รายงานผลการวิจัย
ทุนวิจัยรัชดาภิเษกสมโภช

เรื่อง

ระบบยูเอเอสบี-ตัวกลางกรองแบบอุณหภูมิสูงและสองขั้นตอนสำหรับบำบัดน้ำกากส่าและผลิตก๊าซชีวภาพ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดย

ทส
วท 15
009122

สุเมธ ชวเดช

มกราคม 2540

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทุนวิจัยรัชดาภิเษกสมโภช

รายงานผลการวิจัย

ระบบยูเอเอสบี-ตัวกลางกรองแบบอุณหภูมิสูงและสองขั้นตอนสำหรับบำบัดน้ำกากส่าและผลิตก๊าซชีวภาพ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดย

สุเมธ ชวเดช

มกราคม 2540

I17994580. 27 ม.ค. 2542

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ดี ทั้งนี้เนื่องจากได้รับการสนับสนุนด้วยดีจากหลายฝ่าย โดยได้รับเงินสนับสนุนการวิจัยจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย "ทุนวิจัยรัชดาภิเษกสมโภช" ประจำปี 2533 ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการสนับสนุนและอำนวยความสะดวกเกี่ยวกับสถานที่และการสร้างเครื่องมือทดลอง โรงงานสุราแสงโสมในการอนุเคราะห์จัดหาน้ำเสียเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้ และสุดท้ายผู้วิจัยขอขอบพระคุณบริษัทสุราทิพย์ที่ให้ความอนุเคราะห์จัดหาตะกอนแบคทีเรียที่โรงงานสุรา จังหวัดฉะเชิงเทรา เพื่อใช้ในการเริ่มต้นการทดลองระบบหมักในงานวิจัยนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชื่อโครงการวิจัย	ระบบยูเอเอสบี-ตัวกลางกรองแบบอุณหภูมิสูงและสองขั้นตอนสำหรับบำบัดน้ำกากส่าและผลิตก๊าซชีวภาพ
ชื่อผู้วิจัย	ดร.สุเมธ ชวเดช
เดือนและปีที่ทำวิจัยเสร็จ	มกราคม 2540

บทคัดย่อ

ระบบหมักที่ใช้ศึกษาเป็นระบบตัวกลางกรอง-ยูเอเอสบีสองขั้นตอนแบบอุณหภูมิสูง ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 3 ประการคือ หลักการสองขั้นตอน, ระบบหมักประสิทธิภาพสูง (ระบบหมักตัวกลางกรองและระบบหมักชั้นตะกอนไหลขึ้น) และการควบคุมที่อุณหภูมิสูง ทั้งนี้เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดและการผลิตก๊าซชีวภาพ ในการทดลองนี้ใช้น้ำกากส่าจากโรงงานสุราซึ่งมีค่าซีโอดี 90,000 -120,000 มก/ล ระบบหมักในการทดลองนี้ประกอบด้วยถังหมักกรด (ตัวกลางกรอง) มีขนาดจุ 6.8 ลิตร และถังหมักมีเธน (ตัวกลางกรอง-ยูเอเอสบี) มีขนาดจุ 55 ลิตร ถังหมักทั้งสองถังถูกควบคุมอุณหภูมิที่ 55 °ซ ระบบนี้ได้แสดงถึงเสถียรภาพของระบบที่สูงมาก และสามารถรับอัตราป้อนสารอินทรีย์ได้สูงถึง 13.05 กก ซีโอดี/ม^{3}วัน อัตราป้อนสารอินทรีย์ที่เหมาะสมเท่ากับ 6.38 กก ซีโอดี/ม^{3}วัน สำหรับประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด และที่สภาวะนี้ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเท่ากับ 52 % ในการเปรียบเทียบกับระบบสองขั้นตอนยูเอเอสบีที่ควบคุมที่อุณหภูมิปานกลาง พบว่าระบบที่ศึกษานี้ซึ่งเป็นระบบหมักสองขั้นตอนตัวกลาง-ยูเอเอสบีแบบอุณหภูมิสูง สามารถรับอัตราป้อนสารอินทรีย์ได้สูงกว่าเล็กน้อย นอกจากนี้ระบบหมักที่ศึกษานี้ยังให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าระบบหมักขนาดใหญ่แบบยูเอเอสบีสองขั้นตอนอุณหภูมิปานกลาง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Project Title	Two-Stage Thermophilic filter-UASB System for Distillery Waste Treatment and Biogas Production
Name of the Investigators	Dr.Sumaeth Chavadej
Year	1997

Abstract

This studied system, thermophilic two-stage filter-UASB, consisted of three main components of two-stage concept, high-rate anaerobic processes (anaerobic filter and upflow anaerobic sludge blanket) and thermophilic operation in order to improve treatment efficiency and biogas production. The distillery waste containing COD of 90,000-120,000 mg/l was used in this experimental study. The studied system consisted of 6.8 litre acidogenic fermenter (AF) and 35 litre methanogenic fermenter (AF-UASB). These two fermenters were operated at constant temperature of 55°C. The studied system showed a considerably high degree of process stability and it could withstand a high COD loading up to 13.05 kg COD/ m^3 d. The optimum COD loading for maximum biogas production efficiency was 6.38 kg COD/m^3 d which corresponded to 52 % COD reduction. In comparison with the mesophilic single-stage UASB system, the thermophilic two-stage AF-UASB unit had a maximum COD loading slightly higher. Moreover, it appeared that the studied system could yield a considerably higher efficiency than the full-scale mesophilic two-stage UASB process.

รายนามคณะวิจัย

หัวหน้าโครงการ	ดร.สุเมธ ชวเดช
งานทดลองและวิเคราะห์	นางสาวนาฏนดา ธรินทร์วรคุปต์
จัดสร้างเครื่องมือ	นายสังข์ ชมชื่น
เขียนรายงาน	ดร.สุเมธ ชวเดช, นางพัสตรา สมบูรณ์ธเนศ และ นางสาวนาฏนดา ธรินทร์วรคุปต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	II
บทคัดย่อภาษาไทย	III
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	IV
รายนามคณะวิจัย	V
สารบัญ	VI
สารบัญตาราง	IX
สารบัญภาพ	X
คำย่อและนิยามต่างๆ	XI

บทที่

1. บทนำ.....1
2. วารสารปริทรรศน์.....2
   - 2.1 กระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน.....2
   - 2.2 การเจริญของแบคทีเรีย.....2
   - 2.3 ก๊าซชีวภาพ.....3
   - 2.4 สภาพแวดล้อมที่มีผลต่อระบบหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน.....4
     - 2.4.1 อุณหภูมิ.....4
     - 2.4.2 ความเป็นกรดด่าง (pH).....4
     - 2.4.3 ค่าความเป็นด่าง.....4
     - 2.4.4 กรดอินทรีย์ระเหย (VFA).....5
     - 2.4.5 ธาตุอาหารเสริมสร้าง.....5
     - 2.4.6 สารพิษ.....5
     - 2.4.7 การเติม.....5
     - 2.4.8 การกวนผสม.....6
   - 2.5 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบประสิทธิภาพสูง.....6
     - 2.5.1 ระบบหมักตัวกลางกรอง.....6
     - 2.5.2 ระบบหมักยูเอเอสบี.....7
   - 2.6 กระบวนการเกิดตะกอนเม็ด.....7
   - 2.7 การพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบบำบัดแบบประสิทธิภาพสูง.....8

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.7.1 ระบบหมักสองขั้นตอน 8
2.7.2 ระบบหมักอุณหภูมิสูง 9
3. วิธีการทดลอง 10
3.1 ลักษณะสมบัติของน้ำกากส่าที่ใช้ในการทดลอง 10
3.2 ตะกอนแบคทีเรียที่ใช้เริ่มต้น 11
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ 11
3.3.1 ถังหมัก 11
3.3.2 ถังตกตะกอน 12
3.3.3 ระบบควบคุมอุณหภูมิ 12
3.3.4 เครื่องป้อนน้ำเสียเข้าระบบ 12
3.3.5 เครื่องวัดก๊าซ 12
3.4 การทำงานของระบบ 15
3.5 สภาวะที่ใช้ในการทดลอง 17
3.6 การเก็บตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์ 17
3.7 วิธีวิเคราะห์ 18
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ 19
4.1 อัตราป้อนสารอินทรีย์และระยะเวลาเก็บกักน้ำกากส่า 19
4.2 ระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ 22
4.3 ปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมัก 23
4.4 ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ในระบบหมัก 27
4.5 ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในระบบหมัก 27
4.6 ค่าความเป็นด่าง (alkalinity)ของระบบหมัก 29
4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ 30
4.8 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ 32
4.9 เสถียรภาพของระบบหมัก 38
4.10 สภาวะที่เหมาะสมของระบบหมัก 39
4.11 การเปรียบเทียบระบบหมักที่ศึกษานี้กับระบบหมักอื่นๆ 40
4.12 แนวทางประยุกต์ใช้ระบบหมักที่ทดลอง 42

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ....44
5.1 สรุปผลการทดลอง....44
5.2 ข้อเสนอแนะ....44
รายการอ้างอิง....46
ภาคผนวก....48

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เลขหมู่ ๑๗๕ ว๓๑๕
เลขทะเบียน 009122
วัน,เดือน,ปี 21 ส.ค.40

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

2.1 ระดับความเข้มข้นสูงสุดของสารพิษ (mg/l) ที่ไม่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรียในระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน.....5
2.2 เปรียบเทียบการทำงานของระบบประสิทธิภาพสูงขั้นตอนเดียวและระบบสองขั้นตอนในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตเครื่องดื่มที่ 35 °C.....9
3.1 ลักษณะและสมบัติของน้ำกากส่าที่ใช้ในงานทดลอง.....10
3.2 สภาวะที่ควบคุมในการทดลอง.....17
3.3 ดรรชนีและจำนวนครั้งในการตรวจวิเคราะห์.....18
4.1 ค่าเฉลี่ยดรรชนีต่างๆของน้ำกากส่าเข้าและออกจากระบบที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆภายใต้สภาวะคงตัว..... 20
4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆภายใต้สภาวะคงตัว..... 21
4.3 ปริมาณตะกอนแบคทีเรียที่ความสูงต่างๆในถังหมักมีเธนที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ..... 25
4.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบหมัก UASB แบบขั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิสูงกับระบบหมักที่ทดลองในการบำบัดน้ำกากส่า.....40
4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบหมัก UASB ขนาดอุตสาหกรรมที่ใช้งานจริงกับระบบหมักที่ทดลองในการบำบัดน้ำกากส่า.....41

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่

2.1 การเจริญของแบคทีเรียในระยะต่างๆ....3
3.1 ตัวกรองภายในถังหมักกรด....11
3.2 ถังหมักกรดแบบตัวกลางกรอง....13
3.3 ถังหมักมีเธนแบบยูเอเอสบี....14
3.4 ภาพเครื่องมืออุปกรณ์และการทำงานของระบบหมักที่ใช้ในงานวิจัย....15
3.5 แผนภาพเครื่องมืออุปกรณ์และการทำงานของระบบหมักที่ใช้ในงานวิจัย....16
4.1 ระยะเวลาเก็บกักน้ำกากส่าที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ....22
4.2 ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำกากส่าที่ล้นออกจากถังหมักกรดที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ....24
4.3 ปริมาณตะกอนแบคทีเรียทั้งหมดในถังหมักมีเธนแบบ UASB ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ....26
4.4 ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในน้ำกากส่าที่เข้าและออกจากระบบที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ.... 28
4.5 ค่า alkalinityของน้ำกากส่าที่เข้าและออกจากระบบที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ....30
4.6 ปริมาณสารอินทรีย์(COD)ในน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบที่อัตราป้อนสารต่างๆ...31
4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดCODของระบบ ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ....32
4.8 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากถังหมักกรด, ถังหมักมีเธนและปริมาณโดยรวมทั้งระบบที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ....34
4.9 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ โดยพิจารณาเทียบกับ kgCODที่ป้อนเข้าระบบ....36
4.10 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆพิจารณาเทียบกับ kgCODที่ถูกกำจัด....37

คำย่อและนิยาม

1. ALK (Alkalinity) หมายถึงความสามารถของน้ำในการรับอนุภาคโปรตรอนส่วนใหญ่ เกิดจากองค์ประกอบของสารละลายคาร์บอเนต ไบคาร์บอเนต มีหน่วยเป็น mg/l ในรูป $CaCO_3$
2. COD (Chemical Oxygen Demand) คือปริมาณความเข้มข้นสารอินทรีย์ โดยวัดเป็นปริมาณ O_2 ทั้งหมดที่ใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ มีหน่วยเป็น mg/l
3. EFF (Effluent) น้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักแต่ละถัง
4. HRT (Hydraulic Retention Time) ระยะเวลาเก็บกัก หมายถึงระยะเวลาที่ของเหลวอยู่ในระบบ มีหน่วยเป็นวัน โดย HRT = ปริมาตรถังหมัก / อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบ
5. INF (Influent) น้ำกากส่าที่เข้าสู่ระบบ
6. MLSS (Mixed Liquor Suspended Solids)คือ ปริมาณหรือความเข้มข้นโดยประมาณของจุลินทรีย์ในถังหมัก คิดเป็นปริมาณสารแขวนลอยของน้ำตะกอน โดยวัดเป็นน้ำหนักแห้ง มีหน่วยเป็น mg/l
7. COD Loading อัตราการป้อนสารอินทรีย์ หมายถึงปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบในแต่ละวัน โดยวัดในรูปของ kg COD/m^3 d
8. Gas Yield ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ เป็นดรรชนีที่ใช้วัดประสิทธิภาพของระบบหมัก อาจคำนวณในรูปของ m^3 ของก๊าซที่ผลิตได้ต่อ kg COD ที่ป้อนเข้าระบบ หรือ m^3 ของก๊าซที่ผลิตได้ต่อ kg COD ที่ถูกกำจัด หรือ m^3 ของก๊าซที่ผลิตได้ต่อปริมาตรถังหมัก
9. SS ปริมาณของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids) หมายถึงของแข็งที่ไม่ละลายน้ำและแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ โดยวัดเป็นน้ำหนักแห้ง มีหน่วยเป็น mg/l
10. VFA กรดอินทรีย์ระเหย (Volatile Fatty Acid) เป็นกรดอินทรีย์ที่มี C อะตอมไม่เกิน 6 ละลายน้ำได้ น้ำหนักโมเลกุลต่ำ สามารถกลั่นได้ที่ความดันบรรยากาศ โดยคำนวณในรูปของกรดอะซิติค มีหน่วยเป็น mg/l

บทที่ 1

บทนำ

การขยายตัวอย่างรวดเร็วของภาคอุตสาหกรรม ส่งผลให้เกิดปัญหามลภาวะตามมา โดยเฉพาะมลภาวะทางน้ำ ซึ่งเกิดจากการปล่อยน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมที่ไม่ผ่านการบำบัดที่ถูกต้องลงสู่แหล่งน้ำ จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนากรรมวิธีในการบำบัดน้ำเสีย เพื่อลดปัญหาดังกล่าว

ระบบบำบัดน้ำเสียที่นิยมใช้ในปัจจุบันนั้นได้แก่ระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพ ซึ่งมีทั้งแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic Treatment) และไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Treatment) โดยระบบแรกเหมาะสมกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสารอินทรีย์ต่ำ และระบบหลังเหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสารอินทรีย์สูง ระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนนี้เป็นระบบค่าใช้จ่ายต่ำเนื่องจากไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในขั้นตอนการเติมอากาศ และยังเป็นระบบที่ให้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) เป็นผลพลอยได้ในการนำไปใช้เป็นสารพลังงานทดแทน แต่ข้อเสียของระบบนี้คืออัตราการเกิดปฏิกิริยาย่อยสลายช้า ทำให้ต้องใช้ถังหมักขนาดใหญ่ ส่งผลถึงค่าก่อสร้างถังหมักสูง

ในงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาเพื่อพัฒนาระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นในการกำจัดสารอินทรีย์ และเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ทั้งนี้โดยการเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับให้แบคทีเรียเกาะ เพื่อเพิ่มจำนวนแบคทีเรียที่ทำงานร่วมกันในการย่อยสลายสารอินทรีย์ รวมถึงการใช้ระบบหมักสองขั้นตอน เพื่อให้แต่ละถังมีสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของแบคทีเรียแต่ละชนิด สุดท้ายคือการประยุกต์ใช้ระบบหมักอุณหภูมิสูง (55 °C) ซึ่งมีประสิทธิภาพกว่าระบบหมักที่อุณหภูมิปรกติ (37 °C)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ พัฒนาระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนให้มีประสิทธิภาพสูง และหาสภาวะที่เหมาะสมในการควบคุมระบบหมักที่พัฒนานี้ เพื่อประโยชน์ในการออกแบบและควบคุมระบบหมักให้สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ในอัตราที่สูง

บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

2.1 กระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Treatment)

การย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยแบคทีเรียภายใต้สภาวะปราศจากออกซิเจน ประกอบด้วยปฏิกิริยาที่สำคัญ (สุเมธ ชวเดช, 2530) ดังนี้คือ

2.1.1 ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เป็นขั้นตอนที่ Hydrolytic fermentative bacteria ปล่อยน้ำย่อยออกมาย่อยสลายสารโมเลกุลขนาดใหญ่เช่น คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีน ให้เป็นโมเลกุลที่เล็กลง ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ จึงสามารถซึมผ่านผนังเซลล์แบคทีเรีย

2.1.2 การสร้างกรดอินทรีย์ (Acidogenesis) เป็นขั้นตอนที่แบคทีเรียสร้างกรด (Acidogenic bacteria) ทำการเปลี่ยนสารอินทรีย์ที่เกิดจากการย่อยสลายของแบคทีเรียในกลุ่มแรกให้เป็นกรดอินทรีย์และสารอื่น

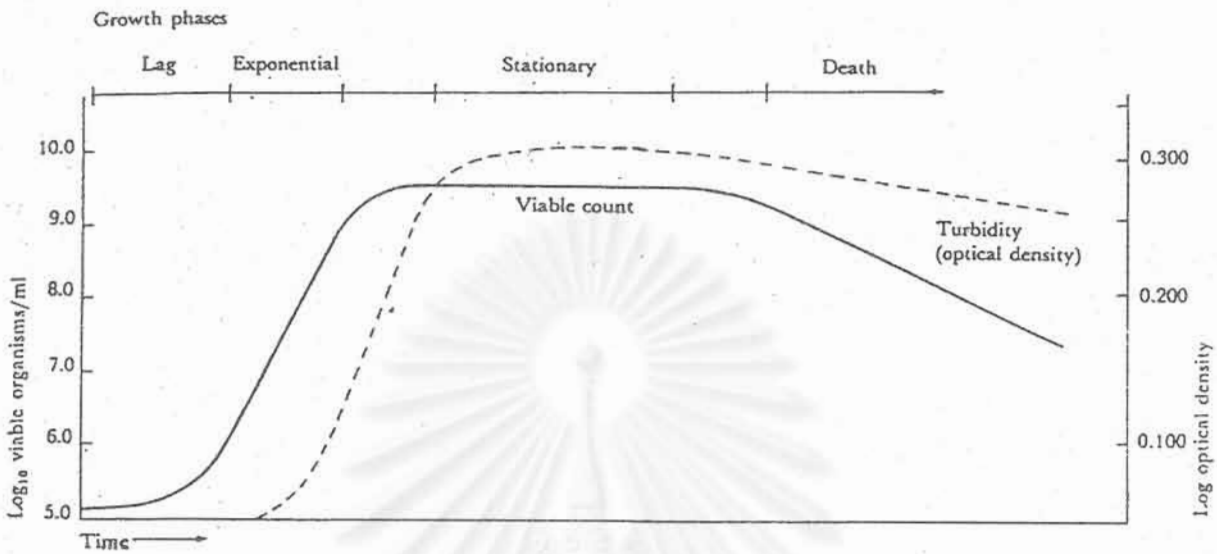
2.1.3 การสร้างมีเธน (Methanogenesis) เป็นขั้นตอนที่แบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเธน (Methanogenic bacteria) ใช้กรดอินทรีย์เป็นสารอาหาร แบคทีเรียกลุ่มนี้มักอาศัยอยู่ร่วมกับ Acetogenic bacteria ในลักษณะพึ่งพากัน โดยที่ Acetogenic bacteria ทำหน้าที่ย่อยสลายสารเพื่อส่งให้ Methanogenic bacteria นำไปใช้ต่อไป

2.1.4 ปฏิกิริยาย่อยสลายซัลเฟต (Sulfate Reduction) เป็นขั้นตอนที่ Sulfate reducing bacteria รีดิวซ์ซัลเฟตในน้ำเสียและเกิดเป็นก๊าซ H_2S ซึ่งมีกลิ่นเหม็น

2.1.5 ปฏิกิริยาย่อยสลายไนเตรท (Denitrification) เป็นขั้นตอนที่ Denitrifying bacteria ทำการรีดิวซ์ไนเตรทในน้ำเสียให้เป็นก๊าซไนโตรเจน

2.2 การเจริญของแบคทีเรีย (Microbial Growth)

การเจริญของแบคทีเรียเมื่อเติมลงในน้ำเสีย สามารถแสดงในรูปที่ 2.1 (Brock, 1991) ซึ่งสามารถแบ่งเส้นกราฟของการเจริญได้เป็น 4 ช่วงคือ



รูปที่ 2.1 การเจริญของแบคทีเรียในระยะต่างๆ (Brock, 1991)

Lag Phase เป็นช่วงที่จุลินทรีย์ปรับตัวให้คุ้นเคยกับสภาพแวดล้อมใหม่ และเตรียมที่จะทำการแบ่งเซลล์ ดังนั้นจึงไม่พบทั้งการเปลี่ยนแปลงจำนวนของแบคทีเรีย และความเข้มข้นของสารอินทรีย์

Log Phase เป็นช่วงที่จุลินทรีย์เกิดการแบ่งตัวอย่างรวดเร็ว ขณะเดียวกับจะมีการลดลงของ สารอินทรีย์อย่างรวดเร็วเช่นกัน อันเนื่องมาจากแบคทีเรียนำสารอินทรีย์ไปใช้ในการเจริญ

Stationary Phase ระยะนี้จำนวนแบคทีเรียมีค่าสูงสุดและคงที่ เพราะแบคทีเรียส่วนที่ตายเท่ากับส่วนที่เกิดขึ้นใหม่ ในระยะนี้ปริมาณสารอินทรีย์เริ่มเป็นตัวจำกัดการเจริญของแบคทีเรีย

Declining Phase เป็นช่วงที่แบคทีเรียลดจำนวนลง อันเนื่องมาจากการขาดอาหาร และเริ่มมี toxic metabolic end products เกิดขึ้น จึงเป็นภาวะที่ไม่เอื้อต่อการเจริญของแบคทีเรีย

2.3 ก๊าซชีวภาพ (Biogas)

ในห่วงโซ่อาหารของการย่อยสลายสารเชิงซ้อน โดยแบคทีเรียกลุ่มต่างๆที่ทำงานร่วมกันในสภาวะไร้ออกซิเจน พบว่าเกิดก๊าซชีวภาพที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน มีองค์ประกอบคือ CH_4 65 -70 % , CO_2 30 % และ H_2S 0.5 - 1% ซึ่ง CH_4 นี้สามารถใช้เป็นสารพลังงาน

2.4 สภาพแวดล้อมที่มีผลต่อระบบหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน

ในการทำงานของระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน จำเป็นต้องมีการควบคุมปัจจัยต่างๆ เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง ปัจจัยที่จำเป็นต้องควบคุมคือ

2.4.1 อุณหภูมิ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Lier, 1991) โดยทั่วไปนิยมควบคุมอุณหภูมิในถังหมักให้อยู่ในช่วงการทำงานของ Mesophilic bacteria (37 °C) เนื่องจากไม่ต้องใช้พลังงานสูงเหมือนในช่วงการทำงานของ Thermophilic bacteria (55 °C) แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าการทำงานในช่วงอุณหภูมิสูงมีข้อดี (Buhr and Andrew, 1977) คืออัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ 55 °C จะสูงกว่าที่ 37 °C 2-3 เท่า ทำให้เวลาเก็บกักลดลง และขนาดถังหมักลดลง สามารถลดปริมาณจุลินทรีย์ก่อโรคได้สูง นอกจากนี้การกวนผสมยังทำได้ง่ายขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิสูงทำให้ความหนืดของของเหลวลดลง

อย่างไรก็ตาม การทำงานของระบบหมักที่อุณหภูมิสูง ต้องการพลังงานสูงด้วย ทั้งนี้อาจแก้โดยการใช้พลังงานจากก๊าซชีวภาพที่เกิดในระบบเอง หรือประยุกต์ใช้กับน้ำเสียที่มีอุณหภูมิสูงอยู่แล้ว นอกจากนี้ยังพบว่าปัญหาอีกประการของระบบหมักดังกล่าวนี้คือแบคทีเรียที่ทำงานที่ 55 °C นี้ สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ต่ำกว่าแบคทีเรียที่ทำงานที่อุณหภูมิ 37 °C ทำให้เสถียรภาพของระบบที่อุณหภูมิสูงนั้นต่ำกว่าระบบที่อุณหภูมิปรกติ

2.4.2 ความเป็นกรดด่าง (pH) ค่าความเป็นกรดด่างนี้มีความสำคัญต่อการเจริญของแบคทีเรียในแต่ละกลุ่มแตกต่างกัน โดยทั่วไปแบคทีเรียเจริญได้ดีในช่วง pH 6.5 -7.8 แต่การที่ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน อาศัยการทำงานร่วมกันของแบคทีเรียสองกลุ่มหลัก โดยกลุ่ม Acid forming bacteria สามารถทนค่า pH ได้ต่ำถึง 4.5 ในขณะที่กลุ่ม Methanogenic bacteria ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเธน สามารถทนค่า pH ต่ำสุดได้เพียง 5.5

2.4.3 ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) เป็นความสามารถของน้ำในการรับอนุภาคโปรตรอน ถ้าระบบมีค่านี้ต่ำ แสดงว่ามีการสะสมของกรดอินทรีย์ในปริมาณสูง ซึ่งเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียในระบบ จำเป็นต้องระมัดระวังในการควบคุมการทำงานของระบบหมัก ค่าความเป็นด่างที่เหมาะสมต่อระบบหมักมีค่าประมาณ 1,000 - 3,000 mg/ l ถ้าต่ำกว่านี้เสถียรภาพ (Buffer Capacity) ของระบบจะต่ำ ค่าความเป็นด่างอาจเพิ่มขึ้นจากการรวมตัวของแอมโมเนียที่เกิดจากการย่อยสลายโปรตีน กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แบคทีเรียขับออกมา เกิดเป็นแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต (สุเมธ ชวเดช, 2529) ดังสมการ

$$NH_3 + CO_2 + H_2O \text{ ----------} \rightarrow NH_4HCO_3$$

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4.4 Volatile Fatty Acids (VFA) กรดอินทรีย์ระเหยนี้เกิดจากการทำงานของ Acid forming bacteria กล่าวคือสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยให้เป็นโมเลกุลที่เล็กลง และสามารถละลายน้ำได้ จะถูกนำไปใช้โดยกลุ่ม Acid forming bacteria และเกิดกรดอินทรีย์ ซึ่งถูกนำไปใช้ต่อโดย Acetogenic bacteria หรือ Methanogenic bacteria แต่ถ้าระบบไม่อยู่ในภาวะสมดุล กล่าวคือแบคทีเรียที่ใช้ VFA ไม่สามารถใช้ได้ทันกับการผลิต จะเกิดการสะสมของ VFA ส่งผลให้ค่าความเป็นกรดด่างลดลง เกิดสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะต่อการเจริญของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเธน $\%CH_4$ ที่ผลิตได้จึงลดต่ำลง (สุเมธ ชวเดช, 2529) โดยทั่วไปปริมาณกรดอินทรีย์ในถังหมักไม่ควรสูงเกิน 2,000 mg/l แต่อาจทนได้ถึง 5,000 mg/l (สุเมธ ชวเดช, 2529) และถ้ามีการสะสมVFAในปริมาณมากก็จะทำให้ระบบล้มเหลวในที่สุด

2.4.5 Nutrients ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่สำคัญต่อการเจริญของแบคทีเรีย ซึ่งอัตราส่วนที่เหมาะสมในระบบหมัก เพื่อให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์และผลิตแก๊สชีวภาพได้ดีควรมีอัตราส่วน COD : N : P เท่ากับ 100 : 2.2 : 0.4 หรือ BOD : N : P เท่ากับ 100 : 1.1 : 0.2 ถ้าพบว่าปริมาณธาตุดังกล่าวไม่เพียงพอก็จำเป็นต้องเติมเพิ่ม (สุเมธ ชวเดช, 2529)

2.4.6 Toxic Substances ในน้ำเสียมีปริมาณสารพิษมากน้อยแตกต่างกันตามชนิดของน้ำเสีย ตารางที่ 2.1 แสดงปริมาณความเข้มข้นของสารพิษที่แบคทีเรียสามารถทนรับได้

2.4.7 Feeding Mode การเติมน้ำเสียเข้าระบบหมักอาจเป็นแบบเติมครั้งเดียว (Batch

ตารางที่ 2.1 ระดับความเข้มข้นสูงสุดของสารพิษ (mg/l) ที่ไม่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรียในระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน

สารพิษ	ความเข้มข้นสูงสุด (mg/l)
Na^{2+}	3,500
K^{+}	2,500
Cu^{2+}	1.0
Zn^{2+}	5.0
SO_4^{2-}	0.02
S^{-}	100
CN^{-}	1.0
Benzene	50
Chloroform	0.1

Feed) เติมกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Feed) และเติมต่อเนื่อง (Continuous Feed) การเติมแบบต่อเนื่องจะมีประสิทธิภาพสูงสุด เพราะสภาวะภายในถังหมักคงที่ และการเติมแบบครั้งเดียวจะมีประสิทธิภาพต่ำสุด อันเนื่องมาจากระบบมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ทำให้แบคทีเรียต้องปรับตัวอยู่ตลอด แต่ในกรณีที่น้ำเสียมีเป็นช่วง ก็จำเป็นต้องใช้วิธีการเติมแบบกึ่งต่อเนื่องแทน (สุเมธ ชวเดช, 2529)

2.4.8 Mixing การกวนผสมในถังหมักมีความสำคัญ เพราะจะทำให้แบคทีเรียมีโอกาสพบอาหารได้โดยทั่วถึง และสารต่างๆที่แบคทีเรียขับออกจะเกิดการกระจายได้ดีขึ้น ทั่วไปมักนิยมการกวนผสมด้วยก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในระบบ เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง

2.5 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบประสิทธิภาพสูง (High Rate Anaerobic Processes)

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบประสิทธิภาพสูงมีหลักการที่สำคัญคือ การเพิ่มปริมาณแบคทีเรียในระบบให้สูงขึ้นและสามารถคงอยู่ในระบบได้เป็นเวลานาน ซึ่งระบบบำบัดดังกล่าวได้แก่ UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) , Anaerobic Filter , Anaerobic Fluid Bed และ Anaerobic Contact Process เป็นต้น ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเพียง 2 ระบบคือ Upflow Anaerobic Sludge Blanket และ Anaerobic Filter

2.5.1 ระบบหมักตัวกลางกรอง (Anaerobic Filter) เป็นระบบที่ประกอบด้วยถังหมักทรงสูง ภายในบรรจุตัวกลาง (Filter Media) ซึ่งเป็น Inert Material และมีพื้นที่ผิวสูง ได้แก่ ตัวกลางที่เป็น ทราย หิน ถ่าน หรือพลาสติค พบว่าจะเกิดเมือกแบคทีเรียเกาะบนผิวตัวกลางเป็นจำนวนมากในระยะเริ่มแรกเดินระบบ แต่ภายหลังเมือกนี้จะค่อยๆลดลง ขณะที่แบคทีเรียส่วนตะกอนที่อยู่ก้นถังและระหว่างช่องว่างของตัวกลางจะมีมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ขึ้นกับแบคทีเรียที่เป็นตะกอนมากกว่าเป็นเมือก

การป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบ สามารถเข้าได้ทั้งด้านบนและด้านล่างของถังหมัก กรณีที่น้ำเสียเข้าทางด้านล่างของถังหมัก น้ำเสียจะผ่านชั้นตะกอนที่อยู่ด้านล่างของถังหมักเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ และเกิดก๊าซชีวภาพซึ่งลอยขึ้นสู่ด้านบน ทำให้ตะกอนแบคทีเรียลอยขึ้น เมื่อตะกอนกระทบตัวกลาง ก็จะตกลงมาส่วนล่างของถังหมักอีก นอกจากนี้ตัวกลางยังทำหน้าที่กระจาย การไหลของน้ำเสีย เพื่อให้สัมผัสกับตะกอนอย่างทั่วถึงอีกด้วย

ระบบนี้เหมาะกับน้ำเสียที่มีของแข็งแขวนลอยต่ำ เพื่อจะได้ไม่ก่อปัญหาการอุดตัน อย่างไรก็ตาม ระบบนี้ยังมีข้อเสียเรื่องค่าก่อสร้างระบบที่สูงมาก เนื่องจากตัวกลางที่นิยมใช้คือ ตัวกลางพลาสติคมีราคาสูง

2.5.2 ระบบหมักยูเอเอสบี (UASB) น้ำเสียจะถูกสูบเข้าที่ก้นถังหมักผ่านชั้นตะกอนแบคทีเรีย 2 ชั้นคือ Sludge bed ซึ่งเป็นแบคทีเรียชนิดเม็ด (Granular bacteria) และ Sludge blanket ซึ่งเป็นตะกอนเบา (Flocculent bacteria) โดยแบคทีเรียชนิดเม็ดนี้เกิดจากการเกาะกันแน่นของแบคทีเรีย ทำให้จำนวนเซลล์แบคทีเรีย/ ปริมาตร สูงกว่าชั้น Sludge blanket ดังนั้น สารอินทรีย์ส่วนใหญ่จึงถูกย่อยสลายและเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเธนในชั้นนี้ ตะกอนแบคทีเรียส่วนหนึ่งจะถูกพาให้ลอยขึ้นโดยฟองก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นตลอดเวลา รวมถึงจากการไหลขึ้นของชั้นน้ำสู่ด้านบนที่มี Gas-Solid Seperator สำหรับแยกเก็บก๊าซ และปล่อยให้ตะกอนจมตัวลงสู่ก้นถัง ส่วนของน้ำใสก็ปล่อยให้ล้นออกนอกถัง

2.6 กระบวนการเกิดตะกอนเม็ด (Process of Granulation)

ดังได้กล่าวมาแล้วว่า ในระบบหมักยูเอเอสบีนั้น สารอินทรีย์ส่วนใหญ่เกิดการย่อยสลายในชั้น Sludge bed ซึ่งมีแบคทีเรียที่มีลักษณะเป็นเม็ด ดังนั้นการที่จะให้ระบบมีประสิทธิภาพสูง จึงจำเป็นต้องสร้างเม็ดแบคทีเรียดังกล่าวให้ได้ในถังหมัก ในการเริ่มต้นระบบหมักยูเอเอสบี จะต้องเติมตะกอนแบคทีเรียซึ่งนำมาจากระบบหมักอื่น ซึ่งมักอยู่ในรูปตะกอนเบา (Flocculent) มาผ่านขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงดังนี้ (สุเมธ ชวเดช, 2530)

Wash-out Stage เริ่มต้นระบบโดยป้อนสารอินทรีย์ต่ำกว่า 2 kg COD / m^3 d แบคทีเรียที่เป็นตะกอนเบาจะไหลออกกับน้ำล้นตลอดเวลา ขณะเดียวกับที่มีการเพิ่มปริมาณของแบคทีเรียในระบบอย่างช้าๆ

Transition Stage ในช่วงนี้อัตราการป้อนสารอินทรีย์ประมาณ 5 kg COD/ m^3 d และช่วงนี้จะเกิดฟองก๊าซชีวภาพมาก ทำให้ปริมาณตะกอนเบาที่ไหลออกจากระบบเพิ่มขึ้น จึงมีข้อควรระวังคือ ไม่ให้เกิดการสูญเสียตะกอนมากกว่าการเพิ่มปริมาณของแบคทีเรียชนิดเม็ด เพราะจะทำให้ระบบล้มเหลว

Progressive Granulation Stage เป็นช่วงที่มีการเพิ่มขนาดและจำนวนของ Granular bacteria ในถังหมัก โดยตะกอนเม็ดที่เกิดในระยะแรกประกอบด้วยกลุ่มตะกอนขนาดใหญ่จับตัวกันหลวมๆ และค่อยๆอัดตัวแน่นเข้า เนื่องจากการเจริญของแบคทีเรียมิได้จำกัดอยู่เฉพาะที่ผิวนอกของกลุ่มตะกอน แต่ยังเกิดการเจริญภายในด้วย (Lettinga and Hulshoff, 1991) และในระยะนี้

ระบบสามารถรับการเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ได้สูงและรวดเร็วกว่าระยะอื่น

2.7 การพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้ระบบบำบัดแบบประสิทธิภาพสูง

ระบบหมักแบบประสิทธิภาพสูงมีหลักการโดยทั่วไป โดยการทำให้แบคทีเรียในถังหมักมีปริมาณสูง ในการเพิ่มประสิทธิภาพระบบหมัก ยังสามารถทำได้ โดยการใช้ระบบสองขั้นตอนและการควบคุมที่อุณหภูมิสูง

2.7.1 ระบบหมักสองขั้นตอน (Two-stage Process) ดังได้กล่าวมาแล้วว่าการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนนั้น ประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญคือไฮโดรไลซิส การสร้างกรดอินทรีย์ และการสร้างมีเธน ซึ่งขั้นตอนสุดท้ายนี้ เป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการย่อยสลายเนื่องจากมีอัตราเร็วต่ำกว่าอีก 2 ขั้นตอน โดยทั่วไปปฏิกิริยาทั้ง 3 นี้ จะเกิดต่อเนื่องกันในถังหมัก ในสภาวะที่อัตราป้อนสารอินทรีย์สูง จะเกิดสภาพที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเธน ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพลดลง จึงได้มีการพัฒนาระบบหมักแบบ 2 ขั้นตอนขึ้น

หลักการทำงานของระบบคือใช้ถังหมัก 2 ถังต่ออนุกรมกัน โดยถังแรกให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและการสร้างกรดอินทรีย์ ส่วนถังหมักที่ 2 ให้เกิดการสร้างก๊าซมีเธน ทั้งนี้เพื่อให้สามารถควบคุมสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญของแบคทีเรียแต่ละกลุ่มได้ (Chavadej, 1988) ซึ่งข้อดีของระบบดังกล่าวนี้ (Ghosh และคณะ, 1975) คือระบบสามารถปรับสภาพภายในถังหมักให้เหมาะกับการเจริญของแบคทีเรียแต่ละกลุ่ม ซึ่งส่งผลดีต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ และผลิตแก๊สชีวภาพด้วย แต่ข้อเสียของระบบนี้คือต้องอาศัยความชำนาญในการควบคุม

เทคนิคในการแยกเป็นสองขั้นตอนมีหลายวิธี (Ghosh and Klass, 1977) แต่วิธีที่เหมาะที่สุดคือการควบคุมอัตราป้อนสารอินทรีย์ โดยใช้อัตราที่สูงในถังหมักกรด เพื่อให้ได้ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยที่สูง และยังเป็นการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเธน ส่วนในถังหมักมีเธน ให้ใช้อัตราป้อนสารอินทรีย์ที่ต่ำกว่า

จากการศึกษาวิจัยของ Ghosh และ Henry (1981)ซึ่งทำการเปรียบเทียบระบบหมักแบบขั้นตอนเดียวกับแบบสองขั้นตอน พบว่าระบบหมักสองขั้นตอนมีประสิทธิภาพในการลดสารอินทรีย์ได้สูงกว่า ระยะเวลาเก็บกักต่ำกว่า และน้ำเสียที่ป้อนมีความเข้มข้นสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบหมักขั้นตอนเดียว (ตารางที่ 2.2) ซึ่งเมื่อนำผลการทดลองนี้มาคำนวณเปรียบเทียบ พบว่าระบบสองขั้นตอนใช้ถังหมักขนาดเล็กกว่า 3 เท่า และให้ก๊าซมีเธนสูงถึง 73 % (Klass, 1984)

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบการทำงานของระบบประสิทธิภาพสูงขั้นตอนเดียวและระบบ2ขั้นตอน ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตเครื่องดื่มที่ 35 °C (Ghosh and Henry, 1981)

Datum	Single Stage	Two Stage
Loading, kg.VS/ m^3 d	0.64	4.8
Retention time, d	15	7.4
Methane yield, m^3/kg of VS added	0.37	0.37
Gas production rate, Vol./liquid Vol.-d	0.39	2.74
Gas composition, mole percent		
-CH_4	61	63
-H_2	0	3
Volatile solids reduction, %	72	64
COD reduction, %	84	96
Feed energy in gas, %	76	75

Chavadej (1988) ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพระบบหมักขั้นตอนเดียวและสองขั้นตอนแบบ Anaerobic Contact ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง พบว่าในการบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพเท่ากัน ระบบหมักสองขั้นตอนมีปริมาณความจุร่วมต่ำเพียงครึ่งหนึ่งของระบบหมักขั้นตอนเดียว และเสนอแนะว่าขนาดถังหมักมีเธนควรใหญ่เป็น 5 เท่าของถังหมักกรด

2.7.2 ระบบหมักอุณหภูมิสูง (Thermophilic Anaerobic System) ดังได้กล่าวมาแล้วว่าระบบหมักควบคุมที่อุณหภูมิสูง (55 °C) มีประสิทธิภาพสูงกว่าที่ควบคุมที่อุณหภูมิ 37 °C (Buhr and Andrew, 1977) สุเมธ ชวเดช (2539) ได้ทำการทดลองระบบหมักยูเอเอสบีที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 55 °C ในการบำบัดน้ำกากส่า พบว่าระบบหมักที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 55 °C สามารถรับอัตราป้อนสารอินทรีย์ได้สูงถึง 7.1 kg COD/ m^3d ซึ่งสูงกว่าระบบหมักยูเอเอสบีที่ทำงานที่ 30 °C ซึ่งสามารถรับอัตราป้อนสารอินทรีย์ได้เพียง 4.5 kg COD/ m^3d

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 ลักษณะสมบัติของน้ำกากส่าที่ใช้ในการทดลอง

น้ำกากส่าที่ใช้ในการทดลองนี้นำมาจากโรงงานสุราแสงโสม จังหวัดนครปฐม มีสีน้ำตาลเข้ม ทึบแสง และมีกลิ่นคล้ายน้ำตาล ผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำกากส่า แสดงดังตารางที่ 3.1 จะเห็นว่าน้ำกากส่านี้มีค่า COD และ BOD สูง นอกจากนี้ยังมีปริมาณโปตัสเซียมและซัลเฟตสูงอีกด้วย

ตารางที่ 3.1 ลักษณะสมบัติของน้ำกากส่าที่ใช้ในงานทดลอง (ข้อมูลการวิเคราะห์ได้รับจากฝ่ายเทคนิค โรงงานสุราแสงโสม)

ลักษณะของน้ำกากส่า	ผลการวิเคราะห์
Temperature ($^{\circ}C$)	95-100
pH	4.6-5.8
BOD_5(mg/l)	28,000-42,000
COD (mg/l)	90,000-120,000
Total Solids (mg/l)	91,000-94,000
Suspended Solids (mg/l)	6,000-11,000
Dissolved Solids (mg/l)	83,000-85,000
Total Nitrogen (mg/l)	2,200-3000
K^+ (mg/l)	10,000-13,750
PO_4^{3-} (mg/l)	10-20
SO_4^{2-} (mg/l)	3,050-4,000
Ca^{2+} (mg/l)	2,100-2,815

3.2 ตะกอนแบคทีเรียที่ใช้เริ่มต้น

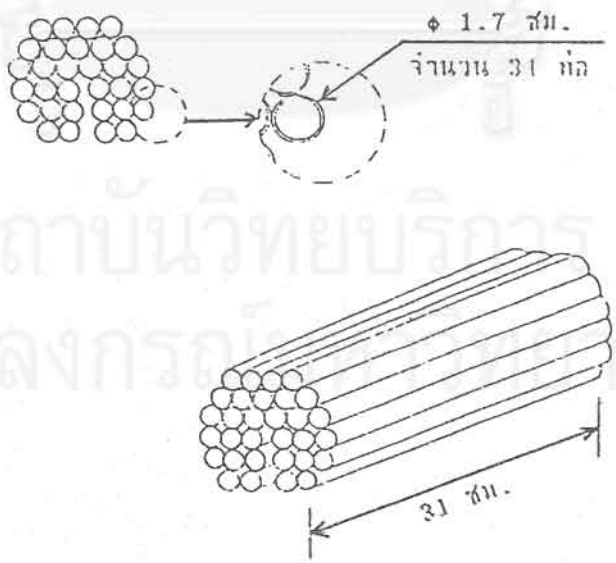
ในการทดลองนี้ใช้ตะกอนจุลินทรีย์ (Sludge) จากระบบยูเอเอสบีของโรงงานสุรา จังหวัดฉะเชิงเทรา โดยนำมาในลักษณะเข้มข้น เติมลงในถังยูเอเอสบีที่ทำการทดลอง โดยได้ทำการตรวจวิเคราะห์ เพื่อให้ตะกอนมีปริมาณความเข้มข้น (MLSS) ประมาณ 35,100 mg/l

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์

อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองนี้ ประกอบด้วยส่วนต่างๆที่สำคัญดังนี้

3.3.1 ถังหมัก จำนวน 2 ถังต่ออนุกรมกัน ถังทั้ง 2 ทำด้วยเหล็กไร้สนิม มีฉนวนไฟเบอร์กลาสหุ้มกันการสูญเสียความร้อน และมีเทอร์โมมิเตอร์สำหรับวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆของถังหมัก ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.3.1.1 ถังหมักกรด เป็นถังหมักแบบตัวกลางกรอง (Anaerobic Filter) ทรงกระบอก 2 ชั้น ชั้นในมีความจุ 6.8 ลิตร ภายในบรรจุตัวกลาง (รูปที่ 3.1) ที่ทำจากท่อพลาสติค



รูปที่ 3.1 ตัวกรอง (packing media) ภายในถังหมักกรด

PVC วางตามความสูงของถัง ขนาดของท่อพลาสติคที่ใช้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.7 ซม ยาว 31 ซม จำนวน 37 ท่อ มีพื้นที่ (total surface area) เท่ากับ 0.61 m^2 คิดเป็นพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) เท่ากับ 235.29 m^2 / m^3 น้ำเสียจะถูกป้อนเข้าทางด้านล่าง และไหลล้นออกทางท่อด้านบนของถัง ส่วนก๊าซชีวภาพที่เกิดจะออกทางด้านบน (รูปที่ 3.2)

3.3.1.2 ถังหมักมีเธน เป็นถังหมักแบบยูเอเอสบี ลักษณะเป็น 2 ชั้นเช่นเดียวกับถังที่ 1 แต่ชั้นในมีความจุ 35 ลิตร มีกรวยแยกตะกอนอยู่ทางตอนบนของถังสำหรับดักตะกอนแบคทีเรียและเป็นทางออกของก๊าซที่เกิดขึ้น น้ำเสียจะถูกป้อนเข้าทางด้านล่าง และไหลล้นออกทางด้านบน (รูปที่ 3.3)

3.3.2 ถังตกตะกอน จำนวน 2 ถัง

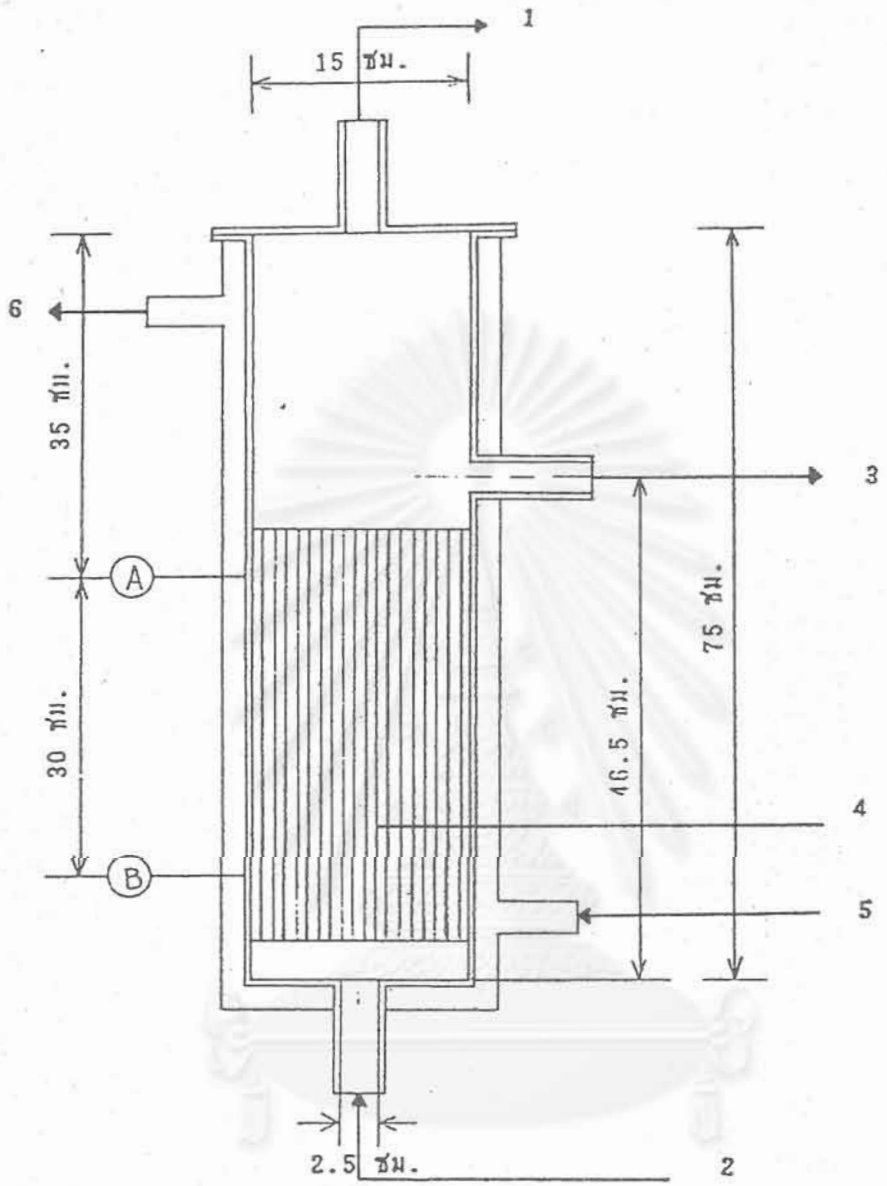
3.3.2.1 ถังที่ 1 ทำจากพลาสติคอะครีลิค เป็นถังทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 11.5 ซม ตอนล่างเป็นรูปกรวย มีทางไหลออกของตะกอน ความสูงจากปากกรวยถึงขอบถังด้านบน 30.5 ซม น้ำเสียจากถังหมักกรดจะเข้าทางด้านข้างตอนล่างของถัง และไหลล้นออกทางท่อด้านข้างตอนบนเข้าสู่ถังตกตะกอนใบที่ 2

3.3.2.2 ถังที่ 2 ทำจากพลาสติคพีวีซี เป็นถังทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม ความสูง 32 ซม ก้นถังแบน มีท่อทางออกของตะกอน น้ำเสียจากถังจะสูบเข้าถังหมักมีเธนโดยการทำงานของเครื่องสูบจะถูกควบคุมด้วยสวิตช์ระดับความสูงของน้ำในถัง

3.3.3 ระบบควบคุมอุณหภูมิ ประกอบด้วยปั๊มสำหรับสูบน้ำร้อนแบบ Circulating pump (Model PMD 311 ขนาด 180 วัตต์) และถังเก็บน้ำร้อน ซึ่งภายในมีขดลวดความร้อนที่ต่อเข้ากับเครื่องควบคุมอุณหภูมิ เพื่อควบคุมอุณหภูมิในชั้นนี้ให้ได้ประมาณ 55°C และมีฉนวนหุ้มรอบถัง

3.3.4 เครื่องป้อนน้ำเสียเข้าระบบ ใช้ปั๊มจำนวน 3 ตัว คือ microtube pump Model MP-3 จำนวน 1 ตัว , peristaltic pump No. 131900 และ pump Series 100

3.3.5 เครื่องวัดก๊าซ (Gas Meter) ใช้สำหรับวัดปริมาตรแก๊สโดยอาศัยหลักการแทนที่น้ำ แก๊สที่เกิดจากกระบวนการหมักจะลอยขึ้นสู่ด้านบน ผ่านเครื่องแยกตะกอนแบคทีเรียและก๊าซเข้าสู่สายยางที่ต่อกับด้านล่างของเครื่องวัด แล้วจะถูกระบายออกทางด้านบนของเครื่องวัดแก๊ส ภายในเป็นกล่องสี่เหลี่ยมมีผนังแยกเป็น 2 ส่วน อยู่ในลักษณะคว่ำ เพื่อดักก๊าซและสามารถพลิกไปมาได้ ก๊าซที่เกิดจะสามารถเข้าที่ช่องใดช่องหนึ่งและทำให้ทำให้น้ำหนักของ 2 ช่องนี้ไม่เท่ากัน เกิดการพลิกกลับไปกลับมา ซึ่งในการพลิกแต่ละครั้งของกล่องนี้มีปริมาตรก๊าซ 95 $ซม^3$ และ 102 $ซม^3$ สำหรับวัดปริมาณก๊าซที่เกิดจากถังหมักกรดและถังหมักมีเธน ตามลำดับ และเมื่อทราบจำนวนครั้งที่กล่องนี้พลิกไปมาในแต่ละวันแล้ว ก็จะสามารถวัดปริมาตรก๊าซที่ผลิต



1 ทางออกของก๊าซที่เกิดขึ้น

2 ทางเข้าของน้ำกากส่า

3 ทางออกของน้ำกากส่าที่ผ่านการบำบัด

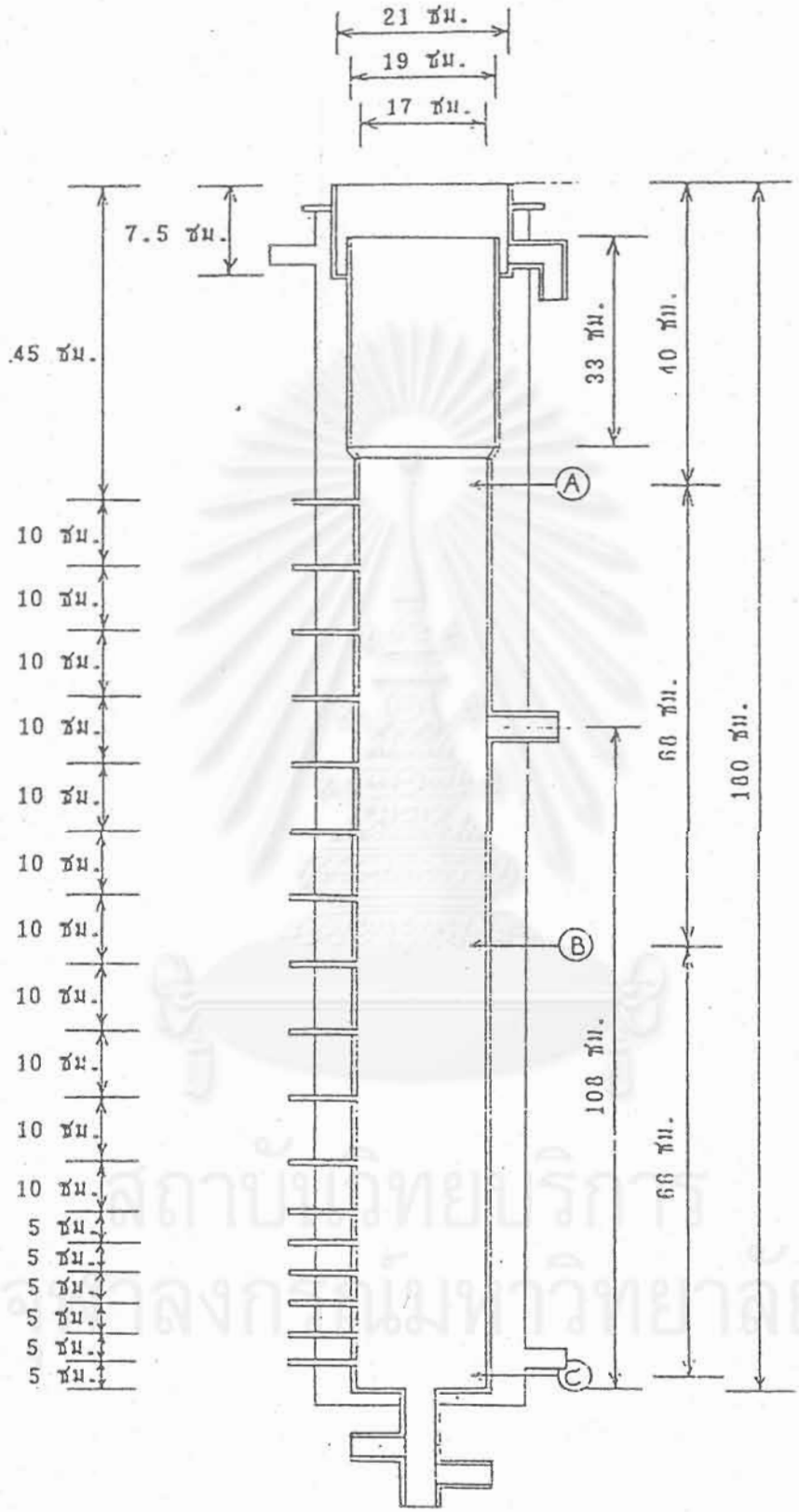
4 ตัวกลาง (packing media)

5,6 ทางเข้าออกของน้ำร้อน

A,B ตำแหน่งที่ทำการวัดอุณหภูมิ

รูปที่ 3.2 ถังหมักกรดแบบตัวกลางกรอง (Anaerobic Filter Acid Digester)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

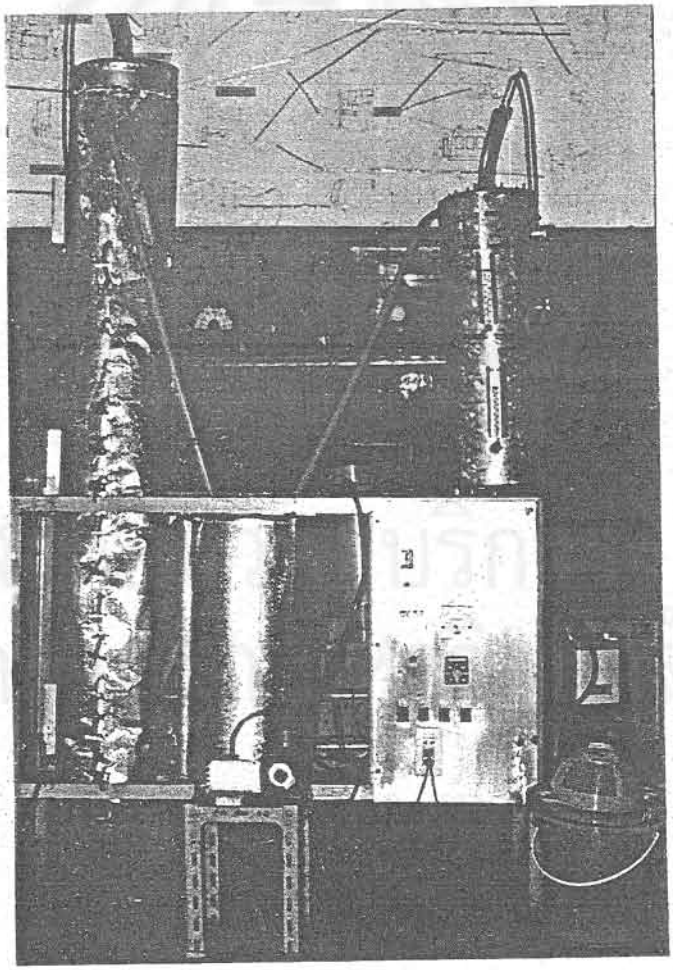


รูปที่ 3.3 ถังหมักมีเธนแบบยูเอเอสบี , A B C แทนตำแหน่งที่ใช้วัดอุณหภูมิ

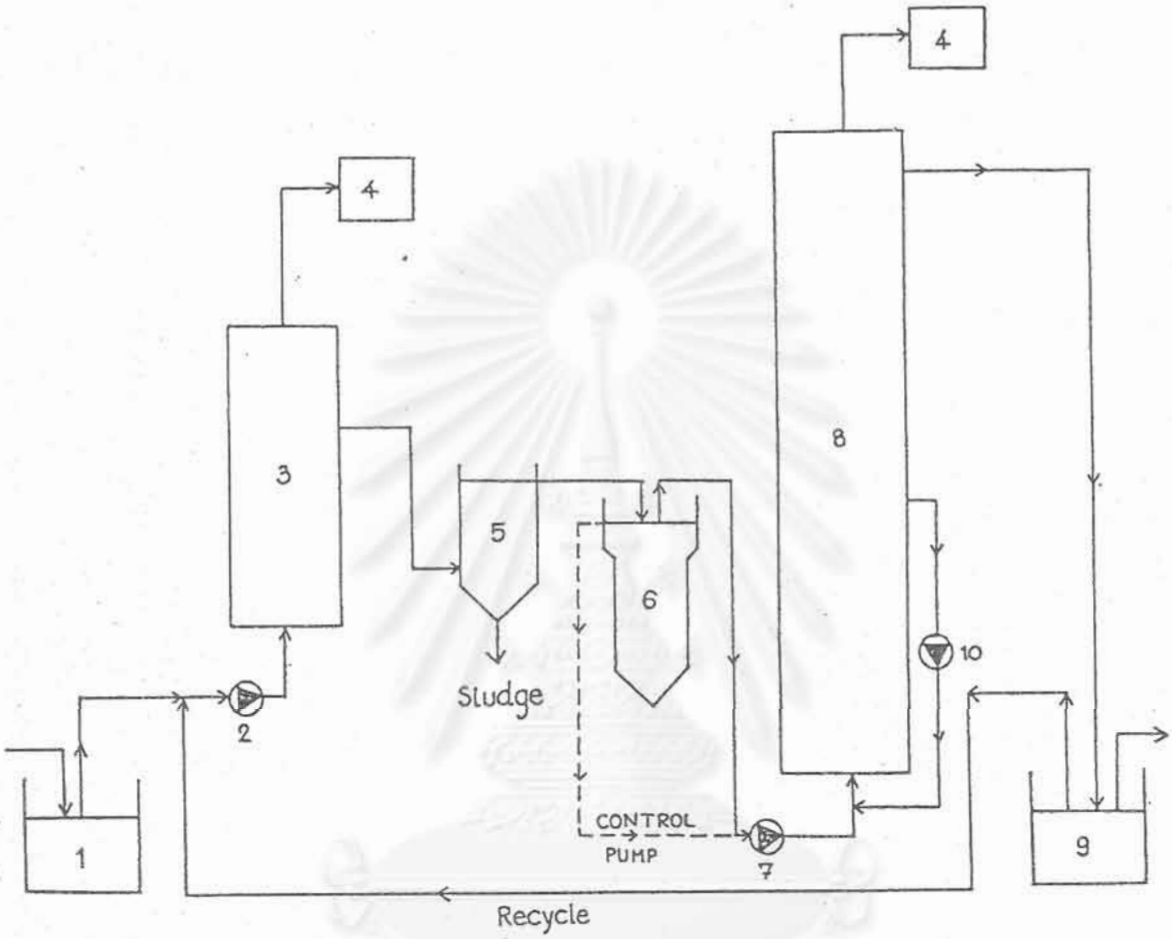
ได้ การนับจำนวนการพลิกของกล่องนี้กระทำโดยใช้เครื่องนับ (Counter) ซึ่งต่อวงจรไฟฟ้าโดยติดตั้งแท่งแม่เหล็กที่ตัวกล่องพลาสติค เมื่อเกิดการพลิกของกล่อง จะทำให้สวิตซ์ปิดครบวงจร

3.4 การทำงานของระบบ

รูปที่ 3.4 แสดงภาพระบบหมักที่ใช้ในการทดลอง และรูปที่ 3.5 แสดงแผนภาพของระบบหมักที่ทำการทดลอง โดยป้อนน้ำเสียที่มีการเจือจางให้ได้อัตราป้อนสารอินทรีย์ตามต้องการเข้าสู่ถังหมักกรดอย่างต่อเนื่องและคงที่ น้ำที่ล้นออกจากถังหมักกรดจะผ่านถังตกตะกอน 2 ถัง แล้วจึงถูกปั๊มเข้าสู่ถังหมักมีเธน ซึ่งน้ำล้นส่วนหนึ่งจะนำกลับมาผสมกับน้ำกากส่าก่อนเข้าสู่ระบบเพื่อปรับค่าความเป็นกรดด่างของน้ำเสียก่อนเข้าสู่ถังหมักกรด การวัดก๊าซที่ได้จากถังหมักทั้งสองทำได้โดยใช้เครื่องวัดก๊าซ



รูปที่ 3.4 แสดงภาพเครื่องมืออุปกรณ์และการทำงานของระบบหมักที่ใช้ในงานวิจัย



1,9 ถังเก็บสิ่งปฏิกูลและน้ำที่ออกจากระบบ

2,7 ปั๊มสำหรับป้อนน้ำกากส่าเข้าสู่ถังหมักใบที่1 และ 2

3 ถังหมักกรดแบบตัวกลางกรอง

4 เครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น

5,6 ถังตกตะกอนใบที่ 1 และ 2

8 ถังหมักมีเธนแบบยูเอเอสบี

10 ปั๊มสำหรับกวนผสมตะกอนแบคทีเรียในถังหมักยูเอเอสบี

รูปที่ 3.5 แสดงแผนภาพเครื่องมืออุปกรณ์และการทำงานของระบบหมักที่ใช้ในงานวิจัย

3.5 สภาวะที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองนี้เริ่มต้นโดยเจือจางน้ำกากส่าเพื่อลดความเป็นพิษ อันเนื่องมาจากซัลเฟตและโปตัสเซียมให้มีค่า COD อยู่ในช่วง 4,800 mg/l แล้วจึงลดอัตราการเจือจางด้วยน้ำให้ต่ำลงจนถึงไม่มีการเจือจาง จากนั้นค่อยๆเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ไปจนระบบหมักเสียสมดุล นำข้อมูลการทดลองที่ได้ ไปพิจารณาอัตราการป้อนสารอินทรีย์สูงสุดที่ระบบสามารถรับได้ ตาราง 3.2 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง อนึ่งในการทดลองนี้ได้ควบคุมอุณหภูมิในถังหมักให้คงที่ 55°C ตลอดการทดลอง

ตารางที่ 3.2 สภาวะที่ควบคุมในการทดลอง

อัตราป้อนสารอินทรีย์ ($kgCOD/m^3 d$)	อัตราส่วนการรีไซเคิล (น้ำกากส่าจากถังหมัก:น้ำกากส่าใหม่)	ความเข้มข้นCODที่เข้าสู่ระบบ(mg/l)	อัตราการไหล (l/d)
0.25	1:1	4,800	4.0
0.5	1:1	9,300	4.0
1.0	1:1	18,000	4.0
2.0	1:1	40,000	3.5
3.0	1:1	60,000	3.5
6.0	1:1	60,000	7.0
8.0	1:1	60,000	9.3
10.0	1:1	60,000	11.7
10.0	3:1	60,000	23.3
13.0	3:1	60,000	30.3

3.6 การเก็บตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์

วิเคราะห์น้ำกากส่าที่เข้าและออกจากถังหมัก ดังตารางที่ 3.3 นอกจากนี้ต้องวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆของถังหมัก และปริมาณตะกอนที่มีอยู่ในถังหมัก (โดยเก็บจากตำแหน่งต่างๆของถังหมัก 17 ตำแหน่ง) เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล ซึ่งสังเกตุจากประสิทธิภาพการลดสารอินทรีย์ ในรูป COD และอัตราการผลิตก๊าซคงที่ จากนั้นนำค่าดรรชนีต่างๆที่วิเคราะห์ได้ในช่วงสภาวะคงที่มาหาค่าเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจะเป็นค่าแสดงผลที่ได้ในการทดลองนั้นๆ

ตารางที่ 3.3 ดรรชนีและจำนวนครั้งในการตรวจวิเคราะห์

ดรรชนีที่ต้องวิเคราะห์	จำนวนครั้งในการวิเคราะห์			
	สิ่งป้อน	น้ำที่ออกจากถังหมักกรด	น้ำที่ออกจากถังหมักมีเธน	ก๊าซชีวภาพ
อัตราป้อนน้ำเสีย	2/สัปดาห์	-	-	-
อุณหภูมิ	ทุกวัน	ทุกวัน	ทุกวัน	-
COD	ทุกวัน	ทุกวัน	ทุกวัน	-
pH	ทุกวัน	ทุกวัน	ทุกวัน	-
VFA	ทุกวัน	ทุกวัน	ทุกวัน	-
ของแข็งแขวนลอย(SS)	1/สัปดาห์	1/สัปดาห์	1/สัปดาห์	-
ค่าความเป็นด่าง	1/สัปดาห์	1/สัปดาห์	1/สัปดาห์	-
MLSS	-	-	2/เดือน	-
อัตราการผลิตก๊าซ	-	-	-	ทุกวัน
องค์ประกอบของก๊าซ	-	-	-	ทุกวัน

3.7 วิธีวิเคราะห์

วิธีการวิเคราะห์ค่าดรรชนีทั้งหมด ใช้วิธีการในเอกสารอ้างอิง Standard Methods (APHA, AWWA and WEF, 1985) ซึ่งได้แก่

3.7.1 pH วัดค่าความเป็นกรดด่างโดยใช้ pH meter

3.7.2 Chemical Oxygen Demand (COD) โดยวิธี Open Reflux Method ด้วย Dichromate

3.7.3 Mixed Liquor Suspended Solids (MLSS) โดยการหาน้ำหนักแห้ง

3.7.4 Suspended Solids (SS) โดยการหาน้ำหนักแห้ง

3.7.5 Alkalinity โดย Titration Method

3.7.6 Volatile Fatty Acids (VFA) โดยวิธีการกลั่น

3.7.7 องค์ประกอบของก๊าซ โดย Orsat Analyzer

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

ในการทดลองนี้ใช้เวลาทั้งสิ้น 384 วัน โดยเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์จาก 0.25 ถึง 13.05 kg COD /m^3 d ในการทดลองที่แต่ละอัตราป้อนสารอินทรีย์ได้ทำการเก็บข้อมูล จนระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady State) ซึ่งสังเกตุได้จากการลดค่า COD และการผลิตก๊าซค่อนข้างคงที่

ในช่วงอัตราป้อนสารอินทรีย์ 0.25- 2.03 kg COD/ m^3 d ตะกอนแบคทีเรียในถังหมักมีเธนไม่จับตัวเป็นตะกอนหนัก ทำให้มีตะกอนแบคทีเรียบางส่วนหลุดติดออกมากับน้ำกากส่าที่ออกมาจากระบบ (ขั้นตอน Sludge Washout) จึงต้องทำการเติมตะกอนแบคทีเรียใหม่เข้าไป เพื่อให้ระบบสามารถทำการทดลองต่อไปได้ ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 10.02 kg COD/ m^3 d ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในน้ำกากส่าที่ออกจากระบบสูง จึงทำการเพิ่มอัตราส่วนรีไซเคิลจาก 1 : 1 เป็น 3 : 1 ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 10.95 และ 13.05 kg COD/ m^3 d ทั้งนี้เพื่อลดความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยในถังหมักกรดและถังหมักมีเธน ข้อมูลการทดลองที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ ได้แสดงในภาคผนวกท้ายรายงานฉบับนี้ ตารางที่ 4.1 แสดงค่าเฉลี่ยคุณสมบัติต่างๆของระบบหมักที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ และตารางที่ 4.2 แสดงประสิทธิภาพของระบบหมักที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ

4.1 อัตราป้อนสารอินทรีย์และระยะเวลาเก็บกักน้ำกากส่า

เมื่อพิจารณาอัตราป้อนสารอินทรีย์ของแต่ละถังหมัก พบว่าช่วงต้นที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 2.03-6.38 kg COD/ m^3 d จะป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ถังหมักกรดแบบตัวกลางกรองด้วยอัตราที่สูงกว่าอัตราการป้อนสารอินทรีย์ในถังหมักมีเธนแบบยูเอเอสบีประมาณ 4.2 - 11.5 เท่า (ทั้งที่ปริมาตรถังหมักกรดแบบตัวกลางกรองน้อยกว่าถังหมักมีเธนแบบยูเอเอสบีเพียง 5.2 เท่า) ทั้งนี้เนื่องจากที่ช่วงอัตราป้อนสารอินทรีย์นี้ สารอินทรีย์ส่วนใหญ่เกิดการย่อยสลายในถังหมักกรดมากกว่าในถังหมักมีเธน จากการทดลองพบว่าถังหมักกรดสามารถรับอัตราป้อนสารอินทรีย์ได้สูงถึง 46.50 kg COD/ m^3 d จึงเริ่มมีการสะสมกรดอินทรีย์ระเหยในน้ำกากส่าที่ออกจากระบบในปริมาณที่สูงกว่า 2,500 mg/l ในขณะที่ถังหมักมีเธนสามารถรับอัตราป้อนสารอินทรีย์ได้เพียง

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยคุณสมบัติต่างๆ ของระบบหมักที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆภายใต้สภาวะคงตัว

Organic Loading ($kgCOD/m^3 d$)*		0.49	1.01	2.03	2.03**	2.98	6.38	8.20	10.02	10.95	13.05
Recycle ratio		1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	3:1	3:1
Feed	COD (mg/l)	9,250	18,000	39,960	41,870	60,110	61,120	66,240	58,100	63,500	60,660
	VFA(mg/l)	98	180	350	350	450	617	545	650	680	650
	pH	5.00	4.6-4.7	4.70	4.70	4.70	4.40	4.60	480	4.80	4.70
	ALK(mg/l)	510	670	1880	1,670	2,380	1,850	1,880	2,780	2,600	1,480
	SS(mg/l)	120-300	300	300-1500	-	1,700-3,600	2,400	2,300	4,000	5,500	5,870
Time to reacth steady state (days)		30	34	44	36	32	31	36	36	30	47
Anae.	Avg. Flowrate(l/d)	-	4.00	3.36	3.33	3.47	6.99	9.12	11.97	23.69	30.75
filter	HRT	-	1.7d	2.02d	2.04d	1.96d	23.3h	17.9h	13.6h	6.9h	5.3h
	Organic Loading ($kgCOD/m^3 d$)	-	7.68	14.02	15.72	22.06	46.50	67.30	77.97	143.65	193.28
	COD(mg/l)	5,410	9,300	19,030	21,950	29,880	32,830	37,370	33,130	35,480	40,120
	VFA(mg/l)	250	490	810	440	1,190	2,250	4,775	4,250	3,520	4,750
	pH	7.20	7.4-7.6	7.7-7.8	7.80	7.7-8.0	7.7-7.8	7.50	7.50	7.50	6.8-6.9
	ALK(mg/l)	1,620	3,020	6,190	7,070	9,180	9,190	9,420	9,980	10,300	7,640
	SS(mg/l)	200-500	540	1,300	1,700	2,000	1,400-2,200	2,000	2,570	5,560	4,180
	Gas Production(ml/d)	-	11,000	6860	11,590	13,440	24,340	23,450	24,720	34,020	37,615
	CO_2(%)	-	50.56	62.90	55.38	71.25	79.82	93.23	90.60	81.44	89.21
	CH_4(%)	-	49.44	37.10	44.62	28.75	20.18	6.77	9.40	18.56	10.79
UASB	HRT	-	5.6	9.2	14.4	15.5	8.1	4.7	3.0	1.4	1.2
	Organic Loading ($kgCOD/m^3 d$)	-	1.65	2.07	1.52	1.93	4.04	7.93	10.97	24.70	32.12
	COD(mg/l)	4,690	8,120	16,780	22,350	26,360	29,360	34,120	30,490	33,810	36,770
	VFA(mg/l)	100	210	390	230	490	996	3,000	2,580	2,660	3,980
	pH	7.3	7.6-7.7	7.9-8.0	8.0	8.2-8.3	8.0-8.1	8.1-8.3	8.2-8.3	8.3	7.7-7.9
	ALK(mg/l)	1,650	3,110	5,170	6,220	7,310	8,010	8,790	9,350	9,970	8,380
	SS(mg/l)	1,700-1,900	3,050	1,800	4,100	2,300	3,200	4,600	4,800	5,100	3,750
	Gas Production(ml/d)	1,390	2,200	670	930	1,890	7,200	13,560	19,670	25,380	27,320
	CO_2(%)	22.38	24.67	22.77	29.19	29.37	29.78	28.97	34.51	36.58	37.37
	CH_4(%)	77.62	75.33	77.23	70.81	70.63	70.22	71.03	65.49	63.42	62.63
	Total Sludge(mg)	691,470	445,070	206,620	705,160	824,760	1,118,720	1,320,720	1,341,150	1,257,130	1,014,570
	Avg. Sludge(mg/l)	19,750	12,720	5,900	20,140	23,560	31,960	37,730	38,310	35,910	28,980
Total Hydraulic Retention Time (d)		-	7.3	11.2	16.4	17.5	9.1	5.4	3.6	1.7	1.4

หมายเหตุ * อัตราป้อนสารอินทรีย์คำนวณจากปริมาตรจุของถังหมักมีเธน

** อัตราป้อนสารอินทรีย์หลังจากเติมตะกอนแบคทีเรียเพิ่ม

ทองมหาวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพของระบบหมักที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆภายใต้สภาวะคงตัว

Organic Loading (kgCOD/m^3 d)		0.49	1.01	2.03	2.03	2.98	6.38	8.20	10.02	10.95	13.05
Recycle ratio		1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	3:1	3:1
Anae.	Biogas Yield:										
filter	m^3/kgCOD fed [a]	-	.14511	.05068	.07067	.06228	.05199	.03382	.03058	.02682	.02031
	m^3/kgCOD removed [b]	-	.96091	.27125	.32908	.36646	.35905	.25165	.22870	.64422	2.12457
	m^3/m^3 reactor.d [c]	-	1.6176	1.0088	1.7044	1.9765	3.5794	3.4485	3.6353	5.0029	5.5316
	Methane Yield:										
	m^3/kgCOD fed [a]	-	.07174	.01880	.03153	.01790	.01049	.00229	.00287	.00498	.00219
	m^3/kgCOD removed [b]	-	.47508	.10063	.14684	.10536	.07246	.01704	.02150	.11957	.22924
	m^3/m^3 reactor.d [c]	-	.79976	.37427	.76051	.56824	.72233	.23347	.34172	.92855	.59686
	COD Removal (%)	22.38	28.79	32.92	31.64	30.89	27.43	25.53	25.21	13.95	6.14
UASB	Biogas Yield:										
	m^3/kgCOD fed [a]	-	.02382	.00856	.02279	.04322	.07682	.05313	.04639	.02553	.02016
	m^3/kgCOD removed [b]	-	.81220	.35504	-	1.74877	3.57311	3.40609	3.47184	5.38881	1.13890
	m^3/m^3 reactor.d [c]	0.03971	.06286	.01914	.02657	.05400	.20571	.38743	.56200	.72514	.78057
	Methane Yield:										
	m^3/kgCOD fed [a]	-	.01795	.00661	.01614	.03053	.05394	.03774	.03038	.01619	.01263
	m^3/kgCOD removed [b]	-	.61183	.27420	-	1.23516	2.50904	2.41934	2.27371	3.41758	.71329
	m^3/m^3 reactor.d [c]	0.03083	.04735	.01478	.01882	.03814	.14445	027519	.36805	.45989	.48887
	COD Removal (%)	13.31	12.69	11.82	-	11.78	10.57	8.70	7.96	4.71	8.35
Total Biogas Yield:											
m^3/kgCOD fed [a]		-	.16893	.05924	.09346	.10550	.12881	.08695	.07697	.05235	.04047
m^3/kgCOD removed [b]		-	1.7731	.62630	-	2.11523	3.93216	3.65774	3.70055	6.03303	3.26347
m^3/m^3 reactor.d [c]		-	1.6805	1.02797	1.73098	2.03047	3.78513	3.83596	4.19729	5.72808	6.31219
Total Methane Yield:											
m^3/kgCOD fed [a]		-	.08969	.02541	.04767	0.4843	.06443	.04003	.03326	.02117	.01482
m^3/kgCOD removed [b]		-	1.0869	.37484	-	1.34051	2.58150	2.43638	2.29521	3.53715	.94254
m^3/m^3 reactor.d [c]		-	.84711	.38906	.77932	.60638	.86678	.50866	.70977	1.38843	1.08573
Total COD Removal (%)		49.30	54.89	58.01	46.62	56.15	51.96	48.49	47.52	46.76	39.38

หมายเหตุ [a] คิดเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ของน้ำกากส่าที่เตรียมได้

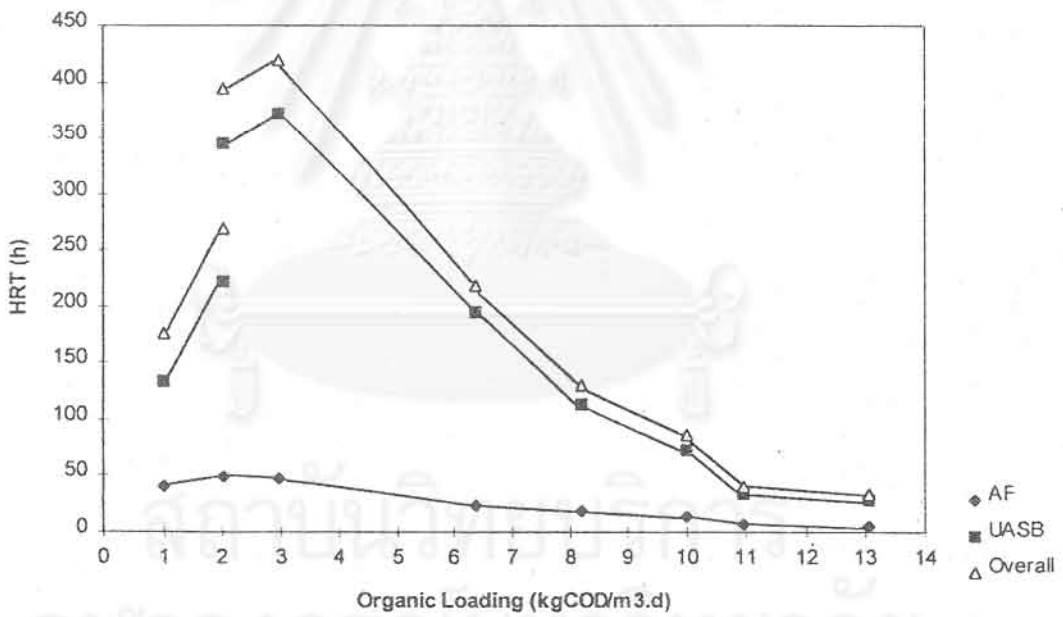
[b] คิดเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ลดลงของทั้งระบบ

[c] คิดเทียบกับปริมาตรรวมของถังหมัก(ในกรณีคำนวณทั้งระบบเป็นปริมาตรรวมของถังหมักกรด และถังหมักมีเธน)

4.04 kg COD/ m^3d

เมื่อลดอัตราไหลของน้ำกากส่าที่เข้าสู่ถังหมักกรดจาก 4.0 l/d เป็น 3.5 l/d พบว่าระยะเวลาเก็บกักน้ำกากส่าในถังหมักเพิ่มขึ้นจาก 1.7 เป็น 2.0 วัน และเมื่อเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์โดยเพิ่มอัตราไหล ขณะที่ความเข้มข้นสารอินทรีย์ในน้ำกากส่าคงที่ คือประมาณ 60,000 mg/l ระยะเวลาการเก็บกักลดลงต่ำสุด 5.3 ชม ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์สูงสุด 13.05 kg COD/ m^3d

สำหรับอัตราป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ถังหมักมีเธนนั้น ขึ้นอยู่กับระดับน้ำในถังตกตะกอนซึ่งสัมพันธ์กับอัตราไหลของน้ำกากส่าเข้าสู่ถังหมักกรด เมื่อเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์เป็น 13.05 kg COD/ m^3d ระยะเวลาเก็บกักในถังหมักมีเธนนี้ลดลงเหลือ 1.2 วัน ทำให้ระยะเวลาเก็บกักน้ำกากส่าของระบบหมักลดลงจาก 17.5 วัน เหลือเพียง 1.4 วัน ซึ่งจากการทดลองจะเห็นว่าระยะเวลาเก็บกักน้ำกากส่าในถังหมักมีเธนยาวนานกว่าในถังหมักกรด (รูปที่ 4.1) เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเธนมีอัตราการเจริญต่ำ จึงใช้เวลามากในการเพิ่มจำนวน



รูปที่ 4.1 ระยะเวลาเก็บกักน้ำกากส่าในระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ

4.2 ระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่

ตลอดช่วงของการทดลองพบว่า ระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวที่อัตราป้อนสารอินทรีย์

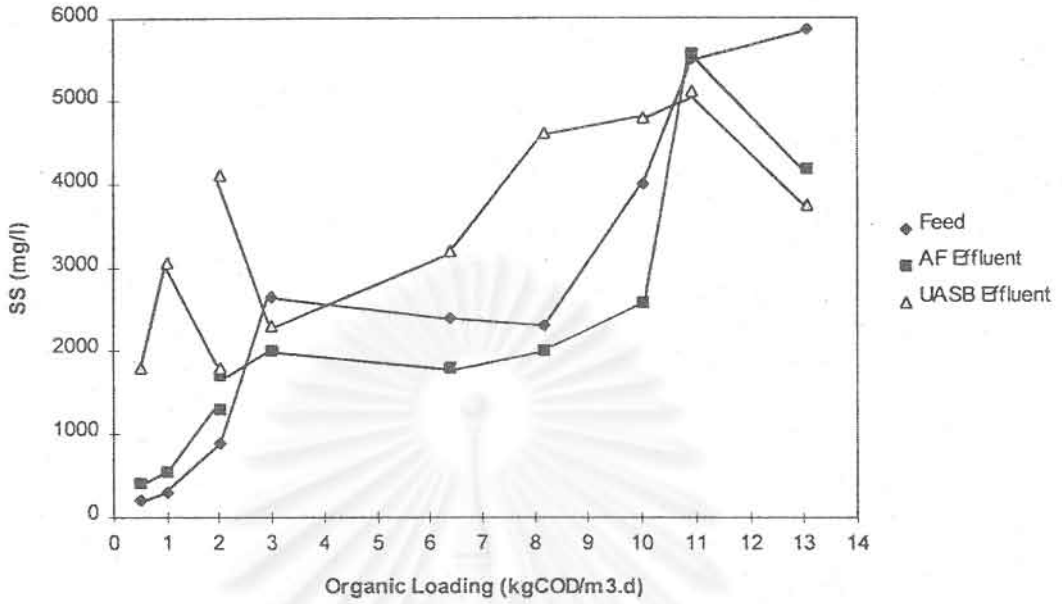
ต่างๆโดยเฉลี่ยคือ 35.6 วัน (ตารางที่ 4.1) ซึ่งเวลาที่ระบบใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงที่นี้ขึ้นกับสภาวะแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ , ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เข้าระบบ เป็นต้น ถ้าระบบมีการเปลี่ยนแปลงปัจจัยดังกล่าวมาก แบคทีเรียในระบบจะใช้เวลายาวนานขึ้นในการเข้าสู่สภาวะคงที่

4.3 ปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมัก

ปริมาณแบคทีเรียมีความสำคัญมากต่อประสิทธิภาพและเสถียรภาพของระบบหมัก กล่าวคือ เมื่อระบบมีปริมาณแบคทีเรียมาก ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพก็มากด้วย ตลอดจนเสถียรภาพของระบบหมักจะสูงขึ้นด้วย

4.3.1 ปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมักกรด ตะกอนแบคทีเรียในถังหมักกรดประกอบด้วย 2 ส่วน คือส่วนที่เป็นเมือกเกาะบนผิวตัวกลางและส่วนที่จมตัวอยู่ก้นถัง จากการที่ไม่สามารถหาปริมาณแบคทีเรีย โดยเฉพาะในส่วนของเมือกที่เกาะบนผิวตัวกลาง จึงใช้การตรวจวัดปริมาณของแข็งแขวนลอย (SS) ในน้ำที่ล้นออกจากถังหมักกรดเป็นดรรชนีในการบ่งชี้ทางอ้อมถึงปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมัก ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณแบคทีเรียในถังหมักมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณตะกอนแบคทีเรียที่ล้นออก ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์ ค่า SS ในน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักกรดเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.2

สำหรับปริมาณสารแขวนลอยในน้ำกากส่าที่ล้นออกจากถังหมักในช่วงเริ่มต้นระบบ ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่ำคือ 0.49-2.03 kg COD/ m^3d มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากอยู่ในขั้นตอน wash out แต่เมื่ออัตราป้อนสารอินทรีย์อยู่ในช่วง 2.03-10.02 kg COD/ m^3d ปริมาณสารแขวนลอยค่อนข้างคงที่คือประมาณ 2,000 mg/l ซึ่งปัจจัยที่มีส่วนสำคัญต่อปริมาณตะกอนแบคทีเรียที่มีในถังหมักคือ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำกากส่าที่เข้าระบบ และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการรีไซเคิลจาก 1 : 1 เป็น 3 : 1 พบว่าปริมาณสารแขวนลอยเพิ่มขึ้นจาก 2,500 เป็น 5,500 mg/l ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนสภาวะในการทำงานทำให้แบคทีเรียต้องปรับตัวใหม่ ประกอบกับการที่เพิ่มอัตราป้อนสาร อินทรีย์จาก 77.97 เป็น 143.65 kg COD/ m^3d ทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของแบคทีเรียในถังหมัก อย่างไรก็ตามเมื่อแบคทีเรียสามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมใหม่ได้แล้ว แม้จะเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์เป็น 193.28 kg COD/ m^3d ตะกอนแบคทีเรียที่ออกจากถังหมักก็มีค่าลดลงเหลือ 4,180 mg/l นั่นคือเมื่อระบบสามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาพที่เปลี่ยนแปลงได้แล้ว การเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์ก็คือการเพิ่มสารอาหารให้แก่แบคทีเรียในระบบนั่นเอง ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการเพิ่มปริมาณแบคทีเรียสูง



รูปที่ 4.2 ปริมาณ SSในน้ำกากส่าที่ล้นออกจากถังหมักกรดที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ

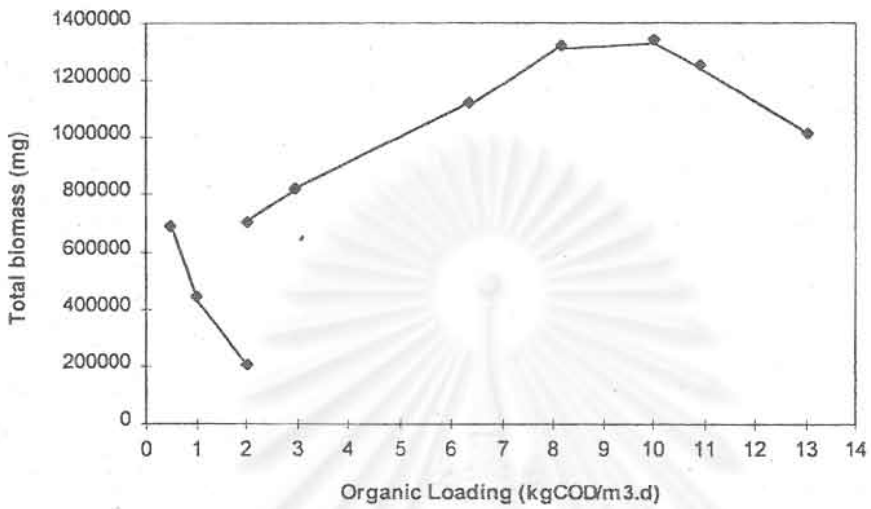
4.3.2 ปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมักมีเธน ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณตะกอนแบคทีเรียที่ระดับต่างๆของถังหมักที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ รูปที่ 4.3 แสดงปริมาณตะกอนทั้งหมดในถังหมักมีเธนที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ ในช่วงเริ่มต้นระบบที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่ำ (0.49-2.03 kg COD/ m^3d) ปริมาณสารแขวนลอยในน้ำที่ล้นออกจากถังหมักมีค่าสูง (1,700-3,000 mg/l) ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการเจริญของแบคทีเรียน้อยกว่าปริมาณที่หลุดออกจากถังหมัก ดังนั้นจึงทำการแก้ไขโดยการเติมตะกอนแบคทีเรียใหม่ หลังการเติมตะกอนครั้งที่สองนี้ พบว่าปริมาณสารแขวนลอยในน้ำล้นเพิ่มขึ้นจาก 2,000 เป็น 4,100 mg/l เนื่องจากตะกอนยังไม่จับตัวเป็นตะกอนหนัก จึงหลุดลอยออกมากับน้ำล้น และเมื่อเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์จาก 2.98 ไปจนถึง 10.02 kg COD/ m^3d ปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมักได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ถึงแม้ปริมาณสารแขวนลอยที่หลุดจากถังหมักจะเพิ่มสูงกว่าช่วงแรก (คือประมาณ 2,300-4,800 mg/l) แสดงว่าในช่วงนี้อัตราการเจริญของแบคทีเรียสูงกว่าปริมาณแบคทีเรียที่หลุดออกไป และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการรีไซเคิลจาก 1 : 1 เป็น 3 : 1 เป็นผลให้อัตราป้อนสารอินทรีย์สำหรับถังหมักมีเธนเพิ่มจาก 10.97 เป็น 24.70 kg COD/ m^3d ปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมักลดลง แต่ปริมาณสารแขวนลอยในน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักมีเธนมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากเกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยในถังหมักสูงกว่า 2,500 mg/l จึงเป็นสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญของ

ตารางที่ 4.3 ปริมาณตะกอนแบคทีเรียที่ความสูงต่างๆ ในถังหมักมีเธนที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ

Height	Organic Loading(kgCOD/ m^3d)																	
(cm)	0.49	1.01		2.03				2.98	6.38	8.20		10.02 (R=1:1)		10.95(R=3:1)		13.05(R=3:1)		
	15d	48d	63d	84d	104d	137d	151d	173d	208d	230d	262d	280d	294d	313d	330d	349d	357d	383d
135	870	490	1015	790	840	6,400	3,650	3,150	2,480	4,810	4,300	3,760	4,540	5,460	4,740	5,370	4,810	3,580
130	1,050	390	685	790	820	6,350	3,510	3,510	2,770	5,820	4,930	3,700	4,410	5,770	4,360	5,070	4,840	3,700
120	910	410	910	735	860	6,570	3,670	3,340	3,040	5,400	4,790	3,900	4,860	5,620	4,840	4,790	5,100	3,810
110	1,210	1,050	810	645	1,063	6,740	3,650	3,070	2,880	5,450	4,830	4,170	4,950	5,610	5,000	4,220	5,010	3,710
100	1,270	470	890	730	845	6,380	3,320	3,420	3,420	5,980	4,640	7,030	4,140	5,520	4,960	4,060	5,030	3,720
90	1,470	720	980	705	970	6,290	3,500	3,100	3,345	5,670	5,090	4,000	4,360	6,000	5,080	4,380	5,150	4,180
80	1,030	410	890	675	855	6,490	3,690	2,850	3,490	5,860	4,680	4,070	4,920	5,750	5,000	4,400	4,920	3,880
70	1,040	310	1,090	750	965	6,550	3,640	3,100	2,990	6,370	5,290	4,140	4,660	6,380	5,440	4,620	4,800	4,150
60	1,410	560	1,015	720	1,025	6,870	3,730	3,280	3,420	11,010	5,360	4,420	4,320	5,820	5,200	4,500	5,080	4,010
50	820	450	1,000	755	930	8,570	4,860	3,450	50,760	106,640	5,350	4,390	4,660	6,000	5,410	4,280	4,360	4,070
40	1,040	340	1,110	695	790	42,520	48,560	88,420	89,180	142,540	8,840	4,790	5,580	6,120	4,920	4,560	4,360	4,010
30	9,340	820	1,405	740	800	35,740	51,240	69,480	96,980	111,840	157,140	35,800	22,260	9,070	5,100	4,160	4,540	3,820
25	5,540	880	1,350	930	1,125	31,260	27,020	92,620	91,720	110,980	205,800	246,800	321,160	197,440	5,120	4,640	4,700	4,040
20	11,520	690	1,560	1,085	1,080	48,400	76,480	86,020	84,200	119,000	223,860	256,540	221,440	219,620	5,140	5,120	4,580	47,480
15	97,580	21,690	17,230	2,390	1,320	53,100	38,080	62,280	102,520	140,510	199,720	244,180	221,520	212,340	276,740	128,320	29,540	230,380
10	264,320	271,690	152,580	3940	3,930	100,9607	158,800	87,680	1,332,001	1,225,402	188,780	235,140	233,100	240,320	275,820	252,640	246,600	247,960
5	192,860	237,880	170,020	119,910	117,320	6,320	133,840	108,180	62,360	34,240	197,760	236,420	228,400	232,120	324,120	276,100	290,400	265,000
weight*	691,500	649,000	445,000	210,900	202,500	657,100	253,200	824,800	1,118,700	1,403,900	1,237,500	1,216,700	1,465,600	1,358,700	1,155,600	922,600	845,100	1,014,600
SS**	19,800	18,500	12,700	6,100	5,800	18,800	21,500	23,600	32,000	40,100	35,400	34,800	41,900	38,800	33,000	26,400	24,100	29,000

หมายเหตุ * เป็นปริมาณตะกอนแบคทีเรียทั้งหมด มีหน่วยเป็น มก

** เป็นค่าตะกอนแขวนลอยเฉลี่ย มีหน่วยเป็น มก/ล



รูปที่ 4.3 ปริมาณตะกอนแบคทีเรียทั้งหมดในถังหมักมีเธนแบบ UASB ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ

แบคทีเรีย ทำให้มีแบคทีเรียหลุดออกจากระบบมากขึ้น

เมื่อพิจารณาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของชั้นตะกอนในถังหมักมีเธน พบว่าในช่วงความสูงจากก้นถังหมัก 5-50 ซม มีปริมาณตะกอนเข้มข้นมาก และลดลงเมื่อความสูงของถังหมักเพิ่มขึ้น ซึ่งความสูงของชั้นตะกอนเข้มข้นนี้ จะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังเห็นได้จากผลการทดลองว่าในช่วงเริ่มต้นของระบบ จนถึงที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่ำ (2.03 kg COD/ m^3 d) ตะกอนมีลักษณะเป็นตะกอนเบา ฟุ้งกระจาย ความสูงของชั้นตะกอนประมาณ 30 ซม และเมื่อเวลาผ่านไป ความสูงนี้จะลดลงเหลือเพียง 30 % ของปริมาณเริ่มต้น ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการหลุดออกของตะกอนเป็นจำนวนมาก ทำให้ความสูงของชั้นตะกอนเหลือเพียง 5 ซม คิดเป็นปริมาณตะกอนเฉลี่ยในถังหมัก 5,800 mg/l จึงทำการเติมตะกอนใหม่ลงไป ทำให้ความสูงของชั้นตะกอนเพิ่มขึ้นเป็น 40 ซม หลังจากนี้พบว่าแบคทีเรียมีการเพิ่มจำนวน โดยพบการเพิ่มความเข้มข้นของตะกอนแบคทีเรีย และความสูงของชั้นตะกอนหนักเพิ่มเป็น 50 ซม ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 8.20 kg COD/ m^3 d คิดเป็นปริมาณตะกอนเฉลี่ยในถังหมักสูงถึง 40,100 mg/l ซึ่งช่วงดังกล่าวเป็นช่วงที่เริ่มเกิดตะกอนเม็ดในระบบ ตะกอนสามารถจมตัวได้ดีขึ้น ดังจะเห็นว่าความสูงของชั้นตะกอนลดลงเหลือ 25 ซม ในขณะที่ความเข้มข้นตะกอนสูงขึ้น เมื่อเพิ่ม

อัตราป้อนสารอินทรีย์เป็น 10.95 kg COD/ m^3 d พบว่าความสูงของชั้นตะกอนหนักลดต่ำลงเหลือ 15 ซม และปริมาณตะกอนเฉลี่ยได้ลดลงเหลือ 33,000 mg/l ซึ่งความสูงของชั้นตะกอนหนักและปริมาณเฉลี่ยนี้ได้ลดต่ำลงอีก เมื่อเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์เป็น 13.05 kg COD/ m^3 d การลดลงของปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมักนี้ เนื่องจากตะกอนบางส่วนหลุดออกจากถังหมัก อนึ่งจากผลการทดลองพบว่าระบบใช้เวลาประมาณ 8 เดือน ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 8.2 kg COD / m^3 d จึงเริ่มสังเกตุเห็นตะกอนเม็ดเกิดขึ้น

4.4 ค่าความเป็นกรดด่างในระบบหมัก (pH)

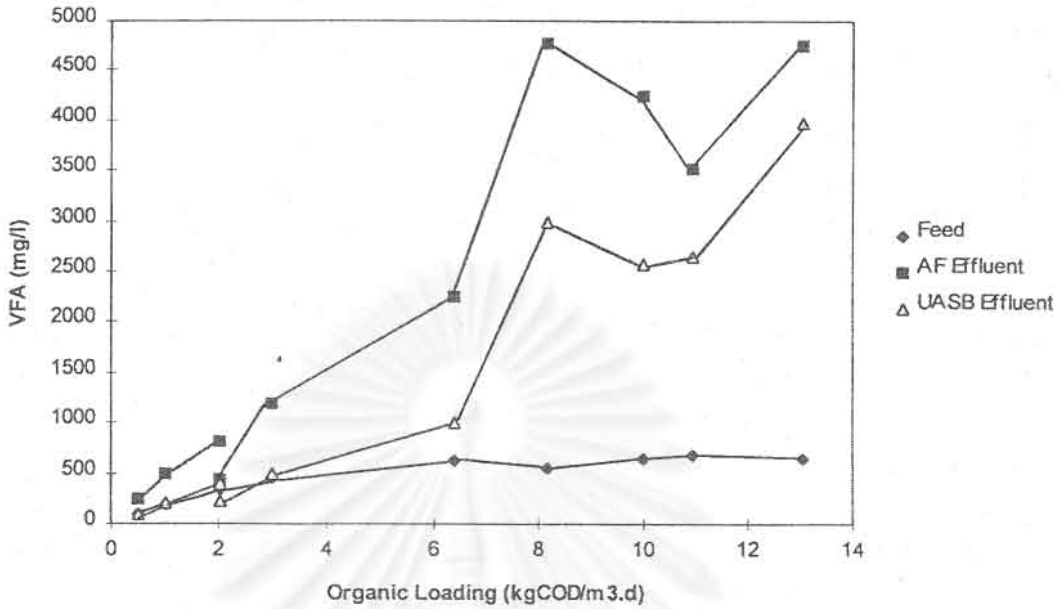
ค่าความเป็นกรดด่างของน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักกรดแบบตัวกลางกรอง อยู่ในช่วง 7.2-8.0 ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ ซึ่งในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่ำ ระบบสามารถรักษาค่าความเป็นกรดด่างให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญของแบคทีเรียได้ แต่เมื่อเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์สูงสุดที่ 13.05 kg COD/ m^3 d ค่าความเป็นกรดด่างของระบบมีค่า 6.8-6.9 เนื่องจากปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยสูงถึง 4,750 mg/l

สำหรับค่าความเป็นกรดด่างของน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักมีเธน มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับถังหมักกรดแบบตัวกลางกรอง แต่มีค่าสูงกว่าเล็กน้อยคืออยู่ในช่วง 7.3-8.3 และที่อัตราป้อนสารอินทรีย์สูงสุด 13.05 kg COD/ m^3 d ค่าความเป็นกรดด่างลดลงอยู่ในช่วง 7.7-7.9 เนื่องจากเสถียรภาพของระบบหมักลดลงจากการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยนั่นเอง

4.5 ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในระบบหมัก

กรดอินทรีย์ระเหยในระบบย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน ได้มาจากขั้นตอนการทำงานของ Acid forming bacteria ในถังหมักกรด รูปที่ 4.4 แสดงปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักกรดและถังหมักมีเธนที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ จะเห็นว่าที่ความเข้มข้นสารอินทรีย์ต่ำ 9,250 mg/l ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในน้ำกากส่าต่ำเพียง 98 mg/l แต่เมื่อความเข้มข้นสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นเป็น 60,000 mg/l ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยสูงขึ้นเป็น 545-680 mg/l (ดังตารางที่ 1)

จากผลการทดลองพบว่าในช่วงเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์จาก 0.49 เป็น 2.03 kg COD/ m^3 d นั้น ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในถังหมักกรดได้เพิ่มสูงอยู่ในช่วง 440-810 mg/l โดยช่วงแรกนี้



รูปที่ 4.4 แสดงปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในน้ำกากส่าที่เข้าและออกจากระบบที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ

กล่าวได้ว่ามีอัตราป้อนสารอินทรีย์ต่ำ ดังนั้นปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยจึงเพิ่มไม่มากนัก เมื่อเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์ในช่วง 2.03-10.02 kg COD/ m^3 d ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์ ซึ่งปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยสูงสุดเท่ากับ 4,775 mg/l ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 8.20 kg COD / m^3 d

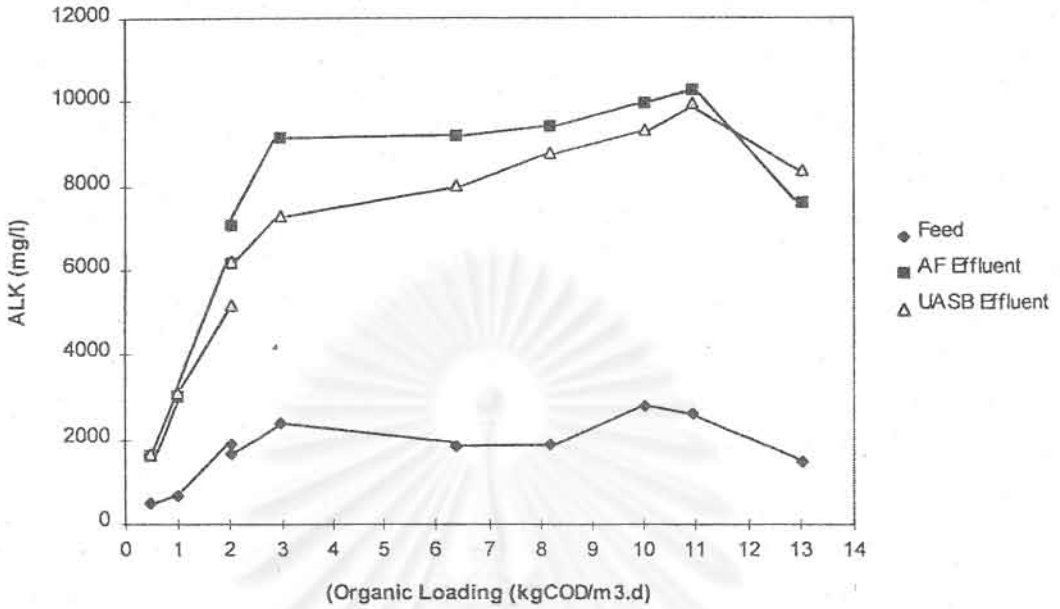
ภายหลังจากการเพิ่มอัตราส่วนการรีไซเคิลจาก 1 : 1 เป็น 1 : 3 ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 10.95 kg COD/ m^3 d ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยลดลงเหลือ 3,520 mg/l ซึ่งการลดลงของกรดอินทรีย์ระเหยนี้ เนื่องจากการรีไซเคิลโดยใช้น้ำกากส่าจากถังหมักมีเธนเข้าสู่ถังหมักกรด ทำให้มี Methanogenic bacteria ในถังหมักกรดเพิ่มขึ้น และเกิดจากการถูกเจือจางที่อัตราป้อนสารอินทรีย์สูงสุด 13.05 kg COD / m^3 d พบว่าปริมาณกรดอินทรีย์สูงเกือบใกล้เคียงค่าสูงสุดและที่อัตราป้อนสารอินทรีย์นี้เอง ที่ประสิทธิภาพของระบบเริ่มลดลง มีการสะสมกรดอินทรีย์ระเหยมากขึ้น ค่า pH ลดต่ำลง เสถียรภาพของระบบลดลง ปริมาณตะกอนที่หลุดออกจากถังหมักกรดสูงขึ้น จึงอาจกล่าวได้ว่า ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักกรด คืออัตราการป้อนสารอินทรีย์ โดยที่ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารอินทรีย์เข้าสู่ถังหมักกรดเพิ่มขึ้น

การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักมีเธน เป็นไปในทำนองเดียวกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักกรด ซึ่งในช่วงแรกที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่ำ 0.49-2.03 kg COD / m^3 d แบคทีเรียยังอยู่ในช่วงของการปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อม จึงพบตะกอนแบคทีเรียหลุดออกจากถังหมัก ทำให้ประสิทธิภาพการนำกรดอินทรีย์ระเหยไปใช้ลดลงจาก 60 % ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 0.49 kg COD / m^3 d เหลือ 52 % ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 2.03 kg COD / m^3 d และเพิ่มขึ้นในช่วงอัตราป้อนสารอินทรีย์ 2.98-6.38 kg COD / m^3 d ในขณะที่เมื่อเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์เป็น 8.20 และ 10.02 kg COD / m^3 d ประสิทธิภาพในการนำกรดอินทรีย์ระเหยไปใช้กลับลดลงอย่างมาก ส่งผลให้การผลิตก๊าซชีวภาพลดลง ทั้งนี้เนื่องจากช่วงหลังนี้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหย ซึ่งเป็นพิษต่อแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเธน ดังจะพบว่ามีการหลุดออกของตะกอนแบคทีเรียในรูปของ SS สูงกว่า 4,000 mg/l และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการรีไซเคิล ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 10.95 kg COD/ m^3 d ได้พบการหลุดออกของตะกอนแบคทีเรียสูงสุดถึง 5,100 mg/l (SS)

4.6 ค่าความเป็นด่างของระบบหมัก (Alkalinity)

รูปที่ 4.5 แสดงค่าความเป็นด่างในน้ำกากส่าที่เข้าและออกจากระบบ ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ ค่าความเป็นด่างของน้ำกากส่าที่เข้าสู่ระบบเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำกากส่าเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับค่าความเป็นด่างของน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักทั้งสอง โดยมีค่าสูงสุดที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 10.95 kg COD/ m^3 d คือ 10,300 และ 9,970 mg/l ในถังหมักกรดและถังหมักมีเธนตามลำดับ และมีค่าลดลงที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 13.05 kg COD/ m^3 d เนื่องจากมีการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยสูงขึ้น (4,750 mg/l)

สำหรับค่าความเป็นด่างของน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักกรด มีค่าสูงกว่าน้ำกากส่าที่เข้าถังหมักกรดประมาณ 1.8-3.7 เท่า และสูงกว่าน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักมีเธนเล็กน้อย โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1,600-10,000 mg/l ซึ่งค่าความเป็นด่างที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 1,000-3,000 mg/l ค่าความเป็นด่างของระบบหมักเกิดจากแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต ที่เกิดจากการรวมตัวของ CO_2 ในระบบกับแอมโมเนีย ทำให้ค่าความเป็นด่างสูงขึ้น (สุเมธ ชวเดช, 2529) ค่าดังกล่าวนี้มีผลต่อเสถียรภาพของระบบหมัก เพื่อรักษาค่า pH ของระบบ ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญของแบคทีเรียในแต่ละกลุ่ม



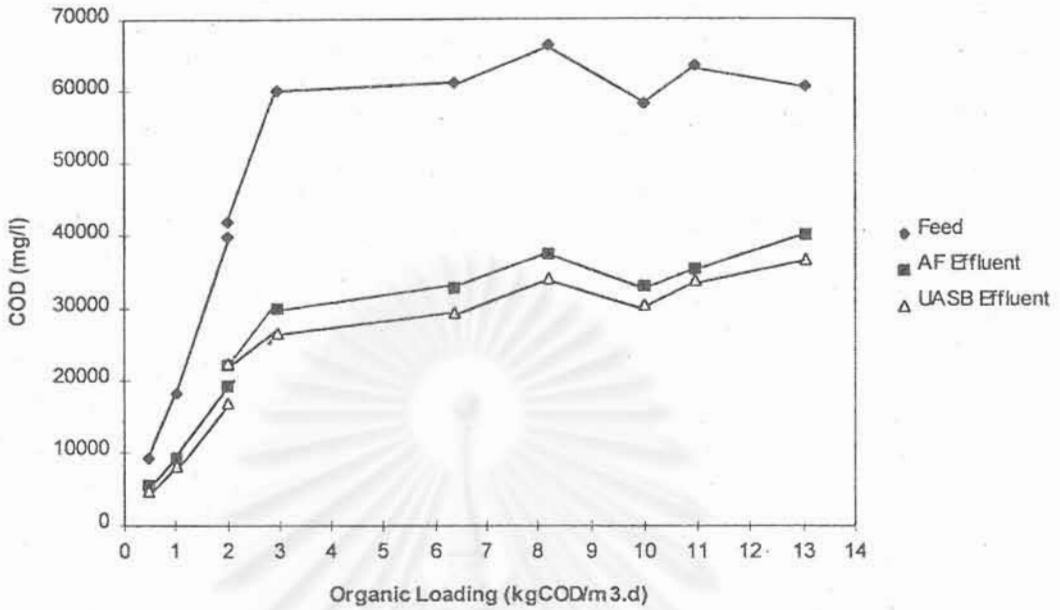
รูปที่ 4.5 แสดงค่าสภาพความเป็นด่างในน้ำกากส่าที่เข้าและออกจากระบบที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ

4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์

รูปที่ 4.6 แสดงปริมาณความเข้มข้นสารอินทรีย์ในรูป COD ของน้ำกากส่าที่เข้าและออกจากถังหมักกรดและถังหมักมีเธนที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ โดยประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์วัดในรูป COD เมื่อผ่านถังหมักกรด ถังหมักมีเธน และทั้งระบบที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ ได้แสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งสามารถพิจารณาถึงประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ได้ดังนี้

เมื่อพิจารณาเฉพาะถังหมักกรด พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นในช่วงอัตราป้อนสารอินทรีย์ต่ำๆ และลดลงอย่างช้าๆเมื่อเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์ โดยประสิทธิภาพการลด COD สูงสุดประมาณ 30 % ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ในช่วง 2-3 kg COD/ m^3 d การเพิ่มอัตรารีไซเคิลจาก 1 : 1 เป็น 3 : 1 ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์สูงกว่า 10.95 kg COD/ m^3 d พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูป COD ยังลดต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากมีการสูญเสียตะกอนแบคทีเรียออกจากระบบ

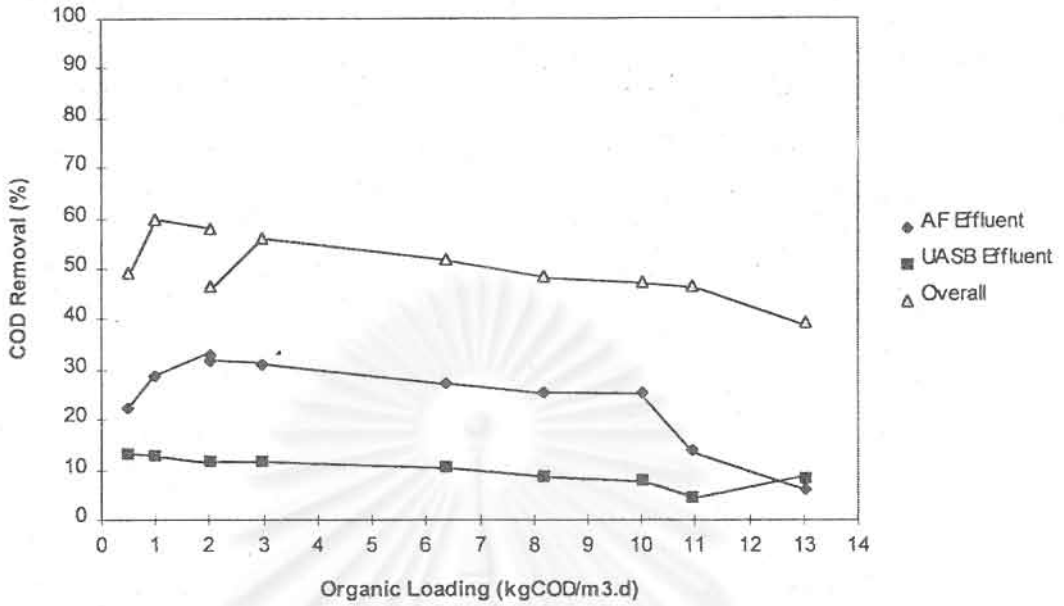
เมื่อพิจารณาเฉพาะถังหมักมีเธน พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูป COD ค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับถังหมักกรด โดยประสิทธิภาพการลด COD สูงสุดเท่ากับ 13.3 %



รูปที่ 4.6 ค่าCOD ในน้ำกากส่าที่เข้าและออกจากระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ

ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 0.49 kg COD/ m^3 d และเมื่อเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์ ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ลดต่ำลงเล็กน้อยอย่างต่อเนื่อง ที่น่าสังเกตุคือการเพิ่มอัตรารีไซเคิลจาก 1 : 1 เป็น 3 : 1 ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์สูงๆ ประสิทธิภาพการลดค่า COD ของถังหมักมีเธนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการรีไซเคิลน้ำกากส่ากลับมาใช้ เป็นการนำแบคทีเรียย้อนกลับมา ทำให้แบคทีเรียในระบบเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ของทั้งระบบ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ขึ้นกับอัตราป้อนสารอินทรีย์ โดยในช่วงอัตราป้อนสารอินทรีย์ต่ำ การเพิ่มสารอินทรีย์ จะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด COD เพิ่มสูงขึ้น แต่ในช่วงอัตราป้อนสารอินทรีย์สูง การเพิ่มสารอินทรีย์ จะทำให้ประสิทธิภาพดังกล่าวลดลง จากการทดลองนี้พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด COD สูงสุดเท่ากับ 58 % ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 2.03 kg COD/ m^3 d และการเพิ่มอัตราส่วนการรีไซเคิลจาก 1 : 1 เป็น 3 : 1 ในช่วงอัตราป้อนสารอินทรีย์สูง (10.95 - 13.05 kg COD/ m^3 d) พบว่าไม่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ของระบบ



รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการกำจัด COD ของระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ

4.8 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ

4.8.1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ โดยทั่วไปก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนประกอบด้วย CH_4 และ CO_2 เป็นส่วนใหญ่ (CH_4 65-70%, CO_2 30% และ H_2S 0.5-1%) ซึ่งปริมาณและสัดส่วนของก๊าซชีวภาพขึ้นกับประสิทธิภาพในการทำงานของแบคทีเรียแต่ละกลุ่ม ในถังหมักกรดมีสภาพแวดล้อมที่เหมาะกับการเจริญของ Acid forming bacteria จึงพบการเจริญของแบคทีเรียกลุ่มนี้สูงกว่า Methanogenic bacteria องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากถังหมักกรดจึงมี CO_2 สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับถังหมักมีเธนที่ทุกอัตราป้อนสารอินทรีย์ และในทางกลับกันพบ CH_4 ในถังหมักมีเธนในปริมาณที่สูงกว่าในถังหมักกรด เนื่องจากกรดอินทรีย์ระเหยถูกนำไปใช้โดย Methanogenic bacteria เพื่อเปลี่ยนเป็น CH_4 และ CO_2

สำหรับถังหมักกรด เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์จาก 1.01 ถึง 10.02 kgCOD/m^3d พบสัดส่วน CO_2 ในก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นเช่นกัน จนสูงสุดเท่ากับ 91 % ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 8.20-10.02 kg COD/ m^3d เนื่องจากการที่มีสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบมากขึ้น จึงเกิดการย่อยสลายโดยขั้นตอน Acidogenesis กล่าวคือสารอินทรีย์ถูกเปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์ระเหย และ CO_2 ส่วนขั้นตอน Methanogenesis เกิดขึ้นมากกว่าที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่ำ และลดต่ำลงที่

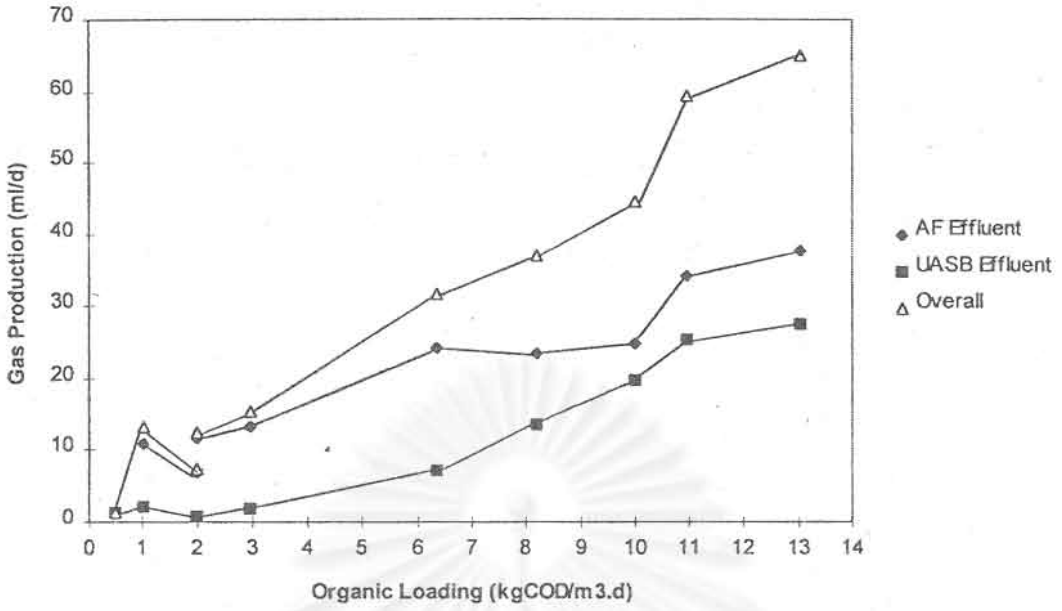
อัตราป้อนสารอินทรีย์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสังเกตุได้จากการลดลงของก๊าซมีเธน เมื่ออัตราป้อนสารอินทรีย์สูงขึ้น

เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการรีไซเคิล พบว่าสัดส่วน CO_2 ในก๊าซชีวภาพลดลงเหลือประมาณ 81 % ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 10.95 kg COD/ m^3 d ทั้งนี้เนื่องจากการรีไซเคิลโดยน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักมีเธน ทำให้ Methanogenic bacteria เพิ่มจำนวนสูงขึ้นในถังหมักกรด เกิดการนำ CO_2 และกรดอินทรีย์ไปใช้ และเมื่ออัตราป้อนสารอินทรีย์เพิ่มเป็น 13.05 kg COD/ m^3 d สัดส่วน CO_2 เพิ่มขึ้นอีกครั้งเป็น 89.21% เพราะเกิดสภาพที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญของแบคทีเรียกลุ่มที่ผลิตมีเธน

ส่วนในถังหมักมีเธน พบสัดส่วน CO_2 น้อยกว่าในถังหมักกรด มีค่าคงที่ประมาณ 29 % ในช่วงอัตราป้อนสารอินทรีย์ 2.03-8.20 kg COD/ m^3 d ทั้งนี้เนื่องจาก CO_2 เป็นสารตั้งต้นอย่างหนึ่งนอกเหนือไปจากกรดอินทรีย์เพื่อนำไปสร้าง CH_4 โดย Methanogenic bacteria และเมื่อเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์เป็น 10.02 kg COD/ m^3 d สัดส่วน CO_2 ในก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นเป็น 34.51% เนื่องจากการสะสมกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่สูงถึง 4,250 mg/l เป็นอันตรายต่อแบคทีเรียที่ผลิตมีเธน และที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 10.95-13.05 kg COD/ m^3 d ก็พบสัดส่วน CO_2 สูงประมาณ 36-38 %

ปริมาณ Methanogenic bacteria ในถังหมักมีเธนขึ้นกับระยะเวลาในการเก็บกักและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย จากผลการทดลองพบว่าเวลาเก็บกักที่ต่ำกว่า 4.7 วัน และปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่สูงกว่า 2,500 mg/l เป็นสภาพที่ไม่เหมาะต่อการเจริญของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเธน สำหรับแนวโน้มของถังหมักทั้งสองเมื่อเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์คือ สัดส่วน CO_2 ในแก๊สชีวภาพเพิ่มขึ้น โดยสามารถพบสัดส่วน CO_2 ในก๊าซชีวภาพจากถังหมักกรดสูงถึง 93.23 % ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 8.20 kg COD/ m^3 d และ 22.77 % ในก๊าซชีวภาพจากถังหมักมีเธนที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 2.03 kg COD/ m^3 d

4.8.2 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ จากรูปที่ 4.8 พบว่า ปริมาณก๊าซที่ได้จากถังหมักกรดมีค่าสูงกว่าที่ได้จากถังหมักมีเธนในช่วงอัตราป้อนสารอินทรีย์ต่ำ โดยในช่วงแรกที่อัตราป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจาก 1.01 เป็น 2.03 kg COD / m^3 d อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากถังหมักกรดลดลงจาก 11,000 ml/d เหลือ 6,860 ml/d เนื่องจากเป็นช่วงที่แบคทีเรียปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมใหม่ และเป็นขั้นตอน wash out หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์จาก 2.03 ไปจนถึง 10.02 kg COD/ m^3 d อัตราการผลิตก๊าซในถังหมักกรดเพิ่มขึ้นจนคงที่ประมาณ 24,000 ml/d ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ในช่วง 6.38- 10.02 kg COD/ m^3 d ซึ่งอธิบายได้ว่าช่วงดังกล่าวเป็นช่วงที่แบคทีเรียสามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมได้แล้ว เกิดการเพิ่มจำนวน



รูปที่ 4.8 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากถังหมักกรด ถังหมักมีเธน และปริมาณโดยรวมทั้งระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ

อย่างรวดเร็ว จึงสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้มาก โดยแบคทีเรียส่วนใหญ่เป็นพวกสร้างกรด และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการรีไซเคิล อัตราการผลิตก๊าซในถังหมักกรดเพิ่มขึ้นเป็น 34,020 และ 37,615 ml/d ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 10.95 และ 13.05 kg COD/ m^3 d ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการรีไซเคิลเป็นการเพิ่มปริมาณ Methanogenic bacteria ในถังหมักกรด และยังเป็นการเพิ่มการกวนผสมอีกด้วย

สำหรับการผลิตก๊าซในถังหมักมีเธนในช่วงแรก ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์จาก 1.01-2.03 kg COD/ m^3 d ซึ่งเป็นช่วงที่ปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมักมีเธนลดลงเหลือเพียง 30 % ของตะกอนเริ่มต้น เนื่องจากเป็นช่วงที่แบคทีเรียปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมใหม่ จึงมีแบคทีเรียบางส่วนหลุดจากถังหมักมีเธน ดังนั้นปริมาณแบคทีเรียที่ทำการย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อเกิดเป็นก๊าซมีเธนจึงลดลง จึงเป็นช่วงที่สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ต่ำ คือจาก 2,200 ml/d ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 1.01 kg COD/ m^3 d เหลือเพียง 670 ml/d ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 2.03 kgCOD/ m^3 d ภายหลังได้ทำการเติมตะกอนแบคทีเรียลงไปในถังหมักมีเธนแล้ว พบว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับการเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์ (รูปที่ 4.8) เนื่องจากช่วงอัตราป้อนสารอินทรีย์ 2.03-10.02 kg COD/ m^3 d แบคทีเรียสามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมได้ ปริมาณแบคทีเรียที่เกิดจึงมากกว่าแบคทีเรียที่หลุดออกจากระบบ จึงสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้มาก โดยพบว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดคือ 19,670 ml/d ที่อัตราป้อน

สารอินทรีย์ 10.02 kg COD/ m^3 d และมีอัตราส่วนการรีไซเคิล 1 : 1 ซึ่งเป็นช่วงที่มีปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมักสูงที่สุด และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการรีไซเคิล อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสามารถเพิ่มขึ้นเป็น 27,320 ml/d ที่ 13.05 kg COD/ m^3 d ซึ่งอธิบายได้ว่าในช่วงดังกล่าวมีอัตราการไหลเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยเข้าสู่ระบบมากขึ้น จึงทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพเพิ่มสูงขึ้นด้วย

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพขึ้นกับปริมาณตะกอนแบคทีเรียในระบบ โดยเฉพาะในช่วงเริ่มต้นการทำงานของระบบ แต่เมื่อแบคทีเรียสามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมได้แล้ว พบว่ามีการเพิ่มจำนวนจนอัตราการเพิ่มมากกว่าอัตราที่สูญเสียไป ทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ และการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้นตามอัตราการป้อนสารอินทรีย์ จนถึงที่อัตราป้อนหนึ่งมีแนวโน้มคงที่ แต่เมื่อเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์สูงขึ้นอีก จะมีผลทำให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพลดต่ำลง

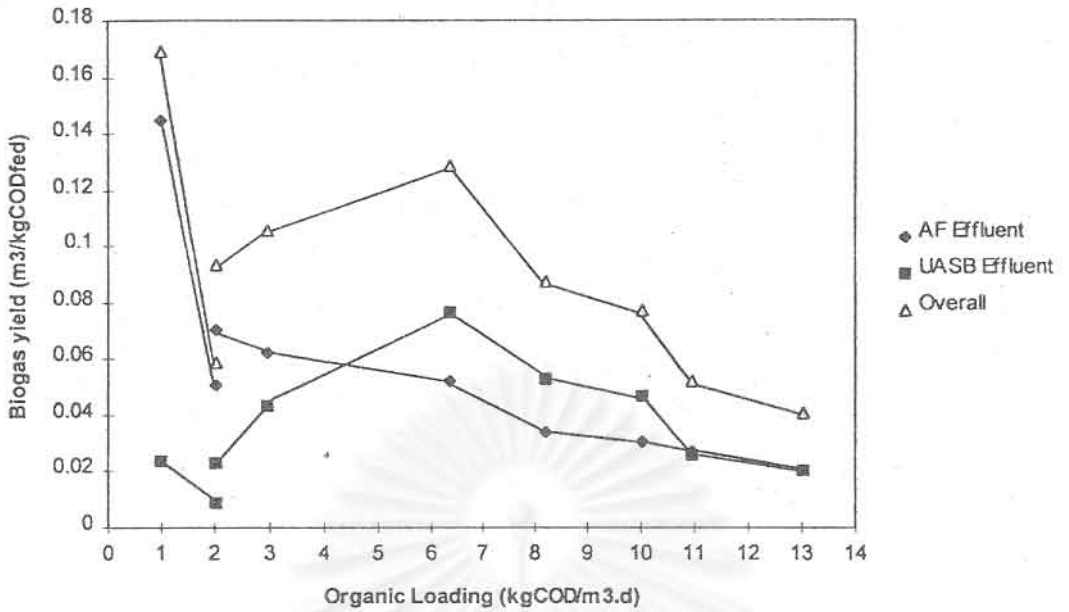
4.8.3 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ (Biogas Yield) ในที่นี้แยกพิจารณาเป็น 3 แบบ คือ เทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ถังหมัก, เทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดและเทียบกับปริมาตรของถังหมักมีเธน

4.8.3.1 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพต่อสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ถังหมัก เป็นค่าดรรชนีบ่งบอกให้ทราบว่าใน 1 หน่วยของสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ จะให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซชีวภาพมากน้อยเพียงใด รูปที่ 4.9 แสดงประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของถังหมักกรดและถังหมักมีเธนเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบ พบว่าในช่วงอัตราป้อนสารอินทรีย์ 1.01-2.03 kg COD/ m^3 d ประสิทธิภาพการผลิตของถังหมักทั้งสองมีค่าลดลง เนื่องจากแบคทีเรียอยู่ในช่วงของการปรับตัว ทำให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพลดต่ำลง หลังจากเติมตะกอนแบคทีเรียใหม่ในถังหมักมีเธน ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออัตราป้อนสารอินทรีย์สูงคือในช่วง 2.03 ไปจนถึง 10.02 kg COD/ m^3 d ประสิทธิภาพการผลิตมีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์

เมื่อพิจารณาในถังหมักกรดสำหรับช่วงอัตราป้อนสารอินทรีย์ 2.03-6.38 kg COD/ m^3 d ซึ่งเป็นช่วงที่ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยมีค่าต่ำ พบว่ามีแบคทีเรียทั้งสองกลุ่ม คือกลุ่มที่สร้างกรดและกลุ่มที่สร้างมีเธน ซึ่งสังเกตุได้จากสัดส่วนของ CH_4 ในก๊าซชีวภาพสูงคือประมาณ 20-44 % แต่เมื่ออัตราป้อนสารอินทรีย์สูงกว่านี้ อัตราการผลิตก็ยังคงสูงขึ้นแต่ไม่เป็นสัดส่วนกับการเพิ่มของสารอินทรีย์ จึงทำให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพลดลง เนื่องจากเกิดการสะสมกรดอินทรีย์ระเหยในถังหมักกรด จึงเกิดสภาพที่ไม่เหมาะสมต่อการทำงานของ Methanogenic bacteria ดังจะเห็นว่าสัดส่วนของมีเธนในก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ลดลงเหลือเพียง 6-10 %

สำหรับถังหมักมีเธน พบว่าเมื่อเติมตะกอนแบคทีเรียใหม่เข้าสู่ระบบ ถังหมักมีเธนมีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ และมีค่าสูงสุดที่

T149013๑๐



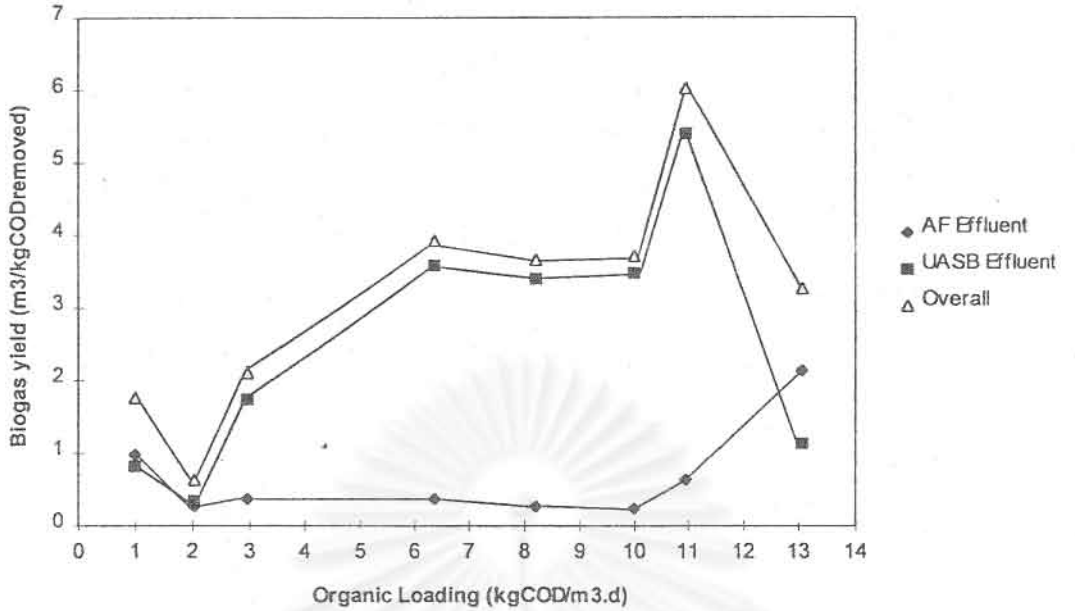
รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ โดยพิจารณาเทียบกับ kg COD ที่ป้อนเข้าระบบ

อัตราป้อนสารอินทรีย์ 6.38 kg COD/ m^3 d ซึ่งเท่ากับ 0.077 m^3 / kg COD ที่ป้อนเข้าระบบ หลังจากนั้น ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์ เนื่องจากเกิดการสะสมกรดอินทรีย์ระเหยในถังหมักมีเธนสูงกว่า 2,500 mg/l ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพลดต่ำลง

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเธนในถังหมักทั้งสอง พบว่าในถังหมักมีเธน มีประสิทธิภาพสูงกว่าประมาณ 5.1-16.5 เท่า ในช่วงอัตราป้อนสารอินทรีย์ 6.38-13.05 kg COD/ m^3 d (ตารางที่ 4.2) นั่นคือประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเธนรวมของทั้งระบบ ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการผลิตก๊าซของถังหมักมีเธนเป็นหลัก

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเธนต่อน้ำหนัก COD ที่ป้อนเข้าระบบของทั้งระบบ พบว่ามีค่าสูงขึ้น เมื่ออัตราป้อนสารอินทรีย์สูงขึ้น และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.12881 m^3/ kgCOD ที่ป้อนเข้าระบบ ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 6.38 kg COD/ m^3 d เมื่ออัตราป้อนสารอินทรีย์สูงกว่า 6.38 kg COD/ m^3 d ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพนี้จึงลดลง (ตารางที่ 4.2)

4.8.3.2 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพต่อปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด เป็นค่าดรรชนีบ่งบอกว่าสารอินทรีย์ที่ถูกใช้ไป 1 หน่วย เกิดก๊าซชีวภาพขึ้นเท่าใด รูปที่ 4.10 แสดงประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพต่อสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ พบว่า



รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ โดยพิจารณาเทียบกับ kg COD ที่ถูกกำจัด

ในช่วงอัตราป้อนสารอินทรีย์ 1.01-2.03 kg COD/ m^3 d ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพนี้มีค่าลดลง เนื่องจากแบคทีเรียอยู่ในช่วงของการปรับตัว และหลังจากเติมตะกอนแบคทีเรียใหม่ลงสู่ถังหมักมีเธน ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพนี้เพิ่มขึ้น แต่เมื่ออัตราป้อนสารอินทรีย์สูงขึ้น (ช่วง 2.03 ไปจนถึง 10.02 kg COD/ m^3 d) ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซนี้สำหรับถังหมักกรดมีแนวโน้มลดลง เมื่ออัตราป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น เพราะสารอินทรีย์ส่วนใหญ่ถูกย่อยสลายไปเป็นกรดอินทรีย์ระเหยมากกว่าที่จะนำไปผลิตก๊าซชีวภาพ และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการรีไซเคิล (ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 10.95 และ 13.05 kg COD/ m^3 d) ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากเป็นการนำแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเธนกลับเข้าสู่ระบบมากขึ้น

สำหรับถังหมักมีเธน พบว่าประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มสูงขึ้น เมื่ออัตราป้อนสารอินทรีย์เพิ่มสูงขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ 3.573 m^3/ kg COD ที่ถูกกำจัด ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 6.38 kg COD/ m^3 d เมื่ออัตราป้อนสารอินทรีย์สูงกว่าค่าดังกล่าว ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพลดลง และที่อัตราป้อนสารอินทรีย์สูงในช่วง 10.02-10.95 kg COD/ m^3 d พบว่าการเพิ่มอัตรารีไซเคิลจาก 1:1 เป็น 3:1 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพอย่างมาก

จากผลการทดลองพบว่า ถังหมักกรดมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์สูง จึงเกิดกรดอินทรีย์ในน้ำกากส่าที่ออกจากระบบในปริมาณมาก แต่มีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซต่ำ

ขณะที่ในถังหมักมีเธนมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ต่ำกว่า แต่ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงกว่า 4.8 - 15.2 เท่า โดยประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซสูงสุดเท่ากับ 3.57 m^3/ kgCOD ที่ถูกกำจัด ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 6.38 kg COD/ m^3 d

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของทั้งระบบ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ให้สูงขึ้น ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ 3.93 m^3/ kg COD ที่ถูกกำจัด ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 6.38 kg COD/ m^3 d แต่เมื่ออัตราป้อนสารอินทรีย์สูงกว่านี้ ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพลดลง และเมื่อมีการรีไซเคิล ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้เพิ่มขึ้นอย่างมาก กล่าวคือที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 10.02 kg COD/ m^3 d มีอัตรารีไซเคิล 1: 1 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 3.7 m^3/ kg COD ที่ถูกกำจัด แต่ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 10.95 kg COD/ m^3 d มีอัตรารีไซเคิล 3 : 1 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้นเป็น 6.03 m^3/ kg COD ที่ถูกกำจัด

4.8.3.3 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพต่อปริมาตรของถังหมัก ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพในถังหมักกรดสูงกว่าถังหมักมีเธนมากที่อัตราป้อนสารอินทรีย์เดียวกัน (ตารางที่ 4.2) แสดงว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการสร้างมีเธนเกิดได้ช้ากว่าการสร้างกรด และหลังจากเติมตะกอนแบคทีเรียใหม่ลงในถังหมักมีเธนแล้ว พบว่าประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับถังหมักทั้งสองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจาก 2.03-13.05 kg COD/ m^3 d และเช่นเดียวกับเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของทั้งระบบ

อนึ่งประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเธนของถังหมักกรดและถังหมักมีเธน และของทั้งระบบมีลักษณะเช่นเดียวกับการทดลองที่คำนวณในรูปประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อน้ำหนักซีโอดีที่เข้าระบบและถูกกำจัด ดังได้กล่าวมาแล้ว

4.9 เสถียรภาพของระบบหมัก

เสถียรภาพของระบบหมัก ขึ้นอยู่กับสมดุลของแบคทีเรียสองกลุ่มคือ Acidogenic bacteria และ Methanogenic bacteria สิ่งที่แสดงว่าเสถียรภาพของระบบลดลง คือปริมาณกรดไขมันระเหยที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดการลดลงของก๊าซมีเธนในก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ ซึ่งสาเหตุดังกล่าวเกิดจาก การเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ , อัตราการป้อนสารอินทรีย์ เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ส่งผลต่ออัตราเร็วที่ระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัว (Kroeker และคณะ, 1979)

จากผลการทดลองพบว่า ในช่วงเริ่มต้นการทำงานของระบบ (ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 0.49 -2.03 kg COD/ m^3 d) เป็นช่วงที่เสถียรภาพของระบบต่ำมาก ทั้งนี้เนื่องจากแบคทีเรียอยู่ในช่วง

ของการปรับตัว และมีการหลุดออก (wash out) ของแบคทีเรียในปริมาณสูง ทำให้อัตราการผลิตแก๊สชีวภาพต่ำ แต่ภายหลังการเติมตะกอนแบคทีเรียลงถังหมักมีเธนแล้ว ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 2.03 ถึง 10.95 kg COD/ m^3 d พบว่าระบบหมักมีเสถียรภาพดีมาก ซึ่งสังเกตุได้จากประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าสูง แม้ในช่วงอัตราป้อนสารอินทรีย์ 8.20-10.95 kg COD/ m^3 d ซึ่งเป็นช่วงที่มีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยสูง ระบบก็ยังคงรักษาสภาพ pH ที่ช่วงกลางไว้ได้ แม้แต่ที่ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยที่เข้าถังหมักมีเธนสูงถึง 4,250 mg/l

สำหรับที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 13.05 kg COD/ m^3 d ซึ่งเป็นอัตราป้อนสารอินทรีย์สูงสุดที่ทำการทดลอง พบว่าเสถียรภาพของระบบลดลง ส่งผลให้การผลิตก๊าซชีวภาพลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากช่วงดังกล่าวนีแบคทีเรียอ่อนแอลงและต้องใช้เวลาถึง 47 วันในการเข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งเป็นที่แน่ชัดว่า ถ้าเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์สูงกว่านี้ เสถียรภาพของระบบจะลดต่ำลง และในที่สุดระบบจะล้มเหลว

4.10 สภาวะที่เหมาะสมของระบบหมัก

สภาวะที่เหมาะสมในการควบคุมระบบหมัก ควรพิจารณาจากประสิทธิภาพในการลดสารอินทรีย์, อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ และสัดส่วนของก๊าซมีเธนที่ผลิตได้ รวมถึงเสถียรภาพของระบบหมักอาจแบ่งได้เป็น 2 กรณีดังนี้

4.10.1 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับลดสารอินทรีย์ พิจารณาสภาวะที่ให้ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์สูงสุดคือที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 2.98 kg COD/ m^3 d เวลาเก็บกัก 17.5 วัน ระบบหมักมีประสิทธิภาพในการลดสารอินทรีย์ 56.15 % ผลิตก๊าซชีวภาพ ได้ 15,330 ml / d ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์นี้ ระบบมีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับถังหมักกรด 0.062 m^3/ kg COD ที่ป้อนเข้าระบบ หรือ 0.37 m^3 / kg COD ที่ถูกกำจัด หรือ 1.98 m^3 / m^3d และสำหรับถังหมักมีเธนเท่ากับ 0.077 m^3 / kg COD ที่ป้อนเข้าระบบ หรือ 3.57 m^3/ kg COD ที่ถูกกำจัด หรือ 0.21 m^3 / m^3d ระบบมีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเธนสำหรับถังหมักกรดเท่ากับ 0.018 m^3/ kgCOD ที่ป้อนเข้าระบบ หรือ 0.11 m^3 / kg COD ที่ถูกกำจัด หรือ 0.57 m^3 / m^3d และสำหรับถังหมัก มีเธนเท่ากับ 0.031 m^3/ kg COD ที่ป้อนเข้าระบบ หรือ 1.24 m^3 / kg COD ที่ถูกกำจัด หรือ 0.038 m^3 / m^3d

4.10.2 สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ พิจารณาสภาวะที่ให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด คือที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 6.38 kg COD/ m^3 d มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับถังหมักกรดเท่ากับ 0.052 m^3 / kg COD ที่ป้อนเข้าระบบ หรือ

0.36 m^3 / kg COD ที่ถูกกำจัด หรือ 3.58 m^3 / m^3d และสำหรับถังหมักมีเธนเท่ากับ 0.077 m^3 / kg COD ที่ป้อนเข้าระบบ หรือ 3.57 m^3 / kg COD ที่ถูกกำจัด หรือ 0.21 m^3 / m^3d

ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์นี้ ระบบมีประสิทธิภาพการผลิตผลิตก๊าซมีเธนสำหรับถังหมักกรดเท่ากับ 0.010 m^3 / kg COD ที่ป้อนเข้าระบบ หรือ 0.072 m^3 / kg COD ที่ถูกกำจัด หรือ 0.72 m^3 / m^3d และสำหรับถังหมักมีเธนเท่ากับ 0.054 m^3/ kg COD ที่ป้อนเข้าระบบ หรือ 2.51 m^3/ kg COD ที่ถูกกำจัด หรือ 0.14 m^3 / m^3d สัดส่วนของมีเธนในก๊าซที่ผลิตได้จากถังหมักกรดและถังหมักมีเธนเท่ากับ 20.2% และ 70.22% ตามลำดับ

4.11 การเปรียบเทียบระบบหมักที่ศึกษานี้กับระบบหมักอื่นๆ

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบหมักยูเอเอสบีแบบขั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิสูงกับระบบหมักที่ทดลองในการบำบัดน้ำกากส่า

	ระบบสองขั้นตอนที่ทดลอง			ระบบขั้นตอนเดียวแบบอุณหภูมิสูง
	ถังหมักกรด	ถังหมักมีเธน	ทั้งระบบ	(อะเคื้อ บุญญศิริ, 2536)
ถังหมัก	ตัวกลางกรอง	ยูเอเอสบี	-	ยูเอเอสบี
ปริมาตรใช้งาน (m^3)	0.0068	0.036	0.0418	0.035
ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (mg/l)	60000	33100	60000	113280
อุณหภูมิ (^{0} C)	55	55	55	55
อัตราป้อนสารอินทรีย์*(kgCOD/m^3d)	143.7	24.7	11.0	10.1
ระยะเวลาเก็บกัก (d)	13.6 ชม	3	3.6	8.10
อัตราส่วนการรีไซเคิล	-	-	1:1	1:1
ปริมาณกรดอินทรีย์ในน้ำกากส่าที่ออกจากระบบ (mg/l)	4250	2580	2580	490
ประสิทธิภาพการลดสารอินทรีย์ (%)	25.2	8.0	47.5	44.0
ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซ				
-(m^3 / kg CODที่ป้อน)	0.031	0.046	0.077	0.099
-(m^3 / kg CODที่ถูกกำจัด)	0.23	3.47	3.7	0.225
อัตราการผลิตก๊าซ				
-(l/d)	25	19	44	36
-m^3 / ปริมาตรถังหมัก-วัน)	3.64	0.56	4.2	1.003
สัดส่วนของก๊าซมีเธนและอื่นๆ (%)	9.4	65	33.4	61

* อัตราป้อนสารอินทรีย์สูงสุดที่ระบบหมักยังมีเสถียรภาพของระบบคือยู่

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของระบบหมักที่ทำการศึกษา ซึ่งเป็นระบบหมักตัวกลางกรอง-ยูเอเอสบี อุณหภูมิสูง (55 °C) ชนิด 2 ขั้นตอน กับระบบหมักยูเอเอสบี อุณหภูมิสูง (55 °C) แบบขั้นตอนเดียว ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

-ระบบหมักที่ทำการศึกษานี้ มีระยะเวลาเก็บกักสั้นคือ 1.4-17.5 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับระบบหมักขั้นตอนเดียว ซึ่งมีเวลาเก็บกักยาวนานกว่าคือ 9-42 วัน

-ระบบหมัก 2 ขั้นตอน อุณหภูมิสูง ที่ทำการทดลองนี้ มีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ($m^3 / m^3 d$) สูงกว่าระบบหมักอุณหภูมิสูงขั้นตอนเดียวประมาณ 4 เท่า

-ระบบหมักทั้งสองมีอัตราป้อนสารอินทรีย์สูงสุดใกล้เคียงกัน ส่วนอัตราป้อนสารอินทรีย์ที่เหมาะสมทั้ง 2 ระบบ มีค่าประมาณ 6 kg COD/ m^3 d

-เสถียรภาพของระบบหมักทั้งสองใกล้เคียงกัน

จากตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของระบบหมักที่ใช้ในการทดลองกับระบบหมักยูเอเอสบีขนาดอุตสาหกรรมที่ใช้งานจริงในการบำบัดน้ำกากส่า ซึ่งเป็นระบบยูเอเอสบี 2 ขั้นตอน โดยถังหมักกรดมีความจุ 450 m^3 และถังหมักมีเธนมีขนาดจุ 3,000 m^3 โดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิในถังหมัก อุณหภูมิน้ำกากส่าเฉลี่ยในถังหมักประมาณ 30 °C สามารถเปรียบเทียบระบบหมักที่ใช้ในการทดลองกับระบบหมักที่ใช้งานจริงได้ดังนี้

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบหมักยูเอเอสบีขนาดอุตสาหกรรมที่ใช้งานจริงกับระบบหมักที่ใช้ในการทดลองในการบำบัดน้ำกากส่า

		ระบบหมักที่ทดลอง		ระบบหมักที่ใช้งานจริง*	
ปริมาตรถังหมัก					
ถังหมักกรด	$ม^3$	ตัวกลางกรอง	0.0068	ถังตกตะกอน	450
ถังหมักมีเธน	$ม^3$	ยูเอเอสบี	0.035	ยูเอเอสบี	3,000
ความเข้มข้นสารอินทรีย์ที่ใช้	มก/ล		58,000-66,000		51,000-61,000
อุณหภูมิ	°ซ		55		อุณหภูมิห้อง
อัตราป้อนสารอินทรีย์	กก ซีโอดี/$ม^3$.วัน		6.4-10.0		2.6-4.2
ระยะเวลากักเก็บ	วัน		3.6-9.1		14-22
ปริมาณกรดอินทรีย์ในน้ำกากส่าที่ออกจากระบบ	มก/ล		990-3,000		100-950
ประสิทธิภาพการลดสารอินทรีย์	%		47-56		50-65
ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซ	$ม^3$/กก ซีโอดีที่ป้อน		0.03-0.06		0.14-0.44
	$ม^3$/กก ซีโอดีที่ถูกกำจัด		2.3-2.6		0.26-0.68
สัดส่วนของก๊าซมีเธนและอื่นๆ			65-70		61-70

* เป็นระบบหมักสองขั้นตอนที่ทดลองใช้ในโรงงานผลิตสุราจังหวัดฉะเชิงเทรา, บุรีรัมย์ และอุตรดิตถ์ (Chavadej and Chattrakoon, 1991)

-อัตราป้อนสารอินทรีย์ที่เหมาะสมสำหรับระบบหมักในการทดลองนี้ อยู่ในช่วง 6.4-10.0 kg COD/ m^3 d ซึ่งสูงกว่าอัตราป้อนสารอินทรีย์ของระบบหมักยูเอเอสบีขนาดอุตสาหกรรม โดยมีค่าอยู่ในช่วง 2.6-4.2 kg COD/ m^3 d

-ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ของระบบหมักทดลองนี้อยู่ในช่วง 47-56 % ซึ่งใกล้เคียงกับประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ของระบบหมักยูเอเอสบีขนาดอุตสาหกรรม โดยมีค่าในช่วง 50-65 %

-ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบหมักยูเอเอสบีขนาดอุตสาหกรรม มีค่าสูงกว่าระบบหมักยูเอเอสบีที่ทดลอง แต่องค์ประกอบก๊าซมีเธนที่ผลิตได้จากถังหมักมีเธนมีค่าใกล้เคียงกันคือประมาณ 65-70 %

-ระบบหมักยูเอเอสบีขนาดอุตสาหกรรมมีระยะเวลาเก็บกักน้ำกากส่ายาวนานถึง 14-22 วัน ในขณะที่ระบบหมักยูเอเอสบีที่ทดลองมีระยะเวลาสั้นกว่า คือเพียง 1.4-7.3 วัน

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของระบบหมักที่ทดลอง, ระบบหมักยูเอเอสบีขั้นตอนเดียว ควบคุมอุณหภูมิที่ 55 °C และระบบหมักยูเอเอสบี 2 ขั้นตอน ควบคุมอุณหภูมิที่ 30 °C สามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพของระบบหมักจะสูงขึ้น ถ้าควบคุมที่อุณหภูมิสูง 55°C และระบบหมักสองขั้นตอน จะมีประสิทธิภาพและเสถียรภาพสูงกว่าระบบหมักขั้นตอนเดียว ดังนั้นการนำวิธีการควบคุมอุณหภูมิที่ 55 °C และระบบสองขั้นตอนมาประยุกต์ใช้ร่วมกัน จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบหมักสูงขึ้น

4.12 แนวทางประยุกต์ใช้ระบบหมักที่ทดลอง

ดังได้กล่าวมาแล้ว ระบบหมักที่ทดลองเป็นระบบยูเอเอสบีสองขั้นตอนควบคุมอุณหภูมิที่ 55 °C พบว่ามีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบหมักอื่นๆ สำหรับแนวทางการประยุกต์ใช้ระบบหมักที่ทดลอง ควรคำนึงถึงเรื่องดังต่อไปนี้

-ควรใช้กับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสารอินทรีย์สูง เนื่องจากให้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่สูงจึงส่งผลถึงความคุ้มในการลงทุน

-ควรใช้กับน้ำเสียที่มีอุณหภูมิสูง เนื่องจากเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการเพิ่มอุณหภูมิกรณีที่ใช้น้ำเสียที่มีอุณหภูมิต่ำ

-ระบบสองขั้นตอนซึ่งประกอบด้วยถังหมักกรดและถังหมักมีเธน ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าระบบหมักขั้นตอนเดียว

-ขนาดถังหมักกรดควรมีขนาด 20 % ของถังหมักมีเธน

-การออกแบบระบบหมัก ควรพิจารณาอัตราป้อนสารอินทรีย์ของถังหมักมีเธนเป็นหลัก

กรณีน้ำเสียทั่วไป อาจออกแบบที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ในช่วง 5-10 kgCOD/m^3d แต่สำหรับน้ำกากส่า ควรออกแบบที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 6.38 kgCOD/m^3d ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด

-ควรมีฉนวนหุ้มถังหมัก เพื่อรักษาอุณหภูมิในถังหมักให้คงที่ 55 °C ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในถังหมัก ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของระบบหมักลดลง

-การหมุนเวียนน้ำกากส่าที่บำบัดแล้วกลับมาที่ถังหมักกรด จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ ทั้งนี้เนื่องจากเป็นการรักษาค่าความเป็นกรดด่าง และเป็นการเพิ่มปริมาณแบคทีเรียที่สร้างมีเธนในระบบอีกด้วย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ประสิทธิภาพในการลดสารอินทรีย์ และผลิตก๊าซชีวภาพของระบบตัวกลางกรอง-ยูเอเอสบี แบบอุณหภูมิสูงชนิดสองขั้นตอน ขึ้นกับปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมัก (โดยเฉพาะในถังหมักมีเธน) และปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในระบบ อัตราป้อนสารอินทรีย์เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบหมัก ซึ่งเกี่ยวข้องกับปริมาณตะกอนและความเข้มข้นกรดอินทรีย์ระเหยในถังหมัก

สำหรับการรีไซเคิลน้ำกากส่าโดยการสูบน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักมีเธน กลับเข้าในระบบเป็นการปรับค่าความเป็นกรดด่างของน้ำกากส่าที่เข้าสู่ถังหมักกรด แล้วยังเป็นการนำเอาตะกอนแบคทีเรียจากถังหมักมีเธนกลับมาใช้ใหม่ เป็นที่น่าสังเกตุว่า ระบบหมักที่ทดลองนี้มีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในน้ำกากส่าที่ออกจากระบบสูงมาก ซึ่งเป็นข้อที่ควรพิจารณาในการนำไปใช้งานจริง

อัตราป้อนสารอินทรีย์ที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของระบบหมักนี้อยู่ในช่วง 6.38 - 10.02 kgCOD/ m^3 d ซึ่งให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซสูงสุดที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 6.38 kgCOD/m^3 d ระยะเวลาเก็บกัก 9.1 วัน ประสิทธิภาพการลดปริมาณสารอินทรีย์ 52 % ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเธนเท่ากับ 0.064 m^3 /kgCOD ที่ป้อนเข้าระบบ หรือ 2.58 m^3 /kgCOD ที่ถูกกำจัด หรือ 0.87 m^3/ m^3 d โดยก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีองค์ประกอบมีเธนประมาณ 70.2 % และอัตราป้อนสารอินทรีย์สูงสุดของระบบนี้คือ 10.95 kg COD /m^3 d

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาเปรียบเทียบระบบหมักนี้ที่อุณหภูมิ 37 °C และที่อุณหภูมิ 30 °C เพื่อประเมินอุณหภูมิที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานระบบหมักนั้น เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

2. ควรนำตะกอนแบคทีเรียที่หลุดออกจากถังหมักกรดในถังตกตะกอน กลับมาใช้ใหม่ในถังหมักกรด เพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณตะกอนในถังหมัก

3. ศึกษาวิธีในการลดปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในน้ำกากส่าที่ออกจากระบบ ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์สูงๆ

4. ศึกษาสัดส่วนก๊าซมีเธนในก๊าซชีวภาพที่ได้ และคุณค่าการเป็นเชื้อเพลิงด้วย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

สุเมธ ชวเดช, 2529. ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนอิสระ .เอกสารวิชาการของห้องปฏิบัติการ วิศวสิ่งแวดล้อมและทรัพยากร สถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2529, หน้า 1-31 (อัดสำเนา)

สุเมธ ชวเดช, 2530. ระบบหมักก๊าซชีวภาพ Upflow Anaerobic Sludge Blanket . เอกสารประกอบคำบรรยายเรื่องการออกแบบและพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ก๊าซชีวภาพ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯ ธนบุรี 1-12 ธันวาคม, หน้า 1-13 (อัดสำเนา)

สุเมธ ชวเดช, 2539. การเพิ่มประสิทธิภาพระบบหมักแบบยูเอเอสบีโดยควบคุมที่อุณหภูมิในช่วงเทอร์โมฟิลิค. รายงานวิจัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อะเคื้อ บุญญศิริ, 2537. การบำบัดน้ำกากส่าโดยกระบวนการ UASB ที่อุณหภูมิสูง . วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาษาอังกฤษ

APHA, AWWA and WEF, 1992. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th.ed., Victor Graphics, Inc., Baltimore, Maryland, USA.

Brock, T., D., and Madigan, M., T., 1991. Biology of Microorganism. 16th.ed., Prentice Hall, New Jersey, USA.

Buhr, H., O., and Andrew, J., F., 1977. Review paper: The thermophilic anaerobic digestion process. Water Research 11: 129-143.

Chavadej, S., 1988. Two-stage anaerobic Process . Bangkok: Thailand of Scientific and Technologe Research. (Mimeographed)

Eckenfelder, W.W., 1979. Principles of Water Quality Management, CBI Publishing Company.

Ghosh, S., Conrad., J.R., and Klass, D., L., 1975 Anaerobic acidogenesis of wastewater sludge. Journal of the Water Pollution Control Federation 47:30-45.

Ghosh, S., and Klass, D.L., 1977. Two phase anaerobic digestion. US.Pat. 4,022,665.

Klass, D.L., 1984 Methane from anaerobic fermentation. Science 223: 1021-1028

Kroeker, E.J., Schutte, D.D., Sparling, A.B., and Lapp, H.M., 1979. Anaerobic treatment process stability. Journal of the Water Pollution Control Federation 51(4): 718-727

Lettinga, G., and Hulshoff Pol, L.W. 1991. Application of modern high rate anaerobic treatment processes for wastewater treatment. New Developments in Industrial Wastewater Treatment: 33-64. Netherlands: Kluwer Academic.

Lier, J. 1991. Thermophilic wastewater treatment. Anaerobic Reactor Technology: 67-85. International course on anaerobic waste water treatment, Jun. 26-Aug.7. Waningen Agricultural University.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ผ.1 - ผ.10 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆตลอดการทดลอง ในแต่ละอัตราป้อนสารอินทรีย์ ตั้งแต่ 0.2 kg. COD/m^3 d จนถึงอัตราป้อนสารอินทรีย์สุดท้ายคือ 12.8 kgCOD/m^3d

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ผ.1 ข้อมูลการทดลองของระบบในแต่ละวันที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 0.49 kgCOD/m^3d โดยใช้อัตราการไหลเข้าถังหมัก AF 4 l/d และระยะเวลาเก็บกักใน AF 1.70 วัน

วันที่	อัตราป้อนสารอินทรีย์ kgCOD/m^3d	COD (mg/l)			สารอินทรีย์ที่ลดลง (%)			กรดอินทรีย์ระเหย (mg/l)			pH			สภาพความเป็นด่าง (mg/l)			ปริมาณของแข็งแขวนลอย (mg/l)			อัตราผลิตก๊าซจาก UASB (ml/d)	CO_2:CH_4 จากถังหมัก UASB (%)
		Feed	AF eff.	UASB eff.	AF	UASB	Overall	Feed	AF eff.	UASB eff.	Feed	AF eff.	UASB eff.	Feed	AF eff.	UASB eff.	Feed	AF eff.	UASB eff.		
15	0.51	8909	4285	3872				109	297	140	5.1	7.5	7.8				320	604	610	282	-
16	0.51	8909	4411	3764	30.98	14.67	57.75	109	332	122	5.1	7.4	7.7							-	-
18	0.51	8909	5152	3788	18.69	26.48	57.48	109	461	56	5.1	7.2	7.5							-	19.41:80.59
19	0.49	8654	5245	3887	17.38	25.89	56.37	84	404	126	5.0	7.3	7.8	509	1590	1526				671	-
22	0.49	8654	5424	4331	13.50	20.15	49.95	84	321	182	5.0	6.9	7.3				390	515	1955	884	26.04:73.96
23	0.49	8.54	4655	4210	28.30	9.56	51.35	84	293	140	5.0	7.3	7.6							550	-
24	0.51	8853	5160	4520	19.78	12.40	47.77	70	377	154	5.6	6.5	7.5							821	-
25	0.51	8853	5437	4445	18.69	18.25	49.79	70	363	154	5.6	6.4	7.3							620	-
26	0.51	8853	5476	4524	17.64	17.38	48.90	70	363	154	5.5	6.8	7.4	509	1654	1590				918	-
27	0.51	8853	5635	4524	15.75	19.72	48.90	70	349	154	5.5	6.6	7.4							1101	22.63:77.37
29	0.49	8.29	5363	4597	19.82	14.28	48.07	98	332	112	5.6	6.7	7.5				85	215	290	1289	-
30	0.49	8607	5246	4754	20.67	9.38	44.91	84	279	140	5.6	7.2	7.6							1084	23.70:76.30
31	0.49	8642	5391	4732	19.30	12.22	45.02	84	279	210	5.7	7.0	7.2							1173	-
32	0.49	8583	5587	4737	16.45	15.21	45.19	84	279	168	5.8	7.0	7.3							1028	22.83:77.17
33	0.51	8871	5565	5081	16.44	8.70	40.80	84	279	168	5.9	7.1	7.4	509	1526	1717				1092	-
36	0.51	8960	5720	5120	18.00	10.49	42.28	93	251	112	5.8	7.3	7.4				125	210	1715	1856	25.95:74.05
37	0.48	8434	5381	4578	23.57	14.92	48.91	98	223	70	6.0	7.2	7.3							1141	-
38	0.48	8434	5640	4640	13.31	17.73	44.98	98	237	70	6.0	7.0	7.3							1219	25.33:74.67
39	0.49	8492	476	4643	16.23	15.21	44.95	98	265	98	5.0	7.2	7.4	318	1717	1781				1308	-
40	058	10117	5331	4864	18.83	8.76	42.72	98	279	140	5.0	7.1	7.3							1113	-
43	0.58	10195	5292	4514	29.35	14.70	55.38	98	223	56	5.0	7.4	7.3							1612	21.31:78.69
44	0.52	9020	5333	4784	27.49	10.29	53.08	98	237	140	4.7	7.4	7.7							800	20.50:79.50

ตาราง ผ.2 ข้อมูลการทดลองของระบบในแต่ละวันที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 1.01 kgCOD/m^3d โดยใช้อัตราการไหลเข้าถังหมัก AF คงที่ที่ 4 l/d เมื่อ unit 1*= m^3/kgCODที่ป้อนข้าระบบ ; unit 2*=m^3/kgCODที่ถูกกำจัด

วันที่	อัตราการไหลเข้าถัง UASB (l/d)	อัตราป้อนสารอินทรีย์ kgCOD/m^3d	ระยะเวลาเก็บกัก (วัน)		COD (mg/l)			กรดอินทรีย์ระเหย (mg/l)			สารอินทรีย์ที่ลดลง (%)			สภาพความเป็นด่าง (mg/l)			ปริมาณของแข็งแขวนลอย (mg/l)		
			AF	UASB	Feed	AF eff	UASB eff.	Feed	AF eff.	UASB eff.	AF	UASB	Overall	Feed	AF eff.	UASB eff.	Feed	AF eff.	UASB eff.
45	6.30	0.88	1.70	5.55	15409	5370	4669	168	251	70	-	13.05	48.24						
46	6.30	1.03	1.70	5.55	17991	5774	4728	164	308	86	42.48	18.12	69.32				-	570	930
47	6.10	0.98	1.70	5.74	17089	5794	4043	136	308	111	48.99	30.22	77.53	636	2162	1844			
50	6.10	0.98	1.70	5.74	17089	7175	3444	308	444	86	32.09	52.00	79.85						
51	6.10	0.91	1.70	5.74	15990	8764	5412	308	740	86	14.63	38.25	68.33						
52	6.10	0.93	1.70	5.74	16326	9133	5918	173	956	222	14.65	35.20	62.99						
53	6.10	1.02	1.70	5.74	17882	8941	6421	187	894	370	19.61	28.18	60.67						
54	5.42	1.00	1.70	6.46	17541	8387	6291	200	802	358	30.98	24.99	64.82	622	2694	2538			
57	5.90	1.11	1.70	5.93	19388	8408	6775	200	678	284	29.44	19.42	61.38				385	405	240
58	5.90	0.95	1.70	5.93	16599	8853	7213	185	678	284	32.32	18.52	62.80						
59	5.90	1.01	1.70	5.93	17755	8571	6531	185	709	148	28.01	23.80	60.65						
60	5.76	0.99	1.70	6.08	17408	8374	6423	170	493	206	31.04	23.30	63.82						
61	5.76	1.16	1.70	6.08	20242	8826	7206	216	524	210	25.93	18.35	58.61	1606	3212	3160	-	813	664
63	5.63	0.91	1.70	6.22	15928	8871	7016	170	555	197	35.36	20.91	65.34						
65	5.91	1.05	1.70	5.92	18334	8667	7084	200	493	271	24.45	18.26	55.52				-	1076	3055
66	5.91	1.07	1.70	5.92	18802	9257	7934	185	493	222	27.16	14.29	56.73						
67	6.83	1.02	1.70	5.12	17769	8513	7438	200	493	173	36.32	12.63	60.44						
68	6.83	1.05	1.70	5.12	18448	9508	8033	185	493	151	24.56	15.51	54.79	622	3160	3056			
71	7.34	1.02	1.70	4.77	17828	9590	8361	200	432	136	27.57	12.82	54.68				-	545	555
72	6.43	0.99	1.70	5.44	17339	9275	8307	170	493	148	29.17	10.44	53.40						
73	6.43	1.05	1.70	5.44	18443	9754	7705	185	463	160	23.93	21.01	55.56						
74	6.50	0.95	1.70	5.38	16667	8862	7805	185	524	148	32.22	11.93	57.68						
75	6.22	1.09	1.70	5.62	19027	9182	8162	170	463	265	24.96	11.11	51.03	673	3002	3177			
76	6.22	1.09	1.70	5.62	19027	9280	8000	170	617	185	31.74	13.79	57.95	673	3004	3004			
77	6.22	1.04	1.70	5.62	18146	9520	8273	185	432	222	29.55	13.10	56.52	466	3108	3004			
78	6.22	1.04	1.70	5.62	18146	9198	8233	355	509	253	30.37	10.49	54.63	466	3004	3134			

ตาราง ผ.2 (ต่อ)

วันที่	pH			อัตราผลิตก๊าซ (ml/d)		CO_2:CH_4 จากถังหมัก (%)		ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซ จากถังหมัก AF				ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซ จากถังหมัก UASB			
	Feed	AF eff.	UASB eff.	AF	UASB	AF	UASB	Biogas yield		Methane yield		Biogas yield		Methane yield	
								Unit 1*	Unit 2*	Unit 1*	Unit 2*	Unit 1*	Unit 2*	Unit 1*	Unit 2*
45	4.5	7.1	7.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
46	4.2	7.1	7.3	-	1022	-	16.04:83.96	-	-	-	-	.02809	.15507	.02359	.13019
47	4.5	7.5	7.5	-	730	-		-	-	-	-	.02067	.06839	-	-
50	5.0	7.3	7.7	4428	1896	54.56:45.44	15.55:84.45	.10477	.32645	.04761	.14834	.04335	.08336	.03661	.07039
51	5.0	6.4	7.8	7112	1442			.17319	1.18336	-	-	.02699	.07057	-	-
52	4.8	7.3	7.7	6379	1911	29.13:70.87	18.43:81.57	.14903	1.01706	.10562	.72079	.03432	.09751	.02799	.07954
53	4.7	7.3	7.4	8024	2228			.18036	.91976	-	-	.04088	.14503	-	-
54	4.8	7.3	7.6	9792	2522	59.77:40.23	19.12:80.88	.20146	.65029	.08105	.26161	.05551	.22213	.04489	.17966
57	4.8	7.8	7.9	9325	4261	46.17:53.83	19.16:80.84	.19564	.66455	.10531	.35773	.08584	.44198	.06939	.35729
58	4.7	7.8	8.0	9196	1904			.17574	.54369	-	-	.03643	.19665	-	-
59	4.7	7.6	7.8	8276	2414	36.15:63.85	17.60:82.40	.17378	.62039	.11096	.39612	.04771	.20044	.03931	.16516
60	4.6	7.6	7.8	10583	2040	53.43:46.57	18.49:81.51	.21788	.70198	.10147	.32691	.04229	.18153	.03447	.14796
61	5.1	7.4	7.5	12295	2014	53.21:46.79	18.23:81.77	.25796	.99490	.12070	.46551	.03961	.21583	.03239	.17648
63	4.6	7.7	7.9	11638	4833			.21200	.59953	-	-	.09677	.46277	-	-
65	4.9	7.4	7.5	22328	3440	53.70:46.30	18.62:81.38	.48658	1.99002	.22529	.92138	.06713	.36753	.05463	.29909
66	4.7	7.3	7.4	12527	2612	52.16:47.84	24.90:75.10	.24642	.90723	.11789	.43402	.04772	.33391	.03584	.25077
67	4.8	7.4	7.7	11752	2323	53.55:46.45	20.95:79.05	.21978	.60515	.10209	.28109	.03994	.31631	.03157	.25005
68	4.4	7.3	7.6	8124	3199	44.13:55.87	20.61:79.39	.16115	.65611	.09003	.36657	.04925	.31747	.03909	.25204
71	4.5	7.4	7.7	9892	3011	45.34:54.66	23.09:76.91	.18677	.67744	.10209	.37029	.04278	.33385	.03291	.25676
72	4.6	7.7	7.7	11576	2165	54.38:45.62	20.18:79.82	.22101	.75769	.10082	.34566	.03628	.34760	.02896	.27745
73	4.6	7.5	7.8	9210	3400			.17956	.75024	-	-	.05417	.25789	-	-
74	4.6	7.5	7.7	12403	2184	52.69:47.31	21.62:78.38	.23717	.73617	.11221	.34828	.03790	.31776	.02971	.24906
75	4.6	7.5	7.7	6244	2464	42.72:57.28	19.93:80.07	.12757	.51113	.07307	.29278	.04311	.38808	.03452	.31074
76	4.6	7.4	7.6	-	-			-	-	-	-	-	-	-	-
77	4.7	7.4	7.5	10148	6485	50.00:50.01	28.78:71.22	.18774	.63528	.09388	.31767	.10944	.83547	.07794	.59502
78	4.7	7.3	7.6	12802	5770	54.64:45.36	29.93:70.07	.24229	.79783	.10990	.36189	.10078	.96059	.07062	.67308

ตาราง ผ.3 ข้อมูลการทดลองแสดงค่าดรรชนีและประสิทธิภาพของระบบในแต่ละวันที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 2.03 kgCOD/m^3d

เมื่อ unit 1*= m^3/kgCODที่ป้อนเข้าระบบ ; unit 2*=m^3/kgCODที่ถูกกำจัด

วันที่	อัตราไหลเข้าถังหมัก(l/d)		อัตราป้อนสารอินทรีย์	ระยะเวลาเก็บกัก(วัน)		COD (mg/l)			กรดอินทรีย์ระเหย (mg/l)			สารอินทรีย์ที่ลดลง (%)			สภาพความเป็นด่าง (mg/l)		
	AF	UASB	kgCOD/m^3d	AF	UASB	Feed	AF eff	UASB eff.	Feed	AF eff.	UASB eff.	AF	UASB	Overall	Feed	AF eff.	UASB eff.
78	3.40	6.22	1.69	2.00	5.62	38955			355								
79	3.40	6.22	2.40	2.00	5.62	49397	11164	8594	370	617	252	42.68	23.02	77.94			
81	3.41	6.22	2.42	1.99	5.62	49600	15680	9920	370	1172	262	45.92	36.73	79.92			
82	3.41	6.22	2.43	1.99	5.62	49791	16456	10633	386	956	206	44.70	35.39	78.56	1917	5180	3678
84	3.41	6.22	1.90	1.99	5.62	38982	17584	11356	339	1141	386	41.80	35.42	77.19			
85	3.47	6.22	2.29	1.96	5.62	46218	18487	12017	324	1264	386	26.55	35.00	69.17			
86	3.47	6.22	1.85	1.96	5.62	37343						-					
87	3.47	6.22	1.85	1.96	5.62	37192	18464	12531	308	1172	447	-	32.13	66.44			
88	3.47	6.22	1.95	1.96	5.62	39258	19009	12976	278	1141	452	23.54	31.74	65.11	2435	5802	4558
91	3.25	3.50	2.26	2.09	10.00	48581	18015	13967	432	1079	416	31.02	22.47	64.42			
93	3.25	3.50	1.93	2.09	10.00	41564	18930	13092	337	899	214	39.47	26.09	71.20			
94	3.25	3.50	1.69	2.09	10.00	40574	18853	14959	365	929	183	32.13	20.65	64.01			
95	3.34	3.50	1.94	2.04	10.00	40574	18238	15164	365	1067	267	34.32	16.85	62.63			
96	3.70	2.02	2.14	1.84	17.35	40574	17828	14549	365	927	337	36.03	18.39	64.14	1606	6061	5128
97	3.70	2.02	1.95	1.84	17.35	36886			365			-					
99	3.70	2.02	2.46	1.84	17.35	46557	18623	15783	393	899	337	-	15.22	57.20			
100	3.70	2.02	2.24	1.84	17.35	42340	18347	15928	337	1039	267	41.14	13.18	65.79			
101	3.70	2.29	2.24	1.84	15.31	42340	18988	15613	337	927	211	34.83	17.77	63.12			
102	2.40	2.76	1.46	2.84	12.66	42677	18828	14644	379	899	197	35.02	22.22	65.41	1643	6187	4818
103	2.93	2.76	1.77	2.32	12.66	42258	17573	15062	351	1011	183	38.69	14.29	64.71			
104	2.93	2.76		2.32	12.66							-					
105	3.37	3.03	1.90	2.02	11.55	39432	18981	16328	351	1053	335	-	13.98	61.36	1643	6105	5010
106	3.37	3.03	1.90	2.02	11.55	39432	19097	15914	351	1095	267	31.50	16.67	59.64		6324	5092
107	3.33	3.27	1.92	2.04	10.70	40329	19088	16285	351	1193	323	31.02	14.68	58.70	1643	6159	5032
108	3.33	3.27	1.92	2.04	10.70	40329	19206	15972	351	1278	372	32.15	16.84	60.40		6159	5201
109	3.36	3.46	1.93	2.03	10.10	40251	17913	15656	309	1313	351	36.37	12.60	61.18	2026	6132	5092
111	3.36	3.46	1.86	2.03	10.10	38741						-					
112												-					
113	3.36	3.46	1.82	2.03	10.10	37959	19341	17284	379	1123	519	-	10.64	55.39	-	6187	5366
114	3.36	3.29	1.88	2.03	10.65	39183	18367	18163	337	955	719	33.50	1.11	52.15			
115	3.41	2.33	2.13	1.99	15.00	43723	18825	17813	379	814	449	34.35	5.38	54.54			
118	3.41	2.33	2.13	1.99	15.00	43723	19456	18410	379	842	407	36.77	5.38	57.89			
119	3.34	3.09	2.18	2.04	11.33	45606	19874	18200	351	730	393	36.03	8.42	58.37	2190	6406	5634
120	3.34	3.09	2.18	2.04	11.33	45606	19501	17219	351			38.87	11.70	62.24			
121	3.10	2.28	1.71	2.19	15.37	38683	19501	17842	337	730	505	37.92	8.51	60.88			

ตาราง ผ.3 (ต่อ)

วันที่	ปริมาณของแข็งแขวนลอย (mg/l)			pH			อัตราผลิตแก๊ส(ml/d)		CO_2:CH_4 จากถังหมัก (%)		ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊ส จากถังหมัก AF				ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊ส จากถังหมัก UASB			
	Feed	AF eff.	UASB eff.	Feed	AF eff.	UASB eff.	AF	UASB	AF	UASB	Biogas yield		Methane yield		Biogas yield		Methane yield	
											Unit 1*	Unit 2*	Unit 1*	Unit 2*	Unit 1*	Unit 2*	Unit 1*	Unit 2*
78				4.7			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
79	112	1890	275	4.6	7.4	7.6	21181	4516	64.36:35.64	33.06:66.94	.31984	.74335	.11399	.26707	.06499	.28229	.04350	.18897
81				4.7	7.2	7.5	22647	5505	55.01:44.99	31.71:68.29	.22972	.50024	.10335	.22506	.05640	.15354	.03852	.10485
82				4.7	7.4	7.6	14740	3223	57.58:42.42	31.21:68.79	.14516	.32471	.06158	.13774	.03147	.08692	.02165	.06117
84				4.8	7.4	7.8	17039	-	64.23:35.77	29.69:70.31	.16529	.39545	.05312	.14145	-	-	-	-
85				5.1	7.4	7.6	16932	-	58.18:41.82	30.78:69.22	.19716	.74264	.08245	.31057	-	-	-	-
86							16710	2339	-	-	.16521	.16521	-	-	-	-	-	-
87	954	670	935	4.8	7.5	7.6	13728	2497	56.98:43.02	30.48:69.52	.21166	19.0457	.09105	8.19346	.02173	.06761	.01510	.04701
88				5.0	7.4	7.6	10672	2266	60.19:39.81	43.55:56.45	.12357	.52494	.04919	.20898	.01915	.06034	.01081	.03406
91				4.8	7.4	7.6	9526	2040	63.14:36.86	47.38:52.62	.10500	.33847	.03870	.12476	.03235	.14395	.01702	.07575
93				4.8	7.5	7.7	9861	1443	61.53:38.47	37.46:62.54	.09688	.24546	.03727	.09443	.02178	.08347	.01362	.05220
94				4.6	7.4	7.9	11770	1706	59.26:40.74	24.49:75.51	.13019	.40521	.05304	.16508	.02585	.12515	.01952	.09449
95				4.6	7.6	7.7	11591	-	57.89:42.11	36.41:63.59	.12827	.37378	.05401	.15739	-	-	-	-
96				4.6	7.5	7.6	11151	1448	62.42:37.58	34.06:65.94	.11977	.33244	.04501	.12493	.04026	.21891	.02655	.14435
97				4.6			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
99	1436	1045	653	4.7	7.6	7.8	11462	1078	58.67:41.33	31.79:68.21	.16795	-	.06941	-	.02869	.18856	.01957	.12862
100				4.7	7.7	7.9	13551	1308	66.33:33.67	34.35:65.65	.11748	.28352	.03955	.09613	.03534	.26804	.02320	.17597
101				4.7	7.6	7.7	12286	1516	55.30:44.70	36.53:63.47	.11396	.32725	.05094	.14628	.03492	-	.02216	-
102				4.6	7.6	7.8	10190	1485	55.15:44.85	25.27:74.73	.09504	.27135	.04262	.12170	.02853	.12839	.02132	.09595
103				4.7	7.7	7.9	8284	1002	59.35:40.65	25.52:74.48	.12065	.31187	.04904	.12678	.02063	.14435	.01536	.10751
104							7174	923	-	-	.08543	.08543	-	-	-	-	-	-
105	1004	1290	2720	4.7	7.7	7.9	6804	855	60.02:39.98	23.84:76.16	-	-	-	-	.01486	.10632	.01132	.08098
106				4.7	7.7	8.0	6816	679	67.52:32.48	21.02:78.98	.07263	.23057	.02359	.07489	.01173	.07038	.00926	.05558
107				4.7	7.7	7.9	6185	608	67.25:32.75	21.38:78.62	.06640	.21405	.02175	.07010	.00974	.06631	.00766	.05214
108				4.7	7.7	7.8	6653	489	69.61:30.39	21.38:78.62	.07048	.21321	.02142	.06662	.00778	.04623	.00612	.03634
109				4.6	7.7	7.9	5684	460	68.94:31.06	16.89:83.11	.06055	.16643	.01881	.05171	.00741	.05833	.00616	.04889
111							6112	682	58.32:41.68	17.53:82.47	.06514	.06514	.02715	.02715	-	-	-	-
112	1525	2840	1730				7055	-	65.00:35.00	16.02:83.98	.10851	.10851	.03798	.03798	-	-	-	-
113				4.9	7.9	7.9	7916	-	62.95:37.05	17.40:82.60	-	-	-	-	-	-	-	-
114				4.5	7.7	8.1	7751	733	58.67:41.33	17.55:82.45	.08360	.24952	.03455	.10313	.01214	1.09310	.01001	.90126
115				4.6	7.6	8.3	7627	-	62.65:37.35	30.08:69.92	.07925	.23073	.02959	.08618	-	-	-	-
118				4.6	7.6	8.3	6876	-	-	-	.06554	.17827	-	-	-	-	-	-
119	300	1385	1245	4.7	7.9	8.2	9831	-	58.14:41.86	-	.09281	.25761	.03885	.10783	-	-	-	-
120							-	865	-	31.86:68.14	-	-	-	-	.01436	.12271	.00979	.08361
121				4.7	7.7	8.0	11280	688	55.67:44.33	38.28:61.72	.10753	.28356	.04767	.12570	.01549	.18211	.00956	.11240

ตาราง ผ.4 ข้อมูลการทดลองแสดงค่าดรรชนีและประสิทธิภาพของระบบในแต่ละวันที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 2.03 kgCOD/m^3d (หลังเติมตะกอนแบคทีเรียลงถังหมักมีเธน) เมื่อ unit 1*= m^3/kgCODที่ป้อนเข้าระบบ ; unit 2*=m^3/kgCODที่ถูกกำจัด

วันที่	อัตราการไหล (l/d)		อัตราป้อนสารอินทรีย์ kgCOD/m^3d	ระยะเวลาเก็บกัก (วัน)		COD (mg/l)			กรดอินทรีย์ระเหย (mg/l)			สารอินทรีย์ที่ลดลง (%)			สภาพความเป็นด่าง (mg/l)		
	AF	UASB		AF	UASB	Feed	AF eff	UASB eff.	Feed	AF eff.	UASB eff.	AF	UASB	Overall	Feed	AF eff.	UASB eff.
125	3.46	1.78	1.85	1.97	19.65	37448	19136	34773	337	814	590	-	-	10.11	1533	6570	7720
126	3.46	3.05	1.85	1.97	11.48	37448	20000	33877	337	814	435	44.61	-	9.54			
127	3.46	3.05	2.24	1.97	11.48	45456	20249	30993	407	758	758	43.22	-	17.24			
128	3.46	3.05	2.24	1.97	11.48	45456	21546	32522	407	897	622	43.63	-	28.45			
129	3.46	3.05	2.18	1.97	11.48	44128	21861	29148	362	1070	853	43.93	-	35.88			
132	3.28	3.05	1.98	2.08	11.48	42400	24000	28000	362	897	521	34.49	-	36.55	1938	7268	6250
133	3.28	3.05	1.98	2.08	11.48	42400	24302	26294	362	607	766	-	-				
134	3.24	2.07	1.88	2.10	16.88	40637	23506	25896	347	578	549	31.56	-	38.92			
136	3.24	2.07	1.92	2.10	16.88	41500	22924	25493	347	1215	607	31.09	-	37.27			
139	3.24	2.07	1.98	2.10	16.88	42859	22818	24207	347	810	492	31.88	-	41.67	1793	7268	6347
140	3.32	2.35	2.03	2.05	14.91	42859	22289	25301	347	925	463	-	-				
141	3.32	2.35	2.03	2.05	14.91	42800	22600	23800	328	665	559	33.69	-	44.47			
142	3.32	2.09	2.03	2.05	16.75	42800	21514	22510	328	839	424	35.39	-	47.41			
143	3.32	2.09	2.05	2.05	16.75	43309	22836	23229	318	578	212	30.07	-	45.73			
146	3.30	2.49	2.19	2.06	14.07	46459	20867	23426	347	1071	231	37.28	-	45.91	1744	7268	6347
147	3.30	2.49	2.19	2.06	14.07	46459	22657	22941	347	723	578	-	-				
148	3.04	2.22	1.49	2.23	15.79	34376	22462	22852	289	434	289	35.27	-	50.81			
149	3.04	2.22	1.49	2.23	15.79	34376	21985	22764	289	463	275	23.17	-	33.78			
150	4.07	2.58	2.43	1.67	13.56	41861	21899	21124	347	492	231	23.35	-	38.55	1599	6880	6105
153	3.16	1.51	2.02	2.15	23.18	44790	21430	21044	443	347	159	31.95	-	49.73			
160	3.16	1.51	2.02	2.15	23.18	44790	22349	22349	443	463	212	32.10	-	50.10			

ตาราง ผ.4 (ต่อ)

วันที่	ปริมาณของแข็งแขวนลอย (mg/l)			pH			อัตราผลิตก๊าซ (ml/d)		CO_2:CH_4 จากถังหมัก (%)		ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซ จากถังหมัก AF				ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซ จากถังหมัก UASB			
	Feed	AF eff.	UASB eff.	Feed	AF eff.	UASB eff.	AF	UASB	AF	UASB	Biogas yield		Methane yield		Biogas yield		Methane yield	
											Unit 1*	Unit 2*	Unit 1*	Unit 2*	Unit 1*	Unit 2*	Unit 1*	Unit 2*
125	225	985	18330	4.7	7.7	8.3	9932	968	56.38:43.62	38.28:61.72	-	-	-	-	.01405	-	.00867	-
126			13500	4.7	7.7	8.4	11322	1249	55.02:44.98	39.07:60.93	.09071	.20333	.04080	.09146	.02048	-	.01248	-
127			9440	4.6	7.8	8.6	12100	1207	54.64:45.36	36.23:63.77	.09817	.22713	.04453	.10303	.01955	-	.01247	-
128			10270	4.6	7.9	8.5	14849	-	57.69:42.31	34.36:65.64	.11239	.25759	.04755	.10899	-	-	-	-
129			8570	4.8	7.8	8.4	15474	1224	55.21:44.79	38.74:61.26	.11483	.26139	.05143	.11708	.01837	-	.01125	-
132				4.8	7.8	8.4	15070	1492	55.48:44.52	29.12:70.88	.11901	.34500	.05298	.15359	.02039	-	.01445	-
133		2820	6450	4.8	7.8	8.4	13156	1470	55.69:44.31	29.02:70.98	.11406	.36842	.05054	.16325	.01984	-	.01408	-
134		2810	6730	4.8	7.8	8.3	13160	920	54.13:45.87	27.70:72.30	.11693	.37047	.05364	.16993	.01887	-	.01365	-
136		2090	6020	4.7	7.8	8.5	12720	1425	55.90:44.10	27.55:72.45	.11802	.37960	.05205	.16741	.02998	-	.02172	-
139			4300	4.6	7.7	8.0	12454	1375	55.58:44.42	28.71:71.29	.11476	.35997	.05097	.15989	.02906	-	.02072	-
140			4620	4.6	7.8	8.0	10756	1106	51.53:48.47	28.15:71.85	.09900	.29526	.04799	.14311	.02114	-	.01519	-
141			5000	4.7	7.8	8.0	11496	1029	56.04:43.96	27.24:72.76	.10169	.30189	.04470	.13271	.01939	-	.01411	-
142			4720	4.7	7.7	8.0	11172	1183	60.99:39.01	38.60:61.40	.10114	.28576	.03946	.11148	.02632	-	.01616	-
143		1870	4250	4.7	7.7	7.9	11642	1027	59.69:40.31	33.20:66.80	.10748	.35744	.04332	.14408	.02152	-	.01438	-
146				4.8	7.8	8.0	12417	1131	58.74:41.26	34.18:65.82	.11252	.30183	.04642	.12454	.02179	-	.01434	-
147				4.7	7.8	8.0	11921	1006	56.62:43.38	38.01:61.99	.10329	.29378	.04481	.12744	.01785	-	.01107	-
148				4.7	7.9	8.1	10715	1006	54.61:45.39	25.83:74.17	.09349	.26509	.04244	.12032	.02021	-	.01499	-
149		1710	4000	4.7	7.8	8.0	9884	-	52.38:47.62	26.33:73.67	.11353	.49005	.05406	.23336	-	-	-	-
150				4.6	7.7	7.9	9271	633	55.00:45.00	28.08:71.92	.10665	.45676	.04799	.20554	.01119	-	.00806	-
153				4.5	7.7	7.9	12463	867	53.06:46.94	25.97:74.03	.09734	.30464	.04569	.14300	.02679	-	.01984	-
160				4.5	7.8	8.0	14477	996	57.22:42.78	25.92:74.08	.13929	.43385	.05959	.18560	.02952	-	.02187	-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ผ.5 ข้อมูลการทดลองแสดงค่าครรชนีและประสิทธิภาพของระบบในแต่ละวันที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 2.98 kgCOD/m^3d

เมื่อ unit 1*= m^3/kgCODที่ป้อนเข้าระบบ ; unit 2*=m^3/kgCODที่ถูกกำจัด

วันที่	อัตราการไหล (l/d)		อัตราป้อนสารอินทรีย์ kgCOD/m^3d	ระยะเวลาเก็บกัก (วัน)		COD (mg/l)			กรดอินทรีย์ระเหย (mg/l)			สารอินทรีย์ที่ลดลง (%)			สภาพความเป็นด่าง (mg/l)		
	AF	UASB		AF	UASB	Feed	AF eff	UASB eff.	Feed	AF eff.	UASB eff.	AF	UASB	Overall	Feed	AF eff.	UASB eff.
160	3.07	2.00	2.88	2.21	17.51	65532			593								
161	3.29	2.00	3.08	2.07	17.51	65532	22387	22014	593	463	130	31.68	1.67	66.41			
162	3.29	2.00	3.15	2.07	17.51	67066	23215	21628	694	752	260	46.97	6.84	67.00	2035	7703	6008
163	3.31	1.88	3.17	2.05	18.60	67066	23334	20626	694	463	202	47.38	11.61	69.25			
164																	
166	3.53	2.50	3.12	1.93	14.01	62040	28367	22653	607	1244	275	35.30	20.14	66.22	2471	8769	6395
167	3.59	2.50	3.18	1.89	14.01	62040	29629	23457	607	1272	448	30.03	20.83	62.19			
168	3.59	2.50	3.15	1.89	14.01	61476	29918	23361	607	1186	477	30.01	21.92	62.35			
169	3.45	2.04	3.03	1.97	17.15	61476	29918	22746	607	1186	419	29.47	23.97	63.00			
170	3.68	2.04	3.09	1.85	17.15	58702	31173	24088	549	1186	448	25.97	22.73	60.82	2277	9206	6928
171	3.66	2.25	3.07	1.86	15.53	58702	31453	24396	549	1070	318	24.02	22.44	58.44			
173	3.63	2.25	2.98	1.87	15.53	57487	28744	24695	549	1186	434	30.82	14.09	57.93			
174	3.64	2.95	2.99	1.87	11.88	57487	30489	25001	549	1215	492	25.80	18.00	56.51			
175	3.66	2.49	2.83	1.86	14.05	54249	27934	24898	463	1244	492	32.27	10.87	56.69			
176	3.66	2.49	2.83	1.86	14.05	54249	29437	23388	463	1215	246	25.61	20.55	56.89			
177	3.54	2.79	3.09	1.92	12.55	61042	30304	25975	492	1157	405	21.93	14.29	52.12	1793	8818	6541
178	3.54	2.79	3.09	1.92	12.55	61042	30737	26408	492	1244	463	29.35	14.08	56.74			
181	3.56	2.48	3.01	1.91	14.10	59321	27966	24999	463	1012	347	36.04	10.61	59.05	2035	9012	6444
182	3.56	2.48	3.01	1.91	14.10	59321	29999	27446	463	882	477	28.84	8.51	53.73			
183	3.56	2.48	3.21	1.91	14.10	63134	29141	25944	434	1038	311	32.83	10.97	56.27	2374	9012	7025
184	3.56	2.48	3.21	1.91	14.10	63134	29852	26332	434	854	374	32.98	11079	58.29			
185	3.99	1.83	3.38	1.71	19.12	59348	28235	24537	427	1220	305	36.88	13.10	61.14	2727	9470	6991
188																	
189	3.99	1.83	3.34	1.71	19.12	58642	30478	27161	488	1739	717	27.33	10.88	54.23	2380	9024	7982
190	2.18	1.37	1.82	3.13	25.51	58642	31001	26168	488	1495	603	27.74	15.59	55.38	2380	9217	7487
191	2.18	1.37	1.82	3.13	25.51	58642	31334	27001	488	1312	763	26.11	13.83	53.96	2380	9371	7933

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ผ.5 (ต่อ)

วันที่	ปริมาณของแข็งแขวนลอย (mg/l)			pH			อัตราผลิตก๊าซ (ml/d)		CO_2:CH_4 จากถังหมัก (%)		ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซ จากถังหมัก AF				ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊ส จากถังหมัก UASB			
	Feed	AF eff.	UASB eff.	Feed	AF eff.	UASB eff.	AF	UASB	AF	UASB	Biogas yield		Methane yield		Biogas yield		Methane yield	
											Unit 1*	Unit 2*	Unit 1*	Unit 2*	Unit 1*	Unit 2*	Unit 1*	Unit 2*
160				4.3			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
161	-	1640	2190	4.3	7.6	8.3	17137	999	61.35:38.65	27.68:72.32	.17021	.53733	.06579	.20768	.02233	1.3401	.01615	.96924
162				4.3	7.7	8.3	16156	661	61.43:38.57	27.68:72.32	.11229	.23909	.04331	.09221	.01425	.20842	.01030	.15073
163				4.3	7.6	8.3	22333	1227	61.66:38.34	27.40:72.60	.15321	.32334	.05874	.12397	.02795	.24082	.02029	.17483
164							22794	1187			-	-	-	-	-	-	-	-
166	-	1370	2360	4.6	7.8	7.9	18769	1942	56.87:43.13	30.68:69.32	.12127	.34350	.05230	.14815	.02739	.13600	.01899	.09428
167				4.6	7.7	7.9	18776	1931	64.97:35.03	32.36:67.64	.12577	.41880	.04406	.14671	.02608	.12519	.01764	.08468
168				4.4	7.7	7.8	17637	1992	66.33:33.67	31.39:68.61	.11496	.38302	.03871	.12896	.02664	.12157	.01828	.08341
169				4.4	8.0	7.9	18273	2032	66.58:33.42	31.34:68.66	.12003	.40731	.04011	.13612	.03327	.13879	.02284	.09529
170	1285	3780	2360	4.4	7.7	8.0	15211	1929	66.41: 33.59	31.61:68.39	.10458	.40265	.03513	.13525	.03031	.13337	.02073	.09121
171				4.4	7.6	8.3	18336	2063	77.37:22.63	41.71:58.29	.12031	.50091	.02723	.11336	.02911	.12972	.01697	.07561
173				4.5	8.0	8.3	16320	2135	67.27:32.73	44.21:55.79	.10722	.34791	.03509	.11387	.03296	.23398	.01839	.13054
174	-	1605	2700	4.5	7.9	8.1	15568	2090	69.29:30.71	30.70:69.30	.10429	.40422	.03203	.12413	.02327	.12929	.01613	.08960
175				4.6	7.8	8.2	15071	1661	69.85:30.15	32.27:67.73	.10037	.31101	.03026	.09377	.02387	.21965	.01617	.14877
176				4.6	7.7	8.5	12939	1524	69.77:30.23	32.87:67.13	.08938	.34895	.02702	.10549	.02079	.10115	.01395	.06790
177				4.6	7.7	7.8	13440	2551	69.94:30.06	30.68:69.32	.09465	.43152	.02845	.12971	.03018	.21129	.02092	.14646
178				4.6	7.6	7.9	14507	2190	70.84:29.16	30.10:69.90	.09412	.32064	.02745	.09349	.02555	.18139	.01786	.12679
181				4.7	7.7	8.1	11235	1891	54.47:45.53	27.25:72.75	.07253	.20124	.03302	.09163	.02724	.25672	.01981	.18677
182				4.7	7.6	7.9	14405	1789	71.58:28.42	28.49:71.51	.09606	.33303	.02730	.09465	.02402	.28226	.01718	.20185
183	1705	2020	2580	4.6	7.7	8.4	14068	1687	70.84:29.16	29.80:70.20	.09117	.27771	.02659	.08098	.02332	.21255	.01637	.14921
184				4.6	7.8	8.6	11339	1672	66.69:33.31	28.77:71.23	.07158	.21706	.02384	.07230	.02256	.19133	.01607	.13629
185				4.7	8.1	8.7	10810	1577	66.91:33.09	28.39:71.61	.06794	.18422	.02248	.06096	.03052	.23301	.02185	.16686
188							14675	1897			.08777	.08776	-	-				
189	3675	2050	1890	4.8	7.8	8.3	13932	2207	72.13:27.87	33.27:66.73	.08325	.30457	.02320	.08488	.03957	.36355	.02640	.24259
190				4.8	7.9	8.3	15426	2323	74.71:25.29	30.12:69.88	.09019	.32515	.02281	.08223	.05462	.35038	.03817	.24485
191				4.8	7.9	8.2	15078	2019	75.87:24.13	28.83:71.17	.16342	.62595	.03943	.15104	.04697	.33967	.03343	.24174

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ผ.6 ข้อมูลการทดลองแสดงค่าดรรชนีและประสิทธิภาพของระบบในแต่ละวันที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 6.38 kgCOD/m^3d เมื่อ unit 1*= m^3/kgCODที่ป้อนเข้าระบบ ; unit 2*=m^3/kgCODที่ถูกกำจัด

วันที่	อัตราการไหล (l/d)		อัตราป้อนสารอินทรีย์ kgCOD/m^3d	ระยะเวลาเก็บกัก(วัน)		COD (mg/l)			กรดอินทรีย์ระเหย (mg/l)			สารอินทรีย์ที่ลดลง (%)			สภาพความเป็นด่าง (mg/l)		
	AF	UASB		AF	UASB	Feed	AF eff	UASB eff.	Feed	AF eff.	UASB eff.	AF	UASB	Overall	Feed	AF eff.	UASB eff.
197	4.52	1.37	4.03	1.51	25.51	62500			580						2082		
198	4.25	2.76	3.79	1.60	12.70	62500	31076	28100	580	1342	870	-	9.58	55.04		9024	7883
199	7.08	2.76	6.71	0.96	12.70	66358	31605	28642	549	1403	763	30.23	9.38	54.17			
202	7.05	4.17	6.45	0.96	8.40	64027	33497	30245	488	2044	1251	29.48	9.71	54.42	1240	8181	7288
203	7.05	4.17	6.45	0.96	8.40	64027	34148	29920	488	1800	1312	27.55	12.38	53.27			
204	6.23	3.61	5.43	1.09	9.71	60990	31937	29678	488	1892	1159	32.01	7.07	53.65			
206	6.27	4.26	5.26	1.08	8.21	58673	32973	31020	127	2136	1403	27.27	5.92	49.14			
209	6.78	4.05	5.78	1.00	8.64	59693	32326	31020	580	1953	1151	27.92	4.04	47.13	2082	9271	8181
210	6.78	4.05	5.78	1.00	8.64	59693	32711	30768	580	1739	1403	27.88	5.94	48.46			
211	7.61	3.88	6.60	0.89	9.03	60742	32449	30522	488	1648	885	28.26	5.94	48.87			
212	7.61	3.88	6.60	0.89	9.03	60742	32711	29796	488	1464	702	28.32	8.91	50.95			
213	7.51	5.46	6.11	0.91	6.41	56958	32259	30646	610	2075	1190	28.74	5.00	49.55			
216	7.65	7.59	6.31	0.89	4.61	57768	31872	29641	610	1831	1007	27.24	7.00	47.96	1388	8726	7734
217	7.65	4.70	6.31	0.89	7.45	57768	31112	29207	610	1861	915	28.81	6.12	49.44			
218	7.59	4.73	6.40	0.90	7.41	59030	32065	28890	549	1831	1129	26.27	9.90	49.99			
219	7.59	4.73	6.40	0.90	7.41	59030	30553	29608	549	1739	1129	30.50	3.09	49.84			
220	7.66	3.74	6.89	0.89	9.37	62995	31183	29293	470	1735	941	29.64	6.06	50.38	1785	8875	7487
223	7.60	5.98	6.54	0.89	5.85	60220	31578	28501	529	2058	1088	31.57	9.74	54.76	1934	8875	7734
224	7.60	5.98	6.54	0.89	5.85	60220	32694	29251	529	2117	1000	26.30	10.53	51.43	1934	9073	7883
225	7.36	4.35	6.57	0.92	8.04	62502	33196	29877	676	2440	926	25.79	10.00	50.39	1587	9073	8181
226	7.36	4.35	6.57	0.92	8.04	62502	33155	29527	676	2352	985	28.22	10.94	52.76	1587	9371	8082
227	7.52	7.24	6.47	0.90	4.84	60185	34238	29959	647	2293	970	25.59	12.50	52.07	2033	9569	8181

ตาราง ผ.6 (ต่อ)

วันที่	ปริมาณของแข็งแขวนลอย (mg/l)			pH			อัตราผลิตก๊าซ (ml/d)		CO_2:CH_4 จากถังหมัก (%)		ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซ จากถังหมัก AF				ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซ จากถังหมัก UASB			
	Feed	AF eff.	UASB eff.	Feed	AF eff.	UASB eff.	AF	UASB	AF	UASB	Biogas yield		Methane yield		Biogas yield		Methane yield	
											Unit 1*	Unit 2*	Unit 1*	Unit 2*	Unit 1*	Unit 2*	Unit 1*	Unit 2*
197				4.5					71.34:28.66	29.25:70.75								
198				4.5	7.7	8.0	13634	1733	79.39:20.61	31.31:68.69	.09659	-	.01991	-	.02023	.21125	.01389	.14511
199				4.2	7.9	8.4	11511	1951	81.42:18.58	31.77:68.23	.05984	.19795	.01112	.03678	.02239	.23887	.01528	.16298
202				4.6	7.8	8.4	16273	2228	75.56:24.44	30.01:69.99	.04841	.16421	.01183	.04013	.01596	.16437	.01117	.11504
203				4.6	7.6	8.1	16372	2510	84.58:15.42	31.77:68.23	.04928	.17884	.00760	.02758	.01763	.14243	.01203	.09718
204				4.4	7.7	8.0	17931	2816	80.12:19.88	41.96:58.04	.05416	.16918	.01077	.03363	.02445	.34573	.01419	.20066
206	5600	2610	3080	4.7	7.6	7.9	16626	3167	77.90:22.10	37.80:62.20	.05883	.21575	.01300	.04768	.02254	.38055	.01402	.23670
209				4.6	7.9	8.4	17156	4308	74.60:25.40	37.84:62.16	.06098	.21844	.01549	.05548	.03289	.81403	.02044	.50600
210				4.6	7.9	8.2	16095	4894	75.56:24.44	32.20:67.80	.05233	.18771	.01279	.04588	.03692	.62159	.02503	.42143
211	4860	4900	2240	4.5	7.8	8.0	13350	4946	77.28:22.72	32.62:67.38	.04353	.15404	.00989	.03500	.03933	.66219	.02649	.44619
212				4.5	8.0	8.2	13680	4446	75.67:24.33	28.04:71.96	.03942	.13921	.00959	.03387	.03507	.39350	.02523	.28316
213				4.2	8.1	8.4	21018	5273	81.65:18.35	30.94:69.06	.06105	.21243	.01120	.03898	.02993	.59865	.02067	.41343
216				4.2	8.0	8.5	20058	5100	78.51:21.49	30.65:69.35	.06098	.22389	.01310	.04811	.02108	.30114	.01462	.20884
217				4.2	7.7	8.1	22022	5450	82.69:17.31	29.93:70.07	.06589	.22869	.01141	.03959	.03730	.60918	.02614	.42685
218	7240	5980	2940	4.3	8.0	8.3	19584	5380	75.30:24.70	29.30:70.70	.05889	.22421	.01455	.05538	.03551	.35859	.02510	.25352
219				4.3	7.9	8.5	24048	5935	80.79:19.21	31.33:68.67	.07205	.23624	.01384	.04538	.04111	1.32908	.02823	.91268
220				4.3	8.1	8.5	21621	5344	81.11:18.89	29.98:70.02	.06425	.21678	.01214	.04095	.04586	.75661	.03211	.52978
223	4320	1460	2850	4.4	7.7	7.9	20695	6887	76.98:23.02	29.07:70.93	.05857	.18555	.01348	.04271	.03644	.37399	.02585	.26527
224				4.4	7.8	8.2	25366	6617	80.96:19.04	29.25:70.75	.07525	.28614	.01433	.05448	.03382	.32113	.02393	.22720
225	2485	1340	3720	4.3	7.7	8.1	24701	7496	81.04:18.96	29.20:70.80	.07267	.28170	.01378	.05341	.05187	.51882	.03673	.36732
226				4.3	8.1	8.6	25543	7367	80.11:19.89	31.60:68.40	.07511	.26618	.01494	.05294	.05104	.46646	.03491	.31906
227	2400	2280	4730	4.4	7.9	8.4	25402	7622	80.02:19.98	29.80:70.20	.07498	.29298	.01498	.05854	.03076	.24611	.02159	.17277

ตาราง ผ.7 ข้อมูลการทดลอง แสดงค่าดรรชนีและประสิทธิภาพของระบบในแต่ละวันที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 8.20 kgCOD/m^3d

เมื่อ unit 1*= m^3/kgCODที่ป้อนเข้าระบบ ; unit 2*=m^3/kgCODที่ถูกกำจัด

วันที่	อัตราการไหล (l/d)		อัตราป้อนสารอินทรีย์ kgCOD/m^3d	ระยะเวลาเก็บกัก (วัน)		COD (mg/l)			กรดอินทรีย์ระเหย (mg/l)			สารอินทรีย์ที่ถูกลง (%)			สภาพความเป็นด่าง (mg/l)		
	AF	UASB		AF	UASB	Feed	AF eff	UASB eff.	Feed	AF eff.	UASB eff.	AF	UASB	Overall	Feed	AF eff.	UASB eff.
230	9.45	5.23	8.41	0.72	6.69	62244			588						1785		
231	9.45	5.23	8.81	0.72	6.69	62244	34007	29796	588	2940	1322	-	12.38	52.13		9123	8230
232	9.38	5.63	8.48	0.72	6.21	63252	34377	31807	470	3057	1646	25.30	7.48	48.90			
233	9.38	5.63	8.48	0.72	6.22	63252	33784	31235	470	3028	1646	28.92	7.54	50.62			
234	9.19	7.38	8.21	0.74	4.74	62502	33497	30896	500	2969	1764	29.10	7.76	51.15			
236	9.18	5.62	8.20	0.74	6.23	62500	33280	30080	441	3557	1882	28.74	9.62	51.87	2380	9123	8677
237	9.18	5.62	8.20	0.74	6.23	62500	35020	31164	441	3851	2117	24.35	11.01	50.14			
238	7.18	5.93	6.49	0.95	5.91	63256	35950	30444	529	3969	2081	23.24	15.32	51.29			
239	7.18	5.93	6.49	0.95	5.91	63256	34240	31360	529	3116	2087	26.92	8.41	50.42			
240	9.22	8.17	7.84	0.74	4.28	59500	34880	31360	470	3204	1852	26.27	10.09	50.42			
243	9.19	7.29	7.82	0.74	4.80	59593	31938	30388	500	2852	1646	29.70	4.85	48.93	1289	8478	7784
245	9.50	6.82	8.16	0.72	5.13	60094	31691	30460	470	2440	1235	29.56	3.88	48.89			
246	9.50	6.82	8.16	0.72	5.13	60094	32997	31441	470	2705	1352	27.12	4.72	47.68			
247	9.35	8.75	8.22	0.73	4.00	61532	32868	28572	412	2234	911	28.18	13.07	52.45			
248	9.34	11.00	8.59	0.73	3.18	64409	31450	27786	500	1970	647	30.19	11.65	54.84	1339	9024	6644
249	9.34	11.00	8.18	0.73	3.18	61328	33872	28066	647	2587	529	26.52	17.14	56.43			
250	9.37	5.46	8.21	0.73	6.41	61328	39356	30324	647	5527	1235	11.95	22.95	50.55			
257	9.37	5.46	8.50	0.73	6.41	63479	33439	32189	882	4057	2646	27.03	3.74	47.51	1686	9668	8429
258	9.29	7.94	8.42	0.73	4.41	63479	33516	31303	882	4028	3057	29.93	6.60	50.69			
259	9.47	7.87	8.65	0.72	4.45	63990	36192	32382	529	4380	3057	23.63	10.53	48.99			
261	9.08	7.11	8.43	0.75	4.92	64944	35939	33595	529	4777	2852	25.42	6.52	47.50	1834	9123	8577
262	9.08	7.11	8.43	0.75	4.92	64944	37347	35846	519	4704	3087	24.20	4.02	44.80	1834	9470	9172
263	9.22	8.37	8.84	0.74	4.18	67103	37840	34730	588	4763	3146	24.91	8.22	46.52	1934	9519	8726
264	9.22	8.37	8.84	0.74	4.18	67103	38276	34311	588	4821	2969	24.83	10.36	48.87	1934	9600	8957
265	9.22	8.37	8.84	0.74	4.18	67103	37587	34138	588	4851	2910	25.87	9.18	49.13	1934	9402	8561

ตาราง ผ.7 (ต่อ)

วันที่	ปริมาณของแข็งแขวนลอย (mg/l)			pH			อัตราผลิตก๊าซ (ml/d)		CO_2:CH_4 จากถังหมัก (%)		ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซ จากถังหมัก AF				ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซ จากถังหมัก UASB			
	Feed	AF eff.	UASB eff.	Feed	AF eff.	UASB eff.	AF	UASB	AF	UASB	Biogas yield		Methane yield		Biogas yield		Methane yield	
											Unit 1*	Unit 2*	Unit 1*	Unit 2*	Unit 1*	Unit 2*	Unit 1*	Unit 2*
230				4.5			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
231				4.5	7.8	8.4	27289	6789	83.22:16.78	29.88:70.12	.09276	-	.01557	-	.03815	.30810	.02675	.21604
232	1595	1995	4460	4.7	7.7	8.0	32492	9131	82.94:17.06	30.05:69.95	.07469	.29522	.12742	.05036	.04715	.63069	.03298	.44117
233				4.7	7.6	7.9	34440	9756	83.26:16.74	29.00:71.00	.07721	.26699	.01293	.04469	.05129	.67982	.03642	.48267
234				4.6	7.8	8.2	34107	11178	81.70:18.30	29.58:70.42	.07693	.26439	.01408	.04838	.04523	.58250	.03185	.41019
236				4.7	7.4	7.9	24597	7341	82.66:17.34	32.56:67.44	.05728	.19935	.00993	.03457	.03925	.40821	.02647	.27529
237				4.7	7.5	8.0	34345	13302	88.36:11.64	34.42:65.58	.08081	.33191	.00941	.03863	.06759	.61385	.04433	.40256
238	1160	1890	5120	4.7	7.5	8.0	27457	14008	85.91:14.09	32.42:67.58	.06385	.27480	.00899	.03872	.06574	.42925	.04443	.29008
239				4.7	7.8	8.1	20951	14786	87.68:12.32	30.37:69.63	.06229	.23141	.00767	.02851	.07286	.86621	.05073	.60314
240				4.5	7.5	7.9	20928	14161	87.37:12.63	33.06:66.94	.06161	.23454	.00778	.02962	.04967	.49222	.03325	.32949
243				4.4	7.6	7.9	27140	15092	86.17:13.83	30.22:69.78	.06481	.21823	.00896	.03018	.06479	1.33514	.04521	.93166
245	1170	2360	8795	4.4	7.7	8.2	21139	12629	86.17:13.83	28.31:71.69	.05115	.17304	.00707	.02393	.05840	1.50350	.04187	1.07786
246				4.4	7.5	8.2	24692	13807	86.36:13.64	28.70:71.30	.05740	.21164	.00783	.02887	.06132	1.30042	.04372	.92719
247				4.5	7.7	8.2	49213	10627	87.74:12.26	26.65:73.35	.11318	.40157	.01388	.04923	.03695	.28268	.02710	.20735
248				4.4	8.1	8.6	27711	8497	83.29:16.71	20.77:79.23	.06581	.21797	.01099	.03642	.02455	.21077	.01946	.16699
249	4750	2380	44485	4.5	7.6	8.4	25363	4254	88.40:11.60	20.69:79.31	.05893	.22220	.00684	.02577	.01141	.06659	.00905	.05281
250				4.5	7.0	8.3	30614	6199	90.29:9.71	25.39:74.61	.07336	.61390	.00712	.05961	.02886	.12576	.02153	.09383
257				4.5	7.5	8.3	14348	11870	87.06:12.94	21.15:78.85	.03340	.12356	.00432	.01599	.06504	1.73993	.05128	1.37193
258				4.5	7.4	8.2	12807	6744	90.45:9.55	17.35:82.65	.02856	.09542	.00273	.00911	.02535	.38395	.02095	.31734
259	2907	1800	3550	4.6	7.4	8.3	19625	10365	92.27:773	28.95:71.05	.04459	.18873	.00345	.01459	.03639	.34572	.02586	.24563
261				4.6	7.5	8.3	22451	11025	92.92:7.08	29.80:70.20	.04923	.19368	.00349	.01371	.04312	.66118	.03027	.46415
262				4.6	7.6	8.3	24806	12644	94.53:5.47	28.34:71.66	.05543	.22907	.00303	.01253	.04759	1.18414	.03410	.84855
263	2310	2050	5360	4.6	7.5	8.3	21809	12893	92.44:7.56	29.37:70.63	.04765	.19125	.00360	.01446	.04071	.49532	.02875	.34984
264				4.6	7.3	8.1	25200	14940	94.68:5.32	28.95:71.05	.05368	.21623	.00286	.01150	.04663	.45019	.03313	.31986
265				4.6	7.5	8.1	22976	16326	91.56:8.44	28.40:71.60	.04915	.18994	.00415	.01603	.05189	.56556	.03716	.40494

ตาราง ผ.8 (ต่อ)

วันที่	ปริมาณของแข็งแขวนลอย (mg/l)			pH			อัตราผลิตก๊าซ (ml/d)		CO_2:CH_4 จากถังหมัก (%)		ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซ จากถังหมัก AF				ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซ จากถังหมัก UASB			
	Feed	AF eff.	UASB eff.	Feed	AF eff.	UASB eff.	AF	UASB	AF	UASB	Biogas yield		Methane yield		Biogas yield		Methane yield	
											Unit 1*	Unit 2*	Unit 1*	Unit 2*	Unit 1*	Unit 2*	Unit 1*	Unit 2*
265				4.7			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
267				4.7	7.2	8.1	28505	19800	89.57:10.43	33.42:66.58	.08855	-	.00924	-	.04890	1.25421	.03256	.83505
269				4.4	7.2	8.1	18686	16708	85.99:14.01	34.05:65.95	.03328	.14411	.00466	.02019	.04507	.44660	.02972	.29453
270				4.4	7.0	8.0	27647	22589	85.93:14.07	32.92:67.08	.05408	.28563	.00761	.04019	.05689	.38403	.03817	.25760
271	910	1980	5400	4.4	7.3	8.0	20783	23513	88.01:11.99	34.20:65.80	.04186	.21322	.00502	.02556	.05858	1.01523	.03855	.66802
272				4.8	7.4	8.0	18400	23801	88.92:11.08	34.93:65.07	.03783	.21964	.00419	.02434	.06031	1.23022	.03924	.80051
275				4.7	7.6	8.0	26981	23357	87.27:12.73	35.33:64.67	.04824	.17301	.00614	.02202	.06577	1.10673	.04253	.71572
276				4.7	7.5	8.0	27169	19956	86.73:13.27	32.36:67.64	.04396	.11998	.00583	.01592	.05025	.71077	.03399	.48077
278	4020	4770	3820	4.8	7.4	8.0	27125	18328	85.12:14.88	32.51:67.49	.05126	.16578	.00763	.02467	.04439	.84326	.02997	.56911
279				4.8	7.4	7.9	33463	17207	88.59:11.41	32.20:67.80	.06351	.24633	.00725	.02811	.03912	.39113	.02652	.26519
280				4.8	7.5	8.0	33985	21720	84.03:15.97	27.89:72.11	.06424	.25167	.01026	.04019	.06263	.91272	.04517	.65817
282				4.9	7.5	8.0	31601	20422	91.72:8.28	27.55:72.45	.05654	.20664	.00468	.01711	.04977	.86249	.03606	.62488
283	6380	3110	4460	4.8	7.5	8.0	30357	20357	90.67:9.33	32.64:67.36	.05309	.19703	.00495	.01838	.04815	.47279	.03244	.31847
285				4.8	7.7	8.4	30374	19116	89.82:10.18	33.92:66.08	.05582	.22535	.00568	.02294	.05370	.80551	.03549	.53228
286				4.8	7.5	8.2	29642	18495	88.49:11.51	31.21:68.79	.05635	.22299	.00649	.02567	.05288	.68735	.03637	.47283
287				4.8	7.5	8.2	27457	19232	88.49:11.51	34.05:65.95	.05273	.21250	.00607	.02446	.05479	1.42439	.03613	.93939
290				4.7	7.5	8.1	26853	19451	87.32:12.68	33.06:66.94	.05364	.18855	.00680	.02391	.05141	1.01833	.03441	.68167
291				4.7	7.4	8.1	32795	18355	87.74:12.26	41.03:58.97	.06131	.22997	.00752	.02819	.04520	.58188	.02666	.34314
292	1040	3230	4030	4.7	7.4	8.2	32494	20337	87.27:12.73	32.78:67.22	.05992	.25242	.00763	.03213	.03825	.32072	.02571	.21559
293				4.7	7.5	8.2	31012	21442	89.82:10.18	37.73:62.27	.05609	.20327	.00571	.02069	.04102	.31643	.02554	.19704
294				4.9	7.4	8.3	29761	21403	91.12:8.88	32.81:67.19	.05434	.19765	.00483	.01755	.05839	1.05118	.03923	.70629
296				4.7	7.5	8.2	29367	21819	91.77:8.23	35.50:64.50	.05316	.20082	.00437	.01653	.06625	.79502	.04273	.51279
297				4.7	7.5	8.2	19935	22589	90.22:9.78	32.99:67.01	.03693	.16295	.00361	.01594	.06761	.61976	.04530	.41530
298	4210	3000	4780	4.8	7.5	8.3	26415	20772	89.07:10.93	33.49:66.51	.04917	.23560	.00537	.02575	.05685	.63675	.03781	.42351
299	44210	2310	5730	4.8	7.7	8.2	17898	18818	88.64:11.36	34.48:65.52	.03317	.11750	.00377	.01335	.05523	.74174	.03619	.48599
300	4210	2420	4160	4.8	7.8	8.3	14988	12644	92.77:7.23	37.77:62.23	.02829	.10008	.00205	.00724	.03783	.58519	.02354	.36417

ตาราง ผ.8 ข้อมูลการทดลองแสดงค่าดรรชนีและประสิทธิภาพของระบบในแต่ละวันที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 10.02 kgCOD/m^3d

เมื่อ unit 1*= m^3/kgCODที่ป้อนเข้าระบบ ; unit 2*=m^3/kgCODที่ถูกกำจัด

วันที่	อัตราการไหล (l/d)		อัตราป้อนสารอินทรีย์ kgCOD/m^3d	ระยะเวลาเก็บกัก		COD (mg/l)			กรดอินทรีย์ระเหย (mg/l)			สารอินทรีย์ที่ลดลง (%)			สภาพความเป็นด่าง (mg/l)		
	AF	UASB		AF (Hrs)	UASB (days)	Feed	AF eff	UASB eff.	Feed	AF eff.	UASB eff.	AF	UASB	Overall	Feed	AF eff.	UASB eff.
265	11.49	10.08	9.20	14.20	3.47	56035			441						1831		
267	11.79	11.50	10.35	13.84	3.04	61433	35214	33841	529	4410	3204	-	3.90	39.61			
269	11.61	10.12	9.14	14.06	3.46	55146	36638	32941	588	4674	2793	23.09	10.09	46.38	2177	8808	8709
270	11.61	11.12	9.14	14.06	3.15	55146	35704	30414	588	5262	2852	18.93	14.82	44.85			
271	11.94	11.67	8.37	13.67	3.00	49072	34382	32398	588	5351	2852	19.63	5.77	41.25			
272	12.23	11.70	10.38	13.34	2.99	59403	33720	32067	832	4810	3021	17.22	4.90	34.65			
275	12.06	10.77	12.31	13.53	3.25	71435	32983	31023	709	4655	2867	27.88	5.94	47.78	2128	9303	8758
276	11.88	12.23	10.00	13.74	2.86	58915	32459	30164	647	4378	2590	36.64	7.07	57.77			
278	11.93	13.42	10.09	13.68	2.61	59208	30768	29148	678	4255	2744	30.92	5.27	50.53			
279	11.93	13.42	10.09	13.68	2.61	59208	32787	29508	678	4655	2651	25.78	10.00	50.16			
280	12.15	10.50	10.63	13.43	3.33	61232	33035	30768	678	4563	2621	25.53	6.86	48.03			
282	12.14	12.28	10.88	13.45	2.85	62750	33413	31485	740	4995	3083	27.36	5.77	48.58	3513	9897	9848
283	12.14	12.28	10.19	13.45	2.85	58765	34422	30916	740	4748	3206	26.94	10.19	50.73			
285	11.86	10.55	9.69	13.76	3.32	57228	33734	31485	709	4501	2836	24.77	6.67	46.42			
286	11.86	10.55	9.69	13.76	3.32	57228	33147	30597	709	4532	3176	25.27	7.69	46.53			
287	11.80	10.63	8.95	13.83	3.29	53077	33017	317447	586	4501	2929	24.81	3.85	44.53	2425	10392	9749
290	12.05	12.47	10.32	13.55	2.81	60000	30346	28814	555	3946	2744	28.45	5.05	45.71			
291	12.05	12.47	10.32	13.55	2.81	60000	32568	30038	555	4255	2836	26.66	7.77	49.94			
292	11.86	15.49	10.67	13.76	2.26	62995	34332	30238	617	4748	2867	23.74	11.92	49.60			
293	11.86	15.49	10.67	13.76	2.26	62995	33751	29376	617	4193	2867	27.60	12.96	53.37			
294	12.18	10.95	10.28	13.40	3.20	59108	33488	31628	678	4440	2713	27.49	5.55	49.79	3167	9897	9402
296	12.33	9.87	10.03	13.23	3.55	56950	33359	30579	617	4748	2929	26.47	8.33	48.27	2573	10243	9798
297	12.33	9.87	10.03	13.23	3.55	56950	33846	30154	617	4594	2621	22.66	10.91	47.05	2573	9897	9353
298	12.05	10.60	10.01	13.54	3.30	58173	34462	31385	678	4347	2343	20.87	8.93	44.89	2623	10144	9402
299	12.05	10.60	10.01	13.54	3.30	58173	32137	29744	678	3980	2518	28.23	7.45	48.87	2623	9946	9204
300	12.05	10.60	10.01	13.54	3.30	58173	31529	24491	678	3420	2394	28.28	6.46	49.30	2623	9897	8957

ตาราง ผ.9 ข้อมูลการทดลองแสดงค่าดรรชนีและประสิทธิภาพของระบบในแต่ละวันที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 10.95 kgCOD/m^3d (หลังจากเพิ่มอัตราส่วนรีไซเคิลเป็น 3:1) เมื่อ unit 1*= m^3/kgCODที่ป้อนเข้าระบบ ; unit 2*=m^3/kgCODที่ถูกกำจัด

วันที่	อัตราการไหล (l/d)		อัตราป้อนสารอินทรีย์	ระยะเวลาเก็บกัก		COD (mg/l)			กรดอินทรีย์ระเหย (mg/l)			สารอินทรีย์ที่ลดลง (%)			สภาพความเป็นด่าง (mg/l)		
	AF	UASB	kgCOD/m^3d	AF (Hrs)	UASB (day)	Feed	AF eff	UASB eff.	Feed	AF eff.	UASB eff.	AF	UASB	Overall	Feed	AF eff.	UASB eff.
306	36.00	36.69	14.99	4.53	0.95	58298			653						2524		
308	36.00	36.69	14.57	4.53	0.95	56678											
310	23.74	23.73	9.09	6.88	1.47	53641	32711	31092	622	4975	4135	-	4.95	45.14	2078	6950	9996
311	23.74	23.73	9.09	6.88	1.47	53641	34382	33390	622	4633	3824	18.85	2.89	37.75			
312	23.93	24.10	11.83	6.82	1.45	69218	33059	31406	746	4260	3513	24.03	5.00	41.45			
313	23.93	24.10	11.83	6.82	1.45	69218	34334	32001	746	4073	3234	31.76	6.80	53.77			
314	23.62	24.94	10.54	6.91	1.40	62502	35001	32668	622	4384	3482	30.84	6.67	52.80			
317	23.84	24.20	9.78	6.85	1.45	57421	35449	34148	622	4166	3171	25.50	3.67	45.36	2573	10491	10293
318	23.84	24.20	9.78	6.85	1.45	57421	35146	34141	622	3980	3202	23.24	2.86	40.54			
319	23.66	24.99	10.30	6.90	1.40	60953	33720	32067	653	4011	3171	26.34	4.90	44.15			
320	23.66	24.99	10.30	6.90	1.40	60953	33771	33115	653	3949	3171	27.39	1.94	45.67			
321	23.91	25.78	10.63	6.82	1.36	62244	35592	33959	653	3855	3016	24.33	4.59	44.29			
324	23.62	25.84	10.21	6.91	1.35	60518	33017	31747	808	3824	2767	31.36	3.85	49.00	2524	10293	10095
326	23.49	24.42	9.95	6.95	1.43	59286	32568	32252	653	3731	3202	29.40	0.97	46.71			
327	23.49	24.42	9.95	6.95	1.43	59286	35069	33785	653	3949	3047	23.38	3.66	43.01			
328	23.52	25.41	10.10	6.94	1.38	60105	33361	29616	684	3887	2923	28.31	11.23	50.05			
331	23.62	27.03	10.28	6.91	1.30	60939	34074	32570	684	3451	2612	24.04	4.41	45.81	2672	10441	10243
332	23.62	27.03	10.28	6.91	1.30	60939	36150	35146	684	3607	2985	22.68	2.78	42.33	2672	10144	10045
333	23.63	19.90	10.86	6.91	1.76	64360	36104	34238	684	3513	2689	24.85	5.17	43.82	2573	10441	10144
334	23.63	19.90	10.86	6.91	1.76	64360	35107	33757	684	3731	2565	28.79	3.85	47.55	2573	10045	9749
335	23.38	22.29	10.75	6.98	1.57	64360	36340	34027	684	3372	2629	25.93	6.36	47.13	2573	10441	9699

ตาราง ผ.9 (ต่อ)

วันที่	ปริมาณของแข็งแขวนลอย (mg/l)			pH			อัตราผลิตก๊าซ (ml/d)		CO_2:CH_4 จากถังหมัก (%)		ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซ จากถังหมัก AF				ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซ จากถังหมัก UASB			
	Feed	AF eff.	UASB eff.	Feed	AF eff.	UASB eff.	AF	UASB	AF	UASB	Biogas yield		Methane yield		Biogas yield		Methane yield	
											Unit 1*	Unit 2*	Unit 1*	Unit 2*	Unit 1*	Unit 2*	Unit 1*	Unit 2*
306				4.7			-	-	87.40:12.60	33.77:66.23	-	-	-	-	-	-	-	-
308							-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
310				4.6	7.5	8.1	45793	31189	84.39:15.61	37.99:62.01	.04489	-	.00701	-	.04018	.81185	.02492	.50343
311				4.6	7.4	8.1	28509	32869	83.64:16.36	35.18:64.82	.02835	.15043	.00464	.02461	.04029	1.39636	.02611	.30512
312	6300	6380	4560	4.7	7.4	8.1	25359	32652	81.81:18.19	37.05:62.95	.02455	.10217	.00447	.01859	.04098	.81948	.02579	.51586
313				4.7	7.5	8.2	39660	29469	83.86:16.14	41.96:58.04	.03295	.10374	.00532	.01674	.03561	.52402	.02067	.30414
314				4.8	7.5	8.1	37753	27313	86.64:13.36	39.29:60.71	.03118	.10109	.00417	.01351	.03129	.46946	.01899	.28501
317				4.8	7.6	8.2	30758	28582	84.80:15.20	34.63:65.37	.02737	.10732	.00416	.01631	.03331	.90771	.02178	.59338
318				4.8	7.5	8.2	31365	27614	83.97:16.03	35.76:64.24	.02874	.12368	.00461	.01983	.03246	1.13527	.02085	.72929
319	4530	4240	4946	4.8	7.6	8.2	24597	26491	85.05:14.95	37.86:62.14	.02254	.08555	.00337	.01279	.03144	.64136	.01954	.39854
320				4.8	7.6	8.2	31365	26388	83.85:16.15	41.37:58.63	.02849	.10404	.00460.	.01680	.03127	1.60982	.01833	.94383
321				4.8	7.5	8.3	27839	25772	84.42:15.58	38.57:61.43	.02501	.10281	00390	.01602	.02809	.61213	.01725	.37603
324				4.8	7.5	8.2	29427	26970	82.60:17.40	36.61:63.39	.02558	.08158	.00445	.01420	.03161	.82192	.02004	.52102
326				4.8	7.5	8.2	34880	28493	80.28:19.72	36.15:63.85	.03201	.10887	.00631	.02147	.03583	3.69284	.02288	2.35788
327				4.8	7.3	8.2	35301	28545	81.73:18.27	37.14:62.86	.03284	.14046	.00600	.02566	.03334	.91049	.02095	.57233
328				4.8	7.5	8.2	32509	28753	81.39:18.61	40.69:59.31	.02974	.10505	.00553	.01955	.03391	.30211	.02011	.17918
331	4880	11020	5330	4.8	7.4	8.3	31447	26902	81.02:18.98	36.45:63.55	.02981	.12397	.00566	.02353	.02921	.66185	.01857	.42060
332		5270	4830	4.8	7.5	8.3	36990	25759	80.70:19.30	39.84:60.16	.03349	.14766	.00646	.02850	.02637	.94933	.01586	.57112
333	5850	5270	4970	4.8	7.7	8.2	32319	25990	81.39:18.61	39.84:60.16	.02848	.11460	.00530	.02133	.03617	.69979	.02176	042099
334		5610	5740	4.8	7.5	8.3	39142	24072	81.81:18.19	37.57:62.43	.03359	:11670	.00611	.02123	.03445	89588	.02151	.55929
335		6140	4990	4.8	7.5	8.2	29918	24204	82.27:17.73	29.21:70.79	.02580	.09953	.00458	.01765	.02988	.46938	.02115	.33227

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ผ.10 ข้อมูลการทดลองแสดงค่าดรรชนีและประสิทธิภาพของระบบในแต่ละวันที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 13.05 kgCOD/m^3d เมื่อ unit 1*= m^3/kgCODที่ป้อนเข้าระบบ ; unit 2*=m^3/kgCODที่ถูกกำจัด

วันที่	อัตราการไหล (l/d)		อัตราป้อนสารอินทรีย์ kgCOD/m^3d	ระยะเวลาเก็บกัก		COD (mg/l)			กรดอินทรีย์ระเหย (mg/l)			สารอินทรีย์ที่ลดลง (%)			สภาพความเป็นด่าง (mg/l)		
	AF	UASB		AF (Hrs)	UASB (days)	Feed	AF eff	UASB eff.	Feed	AF eff.	UASB eff.	AF	UASB	Overall	Feed	AF eff.	UASB eff.
338	32.78	35.65	15.53	4.98	0.98	66326			711								
339	32.78	35.65	14.33	4.98	0.98	61191	36150	33807	619	4145	2903	-	6.48	49.03	2920	10936	10738
340	30.32	40.34	12.57	5.38	0.87	58053	36484	34476	650	4176	3403	10.26	5.50	43.66			
341	30.32	40.34	12.57	5.38	0.87	58053	35685	33610	650	4392	3465	11.61	5.81	42.10			
342	30.97	25.03	13.77	5.27	1.40	62242	34979	34568	681	4083	2908	11.94	1.17	40.45			
345	31.10	36.60	13.26	5.25	0.96	59693	34694	33469	619	4269	3712	16.37	3.53	46.23	2425	10392	10045
346	31.10	36.60	13.26	5.25	0.96	59693	35539	32656	619	3619	3093	11.21	8.11	45.29			
347	30.86	30.49	14.40	5.29	1.15	65306	35102	33469	650	3248	3093	10.94	4.65	43.93			
348	30.86	30.49	14.40	5.29	1.15	65306	35774	32928	650	3712	3248	13.65	7.96	49.58			
349	31.23	29.48	13.43	5.23	1.19	60220	35221	31982	650	4207	3557	14.14	9.20	51.03			
352	30.82	27.27	13.32	5.30	1.28	60518	34128	33335	650	3898	3619	12.59	2.32	44.64	2276	10293	9749
353	30.82	27.27	13.32	5.30	1.28	60518	35742	34939	650	4207	3526	10.94	2.25	42.27			
354	30.62	28.21	13.50	5.33	1.24	61753	36654	33865	897	4021	3155	11.32	7.61	44.04	2177	10441	9996
355	30.62	28.21	13.50	5.33	1.24	61753	35573	33597	897	4021	3341	12.89	5.55	45.59			
356	30.74	23.97	13.61	5.31	1.46	62008	36220	34252	650	3836	3403	10.87	5.43	44.53	2375	10144	10144
359	30.36	29.22	13.67	5.37	1.20	63023	35690	34277	694	3694	3091	13.35	3.96	44.72	2581	10218	9842
360	30.36	29.22	13.67	5.37	1.20	63023	34299	32233	694	3770	3377	17.28	6.02	48.86	2581	10433	9788
361	29.87	24.07	13.00	5.46	1.45	60923	36686	34589	905	3785	3212	8.13	5.72	45.12	2151	10057	9896
362	29.87	24.07	13.00	5.46	1.45	60923	35564	34727	905	3649	3106	13.62	2.35	43.00	2151	9788	9519
363	29.87	24.07	13.00	5.46	1.45	69923	34438	31949	905	3257	2880	16.57	7.23	47.56	2151	10164	9680
368	30.83	17.03	13.60	5.29	2.06	61746	40963	34538	663	4433	3679	-	15.68	43.31	2474	7583	8766
369	30.83	17.03	13.60	5.29	2.06	61746	40452	36756	663	4840	4358	2.15	9.14	40.47	2474	7959	8659
370	30.43	27.03	12.03	5.36	1.29	55328	38115	37295	603	5368	4342	11.37	2.15	39.60	1560	8497	8605
373	31.01	27.03	13.79	5.26	1.29	62248	33333	33734	603	4795	4403	20.26	-	39.03	1936	9412	9519
375	30.03	16.45	14.94	5.43	2.13	69623	32913	29959	663	4011	3016	19.45	8.98	51.87	2044	9304	8443
377	31.06	14.95	13.58	5.25	2.34	61201	45226	36098	603	5458	3649	-	20.18	48.15	1829	7959	8972
380	30.27	27.28	12.67	5.39	1.28	58576	39120	35564	573	4644	3935	7.68	9.09	41.89	1667	7691	8659
381	30.27	27.28	12.67	5.39	1.28	58576	40669	36896	573	4554	3935	1.57	9.28	37.01	4667	7852	8443
382	30.47	27.41	13.26	5.36	1.28	60923	40039	37105	725	4595	4015	5.38	7.33	36.65	1560	7637	8443
383	30.47	27.41	13.26	5.36	1.28	60923	41546	37371	725	4783	4232	3.51	10.05	38.66	1560	7422	8013
384	30.47	27.41	13.60	5.36	1.28	62502	38335	37085	667	5183	3798	11.38	3.26	39.13	1237	7583	8336

ตาราง ผ.10 (ต่อ)

วันที่	ปริมาณของแข็งแขวนลอย (mg/l)			pH			อัตราผลิตก๊าซ (ml/d)		CO_2:CH_4 จากถังหมัก (%)		ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซ จากถังหมัก AF				ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซ จากถังหมัก UASB			
	Feed	AF eff.	UASB eff.	Feed	AF eff.	UASB eff.	AF	UASB	AF eff.	UASB eff.	Biogas yield		Methane yield		Biogas yield		Methane yield	
											Unit 1*	Unit 2*	Unit 1*	Unit 2*	Unit 1*	Unit 2*	Unit 1*	Unit 2*
338				4.8			-	-	88.43:11.57	29.67:70.33	-	-	-	-	-	-	-	-
339				4.9	7.7	8.2	56922	26297	94.78:15.22	30.50:69.50	-	-	-	-	.02041	.31486	.01418	.21883
340	4080	11200	5710	4.6	7.4	8.2	55009	29366	84.00:16.00	30.52:69.78	.04128	.40256	.00661	.06441	.01995	.36253	.01386	.25188
341				4.6	7.4	8.2	49670	30804	83.93:16.07	31.64:69.36	.04059	.34970	.00652	.05620	.02140	.36800	.01463	.25157
342				4.8	7.5	8.4	42329	31720	83.64:16.36	31.39:68.51	.03515	.29446	.00575	.04817	.03622	3.08295	.02485	2.11521
345				4.6	7.5	8.2	54207	32518	73.93:26.07	30.09:69.91	.04219	.25767	.01100	.08717	.02561	.72538	.01791	.50711
346				4.6	7.2	8.1	53388	32652	85.41:14.59	31.10:68.90	.04288	.38262	.00626	.05582	.02511	.30949	.01730	.21324
347	6650	5070	5130	4.7	7.8	8.1	19325	27723	-	29.67:70.33	.01576	.14404	-	-	.02590	.55671	.01821	.39154
348				4.7	7.7	8.1	43664	25670	85.20:14.80	34.76:65.24	.03415	.25023	.00505	.03703	.02353	.29578	.01535	.19297
349				4.6	7.4	8.1	53006	28344	83.57:16.43	31.66:68.34	.04187	.29605	.00688	.04864	.02730	.29681	.01865	.20284
352				4.7	7.6	8.1	47676	26696	66.52:33.48	30.05:69.95	.03911	.31073	.01309	.10403	.02868	1.23431	.02006	.86340
353				4.7	7.5	8.0	50432	25862	84.71:15.29	33.06:66.94	.04078	.37288	.00624	.05701	.02653	1..18086	.01776	.79047
354				4.6	7.5	8.1	31175	26491	85.68:14.32	30.94:59.06	.02447	.21617	.00350	.03095	.02562	.33665	.01769	.23249
355				4.6	7.6	8.0	49670	24540	86.44:13.56	31.79:68.21	.03973	.30820	.00539	.04179	.02445	.44016	.01668	.30023
356	6030	6770	4930	4.8	7.5	7.9	45666	23821	85.74:14.26	33.07:66.93	.03671	.33777	.00523	.04817	.02743	.50491	.01836	.33794
359	4160	8640	4920	4.8	7.6	8.1	45729	19577	85.39:14.61	29.97:70.03	.03612	.27044	.00528	.03951	.01877	.47409	.01314	.33201
360		13240	4320	4.8	7.4	8.1	51386	19201	84.55:15.45	32.26:67.74	.04081	.23621	.00631	.03649	.01916	.31802	.01298	.21543
361	5380	6260	3960	4.6	7.6	8.2	49956	19817	85.20:14.80	32.50:67.50	.04120	.50709	.00610	.07505	.02244	.39264	.01515	.26503
362		7060	4600	4.6	7.6	8.2	50704	18996	85.03:14.97	32.93:67.07	.04123	.30269	.00617	.04531	.02219	.94297	.01488	.63245
363		7990	4480	4.6	7.7	8.2	42615	18725	85.56:14.44	33.34:66.66	.03457	.20866	.00499	.03013	.02259	.31258	.01506	.20836
368				4.6	6.7	8.0	39308	18297	82.46:17.54	41.37:58.63	.03358	-	.00589	-	.02623	.16722	.01538	.09804
369		5490	4540	4.6	6.9	7.8	42859	30804	89.51:10.49	47.05:52.95	.03363	1.56567	.00353	.16424	.04471	.48939	.02368	.25913
370				4.6	6.9	8.0	28862	28129	-	35.80:64.20	.02177	.19152	-	-	.02731	1.26921	.01753	.81483
373				4.9	7.4	7.9	29976	23198	-	34.27:65.73	.02357	.11631	-	-	.02575	-	.01693	-
375	7020	4610	3060	4.7	7.4	8.0	13410	16251	88.73:11.27	38.09:61.91	.01058	.05440	.00119	.00613	.03002	.33453	.01859	.20711
377				4.7	6.5	7.9	45413	24107	75.45:24.55	36.61:63.39	.03792	-	.00931	-	.03566	.17670	.02261	.11201
380	6340	3270	3700	4.7	6.9	7.9	-	25695	88.27:11.73	34.89:65.11	-	-	-	-	.02408	.26487	.01568	.17246
381		3810	3780	4.7	6.9	7.9	42329	30185	89.48:10.52	35.61:64.39	.03385	2.15799	.00356	.22702	.02721	.29326	.01752	.18883
382	4270	3050	3850	4.6	6.9	7.6	-	-	91.56:8.44	41.07:58.93	-	-	-	-	-	-	-	-
383		6610	3690	4.6	6.7	7.7	43670	32549	88.59:11.41	37.46:62.54	.03786	1.07710	.00432	.12290	.02859	.28446	.01788	.17790
384				4.5	6.9	7.7	42615	31214	88.17:11.83	37.83:62.17	.03233	.28405	.00382	.03360	.02971	.91112	.01847	.56645