

ค่าจลนพลศาสตร์ของน้ำเสียชุมชนและแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของโรงบำบัดน้ำเสียช่องนนทรี



นายธงชัย นิรันดร์วงษ์วาน

# ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

KINETIC PARAMETERS OF DOMESTIC WASTEWATER AND COMPUTER MODEL  
OF CHONGNONGSI WASTEWATER TREATMENT PLANT



Mr. Thongchai Nirunwongwan

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 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ค่าจลนพลศาสตร์ของน้ำเสียชุมชนและแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์  
ของโรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรี

โดย

นายธงชัย นีรันดรวงศ์วาน

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษา

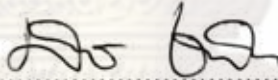
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศรัณย์ เตชะเสน

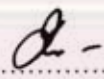
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

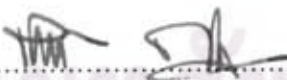
 ..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนรินทร์วงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

 ..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ขวาลภาฤทธิ์)

 ..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศรัณย์ เตชะเสน)

 ..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนัสกร ราชกรกิจ)

 ..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. ชัยพร ภูประเสริฐ)

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ธงชัย นิรันดร์วงศ์วาน : ค่าจลนพลศาสตร์ของน้ำเสียชุมชนและแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของ  
โรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรี. (KINETIC PARAMETERS OF DOMESTIC WASTEWATER AND  
COMPUTER MODEL OF CHONGNONGSI WASTEWATER TREATMENT PLANT)

อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.ศรัณย์ เตชะเสน, 114 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของการบำบัดน้ำเสียชุมชนจริงของไทยด้วยระบบเอเอส และ  
สร้างแบบจำลองของโรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรี ซึ่งจากการทดลองเบื้องต้นโดยใช้น้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำ  
เสียของนนทบุรีพบว่ามีค่าซีโอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพสูงถึง 80% ซึ่งไม่เหมาะแก่การนำมาใช้  
ทดลอง ดังนั้น น้ำเสียจากโรงอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จึงถูกนำมาใช้ใน  
การทดลองแทน โดยใช้เชื้อสลัดจ์จากโรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรี การทดลองเป็นแบบแบตช์ มีค่าซีโอดี  
เริ่มต้นประมาณ 30 - 800 มก./ล. และทดลองโดยใช้เชื้อสลัดจ์ความเข้มข้นสูง (500 - 900 มก./ล.) และ  
ใช้เชื้อสลัดจ์ความเข้มข้นต่ำ (30 มก./ล.) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตของจุลชีพมีค่าเท่ากับ  
0.25 มก.เซลล์ซีโอดี/มก.ซีโอดี ส่วนค่าจลนพลศาสตร์ที่วิเคราะห์โดยใช้สมการแบบไม่เชิงเส้นของ Monod  
, สมการเชิงเส้นของ Hanes และ การจำลองด้วยโปรแกรม AQUASIM พบว่าค่าที่เหมาะสมแก่การ  
นำไปใช้งานมากที่สุด คือ ค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการจำลองด้วย AQUASIM ซึ่งได้แก่  $\mu_{\max}$  เท่ากับ  
2.35 1/วัน และ  $K_{SH}$  เท่ากับ 166 มก./ล. โดยมีค่าความผิดพลาดมาตรฐานต่ำกว่า 10% ของความเข้มข้น  
ซีโอดีเริ่มต้น

ค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้เมื่อนำไปใช้จำลองระบบบำบัดน้ำเสียของนนทบุรีที่สร้างขึ้นด้วย AQUASIM  
พบว่าสอดคล้องกับข้อมูลจากโรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรี และ น้ำทิ้งจากโรงบำบัดที่ได้จากแบบจำลองมี  
สัดส่วนของค่าซีโอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ สูงกว่า 80% ของค่าซีโอดีทั้งหมด

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
ปีการศึกษา 2551

ลายมือชื่อนิสิต ... ธงชัย นิรันดร์วงศ์วาน ...  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ... ศรัณย์ เตชะเสน ...

## 4870585121 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD: KINETIC PARAMETERS / DOMESTIC WASTEWATER / COMPUTER MODEL.

THONGCHAI NIRUNWONGWAN : KINETIC PARAMETERS OF DOMESTIC  
WASTEWATER AND COMPUTER MODEL OF CHONGNONSI WASTEWATER  
TREATMENT PLANT. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SARUN TEJASEN, Ph.D., 114  
pp.

This research studied the kinetic parameters of domestic wastewater in Thailand treatment by Activated Sludge system. The preliminary experiments using wastewater from Chongnonsi wastewater treatment plant shown a high rate of 80% non-biodegradable COD which was not suitable for biodegradation. So the wastewater from faculty of engineering Chulalongkorn University's cafeteria and sludge seed from Chongnonsi wastewater treatment plant were used instead. The batch tests were performed using initial COD concentrations of 30 - 800 mg/l with high concentration of sludge seed (500 - 900 mg/l) and low concentration of sludge seed (30 mg/l). The results shown that the growth yield of biomass was 0.25 mg-cell-COD/mg-COD. Kinetic parameters such as the heterotroph maximum specific growth rate ( $\mu_{mH}$ ) and the half-saturation coefficient for heterotroph ( $K_{SH}$ ) were estimated using non-linear equation of Monod, linear equation of Hanes, and computer simulation by AQUASIM found that the parameters simulated from AQUASIM were most applicable, which were 2.35 1/d and 166 mg/l respectively. The standard error of estimation (SEE) was less than 10% of initial COD values

The kinetic parameters estimated were modeled with computer model of Chongnonsi wastewater treatment system created by using AQUASIM, which agreed with data from Chongnonsi WWTP. The effluent from computer model had non-biodegradable COD more than 80% of total COD.

Department Environmental Engineering

Field of study Environmental Engineering

Academic Year 2008

Student's Signature... 

Advisor's Signature.....

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้กำเนิด อบรม สั่งสอน และ ส่งเสียเลี้ยงดู จนเติบโตใหญ่ได้ถึงทุกวันนี้ และ ยังมอบโอกาสในการศึกษาระดับปริญญาโทนี้ด้วย นอกจากนี้ขอขอบคุณ พี่สาว และ น้องสาว ที่คอยให้คำแนะนำ และ ให้กำลังใจในการทำงานยามท้อแท้ใจ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศรัณย์ เตชะเสน ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา เป็นอย่างสูง ที่คอยให้ความรู้ คำแนะนำ และ แนวทางที่ดีต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ชิ้นนี้ รวมถึงอาจารย์ผู้ทำหน้าที่เป็นประธาน และ คณะกรรมการ ในการสอบวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ที่คอยให้คำแนะนำ คำติชม ในการแก้ไขให้วิทยานิพนธ์ชิ้นนี้เป็นไปในทางที่ดีที่สุด

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกๆ ท่านเป็นอย่างสูง ที่คอยสั่งสอน และ มอบความรู้ในวิชาต่างๆ ให้แก่ข้าพเจ้า รวมถึงคอยให้การสนับสนุนกิจกรรมต่างๆ ที่จัดขึ้นในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมโดยตลอดมา

ขอขอบพระคุณ ครูผู้ดูแลห้องปฏิบัติการของตีภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ทุกๆ ท่าน ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ในการทดลอง และ คอยให้คำแนะนำเกี่ยวกับการทดลองต่างๆ

ขอขอบพระคุณ พี่วรัญญา เจ้าหน้าที่จากโรงบำบัดน้ำเสียช่องนนทรี ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลต่างๆ ที่จำเป็นในการทำวิทยานิพนธ์ชิ้นนี้ รวมทั้ง พี่ๆ เจ้าหน้าที่ในห้องปฏิบัติการของโรงบำบัดน้ำเสียช่องนนทรี ที่ช่วยเก็บตัวอย่างน้ำเสีย และ เชื้อสไลด์จ ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการทดลองของวิทยานิพนธ์ชิ้นนี้

ขอขอบพระคุณ พี่เอก ที่คอยรับฟังคำปรึกษาต่างๆ นานา ให้เกียรติความรู้ดีๆ คำแนะนำต่างๆ และ สรรหาตำราดีๆ มาให้ และ ขอขอบพระคุณ พี่พุด ที่ให้ความช่วยเหลือในหลายๆด้าน ไม่ว่าจะเป็นการให้หยิบยืมอุปกรณ์ทำการทดลอง แบ่งปันสารเคมี ให้คำแนะนำและคำปรึกษาในหลายๆ เรื่อง

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และ น้องๆ ทุกคน ทั้งที่เข้ามาที่ตีภาควิชาเป็นประจำ และ แวะเวียนมาเยี่ยมเป็นบางครั้ง ที่คอยเป็นกำลังใจ ให้สาระความรู้ในหลายๆ ด้าน ทั้งที่เกี่ยวข้อง และ ไม่เกี่ยวข้องของวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ขอขอบคุณทุกคน

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ชื่อวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 คำสำคัญ.....	1
1.3 คำนำ.....	1
1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียชุมชน.....	4
2.2 ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงบำบัดน้ำเสียช่องนนทรี.....	6
2.2.1 ข้อมูลเบื้องต้น.....	6
2.2.2 ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงบำบัดน้ำเสียช่องนนทรี.....	6
2.2.3 ลักษณะของน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบบำบัดน้ำเสีย.....	9
2.2.4 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแคสส์™.....	11
2.2.5 การทำงานของระบบแคสส์™.....	12
2.3 การศึกษาค่าจลนพลศาสตร์.....	16
2.3.1 การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	17
2.3.2 การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์.....	20
2.3.2.1 ทฤษฎีของ Monod.....	20
2.3.2.2 ทฤษฎีของ Lineweaver-Burk.....	21
2.3.2.3 ทฤษฎีของ Hanes.....	22

2.3.2.4 ทฤษฎีของ Hofstee.....	23
2.4 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	25
บทที่ 3 แผนการทดลองและวิจัย.....	33
3.1 แผนการทดลอง.....	33
3.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	34
3.2.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	34
3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	34
3.3 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์.....	35
3.3.1 การเก็บตัวอย่างน้ำเสีย.....	35
3.3.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสีย.....	36
3.4 การดำเนินการทดลอง.....	37
3.4.1 การวางขอบเขต และ กำหนดแผนการในการทดลองขั้นต้น.....	37
3.4.2 การทดลองในห้องปฏิบัติการ.....	40
3.4.2.1 การตรวจสอบคุณสมบัติของน้ำเสียดิบ.....	40
3.4.2.2 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่หาค่าจลนพลศาสตร์.....	41
3.4.2.3 การหาค่ายิลด์ของเฮเทอโรโทรป.....	42
3.4.2.4 การหาค่าซีโอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ.....	43
3.4.3 การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์จากกราฟข้อมูล.....	44
3.4.4 การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์โดยใช้แกรม AQUASIM.....	44
3.4.5 การตรวจสอบ และ เปรียบเทียบค่าที่วิเคราะห์ได้.....	45
3.4.5.1 การตรวจสอบผลโดยใช้โปรแกรม AQUASIM.....	45
3.4.5.2 การเปรียบเทียบค่าที่วิเคราะห์ได้กับค่าที่อ้างอิงจาก งานวิจัยอื่นๆ .....	45
3.4.5.3 การทดสอบความคลาดเคลื่อนของค่าจลนพลศาสตร์.....	46
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	47
4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง.....	47
4.1.1 น้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสียขอนแก่น.....	47



4.1.2	น้ำเสียจากโรงอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์.....	48
4.2	การศึกษาค่ายิลด์ของจุลชีพแบบเฮเทอโรโทรป.....	50
4.3	การศึกษาค่าซีโอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ.....	52
4.4	การศึกษาค่าจลนพลศาสตร์.....	53
4.4.1	การศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของน้ำเสียที่ใช้เชื้อสแลคจ์ความเข้มข้นต่ำ...	53
4.4.1.1	การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์จากกราฟข้อมูล.....	53
4.4.1.2	การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	57
4.4.2	การศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของน้ำเสียที่ใช้เชื้อสแลคจ์ความเข้มข้นสูง...	63
4.4.2.1	การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์จากกราฟข้อมูล.....	63
4.4.2.2	การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	68
4.5	ความคลาดเคลื่อนของค่าจลนพลศาสตร์ที่วิเคราะห์ได้ จากโปรแกรม AQUASIM.....	72
4.6	การเปรียบเทียบค่าตัวแปรต่างๆ ที่วิเคราะห์ได้.....	74
4.7	แบบจำลองของระบบบำบัดน้ำเสียของนนทรี.....	78
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัย และ ข้อเสนอแนะ.....	82
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	82
5.2	ความสำคัญด้านวิศวกรรม และ การนำไปใช้.....	83
5.3	ข้อเสนอแนะ.....	83
	รายการอ้างอิง.....	84
	ภาคผนวก.....	87
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	114

## สารบัญญัตินำ

ญ

ตาราง	หน้า
2.1 ค่าเฉลี่ยของลักษณะน้ำเสียชุมชนในประเทศไทย.....	4
2.2 ลักษณะน้ำเสียชุมชนของต่างประเทศ.....	5
2.3 ค่าพารามิเตอร์ในน้ำเสียที่เข้าและออกจากโรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรี.....	10
2.4 ลำดับการทำงานในช่วงเวลาต่างๆ ของระบบแคสส์™ ทั้ง 4 ถัง.....	15
2.5 สมการทางจลนพลศาสตร์ และปริมาณสารสัมพันธ์ ของกระบวนการต่างๆ ในแบบจำลองเอเอส 1.....	18
2.6 ค่าจลนพลศาสตร์จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32
3.1 ตำแหน่งการเก็บน้ำเสีย ความถี่ในการเก็บ และการนำไปใช้.....	36
3.2 วิธีการวิเคราะห์หรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ใดๆ.....	36
4.1 ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของน้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรี.....	47
4.2 ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของน้ำเสียจากโรงอาหารคณะวิศวกรรมศาสตร์.....	49
4.3 ค่าจลนพลศาสตร์จากการจำลองด้วย AQUASIM กรณีใช้เชื้อสลดจ์ความเข้มข้นต่ำ.....	60
4.4 ค่าจลนพลศาสตร์จากการจำลองด้วย AQUASIM กรณีใช้เชื้อสลดจ์ความเข้มข้นสูง.....	70
4.5 เปรียบเทียบระดับความคลาดเคลื่อนในรูปของ SEE.....	73
4.6 เปรียบเทียบค่าตัวแปรที่วิเคราะห์ได้ และ ที่เกี่ยวข้อง.....	75
4.7 ค่าตัวแปรที่ป้อนเข้าแบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสียของนนทบุรี.....	79
ข.1 ผลการทดลองของน้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรี.....	92
ข.2 ผลการทดลองของน้ำเสียจากโรงอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์.....	93
ข.3 ผลการทดลองของน้ำเสียซีโอดีเริ่มต้น 550 มก./ล. ....	94
ข.4 ผลการทดลองของน้ำเสียซีโอดีเริ่มต้น 280 มก./ล. ....	95
ข.5 ผลการทดลองของน้ำเสียซีโอดีเริ่มต้น 140 มก./ล. ....	96
ข.6 ผลการทดลองของน้ำเสียซีโอดีเริ่มต้น 70 มก./ล. ....	97
ข.7 ผลการทดลองของน้ำเสียซีโอดีเริ่มต้น 30 มก./ล. ....	97
ข.8 ข้อมูลดิบที่ใช้ในการหาค่ายิลด์ของจุลชีพ.....	98
ข.9 ข้อมูลดิบที่ใช้ในการหาค่าซีโอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ.....	99
ข.10 ผลการทดลองของน้ำเสียซีโอดีเริ่มต้น 750 มก./ล. ....	99

ตาราง	หน้า
ข.11 ผลการทดลองของน้ำเสียซีไอดีเริ่มต้น 550 มก./ล. ....	100
ข.12 ผลการทดลองของน้ำเสียซีไอดีเริ่มต้น 180 มก./ล. ....	101
ข.13 ผลการทดลองของน้ำเสียซีไอดีเริ่มต้น 140 มก./ล. ....	102
ค.1 ข้อมูลการสร้างกราฟ Monod กรณีเชื้อสัลดีจความเข้มข้นต่ำ.....	105
ค.2 ข้อมูลการสร้างกราฟ Monod ที่ใช้ฟังก์ชันแก้สมการ กรณีเชื้อสัลดีจความเข้มข้นต่ำ.....	108
ค.3 ข้อมูลการสร้างกราฟ Monod กรณีเชื้อสัลดีจความเข้มข้นสูง.....	109
ค.4 ข้อมูลการสร้างกราฟ Monod ที่ใช้ฟังก์ชันแก้สมการ กรณีเชื้อสัลดีจความเข้มข้นสูง.....	110
ค.5 ข้อมูลการสร้างกราฟ Hanes กรณีเชื้อสัลดีจความเข้มข้นต่ำ.....	111
ค.6 ข้อมูลการสร้างกราฟ Hanes กรณีเชื้อสัลดีจความเข้มข้นสูง.....	111
ค.7 ข้อมูลที่ใช้ในการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า $K_{SH}$ และ $\mu_{mH}$ .....	112
ค.8 ข้อมูลที่ใช้ในการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า $K_1$ .....	113



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูป

ฎ

รูปประกอบ	หน้า	
2.1	พื้นที่บริการของโรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรี.....	4
2.2	ขั้นตอนรวมของระบบบำบัดน้ำเสียในโรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรี.....	5
2.3	องค์ประกอบและการทำงานของระบบแคสส์™.....	9
2.4	ขั้นตอนการทำงานในหนึ่งรอบวัฏจักรของระบบแคสส์™.....	11
2.5	ลักษณะของเครื่องผันริน (Decanter) อย่างคร่าวๆ.....	12
2.6	อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นสารอาหารต่างๆ จากทฤษฎีของ Monod.....	18
2.7	อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นสารอาหารต่างๆ จากทฤษฎีของ Lineweaver-Burk.....	19
2.8	อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นสารอาหารต่างๆ จากทฤษฎีของ Hanes.....	20
2.9	อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นสารอาหารต่างๆ จากทฤษฎีของ Hofstee.....	22
3.1	อัตราการเกิดปฏิกิริยาเทียบกับซีโอดี เมื่อใช้ค่าจลนพลศาสตร์ จากน้ำเสียชุมชนของต่างประเทศ.....	35
3.2	การจำลองการย่อยสลายซีโอดีด้วยโปรแกรม AQUASIM ในกรณี ใช้เชื้อสลดจ์ความเข้มข้น 10% ของค่าซีโอดีเริ่มต้น.....	37
3.3	การจำลองการย่อยสลายซีโอดีด้วยโปรแกรม AQUASIM ในกรณี ใช้เชื้อสลดจ์ความเข้มข้น 10 เท่าของค่าซีโอดีเริ่มต้น.....	38
3.4	การประมาณค่าyield ของจุลชีพแบบเฮเทอโรโทรป.....	41
4.1	ค่าซีโอดีที่เวลาต่างๆ ของน้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรี.....	46
4.2	ค่าซีโอดีที่เวลาต่างๆ ของน้ำเสียจากโรงอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์.....	48
4.3	ปฏิกิริยาทางชีวภาพของน้ำเสียโรงอาหาร ในการหาค่าyield.....	49
4.4	ค่าyield ของน้ำเสียโรงอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์.....	50
4.5	สัดส่วนของซีโอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ.....	51
4.6	ปฏิกิริยาทางชีวภาพของน้ำเสียโรงอาหาร ในการหาค่าจลนพลศาสตร์.....	52
4.7	การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์โดยทฤษฎีของ Monod กรณีใช้เชื้อสลดจ์ความเข้มข้นต่ำ.....	53

รูปประกอบ	หน้า
4.8 การวิเคราะห์ค่าจุลนพลศาสตร์โดยทฤษฎีของ Hanes กรณีใช้เชื้อสลดจ์ความเข้มข้นต่ำ.....	54
4.9 การวิเคราะห์ค่า $K_{SH}$ จากการจำลองด้วย AQUASIM กรณีใช้เชื้อสลดจ์ความเข้มข้นต่ำ.....	56
4.10 การวิเคราะห์ค่า $\mu_{mH}$ จากการจำลองด้วย AQUASIM กรณีใช้เชื้อสลดจ์ความเข้มข้นต่ำ.....	57
4.11 การวิเคราะห์ค่าจุลนพลศาสตร์ กรณีพิจารณาารวมทุกความเข้มข้น ที่เชื้อสลดจ์ความเข้มข้นต่ำ.....	60
4.12 ปฏิริยาทางชีวภาพของน้ำเสียโรงอาหาร ในการหาค่าจุลนพลศาสตร์.....	62
4.13 การวิเคราะห์ค่าจุลนพลศาสตร์โดยทฤษฎีของ Monod กรณีใช้เชื้อสลดจ์ความเข้มข้นสูง.....	63
4.14 การวิเคราะห์ค่าจุลนพลศาสตร์โดยทฤษฎีของ Hanes กรณีใช้เชื้อสลดจ์ความเข้มข้นสูง.....	65
4.15 การวิเคราะห์ค่า $K_1$ ด้วย AQUASIM กรณีใช้เชื้อสลดจ์ความเข้มข้นสูง.....	67
4.16 การวิเคราะห์ค่าจุลนพลศาสตร์ กรณีพิจารณาารวมทุกความเข้มข้น ที่เชื้อสลดจ์ความเข้มข้นสูง.....	69
4.17 แผนผังแบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสียของนนทรี.....	76
4.18 เปรียบเทียบค่าซีโอดีน้ำทิ้งขาออกตลอดปี พ.ศ. 2549 ถึง 2551.....	78
ก.1 ค่าซีโอดีน้ำเสียขาเข้าตลอดปี 2549 ถึง 2551.....	88
ก.2 ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียขาเข้าตลอดปี 2549 ถึง 2551.....	89
ก.3 ค่าไนโตรเจนทั้งหมดของน้ำเสียขาเข้าตลอดปี 2549 ถึง 2551.....	89
ก.4 ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดของน้ำเสียขาเข้าตลอดปี 2549 ถึง 2551.....	90
ข.1 ผลการทดลองหาค่ายิลด์เมื่อรวมข้อมูลจากค่าซีโอดีเริ่มต้นทั้งหมด 5 ชุด.....	97
ค.1 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของน้ำเสีย ในกรณีใช้เชื้อสลดจ์ความเข้มข้นต่ำ ที่ค่าซีโอดีเริ่มต้น 550 มก./ล. ....	103
ค.2 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของน้ำเสีย ในกรณีใช้เชื้อสลดจ์ความเข้มข้นสูง ที่ค่าซีโอดีเริ่มต้น 550 มก./ล. ....	106

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ชื่อวิทยานิพนธ์

ภาษาไทย : ค่าจลนพลศาสตร์ของน้ำเสียชุมชนและแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของโรงบำบัดน้ำเสียช่องนนทรี

ภาษาอังกฤษ : Kinetic parameters of domestic wastewater and computer model of Chongnonsi wastewater treatment plant.

### 1.2 คำสำคัญ (Keyword)

ระบบเอเอส (AS: Activated Sludge); ค่าจลนพลศาสตร์ (Kinetic Parameters); น้ำเสียชุมชน (Domestic Wastewater); ระบบแคสส์™ (CASS™: Cyclic Activated Sludge System); ระบบเอสบีอาร์ (SBR: Sequencing Batch Reactor); แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (Computer Model)

### 1.3 คำนำ

กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพที่ใช้ในประเทศไทยนั้นส่วนใหญ่เป็นระบบเอเอส (AS: Activated Sludge) โดยมีการประยุกต์ ปรับปรุง และเพิ่มเติมอุปกรณ์สมัยใหม่เข้าไป เพื่อให้การควบคุมระบบและการทำงานของระบบดีขึ้น แต่องค์ประกอบที่ยังคงเดิมไม่เปลี่ยนแปลงก็คือ ถังเติมอากาศ (Aeration Tank) เพื่อเลี้ยงสลัดจ์ และ ถังตกตะกอน (Sedimentation Tank) เพื่อแยกสลัดจ์ออกมาเวียนกลับเข้าถังเติมอากาศอีกครั้ง ด้วยเหตุนี้ทำให้การออกแบบระบบในปัจจุบันยังคงอิงตามการออกแบบระบบเอเอสเหมือนเดิม ดังนั้นการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ (Kinetic Parameters) ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบระบบเอเอสที่เหมาะสม จึงเป็นสิ่งที่สำคัญมาก เนื่องด้วยค่าจลนพลศาสตร์นี้จะเป็นตัวแปรที่ควบคุมสภาวะต่างๆ ในการทำงานของระบบให้เหมาะสมกับคุณสมบัติของน้ำเสียที่เข้าระบบ เช่น ปริมาณของชีวมวลในถังเติมอากาศ ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียในระบบ และ ขนาดของถังปฏิกรณ์ เป็นต้น

ปัจจุบันในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพในประเทศไทยนั้น นิยมนำค่า จลนพลศาสตร์ของน้ำเสียชุมชน (Domestic Wastewater) ในต่างประเทศมาใช้ในการออกแบบ แต่เนื่องจากลักษณะของน้ำเสียในประเทศไทยนั้นมีความแตกต่างออกไป ดังนั้น งานวิจัยชิ้นนี้จึง ได้เกิดขึ้นเพื่อทำการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ที่เหมาะสมแก่การนำมาใช้จริงในประเทศไทย ซึ่งจะ ทำการศึกษาโดยใช้น้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรีเป็นตัวแทนของน้ำเสียชุมชน เนื่องจาก โรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรีนั้นเป็นโรงบำบัดที่ใช้ระบบแคสส์™ (CASS™: Cyclic Activated Sludge System) ซึ่งเป็นระบบที่พัฒนามาจากระบบเอสบีอาร์ (SBR) และได้รับการยอมรับให้เป็น โรงบำบัดระบบเอสบีอาร์แบบหลายขั้นที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในโลกด้วย ทำให้มีความน่าสนใจใน การศึกษาเป็นอย่างมาก นอกจากนี้ น้ำเสียจากบ่อตกไขมันของโรงอาหารคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยควบคู่ไปด้วย เนื่องจากเป็นแหล่งน้ำเสียที่มี ปริมาณสารอินทรีย์สูง และ เป็นน้ำเสียที่มาจากร้านอาหาร ซึ่งถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มของน้ำเสียชุมชน ด้วยเหตุนี้ น้ำเสียจากโรงอาหารจึงเหมาะแก่การนำมาใช้เป็นตัวแทนของน้ำเสียชุมชนเช่นเดียวกัน

การศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ในครั้งนี้จะนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ AQUASIM V. 2.1b เข้า มาใช้ร่วมกับแบบจำลองระบบเอสเอส 1 (ASM 1: Activated Sludge Model 1) ในการศึกษาค่า จลนพลศาสตร์ และสร้างแบบจำลองของระบบแคสส์™ เพื่อรองรับข้อมูลที่ได้จากการทดลองใน ห้องปฏิบัติการ ค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้นี้จะนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่อ้างอิงจากงานวิจัยต่างๆ รวมถึงหาความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น นำไปสู่การสรุปผลและวิจารณ์ความเหมาะสมในการนำค่า จลนพลศาสตร์ที่ได้จากงานวิจัยครั้งนี้ไปใช้ในการออกแบบและปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียทาง ชีวภาพในประเทศไทยต่อไปในอนาคต

#### 1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของน้ำเสียชุมชนในประเทศไทย
2. ศึกษาการทำงาน และ นำแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์มาใช้ในการวิเคราะห์ค่า จลนพลศาสตร์ของน้ำเสียชุมชนในประเทศไทย
3. เปรียบเทียบค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์กับค่า จลนพลศาสตร์จากแหล่งอื่นๆ
4. สร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของระบบบำบัดน้ำเสียของนนทบุรี โดยใช้ค่า จลนพลศาสตร์ของน้ำเสียชุมชนในประเทศไทยที่วิเคราะห์ได้

### 1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1. ใช้น้ำเสียจริงจากโรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรี และ จากบ่อดักไขมันของโรงอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในการทดลอง
2. นำแบบจำลองระบบเอเอส 1 มาใช้ในการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ และ สร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของระบบแคสส์™
3. ศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ 2 ค่า ได้แก่
  - 3.1 อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของจุลชีพแบบเฮเทอโรโทรป (Heterotroph maximum specific growth rate;  $\mu_{mH}$ )
  - 3.2 สัมประสิทธิ์การอิ่มตัวครึ่งหนึ่งของจุลชีพแบบเฮเทอโรโทรป (Half-saturation coefficient for Heterotroph;  $K_{SH}$ )
4. ศึกษาค่าปริมาณสัมพันธ์ (Stoichiometric Parameter) คือ ยิลด์ของเฮเทอโรโทรป (Heterotroph Growth yield;  $Y_H$ )
5. ใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ AQUASIM 2.1b (พัฒนาโดย Peter Reichert : Swiss Federal Institute for environmental science and technology (EAWAG) Switzerland) ในการสร้างแบบจำลองของระบบแคสส์™ และ ใช้ในการวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์

### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ค่าจลนพลศาสตร์ของน้ำเสียชุมชนในประเทศไทย
2. ค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้สามารถนำไปใช้อ้างอิง และเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบเพื่อการปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนของประเทศไทย ให้มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้นในอนาคตต่อไป
3. ทราบความคลาดเคลื่อนของประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสีย เพื่อนำค่าดังกล่าวมาใช้ตรวจสอบ, แก้ไข หรือ ปรับปรุง เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงขึ้น หรืออาจใช้ค่าดังกล่าวเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาลง



## บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียชุมชน

น้ำเสียชุมชนเป็นน้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมประจำวันต่างๆ ของประชาชนที่อาศัยอยู่ในชุมชน และกิจกรรมในการประกอบอาชีพ ได้แก่ น้ำเสียที่เกิดจากการประกอบอาหาร และ ชำระล้างสิ่งสกปรกทั้งหลายภายในครัวเรือน และ อาคารประเภทต่างๆ เป็นต้น ซึ่งลักษณะน้ำเสียชุมชนในอาคารประเภทต่างๆ ของประเทศไทยเป็นดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าเฉลี่ยของลักษณะน้ำเสียชุมชนในประเทศไทย

ชุมชน	บีโอดี	ซีโอดี	ของแข็งแขวนลอย	ทีเคเอ็น	ฟอสฟอรัส
อาคารชุดพักอาศัย					
- น้ำส้วม	110	220	-	40.8	1.3
- น้ำเสียอื่น	151	285	-	21	2.1
โรงแรมชั้นหนึ่ง	190	311	84	23	1.8
หอพัก					
- น้ำส้วม	123	1,290	666	32.9	6.8
- น้ำเสีย	75	135	29	19.2	3.9
โรงพยาบาล	170	282	69	27.6	2.9
ภัตตาคาร	919	1,785	401	55.1	3.2
ตลาด	1,123	2,242	551	53.9	4.0
ศูนย์การค้า	81	224	61	66.6	10.1

ที่มา : ธงชัย พรรณสวัสดิ์ (2545)

อาคารที่แต่ละประเภทที่ต่างก็มีลักษณะน้ำเสียที่แตกต่างกันไป ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้ น้ำ รวมถึงกิจกรรมต่างๆ ที่เกิดขึ้นในอาคารนั้นๆ ทั้งนี้ หากเปรียบเทียบลักษณะน้ำเสียชุมชนในประเทศไทยกับต่างประเทศจะพบว่ามีความแตกต่างกันเป็นอย่างมาก โดยลักษณะน้ำเสียชุมชนของประเทศ เป็นดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ลักษณะน้ำเสียชุมชนของต่างประเทศ

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น		
		ต่ำ	ปานกลาง	สูง
ของแข็งทั้งหมด		390	720	1230
- ของแข็งละลายน้ำ	มก./ล.	270	500	860
- ของแข็งแขวนลอย		120	210	400
ปริมาณตะกอนหนัก	มก./ล.	5	10	20
บีโอดี	มก./ล.	110	190	350
ซีโอดี	มก./ล.	250	430	800
ไนโตรเจนทั้งหมด		20	40	70
- อินทรีย์ไนโตรเจน		8	15	25
- แอมโมเนียอิสระ	มก./ล.	12	25	45
- ไนไตรท์		0	0	0
- ไนเตรท		0	0	0
ฟอสฟอรัสทั้งหมด		4	7	14
- สารอินทรีย์	มก./ล.	1	2	4
- สารอนินทรีย์		3	5	10
คลอไรด์	มก./ล.	30	50	90
ซัลเฟต	มก./ล.	20	30	50
ไขมัน	มก./ล.	50	90	100
โคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมด	No./100ml.	$10^6$ - $10^8$	$10^7$ - $10^9$	$10^7$ - $10^{10}$

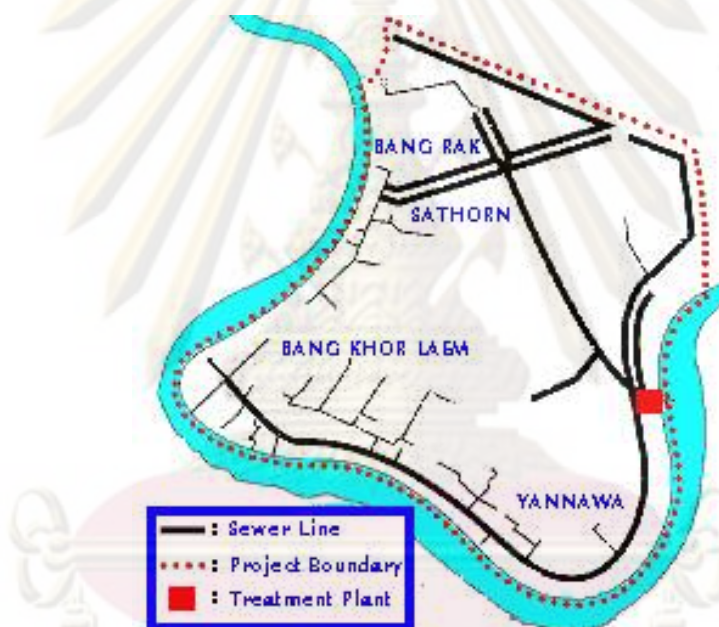
ที่มา : Tchobanoglous et al. (2003)

ลักษณะน้ำเสียของต่างประเทศโดยรวม นั้นมีค่าสูงกว่าน้ำเสียชุมชนในประเทศไทยเป็นอย่างมาก แม้แต่ค่าที่ต่ำที่สุดก็ยังถือว่ามีค่าสูงกว่าของน้ำเสียชุมชน ทั้งนี้ เนื่องจากระบบรวบรวมน้ำเสียในประเทศไทยเป็นระบบรวม ซึ่งแตกต่างจากต่างประเทศที่เป็นระบบแยก ประกอบกับลักษณะทางภูมิอากาศที่แตกต่างกันไปในแต่ละประเทศ ทำให้ลักษณะน้ำเสียชุมชนของประเทศไทยแตกต่างจากน้ำเสียชุมชนของต่างประเทศเป็นอย่างมาก ด้วยเหตุนี้ ทำให้ค่าจลนพลศาสตร์ของน้ำเสียชุมชนในประเทศไทยแตกต่างจากต่างประเทศไปด้วย อันเป็นที่มาของงานวิจัยชิ้นนี้

## 2.2 ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรี

### 2.2.1 ข้อมูลเบื้องต้น

โรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรีตั้งอยู่บนปากคลองของนนทบุรี ถนนพระรามที่ 3 ครอบคลุมพื้นที่เขตบางรัก ยานนาวา สาทร์ และ บางคอแหลม โดยมีพื้นที่บริการรวม 28.5 ตารางกิโลเมตร และโรงบำบัดมีพื้นที่จำนวน 20 ไร่ สามารถรองรับประชากรจำนวน 580,000 คน ในช่วงระยะที่ 1 (พ.ศ. 2558) และ เพิ่มขึ้น 1,000,000 คน ในช่วงระยะที่ 2 (พ.ศ. 2563) พื้นที่บริการของโรงบำบัดแสดงดังรูปที่ 2.1

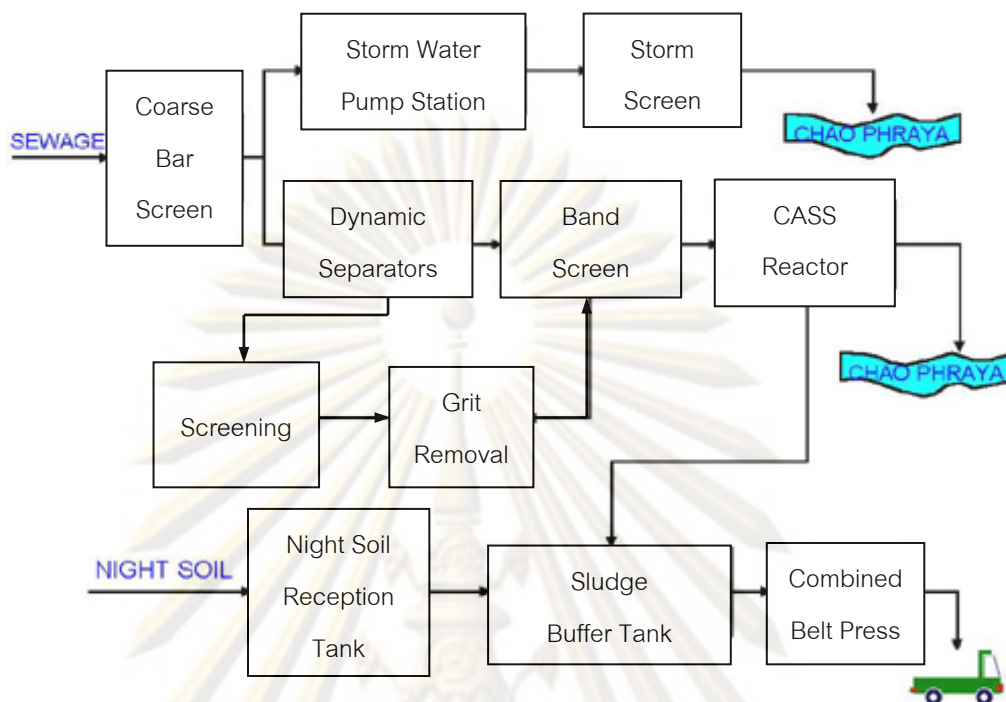


รูปที่ 2.1 พื้นที่บริการของโรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรี

(สำนักการระบายน้ำ, สำนักงานจัดการคุณภาพน้ำ, 2549)

### 2.2.2 ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรี

โรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรี บำบัดน้ำเสียโดยใช้ระบบเอเอสแบบ Cyclic Activated Sludge System™ (CASS™) จำนวน 24 บ่อ โดยการจัดวางบนอาคาร 4 ชั้น และในแต่ละชั้นแบ่งย่อยออกเป็นอีก 6 บ่อ ซึ่งมีมิติของบ่อบำบัดคือ กว้าง 17.5 ม. ยาว 60 ม. และ ลึก 5 ม. มีกำลังการบำบัดน้ำเสียรวม 200,000 ลบ.ม./วัน แผนผังรวมของระบบบำบัดน้ำเสียในโรงบำบัดแสดงดังรูปที่ 2.2 ซึ่งมีรายละเอียดของขั้นตอนต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนรวมของระบบบำบัดน้ำเสียในโรงบำบัดน้ำเสียช่องนนทรี  
(สำนักการระบายน้ำ, สำนักงานจัดการคุณภาพน้ำ, 2549)

1. ตะแกรงหยาบ (Coarse Bar Screen) ทำหน้าที่ดักขยะที่ปะปนมากับน้ำเสียที่เข้ามาในระบบ โดยน้ำเสียที่ถูกแยกขยะออกไปแล้วจะเข้าสู่สถานีสูบน้ำ และถูกสูบต่อไปยัง ถังแยกกรวดทราย

2. สถานีสูบน้ำฝน (Storm Water Pump Station) ทำหน้าที่รับน้ำเสียส่วนที่ถูกเจือจางโดยน้ำฝนในกรณีที่ฝนตกหนัก ซึ่งไหลล้นมาจากสถานีสูบน้ำ และทำหน้าที่สูบน้ำต่อไปยัง ตะแกรงแยกน้ำฝน

3. ตะแกรงแยกน้ำฝน (Storm Screen) แบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ตะแกรงแยกน้ำฝนแบบหมุน (Rotary Storm Screen) และ ตะแกรงแยกน้ำฝนแบบอยู่กับที่ (Static Storm Screen) ทำหน้าที่แยกของแข็งที่ปะปนมากับน้ำ ก่อนปล่อยลงสู่คลองช่องนนทรี ที่เชื่อมต่อกับแม่น้ำเจ้าพระยาต่อไป

4. **ถังแยกกรวดทราย (Dynamic Separator)** เป็นถังกลมมีหน้าที่แยกของแข็งหยาบและกรวดทรายออกจากน้ำเสีย โดยใช้หลักการหมุนวน (Vortex) ซึ่งของแข็งหยาบจะตกลงที่ก้นถัง หลังจากนั้น เครื่องสูบน้ำแบบจุ่มใต้น้ำ (Submersible Pump) จะทำการสูบน้ำเสียที่ก้นถังไปทำการแยกต่อไป ส่วนน้ำเสียส่วนบนจะไหลต่อไปที่ ตะแกรงดักขยะ

5. **เครื่องแยกของแข็งและกรวด (Screening And Grit Removal)** ประกอบไปด้วย ตะแกรงแยกของแข็ง (Underflow Screen) และ เครื่องแยกกรวด (Grit Classifier) เพื่อแยกของแข็งหยาบออกจากน้ำเสียที่ถูกสูบมาจากก้นถังของ ถังแยกกรวดทราย ก่อนไหลกลับไปท่ ตะแกรงดักของแข็งละเอียด

6. **ตะแกรงดักของแข็งละเอียด (Band Screen)** เป็น ตะแกรงแยกละเอียดแบบแนวตั้ง มีหน้าที่แยกของแข็งที่มีขนาดเล็กออกจากน้ำเสียก่อนเข้า ถังปฏิกริยาของระบบแคสส์™

7. **ถังปฏิกริยาของระบบแคสส์™ (CASS™ Reactor)** ทำหน้าที่บำบัดน้ำเสียทางชีวภาพด้วยระบบเอเอสแบบแคสส์™ เพื่อลดค่าบีโอดี, ของแข็งแขวนลอย, ไนโตรเจน และ ฟอสฟอรัส ซึ่งเติมอากาศโดยใช้เครื่องเป่าอากาศ จ่ายลมผ่านหัวเติมอากาศ (Air Diffuser) ภายในมีเครื่องสูบลัดจ์หมุนเวียนในถัง และมีเครื่องสูบลัดจ์ส่วนเกินออกจากถังด้วย นอกจากนี้ยังมีเครื่องล้นริน (Decanter) เพื่อคูดน้ำใสที่บำบัดแล้วออกจากถังด้วย การทำงานของถังจะทำงานแบบมีขั้นตอน (Sequence Batch) และใช้ Alum เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด ฟอสฟอรัส

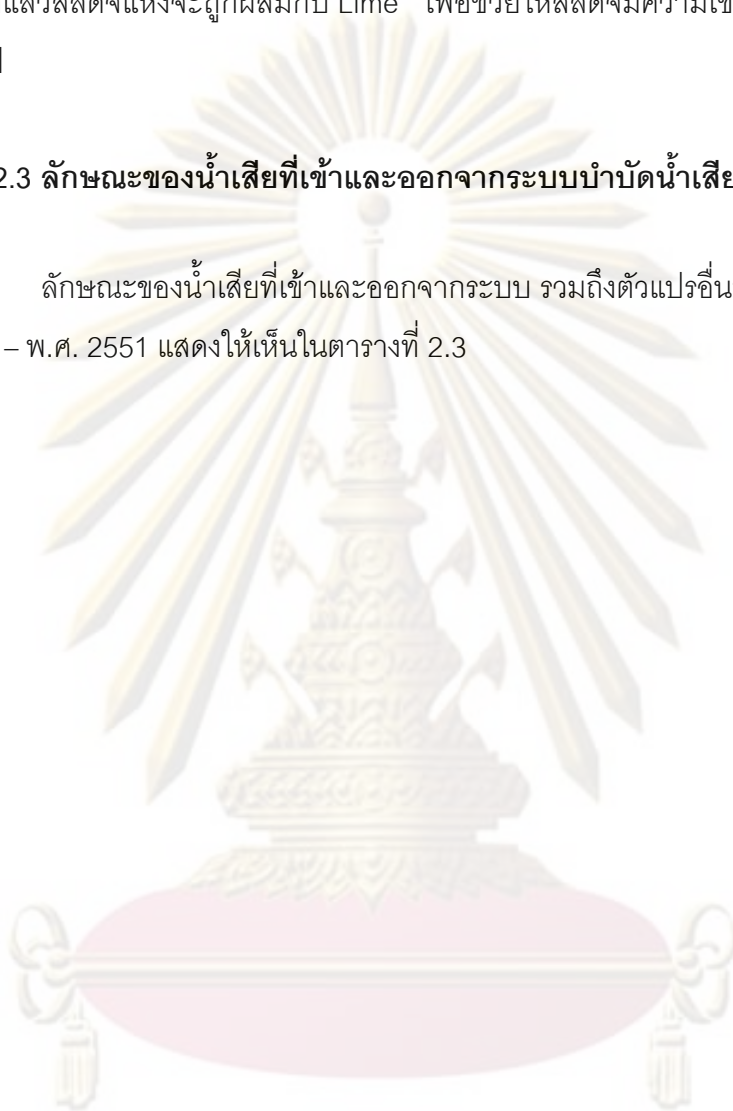
8. **ถังรองรับสิ่งปฏิกูล (Night Soil Reception Tank)** ทำหน้าที่รับของเสียจากบ่อเกรอะโดยรถดูดส้วม ภายในถังประกอบด้วย เครื่องแยกของแข็งและบีบอัด (Screen & Compactor) และ ตะแกรงแยกกรวด (Grit Classifier Screen) เพื่อแยกของแข็งหยาบออกจากของเสีย และมีเครื่องกวนใต้น้ำ (Submersible Mixer) เพื่อกวนไม่ให้เกิดการทับถมของสัดจ์ นอกจากนี้ยังมีเครื่องสูบลัดจ์ออกจากถังด้วย

9. **ถังเก็บสัดจ์ (Sludge Buffer Tank)** เป็นถังเก็บสัดจ์ที่ออกมาจาก ถังปฏิกริยาของระบบแคสส์™ และ ถังรองรับสิ่งปฏิกูล ภายในถังมีการเติมอากาศจากเครื่องเป่าอากาศ ด้วย

10. เครื่องรีดสไลด์ (Combined Belt Press) ทำหน้าที่รีดสไลด์ที่ออกมาจาก ถังเก็บสไลด์ โดยสไลด์จะถูกผสมกับโพลีเมอร์ เพื่อให้สามารถรีดน้ำออกจากสไลด์ได้ง่าย หลังจากผ่านการรีดแล้วสไลด์แห้งจะถูกผสมกับ Lime เพื่อช่วยให้สไลด์มีความเข้มข้นสูงขึ้น ก่อนนำไปกำจัดต่อไป

### 2.2.3 ลักษณะของน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบบำบัดน้ำเสีย

ลักษณะของน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบ รวมถึงตัวแปรอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง ในช่วงปี พ.ศ. 2549 – พ.ศ. 2551 แสดงให้เห็นในตารางที่ 2.3



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 ค่าพารามิเตอร์ในน้ำเสียที่เข้าและออกจากโรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรี

ปี พ.ศ.	อุณหภูมิ °ซ	pH	Flow ลบ.ม./วัน	COD เข้า มก./ล.	COD ออก มก./ล.	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 <sub>4</sub> - N เข้า มก./ล.	NH <sub>4</sub> - N ออก มก./ล.	TN เข้า มก./ล.	TN ออก มก./ล.	DO ออก มก./ล.
2549	28.42	7.54	124,576	73.74	19.85	46.59	11.25	2.41	1.49	15.05	3.01	9.09	1.26	10.37	6.13	6.53
2550	23.63	5.99	122,225	62.48	21.76	49.79	11.50	2.23	1.34	9.21	1.83	7.94	1.11	9.88	6.78	5.37
2551	28.85	7.47	103,876	60.85	24.89	41.09	13.16	2.37	1.53	10.24	2.69	9.54	2.19	10.29	6.79	6.39
เฉลี่ย	27.97	7.00	116,892	65.69	22.18	45.82	11.97	2.34	1.45	11.50	2.51	8.86	1.52	10.18	6.57	6.10
มาตรฐาน*		5 - 9	-	-	-	-	≤ 30	-	-	-	≤ 35	-	-	-	-	-

ที่มา : บริษัท โกลบอล ยูทิลิตี้ เซอร์วิส จำกัด, 2551

\*ค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอาคารประเภท ก. (กรมควบคุมมลพิษ, 2550)

หมายเหตุ : COD (Chemical Oxygen Demand) คือ ปริมาณออกซิเจนที่ต้องการใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์

DO (Dissolved Oxygen) คือ ออกซิเจนละลายน้ำ

SS (Suspended Solids) คือ ของแข็งแขวนลอย

TP (Total Phosphorus) คือ ฟอสฟอรัสทั้งหมด

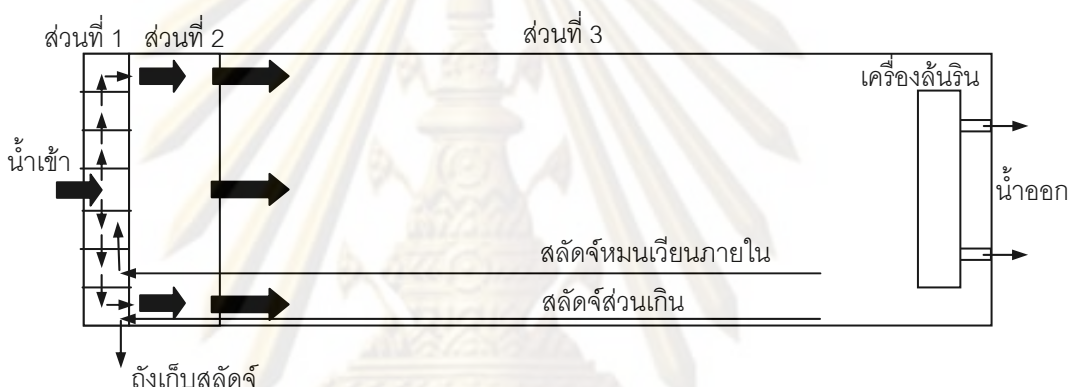
TN (Total Nitrogen) คือ ไนโตรเจนทั้งหมด ประกอบด้วย TKN (เจดาร์ห์ลไนโตรเจน) NO<sub>2</sub>- N (ไนไตรท์ไนโตรเจน) และ NO<sub>3</sub>- N (ไนเตรทไนโตรเจน)

TKN (Total Kjeldahl Nitrogen) คือ เจดาร์ห์ลไนโตรเจน หรือ สารอินทรีย์ไนโตรเจนทั้งหมด ประกอบด้วย Organic - N (สารอินทรีย์ไนโตรเจน)

และ NH<sub>4</sub>- N (แอมโมเนียไนโตรเจน)

## 2.2.4 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแคสส์™

ระบบแคสส์™ (CASS™) นั้นประกอบด้วยถังปฏิกริยาหลักเพียงหนึ่งใบ ซึ่งภายในจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนย่อยด้วยแผ่นกั้น โดยส่วนแรกมีขนาดร้อยละ 5 โดยปริมาตร ส่วนที่ 2 ขนาดร้อยละ 10 โดยปริมาตร และส่วนที่ 3 ขนาดร้อยละ 85 โดยปริมาตร ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งจะมีการเติมอากาศเฉพาะในสองส่วนหลังเท่านั้น รวมถึงมีการไหลเวียนสลัดจ์กลับจากส่วนที่ 3 มายังส่วนแรกด้วย นอกจากนี้ภายในถังยังมีการติดตั้งเครื่องล้นริน (Decanter) ซึ่งสามารถปรับระดับขึ้น-ลงได้ เพื่อทำการสูบน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วออกจากระบบ



รูปที่ 2.3 องค์ประกอบและการทำงานของระบบแคสส์™

(ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2545)

รายละเอียดขององค์ประกอบต่างๆในถังปฏิกริยาของระบบแคสส์™ มีดังนี้

**ส่วนที่ 1.** ทำหน้าที่เป็นถังคัดพันธุ์ (Selector) ซึ่งมีขนาดร้อยละ 5 โดยปริมาตร น้ำเสียที่เข้ามาในระบบจะผ่านเข้ามาที่ส่วนนี้ผสมรวมกับสลัดจ์หนวนเวียนจากส่วนที่สามด้วย โดยในส่วนนี้จะไม่มีการเติมอากาศผสม แต่จะมีการกวนผสมโดยใช้แผ่นกั้นให้มีรูปแบบการไหลตามยาวแทน ซึ่งถังส่วนนี้จะช่วยลดปัญหาสลัดจ์ยึดจากแบคทีเรียแบบเส้นใย (Filamentous Sludge Bulking) ที่เกิดในระบบได้เป็นอย่างดี

**ส่วนที่ 2.** ทำหน้าที่เป็นถังเติมอากาศขั้นสอง (Secondary Aeration) ซึ่งมีขนาดร้อยละ 10 โดยปริมาตร ในส่วนนี้จะมีการเติมอากาศพร้อมกันกับส่วนที่สาม และ ใช้เป็นที่กั้นน้ำ



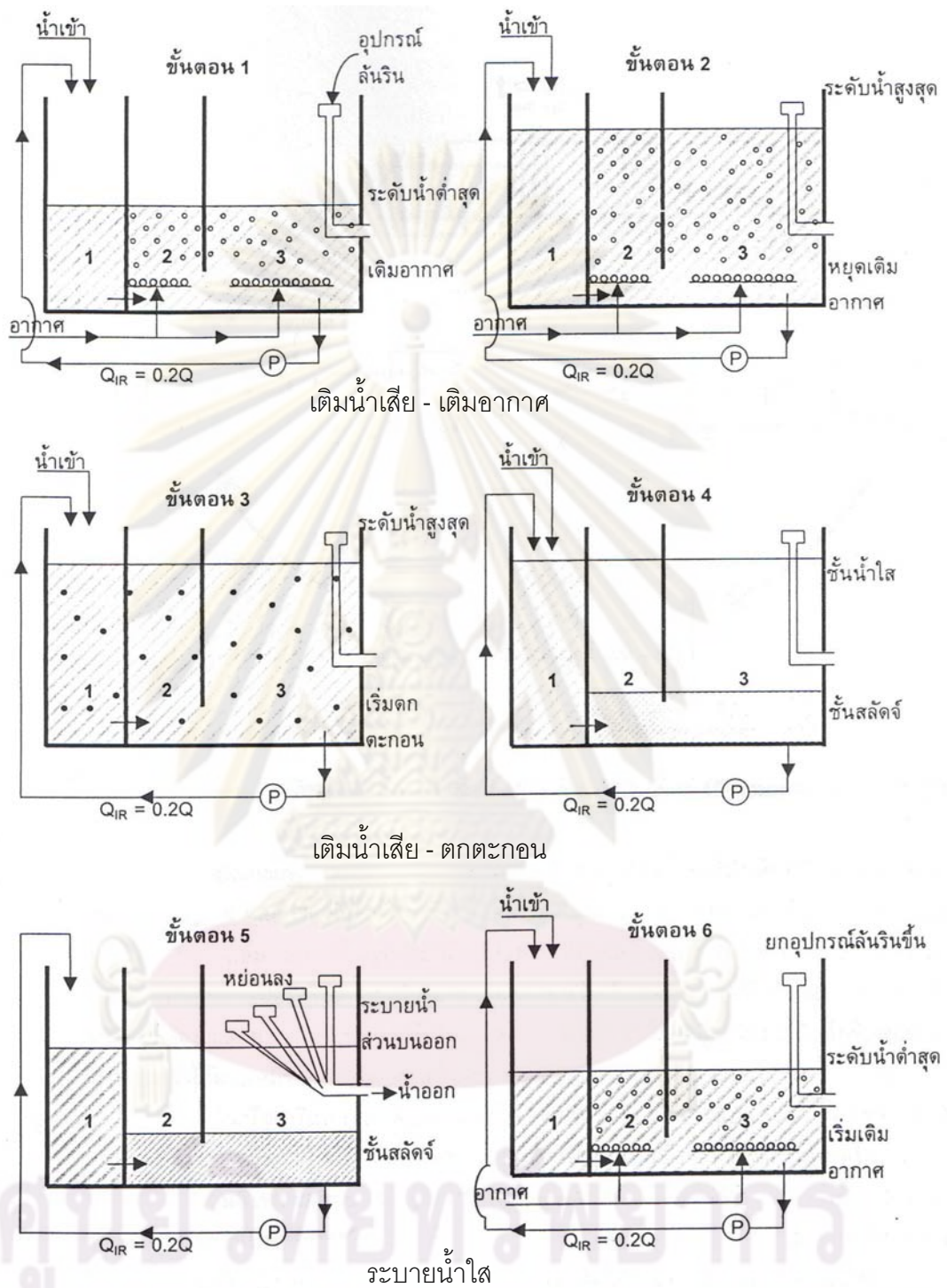
**ส่วนที่ 3.** ทำหน้าที่เป็นถังเติมอากาศหลักของระบบ (Main Aeration) ซึ่งมีขนาดร้อยละ 85 โดยปริมาตร เป็นส่วนที่มีขนาดใหญ่ที่สุดของระบบ ภายในจะมีการกวนผสมอย่างสมบูรณ์ ทำให้ส่วนนี้เป็นส่วนที่เหมาะสมต่อการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำต่างๆ นอกจากนี้ยังเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันร่วมกัน (Co-Current Nitrification/Denitrification) ได้เมื่อมีการควบคุมการเติมออกซิเจนละลายน้ำในระบบให้เหมาะสม เพื่อให้ได้ค่าโออาร์พี (ORP: Oxidation-Reduction Potential) ที่สามารถทำให้เกิดกระบวนการดังกล่าวได้ โดยค่าออกซิเจนละลายน้ำ และ ค่าโออาร์พีที่เหมาะสม อยู่ในช่วง 0.5 มก./ล. ถึง 2 มก./ล. และ 50 mV ถึง - 200 mV (Demoulin, Rudiger และ Goronszy, 2001)

กระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันร่วมกัน จะทำให้ฟล็อกของจุลชีพแบ่งออกเป็น 2 ชั้น โดยชั้นนอกของฟล็อกจะเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน ทำหน้าที่เปลี่ยนแอมโมเนียในน้ำเสียให้กลายเป็นไนเตรท และดูดซับไนเตรทที่ได้เข้าสู่ฟล็อกชั้นใน ส่วนฟล็อกชั้นในจะอยู่ในสภาวะแอน็อกซิก และเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันทำหน้าที่เปลี่ยนไนเตรทที่ดูดซับเข้ามา ให้กลายเป็นก๊าซไนโตรเจน กระบวนการทั้งหมดที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้ระบบสามารถกำจัดแอมโมเนียและ ไนเตรทได้พร้อมกันภายในถังปฏิกริยาใบเดียว (Demoulin et al., 1997)

### 2.2.5 การทำงานของระบบแคสส์™

ระบบแคสส์จะมีการทำงานแบบเป็นวัฏจักรวนเวียนเป็นรอบ ซึ่งระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบแต่ละรอบนั้นสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสมขึ้นกับปริมาณและคุณลักษณะของน้ำเสียที่เข้ามาในระบบ โดยใช้ PLC (Programmable Logic Controller) เป็นตัวควบคุมการทำงานของระบบ ตามปกติระบบทำงานในรอบหนึ่งจะใช้เวลา 4 ชั่วโมง และสามารถเพิ่มหรือลดเวลาได้เมื่อน้ำเสียที่เข้ามาในระบบมีปริมาณน้อยหรือมากตามลำดับ

การทำงานของระบบในแต่ละรอบนั้นจะประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 3 ช่วง ซึ่งสามารถแบ่งย่อยออกได้เป็นทั้งหมด 6 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2.4 มีรายละเอียดดังนี้



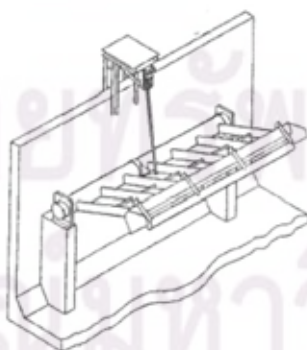
รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการทำงานในหนึ่งรอบวัฏจักรของระบบแคสส์™  
(ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2545)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. **ช่วงเติมน้ำเสีย-เติมอากาศ (Fill-Aerate)** เป็นช่วงเริ่มต้นของระบบ ซึ่งระดับน้ำในถังจะอยู่ที่ระดับน้ำต่ำสุด เริ่มต้นขั้นตอนที่ 1 คือการป้อนน้ำเสียเข้าระบบพร้อมๆ กับเติมอากาศไปเรื่อยๆ จนกระทั่งระดับน้ำในถังขึ้นถึงระดับน้ำสูงสุด (เข้าสู่ขั้นตอนที่ 2) ในช่วงนี้จะมีการเติมอากาศตลอดเวลาในส่วนที่ 2 และ 3 ของถังปฏิกิริยา รวมถึงมีการเวียนสลับกลับจากส่วนที่ 3 มายังส่วนที่ 1 ของถังตลอดเวลา กระบวนการบำบัดทางชีวภาพจะเกิดขึ้นในช่วงนี้ ได้แก่ กระบวนการ ไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันร่วมกัน รวมถึงการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

2. **ช่วงเติมน้ำเสีย-ตกตะกอน (Fill-Settle)** หลังจากเติมอากาศตามระยะเวลาที่กำหนดไว้แล้ว ระบบจะเข้าสู่ขั้นตอนที่ 3 ซึ่งระบบจะทำการปิดเครื่องเติมอากาศเพื่อให้สลัดจ์ตกตะกอน จนกระทั่งได้น้ำใสออกมาและสลัดจ์จมตัวลงที่ก้นถัง (เข้าสู่ขั้นตอนที่ 4) ในช่วงนี้ระบบยังคงมีการป้อนน้ำเสียเข้าอยู่ตลอดเวลาในส่วนที่ 1 ของถัง และมีการหมุนเวียนสลับกลับจากส่วนที่ 3 เข้าสู่ส่วนที่ 1 ตลอดเวลาเช่นกัน

3. **ช่วงระบายน้ำใส (Decant)** เพื่อแยกน้ำใสที่ผ่านการบำบัดแล้วออกจากระบบ ปล่องลงสู่แหล่งรับน้ำต่อไป โดยระบบจะเข้าสู่ขั้นตอนที่ 5 ซึ่งจะทำการปล่อยเครื่องลั่นรินที่ปรับระดับขึ้น-ลงได้ (Decanter) มีลักษณะดังรูปที่ 2.5 การทำงานของเครื่องลั่นรินนี้จะถูกควบคุมด้วย PLC ในการปรับระดับขึ้น-ลงเพื่อทำการสูบน้ำใสออกจากถัง จนกระทั่งระดับน้ำในถังกลับมายู่ที่ระดับน้ำต่ำสุดเหมือนตอนเริ่มต้นของวัฏจักร หลังจากนั้นระบบจะเข้าสู่ขั้นตอนสุดท้าย คือ เครื่องลั่นรินจะถูกยกขึ้นสู่ระดับเดิมแล้วปล่อยระบบพักชั่วคราว หรืออาจเติมอากาศต่อไปก็ได้ ในขั้นตอนนี้จะไม่มีกำหนดระยะเวลาที่แน่นอน เพื่อรักษาเวลารวมของระบบในแต่ละรอบให้เท่ากัน จากนั้นจึงเริ่มต้นวัฏจักรใหม่ต่อไป



รูปที่ 2.5 ลักษณะของเครื่องลั่นริน (Decanter) อย่างคร่าวๆ

(Kirkwood, 2004)

การทำงานในทุกๆ ช่วงจะมีการเวียนสลับถังดับอยู่ตลอดเวลา โดยสลับที่เวียนกลับนี้จะมีอัตราเป็น 0.2 เท่าของอัตราการไหลของน้ำเสียที่เข้ามาในระบบ ทั้งนี้เพื่อรักษาค่าอัตราส่วนของสารอาหารต่อมวลจุลินทรีย์ (F/M Ratio) ให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียชนิดสร้างฟล็อก (Floc Forming Bacteria) ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่มีความจำเป็นต่อระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพเป็นอย่างมาก รวมทั้งทำการควบคุมอายุสลับถังรวมของระบบให้อยู่ที่ 16 วัน (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2545)

รูปแบบการทำงานโดยรวมของระบบแคสส์™ ทั้ง 4 ชั้น ของโรงบำบัดน้ำเสียชองนนทรี ซึ่งแบ่งช่วงการทำงานเป็น 3 ช่วง จะมีลำดับการทำงานสลับกันไปมาทำให้ระบบทำงานเสมือนเป็นระบบต่อเนื่อง ดังตารางที่ 2 รวมระยะเวลาที่ใช้ทั้งหมดในแต่ละวัฏจักรเท่ากับ 4 ชั่วโมง และเดินระบบ 6 วัฏจักรต่อวัน

ตารางที่ 2.4 ลำดับการทำงานในช่วงเวลาต่างๆ ของระบบแคสส์™ ทั้ง 4 ชั้น

	0-1 ชั่วโมง	1-2 ชั่วโมง	2-3 ชั่วโมง	3-4 ชั่วโมง
ชั้นที่ 1	Fill-Aerate	Fill-Aerate	Fill-Settle	Decant
ชั้นที่ 2	Fill-Settle	Decant	Fill-Aerate	Fill-Aerate
ชั้นที่ 3	Fill-Aerate	Fill-Settle	Decant	Fill-Aerate
ชั้นที่ 4	Decant	Fill-Aerate	Fill-Aerate	Fill-Settle

ที่มา : Kirkwood, 2004

ปัจจุบัน เนื่องจากปริมาณน้ำเสียที่เข้าสู่โรงบำบัดน้ำเสียชองนนทรีมีค่าประมาณ 120,000 ลบ.ม./ว. ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าที่ออกแบบไว้คือ 200,000 ลบ.ม./ว. ดังนั้น เพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน โรงบำบัดน้ำเสียชองนนทรีจึงเปิดใช้งานระบบบำบัดจำนวน 3 ชั้น รวมทั้งหมด 18 บ่อ และ ปรับลดช่วงเวลาในการทำงานลงเหลือวัฏจักรละ 3 ชม. แบ่งเป็นช่วงต่างๆ ได้ดังนี้

ช่วง Fill-Aerate 75 นาที

ช่วง Fill-Settle 60 นาที

ช่วง Decant 45 นาที

ด้วยเหตุนี้ทำให้จำนวนวัฏจักรทั้งหมดเพิ่มขึ้นเป็น 8 วัฏจักรต่อวัน

## 2.3 การศึกษาค่าจลนพลศาสตร์

การศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพนั้น สิ่งสำคัญคือการเลือกใช้แบบจำลองของระบบบำบัดที่เหมาะสม ถูกต้อง และ น่าเชื่อถือ โดยแบบจำลองระบบเอเอส (ASM) ซึ่งสร้างขึ้นโดย IAWPRC (International Association on Water Pollution Research and Control) นั้น นับว่าเป็นแบบจำลองที่เกิดขึ้นมานานมาก โดยแบบจำลองระบบเอเอส 1 (ASM1) ถือเป็นแบบจำลองตัวแรกที่ IAWPRC คิดค้นขึ้น ซึ่งตีพิมพ์ในปี 1987 จนถึงปัจจุบันเป็นเวลาแล้ว 20 ปีแล้วที่แบบจำลองระบบเอเอส 1 ยังคงเป็นที่ยอมรับ และ นิยมใช้แพร่หลายในงานวิจัยต่างๆ มากมาย อีกทั้งยังเป็นแบบจำลองพื้นฐานในการนำไปใช้พัฒนาปรับปรุงแบบจำลองอื่นๆ ด้วย แสดงให้เห็นถึงความถูกต้อง และ น่าเชื่อถือของแบบจำลองนี้ ปัจจุบันแบบจำลองระบบเอเอสนั้นได้ตีพิมพ์ออกมาแล้ว 3 รุ่นด้วยกันซึ่งใช้อธิบายขอบเขตของกระบวนการทางชีวภาพที่แตกต่างกัน ดังนี้

1. **แบบจำลองระบบเอเอส 1 (ASM 1)** เป็นแบบจำลองพื้นฐาน ซึ่งมีความซับซ้อนน้อยที่สุด และเป็นพื้นฐานในการพัฒนาต่อยอดของแบบจำลองระบบเอเอสรุ่นอื่นๆ โดยอธิบายถึงกระบวนการทางชีวภาพต่างๆ ในระบบเอเอส รวมถึงการกำจัดไนโตรเจนทางชีวภาพ

2. **แบบจำลองระบบเอเอส 2 (ASM 2)** เป็นส่วนขยายแบบจำลองระบบเอเอส 1 ซึ่งจะมีความซับซ้อนขึ้น โดยเพิ่มกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพเข้าไป

3. **แบบจำลองระบบเอเอส 2d (ASM 2d)** เป็นส่วนขยายเพิ่มเติมต่อจากแบบจำลองระบบเอเอส 2 ซึ่งจะมีความซับซ้อนยิ่งขึ้นไปอีก โดยอธิบายเพิ่มการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันด้วยจุลชีพในกลุ่ม PAOs เข้าไป

4. **แบบจำลองระบบเอเอส 3 (ASM3)** ถือเป็นแบบจำลองพื้นฐานตัวใหม่แทนที่แบบจำลองระบบเอเอส 1 ซึ่งจะนำไปใช้ในการพัฒนาแบบจำลองของระบบเอเอสในยุคต่อไป โดยแบบจำลองตัวนี้จะอธิบายกระบวนการทางชีวภาพต่างๆ เช่นเดียวกับแบบจำลองระบบเอเอส 1 แต่ได้ทำการปรับแก้ข้อด้อยที่พบในแบบจำลองเดิม

งานวิจัยชิ้นนี้จะนำเอาแบบจำลองระบบเอเอส 1 มาใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของระบบแคสส์™ เพื่อวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ เนื่องจากในงานวิจัยนี้ ทำการศึกษาเฉพาะตัวแปรของจุลชีพในกลุ่มเฮเทอโรโทรปเท่านั้น ซึ่งแบบจำลองระบบเอเอส 1 นั้น ใช้อธิบายกระบวนการที่เกิดขึ้นได้อย่างเพียงพอ อีกทั้งยังเป็นแบบจำลองที่มีความซับซ้อนไม่มาก และสามารถทำความเข้าใจได้โดยง่าย นอกจากนี้ยังเป็นแบบจำลองที่ได้รับการยอมรับ และ ถูกนำไปใช้ในงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการงานวิจัยชิ้นนี้เป็นจำนวนมาก ด้วยเหตุนี้จึงเลือกใช้แบบจำลองระบบเอเอส 1 ในการทำงานวิจัยชิ้นนี้

### 2.2.1 การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม AQUASIM นั้น ข้อมูลที่สำคัญเป็นอันดับแรกคือ สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ถูกนำมาใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดทางชีวภาพที่สนใจ โดยในงานวิจัยชิ้นนี้จะอ้างอิงสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจุลชีพแบบเฮเทอโรโทรปจากแบบจำลองระบบเอเอส 1 มาใช้ในการสร้างแบบจำลองของระบบแคสส์™ ซึ่งสมการทางจลนพลศาสตร์ทั้งหมดของแบบจำลองระบบเอเอส 1 นั้นแสดงดังตารางที่ 2.5

สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่นำมาใช้ในครั้งนี้มีทั้งหมด 3 สมการ ได้แก่

1. สมการอัตราการเจริญเติบโตของจุลชีพแบบเฮเทอโรโทรป

$$r_{GX} = \mu_{mH} \left( \frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left( \frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) X_{B,H} \quad (2.1)$$

- โดยที่
- $\mu_{mH}$  = อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของจุลชีพ (ชม.<sup>-1</sup>)
  - $K_S$  = สัมประสิทธิ์การอิ่มตัวครึ่งหนึ่งของจุลชีพ (มก./ล.)
  - $K_{O,H}$  = สัมประสิทธิ์การอิ่มตัวครึ่งหนึ่งของออกซิเจน (มก./ล.)
  - $S_S$  = ความเข้มข้นของสารอาหารละลายน้ำ (มก./ล.)
  - $S_O$  = ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)
  - $X_{B,H}$  = ความเข้มข้นของตะกอนจุลชีพ (มก./ล.)  
(ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยระเหยได้)

ตารางที่ 2.5 สมการทางจลนพลศาสตร์ และปริมาณสารสัมพันธ์ ของกระบวนการต่างๆ ในแบบจำลองระบบเอเอส 1

j	Component → Process ↓	i													Process Rate, $\rho_j$ [ $ML^{-3}T^{-1}$ ]	
		1 $S_I$	2 $S_B$	3 $X_I$	4 $X_S$	5 $X_{B,H}$	6 $X_{B,A}$	7 $X_P$	8 $S_O$	9 $S_{NO}$	10 $S_{NH}$	11 $S_{ND}$	12 $X_{ND}$	13 $S_{ALK}$		
1	Aerobic growth of heterotrophs		$-\frac{1}{Y_H}$			1			$-\frac{1-Y_H}{Y_H}$		$-i_{XB}$				$-\frac{i_{XB}}{14}$	$\hat{\mu}_H \left( \frac{S_B}{K_S + S_B} \right) \left( \frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) X_{B,H}$
2	Anoxic growth of heterotrophs		$-\frac{1}{Y_H}$			1			$-\frac{1-Y_H}{2.86 Y_H}$		$-i_{XB}$				$\frac{1-Y_H}{14 \cdot 2.86 Y_H} - \frac{i_{XB}}{14}$	$\hat{\mu}_H \left( \frac{S_B}{K_S + S_B} \right) \left( \frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right) \times \left( \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \eta_g X_{B,H}$
3	Aerobic growth of autotrophs						1	$-\frac{4.57 - Y_A}{Y_A}$	$\frac{1}{Y_A}$		$-i_{XB} - \frac{1}{Y_A}$				$\frac{i_{XB}}{14} - \frac{1}{7 Y_A}$	$\hat{\mu}_A \left( \frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \left( \frac{S_O}{K_{O,A} + S_O} \right) X_{B,A}$
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		$\frac{1}{14}$	$k_A S_{NO} X_{B,H}$	
7	'Hydrolysis' of entrapped organics		1		-1											$k_h \frac{X_B/X_{B,H}}{K_X + (X_B/X_{B,H})} \left[ \left( \frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) + \eta_h \left( \frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right) \left( \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right] X_{B,H}$
8	'Hydrolysis' of entrapped organic nitrogen											1	-1			$\rho_7 (X_{ND}/X_B)$
Observed Conversion Rates [ $ML^{-3}T^{-1}$ ]		$r_i = \sum_j \nu_{ij} \rho_j$														
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 [ $M(COD)L^{-3}$ ]	Readily biodegradable substrate [ $M(COD)L^{-3}$ ]	Particulate inert organic matter [ $M(COD)L^{-3}$ ]	Slowly biodegradable substrate [ $M(COD)L^{-3}$ ]	Active heterotrophic biomass [ $M(COD)L^{-3}$ ]	Active autotrophic biomass [ $M(COD)L^{-3}$ ]	Particulate products arising from biomass decay [ $M(COD)L^{-3}$ ]	Oxygen (negative COD) [ $M(-COD)L^{-3}$ ]	Nitrate and nitrite nitrogen [ $M(N)L^{-3}$ ]	$NH_4 + NH_3$ nitrogen [ $M(N)L^{-3}$ ]	Soluble biodegradable organic nitrogen [ $M(N)L^{-3}$ ]	Particulate biodegradable organic nitrogen [ $M(N)L^{-3}$ ]	Alkalinity - Molar units	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: $\eta_g$ Ammonification: $k_A$ Hydrolysis: $k_h, K_X$ Correction factor for anoxic hydrolysis: $\eta_h$	

ที่มา : Henze et al., 2000

การนำสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยานี้ไปใช้งานนั้น ตัวแปรสำคัญที่จำเป็นซึ่งจะได้จากการทดลองนั้นมีถึง 3 ค่า ได้แก่ ปริมาณความเข้มข้นของสารอาหารละลายน้ำ, ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำ และ ปริมาณความเข้มข้นของตะกอนจุลชีพ ทำให้การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์นั้นมีความยากลำบากมากขึ้น ดังนั้น เพื่อให้การวิเคราะห์สะดวกมากขึ้นจึงสมมติให้ในระบบมีปริมาณการเติมอากาศที่สูงมากๆ กว่า  $K_{O,H}$  (โดยทั่วไป  $K_{O,H}$  จะมีค่าเท่ากับ 0.2 มก.  $O_2/ล.$ ) ซึ่งจะทำให้พจน์  $(K_{O,H} + S_O)$  เท่ากับ  $S_O$  และสามารถลดรูปสมการที่ 2.1 ได้ใหม่เป็นดังนี้

$$r_{GX} = \mu_{mH} \left( \frac{S_S}{K_S + S_S} \right) X_{B,H} \quad (2.2)$$

สมการที่ได้นี้จะนำไปใช้แทนสมการที่ 2.1 ซึ่งจะช่วยให้การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์สามารถทำได้ง่ายขึ้น เนื่องจากตัวแปรสำคัญที่จะได้จากการทดลองนั้นเหลือเพียง 2 ค่า ซึ่งก็คือ ปริมาณความเข้มข้นของสารอาหารละลายน้ำ และ ปริมาณความเข้มข้นของตะกอนจุลชีพ เท่านั้น

#### 1. สมการอัตราการสลายตัวของจุลชีพแบบเฮเทอโรโทรป

$$r_{DX} = -b_H X_{B,H} \quad (2.3)$$

โดยที่  $b_H$  = อัตราการสลายตัวจำเพาะของจุลชีพแบบเฮเทอโรโทรป (ชม.<sup>-1</sup>)

#### 2. สมการอัตราการกำจัดสารอาหาร

$$r_S = -\frac{\mu}{Y_H} X_{B,H} \quad (2.4)$$

และ 
$$\mu = \mu_{mH} \left( \frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \quad (2.5)$$

แทนสมการที่ 2.5 ลงในสมการที่ 2.4 จะได้สมการใหม่เป็น

$$r_S = -\frac{\mu_{mH}}{Y_H} \left( \frac{S_S}{K_S + S_S} \right) X_{B,H} \quad (2.6)$$



โดยที่  $Y_H =$  ยิลด์ของเฮเทอโรโทรป (มก. วีเอสเอส/มก. ซีไอดี)

สมการที่ (2.2), (2.3) และ (2.6) เป็นสมการที่จะถูกป้อนลงในโปรแกรม AQUASIM เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ร่วมกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองต่อไป

## 2.2.2 การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์

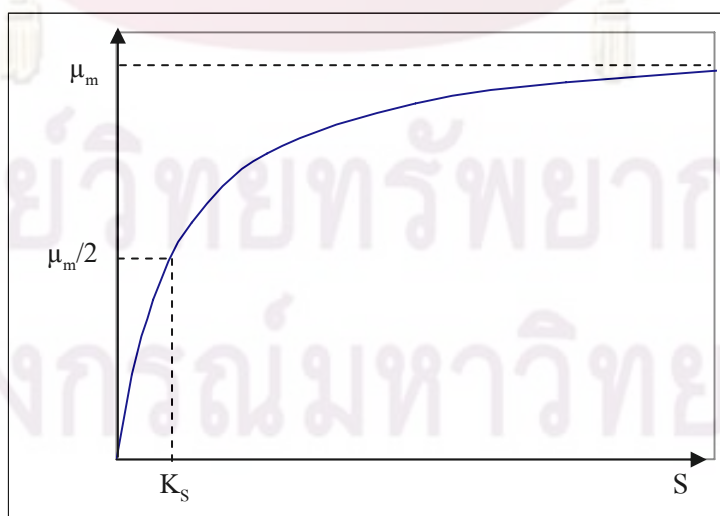
ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์โดยใช้กราฟข้อมูลการทดลองมาวิเคราะห์นั้น มี 4 ทฤษฎี ได้แก่

### 2.2.2.1 ทฤษฎีของ Monod (Grady, Daigger และ Lim, 1999)

สมการของทฤษฎีนี้เป็นสมการที่ได้จากการทดลอง ซึ่งได้รับการยอมรับ และ เป็นที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ โดยจะมีลักษณะดังสมการที่ (2.7)

$$\mu = \frac{1}{X} r_{GX} = \frac{\mu_m \cdot S}{K_S + S} \quad (2.7)$$

กราฟที่ได้จากสมการที่ (2.7) จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.6 ซึ่งเมื่อประมาณค่าของ  $\mu_m$  ในกราฟนี้ ก็จะสามารถหาค่า  $K_S$  จากกราฟนี้ได้เช่นกัน



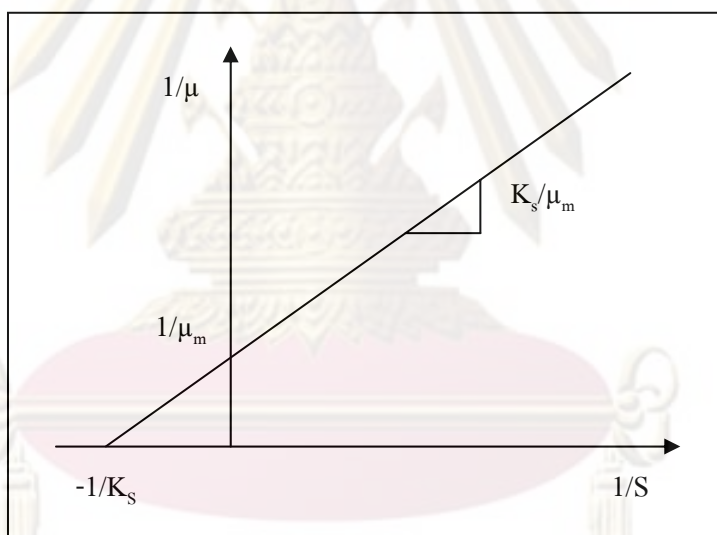
รูปที่ 2.6 อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นสารอาหารต่างๆ จากทฤษฎีของ Monod

### 2.2.2.2 ทฤษฎีของ Lineweaver-Burk (Grady et al., 1999)

ทฤษฎีนี้มาจากการนำสมการของ Monod มาหาส่วนกลับต่อ ซึ่งสมการที่ได้จะเป็นดังสมการที่ (2.8)

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_m} + \frac{K_s}{\mu_m} \cdot \left(\frac{1}{S}\right) \quad (2.8)$$

สมการที่ได้นี้จะอยู่ในรูปของสมการเส้นตรง ซึ่งสามารถหาค่าจลนพลศาสตร์ได้จากสมการนี้ โดยการสร้างกราฟของส่วนกลับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเทียบกับส่วนกลับความเข้มข้นสารอาหาร ซึ่งจะได้กราฟดังรูปที่ 2.7 และสามารถหาค่าจลนพลศาสตร์ได้จากจุดตัดที่แกน X และ ค่าความชันของเส้นกราฟ



รูปที่ 2.7 อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นสารอาหารต่างๆ

จากทฤษฎีของ Lineweaver-Burk

ข้อเสียของทฤษฎีนี้ก็คือ ข้อมูลที่ได้มีการกระจายตัวที่ไม่ดี โดยไปรวมกลุ่มอยู่แค่สองตำแหน่ง คือ ข้อมูลที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำจะรวมตัวอยู่ใกล้กับตำแหน่งจุดตัดแกน Y ของกราฟ เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่มีความเข้มข้นของสารอาหารสูงทำให้การทดลองวิเคราะห์ค่าในบริเวณนี้สามารถหาได้ง่าย และ มีความถูกต้องสูง ส่วนข้อมูลที่มีความคลาดเคลื่อนสูงจะอยู่ไกลออกไปที่ปลายเส้นกราฟ เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่มีความเข้มข้นของสารอาหารต่ำทำให้การทดลองวิเคราะห์ค่าในบริเวณนี้ให้มีความถูกต้องนั้น ทำได้ยาก ดังนั้น เส้นกราฟที่สร้างขึ้นจึงคลาดเคลื่อน

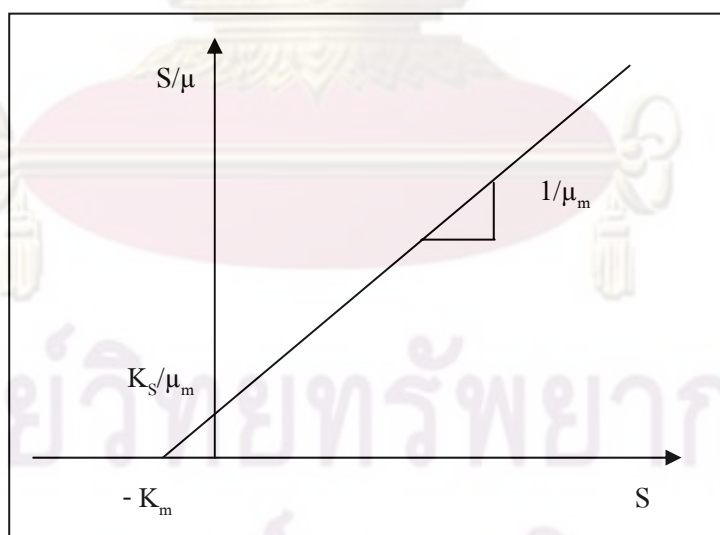
ได้ง่าย และ ทำให้ความชันของเส้นกราฟคลาดเคลื่อนตามไปด้วย ส่งผลให้ค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้ เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น

### 2.2.2.3 ทฤษฎีของ Hanes (Grady et al., 1999)

ทฤษฎีนี้มาจากการนำสมการของ Lineweaver-Burk มาปรับแก้ลดความคลาดเคลื่อนของสมการโดยการคูณด้วย  $S$  เข้าไปในสมการ ซึ่งจะได้สมการที่ (2.9) ออกมา

$$\frac{S}{\mu} = \frac{1}{\mu_m} \cdot S + \frac{K_s}{\mu_m} \quad (2.9)$$

สมการที่ได้นี้จะอยู่ในรูปของสมการเส้นตรงเช่นกัน แต่ให้ค่าที่แม่นยำมากขึ้น อันเนื่องมาจากการกระจายตัวที่ดีของข้อมูลตลอดเส้นกราฟโดยไม่ไปรวมตัวอยู่ที่ตำแหน่งใดตำแหน่งเดียว โดยกราฟที่ได้จากสมการนี้จะมาจากอัตราส่วนของความเข้มข้นสารอาหารต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเทียบกับความเข้มข้นสารอาหาร ซึ่งกราฟที่ได้จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.8 การหาค่าจลนพลศาสตร์จากทฤษฎีนี้หาได้จากจุดตัดแกน  $Y$  และค่าความชันของเส้นกราฟ



รูปที่ 2.8 อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นสารอาหารต่างๆ จากทฤษฎีของ Hanes

ข้อดีของทฤษฎีนี้คือ ข้อมูลที่ได้มีการกระจายตัวที่ดี ทำให้กราฟที่ได้มีความแม่นยำกว่าของ Lineweaver-Burk และได้ค่าความชันที่ถูกต้องกว่า โดยเฉพาะเมื่อใช้คอมพิวเตอร์ในการสร้างกราฟจะให้ข้อมูลที่ดียิ่งขึ้น

ข้อเสียคือ ค่าที่ได้จากจุดตัดแกน Y อยู่ใกล้จุดพิกัด (0,0) มากทำให้อ่านค่าจากกราฟได้ยาก แต่สามารถแก้ไขได้โดยการใช้อคอมพิวเตอร์สร้างกราฟ และ ทำการถดถอยเชิงเส้น

#### 2.2.2.4 ทฤษฎีของ Hofstee (Grady et al., 1999)

ทฤษฎีนี้มาจากการนำสมการของ Monod มาคูณกับพจน์  $(K_s+S)/S$  ได้ออกมาเป็นสมการที่ (2.10)

$$\mu \cdot \left( \frac{K_s + S}{S} \right) = \mu_m \quad (2.10)$$

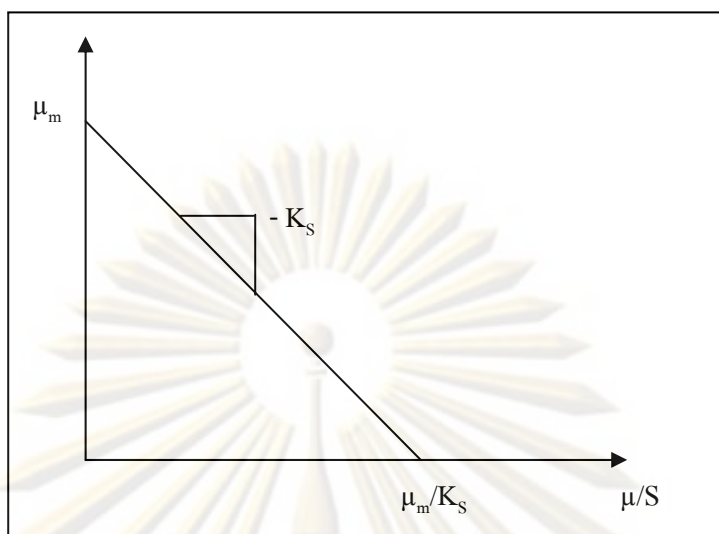
จัดรูปสมการที่ (2.10) ใหม่ได้เป็นสมการที่ (2.11)

$$\mu = \mu_m - K_s \cdot \left( \frac{\mu}{S} \right) \quad (2.11)$$

สมการที่ได้จะอยู่ในรูปสมการเส้นตรง ซึ่งสามารถสร้างกราฟจากสมการนี้ได้โดยการสร้างกราฟของอัตราการผลิตปฏิกิริยาเทียบกับอัตราส่วนของอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นของสารอาหาร กราฟที่ได้จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.9 สามารถหาค่าจลนพลศาสตร์ได้จากจุดตัดแกน Y และค่าความชันของเส้นกราฟ

ข้อดีของทฤษฎีนี้คือ ข้อมูลที่ได้มีการกระจายตัวดี และสามารถสร้างเส้นกราฟได้เองโดยไม่ต้องใช้อคอมพิวเตอร์ช่วย

ข้อเสียคือ เส้นกราฟที่ได้จะให้ค่าของ  $\mu_m$  อยู่ในจุดตัดของทั้งแกน Y และ X ทำให้ใช้อคอมพิวเตอร์ทำการถดถอยเชิงเส้นไม่ได้



รูปที่ 2.9 อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นสารอาหารต่างๆ จากทฤษฎีของ Hofstee

ทฤษฎีในการวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ทั้ง 4 ทฤษฎีนี้ ต่างก็มีข้อดี และ ข้อเสียแตกต่างกันไป โดยในงานวิจัยชิ้นนี้ได้เลือกทฤษฎีที่เหมาะสมเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ จำนวน 2 ทฤษฎี ได้แก่

1. ทฤษฎีของ Monod ซึ่งเป็นสมการแบบไม่เชิงเส้น โดยเป็นสมการพื้นฐานในการวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้รับการยอมรับ และ นิยมใช้ในงานวิจัยมากมาย อีกทั้งยังเป็นทฤษฎีพื้นฐานในการพัฒนาเป็นอีก 3 ทฤษฎีที่เหลือด้วย จึงถือเป็นตัวเลือกอันดับแรกที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้เป็นอย่างมาก

2. ทฤษฎีของ Hanes ซึ่งเป็นสมการเชิงเส้น โดยเป็นสมการที่ผ่านการปรับแก้แล้ว และ ให้เส้นกราฟที่แม่นยำมากที่สุดในบรรดาทฤษฎีอื่นๆ ที่สามารถใช้คอมพิวเตอร์สร้างกราฟ และ ทำการถดถอยเชิงเส้นได้ โดยเฉพาะ เมื่อใช้คอมพิวเตอร์ในการสร้างกราฟของทฤษฎีนี้ จะให้กราฟข้อมูลที่ดีขึ้น และสามารถวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ได้โดยง่าย

ค่าจลนพลศาสตร์ที่วิเคราะห์ได้จากทั้ง 2 ทฤษฎีนี้จะนำมาเปรียบเทียบกัน เพื่อดูว่าค่าที่ได้จากสมการเชิงเส้น และ สมการแบบไม่เชิงเส้น ใกล้เคียงหรือต่างกันอย่างไร รวมถึง ค่าที่ได้จากสมการที่ยังไม่ได้ปรับแก้ และ สมการที่ปรับแก้แล้ว จะแตกต่างกันอย่างไร

## 2.3 งานวิจัยที่ผ่านมา

Reichert, von Schulthess และ Wild (1995) ได้นำโปรแกรม AQUASIM มาใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองระบบเอเอส โดยนำข้อมูลจากการทดลองกระบวนการดีไนตริฟิเคชันมาใช้ในการประเมินผล

ในงานวิจัยจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ ได้แก่

1. การตรวจสอบความสามารถและหลักการทำงานของโปรแกรม AQUASIM
2. การทดลองระบบจำลอง และ สร้างแบบจำลองของกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน
3. การใช้โปรแกรม AQUASIM ในการประมาณค่าพารามิเตอร์และวิเคราะห์ความสามารถในการระบุค่าของแบบจำลอง

งานวิจัยจะทำการทดลองแบบแบตช์ในถังปฏิกรณ์แบบเอสปีอาร์ ซึ่งเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ในกลุ่มดีไนตริฟิเคชันเอาไว้ และทำการตรวจวัดปริมาณไนเตรท และ ไนไตรท์ในน้ำ รวมทั้งวัดปริมาณแก๊สไนตรัสออกไซด์ และ ไนโตรเจนที่เกิดขึ้นด้วย โดยทำการทดลองทั้งหมด 2 ชุด ซึ่งจะมีระดับของไนไตรท์แตกต่างกัน

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะถูกนำไปใช้ร่วมกับแบบจำลองของระบบดีไนตริฟิเคชัน ซึ่งพิจารณากระบวนการที่เกิดขึ้นเพียง 3 ขั้นตอน ได้แก่ กระบวนการลดรูปของไนเตรทเป็นไนไตรท์ การลดรูปไนไตรท์เป็นไนตรัสออกไซด์ และการลดรูปไนตรัสออกไซด์เป็นไนโตรเจนแก๊ส นอกจากนี้ยังกำหนดให้ค่าความเข้มข้นออกซิเจนที่ใช้ร่วมกับแบบจำลองมีค่าต่ำกว่า 1 มก./ล. ด้วย โดยการประมาณค่าพารามิเตอร์นั้นจะแยกวิเคราะห์ค่าออกเป็น 3 ขั้นตอน ตามลำดับขั้นของกระบวนการที่นำมาพิจารณาในแบบจำลอง และจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีพิจารณาแยกของการทดลองในแต่ละชุด และ กรณีพิจารณาโดยรวมการทดลองสองชุดเข้าด้วยกัน

จากการประมาณพารามิเตอร์ค่าโดยโปรแกรม AQUASIM ได้ค่าพารามิเตอร์ของการทดลองในแต่ละขั้นตอนดังนี้ (ค่าที่ใส่ในวงเล็บคือค่าที่กำหนดขึ้นมาใช้ เพื่อให้สามารถประมาณค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ได้)

ขั้นตอนที่ 1	การทดลอง A:	$k_1 = 1.03 \text{ gN/gCOD/d}$	$K_{\text{NO}_3} = 0.312 \text{ gN/m}^3$
		$K_{\text{NO}_2,1}^I = \infty$	$K_{\text{O}_2,1}^I = 0.082 \text{ gO/m}^3$
	การทดลอง B:	$k_1 = 0.66 \text{ gN/gCOD/d}$	$K_{\text{NO}_3} = 2.01 \text{ gN/m}^3$
		$K_{\text{NO}_2,1}^I = \infty$	$K_{\text{O}_2,1}^I = 0.184 \text{ gO/m}^3$
	การทดลอง A+B :	$k_1 = 0.88 \text{ gN/gCOD/d}$	$K_{\text{NO}_3} = 0.81 \text{ gN/m}^3$
		$K_{\text{NO}_2,1}^I = 29$	$K_{\text{O}_2,1}^I = 0.15 \text{ gO/m}^3$
ขั้นตอนที่ 2	การทดลอง A:	$k_2 = 0.85 \text{ gN/gCOD/d}$	$K_{\text{NO}_2} = (0.01) \text{ gN/m}^3$
		$K_{\text{NO}_2,2}^I = \infty$	$K_{\text{O}_2,2}^I = 0.095 \text{ gO/m}^3$
	การทดลอง B:	$k_2 = 0.41 \text{ gN/gCOD/d}$	$K_{\text{NO}_2} = (0.01) \text{ gN/m}^3$
		$K_{\text{NO}_2,2}^I = \infty$	$K_{\text{O}_2,2}^I = 0.178 \text{ gO/m}^3$
	การทดลอง A+B :	$k_2 = 0.92 \text{ gN/gCOD/d}$	$K_{\text{NO}_2} = (0.01) \text{ gN/m}^3$
		$K_{\text{NO}_2,2}^I = 10.4$	$K_{\text{O}_2,2}^I = 0.14 \text{ gO/m}^3$
ขั้นตอนที่ 3	การทดลอง A:	$k_3 = 2.56 \text{ gN/gCOD/d}$	$K_{\text{N}_2\text{O}} = 0.0040 \text{ gN/m}^3$
		$K_{\text{NO}_2,3}^I = \infty$	$K_{\text{O}_2,3}^I = (0.03) \text{ gO/m}^3$
	การทดลอง B:	$k_3 = 2.09 \text{ gN/gCOD/d}$	$K_{\text{N}_2\text{O}} = 0.0122 \text{ gN/m}^3$
		$K_{\text{NO}_2,3}^I = \infty$	$K_{\text{O}_2,3}^I = (0.03) \text{ gO/m}^3$
	การทดลอง A+B :	$k_3 = 4.73 \text{ gN/gCOD/d}$	$K_{\text{N}_2\text{O}} = 0.0086 \text{ gN/m}^3$
		$K_{\text{NO}_2,3}^I = 7.4$	$K_{\text{O}_2,3}^I = (0.03) \text{ gO/m}^3$

ผลที่ได้จากการประมาณค่าพบว่าทั้งสองกรณีนั้นต่างก็เกิดปัญหาในการระบุค่าพารามิเตอร์ที่เหมือนกัน นั่นคือจำเป็นต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์บางค่าที่เหมาะสมขึ้นมา เพื่อให้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นได้ แต่ทว่าผลที่ได้จากกรณีพิจารณารวมการทดลองทั้งสองชุดนั้นยังคงให้ผลที่ดีกว่า เนื่องจากสามารถระบุค่าพารามิเตอร์บางค่าที่ไม่สามารถระบุได้ในกรณีพิจารณาแยกการทดลองในแต่ละชุด นั่นคือค่าของ  $K_{\text{NO}_2}^I$  ดังจะเห็นได้จากผลการประมาณค่าข้างต้น ปัญหาทั้งหมดที่เกิดขึ้นนี้สามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มชุดการทดลองให้มากขึ้น รวมทั้งทดลองโดยแปรเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของออกซิเจน และ ไนโตรที่ระดับต่างๆ ด้วย

งานวิจัยชิ้นนี้แสดงให้เห็นว่า โปรแกรม AQUASIM นั้นมีความยืดหยุ่นเป็นอย่างมากในการนำไปใช้สร้างแบบจำลองของระบบเอเอส รวมทั้งใช้ในการระบุค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองได้เป็นอย่างดี

Novak, Goronszy และ Wanner (1997) ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ Cyclic Activated Sludge Technology ซึ่งเป็นระบบเอสบีอาร์แบบหนึ่งที่มีการแบ่งช่วงวัฏจักรของการเติมน้ำ-ให้อากาศ (fill-aerate) โดยในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นได้ใช้หลักการพื้นฐาน 3 อย่างได้แก่

1. ปรากฏการณ์ของการเคลื่อนย้ายสาร
2. ปรากฏการณ์ในการแปรสภาพของสาร
3. การควบคุมเวลาในการเกิดปฏิกิริยาภายในระบบเอสบีอาร์

ในการสร้างแบบจำลองนั้น ยังได้พิจารณาถึงปริมาตรของระบบที่สามารถแปรผันไปได้ ซึ่งส่งผลให้ระดับน้ำต่ำสุดภายในระบบมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยไม่คงที่ และกำหนดปริมาตรภายในระบบแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ  $V_1$  (ปริมาตรส่วนที่น้ำเข้า ซึ่งเป็นส่วนที่เกิดสภาวะแอน็อกซิก) และ  $V_2$  (ปริมาตรในส่วนเติมอากาศหลักของระบบ) ซึ่งสุดท้ายแล้วได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปริมาตร  $V_1$  และ  $V_2$  ดังนี้

$$V_1: \frac{dc_{i1}}{dt} = \left[ QI \cdot c_{i0} + QR \cdot c_{i2} - \left( QI + \frac{dV_1}{dt} \right) \cdot c_{i1} \right] / V_1 + \sum v_{ij} \rho_j$$

$$V_2: \frac{dc_{i2}}{dt} = \left[ QI \cdot c_{i1} - \left( QR + \frac{dV_2}{dt} \right) \cdot c_{i2} \right] / V_2 + \sum v_{ij} \rho_j$$

โดยที่  $c_{i0}$ ,  $c_{i1}$  และ  $c_{i2}$  คือ ความเข้มข้นสารอาหารของน้ำเสียที่เข้าระบบ น้ำเสียในปริมาตรที่ 1 และ น้ำเสียในปริมาตรที่ 2 ตามลำดับ

$QI$  และ  $QR$  คือ อัตราการไหลของน้ำเสียที่เข้าระบบ และ อัตราการไหลของสลัดจ์เวียนกลับ ตามลำดับ



$v_{ij}$  และ  $p_j$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ปริมาณสัมพันธ์ และ สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการต่างๆ ตามลำดับ ซึ่งได้จากแบบจำลองที่เกี่ยวข้อง

จากการทดสอบพบว่าแบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้อธิบายระบบ Cyclic Activated Sludge Technology รวมถึงระบบเอเอสแบบอื่นๆ ที่มีการทำงานแบบแบตช์ได้

Cheng และ Ribarova (1999) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการยกระดับ โรงบำบัดน้ำเสีย Parada ให้สามารถรองรับการกำจัดไนโตรเจนทางชีวภาพได้ โดยการสร้างแบบจำลองระบบเอเอสในโรงบำบัดน้ำเสีย Parada และ ทำการประเมินความเป็นไปได้ในการกำจัดไนโตรเจนทางชีวภาพโดยใช้กำลังการบำบัดที่มีอยู่ในปัจจุบันของโรงบำบัด

การทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่

1. รวบรวมข้อมูลที่ต้องใช้ในการปรับแก้แบบจำลอง
2. รวบรวมข้อมูลที่ต้องใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

โดยในแต่ละขั้นตอนจะทำการวิเคราะห์ค่าซีโอดี บีโอดี แอมโมเนีย และ ไนเตรต ที่เข้าและออกจากถังปฏิกิริยา ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่อยู่ในถังปฏิกิริยา และ ที่ถูกทิ้งออกจากระบบ รวมถึง อัตราการใช้ออกซิเจนในการเจริญเติบโตของจุลชีพแบบเฮเทอโรโทรปด้วย

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองของระบบเอเอส โดยใช้แบบจำลองระบบเอเอส 1 เป็นพื้นฐานร่วมกับโปรแกรม AQUASIM และ พิจารณากระบวนการทางชีวภาพเพียง 3 ขั้นตอนเท่านั้น ได้แก่ อัตราการเจริญเติบโตของจุลชีพแบบเฮเทอโรโทรป การสลายตัวของจุลชีพ และการย่อยสลายสารอินทรีย์ ส่วนขั้นตอนของการประเมินความเป็นไปได้ในการกำจัดไนโตรเจนทางชีวภาพของระบบนั้น จะทำการเพิ่มกระบวนการอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องเข้าไปในแบบจำลองด้วย ได้แก่ การเจริญเติบโตของจุลชีพแบบเฮเทอโรโทรปในสถานะแอน็อกซิก การเจริญเติบโตของจุลชีพแบบออกโตโทรป การสลายตัวของจุลชีพแบบออกโตโทรป การสร้างแอมโมเนีย และการย่อยสลายสารอินทรีย์ไนโตรเจน

ผลที่ได้จากการทดลองทั้ง 2 ขั้นตอนแสดงให้เห็นว่า ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความสัมพันธ์กับข้อมูลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม AQUASIM เป็นอย่างมาก ทั้งการเปรียบเทียบอัตราการหายใจ และ ปริมาณสารอาหารละลายน้ำที่ออกจากระบบ นอกจากนี้ การจำลองทางคอมพิวเตอร์ยังแสดงให้เห็นด้วยว่ากำลังการบำบัดที่มีอยู่ของโรงบำบัดน้ำเสีย Parada นั้นเพียงพอต่อการกำจัดไนโตรเจนทางชีวภาพได้ โดยที่ไม่ต้องทำการขยายส่วนต่อเพิ่มเติมใด

Nuhoglu, Keskinler และ Yildiz (2005) ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโรงบำบัดน้ำเสียเมือง Erzincaan ซึ่งอยู่ทางตะวันออกของประเทศตุรกี โดยใช้โปรแกรม GPS-X ร่วมกับแบบจำลองระบบเอเอส 1 ในการสร้างแบบจำลองของระบบเอเอส

ในงานวิจัยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

1. การศึกษาสมบัติเฉพาะตัวของน้ำเสียที่เข้าโรงบำบัดน้ำเสียเมือง Erzincaan
2. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม GPS-X

ในการศึกษาสมบัติเฉพาะตัวของน้ำเสียนั้น จะทำการวิเคราะห์ค่า ซีโอดีทั้งหมด ซีโอดีละลายน้ำ ของแข็งแขวนลอย ของแข็งแขวนลอยระเหยได้ ไนโตรเจนทั้งหมด แอมโมเนียไนโตรเจน ไนโตรที่ไนโตรเจน และ ไนเตรทไนโตรเจน นอกจากนี้ยังทำการทดลองหาค่า ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำได้ยาก ค่าอีลด์ของเฮเทอโรโทรป ปริมาณสารอาหารที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ทันที และ สารอาหารที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ช้า

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง และ ข้อมูลของอุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้ในระบบจริงรวมถึงกระบวนการที่เกี่ยวข้องจากแบบจำลองระบบเอเอส 1 จะถูกป้อนเข้าไปในโปรแกรม GPS-X เพื่อสร้างแบบจำลองของระบบเอเอส นอกจากนี้ยังทำการปรับแก้แบบจำลองนี้ให้มีความแม่นยำมากขึ้นโดยการปรับแก้ที่ค่าจลนพลศาสตร์ ซึ่งค่าเริ่มต้นที่ใช้เป็นค่าที่อยู่ในแบบจำลองเอเอสเอ็ม 1

ค่าที่ผ่านการปรับแก้แล้วมีดังนี้

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

จากการทดสอบแบบจำลองที่ผ่านการปรับแก้แล้ว โดยการนำข้อมูลของพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งจำลองขึ้นมาด้วยแบบจำลองนี้เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ พบว่าให้ผลการเปรียบเทียบที่ดีในพารามิเตอร์หลายค่า ได้แก่ ค่าซีโอดีทั้งหมด ของแข็งแขวนลอย ไนโตรเจน ทั้งหมดละลายน้ำ และ อินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำ ที่ออกจากระบบบำบัด นอกจากนี้ ค่าของแข็งแขวนลอยที่เวียนกลับเข้าระบบก็ให้ผลที่ดีเช่นกัน แต่ผลจากการเปรียบเทียบค่าซีโอดีละลายน้ำที่ ออกจากระบบบำบัด และ ปริมาณของแข็งแขวนลอยในถังเติมอากาศ นั้นกลับให้ผลที่ไม่ดีนัก

แบบจำลองของโรงบำบัดน้ำเสียเมือง Erzincan ที่ได้นี้ให้ผลที่น่าพึงพอใจ ซึ่งทำปรับแก้ค่า จลนพลศาสตร์เพียงสี่ค่าเท่านั้น และสามารถนำไปใช้ในอนาคตต่อไปได้

Pala และ Bolukbas (2005) ได้ทำการหาค่าจลนพลศาสตร์เพื่อใช้ออกแบบระบบบำบัด น้ำเสียที่กำจัด คาร์บอน ไนโตรเจน และ ฟอสฟอรัสทางชีวภาพ ในน้ำเสียชุมชน รวมถึง ทำการศึกษาสมบัติเฉพาะตัวของสลัดจ์ เพื่อประเมินความสามารถในการกำจัดฟอสฟอรัสทาง ชีวภาพของน้ำเสียด้วย โดยทำการทดลองด้วยถังปฏิกรณ์แบบแบตช์และใช้น้ำเสียสังเคราะห์ในรูป ของแอสซิเทต เปรียบเทียบกับ กลูโคส

ในงานวิจัยได้ทำการทดลองหาสมบัติเฉพาะตัวของสลัดจ์ โดยการหาอัตราการปล่อย ฟอสฟอรัสสูงสุด อัตราการรับฟอสฟอรัสสูงสุด และ อัตราการรับฟอสฟอรัสสูงสุดภายใต้สภาวะแ อน็อกซิก รวมถึงหาอัตราการเกิดไนตริฟิเคชัน และ ดีไนตริฟิเคชันด้วย ส่วนการหาค่าจลนพลศาสตร์ นั้นทำโดยการสร้างระบบจำลองแบบแบตช์ซึ่งใช้ตะกอนเร่งจากโรงบำบัด Izmir รวมทั้งจำลอง สภาวะในการเดินระบบเหมือนกับในโรงบำบัด Izmir จากนั้นจึงวัดค่าซีโอดี และ เอ็มแอลวีเอสเอส ที่เวลาต่างๆ และนำสมการ Monod มาใช้ในการหาค่าจลนพลศาสตร์ด้วย

จากการทดลองได้ค่าจลนพลศาสตร์ดังนี้

$$Y = 0.7 \text{ mg VSS/mg COD} \quad k_d = 0.0022 \text{ 1/h}$$

$$\mu_m = 0.047 \text{ 1/h} \quad K_s = 343 \text{ mg/l}$$

$$q_N = 6.87 \times 10^{-4} \text{ mg N/mg VSS/h} \quad q_D = 3.36 \times 10^{-4} \text{ mg N/mg VSS/h}$$

ซึ่งค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้นี้สามารถนำไปใช้ได้กับการกำจัดซีโอดี และ ไนโตรเจน ทาง ชีวภาพเท่านั้น ไม่สามารถใช้ในการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพได้ เนื่องจากมีอัตราการปล่อย

และรับฟอสฟอรัสที่ต่ำ อันเกิดจากการถูกขัดขวางด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชัน และ ดีไนตริฟิเคชัน

**ชลธิพร สุทธิธรรม และ ศรัณย์ เตชะเสน (2550)** ทำการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของระบบบำบัดน้ำเสียดินแดง โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ AQUASIM ร่วมกับแบบจำลองระบบเอส 1 ในการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของระบบบำบัดน้ำเสียดินแดง และ วิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์

ในงานวิจัยได้ทำการทดลองแบบแบตช์โดยใช้น้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสียดินแดง และจากบ่อเกรอะของอาคารสำนักงานสูง 22 ชั้น คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียตั้งแต่ 60 ถึง 200 มก.ซีโอดี/ล. และความเข้มข้นจุลชีพเริ่มต้นที่ 100 และ 710 มก./ล. ผลการทดลองได้ค่าจลนพลศาสตร์ดังนี้

$$Y = 0.43 \text{ mg VSS/mg COD}$$

$$\mu_m = 3.96 \text{ mg VSS/mg COD/d} \quad K_s = 41.34 \text{ mg/l}$$

ผลการทดลองที่ได้ให้ค่าความผิดพลาดมาตรฐานน้อยกว่าร้อยละ 10 ของความเข้มข้นเริ่มต้น และ การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของระบบบำบัดน้ำเสียดินแดง โดยใช้ค่าจลนพลศาสตร์ที่วิเคราะห์ได้ พบว่าค่าซีโอดีที่จำลองได้มีค่าต่ำกว่าที่วัดได้จริงจากโรงบำบัด ซึ่งสาเหตุอาจเกิดจากสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ช้าหลุดลอดออกจากระบบไปกับน้ำทิ้ง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมดนี้แสดงให้เห็นว่า การใช้โปรแกรม AQUASIM ร่วมกับแบบจำลองระบบเอส 1 ในการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ และ ใช้ในการวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ นั้นให้ผลเป็นที่น่าพอใจ และสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ การใช้สมการของ Monod ในการวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ นั้นสามารถทำได้ และ ให้ค่าจลนพลศาสตร์ที่ดี ซึ่งสามารถใช้อธิบายกระบวนการบำบัดทางชีวภาพได้

ค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น จะนำไปใช้ในการเปรียบเทียบผลกับค่าจลนพลศาสตร์ที่วิเคราะห์ได้จากงานวิจัยในครั้งนั้น เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง และ ความแตกต่างที่เกิดขึ้น ซึ่งค่าจลนพลศาสตร์ที่ใช้แสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ค่าจลนพลศาสตร์จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เจ้าของงานวิจัย	ค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้
Nuhoglu, Keskinler และ Yildiz (2005)	$\mu_m = 5.5$ 1/วัน $K_s = 35$ มก./ล.
Pala และ Bolukbas (2005)	$Y = 0.7$ มก.วีเอสเอส/มก.ซีไอดี $\mu_m = 1.128$ 1/วัน $K_s = 343$ มก./ล.
ชลธิพร สุทธิธรรม และ ศรัณย์ เตชะเสน (2550)	$Y = 0.43$ วีเอสเอส/มก.ซีไอดี $\mu_m = 3.96$ 1/วัน $K_s = 41.34$ มก./ล.

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

### 3.1 แผนการทดลอง

งานวิจัยชิ้นนี้จะแบ่งขั้นตอนการวิเคราะห์ออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

**ขั้นตอนที่ 1** คือ การวางแผนขอบเขต และ กำหนดแผนการในการทดลองขั้นต้น โดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ AQUASIM จำลองกราฟความเข้มข้นสารอาหารที่เวลาต่างๆ ซึ่งได้จากค่าจลนพลศาสตร์ของน้ำเสียชุมชนในต่างประเทศ เพื่อทำการหาระยะเวลาในการทดลองที่เหมาะสม รายละเอียดของขั้นตอนนี้จะกล่าวต่อไปภายหลัง

**ขั้นตอนที่ 2** คือ การทดลองภายในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ น้ำเสียชุมชนจริงจากโรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรี และ น้ำเสียจากบ่อดักไขมันของโรงอาหารคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อหาค่าตัวแปรสำคัญที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ ได้แก่

1. อุณหภูมิ
2. พีเอช
3. ซีโอดี

**ขั้นตอนที่ 3** คือ การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนำไปสร้างกราฟแบบเชิงเส้นด้วยทฤษฎีของ Hanes ซึ่งให้ค่าที่แม่นยำกว่าทฤษฎีอื่นเมื่อใช้คอมพิวเตอร์ในการสร้างกราฟ และนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการสร้างกราฟแบบไม่เชิงเส้นโดยใช้ทฤษฎีของ Monod เพื่อหาความถูกต้องของค่าที่ได้

**ขั้นตอนที่ 4** คือ การตรวจสอบความถูกต้อง และ ความน่าเชื่อถือของค่าจลนพลศาสตร์ที่วิเคราะห์หามาได้ โดยการนำค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้ป้อนลงในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของระบบแคสส์™ ที่สร้างไว้ในโปรแกรม AQUASIM เพื่อทำการจำลองกราฟความเข้มข้นของซีโอดีที่เข้าและออกจากระบบ จากนั้นนำข้อมูลค่าซีโอดีของน้ำเสียชุมชนที่ออกจากระบบแคสส์™ ซึ่งได้จากการเก็บน้ำตัวอย่างที่ออกจากระบบ และ ผลตรวจวัดในรอบ 1 ปีโดยโรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรี มาเปรียบเทียบกับกราฟที่จำลองได้ รวมถึงเปรียบเทียบค่าที่วิเคราะห์ได้กับค่าจากงานวิจัย

ที่เกี่ยวข้อง และ เปรียบเทียบกับค่าที่ใช้ในต่างประเทศซึ่งผ่านการปรับแก้คุณภาพแล้ว รวมถึง ทดสอบความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นด้วย

### 3.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

#### 3.2.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่

1. เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
2. พีเอชมิเตอร์ (pH meter)
3. ขวดน้ำพลาสติกปริมาตร 2 ลิตร
4. เครื่องเติมอากาศ พร้อมสายยาง และ หัวจ่ายอากาศ
5. ตู้อบความร้อนที่มีเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Drying Oven)
6. กระดาษกรอง GF/C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.7 ซม.
7. กรวยกรอง (Membrane Filter Funnel)
8. บั๊มสุญญากาศ (Suction Pump) พร้อมขวดสุญญากาศขนาด 500 มล.
9. หลอดย่อยสลาย (Digestion Vessel)
10. ขาตั้งใส่หลอดแก้ว
11. บิวเรต
12. ออโตปิเปต
13. เครื่องคอมพิวเตอร์พีซี
14. โปรแกรม AQUASIM v.2.1b
15. โปรแกรม Microsoft Excel 2007

#### 3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่

1. สารละลายมาตรฐานโปตัสเซียมไดโครเมต ( $K_2Cr_2O_7$ ) เข้มข้น 0.1 N
2. สารละลายกรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) ผสม ซิลเวอร์ซัลเฟต ( $Ag_2SO_4$ )
3. สารละลายมาตรฐานเฟร็สแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) 0.01 N
4. สารละลายเฟอโรอินอินดิเคเตอร์ (Ferroun Indicator)

### 3.3 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์

#### 3.3.1 การเก็บตัวอย่างน้ำเสีย

การทดลองนี้จะนำน้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสียช่องนนทรีมาใช้เป็นตัวแทนของน้ำเสียชุมชน ทั้งนี้เนื่องจากข้อมูลน้ำเสียที่เข้าระบบเฉลี่ย 5 ปี ดังตารางที่ 2.1 ได้แสดงให้เห็นว่าปริมาณซีโอดีของน้ำเสียที่เข้าระบบนั้นมีค่าค่อนข้างต่ำ ดังนั้น เพื่อแก้ไขปัญหาเรื่องค่าซีโอดีในน้ำเสียที่ต่ำเกินไปจนไม่สามารถทำการทดลองบางขั้นตอนซึ่งต้องการค่าซีโอดีเริ่มต้นสูงๆ ได้ จึงต้องทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียชุมชนจากแหล่งอื่นที่มีค่าซีโอดีสูงมาใช้งานควบคู่กัน โดยแหล่งน้ำเสียที่ถูกเลือกในการเก็บน้ำตัวอย่างเพิ่มก็คือ น้ำเสียจากบ่อดักไขมันของโรงอาหารคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เนื่องจากเป็นแหล่งน้ำเสียที่มีค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูงมาก จึงมีค่าซีโอดีที่สูงเช่นกัน ดังนั้นจึงเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมมาก อีกทั้งยังสะดวกแก่การเก็บน้ำตัวอย่างด้วย นอกจากนี้ น้ำเสียจากโรงอาหารถือเป็นน้ำเสียจากอาคารประเภทร้านอาหาร/ภัตตาคาร ซึ่งเป็นหนึ่งในแหล่งปล่อยน้ำเสียชุมชน ด้วยเหตุนี้ น้ำเสียจากโรงอาหารจึงถือเป็นตัวแทนของน้ำเสียชุมชนด้วยเช่นกัน

ในส่วนของ การเก็บน้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสียช่องนนทรีนั้น จะทำการเก็บทั้งหมด 3 จุด ดังนี้

**จุดที่ 1** คือ ตำแหน่งน้ำเสียก่อนเข้าระบบแคสส์™ เป็นจุดเก็บหลัก น้ำเสียที่เก็บจากจุดนี้จะถูกใช้เป็นน้ำเสียตัวอย่างในการวิเคราะห์หาค่าซีโอดีตลอดช่วงเวลาของการทดลองทั้งหมด โดยทำการเก็บทุกๆ ชั่วโมงเป็นเวลา 1 วัน แล้วนำน้ำเสียที่เก็บทั้งหมดมาผสมกัน เพื่อใช้เป็นตัวแทนน้ำเสียชุมชนในการทดลองครั้งนี้

**จุดที่ 2** คือ ตำแหน่งน้ำเสียภายในส่วนที่สามของระบบแคสส์™ โดยทำการเก็บสลัดจ์ที่ตำแหน่งนี้ เพื่อใช้เป็นเชื้อสลัดจ์ (Seed Sludge) ในการทดลอง โดยทำการเก็บ 1 ครั้ง และใช้ตลอดการทดลอง

**จุดที่ 3** คือ ตำแหน่งน้ำเสียออกจากระบบแคสส์™ เพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าซีโอดีที่เหลือหลังจากผ่านการบำบัดแล้ว โดยทำการเก็บทุกๆ ชั่วโมง เป็นเวลา 1 วัน เพื่อนำไปใช้เป็นชุด



ข้อมูลของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว ซึ่งใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของค่าจลนพลศาสตร์ที่วิเคราะห์ได้

สรุปรายละเอียดการเก็บตัวอย่างน้ำเสียชุมชน และระยะเวลาที่เก็บน้ำตัวอย่าง รวมถึงวิธีการนำไปใช้วิเคราะห์ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตำแหน่งการเก็บน้ำเสีย ความถี่ในการเก็บ และการนำไปใช้

แหล่งน้ำเสีย	ตำแหน่งที่เก็บน้ำเสีย	ความถี่ในการเก็บน้ำเสีย	การวิเคราะห์และนำไปใช้
น้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสีย ชื่องนนทรี	ก่อนเข้าระบบแคสส์™	ทุกๆ ชั่วโมง ตลอด 1 วัน (ผสมเข้าด้วยกัน)	อุณหภูมิ, พีเอช, ซีโอดี
	ส่วนที่ 3 ของระบบแคสส์™	1 ครั้ง ใช้ตลอดการทดลอง	ใช้เป็นเชื้อสัลค์
	ออกจากระบบแคสส์™	ทุกๆ ชั่วโมง ตลอด 1 วัน (ผสมเข้าด้วยกัน)	ซีโอดี
น้ำเสียจากโรงอาหารคณะวิศวกรรมศาสตร์	บ่อดักไขมัน บ่อสุดท้าย	1 ครั้ง ใช้ตลอดการทดลอง ในแต่ละรอบ	อุณหภูมิ, พีเอช, ซีโอดี

### 3.3.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสีย

วิธีการวิเคราะห์ หรือ อุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ต้องการนั้น แสดงดังตารางที่ 3.2

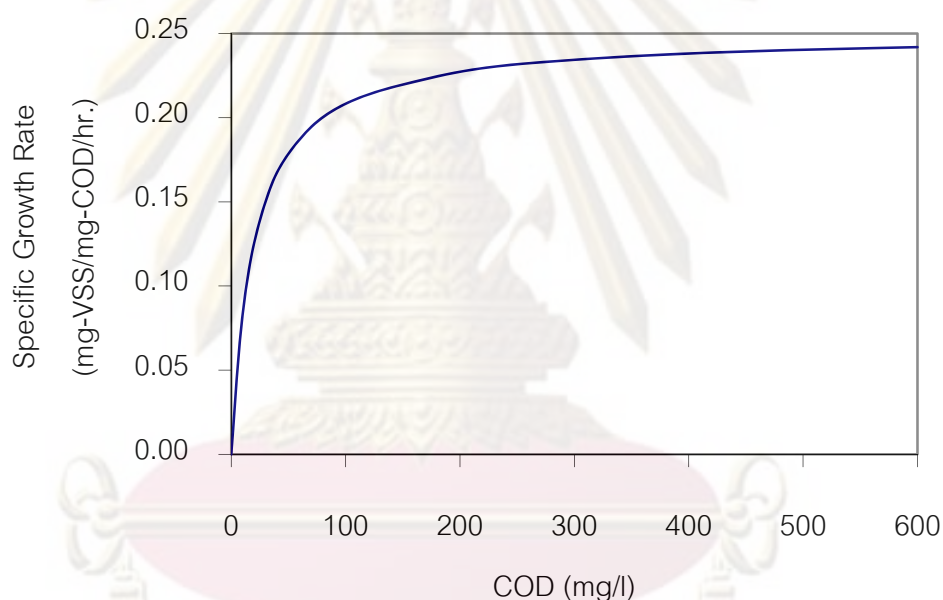
ตารางที่ 3.2 วิธีการวิเคราะห์หรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์/อุปกรณ์ในการวิเคราะห์
อุณหภูมิ	เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
พีเอช	Electrometric Method (pH Meter)
ซีโอดี	Closed reflux method (Standard Method 5220 C)

### 3.4 การดำเนินการทดลอง

#### 3.4.1 การวางขอบเขต และ กำหนดแผนการในการทดลองขั้นต้น มีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดค่าซีโอดีที่เหมาะสมในการทดลองโดยพิจารณาจากกราฟของอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะเทียบกับความเข้มข้นของซีโอดี ที่สร้างขึ้นมาจากสมการที่ (2.2) โดยการสมมติใช้ค่าจลนพลศาสตร์จากน้ำเสียชุมชนของต่างประเทศเป็นค่าเริ่มต้น ค่าที่นำมาใช้คือ  $K_s = 20$  มก./ล. และ  $\mu_{mH} = 0.25$  ชม.<sup>-1</sup> (Randall, Stensel และ Barnard, 1992 อ้างถึงใน Grady, Daigger และ Lim, 1999) ได้กราฟดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะเทียบกับซีโอดี เมื่อใช้ค่าจลนพลศาสตร์จากน้ำเสียชุมชนของต่างประเทศ

2. แบ่งการทดลองออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีใช้เชื้อสัลดจ์ความเข้มข้นสูง และ กรณีใช้เชื้อสัลดจ์ความเข้มข้นต่ำ สาเหตุที่แบ่งออกเป็น 2 กรณี เนื่องจาก กรณีใช้เชื้อสัลดจ์เริ่มต้นที่ความเข้มข้นต่ำจะใช้สำหรับการวิเคราะห์ค่ายิลด์ เพราะต้องการให้ปริมาณจุลชีพที่เกิดขึ้นมีค่าสูงในอัตราส่วนที่แตกต่างจากตอนเริ่มต้นอย่างเห็นได้ชัด (เช่น เชื้อสัลดจ์เริ่มต้นที่ 10 มก.เซลลชีโอดี/ล. สุดท้ายเพิ่มขึ้นเป็น 100 มก.เซลลชีโอดี/ล.) ซึ่งจะทำให้หาค่ายิลด์ได้ง่าย แต่หากใช้เชื้อสัลดจ์เริ่มต้นที่ความเข้มข้นสูงในการหาค่ายิลด์จะทำได้ยาก เพราะปริมาณจุลชีพที่เพิ่มขึ้นถึงแม้จะสูงแต่

อยู่ในอัตราส่วนที่ต่ำเมื่อเทียบกับค่าเริ่มต้น (เช่น เชื้อสลัดจ์เริ่มต้นที่ 1000 มก.เซลลชีโอดี/ล. สูดท้ายเพิ่มขึ้นเป็น 1100 มก.เซลลชีโอดี/ล.) นอกจากนี้ ข้อมูลที่ใช้หาค่ายิลด์นี้ยังสามารถนำไปหาค่าจลนพลศาสตร์ต่อได้ จึงนำข้อมูลส่วนนี้ไปหาค่าจลนพลศาสตร์ต่อด้วย ส่วนกรณีใช้เชื้อสลัดจ์เริ่มต้นที่ความเข้มข้นสูง จะใช้ในการหาค่าจลนพลศาสตร์เท่านั้น เนื่องจาก ในการหาค่าจลนพลศาสตร์นั้น ต้องการให้ในถังปฏิกรณ์มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงที่สุด ซึ่งจะทำให้สารอินทรีย์ในน้ำเสียถูกย่อยสลายจนหมดหรือคงที่ภายในระยะเวลาสั้นๆ ส่งผลให้ระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองสั้นลงด้วย ทำให้สะดวกแก่การเก็บตัวอย่างน้ำเสีย ด้วยเหตุนี้ ปริมาณเชื้อสลัดจ์เริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองจึงเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุด เพราะยังใช้เชื้อสลัดจ์สูงเท่าไร ก็จะทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองน้อยลงเท่านั้น ดังนั้น จึงใช้เชื้อสลัดจ์เริ่มต้นที่ความเข้มข้นสูงในการทดลองด้วย

3. เลือกค่าซีโอดีจากกราฟในข้อ 1 มาใช้เป็นค่าซีโอดีเริ่มต้น ( $COD_0$ ) ในการทดลองแต่ละกรณี โดยค่าที่เลือกมาใช้ ได้แก่ ค่าซีโอดีที่ 550 280 140 70 และ 30 มก./ล. สำหรับกรณีใช้เชื้อสลัดจ์ความเข้มข้นต่ำ ส่วน กรณีใช้เชื้อสลัดจ์ความเข้มข้นสูง ใช้ค่าซีโอดีที่ 750 550 180 และ 140 มก./ล.

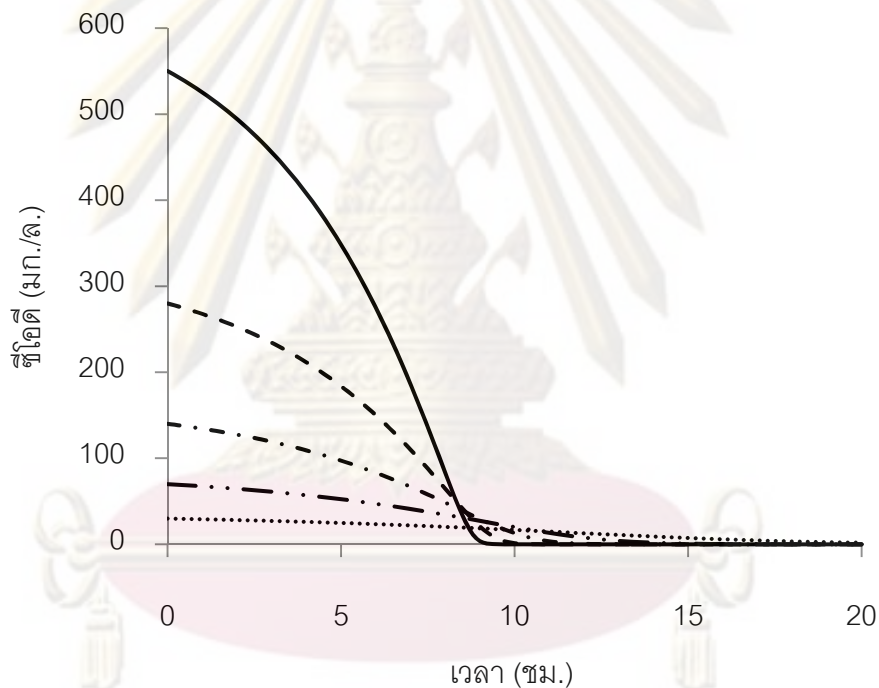
4. ในการทดลองแต่ละชุด จะทำการวิเคราะห์หาค่าซีโอดีที่ลดลงในช่วงเวลาต่างๆ ตั้งแต่เริ่มต้น (ที่  $COD_0$ ) จนสิ้นสุด (ซีโอดีเข้าใกล้ 0) หรือจนกว่าจะคงที่ (กรณีที่น้ำเสียมีซีโอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้)

5. ทำการหาระยะเวลา (t) ที่เหมาะสมที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์ค่าซีโอดีในการทดลองแต่ละชุด โดยการใช้โปรแกรม AQUASIM ทำการจำลองกราฟของซีโอดีที่เวลาต่างๆ ซึ่งจะให้ช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทดลอง สมการที่นำมาใช้คือสมการที่ (2.2), (2.3) และ (2.6) โดยสมมตินำค่าจลนพลศาสตร์ของน้ำเสียชุมชนจากต่างประเทศมาใช้ ได้แก่  $K_s = 20$  มก./ล.  $\mu_{max} = 0.25$  ชม.<sup>-1</sup>  $b = 0.017$  ชม.<sup>-1</sup> และ  $Y_H = 0.6$  มก.-เซลลชีโอดี/มก.-ซีโอดี (Randall et al., 1992 อ้างถึงใน Grady et al., 1999)

6. จำลองกราฟของการทดลองในแต่ละชุด โดยกำหนดค่าความเข้มข้นเชื้อสลัดจ์เริ่มต้นเป็น 10 เท่าของค่าซีโอดีน้ำเสียเริ่มต้น ในกรณีใช้เชื้อสลัดจ์ความเข้มข้นสูง เนื่องจากในการทดลองกรณีใช้เชื้อสลัดจ์ความเข้มข้นสูงนั้น ต้องการให้ปริมาณจุลชีพในระบบเพิ่มขึ้นน้อยมากจนดูเหมือนว่าคงที่ นั่นคือปริมาณจุลชีพต้องเพิ่มขึ้นจากเดิมไม่เกิน 10% ทั้งนี้ ความเข้มข้นเชื้อสลัดจ์เริ่มต้นที่จะทำให้ได้ผลดังกล่าวจะต้องมีค่าที่สูงมาก โดยทั่วไปจึงใช้ความเข้มข้นเชื้อสลัดจ์เริ่มต้นเป็น 10 เท่าของค่าซีโอดีน้ำเสียเริ่มต้น ซึ่งเป็นค่าที่สูงมากเกินไป ส่วนกรณีใช้เชื้อสลัดจ์ความเข้มข้นต่ำ จะใช้ความเข้มข้นเชื้อสลัดจ์เริ่มต้นเป็น 10% ของค่าซีโอดีน้ำเสียเริ่มต้น เนื่องจากเป็น

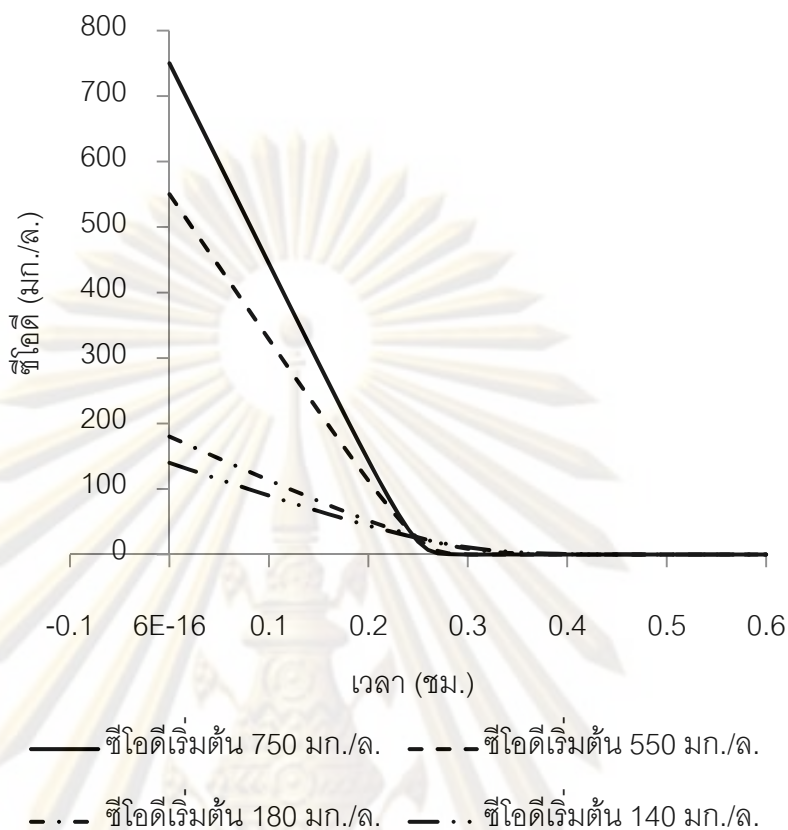
กรณีที่เน้นในการนำไปใช้หาค่ายึดเป็นหลัก ดังนั้น จึงต้องการให้ปริมาณจุลชีพเพิ่มขึ้นสูงไม่ต่ำกว่า 10 เท่าจากปริมาณจุลชีพเริ่มต้น ทำให้ความเข้มข้นเชื้อสัลดีจ์เริ่มต้นที่ใช้ต้องมีค่าต่ำมาก โดยทั่วไปจึงใช้ความเข้มข้นเชื้อสัลดีจ์เริ่มต้นเป็น 10% ของค่าซีโอดีน้ำเสียเริ่มต้น ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำเพียงพอ หากใช้ค่าต่ำกว่านี้จะทำการทดลองได้ยากที่ความเข้มข้นซีโอดีน้ำเสียเริ่มต้นที่ต่ำมาก

7. ทำการแบ่งช่วงเวลาที่ได้จากกราฟซึ่งจำลองโดยใช้โปรแกรม AQUASIM ออกเป็น 5 ถึง 6 ช่วง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ค่าซีโอดีที่เวลานั้นๆ โดยตัวอย่างกราฟที่จำลองได้และระยะเวลาที่ใช้ของกรณีใช้เชื้อสัลดีจ์ความเข้มข้นต่ำและความเข้มข้นสูงเป็นดังรูปที่ 3.2 ถึง 3.3 ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 การจำลองการย่อยสลายซีโอดีด้วยโปรแกรม AQUASIM ในกรณีใช้เชื้อสัลดีจ์ความเข้มข้น 10% ของค่าซีโอดีเริ่มต้น

จากรูปที่ 3.2 จะเห็นว่า ระยะเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายซีโอดีทั้งหมดอยู่ในช่วงระยะเวลา 10 ถึง 20 ชม. โดยประมาณ



รูปที่ 3.3 การจำลองการย่อยสลายซีไอดีด้วยโปรแกรม AQUASIM  
ในกรณีใช้เชื้อสลดจ์ความเข้มข้น 10 เท่าของค่าซีไอดีเริ่มต้น

จากรูปที่ 3.3 จะเห็นว่า ระยะเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายซีไอดีทั้งหมดอยู่ในช่วงระยะเวลา 0.25 ถึง 0.4 ชม. โดยประมาณ ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าในกรณีใช้เชื้อสลดจ์ความเข้มข้นต่ำเป็นอย่างมาก

### 3.4.2 การทดลองในห้องปฏิบัติการ มีดังนี้

#### 3.4.2.1 การตรวจสอบคุณสมบัติของน้ำเสียดิบ มีขั้นตอนดังนี้

1. นำน้ำเสียตัวอย่างที่บริเวณก่อนเข้าระบบแคสต์™ และ น้ำเสียจากบ่อดักไขมันของโรงอาหารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มาวิเคราะห์ค่าซีไอดีของน้ำเสีย อุณหภูมิ และ พีเอช ซึ่งเป็นค่าตัวแปรที่บ่งชี้ลักษณะสมบัติพื้นฐานของน้ำเสีย

2. นำขวดน้ำพลาสติกปริมาตร 2 ลิตร ที่เตรียมไว้มาดัดแปลงใช้เป็นถังปฏิบัติการแบบเบตซ์ในการทดลอง โดยการตัดก้นขวดออกแล้วเอาหัวคว่ำลง และ เติมอากาศด้วยหัวจ่ายอากาศที่ต่อเข้ากับเครื่องเติมอากาศ

3. นำน้ำเสียทั้งสองแหล่งมาใส่ลงในถังปฏิบัติการ พร้อมกับเชื้อสลดจ์ และ เปิดเครื่องเติมอากาศ โดยทำการควบคุมตัวแปรในการทดลองต่างๆ ให้เท่ากันทุกชุดการทดลองได้แก่

อัตราการเติมอากาศ ปรับให้มีระดับการเติมอากาศเต็มที่

ขนาดถังปฏิบัติการ ปริมาตร 2 ลิตรโดยประมาณ

ปริมาณน้ำเสียตัวอย่างที่ใส่ลงในถังปฏิบัติการ ปริมาณ 800 มิลลิลิตร

4. เก็บน้ำเสียตัวอย่างเทียบกับเวลาจนค่าซีโอดีเกือบหมดหรือมีค่าคงที่
5. ปรับค่าพีเอชของน้ำเสียตัวอย่างให้มีค่าไม่เกิน 2 ทันทีที่เก็บมาจากถังปฏิบัติการ โดยใช้กรดซัลฟิวริกในการปรับพีเอช เพื่อหยุดปฏิบัติการทางชีวะที่เกิดขึ้นในน้ำเสียให้คงที่
6. วิเคราะห์ค่าซีโอดีในน้ำเสียตัวอย่างด้วยวิธี Closed reflux โดยวิเคราะห์ซีโอดีแบบกรองน้ำเสียตัวอย่างเพื่อหาค่าซีโอดีละลายน้ำ การทดลองทั้งหมดจะทำจำนวน 3 ซ้ำ
7. สร้างกราฟซีโอดีที่ลดลงเทียบกับเวลาของน้ำเสียทั้งสองแหล่ง เพื่อนำไปพิจารณาว่าน้ำเสียทั้งสองแหล่งเหมาะสมแก่การนำไปใช้ทดลองต่อไปหรือไม่

#### 3.4.2.2 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้หาค่าจลนพลศาสตร์ มีขั้นตอนดังนี้

1. นำน้ำเสียตัวอย่างมาวิเคราะห์ค่าซีโอดี เพื่อใช้หาสัดส่วนในการปรับค่าซีโอดี

2. ปรับค่าซีโอดีในน้ำเสียตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ซีโอดีทั้ง 5 ชุดให้เท่ากับค่าซีโอดีเริ่มต้นของการทดลองแต่ละชุดที่กำหนดไว้ โดยใช้น้ำดื่มในการเจือจางให้ค่าซีโอดีลดลงแทนการใช้น้ำประปา เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของคลอรีนจากน้ำประปา

3. นำขวดน้ำพลาสติกปริมาตร 2 ลิตร ที่เตรียมไว้มาดัดแปลงใช้เป็นถังปฏิบัติการแบบเบตซ์ในการทดลอง โดยการตัดก้นขวดออกแล้วเอาหัวคว่ำลง และ เติมอากาศด้วยหัวจ่ายอากาศที่ต่อเข้ากับเครื่องเติมอากาศ

4. นำน้ำเสียที่ปรับค่าซีโอดีแล้วใส่ลงในถังปฏิบัติการ พร้อมกับเชื้อสลดจ์ และ เปิดเครื่องเติมอากาศ โดยทำการควบคุมตัวแปรในการทดลองต่างๆ ให้เท่ากันทุกชุดการทดลองได้แก่

อัตราการเติมอากาศ ปรับให้มีระดับการเติมอากาศเต็มที่

ขนาดถังปฏิกริยา ปริมาตร 2 ลิตรโดยประมาณ

ปริมาณน้ำเสียตัวอย่างที่ใส่ลงในถังปฏิกริยา ปริมาณ 1.5 ลิตร

5. เก็บน้ำเสียเทียบกับเวลาที่ความเข้มข้นของซีไอดีเริ่มต้น จนค่าซีไอดีเกือบหมดหรือมีค่าคงที่

6. ปรับค่าพีเอชของน้ำเสียตัวอย่างให้มีค่าไม่เกิน 2 ทันทีที่เก็บมาจากถังปฏิกริยา โดยใช้กรดซัลฟริกในการปรับพีเอช เพื่อหยุดปฏิกริยาทางชีววะที่เกิดขึ้นในน้ำเสียให้คงที่

7. วิเคราะห์ค่าซีไอดีในน้ำเสียตัวอย่างด้วยวิธี Closed reflux โดยวิเคราะห์ซีไอดีทั้งแบบกรอง (ค่าซีไอดีละลายน้ำ) และ แบบไม่กรองน้ำเสียตัวอย่าง (ค่าซีไอดีทั้งหมด) เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของตะกอนจุลชีพในน้ำเสีย การทดลองทั้งหมดจะทำจำนวน 3 ซ้ำ

### 3.4.2.3 การหาค่ายิลด์ของเฮเทอโรโทรป มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมน้ำเสียตัวอย่างให้มีค่าซีไอดีประมาณ 550 280 140 70 และ 30 มก./ล. และ เตรียมเชื้อสไลด์ความเข้มข้น 30 มก.เซลล์ซีไอดี/ล. โดยประมาณ

2. นำน้ำเสียตัวอย่างที่ปรับค่าซีไอดีแล้วใส่ลงในถังปฏิกริยาแบบแบตซ์ พร้อมกับเชื้อสไลด์ โดยควบคุมตัวแปรในการทดลองต่างๆ เช่นเดียวกับหัวข้อ 3.4.2.1

3. เก็บน้ำตัวอย่างก่อนเปิดเครื่องเติมอากาศ ของทุกชุดการทดลองมาวิเคราะห์ โดยแบ่งน้ำเสียออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกนำไปวิเคราะห์หาค่าซีไอดี สมมติให้ค่าที่ได้เท่ากับ TCOD มก./ล. น้ำเสียส่วนที่สองนำไปกรองผ่านกระดาษกรอง GF/C แล้วนำน้ำใสที่กรองผ่านออกมาไปวิเคราะห์ค่าซีไอดี สมมติให้ค่าที่ได้เท่ากับ SCOD มก./ล.

4. เปิดเครื่องเติมอากาศทิ้งไว้เป็นเวลานานๆ ให้ค่าซีไอดีในน้ำเสียถูกย่อยสลายจนเกือบหมด

5. เก็บน้ำตัวอย่างของทุกชุดการทดลองมาวิเคราะห์ เช่นเดียวกับในขั้นตอนที่ 3

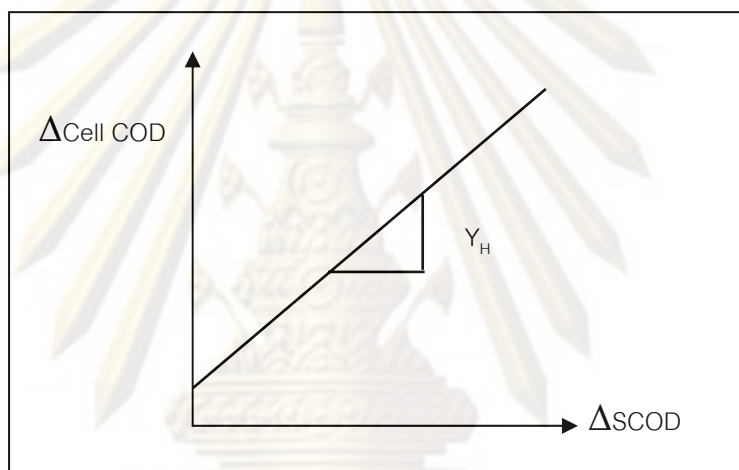
6. หาค่าเซลล์ซีไอดีของน้ำเสียในข้อ 3 และ ข้อ 6 จากสมการที่ 3.1

$$\text{CellCOD} = \text{TCOD} - \text{SCOD} \quad (3.1)$$

โดยที่ TCOD = ปริมาณซีโอดีทั้งหมดในน้ำเสีย (มก./ล.)

SCOD = ปริมาณซีโอดีละลายน้ำในน้ำเสีย (มก./ล.)

7. นำข้อมูลที่ได้ทั้งหมดไปสร้างกราฟของผลต่างเซลล์ซีโอดีที่เพิ่มขึ้น ( $\Delta\text{Cell COD}$ ) เทียบกับ ผลต่างของซีโอดีละลายน้ำในน้ำเสียที่หายไป ( $\Delta\text{SCOD}$ ) ซึ่งจะได้กราฟดังรูปที่ 3.4 ค่าความชันที่ได้จากกราฟคือ ค่ายิลด์ของจุลชีพแบบเฮเทอโรโทรป



รูปที่ 3.4 การประมาณค่ายิลด์ของจุลชีพแบบเฮเทอโรโทรป

#### 3.4.2.4 การหาค่าซีโอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ (Non-Biodegradable COD)

1. นำน้ำเสียตัวอย่างจากทั้ง 2 แหล่ง (น้ำเสียก่อนเข้าระบบแคสส์™ และน้ำเสียจากบ่อดักไขมันของโรงอาหารคณะวิศวกรรมศาสตร์) มาใส่ลงในถังปฏิริยาแบบแบตช์ที่เตรียมไว้ พร้อมกับเชื้อสัลดีจโดยควบคุมตัวแปรในการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อ 3.4.2.1

2. เติมหอากาศในถังปฏิริยาเป็นเวลานานๆ เพื่อให้ค่าซีโอดีที่ย่อยสลายได้ถูกกำจัดจนหมด

3. ทำการเก็บน้ำเสียตัวอย่างจากถังปฏิริยา และ นำไปวิเคราะห์ค่าซีโอดีโดยวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ



4. ทำตามข้อ 3 ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งค่าซีไอดีที่วิเคราะห์ได้มีค่าค่อนข้างคงที่ ค่าซีไอดีที่คงที่แล้ว คือ ค่าซีไอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายได้

### 3.4.3 การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์จากกราฟข้อมูล มีขั้นตอนดังนี้

1. นำค่าซีไอดีที่เวลาต่างๆ ของแต่ละชุดการทดลองมาสร้างกราฟเส้นตรงของค่าซีไอดีเทียบกับเวลาต่างๆ จากนั้นหาความชันของเส้นกราฟในการทดลองแต่ละชุด ค่าความชันที่ได้คือค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยา เมื่อนำไปหารด้วยค่า  $X$  ของการทดลองในแต่ละชุดจะได้ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของแต่ละชุดการทดลอง

2. นำค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ และ ค่าซีไอดีเริ่มต้นของแต่ละชุดการทดลองที่ได้ในข้อที่ 1 ไปใช้ในการสร้างกราฟแบบไม่เชิงเส้นของทฤษฎี Monod และ กราฟแบบเชิงเส้นของทฤษฎี Hanes ที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 เพื่อหาค่าจลนพลศาสตร์จากกราฟเหล่านั้น โดยกราฟมีลักษณะดังรูปที่ 2.6 และ 2.8

3. เปรียบเทียบค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากกราฟแบบเชิงเส้นของทฤษฎี Hanes กับค่าที่ได้จากกราฟแบบไม่เชิงเส้นของทฤษฎี Monod

### 3.4.4 การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์โดยใช้โปรแกรม AQUASIM มีขั้นตอนดังนี้

1. สร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของระบบแคสส์™ ด้วยโปรแกรม AQUASIM โดยใช้สมการที่ (2.2), (2.3) และ (2.6)

2. นำค่าซีไอดีเทียบกับเวลาที่วิเคราะห์ได้ พร้อมทั้งปริมาณเชื้อสัลด์จ์ที่ใช้ของแต่ละชุดการทดลองป้อนลงไปโปรแกรม AQUASIM

3. จากนั้นให้โปรแกรมจำลองค่าจลนพลศาสตร์ ซึ่งทำให้เส้นกราฟของค่าซีไอดีเทียบกับเวลาที่โปรแกรมจำลองขึ้นลากผ่านค่าซีไอดีเทียบกับเวลาที่ได้จากการทดลองมากที่สุด

4. ทำการจำลองค่าจลนพลศาสตร์ด้วยโปรแกรม AQUASIM ทั้งกรณีหาค่าจลนพลศาสตร์ของน้ำเสียแต่ละความเข้มข้นซีไอดีเริ่มต้น และ กรณีหาค่าจลนพลศาสตร์ของน้ำเสียรวมทุกความเข้มข้นซีไอดีเริ่มต้น

### 3.4.5 การตรวจสอบ และ เปรียบเทียบค่าที่วิเคราะห์ได้ มีขั้นตอนดังนี้

#### 3.4.5.1 การตรวจสอบผลโดยใช้โปรแกรม AQUASIM มีขั้นตอนดังนี้

1. สร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของระบบแคสส์™ ด้วยโปรแกรม AQUASIM โดยใช้สมการที่ (2.2), (2.3) และ (2.6)
2. นำค่า COD<sub>in</sub> ที่วิเคราะห์ได้ป้อนลงไปโปรแกรม รวมทั้งป้อนค่า จลนพลศาสตร์ที่ได้ในขั้นตอนข้างต้นลงในโปรแกรมเช่นกัน
3. จากนั้นให้โปรแกรมจำลองกราฟปริมาณซีไอดีที่ก่อนเข้า และหลังออกจากระบบแคสส์™
4. นำข้อมูลซีไอดีของน้ำเสียชุมชนที่ออกจากระบบแคสส์™ ซึ่งวิเคราะห์จากน้ำเสียตัวอย่างที่ออกจากระบบซึ่งเก็บรวบรวมด้วยตัวเอง และ ผลการตรวจวัดในรอบ 1 ปีโดยโรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรี มาเทียบกับกราฟปริมาณซีไอดีที่จำลองมาจากโปรแกรมในขั้นที่ 3 โดยดูว่าข้อมูลซีไอดีนั้นอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับกราฟที่จำลองได้หรือไม่ ถ้าใกล้เคียงแสดงว่าค่า จลนพลศาสตร์ที่หาได้มีความถูกต้องในระดับหนึ่ง

#### 3.4.5.2 การเปรียบเทียบค่าที่วิเคราะห์ได้กับค่าที่อ้างอิงมาจากการวิจัยอื่นๆ

โดยการนำค่าจลนพลศาสตร์ที่หาได้ไปเปรียบเทียบความแตกต่างกับค่าที่นำมาจากการวิจัยที่เกี่ยวข้องในหัวข้อ 2.3 ซึ่งสรุปไว้ในตารางที่ 2.4 นอกจากนี้ นำค่าจลนพลศาสตร์ที่หาได้ไปเปรียบเทียบความแตกต่างกับค่าจลนพลศาสตร์ของน้ำเสียชุมชนในต่างประเทศ ได้แก่  $K_s = 20$  มก./ล.  $\mu_{mH} = 6$  วัน<sup>-1</sup>  $b = 0.408$  วัน<sup>-1</sup> และ  $Y_H = 0.6$  มก.-เซลล์ซีไอดี/มก.-ซีไอดี (Randall et al., 1992 อ้างถึงใน Grady et al., 1999) โดยนำไปปรับแก้อุณหภูมิจาก 20 °C เป็น 25 °C ซึ่งเป็นวิธีที่วิศวกรในประเทศไทยนิยมใช้ในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ โดยการใช้สมการของ Phelps (Grady et al., 1999) ดังนี้

$$k_1 = k_2 \theta^{(T_1 - T_2)} \quad (3.2)$$

โดยที่  $k_1$  = ค่าที่ปรับแก้แล้ว

$k_2$  = ค่าที่ต้องการปรับแก้

$$\begin{aligned}
 T_1 &= \text{อุณหภูมิเริ่มต้นที่ } 20 \text{ }^\circ\text{C} \\
 T_2 &= \text{อุณหภูมิที่ต้องการปรับแก้ } ^\circ\text{C} \\
 \theta &= \text{ค่าคงที่แตกต่างกันไปตามชนิดของจุลชีพ} \\
 &= 1.094 \text{ (จุลชีพเห็ดเชื้อราโพรทอปแบบใช้อากาศ)} \\
 &= 1.20 \text{ (จุลชีพเห็ดเชื้อราโพรทอปแบบแอนีอ็อกซิก)} \\
 &= 1.114 \text{ (จุลชีพออกโตโพรท)} \\
 &= 1.105 \text{ (จุลชีพในระบบไร้อากาศ)} \\
 &\text{(Grady et al., 1999)}
 \end{aligned}$$

นอกจากทำการเปรียบเทียบค่าปรับแก้ที่อุณหภูมิ 25 °C แล้ว ยังนำไปเปรียบเทียบกับค่าปรับแก้ที่อุณหภูมิของน้ำเสียตัวอย่างที่นำมาใช้วิเคราะห์ด้วย โดยใช้ค่าอุณหภูมิที่วัดเอาไว้ตอนเก็บน้ำเสียตัวอย่างจากระบบ มาใช้ในการปรับแก้

### 3.4.5.3 การทดสอบความคลาดเคลื่อนของค่าจลนพลศาสตร์

ทำการตรวจสอบระดับความคลาดเคลื่อนของค่าจลนพลศาสตร์ที่วิเคราะห์ได้โดยนำข้อมูลของซีโอดีที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ได้จากการทดลอง และ ที่ได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ มาใช้ทดสอบความคลาดเคลื่อน ด้วยสมการความผิดพลาดมาตรฐานจากการประมาณค่า (Standard Error of Estimation : SEE) (Holman, 2001) โดยสมการมีดังนี้

$$SEE = \left[ \frac{\sum (C_i - \hat{C}_i)^2}{n - 2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.3)$$

โดยที่  $C_i$  = ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

$\hat{C}_i$  = ข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง

$n$  = จำนวนข้อมูลการทดลองทั้งหมด

ค่าที่ได้จากสมการควรมีค่าน้อยกว่า 10% ของความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้น

สรุปผลที่ได้จากการตรวจสอบ และ เปรียบเทียบด้วยวิธีต่างๆ จากนั้น อธิบายสาเหตุที่เป็นไปได้ของความแตกต่าง และ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น รวมถึงแสดงข้อคิดเห็นถึงความเป็นไปได้ในการนำค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้นี้ไปใช้งานจริงในอนาคต

## บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

### 4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

#### 4.1.1 น้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรี

จากผลการทดลองวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ของน้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรี พบว่าค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของน้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรีนั้น เป็นดังตารางที่ 4.1

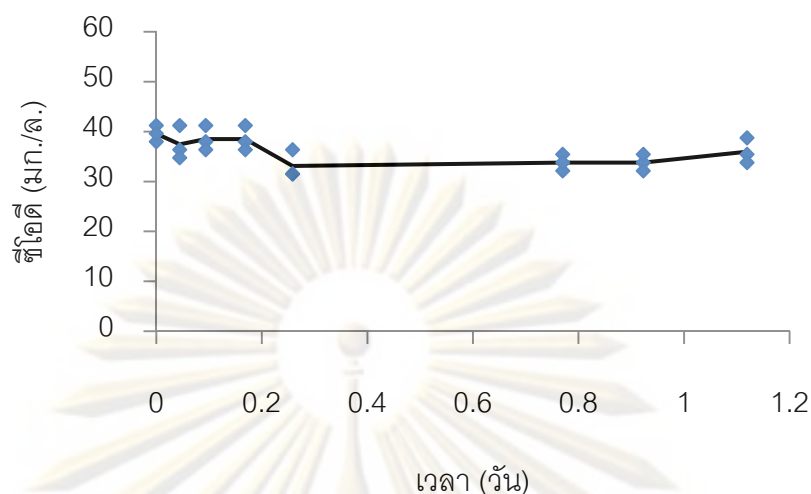
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของน้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรี

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
พีเอช	7.35
อุณหภูมิ (° ซ)	24.6
ซีโอดีละลายน้ำของน้ำเสียเข้าระบบบำบัด (มก./ล.)	25 - 40
ซีโอดีละลายน้ำของน้ำทิ้งออกจากระบบบำบัด (มก./ล.)	28

หมายเหตุ: ค่าที่แสดงเป็นค่าที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ

ค่าซีโอดีน้ำเสียเข้าโรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรีอยู่ในช่วง 25 ถึง 40 มก./ล. เนื่องจากค่าซีโอดีน้ำเสียจะแปรเปลี่ยนไปตามช่วงฤดูกาล โดยในช่วงปลายฤดูร้อนถึงต้นฤดูหนาว น้ำเสียจะมีค่าซีโอดีที่ค่อนข้างสูง ส่วนกลางฤดูหนาวถึงกลางฤดูร้อน น้ำเสียจะมีค่าซีโอดีค่อนข้างต่ำ แต่อย่างไรก็ตามค่าซีโอดีโดยรวมก็ถือว่าต่ำมาก ทั้งนี้เนื่องจากระบบระบายน้ำเสียในประเทศไทยเป็นแบบรวม ทำให้น้ำเสียถูกเจือจางในเส้นท่อด้วยน้ำฝน ซึ่งข้อมูลทั้งหมดในตารางที่ 4.1 เป็นข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการทันทีหลังจากที่เก็บตัวอย่างน้ำเสีย

ผลการทดลอง โดยนำน้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรีนี้ไปเติมอากาศในถังปฏิกิริยาแบบแบตช์ โดยใช้เชื้อสัลค์จากโรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรีความเข้มข้นประมาณ 900 มก.เซลลชีโอดี/ล. แล้ววัดค่าซีโอดีที่เวลาต่างๆ ได้ผลเป็นกราฟออกมาดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ค่าซีไอดีที่เวลาต่างๆ ของน้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสียของนนทรี

น้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสียของนนทรีที่นำมาใช้ในการทดลอง มีค่าซีไอดีเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 40 มก./ล. เมื่อเติมอากาศทิ้งไว้เป็นเวลา 1 วัน พบว่าแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าซีไอดี หรือซีไอดีที่เหลือน่าจะเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายไม่ได้ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าซีไอดีของน้ำทิ้งออกจากระบบบำบัดน้ำเสียของนนทรีที่วิเคราะห์ได้ ดังนั้น น้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสียของนนทรีในช่วงเวลาที่ทำการเก็บน้ำเสียตัวอย่างจึงไม่เหมาะสมแก่การนำมาใช้ในการวิเคราะห์ค่าจุลนพลศาสตร์ ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องนำน้ำเสียจากแหล่งอื่นที่มีสภาวะใกล้เคียงกันมาใช้แทน ซึ่งน้ำเสียที่นำมาใช้แทนคือน้ำเสียจากโรงอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยรายละเอียดจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

#### 4.1.2 น้ำเสียจากโรงอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์

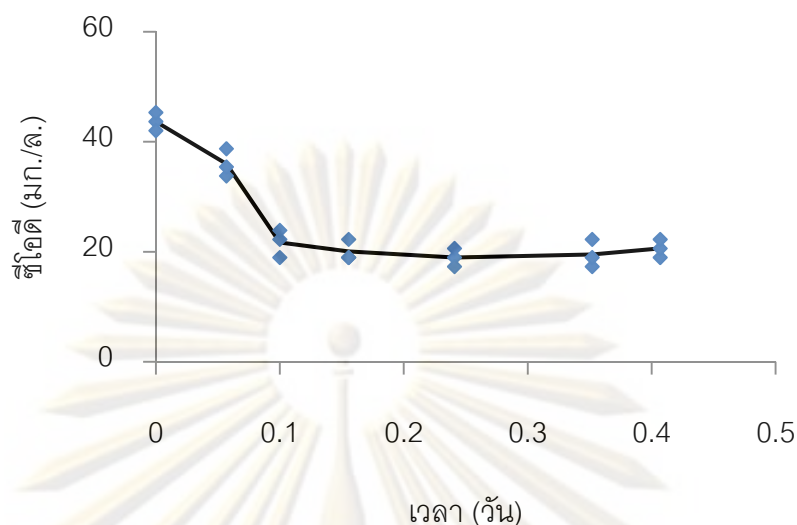
น้ำเสียจากโรงอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถูกนำมาใช้เป็นน้ำเสียตัวอย่างในการวิเคราะห์ค่าจุลนพลศาสตร์แทนน้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสียของนนทรี เนื่องจากเป็นน้ำเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์สูง สามารถใช้เป็นตัวแทนของน้ำเสียชุมชนได้ โดยทำการเก็บน้ำเสียตัวอย่างจากบ่อดักไขมันบ่อสุดท้ายของโรงอาหาร เนื่องจากเป็นบ่อที่มีไขมันลอยตัวอยู่น้อยที่สุด ทำให้เก็บน้ำเสียตัวอย่างได้ง่าย นอกจากนี้ยังสามารถแยกของแข็งและไขมันที่ปะปนออกได้ง่ายด้วย โดยที่ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของน้ำเสียจากโรงอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ เป็นดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของน้ำเสียจากโรงอาหารคณะวิศวกรรมศาสตร์

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
พีเอช	$5.23 \pm 0.05$
อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$25.9 \pm 0.3$
ซีไอดีละลายน้ำ (มก./ล.)	400 - 800

ค่าซีไอดีของน้ำเสียจากโรงอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มีช่วงที่ค่อนข้างกว้าง ตั้งแต่ 400 – 800 มก./ล. เนื่องจากปอดักไขมันของโรงอาหาร มีการดักไขมันทิ้งทุกๆ ต้นเดือน ดังนั้นในช่วงต้นเดือนหลังจากดักไขมันออกไปแล้ว น้ำเสียในปอดักไขมันจึงมีค่าซีไอดีต่ำประมาณ 400 มก./ล. ส่วนช่วงกลางเดือนถึงปลายเดือนน้ำเสียและตะกอนจากโรงอาหารสะสมในปอดักไขมันมากขึ้น ทำให้ค่าซีไอดีสูงขึ้นตั้งแต่ 600 มก./ล. จนถึง 800 มก./ล. โดยข้อมูลทั้งหมดในตารางที่ 4.2 นั้นเป็นข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการหลังจากที่เก็บตัวอย่างน้ำเสีย และ ช่วงของข้อมูลทั้งหมดในตารางที่ 4.2 นี้ มาจากการเก็บตัวอย่างน้ำเสียไปใช้ทดลองจำนวน 4 ครั้ง

จากการทดลองเบื้องต้น โดยนำน้ำเสียจากโรงอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์นี้ไปเจือจางให้มีค่าซีไอดีใกล้เคียงกับน้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรี แล้วนำไปเติมอากาศในถังปฏิกริยาแบบแบตช์ พร้อมทั้งใช้เชื้อสลดจ์จากโรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรีความเข้มข้น 700 มก. เซลล์ซีไอดี/ล. โดยสาเหตุที่ปริมาณเชื้อสลดจ์ที่ใช้ไม่เท่ากับที่ใช้ในน้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรี เพราะเชื้อสลดจ์จากโรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรีนั้นไม่คุ้นเคยกับน้ำเสียจากโรงอาหาร ทำให้ต้องมีการปรับสภาพของเชื้อสลดจ์ให้คุ้นเคยก่อน โดยการนำเชื้อสลดจ์ไปเติมอากาศและเลี้ยงเชื้อด้วยน้ำเสียจากโรงอาหารทิ้งไว้ 1 คืน ทั้งนี้เวลาที่ใช้เลี้ยงสลดจ์อาจนานเกินไปจนสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ของน้ำเสียโรงอาหารถูกย่อยสลายไปจนหมดก่อนที่จะนำเชื้อสลดจ์ไปใช้งาน ทำให้เชื้อสลดจ์อาจเกิดการย่อยสลายตัวเอง เป็นผลให้ความเข้มข้นเชื้อสลดจ์โดยรวมลดลง ด้วยเหตุนี้ เมื่อนำเชื้อสลดจ์ที่ปรับสภาพแล้วมาใช้ทดลองต่อจึงทำให้ความเข้มข้นคลาดเคลื่อนไปจากที่คำนวณไว้ ความเข้มข้นเชื้อสลดจ์ที่ใช้จึงต่ำกว่าด้วยประการฉะนี้ จากการทดลองวัดค่าซีไอดีที่เวลาต่างๆ ได้ผลเป็นกราฟออกมาดังรูปที่ 4.2

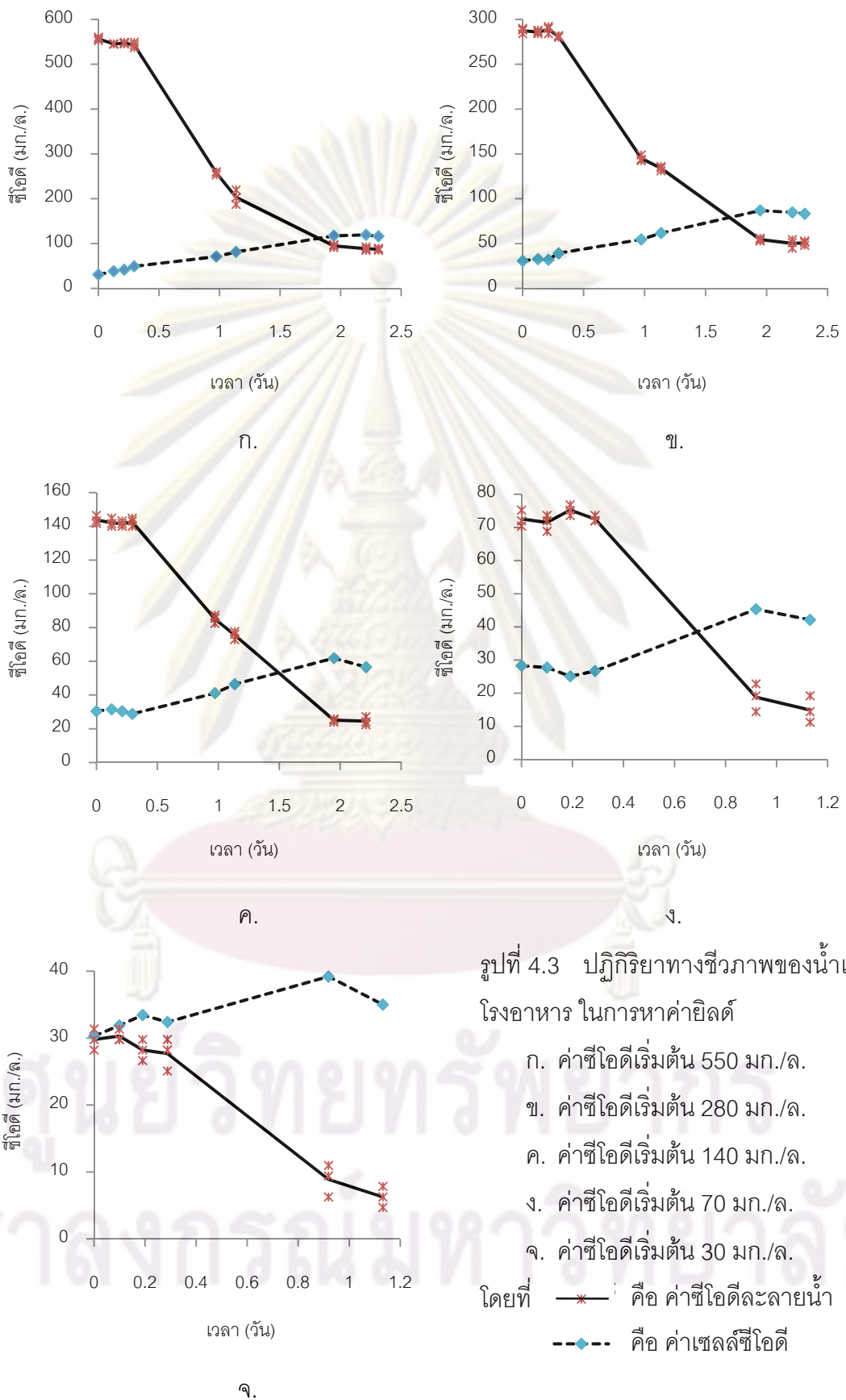


รูปที่ 4.2 ค่าซีไอดีที่เวลาต่างๆ ของน้ำเสียจากโรงงานอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์

น้ำเสียจากโรงงานอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่นำมาเจือจางให้มีค่าซีไอดีเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 43 มก./ล. เมื่อเติมอากาศทิ้งไว้เพียง 5 – 6 ชม. ก็สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้ถึง 24 มก./ล. โดยประมาณ ซึ่งสามารถย่อยสลายได้มากกว่าน้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสียช่องนนทรี และเหลือส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายไม่ได้เพียงบางส่วนเท่านั้น ดังนั้น น้ำเสียจากโรงงานอาหารจึงเหมาะสมแก่การนำมาใช้ในการวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์มากกว่าน้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสียช่องนนทรี ด้วยเหตุนี้ จึงเลือกใช้น้ำเสียจากโรงงานอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ตลอดการวิจัยครั้งนี้

#### 4.2 การศึกษาค่ายิลด์ของจุลชีพแบบเฮเทอโรโทรป

น้ำเสียจากโรงงานอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ ถูกนำมาใช้ในการศึกษาค่ายิลด์ โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้นซีไอดีเริ่มต้นที่แตกต่างกันจำนวน 5 ชุด ได้แก่ ที่ความเข้มข้น 550 280 140 70 และ 30 มก./ล. รวมถึงใช้เชื้อสัลต์จ์ความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำๆ ประมาณ 30 มก./ล. สาเหตุที่ใช้เชื้อสัลต์จ์ความเข้มข้นดังกล่าว เนื่องจาก ค่าซีไอดีเริ่มต้นของน้ำเสียที่ใช้ทดลองนั้น มีค่าที่ต่ำกว่าหลักร้อยด้วย ทำให้หากใช้ความเข้มข้นเชื้อสัลต์จ์ดังที่ได้วางแผนไว้ นั้นจะทำได้ยาก เพราะการเตรียมเชื้อสัลต์จ์ที่ต่ำในระดับหลักหน่วยนั้นทำได้ยากมาก และคลาดเคลื่อนได้สูง ด้วยเหตุนี้จึงใช้ความเข้มข้นเชื้อสัลต์จ์ที่ 30 มก./ล. ซึ่งมีค่าต่ำกว่าซีไอดีน้ำเสียเริ่มต้นส่วนใหญ่ และมีค่าสูงกว่าค่าซีไอดีน้ำเสียที่ต่ำสุดไม่มากนัก โดยผลที่ได้จากการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ปฏิกริยาทางชีวภาพของน้ำเสีย  
โรงอาหาร ในการหาค่ายิลด์

ก. ค่าซีไอดีเริ่มต้น 550 มก./ล.

ข. ค่าซีไอดีเริ่มต้น 280 มก./ล.

ค. ค่าซีไอดีเริ่มต้น 140 มก./ล.

ง. ค่าซีไอดีเริ่มต้น 70 มก./ล.

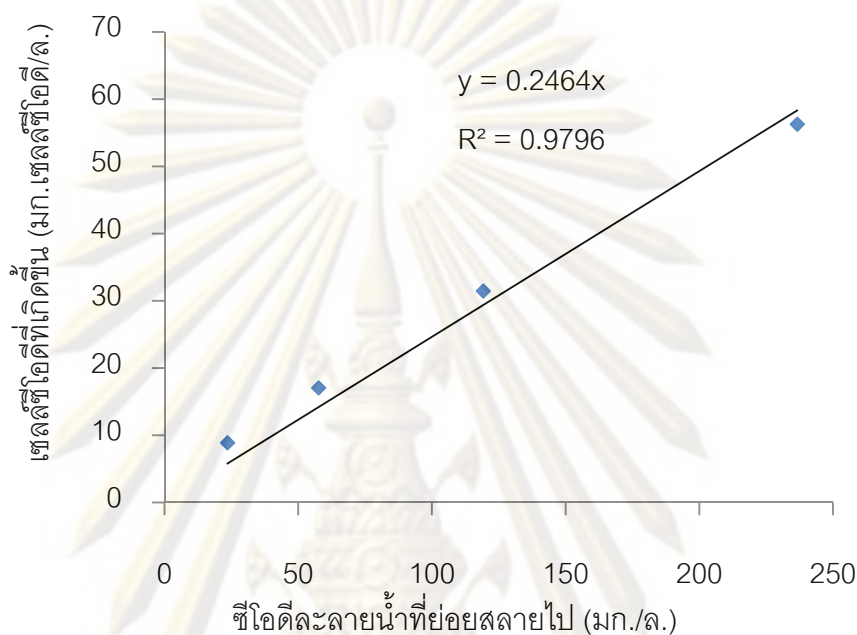
จ. ค่าซีไอดีเริ่มต้น 30 มก./ล.

โดยที่ \*—\*—\* คือ ค่าซีไอดีละลายน้ำ

- - ◆ - - คือ ค่าเชลลซีไอดี



จากข้อมูลการทดลอง สามารถนำไปวิเคราะห์ค่ายึดของจุลชีพ โดยหาได้จากค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าเซลล์ซีไอดีที่เกิดขึ้น ต่อค่าซีไอดีละลายน้ำที่ย่อยสลายไป ดังรูปที่ 4.4



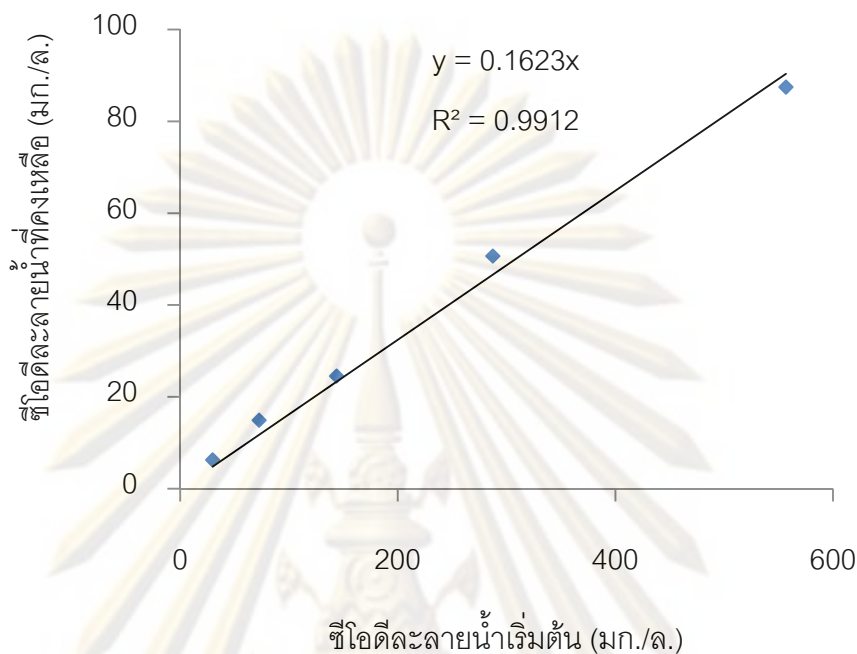
รูปที่ 4.4 ค่ายึดของน้ำเสียโรงอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์

จากการทดลอง ค่ายึดของจุลชีพแบบเฮเทอโรโทรปของน้ำเสียโรงอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีค่าประมาณ 0.25 มก.เซลล์ซีไอดี/มก.ซีไอดี นับว่าเป็นค่าที่ต่ำเมื่อเทียบกับค่ายึดของน้ำเสียชุมชนในต่างประเทศ ซึ่งมีค่าประมาณ 0.6 มก.เซลล์ซีไอดี/มก.ซีไอดี (Randall et al., 1992 อ้างถึงใน Grady et al., 1999) โดยรายละเอียดเกี่ยวกับการเปรียบเทียบค่าตัวแปรต่างๆ จะได้กล่าวถึงอย่างละเอียดต่อไปในภายหลัง

#### 4.3 การศึกษาค่าซีไอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ

ค่าซีไอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ สามารถหาได้จากค่าซีไอดีละลายน้ำที่คงเหลือ ซึ่งไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้อีกต่อไป โดยทดลองที่ความเข้มข้นของน้ำเสียเริ่มต้นต่างๆ กัน ตั้งแต่ 30 ถึง 550 มก.ซีไอดี/ล. พร้อมทั้งเติมเชื้อสัดจ้ลงไปและเติมอากาศ

ตลอดเวลาจนค่าซีไอลดลงจนคงที่ ซึ่งสัดส่วนของค่าซีไอที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพต่อค่าซีไอเริ่มต้นได้แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 สัดส่วนของซีไอที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ

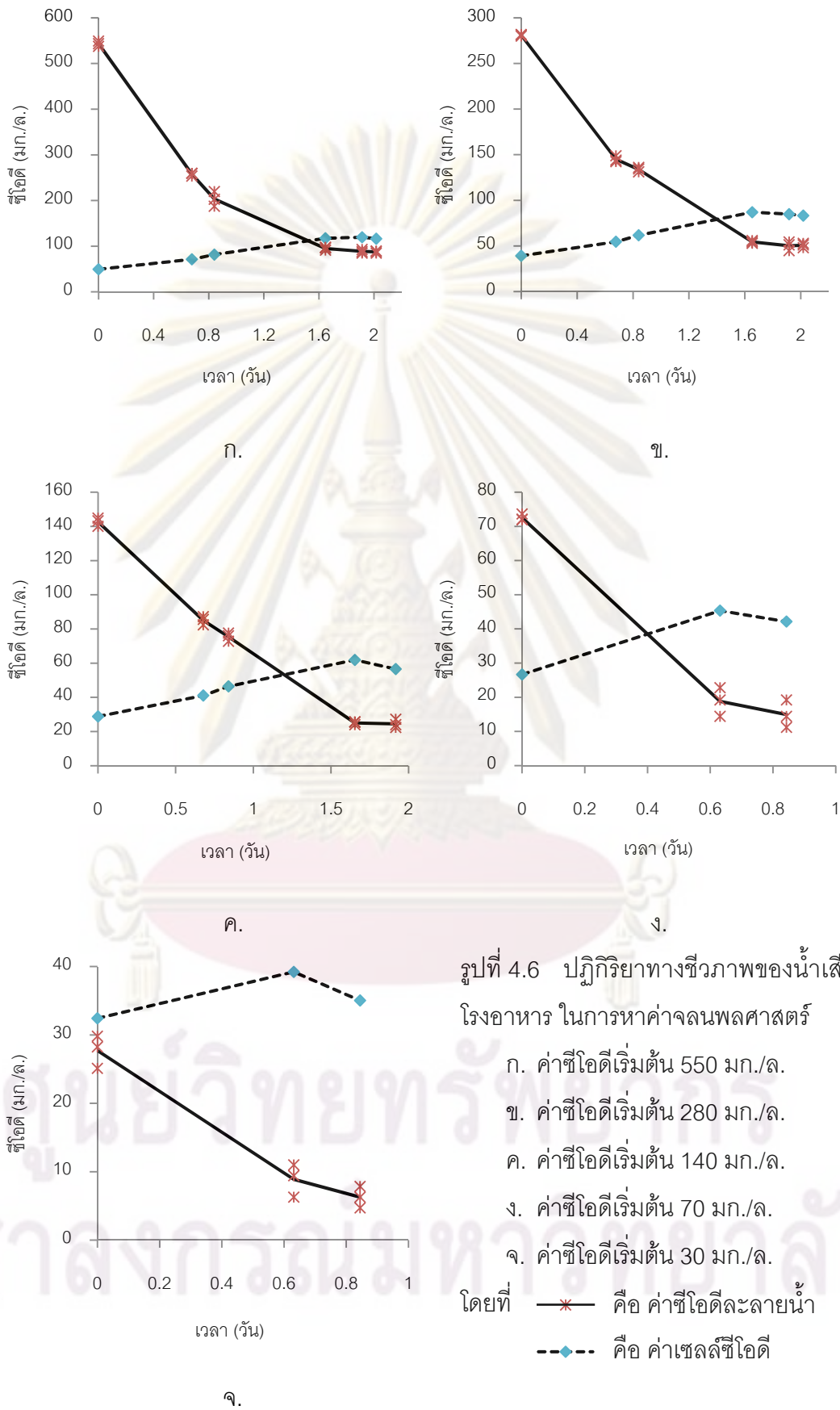
ค่าซีไอที่ไม่สามารถย่อยสลายได้มีสัดส่วนเป็น 0.1623 เท่าของค่าซีไอละลายน้ำเริ่มต้น โดยค่าซีไอที่ไม่สามารถย่อยสลายได้นี้อาจมีองค์ประกอบมาจากสารอินทรีย์ หรือ สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนซึ่งยากแก่การย่อยสลาย เป็นต้น ทั้งนี้ ค่าที่ได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ได้มีการรายงานไว้ทั่วไป คือ 10 - 20% ของซีไอน้ำเสีย โดยค่าซีไอที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพที่ได้นี้มีความสำคัญ และ จำเป็นต่อการทดลองหาค่าจลนพลศาสตร์ของการย่อยสลายทางชีวภาพต่อไป

#### 4.4 การศึกษาค่าจลนพลศาสตร์

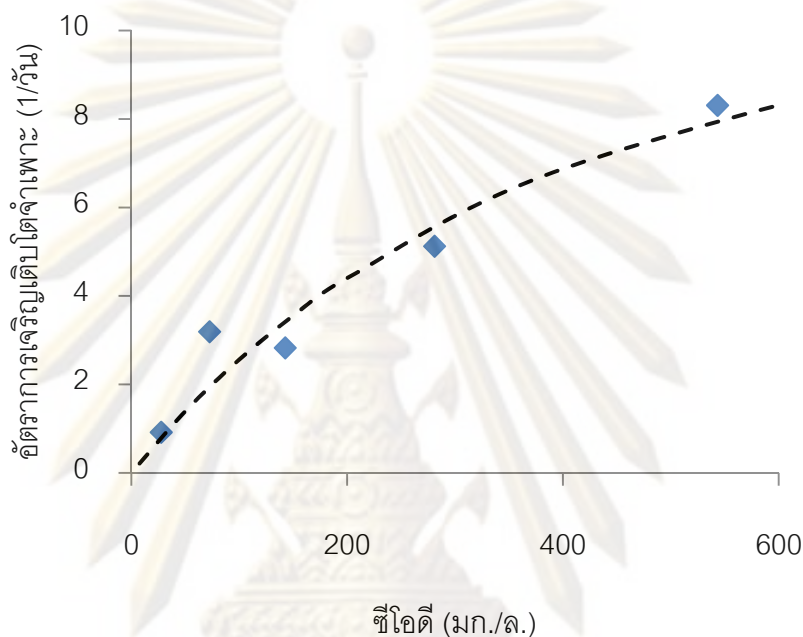
##### 4.4.1 การศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของน้ำเสียที่ใช้เชื้อสลดจ์ความเข้มข้นต่ำ

###### 4.4.1.1 การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์จากกราฟข้อมูล

ผลการทดลองการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำเสียโดยใช้เชื้อสลดจ์ความเข้มข้นต่ำประมาณ 30 มก.เซลล์ซีไอ/ล. แสดงดังรูปที่ 4.6



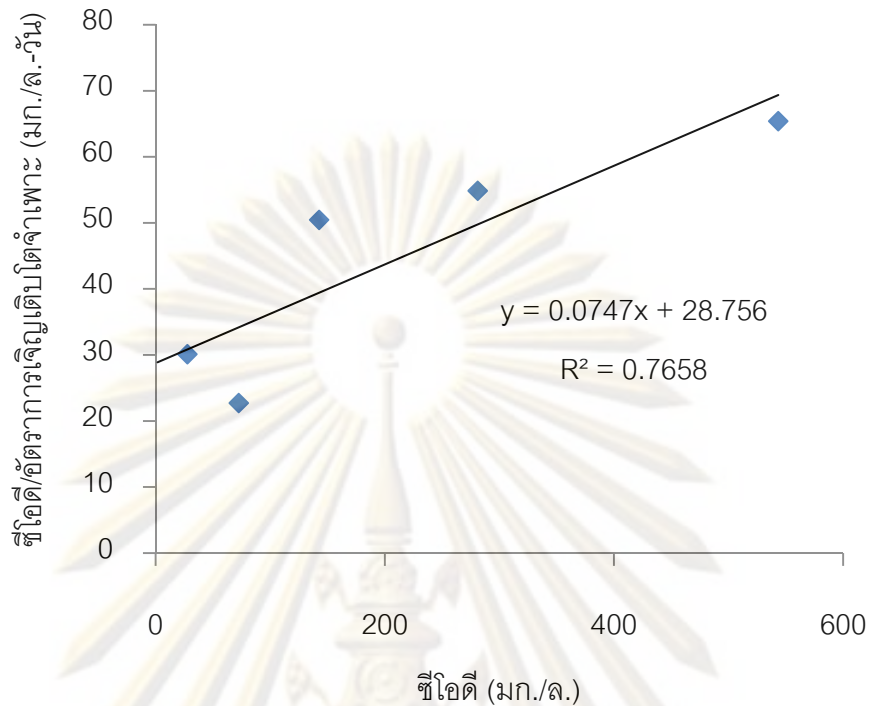
ข้อมูลที่ได้จากรูปที่ 4.6 นำไปสร้างกราฟตามทฤษฎีของ Monod โดยการนำค่าความชันของค่าซีโอดีละลายน้ำช่วงที่ลดลงของแต่ละความเข้มข้น สารด้วยปริมาณเชื้อสัลดีจ์เริ่มต้น ซึ่งจะได้เป็นค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ จากนั้นนำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟเทียบกับค่าซีโอดีละลายน้ำเริ่มต้นของแต่ละความเข้มข้น จะได้กราฟเป็นดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์โดยทฤษฎีของ Monod กรณีใช้เชื้อสัลดีจ์ความเข้มข้นต่ำ

จากรูปที่ 4.7 เนื่องจากจำนวนชุดข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้น้อยเกินไป หรือ เกิดความผิดพลาดบางประการอันเนื่องมาจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ทำให้ไม่สามารถหาค่าจลนพลศาสตร์จากกราฟข้างต้นได้ แต่สามารถแก้ไขได้โดยใช้ฟังก์ชันการแก้สมการหาตัวแปรของโปรแกรม Microsoft Excel ในการวิเคราะห์ค่าได้ โดยค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากวิธีดังกล่าว ได้แก่  $\mu_{mH} = 15.64$  1/วัน และ  $K_{SH} = 510$  มก./ล. นอกจากนี้เส้นกราฟจากสมการของ Monod ที่ได้จากค่าจลนพลศาสตร์ดังกล่าว คือ เส้นประในรูปที่ 4.7 นั่นเอง

ข้อมูลชุดเดียวกับที่ใช้สร้างกราฟจากทฤษฎีของ Monod ถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์โดยทฤษฎีของ Hanes ซึ่งได้กราฟออกมาดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์โดยทฤษฎีของ Hanes  
กรณีใช้เชื้อสัลดีคความเข้มข้นต่ำ

ข้อมูลที่ได้จากรูปที่ 4.8 สามารถนำไปวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ด้วย  
ทฤษฎีของ Hanes ได้ โดยค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้มีดังนี้

$$\begin{aligned} 1/\mu_{mH} &= 0.0747 & \text{ดังนั้น } \mu_{mH} &= 13.39 \text{ 1/วัน} \\ K_{SH}/\mu_{mH} &= 28.756 & \text{ดังนั้น } K_{SH} &= 385 \text{ มก./ล.} \end{aligned}$$

ความแม่นยำของค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้นี้ ไม่สูงมากนักเนื่องจากกราฟใน  
รูปที่ 4.8 มีความแม่นยำต่ำ และการเรียงตัวของข้อมูลที่ไม่ดีนัก ส่งผลให้ค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้  
จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ไม่น่าเชื่อถือนัก อย่างไรก็ตาม ค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากสมการของ  
Monod นั้นใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากสมการของ Hanes ซึ่งในความเป็นจริงก็ควรจะเป็นเช่นนั้น  
เนื่องจากสมการของ Hanes มีพื้นฐานมาจากสมการของ Monod ดังนั้น ค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้  
จากสมการทั้งสองควรจะเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน แต่ถึงกระนั้น แม้ค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จาก  
สมการทั้งสองได้ค่า  $\mu_{mH}$  ที่สูงมาก แต่  $K_{SH}$  ที่ได้ก็สูงมากจนเกินไปเช่นกัน ค่า  $K_{SH}$  สูงเกือบเท่ากับ  
กับค่าซีไอดีเริ่มต้นสูงสุดของน้ำเสีย ทำให้ค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากสมการทั้งสองนี้ ไม่ค่อย

เหมาะสมนัก ดังนั้น การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ AQUASIM จึงถูกนำมาใช้ร่วมด้วย โดยผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะได้กล่าวต่อหัวข้อต่อไป

#### 4.4.1.2 การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ AQUASIM สามารถวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ได้ โดยใช้การสุ่มค่าตัวแปรที่เหมาะสม ซึ่งสามารถจำลองกราฟที่ใกล้เคียงกับชุดข้อมูลที่ป้อนเข้าไป โดยตัวแปรคงที่ ที่ป้อนลงในโปรแกรม AQUASIM ได้แก่  $Y_H = 0.25$  มก เซลล์ซีไอดี/มก. ซีไอดี และ  $b_H = 0.693$  1/วัน (ค่าปรับแก้คุณสมบัติของน้ำเสียโรงอาหารที่ 25.9°ซ โดยใช้สมการของ Phelps)

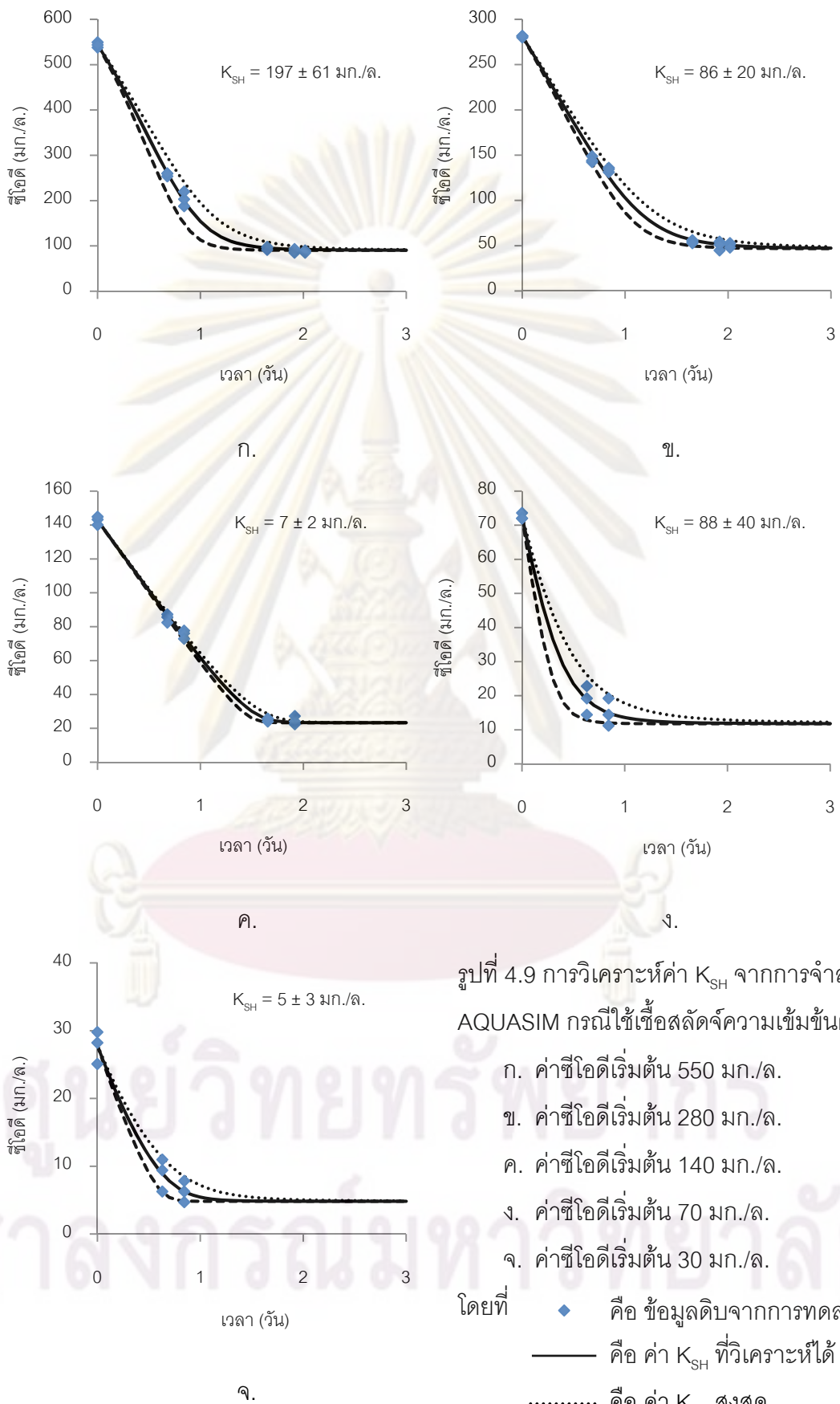
การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์โดยใช้โปรแกรม AQUASIM มีวิธีการ และ หลักการ ดังนี้

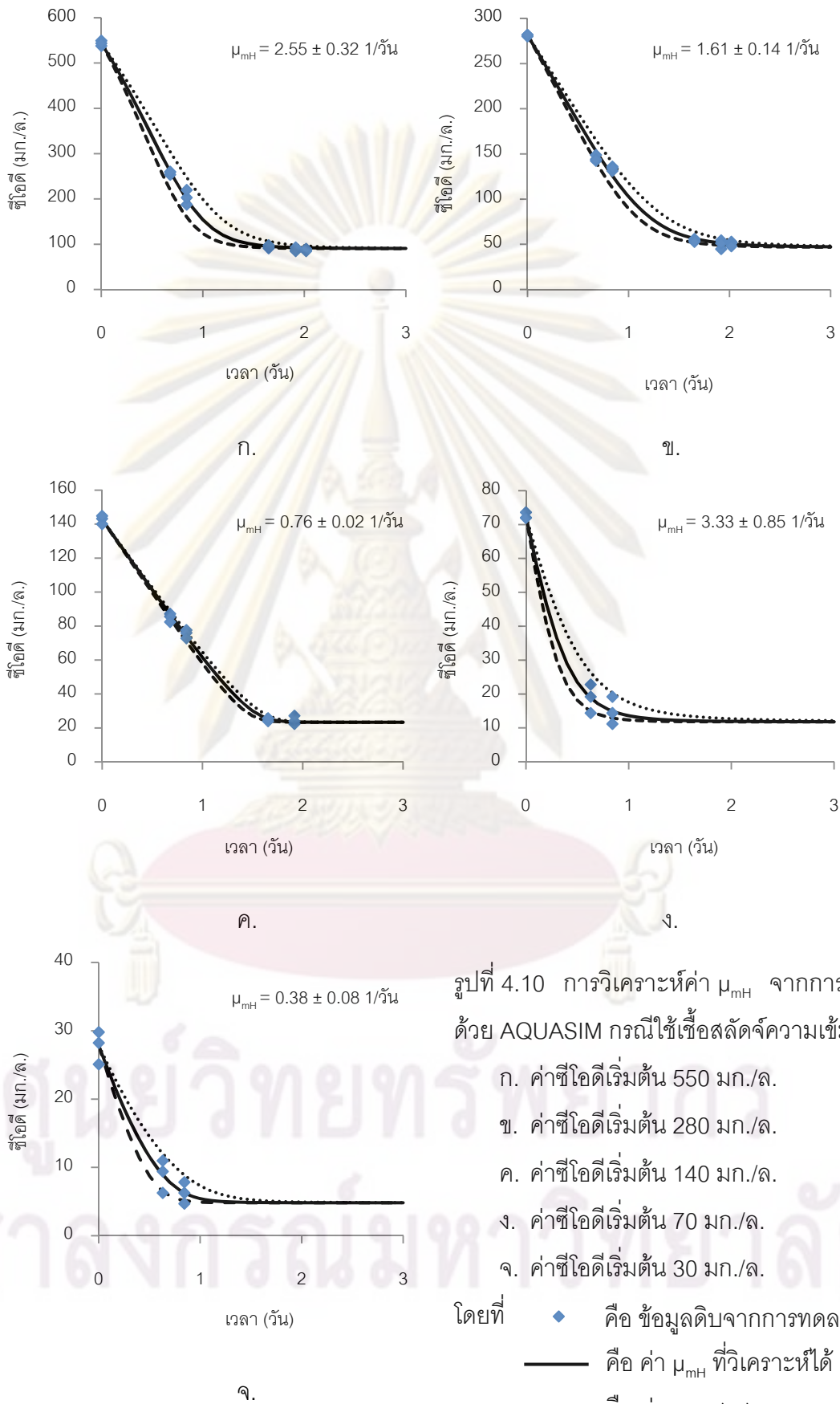
5. ป้อนข้อมูลดิบที่ได้จากการทดลองการย่อยสลายซีไอดีของน้ำเสียในแต่ละความเข้มข้นซีไอดีเริ่มต้น ซึ่งก็คือ ค่าซีไอดีเทียบกับเวลาต่างๆ

6. ป้อนค่าตัวแปรคงที่ต่างๆ ได้แก่ ค่า  $Y_H$   $b_H$  ค่าเชื้อสัจเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลอง และ ค่าซีไอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ ส่วนค่า  $\mu_{mH}$  และ  $K_{SH}$  นั้น เนื่องจากเป็นค่าที่ต้องการวิเคราะห์ ดังนั้น จะใช้การป้อนค่าใดก็ได้เข้าไปก่อนเป็นค่าเริ่มต้น

7. ให้โปรแกรมทำการวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ที่เหมาะสมของการทดลองที่ความเข้มข้นซีไอดีเริ่มต้นนั้นๆ โดยโปรแกรม AQUASIM จะใช้วิธีการทดลองสุ่มค่าจลนพลศาสตร์ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้ค่าจลนพลศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งสามารถนำไปจำลองเส้นกราฟของค่าซีไอดีเทียบกับเวลาที่ลากผ่านข้อมูลดิบที่ป้อนเข้าไปมากที่สุด หรือใกล้เคียงที่สุด

การจำลองด้วยโปรแกรม AQUASIM ดังวิธีการที่กล่าวไว้ข้างต้นนั้น นอกจากจะได้ค่าจลนพลศาสตร์แล้ว ยังแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานด้วย ซึ่งค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้นี้จะนำไปใช้หาช่วงสูงสุด ต่ำสุด ที่เหมาะสมของค่าจลนพลศาสตร์ที่จำลองได้ ในกรณีที่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่สามารถให้ช่วงที่เหมาะสมได้ จะใช้การกำหนดช่วงที่เหมาะสมที่ครอบคลุมข้อมูลทั้งหมดขึ้นมา โดยช่วงสูงสุด ต่ำสุดของค่าจลนพลศาสตร์แต่ละค่า และ กราฟที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม AQUASIM แสดงดังรูปที่ 4.9 และ 4.10







รูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงค่าจลนพลศาสตร์ที่จำลองได้จากโปรแกรม AQUASIM รวมถึงช่วงสูงสุด ต่ำสุดที่เหมาะสมของค่าจลนพลศาสตร์แต่ละค่า โดยค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้ทั้งหมด สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าจลนพลศาสตร์จากการจำลองด้วย AQUASIM  
กรณีใช้เชื้อสัดจ์ความเข้มข้นต่ำ

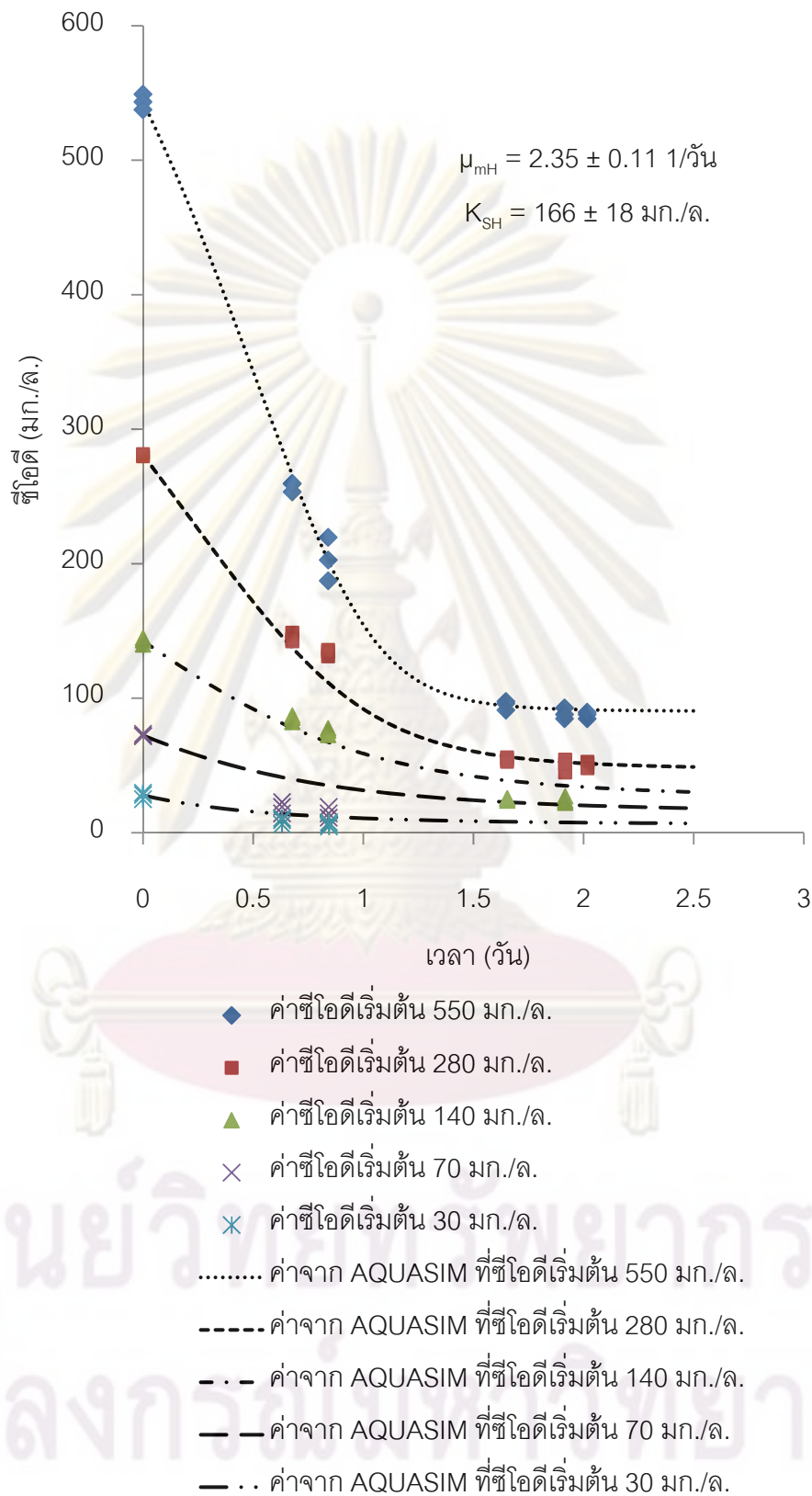
ความเข้มข้นเริ่มต้น ของน้ำเสีย (มก./ล.)	$K_{SH}$ (มก./ล.)	$\mu_{mH}$ (1/วัน)
550	197 ± 61	2.55 ± 0.32
280	86 ± 20	1.61 ± 0.14
140	7 ± 2	0.76 ± 0.02
70	88 ± 40	3.33 ± 0.85
30	5 ± 3	0.38 ± 0.08
ค่าเฉลี่ย	77 ± 70	1.73 ± 1.1

ค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการจำลองด้วย AQUASIM ดังตารางที่ 4.3 มีการกระจายตัวค่อนข้างสูงแสดงให้เห็นถึงความคลาดเคลื่อนที่ค่อนข้างมาก โดยเฉพาะที่ค่าซีโอดีเริ่มต้น 140 และ 30 มก./ล. มีค่าแตกต่างจากค่าอื่นมาก ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง โดยค่าเฉลี่ยของ  $K_{SH}$  และ  $\mu_{mH}$  ที่ได้ คือ 77 มก./ล. และ 1.73 1/วัน ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างกับค่าที่ได้จากการใช้สมการของ Hanes เป็นอย่างมาก นอกจากนี้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยมีค่าที่สูงมาก แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยที่ได้มีความคลาดเคลื่อนสูงเช่นเดียวกัน ทำให้ค่าที่ได้ไม่น่าเชื่อถือนัก และไม่ค่อยเหมาะสมแก่การนำมาใช้ ดังนั้น การหาค่าจลนพลศาสตร์โดยพิจารณาข้อมูลน้ำเสียทุกความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้นพร้อมกัน จึงถูกนำมาใช้ร่วมด้วย

การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ด้วยโปรแกรม AQUASIM โดยพิจารณาข้อมูลของน้ำเสียทุกความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้นพร้อมกันมีวิธีการ และ หลักการคล้ายกับการพิจารณาข้อมูลน้ำเสียความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้นแยกกันดังที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ เพียงเล็กน้อย ซึ่งวิธีการมีดังนี้

1. ป้อนข้อมูลดิบที่ได้จากการทดลองการย่อยสลายซีโอดีของน้ำเสียทุกความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้น ซึ่งก็คือ ค่าซีโอดีเทียบกับเวลาต่างๆ ของการทดลองทั้งหมด จำนวน 5 ชุดความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้น
2. ป้อนค่าตัวแปรคงที่ต่างๆ ได้แก่ ค่า  $Y_H$   $b_H$  ค่าเชื้อสัจเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลอง และ ค่าซีโอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ ส่วนค่า  $\mu_{mH}$  และ  $K_{SH}$  นั้น เนื่องจากเป็นค่าที่ต้องการวิเคราะห์ ดังนั้น จะใช้การป้อนค่าใดก็ได้เข้าไปก่อนเป็นค่าเริ่มต้น
3. ให้โปรแกรมทำการวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ที่เหมาะสมของการทดลองที่ความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้นทั้งหมด 5 ชุดการทดลอง โดยโปรแกรม AQUASIM จะใช้วิธีการทดลองสุ่มค่าจลนพลศาสตร์ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้ค่าจลนพลศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งสามารถนำไปจำลองเส้นกราฟของค่าซีโอดีเทียบกับเวลาจำนวน 5 เส้นที่จะลากผ่านข้อมูลดิบทั้งหมด 5 ชุดการทดลองที่ป้อนเข้าไปมากที่สุด หรือใกล้เคียงที่สุด โดยค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากวิธีนี้จะเป็นตัวแทนของข้อมูลน้ำเสียทั้งหมด

กราฟที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม AQUASIM กรณีพิจารณาข้อมูลของน้ำเสียทุกความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้นพร้อมกัน เป็นดังรูปที่ 4.11



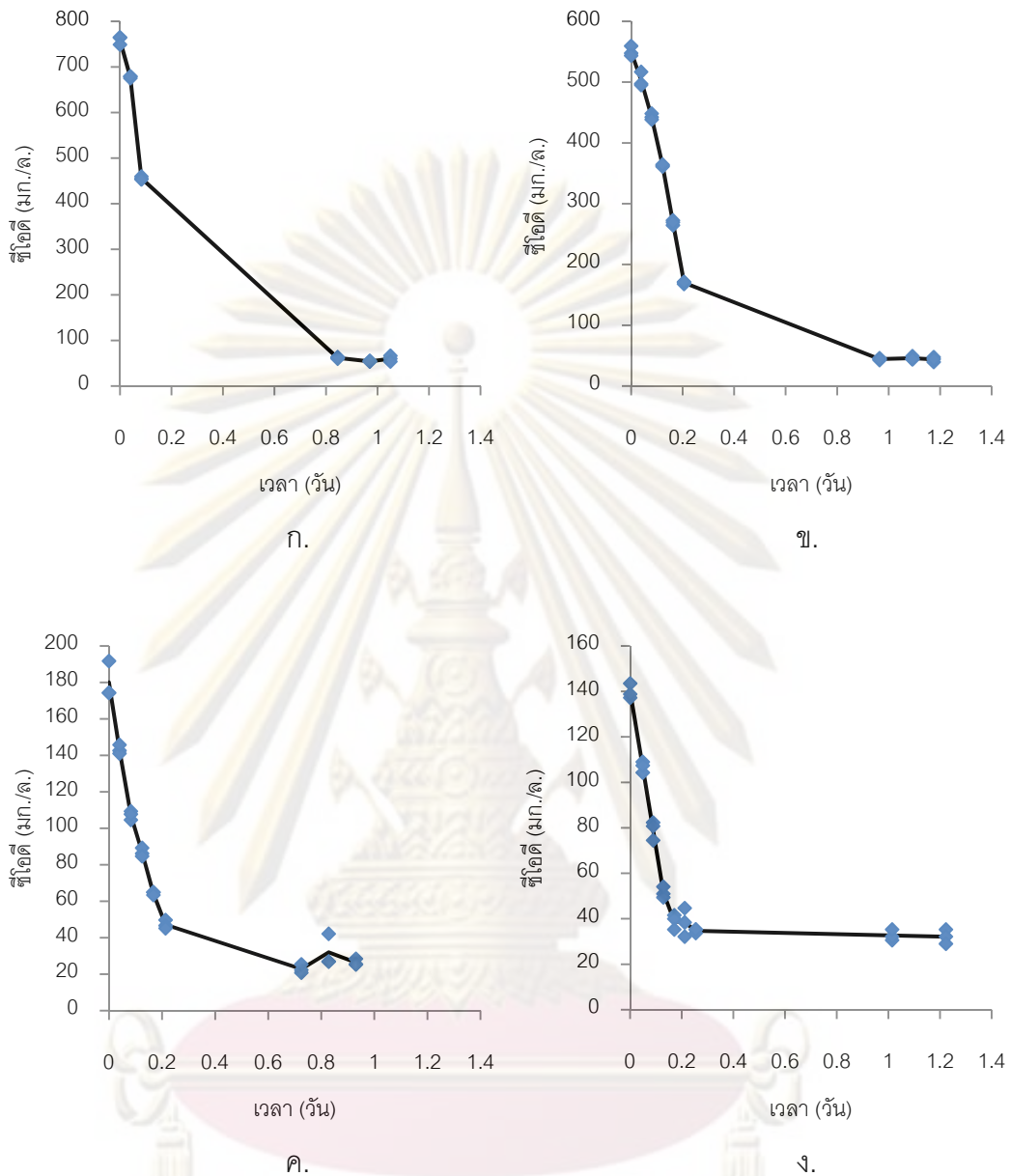
รูปที่ 4.11 การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ กรณีพิจารณาทุกความเข้มข้นที่เชื่อถือได้ความเข้มข้นต่ำ

กราฟที่ได้จากการจำลองโดยพิจารณารวมทุกความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้น ได้เส้นกราฟที่ค่อนข้างแม่นยำ โดยเส้นกราฟที่ได้จากการจำลองด้วยวิธีนี้ลากทับผ่านชุดข้อมูลดิบเป็นส่วนใหญ่ โดยคลาดเคลื่อนในส่วนของความเข้มข้นต่ำๆ เท่านั้น ซึ่งค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้คือ  $\mu_{\text{mH}} = 2.35$  1/วัน และ  $K_{\text{SH}} = 166$  มก./ล. โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.11 1/วัน และ 18 มก./ล. ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าที่ค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าจลนพลศาสตร์เฉลี่ยที่ได้จากกรณีพิจารณาแยกแต่ละความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้น แสดงให้เห็นว่าค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากวิธีนี้ มีความน่าเชื่อถือ และ เหมาะสมมากกว่า อีกทั้งยังเป็นถือตัวแทนของข้อมูลน้ำเสียทุกความเข้มข้นด้วย

#### 4.4.2 การศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของน้ำเสียที่ใช้เชื้อสลดจ์ความเข้มข้นสูง

##### 4.4.2.1 การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์จากกราฟข้อมูล

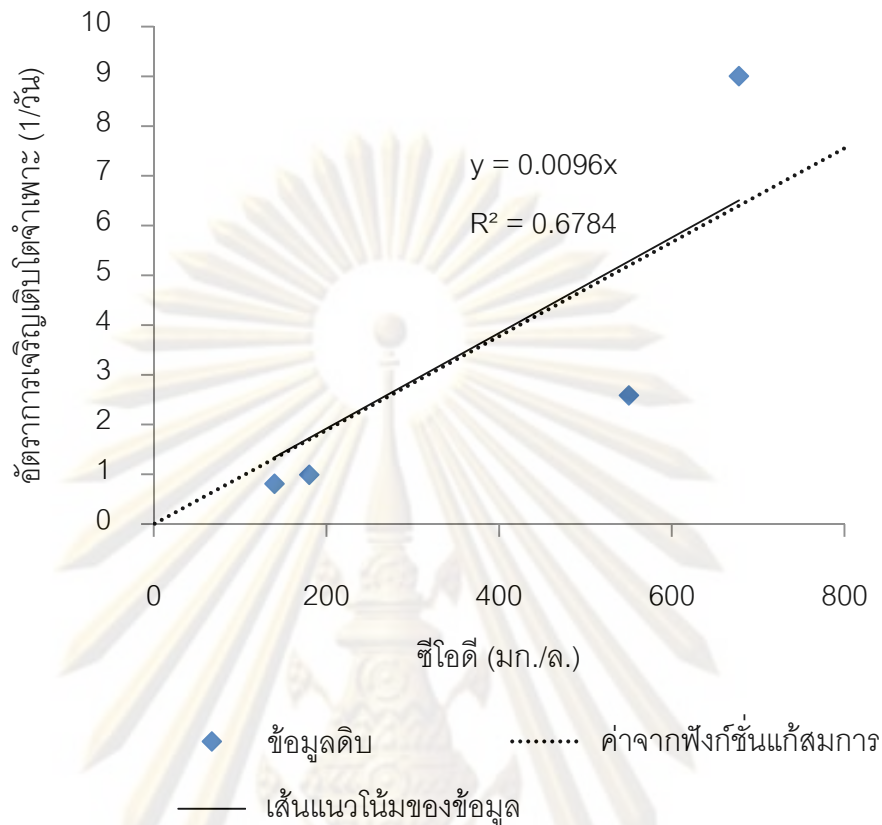
การทดลองการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำเสียโรงอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่น้ำเสียความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้นเท่ากับ 750 550 180 และ 140 มก./ล. โดยใช้เชื้อสลดจ์ความเข้มข้นสูงประมาณ 550 720 890 และ 850 มก.เซลล์ซีโอดี/ล. ตามลำดับ ได้ผลเป็นดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ปฏิกริยาทางชีวภาพของน้ำเสียโรงอาหาร ในการหาค่าจลนพลศาสตร์

- ก. ค่าซีไออดีเริ่มต้น 750 มก./ล.      ข. ค่าซีไออดีเริ่มต้น 550 มก./ล.  
 ค. ค่าซีไออดีเริ่มต้น 180 มก./ล.      ง. ค่าซีไออดีเริ่มต้น 140 มก./ล.

ข้อมูลที่ได้จากรูปที่ 4.12 นำไปสร้างกราฟตามทฤษฎีของ Monod เพื่อวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์จากกราฟ ซึ่งได้กราฟเป็นดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์โดยทฤษฎีของ Monod  
กรณีใช้เชื้อสัลค์ความเข้มข้นสูง

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ไม่สามารถนำไปวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ด้วยทฤษฎีของ Monod ได้ เนื่องจากเส้นกราฟเพิ่มขึ้นไม่ถึงช่วงคงที่ อีกทั้งข้อมูลยังกระจายตัวกันเป็นอย่างมาก ซึ่งเมื่อใช้ฟังก์ชันแก้สมการของ Microsoft Excel ในการวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์แทนพบว่าได้เส้นกราฟเป็นเส้นตรง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ดังนั้นสมการของ Monod จึงสามารถลดรูปเหลือเป็น

$$\mu = K_1 \cdot S \quad (4.1)$$

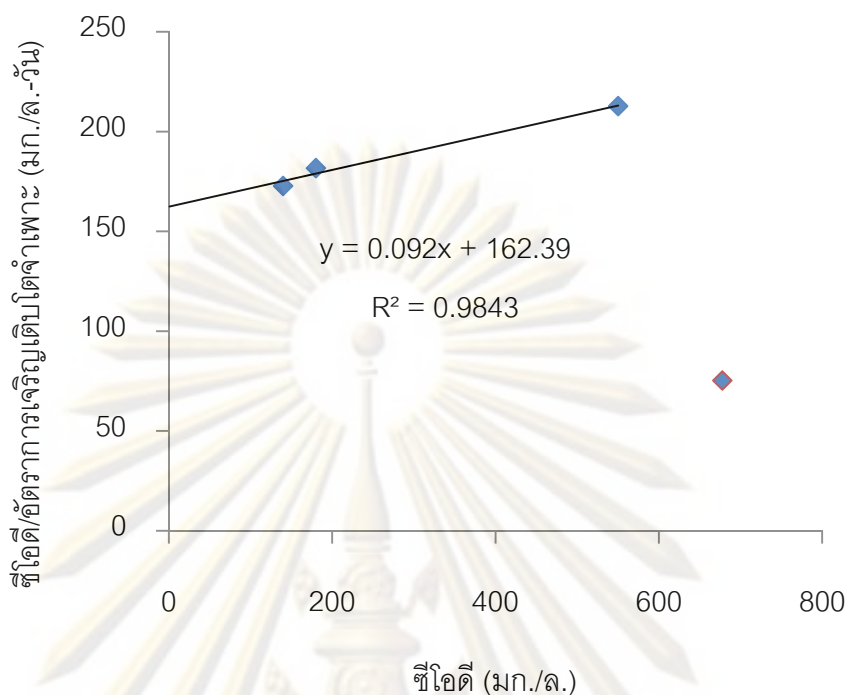
โดยที่

$$K_1 = \frac{\mu_m}{K_s} \quad (4.2)$$

สมการข้างต้นจะถูกนำไปใช้ในแบบจำลองแทนสมการการย่อยสลายทางชีวภาพที่ใช้ก่อนหน้านี้ ทำให้ค่าจลนพลศาสตร์ที่ต้องการวิเคราะห์ลดลงเหลือเพียงค่าเดียวคือ ค่า  $K_1$  หรือ ค่าสัมประสิทธิ์อัตราการเกิดปฏิกิริยาเฉลี่ย (Mean Reaction Rate Coefficient) ซึ่งวิธีนี้จะใช้เฉพาะในกรณีใช้เชื้อสลดจ์ความเข้มข้นสูงเท่านั้น

เนื่องจากสมการที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ดังนั้น การสร้างเส้นแนวโน้มเพื่อหาสมการเส้นตรงของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการหาค่าจลนพลศาสตร์ ซึ่งพบว่าได้เส้นกราฟที่ใกล้เคียง และ แทบจะทับกับเส้นกราฟที่ได้จากฟังก์ชันการแก้สมการด้วย Microsoft Excel เมื่อพิจารณาค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากเส้นกราฟทั้งสอง พบว่าค่าจลนพลศาสตร์จากการใช้ฟังก์ชันแก้สมการของ Microsoft Excel ได้แก่  $\mu_{mH} = 8.41 \cdot 10^9$  1/วัน และ  $K_{SH} = 8.9 \cdot 10^{11}$  มก./ล. เมื่อเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของค่า  $K_1$  จะได้เท่ากับ 0.0094 ล./มก./วัน ส่วนเส้นแนวโน้มให้ค่า  $K_1 = 0.0096$  ล./มก./วัน นั่นคือ ค่าที่ได้จากทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก แสดงให้เห็นว่าหากใช้เส้นแนวโน้มในการอธิบายเพียงอย่างเดียวก็น่าจะเป็นไปได้ ด้วยเหตุนี้ หากพิจารณาเฉพาะที่เส้นแนวโน้มจะเห็นว่าค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้มีความคลาดเคลื่อนสูงมาก เห็นได้จากค่า  $R^2$  ที่ต่ำมาก ดังนั้น ค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้นี้จึงไม่ค่อยน่าเชื่อถือนัก และไม่เหมาะแก่การนำไปใช้ด้วยเหตุดังกล่าว

ข้อมูลที่ใช้ในการสร้างกราฟสมการของ Monod สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ด้วยสมการของ Hanes ได้ ซึ่งได้กราฟดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์โดยทฤษฎีของ Hanes  
กรณีใช้เชื้อสัลค์ความเข้มข้นสูง

จากรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่า หากพิจารณาข้อมูลทั้งหมดจะไม่สามารถหาค่าจลนพลศาสตร์ด้วยสมการของ Hanes ได้ เนื่องจากข้อมูลจุดที่ 4 (ที่ความเข้มข้นซีไอดี 750 มก./ล.) ดิ่งลงแทนที่จะพุ่งขึ้น ทำให้เส้นแนวโน้มของข้อมูลทั้งหมดดิ่งลง และได้ค่าความชันติดลบซึ่งไม่เป็นไปตามหลักการของ Hanes ส่งผลให้ไม่สามารถหาค่าจลนพลศาสตร์ใดๆ ได้เลย สาเหตุนี้อาจเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนจากการทดลองก็เป็นได้ ทำให้ข้อมูลนี้ที่มีปัญหา ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น จึงหาเส้นแนวโน้มของข้อมูลเพียง 3 จุดแรกเท่านั้น และ ตัดข้อมูลในจุดที่สี่ออกไป ซึ่งทำให้สามารถหาค่าจลนพลศาสตร์จากสมการของ Hanes ได้ โดยค่าที่ได้มีดังนี้

$$1/\mu_{mH} = 0.092 \quad \text{ดังนั้น} \quad \mu_{mH} = 10.87 \quad 1/\text{วัน}$$

$$K_{SH}/\mu_{mH} = 162.39 \quad \text{ดังนั้น} \quad K_{SH} = 1765 \quad \text{มก./ล.}$$

ค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้นี้มีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับค่าจลนพลศาสตร์ของกรณีใช้เชื้อสัลค์ความเข้มข้นต่ำซึ่งใช้วิธีเดียวกัน อีกทั้งค่า  $K_{SH}$  ที่ได้นั้น มีค่าสูงกว่าค่าซีไอดีเริ่มต้นสูงสุดเป็นอย่างมาก นี่เป็นเครื่องบ่งชี้อีกอย่างว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งตามที่

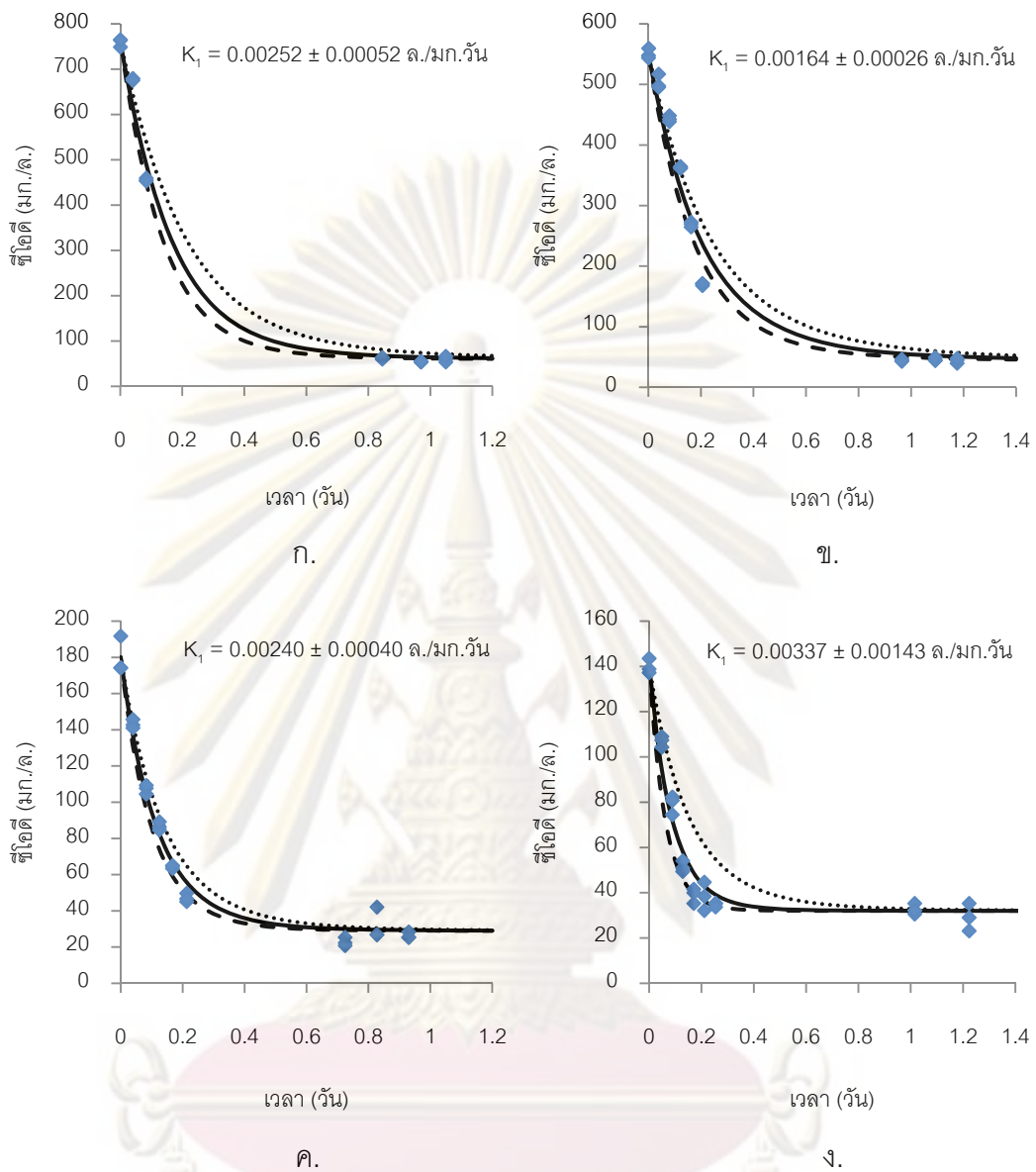


ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากจำนวนชุดข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์น้อยเกินไป ทำให้ค่าที่ได้จากวิธีนี้ไม่ค่อยเหมาะสมนัก ถึงแม้ว่าค่าที่ได้จะมีความคลาดเคลื่อนต่ำมากก็ตาม ด้วยเหตุนี้ทำให้การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ AQUASIM จึงถูกนำมาใช้ร่วมด้วยเช่นกัน โดยผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะได้กล่าวต่อหัวข้อต่อไป

#### 4.4.2.2 การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ด้วยโปรแกรม AQUASIM มีหลักการทำงานดั้งเดิม ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 4.4.1.2 นอกจากนี้ตัวแปรคงที่ที่ป้อนลงในโปรแกรม AQUASIM นั้นก็มีค่าเหมือนเดิมเช่นกัน ได้แก่  $Y_H = 0.25$  มก.เซลล์ซีไอดี/มก.ซีไอดี และ  $b_H = 0.693$  1/วัน (ค่าปรับแก้คุณสมบัติของน้ำเสียโรงอาหารที่ 25.9°ซ โดยใช้สมการของ Phelps) แต่ในครั้งนี้ค่าจลนพลศาสตร์ที่วิเคราะห์จะแสดงในรูปของค่า  $K_1$  เพียงค่าเดียว เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งดังที่กล่าวไว้แล้วก่อนหน้านี้

ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม AQUASIM โดยแสดงช่วงสูงสุด ต่ำสุด ที่เหมาะสม ของค่าจลนพลศาสตร์ที่จำลองได้ เป็นดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 การวิเคราะห์ค่า  $K_1$  ด้วย AQUASIM กรณีใช้เชื้อสลดจ์ความเข้มข้นสูง

- ก. ค่าซีไอดีเริ่มต้น 750 มก./ล.
- ข. ค่าซีไอดีเริ่มต้น 550 มก./ล.
- ค. ค่าซีไอดีเริ่มต้น 180 มก./ล.
- ง. ค่าซีไอดีเริ่มต้น 140 มก./ล.

โดยที่  $\blacklozenge$  คือ ข้อมูลดิบ       $\text{—}$  คือ ค่า  $K_1$  ที่วิเคราะห์ได้  
 $\text{---}$  คือ ค่า  $K_1$  สูงสุด       $\cdots$  คือ ค่า  $K_1$  ต่ำสุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

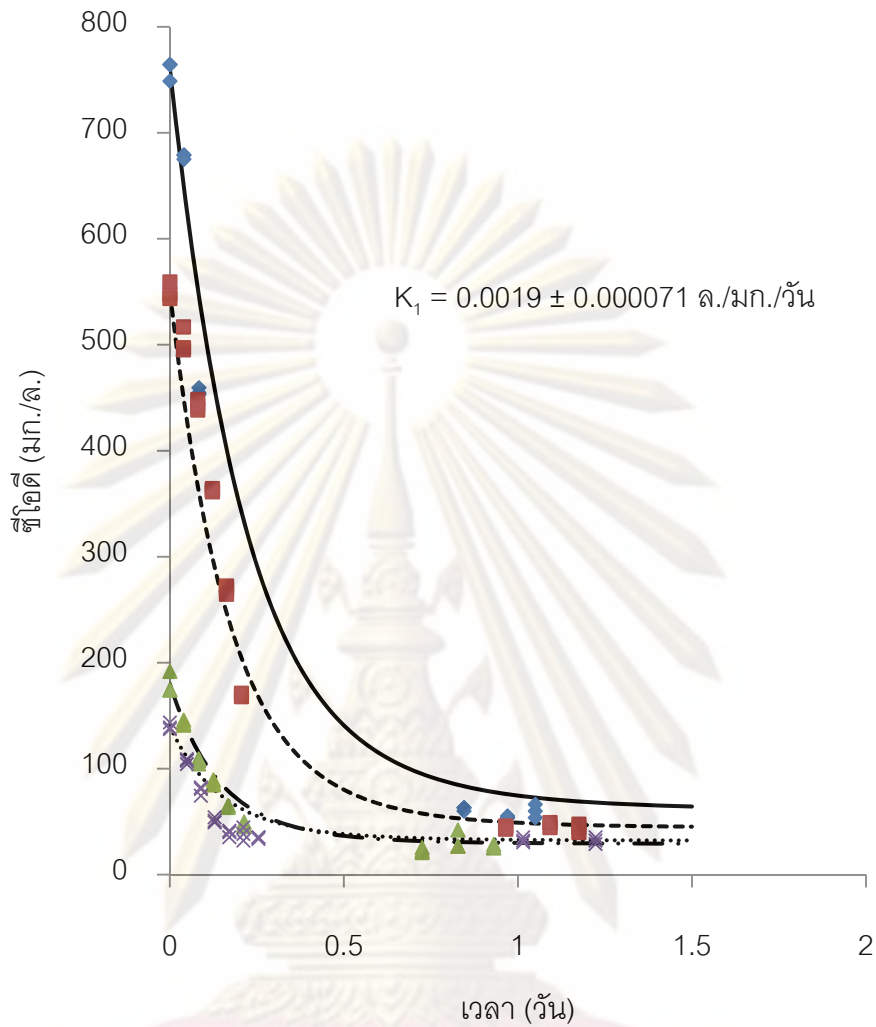
ค่าจลนพลศาสตร์ที่จำลองได้จากโปรแกรม AQUASIM รวมถึงช่วงสูงสุดต่ำสุดที่เหมาะสมของค่าจลนพลศาสตร์ทั้งหมด สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าจลนพลศาสตร์จากการจำลองด้วย AQUASIM

กรณีใช้เชื้อสลดจ์ความเข้มข้นสูง

ความเข้มข้นเริ่มต้น ของน้ำเสีย (มก./ล.)	$K_1$ (ล./มก./วัน)
750	$0.00252 \pm 0.00052$
550	$0.00164 \pm 0.00026$
180	$0.00240 \pm 0.00040$
140	$0.00337 \pm 0.00143$
ค่าเฉลี่ย	$0.00248 \pm 0.00055$

ค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการจำลองด้วย AQUASIM มีการกระจายตัวไม่มากนัก โดยค่าเฉลี่ยที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.00248 ล./มก./วัน ซึ่งมีค่าค่อนข้างต่ำ โดยต่ำกว่าค่าที่ได้จากสมการของ Monod เป็นอย่างมาก นอกจากนี้ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยนี้ก็มีความต่ำมากเช่นกัน แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยที่ได้มีความคลาดเคลื่อนที่ต่ำ อย่างไรก็ตาม การหาค่าจลนพลศาสตร์โดยพิจารณาข้อมูลน้ำเสียทุกความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้นพร้อมกัน ยังคงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ควรนำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้ โดยหลักการ และ วิธีการทำงานยังคงเหมือนเดิมดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.4.1.2 ก่อนหน้านี้ กราฟที่ได้จากการจำลองด้วยวิธีนี้เป็นดังรูปที่ 4.16



- ◆ ค่าซีไอดีเริ่มต้น 750 มก./ล.
- ค่าซีไอดีเริ่มต้น 550 มก./ล.
- ▲ ค่าซีไอดีเริ่มต้น 180 มก./ล.
- × ค่าซีไอดีเริ่มต้น 140 มก./ล.
- ค่าจาก AQUASIM ที่ซีไอดีเริ่มต้น 750 มก./ล.
- - - ค่าจาก AQUASIM ที่ซีไอดีเริ่มต้น 550 มก./ล.
- ..... ค่าจาก AQUASIM ที่ซีไอดีเริ่มต้น 180 มก./ล.
- ..... ค่าจาก AQUASIM ที่ซีไอดีเริ่มต้น 140 มก./ล.

รูปที่ 4.16 การวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ กรณีพิจารณาความเข้มข้นที่เชื่อสัจค์ความเข้มข้นสูง

กราฟที่ได้จากการจำลองโดยพิจารณารวมทุกความเข้มข้น มีความแม่นยำในระดับหนึ่ง โดยเส้นกราฟที่ได้จากการจำลองทับผ่านชุดข้อมูลดิบเป็นบางส่วน โดยคลาดเคลื่อนในส่วนของความเข้มข้นต่ำๆ นอกจากนี้ ค่าที่จำลองได้ยังมีค่าต่ำกว่ากรณีพิจารณาแยกความเข้มข้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้คือ  $K_1 = 0.0019$  ล./มก./วัน โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.000071 ล./มก./วัน จะเห็นว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าที่ต่ำกว่าถึง 10 เท่าเมื่อเทียบกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าจลนพลศาสตร์เฉลี่ยที่ได้จากกรณีพิจารณาแยกแต่ละความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้น แสดงให้เห็นว่าค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากวิธีนี้ มีความน่าเชื่อถือ และเหมาะสมมากกว่า อีกทั้งยังเป็นถือตัวแทนของข้อมูลน้ำเสียทุกความเข้มข้น

#### 4.5 ความคลาดเคลื่อนของค่าจลนพลศาสตร์ที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม AQUASIM

ค่าจลนพลศาสตร์ที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม AQUASIM นั้น แต่ละค่าต่างมีระดับความคลาดเคลื่อนที่แตกต่างกันออกไป อีกทั้งจำนวนค่าที่วิเคราะห์ได้นั้นมีอยู่หลายค่า ดังนั้นการจะพิจารณาว่าค่าใดเป็นค่าที่เหมาะสมนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญ ด้วยเหตุนี้การตรวจสอบระดับความคลาดเคลื่อนจึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ในการคัดเลือกค่าจลนพลศาสตร์ที่เหมาะสม

การตรวจสอบความคลาดเคลื่อนในงานวิจัยชิ้นนี้จะใช้วิธีการหาความผิดพลาดมาตรฐานจากการประมาณ ตามสมการที่ 3.3 ซึ่งผลที่ได้เป็นดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบระดับความคลาดเคลื่อนในรูปของ SEE

ค่าซีไอดีเริ่มต้น (มก./ล.)	$K_{SH}$ (มก./ล.)	$\mu_{mH}$ (1/วัน)	$K_1$ (ล./มก./วัน)	SEE	หมายเหตุ
กรณีใช้เชื้อสัจความเข้มข้นต่ำ					
550	197	2.55	-	8.69	พิจารณาแยกความเข้มข้น ซีไอดีเริ่มต้น
280	86	1.16		3.56	
140	7	0.76		2.16	
70	88	3.33		3.23	
30	5	0.38		2.05	
ค่าเฉลี่ย	77	1.73		3.94	
30 - 550	166	2.35		10.27	พิจารณาทุกความเข้มข้นซีไอดีเริ่มต้น
กรณีใช้เชื้อสัจความเข้มข้นสูง					
750	-	-	0.00252	32.96	พิจารณาแยกความเข้มข้น ซีไอดีเริ่มต้น
550			0.00164	34.58	
180			0.00240	6.74	
140			0.00337	7.89	
ค่าเฉลี่ย			0.00248	20.54	
140 - 750			0.0019	30.17	พิจารณาทุกความเข้มข้นซีไอดีเริ่มต้น

ค่าจลนพลศาสตร์ที่วิเคราะห์ได้นี้ แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ค่าจลนพลศาสตร์ในรูปของ  $K_{SH}$  กับ  $\mu_{mH}$  และ ค่าจลนพลศาสตร์ในรูปของค่า  $K_1$  โดยพบว่าระดับความคลาดเคลื่อนที่วิเคราะห์ได้ของค่าจลนพลศาสตร์ทั้ง 2 ประเภทนี้ มีค่าต่ำมาก และ อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของค่า SEE คือ มีค่าไม่เกินร้อยละ 10 ของความเข้มข้นซีไอดีเริ่มต้น นอกจากนี้ค่าจลนพลศาสตร์ของแต่ละกรณีต่างก็มีค่า SEE เฉลี่ยที่ค่อนข้างต่ำและมีค่าไม่เกินร้อยละ 10 ของความเข้มข้นซีไอดีเริ่มต้นสูงสุดในแต่ละกรณีด้วย ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่าค่าที่วิเคราะห์ได้นั้นทุกค่ามีความถูกต้อง อย่างไรก็ตาม หากนำค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่วิเคราะห์ได้ของแต่ละผลการทดลองมาพิจารณาด้วยจะเห็นว่ามีความขัดแย้งกันระหว่างค่า SEE และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน นั่นคือ ผลการทดลองที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่สูงกลับมีค่า SEE อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากทั้งสองค่านี้ใช้อธิบายความคลาดเคลื่อนในลักษณะที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ค่า SEE นั้นใช้อธิบายความ

คลาดเคลื่อนของข้อมูลดิบเทียบกับเส้นกราฟที่ได้จากแบบจำลอง โดยจะเป็นตัวบอกว่า เส้นกราฟที่ได้จากแบบจำลองลากผ่านชุดข้อมูลดิบทั้งหมดได้แม่นยำมากน้อยเพียงใด และ บ่งบอกว่าค่าจลนพลศาสตร์ที่วิเคราะห์ได้ผลการทดลองชุดนั้นถูกต้องมากน้อยขนาดไหน ในขณะที่ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานนั้น จะใช้บอกการกระจายตัวของค่าจลนพลศาสตร์ทั้งหมดที่ได้ว่ามากน้อยเพียงใด ค่าที่ได้น่าเชื่อถือในระดับใด และ บ่งบอกว่าค่าจลนพลศาสตร์เฉลี่ยที่ได้นั้น มีความคลาดเคลื่อนมากน้อยขนาดไหน

ด้วยเหตุผลดังที่ได้กล่าวมา การคัดเลือกค่าจลนพลศาสตร์ที่เหมาะสมจะอิงจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นหลัก เนื่องจากค่า SEE ที่วิเคราะห์ได้ของการทดลองต่างก็อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานทั้งสิ้น โดยจากผลการทดลองจะเห็นว่าค่าที่ได้จากกรณีพิจารณาน้ำเสียรวมทุกความเข้มข้นซีโอดีของทั้งกรณีใช้เชื้อสลดจ์ความเข้มข้นต่ำและสูงนั้น ต่างก็ให้ค่าที่น่าเชื่อถือ และเหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับค่าจลนพลศาสตร์อื่นในกรณีเดียวกัน อีกทั้งยังเป็นค่าจลนพลศาสตร์ที่เป็นตัวแทนของน้ำเสียทุกความเข้มข้นซีโอดีที่ใช้ในการทดลอง

#### 4.6 การเปรียบเทียบค่าตัวแปรต่างๆ ที่วิเคราะห์ได้

ค่าตัวแปรทั้งหมดที่วิเคราะห์ได้ ได้แก่ ค่ายิลด์ และ ค่าจลนพลศาสตร์ของน้ำเสียโรงอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ค่า คือ  $\mu_{max}$ ,  $K_S$  และ  $K_I$  โดยค่าที่เหมาะสมในการนำมาใช้งานมากที่สุดต่างก็เป็นค่าที่มาจากการจำลองด้วย AQUASIM ในกรณีพิจารณารวมน้ำเสียทุกความเข้มข้นซีโอดีทั้งสิ้น ซึ่งค่าเหล่านี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่อ้างอิงจากงานวิจัยอื่นๆ รวมถึงค่าจลนพลศาสตร์ของน้ำเสียชุมชนจากต่างประเทศที่ผ่านการปรับแก้คุณสมบัติ โดยค่าตัวแปรต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.6

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าตัวแปรที่วิเคราะห์ได้ และ ที่เกี่ยวข้อง

แหล่งที่มา	แหล่งของน้ำเสีย	$Y_H$ (มก.เซลล์ซีไอดี/ มก.ซีไอดี)	$K_{SH}$ (มก./ล.)	$\mu_{mH}$ (1/วัน)	$K_1^*$ (ล./มก./วัน)	หมายเหตุ
1. การทดลองที่เพื่อสัจความเข้มข้นต่ำ	โรงอาหาร คณะ	0.25	166	2.35	-	
2. การทดลองที่เพื่อสัจความเข้มข้นสูง	วิศวกรรมศาสตร์	-	-	-	0.00194	* $K_1 = \mu_m/K_S$
3. ค่าจากแหล่งอื่นที่นำมาเปรียบเทียบ						
- Nuhoglu et al. (2005)	โรงบำบัดน้ำเสียชุมชน	-	35	5.5	-	จากตารางที่ 2.4
- Pala และ Bolukbas (2005)	โรงบำบัดน้ำเสียชุมชน	0.99**	343	1.128	-	
- ชลธิพร สุทธิธรรม และ ศรัณย์ เตชะเสน (2550)	โรงบำบัดน้ำเสียดินแดง และ อาคารเจริญวิศวกรรม	0.61** 0.6	41.34 20	3.96 $6^1$	- -	ไม่ได้ปรับแก้ อุณหภูมิ ปรับแก้ที่ อุณหภูมิ 25.9 °ซ
- Randall et al. (1992) อ้างถึงใน Grady et al. (1999)	น้ำเสียชุมชนต่างประเทศ	0.6	20	$10.19^2$	-	
- Henze et al. (2000)	น้ำเสียชุมชนต่างประเทศ	0.67	20	$6^1$	-	
- Tchobanoglous, Burton และ Stensel (2003)	น้ำเสียชุมชนต่างประเทศ	0.67	20	$10.19^2$	-	
- Tschobanoglous, Burton และ Stensel (2003)	น้ำเสียชุมชนต่างประเทศ	0.43 - 0.71**	5 - 40	3 - 13.2 <sup>1</sup>	-	
- มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ (2525)	น้ำเสียชุมชนต่างประเทศ	0.43 - 0.71**	5 - 40	5.1 - 22.43 <sup>2</sup>	-	
	น้ำเสียเคมีอินทรีย์	-	-	-	0.0259 - 0.0329	
		-	-	-	0.0012 - 0.0018	

\*\*ค่าที่ได้มาจากการเปลี่ยนหน่วยโดยการคูณด้วย 1.42 มก.เซลล์ซีไอดี/มก.วีเอสเอส



ค่ายิลด์ที่วิเคราะห์ได้ มีค่าแตกต่างจากค่าที่นำมาเปรียบเทียบเป็นอย่างมาก สาเหตุอาจเนื่องมาจาก น้ำเสียจากโรงอาหารเมืองค้ประกอบของไขมันปะปนอยู่เป็นจำนวนมาก ถึงแม้จะผ่านการแยกไขมันออกก่อนนำมาใช้งานแล้ว แต่ก็อาจมีไขมันที่สามารถละลายน้ำได้บางส่วนปะปนอยู่ในน้ำเสียด้วย ทำให้เชื้อสัลด์ที่นำมาใช้งานนั้นย่อยสลายน้ำเสียได้ช้า ซึ่งส่งผลให้ปริมาณเซลล์ที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำตามไปด้วย ทำให้ค่ายิลด์ที่ได้มีค่าต่ำมากดังค่าที่ได้จากการทดลอง

นอกจากนี้ ค่ายิลด์ที่ได้จากการทดลองคือ 0.25 มก.เซลล์ซีไอดี/มก.ซีไอดี พบว่าอยู่ในช่วงเดียวกับค่ายิลด์ที่ได้จากการเลี้ยงเชื้อสัลด์จึ้นน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสารประกอบของ ฟีนอล เบนซีน และ พทาเลต เอสเตอร์ เป็นองค์ประกอบ โดยค่ายิลด์ที่ได้อยู่ในช่วง 0.20 ถึง 0.60 (Grady, Aichinger et al., 1989 อ้างถึงใน Grady, Daigger et al., 1999) ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่า น้ำเสียจากโรงอาหารอาจมีองค์ประกอบทางเคมีบางอย่างที่คล้ายคลึงกับน้ำเสียดังกล่าวก็เป็นได้ ความคล้ายคลึงนี้อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้น้ำเสียจากโรงอาหารที่นำมาใช้ในการทดลองมีค่ายิลด์ใกล้เคียงกับค่ายิลด์ที่ได้จากน้ำเสียสังเคราะห์นี้

ในทางทฤษฎีนั้น ค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการทดลองทั้งในกรณีใช้เชื้อสัลด์ความเข้มข้นต่ำ และ กรณีใช้เชื้อสัลด์ความเข้มข้นสูงนั้น ควรจะมีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน แต่ที่ผลการทดลองจริงที่ได้กลับแสดงให้เห็นว่า ค่าจลนพลศาสตร์ของทั้งสองกรณีนั้นมีค่าแตกต่างกัน โดยสิ้นเชิง อีกทั้งยังได้ค่าจลนพลศาสตร์ที่มีรูปแบบแตกต่างกัน สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ อาจเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการทดลอง ซึ่งอาจมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดจากสาเหตุดังต่อไปนี้

1. ช่วงเวลาในการเก็บตัวอย่างน้ำเสียมาทดลอง เนื่องจาก การทดลองทั้งสองกรณีนั้น มีช่วงเวลาในการเก็บตัวอย่างน้ำเสียไม่ตรงกัน โดยในกรณีทดลองใช้เชื้อสัลด์ความเข้มข้นต่ำนั้น เก็บน้ำเสียตัวอย่างตอนต้นเดือน ในขณะที่ กรณีทดลองใช้เชื้อสัลด์ความเข้มข้นสูง เก็บตัวอย่างน้ำเสียตอนกลางเดือนก่อนไปทางปลายเดือน ดังนั้น ระยะเวลาที่แตกต่างกันมากอาจทำให้คุณสมบัติของน้ำแตกต่างกัน ซึ่งอาจส่งผลให้ค่าจลนพลศาสตร์แตกต่างกันก็เป็นได้

2. ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากเชื้อสัลด์ในการทดลอง เนื่องจาก งานวิจัยชิ้นนี้วิเคราะห์ปริมาณของเชื้อสัลด์ในรูปของเซลล์ซีไอดีแทนของแข็งแขวนลอยซึ่งคลาดเคลื่อนจากการชั่งน้ำหนักได้ง่าย อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ในรูปของเซลล์ซีไอดีก็มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นได้เช่นกัน นั่นคือ น้ำเสียตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์หาค่าเซลล์ซีไอดีจะต้องเขย่าให้ตะกอนในน้ำเสีย

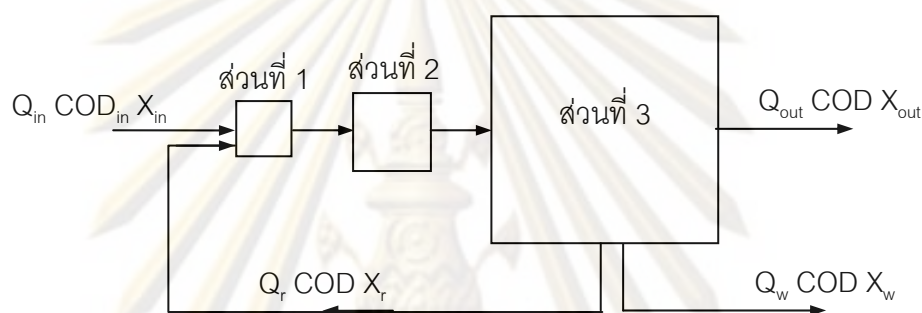
กระจายตัวสม่ำเสมอเสียก่อน มิฉะนั้น ค่าที่ได้จะคลาดเคลื่อนที่ค่อนข้างสูง ดังนั้น ในการทดลองของงานวิจัยชิ้นนี้อาจเกิดความคลาดเคลื่อนดังกล่าวในการวิเคราะห์น้ำเสียตัวอย่างบางชุดก็เป็นได้ ซึ่งเมื่อค่าเซลล์ซีโอดีที่วิเคราะห์ได้มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นก็จะทำให้ค่าจลนพลศาสตร์ที่วิเคราะห์ได้คลาดเคลื่อนตามไปด้วย เพราะถือเป็นตัวแปรสำคัญตัวหนึ่งที่ต้องใช้ในการหาค่าจลนพลศาสตร์

ค่าจลนพลศาสตร์ที่วิเคราะห์ได้ทั้งหมด เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าจากน้ำเสียชุมชนของต่างประเทศและงานวิจัยอื่นๆ พบว่าค่าที่ได้จากการทดลองที่เชื้อสลัดจ์ความเข้มข้นต่ำไม่ใกล้เคียงหรืออยู่ในช่วงเดียวกับค่าจากน้ำเสียชุมชนของต่างประเทศ แต่ใกล้เคียงกับค่า  $\mu_{mH}$  ที่ได้จากงานวิจัยของ Pala และ Bolukbas (2005) และ ชลธิพร สุทธิธรรม และ ศรัณย์ เตชะเสน (2550) ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลองโดยใช้น้ำเสียชุมชนจากแหล่งน้ำเสียที่แตกต่างกัน โดยเป็นน้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนเมือง Izmir ในประเทศตุรกี และ น้ำเสียจากอาคารเจริญวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผสมรวมกับ น้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสียดินแดงตามลำดับ ส่วนค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการทดลองที่เชื้อสลัดจ์ความเข้มข้นสูงนั้น ไม่ใกล้เคียงกับช่วงของค่าที่อ้างอิงจาก มั่นสิน ตันซุลเวสม์ (2525) อีกทั้งผลการทดลองของกรณีนี้มีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง โดยเฉพาะผลการทดลองที่ค่าซีโอดีเริ่มต้น 750 มก./ล. มีความคลาดเคลื่อนสูงมาก และ ไม่สามารถนำไปใช้สร้างกราฟ Monod ได้เลย เมื่อใช้สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งอธิบายผลการทดลองก็ให้ค่าความแม่นยำ ( $R^2$ ) ที่ต่ำมาก แม้แต่สมการของ Hanes ที่ใช้ก็ได้ผลที่ไม่ดีนัก อย่างไรก็ตาม การใช้โปรแกรม AQUASIM สามารถช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้บ้าง แต่ก็ได้ค่าที่ต่ำมากจนเกินไป ดังนั้น ค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการทดลองที่เชื้อสลัดจ์ความเข้มข้นสูงจึงไม่ค่อยน่าเชื่อถือนัก และ ไม่เหมาะสมแก่การนำไปใช้งาน

ค่าจลนพลศาสตร์ที่เหมาะสมแก่การนำไปใช้งานมากที่สุดในบรรดาค่าจลนพลศาสตร์ทั้งหมดที่วิเคราะห์ได้ในงานวิจัยชิ้นนี้ คือ ค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการทดลองที่เชื้อสลัดจ์ความเข้มข้นต่ำ เนื่องด้วยเหตุผลต่างๆ ได้แก่ ให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำ ค่า SEE ที่ได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้มีถึง 2 ค่า คือ  $\mu_{mH}$  และ  $K_{SH}$  ซึ่งสามารถนำไปใช้ออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียได้ละเอียด ชับซ้อน และ หลากหลายรูปแบบมากกว่าใช้ค่า  $K_1$  เพียงค่าเดียว รวมถึงเป็นค่าจลนพลศาสตร์ของน้ำเสียชุมชนที่มีค่าใกล้เคียงกับค่าของน้ำเสียชุมชนจากแหล่งอื่นด้วย

#### 4.7 แบบจำลองของระบบบำบัดน้ำเสียของนนทรี

แบบจำลองของโรงบำบัดน้ำเสียของนนทรีที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม AQUASIM จะนำไปใช้ร่วมกับสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้ง 3 สมการได้แก่ สมการที่ 2.2 2.3 และ 2.6 พร้อมทั้งค่าตัวแปรบางส่วน of โรงบำบัดน้ำเสียของนนทรี ซึ่งค่าจลนพลศาสตร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองจะใช้ค่าที่ได้จากการทดลองที่เชื่อถือได้ความเข้มข้นต่ำ โดยแผนผังแบบจำลองของระบบบำบัดน้ำเสียเป็นดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 แผนผังแบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสียของนนทรี

เนื่องจากระบบแคสส์<sup>TM</sup> ของโรงบำบัดน้ำเสียของนนทรีเป็นระบบแบบเบตซ์ ที่มีฟังก์ชันการทำงานเกิดขึ้นในถังเพียงใบเดียว ดังนั้น เพื่อให้ง่ายแก่การสร้างแบบจำลอง จึงแยกแต่ละส่วนของระบบออกเป็นเหมือนถึงปฏิกิริยา 3 ใบแยกจากกัน โดยสมมติให้ส่วนที่ 1 และ 2 เป็นเหมือนถึงเปล่าๆ เนื่องจากงานวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะกระบวนการบำบัดแบบใช้อากาศ แต่ในส่วนที่ 1 ของระบบนั้นทำหน้าที่เป็นถังคัดพินธุ์ซึ่งเกิดกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ นอกจากนี้ ในปัจจุบันโรงบำบัดน้ำเสียของนนทรี ยังได้ปรับเปลี่ยนการทำงานของระบบให้ส่วนที่ 2 เป็นสถานะไร้อากาศ เช่นเดียวกับส่วนที่ 1 ดังนั้น จึงสมมติให้ปฏิกิริยาทั้งหมดที่เกิดขึ้นจริงอยู่ที่ส่วนที่ 3 เท่านั้น นอกจากนี้ ระบบแคสส์<sup>TM</sup> ยังทำงานเป็นวัฏจักรต่อเนื่องกันและทำงานสลับกันในแต่ละบ่อทำให้เป็นเสมือนระบบแบบต่อเนื่อง ดังนั้น แบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้จะสมมติเพียงแค่อะบบแคสส์<sup>TM</sup> เพียง 1 บ่อเท่านั้นเพื่อให้ง่ายแก่การสร้างแบบจำลอง ด้วยเหตุนี้ อัตราการไหลของน้ำเสียที่เข้าและออกจะถูกปรับลดลงเหลือเพียงที่เข้าระบบแคสส์<sup>TM</sup> 1 บ่อ เท่านั้น โดยตัวแปรทั้งหมดที่ต้องป้อนเข้าแบบจำลองของระบบบำบัดน้ำเสียของนนทรี แสดงดังตารางที่ 4.7

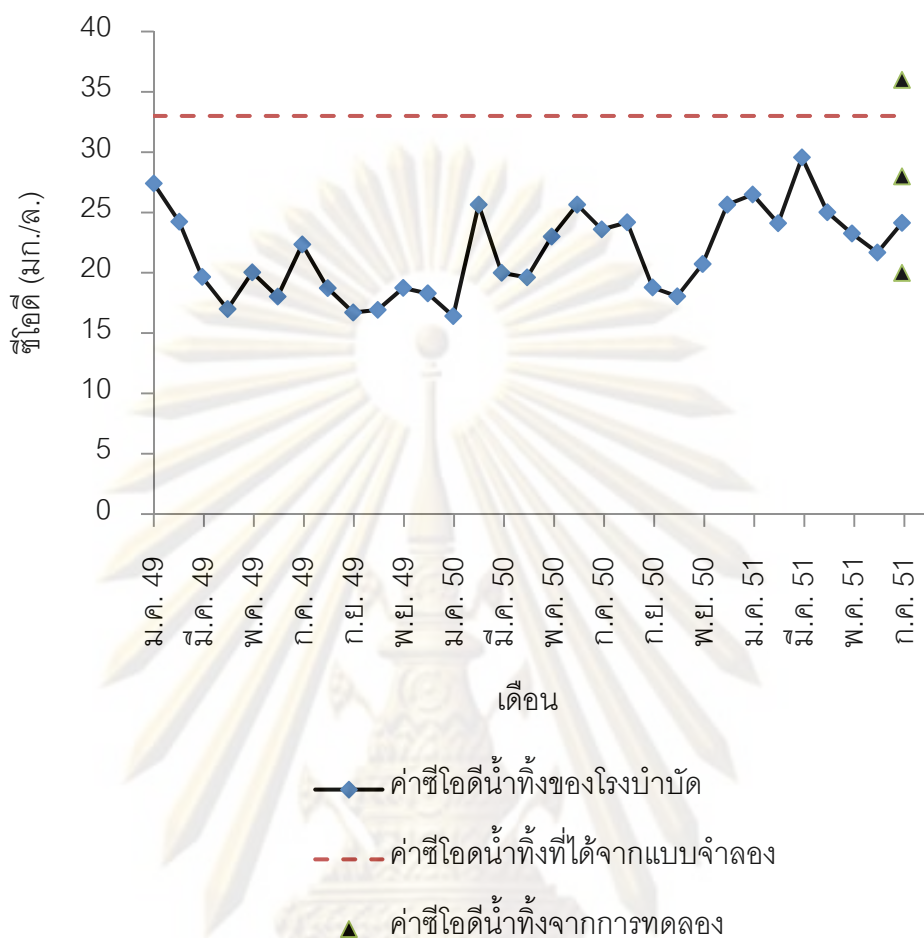
ตารางที่ 4.7 ค่าตัวแปรที่ป้อนเข้าแบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสียชองนนทรี

ตัวแปร		ค่าที่ป้อน	หมายเหตุ
ปริมาตรของบ่อ (ลบ.ม.)	ส่วนที่ 1	262.5	ปริมาตรรวมทั้งบ่อคือ 4,200 ลบ.ม.
	ส่วนที่ 2	525	
	ส่วนที่ 3	4462.5	
อัตราการไหล (ลบ.ม./วัน)	อัตราการไหลเข้า	6,494	อัตราการไหลของ 1 บ่อ
	อัตราการสูบสลัดจ์หมุนเวียน : $Q_r$	1,382.4	
	อัตราการกำจัดสลัดจ์ : $Q_w$	1,555.2	
ค่าซีโอดีของน้ำเสีย (มก./ล.)	ค่าซีโอดีเข้าระบบบำบัดเฉลี่ย : $COD_{in}$	65.69	
	ค่าซีโอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ	33	
ปริมาณสลัดจ์ (มก.เซลล์ซีโอดี/ล.)	เชื้อสลัดจ์ในระบบ : $X$	9,656*	มาจาก MLSS 8,000 มก./ล.
	สลัดจ์ปนในน้ำเสียเข้าระบบบำบัด : $X_{in}$	40.16**	จากวีเอสเอส 28.28 มก./ล.
	สลัดจ์หมุนเวียน : $X_r$	16,898*	มาจาก MLSS
	สลัดจ์ที่นำไปกำจัด : $X_w$	16,898*	14,000 มก./ล.
ค่าปริมาณสัมพันธ์	ค่ายิลด์ : $Y_H$ (มก.เซลล์ซีโอดี/มก.ซีโอดี)	0.25	
ค่าจลนพลศาสตร์	อัตราการเกิดปฏิกิริยาจำเพาะสูงสุด : $\mu_{mH}$ (1/วัน)	2.35	ปรับแก้คุณสมบัติ 27.97 °ซ
	สัมประสิทธิ์การอิ่มตัวครึ่งหนึ่ง : $K_{SH}$ (มก./ล.)	166	
	อัตราการย่อยสลายสลัดจ์ : $b_H$ (1/วัน)	0.835	

\* ค่าที่ได้มาจากการคูณด้วย 0.85 เพื่อเปลี่ยนเป็นค่า วีเอสเอส และ เปลี่ยนหน่วยโดยการคูณต่อด้วย 1.42 มก.เซลล์ซีโอดี/มก.วีเอสเอส

\*\*ค่าที่ได้จากการเปลี่ยนหน่วยโดยการคูณด้วย 1.42 มก.เซลล์ซีโอดี/มก.วีเอสเอส

ค่าตัวแปรที่แสดงในตารางที่ 4.7 คือค่าทั้งหมดที่จำเป็นต้องป้อนลงไปในแบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสียชองนนทรีที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม AQUASIM โดยผลที่ได้จากการใช้แบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสียชองนนทรีทำให้ทราบค่าซีโอดีสุดท้ายที่ออกจากระบบบำบัด ซึ่งมีค่าประมาณ 33 มก./ล. โดยค่าที่ได้นี้จะถูกไปเปรียบเทียบกับข้อมูลค่าซีโอดีของน้ำทิ้งที่โรงบำบัดน้ำเสียชองนนทรีรวบรวมไว้ตลอดปี ในช่วงระยะเวลา 3 ปีย้อนหลัง ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบค่าซีไอได้น้ำทิ้งตลอดปี พ.ศ. 2549 ถึง 2551

จากการเปรียบเทียบค่าที่จำลองได้ แสดงให้เห็นว่าค่าซีไอได้น้ำทิ้งที่ได้จากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าข้อมูลค่าซีไอได้น้ำทิ้งที่ได้จากโรงพยาบาลน้ำเสียของนนทบุรีทั้ง 3 ปีย้อนหลัง อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาให้ละเอียดจะเห็นได้ว่าค่าซีไอได้น้ำทิ้งสูงสุดของโรงพยาบาลอยู่ที่ 30 มก./ล. โดยประมาณ ซึ่งค่อนข้างใกล้เคียงกับค่าซีไอได้น้ำทิ้งที่ได้จากแบบจำลอง นอกจากนี้ ค่าที่ได้จากแบบจำลองยังอยู่ในช่วงกลุ่มข้อมูลของค่าซีไอได้น้ำทิ้งจากการทดลองด้วย แสดงให้เห็นว่าค่าจลนพลศาสตร์ที่วิเคราะห์ได้นั้น สามารถใช้งานร่วมกับระบบบำบัดน้ำเสียของโรงพยาบาลน้ำเสียของนนทบุรีได้ในระดับหนึ่ง

สาเหตุที่ค่าซีไอดีน้ำทิ้งจากแบบจำลอง มีค่าสูงกว่าค่าซีไอดีน้ำทิ้งของโรงบำบัด อาจเนื่องมาจากค่าซีไอดีน้ำทิ้งที่ได้จากโรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรีนั้นเป็นค่าเฉลี่ยในแต่ละเดือน โดยในบางเดือนอาจมีค่าซีไอดีขาออกที่สูง-ต่ำแตกต่างกันมากทำให้เมื่อเฉลี่ยแล้วได้ค่าที่อาจต่ำกว่าที่ควรก็เป็นได้ จึงทำให้ค่าซีไอดีน้ำทิ้งของโรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรีมีค่าโดยรวมต่ำกว่าค่าซีไอดีน้ำทิ้งที่ได้จากแบบจำลอง นอกจากนี้ อาจเกิดจากค่าซีไอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพที่ได้จากการทดลอง ซึ่งป้อนลงในแบบจำลองนั้นมีความคลาดเคลื่อนจากการทดลองทำให้ได้ค่าสูงกว่าที่เป็นจริงก็เป็นได้ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ค่าซีไอดีน้ำทิ้งทั้งหมดที่ได้จากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าค่าซีไอดีน้ำทิ้งของโรงบำบัดน้ำเสียของนนทบุรี



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และ ข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองทั้งหมดที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 สามารถสรุปสั้นๆ เป็นแต่ละข้อได้ดังนี้

1. จากการทดสอบลักษณะสมบัติของน้ำเสียทั้ง 2 แหล่ง ได้แก่ น้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสียช่องนนทรี และ น้ำเสียจากบ่อดักไขมันของโรงอาหารคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าน้ำเสียจากบ่อดักไขมันของโรงอาหารคณะวิศวกรรมศาสตร์ เหมาะสมแก่การนำมาใช้ในการทดลองเป็นอย่างยิ่ง

2. ค่าปริมาณสัมพัทธ์ที่ทำการวิเคราะห์ คือ ค่าอิเล็กโตรนิกเฮเทอโรโพร (Y<sub>H</sub>) จากการทดลองได้ผลดังรูปที่ 4.8 พบว่าค่าอิเล็กโตรนิกเฮเทอโรโพรเท่ากับ 0.25 มก.เซลล์ซีไอดี/มก.ซีไอดี

3. ค่าซีไอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ ซึ่งได้จากการทดลองมีค่าเท่ากับ 16.23% ของค่าซีไอดีละลายน้ำของน้ำเสีย

4. ค่าจลนพลศาสตร์ที่ทำการวิเคราะห์ในงานวิจัยชิ้นนี้ คือ อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของจุลชีพแบบเฮเทอโรโพร ( $\mu_{max}$ ) และ สัมประสิทธิ์การอิ่มตัวครึ่งหนึ่งของจุลชีพแบบเฮเทอโรโพร (K<sub>SH</sub>) ซึ่งค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้คือ คือ  $2.35 \pm 0.11$  1/วัน และ  $166 \pm 18$  มก./ล. ตามลำดับ

5. ค่าจลนพลศาสตร์ที่วิเคราะห์ได้นี้ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่อ้างอิงมาจากแหล่งข้อมูลต่างๆ รวมถึงค่าที่ผ่านการปรับแก้คุณสมบัติด้วย พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่าที่มาจากงานวิจัยอยู่ 2 แหล่ง นั่นคือ งานวิจัยของ Pala และ Bolukbas (2005) และ ชลธิพร สุทธิธรรม และ ศรัณย์ เตชะเสน (2550)

6. การสร้างแบบจำลองของระบบบำบัดน้ำเสียช่องนนทรีด้วยโปรแกรม AQUASIM โดยใช้ค่าจลนพลศาสตร์ที่วิเคราะห์ได้ พบว่าค่าซีไอดีของน้ำทิ้งขาออกที่จำลองได้จากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าค่าซีไอดีขาออกของโรงบำบัดน้ำเสียช่องนนทรีที่รวบรวมไว้ตลอด 3 ปี ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนจากการทดลองของค่าซีไอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ ซึ่งป้อนลงในแบบจำลอง

## 5.2 ความสำคัญด้านวิศวกรรม และการนำไปใช้งาน

ผลที่ได้จากการทำงานวิจัยชิ้นนี้สามารถนำไปใช้งานในด้านต่างๆ ดังนี้

1. โปรแกรม AQUASIM สามารถนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองของระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ค่าตัวแปรอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพได้
2. โปรแกรม AQUASIM สามารถนำไปใช้กับงานอื่นที่เกี่ยวข้องกับระบบน้ำได้นอกเหนือจากระบบบำบัดน้ำเสีย
3. ค่าจลนพลศาสตร์ที่วิเคราะห์ได้จากงานวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบและปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพต่อไปในอนาคต

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

จากการทำงานวิจัยชิ้นนี้ทำให้ผู้ทำงานวิจัยพบประเด็นต่างๆ ที่น่าสนใจ และ เหมาะแก่การนำมาเสนอแนะเป็นแนวทางในการต่อยอดงานวิจัยชิ้นนี้ต่อไปในอนาคต โดยสรุปหัวข้อดังนี้

1. วิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์อีกค่าหนึ่งที่เหลืออยู่ นั่นคือ หาค่าอัตราการย่อยสลายของจุลชีพแบบเฮเทอโรโทรฟ (Heterotroph decay rate;  $b_H$ ) ซึ่งเป็นค่าจลนพลศาสตร์ที่ไม่ได้ทำการวิเคราะห์ในงานวิจัยชิ้นนี้
2. ศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ในกรณีของจุลชีพแบบออโตโทรฟ (Autotroph)
3. ศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ต่างๆ เพิ่มในกรณีของการย่อยสลายแบบไร้อากาศที่เกิดขึ้นในส่วนของถังคัดพินธุ์ ซึ่งไม่ได้นำมาพิจารณาในงานวิจัยชิ้นนี้
4. ศึกษาค่าจลนพลศาสตร์โดยการใช้ระบบจำลองแบบไหลต่อเนื่องอย่างระบบจำลองของระบบเอส ในการทดลองแทนการทดลองแบบแบตช์ที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้
5. ศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์อื่นๆ เช่น GPS-X, SSSP, WEST เป็นต้น และเปรียบเทียบผลที่ได้ รวมถึง ความยากง่ายในการใช้งาน
6. ศึกษาค่าจลนพลศาสตร์โดยใช้น้ำเสียจากแหล่งอื่นๆ ซึ่งเป็นตัวแทนของอาคารประเภทต่างๆ และมีคุณสมบัติของน้ำเสียที่แตกต่างกัน เพื่อรวบรวมเป็นฐานข้อมูลในการนำไปใช้ในการออกแบบและปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียซึ่งรองรับน้ำเสียเหล่านั้นต่อไปในอนาคต



## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

กรุงเทพมหานคร, สำนักการระบายน้ำ, สำนักงานจัดการคุณภาพน้ำ. โรงควบคุมคุณภาพน้ำช่องนนทรี[Online]. (ม.ป.ป.). แหล่งที่มา : <http://dds.bma.go.th/yannawa.htm>[2549, พฤศจิกายน 28]

โกลบอล ยูทิลิตี้ เซอร์วิส จำกัด, บริษัท. ตารางสรุปข้อมูลคุณภาพน้ำรายเดือนประจำปี 2549-2551 โรงควบคุมคุณภาพน้ำช่องนนทรี[Computer file]. (ม.ป.ป.). แหล่งที่มา : โรงควบคุมคุณภาพน้ำช่องนนทรี[2551, สิงหาคม 15]

ชลธิพร สุทธิธรรม และ ศรัณย์ เตชะเสน. การศึกษาค่าจุลชีววิทยาของระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนในกรุงเทพมหานครและการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของโรงบำบัดน้ำเสียดินแดง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.

ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กระทรวง. กรมควบคุมมลพิษ. มาตรฐานคุณภาพน้ำ [Online]. (ม.ป.ป.). แหล่งที่มา : [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/reg\\_std\\_water04.html#s3](http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html#s3)[2550, กุมภาพันธ์ 26]

ธงชัย พรรณสวัสดิ์. การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 2.

กรุงเทพมหานคร: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545.

มันสิน ตันกุลเวศม์. ระบบกำจัดน้ำเสียโดยวิธีชีววิทยา. เล่มที่ 2. พิมพ์ครั้งที่ 1.

กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2525.

### ภาษาอังกฤษ

American Public Health Association, American Water Work Association, and Water Environment Federation. Standard method for the examination of water and wastewater. 20<sup>th</sup> ed. Baltimore: United Book Press, 1998.

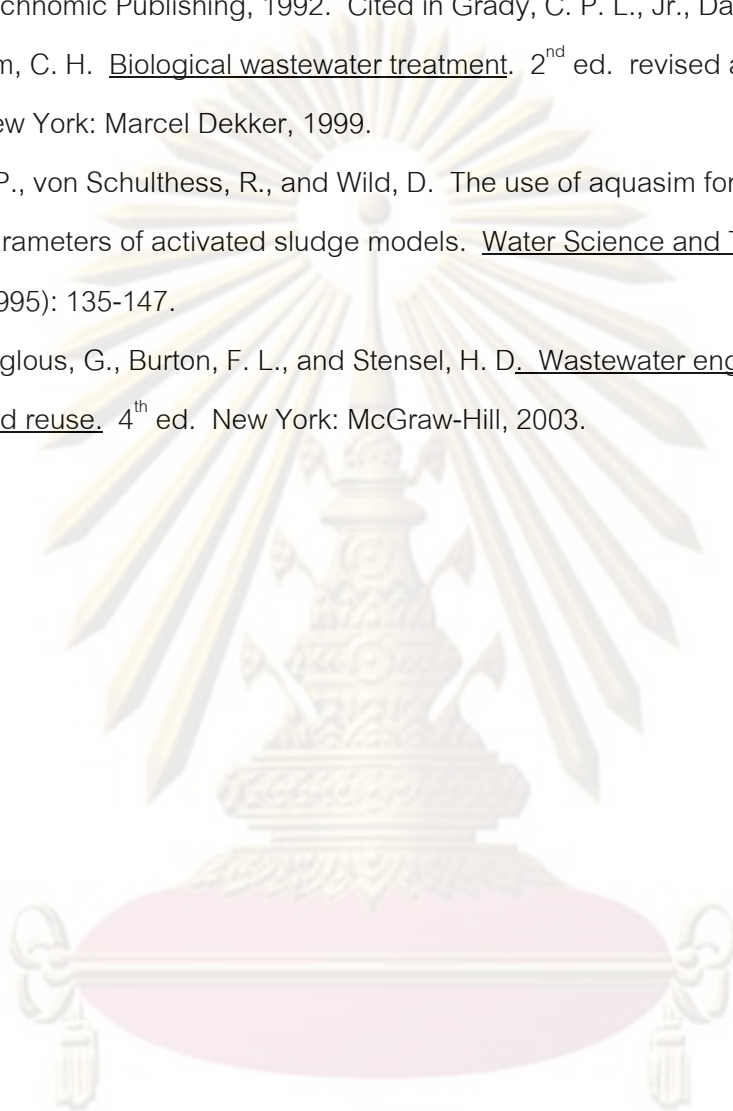
Cheng, C. Y., and Ribarova, I. Activated sludge system modelling and simulations for improving the effluent water quality. Water Science and Technology 39 (1999): 93-98.

- Demoulin, G., Goronszy, M. C., Wutscher, K., and Forsthuber, E. Co-Current nitrification/denitrification and biological P-removal in cyclic activated sludge plants by redox controlled cycle operation. Water Science and Technology 35 (1997): 215-224.
- Demoulin, G., Rudiger, A., and Goronszy, M. C. Cyclic activated sludge technology - recent operating experience with a 90,000 p.e. plant in Germany. Water Science and Technology 43 (2001): 331-337.
- Grady, C. P. L., Jr., Daigger, G. T., and Lim, C. H. Biological wastewater treatment. 2<sup>nd</sup> ed. revised and expanded. New York: Marcel Dekker, 1999.
- Grady, C. P. L., Jr., Aichinger, G., Cooper, S. F., and Naziruddin, M. Proceeding of the 1989 AWMA/EPA international symposium on hazardous waste treatment : biosystems for pollution control. Pittsburgh: Air and Waste Management Association, 1989. Cited in Grady, C. P. L., Jr., Daigger, G. T., and Lim, C. H. Biological wastewater treatment. 2<sup>nd</sup> ed. revised and expanded. New York: Marcel Dekker, 1999.
- Henze, M., Gujer, W., Mino, T., and van Loosdrecht, M. Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2D and ASM3. 1<sup>st</sup> ed. Scientific and technical report No 9. London: IWA publishing, 2000.
- Holman, J.P. Experiment methods for engineers. 7<sup>th</sup> ed. Boston: McGraw-Hill, 2001.
- Kirkwood, S. Yannawa wastewater treatment plant (Bangkok, Thailand): design, construction and operation. Water Science and Technology 50 (2004): 221-228.
- Novak, L., Goronszy, M. C., and Wanner, J. Dynamic mathematical modeling of sequencing batch reactors with aerated and mixed filling period. Water Science and Technology 35(1997): 105-112.
- Nuhoglu, A., Keskinler, B., and Yildiz, E. Mathematical modelling of the activated sludge process-the Erzincan case. Process Biochemistry 40 (2005): 2467-2473.
- Pala, A., and Bolukbas, O. Evaluation of kinetic parameters for biological CNP removal from a municipal wastewater through batch tests. Process Biochemistry 40 (2005): 629-635.

Randall, C. W., Stensel, H.D., and Barnard, J. L. Design and retrofit of wastewater treatment plants for biological nutrient removal. Lancaster, Pennsylvania: Technomic Publishing, 1992. Cited in Grady, C. P. L., Jr., Daigger, G. T., and Lim, C. H. Biological wastewater treatment. 2<sup>nd</sup> ed. revised and expanded. New York: Marcel Dekker, 1999.

Reichert, P., von Schulthess, R., and Wild, D. The use of aquasim for estimating parameters of activated sludge models. Water Science and Technology 31 (1995): 135-147.

Tchobanoglous, G., Burton, F. L., and Stensel, H. D. Wastewater engineering treatment and reuse. 4<sup>th</sup> ed. New York: McGraw-Hill, 2003.



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

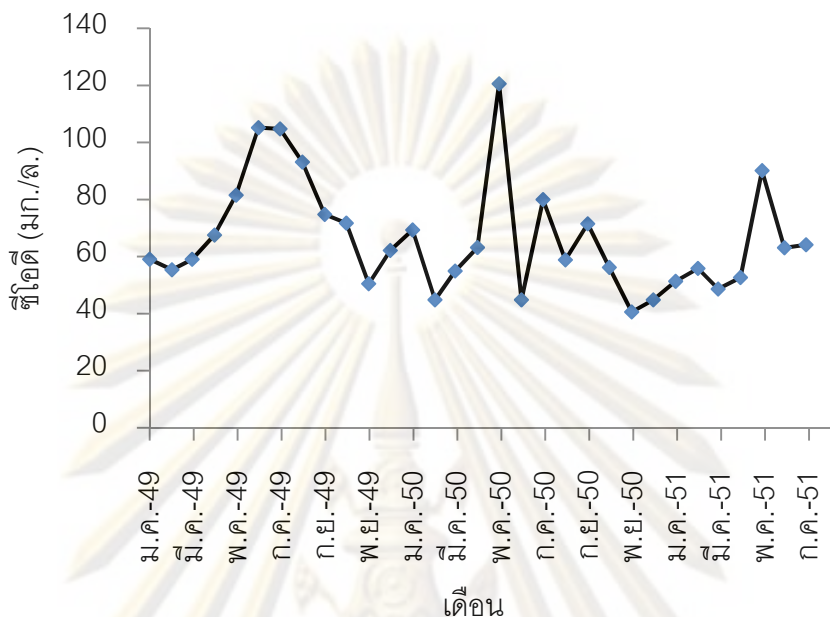
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



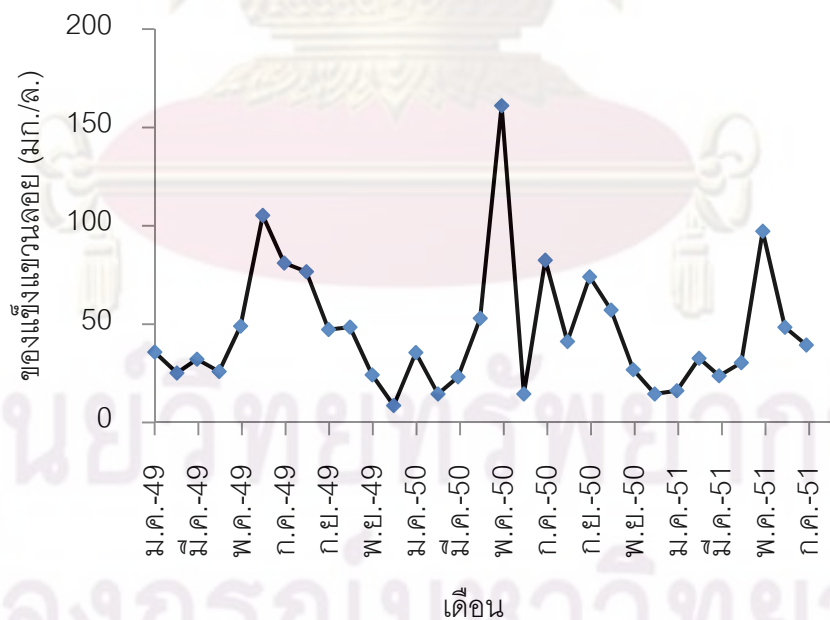
ภาคผนวก ก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

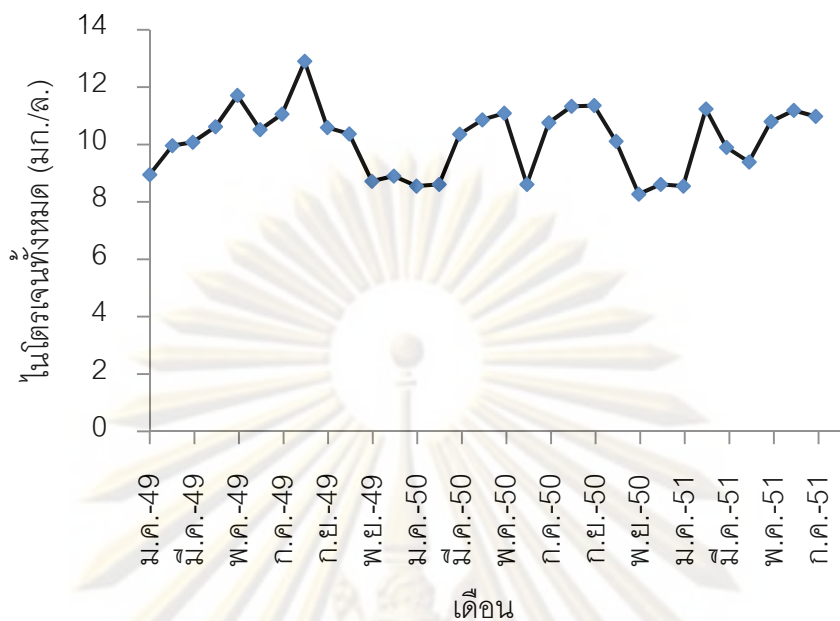
1. ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสียชองนนทรี



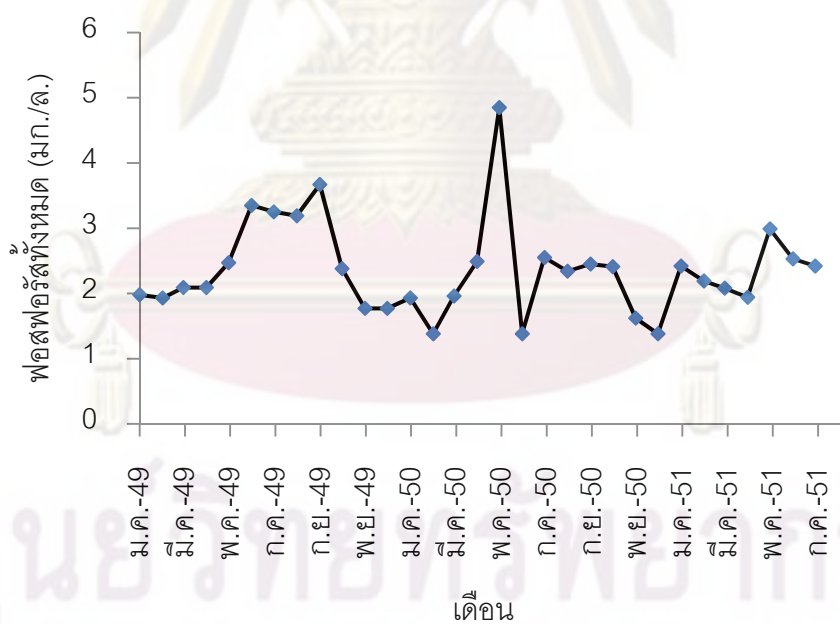
รูปที่ ก.1 ค่าซีโอดีน้ำเสียเข้าระบบบำบัดตลอดปี 2549 ถึง 2551  
(บริษัท โกลบอล ยูทิลิตี้ เซอร์วิส จำกัด, 2551)



รูปที่ ก.2 ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียเข้าระบบบำบัดตลอดปี 2549 ถึง 2551  
(บริษัท โกลบอล ยูทิลิตี้ เซอร์วิส จำกัด, 2551)



รูปที่ 3.3 ค่าไนโตรเจนทั้งหมดของน้ำเสียเข้าระบบบำบัดตลอดปี 2549 ถึง 2551 (บริษัท โกลบอล ยูทิลิตี้ เซอร์วิส จำกัด, 2551)



รูปที่ 3.4 ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดของน้ำเสียเข้าระบบบำบัดตลอดปี 2549 ถึง 2551 (บริษัท โกลบอล ยูทิลิตี้ เซอร์วิส จำกัด, 2551)

ศูนย์บริการวิชาการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## 1. ข้อมูลดิบจากการทดลอง

### 1.1 การทดสอบลักษณะสมบัติของน้ำเสียตัวอย่าง

ผลการทดลองจากรูปที่ 4.1 มาจากข้อมูลดิบในตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 ผลการทดลองของน้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสียช่องนนทรี

วัน/เวลา เก็บตัวอย่างน้ำ	เวลา (วัน)	ซีโอดี (มก./ล.)			
		ก่อนกรอง	ก่อนกรองเฉลี่ย	หลังกรอง	หลังกรองเฉลี่ย
5/2/2008 13:01	0	941.32	957.48	41.21	39.59
5/2/2008 13:01	0	965.56		37.98	
5/2/2008 13:01	0	965.56		39.59	
5/2/2008 14:05	0.0444			36.36	37.44
5/2/2008 14:05	0.0444			34.74	
5/2/2008 14:05	0.0444			41.21	
5/2/2008 15:16	0.0937			37.98	38.51
5/2/2008 15:16	0.0937			41.21	
5/2/2008 15:16	0.0937			36.36	
5/2/2008 17:04	0.1687			41.21	38.51
5/2/2008 17:04	0.1687			37.98	
5/2/2008 17:04	0.1687			36.36	
5/2/2008 19:13	0.2583			31.51	33.13
5/2/2008 19:13	0.2583			31.51	
5/2/2008 19:13	0.2583			36.36	
6/2/2008 7:30	0.7701	35.43	33.78		
6/2/2008 7:30	0.7701	32.14			
6/2/2008 7:30	0.7701	33.78			
6/2/2008 11:10	0.9229	33.78	33.78		
6/2/2008 11:10	0.9229	35.43			
6/2/2008 11:10	0.9229	32.14			
6/2/2008 15:53	1.1194	38.73	35.98		
6/2/2008 15:53	1.1194	35.43			
6/2/2008 15:53	1.1194	33.78			

ผลการทดลองจากรูปที่ 4.2 มาจากข้อมูลดิบในตารางที่ ข.2

ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองของน้ำเสียจากโรงอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์

วัน/เวลา เก็บตัวอย่างน้ำ	เวลา (วัน)	ซีโอดี (มก./ล.)			
		ก่อนกรอง	ก่อนกรองเฉลี่ย	หลังกรอง	หลังกรองเฉลี่ย
6/2/2008 7:24	0	778.68		43.67	
6/2/2008 7:24	0	770.44	770.44	45.32	43.67
6/2/2008 7:24	0	762.20		42.02	
6/2/2008 8:46	0.0569			38.73	
6/2/2008 8:46	0.0569			33.78	35.98
6/2/2008 8:46	0.0569			35.43	
6/2/2008 9:48	0.1			22.25	
6/2/2008 9:48	0.1			18.95	21.7
6/2/2008 9:48	0.1			23.90	
6/2/2008 11:08	0.1556			18.95	
6/2/2008 11:08	0.1556			22.25	20.05
6/2/2008 11:08	0.1556			18.95	
6/2/2008 13:11	0.241			18.95	
6/2/2008 13:11	0.241			17.30	18.95
6/2/2008 13:11	0.241			20.60	
6/2/2008 15:51	0.3521			22.25	
6/2/2008 15:51	0.3521			17.30	19.5
6/2/2008 15:51	0.3521			18.95	
6/2/2008 17:10	0.4069			18.95	
6/2/2008 17:10	0.4069			20.60	20.6
6/2/2008 17:10	0.4069			22.25	

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 1.2 การทดลองที่เชื้อสลดจ์ความเข้มข้นต่ำ

ผลการทดลองจากรูปที่ 4.3 และ 4.6 มาจากข้อมูลดิบในตารางที่ ข.3 ถึง ข.7

ตารางที่ ข.3 ผลการทดลองของน้ำเสียซีโอดีเริ่มต้น 550 มก./ล.

วัน/เวลา เก็บตัวอย่างน้ำ	เวลา (วัน)	ซีโอดี (มก./ล.)				เซลล์ซีโอดี (มก.เซลล์ ซีโอดี/ล.)
		ก่อนกรอง	ก่อนกรอง เฉลี่ย	หลังกรอง	หลังกรอง เฉลี่ย	
6/1/2008 13:15	0	591.36		552.96		
6/1/2008 13:15	0	587.52	587.52	560.64	556.80	30.72
6/1/2008 13:15	0	583.68		556.80		
6/1/2008 16:17	0.1264	579.84		545.28		
6/1/2008 16:17	0.1264	591.36	583.68	545.28	545.28	38.40
6/1/2008 16:17	0.1264	579.84		545.28		
6/1/2008 18:22	0.2132	595.20		545.28		
6/1/2008 18:22	0.2132	583.68	588.80	547.20	547.20	41.60
6/1/2008 18:22	0.2132	587.52		549.12		
6/1/2008 20:21	0.2958	595.20		549.12		
6/1/2008 20:21	0.2958	591.36	592.64	537.60	543.36	49.28
6/1/2008 20:21	0.2958	591.36		543.36		
7/1/2008 12:37	0.9736	327.17		259.58		
7/1/2008 12:37	0.9736	330.24	328.70	259.58	257.54	71.17
7/1/2008 12:37	0.9736	328.70		253.44		
7/1/2008 16:32	1.1368	284.16		187.39		
7/1/2008 16:32	1.1368	287.23	284.67	219.65	203.26	81.41
7/1/2008 16:32	1.1368	282.62		202.75		
8/1/2008 11:54	1.9437	214.40		97.60		
8/1/2008 11:54	1.9437	209.60	212.27	91.20	94.93	117.33
8/1/2008 11:54	1.9437	212.80		96.00		
8/1/2008 18:17	2.2097	206.40		92.80		
8/1/2008 18:17	2.2097	211.20	208.00	88.00	88.53	119.47
8/1/2008 18:17	2.2097	206.40		84.80		
8/1/2008 20:45	2.3125	201.60		84.80		
8/1/2008 20:45	2.3125	206.40	203.73	89.60	87.47	116.27
8/1/2008 20:45	2.3125	203.20		88.00		

ตารางที่ ข.4 ผลการทดลองของน้ำเสียซีโอดีเริ่มต้น 280 มก./ล.

วัน/เวลา เก็บตัวอย่างน้ำ	เวลา (วัน)	ซีโอดี (มก./ล.)				เซลล์ซีโอดี (มก,เซลล์ ซีโอดี/ล.)
		ก่อนกรอง	ก่อนกรอง เจลลี่	หลังกรอง	หลังกรอง เจลลี่	
6/1/2008 13:15	0	318.00		290.00		
6/1/2008 13:15	0	316.00	318.00	284.00	287.33	30.67
6/1/2008 13:15	0	320.00		288.00		
6/1/2008 16:15	0.125	324.00		284.00		
6/1/2008 16:15	0.125	320.00	318.67	286.00	286.00	32.67
6/1/2008 16:15	0.125	312.00		288.00		
6/1/2008 18:19	0.2111	324.00		284.00		
6/1/2008 18:19	0.2111	318.00	320.67	290.00	288.67	32.00
6/1/2008 18:19	0.2111	320.00		292.00		
6/1/2008 20:19	0.2944	318.16		280.00		
6/1/2008 20:19	0.2944	321.26	320.23	281.60	281.07	39.16
6/1/2008 20:19	0.2944	321.26		281.60		
7/1/2008 12:35	0.9722	198.66		142.40		
7/1/2008 12:35	0.9722	204.86	199.69	144.00	145.07	54.62
7/1/2008 12:35	0.9722	195.55		148.80		
7/1/2008 16:29	1.1347	190.90		131.20		
7/1/2008 16:29	1.1347	197.10	195.55	134.40	133.87	61.69
7/1/2008 16:29	1.1347	198.66		136.00		
8/1/2008 11:59	1.9472	139.20		56.00		
8/1/2008 11:59	1.9472	145.60	141.33	52.80	54.40	86.93
8/1/2008 11:59	1.9472	139.20		54.40		
8/1/2008 18:19	2.2111	139.20		44.80		
8/1/2008 18:19	2.2111	129.60	134.93	51.20	50.13	84.80
8/1/2008 18:19	2.2111	136.00		54.40		
8/1/2008 20:45	2.3125	132.80		52.80		
8/1/2008 20:45	2.3125	132.80	133.87	48.00	50.67	83.20
8/1/2008 20:45	2.3125	136.00		51.20		

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองของน้ำเสียซีโอดีเริ่มต้น 140 มก./ล.

วัน/เวลา เก็บตัวอย่างน้ำ	เวลา (วัน)	ซีโอดี (มก./ล.)				เซลล์ซีโอดี (มก.เซลล์ ซีโอดี/ล.)
		ก่อนกรอง	ก่อนกรอง เจลลี่	หลังกรอง	หลังกรอง เจลลี่	
6/1/2008 13:15	0	175.20		146.40		
6/1/2008 13:15	0	175.20	174.13	143.20	143.73	30.40
6/1/2008 13:15	0	172.00		141.60		
6/1/2008 16:15	0.125	172.00		144.80		
6/1/2008 16:15	0.125	173.60	173.60	140.00	142.13	31.47
6/1/2008 16:15	0.125	175.20		141.60		
6/1/2008 18:19	0.2111	170.40		143.20		
6/1/2008 18:19	0.2111	173.60	172.00	140.00	141.60	30.40
6/1/2008 18:19	0.2111	172.00		141.60		
6/1/2008 20:19	0.2944	167.20		143.20		
6/1/2008 20:19	0.2944	175.20	171.47	144.80	142.67	28.80
6/1/2008 20:19	0.2944	172.00		140.00		
7/1/2008 12:35	0.9722	124.00		87.20		
7/1/2008 12:35	0.9722	125.60	126.13	82.40	85.07	41.07
7/1/2008 12:35	0.9722	128.80		85.60		
7/1/2008 16:29	1.1347	122.40		77.60		
7/1/2008 16:29	1.1347	122.40	121.87	72.80	75.47	46.40
7/1/2008 16:29	1.1347	120.80		76.00		
8/1/2008 12:01	1.9486	84.80		25.60		
8/1/2008 12:01	1.9486	86.40	86.93	25.60	25.07	61.87
8/1/2008 12:01	1.9486	89.60		24.00		
8/1/2008 18:20	2.2118	80.00		22.40		
8/1/2008 18:20	2.2118	84.80	81.07	27.20	24.53	56.53
8/1/2008 18:20	2.2118	78.40		24.00		

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.6 ผลการทดลองของน้ำเสียซีโอดีเริ่มต้น 70 มก./ล.

วัน/เวลา เก็บตัวอย่างน้ำ	เวลา (วัน)	ซีโอดี (มก./ล.)				เซลล์ซีโอดี (มก.เซลล์ ซีโอดี/ล.)
		ก่อนกรอง	ก่อนกรอง เจลลี่	หลังกรอง	หลังกรอง เจลลี่	
6/1/2008 13:15	0	102.40		70.40		
6/1/2008 13:15	0	100.80	100.80	72.00	72.53	28.27
6/1/2008 13:15	0	99.20		75.20		
6/1/2008 15:39	0.1	102.40		68.80		
6/1/2008 15:39	0.1	96.00	99.20	72.00	71.47	27.73
6/1/2008 15:39	0.1	99.20		73.60		
6/1/2008 17:50	0.191	97.60		75.20		
6/1/2008 17:50	0.191	102.40	100.27	76.80	75.20	25.07
6/1/2008 17:50	0.191	100.80		73.60		
6/1/2008 20:10	0.2882	100.80		73.60		
6/1/2008 20:10	0.2882	97.60	99.20	72.00	72.53	26.67
6/1/2008 20:10	0.2882	99.20		72.00		
7/1/2008 11:19	0.9194	64.00		19.20		
7/1/2008 11:19	0.9194	64.00	63.47	14.40	18.80	45.33
7/1/2008 11:19	0.9194	62.40		22.80		
7/1/2008 16:24	1.1312	57.60		19.20		
7/1/2008 16:24	1.1312	56.00	57.07	11.20	14.93	42.13
7/1/2008 16:24	1.1312	57.60		14.40		

ตารางที่ ข.7 ผลการทดลองของน้ำเสียซีโอดีเริ่มต้น 30 มก./ล.

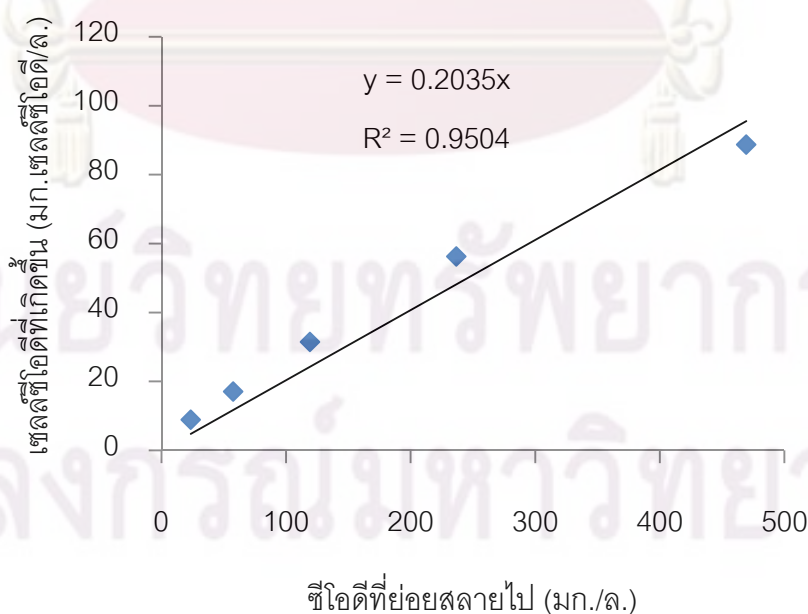
วัน/เวลา เก็บตัวอย่างน้ำ	เวลา (วัน)	ซีโอดี (มก./ล.)				เซลล์ซีโอดี (มก.เซลล์ ซีโอดี/ล.)
		ก่อนกรอง	ก่อนกรอง เจลลี่	หลังกรอง	หลังกรอง เจลลี่	
6/1/2008 13:15	0	58.02		28.22		
6/1/2008 13:15	0	59.58	60.11	29.79	29.79	30.31
6/1/2008 13:15	0	62.72		31.36		
6/1/2008 15:37	0.0986	61.15		29.79		
6/1/2008 15:37	0.0986	64.29	62.20	31.36	30.31	31.88
6/1/2008 15:37	0.0986	61.15		29.79		
6/1/2008 17:49	0.1903	61.15		26.66		
6/1/2008 17:49	0.1903	62.72	61.67	28.22	28.22	33.45
6/1/2008 17:49	0.1903	61.15		29.79		
6/1/2008 20:09	0.2875	62.72		28.22		
6/1/2008 20:09	0.2875	59.58	60.11	25.09	27.70	32.41
6/1/2008 20:09	0.2875	58.02		29.79		
7/1/2008 11:18	0.9187	47.04		10.98		
7/1/2008 11:18	0.9187	47.04	48.09	6.27	8.89	39.20
7/1/2008 11:18	0.9187	50.18		9.41		
7/1/2008 16:25	1.1319	43.90		7.84		
7/1/2008 16:25	1.1319	39.20	41.29	6.27	6.27	35.02
7/1/2008 16:25	1.1319	40.77		4.70		

ผลการทดลองจากรูปที่ 4.4 มาจากการนำข้อมูลต่างๆ จากตารางที่ ข.3 ถึง ข.7 ได้แก่ ค่าซีโอดีหลังกรองเฉลี่ยค่าแรก และ สุดท้าย ของน้ำเสียแต่ละความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้น ทั้งสองค่า เมื่อนำมาลบกันจะได้ปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัดไป ส่วนค่าเซลล์ซีโอดีเริ่มต้น และ เพิ่มขึ้นสูงสุด เมื่อนำมาลบกันจะได้ค่าเซลล์ซีโอดีที่เกิดขึ้น ดังนั้น จะได้ข้อมูลดิบที่ใช้สร้างกราฟรูปที่ 4.4 ดัง ตารางที่ ข.9

ตารางที่ ข.8 ข้อมูลดิบที่ใช้ในการหาค่ายิลด์ของจุลชีพ

ซีโอดีหลังกรอง (มก./ล.)		เซลล์ซีโอดี (มก.เซลล์ซีโอดี/ล.)		ซีโอดีที่ถูก กำจัดไป (มก./ล.)	เซลล์ซีโอดี ที่เกิดขึ้น (มก.เซลล์ซีโอดี/ล.)
เริ่มต้น	หลงเหลือ	เริ่มต้น	เพิ่มขึ้นสูงสุด		
556.80	87.47	30.72	119.47	469.33	88.75
287.33	50.67	30.67	86.94	236.67	56.27
143.73	24.53	30.40	61.87	119.20	31.47
72.53	14.93	28.27	45.34	57.60	17.07
29.79	6.27	30.31	39.20	23.52	8.89

ข้อมูลที่ใช้ในการสร้างกราฟหาค่ายิลด์ดังรูปที่ 4.4 มาจากข้อมูลที่ค่าซีโอดีเริ่มต้น 280 140 70 และ 30 มก./ล. เท่านั้น ไม่รวมข้อมูลที่ค่าซีโอดีเริ่มต้น 550 มก./ล. เนื่องจาก เมื่อรวมข้อมูลที่ค่าซีโอดีเริ่มต้น 550 มก./ล. เข้าไปด้วยจะทำให้เส้นกราฟที่ได้คลาดเคลื่อนบางส่วน และทำให้ค่ายิลด์ที่ได้มีค่าต่ำลง ดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 ผลการทดลองหาค่ายิลด์เมื่อรวมข้อมูลจากค่าซีโอดีเริ่มต้นทั้งหมด 5 ชุด

ผลการทดลองจากรูปที่ 4.5 มาจากการนำค่าซีโอดีหลังกรองเฉลี่ยค่าแรก และสุดท้าย ในตารางที่ ข.3 ถึง ข.7 มาสร้างกราฟ โดยข้อมูลดิบที่ใช้สร้างกราฟรูปที่ 4.5 เป็นดังตารางที่ ข.9

ตารางที่ ข.9 ข้อมูลดิบที่ใช้ในการหาค่าซีโอดีที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ

ซีโอดีละลายน้ำเริ่มต้น	ซีโอดีละลายน้ำที่หลงเหลืออยู่
556.80	87.47
287.33	50.67
143.73	24.53
72.53	14.93
29.79	6.27

### 1.3 การทดลองที่เชื่อถือได้ความเข้มข้นสูง

ผลการทดลองจากรูปที่ 4.12 มาจากข้อมูลดิบในตารางที่ ข.10 ถึง ข.13

ตารางที่ ข.10 ผลการทดลองของน้ำเสียซีโอดีเริ่มต้น 750 มก./ล.

วัน/เวลา เก็บตัวอย่างน้ำ	เวลา (วัน)	ซีโอดี (มก./ล.)			
		ก่อนกรอง	ก่อนกรอง เจลย	หลังกรอง	หลังกรอง เจลลีย
5/12/2007 15:03	0.00	1341.99		764.36	
5/12/2007 15:03	0.00	1302.79	1311.07	764.36	759.19
5/12/2007 15:03	0.00	1288.43		748.84	
5/12/2007 16:01	0.0403			679.00	
5/12/2007 16:01	0.0403			675.12	677.71
5/12/2007 16:01	0.0403			679.00	
5/12/2007 17:03	0.0833			459.51	
5/12/2007 17:03	0.0833			454.81	455.85
5/12/2007 17:03	0.0833			453.24	
6/12/2007 11:20	0.8451			60.05	
6/12/2007 11:20	0.8451			63.19	62.15
6/12/2007 11:20	0.8451			63.19	
6/12/2007 14:20	0.9701			53.78	
6/12/2007 14:20	0.9701			55.35	54.31
6/12/2007 14:20	0.9701			53.78	
6/12/2007 16:15	1.0500			60.05	
6/12/2007 16:15	1.0500			66.33	60.05
6/12/2007 16:15	1.0500			53.78	



ตารางที่ ข.11 ผลการทดลองของน้ำเสียซีโอดีเริ่มต้น 550 มก./ล.

วัน/เวลา เก็บตัวอย่างน้ำ	เวลา (วัน)	ซีโอดี (มก./ล.)			
		ก่อนกรอง	ก่อนกรอง เจลลี่	หลังกรอง	หลังกรอง เจลลี่
5/12/2007 12:09	0	1251.05		547.62	
5/12/2007 12:09	0	1272.55	1271.32	559.38	550.24
5/12/2007 12:09	0	1290.35		543.70	
5/12/2007 13:05	0.0389			497.25	
5/12/2007 13:05	0.0389			495.29	503.13
5/12/2007 13:05	0.0389			516.85	
5/12/2007 14:04	0.0799			448.25	
5/12/2007 14:04	0.0799			442.37	443.03
5/12/2007 14:04	0.0799			438.45	
5/12/2007 15:05	0.1222			361.15	
5/12/2007 15:05	0.1222			362.74	362.74
5/12/2007 15:05	0.1222			364.32	
5/12/2007 16:03	0.1625			272.45	
5/12/2007 16:03	0.1625			264.53	268.75
5/12/2007 16:03	0.1625			269.28	
5/12/2007 17:05	0.2056			167.90	
5/12/2007 17:05	0.2056			171.07	170.02
5/12/2007 17:05	0.2056			171.07	
6/12/2007 11:18	0.9646			45.94	
6/12/2007 11:18	0.9646			42.77	44.35
6/12/2007 11:18	0.9646			44.35	
6/12/2007 14:22	1.0924			44.35	
6/12/2007 14:22	1.0924			49.10	45.94
6/12/2007 14:22	1.0924			44.35	
6/12/2007 16:21	1.1750			39.60	
6/12/2007 16:21	1.1750			47.52	43.82
6/12/2007 16:21	1.1750			44.35	

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.12 ผลการทดลองของน้ำเสียซีโอดีเริ่มต้น 180 มก./ล.

วัน/เวลา เก็บตัวอย่างน้ำ	เวลา (วัน)	ซีโอดี (มก./ล.)			
		ก่อนกรอง	ก่อนกรอง เจลลี่	หลังกรอง	หลังกรอง เจลลี่
30/10/2007 15:58	0	1061.28		191.66	
30/10/2007 15:58	0	1069.20	1069.20	174.24	180.05
30/10/2007 15:58	0	1077.12		174.24	
30/10/2007 16:55	0.0396			142.56	
30/10/2007 16:55	0.0396			140.98	143.09
30/10/2007 16:55	0.0396			145.73	
30/10/2007 17:57	0.0826			104.54	
30/10/2007 17:57	0.0826			109.30	107.18
30/10/2007 17:57	0.0826			107.71	
30/10/2007 18:58	0.1250			86.18	
30/10/2007 18:58	0.1250			89.22	86.69
30/10/2007 18:58	0.1250			84.66	
30/10/2007 19:59	0.1674			64.90	
30/10/2007 19:59	0.1674			64.90	64.40
30/10/2007 19:59	0.1674			63.38	
30/10/2007 21:05	0.2132			49.70	
30/10/2007 21:05	0.2132			46.66	47.17
30/10/2007 21:05	0.2132			45.14	
31/10/2007 9:22	0.7250			20.82	
31/10/2007 9:22	0.7250			22.34	22.85
31/10/2007 9:22	0.7250			25.38	
31/10/2007 11:50	0.8278			26.90	
31/10/2007 11:50	0.8278			42.10	31.97
31/10/2007 11:50	0.8278			26.90	
31/10/2007 14:18	0.9306			28.42	
31/10/2007 14:18	0.9306			25.38	26.40
31/10/2007 14:18	0.9306			25.38	

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.13 ผลการทดลองของน้ำเสียซีโอดีเริ่มต้น 140 มก./ล.

วัน/เวลา เก็บตัวอย่างน้ำ	เวลา (วัน)	ซีโอดี (มก./ล.)			
		ก่อนกรอง	ก่อนกรอง เจลลี่	หลังกรอง	หลังกรอง เจลลี่
5/12/2007 10:58	0	976.08		143.47	
5/12/2007 10:58	0	968.24	989.15	137.20	139.81
5/12/2007 10:58	0	1023.12		138.77	
5/12/2007 12:08	0.0486			108.98	
5/12/2007 12:08	0.0486			104.27	106.89
5/12/2007 12:08	0.0486			107.41	
5/12/2007 13:06	0.0889			82.32	
5/12/2007 13:06	0.0889			80.75	79.18
5/12/2007 13:06	0.0889			74.48	
5/12/2007 14:03	0.1285			50.96	
5/12/2007 14:03	0.1285			49.39	51.48
5/12/2007 14:03	0.1285			54.10	
5/12/2007 15:04	0.1708			41.55	
5/12/2007 15:04	0.1708			39.98	38.94
5/12/2007 15:04	0.1708			35.28	
5/12/2007 16:02	0.2111			44.69	
5/12/2007 16:02	0.2111			32.14	38.42
5/12/2007 16:02	0.2111			38.42	
5/12/2007 17:04	0.2542			35.28	
5/12/2007 17:04	0.2542			33.71	34.76
5/12/2007 17:04	0.2542			35.28	
6/12/2007 11:19	1.0146			30.58	
6/12/2007 11:19	1.0146			32.14	32.67
6/12/2007 11:19	1.0146			35.28	
6/12/2007 16:19	1.2229			35.28	
6/12/2007 16:19	1.2229			32.14	32.14
6/12/2007 16:19	1.2229			29.01	

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ค

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 1. วิธีการคำนวณ

### 1.1 การหาค่าจลนพลศาสตร์ด้วยสมการ Monod

การหาค่าจลนพลศาสตร์ด้วยสมการของ Monod มีหลายขั้นตอน ดังนั้น จึงแสดงการคำนวณและวิธีทำอย่างละเอียดเฉพาะข้อมูลจากผลการทดลองที่เชื้อสัดจ์ความเข้มข้นต่ำเท่านั้น ส่วนการทดลองที่เชื้อสัดจ์ความเข้มข้นสูงจะแสดงเป็นตารางข้อมูลแทน

#### 1.1.1 ผลการทดลองที่เชื้อสัดจ์ความเข้มข้นต่ำ

การหาค่าจลนพลศาสตร์ด้วยสมการของ Monod ขั้นตอนในการคำนวณมีดังนี้

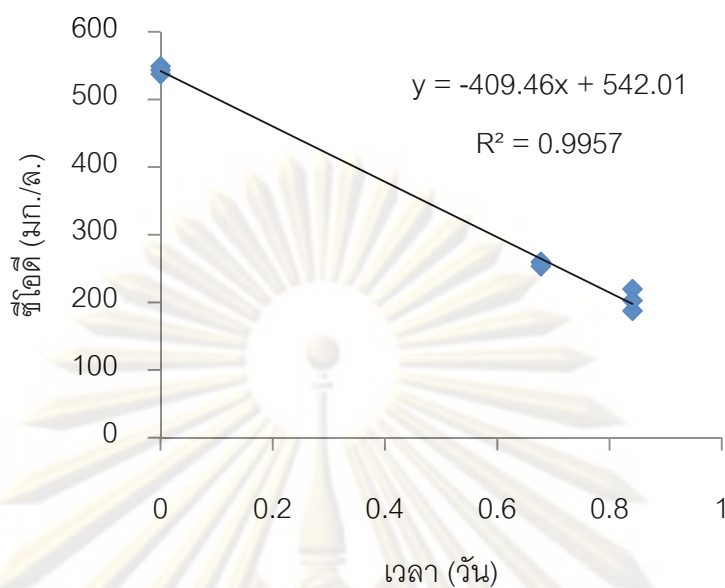
1. หาค่าอัตราการเจริญเติบโต ( $r_{GX}$ ) ในการทดลองแต่ละความเข้มข้นซีโอดีน้ำเสียเริ่มต้น โดยหาค่าความชันของเส้นกราฟซีโอดีที่ลดลงเทียบกับเวลาของการทดลองในแต่ละชุด พิจารณาเฉพาะช่วงของข้อมูลที่คาดว่าจะมีค่าความชันสูงสุด ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการหาค่าความชันจากเส้นแนวโน้มของข้อมูลช่วงที่มีค่าความชันสูงสุดในแต่ละชุดการทดลองเพื่อให้อ่านค่าความชันได้ง่ายขึ้น โดยตัวอย่างกราฟแสดงเส้นแนวโน้มที่บอกค่าความชันของข้อมูลการทดลอง เป็นดังรูปที่ ค.1

2. หาค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ ( $\mu$ ) จากสมการ

$$\mu = r_{GX}/X \quad (\text{ค.1})$$

โดยที่  $r_{GX}$  คือ ค่าความชันของเส้นกราฟแต่ละเส้นในรูปที่ ค.1

$X$  คือ ค่าเซลล์ซีโอดีที่ตำแหน่งจุดเริ่มต้นของเส้นกราฟแต่ละเส้นในรูปที่ ค.1



รูปที่ ค.1 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของน้ำเสีย ในกรณีใช้เชื้อสลดจ์ความเข้มข้นต่ำ  
ที่ค่าซีโอดีเริ่มต้น 550 มก./ล.

ยกตัวอย่าง ที่ความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้น 550 มก./ล. จะได้ว่า

$$r_{GX} = 409.46 \text{ มก./ล./วัน}$$

$$X = 49.28 \text{ มก.เซลล์ซีโอดี/ล.}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } \mu &= 409.46/49.28 \\ &= 8.3088 \text{ 1/วัน} \end{aligned}$$

ส่วนที่ความเข้มข้นอื่นๆ ใช้วิธีคำนวณเหมือนดังตัวอย่าง สรุปผลการคำนวณ  
ได้ดังตารางที่ ค.1

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลการสร้างกราฟ Monod กรณีเชื้อสลดจ์ความเข้มข้นต่ำ

อัตราการเจริญเติบโต : $r_{GX}$ (มก./ล./วัน)	เซลล์ซีโอดีเริ่มต้น (มก.เซลล์ซีโอดี/ล.)	อัตราการเจริญเติบโต จำเพาะ : $\mu$ (1/วัน)	ซีโอดีเริ่มต้น (มก./ล.)
409.46	49.28	8.3088	543.36
200.66	39.16	5.1241	281.07
81.442	28.8	2.8278	142.67
85.122	26.67	3.1917	72.53
29.808	32.41	0.9197	27.70

3. สร้างกราฟของค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะเทียบกับค่าซีไอดีเริ่มต้น ด้วยข้อมูลจากตารางที่ ค.1 ได้เป็นกราฟสมการของ Monod ดังรูปที่ 4.7

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากข้อมูลที่น่าไปสร้างกราฟ Monod ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถใช้หาค่าจลนพลศาสตร์ได้ เนื่องจากเส้นกราฟเพิ่มขึ้นไม่ถึงช่วงคงที่ตามทฤษฎี ดังนั้น ตัวช่วยอื่นจึงถูกนำมาใช้เพื่อให้สามารถหาค่าจลนพลศาสตร์ได้ โดยตัวช่วยที่ว่าคือ ฟังก์ชันการแก้สมการ (Solver) ของ Microsoft Excel ซึ่งสามารถหาค่าจลนพลศาสตร์ได้โดยใช้สมการของ Monod และ ข้อมูลเพียงบางชุดเท่านั้น ฟังก์ชันการแก้สมการที่ว่านี้มีวิธีการใช้งานดังนี้

1. สมมติค่า  $\mu_{mH}$  และ  $K_{SH}$  ค่าใดก็ได้เป็นค่าเริ่มต้น ใส่ลงในเซลล์ใดก็ได้ในแผ่นงานของโปรแกรม Microsoft Excel (สมมติใช้  $\mu_{mH} = 15$  1/วันและ  $K_{SH} = 500$  มก./ล.)
2. ป้อนสูตรสมการของ Monod ลงในแผ่นงานของโปรแกรม Microsoft Excel โดยใช้ค่าซีไอดีเริ่มต้นที่ใช้สร้างกราฟของ Monod ซึ่งอยู่ในตาราง ค.1 กำหนดให้เป็นค่า  $\mu_{EX}$

ยกตัวอย่างที่ค่าซีไอดีเริ่มต้น 550 มก./ล. จะได้ว่า

$$\begin{aligned}\mu_{EX} &= \mu_{mH}(S)/(K_{SH}+S) \\ &= (15)(543.36)/(500+543.36) \\ &= 7.8117 \text{ 1/วัน}\end{aligned}$$

3. นำค่า  $\mu_{EX}$  และ  $\mu$  จากตารางที่ ค.1 มาหาค่า  $R^2$  ของข้อมูลทั้งสอง เพื่อหาระดับความคลาดเคลื่อนระหว่างข้อมูลทั้งสอง โดยใช้สมการ

$$R^2 = (\mu_{EX} - \mu)^2 \quad (\text{ค.2})$$

ยกตัวอย่างที่ค่าซีไอดีเริ่มต้น 550 มก./ล. จะได้ว่า

$$\begin{aligned}R^2 &= (7.8117-8.3088)^2 \\ &= 0.2471\end{aligned}$$

4. หาผลรวมของค่า  $R^2$  ทั้งหมดที่ได้ กำหนดให้เป็นค่า sum\_R<sup>2</sup>

5. เรียกใช้ฟังก์ชันแก้สมการ (Solver) ของ Microsoft Excel จะมีกล่องข้อความขึ้นมา ในช่อง "Set Target Cell" ของกล่องข้อความให้ใส่ตำแหน่งของเซลล์ที่มีค่า sum\_R<sup>2</sup> อยู่ และ ที่ตัวเลือก "Equal To" ให้เลือกเป็น Min สุดท้ายคือ ที่ช่อง "By Changing Cells" ให้ใส่ตำแหน่งของเซลล์ที่มีค่า  $\mu_{mH}$  และ  $K_{SH}$  ที่สมมติเอาไว้ จากนั้น กดปุ่ม "Solve" โปรแกรมจะทำการสุ่มค่า  $\mu_{mH}$  และ  $K_{SH}$  ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้ค่า  $\mu_{EX}$  ที่ทำให้ค่า sum\_R<sup>2</sup> สุดท้ายที่ออกมา มีค่าน้อยที่สุดหรือก็คือข้อมูลมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากวิธีนี้คือ

$$\mu_{mH} = 15.64 \text{ 1/วัน} \quad \text{และ} \quad K_{SH} = 510 \text{ มก./ล}$$

6. นำค่า  $\mu_{mH}$  และ  $K_{SH}$  ที่ได้ไปใช้กับสมการของ Monod เพื่อคำนวณหาค่า  $\mu$  ชุดใหม่ขึ้นมาสำหรับใช้สร้างกราฟของ Monod เส้นใหม่ โดยสมมติค่าซีโอดีเริ่มต้นหลายๆ ค่าที่ครอบคลุมค่าซีโอดีเริ่มต้นเดิมในตารางที่ ค.1

ยกตัวอย่างที่ค่าซีโอดีเริ่มต้น 400 มก./ล. (ค่าสมมติ)

$$\begin{aligned} \mu &= \mu_{mH}(S)/(K_{SH}+S) \\ &= (15.64)(400)/(510+400) \\ &= 6.8747 \text{ 1/วัน} \end{aligned}$$

สมมติใช้ค่าซีโอดีเริ่มต้นที่ครอบคลุมกับค่าซีโอดีเริ่มต้นในตารางที่ ค.1 เท่ากับ 800 400 200 150 100 500 และ 0 มก./ล. โดยค่า  $\mu$  ที่คำนวณได้จากค่า  $\mu_{mH}$  และ  $K_{SH}$  ที่วิเคราะห์ได้ด้วยวิธีนี้แสดงดังตารางที่ ค.2



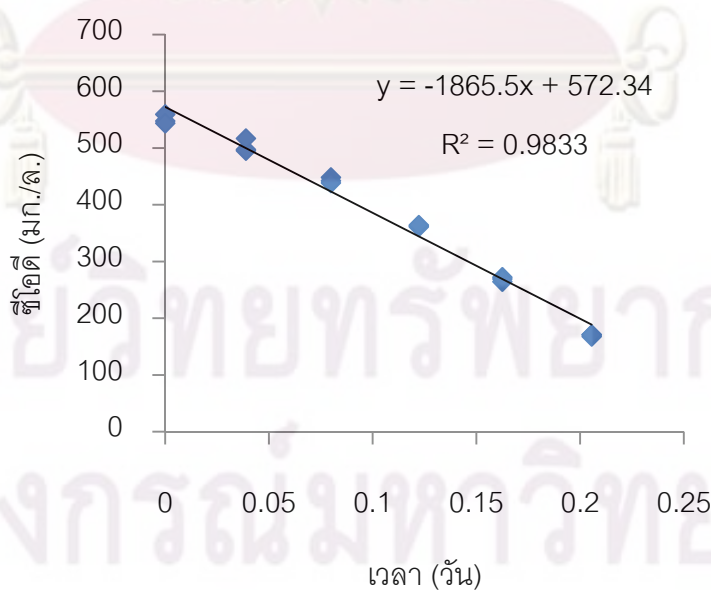
ตารางที่ ค.2 ข้อมูลการสร้างกราฟ Monod ที่ใช้ฟังก์ชันแก้สมการ  
กรณีเชื้อสลดจ์ความเข้มข้นต่ำ

ซีโอดีเริ่มต้น (มก./ล.)	อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ : $\mu$ (1/วัน)
0	0
50	1.3964
100	2.5639
150	3.5545
200	4.4056
400	6.8747
800	9.5511

ข้อมูลที่ได้จากตารางที่ ค.2 นำไปสร้างกราฟของ Monod จะได้ดังรูปที่ 4.7 อยู่ในรูปของเส้นประ ซึ่งจะเห็นว่าลากผ่านชุดข้อมูลที่ได้จากตารางที่ ค.1 เป็นอย่างดี

### 1.1.2 ผลการทดลองที่เชื้อสลดจ์ความเข้มข้นสูง

เนื่องจากวิธีการคำนวณเหมือนกับที่ได้กล่าวไว้แล้วก่อนหน้านี้ ดังนั้น จึงแสดงเฉพาะข้อมูลที่ได้เท่านั้น โดยกราฟแสดงเส้นแนวโน้มที่บอกค่าความชันของแต่ละชุดการทดลองเป็นดังรูปที่ ค.2



รูปที่ ค.2 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของน้ำเสีย ในกรณีใช้เชื้อสลดจ์ความเข้มข้นสูง  
ที่ค่าซีโอดีเริ่มต้น 550 มก./ล.

ที่ค่าซีโอดีเริ่มต้น 750 มก./ล. จะแตกต่างกันออกไปเล็กน้อย เนื่องจากช่วงข้อมูลที่มีความชันสูงสุดไม่ได้เริ่มที่ค่าซีโอดี 750 มก./ล. แต่ไปเริ่มที่ค่าซีโอดีถัดไปอีกหนึ่งค่าซึ่งไม่ทราบค่าเซลล์ซีโอดี ดังนั้น การหาค่าเซลล์ซีโอดีเริ่มต้นที่จุดนั้น จึงต้องใช้ค่ายิลด์ที่วิเคราะห์ได้เข้ามาช่วงซึ่งมีวิธีคำนวณดังนี้

ค่าซีโอดีเริ่มต้นของทั้งชุดกาทดลอง คือ 759.19 มก./ล.

ค่าซีโอดีเริ่มต้นของช่วงที่ความชันสูงสุด คือ 677.71 มก./ล.

นั่นคือ ซีโอดีลดลง 81.48 มก./ล.

ค่ายิลด์ คือ เซลล์ซีโอดีที่เพิ่มขึ้น/ซีโอดีที่ลดลง = 0.25 มก.เซลล์ซีโอดี/ล.

ดังนั้น เซลล์ซีโอดีเพิ่มขึ้นจากเดิม =  $0.25 \times \text{ซีโอดีที่ลดลง}$

$$= 0.25 \times 81.48$$

$$= 20.37 \text{ มก.เซลล์ซีโอดี/ล.}$$

เพราะฉะนั้น ค่าเซลล์ซีโอดีที่ต้องการ = เซลล์ซีโอดีเริ่มต้น + ที่เพิ่มขึ้น

$$= 551.88 + 20.37$$

$$= 572.25 \text{ มก.เซลล์ซีโอดี/ล.}$$

ข้อมูลทั้งหมดที่ใช้ในการสร้างกราฟ Monod ของการทดลองที่เชื้อสัลดีจ์ความเข้มข้นสูง เป็นดังตารางที่ ค.3

ตารางที่ ค.3 ข้อมูลการสร้างกราฟ Monod กรณีเชื้อสัลดีจ์ความเข้มข้นสูง

อัตราการเจริญเติบโต : $r_{GX}$ (มก./ล./วัน)	เซลล์ซีโอดีเริ่มต้น (มก.เซลล์ซีโอดี/ล.)	อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ : $\mu$ (1/วัน)	ซีโอดีเริ่มต้น (มก./ล.)
5152.8	572.25	9.0031	677.71
1865	721.08	2.5864	550.24
881	889.15	0.9908	180.05
687.3	849.33	0.8092	139.81

ข้อมูลทั้งหมดที่ใช้ในการสร้างกราฟ Monod ที่ได้จากการใช้ฟังก์ชันแก้สมการช่วย ของการทดลองที่เชื้อสัลดีจ์ความเข้มข้นสูง เป็นดังตารางที่ ค.3

ตารางที่ ค.4 ข้อมูลการสร้างกราฟ Monod ที่ใช้ฟังก์ชันแก้สมการ  
กรณีเชื้อสัลดีจ์ความเข้มข้นสูง

ซีโอดีเริ่มต้น (มก./ล.)	อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ : $\mu$ (1/วัน)
800	7.5542
400	3.7771
200	1.8885
100	0.9443
50	0.4721
0	0

## 1.2 การหาค่าจลนพลศาสตร์ด้วยสมการ Hanes

การหาค่าจลนพลศาสตร์ด้วยสมการของ Hanes จะแสดงการคำนวณและวิธีทำ  
อย่างละเอียดเฉพาะข้อมูลจากผลการทดลองที่เชื้อสัลดีจ์ความเข้มข้นต่ำเท่านั้น ส่วนการทดลองที่  
เชื้อสัลดีจ์ความเข้มข้นสูงจะแสดงเป็นตารางข้อมูลแทน

### 1.2.1 ผลการทดลองที่เชื้อสัลดีจ์ความเข้มข้นต่ำ

การหาค่าจลนพลศาสตร์ด้วยสมการของ Hanes จะใช้ข้อมูลชุดเดียวกันกับที่  
ใช้สร้างกราฟสมการของ Monod ซึ่งอยู่ในตารางที่ ค.1 โดยกราฟสมการของ Hanes จะมีแกน Y  
เป็นค่า อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะหารด้วยซีโอดีเริ่มต้น ( $\mu/S$ ) ส่วนแกน X เป็นค่าซีโอดีเริ่มต้น

ยกตัวอย่างที่ ค่าซีโอดีเริ่มต้น 550 มก./ล.

$$\begin{aligned}\mu/S &= \text{ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ} / \text{ค่าซีโอดีเริ่มต้น} \\ &= 543.36 / 8.3088 \\ &= 65.39 \text{ มก./ล.-วัน}\end{aligned}$$

ข้อมูลทั้งหมดที่ใช้ในการสร้างกราฟสมการของ Hanes อยู่ในตารางที่ ค.5

ตารางที่ ค.5 ข้อมูลการสร้างกราฟ Hanes กรณีเชื้อสัลดีค์ความเข้มข้นต่ำ

อัตราการเจริญเติบโต จำเพาะ : $\mu$ (1/วัน)	อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ/ ซีโอดีเริ่มต้น (มก./ล.-วัน)	ซีโอดีเริ่มต้น (มก./ล.)
8.3088	65.3954	543.36
5.1241	54.8525	281.07
2.8278	50.4518	142.67
3.1917	22.7247	72.53
0.9197	30.1180	27.7

รูปที่ 4.8 ข้อมูลที่ได้จากตารางที่ ค.5 เมื่อนำไปสร้างกราฟสมการของ Hanes จะได้ดัง

### 1.2.2 ผลการทดลองที่เชื้อสัลดีค์ความเข้มข้นสูง

เนื่องจากวิธีการคำนวณเหมือนกับที่ได้กล่าวไว้แล้วก่อนหน้านี้ ดังนั้น จึงแสดงเฉพาะข้อมูลที่ได้เท่านั้น โดยข้อมูลทั้งหมดที่ใช้ในการสร้างกราฟ Hanes ของการทดลองที่เชื้อสัลดีค์ความเข้มข้นสูง เป็นดังตารางที่ ค.6

ตารางที่ ค.6 ข้อมูลการสร้างกราฟ Hanes กรณีเชื้อสัลดีค์ความเข้มข้นสูง

อัตราการเจริญเติบโต จำเพาะ : $\mu$ (1/วัน)	อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ/ ซีโอดีเริ่มต้น (มก./ล.-วัน)	ซีโอดีเริ่มต้น (มก./ล.)
9.0031	75.2638	677.71
2.5864	212.6867	550.24
0.9908	181.7115	180.05
0.8092	172.7650	139.81

### 1.3 การหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

การหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะแสดงการคำนวณและวิธีทำอย่างละเอียดเฉพาะข้อมูลจากผลการทดลองที่เชื้อสัลดีค์ความเข้มข้นต่ำเท่านั้น ส่วนการทดลองที่เชื้อสัลดีค์ความเข้มข้นสูงจะแสดงเป็นตารางข้อมูลแทน

### 1.3.1 การทดลองที่เชื่อถือได้ของความเข้มข้นต่ำ

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ใช้อธิบายในการทดลองที่เชื่อถือได้ของความเข้มข้นต่ำจะเป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า  $\mu_{mH}$  และ  $K_{SH}$  ที่ได้จากการใช้โรแกรม AQUASIM ในการวิเคราะห์ โดยหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉพาะในกรณีพิจารณาแยกความเข้มข้นเท่านั้น โดยสมการที่ใช้คือ

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (\text{ค.3})$$

โดยที่  $N$  คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

$X_i$  คือ ข้อมูลแต่ละค่า

$\bar{X}$  คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด

ข้อมูลทั้งหมดที่ใช้ในการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า  $K_{SH}$  และ  $\mu_{mH}$  แสดงดังตารางที่ ค.7

ตารางที่ ค.7 ข้อมูลที่ใช้ในการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า  $K_{SH}$  และ  $\mu_{mH}$

$K_{SH}$			$\mu_{mH}$		
$X_i$	$(X_i - \bar{X})$	$(X_i - \bar{X})^2$	$X_i$	$(X_i - \bar{X})$	$(X_i - \bar{X})^2$
197	120.4	14496.16	2.55	0.82	0.6724
86	9.4	88.36	1.61	-0.12	0.0144
7	-69.6	4844.16	0.76	-0.97	0.9409
88	11.4	129.96	3.33	1.6	2.56
5	-71.6	5126.56	0.38	-1.35	1.8225
$X_i$ เฉลี่ย		ผลรวม	$X_i$ เฉลี่ย		ผลรวม
76.6		24685.2	1.73		6.0102

จากข้อมูลในตารางข้างต้นจะเห็นว่า

$$\begin{aligned} \text{ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า } K_{SH} &= \sqrt{\frac{1}{5} (24685.2)} \\ &= 70.26 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า } \mu_{mH} &= \sqrt{\frac{1}{5}(24685.2)} \\ &= 1.1 \end{aligned}$$

### 1.3.2 การทดลองที่เชื่อถือได้ความเข้มข้นสูง

ข้อมูลทั้งหมดที่ใช้ในการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า  $K_1$  แสดงดังตารางที่

ค.8

ตารางที่ ค.8 ข้อมูลที่ใช้ในการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า  $K_1$

K <sub>SH</sub>		
X <sub>i</sub>	(X <sub>i</sub> -X)	(X <sub>i</sub> -X) <sup>2</sup>
0.00252	0.00004	1.600E-09
0.00164	-0.00084	7.056E-07
0.0024	-0.00008	6.400E-09
0.00337	0.00089	7.921E-07
X <sub>i</sub> เฉลี่ย		ผลรวม
0.00248		1.5057E-06

จากข้อมูลในตารางข้างต้นจะได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า } K_1 &= \sqrt{\frac{1}{4}(1.5057E - 06)} \\ &= 0.000549 \end{aligned}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธงชัย นรินทร์วงศ์วาน เกิดเมื่อวันที่ 31 มีนาคม พ.ศ. 2525 สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนวัดสุทธิวาราม เมื่อปี พ.ศ. 2543 และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาตรีในสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน จนสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2547 หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2548



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย