

ค่าจลนพลศาสตร์และแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของโรงบำบัดน้ำเสียหนองแขม



นายคณิน ตุงคะเสน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

KINETIC PARAMETERS AND COMPUTER MODEL OF
NHONG KHAM WASTEWATER TREATMENT PLANT



Mr. Kanin Tungkhasen

ศูนย์วิทยทรัพยากร

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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

คณิน ตุงคะเสน : ค่าจลนพลศาสตร์และแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของโรงบำบัด
น้ำเสียหนองแขม. (Kinetic parameters and computer model of Nhong Kham
Wastewater treatment plant) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์
ดร.ศรัณย์ เตชะเสน, 86 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของการบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบเติม
อากาศของประเทศไทย โดยใช้น้ำเสียจริงที่เข้าโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมเป็นตัวแทน
น้ำเสียชุมชนของประเทศไทย งานวิจัยนี้ใช้น้ำเสียจริงจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม
และใช้นมขาดมันเนยเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเสียให้มีค่าซีโอดีเริ่มต้นในช่วง 10 – 200
มก./ล. ทำการเดินระบบแบบแบทช์ ศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตของจุลชีพ (Y)
โดยได้ผลคือ 0.298 มก.เซลล์ซีโอดี/มก.ซีโอดี ส่วนค่าซีโอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ
มีสัดส่วนเป็น 0.259 เท่าของค่าซีโอดีเริ่มต้น สำหรับค่าจลนพลศาสตร์ที่วิเคราะห์ด้วยสมการ
แบบไม่เชิงเส้นของ Monod โดยใช้โปรแกรมทางสถิติ พบว่าค่าคงที่ที่ได้คือ อัตราการ
เจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของจุลชีพ (μ_m) เท่ากับ 8.77 ± 1.731 ต่อวัน และสัมประสิทธิ์การ
อิ่มตัวครึ่งหนึ่งของจุลชีพ (K_s) เท่ากับ 15.81 ± 4.788 มก./ล. ทั้งนี้ค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จาก
งานวิจัยนี้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงหรืองานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน

เมื่อนำค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปใช้จำลองระบบบำบัดน้ำเสียของ
โรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมด้วยโปรแกรม AQUASIM พบว่า ค่าซีโอดีของน้ำทิ้งที่ออก
จากระบบมีค่าต่ำกว่าค่าที่วัดได้จริงจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมมาก สาเหตุที่เป็น
เช่นนี้อาจเกิดจากในน้ำเสียจริงมีค่าซีโอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพเจือปนอยู่ ซึ่งใน
แบบจำลองนี้ไม่ได้คำนึงถึงค่าซีโอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ และผลจาก
แบบจำลองนี้ยังแสดงให้เห็นว่าปริมาณของของแข็งแขวนลอยรวมในระบบมีความเข้มข้น
ประมาณ 4000 มก./ล. ซึ่งประกอบด้วยจุลชีพที่ทำปฏิกิริยาทางชีวภาพเพียง 250-350 มก./ล.
และของแข็งแขวนลอยชนิดอื่น 3500-3700 มก./ล. อย่างไรก็ตามการที่ในระบบมีของแข็ง
แขวนลอยชนิดอื่นปนอยู่ถือเป็นผลดีต่อถังตกตะกอน อีกทั้งผลที่ได้จากแบบจำลองนี้แสดงให้เห็น
เห็นว่าแบบจำลองนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมได้จริง

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิตศ.คณิน ตุงคะเสน
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
ปีการศึกษา 2553.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำปรึกษาแนะแนวทาง หลักการในการดำเนินงานวิจัย และแก้ไขในสิ่งที่บกพร่องมาตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย ซึ่งมีส่วนสำคัญมากในการทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ตลอดจน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาพันธุ์ และ ดร.เปธาน บรรจงปรุ ที่ได้ให้คำปรึกษาจนวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่ช่วยให้คำชี้แนะ ให้ความช่วยเหลืองานด้านเอกสาร และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือเสมอมา

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ของโรงบำบัดน้ำเสียหนองแขม ที่ให้ความอนุเคราะห์เรื่องน้ำเสียเชื้อจุลินทรีย์ และข้อมูลต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ ทูนอุตหนุญวิทยานิพนธ์ จากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้สนับสนุนค่าใช้จ่ายจนวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

ขอบคุณเพื่อนๆ และพี่ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และดูแลกันและกันในระหว่างการทำวิจัยมาโดยตลอด

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา น้องสาว ซึ่งสนับสนุน ส่งเสริม และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

| | หน้า |
|----------------------------------------------------------|-----------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ณ |
| สารบัญรูป..... | ญ |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... | 3 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 3 |
| บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 4 |
| 2.1 โรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม..... | 4 |
| 2.1.1 ข้อมูลเบื้องต้น..... | 4 |
| 2.1.2 ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม..... | 6 |
| 2.1.3 ลักษณะน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบบำบัดน้ำเสีย..... | 10 |
| 2.2 ระบบบำบัดน้ำเสียวีแอลอาร์..... | 12 |
| 2.2.1 ข้อมูลทั่วไป..... | 12 |
| 2.2.2 การทำงานของระบบวีแอลอาร์..... | 12 |
| 2.3 การศึกษาค่าจลนพลศาสตร์..... | 13 |
| 2.3.1 การหาค่าจลนพลศาสตร์..... | 14 |
| 2.3.2 การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์..... | 18 |
| 2.4 งานวิจัยที่ผ่านมา..... | 22 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย..... | 26 |
| 3.1 แผนการดำเนินการวิจัย..... | 27 |

| | | |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2 | วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย..... | 27 |
| 3.3 | การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์..... | 28 |
| 3.4 | การดำเนินการทดลอง..... | 29 |
| 3.4.1 | การวางแผนขอบเขตและกำหนดแผนการในการทดลองขั้นต้น..... | 29 |
| 3.4.2 | การทดลองในห้องปฏิบัติการ..... | 33 |
| 3.4.3 | การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์จากกราฟข้อมูล..... | 36 |
| 3.4.4 | เปรียบเทียบค่าที่วิเคราะห์ได้..... | 37 |
| 3.4.5 | การสร้างแบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสียของโรงควบคุมคุณภาพ น้ำหนองแขมด้วยโปรแกรม AQUASIM | 38 |
| บทที่ 4 | ผลการวิเคราะห์ข้อมูล..... | 39 |
| 4.1 | ลักษณะสมบัติของน้ำเสียตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง..... | 39 |
| 4.2 | การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้หาค่าจลนพลศาสตร์..... | 39 |
| 4.3 | การหาค่ายิลด์..... | 46 |
| 4.4 | การหาค่าซีโอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ..... | 47 |
| 4.5 | การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์..... | 48 |
| 4.6 | การเปรียบเทียบค่าที่วิเคราะห์ได้กับค่าที่อ้างอิงมาจากการวิจัยอื่นๆ..... | 49 |
| 4.7 | การสร้างแบบจำลองของระบบบำบัดน้ำเสียโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม | 52 |
| บทที่ 5 | สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... | 56 |
| 5.1 | สรุปผลการวิจัย..... | 56 |
| 5.2 | ความสำคัญด้านวิศวกรรมและการนำไปใช้งาน..... | 57 |
| 5.3 | ข้อเสนอแนะ..... | 57 |
| | รายการอ้างอิง..... | 59 |
| | ภาคผนวก..... | 61 |
| | ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 86 |

สารบัญญัตินำ

| ตารางที่ | | หน้า |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1.1 | ตารางเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์น้ำเสียที่เข้าโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมและน้ำเสียในประเทศสหรัฐอเมริกา..... | 2 |
| 2.1 | รายละเอียดโครงการของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม..... | 5 |
| 2.2 | ตารางสรุปลักษณะน้ำเสียและน้ำทิ้งของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม..... | 10 |
| 2.3 | ค่าพารามิเตอร์ในน้ำเสียที่เข้าและออกจากโรงบำบัดน้ำเสียหนองแขม..... | 11 |
| 2.4 | สมการทางจลนพลศาสตร์และปริมาณสารสัมพันธ์ของกระบวนการต่างๆในแบบจำลองระบบเอเอสเอ็ม 1..... | 15 |
| 2.5 | ค่าจลนพลศาสตร์จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 25 |
| 3.1 | วิธีการวิเคราะห์หรืออุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ..... | 28 |
| 4.1 | เปรียบเทียบค่าจลนพลศาสตร์ที่วิเคราะห์ได้กับงานวิจัยด้านน้ำเสียชุมชนอื่นๆ... | 50 |
| 4.2 | ตัวแปรที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม..... | 52 |
| ก.1 | ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 10 มก./ล. เซลล์เริ่มต้น 100 มก./ล. ชุดที่ 1..... | 62 |
| ก.2 | ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 10 มก./ล. เซลล์เริ่มต้น 100 มก./ล. ชุดที่ 2..... | 63 |
| ก.3 | ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 10 มก./ล. เซลล์เริ่มต้น 100 มก./ล. ชุดที่ 3..... | 64 |
| ก.4 | ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 25 มก./ล. เซลล์เริ่มต้น 150 มก./ล. ชุดที่ 1..... | 65 |
| ก.5 | ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 25 มก./ล. เซลล์เริ่มต้น 150 มก./ล. ชุดที่ 2..... | 66 |
| ก.6 | ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 25 มก./ล. เซลล์เริ่มต้น 150 มก./ล. ชุดที่ 3..... | 67 |
| ก.7 | ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 50 มก./ล. เซลล์เริ่มต้น 200 มก./ล. ชุดที่ 1..... | 68 |
| ก.8 | ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 50 มก./ล. เซลล์เริ่มต้น 200 มก./ล. ชุดที่ 2..... | 69 |

| ตารางที่ | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ก.9 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 50 มก./ล. เซลล์เริ่มต้น 200 มก./ล. ชุดที่ 3..... | 70 |
| ก.10 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 100 มก./ล. เซลล์เริ่มต้น 400 มก./ล. ชุดที่ 1..... | 71 |
| ก.11 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 100 มก./ล. เซลล์เริ่มต้น 400 มก./ล. ชุดที่ 2..... | 72 |
| ก.12 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 100 มก./ล. เซลล์เริ่มต้น 400 มก./ล. ชุดที่ 3..... | 73 |
| ก.13 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 150 มก./ล. เซลล์เริ่มต้น 600 มก./ล. ชุดที่ 1..... | 74 |
| ก.14 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 150 มก./ล. เซลล์เริ่มต้น 600 มก./ล. ชุดที่ 2..... | 75 |
| ก.15 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 150 มก./ล. เซลล์เริ่มต้น 600 มก./ล. ชุดที่ 3..... | 76 |
| ก.16 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 200 มก./ล. เซลล์เริ่มต้น 800 มก./ล. ชุดที่ 1..... | 77 |
| ก.17 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 200 มก./ล. เซลล์เริ่มต้น 800 มก./ล. ชุดที่ 2..... | 78 |
| ก.18 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 200 มก./ล. เซลล์เริ่มต้น 800 มก./ล. ชุดที่ 3..... | 79 |
| ก.19 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 10 มก./ล. | 80 |
| ก.20 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 25 มก./ล. | 81 |
| ก.21 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 50 มก./ล. | 82 |
| ก.22 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 100 มก./ล. | 83 |
| ก.23 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 150 มก./ล. | 84 |
| ก.24 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 200 มก./ล. | 85 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1 | ที่ตั้งของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม..... | 4 |
| 2.2 | แผนผังกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม..... | 6 |
| 2.3 | แผนผังกระบวนการบำบัดตะกอนของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม..... | 9 |
| 2.4 | ถังปฏิกรณ์ของระบบบีแอลอาร์..... | 12 |
| 2.5 | การต่อถังปฏิกรณ์ของระบบบีแอลอาร์..... | 13 |
| 2.6 | อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นสารอาหารต่างๆ จากสมการของ Monod | 18 |
| 2.7 | อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นสารอาหารต่างๆ จากสมการของ Lineweaver-Burk | 19 |
| 2.8 | อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นสารอาหารต่างๆ จากสมการของ Hanes | 20 |
| 2.9 | อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นสารอาหารต่างๆ จากสมการของ Hofstee | 21 |
| 3.1 | อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะเทียบกับซีโอดี เมื่อใช้ค่าจลนพลศาสตร์ จากน้ำเสียชุมชนของชลธิพร สุทธิธรรม..... | 29 |
| 3.2 | ความเข้มข้นซีโอดีที่ลดลง ณ เวลาต่างๆ เมื่อค่าซีโอดีเริ่มต้น 200 มก./ล..... | 30 |
| 3.3 | ความเข้มข้นซีโอดีที่ลดลง ณ เวลาต่างๆ เมื่อค่าซีโอดีเริ่มต้น 150 มก./ล..... | 31 |
| 3.4 | ความเข้มข้นซีโอดีที่ลดลง ณ เวลาต่างๆ เมื่อค่าซีโอดีเริ่มต้น 100 มก./ล..... | 31 |
| 3.5 | ความเข้มข้นซีโอดีที่ลดลง ณ เวลาต่างๆ เมื่อค่าซีโอดีเริ่มต้น 50 มก./ล..... | 32 |
| 3.6 | ความเข้มข้นซีโอดีที่ลดลง ณ เวลาต่างๆ เมื่อค่าซีโอดีเริ่มต้น 25 มก./ล..... | 32 |
| 3.7 | ความเข้มข้นซีโอดีที่ลดลง ณ เวลาต่างๆ เมื่อค่าซีโอดีเริ่มต้น 10 มก./ล..... | 33 |
| 3.8 | การประมาณค่ายิลด์ของจุลชีพแบบเฮเทอโรโทรป..... | 35 |
| 3.9 | การหาค่าซีโอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ..... | 36 |
| 3.10 | แผนผังการสร้างแบบจำลองระบบบำบัดโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมด้วย โปรแกรม AQUASIM..... | 38 |
| 4.1 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีกับความเข้มข้น ของนมขาดมันเนย..... | 39 |

| รูปที่ | หน้า | |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2 | ผลของการทดลองการวิเคราะห์ค่าซีไอดีเทียบกับเวลา ของซีไอดีเริ่มต้น 10 มก./ล. และเซลล์เริ่มต้น 100 มก./ล..... | 40 |
| 4.3 | ผลของการทดลองการวิเคราะห์ค่าซีไอดีเทียบกับเวลา ของซีไอดีเริ่มต้น 25 มก./ล. และเซลล์เริ่มต้น 150 มก./ล..... | 40 |
| 4.4 | ผลของการทดลองการวิเคราะห์ค่าซีไอดีเทียบกับเวลา ของซีไอดีเริ่มต้น 50 มก./ล. และเซลล์เริ่มต้น 200 มก./ล..... | 41 |
| 4.5 | ผลของการทดลองการวิเคราะห์ค่าซีไอดีเทียบกับเวลา ของซีไอดีเริ่มต้น 100 มก./ล. และเซลล์เริ่มต้น 400 มก./ล..... | 41 |
| 4.6 | ผลของการทดลองการวิเคราะห์ค่าซีไอดีเทียบกับเวลา ของซีไอดีเริ่มต้น 150 มก./ล. และเซลล์เริ่มต้น 600 มก./ล..... | 42 |
| 4.7 | ผลของการทดลองการวิเคราะห์ค่าซีไอดีเทียบกับเวลา ของซีไอดีเริ่มต้น 200 มก./ล. และเซลล์เริ่มต้น 800 มก./ล..... | 42 |
| 4.8 | อัตราการเกิดปฏิกิริยาของชุดการทดลองที่มีซีไอดีเริ่มต้น 10 มก./ล. และเซลล์เริ่มต้น 100 มก./ล..... | 43 |
| 4.9 | อัตราการเกิดปฏิกิริยาของชุดการทดลองที่มีซีไอดีเริ่มต้น 25 มก./ล. และเซลล์เริ่มต้น 150 มก./ล..... | 43 |
| 4.10 | อัตราการเกิดปฏิกิริยาของชุดการทดลองที่มีซีไอดีเริ่มต้น 50 มก./ล. และเซลล์เริ่มต้น 200 มก./ล..... | 44 |
| 4.11 | อัตราการเกิดปฏิกิริยาของชุดการทดลองที่มีซีไอดีเริ่มต้น 100 มก./ล. และเซลล์เริ่มต้น 400 มก./ล..... | 44 |
| 4.12 | อัตราการเกิดปฏิกิริยาของชุดการทดลองที่มีซีไอดีเริ่มต้น 150 มก./ล. และเซลล์เริ่มต้น 600 มก./ล..... | 45 |
| 4.13 | อัตราการเกิดปฏิกิริยาของชุดการทดลองที่มีซีไอดีเริ่มต้น 200 มก./ล. และเซลล์เริ่มต้น 800 มก./ล..... | 45 |
| 4.14 | ปฏิกิริยาทางชีวภาพในการทดลองหาค่ายึดของน้ำเสีย โรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม..... | 46 |
| 4.15 | ค่ายึดของน้ำเสียโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม..... | 47 |
| 4.16 | ค่าซีไอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ..... | 48 |
| 4.17 | การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์โดยทฤษฎีของ Monod | 49 |

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.18 | ผลการจำลองค่าซีไอดีในถึงปฏิกิริยาต่างๆ ของแบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสีย หนองแขม ด้วยโปรแกรม AQUASIM..... | 53 |
| 4.19 | กราฟแสดงค่าซีไอดีที่ออกจากระบบจริง และค่าซีไอดีออกที่ได้จากโปรแกรม AQUASIM | 54 |
| 4.20 | ผลของการจำลองความเข้มข้นของจุลชีพและของแข็งแขวนลอยในถังเติม อากาศ..... | 55 |



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพที่เป็นที่นิยมทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ ได้แก่ ระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) เนื่องจากเป็นระบบที่ควบคุมง่ายและประสิทธิภาพสูง การออกแบบระบบนี้มักนำค่าจลนพลศาสตร์ของน้ำเสียชุมชนจากต่างประเทศมาใช้ในการออกแบบเนื่องด้วยค่าจลนพลศาสตร์นี้เป็นตัวแปรควบคุมสภาวะต่างๆ ในการทำงานของระบบให้เหมาะสมกับคุณสมบัติของน้ำเสีย เช่น ความเข้มข้นของชีวมวลในถังเติมอากาศ ระยะเวลาเก็บกักตะกอนในระบบ ขนาดของถังปฏิกรณ์ เป็นต้น แต่เนื่องจากน้ำเสียชุมชนของประเทศไทยกับของต่างประเทศมีลักษณะสมบัติที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 1.1 ซึ่งแสดงให้เห็นความแตกต่างของลักษณะน้ำเสียที่เข้าโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมและน้ำเสียของประเทศสหรัฐอเมริกา ดังนั้น งานวิจัยชิ้นนี้จึงเกิดขึ้นเพื่อการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ที่เหมาะสมแก่การนำมาใช้จริงในประเทศไทย โดยใช้น้ำเสียจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมเป็นตัวแทนของน้ำเสียชุมชน

โรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมมีเนื้อที่ประมาณ 54 ไร่ มีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียประมาณวันละ 157,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน มากเป็นอันดับที่ 3 ในกรุงเทพมหานคร ใช้ระบบตะกอนเร่งชนิดวีแอลอาร์ (Vertical Loop Reactor) เนื้อที่ให้บริการประมาณ 44 ตร.กม. ปัจจุบันใหญ่เป็นอันดับที่ 1 ในกรุงเทพมหานคร

ตารางที่ 1.1 ตารางเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์น้ำเสียที่เข้าโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมและน้ำเสียในประเทศสหรัฐอเมริกา

| พารามิเตอร์ | น้ำเสียที่เข้าโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม* (มก./ล.) | น้ำเสียในอเมริกา** (มก./ล.) |
|----------------|---------------------------------------------------|-----------------------------|
| บีโอดี | 40.03 | 110-400 |
| ของแข็งแขวนลอย | 64.93 | 100-350 |
| ทีเคเอ็น | 11.61 | 20-85 |
| ฟอสฟอรัส | 1.97 | 4-15 |
| คลอไรด์ | - | 50-150 |

หมายเหตุ : *ค่าน้ำเสียที่เข้าโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมเป็นค่าเฉลี่ยช่วงปี พ.ศ.2542-2550

** Metcalf & Eddy (2003)

การศึกษาค่าจลนพลศาสตร์นี้จะใช้แบบจำลองระบบเอเอส 1 (ASM 1: Activated Sludge Model 1) และสร้างแบบจำลองของระบบวีแอลอาร์โดยใช้โปรแกรม AQUASIM ค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้นี้จะนำไปใช้ในการประมวลผลของแบบจำลองการบำบัดเปรียบเทียบกับผลการบำบัดจริง เพื่อหาความคาดเคลื่อนและความแตกต่างที่เกิดขึ้น นำไปสู่การสรุปผลและวิจารณ์ความเหมาะสมในการนำค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากงานวิจัยครั้งนี้ ไปใช้ในการออกแบบและปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพในประเทศไทยต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 หาค่าจลนพลศาสตร์ของการบำบัดน้ำเสียชุมชนที่เข้าโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมด้วยระบบการเติมอากาศ

1.2.2 นำค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้มาใช้จำลองระบบบำบัดของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม

1.2.3 เปรียบเทียบและหาความคลาดเคลื่อนของผลจากแบบจำลองและผลการบำบัดจริง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ใช้น้ำเสียจริงจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมและน้ำเสียสังเคราะห์จากนมขาดมันเนยในการทดลอง

1.3.2 การทดลองทั้งหมดทำในถังปฏิริยาแบบแบทช์และใช้ค่าซีโอดีในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ทั้งหมดโดยทำซ้ำอย่างน้อย 3 ค่า

1.3.3 นำสมการจากเอเอสเอ็ม 1 มาใช้ในการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ 2 ค่า ได้แก่

1) อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของจุลชีพแบบเฮเทอโรโทรฟ (Heterotroph maximum specific growth rate; μ_{mH})

2) สัมประสิทธิ์การอิ่มตัวครึ่งหนึ่งของจุลชีพแบบเฮเทอโรโทรฟ (Half-saturation coefficient Heterotroph; K_{SH})

1.3.4 ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโต คือ ยิลด์ของเฮเทอโรโทรฟ (Heterotroph Growth yield; Y_H)

1.3.5 ใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ AQUASIM 2.1b (พัฒนาโดย Peter Reichert : Swiss Federal Institute for environmental science and technology (EAWAG) Switzerland) ในการสร้างแบบจำลองของระบบวีแอลอาร์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ตัวแทนค่าจลนพลศาสตร์การบำบัดแบบใช้ออกซิเจนของน้ำเสียชุมชนในประเทศไทย

1.4.2 สามารถนำค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้ไปใช้อ้างอิงและเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบหรือการปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนของประเทศไทยให้มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น

1.4.3 ทราบความคลาดเคลื่อนของประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสีย เพื่อนำค่าดังกล่าวมาใช้ตรวจสอบหรือปรับปรุง เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงขึ้นหรืออาจใช้ค่าดังกล่าวเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา

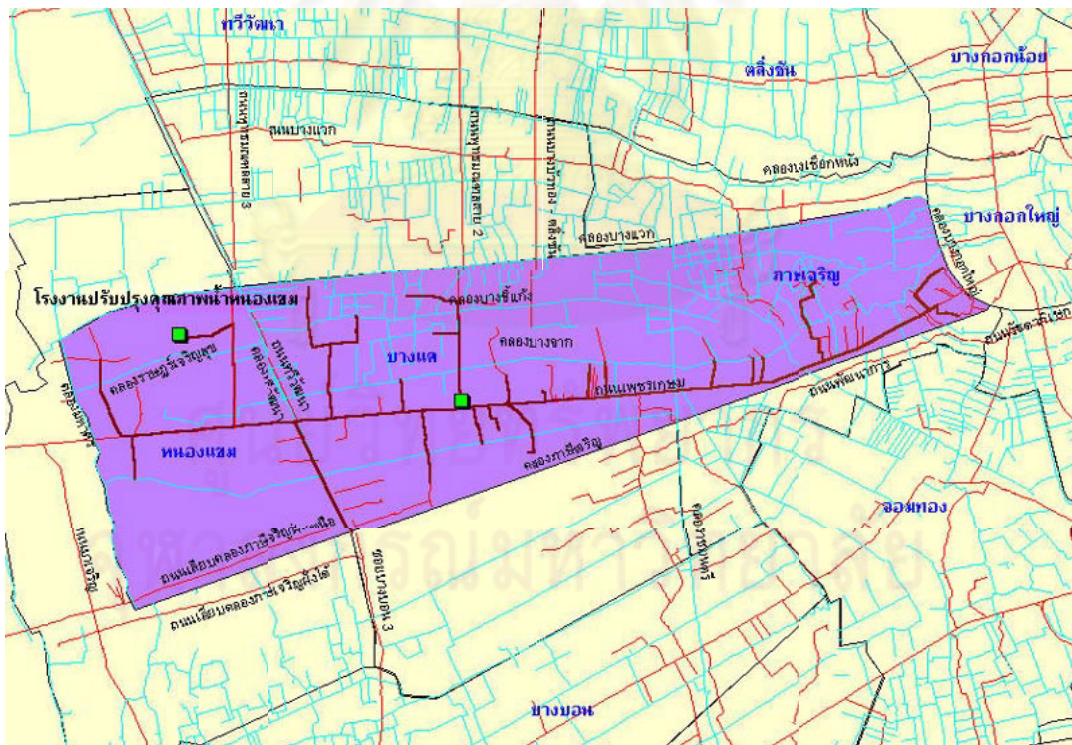
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม

2.1.1 ข้อมูลเบื้องต้น

โรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมตั้งอยู่บริเวณโรงงานกำจัดมูลฝอยหนองแขม ถนนพุทธมณฑลสาย 3 (รูปที่ 2.1) มีเนื้อที่ 54 ไร่ มีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียวันละ 157,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (1 Dry Weather Flow) เป็นระบบบำบัดแบบตะกอนเร่งชนิดวีแอลอาร์ (Vertical Loop Reactor) ที่สามารถกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส น้ำทิ้งหลังการบำบัดระบายลงคลองราษฎร์เจริญสุข ให้บริการครอบคลุมพื้นที่เขตหนองแขม ภาษีเจริญ และบางส่วนของเขตบางแค คิดเป็นพื้นที่ทั้งหมด 44 ตารางกิโลเมตร หรือรองรับจำนวนประชากร 418,000 คน มีรายละเอียดดังตารางที่ 2.1



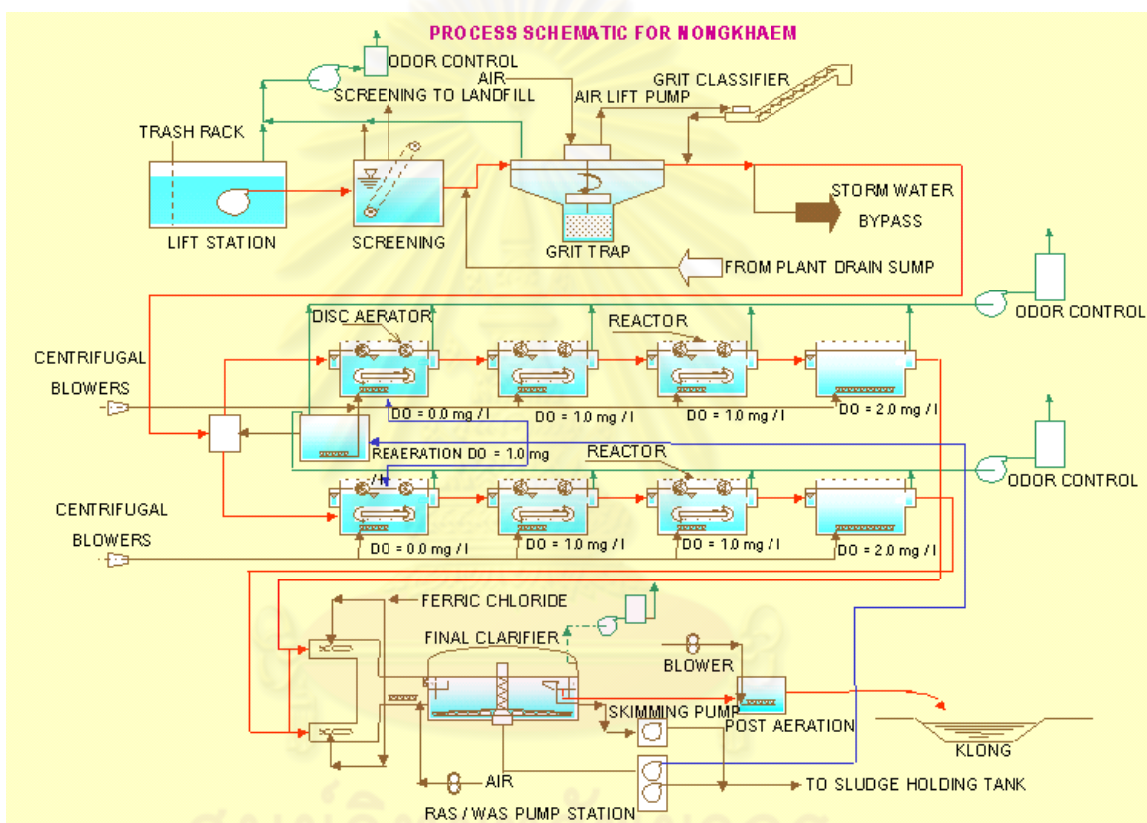
รูปที่ 2.1 ที่ตั้งของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดโครงการของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม

| | |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| พื้นที่บริการ : | 44 ตร.กม. |
| ประชากร : | 418,000 คน |
| เขตการปกครอง : | เขตหนองแขม, ภาษีเจริญ และบางส่วนของเขตบางแค |
| ความยาวท่อรวบรวมน้ำเสีย : | 46.02 กม. |
| อัตราการบำบัดน้ำเสีย : | 157,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน |
| ขนาดพื้นที่โรงบำบัดน้ำเสีย : | 54 ไร่ |
| กระบวนการบำบัดน้ำเสีย : | ระบบบำบัดแบบตะกอนเร่งที่สามารถกำจัดไนโตรเจน และ ฟอสฟอรัสได้ (Activated Sludge Process with Vertical Loop Reactor) |
| ค่าออกแบบรวมก่อสร้าง : | 2,802,757,000.- บาท |
| ค่าเดินระบบ 1 ปีแรก : | 163,434,294.- บาท |
| ค่าฝึกอบรมเจ้าหน้าที่ กทม. : | 4,750,000.- บาท |
| รวมเป็นเงินค่าจ้างเหมา : | 2,970,941,294.- บาท |
| กลุ่มบริษัทผู้รับจ้าง : | กลุ่มบริษัท PREMIER ENTERPRISE PUBLIC COMPANY LIMITED ซึ่งประกอบด้วย 1. บริษัท PREMIER ENTERPRISE PUBLIC COMPANY LIMITED 2. บริษัท PATE ENGINEERS. INC. /LOCKWOOD ANDREWS AND NEWNAM. INC. JOINT VENTURE |
| ค่าควบคุมการก่อสร้าง : | 296,648,580.60 บาท |
| กลุ่มบริษัทวิศวกรที่ปรึกษา : | กลุ่มบริษัท CH2M HILL INTERNATIONAL ENGINEERING, INC. ประกอบด้วย 1. บริษัท CH2M HILL INTERNATIONAL ENGINEERING, INC. 2. บริษัท EPSILON CO.,INC. |

2.1.2 ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม

ปริมาณน้ำเสียที่รวบรวมมายังโรงควบคุมคุณภาพน้ำไหลมารวมที่สถานีสูบน้ำยกระดับ (Lift Station) เพื่อยกน้ำเสียขึ้นสู่ระดับที่สูงกว่า ให้ไหลต่อไปตามแรงโน้มถ่วงของโลกผ่านไปยังระบบบำบัดขั้นต้น (Preliminary Treatment) และระบบบำบัดทางชีววิทยา (Biological Treatment) ดังรูปที่ 2.2 ส่วนตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียจะถูกกำจัดโดยระบบกำจัดกากตะกอนชีวภาพของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม



รูปที่ 2.2 แผนผังกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม

1) ระบบบำบัดขั้นต้น ประกอบด้วย

1.1) ตะแกรงดักขยะแบบหยาบ (Trash Rack Screening) ติดตั้งที่บริเวณทางเข้าของสถานีสูบน้ำเสีย เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับเครื่องสูบน้ำ ระยะห่างระหว่างตะแกรง 50 มิลลิเมตร ความสามารถในการสูบน้ำ 1,385 ลิตร/วินาที เป็นเครื่องสูบน้ำชนิดจุ่มน้ำ (Submersible Pump)

1.2) ตะแกรงดักขยะแบบละเอียด (Fine Screening) เครื่องดักขยะแบบละเอียด ชนิด Rotating Band Screen ซึ่งจะมีการหมุนและฉีดล้างพร้อมกัน ควบคุมการทำงานจาก อุปกรณ์วัดค่าความแตกต่างของระดับน้ำที่ไหลผ่านเครื่องดักขยะ เครื่องดักขยะที่ติดตั้งมีจำนวน 3 เครื่อง และมีตะแกรงดักขยะแบบ Manual สำหรับกรณีฉุกเฉินที่ต้องการผันออกจาก Fine Screening เนื่องจากการหยุดใช้งานหรือซ่อมบำรุง ระยะห่างระหว่างตะแกรง ประมาณ 5 มิลลิเมตร

1.3) ถังแยกกรวดทราย (Grit Trap) มีหน้าที่แยกกรวดทรายที่ปนมากับน้ำเสีย ออกโดยวิธี Vortex ซึ่งประกอบด้วยถังแยกกรวดทรายแบบกลมจำนวน 2 ถัง และใบกวนซึ่งมี หน้าที่ทำให้เกิดการหมุนวนตะกอนกรวดทรายและรวมตัวกันที่บริเวณก้นถัง ตะกอนทรายที่แยกได้ จะถูกสูบออกโดยเครื่องสูบน้ำแบบใช้อากาศยก (Air Lift Pump) เพื่อนำไปกำจัดต่อไป

เนื่องจากระบบบำบัดน้ำเสียถูกออกแบบให้รองรับน้ำเสียได้สูงสุด 235,500 ลบ.ม./วัน (1.5 DWF) สำหรับระยะที่ 1 และเพิ่มขึ้นเป็น 392,500 ลบ.ม./วัน ในระยะที่ 2 ปริมาณ น้ำเสียส่วนเกินจะผันระบายทิ้งหลังจากระบบบำบัดขั้นต้น การควบคุมปริมาณน้ำเสียเพื่อเข้าสู่ ระบบบำบัดทางชีววิทยาโดยการใช้ฝายน้ำล้น น้ำส่วนที่เกินจะไหลสู่รางระบายน้ำรวมกับน้ำทิ้ง จากระบบบำบัดขั้นที่ 1

2) ระบบบำบัดทางชีววิทยา ประกอบด้วย

2.1) ถังเติมอากาศสำหรับตะกอนหมุนเวียน (Reaeration Tank) เติมอากาศ ก่อนที่จะนำจุลินทรีย์หมวนเวียนกลับไปถังเติมอากาศวีแอลอาร์ (คล้ายกับบ่อปรับเสถียรของ ระบบ Contact-stabilization) ค่า DO ที่ออกแบบไว้ในถังนี้ประมาณ 1 มก./ล. ปริมาตรถัง ประมาณ 8,780 ลบ.ม.

2.2) ถังเติมอากาศ (Aeration Tank) มีจำนวน 8 ถัง เป็นถังเติมอากาศชนิดไหล แนวตั้ง (Envirex Vertical Loop Reactors, VLR) จำนวน 6 ถัง ๗ ละประมาณ 6,250 ลบ.ม. ถัง เติมอากาศแบบ VLR 3 ถังแรกของแต่ละชุดประกอบด้วย หัวจ่ายลมแบบ Coarse Bubble แผ่น horizontal baffle และเครื่องเติมอากาศแบบ Surface disc aerator ส่วนถัง เติมอากาศถัง สุดท้ายออกแบบเพื่อจุดประสงค์เป็นถัง Polishing Tank โดยมีการเติมอากาศเฉพาะหัวจ่ายลม เท่านั้น ระบบถังเติมอากาศแบบวีแอลอาร์มีความยืดหยุ่นในการควบคุมการใช้งาน การไหลของ น้ำเสียเป็นแบบ Plug Flow สามารถกำจัดสารประกอบบีโอดี ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส นอกจากนี้ ระบบการหมุนเวียนตะกอนสามารถส่งตรงไปยังถังวีแอลอาร์ทั้ง 3 ถัง ได้โดยตรง ไม่ต้องผ่าน ถัง Reaeration ก็ได้ ค่า DO ที่ออกแบบไว้ในถังเติมอากาศวีแอลอาร์จำนวน 3 ถัง และถังเติม

อากาศสุดท้าย 1 ถึง มีค่า 0.11 และ 2 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งถึงแรกมีสภาวะแบบ Anoxic สามารถเกิด Denitrification บำบัดไนเตรทได้ ส่วนถึงที่เหลือมีสภาวะแบบ Oxic โดย 2 ถึงแรกใช้ บำบัดบีโอดีและถึงสุดท้ายใช้บำบัดแอมโมเนียโดยกระบวนการ Nitrification

2.3) ถังตกตะกอนขั้นสุดท้าย (Final Clarifier) น้ำเสียที่ผ่านจากถังเติมอากาศ จะเข้าสู่ถังตกตะกอนขั้นสุดท้าย เพื่อแยกตะกอนจุลชีพออกจากน้ำเสียที่บำบัดแล้ว น้ำใสด้านบน ไหลออกไปยังรางรับน้ำเพื่อไหลไปจุดปล่อยน้ำทิ้งต่อไป ส่วนตะกอนที่ตกลงมาบริเวณก้นถังจะถูก รวบรวมมายังถังเก็บตะกอน (Sludge Holding Tank) ถังตกตะกอนที่โรงควบคุมคุณภาพน้ำหนอง แวมเป็นถังวงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 51 เมตร ลึกประมาณ 4.6 เมตร จำนวน 3 ถัง ในระยะที่ 1 และอีก 1 ถังในระยะที่ 2 ระยะเวลาที่เก็บสำหรับปริมาณน้ำ 1 DWF ประมาณ 3 ชั่วโมง

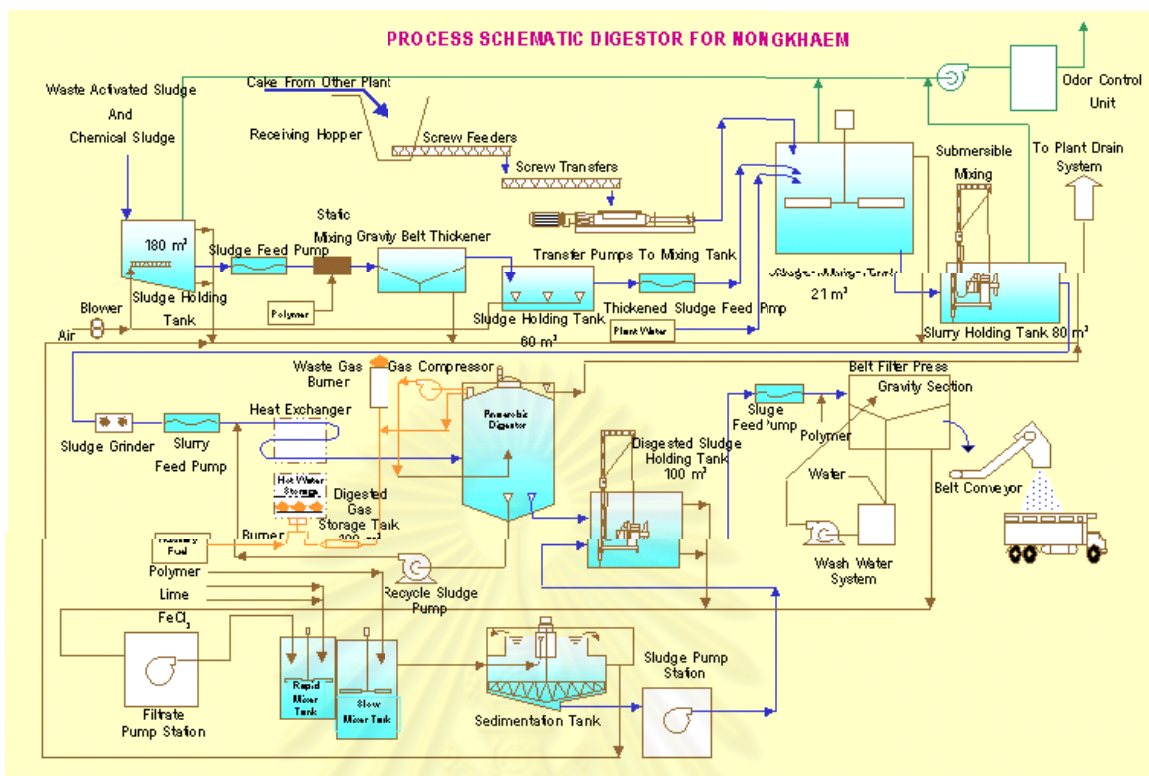
2.4) ระบบจ่ายสารเคมี (Chemical Feed System) ประกอบด้วยการเติมสาร เฟอร์ริคคลอไรด์ ($FeCl_3$) เพื่อกำจัดสารประกอบฟอสฟอรัสในน้ำเสียและการเติมสารประกอบ โซเดียมไฮโปคลอไรด์ (Na_2HClO_3) เพื่อฆ่าเชื้อโรค โดยเติมก่อนที่จะเข้าสู่ถังตกตะกอนขั้นสุดท้าย

2.5). การปล่อยน้ำทิ้งสุดท้าย (Effluent Discharge) น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดและ ไหลล้นจากถังตกตะกอนขั้นสุดท้ายจะถูกเติมอากาศด้วยหัวจ่ายลมแบบ Fine bubble เพื่อเพิ่ม ออกซิเจนในน้ำทิ้ง

3) การกำจัดตะกอน (รูปที่ 2.3) ประกอบด้วย

3.1) ถังกักตะกอน (Sludge Holding Tank) ขนาด 180 ลบ.ม. ตะกอนจุลชีพ 1 เปอร์เซนต์ และตะกอนเคมีจากกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสจะถูกเก็บไว้ในถังขนาด 180 ลูกบาศก์เมตร จำนวน 1 ถัง โดยมีระยะเวลาเก็บกักประมาณ 1.90 ชั่วโมง ภายใน ถังจะถูกกวน โดย Fine bubble diffusers เพื่อป้องกันการเกิดสภาพไร้ออกซิเจนจนทำให้เกิดการปลดปล่อยของ ฟอสฟอรัส

3.2) เครื่องรีดตะกอน (Gravity Belt thickener) จำนวน 2 เครื่อง ตะกอนจุลชีพ 1 เปอร์เซนต์ จะถูกทำให้มีความเข้มข้นที่ 4 เปอร์เซนต์ โดยตะกอนจุลชีพ 1 เปอร์เซนต์ จะผสมกับ โพลีเมอร์ในท่อน Static Mixing ก่อนเข้าสู่การทำให้ตะกอนข้น ปริมาณโพลีเมอร์ที่ใช้อยู่ระหว่าง 3.5 ถึง 5.5 กิโลกรัมโพลีเมอร์ต่อตันตะกอนแห้ง ตะกอนจุลชีพ 4 เปอร์เซนต์ จะถูกเก็บไว้ในถังขนาด 60 ลบ.ม. จำนวน 1 ถัง โดยมีระยะเวลาเก็บกักประมาณ 2.0 ชั่วโมง ภายในถังจะถูกกวนโดย Fine bubble diffusers เพื่อป้องกันการเกิดสภาพไร้ออกซิเจนทำให้เกิดการปลดปล่อยของฟอสฟอรัส



รูปที่ 2.3 แผนผังกระบวนการบำบัดตะกอนของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม

3.3) ถังผสมตะกอน (Sludge Mixing Tank) ตะกอนน้ำเสียจาก 2 แหล่งกำเนิด คือ ตะกอนจุลชีพ 4 เปอร์เซ็นต์ จากโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม-ภาษีเจริญ และตะกอนจุลชีพ 20 เปอร์เซ็นต์ จากโรงควบคุมคุณภาพน้ำอื่นของกทม. ถูกนำมาผสมกันในถังขนาด 21 ลบ.ม. จำนวน 2 ถัง โดยใช้เวลาในการผสมประมาณ 21 นาทีต่อครั้ง ตะกอนที่ผสมแล้วจะมีความเข้มข้นประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์

3.4) ถังกักตะกอน (Slurry Holding Tank) ขนาด 80 ลบ.ม. ตะกอนที่ถูกผสมแล้วจนมีความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ จะถูกเก็บไว้ในถังขนาด 80 ลบ.ม. จำนวน 1 ถัง ก่อนถูกส่งเข้าสู่ถัง Digester ภายในถังเก็บตะกอนนี้จะมีการกวนด้วย Submersible Mixing เพื่อป้องกันการตกตะกอน

3.5) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) ก่อนที่ตะกอนจุลชีพ 10 เปอร์เซ็นต์ จะเข้าสู่ถัง Digester ตะกอนจะต้องถูกทำให้ร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 35 °C โดยการผ่านตะกอนเข้าสู่ระบบแลกเปลี่ยนความร้อน แหล่งพลังงานที่ใช้เพิ่มอุณหภูมิสามารถใช้จากน้ำมันเชื้อเพลิงหรือก๊าซที่เกิดจากการหมักในถัง Digester

3.6) ถังหมักตะกอนแบบไร้ออกซิเจน (Anaerobic Digester) มีจำนวน 2 ถัง แต่ละถังมีความจุประมาณ 12,250 ลูกบาศก์เมตร การเดินระบบถังหมักตะกอนทั้งสองถังสามารถ

เดินได้ทั้งแบบอนุกรมหรือขนานในกรณีที่เดินระบบแบบอนุกรมจะใช้ระยะเวลาในการหมักประมาณ 19 วัน ก๊าซที่เกิดขึ้นในถังหมักส่วนหนึ่งจะถูกนำไปใช้ในถังหมักเพื่อกวนตะกอนและบางส่วนนำไปใช้เป็นพลังงานในการอุ่นตะกอน ก๊าซส่วนเกินจะถูกเผาทิ้งไป ตะกอนที่ผ่านการหมักแล้วจะถูกนำมาเก็บไว้ในถัง

3.7) ถังกักตะกอนที่ผ่านการหมัก (Digested Sludge Holding Tank) ขนาด 100 ลูกบาศก์เมตร จำนวน 1 ถัง ตะกอนที่ผ่านการหมักแล้วจะถูกนำมาเก็บไว้ในถังนี้ก่อนถูกส่งไปรีดน้ำที่เครื่อง Belt Filter Press

3.8) เครื่องรีดตะกอน (Belt Filter Pres) จะทำหน้าที่รีดน้ำออกจากตะกอนโดยตะกอนที่หมักแล้วจะถูกผสมกับโพลีเมอร์ก่อนเข้าเครื่องรีด ตะกอนที่ผ่านการรีดจะมีความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์

4) ระบบกำจัดกลิ่น (Odor Control System) ประกอบด้วย สถานีสูบน้ำเสียหลักมีระบบกำจัดกลิ่นแบบเปียก (Wet Scrubber) ส่วนบ่อเติมอากาศและถังตกตะกอนมีระบบกำจัดกลิ่นโดยใช้ถ่านกัมมันต์ (Dry Activated Carbon Scrubber)

2.1.3 ลักษณะของน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบบำบัดน้ำเสีย

ลักษณะของน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมในช่วงปี พ.ศ. 2546-2549 สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.2 และรายละเอียดแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 ตารางสรุปลักษณะน้ำเสียและน้ำทิ้งของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม

| พารามิเตอร์ | ขาเข้า (มก./ล.) | ขาออก (มก./ล.) |
|--------------------|-----------------|----------------|
| BOD | 35-46 | ~ 5 |
| SS | 60-76 | < 10 |
| TP | ~ 2 | < 1 |
| TKN | 10-13 | < 3 |
| NH ₄ -N | ~ 7.5 | ~ 0.6 |
| NO ₃ -N | ~ 1.8 | 4-7 |
| TN | ~ 13.5 | 6-11 |
| DO | - | ~ 6.5 |

ตารางที่ 2.3 ค่าพารามิเตอร์ในน้ำเสียที่เข้าและออกจากโรงบำบัดน้ำเสียหนองแขม

| พ.ศ. | Flow ลบ.ม./ วัน | BOD เข้า มก./ล. | BOD ออก มก./ล. | BOD Loading กก./วัน | SS เข้า มก./ล. | SS ออก มก./ล. | TP เข้า มก./ล. | TP ออก มก./ล. | TKN เข้า มก./ล. | TKN ออก มก./ล. | NH ₄ -N เข้า มก./ล. | NH ₄ -N ออก มก./ล. | NO ₃ -N เข้า มก./ล. | NO ₃ -N ออก มก./ล. | TN เข้า มก./ล. | TN ออก มก./ล. | DO ออก มก./ล. | ปริมาณ สลัดจ์ที่ ลบ.ม./วัน |
|---------|-----------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|----------------------------------|
| 2546 | 88,245 | 45.43 | 4.98 | 3,972.84 | 71.49 | 5.42 | 2.11 | 0.85 | 12.54 | 1.90 | 7.80 | 0.67 | 2.08 | 8.68 | 14.59 | 10.60 | 6.76 | 15.34 |
| 2547 | 110,652 | 41.77 | 5.23 | 4,465.64 | 61.49 | 7.16 | 1.89 | 0.83 | 12.83 | 2.11 | 8.10 | 0.60 | 1.83 | 6.86 | 14.41 | 8.80 | 6.41 | 14.21 |
| 2548 | 103,657 | 35.92 | 5.52 | 3,446.16 | 60.67 | 9.18 | 2.09 | 0.99 | 10.82 | 1.73 | 7.84 | 0.71 | 1.71 | 6.23 | 12.42 | 7.38 | 6.31 | 15.99 |
| 2549 | 122,965 | 44.26 | 5.00 | 5,233.47 | 75.99 | 8.73 | 2.04 | 0.75 | 10.90 | 1.76 | 6.63 | 0.56 | 1.56 | 4.82 | 12.40 | 6.73 | 6.15 | 25.55 |
| 2550 | 124,423 | 32.78 | 3.79 | 3,965.23 | 55.03 | 8.04 | 1.74 | 0.89 | 10.95 | 1.53 | 7.13 | 0.43 | 0.65 | 5.05 | 11.76 | 6.88 | 6.24 | 35.98 |
| เฉลี่ย | 109,988 | 40.03 | 4.90 | 4,216.67 | 64.93 | 7.71 | 1.97 | 0.86 | 11.61 | 1.81 | 7.50 | 0.59 | 1.57 | 6.33 | 13.12 | 8.08 | 6.37 | 21.41 |
| มาตรฐาน | - | - | ≤ 20 | - | - | ≤ 30 | - | ≤ 2 | - | - | - | - | - | ≤ 3 | - | ≤ 10 | ≥ 5 | - |

ที่มา: สำนักงานการจัดการคุณภาพน้ำ, 2551

หมายเหตุ: BOD (Biochemical Oxygen Demand) คือ ปริมาณออกซิเจนที่แบคทีเรียต้องการใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์

COD (Chemical Oxygen Demand) คือ ปริมาณออกซิเจนที่ต้องการใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์

DO (Dissolved Oxygen) คือ ออกซิเจนละลายน้ำ

SS (Suspended Solids) คือ ของแข็งแขวนลอย

TP (Total Phosphorus) คือ ฟอสฟอรัสทั้งหมด

TN (Total Nitrogen) คือ ไนโตรเจนทั้งหมด ประกอบด้วยเจตาไนโตรเจน (TKN) และไนเตรทไนโตรเจน (NO₃-N)

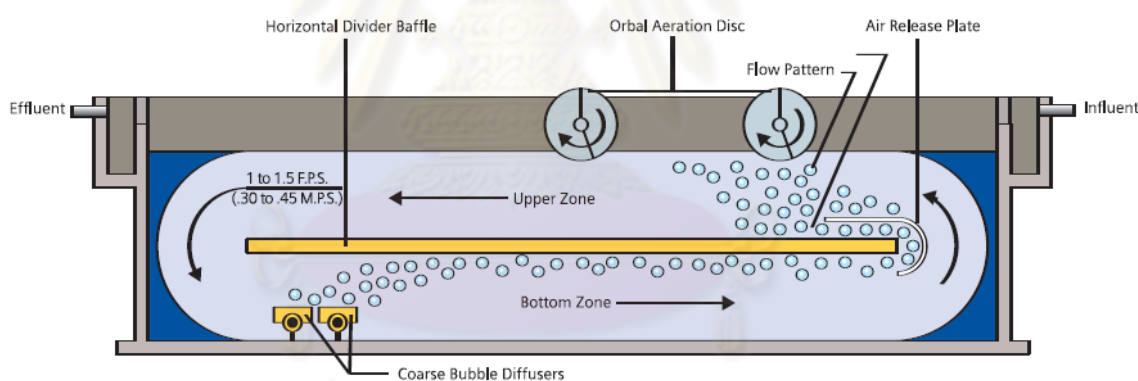
TKN (Total Kjeldahl Nitrogen) คือ สารอินทรีย์ไนโตรเจนทั้งหมดและแอมโมเนียไนโตรเจน

จากข้อมูลทีกล่าวมาจะเห็นว่า น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีคุณภาพที่ดีขึ้น ผ่านค่ามาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษทั้งค่า BOD (≤ 20 มก./ล.), ค่า SS (≤ 30 มก./ล.) และ ค่า TKN (≤ 35 มก./ล.) แต่ปริมาณ $\text{NO}_3\text{-N}$ ที่ออกจากระบบมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากสัดส่วน BOD:N ไม่เหมาะสมจึงไม่สามารถบำบัด $\text{NO}_3\text{-N}$ ได้

2.2 ระบบบำบัดน้ำเสียวีแอลอาร์

2.2.1 ข้อมูลทั่วไป

ระบบวีแอลอาร์ (Vertical Loop Reactor) เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่มีลักษณะคล้ายกับระบบคลองวนเวียน (Oxidation ditch) ในแนวตั้ง โดยอาศัยแผ่นกั้นแนวนอน (Horizontal baffle) แบ่งแยกระหว่างส่วนบนกับส่วนล่าง ระบบนี้ประกอบไปด้วยถังปฏิกรณ์รูปสี่เหลี่ยมต่อแบบอนุกรม ที่มี Disc aerator ไว้สำหรับกวนผสมและมี Coarse bubble diffuser สำหรับเติมอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



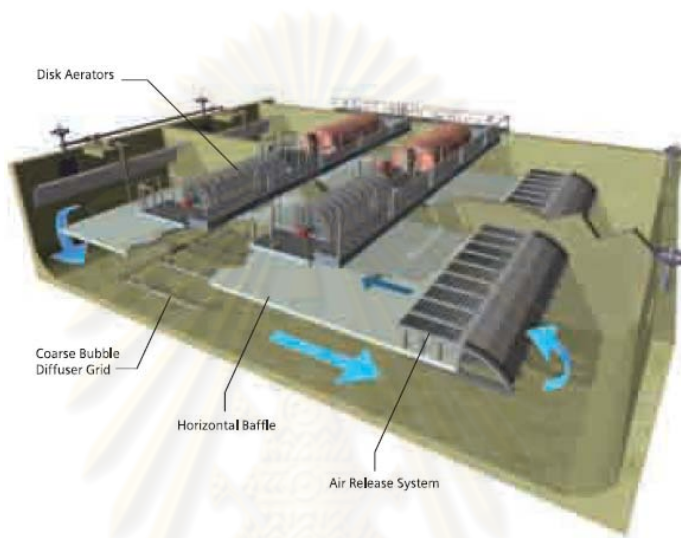
รูปที่ 2.4 ถังปฏิกรณ์ของระบบวีแอลอาร์

2.2.2 การทำงานของระบบวีแอลอาร์

การเดินระบบบำบัดน้ำเสียวีแอลอาร์จะเป็นแบบอนุกรม โดยมีถังปฏิกรณ์ตั้งแต่สองถึงเป็นต้นไปต่อกันในแนวด้านข้างดังรูปที่ 2.5 ถังปฏิกรณ์แรกใช้เป็นถังกำจัดไนเตรท (Denitrification) มีระดับออกซิเจนละลายไกล้ๆ ศูนย์ ส่วนถังปฏิกรณ์สุดท้ายจะเดินระบบให้มีระดับออกซิเจนละลายมากกว่า 2 มก./ล ขึ้นไปเพื่อบำบัดแอมโมเนีย (Nitrification)

ระบบวีแอลอาร์ส่วนใหญ่จะออกแบบให้มีความลึกมากกว่า 20 ฟุตขึ้นไป โดยติดตั้งแผ่นกั้นแนวนอนอยู่ตรงกึ่งกลางของระดับความลึก ซึ่งจะทำให้ส่วนบนของถังและส่วนล่างของถังมีความลึกประมาณ 10 ฟุต ในส่วนของ Disc aerator หรือ Aeration disc ที่อยู่ส่วนบนของถัง

ทำหน้าที่กวนผสมโดยมีรูปแบบที่เรียกว่า “Over and under” ที่มีทิศทางการไหลของน้ำส่วนบนตรงข้ามกับทิศทางการไหลของน้ำส่วนล่าง การเติมอากาศให้กับระบบจะอาศัย Coarse bubble diffuser ซึ่งอยู่บริเวณส่วนล่างของถัง แผ่นกั้นแนวนอนจะช่วยป้องกันไม่ให้ฟองอากาศขึ้นสู่ผิวน้ำได้โดยตรง แต่จะให้ฟองอากาศเคลื่อนที่ไปตามความยาวของถังก่อน แล้วค่อยปล่อยออกทางแผ่นระบายอากาศ (Air release plate) ทำให้ประสิทธิภาพในการเติมออกซิเจนสูงขึ้น



รูปที่ 2.5 การต่อถังปฏิกรณ์ของระบบวีแอลอาร์

2.3 การศึกษาค่าจลนพลศาสตร์

ใช้แบบจำลองระบบเอเอสซึ่งสร้างขึ้นโดย IAWPRC (International Association on Water Pollution Research and Control) นั้น โดยแบบจำลองระบบเอเอสเอ็ม 1 (ASM 1) ถือเป็นแบบจำลองตัวแรกที่ IAWPRC คิดค้นขึ้น ซึ่งตีพิมพ์ในปี ค.ศ. 1987 จนถึงปัจจุบันเป็นเวลาร่วม 20 ปีแล้วที่แบบจำลองระบบเอเอส 1 ยังคงเป็นที่ยอมรับและนิยมใช้อย่างแพร่หลายในงานวิจัยต่างๆ มากมาย อีกทั้งยังเป็นแบบจำลองพื้นฐานในการนำไปใช้พัฒนาปรับปรุงแบบจำลองอื่นๆ ด้วย แสดงให้เห็นถึงความถูกต้องและน่าเชื่อถือของแบบจำลองนี้ ปัจจุบันแบบจำลองระบบเอเอสนั้น ได้ตีพิมพ์ออกมาแล้ว 3 รุ่นด้วยกัน ซึ่งใช้อธิบายขอบเขตของกระบวนการทางชีวภาพที่แตกต่างกัน ดังนี้

1) **แบบจำลองระบบเอเอสเอ็ม 1 (ASM 1)** เป็นแบบจำลองพื้นฐาน ซึ่งมีความซับซ้อนน้อยที่สุดและเป็นพื้นฐานในการพัฒนาต่อยอดของแบบจำลองระบบเอเอสเอ็มอื่นๆ โดยอธิบายถึงกระบวนการทางชีวภาพต่างๆ ในระบบเอเอสเอ็มรวมถึงการกำจัดไนโตรเจนทางชีวภาพ

2) **แบบจำลองระบบเอเอสเอ็ม 2 (ASM 2)** เป็นส่วนขยายแบบจำลองระบบเอเอสเอ็ม 1 ซึ่งจะมีความซับซ้อนขึ้น โดยเพิ่มกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพเข้าไป

3) **แบบจำลองระบบเอเอสเอ็ม 2d (ASM 2d)** เป็นส่วนขยายเพิ่มเติมจากแบบจำลองระบบเอเอสเอ็ม 2 ซึ่งจะมีความซับซ้อนยิ่งขึ้นไปอีก โดยเพิ่มการอธิบายกระบวนการดีไนตริฟิเคชันด้วยจุลชีพในกลุ่ม PAOs เข้าไป

4) **แบบจำลองระบบเอเอสเอ็ม 3 (ASM 3)** ถือเป็นแบบจำลองพื้นฐานตัวใหม่ แทนที่แบบจำลองระบบเอเอสเอ็ม 1 ซึ่งจะนำไปใช้ในการพัฒนาแบบจำลองของระบบเอเอสเอ็มในยุคต่อไป โดยแบบจำลองตัวนี้จะอธิบายกระบวนการทางชีวภาพต่างๆ เช่นเดียวกับแบบจำลองระบบเอเอสเอ็ม 1 แต่ได้ทำการปรับแก้ข้อด้อยที่พบในแบบจำลองเดิม

งานวิจัยชิ้นนี้นำเอาสมการจากเอเอสเอ็ม 1 (แสดงในตารางที่ 2.4) มาใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของระบบชีวแอสคาร์เพื่อวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาเฉพาะตัวแปรของจุลชีพในกลุ่มเฮเทอโรโทรปเท่านั้น ซึ่งแบบจำลองระบบเอเอส 1 ใช้อธิบายกระบวนการที่เกิดขึ้นได้อย่างเพียงพอ อีกทั้งยังเป็นแบบจำลองที่มีความซับซ้อนไม่มาก และสามารถทำความเข้าใจได้ง่าย นอกจากนี้ยังเป็นแบบจำลองที่ได้รับการยอมรับและถูกนำไปใช้ในงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยชิ้นนี้เป็นจำนวนมาก ด้วยเหตุนี้จึงเลือกใช้แบบจำลองระบบเอเอสเอ็ม 1 ในการทำงานวิจัยชิ้นนี้

2.3.1 การหาค่าจลนพลศาสตร์

การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม AQUASIM นั้น ข้อมูลที่สำคัญในการสร้างแบบจำลอง คือ สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ถูกนำมาใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดทางชีวภาพที่สนใจ โดยในงานวิจัยชิ้นนี้จะอ้างอิงสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจุลชีพแบบเฮเทอโรโทรปจากแบบจำลองระบบเอเอสเอ็มมาใช้ในการสร้างแบบจำลองของระบบชีวแอสคาร์ โดยสมการหลักๆ ที่สนใจ ได้แก่ สมการอัตราการเจริญเติบโตของจุลชีพแบบเฮเทอโรโทรป (r_{GX}) สมการอัตราการสลายตัวของจุลชีพแบบเฮเทอโรโทรป (r_{DX}) และสมการอัตราการกำจัดสารอาหาร (r_S) สมการทางจลนพลศาสตร์ทั้งหมดของแบบจำลองระบบเอเอส 1 แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สมการทางจลนพลศาสตร์และปริมาณสารสัมพันธ์ของกระบวนการต่างๆ ในแบบจำลองระบบเอเอสเอ็ม 1

| Component → | | <i>i</i> | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | Process Rate, ρ_j [ML ⁻³ T ⁻¹] | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>j</i> | Process ↓ | <i>S_i</i> | <i>S_s</i> | <i>X_i</i> | <i>X_s</i> | <i>X_{B,H}</i> | <i>X_{B,A}</i> | <i>X_P</i> | <i>S_O</i> | <i>S_{NO}</i> | <i>S_{NH}</i> | <i>S_{ND}</i> | <i>X_{ND}</i> | <i>S_{ALK}</i> | | | |
| 1 | Aerobic growth of heterotrophs | | $-\frac{1}{Y_H}$ | | | 1 | | | | $-\frac{1-Y_H}{Y_H}$ | | $-i_{XB}$ | | | $\frac{i_{XB}}{14}$ | $\hat{\mu}_H \left(\frac{S_s}{K_s + S_s} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) X_{B,H}$ | |
| 2 | Anoxic growth of heterotrophs | | $-\frac{1}{Y_H}$ | | | 1 | | | | $-\frac{1-Y_H}{2.86 Y_H}$ | | $-i_{XB}$ | | | $\frac{1-Y_H}{14 \cdot 2.86 Y_H}$ $-\frac{i_{XB}}{14}$ | $\hat{\mu}_H \left(\frac{S_s}{K_s + S_s} \right) \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right)$ $\left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \eta_g X_{B,H}$ | |
| 3 | Aerobic growth of autotrophs | | | | | | 1 | | | $-\frac{4.57}{Y_A} + 1$ | | $-i_{XB} - \frac{1}{Y_A}$ | | | $-\frac{i_{XB}}{14} - \frac{1}{7 Y_A}$ | $\hat{\mu}_A \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,A} + S_O} \right) X_{B,A}$ | |
| 4 | 'Decay' of heterotrophs | | | | $1-f_p$ | -1 | | f_p | | | | | $i_{XB} - f_p i_{XP}$ | | | $b_H X_{B,H}$ | |
| 5 | 'Decay' of autotrophs | | | | $1-f_p$ | | -1 | f_p | | | | | $i_{XB} - f_p i_{XP}$ | | | $b_A X_{B,A}$ | |
| 6 | Ammonification of soluble organic nitrogen | | | | | | | | | | | 1 | -1 | | $\frac{1}{14}$ | $k_a S_{ND} X_{B,H}$ | |
| 7 | 'Hydrolysis' of entrapped organics | | 1 | | | -1 | | | | | | | | | | $k_h \frac{X_s / X_{B,H}}{K_x + (X_s / X_{B,H})} \left[\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right]$ $+ \eta_h \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) X_{B,H}$ | |
| 8 | 'Hydrolysis' of entrapped organics nitrogen | | | | | | | | | | | | 1 | -1 | | $\rho_l (X_{ND} / X_s)$ | |
| Observed Conversion Rates [ML ⁻³ T ⁻¹] | | $r_i = \sum_j v_{ij} \rho_j$ | | | | | | | | | | $r_i = \sum_j v_{ij} \rho_j$ | | | | | |
| Stoichiometric Parameters: Heterotrophic yield: Y_H Autotrophic yield: Y_A Fraction of biomass yielding particulate products: f_p Mass N/Mass COD in biomass: i_{XB} Mass N/Mass COD in products from biomass: i_{XP} | | Soluble inert organic matter [M(COD)L ⁻¹] | Readily biodegradable substrate [M(COD)L ⁻¹] | Particulate inert organic matter [M(COD)L ⁻¹] | Slowly biodegradable substrate [M(COD)L ⁻¹] | Active heterotrophic biomass [M(COD)L ⁻¹] | Active autotrophic biomass [M(COD)L ⁻¹] | Particulate products arising from biomass decay [M(COD)L ⁻¹] | Oxygen (negative COD) [M(COD)L ⁻¹] | Nitrate and nitrite nitrogen [M(N)L ⁻¹] | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | Kinetic Parameters: Heterotrophic growth and decay: $\hat{\mu}_H, K_s, K_{O,H}, K_{NO}, b_H$ Autotrophic growth and decay: $\hat{\mu}_A, K_{NH}, K_{O,A}, b_A$ Correction factor for anoxic growth of heterotrophs: η_g Ammonification: k_a Hydrolysis: k_h, K_x Correction factor for anoxic hydrolysis: η_h |

สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่นำมาใช้ในการสร้างแบบจำลอง 3 สมการ แสดงดังนี้

1) สมการอัตราการเจริญเติบโตของจุลชีพแบบเฮเทอโรโทรป (r_{GX}) งานวิจัยชิ้นนี้เป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งใช้จุลชีพแบบเฮเทอโรโทรปและใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) ดังนั้น สมการอัตราการเจริญเติบโตของจุลชีพจึงได้มาจากสมการ Process Rate ในแถวที่ 1 Aerobic growth of heterotrophs คู่กับตัวคูณ (1) จากคอลัมน์ที่ 5 Active heterotrophic biomass ($X_{B,H}$) ในตารางที่ 2.4 ได้สมการดังนี้

$$r_{GX} = \mu_{mH} \left(\frac{S_s}{K_s + S_s} \right) \left(\frac{S_o}{K_{O,H} + S_o} \right) X_{B,H} \quad (1)$$

โดยที่ μ_{mH} = อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของจุลชีพ (ชม.⁻¹)

K_s = สัมประสิทธิ์การอิ่มตัวครึ่งหนึ่งของจุลชีพ (มก./ล.)

$K_{O,H}$ = สัมประสิทธิ์การอิ่มตัวครึ่งหนึ่งของออกซิเจน (มก./ล.)

S_s = ความเข้มข้นของสารอาหารละลายน้ำ (มก./ล.)

S_o = ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)

$X_{B,H}$ = ความเข้มข้นของตะกอนจุลชีพเฮเทอโรโทรป (มก./ล.)

การนำสมการดังกล่าวไปใช้งานนั้น ตัวแปรที่จะใช้จากการทดลองนั้นมีถึง 3 ค่า ได้แก่ ความเข้มข้นของสารอาหารละลายน้ำ (S_s), ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำ (S_o) และความเข้มข้นของตะกอนจุลชีพเฮเทอโรโทรป ($X_{B,H}$) ทำให้การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์มีความยากลำบาก ดังนั้น เพื่อให้การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์มีความสะดวกจึงสมมติให้ในระบบมีปริมาณการเติมอากาศที่สูงมากกว่าค่า $K_{O,H}$ มากๆ ซึ่งค่า $K_{O,H}$ ที่ 20 °C จะเท่ากับ 0.1 มก.-ออกซิเจน/ล. (Grady, Daigger และ Lim, 1999) ดังนั้น จะทำให้พจน์ $K_{O,H} + S_o$ เท่ากับ S_o และสามารถลดรูปสมการที่ (1) ได้ เป็นดังนี้

$$r_{GX} = \mu_{mH} \left(\frac{S_s}{K_s + S_s} \right) X_{B,H} \quad (2)$$

สมการที่ได้นี้จะนำไปใช้แทนสมการที่ (1) ซึ่งจะช่วยให้การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์สามารถทำได้ง่าย เนื่องจากตัวแปรที่จะใช้จากการทดลองนั้นเหลือเพียง 2 ค่า

คือ ความเข้มข้นของสารอาหารละลายน้ำ (S_s) และความเข้มข้นของตะกอนจุลชีพเฮเทอโรโทรฟ ($X_{B,H}$)

2) สมการอัตราการสลายตัวของจุลชีพแบบเฮเทอโรโทรฟ (r_{DX}) จากตารางที่ 2.4 สมการนี้ได้มาจากสมการ Process Rate ในแถวที่ 4 Decay of heterotrophs คู่กับตัวคูณ (-1) จากคอลัมน์ที่ 5 Active heterotrophic biomass ($X_{B,H}$) ได้สมการดังนี้

$$r_{DX} = -b_H X_{B,H} \quad (3)$$

โดยที่ b_H = อัตราการสลายตัวจำเพาะของจุลชีพแบบเฮเทอโรโทรฟ (ชม.⁻¹)

3) สมการอัตราการกำจัดสารอาหาร (r_s) จากตารางที่ 2.4 สมการนี้ได้มาจากสมการ Process Rate ในแถวที่ 1 Aerobic growth of heterotrophs คู่กับตัวคูณ ($-1/Y_H$) จากคอลัมน์ที่ 2 Readily biodegradable substrate (S_s) ได้สมการดังนี้

$$r_s = -\frac{u_{mH}}{Y_H} \left(\frac{S_s}{K_s + S_s} \right) \left(\frac{S_o}{K_{o,H} + S_o} \right) X_{B,H} \quad (4)$$

และในทำนองเดียวกันกับสมการที่ (1) สามารถลดรูปสมการที่ (4) ได้ เป็นดังนี้

$$r_s = -\frac{u_{mH}}{Y_H} \left(\frac{S_s}{K_s + S_s} \right) X_{B,H} \quad (5)$$

โดยที่ Y_H = ยิลด์ของเฮเทอโรโทรฟ (มก.-วีเอสเอส/มก.-ซีไอดี)

สมการที่ (2), (3) และ (5) เป็นสมการที่จะนำไปใช้ในโปรแกรม AQUASIM เพื่อการวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองต่อไป

2.3.2 การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์

สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์โดยใช้กราฟข้อมูลการทดลองมาวิเคราะห์นั้น มี 4 สมการได้แก่ สมการของ Monod, Lineweaver-Burk, Hanes และ Hofstee มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

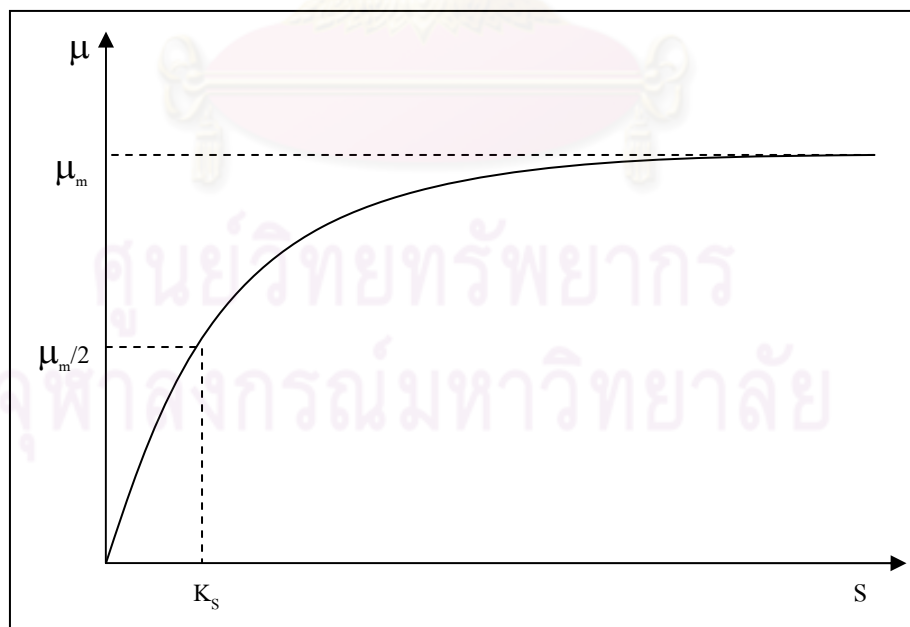
1) สมการของ Monod (Grady, Daigger และ Lim, 1999)

เป็นสมการที่ได้จากการทดลอง ได้รับการยอมรับและเป็นที่ยอมรับใช้ในการวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ มีสมการดังนี้

$$\mu = \frac{1}{x} r_{GX} = \frac{\mu_m \cdot S}{K_s + S} \quad (6)$$

กราฟที่ได้จากสมการที่ (6) จะมีลักษณะดังรูปที่ 6 เมื่อหาค่าของ μ_m ในกราฟได้ จะสามารถประมาณค่า K_s ได้โดย K_s เท่ากับค่าความเข้มข้น (S) ที่ทำให้ได้ค่า $\mu = \mu_m/2$

การหาค่า μ_m และ K_s ในรูปแบบนี้ จำเป็นต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูลแบบไม่เป็นเชิงเส้นได้ (Non-linear relationship)



รูปที่ 2.6 อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นสารอาหารต่างๆ จากสมการของ Monod

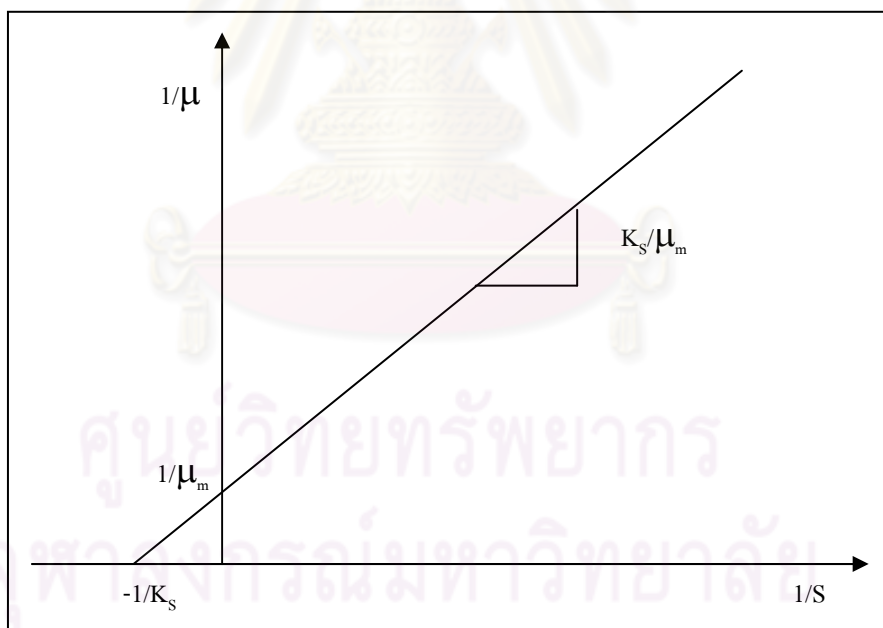
2) สมการของ Lineweaver-Burk (Grady, Daigger และ Lim, 1999)

มาจากการนำสมการของ Monod มาหาส่วนกลับ ได้สมการดังนี้ (รูปที่ 2.7)

$$\frac{1}{u} = \frac{1}{u_m} + \frac{K_s}{u_m} \cdot \left(\frac{1}{S} \right) \quad (7)$$

ข้อดี คือ สามารถหาค่าจลนพลศาสตร์ (K_s) ได้จากจุดตัดบนแกน X และค่าความชันของกราฟ

ข้อเสียของสมการนี้ คือ ข้อมูลที่ได้มีการกระจายตัวที่ไม่ดี โดยไปรวมกลุ่มอยู่แค่สองตำแหน่ง กล่าวคือ ข้อมูลที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำจะรวมตัวอยู่ใกล้กับตำแหน่งจุดตัดแกน Y เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่มีความเข้มข้นของสารอาหารสูงทำให้การทดลองวิเคราะห์ค่าในบริเวณนี้สามารถหาได้ง่ายและมีความถูกต้องสูง ส่วนข้อมูลที่มีความคลาดเคลื่อนสูงจะอยู่ไกลออกไปที่ปลายเส้นกราฟ เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่มีความเข้มข้นของสารอาหารต่ำ



รูปที่ 2.7 อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นสารอาหารต่างๆ จากสมการของ Lineweaver-Burk

3) สมการของ Hanes (Grady, Daigger และ Lim, 1999)

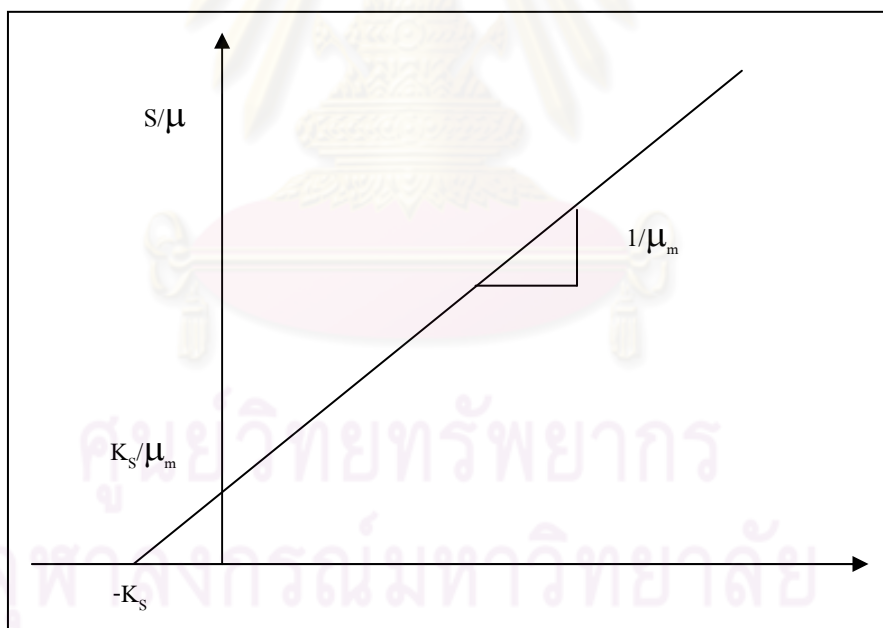
สมการนี้มาจากการนำสมการของ Lineweaver-Burk มาปรับแก้ลดความคลาดเคลื่อนของสมการ โดยการคูณด้วย S เข้าไปในสมการ ซึ่งจะได้สมการที่ (8) ออกมา

$$\frac{S}{u} = \frac{1}{u_m} \cdot S + \frac{K_s}{u_m} \quad (8)$$

สมการที่ได้นี้จะอยู่ในรูปของสมการเส้นตรง แต่ให้ค่าที่แม่นยำมากขึ้น อันเนื่องมาจากการกระจายตัวที่ดีของข้อมูลตลอดเส้นกราฟ โดยไม่ไปรวมตัวตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง กราฟที่ได้จากสมการนี้มาจากอัตราส่วนของความเข้มข้นสารอาหารต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา (S/μ) กับความเข้มข้นสารอาหาร (S) ดังรูปที่ 2.8 การหาค่าจลนพลศาสตร์จากสมการนี้ หาได้จากจุดตัดแกน Y และค่าความชัน

ข้อดีของสมการนี้ คือ ข้อมูลที่ได้มีการกระจายตัวที่ดี ทำให้กราฟที่ได้มีความแม่นยำกว่ากราฟของ Lineweaver-Burk และได้ค่าความชันที่ถูกต้องกว่า โดยเฉพาะเมื่อใช้คอมพิวเตอร์ในการสร้างกราฟจะให้ข้อมูลที่ดียิ่งขึ้น

ข้อเสีย คือ ค่าที่ได้จากจุดตัดแกน Y อยู่ใกล้จุด (0,0) มากทำให้อ่านค่าจากกราฟได้ยาก แต่สามารถแก้ไขได้โดยการใช้คอมพิวเตอร์สร้างกราฟและทำการถดถอยเชิงเส้น



รูปที่ 2.8 อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นสารอาหารต่างๆ จากสมการของ Hanes

4. สมการของ Hofstee (Grady, Daigger และ Lim, 1999)

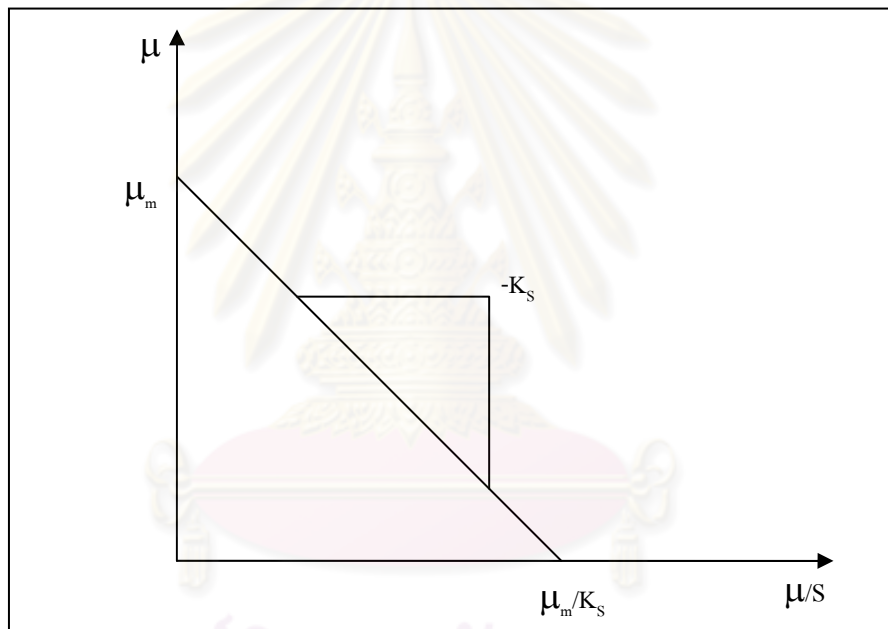
มาจากการนำสมการของ Monod มาคูณกับพจน์ $(K_s + S)/S$ ได้สมการดังนี้ (รูปที่ 2.9)

$$u \cdot \left(\frac{K_s + S}{S} \right) = u_m \quad (9)$$

จะได้
$$u = u_m - K_s \cdot \left(\frac{u}{S} \right) \quad (10)$$

ข้อดีของสมการนี้ คือ ข้อมูลที่ได้มีการกระจายตัวดีและสามารถร่างเส้นกราฟได้เอง โดยไม่ต้องใช้คอมพิวเตอร์ช่วย

ข้อเสีย คือ เส้นกราฟที่ได้จะให้ค่าของ μ_m อยู่บนจุดตัดแกน X และ Y ทำให้ใช้คอมพิวเตอร์สร้างการถดถอยเชิงเส้นไม่ได้



รูปที่ 2.9 อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นสารอาหารต่างๆ จากสมการของ Hofstee

สมการในการวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ทั้ง 4 สมการนี้ ต่างก็มีข้อดี-เสียแตกต่างกันไป โดยในงานวิจัยขั้นนี้ได้เลือกสมการที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ ได้แก่ สมการของ Monod ซึ่งเป็นสมการพื้นฐานในการวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้รับการยอมรับและนิยมใช้ในงานวิจัยอื่นๆ มากมาย อีกทั้งยังเป็นสมการพื้นฐานที่ใช้ในการพัฒนาสมการอื่นๆ และเมื่อใช้คอมพิวเตอร์สร้างกราฟจะได้กราฟข้อมูลที่ดีและสามารถวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ได้ง่าย

2.4 งานวิจัยที่ผ่านมา

Nuhoglu A., Keskinler B. และ Yildiz E. (2005) ทำการศึกษาและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโรงบำบัดน้ำเสียเมือง Erzincaan ซึ่งตั้งอยู่ทางตะวันออกของประเทศตุรกี โดยใช้แบบจำลองระบบเอเอส 1 ร่วมกับโปรแกรม GPS-X

จุดประสงค์ของงานวิจัยชิ้นนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

1. ศึกษาสมบัติของน้ำเสียที่เข้าบำบัดในโรงบำบัดน้ำเสียเมือง Erzincaan
2. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโรงบำบัดโดยใช้โปรแกรม GPS-X และเปรียบเทียบค่าที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์จริง

ในงานวิจัยส่วนที่หนึ่ง ทำการวิเคราะห์ค่าต่างๆ ดังนี้ ซีโอดีทั้งหมด (TCOD) ซีโอดีละลายน้ำ (SCOD) ไนเตรท ($\text{NO}_3\text{-N}$) แอมโมเนีย ($\text{NH}_3\text{-N}$) สารอินทรีย์ไนโตรเจน (Organic-N) ไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ของแข็งแขวนลอย (MLSS) ของแข็งแขวนลอยระเหย (MLVSS) ปริมาณสารอาหารย่อยสลายง่าย (S_0) ปริมาณสารอาหารย่อยสลายยาก (X_0) และปริมาณสารอาหารละลายน้ำได้ยาก (S_1)

ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ในส่วนที่หนึ่งและข้อมูลของอุปกรณ์ในระบบตะกอนเร่งจะถูกป้อนเข้าโปรแกรม GPS-X เพื่อสร้างแบบจำลองระบบตะกอนเร่ง นอกจากนี้ ยังทำการปรับแก้แบบจำลองให้มีความแม่นยำมากขึ้นโดยปรับแก้ที่ค่าจลนพลศาสตร์จากแบบจำลองเอเอสเอ็ม 1 ได้ดังนี้

ค่าจลนพลศาสตร์ที่ผ่านการปรับแก้แล้ว

$$\begin{array}{ll} \mu_{\max,h} = 5.5 \text{ d}^{-1} & \mu_{\max,a} = 0.19 \text{ d}^{-1} \\ K_s = 35 \text{ g COD/m}^3 & K_{\text{NH}} = 2.5 \text{ g N/m}^3 \end{array}$$

จากการทดสอบแบบจำลองที่ผ่านการปรับแก้แล้ว โดยนำค่าที่ได้จากแบบจำลองเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ พบว่าพารามิเตอร์ที่ได้ผลที่ดี ได้แก่ ซีโอดีทั้งหมด ของแข็งแขวนลอยที่เวียนกลับเข้าระบบ ไนโตรเจนทั้งหมด และสารอินทรีย์ไนโตรเจน ส่วนพารามิเตอร์ที่ได้ผลที่ไม่ดี ได้แก่ ซีโอดีละลายน้ำและของแข็งแขวนลอยในถังเติมอากาศ

แบบจำลองของโรงบำบัดน้ำเสียเมือง Erzincaan จากโปรแกรม GPS-X ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ โดยทำการปรับค่าจลนพลศาสตร์เพียง 4 ค่า และหวังว่าแบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้ในขนาดต่อไป

Pala A. และ Bölükbas Ö. (2005) ทำการศึกษาการกำจัดซีโอดีในโตรเจน และ ฟอสฟอรัสในโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยใช้ถังปฏิกริยาแบบแบตซ์และหาค่าจลนพลศาสตร์ จุดประสงค์หลักของงานวิจัย ได้แก่ การหาค่าจลนพลศาสตร์ (Y , k_d , μ_{max} และ K_S) และอัตรา ของปฏิกริยา Nitrification และ Denitrification โดยใช้ถังปฏิกริยาแบบตซ์ในการออกแบบระบบ NDBPR (nitrification–denitrification–biological phosphorus removal)

ในงานวิจัยได้ทำการทดลองหาสมบัติของสลัดจ์ (Sludge characterization tests) ได้แก่ การทดสอบการปล่อยฟอสฟอรัสในสภาวะไร้อากาศ (Anaerobic P release test) การทดสอบการรับฟอสฟอรัส (Aerobic P uptake test) การทดสอบการรับฟอสฟอรัสในสภาวะ แอน็อกซิก (Anoxic P uptake test) การทดสอบหาปฏิกริยาไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน (Nitrification and denitrification tests) สำหรับการหาค่าจลนพลศาสตร์ (ค่า Y และ k_d) จะสร้าง ระบบจำลองโดยใช้ถังปฏิกริยาแบบตซ์และใช้สภาวะการเดินระบบแบบเดียวกันกับโรงบำบัดน้ำเสีย Izmir วัดค่าซีโอดีและเอ็มแอลวีเอสเอสที่เวลา 0 – 24 ชั่วโมง และสร้างกราฟหาค่าความชัน (Y และ k_d) ส่วนพารามิเตอร์ที่เหลือ (ค่า μ_{max} และ K_S) หาได้จากสมการ Monod ซึ่งมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} Y &= 0.7 \text{ mg-VSS/mg-COD} & k_d &= 0.0022 \text{ h}^{-1} \\ \mu_{max} &= 0.047 \text{ h}^{-1} & K_S &= 343 \text{ mg/l} \\ q_N &= 6.87 \times 10^{-4} \text{ mg-N/mg-VSS/h} & q_D &= 3.36 \times 10^{-4} \text{ mg-N/mg-VSS/h} \end{aligned}$$

ซึ่งค่าจลนพลศาสตร์จากการทดลองเหมาะสำหรับการกำจัดซีโอดีและไนโตรเจนเท่านั้น แต่ไม่เหมาะสำหรับการกำจัดฟอสฟอรัสเนื่องจากมีอัตราที่ต่ำ อย่างไรก็ตาม การหาค่าจลนพลศาสตร์และการทดสอบสมบัติของสลัดจ์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการวางแผน ออกแบบ และจำลองระบบของโรงบำบัดน้ำเสียต่อไปในอนาคต

ชลธิพร สุทธิธรรม (2550) ทำการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของระบบบำบัดน้ำเสีย ดินแดงโดยใช้โปรแกรม AQUASIM ร่วมกับแบบจำลองระบบเอเอส 1 ในการสร้างแบบจำลองของ ระบบบำบัดน้ำเสียดินแดงและวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์

ในงานวิจัยได้ทำการทดลองโดยใช้ถังปฏิกริยาแบบแบตซ์ น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง นำมาจากโรงบำบัดน้ำเสียดินแดงและบ่อเกรอะของอาคาร 22 ชั้น คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทำการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียตั้งแต่ 60 ถึง 200

มก.ซีไอดี/ล. และความเข้มข้นจุลชีพเริ่มต้นที่ 100 และ 710 มก./ล. ผลการทดลองได้ค่า จลนพลศาสตร์ ดังนี้

$$Y = 0.43 \text{ mg-VSS/mg-COD} \quad K_s = 41.34 \text{ mg/l}$$

$$\mu_{\max} = 3.96 \text{ d}^{-1}$$

ผลการทดลองที่ได้มีความผิดพลาดมาตรฐานน้อยกว่าร้อยละ 10 ของความเข้มข้น เริ่มต้น การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของระบบบำบัดน้ำเสียดินแดงโดยใช้ค่า จลนพลศาสตร์ที่วิเคราะห์ได้ พบว่าค่าซีไอดีที่จำลองได้มีค่าต่ำกว่าที่วัดได้จริงจากโรงบำบัด ซึ่งคาดว่าสาเหตุอาจเกิดจากสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ซ้ำหลุดออกจากระบบไปกับน้ำทิ้ง

ธงชัย นีรันตร์วงศ์วาน (2551) ทำการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของการบำบัดน้ำเสีย ชุมชนจริงของไทยด้วยระบบเอเอส และสร้างแบบจำลองของโรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรีด้วย โปรแกรม AQUASIM

ในงานวิจัยนี้เป็นการทดลองแบบแบตช์ ทั้งนี้จากการทดลองเบื้องต้นโดยใช้น้ำเสียจาก โรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรีพบว่าค่าซีไอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพสูงถึงร้อยละ 80 ซึ่ง ไม่เหมาะแก่การทดลอง ดังนั้นผู้ทำงานวิจัยนี้จึงได้เปลี่ยนน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียจาก โรงอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยค่าซีไอดีเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลอง อยู่ในช่วง 30 – 800 มก./ล. และทดลองโดยใช้เชื้อสลดจ์ความเข้มข้นสูง 500-900 มก./ล. และ ใช้เชื้อสลดจ์ความเข้มข้นต่ำ 30 มก./ล. จากโรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรี ซึ่งผลการทดลองได้ค่า จลนพลศาสตร์ ดังนี้

$$Y = 0.25 \text{ mg-VSS/mg-COD} \quad K_s = 166 \text{ mg/l}$$

$$\mu_{\max} = 2.35 \text{ d}^{-1}$$

สำหรับค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้เมื่อนำไปใช้จำลองระบบบำบัดน้ำเสียของนนทบุรีที่สร้างขึ้น ด้วย AQUASIM พบว่าสอดคล้องกับข้อมูลจากโรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรี อย่างไรก็ตามค่าซีไอดี ของน้ำทิ้งขาออกที่จำลองได้จากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าค่าซีไอดีขาออกของโรงบำบัดน้ำเสียของ นนทบุรี ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนจากการทดลองของค่าซีไอดีที่ไม่สามารถย่อย สลายทางชีวภาพ ซึ่งป้อนลงในแบบจำลอง

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมดนี้แสดงให้เห็นว่า การใช้โปรแกรม AQUASIM ร่วมกับแบบจำลองระบบเอเอส 1 ในการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และการวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ให้ผลเป็นที่น่าพอใจและใช้งานได้เป็นอย่างดี

ค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จะนำมาเปรียบเทียบผลกับค่าจลนพลศาสตร์ที่วิเคราะห์ได้จากงานวิจัยในครั้งนี้ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและความแตกต่างที่เกิดขึ้น ซึ่งค่าจลนพลศาสตร์ที่ใช้เปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ค่าจลนพลศาสตร์จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

| เจ้าของงานวิจัย | สมบัติของน้ำเสีย | ค่าจลนพลศาสตร์ |
|-----------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Pala A. และ Bölükbas Ö. (2005) | น้ำเสียชุมชนประเทศตุรกี 20 °C | $\mu_m = 1.128 d^{-1}$ $KS = 343 mg/l$ $Y = 0.994 mg-cellCOD/mg-COD$ |
| Nuhoglu A., Keskinler B. และ Yildiz E. (2005) | น้ำเสียชุมชนประเทศตุรกี 20 °C | $\mu_m = 5.5 d^{-1}$ $KS = 35 mg/l$ |
| ชลธิพร สุทธิธรรม (2550) | โรงควบคุมคุณภาพน้ำ ดินแดง 30 °C | $\mu_m = 3.96 d^{-1}$ $KS = 41.34 mg/l$ $Y = 0.43 mg-cellCOD/mg-COD$ |
| ธงชัย นีรันดรวิงศ์วาน (2551) | โรงควบคุมคุณภาพน้ำ ช่องนนทรี 24.6 °C | $\mu_m = 2.35 d^{-1}$ $KS = 166 mg/l$ $Y = 0.25 mg-cellCOD/mg-COD$ |

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยชิ้นนี้แบ่งขั้นตอนการวิเคราะห์ออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 คือ การวางขอบเขตและกำหนดแผนการในการทดลองขั้นต้น โดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ AQUASIM จำลองกราฟความเข้มข้นของสารอาหารที่เวลาต่างๆ ซึ่งได้จากค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้ทำการศึกษาโดยชลธิพร สุทธิธรรม (2550) เพื่อทำการหาระยะเวลาในการทดลองที่เหมาะสม รายละเอียดของขั้นตอนนี้จะกล่าวต่อไปในภายหลัง

ขั้นตอนที่ 2 คือ การทดลองภายในห้องปฏิบัติการ โดยใช้น้ำเสียชุมชนจริงจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมและน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยนมขาดมันเนยสำหรับเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเสีย เพื่อหาค่าตัวแปรสำคัญที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ ได้แก่

- 1) อุณหภูมิ
- 2) ซีโอดี (COD)
- 3) ของแข็งแขวนลอย (MLSS)

ขั้นตอนที่ 3 คือ การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนำไปสร้างกราฟแบบเชิงเส้นด้วยสมการของ Monod

ขั้นตอนที่ 4 คือ การตรวจสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของค่าจลนพลศาสตร์ที่วิเคราะห์ห่อออกมาได้ โดยการนำค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้ป้อนลงในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของระบบวีแอลอาร์ที่สร้างไว้ในโปรแกรม AQUASIM เพื่อทำการจำลองกราฟความเข้มข้นของซีโอดีที่เข้าและออกจากระบบ จากนั้นนำข้อมูลค่าซีโอดีของน้ำเสียชุมชนที่ออกจากระบบวีแอลอาร์ ซึ่งได้จากการเก็บน้ำตัวอย่างที่ออกจากระบบและผลตรวจวัดโดยโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมมาเปรียบเทียบกับกราฟที่จำลองได้ รวมถึงเปรียบเทียบค่าที่วิเคราะห์ได้กับค่าที่ใช้จริงในโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมและทดสอบความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น

3.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่

- 1) เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
- 2) พีเอชมิเตอร์ (pH meter)
- 3) ขวดน้ำพลาสติกปริมาตร 2 ลิตร
- 4) เครื่องเติมอากาศพร้อมสายยางและหัวจ่ายอากาศ
- 5) ตู้อบความร้อนที่มีเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Drying Oven)
- 6) กระดาษกรอง GF/C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.7 ซม.
- 7) ขวดกรอง (Membrane Filter Funnel)
- 8) ปั๊มสุญญากาศ (Suction Pump) พร้อมขวดสุญญากาศขนาด 500 – 1,000 มล.
- 9) หลอดย่อยสลาย (Digestion Vessel)
- 10) ขาตั้งใส่หลอดแก้ว
- 11) บิวเรต
- 12) บีเปต
- 13) เครื่องคอมพิวเตอร์
- 14) โปรแกรม AQUASIM v. 2.1b
- 15) โปรแกรม Microsoft Excel 2003

3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่

- 1) สารละลายมาตรฐานโปตัสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) เข้มข้น 0.1 N
- 2) สารละลายกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ผสมซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4)
- 3) สารละลายมาตรฐานฟอสเฟตแอมโมเนียซัลเฟต (FAS) 0.05 N
- 4) สารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ (Ferroun Indicator)

3.3 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์

3.3.1 การเก็บตัวอย่างน้ำเสีย

การทดลองนี้ นำน้ำเสียจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมมาใช้เป็นตัวแทนของน้ำเสียชุมชน ทั้งนี้เนื่องจากข้อมูลน้ำเสียที่เข้าระบบเฉลี่ย 5 ปี ดังตารางที่ 2.3 ได้แสดงให้เห็นว่าปริมาณบีโอดีของน้ำเสียที่เข้าระบบนั้นมีค่าค่อนข้างต่ำ ซึ่งส่งผลให้ค่าซีโอดีของน้ำเสียนี้มีค่าต่ำเช่นกัน เพื่อแก้ไขปัญหาเรื่องค่าซีโอดีในน้ำเสียที่ต่ำเกินไปจนไม่สามารถทำการทดลองบางขั้นตอนที่ต้องการค่าซีโอดีเริ่มต้นสูงๆ จึงต้องทำการผสมกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำจากนมขาดมันเนย ทั้งนี้การเก็บน้ำเสียจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม ทำการเก็บทั้งหมด 2 จุด ดังนี้

จุดที่ 1 คือ น้ำเสียก่อนเข้าระบบวีแอลอาร์เป็นจุดเก็บหลัก น้ำเสียที่เก็บจากจุดนี้จะถูกใช้เป็นน้ำเสียตัวอย่างในการวิเคราะห์หาค่าซีโอดีตลอดช่วงเวลาของการทดลองทั้งหมด

จุดที่ 2 คือ น้ำเสียก่อนเข้าถังตกตะกอนขั้นสุดท้าย ทำการเก็บสลัดจ์ที่ตำแหน่งนี้เพื่อใช้เป็นเชื้อสลัดจ์ (Seed sludge) ในการทดลอง โดยเก็บ 1 ครั้ง ใช้ตลอดการทดลอง

3.3.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสีย

วิธีการวิเคราะห์หรืออุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ต้องการนั้นแสดงดังตารางที่ 3.1

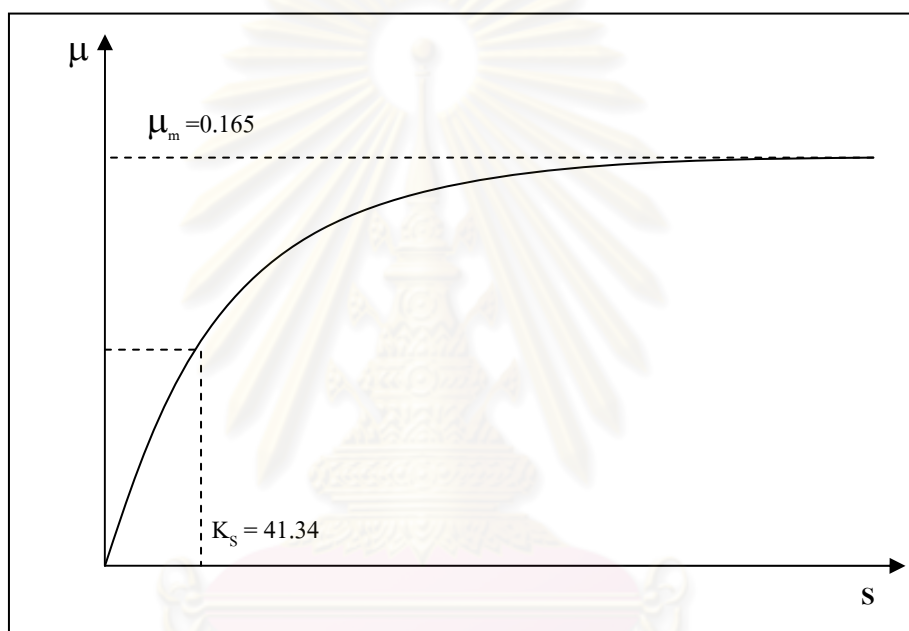
ตารางที่ 3.1 วิธีการวิเคราะห์หรืออุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

| พารามิเตอร์ | วิธีการวิเคราะห์/อุปกรณ์ในการวิเคราะห์ |
|-------------------|-----------------------------------------------|
| 1. อุณหภูมิ | เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer) |
| 2. ซีโอดี | Closed reflux method (Standard Method 5220 C) |
| 3. ของแข็งแขวนลอย | Cell COD = TCOD - SCOD |
| 4. พีเอช | pH meter |

3.4 การดำเนินการทดลอง

3.4.1 การวางขอบเขตและกำหนดแผนการในการทดลองขั้นต้น

1) กำหนดค่าซีโอดีที่เหมาะสมในการทดลองจำนวน 6 ค่า โดยพิจารณาจากกราฟของอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะเทียบกับความเข้มข้นของซีโอดีที่สร้างขึ้นมาจากสมการที่ 2 โดยสมมติค่าจลนพลศาสตร์จากน้ำเสียชุมชนของชลธิพร สุทธิธรรม (2550) (ตารางที่ 2.5) เป็นค่าเริ่มต้น ได้แก่ $K_s = 41.34$ มก./ล. และ $\mu_m = 0.165$ ชม.⁻¹ ได้กราฟดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะเทียบกับซีโอดี เมื่อใช้ค่าจลนพลศาสตร์จากน้ำเสียชุมชนของชลธิพร สุทธิธรรม (2550)

2) แบ่งการทดลองออกเป็น 6 ชุด และนำค่าซีโอดีที่เลือกมาจากกราฟในข้อ 1 มาใช้เป็นค่าซีโอดีเริ่มต้น (COD_0) ในการทดลองแต่ละชุด โดยค่าที่เลือกมาใช้ ได้แก่ ค่าซีโอดีที่ 200 150 100 50 25 และ 10 มก./ล.

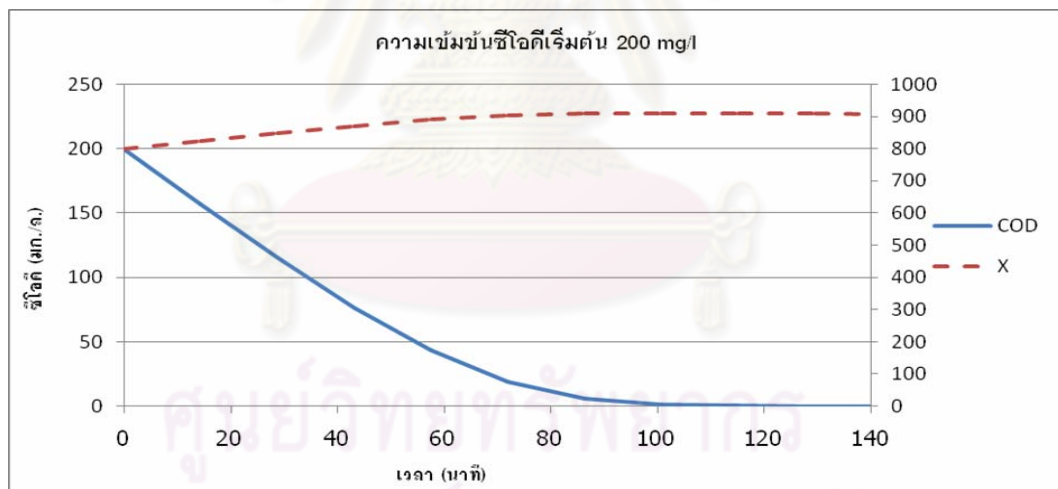
3) ในการทดลองแต่ละชุดจะทำการวิเคราะห์หาค่าซีโอดีที่ลดลงในช่วงเวลาต่างๆ ทั้งหมด 6 ค่า ตั้งแต่เริ่มต้น (ที่ COD_0) จนถึงสิ้นสุด (ซีโอดีเข้าใกล้ 0)

4) หาระยะเวลา (t) ที่เหมาะสมที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์ค่าซีโอดีในการทดลองแต่ละชุด โดยการใส่โปรแกรม AQUASIM ทำการจำลองกราฟของซีโอดีที่เวลาต่างๆ ซึ่งจะได้ช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทดลองรวมถึงสร้างกราฟของความเข้มข้นของตะกอนจุลชีพที่เวลาต่างๆ นำมาใช้

ประกอบพิจารณาช่วงเวลาในการทดลองที่เหมาะสมด้วย สมการที่นำมาใช้คือสมการที่ (2) (3) และ (5) โดยใช้ค่าจลนพลศาสตร์จากชลธิพร สุทธิธรรม (2550) ในตารางที่ 2.5 ได้แก่ $K_s = 41.34$ มก./ล. $Y_H = 0.43$ mg-VSS/mg-COD และ $\mu_{mH} = 0.165$ ชม.⁻¹ นอกจากนี้ ค่าซีโอดีที่ได้จากข้อ 2 นั้นนำมาใส่เป็นค่า S_0 เริ่มต้นลงในโปรแกรมเพื่อจำลองกราฟของการทดลองในแต่ละชุด จากนั้นทำการกำหนดค่าความเข้มข้นตะกอนจุลชีพในน้ำเสียเริ่มต้นที่เหมาะสม ซึ่งใช้เป็นตัวแปร X โดยพิจารณาว่าค่าเท่าใดจึงจะให้ช่วงระยะเวลาในการทดลองแต่ละชุดไม่สั้นหรือไม่นานเกินไปและให้เส้นกราฟที่เป็นเส้นตรงมากที่สุด รวมถึงให้กราฟของความเข้มข้นตะกอนจุลชีพมีการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นไม่เกิน 10% ซึ่งถือว่าค่อนข้างคงที่

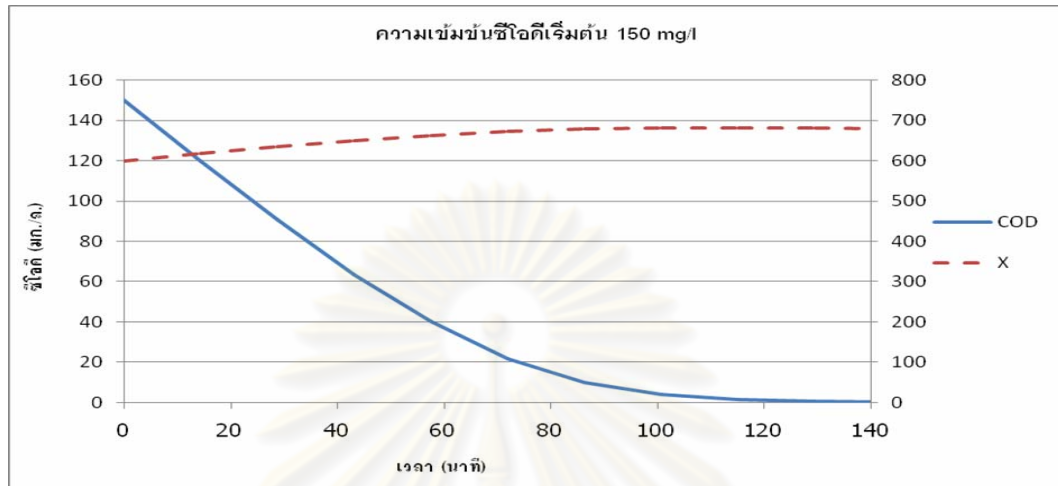
5) ทำการแบ่งช่วงเวลาที่ได้จากกราฟซึ่งจำลองโดยใช้โปรแกรม AQUASIM ออกเป็น 5 ช่วง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ค่าซีโอดีที่เวลานั้นๆ ทั้งหมด 6 ค่าในหนึ่งชุดการทดลอง โดยกราฟที่จำลองได้และเวลาที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

ชุดการทดลองที่ 1 ที่ค่าซีโอดีเริ่มต้น 200 มก./ล. และใช้ X เริ่มต้น 800 มก./ล. ได้ผลดังรูปที่ 3.2



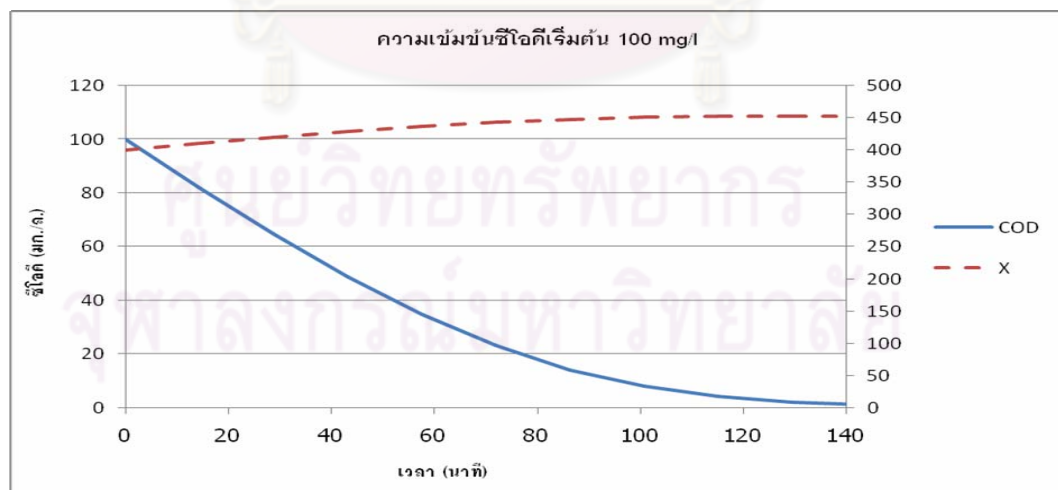
รูปที่ 3.2 ความเข้มข้นซีโอดีที่ลดลง ณ เวลาต่างๆ เมื่อค่าซีโอดีเริ่มต้น 200 มก./ล.

ชุดการทดลองที่ 2 ที่ค่าซีโอดีเริ่มต้น 150 มก./ล. และใช้ X เริ่มต้น 600 มก./ล. ได้ผลดัง
รูปที่ 3.3



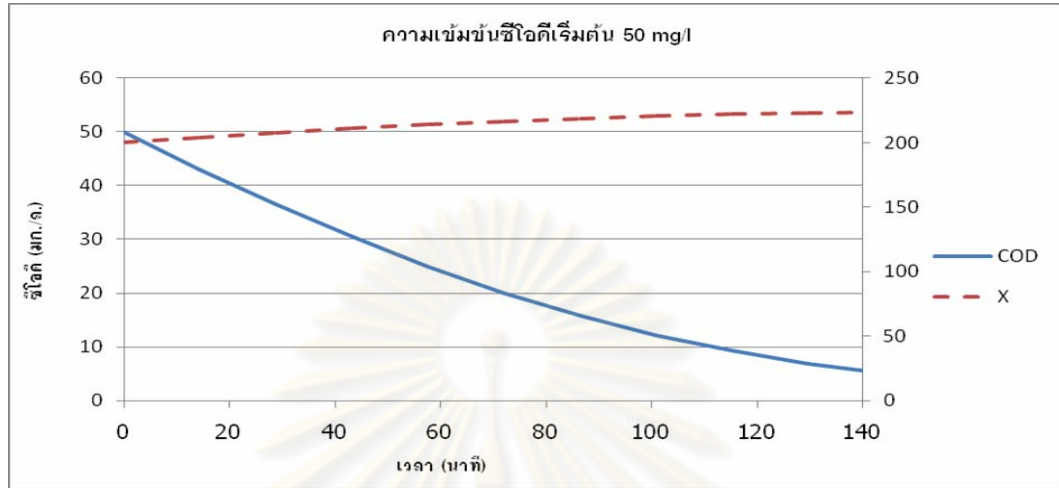
รูปที่ 3.3 ความเข้มข้นซีโอดีที่ลดลง ณ เวลาต่างๆ เมื่อค่าซีโอดีเริ่มต้น 150 มก./ล.

ชุดการทดลองที่ 3 ที่ค่าซีโอดีเริ่มต้น 100 มก./ล. และใช้ X เริ่มต้น 400 มก./ล. ได้ผลดัง
รูปที่ 3.4



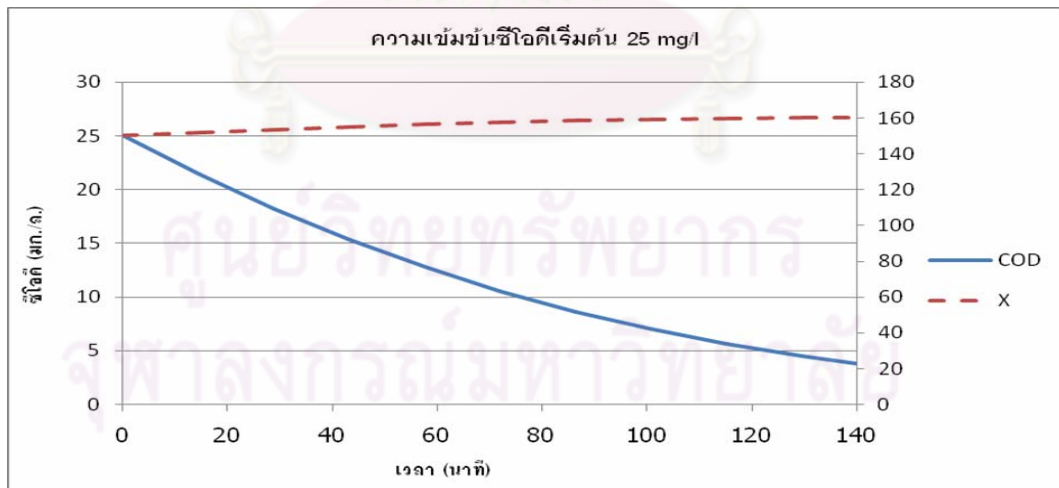
รูปที่ 3.4 ความเข้มข้นซีโอดีที่ลดลง ณ เวลาต่างๆ เมื่อค่าซีโอดีเริ่มต้น 100 มก./ล.

ชุดการทดลองที่ 4 ที่ค่าซีไอดีเริ่มต้น 50 มก./ล. และใช้ X เริ่มต้น 200 มก./ล. ได้ผลดังรูปที่ 3.5



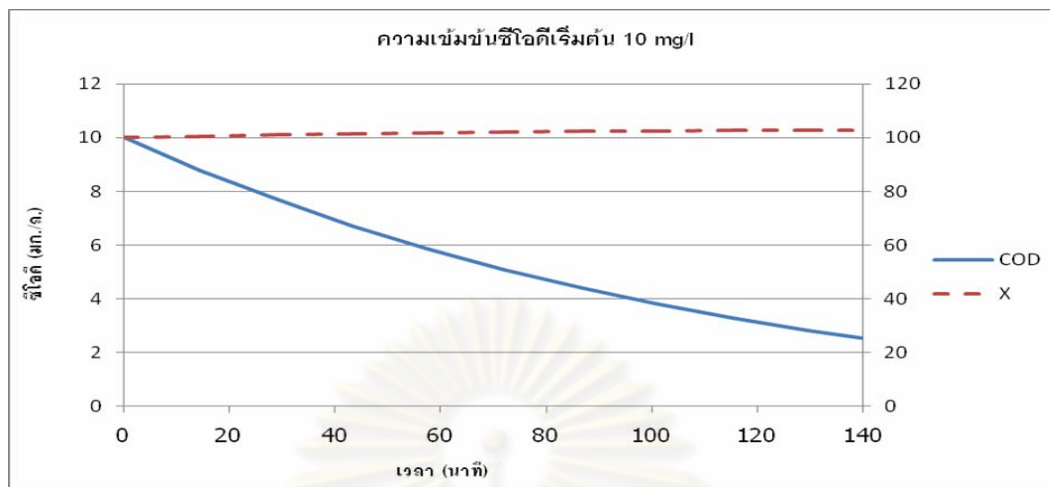
รูปที่ 3.5 ความเข้มข้นซีไอดีที่ลดลง ณ เวลาต่างๆ เมื่อค่าซีไอดีเริ่มต้น 50 มก./ล.

ชุดการทดลองที่ 5 ที่ค่าซีไอดีเริ่มต้น 25 มก./ล. และใช้ X เริ่มต้น 150 มก./ล. ได้ผลดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ความเข้มข้นซีไอดีที่ลดลง ณ เวลาต่างๆ เมื่อค่าซีไอดีเริ่มต้น 25 มก./ล.

ชุดการทดลองที่ 6 ที่ค่าซีไอดีเริ่มต้น 10 มก./ล. และใช้ X เริ่มต้น 100 มก./ล. ได้ผลดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ความเข้มข้นซีโอดีที่ลดลง ณ เวลาต่างๆ เมื่อค่าซีโอดีเริ่มต้น 10 มก./ล.

3.4.2 การทดลองในห้องปฏิบัติการ มีดังนี้

1) การเริ่มเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ มีขั้นตอนดังนี้

1.1) ทำการเก็บเชื้อสลัดจ์จากน้ำเสียก่อนเข้าถังตกตะกอนชั้นสุดท้ายของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม

1.2) ตั้งเชื้อสลัดจ์ที่เก็บมาทิ้งไว้เพื่อให้ตกตะกอน

1.3) เตรียมถังปฏิกริยาจากขวดน้ำพลาสติกปริมาตร 2 ลิตร จำนวน 2 ถัง แต่ละถังใส่น้ำเสียสังเคราะห์จากนมขาดมันเนยที่มีความเข้มข้นซีโอดีประมาณ 400-500 มก./ล. ในปริมาณ 1 ลิตร และใส่เชื้อสลัดจ์ปริมาณ 10 มิลลิลิตร ซึ่งดูคจากน้ำใสส่วนบนของถังเชื้อสลัดจ์ จากนั้นทำการเติมอากาศตลอดเวลา และควบคุมค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 7-7.5 ทั้งนี้สำหรับเหตุผลที่ต้องใช้น้ำใสส่วนบนของถังที่ตั้งไว้ให้ตกตะกอนมาเป็นเชื้อสลัดจ์ในการทดลองนั้น เพราะต้องการเฉพาะเชื้อจุลินทรีย์เท่านั้น ไม่ต้องการให้ได้ของแข็งชนิดอื่นเจือปนมาด้วย

1.4) ตรวจวิเคราะห์ค่าซีโอดีของน้ำในถังปฏิกริยา และเมื่อพบว่าค่าซีโอดีลดลงจนคงที่ ทำการเติมน้ำเสียสังเคราะห์ให้ในถังปฏิกริยาที่มีความเข้มข้นซีโอดีประมาณ 400-500 มก./ล. เพื่อเป็นสารอาหารให้กับจุลินทรีย์ และทำเช่นเดิมอย่างนี้ในทุกครั้งที่ค่าซีโอดีมีแนวโน้มคงที่

1.5) เมื่อได้ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์มากพอตามที่ต้องการ โดยประมาณจากสารอาหารที่ถูกใช้ไป ทำการแยกเชื้อจุลินทรีย์ออกจากน้ำด้วยเครื่องปั่นแยก (เครื่องเซนตริฟิวจ์)

2) การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้หาค่าจลนพลศาสตร์ มีขั้นตอนดังนี้

2.1) นำน้ำเสียตัวอย่างก่อนเข้าระบบวีแอลอาร์และน้ำเสียสังเคราะห์จากนมขาดมันเนย มาวิเคราะห์ค่าซีโอดีเพื่อให้หาสัดส่วนในการปรับค่าซีโอดี

2.2) นำน้ำเสียตัวอย่างก่อนเข้าระบบวีแอลอาร์มาแบ่งออกเป็น 6 ส่วน สำหรับการวิเคราะห์ค่าซีโอดีของการทดลองในแต่ละชุด

2.3) ปรับค่าซีโอดีในน้ำเสียตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ซีโอดีทั้ง 6 ชุด ให้เท่ากับค่าซีโอดีเริ่มต้นของการทดลองแต่ละชุดที่กำหนดไว้ โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์จากนมขาดมันเนยช่วยเพิ่มค่าซีโอดีให้สูงขึ้นหรือเจือจางด้วยน้ำกลั่นเพื่อให้ได้ค่าซีโอดีที่ลดลง

2.4) นำขวดน้ำพลาสติกปริมาตร 2 ลิตร ดัดแปลงใช้เป็นถังปฏิบัติการแบบแบตช์ในการทดลอง และเติมอากาศด้วยหัวจ่ายอากาศที่ต่อเข้ากับเครื่องเติมอากาศ ทั้งนี้ในแต่ละชุดการทดลองมีถังปฏิบัติการจำนวน 3 ถัง

2.5) นำน้ำเสียที่ปรับค่าซีโอดีแล้วใส่ลงในถังปฏิบัติการพร้อมกับเชื้อจุลินทรีย์ และเปิดเครื่องเติมอากาศ

2.6) เก็บน้ำเสียเทียบกับเวลาที่ความเข้มข้นของซีโอดีเริ่มต้นเท่ากับ 10 25 50 100 150 และ 200 มก./ล. จนค่าซีโอดีที่ลดลงมีค่าคงที่

2.7) ปรับค่าพีเอชของน้ำเสียตัวอย่างให้มีค่าไม่เกิน 2 ทันทีที่เก็บมาจากถังปฏิบัติการ โดยใช้กรดซัลฟูริกในการปรับพีเอช เพื่อหยุดปฏิกิริยาทางชีวะที่เกิดขึ้นในน้ำเสียให้คงที่

2.8) วิเคราะห์ค่าซีโอดีในน้ำเสียตัวอย่างด้วยวิธี Closed reflux โดยวิเคราะห์ซีโอดีทั้งแบบกรองและไม่กรองน้ำเสียตัวอย่างเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของตะกอนจุลชีพในน้ำเสีย โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ ต่อหนึ่งตัวอย่าง

3) การหาค่ายิลด์ของเฮเทอโรโทรป มีขั้นตอนดังนี้

3.1) เตรียมถังปฏิบัติการและน้ำเสียที่มีค่าซีโอดีเริ่มต้น 6 ค่า เช่นเดียวกับข้อที่ 2.6)

3.2) นำน้ำเสียตัวอย่างที่ปรับค่าซีโอดีแล้ว ใส่ลงในถังปฏิบัติการแบบแบตช์ แล้วเติมเชื้อสลัดจ์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 5 ของค่าซีโอดีเริ่มต้นในแต่ละชุดการทดลอง

3.3) เก็บน้ำตัวอย่างก่อนเปิดเครื่องเติมอากาศของทุกชุดการทดลองมาวิเคราะห์ แบ่งน้ำเสียออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งนำไปวิเคราะห์หาค่าซีโอดี โดยสมมติให้ค่าที่ได้เท่ากับ TCOD มก./ล. ส่วนที่สองนำไปกรองผ่านกระดาษกรอง GF/C แล้วนำน้ำใส่ที่กรองผ่านออกมาไปวิเคราะห์ค่าซีโอดี โดยสมมติให้ค่าที่ได้เท่ากับ SCOD มก./ล.

3.4) เปิดเครื่องเติมอากาศทิ้งไว้เป็นเวลานานๆ ให้ค่าซีโอดีในน้ำเสียถูกย่อยสลายจนเกือบหมด

3.5) เก็บน้ำตัวอย่างของทุกชุดการทดลองมาวิเคราะห์เช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 3.3)

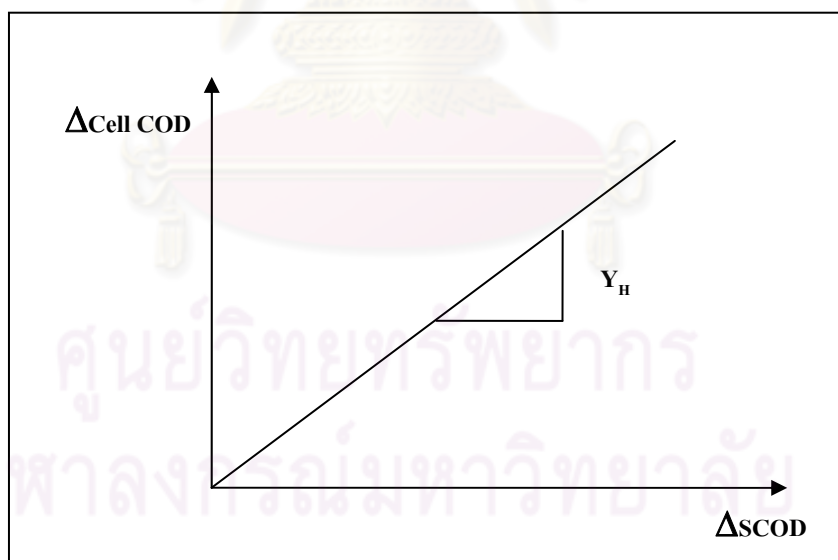
3.6) หาค่าเซลล์ซีโอดีของน้ำเสียในข้อ 3 และข้อ 6 จากสมการที่ (11)

$$\text{Cell COD} = \text{TCOD} - \text{SCOD} \quad (11)$$

โดยที่ $\text{TCOD} =$ ปริมาณซีโอดีทั้งหมดในน้ำเสีย (มก./ล.)

$\text{SCOD} =$ ปริมาณซีโอดีละลายน้ำในน้ำเสีย (มก./ล.)

3.7) นำข้อมูลที่ได้ทั้งหมดไปสร้างกราฟของผลต่างเซลล์ซีโอดี ($\Delta\text{Cell COD}$) เทียบกับผลต่างของซีโอดีละลายน้ำในน้ำเสียหายไป (ΔSCOD) ซึ่งจะได้กราฟดังรูปที่ 3.8 ค่าความชันที่ได้จากกราฟ คือ ค่ายิลด์ของจุลชีพแบบเฮเทอโรโทรป



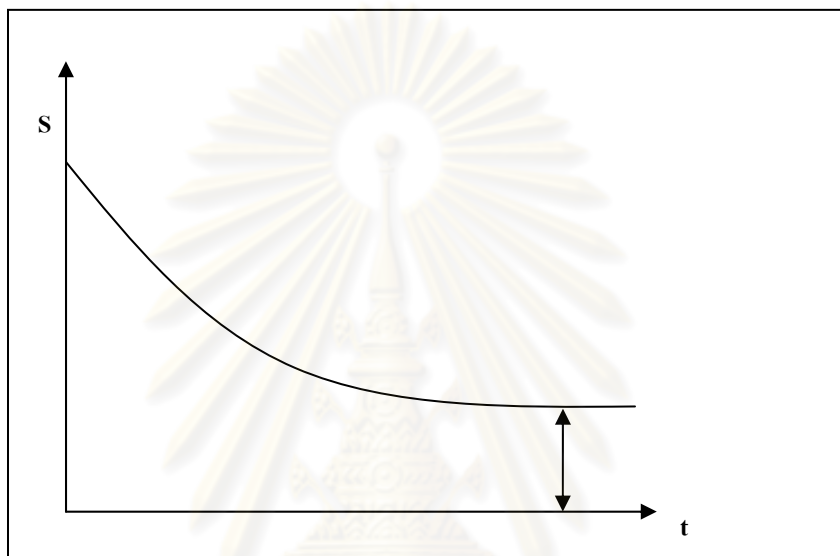
รูปที่ 3.8 การประมาณค่ายิลด์ของจุลชีพแบบเฮเทอโรโทรป

4) การหาค่าซีโอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ

4.1) เตรียมถังปฏิกรณ์ฯ น้ำเสียตัวอย่าง และเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 2) ข้างต้น

4.2) เติมหากาศในถังปฏิกิริยาเป็นเวลานานๆ เพื่อให้ค่าซีไอดีที่ทยอยสลายได้ถูกกำจัดจนหมด

4.3) ทำการเก็บน้ำเสียตัวอย่างจากถังปฏิกิริยาและนำไปวิเคราะห์ค่าซีไอดีเรื่อยๆ จนกระทั่งค่าซีไอดีที่วิเคราะห์ได้มีค่าค่อนข้างคงที่ ซึ่งค่าซีไอดีที่คงที่แล้ว คือ ค่าซีไอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้



รูปที่ 3.9 การหาค่าซีไอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ

3.4.3 การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์จากกราฟข้อมูล มีขั้นตอนดังนี้

1) นำค่าซีไอดีที่เวลาต่างๆ ของแต่ละชุดการทดลองมาสร้างกราฟเส้นตรงของค่าซีไอดีเทียบกับเวลาต่างๆ โดยกราฟมีลักษณะดังรูปที่ 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 และ 3.7 จากนั้นหาความชันของเส้นกราฟในการทดลองแต่ละชุด ค่าความชันที่ได้ คือ ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยา

2) นำค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาหารด้วยความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นในแต่ละชุดการทดลอง และค่าซีไอดีที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพที่ได้จากข้อที่ 3.4.2 ไปใช้ในการสร้างกราฟคามของทฤษฎี Monod ที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 เพื่อหาค่าจลนพลศาสตร์จากกราฟซึ่งกราฟมีลักษณะดังรูปที่ 2.6

3.4.4 เปรียบเทียบค่าที่วิเคราะห์ได้ มีขั้นตอนดังนี้

1) การเปรียบเทียบค่าที่วิเคราะห์ได้กับค่าที่ใช้งานจริง

โดยการนำค่าจลนพลศาสตร์ที่หาได้ไปเปรียบเทียบความแตกต่างกับค่าที่ใช้จริง ในโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม

2) การเปรียบเทียบค่าที่วิเคราะห์ได้กับค่าอ้างอิงมาจากงานวิจัยอื่นๆ

โดยการนำค่าจลนพลศาสตร์ที่หาได้ไปเปรียบเทียบความแตกต่างกับค่าที่นำมา จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในหัวข้อ 2.4 ซึ่งสรุปไว้ในตารางที่ 2.5

นอกจากนี้ นำค่าจลนพลศาสตร์ที่หาได้ไปเปรียบเทียบความแตกต่างกับค่า จลนพลศาสตร์ของน้ำเสียชุมชนในต่างประเทศ ได้แก่ $K_s = 20$ มก./ล. $\mu_{\max} = 6$ วัน⁻¹ $b = 0.408$ วัน⁻¹ และ $Y_H = 0.6$ มก.-เซลล์ซีไอดี/มก.-ซีไอดี (Grady; Daigger และ Lim, 1999) โดยนำไป ปรับแก้อุณหภูมิจาก 20 °C เป็น 25 °C ซึ่งเป็นวิธีที่วิศวกรในประเทศไทยนิยมใช้ในการออกแบบ ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ โดยการใช้สมการของ Phelps (Grady; Daigger และ Lim, 1999) ดังนี้

$$k_2 = k_1 \theta^{(T_1 - T_2)} \quad (12)$$

โดยที่ k_1 = ค่าที่ปรับแก้แล้ว

k_2 = ค่าที่ต้องปรับแก้

T_1 = อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 20 °C

T_2 = อุณหภูมิที่ต้องปรับแก้ °C

θ = ค่าคงที่แตกต่างกันไปตามชนิดของจุลชีพ

= 1.094 (จุลชีพเฮเทอโรโทรปแบบใช้อากาศ)

= 1.20 (จุลชีพเฮเทอโรโทรปแบบแอนีอโรบิก)

= 1.114 (จุลชีพออโตโทรป)

= 1.105 (จุลชีพในระบบไร้อากาศ)

(Grady; Daigger และ Lim, 1999)

นอกจากทำการเปรียบเทียบค่าปรับแก้ที่อุณหภูมิ 25°C แล้ว ยังนำไปเปรียบเทียบค่าปรับแก้ที่อุณหภูมิของน้ำเสียตัวอย่างที่นำมาใช้วิเคราะห์ด้วย โดยใช้ค่าอุณหภูมิที่วัดเอาไว้ตอนเก็บน้ำเสียตัวอย่างจากระบบ มาใช้ในการปรับแก้

สรุปผลที่ได้จากการตรวจสอบและเปรียบเทียบด้วยวิธีต่างๆ จากนั้น อธิบายสาเหตุที่เป็นไปได้ของความแตกต่างและความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น รวมถึงแสดงข้อคิดเห็นถึงความเป็นไปได้ในการนำค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้นี้ไปใช้จริงในอนาคต

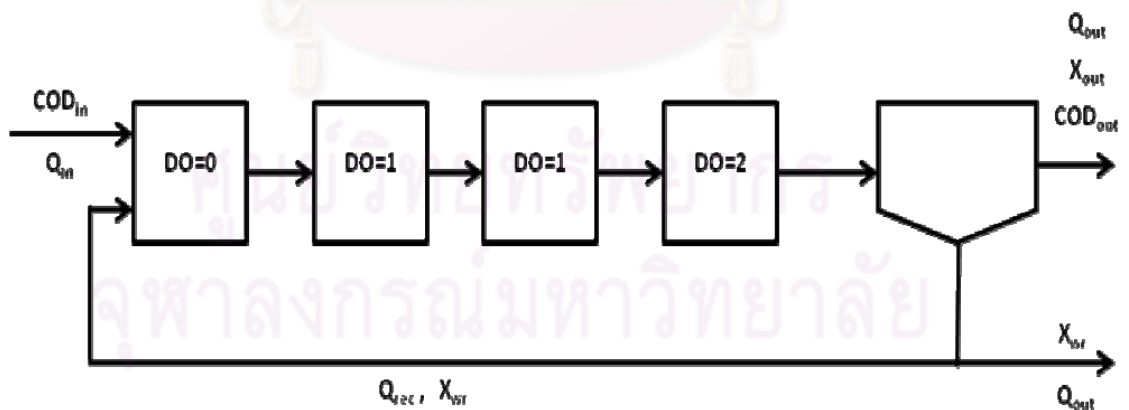
3.4.5 การสร้างแบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสียของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมด้วยโปรแกรม AQUASIM

1) นำข้อมูลการเดินระบบบำบัดและสมบัติน้ำเสียจริงจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม รวมทั้งค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ มาใช้เป็นตัวแปรในโปรแกรม AQUASIM เพื่อจำลองระบบบำบัดของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม

2) สร้างแบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสียของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม โดยประกอบด้วยระบบวีแอลอาร์ 4 ถัง และถังตกตะกอน 1 ถัง แสดงดังรูปที่ 3.10

3) ให้โปรแกรมจำลองกราฟค่าซีไอดีขาเข้าและออก

4) นำข้อมูลค่าซีไอดีของน้ำเสียจริงจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมที่เข้า-ออก จากผลการตรวจวัด เปรียบเทียบกับกราฟค่าซีไอดีที่จำลองมาจากโปรแกรม



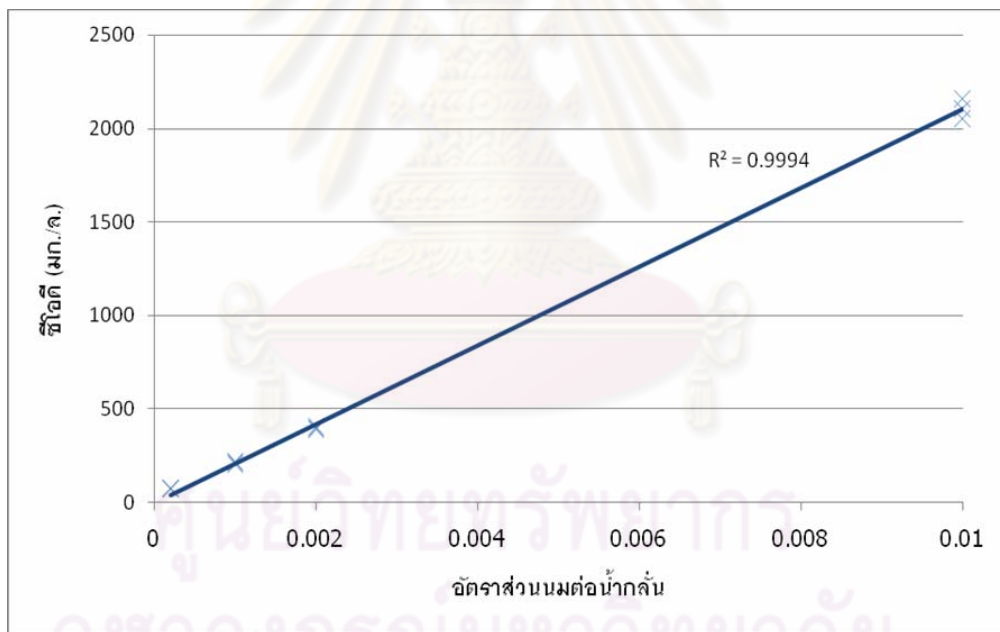
รูปที่ 3.10 แผนผังการสร้างแบบจำลองระบบบำบัดโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมด้วยโปรแกรม AQUASIM

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

น้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยนี้มาจาก 2 แหล่ง คือ น้ำเสียจริงจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมโดยใช้น้ำจากบริเวณที่ผ่านถังตกกรวดทรายแล้ว และน้ำเสียสังเคราะห์ที่ได้จากนมขาดมันเนยเพื่อนำมาช่วยเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเสียจริง โดยได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีของนมที่ความเข้มข้นต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.1 ทั้งนี้เหตุผลที่เลือกใช้นมขาดมันเนยในการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเสียเนื่องจากไม่ต้องการให้มีของแข็งชนิดอื่นนอกจากเชื้อจุลินทรีย์เข้าไปผสมกับน้ำเสียที่ใช้ทดลองหรือให้เกิดการเจือปนน้อยที่สุด

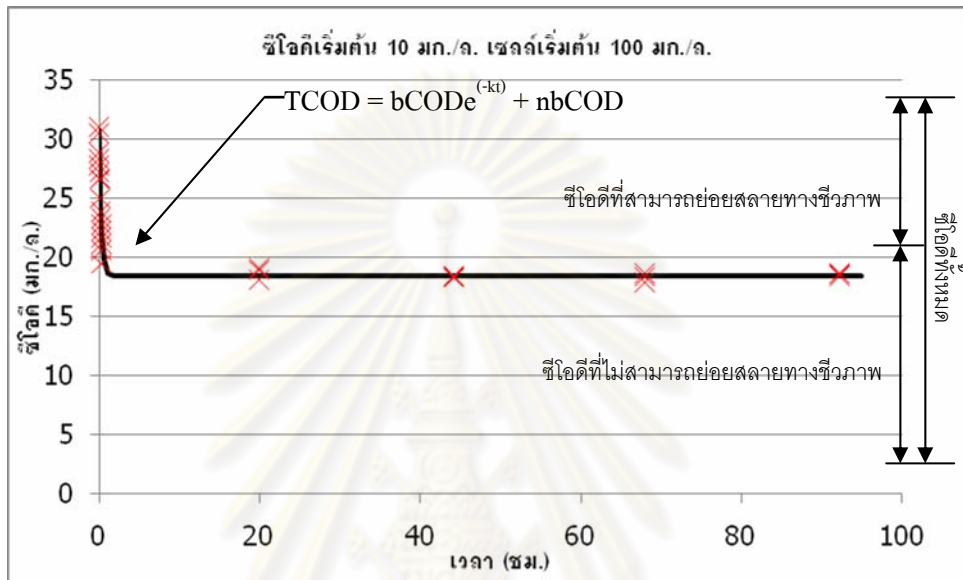


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีกับความเข้มข้นของนมขาดมันเนย

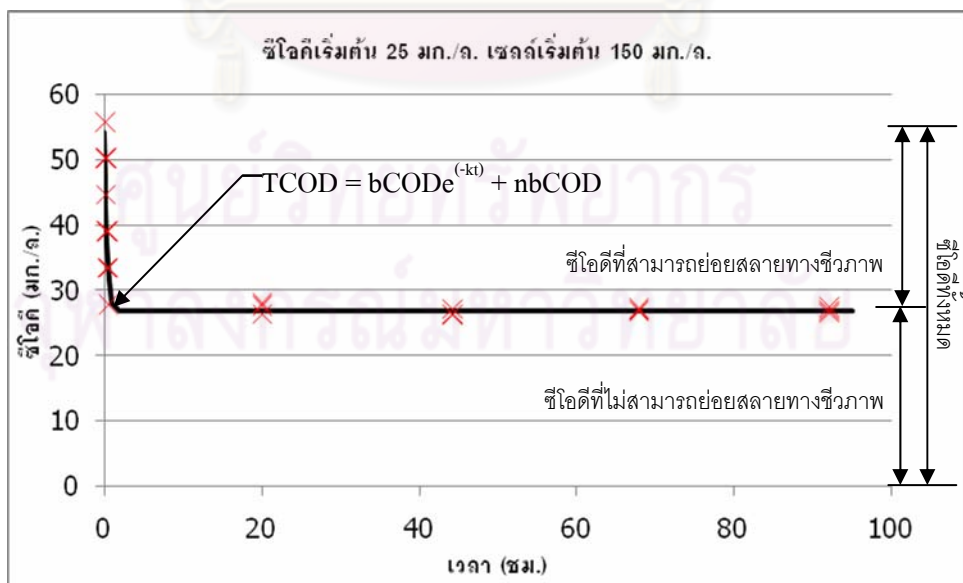
4.2 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้หาค่าจลนพลศาสตร์

จากการทดลองการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยการวิเคราะห์ค่าซีไอดีที่เวลาต่างๆ โดยใช้ค่าซีไอดีความเข้มข้นเริ่มต้น 10 25 50 100 150 และ 200 มก./ล. และความเข้มข้นตะกอน

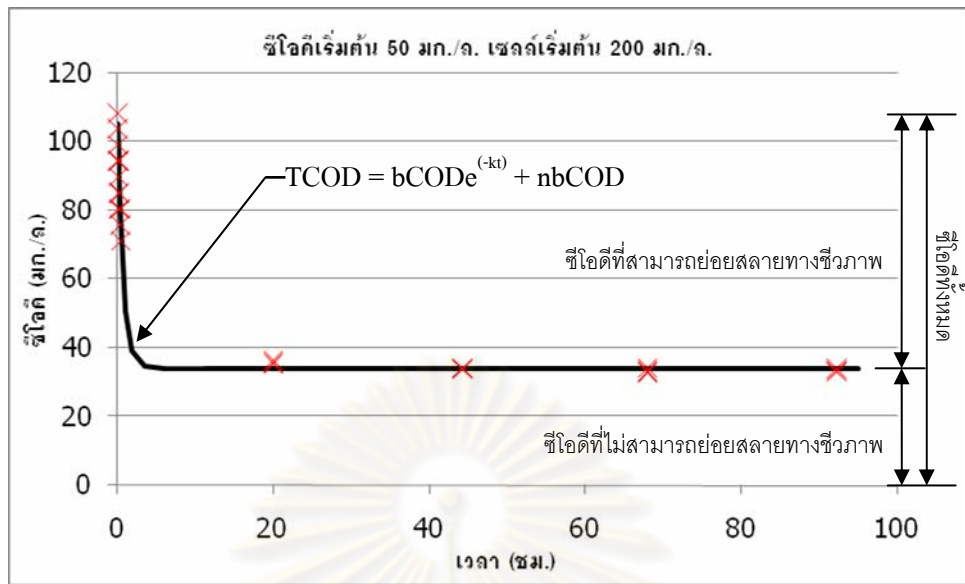
จุดซีพีเริ่มต้น 100 150 200 400 600 และ 800 มก./ล. เมื่อนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีเทียบกับเวลาและทำการปรับแก้ข้อมูลด้วยฟังก์ชันการแก้สมการหาตัวแปรของโปรแกรม Microsoft Excel ทำให้ได้ค่า ซีไอดีที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ (bCOD) และค่าซีไอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ (nbCOD) ของแต่ละชุดการทดลอง แสดงดังภาพที่ 4.2 ถึง 4.7



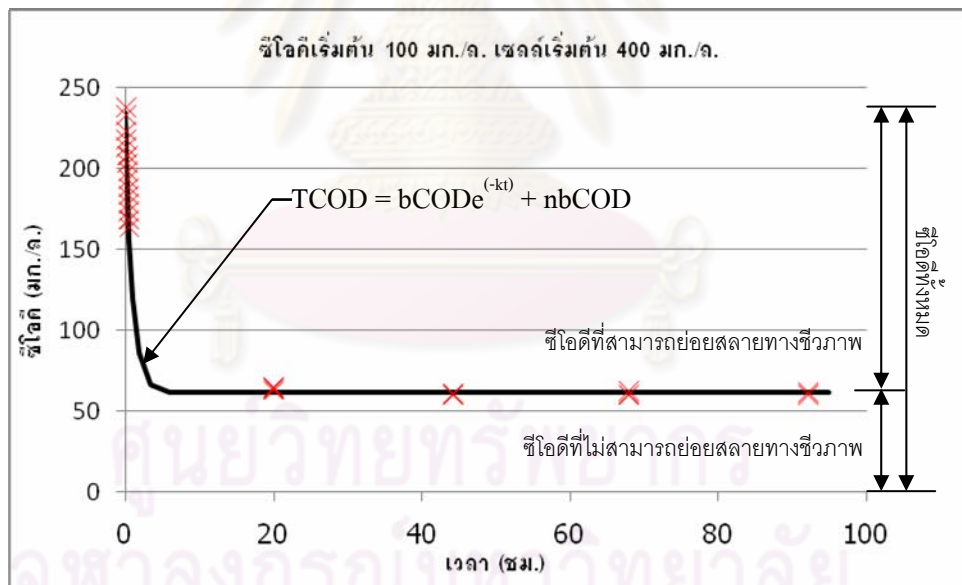
รูปที่ 4.2 ผลของการทดลองการวิเคราะห์ค่าซีไอดีเทียบกับเวลาของซีไอดีเริ่มต้น 10 มก./ล. และเซลล์เริ่มต้น 100 มก./ล.



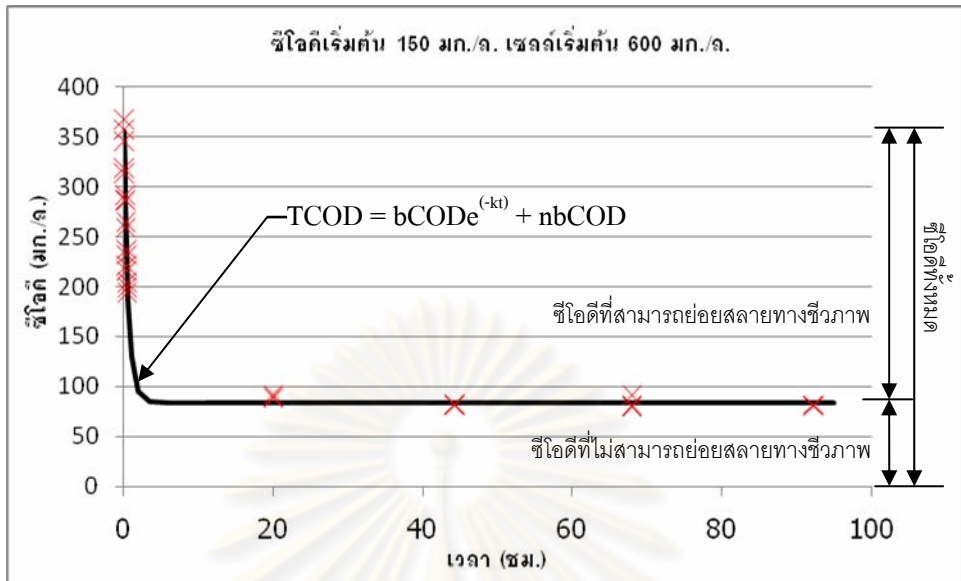
รูปที่ 4.3 ผลของการทดลองการวิเคราะห์ค่าซีไอดีเทียบกับเวลาของซีไอดีเริ่มต้น 25 มก./ล. และเซลล์เริ่มต้น 150 มก./ล.



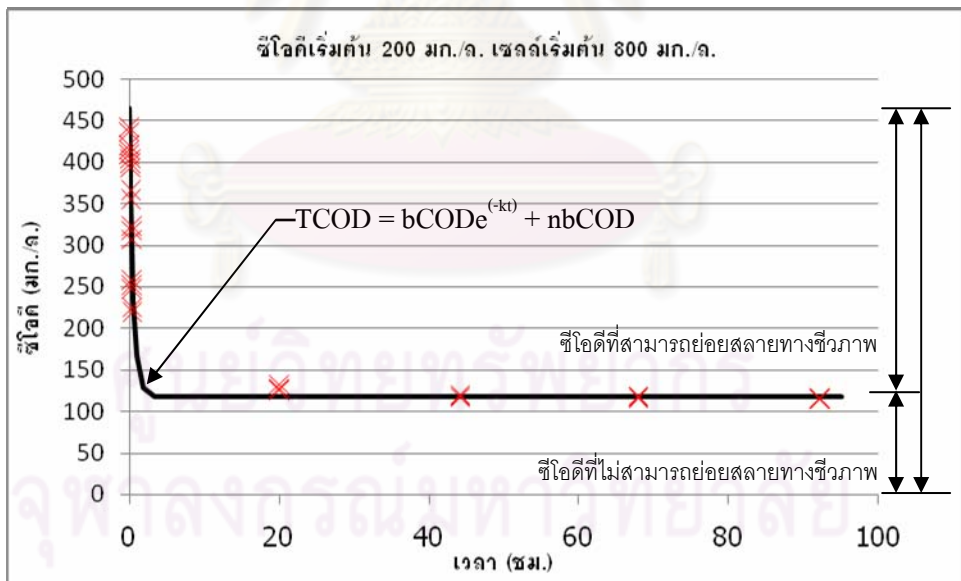
รูปที่ 4.4 ผลของการทดลองการวิเคราะห์ค่าชีโอดีเทียบกับเวลาของชีโอดีเริ่มต้น 50 มก./ล. และเซลล์เริ่มต้น 200 มก./ล.



รูปที่ 4.5 ผลของการทดลองการวิเคราะห์ค่าชีโอดีเทียบกับเวลาของชีโอดีเริ่มต้น 100 มก./ล. และเซลล์เริ่มต้น 400 มก./ล.

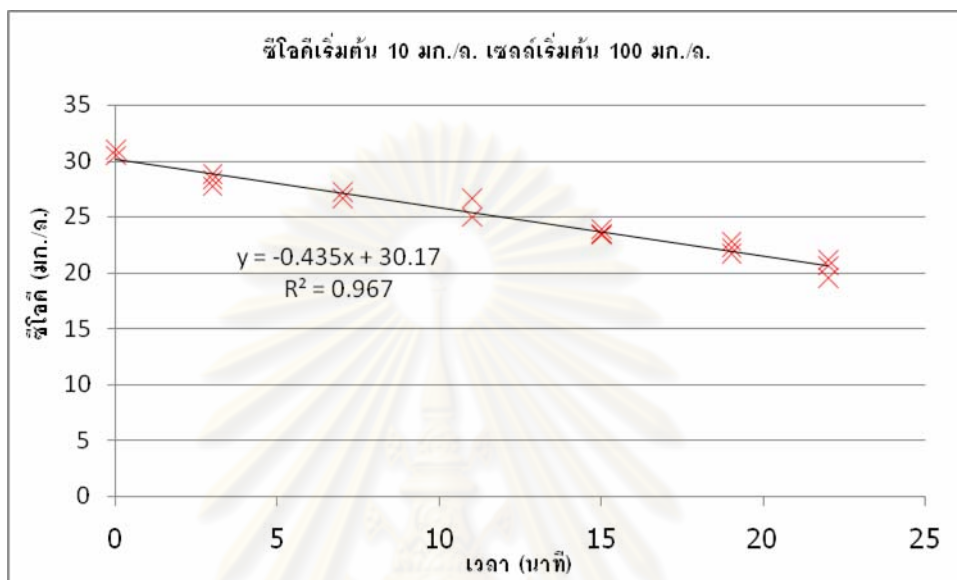


รูปที่ 4.6 ผลของการทดลองการวิเคราะห์ค่าชีโอดีเทียบกับเวลาของชีโอดีเริ่มต้น 150 มก./ล. และเซลล์เริ่มต้น 600 มก./ล.

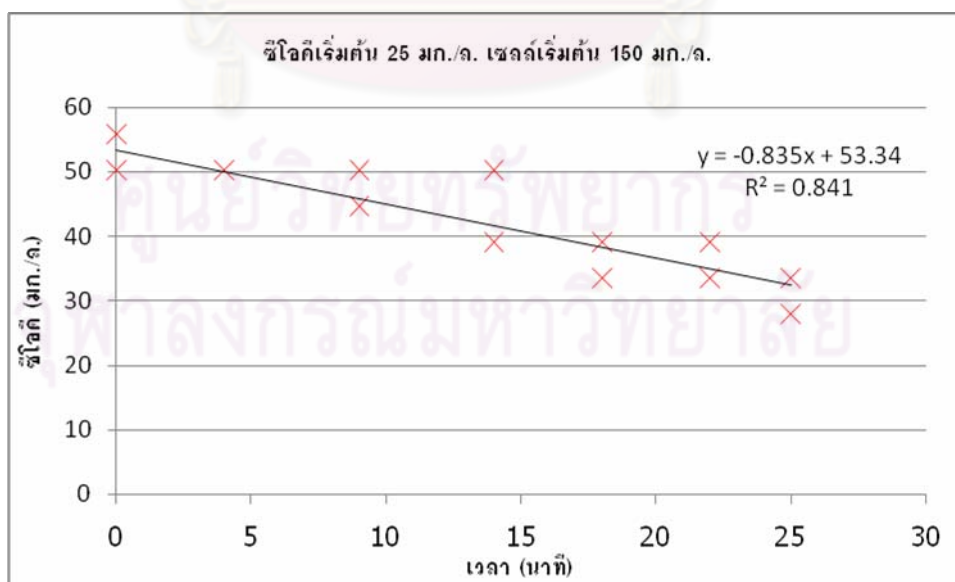


รูปที่ 4.7 ผลของการทดลองการวิเคราะห์ค่าชีโอดีเทียบกับเวลาของชีโอดีเริ่มต้น 200 มก./ล. และเซลล์เริ่มต้น 800 มก./ล.

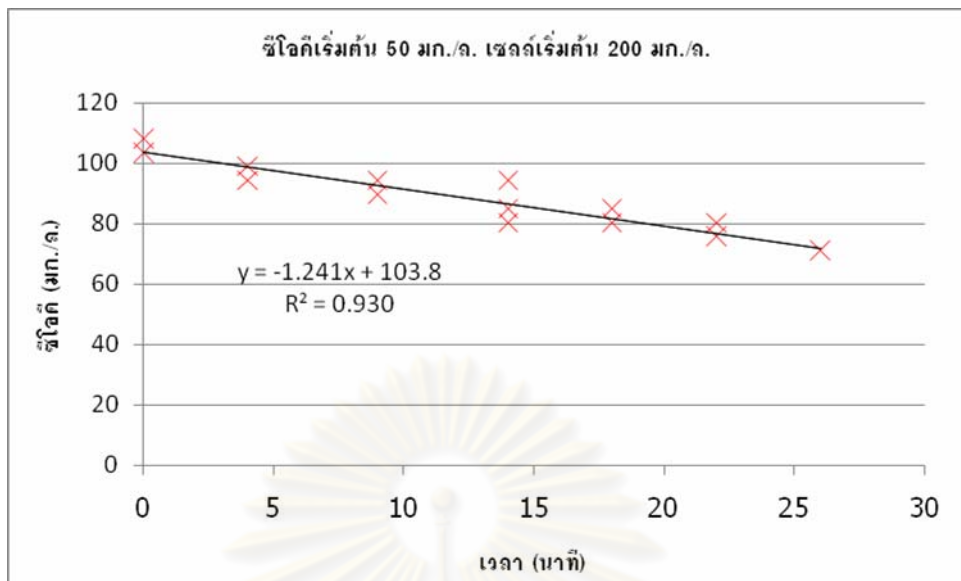
เมื่อนำค่าซีไอดีเทียบกับเวลาในช่วงแรกที่มีการลดลงเป็นเส้นตรงของแต่ละชุดการทดลองไปสร้างกราฟเส้นตรงความสัมพันธ์ระหว่างซีไอดีกับเวลา โดยความชันที่ได้จากกราฟของแต่ละชุดคือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 4.8 ถึง 4.13



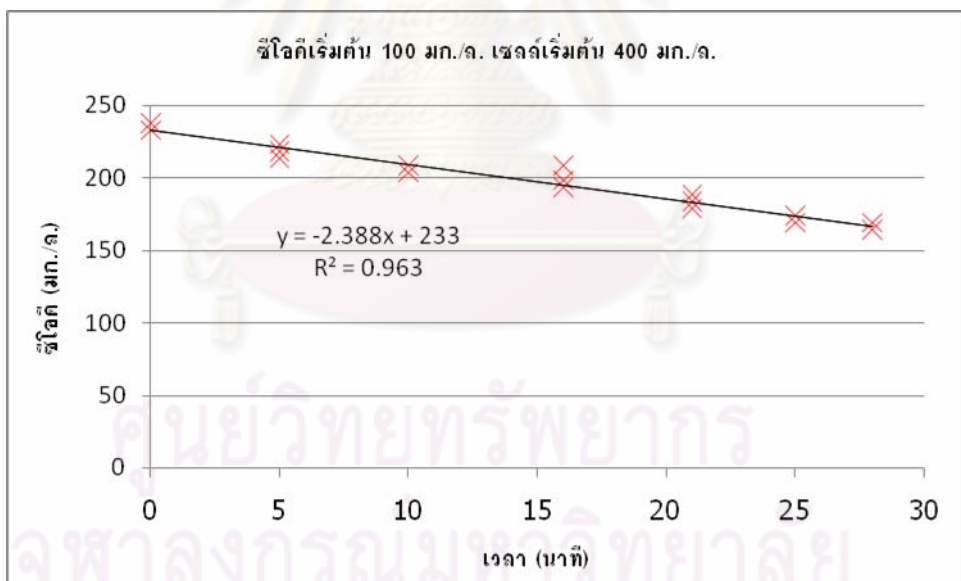
รูปที่ 4.8 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของชุดการทดลองที่มีซีไอดีเริ่มต้น 10 มก./ล. และเซลล์เริ่มต้น 100 มก./ล.



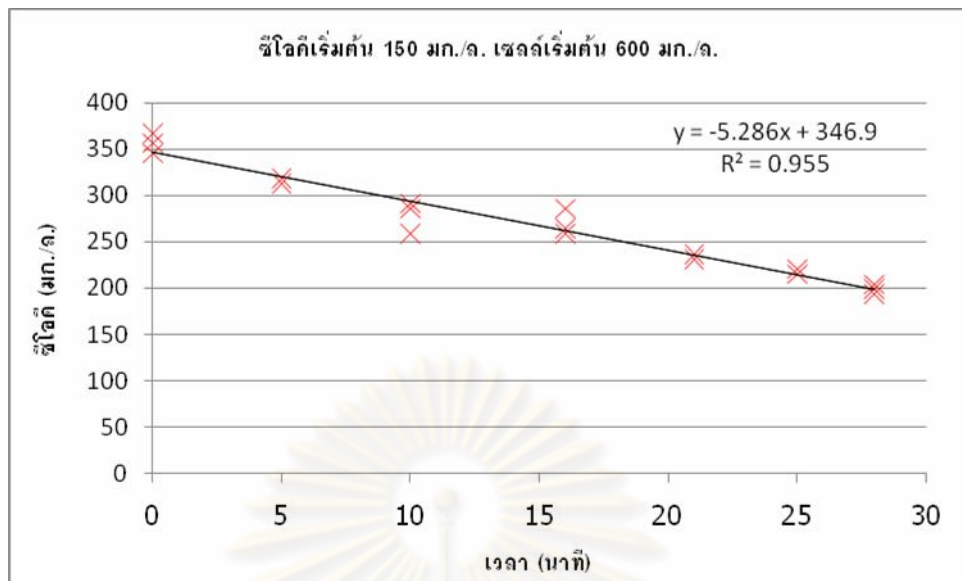
รูปที่ 4.9 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของชุดการทดลองที่มีซีไอดีเริ่มต้น 25 มก./ล. และเซลล์เริ่มต้น 150 มก./ล.



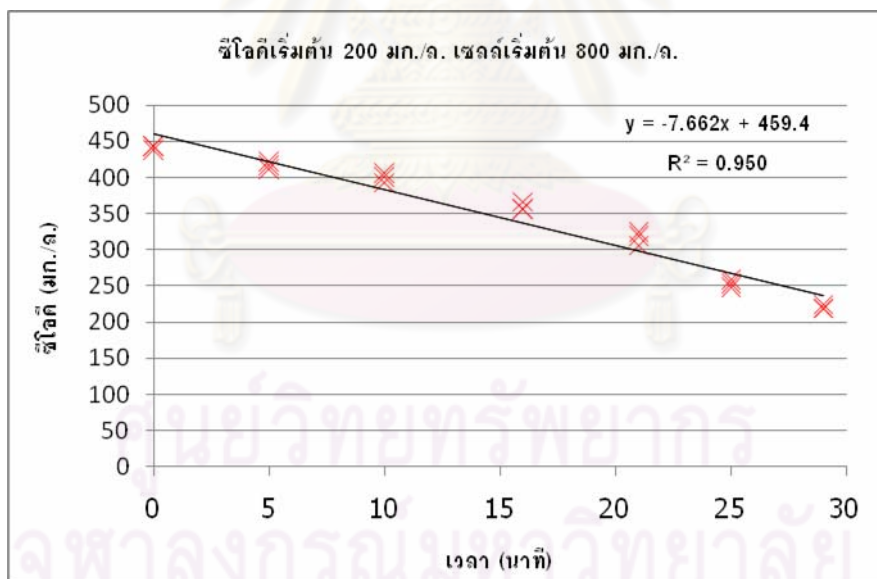
รูปที่ 4.10 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของชุดการทดลองที่มีซีไอทีเริ่มต้น 50 มก./ล. และเซลล์เริ่มต้น 200 มก./ล.



รูปที่ 4.11 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของชุดการทดลองที่มีซีไอทีเริ่มต้น 100 มก./ล. และเซลล์เริ่มต้น 400 มก./ล.



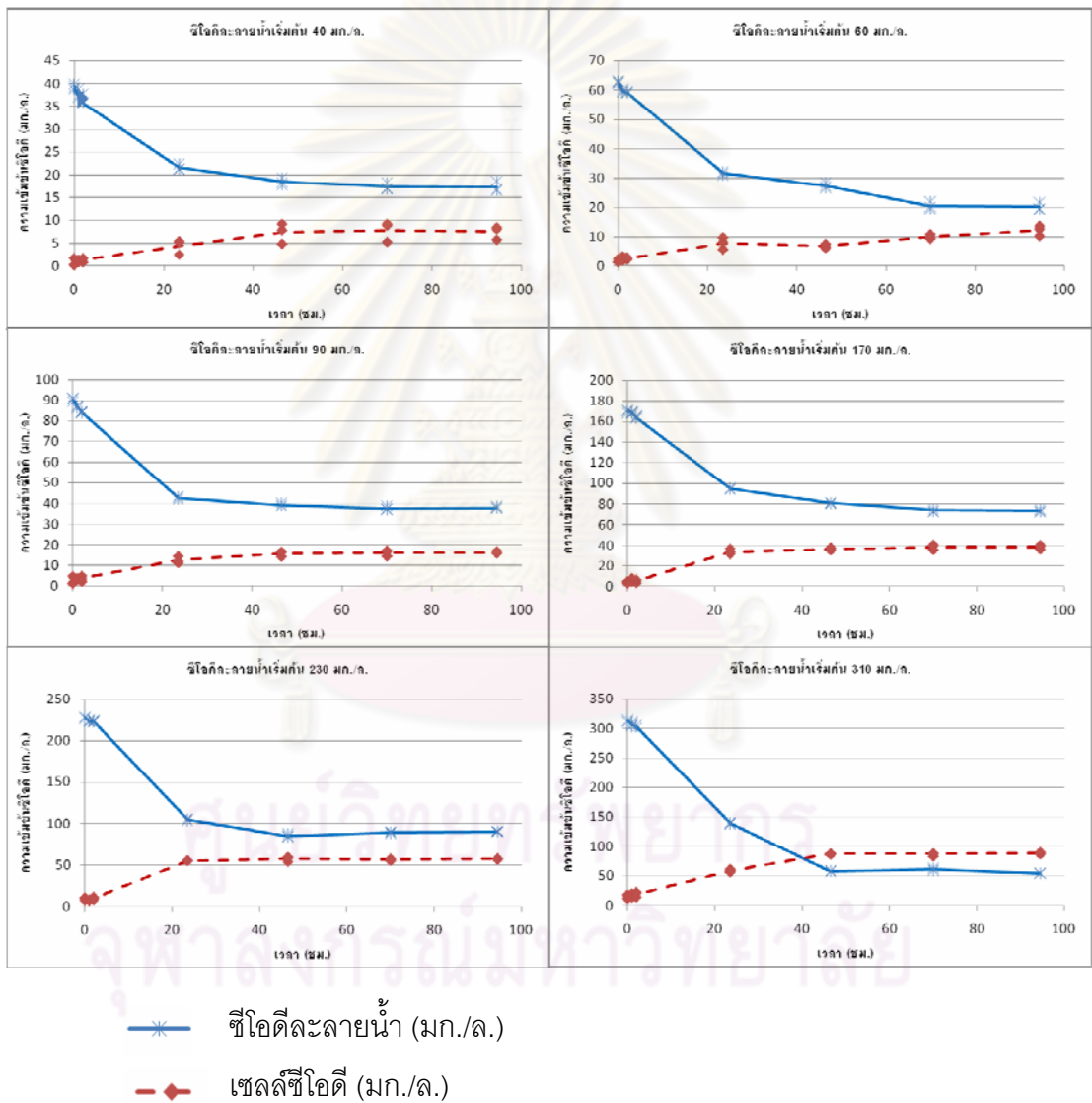
รูปที่ 4.12 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของชุดการทดลองที่มีซีโอไซด์เริ่มต้น 150 มก./ล. และเซลล์เริ่มต้น 600 มก./ล.



รูปที่ 4.13 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของชุดการทดลองที่มีซีโอไซด์เริ่มต้น 200 มก./ล. และเซลล์เริ่มต้น 800 มก./ล.

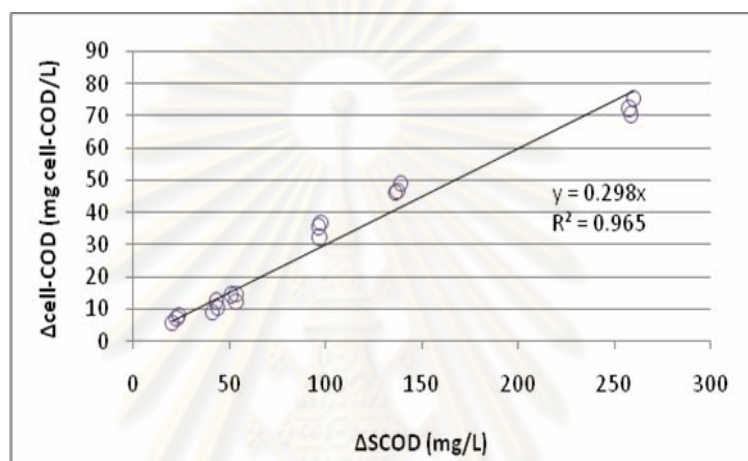
4.3 การหาค่ายิลด์

ในการศึกษาหาค่ายิลด์ได้ทำการทดลองที่ความเข้มข้นซีโอดีละลายน้ำเริ่มต้นที่แตกต่างกัน 6 ชุด ได้แก่ 40 60 90 170 230 และ 310 มก./ล. และใช้เชื้อสลดจ์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นที่ร้อยละ 5 ของค่าซีโอดีเริ่มต้นในแต่ละชุด เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเซลล์จุลชีพ โดยได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ปฏิบัติทางชีวภาพในการทดลองหาค่ายิลด์ของน้ำเสียโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม

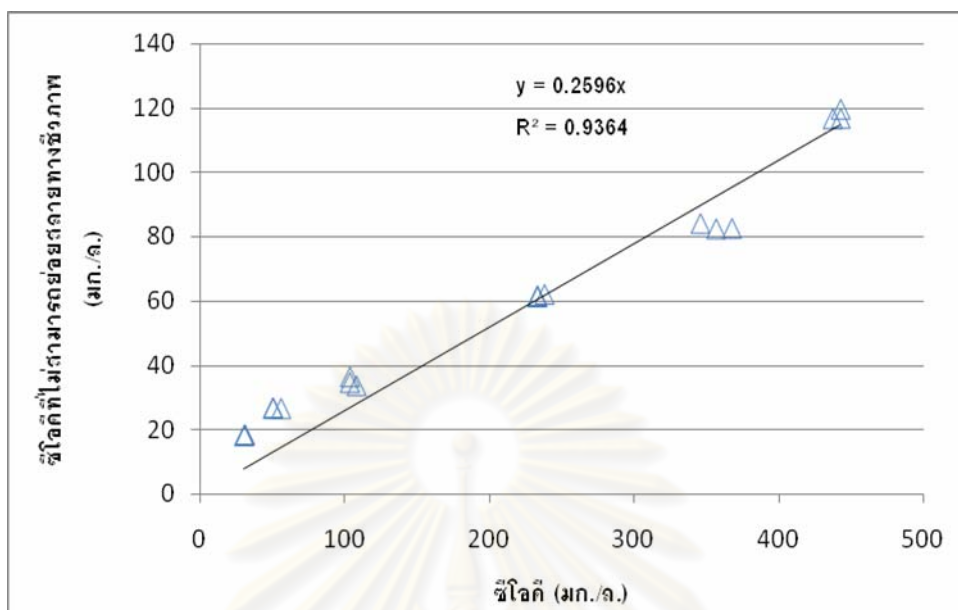
จากข้อมูลการทดลองข้างต้น เมื่อนำผลที่ได้ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างของผลต่างเซลล์ซีโอดี ($\Delta\text{Cell COD}$) เทียบกับผลต่างของซีโอดีละลายน้ำในน้ำเสียหายไป (ΔSCOD) จะสามารถหาค่ายิลด์ได้จากความชันของกราฟดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4.15 ซึ่งค่ายิลด์ที่ได้คือ 0.298 มก.เซลล์ซีโอดี/มก.ซีโอดี นับว่าเป็นค่าที่ต่ำเมื่อเทียบกับยิลด์ของน้ำเสียชุมชนในต่างประเทศ ซึ่งมีค่าประมาณ 0.6 มก.เซลล์ซีโอดี/มก.ซีโอดี (Randall et al., 1992 อ้างถึงใน Grady et al., 1999)



รูปที่ 4.15 ค่ายิลด์ของน้ำเสียโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม

4.4 การหาค่าซีโอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ

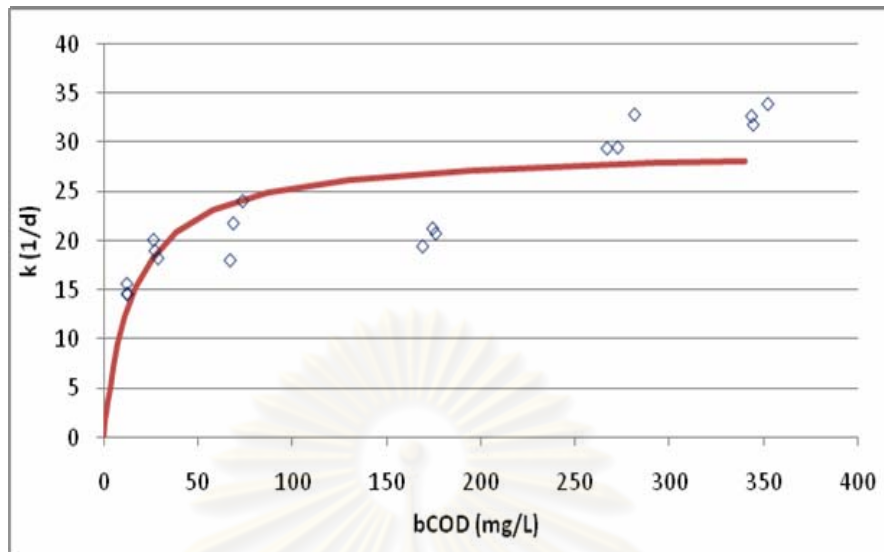
จากการศึกษาค่าซีโอดีเทียบกับเวลาต่างๆ ข้างต้น (อ้างถึงหัวข้อ 4.2) เมื่อทำการศึกษาจนค่าซีโอดีไม่มีการเปลี่ยนแปลง จะได้ค่าซีโอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพโดยเมื่อเมื่อนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีเริ่มต้นกับค่าซีโอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ พบว่าค่าซีโอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพมีสัดส่วนเป็น 0.259 เท่าของค่าซีโอดีเริ่มต้น แสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ค่าชีโอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ

4.5 การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์

จากผลการทดลองในขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้หาค่าจลนพลศาสตร์ ทำให้เราสามารถทราบค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาจากความสัมพันธ์ของกราฟที่ความเข้มข้นค่าชีโอดีต่างๆ และเมื่อนำไปหารด้วยความเข้มข้นเชื้อสลัดจ์เริ่มต้นจะเป็นค่า k จากนั้นนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า k กับค่าชีโอดีที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพตามสมการของ Monod และใช้โปรแกรม SPSS วิเคราะห์หาค่าตัวแปรแบบ Non-Linear Regression ได้ผลดังรูปที่ 4.17 และค่าตัวแปรที่วิเคราะห์ค่าได้ คือ $k_m = 29.43 \pm 1.73$ ต่อวัน และ $K_{SH} = 15.81 \pm 4.79$ มก./ล. ทั้งนี้สามารถคำนวณค่า μ_{mH} ได้จาก $\mu_{mH} = Y \times k_m$ โดยที่ $Y = 0.298$ มก.เซลล์ชีโอดี/มก.ชีโอดี ฉะนั้น $\mu_{mH} = 8.77 \pm 1.73$ ต่อวัน



รูปที่ 4.17 การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์โดยทฤษฎีของ Monod

4.6 การเปรียบเทียบค่าที่วิเคราะห์ได้กับค่าที่อ้างอิงมาจางานวิจัยอื่นๆ

ค่าตัวแปรทั้งหมดที่วิเคราะห์ได้ ได้แก่ ค่ายิลด์ และค่าจลนพลศาสตร์ของน้ำเสียที่เข้าโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมรวมกับน้ำเสียสังเคราะห์จากนมขาดมันเนย คือ μ_{mH} และ K_{SH} ซึ่งค่าที่วิเคราะห์ได้นี้จะถูกลนำมาเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงจากงานวิจัยของน้ำเสียชุมชนอื่นๆ รวมถึงค่าจลนพลศาสตร์ของน้ำเสียชุมชนจากต่างประเทศที่ผ่านมา แสดงดังตารางที่ 4.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าจลนพลศาสตร์ที่วิเคราะห์ได้จากงานวิจัยด้านน้ำเสียชุมชนอื่นๆ

| แหล่งที่มา | แหล่งของน้ำเสีย | Y_H (มก.เซลล์ชีโอดี/มก.ชีโอดี) | K_{SH} (มก./ล.) | μ_{mH} (1/วัน) |
|--------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|-----------------------|
| 1. งานวิจัยนี้ | โรงควบคุมคุณภาพน้ำ หนองแขม และนมขาดมันเนย | 0.298 | 15.81±4.79 | 8.77±1.73 |
| 2. ค่าจากแหล่งอื่นที่นำมาเปรียบเทียบ | | | | |
| - Grady; Daigger & Lim (1999) | น้ำเสียชุมชนต่างประเทศ | 0.67 | 20 | 6 |
| - Metcalf & Eddy (2003) | น้ำเสียชุมชนต่างประเทศ | 0.568 | 40 | 2 |
| - Nuhoglu A et al. (2005) | น้ำเสียชุมชนประเทศตุรกี | - | 35 | 5.5 |
| - Pala A. และ Bölükbas Ö. (2005) | น้ำเสียชุมชนประเทศตุรกี | 0.994 | 343 | 1.128 |
| - ชลธิพร สุทธิธรรม (2550) | โรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดง | 0.61 | 41.34 | 3.96 |
| - ธงชัย นรินทร์วงศ์วาน (2551) | โรงควบคุมคุณภาพน้ำช่องนนทรี | 0.25 | 166 | 2.35 |

ค่ายิลด์ที่วิเคราะห์ได้ มีค่าแตกต่างจากค่าที่นำมาเปรียบเทียบส่วนใหญ่ สาเหตุอาจเนื่องมาจากในน้ำเสียจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมมีองค์ประกอบของไขมันปะปนอยู่ หรืออาจมาจากในนมขาดมันเนยมีองค์ประกอบบางอย่างที่ส่งผลให้เชื้อสัลดีจ์ย่อยสลายน้ำเสียได้ช้า ซึ่งก็จะส่งผลให้ปริมาณเซลล์ที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำตามไปด้วย ทำให้ค่ายิลด์ที่ได้มีค่าต่ำดังที่ได้จากการทดลอง ทั้งนี้ค่ายิลด์ที่ได้นี้มีค่าใกล้เคียงกับธงชัย นิรันดร์วงษ์วาน (2551) ซึ่งอาจแสดงให้เห็นว่าค่ายิลด์ของน้ำเสียชุมชนในประเทศไทยมีค่าต่ำกว่าน้ำเสียชุมชนในต่างประเทศ

ค่าจลนศาสตร์ที่วิเคราะห์ได้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าจากน้ำเสียชุมชนของต่างประเทศและงานวิจัยอื่นๆ ที่ได้ปรับแก้คณพหุมีมาที่ 28 องศาเซลเซียส พบว่า ค่า K_{SH} ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าจาก Grady; Daigger & Lim (1999) Metcalf & Eddy (2003) และ Nuhoglu A et al. (2005) ส่วนค่า μ_{mH} จากงานวิจัยนี้ค่อนข้างมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้งานวิจัยที่ผ่านมา

อย่างไรก็ตามความคลาดเคลื่อนของค่าจลนพลศาสตร์ที่วิเคราะห์ได้จากงานวิจัยนี้อาจเกิดจากเชื้อสัลดีจ์ในการทดลอง เนื่องจาก งานวิจัยนี้วิเคราะห์ปริมาณของเชื้อสัลดีจ์ในรูปของเซลล์ซีโอดีก็มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นได้เช่นกัน นั่นคือ น้ำเสียตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์หาค่าเซลล์ซีโอดีจะต้องเขย่าให้ตะกอนในน้ำเสียกระจายตัวสม่ำเสมอเสียก่อน มิฉะนั้น ค่าที่ได้จะคลาดเคลื่อนที่ค่อนข้างสูง ดังนั้น ในการทดลองของงานวิจัยชิ้นนี้อาจเกิดความคลาดเคลื่อนดังกล่าวในการวิเคราะห์น้ำเสียตัวอย่างบางชุดก็เป็นไปได้ ซึ่งเมื่อค่าซีโอดีที่วิเคราะห์ได้มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นก็จะทำให้ค่าจลนพลศาสตร์ที่วิเคราะห์ได้คลาดเคลื่อนตามไปด้วย เพราะถือเป็นตัวแปรสำคัญตัวหนึ่งที่ต้องใช้ในการหาค่าจลนพลศาสตร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.7 การสร้างแบบจำลองของระบบบำบัดน้ำเสียโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม

แบบจำลองระบบระบบบำบัดน้ำเสียของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม AQUASIM จะนำไปใช้ร่วมกับสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้ง 3 สมการ ได้แก่ สมการที่ (1) (3) และ (4) พร้อมทั้งค่าจลนพลศาสตร์ที่วิเคราะห์ได้จากงานวิจัยนี้ รวมถึงข้อมูลที่เป็นตัวแปรบางส่วนของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม ทั้งนี้ตัวแปรและสมการต่างๆ ที่กำหนดในแบบจำลองนี้แสดงดังตารางที่ 4.2

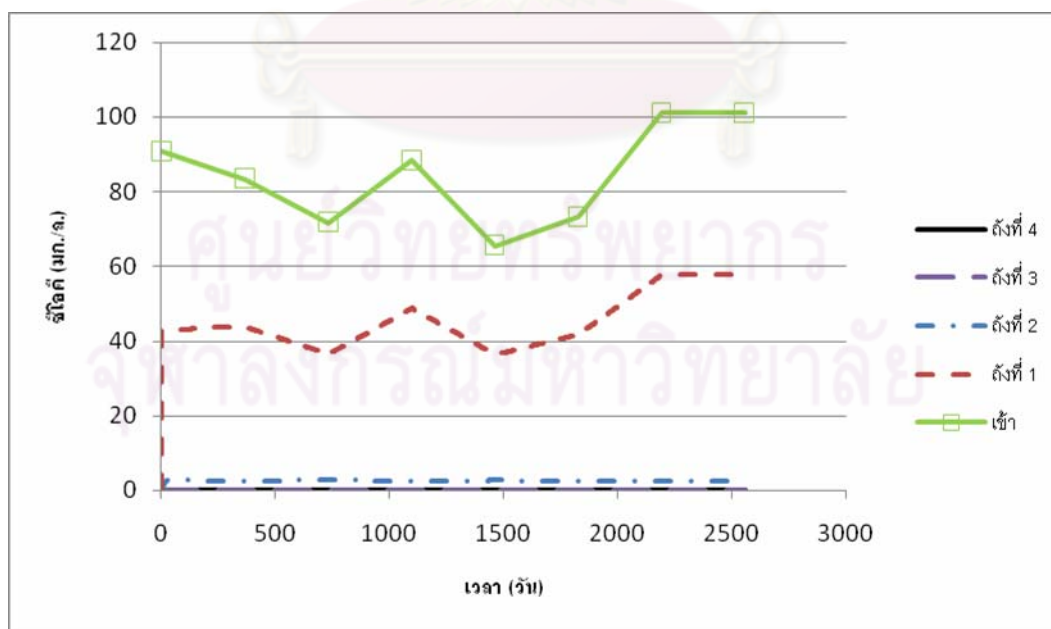
ตารางที่ 4.2 ตัวแปรที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม

| ตัวแปร | ความหมาย | สมการ/ค่า |
|-------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| COD | ซีโอดีของน้ำเสีย (mg/l) | |
| COD _{in} | ซีโอดีของน้ำเสียที่เข้าระบบ | เฉลี่ย 82 |
| DO | ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (mg/l) | 0 ถึง 2 |
| Q | อัตราการไหลของน้ำเสีย (m ³ /d) | |
| Q _{in} | อัตราการไหลของน้ำเสียที่ไหลเข้าสู่ถังเติมอากาศ | เฉลี่ย 58262 |
| Q _{out} | อัตราการไหลของน้ำเสียที่ไหลออกจากถังตกตะกอน | Q _{in} -Q _w |
| Q _r | อัตราการไหลของน้ำเสียที่เวียนจากถังตกตะกอนสู่ถังเติมอากาศ | 1*Q _{in} |
| Q _w | อัตราการไหลของน้ำเสียที่ทิ้งตะกอน | 500 |
| SRT | อายุจุลชีพ (d) | $(V \cdot X) / (Q_{out} \cdot X_{out} + Q_w \cdot X_w)$ |
| X | จุลชีพ (mg/l) | |
| X _{ini} | จุลชีพเริ่มต้นในถังเติมอากาศ | 3500 |
| X _{in} | จุลชีพที่เข้าสู่ระบบ | 0 |
| X _{out} | จุลชีพที่ออกจากถังตกตะกอน | 1.5 |
| X _w | จุลชีพที่ทิ้งออกจากระบบ | $(X \cdot (Q_{in} + Q_r) - X_{out} \cdot Q_{out}) / (Q_w + Q_r)$ |
| Z | ของแข็งแขวนลอย | |
| Z _{ini} | ของแข็งแขวนลอยเริ่มต้นในถังเติมอากาศ | 0 |
| Z _{in} | ของแข็งแขวนลอยที่เข้าสู่ระบบ | 72 |
| Z _{out} | ของแข็งแขวนลอยที่ออกจากถังตกตะกอน | 6.5 |
| Z _w | ของแข็งแขวนลอยที่ทิ้งออกจากระบบ | $(Z \cdot (Q_{in} + Q_r) - Z_{out} \cdot Q_{out}) / (Q_w + Q_r)$ |

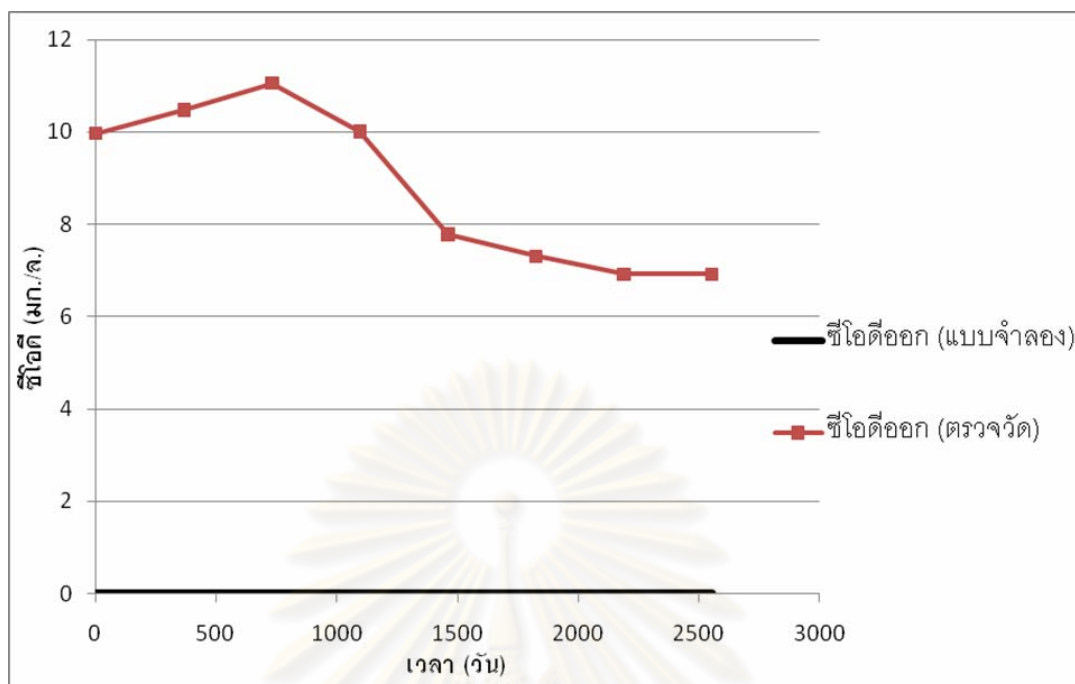
ตารางที่ 4.2 ตัวแปรที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม (ต่อ)

| ตัวแปร | ความหมาย | สมการ/ค่า |
|----------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| V | ปริมาตรของถังเติมอากาศ (m ³) | 6250 |
| b | อัตราการย่อยสลายจำเพาะของจุลชีพ (1/d) | 0.2 |
| K _o | สัมประสิทธิ์การอิ่มตัวครึ่งหนึ่งของออกซิเจน (mg/l) | 0.2 |
| K _s | สัมประสิทธิ์การอิ่มตัวครึ่งหนึ่งของจุลชีพ (mg/l) | 15.81 |
| U _m | อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของจุลชีพ (1/d) | 8.77 |
| Y | ยิลด์ของชีพแบบเฮเทอโรโทรฟ | 0.298 |
| DecayCell | สมการการสลายตัวของจุลชีพ | -b*X |
| Degradation | สมการการย่อยสลายน้ำเสีย | -(U _m /Y)*(COD/(COD+K _s))*X |
| GrowthCell | สมการการเติบโตของจุลชีพ | U _m *(COD/(COD+K _s))*X |

ค่าตัวแปรที่แสดงดังตารางที่ 4.2 คือ ค่าทั้งหมดที่จำเป็นต้องป้อนลงไปในรูปแบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสียของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม AQUASIM ทั้งนี้ในการจำลองระบบบำบัดน้ำเสียดังกล่าวได้ใช้ข้อมูลย้อนหลัง 7 ปี ประกอบการจำลองระบบ โดยผลที่ได้จากการใช้แบบจำลองนี้ทำให้ทราบค่าซีโอดีที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละถัง รวมถึงค่าซีโอดีสุดท้ายที่ออกจากระบบ แสดงดังรูปที่ 4.18 และ 4.19



รูปที่ 4.18 ผลการจำลองค่าซีโอดีในถังปฏิบัติการต่างๆ ของแบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสียหนองแขม ด้วยโปรแกรม AQUASIM



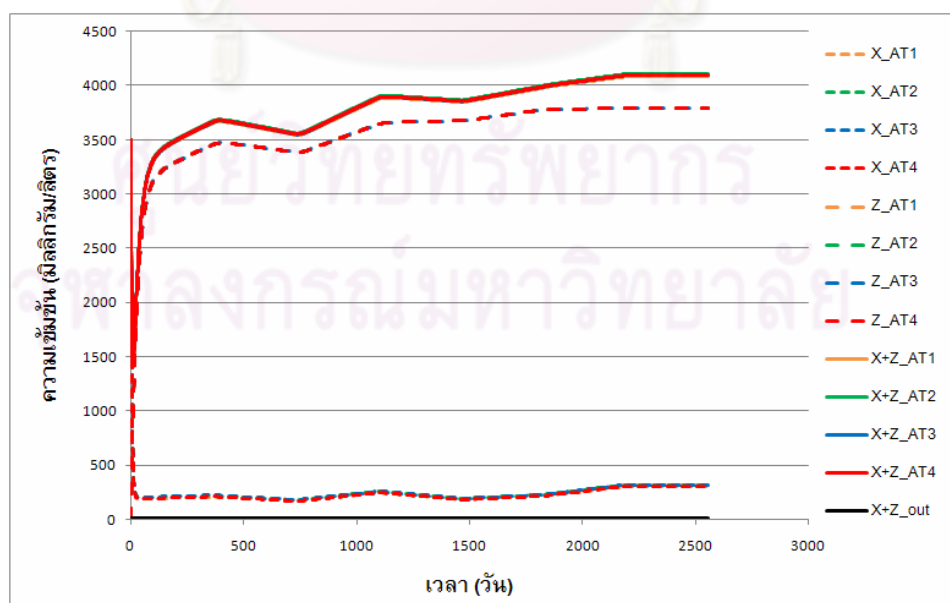
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงค่าซีโอได้ออกจากระบบจริง และค่าซีโอได้ออกที่ได้จากโปรแกรม AQUASIM

จากกราฟแสดงผลของการเปลี่ยนแปลงค่าซีโอได้ออกในถังต่างๆ ของระบบ พบว่า น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบมีค่าซีโอได้ออกเฉลี่ยประมาณ 82 มก./ล. เมื่อเข้าสู่ถังที่ 1 ค่าซีโอได้ออกถูกบำบัดไปประมาณร้อยละ 50 ซึ่งความจริงแล้วถังนี้จะไม่สามารถเกิดการบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพได้ เนื่องจากในถังที่ 1 ได้ควบคุมค่าออกซิเจนละลายให้เท่ากับ 0 มก./ล. แต่สาเหตุที่ทำให้ค่าซีโอได้ออกลดลงอาจเกิดมาจากการเจือจางของน้ำที่ถูกเวียนกลับมาจากถังตะตะกอน ต่อมาเมื่อเข้าสู่ถังที่ 2 3 และ 4 ค่าซีโอได้ออกจะลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากปฏิกิริยาทางชีวภาพซึ่งในถังที่ 2 3 และ 4 ได้ถูกควบคุมให้มีค่าออกซิเจนละลาย 1.1 และ 2 มก./ล. ตามลำดับ

สำหรับค่าซีโอได้ออกจากระบบที่ได้จากแบบจำลองด้วยโปรแกรม AQUASIM พบว่ามีค่าต่ำมาก (ประมาณ 0.1 มก./ล.) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าจำลองศาสตร์ที่วิเคราะห์ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้งานร่วมกับระบบบำบัดน้ำเสียของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมได้ อย่างไรก็ตามเมื่อนำค่าซีโอได้ออกจากระบบที่ได้จากแบบจำลองนี้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าซีโอได้ออกผลการตรวจวัดจริงของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม พบว่า มีค่าต่ำกว่ามาก สาเหตุที่เป็นเช่นนั้นอาจเกิดมาจากการจำลองแบบจำลองไม่ได้คำนึงถึงค่าซีโอได้ออกที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ ซึ่งจากผลข้างต้น พบว่า ในระบบบำบัดจริงมีอัตราส่วนของซีโอได้ออกที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพต่อซีโอได้ออกทั้งหมดเท่ากับ 0.11 เท่า จึงทำให้ค่าซีโอได้ออกจากระบบที่ได้จาก

แบบจำลองและผลจากการตรวจวัดจริงมีค่าแตกต่างกัน ทั้งนี้หากนำอัตราส่วนของซีโอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพต่อซีโอดีทั้งหมดที่จากงานวิจัยนี้ (0.256) มาป้อนเข้าสู่แบบจำลองก็จะทำให้ค่าซีโอดีที่ออกจากระบบที่ได้มีค่าคลาดเคลื่อนจากผลการตรวจวัดจริง สำหรับเหตุผลที่ทำให้อัตราส่วนระหว่างค่าซีโอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพต่อซีโอดีทั้งหมดที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าสูงกว่าผลจากการตรวจวัดจริงคาดว่ามีสาเหตุเนื่องจาก ในงานวิจัยนี้ได้มีการใช้นมขาดมันเนยมาช่วยเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเสียจริง ซึ่งในนมดังกล่าวอาจมีสารที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพหรือย่อยสลายได้ยากปนอยู่ จึงส่งผลให้อัตราส่วนระหว่างค่าซีโอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพต่อซีโอดีทั้งหมดของงานวิจัยนี้มีค่าสูงกว่าผลการตรวจวัดจริง

นอกจากนี้จากการสร้างแบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสียของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมมีของแข็งแขวนลอยในถังเติมอากาศแต่ละถังประมาณ 4000 มก./ล. ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลการควบคุมการเดินระบบของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมที่แจ้งว่ามีค่า MLSS อยู่ในช่วง 3000-4000 มก./ล. ก็ถือว่ามีค่าใกล้เคียงกัน อีกทั้งผลจากแบบจำลองทำให้ทราบว่าของแข็งแขวนลอยในการเดินถังเติมอากาศประกอบด้วยจุลชีพที่ทำปฏิกิริยาทางชีวภาพมีเพียง 250-350 มก./ล. และส่วนที่เหลือเป็นของแข็งแขวนลอยชนิดอื่นที่สะสมอยู่ในระบบถึง 3500-3700 มก./ล. อย่างไรก็ตามปริมาณความเข้มข้นของจุลชีพดังกล่าวก็สามารถย่อยสลายค่าซีโอดีของน้ำเสียได้ และนอกจากนี้การทำให้ระบบมีค่าความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยรวมประมาณ 4000 มก./ล. ถือเป็นผลดีต่อถังตกตะกอน เพราะว่ถังตกตะกอนจะมีประสิทธิภาพได้ดีเมื่อในถังมีความเข้มข้นของของแข็งมากกว่า 1500 มก./ล.



รูปที่ 4.20 ผลของการจำลองความเข้มข้นของจุลชีพและของแข็งแขวนลอยในถังเติมอากาศ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองทั้งหมดที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ ดังนี้

1) ค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตที่ทำการวิเคราะห์ คือ ยิลด์ของเฮเทอโรโทรป (Y_H) จากการทดลองได้ผลดังรูปที่ 4.14 พบว่ามีค่ายิลด์เท่ากับ 0.298 มก.เซลล์ซีไอดี/มก.ซีไอดี

2) ค่าซีไอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพที่ได้จากการทดลองนี้ มีสัดส่วนเป็น 0.259 เท่าของค่าซีไอดีเริ่มต้น

3) ค่าจลนพลศาสตร์ที่ทำการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ คือ อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของจุลชีพแบบเฮเทอโรโทรป (μ_{mH}) เท่ากับ 8.77 ± 1.73 ต่อวันและสัมประสิทธิ์การอิ่มตัวครั้งหนึ่งของจุลชีพแบบเฮเทอโรโทรป (K_{SH}) 15.81 ± 4.79 มก./ล.

4) ค่าจลนพลศาสตร์ที่วิเคราะห์ได้นี้โดยเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์การอิ่มตัวครั้งหนึ่งของจุลชีพแบบเฮเทอโรโทรป (K_{SH}) เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงจากแหล่งข้อมูลต่างๆ โดยทำการปรับแก้อุณหภูมิแล้ว พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่าจาก Grady; Daigger & Lim (1999) Metcalf & Eddy (2003) และ Nuhoglu A et al. (2005) ในส่วนของค่ายิลด์ของเฮเทอโรโทรป (Y_H) เมื่อพิจารณาเฉพาะงานวิจัยของน้ำเสียชุมชนในประเทศไทย พบว่า มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมา โดยเฉพาะเมื่อเทียบกับธงชัย นิรันดร์วงศ์วาน (2551)

5) การสร้างแบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสียของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมด้วยโปรแกรม AQUASIM โดยใช้ค่าจลนพลศาสตร์ที่วิเคราะห์ได้จากงานวิจัยนี้ พบว่า ได้ค่าซีไอดีที่ออกจากระบบมีค่าต่ำกว่าผลจากการตรวจวัดจริง ซึ่งอาจเกิดมาจากในแบบจำลองไม่ได้คำนึงถึงค่าซีไอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ อย่างไรก็ตามผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าค่าจลนพลศาสตร์ที่วิเคราะห์ได้สามารถนำไปใช้งานร่วมกับระบบบำบัดน้ำเสียของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมได้

6) จากการสร้างแบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสียของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม พบว่า มีจุลชีพที่ทำปฏิกิริยาทางชีวภาพเพียง 315 มก./ล. และของแข็งแขวนลอยอื่นที่สะสมอยู่ในระบบประมาณ 3700 มก./ล. อย่างไรก็ตามปริมาณจุลชีพที่มีอยู่ในระบบก็เพียงพอที่จะสามารถทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ดินนอกจากนี้ การที่ระบบมีปริมาณของแข็งรวมอยู่

ในช่วงประมาณ 4000 มก./ล. เป็นผลดีต่อถังตกตะกอนเพราะว่าถังตกตะกอนจะมีประสิทธิภาพในการตกตะกอนได้ดีเมื่อในถังมีความเข้มข้นของของแข็งมากกว่า 1500 มก./ล.

5.2 ความสำคัญด้านวิศวกรรม และ การนำไปใช้งาน

ผลที่ได้จากการทำงานวิจัยชิ้นนี้สามารถนำไปใช้ในด้านต่างๆ ดังนี้

- 1) โปรแกรม AQUASIM สามารถนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองของระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ค่าตัวแปรอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพได้
- 2) โปรแกรม AQUASIM สามารถนำไปใช้กับงานอื่นที่เกี่ยวข้องกับระบบบำบัดน้ำได้นอกเหนือจากระบบบำบัดน้ำเสีย
- 3) ค่าจลนพลศาสตร์ที่วิเคราะห์ได้จากงานวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบหรือปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพต่อไปในอนาคต

5.3 ข้อเสนอแนะ

จากการทำงานวิจัยชิ้นนี้พบประเด็นที่น่าสนใจ และเหมาะแก่การนำมาเสนอแนะเป็นแนวทางในการต่อยอดงานวิจัยชิ้นนี้ต่อไปในอนาคต โดยสรุปได้ดังนี้

- 1) วิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์อีกค่าหนึ่งที่เหลืออยู่ คือ หาค่าอัตราการย่อยสลายของจุลชีพแบบเฮเทอโรโทรฟ (Heterotroph decay rate; b_H) ซึ่งเป็นค่าจลนพลศาสตร์ที่ไม่ได้ทำการวิเคราะห์ในงานวิจัยครั้งนี้
- 2) ศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ในกรณีของจุลชีพแบบออโตโทรฟ (Autotroph)
- 3) ศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ต่างๆ เพิ่มในกรณีของการย่อยสลายแบบไร้อากาศที่เกิดขึ้นในส่วนถังวีแอลอาร์ถังแรก ซึ่งไม่ได้นำมาพิจารณาในงานวิจัยนี้
- 4) ศึกษาปฏิกิริยาของแข็งแขวนลอยที่ไม่ใช่จุลชีพที่เข้ามาสะสมในระบบ
- 5) ศึกษาค่าจลนพลศาสตร์โดยใช้น้ำเสียจากแหล่งอื่นๆ ซึ่งมีคุณสมบัติของน้ำเสียที่แตกต่างกัน เพื่อรวบรวมข้อมูลในการนำไปใช้ในการออกแบบและปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียต่อไปในอนาคต
- 6) แบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสียของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ได้มีการออกแบบให้สามารถควบคุมค่าออกซิเจนละลายน้ำได้ แต่ยังไม่ได้ออกแบบ

ของการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน และดีไนตริฟิเคชัน ซึ่งหากได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาดังกล่าว รวมถึงเรื่องของของแข็งที่เข้าสู่ระบบ และค่าซีโอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพเพิ่มเติม จะทำให้แบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสียของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมสมบูรณ์ยิ่งขึ้น



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- ชลธิพร สุทธิธรรม. 2550. การศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนใน กรุงเทพมหานครและการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของโรงบำบัดน้ำเสียดินแดง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2544. การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- มันสิน ตันสกุลเวศม์. 2538. คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธงชัย นีรันดรวงสาน. 2551. ค่าจลนพลศาสตร์ของน้ำเสียชุมชนและแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของโรงบำบัดน้ำเสียหนองนทรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- American Public Health Association. 1998. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 20th ed. Baltimore : United Book Press.
- Grady, C. P. L., Jr., Daigger, G. T., and Lim, C. H. 1999. Biological wastewater treatment. 2nd ed. Revised and expanded. New York: Marcel Dekker.
- Henze, M., Gujer, W., Mino, T., and van Loosdrecht, M. 2000. Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2D and ASM3. 1st ed. Scientific and technical report No.9 London : IWA publishing.
- Holman, J. P. 2001. Experiment methods for engineers. 7th ed. Boston : McGraw-Hill.
- IWA task group on mathematical modeling for design and operational of biological wastewater treatment. 2000. Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2D and ASM3. 1st ed. Scientific and technical report No 9. London: IWA publishing.

- Nuhoglu, A., Keskinler, B., and Yildiz, E. 2005. Mathematical modelling of the activated sludge process—the Erzincan case. Process Biochemistry 40 : 2467-2473.
- Peter Reichert. 1998. AQUASIM 2.0 – Tutorial. Switzerland : Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology (EAWAG).
- Randall, C. W., Stensel, H.D., and Barnard, J. L. 1992. Design and retrofit of wastewater treatment plants for biological removal. Lancaster, Pennsylvania : Technomic Publishing.
- Reichert, P., von Schulthess, R., and Wild, D. 1995. The use of aquasim for estimating parameters of activated sludge models. Water Science and Technology 31 : 135-147.





ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. ข้อมูลดิบจากการทดลอง

1.1 ผลการทดลองการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้หาค่าจลนพลศาสตร์

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 10 มก./ล. เซลล์เริ่มต้น 100 มก./ล. ชุดที่ 1

| TIME (hr) | TCOD (mg/l) | | | | SCOD (mg/l) | | | | cell-COD (mg/l) | | | |
|--------------|-------------|----------|----------|--------|-------------|----------|----------|--------|-----------------|----------|----------|--------|
| | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย |
| 0 | 31.04 | 30.67 | 29.88 | 30.53 | 25.11 | 25.08 | 24.84 | 25.01 | 5.93 | 5.59 | 5.04 | 5.52 |
| 0.05 | 28.87 | 28.87 | 27.22 | 28.32 | 22.20 | 22.28 | 22.27 | 22.25 | 6.67 | 6.59 | 4.95 | 6.07 |
| 0.117 | 26.88 | 26.88 | 26.25 | 26.67 | 20.66 | 20.66 | 20.48 | 20.6 | 6.22 | 6.22 | 5.77 | 6.07 |
| 0.183 | 25.11 | 25.08 | 24.84 | 25.01 | 19.49 | 19.54 | 19.44 | 19.49 | 5.62 | 5.54 | 5.4 | 5.52 |
| 0.25 | 23.44 | 23.68 | 22.96 | 23.36 | 17.25 | 17.38 | 17.24 | 17.29 | 6.19 | 6.3 | 5.72 | 6.07 |
| 0.317 | 22.18 | 22.21 | 22.36 | 22.25 | 15.66 | 15.63 | 15.6 | 15.63 | 6.52 | 6.58 | 6.76 | 6.62 |
| 0.367 | 20.54 | 20.68 | 20.58 | 20.6 | 13.97 | 13.89 | 14.08 | 13.98 | 6.57 | 6.79 | 6.5 | 6.62 |
| 20 | 18.11 | 18.15 | 18.19 | 18.15 | 12.21 | 12.27 | 12.24 | 12.24 | 5.90 | 5.88 | 5.95 | 5.91 |
| 44.25 | 18.28 | 18.24 | 18.41 | 18.31 | 11.88 | 11.88 | 11.88 | 11.88 | 6.40 | 6.36 | 6.53 | 6.43 |
| 68 | 17.99 | 17.87 | 17.81 | 17.89 | 11.68 | 11.65 | 11.71 | 11.68 | 6.31 | 6.22 | 6.1 | 6.21 |
| 92.25 | 18.76 | 18.84 | 18.44 | 18.68 | 11.45 | 11.42 | 11.42 | 11.43 | 7.31 | 7.42 | 7.02 | 7.25 |

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 10 มก./ล. เซลล์เริ่มต้น 100 มก./ล. ชุดที่ 2

| TIME (hr) | TCOD (mg/l) | | | | SCOD (mg/l) | | | | cell-COD (mg/l) | | | |
|--------------|-------------|----------|----------|--------|-------------|----------|----------|--------|-----------------|----------|----------|--------|
| | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย |
| 0 | 31.10 | 31.16 | 30.98 | 31.08 | 26.11 | 26.11 | 26.11 | 26.11 | 4.99 | 5.05 | 4.87 | 4.97 |
| 0.05 | 28.87 | 28.92 | 28.82 | 28.87 | 23.35 | 23.16 | 23.57 | 23.36 | 5.52 | 5.76 | 5.25 | 5.51 |
| 0.117 | 27.20 | 27.28 | 27.18 | 27.22 | 21.70 | 21.91 | 21.49 | 21.7 | 5.50 | 5.37 | 5.69 | 5.52 |
| 0.183 | 25.01 | 25.08 | 24.94 | 25.01 | 19.45 | 19.87 | 19.15 | 19.49 | 5.56 | 5.21 | 5.79 | 5.52 |
| 0.25 | 23.87 | 23.9 | 23.96 | 23.91 | 18.35 | 18.57 | 18.25 | 18.39 | 5.52 | 5.33 | 5.71 | 5.52 |
| 0.317 | 22.84 | 22.8 | 22.76 | 22.8 | 16.17 | 16.32 | 16.05 | 16.18 | 6.67 | 6.48 | 6.71 | 6.62 |
| 0.367 | 21.11 | 21.15 | 21.19 | 21.15 | 14.52 | 14.69 | 14.38 | 14.53 | 6.59 | 6.46 | 6.81 | 6.62 |
| 20 | 19.15 | 19.2 | 19.01 | 19.12 | 12.88 | 12.65 | 13.08 | 12.87 | 6.27 | 6.55 | 5.93 | 6.25 |
| 44.25 | 18.45 | 18.42 | 18.42 | 18.43 | 12.34 | 12.49 | 12.28 | 12.37 | 6.11 | 5.93 | 6.14 | 6.06 |
| 68 | 18.68 | 18.71 | 18.71 | 18.7 | 11.99 | 11.76 | 12.16 | 11.97 | 6.69 | 6.95 | 6.55 | 6.73 |
| 92.25 | 18.42 | 18.46 | 18.43 | 18.44 | 11.86 | 11.99 | 11.82 | 11.89 | 6.56 | 6.47 | 6.61 | 6.55 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.3 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 10 มก./ล. เซลล์เริ่มต้น 100 มก./ล. ชุดที่ 3

| TIME (hr) | TCOD (mg/l) | | | | SCOD (mg/l) | | | | cell-COD (mg/l) | | | |
|--------------|-------------|----------|----------|--------|-------------|----------|----------|--------|-----------------|----------|----------|--------|
| | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย |
| 0 | 30.55 | 30.42 | 30.62 | 30.53 | 25.00 | 25.34 | 24.69 | 25.01 | 5.55 | 5.08 | 5.93 | 5.52 |
| 0.05 | 27.75 | 27.98 | 27.58 | 27.77 | 22.23 | 22.54 | 23.63 | 22.8 | 5.52 | 5.44 | 3.95 | 4.97 |
| 0.117 | 26.54 | 26.88 | 26.59 | 26.67 | 21.13 | 21.43 | 20.89 | 21.15 | 5.41 | 5.45 | 5.7 | 5.52 |
| 0.183 | 26.55 | 26.92 | 26.54 | 26.67 | 19.44 | 19.65 | 19.38 | 19.49 | 7.11 | 7.27 | 7.16 | 7.18 |
| 0.25 | 23.51 | 23.64 | 22.93 | 23.36 | 16.42 | 16.81 | 16.99 | 16.74 | 7.09 | 6.83 | 5.94 | 6.62 |
| 0.317 | 21.64 | 21.7 | 21.76 | 21.7 | 15.03 | 15.27 | 14.94 | 15.08 | 6.61 | 6.43 | 6.82 | 6.62 |
| 0.367 | 19.37 | 19.66 | 19.44 | 19.49 | 13.87 | 13.66 | 14.41 | 13.98 | 5.50 | 6 | 5.03 | 5.51 |
| 20 | 18.86 | 18.49 | 19.47 | 18.94 | 12.78 | 12.98 | 13.09 | 12.95 | 6.08 | 5.51 | 6.38 | 5.99 |
| 44.25 | 18.22 | 18.57 | 18.35 | 18.38 | 12.45 | 12.78 | 12.18 | 12.47 | 5.77 | 5.79 | 6.17 | 5.91 |
| 68 | 18.4 | 18.18 | 18.68 | 18.42 | 12.06 | 12.32 | 11.83 | 12.07 | 6.34 | 5.86 | 6.85 | 6.35 |
| 92.25 | 18.64 | 18.87 | 18.38 | 18.63 | 12.2 | 12.45 | 12.07 | 12.24 | 6.44 | 6.42 | 6.31 | 6.39 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.4 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 25 มก./ล. เซลล์เริ่มต้น 150 มก./ล. ชุดที่ 1

| TIME (hr) | TCOD (mg/l) | | | | SCOD (mg/l) | | | | cell-COD (mg/l) | | | |
|--------------|-------------|----------|----------|--------|-------------|----------|----------|--------|-----------------|----------|----------|--------|
| | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย |
| 0.00 | 56.03 | 55.78 | 56.01 | 55.94 | 45.65 | 44.89 | 43.74 | 44.76 | 10.38 | 10.89 | 12.27 | 11.18 |
| 0.07 | 51.36 | 50.28 | 49.41 | 50.35 | 40.24 | 39.26 | 37.98 | 39.16 | 11.12 | 11.02 | 11.43 | 11.19 |
| 0.15 | 46.03 | 44.45 | 43.80 | 44.76 | 39.89 | 39.24 | 38.35 | 39.16 | 6.14 | 5.21 | 5.45 | 5.60 |
| 0.23 | 40.21 | 39.65 | 37.62 | 39.16 | 34.54 | 33.72 | 32.45 | 33.57 | 5.67 | 5.93 | 5.17 | 5.59 |
| 0.30 | 39.98 | 39.65 | 37.85 | 39.16 | 28.59 | 28.07 | 27.25 | 27.97 | 11.39 | 11.58 | 10.60 | 11.19 |
| 0.37 | 39.54 | 39.48 | 38.46 | 39.16 | 28.07 | 28.07 | 27.77 | 27.97 | 11.47 | 11.41 | 10.69 | 11.19 |
| 0.42 | 34.02 | 33.78 | 32.91 | 33.57 | 23.51 | 22.83 | 20.80 | 22.38 | 10.51 | 10.95 | 12.11 | 11.19 |
| 20.00 | 27.25 | 26.84 | 25.35 | 26.48 | 13.43 | 13.03 | 12.21 | 12.89 | 13.82 | 13.81 | 13.14 | 13.59 |
| 44.25 | 27.08 | 26.84 | 25.37 | 26.43 | 13.03 | 13.03 | 12.67 | 12.91 | 14.05 | 13.81 | 12.70 | 13.52 |
| 68.00 | 27.25 | 27.25 | 26.41 | 26.97 | 13.03 | 12.95 | 12.21 | 12.73 | 14.22 | 14.30 | 14.20 | 14.24 |
| 92.25 | 27.89 | 26.92 | 26.31 | 27.04 | 12.95 | 12.21 | 12.88 | 12.68 | 14.94 | 14.71 | 13.43 | 14.36 |

ศูนย์วิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.5 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 25 มก./ล. เซลล์เริ่มต้น 150 มก./ล. ชุดที่ 2

| TIME (hr) | TCOD (mg/l) | | | | SCOD (mg/l) | | | | cell-COD (mg/l) | | | |
|--------------|-------------|----------|----------|--------|-------------|----------|----------|--------|-----------------|----------|----------|--------|
| | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย |
| 0 | 51.62 | 50.48 | 48.95 | 50.35 | 45.82 | 45.02 | 43.44 | 44.76 | 5.80 | 5.46 | 5.51 | 5.59 |
| 0.067 | 51.21 | 49.81 | 50.03 | 50.35 | 40.54 | 39.14 | 37.8 | 39.16 | 10.67 | 10.67 | 12.23 | 11.19 |
| 0.15 | 45.86 | 44.85 | 43.57 | 44.76 | 34.85 | 33.62 | 32.24 | 33.57 | 11.01 | 11.23 | 11.33 | 11.19 |
| 0.23 | 40.28 | 39.84 | 37.36 | 39.16 | 34.23 | 33.62 | 32.86 | 33.57 | 6.05 | 6.22 | 4.5 | 5.59 |
| 0.3 | 40.28 | 38.41 | 38.79 | 39.16 | 28.56 | 27.84 | 27.51 | 27.97 | 11.72 | 10.57 | 11.28 | 11.19 |
| 0.367 | 34.52 | 33.63 | 32.56 | 33.57 | 22.82 | 22.34 | 21.98 | 22.38 | 11.70 | 11.29 | 10.58 | 11.19 |
| 0.417 | 28.36 | 28.04 | 27.51 | 27.97 | 22.34 | 22.74 | 22.06 | 22.38 | 6.02 | 5.3 | 5.45 | 5.59 |
| 20 | 28.03 | 27.84 | 27.17 | 27.68 | 14.18 | 13.54 | 12.21 | 13.31 | 13.85 | 14.3 | 14.96 | 14.37 |
| 44.25 | 27.17 | 26.51 | 25.25 | 26.31 | 14.53 | 14.53 | 12.58 | 13.88 | 12.64 | 11.98 | 12.67 | 12.43 |
| 68 | 27.84 | 27.35 | 25.93 | 27.04 | 13.78 | 13.46 | 12.48 | 13.24 | 14.06 | 13.89 | 13.45 | 13.8 |
| 92.25 | 28.03 | 27.84 | 26.69 | 27.52 | 13.05 | 12.97 | 12.32 | 12.78 | 14.98 | 14.87 | 14.37 | 14.74 |

ศูนย์วิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.6 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 25 มก./ล. เซลล์เริ่มต้น 150 มก./ล. ชุดที่ 3

| TIME (hr) | TCOD (mg/l) | | | | SCOD (mg/l) | | | | cell-COD (mg/l) | | | |
|--------------|-------------|----------|----------|--------|-------------|----------|----------|--------|-----------------|----------|----------|--------|
| | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย |
| 0 | 52.64 | 50.48 | 47.93 | 50.35 | 40.35 | 39.82 | 37.31 | 39.16 | 12.29 | 10.66 | 10.62 | 11.19 |
| 0.067 | 52.03 | 50.28 | 48.74 | 50.35 | 40.05 | 39.52 | 37.91 | 39.16 | 11.98 | 10.76 | 10.83 | 11.19 |
| 0.15 | 51.85 | 50.28 | 48.92 | 50.35 | 34.36 | 33.48 | 32.87 | 33.57 | 17.49 | 16.8 | 16.05 | 16.78 |
| 0.23 | 50.75 | 50.75 | 49.55 | 50.35 | 28.67 | 28.05 | 27.19 | 27.97 | 22.08 | 22.7 | 22.36 | 22.38 |
| 0.3 | 34.52 | 33.67 | 32.52 | 33.57 | 28.05 | 27.46 | 28.4 | 27.97 | 6.47 | 6.21 | 4.12 | 5.60 |
| 0.367 | 34.52 | 34.08 | 32.11 | 33.57 | 23.34 | 22.86 | 20.94 | 22.38 | 11.18 | 11.22 | 11.17 | 11.19 |
| 0.417 | 34.08 | 34.08 | 32.55 | 33.57 | 17.62 | 16.83 | 15.89 | 16.78 | 16.46 | 17.25 | 16.66 | 16.79 |
| 20 | 29.31 | 28.51 | 26.6 | 28.14 | 14.28 | 14.28 | 11.97 | 13.51 | 15.03 | 14.23 | 14.63 | 14.63 |
| 44.25 | 28.63 | 27.41 | 25.59 | 27.21 | 13.76 | 13.43 | 12.44 | 13.21 | 14.87 | 13.98 | 13.15 | 14.00 |
| 68 | 28.63 | 27.73 | 25.69 | 27.35 | 13.43 | 12.95 | 12.23 | 12.87 | 15.20 | 14.78 | 13.46 | 14.48 |
| 92.25 | 27.73 | 26.84 | 25.47 | 26.68 | 13.76 | 12.95 | 12.83 | 13.18 | 13.97 | 13.89 | 12.64 | 13.50 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.7 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 50 มก./ล. เซลล์เริ่มต้น 200 มก./ล. ชุดที่ 1

| TIME (hr) | TCOD (mg/l) | | | | SCOD (mg/l) | | | | cell-COD (mg/l) | | | |
|--------------|-------------|----------|----------|--------|-------------|----------|----------|--------|-----------------|----------|----------|--------|
| | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย |
| 0 | 110.58 | 109.03 | 104.72 | 108.11 | 84.02 | 85.15 | 85.65 | 84.94 | 26.56 | 23.88 | 19.07 | 23.17 |
| 0.067 | 100.21 | 98.54 | 97.77 | 98.84 | 74.35 | 75.12 | 77.57 | 75.68 | 25.86 | 23.42 | 20.2 | 23.16 |
| 0.15 | 95.64 | 95.64 | 91.35 | 94.21 | 71.54 | 72.04 | 69.54 | 71.04 | 24.10 | 23.6 | 21.81 | 23.17 |
| 0.23 | 82.05 | 80.87 | 78.01 | 80.31 | 67.62 | 66.87 | 64.74 | 66.41 | 14.43 | 14 | 13.27 | 13.9 |
| 0.3 | 82.05 | 80.87 | 78.01 | 80.31 | 58.36 | 57.74 | 55.32 | 57.14 | 23.69 | 23.13 | 22.69 | 23.17 |
| 0.367 | 76.84 | 75.54 | 74.66 | 75.68 | 53.62 | 52.18 | 51.73 | 52.51 | 23.22 | 23.36 | 22.93 | 23.17 |
| 0.43 | 72.64 | 71.43 | 69.05 | 71.04 | 48.63 | 48.02 | 46.99 | 47.88 | 24.01 | 23.41 | 22.06 | 23.16 |
| 20 | 36.08 | 35.48 | 34.73 | 35.43 | 15.62 | 14.98 | 12.96 | 14.52 | 20.46 | 20.5 | 21.77 | 20.91 |
| 44.25 | 35.21 | 34.18 | 31.65 | 33.68 | 13.84 | 12.72 | 11.81 | 12.79 | 21.37 | 21.46 | 19.84 | 20.89 |
| 68 | 33.54 | 33.54 | 32.16 | 33.08 | 13.84 | 13.49 | 12.69 | 13.34 | 19.70 | 20.05 | 19.47 | 19.74 |
| 92.25 | 33.54 | 32.64 | 32.64 | 32.94 | 14.05 | 13.49 | 13.38 | 13.64 | 19.49 | 19.15 | 19.26 | 19.3 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.8 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 50 มก./ล. เซลล์เริ่มต้น 200 มก./ล. ชุดที่ 2

| TIME (hr) | TCOD (mg/l) | | | | SCOD (mg/l) | | | | cell-COD (mg/l) | | | |
|--------------|-------------|----------|----------|--------|-------------|----------|----------|--------|-----------------|----------|----------|--------|
| | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย |
| 0 | 105.34 | 104.05 | 101.02 | 103.47 | 81.35 | 80.47 | 79.11 | 80.31 | 23.99 | 23.58 | 21.91 | 23.16 |
| 0.067 | 95.34 | 94.85 | 92.44 | 94.21 | 76.85 | 75.41 | 74.78 | 75.68 | 18.49 | 19.44 | 17.66 | 18.53 |
| 0.15 | 90.85 | 89.51 | 88.38 | 89.58 | 72.24 | 71.32 | 69.56 | 71.04 | 18.61 | 18.19 | 18.82 | 18.54 |
| 0.23 | 85.97 | 84.04 | 84.81 | 84.94 | 67.52 | 66.41 | 65.3 | 66.41 | 18.45 | 17.63 | 19.51 | 18.53 |
| 0.3 | 84.04 | 84.81 | 85.97 | 84.94 | 58.49 | 57.45 | 55.48 | 57.14 | 25.55 | 27.36 | 30.49 | 27.8 |
| 0.367 | 81.87 | 80.95 | 78.11 | 80.31 | 53.36 | 52.74 | 51.43 | 52.51 | 28.51 | 28.21 | 26.68 | 27.8 |
| 0.43 | 72.48 | 71.75 | 68.89 | 71.04 | 44.85 | 43.25 | 41.62 | 43.24 | 27.63 | 28.5 | 27.27 | 27.8 |
| 20 | 37.89 | 36.74 | 34.15 | 36.26 | 15.87 | 14.75 | 13.15 | 14.59 | 22.02 | 21.99 | 21 | 21.67 |
| 44.25 | 35.42 | 34.85 | 34.04 | 34.77 | 14.28 | 13.84 | 12.26 | 13.46 | 21.14 | 21.01 | 21.78 | 21.31 |
| 68 | 34.85 | 34.4 | 33.23 | 34.16 | 13.84 | 13.04 | 12.39 | 13.09 | 21.01 | 21.36 | 20.84 | 21.07 |
| 92.25 | 34.02 | 34.02 | 33.78 | 33.94 | 13.04 | 12.74 | 12.35 | 12.71 | 20.98 | 21.28 | 21.43 | 21.23 |

ศูนย์วิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.9 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 50 มก./ล. เซลล์เริ่มต้น 200 มก./ล. ชุดที่ 3

| TIME (hr) | TCOD (mg/l) | | | | SCOD (mg/l) | | | | cell-COD (mg/l) | | | |
|--------------|-------------|----------|----------|--------|-------------|----------|----------|--------|-----------------|----------|----------|--------|
| | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย |
| 0 | 105.23 | 103.54 | 101.64 | 103.47 | 81.52 | 80.75 | 78.66 | 80.31 | 23.71 | 22.79 | 22.98 | 23.16 |
| 0.067 | 99.54 | 98.87 | 98.11 | 98.84 | 72.86 | 71.35 | 68.91 | 71.04 | 26.68 | 27.52 | 29.2 | 27.80 |
| 0.15 | 95.89 | 94.74 | 92 | 94.21 | 67.38 | 66.65 | 65.2 | 66.41 | 28.51 | 28.09 | 26.8 | 27.80 |
| 0.23 | 95.24 | 94.74 | 92.65 | 94.21 | 62.85 | 61.76 | 60.73 | 61.78 | 32.39 | 32.98 | 31.92 | 32.43 |
| 0.3 | 81.77 | 80.59 | 78.57 | 80.31 | 58.36 | 57.26 | 55.8 | 57.14 | 23.41 | 23.33 | 22.77 | 23.17 |
| 0.367 | 76.15 | 77.06 | 73.83 | 75.68 | 53.61 | 52.89 | 51.03 | 52.51 | 22.54 | 24.17 | 22.8 | 23.17 |
| 0.43 | 71.54 | 71.54 | 70.04 | 71.04 | 48.65 | 47.85 | 47.14 | 47.88 | 22.89 | 23.69 | 22.9 | 23.16 |
| 20 | 35.51 | 35.51 | 35.51 | 35.51 | 14.85 | 14.05 | 12.89 | 13.93 | 20.66 | 21.46 | 22.62 | 21.58 |
| 44.25 | 34.21 | 33.98 | 33.33 | 33.84 | 14.05 | 13.52 | 12.06 | 13.21 | 20.16 | 20.46 | 21.27 | 20.63 |
| 68 | 33.08 | 33.08 | 31.97 | 32.71 | 13.52 | 12.85 | 11.85 | 12.74 | 19.56 | 20.23 | 20.12 | 19.97 |
| 92.25 | 33.74 | 33.08 | 32.57 | 33.13 | 14.05 | 14.05 | 13.51 | 13.87 | 19.69 | 19.03 | 19.06 | 19.26 |

ศูนย์วิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.10 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 100 มก./ล. เซลล์เริ่มต้น 400 มก./ล. ชุดที่ 1

| TIME (hr) | TCOD (mg/l) | | | | SCOD (mg/l) | | | | cell-COD (mg/l) | | | |
|--------------|-------------|----------|----------|--------|-------------|----------|----------|--------|-----------------|----------|----------|--------|
| | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย |
| 0 | 229.54 | 235.14 | 234.5 | 233.06 | 136.45 | 129.24 | 135.95 | 133.88 | 93.09 | 105.9 | 98.55 | 99.18 |
| 0.083 | 210.94 | 210.94 | 217.78 | 213.22 | 121.85 | 125.36 | 124.7 | 123.97 | 89.09 | 85.58 | 93.08 | 89.25 |
| 0.167 | 198.35 | 202.41 | 209.17 | 203.31 | 118.35 | 121.54 | 117.14 | 119.01 | 80.00 | 80.87 | 92.03 | 84.3 |
| 0.267 | 196.34 | 192.74 | 191.09 | 193.39 | 110.84 | 110.84 | 105.59 | 109.09 | 85.50 | 81.9 | 85.5 | 84.3 |
| 0.35 | 184.55 | 183.47 | 182.39 | 183.47 | 102.54 | 100.42 | 94.55 | 99.17 | 82.01 | 83.05 | 87.84 | 84.3 |
| 0.417 | 170.64 | 175.34 | 174.67 | 173.55 | 96.35 | 95.89 | 90.39 | 94.21 | 74.29 | 79.45 | 84.28 | 79.34 |
| 0.467 | 160.38 | 163.45 | 167.09 | 163.64 | 92.48 | 90.25 | 85.05 | 89.26 | 67.90 | 73.2 | 82.04 | 74.38 |
| 20 | 65.08 | 64.85 | 62.34 | 64.09 | 18.06 | 16.59 | 14.4 | 16.35 | 47.02 | 48.26 | 47.94 | 47.74 |
| 44.25 | 62.87 | 62.87 | 58.28 | 61.34 | 16.74 | 15.86 | 13.03 | 15.21 | 46.13 | 47.01 | 45.25 | 46.13 |
| 68 | 61.32 | 62.04 | 59.28 | 60.88 | 16.74 | 16.74 | 15.03 | 16.17 | 44.58 | 45.3 | 44.25 | 44.71 |
| 92.25 | 60.55 | 60.55 | 60.55 | 60.55 | 16.04 | 15.96 | 15.22 | 15.74 | 44.51 | 44.59 | 45.33 | 44.81 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.11 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 100 มก./ล. เซลล์เริ่มต้น 400 มก./ล. ชุดที่ 2

| TIME (hr) | TCOD (mg/l) | | | | SCOD (mg/l) | | | | cell-COD (mg/l) | | | |
|--------------|-------------|----------|----------|--------|-------------|----------|----------|--------|-----------------|----------|----------|--------|
| | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย |
| 0 | 240.35 | 237.95 | 235.76 | 238.02 | 135.29 | 132.45 | 133.9 | 133.88 | 105.06 | 105.5 | 101.86 | 104.14 |
| 0.083 | 226.84 | 220.35 | 222.23 | 223.14 | 129.87 | 127.65 | 129.27 | 128.93 | 96.97 | 92.7 | 92.96 | 94.21 |
| 0.167 | 210.65 | 210.65 | 203.48 | 208.26 | 122.05 | 118.64 | 116.34 | 119.01 | 88.60 | 92.01 | 87.14 | 89.25 |
| 0.267 | 195.36 | 200.87 | 198.82 | 198.35 | 111.69 | 108.57 | 109.09 | 109.78 | 83.67 | 92.3 | 89.73 | 88.57 |
| 0.35 | 187.24 | 191.58 | 186.47 | 188.43 | 107.54 | 107.54 | 104.13 | 106.40 | 79.70 | 84.04 | 82.34 | 82.03 |
| 0.417 | 173.64 | 174.85 | 172.16 | 173.55 | 96.34 | 94.89 | 91.4 | 94.21 | 77.30 | 79.96 | 80.76 | 79.34 |
| 0.467 | 169.85 | 170.31 | 165.64 | 168.6 | 95.54 | 94.89 | 92.2 | 94.21 | 74.31 | 75.42 | 73.44 | 74.39 |
| 20 | 66.8 | 66.8 | 62.03 | 65.21 | 16.87 | 15.94 | 15.73 | 16.18 | 49.93 | 50.86 | 46.3 | 49.03 |
| 44.25 | 61.58 | 59.84 | 59.36 | 60.26 | 16.26 | 15.94 | 15.59 | 15.93 | 45.32 | 43.9 | 43.77 | 44.33 |
| 68 | 61.58 | 62.89 | 63.69 | 62.72 | 15.94 | 15.94 | 14.68 | 15.52 | 45.64 | 46.95 | 49.01 | 47.2 |
| 92.25 | 61.03 | 59.84 | 60.27 | 60.38 | 16.26 | 15.07 | 15.68 | 15.67 | 44.77 | 44.77 | 44.59 | 44.71 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.12 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 100 มก./ล. เซลล์เริ่มต้น 400 มก./ล. ชุดที่ 3

| TIME (hr) | TCOD (mg/l) | | | | SCOD (mg/l) | | | | cell-COD (mg/l) | | | |
|--------------|-------------|----------|----------|--------|-------------|----------|----------|--------|-----------------|----------|----------|--------|
| | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย |
| 0 | 235.98 | 232.54 | 230.66 | 233.06 | 130.54 | 128.45 | 127.8 | 128.93 | 105.44 | 104.09 | 102.86 | 104.13 |
| 0.083 | 220.06 | 218.87 | 215.61 | 218.18 | 123.45 | 123.45 | 125.01 | 123.97 | 96.61 | 95.42 | 90.6 | 94.21 |
| 0.167 | 210.54 | 208.64 | 205.6 | 208.26 | 115.64 | 115.64 | 110.87 | 114.05 | 94.90 | 93 | 94.73 | 94.21 |
| 0.267 | 208.64 | 203.37 | 212.77 | 208.26 | 111.02 | 110.25 | 106 | 109.09 | 97.62 | 93.12 | 106.77 | 99.17 |
| 0.35 | 179.64 | 177.18 | 178.71 | 178.51 | 101.54 | 99.87 | 96.1 | 99.17 | 78.10 | 77.31 | 82.61 | 79.34 |
| 0.417 | 170.84 | 168.34 | 166.62 | 168.6 | 95.64 | 94.74 | 62.25 | 84.21 | 75.20 | 73.6 | 104.37 | 84.39 |
| 0.467 | 165.34 | 163.84 | 161.74 | 163.64 | 90.85 | 89.45 | 87.48 | 89.26 | 74.49 | 74.39 | 74.26 | 74.38 |
| 20 | 64.85 | 63.45 | 61.48 | 63.26 | 18.65 | 18.65 | 16.16 | 17.82 | 46.20 | 44.8 | 45.32 | 45.44 |
| 44.25 | 61.82 | 60.85 | 57.84 | 60.17 | 15.45 | 14.98 | 14.03 | 14.82 | 46.37 | 45.87 | 43.81 | 45.35 |
| 68 | 60.55 | 60.55 | 59.53 | 60.21 | 15.45 | 15.89 | 13.72 | 15.02 | 45.10 | 44.66 | 45.81 | 45.19 |
| 92.25 | 62.48 | 61.84 | 61.11 | 61.81 | 15.98 | 15.45 | 13.48 | 14.97 | 46.50 | 46.39 | 47.63 | 46.84 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.13 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 150 มก./ล. เซลล์เริ่มต้น 600 มก./ล. ชุดที่ 1

| TIME (hr) | TCOD (mg/l) | | | | SCOD (mg/l) | | | | cell-COD (mg/l) | | | |
|--------------|-------------|----------|----------|--------|-------------|----------|----------|--------|-----------------|----------|----------|--------|
| | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย |
| 0.00 | 342.65 | 348.26 | 346.19 | 345.70 | 207.21 | 202.34 | 204.01 | 204.52 | 135.44 | 145.92 | 142.18 | 141.18 |
| 0.08 | 320.13 | 317.56 | 317.96 | 318.55 | 187.64 | 189.64 | 187.44 | 188.24 | 132.49 | 127.92 | 130.52 | 130.31 |
| 0.17 | 290.64 | 292.16 | 291.40 | 291.40 | 166.87 | 165.23 | 167.46 | 166.52 | 123.77 | 126.93 | 123.94 | 124.88 |
| 0.27 | 264.35 | 263.87 | 264.53 | 264.25 | 152.84 | 149.34 | 148.51 | 150.23 | 111.51 | 114.53 | 116.02 | 114.02 |
| 0.35 | 232.45 | 233.14 | 229.42 | 231.67 | 133.94 | 133.94 | 133.94 | 133.94 | 98.51 | 99.20 | 95.48 | 97.73 |
| 0.42 | 218.97 | 220.34 | 223.12 | 220.81 | 110.56 | 111.89 | 114.21 | 112.22 | 108.41 | 108.45 | 108.91 | 108.59 |
| 0.47 | 199.67 | 201.32 | 196.31 | 199.10 | 100.87 | 103.45 | 99.76 | 101.36 | 98.80 | 97.87 | 96.55 | 97.74 |
| 20.00 | 90.54 | 91.68 | 93.69 | 91.97 | 26.12 | 15.34 | 35.19 | 25.55 | 64.42 | 76.34 | 58.50 | 66.42 |
| 44.25 | 82.35 | 83.64 | 80.88 | 82.29 | 18.03 | 17.46 | 17.91 | 17.80 | 64.32 | 66.18 | 62.97 | 64.49 |
| 68.00 | 82.64 | 81.24 | 79.84 | 81.24 | 17.91 | 16.68 | 15.18 | 16.59 | 64.73 | 64.56 | 64.66 | 64.65 |
| 92.25 | 81.35 | 81.35 | 82.07 | 81.59 | 17.55 | 18.04 | 15.89 | 17.16 | 63.80 | 63.31 | 66.18 | 64.43 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.14 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 150 มก./ล. เซลล์เริ่มต้น 600 มก./ล. ชุดที่ 2

| TIME (hr) | TCOD (mg/l) | | | | SCOD (mg/l) | | | | cell-COD (mg/l) | | | |
|--------------|-------------|----------|----------|--------|-------------|----------|----------|--------|-----------------|----------|----------|--------|
| | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย |
| 0 | 370.34 | 366.24 | 365.68 | 367.42 | 218.33 | 214.64 | 213.17 | 215.38 | 152.01 | 151.6 | 152.51 | 152.04 |
| 0.083 | 320.31 | 318.12 | 317.22 | 318.55 | 194.64 | 192.87 | 193.5 | 193.67 | 125.67 | 125.25 | 123.72 | 124.88 |
| 0.167 | 282.68 | 287.34 | 287.89 | 285.97 | 166.34 | 168.84 | 164.38 | 166.52 | 116.34 | 118.5 | 123.51 | 119.45 |
| 0.267 | 259.34 | 257.05 | 260.07 | 258.82 | 143.24 | 145.32 | 145.84 | 144.8 | 116.10 | 111.73 | 114.23 | 114.02 |
| 0.35 | 237.84 | 236.41 | 237.05 | 237.1 | 127.03 | 127.03 | 131.47 | 128.51 | 110.81 | 109.38 | 105.58 | 108.59 |
| 0.417 | 213.98 | 214.75 | 217.41 | 215.38 | 105.77 | 108.36 | 106.24 | 106.79 | 108.21 | 106.39 | 111.17 | 108.59 |
| 0.467 | 192.68 | 194.34 | 193.99 | 193.67 | 94.47 | 95.31 | 98.01 | 95.93 | 98.21 | 99.03 | 95.98 | 97.74 |
| 20 | 90.64 | 88.34 | 89.58 | 89.52 | 24.3 | 23.45 | 25.45 | 24.4 | 66.34 | 64.89 | 64.13 | 65.12 |
| 44.25 | 80.35 | 79.98 | 81.89 | 80.74 | 18.35 | 17.26 | 16.11 | 17.24 | 62.00 | 62.72 | 65.78 | 63.5 |
| 68 | 80.46 | 78.14 | 79.54 | 79.38 | 16.84 | 16.15 | 15.07 | 16.02 | 63.62 | 61.99 | 64.47 | 63.36 |
| 92.25 | 79.14 | 81.36 | 81.87 | 80.79 | 16.35 | 17.02 | 15.65 | 16.34 | 62.79 | 64.34 | 66.22 | 64.45 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.15 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 150 มก./ล. เซลล์เริ่มต้น 600 มก./ล. ชุดที่ 3

| TIME (hr) | TCOD (mg/l) | | | | SCOD (mg/l) | | | | cell-COD (mg/l) | | | |
|--------------|-------------|----------|----------|--------|-------------|----------|----------|--------|-----------------|----------|----------|--------|
| | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย |
| 0 | 358.21 | 350.89 | 360.58 | 356.56 | 212.35 | 207.89 | 209.61 | 209.95 | 145.86 | 143 | 150.97 | 146.61 |
| 0.083 | 310.54 | 316.24 | 312.58 | 313.12 | 185.34 | 190.84 | 188.54 | 188.24 | 125.20 | 125.4 | 124.04 | 124.88 |
| 0.167 | 286.45 | 286.45 | 285.01 | 285.97 | 161.64 | 159.68 | 161.95 | 161.09 | 124.81 | 126.77 | 123.06 | 124.88 |
| 0.267 | 283.64 | 284.97 | 289.3 | 285.97 | 140.36 | 141.54 | 136.21 | 139.37 | 143.28 | 143.43 | 153.09 | 146.6 |
| 0.35 | 235.64 | 238.48 | 237.18 | 237.1 | 130.52 | 127.64 | 127.37 | 128.51 | 105.12 | 110.84 | 109.81 | 108.59 |
| 0.417 | 217.84 | 214.35 | 213.95 | 215.38 | 110.69 | 114.34 | 111.63 | 112.22 | 107.15 | 100.01 | 102.32 | 103.16 |
| 0.467 | 208.44 | 203.54 | 201.58 | 204.52 | 93.65 | 96.87 | 97.27 | 95.93 | 114.79 | 106.67 | 104.31 | 108.59 |
| 20 | 90.12 | 86.45 | 88.96 | 88.51 | 23.94 | 24.35 | 23.17 | 23.82 | 66.18 | 62.1 | 65.79 | 64.69 |
| 44.25 | 81.64 | 79.64 | 81.63 | 80.97 | 17.35 | 16.89 | 13.94 | 16.06 | 64.29 | 62.75 | 67.69 | 64.91 |
| 68 | 81.03 | 79.64 | 81.76 | 80.81 | 16.85 | 15.76 | 15.18 | 15.93 | 64.18 | 63.88 | 66.58 | 64.88 |
| 92.25 | 80.98 | 79.45 | 80.71 | 80.38 | 17.74 | 15.97 | 16.93 | 16.88 | 63.24 | 63.48 | 63.78 | 63.5 |

ศูนย์วิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.16 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 200 มก./ล. เซลล์เริ่มต้น 800 มก./ล. ชุดที่ 1

| TIME (hr) | TCOD (mg/l) | | | | SCOD (mg/l) | | | | cell-COD (mg/l) | | | |
|--------------|-------------|----------|----------|--------|-------------|----------|----------|--------|-----------------|----------|----------|--------|
| | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย |
| 0 | 431.27 | 442.65 | 437.65 | 437.19 | 210.74 | 218.35 | 213.09 | 214.06 | 220.53 | 224.3 | 224.56 | 223.13 |
| 0.083 | 420.38 | 412.94 | 412.94 | 415.42 | 202.56 | 194.64 | 195.99 | 197.73 | 217.82 | 218.3 | 216.95 | 217.69 |
| 0.167 | 396.41 | 388.65 | 395.89 | 393.65 | 174.34 | 174.34 | 179.2 | 175.96 | 222.07 | 214.31 | 216.69 | 217.69 |
| 0.267 | 362.38 | 370.02 | 366.92 | 366.44 | 148.87 | 140.16 | 141.2 | 143.41 | 213.51 | 229.86 | 225.72 | 223.03 |
| 0.35 | 322.9 | 322.9 | 322.9 | 322.9 | 130.03 | 123.62 | 127.29 | 126.98 | 192.87 | 199.28 | 195.61 | 195.92 |
| 0.417 | 252.34 | 252.34 | 268.12 | 257.6 | 104.72 | 107.46 | 103.48 | 105.22 | 147.62 | 144.88 | 164.64 | 152.38 |
| 0.483 | 226.14 | 215.64 | 216.72 | 219.5 | 67.54 | 67.89 | 65.93 | 67.12 | 158.60 | 147.75 | 150.79 | 152.38 |
| 20 | 122.89 | 125.23 | 125.56 | 124.56 | 35.19 | 33.94 | 34.25 | 34.46 | 87.70 | 91.29 | 91.31 | 90.1 |
| 44.25 | 117.95 | 119.34 | 117.73 | 118.34 | 20.14 | 20.14 | 20.14 | 20.14 | 97.81 | 99.2 | 97.59 | 98.2 |
| 68 | 117.21 | 116.52 | 114.93 | 116.22 | 21.05 | 20.14 | 19.92 | 20.37 | 96.16 | 96.38 | 95.01 | 95.85 |
| 92.25 | 114.12 | 113.13 | 113.46 | 113.57 | 20.14 | 18.28 | 19.66 | 19.36 | 93.98 | 94.85 | 93.8 | 94.21 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.17 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 200 มก./ล. เซลล์เริ่มต้น 800 มก./ล. ชุดที่ 2

| TIME (hr) | TCOD (mg/l) | | | | SCOD (mg/l) | | | | cell-COD (mg/l) | | | |
|--------------|-------------|----------|----------|--------|-------------|----------|----------|--------|-----------------|----------|----------|--------|
| | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย |
| 0 | 440.28 | 448.59 | 439.02 | 442.63 | 224.30 | 224.3 | 226.22 | 224.94 | 215.98 | 224.29 | 212.8 | 217.69 |
| 0.083 | 419.87 | 419.87 | 422.84 | 420.86 | 207.46 | 205.37 | 196.68 | 203.17 | 212.41 | 214.5 | 226.16 | 217.69 |
| 0.167 | 410.36 | 400.87 | 402.39 | 404.54 | 178.34 | 183.47 | 182.42 | 181.41 | 232.02 | 217.4 | 219.97 | 223.13 |
| 0.267 | 352.98 | 358.92 | 354.78 | 355.56 | 146.68 | 151.34 | 148.23 | 148.75 | 206.30 | 207.58 | 206.55 | 206.81 |
| 0.35 | 315.21 | 320.06 | 317.11 | 317.46 | 124.24 | 129.48 | 127.22 | 126.98 | 190.97 | 190.58 | 189.89 | 190.48 |
| 0.417 | 248.35 | 244.84 | 246.94 | 246.71 | 102.51 | 99.12 | 97.68 | 99.77 | 145.84 | 145.72 | 149.26 | 146.94 |
| 0.483 | 218.46 | 218.46 | 221.58 | 219.5 | 72.35 | 71.68 | 73.65 | 72.56 | 146.11 | 146.78 | 147.93 | 146.94 |
| 20 | 129.05 | 126.79 | 125.64 | 127.16 | 39.24 | 38.54 | 34.06 | 37.28 | 89.81 | 88.25 | 91.58 | 89.88 |
| 44.25 | 116.44 | 116.44 | 116.44 | 116.44 | 19.21 | 18.46 | 18.1 | 18.59 | 97.23 | 97.98 | 98.34 | 97.85 |
| 68 | 116.87 | 115.25 | 114.38 | 115.5 | 20.35 | 18.89 | 19.8 | 19.68 | 96.52 | 96.36 | 94.58 | 95.82 |
| 92.25 | 112.95 | 116.21 | 114.79 | 114.65 | 19.54 | 21.65 | 20.04 | 20.41 | 93.41 | 94.56 | 94.75 | 94.24 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.18 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 200 มก./ล. เซลล์เริ่มต้น 800 มก./ล. ชุดที่ 3

| TIME (hr) | TCOD (mg/l) | | | | SCOD (mg/l) | | | | cell-COD (mg/l) | | | |
|--------------|-------------|----------|----------|--------|-------------|----------|----------|--------|-----------------|----------|----------|--------|
| | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย | ซ้ำที่ 1 | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 | เฉลี่ย |
| 0 | 440.28 | 448.59 | 439.02 | 442.63 | 220.65 | 218.34 | 219.51 | 219.5 | 219.63 | 230.25 | 219.51 | 223.13 |
| 0.083 | 410.58 | 408.64 | 410.72 | 409.98 | 191.65 | 193.18 | 192.04 | 192.29 | 218.93 | 215.46 | 218.68 | 217.69 |
| 0.167 | 400.68 | 397.84 | 398.75 | 399.09 | 181.36 | 180.84 | 182.03 | 181.41 | 219.32 | 217 | 216.72 | 217.68 |
| 0.267 | 353.12 | 358.03 | 355.53 | 355.56 | 155.4 | 153.87 | 153.33 | 154.2 | 197.72 | 204.16 | 202.2 | 201.36 |
| 0.35 | 306.97 | 304.55 | 308.22 | 306.58 | 130.89 | 133.65 | 132.75 | 132.43 | 176.08 | 170.9 | 175.47 | 174.15 |
| 0.417 | 251.54 | 253.97 | 250.94 | 252.15 | 103.14 | 104.56 | 107.96 | 105.22 | 148.40 | 149.41 | 142.98 | 146.93 |
| 0.483 | 226.31 | 223.46 | 225.05 | 224.94 | 78 | 78 | 78 | 78 | 148.31 | 145.46 | 147.05 | 146.94 |
| 20 | 132.56 | 129.79 | 133.35 | 131.9 | 37.86 | 38.25 | 38.25 | 38.12 | 94.70 | 91.54 | 95.1 | 93.78 |
| 44.25 | 120.35 | 119.34 | 117.7 | 119.13 | 22.63 | 20.82 | 20.6 | 21.35 | 97.72 | 98.52 | 97.1 | 97.78 |
| 68 | 117.32 | 116.21 | 119.48 | 117.67 | 21.58 | 20.39 | 22.32 | 21.43 | 95.74 | 95.82 | 97.16 | 96.24 |
| 92.25 | 115.3 | 116.18 | 114.84 | 115.44 | 20.39 | 18.88 | 19.92 | 19.73 | 94.91 | 97.3 | 94.92 | 95.71 |

ศูนย์วิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2 ผลการทดลองการวิเคราะห์หาค่ายิลด์

ตารางที่ ก.19 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 10 มก./ล.

| time (hr) | TCOD (mg/l) | | | | SCOD (mg/l) | | | | cell (mg/l) |
|--------------|-------------|------|------|--------|-------------|------|------|--------|----------------|
| | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | |
| 0 | 38.9 | 40.2 | 40.9 | 40.00 | 38.7 | 39.9 | 39.2 | 39.27 | 0.73 |
| 1 | 37.7 | 38.5 | 38.7 | 38.30 | 36.9 | 37.3 | 37.3 | 37.17 | 1.13 |
| 2 | 36.4 | 37.3 | 37.5 | 37.07 | 35.6 | 35.6 | 35.9 | 35.70 | 1.37 |
| 23.5 | 23.8 | 26.7 | 27.6 | 26.03 | 21.3 | 21.2 | 22.4 | 21.63 | 4.40 |
| 46.5 | 24.3 | 26.2 | 27.1 | 25.87 | 19.4 | 18.3 | 17.8 | 18.50 | 7.37 |
| 70 | 23.6 | 25.8 | 26.4 | 25.27 | 18.3 | 16.9 | 17.1 | 17.43 | 7.83 |
| 94.5 | 24.4 | 24.6 | 25.3 | 24.77 | 18.6 | 16.5 | 16.8 | 17.30 | 7.47 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.20 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 25 มก./ล.

| time (hr) | TCOD (mg/l) | | | | SCOD (mg/l) | | | | cell (mg/l) |
|--------------|-------------|------|------|--------|-------------|------|------|--------|----------------|
| | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | |
| 0 | 64.3 | 65.6 | 63.8 | 64.57 | 62.8 | 63.1 | 62.4 | 62.77 | 1.80 |
| 1 | 61.7 | 62.2 | 62.6 | 62.17 | 59.7 | 60.3 | 59.2 | 59.73 | 2.43 |
| 2 | 61.6 | 61.9 | 61.8 | 61.77 | 59.3 | 59.4 | 58.8 | 59.17 | 2.60 |
| 23.5 | 37.4 | 40.7 | 40.5 | 39.53 | 31.6 | 30.9 | 32.3 | 31.60 | 7.93 |
| 46.5 | 35.2 | 33.5 | 34.3 | 34.33 | 28.4 | 27.3 | 26.7 | 27.47 | 6.87 |
| 70 | 31.4 | 30.3 | 30.1 | 30.60 | 22 | 19.4 | 20.1 | 20.50 | 10.10 |
| 94.5 | 32.1 | 31.8 | 33.2 | 32.37 | 21.8 | 19.2 | 19.5 | 20.17 | 12.20 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.21 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 50 มก./ล.

| time (hr) | TCOD (mg/l) | | | | SCOD (mg/l) | | | | cell (mg/l) |
|--------------|-------------|------|------|--------|-------------|------|------|--------|----------------|
| | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | |
| 0 | 92.5 | 90.7 | 95.4 | 92.87 | 91.2 | 89.3 | 90.7 | 90.40 | 2.47 |
| 1 | 91.2 | 89.3 | 90.3 | 90.27 | 87.5 | 86.1 | 86.9 | 86.83 | 3.43 |
| 2 | 88.6 | 86.6 | 87.8 | 87.67 | 83.8 | 84.5 | 84.3 | 84.20 | 3.47 |
| 23.5 | 53.8 | 56.1 | 55.2 | 55.03 | 42.7 | 41.8 | 43.2 | 42.57 | 12.47 |
| 46.5 | 54.2 | 54.8 | 55.7 | 54.90 | 40.1 | 38.4 | 39.2 | 39.23 | 15.67 |
| 70 | 52.9 | 54.2 | 53.4 | 53.50 | 38.6 | 37.2 | 36.8 | 37.53 | 15.97 |
| 94.5 | 53.7 | 54.3 | 54.1 | 54.03 | 37.9 | 38.6 | 37.4 | 37.97 | 16.07 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.22 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 100 มก./ล.

| time (hr) | TCOD (mg/l) | | | | SCOD (mg/l) | | | | cell (mg/l) |
|--------------|-------------|-------|-------|--------|-------------|-------|-------|--------|----------------|
| | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | |
| 0 | 175.2 | 173.2 | 172.8 | 173.73 | 171.5 | 170.3 | 168.2 | 170.00 | 3.73 |
| 1 | 174.6 | 172.8 | 175.3 | 174.23 | 169.4 | 168.6 | 167.7 | 168.57 | 5.67 |
| 2 | 170.3 | 168.4 | 168.6 | 169.10 | 164.3 | 165.1 | 162.9 | 164.10 | 5.00 |
| 23.5 | 126.8 | 130.1 | 127.4 | 128.10 | 95.6 | 93.7 | 94.3 | 94.53 | 33.57 |
| 46.5 | 117.4 | 116.2 | 118.3 | 117.30 | 80.2 | 81.4 | 80.8 | 80.80 | 36.50 |
| 70 | 110.5 | 112.9 | 112.6 | 112.00 | 75.3 | 73.2 | 72.4 | 73.63 | 38.37 |
| 94.5 | 110.7 | 112.4 | 111.9 | 111.67 | 74.8 | 73 | 71.9 | 73.23 | 38.43 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.23 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 150 มก./ล.

| time (hr) | TCOD (mg/l) | | | | SCOD (mg/l) | | | | cell (mg/l) |
|--------------|-------------|-------|-------|--------|-------------|-------|-------|--------|----------------|
| | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | |
| 0 | 236.6 | 239.1 | 237.2 | 237.63 | 228.7 | 228.4 | 226.9 | 228.00 | 9.63 |
| 1 | 232.3 | 231.8 | 231.3 | 231.80 | 224.2 | 224.2 | 223.1 | 223.83 | 7.97 |
| 2 | 233.2 | 235 | 232.8 | 233.67 | 224.8 | 223.6 | 222.4 | 223.60 | 10.07 |
| 23.5 | 160.7 | 158.3 | 159.6 | 159.53 | 105.5 | 103.9 | 104.8 | 104.73 | 54.80 |
| 46.5 | 140.8 | 142.6 | 143.1 | 142.17 | 87.3 | 83.7 | 84.6 | 85.20 | 56.97 |
| 70 | 144.4 | 146.2 | 144.9 | 145.17 | 88.2 | 89.3 | 90.2 | 89.23 | 55.93 |
| 94.5 | 146.2 | 148.4 | 146.8 | 147.13 | 89.5 | 91.2 | 90.5 | 90.40 | 56.73 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.24 ผลการทดลองค่าซีโอดีเริ่มต้น 200 มก./ล.

| time (hr) | TCOD (mg/l) | | | | SCOD (mg/l) | | | | cell (mg/l) |
|--------------|-------------|-------|-------|--------|-------------|-------|-------|--------|----------------|
| | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | |
| 0 | 325.8 | 331.2 | 329.3 | 328.77 | 314.3 | 313.8 | 311.1 | 313.07 | 15.70 |
| 1 | 325.4 | 324.2 | 325.9 | 325.17 | 304.8 | 310.5 | 306.7 | 307.33 | 17.83 |
| 2 | 322.8 | 320.4 | 323.9 | 322.37 | 301.6 | 306.2 | 301.3 | 303.03 | 19.33 |
| 23.5 | 197.2 | 199.4 | 198 | 198.20 | 140.8 | 138.1 | 139.4 | 139.43 | 58.77 |
| 46.5 | 145.1 | 144.7 | 146.3 | 145.37 | 57.2 | 58.6 | 58.8 | 58.20 | 87.17 |
| 70 | 146.6 | 148.3 | 147.2 | 147.37 | 63.4 | 60 | 59.2 | 60.87 | 86.50 |
| 94.5 | 140.8 | 142.6 | 143.7 | 142.37 | 54.2 | 54.9 | 53.4 | 54.17 | 88.20 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายคณิน ตุงคะเสน เกิดเมื่อวันที่ 17 เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ.2527 สำเร็จการศึกษา ระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสามเสนวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ.2545 และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาตรีในสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จนสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ในปีการศึกษา 2548 จากนั้นได้เข้าทำงานในบริษัท แอร์เซฟ จำกัด ในตำแหน่งวิศวกรสิ่งแวดล้อมเป็นเวลา 1 ปี จึงได้ลาออก และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ.2550



ศูนย์วิทยพัชร์พยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย