

การผลิตไฮโดรเจนและมีเทนชีวภาพโดยใช้ระบบยูเอเอสบีแบบสองขั้นตอน



นางสาวภนิดา เกษมโชติช่วง

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

BIOLOGICAL HYDROGEN AND METHANE PRODUCTION USING TWO-STAGE UASB SYSTEM



Miss Panita Kasamechonchung

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Biotechnology

Faculty of Science

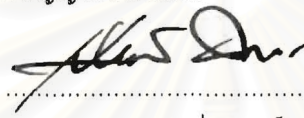
Chulalongkorn University

Academic Year 2006

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การผลิตไฮโดรเจนและมีเทนชีวภาพโดยใช้ระบบยูเอเอสบีแบบสองขั้นตอน
โดย นางสาวณิศา เกษมโชติช่วง
สาขาวิชา เทคโนโลยีชีวภาพ
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. นภา ศิวรังสรรค์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิพนธ์ พิสุทธิไพศาล

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

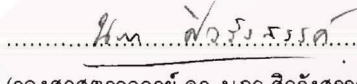


..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. เปี่ยมศักดิ์ เมณะเวต)

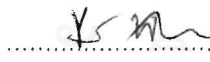
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. อรัญ อินเจริญศักดิ์)



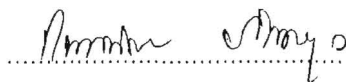
..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. นภา ศิวรังสรรค์)



..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิพนธ์ พิสุทธิไพศาล)



..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. กฤษณเวช ทรงรัตนศักดิ์)



..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กนกทิพย์ รัตติบำรุง)

ภนิดา เกษมโชติช่วง : การผลิตไฮโดรเจนและมีเทนชีวภาพโดยใช้ระบบยูเอเอสบีแบบสอง
 ขั้นตอน (BIOLOGICAL HYDROGEN AND METHANE PRODUCTION USING
 TWO-STAGE UASB SYSTEM) อ. ที่ปรึกษา: รศ.ดร. นภา ศิวรังสรรค์, อ.ที่ปรึกษาร่วม:
 ผศ.ดร. นิพนธ์ พิสุทธิไพศาล, 98 หน้า

ในการวิจัยนี้ได้พัฒนาศึกษาการผลิตแก๊สไฮโดรเจนและมีเทนแบบสองขั้นตอนโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ
 UASB โดยขั้นที่ 1 เป็นการผลิตแก๊สไฮโดรเจน ส่วนขั้นที่ 2 เป็นการผลิตแก๊สมีเทน ซึ่งถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการผลิต
 แก๊สไฮโดรเจน และมีเทน มีปริมาตรเท่ากับ 1 และ 1.5 ลิตร ตามลำดับ ภาวะที่ใช้ในการทดลองของขั้นตอนการ
 ผลิตแก๊สไฮโดรเจน คือ ค่าพีเอชน้ำเข้าเท่ากับ 5.50 ที่อุณหภูมิห้อง มีการทดลองโดยการแปรผันระยะเวลาการ
 กักเก็บทางชลศาสตร์ (hydraulic retention time, HRT) 2 ค่า คือ 8 และ 6 ชั่วโมง และมีการแปรผันค่าอัตราการ
 ป้อนสารอินทรีย์เข้าถังปฏิกรณ์ (organic loading rate, OLR) 2 ค่า คือ 6.54 ± 0.09 , 6.70 ± 0.20 และ
 7.70 ± 0.24 กรัมซีโอดีต่อวันต่อลิตรถังปฏิกรณ์ ส่วนขั้นตอนการผลิตแก๊สมีเทนนั้น น้ำที่เข้าถังปฏิกรณ์เป็นน้ำที่
 ออกจากถังผลิตแก๊สไฮโดรเจนนำมาปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 7.0 อุณหภูมิที่ใช้เป็นอุณหภูมิห้อง ระยะเวลาการกัก
 เก็บทางชลศาสตร์กำหนดค่าเดียวตลอดการทดลองคือ 10 ชั่วโมง ส่วนอัตราการป้อนสารอินทรีย์เข้าถังปฏิกรณ์
 แปรผันตรงกับปริมาณ ซีโอดีที่ออกจากถังผลิตแก๊สไฮโดรเจน จากการทดลองพบว่า ที่ HRT 8 ชั่วโมง OLR
 เท่ากับ 6.54 ± 0.09 กรัมซีโอดีต่อวันต่อลิตรถังปฏิกรณ์ของถังผลิตไฮโดรเจนได้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจน
 $1,464.47 \pm 22.40$ มิลลิลิตรต่อวัน (12.48 ± 1.39 มิลลิโมลต่อกรัมซีโอดีที่ใช้ไป) เปอร์เซ็นต์กำจัดซีโอดีเท่ากับ
 39.69 ± 1.28 เปอร์เซ็นต์ มีกรดอะซิติก โพรไพอิก และบิวทริก เท่ากับ 12.97, 3.27 และ 0.81 โมลาร์
 ตามลำดับ ส่วนถังผลิตแก๊สมีเทน (ถังที่2) ได้ ปริมาตรแก๊สมีเทน $2,371.00 \pm 114.55$ มิลลิลิตรต่อวัน
 (87.62 ± 2.34 มิลลิโมลต่อกรัมซีโอดีที่ใช้ไป) เปอร์เซ็นต์กำจัดซีโอดีเท่ากับ 87.91 ± 1.65 เปอร์เซ็นต์ ที่ HRT 6
 ชั่วโมง OLR เท่ากับ 7.70 ± 0.24 กรัมซีโอดีต่อวันต่อลิตรถังปฏิกรณ์ของถังผลิตไฮโดรเจน ได้ ปริมาตรแก๊ส
 ไฮโดรเจน $1,286.76 \pm 59.64$ มิลลิลิตรต่อวัน (7.38 ± 1.19 มิลลิโมลต่อกรัมซีโอดีที่ใช้ไป) เปอร์เซ็นต์กำจัด
 ซีโอดีเท่ากับ 29.30 ± 1.09 เปอร์เซ็นต์ มีกรดอะซิติก โพรไพอิก และบิวทริก เท่ากับ 15.91, 3.14 และ 0.06
 โมลาร์ตามลำดับ ส่วนถังผลิตแก๊สมีเทนได้ปริมาณแก๊สมีเทน $2,913.34 \pm 97.37$ มิลลิลิตรต่อวัน
 (96.00 ± 4.04 มิลลิโมลต่อกรัมซีโอดีที่ใช้ไป) เปอร์เซ็นต์กำจัดซีโอดีเท่ากับ 85.76 ± 1.18 เปอร์เซ็นต์ และที่
 HRT 6 ชั่วโมง OLR เท่ากับ 6.70 ± 0.20 กรัมซีโอดีต่อวันต่อลิตรถังปฏิกรณ์ของถังผลิตไฮโดรเจนได้ ปริมาตร
 แก๊สไฮโดรเจน $1,802.67 \pm 68.89$ มิลลิลิตรต่อวัน (21.87 ± 1.50 มิลลิโมลต่อกรัมซีโอดีที่ใช้ไป) เปอร์เซ็นต์
 กำจัดซีโอดีเท่ากับ 30.93 ± 0.57 เปอร์เซ็นต์ มีกรดอะซิติก โพรไพอิก และบิวทริก เท่ากับ 19.16, 1.51 และ
 0.53 โมลาร์ ส่วนถังผลิตแก๊สมีเทนได้ปริมาณแก๊สมีเทน $2,554.83 \pm 98.70$ มิลลิลิตรต่อวัน (78.89 ± 4.06
 มิลลิโมลต่อกรัมซีโอดีที่ใช้ไป) เปอร์เซ็นต์กำจัดซีโอดีเท่ากับ 88.21 ± 0.52 เปอร์เซ็นต์

สาขาวิชา.....เทคโนโลยีชีวภาพ.....ลายมือชื่อนิสิต.....ภนิดา เกษมโชติช่วง.....
 ปีการศึกษา.....2549.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....ผศ.ดร. นภา ศิวรังสรรค์.....
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....ผศ.ดร. นิพนธ์ พิสุทธิไพศาล.....

4872404623 : MAJOR BIOTECHNOLOGY

KEY WORD : HYDROGEN/ METHANE/ HYDRULIC RETENTION TIME/ ORGANIC
LOADING RATE/ UASB

PANITA KASAMECHONCHUNG : BIOLOGICAL HYDROGEN AND METHANE
PRODUCTION USING TWO-STAGE UASB SYSTEM THESIS ADVISOR :
ASSOC. PROF. NAPA SIWARUNGSON, Ph.D., THESIS COADVISOR :
ASSIST. PROF. NIPON PISUTPAISAL, Ph.D., 98 pp.

Hydrogen and methane production using a two stage Up-flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) were investigated in this research. The first and second stages using 1 L and 1.5 L UASB reactors were designed for the hydrogen and methane production, respectively. All experiments were conducted under the room temperature ($30 \pm 3^\circ\text{C}$), and fixed influent pHs of 5.5 for the hydrogen production reactor and that of 7.0 for the methane production reactor. In the hydrogen production reactor, the hydrogen production under the varied hydraulic retention times (HRT) of 8 and 6 hours and organic loading rates of 6.54 ± 0.09 , 6.70 ± 0.20 and 7.70 ± 0.24 g COD $\text{d}^{-1} \text{L}^{-1}_{\text{reactor}}$ were studied, while HRT in methane production was fixed 10 hours, and the ORL was dependent on the ORL of the effluent of the hydrogen production reactor. At HRT of 8 hours and OLR of 6.54 ± 0.09 g COD $\text{d}^{-1} \text{L}^{-1}_{\text{reactor}}$ the amount of hydrogen produced is $1,464.47 \pm 22.40$ mL d^{-1} (12.48 ± 1.39 mmole H_2 / g COD) COD removal is 39.69 ± 1.28 %, and the concentrations of acetic acid, propionic acid, and butyric acid accumulated in the reactor are 12.97, 3.27 and 0.81 M, respectively, while the amount of methane produced is $2,371.00 \pm 114.55$ mL d^{-1} (87.62 ± 2.34 mmole CH_4 / g COD) COD removal is 87.91 ± 1.65 %. At HRT of 6 hours and OLR of 7.70 ± 0.24 g COD $\text{d}^{-1} \text{L}^{-1}_{\text{reactor}}$ the amount of hydrogen produced is $1,286.76 \pm 59.64$ mL d^{-1} (7.38 ± 1.19 mmole H_2 / g COD) COD removal is 29.30 ± 1.09 %, and the concentrations of acetic acid, propionic acid, and butyric acid accumulated in the reactor are 5.91, 3.14 and 0.06 M, respectively, while the amount of methane produced is $2,913.34 \pm 97.37$ mL d^{-1} (96.00 ± 4.04 mmole CH_4 / g COD) and COD removal is 85.76 ± 1.18 %. At HRT of 6 hours, and OLR of 6.70 ± 0.20 g COD $\text{d}^{-1} \text{L}^{-1}_{\text{reactor}}$ the amount of hydrogen produced is $1,802.67 \pm 68.89$ mL d^{-1} (21.87 ± 1.50 mmole H_2 / g COD) COD removal is 30.93 ± 0.57 %, and the concentrations of acetic acid, propionic acid, and butyric acid accumulated in the reactor are 19.16, 1.51 and 0.53 M, respectively, while the amount of methane produced is $2,554.83 \pm 98.70$ mL d^{-1} (78.89 ± 4.06 mmole CH_4 / g COD) and COD removal 88.21 ± 0.52 %.

Field of study.....Biotechnogy.....Student's signature.....Panita Kasamechonchung.....
Academic year.....2006.....Advisor's signature.....Napa Siwarungson.....
Co-advisor's signature.....Nipon Pisutpaisal.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. นภา ศิวรังสรรค์ อาจารย์ที่ปรึกษา และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิพนธ์ พิสุทธิไพศาล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้ให้ความกรุณาเป็น อาจารย์ที่ปรึกษา คอยให้คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือตลอดระยะเวลาที่ผู้เขียนได้ศึกษา และทำงานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อรัญ อินเจริญศักดิ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กนกทิพย์ ภัคดีบำรุง และอาจารย์ ดร.กฤษณเวช ทรงธนศักดิ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำแก่ผู้เขียน

ขอขอบคุณ ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ หลักสูตรเทคโนโลยีชีวภาพบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ได้อนุเคราะห์สถานที่และทุนในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ อาจารย์ พี่ๆ น้องๆ ที่หลักสูตรเทคโนโลยีชีวภาพ ที่ภาควิชาชีวเคมี และน้องๆ ที่ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่คอยให้คำแนะนำ ช่วยเหลือในทุกๆ เรื่องเป็นอย่างดีตลอดเวลาที่ได้ทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติพี่น้องทุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจที่ดีแก่ผู้เขียนจนสำเร็จการศึกษา

ศิริกมล วิทยุบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 การตรวจเอกสาร.....	4
2.1 ประเภทของพลังงาน.....	4
2.2 แก๊สชีวภาพ.....	6
2.3 แก๊สไฮโดรเจน.....	8
2.4 การผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากการบำบัดน้ำเสีย.....	10
2.5 ความหมายของน้ำเสีย และการบำบัด.....	12
2.6 ระบบการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ.....	14
2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ภายในถังปฏิกรณ์.....	22
2.8 ระบบ UASB	27
2.9 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในภาวะไม่ใช้ออกซิเจนแบบสอง ขั้นตอนโดยระบบ UASB (two-stage anaerobic digestion).....	31

บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	35
3.1 วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมี.....	35
3.2 วิธีวิจัย.....	42
3.3 การวิเคราะห์ตัวอย่าง.....	44
บทที่ 4 ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง.....	50
4.1 ค่าพีเอช.....	50
4.2 ปริมาณแก๊ส.....	56
4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (COD _{removal}).....	64
4.4 ปริมาณกรดระเหยง่าย.....	72
4.5 ผลของค่า HRT และ OLR ต่อค่าไฮโดรเจน	77
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	87
รายการอ้างอิง.....	89
ภาคผนวก.....	94
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	98

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การผลิตแก๊สมีเทนและแก๊สไฮโดรเจนด้วยวิธีทางชีวภาพ.....	7
2.2 อนุกรมวิธานของแบคทีเรียที่ผลิตแก๊สมีเทน	21
2.3 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของระบบ UASB.....	30
3.1 ส่วนประกอบของน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง.....	40
3.2 พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์และควมถึในการวิเคราะห์.....	44
3.3 องค์ประกอบและความเข้มข้นของแก๊สมาตรฐาน.....	47
4.1 ค่าพีเอชของน้ำออกที่ภาวะเสถียรคงตัวของระบบภายใต้ภาวะการทดลองต่างๆ.	51
4.2 ปริมาตรและเปอร์เซ็นต์ของแก๊สไฮโดรเจนที่ภาวะคงตัวของระบบภายใต้ภาวะการทดลองต่างๆ.....	57
4.3 ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่ HRT เท่ากับ 8 ชั่วโมง OLR เท่ากับ 6.54 มก.ซีโอดี/วัน/ลิตรถึงปฏิกรณ์.....	72
4.4 ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่ HRT เท่ากับ 6 ชั่วโมง OLR เท่ากับ 7.70 มก.ซีโอดี/วัน/ลิตรถึงปฏิกรณ์.....	73
4.5 ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่ HRT เท่ากับ 6 ชั่วโมง OLR เท่ากับ 6.70 มก.ซีโอดี/วัน/ลิตรถึงปฏิกรณ์.....	73
4.6 ค่าเฉลี่ยความสัมพันธ์ระหว่าง HRT, OLR และปริมาตรแก๊สไฮโดรเจน.....	78
4.7 ค่าเฉลี่ยการผลิตแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สมีเทนภายใต้ภาวะการทดลองต่างๆ.....	80
4.8 ค่าเฉลี่ยความสัมพันธ์ระหว่าง HRT, OLR และประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีในถังปฏิกรณ์ที่ 1.....	81
4.9 ค่าเฉลี่ยความสัมพันธ์ระหว่าง HRT, OLR และประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีในถังปฏิกรณ์ที่ 2.....	83
5.1 สรุปผลการทดลองที่ภาวะต่างๆ.....	88

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	ปฏิบัติการแสดงการหมักแบบไม่ใช้อากาศ.....	2
2.1	กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน.....	15
3.1	ส่วนประกอบถังปฏิกรณ์ยูเอเอสพีถังที่ 1.....	36
3.2	ส่วนประกอบถังปฏิกรณ์ยูเอเอสพีถังที่ 2.....	37
3.3	ถังเตรียมน้ำเสีย.....	38
3.4	จุกยางซิลิโคน พร้อมสายยาง.....	38
3.5	อุปกรณ์วัดปริมาตรแก๊ส.....	39
3.6	เมล็ดจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง.....	41
3.7	แผนภาพการเดินระบบ.....	43
3.8	การดูดตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์.....	46
3.9	การแยกแก๊สมาตรฐานโดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี.....	48
4.1	ค่าพีเอชที่เกิดขึ้นเมื่อเดินระบบถึงวันที่ 275 ของการทดลองถังไฮโดรเจน....	53
4.2	ค่าพีเอชที่เกิดขึ้นเมื่อเดินระบบถึงวันที่ 275 ของการทดลองถังมีเทน.....	55
4.3	ปริมาตรแก๊สที่เกิดขึ้นในถังไฮโดรเจน.....	58
4.4	ปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิด.....	61
4.5	เปรียบเทียบระหว่างกรัมซีโอดีที่เข้าสู่ระบบในถังปฏิกรณ์ที่ผลิตแก๊สมีเทน.....	62
4.6	ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีในถังปฏิกรณ์ที่ 1.....	65

ภาพที่	หน้า
4.7	63
แผนภาพการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากปฏิกิริยาการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน.....	
4.8	69
ประสิทธิภาพในการกำจัดซัลไฟด์ในถังปฏิกรณ์ที่ 2.....	
4.9	71
ประสิทธิภาพโดยรวมในการลดค่าซัลไฟด์ของระบบทั้งสองชั้นตอน.....	
4.10	74
ปริมาณกรดระเหยง่ายของถังปฏิกรณ์ที่ HRT ต่างกัน.....	
4.11	79
ค่าซัลไฟด์ของระบบที่เข้าสู่ถังปฏิกรณ์ที่ 2 เทียบกับประสิทธิภาพการเกิดแก๊สมีเทน.....	
4.12	85
ปริมาณกรดระเหยง่ายที่ค่า HRT ต่างๆ.....	

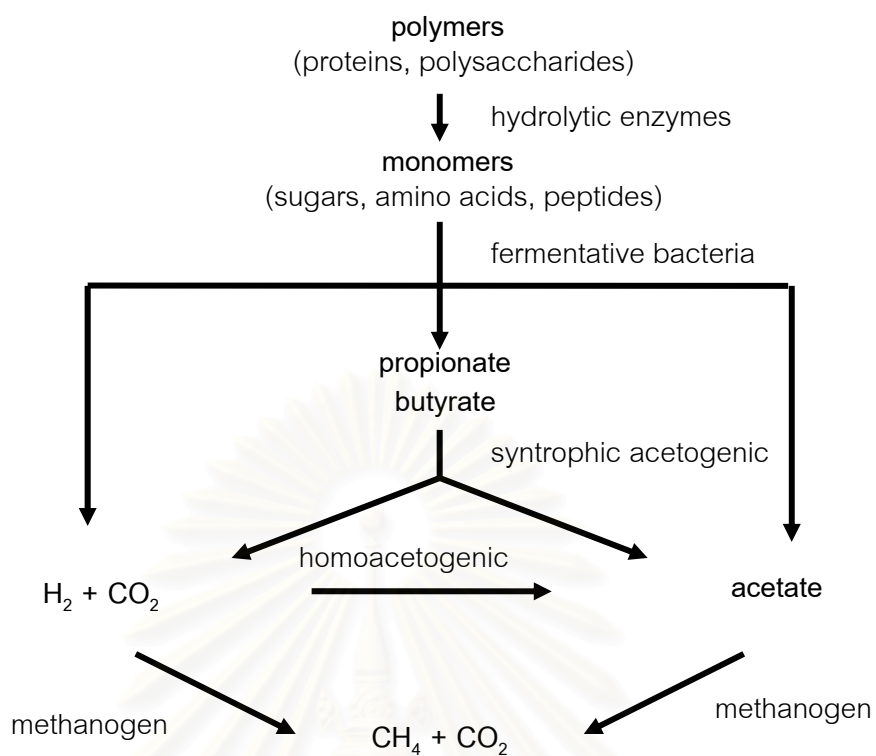
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน เชื้อเพลิงประเภทฟอสซิล ได้แก่ ปิโตรเลียม แก๊สธรรมชาติ และถ่านหิน มีราคาและความต้องการสูงเป็นอย่างมาก นอกจากนี้แหล่งพลังงานดังกล่าวยังมีปริมาณที่จำกัดและคาดว่าจะหมดไปในอนาคตอันใกล้ ดังนั้น การคิดค้นหาพลังงานที่มีศักยภาพในการทดแทนเชื้อเพลิง ประเภทที่ใช้แล้วหมดไปจึงได้รับความสนใจอย่างมาก แก๊สชีวภาพเป็นพลังงานจากชีวมวลที่มีศักยภาพที่จะนำมาใช้ทดแทนปิโตรเลียม และถ่านหิน เนื่องจากแก๊สชีวภาพสามารถผลิตได้จากวัตถุดิบที่มีอินทรีย์สารเป็นองค์ประกอบได้แก่ มูลสัตว์ หรือ วัตถุดิบชีวภาพอื่นๆ เช่น ขยะชุมชนที่เป็นของแข็ง (AL-Dabbas, 1998; Fern'andez และคณะ, 2005) สิ่งเหลือใช้ทางด้านการเกษตร เช่น ของเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องจากการเกษตรทั้งที่เป็นของแข็ง (solid waste) เช่น กากถั่ว กากปาล์ม (Atif และคณะ, 2004; Morimoto และคณะ, 2004) และน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น สำหรับน้ำเสียที่เกิดจากภาคอุตสาหกรรมจะต้องผ่านการบำบัดเพื่อกำจัดอินทรีย์สารก่อนปล่อยลงแหล่งน้ำสาธารณะโดยต้องไม่เกินค่ามาตรฐานที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนด คือ มีค่าบีโอดีน้อยกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร กระบวนการที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียนั้นโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือกระบวนการบำบัดแบบใช้อากาศ (aerobic treatment) ซึ่งเหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียที่มีค่าความสกปรกต่ำ (ค่าบีโอดี ต่ำกว่า 1,000 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร) และแบบไม่ใช้อากาศ (anaerobic treatment) ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียที่มีค่าความสกปรกสูง (ค่าบีโอดีสูงกว่า 1,000 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร) ในกระบวนการบำบัดที่ไม่ใช้อากาศ จุลินทรีย์จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยกระบวนการหมัก (fermentation) สามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้ถึง 80-90% และจะให้ผลผลิตเป็นแก๊สชีวภาพ ซึ่งประกอบด้วย มีเทน (CH_4) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ไฮโดรเจน (H_2) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) เป็นต้น ดังปฏิกิริยาแสดงในภาพที่ 1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 1.1 ปฏิกิริยาแสดงการหมักแบบไม่ใช้ออกาศ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มีเทน (CH_4) ที่ได้จากระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน (ภาพที่ 1.1) มีสมบัติติดไฟได้ดี จึงทำให้มีสมบัติเหมาะสมสำหรับนำมาใช้เป็นพลังงานทางเลือกทางหนึ่ง ส่วนไฮโดรเจน (H_2) ที่เกิดขึ้นก็สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ สมบัติเด่นของพลังงานไฮโดรเจนคือ ให้พลังงานต่อหน่วยสูง ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เพราะหลังจากกระบวนการเผาไหม้จะให้น้ำออกเป็นผลผลิตสุดท้าย กระบวนการผลิตไฮโดรเจนในปัจจุบันมีหลายวิธี โดยวิธีที่น่าสนใจคือ วิธีการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการทางชีวภาพ เพราะสามารถนำกากของแข็งที่เป็นชีวมวล หรือน้ำเสีย (Han and Shin, 2004; Morimoto และคณะ, 2004; Mu และคณะ, 2006; Zhang และคณะ, 2006) มาใช้เลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ จึงทำให้เป็นการบำบัดน้ำเสียได้อีกด้วย

ในกระบวนการข้างต้นก่อนที่จะได้มีเทน จะมีไฮโดรเจนเกิดขึ้นก่อน และจะเปลี่ยนไปเป็นมีเทนโดยจุลินทรีย์กลุ่มมีทาโนเจน อย่างไรก็ตาม ไฮโดรเจน (ที่เป็น intermediate ในวิธีการผลิตมีเทน) เป็นแก๊สที่มีศักยภาพในการเป็นเชื้อเพลิงทดแทนเช่นเดียวกับแก๊สมีเทน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำพลังงานในรูปแบบไฮโดรเจนและมีเทนกลับคืนมาในระหว่างกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB) แบบสองขั้นตอน โดยที่ขั้นตอนที่ 1 เป็นขั้นตอนการผลิตไฮโดรเจน ส่วนขั้นตอนที่ 2 เป็นขั้นตอนการผลิตมีเทน ตามลำดับ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ออกแบบและสร้างระบบขนาด bench scale เพื่อผลิตไฮโดรเจนและมีเทนจากน้ำเสียโดยใช้กระบวนการหมัก
2. หาภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มผลผลิตไฮโดรเจนและมีเทน เช่นระยะเวลาพักน้ำ (hydraulic retention time, HRT) และอัตราการป้อนน้ำเสีย
3. วัดปริมาตรและวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมัก
4. วัดประสิทธิภาพของการกำจัดสารอินทรีย์ในขณะที่ทำการผลิตไฮโดรเจนและมีเทน

บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

ปัจจุบันพลังงานเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการพัฒนาประเทศและมีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของทุกประเทศ เพราะพลังงานมีผลต่อกิจกรรมต่างๆของมนุษย์ โดยเฉพาะในด้านการดำรงชีวิตประจำวัน ด้านอุตสาหกรรม และการขนส่ง เป็นต้น

2.1 ประเภทของพลังงาน

พลังงานแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

2.1.1 พลังงานสิ้นเปลือง (nonrenewable energy)

คือ แหล่งพลังงานจากใต้พื้นดิน เมื่อใช้หมดแล้วไม่สามารถสร้างขึ้นมาใหม่หรือหามาทดแทนโดยธรรมชาติได้ทันความต้องการในเวลาอันรวดเร็ว ต้องใช้เวลานานกว่าร้อยล้านปีที่จะสร้างขึ้นมาอีกได้และมีปริมาณจำกัด ชื่อที่ใช้แทนพลังงานกลุ่มนี้จึงมีทั้งพลังงานฟอสซิลและพลังงานที่ใช้แล้วหมด ได้แก่ น้ำมันดิบ (ปิโตรเลียม) ถ่านหิน แก๊สธรรมชาติและพลังงานนิวเคลียร์ (แรงแม่เหล็ก) ฯลฯ

พลังงานที่ใช้กันอยู่ทุกวันนี้ส่วนมากนำมาจากแหล่งพลังงานสิ้นเปลือง เช่น เชื้อเพลิงฟอสซิลจำพวกน้ำมันดิบ ถ่านหินและแก๊สธรรมชาติ โดยเชื้อเพลิงนี้เกิดขึ้นจากซากพืชซากสัตว์ที่ตายมานานนับล้านปี ทับถมอยู่ใต้ดินจนเปลี่ยนเป็นฟอสซิล จากนั้นเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติกลายเป็นน้ำมันดิบ ถ่านหินและแก๊สธรรมชาติ ซึ่งกลายเป็นปัญหาในปัจจุบันคือไม่สามารถหามาทดแทนการใช้ได้ทัน โลกเราต้องใช้เวลานานเป็นล้านปีกว่าจะผลิตน้ำมันแต่ละลิตรได้ นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมด้วย เพราะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจะได้แก๊สพิษออกมาด้วย เช่น ฟุนละออง, เขม่าควัน, ไนโตรเจน, คาร์บอนมอนอกไซด์, คาร์บอนไดออกไซด์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ฯลฯ ซึ่งแก๊สเหล่านี้ทำให้โลกเกิดภาวะร้อนขึ้น หรือที่เรียกอีกอย่างว่าปรากฏการณ์เรือนกระจก (green house effect)

2.1.2 พลังงานหมุนเวียน (renewable energy)

คือ แหล่งพลังงานที่ได้จากธรรมชาติรอบตัวเรา หามาใช้ได้ไม่มีวันหมด ซึ่งสามารถสร้างทดแทนได้ในช่วงเวลาสั้นๆ โดยธรรมชาติหลังจากมีการใช้ไป จึงมีหลายชื่อที่ใช้เรียกพลังงานทดแทน รวมถึงพลังงานสะอาดและพลังงานสีเขียว เนื่องจากไม่ทำให้เกิดมลพิษต่อ

สิ่งแวดล้อมนั่นเอง ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังน้ำ พลังงานคลื่นในทะเล พลังงานน้ำขึ้นน้ำลง พลังงานชีวมวล พลังงานความร้อนใต้พิภพและพลังงานไฮโดรเจน ฯลฯ

พลังงานจากแก๊สชีวภาพ ที่ได้จากสารชีวมวลนี้ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เพราะในการผลิตแก๊สชีวภาพนอกจากจะได้พลังงานแล้วยังสามารถลดปริมาณขยะของเสียลงได้ด้วย

สารชีวมวล (biomass) คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น

- แกลบ ได้จากการสีข้าวเปลือก
- ชานอ้อย ได้จากการผลิตน้ำตาลทราย
- เศษไม้ ได้จากการแปรรูปไม้ยางพาราหรือไม้ยูคาลิปตัสเป็นส่วนใหญ่ และบางส่วนได้จากสวนป่าที่ปลูกไว้
- กากปาล์ม ได้จากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบออกจากผลปาล์มสด
- กากมันสำปะหลัง ได้จากการผลิตแป้งมันสำปะหลัง
- ชังข้าวโพด ได้จากการสีข้าวโพดเพื่อนำเมล็ดออก
- กาบและกะลามะพร้าว ได้จากการนำมะพร้าวมาปอกเปลือกออกเพื่อนำเนื้อมะพร้าวไปผลิตกะทิ และน้ำมันมะพร้าว
- ส่าเหล้า ได้จากการผลิตแอลกอฮอล์
- รวมไปถึงน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์สูงด้วย เป็นต้น

การนำวัสดุเหล่านี้มาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้หลายวิธี เช่น เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงในการให้ความร้อน หรือนำมาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการหมักทางชีวภาพเพื่อผลิตแก๊สชีวภาพ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการใช้เชื้อเพลิงประเภทฟอสซิลเป็นแหล่งพลังงานหลัก และมีแนวโน้มการใช้พลังงานสูงขึ้นเรื่อยๆ แต่แหล่งพลังงานดังกล่าวมีจำนวนจำกัด และปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อนำไปใช้เป็นพลังงาน จะก่อให้เกิดการปลดปล่อยแก๊สที่เป็นมลพิษทางอากาศ เช่น CO_x , NO_x , SO_x , C_xH_x , ฝุ่น, เขม่าควัน และสารประกอบอินทรีย์ชนิดต่างๆ เข้าสู่ชั้นบรรยากาศซึ่งมลพิษทางอากาศ เหล่านี้เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก ฝนกรด และทำให้สภาพอากาศของโลกเกิดการเปลี่ยนแปลงจนทำให้น้ำแข็งบริเวณขั้วโลกเกิดการละลาย ด้วยเหตุนี้เราจึงเริ่มตระหนักถึงปัญหามลภาวะที่เกิดขึ้น และจำนวนของแหล่งพลังงานที่กำลังจะหมดไป โดยการเริ่มทำการอนุรักษ์พลังงานอย่างแท้จริง ตลอดจนเร่งดำเนินนโยบายสำรวจค้นคว้าวิจัย และพัฒนา

แหล่งทรัพยากรพลังงานอย่างกว้างขวาง เพื่อให้มีพลังงานใช้ทดแทนพลังงานจากแหล่งธรรมชาติที่อาจหมดไปในอนาคต

พลังงานชีวมวลเป็นพลังงานทดแทนทางเลือกหนึ่ง ที่น่าจะเข้ามามีบทบาทสำคัญในการนำมาใช้เพื่อทดแทนพลังงานรูปแบบดั้งเดิมที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เพราะพลังงานจากชีวมวลจะเป็นการนำของเหลือทิ้งจากภาคเกษตรกรรม และอุตสาหกรรมที่หาได้ง่ายราคาไม่แพง และมีจำนวนมาก มาใช้ให้เป็นประโยชน์ การใช้พลังงานจากชีวมวลยังสามารถนำมาใช้ได้หลายรูปแบบ เช่น นำมาเผาไหม้โดยตรง หรือนำไปเผาให้พลังงานในเตาไอน้ำ เพื่อใช้พลังงานจากไอน้ำ และการนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นเพื่อผลิตแก๊สชีวภาพ และแก๊สไฮโดรเจน เป็นต้น ดังตารางที่ 2.1 จะเปรียบเทียบการผลิตแก๊สชีวภาพ (แก๊สมีเทน) กับแก๊สไฮโดรเจนที่ผลิตด้วยวิธีทางชีวภาพ

2.2 แก๊สชีวภาพ

แก๊สชีวภาพเป็นสารที่อยู่ในรูปของแก๊สซึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาติในภาวะที่เหมาะสม เป็นแก๊สที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยวิธีทางชีวภาพ โดยแบคทีเรียชนิดไม่ใช้ออกซิเจนในภาวะไร้อากาศแหล่งที่เกิดแก๊สชีวภาพได้แก่น้ำเสียของโรงงานแปรรูปสินค้าทางการเกษตรและฟาร์มเลี้ยงสัตว์เช่น โรงงานแปรงมันสำปะหลัง โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ โรงงานผลไม้กระป๋อง โรงงานผลิตแอลกอฮอล์ และฟาร์มเลี้ยงหมู เป็นต้น

องค์ประกอบหลักของแก๊สชีวภาพได้แก่ แก๊สมีเทน (CH_4) ประมาณ 60-70% แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณ 28-38 % และแก๊สอื่นๆ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และไนโตรเจน (N_2) เป็นต้น ประมาณ 2 % เนื่องจากแก๊สชีวภาพมีแก๊สมีเทนเป็นส่วนประกอบหลัก ดังนั้นจึงทำให้มีสมบัติจุดติดไฟได้ดีและสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนในรูปแบบต่างๆ ได้เช่น เผาเพื่อใช้ประโยชน์จากความร้อนโดยตรง โดยนำพลังงานความร้อนที่ได้ไปใช้กับเครื่องกลูกสุกร และหม้อต้มไอน้ำ (steam boiler) เป็นต้น และใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องจักรกลต่างๆ เช่น ใช้กับเครื่องยนต์เบนซินและเครื่องยนต์ดีเซล เป็นต้น หรือเผาเพื่อใช้พลังงานความร้อนร่วมกับการใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าแก๊สมีเทนที่เกิดด้วยวิธีทางชีวภาพ ซึ่งเป็นผลมาจากการกระบวนการเมแทบอลิซึมของแบคทีเรียในกลุ่มมีทาโนเจนลักษณะจำเพาะของแบคทีเรียในกลุ่มนี้คือ ต้องอาศัยอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ไร้ออกซิเจนแหล่งที่เราสามารถพบแบคทีเรียเหล่านี้ตามธรรมชาติได้แก่ กากตะกอนในบ่อบำบัด กระจาเพาะ หรือ ลำไส้ของสัตว์ และในตะกอน หรือโคลนขึ้นแฉะ เป็นต้น

แบคทีเรียในกลุ่มมีทาโนเจนเป็นกลุ่มแบคทีเรียที่ไม่ค่อยได้รับการสนใจ มีการศึกษาน้อย แต่เมื่อเกิดวิกฤตการณ์ด้านพลังงาน จึงเป็นการกระตุ้นให้นักวิทยาศาสตร์หันมาสนใจศึกษากันมากขึ้นเพื่อที่จะนำพลังงานที่ได้จากแก๊สชีวภาพมาใช้ประโยชน์ต่อไป การผลิตแก๊สชีวภาพจะเกิดจากการที่แบคทีเรียนำแหล่งพลังงานที่จำเพาะ มาใช้เพื่อการเจริญเติบโต โดยจะได้ผลผลิตสุดท้าย

เป็นแก๊สชีวภาพ ซึ่งแหล่งพลังงานที่จำเพาะจะได้มาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ หรือลักษณะทางธรณีวิทยาของแหล่งที่อยู่อาศัย

ตารางที่ 2.1 การผลิตแก๊สมีเทนและแก๊สไฮโดรเจนด้วยวิธีทางชีวภาพ (Heguang และคณะ, 2002)

	การผลิตแก๊สมีเทน (methane production)	การผลิตแก๊สไฮโดรเจน (hydrogen production)	
		ชนิดจุลินทรีย์	
		anoxygenic phototrophic bacteria	heterotrophic anaerobic bacteria
แหล่งคาร์บอน (carbon sources)	acetic acid, CO ₂	saccharide, lipid, protein, fatty acids, aromatic compound, alcohol เป็นต้น	cellulose, saccharide, lipid, protein, aromatic compound เป็นต้น
แหล่งพลังงาน (energy source)	oxidation of H ₂	oxidation of reductive organic compounds and light energy	oxidation of reductive organic compounds
เอนไซม์ที่เกี่ยวข้อง (key enzyme)	Hydrogenase	Nitrogenase and Hydrogenase	Hydrogenase
ตัวยับยั้ง (inhibitors)	O ₂ , S ₂ , SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻	O ₂ , NH ₄ ⁺	CO, O ₂
เวลาในการหมัก (retention time)	5-10 วัน (อุณหภูมิสูง) 10-20 วัน (อุณหภูมิต่ำ)	< 4 วัน	< 4 วัน
pH ที่เหมาะสม	6.7-7.4	6.5-9.0	6.5-8.5
อัตราการผลิตแก๊สที่ใช้เป็นพลังงาน	สูง	สูง	ต่ำ
สายพันธุ์	<i>Methanosarcina methanica</i> <i>Methanotherix sp.</i> <i>Methanobacter sp.</i> <i>Methanococcus sp.</i>	<i>Rhodobacter sphaeroides</i> <i>Rhodobacter capsulatus</i>	<i>Clostridium butyricum</i> <i>Methanobacterium sp.</i>

2.3 แก๊สไฮโดรเจน

ไฮโดรเจนเป็นธาตุที่เบาที่สุด มีอยู่ในปริมาณมากที่สุดในจักรวาล และบนโลกนี้ เป็นโมเลกุลที่พบได้ทั่วไปตามธรรมชาติ ธาตุไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบของสสารแทบจะทุกชนิด ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือ น้ำที่เป็นปัจจัยสำคัญมากที่สุดของสิ่งมีชีวิตบนโลกในน้ำหนึ่งโมเลกุลจะมีไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบอยู่ถึงสองอะตอม บรรยากาศในโลกรวมแก๊สไฮโดรเจนอยู่ประมาณ 0.1 ppm. มีความแข็งแรงในการยึดโมเลกุลเท่ากับ 436 kJ/mol (104 kcal/mol) แก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สที่ไม่มีสี และไม่มีกลิ่น เมื่ออยู่ในสถานะแก๊สจะมีความหนาแน่น 0.0899 g/l ในสถานะของเหลวจะไม่มีสี ค่าความหนืดต่ำ เคลื่อนที่ได้เร็วในสถานะของแข็งจะเป็นของแข็งไม่มีสี มีลักษณะเป็นโครงสร้างผลึก 6 เหลี่ยมมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ -259.20 องศาเซลเซียส และมีจุดเดือดที่อุณหภูมิ -252.77 องศาเซลเซียสต้องการพลังงานในการติดไฟต่ำ กระบวนการนำไฮโดรเจนไปใช้เป็นพลังงานยังไม่ก่อให้เกิดของสะสมที่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมด้วย เพราะผลผลิตสุดท้ายเมื่อนำไฮโดรเจนไปใช้จะได้เป็นน้ำบริสุทธิ์

พลังงานจากแก๊สไฮโดรเจนเป็นพลังงานที่สะอาด ไม่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม สามารถสร้างทดแทนได้ตลอด และยังให้พลังงานสูงด้วย แก๊สไฮโดรเจนจึงเป็นแหล่งพลังงานที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนแก๊สไฮโดรเจนนอกจากจะนำไปใช้เป็นพลังงานแล้วยังสามารถนำไปใช้ในรูปแบบต่างๆ ได้อีก

2.3.1 ประโยชน์ของแก๊สไฮโดรเจน

ภาคขนส่ง

แก๊สไฮโดรเจนสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานได้เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงในจรวด ใช้เป็น fuel cell เพื่อผลิตไฟฟ้า เป็นต้น แก๊สไฮโดรเจนเมื่อเกิดการเผาผลาญจะได้ผลผลิตสุดท้ายเป็นน้ำบริสุทธิ์อีกทั้งแก๊สไฮโดรเจนยังเป็นแก๊สที่ไม่มีวันหมดไปจากโลก แก๊สไฮโดรเจนสามารถสกัดได้จากน้ำเมื่อเผาผลาญเราจะได้น้ำกลับมาอีกครั้ง ด้วยเหตุผลเหล่านี้จึงทำให้แก๊สไฮโดรเจนเป็นตัวเลือกที่ดีที่จะใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทน

ภาคอุตสาหกรรม

เราสามารถนำแก๊สไฮโดรเจนมาใช้ในด้านอุตสาหกรรมหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมันดิบ เราจะใช้แก๊สไฮโดรเจนในกระบวนการ hydroheating ซึ่งเป็นกระบวนการกำจัดซัลเฟอร์ และสารตกค้างอื่นๆ ที่ปะปนมาในน้ำมันดิบ อุตสาหกรรมการเกษตรจะใช้แก๊สไฮโดรเจนเพื่อใช้ผลิตปุ๋ยแอมโมเนียม อุตสาหกรรมเคมีจะใช้แก๊ส

ไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้นเพื่อสังเคราะห์แอมโมเนียม แอลกอฮอล์ อัลดีไฮด์ และสารเคมีต่างๆ อุตสาหกรรมอาหารจะใช้แก๊สไฮโดรเจนในการผลิตน้ำมันพืช เพื่อป้องกันปฏิกิริยาการเกิดออกซิไดซ์ และป้องกันการเกิดกลิ่นเหม็นหืน นอกจากนี้ยังมีการใช้แก๊สไฮโดรเจนในการเปลี่ยนน้ำมันเหลวไปเป็นน้ำมันแข็ง เช่น margarine อุตสาหกรรมโลหะหนัก และเหมืองแร่จะใช้แก๊สไฮโดรเจนในการผลิตเหล็ก โดยใช้เป็นแหล่งให้พลังงานความร้อนแก่เหล็ก เพื่อใช้เปลี่ยนแปลง และปรับปรุงคุณภาพของเหล็กนอกจากนี้ยังมีการใช้แก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์ในการผลิตทังสแตน โมลิบดีนัม แมกนีเซียม และใช้แก๊สไฮโดรเจนในการตัด-หลอมแก้ว และแร่ควอตซ์

2.3.2 วิธีการผลิตแก๊สไฮโดรเจน

2.3.2.1 การผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยวิธีกายภาพ และเคมี

การผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากเชื้อเพลิงฟอสซิล

การผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยวิธีนี้อาศัยกระบวนการ steam hydrocarbon reforming โดยฉีดพ่นไอน้ำร้อนอุณหภูมิสูงเข้าผสมกับแก๊สธรรมชาติ ทำให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนเกิดการแตกตัว และปลดปล่อยไฮโดรเจนออกมา โดยสมการที่ 2.6 และสมการที่ 2.7 เป็นสมการเคมีของปฏิกิริยาการเกิดกระบวนการ steam hydrocarbon reforming นอกจากนี้ยังมีอีกวิธีหนึ่งเรียกว่า gasification คือการเผาถ่านที่มีกำมะถันต่ำโดยใช้อุณหภูมิสูง



ในกระบวนการนี้จะมีการดักจับแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น โดยใช้ตัวดูดซับหรือแผ่นเมมเบรนแยกสกัดเอาแก๊สไฮโดรเจนออกจากแก๊สผสม และแยกเอาส่วนประกอบที่ไม่ต้องการออกไป

การผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยวิธีเทอโมเคมีสทรี (thermochemistry)

การผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยวิธีเทอโมเคมีสทรีเป็นวิธีที่อาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อทำให้อุณหภูมิในการเกิดการสลายตัวของน้ำต่ำลง โดยการใช้สารประกอบของปรอทโบรมไนด์ และแคลเซียมในกระบวนการ แต่วิธีนี้จะพบปัญหาที่เกิดจากสารประกอบโลหะหนักที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยา

การผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยวิธีอิเล็กโทรไลซิส (electrolysis)

วิธีนี้จะได้แก๊สไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์สูง เป็นการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้าซึ่งกระแสไฟฟ้าจะเข้าไปสลายโมเลกุลของน้ำได้เป็นไฮโดรเจนอะตอมและออกซิเจนอะตอม โดยอาศัยการจุ่มสายไฟสองสายลงในน้ำที่ทำให้มีความเป็นตัวนำมากขึ้น แล้วผ่านไฟฟ้ากระแสตรงลงไปตามสายนั้น จึงทำให้เกิดขั้วสองขั้วตรงข้ามกันคือ positive electrode และ negative electrode ไฮโดรเจนอะตอม และออกซิเจนอะตอมจะแยกออกจากกัน โดยไฮโดรเจนอะตอมจะเข้าไปเกาะที่ด้าน negative electrode และออกซิเจนอะตอมจะเข้าไปเกาะที่ด้าน positive electrode ถึงแม้ว่าไฮโดรเจนที่ได้จะมีความบริสุทธิ์สูง แต่วิธีนี้ก็ยังมีต้นทุนที่สูงตามไปด้วย อีกทั้งต้องใช้ไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก และในระหว่างการแยกโมเลกุลของน้ำยังต้องทำในภาวะที่มีอุณหภูมิสูง

2.4. การผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากการบำบัดน้ำเสีย

การใช้เทคโนโลยีในการบำบัดน้ำเสียแบบ anaerobic treatment มาดัดแปลงเพื่อใช้แก๊สไฮโดรเจนมีทั้งที่ใช้เชื้อแบคทีเรียเพียงชนิดเดียว (pure culture) และที่ใช้เชื้อแบคทีเรียรวมๆกันหลายชนิด (mixed culture) เป็นการหมักแบบต่อเนื่อง ไฮโดรเจนสามารถลดค่าซีโอดีในน้ำเสียไปได้ประมาณ 10% จึงต้องมีการบำบัดในขั้นต่อไปเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ยังมีเหลืออยู่ซึ่งอาจจะเป็นการหมักเพื่อผลิตแก๊สมีเทนต่อเป็นกระบวนการที่ 2 ขั้นตอนกระบวนการโดยรวมจึงสามารถใช้กระบวนการ anaerobic treatment เพื่อผลิตแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สมีเทนจากการบำบัดน้ำเสียและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรได้

2.4.1 การผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยกระบวนการทางเทคโนโลยีชีวภาพ

งานวิจัยทางเทคโนโลยีชีวภาพในช่วงที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นว่า สามารถจะใช้สิ่งมีชีวิตบางชนิดมาผลิตแก๊สไฮโดรเจน (biohydrogen) ในปริมาณมาก ได้จากทรัพยากรธรรมชาติที่ใช้ไม่หมด เช่น แสงแดดและน้ำ อีกทั้งยังผลิตได้จากกากของเสียที่เป็นชีวมวล (biomass) หรือจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียได้อีกด้วย เป็นการช่วยอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมไปในตัว การผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยกระบวนการทางเทคโนโลยีชีวภาพจึงเป็น “เทคโนโลยีสีเขียว” (green technology) สำหรับอนาคต

แนวคิดของการผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยกระบวนการทางเทคโนโลยีชีวภาพ แยกออกเป็น 2 แบบ แบบแรกจะใช้สิ่งมีชีวิตมาเก็บเกี่ยวพลังงานแสงอาทิตย์ไปสังเคราะห์แก๊สไฮโดรเจน ส่วนอีกแบบจะใช้การสังเคราะห์แก๊สไฮโดรเจนเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

2.4.2 สิ่งมีชีวิตที่สามารถสังเคราะห์ไฮโดรเจน

สิ่งมีชีวิตที่ถูกนำมาใช้ในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ พวกที่ใช้กระบวนการสังเคราะห์แสงในการผลิตแก๊สไฮโดรเจน (photosynthesis-light process) ได้แก่ สาหร่ายขนาดเล็ก (microalgae) และแบคทีเรียที่สังเคราะห์แสง (photosynthesis bacteria) และพวกที่ใช้กระบวนการหมักในการผลิตแก๊สไฮโดรเจน (fermentation-dark process) อันได้แก่ แบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจน รายละเอียดของกลไกในการสังเคราะห์ไฮโดรเจนในสิ่งมีชีวิตแต่ละกลุ่ม นอกจากนี้ยังมี nitrogen-fixing aerobic bacteria บางชนิดกับ protozoa บางชนิดที่สามารถสังเคราะห์ไฮโดรเจนได้เช่นกัน แต่ยังไม่ถูกนำมาใช้ในการผลิตแก๊สไฮโดรเจน

microalgae ใช้กระบวนการในการสังเคราะห์แสงแยกอะตอมของไฮโดรเจนและออกซิเจนจากน้ำ แล้วนำไฮโดรเจนอะตอมที่ได้ ไปสังเคราะห์แก๊สไฮโดรเจนอีกที โดยใช้เอนไซม์ไฮโดรจีเนส (hydrogenase) หรือเอนไซม์ไนโตรจีเนส microalgae เป็นสาหร่ายขนาดเล็กที่เป็นสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียว มีข้อดีตรงที่มีต้นทุนวัตถุดิบถูกมาก คือ น้ำ และแสงแดด เพราะสามารถใช้กระบวนการสังเคราะห์แสงมาสร้างพลังงาน ไม่ปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และยังดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศกลับมาสร้างชีวโมเลกุลในเซลล์ได้อีก การใช้ Microalgae จึงเป็นกระบวนการสังเคราะห์แก๊สไฮโดรเจนที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมาก

photosynthetic bacteria แยกไฮโดรเจนจากสารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งอาหารโดยอาศัยกระบวนการหมัก ซึ่งย่อยสลายสารอินทรีย์อย่างสมบูรณ์ให้กลายเป็นไฮโดรเจนอะตอม และกระบวนการสังเคราะห์แสงมาช่วยเอนไซม์ไนโตรจีเนสในการสังเคราะห์แก๊สไฮโดรเจน ซึ่งแบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงได้ ไม่ได้ใช้น้ำเป็นตัวให้อิเล็กตรอนเหมือนอย่างในพืช จึงไม่มีออกซิเจนเกิดขึ้นจากกระบวนการสังเคราะห์แสง เอนไซม์ไนโตรจีเนสไม่ถูกรบกวนโดยออกซิเจนในเซลล์ การสังเคราะห์แก๊สไฮโดรเจนจึงสามารถเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องในภาวะที่มีแสง เมื่อเทียบกับพวก Microalgae แล้ว แบคทีเรียพวกนี้มีอัตราการผลิตแก๊สไฮโดรเจนที่สูงกว่า แบคทีเรียพวกนี้ใช้สารประกอบกำมะถันหรือสารอินทรีย์เป็นตัวให้อิเล็กตรอนแทนน้ำ เนื่องจากแบคทีเรียพวกนี้ใช้สารอินทรีย์เป็นอาหาร จึงมีการนำเอาแบคทีเรียนี้ไปใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วย กลายเป็นกระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่สามารถบำบัดน้ำเสียไปด้วยพร้อมกัน

2.5 ความหมายของน้ำเสียและการบำบัด

น้ำเสีย หมายถึง ของเสียที่อยู่ในสภาพของเหลวรวมทั้งมวลสารที่ปะปนหรือปนเปื้อนอยู่ในของเหลวทำให้เกิดภาวะมลพิษทางน้ำในแหล่งน้ำที่สำคัญของประเทศต่างๆ ซึ่งกำลังทวีความรุนแรงมากขึ้นเรื่อยๆ โดยเฉพาะแหล่งน้ำที่อยู่ในบริเวณชุมชนขนาดใหญ่รวมทั้งแหล่งอุตสาหกรรมและแหล่งเกษตรกรรม ทั้งนี้เพราะของเสียจากกิจกรรมต่างๆ เหล่านี้ได้ระบายลงสู่แหล่งน้ำโดยไม่ผ่านการบำบัดน้ำเสีย เพราะปริมาณของของเสียหรือน้ำเสียจากชุมชน โรงงานอุตสาหกรรมหรือเกษตรกรรมมีปริมาณมากเกินกว่าที่แหล่งน้ำสามารถปรับสภาพตามธรรมชาติ หรือทำความสะอาดได้ด้วยตัวเอง (self purification) ตามธรรมชาติของแหล่งน้ำนั้นๆ ทำให้ระบบนิเวศของแหล่งน้ำเปลี่ยนไปจนถึงขั้นที่แม่น้ำลำคลองเน่าเสีย ทำให้ไม่สามารถนำน้ำจากแหล่งน้ำเหล่านั้นมาใช้อุปโภคบริโภคหรือนำมาใช้ในทางเกษตรกรรม และอุตสาหกรรมได้อีกต่อไป โดยแหล่งกำเนิดน้ำเสียสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ

- 1) น้ำเสียที่เกิดจากน้ำโสโครกของแหล่งชุมชน (domestic wastewater) เป็นน้ำเสียที่ถูกปล่อยออกจากบ้านเรือน ชุมชน ตลาด และโรงพยาบาล
- 2) น้ำเสียที่เกิดจากน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม (industrial wastewater) เป็นน้ำเสียที่เกิดจากการทำกิจกรรมต่างๆ ภายในโรงงาน เช่น การล้างวัตถุดิบ การล้างเครื่องจักรกล การทำความสะอาดภายในโรงงาน เป็นต้น
- 3) น้ำเสียที่เกิดจากการเกษตรกรรม (agricultural wastewater) เป็นน้ำเสียที่เกิดจากการทำเกษตรกรรม เช่น การใช้สารเคมีเพื่อเพิ่มผลผลิตของพืช การใช้ยาปราบศัตรูพืช ดังนั้น วิธีการบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ จึงเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถลดการเน่าเสียของแหล่งน้ำได้

กระบวนการบำบัดน้ำเสีย

เป็นการกำจัดสิ่งเจือปนที่อยู่ในน้ำเสียให้หมดไปหรือบำบัดให้เหลือน้อยที่สุด ที่ไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสัตว์ และสามารถนำน้ำที่ผ่านการบำบัดมาใช้ประโยชน์ได้ โดยกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบ่งเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ

- ◆ กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางกายภาพ เป็นกระบวนการที่กำจัดสิ่งเจือปน ประเภทของแข็งแขวนลอยขนาดใหญ่ ซึ่งตกตะกอนด้วยตนเองได้ง่าย
- ◆ กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมี เป็นกระบวนการที่ใช้ในการกำจัดสารประกอบต่างๆ ซึ่งส่วนมากเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำทั้ง ได้แก่การทำให้เป็นกลาง การทำให้ตกตะกอน การเติมกรดและออกซิเจน เป็นต้น
- ◆ กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยา เป็นกระบวนการที่ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ ซึ่งอยู่ในรูปของสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กที่ไม่สามารถตกตะกอนได้โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก โดยการใช้จุลินทรีย์ชนิดต่างๆ จากธรรมชาติมาย่อยสลายสารอินทรีย์อินทรีย์บางชนิดที่มีอยู่ในน้ำเสีย ในภาวะที่มีออกซิเจนหรือภาวะที่ไม่มีออกซิเจนเปลี่ยนเป็นผลผลิตสุดท้ายและเซลล์

2.6 ระบบการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ

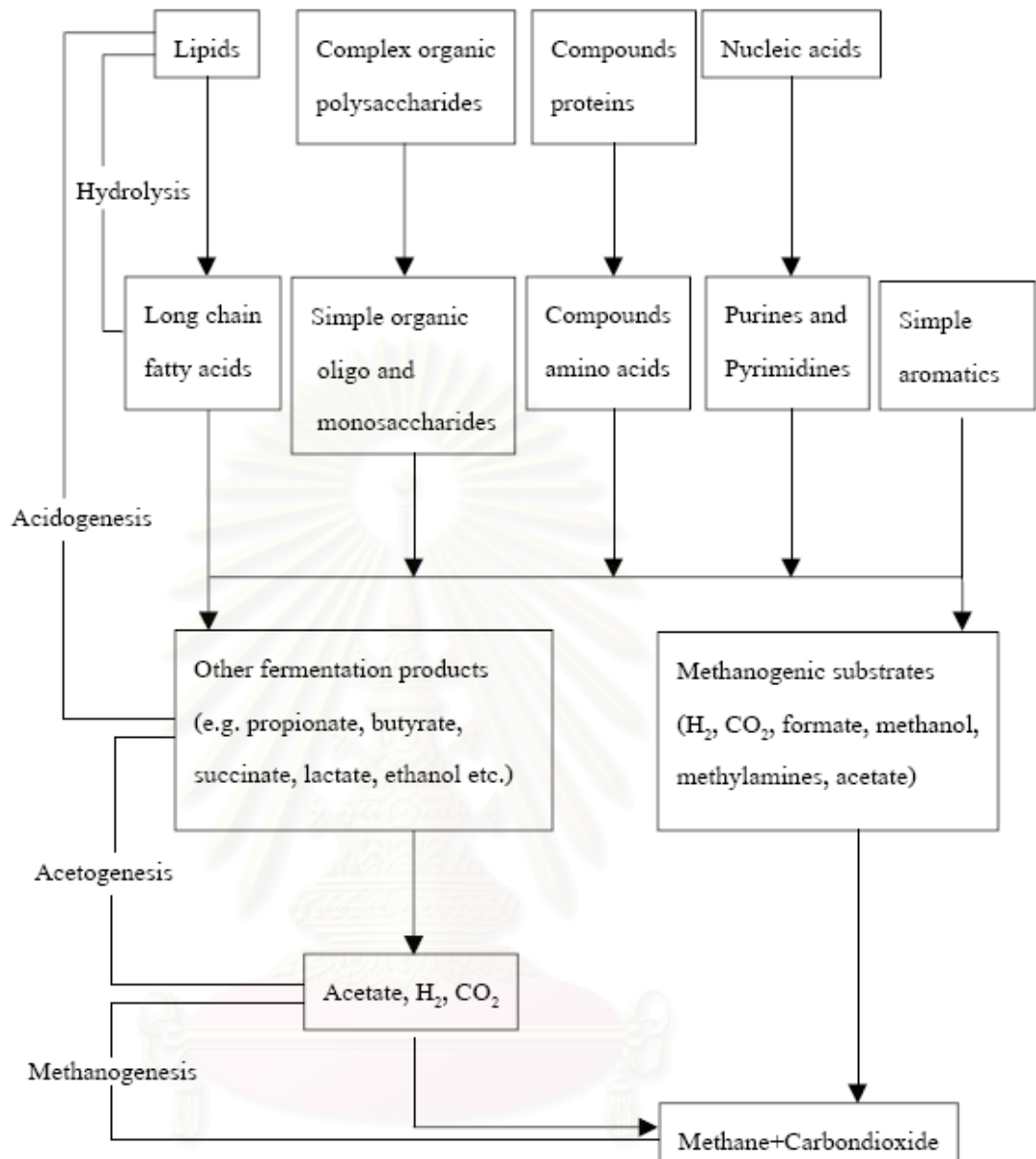
การบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพหรือโดยใช้จุลินทรีย์ เป็นวิธีที่ใช้กำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย โดยเฉพาะสารอินทรีย์ซึ่งเป็นความสกปรกจะถูกใช้เป็นอาหารของจุลินทรีย์ที่เพาะเลี้ยงไว้ในถังเชื้อ ทำให้น้ำเสียมีความสกปรกลดลง จุลินทรีย์อาจเป็นแบบใช้ออกซิเจนหรือไม่ใช้ออกซิเจนก็ได้ ระบบบำบัดน้ำเสียที่อาศัยหลักชีวภาพมีหลายชนิด เช่น

- ▶ ระบบแอกติเวตเต็ดสลัดจ์ (activated sludge)
- ▶ ระบบทรिकคลิงฟิลเตอร์ (trickling filter)
- ▶ ระบบจานหมุนชีวภาพ (bio disc หรือ rotatory biological contactor)
- ▶ ระบบบ่อบำบัดน้ำเสีย
- ▶ ระบบถังกรองไร้ออกซิเจน (anaerobic filter)

กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบไร้อากาศ

2.6.1 ชีวเคมีของการผลิตแก๊สชีวภาพ

การผลิตแก๊สชีวภาพจะอาศัยกระบวนการย่อยสลายของแบคทีเรียแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic digestion) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ให้กลายเป็นแก๊สมีเทนโดยการเกิดปฏิกิริยาเหล่านี้ส่วนใหญ่แล้วจะเกิดขึ้นได้จะต้องอาศัยแบคทีเรียหลายชนิดช่วยกันย่อยสลาย สารอินทรีย์ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนจะต้องอาศัยจุลินทรีย์ 3 กลุ่มในการย่อยสลายจุลินทรีย์กลุ่มแรกจะเป็นตัวย่อยสลาย (hydrolysis) สารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้มีโมเลกุลเล็กลงจนจุลินทรีย์ในกลุ่มที่ 2 ซึ่งเป็นกลุ่มที่สร้างกรดสามารถนำไปใช้ได้ และกลุ่มสุดท้ายจะเป็นจุลินทรีย์ กลุ่มที่สร้างมีเทนซึ่งขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ แสดงดังภาพ 2.1 และมี รายละเอียดของแต่ละปฏิกิริยาแบ่งได้ 4 แบบคือ



ภาพที่ 2.1 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้ภาวะไร้ออกซิเจน (Holland และคณะ., 1987)

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis)

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเป็นปฏิกิริยาที่ทำการเปลี่ยนสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ (คาร์โบไฮเดรต โปรตีนและไขมัน) ซึ่งสารอินทรีย์ในกลุ่มนี้มีขนาดใหญ่เกินกว่าที่แบคทีเรียจะดูดซึมเข้าเซลล์ได้ให้ กลายเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก (น้ำตาลกรดอะมิโนและกรดไขมัน) หรือเรียกว่ากระบวนการย่อยสลายพอลิเมอร์ (polymer breakdown) แบคทีเรียในกลุ่มนี้จะ เรียกว่า ไฮโดรไลซิงแบคทีเรียซึ่งไฮโดรไลซิงแบคทีเรียจะผลิตเอนไซม์และทำการปล่อยออกมาภายนอก เซลล์ (extracellular enzyme) เพื่อทำการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสทำให้สารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลเล็กลงจน แบคทีเรียสามารถดูดซึมเข้าสู่เยื่อหุ้มเซลล์ได้โดยตรง การย่อยสลายขั้นนี้เป็นไปได้ช้าและมีข้อจำกัดในการย่อยสลายของเสียบางประเภท เช่น ของเสียจำพวกเซลลูโลส (cellulolytic waste) ที่มีลิกนินเป็นองค์ประกอบ

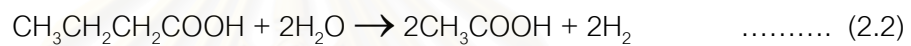
ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารตั้งต้น ซึ่งกระบวนการนี้เป็นเพียงการเปลี่ยนสารประกอบอินทรีย์ที่ซับซ้อนไปเป็นสารอินทรีย์อย่างง่ายเท่านั้นยังไม่มีการลดค่าซีโอดีในขั้นตอนนี้

ปฏิกิริยาการเกิดกรด (acidogenesis)

ปฏิกิริยาการเกิดกรดจะเป็นปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก (น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว กรดอะมิโนและกรดไขมัน) ซึ่งแบคทีเรียที่มีความทนทานสูงดำรงชีพอยู่ได้ทั้งสภาพที่มี และไม่มีออกซิเจนอิสระ ทนต่อสภาพความเป็นกรดที่ระดับพีเอช 4-5 แบคทีเรียกลุ่มนี้จัดเป็นประเภท facultative bacteria ใช้แหล่งคาร์บอนและพลังงาน จากกระบวนการหมัก (fermentation) ซึ่งจะได้ผลผลิตส่วนใหญ่คือ กรดอินทรีย์อย่างง่ายที่ละลายน้ำ เช่น กรดอะซิติก (acetic acid) กรดโพรพิโอนิก (propionic acid) กรดบิวทีริก (butyric acid) กรดวาเลอริก (valeric acid) เป็นต้น จึงทำให้ปฏิกิริยานี้ถูกเรียกว่าเป็นปฏิกิริยาการสร้างกรด (acid forming bacteria) นอกจากผลผลิตส่วนใหญ่ที่เป็นกรดอินทรีย์แล้วยังสามารถพบผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นปะปนออกมาได้อีกโดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรียและภาวะแวดล้อมของการเกิดปฏิกิริยา เช่น แก๊สไฮโดรเจน กรดอะซิติก และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ปฏิกิริยาการสร้างกรดอะซิติก (acetogenesis)

ปฏิกิริยาการสร้างกรดอะซิติกคือ ปฏิกิริยาที่ย่อยสลายกรดอินทรีย์ที่ระเหยง่ายที่เกิดจากขั้นตอนของปฏิกิริยาการเกิดกรดให้เป็นกรดที่มีขนาด 1-2 คาร์บอน คือ อะซิเตต (acetate) ฟอร์มเมต (formate) แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยแบคทีเรียในกลุ่มที่สร้างกรดอะซิเตต (acetogenic bacteria) ให้เป็นผลิตภัณฑ์เป็นกรดอะซิเตต แก๊สไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนที่สำคัญของการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยภายในระบบจะต้องมีภาวะที่เหมาะสมถึงจะเกิดปฏิกิริยาโดยสมการที่ 2.1 เป็นการเปลี่ยนกรดบิวทิริก และสมการที่ 2.2 เป็นการเปลี่ยนกรดโพรพิโอนิกให้เป็นกรดอะซิติกและแก๊สไฮโดรเจน



ปฏิกิริยานี้ถือเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญในการหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย และไฮโดรเจนในปริมาณมากเกินไปซึ่งกระบวนการสร้างมีเทน

Eunoh, และคณะ (2006) รายงานว่ากรดอินทรีย์ระเหยที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ในถังหมักกรด ได้แก่ กรดอะซิติก (acetic acid) กรดโพรพิโอนิก (propionic acid) กรดบิวทิริก (butyric acid) และกรดไอโซวาเลอริก (isovaleric acid) เพียงเล็กน้อย ซึ่งเท่ากับ 24.1, 12.8 และ 29.4 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ปฏิกิริยาการสร้างแก๊สมีเทน (methanogenesis)

ปฏิกิริยาการสร้างแก๊สมีเทนเป็นปฏิกิริยาการเปลี่ยนกรดอะซิติกและแก๊สไฮโดรเจนให้เป็นแก๊สมีเทนภายใต้ภาวะที่ไม่มีออกซิเจนโดยแบคทีเรียในกลุ่มที่สร้างมีเทน (methanogen) แบคทีเรียในกลุ่ม ที่สร้างมีเทนจะเป็นแบคทีเรียที่มีอัตราการเจริญเติบโตช้ามากและยังเป็นแบคทีเรียที่สามารถใช้สารตั้งต้นได้เพียงไม่กี่ชนิดคือ สารที่มีคาร์บอนเพียง 1 หรือ 2 คาร์บอนเท่านั้น ส่วนกรดอินทรีย์ที่มีจำนวนคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมแบคทีเรียที่สร้างมีเทนจะไม่สามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นเพื่อผลิตเป็นแก๊สมีเทนได้จึงทำให้แบคทีเรียในกลุ่มนี้ต้องอาศัยแบคทีเรียชนิดอื่นๆให้ทำการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ชนิดต่างๆ ให้เป็นกรดอะซิติกหรือแก๊สไฮโดรเจนก่อน หลังจากนั้นแบคทีเรียในกลุ่มที่สร้างมีเทนจึงสามารถนำสารเหล่านั้นมาย่อยสลายต่อไป ดังสมการที่ 2.3 และสมการที่ 2.4

การย่อยสลายกรดอะซิติกไปเป็นมีเทน



การเกิดมีเทนจากคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจน



นอกจากนั้นแบคทีเรียในกลุ่มที่สร้างแก๊สมีเทนยังเป็นแบคทีเรียที่มีความไวต่อสภาพแวดล้อมเป็นอย่างมากเช่นไม่อาจทนต่อแก๊สออกซิเจนแม้มีเพียงปริมาณเล็กน้อยและอาจเจริญเติบโตได้ไม่ดีเมื่ออยู่ในช่วงพีเอชนอกเหนือจากช่วง 6.8 – 9.2

2.6.2 จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์

กลุ่มจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ไปเป็นแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สมีเทน โดยมากเป็นพวกแบคทีเรีย ซึ่งประกอบไปด้วยแบคทีเรียหลายกลุ่มที่มีการทำงานร่วมกันถึงแม้ว่าอาจพบเชื้อราและโปรโตซัวในระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน แต่แบคทีเรียเป็นกลุ่มที่มีมากที่สุดและมีบทบาทสำคัญที่สุด แบคทีเรียพวก strictly และ facultative anaerobic bacteria จำนวนมาก เช่น *Bacteriodes* sp., *Bifidobacterium* sp., *Clostridium* sp., *Lactobacillus* sp., และ *Streptococcus* sp. มีส่วนเกี่ยวข้องในกระบวนการ hydrolysis และ fermentation

ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆที่มีโครงสร้างซับซ้อนภายใต้ภาวะไม่ใช้ออกซิเจน จนได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายอยู่ในรูปของแก๊สชีวภาพนั้น จำเป็นต้องอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ซึ่งส่วนมากเป็นพวกแบคทีเรีย แบคทีเรียที่มีบทบาทต่อกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในภาวะไม่ใช้ออกซิเจนสามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ พวก non-methanogenic bacteria และ methanogenic bacteria การย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ไปเป็นสารที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลงอาศัยการทำงานที่สัมพันธ์กันของแบคทีเรียเหล่านี้

แบคทีเรียกลุ่มที่ไม่สร้างมีเทน (non-methanogenic bacteria)

แบคทีเรียประเภทนี้ ประกอบด้วยเซลล์ที่ไม่ต้องการออกซิเจนอย่างเด็ดขาด (obligate anaerobes) และแบคทีเรียพวกที่ใช้ออกซิเจนได้บางส่วนใหญ่เป็นพวก facultative anaerobic bacteria ซึ่งสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ทั้งในภาวะแวดล้อมที่มีและไม่มีออกซิเจน โดยได้รับพลังงานที่ใช้ในการเจริญเติบโตจากการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้เป็นกรดไขมันระเหยง่าย กรดอินทรีย์ แอลกอฮอล์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน แอมโมเนีย และซัลไฟด์ สามารถเจริญเติบโต

ได้ดีในช่วงพีเอช 4.0-6.5 ทนต่อการเปลี่ยนแปลงภาวะแวดล้อมได้ดีมีอัตราการเจริญเติบโตสูง แบ่งตัวเพิ่มจำนวนได้เป็น 2 เท่าภายในเวลา 24 ชั่วโมง

ในปัจจุบัน ปรากฏว่าแบคทีเรียประเภทไม่สร้างมีเทนที่สามารถสร้างไฮโดรเจนได้จากกรดอินทรีย์ขนาดใหญ่มีบทบาทสำคัญในฐานะเป็นตัวเชื่อมระหว่างแบคทีเรียที่สร้างกรดแบบธรรมดาและแบคทีเรียที่สร้างมีเทน ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาที่สร้างไฮโดรเจน เช่น ปฏิกิริยาฟอสฟอโรคลาสติค สามารถสร้างกรดอะซิติกได้จากสารอินทรีย์อื่นด้วย แบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเทนจะสร้างกรดอะซิติกและสารอินทรีย์อย่างง่ายให้เป็นอาหารของแบคทีเรียสร้างมีเทน

แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทน (methanogenic bacteria)

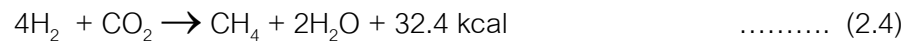
ขั้นตอนการเกิดมีเทนเป็นขั้นตอนสุดท้ายในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ผลิตภัณฑ์สุดท้ายคือ มีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ สารตั้งต้นของขั้นตอนนี้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มาจากขั้นตอนการเกิดกรด โดยสารตั้งต้นที่มีความสำคัญมากที่สุด คือ กรดอะซิติก ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ แบคทีเรียที่ทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการผลิตมีเทน ส่วนใหญ่จัดอยู่ในพวก obligate anaerobic bacteria เจริญเติบโตได้ดีในภาวะขาดออกซิเจน ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.5 - 7.5 ทำให้มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงภาวะกรดได้น้อย และมีอัตราการเจริญเติบโตได้ช้ากว่าแบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเทน และยังเป็นเซลล์ที่พิถีพิถันในการเลือกชนิดของอาหารมากและ บอบบาง ระยะเวลาที่ใช้ในการเพิ่มจำนวนเป็น 2 เท่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 3 วัน (ที่ 35 องศาเซลเซียส) ถึง 10 วัน (ที่ 10 องศาเซลเซียส) จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนนี้มีความเฉพาะเจาะจงสูง คือแบคทีเรียที่สร้างมีเทน (methanogenic producing bacteria) จำแนกได้เป็น 3 ชนิด ตามลักษณะการเกิดแก๊สมีเทน ดังนี้

> obligate acetoclastic methanogen สามารถใช้กรดอะซิติกได้เพียงอย่างเดียว โดยใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงาน แบคทีเรียกลุ่มนี้ไม่สามารถอยู่ได้ในภาวะที่มีออกซิเจน ระยะเวลาการเจริญเติบโตใช้เวลานาน 3-5 วัน



> obligate hydrogenotrophic methanogen เป็นแบคทีเรียที่สามารถผลิตมีเทนได้จากไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ แบคทีเรียในกลุ่มนี้ใช้แก๊สไฮโดรเจน (H_2 utilizer) เป็นแหล่งพลังงานและมีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน แบคทีเรียกลุ่มนี้จัดเป็นแบคทีเรียกลุ่ม

สังเคราะห์อาหาร เนื่องจากสามารถดำรงชีวิตได้โดยใช้สารอินทรีย์ และปลดปล่อยแก๊สมีเทนออกมาในรูปแบบพลังงาน ระยะเวลาการเจริญเติบโตใช้เวลานาน 2-4 ชั่วโมง



> Hydrogenotrophic / Acetoclastic Methanogen แบคทีเรียเหล่านี้สามารถสร้างแก๊สมีเทนได้โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนร่วมกับสารอินทรีย์ เพื่อให้สารอินทรีย์เป็นตัวรับอิเล็กตรอน หรือตัวให้อิเล็กตรอนในการเกิดก๊าซมีเทน และสามารถให้ไฮโดรเจนร่วมกับคาร์บอนไดออกไซด์ในการสร้างแก๊สมีเทนได้ด้วย ระยะเวลาการเจริญเติบโตใช้เวลานาน 10-12 ชั่วโมง

การทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ต้องอาศัยจุลินทรีย์ทั้ง 2 กลุ่มที่กล่าวข้างต้น คือจุลินทรีย์ที่ผลิตกรดอินทรีย์และกลุ่มที่ผลิตมีเทน เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มที่ผลิตมีเทนไม่สามารถสร้างอะซิเตตหรือไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์หลักได้ ต้องอาศัยผลิตภัณฑ์ดังกล่าวจากแบคทีเรียที่ผลิตกรดอินทรีย์เพื่อนำมาสร้างแก๊สมีเทน ดังนั้น จุลินทรีย์ ทั้ง 2 กลุ่มนี้จึงต้องทำงานสัมพันธ์กันที่ภาวะสมดุลเมื่อจุลินทรีย์พวกที่ไม่สร้างมีเทนย่อยสลายสารอินทรีย์และผลิตกรดอินทรีย์ขึ้นมาในระบบ กรดอินทรีย์เหล่านี้ถูกจุลินทรีย์อีกพวกคือพวกที่สร้างมีเทนย่อยสลายเพื่อให้ได้แก๊สมีเทน ซึ่งปริมาณแก๊สไฮโดรเจนและปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นจะแสดงประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสีย

ตารางที่ 2.2 อนุกรมวิธานของแบคทีเรียที่ผลิตแก๊สมีเทน (Bitton, 1994)

อันดับของแบคทีเรีย สร้างแก๊สมีเทน	ตระกูลของแบคทีเรีย สร้างแก๊สมีเทน	สกุลของแบคทีเรีย สร้างแก๊สมีเทน	ชนิดของแบคทีเรีย สร้างแก๊สมีเทน
Methanobacteriales	Methanobacteriaceae	Methanobacterium	<i>M. formicicum</i> <i>M. bryanri</i> <i>M.</i> <i>thermoautotrophicum</i> <i>M. ruminantium</i>
		Methanobrevibacter	<i>M. arboriphilus</i> <i>M. smihii</i> <i>M. vannielli</i>
Methanococcales	Methanococcaceae	Methanococcus	<i>M. voltae</i> <i>M. mobile</i>
Methanomicrobiales	Methanomicrobiceae	Methanogenium	<i>M. cariaci</i> <i>M. marisnigri</i>
		Methanosprillum	<i>M. hungatei</i> <i>M. barkeri</i>
	Methanosarcinaceae	Methanosarcina	<i>M. mazei</i>

จะเห็นได้ว่าปฏิกริยาของการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนนั้นจะประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆหลายขั้นตอนดังนั้นการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนนี้จึงมีความสลับซับซ้อนอันเนื่องมาจากต้องมีการอาศัยพึ่งพาของแบคทีเรียในกลุ่มต่างๆให้เกิดการทำงานร่วมกันโดยเฉพาะในขั้นตอนสุดท้ายคือ ขั้นตอนการสร้างแก๊สมีเทนจะเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของการย่อยสลายสารอินทรีย์อย่างสมบูรณ์และทำให้ระบบการย่อยสลายไม่ล้มเหลวเนื่องเป็นการเกิดปฏิกริยาอย่างช้าๆและต้องมีการควบคุมปัจจัยต่างๆให้เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียในกลุ่มนี้

2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ภายในถังปฏิกรณ์

เนื่องจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ต้องอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์หลายชนิดร่วมกัน ดังนั้นจำเป็นต้องเข้าใจถึงปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์เพื่อให้กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ดำเนินไปได้อย่างดีเยี่ยม ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนนี้ประกอบด้วยจุลินทรีย์ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ผลิตกรดอินทรีย์ (ไฮโดรเจน) และกลุ่มที่ผลิตมีเทน ซึ่ง จุลินทรีย์ทั้งสองกลุ่มมีความต้องการภาวะที่เหมาะสมต่างกัน ดังนั้นการที่จะพัฒนาถังปฏิกรณ์ให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น ต้องมีความเข้าใจถึงปัจจัยที่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์ก่อน ซึ่งภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์มีดังนี้

2.7.1 ภาวะไร้ออกซิเจน

จุลินทรีย์ที่อยู่ภายในระบบแบบไม่ใช้ออกซิเจน มี 2 กลุ่มคือ พวกที่เป็น facultative bacteria คือพวกที่ผลิตกรดสร้างแก๊สไฮโดรเจน และพวกที่เป็น strictly anaerobic bacteria คือพวกที่ผลิตมีเทน ซึ่งใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจน ดังนั้นสภาพแวดล้อมที่สำคัญที่สุดในถังปฏิกรณ์ชนิดนี้ต้องไม่มีออกซิเจนอยู่เลย เนื่องจากออกซิเจนเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียจำพวกที่ผลิตมีเทน

2.7.2 อุณหภูมิ (temperature)

เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่ออัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์และการผลิตแก๊สชีวภาพของถังปฏิกรณ์ เนื่องจากการทำงานของถังปฏิกรณ์ต้องอาศัยจุลินทรีย์หลายกลุ่มที่สามารถเจริญเติบโตและเกิดเมแทบอลิซึมได้ดีที่ช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน สามารถแบ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียมี 3 ระยะ ดังนี้

◆ ระยะเวลา psychrophilic ช่วงอุณหภูมิ 0-20 องศาเซลเซียส การทำงานของแบคทีเรียจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นร้อยละ 40-50 แบคทีเรียกลุ่มนี้เรียกว่า psychophysics bacteria

◆ ระยะเวลา mesophilic ช่วงอุณหภูมิ 20-45 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิทั่วไปในการดูแลระบบ โดยเฉพาะประเทศในแถบเขตร้อน ประสิทธิภาพในการสร้างแก๊สมีเทนเป็นร้อยละ 70-80 แบคทีเรียกลุ่มนี้เรียกว่า mesophilic bacteria

◆ ระยะเวลา thermophilic ช่วงอุณหภูมิ 45-90 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิสูงขึ้นไปจะทำให้แบคทีเรียทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นร้อยละ 90-95 แบคทีเรียกลุ่มนี้เรียกว่า thermophilic bacteria

อุณหภูมิที่แบคทีเรียเจริญเติบโตอยู่เป็นอุณหภูมิที่มีผลต่อองค์ประกอบของเซลล์ ภาวะโภชนาการของแบคทีเรีย และกิจกรรมของเอนไซม์ในเซลล์ ดังนั้นอุณหภูมิจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดชนิดของแบคทีเรียที่ dominant ในถังปฏิกรณ์ ซึ่งจุลินทรีย์ในระบบแบบไม่ใช้ออกซิเจนนี้ ปฏิกริยาชีวเคมีเกิดขึ้นได้ดีในช่วงของอุณหภูมิ 2 ช่วง คือ ช่วง mesophilic มีอุณหภูมิระหว่าง 30-40 องศาเซลเซียส และช่วง thermophilic อุณหภูมิระหว่าง 45-55 องศาเซลเซียส และมีรายงานว่าที่อุณหภูมิต่ำจุลินทรีย์มีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่ำ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงจุลินทรีย์มีเมแทบอลิซึมสูงกว่าและมีอัตราการเจริญสูงกว่า อุณหภูมิสูงก็มีข้อดีเหนือกว่าในช่วงอุณหภูมิอื่นๆ คือ

- เพิ่มอัตราเร็วในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ซึ่งโดยทั่วไปอัตราการเติบโตที่ 55 องศาเซลเซียส จะมากกว่าที่ 30 องศาเซลเซียส 2-3 เท่าทำให้ใช้เวลาในการกักเก็บลดลงขนาดถังหมักลดลง ทำให้ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบลดลงได้
- เพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในส่วนที่เป็นของแข็งทำให้ปริมาณของแข็งที่เหลือทิ้งจากระบบลดลง และยังให้แก๊สมีเทนเป็นผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นด้วย
- ช่วยลดปริมาณจุลินทรีย์ชนิดอื่นๆที่เป็นเชื้อโรคลงได้
- การกวนผสมทำได้ง่ายขึ้นและการจมตัวของตะกอนในระบบดีขึ้นเนื่องจากที่อุณหภูมิสูงความหนืดของของเหลวลดลง
- ในกรณีที่ต้องการกำจัดน้ำออกจากตะกอนที่ผ่านการย่อยสลายแล้วก่อนจะนำไปผ่านขั้นตอนต่อไปหรือนำไปทิ้ง สามารถทำได้ง่ายขึ้น เนื่องจากเกิดการแยกแหว่งวัฏภาคของแข็งกับของเหลวเกิดขึ้นได้ดี

ปัญหาในการทำงานของระบบหมักที่อุณหภูมิสูง นอกจากจะต้องการพลังงานจำนวนมาก เพื่อให้อุณหภูมิของระบบสูงถึง 50-60 องศาเซลเซียส แล้ว ข้อเสียอื่นๆ ได้แก่ น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจะมีปริมาณสารละลายปนอยู่สูง ปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำเสียที่ออกจากระบบสูงขึ้นซึ่งปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับช่วงเวลาในการเริ่มต้นการทำงานของระบบ ถ้าในช่วงเวลาเริ่มต้นนานปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำที่ออกจากระบบส่วนใหญ่จะมีค่าต่ำกว่าและปัญหาที่สำคัญที่สุดคือ เสถียรภาพของระบบหมักจะไม่ค่อยดี เนื่องจากมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม เช่น พีเอช อุณหภูมิและอื่นๆของจุลินทรีย์ ในระบบที่อุณหภูมิสูงทำให้จุลินทรีย์บางส่วนตายลง เป็นผลทำให้ความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงภาวะต่างๆลดลง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานในช่วงอุณหภูมิปานกลาง พบว่าเสถียรภาพของระบบดีกว่าที่อุณหภูมิสูง

2.7.3 สารอาหาร (nutrients)

โดยทั่วไปแบคทีเรียนอกจากต้องการสารอาหารหลักในการเจริญเติบโตแล้ว ยังต้องการธาตุอาหารอื่นเพื่อช่วยในการสร้างเซลล์ใหม่ด้วย ธาตุอาหารที่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียมาก ได้แก่ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส จากโครงสร้างของเซลล์แบคทีเรียเป็น $C_2H_7O_2N$ มีองค์ประกอบของไนโตรเจนประมาณ 12% ของน้ำหนักเซลล์แห้งและมีความต้องการฟอสฟอรัสประมาณ 1/7 - 1/5 ของไนโตรเจนอัตราส่วนที่เหมาะสมในระบบหมักควรมีอัตราส่วน COD : N : P เป็น 100 : 2 : 0.4 หรือ BOD : N : P เป็น 100 : 1.1 : 0.2 ถ้ามีธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่ำกว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมนี้ ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์และการผลิตแก๊สชีวภาพจะลดต่ำลง ในทางตรงกันข้ามถ้ามีปริมาณธาตุไนโตรเจนมากเกินไปจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียหรือเปลี่ยนแปลงสภาพแบคทีเรียได้ เช่น ทำให้ตะกอนของแบคทีเรียมีน้ำหนักเบาถึงปฏิกิริยามีโอกาสสูญเสียชีวมวลได้มากขึ้น ส่วนฟอสฟอรัสพบว่าถ้ามีการขาดฟอสฟอรัสทำให้อัตราส่วนของจุลินทรีย์ลดลงถึง 50% แต่ถ้ามีมากเกินไปก็ไม่มีประโยชน์ทั้งต่อประสิทธิภาพของถังและกิจกรรมของจุลินทรีย์ นอกจากจะไปเพิ่มความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งขาออกเท่านั้น

นอกจากนี้ยังมี trace element ที่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มเมทาโนเจน ได้แก่ Ni, Co, Fe, Cu, Mg, Ca, Na, Br, Se, S, K และ Mo ซึ่งมีความสำคัญต่อการเกิดฟิล์มชีวภาพและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์แต่แบคทีเรียต้องการในปริมาณน้อยมากในทางปฏิบัติจะคำนึงถึงปริมาณธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเท่านั้น ถ้าตรวจวิเคราะห์ว่ามีไม่เพียงพอจำเป็นต้องเติมสารสองชนิดดังกล่าวให้เพียงพอ

2.7.4 ความเค็ม (salinity)

ความเค็มมีผลต่อการเจริญของจุลินทรีย์ในกลุ่มเมทาโนเจนปริมาณโซเดียมคลอไรด์มีส่วนช่วยในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในกลุ่มนี้ประมาณ 2 โมลาร์ แต่ถ้ามีสูงเกินไปจะมีผลยับยั้งการเจริญ

2.7.5 ค่าพีเอช (pH)

ค่าพีเอชมีความสำคัญต่อการทำงานของจุลินทรีย์ เนื่องจากพีเอชมีผลต่อกิจกรรมของเอนไซม์ซึ่งเอนไซม์แต่ละตัวทำงานได้ดีในช่วงพีเอชแคบๆ และมีกิจกรรมสูงสุดที่พีเอชที่เหมาะสมดังนั้นจุลินทรีย์แต่ละชนิดจึงมีช่วงพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตและเมแทบอลิซึมแตกต่างกันไป สรุปได้ดังนี้

2.7.5.1 hydrolytic bacteria แบคทีเรียประเภทนี้เจริญเติบโตได้ดีที่ระดับพีเอชที่เป็นกลาง สามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับพีเอช และสามารถทนได้ถึงระดับพีเอชต่ำๆที่พีเอช 4.5

2.7.5.2 acidogenic bacteria แบคทีเรียประเภทนี้มีลักษณะคล้ายคลึงกับกลุ่ม Hydrolytic Bacteria เช่น จุลินทรีย์กลุ่มที่ผลิตกรด (ผลิตแก๊สไฮโดรเจน) มีความต้องการพีเอชอยู่ในช่วง 4.0-6.0

2.7.5.3 methanogenic bacteria แบคทีเรียประเภทนี้เจริญเติบโตได้ดีในระดับพีเอชเป็นกลางให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมประมาณ 6.5-7.5 (Archer and Kirsop, 1991) ถ้าพีเอช มีค่าสูงหรือต่ำกว่านี้ประสิทธิภาพของระบบจะลดลง และถ้า พีเอช มีค่าต่ำกว่า 6.2 ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงตัวอย่างรวดเร็ว เพราะที่ภาวะนี้จะเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียพวกที่สร้างแก๊สมีเทน

2.7.6 สารพิษ (toxic substance) หรือสารยับยั้ง

ในถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนนั้นจะต้องไม่มีสารที่เป็นพิษต่อแบคทีเรียเนื่องจากแบคทีเรียเป็นสิ่งสำคัญในการย่อยสลายสารอินทรีย์ แต่บางครั้งสารอาหารที่ใส่เข้าไปเพื่อช่วยในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ มีการสะสมอยู่ในปริมาณมากเกินไปอาจทำให้เป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ ซึ่งระดับความเป็นพิษจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารนั้นๆ สารที่เป็นพิษต่อการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนได้แก่ สารประกอบของโลหะซึ่งธาตุที่มีน้ำหนักอะตอมและอ็อกซิเจนที่ valency สูงจะมีความเป็นพิษสูงกว่าธาตุที่มีน้ำหนักอะตอมและอ็อกซิเจนที่ valency ต่ำกว่า สามารถเรียงลำดับความเป็นพิษจากน้อยไปหามากได้ดังนี้

โซเดียม>แอมโมเนีย>โปแตสเซียม>แคลเซียม>แมกนีเซียม

นอกจากนี้สารที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นวงแหวนซึ่งจุลินทรีย์ย่อยสลายไม่ได้ ถ้ามีอยู่ในระบบมากเกินไปจะทำให้เป็นพิษต่อแบคทีเรียได้เช่นกัน

ปริมาณซัลเฟตในระบบก็มีผลต่อการดำรงชีวิตของแบคทีเรียในกลุ่ม เมทาโนเจน เพราะทำให้มีการแข่งขันการใช้อาหารระหว่างแบคทีเรียพวก sulfate-reducing bacteria และ เมทาโนเจน ถ้ามีซัลเฟตสูงๆจะไปกระตุ้นการเกิดกิจกรรมของพวก sulfate-reducing bacteria และผลิตไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกมา ส่งผลยับยั้งการเจริญของพวก เมทาโนเจน ทำให้การผลิตมีเทนในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนลดลง

ในภาวะการทำงานจริงปรากฏว่าน้ำเสียที่มีปริมาณสารพิษหลายชนิดปะปนอยู่และมีปริมาณสูงแต่น้ำเสียดังกล่าวยังสามารถถูกย่อยสลายในภาวะไร้ออกซิเจนได้โดยไม่แสดงความเป็นพิษเห็นเด่นชัด ทั้งนี้เนื่องจากในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนนี้มีปฏิกิริยาเกิดขึ้นมากมาย เช่น การตกตะกอนของสารพิษ การถูกทำลายเปลี่ยนแปลงไปเป็นสารรูปอื่นและการรวมตัวของอิออนต่างๆจึงเกิดสภาพลดหรือเสริมความเป็นพิษนอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับค่าพีเอชในระบบหมักอีกด้วย

1) พิษของอิออนบวกและโลหะหนัก

อิออนบวกที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนได้แก่ โซเดียม โปแทสเซียม แมกนีเซียมและแคลเซียม ซึ่งธาตุเหล่านี้โดยปกติระดับความเข้มข้นที่พอเหมาะจะเป็นธาตุที่มีประโยชน์ต่อแบคทีเรีย แต่ถ้ามีมากเกินไปความจำเป็นจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ปกติอิออนบวกที่มีวาเลนซ์สูงจะมีความเป็นพิษมากกว่าอิออนบวกที่มีวาเลนซ์ต่ำ สารพิษเหล่านี้มีผลยับยั้งการสร้างแก๊สมีเทนเมื่อมีปริมาณมากเกินไป

2) พิษของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย

กรดอินทรีย์ระเหยง่ายถ้าถูกสร้างขึ้นมามากเกินไป เช่น ในภาวะที่มีสารอินทรีย์ หรืออาหารเข้ามามากแบคทีเรียที่ผลิตกรดออกมามาก หากว่าระบบมีบัฟเฟอร์ไม่เพียงพอจะทำให้ค่าพีเอชของระบบลดลงส่งผลต่อการทำงานของแบคทีเรียผลิตมีเทนได้

3) พิษของแอมโมเนีย

แอมโมเนียที่เกิดขึ้นในน้ำเสียของระบบไม่ใช้ออกซิเจน มาจากการย่อยสลายพวกโปรตีนโดยไนโตรเจนที่ปล่อยออกมาจะอยู่ในรูปของแอมโมเนียมอิออน และแอมโมเนีย

โดยปริมาณของแอมโมเนียมอิออนนี้ขึ้นอยู่กับค่าพีเอช คือ ที่พีเอชประมาณ 7 ความเข้มข้นของแอมโมเนียจะมีประมาณ 1 % ของแอมโมเนียทั้งหมด โดยจะมีค่าความเข้มข้น

ของแอมโมเนียมไอออน 99% แต่ถ้าพีเอชสูงขึ้นปฏิกิริยาจะไปทางขวามือมากขึ้นทำให้เกิดแอมโมเนียมากขึ้น ซึ่งความเข้มข้นที่เป็นพิษต่อแบคทีเรียคือมากกว่า 150 มก./ล. ในขณะที่แบคทีเรียสามารถทนความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนได้สูงถึง 3,000 มก./ล. ดังนั้นการรักษา พีเอชให้มีค่าประมาณ 7 หรือ ต่ำกว่าจะทำให้แอมโมเนียทั้งหมดอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออน ซึ่งเป็นพิษต่อระบบน้อยกว่า

2.7.7 การรักษาปริมาณจุลินทรีย์ในระบบ

การรักษาปริมาณจุลินทรีย์ให้คงอยู่ในระบบ (ถังยูเอเอสบี) เป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งของระบบอุปกรณ์แยกแก๊ส-ตะกอนแขวนลอย เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในการรักษาปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ให้คงอยู่ในระบบ ดังนั้นการออกแบบอุปกรณ์ให้ถูกต้องเหมาะสมตรงตามวัตถุประสงค์จึงเป็นเรื่องสำคัญการออกแบบอุปกรณ์แยกแก๊ส-ตะกอนแขวนลอยต้องพิจารณาถึงสมบัติของน้ำเสีย ชนิดของตะกอนจุลินทรีย์ที่ปรากฏในระบบ อัตราบรรทุกสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบ ปริมาณแก๊สชีวภาพที่คาดว่าจะเกิดขึ้น ขนาดและรูปร่างของถังยูเอเอสบี

2.8 ระบบ UASB (สมชาย, 2536)

2.8.1 ความเป็นมาของระบบ UASB

โครงการพัฒนาระบบ UASB (upflow anaerobic sludge blanket) เริ่มต้นในปี 1970 โดยได้รับการสนับสนุนจากกระทรวงสาธารณสุขและสิ่งแวดล้อมของรัฐบาลเนเธอร์แลนด์ ซึ่งดำเนินการวิจัยร่วมกับกลุ่มวิจัยของ Central-Suiker และ Maats-chappij (CSM) และมหาวิทยาลัย Delft University of Technology รวมถึงมหาลัย Wageningen และ Amsterdam ผลการวิจัยและพัฒนาในช่วงปี 1974 ถึง 1977 นำมาซึ่งการเริ่มต้นก่อสร้างถังปฏิกิริยาในชั้นโรงงานต้นแบบและในปี 1978 ถังปฏิกิริยา UASB ก็เริ่มถูกนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์โดยถูกใช้เพื่อบำบัดน้ำเสียจากโรงงานน้ำตาล ซึ่งมีประสิทธิภาพการลดสารอินทรีย์ได้ถึงร้อยละ 88 ปัจจุบันถังปฏิกิริยา UASB ทำหน้าที่ลดปัญหามลพิษมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง

2.8.2 หลักการทำงานของระบบ UASB

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบ UASB เป็นระบบบำบัดที่มีการฉีดพ่นน้ำเสียจากด้านล่างของถังปฏิกิริยาขึ้นสู่ด้านบนโดยไม่ใช้ตัวกลางหรือวัสดุใดๆในการพองมวลชีวภาพทั้งสิ้น องค์ประกอบหลักของถังปฏิกิริยาประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

2.8.2.1 ส่วนของตะกอนชั้นล่าง (sludge bed) เป็นชั้นของตะกอนจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการตกตะกอนสูง และมีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้สูง

2.8.2.2 ส่วนของชั้นตะกอนลอย (sludge blanket) เป็นชั้นที่ตะกอนจุลินทรีย์ลอยฟุ้งกระจายเนื่องจากแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกริยา

2.8.2.3 ส่วนของอุปกรณ์แยกตะกอนชีวภาพและแก๊สชีวภาพ (gas-solids separator: GSS) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แยกแก๊สชีวภาพออกจากของผสมระหว่างแก๊สชีวภาพน้ำและตะกอนจุลินทรีย์ ซึ่งตะกอนจุลินทรีย์ที่ถูกแยกจะไหลเข้าสู่ส่วนแยกตะกอนและแก๊สชีวภาพจะถูกรวบรวมเพื่อนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานต่อไป

2.8.2.4 ส่วนของอุปกรณ์ในการตกตะกอน (settlement compartment) ในส่วนของอุปกรณ์นี้จะสร้างภาวะที่เอื้ออำนวยต่อการตกตะกอนของตะกอนจุลินทรีย์ น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วและแยกแก๊สชีวภาพออกไปจะเป็นของผสมระหว่างน้ำเสียที่มีสารมลพิษต่ำและตะกอนชีวภาพซึ่งเมื่อน้ำเสียส่วนนี้ไหลมาถึงอุปกรณ์นี้ตะกอนจุลินทรีย์ส่วนใหญ่จะแยกตัวและตกตะกอนลงสู่ส่วนล่างของถังปฏิกริยา ส่วนตะกอนชีวภาพที่มีน้ำหนักเบาจะไหลปะปนไปกับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว

รูปแบบการทำงานที่ง่ายของระบบ UASB เมื่อเปรียบเทียบกับถังหมักอื่นๆ แล้วระบบ UASB เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง รองรับอัตราการรับภาระสารอินทรีย์ได้สูง และค่าก่อสร้างระบบต่ำเนื่องจากไม่ต้องใช้ตัวกลางเพื่อให้แบคทีเรียเกาะจับ ไม่ต้องมีอุปกรณ์ในการกวน และไม่ต้องมีถังตกตะกอน แต่จุดด้อยของระบบ UASB ที่สำคัญ คือ ความยุ่งยากและซับซ้อนในการเริ่มต้นเดินระบบ (start Up) คือ การสร้างเม็ดจุลินทรีย์ที่มีน้ำหนักสูงให้เกิดภายในถังปฏิกริยา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปัญหาของระบบ UASB

ปัญหาต่างๆที่พบเมื่อใช้ตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นที่ยังไม่คุ้นเคยกับระบบ UASB มีดังนี้

- ระยะเวลา เนื่องจากจุลินทรีย์พวกที่ไม่ใช้ออกซิเจนจะมีการเจริญเติบโตที่ช้ามาก ดังนั้นในช่วงเริ่มต้นเดินระบบจึงต้องใช้เวลามาก นอกจากนี้ยังมีปัจจัยต่างๆที่จะส่งผลให้การเจริญเติบโตยิ่งช้ามากขึ้น เช่น สารยับยั้ง
- ความสามารถของตะกอนจุลินทรีย์ (methanogenic activity) การเลือกตะกอนจุลินทรีย์ เริ่มต้นเดินระบบจึงต้องใช้เวลามาก นอกจากนี้ยังมีปัจจัยต่างๆที่ส่งผลให้การเจริญเติบโตยิ่งช้ามากขึ้น เช่น สารยับยั้งต่างๆ
- ธรรมชาติของตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้น ในทางทฤษฎีแล้วตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นที่มีจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนเกาะอยู่บนตัวกลางสามารถที่จะนำมาใช้กับระบบ UASB ได้ เช่น ตะกอนโคลนตมน้ำจืด
- ระยะเวลา lag phase เมื่อใช้ตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นที่ยังไม่คุ้นเคยกับน้ำเสียจะเกิด lag phase ซึ่งระยะนี้จะสั้นหรือยาวขึ้นกับปริมาณของตะกอนจุลินทรีย์ที่มีความ active การกวนผสม และความเข้มข้นของน้ำเสียในระยะเริ่มต้น
- การเพิ่มจุลินทรีย์ (growth yield) ปริมาณในการเพิ่มขึ้นของตะกอนจุลินทรีย์จะมีผลต่อความยาวนานของระยะเวลาในการเริ่มต้นเดินระบบแต่การเพิ่มปริมาณของพวกตะกอนจุลินทรีย์จะขึ้นกับธรรมชาติของอาหารและปัจจัยทางภาวะแวดล้อม ดังนั้นปัจจัยทางภาวะแวดล้อมและของอาหารจึงเป็นปัญหาหนึ่งในการเริ่มเดินระบบ

นอกจากปัญหาในการเริ่มต้นเดินระบบของระบบ UASB แล้วระบบ UASB ยังมีข้อดีข้อเสียต่างๆซึ่งสามารถแสดงเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ข้อดีและข้อเสียของระบบ UASB

ข้อดี	ข้อเสีย
1. สามารถรับสารอินทรีย์ได้สูงกว่าระบบไร้อากาศแบบอื่นๆ 1-2 เท่า	1. ต้องใช้เวลาในการ start-up ระบบค่อนข้างนาน
2. ใช้พลังงานต่ำ	2. ต้องการระบบน้ำเสียที่ต่อเนื่องเพื่อลดความเข้มข้นของสารอินทรีย์
3. ค่าก่อสร้างต่ำ-ใช้พื้นที่น้อย	3. ต้องเลี้ยงจุลินทรีย์ให้จับตัวเป็นเม็ด มิฉะนั้นจะด้อยประสิทธิภาพ
4. ลดการลงทุนเรื่องเครื่องเติมอากาศ	4. ต้องรักษาตะกอนจุลินทรีย์ในระบบให้เหมาะสมและควบคุมการล้างออก
5. การเกิดตะกอนจุลินทรีย์ส่วนเกินน้อยมาก	5. เมื่อสูญเสียตะกอนจุลินทรีย์ออกจากระบบทำให้อัตรากาารเจริญทดแทนไม่ทัน อัตราการรับสารอินทรีย์จึงไม่สูงขึ้น
6. ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบต่ำ	6. ต้องการอัตราการผลิตแก๊สชีวภาพที่เหมาะสม
7. ต้องการธาตุอาหารเสริมน้อยมาก	7. ต้องการวิธีการเริ่มต้นเดินระบบที่ถูกต้อง
8. ไม่ต้องใช้สารตัวกลาง ทำให้ลดค่าใช้จ่าย	8. ค่า know-how ของระบบค่อนข้างสูง
9. ได้ผลผลิตแก๊สชีวภาพที่เป็นเชื้อเพลิง	9. ต้องมีระบบบำบัดเติมอากาศตามหลัง

2.9 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในภาวะไม่ใช้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน โดยระบบ UASB (two-stage anaerobic digestion) [อาริยา, (2543)]

2.9.1 ระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้ภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

เนื่องมาจากภาวะที่เหมาะสม (optimum condition) มีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียพวกสร้างกรดและแบคทีเรียสร้างแก๊สมีเทนมีความแตกต่างกัน เช่น แบคทีเรียพวกสร้างกรดเจริญได้ดีที่พีเอชต่ำและระยะเวลาเก็บกักน้อยซึ่งจะไปยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียพวกสร้างมีเทนทำให้จุลินทรีย์ทั้งสองกลุ่มทำงานได้ไม่เต็มที่ ทำให้ประสิทธิภาพของระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่ำภายใต้ภาวะไร้ออกซิเจนแบบขั้นตอนเดียว ต่อมาได้มีการพัฒนาระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้ภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนขึ้น โดยวิธีการแยกกลุ่มจุลินทรีย์ทั้งสองออกจากกันและจัดให้มีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในแต่ละกลุ่มเพื่อให้จุลินทรีย์ในแต่ละกลุ่มนั้นสามารถที่จะทำงานได้อย่างเต็มที่ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบทำให้ระบบสามารถทำงานได้ดีมากขึ้น (Ince, 1998) วิธีการที่จะใช้ในการแยกกลุ่มจุลินทรีย์มีหลายวิธี เช่น การแยกด้วยเมมเบรน (membrane separation) การควบคุมจลศาสตร์ (kinetic control) และการควบคุมพีเอช (pH control) แต่วิธีที่นิยมใช้คือการควบคุมจลศาสตร์ร่วมกับการควบคุมพีเอช

ระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้ภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนประกอบด้วยถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนอย่างทั่วถึง (completely mixed) ซึ่งสองถังแยกจากกันโดยเรียงต่อกันแบบอนุกรม ถังหนึ่งใช้สำหรับการสร้างกรด ขณะที่อีกถังหนึ่งใช้สำหรับการสร้างแก๊สมีเทนโดยที่สภาพแวดล้อมในถังใบแรกจะมีสภาพที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียประเภทที่สร้างกรดขณะที่ถังใบที่สองซึ่งรับผลผลิตมาจากถังใบแรกออกแบบให้เกิดภาวะที่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียพวกสร้างแก๊สมีเทน

เนื่องจากกรดอินทรีย์ระเหยเป็นผลผลิตหลักของขั้นตอนแรก ดังนั้นการควบคุมพีเอชในขั้นที่สองเป็นสิ่งจำเป็นเมื่อความสามารถของบัฟเฟอร์เกินขีดจำกัด ซึ่งการควบคุมภายในถังหมักแก๊สมีเทนอาจทำได้โดยการทำให้สารอินทรีย์ที่จะเข้าถังหมักเป็นกลางโดยการปรับค่าพีเอช หรือให้มีการเวียนกลับของส่วนเกินที่ออกจากขั้นตอนที่สอง

2.9.2 ข้อดีและข้อเสียของระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้ภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

ข้อดีของระบบย่อยสลายภายใต้ภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

- สามารถที่จะดำรงอยู่ได้ในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมที่สุด (optimum condition) สำหรับจุลินทรีย์แต่ละกลุ่มในถังหมัก
- สามารถลดขนาดของถังหมัก และทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง รวมถึงการควบคุมดูแลรักษา
- แบคทีเรียพวกสร้างกรดในขั้นแรกสามารถเจริญเติบโตได้อย่างเต็มที่โดยไม่มีผลไปรบกวนแบคทีเรียพวกสร้างแก๊สมีเทน
- มีอัตราการทำให้ของแข็งคงสภาพ (solid stabilization) สูง และอัตราของผลผลิตแก๊สชีวภาพขั้นสุดท้ายมีเปอร์เซ็นต์แก๊สมีเทนสูง
- ประสิทธิภาพการลดลงของของแข็งแขวนลอยสูง
- เหมาะสำหรับการติดตั้งร่วมกับระบบบำบัดที่มีอยู่แล้ว โดยมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนต่ำ
- สารพิษที่มีผลต่อแบคทีเรียพวกสร้างแก๊สเช่น แอมโมเนีย กรดไขมันสายยาว และซัลไฟด์ จะถูกกำจัดในขั้นตอนแรกโดยแบคทีเรียพวกสร้างกรด
- ลดปัญหาการสูญเสียแบคทีเรียพวกสร้างแก๊สลง ซึ่งปัญหานี้มีผลมาจากการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของแบคทีเรียพวกสร้างกรด
- ในถังหมักกรดที่มีการกวนผสมที่ดี จะเอื้ออำนวยต่อการควบคุมค่าพีเอชของถังหมักกรดและรวมไปถึงการกำจัดจุลินทรีย์ส่วนเกินหรือที่ตายแล้วออกจากระบบ

ข้อเสียของระบบย่อยสลายภายใต้ภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

- ต้องอาศัยความชำนาญในการควบคุมระบบและต้องเพิ่มเครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆในการวัดและตรวจสอบควบคุมระบบ
- การควบคุมค่าพีเอชของแต่ละระบบให้มีค่าคงที่เป็นสิ่งที่จำเป็น เนื่องจากการผลิตกรดจะถูกแยกออกจากการใช้กรด
- อาจมีการแพร่กระจายของจุลินทรีย์ชนิดหมักกรดเข้าไปในถังหมักมีเทน
- ความไม่เสถียรภาพของระบบอาจเกิดขึ้นเมื่อมีการสะสมของไฮโดรเจนในถังหมักกรดทำให้เกิดความหลากหลายของการผลิตกรดไขมันระเหย เปลี่ยนจากกรดอะซิติกเป็นกรดไขมันระเหยที่มีสายโซ่ยาวขึ้น
- ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและควบคุมระบบสูง

2.9.3 เทคนิคในการแยกวัฏภาคออกเป็นสองขั้นตอน

จุดประสงค์การแยกออกเป็นสองวัฏภาคการสร้างกรดไขมันระเหยและวัฏภาคการสร้างมีเทนเพื่อให้มีแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดและสร้างมีเทนในปริมาณที่พอเหมาะในถังหมักแต่ละถังเพื่อให้อัตราการสร้างกรดและการผลิตแก๊สชีวภาพสูงสุด โดยการควบคุมถังหมักแต่ละถังแยกจากกัน อย่างไรก็ตามในถังหมักกรดไม่มีแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนอยู่แต่ในทางกลับกันในถังหมักมีเทนยังคงมีแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดร่วมอยู่ด้วย แต่มิได้เป็นแบคทีเรียที่มีบทบาทสำคัญในถังหมักกรดและถังหมักมีเทนตามลำดับแต่เทคนิคที่เหมาะสมที่สุด คือ การควบคุมอัตราการป้อนสารอินทรีย์โดยการใช้อัตราการป้อนสารอินทรีย์ในถังหมักกรดสูง (ระยะเวลาพักเก็บน้ำเสียน้ำ) ส่วนในถังหมักมีเทนนั้นให้อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่ำกว่าในถังหมักกรด (ระยะเวลาพักเก็บน้ำเสียนานกว่า)

2.9.4 ลักษณะการทำงานของระบบหมักแบบสองขั้นตอน

เนื่องจากความแตกต่างในลักษณะการเจริญเติบโต อาหารที่ต้องการและภาวะในการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดและสร้างมีเทน จึงต้องมีการแยกการย่อยออกเป็น 2 ขั้นตอน ในระบบประกอบด้วยถังหมักจำนวน 2 ถัง ต่ออนุกรมกันโดยในแต่ละถังจะมีการกวนผสมอย่างดีและมีการควบคุมภาวะต่างๆรวมทั้งอัตราการป้อนสารอินทรีย์ให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในแต่ละกลุ่มเพื่อให้แบคทีเรียทั้งสองกลุ่มสามารถทำงานได้ดีขึ้นเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ โดยในถังแรกหรือถังหมักกรดจะควบคุมภาวะให้เหมาะสมสำหรับการเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรด เกิดการย่อยสลายในขั้นตอน ไฮโดรไลซิสและการสร้างกรดได้กรดไขมันระเหยเป็นผลิตภัณฑ์ และแก๊สไฮโดรเจน ส่วนในถังหมักที่สองหรือถังหมักมีเทนมีการควบคุมภาวะให้เหมาะสมสำหรับการเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในขั้นตอนการสร้างแก๊สมีเทนโดยใช้กรดไขมันระเหยจากถังหมักกรดเป็นอาหารของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนได้แก๊สชีวภาพ ซึ่งประกอบด้วยแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ ตะกอนแบคทีเรียที่ออกจากถังหมักกรดจะถูกนำกลับมาใช้ในถังหมักมีเทนอีก

เนื่องจากในขั้นตอนแรกได้กรดไขมันระเหยเป็นผลิตภัณฑ์ ในบางครั้งจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมค่าพีเอชในถังหมักมีเทน มิฉะนั้นถ้าค่าพีเอชต่ำเกินไปจะมีผลไปยังการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนได้ การควบคุมพีเอชสามารถทำได้โดยการเติมสารเคมี เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ ลงในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ อย่างไรก็ตามการปรับค่าพีเอชโดยการเติมสารเคมีนั้นไม่เหมาะสมเพราะนอกจากต้องเสียค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีแล้วยังอาจทำให้ค่า

พีเอชของน้ำเสียที่เข้าสู่ถังหมักมีเทนสูงเกินไปซึ่งมีผลไปยังการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนด้วยเช่นกันดังที่จะกล่าวต่อไปนี้

1. **ถังหมักกรด** เกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนไฮโดรไลซิสและการสร้างกรดอินทรีย์เป็นสำคัญผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่ คือ กรดไขมันระเหย ซึ่งองค์ประกอบของไขมันระเหยที่ได้ขึ้นอยู่กับภาวะในการทำงาน โดยทั่วไปกรดไขมันระเหยที่ได้จากปฏิกิริยาในขั้นตอนการสร้างกรดอินทรีย์ประกอบด้วย กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทิริก เป็นส่วนใหญ่และมีกรดไขมันระเหยโมเลกุลสูงอื่นๆ เช่น กรดวาเลริก และกรดคาร์โบโรอิก บ้างเล็กน้อยในขั้นตอนหมักกรดนั้นจะมีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อปฏิกิริยาการสร้างแก๊สมีเทนถูกยับยั้ง โดยการใช้ระยะเวลาที่เก็บสั้นและอัตราการป้อนสารอินทรีย์สูงๆ การลดระยะเวลาที่เก็บลงจะเป็นผลให้สัดส่วนของกรดไขมันระเหยที่มีโมเลกุลสูงในผลิตภัณฑ์สูงขึ้นด้วย ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดอยู่ในช่วงที่เป็นกรด 4.0-6.5 โดยไม่สูญเสียประสิทธิภาพในการทำงาน

2. **ถังหมักมีเทน** เกิดปฏิกิริยาการสร้างแก๊สมีเทนซึ่งมีปฏิกิริยาหลัก 2 ปฏิกิริยา คือเกิดจากปฏิกิริยาของกรดอินทรีย์จากถังหมักกรดกับแบคทีเรียได้มีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ และเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับไฮโดรเจนได้มีเทนและน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาการสร้างแก๊สมีเทนนั้นช้ากว่าในขั้นตอนไฮโดรไลซิสและการสร้างกรดอินทรีย์มาก ในการทำงานจึงต้องใช้ถังหมักขนาดใหญ่กว่าระยะเวลาที่เก็บนานกว่าในถังหมักกรด ปฏิกิริยาต่างๆในถังหมักมีเทนสามารถดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่องเนื่องจากผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นแก๊สซึ่งจะถูกดึงออกจากถังหมักตลอดเวลา สำหรับแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนในถังหมักมีเทนนั้นควรใช้แบคทีเรียหลายชนิดรวมกัน เนื่องจากแบคทีเรียแต่ละชนิดมีข้อจำกัดในการย่อยสลายกรดอินทรีย์ที่แตกต่างกัน แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชสูง ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องควบคุมค่าพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เป็นกลางเสมอ

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 ถังปฏิกรณ์ระบบไร้อากาศแบบยูเอเอสพีจำนวน 2 ถัง

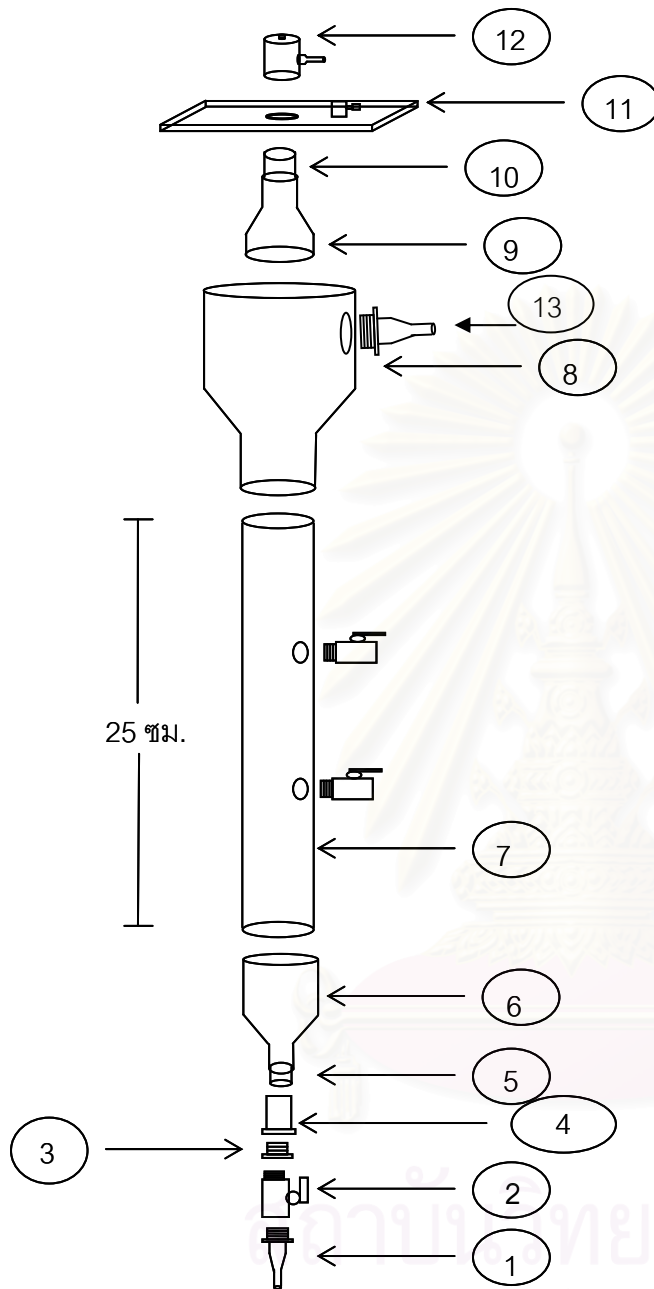
ถังปฏิกรณ์ถังที่ 1 (สำหรับผลิตแก๊สไฮโดรเจน)

ตัวถังประกอบด้วยท่ออะคริลิกใส เบอร์ 603 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 54 มิลลิเมตร สูง 25 เซนติเมตร ด้านบนของถัง จะต่อเข้ากับข้อต่อพีวีซีขนาด 4×2 นิ้ว เพื่อเป็นส่วนเก็บแก๊สของถัง และปิดด้วยแผ่นพลาสติกอะคริลิกใส หนา 8 มิลลิเมตร ยึดติดกับตัวถังด้วยน็อต ด้านล่างจะต่อกับ ข้อต่อพีวีซีขนาด $2 \times \frac{1}{2}$ ปริมาตรของถัง เท่ากับ 1 ลิตร โดยด้านข้างของถังมีการเจาะรู 2 รู เพื่อใช้ในการเก็บตัวอย่าง โดยแต่ละรูมีระยะห่างกันเท่ากับ 6.25 เซนติเมตร ส่วนของตัวถังที่เหลือประกอบด้วยข้อต่อ พีวีซี ข้อต่อทองเหลือง และสายยาง รายละเอียดตามภาพที่ 3.1

ถังปฏิกรณ์ถังที่ 2 (สำหรับผลิตแก๊สมีเทน)

ส่วนประกอบถังเหมือนกับถังที่ 1 แต่ความสูงถังเท่ากับ 50 เซนติเมตร ปริมาตรเท่ากับ 1.5 ลิตร โดยด้านข้างของถังมีการเจาะรู 4 รู เพื่อใช้ในการเก็บตัวอย่าง โดยแต่ละรูมีระยะห่างกันเท่ากับ 10 เซนติเมตร ตามภาพที่ 3.2

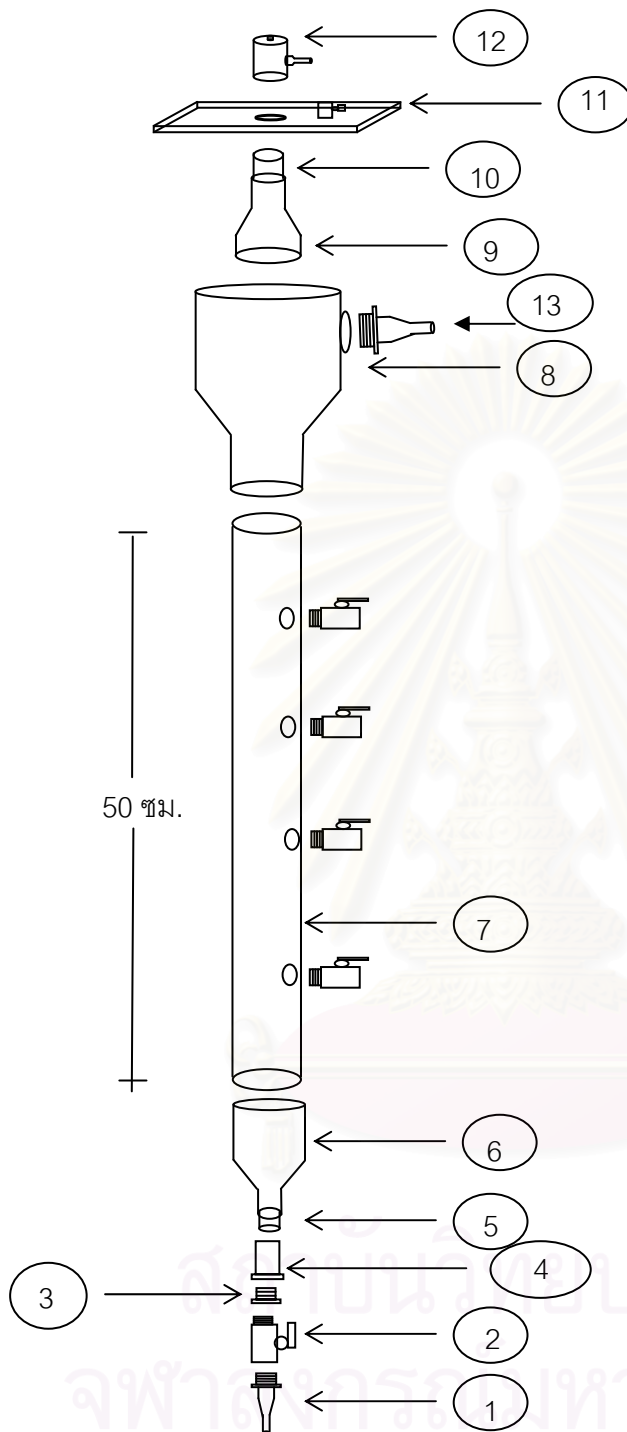
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ส่วนประกอบ

1. ข้อต่อสายยางทองเหลือง
ขนาด ¼ นิ้ว
2. บอลล์วาล์วขนาด ¼ นิ้ว
3. นิปเปิดทองเหลืองขนาด
¼ × ½ นิ้ว
4. ข้อต่อพีวีซีเกลียวใน
ทองเหลืองขนาด ½ นิ้ว
5. ท่อพีวีซีขนาด ½ นิ้ว
6. ข้อต่อตรงลดขนาด 2 × ½ นิ้ว
7. ท่ออะคริลิกใส เบอร์ 603
- เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 60 มม.
- เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 54 มม.
8. ข้อต่อตรงลดขนาด 4 × 2 นิ้ว
9. ข้อต่อตรงลดขนาด 2 × 1 นิ้ว
10. ท่อพีวีซีขนาด 1 นิ้ว
11. ฝาบนแผ่นพลาสติกใสหนา 3 มม.
12. หัวอุดท่อพีวีซีขนาด 1 นิ้ว
13. ข้อต่อสายยางขนาด ½ นิ้ว

ภาพที่ 3.1 ส่วนประกอบถังปฏิกรณ์ยูเอเอสพีถังที่ 1



ส่วนประกอบ

1. ข้อต่อสายยางทองเหลือง
ขนาด $\frac{1}{4}$ นิ้ว
2. บอลล์วาล์วขนาด $\frac{1}{4}$ นิ้ว
3. นิปเปิ้ลทองเหลือง
ขนาด $\frac{1}{4} \times \frac{1}{2}$ นิ้ว
4. ข้อต่อพีวีซีเกลียวในทองเหลือง
ขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว
5. ท่อพีวีซีขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว
6. ข้อต่อตรงลดขนาด $2 \times \frac{1}{2}$ นิ้ว
7. ท่ออะคริลิคใส เบอร์ 603
- เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 60 มม.
- เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 54 มม.
8. ข้อต่อตรงลดขนาด 4×2 นิ้ว
9. ข้อต่อตรงลดขนาด 2×1 นิ้ว
10. ท่อพีวีซีขนาด 1 นิ้ว
11. ฝาบนแผ่นพลาสติกใสหนา 3 มม.
12. หัวดูดท่อพีวีซีขนาด 1 นิ้ว
13. ข้อต่อสายยางขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว

ภาพที่ 3.2 ส่วนประกอบถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีดังที่ 2

3.1.2 ถังเตรียมน้ำเสีย

ถังที่ใช้เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เป็นขวดแก้วปริมาตร 10 ลิตร (SCHOTT DURAN) ที่ฝาขวดอุดด้วยจุกยางซิลิโคนและสายยางซิลิโคน ดังภาพที่ 3.3 และ 3.4



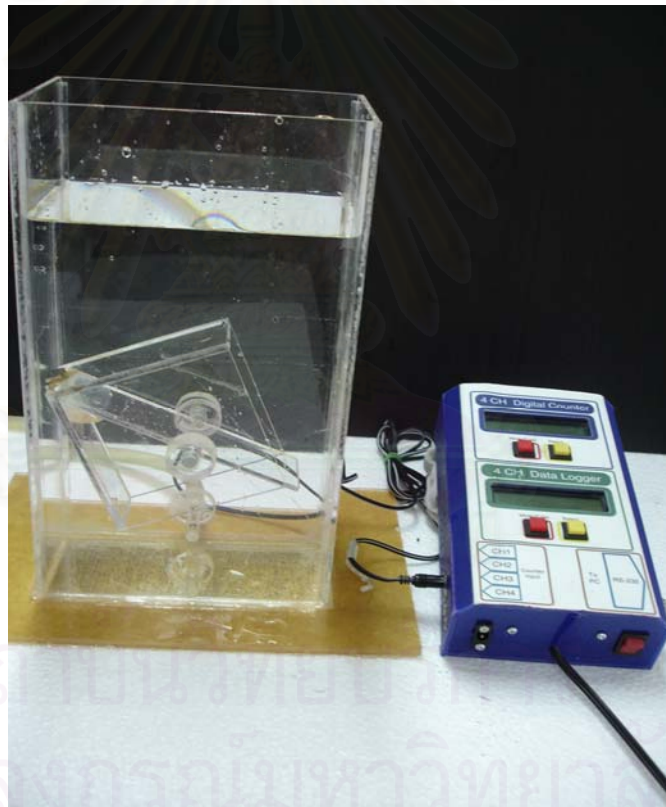
ภาพที่ 3.3 ถังเตรียมน้ำเสีย



ภาพที่ 3.4 จุกยางซิลิโคน พร้อมสายยาง

3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปริมาตรแก๊ส

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปริมาตรแก๊สทำจากอะคริลิคใสขนาด 16×10×30 เซนติเมตร ภายในมีแผ่นอะคริลิคขนาด 10×10×5.2 เซนติเมตร ซึ่งมีแกนกลางสามารถหมุนพลิกไปมาได้ (ภาพที่ 3.5) จากนั้นทำการเติมน้ำให้ได้ระดับที่ทำให้เครื่องวัดปริมาตรแก๊สอ่านค่าที่ 50 มิลลิลิตร ซึ่งอุปกรณ์นี้จะใช้หลักการแทนที่น้ำ เมื่อเกิดแก๊สขึ้น แก๊สก็จะเข้าไปแทนที่น้ำภายในกล่องสีเหลืองมเล็กที่อยู่ภายในเมื่อปริมาตรครบ 50 มิลลิลิตร กล่องสีเหลืองขนาดเล็กภายในจะพลิกและเกาะกับตัวเซนเซอร์ ข้อมูลของปริมาตรแก๊สที่ได้จะถูกเก็บที่เครื่องประมวลผล เครื่องจะทำการบันทึกจำนวนครั้งในการที่กล่องขนาดเล็กกระทบกับตัวเซนเซอร์ โดยเครื่องสามารถกำหนดระยะเวลาในการเก็บตัวอย่าง ได้ 3 หน่วยเวลา คือ นาที ชั่วโมง และวัน สามารถจัดเก็บได้ 10 ครั้ง



ภาพที่ 3.5 อุปกรณ์วัดปริมาตรแก๊ส

3.1.4 น้ำเสีย

น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองนี้เป็น minimal medium ที่มีค่าซีโอดีอยู่ระหว่าง 1,500 ถึง 3,500 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำเสีย 1 ลิตรจะประกอบด้วยสารเคมีต่างๆ (ตารางที่ 3.1) โดยมีน้ำตาลทรายแดงเป็นแหล่งคาร์บอน จากนั้นปรับค่า pH ให้อยู่ในช่วง 5.5 ± 0.1 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 6 M และสารละลาย HCl เข้มข้น 6 M วัดค่าพีเอชด้วยเครื่องวัด pH (pH Meters) รุ่น (pH meter; EUTECH INSTRUMENTS รุ่น Cyberscan pH 11) แล้วนำไปอบฆ่าเชื้อที่ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์ เป็นเวลา 15 นาที นำออกมาตั้งทิ้งไว้ให้เย็น ไล่แก๊สออกซิเจนด้วยแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 10 นาที เก็บตัวอย่างเพื่อนำไปหาค่าซีโอดี

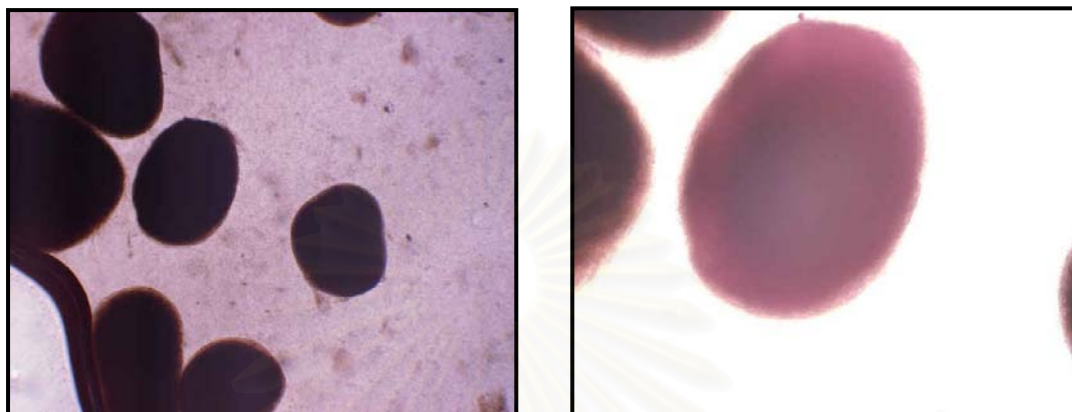
ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

ชนิดของสารเคมี	ปริมาณที่ใช้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ชนิดของสารเคมี	ปริมาณที่ใช้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
KH_2PO_4	6.375	$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	1.000
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	14.050	ZnCl_2	1.000
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	5.000	$\text{CuCl}_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.200
CaCl_2	0.375	H_3BO_3	0.100
$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.025	NaMo	0.100
$\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.500	Na_2SeO_3	0.170
NaHCO_3	10.500	$\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.260
NTA ^a	15.000	NaCl	10.000
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	1.000	KH_2PO_4	134.700
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1.000	K_2HPO_4	10.000
$\text{CoCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	17.000	Brown sugar	300.000

^aNitrilotriacetic acid

3.1.5 จุลินทรีย์

จุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองนำมาจากบ่อบำบัดน้ำเสียในระบบยูเอเอสพีของโรงงานเส้นไหมโซเฮง จำกัด ตำบลยายชา อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม ลักษณะของเชื้อจุลินทรีย์เป็นเม็ด (granule) ดังภาพที่ 3.6



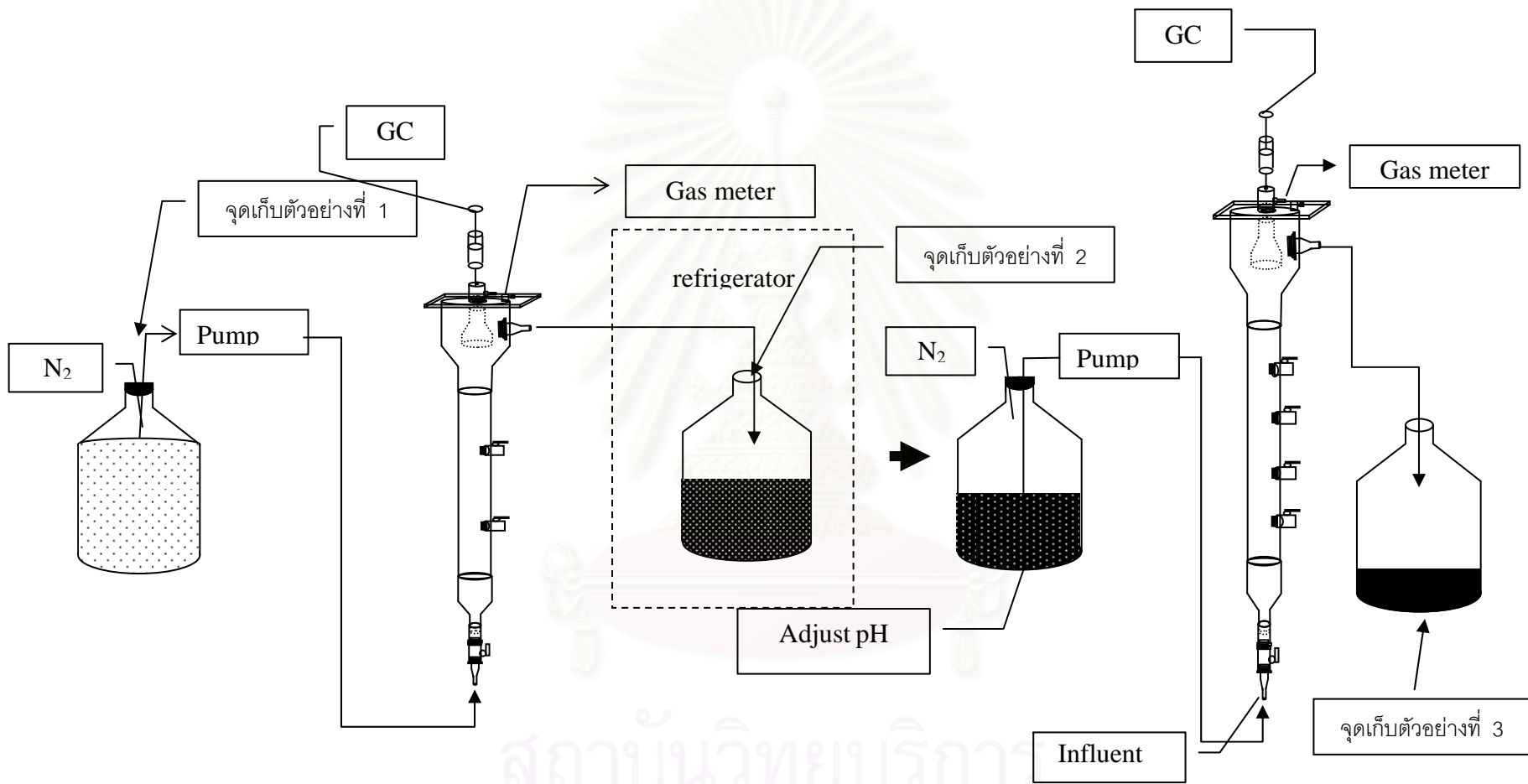
ก

ข

ภาพที่ 3.6 เม็ดจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองที่กำลังขยาย ก. 40 ข. 100 เท่า

3.2 วิธีวิจัย

ในถังปฏิกรณ์ถังที่ 1 (ถังผลิตแก๊สไฮโดรเจน) เริ่มต้นระบบโดยการนำตะกอนจุลินทรีย์หัวเชื้อจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบยูเอเอสบี ที่มีประสิทธิภาพสูงมาผ่านการต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ในอ่างน้ำร้อน เพื่อฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่ไม่สามารถสร้างสปอร์ได้ เนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์ที่สร้างสปอร์ได้นั้น จะสามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้ แล้วเทลงในถังปฏิกรณ์ ปริมาตร 200 มิลลิลิตร. จากนั้นป้อนน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ที่ 1 โดยใช้ปั๊มเพอริสทาลติก (Masterflex® L/S® รุ่น No.7524-55) น้ำเสียจะเคลื่อนที่จากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนของถังปฏิกรณ์ โดยค่าซีไอดี (COD) ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ป้อนเข้าระบบในถังปฏิกรณ์ถังที่ 1 (ถังผลิตแก๊สไฮโดรเจน) อยู่ในช่วง 2,000-2,500 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหลที่ 2.1 มิลลิลิตรต่อนาที ระยะเวลาที่เก็บน้ำเสียทางชลศาสตร์ (Hydraulic retention time, HRT) ของถังปฏิกรณ์แรก คือ 8 ชั่วโมง และมีอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 10,186.0 มิลลิกรัมซีไอดี ต่อวัน น้ำที่ไหลออกจากถังปฏิกรณ์นี้จะไหลเข้าไปสู่ภาชนะเก็บที่ตั้งอยู่ในตู้เย็น (ภาพที่ 3.7) น้ำออกจากถังปฏิกรณ์ถังที่ 1 ที่อยู่ในตู้เย็น จะเป็นน้ำเสียที่ใช้ป้อนเข้าถังปฏิกรณ์ถังที่ 2 โดยน้ำเสียจะถูกนำออกมาจากตู้เย็นและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เก็บตัวอย่างน้ำเพื่อนำไปตรวจวิเคราะห์ค่าซีไอดี และวัดค่าพีเอช จากนั้นทำการปรับค่าพีเอชของน้ำโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 6 โมลาร์ ปรับค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 7.0 ± 0.1 และทำการไล่ออกซิเจนด้วยไนโตรเจน แล้วนำไปจ่ายเข้าสู่ถังยูเอเอสบี 1.5 ลิตร เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในถังปฏิกรณ์ถังที่ 2 ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ไม่ต้องนำไปต้ม น้ำเสียที่ผ่านการปรับพีเอชแล้วจะถูกป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ด้วยอัตราการไหลที่ 2.1 มิลลิลิตรต่อนาที ระยะเวลาของน้ำเสียที่ไหลในระบบ (HRT) ที่ใช้ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ที่สอง คือ 10 ชั่วโมง อัตราการป้อนสารอินทรีย์ขึ้นอยู่กับค่าซีไอดีที่ออกจากถังยูเอเอสบีถังแรก น้ำที่ออกจากระบบนี้จะถูกเก็บเพื่อตรวจวัดค่า ซีไอดี และวัดค่าพีเอชสุดท้าย ตรวจวัดปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นในระบบโดยใช้การแทนที่น้ำเพื่อให้ทราบปริมาตรของแก๊สที่เกิดขึ้นต่อวัน แก๊สที่ได้จะนำไปวิเคราะห์แยกองค์ประกอบด้วยเครื่อง Gas Chromatography ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC8A ใช้ detector เป็น thermal conductivity detector (TCD) โดยใช้คอลัมน์ Unibead C 60/80 ประมวลผลโดยเครื่อง Shimadzu รุ่น CR6A ทุกๆ 2 วัน เมื่อระบบเข้าสู่ภาวะคงตัว (steady state) แล้ว จะทำการเปลี่ยนอัตราการไหล ระยะเวลาที่เก็บน้ำเสียและอัตราการป้อนสารอินทรีย์เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไฮโดรเจนและมีเทน และประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ภาพที่ 3.7 แผนภาพการเดินระบบ

3.3 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

ตัวอย่างน้ำที่เก็บได้จากจุดเก็บตัวอย่างจุดที่ 1, 2 และ 3 จะทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์และความถี่ของการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์และความถี่ในการวิเคราะห์

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	ความถี่ในการวิเคราะห์
pH	2 วันครั้ง
COD	สัปดาห์ละ 1 ครั้ง
VFA	1 เดือนครั้ง
ปริมาณแก๊สชีวภาพ	ทุกวัน
องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพ	2 วันครั้ง

3.3.1 ค่าพีเอช

ในงานทดลองนี้ใช้ค่าพีเอชในการควบคุมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สชีวภาพ ทำการวัดค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ pH meter; EUTECH INSTRUMENTS รุ่น Cyberscan pH 11 จุ่มลงในน้ำตัวอย่างที่เก็บมาตามจุดต่างๆที่แสดงไว้ในข้างต้น เพื่อทำการตรวจวัด โดยรอจนกว่าค่าจะคงที่ซึ่งจะมีคำว่า read ปรากฏขึ้นบนหน้าจอ แล้วจึงทำการแปรผลที่ได้อ่านค่าพีเอชเพื่อทำการบันทึกผล

3.3.2 chemical oxygen demand (COD)

การวิเคราะห์ หาซีโอดีเป็นวิธีหาความสกปรกของน้ำเสียต่างๆ โดยเป็นการวัดปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ของน้ำเสียเพื่อให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ เป็นปฏิกิริยาสุดท้าย เงื่อนไขสำคัญในการวิเคราะห์หาคีโอดี คือปฏิกิริยาออกซิเดชันต้องเกิดขึ้นโดยอาศัยออกซิไดซิงเอเจนต์ (oxidizing agent) อย่างแรง ภายใต้ภาวะที่เป็นกรดเข้มข้นและมีอุณหภูมิสูง ทำการวัดโดยวิธีรีฟลักซ์ปิดแบบเทียบสี

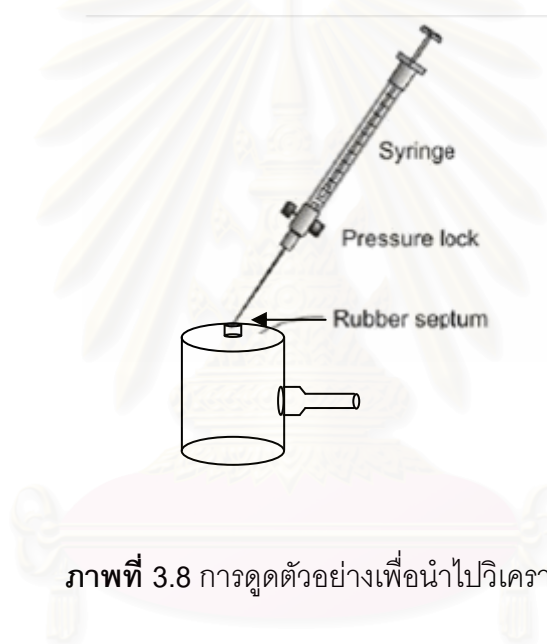
3.3.3 ปริมาตรแก๊สที่เกิดขึ้นในการทดลอง

ปริมาตรแก๊สที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นตัวชี้วัดให้เห็นถึงความเหมาะสมของภาวะต่างๆ ว่าเหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์มากน้อยแค่ไหน ถ้าจุลินทรีย์มีการผลิตแก๊สออกมาเป็นจำนวนมาก ก็จะทำให้เห็นว่าที่ภาชนะนั้นๆ มีความเหมาะสมในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยปริมาตรแก๊สที่เกิดขึ้นจะเก็บโดยวิธีการแทนที่น้ำ โดยใช้อุปกรณ์วัดปริมาตรแก๊สซึ่งต่อเข้ากับเครื่องเก็บข้อมูล รายละเอียดในหัวข้อ 3.1.3

3.3.4 องค์ประกอบของแก๊ส

แก๊สในถังปฏิกิริยาปริมาตร 300 ไมโครลิตรจะคูดอกมาจากส่วนที่เป็นช่องว่างในถังปฏิกิริยาโดยใช้เข็มฉีดยาขนาด 500 ไมโครลิตร (Hamilton, USA) (ภาพที่ 3.8) แล้วทำการฉีดเข้าเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (Shimadzu GC-8A) ซึ่งจะเชื่อมต่อกับเครื่องอ่านผล (Shimadzu CR6A) คอลัมน์ที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊สตัวอย่างคือ Unibeads C 60/80 โดยในการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สจะใช้แก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สตัวพา (carrier gas) และมีตัวตรวจวัดแบบ thermal conductivity detector (TCD) ซึ่งเป็นตัวตรวจวัดที่ประกอบด้วย heated filament ที่มีการให้กระแสไฟฟ้าคงที่ ในการตรวจวัดจะเป็นการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของ filament current ของ reference cell และ sample cell การเปลี่ยนแปลงนี้将有ความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์นำความร้อนของสารที่ต้องการวิเคราะห์ กับค่าสัมประสิทธิ์นำความร้อนของแก๊สตัวพา

ทำให้ตัวตรวจวัดชนิดนี้สามารถตรวจสอบสารได้ทุกชนิด ยกเว้นแก๊สที่ใช้เป็นแก๊สตัวพา ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สมีดังต่อไปนี้คือ อุณหภูมิของ injector และ detector เท่ากับ 150 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของคอลัมน์เท่ากับ 80 องศาเซลเซียส และปรับค่า current ที่ 140 mA ฉีดแก๊สตัวอย่างเทียบกับแก๊สผสมมาตรฐานในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของแก๊สแต่ละชนิด จะสังเกตจากระยะเวลาที่แก๊สใช้เวลาในการผ่านคอลัมน์ โดยแก๊สแต่ละชนิดจะใช้เวลาที่แตกต่างกัน ดังภาพที่ 3.9 จะเป็นผลของการฉีดแก๊สผสมมาตรฐาน (Restek air standard no. 34512) ที่ทราบปริมาณความเข้มข้นที่แน่นอนซึ่งจะประกอบไปด้วยแก๊สชนิดต่างๆ ตามตารางที่ 3.2 ผสมอยู่กับแก๊สฮีเลียม (helium) โดยจากภาพที่ 3.9 แก๊สมาตรฐานที่จะออกมาเป็นชนิดแรกคือ แก๊สไฮโดรเจน(peak A) แก๊สมีเทนจะออกมาเป็นลำดับที่ 5 (peak B)



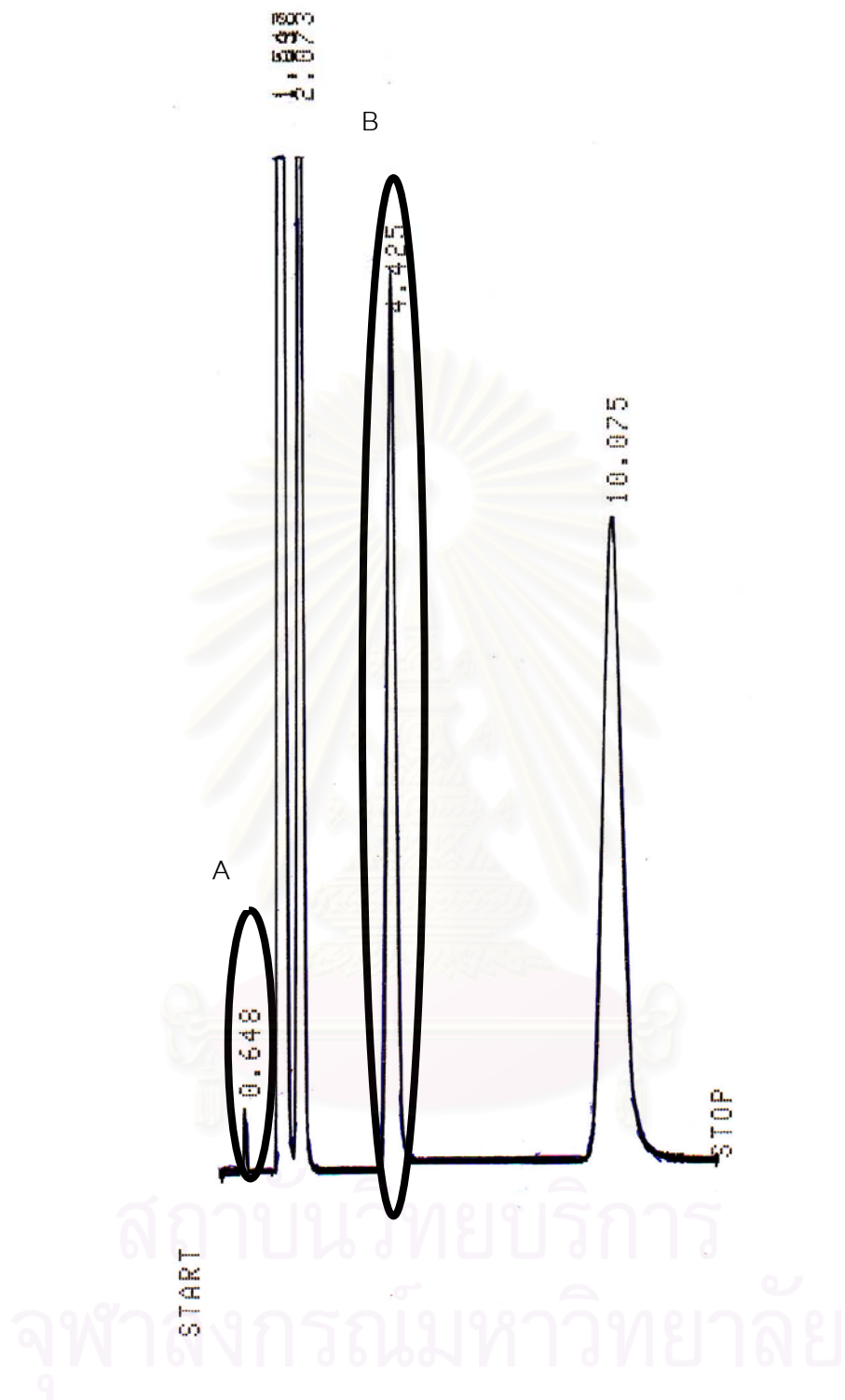
ภาพที่ 3.8 การฉีดตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบและความเข้มข้นของแก๊สมาตรฐาน

องค์ประกอบของแก๊สมาตรฐาน	เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของแก๊สมาตรฐาน
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	5
คาร์บอนมอนอกไซด์(CO)	5
ไฮโดรเจน (H ₂)	4
มีเทน (CH ₄)	4
ไนโตรเจน (N ₂)	5
ออกซิเจน (O ₂)	5
ฮีเลียม (helium)	72
รวม	100

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 3.9 การแยกแก๊สมาตรฐานโดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี A คือแก๊สไฮโดรเจน (retention time เท่ากับ 0.65 นาที) และ B คือ แก๊สมีเทน (retention time เท่ากับ 4.43 นาที)

3.3.5 วิธีวิเคราะห์ห้องค์ประกอบภายในน้ำเสีย

น้ำเสียในถังปฏิกริยาจะถูกเก็บมาปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร นำไปผ่านการกรอง เก็บใส่ขวดเก็บตัวอย่าง ปริมาตร 1 มิลลิลิตร โดยจะใส่กรดซัลฟูริกเข้มข้น 6 M 30 ไมโครลิตร เพื่อยับยั้งปฏิกริยาของจุลินทรีย์ จากนั้นดูตัวอย่างปริมาตร 2 ไมโครลิตร แล้วทำการฉีดเข้า เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟฟี (Shimadzu GC-7AG) ซึ่งจะเชื่อมต่อกับเครื่องอ่านผล (Shimadzu CR7Ae plus) คอลัมน์ที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊สตัวอย่างคือ Porapak Q ยาว 1 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3.3 มิลลิเมตร โดยในการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของน้ำเสียจะใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สตัวพา (carrier gas) และมีตัวตรวจวัดแบบ Frame ionization detector (FID) เป็นดีเทคเตอร์ที่ใช้ตรวจหาสารประกอบอินทรีย์แก๊สพาจะถูกติดไฟด้วย heater ไฟฟ้าซึ่งอยู่ใกล้ๆ กับ Flame jet ส่วนอากาศที่ผ่านเข้าไปทำหน้าที่สองอย่าง คือช่วยการเผาไหม้ของแก๊สตัวพา และช่วยพาให้แก๊สที่เผาไหม้แล้วออกไป แก๊สพา และสารตัวอย่างที่ออกมาจากคอลัมน์จะเข้าสู่เปลวไฟ จะทำให้สารเหล่านั้นเกิดไอออนไนเซชันได้เป็นอิเล็กตรอนและไอออนบวก อิเล็กตรอนจะวิ่งเข้าไปยัง Flame jet ไอออนบวกจะเคลื่อนที่ไปยังอิเล็กโทรด สัญญาณที่เกิดขึ้น จะถูกส่งไปยังอิเล็กโทรมิเตอร์ และบันทึกสัญญาณด้วยเครื่องบันทึกโครมาโทแกรม ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของแก๊สมีดังต่อไปนี้คือ อุณหภูมิของ injector และ detector เท่ากับ 240 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของคอลัมน์เท่ากับ 180 องศาเซลเซียส ฉีดแก๊สตัวอย่างเทียบกับแก๊สผสมมาตรฐานในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของแก๊สแต่ละชนิด แสดงผลเหมือนกับการวิเคราะห์แก๊ส นำค่าที่ได้ทำกราฟมาตรฐาน

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ค่าพีเอช

ถังปฏิกรณ์ที่ 1 (ถังผลิตแก๊สไฮโดรเจน)

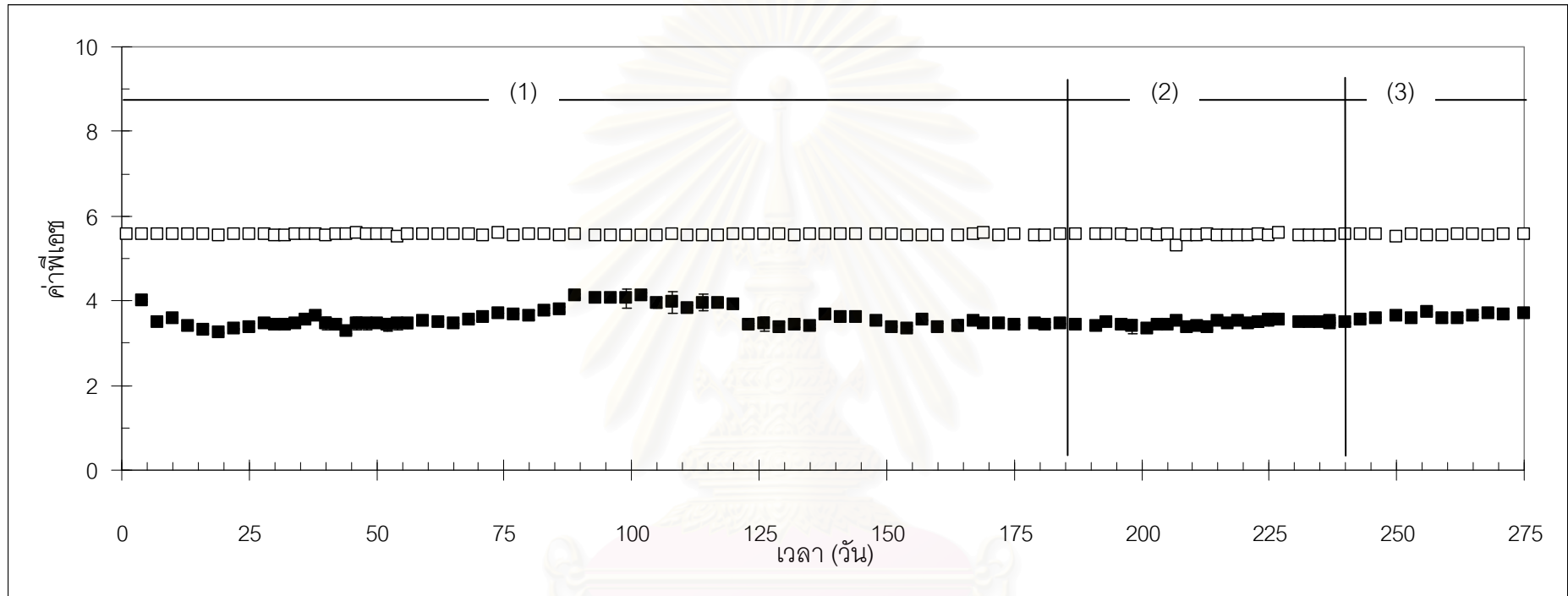
การทดลองนี้ใช้เชื้อจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนและไม่ใช้แสงโดยเชื้อที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเชื้อผสม (mixed culture) การผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้ทำในถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี โดยเดินระบบอย่างต่อเนื่อง ควบคุมค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าสู่ถังที่ 1 เท่ากับ 5.55 ± 0.03 และมีน้ำตาลทรายแดงเป็นแหล่งคาร์บอน ในการทดลองได้กำหนดค่าระยะเวลาที่เก็บน้ำเสียทางไฮดรอลิก (hydraulic retention time, HRT) ที่ 8 ชั่วโมง อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าถังเท่ากับ 2.10 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราการป้อนสารอินทรีย์ (organic loading rate, OLR) 6.54 ± 0.09 กรัมซีโอดีต่อวันต่อลิตรถังปฏิกรณ์ กระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนเกิดที่อุณหภูมิห้อง (30 ± 3 องศาเซลเซียส) การทดลองที่ภาวะดังกล่าวได้ทำเป็นเวลา 193 วัน จากการวัดค่าพีเอชของน้ำที่ออกจากถังปฏิกรณ์พบว่าค่าลดลงเมื่อเทียบกับพีเอชน้ำเข้าโดยในช่วงแรกค่าพีเอชแปรปรวนเล็กน้อย ก่อนเข้าสู่ภาวะสมดุลในช่วง 165 – 193 วัน หลังจากนั้นจึงทำการเปลี่ยน HRT ของระบบเป็น 6 ชั่วโมง OLR เท่ากับ 7.70 ± 0.24 กรัมซีโอดีต่อวันต่อลิตรถังปฏิกรณ์ หลังจากป้อนน้ำเสียเป็นเวลา 56 วัน โดยเริ่มจากวันที่ 194 ของการทดลองพีเอชมีค่าแปรปรวนเล็กน้อย แต่มีค่าลดลงจากพีเอชตั้งต้นมาก และเริ่มเข้าสู่ภาวะสมดุลในช่วงเวลา 216 – 249 จากนั้นทำการเปลี่ยนภาวะของระบบเป็นครั้งสุดท้าย คือ ค่า HRT เท่ากับ 6 ชั่วโมง ค่า OLR เท่ากับ 6.70 ± 0.20 กรัมซีโอดีต่อวันต่อลิตรถังปฏิกรณ์ หลังจากป้อนน้ำเสียเป็นเวลา 26 วัน โดยเริ่มจากวันที่ 250 ของการทดลอง ค่าพีเอชสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ 2 ภาวะแรก และมีการเข้าสู่ภาวะเสถียรเร็วขึ้นเนื่องจากเชื้อในถังปฏิกรณ์ได้มีการปรับสภาพให้เข้าสู่ช่วงคงที่ โดยภาวะคงที่สามารถสังเกตได้จากกราฟ คือลักษณะของกราฟจะเป็นเส้นตรง หรือมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง โดยค่าพีเอชในภาวะคงที่ของ HRT 8 ชั่วโมง OLR เท่ากับ 6.54 ± 0.09 กรัมซีโอดีต่อวันต่อลิตรถังปฏิกรณ์ อยู่ที่ 3.45 ± 0.01 และ HRT 6 ชั่วโมง OLR เท่ากับ 7.70 ± 0.24 กรัมซีโอดีต่อวันต่อลิตรถังปฏิกรณ์ อยู่ที่ 3.55 ± 0.05 และค่าพีเอชในภาวะคงที่ของ HRT 6 ชั่วโมง ค่า OLR เท่ากับ 6.70 ± 0.20 กรัมซีโอดีต่อวันต่อลิตรถังปฏิกรณ์ อยู่ที่ 3.65 ± 0.01 (ตารางที่ 4.1) จากการทดลองจะเห็นว่าค่าของพีเอชของน้ำออกในแต่ละ HRT ไม่ต่างกันมาก คือมีค่าอยู่ในช่วง 3.40 - 3.70 แสดงดังภาพที่ 4.1 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าพีเอชของน้ำออกถึงผลิตไฮโดรเจนมีค่าที่ความเป็นกรดต่ำกว่าค่าพีเอชของน้ำเข้าประมาณ 2

ตารางที่ 4.1 ค่าพีเอชของน้ำออกที่ภาวะเสถียรคงตัวของระบบภายใต้ภาวะการทดลองต่างๆ

ปัจจัย	1	2	3
HRT	8	6	6
OLR	6.54 ± 0.09	7.70 ± 0.24	6.70 ± 0.20
ค่าพีเอชน้ำเข้า	5.55 ± 0.03	5.55 ± 0.03	5.55 ± 0.03
ค่าพีเอชน้ำออก	3.45 ± 0.01	3.55 ± 0.05	3.65 ± 0.01

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่าพีเอชน้ำออกจากถังที่ผลิตไฮโดรเจนที่ได้จากการทดลองนี้มีค่าพีเอชลดลงเมื่อเทียบกับค่าพีเอชน้ำเข้าซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยที่ได้รายงานก่อนหน้านี้ (Zhang และคณะ, 2006; Mohan และคณะ, 2007; Wu and Chang, 2007) โดย Zhang และคณะ, (2006) ได้ศึกษาการผลิตแก๊สไฮโดรเจนชีวภาพโดยเชื้อบริสุทธิ์ *Clostridium acetobutylicum* ในถังปฏิกรณ์แบบ unsaturated flow โดยใช้กลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน พบว่าค่าพีเอชลดจาก 6.20 เป็นค่าพีเอชช่วง 4.90 - 5.60 (ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้นของกลูโคส) ส่วน Mohan และคณะ (2007) ศึกษาการผลิตแก๊สไฮโดรเจนชีวภาพจากน้ำเสียที่ประกอบด้วยสารเคมี (chemical wastewater, CW) โดยใช้ถังหมักแบบยูเอเอสบี โดยภายในบรรจุวัสดุค้ำจุลินทรีย์มาเกาะ (biofilm) แบบไม่ต่อเนื่อง โดยทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างน้ำเสียสังเคราะห์ (synthesis wastewater, SW) และน้ำเสียที่มีส่วนประกอบของสารเคมี (CW) โดยอัตราการป้อนสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate, OLR) อยู่ที่ 4.80 และ 5.60 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ให้ค่าพีเอช ลดลงจาก 6.00 เป็น 4.23 และจาก 6.00 เป็น 4.62 ตามลำดับ ส่วนการทดลองของ Wu และ Chang (2007) ศึกษาการผลิตไฮโดรเจนเปรียบเทียบกระบวนการหมักระหว่างการหมักแบบ batch และแบบต่อเนื่อง โดยใช้จุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนบรรจุในพอลิเมอร์พบว่าเมื่อเริ่มระบบจะปรับค่าพีเอชของกากอ้อยที่พีเอช 5.00 - 6.50 หลังจากเดินระบบ 40 วัน ค่าชีโอดี 6.32 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรถึงปฏิกรณ์ต่อวัน HRT เท่ากับ 11.4 ชั่วโมง ค่าพีเอชลดจาก 5.00 เป็น 4.50

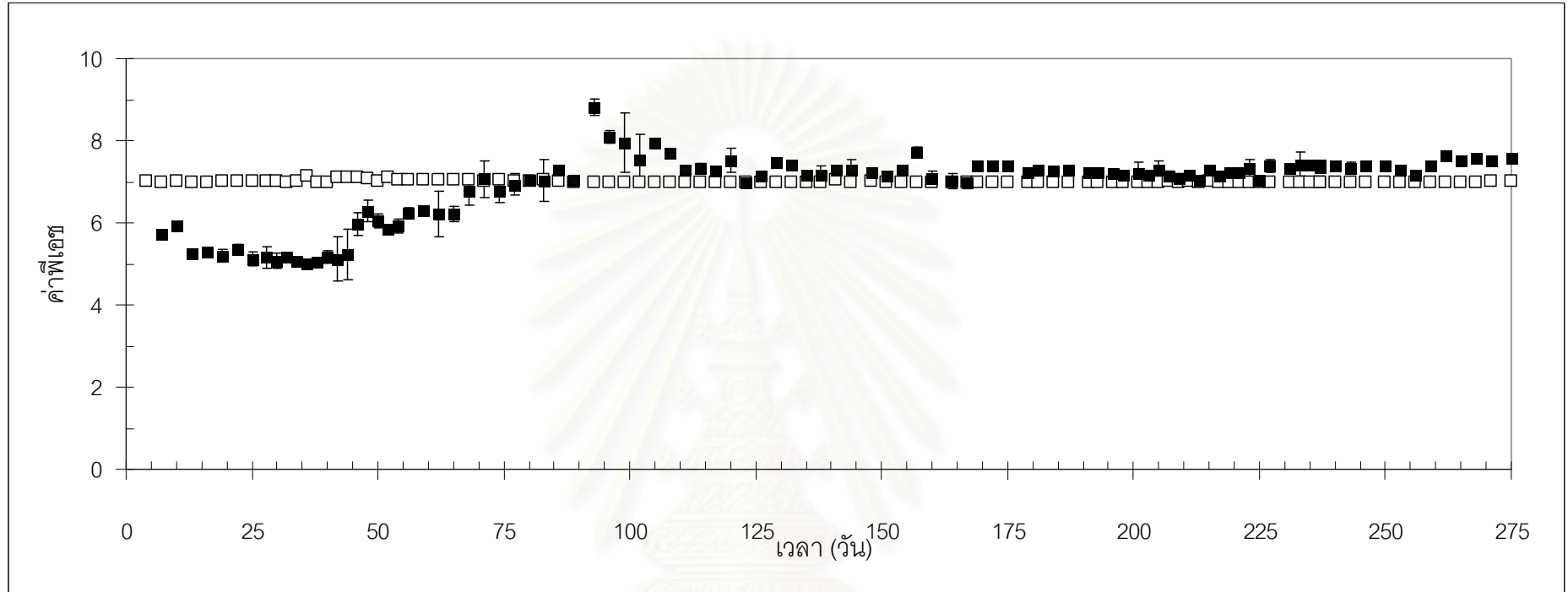


ภาพที่ 4.1 ค่าพีเอชที่เกิดขึ้นเมื่อเดินระบบถึงวันที่ 275 ของการทดลอง โดยสัญลักษณ์ □ แสดงค่าพีเอชของน้ำที่เข้าภายในระบบ ■ แสดงค่าพีเอชหลังจากผ่านถึงปฏิกิริยา สัญลักษณ์ I bar แทนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัดค่าพีเอชของการทำซ้ำสองครั้ง และ แนวเส้นแสดงค่า HRT และ OLR; (1) เท่ากับ HRT เท่ากับ 8 ชั่วโมง และค่า OLR เท่ากับ 6.54 ± 0.09 กรัมซีโอดีต่อวัน (2) เท่ากับ HRT เท่ากับ 6 ชั่วโมง และค่า OLR เท่ากับ 7.70 ± 0.24 กรัมซีโอดีต่อวัน (3) เท่ากับ HRT เท่ากับ 6 ชั่วโมง และค่า OLR เท่ากับ 6.70 ± 0.20 กรัมซีโอดีต่อวัน

ถังปฏิกรณ์ที่ 2 (ถังผลิตแก๊สมีเทน)

การผลิตแก๊สมีเทนได้ทำในถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี โดยเดินระบบอย่างต่อเนื่อง น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองได้มาจากน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์ที่ 1 นำมาปรับค่าพีเอชอยู่ที่ 7.00 ± 0.01 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 โมลาร์ เมื่อเริ่มเดินระบบกำหนดค่า HRT ที่ 10 ชั่วโมง อัตราการไหลอยู่ที่ 2.1 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการป้อนสารอินทรีย์ ขึ้นอยู่กับสารอินทรีย์ที่ผ่านจากถังที่ 1 กระบวนการเกิดแก๊สมีเทนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้อง โดยทำการเดินระบบเป็นเวลา 275 วัน พีเอชของน้ำที่ออกจากถังนี้ในช่วงแรกมีความแปรปรวนสูง เมื่อเวลาผ่านไปค่าพีเอชค่อยๆ ปรับตัวเข้าสู่ภาวะสมดุล โดยสังเกตจากกราฟที่ค่อยๆ ลงสู่แนวเส้นตรง ตั้งแต่วันที่ 111 แสดงดังภาพที่ 4.2 โดยในถังผลิตแก๊สมีเทนทำที่ HRT เดียวเท่านั้น โดยค่าพีเอชของระบบนี้อยู่ในช่วง 7.27 ± 0.20

จากการทดลองเห็นว่าค่าพีเอชในถังหมักนี้มีค่อนข้างเป็นกลางซึ่งในถังนี้จะมีเชื้อที่สามารถผลิตแก๊สมีเทนได้เจริญเติบโตอยู่ซึ่งช่วงของพีเอชที่ 6.80 - 7.80 เนื่องจากจุลินทรีย์ได้ทำการย่อยเปลี่ยนกรดอินทรีย์ให้กลายเป็นแก๊สมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ ก่อนที่น้ำจะเข้าสู่ระบบที่ 2 ได้ทำการปรับค่าพีเอชให้เหมาะสมกับการเกิดแก๊สมีเทน เพราะเมื่อพีเอชต่ำมากเกินไปจะทำให้ปฏิกิริยาการเปลี่ยนเป็นแก๊สมีเทนหยุดลง ค่าพีเอชน้ำออกจากถังที่ผลิตมีเทนที่ได้จากการทดลองนี้มีค่าพีเอชค่อนข้างเป็นกลาง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยที่ได้รายงานก่อนหน้านี้ (Dinsdale และคณะ, 2000; Borja และคณะ, 2001; Patel and Madamwar, 2001; Wu and Chang, 2007) โดยที่ Dinsdale และคณะ (2000) ศึกษาการย่อยสลายเศษผักผลไม้ภายใต้ภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน โดยใช้ถังหมักแบบ CSTR และถังหมักแก๊สแบบ inclined tubular digestion พบว่าถังหมักกรดที่ HRT 1, 2, 3 และ 4 วัน มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 4.40 - 6.20 ส่วนถังหมักแก๊สมีค่าพีเอชเท่ากับ 7.80 ส่วน Paltel และ Madamwar (2001) ศึกษาการผลิตแก๊สมีเทนจากน้ำทิ้งโรงงานน้ำมันปิโตรเลียมที่มีความเป็นกรดสูง โดยใช้ระบบสองขั้นตอนแบบ multichamber anaerobic fixed film bioreactor พบว่าถังหมักกรดมีพีเอชอยู่ในช่วง 5.00 - 5.55 และถังหมักแก๊สมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7.50 - 8.50 และการทดลองของ Borja และคณะ (2001) ศึกษาการย่อยสลายของเสียจากโรงงานน้ำมันมะกอกภายใต้ภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่มีการกวนผสมอย่างสมบูรณ์ โดยใช้อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เข้าในระบบเท่ากับ 20 และ 40 เปอร์เซ็นต์ พีเอชมีค่าสูงขึ้นกว่า 7.00 ในทุกๆ HRT และ OLR แต่ที่ความเข้มข้นของเสียเข้าระบบ 80 เปอร์เซ็นต์ พีเอชจะเพิ่มค่าสูงขึ้นมากกว่า 6.90 เมื่อมี OLR ต่ำกว่า 12.02 กรัมชีโอดีต่อลิตรต่อวัน และ HRT สูงกว่า 12.5 วัน ค่าพีเอชจะอยู่ที่ 7.20



ภาพที่ 4.2 ค่าพีเอชที่เกิดขึ้นเมื่อเดินระบบถึงวันที่ 275 ของการทดลอง โดยสัญลักษณ์ □ แสดงค่าพีเอชของน้ำที่เข้าภายในระบบ ■ แสดงค่าพีเอชหลังจากผ่านถึงปฏิกริยา สัญลักษณ์ I bar แทนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัดค่าพีเอชของการทำซ้ำสองครั้ง

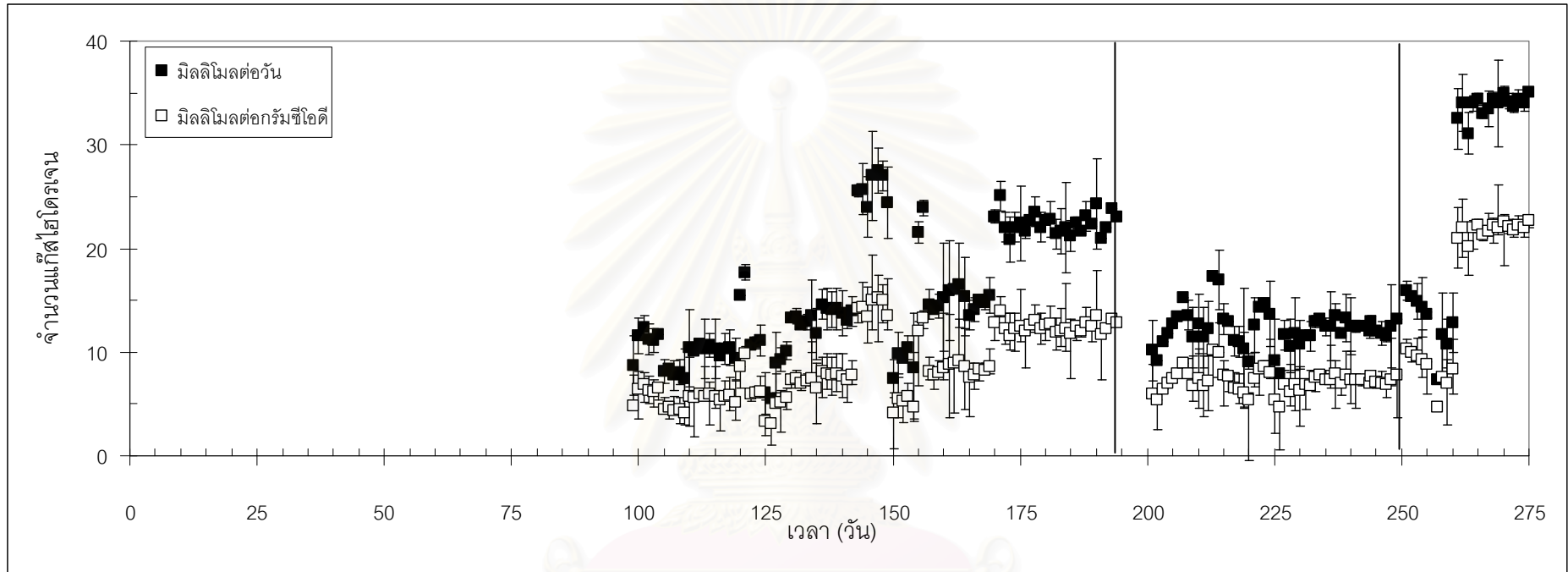
4.2 ปริมาณแก๊ส

ถังปฏิกรณ์ที่ 1 (ถังผลิตไฮโดรเจน)

จุลินทรีย์ที่ใช้เป็นหัวเชื้อในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์จากระบบผลิตแก๊สมีเทนแบบยูเอเอสบีที่ผ่านการต้มที่ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาทีเพื่อกำจัดจุลินทรีย์ที่สามารถผลิตแก๊สมีเทนได้ ในภาวะการทดลองที่ HRT เท่ากับ 8 ชั่วโมง OLR เท่ากับ 6.54 ± 0.09 กรัมซีโอดีต่อวันต่อลิตรถังปฏิกรณ์ อัตราการป้อนเข้าระบบเท่ากับ 2.1 มิลลิเมตรต่อนาที ควบคุมที่ เลขที่ 5.55 ± 0.03 ที่อุณหภูมิห้อง (30 ± 3 องศาเซลเซียส) ได้ทำการวัดปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นตั้งแต่วันที่ 99 - 193 โดยในช่วงวันที่ 99 - 174 พบว่าปริมาณแก๊สรวมและแก๊สไฮโดรเจนมีความแปรปรวนสูง (ภาพที่ 4.3) อย่างไรก็ตาม ปริมาณแก๊สรวมและแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นมีความแปรปรวนน้อย และมีค่าค่อนข้างคงที่ที่ 1450.80 ± 8.54 มิลลิเมตรต่อวัน ในช่วงวันที่ 177 - 193 ซึ่งลักษณะดังกล่าวแสดงถึงภาวะคงตัว (steady state) ของระบบ หลังจากนั้นทำการเปลี่ยนภาวะที่ HRT 6 ชั่วโมง OLR เท่ากับ 7.70 ± 0.24 กรัมซีโอดีต่อวันต่อลิตรถังปฏิกรณ์ เริ่มทดลองที่ภาวะนี้ในวันที่ 194 ใช้ระยะเวลา 56 วัน และระบบเข้าสู่ภาวะคงตัว ตั้งแต่วันที่ 233 - 249 จึงทำการเปลี่ยนภาวะสุดท้ายเป็น HRT 6 ชั่วโมง OLR 6.70 ± 0.20 กรัมซีโอดีต่อวันต่อลิตรถังปฏิกรณ์ โดยเริ่มภาวะนี้ในวันที่ 250 ใช้ระยะเวลา 26 วัน ระบบจะเข้าสู่ภาวะสมดุลวันที่ 262 จนถึงวันสุดท้ายได้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจน ที่ HRT 8 ชั่วโมง OLR 6.54 ± 0.09 กรัมซีโอดีต่อวันต่อลิตรถังปฏิกรณ์ มีค่าเท่ากับ 22.43 ± 1.01 มิลลิโมลต่อวัน หรือ เท่ากับ 12.48 ± 1.39 มิลลิโมลต่อกรัมซีโอดี เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจน เท่ากับ 38.22 ± 6.79 เปอร์เซ็นต์ ที่ HRT เท่ากับ 6 ชั่วโมง OLR เท่ากับ 7.70 ± 0.24 กรัมซีโอดีต่อวันต่อลิตรถังปฏิกรณ์เท่ากับ 12.55 ± 0.57 มิลลิโมลต่อวัน หรือ 7.38 ± 1.19 มิลลิโมลต่อกรัมซีโอดี เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจน เท่ากับ 25.21 ± 2.89 เปอร์เซ็นต์ และ ที่ HRT 6 ชั่วโมง OLR เท่ากับ 6.70 ± 0.20 กรัม ซีโอดีต่อวันต่อลิตรถังปฏิกรณ์ ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ได้มีค่าเท่ากับ 33.81 ± 1.00 มิลลิโมลต่อวัน หรือ 21.87 ± 1.50 มิลลิโมลต่อกรัมซีโอดี เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจน เท่ากับ 49.23 ± 0.50 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 4.2)

ตารางที่ 4.2 ปริมาตรและเปอร์เซ็นต์ของแก๊สไฮโดรเจนที่ภาวะคงตัวของระบบ ภายใต้ภาวะการทดลองต่างๆ

ปัจจัย	1	2	3
HRT	8	6	6
OLR	6.54 ± 0.09	7.70 ± 0.24	6.70 ± 0.20
ปริมาตรแก๊สที่ได้ต่อวัน (มิลลิลิตรต่อวัน)	$1,464.47 \pm 22.40$	$1,286.76 \pm 59.64$	$1,802.67 \pm 68.89$
ปริมาตรแก๊สที่ได้ต่อค่าซีไอดี (มิลลิเมตรต่อกรัมซีไอดี)	12.48 ± 1.39	7.38 ± 1.19	21.87 ± 1.50
ความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจน (เปอร์เซ็นต์)	38.22 ± 6.79	25.21 ± 2.81	49.23 ± 0.50



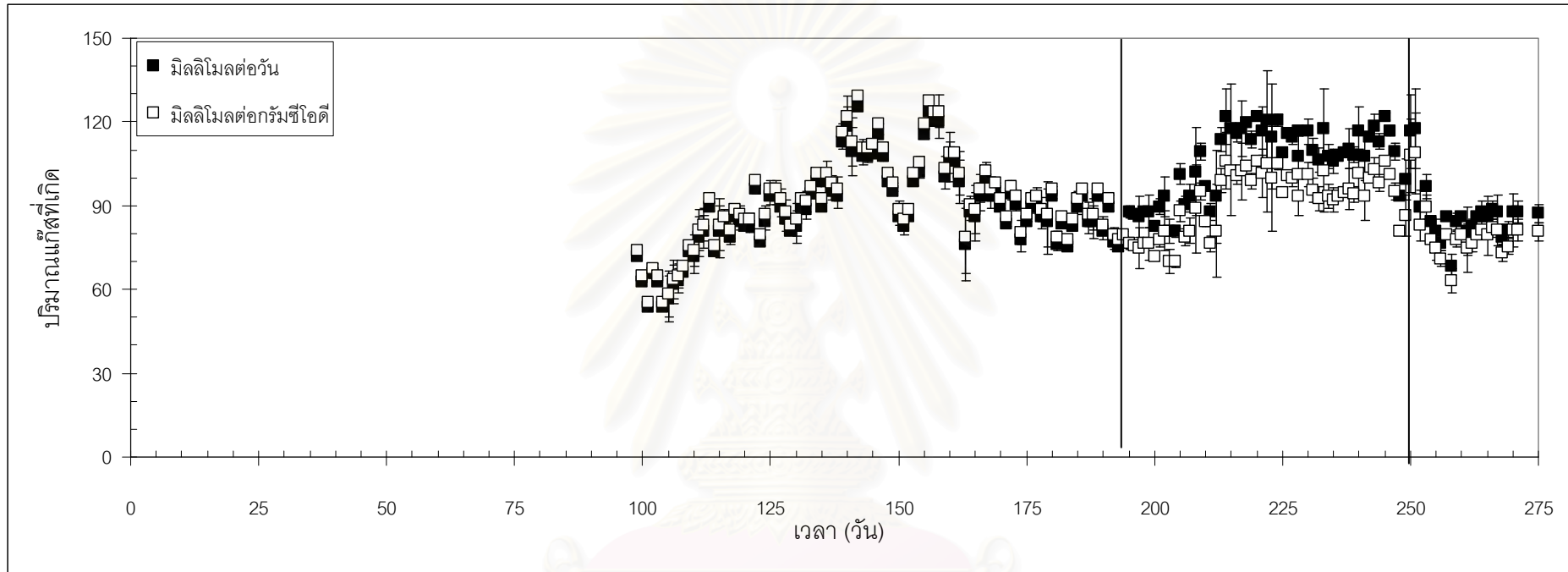
ภาพที่ 4.3 จำนวนแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในถังไฮโดรเจน แสดงในหน่วยของมิลลิโมลต่อวัน (■) และมิลลิโมลต่อกรัมชีไอดี (□)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากการกราฟจะเห็นได้ว่าที่ HRT เท่ากับ 6 ชั่วโมง ค่า OLR 6.8 กรัมชีโอดีต่อวันต่อลิตร ดังปฏิกรณ์ ให้จำนวนโมลของแก๊สไฮโดรเจนได้สูงที่สุด เมื่อเทียบกับที่ HRT เดียวกัน และที่ OLR ใกล้เคียงกันซึ่งสอดคล้องกับการทดลองก่อนหน้านี้ (Rene และคณะ, 2006; Wu and Chang, 2007) เมื่อลดค่า HRT จาก 8 เป็น 6 ชั่วโมงค่าโมลไฮโดรเจนน่าจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีค่า OLR สูงขึ้น แต่ค่าโมลแก๊สไฮโดรเจนกลับลดเนื่องจากอาจเป็นเพราะค่า OLR ไม่เหมาะสมกับการผลิตแก๊สไฮโดรเจน คือมากเกินไปที่ระบบจะรับไหวจึงทำให้ได้ผลผลิตต่ำ สอดคล้องกับค่าที่ได้จาก HRT 6 ชั่วโมง ที่ OLR ต่ำกว่า ให้ค่าจำนวนโมลของไฮโดรเจนที่ระบบผลิตได้สูงขึ้น โดยที่การทดลองของ Wu และ Chang (2007) ได้ศึกษาการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้เทคนิคการตรึงเชื้อจุลินทรีย์บนวัสดุพอลิเมอร์เปรียบเทียบกับระบบแบบต่อเนื่องกับแบบไม่ต่อเนื่อง โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส ที่ พีเอช 6.0 OLR เท่ากับ 20 กรัมชีโอดีต่อลิตร สารตั้งต้นที่ใช้ในการทดลองคือ ซูโครส โดยที่อุณหภูมิแตกต่างกันก็ให้ผลผลิตไฮโดรเจนต่างกัน ซึ่งผู้วิจัยได้ทดลองผลเป็นดังนี้ ที่ อุณหภูมิ 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียส ที่ พีเอช 5.50 ให้ผลผลิตไฮโดรเจนเท่ากับ 0.31, 1.21, 0.91 โมลไฮโดรเจนต่อโมลซูโครส ตามลำดับ ผลการทดลองโดยการเปลี่ยนความเข้มข้น OLR จาก 5, 10, 20 และ 30 กรัมชีโอดีต่อลิตร ให้ผลผลิตแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 1.78, 2.68, 2.25 และ 0.58 ตามลำดับ และเมื่อทดลองเปลี่ยนค่า HRT จาก 8, 6 และ 4 ชั่วโมง ให้ผลผลิตแก๊สไฮโดรเจนดังนี้ 1.7, 2.0 และ 1.1 โมลไฮโดรเจนต่อโมลซูโครส

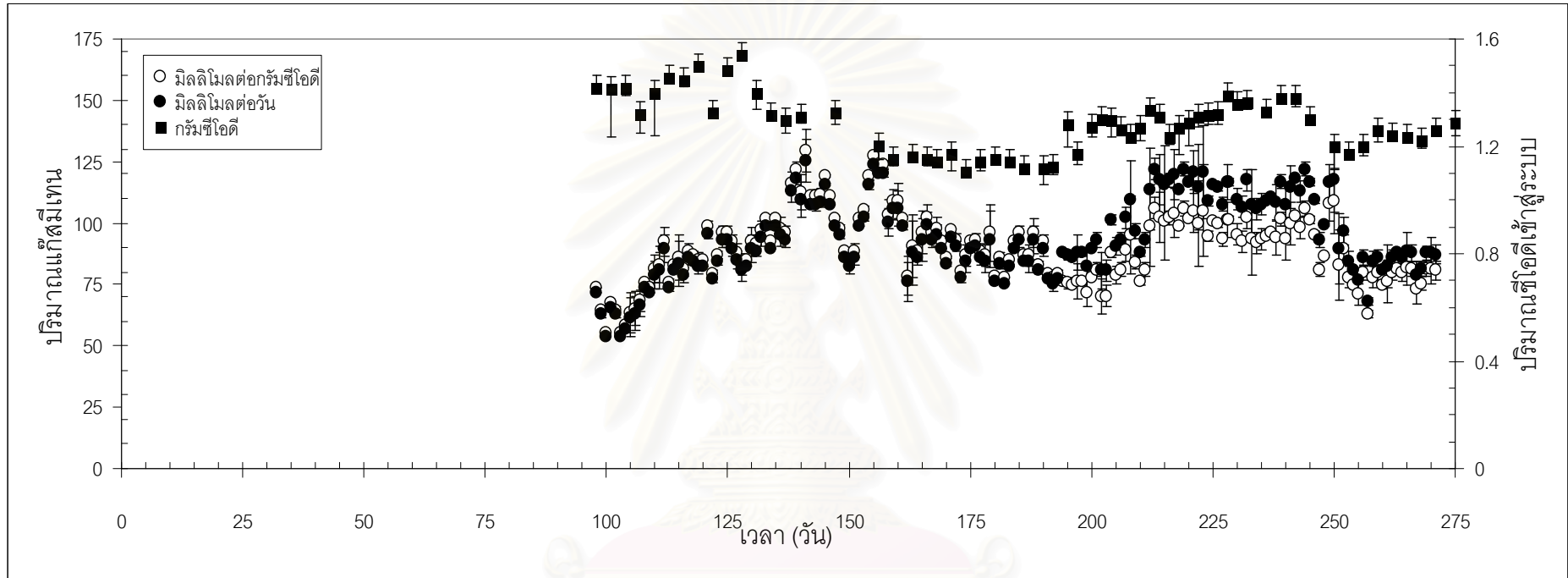
ถังปฏิกรณ์ที่ 2 (ถังผลิตมีเทน)

ถังที่ 2 นี้ใช้ในการผลิตแก๊สมีเทน เริ่มการทดลองกำหนดภาวะการทดลองนี้ทำที่ภาวะเดียวคือ HRT 10 ชั่วโมง OLR ขึ้นอยู่กับอัตราการกำจัดสารอินทรีย์ในถังที่ 1 อัตราการป้อนเข้าระบบเท่ากับ 2.1 มิลลิเมตรต่อนาที ควบคุมพีเอชที่ 7.0 ± 0.1 ที่อุณหภูมิห้อง (30 ± 3 องศาเซลเซียส) หลังจากเริ่มเดินระบบเป็นเวลา 275 วัน ปริมาณแก๊สมีเทนที่ออกมาขึ้นอยู่กับค่าซีไอดีที่ออกมาจากถังผลิตไฮโดรเจนซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวทั้งระบบคือ ไฮโดรเจน ที่ HRT 8 ชั่วโมง OLR 6.54 กรัมซีไอดีต่อวันต่อลิตรถังปฏิกรณ์ ให้ค่าซีไอดีน้ำออกเฉลี่ยอยู่ที่ 0.97 กรัมออกซิเจน ที่ HRT เท่ากับ 6 ชั่วโมง OLR เท่ากับ 7.70 กรัมซีไอดีต่อวันต่อลิตรถังปฏิกรณ์ ให้ค่าซีไอดีน้ำออกเฉลี่ยอยู่ที่ 1.15 กรัม และ ที่ HRT 6 ชั่วโมง OLR เท่ากับ 6.70 กรัมซีไอดีต่อวันต่อลิตรถังปฏิกรณ์ ให้ค่าซีไอดีน้ำออกเฉลี่ยอยู่ที่ 1.08 กรัมออกซิเจน ปริมาณแก๊สที่เกิดในระยะเวลาเดียวกับที่เปลี่ยนภาวะของไฮโดรเจนในช่วงต่างๆคือ ช่วงที่ 98 - 193 วัน ช่วง 194 - 249 วัน และ ช่วง 250 - 275 วัน ให้ปริมาณแก๊สมีเทนเท่ากับ 87.62 ± 2.34 มิลลิโมลต่อกรัมซีไอดี หรือ 84.19 ± 6.35 มิลลิโมลต่อวัน, 96.00 ± 4.04 มิลลิโมลต่อกรัมซีไอดี หรือ 110.40 ± 7.15 มิลลิโมลต่อวัน และ 78.89 ± 4.06 มิลลิโมลต่อกรัมซีไอดี หรือ 85.20 ± 3.40 มิลลิโมลต่อวัน แสดงในภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 ปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิด มิลลิโมลต่อวัน (■) และมิลลิโมลต่อกรัมชีไอดี (□)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.5 เปรียบเทียบระหว่างกรัมชีไอดีที่เข้าสู่ระบบในถังปฏิกรณ์ที่ผลิตแก๊สมีเทน กรัมชีไอดี (■) กับจำนวนโมลที่เกิดขึ้นในระบบ มิลลิโมลต่อวัน (●) และมิลลิโมลต่อกรัมชีไอดี (○)

จากผลการทดลองดังภาพที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าปริมาณการเกิดแก๊สของมีเทนขึ้นอยู่กับ ค่า OLR ที่เข้าสู่ระบบเมื่อค่า OLR ลดลงจะทำให้การผลิตแก๊สมีเทนลดลงเช่นเดียวกันซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ อาริยา (2546) เมื่อเปลี่ยน ค่า HRT ต่ำลง ค่า OLR จะเพิ่มสูงขึ้น ระบบจะให้แก๊สมีเทนมากขึ้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

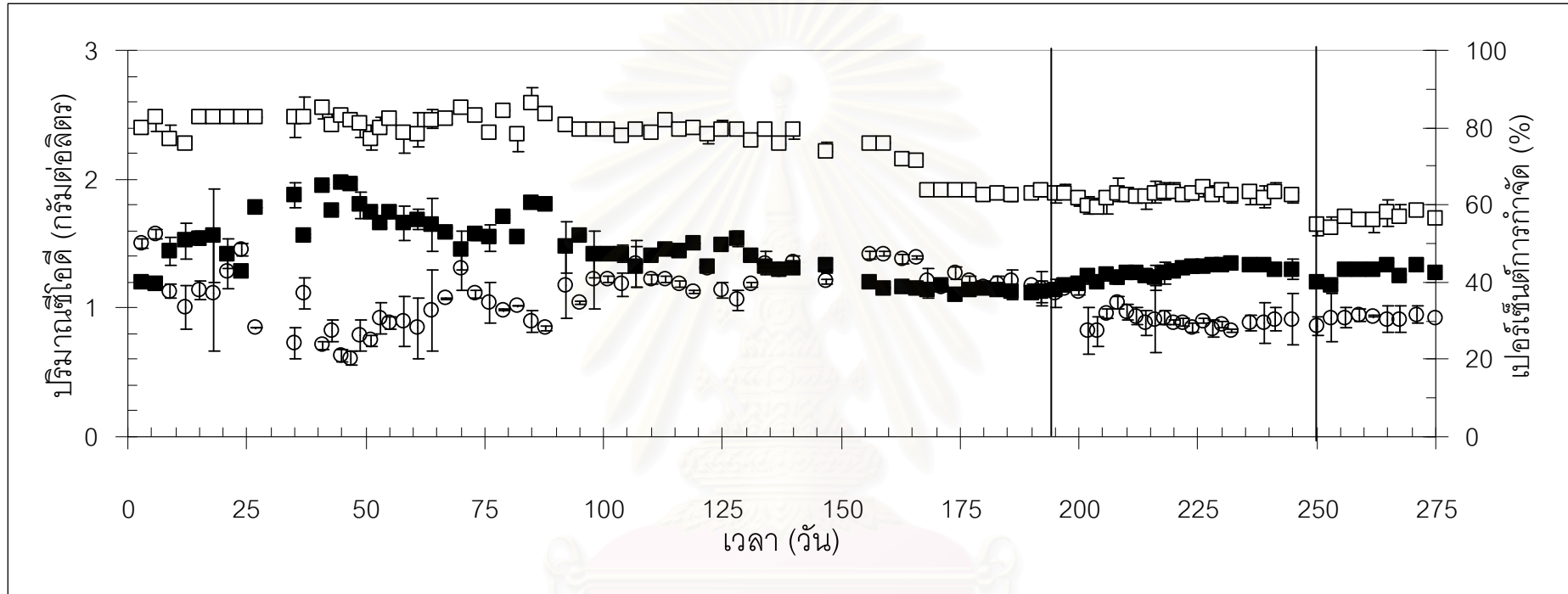
4.3 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี

ถังปฏิกรณ์ที่ 1 (ถังผลิตแก๊สไฮโดรเจน)

น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นอาหารเลี้ยงเชื้อ minimal media ที่ผสมกับน้ำตาลทรายแดง ซึ่งจุลินทรีย์ใช้เป็นแหล่งคาร์บอนเพื่อควบคุมค่าซีโอดี ค่าซีโอดีที่ได้ขึ้นอยู่กับแหล่งอาหารคาร์บอน ซึ่งไม่ทราบองค์ประกอบภายในของน้ำตาลทรายแดงที่แน่นอน ทำให้ปริมาณซีโอดีของน้ำเข้าสู่ระบบมีความแปรปรวน (ภาพที่ 4.6) โดยเมื่อเดินระบบควบคุมภาวะที่ พีเอช 5.5 HRT 8 ชั่วโมง OLR 6.54 ± 0.09 กรัมซีโอดีต่อวันต่อลิตรถังปฏิกรณ์ เป็นเวลา 193 วันในช่วงแรกค่าซีโอดีจะแปรปรวนค่อนข้างมาก แล้วจึงเข้าสู่ภาวะสมดุลเมื่อวันที่ 175 - 193 ของการทดลองจะเห็นจากกราฟค่อนข้างเป็นเส้นตรง จึงทำการเปลี่ยนภาวะการทดลองอยู่ที่ HRT 6 ชั่วโมง OLR 7.70 ± 0.24 กรัมซีโอดีต่อวันต่อลิตรถังปฏิกรณ์ เดินระบบเป็นเวลา 56 วัน เริ่มวันที่ 194 ของการทดลอง เมื่อเริ่มเปลี่ยนภาวะค่าของซีโอดีแปรปรวนเล็กน้อยก่อนเข้าสู่ภาวะเสถียรที่ช่วงเวลา 226 - 249 แล้วจึงเปลี่ยนภาวะเป็น HRT 6 ชั่วโมง OLR 6.70 ± 0.20 กรัมซีโอดีต่อวันต่อลิตรถังปฏิกรณ์ เดินระบบเป็นเวลา 26 วัน โดยเริ่มจากวันที่ 250 ของการทดลอง ได้ผลประสิทธิภาพในการกำจัดดังนี้ 39.69 ± 1.28 , 29.30 ± 1.09 และ 30.93 ± 0.57 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (จากภาพที่ 4.6)

จากการทดลองเห็นว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสารขึ้นอยู่กับค่า HRT น้ำเข้า จะเห็นได้ว่าเมื่อค่า HRT ของน้ำเข้าเปลี่ยนแปลงลงทำให้น้ำเสียอยู่ในระบบสั้นลง เชื้อจุลินทรีย์ที่อยู่ภายในถังปฏิกรณ์ก็มีเวลาสัมผัสกับน้ำเสียได้น้อยลง ประสิทธิภาพในการบำบัดจึงลดลงตามไปด้วย เทียบที่ค่า HRT เท่ากับ 6 และ 8 ชั่วโมงที่ OLR มีค่าใกล้เคียงกันพบว่าที่ 8 ชั่วโมงมีการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดีกว่าที่ 6 ชั่วโมง และเมื่อป้อนที่ค่าที่ HRT ที่ 6 ชั่วโมง เปลี่ยนค่าของ OLR เท่ากับ 7.70 และ 6.70 กรัมซีโอดีต่อวัน ประสิทธิภาพในการกำจัดค่อนข้างใกล้เคียงกันไม่ต่างกันมาก ดังนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีน่าจะขึ้นอยู่กับค่า HRT

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

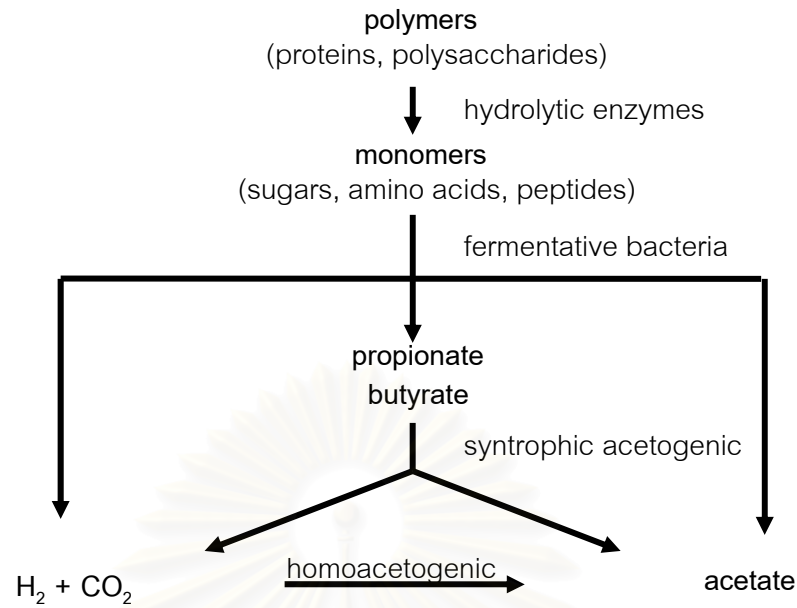


ภาพที่ 4.6 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีในถังปฏิกรณ์ที่ 1 (ผลิตแก๊สไฮโดรเจน) โดย □ แสดงค่าปริมาณซีไอดีน้ำเข้าสู่ระบบ; ■ แสดงค่าปริมาณซีไอดีที่ถูกใช้ไปในการทดลอง; ○ แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์

จากการทดลองเห็นว่าประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดีน้ำเสียในถังปฏิกรณ์ที่ 1 ที่ใช้ในการผลิตไฮโดรเจนยังคงใช้ในการบำบัด หรือลดค่าซีโอดีได้น้อย เนื่องจากปฏิกิริยาที่ใช้ในการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนในขั้นตอนแรกๆจะยังไม่สามารถ หรือลดค่าซีโอดีได้ไม่มาก คือเชื้อจุลินทรีย์ไม่สามารถนำแหล่งอาหารเหล่านี้ไปใช้ได้หมด



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.7 แผนภาพการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากปฏิกิริยาการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

จากภาพแสดงให้เห็นว่าหลังจากการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายในปฏิกิริยาการสร้างกรดขึ้นในน้ำเสียก็ยังคงเหลือ กรดที่มีคาร์บอนอะตอมไม่เกิน 5 คาร์บอนอะตอม ซึ่งผลการทดลองได้สอดคล้องกับการทดลองที่ผ่านมา (Trnovec and Britz, 1998; Lee และคณะ, 2006; Lin และคณะ, 2006; Ren และคณะ 2006; Rene และคณะ, 2006; Mohan และคณะ, 2007) คือเมื่อมีการลดค่า HRT ลงจะทำให้ระบบสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ลง ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีจึงลดลง

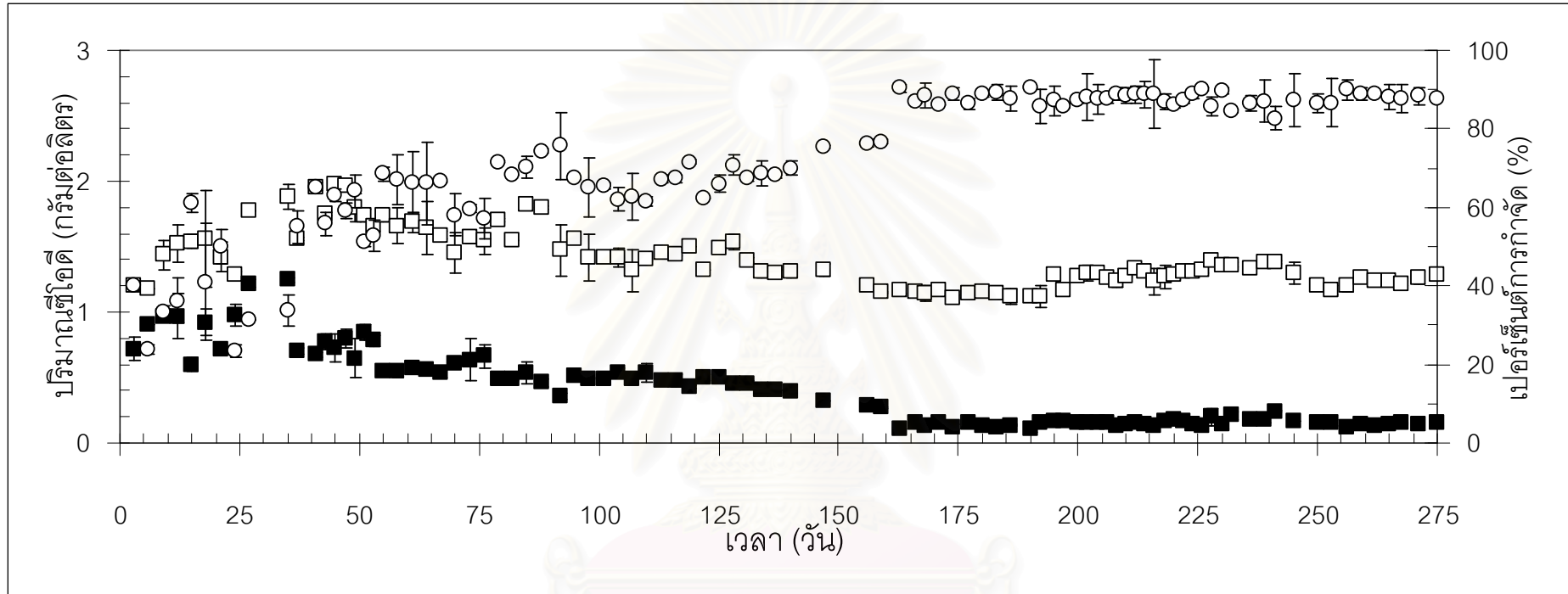
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถังปฏิกรณ์ที่ 2 (ถังผลิตแก๊สมีเทน)

น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นน้ำเสียที่ผ่านถังปฏิกรณ์ที่ 1 จึงไม่สามารถควบคุมค่าซีไอดีน้ำเข้าสู่ระบบได้ทำให้กราฟที่ได้ค่อนข้างแปรปรวนมาก และการเข้าสู่ภาวะสมดุลได้นั้นสังเกตจากค่าการเปอร์เซ็นต์การกำจัดสารอินทรีย์เท่านั้น เพราะค่าซีไอดีน้ำเข้าไม่เท่ากัน โดยเมื่อเดินระบบควบคุมภาวะที่ พีเอช 7.00 HRT 10 ชั่วโมง ค่า OLR ขึ้นกับน้ำที่ออกจากถังปฏิกรณ์ที่ 1 โดยทำการทดลองเป็นเวลา 275 วันในช่วงแรกค่าซีไอดีจะแปรปรวนค่อนข้างมาก แล้วจึงเข้าสู่ภาวะสมดุลเมื่อวันที่ 159 - 275 ของการทดลองจะเห็นจากกราฟค่อนข้างเป็นเส้นตรง ได้ผลประสิทธิภาพในการกำจัดดังนี้ 87.48 ± 1.05 เปอร์เซ็นต์ (จากภาพที่ 4.8)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.8 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีในถังปฏิกรณ์ที่ 2 (ผลิตแก๊สมีเทน) โดย □ แสดงค่าปริมาณซีโอดีน้ำเข้าสู่ระบบ; ■ แสดงค่าปริมาณซีโอดีที่ถูกใช้ไปในการทดลอง (กรัมซีโอดีต่อลิตร); ○ แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์

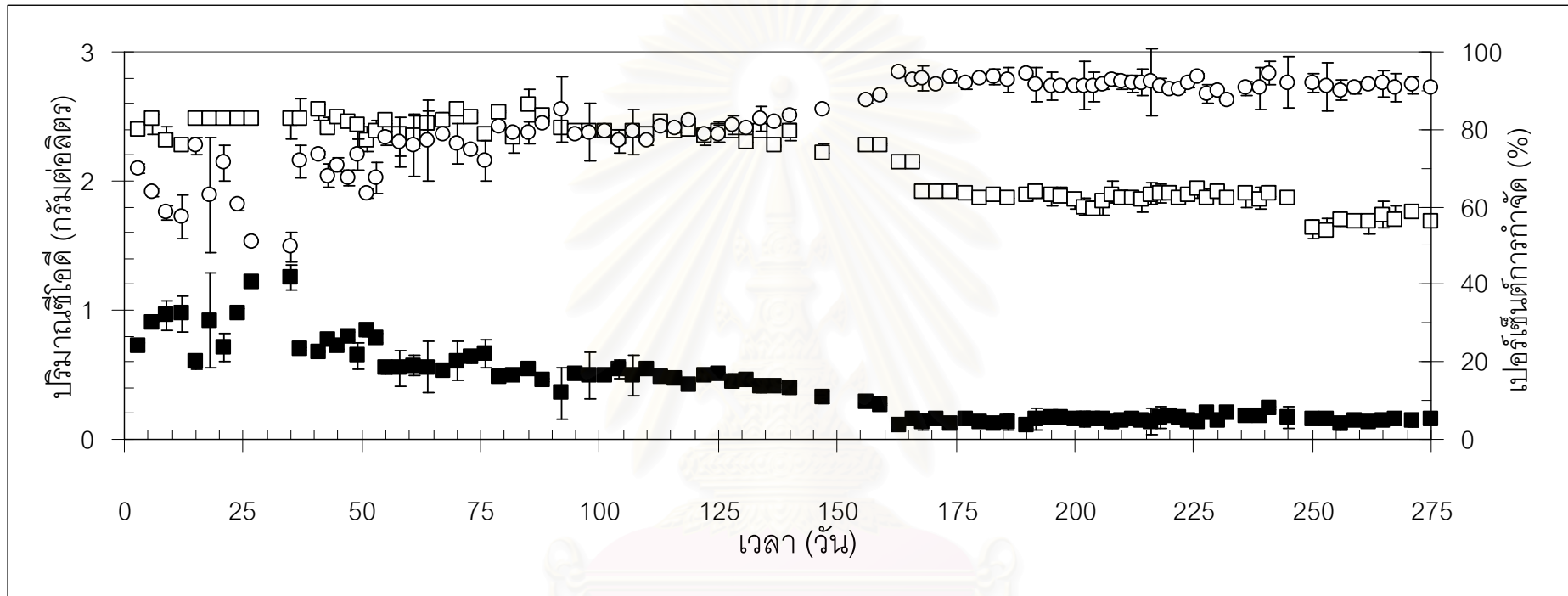
จากการกราฟเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดีเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ในขั้นตอนปฏิกิริยาการสร้างมีเทน เนื่องจากในขั้นตอนนี้มีการนำกรดระเหยง่ายที่เหลือจากการย่อยสลายของถังปฏิกรณ์ที่ 1 ใช้เปลี่ยนเป็นแก๊สมีเทน ดังปฏิกิริยาที่ 4.1



ระบบการผลิตแก๊สชีวภาพสามารถลดค่าซีโอดีโดยที่ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ลดซีโอดีลงได้เล็กน้อย เห็นได้จากกราฟภาพ 4.6 และประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเมื่อเข้าสู่ระบบที่ 2 หรือถังผลิตมีเทน ทำให้ค่าซีโอดีของระบบที่ดำเนินมา 275 วัน มีประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดีลงถึง 90.49 ± 12.05 เปอร์เซ็นต์ดังภาพที่ 4.9



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.9 แสดงประสิทธิภาพโดยรวมในการลดค่าซีไอดีของระบบทั้งสองชั้นตอนโดย □ แสดงค่าปริมาณซีไอดีน้ำเข้าสู่ระบบ; ■ แสดงค่าปริมาณซีไอดีที่ถูกใช้ไปในการทดลอง (กรัมซีไอดีต่อลิตร); ○ แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์

4.4 ปริมาณกรดระเหยได้

เมื่อเริ่มการทดลองที่ HRT เท่ากับ 8 ชั่วโมง อัตราการป้อนเข้าของสารอยู่ที่ 2.1 มิลลิลิตร ต่อนาที ค่า OLR เท่ากับ 6.54 มิลลิกรัมชีโอดีต่อวันต่อลิตรถังปฏิกรณ์ โดยจะทำการสุ่มเก็บ น้ำในบริเวณจุดเก็บตัวอย่างต่างๆของระบบ พบว่าได้ค่าดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่ HRT เท่ากับ 8 ชั่วโมง OLR เท่ากับ 6.54 ± 0.09 มิลลิกรัมชีโอดีต่อวันต่อลิตรถังปฏิกรณ์

จุดเก็บตัวอย่าง	ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (โมลาร์)		
	อะซิเตต	โพรพิโอเนต	บิวทาเรต
น้ำเข้าระบบ	0	0	0
น้ำออกจากถังปฏิกรณ์ที่ 1	12.97	3.27	0.81
น้ำออกจากถังปฏิกรณ์ที่ 2	2.45	1.19	0

จากตารางจะเห็นว่าจากจุดเก็บตัวอย่างน้ำออกจากถังปฏิกรณ์ที่ 1 พบว่ามี ปริมาณกรดสูงกว่าจุดเก็บตัวอย่างน้ำออกถังปฏิกรณ์ที่ 2 ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี ของการย่อยสลายสารแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งในจุดเก็บตัวอย่างน้ำออกจากถังปฏิกรณ์ที่ 1 มีการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้กลายเป็นกรดอินทรีย์ระเหยได้ สอดคล้องกับค่าพีเอชที่ออกมาจากถังปฏิกรณ์นี้มีค่าต่ำเช่นเดียวกันดังที่กล่าวในข้อ 4.1 เมื่อนำน้ำจากจุดนี้มาปรับค่าพีเอชแล้ว ป้อนเข้าสู่ถังที่ 2 ค่าของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายได้ลดลงอย่างมาก แสดงว่าในถังที่ 2 นี้ได้มีการนำสารอินทรีย์ระเหยง่ายเหล่านั้นไปใช้ในการผลิตแก๊สมีเทน ทำให้ปริมาณกรดอินทรีย์เหล่านี้ลดลง

การสุ่มเก็บตัวอย่างน้ำจากการทดลองที่ HRT เท่ากับ 6 ชั่วโมง อัตราการป้อนเข้าของสารอยู่ที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ค่า OLR เท่ากับ 7.68 มิลลิกรัมชีโอดีต่อวันต่อปริมาตรถังปฏิกรณ์ โดยจะทำการสุ่มเก็บน้ำในบริเวณจุดเก็บตัวอย่างต่างๆ ของระบบ ดังที่กล่าวมาแล้ว ได้ค่าดัง ตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่ HRT เท่ากับ 6 ชั่วโมง OLR เท่ากับ 7.70 ± 0.24 มิลลิกรัมซีไอดีต่อวันต่อปริมาตรถังปฏิกรณ์

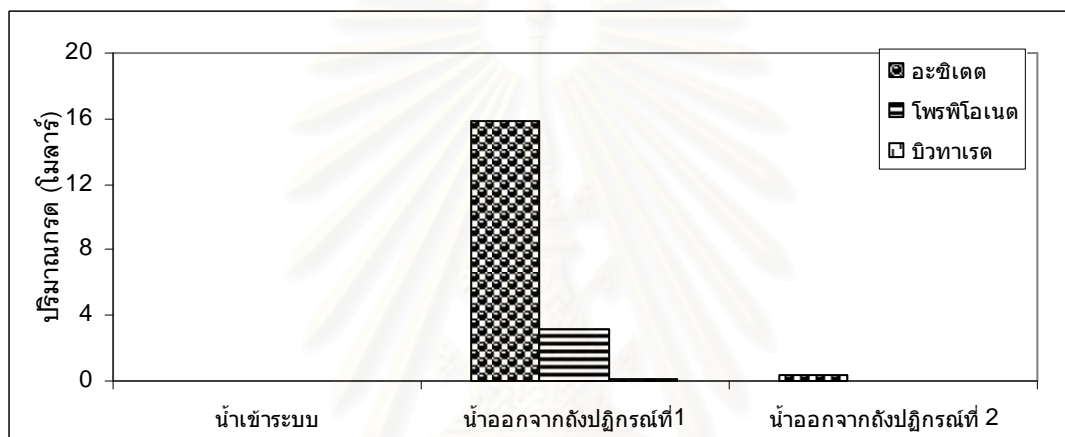
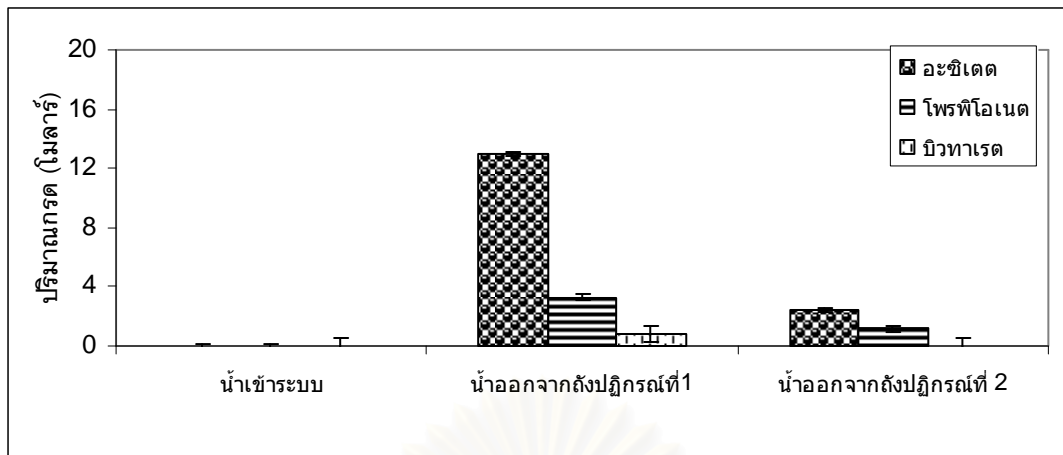
จุดเก็บตัวอย่าง	ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (โมลาร์)		
	อะซิเตต	โพรพิโอเนต	บิวทาเรต
น้ำเข้าระบบ	0	0	0
น้ำออกจากถังปฏิกรณ์ที่ 1	15.91	3.14	0.06
น้ำออกจากถังปฏิกรณ์ที่ 2	0.36	0.06	0

จะเห็นว่าจากจุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 2 พบว่ามีปริมาณกรดสูงขึ้นจาก HRT เดิมเล็กน้อย เนื่องจากสารตั้งต้นเข้าไปในระบบมากกว่าเดิม และมีเวลาในการย่อยสลายกรดอินทรีย์น้อยทำให้เกิดกรดอินทรีย์สูงขึ้น

การสุ่มเก็บตัวอย่างน้ำจากการทดลองที่ HRT เท่ากับ 6 ชั่วโมง อัตราการป้อนเข้าของสารอยู่ที่ 2.8 มิลลิตรต่ออนาที ค่า OLR เท่ากับ 6.70 มิลลิกรัมซีไอดีต่อวัน-ปริมาตรถังปฏิกรณ์ โดยจะทำการสุ่มเก็บน้ำในบริเวณจุดเก็บตัวอย่างต่างๆของระบบ ดังที่กล่าวมาแล้ว ได้ค่าดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่ HRT เท่ากับ 6 ชั่วโมง OLR เท่ากับ 6.70 ± 0.20 มิลลิกรัมซีไอดีต่อวันต่อปริมาตรถังปฏิกรณ์

จุดเก็บตัวอย่าง	ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (โมลาร์)		
	อะซิเตต	โพรพิโอเนต	บิวทาเรต
น้ำเข้าระบบ	0	0	0
น้ำออกจากถังปฏิกรณ์ที่ 1	19.16	1.51	0.53
น้ำออกจากถังปฏิกรณ์ที่ 2	0.08	0.94	0



ภาพที่ 4.10 ปริมาณกรดระเหยง่าย ก) ที่ HRT 8 ชั่วโมง OLR 6.54 กรัมชีโอดีต่อวันต่อลิตรถังปฏิกรณ์ ข) ที่ HRT 6 ชั่วโมง OLR 7.70 กรัมชีโอดีต่อวันต่อลิตรถังปฏิกรณ์ ค) ที่ HRT 6 ชั่วโมง OLR 6.70 กรัมชีโอดีต่อวันต่อลิตรถังปฏิกรณ์

จากการทดลองเห็นได้ว่า เมื่อทำการลดค่า HRT จาก 8 เป็น 6 ชั่วโมง ค่าของ กรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยที่ HRT เท่ากับ 6 ชั่วโมงมีค่าของกรดระเหยง่ายสูงกว่าที่ HRT 8 ชั่วโมง มีค่า OLR ใกล้เคียงกัน และที่ HRT ที่ 6 ชั่วโมง แตกต่างกันว่า ค่า OLR เห็นได้ว่ามีค่าของกรดเพิ่มมากขึ้น โดยที่ค่า OLR ที่ 6.70 มิลลิกรัมซีโอดีต่อวันต่อลิตรถึงปฏิบัติการจะให้ค่าของกรดระเหยง่ายสูงกว่า ที่ OLR 7.70 มิลลิกรัมซีโอดีต่อวันต่อลิตรถึงปฏิบัติการ ซึ่งแตกต่างจากการทดลองที่ผ่านมาของ Zhang และคณะ (2007) โดยผลการศึกษาการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพในถังหมักแบบ fluidized bed โดยใช้จุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน พบว่า ที่ HRT เท่ากับ 1, 2 และ 4 ชั่วโมง ให้ค่า อะซิเตตเท่ากับ 19, 21 และ 24 มิลลิโมลาร์ โพรพิโอเนต เท่ากับ 1.5, 1.0 และ 1.3 มิลลิโมลาร์ และให้ค่า บิวทาเรต เท่ากับ 14, 13 และ 12 มิลลิโมลาร์ เมื่อทำการเปลี่ยนปัจจัยพบว่าที่ OLR เท่ากับ 10, 20 และ 30 กรัมต่อลิตร ให้ค่าอะซิเตตเท่ากับ 20, 38 และ 40 มิลลิโมลาร์ โพรพิโอเนต เท่ากับ 2, 3 และ 4 มิลลิโมลาร์ และให้ค่า บิวทาเรต เท่ากับ 15, 25 และ 26 มิลลิโมลาร์ จากการทดลองจะเห็นได้ว่าผลของกรดระเหยง่ายแตกต่างจากการทดลองของ Zhang และคณะ (2007) แต่ไปในทางเดียวกับการเกิดแก๊สในการทดลองนี้ คือที่ HRT เท่ากับ 6 ชั่วโมง และ OLR เท่ากับ 6.80 กรัมต่อวันต่อลิตรถึงปฏิบัติการ ให้ค่าแก๊สไฮโดรเจนสูงที่สุด จึงมีผลสอดคล้องกับการสมการที่ 4.1 ที่กล่าวมาแล้ว คือ เมื่อปฏิกิริยาสามารถย่อยสลายสารให้ผลผลิตสุดท้ายเป็นอะซิเตตได้ ก็จะทำให้โมลของกลูโคสมากที่สุด

Zhang และคณะ., 2006 ศึกษาการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพโดยเชื้อ *Clostridium acetobutylicum* โดยใช้กลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน ควบคุมอัตราการป้อนน้ำเสียที่ 1.6 มิลลิลิตรต่อนาที HRT 2.1 นาที โดยทำการเปลี่ยนความเข้มข้นที่ 10.5, 4.5, 3.3 และ 1 ได้ อะซิเตต เท่ากับ 1.2, 1.5, 1.3 และ 0.4 มิลลิโมล ตามลำดับ บิวทาเรต เท่ากับ 0.5, 0.5, 0.6 และ 0.2 มิลลิโมล

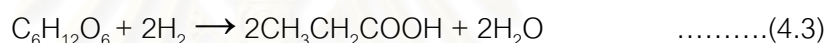
จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเป็นไปในทางเดียวกับการทดลองของ Zhang และคณะ (2007) คือ เมื่อเพิ่ม OLR จะให้ค่าของ กรดอินทรีย์ระเหยง่ายมากขึ้น และแตกต่างจากการทดลองของ Zhang และคณะ เมื่อทำการเปลี่ยน HRT เพราะแนวโน้มในการทดลองเมื่อทำการลดค่า HRT ลง ค่าของกรดควรจะมากขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากค่าพีเอช ดังในการทดลองของ Mu, Yu และ Wang (2006) ได้รายงานไว้ว่าเมื่อค่าพีเอชอยู่ที่ช่วง 3.4 - 3.5 จะให้ปริมาณของอะซิเตตสูงที่สุดในการทดลอง ซึ่งค่าพีเอชของการทดลองนี้อยู่ที่ 3.3-3.5 จึงอาจเป็นเหตุผลที่ได้ผลการทดลองตรงข้ามกับการทดลองของ Zhang และคณะ

จากภาพกรตระเหียง่ายสังเกตได้ว่าค่าของโพธิโหนดนั้นไม่เท่ากัน โดยจากการศึกษาของ Wang, Zhou และ Li (2006) พบว่าการที่มีโพธิโหนดสะสมไว้ในระบบ จะทำให้เกิดการยับยั้งการ ผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้ดังสมการที่ 4.2



ดังนั้นผลที่ทำให้ปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนแตกต่างกันระหว่าง 2 HRT และ 2 OLR อาจเกิดจากการสะสมของโพธิโหนด

จากภาพกรตระเหียง่ายสังเกตได้ว่าค่าของโพธิโหนดนั้นไม่เท่ากัน โดยจากการศึกษาของ Wang, Zhou และ Li (2006) พบว่าการที่มีโพธิโหนด สะสมไว้ในระบบจะทำให้เกิดการยับยั้งการผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้ดังสมการที่ 4.3



ดังนั้นผลที่ทำให้ปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนแตกต่างกันระหว่าง 2 HRT และ 2 OLR อาจเกิดจากการสะสมของโพธิโหนด

4.5 ผลของค่า HRT และค่า OLR ต่อค่าไฮโดรเจน

ในการทดลองนี้ทำการเปลี่ยนภาวะ 3 ครั้งเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยกำหนด 3 ภาวะเป็นที่ HRT เท่ากับ 8 ชั่วโมง OLR เท่ากับ 6.54 ± 0.09 กรัมชีโอดีต่อวันต่อลิตรของถังปฏิกรณ์ เมื่อเข้าสู่ภาวะเสถียรทำการเปลี่ยนค่า HRT เป็น 6 ชั่วโมง OLR เท่ากับ 7.70 ± 0.24 กรัมชีโอดีต่อวันต่อลิตรของถังปฏิกรณ์ เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมกับการทดลอง และเมื่อภาวะเข้าสู่สมดุลอีกครั้งทำการเปลี่ยนภาวะครั้งสุดท้ายเพื่อเป็นการยืนยันผลการทดลองของภาวะคือที่ HRT เท่ากับ 6 ชั่วโมง OLR เท่ากับ 6.70 ± 0.20 กรัมชีโอดีต่อวันต่อลิตรของถังปฏิกรณ์ โดยปรับให้ค่า OLR มีค่าใกล้เคียงกับของ HRT เท่ากับ 8 ชั่วโมงเพื่อดูประสิทธิภาพในการผลิต จากการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า HRT, OLR กับปัจจัยอื่น ๆ มีรายละเอียดดังนี้

4.5.1 อิทธิพลของค่า HRT และ OLR ต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแก๊ส

เมื่อเดินระบบการผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยใช้ HRT 8 ชั่วโมง OLR 6.54 ± 0.09 กรัมชีโอดีต่อวันต่อลิตรถังปฏิกรณ์ ปริมาตรที่ได้ต่อวันต่อกรัมชีโอดีอยู่ที่ 12.48 ± 1.39 มิลลิโมลต่อกรัมชีโอดีต่อวัน เมื่อเปลี่ยนค่า HRT เป็น 6 ชั่วโมง OLR 7.70 ± 0.24 กรัมชีโอดีต่อวันต่อลิตรถังปฏิกรณ์ ได้ปริมาตรแก๊สลดลงอยู่ที่ 7.38 ± 1.19 มิลลิโมลต่อกรัมชีโอดี และเมื่อเปลี่ยนค่า OLR เท่ากับ 6.70 ± 0.20 ที่ HRT เท่ากับ 6 ชั่วโมง พบว่าให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มสูงขึ้นประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สอยู่ที่ 21.87 ± 1.50 มิลลิโมลดังตารางที่ 4.6

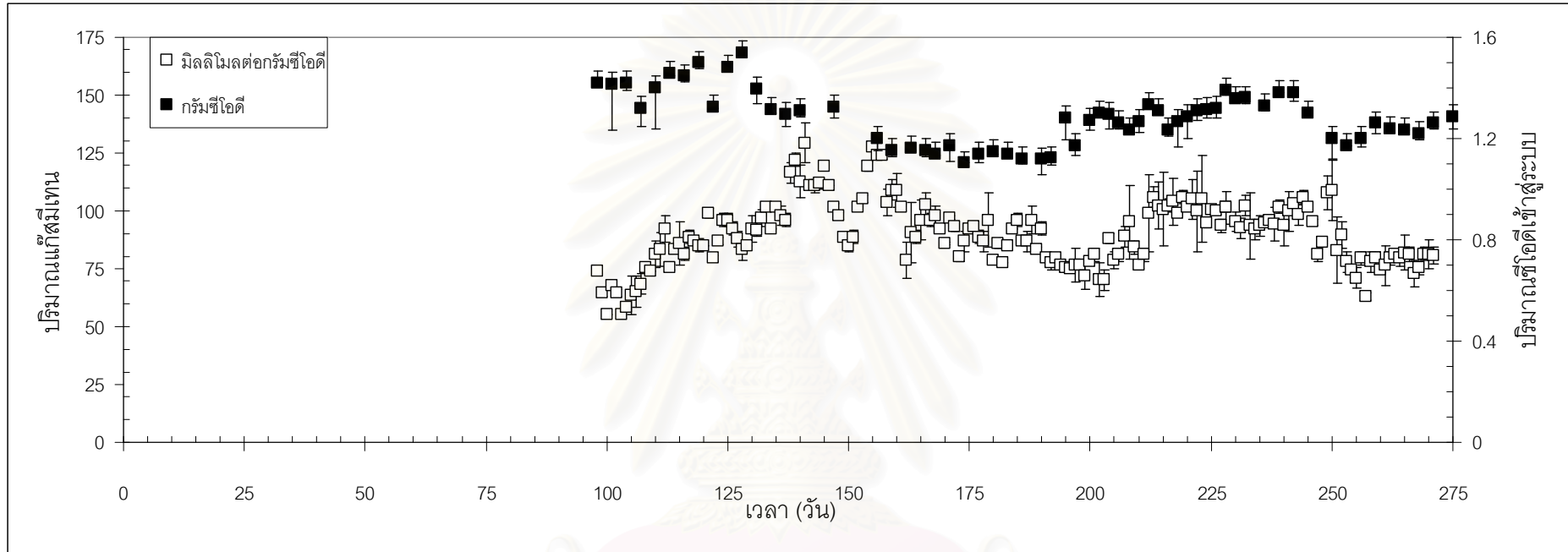
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยความสัมพันธ์ระหว่าง HRT, OLR และ ปริมาณแก๊สไฮโดรเจน

HRT (ชั่วโมง)	OLR(กรัมชีโอดีต่อ วันต่อลิตรถึง ปฏิกรณ์)	ปริมาณแก๊สที่ได้ ต่อวัน(มิลลิเมตร)	ปริมาณแก๊ส ไฮโดรเจน(มิลลิเมตร ต่อวัน)	ประสิทธิภาพของแก๊ส ไฮโดรเจน(มิลลิเมตรต่อกรัม ชีโอดี)
8	6.54 ± 0.09	1,464.47 ± 22.40	22.43 ± 1.01	12.48 ± 1.39
6	7.70 ± 0.24	1,286.76 ± 59.64	12.55 ± 0.57	7.38 ± 1.19
6	6.70 ± 0.20	1,802.67 ± 68.89	33.81 ± 1.00	21.87 ± 1.50

ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการทดลองของ Ren และคณะ (2006) ซึ่งศึกษาการผลิตไฮโดรเจนจากกากอ้อยโดยใช้การหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยทำการหาปัจจัยต่างๆที่เหมาะสมกับการผลิต ซึ่งที่ 6 ชั่วโมงให้ผลผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้ดีที่สุดต่อกรัมชีโอดีเมื่อเทียบกับ HRT อื่น

เมื่อเดินระบบการผลิตแก๊สมีเทนในถังปฏิกรณ์ที่ 2 ที่ใช้ในการผลิตแก๊สมีเทน ในถังนี้ไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงค่า HRT แต่มีการเปลี่ยนค่า OLR ของน้ำเข้าเนื่องจากค่าน้ำเข้าได้มาจากการเดินระบบของถังปฏิกรณ์ที่ 1 ทำให้ไม่สามารถควบคุมค่า OLR น้ำเข้าได้ แต่ปริมาณแก๊สที่เปลี่ยนแปลงตามค่าชีโอดีที่เข้าระบบ ซึ่งจะเห็นได้ดังภาพ 4.11 ปริมาณแก๊สมีเทนเกิดมากน้อยขึ้นอยู่กับค่าชีโอดีของน้ำเข้าด้วย ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองที่ผ่านมา [Tmovec และ Britz, (1998) Ren และคณะ (2006)] ศึกษาถึงผลของค่า OLR ที่มีต่อการผลิตแก๊สชีวภาพ เมื่อเปลี่ยนค่า OLR โดยเมื่อค่า OLR เพิ่มสูงขึ้นจะให้ปริมาณแก๊สชีวภาพเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.11 แสดงค่าซีไออดีของระบบที่เข้าสู่ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 เทียบกับประสิทธิภาพการเกิดแก๊สไอโอดีนโดยที่ □ แทนจำนวนโมลมีหน่วยเป็นมิลลิโมลต่อกรัมซีไออดี; ■ แทนปริมาณซีไออดีมีหน่วยเป็นกรัมซีไออดี

ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยการผลิตแก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทนภายใต้ภาวะการทดลองต่างๆ

ปัจจัย	1	2	3
¹ HRT	8	6	6
¹ OLR	6.54 ± 0.09	7.70 ± 0.09	6.70 ± 0.20
ช่วงเวลาที่ใช้ในการทดลอง	98-194	195-249	250-275
ปริมาณแก๊สที่ผลิตได้ในถังที่ 1 (มิลลิลิตรต่อวัน)	1,464.47 ± 22.40	1,286.76 ± 59.64	1,802.67 ± 68.89
เปอร์เซ็นต์แก๊สไฮโดรเจน	38.22 ± 6.79	25.21 ± 2.89	49.23 ± 0.50
² ปริมาณแก๊สที่ผลิตได้ในถังที่ 2 (มิลลิลิตรต่อวัน)	2,371.00 ± 114.55	2,913.34 ± 97.37	2,554.83 ± 98.70
² เปอร์เซ็นต์แก๊สมีเทน	70.00 ± 2.10	94.25 ± 4.73	88.80 ± 6.24

¹ เทียบช่วงเวลาในการเปลี่ยน HRT และ OLR ของถังปฏิบัติการที่ 1

² HRT ของถังที่สองเท่ากับ 10 ชั่วโมงตลอดการทดลอง ส่วน OLR ขึ้นอยู่กับ OLR ของน้ำออกถังที่ 1 (ข้อมูลไม่ได้แสดงในตาราง)

4.5.2 การเปลี่ยนแปลงของค่าซีไอดี

เมื่อดำเนินระบบโดยใช้ HRT 8 ชั่วโมง คิดเป็น OLR 6.54 ± 0.09 กรัมซีไอดีต่อลิตรต่อวัน ลดซีไอดีจาก $2,320 \pm 86.05$ มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น $1,460 \pm 86.05$ มิลลิกรัมต่อลิตร นั่นคือลดได้ 39.69 ± 1.28 เปอร์เซ็นต์ เมื่อดำเนินระบบโดยใช้ HRT 6 ชั่วโมง คิดเป็น OLR 7.70 ± 0.24 กรัมซีไอดีต่อวันต่อลิตรถึงปฏิกรณ์ ลดซีไอดีจาก $1,670 \pm 60.10$ มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น $1,300 \pm 48.23$ มิลลิกรัมต่อลิตร นั่นคือลดได้ 29.30 ± 1.09 เปอร์เซ็นต์ เมื่อดำเนินระบบโดยใช้ HRT 6 ชั่วโมง คิดเป็น OLR 6.70 ± 0.20 กรัมซีไอดีต่อวันต่อลิตรถึงปฏิกรณ์ ลดซีไอดีจาก $1,690 \pm 57.02$ มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น $1,270 \pm 45.20$ มิลลิกรัมต่อลิตร คือลดได้ 30.93 ± 0.57 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยความสัมพันธ์ระหว่าง HRT, OLR และ ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีในถังปฏิกรณ์ที่ 1

HRT (ชั่วโมง)	OLR(กรัมซีไอดีต่อวันต่อลิตรถึงปฏิกรณ์)	ค่าซีไอดีน้ำเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าซีไอดีน้ำออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี (เปอร์เซ็นต์)
8	6.54 ± 0.09	$2,320 \pm 86.05$	$1,460 \pm 86.05$	39.69 ± 1.28
6	7.68 ± 0.24	$1,670 \pm 60.10$	$1,300 \pm 48.23$	29.30 ± 1.09
6	6.70 ± 0.20	$1,690 \pm 57.02$	$1,270 \pm 45.20$	30.93 ± 0.57

จากตารางแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถลดซีไอดีได้จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมี HRT มากขึ้น โดยที่ HRT 8 ชั่วโมง คิดเป็น OLR 6.54 ± 0.09 กรัมซีไอดีต่อลิตรต่อวัน มีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีสูงสุด เท่ากับ 39.69 ± 1.28 เปอร์เซ็นต์ และที่ HRT 6 ชั่วโมง คิดเป็น OLR 7.70 ± 0.24 กรัมซีไอดีต่อวันต่อลิตรถึงปฏิกรณ์ มีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีต่ำที่สุดเท่ากับ 29.30 ± 1.09 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากระบบที่มี HRT น้อย มีปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบมาก ทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้ทันจึงมีสารอินทรีย์เหลืออยู่ในระบบมาก เป็นเหตุให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์น้อยด้วย แต่เมื่อดำเนินระบบโดยมี HRT มากขึ้น จุลินทรีย์มีเวลาที่จะเมตาบอลิซึม (metabolize) สารอินทรีย์ต่าง ๆ ได้ ทำให้ระบบมีสารอินทรีย์เหลืออยู่น้อยลง ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์จึงสูงขึ้นด้วย สอดคล้องกับการทดลองก่อนหน้านี้ (Cho และคณะ, 1995; Yilmazer and Yenigun, 1999; Carbone และคณะ, 2002; Elmitwalli และคณะ, 2002; Held และคณะ, 2002) โดย Cho และคณะ (1995) ที่พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี และปริมาณซีไอดี ที่ออกจากระบบลดลงเมื่อเพิ่ม OLR ให้มากขึ้น (HRT น้อยลง) โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีสูงถึง 90 เปอร์เซ็นต์ การทดลองของ Yilmazer and Yenigun (1999) ศึกษาการย่อยสลาย cheese whey ภายใต้ภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน โดยใช้ถังหมักกรดแบบ CSTR และถังหมักแก๊สแบบ anaerobic filter ที่ HRT 3, 4, 5 และ 6 วัน ตามลำดับ พบว่าที่ HRT 6 วัน สามารถกำจัดซีไอดีได้ ประมาณ 67 เปอร์เซ็นต์ เมื่อลด HRT เป็น 4 วัน สามารถกำจัดซีไอดีได้ประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อลด HRT เป็น 3 วัน การกำจัดซีไอดีมีค่าลดลงเหลือ 63 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจาก HRT ต่ำกว่า ระยะเวลาที่ methanogenic bacteria ใช้ในการเจริญทำให้จุลินทรีย์ถูกดึงออกจากถังหมักการทดลองของ Carbone และคณะ (2002) ศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานแปรงมันสำปะหลังด้วยกระบวนการย่อยสลายภายใต้ภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน โดยใช้ถังหมักกรดแบบ CSTR และถังหมักแก๊สแบบ hybrid type (upflow anaerobic blanket reactor + anaerobic filter) พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดี ของระบบอยู่ในช่วง 80-87 เปอร์เซ็นต์ การทดลองของ Elmitwalli และคณะ (2002) ศึกษาการย่อยสลายของเสียจากครีวเรื่อนภายใต้ภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน โดยใช้ถังหมักกรดแบบ anaerobic filter และถังหมักแก๊สแบบ anaerobic hybrid พบว่าที่ HRT 4 ชั่วโมง ในถังหมักกรดและ 8 ชั่วโมง ในถังหมักแก๊ส มีการกำจัด COD_t, COD_{ss}, COD_{col} และ COD_{dis} เท่ากับ 70.6, 91.3, 59.6 และ 55.2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่ HRT 2 ชั่วโมง ในถังหมักกรด และ 4 ชั่วโมง ในถังหมักแก๊ส มีการกำจัด COD_t, COD_{ss}, COD_{col} และ COD_{dis} เท่ากับ 58.6, 70.5, 45.3 และ 54.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และที่ HRT 3 ชั่วโมง ในถังหมักกรดและ 6 ชั่วโมง ในถังหมักแก๊ส มีการกำจัด COD_t, COD_{ss}, COD_{col} และ COD_{dis} เท่ากับ 63.0, 78.8, 45.8 และ 53.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การทดลองของ Held และคณะ (2002) ศึกษาการย่อยสลายของเสีย

เทศบาลภายใต้ภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน โดยใช้ถังหมักกรดแบบ CSTR และถังหมักแก๊สแบบ anaerobic filter พบว่าที่ OLR 9.8 กก. ซีไอดี/ลูกบาศก์เมตรวัน ในถังหมักกรด และ 12.2 กิโลกรัมซีไอดี/ลูกบาศก์เมตรวัน ในถังหมักแก๊สสามารถกำจัดซีไอดีได้ 67.7 เปอร์เซ็นต์ ในถังหมักกรด และ 37.5 เปอร์เซ็นต์ ในถังหมักแก๊ส

ในถังปฏิกรณ์ที่ 2 ดำเนินระบบโดยใช้ HRT 10 ชั่วโมง โดยที่ค่า OLR ไม่สามารถกำหนดได้เนื่องจากน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบมาจากถังปฏิกรณ์ที่ 1 ซึ่งคิดได้เป็นค่าเฉลี่ยเป็นช่วงๆ โดยคิดแบ่งตามค่า HRT ของถังปฏิกรณ์ที่ 1 ช่วงเวลา 98 - 194 วันที่ใช้ในการทดลอง ลดซีไอดีจาก $1,260 \pm 36.05$ มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 520 ± 12.17 มิลลิกรัมต่อลิตร นั่นคือลดได้ 65.10 ± 3.04 เปอร์เซ็นต์ เมื่อดำเนินระบบในช่วงเวลา 195 - 249 วันที่ใช้ในการทดลอง ลดซีไอดี จาก $1,300 \pm 48.23$ มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 160 ± 20.36 มิลลิกรัมต่อลิตร นั่นคือลดได้ 87.40 ± 5.23 เปอร์เซ็นต์ เมื่อดำเนินระบบในช่วงเวลา 250 - 275 วันที่ใช้ในการทดลอง ลดซีไอดีจาก $1,270 \pm 45.20$ มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 140 ± 16.23 มิลลิกรัมต่อลิตร คือลดได้ 88.33 ± 0.23 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยความสัมพันธ์ระหว่าง HRT, OLR และ ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีในถังปฏิกรณ์ที่ 2

HRT (ชั่วโมง)	ค่าซีไอดีน้ำเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าซีไอดีน้ำออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี (เปอร์เซ็นต์)
8	$1,260 \pm 36.05$	520 ± 12.17	65.10 ± 3.04
6	$1,300 \pm 48.23$	160 ± 20.36	87.40 ± 5.23
6	$1,270 \pm 45.20$	140 ± 16.23	88.33 ± 0.23

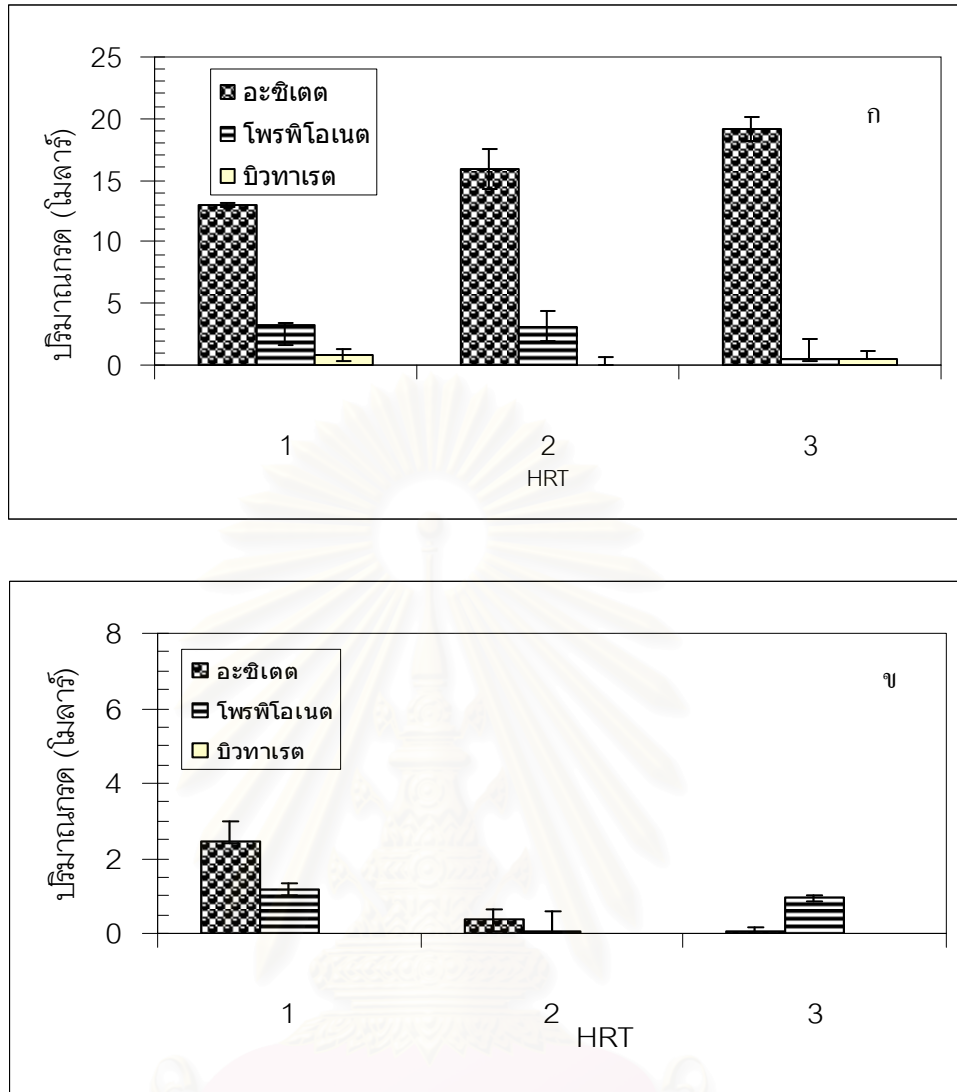
จากตารางพบว่าในช่วงแรกของระบบยังมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ต่ำอยู่เมื่อระบบดำเนินไป ประสิทธิภาพการกำจัดจึงเพิ่มขึ้น เมื่อดูประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ทั้ง 2 ขั้นตอนพบว่าประสิทธิภาพของระบบยูเอเอสบีที่ใช้ในการทดลองมีประสิทธิภาพในการลดค่าสารอินทรีย์ได้ร้อยละ 90.49 ± 12.05

4.5.3 การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบกรดระเหยได้

เมื่อดำเนินระบบที่ HRT 8 ชั่วโมง OLR 6.54 ± 0.09 กรัมซีไอต่อวันต่อลิตรถึงปฏิกรณ์ ที่ค่า HRT เป็น 6 ชั่วโมง OLR 7.68 ± 0.24 กรัมซีไอต่อวันต่อลิตรถึงปฏิกรณ์ และเมื่อเปลี่ยนค่า OLR เท่ากับ 6.70 ± 0.20 ที่ HRT เท่ากับ 6 ชั่วโมง พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของกรดระเหยง่าย ดังภาพที่ 4.12

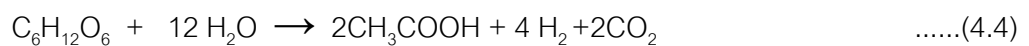


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.12 ปริมาณกรดระเหยง่ายที่ค่า HRT ต่างๆ โดยหมายเลข 1 แสดงค่า HRT เท่ากับ 8 ชั่วโมง OLR 6.54 ± 0.09 กรัมชีโอดีต่อวันต่อลิตรถังปฏิกรณ์ หมายเลข 2 แสดงค่า HRT เท่ากับ 6 ชั่วโมง OLR 7.68 ± 0.24 กรัมชีโอดีต่อวันต่อลิตรถังปฏิกรณ์ หมายเลข 3 แสดงค่า HRT เท่ากับ 6 ชั่วโมง OLR 6.70 ± 0.20 กรัมชีโอดีต่อวันต่อลิตรถังปฏิกรณ์; ก) ปริมาณกรดระเหยง่ายในน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์ที่ 1, ข) ปริมาณกรดระเหยง่ายในน้ำเสียจากถังปฏิกรณ์ที่ 2

จากภาพ ก) ค่าของอะซิเตดจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปลี่ยนให้ HRT และ OLR ลง ซึ่งเป็นผลให้ปริมาณกรดไฮโดรเจนเพิ่มมากขึ้นดังปฏิกิริยาที่ 4.4



ซึ่งจากทฤษฎีจะให้จำนวนโมลของไฮโดรเจนออกมา 4 โมลจากน้ำตาลกลูโคส 1 โมล ซึ่งให้ค่าของแก๊สไฮโดรเจนสูงที่สุด เป็นไปตามผลการทดลองนี้ ภาพ ข) เป็นกราฟของปริมาณกรดระเหยง่ายของน้ำเสียในถังที่ 2 จากกราฟปริมาณกรดระเหยง่ายลดลงเป็นอย่างมากสอดคล้องกับประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่เพิ่มสูงขึ้นของระบบ และให้ปริมาณแก๊สมีเทนออกมาสูงตามสมการที่ 4.5



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ในการวิจัยนี้ ได้พัฒนาการผลิตแก๊สไฮโดรเจนและมีเทนแบบสองขั้นตอนโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ UASB โดยขั้นที่ 1 เป็นการผลิตแก๊สไฮโดรเจน ส่วนขั้นที่ 2 เป็นการผลิตแก๊สมีเทน ซึ่งถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการผลิตแก๊สไฮโดรเจน และมีเทนมีปริมาตรเท่ากับ 1 และ 1.5 ลิตร ตามลำดับ ภาวะที่ใช้ในการทดลองของขั้นตอนการผลิตแก๊สไฮโดรเจน คือ ค่าพีเอชน้ำเข้าเท่ากับ 5.5 อุณหภูมิห้อง มีการทดลองโดยการแปรผันระยะเวลาการกักเก็บทางชลศาสตร์ (hydraulic retention time, HRT) 2 ค่า คือ 8 และ 6 ชั่วโมง และมีการแปรผันค่าอัตราการป้อนสารอินทรีย์ เข้าถังปฏิกรณ์ (organic loading rate, OLR) คือ 6.54 ± 0.09 , 6.70 ± 0.20 และ 7.70 ± 0.24 กรัมซีไอต่อวันต่อลิตรถังปฏิกรณ์ ส่วนขั้นตอน การผลิตแก๊สมีเทนนั้น น้ำที่เข้าถังปฏิกรณ์เป็นน้ำ ที่ออกจากถังผลิตแก๊สไฮโดรเจนนำมาปรับค่าพีเอชอยู่ที่ 7.0 อุณหภูมิที่ใช้เป็นอุณหภูมิห้อง ระยะเวลาการกักเก็บทางชลศาสตร์กำหนดค่าเดียวตลอดการทดลองคือ 10 ชั่วโมง ได้ผลดังตาราง ที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สรุปผลการทดลองที่สภาวะต่าง ๆ ของระบบ

ปัจจัย	1	2	3
¹ HRT	8	6	6
¹ OLR	6.54 ± 0.09	7.70 ± 0.24	6.70 ± 0.20
พีเอชเริ่มต้น	5.5	5.5	5.5
พีเอชน้ำออก	3.45±0.01	3.55±0.05	3.65±0.01
ปริมาณแก๊สไฮโดรเจน (มิลลิลิตรต่อวัน)	1,464.47 ± 22.40	1,286.76 ± 59.64	1,802.67 ± 68.89
ปริมาณแก๊สไฮโดรเจน (มิลลิโมลต่อกรัมชีโอดีที่ใช้)	12.48 ± 1.39	7.38 ± 1.19	21.87 ± 1.50
เปอร์เซ็นต์การกำจัดชีโอดี	38.22 ± 6.79	25.21 ± 2.81	49.23 ± 0.50
ความเข้มข้นอะซิเตท (โมลาร์)	12.97	15.91	19.16
ความเข้มข้นโพธิโอเนท (โมลาร์)	3.27	3.14	1.51
ความเข้มข้นบิวทาเรท (โมลาร์)	0.81	0.06	0.53
² ปริมาณแก๊สมีเทนต่อวัน(มิลลิลิตรต่อวัน)	2,371.00 ± 114.55	2,913.34 ± 97.37	2,554.83 ± 98.70
² ปริมาณแก๊สมีเทน(มิลลิโมลต่อกรัมชีโอดีที่ใช้)	87.62 ± 2.34	96.00 ± 4.04	78.89 ± 4.06
² เปอร์เซ็นต์การกำจัดชีโอดี	70.00 ± 2.10	94.25 ± 4.73	88.80 ± 6.24

¹ เทียบช่วงเวลาในการเปลี่ยน HRT และ OLR ของถังปฏิกรณ์ที่ 1

² HRT ของถังที่สองเท่ากับ 10 ชั่วโมงตลอดการทดลอง ส่วน OLR ขึ้นอยู่กับ OLR ของน้ำออกถังที่ 1 (ข้อมูลไม่ได้แสดงในตาราง)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

สมชาย พรชัยวิวัฒน์, “ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบชั้นตัวกลางลอยตัว,”

(วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ

วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2538), หน้า 80.

สุภัณฑิต นิมรัตน์. จุลชีววิทยาของน้ำเสีย. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,

2548.

อาริยา วิรัชวรกุล, “การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะ

ไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน,” (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชา

จุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2546), หน้า 173.

ภาษาอังกฤษ

AL-Dabbas, M. A. F. (1998). Reduction of methane emissions and utilization of municipal waste for energy in Amman Renewable Energy 14: 427-434.

Archer, D. B. and Kirsop, B. H. (1991). The microbiology and control of anaerobic digestion: In A. W.ed., Anaerobic Digestion: A Waste Treatment Technology.

London, Elsevier Applied Science Publisher.

Atif, A. A. Y., Fakhru'l-Razi, A., Ngan, M. A., Morimoto, M., Iyuke, S. E. and Veziroglu, N.

T. (2004). Fed batch production of hydrogen from palm oil mill effluent using

anaerobic microflora. International Journal of Hydrogen Energy 30: 1393-1397.

Bitton, G. (1994). Wastewater microbiology. Chichester, John Wiley & Sons.

- Borja, R., Gonzalez, E., Raposo, F., Millan, F. and Martin, A. (2001). Performance evaluation of a mesophilic anaerobic fluidized-bed reactor treating wastewater derived from the production of proteins from extracted sunflower flour. Bioresource Technology 76: 45-52.
- Carbone, S. R., Dasilva, F. M., Tavares, C. R. G. and Diasfilho, B. P. (2002). Bacterial population of a two-phase anaerobic digestion process treating effluent of cassava starch factory. Environmental Technology 23: 591-597.
- Cho, J. K., Park, S. C. and Chang, H. N. (1995). Biochemical methane potential and solid state anaerobic digestion of Korean food wastes. Bioresource Technology 52: 245-253.
- Dinsdale, R. M., Premier, G. C., Hawkes, F. R. and Hawkes, D. L. (2000). Two-stage anaerobic codigestion of waste activated sludge and fruit/vegetable waste using inclined tubular digesters. Bioresource Technology 72: 159-168.
- Elmitwalli, T. A., Oahn, K. L. T., Zeeman, G. and Lettinga, G. (2002). Treatment of domestic sewage in a two-step anaerobic filter/anaerobic hybrid system at low temperature. Water Research 36: 2225-2232.
- Fernandez, A., Sanchez, A. and Font, X. (2005). Anaerobic co-digestion of a simulated organic fraction of municipal solid wastes and fats of animal and vegetable origin. Biochemical Engineering Journal 26: 22-28.
- Han, S. K. and Shin, H. S. (2004). Biohydrogen production by anaerobic fermentation of food waste. International Journal of Hydrogen Energy 29: 569-577.

- Heguang, Z., Shunsaku, U., Yasio, A. and Jun, M. (2002). Hydrogen production as a novel process of wastewater treatment-studies on tofu wastewater with entrapped *R. sphaeroides* and mutagenesis. International Journal of Hydrogen Energy 27: 1349-1357.
- Held, C., Wellacher, M., Robra, K.-H. and Gubitz, G. M. (2002). Two-stage anaerobic fermentation of organic waste in CSTR and UFAF-reactors. Bioresource Technology 81: 19-24.
- Holland, K. T., Knapp, J. S. and Shoesmith, J. G. (1987). Anaerobic bacteria. New York, Chapman and Hall.
- Ince, O. (1998). Performance of a two-phase anaerobic digestion system when treating dairy wastewater. Water Research 32(9): 2707-2713.
- Lee, K. S., Lo, Y. C., Lin, P. J. and Chang, J. S. (2006). Improving biohydrogen production in a carrier-induced granular sludge bed by altering physical configuration and agitation pattern of the bioreactor. International Journal of Hydrogen Energy 31: 1648-1657.
- Lin, C. N., Wu, S. Y. and Chang, J. S. (2006). Fermentative hydrogen production with a draft tube fluidized bed reactor containing silicone-gel-immobilized anaerobic sludge. International Journal of Hydrogen Energy 31: 2200-2210.
- Mohan, S. V., Bhaskar, Y. V. and Sarma, P. N. (2007). Biohydrogen production from chemical wastewater treatment in biofilm configured reactor operated in periodic

discontinuous batch mode by selectively enriched anaerobic mixed consortia.

Water Research ARTICLE IN PRESS.

Morimoto, M., Atsuko, M., Atif, A. A. Y., Ngan, M. A. and Fakhru'l-Razi, A. (2004).

Biological production of hydrogen from glucose by natural anaerobic microflora.

International Journal of Hydrogen Energy 29: 709-713.

Mu, Y., Yu, H. Q. and Wang, Y. (2006). The role of pH in the fermentative H₂ production

from an acidogenic granule-based reactor. Chemosphere ARTICLE IN PRESS.

Mu, Y., Zheng, X. J., Yu, H. Q. and Zhu, R. F. (2006). Biological hydrogen production by

anaerobic sludge at various temperatures. International Journal of Hydrogen

Energy 31: 780-785.

Patel, H. and Madamwar, D. (2001). Single and multichamber fixed film anaerobic

reactors for biomethanation of acidic petrochemical wastewater-systems

performance. Process Biochemistry 36: 613-619.

Ren, N., Li, J., Li, B., Wang, Y. and Liu, S. (2006). Biohydrogen production from

molasses by anaerobic fermentation with a pilot-scale bioreactor system.

International Journal of Hydrogen Energy 31: 2147-2157.

Rene, A., Saul, V. and Gunnar, L. (2006). Biogas production from llama and cow manure

at high altitude. Biomass and Bioenergy 30: 66-75.

Trnovec, W. and Britz, T. J. (1998). Influence of organic loading rate and hydraulic

retention time on the efficiency of a UASB bioreactor treating a canning factory

effluent. Water S.A. 24: 1147-1152.

Wang, L., Zhou, Q. and Li, F. T. (2006). Avoiding propionic acid accumulation in the anaerobic process for biohydrogen production. Biomass and Bioenergy 30: 177-182.

Wu, K. J. and Chang, J. S. (2007). Batch and continuous fermentative production of hydrogen with anaerobic sludge entrapped in a composite polymeric matrix. Process Biochemistry 42: 279-284.

Yilmazer, G. and Yenigun, O. (1999). Two-phase anaerobic treatment of cheese whey. Water Science and Technology 40(1): 289-295.

Zhang, H., Bruns, M. A. and Logan, B. E. (2006). Biological hydrogen production by *Clostridium acetobutylicum* in an unsaturated flow reactor. Water Research 40: 728-734.

Zhang, Z. P., Tay, J. H., Show, K. Y., Yan, R., Liang, D. T., Lee, D. J. and Jiang, W. J. (2007). Biohydrogen production in a granular activated carbon anaerobic fluidized bed reactor. International Journal of Hydrogen Energy 32: 185-191.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิธีการคำนวณ

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของแก๊ส

จากผลการวิเคราะห์เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟฟี จะได้พื้นที่ใต้กราฟมาโดยที่เราจะนำพื้นที่ใต้กราฟมาหาเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของแก๊ส โดยเทียบกับพื้นที่ใต้กราฟของแก๊สมาตรฐานดังตัวอย่างนี้

วันที่ 23 พฤศจิกายน 2549 (วิเคราะห์ทั้งหมด 3 ซ้ำ)

ตารางผนวกที่ 2 ตัวอย่างพื้นที่ใต้กราฟที่ใช้ในการคำนวณหาปริมาตรแก๊ส

ชนิดของแก๊สมาตรฐาน	เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของแก๊สมาตรฐาน	พื้นที่ใต้กราฟแก๊สมาตรฐาน	พื้นที่ใต้กราฟแก๊สตัวอย่างในถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีที่ 1 (ถังผลิตไฮโดรเจน ชุดที่ 1)
ไฮโดรเจน	4.03	714	4921,4432,4524
ไนโตรเจน	5.01	22134	46861,44507,43310
คาร์บอนไดออกไซด์	5.01	33898	660839,653812,668679

จากตารางจะได้พื้นที่ใต้กราฟแก๊สตัวอย่างในถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีที่ 1 (ชุดที่ 1) ซ้ำที่ 1 เท่ากับ 4921 และ พื้นที่ใต้กราฟแก๊สมาตรฐาน เท่ากับ 714 เทียบกับเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของแก๊สมาตรฐานจะได้

เปอร์เซ็นต์ของแก๊สไฮโดรเจนเทียบกับแก๊สไฮโดรเจนมาตรฐาน เท่ากับ

$$\frac{4921}{714} \times 4.03 = 27.77539 \%, 25.01535\%, 25.53462\%$$

เฉลี่ย = 26.1085 %

เปอร์เซ็นต์ของแก๊สไนโตรเจนเทียบกับแก๊สไนโตรเจนมาตรฐาน เท่ากับ

$$\frac{46861}{22134} \times 5.01 = 0.72054 \%, 0.68434 \%, 0.66594\%$$

เฉลี่ย = 0.6903 %

เปอร์เซ็นต์ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เทียบกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มาตรฐาน

$$\text{เท่ากับ } \frac{660839}{33898} \times 5.01 = 97.66958\%, 96.63101\%, 98.82830\%$$

$$\text{เฉลี่ย} = 97.7096\%$$

การคำนวณหาจำนวนโมลรวมของแก๊ส

ปริมาตรรวมของก๊าซทั้งหมดในวันนี้ เท่ากับ 1250 มิลลิลิตร

จากสูตรการหาจำนวนโมล จะได้
$$n_i = \frac{PV}{RT}$$

โดยที่ P คือ ความดันบรรยากาศ เท่ากับ 1 atm

V คือ ปริมาตรแก๊สที่เก็บได้ต่อวัน

R คือ ค่าคงที่แก๊ส เท่ากับ $0.082054 \text{ L}\cdot\text{atm}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

T คือ อุณหภูมิห้องเท่ากับ 298°K

แทนสมการจะได้

$$n_i = \frac{1\text{atm} \times 1250\text{ml} \times 1\text{L}}{0.082054\text{L}\cdot\text{atm}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} \times 298^\circ\text{K}^{-1} \times 1000\text{mL}}$$

$$= 0.0511 \text{ mol}$$

จะได้จำนวน โมลรวม ในถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีถังที่ 1 (ถังผลิตไฮโดรเจน ชุดที่ 1) เท่ากับ 0.0511 โมล

การคำนวณหาจำนวนโมลของแก๊ส

จากเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นแก๊สไฮโดรเจน(เฉลี่ย)ที่ได้ข้างต้นนำมาคูณกับจำนวนโมลรวมที่ได้จะได้เท่ากับ

$$\frac{26.1085}{100} \times 0.0511 = 0.0133 \text{ โมลไฮโดรเจน}$$

จากเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นแก๊สไนโตรเจน(เฉลี่ย)ที่ได้ข้างต้นนำมาคูณกับจำนวนโมลรวมที่ได้จะได้เท่ากับ

$$\frac{0.6903}{100} \times 0.0511 = 0.0004 \text{ โมลไนโตรเจน}$$

จากเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์(เฉลี่ย)ที่ได้ข้างต้นนำมาคูณกับจำนวนโมลรวมที่ได้จะได้เท่ากับ

$$\frac{97.7096}{100} \times 0.0511 = 0.0499 \text{ โมลคาร์บอนไดออกไซด์}$$

การคำนวณหาปริมาตรแก๊ส

จากเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นแก๊สไฮโดรเจน(เฉลี่ย)ที่ได้ข้างต้นนำมาคูณกับปริมาตรก๊าซรวมทั้งหมดที่เก็บได้ในวันนี้จะได้เท่ากับ

$$\frac{26.1085}{100} \times 1250 = 326.36 \text{ มิลลิลิตร}$$

จากเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นแก๊สไนโตรเจน(เฉลี่ย)ที่ได้ข้างต้นนำมาคูณกับปริมาตรก๊าซรวมทั้งหมดที่เก็บได้ในวันนี้จะได้เท่ากับ

$$\frac{0.6903}{100} \times 1250 = 8.63 \text{ มิลลิลิตร}$$

จากเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์(เฉลี่ย)ที่ได้ข้างต้นนำมาคูณกับปริมาตรก๊าซรวมทั้งหมดที่เก็บได้ในวันนี้จะได้เท่ากับ

$$\frac{97.7096}{100} \times 1250 = 1221.37 \text{ มิลลิลิตร}$$

ในส่วนของถังปฏิกรณ์ยูเอเอสพีถังที่ 1 (ถังผลิตไฮโดรเจน ชุดที่ 2) และถังปฏิกรณ์ยูเอเอสพีถังที่ 2 (ถังผลิตมีเทน ชุดที่ 1 และ ชุดที่ 2) ทำการคำนวณด้วยวิธีเดียวกันนี้

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวภนิตา เกษมโชติช่วง เกิดเมื่อวันที่ 14 ตุลาคม พ.ศ. 2526 ที่จังหวัดชลบุรี จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น และมัธยมศึกษาตอนปลาย สายวิทยาศาสตร์ จากโรงเรียนชลกันยานุกูล อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี และได้รับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป จากคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2547 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2548 และสำเร็จการศึกษาชั้นปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ในภาคปลายปีการศึกษา 2549



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย