

การเปรียบเทียบสมรรถนะของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศน้ำเสียไหลขึ้นกับถังปฏิกรณ์ไร้อากาศน้ำเสียไหลขึ้น  
แบบแบ่งส่วนในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีปริมาณสารอินทรีย์เปลี่ยนแปลงระดับ



นาย สิทธิโชค ศิริจินดาเลิศ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

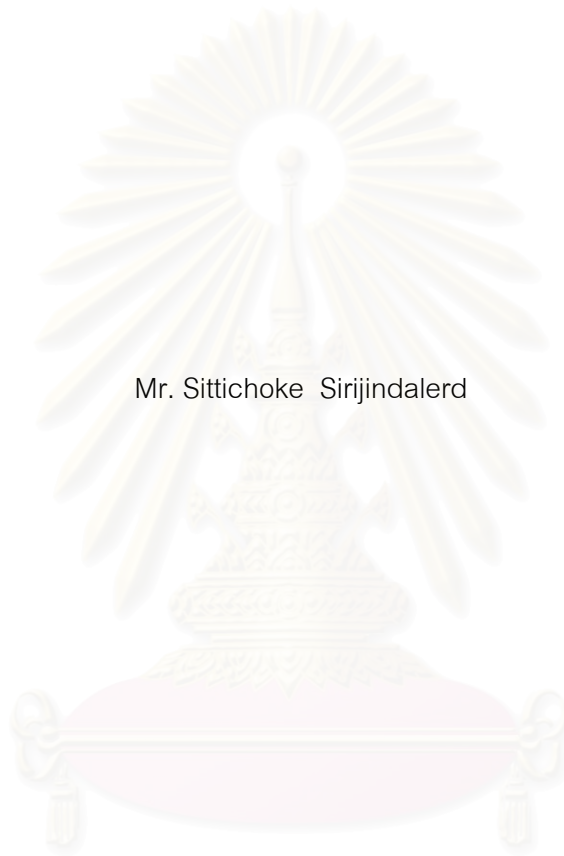
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0410-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COMPARISON BETWEEN PERFORMANCE OF AN UPFLOW ANAEROBIC SLUDGE BLANKET AND A  
STAGING UPFLOW ANAEROBIC SLUDGE BLANKET IN TREATING SYNTHETIC WASTEWATER WITH  
AN ORGANIC SHOCKLOAD



Mr. Sittichoke Sirijindalerd

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-0410-9



สิทธิโชค ศิริจินดาเลิศ : การเปรียบเทียบสมรรถนะของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศน้ำเสียไหลขึ้นกับถังปฏิกรณ์  
ไร้อากาศน้ำเสียไหลขึ้นแบบแบ่งส่วนในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีปริมาณสารอินทรีย์เปลี่ยนแปลง  
ฉับพลัน (COMPARISON BETWEEN PERFORMANCE OF AN UPFLOW ANAEROBIC SLUDGE  
BLANKET AND A STAGING UPFLOW ANAEROBIC SLUDGE BLANKET IN TREATING  
SYNTHETIC WASTEWATER WITH AN ORGANIC SHOCKLOAD) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. ประเสริฐ  
ภวสันต์, 99 หน้า. ISBN 974-03-0410-9.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศน้ำเสียไหลขึ้น (Upflow Anaerobic Sludge  
Blanket : UASB) เปรียบเทียบกับถังปฏิกรณ์ไร้อากาศน้ำเสียไหลขึ้นแบบแบ่งส่วน (Staging Upflow Anaerobic  
Sludge Blanket : SUASB) เมื่อทำการป้อนด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าอัตราการป้อน (OLR) เปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน  
ช่วง OLR ที่ทำการศึกษามีค่า 2-25 กรัมต่อลิตรต่อวัน การเปลี่ยนแปลงค่า OLR ของสายป้อนทำได้สองวิธี คือ การลด  
เวลาที่น้ำเสียอยู่ในถังปฏิกรณ์ (HRT) และการเพิ่มค่า COD ในสายป้อนให้สูงขึ้น การทดลองนี้จะดำเนินการระบบ  
UASB และ SUASB มีปริมาตรของแต่ละระบบรวม 8 ลิตร ไปพร้อม ๆ กัน โดยระบบ SUASB จะมีถังปฏิกรณ์ย่อย  
ทั้งหมด 4 ถัง โดยมีขนาดเท่ากันที่ 2 ลิตร ผลจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะพบว่า ในช่วงแรกของการดำเนินการ (วันที่ 1-  
12) ประสิทธิภาพในการกำจัด COD ของ SUASB มีค่าอยู่ในช่วง 92-99 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าสูงและคงที่กว่า UASB ที่มีค่า  
อยู่ในช่วง 82-99 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากในระบบ UASB จะเกิดสภาวะการเจือจางขึ้น แต่หลังจากเกิดการปรับตัวของ  
ตะกอนที่มีความหนาแน่นสูงขึ้นทำให้การทดลองช่วงหลัง (วันที่ 13-25) ถังปฏิกรณ์ทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพใกล้เคียง  
กัน แต่เมื่อพิจารณาค่าสัดส่วนมีเทนและปริมาณของก๊าซที่ผลิตขึ้นจากถังปฏิกรณ์ พบว่าก๊าซที่ได้จาก SUASB จะมี  
ปริมาตรและสัดส่วนมีเทนสูงกว่า UASB ซึ่งระบุได้ว่าสภาวะในถังปฏิกรณ์แบบ SUASB มีความเหมาะสมกับการ  
ดำรงชีวิตของแบคทีเรียประเภทสร้างมีเทนมากกว่า UASB

นอกจากนี้การเพิ่ม OLR ด้วยวิธีต่างกันจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัด COD ต่างกันด้วย เนื่องจากปัจจัย  
ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัด COD คือขีดจำกัดในการถ่ายเทมวลของสารอินทรีย์ผ่านเข้าสู่เซลล์แบคทีเรีย การเพิ่ม  
อัตราการไหล (ลด HRT) เป็นการเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลสาร ดังนั้นในการทดลองเพิ่ม OLR ให้มีค่า 10 กรัมต่อลิตรต่อ  
วันโดยการเพิ่มอัตราการไหล (หรือลด HRT) ในวันที่ 6 และ 15-16 ของการทดลอง ประสิทธิภาพในการกำจัด COD ของ  
ถังปฏิกรณ์ทั้งสองแบบยังคงรักษาระดับให้มีค่าสูงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ได้ ในขณะที่การเพิ่ม OLR โดยการเพิ่ม COD ไม่ทำ  
ให้อัตราการถ่ายเทมวลเพิ่มขึ้น ดังนั้นประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ทั้งสองแบบมีค่าลดลง โดยในวันที่ 21 ที่มีการเพิ่ม  
OLR เป็น 20 กรัมต่อลิตรต่อวันด้วยวิธีการเพิ่ม COD ประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ทั้งสองแบบลดเหลือเพียงประมาณ 75  
เปอร์เซ็นต์เท่านั้น นอกจากนี้การเพิ่ม COD ยังมีผลกระทบต่อสัดส่วนมีเทนด้วย เนื่องจากเกิดการสะสมของกรด  
ในระบบ และเมื่อเพิ่ม OLR จนถึง 25 กรัมต่อลิตรต่อวันโดยการลด HRT และเพิ่ม COD พร้อม ๆ กัน ถังปฏิกรณ์ทั้งสอง  
แบบไม่สามารถทำงานต่อไปได้

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ปีการศึกษา.....2544.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## 4170584921 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: ANAEROBIC / WASTEWATER TREATMENT / UASB / STAGING

COMPARISON BETWEEN PERFORMANCE OF AN UPFLOW ANAEROBIC SLUDGE BLANKET AND A STAGING UPFLOW ANAEROBIC SLUDGE BLANKET IN TREATING SYNTHETIC WASTEWATER WITH AN ORGANIC SHOCKLOAD. THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. PRASERT PAVASANT, Ph.D., 99 pp. ISBN 974-03-0410-9.

The performances of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) and staging upflow anaerobic sludge blanket (SUASB) in treating synthetic wastewater under organic shock load condition were investigated. The organic load was altered by reducing hydraulic retention time (HRT) of wastewater, and/or increasing the COD in inlet wastewater, such that the organic loading rate (OLR) varied between 2 to 25 g/(L d). For this experiment, 8 L UASB and SUASB with four 2 L UASB connected in series were operated in parallel. In the first period (day 1-12), COD removal efficiency of SUASB was in a range of 92-99% which was higher and more stable than that obtained from the UASB (which was approximately 82-99%). Wash-out of sludge was observed in the UASB in this period. In the second period (day 13-25), no more wash-out was observed as sludge was denser with higher density, and the efficiencies of both reactors were by and large in the same range. In addition, it was found that the proportion and volume of methane produced from SUASB were higher than those obtained from UASB. This, to some extent, indicated that the condition in SUASB was more suitable for methanogenic bacteria than UASB.

Both reactors reacted differently to the different way of increasing OLR. It was expected that the efficiencies of both reactors were limited by the rate of mass transfer between liquid and bacterial cells. Hence, reducing HRT effectively increased the rate of mass transfer of organic substrate from bulk liquid to cell. It was shown that both reactors could still maintain their ability to treat the COD and the resulting removal efficiencies from both reactors were still high (more than 90%) when OLR was increased to 10 g/(L d) by reducing HRT. However, an increase in inlet wastewater COD had strong negative influence on both the removal efficiency and methane production. For instance, with increasing COD concentration in wastewater in day 21 (OLR 20 g/(L d)), COD removal efficiencies of both reactors decreased to approximately 75%. This was because the reactors were already limited by the rate of mass transfer which was not enhanced by increasing the COD concentration. In addition, when increasing OLR to 25 g/(L d) by reducing HRT together with increasing COD, both reactors failed to work and no recovery of bacteria was possible.

Department....Chemical engineering..... Student's signature.....

Field of study.... Chemical engineering..... Advisor's signature.....

Academic year.....2001..... Co-advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากหลาย ๆ ท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ประเสริฐ ภาวสันต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์ ประธานกรรมการ ดร.เหมือนเดือน พิศาลพงศ์ และ ดร.ทวิรัตน์ วิจิตรสุนทรกุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้เสนอข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์และแก้ไข เพิ่มเติมส่วนที่บกพร่องของงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ คุณอรุณี วจนะวิจัย ฝ่ายบำบัดน้ำเสียของบริษัท บุญรอดบริวเวอรี่ จำกัด ที่อนุเคราะห์ตะกอนแบคทีเรียเพื่อใช้ในการทดลอง

ขอขอบพระคุณ ดร.ทวิรัตน์ วิจิตรสุนทรกุล ที่ให้คำแนะนำและความรู้ต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัย KAPI มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณห้องปฏิบัติการวิศวกรรมชีวเคมี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ห้องวิจัยสิ่งแวดล้อม ที่ได้ให้กำลังใจ คำแนะนำ และช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ

ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา และทุกคนในครอบครัว ที่คอยเป็นกำลังใจและสนับสนุนในเรื่องทุนทรัพย์จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

สถาบันนวัตกรรมการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญรูป .....	ฎ
คำย่อ .....	ฏ
บทที่	
1. บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและมูลเหตุจูงใจ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา .....	2
2. ทฤษฎี .....	4
2.1 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน .....	4
2.2 สภาวะแวดล้อมที่มีอิทธิพลต่อระบบบำบัดน้ำเสีย แบบไม่ใช้ออกซิเจน .....	6
2.3 ความสามารถของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน .....	10
2.4 การเปรียบเทียบระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจน และไม่ใช้ออกซิเจน .....	11
2.5 ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศน้ำเสียไหลขึ้น (UASB) .....	13
3. ตรวจเอกสาร .....	18
4. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง .....	31
4.1 อุปกรณ์ .....	31
4.1.1 ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศน้ำเสียไหลขึ้น (Upflow Anaerobic Sludge Blanket : UASB) .....	31
4.1.2 ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศน้ำเสียไหลขึ้นแบบแบ่งส่วน (Staging Upflow Anaerobic Sludge Blanket : SUASB) .....	31

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า	
4.2	การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์และเชื้อแบคทีเรีย .....	32
4.3	วิธีวิเคราะห์ตัวอย่าง .....	33
4.3.1	วิธีวิเคราะห์น้ำเสียตัวอย่าง .....	33
4.3.2	วิธีวิเคราะห์ก๊าซตัวอย่าง .....	33
4.3.3	วิธีวิเคราะห์ความหนาแน่นของตะกอน (น้ำหนักแห้ง) .....	34
4.4	ขั้นตอนการทดลอง .....	34
4.5	การคำนวณประสิทธิภาพในการกำจัด COD .....	36
5.	ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	43
5.1	ประสิทธิภาพในการกำจัด COD .....	43
5.1.1	การเพิ่ม OLR ด้วยวิธีลด HRT .....	43
5.1.2	การเพิ่ม OLR ด้วยวิธีเพิ่ม COD ในสายป้อน .....	46
5.2	แนวโน้มของระบบเมื่อเพิ่ม OLR ให้สูงขึ้น .....	48
5.3	สัดส่วนมีเทน .....	49
5.3.1	การเพิ่ม OLR ด้วยวิธีลด HRT .....	49
5.3.2	การเพิ่ม OLR ด้วยวิธีเพิ่ม COD ในสายป้อน .....	50
5.4	เปรียบเทียบปริมาตรก๊าซที่ UASB และ SUASB สามารถผลิตได้ .....	51
5.5	การสูญเสียตะกอนโดยการไหลไปในสายออก (wash out) .....	55
5.5.1	ลักษณะของตะกอน .....	55
5.5.2	สภาวะการเจือจางของตะกอน (wash out) .....	56
5.6	เปรียบเทียบผลของการลด HRT กับการเพิ่ม COD .....	58
5.6.1	ค่า COD และประสิทธิภาพในการกำจัด COD .....	58
5.6.2	สัดส่วนมีเทน .....	60
5.7	การฟื้นตัวของระบบหลังการเพิ่มค่า OLR อย่างฉับพลัน .....	61
5.7.1	กรณีลด HRT .....	61
5.7.2	กรณีเพิ่ม COD ในสายป้อน .....	61



## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
6. สรุปผลการทดลอง .....	77
รายการอ้างอิง .....	78
ภาคผนวก .....	81
ภาคผนวก ก .....	82
ภาคผนวก ข .....	88
ภาคผนวก ค .....	91
ภาคผนวก ง .....	98
ประวัติผู้เขียน .....	99



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความเข้มข้นของอิออนบวกของธาตุบางชนิดที่มีผลกระทบต่อ การดำรงชีวิตของแบคทีเรีย .....	10
5.1 อัตราการเจือจางของเซลล์ , ความหนาแน่นของตะกอน และ อัตราการเจริญเติบโตของเซลล์ ในถังปฏิกรณ์ UASB .....	63
5.2 อัตราการเจือจางของเซลล์ , ความหนาแน่นของตะกอน และ อัตราการเจริญเติบโตของเซลล์ ในถังปฏิกรณ์ SUASB .....	64
ก.1 ค่า O.D. ที่วัดได้จากการทดลอง .....	84
ก.2 ความเข้มข้นของน้ำตาลและค่า O.D. ที่วัดได้เพื่อทำเส้นกราฟ มาตรฐาน ครั้งที่ 1 .....	85
ก.3 ค่าความเข้มข้นของน้ำตาลและค่า O.D. ที่วัดได้เพื่อทำเส้นกราฟ มาตรฐาน ครั้งที่ 2 .....	86
ข.1 สัดส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนของก๊าซชีวภาพที่ถูกลดขึ้น วิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี .....	89
ค.1 ค่า COD , HRT และ OLR ที่ใช้ในการดำเนินการจริง .....	91
ค.2 ค่า COD ในถังปฏิกรณ์และประสิทธิภาพในการกำจัด COD .....	92
ค.3 ประสิทธิภาพในการกำจัด COD ของถังปฏิกรณ์ SUASB1 .....	93
ค.4 ค่า pH ในถังปฏิกรณ์ .....	94
ค.5 สัดส่วนมีเทน (เปอร์เซ็นต์) ของก๊าซที่เกิดขึ้นของถังปฏิกรณ์ UASB และ SUASB .....	95
ค.6 ปริมาตรก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นของ UASB และ SUASB โดยการคำนวณ (ลิตรต่อวัน) .....	96
ค.7 ความหนาแน่นของตะกอนที่ทับถมด้านล่างของถังปฏิกรณ์ .....	97

## สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	7
2.2	16
2.3	17
4.1	37
4.2	38
4.3	39
4.4	40
4.5	41
4.6	42
5.1	65
5.2	66
5.3	67
5.4	68
5.5	69
5.6	70
5.7	71
5.8	72
5.9	73
5.10	74
5.11	75
5.12	76
ก.1	85
ก.2	86
ข.1	88

## คำย่อ

### หน่วย

COD	ปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีต้องการ (Chemical Oxygen Demand)	มิลลิกรัมต่อลิตร
EGSB	ถังขยายพื้นที่ตะกอน (Expanded Granular Sludge Bed)	
HRT	เวลาที่น้ำเสียอยู่ในถังปฏิกรณ์ (Hydraulic Retention Time)	ชั่วโมง
OLR	อัตราการป้อนสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate)	กรัมต่อลิตรต่อวัน
pH	ความเป็นกรดต่าง	
SS	ตะกอนของแข็งแขวนลอย (Suspended Sludge)	
SUASB	ถังปฏิกรณ์ตะกอนไร้อากาศน้ำเสียไหลขึ้นแบบแบ่งส่วน (Staging Upflow Anaerobic Sludge Blanket)	
UASB	ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศน้ำเสียไหลขึ้น (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)	
USSB	ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศน้ำเสียไหลขึ้นแบบแบ่งเป็นชั้น (Upflow Staged Sludge Bed)	
VFA	กรดอินทรีย์ (Volatile Fatty Acid)	มิลลิกรัมต่อลิตร
VSS	ตะกอนของแข็งแขวนลอยที่สามารถระเหยได้ (Volatile Suspended Sludge)	

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและมูลเหตุจูงใจ

เทคโนโลยีในปัจจุบันได้พัฒนาขึ้นมา โดยเฉพาะเทคโนโลยีที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งนอกจากจะพัฒนาในเชิงประสิทธิภาพ ยังมีการพัฒนาเพื่อให้ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุดด้วย ทั้งนี้เนื่องจากสังคมในปัจจุบันได้ให้ความสำคัญแก่ปัญหาสิ่งแวดล้อมมากขึ้นกว่าในอดีต เป้าหมายสูงสุดของการป้องกันปัญหาสิ่งแวดล้อม (Pollution Prevention) ก็คือการไม่ผลิตสิ่งแปลกปลอม (หรือที่เรียกกันทั่วไปว่าของเสีย) ออกสู่สิ่งแวดล้อม (Zero emission) รูปแบบการพัฒนาเทคโนโลยีในปัจจุบันจึงเน้นไปทางด้านของการป้องกันที่แหล่งกำเนิดมากกว่าการแก้ไขที่ปลายเหตุ นั่นคือพยายามทำให้ของเสียเกิดขึ้นน้อยที่สุดนั่นเอง ดังนั้นจึงเกิดแนวความคิดใหม่ ๆ ขึ้นมากมายช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา เช่น แนวคิดของการทำเทคโนโลยีสะอาด (Clean Technology) แนวคิดของการใช้วงจรชีวิตช่วยวิเคราะห์กระบวนการผลิต (Life Cycle Assessment) แนวคิดของระบบนิเวศน์อุตสาหกรรม (Industrial Ecology) ฯลฯ

อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีในปัจจุบันยังไม่สามารถช่วยให้บรรลุเป้าหมายสูงสุดของการป้องกันปัญหาสิ่งแวดล้อมได้ ดังนั้นกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมจึงยังคงก่อให้เกิด “ของเสีย” ขึ้นในหลายหลากรูปแบบ ซึ่งจำเป็นจะต้องผ่านการบำบัดก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมเพื่อลดผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นอันเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ รูปแบบของการบำบัดของเสียขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของของเสีย แต่โดยทั่วไปการบำบัดสารอินทรีย์หรือสารที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ มักจะใช้วิธีทางชีวภาพ เนื่องจากเป็นวิธีที่มีข้อดีคือระบบบำบัดจะสามารถดำเนินการที่อุณหภูมิและความดันปกติหรือไม่เปลี่ยนไปจากสภาวะการทำงานปกติมากนัก จึงไม่สิ้นเปลืองและไม่เป็นอันตราย นอกจากนี้ระบบทางชีวภาพยังใช้พลังงานและสารเคมีในการดำเนินการบำบัดน้อยเมื่อเทียบกับกระบวนการทางเคมี โดยเฉพาะระบบบำบัดที่ใช้แบคทีเรียแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะได้ก๊าซมีเทนเป็นผลพลอยได้ สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานได้

ระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็นที่สนใจและได้รับการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง รูปแบบของการบำบัดมีอยู่มากมาย รูปแบบหนึ่งที่ได้รับความสะดวกค่อนข้างมากคือ **ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศน้ำเสียไหลขึ้น (Upflow Anaerobic Sludge Blanket : UASB)** ทั้งนี้เนื่องจากระบบนี้สามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งค่าใช้จ่ายในการสร้างและ

ดำเนินการไม่สูงเพราะไม่ต้องสร้างถังตกตะกอนและไม่ใช้เครื่องปั่นกววน แต่ระบบนี้ยังมีข้อจำกัดอยู่ที่การสะสมของผลิตภัณฑ์ขั้นกลาง (intermediate) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ก่อนที่จะถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ผลิตภัณฑ์ขั้นกลางนี้มักจะอยู่ในรูปของกรดอินทรีย์ เมื่อเกิดการสะสมขึ้นจะยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ทำให้ประสิทธิภาพของระบบบำบัดลดลง ดังนั้นจึงมีการออกแบบถังปฏิกรณ์แบบใหม่เพื่อแก้ไขข้อจำกัดนี้ได้แก่การแบ่ง UASB ออกเป็นหลาย ๆ ส่วน เรียก **ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศน้ำเสียไหลขึ้นแบบแบ่งส่วน (Staging Upflow Anaerobic Sludge Blanket : SUASB)** เพื่อให้กรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในส่วนหนึ่งไม่กระทบกระเทือนต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในส่วนอื่น ๆ ของถังปฏิกรณ์

โดยธรรมชาติแล้วน้ำเสียที่ถูกปล่อยออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรมจะมีปริมาณสารอินทรีย์ไม่คงที่ การศึกษาในรายงานฉบับนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมของระบบ UASB และ SUASB ในกรณีที่น้ำเสียที่ไหลเข้าสู่ระบบมีปริมาณสารอินทรีย์ไม่คงที่ เนื่องจากอัตราการไหลและความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เปลี่ยนแปลงแบบฉับพลัน

## 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาพฤติกรรมของ ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศน้ำเสียไหลขึ้น (UASB) เปรียบเทียบกับ ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศน้ำเสียไหลขึ้นแบบแบ่งส่วน (SUASB) ในสภาวะที่น้ำเสียสังเคราะห์มีอัตราการไหลและความเข้มข้นของสารอินทรีย์เปลี่ยนแปลงแบบฉับพลัน (Shock Load)

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาเป็นน้ำเสียสังเคราะห์โดยมีสารอาหารหลักที่สำคัญคือน้ำตาลซูโครส และมีสารอาหารเสริมตามรายละเอียดที่เสนอในหัวข้อ 4.2
- 1.3.2 การวัดปริมาณน้ำตาลคิดในหน่วย ปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีต้องการ (Chemical Oxygen Demand : COD) (มิลลิกรัมต่อลิตร)
- 1.3.3 การศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงสภาวะของน้ำเสียสังเคราะห์ทำโดย
  1. เปลี่ยนแปลงค่า COD ในสายป้อนจาก 2000 ถึง 20000 มิลลิกรัมต่อลิตร
  2. เปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำเสียโดยควบคุมเวลาที่น้ำเสียอยู่ในถังปฏิกรณ์มีค่าระหว่าง 8 ถึง 24 ชั่วโมง

- 1.3.4 ดัชนีที่ใช้วัดประสิทธิภาพการทำงานคือ
1. ประสิทธิภาพในการกำจัด COD
  2. สัดส่วนก๊าซมีเทนของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากระบบบำบัด
- 1.3.5 ศึกษาความหนาแน่นของตะกอนแบคทีเรีย (granule) ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 ชนิด



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน

การบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาแบบไม่ใช้ออกซิเจน เป็นการใช้แบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียแล้วเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ , ก๊าซมีเทน และ สารอนินทรีย์ ระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนนี้สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีอัตราการป้อน (Organic Loading Rate : OLR) สูงได้ค่อนข้างมีประสิทธิภาพมากกว่าระบบแบบใช้ออกซิเจน แต่น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจะมีค่า COD ต่ำแค่เพียงในระดับหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นในกรณีที่ต้องบำบัดน้ำเสียที่มีค่า OLR สูงปริมาณมาก ๆ การนำระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนมาต่อกับระบบแบบใช้ออกซิเจนจึงเป็นทางเลือกที่นิยมใช้กัน ซึ่งนอกจากจะได้ประสิทธิภาพสูงขึ้นแล้วยังประหยัดกว่าการสร้างระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจนรองรับเพียงอย่างเดียว เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของระบบแบบไม่ใช้ออกซิเจนต่ำกว่านั่นเอง สำหรับอุตสาหกรรมที่ใช้วิธีบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนนี้ มักจะเป็นอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการใช้สารอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นสูง เช่น อุตสาหกรรมเครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์ , อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์นม , อุตสาหกรรมอาหาร , อุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ , อุตสาหกรรมเวชภัณฑ์ ฯลฯ (Gerard, 1996)

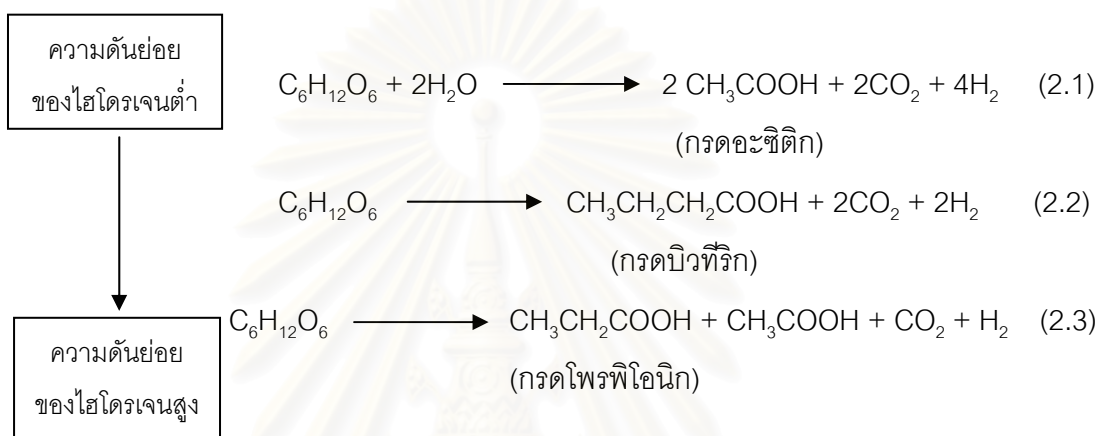
แบคทีเรียแบบไม่ใช้ออกซิเจนนี้สามารถจำแนกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ พวกที่ย่อยสลายสารอินทรีย์แล้วเกิดกรด (acidogen) และ พวกที่ย่อยสลายกรดอินทรีย์แล้วเกิดก๊าซมีเทน (methanogen) โดยขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรียเหล่านี้สามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนหลัก (อรุณี, 2534) คือ

1. ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ เช่น แป้ง ไขมัน โปรตีน ให้มีขนาดโมเลกุลเล็กลง เช่น น้ำตาล , กรดไขมัน และ กรดอะมิโน ขั้นตอนนี้เรียกว่า การย่อยสลายแบบไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)
2. ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กที่ได้จากขั้นตอนแรกแล้วขับของเสีย ได้แก่ กรดอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ และคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ขั้นตอนนี้เรียกว่า ขั้นตอนการสร้างกรด (Acidogenesis) กรดอินทรีย์ที่ขับออกมา ได้แก่ กรดอะซิติก , กรดโพรพิโอนิก , กรดบิวทิริก เป็นต้น กลุ่มแบคทีเรียประเภทนี้เรียกว่า แบคทีเรีย



ประเภทสร้างกรด (acidogen) มีอัตราการเจริญเติบโตช้าเมื่อเทียบกับแบคทีเรียประเภทใช้ออกซิเจน

การที่สารอินทรีย์จะถูกแบคทีเรียย่อยสลายเป็นกรดอินทรีย์ชนิดใดนั้นขึ้นอยู่กับค่าความดันย่อยของไฮโดรเจน (Hydrogen partial pressure) ในระบบ ถ้าค่าความดันย่อยของไฮโดรเจนนี้มีค่าต่ำจะได้กรดอะซิติก ถ้าค่าสูงจะได้กรดไพรูวอิก ส่วนกรดบิวทีริกเกิดได้ในทั้งสองสภาวะดังสมการ (กิตติศักดิ์, 2539 และ เนตรนภา, 2539)

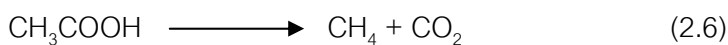


ต่อจากนั้นกรดไพรูวอิกและบิวทีริกจะแบคทีเรียถูกย่อยสลายอีกครั้งจนได้กรดอะซิติก ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนย่อย เรียกว่า การย่อยสลายแบบ อะซิโตเจนิซิส (Acetogenesis) สมการเป็นดังนี้



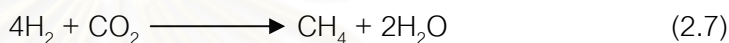
3. ขั้นตอนที่แบคทีเรียจะใช้กรดอินทรีย์, ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนที่ 2 เป็นสารอาหารในการดำรงชีวิต สารอาหารเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน ขั้นตอนนี้เรียกว่า ขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenesis) แบคทีเรียประเภทนี้เรียกว่า แบคทีเรียประเภทสร้างก๊าซมีเทน (methanogen) มีอัตราการเจริญเติบโตช้ากว่าแบคทีเรียประเภทสร้างกรด 5-8 เท่า (Gerard, 1996) แบคทีเรียประเภทนี้ยังสามารถแบ่งได้เป็นสองกลุ่มหลัก ๆ ตามประเภทของสารอาหารที่ใช้ ได้แก่

- 1.) แบคทีเรียสร้างมีเทนจากกรดอะซิติก (Acetoclastic methane bacteria) มีสมการดังนี้

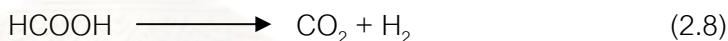


ก๊าซมีเทนส่วนใหญ่ (ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์) เกิดจากชั้นตอสนี้

- 2.) แบคทีเรียสร้างมีเทนจากไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ (Hydrogen-utilizing methane bacteria) มีสมการดังนี้



ก๊าซมีเทนที่เหลือประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์เกิดจากแบคทีเรียประเภทนี้ นอกจากนี้กรดฟอร์มิกยังใช้เป็นสารอาหารให้แก่แบคทีเรียประเภทนี้ได้ เช่นเดียวกัน เนื่องจากสามารถฟอร์มิกแตกตัวเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ดังสมการ

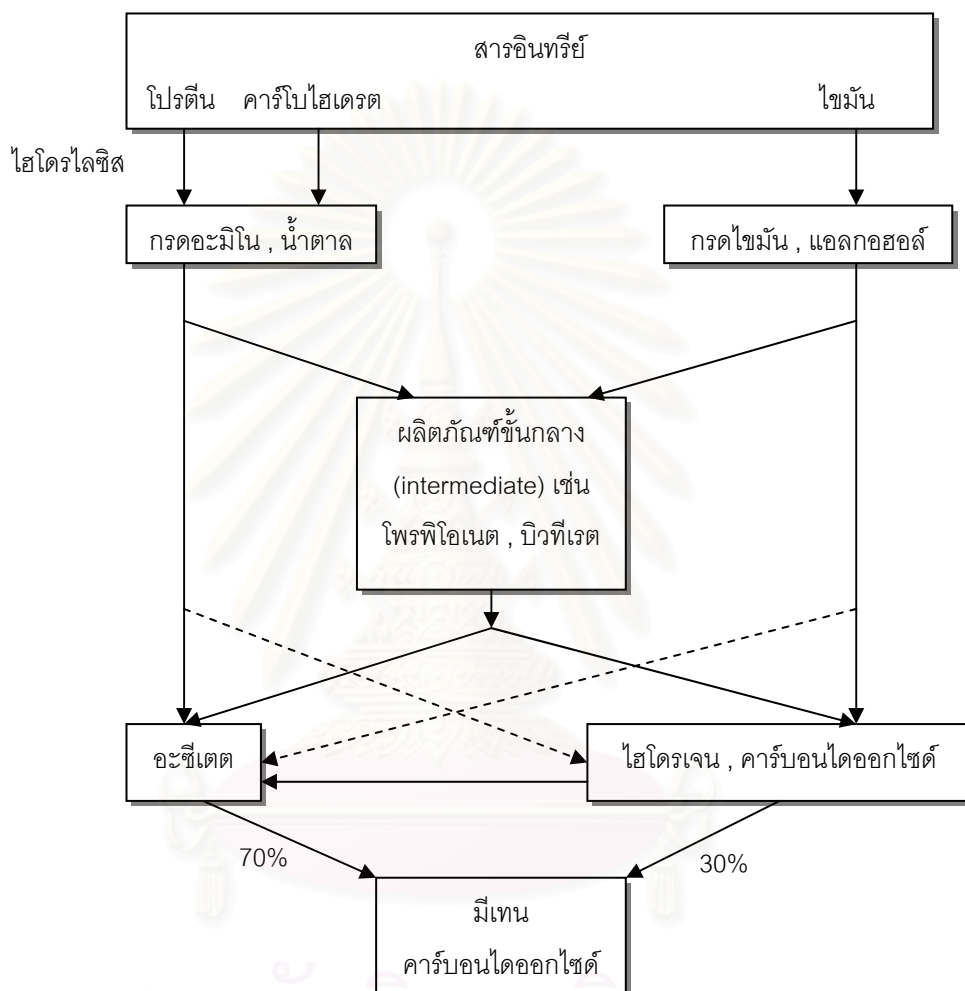


ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์สามารถแสดงเป็นแผนภาพดังรูปที่ 2.1

## 2.2 สภาวะแวดล้อมที่มีอิทธิพลต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน

กลุ่มแบคทีเรียแบบไม่ใช้ออกซิเจนมีอัตราการเจริญเติบโตช้า และไม่แข็งแรง เมื่อสภาวะแวดล้อมรอบข้างเปลี่ยนแปลงจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบบำบัด ตัวแปรที่มีผลต่อการดำรงชีวิตของแบคทีเรียกลุ่มนี้ได้แก่

- **อุณหภูมิ** อุณหภูมิมีอิทธิพลอย่างมากต่อการดำรงชีวิตของแบคทีเรีย เพราะว่าแบคทีเรียแต่ละชนิดจะทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิหนึ่ง ๆ ถ้าอุณหภูมิของระบบบำบัดไม่เหมาะสม แบคทีเรียจะทำงานได้น้อยลง ดังนั้นประสิทธิภาพของระบบจะลดลง ช่วงอุณหภูมิที่แบคทีเรียทำงานสามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วง คือ



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Gerard, 1996)

- 1.) ช่วงอุณหภูมิต่ำ (Psychrophilic range) มีช่วงอุณหภูมิระหว่าง 10-15 องศาเซลเซียส
- 2.) ช่วงอุณหภูมิปานกลาง (Mesophilic range) มีช่วงอุณหภูมิระหว่าง 35-37 องศาเซลเซียส
- 3.) ช่วงอุณหภูมิสูง (Thermophilic range) มีช่วงอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 50-55 องศาเซลเซียส

โดยมากแบคทีเรียจะทำงานในช่วงอุณหภูมิปานกลาง ในกรณีอุณหภูมิน้ำเสียสูงอาจควบคุมระบบบำบัดให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิสูง ประสิทธิภาพของระบบบำบัดจะสูงขึ้นเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมipานกลางแต่เสถียรภาพต่ำ

ระบบแบบไม่ใช้ออกซิเจนสามารถดำเนินการได้ที่อุณหภูมิต่ำสุด 10 องศาเซลเซียส (แต่สำหรับในโรงงานจริงแล้วสามารถดำเนินงานได้จริงต่ำสุดที่ 20 องศาเซลเซียส) Droste (1997) ประมาณว่าขนาดของถังปฏิกรณ์จะเพิ่มขึ้นสองเท่าทุก ๆ อุณหภูมิต่ำลง 10 องศาเซลเซียส

- ความเป็นกรดต่าง (pH) เช่นเดียวกับอุณหภูมิ ถ้าระบบบำบัดดำเนินการในช่วง pH ที่ไม่เหมาะกับการเจริญเติบโตและดำรงชีวิตของแบคทีเรียแล้ว ประสิทธิภาพจะลดลง สำหรับแบคทีเรียทั้งกลุ่มสร้างกรด และกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน จะมีค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 6 - 8 และจะมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ค่าความเป็นกรดต่างที่ 7 ระบบที่มีค่า pH ต่ำกว่า 6.5 จะไม่เหมาะสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน และจะเป็นอันตรายมากถ้าต่ำกว่า 5.0 ส่วนแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดจะมีความทนต่อค่า pH มากกว่ากลุ่มสร้างก๊าซมีเทน สามารถทนค่า pH ได้ถึง 4.5 แต่ถ้าต่ำกว่านี้ก็จะมีผลต่อการดำรงชีวิตของแบคทีเรียเช่นเดียวกัน
- ความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดต่าง (Alkalinity) ถ้าระบบบำบัดมีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงค่า pH มาก เมื่อน้ำเสียที่เข้ามามีปริมาณกรดเพิ่มขึ้น ค่า pH ในระบบจะยังคงเปลี่ยนแปลงไม่มาก ทำให้ระบบมีเสถียรภาพสูงขึ้น กรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจะทำให้ค่า pH ต่ำกว่า 7 ยกเว้นจะมีสารประเภทไบคาร์บอเนตไอออน (bicarbonate :  $\text{HCO}_3^-$ ) ซึ่งเกิดจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในน้ำทำปฏิกิริยารวมกับไฮดรอกไซด์ไอออน (hydroxide ion) เป็นสารปรับ pH (buffer หรือ neutralize) แต่ในบางครั้งปริมาณบัฟเฟอร์ที่เกิดขึ้นในระบบไม่เหมาะสม ไม่เพียงพอจะทำให้ระบบมีเสถียรภาพ

ได้จึงต้องมีการเติมเข้าไป โดยปกติระบบแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะผลิตกรดอินทรีย์ขึ้นประมาณ 200-500 มิลลิกรัมต่อลิตร และต้องการบัพเฟอร์แคลเซียมคาร์บอเนตประมาณ 570-1430 มิลลิกรัมต่อลิตร

- ปริมาณกรดอินทรีย์ (Volatile Fatty Acids) เมื่อมีการสะสมของกรดอินทรีย์ในระบบ จะส่งผลให้ค่า pH ลดลง ซึ่งมีผลกระทบต่อการทำงานของแบคทีเรีย และทำให้ประสิทธิภาพของระบบบำบัดลดลง
- ธาตุอาหารเสริม (Nutrients) จุลินทรีย์ต้องการสารอาหารเสริมในการดำรงชีพ ธาตุอาหารเสริมที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตของแบคทีเรีย ได้แก่ ธาตุไนโตรเจน และ ฟอสฟอรัส ถ้าปริมาณธาตุอาหารเสริมที่จำเป็นไม่เพียงพอ อาจไม่สามารถทำให้แบคทีเรียดำรงชีวิตเป็นปกติได้ นอกจากนี้ยังมีแร่ธาตุอื่น ๆ ที่แบคทีเรียต้องการเล็กน้อย เช่น แคลเซียม , แมกนีเซียม , เหล็ก เป็นต้น แต่โดยทั่วไปจะมีเพียงพออยู่แล้วในน้ำเสีย ถ้าระบบบำบัดขาดธาตุอาหารเสริมเหล่านี้ แบคทีเรียจะไม่สามารถดำรงชีวิตได้ ซึ่งจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง
- สารพิษ (Toxic substances) สารพิษต่าง ๆ ที่เป็นอันตราย เช่น ทองแดง , สังกะสี , นิเกิล , โครเมียม , เบนซีน , ซัลเฟต , คลอไรด์ , โซเดียม , คลอโรฟอร์ม เป็นต้น ถ้าน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบบำบัดมีปริมาณสารพิษสูงกว่าระดับอันตรายจะส่งผลให้แบคทีเรียไม่สามารถดำรงชีวิตได้ ดังนั้นจำเป็นต้องกำจัดสารพิษเหล่านี้ด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น การตกตะกอนสารโลหะหนัก , การเจือจางเพื่อลดความเข้มข้นสารพิษให้ต่ำลง เป็นต้น

นอกจากนี้อิออนบวกบางชนิดจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียในระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน ตัวอย่างของอิออนเหล่านี้ได้แก่ โซเดียม , โปแตสเซียม แคลเซียม เป็นต้น อิออนบวกของธาตุเหล่านี้ถ้ามีในปริมาณที่พอเหมาะจะเป็นประโยชน์ต่อแบคทีเรีย แต่ถ้ามีในระบบมากเกินไปจะเป็นพิษต่อแบคทีเรีย ตารางที่ 2.1 แสดงค่าช่วงความเข้มข้นของอิออนบวกของธาตุบางชนิดและผลกระทบต่อแบคทีเรีย (กิตติศักดิ์, 2539)

ตารางที่ 2.1 ความเข้มข้นของอิออนบวกของธาตุบางชนิดที่มีผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของแบคทีเรีย

อิออนบวก	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
	เป็นประโยชน์	เป็นพิษ	เป็นพิษมาก
Na <sup>+</sup>	100-200	3500-5500	มากกว่า 8000
K <sup>+</sup>	200-400	2500-4500	มากกว่า 12000
Ca <sup>2+</sup>	100-200	2500-4500	มากกว่า 8000
Mg <sup>2+</sup>	75-150	1000-1500	มากกว่า 3000

อย่างไรก็ตามความเป็นพิษของอิออนบวกของธาตุหนึ่ง ๆ สามารถลดลงได้ (antagonism) เมื่อเติมอิออนของธาตุอื่นบางชนิดลงไป เช่น พิษของ Na<sup>+</sup> ที่ความเข้มข้น 3500 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถลดลงได้เมื่อเติม Mg<sup>2+</sup> และ Ca<sup>2+</sup> ความเข้มข้นอยู่ในช่วง 50-1000 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ในทางตรงข้ามอิออนบวกของธาตุบางชนิดสามารถเพิ่มความความเป็นพิษของอีกธาตุหนึ่งให้มากขึ้น (synergism) ได้เช่นกัน

- **การกวนผสม (Mixing)** การกวนผสมในถังปฏิกรณ์ช่วยให้แบคทีเรียมีโอกาสพบสารอาหารได้ทั่วถึงและช่วยการกระจายสารที่ขับออกมาจากเซลล์แบคทีเรีย โดยทั่วไปแล้วการกวนผสมที่ดีจะส่งผลให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ การกวนผสมมี 3 วิธีหลัก คือ วิธีแรกใช้เครื่องกวนโดยมีใบพัดภายในถัง พบว่าโดยทั่วไปถังหมักจะมีขนาดใหญ่ ทำให้ต้องใช้พลังงานสูงและประสิทธิภาพต่ำ วิธีที่สองเป็นการสูบน้ำภายในให้หมุนเวียน เป็นวิธีที่ง่ายแต่ประสิทธิภาพการกวนผสมต่ำ ส่วนวิธีที่สามเป็นการนำก๊าซที่เกิดจากการบำบัดมาใช้ในการกวนผสม เป็นวิธีที่ได้ผลดีที่สุด (Gerard, 1996)

### 2.3 ความสามารถของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน

ระบบแบบไม่ใช้ออกซิเจนมีขอบเขตในการบำบัดน้ำเสียอย่างกว้างขวาง สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์ทั้งสูง , กลาง และ ต่ำ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อัตราการป้อนสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate : OLR) อยู่ในระหว่าง 0.5-40 กรัมต่อลิตรต่อวัน สามารถกำจัด ซีโอดีได้ 70 – 90 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตรก๊าซเกิดขึ้นประมาณ 1-5 ลิตรต่อลิตรของถังปฏิกรณ์

โดยมีส่วนประกอบเป็นก๊าซมีเทน 50-70 เปอร์เซ็นต์ ก๊าซที่เหลือส่วนใหญ่จะประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ โดยปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น ได้แก่ รูปร่างลักษณะของถังปฏิกรณ์ (configuration) , อุณหภูมิที่ดำเนินการ , ชนิดของน้ำเสีย ฯลฯ

สาเหตุที่ทำให้ระบบแบบไม่ใช้ออกซิเจนมีเสถียรภาพต่ำมีมากมาย เช่น การผสมกันภายในถังปฏิกรณ์ไม่ดี ทำให้พื้นที่บางส่วนในถังปฏิกรณ์ไม่เกิดปฏิกิริยา (dead zone) , เวลาที่แบคทีเรียและน้ำเสียอยู่ในระบบไม่เหมาะสม , จำนวนแบคทีเรียในระบบต่ำ แต่ตัวแปรที่มีความสำคัญและเป็นตัวชี้บ่งถึงเสถียรภาพของระบบ ได้แก่ ค่าความเป็นกรดต่าง (ค่าพีเอชจะเปลี่ยนแปลงเนื่องจากเกิดกรดอินทรีย์ขึ้นในระบบ) , ค่าความต้านทานการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดต่าง และส่วนประกอบของก๊าซ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อัตราส่วนของกรดอินทรีย์ต่อค่าความสามารถในการต้านทานความเป็นกรดเป็นด่าง จะมีผลมากที่สุด เหนือกว่าตัวแปรตัวอื่น ๆ ถ้าอัตราส่วนนี้มีค่าสูงกว่า 0.4 ระบบจะเริ่มไม่เสถียร และเมื่อเกิน 0.8 ค่า pH จะลดลง ส่งผลให้ไปยับยั้งการเกิดก๊าซมีเทน ระบบเสียหาย ดังนั้นจึงต้องออกแบบถังปฏิกรณ์และมีการดำเนินการที่เหมาะสม

#### 2.4 การเปรียบเทียบระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน

ระบบบำบัดแบบชีววิทยาสามารถแบ่งตามลักษณะการดำรงชีวิตของแบคทีเรียได้เป็น 2 ประเภท คือ การบำบัดแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic Treatment) และ การบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Treatment) โดยแต่ละแบบจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันดังนี้ (Droste, 1997)

##### แบบใช้ออกซิเจน

ข้อดี	ข้อเสีย
1. น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจะมีค่า COD ต่ำ 2. การเริ่ม (start up) ระบบง่ายและเร็ว เนื่องจากแบคทีเรียมีอัตราการเจริญเติบโตเร็วและทนต่อสภาพแวดล้อม 3. ระบบมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ , pH ฯลฯ	1. เกิดตะกอนมาก เป็นปัญหาและเสียค่าใช้จ่ายในการบำบัด 2. ระบบใช้พลังงานมาก โดยพลังงานส่วนใหญ่ใช้เป็นพลังงานในการเติมอากาศเข้าสู่ระบบ

## แบบไม่ใช้ออกซิเจน

ข้อดี	ข้อเสีย
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ระบบผลิตก๊าซมีเทนขึ้น สามารถนำกลับมาใช้เป็นพลังงานหมุนเวียนได้</li> <li>2. เกิดตะกอนน้อยกว่าแบบใช้ออกซิเจน ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดตะกอนน้อยกว่า</li> <li>3. สามารถรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate : OLR) ได้สูง</li> <li>4. สามารถดำเนินการได้เป็นระยะเวลานาน</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. การเริ่ม (start up) ยุ่งยากและใช้เวลานาน</li> <li>2. ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการใส่สารเคมี (เช่น บัฟเฟอร์) เพื่อปรับสภาวะของระบบให้เหมาะสม</li> <li>3. ระบบมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมต่ำกว่าระบบแบบใช้ออกซิเจน</li> </ol>

## การเปรียบเทียบเชิงพลังงาน

พลังงานที่เกิดขึ้น ในระบบแบบไม่ใช้ออกซิเจนนั้นสารอินทรีย์จะถูกแบคทีเรียย่อยสลายแล้วปล่อยพลังงานออกมาสู่สิ่งแวดล้อมน้อยกว่าแบบใช้ออกซิเจนเพราะพลังงานบางส่วนจะถูกแบคทีเรียเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทน ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นนี้จะสามารถนำกลับมาใช้หมุนเวียนเป็นพลังงานในระบบได้อีกในรูปของเชื้อเพลิง

พลังงานที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ในระบบแบบใช้ออกซิเจนจะต้องมีการป้อนพลังงานเข้าสู่ระบบมากกว่าแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยพลังงานหลัก ๆ คือพลังงานเพื่อป้อนอากาศเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ นอกจากนั้นยังมีพลังงานที่ใช้ในการหมุนเวียนน้ำเสียในสายออกจากถังปฏิกรณ์ให้เข้ามาสู่ระบบใหม่ (recycle) เนื่องจากระบบแบบใช้ออกซิเจนทุกชนิดต้องการการหมุนเวียน แต่ระบบแบบไม่ใช้ออกซิเจนบางชนิดไม่ต้องการ เช่น ระบบแบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศน้ำเสียไหลขึ้น (Upflow Anaerobic Sludge Blanket : UASB) เป็นต้น พลังงานอื่น ๆ ได้แก่ พลังงานในการกำจัดตะกอนที่เกิดขึ้นจากระบบ ซึ่งระบบแบบไม่ใช้ออกซิเจนใช้พลังงานน้อยกว่าเพราะเกิดตะกอนน้อยกว่า และไม่ต้องเสียพลังงานในการป้อนอากาศ

## ตะกอนที่เกิดจากระบบบำบัด

ตะกอนแบคทีเรียที่เกิดจากการบำบัดของระบบแบบใช้ออกซิเจนจะมีปริมาณมากกว่าแบบไม่ใช้ออกซิเจน เนื่องจากระบบแบบใช้ออกซิเจนสามารถสร้างเซลล์แบคทีเรียได้มาก เพราะมีอัตราการเจริญเติบโตเร็วและสามารถหาส่วนประกอบของเซลล์ (คาร์บอน , ไนโตรเจน และ



ออกซิเจน) ได้ง่ายกว่า ตะกอนที่เกิดขึ้นเหล่านี้ล้วนเป็นปัญหาในการกำจัดเพราะต้องผ่านกระบวนการเพื่อให้แห้งก่อนจะขนส่งไปสู่แหล่งกำจัด ขั้นตอนเหล่านี้ล้วนสิ้นเปลืองพลังงานและเสียค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น

### ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของระบบ

ค่าใช้จ่ายของระบบแบบใช้ออกซิเจนจะสูงกว่าระบบแบบไม่ใช้ออกซิเจน เพราะระบบแบบไม่ใช้ออกซิเจนมีค่าใช้จ่ายหลัก ๆ เพียงแค่ค่าสารเคมีสำหรับปรับค่า pH เท่านั้น นอกจากนี้ยังมีก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากระบบสามารถนำกลับมาใช้เป็นพลังงานได้อีกด้วยทำให้ช่วยประหยัดพลังงานมากขึ้น แต่ในระบบแบบใช้ออกซิเจนต้องเสียค่าใช้จ่ายหลาย ๆ อย่าง เช่น

- ค่าใช้จ่ายในการป้อนอากาศเข้าสู่ระบบ ถือเป็นค่าใช้จ่ายหลักที่ระบบแบบใช้ออกซิเจนต้องเสีย แต่ในระบบแบบไม่ใช้ออกซิเจนนั้นไม่จำเป็น
- ค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนที่เกิดขึ้นสูงกว่า เนื่องจากตะกอนในระบบแบบใช้ออกซิเจนนั้นมีปริมาณมากกว่า จึงต้องเสียค่าใช้จ่ายในการผ่านกระบวนการทำให้แห้ง และเสียค่าใช้จ่ายในการขนส่งสู่แหล่งกำจัดต่อไป
- ค่าใช้จ่ายในการบิ่ย้อนกลับ (recirculation) ฯลฯ

### การเริ่ม (start up) ระบบ

ระบบแบบไม่ใช้ออกซิเจนใช้เวลาในการเริ่มระบบนานกว่าแบบใช้ออกซิเจน เพราะอัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียช้า แต่ก็ยังมีข้อดีที่สามารถดำเนินการได้เป็นเวลานาน และในปัจจุบันได้มีผู้ศึกษาเพิ่มเติมทำให้เวลาในการเริ่มระบบเร็วขึ้น

## 2.5 ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศน้ำเสียไหลขึ้น (UASB)

### ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศน้ำเสียไหลขึ้น (Upflow Anaerobic Sludge Blanket : UASB)

ระบบ UASB เป็นระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนชนิดหนึ่งที่มีหลักการทำงานที่ว่า น้ำเสียจะถูกป้อนเข้าทางก้นถังด้วยความเร็วไหลขึ้น (upflow velocity) ที่เหมาะสม (ไม่เกิน 1 เมตรต่อชั่วโมง (Droste, 1997)) ถ้าความเร็วไหลขึ้นน้อยเกินไปจะทำให้แบคทีเรียสัมผัสกับน้ำเสียน้อยและเกิดการอุดตันของแบคทีเรียที่อยู่ด้านล่างของถัง แต่ถ้าความเร็วมากเกินไปจะพัดพาเอา

แบคทีเรียที่ตกตะกอนไหลออกจากถังปฏิกรณ์ เมื่อน้ำเสียผ่านชั้นของตะกอนด้านล่างถังแบคทีเรีย จะทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียและเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วน ยอดของถังปฏิกรณ์จะติดตั้งอุปกรณ์ (Gas-Solid Separator) ในการแยกน้ำเสีย , ก๊าซ และ ตะกอนที่ลอยขึ้นมาออกจากกัน น้ำที่ผ่านการบำบัดจะถูกปล่อยออกทางด้านบนของถัง ส่วนก๊าซที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปผ่านกระบวนการเพื่อแยกก๊าซมีเทนออกมา และสามารถนำกลับมาใช้เป็น เชื้อเพลิงได้ รูปแบบการบำบัดแบบนี้จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียสูง เนื่องจากมีปริมาณของแบคทีเรียเข้มข้นที่จับตัวกันเป็นเม็ด (granule) (มากกว่า 50 กรัมต่อลิตร) อยู่ภายในถังปฏิกรณ์ด้านล่างตลอดเวลา

การดำเนินการระบบแบบ UASB นี้มีปัจจัยสำคัญ ๆ ที่จะต้องควบคุมเพื่อให้ระบบมี ประสิทธิภาพที่สูง ได้แก่

- ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย (คิดในรูปของความต้องการออกซิเจน หรือ COD) ถ้า ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ หรือค่า COD ต่ำเกินไป จะทำให้สารอาหารและแหล่งพลังงานใน การดำรงชีวิตของแบคทีเรียไม่เพียงพอ แต่ถ้าค่า COD สูงเกินไป จะเกิดการสะสมของกรด อินทรีย์ (Volatile Fatty Acid : VFA) ทำให้สภาวะไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของ แบคทีเรียประเภทสร้างมีเทน
- เวลาที่น้ำเสียอยู่ในถังปฏิกรณ์ (Hydraulic Retention Time : HRT) ควรจะควบคุมให้ เหมาะสม ถ้าให้เวลาน้ำเสียในถังปฏิกรณ์น้อยเกินไป แบคทีเรียจะไม่สามารถย่อยสลาย สารอินทรีย์ได้ทัน
- อัตราการป้อนสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate : OLR) เป็นค่าที่บอกถึงปริมาณของ สารอินทรีย์ที่ระบบต้องรับภาระในการบำบัด ค่า OLR จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่า COD และ HRT

นอกจากนี้ UASB เป็นระบบที่มีความไวต่อส่วนประกอบของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบมาก น้ำ เสียที่มีปริมาณแอมโมเนียมไอออน ( $\text{NH}_4^+$ ) สูงจะไม่เหมาะกับระบบบำบัดแบบนี้ (กิตติศักดิ์, 2539) เช่นเดียวกับน้ำเสียที่มีปริมาณไดวาเลนต์ แคทไอออน (divalent cation) ต่ำซึ่งมีผลต่อการจับเป็น เม็ดของแบคทีเรีย (van langerak และคณะ, 1998)

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบ UASB นี้สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีค่า COD ตั้งแต่ 500 ถึง 20000 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ แต่ในอุตสาหกรรมจริงนั้นค่าสารอินทรีย์ที่ต่ำที่สุดที่สามารถบำบัดได้นั้น ประมาณ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร (Droste, 1997) อัตราการป้อนสารอินทรีย์ (OLR) อยู่ในช่วง 0.5-40 กรัมต่อลิตรต่อวัน (เวลาที่น้ำเสียอยู่ในถัง (HRT) ไม่เกิน 1 วัน) รูปที่ 2.2ก เป็นแผนผังคร่าว ๆ สำหรับถังปฏิกรณ์แบบ UASB

### ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศน้ำเสียไหลขึ้นอุณหภูมิสูง (High Rate Thermophilic UASB)

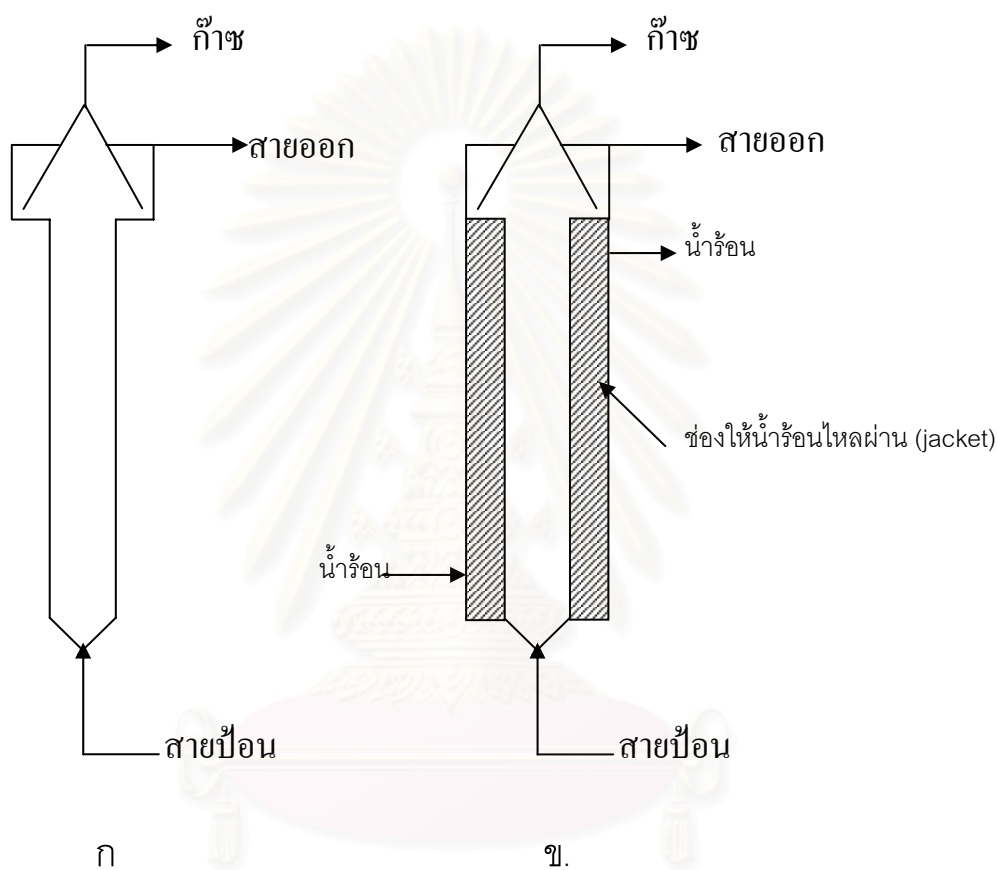
เป็นการดัดแปลง UASB ให้ทำงานที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้มีสภาวะเหมาะกับการเจริญเติบโตและดำรงชีวิตของแบคทีเรียประเภทที่ทำงานที่อุณหภูมิสูง (thermophilic bacteria) รอบ ๆ ถังปฏิกรณ์จะมีช่องทางสำหรับให้น้ำร้อนไหลผ่าน (jacket) ประสิทธิภาพของระบบนี้จะสูงกว่า UASB แบบธรรมดาเพราะว่าแบคทีเรียมีความสามารถในการย่อยสลายสูงกว่า แต่ระบบนี้มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็นอย่างมาก ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือลดลงเพียงเล็กน้อย ประสิทธิภาพของระบบจะต่ำลงทันที (Harada และคณะ, 1996) รูปที่ 2.2x แสดงถึงลักษณะการทำงานของถังปฏิกรณ์แบบนี้

### ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศน้ำเสียไหลขึ้นแบบเพิ่มพื้นที่ตะกอน (Expanded Granular Sludge Bed : EGSB)

เป็นการปรับปรุงถังแบบ UASB ให้มีพื้นที่สัมผัสระหว่างน้ำเสียกับตะกอนเพิ่มขึ้น ทำได้หลายวิธี เช่นใส่วัสดุบางชนิดที่มีพื้นที่ผิวมาก ๆ ลงไปเพื่อให้ตะกอนเกาะ หรือการนำน้ำเสียที่ออกจากระบบกลับไปผสมกับสายป้อนและป้อนเข้าสู่ระบบใหม่ (Recycle) เป็นการเพิ่มความเร็วของน้ำเสียที่ป้อน (อยู่ในช่วง 6-12 เมตรต่อชั่วโมง) ทำให้เกิดการกวนผสมที่ดีขึ้น ทำให้เวลาที่น้ำเสียอยู่ในถังปฏิกรณ์มากขึ้น จึงสามารถบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำได้

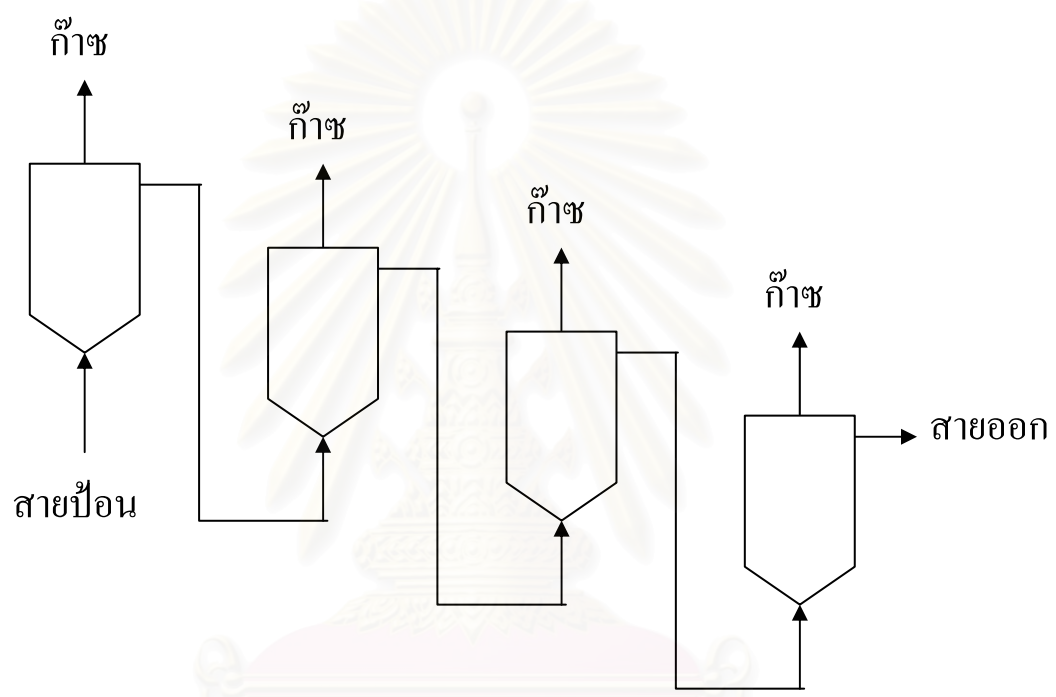
### ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศน้ำเสียไหลขึ้นแบบแบ่งส่วน (Staging Upflow Anaerobic Sludge Blanket : SUASB)

เป็นการแบ่ง UASB ออกเป็นหลาย ๆ ส่วนต่อกัน สาเหตุของการแบ่งถังปฏิกรณ์เพื่อให้ส่วนแรก ๆ เก็บกรดอินทรีย์ที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นระหว่างที่สารอินทรีย์จะเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ (intermediate) เมื่อกรดอินทรีย์สะสมอยู่ในถังปฏิกรณ์ส่วนแรก ๆ กรดอินทรีย์จะเปลี่ยนสภาวะในถังปฏิกรณ์ให้มีสภาพเป็นกรด ทำให้สภาวะเหมาะแก่กับแบคทีเรียประเภทสร้างกรด (acidogen) ถังปฏิกรณ์ส่วนหลัง ๆ ที่ปราศจากการสะสมของกรดอินทรีย์จะมีสภาวะเหมาะแก่กับแบคทีเรียประเภทสร้างมีเทน ดังนั้นถังปฏิกรณ์แบบนี้จึงมีสภาวะเหมาะสมกับแบคทีเรียทั้งสองประเภท ลักษณะถังปฏิกรณ์เป็นดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 ตั้งปฏิกรณ์แบบต่าง ๆ ก. ตั้งปฏิกรณ์ไร้อากาศน้ำเสียไหลขึ้น

ข. ตั้งปฏิกรณ์ไร้อากาศน้ำเสียไหลขึ้นอุณหภูมิสูง



รูปที่ 2.3 ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศน้ำเสียไหลขึ้นแบบแบ่งส่วน  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3

#### ตรวจเอกสาร

กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาที่ไม่ใช้ออกซิเจนแบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศน้ำเสียไหลขึ้น (Upflow Anaerobic Sludge Blanket : UASB) เป็นที่สนใจมานานกว่า 20 ปีแล้ว ทั้งนี้เพราะข้อดีคือค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำ และได้ผลผลิตเป็นก๊าซมีเทนที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบ UASB มีใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเครื่องตีแม่เหล็กฮอลล์ และอุตสาหกรรมที่มีปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียสูง (Gerard, 1996) เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ, ผลิตภัณฑ์อาหาร, อุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล ฯลฯ

งานวิจัยเบื้องต้นทางด้านนี้มักจะเกี่ยวข้องกับการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบ เช่น การศึกษาของ Moosbrugger และคณะ (1993) ที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของความเป็นกรดต่าง (pH) และ ความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลง pH ต่อประสิทธิภาพของระบบ โดยทดลองบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตไวน์ที่มีอุณหภูมิเป็นวัฏศุนย์ด้วยถังปฏิกรณ์แบบ UASB พบว่าเมื่อค่า pH ลดลง หรือเมื่อระบบมีสภาพเป็นกรดมากขึ้น ประสิทธิภาพที่คิดจากเปอร์เซ็นต์การกำจัดสารอินทรีย์ (%COD removal) มีค่าลดลง สาเหตุที่ความเป็นกรดต่างมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบอาจเนื่องจากเมื่อแบคทีเรียในถังปฏิกรณ์ย่อยสลายสารอินทรีย์จะได้กรดอินทรีย์ และเมื่อเกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ปริมาณมากขึ้น ค่า pH จะลดลง สภาวะในถังปฏิกรณ์จะไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของแบคทีเรีย ประสิทธิภาพจึงลดลง ดังนั้นจึงสรุปว่าถ้าระบบมีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลง pH ก็จะมีเสถียรภาพมากขึ้น นอกจากนี้การศึกษานักวิจัยกลุ่มนี้ยังศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเป็นกรดต่างในระบบ UASB ด้วย โดยทดลองเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ (COD loading rate) ซึ่งทำได้โดยการควบคุมความเข้มข้นของสารอินทรีย์ให้คงที่แต่เพิ่มอัตราการไหล (flow rate) ดังนั้นปริมาณ  $H_2CO_3$  ที่ใช้เป็นตัวต้านทานการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่าง (buffer) ที่เข้าสู่ระบบจะมากขึ้นด้วย สรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่า pH สามารถพิจารณาได้จากอัตราส่วนของ  $H_2CO_3$  ต่อความเข้มข้นสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าไป ( $H_2CO_3$  : COD) ถ้าอัตราส่วนดังกล่าวเพิ่มขึ้น ความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลง pH จะเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังได้ทดลองเพื่อหาผลของการป้อนกลับ (Recycle) โดยการป้อนน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์บางส่วนกลับเข้าสู่ถังปฏิกรณ์อีกครั้ง โดยควบคุมให้ความเข้มข้นรวมของสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบเท่าเดิม ดังนั้น  $H_2CO_3$

ที่เกิดขึ้นและไหลออกมาพร้อมสายออกจะถูกบ่อนกลับเข้าไปในถังปฏิกรณ์ใหม่ ทำให้อัตราส่วน  $H_2CO_3$  : COD เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า pH เพิ่มขึ้นด้วย สรุปว่าการบ่อนกลับมีผลดีทำให้ค่า pH ในระบบไม่ลดต่ำจนเกินไป

### การใช้ UASB บำบัดน้ำเสียอุณหภูมิสูง

Wiegant และ Lettinga (1985) และ Harada และคณะ (1996) ได้เสนอการใช้ UASB ที่อุณหภูมิสูงโดยใช้แบคทีเรียที่สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูง เพื่อช่วยเร่งอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยการศึกษาทั้งสองนี้พบว่า UASB ที่อุณหภูมิสูงสามารถมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ได้สูงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ที่อัตราการไหลของน้ำเสียสูง ระบบบำบัดแบบที่มีอุณหภูมิสูงนี้เหมาะสำหรับอุตสาหกรรมบางประเภทที่น้ำเสียจากโรงงานมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิปกติเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการลดอุณหภูมิของน้ำเสียที่ถูกปล่อยออกมา อย่างไรก็ตามแม้ผลการทดลองของระบบบำบัดที่อุณหภูมิสูงนี้จะชี้ให้เห็นว่าระบบนี้เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูง แต่ในโรงงานใหญ่ ๆ ระบบนี้ไม่เป็นที่นิยมเพราะว่าประสิทธิภาพของระบบจะมีความไวต่ออุณหภูมิอย่างมาก แม้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยจะส่งผลเสียอย่างมากต่อประสิทธิภาพของระบบ

Syutsubo และคณะ (1998) ค้นหากลไกการจับเป็นเม็ดของแบคทีเรียในถังปฏิกรณ์ UASB ที่อุณหภูมิสูง (55 องศาเซลเซียส) การทดลองใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีน้ำตาลซูโครส , อะซีเตท , โพรพิโอเนต และ yeast extract ในสัดส่วน 4.5 : 2.25 : 2.25 : 1 ให้ค่า COD เริ่มต้นที่ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน แล้วค่อย ๆ ลด HRT ลงจนเหลือ 4.2 ชั่วโมง และเพิ่มค่า COD เป็น 2 , 3 และ 4 เท่า ผลการทดลองพบระบบสามารถรับ OLR ได้มากที่สุด 45 กรัม COD ต่อลิตรต่อวัน มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ การทดลองสามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วง ช่วงแรก (OLR น้อยกว่า 3.4 กรัม COD ต่อลิตรต่อวัน) เกิดสภาวะการเจือจาง (wash out) ขึ้น ช่วงที่สอง (OLR 3.4-23 กรัม COD ต่อลิตรต่อวัน) พบว่ามีตะกอนในถังมากขึ้นเนื่องจากเป็นช่วงของการจับเป็นเม็ด และช่วงที่ 3 (OLR 45 กรัม COD ต่อลิตรต่อวัน) เกิดสภาวะการเจือจางอีกครั้ง เนื่องจากค่า OLR ที่มากเกินไปเป็นผลให้เกิดก๊าซที่ผลักดันให้ตะกอนลอยมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเวลาที่ใช้ในการจับเป็นเม็ดสูงถึง 200 วัน ทั้งนี้สาเหตุอาจจะมาจากการใช้แบคทีเรียที่มีความสามารถในการจับเป็นเม็ดต่ำ

## การใช้ UASB บำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำ

ระบบบำบัดแบบ UASB มีการพัฒนามาเรื่อย ๆ จนปัจจุบันใช้ได้ดีและมีประสิทธิภาพเป็นที่น่าพอใจเมื่อใช้บำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์สูง (Austermann-Haun และคณะ, 1997 และ Kida และคณะ, 1995) แต่ในประเทศกำลังพัฒนาส่วนใหญ่จะพบกับปัญหาการปล่อยน้ำเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำ (ค่า COD น้อยกว่า 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร) ออกมาจากโรงงาน เนื่องจากการบำบัดของโรงงานอุตสาหกรรมเหล่านั้นมีประสิทธิภาพไม่ดีพอ น้ำเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำเหล่านี้จะไหลลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติและทำลายสภาพแวดล้อม จึงมีผู้สนใจนำระบบบำบัดแบบ UASB นี้มาประยุกต์ใช้กับน้ำเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำ ๆ แต่การบำบัดน้ำเสียประเภทนี้พบปัญหาที่แตกต่างจากน้ำเสียประเภทเดิมที่มีปริมาณสารอินทรีย์สูง เพราะเมื่อปริมาณ COD (สารอินทรีย์) ที่ป้อนเข้ามาต่ำ ทำให้ปริมาณสารอาหารในถังปฏิกรณ์ต่ำไปด้วย เป็นผลให้อัตรการย่อยสลายสารอาหารของแบคทีเรียสูงกว่าอัตราการถ่ายเทของสารอาหาร (external mass transfer) ที่ผ่านเข้าไปหาแบคทีเรียที่จับตัวกันแน่นเป็นเม็ด (granule) ดังนั้นแบคทีเรียที่อยู่ด้านในของเม็ดตะกอนจะได้รับสารอาหารปริมาณน้อย ไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพของระบบจึงลดลง

Agrawal และคณะ (1997) ศึกษาการใช้ถังปฏิกรณ์แบบ UASB บำบัดน้ำเสียที่มีค่า COD ต่ำ (300 มิลลิกรัมต่อลิตร) ทำการทดลองที่ 25 องศาเซลเซียส ใช้ HRT เริ่มแรกที่ 28 ชั่วโมง (คิดเป็นค่า OLR 0.26 กรัม COD ต่อลิตรต่อวัน) แล้วค่อย ๆ ปรับค่าลดลงมาจนเหลือ 9 ชั่วโมง (OLR 0.73 กรัม COD ต่อลิตรต่อวัน) ผลการทดลองปรากฏว่าเมื่อใช้ HRT 28 ชั่วโมง ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัด COD เพียง 65 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น นอกจากนี้ในสายออกยังพบกรดอินทรีย์ (ได้แก่ กรดอะซิติกและโพรพิโอนิก) อยู่ประมาณ 60 มิลลิกรัม COD ต่อลิตร แต่เมื่อลด HRT ลงเหลือ 9 ชั่วโมง ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัด COD สูงขึ้นเป็น 80 เปอร์เซ็นต์ รวมทั้งพบปริมาณกรดอินทรีย์ในสายออกน้อยลงเหลือ 20 มิลลิกรัม COD ต่อลิตร และเมื่อตรวจก๊าซที่เกิดขึ้นพบว่าเมื่อลด HRT ปริมาณมีเทนที่ผลิตได้เพิ่มจาก 3.5 เป็น 12 ลิตรต่อวัน สัดส่วนมีเทนคิดเป็น 60-70 เปอร์เซ็นต์ของก๊าซที่เกิดขึ้น แต่เมื่อลด HRT ลงต่ำกว่า 9 ชั่วโมง ระบบไม่สามารถทำงานต่อไปได้

Mario และคณะ (1997) ได้ทดลองป้อนน้ำเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ UASB ด้วยการใช้อัตราการไหลและความเข้มข้นของสารอินทรีย์ต่ำ จะทำให้การผสมกันในถังปฏิกรณ์มีน้อยเพราะอัตราการไหลน้อยไม่เพียงพอต่อการทำให้เกิดการปั่นกววนในถังปฏิกรณ์ อีกทั้งเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่ำจึงเกิดก๊าซทางชีวภาพน้อยทำให้การผสมกันด้วยก๊าซภายในถัง



น้อย จึงสรุปว่าการใช้ UASB ในการบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำจะมีประสิทธิภาพไม่ดี เนื่องจากกระบวนการผสมกันภายในถังปฏิกรณ์ดีไม่เพียงพอ Mario และคณะ (1997) จึงคิดออกแบบถังปฏิกรณ์แบบใหม่ เรียกว่า **ถังขยายพื้นที่ตะกอน (Expanded Granular Sludge Bed : EGSB)** โดยมีหลักการการทำงานเหมือนกับ UASB แต่พยายามทำให้แบคทีเรียสัมผัสกับสารอินทรีย์ในน้ำเสียมากขึ้น อาจทำได้โดยการเพิ่มความเร็วในการปั่นสารอินทรีย์ด้วยการเติมน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์กลับเข้าไปใหม่เพื่อให้ระบบบำบัดอยู่ในสภาวะที่แบคทีเรียสามารถสัมผัสกับสารอินทรีย์ได้มากขึ้น (Expanded condition) หรือเติมวัสดุสำหรับให้แบคทีเรียเกาะ (medium) เช่น ทอวย ถ่าน ฯลฯ เมื่ออาศัยหลักการออกแบบถังปฏิกรณ์แบบนี้ช่วยให้แบคทีเรียสามารถบำบัดน้ำเสียได้อย่างทั่วถึงขึ้น เพราะว่ามีกระบวนการผสมผสานที่ดีขึ้น ผลการทดลองพบว่าถังปฏิกรณ์แบบนี้สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ต้องควบคุมตัวแปร 3 ชนิด คือ อัตราการไหล (flow rate) , อัตราการป้อนสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate : OLR) และความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ป้อน (influent COD concentration) ให้มีค่าที่เหมาะสม ถ้าค่าอัตราการไหลน้อยกว่าช่วงที่เหมาะสมนี้ทำให้สารอาหารของแบคทีเรียในน้ำเสียเกิดการถ่ายเทผ่านก้อนแบคทีเรียได้ช้ากว่าอัตราการใช้สารอาหาร แต่ถ้าค่ามากกว่าช่วงที่เหมาะสมแรงลอยตัวของฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะดันให้แบคทีเรียลอยขึ้นไปด้านบนของถังปฏิกรณ์และไหลออกมาพร้อมสายออก (wash out) เพื่อป้องกันการเกิดก๊าซชีวภาพที่มากเกินไปจึงต้องจำกัดค่าอัตราการป้อนสารอินทรีย์ไม่ให้มากเกินไปด้วย เพราะอัตราการเกิดก๊าซขึ้นอยู่กับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ เมื่อเปรียบเทียบถังปฏิกรณ์แบบ UASB และ EGSB ที่อัตราการป้อนเดียวกันแล้ว พบว่า EGSB สามารถบำบัดของเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์ที่ต่ำกว่า และเมื่อทดลองดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำ พบว่า EGSB สามารถบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วย สรุปแล้ว UASB สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำได้ โดยปัญหาที่เกิดขึ้นสามารถแก้ไขโดยการออกแบบถังปฏิกรณ์ให้แบคทีเรียสามารถสัมผัสกับน้ำเสียได้มากขึ้น โดยทำให้เกิดการผสมกันดีขึ้น เกิดการถ่ายเทมวลดีขึ้น แต่ถังปฏิกรณ์แบบ EGSB ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการสร้างเพิ่มขึ้น เช่น ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการซื้อวัสดุที่จะให้แบคทีเรียเกาะ หรือต้องติดตั้งเพิ่มเพื่อใช้ในการป้อนน้ำเสียจากสายออกกลับเข้าสู่ถังปฏิกรณ์

Diessen และ Yspeert (1999) ได้ศึกษาถึงจุดอ่อนของถังปฏิกรณ์แบบ UASB ที่มักจะมีประสิทธิภาพในการกำจัด COD ต่ำเมื่อนำมาบำบัดน้ำเสียที่มีค่า COD ต่ำหรือสูงเกินไป ในน้ำเสียที่มีค่า COD ต่ำนั้นตัวแปรที่จำกัดประสิทธิภาพคือค่า HRT เนื่องจากที่ HRT ต่ำ ๆ น้ำเสียมีเวลาอยู่ในถังปฏิกรณ์น้อย แบคทีเรียไม่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ทัน โดยทั่วไป UASB จะมีค่า HRT ไม่น้อยกว่า 4-5 ชั่วโมง (คิดเป็นความเร็วน้ำเสียที่ลอยขึ้นไม่เกิน 1.3 เมตรต่อชั่วโมง) แต่เมื่อ

น้ำเสียมีค่า COD สูงแล้ว ประสิทธิภาพของระบบจะถูกจำกัดด้วย *ความสามารถในการรับภาระ OLR (Organic Loading Capacity)* เนื่องจากถึงแม้ว่าเวลาที่น้ำเสียอยู่ในถังปฏิกรณ์จะมาก แต่ค่า COD อันแสดงถึงปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียนั้นมากด้วย ดังนั้นแบคทีเรียจึงไม่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ทัน เพื่อแก้ปัญหานี้ของ UASB ช่างต้น Driessen และ Yspeert (1999) จึงออกแบบถังปฏิกรณ์ให้เป็น EGSB โดยการเพิ่ม *อัตราส่วนของความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง* ของถังปฏิกรณ์ รวมทั้งให้มีการบ่อน้ำเสียดับเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ (recycle) ด้วยเพื่อเป็นการเพิ่มความเร็วน้ำเสียที่ลอยขึ้น การทดลองใช้ EGSB บำบัดน้ำเสีย 3 ประเภท คือ 1. น้ำเสียที่มีค่า COD ต่ำจากโรงงานนม 2. น้ำเสียที่มีค่า COD ปานกลางจากโรงงานอาหาร และ 3. น้ำเสียที่มีค่า COD สูงจากโรงงานหมักเบียร์ ผลการทดลองเป็นดังนี้

1. กรณีบำบัดน้ำเสียที่มีค่า COD ต่ำ (เฉลี่ย 1,550 มิลลิกรัมต่อลิตร) หลังจากทดลองเปลี่ยนค่า OLR ไปเรื่อย ๆ พบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัด COD ค่อนข้างคงที่ที่ 51 เปอร์เซ็นต์ พบว่าประสิทธิภาพจะไม่ขึ้นกับค่า HRT (ค่าต่ำสุดที่ 2.6 ชั่วโมง)
2. กรณีบำบัดน้ำเสียที่มีค่า COD ปานกลาง (เฉลี่ย 4,550 มิลลิกรัมต่อลิตร) เมื่อทดลองเปลี่ยน OLR แล้ว (HRT ระหว่าง 3.6-9.1 ชั่วโมง) พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด COD จะมีค่าคงที่ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์เมื่อค่า OLR มากกว่า 42 กรัมต่อลิตรต่อวัน
3. กรณีบำบัดน้ำเสียที่มีค่า COD สูง (เฉลี่ย 13,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) เมื่อปรับ OLR โดยใช้ HRT ระหว่าง 8-24 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด COD แปรผันตามค่า OLR อยู่ในช่วง 70-90 เปอร์เซ็นต์

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า EGSB สามารถเพิ่มขอบเขตของการทำงานได้มากขึ้นกว่า UASB โดยในน้ำเสียที่มีค่า COD ต่ำ สามารถลด HRT ได้ถึง 3.6 ชั่วโมง และในน้ำเสียที่มีค่า COD สูงสามารถบำบัดน้ำเสียได้มีประสิทธิภาพสูง (70-90 เปอร์เซ็นต์)

#### การทดลองที่อุณหภูมิต่ำและผลของออกซิเจนต่อประสิทธิภาพระบบบำบัดแบบ UASB

Mario และคณะ (1997) ได้ทดลองใช้ระบบแบบ UASB ศึกษาผลของออกซิเจนที่มีต่อประสิทธิภาพของระบบ และประสิทธิภาพของระบบเมื่อดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 15 องศาเซลเซียส) แบคทีเรียประเภทสร้างก๊าซมีเทน (methanogen) เป็นแบคทีเรียที่อ่อนแอไม่ทนต่อสภาพแวดล้อม ดังนั้นเมื่อระบบมีออกซิเจนปะปนอยู่ แบคทีเรียประเภทสร้างก๊าซมีเทนนี้จึงได้รับผลกระทบมากที่สุด การทดลองเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของออกซิเจนทำโดยใช้ถังปฏิกรณ์ UASB สองถังป้อนด้วยน้ำเสียชนิดเดียวกัน ดำเนินการบำบัดไปพร้อมกัน แตกต่างกันที่น้ำเสียที่ป้อนสู่ถังแรกจะมีการเป่าด้วยอากาศเพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจน ถึงที่สองเติมโซเดียมซัลไฟด์ (Sodium

sulfide) เพื่อกำจัดออกซิเจน พบว่าผลการทดลองของทั้งสองถังใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นออกซิเจนไม่มีผลต่อการดำรงชีวิตของแบคทีเรียประเภทสร้างมีเทน (methanogen) ทั้งนี้เนื่องจากแบคทีเรียในถังปฏิกรณ์แบบ UASB จะจับตัวกันเป็นก้อน (granule) โดยแบคทีเรียประเภทสร้างมีเทนที่ไม่ทนต่อสภาวะแวดล้อมจะอยู่ข้างในและล้อมรอบด้วยแบคทีเรียประเภทที่มีความทนต่อสภาวะแวดล้อม (facultative bacteria) เนื่องจากปริมาณออกซิเจนมีไม่มากนัก ออกซิเจนจึงถูกแบคทีเรียที่อยู่รอบนอกใช้ในกระบวนการเคมีในเซลล์ (respiration) จนหมด ออกซิเจนจึงเข้าไปไม่ถึงแบคทีเรียประเภทสร้างมีเทนที่อยู่ด้านใน การเปลี่ยนชนิดของสารอาหาร (substrate) ในน้ำเสียจะมีผลต่อความสามารถในการทำงานของระบบ เช่นเมื่อทดลองหยุดการป้อนสารอาหาร จะส่งผลให้กระบวนการเคมีในเซลล์ (respiration) ที่อยู่รอบนอกของก้อนแบคทีเรียน้อยลง จึงทำให้มีออกซิเจนเหลือพอที่จะแพร่เข้าไปสัมผัสกับแบคทีเรียประเภทสร้างมีเทนที่อยู่ด้านในของก้อนแบคทีเรียมากขึ้น ดังนั้นชนิดและปริมาณของสารอาหารในน้ำเสียจึงอาจมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบได้เช่นกัน

Kalyuzhnyi และคณะ (2000) ทดลองบำบัดน้ำเสียด้วย UASB ที่อุณหภูมิต่ำ HRT 1 วัน แบ่งการทดลองเป็น 4 ตอน โดยที่ในตอนที่ 1 และ 2 ทดลองที่อุณหภูมิ 35 และ 19-21 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ทั้งสองตอนไม่มีสายป้อนกลับ (recycle) แบคทีเรียที่ใช้เป็นประเภทสามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วงอุณหภูมิปานกลาง (Mesophilic bacteria : 35-37 องศาเซลเซียส) ผลการทดลองปรากฏว่าระบบสามารถรับ OLR ได้ 15.9 และ 6.5 กรัม COD ต่อลิตรต่อวัน ในการทดลองตอนที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการกำจัด COD มากกว่า 85 เปอร์เซ็นต์ทั้งสองตอน แต่พบตะกอนในการทดลองตอนที่ 2 (ที่อุณหภูมิต่ำ) จะลอยขึ้นและจากการพิจารณาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไม่พบการจับตัวเป็นเม็ด ในขณะที่การทดลองตอนที่ 1 มีการจัดเรียงตัวกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอุณหภูมิมิมีผลต่อการจับกันเป็นเม็ด ส่วนตอนที่ 3 และ 4 ทำที่อุณหภูมิ 18-20 และ 9-10 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ทั้งสองตอนมีการป้อนกลับ และใช้แบคทีเรียประเภทเจริญเติบโตได้ดีในช่วงอุณหภูมิต่ำ (Psychrophilic bacteria : 10-15 องศาเซลเซียส) ปรากฏว่าการทดลองตอนที่ 3 และ 4 สามารถรับ OLR ได้สูงสุด 12.5 และ 7.2 กรัม COD ต่อลิตรต่อวันตามลำดับ การทดลองตอนที่ 3 พบการจับตัวเป็นเม็ดดี และมีประสิทธิภาพในการกำจัด COD ได้มากกว่า 85 เปอร์เซ็นต์ แต่ในการทดลองที่ 4 ได้ประสิทธิภาพเพียง 60 เปอร์เซ็นต์ พบกรดอะซิติกและโพรพิโอนิกมากในสายออก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอุณหภูมิจนชนิดของแบคทีเรียมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบและกลไกในการจับตัวเป็นเม็ดของแบคทีเรีย

## การเติมสารที่เป็นพิษเข้าสู่ระบบแบบ UASB

Thaveesri และคณะ (1994) ศึกษาผลกระทบของการเติมโมเนนซิน (monensin) ที่มีต่อสมรรถนะในการทำงานของระบบแบบ UASB โมเนนซินเป็นสารที่เป็นพิษต่อแบคทีเรียทั้งประเภทสร้างกรดและประเภทสร้างก๊าซมีเทน การทดลองจะใช้ถังปฏิกรณ์ UASB ขนาด 2.3 ลิตร จำนวน 2 ถัง ทำการทดลองที่อุณหภูมิประมาณ 33 องศาเซลเซียส ทั้งสองถังป้อนด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่า COD 7,500 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยน้ำเสียสังเคราะห์ประกอบด้วยน้ำตาลและเปปโตน (peptone) ในอัตราส่วน 1 ต่อ 4 ค่า HRT 1 วัน UASB และสายป้อนหนึ่งสายจะผสมสารโมเนนซินที่มีความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าถังปฏิกรณ์ที่ใส่โมเนนซินนั้นจะใช้เวลาในการเริ่มระบบ (start up period) นานกว่าถังที่ไม่ใส่ถึง 2 เท่า นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ในสายออกของถังที่ใส่โมเนนซินจะมากกว่าถังที่ไม่ใส่ 2 เท่าด้วย และทำให้ก๊าซที่เกิดขึ้นปริมาณน้อยลง 20 เปอร์เซ็นต์ แต่โมเนนซินจะไม่มีผลต่อการจับเป็นเม็ดของตะกอนแบคทีเรียหรือผลต่อการไหลออกของแบคทีเรียแต่อย่างใด ดังนั้นการเติมโมเนนซินปริมาณต่ำ (0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร) ในระบบแบบ UASB เกิดผลเสียบ้างแต่ไม่รุนแรงมากนัก

## การใช้ UASB กำจัดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทเป็นวง (aromatic) ในน้ำเสียที่มีปริมาณซัลเฟตสูง

ระบบแบบ UASB ถูกใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทเป็นวง (aromatic) ที่มีโครงสร้างง่าย ๆ เช่น เบนโซเอต (benzoate) ฟีนอล (phenol) ปรากฏว่าระบบ UASB สามารถย่อยสลายสารเหล่านี้ได้ โดย Herbert และคณะ (1997) ศึกษาการบำบัดสารครีซอล (cresol) ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างเป็นวงแต่ซับซ้อนขึ้นเล็กน้อย และเป็นพิษต่อแบคทีเรียโดยใช้ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศน้ำเสียไหลขึ้น จุดประสงค์ของการทดลองเพื่อศึกษาอัตราการย่อยสลายครีซอลในน้ำเสียที่มีส่วนประกอบของซัลเฟต (sulfate) และเบนโซเอต และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการกำจัดซัลเฟตของแบคทีเรียประเภทสร้างก๊าซมีเทน (methane-producing bacteria : MPB) และการกำจัดซัลเฟตของแบคทีเรียประเภทย่อยสลายซัลเฟต (sulfate reducing bacteria : SRB) ในน้ำเสียที่มีเบนโซเอตและครีซอล การทดลองทำโดยป้อนน้ำเสียที่มีเบนโซเอต ครีซอล และซัลเฟตเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ ปริมาณของสารทั้งสามชนิดจะเปลี่ยนแปลงไปเรื่อย ๆ พบว่าตลอดการทดลองเบนโซเอตถูกย่อยสลายในอัตราที่สูง แต่ปริมาณครีซอลลดลงเพียงเล็กน้อย และปริมาณครีซอลที่เหลืออยู่ในระบบก็ไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบ อาจเพราะว่าการจับตัวกันเป็นก้อนของแบคทีเรีย โดยแบคทีเรียประเภทสร้างก๊าซมีเทนที่เป็น

แบคทีเรียที่อ่อนแอไม่สามารถทนต่อสภาวะแวดล้อมอยู่ด้านบนแล้วถูกล้อมรอบด้วยแบคทีเรียประเภทสร้างกรดที่มีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมมากกว่า เมื่อทดลองเพิ่มปริมาณซัลเฟตในน้ำเสีย อัตราการย่อยสลายครีซอล เบนโซเอต และอัตราการผลิตก๊าซมีเทนไม่เปลี่ยนแปลง แต่ประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตลดลง สรุปได้ว่าอัตราการย่อยสลายซัลเฟตจะคงที่ถ้าปราศจากการเพิ่มสารอาหารหลัก (carbon source ซึ่งในที่นี้คือเบนโซเอต) ซึ่งเมื่อทดลองเปลี่ยนชนิดของสารอาหารหลักพบว่าผลกระทบต่อความสามารถในการย่อยสลายซัลเฟตด้วย และจากการทดลองพบว่าในน้ำเสียที่ไม่มีซัลเฟตอยู่นั้นเบนโซเอตจะถูกแบคทีเรียประเภทสร้างกรดย่อยสลายเป็นกรดอะซิติกก่อนที่จะถูกแบคทีเรียประเภทสร้างก๊าซมีเทนเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน แต่ในน้ำเสียที่มีซัลเฟต แบคทีเรียประเภทย่อยสลายซัลเฟตจะแข่งขันกับแบคทีเรียประเภทสร้างกรด ทำให้อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ (เบนโซเอต) ในน้ำเสียที่มีซัลเฟตจะสูงกว่า แต่ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจะลดลง เพราะเบนโซเอตบางส่วนถูกแบคทีเรียประเภทย่อยสลายซัลเฟตย่อยสลายไป

#### การใช้ UASB กำจัดกรดอินทรีย์ในน้ำเสียที่มีปริมาณซัลเฟตสูง

Omil และคณะ (1996) ได้ทดลองใช้ UASB บำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่ประกอบด้วยอะซีเตท , โพรพิโอเนต และบิวทีเรต ในน้ำเสียที่มีปริมาณซัลเฟตสูง (Sulfidogenic condition) โดยอัตราส่วนของ COD ต่อซัลเฟต (COD : sulfate) เป็น 0.5 การทดลองจะศึกษาอิทธิพลของความเร็วน้ำเสียที่ป้อน (upward liquid velocity :  $v_{up}$ ) อัตราส่วนปริมาณของส่วนประกอบในสายป้อน และค่าความเป็นกรดต่างในถังปฏิกรณ์ ที่มีต่อการทำงานของแบคทีเรียประเภทกำจัดซัลเฟต และประเภทสร้างมีเทน เริ่มทดลองโดยป้อนน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ด้วยความเร็วในการป้อนต่ำ (1-2 เมตรต่อชั่วโมง) พบว่าสามารถกำจัดโพรพิโอเนตและบิวทีเรตได้อย่างสมบูรณ์ในเวลาอันรวดเร็ว แต่อะซีเตทถูกกำจัดออกไปได้น้อย เมื่อเวลาผ่านไปพบว่าระบบ UASB สามารถกำจัดอะซีเตทได้เกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นภายใต้สภาวะที่มีปริมาณซัลเฟตสูง ที่ความเร็วในการป้อนต่ำ UASB สามารถใช้ได้ดี แบคทีเรียที่ทำงานคือแบคทีเรียประเภทกำจัดซัลเฟต เมื่อเพิ่มความเร็วในการป้อนขึ้นโดยปกติระบบบำบัดควรมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเนื่องจากการสัมผัสกันของแบคทีเรียกับน้ำเสียเพิ่มขึ้น ทำให้การถ่ายเทมวลเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองชี้ว่าประสิทธิภาพของระบบที่ความเร็วสูงต่ำลงเนื่องจากแบคทีเรียไหลออกไปพร้อมกับสายออก (wash out) แต่พบว่าอัตราส่วนของสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียประเภทสร้างมีเทนเพิ่มขึ้น จากการทดลองยังพบอีกว่าแบคทีเรียจะมีความสามารถในการกำจัดอะซีเตทสูงสุดที่ค่าค่าหนึ่ง (acetate removal capacity) ถ้าเพิ่มอัตราการป้อนอะซีเตทเกินกว่าค่านี้แล้ว การกำจัดอะซีเตทจะไม่สมบูรณ์ ดังนั้นความสามารถในการกำจัดอะซีเตทของแบคทีเรียเป็นปัจจัยที่จำกัดความสามารถ

ในการกำจัด อะซิเตทในระบบบำบัดแบบ UASB นี้ ในงานเดียวกันนี้นักวิจัยยังได้ทดลองเพิ่มความเข้มข้นของ โพรพิโอเนตและบิวทีเรตในสายป้อน พบว่าแบคทีเรียประเภทกำจัดซัลเฟตทำงานได้ดีขึ้น แต่เมื่อเปลี่ยนมาเพิ่มความเข้มข้นอะซิเตทในสายป้อนแบคทีเรียประเภทสร้างก๊าซมีเทนกลับทำงานได้มากขึ้น ดังนั้นปริมาณของส่วนประกอบของน้ำเสียเป็นตัวแปรตัวหนึ่งที่มีผลต่อการทำงานของแบคทีเรียทั้ง 2 ประเภทแต่ไม่ใช่ปัจจัยหลัก จากการทดลองพบว่าปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลมากกว่าคือค่าความเร็วน้ำเสียที่ป้อน และค่าความเป็นกรดต่างซึ่งเมื่อทดลองลดค่า pH จาก 8 เป็น 7 ปริมาณซัลไฟด์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งเป็นพิษต่อแบคทีเรียประเภทสร้างก๊าซมีเทน

#### การเพิ่มความสามารถในการจับเป็นเม็ดของแบคทีเรียใน UASB

Thaveesri และคณะ (1995) ศึกษาอิทธิพลของค่าความตึงผิวของน้ำเสียในถังปฏิกรณ์ UASB ที่มีต่อผลของการจับเป็นเม็ดของแบคทีเรียเมื่อป้อนด้วยน้ำเสียที่มีความเข้มข้นน้ำตาลต่าง ๆ กัน การทดลองจะใช้ UASB ขนาด 2.4 ลิตร จำนวน 2 ถัง ทำการทดลองที่อุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส ทั้งสองถังป้อนด้วยน้ำเสียที่ได้จากโรงงานน้ำตาลมีค่า COD 7,500-12,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่า HRT 12-96 ชั่วโมง UASB ทั้งสองถังจะมีหนึ่งถังที่ลดความตึงผิวของน้ำเสียในถังปฏิกรณ์ลงให้ต่ำกว่า 48 มิลลินิวตันต่อเมตร โดยการเติมสารแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต (alkylbenzenesulphonate) ความเข้มข้น 3-8 มิลลิกรัมต่อลิตร การทดลองจะแบ่งเป็นสองช่วง โดยช่วงแรก UASB ทั้งสองถังจะถูกป้อนด้วยน้ำเสียจากโรงงานน้ำตาลที่ผ่านการหมักจนน้ำตาลส่วนใหญ่เปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์และให้เหลือปริมาณน้ำตาลในสายป้อน 7 เปอร์เซ็นต์ ช่วงที่สองปริมาณน้ำตาลในน้ำเสียจะถูกเพิ่มเป็น 27 เปอร์เซ็นต์ พบว่าช่วงแรกของการทดลอง (ปริมาณน้ำตาลต่ำ) ไม่เกิดการจับเป็นเม็ดของตะกอน และถังปฏิกรณ์ที่น้ำเสียมีความตึงผิวต่ำจะเกิดการไหลออกของตะกอนมากกว่า แต่ในช่วงที่สอง (ปริมาณน้ำตาล 27 เปอร์เซ็นต์) ระบบมีการเปลี่ยนแปลงโดยปริมาณก๊าซชีวภาพที่ถูกระบบสร้างขึ้น รวมทั้งค่าสัดส่วนมีเทนของก๊าซชีวภาพลดลง แต่ในถังปฏิกรณ์ที่น้ำเสียมีความตึงผิวต่ำกลับมีการจับเป็นเม็ดของแบคทีเรียดีกว่า ทำให้ตะกอนไหลออกจากระบบน้อยกว่าถังอีกใบที่มีความตึงผิวของน้ำเสียสูงกว่า

van langerak และคณะ (1998) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณแคลเซียมสูง (600-1,200 มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยใช้ น้ำเสีย 2 ประเภทคือ น้ำเสียที่เป็นกรด (อะซิเตทและบิวทีเรต) และน้ำเสียที่เป็นกรดผสมกับกลูโคส (อะซิเตท , บิวทีเรต และ กลูโคส) ค่า OLR คงที่ที่ 14 กรัม COD ต่อลิตรต่อวัน จากการทดลองพบว่าปริมาณแคลเซียมที่มากเกินไป (ค่าที่เหมาะสมประมาณ 80-150 มิลลิกรัมต่อลิตร (กิตติศักดิ์, 2539)) จะทำให้เกิดการสะสมของแคลเซียม

คาร์บอนและเกาะติดตามผนังถังปฏิกรณ์ รวมทั้งทำให้ความสามารถในการผลิตก๊าซมีเทนของแบคทีเรียลดลงเหลือ 0.5-0.7 กรัม COD ต่อกรัม VSS ต่อวัน ซึ่งต่ำกว่าระบบที่ไม่มีแคลเซียมประมาณ 2-3 เท่า นอกจากนี้ในกรณีที่น้ำเสียมีความเข้มข้นแคลเซียมสูง ระบบแบบ UASB นี้จะสามารถทำงานได้ดีกับน้ำเสียประเภทที่เป็นกรดผสมกับกลูโคสมากกว่าประเภทที่เป็นกรดเพียงอย่างเดียว เพราะน้ำตาลจะช่วยให้แบคทีเรียประเภทสร้างกรดอินทรีย์ (acidogen) เจริญเติบโตได้ดีขึ้น ส่งผลให้มีแบคทีเรียจำนวนมากพอจะไปจับกับเม็ดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีอยู่มาก

El-Mamouni และคณะ (1998) ศึกษาการจับเป็นเม็ดของแบคทีเรียในถังปฏิกรณ์แบบ UASB เมื่อมีการเติมโพลีเมอร์เข้าไป การทดลองทำที่ HRT 24 ชั่วโมง , ความเร็วน้ำเสียที่ไหลขึ้น 1 เมตรต่อชั่วโมง , ค่า OLR อยู่ในช่วง 0.2-0.6 กรัม COD ต่อกรัม VSS ต่อวัน สายป้อนใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนของ COD : ไนโตรเจน : ฟอสฟอรัส : ซัลเฟอร์ เป็น 100 : 2 : 0.4 : 0.2 โพลีเมอร์ที่ใช้ ได้แก่ โพลีเมอร์จากธรรมชาติ (chitosan) และ โพลีเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้น (percol 763) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเติมโพลีเมอร์ทั้งสองแบบช่วยให้กระบวนการจับเป็นเม็ดของแบคทีเรียเร็วและแข็งแรงขึ้น เนื่องจากเม็ดแบคทีเรียจะถูกเคลือบเอาไว้ด้วยชั้นบาง ๆ ของโพลีเมอร์ นอกจากนี้ยังพบว่า chitosan เพิ่มความสามารถให้กับกระบวนการจับเป็นเม็ดดีกว่า percol 763 ด้วย แต่ก็มีข้อด้อยกว่าตรงที่ทนต่อสภาพความเป็นกรดของระบบได้น้อยกว่า

Lin และ Chen (1999) ศึกษาผลของโลหะหนักที่มีต่อแบคทีเรียประเภทสร้างมีเทน (Methanogen) ที่อยู่ในเม็ดแบคทีเรีย การทดลองจะใช้ UASB ป้อนด้วยน้ำเสียที่มีค่า COD 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำเสียประกอบด้วยกรดอะซีติก , โพรพิโอนิก และบิวทิริก ในอัตราส่วน 2 : 1 : 1 ค่า HRT อยู่ในช่วง 1-2 วัน โลหะหนักที่ใช้ทดลอง ได้แก่ แคดเมียม , โครเมียม , ทองแดง และ สังกะสี (ความเข้มข้นระหว่าง 1-1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) , นิกเกิล (1-3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) และ ตะกั่ว (1-10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) ดัชนีที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลคือ ประสิทธิภาพในการกำจัด VFA และปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น หลังทำการทดลองพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อระบบ ได้แก่ ชนิดของโลหะ , ชนิดของกรดอินทรีย์ และ HRT โดยความเป็นพิษเรียงลำดับจากมากไปน้อย เป็นดังนี้ ทองแดง , โครเมียม , แคดเมียมกับสังกะสี , นิกเกิล และ ตะกั่ว และได้รายงานว่าโลหะหนักจะมีผลเป็นพิษต่อแบคทีเรียประเภทสร้างก๊าซมีเทน (ย่อยสลายกรดอะซีติก) มากกว่าประเภทย่อยสลายกรดโพรพิโอนิกและบิวทิริก แต่ถ้าเพิ่ม HRT ขึ้นแล้วแบคทีเรียประเภทสร้างก๊าซมีเทนจะสามารถต้านทานต่อสารพิษได้มากขึ้น ตรงข้ามกับแบคทีเรียประเภทที่ย่อยสลายกรดโพรพิโอนิกและบิวทิริกที่มีความต้านทานลดลง

Yu และคณะ (1999) ศึกษาหาผลของการเติมถ่านกัมมันต์แบบผง (powdered activated carbon : PAC) และ ถ่านกัมมันต์แบบเม็ด (granular activated carbon : GAC) ที่มีต่อการจับเป็นเม็ดของแบคทีเรีย โดยใช้ถังปฏิกรณ์ UASB บำบัดด้วยเปปโตน (peptone) , กลูโคส และ meat extract คิดเป็น COD 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราส่วน COD : ไนโตรเจน : ฟอสฟอรัส เป็น 200 : 4 : 1 เติม PAC และ GAC 1,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ HRT เริ่มแรก 48 ชั่วโมง แล้วค่อย ๆ เพิ่ม OLR โดยการลด HRT ลงเรื่อย ๆ ผลปรากฏว่าการเติม PAC และ GAC ช่วยลดเวลาในการจับเป็นเม็ดลง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการเติม PAC และ GAC แล้ว พบว่าในถังปฏิกรณ์ที่เติม GAC มีค่าอัตราการจับเป็นเม็ดสูงกว่า และขนาดของเม็ดแบคทีเรียใหญ่กว่าเล็กน้อย นอกจากนี้ Yu และคณะ (1999) ยังแนะนำอีกว่าวัสดุที่จะเติมลงไปในถังปฏิกรณ์ต้องมีคุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้ ได้แก่

1. ควรมีพื้นที่ผิวมากและมีสภาพเหมาะที่จะให้แบคทีเรียไปเกาะได้
2. ควรมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับตะกอนเพราะถ้ามีค่ามากกว่าวัสดุจะตกลงไปอยู่ด้านล่างทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างวัสดุกับตะกอนน้อยลง
3. ควรมีทรงกลม

#### การแบ่งถังปฏิกรณ์ UASB เป็น 2 ถัง

เนื่องจากการทำงานของแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนจะประกอบไปด้วยอย่างน้อย 2 ขั้นตอนหลักคือ (ก) การย่อยสลายสารอินทรีย์แล้วได้ผลผลิตเป็นกรดอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ และ (ข) การเปลี่ยนกรดอินทรีย์เป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ทั้งสองนี้จะทำงานที่สภาวะการทำงานที่เหมาะสมต่างกัน Shin และคณะ (1992) ได้ทดลองแบ่งถังปฏิกรณ์ UASB ออกเป็น 2 ถังต่อกัน แต่ละถังทำงานที่สภาวะต่างกันตามความเหมาะสมของแบคทีเรียแต่ละชนิด ถังปฏิกรณ์ถังแรกจะมีสภาวะเป็นกรดเพื่อให้เหมาะกับแบคทีเรียประเภทสร้างกรด (acidogen) ที่อยู่ในถังนี้ ถังปฏิกรณ์ถังที่สองจะมีสภาวะเป็นกลางเพื่อให้เหมาะกับแบคทีเรียประเภทสร้างมีเทน (methanogen) น้ำเสียจะถูกบ่อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ถังแรก แบคทีเรียประเภทสร้างกรดจะย่อยสลายสารอินทรีย์ได้กรดออกมา เมื่อน้ำเสียผ่านถังปฏิกรณ์ถังแรกแล้วจะถูกส่งมายังถังพักชั่วคราวเพื่อปรับค่า pH ให้เป็นกลางแล้วบ่อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ถังที่สอง ผลการทดลองของถังทั้งสองเป็นดังนี้คือ ในถังแรกเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate : OLR) พบว่าอัตราการเกิดกรดอินทรีย์กับอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (biogas) จะเพิ่มขึ้นด้วย จนกระทั่งอัตราการป้อนสารอินทรีย์สูงถึงค่าหนึ่งจะเกิดการสะสมของตะกอนของแข็ง (Suspended Solid : SS) ส่งผลให้อัตราการเกิดกรดอินทรีย์กับอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพลดลง ส่วนประกอบของก๊าซชีวภาพพบว่าส่วนใหญ่เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และเมื่อตรวจน้ำเสียใน



ถึงพบว่ากรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้น 40 – 60 เปอร์เซ็นต์ จะเป็นกรดอะซิติก (acetic acid) ส่วนที่เหลือเป็นกรดโพรพิโอนิก (propionic acid) กับ บิวทีริก (butyric acid) นอกจากนี้ยังพบว่าซัลเฟต 35 – 65 เปอร์เซ็นต์ที่มีในน้ำเสียถูกย่อยสลายในถังปฏิกรณ์ถังแรกนี้ ซัลเฟตเป็นสารตัวหนึ่งที่เป็นพิษต่อระบบ เมื่อถูกกำจัดไปบางส่วนทำให้ถังปฏิกรณ์ถังที่สองสามารถทำงานในสภาวะที่เหมาะสมมากขึ้น ในถังที่สองก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีก๊าซมีเทนเป็นส่วนประกอบหลัก จากผลการทดลองสรุปว่าการแยกถังปฏิกรณ์ออกเป็นสองถังสามารถบำบัดน้ำเสียอย่างมีประสิทธิภาพ กำจัดสารอินทรีย์ได้สูงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์สูง (44 กรัม COD ต่อลิตรต่อวัน) และมีเสถียรภาพสูงกว่าเพราะสารที่เป็นพิษต่อแบคทีเรียแบบสร้างก๊าซมีเทนจะถูกกำจัดออกบางส่วนในถังปฏิกรณ์ถังแรก

### การแบ่ง UASB ออกเป็นส่วน ๆ

จากที่กล่าวมาข้างต้น ก่อนที่จะได้ก๊าซมีเทนกับคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา สารอินทรีย์จะถูกแบคทีเรียเปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์ก่อน การสะสมของกรดอินทรีย์นี้เป็นปัญหาใหญ่ต่อประสิทธิภาพของระบบเพราะจะไปยับยั้งไม่ให้แบคทีเรียสามารถทำงานได้ และเนื่องจากกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นมามีหลายชนิด เพื่อความเหมาะสมยิ่งขึ้น van Lier และคณะ (1994) จึงเปลี่ยนรูปแบบของระบบ UASB ใหม่ด้วยการแบ่ง UASB ออกเป็นส่วน ๆ (Upflow Staged Sludge Bed : USSB) รวมทั้งหมด 5 ส่วน และทดลองใช้บำบัดน้ำเสียในสภาวะอุณหภูมิสูง สารอินทรีย์ชนิดที่ย่อยสลายได้ง่ายก็จะถูกย่อยสลายไปก่อนในส่วนแรก และชนิดที่ย่อยสลายได้ยากก็จะถูกย่อยสลายในส่วนหลังถัดไป นอกจากนี้จะแบ่งถังปฏิกรณ์ออกเป็นส่วน ๆ แล้ว ยังทดลองใช้แบคทีเรียประเภทเดียวกันแต่ป้อนด้วยสารอาหารต่างชนิดกัน พบว่าแบคทีเรียให้ผลในการจับกันเป็นก้อนที่มีขนาดต่างกัน แบคทีเรียที่จับกันเป็นก้อนจะไหลออกจากถังปฏิกรณ์ได้ยาก ดังนั้นจึงสามารถเพิ่มอัตราการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัดได้ เมื่อตรวจวัดปริมาณกรดอินทรีย์ที่ส่วนต่าง ๆ ของถังพบว่าในส่วนแรกน้ำตาลซูโครสจะถูกย่อยสลาย และในส่วนถัดไปจะเป็นอะซีเตต (acetate) บิวทีเรต (butyrate) ในส่วนสุดท้ายจะเป็นโพรพิโอเนต (propionate) ซึ่งเป็นกรดอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากที่สุด แต่เมื่อน้ำเสียผ่านส่วนสุดท้ายพบว่าโพรพิโอเนตถูกกำจัดออกเกือบหมด ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้นเมื่อเทียบกับการบำบัดด้วยถังปฏิกรณ์แบบ UASB เพราะอะซีเตตที่เกิดขึ้นและเป็นตัวยับยั้งปฏิกิริยาจะถูกย่อยสลายในถังปฏิกรณ์ส่วนแรก ดังนั้นจึงไม่มีปรากฏในถังปฏิกรณ์ส่วนหลัง ปริมาณกรดอินทรีย์ที่ออกมาจึงมีปริมาณต่ำตลอดเวลา นอกจากนี้ผลการทดลองยังชี้ว่าถังปฏิกรณ์แบบแบ่งเป็นส่วน ๆ นี้จะมีเสถียรภาพสูงเนื่องจากสามารถย่อยสลายกรดอินทรีย์ประเภทต่าง ๆ ได้มาก และสามารถแก้ปัญหาการไหลออกไปพร้อมสายออกของแบคทีเรีย

(wash out) ได้ดีกว่าระบบแบบ UASB เนื่องจากปริมาณก๊าซที่ใช้พัดพาแบคทีเรียผ่านชั้นบนสุดของถังปฏิกรณ์น้อยลง เพราะก๊าซที่เกิดขึ้นบางส่วนจะถูกเก็บไว้ในอุปกรณ์เก็บก๊าซที่ติดตั้งไว้ในทุก ๆ ชั้นของ USSB

ต่อมา Lens และคณะ (1998) ได้ทดลองใช้ถังปฏิกรณ์แบบ USSB กำจัดอะซิเตทในน้ำเสียที่มีปริมาณซัลเฟตสูง นำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับ UASB ที่ทำที่สภาวะเดียวกัน จากการทดลองพบว่าการแบ่งถังปฏิกรณ์เป็นชั้น ๆ ทำให้ในแต่ละชั้นเกิดการย่อยสลายของแบคทีเรียต่างชนิดกัน ดังนั้นตะกอนที่ได้ในแต่ละชั้นจะมีคุณสมบัติและความสามารถในการย่อยสลายแตกต่างกัน โดยตะกอนของส่วนบนสุดจะมีความสามารถในการย่อยสลายอะซิเตทได้น้อยกว่าส่วนล่าง เพราะปริมาณอะซิเตทที่ผ่านมาถึงชั้นสุดท้ายเหลือ้น้อยกว่าชั้นอื่น ๆ แต่ประสิทธิภาพในการย่อยสลายอะซิเตทของถังปฏิกรณ์แบบนี้ก็ไม่เพิ่มขึ้นจากถังแบบ UASB ดังนั้นการออกแบบถังแบบนี้ไม่ได้ช่วยปรับปรุงความสามารถในการย่อยสลายอะซิเตทให้เพิ่มขึ้น และเมื่อทดลองลดเวลาที่น้ำเสียอยู่ในถังปฏิกรณ์ (Hydraulic Retention Time : HRT) ลงถังปฏิกรณ์แบบ USSB มีประสิทธิภาพในการกำจัดอะซิเตทลดลงมากกว่าแบบ UASB ดังนั้นถังปฏิกรณ์แบบ USSB มีเสถียรภาพต่ำกว่าแบบ UASB

ในอุตสาหกรรมจริงนั้นน้ำเสียที่ปล่อยออกมาจากโรงงานจะมีปริมาณสารอินทรีย์ไม่คงที่ซึ่งอาจเกิดเนื่องจากผลของการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลและความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (Shock Load) งานวิจัยในรายงานฉบับนี้จะศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดแบบ UASB เปรียบเทียบกับ SUASB เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว

## บทที่ 4

### อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

4.1 อุปกรณ์ ดังปฏิกรณ์ (reactor) ที่ใช้ในการทดลองมี 2 แบบ ได้แก่

4.1.1 ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศน้ำเสียไหลขึ้น (Upflow Anaerobic Sludge Blanket : UASB)

รูปที่ 4.1 แสดงแผนผังของถัง UASB ที่ใช้ในการทดลองนี้ โดยตัวถังของถัง UASB ทำจากพลาสติกใสรูปทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 100 เซนติเมตร ปริมาตร 8 ลิตร ตลอดความสูงของถังจะมีท่อเล็ก ๆ สำหรับเก็บตัวอย่างน้ำเสียจำนวน 10 ท่อ โดยตำแหน่งของท่อแรกอยู่สูงจากฐาน 5 เซนติเมตร และทุก ๆ ความสูง 10 เซนติเมตรจะมีท่อถัดไป ส่วนด้านบนของถังจะติดตั้งอุปกรณ์แยกก๊าซ (Gas-Solid Separator) มีลักษณะเป็นกรวยสำหรับดักก๊าซที่เกิดขึ้นกับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วออกจากกัน น้ำที่ผ่านการบำบัดจะไหลออกจากถังปฏิกรณ์โดยการไหลล้นไปทางท่อไหลล้นที่อยู่บริเวณด้านบนของถัง UASB ส่วนก๊าซจะไหลไปตามท่อที่ติดอยู่กับกรวยดักก๊าซและจะถูกเก็บไว้ด้วยวิธีการแทนที่น้ำ

4.1.2 ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศน้ำเสียไหลขึ้นแบบแบ่งส่วน (Staging Upflow Anaerobic Sludge Blanket : SUASB)

รูปที่ 4.2 แสดงแผนผังของถัง SUASB ที่ใช้ในการทดลองนี้ โดย SUASB นี้คล้ายกับเป็นการแบ่งถังปฏิกรณ์ UASB ขนาดใหญ่ปริมาตร 8 ลิตรออกเป็นถังเล็ก ๆ จำนวน 4 ถัง ที่มีขนาดและปริมาตรเท่า ๆ กัน ต่อเชื่อมด้วยสายยางซิลิโคน แต่ละถังทำจากพลาสติกรูปทรงกระบอกใส เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร ปริมาตร 2 ลิตร ดังนั้นปริมาตรรวมทั้ง 4 ถังจะเป็น 8 ลิตร ที่ทุก ๆ ถังจะมีท่อเก็บน้ำเสียตัวอย่างรวมทั้งจะมีกรวยดักก๊าซที่เกิดขึ้นส่วนบนเช่นเดียวกับถังปฏิกรณ์แบบ UASB

เริ่มแรกน้ำเสียสังเคราะห์จะถูกป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ย่อยที่ 1 เรียกว่า SUASB1 เมื่อน้ำเสียผ่าน SUASB1 ไปแล้วจะเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ย่อยถัด ๆ ไป คือ SUASB2 , SUASB3 และ SUASB4 ตามลำดับ โดยน้ำเสียจาก SUASB1 จะไหลล้นออกทางด้านบนของถังและไหลเข้าไปสู่ถัง SUASB2 และน้ำเสียจาก SUASB2 จะไหลล้นเพื่อไปเข้าถังย่อยต่อ ๆ ไปในลักษณะเดียวกัน และ

เพื่อให้เกิดการไหลได้อย่างธรรมชาติ (เพื่อประหยัดการใช้ปั๊ม) จึงต้องมีการเรียงลำดับความสูงของถัง SUASB ย่อย ๆ โดยตั้งถังปฏิกรณ์ย่อย SUASB1 อยู่สูงที่สุด ตำแหน่งการวางของถังปฏิกรณ์ย่อยถัดไปจะต่ำลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึง SUASB4 ที่ตั้งอยู่ในตำแหน่งที่ต่ำสุด

#### 4.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์และเชื้อแบคทีเรีย

เชื้อแบคทีเรียที่ใช้ในการทดลองได้มาจากตะกอนที่ก้นถัง UASB ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียของบริษัท บุญรอด บริวเวอรี่ จำกัด (โรงงานที่บางกระบือ) โดยเติมใส่ในถังปฏิกรณ์ทั้งสองในปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียที่สังเคราะห์ขึ้นโดยใช้น้ำประปาผสมสารอาหารที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย และใช้น้ำตาลซูโครส (น้ำตาลทราย) เป็นสารอาหารหลัก (Carbon source) ของแบคทีเรีย ส่วนผสมของน้ำเสียสังเคราะห์เป็นดังนี้ (Wiegant และ Lettinga, 1985)

$\text{NH}_4\text{Cl}$	170 มิลลิกรัมต่อลิตร
$\text{NaH}_2\text{PO}_4$	37 มิลลิกรัมต่อลิตร
$\text{MgCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	9 มิลลิกรัมต่อลิตร
KCl	25 มิลลิกรัมต่อลิตร
$\text{Na}_2\text{SO}_4$	70 มิลลิกรัมต่อลิตร
Yeast extract	0.1 กรัมต่อลิตร
น้ำตาลซูโครส	เริ่มต้นที่ 1.78 กรัมต่อลิตร
$\text{NaHCO}_3$	เริ่มต้น 5 กรัมต่อลิตร
แร่ธาตุอื่น ๆ (Trace element	1 มิลลิกรัมต่อลิตร) เป็นสารละลายที่มีส่วนประกอบดังนี้
$\text{FeCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	2000 มิลลิกรัมต่อลิตร
$\text{ZnCl}_2$	50 มิลลิกรัมต่อลิตร
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	500 มิลลิกรัมต่อลิตร
$\text{CuSO}_4$	30 มิลลิกรัมต่อลิตร

น้ำเสียที่สังเคราะห์ขึ้นนี้ก่อนที่จะป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ทั้งสองแบบต้องกำจัดก๊าซออกซิเจนโดยการเป่าไล่ด้วยก๊าซไนโตรเจน

การเติมบัฟเฟอร์ ( $\text{NaHCO}_3$ ) ให้กับถังปฏิกรณ์ทั้งสองแบบจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะของการดำเนินการเพื่อควบคุมค่า pH ในสายป้อนให้มีค่าอยู่ในช่วง 8-9 ปริมาณความเข้มข้นของบัฟเฟอร์เป็นดังนี้

วันที่	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)
1-9	5
10	8
11-14	10
15-17	5
18	8
19-20	10
21	15
22	10
23-25	5

#### 4.3. วิธีวิเคราะห์ตัวอย่าง

##### 4.3.1 วิธีวิเคราะห์น้ำเสียตัวอย่าง

น้ำเสียตัวอย่างจะถูกนำไปวิเคราะห์หาค่าต่าง ๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ และค่าความเป็นกรดต่าง (pH) วิธีวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ เป็นดังนี้

- **ความเข้มข้นของสารอินทรีย์** เนื่องจากสารอินทรีย์ในระบบบำบัดคือน้ำตาล ดังนั้นจะหาความเข้มข้นของน้ำตาลในสายออกด้วย วิธีวิเคราะห์ฟินอล (phenol analysis) และคำนวณออกมาในรูปของค่า *COD (Chemical Oxygen Demand)* มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก)
- **ค่าความเป็นกรดต่าง (pH)** วัดโดยใช้พีเอชมิเตอร์ (pH meter) Cyber Scan รุ่น 500

##### 4.3.2 วิธีวิเคราะห์ก๊าซตัวอย่าง

ก๊าซที่เกิดขึ้นจากถังปฏิกรณ์ทุกถังจะถูกนำมาวิเคราะห์หาส่วนประกอบของมีเทน (methane) และคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbondioxide) ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี Shimadzu GC-14B ตรวจวัดด้วยเครื่องตรวจชนิด TCD (Thermal Conductivity Detector) และติดตั้ง

Packed column WG-100 โดยใช้ก๊าซนำ (Carrier gas) เป็นก๊าซฮีเลียม (Helium) ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิเริ่มต้น 50 องศาเซลเซียส อุณหภูมิสุดท้าย 50 องศาเซลเซียส อุณหภูมิการฉีด (Injection Temperature) 50 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ตรวจวัด 50 องศาเซลเซียส (รายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ข)

#### 4.3.3 วิธีวิเคราะห์ความหนาแน่นของตะกอน (น้ำหนักแห้ง)

การหาความหนาแน่นของตะกอนทำโดยการเก็บตะกอนส่วนที่ทับถมกันอยู่กันถึงปฏิกรณ์ มาปริมาตร 5 มิลลิลิตร ทำการอบให้แห้งแล้วชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำมาคำนวณหาความหนาแน่น มีหน่วยกรัมต่อลิตร

#### 4.4 ขั้นตอนการทดลอง

รูปที่ 4.3 แสดงแผนภาพของการทดลอง ขั้นตอนการทดลองเริ่มต้นด้วยการเติมเชื้อแบคทีเรีย (inoculate) ลงในถังปฏิกรณ์แต่ละแบบ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และเติมน้ำเสียสังเคราะห์เข้าไปในถังปฏิกรณ์ทั้งสองแบบจนเต็ม ทิ้งไว้ 1 วัน จากนั้นในวันต่อไปจึงเริ่มป้อนน้ำเสียสังเคราะห์แบบต่อเนื่อง (continuous feed)

การทดลองทำที่สภาวะดังนี้

อุณหภูมิห้อง (25-30 องศาเซลเซียส)

ความดัน 1 บรรยากาศ

เริ่มต้นการทดลอง ความเข้มข้นน้ำตาล 1.78 กรัม/ลิตร (คิดเป็นค่า COD 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลาที่น้ำเสียอยู่ในถัง (Hydraulic Retention Time : HRT) 24 ชั่วโมง

คิดเป็นอัตราการป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ 0.33 ลิตร/ชั่วโมง

รูปที่ 4.4 แสดงภาพของเครื่องมือในวันที่ดำเนินการจริง

เก็บน้ำเสียตัวอย่างและก๊าซที่เกิดขึ้นจากทุกถังนำมาวิเคราะห์วันละหนึ่งครั้ง ส่วนการตรวจหาความหนาแน่นของตะกอนในการทดลองนี้วิเคราะห์ในวันต่าง ๆ ดังนี้

<u>ครั้งที่</u>	<u>วันที่</u>
เริ่มแรก	ก่อนการทดลอง
1	5
2	12
3	20
4	25

น้ำเสียจากถังปฏิกรณ์ UASB จะถูกเก็บตัวอย่างจากท่อเก็บตัวอย่างตำแหน่งที่ 4 , 6 , 8 และ 10 (ในรูปที่ 4.1) เนื่องจากที่ตำแหน่ง 1 ถึงตำแหน่งที่ 3 เป็นส่วนที่มีชั้นตะกอนทับถมกันอยู่ แต่ละตำแหน่งของรูเก็บตัวอย่างมีชื่อเรียกดังนี้

<u>ตำแหน่ง</u>	<u>ชื่อเรียก</u>
4	UASB1
6	UASB2
8	UASB3
10	UASB4

ส่วนในถังปฏิกรณ์แบบ SUASB จะเก็บน้ำเสียตัวอย่างทั้งหมด 4 ตำแหน่งเช่นเดียวกัน คือ จากท่อเก็บน้ำเสียตัวอย่างของถังปฏิกรณ์ย่อย SUASB1 , SUASB2 , SUASB3 และ SUASB4

จากนั้นเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของน้ำตาล และอัตราการผลิตของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยที่สภาวะในการดำเนินการทดลองการทดลองจะแสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6

เนื่องจากน้ำเสียจะใช้เวลาอยู่ในระบบประมาณ 1 วัน (หรือน้อยกว่าในกรณีที่เพิ่มอัตราผลิตของน้ำเสีย) ดังนั้นผลการวิเคราะห์จะเป็นผลที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงเมื่อ 1 วันก่อนทำการวิเคราะห์ ซึ่งการอ่านกราฟในลักษณะนี้อาจทำให้เกิดความสับสน ในการทดลองนี้เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาค่าต่าง ๆ จากรูปกราฟที่นำเสนอ จึงได้ทำการเลื่อนค่าให้ตรงกับวันที่ต้องการพิจารณา นั่นคือค่าจากสายป้อนจะถูกเลื่อนไป 1 วัน (ค่าที่เปลี่ยนแปลงในวันที่ 1 และแสดงให้เห็นในวันที่ 2) ซึ่งทำให้สามารถอ่านค่าต่าง ๆ จากวันที่ต้องการหาค่าได้ทันที เช่น ถ้าต้องการหาค่า COD ของสายป้อนในวันที่ 24 สามารถอ่านค่า COD จากรูปที่ 4.5 ในวันที่ 24 ได้ทันที

#### 4.5 การคำนวณประสิทธิภาพในการกำจัด COD

ประสิทธิภาพในการกำจัด COD ของถังปฏิกรณ์แต่ละแบบจะคิดจากผลต่างของค่า COD ที่เข้าสู่ถังปฏิกรณ์กับค่า COD ที่ตำแหน่งสุดท้ายก่อนจะออกจากถังปฏิกรณ์ ดังนั้นประสิทธิภาพในการกำจัด COD ของถังปฏิกรณ์แต่ละแบบเป็นดังนี้

##### UASB

$$\text{ประสิทธิภาพในการกำจัด COD} = \frac{\text{COD ที่สายป้อน} - \text{COD ที่ตำแหน่ง UASB4}}{\text{COD ที่สายป้อน}} \times 100\% \quad (4.1)$$

##### SUASB

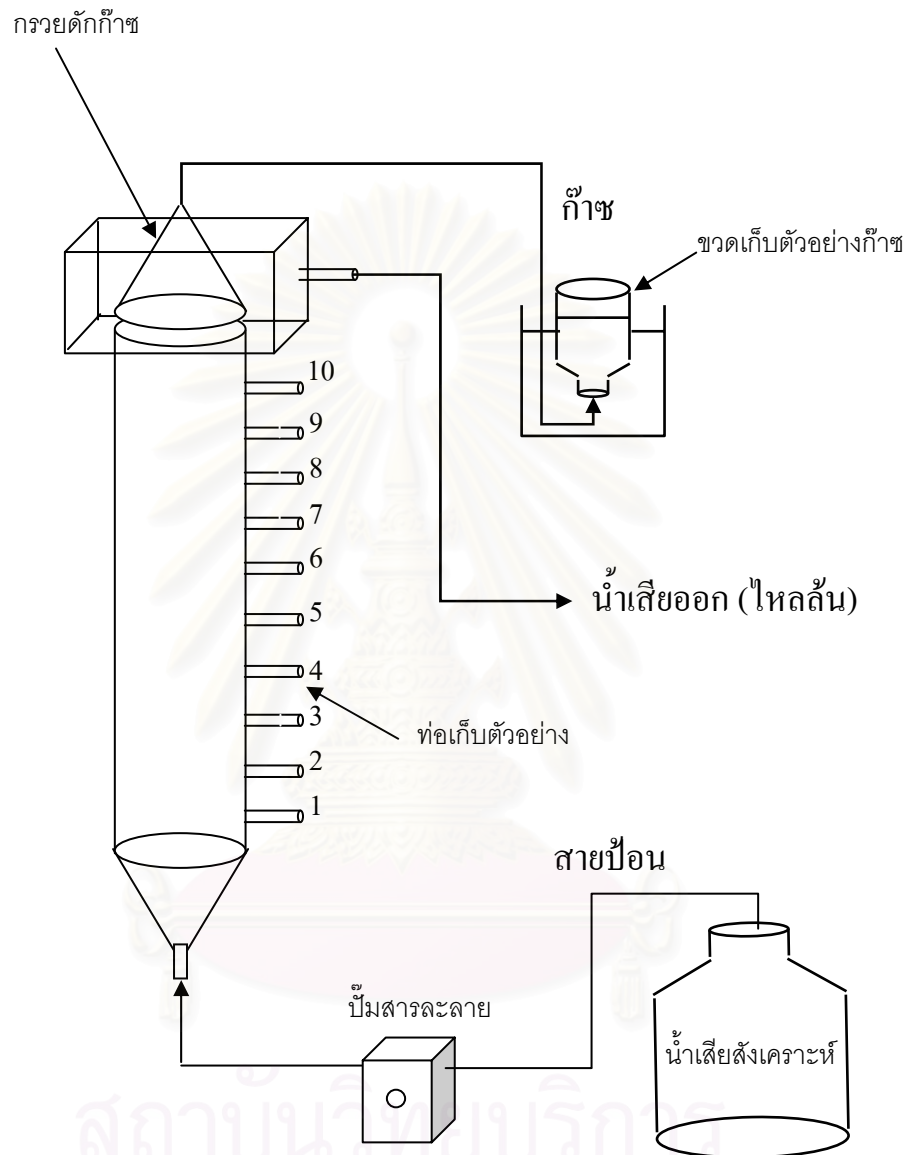
$$\text{ประสิทธิภาพในการกำจัด COD} = \frac{\text{COD ที่สายป้อน} - \text{COD ที่ตำแหน่ง SUASB4}}{\text{COD ที่สายป้อน}} \times 100\% \quad (4.2)$$

นอกจากนี้ในกรณีต้องการหาค่าประสิทธิภาพในการกำจัด COD ของถังปฏิกรณ์ย่อย SUASB1 จะใช้ค่าผลต่างของค่า COD ในสายป้อนกับค่า COD ในถังปฏิกรณ์ย่อย SUASB1 ดังนั้นสมการเป็นดังนี้

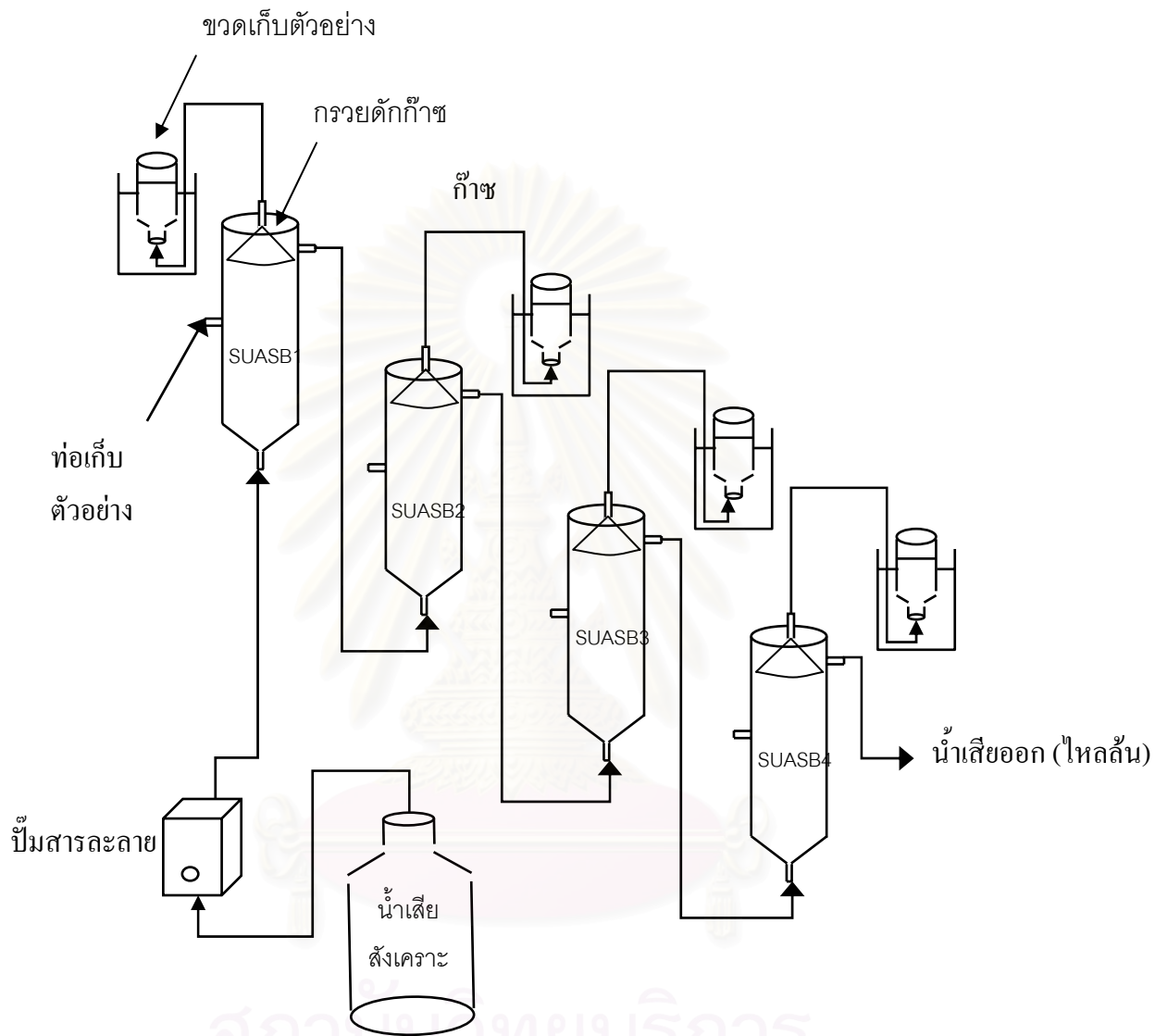
##### SUASB1

$$\text{ประสิทธิภาพในการกำจัด COD} = \frac{\text{COD ที่สายป้อน} - \text{COD ที่ตำแหน่ง SUASB1}}{\text{COD ที่สายป้อน}} \times 100\% \quad (4.3)$$

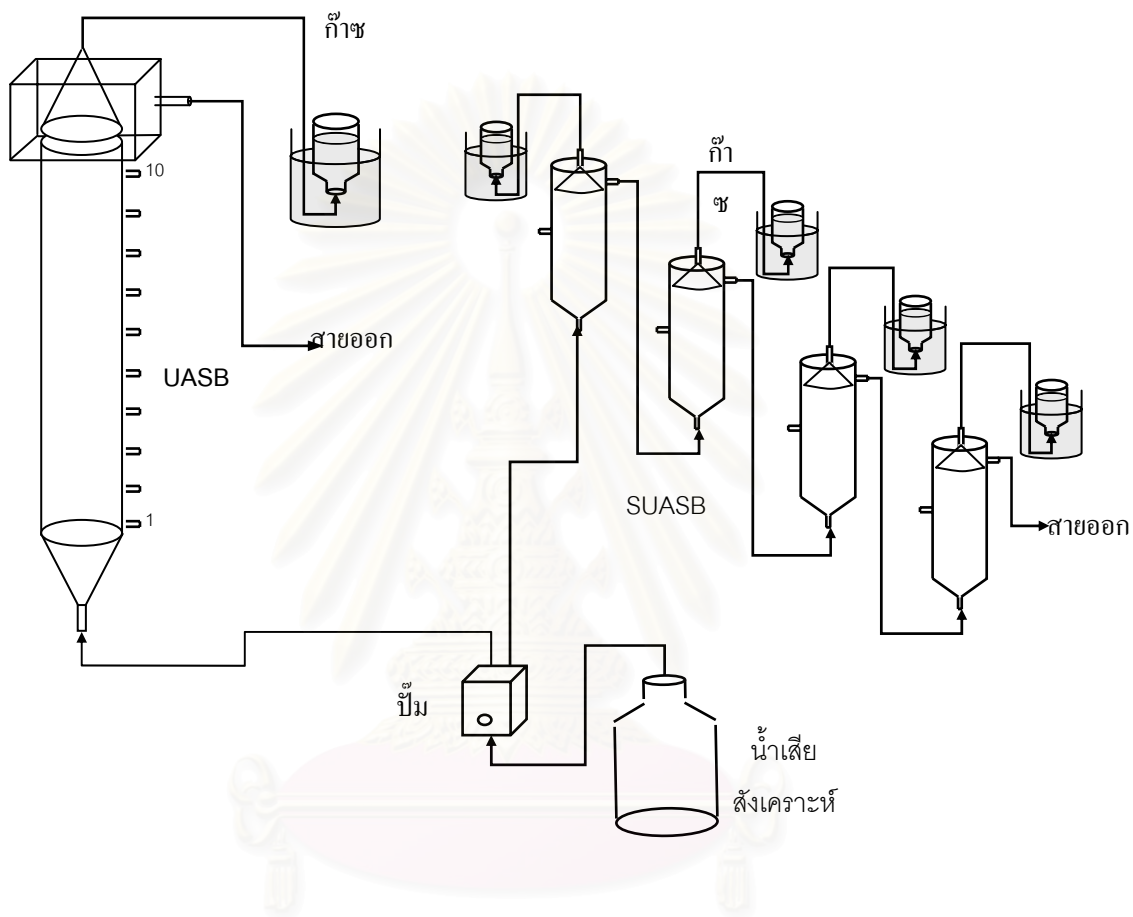




รูปที่ 4.1 UASB ที่ใช้ในการทดลอง



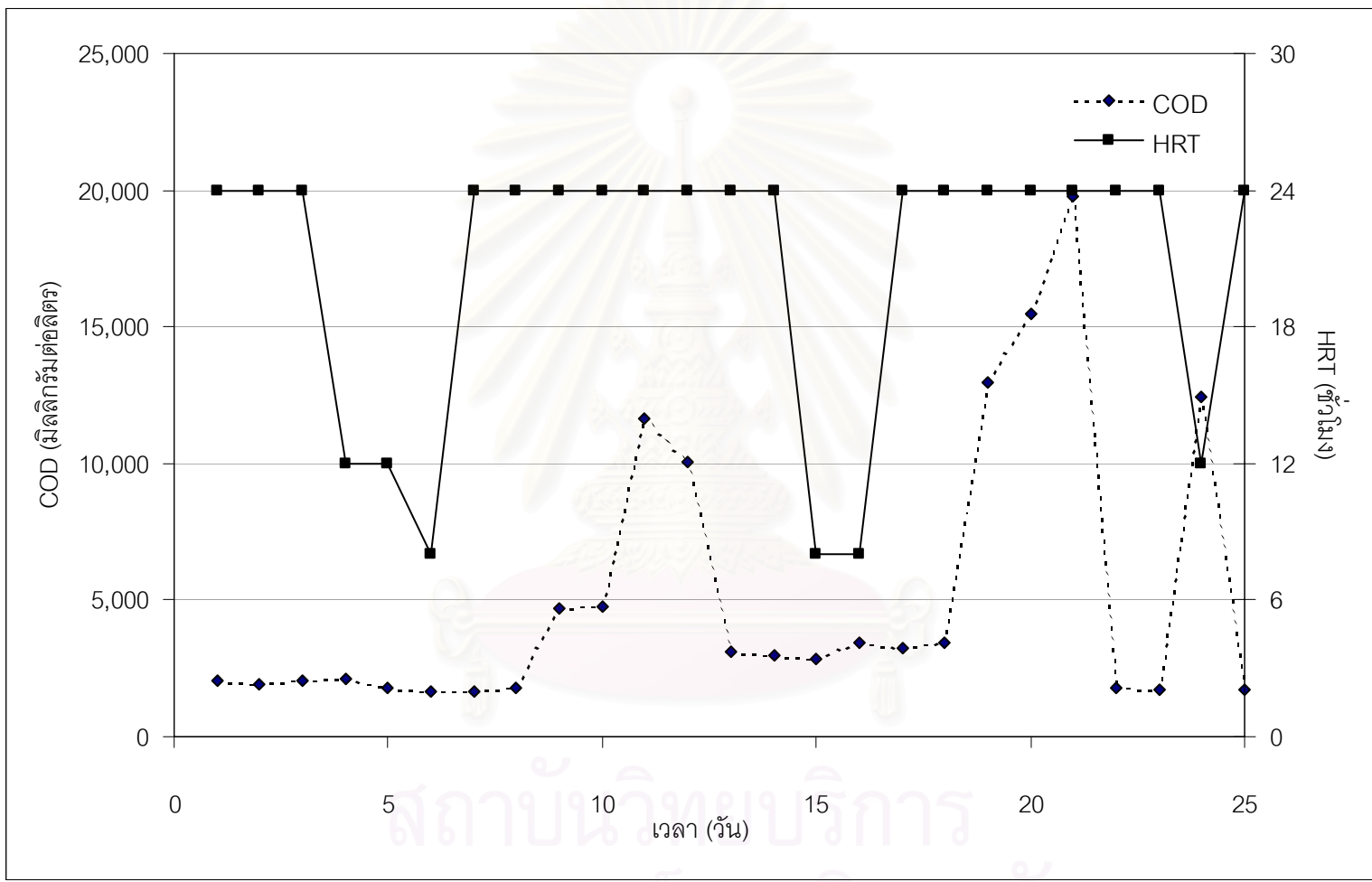
รูปที่ 4.2 SUASB ที่ใช้ในการทดลอง



สถาบันวิทยบริการ  
รูปที่ 4.3 แผนภาพของการทดลอง  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

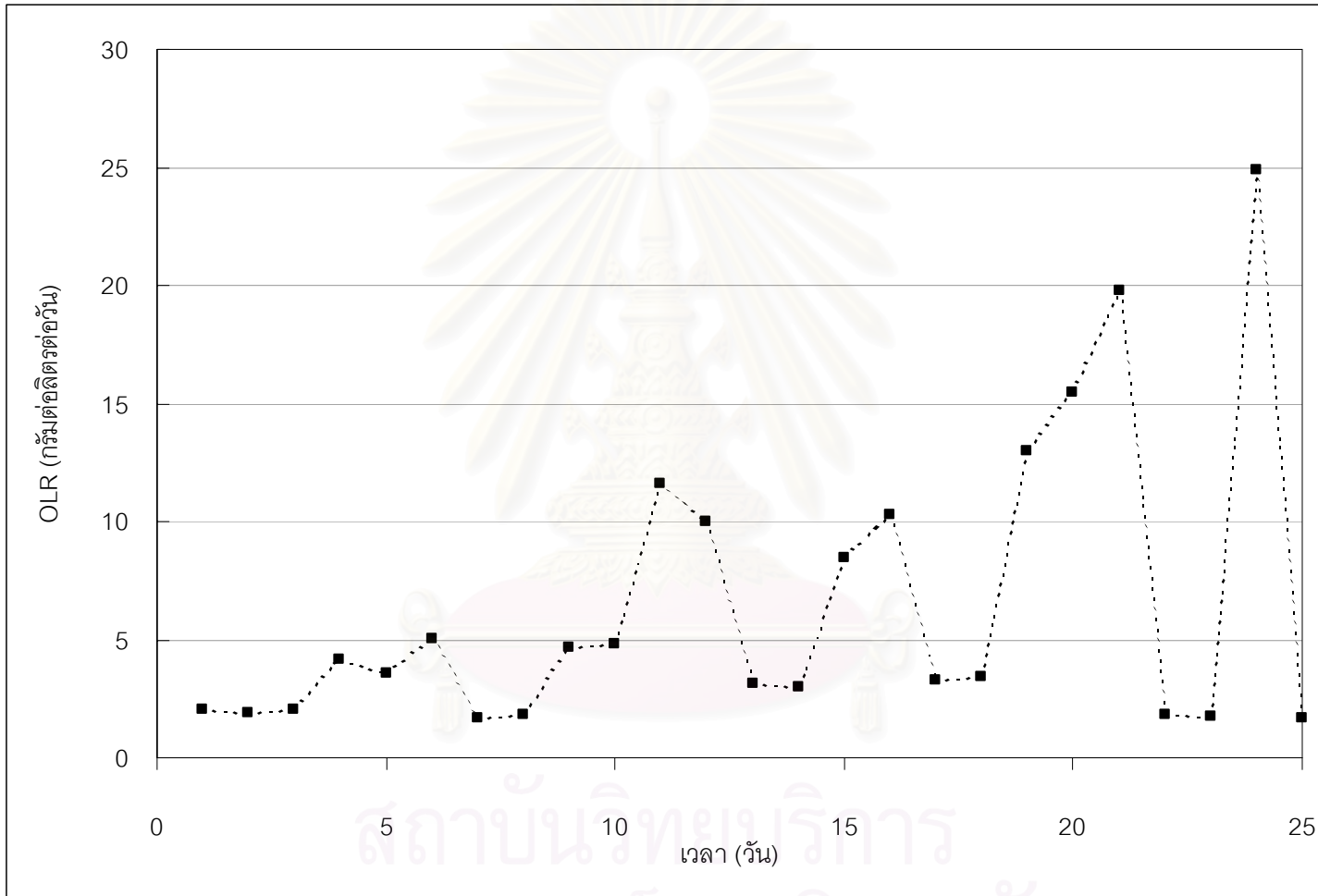


รูปที่ 4.4 เครื่องมือการดำเนินการจริง



รูปที่ 4.5 สถานะในการดำเนินการ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.6 ค่า OLR ที่ใช้ดำเนินการ

## บทที่ 5

### ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 5.1 ประสิทธิภาพในการกำจัด COD

##### 5.1.1 การเพิ่ม OLR ด้วยวิธีลด HRT (OLR 3.5-10.0 กรัมต่อลิตรต่อวัน)

###### UASB

รูปที่ 5.1 แสดงค่า COD ที่จุดต่าง ๆ ตลอดความสูงของถังปฏิกรณ์ (สามารถดูตัวเลขของค่าต่าง ๆ ได้ในตารางรวบรวมผลการทดลองในภาคผนวก ค) จากรูปจะเห็นว่าตลอดช่วงเวลาที่ลด HRT ลง (วันที่ 4-6 และ 15-16) ค่า COD ทุกจุดในถังปฏิกรณ์มีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าต่ำ แสดงว่าการย่อยสลายสารอินทรีย์ส่วนใหญ่โดยแบคทีเรียเกิดขึ้นในชั้นตะกอนที่อยู่ด้านล่างของถังปฏิกรณ์อย่างรวดเร็ว ยกเว้นเพียงวันที่ 6 (ทดลองลด HRT ลงเหลือ 8 ชั่วโมงครั้งแรก) มีค่า COD ที่จุด UASB1 และ UASB2 สูงกว่าจุดอื่น สาเหตุมาจากการเกิดฟุ้งกระจายของชั้นตะกอนที่ยังทับถมและจับตัวกันไม่แน่น เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 5.1 ตะกอนมีความหนาแน่นเพียงประมาณ 27 กรัมต่อลิตร (วิธีหาค่าความหนาแน่นแสดงในภาคผนวก ง) เมื่อค่า OLR เพิ่มขึ้น ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นตาม พัดพาให้ตะกอนฟุ้งกระจายแขวนลอยอยู่ในน้ำเสีย ตะกอนด้านล่างถังปฏิกรณ์มีปริมาณต่ำลงจึงสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้น้อยลง ค่าของ COD ส่วนล่างของถังปฏิกรณ์ (UASB1 และ UASB2) จึงมีค่าสูง สารอินทรีย์ที่เหลือจะถูกแบคทีเรียที่ฟุ้งกระจายอยู่ส่วนบนย่อยสลายต่อไป ค่า COD ที่ตำแหน่ง UASB3 และ UASB4 จึงค่อย ๆ ลดลง แต่เนื่องจากที่ส่วนบนของถังปฏิกรณ์นั้นมีปริมาณของตะกอนที่ลอยฟุ้งอยู่เบาบางกว่าด้านล่าง ทำให้ความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์น้อยลงด้วย เป็นเหตุให้น้ำเสียที่จุดปลายมีค่า COD ลดลงอีกเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นค่า COD ในวันที่ 6 นี้จึงมีค่าสูงกว่าวันอื่นที่ไม่มีการลอยฟุ้งกระจายเล็กน้อย ทำให้ประสิทธิภาพในวันที่ 6 ต่ำกว่าวันอื่นเล็กน้อยด้วย

รูปที่ 5.2 แสดงถึงประสิทธิภาพในการกำจัด COD สังเกตว่าในวันที่ 4-6 และวันที่ 15-16 ที่มีการลด HRT ลงนั้น ประสิทธิภาพในการกำจัด COD ยังคงมีค่าสูงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ค่า COD ทุกจุดตลอดความสูงของถังยังมีค่าต่ำ แสดงว่าระบบแบบ UASB นี้สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีค่า HRT 8 ชั่วโมง (คิดเป็น OLR 3.5-10.0 กรัมต่อลิตรต่อวัน) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

SUASB

รูปที่ 5.3 แสดงค่า COD ในแต่ละถังปฏิกรณ์ย่อย SUASB1 ถึง SUASB4 ในแต่ละวัน พบว่าเมื่อลด HRT ลง COD ในถังปฏิกรณ์ย่อย SUASB1 มีค่าสูงกว่าถังปฏิกรณ์ย่อยตัวอื่นมาก เมื่อใช้ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของเซลล์ (specific growth rate :  $\mu_x$ ) ประกอบการพิจารณาประสิทธิภาพของระบบบำบัด ซึ่งมีรายละเอียดการคำนวณดังนี้

การคำนวณค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของเซลล์ (specific growth rate :  $\mu_x$ )

1. หาค่าอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ ( $r_s$  มีหน่วยเป็น กรัม COD ต่อลิตรต่อวัน) ที่แต่ละถังปฏิกรณ์สามารถย่อยสลายได้จากตารางที่ ค.2
2. เมื่อได้ค่า  $r_s$  นำไปหาค่า  $r_x$  โดยใช้สมการ

$$r_x = Y_{x/s} r_s \tag{5.1}$$

โดย  $r_x$  = อัตราการเกิดปฏิกิริยา (reaction rate) มีหน่วย กรัมตะกอนต่อลิตรต่อวัน

$Y_{x/s}$  = ค่าผลผลิต (yield) มีหน่วย กรัมตะกอนต่อกรัม COD

ในที่นี้ค่าผลผลิตของแบคทีเรียหาได้จากค่าเฉลี่ยของค่าผลผลิตของแบคทีเรียที่ดำรงชีวิตแบบไม่ใช้ออกซิเจน 5 ชนิดดังนี้ (เนตรนภา, 2539)

แบคทีเรีย	$Y_{x/s}$	ค่าเฉลี่ย
Acidogenic	0.140-0.170	0.155
Acetogenic	0.025-0.047	0.036
Methanogenic	0.010-0.054*	0.032
	หรือ	
	0.017-0.054*	0.036
<i>Methanosaeta sohngeniei</i>	0.020-0.030	0.025
<i>Methanosarcina barkeri</i>	0.040-0.050	<u>0.045</u>
	เฉลี่ย	<u>0.055</u>

\*ค่าผลผลิตเมื่อใช้สารอาหารต่างชนิดกัน

ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่า  $Y_{x/s} = 0.055$  เป็นบรรทัดฐานของการคำนวณ



3. หาค่า  $\mu_x$  ได้จากสมการ

$$\mu_x = \frac{r_x}{\rho} \quad (5.2)$$

$\rho$  = ความหนาแน่นของตะกอน มีหน่วย กรัมตะกอนต่อลิตร  
(ได้จากตารางที่ 5.1 และ 5.2)

$\mu_x$  = อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของเซลล์ (specific growth rate) มีหน่วย ต่อวัน

ตัวอย่าง การคำนวณค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของเซลล์ของ UASB ในวันที่ 6 จากตารางที่ ค.2 วันที่ 6 สามารถหาอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ของ UASB ได้ดังนี้

$$r_s = \frac{1678 - 162}{8} \times 24 = 4548 \text{ มิลลิกรัม COD ต่อลิตรต่อวัน}$$

$$= 4.55 \text{ กรัม COD ต่อลิตรต่อวัน}$$

$$r_x = 0.055 \times 4.55 = 0.25 \text{ กรัมตะกอนต่อลิตรต่อวัน}$$

จากตารางที่ 5.1 ความหนาแน่นตะกอน ( $\rho$ ) มีค่า 26.95 กรัมตะกอนต่อลิตร แทนค่าในสมการที่ 5.2

$$\mu_x = \frac{0.25}{26.95} = 0.00928 \text{ ต่อวัน}$$

ตารางที่ 5.1 และ 5.2 แสดงค่า  $\mu_x$  ที่คำนวณได้ในถังปฏิกรณ์ UASB และ SUASB ตามลำดับ จากตารางที่ 5.2 ในวันที่มีการลดเวลารวมของน้ำเสียที่อยู่ในถังปฏิกรณ์ SUASB เหลือ 8 ชั่วโมง (วันที่ 6 และ 15-16) ทำให้ค่า HRT ของแต่ละถังปฏิกรณ์ย่อยจะเหลือเพียง 2 ชั่วโมง พบว่าที่ถัง SUASB1 มีอัตราการเจริญเติบโตต่ำ แต่อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียใน SUASB2 มีค่าสูงกว่าถังอื่น ๆ เนื่องจากการลด HRT ลง ทำให้น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบเร็วขึ้น ส่งผลให้ปริมาณการถ่ายเทสารอาหารทั้งหมดที่ผ่านเข้าสู่เซลล์ของแบคทีเรียในถัง SUASB2 มีค่าสูง (แม้ว่าอัตราการถ่ายเทมวลอาจสูงขึ้น แต่เนื่องจากเวลาที่สารอาหารสัมผัสกับเซลล์แบคทีเรียมีค่าน้อย ดังนั้นปริมาณการถ่ายเทมวลรวมจะมีค่าน้อยลง) เมื่อแบคทีเรียได้รับสารอาหารน้อยจึงมีการเจริญเติบโตน้อยลง แต่ผลที่ได้จาก SUASB2 แสดงให้เห็นว่าการย่อยสลายในถังปฏิกรณ์ย่อยนี้มีค่าสูง ทั้งที่เวลาในการสัมผัสระหว่างแบคทีเรียและสารอาหารมีน้อย และปริมาณเซลล์ก็มีน้อยกว่าด้วย (ดูจากความหนาแน่นของตะกอนที่มีค่าต่ำในตารางที่ 5.2) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าแบคทีเรียใน SUASB2 นี้ไม่จับตัวกันแน่นเหมือนกับแบคทีเรียที่อยู่ใน SUASB1 ดังนั้นสารอาหารจึงสามารถผ่านเข้าสู่เซลล์แบคทีเรียได้ง่ายกว่า สารอินทรีย์ส่วนใหญ่จึงถูกย่อยสลายในถังปฏิกรณ์ย่อยตัวที่สองนี้ ส่งผลให้มีอัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสูงกว่าด้วย ส่วนในถัง SUASB4 เกิดการย่อยสลายน้อยมากสังเกตจากอัตราการเจริญเติบโตของ SUASB4 ที่มีค่าต่ำ ดังนั้นในระบบแบบ SUASB เมื่อลด HRT ลงถึง

ปฏิกรณ์ย่อยตัวแรก (SUASB1) จะคอยรับภาระของสายป้อนที่มีค่า OLR สูง ๆ เอาไว้ แต่ในกรณี HRT ลดลงมากจนแบบที่เรียกใน SUASB1 ย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ลดลง ถึงปฏิกรณ์ถัดไป (SUASB2) จะทำหน้าที่แทน (จากการทดลองนี้ ถึงปฏิกรณ์ย่อย SUASB2 สามารถทำงานแทนได้ เพราะ OLR ยังคงอยู่ในระดับที่ไม่สูงมาก เพียง 10 กรัมต่อลิตรต่อวัน แต่ถ้าค่า OLR สูงกว่านี้ SUASB2 จะทำหน้าที่แทนได้ไม่สมบูรณ์แบบเพราะปริมาณแบบที่เรียกน้อยกว่า)

จากรูปที่ 5.2 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ของระบบแบบ SUASB นี้มีค่าสูงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าระบบแบบ SUASB นี้มีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียที่มีค่า HRT 8 ชั่วโมง (OLR 3.5-10.0 กรัมต่อลิตรต่อวัน) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### เปรียบเทียบ UASB กับ SUASB

ทั้ง UASB และ SUASB มีความสามารถในการกำจัด COD ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ค่า HRT 8 ชั่วโมง แต่ถ้าสังเกตค่าประสิทธิภาพจากรูปที่ 5.2 ให้ดีแล้ว เฉพาะในช่วงแรกที่ลด HRT (วันที่ 4-6) ลงนั้น ค่าประสิทธิภาพของ UASB มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ SUASB แต่ในช่วงที่สอง (วันที่ 15-16) ประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากปัญหาการฟุ้งกระจายของตะกอนแบบที่เรียก ระบบแบบ SUASB จะไม่มีปัญหานี้เนื่องจากตะกอนจะฟุ้งกระจายแค่เพียงใน SUASB1 เท่านั้น (ถึงปฏิกรณ์ย่อยอื่นไม่เกิดการฟุ้งกระจายเนื่องจากย่อยสลายสารอินทรีย์ปริมาณน้อย ทำให้เกิดก๊าซน้อย) ส่วนถึงปฏิกรณ์ที่เหลือสามารถทำงานได้อย่างปกติ ดังนั้นในช่วงแรกของการเริ่มระบบที่ตะกอนแบบที่เรียกด้านล่างของถึงปฏิกรณ์ยังทับถมและจับตัวกันอย่างหลวม ๆ SUASB สามารถรักษาระดับประสิทธิภาพในการกำจัด COD ให้คงที่ได้ดีกว่า UASB

#### 5.1.2 การเพิ่ม OLR ด้วยวิธีเพิ่ม COD ในสายป้อน (4.6-20.0 มิลลิกรัมต่อลิตร)

### UASB

จากรูปที่ 5.1 จะเห็นว่า COD แต่ละจุดใน UASB ยังคงมีค่าใกล้เคียงกันมากแม้ว่าจะเพิ่มค่า COD ขึ้น การเพิ่มค่า COD ในสายป้อนเป็น 4,600 มิลลิกรัมต่อลิตร (OLR 4.6 กรัมต่อลิตรต่อวัน) ในวันที่ 9-10 ถึงปฏิกรณ์ UASB ยังสามารถรักษาระดับค่า COD ที่อยู่ในถึงปฏิกรณ์ให้มีค่าต่ำอยู่ได้ แต่เมื่อเพิ่มค่า COD ในสายป้อนให้มากกว่า 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (OLR 10 กรัมต่อลิตรต่อวัน) ขึ้นไปทั้งสองครั้ง (วันที่ 11-12 และวันที่ 19-21) ทำให้ค่า COD ในถึงปฏิกรณ์ทุกจุดมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัด COD ของระบบลดลง จากรูปที่ 5.2 จะเห็นว่าประสิทธิภาพของระบบจะมีค่าต่ำลงจนสังเกตเห็นได้ในช่วงที่ค่า COD ของสายป้อนมากกว่า

10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร การที่ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของระบบลดลงนี้อาจเกิดขึ้นเนื่องจาก

- ชีตจำกัดของแบคทีเรียในการย่อยสลายสารอินทรีย์
- ชีตจำกัดในการถ่ายเทมวลสารของสารอินทรีย์จากน้ำเสียเข้าสู่เซลล์
- แบคทีเรียถูกยับยั้งด้วยน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง (อาจต้องใช้เวลาในการปรับตัวให้เข้ากับสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป)

แต่เนื่องจากกรณีการเพิ่มค่า COD ในวันที่ 12 นี้จะให้ค่า OLR เท่าเทียมกับการลด HRT ในวันที่ 16 ดังที่ได้กล่าวถึงข้างต้น นั่นคือปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบทั้งหมดจะมีค่าเท่ากันใน 2 กรณีนี้ และในกรณีที่ลดค่า HRT ลง แบคทีเรียยังคงมีความสามารถในการย่อยสลายได้ (โดยที่ประสิทธิภาพไม่เปลี่ยนแปลง) แสดงว่าแบคทีเรียไม่น่าจะมีชีตจำกัดในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในช่วงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ใช้ในช่วงการทดลองนี้ ดังนั้นปัจจัยที่ควบคุมประสิทธิภาพของระบบน่าจะเป็นอัตราการถ่ายเทมวลสาร หรือสภาวะการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียมากกว่า (รายละเอียดจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อ ๆ ไป)

### SUASB

จากรูปที่ 5.3 การเพิ่มค่า COD ในสายป้อนทำให้ค่า COD ในแต่ละถังปฏิกรณ์ย่อยมีค่าสูงขึ้นด้วย SUASB1 จะเป็นถังปฏิกรณ์ที่มีค่า COD สูงที่สุดเนื่องจากต้องรับน้ำเสียจากสายป้อนที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง ต่อมาน้ำเสียที่สารอินทรีย์บางส่วนถูกย่อยสลายจนมีความเข้มข้นลดลงแล้วจึงไหลเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ย่อยถัดไป ดังนั้นถังปฏิกรณ์ย่อยถัด ๆ ไปจึงรับภาระน้ำเสียน้อยลงเรื่อย ๆ ดังนั้น COD จึงมีค่าลดหลั่นกันลงมาจนกระทั่งมีค่าน้อยที่สุดที่ถังปฏิกรณ์ย่อยสุดท้าย SUASB4

เมื่อพิจารณารูปที่ 5.2 จะพบว่าในการทดลองนี้ ระบบแบบ SUASB จะมีประสิทธิภาพในการกำจัด COD สูงสุด (มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์) เมื่อค่า COD ในสายป้อนอยู่ในช่วงไม่เกิน 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (วันที่ 9-10) แต่ถ้าเพิ่มค่า COD ขึ้นอีก (วันที่ 11-12 และ 19-21) ประสิทธิภาพของระบบจะลดลง

ในกรณีการเพิ่ม COD ให้มีค่าสูงไม่มากนัก (น้อยกว่า 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) ในวันที่ 9-10 สารอินทรีย์ในน้ำเสียส่วนใหญ่จะถูกย่อยสลายจนเกือบหมดใน SUASB1 ถึงปฏิกรณ์ย่อยที่เหลือแทบไม่เกิดการย่อยสลาย ส่งผลให้ค่าอัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (ตารางที่ 5.2) ต่ำ แต่เมื่อค่า COD ในสายป้อนเพิ่มขึ้น SUASB1 จะมีประสิทธิภาพลดลง เพราะชีตจำกัดของการถ่ายเทมวล (ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น) ถึงแม้จะมีปริมาณสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น แต่สารอินทรีย์เหล่านี้ไม่สามารถถ่ายเทผ่านเข้าสู่เซลล์แบคทีเรียได้เพิ่มขึ้น ดังนั้น SUASB1 จึงสามารถกำจัด COD เพิ่มขึ้น

ได้ไม่มากเมื่อเทียบกับการเพิ่ม COD ในสายป้อน ทำให้ประสิทธิภาพลดลง ดังปฏิกรณ์ย่อยที่เหลือ จะช่วยกันย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เหลือ แต่เนื่องจากดังปฏิกรณ์ย่อยที่ 2-4 มีความเข้มข้นของเซลล์ ไม่มาก จึงไม่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ให้หมดได้ ดังเช่นในวันที่ 11-12 และ 19-21 ที่ ประสิทธิภาพลดลง

#### เปรียบเทียบ UASB กับ SUASB

รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบค่า COD ที่จุดสุดท้าย (UASB4 และ SUASB4) ของดังปฏิกรณ์ แบบ UASB และ SUASB สังเกตว่าการเพิ่มค่า COD จนเป็น 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตรครั้งแรก ระบบแบบ SUASB มีค่า COD ต่ำกว่า UASB เล็กน้อยส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัด COD ของ SUASB สูงกว่า UASB เล็กน้อยด้วย (ดังรูปที่ 5.2) แต่การเพิ่ม COD ในสายป้อนครั้งที่สองมี ประสิทธิภาพใกล้เคียงกันมาก สาเหตุเกิดจากค่า COD ในสายป้อนที่สูงมากขึ้น จน SUASB1 ไม่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ให้มีปริมาณลดลงได้มาก ดังนั้นดังปฏิกรณ์ย่อยถัด ๆ ไปต้อง รับภาระน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพของ SUASB ลดลงมาจนมีค่า ใกล้เคียงกับ UASB

## 5.2 แนวโน้มของระบบเมื่อเพิ่ม OLR ให้สูงขึ้น

แนวโน้มเมื่อเพิ่ม OLR ด้วยวิธีลด HRT ลงให้ต่ำกว่า 8 ชั่วโมง UASB จะยังสามารถ ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากค่า COD ที่ HRT 8 ชั่วโมงมีค่าต่ำ (จากรูปที่ 5.1 COD ใน วันที่ 6 และ 15-16 มีค่าน้อยกว่า 300 มิลลิกรัมต่อลิตร) และเมื่อพิจารณาอัตราการเจริญเติบโต ของเซลล์จากตารางที่ 5.1 พบว่าในวันที่ 6 และ 15-16 มีค่า  $\mu_x$  ไม่เกิน  $1.161 \times 10^{-2} \text{ วัน}^{-1}$  แต่ อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสามารถมีค่ามากกว่านี้ได้ (พิจารณาจากตารางที่ 5.1 พบว่า  $\mu_x$  มีค่าได้สูงถึงประมาณ  $1.679 \times 10^{-2} \text{ วัน}^{-1}$ ) ดังนั้นระบบยังสามารถทำงานได้อย่างเป็นปกติและ ยังรับภาระได้สูงกว่านี้ ในระบบ SUASB ก็เช่นกัน กล่าวคือระบบยังมีความสามารถในการรองรับ การทำงานที่ HRT ต่ำ ๆ ได้มาก เนื่องจากในกรณีที่ SUASB1 ไม่สามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ แบคทีเรียใน SUASB2 จะช่วยในการย่อยสลายน้ำเสียที่ไหลออกจาก SUASB1 ได้ อย่างไรก็ตาม ในระบบ SUASB นั้น ชนิดและสัดส่วนของแบคทีเรียในดังปฏิกรณ์แต่ละดังอาจจะไม่เหมือนกัน ทำให้ ประสิทธิภาพในการบำบัดอาจแตกต่างกันไป และเป็นไปได้ว่าถึง SUASB3 และ SUASB4 อาจ ไม่สามารถช่วยในการย่อยสลายได้ เนื่องจากมีแบคทีเรียประเภทย่อยสลายสารอินทรีย์และผลิต กรดน้อย ดังจะเห็นได้ว่า ในกรณีที่มีการเพิ่ม OLR อย่างฉับพลัน เช่น ในวันที่ 24 ซึ่งเป็นการเพิ่ม COD จนมีค่า 25 กรัมต่อลิตรต่อวัน SUASB1 จะไม่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ (ประสิทธิภาพเพียงแค่ 0.14 เปอร์เซ็นต์) SUASB2 ก็ไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง

ทำให้น้ำเสียยังคงมีปริมาณสารอินทรีย์มาก และ SUASB3 และ SUASB4 ก็ไม่ได้ช่วยในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เหลือมากนัก ประสิทธิภาพของระบบเมื่อคิดจากการทำงานของ SUASB1 และ SUASB2 มีค่าประมาณ 37% ซึ่งไม่ต่างจากประสิทธิภาพรวมเมื่อรวม SUASB3 และ SUASB4 เข้าไปด้วยเท่าไรนัก (ประสิทธิภาพรวม = 49%)

ในกรณีที่ OLR สูง ๆ นี้จะพบว่า UASB ให้ประสิทธิภาพสูงกว่า SUASB โดยเฉพาะในวันที่ 24 นี้ ประสิทธิภาพของ UASB มีค่าสูงถึงประมาณ 62 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 5.2) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากชนิดและสัดส่วนของแบคทีเรียที่อยู่ในถัง UASB จะไม่เปลี่ยนแปลงมากเท่ากับชนิดและสัดส่วนในถังปฏิกรณ์ย่อยต่าง ๆ ใน SUASB (เฉพาะในกรณีเพิ่ม OLR ให้สูงขึ้นมาก ๆ อย่างฉับพลัน)

อย่างไรก็ตาม การเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียขึ้นอย่างฉับพลันในปริมาณมากในช่วงสุดท้ายของการทดลอง จะมีผลทำให้ทั้งสองระบบไม่สามารถทำงานอีกต่อไปได้แม้ว่าจะลด OLR ให้มีระดับต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากสภาวะการทำงานที่เปลี่ยนไปอย่างรวดเร็วจะทำให้แบคทีเรียตายและทำให้ระบบไม่สามารถฟื้นตัวได้อีก (ซึ่งจะได้กล่าวถึงการทำงานในช่วงนี้ของถังปฏิกรณ์ทั้งสองแบบในหัวข้อต่อไป)

### 5.3 สัดส่วนมีเทน

#### 5.3.1 การเพิ่ม OLR ด้วยวิธีลด HRT

##### UASB

รูปที่ 5.5 แสดงค่าสัดส่วนมีเทนของถังปฏิกรณ์ทุกตัวในแต่ละวัน พบว่าค่าสัดส่วนมีเทนของ UASB เมื่อลด HRT ลงครั้งแรก (วันที่ 4-6) ค่อนข้างแตกต่างจากครั้งที่สอง (วันที่ 15-16) ในการลด HRT ครั้งแรกค่าเฉลี่ยของสัดส่วนมีเทนประมาณ 60-70 เปอร์เซ็นต์ แต่ในครั้งที่สองมีค่าเพียง 20-30 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น เพราะว่าครั้งแรกสภาวะของถังปฏิกรณ์มีค่าเหมาะสมกับการดำรงชีวิตของแบคทีเรียประเภทสร้างมีเทน (รูปที่ 5.6 แสดงค่า pH ใน UASB ค่า pH ของ 6 วันแรกมีค่าอยู่ในช่วง 6.7-7) แต่ในครั้งหลังจำนวนของแบคทีเรียสร้างมีเทนน่าจะลดลงเพราะสภาวะที่เป็นกรดมากขึ้น (ค่า pH อยู่ในช่วง 6.5-6.6) อีกทั้งช่วงวันที่ 11-12 (ทำการเพิ่มค่า COD ในสายป้อน) ค่า pH ลดต่ำลงเหลือเพียง 6.3 ส่งผลให้เกิดสภาวะที่ไม่เหมาะสม ทำให้แบคทีเรียสร้างมีเทนบางส่วนไม่สามารถดำรงชีวิตได้ (แบคทีเรียประเภทสร้างมีเทนสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ค่า pH ระหว่าง 6.5-7.2 (กิตติศักดิ์, 2539)) จำนวนของแบคทีเรียชนิดนี้น่าจะลดลง ดังนั้นระบบจึงสามารถผลิตก๊าซมีเทนออกมาได้น้อยลง

### SUASB

ตามแนวความคิดของการแบ่งถังปฏิกรณ์นั้น ถังปฏิกรณ์ย่อยแรก ได้แก่ SUASB1 จะผลิตก๊าซที่มีค่าสัดส่วนมีเทนต่ำที่สุดเนื่องจากต้องรับภาระน้ำเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์มากที่สุด เกิดการสะสมของกรดในถัง ทำให้มีค่า pH ต่ำกว่าถังปฏิกรณ์อื่น จำนวนแบคทีเรียประเภทสร้างมีเทนจึงลดจำนวนลงเนื่องจากสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิต ทำให้สัดส่วนมีเทนใน SUASB1 มีค่าต่ำที่สุด ค่าสัดส่วนมีเทนจะค่อย ๆ สูงขึ้นในถังปฏิกรณ์ย่อยถัด ๆ ไปเพราะรับภาระน้ำเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์ลดลง แต่จากรูปที่ 5.5 จะเห็นว่าไม่เป็นเช่นนั้น ค่าสัดส่วนมีเทนของ SUASB1 ส่วนใหญ่มีค่ามากกว่า SUASB2 และบางครั้งมากกว่า SUASB3 เนื่องจากการลด HRT คือการทำให้ น้ำเสียไหลเข้าสู่ระบบเร็วขึ้น บัฟเฟอร์ที่ถูกผสมลงไป น้ำเสียจะไหลเข้าไปในระบบพร้อม ๆ กันด้วย ดังนั้นปริมาณบัฟเฟอร์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ SUASB1 จะสูงขึ้น สังเกตได้จากค่า pH ใน SUASB1 จะมีค่าสูงกว่าถังปฏิกรณ์ย่อยตัวอื่น (จากรูปที่ 5.7 วันที่ 15-16 SUASB1 มีค่า pH อยู่ในช่วง 6.5-6.6 แต่ในถังปฏิกรณ์ย่อยที่เหลือมีค่า pH อยู่ในช่วง 6.2-6.3) ทำให้สภาวะในถัง SUASB1 นี้มีความเหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของแบคทีเรียสร้างมีเทนมากขึ้นจึงช่วยให้ค่าสัดส่วนมีเทนของ SUASB1 สูงขึ้น ส่วนใน SUASB4 สามารถรักษาระดับค่าสัดส่วนมีเทนให้สูงที่สุดอยู่เสมอ

จากรูปที่ 5.5 พบว่าการลด HRT ในครั้งแรก (วันที่ 4-6) ก๊าซที่เกิดขึ้นมีค่าสัดส่วนมีเทนสูงกว่าการลด HRT ครั้งที่สอง (วันที่ 15-16) มาก (ประมาณ 20-30 เปอร์เซ็นต์) เหตุผลเป็นเช่นเดียวกับ UASB คือคาดว่าจำนวนแบคทีเรียประเภทสร้างมีเทนในระบบน้อยลงเนื่องจากระบบพบกับสภาวะที่เป็นกรดในวันที่ 11-12

#### 5.3.2 การเพิ่ม OLR ด้วยวิธีเพิ่ม COD ในสายป้อน

### UASB

จากรูปที่ 5.5 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มค่า COD ในสายป้อนขึ้น ค่าสัดส่วนมีเทนจะลดลง การทดลองเพิ่มค่า COD สองครั้งมีแนวโน้มในทางเดียวกัน คือเมื่อเพิ่มค่า COD ในสายป้อนเกิน 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (วันที่ 11-12 และวันที่ 19-21) จะทำให้ค่าสัดส่วนมีเทนลดลงมาเหลือไม่ถึง 25 เปอร์เซ็นต์ การเพิ่มค่า COD ทำให้แบคทีเรียสร้างกรดมากขึ้น อีกทั้งปริมาณบัฟเฟอร์ในระบบยังคงเท่าเดิม ไม่เพิ่มขึ้นเหมือนกรณีการลด HRT ค่า pH จึงลดลงเหลือประมาณ 6.4 ซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของแบคทีเรียสร้างมีเทน (ค่า pH ที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของแบคทีเรียประเภทสร้างมีเทนมีค่าอยู่ในช่วง 6.5-7.2 (กิตติศักดิ์, 2539)) ดังนั้นการเพิ่ม OLR ด้วยวิธีเพิ่มค่า COD ในสายป้อนจะทำให้ระบบสูญเสียแบคทีเรียประเภทสร้างมีเทน

มาก ค่าสัดส่วนมีเทนจึงลดลงมาก ดังนั้นเมื่อลด HRT หลังจากการเพิ่ม COD ในวันที่ 12 จึงทำให้มีสัดส่วนมีเทนน้อยกว่าสัดส่วนที่ได้จากการลด HRT ครั้งแรก

### SUASB

การเพิ่มค่า COD ในสายป้อนทำให้ค่าสัดส่วนมีเทนใน SUASB ลดลงมากเช่นเดียวกับ UASB ถึงปฏิกรณ์ย่อย SUASB1 จะมีค่าสัดส่วนมีเทนต่ำที่สุดเนื่องจากรับน้ำเสียที่มีค่า COD สูงที่สุด ค่าสัดส่วนมีเทนจะค่อย ๆ สูงขึ้นที่ถังปฏิกรณ์ย่อยถัด ๆ ไปเพราะปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียลดลงเรื่อย ๆ ถึงแม้ว่าจะเพิ่มค่า COD ในสายป้อนเป็น 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร SUASB4 ยังคงรักษาค่าสัดส่วนมีเทนให้สูงใกล้เคียงค่าเดิมได้ (ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์) แต่การเพิ่ม COD ถึงระดับ 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ถังปฏิกรณ์ย่อยสามตัวแรกไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้หมด ดังนั้นค่าสัดส่วนมีเทนของ SUASB4 จึงลดลง

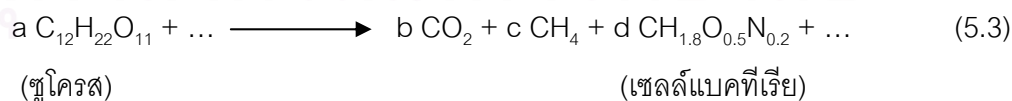
## 5.4 เปรียบเทียบปริมาตรก๊าซที่ UASB และ SUASB สามารถผลิตได้

### การประมาณปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้น

เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ทำให้ไม่สามารถเก็บก๊าซที่เกิดขึ้นทั้งหมดได้ ดังนั้นการประมาณค่าปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้นจะทำได้โดยใช้การคำนวณต่อไปนี้

ขั้นแรกสมมติให้ก๊าซประพุดิตนเป็นก๊าซในอุดมคติและในการคำนวณนี้จะคิดว่าโครงสร้างของเซลล์แบคทีเรียแบบไม่ใช้ออกซิเจนทั้งประเภทสร้างกรดและสร้างมีเทนเหมือนกัน คิดรวมกันเป็น  $\text{CH}_{1.8}\text{O}_{0.5}\text{N}_{0.2}$  (Prasert, 1997)

น้ำตาลซูโครสในน้ำเสียสังเคราะห์จะทำหน้าที่เป็นแหล่งคาร์บอนเพื่อให้แบคทีเรียใช้ในการสร้างเซลล์ คาร์บอนที่เหลือจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทน ดังนั้นสมการที่ใช้จะเป็นดังนี้



ดุลสมการเพื่อหาค่า a, b, c และ d

**ค่า a และ d**

หาค่าตัวแปร a และ d โดยคิดจากค่าผลผลิต (Yield :  $Y_{x/s}$ ) โดยในการคำนวณจะใช้ค่า

$Y_{x/s} = 0.055$  (ดังที่ได้กล่าวถึงแล้วข้างต้น)

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของ } C_{12}H_{22}O_{11} &= (12 \times 12) + (1 \times 22) + (11 \times 16) \\ &= 342 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของ } CH_{1.8}O_{0.5}N_{0.2} &= (12 \times 1) + (1 \times 1.8) + (16 \times 0.5) + (14 \times 0.2) \\ &= 24.6 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

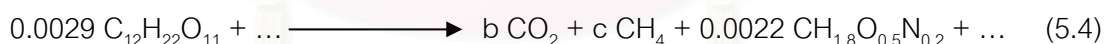
$Y_{x/s} = 0.055$  แสดงว่าถ้าใช้  $C_{12}H_{22}O_{11}$  1 กรัม จะเปลี่ยนเป็น  $CH_{1.8}O_{0.5}N_{0.2}$  0.055 กรัม

$$\text{ดังนั้น ถ้าใช้ } C_{12}H_{22}O_{11} \quad 1 \text{ กรัม} = \frac{1}{342} = 0.0029 \text{ กรัมโมล}$$

$$\text{เปลี่ยนเป็น } CH_{1.8}O_{0.5}N_{0.2} \quad 0.055 \text{ กรัม} = \frac{0.055}{24.6} = 0.0022 \text{ กรัมโมล}$$

ค่า a = 0.0029 และ d = 0.0022

ดังนั้นสมการ (5.3) จะเป็น



**หาค่า b และ c**

เนื่องจากคาร์บอนในน้ำตาลซูโครสที่เป็นแหล่งคาร์บอนบางส่วนถูกแบคทีเรียใช้เพื่อสร้างเซลล์ คาร์บอนส่วนที่เหลือจะเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทน เมื่อคิดจำนวนคาร์บอนในสมการ (5.4)

$$\text{น้ำตาลซูโครสมีจำนวนคาร์บอน} = 0.0029 \times 12 = 0.0351 \text{ โมลคาร์บอน}$$

$$\text{คาร์บอนถูกเปลี่ยนเป็นเซลล์แบคทีเรีย} = 0.0022 \times 1 = 0.0022 \text{ โมลคาร์บอน}$$

$$\text{ดังนั้นจำนวนคาร์บอนที่เหลือ} = 0.0351 - 0.0022 = 0.0329 \text{ โมลคาร์บอน}$$



คาร์บอนที่เหลือนี้จะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพที่ประกอบไปด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทน โดยค่าสัดส่วนของมีเทน (เป็นเปอร์เซ็นต์) ในก๊าซชีวภาพนี้สามารถวิเคราะห์ได้จากเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี ผลดังตารางที่ ค.5 ดังนั้นค่า c สามารถหาได้จากตารางที่ ค.5 และคาร์บอนส่วนที่เหลือจะเป็นคาร์บอนไดออกไซด์

เมื่อรู้ค่า c (จำนวนโมลของมีเทนที่เกิดขึ้น) จึงสามารถเทียบหาปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นได้จากปริมาณน้ำตาลที่ถูกย่อยสลายไป

ตัวอย่าง การคำนวณหาปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นใน UASB ในวันที่ 1 (HRT มีค่า 1 วัน) เป็นดังนี้

จากวิธีการคำนวณข้างต้น

$$a = 0.0029$$

$$d = 0.0022$$

หาค่า b และ c

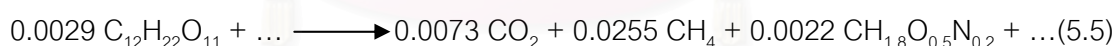
จากตารางที่ ค.5 มีค่าสัดส่วนมีเทนของ UASB ในวันที่ 1 เป็น 77.49 เปอร์เซ็นต์

จึงได้

$$\text{ค่า } c = 0.7749 \times 0.0329 = 0.0255$$

$$\text{ค่า } b = 0.0329 - 0.0255 = 0.0074$$

ดังนั้นจากสมการ (5.4) จะเป็น



เนื่องจากปริมาณของสารอินทรีย์แสดงในรูป COD จึงต้องทำการเปลี่ยนหน่วยจากปริมาณของน้ำตาลซูโครสที่ถูกย่อยสลายเป็น COD โดยพิจารณาการย่อยสลายจากสมการ



จากตารางที่ ค.2

$$\begin{aligned} \text{ถังปฏิกรณ์ UASB กำจัด COD ไป} &= 2077 - 25 = 2052 \text{ มิลลิกรัม COD ต่อลิตรต่อวัน} \\ &= 2.052 \text{ กรัม COD ต่อลิตรต่อวัน} \end{aligned}$$

(กรณีที่ HRT มีค่าอื่น เช่น 8 ชั่วโมง ดังนั้นการกำจัด COD จะมีหน่วยเป็น กรัม COD ต่อลิตรต่อ 8 ชั่วโมง ดังนั้นถ้าจะทำเป็นหน่วย กรัม COD ต่อลิตรต่อวัน ต้องคูณด้วย 3)

มวลโมเลกุลของ  $O_2 = 16 \times 2 = 32$

$$\text{ในวันที่ 1 UASB ใช้ } O_2 \text{ ไป} = \frac{2.052}{32} = 0.064 \text{ กรัมโมล COD ต่อลิตรต่อวัน}$$

$$\text{คิดเป็นการย่อยสลายน้ำตาล} = \frac{(1 \times 0.064)}{12} = 0.00534 \text{ กรัมโมลต่อลิตรต่อวัน}$$

เมื่อใช้น้ำตาลไป 0.00534 กรัมโมลต่อลิตรต่อวัน

$$\begin{aligned} \text{ทำให้เกิดก๊าซมีเทน} &= \frac{(0.00534 \times 0.0255)}{0.0029} \\ &= 0.0465 \text{ กรัมโมลต่อลิตรต่อวัน} \end{aligned}$$

หาปริมาตรก๊าซมีเทนจากสูตร

$$PV = nRT \text{ (โดยสมมติว่าเป็นก๊าซอุดมคติ)}$$

$$1 \times V = 0.0465 \times 82.05 \times (30 + 273)$$

$$V = 1156.65 \text{ ลิตรมีเทนต่อลบ.ชม.ต่อวัน}$$

$$= 1.157 \text{ ลิตรมีเทนต่อลิตรต่อวัน}$$

แต่วันที่ 1 มี HRT 1 วัน แสดงว่าใน 1 วันมีน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ 8 ลิตร

$$\text{ดังนั้น ปริมาตรมีเทนที่เกิดขึ้น} = 1.157 \times 8 = 9.25 \text{ ลิตรต่อวัน}$$

รูปที่ 5.8 แสดงปริมาตรก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นใน SUASB แต่ละถังในหนึ่งวัน พบว่าก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ได้มาจากถังปฏิกรณ์ย่อยถังแรก ๆ (SUASB1 และ SUASB2) มากกว่าที่จะได้มาจากถังปฏิกรณ์หลัง ๆ ทั้งที่ถังปฏิกรณ์แรก ๆ มีค่าสัดส่วนมีเทนต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากสารอินทรีย์ส่วนใหญ่ถูกย่อยสลายและเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพในถังปฏิกรณ์ย่อยแรก ๆ เกือบหมดแล้ว ในถังปฏิกรณ์ย่อยหลัง ๆ จึงผลิตก๊าซชีวภาพได้ปริมาณน้อยกว่าเนื่องจากมีปริมาณสารอินทรีย์ที่ไหลเข้าต่ำนั่นเอง (แต่จะได้มีเทนในสัดส่วนที่สูงในถังปฏิกรณ์ย่อยที่ 3 และ 4)

จากรูปที่ 5.8 จะเห็นว่าก๊าซที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ได้มาจากถัง SUASB1 แต่ SUASB2, SUASB3 และ SUASB4 ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์น้อยมาก (สังเกตจากตารางที่ 5.2 ค่า  $\mu_x$  ใน SUASB1 สูงกว่าถังปฏิกรณ์ย่อยอื่น) ยกเว้นในกรณีการเพิ่ม OLR โดยการลด HRT ลงเหลือ 8 ชั่วโมงที่ก๊าซมีเทนส่วนใหญ่ได้จาก SUASB2 (ช่วงวันที่ 6 และ 15-16) ทั้งนี้เนื่องจากการลด HRT

ลงทำให้ SUASB1 ไม่สามารถกำจัด COD ได้ทัน สารอินทรีย์ส่วนใหญ่ถูกย่อยสลายใน SUASB2 แทน (ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 5.1.1)

รูปที่ 5.9 แสดงปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นใน UASB เปรียบเทียบกับ SUASB เส้นกราฟสามารถแบ่งได้เป็นสองช่วงการทดลอง

- ช่วงแรก (วันที่ 1-12) ปริมาณก๊าซมีเทนที่ได้จาก UASB จะมากกว่า SUASB ไม่ว่าจะเพิ่ม OLR ด้วยวิธีการใดก็ตาม เมื่อนำปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากถังปฏิกรณ์ทั้งสองแบบมาคำนวณหาผลรวมและเปรียบเทียบจะได้ดังรูปที่ 5.10 ถึง UASB สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ 201 ลิตรต่อวัน มากกว่า SUASB ที่สามารถผลิตได้ 164 ลิตรต่อวัน
- ช่วงที่สอง (วันที่ 13-25) ภายหลังจากผ่านการดำเนินการเปลี่ยนแปลงสถานะของสายป้อนแบบฉับพลันไปแล้วหนึ่งครั้ง แนวโน้มได้เปลี่ยนไป เนื่องจากการเพิ่ม COD ในสายป้อนในวันที่ 11-12 ทำให้ระบบแบบ UASB สูญเสียแบคทีเรียประเภทสร้างมีเทนไปบางส่วนเนื่องจากเกิดสถานะความเป็นกรดในถังปฏิกรณ์ (ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.2) การลด HRT ในช่วงที่สอง (วันที่ 15-16) นี้ SUASB สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้มากกว่า UASB มาก ในขณะที่การเพิ่ม COD (วันที่ 19-21) ทำให้ทั้งสองระบบผลิตก๊าซออกมาปริมาณใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาผลรวมของปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากรูปที่ 5.10 UASB ผลิตก๊าซมีเทนได้ 170 ลิตร น้อยกว่า SUASB ที่สามารถผลิตได้ 208 ลิตรต่อวัน

ดังนั้นแสดงว่าภายหลังจากการเปลี่ยนแปลงสถานะการดำเนินการแบบฉับพลัน ระบบแบบ SUASB สามารถรักษาสมรรถนะในการผลิตก๊าซมีเทนได้ดีกว่า UASB

## 5.5 การสูญเสียตะกอนโดยการไหลไปในสายออก (wash out)

### 5.5.1 ลักษณะของตะกอน

ใน UASB พบว่าเกิดการฟุ้งกระจายของตะกอนทุกครั้งที่มีการลด HRT ลงเหลือ 8 ชั่วโมง หรือมีการเพิ่ม COD ในสายป้อนขึ้น (OLR มากกว่า 4.6 กรัมต่อลิตรต่อวัน) เนื่องจากค่า OLR สูงขึ้น ระบบจึงผลิตก๊าซออกมามากขึ้น ตะกอนบางส่วนได้ไหลออกจากระบบไปพร้อมกับสายออกด้านบนของถังปฏิกรณ์

ส่วนใน SUASB จะพบการฟุ้งกระจายของตะกอนเมื่อทดลองลด HRT เหลือ 8 ชั่วโมงและเพิ่ม COD ขึ้นในครั้งแรก (วันที่ 6 และวันที่ 9-12) และพบเฉพาะที่ถังปฏิกรณ์ย่อย SUASB1 เท่านั้น แต่ยังมี SUASB2 คอยรองรับตะกอนที่ไหลออกจาก SUASB1 อยู่ การทดลองเพิ่ม OLR ครั้งหลัง ไม่มีการฟุ้งกระจายของตะกอนแต่อย่างใด สาเหตุเป็นเพราะตะกอนในถัง SUASB1 มี

การปรับตัวให้จับตัวกันแน่นขึ้นเพื่อที่จะทนต่อสภาวะที่รุนแรงเนื่องจากถังปฏิกรณ์มีขนาดเล็กนั่นเอง (ในสภาวะที่สายป้อนที่มีค่า OLR เท่ากัน SUASB มีขนาดเล็กกว่าจึงต้องรับภาระมากกว่า) พิจารณาได้จากค่าความหนาแน่นของตะกอนในรูปที่ 5.11 เริ่มต้นทุกถังปฏิกรณ์มีความหนาแน่นเท่ากัน (18.56 กรัมต่อลิตร) เมื่อเวลาผ่านไปความหนาแน่นของตะกอนทุกถังมีค่าเพิ่มขึ้น และลักษณะของตะกอนเหนียวขึ้น แสดงให้เห็นว่าตะกอนเกิดการจับตัวแน่นขึ้น ความหนาแน่นของตะกอนที่ถัง SUASB1 มีค่าเพิ่มขึ้นมากที่สุด คือเพิ่มจาก 18.56 เป็น 67.72 กรัมต่อลิตร เนื่องจากต้องรับภาระของสายป้อนมากที่สุด ในขณะที่ SUASB4 เกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด ความหนาแน่นเพิ่มเล็กน้อยเป็น 24.18 กรัมต่อลิตร เพราะน้ำเสียที่เข้ามาใน SUASB4 มีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำที่สุด

จากรูปที่ 5.11 แม้ว่าค่าความหนาแน่นของตะกอนจากถัง UASB จะใกล้เคียงกับ SUASB1 (ประมาณ 68 กรัมต่อลิตร) แต่เกิดการลอยของตะกอนเฉพาะใน UASB เท่านั้น เนื่องจากใน UASB ผลิตก๊าซที่เป็นตัวผลักดันตะกอนให้ลอยขึ้นมากกว่า พิจารณาได้จากตารางที่ ค.6 จะเห็นว่าก๊าซมีเทนจาก UASB ในวันที่มีการฟุ้งกระจายของตะกอน (วันที่ 15-16 และ 19-21) จะมีปริมาณมากถึง 32.81 ลิตร (ในวันที่ 16) ซึ่งมากกว่าปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นใน SUASB1 (ในวันที่ 16 มีปริมาณเพียง 3.66 ลิตรเท่านั้น) (ปริมาณก๊าซทั้งหมดจะเป็นปริมาณก๊าซมีเทนรวมกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไนโตรเจนที่ใช้ในการไล่ออกซิเจน ซึ่งสัดส่วนของก๊าซมีเทน (ตารางที่ ค.5) ในวันที่ 16 จะอยู่ที่ประมาณ 19.96 สำหรับ UASB และอยู่ที่ประมาณ 16.69 สำหรับ SUASB1 ดังนั้นปริมาณก๊าซทั้งหมดที่เกิดขึ้นใน UASB และ SUASB คือ 164.38 ลิตร และ 21.93 ลิตร ตามลำดับ)

ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่าถังปฏิกรณ์แบบ SUASB มีความสามารถในการรักษาปริมาณตะกอนในระบบได้ดีกว่า UASB ข้อสังเกตอีกอย่างที่ใช้สนับสนุนคือเมื่อเพิ่มค่า OLR ขึ้นมักพบตะกอนอยู่ในถังรองรับน้ำเสียที่ออกจาก UASB แต่ไม่พบตะกอนในถังรองรับน้ำเสียของ SUASB

#### 5.5.2 สภาวะการเจือจางของตะกอน (wash out)

สภาวะการเจือจางคือสภาวะที่อัตราการเจือจางของสายป้อนสูงกว่าอัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย จะเกิดขึ้นเมื่อมีการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบด้วยอัตราการป้อนที่สูง ก๊าซปริมาณมากที่เกิดขึ้นจะพัดพาตะกอนที่ทับถมอยู่ด้านล่างให้ลอยขึ้นสู่ด้านบนและไหลออกจากถังปฏิกรณ์ในที่สุด ถ้าอัตราการเจือจางมีค่าสูงกว่าอัตราการเจริญเติบโต แบคทีเรียจะไม่สามารถเจริญเติบโต

ได้ทันต่อการสูญเสียออกไป ปริมาณแบคทีเรียในระบบจะลดลงจนกระทั่งหมดไป ขั้นตอนการคำนวณว่าระบบจะเกิดสภาวะเชื้อจางขึ้นหรือไม่เป็นดังนี้

ขั้นตอนการคำนวณสภาวะการเชื้อจางของตะกอน

1. หาค่าอัตราการเชื้อจางของเซลล์ (Dilution rate : D) หาได้จากสมการ

$$D = \frac{F}{V} \quad (5.7)$$

โดย  $D$  = อัตราการเชื้อจางของเซลล์ (Dilution rate) มีหน่วย ต่อวัน  
 $F$  = อัตราการไหลของสายป้อน (Flow rate) มีหน่วย ลิตรต่อวัน  
 $V$  = ปริมาตรของถังปฏิกรณ์ (Volume) มีหน่วย ลิตร

2. หาค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของเซลล์ (กล่าวในหัวข้อ 5.1.1)
3. เปรียบเทียบค่า  $D$  (ที่คำนวณได้จากข้อ 1) และ  $\mu_x$  (ที่คำนวณได้จากข้อ 2)

ในกรณี  $D > \mu_x$  ระบบมีอัตราการเชื้อจางของเซลล์แบคทีเรียสูงกว่าอัตราการเจริญเติบโต ดังนั้นจำนวนแบคทีเรียในระบบจะลดลงเนื่องจากไม่สามารถเจริญเติบโตได้ทันต่อการสูญเสียแบคทีเรียโดยการไหลออกจากระบบ (wash out)

ตัวอย่างการคำนวณ คำนวณการไหลออกของแบคทีเรียในวันที่ 6 ของถังปฏิกรณ์ UASB

1. ในวันที่ 6 ค่า HRT 8 ชั่วโมง

$$\text{ดังนั้นอัตราการไหล (F) ของถังปฏิกรณ์} = \frac{8 \text{ ลิตร}}{8 \text{ ชั่วโมง}} = 24 \text{ ลิตรต่อวัน}$$

$$\text{ปริมาตรถัง (V)} = 8 \text{ ลิตร}$$

$$D = \frac{24}{8} = 3 \text{ ต่อวัน}$$

2. ค่าอัตราการเจริญเติบโตของเซลล์แสดงดังหัวข้อที่ 5.1.1

$$\mu_x = 0.00928$$

3. เปรียบเทียบค่า  $D$  กับ  $\mu_x$  พบว่า  $D$  มีค่ามากกว่าแสดงว่าระบบเกิดสภาวะเชื้อจาง (wash out) จากระบบ

ตารางที่ 5.1 และ 5.2 แสดงค่า D และ  $\mu_x$  ของถังปฏิกรณ์ทั้งสองแบบในแต่ละวัน เมื่อเปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้แล้วพบว่าในถังปฏิกรณ์ทุกถังมีค่า D มากกว่า  $\mu_x$  เสมอ แสดงว่าสถานะของการดำเนินการที่ใช้จะทำให้เกิดการสภาวะเจือจาง (wash out) แต่จากการทดลองเกิดการสูญเสียตะกอนใน UASB และ SUASB1 เพียงบางวันเท่านั้น (ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น) ทั้งนี้เนื่องจากในความเป็นจริงสภาพการผสมผสานของสารภายในถังปฏิกรณ์มีน้อยมากและตะกอนมีการจับตัวกันค่อนข้างแน่นที่บริเวณฐานของถังปฏิกรณ์ ทำให้ตะกอนเหล่านี้ไม่ถูกเจือจางไปกับสารที่ไหลล้นออกจากถังปฏิกรณ์ แต่ในสภาวะที่มีการให้สารอาหารเพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของตะกอนและถ้าการฟุ้งกระจายมีมากพออาจทำให้เกิดการเจือจางของตะกอนภายในระบบ ดังที่เกิดขึ้นในระบบ UASB ในวันที่ 6 , 9-12 , 15-16 และ 19-21

การเกิดการผสมกันอย่างสมบูรณ์ในถังปฏิกรณ์ลักษณะนี้เป็นไปได้ยากเนื่องจากของไหลไหลด้วยอัตราไหลต่ำมาก และมีเพียงการผสมผสานที่เกิดจากก๊าซที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์เท่านั้น นอกจากนี้ตะกอนยังมีการจับตัวกันแน่นขึ้นในช่วงหลังของการทดลอง (หลังวันที่ 12) ทำให้เกิดการฟุ้งกระจายได้น้อยลง

## 5.6 เปรียบเทียบผลของการลด HRT กับการเพิ่ม COD

รูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงสถานะและค่า OLR ของการทดลอง จะเห็นว่าในวันที่ 6 และวันที่ 9-10 มีค่า OLR ใกล้เคียงกันประมาณ 4.7-5.0 กรัมต่อลิตรต่อวัน อีกช่วงคือวันที่ 12 กับวันที่ 16 มีค่า OLR 10 กรัมต่อลิตรต่อวัน ทั้งสองช่วงมีค่า OLR ใกล้เคียงกันแต่ใช้วิธีเพิ่ม OLR แตกต่างกันในวันที่ 6 และ 16 เพิ่มด้วยวิธีลด HRT ส่วนในวันที่ 9-10 และ 12 ใช้วิธีเพิ่มค่า COD ในสายป้อนในหัวข้อนี้จะเปรียบเทียบผลต่าง ๆ ของการลด HRT และการเพิ่มค่า COD ในวันดังกล่าว

### 5.6.1 ค่า COD และประสิทธิภาพในการกำจัด COD

UASB  
จากรูปที่ 5.2 ที่ค่า OLR 4.7-5 กรัมต่อลิตรต่อวัน (วันที่ 6 และ 9-10) การลด HRT ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัด COD ต่ำลงเล็กน้อยเนื่องจากตะกอนยังจับตัวกันอย่างหลวม ๆ และเกิดการฟุ้งกระจาย (ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 5.5.1) แต่โดยรวมแล้ว ทั้งสองวิธีมีประสิทธิภาพในการกำจัด COD สูง (มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์) ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเสียที่ป้อนมีระดับปริมาณสารอินทรีย์ไม่สูงนัก ดังนั้นระบบสามารถย่อยสลายได้ไม่ว่าจะเพิ่ม OLR ด้วยวิธีใด

จากรูปที่ 5.2 เมื่อพิจารณาที่ค่า OLR 10 กรัมต่อลิตรต่อวัน (วันที่ 12 และ 16) พบว่าการลด HRT เหลือ 8 ชั่วโมงมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการเพิ่ม COD เป็น 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากวิธีลด HRT ลง ถึงแม้ว่าเสียที่ไหลเข้าสู่ระบบจะผ่านออกจากระบบได้เร็ว แต่การเพิ่มอัตราไหลของน้ำเสียเท่ากับเป็นการเพิ่มอัตราการถ่ายเทสารอาหาร (external mass transfer) ผ่านเข้าสู่เซลล์ของแบคทีเรีย ดังนั้นถ้าระบบถูกจำกัดด้วยอัตราการถ่ายเทสารอาหารจากของเหลวไปสู่เซลล์ เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเสียระบบอาจจะสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงขึ้น หรือสารอินทรีย์จะยังสามารถถูกย่อยสลายได้มาก ซึ่งผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า การทดลองในงานวิจัยนี้ปัจจัยที่ควบคุมประสิทธิภาพของระบบอาจจะเป็นอัตราการถ่ายเทสารอาหารก็เป็นได้ เนื่องจากเมื่อลด HRT ของน้ำเสียในระบบแล้วยังคงทำให้ระบบสามารถดำเนินงานได้เป็นปกติ

ในกรณีการเพิ่ม COD ในสายป้อนน้ำเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์สูงเข้าไป ถึงแม้ว่าจะมีเวลาในการถ่ายเทสารอาหารนาน แต่แบคทีเรียอาจต้องปรับตัวให้เข้ากับสภาวะที่น้ำเสียมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง หรืออาจเป็นไปได้ว่าน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูงจะมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย จึงส่งผลให้เกิดการลดลงของประสิทธิภาพในการกำจัด COD ดังเช่นในวันที่ 20-21 นอกจากนี้ยังเป็นไปได้ว่าระบบการบำบัดนี้ถูกจำกัดโดยอัตราการถ่ายเทสารอาหารจากของเหลวไปสู่เซลล์ (ดังที่อธิบายในย่อหน้าข้างต้น) ซึ่งในกรณีนี้การเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์จะไม่ช่วยให้เกิดการย่อยสลายได้ดีขึ้นแต่อย่างใด เพราะอัตราการถ่ายเทสารอาหารเข้าสู่เซลล์ยังคงเป็นไปได้ด้วยอัตราเท่าเดิม

### SUASB

เมื่อเปรียบเทียบค่า COD ที่จุดปลายในรูปที่ 5.4 และประสิทธิภาพในการกำจัด COD ในรูปที่ 5.2 จะเห็นว่าการเพิ่ม OLR ด้วยวิธีทั้งสองแบบให้ผลใกล้เคียงกันมาก โดยมีค่าสูงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าพิจารณาที่ SUASB1 จะเห็นความแตกต่าง จากรูปที่ 5.12 เมื่อเพิ่ม OLR ขึ้นด้วยวิธีเพิ่มค่า COD (วันที่ 9-10 และวันที่ 12) ประสิทธิภาพของ SUASB1 จะมีค่ามากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ใช้วิธีลด HRT (วันที่ 6 และวันที่ 16) มีค่าแค่เพียงไม่ถึง 15 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น (แต่ถึงปฏิกรณ์ย่อยอื่น ๆ มีประสิทธิภาพไม่เปลี่ยนแปลง) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าใน SUASB นั้นน้ำเสียมีเวลาในการสัมผัสกับแบคทีเรียจำกัดมาก ทำให้การถ่ายเทมวลของของเสียไปยังเซลล์เกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ในช่วงเวลาที่น้ำเสียอยู่ในถังปฏิกรณ์ แต่ของเสียที่ผ่านออกจาก SUASB1 จะถูกย่อยสลายต่อไปในถังปฏิกรณ์ย่อยที่เหลือ

## 5.6.2 สัดส่วนมีเทน

### UASB

จากรูปที่ 5.5 จะเห็นว่าที่ OLR 4.7-5 กรัมต่อลิตรต่อวัน นั้นวิธีการเพิ่ม COD ในสายป้อน (วันที่ 9-10) ก๊าซที่ผลิตได้จะมีสัดส่วนมีเทนประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าน้อยกว่าวิธีการลด HRT (วันที่ 6) ที่มีค่า 74 เปอร์เซ็นต์ วิธีเพิ่มค่า COD ในสายป้อนจะได้สัดส่วนมีเทนต่ำกว่าวิธีลด HRT เนื่องจากการเพิ่ม COD ขึ้น แบคทีเรียจะย่อยสลายสารอินทรีย์ปริมาณมากเกิดการสะสมของกรด ส่งผลให้ค่า pH ของระบบลดลง พิจารณาได้จากตารางที่ ค.4 ค่า pH ในวันที่ 6 (ใช้วิธีลด HRT) มีค่าประมาณ 6.7-6.9 และในวันที่ 9 (เพิ่ม COD ในสายป้อน) มีค่าประมาณ 6.6-6.7 เปรียบเทียบกันแล้วค่า pH ในวันที่ 9 ต่ำกว่าในวันที่ 6 (แต่ pH ในวันที่ 11-12 ที่ใช้วิธีเพิ่ม COD (6.4-6.6) มีค่าสูงกว่าในวันที่ 15-16 ที่ใช้วิธีลด HRT (ประมาณ 6.2) เนื่องจากมีการเพิ่มความเข้มข้นบัพเฟอร์ในสายป้อนจาก 5 เป็น 10 กรัมต่อลิตร) นอกจากนี้วิธีเพิ่ม COD เวลาที่กรดสะสมอยู่ในถังปฏิกรณ์นานกว่าเพราะค่า HRT สูง ทำให้สภาวะเป็นพิษต่อการดำรงชีวิตของแบคทีเรียสร้างมีเทน การลด HRT ลงเกิดการสะสมของกรดรอบ ๆ เซลล์แบคทีเรียที่น้อยกว่า เพราะน้ำเสียที่เป็นกรดจะถูกแทนที่ด้วยน้ำเสียใหม่อย่างรวดเร็ว เป็นเหตุให้การลดค่า HRT รักษาค่าสัดส่วนมีเทนได้สูงกว่าการเพิ่ม COD

แต่เมื่อระบบมีค่า OLR 10 กรัมต่อลิตรต่อวัน (วันที่ 12 และวันที่ 16) การเพิ่ม OLR ด้วยวิธีทั้งสองแบบมีค่าสัดส่วนมีเทนใกล้เคียงกัน (17-19 เปอร์เซ็นต์) เนื่องจากระบบผ่านการดำเนินการด้วยสภาวะที่เปลี่ยนแปลงแบบฉับพลันในวันที่ 11-12 มาแล้ว ดังนั้นจำนวนแบคทีเรียประเภทสร้างมีเทนจึงลดลง (ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 5.3) ดังนั้นสัดส่วนมีเทนของทั้งสองวันจึงมีค่าต่ำและใกล้เคียงกัน

### SUASB

เช่นเดียวกับ UASB สัดส่วนมีเทนของ SUASB เมื่อเพิ่ม OLR ด้วยวิธีลด HRT (วันที่ 6 และวันที่ 16) จะมีค่าสูงกว่าวิธีเพิ่ม COD (วันที่ 9-10 และวันที่ 12) โดยเฉพาะอย่างยิ่งใน SUASB1 เนื่องจาก SUASB1 นี้รับน้ำเสียใหม่ที่มีปริมาณบัพเฟอร์สูงอยู่ตลอดเวลา จึงรักษาระดับค่า pH ให้สูงกว่าถังปฏิกรณ์ย่อยตัวอื่น ๆ ดังนั้นวิธีการลด HRT ช่วยรักษาระดับสัดส่วนมีเทนได้ดีกว่าการวิธีการเพิ่ม COD เนื่องจากสภาวะในถังปฏิกรณ์เป็นพิษจากการเป็นกรดน้อยกว่า จึงน่าจะทำให้แบคทีเรียประเภทสร้างมีเทนที่อ่อนแอยังสามารถดำรงชีวิตและเจริญเติบโตได้



## 5.7 การฟื้นตัวของระบบหลังการเพิ่มค่า OLR อย่างฉับพลัน

### 5.7.1 กรณีลด HRT

เนื่องจากในการทดลองนี้เมื่อลด HRT ลง (วันที่ 4-6 และวันที่ 15-16) ประสิทธิภาพในการกำจัด COD ของ UASB และ SUASB ลดลงเพียงเล็กน้อย (ประสิทธิภาพในการกำจัด COD ยังคงมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์) ดังนั้นหลังการทดลองประสิทธิภาพจึงกลับสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว (ดูจากรูปที่ 5.2 วันที่ 7 และ 17) แต่ถึงแม้ประสิทธิภาพจะลดต่ำลงมาก คาดว่ามีความเป็นไปได้ที่ระบบจะฟื้นตัวอย่างรวดเร็วเพราะอันตรายสำคัญจากการลด HRT คือการสูญเสียตะกอนออกจากระบบ (wash out) แต่จะมีปัญหาเกี่ยวกับการสะสมของสารอินทรีย์น้อย เนื่องจากมีการแทนที่ด้วยน้ำเสียใหม่ที่มีค่า COD ไม่สูงนักอย่างรวดเร็ว ดังนั้นเมื่อเพิ่มค่า HRT ขึ้น ค่า COD ในถังปฏิกรณ์จะมีค่าไม่มาก ประสิทธิภาพในการกำจัด COD ของระบบจึงสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว

### 5.7.2 กรณีเพิ่ม COD ในสายป้อน

กรณีการเพิ่ม COD เมื่อประสิทธิภาพในการกำจัด COD ของถังปฏิกรณ์ทั้งสองชนิดลดต่ำลงแล้ว ถ้าปรับลดค่า OLR ให้ต่ำลง พบว่าระบบแบบ UASB สามารถฟื้นตัวได้เร็วกว่า SUASB สังเกตจากรูปที่ 5.2 ประสิทธิภาพในการกำจัด COD ในวันที่ 13 และ 22 (วันหลังทำการทดลองเพิ่ม COD ในสายป้อน 1 วัน) ประสิทธิภาพของ UASB มีค่าสูงกว่า SUASB สาเหตุเป็นเพราะว่าการเพิ่ม COD ให้มีค่าสูงนั้นเป็นการเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ในระบบ (โดยมีอัตราการไหลของน้ำเสียคงเดิม) และเนื่องจากถัง UASB และ SUASB1 และ SUASB2 จะมีสัดส่วนของแบคทีเรียประเภทสร้างกรด (Hydrolysis และ acidogenic bacteria) สูงกว่าในถัง SUASB3 และ SUASB4 ดังนั้นถังปฏิกรณ์ UASB, SUASB1 และ SUASB2 จะยังคงสามารถบำบัดน้ำเสียได้ ในขณะที่ถัง SUASB3 และ SUASB4 จะไม่สามารถบำบัดได้ในประสิทธิภาพที่เท่ากัน และอาจต้องรอให้น้ำเสียที่มีค่า COD สูง ๆ ไหลออกไปหมดเสียก่อน ซึ่งอาจใช้เวลานาน (เพราะการผสมผสานภายในถังปฏิกรณ์เหล่านี้มีน้อยมาก) ดังนั้นจึงทำให้ COD ในสองถังท้ายมีค่าสูง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบ SUASB โดยรวมมีค่าต่ำ

ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่าหลังการเพิ่ม COD ในสายป้อนให้สูงมาก ๆ ระบบต้องการเวลาในการฟื้นฟูสภาพให้กลับมามีประสิทธิภาพดังเดิม แตกต่างจากการลด HRT ที่เมื่อเสียสมรรถนะไปแล้ว แต่เมื่อลด OLR ลง ระบบสามารถกลับมามีประสิทธิภาพสูงได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากการลด HRT นั้นทำให้เวลาที่แบคทีเรียจะใช้ย่อยสลายสารอินทรีย์น้อยลงเท่านั้น แต่

สารอินทรีย์ไม่เกิดการสะสมในถังปฏิกรณ์แต่อย่างใด (เพราะน้ำเสียใหม่ที่มีค่า COD ไม่สูงมากนัก เข้ามาแทนที่เรื่อย ๆ) ดังนั้นเมื่อลด OLR ลงมาโดยการเพิ่ม HRT ให้มากขึ้นนั้น แบคทีเรียสามารถทำงานได้เหมือนเดิม เพราะสถานะที่เป็นปกติ ไม่เกิดการสะสมของสารอินทรีย์จำนวนมากอย่างวิธีการเพิ่มค่า COD ในสายป้อน

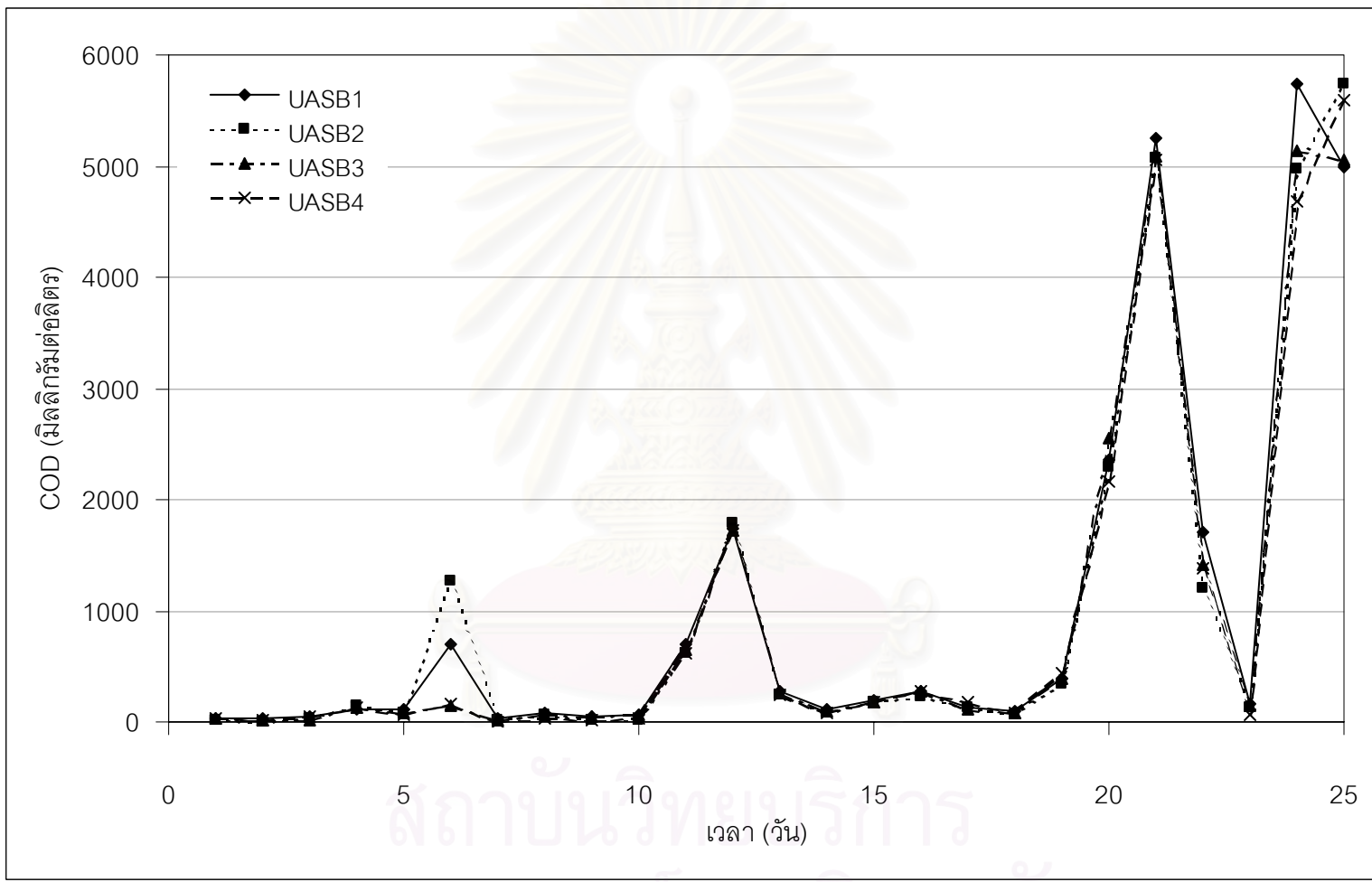
การทดลองในวันที่ 24 เป็นการเพิ่มค่า OLR ให้มีค่า 25 กรัมต่อลิตรต่อวันโดยการลด HRT เหลือ 12 ชั่วโมงและเพิ่ม COD เป็น 12,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลปรากฏว่าระบบทั้งสองแบบไม่สามารถรองรับสภาวะการเปลี่ยนแปลงฉับพลันระดับนี้ได้ ประสิทธิภาพทั้ง UASB และ SUASB ลดลงอย่างมาก (รูปที่ 5.2) โดยเฉพาะใน SUASB1 ไม่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ ส่งผลให้ประสิทธิภาพรวมของ SUASB ลดลงอย่างมาก (เหลือเพียงประมาณ 48 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ UASB มีค่า 62 เปอร์เซ็นต์) รวมทั้งค่าสัดส่วนมีเทนลดลงเหลือน้อยมาก (จากตารางที่ ค.5 ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ใน UASB และ 6 เปอร์เซ็นต์ใน SUASB1) เกิดสถานะที่เป็นกรด มีค่า pH น้อยกว่า 6 จากการนำตัวอย่างแบคทีเรียมาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ พบว่าในสถานะเช่นนี้ (เพิ่ม COD และลด HRT ทำให้ OLR เพิ่มขึ้นกว่า 10 เท่า) แบคทีเรียไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ และทำให้ระบบไม่สามารถฟื้นสภาพได้

ตารางที่ 5.1 ค่าอัตราการเจือจางของเซลล์ (Dilution rate : D) , ความหนาแน่นของตะกอน (Density :  $\rho$ ) และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของเซลล์ (Cell growth rate :  $\mu_x$ ) ในถังปฏิกรณ์ UASB

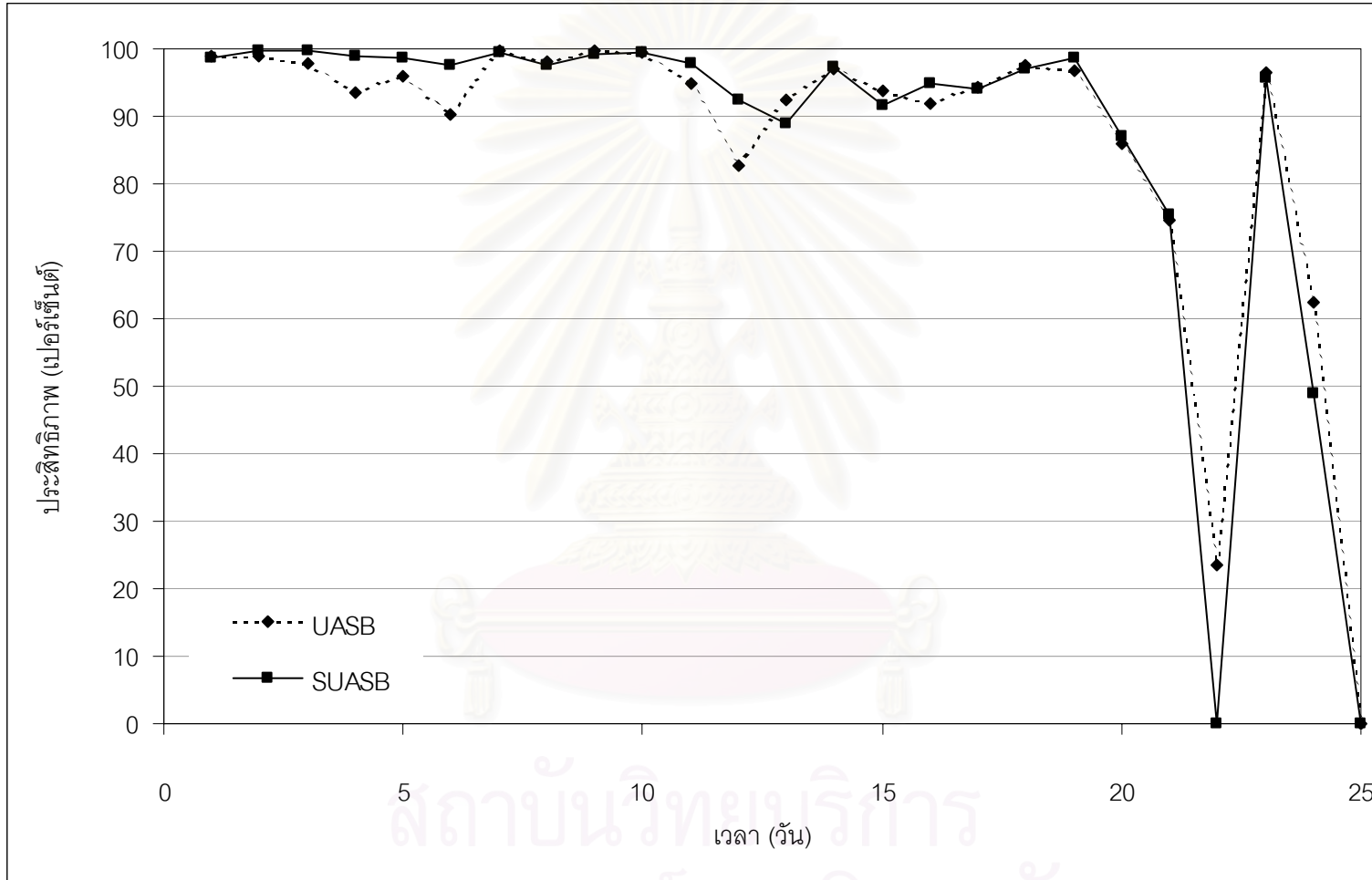
วันที่	HRT (ชั่วโมง)	D (ต่อวัน)	$\rho$ (กรัมตะกอนต่อลิตร)	$\mu_x$ (ต่อวัน)
1	24	1	19.61	5.755E-03
2	24	1	20.66	5.042E-03
3	24	1	21.72	5.004E-03
4	12	2	22.77	9.477E-03
5	12	2	23.82	7.927E-03
6	8	3	26.95	9.288E-03
7	24	1	30.07	3.012E-03
8	24	1	33.20	2.943E-03
9	24	1	36.32	7.055E-03
10	24	1	39.45	6.630E-03
11	24	1	42.57	1.422E-02
12	24	1	45.70	9.996E-03
13	24	1	45.43	3.508E-03
14	24	1	45.16	3.528E-03
15	8	3	44.88	9.725E-03
16	8	3	44.61	1.161E-02
17	24	1	44.34	3.806E-03
18	24	1	44.07	4.160E-03
19	24	1	43.79	1.576E-02
20	24	1	43.52	1.679E-02
21	24	1	48.36	1.678E-02
22	24	1	53.20	4.370E-04
23	24	1	58.04	1.570E-03
24	12	2	62.88	1.358E-02
25	24	1	67.72	0.000E+00

ตารางที่ 5.2 ค่าอัตราการเจือจางของเซลล์ (Dilution rate : D) ความหนาแน่นของตะกอน (Density :  $\rho$ ) และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของเซลล์ (Cell growth rate :  $\mu_x$ ) ในถังปฏิกรณ์ SUASB

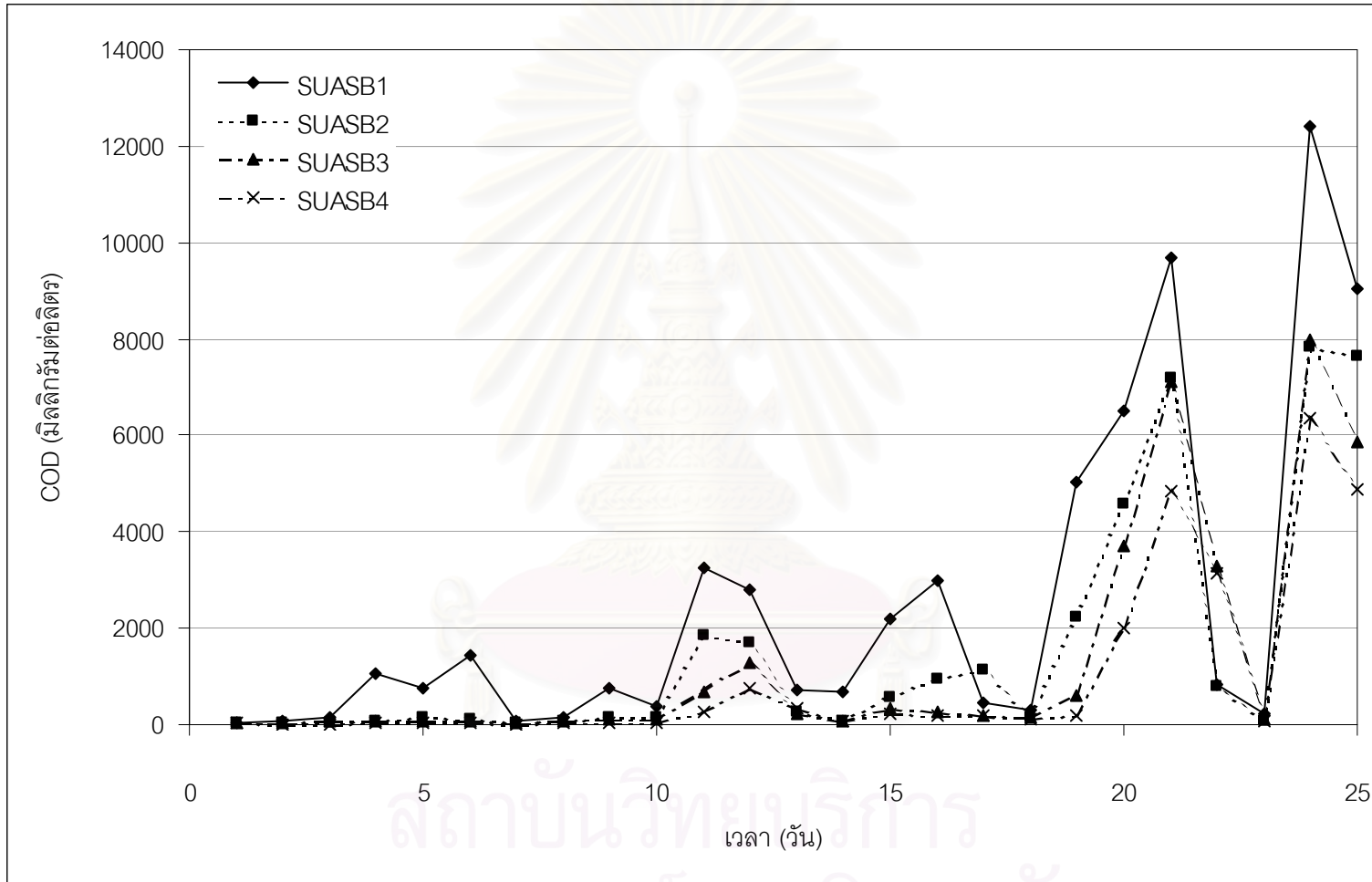
วันที่	HRT (ชั่วโมง)	D (ต่อวัน)	SUASB1		SUASB2		SUASB3		SUASB4	
			$\rho$ (กรัมต่อลิตร)	$\mu_x$ (ต่อวัน)	$\rho$ (กรัมต่อลิตร)	$\mu_x$ (ต่อวัน)	$\rho$ (กรัมต่อลิตร)	$\mu_x$ (ต่อวัน)	$\rho$ (กรัมต่อลิตร)	$\mu_x$ (ต่อวัน)
1	24	4	19.94	5.676E-03	19.41	0.000E+00	17.89	0.000E+00	19.12	0.000E+00
2	24	4	21.31	4.757E-03	20.26	1.312E-04	17.22	0.000E+00	19.69	6.309E-05
3	24	4	22.69	4.494E-03	21.12	3.214E-04	16.54	0.000E+00	20.25	2.277E-04
4	12	8	24.06	4.805E-03	21.97	4.837E-03	15.87	8.489E-05	20.82	2.380E-04
5	12	8	25.44	4.425E-03	22.82	2.984E-03	15.20	4.728E-04	21.38	2.974E-04
6	8	12	28.91	1.428E-03	23.91	9.154E-03	16.87	2.646E-04	22.25	2.375E-04
7	24	4	32.39	2.707E-03	25.01	3.451E-05	18.53	2.651E-05	23.11	6.255E-05
8	24	4	35.86	2.550E-03	26.10	1.734E-04	20.20	0.000E+00	23.98	5.473E-05
9	24	4	39.34	5.481E-03	27.20	1.196E-03	21.86	1.258E-04	24.84	1.763E-04
10	24	4	42.81	5.638E-03	28.29	4.527E-04	23.53	1.303E-04	25.71	1.758E-04
11	24	4	46.29	9.954E-03	29.39	2.577E-03	25.19	2.579E-03	26.57	8.738E-04
12	24	4	49.76	7.985E-03	30.48	1.969E-03	26.86	8.987E-04	27.44	1.054E-03
13	24	4	49.18	2.716E-03	30.74	7.880E-04	27.19	4.543E-05	26.97	0.000E+00
14	24	4	48.60	2.597E-03	31.01	1.094E-03	27.51	0.000E+00	26.50	0.000E+00
15	8	12	48.01	2.163E-03	31.27	8.664E-03	27.84	1.301E-03	26.02	5.764E-04
16	8	12	47.43	1.458E-03	31.53	1.081E-02	28.16	4.003E-03	25.55	5.006E-04
17	24	4	46.85	3.301E-03	31.79	0.000E+00	28.49	1.827E-03	25.08	0.000E+00
18	24	4	46.27	3.677E-03	32.06	2.958E-04	28.81	0.000E+00	24.61	1.490E-04
19	24	4	45.68	9.590E-03	32.32	4.717E-03	29.14	3.110E-03	24.13	9.642E-04
20	24	4	45.10	1.091E-02	32.58	3.285E-03	29.46	1.588E-03	23.66	3.988E-03
21	24	4	49.84	1.118E-02	33.28	4.125E-03	29.08	1.151E-04	23.76	5.251E-03
22	24	4	54.57	9.725E-04	33.97	8.209E-05	28.71	0.000E+00	23.87	2.921E-04
23	24	4	59.31	1.392E-03	34.67	2.023E-04	28.33	0.000E+00	23.97	7.230E-05
24	12	8	64.04	3.048E-05	35.36	1.433E-02	27.96	0.000E+00	24.08	7.415E-03
25	24	4	68.78	0.000E+00	36.06	2.083E-03	27.58	3.559E-03	24.18	2.244E-03



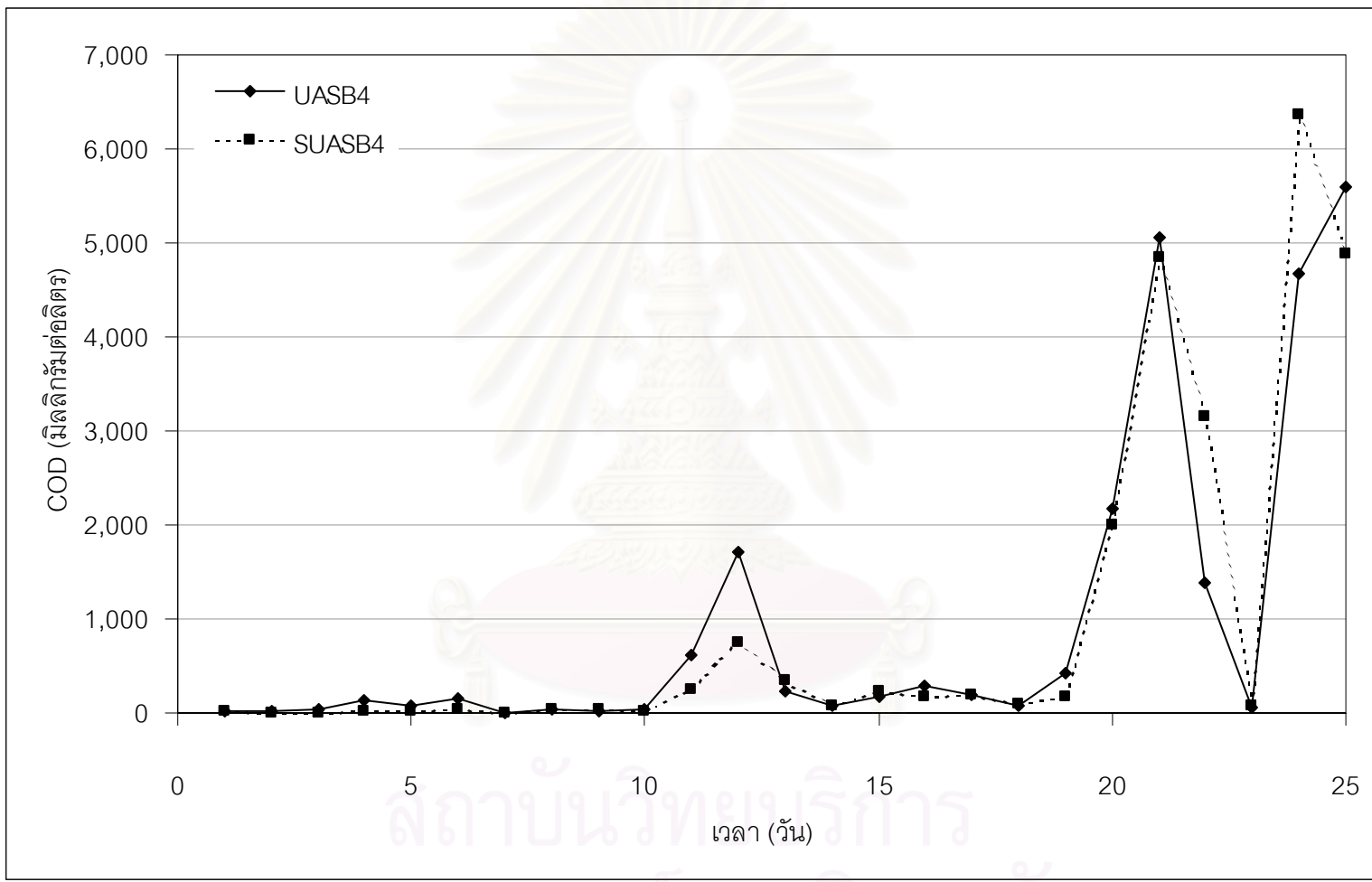
รูปที่ 5.1 ค่า COD ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ใน UASB



รูปที่ 5.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัด COD ระหว่าง UASB กับ SUASB

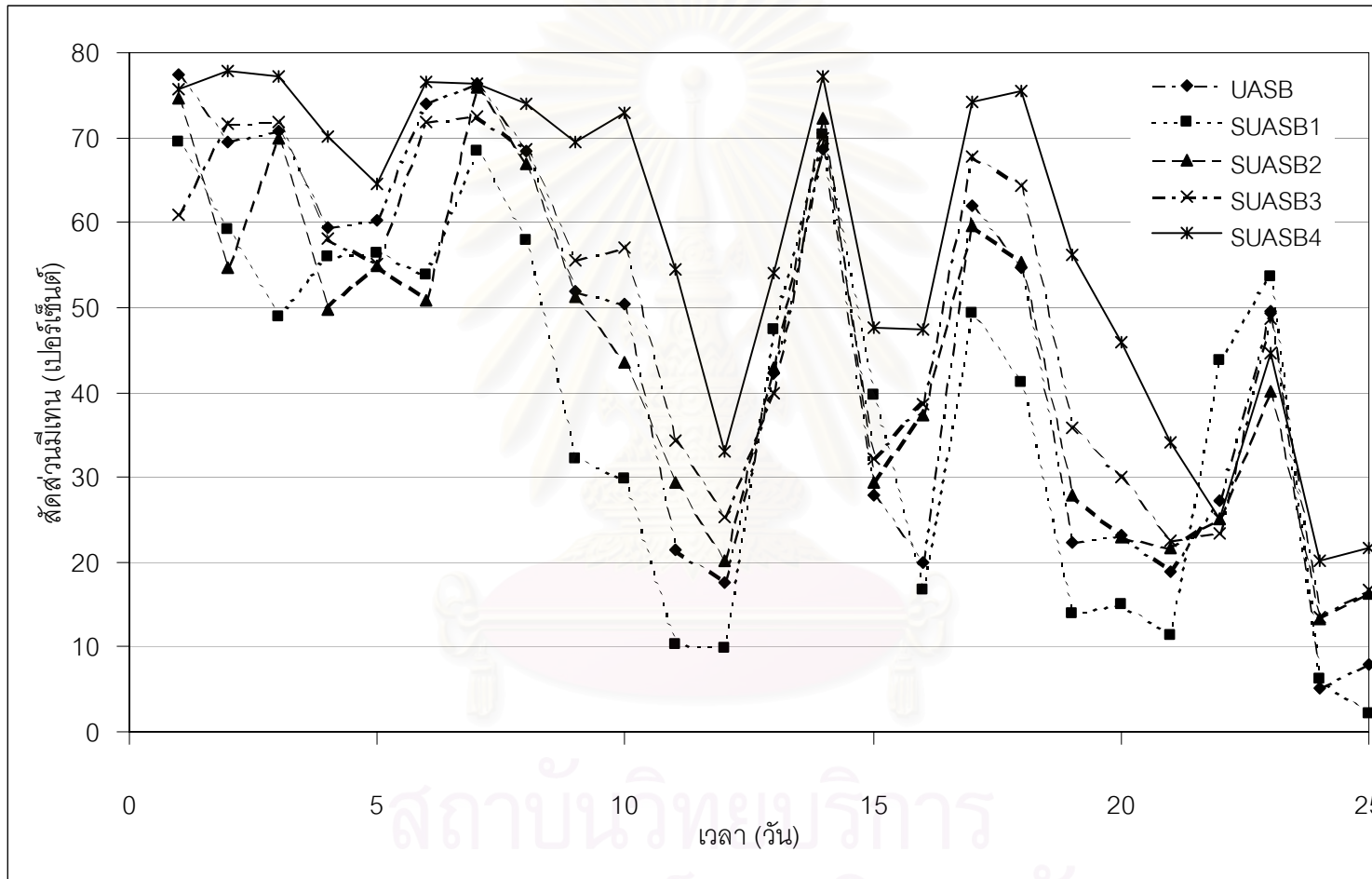


รูปที่ 5.3 ค่า COD ในแต่ละถังปฏิกรณ์ย่อยของ SUASB

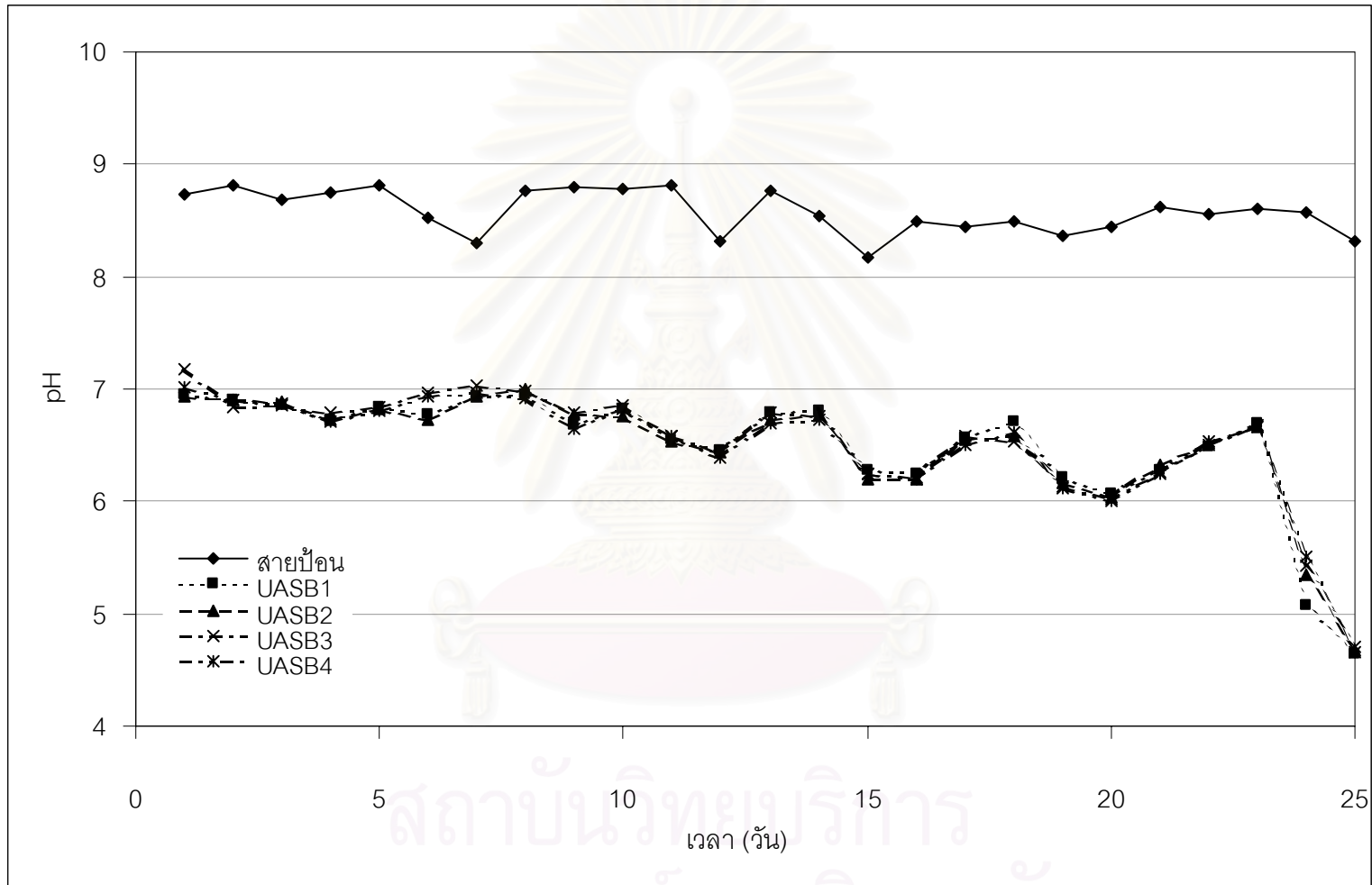


รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบค่า COD ที่ตำแหน่งก่อนออกของ UASB กับ SUASB (เปรียบเทียบ UASB4 กับ SUASB4)

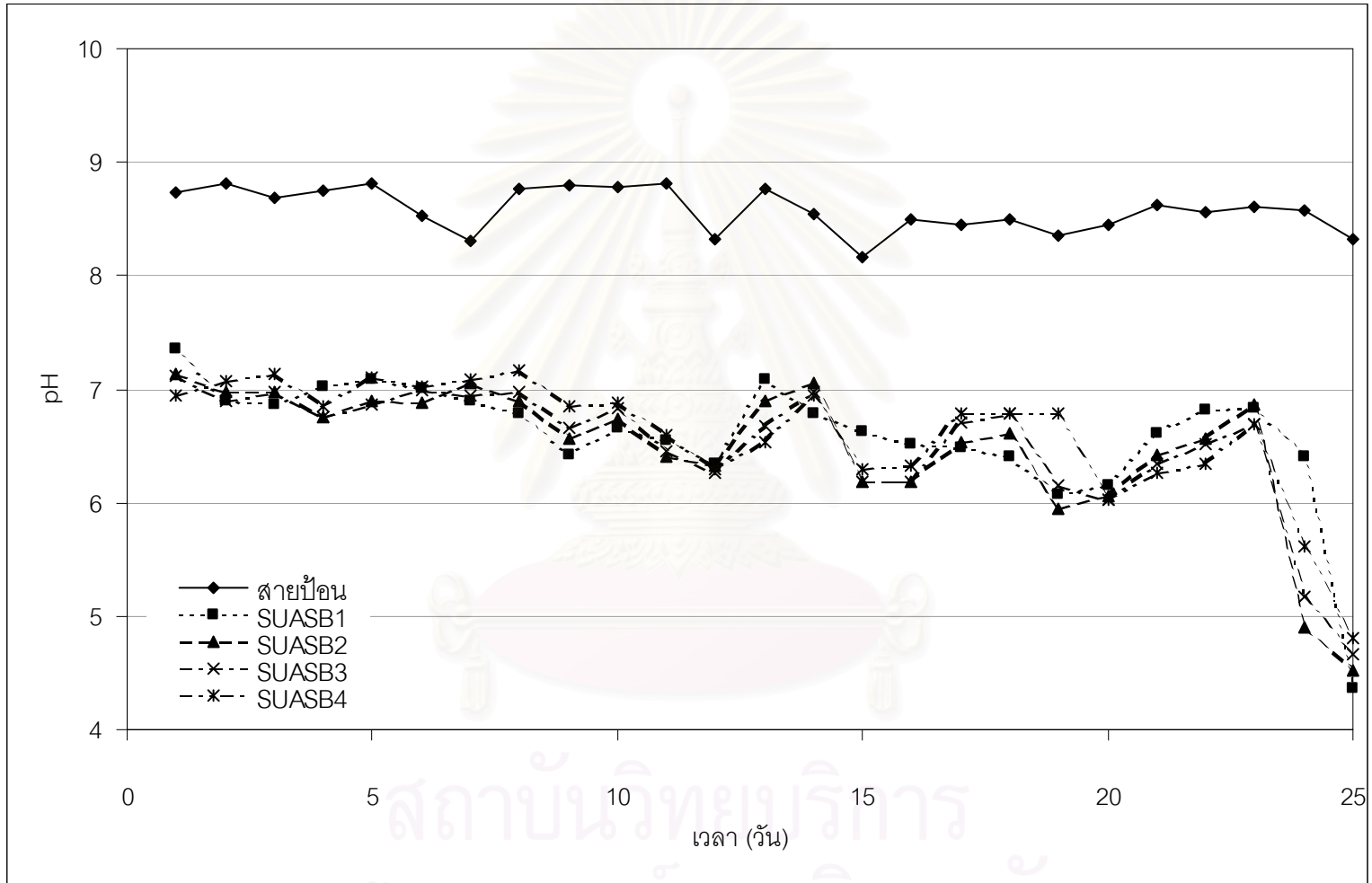




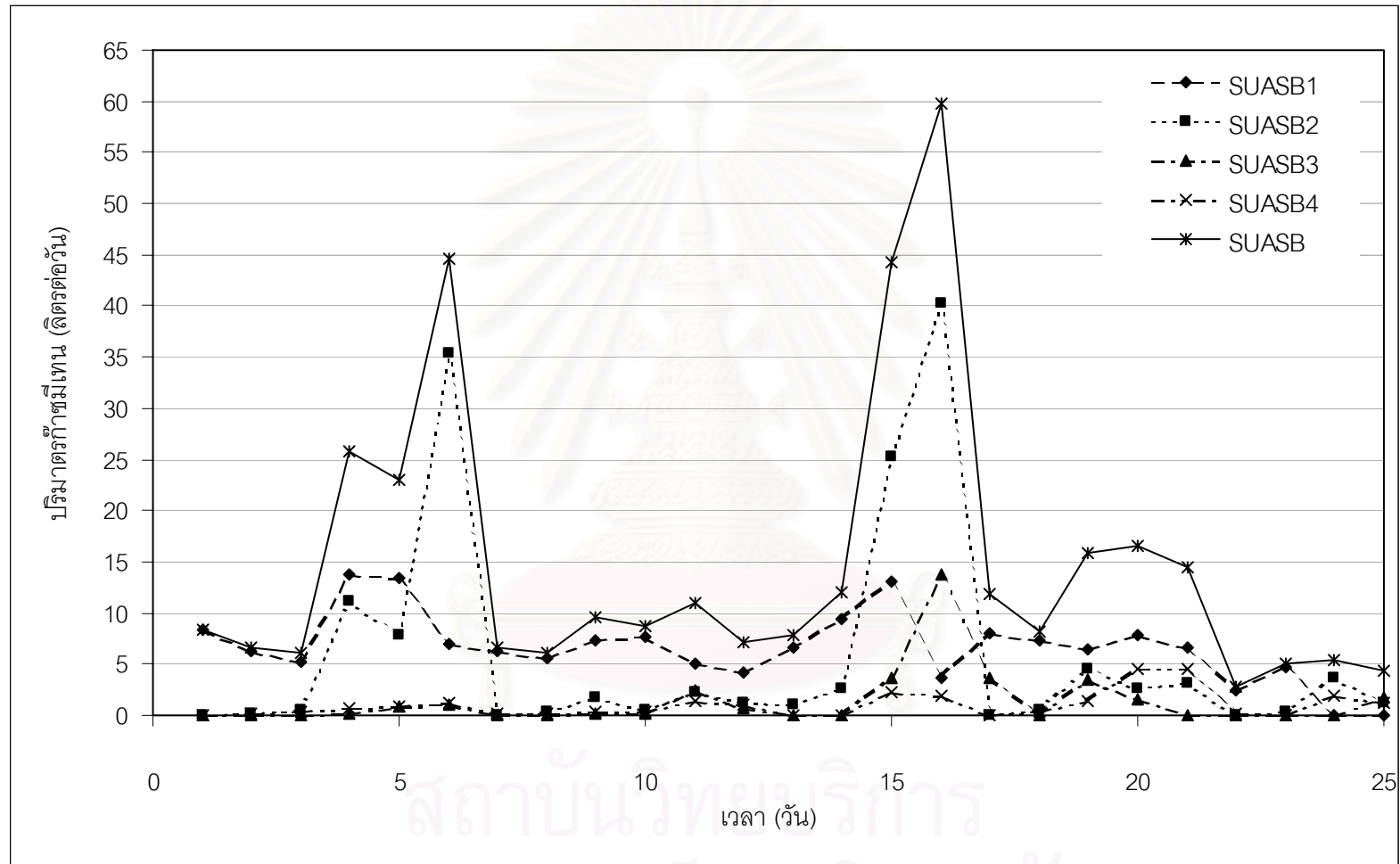
รูปที่ 5.5 สัดส่วนมีเทนของก๊าซที่ถูกผลิตขึ้นในแต่ละถังปฏิกรณ์



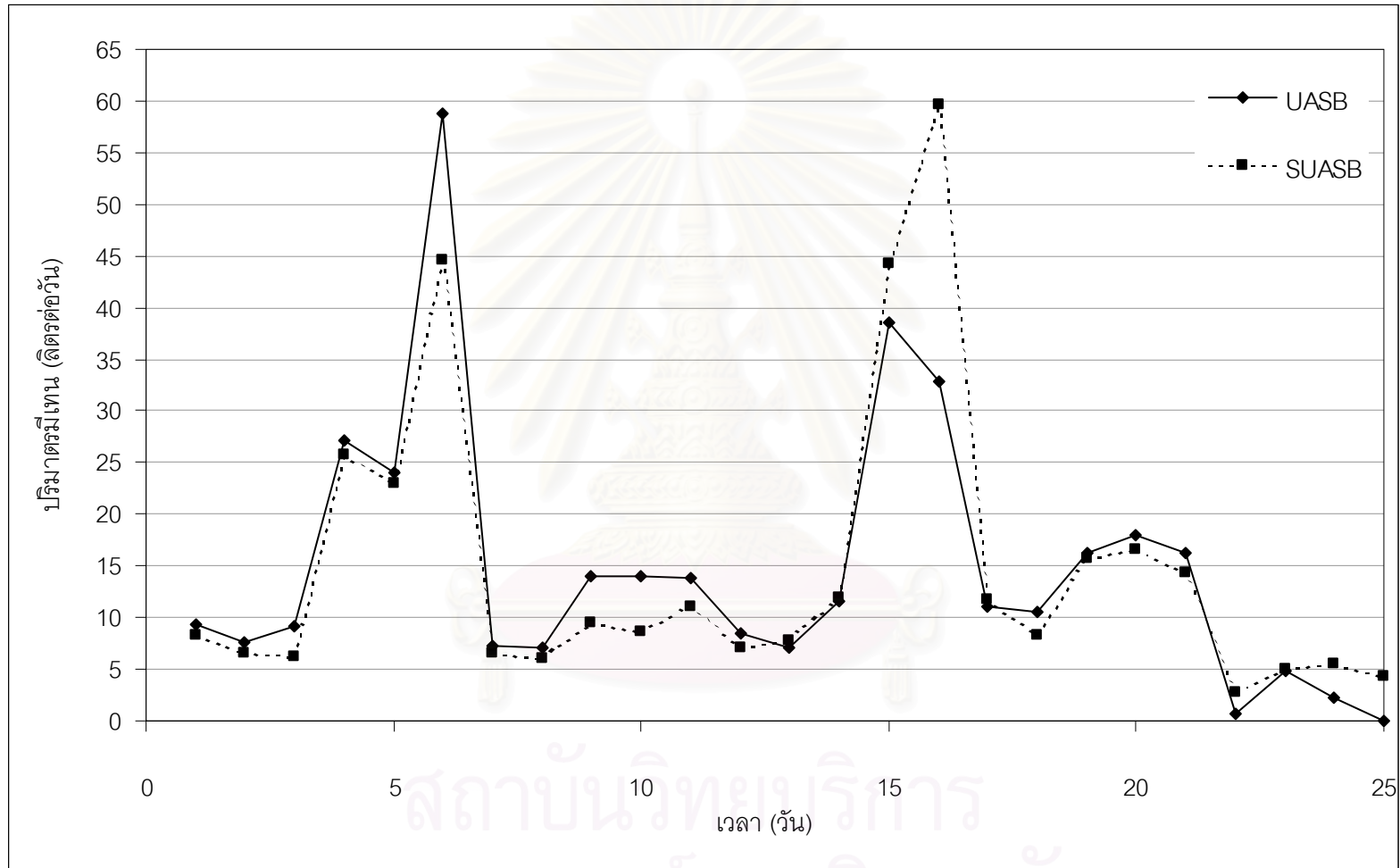
รูปที่ 5.6 ค่า pH ของสายป้อนและค่า pH ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของถังปฏิกรณ์ UASB



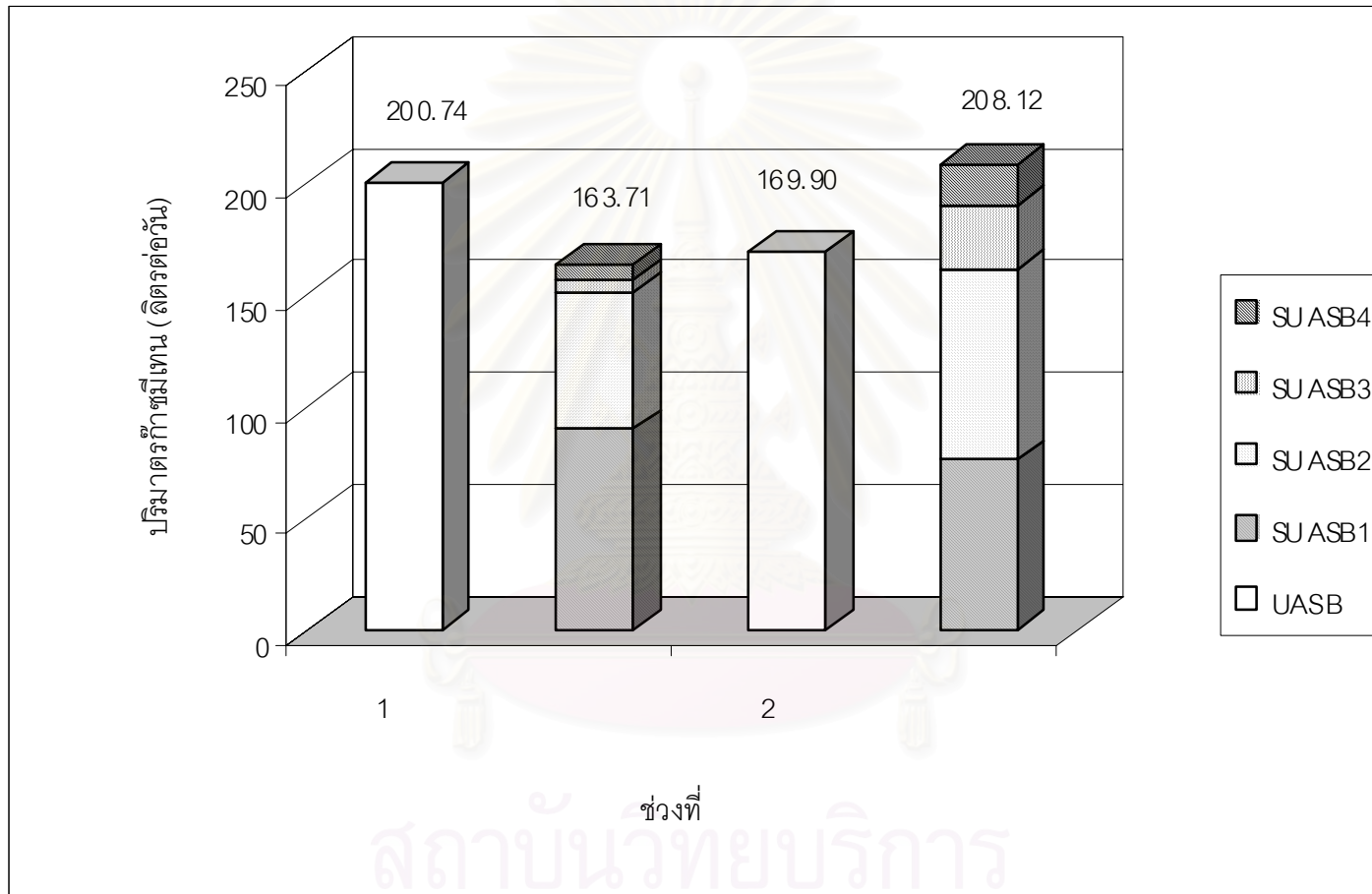
รูปที่ 5.7 ค่า pH ของสายป้อนและค่า pH ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของถังปฏิกรณ์ย่อย SUASB



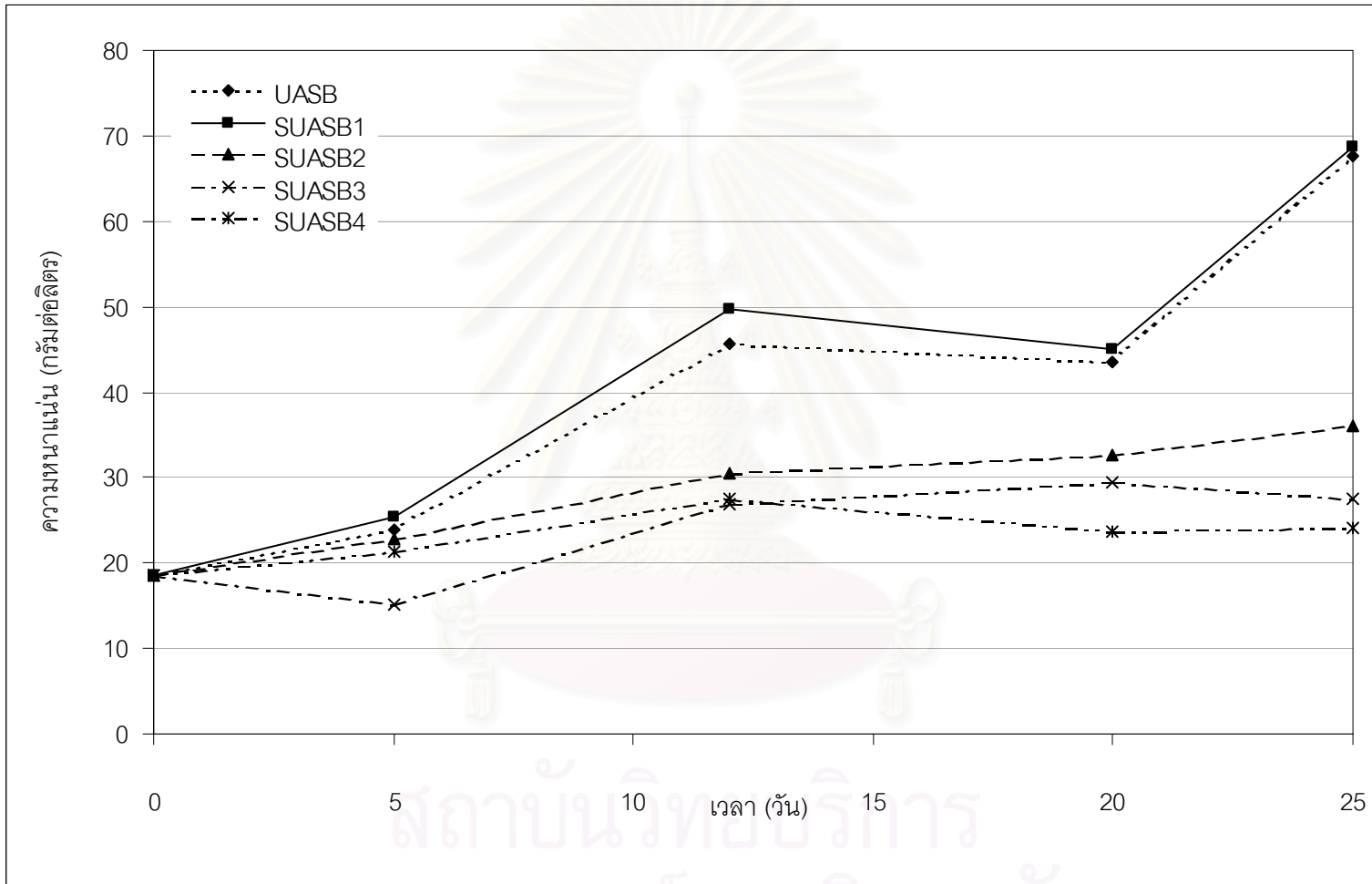
รูปที่ 5.8 ปริมาณมีเทนที่เกิดขึ้น (โดยการคำนวณ) ในแต่ละถังปฏิกรณ์ย่อย SUASB ในหนึ่งวัน



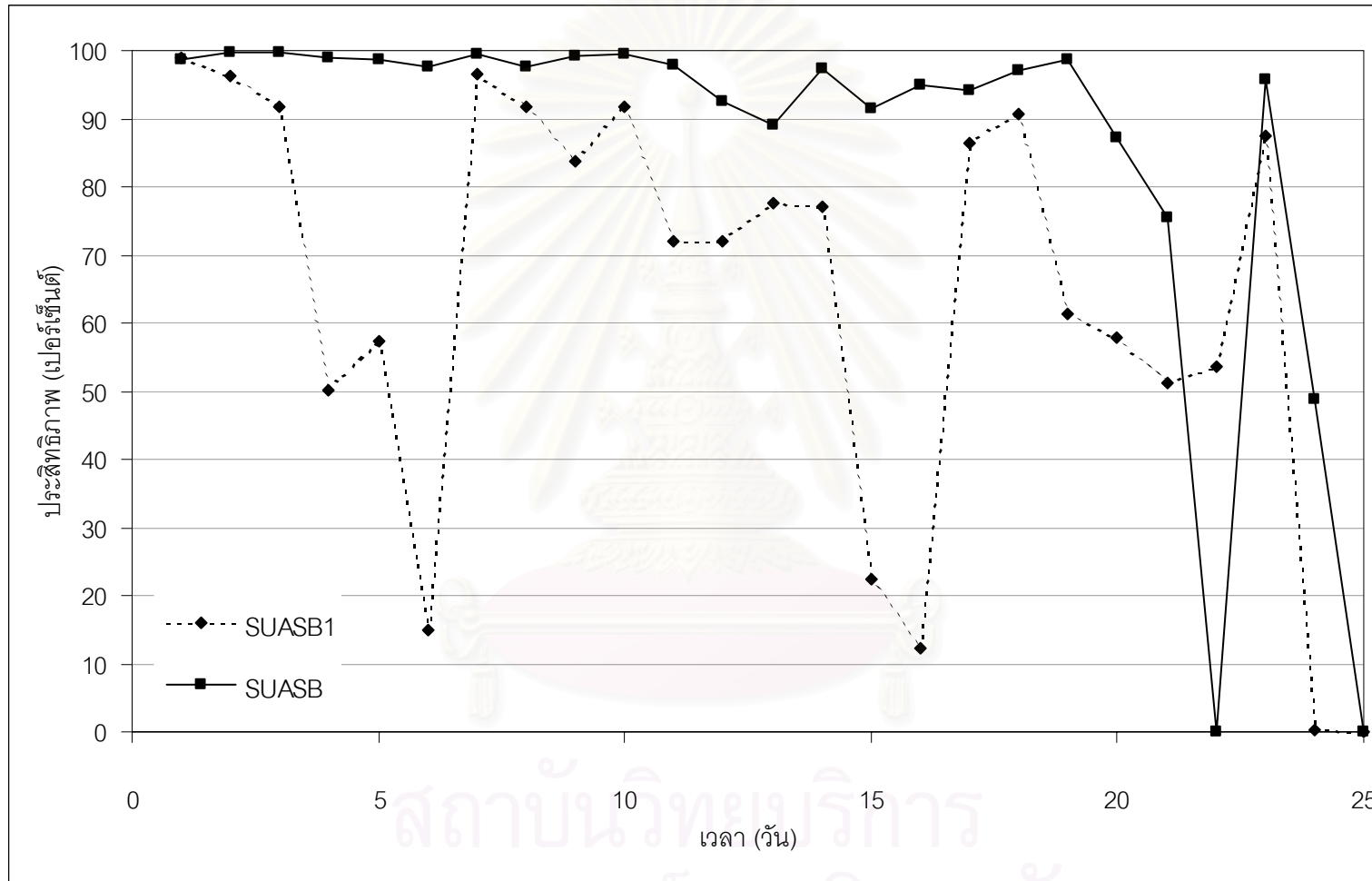
รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบปริมาณมีเทนที่เกิดขึ้น (โดยการคำนวณ) ในหนึ่งวันระหว่าง UASB กับ SUASB



รูปที่ 5.10 ปริมาณก๊าซแอมโมเนียที่แต่ละถังปฏิกรณ์สามารถผลิตได้ในแต่ละช่วงการทดลอง



รูปที่ 5.11 ความหนาแน่นของตะกอนที่ทับถมด้านล่างของแต่ละถังปฏิกรณ์



รูปที่ 5.12 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัด COD ระหว่าง SUASB1 กับ SUASB



## บทที่ 6

### สรุปผลการทดลอง

การใช้ถังปฏิกรณ์แบบ UASB และ SUASB ในการบำบัดน้ำเสียที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า OLR อย่างฉับพลันในช่วง 2-20 กรัมต่อลิตรต่อวันนั้น ถังปฏิกรณ์ทั้งสองชนิดจะมีจุดเด่นแตกต่างกัน แม้ประสิทธิภาพในการกำจัด COD โดยรวมของถังปฏิกรณ์ทั้งสองชนิดจะใกล้เคียงกัน แต่ประสิทธิภาพของ SUASB ในช่วงเริ่มระบบจะมีค่าสูงและคงที่กว่า อีกทั้งถังปฏิกรณ์แบบ SUASB นี้ยังรักษาความสามารถในการผลิตก๊าซมีเทนให้มีปริมาตรสูงได้ดีกว่า UASB แม้ว่าระบบจะผ่านสภาวะน้ำเสียที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแบบฉับพลัน

ดังนั้นแนวคิดในการแยกถังปฏิกรณ์ UASB ออกเป็นส่วน ๆ นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีค่า OLR เปลี่ยนแปลงแบบฉับพลันได้ แต่จะใช้ถังปฏิกรณ์ให้เกิดประโยชน์สูงสุดนั้น ขอบเขตในการใช้งานต้องมีความเหมาะสม เช่น การแบ่งส่วนของถังปฏิกรณ์ ถ้าจำนวนส่วนของถังถูกแบ่งมากเกินไป จะเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง อีกทั้งถังปฏิกรณ์ย่อยส่วนหลัง ๆ อาจไม่ก่อประโยชน์แต่อย่างใด เพราะสารอินทรีย์ถูกย่อยสลายหมดตั้งแต่ถังแรก ๆ แล้ว นอกจากนี้ถ้าต้องการจะบำบัดน้ำเสียที่มีขอบเขตของค่า OLR สูง ๆ แล้วระบบ SUASB อาจไม่สามารถทำงานได้ ซึ่งการทำงานในช่วง OLR ที่อยู่นอกเหนือจากที่ใช้ในงานวิจัยนี้จำเป็นต้องอาศัยผลจากการศึกษาเพิ่มเติม เนื่องจากงานวิจัยชิ้นนี้ยังไม่สามารถระบุชี้ชัดได้ว่า ระบบแบบ SUASB จะมีประสิทธิภาพดีกว่า UASB ในทุกช่วงของการบำบัดน้ำเสีย

## รายการอ้างอิง

1. Agrawal L. K., H. Harada, and H. Okui. Treatment of Dilute Wastewater in a UASB Reactor at a Moderate Temperature: Performance Aspects. J. Ferment. Bioeng. 83 (1997): 179-184.
2. Austermann-Haun U., C. F. Seyfried, and K. Rosenwinkel. UASB-Reactor in the Fruit Juice Industry. Wat. Sci. Tech. 36 (1997): 407-414.
3. Driessen W., and P. Yspeert. Anaerobic Treatment of Low, Medium and High Strength Effluent in the Agro-Industry. Wat. Sci. Tech. 40 (1999): 221-228.
4. Droste R. L. Theory and Practice of Water and Wastewater Treatment. n.p.: John Wiley & Sons, 1997.
5. El-Mamouni R., R.Leduc, and S. R. Guiot. Influence of Synthetic and Natural Polymers on the Anaerobic Granulation Process. Wat. Sci. Tech. 38 (1998): 341-347.
6. Gerard Kiely Environmental Engineering. n.p.: McGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS, 1996.
7. Harada H., S. Uemura, A. Chen, and J. Jayadevan. Anaerobic Treatment of a Recalcitrant Distillery Wastewater by a Thermophilic UASB Reactor. Bioresource Tech. 55 (1996): 215-221.
8. Herbert H. P. Fang, and Gong-Ming Zhou. Anaerobic Degradation of Benzoate and Cersol Isomers in Sulfate-Rich Wastewater. Wat. Sci. Tech. 36 (1997): 7-14.
9. Kalyuzhnyi S. V., M. A. Gladchenko, V. I. Sklyar, O. V. Kurakova, and S. S. Shcherbakov. The UASB Treatment of Winery Wastewater under Submesophilic and Psychrophilic Conditions. Envi. Tech. 21 (2000): 919-925.
10. Kida K., S. Morimura, N. Abe, and Y. Sonoda. Biological Treatment of Shochu Distillery Wastewater. Process Biochem. 30 (1995): 125-132.
11. Lens P. N. L., M. C. van Den Bosch, L. W. Hulshoff Pol, and G. Lettinga. Effect of Staging on Volatile Fatty Acid Degradation in a Sulfidogenic Granular Sludge Reactor. Wat. Res. 32 (1998): 1178-1192.
12. Lin C. Y., and C. C. Chen. Effect of Heavy Metals on the Methanogenic UASB Granule. Wat. Res. 33 (1999): 409-416.

13. Mario T. Kato, J. A. Field and G. Lettinga. The Anaerobic Treatment of Low Strength Wastewaters in UASB and EGSB Reactors. Wat. Sci. Tech. 36 (1997): 375-382.
14. Moosbrugger R. E., M. C. Wentzel, G. A. Ekama, and G. v. R. Marais. Treatment of Wine Distillery Waste in UASB Systems Feasibility, Alkalinity Requirements and pH Control. Wat. Sci. Tech. 28 (1993): 45-54.
15. Omil F., P. Lens, L. Hulshoff Pol and G. Lettinga. Effect of Upward Velocity and Sulphide Concentration on Volatile Fatty Acid Degradation in a Sulphidogenic Granular Sludge Reactor. Process Biochem. 31 (1996): 699-710.
16. Prasert Pavasant. Modelling of the extractive membrane bioreactor process. Ph.D. Thesis, Imperial Collage, 1997.
17. Shin H.-S., B.-U. Bae, J.-J Lee, and B.-C. Paik. Anaerobic Digestion of Distillery Wastewater in a Two-Phase UASB System. Wat. Sci. Tech. 25 (1992): 361-371.
18. Syutsubo K., H. Harada, and A. Ohashi. Granulation and Sludge Retainment During Start-up of a Thermophilic UASB Reactor. Wat. Sci. Tech. 38 (1998): 349-357.
19. Thaveesri J., B. Liessens, and W. Verstraete. Granular Sludge Growth Under Different Reactor Liquid Surface Tensions in Lab-Scale Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors Treating Wastewater from Sugar-Beet Processing. Appl Microbiol Biotechnol. 43 (1995): 1122-1127.
20. Thaveesri J., G. Boucneau, and W. Verstraete. Effect of Monensin on UASB-Reactor Performance. Environmental Technology. 15 (1994): 491-496.
21. van langerak E. P. A., G. Gonzalez-Gil, A. van aelst, J. B. van lier, H. V. M. Hamelers, and G. Lettinga. Effects of High Calcium Concentrations on the Development of Methanogenic Sludge in Upflow Anaerobic Sludge Bed (UASB) Reactors. Wat. Res. 32 (1998): 1255-1263.
22. van Lier J.B., F. Boersma, M. M. W. H. Debets, and G. Lettinga. High Rate Thermophilic Anaerobic Wastewater Treatment in Compartmentalized Upflow Reactors. Water Sci. Tech. 30 (1994): 251-261.
23. Wiegant W. M., and G. Lettinga. Thermophilic Anaerobic Digestion of Sugars in Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors. Biotech. And Bioeng. 27 (1985): 1603-1607.

24. Yu H. Q., J. H. Tay, and H. H. P. Fang. Effects of Added Powdered and Granular Activated Carbons on Start-up Performance of UASB Reactors. Envi. Tech. 20(1999): 1095-1101.
25. กิตติศักดิ์ ต้นชนะชัย. การใช้ยูเอเอสบีบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอาหารทะเลแช่แข็ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
26. เนตรนภา ศรุตวราพงศ์. การใช้ยูเอเอสบีแบบมีถังสร้างกรดในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีแป้งมันสำปะหลัง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
27. อรุณี วจนะวิชัย. การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานเป็ยรีโดยกระบวนการขึ้นตะกอนจุลินทรีย์ใ้อากาศแบบไหลขึ้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534.

## ภาคผนวก ก

### การคำนวณค่า COD ในน้ำเสียสังเคราะห์

ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (น้ำตาลซูโครส) ในน้ำเสียสังเคราะห์คิดในรูปของ COD (Chemical Oxygen Demand) มีหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร มีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

#### ขั้นตอนการคำนวณ

1. หาค่าปริมาณน้ำตาลในน้ำเสียจากวิธีวิเคราะห์ฟินอล
2. เทียบหาปริมาณออกซิเจนที่ระบบต้องการจากปริมาณน้ำตาลที่ได้ เป็นค่า COD โดยใช้สมการที่ 5.6



#### วิธีวิเคราะห์ฟินอล

1. นำน้ำเสียตัวอย่างมาเจือจางให้มีปริมาณน้ำตาลอยู่ในช่วง 10-100 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร แบ่งมา 1 มิลลิลิตร ในงานวิจัยน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดจะมีค่า COD ไม่เกิน 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 1000 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร (ในกรณีที่ไม่ได้ทำการเพิ่ม OLR) ดังนั้นก่อนทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีฟินอลนี้จึงต้องเจือจางให้มีปริมาณน้ำตาลอยู่ในช่วงที่กำหนดไม่เกิน 100 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยการปิเปตน้ำเสียตัวอย่างมา 0.1 มิลลิลิตร แล้วผสมน้ำกลั่นจนเป็น 1 มิลลิลิตร (ยกเว้นวันที่ 9-12 , 19-21 และ 24 ที่ปิเปต 0.02 มิลลิลิตรแล้วผสมน้ำกลั่นจนเป็น 1 มิลลิลิตร เนื่องจากในวันดังกล่าวดำเนินการที่ค่า COD สูง)
2. เติม 5 เปอร์เซ็นต์ สารละลายฟินอล (ละลายฟินอล 5 กรัมลงในน้ำกลั่นเติมน้ำจนได้ 100 มิลลิลิตร) 1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันทิ้งไว้ 2-3 นาที
3. เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 5 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที เขย่าอีกครั้ง แล้ววางในอ่างน้ำที่มีอุณหภูมิ 25-30 องศาเซลเซียส นาน 10-20 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (absorbance : O.D.) ที่ 490 นาโนเมตร ตารางที่ ก.1 แสดงค่าการดูดกลืนแสง (O.D.) ของน้ำเสียที่วัดได้ในการทดลองนี้

ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้จะถูกนำไปเทียบหาความเข้มข้นของน้ำตาลจากเส้นกราฟมาตรฐานที่ได้มาจากการใช้สารละลายกลูโคสมาตรฐานปริมาณ 20 , 40 , 60 และ 80 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ทำวิธีเดียวกับข้างต้น

#### เส้นกราฟมาตรฐาน

ในงานวิจัยนี้ทำเส้นกราฟมาตรฐานสองครั้ง ดังนี้

ครั้งแรก            ใช้ในวันที่ 1-12  
ครั้งที่สอง        ใช้ในวันที่ 13-25

ทั้งนี้เพื่อความเหมาะสมเนื่องจากวิธีวิเคราะห์ฟินอลเป็นวิธีที่ค่อนข้างละเอียด ในงานวิจัยนี้มีการผสมสารละลาย 5 เปอร์เซนต์ฟินอลสองครั้ง ในวันที่ 1 และวันที่ 13 ดังนั้นจึงทำเส้นกราฟมาตรฐานสองครั้งเพื่อใช้กับแต่ในแต่ละช่วงเวลา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.1 ค่า O.D. ที่วัดได้จากการทดลอง

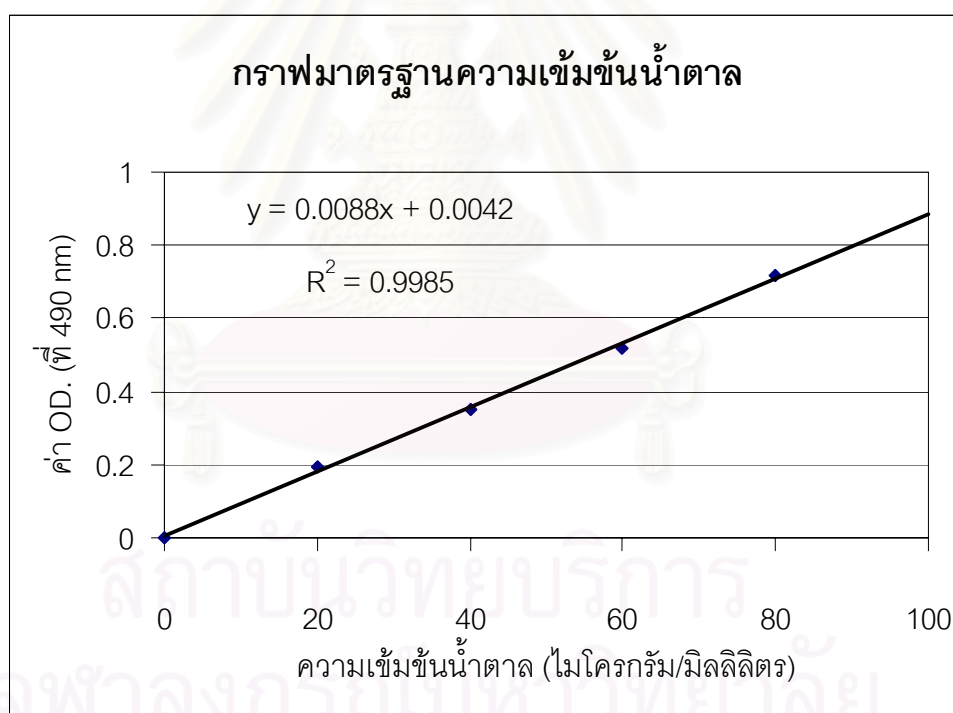
วันที่	UASB					SUASB				
	สายป้อน	O.D. (ที่ 490 นาโนเมตร)				สายป้อน	O.D. (ที่ 490 นาโนเมตร)			
		UASB1	UASB2	UASB3	UASB4		SUASB1	SUASB2	SUASB3	SUASB4
1	1.6319	0.0360	0.0232	0.0267	0.0236	1.6319	0.0195	0.0235	0.0235	0.0264
2	1.5050	0.0278	0.0086	0.0156	0.0204	1.5050	0.0602	0.0223	0.027	0.0093
3	1.5862	0.0478	0.0290	0.0218	0.0376	1.5862	0.1333	0.0366	0.0727	0.007
4	1.6465	0.0924	0.1148	0.1032	0.1092	1.6465	0.8226	0.0655	0.0559	0.0206
5	1.4057	0.0960	0.0695	0.0693	0.0603	1.4057	0.6036	0.1184	0.0672	0.0219
6	1.3197	0.5577	1.0011	0.1230	0.1309	1.3197	1.1236	0.0838	0.0626	0.0375
7	1.3001	0.0311	0.0210	0.0127	0.0093	1.3001	0.0505	0.0382	0.0312	0.0106
8	1.4240	0.0700	0.0514	0.0501	0.0320	1.4240	0.1209	0.0564	0.0576	0.0389
9	0.7374	0.0455	0.0132	0.0369	0.0183	0.7374	0.5979	0.1344	0.0952	0.0328
10	0.7544	0.0490	0.0140	0.0491	0.0284	0.7544	0.3155	0.1330	0.0893	0.0249
11	1.8250	0.5467	0.4827	0.5199	0.4839	1.8250	2.5431	1.4638	0.5378	0.2069
12	1.5759	1.3719	1.4002	1.3527	1.3529	1.5759	2.2004	1.3453	1.0013	0.5893
13	0.8601	0.0705	0.0637	0.0682	0.0602	0.8601	0.1895	0.0679	0.0617	0.0897
14	0.8183	0.0249	0.0187	0.0218	0.0187	0.8183	0.1849	0.0147	0.0176	0.0180
15	0.7737	0.0477	0.0423	0.0426	0.0433	0.7737	0.5999	0.1466	0.0860	0.0609
16	0.9389	0.0692	0.0586	0.0700	0.0723	0.9389	0.8232	0.2528	0.0642	0.0428
17	0.8936	0.0321	0.0326	0.0282	0.0465	0.8936	0.1172	0.3059	0.0446	0.0481
18	0.9369	0.0218	0.0147	0.0189	0.0167	0.9369	0.0830	0.0354	0.0405	0.0221
19	0.7119	0.1029	0.0904	0.1020	0.1144	0.7119	1.3802	0.6149	0.1601	0.0433
20	0.8481	0.6452	0.6261	0.7011	0.5932	0.8481	1.7914	1.2542	1.0194	0.5458
21	1.0886	1.4432	1.3968	1.4007	1.3890	1.0886	2.6668	1.9777	1.9609	1.3345
22	0.4929	0.4674	0.3263	0.3860	0.3762	0.4929	0.2265	0.2125	0.9020	0.8670
23	0.4693	0.0383	0.0297	0.0362	0.0120	0.4693	0.0548	0.0196	0.0244	0.0157
24	0.6822	1.5798	1.3702	1.4141	1.2875	0.6822	3.4261	2.1544	2.1985	1.7504
25	0.4622	1.3753	1.5809	1.3911	1.5382	0.4622	2.4872	2.1102	1.6174	1.3450

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## เส้นกราฟมาตรฐานครั้งที่ 1

ตารางที่ ก.2 ความเข้มข้นของน้ำตาลและค่า O.D. ที่วัดได้เพื่อทำเส้นกราฟมาตรฐาน

ความเข้มข้นของน้ำตาล (ไมโครกรัม/มิลลิลิตร)	OD. ที่ 490 nm
0	0
20	0.1936
40	0.3492
60	0.5188
80	0.7154



รูปที่ ก.1 เส้นกราฟมาตรฐานครั้งที่ 1

ดังนั้น สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า O.D. กับ ความเข้มข้นน้ำตาลในวันที่ 1-12 คือ

$$y = 0.0088x + 0.0042$$

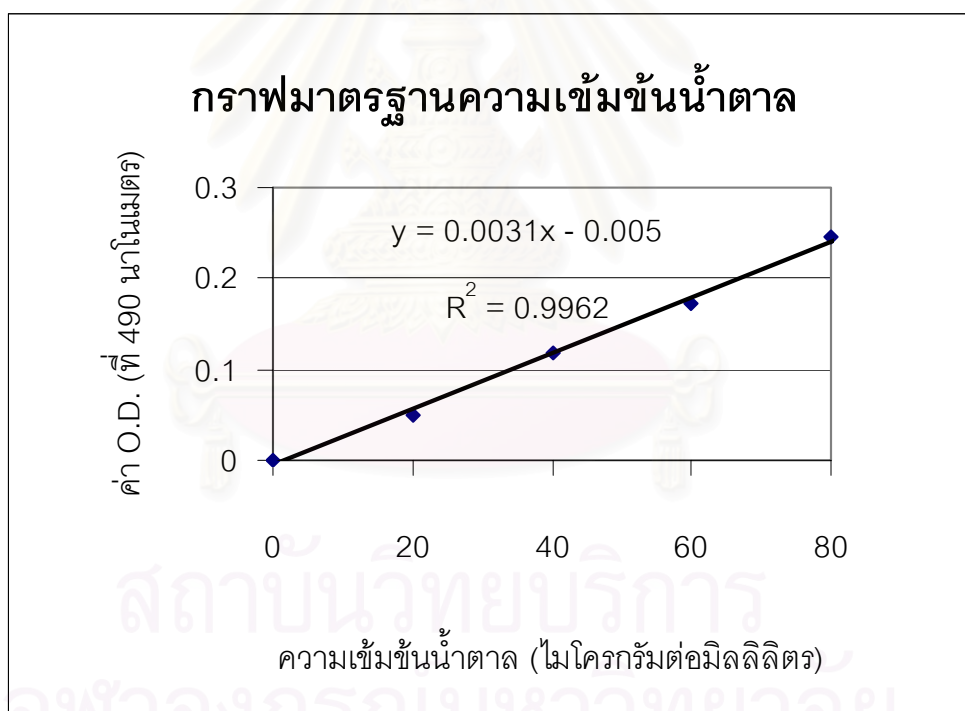
(ก.1)



## เส้นกราฟมาตรฐานครั้งที่ 2

ตารางที่ ก.3 ความเข้มข้นของน้ำตาลและค่า O.D. ที่วัดได้เพื่อทำเส้นกราฟมาตรฐาน

ความเข้มข้นของน้ำตาล (ไมโครกรัม/มิลลิลิตร)	OD. ที่ 490 nm
0	0
20	0.0505
40	0.1192
60	0.1715
80	0.2454



รูปที่ ก.2 เส้นกราฟมาตรฐานครั้งที่ 2

ดังนั้น สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า O.D. กับ ความเข้มข้นน้ำตาลในวันที่ 13-25 คือ

$$y = 0.0031x - 0.005$$

(ก.2)

ตัวอย่าง คำนวณค่า COD ที่ตำแหน่ง UASB1 ในวันที่ 1

1. จากตาราง ก.1 ค่า O.D. ที่ตำแหน่ง UASB1 ในวันที่ 1 มีค่า 0.036  
จากสมการ ก.1 หาค่าปริมาณน้ำตาลจากค่า O.D. ดังนี้

$$y = 0.0088x + 0.0042 \quad (\text{ก.1})$$

$$\text{ปริมาณน้ำตาล} = \frac{0.036 - 0.0042}{0.0088} = 3.61 \text{ ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร}$$

2. คิดหาปริมาณของออกซิเจนจากปริมาณน้ำตาลในข้อ 1. และสมการที่ 5.3

$$\text{มวลโมเลกุลของ } C_{12}H_{22}O_{11} = (12 \times 12) + (22 \times 1) + (11 \times 16) = 342$$

$$12 O_2 = 12 \times (2 \times 16) = 384$$

แสดงว่า  $C_{12}H_{22}O_{11}$  342 กรัม เกิดเป็น  $O_2$  384 กรัม

ดังนั้นถ้าใช้  $C_{12}H_{22}O_{11}$  3.61 กรัม

$$\begin{aligned} \text{เกิดเป็น } O_2 & \frac{3.61 \times 384}{342} = 4.06 \text{ ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร} \\ & = 4.06 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร} \end{aligned}$$

แต่เนื่องจากก่อนวิเคราะห์ต้องเจือจางตัวอย่างลง 10 เท่า

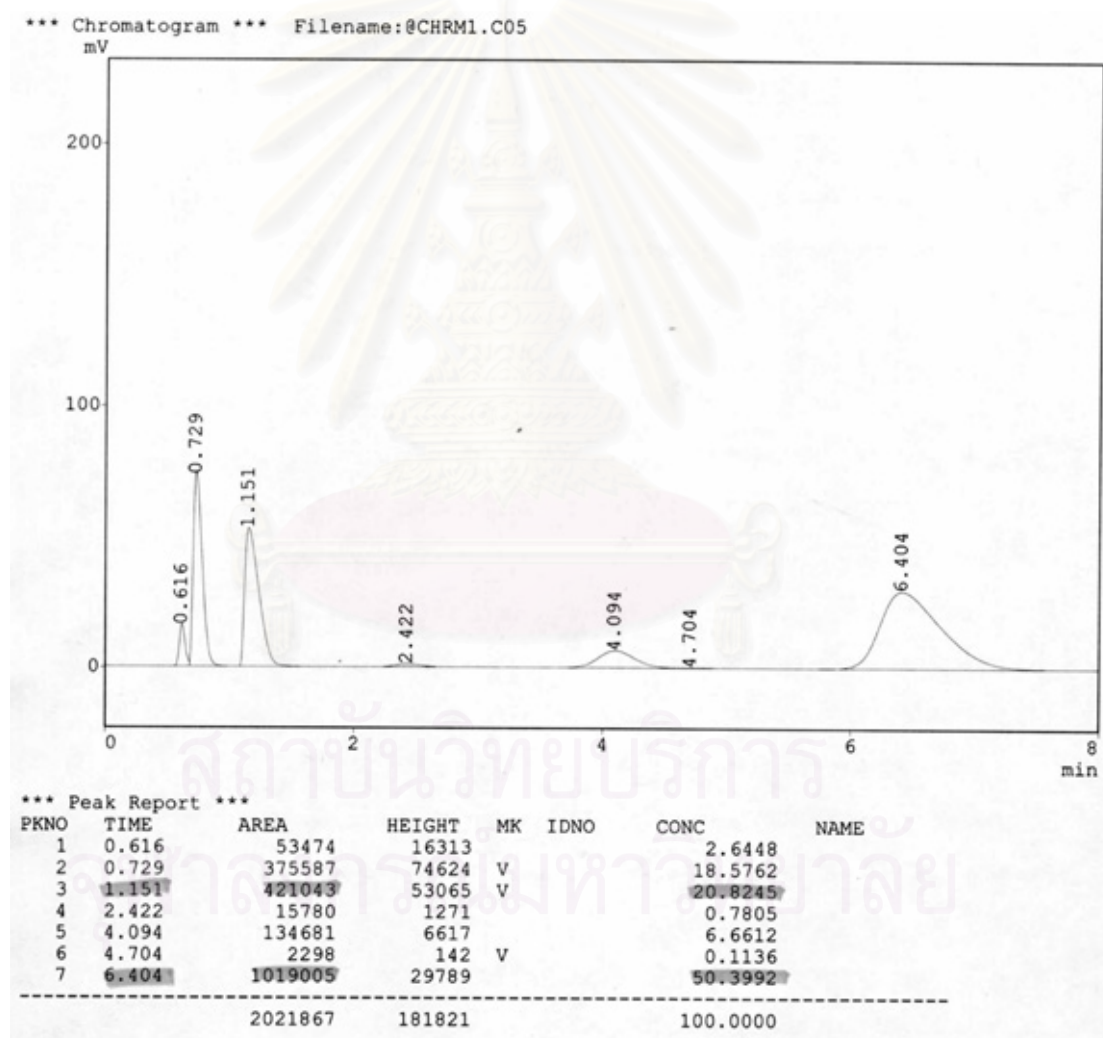
ดังนั้นค่า COD ที่ตำแหน่ง UASB1 ในวันที่ 1 มีค่า  $4.06 \times 10 = 40.6$  มิลลิกรัมต่อลิตร

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

ก๊าซที่ระบบผลิตได้จะถูกนำมาวิเคราะห์หาสัดส่วนด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี ก๊าซตัวอย่างปริมาตร 1 มิลลิลิตรจะถูกฉีดเข้าไปในเครื่องวิเคราะห์ และผลการวิเคราะห์จะรายงานออกมาในรูปของโครมาโทแกรม (chromatogram) ดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 ตัวอย่างโครมาโทแกรมจากการวิเคราะห์ก๊าซด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

รูปที่ ข.1 เป็นโครมาโตแกรมของก๊าซที่เกิดขึ้นจากถังปฏิกรณ์ UASB ในวันที่ 3 การวิเคราะห์ชนิดของก๊าซ พิจารณาจากเวลาที่เกิดกราฟเป็นยอดขึ้น เวลาที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ถูกตรวจพบคือประมาณ 1 นาที และมีเทนจะถูกตรวจพบที่เวลาประมาณ 6.5 นาที

จากรูปที่ ข.1 พบว่าก๊าซที่เกิดขึ้นใน UASB ในวันที่ 3 จะมีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนประกอบอยู่ประมาณ 21 เปอร์เซ็นต์ และมีมีเทนเป็นส่วนประกอบอยู่ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ก๊าซที่วิเคราะห์ส่วนใหญ่จะพบไนโตรเจน (ยอดกราฟเกิดที่เวลาประมาณ 4 นาที) เนื่องจากในการทดลองจะใช้ก๊าซชนิดนี้เพื่อเป่าไล่ออกซิเจนที่อยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ออก สัดส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนที่วิเคราะห์จากเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟีแสดงในตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 สัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนของก๊าซชีวภาพที่ถูกผลิตขึ้นวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

วันที่	สัดส่วนคาร์บอนไดออกไซด์ (เปอร์เซ็นต์)					สัดส่วนมีเทน (เปอร์เซ็นต์)				
	UASB	SUASB1	SUASB2	SUASB3	SUASB4	UASB	SUASB1	SUASB2	SUASB3	SUASB4
1	6.81	6.26	9.42	8.40	9.24	23.45	14.29	27.78	13.03	28.89
2	11.05	9.30	5.74	6.19	3.87	25.18	13.46	6.93	15.55	13.59
3	20.82	23.66	19.54	15.02	11.24	50.40	22.63	45.31	38.24	38.22
4	28.84	18.93	23.06	15.42	17.04	42.37	24.14	22.93	21.49	40.12
5	27.88	19.52	31.09	24.59	22.82	42.28	25.33	37.83	30.30	41.73
6	19.17	15.77	4.18	14.37	12.64	54.43	18.38	4.32	36.86	41.23
7	16.42	22.89	16.65	12.99	10.84	53.16	49.71	52.26	34.20	34.96
8	22.03	19.54	21.90	17.43	9.15	47.74	26.80	44.25	37.96	26.03
9	36.10	55.62	28.01	20.55	17.61	38.96	26.39	29.54	25.70	40.14
10	38.11	37.75	24.49	20.92	18.59	38.78	15.97	18.86	27.78	50.12
11	65.43	80.21	54.66	46.29	32.33	17.90	9.15	22.66	24.26	38.84
12	72.90	77.31	55.05	55.10	54.20	15.58	8.53	13.93	18.58	26.70
13	45.74	32.52	32.02	23.72	28.84	33.46	29.26	24.08	15.74	33.78
14	6.87	16.77	14.69	11.23	14.33	15.08	39.67	38.30	26.02	48.70
15	55.50	43.47	39.92	49.56	40.36	21.41	28.54	16.57	23.57	36.60
16	66.92	23.96	41.51	46.18	38.56	16.68	4.80	24.66	29.01	34.83
17	30.07	38.56	30.65	21.56	18.03	49.15	37.59	45.09	45.26	51.99
18	35.38	47.30	31.85	14.35	18.13	42.81	33.06	39.32	25.87	55.61
19	48.26	76.35	62.27	49.54	35.08	13.83	12.34	24.06	27.77	45.08
20	67.13	76.53	65.53	49.51	44.69	20.26	13.63	19.64	21.34	37.87
21	72.53	76.19	46.36	32.41	53.71	16.89	9.74	12.77	9.44	27.76
22	23.47	17.58	34.92	20.65	28.06	8.74	13.72	11.72	6.32	9.42
23	21.86	27.74	10.99	4.59	33.95	21.44	32.13	7.37	4.35	27.42
24	23.77	18.60	49.24	55.91	63.43	1.27	1.24	7.59	8.76	15.96
25	65.91	49.75	21.51	34.24	33.32	5.68	1.08	4.22	6.86	9.19

ในส่วนของการวิเคราะห์ผลการทดลองในบทที่ 5 นั้น จะพิจารณาเฉพาะก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์เท่านั้น โดยหักลบก๊าซประเภทอื่นออกทั้งหมด และคิดเฉพาะก๊าซสองชนิดนี้เป็น 100 เปอร์เซ็นต์ ตัวอย่างเช่น ต้องการหาสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนของถังปฏิกรณ์ UASB ในวันที่ 3

จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (ตารางที่ ข.1) จะมีส่วนประกอบดังนี้

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์                      20.82                      เปอร์เซ็นต์

ก๊าซมีเทน    50.40                      เปอร์เซ็นต์

ดังนั้นค่าสัดส่วนมีเทนในส่วนวิเคราะห์ผลจะมีค่า =  $\frac{50.40}{20.82 + 50.40} \times 100 = 70.77$  เปอร์เซ็นต์



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค.1 ค่า COD , HRT และ OLR ที่ใช้ในการดำเนินการ

วันที่	COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	HRT (ชั่วโมง)	OLR (กรัมต่อลิตรต่อวัน)
1	2077	24	2.08
2	1915	24	1.91
3	2019	24	2.02
4	2095	12	4.19
5	1788	12	3.58
6	1678	8	5.04
7	1653	24	1.65
8	1812	24	1.81
9	4678	24	4.68
10	4786	24	4.79
11	11616	24	11.62
12	10027	24	10.03
13	3133	24	3.13
14	2982	24	2.98
15	2820	8	8.46
16	3419	8	10.26
17	3255	24	3.25
18	3412	24	3.41
19	12983	24	12.98
20	15449	24	15.45
21	19805	24	19.80
22	1803	24	1.80
23	1718	24	1.72
24	12445	12	24.89
25	1692	24	1.69

ตารางที่ ค.2 ค่า COD ในถังปฏิกรณ์และประสิทธิภาพในการกำจัด COD

วันที่	COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)					ประสิทธิภาพ (เปอร์เซ็นต์)	COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)					ประสิทธิภาพ (เปอร์เซ็นต์)
	สายป้อน	UASB1	UASB2	UASB3	UASB4		สายป้อน	SUASB1	SUASB2	SUASB3	SUASB4	
1	2077	41	24	29	25	98.81	2077	20	25	25	28	98.64
2	1915	30	6	15	21	98.92	1915	71	23	29	7	99.66
3	2019	56	32	22	43	97.89	2019	165	41	87	4	99.82
4	2095	113	141	126	134	93.61	2095	1044	78	66	21	99.00
5	1788	117	83	83	72	96.00	1788	765	146	80	23	98.74
6	1678	706	1272	152	162	90.37	1678	1428	102	75	42	97.47
7	1653	34	21	11	7	99.61	1653	59	43	34	8	99.51
8	1812	84	60	59	35	98.04	1812	149	67	68	44	97.56
9	4678	53	11	42	18	99.62	4678	758	166	116	36	99.22
10	4786	57	13	57	31	99.35	4786	397	164	109	26	99.45
11	11616	692	611	658	612	94.73	11616	3239	1862	681	259	97.77
12	10027	1745	1781	1721	1721	82.84	10027	2802	1711	1272	747	92.55
13	3133	273	249	265	236	92.46	3133	704	264	242	343	89.05
14	2982	108	86	97	86	97.12	2982	688	71	82	83	97.21
15	2820	191	171	172	175	93.80	2820	2191	549	330	239	91.54
16	3419	269	230	272	280	91.81	3419	3000	934	251	173	94.94
17	3255	134	136	120	187	94.27	3255	443	1126	180	192	94.09
18	3412	97	71	87	79	97.70	3412	319	146	165	98	97.12
19	12983	391	346	388	432	96.67	12983	5017	2245	598	175	98.65
20	15449	2355	2286	2557	2167	85.98	15449	6506	4561	3710	1995	87.09
21	19805	5245	5077	5091	5049	74.51	19805	9677	7181	7120	4852	75.50
22	1803	1711	1200	1416	1381	23.44	1803	838	788	3285	3158	0.00
23	1718	157	126	149	62	96.42	1718	217	89	106	75	95.64
24	12445	5740	4981	5140	4681	62.38	12445	12427	7821	7981	6358	48.91
25	1692	4999	5744	5057	5589	0.00	1692	9027	7661	5876	4890	0.00

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.3 ประสิทธิภาพในการกำจัด COD ของถังปฏิกรณ์ SUASB1

วันที่	COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ประสิทธิภาพของ SUASB1 (เปอร์เซ็นต์)
	สายป้อน	SUASB1	
1	2077	20	99.06
2	1915	71	96.27
3	2019	165	91.84
4	2095	1044	50.17
5	1788	765	57.23
6	1678	1428	14.91
7	1653	59	96.43
8	1812	149	91.78
9	4678	758	83.81
10	4786	397	91.70
11	11616	3239	72.11
12	10027	2802	72.05
13	3133	704	77.52
14	2982	688	76.93
15	2820	2191	22.32
16	3419	3000	12.26
17	3255	443	86.40
18	3412	319	90.66
19	12983	5017	61.36
20	15449	6506	57.89
21	19805	9677	51.14
22	1803	838	53.50
23	1718	217	87.39
24	12445	12427	0.14
25	1692	9027	0.00



ตารางที่ ค.4 ค่า pH ในถังปฏิกรณ์

วันที่	สายบ่อน	UASB1	UASB2	UASB3	UASB4	SUASB1	SUASB2	SUASB3	SUASB4
1	8.74	6.95	6.93	7.17	7.01	7.36	7.13	7.12	6.95
2	8.82	6.90	6.91	6.84	6.91	6.90	6.97	6.90	7.07
3	8.69	6.85	6.89	6.85	6.87	6.86	6.97	6.97	7.14
4	8.75	6.72	6.73	6.79	6.71	7.03	6.75	6.75	6.85
5	8.81	6.84	6.82	6.84	6.81	7.09	6.89	6.87	7.10
6	8.53	6.77	6.73	6.97	6.93	7.01	6.88	7.00	7.02
7	8.30	6.93	6.93	7.04	6.96	6.89	7.06	6.95	7.08
8	8.76	6.95	7.00	6.99	6.92	6.78	6.90	6.97	7.16
9	8.80	6.68	6.77	6.79	6.64	6.42	6.56	6.66	6.85
10	8.78	6.83	6.76	6.85	6.83	6.66	6.74	6.83	6.88
11	8.81	6.55	6.54	6.59	6.58	6.55	6.40	6.46	6.60
12	8.32	6.45	6.44	6.44	6.39	6.34	6.33	6.26	6.30
13	8.76	6.79	6.72	6.79	6.70	7.09	6.89	6.67	6.53
14	8.54	6.80	6.77	6.76	6.72	6.79	7.05	6.98	6.94
15	8.17	6.28	6.19	6.25	6.24	6.63	6.19	6.19	6.30
16	8.50	6.25	6.20	6.21	6.19	6.51	6.18	6.18	6.33
17	8.45	6.56	6.55	6.59	6.50	6.49	6.54	6.70	6.78
18	8.49	6.71	6.58	6.53	6.62	6.41	6.62	6.78	6.79
19	8.36	6.22	6.16	6.13	6.12	6.08	5.94	6.16	6.79
20	8.45	6.07	6.04	6.02	6.01	6.16	6.06	6.03	6.02
21	8.62	6.28	6.32	6.26	6.24	6.62	6.43	6.34	6.27
22	8.56	6.48	6.52	6.51	6.54	6.82	6.56	6.52	6.35
23	8.61	6.70	6.67	6.66	6.68	6.84	6.86	6.69	6.69
24	8.58	5.07	5.35	5.43	5.51	6.40	4.90	5.17	5.62
25	8.32	4.64	4.68	4.70	4.66	4.37	4.53	4.66	4.81

ตารางที่ ค.5 สัดส่วนมีเทน (เปอร์เซ็นต์) ของก๊าซที่เกิดขึ้นของถังปฏิกรณ์ UASB และ SUASB

วันที่	UASB	SUASB1	SUASB2	SUASB3	SUASB4
1	77.49	69.55	74.68	60.81	75.76
2	69.50	59.14	54.68	71.54	77.81
3	70.76	48.88	69.87	71.80	77.28
4	59.50	56.04	49.86	58.22	70.19
5	60.26	56.48	54.89	55.20	64.65
6	73.95	53.82	50.82	71.95	76.54
7	76.39	68.47	75.84	72.48	76.32
8	68.43	57.84	66.89	68.53	73.99
9	51.91	32.18	51.33	55.57	69.51
10	50.43	29.73	43.51	57.04	72.94
11	21.48	10.24	29.31	34.38	54.57
12	17.61	9.94	20.19	25.22	33.01
13	42.25	47.36	42.92	39.89	53.95
14	68.70	70.29	72.28	69.85	77.27
15	27.84	39.64	29.33	32.23	47.56
16	19.96	16.69	37.27	38.58	47.46
17	62.04	49.36	59.53	67.74	74.25
18	54.75	41.14	55.25	64.33	75.41
19	22.27	13.92	27.87	35.92	56.24
20	23.18	15.11	23.06	30.12	45.87
21	18.88	11.33	21.60	22.55	34.08
22	27.13	43.83	25.13	23.44	25.13
23	49.51	53.66	40.14	48.65	44.68
24	5.06	6.26	13.36	13.54	20.11
25	7.93	2.12	16.40	16.69	21.61

ตารางที่ ค.6 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นของ UASB และ SUASB โดยการคำนวณ (ลิตรต่อวัน)

วันที่	UASB	SUASB1	SUASB2	SUASB3	SUASB4	SUASB
1	9.25	8.33	0.00	0.00	0.00	8.33
2	7.66	6.34	0.15	0.00	0.10	6.60
3	9.14	5.27	0.50	0.00	0.38	6.15
4	27.17	13.71	11.21	0.17	0.74	25.83
5	24.08	13.46	7.91	0.84	0.87	23.07
6	58.75	7.05	35.31	1.02	1.28	44.67
7	7.32	6.35	0.07	0.04	0.12	6.58
8	7.07	5.60	0.32	0.00	0.10	6.02
9	14.07	7.34	1.77	0.16	0.32	9.59
10	13.96	7.59	0.59	0.19	0.35	8.72
11	13.76	4.99	2.35	2.36	1.34	11.04
12	8.51	4.18	1.28	0.64	1.01	7.12
13	7.12	6.69	1.10	0.05	0.00	7.85
14	11.58	9.38	2.59	0.00	0.00	11.98
15	38.57	13.07	25.22	3.71	2.26	44.26
16	32.81	3.66	40.32	13.80	1.93	59.71
17	11.08	8.08	0.00	3.73	0.00	11.81
18	10.62	7.40	0.55	0.00	0.29	8.25
19	16.27	6.45	4.50	3.44	1.38	15.77
20	17.92	7.87	2.61	1.49	4.58	16.55
21	16.22	6.68	3.14	0.08	4.50	14.39
22	0.67	2.46	0.07	0.00	0.19	2.72
23	4.77	4.69	0.30	0.00	0.08	5.07
24	2.29	0.01	3.58	0.00	1.90	5.49
25	0.00	0.00	1.30	1.73	1.24	4.28
ช่วงแรก (วันที่ 1-12)	200.74	90.22	61.47	5.42	6.61	163.71
ช่วงที่สอง (วันที่ 13-25)	169.90	76.44	85.29	28.04	18.35	208.12
	370.64	166.66	146.75	33.46	24.96	371.83

ตารางที่ ค.7 ความหนาแน่นของตะกอนที่ทับถมด้านล่างของถังปฏิกรณ์

	ถังปฏิกรณ์	น้ำหนัก (กรัมต่อ 5 มิลลิลิตร)		ความหนาแน่น (กรัมต่อลิตร)
		ก่อนอบ	หลังอบ	
เริ่ม	ทุกถัง	5.4002	0.6368	18.56
ครั้งที่ 1 (วันที่ 5)	UASB	5.1466	0.5857	23.82
	SUASB1	5.8698	1.0183	25.44
	SUASB2	5.6328	0.5459	22.82
	SUASB3	5.5685	0.4643	15.20
	SUASB4	5.6411	0.5802	21.38
ครั้งที่ 2 (วันที่ 12)	UASB	4.1260	0.4255	45.70
	SUASB1	4.6720	0.4557	49.76
	SUASB2	5.1209	0.3429	30.48
	SUASB3	5.2768	0.3523	26.86
	SUASB4	5.1198	0.3447	27.44
ครั้งที่ 3 (วันที่ 20)	UASB	5.0407	0.4425	43.52
	SUASB1	4.9513	0.4406	45.10
	SUASB2	4.7744	0.3898	32.58
	SUASB3	5.1401	0.3603	29.46
	SUASB4	5.1437	0.3271	23.66
ครั้งที่ 4 (วันที่ 25)	UASB	5.1197	0.5345	67.72
	SUASB1	5.2848	0.5436	68.78
	SUASB2	5.1248	0.3764	36.06
	SUASB3	5.0655	0.3264	27.58
	SUASB4	5.1827	0.3161	24.18

## ภาคผนวก ง

การหาค่าความหนาแน่นของตะกอน

ก่อนการทดลองตะกอนที่จะถูกเติมเข้าสู่ถังปฏิกรณ์จะถูกระเหิดวิเคราะห์หาค่าความหนาแน่นก่อน และในระหว่างการทดลองได้ทำการหาความหนาแน่นของตะกอนอีก 4 ครั้ง คือ ในวันที่ 5 , 12 , 20 และ 25 การหาค่าความหนาแน่นในแต่ละวันจะคำนวณหาจากเส้นกราฟในรูปดังนี้

ตัวอย่าง การคำนวณความหนาแน่นของตะกอนจากถัง UASB ในวันที่ 10

จากตารางที่ ค.7

ความหนาแน่นของตะกอนจากถัง UASB ในวันที่ 5 มีค่า 23.82 กรัมต่อลิตร

ความหนาแน่นของตะกอนจากถัง UASB ในวันที่ 12 มีค่า 45.70 กรัมต่อลิตร

ดังนั้น ความหนาแน่นของตะกอนจากถัง UASB ในวันที่ 10 สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ความหนาแน่น} &= 23.82 + \frac{(45.70 - 23.82) \times (10 - 5)}{12 - 5} \\ &= 39.45 \text{ กรัมต่อลิตร} \end{aligned}$$

ค่าความหนาแน่นในแต่ละถังปฏิกรณ์ที่คำนวณได้จะแสดงในตารางที่ 5.1 และ 5.2

## ประวัติผู้เขียน

นายสิทธิโชค ศิริจินดาเลิศ เกิดวันที่ 25 พฤษภาคม พ.ศ.2520 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ.2541



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย