอดี คอลัมน์ซี20

C20		Depth (cm), (mg/L)				
Run	**Day**	**0**	**20**	**40**	**60**	**80**
1	**5**	5568	974	557	418	418
	10	5290	1531	974	696	696
	15	5011	1651	1376	1376	1238
	20	6550	1638	1566	1424	2040
	25	5981	1632	1496	1496	1224
	30	5440	1830	1619	1549	1408
	35	5914	1601	1462	1253	2040
	40	6403	2064	1514	1376	2430
	45	6330	1810	1531	1670	2140
	50	6960	2366	2227	2366	1949
	55	7238	2506	2366	2366	3030
	60	6860	3062	974	1114	4000
	65	5493	5129	4385	4274	3788
	70	6490	5283	4562	4279	3875
	75	5600	5329	4468	4227	4189
	80	5382	5028	4568	4211	3998
	85	5739	5261	4748	4418	4571
	90	5843	5483	4938	4638	4868
2	**100**	6000	5542	5210	5020	4980
	110	5769	5419	4911	4722	4565
	120	5843	5530	4750	4600	4540
	130	6043	5840	5000	4730	4585
	140	5994	5520	4780	4650	4533
3	**150**	5412	5315	4653	4500	4315
	160	5600	5410	4418	4258	4200
	170	6182	6010	5115	4900	4612
	180	5252	4817	4993	4813	4700
	190	5110	5013	4990	4815	4712
	200	6080	6100	5348	5110	5100

ตารางผนวกที่ ข3 ข้อมูลผลการทดลองของซีโอดี คอลัมน์ซี10

C10		Depth (cm), (mg/L)				
Run	**Day**	**0**	**10**	**20**	**30**	**40**
1	**5**	5568	2088	1810	1810	1440
	10	5290	1670	1531	1670	1690
	15	5011	1651	1514	1651	2000
	20	6550	2136	1994	1994	2800
	25	5981	2448	2448	2176	2176
	30	5440	2112	1971	2112	2680
	35	5914	2506	2227	2088	3330
	40	6403	2752	2890	2752	2614
	45	6330	2645	2506	2506	3230
	50	6960	3202	3202	3062	4070
	55	7238	3202	3062	3202	4600
	60	6860	4454	4176	4037	5400
2	**65**	5493	4385	4385	4355	4327
	70	5490	4563	4274	4122	3978
	75	5600	4769	4274	3997	3867
	80	5382	4998	4683	4438	4264
	85	5739	5128	4674	4500	4439
	90	5843	5385	4986	4733	4578
	100	6000	5500	4890	4700	4511
	110	5769	5300	4765	4420	4338
	120	5843	5600	5030	4575	4290
	130	6043	5700	5000	4582	4100
	140	5994	5745	5020	4400	4010
3	**150**	5412	5300	4430	4315	4100
	160	5600	5510	4410	4315	4212
	170	6182	6015	4952	4800	4610
	180	5252	4900	4700	4513	4415
	190	5110	5040	4511	4400	4381
	200	6080	5900	5000	4952	4950

ตารางผนวกที่ ข4 ข้อมูลผลการทดลองของบีโอดี คอลัมน์ซี30

C30		Depth (cm), (mg/L)				
Run	**Day**	**0**	**30**	**60**	**90**	**120**
1	**6**	1775	726	573	322	67
	12	2016	643	482	174	65
	18	1553	522	163	47	31
	24	1730	411	135	122	15
	30	1596	442	168	154	38
	36	1943	475	178	163	98
	42	1845	503	278	174	195
	48	1569	438	319	236	197
	54	1637	522	267	276	263
	60	1783	655	323	297	265
	66	1732	798	433	345	300
	72	1832	875	549	411	325
	79	1594	889	435	387	311
	85	1570	735	511	484	305
	91	1600	1200	750	500	411
	100	1550	1190	850	660	421
	110	1650	1120	900	600	470
	120	1730	994	760	651	510
	130	1550	1250	985	730	540
	140	1500	1285	950	720	580
3	**150**	1800	1640	842	654	500
	160	1950	1780	900	682	485
	170	1600	1450	725	654	460
	180	1750	1580	832	721	400
	190	1800	1680	840	770	425
	200	1650	1480	792	668	460

ตารางผนวกที่ ข5 ข้อมูลผลการทดลองของบีโอดี คอลัมน์ซี20

C20		Depth (cm), (mg/L)				
Run	**Day**	**0**	**20**	**40**	**60**	**80**
	6	1775	827	716	522	274
	12	2016	681	583	382	184
	18	1553	729	605	382	188
	24	1730	773	643	475	289
	30	1596	810	684	498	250
	36	1943	843	753	511	358
	42	1845	936	864	683	449
1	**48**	1569	851	821	743	740
	54	1637	876	793	774	620
	60	1783	1198	967	922	895
	66	1732	1222	1163	956	882
	72	1832	1367	1203	895	881
	79	1594	1167	1038	945	890
	85	1570	879	812	800	890
	91	1600	1430	1205	1045	900
	100	1550	1325	1120	1035	960
	110	1650	1250	1020	1000	955
2	**120**	1730	1375	1120	1065	970
	130	1550	1215	1005	975	850
	140	1500	1353	1150	1035	820
	150	1800	1600	911	825	720
	160	1950	1810	925	880	750
	170	1600	1500	933	890	740
3	**180**	1750	1600	964	872	780
	190	1800	1532	890	813	700
	200	1650	1253	992	902	750

ตารางผนวกที่ ข6 ข้อมูลผลการทดลองของบีโอดี คอลัมน์ซี10

C10		Depth (cm), (mg/L)				
Run	**Day**	**0**	**20**	**40**	**60**	**80**
1	**6**	1775	945	562	449	172
	12	2016	894	663	369	147
	18	1553	852	683	428	134
	24	1730	932	848	559	431
	30	1596	941	873	582	557
	36	1943	974	884	606	578
	42	1845	1032	937	628	580
	48	1569	1129	942	712	700
	54	1637	1164	983	767	730
	60	1783	1023	931	658	600
2	**66**	1732	1102	876	710	635
	72	1832	1045	811	678	618
	79	1594	1104	843	615	597
	85	1570	764	632	551	556
	91	1600	1352	1050	950	600
	100	1550	1125	885	675	590
	110	1650	1265	986	725	610
	120	1730	1325	875	743	590
	130	1550	1256	910	752	610
	140	1500	1320	895	755	600
3	**150**	1800	1500	815	748	652
	160	1950	1685	890	811	688
	170	1600	1495	895	749	670
	180	1750	1632	911	825	710
	190	1800	1712	925	892	793
	200	1650	1531	918	870	770

ตารางผนวกที่ ข7 ข้อมูลผลการทดลองของเจลดาร์ลไนโตรเจน คอลัมน์ซี30

C30		Depth (cm), (mg/L)				
Run	**Day**	**0**	**30**	**60**	**90**	**120**
1	**5**	343	238	210	210	162
	10	322	252	189	168	112
	15	371	287	161	91	49
	20	280	203	112	105	63
	25	364	287	154	154	77
	30	322	273	91	77	63
	35	350	252	119	105	49
	40	350	273	133	112	63
	45	345	245	128	84	49
	50	381	252	133	70	42
	55	315	266	182	98	70
	60	376	259	188	153	136
	70	398	275	195	153	146
	80	387	263	204	184	169
	90	364	281	213	199	182
	100	400	322	251	226	211
	110	411	311	250	242	223
	120	421	342	286	255	249
	130	431	351	299	279	268
	140	430	410	324	315	295
3	**150**	459	430	288	255	238
	160	455	442	258	238	206
	170	484	471	241	217	171
	180	434	413	175	146	125
	190	476	453	200	176	155
	200	464	433	184	173	134

ตารางผนวกที่ ข8 ข้อมูลผลการทดลองของ เจลดาร์ลไนโตรเจน คอลัมน์ซี20

C20		Depth (cm), (mg/L)				
Run	**Day**	**0**	**20**	**40**	**60**	**80**
	5	322	252	217	217	182
	10	343	252	210	175	147
	15	343	217	126	126	84
	20	287	238	77	70	42
	25	364	301	196	175	65
	30	315	301	147	140	110
	35	357	231	175	168	126
1	**40**	371	322	161	148	126
	45	322	203	133	105	104
	50	315	231	147	133	128
	55	366	280	196	168	158
	60	379	288	203	183	181
	70	398	298	232	215	209
	80	387	288	241	234	218
	90	364	290	245	238	222
	100	400	311	276	261	229
	110	411	310	264	235	221
2	**120**	421	321	260	236	220
	130	431	385	302	266	240
	140	430	378	311	271	238
	150	459	413	242	224	193
	160	455	406	260	214	193
	170	484	441	239	220	180
3	**180**	434	411	255	238	218
	190	476	431	265	230	200
	200	464	426	257	230	210

ตารางผนวกที่ ข9 ข้อมูลผลการทดลองของ เจลดาร์ลไนโตรเจน คอลัมน์ซี10

C10		Depth (cm), (mg/L)				
Run	**Day**	**0**	**10**	**20**	**30**	**40**
1	**5**	303	261	252	249	228
	10	329	256	235	168	125
	15	406	341	267	203	136
	20	284	209	144	138	109
	25	370	286	219	207	116
	30	353	295	174	155	132
	35	359	197	172	138	124
	40	341	306	255	226	169
	45	348	197	168	136	153
	50	441	358	283	216	211
	55	365	315	267	259	255
	60	387	311	298	279	254
2	**70**	398	295	242	238	223
	80	387	277	225	219	199
	90	364	245	239	232	220
	100	400	287	254	219	205
	110	411	286	252	214	189
	120	421	293	231	221	189
	130	431	388	304	254	205
	140	430	389	312	259	214
3	**150**	459	429	250	226	212
	160	455	429	263	239	228
	170	484	442	264	252	229
	180	434	410	256	242	216
	190	476	446	281	248	218
	200	464	453	277	249	227

ตารางผนวกที่ ข10 ข้อมูลผลการทดลองของอินทรีย์ในโตรเจน คอลัมน์ซี30

C30		Depth (cm), (mg/L)				
Run	**Day**	**0**	**30**	**60**	**90**	**120**
1	**5**	99	25	14	8	8
	10	56	36	32	25	11
	15	85	52	41	18	7
	20	42	38	25	21	15
	25	109	94	73	17	15
	30	67	66	32	13	12
	35	73	42	38	24	14
	40	53	29	24	17	13
	45	65	29	11	11	7
	50	107	20	13	8	3
	55	94	22	20	11	8
	60	100	53	43	33	31
	70	91	64	44	34	28
	80	98	74	56	46	44
	90	53	47	44	39	36
	100	60	56	50	49	43
	110	88	71	62	59	45
	120	114	111	93	71	66
	130	75	70	61	58	55
	140	81	71	66	65	63
3	**150**	100	90	59	51	48
	160	84	80	52	43	37
	170	92	90	53	45	39
	180	84	81	55	47	41
	190	93	89	49	42	35
	200	73	69	53	48	32

ตารางผนวกที่ ข11 ข้อมูลผลการทดลองของแอมโมเนียไนโตรเจน คอลัมน์ซี20

C20		Depth (cm), (mg/L)				
Run	**Day**	**0**	**20**	**40**	**60**	**80**
	5	67	45	35	13	8
	10	46	31	14	13	4
	15	102	66	42	20	13
	20	41	31	27	11	8
	25	95	66	62	24	20
	30	63	29	27	22	18
	35	108	77	74	34	31
1	**40**	74	70	41	34	31
	45	67	43	18	13	10
	50	116	85	74	38	4
	55	83	28	11	11	7
	60	110	80	49	37	35
	70	91	32	31	27	21
	80	98	54	46	34	28
	90	53	34	34	30	27
	100	60	41	29	28	22
	110	88	56	43	37	35
2	**120**	114	87	45	36	33
	130	75	69	47	41	34
	140	81	73	54	47	36
	150	100	82	41	36	21
	160	84	64	49	41	33
	170	92	81	46	36	27
3	**180**	84	75	45	39	30
	190	93	80	47	38	29
	200	73	62	51	42	32

ตารางผนวกที่ ข12 ข้อมูลผลการทดลองของอินทรีย์ในโตรเจน คอลัมน์ซี10

C10		Depth (cm), (mg/L)				
Run	**Day**	**0**	**10**	**20**	**30**	**40**
1	**5**	70	54	37	31	24
	10	55	38	33	25	16
	15	100	75	58	43	27
	20	49	38	35	26	14
	25	107	96	87	45	32
	30	70	65	48	42	38
	35	87	71	63	58	32
	40	64	51	43	38	21
	45	71	49	34	21	15
	50	127	95	88	56	42
	55	99	74	63	38	17
	60	102	100	90	80	77
2	**70**	86	75	69	56	23
	80	98	75	69	56	44
	90	83	71	65	60	53
	100	60	46	35	26	24
	110	88	31	31	26	19
	120	114	72	63	62	42
	130	75	68	51	45	39
	140	81	72	58	51	51
3	**150**	100	93	51	45	42
	160	84	79	63	54	50
	170	92	81	51	59	53
	180	84	76	62	59	53
	190	93	84	63	56	46
	200	73	69	54	49	43

ตารางผนวกที่ ข13 ข้อมูลผลการทดลองของแอมโมเนียไนโตรเจน คอลัมน์ซี30

C30		Depth (cm), (mg/L)				
Run	**Day**	**0**	**30**	**60**	**90**	**120**
1	**5**	244	213	196	230	174
	10	266	216	157	143	143
	15	286	235	120	73	42
	20	258	165	28	84	48
	25	265	193	50	137	52
	30	294	207	36	64	39
	35	277	210	53	81	80
	40	297	244	109	95	50
	45	308	216	17	73	91
	50	274	232	120	62	104
	55	294	244	162	87	107
	60	276	236	166	92	105
	70	307	241	172	131	108
	80	289	239	164	144	123
	90	311	250	173	155	143
	100	340	266	201	177	168
	110	323	250	178	168	178
	120	307	210	167	165	183
	130	377	281	238	221	213
	140	349	339	258	250	232
3	**150**	359	340	229	204	190
	160	371	362	206	195	169
	170	392	381	188	172	132
	180	350	332	120	99	84
	190	383	350	151	134	120
	200	391	364	131	125	92

ตารางผนวกที่ ข14 ข้อมูลผลการทดลองของแอมโมเนียไนโตรเจน คอลัมน์ซี20

C20		Depth (cm), (mg/L)				
Run	**Day**	**0**	**20**	**40**	**60**	**80**
	5	244	207	182	204	174
	10	266	238	196	162	143
	15	286	151	84	106	92
	20	258	207	50	90	50
	25	265	235	134	151	106
	30	294	272	120	157	87
	35	277	154	101	134	95
1	**40**	297	316	120	134	66
	45	308	160	14	92	133
	50	274	146	73	95	113
	55	294	207	185	157	182
	60	276	208	194	173	197
	70	307	257	201	198	188
	80	289	244	215	210	193
	90	311	266	235	211	205
	100	340	270	247	233	207
	110	323	254	221	198	186
2	**120**	307	234	215	200	187
	130	356	316	255	225	206
	140	349	305	257	224	202
	150	359	331	201	188	172
	160	371	342	211	173	160
	170	392	360	193	184	153
3	**180**	350	336	210	199	188
	190	383	351	218	192	171
	200	391	364	206	188	178

ตารางผนวกที่ ข15 ข้อมูลผลการทดลองของแอมโมเนียไนโตรเจน คอลัมน์ซี10

C10		Depth (cm), (mg/L)				
Run	**Day**	**0**	**10**	**20**	**30**	**40**
1	**5**	244	213	196	230	174
	10	266	216	157	143	101
	15	286	235	120	73	42
	20	258	165	28	84	48
	25	265	193	50	137	62
	30	294	207	36	64	39
	35	277	210	53	81	93
	40	297	244	109	95	113
	45	308	216	117	73	143
	50	274	232	120	62	107
	55	294	244	162	87	141
	60	276	243	174	93	153
2	**70**	307	258	211	163	166
	80	289	232	156	133	155
	90	311	234	149	137	192
	100	340	241	219	193	181
	110	323	255	221	188	170
	120	307	221	168	159	147
	130	356	320	253	209	166
	140	349	317	254	163	163
3	**150**	359	336	199	181	170
	160	371	350	200	185	178
	170	392	361	213	199	181
	180	350	334	194	183	163
	190	383	362	218	192	172
	200	391	384	223	200	184

ตารางผนวกที่ ข16 ข้อมูลผลการทดลองของไนไตรท์ไนโตรเจน คอลัมน์ซี30

C30		Depth (cm), (mg/L)				
Run	**Day**	**0**	**30**	**60**	**90**	**120**
	5	6	7	7	6	6
	10	6	7	7	6	6
	15	6	7	7	6	6
	20	6	7	7	6	6
	25	6	7	7	6	6
	30	0	0	0	0	0
	35	0	0	0	0	0
	40	0	0	0	0	0
1	**45**	0	0	0	0	0
	50	0	0	0	0	0
	55	0	0	0	0	0
	60	0	0	0	0	0
	70	0	0	0	0	0
	80	0	0	0	0	0
	90	0	0	0	0	0
	120	0	0	0	0	0
	140	0	0	0	0	0
	150	0	0	0	0	0
	160	0	0	0	0	0
	170	0	0	0	0	0
3	**180**	0	0	0	0	0
	190	0	0	0	0	0
	200	0	0	0	0	0

ตารางผนวกที่ ข17 ข้อมูลผลการทดลองของไนไตรท์ไนโตรเจน คอลัมน์ซี20

C20		Depth (cm), (mg/L)				
Run	**Day**	**0**	**20**	**40**	**60**	**80**
	5	6	7	7	6	6
	10	6	7	7	6	6
	15	6	7	7	6	6
	20	6	7	7	6	6
	25	6	7	7	6	6
	30	0	0	0	0	0
	35	0	0	0	0	0
1	**40**	0	0	0	0	0
	45	0	0	0	0	0
	50	0	0	0	0	0
	55	0	0	0	0	0
	60	0	0	0	0	0
	70	0	0	0	0	0
	80	0	0	0	0	0
	90	0	0	0	0	0
2	**120**	0	0	0	0	0
	140	0	0	0	0	0
	150	0	0	0	0	0
	160	0	0	0	0	0
	170	0	0	0	0	0
3	**180**	0	0	0	0	0
	190	0	0	0	0	0
	200	0	0	0	0	0

ตารางผนวกที่ ข18 ข้อมูลผลการทดลองของไนไตรท์ไนโตรเจน คอลัมน์ซี10

C10		Depth (cm), (mg/L)				
Run	**Day**	**0**	**10**	**20**	**30**	**40**
1	**5**	6	7	7	6	6
	10	6	7	7	6	6
	15	6	7	7	6	6
	20	6	7	7	6	6
	25	6	7	7	6	6
	30	0	0	0	0	0
	35	0	0	0	0	0
	40	0	0	0	0	0
	45	0	0	0	0	0
	50	0	0	0	0	0
	55	0	0	0	0	0
	60	0	0	0	0	0
2	**70**	0	0	0	0	0
	80	0	0	0	0	0
	90	0	0	0	0	0
	120	0	0	0	0	0
	140	0	0	0	0	0
3	**150**	0	0	0	0	0
	160	0	0	0	0	0
	170	0	0	0	0	0
	180	0	0	0	0	0
	190	0	0	0	0	0
	200	0	0	0	0	0

ตารางผนวกที่ ข19 ข้อมูลผลการทดลองของไนเตรทไนโตรเจน คอลัมน์ซี30

C30		Depth (cm), (mg/L)				
Run	**Day**	**0**	**30**	**60**	**90**	**120**
1	**5**	1	9	12	28	17
	10	0	15	45	44	9
	15	5	19	55	43	0
	20	2	15	65	19	8
	25	0	14	79	10	0
	30	1	13	58	1	0
	35	0	7	90	39	0
	40	2	7	87	12	0
	45	0	8	89	5	0
	50	3	14	98	8	0
	55	0	16	56	4	0
	60	2	4	42	0	0
	70	2	3	52	0	0
	80	0	3	42	0	0
	90	0	4	42	0	0
	100	0	2	21	0	0
	110	0	1	12	0	0
	120	0	4	0	0	0
	130	0	6	1	0	0
	140	0	6	1	0	0
3	**150**	0	3	75	18	2
	160	0	3	91	0	0
	170	0	4	89	0	0
	180	0	4	94	0	0
	190	0	4	89	0	0
	200	0	5	99	0	0

ตารางผนวกที่ ข20 ข้อมูลผลการทดลองของไนเตรทไนโตรเจน คอลัมน์ซี20

C20		Depth (cm), (mg/L)				
Run	**Day**	**0**	**20**	**40**	**60**	**80**
	5	1	5	8	23	11
	10	0	14	37	21	10
	15	4	19	32	27	1
	20	2	8	52	15	3
	25	0	4	45	11	0
	30	1	14	46	1	0
	35	0	2	41	1	0
1	**40**	2	2	63	4	0
	45	0	4	53	1	0
	50	3	3	41	4	0
	55	0	4	35	4	0
	60	2	33	1	0	0
	70	2	34	2	1	0
	80	0	33	2	0	0
	90	0	14	3	0	0
	100	0	11	3	0	0
	110	0	10	4	0	0
2	**120**	0	8	10	0	0
	130	0	9	14	0	0
	140	0	10	12	0	0
	150	0	1	31	2	1
	160	0	1	72	0	0
	170	0	5	65	0	0
3	**180**	0	2	65	0	0
	190	0	4	53	0	0
	200	0	3	42	0	0

ตารางผนวกที่ ข21 ข้อมูลผลการทดลองของ ไนเตรทไนโตรเจน คอลัมน์ซี10

C10		Depth (cm), (mg/L)				
Run	**Day**	**0**	**10**	**20**	**30**	**40**
1	**5**	1	9	24	17	11
	10	0	7	12	15	6
	15	5	7	9	12	0
	20	2	6	17	8	5
	25	0	5	6	1	0
	30	1	4	11	2	0
	35	0	32	4	3	0
	40	2	32	2	2	0
	45	0	23	4	0	0
	50	3	12	4	0	0
	55	0	14	4	5	0
	60	2	12	1	0	0
2	**70**	2	14	3	1	0
	80	0	14	3	0	0
	90	0	15	4	0	0
	100	0	12	13	0	0
	110	0	18	14	0	0
	120	0	15	19	0	0
	130	0	17	19	0	0
	140	0	10	18	1	0
3	**150**	0	2	12	4	3
	160	0	43	19	0	0
	170	0	40	30	0	0
	180	0	21	14	2	0
	190	0	14	11	0	0
	200	0	9	3	0	0

ตารางผนวกที่ ข22 ข้อมูลผลการทดลองของฟอสฟอรัสทั้งหมด คอลัมน์ซี30

C30		Depth (cm), (mg/L)				
Run	**Day**	**0**	**30**	**60**	**90**	**120**
1	**5**	22	2	1	1	0
	10	22	3	2	1	0
	15	20	3	1	0	0
	20	15	3	2	0	0
	25	24	2	2	0	0
	30	23	5	2	1	0
	35	24	3	2	1	1
	40	27	1	1	1	0
	45	11	7	4	1	0
	50	12	9	5	3	1
	55	15	1	1	4	3
	60	14	9	5	3	3
	65	14	7	5	4	3
	70	13	9	7	5	3
	75	15	11	11	8	4
	80	14	11	10	5	4
	85	12	10	7	5	4
	90	12	10	7	7	4
	100	10	10	8	7	5
	120	11	10	9	7	6
3	**140**	12	11	8	7	6
	160	11	11	7	6	5
	180	10	9	6	4	4
	200	8	7	5	5	4

ตารางผนวกที่ ข23 ข้อมูลผลการทดลองของ ฟอสฟอรัสทั้งหมด คอลัมน์ซี20

C20		Depth (cm), (mg/L)				
Run	**Day**	**0**	**20**	**40**	**60**	**80**
1	**5**	22	4	3	1	1
	10	20	4	1	0	0
	15	27	7	2	1	1
	20	24	4	3	0	0
	25	23	4	1	1	0
	30	28	5	3	2	0
	35	17	3	3	2	2
	40	30	2	1	1	1
	45	10	8	1	0	0
	50	11	10	9	7	6
	55	12	1	1	1	1
	60	13	11	10	7	5
	65	15	10	6	4	3
	70	14	10	7	5	3
	75	15	10	9	7	5
	80	13	10	10	8	4
	85	12	10	7	6	4
	90	12	10	9	6	5
2	**100**	10	10	8	7	6
	120	11	9	9	6	6
	140	12	9	8	7	5
3	**160**	11	10	7	6	5
	180	10	9	7	6	5
	200	8	7	6	5	4

ตารางผนวกที่ ข24 ข้อมูลผลการทดลองของ ฟอสฟอรัสทั้งหมด คอลัมน์ซี10

C10		Depth (cm), (mg/L)				
Run	**Day**	**0**	**10**	**20**	**30**	**40**
1	**5**	18	3	1	1	0
	10	24	4	3	1	0
	15	20	5	2	1	0
	20	25	7	2	0	0
	25	24	1	1	0	0
	30	22	8	3	2	0
	35	19	6	4	1	1
	40	25	6	4	1	1
	45	10	4	2	1	1
	50	15	14	12	9	7
	55	16	14	12	12	12
	60	12	11	9	7	7
2	**65**	15	10	8	4	3
	70	13	12	11	9	6
	75	14	10	9	7	5
	80	14	11	9	6	4
	85	12	10	8	7	4
	90	12	11	9	6	5
	100	10	8	7	6	5
	120	11	10	8	6	5
	140	12	10	8	7	5
3	**160**	11	10	7	5	4
	180	10	9	6	6	5
	200	8	7	6	6	6

ตารางผนวกที่ ข25 ข้อมูลผลการทดลองของแข็งแขวนลอย คอลัมน์ซี30

C30		Depth (cm), (mg/L)				
Run	**Day**	**0**	**30**	**60**	**90**	**120**
1	**5**	605	265	175	140	95
	10	499	215	160	105	55
	15	520	325	270	160	100
	20	585	370	265	220	165
	25	547	420	315	295	170
	30	475	215	155	115	90
	35	480	225	160	130	75
	40	445	340	280	210	96
	45	470	320	240	130	105
	50	527	290	160	105	70
	55	468	105	55	40	25
	60	711	350	115	50	40
	65	571	210	103	84	53
	70	641	372	204	124	61
	75	673	345	213	118	74
	80	606	328	205	164	59
	85	641	400	204	143	72
	90	628	378	195	115	68
	120	550	438	217	143	77
	140	603	422	205	100	89
3	**150**	611	435	199	120	74
	160	642	411	190	90	82
	170	588	428	152	109	100
	180	600	510	147	97	84
	190	623	528	130	84	79
	200	582	430	120	80	89

ตารางผนวกที่ ข26 ข้อมูลผลการทดลอง ของแข็งแขวนลอย คอลัมน์ซี20

C20		Depth (cm), (mg/L)				
Run	**Day**	**0**	**20**	**40**	**60**	**80**
1	**5**	605	290	215	155	120
	10	499	205	185	125	85
	15	520	355	310	225	175
	20	585	405	345	290	230
	25	547	440	345	320	240
	30	475	310	215	190	105
	35	480	270	190	105	95
	40	445	305	335	195	140
	45	470	380	210	140	95
	50	527	380	265	195	155
	55	468	210	190	160	85
	60	711	435	200	150	60
	65	571	511	320	146	72
	70	641	499	321	187	65
	75	673	532	375	219	63
	80	606	517	355	274	72
	85	641	505	322	178	78
	90	628	487	299	196	60
2	**120**	550	485	231	111	81
	140	603	525	210	145	99
3	**150**	611	510	200	139	100
	160	642	532	215	142	84
	170	588	500	193	133	92
	180	600	540	197	137	95
	190	623	532	199	152	110
	200	582	504	230	137	94

ตารางผนวกที่ ข27 ข้อมูลผลการทดลองของแข็งแขวนลอย คอลัมน์ซี10

C10		Depth (cm), (mg/L)				
Run	**Day**	**0**	**10**	**20**	**30**	**40**
1	**5**	605	375	105	100	75
	10	499	265	190	155	100
	15	520	315	275	205	160
	20	585	365	305	260	190
	25	547	465	355	330	175
	30	475	255	160	105	75
	35	480	305	155	130	105
	40	445	360	320	255	210
	45	470	420	275	190	140
	50	527	265	160	125	55
	55	468	220	160	140	115
	60	711	555	190	150	135
2	**65**	571	362	275	199	156
	70	641	354	257	211	173
	75	673	327	238	218	164
	80	606	311	228	197	177
	85	641	365	267	211	147
	90	628	355	238	190	155
	120	550	478	211	156	118
	140	603	419	203	187	127
3	**150**	611	400	218	191	130
	160	642	530	255	184	129
	170	588	512	281	210	110
	180	600	532	248	213	137
	190	623	528	225	215	152
	200	582	500	263	285	154

ตารางผนวกที่ ข28 ข้อมูลผลการทดลองของพีเอช คอลัมน์ซี30

C30		Depth (cm)				
Run	**Day**	**0**	**30**	**60**	**90**	**120**
1	**5**	6.74	7.29	6.54	7.19	6.67
	10	6.74	7.44	7.82	7.85	7.80
	15	7.18	7.70	7.92	7.95	7.87
	20	7.24	7.50	7.33	7.37	7.54
	25	7.00	7.48	7.61	7.59	7.54
	30	6.89	7.18	7.19	7.09	7.10
	35	7.18	7.62	7.69	7.68	7.60
	40	7.08	7.53	7.64	7.44	7.18
	45	7.32	7.73	7.88	7.79	7.69
	50	7.51	8.17	8.20	7.14	7.11
	55	7.42	7.77	7.98	8.00	7.82
	60	8.23	8.43	8.00	7.48	7.22
	70	7.11	7.44	7.21	7.03	7.11
	80	7.20	7.38	7.40	7.29	7.22
	90	6.57	7.32	7.22	7.15	7.31
	100	6.85	7.48	7.61	7.33	7.22
	110	6.59	7.05	7.43	7.45	7.30
	120	6.52	7.24	6.98	7.05	6.92
	130	7.12	7.48	7.29	7.12	7.04
	140	7.08	7.22	7.21	7.05	6.75
3	**150**	6.05	7.10	7.05	6.69	6.55
	160	6.16	7.15	7.02	6.73	6.42
	170	6.88	7.16	7.06	6.78	6.35
	180	7.10	7.23	7.11	6.81	6.42
	190	7.09	7.31	7.21	6.92	6.61
	200	7.22	7.30	7.15	6.84	6.48

ตารางผนวกที่ ข29 ข้อมูลผลการทดลองของ พีเอช คอลัมน์ซี20

C20		Depth (cm)				
Run	**Day**	**0**	**20**	**40**	**60**	**80**
	5	6.93	7.35	7.63	7.69	7.73
	10	6.93	7.37	7.35	7.47	7.25
	15	7.04	7.44	7.66	7.70	7.72
	20	7.30	7.48	7.52	7.61	7.40
	25	7.11	7.46	7.60	7.66	7.67
	30	6.83	7.03	7.15	7.11	7.07
	35	7.25	7.48	7.58	7.57	7.51
1	**40**	7.42	7.66	7.51	7.63	7.50
	45	7.31	7.50	7.68	7.61	7.58
	50	7.51	8.21	7.53	7.94	8.10
	55	7.37	7.55	7.65	7.59	7.54
	60	8.21	8.34	8.11	7.75	7.23
	70	7.11	7.55	7.48	7.26	7.58
	80	7.20	7.53	7.55	7.48	7.15
	90	6.57	7.32	7.24	7.18	7.57
	100	6.85	7.55	7.86	7.53	7.70
	110	6.59	7.00	7.39	7.22	7.31
2	**120**	6.52	7.47	7.49	7.32	7.26
	130	7.12	7.48	7.44	7.19	7.11
	140	7.08	7.32	7.40	7.21	7.08
	150	6.05	6.91	7.11	6.54	6.11
	160	6.16	6.93	7.12	6.65	6.08
	170	6.88	7.13	7.05	6.93	6.13
3	**180**	7.10	7.15	7.06	6.54	6.31
	190	7.09	7.20	7.15	6.84	6.33
	200	7.22	7.41	7.35	6.35	6.03

ตารางผนวกที่ ข30 ข้อมูลผลการทดลองของ พีเอช คอลัมน์ซี10

C10		Depth (cm)				
Run	**Day**	**0**	**10**	**20**	**30**	**40**
1	**5**	6.76	7.38	7.68	7.72	7.73
	10	6.76	7.41	8.42	8.26	7.14
	15	7.18	7.31	7.84	7.88	7.84
	20	6.94	7.48	7.11	7.28	7.18
	25	7.08	7.42	7.91	8.04	7.88
	30	7.04	7.24	7.29	7.31	6.54
	35	7.36	7.59	7.73	7.60	7.48
	40	7.45	7.69	7.61	7.54	7.00
	45	7.28	7.58	7.80	7.43	6.88
	50	7.53	7.71	8.13	7.78	6.93
	55	7.53	7.66	7.69	7.63	7.55
	60	7.79	7.84	7.58	7.63	7.73
2	**70**	7.11	7.54	7.33	7.51	7.03
	80	7.20	7.54	7.41	7.36	7.26
	90	6.57	7.80	7.48	7.70	7.51
	100	6.85	7.47	7.55	7.46	7.51
	110	6.59	7.11	7.46	7.33	7.41
	120	6.52	7.40	7.61	7.71	7.76
	130	7.12	7.23	7.33	7.29	7.26
	140	7.08	7.18	7.34	7.17	7.16
3	**150**	6.05	6.21	6.41	6.05	6.04
	160	6.16	6.30	6.21	6.11	6.05
	170	6.88	6.91	6.81	6.72	6.41
	180	7.10	7.21	6.99	6.84	6.71
	190	7.09	7.15	6.84	6.80	6.53
	200	7.22	7.50	7.10	7.00	6.84

ตารางผนวกที่ ข31 ข้อมูลผลการทดลองของ ออกซิเจนละลาย คอลัมน์ซี30

C30		Depth (cm), (mg/L)				
Run	**Day**	**0**	**30**	**60**	**90**	**120**
	5	0.66	2.66	3.07	3.21	1.70
	10	0.78	2.53	2.88	2.43	1.76
	15	0.64	2.04	2.30	3.14	1.72
	20	0.75	1.25	2.21	2.63	1.54
	25	0.34	1.33	1.97	2.63	1.32
	30	0.42	1.83	2.51	2.53	1.35
	35	0.51	1.03	1.59	2.24	1.32
	40	0.75	2.40	2.59	2.58	1.33
	45	0.76	1.21	1.79	2.10	1.32
	50	0.43	1.15	1.78	2.12	1.44
	55	0.38	1.15	1.07	0.86	0.31
1	**60**	0.28	0.98	0.84	0.65	0.38
	65	0.31	0.86	0.88	0.62	0.37
	70	0.36	0.89	0.91	0.54	0.28
	75	0.43	0.99	0.96	0.57	0.26
	80	0.37	0.87	0.98	0.51	0.32
	85	0.41	0.97	1.03	0.65	0.25
	90	0.44	0.88	1.00	0.67	0.64
	100	0.34	1.11	1.32	0.87	0.54
	110	0.41	0.99	1.21	0.78	0.70
	120	0.39	1.11	1.12	0.56	0.51
	130	0.37	1.25	1.02	0.45	0.40
	140	0.35	1.18	1.12	0.46	0.32
	150	0.31	2.12	2.20	0.76	0.41
	160	0.29	2.23	2.11	0.55	0.34
	170	0.27	2.31	2.10	0.47	0.33
3	**180**	0.41	2.18	1.98	0.67	0.42
	190	0.27	2.31	2.1	0.57	0.37
	200	0.21	2.24	2.15	0.45	0.31

ตารางผนวกที่ ข32 ข้อมูลผลการทดลองของ ออกซิเจนละลาย คอลัมน์ซี20

C20		Depth (cm), (mg/L)				
Run	**Day**	**0**	**20**	**40**	**60**	**80**
1	**5**	0.66	1.96	2.64	2.91	2.99
	10	0.78	1.98	2.67	2.08	2.45
	15	0.64	1.76	2.43	2.27	2.08
	20	0.75	1.52	1.99	2.09	1.21
	25	0.34	1.61	2.15	2.18	1.11
	30	0.42	1.64	2.41	2.31	1.08
	35	0.51	1.52	1.81	2.07	0.92
	40	0.75	1.56	2.48	2.20	0.83
	45	0.76	1.28	1.50	1.44	1.17
	50	0.43	1.22	2.25	2.18	1.08
	55	0.38	1.35	1.21	0.75	0.20
	60	0.28	0.85	0.54	0.32	0.15
	65	0.31	1.13	1.16	0.87	0.53
	70	0.36	0.95	1.14	0.76	0.43
	75	0.43	0.93	0.87	0.61	0.23
	80	0.37	0.89	0.81	0.57	0.31
	85	0.41	0.81	0.74	0.47	0.22
	90	0.44	0.64	0.82	0.67	0.48
2	**100**	0.34	1.20	1.43	1.02	0.98
	110	0.41	1.32	1.54	1.37	1.32
	120	0.39	1.75	1.89	1.32	1.28
	130	0.37	1.95	2.14	2.02	1.26
	140	0.35	2.16	2.05	1.75	1.01
3	**150**	0.31	2.12	2.16	1.11	0.78
	160	0.29	1.99	2.10	1.25	0.51
	170	0.27	2.05	2.00	1.03	0.61
	180	0.41	2.04	2.32	1.43	0.55
	190	0.27	2.11	2.15	1.28	0.78
	200	0.21	2.15	2.05	1.11	0.76

ตารางผนวกที่ ข33 ข้อมูลผลการทดลองของ ออกซิเจนละลาย คอลัมน์ซี10

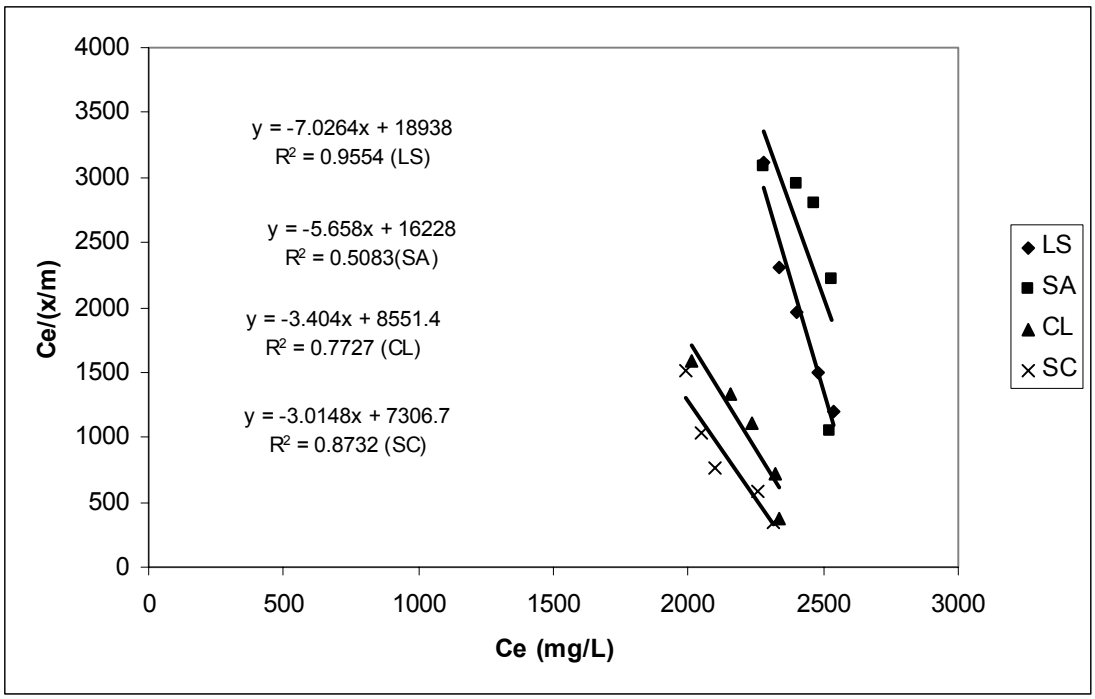
C10		Depth (cm), (mg/L)				
Run	**Day**	**0**	**10**	**20**	**30**	**40**
1	**5**	0.66	1.97	2.36	2.56	2.23
	10	0.78	1.20	1.84	2.62	1.60
	15	0.64	1.21	1.74	1.77	1.20
	20	0.75	0.63	1.20	1.70	1.11
	25	0.34	0.62	1.51	1.36	0.38
	30	0.42	0.51	1.20	0.95	1.00
	35	0.51	1.11	1.27	1.03	0.73
	40	0.75	2.06	1.59	1.51	0.91
	45	0.76	1.05	1.33	1.11	0.83
	50	0.43	1.11	1.67	1.60	0.62
	55	0.38	0.95	0.93	0.41	0.23
	60	0.28	0.78	0.56	0.25	0.17
2	**65**	0.31	0.89	1.20	0.76	0.51
	70	0.36	0.92	1.02	0.78	0.60
	75	0.43	0.89	0.93	0.75	0.56
	80	0.37	1.34	1.60	0.78	0.63
	85	0.41	1.21	1.23	0.74	0.59
	90	0.44	0.80	1.11	0.92	0.53
	100	0.34	1.16	1.54	1.77	1.65
	110	0.41	1.43	1.86	1.68	1.45
	120	0.39	1.98	1.87	1.63	1.66
	130	0.37	2.04	2.15	1.59	1.81
	140	0.37	2.01	2.05	1.45	1.64
3	**150**	0.31	2.22	2.44	1.45	0.98
	160	0.29	2.31	2.50	1.44	0.88
	170	0.27	2.12	2.44	1.50	0.76
	180	0.41	2.25	2.51	1.11	0.68
	190	0.27	2.17	2.49	1.21	0.79
	200	0.21	2.35	2.24	1.17	0.78

ภาคผนวก ค

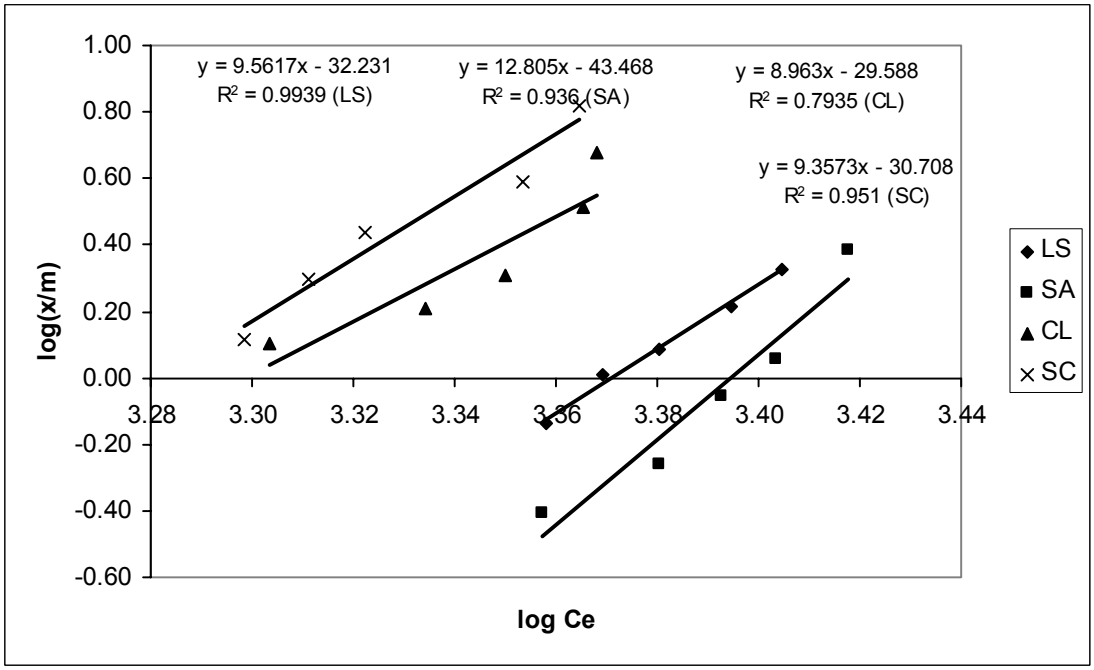
ข้อมูลผลการดูดซับ

ตารางผนวกที่ ค1 ข้อมูลผลการดูดซับของ สารอินทรีย์ทั้งหมด โดยวัสดุแต่ละชนิด

Textures	Weight(g)	t_{op} (min)	C_e (mg/L)	$C_e/(x/m)$	log(x/m)	log(C_e)
	5	30	2539	1198	0.33	3.40
	10	30	2480	1503	0.22	3.39
LS	20	30	2401	1968	0.09	3.38
	30	30	2340	2302	0.01	3.37
	50	30	2280	3123	-0.14	3.36
	5	60	2524	1043	0.38	3.42
	10	60	2531	2220	0.06	3.40
SA	20	60	2469	2806	-0.06	3.39
	30	60	2401	2952	-0.26	3.38
	50	60	2276	3084	-0.41	3.36
	5	30	2333	374	0.68	3.37
	10	30	2320	714	0.51	3.37
CL	20	30	2239	1103	0.31	3.35
	30	30	2158	1329	0.21	3.33
	50	30	2011	1586	0.10	3.30
	5	30	2315	351	0.82	3.36
	10	30	2257	582	0.59	3.35
SC	20	30	2100	771	0.44	3.32
	30	30	2048	1029	0.30	3.31
	50	30	1989	1516	0.12	3.30



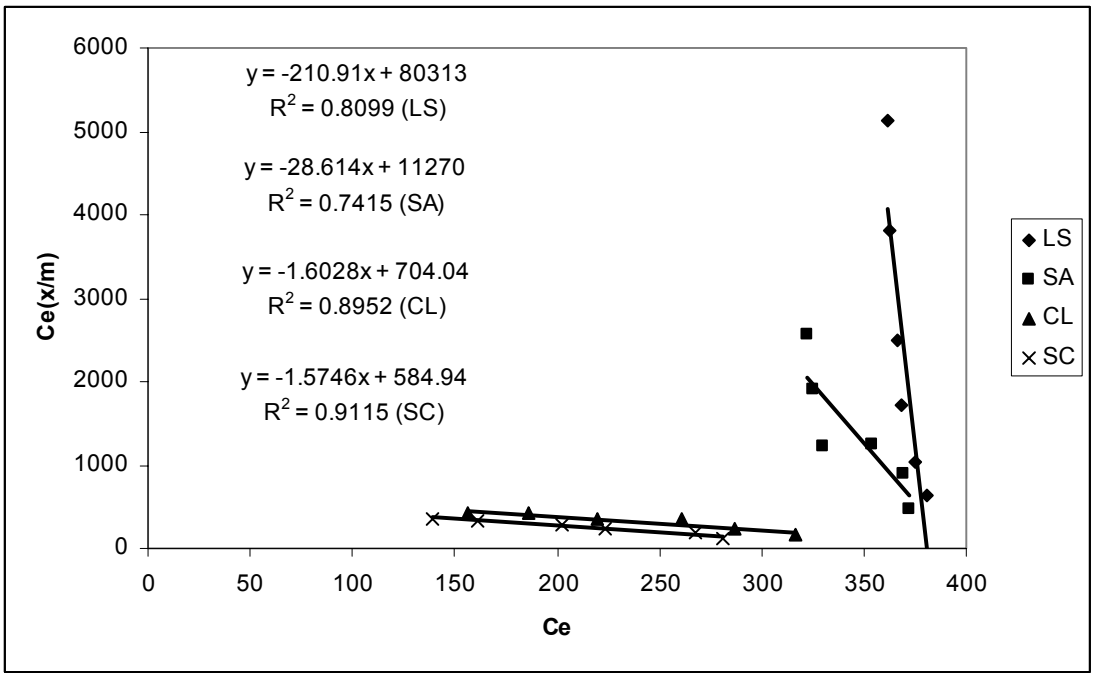
ภาพผนวกที่ ค1 กราฟแบบแลงเมียร์ของสารอินทรีย์ทั้งหมด กับวัสดุต่างๆ



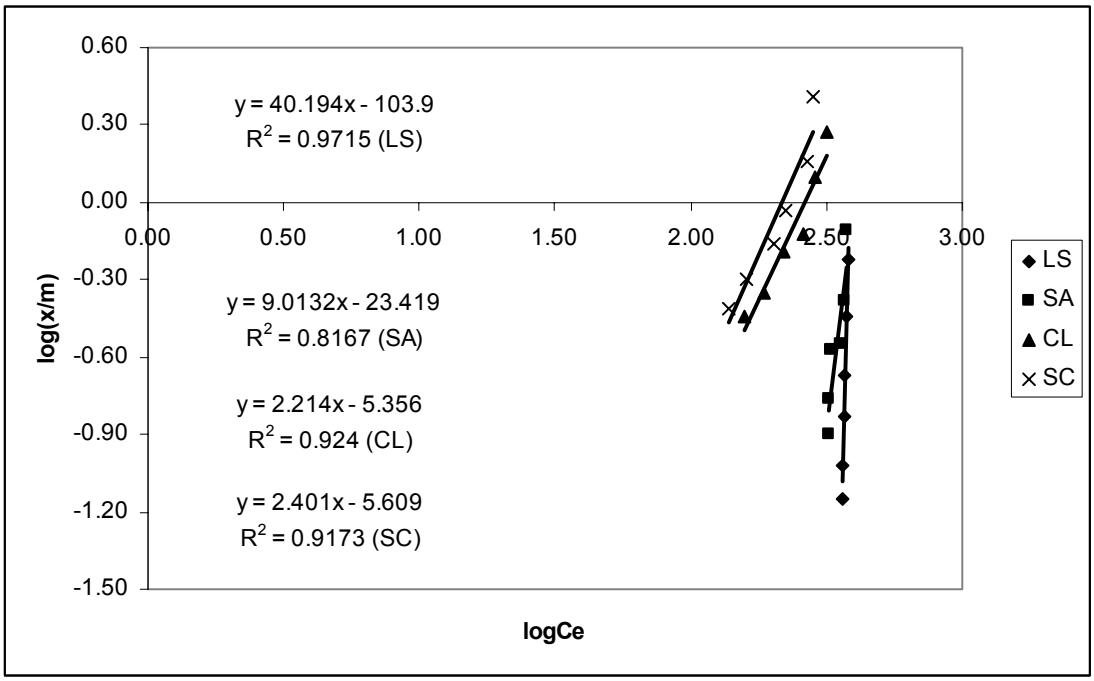
ภาพผนวกที่ ค2 กราฟแบบฟรุนดิชของสารอินทรีย์ทั้งหมด กับวัสดุต่างๆ

ตารางผนวกที่ ค2 ข้อมูลผลการดูดซับของ แอมโมเนียไนโตรเจน โดยวัสดุแต่ละชนิด

Textures	Weight(g)	t_{op} (min)	C_e (mg/L)	$C_e/(x/m)$	log(x/m)	log(C_e)
LS	5	60	380.75	635	-0.22	2.58
	10	60	374.75	1041	-0.44	2.57
	20	60	368.00	1722	-0.67	2.57
	30	60	366.50	2485	-0.83	2.56
	50	60	363.00	3801	-1.02	2.56
	70	60	361.50	5138	-1.15	2.56
SA	5	60	372.00	480	-0.11	2.57
	10	60	369.00	884	-0.38	2.57
	20	60	354.25	1254	-0.55	2.55
	30	60	330.00	1226	-0.57	2.52
	50	60	325.00	1895	-0.77	2.51
	70	60	322.75	2567	-0.90	2.51
CL	5	60	316.75	168	0.27	2.50
	10	60	286.50	231	0.09	2.46
	20	60	261.00	349	-0.13	2.42
	30	60	219.25	343	-0.19	2.34
	50	60	186.50	416	-0.35	2.27
	70	60	156.50	431	-0.44	2.19
SC	5	60	281.25	109	0.41	2.45
	10	60	267.50	187	0.16	2.43
	20	60	223.50	239	-0.03	2.35
	30	60	202.25	291	-0.16	2.31
	50	60	160.75	322	-0.30	2.21
	70	60	138.75	357	-0.41	2.14



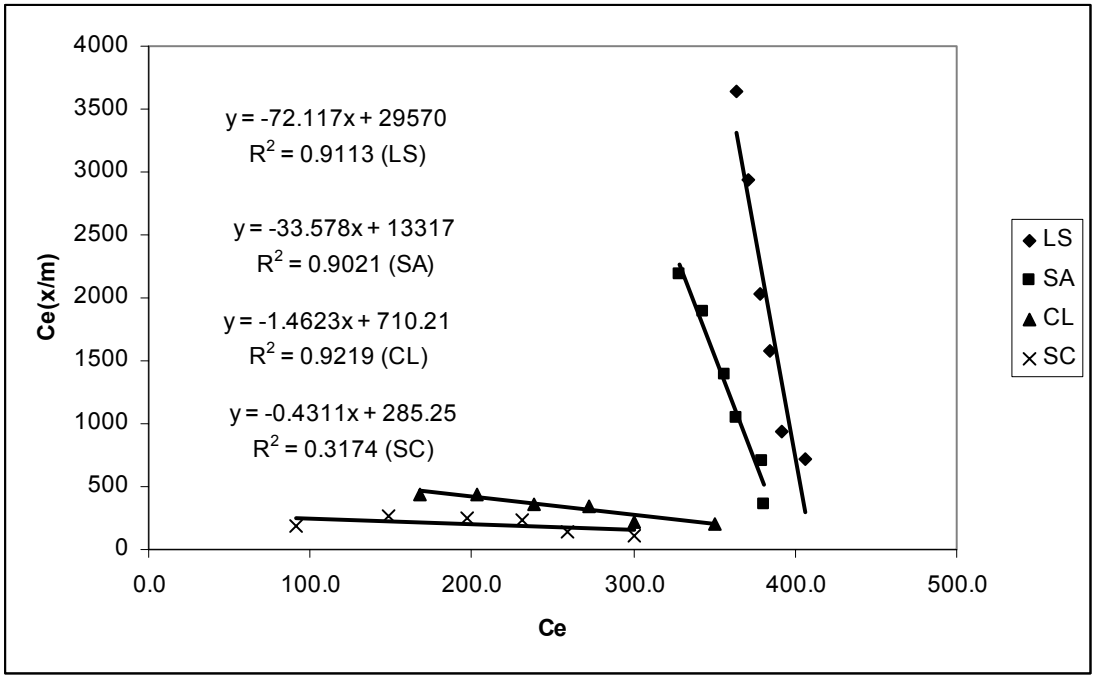
ภาพผนวกที่ ค3 กราฟแบบแลงเมียร์ของแอมโมเนียไนโตรเจน กับวัสดุต่างๆ



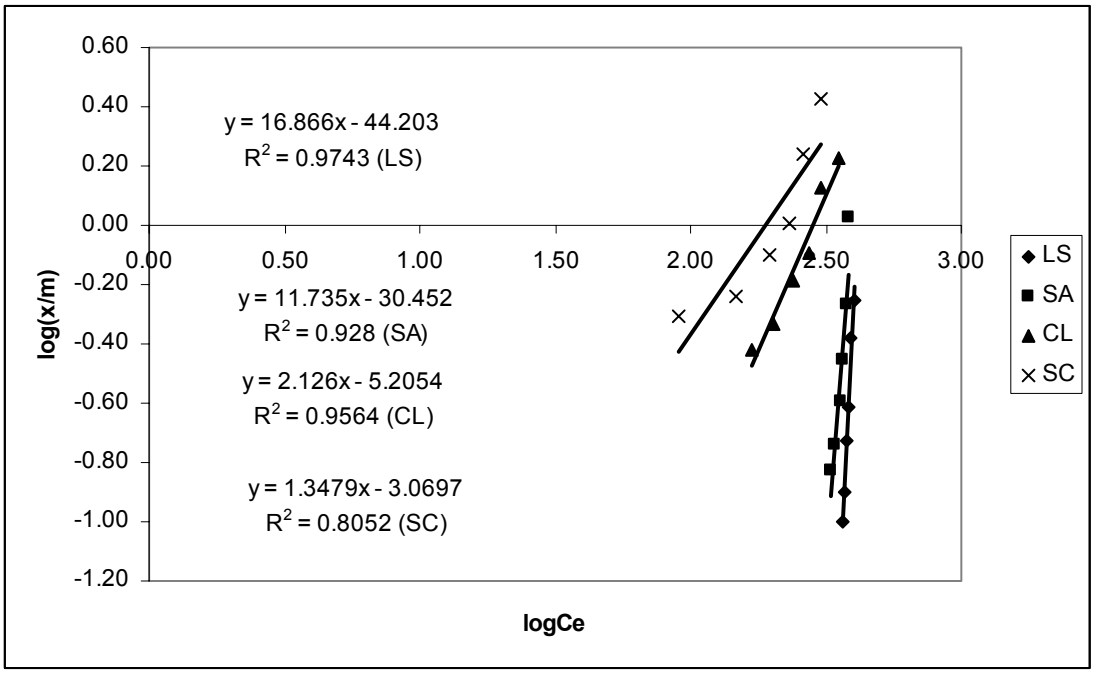
ภาพผนวกที่ ค4 กราฟแบบฟรุนดิชของแอมโมเนียไนโตรเจน กับวัสดุต่างๆ

ตารางผนวกที่ ค3 ข้อมูลผลการดูดซับของอินทรีย์ไนโตรเจน โดยวัสดุแต่ละชนิด

Textures	Weight(g)	t_{op} (min)	C_e (mg/L)	$C_e/(x/m)$	log(x/m)	log(C_e)
LS	5	60	406.0	725	-0.25	2.61
	10	60	392.0	933	-0.38	2.59
	20	60	385.0	1571	-0.61	2.59
	30	60	378.0	2025	-0.73	2.58
	50	60	371.0	2944	-0.90	2.57
	70	60	364.0	3640	-1.00	2.56
SA	5	60	381.0	359	0.03	2.58
	10	60	380.0	704	-0.27	2.58
	20	60	364.0	1040	-0.46	2.56
	30	60	357.0	1391	-0.59	2.55
	50	60	343.0	1885	-0.74	2.54
	70	60	329.0	2193	-0.82	2.52
CL	5	60	350.0	208	0.23	2.54
	10	60	301.0	226	0.12	2.48
	20	60	273.0	339	-0.09	2.44
	30	60	238.0	364	-0.18	2.38
	50	60	203.0	439	-0.34	2.31
	70	60	168.0	442	-0.42	2.23
SC	5	60	301.0	113	0.42	2.48
	10	60	259.0	148	0.24	2.41
	20	60	231.0	228	0.01	2.36
	30	60	197.0	249	-0.10	2.29
	50	60	148.0	259	-0.24	2.17
	70	60	91.0	186	-0.31	1.96



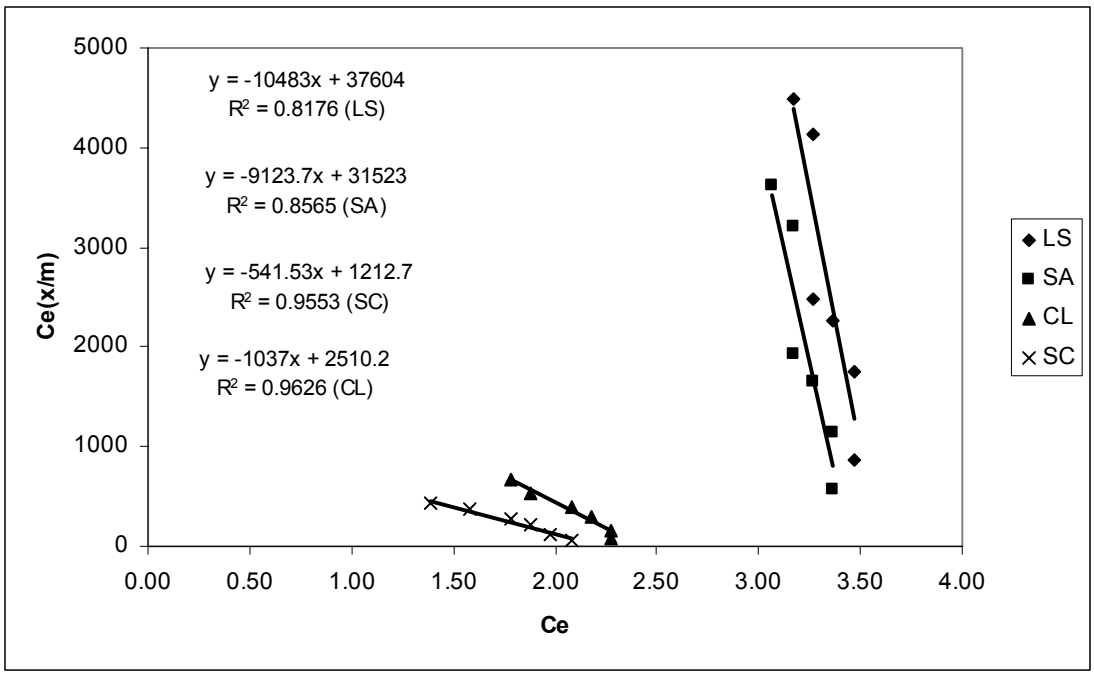
ภาพผนวกที่ ค5 กราฟแบบแลงเมียร์ของ อินทรีย์ไนโตรเจน กับวัสดุต่างๆ



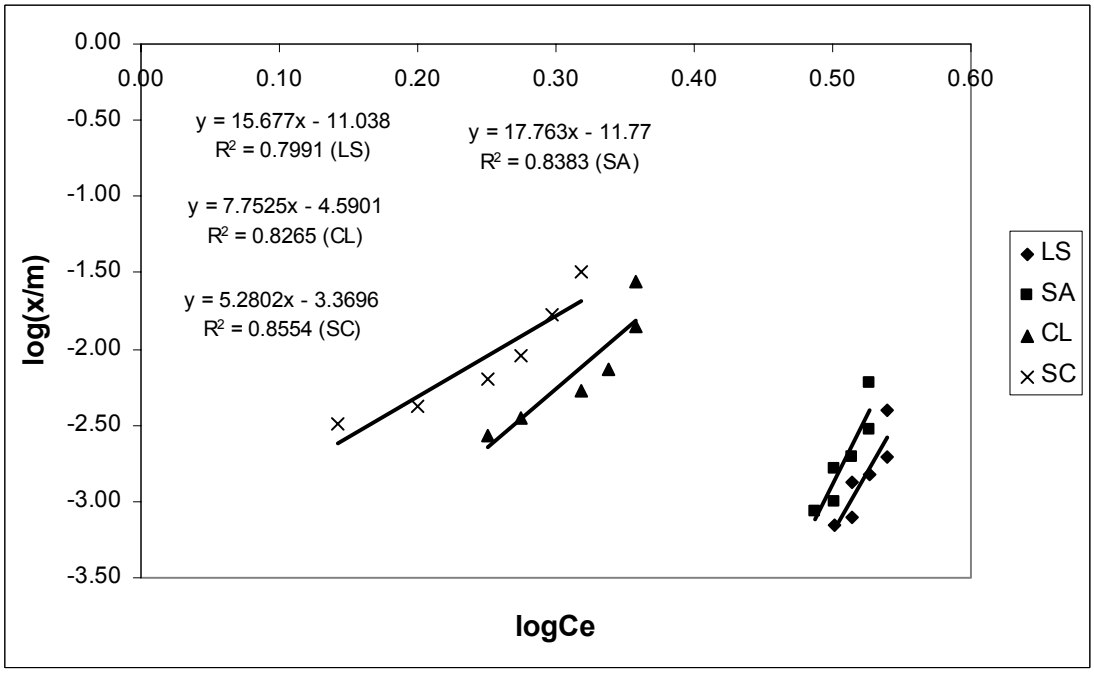
ภาพผนวกที่ ค6 กราฟแบบฟรุนดิชของอินทรีย์ไนโตรเจน กับวัสดุต่างๆ

ตารางผนวกที่ ค4 ข้อมูลผลการดูดซับของ ไนไตรท์ไนโตรเจน โดยวัสดุแต่ละชนิด

Textures	Weight(g)	t_{op} (min)	C_e (mg/L)	$C_e/(x/m)$	log(x/m)	log(C_e)
LS	5	60	3.465	875	-2.40	0.54
	10	60	3.465	1750	-2.70	0.54
	20	60	3.366	2267	-2.83	0.53
	30	60	3.267	2475	-2.88	0.51
	50	60	3.267	4125	-3.10	0.51
	70	60	3.168	4480	-3.15	0.50
SA	5	60	3.366	567	-2.23	0.53
	10	60	3.366	1133	-2.53	0.53
	20	60	3.267	1650	-2.70	0.51
	30	60	3.168	1920	-2.78	0.50
	50	60	3.168	3200	-3.00	0.50
	70	60	3.069	3617	-3.07	0.49
CL	5	60	2.277	82	-1.56	0.36
	10	60	2.277	164	-1.86	0.36
	20	60	2.178	293	-2.13	0.34
	30	60	2.079	394	-2.28	0.32
	50	60	1.881	528	-2.45	0.27
	70	60	1.782	663	-2.57	0.25
SC	5	60	2.079	66	-1.50	0.32
	10	60	1.980	118	-1.77	0.30
	20	60	1.881	211	-2.05	0.27
	30	60	1.782	284	-2.20	0.25
	50	60	1.584	381	-2.38	0.20
	70	60	1.386	426	-2.49	0.14



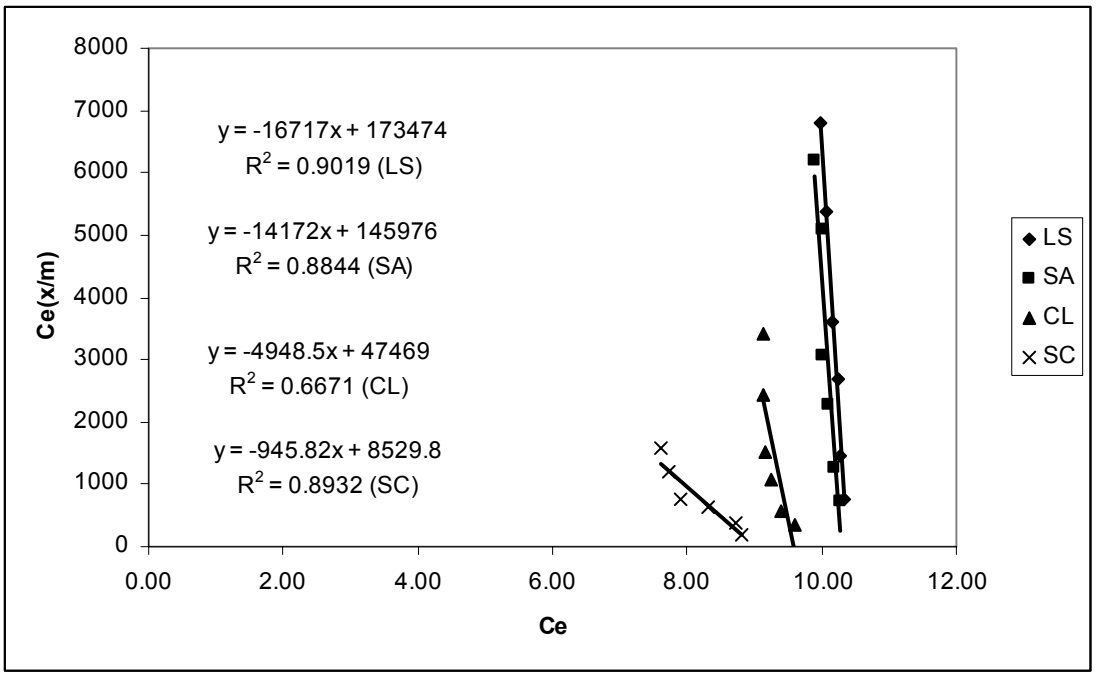
ภาพผนวกที่ ค7 กราฟแบบแลงเมียร์ของ ไนไตรท์ไนโตรเจน กับวัสดุต่างๆ



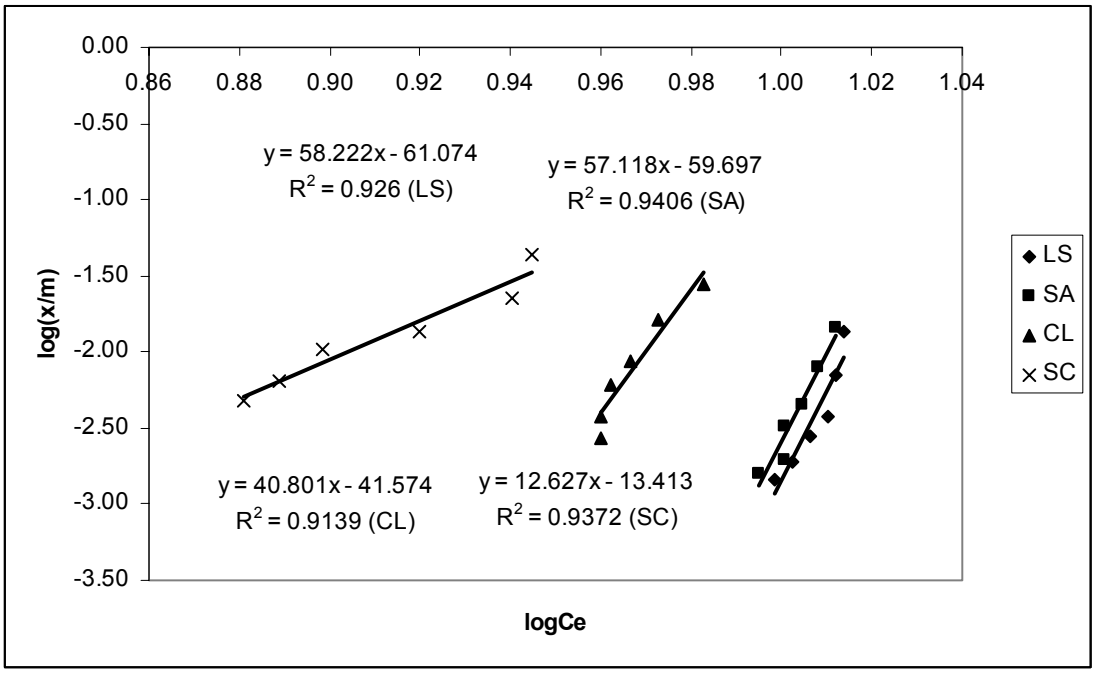
ภาพผนวกที่ ค8 กราฟแบบฟรุนดิชของ ไนไตรท์ไนโตรเจน กับวัสดุต่างๆ

ตารางผนวกที่ ค5 ข้อมูลผลการดูดซับของ ไนเตรทไนโตรเจน โดยวัสดุแต่ละชนิด

Textures	Weight(g)	t_{op} (min)	C_e (mg/L)	$C_e/(x/m)$	log(x/m)	log(C_e)
LS	5	60	10.33	771	-1.87	1.01
	10	60	10.28	1440	-2.15	1.01
	20	60	10.24	2698	-2.42	1.01
	30	60	10.15	3589	-2.55	1.01
	50	60	10.06	5365	-2.73	1.00
	70	60	9.97	6797	-2.83	1.00
SA	5	60	10.28	720	-1.85	1.01
	10	60	10.19	1269	-2.09	1.01
	20	60	10.10	2263	-2.35	1.00
	30	60	10.01	3059	-2.48	1.00
	50	60	10.01	5098	-2.71	1.00
	70	60	9.88	6197	-2.80	0.99
CL	5	60	9.61	347	-1.56	0.98
	10	60	9.39	584	-1.79	0.97
	20	60	9.26	1063	-2.06	0.97
	30	60	9.17	1502	-2.21	0.96
	50	60	9.12	2433	-2.43	0.96
	70	60	9.12	3406	-2.57	0.96
SC	5	60	8.81	201	-1.36	0.94
	10	60	8.72	383	-1.64	0.94
	20	60	8.32	621	-1.87	0.92
	30	60	7.92	771	-1.99	0.90
	50	60	7.74	1187	-2.19	0.89
	70	60	7.60	1569	-2.31	0.88



ภาพผนวกที่ ค9 กราฟแบบแลงเมียร์ของไนเตรทไนโตรเจน กับวัสดุต่างๆ



ภาพผนวกที่ ค10 กราฟแบบฟรุนดิชของไนเตรทไนโตรเจน กับวัสดุ

ภาคผนวก ง

ข้อมูลผลการทดลองสมดุลมวล

ตารางผนวกที่ ง 1 ผลการทดลองสมดุลมวลสารอินทรีย์ทั้งหมดหลังสิ้นสุดการทดลอง

Column	Texture	Influent (g.C)	Effluent (g.C)	Soil Accumulate (g.C)	Unaccount (g.C)
C30	LS	108.66	98.29	3.33	7.05
	SA	98.29	82.99	0.00	15.30
	CL	82.99	80.47	0.13	2.39
	SC	80.47	78.60	0.00	1.86
Total		108.66	78.60	3.46	26.60
C20	LS	108.66	101.08	3.33	4.26
	SA	101.08	88.98	0.00	12.10
	CL	88.98	86.18	0.00	2.79
	SC	86.18	83.79	0.00	2.39
Total		108.66	83.79	3.33	21.55
C10	LS	108.66	102.41	3.19	3.06
	SA	102.41	87.25	0.00	15.16
	CL	87.25	85.12	0.00	2.13
	SC	85.12	83.26	0.13	1.73
Total		108.66	83.26	3.33	22.08

ตารางผนวกที่ ง 2 ผลการทดลองสมดุลมวลไนโตรเจนทั้งหมดหลังสิ้นสุดการทดลอง

Column	Texture	Influent (g.N)	Effluent (g.N)	Soil Accumulate (g.N)	Unaccount (g.N)
C30	LS	500	435	2	63
	SA	435	285	2	148
	CL	285	190	5	90
	SC	190	150	3	37
Total		500	150	12	338
C20	LS	500	460	1	39
	SA	460	290	2	168
	CL	290	230	4	56
	SC	230	210	3	17
Total		500	210	10	280
C10	LS	500	465	3	32
	SA	465	310	2	153
	CL	310	265	4	41
	SC	265	240	2	23
Total		500	240	11	249

ภาคผนวก จ

ข้อมูลผลการทดลองการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์

ตารางผนวกที่ จ1 ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนที่เหลือจากการย่อยสลายโดย เฮทเทอโรโทรฟิค คอลัมน์ ซี10

Texture	No.	Time (minute), mg/L						
		0	30	60	90	120	150	180
Limestone	1	75	53	24	21	22	22	22
	2	88	66	26	28	26	33	27
	3	122	79	37	37	36	37	37
	4	146	120	47	47	47	47	47
	5	173	142	55	49	49	49	49
	6	189	153	64	60	61	63	63
	7	224	209	100	97	96	93	99
Sand	1	75	55	22	20	21	20	22
	2	88	68	28	27	28	29	30
	3	122	85	34	36	32	35	36
	4	146	102	39	38	37	39	39
	5	173	134	48	44	44	44	44
	6	189	154	56	59	56	56	59
	7	224	177	83	83	83	82	86
Clay	1	79	39	7	6	6	9	9
	2	90	56	20	23	20	15	21
	3	147	90	21	22	23	22	21
	4	170	106	30	33	29	31	28
	5	192	122	34	34	34	38	35
	6	216	151	53	53	59	53	59
	7	235	161	64	68	68	69	77
Silty Clay	1	58	39	12	10	12	8	10
	2	90	56	14	20	23	21	17
	3	147	76	16	13	17	10	7
	4	189	113	22	24	24	24	22
	5	207	125	29	27	26	39	31
	6	216	156	33	32	31	31	37
	7	235	175	51	63	51	54	56

ตารางผนวกที่ จ2 ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนที่เหลือจากการย่อยสลายโดย เฮทเทอโรโทรฟิค คอลัมน์ ซี30

Texture	No.	Time (minute), mg/L						
		0	30	60	90	120	150	180
Limestone	1	79	63	32	31	32	31	31
	2	94	76	35	34	35	34	35
	3	112	90	35	36	35	35	36
	4	152	110	42	42	42	42	42
	5	163	122	45	50	50	49	50
	6	195	139	62	62	62	62	61
	7	203	175	70	70	70	70	70
Sand	1	79	63	24	24	24	24	23
	2	94	73	32	32	35	34	35
	3	112	90	38	36	35	35	36
	4	152	110	41	42	42	42	42
	5	163	122	45	47	48	48	50
	6	195	151	66	65	64	64	64
	7	203	168	75	72	72	72	72
Clay	1	79	52	11	8	9	9	9
	2	108	69	15	18	18	18	19
	3	147	90	23	22	23	22	21
	4	163	110	27	31	31	29	30
	5	188	122	37	37	38	38	37
	6	208	151	58	59	59	58	59
	7	224	171	74	76	78	77	77
Silty Clay	1	79	48	14	12	13	13	14
	2	94	65	18	16	16	16	13
	3	133	85	21	20	20	20	20
	4	163	99	27	27	27	27	25
	5	186	125	33	32	32	33	33
	6	208	156	58	58	57	57	57
	7	224	175	67	66	65	65	64

ตารางผนวกที่ จ3 ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนที่เหลือจากการย่อยสลายโดย ไนโตรโซโมเนส คอลัมน์ ซี10

Texture	No.	Time (minute), mg/L						
		0	**30**	**60**	**90**	**120**	**150**	**180**
Limestone	**1**	25	6	1	5	4	4	5
	2	50	43	22	20	19	20	21
	3	75	39	16	15	17	19	18
	4	100	61	27	41	35	45	42
	5	125	90	35	37	39	31	34
	6	150	104	40	45	46	40	38
	7	175	141	69	71	70	74	70
Sand	**1**	25	14	8	9	9	6	5
	2	50	37	28	30	27	32	27
	3	75	58	46	51	45	43	51
	4	100	91	37	34	37	39	37
	5	125	118	51	46	52	48	44
	6	150	144	74	75	77	73	71
	7	175	152	93	89	93	93	94
Clay	**1**	25	16	10	10	14	13	13
	2	50	38	27	32	32	35	33
	3	75	61	45	46	57	54	54
	4	100	68	46	43	43	63	43
	5	125	92	53	56	60	63	76
	6	150	118	72	81	78	81	88
	7	175	152	93	101	97	102	106
Silty Clay	**1**	25	15	4	7	13	10	10
	2	50	40	26	25	28	22	23
	3	75	63	43	38	41	39	41
	4	100	88	53	52	50	51	49
	5	125	108	57	56	66	69	68
	6	150	123	86	87	88	88	91
	7	175	128	112	112	111	113	112

ตารางผนวกที่ จ4 ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนที่เหลือจากการย่อยสลายโดย ไนโตรโซโมเนส คอลัมน์ ซี30

Texture	No.	Time (minute), mg/L						
		0	**30**	**60**	**90**	**120**	**150**	**180**
	1	25	9	4	5	5	8	9
	2	50	46	24	24	26	32	24
	3	75	52	37	37	39	36	39
Limestone	**4**	100	93	53	54	53	47	55
	5	125	93	73	80	82	77	83
	6	150	104	94	94	95	97	92
	7	175	121	119	121	120	119	123
	1	25	4	6	6	7	9	9
	2	50	27	17	17	16	20	20
	3	75	39	29	27	28	33	32
Sand	**4**	100	91	28	27	30	32	37
	5	125	81	39	40	45	51	45
	6	150	145	64	75	71	72	74
	7	175	167	86	95	91	91	96
	1	25	21	5	7	9	8	6
	2	50	32	17	16	19	17	26
	3	75	61	28	32	32	30	32
Clay	**4**	100	89	34	40	39	39	42
	5	125	100	41	48	48	45	52
	6	150	126	67	73	73	76	76
	7	175	156	87	92	88	85	93
	1	25	10	3	9	8	7	9
	2	50	34	17	23	18	20	21
	3	75	43	28	35	33	34	29
Silty Clay	**4**	100	68	33	30	29	27	31
	5	125	89	42	45	41	42	41
	6	150	125	68	65	59	64	61
	7	175	175	88	90	94	94	97

ตารางผนวกที่ จ5 ปริมาณไนเตรทไนโตรเจนที่เกิดจากการย่อยสลายไนไตรท์ไนโตรเจน โดย ไนโตรเบคเตอร์ คอลัมน์ ซี10

Texture	No.	Time (minute), mg/L						
		0	**30**	**60**	**90**	**120**	**150**	**180**
Limestone	**1**	0	11	12	28	28	28	27
	2	0	14	15	30	30	30	29
	3	0	28	28	29	31	31	31
	4	0	39	40	46	47	47	48
	5	0	55	78	78	79	76	78
	6	0	67	95	99	102	100	100
	7	0	78	102	105	104	105	104
Sand	**1**	0	19	32	31	28	28	27
	2	0	25	39	40	37	39	39
	3	0	28	48	50	52	51	50
	4	0	39	58	60	60	57	60
	5	0	55	78	78	79	76	78
	6	0	67	104	108	108	107	107
	7	0	78	118	120	122	123	120
Clay	**1**	0	6	9	8	8	8	9
	2	0	10	16	16	18	18	18
	3	0	13	19	22	23	26	23
	4	0	15	22	25	24	23	27
	5	0	19	24	28	29	31	28
	6	0	20	25	26	27	27	32
	7	0	23	24	27	31	31	31
Silty Clay	**1**	0	6	11	11	11	11	9
	2	0	10	13	13	13	14	15
	3	0	13	16	17	17	18	18
	4	0	14	18	19	19	20	20
	5	0	19	24	26	25	24	26
	6	0	17	22	23	24	23	23
	7	0	21	25	26	26	26	26

ตารางผนวกที่ จ6 ปริมาณไนเตรทไนโตรเจนที่เกิดจากการย่อยสลายไนไตรท์ไนโตรเจน โดย ไนโตรเบคเตอร์ คอลัมน์ ซี30

Texture	No.	Time (minute), mg/L						
		0	**30**	**60**	**90**	**120**	**150**	**180**
Limestone	**1**	0	11	22	28	28	28	27
	2	0	14	26	30	30	30	29
	3	0	28	35	36	37	37	36
	4	0	32	50	46	47	47	48
	5	0	55	72	72	72	76	72
	6	0	67	89	91	92	92	95
	7	0	78	98	98	97	101	100
Sand	**1**	0	19	26	25	28	22	27
	2	0	25	31	33	30	31	31
	3	0	28	54	53	52	55	54
	4	0	39	56	58	58	57	58
	5	0	55	73	74	73	76	72
	6	0	67	103	105	103	107	102
	7	0	78	113	117	117	118	117
Clay	**1**	0	4	13	13	12	13	13
	2	0	8	13	14	16	15	18
	3	0	13	20	20	21	21	21
	4	0	15	23	24	24	23	22
	5	0	19	26	28	29	28	28
	6	0	20	31	29	27	27	26
	7	0	27	33	30	30	31	32
Silty Clay	**1**	0	6	10	11	10	11	10
	2	0	10	11	11	11	12	13
	3	0	13	16	16	17	16	17
	4	0	14	17	18	19	18	18
	5	0	19	24	24	23	24	26
	6	0	17	21	21	21	23	22
	7	0	21	25	26	25	26	27

ภาคผนวก ฉ

สัดส่วนของจุลินทรีย์ในตริไฟอิงต่อจุลินทรีย์ทั้งหมด

ตารางผนวกที่ ฉ1 ปริมาณจุลินทรีย์ไนตริไฟอิงต่อจุลินทรีย์ทั้งหมดในคอลัมน์ ซี30

Textures	C30 (%)			
	Pre	AOB	NOB	Total
Limestone	0	4.12	3.22	7.34
Sand	0	4.65	5.24	9.89
Clay	0.33	0.18	0.14	0.32
Silty Clay	0.41	0.14	0.01	0.15
Total	0.74	9.09	8.61	17.7

ตารางผนวกที่ ฉ2 ปริมาณจุลินทรีย์ไนตริไฟอิงต่อจุลินทรีย์ทั้งหมดในคอลัมน์ ซี20

Textures	C20 (%)			
	Pre	AOB	NOB	Total
Limestone	0	3.32	4.95	8.27
Sand	0	5.21	2.32	7.53
Clay	0.33	0.47	0.16	0.63
Silty Clay	0.41	0.24	0.58	0.82
Total	0.74	9.24	8.01	17.25

ตารางผนวกที่ ฉ3 ปริมาณจุลินทรีย์ไนตริไฟอิงต่อจุลินทรีย์ทั้งหมดในคอลัมน์ ซี10

Textures	C10 (%)			
	Pre	AOB	NOB	Total
Limestone	0	3.32	3.11	6.43
Sand	0	3.11	4.28	7.39
Clay	0.33	1.32	0.53	1.85
Silty Clay	0.41	0.54	0.98	1.52
Total	0.74	8.29	8.9	17.19