ถังกรองชีวภาพแบบไหลลงที่ใช้เปลือกหอยเป็นตัวกลางกรอง

นางสาววชิรา สันพนวัฒน์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2543
ISBN 974-13-0017-4
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A DOWNFLOW BIOFILTER USING SEA SHELLS AS FILTER MEDIA

Miss Wachira Sanpanawat

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Environmental Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 2000
ISBN 974-13-0017-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ถังกรองชีวภาพแบบไหลลงที่ใช้เปลือกหอยเป็นตัวกลางกรอง
โดย	นางสาววชิรา สันพนวัฒน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย พรรณสวัสดิ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ สุรี ขาวเธียร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย พรรณสวัสดิ์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมกุล)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วชิรา สันพนวัฒน์ : ถังกรองชีวภาพแบบไหลลงที่ใช้เปลือกหอยเป็นตัวกลางกรอง.
(A DOWNFLOW BIOFILTER USING SEA SHELLS AS FILTER MEDIA)
อ. ที่ปรึกษา : ศ.ดร.ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 94 หน้า. ISBN 974-13-0017-4.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยถังกรองชีวภาพแบบไหลลง ที่ใช้เปลือกหอย ขนาด 5–10 มิลลิเมตร ความหนาแน่น 2.52 กรัม/ลบ.ซม. เป็นตัวกลาง น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีซีโอดีประมาณ 300 มก./ล. และควบคุมอัตราส่วน ซีโอดี:ไนโตรเจน:ฟอสฟอรัส ให้ใกล้เคียงกับน้ำเสียชุมชนหรือประมาณ 300:40:10 ตลอดการทดลอง

การทดลองแบ่งออกเป็น 5 ชุด โดยชุดที่ 1 และ 2 เป็นการทดลองเพื่อหาความสูงของชั้นตัวกลางที่เหมาะสม โดยความสูงของชั้นตัวกลางกรองในขั้นตอนนี้เป็น 2 และ 1.5 เมตร ตามลำดับ และใช้ความเร็วการไหลลงของน้ำเสียเท่ากับ 0.62 ม./ชม. พบว่า ถ้าต้องการควบคุมระบบให้เดินได้ระยะเวลานานขึ้นและ/หรือสามารถรับภาระบรรทุกอินทรีย์เพิ่มขึ้นได้ต้องใช้ความสูงของชั้นตัวกลางกรอง 1.5 เมตร ซึ่งยังคงประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีไว้ได้ที่ร้อยละ 97 และ 95 ตามลำดับ ประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็นร้อยละ 96 และ 90 ตามลำดับ และประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดร้อยละ 30 และ 28 ตามลำดับ ส่วนชุดที่ 3 – 5 ใช้ความสูงของชั้นตัวกลางกรอง 1.5 เมตร แต่แปรผันความเร็วการไหลลงของน้ำเสียเพิ่มขึ้นเป็น 1.08, 1.54 และ 2 ม./ชม. ตามลำดับ ได้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเท่ากับ 95, 88 และ 80 ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็นร้อยละ 54, 24 และ 19 ตามลำดับ และประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดร้อยละ 23, 23 และ 18 ตามลำดับ แสดงว่าการเพิ่มภาระบรรทุกอินทรีย์จาก 3 ถึง 10 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ยังคงรักษาการกำจัดซีโอดีสูงๆไว้ได้ แต่อัตราการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดลดลงอย่างเห็นได้ชัด

สรุปได้ว่าสามารถใช้เปลือกหอยเป็นตัวกลางในถังกรองชีวภาพในการกำจัดซีโอดีได้ เช่นเดียวกับการใช้ตัวกลางชนิดอื่น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2543

4070521221 : MAJOR : ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD : BIOFILTRATION / FILTER MEDIA / SEA SHELLS / WASTEWATER TREATMENT

WACHIRA SANPANAWAT : A DOWNFLOW BIOFILTER USING SEA SHELLS AS FILTER MEDIA. THESIS ADVISOR : PROF.THONGCHAI PANSWAD,Ph.D. 94 pp. ISBN 974-13-0017-4.

A feasibility study of wastewater treatment by downflow biofilter using sea shells as filter media was investigated. The experiments were performed on 5-10 mm diameter sea shells with 2.52 g/cm^3 density and a synthetic wastewater with 300 mg/l COD and COD:N:P controlled ratio of 300:40:10.

The experiments were carried out in five sets. The first and the second sets were to find out the appropriate media depth to be subsequently tested in the third to fifth sets. The hydraulic loading rate of the first 2 sets tested at 1.5 and 2.0 m depth was 0.62 m/hr. The results from these tests showed that a more efficient depth of filter media should be 1.5 m. The COD removal efficiencies were 97 and 95 percent, respectively. The TKN removal efficiencies were 96 and 90 percent, respectively, while the TN removal efficiencies were 30 and 28 percent, respectively. The subsequent last 3 sets were tested at 1.5 m media depth and at the hydraulic loading rates of 1.08, 1.54 and 2 m/hr. The COD removal efficiencies were 95, 88 and 80 percent, respectively. The TKN removal efficiencies were 54, 24 and 19 percent, respectively, whereas the TN removal efficiencies were 23, 23 and 18 percent, respectively. This indicates that the increase of organic loading rates from 3 to 10 kgCOD/m^3-d did not much affect the system efficiency and the process could still produce an efficient COD removal, but the TN reduction rate was clearly reduced.

In conclusion, sea shells can be used as filter media in biofilter reators.

Department of Environmental Engineering Student's signature

Field of Environmental Engineering Advisor's signature

Academic year 2000

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิรักษ์ สุจริตตานนท์ ที่กรุณาให้หัวข้องานวิจัยแนวคิดวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย พรรณสวัสดิ์ เป็นอย่างสูงที่กรุณาให้คำปรึกษาในการทำงานวิจัย และเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์แทน รศ.ดร.สุทธิรักษ์ สิจริตตานนท์ ผู้ล่วงลับ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนถ่ายทอดความรู้ทางวิชาการต่างๆสู่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนอุดหนุนในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ธุรการและเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทุกท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณวัฒนาพร ฉิมเรศ คุณปรีชาวิทย์ รอดรัตน์ เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือแก่ผู้วิจัยเป็นอย่างดี

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้คำสั่งสอน และคอยสนับสนุนในทุกด้านแก่ผู้วิจัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ

กิตติกรรมประกาศ.....ฉ

สารบัญ.....ช

สารบัญรูป.....ฌ

สารบัญตาราง.....ฎ

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 บทนำ.....1

1.2 วัตถุประสงค์.....2

1.3 ขอบเขตการวิจัย.....2

บทที่ 2 ทฤษฎีและแนวความคิด.....3

2.1 หลักการทำงานของการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ถังกรองชีวภาพแบบไหลลง.....3

2.2 กลไกการกำจัดสารอินทรีย์โดยกระบวนการฟิล์มชีวภาพ.....5

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการย่อยสลายทางชีววิทยาแบบใช้ออกซิเจน.....6

2.4 ค่าสัมประสิทธิ์แพร่ซึม.....9

2.5 ความหนาประสิทธิผล.....10

2.6 องค์ประกอบที่มีผลต่อการทำงานของถังกรองชีวภาพแบบไหลลง.....11

2.7 ข้อดีและข้อเสียของถังกรองชีวภาพแบบไหลลง.....14

2.8 รายงานและผลการวิจัยที่เกี่ยวกับระบบถังกรองชีวภาพแบบไหลลง.....15

บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย.....21

3.1 แผนการวิจัย.....21

3.2 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง.....22

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....23

3.4 การเตรียมการทดลอง.....26

3.5 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ.....26

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....30
4.1 การดำเนินการทดลอง.....30
4.2 ผลการทดลองแต่ละภาระบรรทุกอินทรีย์.....30
4.2.1 ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.22 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน ที่ความสูงชั้นกรอง 2 เมตร.....31
4.2.2 ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.96 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน ที่ความสูงชั้นกรอง 1.5 เมตร.....37
4.2.3 การเลือกระดับความสูงของตัวกลางที่เหมาะสม.....44
4.2.4 ภาระบรรทุกอินทรีย์ 5.18 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน ที่ความสูงชั้นกรอง 1.5 เมตร.....47
4.2.5 ภาระบรรทุกอินทรีย์ 7.40 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน ที่ความสูงชั้นกรอง 1.5 เมตร.....53
4.2.6 ภาระบรรทุกอินทรีย์ 9.62 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน ที่ความสูงชั้นกรอง 1.5 เมตร.....59
4.3 ผลของภาระบรรทุกอินทรีย์ต่อซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัด.....65
4.4 ผลของภาระบรรทุกอินทรีย์ต่อไนโตรเจนและประสิทธิภาพการกำจัด.....67
4.5 ผลของภาระบรรทุกอินทรีย์ต่อของแข็งแขวนลอย.....71

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....73
5.1 สรุปผลการทดลอง.....74
5.2 ข้อเสนอแนะ.....74
รายการอ้างอิง.....75
ภาคผนวก.....77
ภาคผนวก ก การคำนวณ.....78
ภาคผนวก ข ผลการทดลองที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ต่าง ๆ.....82
ภาคผนวก ค ผลการทดลองที่สภาวะคงที่ที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ต่าง ๆ.....88
ภาคผนวก ง ความดันสูญเสียและระดับน้ำในถังปฏิกิริยา ที่ระดับความสูงชั้นตัวกลาง 2 และ 1.5 เมตร.....92
ประวัติผู้เขียน.....94

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียก่อนเข้าสู่ถังกรองชีวภาพ.....3
รูปที่ 2.2 ชนิดของถังกรองชีวภาพ.....4
รูปที่ 2.3 ลักษณะชั้นเมือกจุลินทรีย์.....11
รูปที่ 3.1 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....24
รูปที่ 3.2 เปลือกหอยที่ใช้เป็นตัวกลางกรอง.....25
รูปที่ 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....29
รูปที่ 4.1 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.22 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน
และความสูงชั้นตัวกลาง 2 ม.....32
รูปที่ 4.2 ของแข็งแขวนลอยที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.22 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน
และความสูงชั้นตัวกลาง 2 ม.....32
รูปที่ 4.3 ทีเคเอ็นและประสิทธิภาพการกำจัดที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.22 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน
และความสูงชั้นตัวกลาง 2 ม.....34
รูปที่ 4.4 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ
ที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.22 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วันและความสูงชั้นตัวกลาง 2 ม.....34
รูปที่ 4.5 พีเอชที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.22 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน
และความสูงชั้นตัวกลาง 2 ม.....37
รูปที่ 4.6 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.96 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน
และความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.....38
รูปที่ 4.7 ของแข็งแขวนลอยที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.96 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน
และความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.....38
รูปที่ 4.8 ทีเคเอ็นและประสิทธิภาพการกำจัดที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.96 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน
และความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.....40
รูปที่ 4.9 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ
ที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.96 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วันและความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.....40
รูปที่ 4.10 พีเอชที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.96 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน
และความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.....44
รูปที่ 4.11 ความดันสูญเสียและระดับน้ำในถังปฏิกิริยา
ที่ระดับความสูงชั้นตัวกลาง 2 และ 1.5 เมตร.....46

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.12 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 5.18 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.....48
รูปที่ 4.13 ของแข็งแขวนลอยที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 5.18 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.....48
รูปที่ 4.14 ทีเคเอ็นและประสิทธิภาพการกำจัดที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 5.18 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.....50
รูปที่ 4.15 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ ที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 5.18 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วันและความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.....50
รูปที่ 4.16 พีเอชที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 5.18 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.....53
รูปที่ 4.17 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 7.40 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.....55
รูปที่ 4.18 ของแข็งแขวนลอยที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 7.40 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.....55
รูปที่ 4.19 ทีเคเอ็นและประสิทธิภาพการกำจัดที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 7.40 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.....57
รูปที่ 4.20 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ ที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 7.40 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วันและความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.....57
รูปที่ 4.21 พีเอชที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 7.40 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.....59
รูปที่ 4.22 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 9.62 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.....62
รูปที่ 4.23 ของแข็งแขวนลอยที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 9.62 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.....62
รูปที่ 4.24 ทีเคเอ็นและประสิทธิภาพการกำจัดที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 9.62 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.....63
รูปที่ 4.25 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ ที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 9.62 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วันและความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.....63

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.26 พีเอชที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 9.62 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน
และความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.....65
รูปที่ 4.27 ซีโอดีน้ำออกที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ต่างกันและความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.....66
รูปที่ 4.28 ไนโตรเจนที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ต่างกันและความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.....70
รูปที่ 4.29 ของแข็งแขวนลอยรวมที่ทิ้งในแต่ละวันที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ต่างกัน
และความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.....71

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้าที่

ตารางที่ 2.1 แสดงผลของขนาดตัวกลางที่มีต่อลักษณะน้ำทิ้ง.....17
ตารางที่ 2.2 แสดงค่าความสามารถในการเก็บของแข็งแขวนลอย
ของตัวกลางที่ขนาดต่าง ๆ.....17
ตารางที่ 3.1 แผนการทดลอง.....21
ตารางที่ 3.2 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์
ที่มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร.....23
ตารางที่ 3.3 แผนการเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ.....28
ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่าง ๆ ที่สถานะคงตัว
ที่ความสูงชั้นกรอง 2 เมตร.....35
ตารางที่ 4.2 ค่าซีโอดีตามลำดับความสูงของชั้นตัวกลาง.....36
ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่าง ๆ ที่สถานะคงตัว
ที่ความสูงชั้นกรอง 1.5 เมตร.....42
ตารางที่ 4.4 ค่าซีโอดีตามลำดับความสูงของชั้นตัวกลาง.....43
ตารางที่ 4.5 คุณภาพของน้ำออกที่ความเร็วของการไหล 0.62 ม./ชม.....44
ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ทีเคเอ็นและไนโตรเจนทั้งหมด
ที่ความเร็วของการไหล 0.62 ม./ชม.....45
ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่าง ๆ ที่สถานะคงตัว
ที่ความสูงชั้นกรอง 1.5 เมตร.....51
ตารางที่ 4.8 ค่าซีโอดีตามลำดับความสูงของชั้นตัวกลาง.....52
ตารางที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่าง ๆ ที่สถานะคงตัว
ที่ความสูงชั้นกรอง 1.5 เมตร.....56
ตารางที่ 4.10 ค่าซีโอดีตามลำดับความสูงของชั้นตัวกลาง.....58
ตารางที่ 4.11 ค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่าง ๆ ที่สถานะคงตัว
ที่ความสูงชั้นกรอง 1.5 เมตร.....63
ตารางที่ 4.12 ค่าซีโอดีตามลำดับความสูงของชั้นตัวกลาง.....64
ตารางที่ 4.13 ค่าเฉลี่ยซีโอดีที่สถานะคงตัวของการทดลอง
ที่ความสูงชั้นกรอง 1.5 เมตร.....65
ตารางที่ 4.14 ค่าเฉลี่ยไนโตรเจนที่สถานะคงตัวของการทดลอง
ที่ความสูงชั้นกรอง 1.5 เมตร.....67

สารบัญตาราง(ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.15 การดูดมวลไนโตรเจนที่ความสูงชั้นกรอง 1.5 เมตร.....69
ตารางที่ 4.16 ค่าเฉลี่ยของแข็งแขวนลอยที่สถานะคงตัวของการทดลอง
ที่ความสูงชั้นกรอง 1.5 เมตร.....71

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

ในอดีตได้มีความพยายามที่จะพัฒนากระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ เพื่อที่จะลดขนาดของพื้นที่ในการก่อสร้าง รวมถึงการประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและประหยัดพลังงานด้วย

ระบบถังกรองชีวภาพเติมอากาศ (Biological Aerated Filter : BAF) เป็นระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพคล้ายกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวดเต็ดสลัดจ์ ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากให้ผลที่ดีแต่ต้องการใช้พื้นที่มาก จึงไม่เหมาะกับบริเวณที่ต้องจำกัดพื้นที่ แต่ถังกรองชีวภาพเติมอากาศสามารถใช้กับบริเวณที่มีพื้นที่จำกัดได้

จากการศึกษาพบว่าระบบบีเอเอฟ สามารถบำบัดน้ำเสียได้ดี และยังใช้พื้นที่ในการก่อสร้างน้อยกว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวดเต็ดสลัดจ์ (R.Pujol, 1992 อ้างถึงใน BEBIN *et al*., 1975 ; BLANC, 1975 ; GRASMICK *et al*., 1979 ; LEGLISE, 1980) เนื่องจากไม่ต้องมีถังตกตะกอนขั้นที่ 2 ระบบดังกล่าวเป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบจุลินทรีย์เกาะติดตัวกลาง โดยมีการฉีดอากาศเข้าที่ด้านล่างของชั้นตัวกลางเพื่อให้ออกซิเจนกับระบบ เมื่อเดินระบบไปได้ระยะหนึ่งต้องหยุดเพื่อทำการล้างย้อน(back wash)เพื่อกำจัดของแข็งแขวนลอยซึ่งสะสมในชั้นตัวกลาง น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีของแข็งแขวนลอยหลุดออกมาน้อย ทำให้ได้น้ำทิ้งค่อนข้างใส จึงไม่ต้องมีถังตกตะกอนขั้นที่สองซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของปัญหาต่าง ๆ ในกรณีที่ใช้ระบบแอกทิเวดเต็ดสลัดจ์ เช่น ปัญหาของแข็งแขวนลอยไม่จมตัว ส่วนนี้จึงเป็นข้อดีของระบบถังกรองชีวภาพเติมอากาศ

การวิจัยถังกรองชีวภาพเติมอากาศนี้เป็นแนวทางหนึ่งซึ่งคาดว่าน่าจะมีความเหมาะสมกับการนำมาใช้ในกรณีที่มีข้อจำกัดเรื่องที่ดิน และง่ายสำหรับการดำเนินงาน รวมถึงการนำตัวกลางกรองที่สามารถหาได้ง่ายในท้องถิ่นเพื่อมาเป็นทางเลือกใหม่ ซึ่งคาดว่าจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาศักยภาพและขีดความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ของถังกรองชีวภาพแบบไหลลง โดยใช้เปลือกหอยเป็นตัวกลาง
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนอัตราภาระบรรทุกอินทรีย์ของน้ำเสีย ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ ทีเคเอ็น และไนโตรเจนทั้งหมดของกระบวนการดังกล่าว

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ใช้แบบจำลองชีวภาพแบบไหลลงขนาดนำร่อง โดยใช้เปลือกหอยเป็นตัวกลาง
2. ระดับความสูงทั้งหมดของถังกรองไม่เกิน 3 เมตร
3. การวิจัยนี้เป็นการศึกษาทดลองในห้องปฏิบัติการวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
4. ใช้น้ำเสียสังเคราะห์เลียนแบบสภาพน้ำเสียชุมชน โดยที่มีซีโอดีประมาณ 300 มิลลิกรัม/ลิตร และอัตราส่วนซีโอดี:ไนโตรเจน:ฟอสฟอรัส เท่ากับ 300:40:10 หรือ 30:40:1 หรือ 100:13:3.3
5. อัตราป้อนน้ำเสียอยู่ในช่วง 120 ถึง 390 ลิตร/ชม. หรือ 0.6 ถึง 2 ม./ชม.ซึ่งทำให้มีเวลากักน้ำในชั้นกรองแบบถังเปล่า(EBDT) เท่ากับ 3.2 ถึง 0.6 ชั่วโมง ตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและแนวความคิด

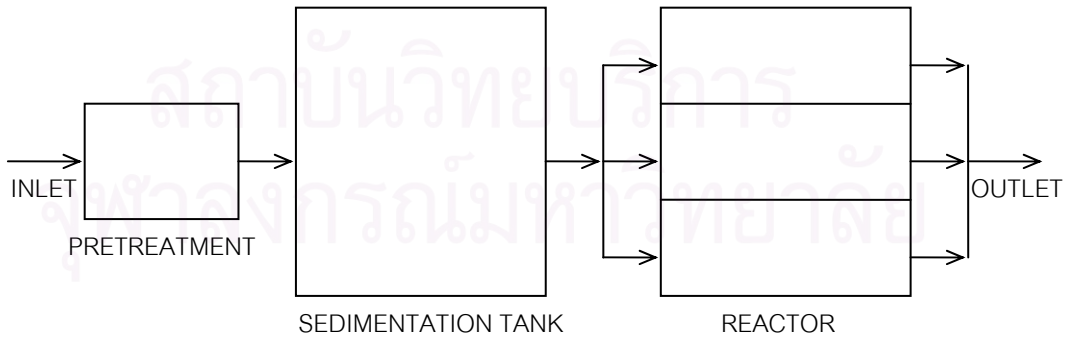
2.1 หลักการทำงานของการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ถังกรองชีวภาพแบบไหลลง

ระบบบำบัดน้ำเสียนี้เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจน โดยอาศัยจุลินทรีย์ที่ยึดติดตัวกลาง (Fixed Film Process) ซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ดขนาดเล็ก น้ำเสียจะไหลผ่านชั้นตัวกลางซึ่งมีจุลินทรีย์อาศัยยึดติดอยู่บนผิวเป็นฟิล์มบาง ๆ เรียกว่า ฟิล์มชีวภาพ (biofilm) จะเปลี่ยนรูปของสารอินทรีย์ละลายที่มากับน้ำเสียให้อยู่ในรูปของแข็งหรือเซลล์ ของแข็งจะติดอยู่บนชั้นกรองเกิดการอัดตัวกันขึ้น จึงไม่จำเป็นจะต้องมีถังตกตะกอนขั้นที่ 2

ภายในถังปฏิกรณ์ดังกล่าวจะมีความเกี่ยวข้อง 3 สถานะ

1. ของแข็ง เกิดขึ้นรอบ ๆ ตัวกลางซึ่งมีทั้งของแข็งแขวนลอย และของแข็งชีวภาพที่เกาะติดอยู่
2. ของเหลว ซึ่งจะอยู่ในถังปฏิกรณ์ และไหลผ่านชั้นตัวกลาง
3. ก๊าซ โดยการเติมอากาศเข้าในถังปฏิกรณ์

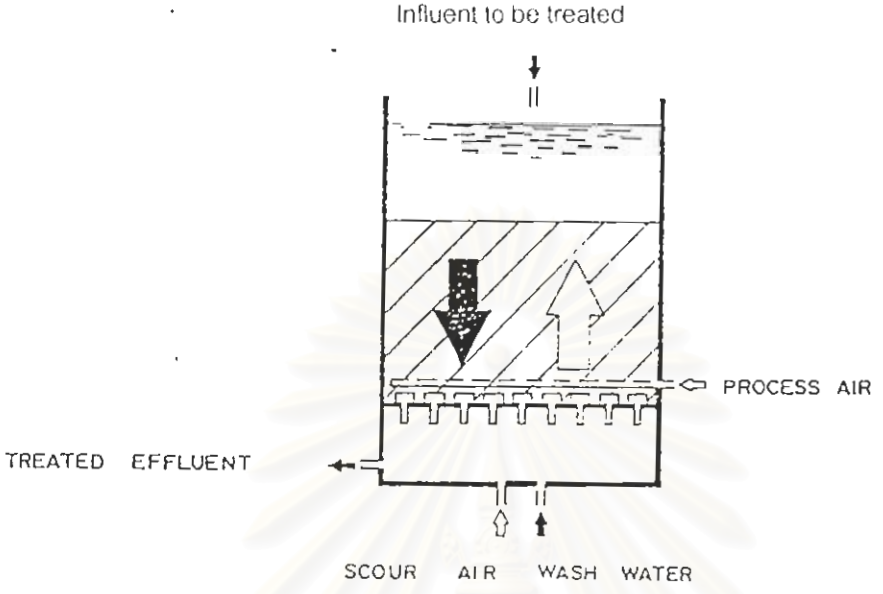
ถังปฏิกรณ์นี้จำเป็นจะต้องมีการบำบัดขั้นต้นก่อน ดังแสดงในรูปที่ 2.1



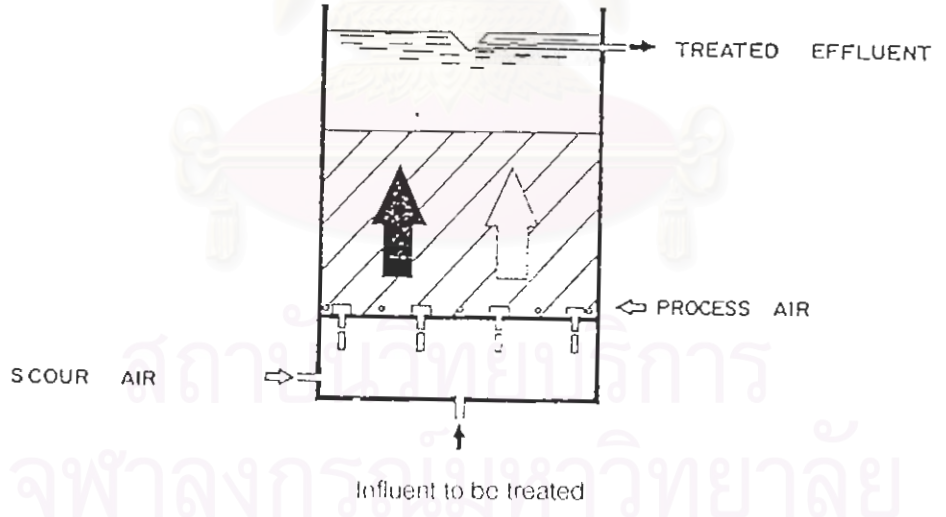
รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียก่อนเข้าสู่ถังกรองชีวภาพ

(R. Pujol, J.P. Canler และ A. Iwema, 1992)

ถังปฏิกรณ์นี้จะแบ่งออกเป็น 2 ชนิดด้วยทิศทางการไหลของน้ำเสียที่เข้าสู่ถังปฏิกรณ์ คือ ชนิดไหลลง และชนิดไหลขึ้น ดังรูปที่ 2.2



1)ไหลลง



2)ไหลขึ้น

รูปที่ 2.2 ชนิดของถังกรองชีวภาพ (R. Pujol, J.P. Canler และ A. Iwema, 1992)

1) ไหลลง 2) ไหลขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กระบวนการทางกายภาพและชีวภาพที่เกิดภายในถังปฏิกรณ์ จะนำไปสู่การเกิดมวลจุลชีพเติบโต เกิดการสะสมของแข็งแขวนลอยในชั้นตัวกลาง ทำให้เกิดการอุดตันหรือเกิดการหลุดลอยของฟิล์มชีวภาพ จึงจำเป็นต้องทำการล้างย้อน (backwash) ซึ่งรอบของการล้างย้อนจะอยู่ระหว่าง 24-48 ชั่วโมง โดยใช้น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว

2.2 กลไกการกำจัดสารอินทรีย์โดยกระบวนการฟิล์มชีวภาพ

กระบวนการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียด้วยฟิล์มชีวภาพนั้น เป็นกระบวนการถ่ายเทมวลสารอินทรีย์และออกซิเจนพร้อมกัน ระหว่างพื้นผิวที่แตกต่างกัน (heterogenous nature) คือ ระหว่างผิวฟิล์มชีวภาพซึ่งเป็นมวลจุลินทรีย์ที่เกาะอยู่บนตัวกลางกับผิวของเหลวโดยรอบ โดยมีขั้นตอนดังนี้ (E.Arvin และ P.Harremoës, 1990)

1. สารอินทรีย์และออกซิเจนละลาย จะถ่ายเทจากชั้นของเหลวไปยังเขตร่วม (interface) ระหว่างชั้นของเหลวและฟิล์มชีวภาพ
2. สารอินทรีย์และออกซิเจนละลาย จะถ่ายเทผ่านเขตร่วมไปยังชั้นของฟิล์มชีวภาพ
3. มีการใช้สารอินทรีย์และออกซิเจนละลายโดยพวกจุลินทรีย์ในชั้นของฟิล์มชีวภาพ
4. มีการถ่ายเทผลิตผลที่ได้ คือ CO_2 , H_2O จากชั้นฟิล์มชีวภาพไปยังเขตร่วม
5. ผลิตผลที่ได้นี้จะถูกถ่ายเทต่อจากเขตร่วมไปยังชั้นของเหลว

อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์อาจถูกควบคุมโดยออกซิเจน และสารอินทรีย์ กล่าวคือ ชั้นนอกจะเป็นชั้นแอโรบิค ปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียเป็นแบบใช้ออกซิเจน ส่วนชั้นในถัดเข้าไปจะเป็นชั้นที่ไม่มีออกซิเจน ดังนั้น ปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์จึงเป็นแบบไม่ใช้ออกซิเจน ปฏิกิริยาการย่อยสลายโดยใช้ออกซิเจนอิสระ จะรวดเร็วกว่าแบบไม่ใช้ออกซิเจน อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ จึงขึ้นกับปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดในชั้นแอโรบิคเป็นส่วนใหญ่ E.Arvin และ P.Harremoës, (1990) ได้สรุปสิ่งที่ควรพิจารณาออกแบบถังปฏิกรณ์แบบฟิล์มชีวภาพมีดังนี้

1. รูปร่างรูปทรงของตัวกลางที่มีฟิล์มชีวภาพ และลักษณะการไหลของน้ำเมื่อผ่านฟิล์มชีวภาพนั้น
2. รูปแบบในการเติมอากาศ เพื่อจ่ายออกซิเจนให้เพียงพอกับกระบวนการบำบัดแบบใช้ออกซิเจน
3. การควบคุมปริมาณมวลจุลินทรีย์ที่เติบโตขึ้นบนผิวตัวกลาง

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการย่อยสลายทางชีววิทยาแบบใช้ออกซิเจน

ปัจจัยและสภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อการเจริญเติบโต และประสิทธิภาพในกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาแบบใช้ออกซิเจน ได้แก่ อุณหภูมิ ค่าพีเอช ความต้องการออกซิเจนของจุลินทรีย์ สารอาหารที่จำเป็น และสารพิษ ดังนั้นในการควบคุมให้กระบวนการมีเสถียรภาพสูงสุด จึงต้องควบคุมปัจจัยและสภาวะแวดล้อมให้พอเหมาะ

1) อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ เพราะกระบวนการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาทางชีวเคมี และอัตราของปฏิกิริยานี้ก็มีผลมาจากอุณหภูมิภายใต้ช่วงอุณหภูมิที่มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตสามารถแบ่งจุลินทรีย์ได้เป็น 3 ประเภท คือ

Psychrophilic microorganism เจริญเติบโตได้ในช่วงอุณหภูมิ 5 - 20 องศาเซลเซียส
Mesophilic microorganism เจริญเติบโตได้ในช่วงอุณหภูมิ 20 - 45 องศาเซลเซียส
Thermophilic microorganism เจริญเติบโตได้ในช่วงอุณหภูมิ 45 - 55 องศาเซลเซียส

จะเห็นได้ว่าจุลินทรีย์เติบโตได้ในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ กัน โดยทั่วไปแล้วจุลินทรีย์เติบโตได้ดีในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 30-40 องศาเซลเซียส(Metcalf & Eddy,1991)ซึ่งเป็นช่วงของ Mesophilic ที่แสดงถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่สุด (optimum growth temperature) จุลินทรีย์จะแบ่งตัวได้อย่างรวดเร็วที่อุณหภูมินี้

2) ค่าพีเอช เป็นตัวการสำคัญในการที่จะทำให้เอนไซม์ต่าง ๆ ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเมตาโบลิซึมของเซลล์ดำเนินไปได้ด้วยการทำงานของเอนไซม์เหล่านั้น ดังนั้นโดยสรุปแล้วค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อจุลินทรีย์ในแง่ของการเจริญเติบโต โดยค่าพีเอชที่มีปริมาณไฮโดรเจนอิออน (H^+ ion) แตกต่างกันออกไป จะทำให้ความต่างศักย์ทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical gradient) ของการขนถ่ายสารอาหาร และการกำจัดของเสียออกจากเซลล์เปลี่ยนแปลงไป โดยที่ค่าพีเอชที่ต่ำๆ จะมีปริมาณไฮโดรเจนอิออนอยู่มาก ทำให้การซึมเข้าและออกจากเซลล์เป็นไปได้ยาก เป็นสาเหตุให้เกิดการยับยั้งการเจริญเติบโตและการตายของจุลินทรีย์

3) ความต้องการออกซิเจน ในกระบวนการย่อยสลายทางชีววิทยาแบบใช้ออกซิเจน พวกจุลินทรีย์ที่เจริญได้ในบริเวณที่มีออกซิเจนอิสระ (Obligate aerobe) จะต้องการโมเลกุลออกซิเจนเพื่อใช้เป็นตัวรับอิเล็กตรอน (Terminal electron acceptor) ดังสมการ

e-

สารอินทรีย์ ⟶ โมเลกุลออกซิเจน ⟶ คาร์บอนไดออกไซด์ + น้ำ + พลังงาน

(สารให้อิเล็กตรอน) (สารรับอิเล็กตรอน) (ผลสุดท้ายของปฏิกิริยา)

ในระหว่างพวก heterotrop ต่าง ๆ aerobic และ facultative microorganism จะสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างสมบูรณ์ และให้ปริมาณพลังงานที่สูงมาก ในขณะที่ anaerobic fermenter ไม่สามารถทำได้ ซึ่งจะแสดงความแตกต่างให้เห็นตามสมการเมตาโบลิซึมของกลูโคส ดังนี้คือ

$$C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2 \longrightarrow 6\ CO_2 + 6\ H_2O + 689{,}000\ cal$$

$$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2\ C_2H_6O + 2\ CO_2 + 31{,}000\ cal$$

Aerobic autotrophic bacteria บางจำพวกสามารถย่อยสลายสารประกอบอนินทรีย์ได้อย่างสมบูรณ์ เช่น การย่อยสลายสารประกอบซัลเฟอร์โดย *Thiobacillus thiooxidans* ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ดี ดังแสดงตามสมการ คือ

$$2\ S + 2\ H_2O + 3\ O_2 \longrightarrow 2\ H_2SO_4 + 237{,}000\ cal$$

นอกจากนี้เชื้อ *Nitrosomonas* จะสามารถย่อยสลายแอมโมเนียบางส่วนได้ ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนอิสระ ดังที่แสดงในสมการ คือ

$$3\ NH_3 + 3\ O_2 \longrightarrow 2\ HNO_3 + 2\ H_2O + 66{,}500\ cal$$

ดังนั้น การให้อากาศในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาแบบใช้ออกซิเจนนี้ จะต้องออกแบบให้มีการถ่ายเทออกซิเจน ในอัตราที่สามารถตอบสนองความต้องการ ของเซลล์จุลินทรีย์ภายในถังปฏิกรณ์อย่างพอเพียง และต้องควบคุมปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำ (dissolved oxygen) ไม่ให้ต่ำกว่า 1 - 2 มิลลิกรัมต่อลิตร

การกำจัดแป้งจะต้องใช้ปริมาณออกซิเจนต่อปริมาณแป้งที่ถูกกำจัดเพียง 0.745 ต่อ 1.00 ในระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ (สิทธิชัย, 1986)

ปริมาณอากาศที่ใช้กับระบบแอกทิเวดเต็ดสลัดจ์ โดยการเป่าอากาศด้วยอัตรา 20 - 30 ลูกบาศก์ฟุต/นาที/1,000 ลูกบาศก์ฟุต ซึ่งเพียงพอที่จะทำให้แบคทีเรียอยู่ในลักษณะแขวนลอย และทำให้ปริมาณออกซิเจนในระบบมีค่าประมาณ 1 - 2 มิลลิกรัมต่อลิตร (สิทธิชัย, 1986)

Metcalf & Eddy (1991) กล่าวว่า ปริมาณอากาศที่ใช้ในระบบ Conventional Activated Sludge นั้น จะใช้ประมาณ 75 - 115 ลูกบาศก์เมตรของอากาศต่อกิโลกรัมบีโอดีที่ถูกกำจัดไป

4) สารอาหารที่จำเป็น สารอาหารที่จำเป็นต่อจุลินทรีย์ ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาแบบใช้ออกซิเจน ได้แก่ ธาตุคาร์บอน ธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส เนื่องจากธาตุต่าง ๆ เหล่านี้เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของเซลล์จุลินทรีย์ คือ $(C_5H_7NO_2)n$ นอกจากนี้ก็มีสารอาหารรองที่ช่วยในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ความสมบูรณ์และแข็งแรงยิ่งขึ้น ซึ่งมีความต้องการในปริมาณที่ต่ำ เช่น ธาตุเหล็ก และอื่น ๆ ตามแต่ชนิดของจุลินทรีย์นั้น อัตราส่วนของสารอาหารที่เหมาะสมควรมีค่า BOD : N : P : Fe เท่ากับ 100 : 5 : 1 : 0.5 หรือถ้าเป็น COD : N : P : Fe เท่ากับ 150 : 5 : 1 : 0.5

5) สารพิษ สารเคมีใด ๆ ที่เข้าสู่ระบบเมื่อมีค่าความเข้มข้นถึงระดับหนึ่งแล้ว มีผลให้ประสิทธิภาพหรือเสถียรภาพของระบบลดลง สารนั้นจัดว่าเป็นสารพิษ ความเป็นพิษต่อระบบมีผลตั้งแต่ยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (inhibition) จนถึงทำลายจุลินทรีย์หมด (completely toxic) ดังนั้นจึงจำเป็นจะต้องควบคุมความเข้มข้นของสารใด ๆ มิให้เกินขีดจำกัด ซึ่งมีผลต่อระบบในน้ำเสียก่อนที่จะเข้าสู่ระบบบำบัด

สารพิษที่มีผลต่อระบบบำบัดทางชีวภาพ ได้แก่ โลหะหนัก เช่น ตะกั่ว (Pb) สังกะสี (Zn) โครเมี่ยม (Cr) ทองแดง (Cu) ปรอท (Hg) และนิกเกิล (Ni) เกลืออนินทรีย์ คลอรีน และสารอินทรีย์บางชนิดที่มีความเข้มข้นมากเกินไป และอาจรวมถึงสารพิษฆ่าแมลงต่าง ๆ ด้วย เป็นต้น

ดังนั้นการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ถ้าสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ เช่น พีเอช และอุณหภูมิไม่ขัดต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ จะขึ้นอยู่กับปริมาณสารอาหารเท่านั้น ถ้าสารอาหารเสริมพวกไนโตรเจน ฟอสฟอรัส เหล็ก แคลเซียม และแมกนีเซียมแพียงพอ การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จะขึ้นอยู่กับปริมาณสารอาหารที่เป็นพลังงานเป็นสำคัญ

2.4 ค่าสัมประสิทธิ์แพร่ซึม

การถ่ายเทมวลของสารอินทรีย์และออกซิเจนจากน้ำเสียไปยังเซลล์แบคทีเรีย ภายในฟิล์มชีวภาพนั้นเป็นกระบวนการแพร่ซึมระดับโมเลกุล (Molecular Diffusion) ตามกฎของฟิค (Fick's Law) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสูตรคณิตศาสตร์ได้

$$N = - D \frac{ds}{dy}$$

โดยที่

N	=	อัตราการแพร่ซึมมวล	M/L^2t
D	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ซึม	L^2/t
S	=	ความเข้มข้นสารอินทรีย์	M/L^3
Y	=	ระยะทางการถ่ายเทมวล	L

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์แพร่ซึมของสารต่าง ๆ ในเมือกจุลินทรีย์จึงมีความสำคัญต่อการคำนวณเพื่อประเมินประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์

ใน ค.ศ. 1985 Steve Reiber และ David Sensel ได้ทำการทดลองการถ่ายเทออกซิเจนของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้ออกซิเจน โดยใช้ถังปฏิกรณ์เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 16.5 เซนติเมตร บรรจุแอนทราไซท์เป็นตัวกลางสูง 1.5 เมตร พบว่าประสิทธิภาพในการละลายน้ำของออกซิเจนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำสูงขึ้น กล่าวคือ ประสิทธิภาพการละลายน้ำของออกซิเจนจะเพิ่มขึ้น 2.5-11 % เมื่อภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มจาก 2 เป็น 14 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ซึ่งชี้ให้เห็นว่า หลักการการแพร่ซึมถ่ายเทออกซิเจนระหว่างผิวฟิล์มชีวภาพและน้ำตามสมการข้างต้น ไม่เพียงพอที่จะอธิบายกลไกการถ่ายเทออกซิเจนในถังกรองชีวภาพได้ และได้สรุปกลไกการถ่ายเทออกซิเจนในระบบไว้ดังนี้

1) การถ่ายเทออกซิเจนระหว่างผิว (ฟิล์มชีวภาพกับผิวน้ำ) และการละลายของออกซิเจนสู่น้ำเกิดในขณะเดียวกันโดยทันทีทันใด
2) การละลายของออกซิเจนลงสู่น้ำเป็นไปตามกระบวนการแพร่ซึม แต่การถ่ายเทออกซิเจนระหว่างผิวเกิดจากหลักการแพร่ซึมของออกซิเจนระหว่างผิวฟิล์มชีวภาพกับน้ำ รวมกับกระบวนการถ่ายเทจากฟองอากาศสู่ผิวฟิล์มชีวภาพโดยตรง

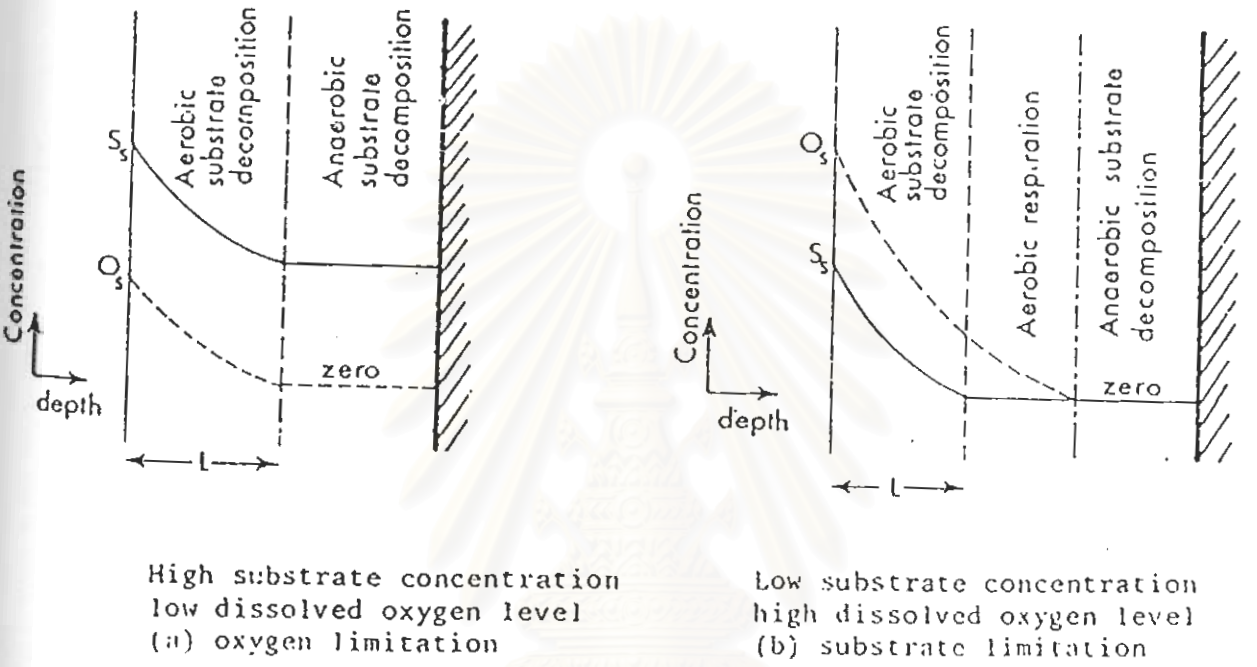
3) การเพิ่มพื้นที่ผิวฟิล์มชีวภาพ และการเพิ่มปริมาณฟองอากาศ หรือความเร็วฟองอากาศ ทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างฟองอากาศ กับเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนอย่างใกล้ชิด ทำให้การใช้สารอาหารในน้ำเสียเป็นไปอย่างรวดเร็ว กับเพิ่มอัตราการถ่ายเทออกซิเจนระหว่างผิว อย่างไรก็ตาม อัตราการถ่ายเทออกซิเจนระหว่างผิวจะเพิ่มอย่างมีขีดจำกัด การเพิ่มปริมาณฟองอากาศ และความเร็วฟองอากาศสูงขึ้นอีก ก็ไม่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทออกซิเจนระหว่างผิว

2.5 ความหนาประสิทธิผล

ลักษณะชั้นเมือกจุลินทรีย์ที่มีความหนามาก อาจแบ่งเป็น 2 ชั้น คือ แอโรบิค (aerobic layer) และ แอนแอโรบิค (anaerobic layer) ดังแสดงในรูปที่ 2.3

อัตราการดูดซึมสารอินทรีย์โดยเมือกจุลินทรีย์เพิ่มขึ้น เมื่อความหนาเมือกจุลินทรีย์เพิ่มขึ้น แต่อัตราการดูดซึมสารอินทรีย์จะคงที่ เมื่อความหนาเมือกจุลินทรีย์หนากว่าความหนาของชั้นแอโรบิค โดยความหนาของชั้นแอโรบิคประมาณ 70 - 100 μm (สุเมธ, 1987) ที่ความหนาของชั้นแอโรบิคประมาณ 50 - 150 μm นี้ขึ้นกับความเข้มข้นสารอินทรีย์ ดังนั้นการกำจัดสารอินทรีย์โดยเมือกจุลินทรีย์ในการบำบัดน้ำเสียต่าง ๆ จะเกิดก็เฉพาะชั้นผิวนอกบาง ๆ เท่านั้น เช่น การใช้แก๊สออกซิเจนแทนอากาศ เป็นต้น (สุเมธ, 1987)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



High substrate concentration
low dissolved oxygen level
(a) oxygen limitation

Low substrate concentration
high dissolved oxygen level
(b) substrate limitation

รูปที่ 2.3 ลักษณะชั้นเมือกจุลินทรีย์

2.6 องค์ประกอบที่มีผลต่อการทำงานของ ถังกรองชีวภาพแบบไหลลง

2.6.1 ชนิดตัวกลางกรอง ตัวกลางที่ใช้ในระบบควรมีคุณสมบัติดังนี้ (R.D. Tyagi, 1990)

1) มีความสามารถในการยึดเกาะของฟิล์มชีวภาพได้ดี
2) มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง
3) มีความพรุน และเมื่อเป็นชั้นกรองต้องสามารถอัดแน่นได้
4) มีความต้านทานต่อการไหลของน้ำต่ำ
5) สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและทางชีวะได้ดี

6) มีความทนทานพอ ไม่หักหรือแตกง่าย
7) มีความสามารถในการจับของแข็งแขวนลอยได้ดี
8) มีลักษณะรูปร่างคงที่ การไหลของน้ำจะได้สม่ำเสมอเมื่อผ่านชั้นตัวกลาง
9) ไม่มีสารพิษ หรือโลหะหนักที่สามารถละลายน้ำได้เป็นองค์ประกอบ
10) มีค่าความแตกต่างที่น้อยของความถ่วงจำเพาะระหว่างสารกรองและน้ำ เพื่อโครงสร้างถังกรองจะได้ไม่รับน้ำหนักมาก
11) มีราคาถูกและจัดหาได้ง่าย
12) มีความสะดวกและง่ายต่อการขนส่งประกอบและติดตั้ง

เนื่องจากการเลือกตัวกลางกรองให้มีคุณสมบัติบางอย่างมีลักษณะตรงข้ามกัน เช่น การมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและความต้านทานการไหลของน้ำต่ำ หรือ การมีความคงทนสูง และต้องการความพรุนสูง และราคาถูก ดังนั้นการเลือกตัวกลางที่เหมาะสมจึงควรคำนึงถึงองค์ประกอบดังนี้

1) วัตถุประสงค์ในการบำบัด และข้อจำกัดในการออกแบบดูแลรักษาระบบ
2) พิจารณาวิเคราะห์เลือกรูปร่างและขนาดให้เหมาะสมกับการใช้งาน
3) การเลือกตัวกลางที่มีสัมประสิทธิ์พื้นที่ผิวสูงจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของถังกรอง แต่การอุดตันก็จะเกิดขึ้นเร็วเช่นกัน

2.6.2 ภาระบรรทุกทางน้ำ (hydraulic loading) หมายถึง อัตราการไหลของน้ำเสียต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัดของถังกรอง ซึ่งบางครั้งเรียกว่า surface loading rate ค่าภาระบรรทุกทางน้ำสามารถหาได้จากสมการ

$$q = \frac{Q}{A}$$

โดยที่

q = ภาระบรรทุกทางน้ำ (เมตร^3/เมตร^2-ชั่วโมง)
Q = อัตราการไหลของน้ำเสีย (เมตร^3/ชั่วโมง)
A = พื้นที่หน้าตัดของถังกรอง (เมตร^2)

ภาระบรรทุกทางน้ำจะมีผลต่อประสิทธิภาพของถังกรองชีวภาพ เนื่องจากจะกระทบต่อระยะเวลาสัมผัสน้ำเสียเมื่อไม่คิดตัวกลาง กล่าวคือ ถ้าค่าภาระบรรทุกทางน้ำมาก จะทำให้ได้

ระยะเวลาสัมผัสน้ำเสียเมื่อไม่คิดตัวกลางมีค่าต่ำ ทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียไม่ทั่วถึง หรือย่อยสลายสารอินทรีย์ไม่ทัน น้ำทิ้งจะมีลักษณะสมบัติไม่ดีพอ

2.6.3 ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ทางปริมาตร (volumetric organic loading) หมายถึง อัตราการจ่ายสับสเตรทเข้าสู่ระบบต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรถังกรองความสูงเท่าชั้นกรอง โดยสารอาหารจะวัดในรูปของบีโอดี หรือซีโอดี สามารถหาได้จากสมการ

$$q_0 = \frac{QS_0}{V}$$

โดยที่

q_0 = ค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ทางปริมาตร (กิโลกรัม/เมตร^3-วัน)

S_0 = ความเข้มข้นของสับสเตรทที่เข้าสู่ระบบ (กิโลกรัม/เมตร^3)

Q = อัตราการไหลของน้ำเสีย (เมตร^3/วัน)

V = ปริมาตรของตัวกลางกรอง (เมตร^3)

ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่สูง จะมีผลโดยตรงต่อลักษณะสมบัติน้ำทิ้ง ทำให้น้ำทิ้งมีคุณสมบัติไม่ดี และทำให้ความถี่การล้างย้อนของถังกรองต้องล้างบ่อยขึ้น การออกแบบให้ถังกรองรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูง ต้องคำนึงถึงระบบการเติมอากาศให้ทั่วถึง และเพียงพอต่อชั้นกรอง

2.6.4 ภาระบรรทุกอินทรีย์เทียบกับพื้นที่ผิวของตัวกลาง (OALR) หมายถึงอัตราการจ่ายสับสเตรทเข้าสู่ระบบต่อพื้นที่ผิวตัวกลาง โดยสารอาหารจะวัดในรูปของบีโอดีหรือซีโอดี สามารถหาได้จากสมการ

$$q_i = \frac{QS_i}{A}$$

โดยที่

q_i = ค่าภาระบรรทุกอินทรีย์เทียบกับพื้นที่ผิวตัวกลาง (กิโลกรัม/เมตร^2-วัน)

S_i = ความเข้มข้นของสับสเตรทที่เข้าสู่ระบบ (กิโลกรัม/เมตร^3)

Q = อัตราการไหลของน้ำเสีย (เมตร^3/วัน)

A = พื้นที่ผิวของตัวกลางกรอง (เมตร^2)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.6.5 ระยะเวลาสัมผัสน้ำเสียเมื่อไม่คิดตัวกลาง (empty bed contact time) หมายถึง ระยะเวลาที่น้ำไหลผ่านชั้นกรองในถังกรอง โดยไม่คิดปริมาตรตัวกลางที่อยู่ในถังกรอง ค่าระยะเวลาสัมผัสน้ำเสียเมื่อไม่คิดตัวกลางสามารถหาได้จากสมการ

$$EBCT = \frac{H}{q}$$

โดยที่

EBCT = ระยะเวลาสัมผัสน้ำเสียเมื่อไม่คิดตัวกลาง (ชั่วโมง)

H = ความสูงของชั้นตัวกลางในถังกรอง (เมตร)

q = ค่าภาระบรรทุกทางน้ำ (เมตร^3/เมตร^2-ชั่วโมง)

ค่าระยะเวลาสัมผัสน้ำเสียเมื่อไม่คิดตัวกลาง มีผลต่อประสิทธิภาพของถังกรองชีวภาพ นอกจากนี้การออกแบบระบบถังกรองชีวภาพสามารถใช้ค่า EBCT ทำนายลักษณะน้ำทิ้งได้ด้วย (J.Condren, 1990)

2.6.6 การเติมอากาศ (process air) วิธีการเติมอากาศแก่ระบบถังกรองชีวภาพมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียนั้น ถ้าน้ำเสียมีความเข้มข้นสูงการถ่ายเทออกซิเจนจากการเติมอากาศควรเป็นไปอย่างรวดเร็วเพื่อจุลินทรีย์สามารถใช้ออกซิเจนในการบำบัดน้ำเสียได้ทัน

2.7 ข้อดีและข้อเสียของระบบถังกรองชีวภาพแบบไหลลง

2.7.1 ข้อดีของระบบถังกรองชีวภาพแบบไหลลง

1) การเริ่มเดินระบบสามารถทำได้สะดวกและง่าย ปกติใช้เวลาประมาณ 8 - 10 วัน ในการสร้างฟิล์มชีวภาพบนตัวกลาง
2) การควบคุมการทำงานและบำรุงรักษาสามารถทำได้ง่าย เนื่องจากระบบไม่ต้องมีการหมุนเวียนตะกอนกลับเข้ามา และระบบไม่จำเป็นต้องมีถังตกตะกอนขั้นที่ 2 ไม่ต้องกลัวปัญหาเรื่องตะกอนไม่จมตัว (bulking)

3) มีความสามารถในการรับภาระบรรทุกได้สูง จากการศึกษาพบว่าสามารถรับภาระบรรทุกทางน้ำได้ปกติเท่ากับ 1.2 - 5.6 เมตร/ชั่วโมง และสามารถรับได้สูงถึง 2.7 - 8.2 เมตร/ชั่วโมง ที่อัตราการไหลน้ำสูงสุด
4) สามารถทนและรับช็อคโหลด (shock load) ได้เนื่องจากภายในถังปฏิกรณ์มีปริมาณจุลินทรีย์สูง และมีหลากหลายชนิด ทำให้ระบบสามารถหรับตัวให้เข้ากับสภาวะต่าง ๆ ได้รวดเร็ว ระบบจึงสามารถคืนตัวได้เร็วเมื่อพบกับภาวะผิดปกติเฉียบพลัน
5) ประหยัดพื้นที่ในการติดตั้ง จากการศึกษาพบว่าใช้พื้นที่ในการก่อสร้างน้อยกว่าระบบแอกทิเวดเต็ดทั่วไป 10 เท่า (M.Boller, W.Gujer และ M.Tschui, 1994)

2.7.2 ข้อเสียของระบบถังกรองชีวภาพแบบไหลลง

1) ต้องมีการหยุดระบบเพื่อทำการล้างย้อน ความถี่ในการล้างย้อนขึ้นกับภาระบรรทุกทางน้ำ และภาระบรรทุกสารอินทรีย์ ปกติมักจะต้องมีการล้างย้อนทุก 1-2 วัน ทำให้การออกแบบควรมีหลายเซลล์ และต้องคำนึงถึงภาระบรรทุกทางน้ำที่เพิ่มขึ้นทันที เมื่อมีการล้างย้อนเซลล์ใดเซลล์หนึ่ง
2) สิ้นเปลืองพลังงานในการเติมอากาศ เนื่องจากจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ต้องการออกซิเจนไปใช้ ดังนั้นจำเป็นต้องมีการเติมอากาศให้ระบบให้เพียงพอ

2.8 รายงานและผลการวิจัยที่เกี่ยวกับระบบถังกรองชีวภาพแบบไหลลง

Bjorn Rusten (1984) ได้ทำการศึกษาโดยใช้ตัวกลาง 2 ชนิดคือ PLASdek S19 และ PLASdek S12 ซึ่งมีสัมประสิทธิ์พื้นที่ผิวเท่ากับ 140 เมตร^2/เมตร^3 และ 230 เมตร^2/เมตร^3 ตามลำดับ สรุปได้ดังนี้

1) การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่าง 10 - 20 องศาเซลเซียส ไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของระบบ
2) คุณภาพน้ำทิ้งขึ้นกับภาระบรรทุกสารอินทรีย์เป็นหลัก การออกแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพจึงควรคำนึงถึงภาระบรรทุกสารอินทรีย์ แม้ว่าน้ำเสียจะมีความเข้มข้นสูงและภาระบรรทุกทางน้ำต่ำ หรือน้ำเสียเข้มข้นต่ำแต่ภาระบรรทุกทางน้ำสูง
3) การถ่ายเทออกซิเจนของระบบเป็นไปด้วยดีในตัวกลางทั้งสองชนิด โดยมีอัตราการเติมอากาศ เท่ากับ 10 - 15 ม.^{3} อากาศ/กก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด

H.D.Stensel, R.C.Brenner, K.M.Lee, H.Melcer, และ K.Rakness (1988) ได้ทดลองถังกรองชีวภาพโดยใช้ถังกรองขนาด 3.7 x 6.4 x 3.7 ม.^{3} และใช้ดินเหนียวแข็งเป็นตัวกลาง

1) น้ำที่ใช้ในการล้างสารกรองจะใช้เพียง 7 - 10 % ของน้ำที่บำบัดได้
2) ที่ภาระบรรทุกทางน้ำ 2.4 เมตร/ชั่วโมง จะทำให้เกิดของแข็ง 2.5 กก.ทีเอสเอส/ม.^{3} ของปริมาตรสารกรอง และที่ภาระบรรทุกทางน้ำที่ต่ำกว่าก็จะให้ของแข็งต่ำกว่า
3) ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยของน้ำล้างสารกรองเป็น 1500 มิลลิกรัม/ลิตร
4) อัตราการเติมอากาศ 20 ม.^{3}/กก.ทีบีโอดี ที่เข้าระบบ ซึ่งจะทำให้ออกซิเจนละลายเฉลี่ยในถังปฏิกรณ์เป็น 1.5 มิลลิกรัม/ลิตร

Frank Rogalla, Michele Payraudeau และคณะ (1990) ได้ศึกษาทดลองการทำงานของถังกรองชีวภาพเติมอากาศแบบไหลลง โดยใช้น้ำเสียชุมชน ตัวกลางในถังกรองสูง 2 เมตร มีปริมาตร 0.14 ลูกบาศก์เมตร จากการทดลองพบว่า

1) คุณภาพน้ำทิ้งของระบบ ขึ้นกับความเข้มข้นสารอินทรีย์ในน้ำเสียเข้าระบบ และระยะเวลาสัมผัสของน้ำเสียเมื่อไม่คิดตัวกลาง โดยที่ถ้าน้ำเสียมีเวลาสัมผัสของน้ำเสียเมื่อไม่คิดตัวกลางนานคุณภาพน้ำทิ้งจะมีค่าซีโอดีต่ำ
2) ค่าที่เหมาะสมของระยะเวลาสัมผัสน้ำเสียเมื่อไม่คิดตัวกลาง ควรเป็น 2.5 ชั่วโมง ทำให้ค่าบีโอดี ค่าของแข็งแขวนลอย และค่าทีเคเอ็นต่ำกว่า 10 มิลลิกรัม/ลิตร

G.R.Dillon และ V.K.Thomas (1990) ได้ทดลองโดยใช้ถังกรองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 เมตร สูง 4.3 เมตร และใช้หินชนวนขนาด 3 - 6 มิลลิเมตร เป็นตัวกลาง ชั้นกรองสูง 2 เมตร พบว่า

1) คุณภาพน้ำออกสามารถควบคุมให้ดีได้เมื่อภาระบรรทุกเป็น 4.1 กก.บีโอดีห้า/ม.^{3}-วัน (9.2 กก.ซีโอดี/ม.^{3}-วัน)
2) ปริมาณของสลัดจ์ที่เกิดขึ้นจากระบบประมาณ 0.63 - 1.06 กก.เอสเอส/กก.บีโอดีห้าที่ถูกกำจัด
3) ใช้น้ำในการล้างชั้นกรอง 12 - 35 % ของน้ำที่ได้รับการบำบัด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

J.Condren (1990) ได้ศึกษาถังกรองชีวภาพเติมอากาศ โดยใช้ตัวกลาง 2 ชนิด คือ แอกทิเวดเต็ดคาร์บอน และ ไบโอดาไมน์ซึ่งเป็นพวกดินเหนียวแข็ง สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ถังกรองชีวภาพเติมอากาศที่ใช้แอกทิเวดเต็ดคาร์บอนเป็นตัวกลาง จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี ได้ดีกว่าที่ใช้ไบโอดาไมน์เป็นตัวกลาง
2) ขนาดตัวกลางมีผลต่อบีโอดี และของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งดังแสดงในตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่าการใช้สารตัวกลางขนาดเล็กจะมีประสิทธิภาพในการลดสารอินทรีย์และของแข็งแขวนลอยได้ดีกว่าตัวกลางขนาดใหญ่ แต่การใช้สารตัวกลางขนาดเล็กต้องมีอัตราการล้างย้อนที่มากกว่า

ตารางที่ 2.1 ผลของขนาดตัวกลางที่มีต่อคุณภาพน้ำทิ้ง

ขนาดตัวกลาง		คุณภาพน้ำทิ้ง, มิลลิกรัม/ลิตร	
นิ้ว	มิลลิเมตร	BOD_5	TSS
0.079 - 0.157	2 - 4	10	10
0.118 - 0.236	3 - 6	20	20
0.157 - 0.315	4 - 8	30	30

3) ขนาดตัวกลางมีผลต่อปริมาตรช่องว่างในชั้นตัวกลาง ซึ่งเป็นแหล่งเก็บของแข็งแขวนลอย ที่เกิดจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 โดยคิดค่าความหนาแน่นของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 0.16 ปอนด์/ลูกบาศก์ฟุต (2.5 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

ตารางที่ 2.2 ค่าความสามารถในการเก็บของแข็งแขวนลอยของตัวกลางขนาดต่างๆ

ขนาดตัวกลาง		ความสามารถในการเก็บของแข็งต่อปริมาตรตัวกลาง	
นิ้ว	มิลลิเมตร	ปอนด์/ลูกบาศก์ฟุต	กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
0.079 – 0.157	2 - 4	0.06 - 0.09	1.0 - 1.5
0.118 – 0.236	3 - 6	0.14 - 0.17	2.2 - 2.7
0.157 – 0.315	4 - 8	0.19 - 0.22	3.0 - 3.7

4) อัตราการผลิตของแข็งในระบบ (solids production rate) สามารถหาได้จากสมการ

$$\text{Solids production rate} = \frac{0.4 \text{ lb (kg)}}{\text{lb (kg) soluble } BOD_5 \text{ removed}} + \frac{1.016 \text{ lb (kg)}}{\text{lb (kg) insoluble } BOD_5 \text{ removed}}$$

$$\text{Solids production rate} = \frac{0.4 \text{ lb (kg)}}{\text{lb (kg) soluble } BOD_5 \text{ removed}} + \frac{0.65 \text{ lb (kg)}}{\text{lb (kg) TSS removed}}$$

5) การออกแบบและการคาดคะเนคุณภาพน้ำทิ้ง จากการศึกษาจากระบบจริงที่ Soissons และ Columbes คุณภาพน้ำทิ้งขึ้นกับระยะเวลาสัมผัสน้ำเมื่อไม่คิดตัวกลาง (Empty Bed Contact Time ; EBCT) ดังสมการ

$$\text{Effluent } BOD_5 \text{ (mg/l)} = \frac{\text{Influent } BOD_5 \text{ (mg/l)}}{0.13 \text{ (EBCT)}}$$

$$\text{Effluent TSS (mg/l)} = \frac{\text{Influent TSS (mg/l)}}{0.09 \text{ (EBCT)}}$$

$$\text{Effluent } NH_4\text{-N (mg/l)} = \frac{\text{Influent } NH_4\text{-N (mg/l)}}{0.60 \text{ (EBCT)}}$$

Okubo,Y., Itoh,T. และ Miki,K. (1990) ได้ทดลองถังกรองชีวภาพเติมอากาศ โดยใช้เม็ดเซรามิคขนาด 4 - 7 มิลลิเมตร เป็นตัวกลาง มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 600 - 700 เมตร^2/เมตร^3 และมีความถ่วงจำเพาะ 1.5 ขนาดถังกรองชีวภาพมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1,000 มิลลิเมตร และสูง 3,900 มิลลิเมตร น้ำเสียจะผ่านการบำบัดขั้นต้นซึ่งเป็นถังกรองไหลขึ้น ก่อนจ่ายไปบำบัดต่อในถังกรองชีวภาพ ระยะเวลาสัมผัสน้ำเสียทั้งหมดเท่ากับ 1.5 - 2 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่า

1) ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1.7 กิโลกรัม/เมตร^3-วัน หรือน้อยกว่า ความเข้มข้นน้ำเสียเข้าถังกรองเท่ากับ 60 - 90 มิลลิกรัม/ลิตร และ เอสเอสเท่ากับ 30 - 50 มิลลิกรัม/ลิตร จะได้บีโอดีน้ำทิ้งเท่ากับ 10 มิลลิกรัม/ลิตร
2) เมื่อภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 3 กิโลกรัม/เมตร^3-วัน จะได้ค่าบีโอดีน้ำทิ้งเท่ากับหรือน้อยกว่า 20 มิลลิกรัม/ลิตร และประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดีเท่ากับ 85 - 92 %

3) เอสเอสน้ำทิ้งเท่ากับหรือต่ำกว่า 10 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อภาระบรรทุกบีโอดีเท่ากับหรือน้อยกว่า 3 กิโลกรัม/เมตร^3-วัน น้ำทิ้งจะมีลักษณะใส และไม่ต้องมีถังตกตะกอน
4) เนื่องจากระยะเวลาสัมผัสน้ำเสียประมาณ 2 ชั่วโมงทำให้ระบบมีขนาดเล็กกว่าระบบบำบัดน้ำเสียทั่วไปประมาณ 5 - 10 เท่า

R.Pujol, J.P.Canler และ A.Iwema (1992) ได้ศึกษาประเมินระบบถังกรองชีวภาพเติมอากาศจากระบบจริง 8 แห่ง สรุปได้ดังนี้

1) ความเข้มข้นซีโอดีในน้ำทิ้งจะเพิ่มขึ้นตามภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$Y = 9.82X + 15.83$$

โดยที่

Y = ความเข้มข้นซีโอดีในน้ำทิ้ง (มิลลิกรัม/ลิตร)

X = ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน)

2) ถังกรองจะควบคุมคุณภาพน้ำทิ้งให้มีซีโอดีไม่เกิน 90 มิลลิกรัม/ลิตร ได้เมื่อระบบรับภาระบรรทุกไม่เกิน 6 กก.ซีโอดี/ม.^{3}-วัน
3) คุณภาพน้ำทิ้งจะสามารถควบคุมให้คงที่ได้ โดยการควบคุมอัตราการล้างสารกรองและอัตราการเติมอากาศของระบบ

J.P.Canler และ J.M.Peret (1994) ได้ศึกษาประเมินระบบถังกรองชีวภาพเติมอากาศ จากระบบจริงที่ก่อสร้างแล้วเสร็จจำนวน 12 แห่ง สรุปได้ดังนี้

1) ถังกรองแบบไหลลงมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี บีโอดี และของแข็งแขวนลอยได้ดีกว่าถังกรองแบบไหลขึ้น แต่ถังกรองแบบไหลขึ้นจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนได้ดีกว่า
2) อัตราการกำจัดบีโอดีห้าจะมากกว่าอัตราการกำจัดซีโอดีประมาณ 10 % เสมอซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะทางของถังกรองชีวภาพเติมอากาศ
3) ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีจะลดลงเมื่อภาระบรรทุกทางน้ำเพิ่มขึ้น แม้ว่าน้ำเสียจะเข้มข้นน้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากระยะเวลาสัมผัสน้ำเสียระหว่างสับสเตรทกับฟิล์มชีวภาพถูกจำกัดให้ลดลง และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกำจัดซีโอดี กับภาระบรรทุกทางน้ำสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$Y = - 8.6X + 89.56$$

โดยที่

Y = ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (%)

X = ภาระบรรทุกทางน้ำ (เมตร^3/เมตร^2-ชั่วโมง)

4) เมื่อต้องการควบคุมให้คุณภาพน้ำทิ้งมีค่าซีโอดีไม่เกิน 90 มิลลิกรัม/ลิตร ระบบไม่ควรรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์มากกว่า 7 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน และความสัมพันธ์ระหว่างซีโอดีน้ำทิ้งกับภาระบรรทุกสารอินทรีย์สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$Y = 9.49X + 19.16$$

โดยที่

Y = ค่าซีโอดีน้ำทิ้ง (มิลลิกรัม/ลิตร)

X = ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน)

5) อัตราการกำจัดไนโตรเจนขึ้นกับหลายองค์ประกอบ เช่น อุณหภูมิน้ำ การเติมอากาศในถังกรอง ภาระบรรทุกสารอินทรีย์คาร์บอน และการล้างย้อนที่มีประสิทธิภาพ ระบบสามารถกำจัดไนโตรเจนได้มากกว่า 80% สำหรับภาระบรรทุกไม่เกิน 0.45 กิโลกรัมไนโตรเจน/ลูกบาศก์เมตร-วัน หรือ 0.36 กิโลกรัม NH_4^+/ลูกบาศก์เมตร-วัน เมื่อระบบรับน้ำเสียที่มีอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงประมาณ 10

6) ปริมาณของแข็งที่เกิดขึ้นจากระบบ เท่ากับ 0.41 กิโลกรัมเอสเอส/กิโลกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด เมื่อระบบรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 6.2 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน และประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเท่ากับ 67%

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการวิจัย

การวิจัยทั้งหมดได้กระทำ ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย การวิจัยกระทำโดยใช้ถังกรองขนาดนำร่อง(pilot scale)

การวิจัยถังกรองชีวภาพแบบไหลลงโดยใช้เปลือกหอยเป็นตัวกลางนี้ ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 5 ชุดการทดลอง โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าความเข้มข้นซีโอดีประมาณ 300 มิลลิกรัมต่อลิตรทุกการทดลอง และในชุดการทดลองที่ 1 และ 2 เป็นการทดลองเพื่อหาความสูงของชั้นตัวกลางที่เหมาะสม เพื่อจะนำไปใช้ในการทดลองชุดที่ 3 – 5 ซึ่งในชุดการทดลอง 3 ชุดหลังดังกล่าวได้ศึกษาตัวแปรค่าเดียวคือ ค่าอัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ ทั้งนี้ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แผนการทดลอง

การทดลองที่	อัตราการไหล (ลิตร/วัน)	ความสูงชั้นกรอง (เมตร)	ความเร็วการไหล (ม/ชม.)	EBDT (ชั่วโมง)	AOLR (กก.ซีโอดี/ตร.ม.-วัน)	VOLR (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)
1	120	2	0.62	3.24	3.53×10^{-6}	2.22
2	120	1.5	0.62	2.43	4.65×10^{-6}	2.96
3	210	1.5	1.08	1.39	8.14×10^{-6}	5.18
4	300	1.5	1.54	0.97	1.16×10^{-5}	7.40
5	390	1.5	2.00	0.75	1.51×10^{-5}	9.62

- วิธีคำนวณ EBDT(ระยะเวลากักน้ำในชั้นกรองแบบถังเปล่า), AOLR(ภาระบรรทุกเทียบกับพื้นที่ผิวของตัวกลาง) และ VOLR(ภาระบรรทุกเทียบกับปริมาตรชั้นกรอง) ในภาคผนวก ก
- การวัดพื้นที่ผิวโดยวิธี BET เป็นการหาพื้นที่ผิวของวัสดุจริง แต่เมื่อนำวัสดุเปลือกหอยมาใช้งานจริงการเรียงตัวของเปลือกหอยจะซ้อนทับกันทำให้พื้นที่ผิวบางส่วนมิได้ถูกใช้งาน การคำนวณ AOLR จึงเป็นตัวเลขที่คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง ในการวิเคราะห์จึงใช้ VOLR ในการวิเคราะห์แทน

โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

1) พารามิเตอร์อิสระ

- ความสูงชั้นกรอง คือ 2 และ 1.5 เมตร
- ความเร็วการไหลลงของน้ำเสีย คือ 0.62, 1.08, 1.54 และ 2.00 เมตร/ชั่วโมง
-AOLR เท่ากับ $3.53x10^{-6}$,$4.65x10^{-6}$,$8.14x10^{-6}$,$1.16x10^{-5}$และ $1.51x10^{-5}$ กก.ซีโอดี/ตร.ม.-วัน
- ภาระบรรทุกอินทรีย์ เท่ากับ 2.22, 2.96, 5.18, 7.40 และ 9.62 กก.ซีโอดี/ตร.ม.-วัน

2) พารามิเตอร์ตาม

- ค่าซีโอดีของน้ำหลังกรอง
- ค่าของแข็งแขวนลอย
- ค่าทีเคเอ็น ไนไตรท์ และไนเตรท

3) พารามิเตอร์ที่ควบคุม

- ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ให้คล้ายกับน้ำเสียชุมชน กล่าวคือ มีซีโอดีประมาณ 300 มิลลิกรัม/ลิตร และควบคุมอัตราส่วน ซีโอดี:ไนโตรเจน:ฟอสฟอรัส เท่ากับ 300:40:10
- ขนาดตัวกลางกรอง 5-10 มิลลิเมตร
- ค่าดีโอไม่ต่ำกว่า 1 - 2 มิลลิกรัม/ลิตร

3.2 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้กำหนดให้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ โดยมีน้ำตาลทราย (sucrose) ซึ่งมีสารประกอบประเภทคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลักของสารอาหารคาร์บอนที่ให้พลังงานในการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ ในที่นี้พิจารณาในรูปของค่าซีโอดี ส่วนค่าไนโตรเจนและฟอสฟอรัสนั้น ใช้ในรูปของสารประกอบยูเรีย ($(NH_2)_2CO$) โพแทสเซียมโมโนไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4) ตามลำดับ เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของ ซีโอดี:ไนโตรเจน:ฟอสฟอรัส ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองนี้ต้องควบคุมให้มีค่า 300:40:10 เท่ากันตลอดทุกการทดลอง โดยได้เติมธาตุอาหารเสริม (เกรียงศักดิ์,2539) เช่น แมกนีเซียม (Mg) แคลเซียม (Ca) เหล็ก (Fe) ตามที่ได้แสดงส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์ไว้ในตารางที่ 3.2

การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ได้เตรียมให้มีความเข้มข้นสูง แล้วจึงนำไปเจือจางกับน้ำประปาให้มีความเข้มข้น COD ประมาณ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 3.2 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

แร่ธาตุ	ส่วนประกอบ	ปริมาณที่เติม (มิลลิกรัม)
คาร์บอน	น้ำตาลทราย (Sucrose)	1000
ไนโตรเจน	$(NH_2)_2CO$	285.64
ฟอสฟอรัส	K_2HPO_4	146.44
Trace element	$MgSO_4 . 7H_2O$	37.17
	$CaCl_2 . 2H_2O$	45.82
	$FeCl_3 . 6H_2O$	0.39
โพแทสเซียมไบคาร์บอเนต	$KHCO_3$	540

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1) ถังป้อนน้ำเสียขนาด 200 และ 500 ลิตร

2) เครื่องสูบน้ำเสียเข้าระบบ

การป้อนน้ำเสียเข้าสู่ถังกรอง ใช้เครื่องสูบน้ำชนิดรีดสาย (Peristatic pump ยี่ห้อ Watson Marlow 604U/R)

3) ถังกรองชีวภาพแบบไหลลง

ถังกรองทำจากอะคลีลิคใสลักษณะทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ความสูงทั้งหมด 3 เมตร และบรรจุตัวกลางกรอง ตลอดแนวความสูงจากส่วนฐานของตัวกลางกรอง ในถังกรอง จะเจาะช่องสำหรับเก็บตัวอย่างโดยมีระยะห่างแต่ละช่อง 50 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.1

4) ตัวกลางกรอง

ตัวกลางกรองที่ใช้ในการทดลองจะใช้เปลือกหอยชื่อหอยตาก *Donax bicolor* ซึ่งเป็นหอย 2 ฝา ขนาดของเปลือกหอยประมาณ 5-10 มิลลิเมตร ความหนาแน่นประมาณ 2.52 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร(วิเคราะห์โดยการแทนที่น้ำ) ความพรุนอากาศขณะแห้งเป็น 0.715 (วิเคราะห์โดยการแทนที่น้ำ) และพื้นที่ผิวสัมผัส 0.88 ตารางเมตรต่อกรัม(วิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Micromeritics ASAP 2000 ด้วยวิธี BET Surface ที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี)

5) ถังเก็บน้ำเสียที่บำบัดแล้ว ขนาด 200 ลิตร

6) ถังเก็บน้ำล้างตัวกลางกรอง ขนาด 50 ลิตร

7) เครื่องเติมอากาศ

เครื่องเติมอากาศใช้เครื่องอัดอากาศ(air compressor) ขนาด ½ HP ยี่ห้อ HERO

รูปที่ 3.1 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.2 เปลือกหอยที่ใช้เป็นตัวกลางกรอง (Media)

หมายเหตุ : เปลือกหอยชื่อ หอยตาก *Donax bicolor*

ขนาด 5-10 มิลลิเมตร

ความหนาแน่น 2.52 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

พื้นที่ผิวสัมผัส 0.88 ตารางเมตรต่อกรัม

ความพรุนอากาศขณะแห้งเป็น 0.715

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4 การเตรียมการทดลอง

1) ติดตั้งเครื่องมือและจัดเตรียมอุปกรณ์ต่าง ๆ ตลอดจนสารเคมีชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง
2) คัดขนาดหอยตากที่ใช้เป็นตัวกลางกรอง ให้มีขนาดประมาณ 5-10 มิลลิเมตร
3) เตรียมน้ำสังเคราะห์ให้มีค่าความเข้มข้น ซีโอดีประมาณ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร และควบคุมให้มีอัตราส่วน ซีโอดี:ไนโตรเจน:ฟอสฟอรัส เท่ากับ 300:40:10
4) การเพาะเลี้ยงเชื้อ (seeding) จุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองได้มาจากสลัดจ์เข้มข้นจากโรงบำบัดน้ำเสียสี่พระยา โดยนำมาใส่เข้าไปในถังเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ตามข้อ 3) แล้วจึงปล่อยให้ผ่านเข้าไปในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ ซึ่งมีเปลือกหอยที่ล้างสะอาดแล้วบรรจุอยู่ โดยมีความสูงของชั้นกรองเท่ากับ 2 เมตร ด้วยอัตราเร็วในการไหลของน้ำตามที่กำหนดไว้ในแต่ละการทดลอง พร้อมกับการให้ออกซิเจนโดยการเป่าอากาศให้กับน้ำเสีย จะเกิดมวลชีววิทยาขึ้นปกคลุมอนุภาคตัวกลางกรอง ในกรณีการทดลองช่วงท้าย ๆ ที่ภายในถังปฏิกรณ์มีเชื้อจุลินทรีย์อยู่แล้วก็ไม่จำเป็นต้องใส่เชื้อจุลินทรีย์เข้าไปในถังน้ำเสียสังเคราะห์ดังกล่าว

3.5 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ

1. การเก็บตัวอย่างน้ำเสีย

การเก็บตัวอย่างน้ำเสียได้เก็บจากน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ น้ำเสียในถังปฏิกรณ์ น้ำทิ้ง และน้ำล้างชั้นกรอง น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบได้เก็บจากถังป้อนน้ำเสีย น้ำเสียในถังปฏิกรณ์ได้เก็บตามจุดเก็บตัวอย่างตลอดแนวความสูงถังปฏิกรณ์ น้ำทิ้งได้เก็บจากถังเก็บน้ำทิ้งโดยก่อนเก็บมีการกวนน้ำในถังให้สม่ำเสมอกระจายทั่วเท่ากันก่อนชักตัวอย่าง เพื่อให้ได้ค่าของแข็งแขวนลอยที่เป็นจริงในน้ำออก และน้ำล้างชั้นกรองได้เก็บจากถังเก็บน้ำล้างชั้นกรองโดยก่อนเก็บมีการกวนน้ำในถังก่อนเช่นกัน

2. การล้างตัวกลางกรองและการวิเคราะห์น้ำล้างตัวกลางกรอง

การล้างตัวกลางกรองได้ควบคุมความถี่ในการล้างย้อนให้คงที่คือล้างทุก 24 ชั่วโมงในแต่ละการทดลอง และปริมาตรน้ำที่ใช้ในการล้างย้อนก็คงที่ด้วยเท่ากับ 20 ลิตร โดยในการล้างย้อนได้หยุดระบบแล้วจึงทำการล้างย้อนตัวกลางกรอง ซึ่งการล้างย้อนได้ใช้น้ำพร้อมกับการเป่าอากาศร่วมด้วย การล้างย้อนจะเป่าอากาศล้างเป็นเวลาประมาณ 2 นาที แล้วจึงใช้น้ำล้างย้อนด้วยอัตรา 680

ลิตร/ชั่วโมงหรือ 3.5 เมตร/ชั่วโมง จึงจะทำให้ชั้นเปลือกหอยลอยตัวขึ้นจากเดิมประมาณร้อยละ 70 จนน้ำล้างย้อนล้นสู่ถังเก็บได้ 20 ลิตร จึงหยุดเป่าน้ำและอากาศ เก็บน้ำไว้วิเคราะห์หาค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำล้างย้อนต่อไป

3. การเข้าสู่สถานะคงตัวของระบบ

การเข้าสู่สถานะคงตัวสังเกตได้จากซีโอดีและทีเคเอ็นของน้ำออกคงที่ รวมทั้งของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในระบบ(คือของแข็งแขวนลอยในน้ำออกและของแข็งแขวนลอยในน้ำล้างย้อนรวมกัน)เท่ากันทุกวัน ซึ่งหมายถึงระบบสามารถสร้างเซลล์ขึ้นเท่ากันทุกวัน นั่นคือระบบเข้าสู่สถานะคงตัวแล้ว

4. การเติมอากาศ

การเติมอากาศต้องควบคุมให้มีอัตราการเติมอากาศคงที่ และเพียงพอโดยต้องให้ค่าออกซิเจนละลายไม่ต่ำกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ในแต่ละการทดลอง

5. การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ

วิเคราะห์ลักษณะทางเคมี และทางกายภาพของน้ำ ดังนี้

1) การวิเคราะห์ค่าพีเอช วิเคราะห์โดยเครื่องวัดพีเอช HORIBA F-13
2) การวิเคราะห์ค่าซีโอดี วิเคราะห์โดยวิธี Close Reflux Titrimetric Method
3) การวิเคราะห์ปริมาณของแข็ง วิเคราะห์โดยวิธี Filtered and Dried at 105 °C
4) การวิเคราะห์ค่าทีเคเอ็น (TKN) วิเคราะห์โดยวิธี Digestion and Titration
5) การวิเคราะห์ค่าไนไตรท์ไนโตรเจน (NO_2-N) วิเคราะห์โดยวิธี Colorimetric Method(วิธี NED)
6) การวิเคราะห์ค่าไนเตรทไนโตรเจน (NO_3-N) วิเคราะห์โดยวิธี Ultraviolet Spectrophotometric Screening Method(HCl)

การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้น วิเคราะห์ตามวิธี Standard Methods for Examination of Water and Wastewater ของ APHA, AWWA และ WPCF (1995)

ตารางที่ 3.3 แผนการเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ

ตัวแปร	ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างน้ำ							
	1	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	3	4
พีเอช (pH)	○							○
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS)							○	○
ซีโอดี (COD)	○	●	●	●	●	●	○	
ทีเคเอ็น (TKN)	○						○	
ไนไตรท์ไนโตรเจน (NO_2-N)							●	
ไนเตรทไนโตรเจน (NO_3-N)							●	

หมายเหตุ ○ หมายถึง ตัวแปรที่วิเคราะห์ทุกวัน

● หมายถึง ตัวแปรที่วิเคราะห์ทุกวันเป็นเวลา 7 วัน ติดต่อกันหลังจากที่ระบบเข้าสู่สถานะคงตัว (Steady State)

ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างน้ำ

1 คือ น้ำเสียสังเคราะห์จากถังป้อนน้ำเสีย

2.1 - 2.5 คือ น้ำเสียที่อยู่ในถังปฏิกรณ์ 5 ตำแหน่ง ตามแนวความสูงของถังปฏิกรณ์จากฐาน

3 คือ น้ำที่บำบัดแล้ว

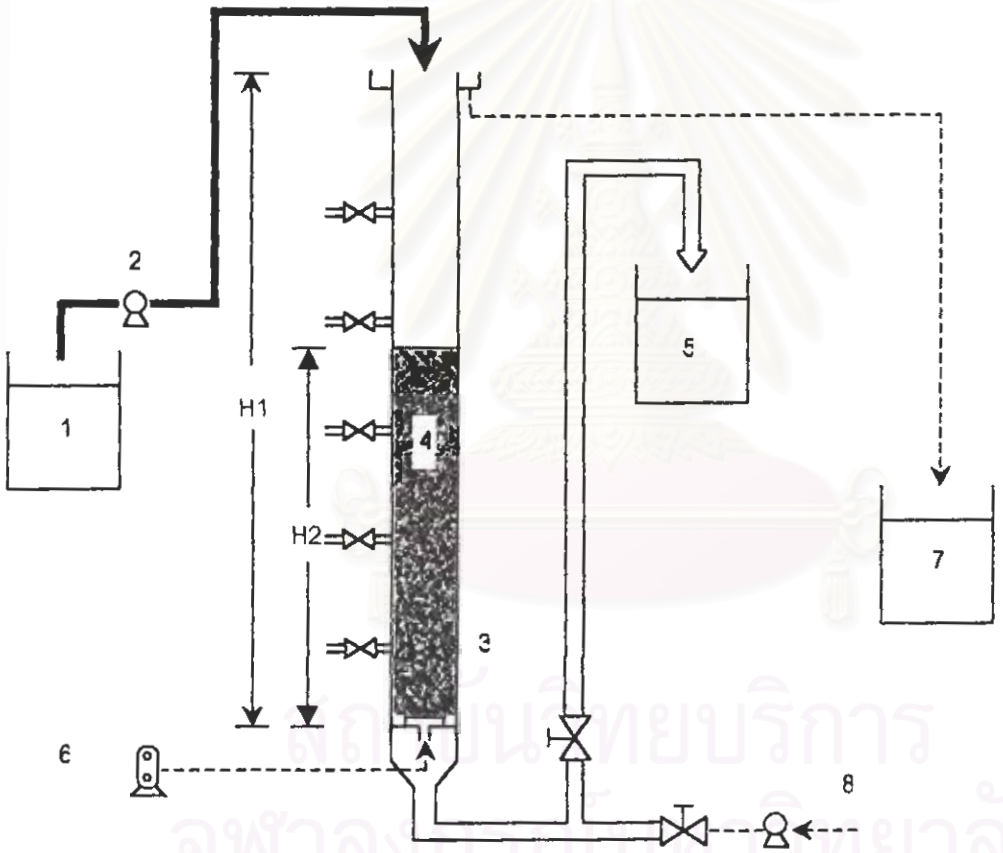
4 คือ น้ำเสียที่อยู่ในถังเก็บน้ำล้างชั้นกรอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. ถังป้อนน้ำเสีย
2. เครื่องสูบน้ำเสียเข้าระบบ
3. ถังกรองชีวภาพ
4. บรรจุตัวกลางกรอง
5. ถังเก็บน้ำที่บำบัดแล้ว
6. เครื่องเติมอากาศ
7. ถังเก็บน้ำล้างขั้นกรอง
8. เครื่องสูบน้ำล้างย้อน

H1 (ความสูงทั้งหมดของถังกรอง) = 3 เมตร

H2 (ความสูงของชั้นตัวกลาง) = 1.5 และ 2 เมตร



รูปที่ 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

รูป 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิจารณ์

4.1 การดำเนินการทดลอง

ในการทดลองครั้งนี้ได้นำเปลือกหอยสำหรับใช้เป็นตัวกลางกรองซึ่งเตรียมโดยการนำเปลือกหอยชื่อหอยตากที่ชาวบ้านใช้ในการเลี้ยงเป็ดแล้วเหลือเปลือกหอยทิ้งไว้ นำมาล้างด้วยน้ำสะอาดจนเปลือกหอยสะอาดแล้วตากแดดทิ้งไว้จนแห้ง จึงนำมาคัดขนาดโดยใช้ตะแกรงร่อนขนาด 5 และ 10 มิลลิเมตร นำเปลือกหอยที่ได้ใส่ลงในถังปฏิกิริยาจนได้ระดับความสูงของชั้นตัวกลางกรองในถังปฏิกิริยาเป็น 2 เมตร และได้ทำการนำเชื้อจุลชีพใส่ลงในถังกรองที่เตรียมไว้ และทำการเลี้ยงเชื้อโดยเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ป้อนให้ระบบเพื่อให้เกิดฟิล์มชีวภาพบนเปลือกหอย โดยการเติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีซีโอดี 300 มก./ล. ด้วยอัตราการป้อนน้ำเสีย 90 ลิตร/วัน ซึ่งทำให้ระบบรับภาระบรรทุกอินทรีย์ที่ 1.66 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วันหรือ 3.49×10^{-6} กก.ซีโอดี/ตร.ม.ตัวกลาง-วัน และมีเวลาเก็บกักน้ำในชั้นกรองแบบถังเปล่าเป็น 4.3 ชั่วโมง ในระยะนี้ใช้เวลาประมาณ 2 เดือน แล้วจึงเริ่มทำการทดลอง ในช่วงแรก ได้ทำการทดลองโดยใช้ระดับความสูงของชั้นตัวกลางกรองในถังปฏิกิริยาเป็น 2 เมตร โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีซีโอดี 300 มก./ล. และภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.22 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วันหรือ 3.53×10^{-6} กก.ซีโอดี/ตร.ม.ตัวกลาง-วัน หลังจากนั้นได้ทำการทดลองในช่วงที่ 2 ต่อไป โดยลดความสูงของชั้นกรองในถังปฏิกิริยาเป็น 1.5 เมตร แต่ยังคงใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีซีโอดี 300 มก./ล. เท่าเดิม และภาระบรรทุกอินทรีย์เป็น 2.96 , 5.18 , 7.40 และ 9.62 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วันหรือ 4.65×10^{-6}, 8.14×10^{-6}, 1.16×10^{-5}และ 1.51×10^{-6}, กก.ซีโอดี/ตร.ม.ตัวกลาง-วัน ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดประมาณ 11 เดือน โดยเริ่มจากเดือนตุลาคม พ.ศ. 2542 ถึงเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2543 ช่วง 2 เดือนแรกเป็นการเริ่มเดินระบบ และหลังจากนั้นจึงเริ่มทำการทดลองและวิเคราะห์ผลตามลำดับ

4.2 ผลการทดลองแต่ละภาระบรรทุกอินทรีย์

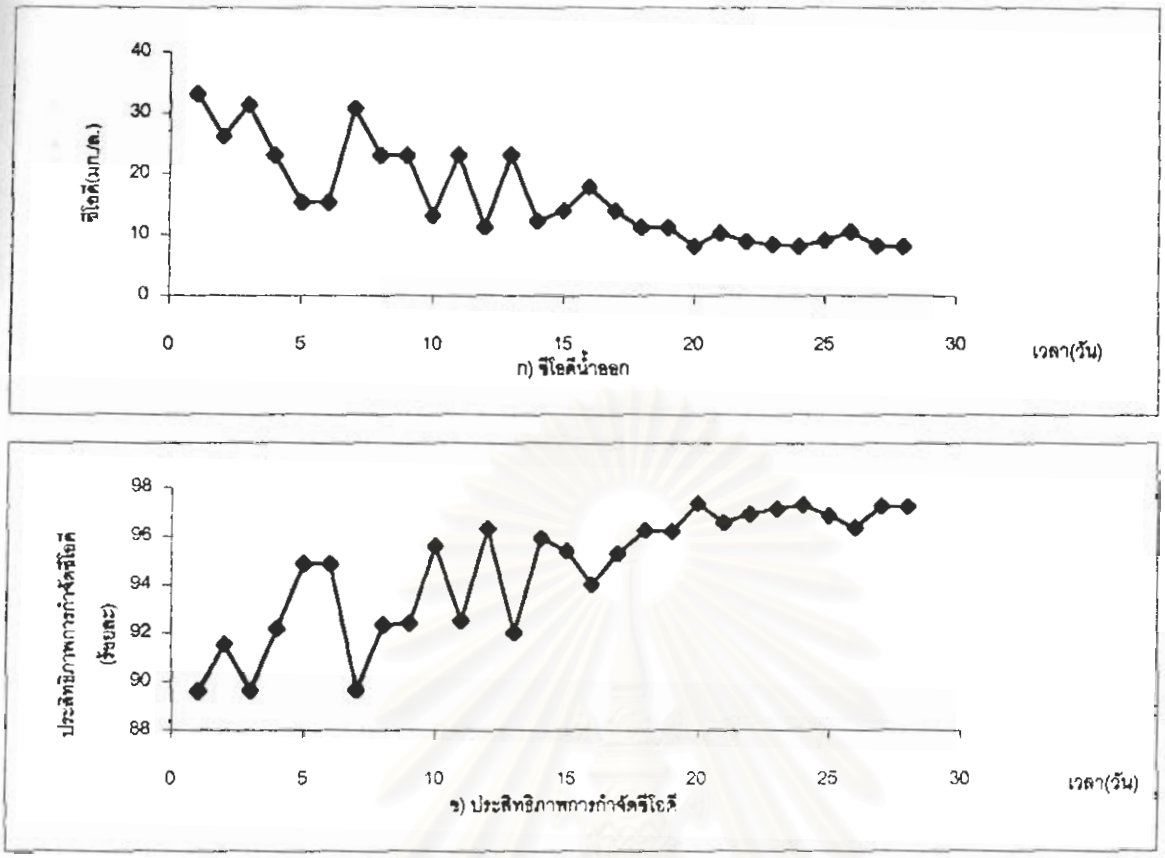
การแสดงผลการทดลองและการวิจารณ์ จะนำเสนอทีละภาระบรรทุกอินทรีย์ก่อน แล้วในตอนท้ายจะนำเสนอโดยรวมกันไป ด้วยค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่าง ๆ ที่สถานะคงตัว

4.2.1 ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.22 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วันที่ความสูงชั้นกรอง 2 เมตร

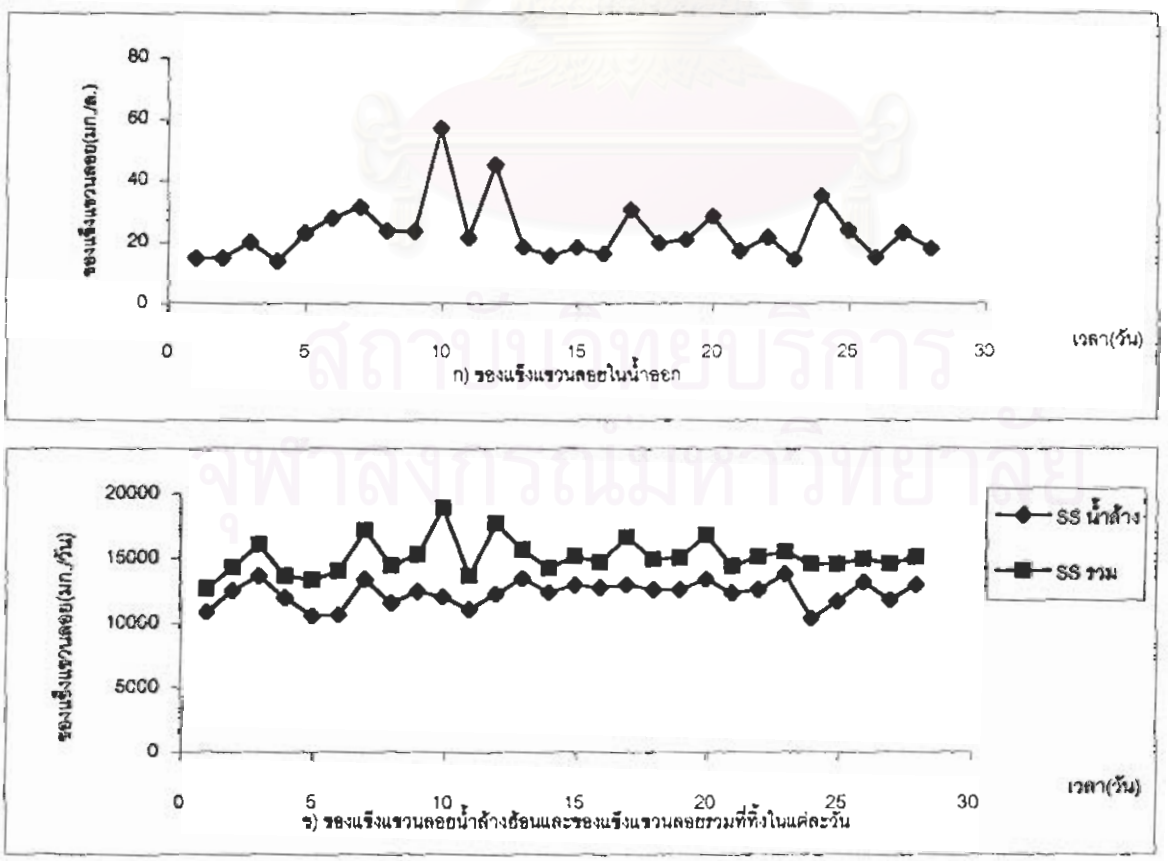
ที่ภาระบรรทุกอินทรีย์นี้ใช้ความสูงของชั้นกรอง 2 เมตรวิเคราะห์ซีโอดีได้ดังรูปที่ 4.1 เห็นได้ว่าซีโอดีในน้ำออกค่อย ๆ ลดลงจากวันแรกของการทดลอง ในช่วงแรกของการทดลองที่ภาระบรรทุกอินทรีย์นี้ ซีโอดีในน้ำออกสูงและแกว่งมาก สังเกตได้จากเส้นกราฟที่ขึ้นลงในช่วง 10-35 มก./ล. เมื่อเวลาผ่านไประบบสามารถปรับตัวจนวันที่ 20 ของการทดลองระบบสามารถปรับตัวเพื่อรับภาระในการกำจัดซีโอดีที่ภาระบรรทุกอินทรีย์นี้ได้ ซีโอดีน้ำออกมีความเปลี่ยนแปลงลดลง โดยคงอยู่ในช่วง 8-10 มก./ล. ซึ่งเมื่อคิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีแล้วอยู่ในช่วงร้อยละ 96-98

ของแข็งแขวนลอยที่ออกจากระบบนี้ประกอบด้วยของแข็งแขวนลอยในน้ำออกและของแข็งแขวนลอยที่ออกมากับน้ำล้างย้อน ที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.22 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วันนี้ของแข็งแขวนลอยที่หลุดออกมากับน้ำออกนี้อยู่ในช่วง 15-30 มก./ล. และจากการใช้น้ำในการล้างย้อน 20 ลิตรโดยล้างย้อนด้วยอัตรา 680 ลิตร/ชม.หรือ 3.5 เมตร/ชม. ของแข็งแขวนลอยในน้ำล้างย้อนแกว่งในช่วงแรก แต่เมื่อผ่านไปช่วงหนึ่งแกว่งน้อยลงเมื่อระบบสามารถปรับตัวจนเข้าสู่สถานะคงตัว จากรูปที่ 4.2 เห็นได้ว่าเส้นกราฟของของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่หลุดออกจากระบบมีแนวโน้มเหมือนกันกับเส้นกราฟของของแข็งแขวนลอยในน้ำล้างย้อนคือประมาณ 12,140 มก./วัน เนื่องจากของแข็งแขวนลอยในน้ำออกประมาณ 22.8 มก./ล. มีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับของแข็งแขวนลอยในน้ำล้างย้อนซึ่งของแข็งแขวนลอยรวมที่หลุดออกจากระบบคงที่อยู่ที่ประมาณ 14,870 มก./วัน(ตัวอย่างการคำนวณคือ ของแข็งแขวนลอยในน้ำล้างย้อน 12,140 มก./วัน + ของแข็งแขวนลอยในน้ำออก 22.8x120 มก./วัน = ของแข็งแขวนลอยรวม 14,870 มก./วัน) ของแข็งแขวนลอยรวมในแต่ละวันคือของแข็งแขวนลอยในน้ำออกรวมกับของแข็งแขวนลอยในน้ำล้างย้อน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงปริมาณเซลล์ที่ถูกสร้างขึ้นในแต่ละวันของระบบ เมื่อของแข็งแขวนลอยรวมในแต่ละวันคงที่ นั่นคือระบบสามารถสร้างเซลล์ได้เท่ากันทุกวัน ซึ่งหมายถึงระบบอยู่ในสถานะคงตัว ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยในน้ำล้างย้อนได้เข้าสู่สถานะคงตัวแล้วจึงเก็บข้อมูลมาวิเคราะห์ต่อไปได้

ที่สถานะคงตัว ระบบสร้างเซลล์ขึ้นวันละประมาณ 14,870 มก. และหลุดออกมากับน้ำออก 22.8 มก./ล. หรือ 2,730 มก./วัน และหลุดออกโดยการล้างย้อนอีกประมาณ 12,140 มก./วัน



รูปที่ 4.1 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.22 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วันและความสูงชั้นตัวกลาง 2 ม



รูปที่ 4.2 ของแข็งแขวนลอยที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.22 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วันและความสูงชั้นตัวกลาง 2 ม.

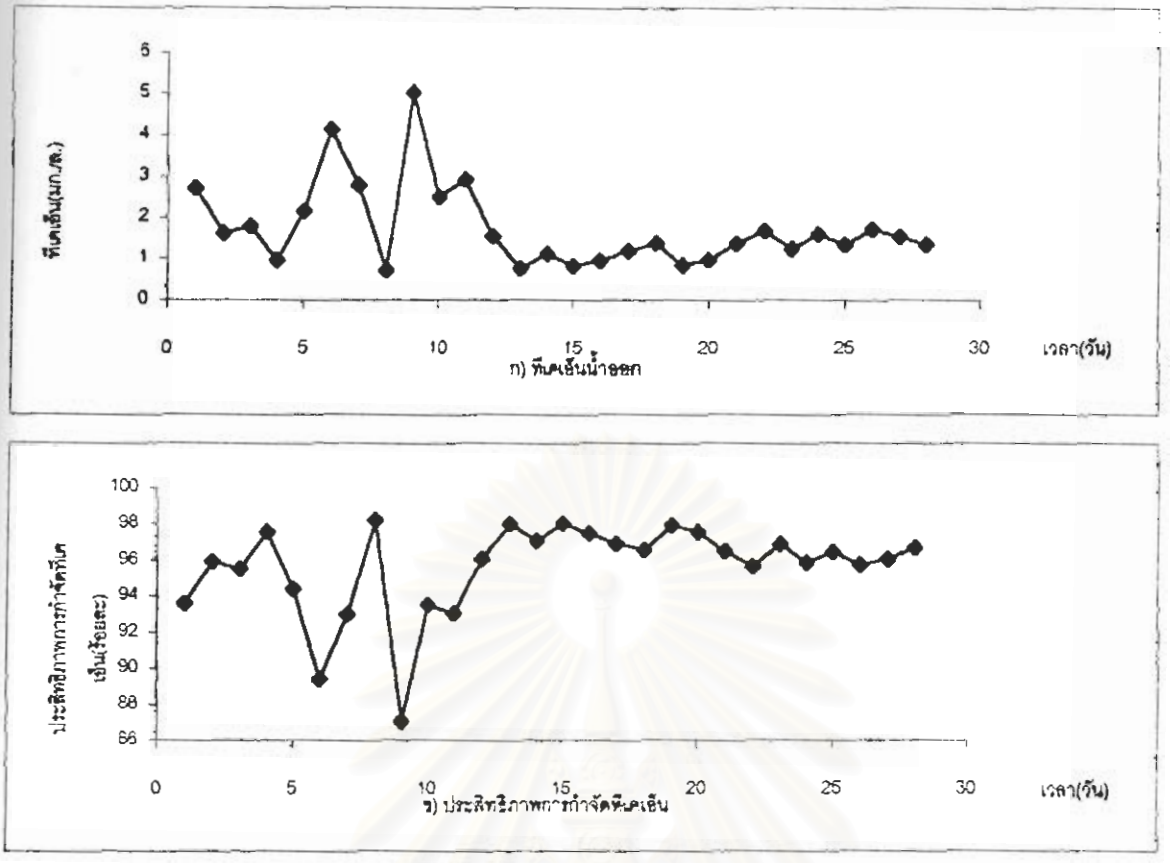
จากรูปที่ 4.3 พิจารณาไนโตรเจนโดยวิเคราะห์จากค่าทีเคเอ็นของน้ำตัวอย่าง เห็นว่าในวันแรก ๆ ของการทดลองนี้ ค่าทีเคเอ็นแกว่งอยู่ในช่วง 1-5 มก./ล. เมื่อเวลาผ่านไป ระบบปรับตัวเพื่อให้สามารถลดไนโตรเจนได้จนคงที่ ระบบสามารถลดทีเคเอ็นได้จนทำให้ทีเคเอ็นในน้ำออกอยู่ในช่วง 1-2 มก./ล. โดยใช้เวลา 13 วัน จึงเริ่มมีการแกว่งตัวน้อยลง

จากการทดลองพบว่า เมื่อเข้าสู่สถานะคงตัวดูจากการคงที่ของของแข็งแขวนลอยรวมออกจากระบบทีเคเอ็นน้ำออกเฉลี่ย 1.55 มก./ล. นั่นคือระบบสามารถกำจัดทีเคเอ็นได้ถึง 38.3 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดได้สูงถึงร้อยละ 96

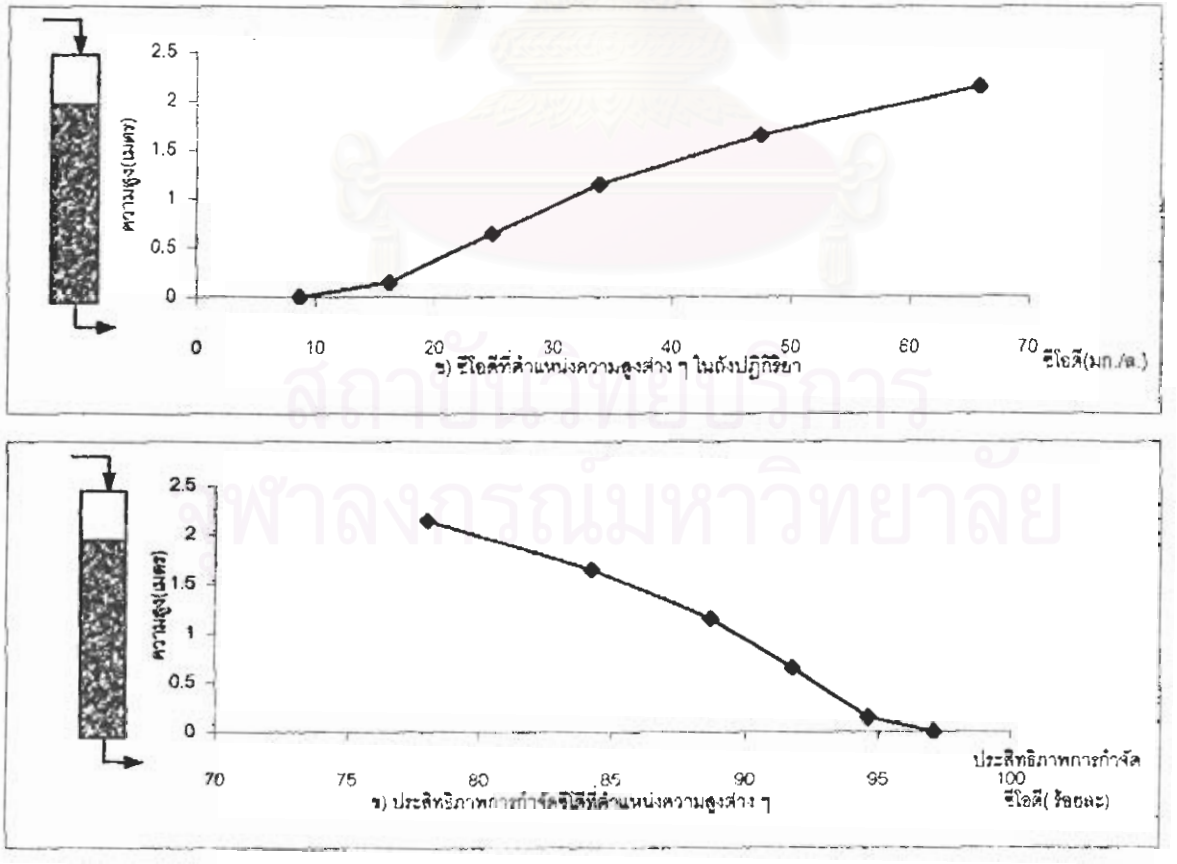
ที่สถานะคงตัว วิเคราะห์ค่าไนโตรเจนในรูปไนไตรท์และไนเตรทได้ดังตารางที่ 4.1 ไนไตรท์น้ำออกมีค่าน้อยมากเข้าใกล้ศูนย์ ส่วนไนเตรทในน้ำออกมีมากเนื่องจากการเกิดไนตริฟิเคชั่นเปลี่ยนรูปแอมโมเนียไนโตรเจนจนกลายเป็นไนไตรท์และไนเตรท ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็นสูงถึงร้อยละ 96 แต่ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดได้เพียงร้อยละ 30 เพราะไม่มีขั้นตอนแอนอกซิกอยู่ในระบบนี้

ที่ภาระบรรทุกอินทรีย์นี้ใช้ความสูงของชั้นกรอง 2 เมตร ใช้เวลาในการเดินระบบ 28 วัน จึงเริ่มเก็บตัวอย่าง ที่สถานะคงตัวอีก 7 วัน ที่สถานะคงตัววิเคราะห์ตัวอย่างได้ซีโอดีของน้ำเข้าเฉลี่ย 300 มก./ล. ซึ่งให้ค่าเฉลี่ยซีโอดีของน้ำออกประมาณ 8.69 มก./ล. ทีเคเอ็นของน้ำเข้าเฉลี่ย 40 มก./ล. ให้ค่าทีเคเอ็นของน้ำออกเฉลี่ย 1.55 มก./ล. และมีของแข็งแขวนลอยที่หลุดออกไปกับน้ำออกอยู่ในช่วง 14-29 มก./ล. หรือ 1,680-3,480 มก./วัน ของแข็งแขวนลอยที่ถูกกำจัดทิ้งไปจากการล้างย้อนประมาณ 12,140 มก./วัน ดังนั้นของแข็งแขวนลอยที่หลุดออกจากระบบทั้งหมดประมาณ 14,870 มก./วัน ปริมาณไนไตรท์และไนเตรทของน้ำออกเป็น 0.008 และ 26.4 มก./ล. ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.3 ทีเคเอ็นและประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็นที่ภาระบรรทุก 2.22 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วันและความสูงชั้นตัวกลาง 2 ม.



รูปที่ 4.4 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ ที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.22 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และความสูงชั้นตัวกลาง 2 ม.

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่าง ๆ ที่สถานะคงตัวที่ความสูงชั้นกรอง 2 เมตร

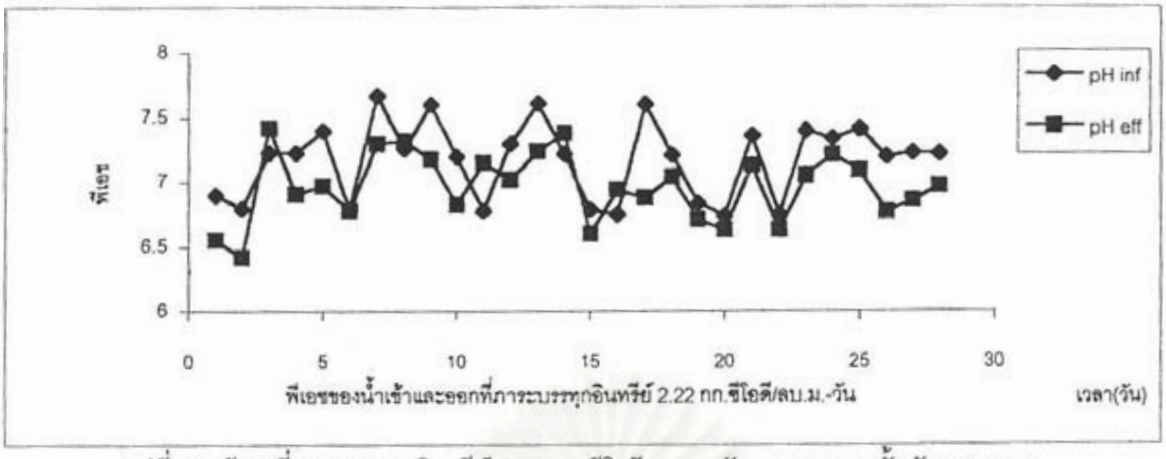
พารามิเตอร์ที่วัด	ค่าเฉลี่ย	SD	N
ซีโอดีน้ำเข้า (มก./ล.)	300	13.4	7
ซีโอดีน้ำออก (มก./ล.)	8.67	0.97	7
ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (ร้อยละ)	97	-	-
ทีเคเอ็นน้ำเข้า (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	40	1	7
ทีเคเอ็นน้ำออก (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	1.55	0.25	7
ประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็น (ร้อยละ)	96	-	-
ไนไตรท์น้ำออก (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	0.008	0.003	7
ไนเตรทน้ำออก (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	26.4	2.28	7
ไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำเข้า (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	40	-	-
ไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำออก (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	28	-	-
ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมด (ร้อยละ)	30	-	-
ของแข็งแขวนลอยน้ำออก (มก./ล.)	22.8	5.73	7
(มก./วัน)	2,730	-	-
ของแข็งแขวนลอยน้ำล้างย้อน (มก./วัน)	12,140	800	7
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่หลุดจากระบบ (มก./วัน)	14,870	890	7

ในการทดลองนี้ระบบมีระยะเวลากักน้ำในชั้นกรองแบบถังเปล่า(EBDT) 3.24 ชั่วโมง ซึ่งให้ค่าเฉลี่ยซีโอดีตามลำดับความสูงของชั้นตัวกลางดังตารางที่ 4.2 พบว่า ระดับความสูง 2.15 เมตร (ซึ่งอยู่เหนือชั้นตัวกลาง) ซีโอดีเฉลี่ย 66 มก./ล. ซึ่งเห็นว่าซีโอดีลดไปแล้วถึงร้อยละ 78 เนื่องจากการเป่าอากาศจากด้านล่างของถังทำให้เกิดการกวนผสมของน้ำในถังที่ถูกกำจัดซีโอดีไปก่อนหน้า (ซึ่งมีซีโอดีต่ำแล้ว)กับน้ำที่เพิ่งป้อนเข้าสู่ถัง ทำให้วิเคราะห์น้ำที่ระดับความสูงนี้มีซีโอดีต่ำ ดังรูปที่ 4.4 และการกำจัดซีโอดียังเพิ่มขึ้นอีกเมื่อน้ำผ่านชั้นกรองไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งสูงสุดที่ทางน้ำออก ซึ่งมีซีโอดีน้ำออกเฉลี่ย 8.67 มก./ล. และประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเป็นร้อยละ 97

ตารางที่ 4.2 ค่าซีโอดีตามลำดับความสูงของชั้นตัวกลาง

ความสูงของชั้นตัวกลาง (ม.)		ซีโอดี (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (ร้อยละ)
2.15	เฉลี่ย	66	78
	SD	3.62	-
	N	7	-
1.65	เฉลี่ย	47.4	84
	SD	4.71	-
	N	7	-
1.15	เฉลี่ย	34	89
	SD	4.84	-
	N	7	-
0.65	เฉลี่ย	24.9	92
	SD	3.02	-
	N	7	-
0.15	เฉลี่ย	16.1	95
	SD	0.17	-
	N	7	-
0 (น้ำออก)	เฉลี่ย	8.69	97
	SD	0.97	-
	N	7	-

จากการทดลองเห็นได้ว่า พีเอชของน้ำเข้าซึ่งเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ มีค่าอยู่ในช่วง 6.9-7.7 และน้ำออกมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.5-7.4 ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่อยู่ในช่วงที่จุลชีพสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ ดังรูปที่ 4.5

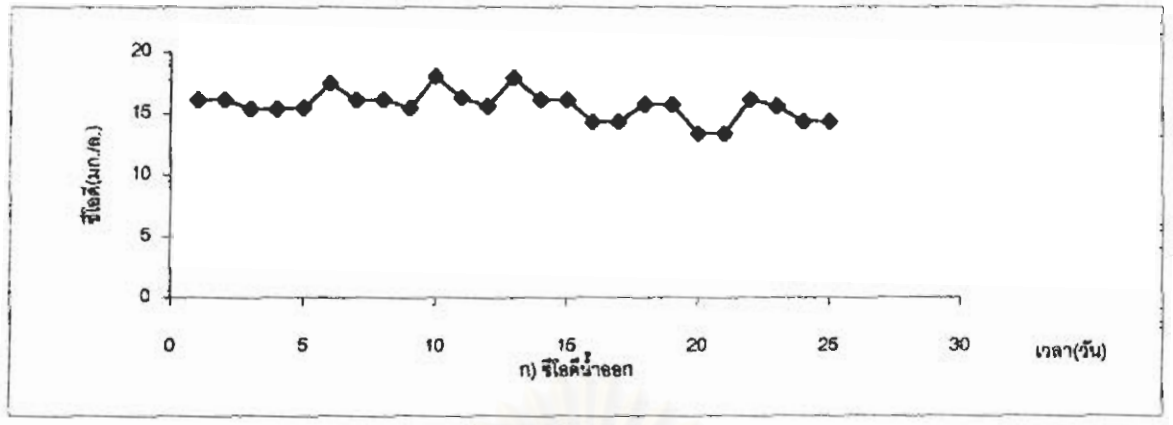


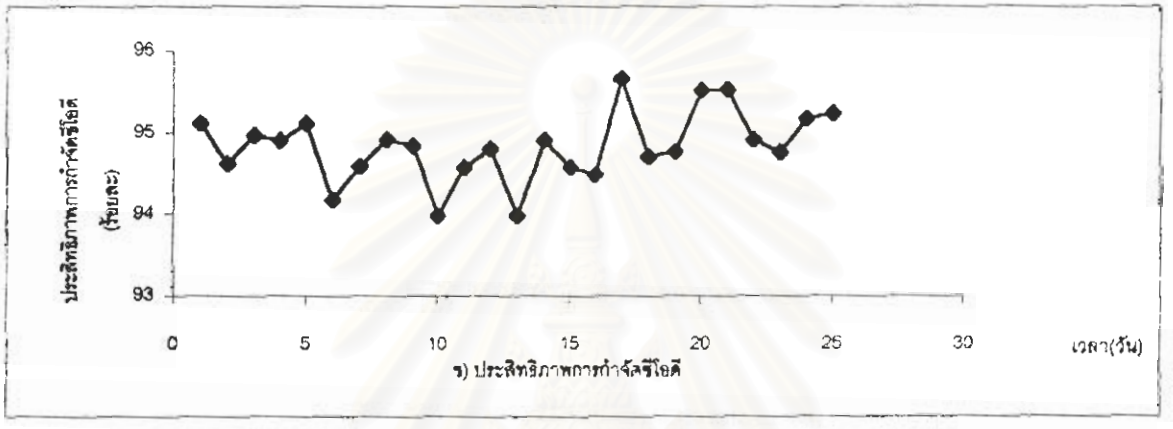
รูปที่ 4.5 พีเอชที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.22 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วันและความสูงชั้นตัวกลาง 2 ม.

4.2.2 ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.96 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วันที่ความสูงชั้นกรอง 1.5 เมตร

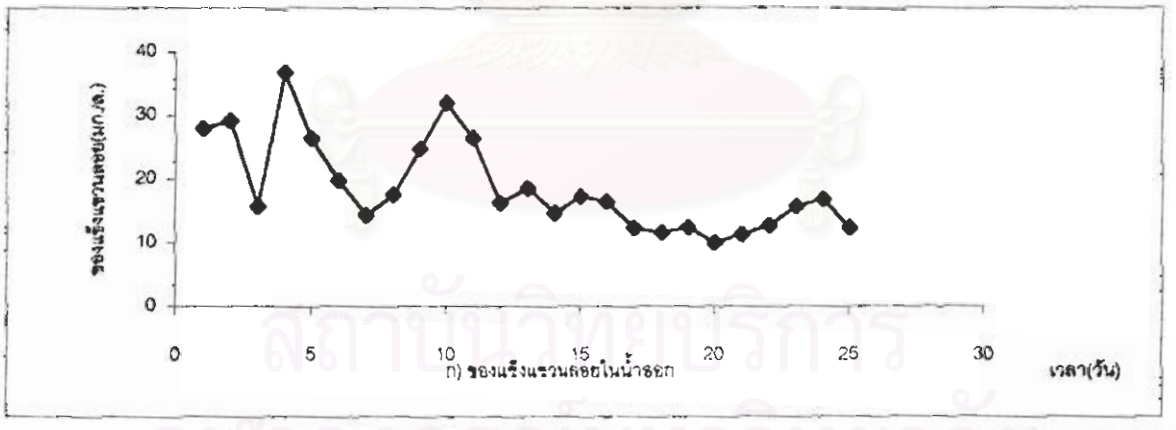
ที่ภาระบรรทุกอินทรีย์นี้ เป็นการลดระดับชั้นความสูงจาก 2 เมตร เหลือ 1.5 เมตรเนื่องจากเมื่อเดินระบบไปเรื่อย ๆ ระดับน้ำเหนือตัวกลางก็จะสูงขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากการสูญเสียความดันจากเซลล์ในระบบเพิ่มขึ้นหากมีการเพิ่มภาระบรรทุกจะยิ่งทำให้อัตราการเกิดเซลล์เพิ่มมากขึ้น ชั้นตัวกลางก็ยิ่งอุดตันเร็วยิ่งขึ้น ถ้าต้องการคงความถี่ในการล้างตัวกลางไว้ที่ 24 ชั่วโมงตลอดการทดลองจึงต้องลดความสูงของชั้นกรองลง โดยที่ยังใช้ความเร็วการไหลเท่าเดิมต่อเนื่องคือใช้ความเร็วการไหลลง 0.62 ม./ชม. จึงทำให้ซีโอดีในน้ำออกในช่วงเริ่มระบบไม่สูงมากนัก และอยู่ในช่วง 14-16 มก./ล. แต่ซีโอดีในน้ำออกนี้สูงกว่าซีโอดีน้ำออกที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.22 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน เนื่องจากการลดความสูงของระดับชั้นตัวกลาง ทำให้ระบบต้องรับภาระบรรทุกเพิ่มขึ้น พื้นที่ผิวของตัวกลางสำหรับให้เซลล์เกาะน้อยลง เซลล์ในถังปฏิกิริยาจึงน้อยลง และการลดระดับความสูงของชั้นตัวกลางยังทำให้เวลากักในส่วนที่เป็นถังปฏิกิริยา(ส่วนที่มีเปลือกหอย)ลดลงด้วย ดังนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของระบบจึงลดลงด้วย ดังรูปที่ 4.6

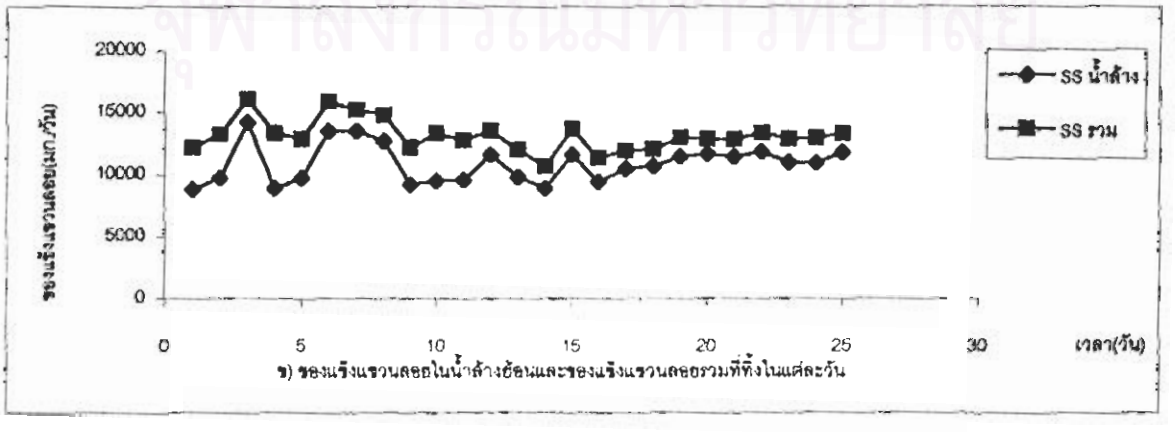
ทั้งนี้โดยการลดความสูงของชั้นตัวกลางลงและใช้ความเร็วในการไหลเท่าเดิมต่อจากการทดลองก่อนหน้านี้ ซีโอดีจึงค่อนข้างคงที่ตั้งแต่เริ่มเดินระบบ ซึ่งอยู่ในช่วง 14-16 มก./ล. เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่ภาระบรรทุกอินทรีย์นี้พบว่าลดลงจากการทดลองที่แล้ว ซึ่งที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.96 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน นี้มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเป็นร้อยละ 95





รูปที่ 4.6 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่ภาระบรรทุก 2.96 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วันและความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.



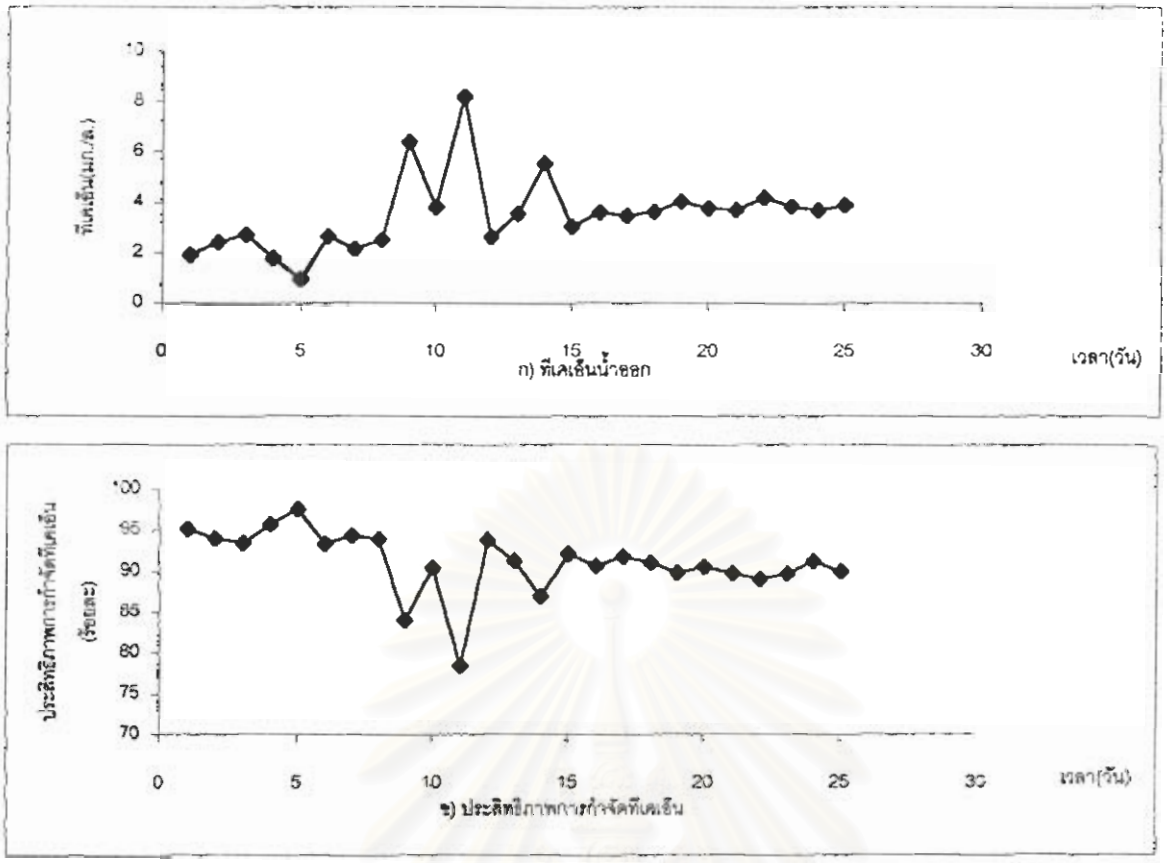


รูปที่ 4.7 ของแข็งแขวนลอยที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.96 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วันและความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.

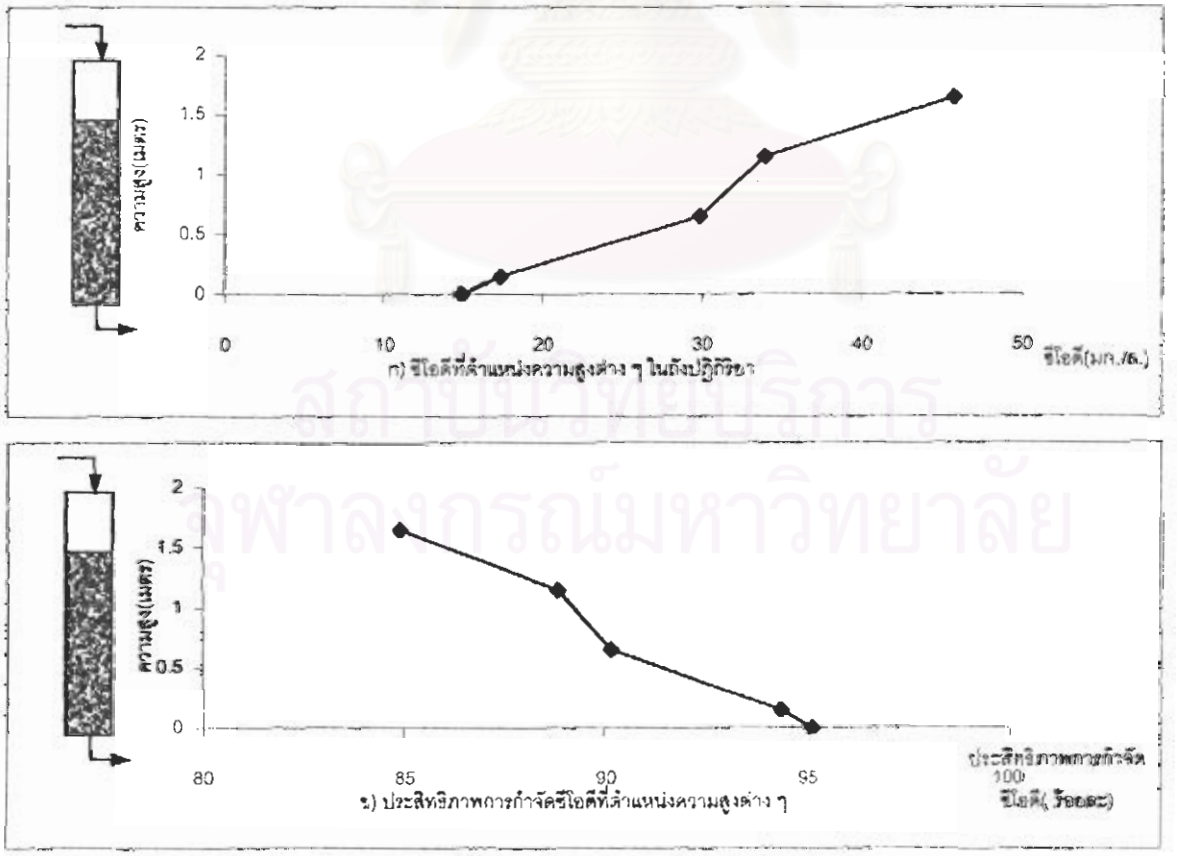
ของแข็งแขวนลอยในน้ำออกที่ภาระบรรทุกอินทรีย์นี้มีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นลงเยอะในช่วงแรก อยู่ในช่วง 15-40 มก./ล. เมื่อเข้าสู่วันที่ 12 ของการทดลอง ของแข็งแขวนลอยในน้ำออกมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยลงค่อนข้างใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 10-20 มก./ล. ของแข็งแขวนลอยในน้ำล้างย้อนมีค่าแกว่งในช่วงวันแรกของการทดลอง และเริ่มมีค่าแกว่งน้อยลงเมื่อวันที่ 16 ของการทดลอง เนื่องมาจากระบบเริ่มปรับตัวเพื่อเข้าสู่สถานะคงตัว ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่หลุดออกจากระบบในแต่ละวันมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับของแข็งแขวนลอยในน้ำล้างย้อน เพราะเมื่อเปรียบเทียบของแข็งแขวนลอยในน้ำออกคือประมาณ 13.5 มก./ล.(1,620 มก./วัน) กับของแข็งแขวนลอยในน้ำล้างย้อนคือประมาณ 11,470 มก./วัน แล้วพบว่าของแข็งแขวนลอยในน้ำออกน้อยมาก ทำให้ของแข็งแขวนลอยรวมที่หลุดออกจากระบบคงที่เฉลี่ย 13,090 มก./วัน(1,620 มก./วัน + 11,470 มก./วัน) ของแข็งแขวนลอยรวมในแต่ละวันคือของแข็งแขวนลอยในน้ำออกรวมกับของแข็งแขวนลอยในน้ำล้างย้อน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงปริมาณเซลล์ที่ถูกสร้างขึ้นในแต่ละวันของระบบ เมื่อของแข็งแขวนลอยรวมในแต่ละวันคงที่ นั่นคือระบบสามารถสร้างเซลล์ได้เท่ากันทุกวัน ซึ่งหมายถึงระบบอยู่ในสถานะคงตัว ดังรูปที่ 4.7 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยในน้ำล้างย้อนได้เข้าสู่สถานะคงตัวแล้วจึงเก็บข้อมูลมาวิเคราะห์ได้

ที่สถานะคงตัว ระบบสร้างเซลล์ขึ้นวันละประมาณ 13,090 มก. และหลุดออกมากับน้ำออก 13.5 มก./ล. หรือ 1620 มก./วัน และหลุดออกโดยการล้างย้อนอีกประมาณ 11,470 มก./วัน

ที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.22 และ 2.96 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน ซึ่งต่างกันที่ความสูงของชั้นตัวกลางกรองโดยยังมีความเร็วการไหลที่เท่ากัน เห็นได้ว่าสามารถกำจัดทีเคเอ็นได้จนเหลือน้อยมากเฉลี่ย 1.55 และ 3.94 มก./ล. ตามลำดับ ที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.92 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน เหลือทีเคเอ็นในน้ำออกมากกว่าที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.22 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน เนื่องจากที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.22 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน นั้นมีความสูงของชั้นตัวกลางเป็น 2 เมตร ทำให้เวลากักมากกว่าที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.96 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน ซึ่งมีความสูงของชั้นตัวกลางเป็น 1.5 เมตร จึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็นมากกว่า



รูปที่ 4.8 ทีเคเอ็นและประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็นที่ภาระบรรทุก 2.96 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วันและความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.



รูปที่ 4.9 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ ที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.96 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.

พิจารณาทีเคเอ็นที่น้ำออกในช่วงวันแรกของการทดลองที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.96 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน เห็นว่าทีเคเอ็นในน้ำออกมีค่าต่ำตั้งแต่ต้น ถึงแม้มีการแกว่งขึ้นลงบ้าง แต่แกว่งอยู่ในช่วงต่ำ และเข้าสู่สถานะคงตัวได้อย่างรวดเร็ว คือเริ่มมีค่าค่อนข้างคงที่ ที่วันที่ 15 ของการทดลองที่ภาระบรรทุกอินทรีย์นี้ เนื่องด้วยการทดลองนี้ดำเนินต่อเนื่องจากการทดลองที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.22 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน ระบบจึงสามารถปรับตัวได้เร็ว เพราะเพิ่มภาระบรรทุกอินทรีย์ให้ระบบเพียงเล็กน้อย ประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็นของการทดลองที่ภาระบรรทุกอินทรีย์นี้จึงเป็นร้อยละ 90 ดังรูปที่ 4.8

ที่สถานะคงตัว(ดูจากการคงที่ของของแข็งแขวนลอยรวมออกจากระบบ) วิเคราะห์ค่าทีเคเอ็น ไนไตรท์ และไนเตรทได้ดังตารางที่ 4.3 ไนไตรท์ในน้ำออกมีค่าน้อยมากเข้าใกล้ศูนย์ และไนเตรทในน้ำออกเฉลี่ย 24.7 มก./ล.ไนเตรทในน้ำออกมีมากเนื่องจากการเกิดไนตริฟิเคชั่นเปลี่ยนรูปแอมโมเนียไนโตรเจนจนกลายเป็นไนไตรท์และไนเตรท ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดน้อยคือร้อยละ 28 เพราะไม่มีขั้นตอนแอนอกซิกอยู่ในระบบนี้

ที่ภาระบรรทุกอินทรีย์นี้ใช้ความสูงของชั้นกรอง 1.5 เมตร ใช้เวลาในการเดินระบบ 25 วัน จึงเริ่มเก็บตัวอย่าง ที่สถานะคงตัวอีก 7 วัน ซีโอดีของน้ำเข้าเฉลี่ย 302 มก./ล. ซึ่งให้ค่าเฉลี่ยซีโอดีของน้ำออก 14.8 มก./ล. ค่าทีเคเอ็นของน้ำเข้าเฉลี่ย 40 มก./ล. ให้ค่าทีเคเอ็นของน้ำออกเฉลี่ย 3.94 มก./ล. และมีของแข็งแขวนลอยที่หลุดออกไปกับน้ำออกอยู่ในช่วง 9-20 มก./ล. หรือ 1,080-2,400 มก./วัน ของแข็งแขวนลอยที่ถูกกำจัดทิ้งไปจากการล้างย้อนประมาณ 11,470 มก./วัน ดังนั้นของแข็งแขวนลอยที่หลุดออกจากระบบทั้งหมดประมาณ 13,090 มก./วัน ปริมาณไนไตรท์และไนเตรทของน้ำออกเป็น 0.03 และ 24.7 มก./ล. ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่าง ๆ ที่สถานะคงตัวที่ความสูงชั้นกรอง 1.5 เมตร

พารามิเตอร์ที่วัด	ค่าเฉลี่ย	SD	N
ซีโอดีน้ำเข้า (มก./ล.)	302	13.0	7
ซีโอดีน้ำออก (มก./ล.)	14.8	1.22	7
ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (ร้อยละ)	95	-	-
ทีเคเอ็นน้ำเข้า (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	40	1.16	7
ทีเคเอ็นน้ำออก (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	3.95	0.30	7
ประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็น (ร้อยละ)	90	-	-
ไนไตรท์น้ำออก (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	0.033	0.007	7
ไนเตรทน้ำออก (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	24.7	1.98	7
ไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำเข้า (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	40	-	-
ไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำออก (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	28.7	-	-
ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมด (ร้อยละ)	28	-	-
ของแข็งแขวนลอยน้ำออก (มก./ล.)	13.5	4.55	7
(มก./วัน)	1,620	-	-
ของแข็งแขวนลอยน้ำล้างย้อน (มก./วัน)	11,470	607	7
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่ออกจากระบบ (มก./วัน)	13,090	924	7

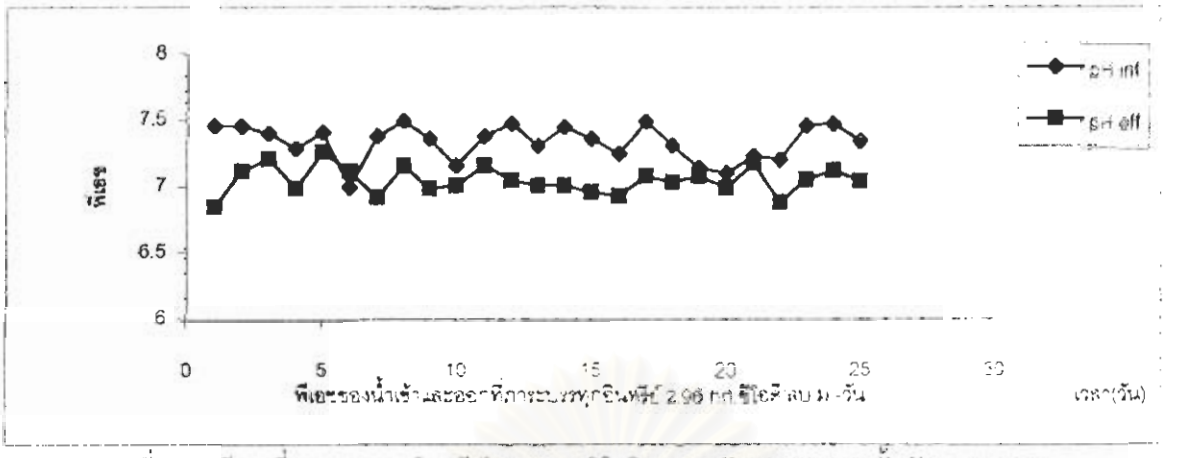
ในการทดลองนี้ ระบบมีระยะเวลากักน้ำในชั้นกรองแบบถังเปล่า(EBDT) 2.43 ชั่วโมง ซึ่งให้ค่าซีโอดีตามลำดับความสูงของชั้นตัวกลางดังตารางที่ 4.4 พบว่าที่ระดับความสูง 1.65 เมตร(ซึ่งอยู่เหนือชั้นตัวกลาง)ซีโอดีเฉลี่ย 45.7 มก./ล. ซึ่งซีโอดีลดไปแล้วถึงร้อยละ 85 เนื่องจากการเป่าอากาศจากด้านล่างของถังทำให้เกิดการกวนผสมของน้ำในถังที่ถูกกำจัดซีโอดีไปก่อนหน้า(ซึ่งมีซีโอดีต่ำแล้ว)กับน้ำที่เพิ่งป้อนเข้าสู่ถัง ทำให้น้ำที่วิเคราะห์ได้มีซีโอดีต่ำดังรูปที่ 4.9 เห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดียังเพิ่มขึ้นอีกเมื่อน้ำผ่านชั้นกรองไปเรื่อยๆ จนกระทั่งสูงสุดที่ทางน้ำออกประมาณร้อยละ 95

ตารางที่ 4.4 ค่าซีโอดีตามลำดับความสูงของชั้นตัวกลาง

ความสูงของชั้นตัวกลาง (ม.)		ซีโอดี (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (ร้อยละ)
1.65	เฉลี่ย	45.7	85
	SD	3.73	-
	N	7	-
1.15	เฉลี่ย	33.8	89
	SD	1.42	-
	N	7	-
0.65	เฉลี่ย	29.8	90
	SD	2.52	-
	N	7	-
0.15	เฉลี่ย	17.2	94
	SD	2.37	-
	N	7	-
0 (น้ำออก)	เฉลี่ย	14.8	95
	SD	1.22	-
	N	7	-

จากการทดลองเห็นได้ว่า พีเอชของน้ำเข้าซึ่งเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ มีค่าอยู่ในช่วง 7.0-7.5 และน้ำออกมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.9-7.3 ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่อยู่ในช่วงที่จุลชีพสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ ดังรูปที่ 4.10

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.10 พีเอชที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.96 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วันและความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.

4.2.3 การเลือกระดับความสูงของตัวกลางที่เหมาะสม

เมื่อเปรียบเทียบค่าต่าง ๆ ของการทดลองที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.22 กับ 2.96 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน ซึ่งมีความเร็วของการไหลเท่ากัน ต่างกันที่ระดับความสูงของตัวกลาง คือที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.22 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน บรรจุตัวกลางสูง 2 เมตร ส่วนที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.96 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน บรรจุตัวกลางสูง 1.5 เมตร ได้คุณสมบัติต่าง ๆ ของน้ำออกที่สถานะคงตัว ดังตาราง 4.5

ตารางที่ 4.5 คุณภาพของน้ำออกที่ความเร็วของการไหล 0.62 ม./ชม.

พารามิเตอร์ที่วัด	ระดับความสูงของตัวกลาง	
	2 เมตร	1.5 เมตร
ซีโอดี (มก./ล.)	8.69	14.8
ทีเคเอ็น (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	1.55	3.94
ไนโตรเจนทั้งหมด (มก./ล.)	28	28.7
SS น้ำออก (มก./ล.)	22.8	13.5
SS น้ำออก (มก./วัน)	2,730	1,620
SS รวม (มก./วัน)	14,880	13,100
SS น้ำล้าง (มก./วัน)	12,140	11,470
NO_3-N (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	26.4	24.73
NO_2-N (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	0.008	0.033

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ทีเคเอ็น และ ไนโตรเจนทั้งหมด ได้ดังตาราง 4.6

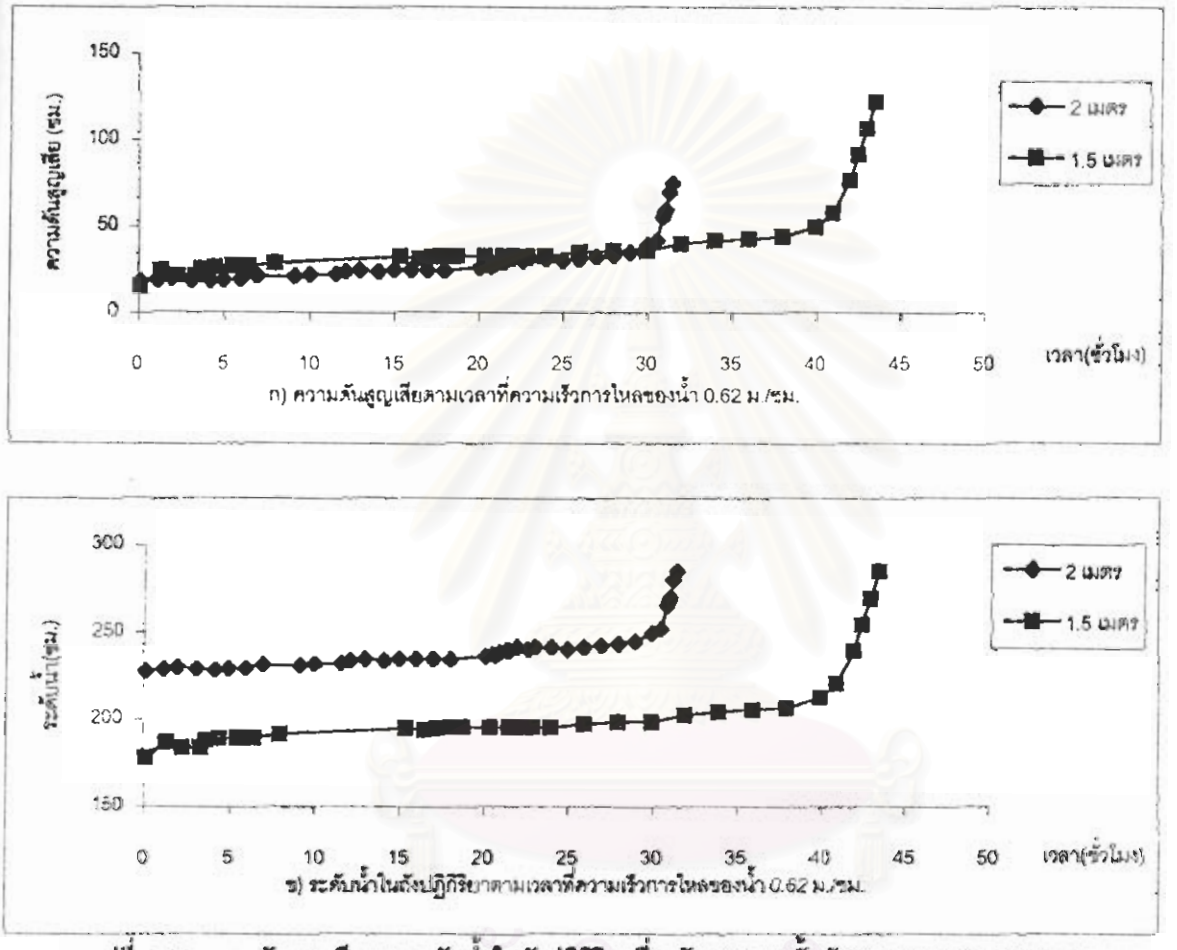
ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ทีเคเอ็น และ ไนโตรเจนทั้งหมด ที่ความเร็วของการไหล 0.62 ม./ชม.

ประสิทธิภาพการกำจัด	ระดับความสูงของตัวกลาง	
	2 เมตร	1.5 เมตร
ซีโอดี (ร้อยละ)	97	95
ทีเคเอ็น (ร้อยละ)	97	90
ไนโตรเจนทั้งหมด (ร้อยละ)	28	28

จากตารางที่ 4.6 เห็นว่าการลดระดับความสูงของตัวกลางลงนั้นทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดลดลงเล็กน้อยมากเกือบจะเท่ากันและคุณภาพน้ำทิ้งก็ใกล้เคียงกันมากด้วย แต่ที่ระดับความสูง 2 เมตรนั้นทำให้ถังปฏิกิริยามีส่วนว่างที่เหลือเหนือจากตัวกลางอีก 1 เมตร ซึ่งเมื่อเดินระบบไปเรื่อย ๆ พบว่าระดับน้ำเหนือตัวกลางสูงขึ้นเรื่อย ๆ จากการสูญเสียความดันอันเนื่องมาจากเซลล์ในระบบเพิ่มขึ้น เซลล์จุลชีพที่เพิ่มขึ้นนี้เกาะอยู่ที่ผิวของชั้นตัวกลาง จึงทำให้เกิดการอุดตันที่ผิวของชั้นตัวกลาง เป็นผลให้ระดับน้ำเหนือชั้นตัวกลางสูงขึ้นเรื่อย ๆ หากไม่มีการล้างตัวกลางกรองระดับน้ำเหนือชั้นตัวกลางสูงขึ้นจนล้นที่ความสูงของชั้นตัวกลาง 2 เมตร ซึ่งใช้เวลาประมาณ 31 ชั่วโมง ระดับน้ำจึงล้นจากถังปฏิกิริยา แต่ที่ความสูงของชั้นตัวกลางที่ 1.5 เมตรนั้น ใช้เวลาประมาณ 43 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.11 ซึ่งเห็นได้ว่าค่าสูญเสียความดันสูงสุดของความสูงชั้นตัวกลางที่ 2 เมตร เป็น 60 ซม. ระยะเวลาที่ทำให้เกิดระดับน้ำสูญเสีย 60 ซม. ใช้เวลาประมาณ 31 ชั่วโมง และค่าสูญเสียความดันสูงสุดของความสูงชั้นตัวกลางที่ 1.5 เมตร เป็น 107 ซม. ระยะเวลาที่ทำให้เกิดระดับน้ำสูญเสีย 107 ซม. ใช้เวลาประมาณ 43 ชั่วโมง ซึ่งมากกว่ากรณีแรก 12 ชั่วโมง จึงเลือกใช้ที่ความสูง 1.5 เมตร นี้ในการทดลองต่อไป

ในการทดลองครั้งนี้เป็นการทดลองโดยการเพิ่มอัตราการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกิริยา ดังนั้น ในการทดลองอื่น ๆ จะเพิ่มอัตราการป้อนน้ำเสียซึ่งเป็นการเพิ่มภาระบรรทุกอินทรีย์ด้วยนั้น ยิ่งทำให้อัตราการเกิดเซลล์เพิ่มมากขึ้น ผิวของชั้นตัวกลางก็ยิ่งอุดตันเร็วยิ่งขึ้น ความถี่ในการล้างตัวกลางก็จำเป็นต้องเพิ่มขึ้นตามด้วย ซึ่งการเพิ่มความถี่ในการล้างย้อนนี้ทำให้สิ้นเปลืองน้ำที่ต้องใช้ในการล้างย้อน และสิ้นเปลืองพลังงานในการล้างย้อนอีกด้วย การทดลองนี้ต้องการคงความถี่ในการล้างตัวกลางไว้ที่ 24 ชั่วโมงตลอดการทดลอง ดังนั้นในการทดลองที่เหลือจึงเลือกใช้ความสูง

ชั้นตัวกลางกรองที่ 1.5 เมตร เพื่อให้ถังปฏิกิริยามีที่ว่างเหนือชั้นตัวกลางกรองพอที่จะเดินระบบต่อจนครบ 24 ชั่วโมงได้



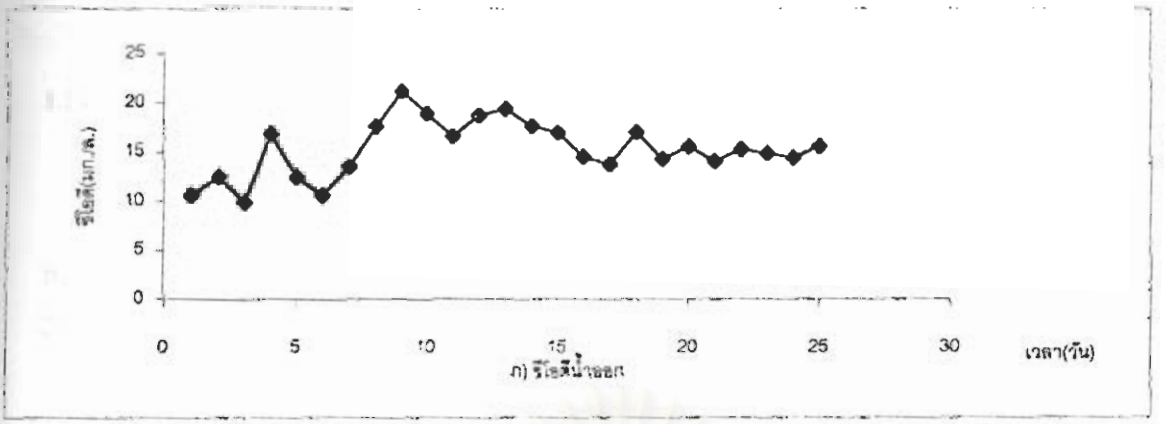
รูปที่ 4.11 ความดันสูญเสียและระดับน้ำในถังปฏิกิริยาที่ระดับความสูงชั้นตัวกลาง 2 และ 1.5 เมตร

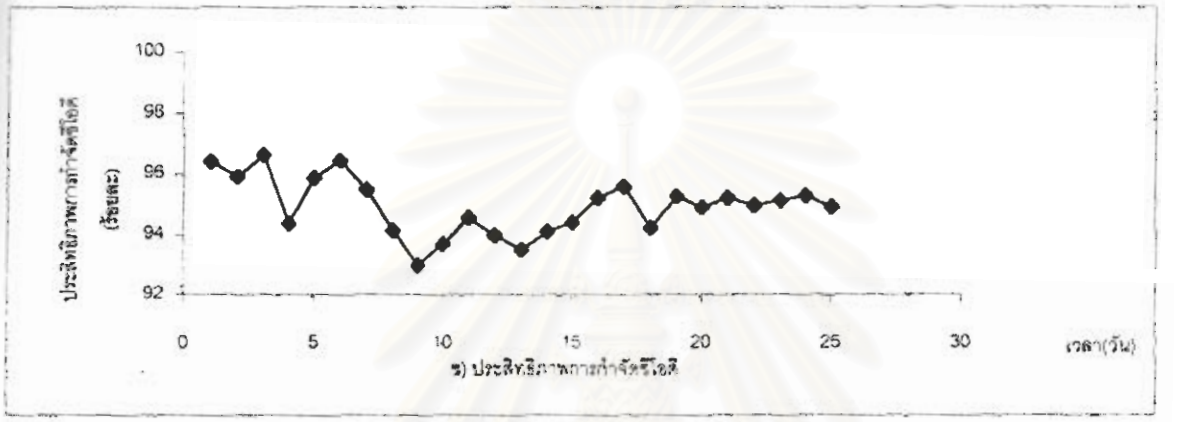
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.4 ภาระบรรทุกอินทรีย์ 5.18 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วันที่ความสูงชั้นกรอง 1.5 เมตร

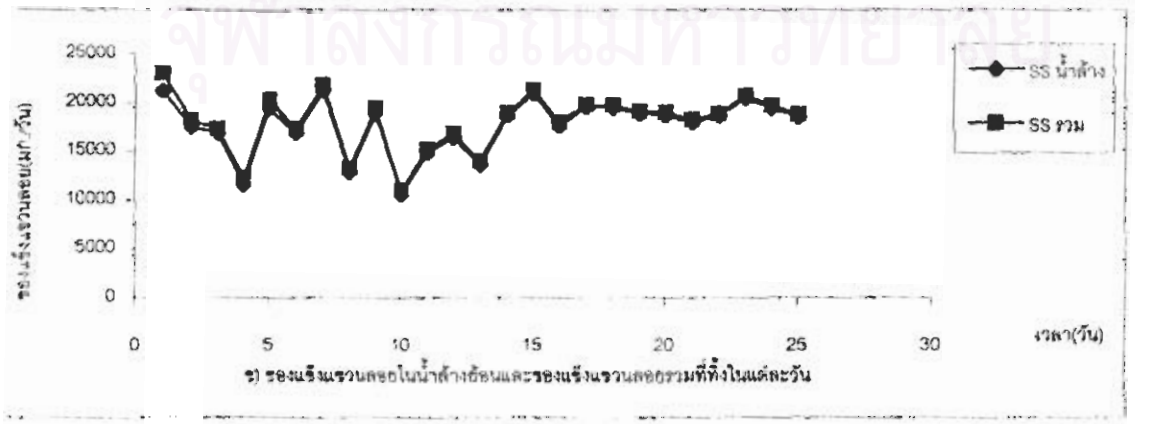
ที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 5.18 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน เป็นการเพิ่มความเร็วในการไหล ในขณะที่ความสูงของชั้นตัวกลางกรองยังเท่าเดิมอยู่ที่ 1.5 เมตร เมื่อเริ่มเดินระบบในช่วงแรกเห็นว่า การกำจัดซีโอดีของระบบไม่คงที่มีการแกว่งอยู่มาก เมื่อเดินระบบไประยะหนึ่งระบบค่อย ๆ ปรับตัวเพื่อให้สามารถรับภาระบรรทุกอินทรีย์นี้ได้ ซึ่งการทดลองนี้ใช้เวลา 19 วัน ระบบจึงเริ่มเข้าสู่สถานะคงตัว สังเกตจากความเปลี่ยนแปลงของซีโอดีในน้ำออกช่วงหลังวันที่ 19 ของการทดลองนั้นลดลง และค่อนข้างคงที่อยู่ในช่วง 13-16 มก./ล. แต่ซีโอดีในน้ำออกของการทดลองที่ภาระบรรทุกอินทรีย์นี้สูงกว่าที่การทดลองที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.96 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน เนื่องมาจากการเพิ่มความเร็วในการไหลจาก 0.62 ม./ชม. เป็น 1.08 ม./ชม. ทำให้เวลากักเก็บในถังปฏิกิริยาลดลงจึงเป็นผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีลดลงด้วยเหลือ 95 ดังรูปที่ 4.12

ของแข็งแขวนลอยในน้ำออกที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 5.18 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน อยู่ในช่วง 1-3 มก./ล. ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นลงอย่างมาก ในช่วงวันแรก ๆ ของการทดลอง เมื่อเดินระบบไปพบว่าค่าการแกว่งของของแข็งแขวนลอยในน้ำออกลดลงโดยมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงที่แคบลงค่อนข้างใกล้เคียงกันคือประมาณ 1.24 มก./ล.(260มก./วัน) ของแข็งแขวนลอยในน้ำล้างย้อนมีค่าแกว่งมากในช่วงแรก เมื่อเวลาผ่านไปจนในวันที่ 17 ของการทดลอง ระบบมีของแข็งแขวนลอยในน้ำล้างย้อนค่อนข้างคงที่คือประมาณ 18,790 มก./วัน เนื่องจากระบบเริ่มปรับตัวให้เข้าสู่สถานะคงตัว ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่หลุดออกจากระบบในแต่ละวันมีแนวโน้มคล้ายกับของแข็งแขวนลอยในน้ำล้างย้อน เมื่อของแข็งแขวนลอยในน้ำล้างย้อนเริ่มคงที่ ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดจึงคงที่ด้วย ดังรูปที่ 4.13 เมื่อเปรียบเทียบที่ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่หลุดจากระบบในแต่ละวัน ของภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.96 กับ 5.18 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน แล้วเห็นว่า ที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 5.18 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากระบบต้องรับภาระบรรทุกอินทรีย์เพิ่มขึ้น จึงทำให้ระบบสร้างเซลล์จุลชีพได้เพิ่มมากขึ้นอีก ของแข็งแขวนลอยรวมเริ่มคงที่โดยมีค่าอยู่ที่ประมาณ 19,050 มก./วัน(260 มก./วัน + 18,790 มก./วัน) ของแข็งแขวนลอยรวมในแต่ละวันคือของแข็งแขวนลอยในน้ำออกรวมกับของแข็งแขวนลอยในน้ำล้างย้อน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงปริมาณเซลล์ที่ถูกสร้างขึ้นในแต่ละวันของระบบ เมื่อของแข็งแขวนลอยออกจากระบบรวมในแต่ละวันคงที่ นั่นคือระบบสามารถสร้างเซลล์ได้เท่ากันทุกวัน ซึ่งหมายถึงระบบอยู่ในสถานะคงตัว ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยในน้ำล้างย้อนได้เข้าสู่สถานะคงตัวแล้วจึงเก็บข้อมูลมาวิเคราะห์ต่อไปได้





รูปที่ 4.12 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่ภาระบรรทุก 5.18 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วันและความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.



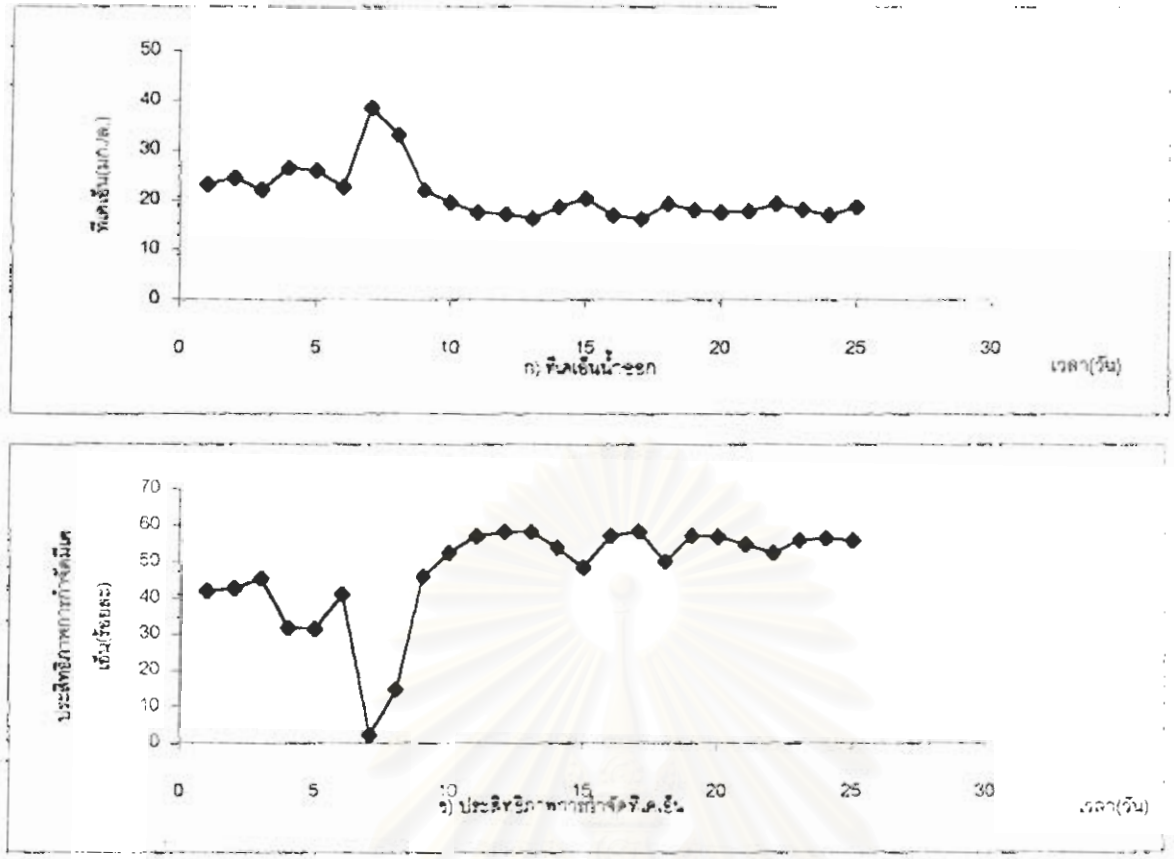
รูปที่ 4.13 ขอ ของแข็งแขวนลอยที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 5.18 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วันและความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.

ที่สถานะคงตัว ระบบสร้างเซลล์ขึ้นวันละประมาณ 19,050 มก. และหลุดออกมากับน้ำออก 1.24 มก./ล.หรือ 260 มก./วัน และหลุดออกโดยการล้างย้อนอีกประมาณ 18,790 มก./วัน

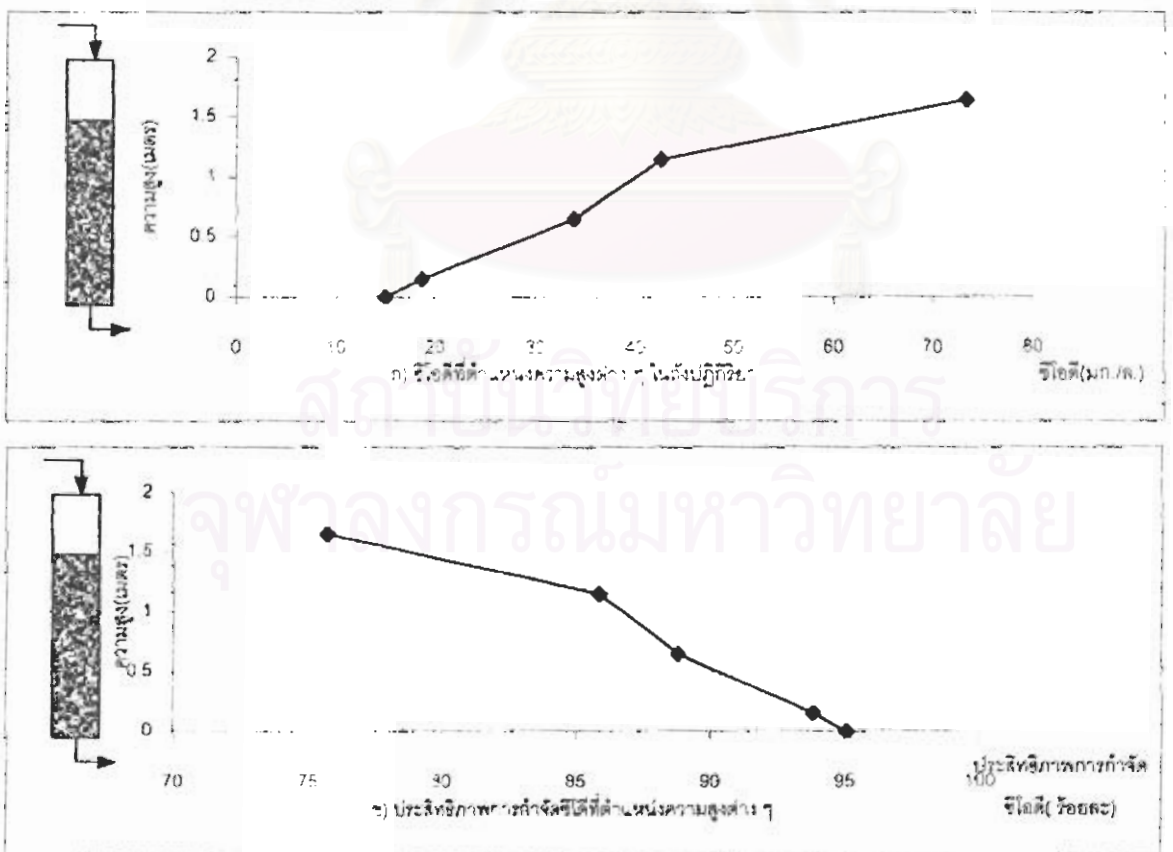
พิจารณาทีเคเอ็นในน้ำออกในช่วงแรกแกว่งมาก เมื่อเวลาผ่านไประบบสามารถปรับตัวเพื่อสามารถกำจัดทีเคเอ็นได้ด้วยปริมาณที่ค่อนข้างคงที่ คือที่วันที่ 11 ของการทดลองที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 5.18 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน ให้ทีเคเอ็นในน้ำออกเริ่มคงที่อยู่ในช่วง 17-19 มก./ล. ซึ่งเห็นว่าระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดทีเคเอ็นได้ลดลงจากการทดลองที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.96 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน เนื่องจากระบบต้องรับภาระบรรทุกอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น ด้วยความเร็วในการไหลเพิ่มขึ้น ทำให้ระยะเวลากักเก็บในถังปฏิกิริยาลดน้อยลง จึงมีช่วงระยะเวลาสำหรับการกำจัดไนโตรเจนน้อยลง จึงทำให้มีส่วนเหลือออกมากับน้ำออกมากขึ้น ดังรูปที่ 4.14

ที่สถานะคงตัว(ดูจากการคงที่ของของแข็งแขวนลอยรวมที่ออกจากระบบ) วิเคราะห์ค่าทีเคเอ็น ไนไตรท์ และไนเตรทได้ดังตารางที่ 4.7 ไนไตรท์ในน้ำออกมีค่าน้อยมากเข้าใกล้ศูนย์ และไนเตรทในน้ำออกเฉลี่ย 11.8 มก./ล. การเปลี่ยนรูปอินทรีย์ไนโตรเจนให้อยู่ในรูปไนไตรท์และไนเตรทน้อยลงสังเกตจากไนเตรทในน้ำออกลดลงจากที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.96 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วันเวลากักไม่พอสำหรับการเปลี่ยนรูปอินทรีย์ไนโตรเจน ประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็นลดลง และประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดเพิ่มขึ้น

ที่ภาระบรรทุกอินทรีย์นี้ใช้ความสูงของชั้นกรอง 1.5 เมตร ใช้เวลาในการเดินระบบ 25 วัน จึงเริ่มเก็บตัวอย่าง ที่สถานะคงตัวอีก 7 วัน ซีโอดีของน้ำเข้าเท่ากับ 302 มก./ล. ซึ่งให้ค่าเฉลี่ยซีโอดีของน้ำออก 14.9 มก./ล. ค่าทีเคเอ็นของน้ำเข้าเท่ากับ 39 มก./ล. ให้ค่าทีเคเอ็นของน้ำออกเฉลี่ย 18.0 มก./ล. และมีของแข็งแขวนลอยที่หลุดออกไปกับน้ำออกอยู่ในช่วง 1.0-1.5 มก./ล. หรือ 210-315 มก./วัน ของแข็งแขวนลอยที่ถูกกำจัดทิ้งไปจากการล้างย้อนประมาณ 18,790 มก./วัน ดังนั้นของแข็งแขวนลอยที่หลุดออกจากระบบทั้งหมดประมาณ 19,050 มก./วัน ปริมาณไนไตรท์และไนเตรทของน้ำออกเป็น 0.40 และ 11.8 มก./ล. ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.7



4.14 ทีเคเอ็นและประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็นที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 5.18 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วันและความสูงชั้นตัวกลาง 1.



รูปที่ 4.15 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ ที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 5.18 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.

ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่าง ๆ ที่สถานะคงตัวที่ความสูงชั้นกรอง 1.5 เมตร

พารามิเตอร์ที่วัด	ค่าเฉลี่ย	SD	N
ซีโอดีน้ำเข้า (มก./ล.)	302	11.4	7
ซีโอดีน้ำออก (มก./ล.)	14.9	1.21	7
ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (ร้อยละ)	95	-	-
ทีเคเอ็นน้ำเข้า (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	39	1.55	7
ทีเคเอ็นน้ำออก (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	18.0	0.56	7
ประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็น (ร้อยละ)	54	-	-
ไนไตรท์น้ำออก (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	0.40	0.03	7
ไนเตรทน้ำออก (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	11.8	0.98	7
ไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำเข้า (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	39	-	-
ไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำออก (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	30.2	-	-
ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมด (ร้อยละ)	23	-	-
ของแข็งแขวนลอยน้ำออก (มก./ล.)	1.24	0.13	7
(มก./วัน)	260	-	-
ของแข็งแขวนลอยน้ำล้างย้อน (มก./วัน)	18,790	1,100	7
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่ออกจากระบบ (มก./วัน)	19,050	1,100	7

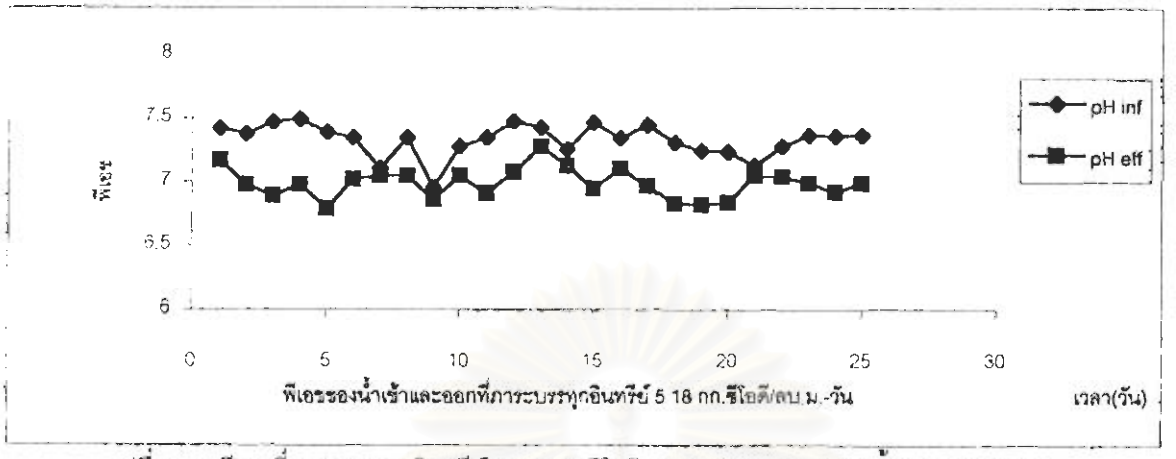
ในการทดลองนี้ ระบบมีระยะเวลากักน้ำในชั้นกรองแบบถังเปล่า(EBDT) 1.4 ชั่วโมง ซึ่งให้ค่าซีโอดีตามลำดับความสูงของชั้นตัวกลางดังตารางที่ 4.8 พบว่าที่ระดับความสูง 1.65 เมตร(ซึ่งอยู่เหนือชั้นตัวกลาง)ซีโอดีเฉลี่ย 73.3 มก./ล. ซึ่งซีโอดีลดไปแล้วถึงร้อยละ 76 เนื่องจากการเป่าอากาศจากด้านล่างของถังทำให้เกิดการกวนผสมของน้ำในถังที่ถูกกำจัดซีโอดีไปก่อนหน้า(ซึ่งมีซีโอดีต่ำแล้ว)กับน้ำที่เพิ่งป้อนเข้าสู่ถัง ทำให้วิเคราะห์น้ำที่ระดับความสูงนี้มีซีโอดีต่ำ ดังรูปที่ 4.15 เห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดียังเพิ่มขึ้นอีกเมื่อน้ำผ่านชั้นกรองไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งสูงสุดที่ทางน้ำออกประมาณร้อยละ 95

ตารางที่ 4.8 ค่าซีโอดีตามลำดับความสูงของชั้นตัวกลาง

ความสูงของชั้นตัวกลาง (ม.)		ซีโอดี (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (ร้อยละ)
1.65	เฉลี่ย	73.3	76
	SD	4.71	-
	N	7	-
1.15	เฉลี่ย	42.6	86
	SD	2.28	-
	N	7	-
0.65	เฉลี่ย	29.7	90
	SD	12.3	-
	N	7	-
0.15	เฉลี่ย	18.6	94
	SD	2.26	-
	N	7	-
0 (น้ำออก)	เฉลี่ย	14.9	95
	SD	1.21	-
	N	7	-

จากการทดลองเห็นได้ว่า พีเอชของน้ำเข้าซึ่งเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ มีค่าอยู่ในช่วง 7.0-7.5 และน้ำออกมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7.0-7.3 ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่อยู่ในช่วงที่จุลชีพสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ ดังรูปที่ 4.16

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.16 พีเอชที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 5.18 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วันและความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.

4.2.5 ภาระบรรทุกอินทรีย์ 7.40 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน ที่ความสูงชั้นกรอง 1.5 เมตร

ที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 7.40 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน นี้เป็นการเพิ่มภาระบรรทุกอินทรีย์ โดยการเพิ่มความเร็วในการไหล จากเดิมที่ 1.08 ม./ชม. เป็น 1.54 ม./ชม. ซึ่งเดิมสามารถกำจัดซีโอดีเหลือเฉลี่ย 14.9 มก./ล. เป็นเหลือซีโอดีในน้ำออกเฉลี่ย 38.3 มก./ล. เมื่อเริ่มเดินระบบที่ภาระบรรทุกอินทรีย์นี้ ระบบเริ่มปรับตัวโดยมีซีโอดีขึ้นลงในระหว่าง 20-50 มก./ล. จนกระทั่งในวันที่ 23 ของการทดลอง ระบบสามารถปรับตัวได้จนสามารถกำจัดซีโอดีให้เหลือซีโอดีน้ำออกเฉลี่ย 38.3 มก./ล. พบว่าซีโอดีน้ำออกที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ โดยการเพิ่มความเร็วการไหลนั้น มีผลทำให้เวลากักในถังปฏิกิริยาลดลง ประสิทธิภาพการลดซีโอดีจึงลดลงเหลือร้อยละ 88 ดังรูปที่ 4.17

ของแข็งแขวนลอยในน้ำออกในช่วงแรกของการทดลองค่อนข้างแกว่งมาก เมื่อเดินระบบไประยะหนึ่งระบบมีของแข็งแขวนลอยในน้ำออกอยู่ในช่วง 7-15 มก./ล.

จากรูปที่ 4.18 ของแข็งแขวนลอยในน้ำล้างย้อนในช่วงแรกค่อนข้างแกว่งขึ้นลงมากเนื่องจากระบบกำลังเริ่มปรับตัว จนวันที่ 29 ของการทดลองค่อนข้างคงที่เฉลี่ย 21,900 มก./วัน เมื่อพิจารณาเป็นของแข็งแขวนลอยรวมที่หลุดจากระบบ เห็นว่ามีแนวโน้มคล้ายของแข็งแขวนลอยในน้ำล้างย้อน เนื่องจากของแข็งแขวนลอยในน้ำออกประมาณ 14.2 มก./ล.(4,280 มก./วัน) ค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับของแข็งแขวนลอยในน้ำล้างย้อน ของแข็งแขวนลอยรวมที่ทิ้งในแต่ละวันจึงเริ่มค่อนข้างคงที่ที่วันที่ 29 ของการทดลองเช่นเดียวกัน โดยมีค่าเฉลี่ย 26,180 มก./วัน(4,280 มก./วัน +

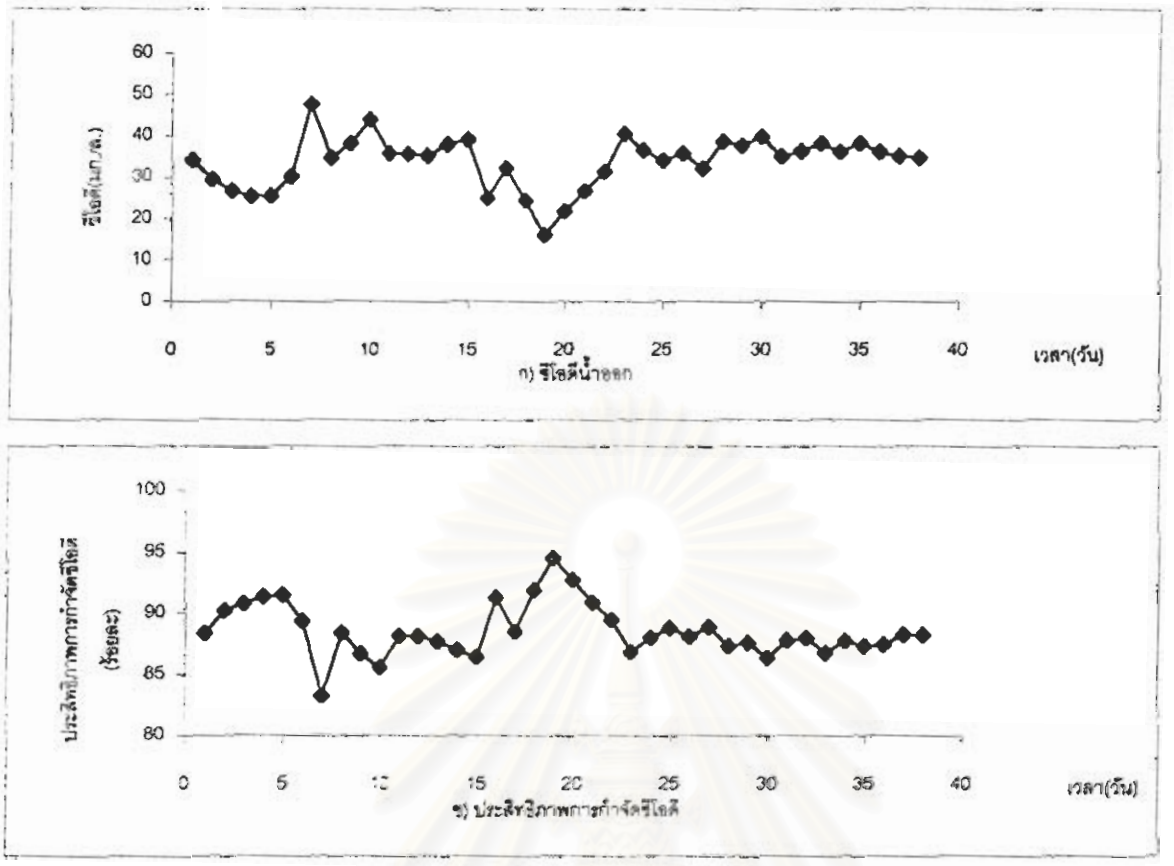
21,900 มก./วัน) ซึ่งเพิ่มขึ้นจากการทดลองก่อนหน้าเนื่องจากภาระบรรทุกอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดเซลล์จุลชีพมากขึ้น ของแข็งแขวนลอยรวมในแต่ละวันคือของแข็งแขวนลอยในน้ำออกรวมกับของแข็งแขวนลอยในน้ำล้างย้อน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงปริมาณเซลล์ที่ถูกสร้างขึ้นในแต่ละวันของระบบ เมื่อของแข็งแขวนลอยออกจากระบบรวมในแต่ละวันคงที่ นั่นคือระบบสามารถสร้างเซลล์ได้เท่ากันทุกวัน ซึ่งหมายถึงระบบอยู่ในสถานะคงตัว ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยในน้ำล้างย้อนได้เข้าสู่สถานะคงตัวแล้วจึงเก็บข้อมูลมาวิเคราะห์ต่อไปได้

ที่สถานะคงตัว ระบบสร้างเซลล์ขึ้นวันละประมาณ 26,180 มก. และหลุดออกมากับน้ำออก 14.22 มก./ล. หรือ 4280 มก./ล. และหลุดออกโดยการล้างย้อนอีกประมาณ 21,900 มก./วัน

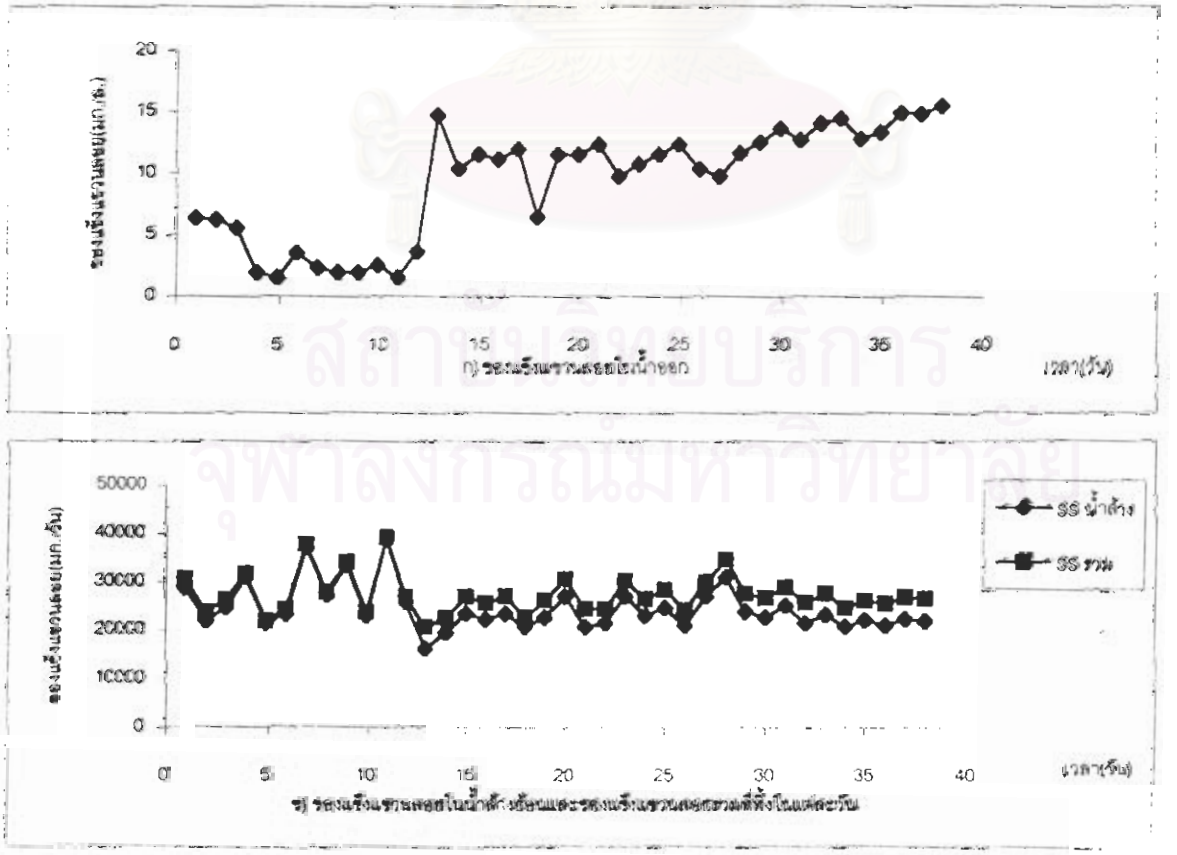
พิจารณาทีเคเอ็นในน้ำออกในช่วงแรกของการทดลอง เห็นว่าการกำจัดทีเคเอ็นยังไม่คงที่เนื่องจากการปรับตัวในการรับภาระบรรทุกที่เพิ่มขึ้น เมื่อเวลาผ่านไปจนวันที่ 28 ของการทดลองระบบสามารถปรับตัวจนมีทีเคเอ็นในน้ำออกค่อนข้างคงที่เฉลี่ย 29.9 มก./ล. เห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็นค่อนข้างน้อยเนื่องจากเวลากักที่ลดลงนั่นเอง ทำให้มีไนโตรเจนเหลือออกมากับน้ำออกมากขึ้น ดังรูปที่ 4.19

ที่สถานะคงตัว (ดูจากการคงที่ของของแข็งแขวนลอยรวมออกจากระบบ) วิเคราะห์ค่าทีเคเอ็น ไนไตรท์ และไนเตรทได้ดังตารางที่ 4.9 ไนไตรท์ในน้ำออกมีค่าน้อยมากเข้าใกล้ศูนย์ และไนเตรทในน้ำออกเฉลี่ย 0.88 มก./ล. ซึ่งลดลงเนื่องจากเวลาในการกักลดลงทำให้เกิดไนตริฟิเคชั่นน้อย ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดน้อยคือร้อยละ 23 เพราะไม่มีขั้นตอนแอนอกซิกอยู่ในระบบนี้

ที่ภาระบรรทุกอินทรีย์นี้ใช้ความสูงของชั้นกรอง 1.5 เมตร ใช้เวลาในการเดินระบบ 38 วัน จึงเริ่มเก็บตัวอย่าง ที่สถานะคงตัวอีก 7 วัน ซีโอดีของน้ำเข้าเฉลี่ย 307 มก./ล. ซึ่งให้ค่าเฉลี่ยซีโอดีของน้ำออก 38.3 มก./ล. ค่าทีเคเอ็นของน้ำเข้าเฉลี่ย 40 มก./ล. ให้ค่าทีเคเอ็นของน้ำออกเฉลี่ย 29.9 มก./ล. และมีของแข็งแขวนลอยที่หลุดออกไปกับน้ำออกอยู่ในช่วง 7-15 มก./ล.หรือ 2,000-4,500 มก./วัน ของแข็งแขวนลอยที่ถูกกำจัดทิ้งไปจากการล้างย้อนเฉลี่ย 21,900 มก./วัน ดังนั้นของแข็งแขวนลอยที่หลุดออกจากระบบทั้งหมดประมาณ 26,180 มก./วัน ปริมาณไนไตรท์และไนเตรทของน้ำออกเป็น 0.009 และ 0.88 มก./ล. ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.9



รูปที่ 4.17 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่ภาระบรรทุก 7.40 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วันและความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.

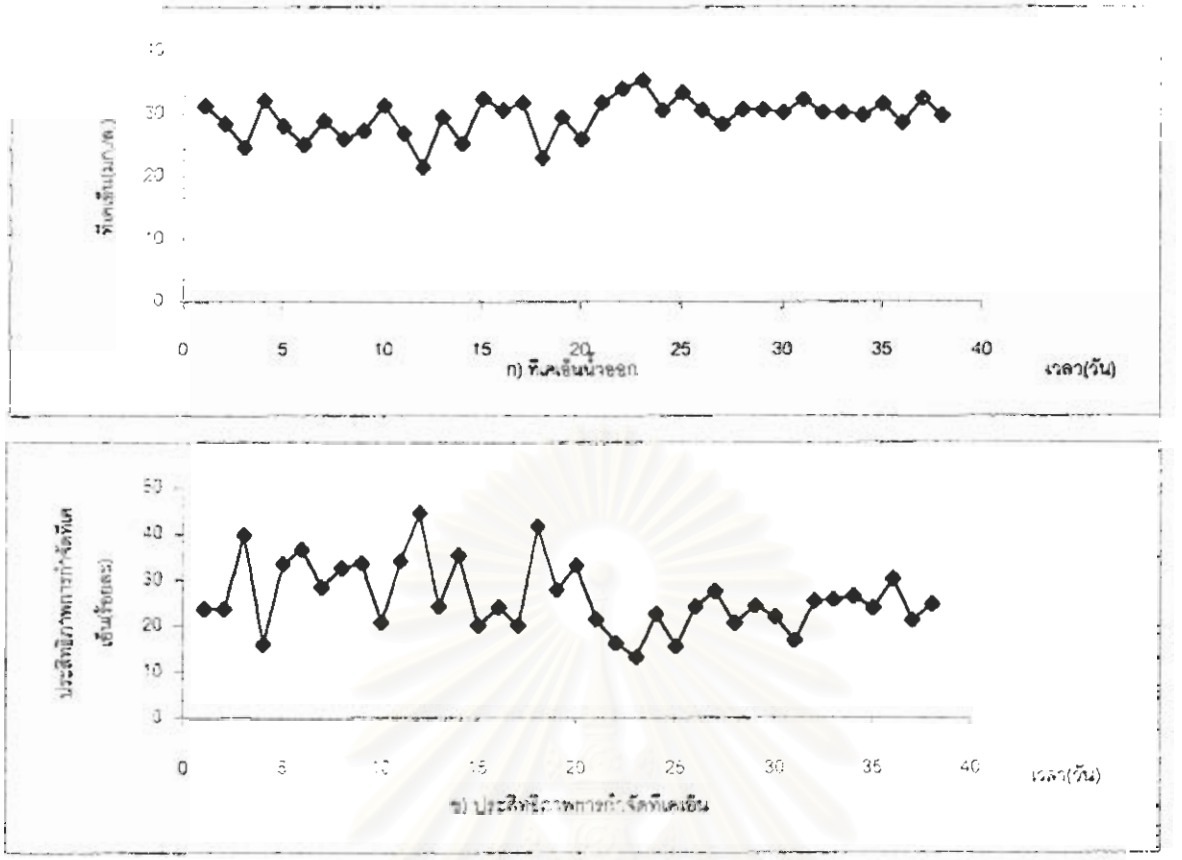


รูปที่ 4.18 ของแข็งแขวนลอยที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 7.40 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วันและความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.

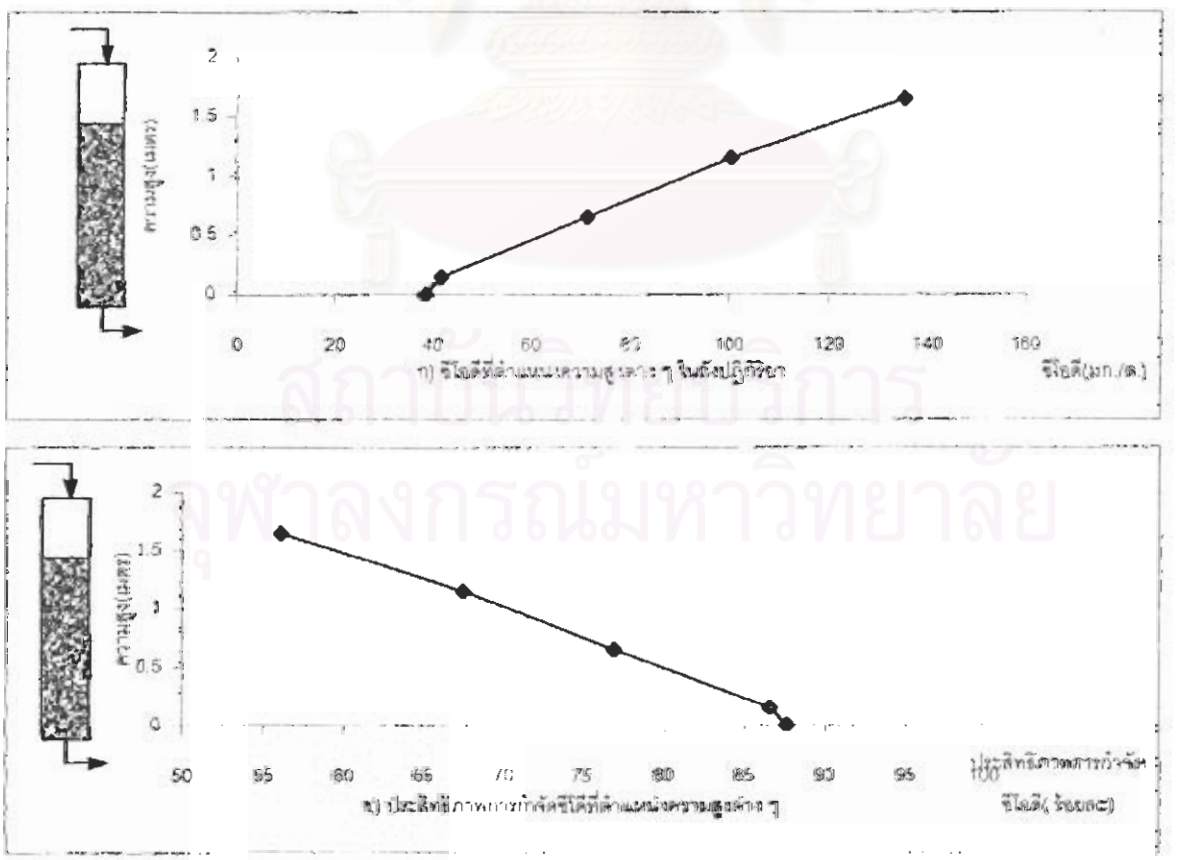
ตารางที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่าง ๆ ที่สถานะคงตัวที่ความสูงชั้นกรอง 1.5 เมตร

พารามิเตอร์ที่วัด	ค่าเฉลี่ย	SD	N
ซีโอดีน้ำเข้า (มก./ล.)	307	6.64	7
ซีโอดีน้ำออก (มก./ล.)	38.3	2.57	7
ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (ร้อยละ)	88	-	-
ทีเคเอ็นน้ำเข้า (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	40	1.40	7
ทีเคเอ็นน้ำออก (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	29.9	1.03	7
ประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็น (ร้อยละ)	24	-	-
ไนไตรท์น้ำออก (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	0.009	0.005	7
ไนเตรทน้ำออก (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	0.88	0.08	7
ไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำเข้า (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	40	-	-
ไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำออก (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	30.8	-	-
ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมด (ร้อยละ)	23	-	-
ของแข็งแขวนลอยน้ำออก (มก./ล.)	14.2	0.64	7
(มก./วัน)	4,280	-	-
ของแข็งแขวนลอยน้ำล้างย้อน (มก./วัน)	21,900	1,380	7
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่หลุดจากระบบ (มก./วัน)	26,180	1,270	7

ในการทดลองนี้ระบบมีระยะเวลากักน้ำในชั้นกรองแบบถังเปล่า(EBDT) 0.97 ชั่วโมง ซึ่งให้ค่าซีโอดีตามลำดับความสูงของชั้นตัวกลางดังตารางที่ 4.10 พบว่าที่ระดับความสูง 1.65 เมตร(ซึ่งอยู่เหนือชั้นตัวกลาง) ซีโอดีเฉลี่ย 135 มก./ล. ซึ่งซีโอดีลดไปแล้วร้อยละ 56 เนื่องจากการเป่าอากาศจากด้านล่างของถังทำให้เกิดการกวนผสมของน้ำในถังที่ถูกกำจัดซีโอดีไปก่อนหน้า(ซึ่งมีซีโอดีต่ำแล้ว) กับน้ำที่เพิ่งป้อนเข้าสู่ถัง ทำให้วิเคราะห์น้ำที่ระดับความสูงนี้มีซีโอดีต่ำ ดังรูปที่ 4.20 เห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดียังเพิ่มขึ้นอีกเมื่อน้ำผ่านชั้นกรองไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งสูงสุดที่ทางน้ำออกเฉลี่ยร้อยละ 88



รูปที่ 4.19 ฟีเคเอ็นและประสิทธิภาพการกำจัดฟีเคเอ็นที่ภาระบรรทุก 7.40 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วันและความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.



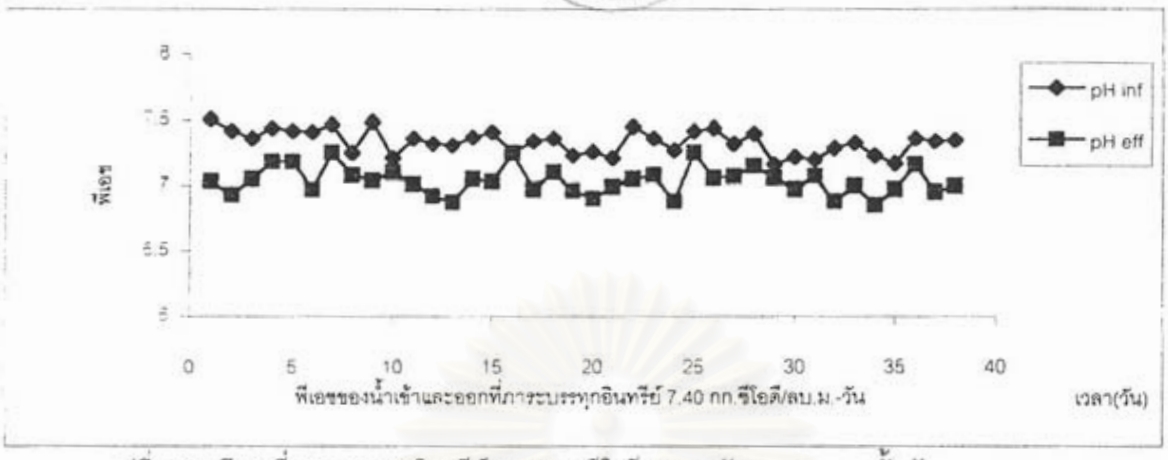
รูปที่ 4.20 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ ที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 7.40 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.

ตารางที่ 4.10 ค่าซีโอดีตามลำดับความสูงของชั้นตัวกลาง

ความสูงของชั้นตัวกลาง (ม.)		ซีโอดี (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (ร้อยละ)
1.65	เฉลี่ย	135	56
	SD	4.36	-
	N	7	-
1.15	เฉลี่ย	100	67
	SD	2.64	-
	N	7	-
0.65	เฉลี่ย	71.1	77
	SD	3.49	-
	N	7	-
0.15	เฉลี่ย	41.5	87
	SD	4.15	-
	N	7	-
0 (น้ำออก)	เฉลี่ย	38.3	88
	SD	2.57	-
	N	7	-

จากการทดลองเห็นได้ว่า พีเอชของน้ำเข้าซึ่งเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ มีค่าอยู่ในช่วง 7.2-7.5 และน้ำออกมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.9-7.3 ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่อยู่ในช่วงที่จุลชีพสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ ดังรูปที่ 4.21

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.21 พีเอชที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 7.40 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วันและความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.

4.2.6 ภาระบรรทุกอินทรีย์ 9.62 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน ที่ความสูงชั้นกรอง 1.5 เมตร

เมื่อภาระบรรทุกอินทรีย์เพิ่มขึ้นระบบสามารถกำจัดซีโอดีได้ลดลง ซีโอดีในน้ำออกของ การทดลองที่ภาระบรรทุกอินทรีย์นี้เหลือเยอะ เนื่องจากภาระบรรทุกอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีเวลา กักน้อยลง เมื่อเริ่มทำการทดลอง ระบบให้ซีโอดีในน้ำออกค่อนข้างแกว่งในช่วงวันแรกของการ ทดลอง จนกระทั่งสามารถปรับตัวให้มีซีโอดีค่อนข้างคงที่ ที่วันที่ 16 ของการทดลอง โดยให้ซีโอดี น้ำออกเฉลี่ย 59.9 มก./ล. ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยร้อยละ 80 ดังรูปที่ 4.22

ของแข็งแขวนลอยในน้ำออกในช่วงแรกของการทดลองค่อนข้างแกว่งมาก เมื่อเดินระบบ ไประยะหนึ่งระบบมีของแข็งแขวนลอยในน้ำออกอยู่ในช่วง 15-25 มก./ล.

จากรูปที่ 4.23 ของแข็งแขวนลอยในน้ำล้างย้อนในช่วงแรกค่อนข้างแกว่งขึ้นลงมากเนื่อง จากระบบกำลังเริ่มปรับตัว จนวันที่ 19 ของการทดลองค่อนข้างคงที่เฉลี่ย 22,710 มก./วัน เมื่อ พิจารณาเป็นของแข็งแขวนลอยรวมที่หลุดจากระบบ เห็นว่ามีแนวโน้มคล้ายของแข็งแขวนลอยใน น้ำล้างย้อน เนื่องจากของแข็งแขวนลอยในน้ำออกคือประมาณ 19.1 มก./ล.(7,460 มก./วัน) ค่อน ข้างน้อยเมื่อเทียบกับของแข็งแขวนลอยในน้ำล้างย้อน ของแข็งแขวนลอยรวมที่ทิ้งในแต่ละวันจึง เริ่มค่อนข้างคงที่ที่วันที่ 19 ของการทดลองเช่นเดียวกัน โดยมีค่าเฉลี่ย 30,170 มก./วัน(7,460 มก./วัน + 22,710 มก./วัน) ซึ่งเพิ่มขึ้นจากการทดลองก่อนหน้าเนื่องจากภาระบรรทุกอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นทำให้ เกิดเซลล์จุลชีพมากขึ้น ของแข็งแขวนลอยรวมในแต่ละวันคือของแข็งแขวนลอยในน้ำออกรวมกับ

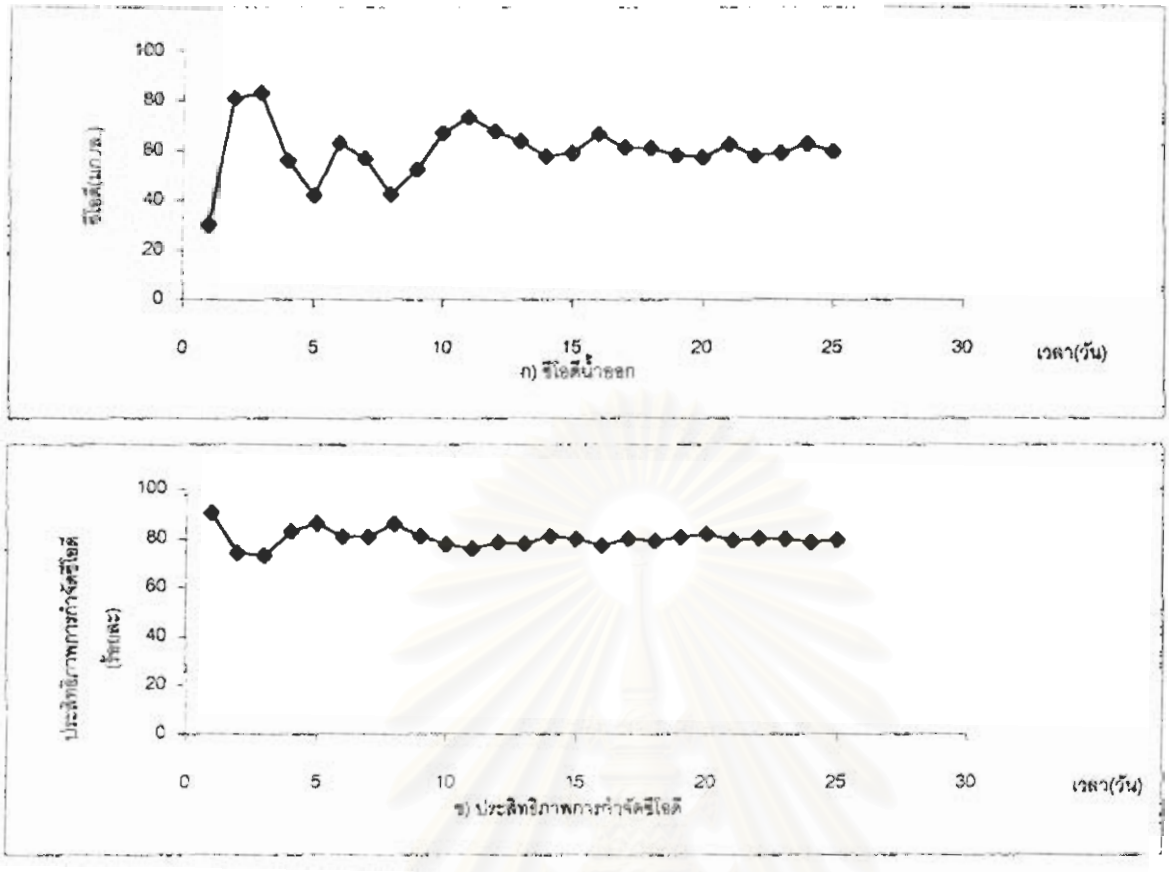
กับของแข็งแขวนลอยในน้ำล้างย้อน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงปริมาณเซลล์ที่ถูกสร้างขึ้นในแต่ละวันของระบบ เมื่อของแข็งแขวนลอยรวมในแต่ละวันคงที่ นั่นคือระบบสามารถสร้างเซลล์ได้เท่ากันทุกวัน ซึ่งหมายถึงระบบอยู่ในสถานะคงตัว ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยในน้ำล้างย้อนได้เข้าสู่สถานะคงตัวแล้วจึงเก็บข้อมูลมาวิเคราะห์ได้

ที่สถานะคงตัว ระบบสร้างเซลล์ขึ้นวันละประมาณ 30,170 มก. และหลุดออกมากับน้ำออก 19.12 มก./ล. หรือ 7,460 มก./วัน และหลุดออกโดยการล้างย้อนอีกประมาณ 22,710 มก./วัน

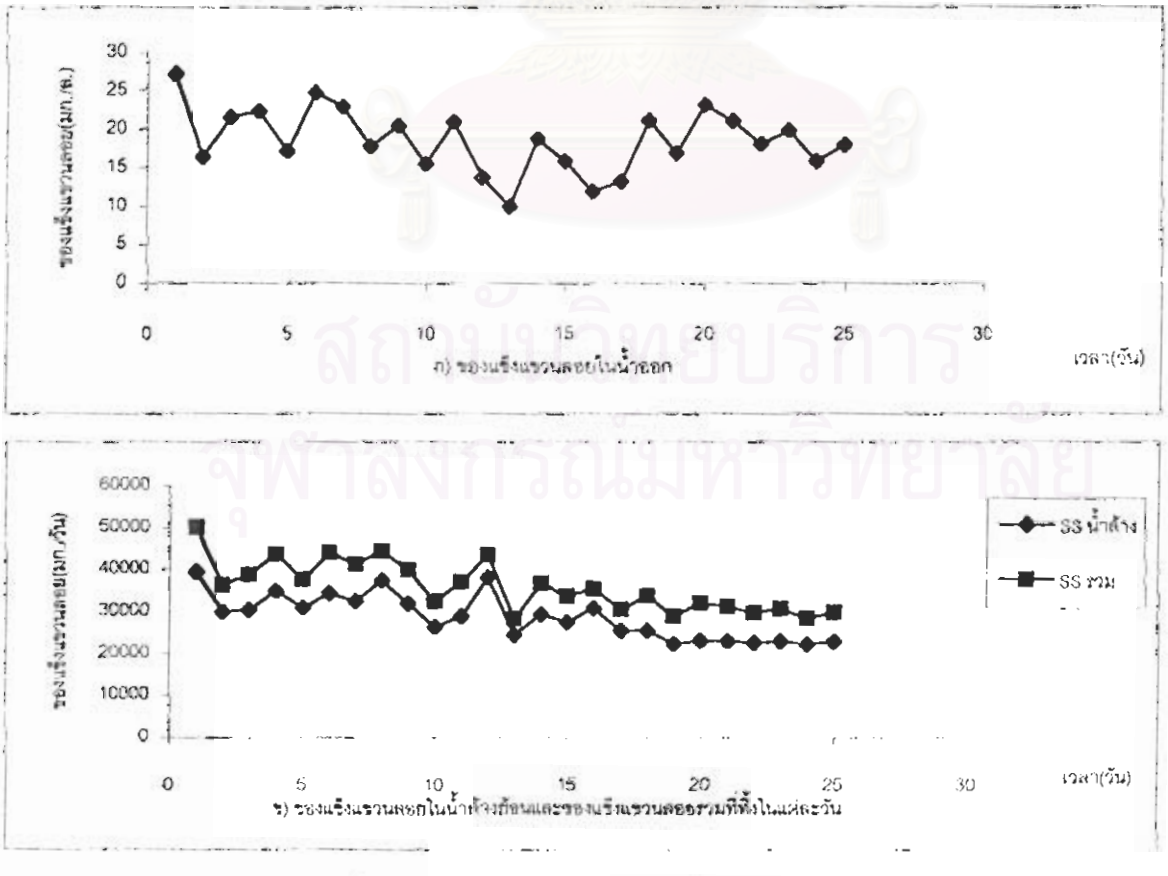
พิจารณาทีเคเอ็นในน้ำออกในช่วงแรกของการทดลอง เห็นว่าการกำจัดทีเคเอ็นยังไม่คงที่ เนื่องจากการปรับตัวในการรับภาระบรรทุกที่เพิ่มขึ้น เมื่อเวลาผ่านไปจนวันที่ 16 ของการทดลอง ระบบสามารถปรับตัวจนมีทีเคเอ็นในน้ำออกค่อนข้างคงที่เฉลี่ย 32.5 มก./ล. เห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็นค่อนข้างน้อย เนื่องจากเวลากักที่ลดลงนั่นเอง ทำให้มีไนโตรเจนเหลือออกมากับน้ำออกมากขึ้น ดังรูปที่ 4.24

ที่สถานะคงตัว(ดูจากการคงที่ของของแข็งแขวนลอยรวมออกจากระบบ) วิเคราะห์ค่าทีเคเอ็น ไนไตรท์ และไนเตรทได้ดังตารางที่ 4.11 ไนไตรท์ในน้ำออกมีค่าน้อยมากเข้าใกล้ศูนย์ และไนเตรทในน้ำออกเฉลี่ย 0.11 มก./ล. ซึ่งลดลงเนื่องจากเวลาในการกักลดลงทำให้เกิดไนตริฟิเคชั่นน้อย ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดลดเหลือร้อยละ 18 เพราะไม่มีขั้นตอนแอนอกซิกอยู่ในระบบนี้

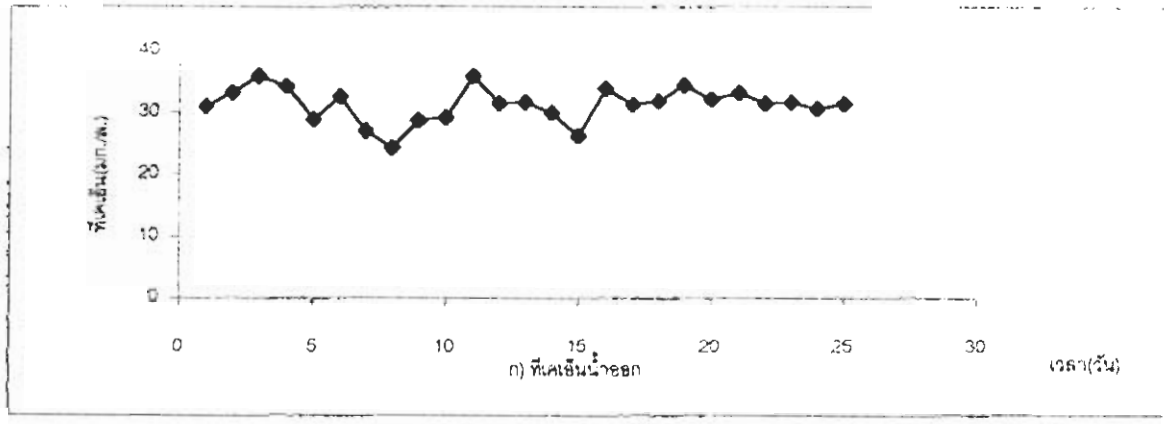
ที่ภาระบรรทุกอินทรีย์นี้ใช้ความสูงของชั้นกรอง 1.5 เมตร ใช้เวลาในการเดินระบบ 25 วัน จึงเริ่มเก็บตัวอย่าง ที่สถานะคงตัวอีก 7 วัน ซีโอดีของน้ำเข้าเฉลี่ย 298 มก./ล. ซึ่งให้ค่าเฉลี่ยซีโอดีของน้ำออก 59.9 มก./ล. ค่าทีเคเอ็นของน้ำเข้าเฉลี่ย 40 มก./ล. ให้ค่าทีเคเอ็นของน้ำออกเฉลี่ย 32.5 มก./ล. และมีของแข็งแขวนลอยที่หลุดออกไปกับน้ำออกอยู่ในช่วง 15-25 มก./ล. หรือ 5,850-9,750 มก./วัน ของแข็งแขวนลอยที่ถูกกำจัดทิ้งไปจากการล้างย้อนเฉลี่ย 22,710 มก./วัน ดังนั้นของแข็งแขวนลอยที่หลุดออกจากระบบทั้งหมดเฉลี่ย 30,170 มก./วัน ปริมาณไนไตรท์และไนเตรทของน้ำออกเป็น 0.073 และ 0.11 มก./ล. ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.11

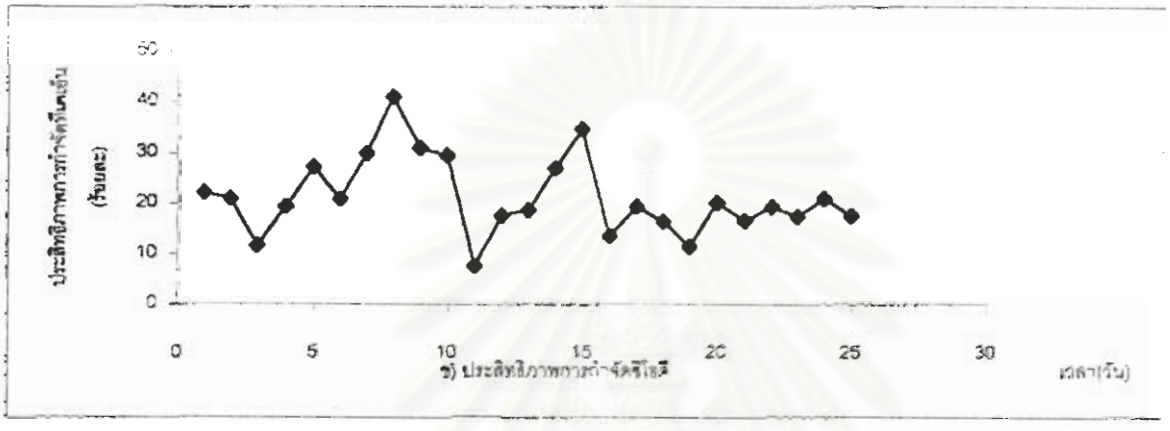


รูปที่ 4.22 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่ภาระบรรทุก 9.62 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วันและความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.

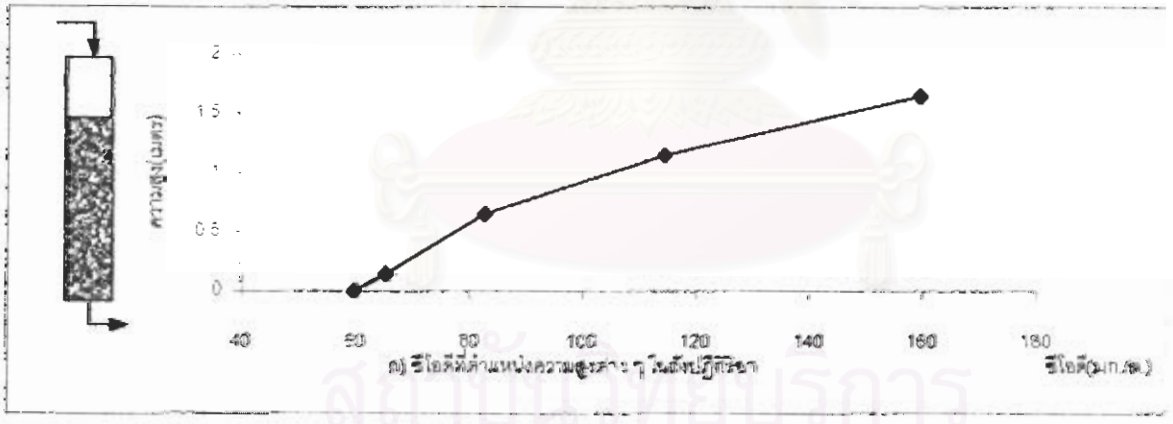


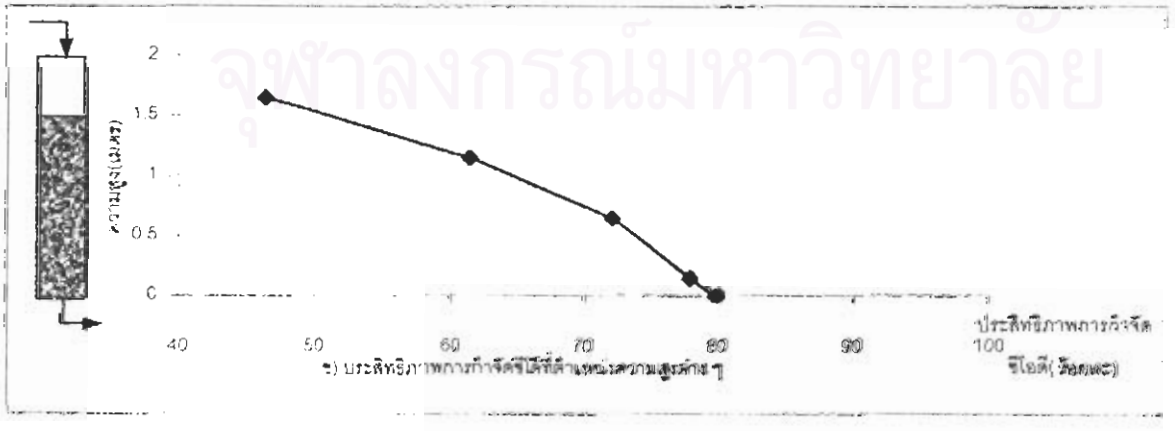
รูปที่ 4.23 ของแข็งแขวนลอยที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 9.62 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วันและความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.





รูปที่ 4.24 ที่เคเอ็นและประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็นที่ภาระบรรทุก 9.62 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วันและความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.





รูปที่ 4.25 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ ที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 9.62 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.

ตารางที่ 4.11 ค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่าง ๆ ที่สถานะคงตัวที่ความสูงชั้นกรอง 1.5 เมตร

พารามิเตอร์ที่วัด	ค่าเฉลี่ย	SD	N
ซีโอดีน้ำเข้า (มก./ล.)	298	5.87	7
ซีโอดีน้ำออก (มก./ล.)	59.9	1.91	7
ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (ร้อยละ)	80	-	-
ทีเคเอ็นน้ำเข้า (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	40	0.92	7
ทีเคเอ็นน้ำออก (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	32.5	0.84	7
ประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็น (ร้อยละ)	19.3	-	-
ไนไตรท์น้ำออก (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	0.073	0.012	7
ไนเตรทน้ำออก (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	0.11	0.005	7
ไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำเข้า (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	40	-	-
ไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำออก (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	32.7	-	-
ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมด (ร้อยละ)	18	-	-
ของแข็งแขวนลอยน้ำออก (มก./ล.)	19.1	2.85	7
(มก./วัน)	7,460	-	-
ของแข็งแขวนลอยน้ำล้างย้อน (มก./วัน)	22,710	672	7
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่หลุดจากระบบ (มก./วัน)	30,170	1,365	7

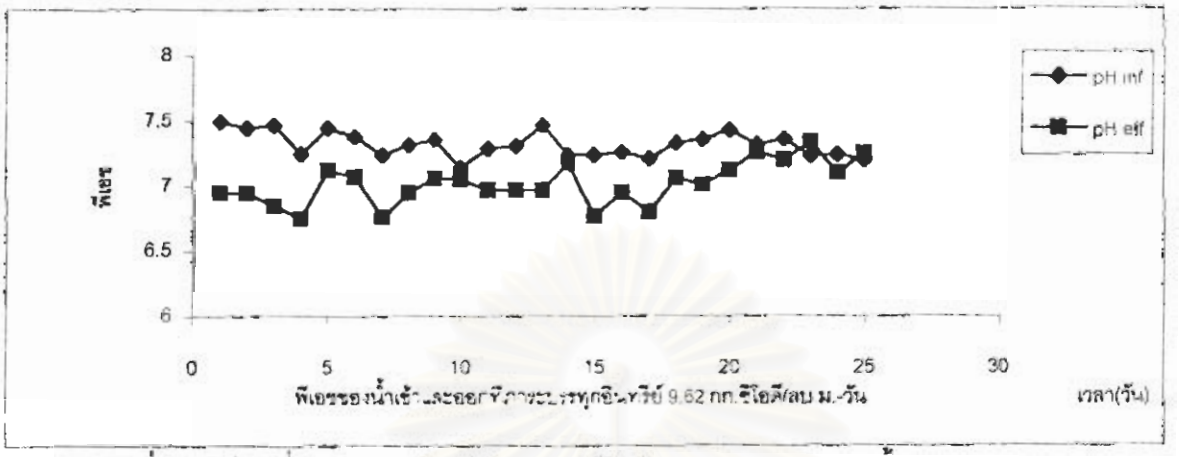
ในการทดลองนี้ระบบมีระยะเวลากักน้ำในชั้นกรองแบบถังเปล่า(EBDT) 0.75 ชั่วโมง ซึ่งให้ค่าซีโอดีตามลำดับความสูงของชั้นตัวกลางดังตารางที่ 4.12 พบว่าที่ระดับความสูง 1.65 เมตร(ซึ่งอยู่เหนือชั้นตัวกลาง) ซีโอดีเฉลี่ย 160 มก./ล. ซึ่งซีโอดีลดไปแล้วร้อยละ 46 เนื่องจากการเป่าอากาศจากด้านล่างของถังทำให้เกิดการกวนปสมของน้ำในถังที่ถูกกำจัดซีโอดีไปก่อนหน้า(ซึ่งมีซีโอดีต่ำแล้ว) กับน้ำที่เพิ่งป้อนเข้าสู่ถัง ทกให้วิเคราะห์น้ำที่ระดับความสูงนี้มีซีโอดีต่ำ ดังรูปที่ 4.25 เห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดียังเพิ่มขึ้นอีกเมื่อน้ำผ่านชั้นกรองไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งสูงสุดที่ทางน้ำออกเฉลี่ยร้อยละ 80

ตารางที่ 4.12 ค่าซีโอดีตามลำดับความสูงของชั้นตัวกลาง

ความสูงของชั้นตัวกลาง (ม.)		ซีโอดี (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (ร้อยละ)
1.65	เฉลี่ย	160	46
	SD	5.62	-
	N	7	-
1.15	เฉลี่ย	115	62
	SD	3.13	-
	N	7	-
0.65	เฉลี่ย	83	72
	SD	3.13	-
	N	7	-
0.15	เฉลี่ย	65.6	78
	SD	2.97	-
	N	7	-
0 (น้ำออก)	เฉลี่ย	59.9	80
	SD	1.91	-
	N	7	-

จากการทดลองเห็นได้ว่า พีเอชของน้ำเข้าซึ่งเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ มีค่าอยู่ในช่วง 7.1-7.5 และน้ำออกมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.8-7.3 ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่อยู่ในช่วงที่จุลชีพสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ ดังรูปที่ 4.26

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.26 พีเอชที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 9.62 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วันและความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.

4.3 ผลของภาระบรรทุกอินทรีย์ต่อซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัด

ที่สถานะคงตัว เมื่อพิจารณานำผลการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ค่าเฉลี่ยซีโอดีที่สถานะคงตัวของทุกการทดลองที่ความสูงชั้นกรอง 1.5 เมตร

ภาระบรรทุกอินทรีย์(กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน)	2.96	5.18	7.40	9.62
OALR (กก.ซีโอดี/ตร.ม.-วัน)	4.65×10^{-6}	8.14×10^{-6}	1.16×10^{-5}	1.51×10^{-5}
ความเร็วการไหล (ม./ชม.)	0.62	1.08	1.54	2.00
ซีโอดีน้ำเข้า (มก./ล.)	302	301	307	298
ซีโอดีน้ำออก (มก./ล.)	14.8	14.9	38.3	59.9
ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (ร้อยละ)	95	95	88	80

เมื่อพิจารณาที่ระดับชั้นความสูงเดียวกันของตัวกลาง ดังรูปที่ 4.27 เห็นได้ว่าการเพิ่มภาระบรรทุกอินทรีย์มากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีลดลง เนื่องจากการเพิ่มภาระบรรทุกอินทรีย์นั้นมาจากการเพิ่มความเร็วของการไหล ซึ่งทำให้เวลากักในถังปฏิกิริยาน้อยลง จึงเป็นผลให้เกิดการกำจัดซีโอดีได้น้อยลงนั่นเอง จากรูป 4.27 เห็นได้ว่าช่วงระหว่างภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.96 กับ 5.18 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน เส้นกราฟมีความชันน้อยกว่าช่วงอื่น เป็นผลเนื่องมาจากเวลา

กักในถังปฏิกิริยาที่มากเพียงพอที่จะสามารถกำจัดซีโอดีได้มาก เมื่อภาระบรรทุกอินทรีย์เพิ่มขึ้นอีก เส้นกราฟมีความชันเพิ่มขึ้น คือระบบสามารถกำจัดซีโอดีได้น้อยลง

การที่ภาระบรรทุกอินทรีย์เพิ่มขึ้นแล้วทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีลดลง เพราะประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีขึ้นอยู่กับปริมาณจุลชีพที่มีอยู่ในระบบซึ่งค่อนข้างจำกัด เมื่อภาระบรรทุกอินทรีย์เพิ่มขึ้นทำให้อัตราส่วนของอาหารต่อมวลจุลชีพสูงขึ้น และการเพิ่มภาระบรรทุกอินทรีย์ในการทดลอง เนื่องมาจากการเพิ่มความเร็วในการไหลของน้ำ ทำให้เวลากักในถังลดลงด้วย ทำให้มีอาหารเหลือมากขึ้นซึ่งก็คือซีโอดีในน้ำออกเหลือมากขึ้น เป็นผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีลดลง

จากรูปที่ 4.27 ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นซีโอดีในน้ำออกกับภาระบรรทุกอินทรีย์ในช่วง 3-10 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน โดยการแปรผันความเร็วการไหลของน้ำ

$$Y = 1.0942X^2 - 6.6146X + 23.533$$

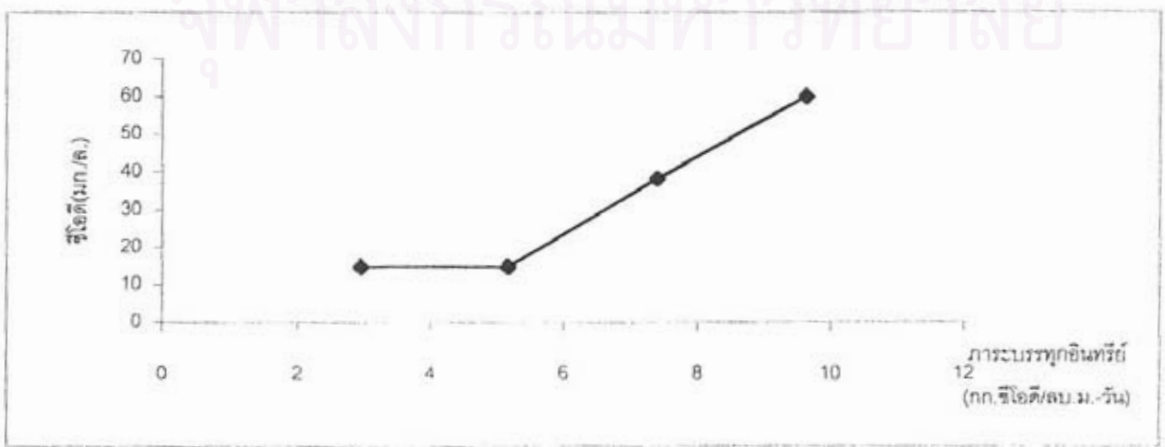
$$R^2 = 0.9778$$

เมื่อ Y = ความเข้มข้นซีโอดีในน้ำออก (มก./ล.)

X = ภาระบรรทุกอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน)

R^2 = สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

เมื่อต้องการจำกัดซีโอดีน้ำออกไม่เกิน 60 มก./ล. ระบบจะต้องรับภาระบรรทุกอินทรีย์ไม่เกิน 9.5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน หรือ 1.5×10^{-5} กก.ซีโอดี/ตร.ม.-วัน



รูปที่ 4.27 ซีโอดีน้ำออกที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ต่างกันและความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.

จากการทดลองของ Okubo(1990) ซึ่งใช้เม็ดเซรามิคขนาด 4-7 มิลลิเมตร พื้นที่ผิวจำเพาะ 600-700 $ม^2/ม^3$ น้ำเสียที่ใช้มีบีโอดีเท่ากับ 60-90 มก./ล. พบว่า เมื่อภาระบรรทุก 3 กก./ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน ได้ค่าบีโอดีน้ำทิ้งน้อยกว่า 20 มก./ล. และประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 85-92 การใช้เปลือกหอยเป็นตัวกลางซึ่งมีขนาด 5-10 มิลลิเมตร ความหนาแน่น 2.52 กรัม/ลบ.ซม. พื้นที่ผิวสัมผัส 0.88 $ม^2$/กรัม คำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะได้ 2,217,600 $ม^2/ม^3$ ได้ซีโอดีน้ำทิ้งน้อยกว่า 15 มก./ล. ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 95 พื้นที่ผิวที่มากกว่าทำให้เซลล์เกาะได้มากกว่าประสิทธิภาพการกำจัดจึงดีกว่า

จากการทดลองของ J.P.Canler(1994) ซึ่งใช้ดินเหนียวเผาขนาด 2-6 มิลลิเมตรเป็นตัวกลาง และใช้น้ำเสียที่มีซีโอดีประมาณ 500 มก./ล. พบว่าเมื่อต้องการควบคุมคุณภาพน้ำทิ้งซีโอดีไม่เกิน 90 มก./ล. ระบบไม่ควรรับภาระบรรทุกอินทรีย์มากกว่า 7 กก./ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน แต่การทดลองใช้เปลือกหอยเป็นตัวกลางที่ภาระบรรทุกอินทรีย์สูงสุด 9.62 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน ให้ซีโอดีน้ำออกต่ำกว่า 60 มก./ล.

4.4 ผลของภาระบรรทุกอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจน

ที่สถานะคงตัวเมื่อพิจารณานำผลการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ค่าเฉลี่ยไนโตรเจนที่สถานะคงตัวของทุกการทดลองที่ความสูงชั้นกรอง 1.5 เมตร

ภาระบรรทุกอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน)	2.96	5.18	7.40	9.62
ความเร็วการไหล (ม./ชม.)	0.62	1.08	1.54	2.00
ทีเคเอ็นน้ำเข้า (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	40	39	40	40
ทีเคเอ็นน้ำออก (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	3.94	18.0	29.9	32.5
ประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็น (ร้อยละ)	90	54	24	19
ไนไตรท์ไนโตรเจน (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	0.033	0.40	0.009	0.07
ไนเตรทไนโตรเจน (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	24.7	11.8	0.88	0.11
ไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำเข้า (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	40	39	40	40
ไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำออก (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	28.7	30.2	30.789	32.7
ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมด(ร้อยละ)	28	23	23	18

เมื่อพิจารณาที่ระดับชั้นความสูงเดียวกัน ดังรูปที่ 4.28 เห็นได้ว่า การเพิ่มภาระบรรทุกอินทรีย์มากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็นลดลง เนื่องจากการเพิ่มภาระบรรทุกอินทรีย์นั้นมาจากการเพิ่มความเร็วของการไหล ซึ่งทำให้เวลากักในถังปฏิกิริยาน้อยลง จึงเป็นผลให้เกิดการกำจัดทีเคเอ็นได้น้อยลงนั่น จากรูป 4.28 เห็นได้ว่าช่วงระหว่างภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.96 กับ 5.18 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน เส้นกราฟมีความชันน้อยกว่าช่วงอื่น เป็นผลเนื่องมาจากเวลากักในถังปฏิกิริยาที่มากเพียงพอที่จะสามารถกำจัดซีโอดีได้มาก เมื่อภาระบรรทุกอินทรีย์เพิ่มขึ้นอีกเส้นกราฟมีความชันเพิ่มขึ้น คือระบบสามารถกำจัดทีเคเอ็นได้น้อยลง

การกำจัดไนโตรเจนเกิดจากการใช้ไปในการสร้างเซลล์จุลชีพขึ้น และการเกิดไนตริฟิเคชั่น ซึ่งเป็นการเปลี่ยนรูปแอมโมเนียไนโตรเจนไปเป็นไนไตรท์และไนเตรท เมื่อภาระบรรทุกอินทรีย์เพิ่มขึ้นการเกิดไนตริฟิเคชั่นก็น้อยลง เนื่องจากการเพิ่มความเร็วการไหลทำให้ระยะเวลากักในถังปฏิกิริยาไม่เพียงพอการเกิดไนตริฟิเคชั่นจึงลดลง

เมื่อพิจารณาสูตรโมเลกุลของแอร์โรบิคแบคทีเรีย $C_5H_7O_2NP_{0.2}$ เห็นได้ว่าเซลล์จุลชีพแบบแอร์โรบิคประกอบด้วย ไนโตรเจนร้อยละ 11.8 ของน้ำหนักเซลล์ นั่นคือ เซลล์ 1 กรัมต้องใช้ไนโตรเจน 0.118 กรัม จากการทดลองพบว่า เซลล์ 1 กรัม ใช้ไนโตรเจนประมาณ 0.10 กรัม เห็นได้ว่าปริมาณไนโตรเจนที่ใช้ไปเท่ากับ (ทีเคเอ็นเข้า – ทีเคเอ็นออก – ไนไตรท์ไนโตรเจนในน้ำออก – ไนเตรทไนโตรเจนในน้ำออก) ซึ่งน้อยกว่าปริมาณไนโตรเจนเมื่อพิจารณาจากสูตรโมเลกุลของเซลล์

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า ไนโตรเจนถูกใช้ในการสร้างเซลล์ และเกิดไนตริฟิเคชั่น สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$TN_{inf} = TKN_{eff} + NO_2\text{-}N + NO_3\text{-}N + N_{cell}$$

เมื่อ TN_{inf} = ไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำเข้า (มก.-ไนโตรเจน/วัน)

TKN_{eff} = ทีเคเอ็นน้ำออก (มก.-ไนโตรเจน/วัน)

N_{cell} = ไนโตรเจนในเซลล์ที่ทิ้งออกจากระบบ (มก.-ไนโตรเจน/วัน)

$NO_2\text{-}N$ = ไนไตรท์ไนโตรเจนในน้ำออก (มก.-ไนโตรเจน/วัน)

$NO_3\text{-}N$ = ไนเตรทไนโตรเจนในน้ำออก (มก.-ไนโตรเจน/วัน)

ที่สถานะคงตัว ถือว่าปริมาณเซลล์ที่ถูกสร้างขึ้นเท่ากับเซลล์รวมที่ทิ้งออกจากถังปฏิกิริยาทุกวัน ดังนั้นจึงนำปริมาณของแข็งแขวนลอยรวมที่หลุดออกจากถังปฏิกิริยามาคิดค่าไนโตรเจนที่ถูกใช้ในการสร้างเซลล์ ดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 การดุลมวลไนโตรเจนที่ความสูงชั้นกรอง 1.5 เมตร

ภาระบรรทุกอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	TN_{inf} (มก./วัน) A	TKN_{eff} (มก./วัน) B	NO_2-N (มก./วัน) C	NO_3-N (มก./วัน) D	N_{cell}* (มก./วัน) E	$\sum TN_{eff}$ (มก./วัน) F=B+C+D+E	SND (มก./วัน) A-F
2.96	8,368	829	6.93	5,193	1,309	7,338	1,030
5.18	11,832	5,403	120	3,543	1,905	10,971	861
7.40	15,444	11,657	3.5	343.2	2,618	14,622	822
9.62	19,324	15,595	35	52.8	3,017	18,700	624

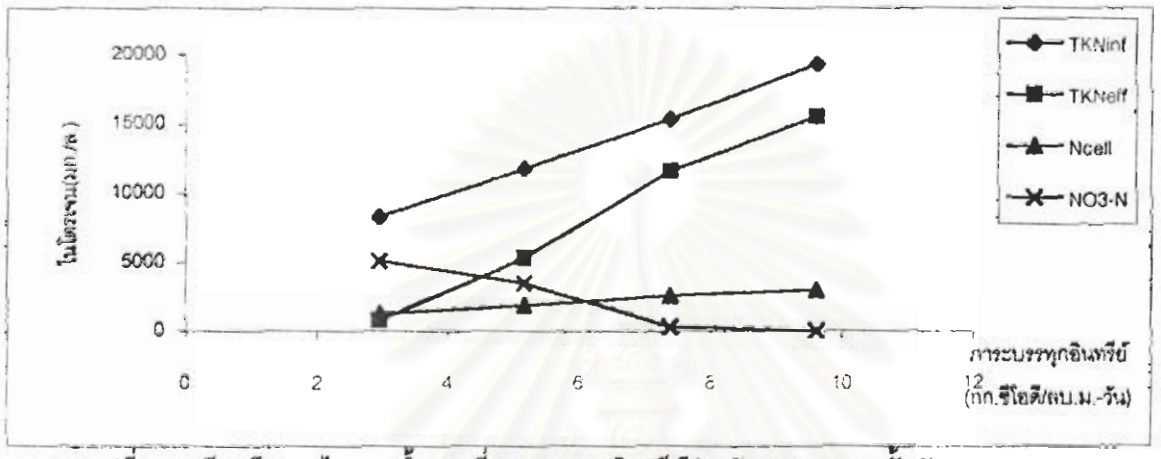
* จากการคำนวณเซลล์ 1 กรัม ใช้ไนโตรเจน 0.1 กรัม

จากตารางที่ 4.15 เห็นได้ว่าทีเคเอ็นที่ป้อนเข้าสู่ระบบมากกว่าทีเคเอ็นออก เนื่องจากการเกิดดีไนตริฟิเคชั่น กล่าวคือ ชั้นนอกของฟิล์มบนตัวกลางจะเป็นชั้นแอโรบิค ปฏิกิริยาการย่อยสลายเป็นแบบใช้ออกซิเจนแต่ชั้นในถัดเข้าไปจะเป็นชั้นที่ไม่มีออกซิเจน ซึ่งทำให้ไนไตรท์และไนเตรทเปลี่ยนไปเป็นก๊าซไนโตรเจนมีผลทำให้ไนโตรเจนที่ควรเก็บได้หายไป ทีเอ็นในน้ำออกจึงน้อยกว่าทีเอ็นในน้ำเข้า ที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.96 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน ไนโตรเจนหายไปประมาณ 1,030 มก./วัน ที่ 5.18 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน ไนโตรเจนหายไป 861 มก./วัน ที่ 7.40 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน ไนโตรเจนหายไป 822 มก./วัน และที่ 9.62 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน ไนโตรเจนหายไป 624 มก./วัน เมื่อภาระบรรทุกสูงการเกิดไนเตรทก็น้อยลงจึงทำให้โอกาสการเกิด SND น้อย

เห็นได้ว่าที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.22–5.18 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน มีไนเตรทเกิดขึ้นด้วยซึ่งเกิดเนื่องมาจากการเกิดไนตริฟิเคชั่น ดังนั้นไนโตรเจนในน้ำเข้าถูกใช้ไปในการสังเคราะห์เซลล์และเกิดไนตริฟิเคชั่นด้วย ส่วนที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 7.40–9.62 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน ใช้ไนโตรเจนในการสังเคราะห์เซลล์เป็นส่วนใหญ่ และเกิดไนตริฟิเคชั่นน้อยมากเห็นได้จากไนเตรทที่มีค่าน้อยนั่นเอง

จากรูปที่ 4.28 เห็นได้ว่าที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ต่ำ ทีเคเอ็นในน้ำออกจะถูกกำจัดโดยการสังเคราะห์เซลล์และถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปไนเตรท ซึ่งเห็นได้ว่าทีเคเอ็นในน้ำออกเหลือน้อยแต่ไน

เตรทสูง เมื่อภาระบรรทุกสูงขึ้นทีเคเอ็นถูกกำจัดน้อยเหลือออกมากับน้ำออกมาก ไนเตรทน้ำออกก็น้อยลง ส่วนไนโตรเจนเซลล์นั้นจะมากขึ้นตามเซลล์ที่มากขึ้นอันเนื่องมาจากการเพิ่มภาระบรรทุกอินทรีย์



รูปที่ 4.28 ทีเคเอ็นและไนเตรทน้ำออกที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ต่างกันและความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

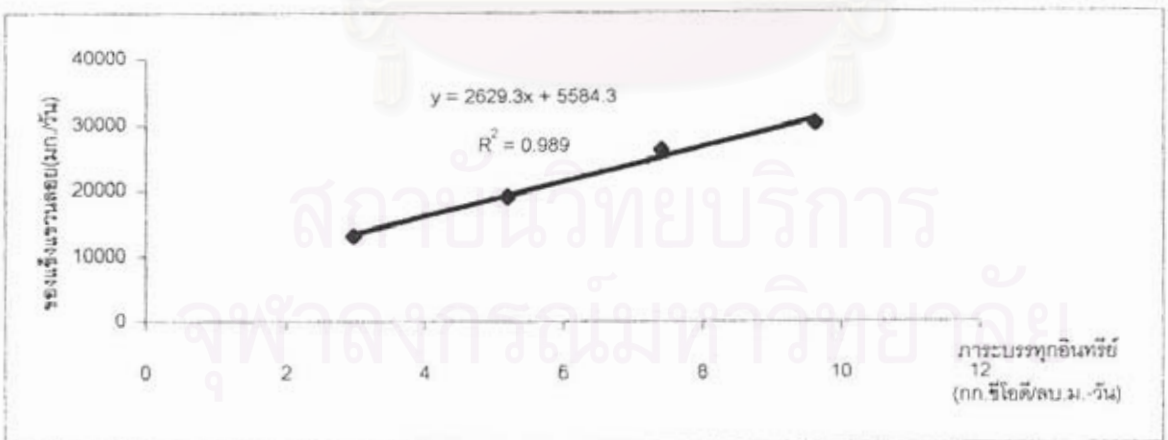
4.5 ผลของภาระบรรทุกอินทรีย์ต่อของแข็งแขวนลอย

ที่สถานะคงตัวเมื่อพิจารณานำผลการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ค่าเฉลี่ยของแข็งแขวนลอยที่สถานะคงตัวที่ความสูงชั้นกรอง 1.5 เมตร

ภาระบรรทุกอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน)	2.96	5.18	7.40	9.62
ความเร็วการไหล (ม./ชม.)	0.62	1.08	1.54	2.00
ของแข็งแขวนลอยในน้ำออก (มก./ล.)	13.5	1.24	14.2	19.1
(มก./วัน)	1620	260	4280	7460
ของแข็งแขวนลอยในน้ำล้างย้อน (มก./วัน)	11,470	18,790	21,900	22,710
ของแข็งแขวนลอยรวม (มก./วัน)	13,090	19,050	26,180	30,170

เมื่อพิจารณาที่ระดับชั้นความสูงเดียวกัน ดังรูปที่ 4.29 เห็นได้ว่าการเพิ่มภาระบรรทุกอินทรีย์มากขึ้นทำให้เกิดเซลล์จุลชีพในระบบเพิ่มมากขึ้นด้วย การเพิ่มภาระบรรทุกอินทรีย์เป็นการเพิ่มอาหารให้กับเซลล์จุลชีพเมื่อภาระบรรทุกอินทรีย์เพิ่มอาหารเพิ่มจึงทำให้อัตราการเกิดจุลชีพเพิ่ม



รูปที่ 4.29 ของแข็งแขวนลอยรวมที่ทิ้งในแต่ละวันที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ต่างกันและความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 ม.

จากรูปที่ 4.29 ได้ความสัมพันธ์ระหว่างของแข็งแขวนลอยรวมกับภาระบรรทุกในช่วง 3-10 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน โดยการแปรผันความเร็วการไหลของน้ำ

$$Y = 2629.3X + 5584.3$$

$$R^2 = 0.989$$

เมื่อ Y = ของแข็งแขวนลอยรวม (เซลล์ที่ถูกสร้างขึ้นในระบบ) (มก./วัน)
X = ภาระบรรทุกอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน)
R^2 = สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

เห็นได้ว่าความชันของกราฟเท่ากับ 2629.3 นั่นคือเมื่อภาระบรรทุกอินทรีย์เพิ่มขึ้น 1 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน จะทำให้เกิดเซลล์เพิ่มขึ้น 2693.3 มก./วัน

การทดลองของ H.D.Stensel(1988) ใช้ดินเหนียวแข็งเป็นตัวกลาง พบว่าที่ภาระบรรทุกทางน้ำ 2.4 ม./ชม. ทำให้เกิดของแข็ง 2.5 กก./$ม^3$ ของปริมาตรบรรจุตัวกลาง แต่การใช้เปลือกหอยเป็นตัวกลางคำนวณได้ว่าที่ภาระบรรทุกทางน้ำ 2.4 ม./ชม. และบรรจุตัวกลางสูง 1.5 เมตร ทำให้เกิดของแข็ง 2.9 กก./$ม^3$ การใช้เปลือกหอยเป็นตัวกลางทำให้เกิดของแข็งมากกว่าอันเนื่องมาจากรูปร่างและพื้นที่ผิวสัมผัสที่มากกว่าดินเหนียวแข็ง

การทดลองของ Okubo(1990) ซึ่งใช้เม็ดเซรามิคขนาด 4-7 มิลลิเมตร พื้นที่ผิวจำเพาะ 600-700 $ม^2/ม^3$ น้ำเสียที่ใช้มีบีโอดีเท่ากับ 60-90 มก./ล. พบว่า ของแข็งน้ำทิ้งเท่ากับหรือต่ำกว่า 10 มก./ล. เมื่อภาระบรรทุกบีโอดีเท่ากับหรือน้อยกว่า 3 กก./ลบ.-วัน แต่การใช้เปลือกหอยเป็นตัวกลางที่ภาระบรรทุกต่ำกว่า 3 กก./ลบ.-วัน ให้ของแข็งน้ำทิ้งต่ำกว่า 15 มก./ล. ซึ่งจะมากกว่า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลองบทนำ

การศึกษาถังกรองชีวภาพแบบไหลลงโดยใช้เปลือกหอยเป็นตัวกลาง ได้ข้อสรุปดังนี้

1. ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีลดลงเมื่อภาระบรรทุกอินทรีย์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากระยะเวลาสัมผัสน้ำเสียระหว่างสับสเตรทกับฟิล์มชีวภาพถูกจำกัดให้ลดลง ระบบสามารถมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีได้ร้อยละ 80-95

2. ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนลดลงเมื่อภาระบรรทุกอินทรีย์เพิ่มขึ้น ที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ต่ำกว่า 5.18 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ได้ค่าทีเคเอ็นน้ำทิ้งน้อยกว่า 20 มก./ล. ประสิทธิภาพการกำจัดมากกว่าร้อยละ 50 ที่ภาระบรรทุกอินทรีย์สูงประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็นต่ำลง ระบบสามารถมีประสิทธิภาพในการกำจัดทีเคเอ็นได้ร้อยละ 19-90 และประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดร้อยละ 18-30

3. ระบบสามารถผลิตน้ำทิ้งที่มีคุณภาพดีซึ่งมีของแข็งแขวนลอยในน้ำออกต่ำกว่า 30 มก./ล.

4. เปลือกหอยที่ใช้ในการทดลองสามารถใช้เป็นตัวกลางกรองในถังกรองชีวภาพแบบไหลลงได้ และสามารถหาได้ง่ายในท้องถิ่น และยังให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียเช่นเดียวกับตัวกลางกรองชนิดอื่น

5.2 ข้อเสนอแนะ

การเลือกใช้เปลือกหอยเป็นตัวกลางในถังกรองชีวภาพ ที่ภาระบรรทุกสูงประสิทธิภาพจะลดลง เนื่องจากเวลาสัมผัสระหว่างสับสเตรทกับฟิล์มชีวภาพลดลง เมื่อต้องการให้ประสิทธิภาพยังสูงก็ต้องให้เวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นด้วย การเพิ่มความสูงของชั้นกรองจะช่วยเพิ่มเวลาสัมผัสให้มากขึ้น และยังเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสให้มากขึ้นด้วย ประสิทธิภาพก็จะสูงขึ้นแต่จะต้องใช้ถังกรองที่มีขนาดสูงขึ้นมากด้วยซึ่งทำให้เปลืองพลังงาน ควรแยกถังกรองออกเป็น 2 ถัง โดยให้น้ำที่ออกจากถัง

ที่ 1 ไปผ่านถังที่ 2 อีกทีหนึ่ง วิธีนี้จะช่วยลดขนาดความสูงของถังกรอง โดยที่น้ำเสียจะมีเวลาสัมผัสที่เพิ่มขึ้นและพื้นที่ผิวสัมผัสก็มากขึ้นด้วย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, " การบำบัดน้ำเสีย," วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, 2539.

โชติ สุวัตถิ, " Pelecypoda, Class," หอยเมืองไทย,คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2509.

วันทนา อยู่สุข, "หอยทะเลสองฝา," หอยทะเล, ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2528.

สิทธิชัย เชี่ยวยืนยง, " การศึกษากรรมวิธีแอร์เรตต์ซับเมอรจค์ฟิลเตอร์," วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต,ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2529.

สุเมธ ชวเดช, "ลักษณะสมบัติเมือกจุลินทรีย์," สัมมนาทางวิชาการระดับชาติ เทคโนโลยีน้ำและน้ำเสีย คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530.

สุรพล สายพานิช, วิศวกรรมน้ำเสีย,เอกสารประกอบการเรียน ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

Arthur J. Condren, Technology Assessment of the Biological Aerated Filter, EPA, 1990.

Bjorn Rusten, "Wastewater Treatment with Aerated Submerged Biological Filter," Journal WPCF,56, 424-431, 1984.

E. Arvin, and P. Harrmoës, "Concepts and Models for Biofirm Reactor Performance," Wat. Sci. Tech., 22, 171-192, 1990.

Frank Rogalla, and Marie-Marguerite Bourbigot, "New Developments in Complete Nitrogen Removal with Biological Aerated Filters," Wat. Sci. Tech., 22, 273-280, 1990.

G. R. Dillon, and V. K. Thomas, "A Pilot-Scale Evaluation of the Biocarbone Process for the Treatment of Settled Sewage and for Tertiary Nitrification of Secondary Effluent," Wat. Sci. Tech., 22, 305-316, 1990.

H. Rœffer, and K.H. Rosenwinkel, "The Use of Biological for Further Wastewater Treatment," Wat. Sci. Tech., 16, 241-260, 1984.

Iwasaki, "Some Note on Sand Filtrations," Journal AWWA., 29,1591-1602, 1937.

Ives, and K.J., "A Theory of the Functioning of Deep Filters Prac. Symp. on the Interaction between Fluid and Particles," Inst. Chem. Eng., 260-268, 1962.

J.P. Canler, and J.M. Perret, “Biological Aerated Filters : Assessment of the Process Based on 12 Sewage Treatment Plants,” Wat. Sci. Tech., 29, 13-22, 1994.

Kornegay, B.H., Andrew, and J.F., “Kinetics of Fixed-Film Biological Reactors,” J.WPCF, 40, 1968.

Metcalf, and Eddy, Inc, Wastewater Engineering : Treatment, Disposal, and Reuse, 1991.

M. Boller, W. Gujer, and M. Tschui, “Parameters Affecting Nitrifying Biofilm Reactors,” Wat. Sci. Tech., 29, 1-11, 1994.

Okubo, Y., Itoh, T. and Miki, K., “Development of a New Domestic Wastewater Treatment System Using an Upflow Filter for Raw Wastwater,” Water Pollution Research and Control, 299-302, 1990.

O. Wanner, and W. Gujer, “Competition in Biofilms,” Wat. Sci. Tech., 17, 27-44, 1984.

R. D. Tyagi, Wastewater Treatment by Immobilized Cells, Universite du Quebec sainte Foy, Quebec, Canada , 1990.

R. Pujol, J.P.Canler, and A. Iwema, “Biological Aerated Filters : an Attractive and Alternative Biological Process,” Wat. Sci. Tech., 26, 693-702, 1992.

R. Pujol, J.P.Canler, A. Vachon and P. Vidou, “Biological Aerated Filters : An Adapted Biological Process for Wastewater from Coastal Areas,” Wat. Sci. Tech.,25, 175-184, 1992.

Stensel H.D., Brenner R. C. Lee K. ,Meller H., and Rakness K., “Biological Aerated Filter Evaluation,” Journ. of Envir. Eng., 114, 655-671, 1988.

Steve Reiber, David Sensel, “Biologically Enhanced Oxygen Trasfer in a Fixed-Film System,” Journal WPCF, 57, 135-142, 1985.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก การคำนวณ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถังขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง = 4 นิ้ว = 0.1 เมตร

พื้นที่หน้าตัด = 8.1×10^{-3} เมตร^2

พื้นที่ผิวสัมผัสของเปลือกหอย = 0.88 ตร.ม./กรัม

ความเข้มข้นซีโอดีที่เข้าสู่ระบบ 300 มก./ล. = 0.3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.

ความสูงชั้นตัวกลาง 2 เมตร (การทดลองที่ 1)

ปริมาตรบรรจุเปลือกหอย= 1.6×10^{-2} ลบ.ม.

บรรจุเปลือกหอย = 11,600 กรัม

พื้นที่ผิวสัมผัส = 0.88 x 11,600 = 10,208 ตร.ม.

ความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 เมตร (การทดลองที่ 2-5)

ปริมาตรบรรจุเปลือกหอย= 1.2×10^{-2} ลบ.ม.

บรรจุเปลือกหอย = 8,800 กรัม

พื้นที่ผิวสัมผัส = 0.88 x 8,800 = 7,744 ตร.ม.

อัตราการไหล	การทดลองที่ 1, 2	120 ลิตร/วัน	= 0.12 ลบ.ม./วัน= 0.005 ลบ.ม./ชม.
	การทดลองที่ 3	210 ลิตร/วัน	= 0.21 ลบ.ม./วัน= 0.009 ลบ.ม./ชม.
	การทดลองที่ 4	300 ลิตร/วัน	= 0.30 ลบ.ม./วัน= 0.013 ลบ.ม./ชม.
	การทดลองที่ 5	390 ลิตร/วัน	= 0.39 ลบ.ม./วัน= 0.016 ลบ.ม./ชม.

ความเร็วการไหล (ม./ชม.) $= \dfrac{\text{อัตราการไหล(ลบ.ม./ชม.)}}{\text{พื้นที่หน้าตัดถัง(ตร.ม.)}}$

การทดลองที่ 1, 2 $= \dfrac{0.005}{8.1 \times 10^{-3}}$ = 0.62 ม./ชม.

การทดลองที่ 3 $= \dfrac{0.009}{8.1 \times 10^{-3}}$ = 1.08 ม./ชม.

การทดลองที่ 4 $= \dfrac{0.013}{8.1 \times 10^{-3}}$ = 1.54 ม./ชม.

การทดลองที่ 5 $= \dfrac{0.016}{8.1 \times 10^{-3}}$ = 2.00 ม./ชม.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EBDT (ชม.) เวลากักน้ำในชั้นกรองแบบถังเปล่า

$$\text{EBDT} = \frac{\text{ความสูงชั้นตัวกลางในถัง(เมตร)}}{\text{ความเร็วการไหล(ม./ชม.)}}$$

การทดลองที่ 1 $= \frac{2}{0.62} = 3.24$ ชม.

การทดลองที่ 2 $= \frac{1.5}{0.62} = 2.43$ ชม.

การทดลองที่ 3 $= \frac{1.5}{1.08} = 1.39$ ชม.

การทดลองที่ 4 $= \frac{1.5}{1.54} = 0.97$ ชม.

การทดลองที่ 5 $= \frac{1.5}{2} = 0.75$ ชม.

VOLR (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน) ภาระบรรทุกอินทรีย์เทียบกับปริมาตรบรรจุตัวกลาง

$$\text{VOLR} = \frac{\text{ความเข้มข้นซีโอดีเข้าสู่ระบบ(กก./ลบ.ม.)xอัตราการไหล(ลบ.ม./วัน)}}{\text{ปริมาตรบรรจุตัวกลางกรอง(ลบ.ม.)}}$$

การทดลองที่ 1 $= \frac{0.3 \times 0.12}{1.6 \times 10^{-2}} = 2.22$ กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน

การทดลองที่ 2 $= \frac{0.3 \times 0.12}{1.2 \times 10^{-2}} = 2.96$ กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน

การทดลองที่ 3 $= \frac{0.3 \times 0.21}{1.2 \times 10^{-2}} = 5.18$ กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน

การทดลองที่ 4 $= \frac{0.3 \times 0.3}{1.2 \times 10^{-2}} = 7.40$ กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน

การทดลองที่ 5 $= \frac{0.3 \times 0.39}{1.2 \times 10^{-2}} = 9.62$ กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ชั้นกรอง-วัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

AOLR (กก.ซีโอดี/ตร.ม.ชั้นกรอง-วัน) ภาระบรรทุกอินทรีย์เทียบกับพื้นที่ผิวสัมผัสตัวกลาง

$$\text{AOLR} = \frac{\text{ความเข้มข้นซีโอดีเข้าสู่ระบบ(กก./ลบ.ม.)x อัตราการไหล(ลบ.ม./วัน)}}{\text{พื้นที่ผิวของตัวกลางกรอง(ตร.ม.)}}$$

การทดลองที่ 1 $= \frac{0.3 \times 0.12}{10208} = 3.53 \times 10^{-6}$ กก.ซีโอดี/ตร.ม.ตัวกลาง-วัน

การทดลองที่ 2 $= \frac{0.3 \times 0.12}{7744} = 4.65 \times 10^{-6}$ กก.ซีโอดี/ตร.ม.ตัวกลาง-วัน

การทดลองที่ 3 $= \frac{0.3 \times 0.21}{7744} = 8.14 \times 10^{-6}$ กก.ซีโอดี/ตร.ม.ตัวกลาง-วัน

การทดลองที่ 4 $= \frac{0.3 \times 0.3}{7744} = 1.16 \times 10^{-5}$ กก.ซีโอดี/ตร.ม.ตัวกลาง-วัน

การทดลองที่ 5 $= \frac{0.3 \times 0.39}{7744} = 1.51 \times 10^{-5}$ กก.ซีโอดี/ตร.ม.ตัวกลาง-วัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข ผลการทดลองที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ต่าง ๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลองที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.22 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

วันที่	ซีโอดี		ทีเคเอ็น		ของแข็งแขวนลอย			พีเอช	
	น้ำเข้า มก./ล.	น้ำออก มก./ล.	น้ำเข้า มก./ล.	น้ำออก มก./ล.	น้ำออก มก./ล.	รวม มก./วัน	น้ำล้างย้อน มก./วัน	น้ำเข้า	น้ำออก
1/12/2542	318	33.1	43	2.72	15.0	12700	10900	6.90	6.55
2/12/2542	310	26.2	40	1.63	15.0	14333	12533	6.80	6.42
3/12/2542	303	31.4	40	1.80	20.2	16124	13700	7.23	7.42
4/12/2542	295	23.0	39	0.96	14.0	13680	12000	7.23	6.91
5/12/2542	300	15.4	39	2.15	23.0	13365	10600	7.40	6.97
6/12/2542	299	15.4	39	4.14	28.0	14060	10700	6.79	6.78
7/12/2542	297	30.7	40	2.80	31.6	17187	13400	7.67	7.30
8/12/2542	301	23.0	41	0.73	23.8	14460	11600	7.26	7.32
9/12/2542	304	23.0	39	5.03	23.6	15332	12500	7.60	7.18
10/12/2542	302	13.2	39	2.51	57.2	18964	12100	7.20	6.83
11/12/2542	311	23.2	42	2.93	21.6	13692	11100	6.78	7.15
12/12/2542	311	11.4	40	1.56	45.2	17724	12300	7.30	7.02
13/12/2542	291	23.2	39	0.78	18.4	15708	13500	7.61	7.24
14/12/2542	302	12.3	39	1.14	15.7	14284	12400	7.22	7.38
15/12/2542	305	14.0	43	0.84	18.4	15208	13000	6.79	6.60
16/12/2542	302	18.0	39	0.96	16.4	14768	12800	6.75	6.94
17/12/2542	298	14.0	39	1.20	30.6	16672	13000	7.60	6.88
18/12/2542	302	11.3	41	1.39	19.8	14976	12600	7.21	7.04
19/12/2542	299	11.3	41	0.84	20.8	15096	12600	6.84	6.71
20/12/2542	311	8.20	41	0.98	28.6	16832	13400	6.74	6.63
21/12/2542	305	10.4	40	1.38	17.2	14450	12386	7.36	7.13
22/12/2542	295	9.00	39	1.69	21.6	15192	12600	6.75	6.63
23/12/2542	297	8.50	41	1.25	14.4	15528	13800	7.40	7.05
24/12/2542	305	8.20	39	1.60	35.2	14600	10376	7.34	7.21
25/12/2542	295	9.20	39	1.36	24.0	14600	11720	7.41	7.09
26/12/2542	292	10.6	41	1.72	15.2	15024	13200	7.20	6.77
27/12/2542	301	8.30	40	1.55	23.2	14600	11816	7.23	6.86
28/12/2542	299	8.20	41	1.35	17.9	15130	12982	7.22	6.97

การทดลองที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.96 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

วันที่	ซีโอดี		ทีเคเอ็น		ของแข็งแขวนลอย			พีเอช	
	น้ำเข้า มก./ล.	น้ำออก มก./ล.	น้ำเข้า มก./ล.	น้ำออก มก./ล.	น้ำออก มก./ล.	รวม มก./วัน	น้ำล้างย้อน มก./วัน	น้ำเข้า	น้ำออก
15/2/2543	331	16.1	40	1.93	28.0	12160	8800	7.46	6.85
16/2/2543	300	16.1	40	2.41	29.2	13204	9700	7.46	7.12
17/2/2543	305	15.4	41	2.72	15.7	16084	14200	7.40	7.21
18/2/2543	302	15.4	42	1.80	36.8	13316	8900	7.29	6.99
19/2/2543	316	15.5	40	0.96	26.4	12868	9700	7.41	7.26
20/2/2543	300	17.5	40	2.65	19.8	15876	13500	7.00	7.12
21/2/2543	298	16.1	38	2.15	14.3	15216	13500	7.38	6.92
22/2/2543	317	16.1	41	2.51	17.5	14800	12700	7.50	7.16
23/2/2543	300	15.5	40	6.40	24.7	12164	9200	7.36	6.99
24/2/2543	300	18.0	40	3.83	32.0	13340	9500	7.16	7.01
25/2/2543	300	16.3	38	8.20	26.5	12780	9600	7.38	7.16
26/2/2543	301	15.6	42	2.62	16.3	13556	11600	7.48	7.05
27/2/2543	298	17.9	41	3.56	18.5	12020	9800	7.31	7.01
28/2/2543	317	16.1	43	5.56	14.7	10664	8900	7.45	7.01
29/2/2543	298	16.1	39	3.05	17.3	13676	11600	7.36	6.96
1/3/2543	260	14.3	39	3.63	16.4	11368	9400	7.25	6.93
2/3/2543	331	14.3	42	3.48	12.3	11910	10434	7.49	7.08
3/3/2543	297	15.7	41	3.66	11.6	12050	10658	7.31	7.03
4/3/2543	301	15.7	40	4.06	12.4	12940	11452	7.14	7.08
5/3/2543	298	13.3	40	3.78	10.0	12870	11670	7.10	6.99
6/3/2543	298	13.3	36	3.72	11.3	12800	11444	7.23	7.17
7/3/2543	317	16.1	38	4.20	12.7	13350	11826	7.20	6.88
8/3/2543	298	15.6	37	3.84	15.7	12870	10986	7.46	7.05
9/3/2543	297	14.3	42	3.69	16.8	12940	10924	7.47	7.12
10/3/2543	301	14.3	39	3.90	12.3	13280	11804	7.34	7.04

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลองที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 5.18 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

วันที่	ซีโอดี		ทีเคเอ็น		ของแข็งแขวนลอย			พีเอช	
	น้ำเข้า มก./ล.	น้ำออก มก./ล.	น้ำเข้า มก./ล.	น้ำออก มก./ล.	น้ำออก มก./ล.	รวม มก./วัน	น้ำล้างย้อน มก./วัน	น้ำเข้า	น้ำออก
1/4/2543	295	10.6	40	23.2	8.60	23006	21200	7.42	7.17
2/4/2543	303	12.4	43	24.5	3.40	18114	17400	7.38	6.98
3/4/2543	292	9.86	41	22.2	2.10	17241	16800	7.47	6.89
4/4/2543	298	16.8	39	26.5	3.60	12256	11500	7.49	6.98
5/4/2543	301	12.5	38	26.0	4.50	20245	19300	7.39	6.79
6/4/2543	296	10.6	38	22.6	2.00	17220	16800	7.35	7.02
7/4/2543	299	13.5	39	38.5	2.60	21746	21200	7.11	7.05
8/4/2543	299	17.6	39	33.2	1.90	13199	12800	7.35	7.05
9/4/2543	301	21.2	41	22.0	2.80	19388	18800	6.96	6.86
10/4/2543	299	18.9	41	19.5	2.10	10941	10500	7.28	7.05
11/4/2543	304	16.6	41	17.6	1.90	15199	14800	7.35	6.91
12/4/2543	309	18.7	41	17.2	1.70	16757	16400	7.48	7.08
13/4/2543	296	19.3	39	16.4	1.70	13957	13600	7.43	7.28
14/4/2543	297	17.6	41	18.7	1.60	18936	18600	7.26	7.13
15/4/2543	302	16.9	40	20.4	1.70	21257	20900	7.47	6.95
16/4/2543	301	14.5	40	17.1	1.50	17915	17600	7.35	7.11
17/4/2543	308	13.7	39	16.3	1.30	19773	19500	7.45	6.97
18/4/2543	293	17.0	39	19.3	1.40	19694	19400	7.31	6.83
19/4/2543	299	14.2	42	18.0	1.20	19052	18800	7.25	6.82
20/4/2543	302	15.5	41	17.6	1.50	18915	18600	7.24	6.84
21/4/2543	292	14.1	39	17.8	1.30	18173	17900	7.13	7.05
22/4/2543	301	15.2	41	19.3	1.20	18852	18600	7.28	7.04
23/4/2543	302	14.8	41	18.1	1.10	20631	20400	7.37	6.99
24/4/2543	303	14.4	39	17.1	1.20	19652	19400	7.36	6.92
25/4/2543	303	15.5	42	18.7	1.30	18773	18500	7.37	6.99

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลองที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 7.40 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

วันที่	ซีโอดี		ทีเคเอ็น		ของแข็งแขวนลอย			พีเอช	
	น้ำเข้า มก./ล.	น้ำออก มก./ล.	น้ำเข้า มก./ล.	น้ำออก มก./ล.	น้ำออก มก./ล.	รวม มก./วัน	น้ำล้างย้อน มก./วัน	น้ำเข้า	น้ำออก
26/5/2543	296	34.3	41	31.2	6.40	30720	28800	7.51	7.03
27/5/2543	304	29.6	37	28.4	6.30	23890	22000	7.42	6.93
28/5/2543	295	26.9	41	24.6	5.60	26480	24800	7.36	7.05
29/5/2543	300	25.7	38	32.1	2.00	31800	31200	7.44	7.18
30/5/2543	305	25.7	42	28.0	1.60	22080	21600	7.42	7.18
31/5/2543	288	30.4	40	25.1	3.60	24580	23500	7.41	6.97
1/6/2543	286	47.7	40	28.9	2.40	37920	37200	7.47	7.25
2/6/2543	303	34.9	39	26.0	2.00	28000	27400	7.25	7.08
3/6/2543	291	38.5	41	27.3	2.00	34200	33600	7.49	7.04
4/6/2543	308	44.2	39	31.3	2.60	23880	23100	7.21	7.10
5/6/2543	305	36.0	41	26.9	1.60	39280	38800	7.36	7.01
6/6/2543	304	35.8	39	21.5	3.70	27110	26000	7.32	6.92
7/6/2543	290	35.4	39	29.4	14.8	20840	16400	7.31	6.87
8/6/2543	296	38.2	39	25.2	10.4	22720	19600	7.37	7.05
9/6/2543	292	39.3	41	32.4	11.6	27080	23600	7.41	7.03
10/6/2543	292	25.2	40	30.6	11.2	25760	22400	7.25	7.25
11/6/2543	284	32.5	40	31.8	12.0	27200	23600	7.34	6.97
12/6/2543	303	24.5	39	22.9	6.50	22750	20800	7.36	7.10
13/6/2543	300	16.3	41	29.4	11.6	26280	22800	7.23	6.96
14/6/2543	305	21.9	39	25.9	11.6	30680	27200	7.26	6.90
15/6/2543	297	26.8	40	31.8	12.4	24520	20800	7.21	6.99
16/6/2543	301	31.6	41	34.0	9.80	24540	21600	7.45	7.05
17/6/2543	310	40.6	41	35.3	10.8	30440	27200	7.36	7.08
18/6/2543	308	36.7	40	30.6	11.6	26680	23200	7.27	6.88
19/6/2543	308	34.3	40	33.4	12.4	28520	24800	7.42	7.25
20/6/2543	304	36.0	40	30.6	10.4	24320	21200	7.44	7.06
21/6/2543	292	32.3	39	28.3	9.80	30140	27200	7.32	7.07
22/6/2543	307	38.8	39	30.6	11.7	34710	31200	7.40	7.15
23/6/2543	307	37.9	41	30.6	12.6	27780	24000	7.16	7.06
24/6/2543	295	40.0	39	30.2	13.7	26900	22790	7.22	6.97
25/6/2543	291	35.3	39	32.2	12.8	29040	25200	7.20	7.07
26/6/2543	305	36.5	41	30.2	14.2	25845	21600	7.29	6.88
27/6/2543	291	38.4	41	30.2	14.6	27700	23335	7.33	7.00
28/6/2543	299	36.4	41	29.8	12.9	24800	20930	7.23	6.85

การทดลองที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 7.40 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน (ต่อ)

วันที่	ซีโอดี		ทีเคเอ็น		ของแข็งแขวนลอย			พีเอช	
	น้ำเข้า มก./ล.	น้ำออก มก./ล.	น้ำเข้า มก./ล.	น้ำออก มก./ล.	น้ำออก มก./ล.	รวม มก./วัน	น้ำล้างย้อน มก./วัน	น้ำเข้า	น้ำออก
29/6/2543	304	38.4	42	31.6	13.4	26300	22280	7.17	6.97
30/6/2543	291	36.4	41	28.6	15.0	25700	21200	7.36	7.16
1/7/2543	303	35.3	41	32.5	14.9	27000	22518	7.34	6.95
2/7/2543	299	35.0	39	29.7	15.6	26700	22029	7.35	7.00

การทดลองที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 9.62 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

วันที่	ซีโอดี		ทีเคเอ็น		ของแข็งแขวนลอย			พีเอช	
	น้ำเข้า มก./ล.	น้ำออก มก./ล.	น้ำเข้า มก./ล.	น้ำออก มก./ล.	น้ำออก มก./ล.	รวม มก./วัน	น้ำล้างย้อน มก./วัน	น้ำเข้า	น้ำออก
17/7/2543	324	30.3	40	31.0	27.2	50108	39500	7.50	6.95
18/7/2543	316	81.1	42	33.3	16.4	36396	30000	7.45	6.95
19/7/2543	310	83.4	41	36.0	21.6	38924	30500	7.47	6.85
20/7/2543	329	56.2	43	34.4	22.4	43736	35000	7.25	6.75
21/7/2543	307	42.1	40	29.0	17.2	37708	31000	7.45	7.12
22/7/2543	328	63.2	41	32.7	24.8	44172	34500	7.38	7.07
23/7/2543	296	57.1	39	27.2	23.0	41470	32500	7.24	6.76
24/7/2543	303	42.6	41	24.4	17.8	44442	37500	7.32	6.95
25/7/2543	278	52.5	42	28.8	20.5	39995	32000	7.36	7.06
26/7/2543	301	67.4	42	29.3	15.5	32545	26500	7.14	7.05
27/7/2543	307	73.5	39	36.0	21.0	37190	29000	7.29	6.97
28/7/2543	315	68.0	38	31.6	13.8	43632	38250	7.31	6.97
29/7/2543	290	64.0	39	31.7	10.0	28400	24500	7.47	6.97
30/7/2543	306	58.0	41	30.0	18.8	36832	29500	7.24	7.18
31/7/2543	296	59.4	40	26.3	15.9	33800	27599	7.24	6.77
1/8/2543	294	66.8	39	34.0	12.0	35600	30920	7.26	6.95
2/8/2543	308	61.5	39	31.4	13.2	30648	25500	7.21	6.80
3/8/2543	292	61.3	38	31.9	21.2	33800	25532	7.33	7.06
4/8/2543	300	58.5	39	34.5	16.9	29000	22409	7.36	7.01
5/8/2543	317	57.5	40	32.3	23.2	32200	23152	7.43	7.12
6/8/2543	301	62.7	40	33.3	21.1	31300	23071	7.32	7.26
7/8/2543	293	58.3	39	31.6	18.1	29700	22641	7.36	7.20
8/8/2543	293	59.2	38	31.7	19.9	30800	23039	7.23	7.34
9/8/2543	296	63.0	39	30.7	15.9	28500	22299	7.24	7.10
10/8/2543	293	60.0	38	31.5	18.0	29900	22880	7.20	7.25

ภาคผนวก ค ผลการทดลองที่สภาวะคงที่ที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ต่าง ๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลองที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.22 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

วันที่	ไนไตรท์	ไนเตรท	ทีเคเอ็น		ซีโอดี		ของแข็งแขวนลอย			ซีโอดีที่ตำแหน่งความสูงของถังกรอง						พีเอช	
	NO-2 มก./ล.	NO-3 มก./ล.	น้ำเข้า มก./ล.	น้ำออก มก./ล.	น้ำเข้า มก./ล.	น้ำออก มก./ล.	น้ำออก มก./ล.	น้ำล้างย้อน มก./วัน	รวม มก./วัน	2.15 ม. มก./ล.	1.65 ม. มก./ล.	1.15 ม. มก./ล.	0.65 ม. มก./ล.	0.15 ม. มก./ล.	0 ม. มก./ล.	น้ำเข้า	น้ำออก
15/1/2542	0.006	28.1	40	1.98	309	8.40	28.6	13000	16432	61.3	48.8	38.2	24.4	16.3	8.40	7.29	6.86
16/1/2542	0.014	27.0	42	1.62	321	8.00	20.2	12900	15324	65.0	52.0	37.6	31.1	15.8	8.00	7.23	7.01
17/1/2542	0.010	22.4	39	1.36	287	10.50	29.1	11000	14492	68.4	51.7	32.2	24.1	16.1	10.5	7.28	6.85
18/1/2542	0.010	26.1	41	1.65	293	8.05	14.5	12000	13740	66.5	46.9	30.7	24.1	16.1	8.05	7.22	7.08
19/1/2542	0.006	27.8	40	1.38	287	9.60	22.1	12700	15352	72.4	48.3	40.2	24.1	16.1	9.60	7.40	7.05
20/1/2542	0.004	24.3	39	1.65	297	8.14	27.3	11200	14476	63.7	38.0	26.6	21.1	16.3	8.14	7.34	7.00
21/1/2542	0.008	28.8	39	1.22	311	8.14	17.6	12200	14312	64.3	46.0	32.5	25.0	16.3	8.14	7.31	6.86

การทดลองที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 2.96 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

วันที่	ไนไตรท์	ไนเตรท	ทีเคเอ็น		ซีโอดี		ของแข็งแขวนลอย			ซีโอดีที่ตำแหน่งความสูงของถังกรอง					พีเอช	
	NO-2 มก./ล.	NO-3 มก./ล.	น้ำเข้า มก./ล.	น้ำออก มก./ล.	น้ำเข้า มก./ล.	น้ำออก มก./ล.	น้ำออก มก./ล.	น้ำล้างย้อน มก./วัน	รวม มก./วัน	1.65 ม. มก./ล.	1.15 ม. มก./ล.	0.65 ม. มก./ล.	0.15 ม. มก./ล.	0 ม. มก./ล.	น้ำเข้า	น้ำออก
16/3/2543	0.037	23.4	39	3.85	284	14.1	11.7	11000	12402	45.8	33.7	28.2	16.1	14.1	7.22	6.87
17/3/2543	0.046	24.7	39	3.60	296	14.3	12.2	12000	13468	43.0	35.3	29.2	17.9	14.3	7.19	6.97
18/3/2543	0.034	22.8	38	4.25	292	14.3	8.22	11500	12486	50.2	34.2	29.4	12.6	14.3	7.26	7.07
19/3/2543	0.029	26.4	40	3.74	324	16.6	16.6	12500	14492	50.4	31.4	27.2	20.0	16.6	7.32	6.91
20/3/2543	0.025	26.3	42	3.68	311	15.1	8.90	10900	11968	44.5	34.0	28.0	17.1	15.1	7.37	7.14
21/3/2543	0.038	27.2	40	4.36	304	13.0	15.9	10900	12813	40.0	32.5	33.8	18.1	13.0	7.28	7.08
22/3/2543	0.026	22.2	41	4.13	302	16.0	20.9	11500	14009	46.0	35.3	32.8	18.7	16.0	7.33	6.97

การทดลองที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 5.18 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

วันที่	ไนไตรท์	ไนเตรท	ทีเคเอ็น		ซีโอดี		ของแข็งแขวนลอย			ซีโอดีที่ตำแหน่งความสูงของถังกรอง					พีเอช	
	NO-2 มก./ล.	NO-3 มก./ล.	น้ำเข้า มก./ล.	น้ำออก มก./ล.	น้ำเข้า มก./ล.	น้ำออก มก./ล.	น้ำออก มก./ล.	น้ำล้างย้อน มก./วัน	รวม มก./วัน	1.65 ม. มก./ล.	1.15 ม. มก./ล.	0.65 ม. มก./ล.	0.15 ม. มก./ล.	0 ม. มก./ล.	น้ำเข้า	น้ำออก
6/5/2543	0.375	12.4	38	18.6	295	15.6	1.18	18500	18748	65.7	42.5	32.5	17.6	15.6	7.22	6.94
7/5/2543	0.407	10.8	42	18.3	283	13.3	1.44	17800	18103	71.0	41.5	30.0	20.0	13.3	7.35	7.03
8/5/2543	0.395	13.2	38	18.1	294	14.6	1.25	18100	18362	73.7	46.2	33.0	20.0	14.6	7.25	7.08
9/5/2543	0.454	11.0	39	17.0	306	15.5	1.36	20200	20486	81.3	38.8	29.8	15.5	15.5	7.29	6.88
10/5/2543	0.383	11.1	39	17.5	309	16.9	1.16	19700	19943	75.0	44.0	36.0	20.0	16.9	7.17	6.99
11/5/2543	0.388	12.9	42	18.3	309	13.9	1.07	19800	20024	72.0	42.0	38.6	21.3	13.9	7.29	7.01
12/5/2543	0.423	11.3	38	18.3	316	14.4	1.25	17400	17662	74.4	43.0	37.9	16.0	14.4	7.29	6.92

การทดลองที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 7.40 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

วันที่	ไนไตรท์	ไนเตรท	ทีเคเอ็น		ซีโอดี		ของแข็งแขวนลอย			ซีโอดีที่ตำแหน่งความสูงของถังกรอง					พีเอช	
	NO-2 มก./ล.	NO-3 มก./ล.	น้ำเข้า มก./ล.	น้ำออก มก./ล.	น้ำเข้า มก./ล.	น้ำออก มก./ล.	น้ำออก มก./ล.	น้ำล้างย้อน มก./วัน	รวม มก./วัน	1.65 ม. มก./ล.	1.15 ม. มก./ล.	0.65 ม. มก./ล.	0.15 ม. มก./ล.	0 ม. มก./ล.	น้ำเข้า	น้ำออก
10/7/2543	0.010	0.84	38	30.7	316	36.3	13.8	22000	26149	130	98.1	67.2	38.9	36.3	7.23	7.10
11/7/2543	0.010	0.91	38	28.5	314	42.6	14.4	24000	28320	132	103	75.6	35.6	42.6	7.30	7.00
12/7/2543	0.004	0.79	40	30.7	303	37.4	13.3	23500	27499	141	96.0	68.3	42.6	37.4	7.17	7.01
13/7/2543	0.003	0.96	38	29.8	311	34.8	13.8	21700	25837	131	103	75.0	37.9	34.8	7.28	6.97
14/7/2543	0.018	0.99	40	29.5	297	40.0	14.6	20900	25292	138	98.9	68.0	46.3	40.0	7.31	7.06
15/7/2543	0.004	0.80	41	28.8	305	39.2	15.3	20300	24887	139	99.6	70.6	46.3	39.2	7.33	7.12
16/7/2543	0.013	0.85	42	31.2	307	37.4	14.2	21000	25274	136	102	73.3	42.7	37.4	7.28	7.01

การทดลองที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ 9.62 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

วันที่	ไนไตรท์	ไนเตรท	ทีเคเอ็น		ซีโอดี		ของแข็งแขวนลอย			ซีโอดีที่ตำแหน่งความสูงของถังกรอง					พีเอช	
	NO-2 มก./ล.	NO-3 มก./ล.	น้ำเข้า มก./ล.	น้ำออก มก./ล.	น้ำเข้า มก./ล.	น้ำออก มก./ล.	น้ำออก มก./ล.	น้ำล้างย้อน มก./วัน	รวม มก./วัน	1.65 ม. มก./ล.	1.15 ม. มก./ล.	0.65 ม. มก./ล.	0.15 ม. มก./ล.	0 ม. มก./ล.	น้ำเข้า	น้ำออก
15/8/2543	0.060	0.108	39	33	291	57.4	21.1	23000	31210	160	118	80.5	62.1	57.4	7.31	7.19
16/8/2543	0.084	0.1208	39	33.4	297	57.3	18.9	22300	29655	167	113	81.3	63.2	57.3	7.34	7.09
17/8/2543	0.092	0.106	40	32.4	294	61.8	23.3	23500	32568	155	110	89.4	66.8	61.8	7.41	7.25
18/8/2543	0.077	0.1094	42	33.1	296	59.5	20.4	22600	30572	167	111	84.0	71.0	59.5	7.3	7.11
19/8/2543	0.064	0.1135	40	32.8	308	61.6	18.6	22100	29354	161	117	83.3	66.5	61.6	7.34	7.06
20/8/2543	0.064	0.1066	41	31.5	296	60.5	14.4	23600	29212	155	117	80.9	63.8	60.5	7.36	7.12
21/8/2543	0.073	0.1075	41	31.2	304	61.3	17.3	21900	28639	154	117	81.2	66.0	61.3	7.29	7.15

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง ความดันสูญเสียและระดับน้ำในถังปฏิกิริยาที่ระดับความสูงชั้นตัวกลาง 2 และ 1.5 เมตร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความดันสูญเสียและระดับน้ำในถังปฏิกิริยาที่ระดับความสูงชั้นตัวกลาง 2 และ 1.5 เมตร

ความสูงชั้นตัวกลาง 2 เมตร			ความสูงชั้นตัวกลาง 1.5 เมตร		
เวลา(ชั่วโมง)	ความดันสูญเสีย(ซม.)	ระดับน้ำ(ซม.)	เวลา(ชั่วโมง)	ความดันสูญเสีย(ซม.)	ระดับน้ำ(ซม.)
0.17	18	228	0.12	15.5	178
1.17	19	229	1.35	24.5	187
1.97	20	230	2.25	21.5	184
3.08	19	229	3.33	21.5	184
4.22	18.5	228.5	3.67	25.5	188
5.00	19	229	4.47	26.5	189
6.00	19.5	229.5	5.53	27	189.5
7.00	21.5	231.5	6.50	27	189.5
9.17	21	231	8.00	29	191.5
10.00	22	232	15.40	32.5	195
11.58	22.5	232.5	16.55	31.5	194
12.13	24	234	17.28	32.5	195
13.00	25	235	18.03	33	195.5
14.12	24	234	18.77	33	195.5
15.03	25	235	20.42	33	195.5
16.02	25	235	21.50	33	195.5
17.02	25	235	22.05	33	195.5
18.03	24.5	234.5	22.50	33	195.5
20.13	26.5	236.5	22.92	33	195.5
20.55	27.5	237.5	24.00	33	195.5
20.75	27	237	26.00	35	197.5
21.02	28.5	238.5	28.00	36	198.5
21.38	29.5	239.5	30.00	36	198.5
21.55	29.5	239.5	32.00	40	202.5
22.03	31.5	241.5	34.00	42	204.5
22.65	30.5	240.5	36.00	43	205.5
23.07	32	242	38.00	44	206.5
24.05	31.5	241.5	40.00	50	212.5
25.02	30.5	240.5	41.00	58	220.5
26.00	31.5	241.5	42.00	77	239.5
27.03	32.5	242.5	42.50	92	254.5
28.05	33.5	243.5	43.00	107	269.5
29.03	35	245	43.50	122.5	285
30.02	39.5	249.5			
30.55	42	252			
30.93	55.5	265.5			
31.02	58	268			
31.05	58.5	268.5			
31.10	60	270			
31.30	70	280			
31.50	75	285			

ประวัติผู้เขียน

นางสาววชิรา สันพนวัฒน์ เกิดวันที่ 26 เมษายน พ.ศ. 2516 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปี พ.ศ. 2539 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2540

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย