จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทุนวิจัยรัชดาภิเษกสมโภช

รายงานผลการวิจัย

การเพิ่มประสิทธิภาพระบบหมักแบบยูเอเอสบีโดยควบคุมอุณหภูมิในช่วงเทอร์โมฟิลิค

Improvement of Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor by Thermophilic Operation.

โดย

ดร. สุเมธ ชวเดช

TD796.5
ส46
2539

กรกฎาคม 2539

LIBRARY
The Petroleum and Petrochemical College
Chulalongkorn University
ห้องสมุดวิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทุนวิจัยรัชดาภิเษกสมโภช

รายงานผลการวิจัย

การเพิ่มประสิทธิภาพระบบหมักแบบยูเอเอสบีโดยควบคุมอุณหภูมิในช่วงเทอร์โมฟิลิค

Improvement of Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor by Thermophilic Operation.

Call No. .....
Acc.No. .....

โดย

ดร. สุเมธ ชวเดช

กรกฎาคม 2539

LIBRARY
The Petroleum and Petrochemical College
Chulalongkorn University

Call No. TD796.5 ส46 2539
Acc.No. 147
1 APR 1999

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่กล่าวขอบคุณอย่างสูง ที่ได้รับเงินสนับสนุนการวิจัยจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย "ทุนวิจัยรัชดาภิเษกสมโภช" ประจำปี 2533 และขอขอบพระคุณโรงงานสุราแสงโสมในการอนุเคราะห์น้ำเสียเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้ และสุดท้ายขอขอบพระคุณภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการสนับสนุนและอำนวยความสะดวกสถานที่ทำการทดลองนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชื่อโครงการวิจัย การเพิ่มประสิทธิภาพระบบหมักแบบยูเอเอสบีโดยควบคุมอุณหภูมิในช่วงเทอร์โมฟีลิค

ชื่อผู้วิจัย ดร.สุเมธ ชวเดช

เดือนและปีที่ทำวิจัยเสร็จ กรกฎาคม 2539

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบยูเอเอสบีในการบำบัดน้ำกากส่า โดยการควบคุมที่อุณหภูมิสูง (เทอร์โมฟีลิค) ถังยูเอเอสบีที่ใช้ในการศึกษานี้ทำด้วยเหล็กปลอดสนิม มีขนาดจุ 34.7 ลิตร ความสูง 172 ซม และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 15 ซม คอลัมน์ยูเอเอสบีมีช่องน้ำชั้นนอกเพื่อใช้ในการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ 55 °ซ จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า อัตราป้อนสารอินทรีย์ที่เหมาะสมคือ 5.2 และ 7.1 กก ซีโอดี/ ม ^{3}วัน สำหรับการกำจัดซีโอดีสูงสุด และอัตราการผลิตแก๊สชีวภาพสูงสุด ตามลำดับ ภายใต้สภาวะอัตราป้อนสารอินทรีย์สูงสุด 10.1 กก ซีโอดี/ ม ^{3}วัน ระบบยูเอเอสบีมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี 44 % และประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพ 0.099 ม ^{3} / กก ซีโอดีเข้าระบบ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบยูเอเอสบีขนาดใหญ่ซึ่งควบคุมการทำงานที่อุณหภูมิ 30 °ซ พบว่าระบบมีอัตราป้อนสารอินทรีย์สูงสุด 4.5 กก ซีโอดี/ ม ^{3}วัน จึงสามารถสรุปได้ว่าระบบยูเอเอสบีแบบอุณหภูมิสูงให้ประสิทธิภาพสูงกว่าในการบำบัดน้ำเสียจากการกลั่นสุรา เมื่อเทียบกับระบบยูเอเอสบีที่อุณหภูมิบรรยากาศ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Project Title	Improvement of Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor by Thermophilic Operation.
Name of the Investigators	Dr.Sumaeth Chavadej
Year	1996

Synopsis

The objective of this study was to improve the treatment efficiency of the UASB system in treating distillery slops by thermophilic operation. The studied UASB unit was made of stainless steel with 34.7 litre working volume, 172 cm height and 15 cm inner diameter. The UASB column had a water jacket to control the temperature constant at 55°C. From the experimental results, it can be concluded that the optimum organic loadings were 5.2 and 7.1 kg COD/ m^3d for the maximum COD reduction and the maximum biogas production, respectively. Under the maximum organic loading of 10.1 kg COD/m^3d , the UASB system had a COD removal of 44 % and a biogas yield of 0.099 m^3/ kg CODapplied. In comparison with the full-scale UASB system operated at 30 °C, which had a maximum COD loading of 4.5 kg COD/m^3 d, it can be concluded that the thermophilic UASB provided better treatment for the distillery waste than the UASB system operated at ambient temperature.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายนามคณะวิจัย

หัวหน้าโครงการ	ดร.สุเมธ ชวเดช
งานทดลองและวิเคราะห์	นางอะเคื้อ บุญญศิริ
จัดสร้างเครื่องมือ	นายสังข์ ชมชื่น และ
	นายสนิท ปรีนคร
เขียนรายงาน	ดร.สุเมธ ชวเดช,
	นางพัสตรา สมบูรณ์ธเนศ และ
	นางอะเคื้อ บุญญศิริ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญเรื่อง

หน้า

กิตติกรรมประกาศ I

บทคัดย่อภาษาไทย II

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ III

รายนามคณะวิจัย IV

สารบัญเรื่อง V

สารบัญตาราง VII

สารบัญภาพ VIII

คำย่อและนิยามต่างๆ IX

บทที่

1. บทนำ....1

2. วารสารปริทรรศน์....2

2.1 กระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน....2

2.2 แก๊สชีวภาพ....2

2.3 สภาพแวดล้อมที่มีผลต่อระบบหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน....3

2.3.1 อุณหภูมิ....3

2.3.2 ความเป็นกรดด่าง (pH)....3

2.3.3 alkalinity....4

2.3.4 กรดอินทรีย์ระเหย (VFA)....4

2.3.5 ธาตุอาหารเสริมสร้าง....5

2.3.6 การเติม....5

2.3.7 สารพิษ....5

2.3.8 การกวนผสม....6

2.4 จลนพลศาสตร์ของระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน....6

2.5 ระบบหมักแก๊สชีวภาพแบบ UASB....7

2.5.1 หลักการทำงาน....7

2.5.2 กระบวนการเกิดตะกอนเม็ด....8

2.5.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมการทำงาน....9

3. วิธีการทดลอง....10

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1 ลักษณะสมบัติของน้ำกากส่าที่ใช้ในการทดลอง....10
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์....10
3.2.1 ถัง UASB....10
3.2.2 เครื่องสูบน้ำกากส่าเข้าระบบ....10
3.2.3 เครื่องควบคุมอุณหภูมิภายในถัง UASB....12
3.2.4 เครื่องแยกตะกอนแบคทีเรียและแก๊ส....12
3.2.5 เครื่องวัดแก๊ส....13
3.3 การเติมตะกอนแบคทีเรีย....13
3.4 แผนการทดลอง....13
3.5 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์....14
3.6 วิธีวิเคราะห์....15
4. ผลการทดลองและวิจารณ์....16
4.1 ระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่....16
4.2 ประสิทธิภาพของการกำจัดสารอินทรีย์....20
4.3 ประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สชีวภาพ....21
4.4 ปริมาณของแข็งแขวนลอย....25
4.5 ปริมาณสารอินทรีย์ (COD)....29
4.6 ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย....29
4.7 ค่าความเป็นกรดด่าง (pH)....29
4.8 ค่าความเป็นด่าง (alkalinity)....31
4.9 เสถียรภาพของระบบหมัก....32
4.10 สภาวะที่เหมาะสมของระบบหมัก....33
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ....34
5.1 สรุปผลการทดลอง....34
5.2 ข้อเสนอแนะ....34
รายการอ้างอิง....36
ภาคผนวก....37

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

2.1 อัตราการเกิดแก๊สชีวภาพในระบบย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศโดยMesophilic..... bacteria (37°C)และThermophilic bacteria(55°C) HRT 30วัน.....3

2.2 ระดับความเข้มข้นสูงสุดของสารพิษ (mg/l) ที่ไม่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรีย..... ในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ.....5

2.3 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างระบบ UASB กับระบบหมักแบบประสิทธิภาพ..... สูงอื่นๆ.....8

3.1 ลักษณะและสมบัติของน้ำกากส่าจากโรงงานสุราแสงโสม จ.นครปฐม.....10

3.2 พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลอง.....14

3.3 ดรรชนีและความถี่ที่ทำการตรวจวัด ณ จุดเก็บตัวอย่างต่างๆ.....15

4.1 ค่าเฉลี่ยดรรชนีต่างๆของน้ำกากส่าเข้าและออกจากระบบที่อัตราป้อน..... สารอินทรีย์ต่างๆภายใต้สภาวะคงที่.....18

4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพ..... ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆภายใต้สภาวะคงที่.....19

4.3 ปริมาณตะกอนแบคทีเรียที่ความสูงต่างๆของถังหมักและปริมาณตะกอน..... แบคทีเรียโดยเฉลี่ยในระบบ UASB ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ.....28

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่

2.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง pH และความเข้มข้นไบคาร์บอเนตที่ 35° C....4
2.2 การเจริญของแบคทีเรียในระยะต่างๆ....6
2.3 ลักษณะภายในของถังหมักแบบ UASB....7
3.1 Flow Diagram ของระบบUASBที่ใช้ในการทดลอง....11
3.2 ระบบ UASB ที่ใช้ในการทดลอง....12
4.1 อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ....17
4.2 ระยะเวลาเก็บกักที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ....17
4.3 ระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ....20
4.4 ประสิทธิภาพการลดลงของค่า COD ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ....21
4.5 อัตราการผลิตแก๊สชีวภาพ ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ....22
4.6 ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพ ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ....22
4.7 องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ....23
4.8 อัตราการผลิตแก๊สมีเธนที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ....24
4.9 ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเธนที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ....24
4.10 ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบที่อัตราการ
ป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ....25
4.11 ปริมาณสารแขวนลอยในระบบที่ระดับความสูงต่างๆของถังหมัก....27
4.12 ปริมาณสารอินทรีย์ (COD)ในน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบที่อัตราการ
ป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ....30
4.13 ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบที่อัตราการ
ป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ....30
4.14 ค่า pH ของน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ....31
4.15 ค่าalkalinityของน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบที่อัตราการป้อนสาร
อินทรีย์ต่างๆ....32

คำย่อและนิยาม

1. ALK (alkalinity)	หมายถึงความสามารถของน้ำในการรับอนุภาคโปรตรอน ส่วนใหญ่เกิดจากองค์ประกอบของสารละลายคาร์บอเนต ไบคาร์บอเนต มีหน่วยเป็น mg/l ในรูป $CaCO_3$
2. COD (Chemical Oxygen Demand)	คือปริมาณความเข้มข้นสารอินทรีย์โดยวัดเป็นปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ มีหน่วยเป็น mg/l
3. EFF(Effluent)	น้ำทิ้งที่ออกจากระบบ
4. HRT (Hydraulic Retention Time)	ระยะเวลาเก็บกัก หมายถึงระยะเวลาที่ของเหลวอยู่ในระบบ มีหน่วยเป็นวันโดย HRT = ปริมาตรถังหมัก / อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบ
5. INF(Influent)	น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ
6. MLSS(Mixed Liquor Suspended Solids)	ปริมาณหรือความเข้มข้นโดยประมาณของจุลินทรีย์ในถังหมัก คิดเป็นปริมาณสารแขวนลอยของน้ำตะกอน มีหน่วยเป็น mg/l
7. MLVSS(Mixed Liquor Volatile Suspended Solids)	เป็นส่วนของ MLSS ที่เป็นอินทรีย์สาร มีค่าประมาณ 80-90 % ของ MLSS มีหน่วยเป็น mg/l
8. Organic Loading	อัตราการป้อนสารอินทรีย์ หมายถึงปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบในแต่ละวัน โดยวัดในรูปของ kg COD/m^3 d
9. Sludge Yield	น้ำหนักแห้งของเซลล์แบคทีเรียที่เกิดขึ้นต่อสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลาย
10. SS (Suspended Solids)	ปริมาณของแข็งแขวนลอย หมายถึงส่วนของของแข็งที่ไม่ละลายน้ำและแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ มีหน่วยเป็น mg/l
11. SVI (Sludge Volume Index)	คือปริมาตรสลัดจ์เมื่อตั้งทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาทีต่อน้ำหนักแห้งของสลัดจ์ 1 กรัม มีหน่วยเป็น cm^3/g

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ปัญหามลภาวะนับวันจะทวีความรุนแรงมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการขยายตัวอย่างรวดเร็วของภาคอุตสาหกรรม การปล่อยน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมลงสู่แหล่งน้ำส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมเป็นอันมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการพัฒนากรรมวิธีในการบำบัดน้ำเสีย เพื่อลดปัญหาดังกล่าว

การบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพ มักนิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบ เนื่องจากค่าใช้จ่ายต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการบำบัดอื่นๆ สำหรับการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสารอินทรีย์สูง ควรเป็นระบบบำบัดชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Treatment) เพราะระบบบำบัดดังกล่าว มีค่าใช้จ่ายต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic Treatment) นอกจากนี้ระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนยังให้แก๊สชีวภาพ (Biogas) เป็นผลพลอยได้ อย่างไรก็ตามระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนยังมีประสิทธิภาพต่ำ จึงจำเป็นที่จะศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาระบบบำบัดดังกล่าวให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และนำไปประยุกต์ใช้ให้แพร่หลายในการแก้ไขปัญหามลภาวะทางน้ำ

กระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนประสิทธิภาพสูง (High Rate Anaerobic Process) ที่น่าสนใจคือ กระบวนการชั้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น(Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB) ซึ่งค้นพบและพัฒนาโดย Lettinga ในปี 1971 และได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำกากส่าในประเทศไทย พบว่าประสิทธิภาพการทำงานยังต่ำ เนื่องจากความเป็นพิษของโปตัสเซียมในน้ำกากส่า ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักโดยการใช้ระบบบำบัดแบบ UASB ในการบำบัดน้ำกากส่าที่ความเข้มข้นสารอินทรีย์สูง และควบคุมการทำงานของระบบที่อุณหภูมิสูง (55 °C)

ผลการทดลองนี้จะมีประโยชน์อย่างมาก ในการพัฒนาระบบบำบัดประสิทธิภาพสูง เช่น Thermophilic UASB ในการบำบัดน้ำกากส่า และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอื่นๆในอนาคต

บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

2.1 กระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Treatment)

โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์ในน้ำเสีย อาศัยแบคทีเรียหลายกลุ่มทำงานร่วมกัน (สุเมธ ชวเดช, 2529) คือ

2.1.1 Hydrolytic Fermentative Bacteria แบคทีเรียกลุ่มนี้ปล่อยน้ำย่อยออกมาย่อยสารโมเลกุลใหญ่เช่น คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีน ให้กลายเป็นโมเลกุลที่เล็กลง

2.1.2 Acid Forming Bacteria แบคทีเรียกลุ่มนี้ทำการเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้เป็น กรดอินทรีย์และสารอื่น

2.1.3 Acetogenic Bacteria แบคทีเรียกลุ่มนี้อยู่ร่วมกับ Methanogenic Bacteria ในลักษณะพึ่งพากัน โดยทำหน้าที่ย่อยสลายสารเพื่อส่งให้ Methanogenic Bacteria นำไปใช้ต่อไป

2.1.4 Methanogenic Bacteria เป็นแบคทีเรียที่ใช้ซับสเทรตเพื่อเกิดเป็นแก๊สมีเธน ซึ่งการที่แบคทีเรียกลุ่มนี้ดึงซับสเทรตมาใช้ ก็จะส่งผลให้แบคทีเรียกลุ่ม Acetogenic Bacteria สามารถย่อยสลายสารมากขึ้นและโตได้รวดเร็วขึ้น

2.1.5 Sulfate Reducing Bacteria เป็นแบคทีเรียกลุ่มที่รีดิวซ์ซัลเฟตในน้ำเสีย และเกิดเป็นก๊าซ H_2S ซึ่งมีกลิ่นเหม็น แบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถแย่งซับสเทรตของ Methanogenic Bacteria ทำให้เกิด H_2S ในระบบมากกว่าCH_4

2.1.6 Denitrifying Bacteria แบคทีเรียกลุ่มนี้ทำการรีดิวซ์ไนเตรทในน้ำเสียให้เป็นแก๊สไนโตรเจน

2.2 แก๊สชีวภาพ (Biogas)

ในห่วงโซ่อาหารของการย่อยสลายสารเชิงซ้อน โดยแบคทีเรียกลุ่มต่างๆที่ทำงานร่วมกันในสภาวะไร้ออกซิเจน พบว่าเกิดแก๊สชีวภาพซึ่งมีองค์ประกอบคือ CH_4 65 -70 % , CO_2 30 % และ H_2S 0.5 - 1% ซึ่ง CH_4 นี้สามารถใช้เป็นสารพลังงานได้ดี

เมื่อผ่านน้ำกากส่าที่มีค่า COD สูงถึง 100,000 mg/l เข้าสู่ระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ พบว่าเกิดแก๊สชีวภาพขึ้นประมาณ 0.25 - 0.30 m^3/m^3 น้ำกากส่า ซึ่งสามารถที่จะนำพลังงานในส่วนนี้ไปใช้เป็นแหล่งพลังงานชดเชยได้

2.3 สภาพแวดล้อมที่มีผลต่อระบบหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน

ในการออกแบบระบบบำบัดจำเป็นต้องมีการควบคุมปัจจัยต่างๆ เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง ปัจจัยที่จำเป็นต้องควบคุมคือ

2.3.1 อุณหภูมิ จากการทดลองของ Gaudy A.F.(1975) แสดงให้เห็นว่าอัตราการเกิดแก๊สชีวภาพในระบบหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่อุณหภูมิ 65 °C มีค่าสูงกว่าที่ 37 °C (ตารางที่ 2.1) แต่การควบคุมระบบหมักที่อุณหภูมิสูงจะต้องใช้พลังงานสูงขึ้น นอกจากนี้พบว่าแบคทีเรียที่ทำงานที่อุณหภูมิสูง 55 °C (Thermophilic bacteria) มีความทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ต่ำกว่าแบคทีเรียที่ทำงานที่อุณหภูมิ 37 °C (Mesophilic bacteria)

ตารางที่ 2.1 อัตราการเกิดแก๊สชีวภาพในระบบย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนโดย Mesophilic Bacteria และ Thermophilic Bacteria ที่ HRT 30 วัน (Gaudy, 1975)

อุณหภูมิ	อัตราการผลิตแก๊สชีวภาพ (ฟุต^3/วัน)
37	0.36
65	0.54

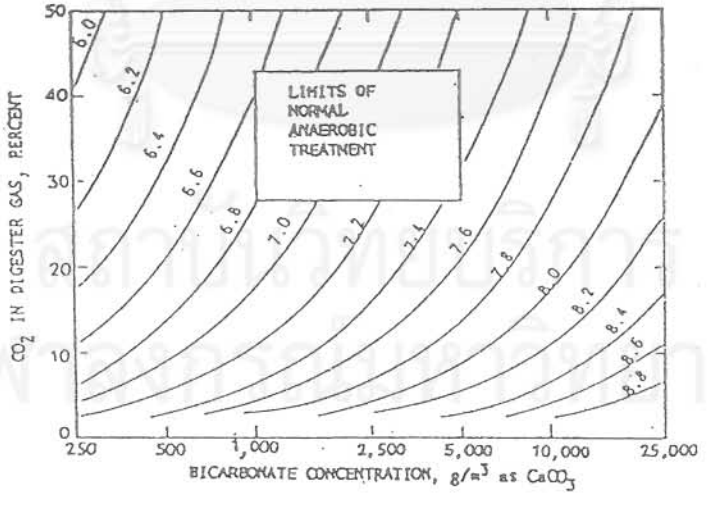
2.3.2 ความเป็นกรดด่าง (pH) ค่าความเป็นกรดด่างมีความสำคัญต่อการเจริญของแบคทีเรียในแต่ละกลุ่มไม่เท่ากัน โดยทั่วไปแบคทีเรียเจริญได้ดีในช่วง pH 6.5 - 7.8 แต่การที่ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน อาศัยการทำงานร่วมกันของแบคทีเรียหลายกลุ่ม บางกลุ่ม เช่น Acid Forming Bacteria สามารถทนค่า pH ได้ต่ำถึง 4.5 แต่บางกลุ่มเช่น Methanogenic Bacteria ซึ่งเป็นแบคทีเรียกลุ่มที่ผลิตแก๊สมีเธน เจริญได้ดีในช่วงค่า pH ที่เป็นกลาง ดังนั้น การ ควบคุม pH ให้เหมาะสมในการอยู่ร่วมกันของแบคทีเรียกลุ่มต่างๆ จะทำให้ระบบบำบัดมีประสิทธิภาพ และผลิตแก๊สชีวภาพได้สูงขึ้น

2.3.3 Alkalinity เป็นความสามารถของน้ำในการรับอนุภาคโปรตรอน ถ้าระบบมีค่านี้ต่ำ แสดงว่ามีการสะสมของกรดอินทรีย์ในปริมาณสูง ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียในระบบ

Mc Carty (1964) เสนอว่าค่าความเป็นด่างไบคาร์บอเนต (Bicarbonate alkalinity) ควรอยู่ในช่วง 2,500 - 5,000 g / m^3 เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพ (Buffer Capacity) เพียงพอ ซึ่งในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศนี้พบว่าค่า pH สัมพันธ์กับปริมาณไบคาร์บอเนต (รูปที่ 2.1) จะเห็นว่า Bicarbonate concentration ไม่ควรต่ำกว่า 1,000 g / m^3 เพื่อให้ระบบมี pH เหมาะสมที่จะไม่ทำอันตรายต่อแบคทีเรียในระบบ

Lettinga และคณะ (1980) พบว่าสามารถใช้ $Ca(OH)_2$ แทน $NaHCO_3$ ได้ดีในถังปฏิกิริยาแบบ UASB สำหรับบำบัดน้ำเสียจากโรงงานที่ใช้มะเขือเทศเป็นวัตถุดิบ นอกจากนี้ยังทำให้ตะกอนจุลินทรีย์จมตัวได้ดี อันเป็นประโยชน์ต่อการกักตะกอนให้อยู่ในถังปฏิกิริยาได้นาน และสามารถเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบได้

2.3.4 Volatile Fatty Acids (VFA) กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (VFA) นี้เกิดจากการทำงานของ Acid Forming Bacteria ซึ่งจะถูกนำไปใช้ โดยแบคทีเรียกลุ่ม Acetogenic bacteria หรือ Methanogenic bacteria แต่ถ้าระบบไม่อยู่ในภาวะสมดุล กล่าวคือแบคทีเรียที่ใช้ VFA ไม่สามารถใช้ได้ทันกับการผลิต จะเกิดการสะสมของ VFA ส่งผลให้ค่า pH ลดลง ทำให้เกิดสภาพแวดล้อม



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง pH และความเข้มข้นไบคาร์บอเนตที่ 35 °C (Mc Carty, 1964)

แวดล้อม ที่ไม่เหมาะต่อการเจริญของแบคทีเรียกลุ่มดังกล่าว ทำให้ % CH_4 ที่ผลิตลดต่ำลง โดยทั่วไปปริมาณกรดอินทรีย์ในถังหมักไม่ควรสูงเกิน 500 mg/l มิฉะนั้นปริมาณแก๊สมีเธนที่ผลิตได้จะลดลง และถ้ามีการสะสม VFA ในปริมาณมากก็จะทำให้ระบบล้มเหลวในที่สุด

2.3.5 Nutrients ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่สำคัญต่อการเจริญของแบคทีเรีย ซึ่งอัตราส่วนที่เหมาะสมในระบบหมัก เพื่อให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์และผลิตแก๊สชีวภาพได้ดีควรมีอัตราส่วน COD : N : P เท่ากับ 100 : 2.2 : 0.4 หรือ BOD : N : P เท่ากับ 100 : 1.1 : 0.2 ถ้าพบว่าปริมาณธาตุดังกล่าวไม่เพียงพอก็จำเป็นต้องเติมเพิ่ม

2.3.6 Feeding Mode การเติมน้ำเสียเข้าระบบหมักอาจเป็นแบบเติมครั้งเดียว (Batch Feed) เติมกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Feed) หรือเติมต่อเนื่อง (Continuous Feed) โดยทั่วไปการเติมแบบต่อเนื่องจะมีประสิทธิภาพสูงสุด เพราะสภาวะภายในถังหมักคงที่ และการเติมแบบครั้งเดียวจะมีประสิทธิภาพต่ำสุด อันเนื่องมาจากระบบเกิดความเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ทำให้แบคทีเรียต้องปรับตัวอยู่ตลอดเวลา

2.3.7 Toxic Substances ในน้ำเสียมีปริมาณสารพิษมากน้อยแตกต่างกันตามประเภทน้ำเสีย ตัวอย่างในตารางที่ 2.2 (Eckenfelder, 1979) แสดงปริมาณความเข้มข้นของสารพิษต่างๆ ที่แบคทีเรียสามารถทนรับได้

ตารางที่ 2.2 ระดับความเข้มข้นสูงสุดของสารพิษ (mg/l) ที่ไม่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรียในระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Eckenfelder, 1979)

สารพิษ	ความเข้มข้นสูงสุดที่ไม่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรีย (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

2.3.8 Mixing การกวนผสมในถังหมักมีความสำคัญ เพราะจะทำให้แบคทีเรียมีโอกาสพบอาหารได้โดยทั่วถึง และสารต่างๆที่แบคทีเรียขับออก จะเกิดการกระจายได้ดีขึ้น โดยทั่วไปมักนิยมการกวนผสมด้วยแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นในระบบ เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง

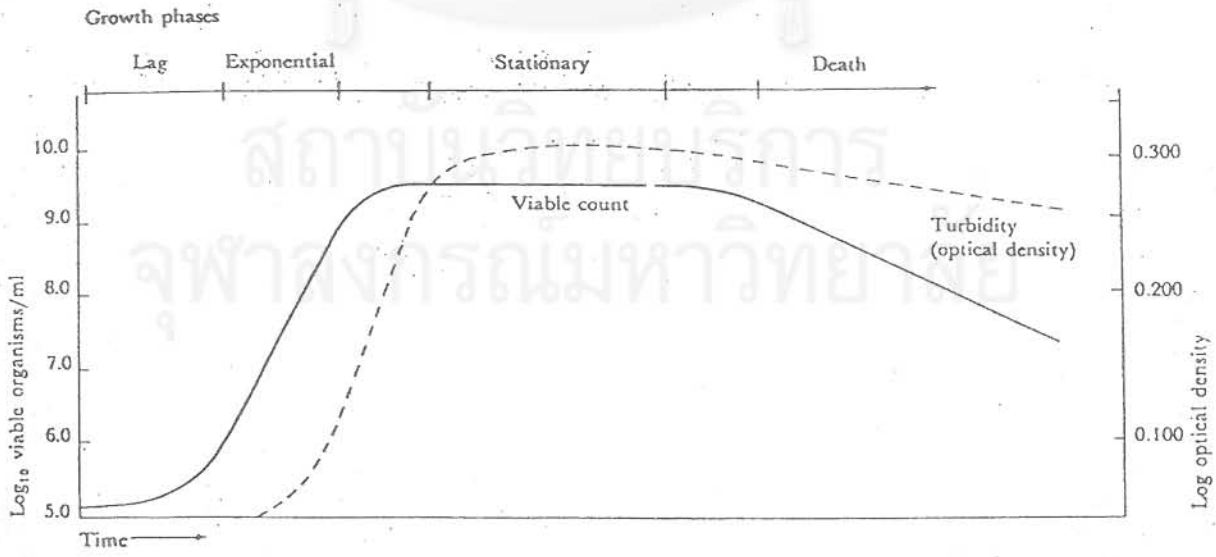
2.4 จลนพลศาสตร์ของระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Kinetics of Anaerobic Digestion)

การเจริญของแบคทีเรียเมื่อเติมลงในน้ำเสีย สามารถแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งสามารถแบ่งเส้นกราฟของการเจริญได้เป็น 4 ช่วงคือ

Lag phase เป็นช่วงที่จุลินทรีย์ปรับตัวให้คุ้นเคยกับสภาพแวดล้อมใหม่ และเตรียมที่จะทำการแบ่งเซลล์ ดังนั้นจึงไม่พบทั้งการเปลี่ยนแปลงจำนวนของแบคทีเรีย และความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ยังมีการพบว่าถ้าระบบมีสภาพที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญ ช่วง Lag phase จะยาว

Log phase เป็นช่วงที่จุลินทรีย์เกิดการแบ่งตัวอย่างรวดเร็ว ขณะเดียวกับจะมีการลดลงของสารอินทรีย์อย่างรวดเร็ว จากการที่แบคทีเรียนำสารอินทรีย์ไปใช้ในการเจริญ

Stationary phase ระยะนี้จำนวนแบคทีเรียมีค่าสูงสุดและคงที่ เพราะแบคทีเรียส่วนที่ตายเท่ากับส่วนที่เกิดขึ้นใหม่ ในระยะนี้ปริมาณสารอินทรีย์เริ่มเป็นตัวจำกัดการเจริญของแบคทีเรีย



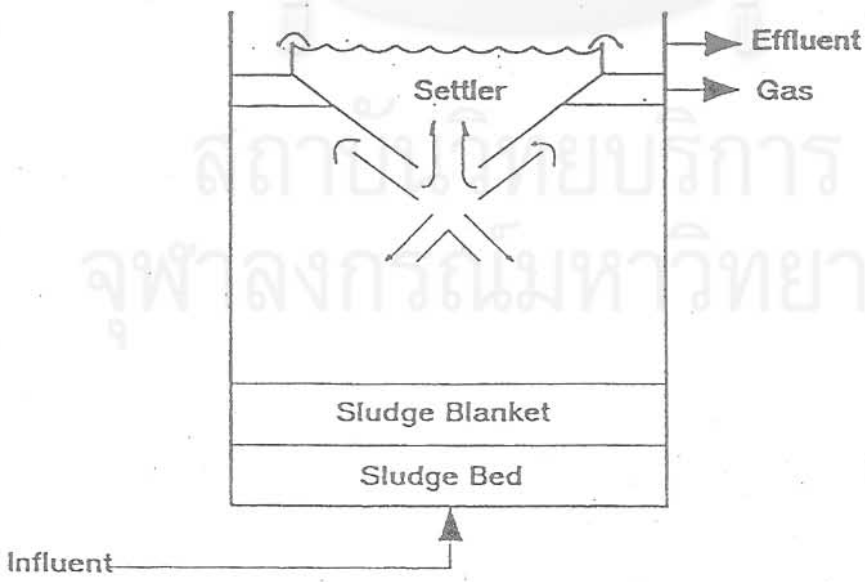
รูปที่ 2.2 การเจริญของแบคทีเรียในระยะต่างๆ (Brock, 1991)

Declining phase เป็นช่วงที่แบคทีเรียลดจำนวนลงจากการขาดอาหาร และเริ่มมี toxic metabolic end products เกิดขึ้น จึงเป็นภาวะที่ไม่เอื้อต่อการเจริญของแบคทีเรีย

2.5 ระบบหมักแก๊สชีวภาพแบบ UASB

ระบบหมักแบบ UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) เป็นระบบหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่มีประสิทธิภาพสูง (High-rate Anaerobic Process) เหมาะกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสารอินทรีย์สูง ปัจจุบันได้มีการพัฒนาระบบดังกล่าวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน เช่นเพิ่มปริมาณแบคทีเรียโดยการใช้ตัวกลางที่มีพื้นที่ผิวสูงสำหรับให้แบคทีเรียเกาะติด

2.5.1 หลักการทำงาน รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะภายในของถังหมัก UASB น้ำเสียจะถูกสูบเข้าที่ก้นถังหมักผ่านชั้นตะกอนแบคทีเรีย 2 ชั้น คือ Sludge bed ซึ่งเป็นแบคทีเรียชนิดเม็ด (Granular bacteria) และ Sludge blanket ซึ่งเป็นตะกอนเบา (Flocculent bacteria) โดยแบคทีเรียชนิดเม็ดนี้เกิดจากการเกาะติดกันแน่นของแบคทีเรีย ทำให้จำนวนเซลล์แบคทีเรีย/ ปริมาตรสูงกว่าชั้น Sludge blanket ดังนั้นสารอินทรีย์ส่วนใหญ่จึงถูกย่อยสลายและเปลี่ยนเป็นแก๊สมีเธนในชั้นนี้ ตะกอนแบคทีเรียส่วนหนึ่งจะถูกพาให้ลอยขึ้นโดยฟองแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นตลอดเวลา รวมถึงจากการไหลขึ้นของชั้นน้ำพาขึ้นสู่ด้านบนที่มี Gas-Solid Seperator สำหรับแยกเก็บแก๊สและปล่อยให้ชั้นตะกอนจมตัวลงสู่ก้นถัง ส่วนของน้ำใสก็ปล่อยให้ล้นออกนอกถัง เมื่อเปรียบเทียบระบบบำบัดดังกล่าวกับระบบอื่น ดังแสดงในตารางที่ 2.3 (สุเมธ ชวเดช, 2530) จะเห็นว่าระบบ UASB



รูปที่ 2.3 ลักษณะภายในของถังหมักแบบ UASB

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบระหว่างระบบ UASB กับระบบหมักแบบประสิทธิภาพสูงอื่นๆ (สุเมธ ชวเดช, 2530)

	Anerobic Filter	Anaerobic Contact	Anaerobic Fluidized Bed	UASB
-Investment	สูง	ปานกลาง	สูงมาก	ต่ำ
-Operation cost	ต่ำ	ปานกลาง	สูงมาก	ต่ำ
-Control	ง่าย	ปานกลาง	ยาก	ปานกลาง
-Loading	สูง	สูง	สูงมาก	สูงมาก
-Shock load	ดี	ดี	ดีมาก	ดีมาก
-Digestor size	เล็ก	เล็ก	เล็กมาก	เล็กมาก
-Start-up	ง่าย	ปานกลาง	ยาก	ยาก

เป็นระบบที่มีข้อดี และยังสามารถให้แก๊สมีเธนในปริมาณที่สูง โดยเกิด Sludge Yield ต่ำ ดังนั้น ตะกอนส่วนเกินของแบคทีเรียที่ต้องถ่ายออกจากถังหมักจึงมีไม่มาก

2.5.2 กระบวนการเกิดตะกอนเม็ด (Process of Granulation) ประสิทธิภาพการสร้างแก๊สมีเธนและกำจัดสารอินทรีย์ออกจากระบบ จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแบคทีเรียสูงขึ้น ซึ่งสามารถทำได้โดยเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ และ / หรือลด HRT

โดยทั่วไปในระบบ UASB มี MLSS สูง 20,000 - 40,000 mg/l และอาจสูงถึง 80,000 - 200,000 mg/l ในชั้น Sludge bed ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงกว่าระบบหมักอื่นๆ

จากการที่พบว่าสารอินทรีย์ส่วนใหญ่ เกิดการย่อยสลายในชั้น Sludge bed ซึ่งมีแบคทีเรียที่มีลักษณะเป็นเม็ด ดังนั้นการที่จะให้ระบบ UASB มีประสิทธิภาพสูง จึงจำเป็นต้องสร้างเม็ดแบคทีเรียดังกล่าวให้ได้ในถังหมัก โดยมากจะนำแบคทีเรียจากระบบหมักอื่นๆ ซึ่งมักอยู่ในรูปตะกอนเบามาผ่านขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงดังนี้

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

Transition Stage ในช่วงนี้อัตราการป้อนสารอินทรีย์ประมาณ 5 kg COD/ m^3d และช่วงนี้จะเกิดฟองแก๊สชีวภาพมาก ทำให้เพิ่มปริมาณของตะกอนเบาที่ไหลออกจากระบบ แต่

มีข้อควรระวังคือ ไม่ควรให้มีการสูญเสียตะกอนเบามากกว่าการเพิ่มปริมาณของแบคทีเรียชนิดเม็ด เพราะจะทำให้ระบบล้มเหลว

Progressive Granulation Stage เป็นช่วงที่มีการเพิ่มทั้งขนาดและจำนวนของ Granular bacteria ในถังหมัก และระบบสามารถรับการเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ได้สูง และรวดเร็วกว่าระยะอื่น

2.5.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมการทำงาน ในการควบคุมระบบ UASB นั้นจำเป็นต้องรักษาสภาพสมดุลของ Acid forming bacteria และ Methanogenic bacteria และยังต้องรักษาปริมาณจุลินทรีย์ในระบบให้คงที่ให้มากที่สุด ซึ่งกรณีหลังนี้ขึ้นกับความสามารถในการตกตะกอนของจุลินทรีย์ (Sludge Settleability) ซึ่งควบคุมโดยอัตราการป้อนสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate) และอัตราการไหลต่อพื้นที่หน้าตัด (Hydraulic Loading Rate) ดังนี้

2.5.3.1 อัตราการป้อนสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate) อัตราการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบควรต่ำกว่าอัตราสูงสุดที่ตะกอนจุลินทรีย์สามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้

2.5.3.2 อัตราการไหลต่อพื้นที่หน้าตัด (Hydraulic Loading Rate) ในการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบควรกระจายทางน้ำเข้า (Feed Inlet Distribution) ให้สม่ำเสมอตลอดพื้นที่ด้านล่างของถังหมัก เพื่อให้น้ำเสียสามารถสัมผัสกับชั้นของจุลินทรีย์ได้อย่างทั่วถึง และยังทำให้ระบบสามารถรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ได้สูงด้วย

Chavadej and Chatrakoon (1990) ได้รายงานการประเมินประสิทธิภาพระบบหมัก UASB ขนาด 3,000 m^3 ในการบำบัดน้ำกากส่า พบว่าระบบหมักสามารถรับอัตราป้อนสารอินทรีย์สูงสุด 4.5 kg COD/ m^3d มีประสิทธิภาพการกำจัด COD 60 % ถ้าเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์สูงกว่าค่าค่าสูงสุดดังกล่าว จะเกิดการสูญเสียของตะกอนอย่างมาก และในที่สุดระบบจะล้มเหลว ทั้งนี้เนื่องจากมีการสะสมของกรดอินทรีย์ และจากความเป็นพิษของสารโปตัสเซียม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 ลักษณะสมบัติของน้ำกากส่าที่ใช้ในการทดลอง

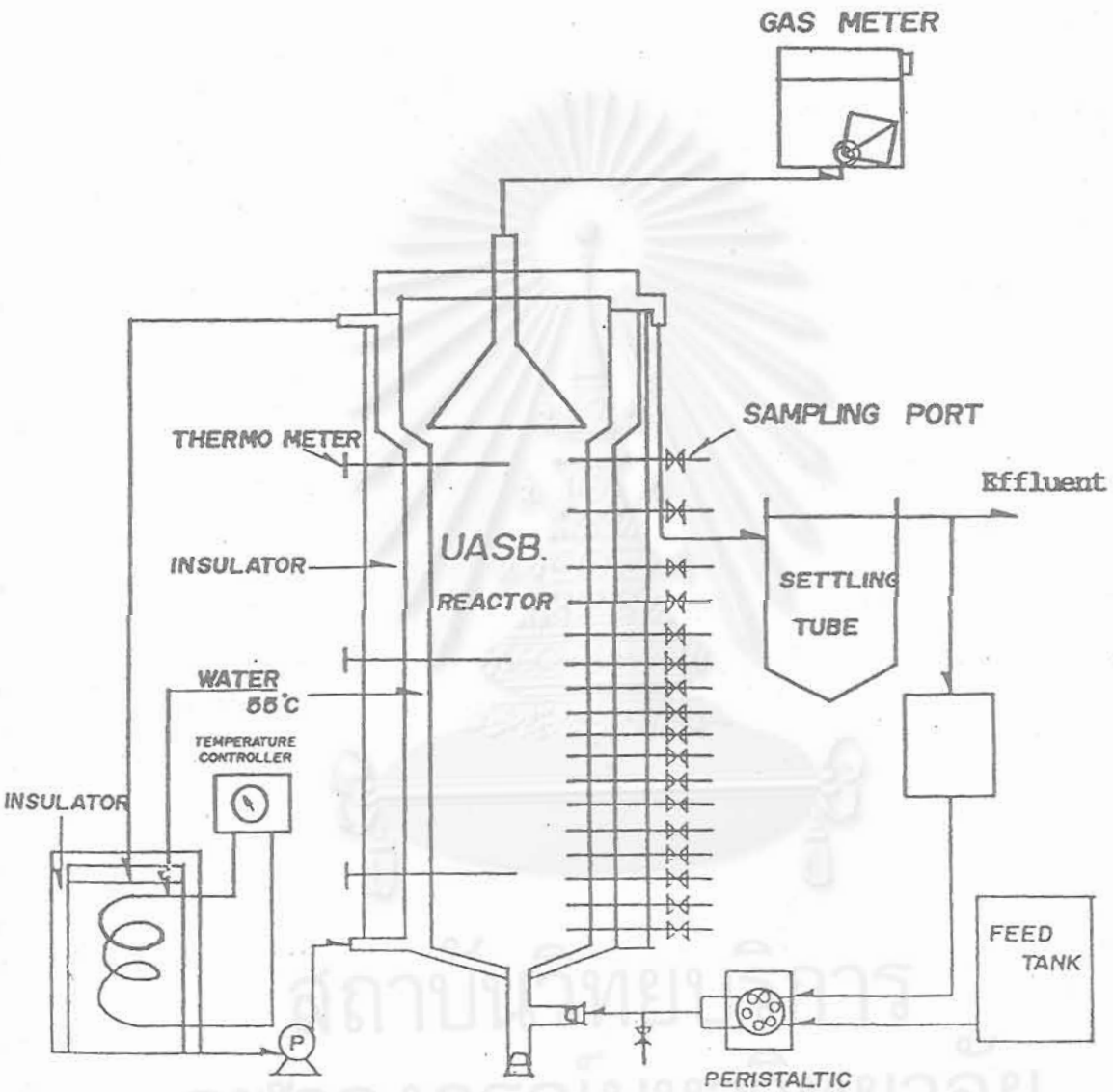
น้ำกากส่าที่ใช้ในการทดลองนำมาจากโรงงานสุราแสงโสม จังหวัดนครปฐม มีลักษณะคล้ายน้ำตาลไหม้ สีน้ำตาลดำ โดยได้นำมาเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 °C เพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆขึ้นก่อนทดลอง ลักษณะสมบัติของน้ำกากส่าที่ใช้วิเคราะห์โดยกรมวิทยาศาสตร์บริการเมื่อปี 2536 แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ลักษณะและสมบัติของน้ำกากส่าจากโรงงานสุราแสงโสม จังหวัดนครปฐม

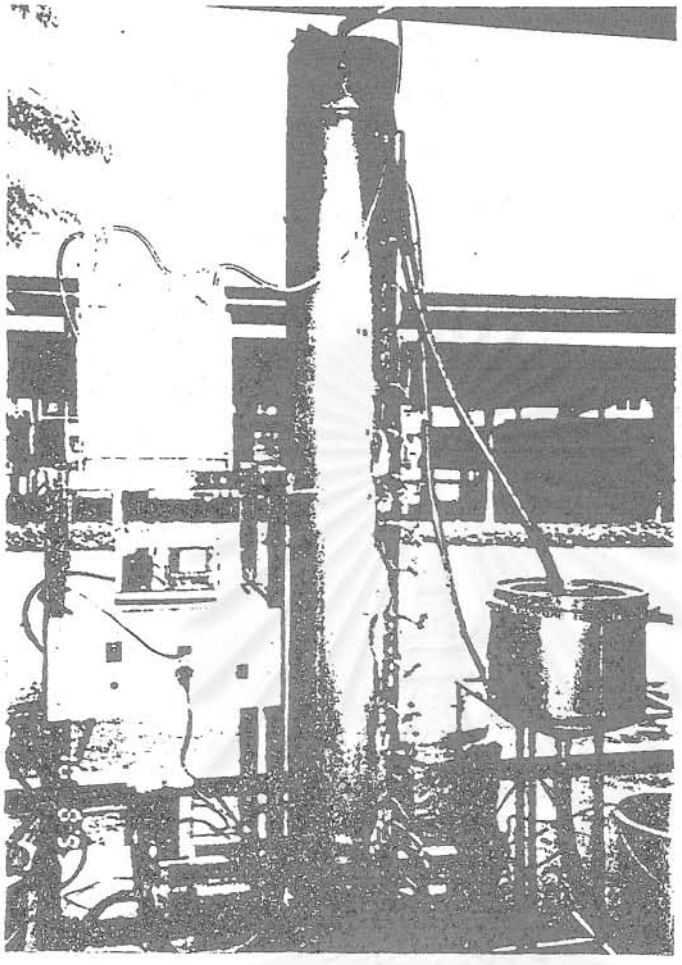
ลักษณะของน้ำกากส่า	ผลการวิเคราะห์
pH	4.11
COD (mg/l)	112,500
suspended Solids (mg/l)	5,130
Total Nitrogen (mg/l)	18.4
K^+ (mg/l)	10,000
P (mg/l)	55.6
SO_4^{2-} (mg/l)	5,525
Na^+ (mg/l)	5,000

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 ถัง UASB เป็นถังเหล็กปลอดสนิม รูปทรงกระบอกในแนวตั้ง ประกอบด้วย 2 ชั้น ถังชั้นในมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม สูง 172 ซม มีท่อเก็บตัวอย่างที่ระดับความสูงต่างๆ 17 ระดับ ติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์เพื่อวัดอุณหภูมิภายในถัง 3 จุด สำหรับตรวจสอบอุณหภูมิภายในถังตลอดเวลา



รูปที่ 3.1 Flow Diagram ของระบบ UASB ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.2 แสดงระบบ UASB ที่ใช้ในการทดลอง

ส่วนถังชั้นนอกเป็นถังหล่อด้วยน้ำร้อน และหุ้มถังชั้นนอกนี้ด้วยไฟเบอร์กลาสซึ่งมีความหนา 2.54 ซม หุ้มด้วยแผ่นอลูมิเนียมหนา 0.05 ซม ที่ชั้นนอกสุด (รูปที่ 3.1 - 3.2)

3.2.2 เครื่องสูบน้ำกากส่าเข้าระบบ เป็น peristaltic pump ยี่ห้อ EYELA MP-3

3.2.3 เครื่องควบคุมอุณหภูมิภายในถัง UASB ประกอบด้วยถังผลิตน้ำร้อน เครื่องควบคุมอุณหภูมิ และเครื่องปั๊มน้ำร้อน ภายในถังผลิตน้ำร้อนจะมีขดลวดความร้อนที่ต่อเข้ากับเครื่องควบคุมอุณหภูมิ เพื่อควบคุมอุณหภูมิในชั้นนี้ให้ได้ประมาณ 56°C สำหรับหล่อถัง UASB เพื่อให้อุณหภูมิภายในถัง UASB ประมาณ 55°C

3.2.4 เครื่องแยกตะกอนแบคทีเรียและแก๊ส มีลักษณะเป็นรูปกรวย เส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม อยู่ที่ส่วนบนของถัง UASB

3.2.5 เครื่องวัดแก๊ส (Gas Meter) ทำด้วยอะครีลิค ใช้สำหรับวัดปริมาตรแก๊ส โดยอาศัยหลักการแทนที่น้ำ แก๊สที่เกิดจากกระบวนการหมักจะลอยขึ้นสู่ด้านบนผ่านเครื่องแยกตะกอนแบคทีเรียและแก๊สเข้าสู่สายยางที่ต่อกับด้านล่างของเครื่องวัด แล้วจะถูกระบายออกทางด้านบนของเครื่องวัดแก๊ส ภายในเครื่องเป็นกล่องสี่เหลี่ยมมีผนังแยกเป็น 2 ส่วน อยู่ในลักษณะคว่ำ เพื่อดักแก๊ส และสามารถพลิกไปมาได้ แก๊สที่เกิดจะสามารถเข้าที่ช่องใดช่องหนึ่งและทำให้น้ำหนักของ 2 ช่องนี้ไม่เท่ากัน เกิดการพลิกกลับไปกลับมา ซึ่งในการพลิกแต่ละครั้งของกล่องนี้มีปริมาตรแก๊สเฉลี่ย 108 ซม^3 และเมื่อทราบจำนวนครั้งที่กล่องนี้พลิกไปมาในแต่ละวันแล้ว ก็จะสามารถวัดปริมาตรแก๊สที่ผลิตได้ การนับจำนวนการพลิกของกล่องพลาสติคนี้สามารถกระทำได้โดยใช้เครื่องนับ (Counter) ซึ่งต่อวงจรไฟฟ้าโดยติดตั้งแท่งแม่เหล็กที่ตัวกล่องพลาสติค เมื่อเกิดการพลิก แท่งแม่เหล็กจะเคลื่อนผ่านสวิตซ์ ทำให้สวิตซ์ปิดครบวงจร ซึ่งทำให้ตัวเลขในเครื่องนับเพิ่มขึ้น

3.3 การเติมตะกอนแบคทีเรีย

ในการทดลองนี้ใช้ตะกอนจุลินทรีย์ (Sludge) ในการเริ่มต้นการทดลอง โดยนำมาจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานสุราอยุธยา ซึ่งเป็นระบบหมักแบบ Anaerobic Contact ที่ควบคุมอุณหภูมิในช่วง Thermophilic โดยตะกอนมีปริมาณความเข้มข้น (MLSS) ประมาณ 20,000 mg/l แล้วเติมน้ำประปาจนเต็มถังหมัก จากนั้นจึงป้อนน้ำกากส่าเจือจาง 1:10 อย่างต่อเนื่อง โดยใช้อัตราการไหล 0.8 l/h น้ำที่ล้นจากถังตกตะกอนนำมาหมุนเวียน (Recycle) เข้าถัง UASB พร้อมน้ำกากส่า (เจือจาง 1:10) ที่เตรียมไว้ในอัตราส่วน 1:1 การ Recycle นี้จะช่วยปรับ pH ของน้ำกากส่าก่อนเข้าสู่ระบบให้อยู่ในช่วง 6.5 - 7.8 อันเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์ จนระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady State) ซึ่งสังเกตุได้จากการลดค่า COD และการผลิตแก๊สค่อนข้างคงที่ ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้เวลาประมาณ 3-5 สัปดาห์ แล้วจึงทำการวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆ วันละ 2 ครั้ง เป็นเวลา 5 - 7 วัน เพื่อนำข้อมูลมาใช้หาค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่างๆที่ใช้ จากนั้นจึงค่อยๆเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ให้สูงขึ้น และลดอัตราการเจือจางด้วยน้ำให้ต่ำลงจนถึงไม่มีการเจือจาง

3.4 แผนการทดลอง

การทดลองนี้เริ่มต้นที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่ำ และอัตราการเจือจางสูงเข้าสู่ระบบ แล้วจึงเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ให้สูงขึ้น และลดอัตราการเจือจางด้วยน้ำให้ต่ำลง จนถึงไม่มีการเจือจาง วิธีนี้ทำให้ตะกอนเบาสามารถเปลี่ยนเป็นตะกอนเม็ดได้ในเวลาอันสั้น ตาราง 3.2 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลอง ระยะเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มระบบจนถึงวันสุดท้ายที่ทดลองประมาณ 338 วัน โดยแต่ละอัตราป้อนสารอินทรีย์ พบว่าต้องใช้เวลาประมาณ 3-5 สัปดาห์ ระบบจึงเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady State) ซึ่งสังเกตุได้จากการที่การลดค่า COD และการผลิตแก๊สค่อนข้างคงที่ จากนั้นได้ทำการเก็บตัวอย่างวิเคราะห์ค่าดรรชนีต่างๆ ดังจะได้กล่าวต่อไป ค่าต่างๆที่วิเคราะห์ได้จะนำไปหาค่าเฉลี่ย เพื่อใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของระบบหมักที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ

ตารางที่ 3.2 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลอง

อัตราป้อนสารอินทรีย์ ($kgCOD/m^3d$)	อัตราส่วนการเจือจาง (น้ำ:น้ำกากส่า)	CODที่เข้าสู่ระบบ (mg/l)	อัตราการไหลของสารอินทรีย์ (l/Hr.)	ระยะเวลาเก็บกัก (วัน)	ระยะเวลาที่ทำการทดลอง(วัน)
0.2	10:1	9,510	0.8	42	27
0.7	5:1	24,130	1.0	35	19
1.3	3:1	35,590	1.3	26	16
2.0	2:1	46,930	1.5	23	47
2.5	1.5:1	49,660	1.7	20	57
3.3	0.5:1	65,000	1.8	20	30
5.2	0.1:1	90,590	2.0	17	28
7.1	0:1	111,690	2.2	16	31
10.1	0:1	113,280	3.1	11	30
12.8	0:1	110,940	4.0	9	53

3.5 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์

ทำการวิเคราะห์น้ำกากส่าที่เข้าและออกจากถังหมัก ณ จุดเก็บตัวอย่างต่างๆ โดยใช้ดรรชนีและความถี่ต่างๆดังแสดงในตารางที่ 3.3 นอกจากนี้ต้องทำการวิเคราะห์ปริมาตรแก๊สที่เกิด และองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพ อนึ่ง ในส่วนของการตรวจวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ในถังหมัก

ตารางที่ 3.3 ดรรชนีและความถี่ที่ทำการตรวจวัด ณ จุดเก็บตัวอย่างต่างๆ

ดรรชนี	จุดเก็บตัวอย่าง		
	น้ำเข้า	น้ำออก	ถังหมัก
อุณหภูมิ	-	-	ทุกวัน
อัตราการไหลของน้ำกากส่า	ทุกวัน	-	-
COD	ทุกวัน	ทุกวัน	-
pH	ทุกวัน	ทุกวัน	-
VFA	ทุกวัน	ทุกวัน	-
Alkalinity	ทุกวัน	ทุกวัน	-
SS	ทุกวัน	ทุกวัน	ก่อนใช้อัตราป้อนใหม่
อัตราการเกิดแก๊สชีวภาพ	-	-	ทุกวัน
องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพ	-	-	ทุกวัน

ทำได้โดยดึงตะกอนที่ระดับต่างๆภายในถังมาวิเคราะห์ค่า SS เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่แต่ละอัตราการป้อนสารอินทรีย์ เพื่อนำมาพิจารณาว่าปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ในระบบมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่

3.6 วิธีวิเคราะห์

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

3.6.1 pH วัดค่าความเป็นกรดด่างโดยใช้ pH meter

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

3.6.3 Mixed Liquor Suspended Solids (MLSS) โดยการหาน้ำหนักแห้ง

3.6.4 Suspended Solids (SS) โดยการหาน้ำหนักแห้ง

3.6.5 Alkalinity โดย Titration Method

3.6.6 Volatile Fatty Acids (VFA) โดยวิธีการกลั่น

3.6.7 องค์ประกอบของแก๊ส โดย Orsat Analyzer

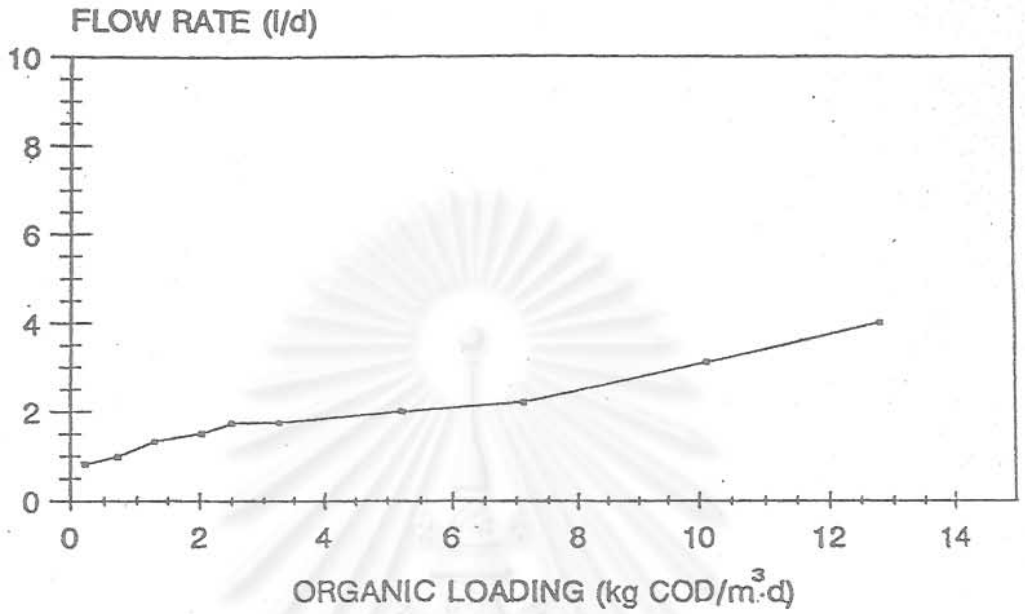
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

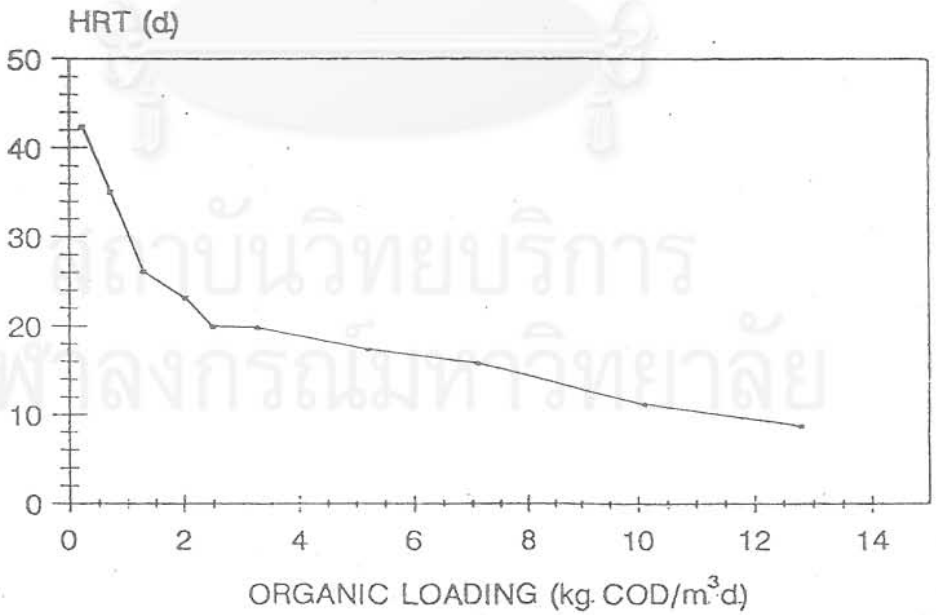
ข้อมูลการทดลองที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ ได้แสดงในภาคผนวกท้ายรายงานฉบับนี้ รูปที่ 4.1, 4.2 และตารางที่ 4.1 แสดงการเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์จาก 0.2-12.8 kg COD/m^3 d โดยเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (COD) ที่เข้าสู่ระบบจาก 9,510-110,940 mg /l และเพิ่มอัตราการไหลสารอินทรีย์เข้าระบบจาก 0.8-4.0 l /d ทำให้เวลาเก็บกัก (HRT) ลดลงจาก 42 d เหลือเพียง 9 d ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์สุดท้ายคือ 2.8 kg COD/ m^3 d ค่าเฉลี่ยของดรรชนีต่างๆ ที่ทำการวิเคราะห์ในช่วงสภาวะคงที่ (Steady State) สรุปไว้ในตารางที่ 4.1 ส่วนการคำนวณประสิทธิภาพการทำงานของระบบ UASB ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆได้ สรุปไว้ในตารางที่ 4.2 ซึ่งรายละเอียดของผลการทดลองจะได้กล่าวต่อไป

4.1 ระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่

รูปที่ 4.3 แสดงระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ โดยพบว่าในช่วงอัตราป้อนสารอินทรีย์ 0.2- 1.3 kg COD/ m^3 d ให้ผลที่ไม่น่าเชื่อถือ เนื่องจากเป็นช่วงเริ่มต้น ดังนั้นระบบจึงยังไม่เข้าสู่สภาวะคงที่อย่างแท้จริง เพื่อให้ระบบคุ้นเคยกับน้ำเสียได้รวดเร็วยิ่งขึ้นจึงทำการถ่ายน้ำเสียออกจากถังทดลองครึ่งถัง เติมน้ำประปาแทนจนเต็ม แล้วทดลองต่อที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 2.0 kg COD/ m^3 d พบว่าระบบต้องการเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่สูงถึง 40 วัน เนื่องจากแบคทีเรียต้องการเวลาในการปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมใหม่ เมื่อปรับตัวได้ จึงสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์สูงขึ้น พบว่าระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ได้เร็วขึ้น แต่เมื่ออัตราป้อนสารอินทรีย์สูงถึง 12.8 kg COD/ m^3 d ระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่สูงขึ้นถึง 35 วัน เนื่องจากที่อัตราป้อนสารอินทรีย์นี้ไม่มีการเจือจางน้ำกากส่า (ตารางที่ 3.2) ทำให้ปริมาณสารพิษที่ปะปนอยู่ในน้ำกากส่า เช่น K^+, Na^+, SO_4^{2-} มีค่าสูงเกินระดับที่แบคทีเรียสามารถทนได้ นอกจากนี้การที่มีสารอินทรีย์ในปริมาณสูง ทำให้แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างกรดสามารถย่อยสลาย และเกิดการสะสมกรดอินทรีย์ระเหยในปริมาณสูงถึง 3,780 mg/ l (ตารางที่ 4.1) ซึ่งเป็นสภาพที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญของแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเธน



รูปที่ 4.1 อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ



รูปที่ 4.2 ระยะเวลาเก็บกัก (HRT) ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ

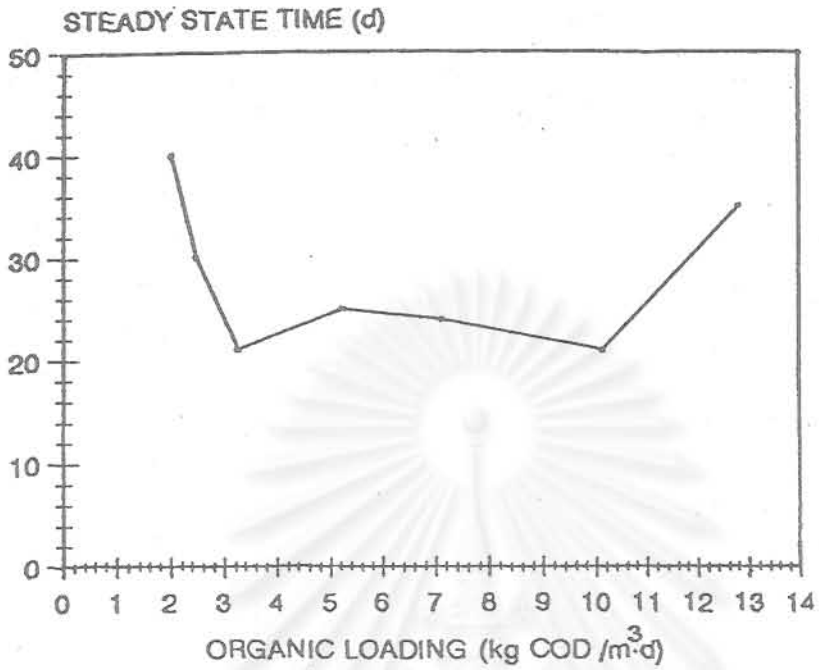
ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยคุณสมบัติต่างๆของน้ำกากส่าเข้าและออกจากระบบหมักที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆภายใต้สภาวะคงที่

Organic Loading (kg COD/m^3d)	0.2	0.7	1.3	2.0	2.5	3.3	5.2	7.1	10.1	12.8
HRT (d)	42	35	26	23	20	20	17	16	11	9
flow rate (l/d)	0.8	1.0	1.3	1.5	1.7	1.8	2.0	2.2	3.1	4.0
pH inf. (mg/l)	6.91	6.75	6.52	6.69	6.52	6.74	4.16	4.12	4.10	4.05
pH eff. (mg/l)	7.70	7.70	7.67	7.79	7.58	7.58	7.55	7.50	7.22	6.95
SS inf. (mg/l)	880	580	980	1480	950	2370	2670	5130	5320	5220
SS eff. (mg/l)	4000	5020	5120	4060	1890	1810	6050	8210	11030	18180
COD inf. (mg/l)	9510	24130	35590	46930	49660	65000	90590	111690	113280	110940
COD eff. (mg/l)	12940	12770	14640	25520	30560	35310	45050	62530	63430	90790
VFA inf. (mg/l)	440	290	520	430	1050	550	660	670	650	680
VFA eff. (mg/l)	600	410	460	370	330	300	420	410	490	3780
ALK inf. (mg/l)	1490	2080	2725	3900	4630	5910	740	-	-	-
ALK eff. (mg/l)	3510	3665	4770	7050	9030	10120	12110	13240	13200	9710
CH_4 & other gases (%)	-	-	-	65	66	65	68	63	61	43
CO_2 (%)	-	-	-	35	34	35	32	37	39	57
steady state time(d)	15	15	11	40	30	21	25	24	21	35

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพของระบบหมักที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ ภายใต้สภาวะคงที่

		ORGANIC LOADING (kgCOD/m^3d)						
		2.0	2.5	3.3	5.2	7.1	10.1	12.8
COD REMOVAL	(%)	45.6	46.0	45.7	50.3	44.0	44.0	18.2
BIOGAS PRODUCTION RATE	(l/d)	3.0	9.0	12.7	25.0	35.1	34.8	8.0
BIOGAS PRODUCTION/d / (FLOW RATE)(CODINF−CODEFF)	m^3 / kg CODremoved	0.092	0.271	0.244	0.275	0.325	0.225	0.099
BIOGAS PRODUCTION/d / (FLOW RATE)(CODINF)	m^3 / kgCODapplied	0.042	0.104	0.111	0.138	0.143	0.099	0.018
BIOGAS PRODUCTION/d / REACTOR VOLUME	m^3/d / m^3	0.085	0.259	0.365	0.721	1.012	1.003	0.231
CH_4 & OTHERS PRODUCTION RATE	(l/d)	1.9	5.9	8.2	17.0	22.1	21.2	3.4
CH_4 & OTHERS PRODUCTION/d / (FLOW RATE)(CODINF−CODEFF)	m^3 / kg CODremoved	0.060	0.179	0.159	0.187	0.204	0.137	0.043
CH_4 & OTHERS PRODUCTION/d / (FLOW RATE)(CODINF)	m^3 / kg CODapplied	0.027	0.069	0.077	0.094	0.090	0.060	0.008
CH_4 & OTHERS PRODUCTION/d / REACTOR VOLUME	m^3/d / m^3	0.055	0.171	0.252	0.490	0.637	0.612	0.099

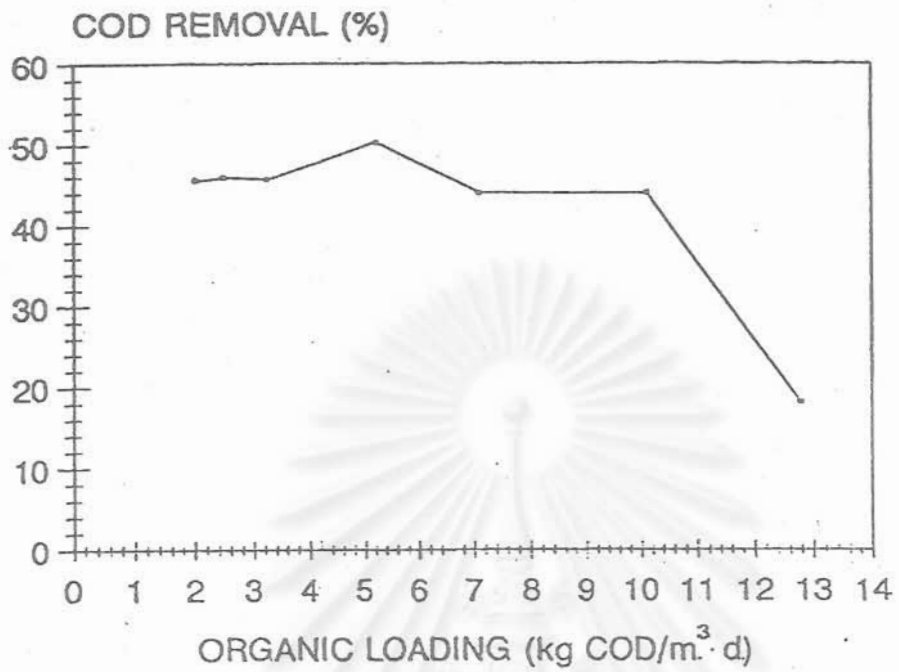


รูปที่ 4.3 ระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ

ทำให้ตะกอนแบคทีเรียหลุดจากระบบ (ตารางที่ 4.1) เป็นผลทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัด COD และอัตราการเกิดแก๊สชีวภาพลดลง

4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์ในช่วง 2.0-10.1 kg COD/ m^3 d ระบบหมักมีประสิทธิภาพในการลดค่า COD ค่อนข้างคงที่ประมาณ 44 - 50 % แต่เมื่อเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์เป็น 12.8 kg COD/ m^3d พบว่าประสิทธิภาพในการลดค่า COD ลดลงเหลือเพียง18 % เนื่องจากการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยในถังหมัก จากการสร้างโดย Acetogenic Bacteria สูงกว่าการใช้กรดอินทรีย์ระเหยโดย Methanogenic Bacteria การสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยนี้ เป็นอันตรายอย่างมากต่อแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเธน ดังจะเห็นว่าประสิทธิภาพของการลดค่า COD ลดลงอย่างมาก

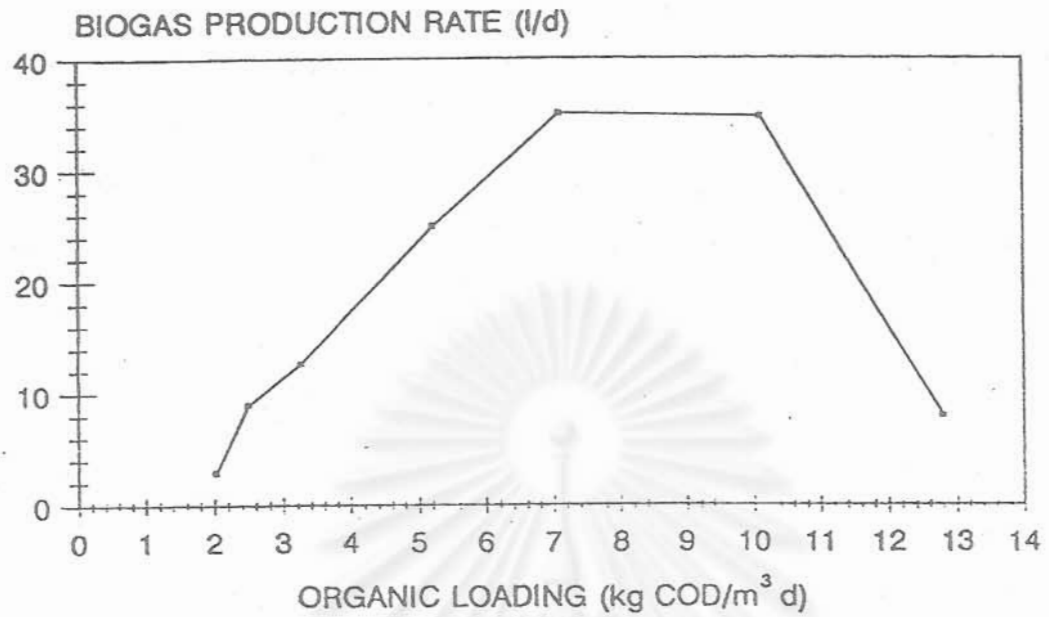


รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการลดลงของค่า COD ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ

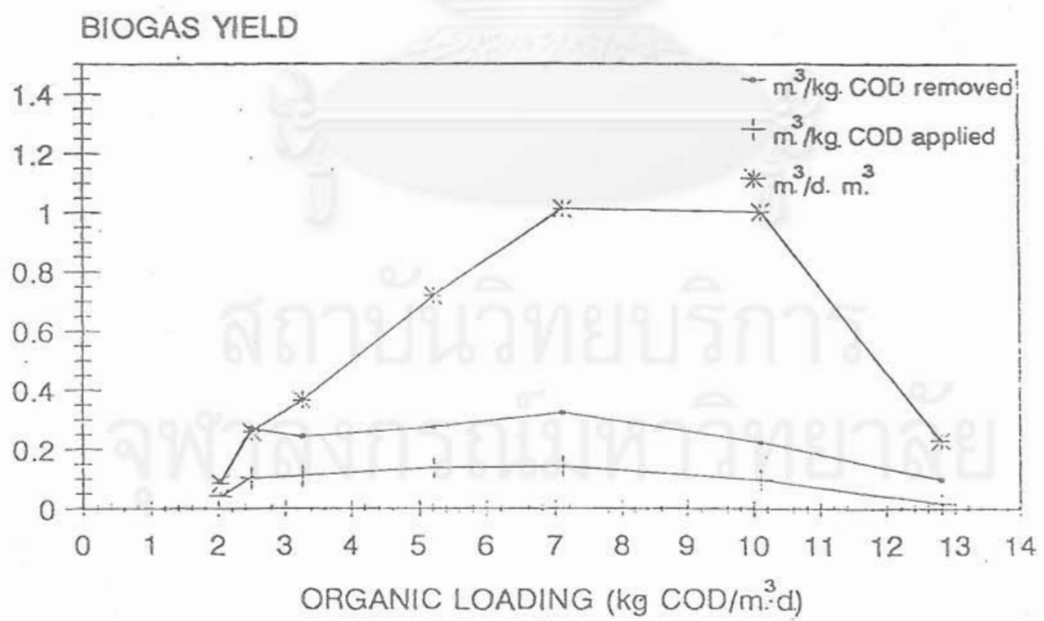
4.3 ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพ

จากรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.2 แสดงอัตราการผลิตแก๊สชีวภาพที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ พบว่าในช่วงอัตราป้อนสารอินทรีย์ 2.0 - 7.1 kg.COD/ m^3.d อัตราการผลิตแก๊สชีวภาพเพิ่มขึ้นค่อนข้างเป็นเส้นตรง โดยที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 2.0 kg.COD / m^3.d อัตราการผลิตแก๊สเป็น 3.0 l/d และเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์เป็น 7.1 kg.COD/ m^3.d อัตราการผลิตแก๊สเป็น 35.1 l/d อัตาการผลิตแก๊สคงที่ในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 7.1-10.1 kg.COD/ m^3.d แต่ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 12.8 kg.COD/ m^3.d อัตราการผลิตแก๊สลดลงเหลือเพียง 8.0 l/d เนื่องจากเกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยขึ้นในระบบซึ่งสูงถึง 3,780 mg/l และเป็นสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญของ Methanogenic Bacteria ทำให้อัตราการผลิตแก๊สชีวภาพลดลงอย่างมาก

การผลิตแก๊สชีวภาพเมื่อคำนวณเป็นปริมาณแก๊สที่ผลิตได้ต่อวันต่อถังหมัก มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สชีวภาพที่ระบบผลิตได้ต่อวัน(รูปที่ 4.6) โดยมีค่าสูงสุดที่ 1.01 m^3/ m^3 ถังหมักต่อวัน ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 7.1 kg.COD/ m^3.d HRT 16 วัน



รูปที่ 4.5 อัตราการผลิตแก๊สชีวภาพที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ

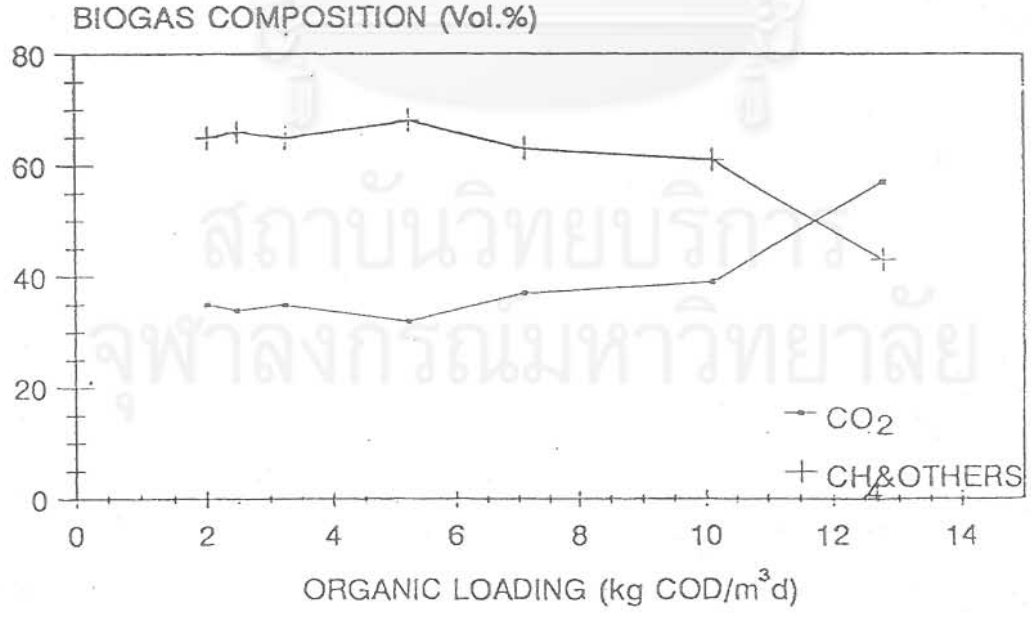


รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ

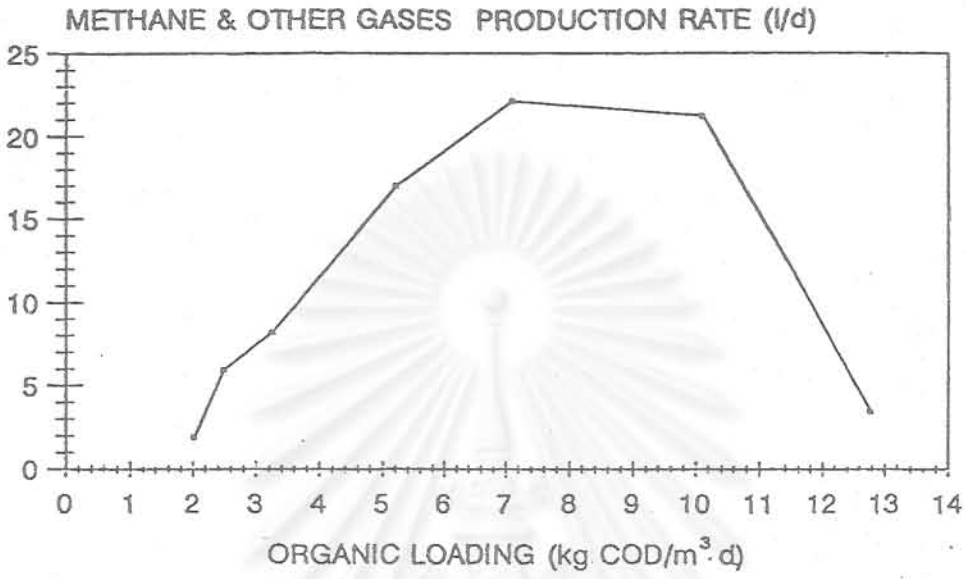
ส่วนประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพต่อ CODที่เข้าสู่ระบบ (m^3/kgCOD applied) พบว่าเมื่ออัตราป้อนสารอินทรีย์อยู่ในช่วง 2.5-7.1 kgCOD/ m^3d ประสิทธิภาพการผลิตมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่ออัตราป้อนสารอินทรีย์สูงกว่า 7.1 kgCOD/ m^3d ประสิทธิภาพการผลิตจะลดลง และที่อัตรา 12.8 kgCOD/ m^3.d ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพลดต่ำลงอย่างมาก ทั้งนี้เพราะเกิดการสะสมกรดอินทรีย์ระเหยและสารพิษในระบบดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพต่อ COD ที่ถูกกำจัด (m^3/ kgCODremoved) มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพต่อ COD เข้าสู่ระบบ (รูปที่ 4.6)

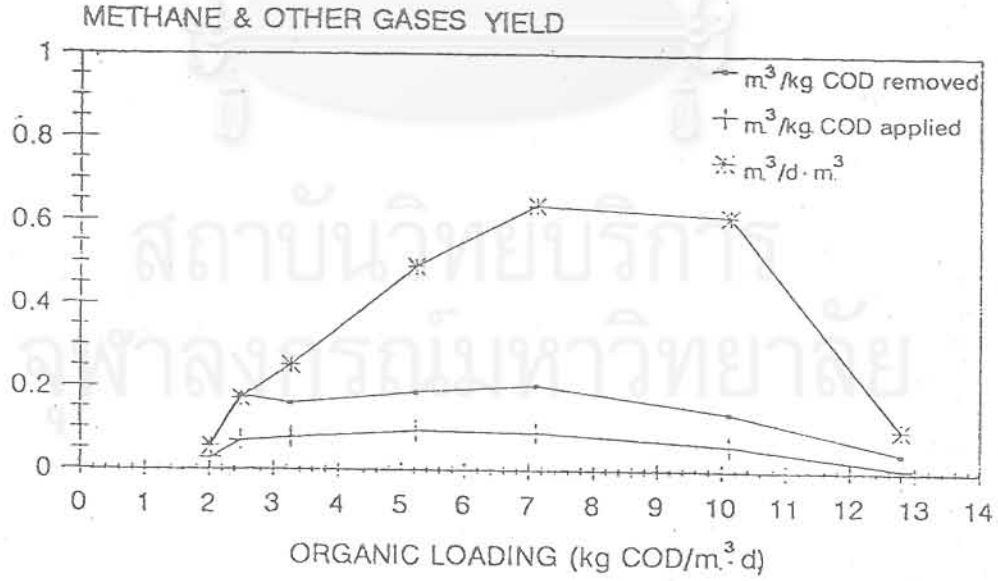
โดยทั่วไปแก๊สชีวภาพจากระบบหมักแบบไร้ออกซิเจน ประกอบด้วย CH_4 และ CO_2 เป็นส่วนใหญ่ ในการทดลองนี้วัดปริมาณ CO_2 ด้วยวิธี Orsat ส่วนปริมาณCH_4 คำนวณจากปริมาณแก๊สชีวภาพที่ได้หักปริมาณ CO_2 ออก จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์จาก 2.0 - 5.2 kg.COD/ m^3.d พบ CO_2 ประมาณ 32 - 35 % และ CH_4 ประมาณ 65 - 68 % แต่เมื่อเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์สูงกว่า 5.2 kg.COD/ m^3.d จะพบ CO_2 เพิ่มขึ้นขณะที่ CH_4 ลดลง และที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 12.8 kg.COD/ m^3.d พบว่าองค์ประกอบ CH_4 ลดลง เหลือเพียง 43% ทั้งนี้เพราะผลกระทบจากการสะสมกรดอินทรีย์ระเหยง่ายซึ่งทำให้ค่า pH ลดต่ำลงมีผลโดยตรงต่อแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างแก๊สมีเธน ทำให้การสร้างแก๊สมีเธนลดต่ำลง



รูปที่ 4.7 องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ



รูปที่ 4.8 อัตราการผลิตแก๊สมีเธนที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ



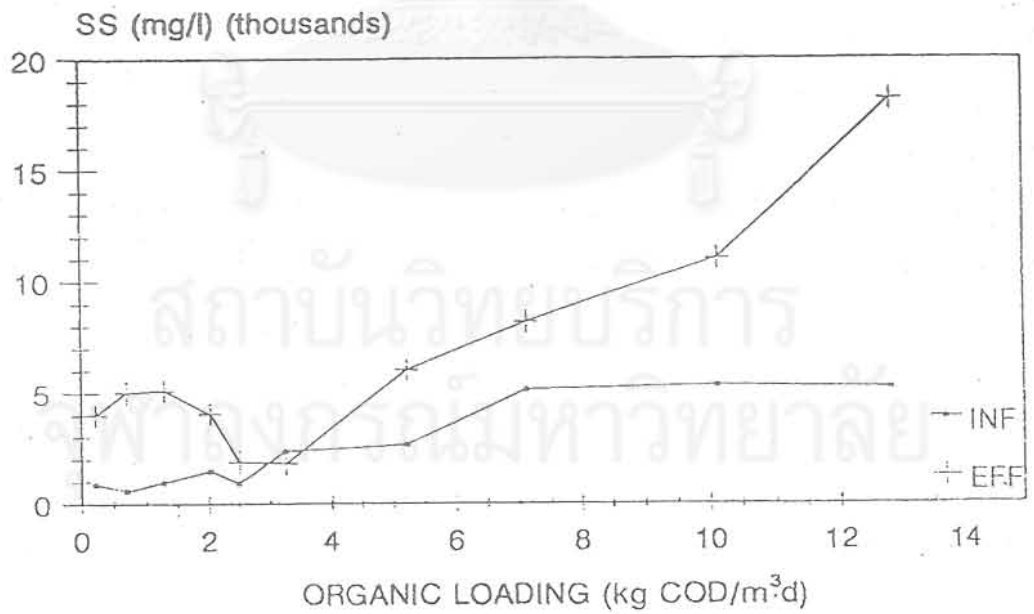
รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเธนที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ

สำหรับอัตราการผลิตและประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเธน (รูปที่ 4.8 และ 4.9) อธิบายได้ในทำนองเดียวกับอัตราการผลิตแก๊สชีวภาพ และประสิทธิภาพการผลิต (รูปที่ 4.5 และ 4.6)

4.4 ปริมาณของแข็งแขวนลอย

รูปที่ 4.10 แสดงปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งที่เข้าและออกจากระบบ UASB ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ แสดงให้เห็นว่าปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำกากส่าที่ป้อนเข้าระบบหมักมีค่าต่ำที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่ำ และมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์ ทั้งนี้จากที่อัตราป้อนสารอินทรีย์สูงขึ้น ได้ลดอัตราเจือจางลง ทำให้ปริมาณสารแขวนลอยสูงขึ้น

สำหรับปริมาณสารแขวนลอยในน้ำกากส่าที่ล้นออกจากถังหมักในช่วงเริ่มต้นระบบ (อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่ำ 0.2-1.3 kg.COD/ m^3.d) ซึ่งเป็นขั้นตอน Sludge Washout มีค่าสารแขวนลอยที่ล้นออกมากับน้ำเสียในปริมาณสูง แต่เมื่ออัตราป้อนสารอินทรีย์สูงกว่า 1.3 kg.COD/ m^3.d ปริมาณสารแขวนลอยได้ลดลงอย่างเห็นได้ชัด และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 1,810 mg./l ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 3.3 kg.COD / m^3.d และเมื่อสูงกว่า 3.3 kg.COD/ m^3.d พบว่าปริมาณสารแขวนลอยสูง



รูปที่ 4.10 ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ

ขึ้นอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์ อัตราเจือจางจะต่ำลง ทำให้ปริมาณความเข้มข้นสารพิษต่างๆสูงขึ้น แบคทีเรียไม่สามารถคงอยู่ในระบบ จึงหลุดลอยออกมากับน้ำล้นสูงขึ้น

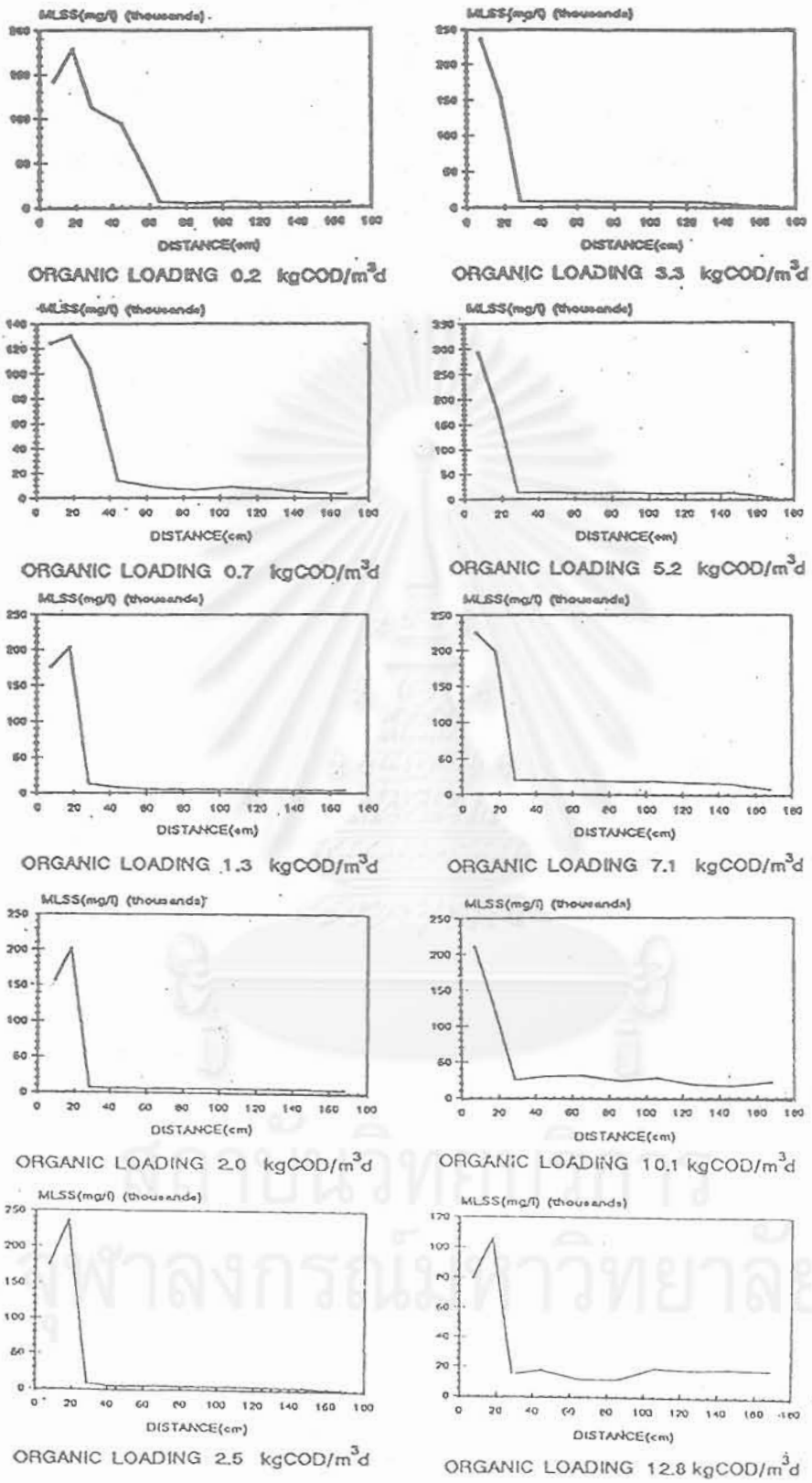
รูปที่ 4.11 แสดงปริมาณแบคทีเรียในถังหมัก UASB ที่ระดับความสูงต่างๆ เมื่อระบบหมักรับอัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ พบว่าเมื่อเริ่มระบบที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่ำ คือ 0.2 และ 0.7 kg COD/ m^3 d ระดับตะกอนสูงถึง 60 และ 40 ซม ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์เป็น 1.3 -12.8 kgCOD / m^3 d พบว่าความสูงของชั้นตะกอนลดลงเหลือประมาณ 30 ซม

เมื่อสังเกตุเส้นกราฟตะกอนหนักบริเวณที่แสดงช่วงล่างของถังหมัก พบว่าเมื่ออัตราป้อนสารอินทรีย์ต่ำ 0.2 - 2.5 kg COD/ m^3 d แก๊สชีวภาพสามารถพยุงตะกอนแบคทีเรียให้ลอยตัวขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์เป็น 3.3-10.1 kgCOD/ m^3 d แก๊สชีวภาพไม่สามารถพยุงตะกอนแบคทีเรียให้ลอยขึ้น เพราะได้พัฒนาเป็นตะกอนหนัก และเมื่ออัตราป้อนสารอินทรีย์ สูงสุด 12.8 kg COD/ m^3 d จึงเกิดสภาพการยกตัวของชั้นตะกอนแบคทีเรียที่ก้นถังอีกครั้ง เนื่องจากตะกอนแบคทีเรียได้เปลี่ยนสภาพเบาลง ทั้งนี้เพราะความเป็นพิษของกรดอินทรีย์ระเหยและสารพิษต่างๆในน้ำกากส่ามีปริมาณที่สูงมากขึ้น

เมื่อพิจารณาตะกอนแบคทีเรียในชั้นเหนือตะกอนหนัก จะเห็นว่ามีปริมาณต่ำมาก แต่เมื่ออัตราป้อนสารอินทรีย์สูงกว่า 5.2 kg COD/ m^3 d ค่าดังกล่าวจะเพิ่มขึ้น แสดงว่าที่อัตราป้อนสารอินทรีย์สูงนี้ เกิดสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญของแบคทีเรีย จึงหลุดออกจากระบบมากขึ้น

ตารางที่ 4.3 แสดงความเข้มข้นของแบคทีเรียในถังหมักที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ จากการทดลองพบว่าตะกอนแบคทีเรียจะสะสมอยู่บริเวณส่วนล่างของถังหมัก ในช่วงความสูงไม่เกิน 18 ซม จากก้นถัง ลักษณะตะกอนเป็นเม็ดเล็กๆสีดำ โดยตะกอนที่อยู่ด้านล่างจะมีขนาดใหญ่กว่าชั้นตะกอนนี้ทำหน้าที่ดึงสารอินทรีย์ในน้ำเสียมาใช้ และเกิดการเพิ่มจำนวนเซลล์ของแบคทีเรียทำให้ตะกอนในชั้นนี้เพิ่มมากขึ้น ส่วนแก๊สชีวภาพที่เกิดจะเป็นตัวพาเอาตะกอนแบคทีเรียที่หลุดจากระบบลอยขึ้นสู่ด้านบนของถัง

เมื่อพิจารณาความเข้มข้นตะกอนแบคทีเรียในช่วงอัตราป้อนสารอินทรีย์ 0.2-2.0 kgCOD/m^3 d พบว่าความเข้มข้นตะกอนแบคทีเรียจะลดลง เมื่ออัตราป้อนสารอินทรีย์สูงกว่า 2.0 kg COD/ m^3 d ความเข้มข้นของตะกอนแบคทีเรียจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการสร้างเซลล์แบคทีเรียสูงกว่าอัตราที่สูญเสียไป และในช่วงอัตราป้อนสารอินทรีย์ 7.1-10.1 kg COD/ m^3 d ความเข้มข้นของตะกอนแบคทีเรียจะคงที่คือประมาณ 37,530 - 37,940 mg /l แต่เมื่อใช้อัตราป้อนสารอินทรีย์ 12.8 kg COD / m^3 d ปริมาณความเข้มข้นแบคทีเรียลดลงเหลือเพียง 24,630 mg /l ทั้งนี้เนื่องจากความเป็นพิษของกรดอินทรีย์ระเหย และความเป็นพิษของโปตัสเซียม



รูปที่ 4.11 ปริมาณสารแขวนลอยในระบบที่ระดับความสูงต่างๆของถังหมัก

ตารางที่ 4.3 ปริมาณตะกอนแบคทีเรียที่ความสูงต่างๆ ของถังหมักและปริมาณตะกอนแบคทีเรียโดยเฉลี่ยในระบบ UASB ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ

distance	Organic Loading (kg COD/m^3d)									
(cm)	0.2	0.7	1.3	2.0	2.5	3.3	5.2	7.1	10.1	12.8
168	4575	4000	4700	4400	1836	1852	3840	8139	21060	18000
147	5133	4829	4806	5380	3643	3876	11638	15410	16020	18550
127	4950	7460	5450	5840	4446	7325	11280	16597	18140	17880
106	6500	9020	6233	6000	4760	7655	10740	18759	27200	19125
86	4700	6740	6160	6267	4420	7748	12333	18446	23067	11525
66	6367	8780	6223	6333	5420	8568	11480	19583	30400	11543
45	94438	14020	8488	6600	4380	8770	13800	19762	29067	17556
29	112222	104000	13380	7000	7983	9002	13580	20230	24325	14911
18	178148	130400	203750	200800	236136	153392	172150	197655	120725	105700
8	141500	124300	175900	147550	173700	236000	292300	224876	209833	79300
MLSS(mg/l)	37550	26630	26490	24530	26600	26160	33590	37530	37940	24630

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.5 ปริมาณสารอินทรีย์

จากรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าค่า COD ในน้ำเสียที่เข้าระบบมีค่าสูงขึ้นจาก 9,510 - 90,590 mg /l เมื่ออัตราป้อนสารอินทรีย์สูงขึ้นจาก 0.2-5.2 kg COD/ m^3.d ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์ ได้กำหนดการเจือจางให้ลดลง จนเมื่อไม่มีการเจือจางเลยที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 7.1-12.8 kg COD/ m^3.d ค่า COD จะสูงมากคือประมาณ 110,940 - 113,280 mg/l

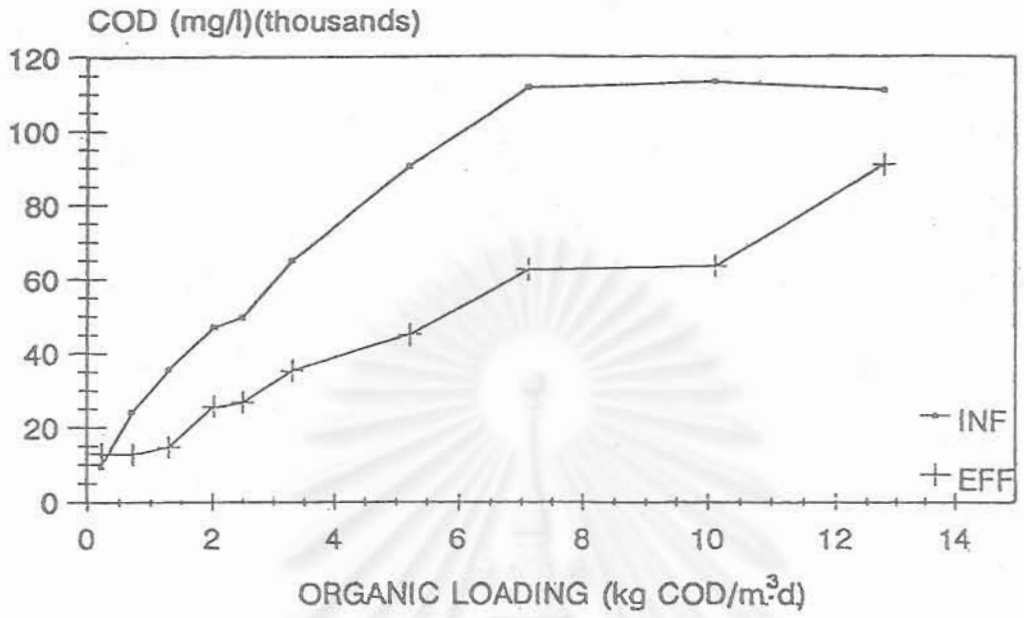
สำหรับค่า COD ที่ออกจากระบบ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 12,940 - 63,430 mg/l เมื่ออัตราป้อนสารอินทรีย์สูงขึ้นจาก 0.2-10.1 kg COD/ m^3d แต่ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 12.8 kg COD/ m^3d ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบลดลง จากการที่ระบบเสียสมดุล ซึ่งเห็นได้จากค่า COD ของน้ำเสียที่ออกจากระบบมีค่าแตกต่างจาก COD ที่เข้าระบบน้อยมาก

4.6 ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย

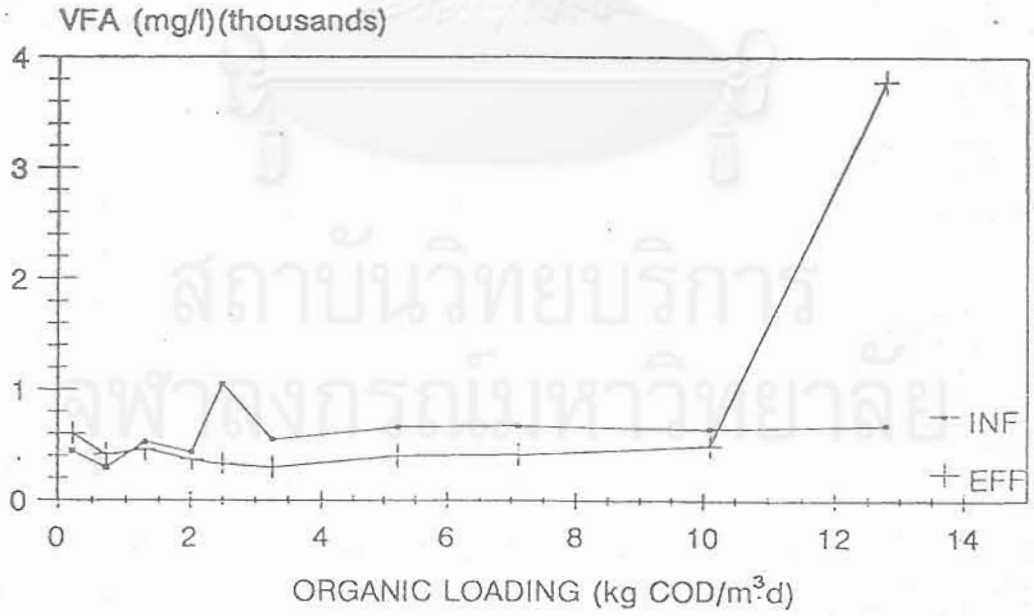
รูปที่ 4.13 แสดงความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยในน้ำกากส่าก่อนเข้าและออก พบว่าน้ำกากส่าที่ออกมีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์ ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในน้ำที่ออกจากระบบมีค่าอยู่ในช่วงต่ำ 300-600 mg/l เมื่ออัตราป้อนสารอินทรีย์อยู่ในช่วง 0.2-10. kgCOD/ m^3d และเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์สูงถึง 12.8 kgCOD / m^3d กรดอินทรีย์ระเหยเพิ่มขึ้นเป็น 3,780 mg/l ซึ่งจากรายงานของสุเมธ ชวเดช (2529) พบว่าปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยที่สูงกว่า 2,000 mg/l ทำให้เกิดสภาพที่ไม่เหมาะต่อการเจริญของแบคทีเรีย ดังนั้นจึงหยุดการทดลองที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์นี้

4.7 ค่าความเป็นกรดด่าง (pH)

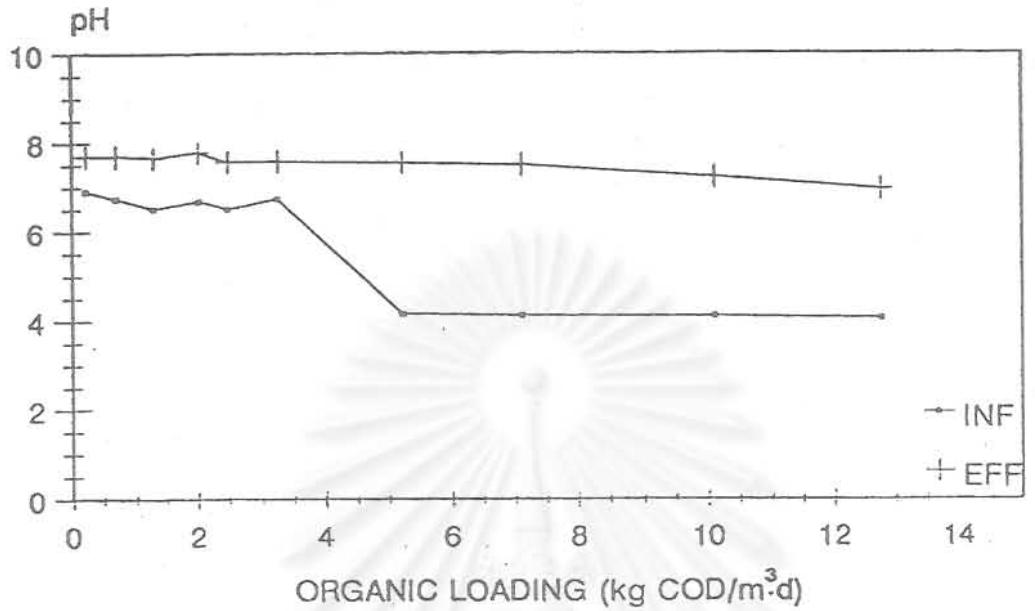
ค่าความเป็นกรดด่างในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบมีค่าต่ำลง เมื่อปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าระบบมีค่าสูงขึ้น (รูปที่ 4.14) พบว่าที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 0.2 kgCOD/ m^3d ซึ่งเป็นช่วงที่มีการเจือจางสูง ค่า pH ของน้ำกากส่ามีค่า 6.9 แต่เมื่อลดการเจือจางที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์สูงขึ้น ค่า pH ของน้ำกากส่าลดลง จนเมื่อไม่มีการเจือจางเลย (ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 7.1-12.8 kgCOD / m^3d) ค่า pH ของน้ำเสียเป็น 4.05-4.12 ส่วน pH ของน้ำที่ออกจากระบบมีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์ เนื่องจากปริมาณกรดอินทรีย์ในถังหมักเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 4.12 ปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ



รูปที่ 4.13 ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ



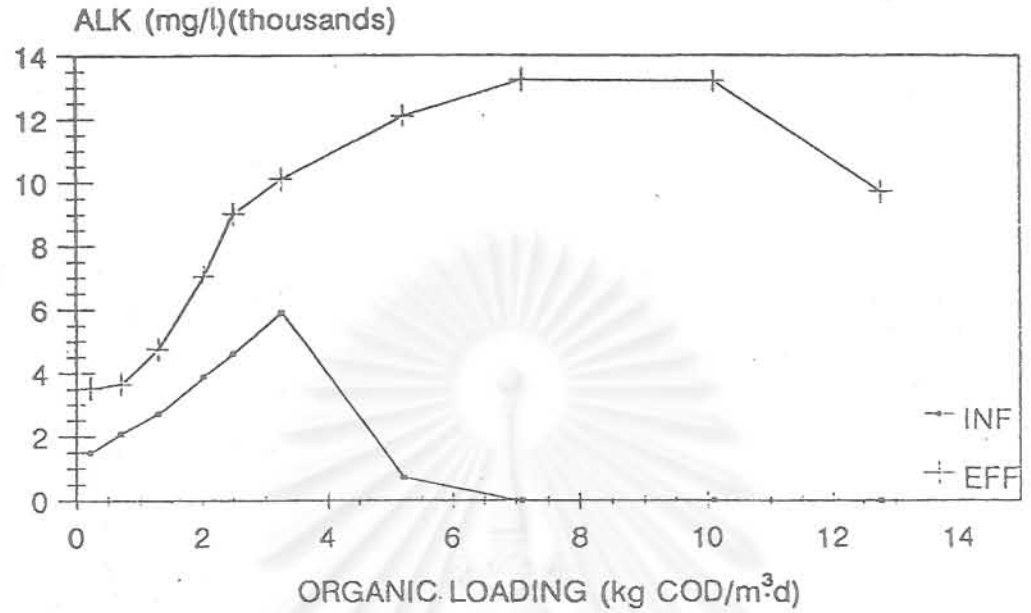
รูปที่ 4.14 ค่า pHของน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ

4.8 ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity)

ในช่วงแรกเมื่อเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์ ค่าความเป็นด่างในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบจะเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.15) แต่เมื่อเพิ่มจนถึง 3.3 kg.COD/ m^3.d พบว่าค่าความเป็นด่างลดลง จนไม่สามารถตรวจได้ (มีค่าเป็น 0) ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 7.1 kg.COD/ m^3.d ซึ่งเป็นน้ำกากส่าที่ไม่มีการเจือจางเลย

สำหรับค่าความเป็นด่างของน้ำกากส่าที่ออกจากระบบ จะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์ ทั้งนี้เนื่องจากCO_2ที่เกิดในระบบจะรวมตัวกับแอมโมเนียมเกิดเป็นแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต ทำให้ความเป็นด่างสูงขึ้น (สุเมธ ชวเดช, 2529)

เมื่อใช้อัตราป้อนสารอินทรีย์ 7.1 kg COD/ m^3d พบว่าความเป็นด่างของน้ำกากส่าขาออกสูงสุด คือ 13,240 mg/l แต่เมื่ออัตราป้อนสารอินทรีย์สูงกว่านี้ ค่าความเป็นด่างได้ลดลงเนื่องจากการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหย จนมีค่าต่ำสุดที่ 9,710 mg/l ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์สุดท้ายคือ 12.8 kg COD / m^3d



รูปที่ 4.15 ค่าAlkalinityของน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ

4.9 เสถียรภาพของระบบหมัก

ค่า pH, ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย และค่าความเป็นด่าง เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบหมัก การที่ระบบสามารถรักษาสภาพ pH ที่ค่อนข้างเป็นกลางได้ ทั้งที่น้ำเสียที่เข้าระบบมี pH เป็นกรด และยังเกิดการผลิตกรดอินทรีย์ขึ้น ทั้งนี้เพราะค่าความเป็นด่างของระบบ (alkalinity) ทำหน้าที่สะเทินกรด นอกจากนี้ยังได้มีการปรับสภาพน้ำกากส่าดิบก่อนเข้าระบบ โดยนำน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักกลับมาป้อนเข้าสู่ระบบพร้อมกับน้ำกากส่าดิบในอัตราส่วน 1:1 ตลอดเวลา ทำให้ pH ของน้ำกากส่าที่เข้าระบบอยู่ในช่วง 6.5 - 7.8 ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะต่อการเจริญของแบคทีเรีย

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการลด COD (รูปที่ 4.4) และประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพ (รูปที่ 4.6) พบว่าในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่ต่ำกว่า 10.1 kg COD/ m^3 d ระบบจะมีประสิทธิภาพสูงและมีเสถียรภาพดี แต่เมื่อเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์เป็น 12.8 kg COD/ m^3d ประสิทธิภาพดังกล่าวลดลงอย่างมาก เนื่องจากการสะสมของกรดอินทรีย์ในปริมาณสูงและสูญเสียตะกอนแบคทีเรียจากระบบ (รูปที่ 4.10 - 4.11) ซึ่งจะทำให้ระบบเสียสมดุลและล้มเหลวในที่สุด

ดังนั้นเมื่อคำนึงถึงเสถียรภาพของระบบหมักเป็นหลัก อาจสรุปได้ว่าอัตราป้อนสารอินทรีย์ไม่ควรสูงกว่า 10.1 kg COD / m^3 d

4.10 สภาวะที่เหมาะสมของระบบหมัก

สภาวะที่เหมาะสมในการควบคุมระบบหมักอาจแบ่งได้เป็น 2 กรณีดังนี้

4.10.1 <u>สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัด COD</u> จากตารางที่ 4.1 และ 4.2 ระบบหมักมีประสิทธิภาพในการกำจัด COD สูงสุดคือ 50 % ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 5.2 kg COD / m^3 d มีเวลาเก็บกัก 17 วัน ผลิตแก๊สชีวภาพได้ 25 l / d และมีประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพ 0.275 m^3/ kg CODถูกกำจัด , 0.721 m^3 / m^3 ถังหมัก .วัน , 0.138 m^3 / kg COD เข้าระบบ

แก๊สชีวภาพประกอบด้วย CO_2 32 % และ CH_4 ประมาณ 68% คิดเป็นประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเธน 0.187 m^3/ kg CODถูกกำจัด, 0.490 m^3 / m^3 ถังหมัก.วัน และ 0.094 m^3 / kg COD เข้าระบบ

4.10.2 <u>สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สมีเธน</u> จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.9 พบว่า ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 7.1 kg COD/ m^3 d เวลาเก็บกัก 16 วัน จะให้ปริมาณ CH_4 สูงสุดคือ 22.1 l/d (คิดเป็นประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเธน 0.204 m^3 / kg CODถูกกำจัด , 0.637 m^3 / m^3 ถังหมัก .วัน และ 0.090 m^3 /kg COD เข้าระบบ)

Chavadej และ Chatrakoon (1990) ได้รายงานว่าเมื่อใช้ระบบ UASB ขนาด 3,000 m^3 สำหรับบำบัดน้ำกากส่าที่อุณหภูมิ 30 °C ระบบหมักสามารถรับอัตราป้อนสารอินทรีย์สูงสุดได้เพียง 4.5 kg COD / m^3 d โดยมีประสิทธิภาพการกำจัด COD เท่ากับ 60 % ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ควบคุมระบบหมัก UASB ที่ 55 °C สามารถสรุปได้ว่าวิธีการควบคุมระบบหมักที่อุณหภูมิสูง (55 °C) จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบเพิ่มขึ้น และสามารถรับอัตราป้อนสารอินทรีย์ได้สูงขึ้น

LIBRARY
The Petroleum and Petrochemical College
Chulalongkorn University

TD796.5
.R46
Call No. 2537
Acc.No. 147
- 1 APR 1999

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ระบบหมักสามารถรับอัตราป้อนสารอินทรีย์ได้สูงสุดถึง 10.1 kg.COD / m^3.d โดย ไม่มีการเจือจางน้ำกากส่าที่เข้าระบบ COD ที่เข้าระบบมีค่าประมาณ 113,280 mg / l และ COD ที่ออกจากระบบมีค่า 63,430 mg / l pH ที่ออกจากระบบมีค่า 7.22 อัตราการผลิตแก๊สชีวภาพ 21.2 l / d ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพคือ 0.225 m^3/ m^3 ถังหมัก.วัน ประสิทธิภาพการกำจัด COD 44 % ระยะเวลาเก็บกัก 11 วัน โดยแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้มีองค์ประกอบแก๊สมีเธนประมาณ 61 % คาร์บอนไดออกไซด์ 39 %

5.1.2 อัตราป้อนสารอินทรีย์ที่เหมาะสมในการกำจัด COD และผลิตแก๊สชีวภาพคือ 5.2 และ 7.1 kg.COD / m^3.d ตามลำดับ

5.1.3 น้ำกากส่าจากโรงงานสุราแสงโสมมีปริมาณสารพิษ ได้แก่ K^+ , Na^+ , SO_4^{2-} สูงมากถึง 10,000 mg / l , 5,000 mg / l และ 5,525 mg / l ตามลำดับ ซึ่งถ้าความเข้มข้นของสารพิษสูงเกินกว่าที่จุลินทรีย์จะสามารถทนได้ ระบบจะมีสภาพที่ไม่เหมาะต่อการคงอยู่ของจุลินทรีย์ จึงต้องมีการเจือจางน้ำกากส่าในอัตราส่วนที่เหมาะสม

5.1.4 ระบบ Thermophilic UASB เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ความเข้มข้นสารอินทรีย์สูง เพราะสามารถรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ได้สูงกว่าระบบ Mesophilic UASB

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการทดลองนี้พบว่าระบบมีการหลุดออกของตะกอนจุลินทรีย์ จึงควรติดตั้งตัวกรองที่ส่วนบนของถัง เพื่อดักตะกอนไว้ก่อนที่จะหลุดออกจากระบบ ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพในการบำบัดดีขึ้น

5.2.2 ควรเจือจางน้ำกากส่าในอัตราส่วนที่เหมาะสม เพื่อลดค่าความเป็นกรดด่างของน้ำกากส่าดิบและจากกรดอินทรีย์ระเหยที่เกิดขึ้น และลดความเข้มข้นของสารพิษด้วย

5.2.3 ศึกษาประเภทของ Thermophilic UASB ที่ใช้ในการบำบัดน้ำกากส่านี้ เพื่อนำไปสู่การพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบบำบัด

5.2.4 ควรทดลองใช้ระบบ Thermophilic UASB ในการบำบัดน้ำเสียอื่นๆที่มีความเข้มข้นสารอินทรีย์สูง โดยทดลองจาก Pilot Scale ก่อนที่จะนำไปใช้งานจริง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

สุเมธ ชวเดช, "ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนอิสระ" เอกสารวิชาการของห้องปฏิบัติการวิศวสิ่งแวดล้อมและทรัพยากร สถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2529, หน้า 1-32 (อัดสำเนา)

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

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.

Chavadej, S., and Chattrakoon, S., 1990. Evaluation of Full-scale UASB Reactors Treating Distillery Slops., Paper presented in the 1st National Chemical Engineering Conference , DPC : 228-235.

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

Gaudy, A.F., 1975. The Transient Response to pH and Temperature Shock Loading of Fermentation Systems., Biotech. and Bioeng., 17 (1975) : 1051-1064

Lettinga, G., et al., 1980. Use Upflow Sludge Blanket (USE) Reactor Concept for Biological Wastewater Treatment Especially for Anaerobic Treatment, Biotech. and Bioeng., 22 : 699

McCarty, P., L., 1964. Anaerobic Waste Treatment Fundamentals, Part1, Chemistry and Biology, Public Works, 95 : 107

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

ข้อมูลการทดลอง

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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก. 1 ข้อมูลการทดลองที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 0.2 kg.COD/ m^3.d ระยะเวลาเก็บกัก (HRT) 42 วัน

DAY	INPUT					OUTPUT					FLOW RATE (l/d)	ORGANIC LOADING (kgCOD/m^3.d)	BIOGAS PRODUCTION RATE (l/d)	% CH_4 % CO_2
	pH	SS (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	ALK (mg/l)	pH	SS (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	ALK (mg/l)				
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.7	-	-	-
2	5.68	600	8956	-	-	6.86	3380	14926	-	-	0.8	0.1	-	-
5	7.23	-	9513	-	-	8.24	-	24695	-	-	1.0	0.3	-	-
9	4.52	150	-	240	425	8.19	5067	23616	690	3925	0.4	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	5625	-	669	-	0.9	-	-	-
12	5.02	145	2783	-	650	7.37	8545	17693	780	3600	0.9	0.1	-	-
15	6.85	740	3162	306	1275	7.62	3700	15606	840	3525	0.9	0.1	-	-
16	7.21	820	5548	320	1250	7.36	4170	16952	750	3600	0.9	0.1	-	-
17	6.59	760	5422	340	1275	7.56	3920	17470	720	3725	0.9	0.1	-	-
20	6.96	960	8718	390	1325	7.57	3675	14926	510	3525	0.9	0.2	-	-
23	6.84	940	13354	375	1250	7.64	4000	9146	510	3550	0.9	0.3	-	-
26	6.91	952	16099	690	2045	7.96	4575	8237	460	3325	0.8	0.4	-	-
27	7.00	960	16286	675	2000	7.91	3075	8050	390	3350	0.8	0.4	-	-
AVG	6.91	800	9510	440	1490	7.70	4000	12940	600	3610	0.8	0.2	-	-
STD	0.17	90	5135	150	340	0.20	280	3950	155	130	0.1	0.1	-	-

หมายเหตุ AVG และ STD คำนวณตั้งแต่วันที่ 15 -27

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก. 2 ข้อมูลการการทดลองที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 0.7 kg.COD/ m^3.d ระยะเวลาเก็บกัก (HRT) 35 วัน

DAY	INPUT					OUTPUT					FLOW RATE (l/d)	ORGANIC LOADING ($kgCOD/m^3d$)	BIOGAS PRODUCTION RATE (l/d)	% CH_4 % CO_2
	pH	SS (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	ALK (mg/l)	pH	SS (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	ALK (mg/l)				
1	6.87	730	24738	180	1750	7.66	3633	19418	360	3250	0.9	0.6	-	-
2	6.64	770	19352	240	1775	7.44	3784	13220	300	3200	1.0	0.6	-	-
5	7.00	950	25889	300	2000	7.50	3850	12663	470	3350	0.9	0.7	-	-
11	6.70	1330	22764	326	2000	7.51	4920	11692	504	3550	1.0	0.6	-	-
15	6.54	640	24118	534	2125	7.92	5020	12796	474	3550	1.0	0.7	-	-
16	7.10	750	24304	250	2125	7.80	4920	12748	480	3725	1.0	0.7	-	-
17	6.88	460	24852	207	2125	7.78	4880	12782	416	3725	1.0	0.7	-	-
18	6.50	460	24722	267	2000	7.66	4790	12730	269	3600	1.0	0.7	-	-
19	6.71	590	22665	207	2025	7.53	5480	12799	416	3725	1.0	0.7	-	-
AVG	6.75	560	24180	290	2080	7.7	5020	12770	410	3665	1.0	0.7	-	-
STD	0.22	110	780	120	60	0.13	240	20	70	75	0	0	-	-

หมายเหตุ AVG และ STD คำนวณตั้งแต่วันที่ 15 - 19

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก. 3 ข้อมูลการทดลองที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 1.3 kg.COD/ m^3.d ระยะเวลาเก็บกัก (HRT) 26 วัน

DAY	INPUT					OUTPUT					FLOW RATE (l/d)	ORGANIC LOADING ($kgCOD/m^3d$)	BIOGAS PRODUCTION RATE (l/d)	% CH_4 - % CO_2
	pH	SS (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	ALK (mg/l)	pH	SS (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	ALK (mg/l)				
1	6.53	570	33182	267	2275	7.60	5670	14236	237	4075	1.5	1.4	-	-
2	6.57	635	33433	315	2175	7.69	5786	14955	303	4009	1.3	1.2	-	-
3	6.12	410	36668	534	1900	7.57	5930	13732	418	3950	1.5	1.6	-	-
4	6.55	515	37170	420	2005	7.60	5666	14030	417	4169	1.3	1.4	-	-
7	7.41	850	28192	302	2000	7.61	6000	14094	334	4092	1.3	1.0	-	-
8	6.48	720	32104	474	2400	7.44	6020	14602	562	4223	1.3	1.2	-	-
9	6.59	640	32947	435	2163	7.55	5500	14573	516	4316	1.3	1.2	-	-
10	6.33	570	30411	652	2175	7.63	5300	15589	504	4400	1.3	1.1	-	-
11	6.50	567	33002	530	2542	7.66	5000	14300	500	4566	1.3	1.2	-	-
14	7.00	1730	30954	296	2775	7.66	5240	14274	415	4775	1.5	1.3	-	-
15	6.50	632	32559	320	2761	7.65	5001	14465	460	4635	1.5	1.4	-	-
16	6.06	960	45837	948	2825	7.69	5170	15529	474	4900	1.0	1.3	-	-
AVG	6.52	900	35590	520	2725	7.67	5120	14640	480	4770	1.3	1.3	-	-
STD	0.33	460	5970	260	110	0.02	90	520	80	125	0.2	0.06	-	-

หมายเหตุ AVG และ STD คำนวณตั้งแต่วันที่ 11 - 16

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก. 5 ข้อมูลการทดลองที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 2.5 kg.COD/ m^3.d ระยะเวลาเก็บกัก (HRT) 20 วัน

DAY	INOUT					OUTPUT					FLOW RATE (l/d)	ORGANIC LOADING (kgCOD/m^3d)	BIOGAS PRODUCTION RATE (l/d)	% CH_4 % CO_2
	pH	SS (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	ALK (mg/l)	pH	SS (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	ALK (mg/l)				
1	6.16	650	40144	497	3050	7.37	2169	21616	273	6050	1.8	2.0	6.9	60/40
2	6.49	560	40656	300	3250	7.47	2200	20946	303	6200	1.8	2.1	6.9	61/39
3	6.54	570	41636	534	3400	7.32	2250	21446	250	6300	1.8	2.1	7.0	61/39
4	6.51	440	42067	845	3400	7.35	2240	22585	273	6200	1.8	2.1	6.9	60/40
5	7.07	530	42597	420	3500	7.43	2054	23039	243	6250	1.8	2.0	6.8	60/40
6	6.03	450	41843	640	3450	7.41	2642	22901	230	6400	1.8	2.1	6.8	61/39
9	6.55	390	43322	660	3500	7.45	2540	23578	225	6750	1.8	2.2	8.0	63/37
10	6.36	250	44296	334	3550	7.44	2900	22344	213	7550	1.8	2.2	7.8	62/38
11	6.54	320	46114	445	3900	7.55	2845	23448	250	7800	1.8	2.3	7.7	65/35
12	6.59	450	45107	575	3900	7.50	2700	24583	270	7800	1.8	2.3	8.0	61/39
15	6.42	560	45097	540	4050	7.50	2500	24627	252	7850	1.8	2.3	8.4	63/37
17	6.24	400	55600	660	4250	7.51	2015	26000	240	7950	1.8	2.6	7.7	66/33
18	6.62	575	53674	534	4600	7.50	1930	26592	300	8000	1.8	2.7	8.7	67/33
22	6.58	660	54305	1320	4650	7.50	1660	25779	300	8075	1.8	2.7	8.6	67/33
24	6.55	670	53105	1337	4750	7.52	2010	27633	304	8450	1.8	2.7	8.7	66/34
30	6.57	1482	48954	1860	4900	7.51	1845	26818	320	9000	1.8	2.5	8.9	68/32
36	6.49	1530	50493	1800	5250	7.67	2025	26471	450	9200	1.8	2.6	9.4	65/35
38	6.52	1174	49062	1500	4700	7.41	1900	26666	330	9200	1.8	2.5	9.0	64/36
43	6.53	1250	49286	1720	4500	7.58	2090	26632	390	9000	1.8	2.5	9.2	63/37
44	6.58	940	48914	1200	4600	7.55	1752	25786	384	9200	1.8	2.5	9.1	66/34
45	6.49	650	48006	1165	4750	7.59	1833	26660	300	8900	1.8	2.5	8.8	66/34
46	6.44	670	49362	475	3500	7.70	1954	26658	300	8900	1.8	2.5	8.9	66/34
48	6.55	695	49074	510	4500	7.62	1742	26466	270	9000	1.7	2.4	8.8	67/33
51	6.58	750	49799	295	4700	7.55	2040	26530	300	9000	1.8	2.5	8.9	66/34
53	6.54	632	49984	500	4600	7.57	1850	26164	300	8900	1.8	2.5	8.8	68/32
57	6.48	650	51050	509	4700	7.59	1750	26136	270	9000	1.7	2.6	9.0	67/33
AVG	6.52	950	49660	1050	4630	7.58	1890	26820	330	9030	1.7	2.6	9.0	66/34
STD	0.04	330	650	580	410	0.07	120	60	90	110	0	0	0.2	- .

หมายเหตุ AVG และ STD คำนวณตั้งแต่วันที่ 30 - 57

ตารางที่ ก. 6 ข้อมูลการทดลองที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 3.3 kg.COD/ m^3.d ระยะเวลาเก็บกัก (HRT) 20 วัน

DAY	INPUT					OUTPUT					FLOW RATE (l/d)	ORGANIC LOADING kgCOD/m^3 d	BIOGAS PRODUCTION RATE (l/d)	% CH_4 % CO_2
	pH	SS (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	ALK (mg/l)	pH	SS (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	ALK (mg/l)				
1	6.69	1630	52566	510	4700	7.54	1710	30142	300	9200	1.8	2.7	9.2	62/38
2	6.70	1540	53872	450	4700	7.60	1752	30160	300	9000	1.8	2.7	9.5	60/40
7	6.41	1377	57832	1440	4400	7.51	1716	32016	300	9278	1.8	2.9	9.9	60/40
8	6.60	1936	61066	780	4132	7.54	1826	32714	270	9000	1.8	3.0	10.2	66/34
9	7.00	2715	65636	660	4575	7.58	2013	34344	270	10000	1.8	3.3	10.4	61/39
10	6.78	3563	61854	600	4471	7.59	2467	33360	276	9136	1.8	3.3	10.2	63/37
11	6.61	3700	66758	600	4650	7.51	2630	33478	270	9900	1.8	3.3	10.1	62/38
14	6.66	4562	66816	540	4736	7.55	2160	34812	240	9900	1.8	3.3	10.8	67/33
15	6.73	4612	66263	540	4643	7.50	2049	35011	270	9650	1.8	3.3	11.1	65/36
16	6.64	4350	65090	1230	5100	7.53	1920	34562	240	9525	1.8	3.3	10.4	64/36
17	6.66	3478	65566	1330	5432	7.52	1822	35354	300	10000	1.8	3.3	10.9	66/36
18	6.59	3692	66244	830	5756	7.53	1835	35621	240	10050	1.8	3.3	12.2	66/34
18.5	6.59	3693	66244	830	5756	7.60	1744	35240	330	9960	1.8	3.3	12.2	64/36
21	6.64	2243	65919	330	5761	7.51	1769	35239	300	10100	1.8	3.3	12.7	66/36
21.5	6.64	2246	65919	330	5761	7.64	1801	35426	270	10100	1.8	3.3	12.7	66/36
22	6.59	2314	66349	330	5846	7.53	1812	35317	300	10000	1.8	3.3	12.9	64/36
22.5	6.59	2314	66349	330	5846	7.50	1760	35440	270	10050	1.8	3.3	12.9	66/36
23	7.03	2619	62152	1318	6450	7.60	1836	35648	330	10700	1.8	3.1	12.7	64/36
23.5	7.03	2619	62152	1318	6450	7.60	1823	35000	300	10050	1.8	3.1	12.7	66/36
25	6.74	2566	66078	360	6750	7.60	1821	36206	330	10100	1.8	3.3	12.7	66/36
25.5	6.74	2566	66078	360	6750	7.6	1817	36311	300	10100	1.8	3.3	12.7	64/36
26	6.66	2320	65842	660	6663	7.58	1818	36262	300	10000	1.8	3.3	13.3	64/36
26.5	6.66	2320	65842	660	6663	7.57	1807	36301	300	10000	1.8	3.3	13.3	66/36
30	6.78	2283	64957	390	6670	7.61	1816	36278	300	10100	1.8	3.3	13.2	66/36
30.5	6.78	2283	64957	390	6670	7.56	1800	36142	303	10100	1.8	3.3	13.2	64/36
AVG	6.74	2370	65000	550	6910	7.55	1810	36310	300	10120	1.8	3.3	13.0	65/36
STD	0.14	120	1325	350	260	0.04	20	200	17	180	0	0.1	0.2	-

หมายเหตุ AVG และ STD คำนวณตั้งแต่วันที่ 21 - 30

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก. 7 ข้อมูลการทดลองที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 5.2 kg.COD/ m^3.d ระยะเวลาเก็บกัก (HRT) 17 วัน

DAY	INPUT					OUTPUT					FLOW RATE (l/d)	ORGANIC LOADING (kg COD/m^3.d)	BIOGAS PRODUCTION RATE (l/d)	% CH_4 % CO_2
	pH	SS (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	ALK (mg/l)	pH	SS (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	ALK (mg/l)				
1	4.34	1618	90709	800	850	7.60	8720	42870	250	11000	2.0	5.2	10.7	65/35
3	4.29	2160	90997	610	720	7.50	8554	41403	300	11600	2.0	5.2	13.6	68/36
4	4.24	2016	90674	540	750	7.60	7965	42758	300	12200	2.0	5.2	14.3	64/36
5	4.35	1953	90698	670	900	7.48	7531	42266	329	10130	2.0	5.2	13.1	62/36
8	4.16	2200	90650	586	675	7.41	7563	42556	480	10600	2.0	5.2	13.1	61/39
9	4.25	2900	89635	660	950	7.50	8240	42016	560	11700	2.0	5.2	16.9	63/37
10	4.23	2810	90651	630	900	7.43	6582	43560	556	10650	2.0	5.2	17.7	65/35
11	4.25	1967	90711	564	900	7.44	7786	43720	676	10750	2.0	5.2	18.9	65/35
12	4.40	2460	89662	642	948	7.54	7563	44696	900	10900	2.0	5.2	19.9	61/39
15	4.39	2940	89640	672	1000	7.56	7700	43833	800	11200	2.0	5.2	21.2	66/35
16	4.37	2816	90602	660	915	7.50	8925	44001	670	11060	2.0	5.2	20.7	66/35
17	4.19	2733	90744	570	970	7.53	8369	43084	548	11100	2.0	5.2	20.9	66/34
18	4.28	2450	90656	654	825	7.52	7036	44901	492	11250	2.0	5.2	21.2	66/34
19	4.17	2781	90653	576	1050	7.53	6546	44878	486	11150	2.0	5.2	21.7	62/36
22	4.40	2559	90400	636	900	7.54	5442	44848	492	11400	2.0	5.2	22.3	66/34
23	4.16	2314	90122	636	815	7.62	6566	44726	474	12100	2.0	5.2	23.9	65/35
24	4.33	2225	90720	654	950	7.48	6203	45142	480	11946	2.0	5.2	23.8	66/34
25	4.13	2350	90406	660	650	7.76	6000	45062	396	12150	2.0	5.2	24.8	68/32
	4.13	2350	90406	660	650	7.61	6129	45042	402	12000	2.0	5.2	26.2	68/32
26	4.10	2785	90645	660	750	7.50	6068	45060	402	12060	2.0	5.2	25.0	67/33
	4.10	2785	90645	660	750	7.52	6066	45013	396	12100	2.0	5.2	25.3	68/32
27	4.16	2900	90700	654	725	7.53	5963	45032	402	12150	2.0	5.2	24.7	68/32
	4.16	2900	90700	654	725	7.51	6005	45058	402	12100	2.0	5.2	24.6	66/32
28	4.25	2663	90698	670	825	7.50	6046	45060	396	12150	2.0	5.2	25.3	68/32
	4.25	2663	90695	670	825	7.50	6073	45047	402	12150	2.0	5.2	25.8	68/32
AVG	4.16	2670	90690	660	740	7.55	6060	45060	400	12110	2.0	5.2	25.0	68/32
STD	0.06	206	110	8	80	0.09	80	20	2	80	0	0	0.2	-

หมายเหตุ AVG และ STD คำนวณตั้งแต่วันที่ 25 - 28

ตารางที่ ก. 8 ข้อมูลการทดลองที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 7.1 kg.COD/ m^3.d ระยะเวลาเก็บกัก (HRT) 16 วัน

DAY	INPUT					OUTPUT					FLOW RATE (Vd)	ORGANIC LOADING ($kgCOD/m^3 d$)	BIOGAS PRODUCTION RATE (Vd)	% CH_4 / % CO_2
	pH	SS (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	ALK (mg/l)	pH	SS (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	ALK (mg/l)				
1	3.90	2680	91993	650	-	7.51	6548	47268	496	11950	2.2	5.8	13.2	62/38
2	4.00	2900	95624	648	-	7.53	6641	49613	540	11800	2.2	6.1	18.4	64/36
3	4.00	3897	99627	656	-	7.60	6936	48286	720	12650	2.2	6.3	26.1	66/36
4	4.12	5020	101250	669	50	7.47	7511	50125	674	12450	2.2	6.4	32.7	66/36
5	4.00	5234	112600	690	-	7.56	7324	49128	780	12800	2.2	7.2	36.6	64/36
6	4.06	5179	112406	664	-	7.60	7469	51299	840	12850	2.2	7.1	33.2	60/40
9	4.06	5246	112997	672	-	7.53	2011	53251	810	12600	2.2	7.2	34.1	62/38
10	4.15	5199	112676	706	50	7.42	7960	55600	670	12650	2.2	7.2	33.4	63/37
11	4.06	5250	111210	696	-	7.40	8146	56150	900	12800	2.2	7.1	36.4	63/37
12	3.95	5222	113303	600	-	7.59	8020	56290	674	12600	2.2	7.2	34.3	63/37
13	4.13	5146	113240	690	50	7.56	8270	56690	780	12650	2.2	7.2	33.4	61/39
16	4.17	5182	113032	706	78	7.53	8110	56776	720	12700	2.2	7.2	32.9	62/38
16	4.11	5034	112954	664	50	7.60	8056	56640	540	13000	2.2	7.2	34.1	64/36
17	4.10	5147	106971	678	50	7.45	8234	60001	450	12900	2.2	6.9	33.9	62/38
18	4.06	5256	113747	678	-	7.47	8211	62124	432	13050	2.2	7.2	34.5	61/39
22	4.02	5250	106056	660	-	7.54	8009	63604	367	13150	2.2	6.7	34.8	61/39
23	4.12	5048	113321	690	50	7.60	7147	63401	360	13600	2.2	7.2	34.7	60/40
24	4.15	5201	109929	667	75	7.56	8290	62960	450	13250	2.2	7.0	34.9	60/40
26	4.17	5173	113471	668	75	7.49	8300	63148	420	13200	2.2	7.2	34.0	62/38
	4.17	5173	113471	668	-	7.52	8212	63016	426	13300	2.2	7.2	36.5	62/38
25	4.12	5096	110016	672	50	7.46	8273	62000	390	13250	2.2	7.0	36.4	66/36
	4.12	5096	110016	672	-	7.47	8221	62320	406	13200	2.2	7.2	36.0	66/36
29	4.06	5002	112907	660	50	7.52	8260	62316	402	13350	2.2	7.2	36.2	64/36
	4.06	5002	112907	660	50	7.46	8097	62148	396	13300	2.2	7.1	35.2	64/36
30	4.11	5210	110461	664	-	7.51	8160	62540	406	13050	2.2	7.0	36.8	63/37
	4.11	5210	110461	664	-	7.45	8120	62321	390	13200	2.2	7.2	36.0	63/37
31	4.17	5146	113289	600	-	7.50	8139	62472	402	13300	2.2	7.2	36.1	62/38
AVG	4.12	5130	111690	670	-	7.50	8206	62530	410	13240	2.2	7.1	36.1	63/37
STD	0.04	75	1540	26	30	0.03	70	370	20	80	0	0.1	0.4	-

หมายเหตุ AVG และ STD คำนวณตั้งแต่วันที่ 24 - 31

ตารางที่ ก. 9 ข้อมูลการทดลองที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 10.1 kg.COD/ m^3.d ระยะเวลาเก็บกัก (HRT) 11 วัน

DAY	INPUT					OUTPUT					FLOW RATE	ORGANIC LOADING	BIOGAS PRODUCTION	% CH_4
	pH	SS (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	ALK (mg/l)	pH	SS (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	ALK (mg/l)	(l/d)	(kgCOD/m^3d)	RATE (Vd)	% CO_2
1	4.01	5197	113716	656	-	7.30	8641	62016	396	13500	2.5	8.2	33.8	66/36
2	4.06	5250	114002	690	-	7.40	8630	62261	396	13000	2.6	8.3	34.4	61/39
3	4.05	5278	113622	672	-	7.30	8916	63935	396	13050	2.7	8.9	36.4	60/40
5	4.10	5246	112959	650	-	7.20	8642	63267	402	13150	2.9	9.4	36.8	60/40
7	4.11	5169	112991	672	-	7.20	9781	65200	408	13500	3.0	9.8	36.0	59/41
8	4.07	5096	113756	666	-	7.10	9600	64160	420	13250	3.0	9.8	33.2	60/40
9	4.06	5150	114100	684	-	7.20	9535	65001	504	12700	3.0	9.8	34.1	63/37
10	3.99	5217	110996	500	-	7.20	9550	63436	510	13250	3.1	9.9	33.4	61/39
15	4.12	5286	112846	668	-	7.20	9926	63468	546	13200	3.1	10.1	36.4	62/38
16	4.11	5214	114094	684	-	7.20	10660	63566	600	13350	3.1	10.2	34.3	62/38
19	4.03	5165	114078	706	-	7.10	9720	63422	486	13300	3.1	10.2	32.4	60/40
20	4.04	5232	113991	672	-	7.20	9340	63151	507	13050	3.1	10.2	32.9	64/36
21	4.02	5204	112786	684	-	7.30	10930	65037	504	13200	3.1	10.1	34.1	62/38
22	4.00	5119	114000	690	-	7.20	10302	63176	492	13300	3.1	10.2	33.9	60/40
	4.00	5119	114000	690	-	7.25	10720	63250	496	13300	3.1	10.2	34.2	60/40
23	4.13	5154	114037	670	-	7.20	10100	62896	492	13250	3.1	10.2	34.2	59/41
	4.13	5154	114037	670	-	7.20	11002	63107	492	13000	3.1	10.2	34.7	59/41
26	4.20	5078	113910	612	-	7.34	11330	63418	504	13200	3.1	10.2	34.9	62/38
	4.20	5078	113910	612	-	7.16	11230	63370	492	12900	3.1	10.2	34.6	62/38
27	4.17	5210	112718	640	-	7.27	11480	63284	504	13250	3.1	10.1	36.8	61/39
	4.17	5210	112718	640	-	7.20	11235	63376	486	13250	3.1	10.1	36.4	61/39
28	4.11	5194	112460	650	-	7.15	11301	63421	486	13200	3.1	10.1	36.0	61/39
	4.11	5194	112460	650	-	7.14	11227	63410	486	13250	3.1	10.1	36.2	61/39
29	4.02	5244	113210	612	-	7.20	11118	63406	486	13200	3.1	10.1	36.2	61/39
	4.02	5244	113210	612	-	7.20	11200	63417	492	13200	3.1	10.1	36.8	61/39
30	4.11	5215	112500	606	-	7.20	11172	63418	486	13250	3.1	10.1	36.0	61/39
AVG	4.10	5320	113260	660	-	7.22	11030	63430	490	13200	3.1	10.1	34.8	61/39
STD	0.07	310	640	30	-	0.06	300	490	9	110	0	0.1	0.8	-

หมายเหตุ AVG และ STD คำนวณตั้งแต่วันที่ 21 - 30

ตารางที่ ก. 10 ข้อมูลการทดลองที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 12.8 kg.COD/ m^3.d ระยะเวลาเก็บกัก (HRT) 9 วัน

DAY	INPUT					OUTPUT					FLOW RATE (l/d)	ORGANIC LOADING (kgCOD/m^3.d)	BIOGAS PRODUCTION RATE (l/d)	% CH_4 / % CO_2
	pH	SS (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	ALK (mg/l)	pH	SS (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	ALK (mg/l)				
1	4.11	5230	110260	650	-	7.05	10470	65356	660	13050	4.0	12.7	39.8	60/40
2	4.13	5190	110173	660	-	7.11	10511	65500	720	13200	4.0	12.7	32.4	57/43
3	4.20	5250	110060	648	-	7.00	10538	66714	690	12600	4.0	12.8	38.2	56/45
4	4.08	5230	111034	650	-	7.20	10531	67222	696	12150	4.0	12.8	34.8	60/30
5	4.12	5200	110950	708	-	7.01	10527	69141	720	11946	4.0	12.8	32.9	53/48
9	4.05	5196	110893	660	-	7.11	10706	68634	750	12000	4.0	12.8	32.8	50/50
10	4.05	5176	111328	668	-	7.15	10618	69278	750	11700	4.0	12.8	30.2	50/50
11	4.03	5189	110657	708	-	7.06	10620	71453	750	11700	4.0	12.8	29.7	51/48
15	4.03	5212	110561	690	-	7.12	11911	72218	750	11250	4.0	12.7	31.1	48/52
16	4.11	5170	110580	696	-	7.05	11600	75190	810	11400	4.0	12.8	28.2	43/58
17	4.10	5222	111373	667	-	7.04	11906	73935	816	11050	4.0	12.8	26.8	50/50
21	4.06	5183	110611	668	-	7.00	11934	76687	840	10000	4.0	12.8	26.8	49/51
22	4.15	5214	110534	684	-	7.02	11858	77693	900	10100	4.0	12.8	24.4	47/53
23	4.04	5176	111319	672	-	7.10	12103	78081	1200	10100	4.0	12.8	22.7	50/50
24	4.05	5201	110504	708	-	6.94	12516	79124	1560	10100	4.0	12.7	21.2	51/49
25	4.06	5206	110692	708	-	6.87	12371	78228	1380	10130	4.0	12.8	22.8	49/51
28	4.02	5241	110795	672	-	6.75	13567	78128	2100	10130	4.0	12.8	21.4	48/52
30	4.09	5179	110661	684	-	7.01	15070	78245	2340	10093	4.0	12.8	21.2	48/52
32	4.06	5244	111342	690	-	6.94	15615	79014	3180	10100	4.0	12.8	18.4	48/52
35	4.10	5217	110554	668	-	7.01	16730	83370	3340	9950	4.0	12.7	10.1	48/52
37	4.02	5224	111456	684	-	7.01	16829	86697	3710	10050	4.0	12.8	9.2	43/57
39	4.03	5156	111347	684	-	7.02	19037	90196	3770	10100	4.0	12.8	9.8	44/56
42	4.08	5221	110412	690	-	6.87	17994	88102	3628	9960	4.0	12.7	8.9	48/52
44	4.05	5230	111307	670	-	7.01	19006	87854	3834	9950	4.0	12.8	8.1	44/56
46	4.04	5214	111133	672	-	7.00	18868	84443	3684	9900	4.0	12.8	7.4	43/57
48	4.02	5240	110546	684	-	6.93	17980	89718	3900	9200	4.0	12.7	4.4	42/58
51	4.03	5190	111390	660	-	6.84	18794	95180	3864	9136	4.0	12.8	6.9	48/52
53	4.05	5247	110025	668	-	6.85	18609	96590	3900	9200	4.0	12.7	7.8	44/56
AVG	4.05	5220	110940	680	-	6.95	18180	90790	3780	9710	4.0	12.8	8.8	43/57
STD	0.03	30	440	10	-	0.07	910	3500	120	380	0	0.1	1.8	-

หมายเหตุ AVG และ STD คำนวณตั้งแต่วันที่ 35 - 53

LIBRARY
The Petroleum and Petrochemical College
Chulalongkorn University