การศึกษาถังกรองชนิดสารกรองเคลื่อนที่เพื่อบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ

นายวีระพันธ์ วัฒนวีรเดช

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2539

ISBN 974-634-426-9

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16495155

A STUDY OF THE MOVING BED FILTER FOR BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT

Mr.WEERAPUN WATTANAWEERADEJ

A Thesis Submitted in Partial Fullfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Environmental Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1996

ISBN 974-634-426-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาถังกรองชนิดสารกรองเคลื่อนที่เพื่อบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ
โดย	นายวีระพันธ์ วัฒนวีรเดช
ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพล สายพานิช

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.สันติ ถุงสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทธิรักษ์ สุจริตตานนท์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพล สายพานิช)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระ เกรอต)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

วีระพันธ์ วัฒนวีรเดช : การศึกษาถังกรองชนิดสารกรองเคลื่อนที่เพื่อบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ (A STUDY OF THE MOVING BED FILTER FOR BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT)
อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.สุรพล สายพานิช, 144 หน้า , ISBN 974-634-426-9

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้และออกแบบถังกรองชนิดสารกรองเคลื่อนที่สำหรับบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ ถังปฏิกิริยาที่ใช้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. ทดลองใช้ทรายขนาด 2 มม. ถึง 4 มม. และถ่านแอนทราไซท์ขนาด 0.8 มม. ถึง 2 มม. เป็นตัวกลางสารกรองเพื่อให้จุลินทรีย์ใช้เป็นที่สำหรับเกาะยึด ตัวกลางมีปริมาตร 30 ลิตร การเติมอากาศจะจ่ายด้วยเครื่องอัดอากาศผ่านหัวจ่ายลมละเอียด การหมุนเวียนล้างตัวกลางสารกรองจะกระทำทุก 6 ชั่วโมง สำหรับอัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลาง 2 และ 5 วัน และกระทำทุก 3 ชั่วโมง สำหรับอัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลาง 0.5 และ 1 วัน เพื่อจำลองการหมุนเวียนล้างตัวกลางแบบต่อเนื่อง

การทดลองในครั้งนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์และควบคุมค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1, 2, 5, และ 10 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ที่อัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลาง 2 วัน และใช้ค่าอัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลาง 0.5, 1, 2, และ 5 วัน ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน การทดลองทั้งหมดจะควบคุมให้ค่าภาระบรรทุกทางน้ำเท่ากับ 2 ม./ชม. ทำให้ค่าเวลาสัมผัสของน้ำเสียเมื่อไม่คิดตัวกลางเท่ากับ 51 นาที

ผลการทดลองพบว่าถังกรองชีวภาพสารกรองเคลื่อนที่ที่ใช้ถ่านแอนทราไซท์เป็นตัวกลางเมื่อควบคุมอัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลาง 2 วัน ระบบสามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน น้ำเสียซีโอดีเข้า 170 มก./ล. ได้ซีโอดีน้ำทิ้ง 15.70 มก./ล. ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี 91% ตะกอนแขวนลอยน้ำทิ้งไม่เกิน 14 มก./ล. ทำให้ไม่ต้องมีถังตกตะกอน และเมื่อภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน สามารถใช้อัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลาง 5 วัน น้ำเสียซีโอดีเข้า 70 มก./ล. ได้ซีโอดีน้ำทิ้ง 5 มก./ล. ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี 92% ตะกอนแขวนลอยน้ำทิ้ง 5.33 มก./ล. ระบบไม่ต้องมีถังตกตะกอน ระบบมีอัตราการทิ้งของแข็ง (observed yield) ประมาณ 0.45 กก.เอสเอส/กก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอายุตะกอนและอัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลางเป็นความสัมพันธ์แบบเส้นตรงดังสมการ $\theta_c = 0.273\ \theta_m + 0.0819$

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ปีการศึกษา 2538 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

บทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

C517657 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING
KEY WORD: MOVING BED FILTER / AERATED FILTER / BIOLOGICAL WASTEWATER TRETMENT
MR.WEERAPUN WATTANAWEERADEJ : A STUDY OF THE MOVING BED FILTER FOR BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT.
THESIS ADVISOR : ASSO.PROF. SURAPOL SAIPANICH ,Dr.Ing.,
144 pp. ISBN 974-634-426-9

The objectives of this study were to study the feasibility of applying the moving bed filter for biological wastewater treatment and to design such filter. Experiments were performed using a reactor with the diameter of 15 cm., the filter media for biomass attachment used were sand with the effective size in the range of 2 mm. to 4 mm. and antracite with the effective size in the range of 0.8 mm. to 2 mm. The volume of filter media used was 30 litres, aeration was carried out using an air compressor and fine bubble diffusors. Washing media were performed every 6 hours for the turn over rates of 2 and 5 days, and every 3 hours for the turn over rates of 0.5 and 1 days, to simulate the continuous washing of moving bed filter media.

For this experimental study, a synthetic wastewater was used with varied organic loading values. For the turn over rate of 2 days, organic loadings of 1,2,5 and 10 Kg.COD/m^3.d were used. And the organic loading of 2 Kg.COD/m^3.d was used for the filter turn over rates of 0.5,1,2 and 5 days. A constant hydraulic loading of 2 m/hr. was used for all experiments. Thus the empty bed contact time for wastewater was controlled to be 51 minutes.

The results of the experiments revealed that for the controlled turn over rate of 2 days, the moving bed filter reactor using anthracite as media was capable of treating wastewater with the organic loading of 5 Kg. COD/m^3-d and influent's COD of 170 mg/l to obtain the effluent's COD of 15.70 mg/l ; i.e. COD removal efficiency was 91% , and the effluent's suspended solids was less than 14 mg/l, thus, a clarifier tank was not required. And for the organic loading of 2 Kg.COD/m^3-d , the turn over rate of 5 days could be used to treat the influent's COD of 70 mg/l down to 5 mg/l i.e. COD removal efficiency was 92% , the effluent's suspended solids was 5.33 mg/l, thus, a clarifier tank was not required. The system observed yield was approximately 0.45 Kg.SS/Kg.CODremoved The relation between sludge age and turn over rate is a linear equation which can be written as; $\theta_c = 0.273\ \theta_m + 0.0819$.

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต วีรพันธ์ วัฒนวีราเดช
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา สุรพล สายพานิช
ปีการศึกษา 2538 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพล สายพานิช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ผู้แนะนำแนวทาง และข้อคิดเห็นต่างๆ แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ผู้ชี้แนะปัญหา และข้อบกพร่องให้แก่ผู้วิจัยมีแนวทางการทำวิจัยได้ชัดเจนขึ้น

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้ผู้วิจัยสามารถใช้ประโยชน์ร่วมในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ พี่ธวัชชัย สายสมร และโรงกรองน้ำบางเขน ผู้อุปการะถ่านแอนทราไซท์ เพื่อใช้เป็นตัวกลางสารกรองของการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณพี่ศักดิ์ชัย โอภาสวัตชัย ผู้ช่วยแนะนำและร่วมแก้ปัญหากับผู้วิจัยด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณพี่ๆ น้องๆ และเพื่อนๆ ทุกท่านที่ให้กำลังใจและความช่วยเหลือตลอด 24 ชั่วโมงด้วยดีตลอดมา

ขอแสดงความขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งช่วยอุดหนุนทุนปัจจัยแก่ผู้วิจัยสามารถใช้เป็นค่าใช้จ่ายดำเนินการวิจัยให้สามารถสำเร็จลุล่วงโดยดี

สุดท้ายนี้คุณงามความดีหรือประโยชน์ทั้งหลายของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอน้อมมอบให้แก่คุณพ่อ คุณแม่ ซึ่งเป็นผู้มีพระคุณสูงสุดของผู้วิจัย

สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย		ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		จ
กิตติกรรมประกาศ		ฉ
สารบัญ		ช
สารบัญตาราง		ญ
สารบัญรูป		ฏ
บทที่ 1	บทนำ	1
	1.1 แนวความคิดถังกรองชนิดสารกรองเคลื่อนที่	1
	1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	2
	1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
บทที่ 2	ทฤษฎี	4
	2.1 หลักการทำงานของถังกรองชนิดสารกรองเคลื่อนที่ และถังกรองชีวภาพเติมอากาศ	4
	2.2 กลไกการกำจัดสารอินทรีย์โดยกระบวนการฟิลม์ชีวภาพ	7
	2.3 การถ่ายเทมวลสารอาหารและออกซิเจน	9
	2.4 ความหนาประสิทธิผล (effective thickness)	10
	2.5 สภาพขาดแคลนสารอินทรีย์และออกซิเจน	11
	2.6 การเกาะและการหลุด (growth and slaughing of the biofilm)	14
	2.7 องค์ประกอบทางเคมีของฟิลม์ชีวภาพ	14
	2.8 กลไกกรองที่มีผลต่อถังกรองชนิดสารกรองเคลื่อนที่	15
	2.9 องค์ประกอบที่มีผลต่อการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียโดยถังกรองชนิดสารกรองเคลื่อนที่	23
	2.10 ข้อดีและข้อเสียของระบบถังกรองชีวภาพเติมอากาศ	28
	2.10.1 ข้อดีของระบบถังกรองชีวภาพเติมอากาศ	28
	2.10.2 ข้อเสียของระบบ	28
	2.11 รายงานและผลการวิจัยที่เกี่ยวกับระบบถังกรองชีวภาพเติมอากาศ	29
บทที่ 3	การดำเนินการวิจัย	39
	3.1 แผนการวิจัย	39
	3.2 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง	41
	3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	42
	3.3.1 ถังปฏิกิริยาระบบถังกรองชนิดสารกรองเคลื่อนที่	42
	3.3.2 ตัวกลางสารกรอง (media)	45

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
3.3.3	ถังพักน้ำเสียเข้มข้น	45
3.3.4	เครื่องสูบน้ำเสียชนิดไดอะแฟรม (diaphragm pump)	45
3.3.5	ถังจ่ายน้ำประปาอัตราการไหลคงที่ (constant head tank)	45
3.3.6	ถังล้างตัวกลางสารกรอง	45
3.3.7	ถังเก็บน้ำล้างตัวกลางสารกรอง	46
3.3.8	เครื่องเติมอากาศ	46
3.3.9	หัวเติมอากาศ	46
3.4	การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ	46
3.4.1	การเก็บตัวอย่างน้ำเสีย	46
3.4.2	การล้างตัวกลางสารกรอง และการวิเคราะห์น้ำล้างตัวกลางสารกรอง	47
3.4.3	การวิเคราะห์หาค่ามวลจุลินทรีย์ทั้งหมดของระบบ	48
3.4.4	เทคนิคการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ	49
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์	50
4.1	การเพาะเลี้ยงฟิล์มชีวภาพและเริ่มต้นเดินระบบ	50
4.2	การทดลองหาตัวกลาง (media) ที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการทดลอง	50
4.2.1	การทดลองโดยใช้ทรายขนาด 2 มม. ถึง 4 มม. เป็นตัวกลางสารกรอง	50
4.2.2	การทดลองโดยใช้ถ่านแอนทราไซท์ ขนาด 0.80 มม. ถึง 2.0 มม. เป็นตัวกลางสารกรอง	51
4.3	ผลของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่อการบำบัดน้ำเสีย	54
4.3.1	ลักษณะทางกายภาพ	54
4.3.2	ออกซิเจนละลายน้ำ, ดีโอ (DO)	58
4.3.3	พีเอช (pH)	61
4.3.4	ซีโอดี และประสิทธิภาพการกำจัด	63
4.3.5	ของแข็งแขวนลอยน้ำทิ้ง	67
4.3.6	ของแข็งที่เพิ่มขึ้นและทิ้ง	69
4.4	ผลการทดลองเมื่อค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 10 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และควบคุมอัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลางเท่ากับ 2 วัน	70
4.4.1	ลักษณะทางกายภาพ	70
4.4.2	ออกซิเจนละลายน้ำ, ดีโอ (DO)	73
4.4.3	พีเอช (pH)	73

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
	4.4.4 ซีโอดี และประสิทธิภาพการกำจัด	74
	4.4.5 ของแข็งแขวนลอยน้ำทิ้ง	74
	4.4.6 แนวความคิดในการแก้ปัญหา	74
	4.5 ผลของอัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลางต่อการบำบัดน้ำเสีย	75
	4.5.1 ลักษณะทางกายภาพ	75
	4.5.2 ออกซิเจนละลายน้ำ, ดีโอ (DO)	79
	4.5.3 พีเอช (pH)	82
	4.5.4 ซีโอดี และประสิทธิภาพการกำจัด	84
	4.5.5 ของแข็งแขวนลอยน้ำทิ้ง	87
	4.5.6 ของแข็งที่เพิ่มขึ้นและทิ้ง	87
	4.6 อัตราการทิ้งของแข็ง (observed yield)	89
	4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง อายุตะกอนกับอัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลาง	90
	4.8 ค่าคงที่ทางจลน์ศาสตร์ (kinetic coefficients)	93
	4.9 ลักษณะเชื้อจุลินทรีย์ที่พบในระบบ	97
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	102
	5.1 สรุปผลการวิจัย	102
	5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป	103
รายการอ้างอิง		104
ภาคผนวก ก.	วิธีคำนวณคุณสมบัติตัวกลาง	109
ภาคผนวก ข.	ข้อมูลดิบทางตัวแปรต่าง ๆ	112
ภาคผนวก ค.	วิธีคำนวณหามวลจุลินทรีย์ทั้งหมดในถังปฏิกิริยา	127
ประวัติผู้วิจัย		129

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	แสดงผลของขนาดตัวกลางที่มีต่อลักษณะน้ำทิ้ง.....	32
ตารางที่ 2.2	แสดงค่าความสามารถในการเก็บตะกอนแขวนลอยของตัวกลางที่ขนาดต่าง ๆ.....	32
ตารางที่ 2.3	แสดงพื้นที่ปริมาตร และพลังงานที่ต้องการสำหรับกระบวนการแบบไนตริฟิเคชั่นในระบบบำบัดน้ำเสียแบบต่าง ๆ.....	37
ตารางที่ 3.1	แสดงค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ และค่าอัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลางสารกรองที่ใช้ในการทดลอง.....	40
ตารางที่ 3.2	แสดงส่วนประกอบน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ	41
ตารางที่ 3.3	แสดงอัตราการสูบจ่ายน้ำเสียสังเคราะห์เข้มข้น และการเติมน้ำประปาเจือจาง ณ ค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ โดยควบคุมค่าภาระบรรทุกทางน้ำ เท่ากับ 2 ม./ชม. (850 ลิตร/วัน).....	42
ตารางที่ 3.4	แสดงการควบคุมปริมาณ และความถี่ในการล้างตัวกลางเพื่อให้ได้อัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลางสารกรองตามต้องการ.....	48
ตารางที่ 4.1	แสดงค่าดีโอตามความลึกของถังปฏิกิริยาและตำแหน่งน้ำทิ้งที่สภาวะคงตัว (ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ = 1, 2, 5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน อัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลาง = 2 วัน).....	61
ตารางที่ 4.2	แสดงค่าพีเอชตามความลึกของถังปฏิกิริยา และตำแหน่งน้ำทิ้งที่สภาวะคงตัว (ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ = 1, 2, 5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน อัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลาง = 2 วัน).....	63
ตารางที่ 4.3	แสดงค่าซีโอดี ตามความลึกของถังปฏิกิริยาและตำแหน่งน้ำทิ้งที่สภาวะคงตัวและประสิทธิภาพการกำจัด (ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ = 1, 2, 5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน อัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลาง = 2 วัน).....	64
ตารางที่ 4.4	แสดงปริมาณของแข็งแขวนลอยน้ำทิ้งของถังปฏิกิริยาที่สภาวะคงตัว (ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ = 1, 2, 5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน อัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลาง = 2 วัน).....	67
ตารางที่ 4.5	แสดงปริมาณของแข็งแขวนลอยน้ำทิ้ง, ของแข็งแขวนลอยน้ำล้าง และของแข็งที่ทิ้งทั้งหมด และค่าอัตราการเกิดตะกอนที่สภาวะคงตัว (ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ = 1, 2, 5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน อัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลาง = 2 วัน).....	69

สารบัญตาราง (ต่อ)

			หน้า
ตารางที่	4.6	แสดงค่าดีโอและค่าพีเอชตามความลึกของถังปฏิกิริยาและตำแหน่งน้ำทิ้งที่วันสุดท้ายของการเดินระบบเมื่อภาระบรรทุกสารอินทรีย์ = 10 กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วันและอัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลาง=2 วัน).....	73
ตารางที่	4.7	แสดงค่าดีโอตามความลึกของถังปฏิกิริยาและตำแหน่งน้ำทิ้งที่สภาวะคงตัว (อัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลาง = 0.5, 1, 2, 5 วัน ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ = 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน).....	79
ตารางที่	4.8	แสดงค่าพีเอชตามความลึกของถังปฏิกิริยา และตำแหน่งน้ำทิ้งที่สภาวะคงตัว (อัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลาง = 0.5,1,2,5 วัน ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ = 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน).....	82
ตารางที่	4.9	แสดงค่าซีโอดี ตามความลึกของถังปฏิกิริยาและตำแหน่งน้ำทิ้งที่สภาวะคงตัว และประสิทธิภาพการกำจัด (อัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลาง = 0.5, 1, 2, 5 วัน ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ = 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	84
ตารางที่	4.10	แสดงปริมาณของแข็งแขวนลอยน้ำทิ้ง, ของแข็งแขวนลอยน้ำล้าง และของแข็งที่ทิ้งทั้งหมด และค่าอัตราการทิ้งของแข็งที่สภาวะคงตัว (อัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลาง = 0.5, 1, 2, 5 วัน ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ = 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม- วัน).....	89
ตารางที่	4.11	แสดงความสัมพันธ์อัตราการทิ้งของแข็งกับค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ ของทุกการทดลอง (ยกเว้นภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 10 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน).....	90
ตารางที่	4.12	แสดงการคำนวณหาค่าอายุตะกอนที่อัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลางต่าง ๆ	92
ตารางที่	4.13	แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่สภาวะคงตัวของการทดลองโดยควบคุมภาระบรรทุกสารอินทรีย์คงที่เท่ากับ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ภาระบรรทุกทางน้ำเท่ากับ 2 ม./ชม. = 850 ลิตร/วัน.....	95
ตารางที่	4.14	แสดงลักษณะจุลินทรีย์ที่พบโดยกล้องจุลทัศน์.....	97

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	แสดงตัวอย่างถังกรองชีวภาพเติมอากาศแบบไหลลง (Degrémont, 1991)	5
รูปที่ 2.2	แสดงส่วนประกอบของถังกรองชีวภาพแบบสารกรองเคลื่อนที่ (R.D.Tyagi, 1990).....	6
รูปที่ 2.3	แสดงปรากฏการณ์พื้นฐานที่เกิดขึ้นของปฏิสัมพันธ์ระหว่างสารอินทรีย์ในน้ำและฟิล์มชีวภาพบนตัวกลาง (E.Arvin และ P.Harremoes, 1990 อ้างจาก Harremoesและ Gonenc, 1983).....	8
รูปที่ 2.4	ลักษณะชั้นฟิล์มชีวภาพในกรณีความเข้มข้นของสารอินทรีย์และออกซิเจน....	12
รูปที่ 2.5	สภาพขาดแคลนสารอินทรีย์ และ/หรือออกซิเจนในระบบกำจัดน้ำเสียแบบใช้ฟิล์มชีวภาพ.....	13
รูปที่ 2.6	แสดงช่วงขนาดของสารแขวนลอยชนิดต่าง ๆ.....	18
รูปที่ 2.7	แสดงขนาดของช่องว่างระหว่างเม็ดทรายและสารแขวนลอย.....	18
รูปที่ 2.8	แสดงระบบการเติมอากาศในถังกรองชีวภาพเติมอากาศแบบต่าง ๆ (Degremont, 1991).....	27
รูปที่ 3.1	แสดงรายละเอียดของถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง.....	43
รูปที่ 3.2	แสดงการติดตั้งและประกอบชุดทำการทดลอง.....	44
รูปที่ 4.1	แสดงส่วนบนของถังกรองชีวภาพที่ใช้ทรายเป็นตัวกลางสารกรอง.....	52
รูปที่ 4.2	แสดงส่วนล่างของถังกรองชีวภาพที่ใช้ทรายเป็นตัวกลางสารกรอง.....	52
รูปที่ 4.3	แสดงเปรียบเทียบการใช้ทราย และถ่านแอนทราไซท์เป็นตัวกลางสารกรองภายในถังปฏิกิริยา.....	53
รูปที่ 4.4	แสดงเปรียบเทียบการใช้ทราย และถ่านแอนทราไซท์เป็นตัวกลางสารกรองภายในถังปฏิกิริยา.....	53
รูปที่ 4.5	กราฟแสดงผลการทดลองเมื่อ ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ = 1 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และอัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลาง = 2 วัน.....	55
รูปที่ 4.6	กราฟแสดงผลการทดลองเมื่อ ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ = 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และอัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลาง = 2 วัน.....	56
รูปที่ 4.7	กราฟแสดงผลการทดลองเมื่อ ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ = 5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และอัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลาง = 2 วัน.....	57
รูปที่ 4.8	แสดงค่าดีโอตามความลึกของถังปฏิกิริยาและตำแหน่งน้ำทิ้ง (ภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 1, 2, 5 และ 10 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ที่อัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลางเท่ากับ 2 วัน).....	59

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดีโอน้ำทิ้งกับค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่อัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลางเท่ากับ 2 วัน..... 60

รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชน้ำทิ้งกับค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่อัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลางเท่ากับ 2 วัน..... 60

รูปที่ 4.11 แสดงค่าพีเอชตามความลึกของถังปฏิกิริยาและตำแหน่งน้ำทิ้ง (ภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 1,2,5 และ 10 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ที่อัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลางเท่ากับ 2 วัน..... 62

รูปที่ 4.12 แสดงค่าซีโอดีตามความลึกของถังปฏิกิริยาและตำแหน่งน้ำทิ้ง (ภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 1,2,5 และ 10 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ที่อัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลางเท่ากับ 2 วัน..... 65

รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างซีโอดีน้ำทิ้ง และค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่อัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลาง = 2 วัน..... 66

รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่อัตราหมุนเวียนล้างตัวกลาง = 2 วัน..... 66

รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างของแข็งแขวนลอยน้ำทิ้งกับค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆที่อัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลางเท่ากับ 2 วัน..... 68

รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างของแข็งแขวนลอยน้ำทิ้ง, ของแข็งแขวนลอยน้ำล้าง, มวลตะกอนที่ทิ้งทั้งหมดกับค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆที่อัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลาง = 2 วัน..... 68

รูปที่ 4.17 กราฟแสดงผลการทดลองเมื่อ ภาระบรรทุกสารอินทรีย์= 10 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และอัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลาง = 2 วัน..... 71

รูปที่ 4.18 แสดงชั้นปุยฟล็อคสีขาวอยู่เหนือตัวกลางแอนทราไซท์..... 72

รูปที่ 4.19 แสดงชั้นปุยฟล็อคสีขาวอยู่เหนือตัวกลางแอนทราไซท์..... 72

รูปที่ 4.20 กราฟแสดงผลการทดลองเมื่อ ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ = 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และอัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลาง = 0.5 วัน..... 76

รูปที่ 4.21 กราฟแสดงผลการทดลองเมื่อ ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ = 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และอัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลาง = 1.0 วัน..... 77

รูปที่ 4.22 กราฟแสดงผลการทดลองเมื่อ ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ = 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และอัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลาง = 5 วัน..... 78

รูปที่ 4.23 แสดงค่าดีโอตามความลึกของถังปฏิกิริยาและตำแหน่งน้ำทิ้ง (อัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลางเท่ากับ 0.5, 1, 2 และ 5 วัน ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 2 กก.)..... 80

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.24	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดีโอน้ำทิ้งกับอัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลางต่าง ๆที่ค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ = 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน.....	81
รูปที่ 4.25	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชน้ำทิ้งกับอัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลางที่ค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ = 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน.....	81
รูปที่ 4.26	แสดงค่าพีเอชตามความลึกของถังปฏิกิริยาและตำแหน่งน้ำทิ้ง (อัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลางเท่ากับ 0.5, 1, 2 และ 5 วัน ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน).....	83
รูปที่ 4.27	แสดงค่าซีโอดีตามความลึกของถังปฏิกิริยาและตำแหน่งน้ำทิ้ง (อัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลางเท่ากับ 0.5, 1, 2 และ 5 วัน ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 2 กก. ซีโอดี/ลบ.ม.).....	85
รูปที่ 4.28	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างซีโอดีน้ำทิ้ง และอัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลางต่าง ๆ ที่ค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ = 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน.....	86
รูปที่ 4.29	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี และอัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลางที่ค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ = 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน....	86
รูปที่ 4.30	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างของแข็งแขวนลอยน้ำทิ้งกับอัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลางต่าง ๆ ที่ค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ = 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน	88
รูปที่ 4.31	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างของแข็งแขวนลอยน้ำทิ้ง, ของแข็งแขวนลอยน้ำล้าง, มวลตะกอนที่ทิ้งทั้งหมดกับอัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลางต่าง ๆ ที่ค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ = 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน.....	88
รูปที่ 4.32	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทิ้งของแข็งกับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ	91
รูปที่ 4.33	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอายุตะกอนกับอัตราการการหมุนเวียนล้างตัวกลาง.....	91
รูปที่ 4.34	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับอายุตะกอนกับอัตราการบริโภคสารอินทรีย์ต่อมวลจุลินทรีย์ในระบบ.....	96
รูปที่ 4.35	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนกลับของอัตราการบริโภคสารอินทรีย์ต่อมวลจุลินทรีย์ทั้งหมดในระบบกับส่วนกลับของความเข้มข้นซีโอดีน้ำทิ้ง.....	96
รูปที่ 4.36	แสดงเชื้อจุลินทรีย์แขวนลอยต่าง ๆ ที่พบในถังปฏิกิริยา.....	98
รูปที่ 4.37	แสดงเชื้อจุลินทรีย์แขวนลอยต่าง ๆ ที่พบในถังปฏิกิริยา.....	98
รูปที่ 4.38	แสดงเชื้อจุลินทรีย์แขวนลอยต่าง ๆ ที่พบในถังปฏิกิริยา.....	99
รูปที่ 4.39	แสดงเชื้อจุลินทรีย์แขวนลอยต่าง ๆ ที่พบในถังปฏิกิริยา.....	99
รูปที่ 4.40	แสดงเชื้อจุลินทรีย์และเมือกที่เกาะติดอยู่บนผิวตัวกลางที่พบในถังปฏิกิริยา	100

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.41	แสดงเชื้อจุลินทรีย์และเมือกที่เกาะติดอยู่บนผิวตัวกลางที่พบในถังปฏิกิริยา	100
รูปที่ 4.42	แสดงเชื้อจุลินทรีย์และเมือกที่เกาะติดอยู่บนผิวตัวกลางที่พบในถังปฏิกิริยา	101
รูปที่ 4.43	แสดงเชื้อจุลินทรีย์และเมือกที่เกาะติดอยู่บนผิวตัวกลางที่พบในถังปฏิกิริยา	101