

PROTEIN CONVERSION FROM DAIRY WASTEWATER

Mr. Pakorn Phuangkrajay

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

Suranaree University of Technology

Academic Year 2001

ISBN 974-533-046-9

การเปลี่ยนแปลงโปรตีนจากน้ำเสียโรงงานผลิตภัณฑ์นม

นายปกรณ์ พวงกระจ่าย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2544
ISBN 974-533-046-9

ปกรณํ พวงกระจาย : การเปลี่ยนแปลงโปรตีนจากน้ำเสียโรงงานผลิตภัณฑ์นม
(PROTEIN CONVERSION FROM DAIRY WASTEWATER)

อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.จงจิตต์ ผลประเสริฐ, 70 หน้า. ISBN 974-533-046-9

การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตภัณฑ์นมด้วยระบบบ่อสาหร่าย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสีย, ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย และปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบบำบัดแบบบ่อสาหร่าย โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ระดับความลึก คือ ที่ระดับความลึก 20 เซนติเมตรมีค่าภาระบรรทุกคือ 88.0, 123.2, 205.3 และ 610.0 kg BOD/ha-d, ที่ระดับความลึก 40 เซนติเมตรมีค่าภาระบรรทุกคือ 176.0, 246.4, 410.7 และ 1226.1 kg BOD/ha-d และที่ระดับความลึก 50 เซนติเมตรมีค่าภาระบรรทุกคือ 217.1, 305.1, 510.4 และ 1531.2 kg BOD/ha-d จากการทดลองพบว่าระบบสามารถลดค่า BOD_5 ได้ 31.8 – 88.6 %, COD 21.2 – 89 %, TKN 1.3 – 72.3 %, TP 45.2 – 87.6 %, NO_3^- 2.4 – 95.1 %, และ FOG 45.8 – 74.7 %

จากการหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์พบว่า ที่ระดับความลึก 40 เซนติเมตร ระบบบ่อสามารถผลิตปริมาณความเข้มข้นของสาหร่ายได้มากที่สุดที่ 67 mg/L พร้อมกับค่าสูงสุดของ μ_m เท่ากับ $8.92\ d^{-1}$ สำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย และจากการวิเคราะห์สมการ Oron and Shelef (1982) เพื่อทำนายปริมาณสาหร่าย หาค่าคงที่ได้ a เท่ากับ 1.106, b เท่ากับ 0.78, β เท่ากับ 1.28 และ γ เท่ากับ 0.51

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

PAKORN PHUANGKRAJAY : PROTEIN CONVERSION FROM DAIRY
WASTEWATER. THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. CHONGCHIN
PROLPRASERT, Ph.D. 70 PP. ISBN 974-533-046-9

HIGH RATE ALGAL POND/DAIRY WASTEWATER

This research was concerned with treatment of dairy wastewater, using an algal pond. Its objectives were to determine the wastewater characteristics, treatment performance, and the factors related to the design of algal pond. The experiments were carried out at 3 levels of pond depth with different organic loading rates (OLR). In the 20-cm-deep pond, the following OLR's were used 88.0, 123.2, 205.3, and 610.0 kg BOD/ha-d; in the 40-cm-deep pond, OLR's = 176.0, 246.4, 410.7, and 1226.1 kg BOD/ha-d; and in the 50-cm-deep pond, OLR's = 217.1, 305.1, 510.4, and 1531.2 kg BOD/ha-d. Overall, the algal pond could achieve the following ranges of removal efficiencies $BOD_5 = 31.8 - 88.6 \%$, $COD = 21.2 - 89 \%$, $TKN = 1.3 - 72.3 \%$, $TP = 45.2 - 87.6 \%$, $NO_3^- = 2.4 - 95.1 \%$, and $FOG = 45.8 - 74.7 \%$

From the kinetic assessment, the 40-cm-deep pond was found to contain the highest algal concentration of 67 mg/L with the maximum value of μ_m equal to 8.92 d^{-1} for bacterial growth. And from the analysis of the Oron and Shelef (1982) equation used for algal mass prediction, the following constant values were obtained $a = 1.106$, $b = 0.78$, $\beta = 1.28$, and $\gamma = 0.51$.

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่างๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการ และด้านการดำเนินการวิจัย ดังต่อไปนี้

- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จงจินต์ ผลประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
 - ดร. อุดมพล พิชน์ไพบูลย์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์
 - ดร. ธรรมรัตน์ คุตตะเทพ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์
 - ผู้จัดการโรงแรมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, บุคลากรประจำโรงแรมทุกท่าน, บุคลากรประจำห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่อำนวยความสะดวก และให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ
 - คุณฤกษ์ฤทธิ์ เกนหาราช คุณนิรันดร์ คงฤทธิ์ คุณอุบล สุริพล และคุณศศิธร มณฑิพย์ ที่กรุณาช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
 - ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การเลี้ยงดูอบรม และส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีตลอดมาในอดีต จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ก่อให้เกิดประโยชน์ต่อส่วนรวม ผู้วิจัยขอมอบความดีนี้แด่บิดา มารดา ครูอาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

ปกรณ์ พวงกระจ่าย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ญ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 กระบวนการผลิตและลักษณะน้ำเสียจากโรงงานผลิตภัณฑันม	4
2.2 แหล่งน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต และน้ำทิ้ง	5
2.3 ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานผลิตภัณฑันม	6
2.4 กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตภัณฑันม	7
2.5 การศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตภัณฑันม	8
2.6 การบำบัดน้ำเสียแบบบ่อสาหร่าย	10
2.7 การศึกษาการบำบัดน้ำเสียโดยใช้สาหร่าย	17
2.8 สมการสำหรับการบำบัดน้ำเสียระบบ CSTR	18
3 วิธีดำเนินการวิจัย	20
3.1 การศึกษาสารติดตาม	20
3.2 การสร้างแบบจำลอง	21

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3	สถานที่ทำการวิจัย.....	22
3.4	น้ำตัวอย่าง.....	23
3.5	การวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสีย.....	23
3.6	วิธีดำเนินการทดลอง.....	23
3.7	การเก็บและรวบรวมข้อมูล.....	24
3.8	การวิเคราะห์ข้อมูล.....	24
4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผล.....	26
4.1	การศึกษาสารติดตาม.....	26
4.2	ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย.....	26
4.3	ประสิทธิภาพของระบบบำบัดแบบบ่อสาหร่าย.....	28
4.4	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการหาค่าสัมประสิทธิ์ทางคณิตศาสตร์.....	38
4.5	การหาค่าคงที่จากสมการปริมาณสาหร่าย.....	47
5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	49
5.1	สรุปผลการทดลอง.....	49
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	50
	เอกสารอ้างอิง.....	51
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก ผลการศึกษาสารติดตาม.....	56
	ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์ลักษณะน้ำทิ้งที่ออกจากระบบบำบัด.....	60
	ภาคผนวก ค โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณ (Maple).....	64
	ภาคผนวก ง ผลการทดสอบทางสถิติ.....	67
	ประวัติผู้เขียน.....	70

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานผลิตกัณฑ์นม.....	7
3.1 ค่าตัวแปรและวิธีการทดสอบที่เลือกใช้	23
3.2 รายละเอียดการทดลอง	25
4.1 ค่าตัวแปรต่างๆ ของน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดที่วัดได้จากการทดลอง	27
4.2 ค่า SS และ VSS เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ระดับความลึก 20 เซนติเมตร.....	33
4.3 ค่า SS และ VSS เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ระดับความลึก 40 เซนติเมตร.....	33
4.4 ค่า SS และ VSS เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ระดับความลึก 50 เซนติเมตร.....	33
4.5 ค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ที่ระดับความลึกต่างๆ.....	39
5.1 ค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ที่ระดับความลึกต่างๆ.....	50
1ก. ผลการทดลองและการคำนวณของการทำTracer.....	57
1ข. การวิเคราะห์ลักษณะน้ำเมื่อระบบคงที่ ที่ระดับความลึก 20 เซนติเมตร.....	61
2ข. ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตกัณฑ์นมโดยใช้ระบบบำบัดแบบบ่อ สาหร่าย ที่ระดับความลึก 20 เซนติเมตร	61
3ข. การวิเคราะห์ลักษณะน้ำเมื่อระบบคงที่ ที่ระดับความลึก 40 เซนติเมตร.....	62
4ข. ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตกัณฑ์นมโดยใช้ระบบบำบัดแบบบ่อ สาหร่าย ที่ระดับความลึก 40 เซนติเมตร	62
5ข. การวิเคราะห์ลักษณะน้ำเมื่อระบบคงที่ ที่ระดับความลึก 50 เซนติเมตร.....	63
6ข. ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตกัณฑ์นมโดยใช้ระบบบำบัดแบบบ่อ สาหร่าย ที่ระดับความลึก 50 เซนติเมตร	63
1ง. ผลการทดสอบค่า COD ทางสถิติเมื่อระบบคงที่ ที่ระดับความลึก 20 เซนติเมตร	68
2ง. ผลการทดสอบค่า COD ทางสถิติเมื่อระบบคงที่ ที่ระดับความลึก 40 เซนติเมตร	68
3ง. ผลการทดสอบค่า COD ทางสถิติเมื่อระบบคงที่ ที่ระดับความลึก 50 เซนติเมตร	68

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่

หน้า

- 4ง. การเปรียบเทียบระหว่างค่าปริมาณอาหารที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ 69
- 5ง. การทดสอบค่า t (t – Test) แบบ Paired – sample T Test ของค่าปริมาณอาหารที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการคำนวณจากการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 69
- 6ง. การเปรียบเทียบระหว่างค่าปริมาณแบคทีเรียที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ 69
- 7ง. การทดสอบค่า t (t – Test) แบบ Paired – sample T Test ของค่าปริมาณแบคทีเรียที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการคำนวณจากการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 69

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	วงจรการเกิดสาหร่าย และการสร้าง O_2 โดยกระบวนการสังเคราะห์แสงในน้ำเสีย..... 12
2.2	ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อสาหร่าย มองด้านตัดขวาง 13
2.3	ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อสาหร่าย มองด้านบน..... 13
3.1	ระบบบำบัดจำลองแบบบ่อสาหร่าย มองจากด้านบน 21
4.1	ความเข้มข้นของคลอไรด์กับเวลา ของการศึกษาสารติดตาม.....27
4.2	ประสิทธิภาพการบำบัด BOD_5 และ COD ของน้ำเสียจากโรงงานผลิตก้อนขนมโดยใช้ระบบ บำบัดแบบบ่อสาหร่าย ที่ระดับความลึก 20 เซนติเมตร 29
4.3	ประสิทธิภาพการบำบัด BOD_5 และ COD ของน้ำเสียจากโรงงานผลิตก้อนขนมโดยใช้ระบบ บำบัดแบบบ่อสาหร่าย ที่ระดับความลึก 40 เซนติเมตร 30
4.4	ประสิทธิภาพการบำบัด BOD_5 และ COD ของน้ำเสียจากโรงงานผลิตก้อนขนมโดยใช้ระบบ บำบัดแบบบ่อสาหร่าย ที่ระดับความลึก 50 เซนติเมตร 31
4.5	ประสิทธิภาพการบำบัด TKN, TP, FOG และ NO_3^- จากโรงงานผลิตก้อนขนมโดยใช้ระบบ บำบัดแบบบ่อสาหร่าย ที่ระดับความลึก 20 เซนติเมตร 35
4.6	ประสิทธิภาพการบำบัด TKN, TP, FOG และ NO_3^- จากโรงงานผลิตก้อนขนมโดยใช้ระบบ บำบัดแบบบ่อสาหร่าย ที่ระดับความลึก 40 เซนติเมตร 36
4.7	ประสิทธิภาพการบำบัด TKN, TP, FOG และ NO_3^- จากโรงงานผลิตก้อนขนมโดยใช้ระบบ บำบัดแบบบ่อสาหร่าย ที่ระดับความลึก 50 เซนติเมตร 37
4.8	การหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ k_d และ Y ที่ระดับความลึก 20 เซนติเมตร 40
4.9	การหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ k_d และ Y ที่ระดับความลึก 40 เซนติเมตร 41
4.10	การหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ k_d และ Y ที่ระดับความลึก 50 เซนติเมตร 42
4.11	การหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ K_s และ k ที่ระดับความลึก 20 เซนติเมตร 43
4.12	การหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ K_s และ k ที่ระดับความลึก 40 เซนติเมตร 44
4.13	การหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ K_s และ k ที่ระดับความลึก 50 เซนติเมตร 45

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.14	กราฟเปรียบเทียบลักษณะการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่เรียกว่าปริมาณอาหารต่างๆ ในแต่ละระดับความลึก.....46

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

BOD ₅	=	ความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (Biochemical Oxygen Demand)
C _a	=	ความเข้มข้นของสาหร่าย
Chl_A	=	คลอโรฟิลล์ เอ
COD	=	ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (Chemical Oxygen Demand)
DO	=	ปริมาณออกซิเจนละลาย (Dissolved Oxygen)
FOG	=	Fat, Oil and Grease
g/m ³ hr	=	กรัมต่อลูกบาศก์เมตร-ชั่วโมง
HRT	=	ระยะเวลาเก็บกัก
HRT/z	=	ระยะเวลาเก็บกักต่อความลึก
I ₀	=	ความเข้มแสง
k	=	อัตราการใช้อาหารมากที่สุดต่อหนึ่งหน่วยมวลของจุลินทรีย์
k _d	=	ค่าสัมประสิทธิ์ในการลดลงของจุลินทรีย์
kg BOD/m ³ d	=	กิโลกรัมบีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร-วัน
kcal/g	=	กิโลแคลลอรี่ต่อกรัม
kg COD/m ³ d	=	กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร-วัน
K _s	=	ปริมาณอาหาร ณ จุดที่มีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของจุลินทรีย์เท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของจุลินทรีย์
m ³	=	ลูกบาศก์เมตร
m ³ /d	=	ลูกบาศก์เมตรต่อวัน
mg/L	=	มิลลิกรัมต่อลิตร
mL/sec	=	มิลลิลิตรต่อวินาที
NO ₃ ⁻	=	Nitrate
pH	=	ค่าความเป็นกรด-ด่าง
Q	=	อัตราการไหล
SS	=	ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

T	=	อุณหภูมิ
TKN	=	Total Kjeldahl Nitrogen
TP	=	Total Phosphorus
Tons/ha-year	=	ตันต่อเฮกแตร์-ปี
VSS	=	ของแข็งแขวนลอยละเอียดง่าย (Volatile Suspended Solids)
Y	=	สัมประสิทธิ์ปริมาณการผลิตเซลล์ใหม่สูงสุดในช่วงที่มีอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์สุทธิสูงสุด
z	=	ความลึก
θ	=	ระยะเวลาเก็บกัก
σ^2	=	ค่าความแปรปรวน

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันได้มีการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร และความนิยมในการบริโภคนมในประเทศมีมากขึ้น ดังนั้นจึงมีการขยายตัวในอุตสาหกรรมการผลิตนมเพื่อการบริโภคเป็นอย่างมาก จากสาเหตุนี้จึงก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัดน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตนมเพิ่มขึ้น ซึ่งถ้าหากไม่มีการบำบัดที่ถูกต้องน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบถูกทิ้งลงในแหล่งน้ำจะทำให้แหล่งน้ำนั้นมีการเน่าเสียอันเนื่องมาจากสิ่งสกปรกต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสียจากโรงงานผลิตภัณฑ์นมนั้น ทำให้มีพืชน้ำหลายชนิด เช่น สาหร่าย, ผักตบชวา, กก และพืชน้ำอื่นๆ เจริญเติบโตมากขึ้น เนื่องจากพืชน้ำเหล่านี้นำสารประกอบที่มีอยู่ในน้ำเสียจากโรงงานผลิตภัณฑ์นมมาใช้ในการเจริญเติบโตและขยายพันธุ์จนอาจก่อให้เกิดภาวะยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) (ทศพร ธงทอง, 2529) ทำให้เกิดปัญหาต่างๆ ตามมาอีก เช่น แหล่งน้ำเกิดการขาดออกซิเจนในเวลากลางคืนทำให้สัตว์น้ำตาย น้ำมีกลิ่นเหม็น สีขุ่นไม่น่าดู และยังทำให้แหล่งน้ำมีสถานะเป็นกรด พืชน้ำที่เจริญเติบโตมากเกินไปจะกีดขวางเส้นทางสัญจรทางน้ำ ดังนั้นถ้าหากมีการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากโรงงานผลิตภัณฑ์นมที่พืชน้ำต้องการไปใช้ในการเจริญเติบโต เช่น ไนโตรเจน และ ฟอสฟอรัส ก็จะทำให้การเจริญเติบโตของพืชน้ำไม่มากจนก่อให้เกิดปัญหาทางคุณภาพน้ำได้

การบำบัดน้ำเสียที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่หลายวิธี แต่ละวิธีก็มีข้อดีข้อเสียต่างกันออกไป การจะเลือกใช้ระบบบำบัดแบบใดแบบหนึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย สถานที่ก่อสร้าง เงินทุน บุคลากร เป็นต้น (มณฑล สุดประเสริฐ, 2535) ซึ่งการบำบัดน้ำเสียแต่ละวิธีเป็นการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำออกไปโดยวิธีต่างกัน ตัวอย่างเช่น การกำจัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตภัณฑ์นมด้วยระบบเบี่ยงตะกอน (Activated Sludge), ระบบบ่อผึ่ง (Oxidation Pond), ระบบ Airlift Bioreactor (เอกพล เหมรา, 2536), ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Constructed Wetlands) (Chris et al, 1995), ระบบ เอสบีอาร์ (Sequencing Batch Reactor) (สุชาติ เหลืองประเสริฐ, 2538) และระบบบำบัดอื่นๆ แต่ระบบเหล่านี้มีข้อดีเพียงการกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำเสียเท่านั้น ไม่ได้มีการนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์

ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จึงทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ระบบบ่อสาหร่าย (High Rate Algal Pond: HRAP) เนื่องจากสาหร่ายมีอัตราการเติบโตเร็ว มีคุณค่าทางอาหารสูง สามารถเจริญเติบโตในน้ำเสียได้ และมีปริมาณโปรตีนสูง (Polprasert, 1996) หากสามารถแปรรูปนำกลับมาเป็นอาหารสัตว์ได้อีกจะเป็นการคุ้มค่าสำหรับการลงทุน โดยน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาจะเป็นน้ำเสียจากโรงงานผลิตภัณฑ์นม (Dairy Wastewater) ซึ่งมีสารประกอบไนโตรเจนสูง ดังนั้นสาหร่ายจึงมีแหล่งอาหารที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโต ทั้งยังเป็นการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสไม่ให้มีเหลือมากในน้ำที่ออกจากระบบบำบัด เป็นการป้องกันการเกิดปัญหายูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

จากความสำคัญของปัญหาดังที่กล่าวมาแล้วทำให้ได้วัตถุประสงค์ในการวิจัยดังนี้

1.2.1 ศึกษาลักษณะน้ำเสียจากโรงงานผลิตภัณฑ์นม

1.2.2 ศึกษาความสามารถในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตภัณฑ์นมของระบบบำบัดแบบบ่อสาหร่าย

1.2.3 ศึกษาปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบบำบัดแบบบ่อสาหร่าย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเพื่อหาความสามารถในการผลิตสาหร่ายซึ่งเป็นแหล่งโปรตีนในสถานะที่เหมาะสมจากการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตภัณฑ์นมด้วยบ่อสาหร่าย โดยได้กำหนดขอบเขตไว้ดังนี้

1.3.1 น้ำเสียที่ใช้ในการวิจัยเป็นน้ำเสียสังเคราะห์

1.3.2 วิเคราะห์และตรวจสอบลักษณะเบื้องต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ และวิเคราะห์สมบัติน้ำทิ้งจากระบบบำบัดแบบบ่อสาหร่าย ตาม “Standard Methods” (APHA et al, 1998) ด้วยตัวแปรดังต่อไปนี้

- Biochemical Oxygen Demand (BOD₅)
- Chemical Oxygen Demand (COD)
- Suspended Solids (SS)
- Volatile Suspended Solids (VSS)

- Total Kjeldahl Nitrogen (TKN)
- Total Phosphorus (TP)
- Nitrate (NO_3^-)
- Fat, Oil and Grease (FOG)

1.3.3 การวิเคราะห์ปริมาณสาหร่าย จะทำการวิเคราะห์ความสามารถในการเจริญเติบโตของสาหร่ายจากบ่อบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตถ่านหิน ด้วยความเข้มข้นของ Chlorophyll A

1.3.4 การวิเคราะห์ความสามารถของระบบบำบัดแบบบ่อสาหร่าย โดยรับน้ำเสียจากโรงงานผลิตถ่านหิน

- แปรเปลี่ยนระยะเวลาเก็บกักของระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อสาหร่าย
- แปรเปลี่ยนระดับความลึกของระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อสาหร่าย

1.3.5 สร้างระบบบำบัดจำลองแบบบ่อสาหร่ายเพื่อทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบบำบัดแบบบ่อสาหร่ายที่สร้างขึ้น สำหรับการวิจัยครั้งนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ระดับความลึก คือ 20, 30 และ 50 เซนติเมตร ในแต่ละระดับความลึกมีช่วงระยะเวลาเก็บกัก (HRT) ที่แตกต่างกัน คือ 7, 5, 3 และ 1 วัน

1.3.6 ประเมินค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์เพื่อนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยพิจารณา

- ค่าปริมาณอาหาร ณ จุดที่มีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของจุลินทรีย์เท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของจุลินทรีย์ (K_s)
- ค่าของอัตราการใช้อาหารมากที่สุดต่อหนึ่งหน่วยมวลจุลินทรีย์ (k)
- ค่าสัมประสิทธิ์ในการลดลงของจุลินทรีย์ (k_d)
- ค่าสัมประสิทธิ์ปริมาณการผลิตเซลล์ใหม่สูงสุดของช่วงที่มีอัตราการเจริญเติบโตสุทธิสูงสุด (Y)

บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อุตสาหกรรมนมมีผลิตภัณฑ์มากมายหลายชนิด เช่น นม (Milk), เนยแข็ง (Cheese), เนยเหลว (Butter), ไอศกรีม (Ice cream), โยเกิร์ต (Yogurt), นมพร่องไขมัน (Nonfat), นมผง (Dried milk), หางนม (Whey), lactose (Elmer et al, 1998) เนื่องจากองค์ประกอบของน้ำเสียจากโรงงานผลิตภัณฑ์นมจะขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์, ลักษณะการทำความสะอาด และการจัดการน้ำในโรงงานนั้นๆ ซึ่งจากกระบวนการผลิตจะทำให้ทราบถึงลักษณะของน้ำเสียในแต่ละขั้นตอนได้

2.1 กระบวนการผลิตและลักษณะน้ำเสียจากโรงงานผลิตภัณฑ์นม

ทองยศ อเนกกะเวียง (2535) ได้รายงานไว้ในอุตสาหกรรมการผลิตนมมีขั้นตอนกระบวนการผลิตดังนี้

2.1.1 นมโคดิบ (Raw milk) นมโคซึ่งทำให้เย็นและบรรจุในถังนมบรรจุทุกในรถตู้ปรับอุณหภูมิเย็นประมาณ 3 °C ผ่านการทดสอบจากเจ้าหน้าที่ควบคุมคุณภาพแล้วสูบนมเก็บใส่ถังนมดิบรอการผลิต

2.1.2 ปรับมันเนยและธาตุน้ำนมไม่รวมมันเนยเข้าสู่มาตรฐาน (Standardization of butter fat and solid-not-fat ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 26 พ.ศ. 2522) นมต้องมีมันเนยไม่น้อยกว่า 3.2 % และธาตุน้ำนมไม่รวมมันเนยไม่น้อยกว่า 8.5 % โดยวิธีของเพียร์สัน

2.1.3 การอุ่นนม (Preheating) คือการอุ่นนมให้ร้อนล่วงหน้า เมื่อนมดิบไหลมาสู่ถังปรับระดับนม (Balance tank) แล้วจะถูกสูบลำเลียงผ่านเครื่องควบคุม อัตราการไหลเข้าสู่ช่อง “รีเจนเนอเรทีฟแซกชัน” (Regenerative saction) ในที่นี้นมดิบเย็นจะได้รับความร้อนจากนมพาสเจอร์ไรส์ ถ่ายเทผ่านโลหะสแตนเลส ทำให้นมดิบร้อนขึ้นถึงอุณหภูมิ 65 °C เพื่อรอการกรองและการโฮโมจิไนส์

2.1.4 กรอง (Filtering) นมดิบที่อุ่นให้ร้อนแล้วจะไหลผ่านเครื่องกรองเพื่อแยกฝุ่นออก

2.1.5 โฮโมจิไนส์ซิ่ง (Homogenizing) คือ การย่อยเม็ดไขมันให้เล็กลงเพื่อนมเป็นเนื้อเดียวกัน เครื่องโฮโมจิไนส์เป็นเครื่องบีบความดันสูง จะบีบนมให้ผ่านลิ้นซึ่งตั้งความดันไว้ 175.75 kg/cm² ทำให้เม็ดไขมันซึ่งมีขนาดใหญ่ถูกย่อยให้เล็กลงมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 1 ไมครอน ซึ่งจะแทรกอยู่ในน้ำนมได้ดี

2.1.6 การให้ความร้อน (Heating) คือการอุ่นนมให้ร้อนถึงอุณหภูมิ 72 °C ณ ที่นั้นนม จะได้รับความร้อนผ่านแผ่นโลหะทำให้นมร้อนขึ้นถึงอุณหภูมิพาสเจอร์ไรส์ คือ 72 °C

2.1.7 การคงความร้อน (Holding) นมที่ผ่านอุณหภูมิ 72 °C มาแล้ว จะไหลผ่านในท่อที่มีความยาวพอเหมาะเป็นเวลา 16 วินาที เพื่อให้ถูกต้องตามการพาสเจอร์ไรส์นม

2.1.8 การทำให้นมเย็นลง (Cooling) ทำให้นมเย็นลงแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ

2.1.8.1 ทำให้นมเย็นลงเท่าอุณหภูมิห้องที่ช่องรีเจนเนอเรตีฟแอคชั่น ในช่องนั้นนม พาสเจอร์ไรส์อุณหภูมิ 72 °C จะถ่ายเทความร้อนผ่านแผ่นโลหะให้แก่หมดเย็น นมพาสเจอร์ไรส์ จะเย็นลงถึงอุณหภูมิประมาณ 30 °C

2.1.8.2 ทำให้นมเย็นลงถึงอุณหภูมิ 5 °C (หรือต่ำกว่า) นมพาสเจอร์ไรส์อุณหภูมิ 30 °C จะไหลผ่านเข้าไปในช่องทำความเย็นจัด โดยน้ำเย็นจัดจากเครื่องทำความเย็นถ่ายเทความร้อนผ่านแผ่นโลหะให้แก่นมพาสเจอร์ไรส์ ในที่สุดนมพาสเจอร์ไรส์จะเย็นลงถึงอุณหภูมิ 5 °C และ ไหลขึ้นไปเก็บในถังสูรการบรรจุต่อไป

2.1.9 บรรจุกล่อง (Packing) ภาชนะบรรจุนมพาสเจอร์ไรส์มี 2 ชนิด คือ บรรจุด้วยเครื่อง บรรจุถุง และบรรจุด้วยเครื่องบรรจุกล่องหรือขวด

2.1.10 เก็บในห้องเย็น นมที่ผลิตออกมาจะบรรจุลงถังพลาสติกแล้วนำเก็บในห้องเย็น อุณหภูมิ 3 °C รอการจำหน่ายต่อไป

2.2 แหล่งน้ำใช้ในกระบวนการผลิตและน้ำทิ้ง

ปัจจุบันโรงงานผลิตภัณฑ์นมใช้แหล่งน้ำในการผลิตคือน้ำประปา โดยจะมีถังเก็บ (Reservoir) เพื่อรองรับน้ำไว้ก่อนปล่อยออกใช้ น้ำดิบจะถูกใช้เพื่อกิจกรรมต่างๆ ดังนี้

2.2.1 ใช้ในระบบหล่อเย็น เป็นน้ำที่ใช้ระบายความร้อนจากเครื่องจักรต่างๆ น้ำหล่อเย็นมี อุณหภูมิสูงปล่อยทิ้งลงตามท่อระบายน้ำรวมกับน้ำเสียอื่นๆ

2.2.2 ใช้ในการล้างถังผสมน้ำ ในส่วนนี้จะมีค่าความสกปรกค่อนข้างสูง เนื่องจากมีนม ที่เหลือติดขอบถังถูกล้าง น้ำส่วนนี้จะมีสีขาวขุ่น

2.2.3 ใช้ทำความสะอาดพื้น ซึ่งน้ำนี้มีความสกปรกสูงเช่นกันแต่จะล้างเพียงครั้งเดียว หลังเสร็จจบการผลิตในแต่ละวัน น้ำส่วนนี้จะล้างพื้นทั้งหมดทุกที่ในโรงงาน

2.2.4 น้ำจากการล้างถังโฮโมจิไนส์ ซึ่งน้ำส่วนนี้มีทั้งกรดและด่าง มีอุณหภูมิสูงแต่มี ความสกปรกน้อยซึ่งจะเข้าสู่รางระบายน้ำรวมด้วย

2.2.5 น้ำใช้ในห้องปฏิบัติการ โรงนมจะมีห้องปฏิบัติการอยู่ด้วยจึงใช้น้ำทำความสะอาดอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งน้ำส่วนนี้เข้าสู่ท่อระบายน้ำเช่นกัน

2.2.7 น้ำล้างถังพลาสติกใส่ถุนนม น้ำส่วนนี้จะใช้ล้างถังที่บรรจุนมส่งตามที่ต่างๆ ซึ่งมีความสกปรกน้อยและไหลรวมกับน้ำที่อื่นๆ ตามรางระบายน้ำ

2.2.8 ใช้ล้างรถที่บรรจุนมดิบมาส่ง ซึ่งน้ำทั้งส่วนนี้ จะรวมกับน้ำเสียอื่นๆ จากนั้นน้ำทั้งทั้งหมดจะไหลลงสู่รางระบายน้ำแล้วไหลลงสู่บ่อพัก ซึ่งบ่อนี้จะมีการดักไขมัน หลังจากนั้นน้ำทั้งจะถูกปล่อยลงสู่บ่อน้ำที่อยู่ข้างโรงนมโดยผ่านท่อระบายน้ำทิ้ง

2.3 ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานผลิตภัณฑ์นม

น้ำเสีย หมายถึงน้ำที่ผ่านการใช้ประโยชน์ต่างๆ ทำให้ลักษณะของน้ำเปลี่ยนไปจากเดิมเนื่องจากสิ่งสกปรกต่างๆ ทั้งสารอินทรีย์ และอนินทรีย์ถ่ายเทลงมาเจือปนอยู่ในน้ำ (เสริมพลรัตน์สุข และไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์, 2518) ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานผลิตภัณฑ์นมค่อนข้างจะเปลี่ยนแปลงเป็นช่วงกว้าง ดังตารางที่ 2.1 แสดงลักษณะน้ำเสียจากโรงงานผลิตภัณฑ์นมในประเทศสหรัฐอเมริกา นิวซีแลนด์ และในโรงงานผลิตภัณฑ์นมมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง BOD และ COD

อัตราส่วนระหว่าง BOD₅ และ COD ในน้ำเสียจากโรงงานผลิตภัณฑ์นมจะเปลี่ยนแปลงไปขึ้นกับชนิดของผลิตภัณฑ์นม อัตราส่วน BOD₅ : COD โดยเฉลี่ยทั่วไปในน้ำเสียโรงงานผลิตภัณฑ์นมจะอยู่ในช่วง 0.11 – 0.80 หรือเฉลี่ยประมาณ 0.53 อุษากร นิยม (2535) พบว่าน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตภัณฑ์นมอัตราส่วน BOD₅ : COD อยู่ในช่วง 0.41 – 0.90 โดยเฉลี่ยประมาณ 0.59 Boonthanon (1976) ศึกษาค่าเฉลี่ย BOD₅ : COD ประมาณ 0.65 สำหรับ Whole milk อัตราส่วน BOD₅ : COD เป็น 0.65 (สุชาติ เหลืองประเสริฐ, 2538)

2.3.2 ของแข็ง และ pH

ปริมาณสารแขวนลอย (Suspended solids) ในน้ำทิ้งโรงงานผลิตภัณฑ์นมมีค่าอยู่ช่วง 6 – 4,500 mg/L และโดยทั่วไปปริมาณสารแขวนลอยจะมีค่าน้อยกว่า BOD₅ (สุชาติ เหลืองประเสริฐ, 2538) ประมาณ 70 % ของปริมาณสารแขวนลอยในน้ำเสียจะเป็นสารแขวนลอยระเหย (Volatile

suspended solids, VSS) ของเหลวตกตะกอนในน้ำเสียมีประมาณ 20 % ของสารแขวนลอยทั้งหมด (Taimmanen et al., 1974) อัตราส่วนระหว่างสารแขวนลอยระเหย (VSS) กับของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS) VSS : TS จะอยู่ในช่วง 0.36 – 0.56 และอุษากร นิยม (2535) ศึกษาค่า pH ของโรงงานผลิตกัณท์นพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 3-11 เฉลี่ย 6.9

ตารางที่ 2.1 ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานผลิตกัณท์น

ลักษณะน้ำเสีย	ปริมาณ		
	I	II	III
BOD ₅ (mg/L)	500-1,000	40-48,000	90-12,000
COD (mg/L)	1,000-15,000	80-95,000	180-23,000
SS (mg/L)	200-3,000	24-4,500	7-7,200
TKN (mg/L)	16-43	1-80	1-70
Ammonia nitrogen (mg/L)	-	-	-
TP (mg/L)	15-23	9-120	4-150
Oil (mg/L)	-	35-500	0-2,100
pH	3-11	4.4-9.4	3-13.2
Temperature °C	28-35	18-55	11-72
Dissolved oxygen, DO (mg/L)	0-0.5	-	-

หมายเหตุ I ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานผลิตกัณท์นมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 II ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานผลิตกัณท์นในประเทศสหรัฐอเมริกา
 III ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานผลิตกัณท์นในประเทศนิวซีแลนด์

หมายเหตุ จาก “การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงนมโดยระบบแอกติเวตเตดสลัดจ์ และระบบฟอกซ์แบคแอเรชั่น”, โดย อุษากร นิยม, 2535, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.4 กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตกัณท์น

ในการผลิตนมเมื่อทำการผลิตเสร็จจะมีน้ำเสียจากกระบวนการผลิต การล้างภาชนะ และการล้างพื้น ซึ่งมีค่าความสกปรกสูง BOD อยู่ในช่วง 500 – 11,000 mg/L COD 1,000 – 15,000 mg/L

ต้องใช้น้ำในการผลิต 15 – 210 m³/d ซึ่งส่งผลให้น้ำเสียจากการผลิตสูงถึง 50 m³/d (อุษากร นิยม, 2535) โดยทั่วไป น้ำเสียจากโรงงานผลิตกัณฑ์นมมีสารอินทรีย์ละลายสูง และในน้ำเสียประกอบด้วยสารอินทรีย์ที่เป็นของเหลว (Boonthanon, 1976) หากปล่อยน้ำทิ้งลงสู่ธรรมชาติ จะส่งผลให้แหล่งน้ำนั้นเกิดภาวะยูโทรฟิเคชัน (Dart and Stretton, 1977) การเกิดยูโทรฟิเคชันเป็นผลเนื่องมาจากการที่แหล่งน้ำได้รับน้ำทิ้งที่มีสารอาหารต่างๆ ที่ทำให้พืชน้ำเจริญเติบโต เช่น K, Mg, Mn, N, Na, O, P, S, และ Zn ซึ่ง C, N, P และ K สำคัญต่อการเจริญของพืชน้ำทำให้มีการเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันเกิดจากแหล่งน้ำได้รับธาตุอาหารพืชมากเกินไป โดยเฉพาะไนโตรเจนและฟอสฟอรัส พืชน้ำจึงเจริญได้อย่างมากมาย และเมื่อพืชน้ำตายและเน่าเปื่อยลงเกิดการย่อยสลายจากแบคทีเรีย ทำให้น้ำขาดออกซิเจน มีกลิ่นเหม็น ไม่สามารถนำมาใช้ได้ มีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ถ้าเกิดยูโทรฟิเคชันลักษณะรุนแรง ออกซิเจนไม่เพียงพอ พืชน้ำและสัตว์น้ำตายทับถมกันมากขึ้น แหล่งน้ำจะตื้นเขินและกลายเป็นพื้นดินในที่สุด (ทศพร ธงทอง, 2529) การเกิดยูโทรฟิเคชันขึ้นอยู่กับปริมาณไนโตรเจน, ฟอสฟอรัส, อุณหภูมิของน้ำ การเจริญเติบโต, การหายใจและการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำ ตลอดจนการละลายของออกซิเจนในน้ำ ฯลฯ (Dart and Stretton, 1977)

2.5 การศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตกัณฑ์นม

จากลักษณะน้ำเสียจากโรงงานผลิตกัณฑ์นมพบว่า น้ำทิ้งมีค่า COD และ BOD₅ สูง อัตราส่วนระหว่าง BOD₅ : COD อยู่ในช่วง 0.41 – 0.90 โดยส่วนมากอยู่ในรูปของสารละลายและย่อยสลายง่าย ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่ำเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของ BOD₅ (อุษากร นิยม, 2535)

ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตกัณฑ์นมมีการบำบัดได้หลายแบบโดยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างเช่น ขนาดของที่ตั้งโรงงาน งบประมาณ และปริมาณน้ำเสีย จากสมบัติน้ำเสียพบว่า การบำบัดทางชีวภาพเหมาะสมที่สุด ได้มีการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตกัณฑ์นมโดยระบบเลี้ยงตะกอนแบบกะ พบว่าสารอินทรีย์ถูกออกซิไดซ์เร็วมากใน 4 ชั่วโมงแรก โดยได้ประสิทธิภาพการบำบัด COD 92 % (Taimmanenate, 1974) และในระบบเลี้ยงตะกอนที่เวลาเก็บกัก 8 ชั่วโมง F/M ratio 0.30 เป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุดประสิทธิภาพในการลดค่า COD, BOD₅ และ SS เป็น 92.52, 98.85 และ 95.77 % ตามลำดับ (อุษากร นิยม, 2535) ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทำงานของระบบเลี้ยงตะกอนคือปัญหาเกี่ยวกับเรื่องฟองและการไม่จับตัวกันเป็น Floc ของตะกอนจุลินทรีย์ ทำให้เกิดปัญหาเรื่องตะกอนลอย ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบลดลงและเกิดปัญหา

ด้านการจัดการตะกอนที่เกิดขึ้น ปัญหาการเกิดฟองในระบบเลี้ยงตะกอน ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตถ่านหิน พบว่าขึ้นอยู่กับปัจจัย 3 ประการ คือ การเติมอากาศ ความเข้มข้นของตะกอน และพื้นที่ผิวของตะกอนเร่ง ส่วนทางด้านจุลินทรีย์ไม่มีผลต่อการเกิดฟอง (Wheatley et al, 1988)

การปล่อยน้ำเสียจากโรงงานผลิตถ่านหินลงสู่แหล่งน้ำ ทะเลสาบหรือบ่อ ถ้าปริมาณน้ำเสียน้อยจะสามารถเกิดการฟอกตัวเองตามธรรมชาติ แต่ถ้าปริมาณน้ำเสียมากเกินไปจะส่งผลให้เกิดการเน่าเสียเนื่องจากออกซิเจนไม่พอ Sharkawi and Moawad (1970) ศึกษาในอียิปต์เพื่อประเมินการใช้ประโยชน์ของ Lagoon สำหรับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตถ่านหิน พบว่าประสิทธิภาพการลด BOD_5 เป็น 80 – 90 % เมื่อใช้ระยะเวลา 10 วัน และที่บ่อลึก 75 เซนติเมตร ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด และจากการบำบัดน้ำเสียโดยปล่อยลงสู่พื้นดินสามารถทำให้น้ำเสียตกตะกอนด้วยอัตรา 0.004 – 0.0337 เมตรต่อวัน ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน การกำจัดน้ำเสียโดยปล่อยลงสู่พื้นดินเพื่อการชลประทานปลูกพืชสามารถใช้บำบัดน้ำเสียจากโรงผลิตถ่านหินได้แต่ต้องมีการบำบัดขั้นต้นก่อน เพื่อลดค่าความสกปรกให้ต่ำลง โดยใช้บ่อผึ่งแบบเติมอากาศ หรือบ่อผึ่งแบบไร้อากาศ (Rajargopalan, 1972) หรืออาจใช้ระบบ Oxidation ditch รวมกับการบำบัดน้ำเสียโดยปล่อยลงสู่พื้นดินได้ (Boonthanon, 1976)

มีการใช้ระบบไบโอฟิลเตอร์ (Biofiltration) บำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตถ่านหินมาตั้งแต่ ค.ศ. 1960 (Herzka and Booth, 1981) ในปัจจุบันถึงปฏิบัติการ Biofilm filter ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้พลาสติกเป็นตัวกลางเนื่องจากพลาสติกมีพื้นที่ใหญ่และความหนาแน่นต่ำ ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตถ่านหินโดยวิธีนี้ พบว่ามีประสิทธิภาพการบำบัด COD 85 % ที่ค่าภาระบรรทุก 500 g/m^3-hr และที่ค่าภาระบรรทุก 900 g/m^3-hr สามารถบำบัด COD ได้ 60 % (Wheatland, 1967)

การใช้ระบบ Two stage anaerobic upflow packed bed ในการบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตถ่านหินมีประสิทธิภาพในการบำบัดถึงที่ 1 เป็น 93.8 – 98.5 % เมื่อภาระบรรทุก 14.29 $kgCOD/m^3-d$ และในถังที่ 2 การบำบัด COD เป็น 72.5 – 84 % เมื่อค่าภาระบรรทุก 5.0 $kgCOD/m^3-d$ (Venkalaraman et al, 1992) ส่วนการบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตถ่านหินในระบบ Fixed bed aeration ที่เวลาเก็บกัก 8 ชั่วโมง F/M ratio 0.30 ประสิทธิภาพในการลดค่า COD, BOD_5 และ SS เท่ากับ 92.82, 98.89 และ 96.76 % (อุษากร นิยม, 2535)

Master (1993) แนะนำระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตถ่านหินที่ราคาต่ำและช่วยลดปัญหามลพิษจากโรงผลิตถ่านหินซึ่งระบบน้ำประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

- 1) ถังรวมซึ่งจะเกิดการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ
- 2) ถังกรองแบบเติมอากาศ
- 3) นำน้ำกลับไปใช้เพื่อการเกษตร

ระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมักจะมีหลายระบบรวมกัน เพื่อต้องการประสิทธิภาพที่ดีที่สุด ตัวอย่างระบบบำบัดน้ำของโรงงานผลิตกัมมันต์ในสหรัฐอเมริกาโดยระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตกัมมันต์ในมลรัฐ Illinois ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งมีน้ำทิ้งวันละ $365 \text{ m}^3/\text{d}$ มีค่า BOD_5 เฉลี่ย $1,172 \text{ mg/L}$ ระบบบำบัดน้ำทิ้งของโรงงานจะเป็นระบบเลี้ยงตะกอนในขั้นแรกแล้วตามด้วยระบบ Lagoon เวลาเก็บกักของระบบเลี้ยงตะกอนประมาณ 24 ชั่วโมง สามารถลดค่า BOD_5 ได้ประมาณ 75 % เวลาเก็บกักในระบบ Lagoon ประมาณ 20 วัน ช่วงนี้ประสิทธิภาพการลด BOD_5 ประมาณ 70 % ประสิทธิภาพรวมทั้งระบบสามารถลดค่า BOD_5 ได้ 90 – 95 % และ ลด SS ได้มากกว่า 85 % ขึ้นไป (ทศพร ธงทอง, 2529) และสามารถใช้น้ำเลี้ยงตะกอนกับระบบไปรยกรองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตกัมมันต์ขนาดใหญ่ได้ (Standridge, 1981)

2.6 การบำบัดน้ำเสียแบบบ่อสาหร่าย

ในการบำบัดน้ำทิ้งทางชีววิทยานั้น อาศัยการย่อยสลายสิ่งสกปรกที่เจือปนในน้ำทิ้งโดยอาศัยจุลินทรีย์ต่างๆ เช่น แบคทีเรีย เชื้อรา ยีสต์ ตลอดจนพวกโปรโตซัว พืชน้ำบางชนิด ฯลฯ สาหร่ายเป็นจุลินทรีย์ที่น่าสนใจและมีความสำคัญในการนำมาใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำทิ้งสามารถเพิ่มออกซิเจนในน้ำและลดแร่ธาตุบางอย่างได้ (Palmer, 1980)

สาหร่ายเป็นพืชชั้นต่ำที่มีโครงสร้างแบบง่าย ๆ มีขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ ไม่มีระบบท่อลำเลียง (Vascular system) คลอโรฟิลล์ที่พบในเซลล์ของสาหร่ายมีหลายชนิด เช่นคลอโรฟิลล์ เอ มีสีเขียวใบไม้ (สมศักดิ์ ตั้งตระกูล, 2522) รังควัตถุมีหน้าที่เร่งปฏิกิริยาการสังเคราะห์แสงเปลี่ยนพลังงานแสงสว่างเป็นพลังงานสะสมในรูปอาหาร โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์และแสงแดดได้สารอินทรีย์และพลังงาน เพื่อใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่และให้ออกซิเจนแก่แหล่งน้ำ นอกจากนี้สาหร่ายสามารถใช้สารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในการสร้างสารต่างๆ และส่วนประกอบของเซลล์ เช่น Phosphoprotein, Phospholipid, Phosphoglycocide, กรดนิวคลีอิก, กรดอะมิโน, สารประกอบอะมีน, Adenosine-phosphate เป็นต้น ขึ้นอยู่กับชนิดของสาหร่าย ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัส (Lewin, 1962) ดังนั้นการเลี้ยงสาหร่ายจึงนำมาใช้ในการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียซึ่งมีไนโตรเจนในรูปของอินทรีย์ไนโตรเจนจำพวกโปรตีนยูเรีย และกรดอะมิโน 40 – 59 % อินทรีย์ไนโตรเจนจำพวกไนโตรัสและไนเตรท 0.5 % แอมโมเนีย 50 - 60 % ในน้ำเสียที่มีสารประกอบไนโตรเจนดังกล่าวเมื่อผ่านกระบวนการบำบัดด้วยระบบเลี้ยงตะกอนจะถูกเปลี่ยนเป็นสารพวกไนโตรัสและไนเตรท อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงวัฏจักร

ไนโตรเจนโดยจุลินทรีย์ ซึ่งสาหร่ายบางชนิดก็สามารถใช้ในโตรเจนในรูปของไนเตรทได้ด้วย (Venkataraman, 1969)

สาหร่ายที่พบทั่วไปๆ ตามแหล่งน้ำที่รับน้ำทิ้ง มักเป็นพวก *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp., *Chlamydomonas* sp., *Euglena* sp., *Oscillatoria* sp., *Anabaena* sp., *Clostridium* sp., *Schizothrix* sp. ฯลฯ ตลอดจนพวกไดอะตอม สำหรับสาหร่ายที่เป็นพวกติดเกาะ (Attached algae) ได้แก่ *Chladophoro* sp., *Ulothrix* sp., *Tolypothrix* sp., *Microspora* sp., *Chaetophora* sp., *Lyngbya* sp. เป็นต้น (Palmer, 1980) สาหร่ายจะใช้พลังงานแสงอาทิตย์ และสารอาหารจากการออกซิเดชันของแบคทีเรียเพื่อการสังเคราะห์แสงและสร้างเซลล์ใหม่ จะพบว่าเซลล์ของสาหร่ายและแบคทีเรียส่วนเกินต้องมีกำจัดออกจากระบบเพื่อรักษาระบบให้มีมวลชีวภาพคงที่ และเพื่อรักษาประสิทธิภาพของระบบดังแสดงในภาพที่ 2.1

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อสาหร่าย (High rate algal pond, HRAP) เป็นบ่อขาวมีน้ำเสียไหลแบบต่อเนื่อง มีการกวนผสมด้วยเครื่องกวน และมีการวนน้ำไหลกลับเข้าบ่อ ลักษณะสำคัญคือ มีอัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรที่ใหญ่มาก ความลึกประมาณ 0.2 – 0.6 m เพื่อให้แสงแดดส่องถึงก้นสระ ในการลดการเกิดน้ำไหลลัดวงจรอาจจะใช้แผ่นกั้น (Baffle) ช่วย เพื่อให้มีอัตราส่วนของความยาว : ความกว้างมากกว่า 2 : 1 (ภาพที่ 2.2 และ 2.3)

น้ำเสียสามารถป้อนเข้าสู่ระบบแบบต่อเนื่องหรือกึ่งต่อเนื่องก็ได้ เช่น 12 ชั่วโมงต่อวันในช่วงที่มีแสงแดด ข้อเสียของระบบ HRAP คือน้ำเสียที่บำบัดแล้วจะมีสาหร่ายแขวนลอยปนอยู่สูงมาก ทำให้มีค่าของแข็งแขวนลอยสูงกว่าค่ากำหนด จึงต้องเข้าสู่หน่วยการแยกสาหร่ายเสียก่อนคุณภาพน้ำหลังจากแยกสาหร่ายออกคาดว่าจะมีค่า BOD₅ 20 mg/L น้ำที่ออกจากบ่อสามารถใช้เพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ เช่น ใช้ในการเกษตร หรือเป็นน้ำหล่อเย็นในอุตสาหกรรม หรือใช้ในสถานที่พักผ่อนหย่อนใจ ระบบ HRAP จึงเป็นที่นิยมทั้งเพื่อการบำบัดน้ำเสีย และการผลิตมวลสาหร่าย

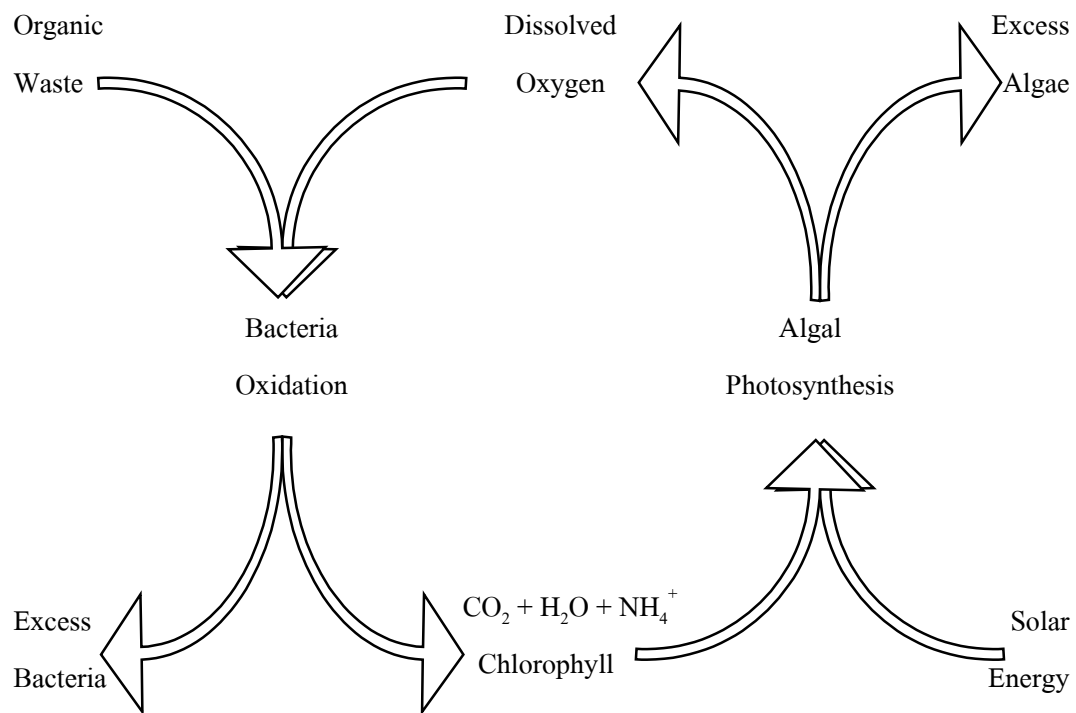
ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของ HRAP และการผลิตสาหร่าย คือปริมาณของสารอาหาร อุณหภูมิ ความเข้มของแสง การกวนผสม ความลึกของบ่อ และระยะเวลาเก็บกัก (HRT) ความเข้มของแสงสำคัญต่อการสังเคราะห์แสง และการเพิ่มจำนวนของสาหร่ายเป็นอย่างมาก

2.6.1 สารอาหาร

สาหร่ายใช้แอมโมเนียเป็นแหล่งสำคัญของไนโตรเจน (N) ซึ่งเซลล์สามารถนำไปใช้ในการสังเคราะห์แสง และสร้างโปรตีนภายในเซลล์ ที่ระยะเวลาเก็บกักปานกลาง ประมาณ 3 วัน หรือ

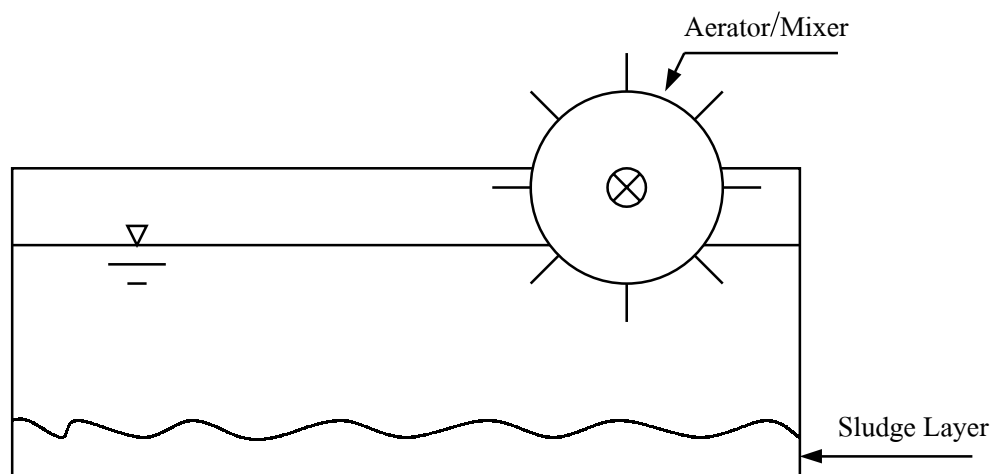
4 วัน เมื่ออุณหภูมิ และแสงแดดพอเหมาะ เพื่อรักษาประสิทธิภาพการทำงานของ HRAP ในการบำบัดน้ำเสีย และการผลิตสาหร่ายจึงควรมีการกำจัดมวลสาหร่ายออกจากระบบอย่างสม่ำเสมอ

ฟอสฟอรัส (P) มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย และพบว่ามีสูงในน้ำเสีย เพราะการใช้ผงซักฟอกเพิ่มขึ้น ส่วนสารอาหารอื่น ๆ เช่น แมกนีเซียม (Mg) โพแทสเซียม (K) ก็ควรมีอยู่ในปริมาณเพียงพอที่จะทำให้สาหร่ายเจริญเติบโตอยู่ได้ เปอร์เซ็นต์ของ P, Mg และ K ในเซลล์สาหร่ายคือ 1.5 , 1 และ 0.5 % ตามลำดับ



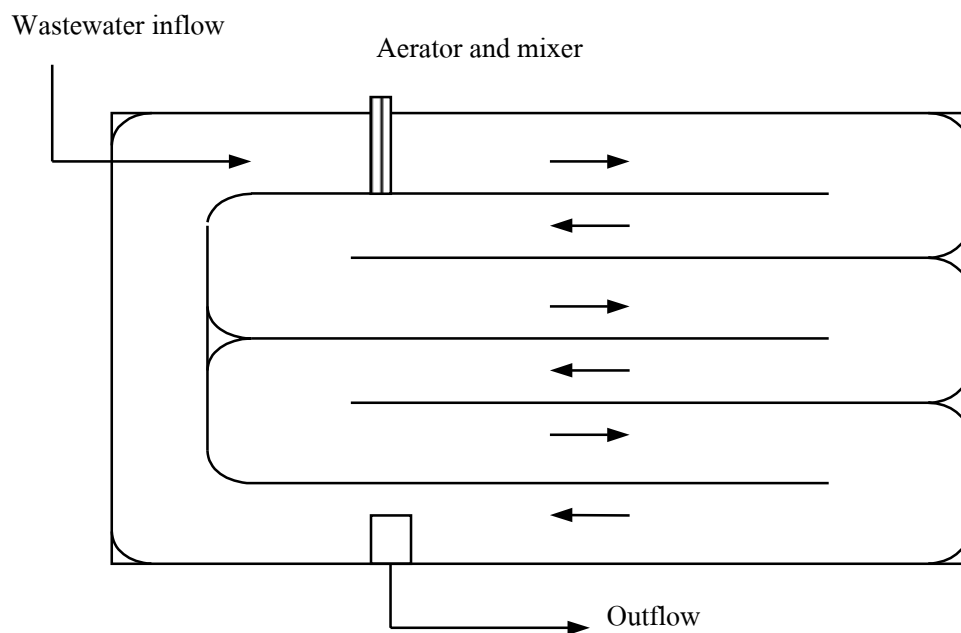
ภาพที่ 2.1 วงจรการเกิดสาหร่าย และการสร้าง O₂ โดยกระบวนการสังเคราะห์แสงในน้ำเสีย

หมายเหตุ จาก Organic Waste Recycling (p.173), Polprasert, Chongrak, 1996, England: John Wiley & Sons.



ภาพที่ 2.2 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อสาหร่าย มองด้านตัดขวาง

หมายเหตุ จาก Organic Waste Recycling (p.173), Polprasert, Chongrak, 1996, England: John Wiley & Sons.



ภาพที่ 2.3 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อสาหร่าย มองด้านบน

หมายเหตุ จาก Organic Waste Recycling (p.173), Polprasert, Chongrak, 1996, England: John Wiley & Sons.

2.6.2 ความลึก

Oswald (1963) ได้ทำการทดลองในห้องทดลองระดับ Pilot scale พบว่าความลึกที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 20 – 25 เซนติเมตร แต่ความลึกควรมากกว่า 20 เซนติเมตร (เช่น 20 – 40 เซนติเมตร) เพื่อให้ตะกอนเกิดการทับถมตัว และมีเวลาเก็บกักนานตามที่ต้องการ

2.6.3 ระยะเวลาเก็บกัก

สภาพแวดล้อมที่ดีสำหรับการเติบโตของสาหร่ายในระบบที่เลี้ยงแบบต่อเนื่อง จะเกิดที่ HRT ค่อนข้างต่ำ ภายใต้สภาวะนี้อัตราการเติบโตของสาหร่ายจะอยู่ในช่วงของ Logarithmic ทั้งยังได้เซลล์ที่มีขนาดใหญ่ อ้วน มีคลอโรฟิลล์สูง มีคาร์โบไฮเดรตต่ำ สำหรับเหตุผลทางชีววิทยาควรให้ HRT นานกว่า 1.8 วัน ซึ่งเป็นช่วงการดำรงชีวิตต่ำสุดของสาหร่าย ถ้าเวลาสั้นกว่านี้จะทำให้สาหร่ายเติบโตไม่ทัน (Oron and Shelef, 1982) Oswald et al (1953) ยังพบว่าถ้าความเข้มข้นที่มาก HRT ก็สามารถลดลงได้ด้วย และน้ำที่มีสารแขวนลอยอันเนื่องมาจากมีสาหร่ายมาก มักเกิดจาก HRT ที่นานและที่ HRT มากกว่า 4 วันค่าของแรงแขวนลอยระเหย (VSS) ทั้งหมดจะเกิดจากเซลล์สาหร่ายนั่นเอง ค่า HRT สูงสุดใน HRAP ไม่ควรนานกว่า 8 วัน เพราะในสภาพเช่นนี้น้ำภายในบ่อจะขาดอาหาร และทำให้ปริมาณสาหร่ายลดลง และการที่จะทำให้ได้ปริมาณสาหร่ายสูงสุดใน HRAP สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งคือการเลือกค่าเหมาะสมของอัตราส่วน HRT/z โดยทั่วไปพบว่าค่า HRT/z ควรอยู่ในช่วง 6 – 12 วันต่อเมตร (Oron and Shelef, 1982)

2.6.4 การกวนผสม

การกวนผสมมีความสำคัญเพื่อป้องกันการตกตะกอนของสาหร่าย และทำให้เกิดการสัมผัสที่ดีระหว่างส่วนที่ตกตะกอนกับออกซิเจนที่ผิวน้ำ การกวนผสมทำให้สารอาหารสัมผัสกับผิวของสาหร่าย ทำให้เกิดการกินอาหารและการใช้แสงมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ใน HRAP ขนาดใหญ่ การกวนจะช่วยป้องกันการแบ่งชั้นของน้ำ (Stratification) และการเกิดสภาพขาดออกซิเจนที่ก้นบ่อ ในทางตรงกันข้ามการกวนจะทำให้ตะกอนขึ้นมาแขวนลอย การกวนที่มากเกินไปยังทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน Moraine et al (1979) พบว่าความเร็วในการไหลของสาหร่ายแขวนลอยใน HRAP ควรประมาณ 5 เซนติเมตรต่อวินาที การไหลเวียนของน้ำภายในบ่อสาหร่ายมีข้อดี คือการรักษา

สาหร่ายและเซลล์ของแบคทีเรียใน HRAP ที่ยังว่องไว และยังเป็นการให้อากาศ (เติมออกซิเจน) แก่น้ำเสียที่เข้าสู่บ่อ HRAP (Polprasert, 1996)

2.6.5 การประเมินผลผลิตของสาหร่าย

Oron and Shelef (1982) นำเสนอแบบจำลองเพื่อทำนายผลผลิตของสาหร่ายจากการเลี้ยงใน HRAP กลางแจ้ง ดังนี้

$$C_a = a \left(\frac{\text{HRT}}{z} \right)^b I_0^\beta T^\gamma \quad (2-1)$$

เมื่อ	C_a	=	ความเข้มข้นของสาหร่าย (mg/L)
	HRT	=	ระยะเวลาเก็บกัก (วัน)
	z	=	ความลึก (m)
	I_0	=	ความเข้มแสง (g-cal/cm ² -day)
	T	=	อุณหภูมิ (°C)
	a, b, β, γ	=	ค่าคงที่
โดย	10.764 Lux	=	0.1119 g-cal/cm ² -day (Polprasert, 1996)

2.6.6 คลอโรฟิลล์ เอ และไนโตรเจนในสาหร่าย

Lip and Avissar (1986) กล่าวว่าคลอโรฟิลล์ เป็นรงควัตถุสีเขียวซึ่งเป็นตัวสำคัญในการสังเคราะห์แสง คลอโรฟิลล์มีหลายชนิด ได้แก่ คลอโรฟิลล์ เอ, บี, ซี, ดี และ อี แต่คลอโรฟิลล์ในสาหร่ายเซลล์เดียวเป็นคลอโรฟิลล์ เอ เท่านั้น คลอโรฟิลล์ เอ จัดเป็นรงควัตถุสังเคราะห์แสงขั้นต้นสามารถดูดแสงด้วยตัวเอง ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายในตัวทำละลายที่เป็นสารอินทรีย์ ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ที่พบในสาหร่ายเซลล์เดียวโดยปกติมีประมาณ 0.5 – 1.5 % ของน้ำหนักแห้ง และสามารถเพิ่มสูงได้ถึง 6 % และ Kaplan และคณะ (1986) ได้รายงานว่ไนโตรเจนเป็นธาตุที่สำคัญที่สุดเป็นองค์ประกอบของเซลล์รองจากคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน พบว่าน้ำหนักแห้ง 1 – 10 % เป็นน้ำหนักของไนโตรเจน ไม่ว่าสาหร่ายเซลล์เดียวจะใช้ไนโตรเจนจากรูปแบบใด ก็ทำให้อัตราการเจริญเติบโตสูงสุดใกล้เคียงกัน

2.6.7 การนำสาหร่ายที่เลี้ยงในน้ำเสียกลับไปใช้ประโยชน์

การใช้สาหร่ายเป็นอาหารเสริมของคนโดยตรงอาจไม่จำเป็น ถ้าสาหร่ายสามารถทำเป็นอาหารสัตว์ได้ (หมู เป็ด ไก่ และปลา ฯลฯ) โดยสัตว์เหล่านี้สามารถใช้เป็นอาหารของคนต่อไป สาหร่ายที่เลี้ยงในน้ำเสีย (*Chlorella* และ *Scenedesmus*) สามารถย่อยได้ 73 % เมื่อใช้เลี้ยงสัตว์ที่เคี้ยวเอื้องเช่น วัว, ควาย, แกะ และย่อยได้ 54 % เมื่อให้หมู ซึ่งพบว่าปริมาณโปรตีนที่เพียงพอสำหรับหมู และเมื่อผสมสาหร่ายกับหญ้าอัลฟาฟาแล้วใช้เลี้ยงแพะจะทำให้แพะมีน้ำหนักมากกว่าเลี้ยงด้วยหญ้าอัลฟาฟาเพียงอย่างเดียว (Hintz et al, 1966) สัตว์ส่วนมากไม่ชอบกินสาหร่ายแต่สามารถแก้ไขได้โดยทำอัดเม็ดแล้วผสมในอาหารสัตว์นั้น Edwards et al (1981) ได้ใช้สาหร่ายที่เลี้ยงในน้ำเสียเลี้ยงพวกปลาที่กินพืช เช่น ปลานิล จากการทดลองพบว่าได้ปลา 20 tons/(ha-year) ในบ่อขนาด 4 m³ ที่ใช้เวลา 3 เดือน ภายใต้อากาศร้อน และพบว่ามีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงระหว่างผลผลิตของปลา และความเข้มข้นเฉลี่ยของสาหร่าย ซึ่งที่ความเข้มข้นของสาหร่าย 70 mg/L ในบ่อ พบว่ามากพอที่จะให้ปลาเจริญได้ ที่ความเข้มข้นมากกว่านี้ไม่เหมาะสมเพราะจะทำให้ DO เป็นศูนย์ในช่วงเช้าตรู่ได้

สาหร่ายอาจนำไปใช้โดยตรงหรืออัดเป็นปุ๋ยในการเกษตร ในการใช้โดยตรง เช่น ใช้พ่นลงบนพื้นที่เพาะปลูก ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายแต่ใช้เวลาเพราะเซลล์สาหร่ายต้องถูกย่อยสลายในดินก่อน การใช้ทางอัดคือสาหร่ายจะถูกแยกจากน้ำ และนำมาหมักเป็นปุ๋ยก่อนนำไปใส่ในดิน การใส่ปุ๋ยลงสู่ดินต้องคำนึงถึงผลกระทบทางด้านสุขอนามัยด้วย เนื่องจากปัจจัยหลายอย่าง เช่น รังสียูวี, ปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมอื่นๆ เช่น pH สูงหรือค่าที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเชื้อโรค และการตกตะกอนกับตะกอนสาหร่าย ปัจจัยเหล่านี้ไม่สามารถทำลายเชื้อโรคได้หมด เพราะอาจมีการป้องกันโดยการกำบังตัวอยู่กับสาหร่าย หรือการรวมตัวเป็นก้อนร่วมกับของแข็งในน้ำเสีย น้ำที่ออกมาจาก HRAP ไม่เหมาะที่จะนำไปรดพืชที่เป็นอาหารของมนุษย์ แต่อาจใช้สำหรับปลูกพืชเพื่อการอุตสาหกรรม หรือกิจกรรมอย่างอื่น ควรระวังความเสี่ยงต่อการติดเชื้อของคนงานในขณะที่แยกเซลล์สาหร่าย

เชื้อเพลิงที่ได้จากเซลล์สาหร่ายแห้ง (ซึ่งมีค่าพลังงานเฉลี่ย 6 kg-cal/g) จะคล้ายกับถ่านหิน bituminous (Bituminous) เกรดปานกลาง จึงเหมาะเป็นแหล่งพลังงาน นอกจากนี้สาหร่ายสามารถใช้ร่วมกับสารอินทรีย์อื่นๆ ในการหมักก๊าซชีวภาพได้ (Benemann et al, 1980)

ไลปิด (Lipid) ในเซลล์สาหร่ายสามารถใช้ในอุตสาหกรรมเช่น ทำวัสดุสิ่งทอ, สารเติมในอาหาร, เครื่องสำอาง และยาเป็นต้น ไลปิดจากสาหร่ายมี Neutral lipid สูง ในรูปของ Glyceride เป็นส่วนมากซึ่งเป็นแหล่งของ Glycerol (Aaronson et al, 1980) สาหร่ายขนาดเล็กยังเป็นแหล่งของ

Steroid ความเข้มข้นของ Steroid ในสาหร่ายจะแตกต่างกัน บางกลุ่มจะมีสูงมาก และสาหร่ายอาจมี Carotenoid สูงถึง 0.2 % ของน้ำหนักแห้ง (Paoletti et al, 1976) ยาบางอย่างก็สกัดจากเซลล์สาหร่าย (Volesky et al, 1970)

2.7 การศึกษาการบำบัดน้ำเสียโดยใช้สาหร่าย

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแบคทีเรียและสาหร่ายในการบำบัดน้ำทิ้งพบว่า ในการบำบัดน้ำทิ้งจากแหล่งชุมชน ให้อากาศพ่นลงไป เพื่อเป็นการกวนให้เข้ากัน และเพิ่มอากาศในน้ำ อุณหภูมิ 22 °C จะมีสาหร่ายมากมายหลายชนิดเกิดขึ้น ในระยะเริ่มแรกจะพบพวก *Ulothrix* sp. เกิดขึ้นเป็นชนิดที่มากที่สุด และในช่วง 20 วันแรกนี้มีการบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งได้ 40 %, ไนโตรเจน 70 – 85 % ส่วน COD ลดลง 80 – 87 % (Humenik and Hanna, 1971) ในการเลี้ยงสาหร่ายเพื่อกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเหมาะสมกับสภาพของประเทศในเขตร้อน เพราะการเจริญของสาหร่ายขึ้นอยู่กับแสงแดด อุณหภูมิ สารอาหารต่างๆ ในน้ำทิ้ง ซึ่งพบว่าสาหร่ายมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบของเซลล์ 10 % โดยน้ำหนัก และในฤดูร้อนสาหร่ายสามารถบำบัดไนโตรเจนได้ถึง 40 – 60 % (Baumann, 1971)

สาหร่ายสามารถนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียขั้นที่สองได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยอาศัยระบบบ่อผึ่งกลางแดด ซึ่งสามารถลดปริมาณไนโตรเจนเนื่องมาจากขบวนการสังเคราะห์แสง ทำให้ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนลดลงอย่างมาก สามารถแยกสาหร่ายจากน้ำทิ้งโดยวิธีการลอยตัว การกรอง และการดูดซับด้วยผงคาร์บอน ซึ่งสามารถนำเอาสาหร่ายมาใช้เป็นอาหารโปรตีน และสามารถดัดแปลงเอาขบวนการนี้มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียในขั้นที่สามได้ ซึ่งการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งขั้นที่สาม ทำการทดลองโดยใช้ปริมาณสาหร่ายในการบำบัดน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สองที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน สามารถกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนได้ดี และประสิทธิภาพการกำจัดเกือบจะสมบูรณ์ เมื่อเพิ่มจำนวนเซลล์ของสาหร่ายการกำจัดไนโตรเจนจะเพิ่มขึ้น แต่สำหรับการกำจัดปริมาณฟอสฟอรัสจะลดลง ดังนั้นการเพิ่มจำนวนเซลล์ของสาหร่ายสามารถบำบัดน้ำทิ้งในขั้นที่สามได้ระดับหนึ่ง (Lavoie and Noue, 1985)

การบำบัดน้ำทิ้งที่มีไนโตรเจนปริมาณสูงในรูปของ ไนเตรท, ไนไตรท์ และแอมโมเนีย โดยอาศัยระบบร่วมกันระหว่าง ดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) และการเลี้ยงสาหร่าย พบว่าในกระบวนการดีไนตริฟิเคชันซึ่งเป็นแบบ Anaerobic packed bed reactor สามารถบำบัดไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของไนไตรท์และไนเตรทจากน้ำทิ้งซึ่งมีเมทานอล (Methanol) และฟอสฟอรัสอยู่ด้วยในปริมาณสูง ในกระบวนการใช้สาหร่ายนั้นพบว่า *Chlorella* sp. สามารถกำจัดแอมโมเนียได้

วิธีการทั้งสองขั้นตอนสามารถลดปริมาณไนโตรเจนได้ 94.0 – 99.9 % แต่การบำบัดนี้จะถูกจำกัดในเรื่องของความเข้มข้นแอมโมเนีย ซึ่งไม่ควรมีระดับเกิน 100 mg/L (Przytocka-Jusiak et al, 1984b)

การบำบัดไนโตรเจนในน้ำทิ้งของอุตสาหกรรมทำปุ๋ย โดยวิธีการใช้ระบบแผ่นจานหมุน ซึ่งมีสาหร่าย *Stichococcus bacillaris* เจริญอยู่ (Algal rotating disk) ร่วมกับกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน โดยใช้ Packed bed reactor พบว่า สามารถลดปริมาณของไนโตรเจนในน้ำทิ้งได้ 90.0 % *S. bacillaris* จะใช้ในโตรเจนส่วนใหญ่ในรูปของแอมโมเนียไนโตรเจน ส่วนปริมาณไนเตรตและไนไตรท์จะถูกบำบัดโดยกิจกรรมของแบคทีเรียไนตริไฟอิง (Denitrifying bacteria) โดยมีเมทานอล เป็นแหล่งของคาร์บอนให้แก่แบคทีเรีย (Przytocka-Jusiak et al, 1984a)

2.8 สมการสำหรับการบำบัดน้ำเสียระบบ CSTR

Monod ได้ทำการทดลองศึกษาถึงลักษณะของการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์สำหรับปริมาณอาหารต่างๆ และเมื่อพิจารณาสมการสมดุลของอาหารจากความรู้เกี่ยวกับจลนศาสตร์และการวิเคราะห์รูปแบบของถึงปฏิกิริยาแบบ Continuous stirred tank reactor (CSTR) ได้สมการของปริมาณอาหารและจุลินทรีย์ในระบบดังนี้ (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2537)

$$\frac{dS}{dt}V = QS_0 - QS + V \left(\frac{-kXS}{K_s + S} \right) \quad (2-2)$$

$$\frac{dX}{dt}V = QX_0 - QX + V \left(\frac{YkXS}{K_s + S} - k_d X \right) \quad (2-3)$$

เมื่อ

k = อัตราการใช้อาหารมากที่สุดต่อหนึ่งหน่วยของมวลจุลินทรีย์

k_d = ค่าสัมประสิทธิ์ในการลดลงของจุลินทรีย์ (d^{-1})

t = ระยะเวลาที่จุลินทรีย์อยู่ในระบบ (d)

K_s = ค่าปริมาณอาหาร ณ จุดที่มีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของจุลินทรีย์เท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของจุลินทรีย์

Q	=	อัตราการไหล (L/d)
V	=	ปริมาตรถังปฏิกรณ์ (L)
S	=	ปริมาณอาหาร (mg/L)
S_0	=	ปริมาณอาหาร ณ เวลาเริ่มต้น (mg/L)
X	=	ความเข้มข้นของจำนวนจุลินทรีย์ (mg/L)
X_0	=	มวลจุลินทรีย์ ณ เวลาเริ่มต้น (mg/L)
Y	=	ค่าสัมประสิทธิ์ปริมาณการผลิตเซลล์ใหม่สูงสุดของช่วงที่มีอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์สุทธิสูงสุด (kg VSS/kg BOD)

จากสมการที่ (2-2), (2-3) และค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ ทำให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอาหารและจุลินทรีย์ในระบบ ซึ่งจะเป็นข้อมูลที่จะนำไปใช้ในการออกแบบและดำเนินการได้อย่างถูกต้องเหมาะสม ค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์สามารถหาได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำเสียและกระบวนการบำบัดน้ำเสียนั้นๆ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

เพื่อหาปริมาณสารหายที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตถ่านหิน การทดลองทั้งหมดได้ทำที่อาคารศูนย์เครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ ทั้งนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 12 การทดลองย่อย

การทดลองที่ 1 – 4 กระทำที่ระดับความลึกของระบบ 20 เซนติเมตร การทดลองที่ 5 – 8 ที่ระดับความลึกของระบบ 40 เซนติเมตร และการทดลองที่ 9 – 12 ที่ระดับความลึกของระบบ 50 เซนติเมตร โดยทั้งหมดทำการแปรเปลี่ยนระยะเวลาเก็บกัก 4 ค่า คือ 7, 5, 3 และ 1 วัน

3.1 การศึกษาสารติดตาม

การศึกษาสารติดตาม (Tracer study) ของการบำบัดน้ำเสียแบบบ่อสาหร่าย ใช้วิธีการแบบ Slug feed โดยทำการใส่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตร ทดลองที่อัตราการไหล 55 mL/sec ทำการเก็บน้ำตัวอย่างมาวิเคราะห์หาคลอไรด์ นำผลที่ได้มาคำนวณดังสมการ (3-1) ถึง (3-4)

$$T_{\text{mean}} = \frac{\sum_{i=0}^t t_i c_i \Delta t}{\sum_{i=0}^t c_i \Delta t} \quad (3-1)$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=0}^t t_i c_i \Delta t}{\sum_{i=0}^t c_i \Delta t} - T_{\text{mean}}^2 \quad (3-2)$$

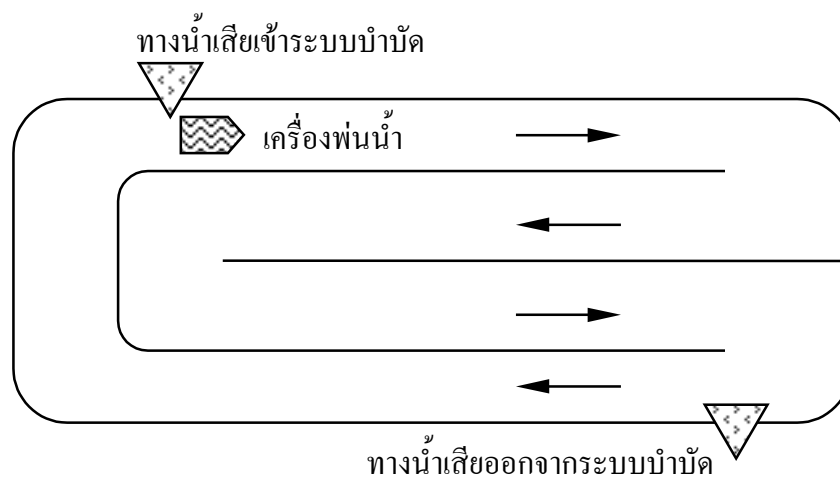
$$\frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = \frac{2}{Pe} + \frac{8}{Pe^2} \quad (3-3)$$

$$d = \frac{1}{Pe} \quad (3-4)$$

- โดยที่ T_{mea} = ระยะเวลาเก็บกักเฉลี่ย
 t_i = ระยะเวลาหลังจากเติม NaCl แล้ว
 C_i = ความเข้มข้นของ NaCl ที่เวลา t_i
 Δt = ช่วงระยะเวลาที่เก็บน้ำมาทดสอบ
 σ^2 = ค่าความแปรปรวน
 d = จำนวนการกระจาย

3.2 การสร้างแบบจำลอง

การวิจัยในครั้งนี้เป็นการวิจัยเพื่อหาความสามารถในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตภัณฑ์นม และความสามารถในการผลิตสาหร่าย ได้ทำการสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการทดลอง ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ระบบบำบัดจำลองแบบบ่อสาหร่าย มองจากด้านบน

สำหรับรายละเอียดในแต่ละส่วนมีดังนี้

3.2.1 ถังรวบรวมน้ำเสีย เป็นถังพลาสติกความจุประมาณ 100 ลิตร สำหรับใส่น้ำเสียสังเคราะห์

3.2.2 ป้อนน้ำ สามารถปรับอัตราการไหลของน้ำได้โดยในการทดลองจะทำการปรับอัตราการไหลเป็น 12 อัตราการไหลตามระยะเวลาเก็บกัก และระดับความสูงที่ได้กำหนดไว้ โดยป้อนน้ำจะทำงาน 24 ชั่วโมง

3.2.3 ถังรับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว เป็นถังพลาสติกความจุประมาณ 20 ลิตร ใช้รับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

3.2.4 บ่อระบบบำบัดจำลองแบบบ่อสาหร่าย เป็นบ่อกระจก ขนาด กว้าง 50 เซนติเมตร ยาว 150 เซนติเมตร และ สูง 60 เซนติเมตร มีแผ่นกั้นกระจกเพื่อเป็นการเพิ่มระยะทาง และทำการเจาะรูทางน้ำออกจากระบบบำบัดที่ระดับความสูง 20, 40 และ 50 เซนติเมตร

3.2.5 เครื่องพ่นน้ำภายในบ่อระบบบำบัดจำลองแบบบ่อสาหร่าย เพื่อให้มีทิศทางการไหลไปในทางเดียวกัน และยังเป็นการกวนให้สาหร่ายและจุลินทรีย์รับสารอาหารอย่างทั่วถึง ทำให้สาหร่ายรับแสงอย่างเต็มที่ และยังป้องกันไม่ให้เซลล์สาหร่ายตกตะกอน เครื่องพ่นน้ำภายในบ่อจะทำงานตลอด 24 ชั่วโมง

3.2.6 เครื่องเติมอากาศจะทำงานเฉพาะช่วงเวลากลางคืน ซึ่งถูกควบคุมโดย Timer เป็นการป้องกันสภาวะเป็นกรด เนื่องจาก CO_2 ในระบบมากเกินไป

3.2.7 แผงไฟฟลูออเรสเซนต์ ใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ 4 หลอด มีความเข้มแสงรวม 1,000 ลักซ์ แผงไฟอยู่เหนือระบบบำบัดจำลองแบบบ่อสาหร่าย จะทำงานเฉพาะช่วงเวลากลางวัน ซึ่งถูกควบคุมโดย Timer

3.2.8 Timer เป็นเครื่องควบคุมการจ่ายไฟฟ้าตามที่ได้กำหนดไว้ โดยจ่ายไฟฟ้าให้แผงไฟฟลูออเรสเซนต์ในเวลากลางวัน (12 ชั่วโมง) และจ่ายไฟฟ้าให้เครื่องเติมอากาศในเวลากลางคืน (12 ชั่วโมง)

3.3 สถานที่ทำการวิจัย

สถานที่ทำการทดลองทั้งหมดกระทำที่บริเวณศูนย์เครื่องมือ 5 และการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำ ใช้ห้องปฏิบัติการสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาคารศูนย์เครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.4 น้ำตัวอย่าง

น้ำตัวอย่างจากโรงงานผลิตกัณฑ์นมที่ใช้ เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ ให้มีค่า COD ประมาณ 700 - 1000 mg/L ทำการสังเคราะห์ทุกวันเพื่อเป็นการป้องกันค่า COD ที่เปลี่ยนแปลงมากเกินไปเมื่อเวลาผ่านไปหลายวัน โดยใช้อัตราส่วน นมสด 4 mL ต่อ น้ำ 1 ลิตร

3.5 การวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสีย

ในการวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียจากโรงผลิตกัณฑ์นมก่อนเข้าและหลังออกระบบบำบัด จำลองแบบบ่อสาหร่ายเพื่อดูความสามารถในการบำบัดน้ำเสียจากโรงผลิตกัณฑ์นมจะวิเคราะห์ตาม การทดลองของ “Standard Methods” (APHA et al, 1998) ซึ่งวิธีการทดลองหาค่าตัวแปร มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าตัวแปรและวิธีการทดสอบที่เลือกใช้

พารามิเตอร์	วิธีที่ใช้วิเคราะห์
pH	pH meter
อุณหภูมิ	เทอร์โมมิเตอร์
BOD ₅	5-Day BOD test
COD	Opened Dichromate Reflux
SS	Suspended Solids Dried at 103 – 105 °C
VSS	Volatile Suspended Solids Ignited at 550 °C
TKN	Macro – Kjeldahl Method
TP	Vanadomolybdophosphoric acid Method
NO ₃ ⁻	Sodium Salicylate Method
FOG	Hexane extract (Partition gravimetric method)

3.6 วิธีดำเนินการทดลอง

นำน้ำเสียมาตรวจสอบลักษณะเบื้องต้นก่อนทำการทดลอง ซึ่งทำการวัด ค่า pH , อุณหภูมิ, BOD₅, COD, SS, VSS, TKN, TP, NO₃⁻ และ ไขมัน ของน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสียแบบ

บ่อสาหร่าย (Influent) และน้ำทิ้งจากระบบบำบัด (Effluent) โดยน้ำทิ้งจากระบบบำบัด จะทำการวิเคราะห์เมื่อการทดลองนั้นเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady State)

สาหร่ายที่ใช้ในการทดลองนั้นจะเป็นสาหร่ายผสม (Mixed culture) การเตรียมสาหร่าย จะทำให้นำสาหร่ายมาจากระบบบำบัดน้ำเสียของเทศบาลนครนครราชสีมา ซึ่งเป็นระบบบำบัด แบบบ่อฝั่งในบ่อสุดท้ายของการบำบัดจะมีสาหร่ายเกิดขึ้นซึ่งเป็นสาหร่ายผสม ในการทดลอง ทำการเลี้ยงสาหร่ายที่ความเข้มแสง 1,000 ลักซ์ ช่วงการให้แสงเท่ากับ 12 ต่อ 12 ชั่วโมง ทำการเป่าด้วยเครื่องพ่นน้ำให้น้ำภายในบ่อให้มีทิศทางไหลไปในทางเดียวกัน เพื่อเป็นการกวน มิให้เซลล์สาหร่ายตกตะกอน

การทดลองแบ่งเป็น 12 การทดลองย่อย ทำการเปลี่ยนแปลงระดับความสูงของน้ำ ในบ่อทดลอง 3 ค่า และในแต่ละระดับความสูงใช้ระยะเวลาเก็บกัก 4 ค่า ดังแสดงรายละเอียดใน ตารางที่ 3.2

3.7 การเก็บและรวบรวมข้อมูล

ทำการเก็บน้ำเสียมาวิเคราะห์หาค่า COD, pH และอุณหภูมิ เพื่อประเมินการ เข้าสู่สภาวะคงที่ของระบบโดยสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (Coefficient of variation $= \frac{\text{Standard deviation}}{\text{Mean}} \times 100$) มีค่าน้อยกว่า 5 % หลังจากทีระบบเข้าสู่สภาวะคงที่แล้วจึงทำการ วิเคราะห์ BOD₅, COD, SS, VSS, TKN, TP, NO₃⁻, ไนมัน และคลอโรฟิลล์ เอ

3.8 การวิเคราะห์ข้อมูล

- วิเคราะห์หาประสิทธิภาพของระบบ
- หาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
- หาค่าคงที่จากสมการของ Oron and Shelef (1982) เพื่อทำนายปริมาณสาหร่ายโดยใช้ โปรแกรม Maple
- ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างจะถูกนำมาวิเคราะห์ค่า t (t – Test) ในการวิเคราะห์ ข้อมูลทางสถิติ เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างข้อมูล ณ ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติ 95 %

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดการทดลอง

การทดลองที่	ระดับน้ำในบ่อทดลอง (cm)	ระยะเวลาเก็บกัก (วัน)
1	20	7
2	20	5
3	20	3
4	20	1
5	40	7
6	40	5
7	40	3
8	40	1
9	50	7
10	50	5
11	50	3
12	50	1

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผล

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผลจะมีการนำเสนอตามลำดับดังนี้

- 4.1 การศึกษาสารติดตาม
- 4.2 ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย
- 4.3 ประสิทธิภาพของระบบบำบัดแบบบ่อสาหร่าย
- 4.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์
- 4.5 การหาค่าคงที่จากสมการปริมาณสาหร่าย

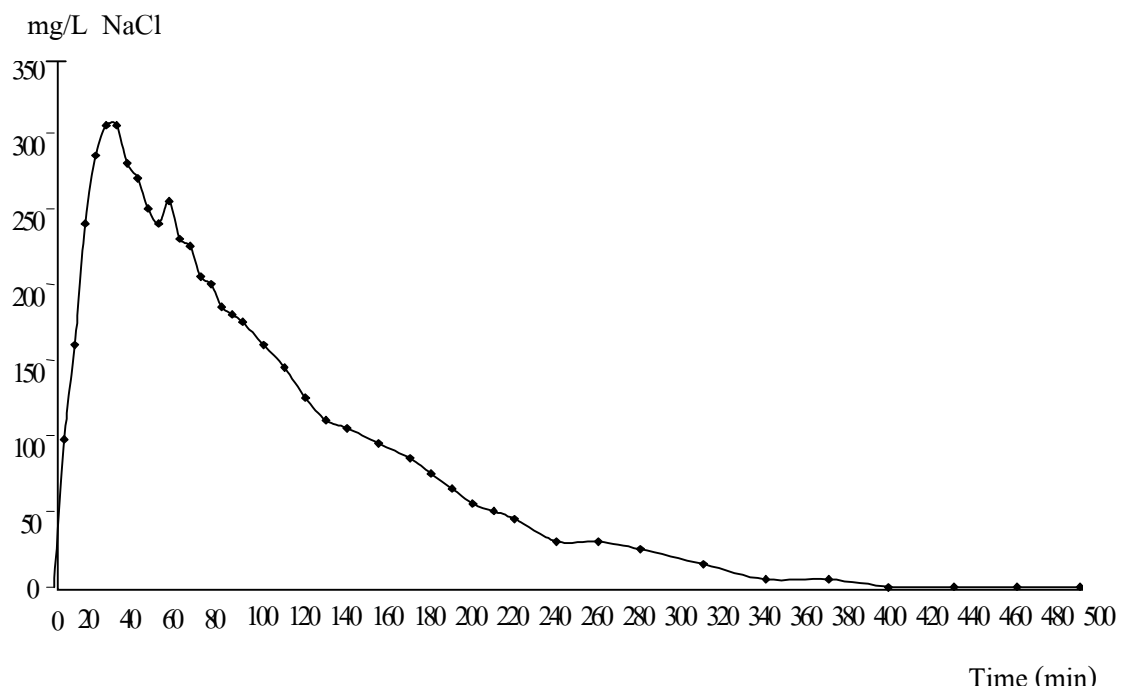
4.1 การศึกษาสารติดตาม

การศึกษาสารติดตาม (Tracer study) ใช้วิธีการแบบ Slug feed โดยทำการใส่สารโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 5 กรัมต่อลิตร ทดลองที่อัตราการไหล 55 mL/sec โดยการศึกษาสารติดตามใช้การคำนวณดังสมการ (3-1) ถึง (3-4) พบว่าค่าระยะเวลาเก็บกักเฉลี่ย (T_{mean}) มีค่าเท่ากับ 97.42 นาที และจำนวนการกระจาย (d) มีค่า 0.2 ซึ่งมีค่ามาก บอกถึงถึงบ่อบำบัดน้ำเสียแบบ CSTR (Levenspiel, 1972) รายละเอียดการศึกษาสารติดตามแสดงใน ภาคผนวก ก

ภาพที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคลอไรด์กับเวลา พบว่ากราฟมีลักษณะเป็นเส้นโค้งรูปประฆังคว่ำ กล่าวคือ เมื่อเริ่มต้นการทดลองความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ออกมาจะมีค่าน้อย เนื่องจากในช่วงเริ่มต้นความเข้มข้นของคลอไรด์ยังไหลไม่ถึงจุดออก และเมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของคลอไรด์จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงจุดจุดหนึ่งที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์มีค่าสูงสุด จากนั้นความเข้มข้นของคลอไรด์จะค่อยๆ ลดลง

4.2 ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย

ผลการตรวจสอบลักษณะสมบัติของน้ำเสียส่งเคราะห์ที่นำมาใช้ในการทดลอง ซึ่งทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำตามวิธีของ “Standard Methods” (APHA et al, 1998) ได้ค่าตัวแปรต่างๆ ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 ความเข้มข้นของคลอไรด์กับเวลาของการศึกษาสารติดตาม

ตารางที่ 4.1 ค่าตัวแปรต่างๆ ของน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดที่วัดได้จากการทดลอง

ตัวแปร	ค่าจริงจากโรงงานผลิตกัมมันตัม (mg/L)	ค่าที่ได้จากการทดลอง (mg/L)
pH	6.9 – 10.2	6.9 – 7.9
อุณหภูมิ	28.0 – 31.0 °C	28.0 – 30.5 °C
BOD ₅	450	440
COD	786	759
SS	148	151
TKN	19.23	17.68
TP	19.78	20.82
NO ₃ ⁻	0.59	0.21
ไขมัน	450	330

4.3 ประสิทธิภาพของระบบบำบัดแบบบ่อสาหร่าย

จากการทดลองน้ำเสียได้ถูกปรับอัตราการไหลเป็น 4 ค่า ในทุกๆ 3 ระดับความลึก คือ ที่ระดับความลึก 20 เซนติเมตร ใช้อัตราการไหล 0.015, 0.021, 0.035 และ 0.104 m³/d ส่วนที่ระดับความลึก 40 เซนติเมตร ใช้อัตราการไหล 0.030, 0.042, 0.070 และ 0.209 m³/d และที่ระดับความลึก 50 เซนติเมตร ใช้อัตราการไหล 0.037, 0.052, 0.087 และ 0.261 m³/d แต่ละอัตราการไหลต้องทำการทดลองจนระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ ทำการตรวจสอบทางสถิติพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของ COD มีค่าไม่เกิน 5 % ซึ่งสามารถยอมรับได้ว่าระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ การวิเคราะห์ทางสถิติแสดงใน ภาคผนวก ง

เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ ทำการศึกษาค่า BOD₅, COD, SS, VSS, TKN, TP, NO₃⁻, ไขมัน และคลอโรฟิลล์ เอ ซึ่งผลการทดลองและประสิทธิภาพของระบบได้แสดงใน ภาคผนวก ข

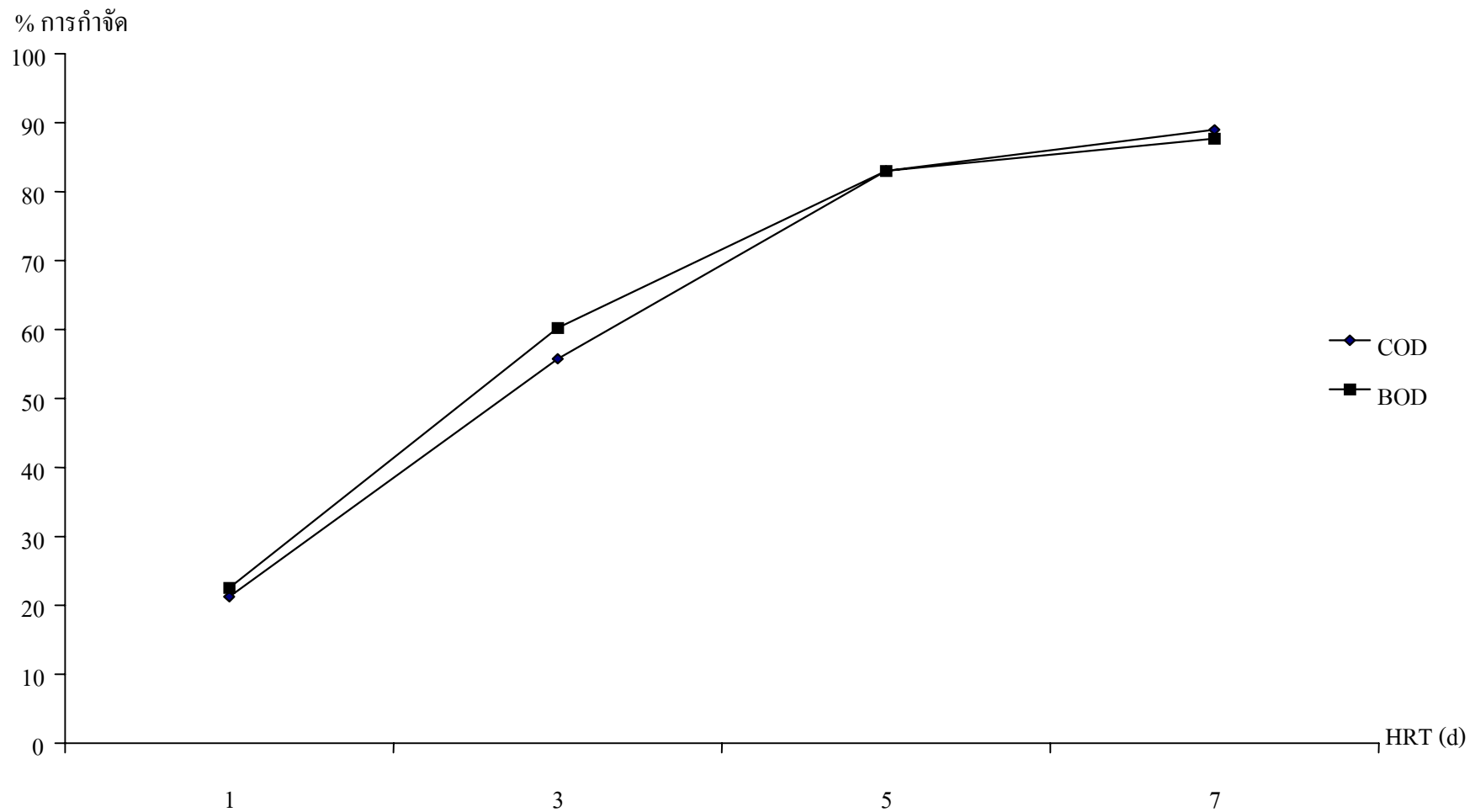
4.3.1 pH และอุณหภูมิ

ค่า pH ของน้ำที่ผ่านระบบบำบัดแล้วมีค่าอยู่ในช่วง 6.8 – 7.9 และมีอุณหภูมิ อยู่ในช่วง 28 – 30.5 °C เฉลี่ย 29.5 °C

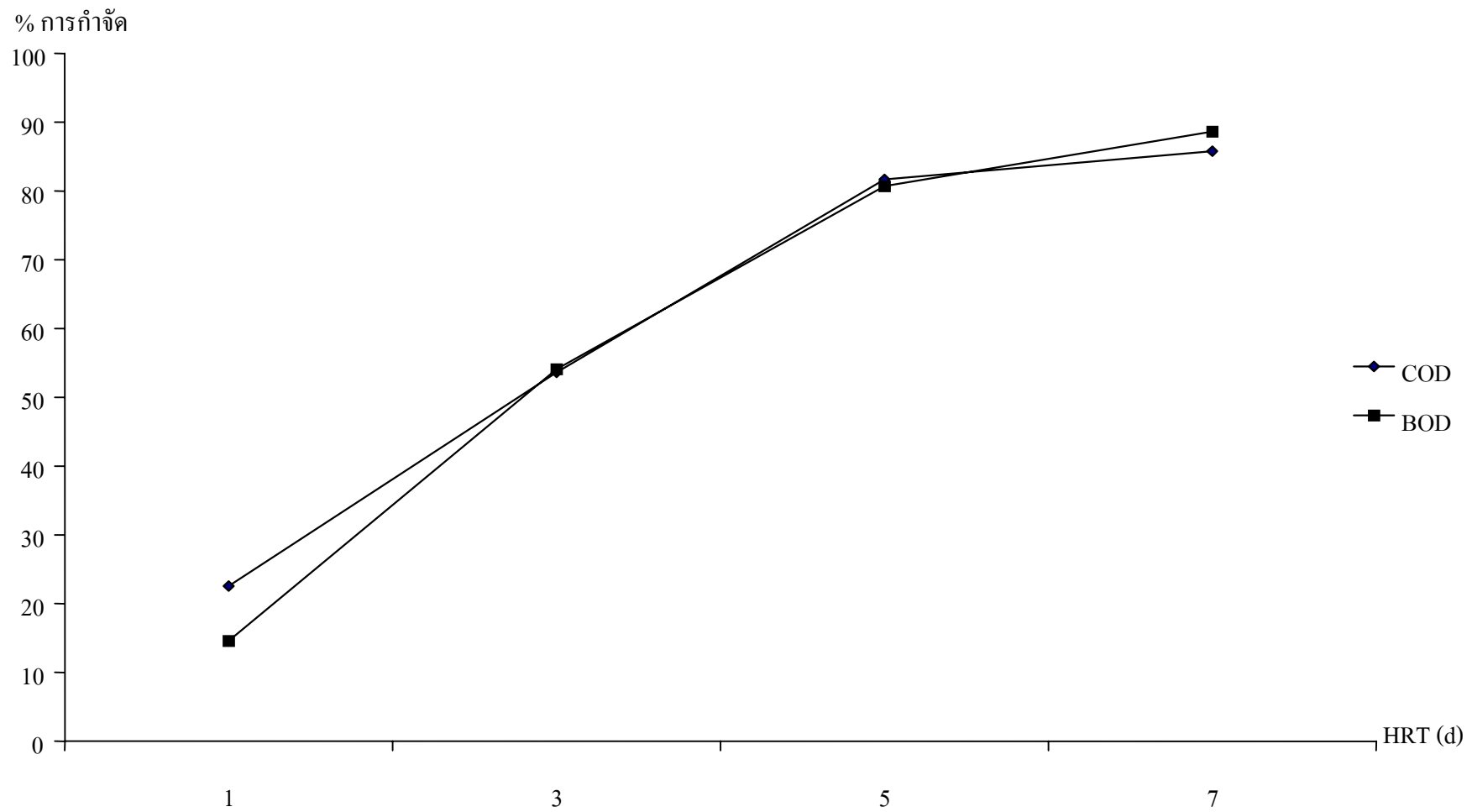
4.3.2 ประสิทธิภาพของการบำบัด BOD₅ และ COD

การวิเคราะห์หาค่า BOD₅ และ COD เป็นการวิเคราะห์เพื่อที่จะทราบถึงความสกปรกของน้ำเพื่อประโยชน์ในการออกแบบระบบบำบัด ควบคุมคุณภาพน้ำทิ้งและประสิทธิภาพของระบบนั้นๆ โดยคิดเปรียบเทียบในรูปของปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ต้องการใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ และย่อยสลายสารอินทรีย์ทางเคมี ตามลำดับ (สมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2540) ซึ่งโดยปกติแล้วค่า BOD₅ จะมีค่าอยู่ระหว่าง 40 – 60 % ของค่า COD (ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และอุษา วิเศษสุน, 2535)

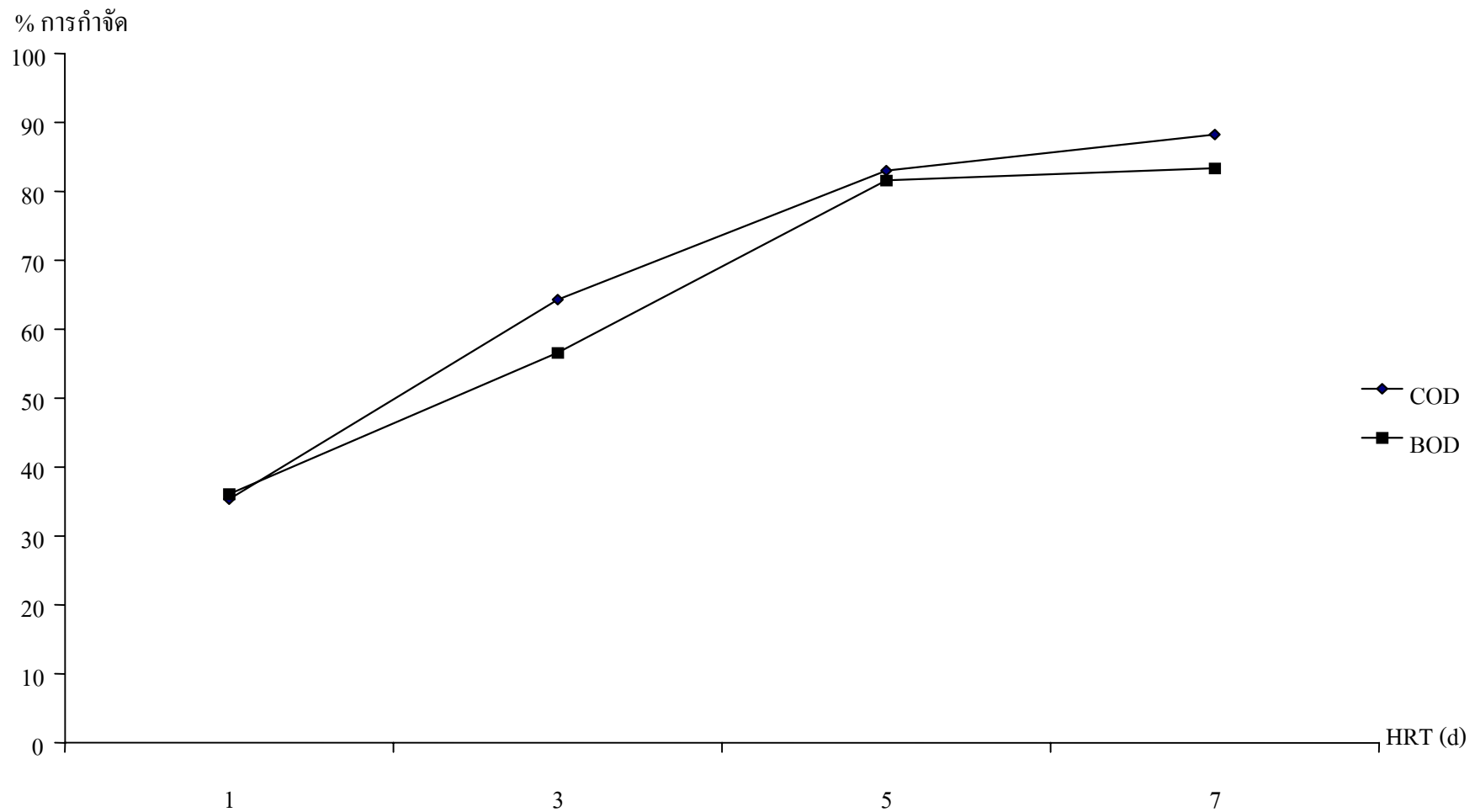
ประสิทธิภาพในการบำบัด BOD₅ และ COD มีอัตราลดลงเมื่อระยะเวลาเก็บกักลดลง ดังแสดงในภาพที่ 4.2 – 4.4 โดยค่า BOD₅ ของน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 440 mg/L จากการทดลองค่า BOD₅ และ COD มีค่าเพิ่มขึ้นถ้าระยะเวลาในการเก็บกักลดลงในทุกๆระดับความลึก เนื่องมาจากระยะเวลาเก็บกักที่ลดลงอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบบำบัดมากขึ้น ช่วงระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ทางชีววิทยา และทางเคมีมีน้อยลง



ภาพที่ 4.2 ประสิทธิภาพการบำบัด BOD₅ และ COD ของน้ำเสียจากโรงงานผลิตถ่านหิน โดยใช้ระบบบำบัดแบบบ่อสาหร่าย ที่ระดับความลึก 20 เซนติเมตร



ภาพที่ 4.3 ประสิทธิภาพการบำบัด BOD₅ และ COD ของน้ำเสียจากโรงงานผลิตกัณฑ์นม โดยใช้ระบบบำบัดแบบบ่อสาหร่าย ที่ระดับความลึก 40 เซนติเมตร



ภาพที่ 4.4 ประสิทธิภาพการบำบัด BOD₅ และ COD ของน้ำเสียจากโรงงานผลิตกัณฑ์นม โดยใช้ระบบบำบัดแบบบ่อสาหร่าย ที่ระดับความลึก 50 เซนติเมตร

และปริมาณน้ำเสียมากขึ้นด้วย ส่งผลให้ปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียยังคงมีเหลืออยู่ ประสิทธิภาพในการบำบัดวัดในรูป BOD_5 และ COD จึงลดลงที่ระยะเวลาเก็บกักน้อย จากการทดลองค่า $BOD_5 : COD$ ที่ระดับความลึก 20 เซนติเมตร คือ 0.52 – 0.58, ระดับความลึก 40 เซนติเมตร คือ 0.46 – 0.64 และที่ระดับความลึก 50 เซนติเมตร คือ 0.57 – 0.82 โดยประสิทธิภาพในการบำบัด BOD_5 มีอัตราการลดลงในช่วง 31.82 – 88.64 % และ COD อยู่ในช่วง 21.23 – 88.96 %

4.3.3 การเพิ่มขึ้นของ SS และ VSS

การวิเคราะห์หาค่าของแข็ง หมายถึงการวิเคราะห์หาสารหรือสิ่งเจือปนที่เหลืออยู่ภายหลังการนำน้ำออกแล้ว สิ่งที่เหลืออยู่หรือตะกอนมีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ (มันสิน คณกุลเวศม์, 2538) โดยการวิเคราะห์ SS เป็นการวัดปริมาณของแข็งแขวนลอยที่สามารถกรองด้วยกระดาษกรองใยแก้ว (“Whatman” GF/C) (ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และอุษา วิเศษสุนน, 2535) และ VSS เป็นการวัดปริมาณของสารที่สลายกลายเป็นไอได้ที่อุณหภูมิ $550 \pm 50 ^\circ C$ ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์จากการนำตัวอย่างไปเผาที่อุณหภูมิดังกล่าวทำให้ทราบปริมาณคร่าวๆ ของสารอินทรีย์ในส่วนที่เป็นของแข็งในน้ำเสีย (ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และเพชรพร เขาวกิจเจริญ, 2536)

จากการทดลองค่า SS และ VSS มีการเพิ่มขึ้นถ้าระยะเวลาในการเก็บกักเพิ่มขึ้นในทุกๆ ความลึกโดยค่า SS ของน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 151.83 mg/L เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ในทุกการทดลองแล้วค่า SS และ VSS มีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.2 – 4.4 และค่า VSS : SS ที่ระดับความลึก 20 เซนติเมตร คือ 0.63 – 0.76, ระดับความลึก 40 เซนติเมตร คือ 0.68 – 0.77 และที่ระดับความลึก 50 เซนติเมตร คือ 0.69 – 0.76

จากการหา VSS ซึ่งคือ น้ำหนักเซลล์แบคทีเรียรวมกับน้ำหนักเซลล์สาหร่าย จะเห็นว่าสัดส่วน VSS : SS ได้ประมาณ 60 – 70 % ของ SS คือ VSS แสดงว่าปริมาณ SS มีผลเนื่องมาจากค่า VSS เป็นส่วนใหญ่ จากผลการทดลองพบว่าค่า SS เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลา เก็บกักเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากระยะเวลาเก็บกักที่ลดลง อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียไม่ดี เท่ากับระยะเวลาเก็บกักที่นาน ทั้งจากปริมาณแบคทีเรียและปริมาณแข็งแขวนลอยในน้ำเสียที่ยังคงมีเหลืออยู่ ประสิทธิภาพในการบำบัดวัดในรูป SS จึงลดลงที่ระยะเวลาเก็บกักมาก ส่วน VSS จะมีการลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาเก็บกักลดลง จากข้อมูลผลการทดลองน้ำเสียที่ผ่านระบบบำบัดแล้ว ค่า VSS มีค่ามากที่สุดในช่วงระยะเวลาเก็บกัก 7 วันในทุกๆ ระดับความลึก ถ้าหากระยะเวลาเก็บกักที่น้อยกว่า 7 วัน พบว่าค่า VSS มีค่าน้อยลง อาจเป็นข้อบ่งบอกได้ว่าระบบบำบัดแบบบ่อสาหร่ายนี้ช่วงระยะเวลาเก็บกักที่ทำให้การเพิ่มขึ้นของแบคทีเรียมากที่สุดคือ 7 วัน

ตารางที่ 4.2 ค่า SS และ VSS เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ระดับความลึก 20 เซนติเมตร

ระยะเวลาเก็บกัก	พารามิเตอร์				
	SS (mg/L)	VSS (mg/L)	สัดส่วน VSS:SS	น้ำหนักเซลล์ แบคทีเรีย (mg/L)	น้ำหนักเซลล์ สาหร่าย (mg/L)
7 วัน	194	145.941	0.75	81.841	64.1
5 วัน	132	100.908	0.76	50.108	50.8
3 วัน	128	89.509	0.70	58.609	30.9
1 วัน	98	62.001	0.63	62.001	0

ตารางที่ 4.3 ค่า SS และ VSS เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ระดับความลึก 40 เซนติเมตร

ระยะเวลาเก็บกัก	พารามิเตอร์				
	SS (mg/L)	VSS (mg/L)	สัดส่วน VSS:SS	น้ำหนักเซลล์ แบคทีเรีย (mg/L)	น้ำหนักเซลล์ สาหร่าย (mg/L)
7 วัน	256	181.308	0.71	99.008	83.3
5 วัน	177	136.469	0.77	69.269	67.2
3 วัน	139	95.923	0.69	44.523	51.4
1 วัน	126	85.700	0.68	85.700	0

ตารางที่ 4.4 ค่า SS และ VSS เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ระดับความลึก 50 เซนติเมตร

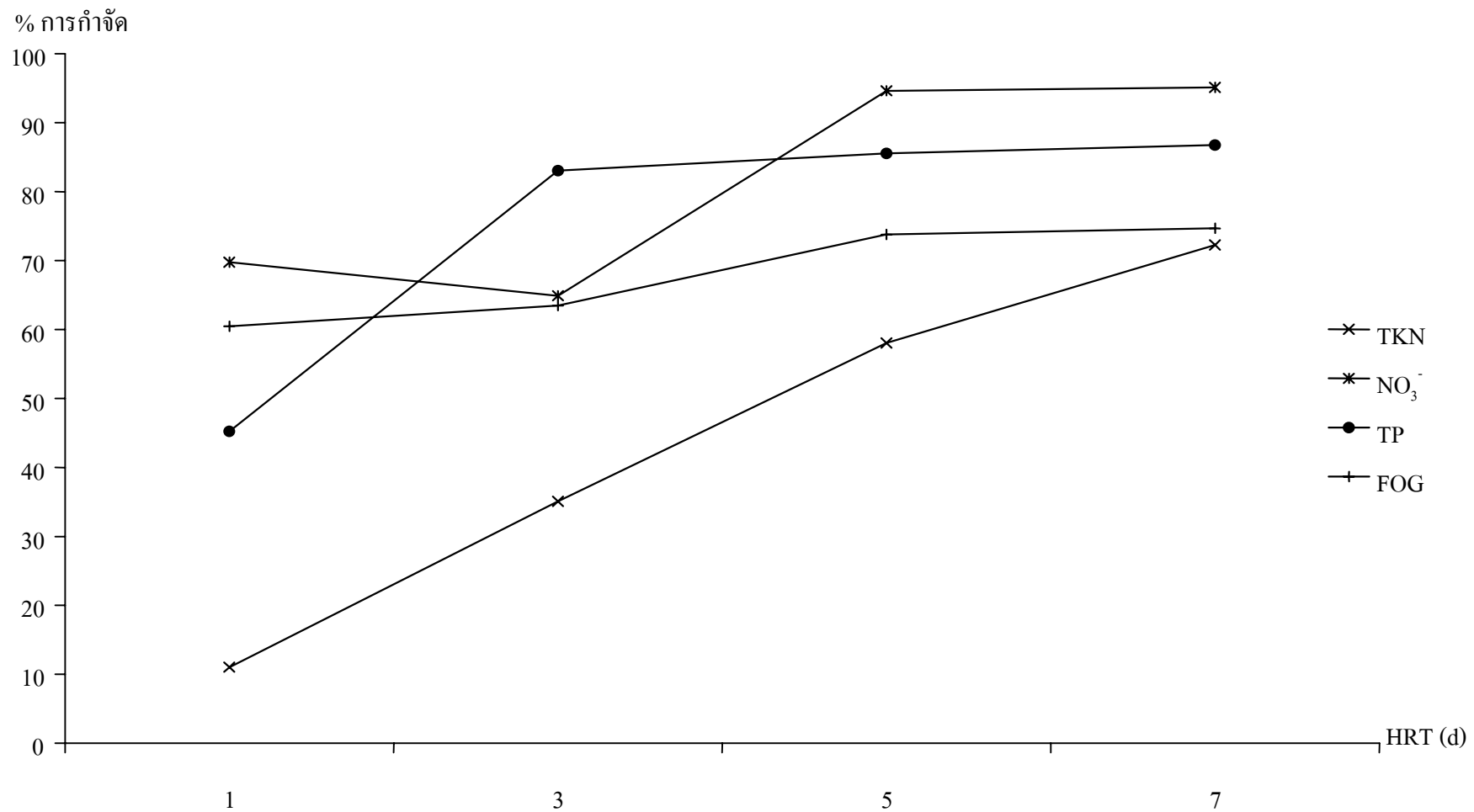
ระยะเวลาเก็บกัก	พารามิเตอร์				
	SS (mg/L)	VSS (mg/L)	สัดส่วน VSS:SS	น้ำหนักเซลล์ แบคทีเรีย (mg/L)	น้ำหนักเซลล์ สาหร่าย (mg/L)
7 วัน	231	163.105	0.71	112.605	50.5
5 วัน	156	114.628	0.73	81.828	32.8
3 วัน	161	110.404	0.69	90.004	20.4
1 วัน	138	105.100	0.76	105.100	0

4.3.4 TKN, TP, NO_3^- และไขมัน

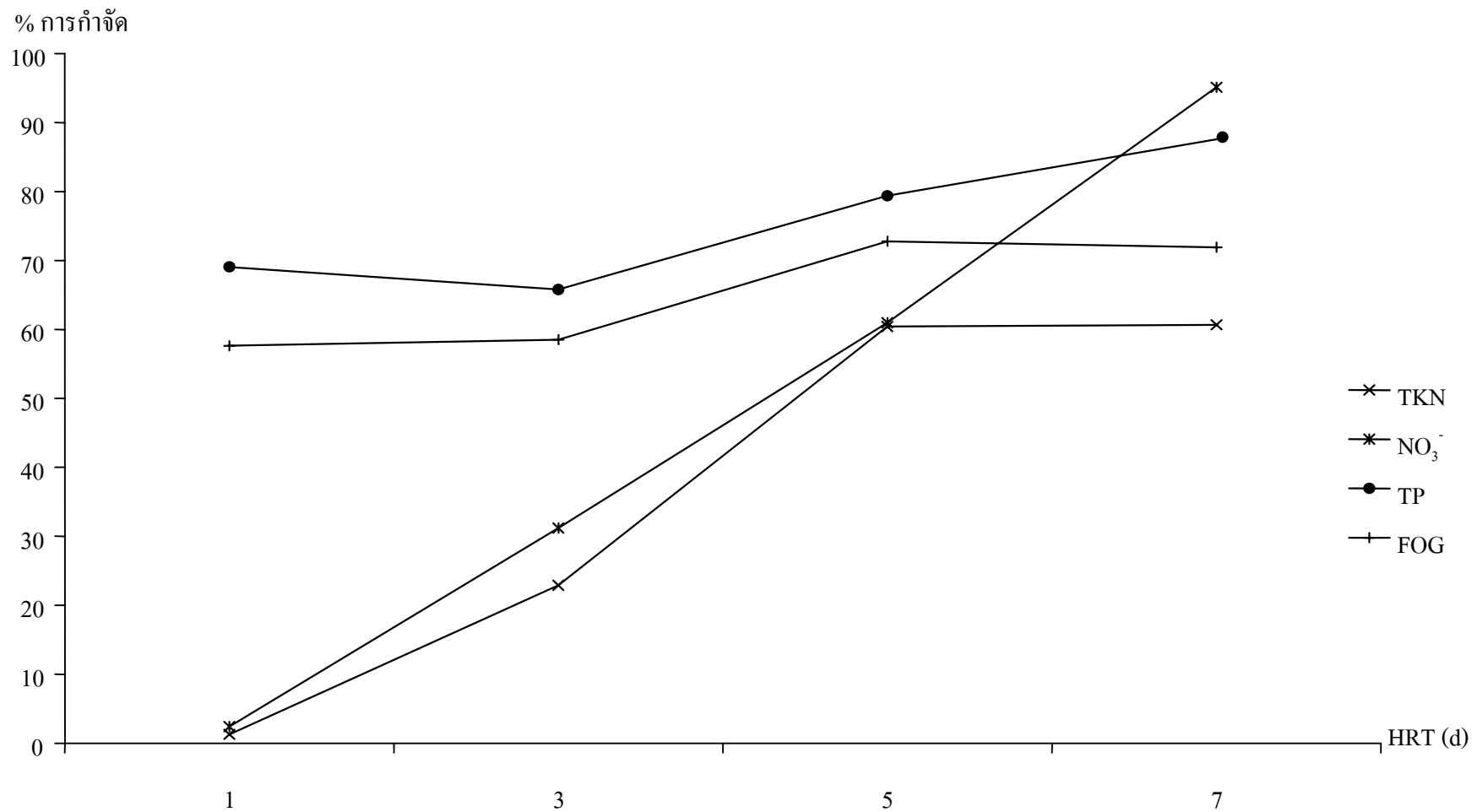
การวิเคราะห์ค่า TKN เป็นการวัดปริมาณไนโตรเจนที่พบในน้ำ ซึ่งเป็นผลบวกระหว่างค่าออร์แกนิกไนโตรเจน และแอมโมเนียไนโตรเจนที่อยู่ในโปรตีนของพืชหรือสัตว์ที่เกิดจากกระบวนการของสิ่งมีชีวิต (ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และอุษา วิเศษสุนน, 2535) การทดลองพบว่าค่า TKN เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาเก็บกักลดลง เนื่องมาจากระยะเวลาเก็บกักที่ลดลง อัตราการไหลของน้ำเสียในระบบบำบัดมากขึ้น และปริมาณน้ำเสียมากขึ้นด้วย ปริมาณ TKN ในน้ำเสียยังคงมีเหลืออยู่ประสิทธิภาพในการบำบัดวัดในรูป TKN จึงลดลงที่ระยะเวลาเก็บกักน้อย ซึ่งมีประสิทธิภาพการบำบัด 1.30 – 72.28 % ส่วน TP และ NO_3^- มีประสิทธิภาพการบำบัด 45.24 – 87.56 % และ 2.44 – 95.12 % ตามลำดับ โดยกลไกการลดลงของ TP อาจเนื่องมาจากแบคทีเรียและสาหร่ายนำเอาฟอสฟอรัสที่ละลายอยู่ในน้ำเสียมาใช้ในกิจกรรมของเซลล์และการสร้างเซลล์ใหม่ การลดลงของ NO_3^- แบคทีเรียและสาหร่ายนำ NO_3^- มาใช้ในกิจกรรมของเซลล์และการสร้างเซลล์ใหม่ ส่วนปริมาณไขมันมีค่าลดลงอาจเนื่องมาจากการย่อยสลายไขมันจากแบคทีเรียประเภทที่ใช้อากาศ โดยมีประสิทธิภาพอยู่ในช่วง 45.83 – 74.68 % ดังแสดงในภาพที่ 4.5 – 4.7

4.3.5 คลอโรฟิลล์ เอ

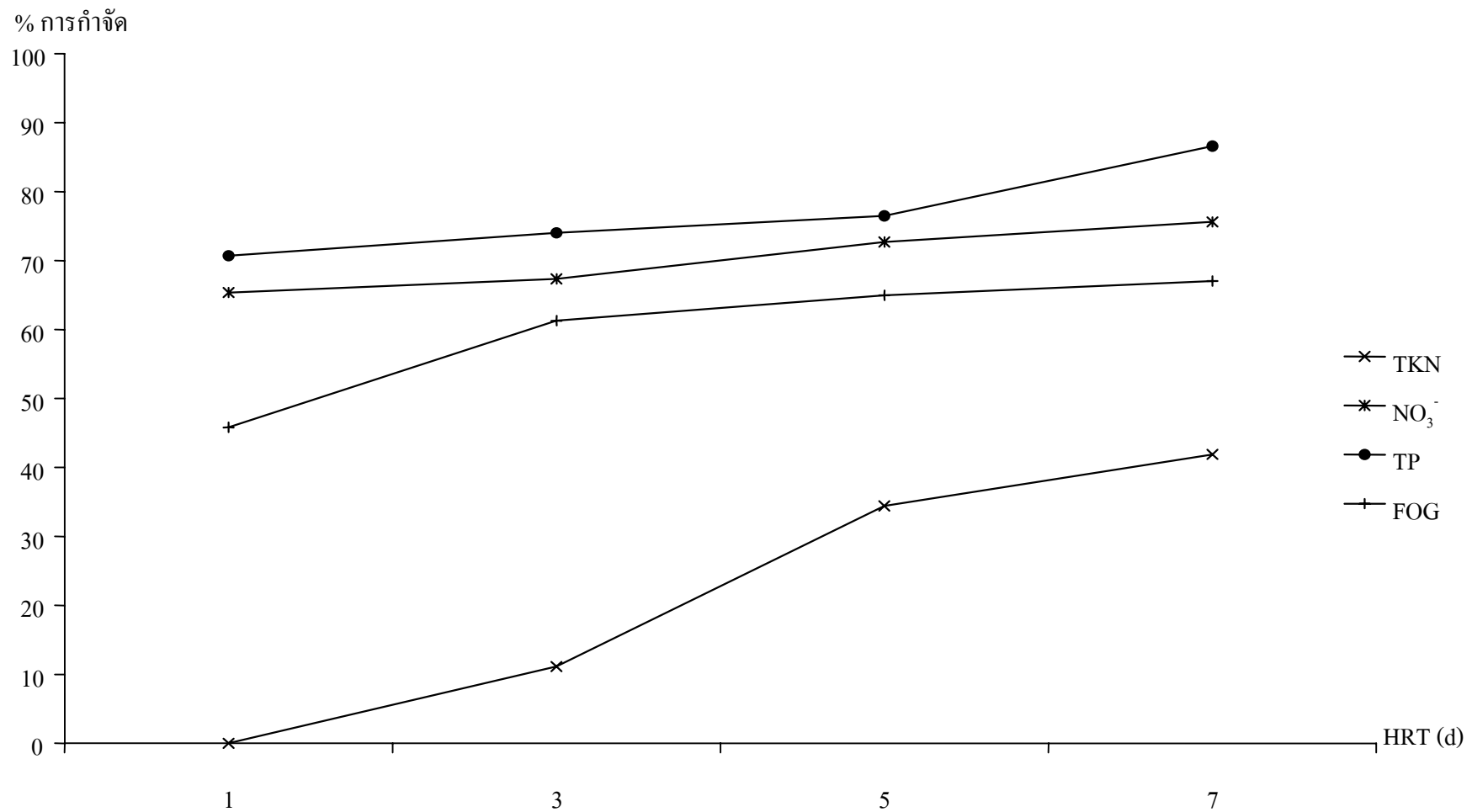
จากการทดลองพบว่าคลอโรฟิลล์ เอ ลดลงเมื่อระยะเวลาเก็บกักลดลง เนื่องมาจากระยะเวลาเก็บกักที่นานแบคทีเรียสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างเต็มที่ ส่งผลให้มีสารอาหารและปริมาณ CO_2 ให้กับสาหร่ายอย่างเพียงพอ ส่วนที่ระยะเวลาเก็บกัก 1 วัน ของทุกระดับความลึกไม่สามารถวัดค่าคลอโรฟิลล์ เอ ได้ อาจเนื่องมาจากเป็นสถานะที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย สำหรับเหตุผลทางชีววิทยาควรให้ระยะเวลาเก็บกักนานกว่า 1.8 วัน ซึ่งเป็นช่วงการดำรงชีวิตต่ำสุดของสาหร่าย ถ้าเวลาสั้นกว่านี้จะทำให้สาหร่ายเติบโตไม่ทัน (Oron and Shelef, 1982)



ภาพที่ 4.5 ประสิทธิภาพการบำบัด TKN, TP, FOG และ NO₃⁻ จากโรงงานผลิตก้อนขนม โดยใช้ระบบบำบัดแบบบ่อสาหร่าย ที่ระดับความลึก 20 เซนติเมตร



ภาพที่ 4.6 ประสิทธิภาพการบำบัด TKN, TP, FOG และ NO_3^- จากโรงงานผลิตถ่านหิน โดยใช้ระบบบำบัดแบบป้อสาหร่าย ที่ระดับความลึก 40 เซนติเมตร



ภาพที่ 4.7 ประสิทธิภาพการบำบัด TKN, TP, FOG และ NO₃⁻ จากโรงงานผลิตก้อนขนม โดยใช้ระบบบำบัดแบบบ่อสาหร่าย ที่ระดับความลึก 50 เซนติเมตร

4.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์

4.4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบบำบัดแบบบ่อสาหร่ายได้จากการนำสมการของ “Monod” มาวิเคราะห์ในรูปของสมการสมดุลของอาหาร และสมดุลของมวลจุลินทรีย์ในถังปฏิกริยาแบบ CSTR แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อสาหร่ายที่ได้สามารถใช้เป็นต้นแบบในการสร้างระบบสำหรับการใช้งานหรือเพื่อการศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของปริมาณอาหารและจุลินทรีย์ในถังปฏิกริยา

จากสมการที่ 2-2 และ 2-3 เมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงที่จะได้ $\frac{dS}{dt} = 0$ และ $\frac{dX}{dt} = 0$ ดังนั้นแก้สมการหาค่า X และ S ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของถังปฏิกริยาแบบ CSTR ดังนี้

$$X = \frac{Y(S_0 - S)}{(1 + k_d \theta)} \quad (4-1)$$

$$S = \frac{K_s(1 + \theta k_d)}{\theta(Yk - k_d) - 1} \quad (4-2)$$

โดยที่	k	=	อัตราการใช้อาหารมากที่สุดต่อหนึ่งหน่วยของมวลแบคทีเรีย
	k_d	=	ค่าสัมประสิทธิ์ในการลดลงของแบคทีเรีย (d^{-1})
	θ	=	ระยะเวลาที่จุลินทรีย์อยู่ในระบบ (d)
	K_s	=	ค่าปริมาณอาหาร ณ จุดที่มีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของแบคทีเรียเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของแบคทีเรีย
	S	=	ปริมาณอาหาร (mg/L)
	S_0	=	ปริมาณอาหาร ณ เวลาเริ่มต้น (mg/L)
	X	=	ความเข้มข้นของจำนวนแบคทีเรีย (mg/L)
	X_0	=	มวลแบคทีเรีย ณ เวลาเริ่มต้น (mg/L)
	Y	=	ค่าสัมประสิทธิ์ปริมาณการผลิตเซลล์ใหม่สูงสุดของช่วงที่มีอัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสุทธิสูงสุด (kg VSS/kg BOD)

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อสาหร่ายที่ระดับความลึกต่างๆ และค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ที่ได้จากการทดลองสามารถแสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอาหารและแบคทีเรียในแบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อสาหร่ายที่ระดับความลึกต่างๆ ดังแสดงในภาคผนวก ง

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการคำนวณโดยแทนค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์และจากผลการทดลองทำการทดสอบทางสถิติ t (t – Test) พบว่าข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ และจากการทดลอง ทั้งปริมาณอาหารและปริมาณแบคทีเรียมีผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (ภาคผนวก ง) ดังนั้นจึงถือว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ข้างต้นสามารถใช้ได้กับระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงผลิตก๊าซนํมแบบบ่อสาหร่าย

4.4.2 ค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์

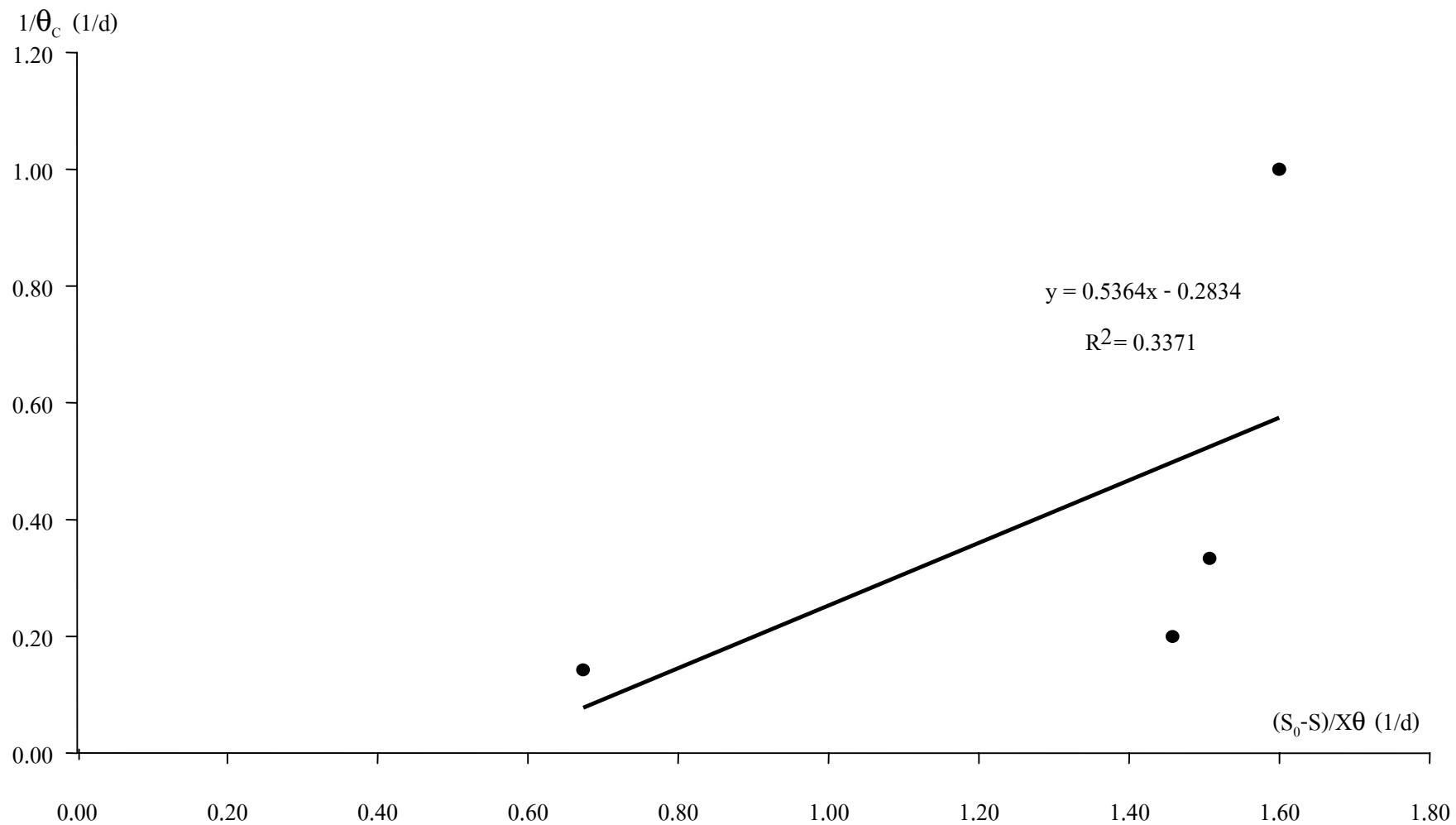
ค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ต่างๆ ได้แก่ K_s , k , k_d และ Y สามารถหาได้จากการนำค่า BOD_5 และค่า VSS (ซึ่งเป็นเซลล์แบคทีเรีย) ที่ได้จากการทดลองมาหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ ดังภาพที่ 4.8 – 4.13 แสดงการหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ที่ระดับความลึกต่างๆ จากค่า BOD_5 และค่า VSS (เซลล์แบคทีเรีย)

โดยพบว่าที่ระดับความลึกต่างๆ กัน ค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ก็ต่างกันด้วย อาจเนื่องมาจากสถานะที่แตกต่างกัน เช่น ปริมาณความเข้มแสงที่ส่องถึงน้ำ เป็นต้น ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ที่ระดับความลึกต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.5

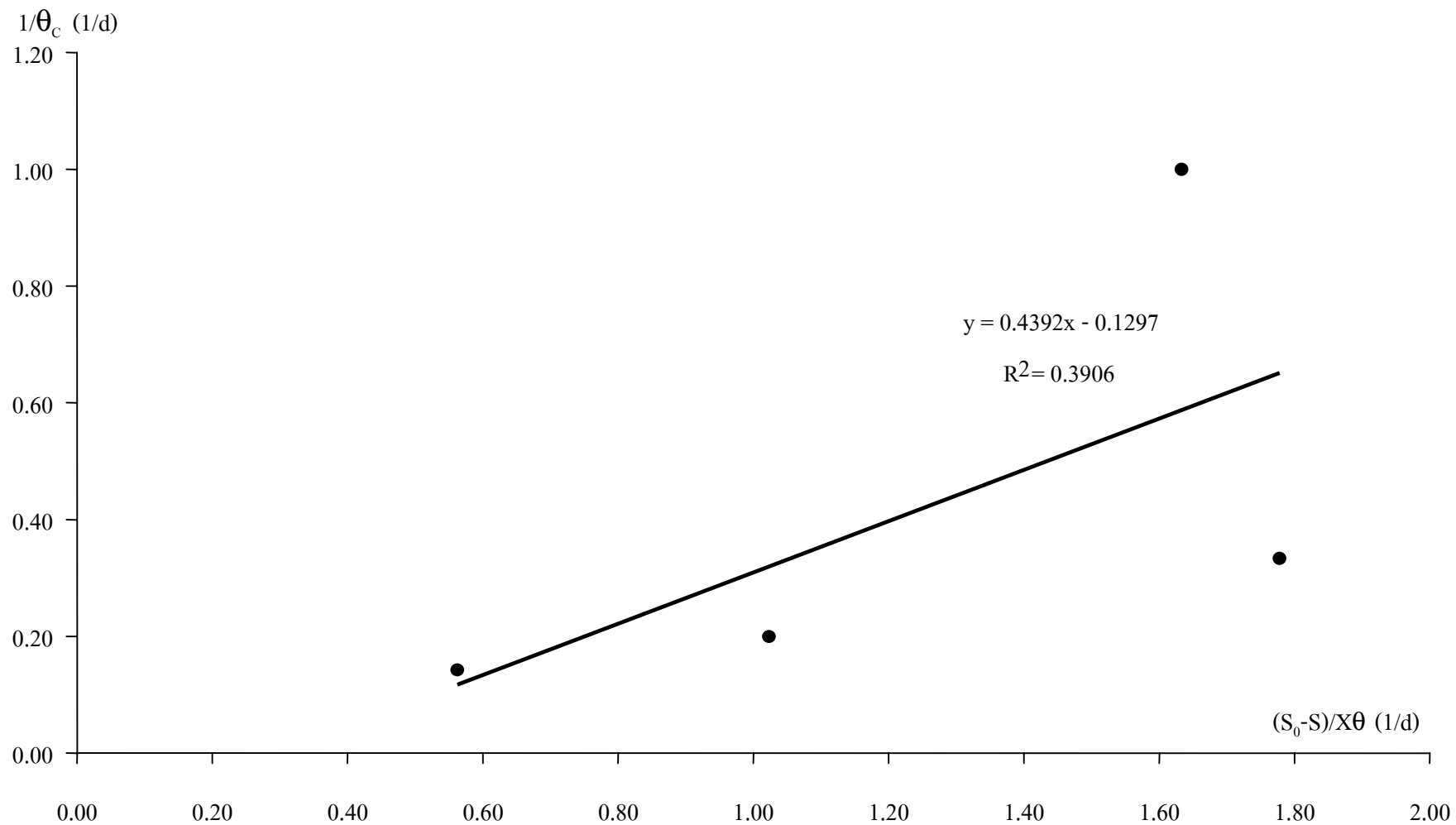
ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ที่ระดับความลึกต่างๆ

ระดับความลึก	K_s (mg/L)	k (d^{-1})	k_d (d^{-1})	Y (mg VSS/mg BOD)
20 cm	124.10	2.610	0.2834	0.5364
40 cm	284.13	3.900	0.1297	0.4392
50 cm	452.38	3.499	0.2921	0.8193

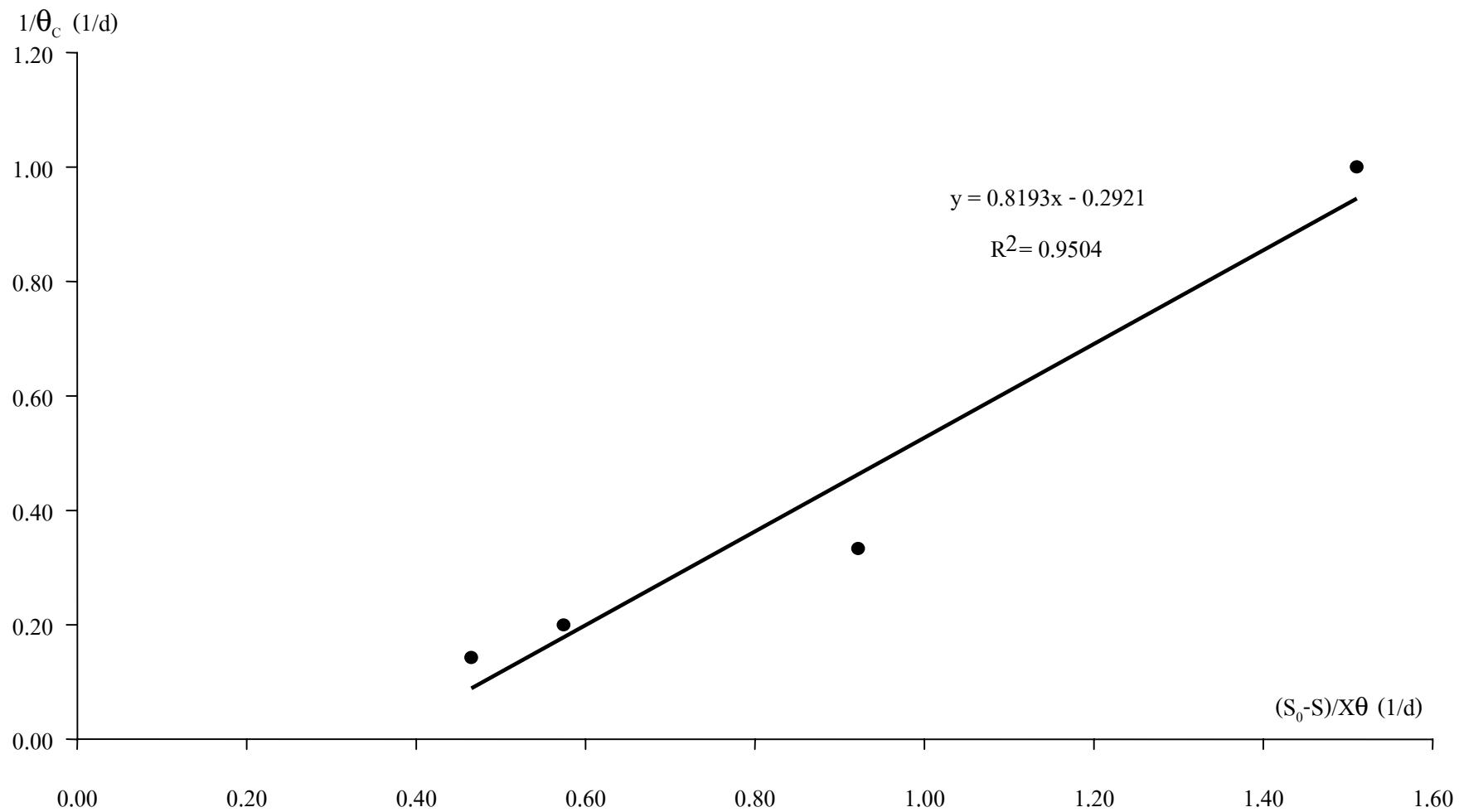
จากข้อมูลผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ที่ระดับความลึกต่างๆ สามารถนำมาเป็นข้อมูลในการเขียนกราฟเปรียบเทียบลักษณะการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกับปริมาณอาหารต่างๆ ในแต่ละระดับความลึก โดยทำการเขียนกราฟข้อมูลระหว่างอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของแบคทีเรีย (μ) และปริมาณอาหาร (S) ดังภาพที่ 4.14



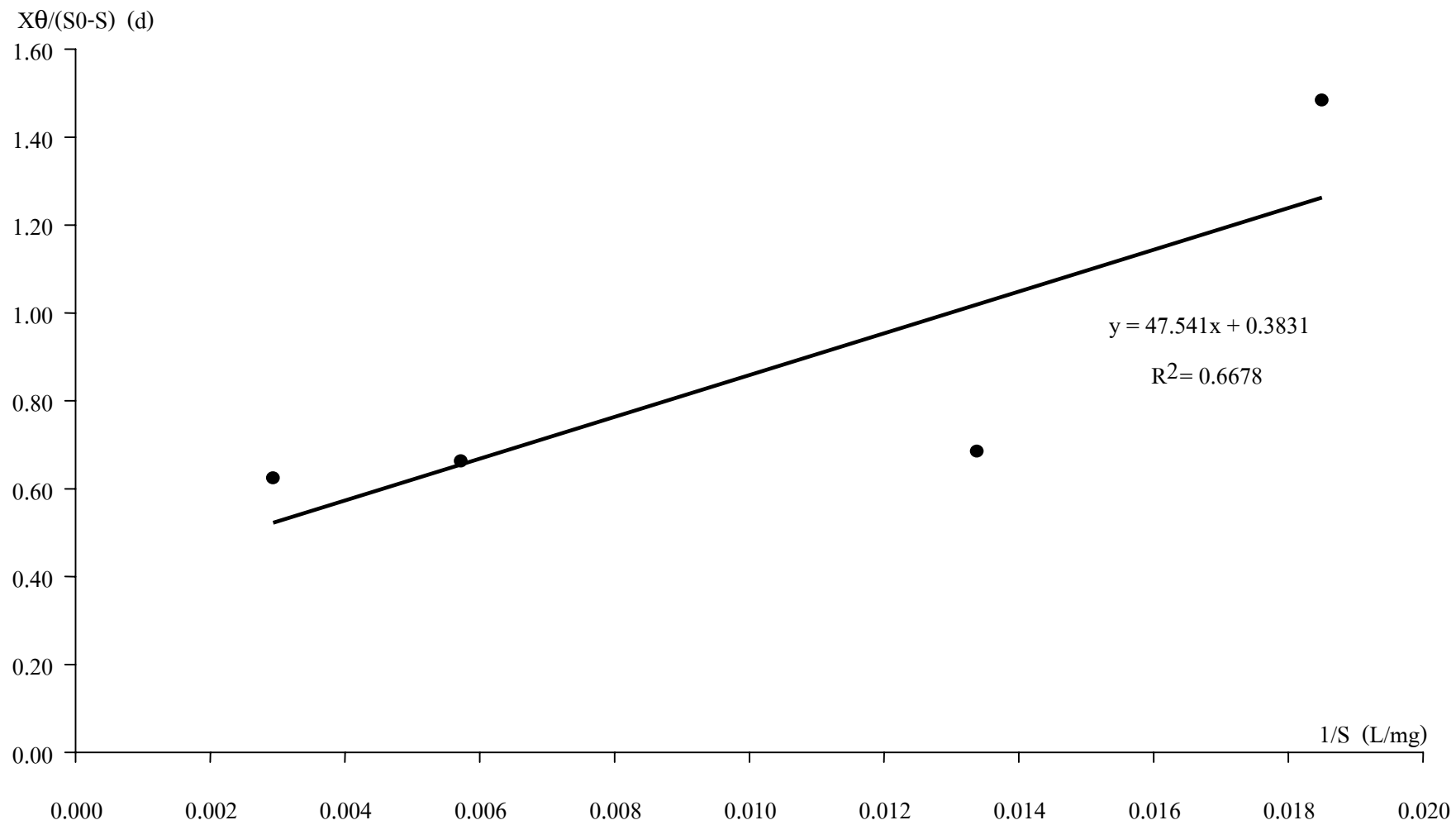
ภาพที่ 4.8 การหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ k_d และ Y ที่ระดับความลึก 20 เซนติเมตร



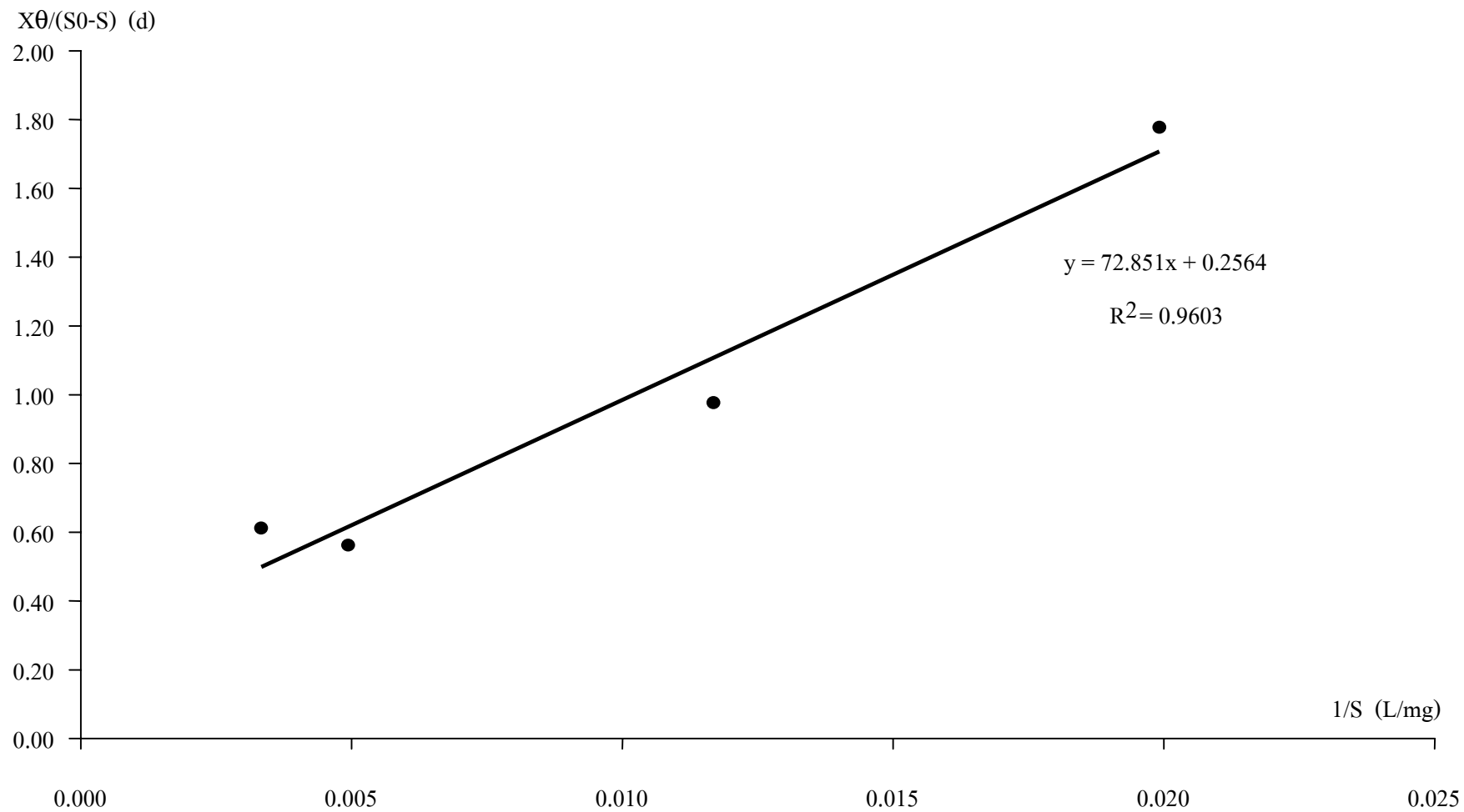
ภาพที่ 4.9 การหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ k_d และ Y ที่ระดับความลึก 40 เซนติเมตร



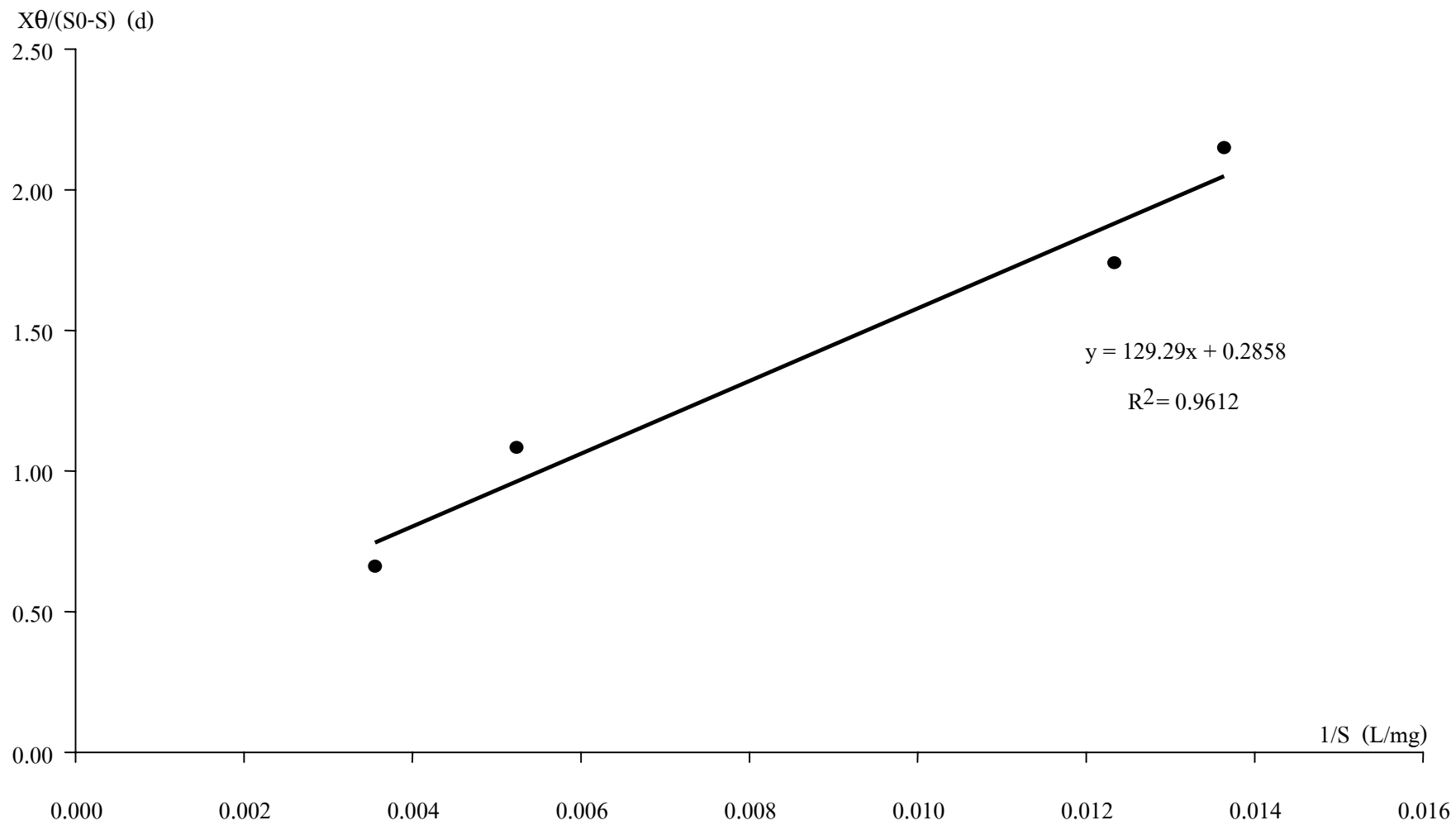
ภาพที่ 4.10 การหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ k_d และ Y ที่ระดับความลึก 50 เซนติเมตร



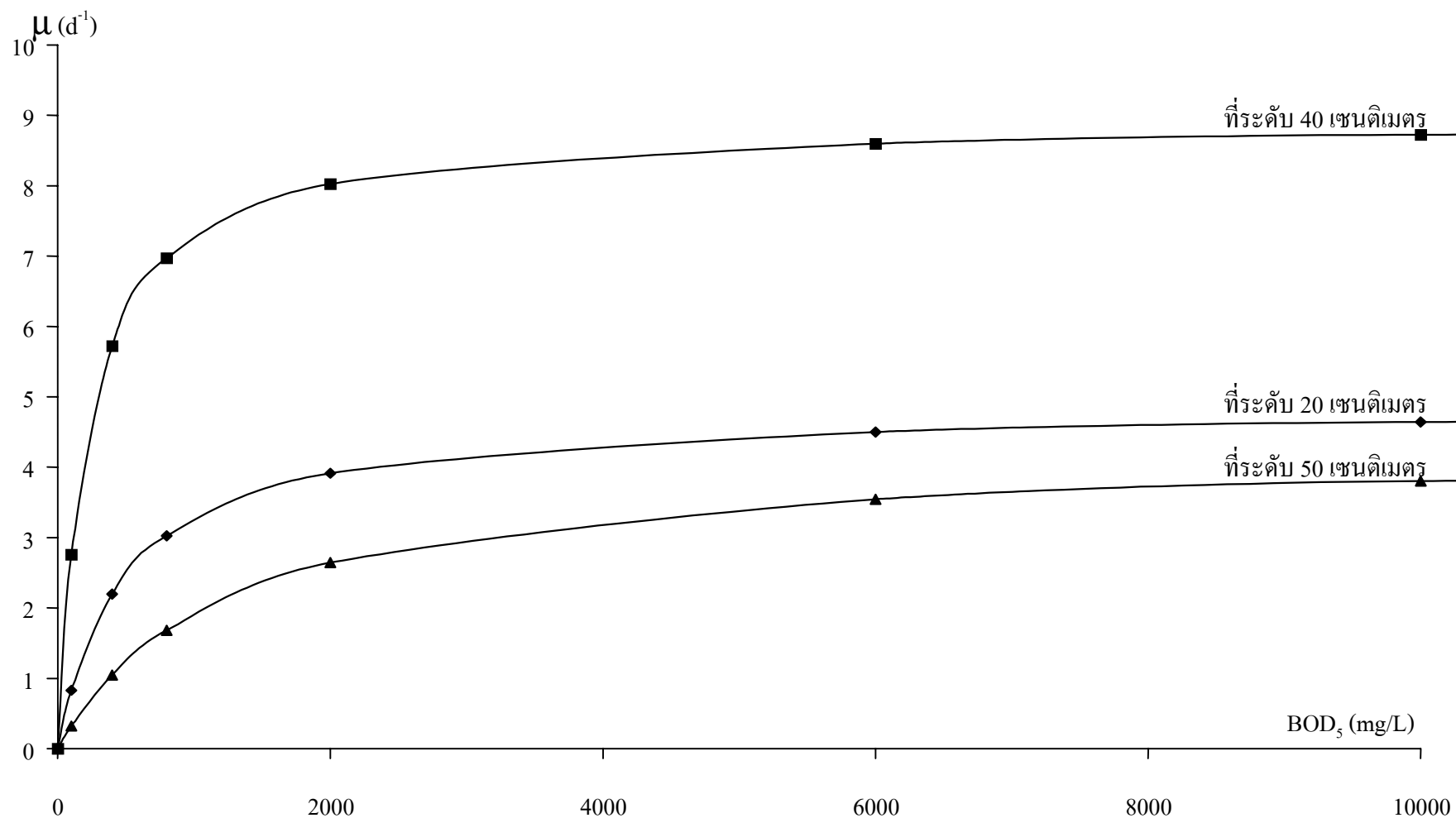
ภาพที่ 4.11 การหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ K_s และ k ที่ระดับความลึก 20 เซนติเมตร



ภาพที่ 4.12 การหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ K_s และ k ที่ระดับความลึก 40 เซนติเมตร



ภาพที่ 4.13 การหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ K_s และ k ที่ระดับความลึก 50 เซนติเมตร



ภาพที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบลักษณะการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกับปริมาณอาหารต่างๆ ในแต่ละระดับความลึก

$$\text{จาก } \mu_m = \frac{k}{Y}$$

$$\text{และ } \mu = \frac{\mu_m S}{K_s + S}$$

โดยที่ μ_m = อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของแบคทีเรียสูงสุด

ค่าครึ่งหนึ่งของอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของแบคทีเรียสูงสุด ($\frac{\mu_m}{2}$) ณ แกนปริมาณ

อาหารจะเป็นค่าปริมาณอาหาร ณ จุดที่มีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของแบคทีเรียเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสูงสุดของแบคทีเรีย (K_s) พบว่าที่ระดับความลึก 40 เซนติเมตร มีค่า μ มากที่สุด แสดงให้เห็นว่าที่สภาวะนี้แบคทีเรียสามารถเจริญเติบโตได้ดีเมื่อเทียบกับที่ระดับความลึก 20 เซนติเมตร และระดับความลึก 50 เซนติเมตร และความเข้มแสงที่ระดับความลึก 40 เซนติเมตร มากกว่าที่ระดับความลึก 20 เซนติเมตร ทำให้มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ สูงกว่า ส่วนที่ระดับความลึก 50 เซนติเมตร นั้นลึกเกินไป ทำให้สาหร่ายไม่สามารถหมุนวนขึ้นมา รับแสงเพื่อใช้ในการสังเคราะห์แสงได้เพียงพอ ทำให้สาหร่ายเจริญเติบโตไม่ดีจึงมีปริมาณสาหร่าย น้อยกว่าที่ระดับความลึก 40 เซนติเมตรแสดงให้ เห็นว่าการทดลองนี้ระดับความลึก 40 เซนติเมตรนี้เป็นสภาวะที่ดีที่สุดสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและสาหร่าย เมื่อเปรียบเทียบกับค่า K_s ของการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตกัณฑ์นมโดยระบบเอสบีอาร์ (Sequencing batch reactor : SBR) ซึ่งมีค่า K_s เท่ากับ 1.761 mg/L และค่าของอัตราการใช้อาหารมากที่สุดต่อหนึ่งหน่วยมวลแบคทีเรีย (k) เท่ากับ 0.248 d⁻¹ (สุชาติ เหลืองประเสริฐ, 2536) แสดงให้เห็นว่าระบบเอสบีอาร์ มีประสิทธิภาพของแบคทีเรียดีกว่าระบบบำบัดแบบบ่อสาหร่าย ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่า k และ K_s จะไม่เท่ากันทั้งนี้เนื่องจากค่าอายุตะกอนแบคทีเรียมาก แบคทีเรียจะมีเวลาในการย่อยสลาย สารอินทรีย์ในน้ำเสียได้นาน ประสิทธิภาพของระบบจะสูง ค่า k จึงต่ำ

4.5 การหาค่าคงที่จากสมการปริมาณสาหร่าย

จากสมการที่ (2.1) นำมาจัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยการ Take Natural Logarithm นำข้อมูลจากการทดลองมาแก้สมการใช้โปรแกรม Maple (ภาคผนวก ก) หาค่าคงที่ a , b , β และ γ โดยวิธี Least square ได้ค่าคงที่ต่างๆ แทนค่าในสมการดังนี้

$$C_a = 1.106 \left(\frac{\text{HRT}}{z} \right)^{0.78} I_0^{1.28} T^{0.51} \quad (4-3)$$

ข้อสังเกตของการทดลองนี้จากอุปกรณ์การทดลอง เนื่องจากได้ทำการทดลองโดยใช้แสงจากหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่ไม่ได้มีการปรับระดับความสูงของแผงไฟตามความลึกของระดับน้ำ แต่ติดตั้งไว้ที่ระดับเดียวคือที่ระดับ 65 เซนติเมตร ความเข้มแสง 1,000 ลักซ์ ซึ่งที่ระดับความสูงของน้ำมาก ผิวน้ำจะใกล้กับหลอดไฟ ทำให้มีความเข้มแสงมาก ส่วนที่ระดับความสูงของน้ำน้อย ผิวน้ำจะไกลจากหลอดไฟ ทำให้มีความเข้มแสงน้อย โดยความเข้มแสงที่ระดับผิวน้ำ 50 เซนติเมตร คือ 900 ลักซ์ ที่ระดับ 40 เซนติเมตร คือ 800 ลักซ์ และที่ระดับ 20 เซนติเมตร คือ 600 ลักซ์ คิดเป็นร้อยละของความเข้มแสงที่ลดลงจากระดับหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่ 65 เซนติเมตร คือร้อยละ 90 ที่ระดับ 50 เซนติเมตร, ร้อยละ 80 ที่ระดับ 40 เซนติเมตร และร้อยละ 60 ที่ระดับ 20 เซนติเมตร และจากสมการปริมาณสาหร่ายแสดงว่าความเข้มแสงมีผลต่อปริมาณการผลิตเซลล์ของสาหร่าย ดังนั้นที่ระดับความลึก 40 เซนติเมตร จึงมีปริมาณสาหร่ายที่วัดในรูปของคลอโรฟิลล์ เอ มากกว่าที่ระดับความลึก 20 เซนติเมตร ส่วนที่ระดับความลึก 50 เซนติเมตร ลึกเกินไปทำให้สาหร่ายไม่สามารถรับแสงได้อย่างทั่วถึงจึงทำให้จึงมีปริมาณสาหร่ายน้อยกว่าที่ระดับความลึก 40 เซนติเมตร และจากการทดลองจะพบว่าปริมาณสาหร่ายที่วัดในรูปของคลอโรฟิลล์ เอ มีค่าน้อย อาจเนื่องมาจากความเข้มแสงที่ใช้ในการทดลองมีค่าแตกต่างจากค่าความเข้มแสงที่ได้จากดวงอาทิตย์โดยตรงซึ่งความเข้มแสงจากดวงอาทิตย์มีค่าประมาณ 8,000 – 50,000 ลักซ์ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากแสงที่ใช้ในการทดลองถึง 8 – 50 เท่า ดังนั้นหากมีการทดลองในความเข้มแสงที่ใกล้เคียงกับแสงอาทิตย์ หรือทำการทดลองโดยใช้แสงอาทิตย์โดยตรง อาจทำให้ผลผลิตของสาหร่ายเพิ่มมากขึ้นได้

บทที่ 5

สรุปการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตภัณฑนมด้วยบ่อสาหร่าย เพื่อศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากโรงงานผลิตภัณฑนม, ความสามารถในการบำบัดน้ำเสีย และปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบบำบัดแบบบ่อสาหร่าย โดยน้ำเสียที่ใช้ในการวิจัยเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ การวิจัยครั้งนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ระดับความลึก คือ ที่ระดับความลึก 20 เซนติเมตรมีค่าภาระบรทุกคือ 88.00, 123.20, 205.33 และ 610.00 kg BOD/ha-d, ที่ระดับความลึก 40 เซนติเมตรมีค่าภาระบรทุกคือ 176.00, 246.40, 410.67 และ 1226.13 kg BOD/ha-d และที่ระดับความลึก 50 เซนติเมตรมีค่าภาระบรทุกคือ 217.07, 305.07, 510.40 และ 1531.20 kg BOD/ha-d ในแต่ละระดับความลึกแต่ละการทดลองต้องทำการทดลองจนระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ แล้วทำการวิเคราะห์ค่าตัวแปรดังต่อไปนี้คือ BOD₅, COD, SS, VSS, TKN, TP, NO₃⁻, FOG และทำการวิเคราะห์ความสามารถในการเจริญเติบโตของสาหร่ายจากบ่อบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตภัณฑนม ด้วยปริมาณความเข้มข้นของ Chlorophyll A ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตภัณฑนมด้วยบ่อสาหร่าย อัตราการลดค่า BOD₅ 31.82 – 88.64 %, COD 21.23 – 88.96 %, TKN 1.30 – 72.28 %, TP 45.24 – 87.56 %, NO₃⁻ 2.44 – 95.12 % , FOG 45.83 – 74.68 % และมีบางการทดลองที่ไม่สามารถกำจัด TKN ได้ดี อาจเนื่องมาจากในการทดลองนั้นๆ ปริมาณแบคทีเรียซึ่งถูกวัดในรูปของ VSS มีมาก และการทดลองที่มีสาหร่ายมากอาจทำให้ค่า TKN รวมมีค่ามาก ดังนั้นจำเป็นต้องทำการแยกสาหร่ายออกจากน้ำทิ้งจากระบบบำบัดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ เพื่อป้องกันปัญหายูโทรฟิเคชัน จะเห็นว่าประสิทธิภาพของระบบบำบัดขึ้นอยู่กับ ระดับความลึก, ระยะเวลาเก็บกัก, ความเข้มแสง และปริมาณสาหร่าย โดยถ้าระดับน้ำลึกมากแสงส่องลงไม่ถึงปริมาณสาหร่ายจะน้อยกว่าที่ระดับน้ำไม่ลึกมาก และระยะเวลาเก็บกัก 1 วัน, 3 วัน และ 5 วัน ประสิทธิภาพของระบบบำบัดจะไม่ดีเท่ากับที่ระยะเวลาเก็บกัก 7 วัน ความเข้มแสงที่มากทำให้สาหร่ายเจริญเติบโตได้มาก ช่วยเพิ่มออกซิเจนและช่วยให้แบคทีเรียเจริญเติบโตทำให้ประสิทธิภาพของระบบบำบัดดีขึ้น

การหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ เพื่อนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตกัณฑ์นมด้วยบ่อสาหร่าย เป็นดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ที่ระดับความลึกต่างๆ

ค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ที่ระดับความลึก	20 เซนติเมตร	40 เซนติเมตร	50 เซนติเมตร
K_s (mg/L)	124.10	284.13	452.38
k (d ⁻¹)	2.610	3.900	3.499
k_d (d ⁻¹)	0.2834	0.1297	0.2921
Y (mg VSS/mg BOD)	0.5364	0.4392	0.8193

จาก μ ที่ระดับความลึก 40 เซนติเมตรมีค่ามากที่สุด แบคทีเรียสามารถเจริญเติบโตได้มากที่สุด และการทดลองนี้สภาวะที่ดีที่สุดสำหรับการเจริญเติบโตของสาหร่าย คือที่ระดับความลึก 40 เซนติเมตร

การหาค่าคงที่จากสมการของ Oron and Shelef (1982) เพื่อทำนายปริมาณสาหร่าย สามารถนำข้อมูลจากการทดลองมาแก้สมการหาค่าคงที่ a , b , β และ γ ได้โดยใช้โปรแกรม Maple ได้ค่าคงที่ต่างๆ แทนค่าในสมการดังนี้

$$C_a = 1.106 \left(\frac{HRT}{z} \right)^{0.78} I_0^{1.28} T^{0.51}$$

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรจะทำการศึกษาทดลองในระบบที่ใหญ่ขึ้น และใช้แสงธรรมชาติ เพื่อสภาวะจะได้ใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมากที่สุด และทดลองกับน้ำเสียประเภทอื่น เช่น น้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์ ซึ่งมีปริมาณไนโตรเจนสูง เพื่อดูความสามารถในการบำบัดและความสามารถในการผลิตสาหร่าย และเพื่อป้องกันปัญหาไฮดรอลิก จำเป็นต้องทำการเก็บเกี่ยวสาหร่ายออกจากน้ำทิ้งจากระบบบำบัดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ เช่น การเก็บเกี่ยวสาหร่ายโดยธรรมชาติ คือ การปล่อยลงสู่บ่อเลี้ยงปลา หรือ การเก็บเกี่ยวสาหร่ายโดยวิธีทางกายภาพ คือ การทำให้เกิดตะกอนโดยใช้สารก่อตะกอน และทำการแยกสาหร่ายออกมา

เอกสารอ้างอิง

- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. (2537). **วิศวกรรมการกำจัดน้ำเสีย**. (เล่มที่ 3). กรุงเทพมหานคร: มิตรนราการพิมพ์.
- ทศพร ธงทอง. (2529). **การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งจากแหล่งชุมชนโดยใช้สาหร่าย**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ทองยศ อเนกกะเวียง. (2535). **เรื่องของนมโค**. เอกสารเผยแพร่ของโรจนม. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และ เพ็ชรพร เซาวกิจเจริญ. (2536). **ปฏิบัติการอย่างง่ายสำหรับวิเคราะห์น้ำเสีย**. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และ อุษา วิเศษสุนน. (2535). **คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย**. (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มณฑล สุดประเสริฐ. (2535). **การบำบัดน้ำเสียจากนิคมอุตสาหกรรมโดยใช้ระบบบ่อเติมอากาศแบบผสมอย่างสมบูรณ์ต่อแบบอนุกรม**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันทุลเทศม์. (2538). **คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ**. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สมศักดิ์ ตั้งตระกูล. (2522). **การกำจัดน้ำเสียจากส้วมโดยวิธีแอนแอโรบิคคอนแทกต์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. (2540). **คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย**. (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพมหานคร.
- สุชาติ เหลืองประเสริฐ. (2538). **การศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงนมมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยระบบเอสปีอาร์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เสริมพล รัตตสุข และ ไชยยุทธ กลั่นสุคนธ์. (2518). **การกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและแหล่งชุมชน**. กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิทยาศาสตร์ประยุกต์แห่งประเทศไทย.

- อุษากร นิยม. (2535). การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงนมโดยระบบ แอคติเวตเตดสลัดจ์และระบบฟลักส์แบคแอเรชั่น. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เอกพล เหมรา. (2536). การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงนมโดยใช้ Airlift Bioreactor. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Aaronson, S., Berner, T., and Dubinsky, Z. (1980). Microalgae as a Source of Chemicals and Natural Products. **Algae Biomass, Production and Use**. Amsterdam Elsevier/North-Holland Biomedical Press.
- APHA, AWWA and WEF. (1998). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. (19 th ed.). Washington D.C.
- Baumann, R. E. (1971). Nitrogen Control in the Midwest. **Journal of Water Pollution Control Federation**. Vol. 44, No. 10, pp.1895 – 1909.
- Benemann, J., Koopman, B., Weissman, J., Eisenberg, D., and Goebel, R. (1980). Development of Microalgae Harvesting and High-rate Pond Technologies in California. **Algae Biomass, Production and Use**. Amsterdam: Elsevier/North-Holland Biomedical Press.
- Boonthanon, S. (1976). **Design of Appropriate Wastes Treatment System for D.P.O. Dairy Plant at Muak Lek, Saraburi, Thailand**. M.S. Thesis, AIT, Bangkok.
- Chris, Tanner C., John, Clayton S. and Martin, Upsdell P. (1995). Effect of Loading Rate and Planting on Treatment of Dairy Farm Wastewaters in Constructed Wetlands-II. Removal of Nitrogen and Phosphorus. **Water Research**. Vol. 29, No. 1, pp. 27 – 34.
- Dart, D. K. and Stretton, R. J. (1977). **Microbiological Aspects of Pollution Control**. New York: Elsevier Scientific.
- Edwards, P., Sinchumpasak, O., and Tabucanon, M. (1981). The Havest of Microalgae from the Effluent of a Sewage Fed High Rate Stabilization Pond by *Tilapia nilotica*. Part 2: Studies of the Fish Ponds. **Aquaculture**. Vol. 23, pp. 107 – 147.
- Elmer, Marth H. and James, Steele L. (1998). **Applied Dairy Microbiology**. New York: MARCEL DEKKER.
- Herzka, A. and Booth, G. R. (1981). **Food Industry Waste Disposal and Recovery**. England: Appied Science Publishers.

- Hintz, H. F., Heitman, H. Jr., Weir, W. C., Torell, D. T., and Meyer, J. H. (1966). Nutritive Value of Algae Grown on Sewage. **Journal of Animal Science**. Vol. 25, pp. 675 – 681.
- Humenik, F. J. and Hanna, G. P. (1971). Algal-bacterial Symbiosis for Removal and Conservation of Wastewater Nutrients. **Journal of Water Pollution Control Federation**. Vol. 43, No. 4, pp. 580 – 598.
- Jones, R. W. (1974). **Pollution Control in the Dairy Industry**. New Jersey: Noyes Data Corporation.
- Kaplan, D., Richmond, A. E., Dubinsky, Z. and Aaronson, S. (1986). Algal Nutrition, In a Richmond (ed.). pp. 147 – 198. **CRC Handbook of Microalgal Mass Culture**. Florida: CRC Press Inc., Roca Raton.
- Kountz, R. R. (1956). **Total Oxidation Waste Treatment, Dairy Food Plant Waste and Waste Treatment Practices**. In Department of Dairy Technology. Ohio State University, Ohio.
- Lavoie, A. and Noue, J. (1985). Hyperconcentrated Cultures of *Scenedesmus Obliquus* a New Approach for Wastewater Biological Tertiary Treatment. **Water Research**. Vol. 19, No. 11, pp. 1437 – 1442.
- Levenspiel, O. (1972). **Chemical Reaction Engineering (2 edition)**. New York: Wiley International.
- Lewin, R. A. (1962). **Physiology and Biochemistry of Algae**. New York: Academic Press.
- Lip, S. H. and Avissar, Y. J. (1986). Photosynthesis and ultrastructure in microalgae, In a Richmond (ed.). pp. 43 – 67. **CRC Handbook of Microalgal Mass Culture**. Florida: CRC Press Inc., Roca Raton.
- Master, B. K. (1993). Management of Dairy Waste: A Low Cost Treatment System Using Phosphorus Adsorbing Material. **Water Science & Technology**. Vol. 27(1), pp. 159 – 169.
- Moraine, R., Shelef, G., Meydan, A., and Levi, A. (1979). Algal Single Cell Protein from Wastewater Treatment and Renovation Process. **Biotechnology Bioengineering**. Vol. XXI, pp. 1191 – 1207.
- Oron, G. and Shelf, G. (1982). Maximizing Algae Yield in High-rate Oxidation Ponds. **Journal of Environmental Engineering Division**. – ASCE. Vol. 108, pp. 730 – 738.

- Oswald, W. J. (1963). High Rate Ponds in Waste Disposal. **Devel. Indust. Microbiol.** Vol. 4, pp. 122 – 199.
- Oswald, W. J., Gotaas, H. B., Ludwig, H. F., and Lynch, V. (1953). Algae Symbiosis in Oxidation Ponds. III. Photosynthetic Oxygenation. **Sewage Industrial Wastes.** Vol. 25, pp. 692 – 705.
- Palmer, C. M. (1980). **Algae and Water Pollution.** London: Castle House Publication.
- Paoletti, C., Phushparaj, B., Florenzano, G., Capella, P., and Lercker, G. (1976). Unsaponifiable Matter of Green and Blue-green Algal Lipids as a Factor of Biochemical Differentiation of Their Biomass: I. Total Unsaponifiable and Hydrocarbon Fraction. **Lipids.** Vol. 11, pp. 258 – 265.
- Polprasert, Chongrak. (1996). **Organic Waste Recycling 2nd.** 2 edition. England: John Wiley & Sons.
- Przytocka-Jusiak, M., Blaszczyk, M., Kosinska, E., and Bisz-Konarzewska, A.(1984a). Removal of Nitrogen from Industrial Wastewater with the Use of the Algal Rotating Discs and Denitrification Packed bed Reactor. **Water Research.** Vol. 18, No. 9, pp. 1077 – 1082.
- Przytocka-Jusiak, M., Matusiak, K., Duszoto, M., and Mycielski, R. (1984b). Intensive Culture of *Chlorella Vulgaris*/AA. as the Second Stage of Biological Purification of Nitrogen Industry Wastewater. **Water Research.** Vol. 18, No. 1, pp. 1 – 7.
- Rajagopalan, S. (1972). Dairy Waste – disposal on Land. **Indian Journal of Environmental Health.** Vol 14, No. 3, pp. 250 – 258.
- Sharkawi, F. M. E. and Moawad, S. K. (1970). Stabilization of Dairy Wastes by Algal – bacterial Symbiosis in Oxidation Ponds. **Journal of Water Pollution Control Federation.** Vol. 42, pp. 115 – 125.
- Standridage, J. H. (1981). Poor Sludge Settleability Caused by the Bacterium *Lamprodia*. **Water Engineering Management.** Vol. 128, No. 1, pp. 41 – 51.
- Taimmanenate, K. (1974). **Wastewater Treatment Evaluation for Dairy Industries.** M.S. Thesis, AIT, Bangkok.
- Venkalaraman, J., Kaul, S. N. and Narayan, S. (1992). Determination of Kinetic Constants for a Two-stage Anaerobic Upflow Packed-bed Reactor for Dairy Wastewater. **The Engineering Index Monthly.** June, No. 083398. 23p.

- Venkataraman, G. S. (1969). **The Cultivation of Algae**. Indian Council of Agricultural Research, New Delhi.
- Volseký, B., Zajíc, J. E., and Knettig, E. (1970). Algal Products. **Properties and Products of Algae**. New York: Plenum Press.
- Wheatland, A. B. (1967). The Treatment of Effluents from the Milk Industry. **Chemical Industry**. pp.1547 – 1551.
- Wheatley, A. D., Johnson, K. A. and Winstanley, C. I. (1988). Foaming in Activated Sludge Plant Treating Dairy Waste. **Environmental Technology**. Vol. 9, pp.181 – 190.

ภาคผนวก ก

ผลการศึกษาริตตาม

ตารางที่ 1ก. ผลการทดลองและการคำนวณของการทำ Tracer, $Q = 55 \text{ mL/sec}$

Time (mins)	Δt_i	C (mg/L)	$C/C_0=C_i$	$C_i\Delta t_i$	$t_i C_i\Delta t_i$	$t_i^2 C_i\Delta t_i$
0	-	0.90	0	0	0	0
5	5	97.5	0.019	0.097	0.48	2.44
10	5	160	0.032	0.160	1.60	16.00
15	5	240	0.048	0.240	3.60	54.00
20	5	285	0.057	0.285	5.70	114.00
25	5	305	0.061	0.305	7.63	190.63
30	5	305	0.061	0.305	9.15	274.50
35	5	280	0.056	0.280	9.80	343.00
40	5	270	0.054	0.270	10.80	432.00
45	5	250	0.050	0.250	11.25	506.25
50	5	240	0.048	0.240	12.00	600.00
55	5	255	0.051	0.255	14.03	771.38
60	5	230	0.046	0.230	13.80	828.00
65	5	225	0.045	0.225	14.63	950.63
70	5	205	0.041	0.205	14.35	1004.50
75	5	200	0.040	0.200	15.00	1125.00
80	5	185	0.037	0.185	14.80	1184.00
85	5	180	0.036	0.180	15.30	1300.50
90	5	175	0.035	0.175	15.75	1417.50
100	10	160	0.032	0.320	32.00	3200.00
110	10	145	0.029	0.290	31.90	3509.00
120	10	125	0.025	0.250	30.00	3600.00
130	10	110	0.022	0.220	28.60	3718.00
140	10	105	0.021	0.210	29.40	4116.00
155	15	95	0.019	0.285	44.18	6847.13
170	15	85	0.017	0.255	43.35	7369.50
180	10	75	0.015	0.150	27.00	4860.00

Time (mins)	Δt_i	C (mg/L)	$C/C_0=C_i$	$C_i\Delta t_i$	$t_i C_i\Delta t_i$	$t_i^2 C_i\Delta t_i$
190	10	65	0.013	0.130	24.70	4693.00
200	10	55	0.011	0.110	22.00	4400.00
210	10	50	0.010	0.100	21.00	4410.00
220	10	45	0.009	0.090	19.80	4356.00
240	20	30	0.006	0.120	28.80	6912.00
260	20	30	0.006	0.120	31.20	8112.00
280	20	25	0.005	0.100	28.00	7840.00
310	30	15	0.003	0.090	27.90	8649.00
340	30	5	0.001	0.030	10.20	3468.00
370	30	5	0.001	0.030	11.10	4107.00
Sum =				6.9875	680.788	105280.94

การคำนวณ Tracer Study

$$\theta_{\text{ทางทฤษฎี}} = \frac{V}{Q}$$

$$= \frac{375 \text{ L}}{3.3 \text{ L/min}}$$

$$= 113.6 \text{ min}$$

$$T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i}$$

$$= \frac{680.7875}{6.9875}$$

$$= 97.429 \text{ min}$$

$$\begin{aligned}\sigma^2 &= \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - T_{\text{mean}}^2 \\ &= \frac{105280.938}{6.9875} - 97.429^2 \\ &= 5574.629\end{aligned}$$

$$\frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = \frac{2}{\text{Pe}} + \frac{8}{\text{Pe}^2}$$

$$0 = \text{Pe}^2 - \frac{2\text{Pe} T_{\text{mean}}^2}{\sigma^2} - \frac{8 T_{\text{mean}}^2}{\sigma^2}$$

$$\text{Pe} = 5.334$$

$$d = \frac{1}{\text{Pe}}$$

$$= \frac{1}{5.334}$$

$$= 0.2$$

ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์ลักษณะน้ำทิ้งที่ออกจากระบบบำบัด

ตารางที่ 1ข. การวิเคราะห์ลักษณะน้ำเมื่อระบบคงที่ ที่ระดับความลึก 20 เซนติเมตร

พารามิเตอร์	คุณภาพน้ำเมื่อระบบคงที่ ที่ระยะเวลาเก็บกักต่างๆ			
	7 วัน	5 วัน	3 วัน	1 วัน
COD (mg/L)	99	129	336	598
BOD ₅ (mg/L)	54.06	74.76	174.98	340.81
SS (mg/L)	194.60	132.45	128.45	98.40
VSS (mg/L)	145.94	100.91	89.51	62.00
TKN (mg/L)	4.90	7.42	11.48	15.73
NO ₃ ⁻ (mg/L)	0.010	0.011	0.072	0.062
TP (mg/L)	2.76	3.01	3.53	11.40
FOG (mg/L)	83.67	86.67	120.75	130.67
Chl_A (mg/L)	0.641	0.508	0.309	0.000

หมายเหตุ Chl_A เริ่มต้นที่ 0.537 (mg/L)

ความเข้มแสงที่ผิวน้ำ 600 ลักซ์

ตารางที่ 2ข. ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตถ่านหิน โดยใช้ระบบบำบัดแบบบ่อสำหรับ ที่ระดับความลึก 20 เซนติเมตร

พารามิเตอร์	ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่ระยะเวลาเก็บกักต่างๆ (%)			
	7 วัน	5 วัน	3 วัน	1 วัน
COD (mg/L)	88.96	83.01	55.74	21.23
BOD ₅ (mg/L)	87.71	83.01	60.23	22.54
TKN (mg/L)	72.28	58.03	35.07	11.03
NO ₃ ⁻ (mg/L)	95.12	94.63	64.88	69.76
TP (mg/L)	86.74	85.54	83.05	45.24
FOG (mg/L)	74.68	73.77	63.46	60.46

ตารางที่ 3ข. การวิเคราะห์ลักษณะน้ำเมื่อระบบคงที่ ที่ระดับความลึก 40 เซนติเมตร

พารามิเตอร์	คุณภาพน้ำเมื่อระบบคงที่ ที่ระยะเวลาเก็บกักต่างๆ			
	7 วัน	5 วัน	3 วัน	1 วัน
COD (mg/L)	108	139	352	588
BOD ₅ (mg/L)	50.21	85.60	202.56	300.01
SS (mg/L)	256.25	177.60	139.00	126.85
VSS (mg/L)	180.50	135.00	95.00	85.00
TKN (mg/L)	6.95	7.00	13.63	17.45
NO ₃ ⁻ (mg/L)	0.010	0.080	0.141	0.200
TP (mg/L)	2.59	4.30	7.12	6.44
FOG (mg/L)	92.78	90.00	137.00	140.00
Chl_A (mg/L)	1.208	1.069	0.823	0.000

หมายเหตุ Chl_A เริ่มต้นที่ 0.536 (mg/L)

ความเข้มแสงที่ผิวน้ำ 800 ลักซ์

ตารางที่ 4ข. ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตกัณท์นัม โดยใช้ระบบบำบัดแบบบ่อสำหรับ ที่ระดับความลึก 40 เซนติเมตร

พารามิเตอร์	ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่ระยะเวลาเก็บกักต่างๆ (%)			
	7 วัน	5 วัน	3 วัน	1 วัน
COD (mg/L)	85.77	81.69	53.64	22.55
BOD ₅ (mg/L)	88.59	80.55	53.96	31.82
TKN (mg/L)	60.69	60.41	22.90	1.30
NO ₃ ⁻ (mg/L)	95.12	60.98	31.22	2.44
TP (mg/L)	87.56	79.35	65.80	69.07
FOG (mg/L)	71.92	72.77	58.54	57.64

ตารางที่ 5ข. การวิเคราะห์ลักษณะน้ำเมื่อระบบคงที่ ที่ระดับความลึก 50 เซนติเมตร

พารามิเตอร์	คุณภาพน้ำเมื่อระบบคงที่ ที่ระยะเวลาเก็บกักต่างๆ			
	7 วัน	5 วัน	3 วัน	1 วัน
COD (mg/L)	89	129	271	491
BOD ₅ (mg/L)	73.33	81.08	191.50	281.25
SS (mg/L)	231.43	156.15	161.75	138.15
VSS (mg/L)	162.00	114.00	110.33	105.00
TKN (mg/L)	10.27	11.59	15.71	20.72
NO ₃ ⁻ (mg/L)	0.050	0.056	0.067	0.071
TP (mg/L)	2.79	4.90	5.41	6.10
FOG (mg/L)	109.00	115.80	128.00	179.00
Chl_A (mg/L)	0.505	0.328	0.204	0.000

หมายเหตุ Chl_A เริ่มต้นที่ 0.554 (mg/L)

ความเข้มแสงที่ผิวน้ำ 900 ลักซ์

ตารางที่ 6ข. ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตถ่านหิน โดยใช้ระบบบำบัดแบบบ่อสำหรับ ที่ระดับความลึก 50 เซนติเมตร

พารามิเตอร์	ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่ระยะเวลาเก็บกักต่างๆ (%)			
	7 วัน	5 วัน	3 วัน	1 วัน
COD (mg/L)	88.28	83.01	64.31	35.33
BOD ₅ (mg/L)	83.33	81.57	56.48	36.08
TKN (mg/L)	41.91	34.44	11.14	-17.19
NO ₃ ⁻ (mg/L)	75.61	72.68	67.32	65.37
TP (mg/L)	86.60	76.46	74.02	70.70
FOG (mg/L)	67.02	64.96	61.27	45.83

ภาคผนวก ก

โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณ (Maple)

จากสมการของ Oron and Shelef (1982) นำมาจัดให้เป็นรูปเส้นตรงโดยการ Take Natural Logarithm ทุกค่า

เมื่อ **yvalues** คือ ค่า $\ln C_a$
hvalues คือ ค่า $\ln \left(\frac{HRT}{z} \right)$
kvalues คือ ค่า $\ln I_0$
tvalues คือ ค่า $\ln T$

และหลังจากแก้สมการหาค่าคงที่โดยใช้โปรแกรม Maple แล้ว จะได้ $\ln a = 1.004359650$
ทำการแก้หาค่า a จะได้ 1.105652839, ส่วนค่า b คือ 0.7796699686, ค่า β คือ 1.279707730 และ
ค่า γ คือ 0.5128655339

> restart;

> with (stats) :

> yvalues := [ln (64.1), ln (50.8), ln (30.9), ln (82.3), ln (67.2), ln (51.4), ln (50.5), ln (32.8),
ln (20.4)] ;

yvalues := [4.160444364, 3.927896355, 3.430756184, 4.410371108, 4.207673248,
3.939638172, 3.921973336, 3.490428515, 3.015534901]

> hvalues := [ln (0.35), ln (0.25), ln (0.15), ln (0.175), ln (0.125), ln (0.075), ln (0.14), ln (0.1),
ln (0.06)] ;

hvalues := [-1.049822124, -1.386294361, -1.897119985, -1.742969305, -2.079441542,
-2.590267165, -1.966112856, -2.302585093, -2.813410717]

> kvalues := [ln (6.237), ln (6.237), ln (6.237), ln (8.316), ln (8.316), ln (8.316), ln (9.356),
ln (9.356), ln (9.356)] ;

kvalues := [1.830499298, 1.830499298, 1.830499298, 2.118181370, 2.118181370,
2.118181370, 2.236017849, 2.236017849, 2.236017849]

> tvalues := [ln (29.5), ln (29.5), ln (29.5), ln (29.5), ln (29.5), ln (29.5), ln (29.5), ln (29.5),
ln (29.5)] ;

tvalues := [3.384390263, 3.384390263, 3.384390263, 3.384390263, 3.384390263,
3.384390263, 3.384390263, 3.384390263, 3.384390263]

>eq_fit := fit [leastsquare [[h, k, t, y], y = a+b*h+c*k+d*t, { a, b, c, d }]] ([hvalues,
kvalues, tvalues, yvalues]) ;

eq_fit := $y = 1.004359650 + .7796699686 h + 1.279707730 k + .5128655339 t$

>exp (1.004359650e-1) ;

1.105652839

ตารางที่ 1ง. ผลการทดสอบค่า COD ทางสถิติเมื่อระบบคงที่ ที่ระดับความลึก 20 เซนติเมตร

ระยะเวลาเก็บกัก (วัน)	ค่าทางสถิติ		
	Mean	Standard Deviation	Coefficient of Variation
7	99	3.830	3.868
5	129	3.368	2.611
3	336	4.453	1.325
1	598	6.948	1.161

ตารางที่ 2ง. ผลการทดสอบค่า COD ทางสถิติเมื่อระบบคงที่ ที่ระดับความลึก 40 เซนติเมตร

ระยะเวลาเก็บกัก (วัน)	ค่าทางสถิติ		
	Mean	Standard Deviation	Coefficient of Variation
7	108	4.662	4.317
5	139	4.392	3.160
3	352	7.531	2.139
1	588	10.146	1.726

ตารางที่ 3ง. ผลการทดสอบค่า COD ทางสถิติเมื่อระบบคงที่ ที่ระดับความลึก 50 เซนติเมตร

ระยะเวลาเก็บกัก (วัน)	ค่าทางสถิติ		
	Mean	Standard Deviation	Coefficient of Variation
7	89	4.244	4.768
5	129	4.243	3.289
3	271	9.083	3.352
1	491	7.948	1.619

หมายเหตุ :
$$\text{Coefficient of Variation} = \frac{\text{Standard Deviation}}{\text{Mean}} \times 100$$

ภาคผนวก ง

ผลการทดสอบทางสถิติ

ตารางที่ 4ง. การเปรียบเทียบระหว่างค่าปริมาณอาหารที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ความลึก	ค่า BOD ₅ จากการคำนวณ (mg/L)				ค่า BOD ₅ จากการทดลอง (mg/L)			
	HRT 7d	HRT 5d	HRT 3d	HRT 1d	HRT 7d	HRT 5d	HRT 3d	HRT 1d
20 cm	54.31	65.43	97.69	1364.07	54.06	74.76	174.98	340.81
40 cm	53.76	67.72	105.26	550.33	50.21	85.60	202.56	300.01
50 cm	80.92	93.75	126.24	371.22	73.33	81.08	191.00	281.25

ตารางที่ 5ง. การทดสอบค่า t (t – Test) แบบ Paired – sample T Test ของค่าปริมาณอาหารที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ระดับความลึก	t	df	Prob. (0.05)
20 เซนติเมตร	.876	3	.446
40 เซนติเมตร	.462	3	.676
50 เซนติเมตร	.360	3	.743

ตารางที่ 6ง. การเปรียบเทียบระหว่างค่าปริมาณแบคทีเรียที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ความลึก	ค่าแบคทีเรียจากการคำนวณ (mg/L)				ค่าแบคทีเรียจากการทดลอง (mg/L)			
	HRT 7d	HRT 5d	HRT 3d	HRT 1d	HRT 7d	HRT 5d	HRT 3d	HRT 1d
20 cm	69.38	81.06	76.83	41.46	81.84	50.11	58.61	62.00
40 cm	89.73	94.42	75.07	54.42	99.01	69.27	44.52	85.70
50 cm	98.67	119.51	108.73	100.66	112.61	81.83	90.00	105.10

ตารางที่ 7ง. การทดสอบค่า t (t – Test) แบบ Paired – sample T Test ของค่าปริมาณแบคทีเรียที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ระดับความลึก	t	df	Prob. (0.05)
20 เซนติเมตร	.330	3	.763
40 เซนติเมตร	.258	3	.813
50 เซนติเมตร	.818	3	.474

ประวัติผู้เขียน

นายปกรณ์ พวงกระจ่าย เกิดเมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ. 2518 เริ่มเข้าศึกษาระดับปริญญาตรีที่สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาเมื่อปี พ.ศ. 2540 และได้ทำการศึกษาต่อในระดับปริญญาโทสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2541