

การดึงอะตอมคลอรีนจากน้ำเสียโพลีเมอร์โดยระบบสัมผัสแอนแอโรบิก

นาย ประยงค์ กิรติอุไร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-533-056-6

**DECHLORINATION OF POLYMER WASTEWATER USING ANAEROBIC
CONTACT PROCESS**

Mr. Prayong Keeratiurai

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of

Master of Engineering in Environmental Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2001

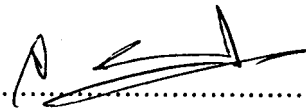
ISBN 974-533-056-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การดั่งอะตอมคลอรีนจากน้ำเสียโพลีเมอร์โดยระบบสัมผัสแอนแอโรบิก
(DECHLORINATION OF POLYMER WASTEWATER USING ANAEROBIC CONTACT
PROCESS)

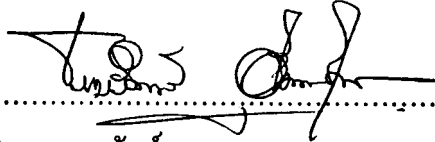
สภามหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



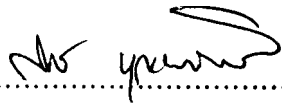
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จงจินต์ ผลประเสริฐ)

ประธานกรรมการ/อาจารย์ที่ปรึกษา



(ดร. ชรรมรัตน์ กุตตะเทพ)

กรรมการ



(ดร. สาโรช บุญกิจสมบัติ)

กรรมการ



(รองศาสตราจารย์ ดร. ทวิช จิตรสมบูรณ์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ



(รองศาสตราจารย์ น.อ.ดร. วรพจน์ จำพิศ)

คณบดี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ประยงค์ กิระดิอุไร : การดึงอะตอมคลอรีนจากน้ำเสียโพลิเมอร์โดยระบบสัมผัสแอนแอโรบิก (DECHLORINATION OF POLYMER WASTEWATER USING ANAEROBIC CONTACT PROCESS) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. จงจินต์ ผลประเสริฐ, 97 หน้า.
ISBN 974-533-056-6

การศึกษาวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายในการกำจัด Dichloromethane (CH_2Cl_2) [หรือ Methylene chloride \equiv MC] และ Chlorobenzene ($\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$) [CB] ในน้ำเสียโพลิเมอร์สังเคราะห์โดยใช้ระบบแอนแอโรบิกทั้งในสภาพที่มีซัลเฟตและไม่มีซัลเฟต และเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของ MC และ CB ที่มีต่อการผลิตแก๊สมีเทน

พบว่าในสภาพไม่มีซัลเฟตมีประสิทธิภาพการบำบัด COD ประมาณ 83% ในขณะที่ถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตอยู่ด้วยมีประสิทธิภาพในการบำบัด COD ได้เพียงแค่ประมาณ 50% เท่านั้นแต่ซัลเฟตก็มีส่วนช่วยในการบำบัด MC+CB โดยในสภาพที่มีซัลเฟตสามารถย่อยสลาย MC และ CB ได้ดีกว่าในสภาพไม่มีซัลเฟตประมาณ 10% และยังพบอีกว่าปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อการเกิดแก๊สชีวภาพคือ ซัลเฟต โดยซัลเฟตจะทำให้การเกิดแก๊สชีวภาพลดลงถึง 50% ในขณะที่ MC+CB มีผลกระทบต่อการเกิดแก๊สชีวภาพน้อยกว่าซัลเฟตโดย MC+CB ทำให้ปริมาตรของแก๊สมีเทนลดลงเพียง 6 % เท่านั้นและนอกจากนี้ซัลไฟด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาลดซัลเฟต และ MC+CB เป็นสารยับยั้งกับระบบแอนแอโรบิกนี้ ซึ่งชนิดของการยับยั้งที่เกิดขึ้นนี้เป็นแบบ Competitive Inhibition

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนักศึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

PRAYONG KEERATIURAI : DECHLORINATION OF POLYMER WASTEWATER
USING ANAEROBIC CONTACT PROCESS THESIS ADVISOR : CHONGCHIN
POLPRASERT, Ph.D. 97 PP. ISBN 974-533-056-6

DECHLORINATION/POLYMER WASTEWATER/ANAEROBIC PROCESS

This study was aimed at the degradation of Dichloromethane (CH_2Cl_2) [or Methylene chloride \equiv MC] and Chlorobenzene ($\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$) [CB] contained in the polymer wastewater, using an anaerobic process in the presence and absence of sulfate, to determine the effects on methane production.

Without sulfate addition, 83% of COD could be removed, while 50% of COD removal was achieved with sulfate addition. Nevertheless, the presence of sulfate in the reactor enhanced the degradation of MC and CB to be 10% better than did the absence of sulfate. The amount of biogas generated was 50% decreased with sulfate but, with MC and CB, it was 6% less than that of the control reactor. Both sulfide produced from the biological sulfate-reduction reaction and MC and CB imposed the competitive inhibition on the reactor performance of COD removal.

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนักศึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่างๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย อาทิเช่น

- ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย
- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จงจินต์ ผลประเสริฐ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์/ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
- ดร. ธรรมรัตน์ กุดตะเทพ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์
- ดร. สาโรช บุญยกิจสมบัติ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์
- คุณ มานพ จร โลกกรวด ที่ให้การช่วยเหลือด้านการดำเนินงานวิจัย

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การเลี้ยงดูอบรมและส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีตลอดมาในอดีต จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

ประยงค์ กิรติอุไร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ สมมติฐานและขอบเขตงานวิจัย.....	3
2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ระบบบำบัดแอนแอโรบิก.....	4
2.2 ทฤษฎีของระบบแอนแอโรบิก.....	5
2.3 ปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่สำคัญต่อระบบแอนแอโรบิก.....	8
2.3.1 อุณหภูมิ.....	9
2.3.2 pH และค่าความเป็นด่าง.....	10
2.3.3 ภาระบรรทุก.....	11
2.3.4 สารที่เป็นพิษ.....	11
2.4 คลอรีเนตเต็ดไฮโดรคาร์บอน.....	14
2.4.1 การย่อยสลายสารประกอบฮาโลเจน.....	15
2.4.2 ลำดับขั้นปฏิกิริยาย่อยสลายทางชีวภาพพวกสารประกอบฮาโลเจน.....	16
2.5 จลนศาสตร์ของการยับยั้ง.....	18
2.5.1 การยับยั้ง.....	18

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	20
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย.....	20
3.2 ขั้นตอนในการเริ่มต้นระบบโดยการเลี้ยงจุลินทรีย์.....	20
3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	21
3.3.1 น้ำเสียและสารแปลกปลอมที่ป้อนเข้าสู่ระบบ.....	21
3.3.2 ระยะเวลาเก็บกัก.....	22
3.3.3 การควบคุม pH และอุณหภูมิ.....	23
3.4 การวิเคราะห์การทดลอง.....	23
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผล.....	24
4.1 การตรวจสอบระบบ CSTR.....	24
4.2 ลักษณะของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบ.....	25
4.3 การประเมินผลประสิทธิภาพของระบบสัมผัสแอนแอโรบิก.....	26
4.3.1 อุณหภูมิและ pH.....	32
4.3.2 ประสิทธิภาพการบำบัด COD.....	32
4.3.3 ประสิทธิภาพการลดซัลเฟต.....	32
4.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างซัลไฟด์และซัลเฟต.....	35
4.3.5 ประสิทธิภาพการบำบัด CB และ MC.....	38
4.3.6 การเกิดแก๊สชีวภาพ.....	41
4.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์.....	52
4.4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	52
4.4.2 ค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์.....	53
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	60
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	60
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	60
รายการอ้างอิง.....	62

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. แสดงข้อมูลกรดไขมันระเหย.....	64
ภาคผนวก ข. แสดงการหาค่าของ COD เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่.....	66
ภาคผนวก ค. แสดงร้อยละประสิทธิภาพของแต่ละถังปฏิกรณ์.....	71
ภาคผนวก ง. แสดงค่าตัวแปรต่างๆทั้งน้ำเข้า-ออกของถังปฏิกรณ์ต่างๆ.....	73
ภาคผนวก จ. แสดงประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ที่ระยะเวลาเก็บกักต่างๆ.....	78
ภาคผนวก ฉ. แสดงการวิเคราะห์สมดุลมวลเพื่อหา %บำบัดCOD _{จากไดเอรท} และ ประสิทธิภาพการบำบัด CB และ MC ในสภาพต่างๆ.....	81
ภาคผนวก ช. แสดงปริมาณและองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพที่ถังปฏิกรณ์ต่างๆ.....	86
ภาคผนวก ซ. แสดงปริมาณและองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพที่ระยะเวลาเก็บกักต่างๆ.....	89
ภาคผนวก ฌ. แสดงปริมาณและองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพจากสมดุลมวล.....	91
ภาคผนวก ญ. แสดงการเปรียบเทียบปริมาณและองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพที่เกิดจริงกับสมดุลมวล.....	94
ประวัติผู้เขียน.....	97

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงอ็อนประจุบวกที่เป็นซินเนอจิสติกหรือแอนทาโกนิสติก.....	12
2.2 แสดงความเข้มข้นของสารยับยั้งในกระบวนการสร้างมีเทน.....	13
2.3 แสดงความเข้มข้นของคลอรีนเตีคไฮโดรคาร์บอนที่ทำให้เกิดการยับยั้ง.....	15
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการย่อยสลายไฮโดรคาร์บอนและโครงสร้างโมเลกุลคลอรีน.....	16
3.1 แสดงลักษณะถึงปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการบำบัดแอนแอโรบิค.....	20
3.2 แสดงลักษณะน้ำเสียสังเคราะห์ในแต่ละถึงปฏิกิริยา.....	22
3.3 แสดงตัวแปรและวิธีการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสีย.....	23
4.1 แสดงค่าตัวแปรของน้ำเสียที่เข้าระบบในแต่ละถึงปฏิกิริยา.....	26
4.2 แสดงร้อยละการระเหยและการย่อยสลายทางชีวภาพ.....	46
4.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ของถึงปฏิกิริยาต่างๆ.....	54
4.4 แสดงค่าความเข้มข้นและค่าคงที่ของสารยับยั้งแบบ Competitive Inhibition.....	59

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	แสดงขั้นตอนการหมักแก๊สชีวภาพ.....5
2.2	แสดงถังหมักแอนแอโรบิกแบบต่างๆ.....9
2.3	แสดงผลของอุณหภูมิต่อการเกิดแก๊ส.....10
2.4	แสดงขั้นตอนการย่อยสลายทางชีวภาพของสารประกอบฮาโลเจน.....17
3.1	แสดงถังปฏิกรณ์แอนแอโรบิกที่ใช้ในการวิจัย.....21
4.1	แสดงประสิทธิภาพการบำบัดของถังปฏิกรณ์ที่ HRT 10 วัน.....28
4.2	แสดงประสิทธิภาพการบำบัดของถังปฏิกรณ์ที่ HRT 7 วัน.....29
4.3	แสดงประสิทธิภาพการบำบัดของถังปฏิกรณ์ที่ HRT 5 วัน.....30
4.4	แสดงประสิทธิภาพการบำบัดของถังปฏิกรณ์ที่ HRT 2 วัน..... 31
4.5	ความสัมพันธ์ของ COD_{out} กับถังปฏิกรณ์ที่ HRT ต่างๆ.....33
4.6	แสดงประสิทธิภาพในการบำบัด COD ของถังปฏิกรณ์ต่างๆ.....34
4.7	ความสัมพันธ์ของซัลเฟตกับถังปฏิกรณ์ที่ HRT ต่างๆ..... 36
4.8	แสดงประสิทธิภาพในการลดซัลเฟต.....37
4.9	ความสัมพันธ์ของซัลไฟด์กับถังปฏิกรณ์ที่ HRT ต่างๆ.....39
4.10	แสดงประสิทธิภาพการบำบัด CB MC และซัลเฟตในสภาพต่างๆ.....40
4.11	แสดงปริมาณและองค์ประกอบแก๊สชีวภาพของถังปฏิกรณ์ควบคุม.....42
4.12	แสดงปริมาณและองค์ประกอบแก๊สชีวภาพของถังปฏิกรณ์ที่ใส่ CB+MC+ซัลเฟต.....43
4.13	แสดงปริมาณและองค์ประกอบแก๊สชีวภาพของถังปฏิกรณ์ที่ใส่ CB+MC.....44
4.14	แสดงปริมาณและองค์ประกอบแก๊สชีวภาพของถังปฏิกรณ์ควบคุม+ซัลเฟต.....45
4.15	แสดงปริมาณและองค์ประกอบแก๊สชีวภาพของถังปฏิกรณ์ต่างๆที่ HRT 10 วัน.....47
4.16	แสดงปริมาณและองค์ประกอบแก๊สชีวภาพของถังปฏิกรณ์ต่างๆที่ HRT 7 วัน.....48
4.17	แสดงปริมาณและองค์ประกอบแก๊สชีวภาพของถังปฏิกรณ์ต่างๆที่ HRT 5 วัน.....49
4.18	แสดงปริมาณและองค์ประกอบแก๊สชีวภาพของถังปฏิกรณ์ต่างๆที่ HRT 2 วัน.....50
4.19	แสดงการหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ K_s และ k ของถังปฏิกรณ์ควบคุม.....55
4.20	แสดงการหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ K_s และ k ของถังปฏิกรณ์ที่ใส่

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
CB+MC+ซัลเฟต.....	56
4.21 แสดงการหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ K_s และ k ของถังปฏิกรณ์ที่ใส่ CB+MC.....	57
4.22 แสดงการหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ K_s และ k ของถังปฏิกรณ์ควบคุม+ซัลเฟต.....	58

อธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

BOD	=	ความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (Biochemical Oxygen Demand)
COD	=	ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (Chemical Oxygen Demand)
CB	=	Chlorobenzene (C_6H_5Cl)
CB*	=	Chlorobenzene ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 50 ppm
CB**	=	Chlorobenzene ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 150 ppm
CSTR	=	Completely-Stirred Tank Reactor
HRT	=	ระยะเวลาเก็บกัก (Hydraulic Retention Time)
MC	=	Methylene Chloride หรือ Dichloromethane (CH_2Cl_2)
MC*	=	Methylene Chloride ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 30 ppm
MC**	=	Methylene Chloride ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 90 ppm
MLVSS	=	Mixed Liquor Volatile Suspended Solids
SRB	=	Sulfate Reducing Bacteria
TDS	=	ของแข็งละลายทั้งหมด (Total Dissolved Solids)
TKN	=	Total Kjeldahl Nitrogen
TS	=	ของแข็งทั้งหมด (Total Solids)
TSS	=	ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids)
TVS	=	ของแข็งระเหยทั้งหมด (Total Volatile Solids)
VDS	=	ของแข็งละลายระเหย (Volatile Dissolved Solids)
VOC _s	=	สารอินทรีย์ระเหย (Volatile Organic Compounds)
VSS	=	ของแข็งแขวนลอยระเหย (Volatile Suspended Solids)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ปัญหาความเสื่อมโทรมของทรัพยากรธรรมชาติได้ปรากฏให้เห็นเด่นชัดมากขึ้นตามการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมที่เกิดขึ้น โดยที่อุตสาหกรรมในแต่ละประเภทก็จะมีลักษณะของน้ำเสียที่แตกต่างกันออกไป น้ำเสียจากบางอุตสาหกรรมอาจมีสารพิษที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมเช่น น้ำเสียโพลีเมอร์ซึ่งเป็นน้ำเสียประเภทหนึ่งที่บางอุตสาหกรรมไม่สามารถบำบัดให้ได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม เนื่องจากมีสารเคมีซึ่งยากต่อการบำบัดปนเปื้อนอยู่เป็นจำนวนมากรวมทั้งสารประกอบพวกฮาโลเจนซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และยังเป็นสารที่มีโครงสร้างโมเลกุลที่ซับซ้อนยากต่อการบำบัดเช่น สารจำพวก Methylene Chloride หรือ Dichloromethane (CH_2Cl_2) [MC] และ Chlorobenzene ($\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$) [CB] โดยสารดังกล่าวเป็นสารประกอบฮาโลเจนที่ปนอยู่ในน้ำเสียโพลีเมอร์ซึ่งสารทั้งสองชนิดถูกจัดเป็นสารตัวทำลายที่เสื่อมคุณภาพ โดยกฎหมายกำหนดให้ต้องทำลายฤทธิ์ บำบัด หรือ ฝัง และจากข้อมูลน้ำเสียที่ปล่อยออกจากโรงงานอุตสาหกรรมพลาสติกพบว่า สารทั้งสองชนิดนี้มีความเข้มข้นค่อนข้างสูง และยังเป็นค่ามาตรฐานของ The Organic Chemical, Plastic and Synthetic Fiber Industries (OCPSF) อีกด้วย (EPA, 1987)

ปัญหาน้ำเสียดังกล่าวที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นปัญหาเรื้อรังที่ยังไม่สามารถแก้ไขได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากการแก้ไขปัญหาล้างสิ่งแวดล้อมจำเป็นต้องใช้เวลาและต้องมีความต่อเนื่องในการดำเนินการแก้ปัญหาดังกล่าวอย่างจริงจัง จึงจะทำให้สามารถประสบผลสำเร็จได้ จึงทำให้โรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ที่มีน้ำเสียประเภทนี้ต้องส่งไปบำบัดที่บริษัทรับบำบัดของเสียอันตราย เพื่อที่จะบำบัดสารดังกล่าวทำให้โรงงานทั้งหลายต้องเสียค่าใช้จ่ายในส่วนนี้เพิ่มมากขึ้น

ในความเป็นจริงแล้ว น้ำเสียพวกนี้จะเกิดจากกลุ่มอุตสาหกรรมเคมี พลาสติก และการสังเคราะห์เส้นใยไฟเบอร์เป็นต้น ซึ่งน้ำเสียโพลีเมอร์เหล่านี้มีองค์ประกอบทางเคมีที่เป็นพิษและมีโครงสร้างโมเลกุลที่ซับซ้อนเช่นธาตุดูโอโลหะจำพวกคลอรีนทำให้มีความยากลำบากในการที่จะจัดการน้ำเสียดังกล่าวให้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุดและให้มีต้นทุนในการบำบัดต่ำที่สุด โดยจะเห็นได้ว่าปัญหาดังกล่าวของน้ำเสียโพลีเมอร์นี้เกิดจากองค์ประกอบที่ซับซ้อนของคลอรีนที่เรา รู้จักกันดีได้แก่ ปัญหาที่เกิดจากดีดีที จากยาฆ่าแมลง และปัญหาที่เกิดจากอุตสาหกรรม

ผลิตสารทำละลาย (Solvents) ทั้งนี้องค์ประกอบของคลอรีนที่ซับซ้อนดังกล่าวสามารถที่จะถูกทำให้เป็นองค์ประกอบอย่างง่ายได้โดยการย่อยสลายทางชีวภาพ (Kobayashi and Rittmann, 1982) และกระบวนการสัมผัสแบบแอนแอโรบิกก็เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของคลอรีนที่ซับซ้อนนี้ให้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด และยังได้ผลพลอยได้ในรูปของพลังงานแก๊สมีเทนอีกด้วย Sufita et al (1982) ได้กล่าวสนับสนุนไว้ว่า การลดธาตุอโลหะจำพวกคลอรีนที่มีโครงสร้างซับซ้อนให้เป็นโครงสร้างคลอรีนอะตอมอย่างง่ายจะสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของระบบชีววิทยาหรือการย่อยสลายทางกระบวนการชีววิทยา ซึ่งการลดหรือการดึงอะตอมของคลอรีน (Dechlorination) นี้จะเป็นการช่วยลดความเป็นพิษที่เกิดกับสิ่งแวดล้อมได้โดยการดึงอะตอมของคลอรีนเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการบำบัดน้ำเสียซึ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่มซัลไฟด์เข้าไปในน้ำเสียเพื่อบำบัดหรือลดคลอรีนอิสระหรือคลอรีนผสม อันเป็นการลดความเป็นพิษที่เกิดจากคลอรีนในน้ำเสีย ซึ่งกระบวนการดึงอะตอมคลอรีนนี้สามารถทำให้สำเร็จโดยการเพิ่มแก๊ส SO_2 ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปเป็น $\text{HSO}_3^-/\text{SO}_3^{2-}$ อย่างรวดเร็วในสภาวะ pH ที่เป็นกลาง (White, 1992; Nagel, 1994) องค์ประกอบของซัลเฟอร์จะทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับคลอรีนอิสระ (Fogelman et al, 1989) และกับสารอนินทรีย์ชนิดคลอรามิน NH_2Cl NHCl_2 และ NCl_3 (Yiin et al, 1987; Yiin and Margerum, 1990) โดยทั่วไปจะพบว่าระบบของการดึงอะตอมคลอรีนจะใช้เวลาอย่างรวดเร็วประมาณไม่เกิน 5 นาที หลังจากที่เราเพิ่ม SO_2 ด้วยวิธีการผสมทางกายภาพและเชื่อได้ว่ากระบวนการนี้เป็นวิธีในการบำบัดหรือทำลายพันธะที่ซับซ้อนของคลอรีนให้เป็นพันธะอย่างง่าย (Nagel, 1994)

สำหรับงานวิจัยของคนไทยที่เกี่ยวกับการดึงอะตอมของคลอรีนจากน้ำเสียโพลิเมอร์ โดยกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากจากระบบแอนแอโรบิกยังไม่มีการทดลองวิจัยเลยพบแต่เพียงการทดลองเฉพาะน้ำเสียที่ย่อยสลายง่ายธรรมดาเท่านั้น

จากงานวิจัยที่กล่าวมาทั้งหมดจะเห็นได้ว่ามีความเป็นไปได้อย่างมากที่การวิจัยในเรื่องนี้จะประสบความสำเร็จดังนั้นก็มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการศึกษาวิจัยและพัฒนาในเรื่องที่เกี่ยวกับการดึงอะตอมคลอรีนจากน้ำเสียโพลิเมอร์โดยระบบแอนแอโรบิก (Dechlorination of Polymer Wastewater Using Anaerobic Process) โดยการศึกษาถึงสารประกอบจำพวก Dichloromethane และ Chlorobenzene ซึ่งสารทั้งสองชนิดนี้เป็นสารที่มีความเข้มข้นค่อนข้างสูงในน้ำเสียที่ออกจากโรงงานอุตสาหกรรมพลาสติกเป็นส่วนใหญ่ (EPA, 1987) เพื่อใช้ในการพัฒนาเทคโนโลยีในการจัดการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมซึ่งจะทำให้สามารถช่วยลดต้นทุนในการจัดการน้ำเสียที่มีองค์ประกอบซับซ้อนและยังก่อให้เกิดผลพลอยได้ในรูปของพลังงานอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์หลักของการศึกษาวิจัยนี้คือ:

- 1.2.1) เพื่อศึกษาเปรียบเทียบถึงการย่อยสลายของปริมาณ Dichloromethane และ Chlorobenzene ในสภาพที่มีซัลเฟตและปราศจากซัลเฟตโดยระบบแอนแอโรบิก
- 1.2.2) เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของ Dichloromethane และ Chlorobenzene ในกระบวนการผลิตแก๊สมีเทน

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

สมมติฐานของการศึกษาวิจัยนี้คือ

- 1.3.1) การดึงอะตอมคลอรีนจากน้ำเสียโพลีเมอร์สามารถทำได้โดยระบบแอนแอโรบิก
- 1.3.2) การดึงอะตอมคลอรีนจากน้ำเสียโพลีเมอร์ออกนี้ ทำให้ความเป็นพิษลดลง

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตของการศึกษาวิจัยนี้คือ

- 1.4.1) วิเคราะห์ค่าของพารามิเตอร์ต่อไปนี้ : CB, MC, ซัลเฟต, ซัลไฟด์, COD , แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ , แก๊สมีเทน และอัตราการเกิดแก๊สชีวภาพ
- 1.4.2) เปรียบเทียบค่า COD ในกรณีที่เติมซัลเฟตและไม่เติมซัลเฟต
- 1.4.3) หาประสิทธิภาพในการย่อยสลายของ CB, MC
- 1.4.4) ประเมินหาผลกระทบของการยับยั้งแบคทีเรียก่อมีเทนที่เกิดจาก CB และ MC
- 1.4.5) เปรียบเทียบปริมาณและองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นจริงและจากการสมมูลมวล
- 1.4.6) หาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ของถังปฏิกรณ์ต่างๆ

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบบำบัดแบบแอนแอโรบิก

ระบบบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีแอนแอโรบิกเป็นวิธีที่ไม่ต้องเติมอากาศหรือที่เรียกว่า ระบบไม่ใช้อากาศหรือถังหมัก ระบบนี้เริ่มนิยมใช้กันแพร่หลายมากขึ้นเรื่อยๆ เพราะสามารถประหยัดพลังงานในการเติมอากาศ และยังสามารถผลิตพลังงานที่เพิ่มขึ้นจากระบบนี้เป็นแก๊สมีเทน (Methane Gas) เป็นต้น ซึ่งเป็นแก๊สที่ใช้ในการหุงต้มอาหารได้ และใช้ในการค้ำน้ำในหม้อน้ำของโรงงานอุตสาหกรรมได้

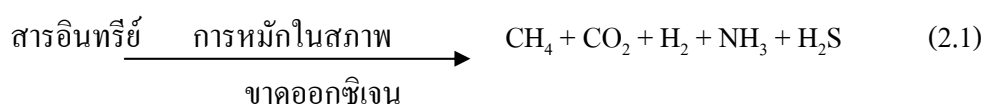
น้ำเสียที่มีค่า BOD สูงมากเช่น BOD>500 มิลลิกรัม/ลิตร มักเป็นน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหารหรืออุตสาหกรรมการเกษตร น้ำเสียเหล่านี้จะมีสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีววิทยาได้มาก การบำบัดโดยใช้ออกซิเจนเป็นวิธีที่ดีที่สุดแต่ก็ต้องประสบปัญหาหลากหลาย เช่น ความยุ่งยากในการรักษาสภาพแอโรบิก โดยเฉพาะถ้ามีสารแขวนลอยปริมาณมากจะเกิดการลอยตัวของสลัดจ์หรือสลัดจ์อืด และไม่สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีภาระบรรทุก COD หรือ BOD ที่สูงๆได้ ค่าดำเนินการและการใช้พลังงานสูง นอกจากนี้การเกิดตะกอนสลัดจ์มากทำให้มีปัญหาในเรื่องการบำบัดทิ้ง การบำบัดแบบแอนแอโรบิกแม้ว่าจะช้าแต่ก็มีความสามารถในการบำบัดน้ำที่สกปรกสูงได้ มีประสิทธิภาพการบำบัดที่ดี และสามารถบำบัดน้ำเสียที่มีภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงได้ เกิดสลัดจ์ส่วนเกินน้อย และค่อนข้างคงตัวอีกทั้งยังได้แก๊สชีวภาพ (Biogas) เป็นผลผลิตสุดท้ายซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาพขาดอากาศ แก๊สที่ได้เป็นแหล่งของพลังงานที่สำคัญอันหนึ่งโดยสารอินทรีย์ที่ใช้สำหรับการหมักนี้ได้แก่ อุจจาระของคนและสัตว์ สลัดจ์จากการบำบัดน้ำเสีย เศษเหลือจากการเกษตร ซึ่งสิ่งเหล่านี้มีสารอาหารที่เหมาะสมกับการเจริญของแบคทีเรียแอนแอโรบิก ซึ่งสามารถใช้ผลิตแก๊สชีวภาพได้โดยปริมาณแก๊สที่ได้จะขึ้นอยู่กับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ อุณหภูมิ และเวลาในกระบวนการย่อยสลาย ซึ่งส่วนประกอบของแก๊สชีวภาพที่ได้จะแตกต่างกันไปแต่สามารถประมาณได้ ดังนี้

CH ₄	55-65 %
CO ₂	35-45 %
N ₂	0 - 3 %
H ₂ และ H ₂ S อย่างละ	0 - 1 %

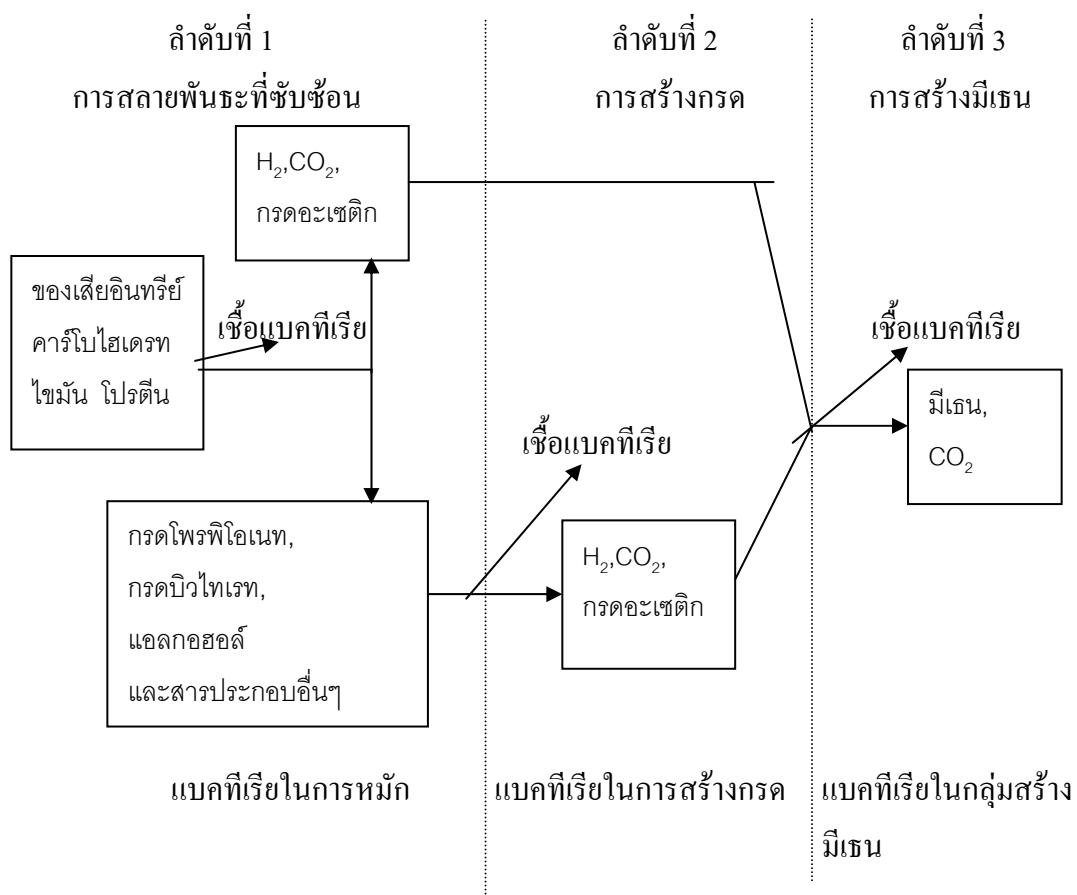
2.2 ทฤษฎีของระบบแอนแอโรบิก

การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการทางแอนแอโรบิกเป็นการเปลี่ยนสภาพจากสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียไปเป็นแก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ระบบนี้มีปฏิกิริยาซับซ้อนกว่าของระบบแอโรบิกมาก

ปฏิกิริยาการหมักแก๊สชีวภาพค่อนข้างซับซ้อนมีสารตัวกลางจำนวนมาก แต่ละขั้นตอนจะมีเอนไซม์เฉพาะในการเร่งปฏิกิริยา อย่างไรก็ตามปฏิกิริยารวมสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.1



โดยทั่วไปแล้วการหมักแก๊สชีวภาพจะเกิดในลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 การหมักแก๊สชีวภาพมี 3 ขั้นตอน

ซึ่งจากภาพที่ 2.1 สามารถอธิบายถึงรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 การสลายพันธะที่ซับซ้อน

ของเสียที่เป็นสารอินทรีย์ประกอบด้วย สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนเช่น โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต เซลลูโลส ลิกนิน ฯลฯ ซึ่งบางส่วนจะไม่ละลายน้ำ ในขั้นนี้สารอินทรีย์ที่เป็น โพลีเมอร์จะถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์ภายนอกเซลล์ที่สร้าง โดยแบคทีเรียกลุ่มไฮโดรไลติกแล้ว ละลายน้ำ และอยู่ในรูปที่สามารถใช้ได้โดยแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างกรดเป็นการยากที่จะแยกขั้นตอน ทั้งสองนี้ออกจากกัน เพราะโมเลกุลบางอย่างจะถูกดูดซึมโดยไม่มีการย่อยสลายต่อไปอีกและ สามารถถูกทำลายภายในเซลล์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้จะเปลี่ยน โปรตีนไปเป็น กรดอะมิโน เปลี่ยนคาร์โบไฮเดรตเป็นน้ำตาลที่มีโครงสร้างอย่างง่าย และเปลี่ยนไขมันเป็นกรด ไขมันที่มีโซ่ยาว แบคทีเรียในขั้นที่ 1 จะทำงานช้ากว่าในขั้นที่ 2 และ 3 มาก ดังนั้นปฏิกิริยาการ สลายพันธะของพวกเซลลูโลส และสารประกอบซับซ้อนอื่นๆ ไปเป็นสารที่มีโครงสร้างอย่างง่ายจึง เป็นขั้นตอนที่มีอัตราเร็วเป็นตัวจำกัด โดยอัตราเร็วไฮโดรไลซิส ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นสารอาหาร และปริมาณแบคทีเรีย รวมทั้งปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมเช่น pH และอุณหภูมิ

ขั้นที่ 2 การสร้างกรด (Acid Formation)

สิ่งที่ได้จากการย่อยสลายในขั้นที่ 1 จะถูกเปลี่ยนต่อไปเป็นกรดอะเซติกและ H_2/CO_2 โดย แบคทีเรียอะซิโตเจน การย่อยสลายพวกคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และ ไขมัน จะได้ผลผลิตสุดท้าย เป็นกรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acids) โดยมีตัวสำคัญคือ กรดโพรพิโอนิก อะเซติก และแลคติก แก๊ส CO_2 และ H_2 จะถูกปล่อยออกมาในขณะที่เกิดการย่อยสลายคาร์โบไฮเดรต นอกจากนี้เมทานอล และสารแอลกอฮอล์อื่นๆ ก็เกิดขึ้นจากการย่อยสลายคาร์โบไฮเดรต ซึ่งสัดส่วนของสารที่เกิดขึ้นนี้ขึ้นอยู่กับจุลินทรีย์ที่มีอยู่กับสภาพแวดล้อมนั้น

ขั้นที่ 3 การสร้างแก๊สมีเทน (Methane Formation)

ผลผลิตจากการสร้างกรดจะถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สมีเทน และสารอื่นๆ โดยแบคทีเรียพวกก่อกมีเทน ซึ่งแบคทีเรียกลุ่มนี้เป็นแบคทีเรียที่ไม่ต้องการออกซิเจนเลย และมีอัตราการเติบโตที่ช้ากว่า แบคทีเรียในการสลายพันธะที่ซับซ้อนและการสร้างกรด แบคทีเรียพวกก่อกมีเทนจะใช้กรดอะเซติก เมทานอล หรือ CO_2 และ H_2 เพื่อสร้างแก๊สมีเทน กรดอะเซติกหรืออะซิเตทเป็นอาหารที่สำคัญที่สุด ที่ใช้สร้างแก๊สมีเทนประมาณ 70% ของแก๊สมีเทนเกิดจากกรดอะเซติก ที่เหลือเกิดจาก CO_2 และ H_2 มีสารอาหารอื่นเช่นกรดฟอร์มิก แต่ไม่สำคัญนักเพราะมักไม่พบในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน

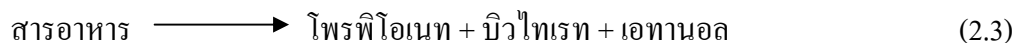
ปฏิกิริยาการเกิดมีเทนเป็นปฏิกิริยาสำคัญที่สุดในกระบวนการหมักแก๊สชีวภาพ นอกจาก จะสร้างแก๊สมีเทนแล้ว แบคทีเรียพวกก่อกมีเทนยังช่วยปรับ pH ให้เป็นกลาง โดยเปลี่ยนกรดไขมัน

ระเหยให้เป็นแก๊สมีเทน และแก๊สอื่น ๆ การเปลี่ยนแก๊สไฮโดรเจนไปเป็นมีเทน จึงเป็นผลดีต่อปฏิกิริยาของการหมักแก๊สชีวภาพ เพราะถ้าแบคทีเรียพวกก่อมีเทนไม่สามารถทำงานได้ จะทำให้เกิดมีเทนน้อยทำให้ของเสียไม่อยู่ในสถานะเสถียร เพราะสารประกอบอินทรีย์จะเปลี่ยนเป็นกรดไขมันเท่านั้นซึ่งสามารถทำให้เกิดภาวะมลพิษได้ถ้าปล่อยออกสู่ดินหรือน้ำ

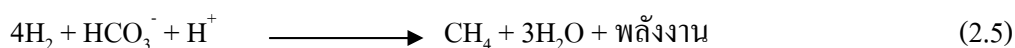
เนื่องจากแบคทีเรียพวกก่อมีเทนเป็นพวกที่ไม่ต้องการออกซิเจนเลย และเชื่อว่าในสภาวะแวดล้อมที่เป็นสภาวะรีดิวซ์จะช่วยให้มันเจริญได้ดี โดยในกระบวนการจะมีแบคทีเรียสำคัญที่เกี่ยวข้อง 4 กลุ่มด้วยกันคือ

1. แบคทีเรียกลุ่มสร้างกรด
2. แบคทีเรียอะซิโตจินิก (สร้างกรดอะซิเตท และ H_2)
3. แบคทีเรียอะซิโตคลาสติก (สร้างมีเทน)
4. แบคทีเรียกลุ่มไฮโดรเจน (สร้างมีเทน)

แบคทีเรียที่สร้างกรด (Acid – Forming) จะเกี่ยวกับไฮโดรไลซิส และย่อยสลายพวกสารที่มีโครงสร้างซับซ้อนให้เป็นสารประกอบอย่างง่ายเช่น CO_2 , H_2 และพวกกรดไขมันระเหยต่างๆ โดยมีปฏิกิริยาที่สำคัญ 2 แบบคือ



ผลที่ได้จากสมการที่ 2.2 สามารถใช้โดยตรงโดยแบคทีเรียพวกอะซิโตคลาสติก และไฮโดรเจนเพื่อสร้างแก๊สมีเทน



จากสมการที่ 2.2 จะเกิดได้ดีในถึงปฏิกรณ์ที่มีความดันของ H_2 ต่ำและสมการที่ 2.3 จะเกิดได้ดีในถึงปฏิกรณ์ที่มีความดันของ H_2 สูง โดยมีการสร้างกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนอะตอมมากกว่าสอง(เช่น โพรพิโอเนท หรือ บิวไทเรท)และเอทานอล ซึ่งจะเปลี่ยนต่อไปเป็นอาหารของแบคทีเรียเมทาโนเจน เช่น อะซิเตท , CO_2 และ H_2

แบคทีเรียอะซิโตคลาสติกใช้เวลาเพิ่มจำนวนที่นานกว่าแบคทีเรียที่สร้างกรด เช่น 2-3 วัน ต่อ 2-3 ชั่วโมง ที่ 35 องศาเซลเซียสภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ดังนั้นการหมักแบบแอนแอโรบิกจึง

ไม่ควรให้ ภาระบรรทุกที่สูงมากเกินไป เนื่องจากแบคทีเรียที่สร้างกรดจะสร้างกรดไขมันระเหยได้เร็วกว่าอัตราที่แบคทีเรียอะซิโตคลาสติคจะไขมันได้ทันและการเจริญของแบคทีเรียอะซิโตเจน จะค่อนข้างไวต่อความดันของ H_2 ถ้าความดันของ H_2 มากกว่า 0.0001 บรรยากาศ สมการที่ 2.3 จะเกิดขึ้นและจะเกิดอะซิเตทจำนวนน้อย เนื่องจากว่า 70 % ของแก๊สมีเทนเกิดจากปฏิกิริยาในสมการที่ 2.4 ดังนั้นจึงทำให้ ปริมาณการเกิดแก๊สชีวภาพลดลง

ปฏิกิริยาในสมการที่ 2.5 สำคัญมากต่อกระบวนการหมักแก๊สชีวภาพ เพราะเป็นการบำบัดแก๊สไฮโดรเจนออก และช่วยให้เกิดความดันของ H_2 ที่ต่ำ อย่างไรก็ตามปัญหาของระบบอาจเกิดจากปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมอื่นๆ เช่น pH ต่ำ ภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงเกินไป ฯลฯ

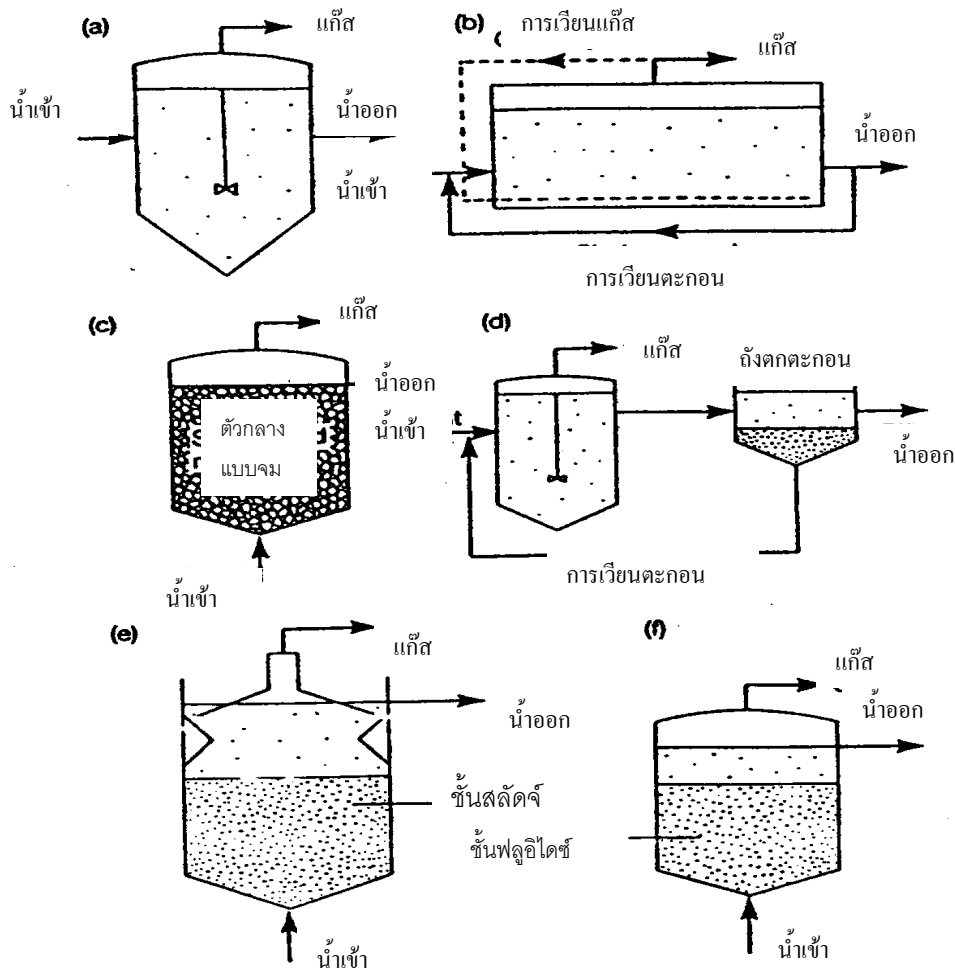
มีกระบวนการแบบแอนแอโรบิกหลายชนิดเช่น บ่อผึ่งแบบไม่ใช้อากาศ , ถังหมักแบบไม่ใช้อากาศ และ ถังกรองแบบไม่ใช้อากาศ ซึ่งสามารถแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 2 กลุ่มคือระดับการไหลผ่าน สำหรับของเสียที่เข้มข้นมาก เช่น มูลสัตว์ หรือสลัดจ์ของน้ำเสียที่มีของแข็งอยู่ประมาณ 2-10% ซึ่งจะรวม ถังกวนสมบูรณ์ (Completely-Stirred Tank Reactor) ดังภาพที่ 2.2a ซึ่งใช้ในการบำบัดสลัดจ์ของน้ำเสียขั้นแรก ถึงปฏิกิริยาแบบปลั๊กโฟลว์ (Plug-Flow Reactor) ใช้บำบัดมูลสัตว์ ดังภาพที่ 2.2b

น้ำเสียที่มีปริมาณของแข็งน้อยจะบำบัดแบบแอนแอโรบิกด้วยระบบสัมผัส ซึ่งน้ำเสียจะถูกสัมผัสกับจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบ มวลจุลินทรีย์จะถูกกักอยู่ในระบบ โดยวิธีต่างๆ เช่น ในรูปของฟิล์มที่ยึดติดกับตัวกลางหรือจับกันเป็นฟลอคแขวนลอยอยู่ในถังที่มีการกวนหรือการไหลขึ้นผ่านถังปฏิกรณ์ ฟลอคของจุลินทรีย์เหล่านี้จะถูกทำให้ตกตะกอนในถังตกตะกอนและไหลเวียนกลับสู่ถังปฏิกรณ์อีก ดังภาพที่ 2.2d ซึ่งเรียกว่ากระบวนการแอกติเวเต็ดสลัดจ์แบบแอนแอโรบิก (Anaerobic Activated Sludge Process) กระบวนการเหล่านี้สามารถเกิดได้ในถังเดี่ยวซึ่งความลึกของสลัดจ์จะถูกควบคุมโดยการไหลย้อนขึ้นดังภาพที่ 2.2e ซึ่งเรียกว่ากระบวนการสลัดจ์เบลงเก็ต (Sludge Blanket Process) ฟิล์มจุลินทรีย์อาจเกาะติดกับตัวกลางธรรมชาติ เช่น หิน หรือพลาสติกดังภาพที่ 2.2c ซึ่งก็คือกระบวนการถังกรองแบบตัวกลางอยู่กับที่ (Static Media Filters Process) ในขณะที่ ชั้นฟลูอิดไดซ์จะมีตัวกลางเป็นเม็ดขนาดเล็กเช่น ทรายดังภาพที่ 2.2f ซึ่งเรียกว่ากระบวนการฟลูอิดไดซ์ มีเดีย (Fluidized Bed Process) ตัวกลางทั้งสองแบบจะอยู่ใต้น้ำเพื่อให้เกิดสภาพแอนแอโรบิก และน้ำเสียจะไหลย้อนขึ้น

2.3 ปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่สำคัญต่อระบบแอนแอโรบิก

ปฏิกิริยาในถังหมักแก๊สชีวภาพนี้ สามารถเริ่มได้เร็ว ถ้ามีการเลี้ยงให้เคยชิน (Acclimation)

ก่อนเพื่อให้ระบบปรับสภาพ และพร้อมที่จะเริ่มใช้งานได้ เช่นเดียวกันกับกระบวนการทางชีววิทยาอื่นๆ การหมักแก๊สชีวภาพนี้เป็นระบบที่ต้องควบคุมปัจจัยหลายๆอย่างให้เหมาะสม ซึ่งแต่ละปัจจัยสามารถมีผลกระทบต่อระบบไม่ทางตรงก็ทางอ้อม โดยปัจจัยเหล่านี้ได้แก่

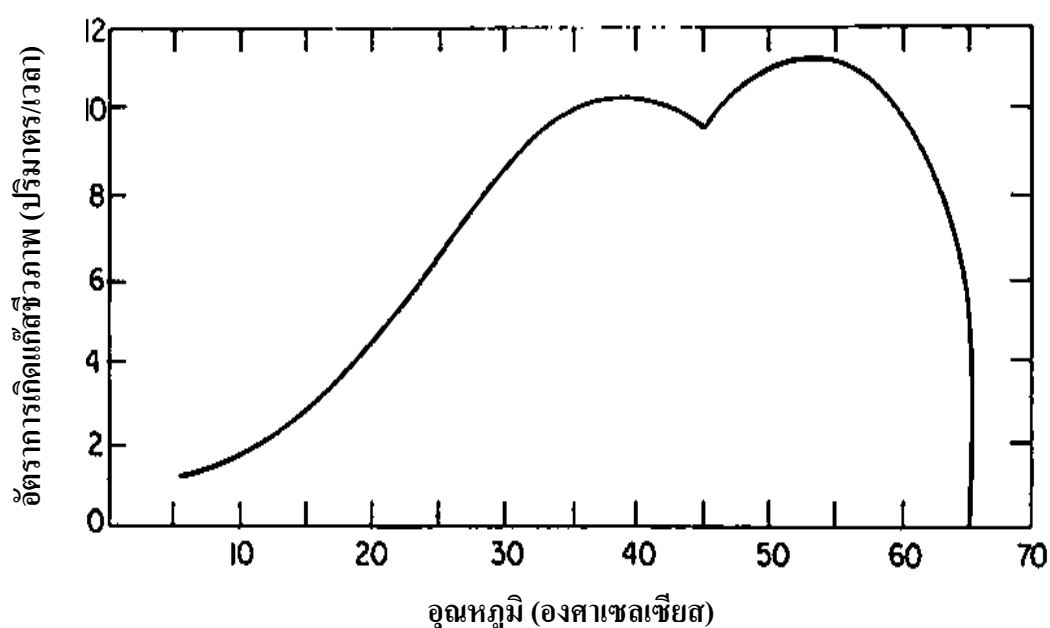


ภาพที่ 2.2 ถังหมักแอนแอโรบิคแบบต่างๆ (Gray,1989)

2.3.1) อุณหภูมิ

การแปรผันของอุณหภูมิตามวัน หรือ ฤดูกาล มีผลต่ออัตราการเกิดแก๊ส โดยทั่วไปแล้วมีอุณหภูมิ 2 ช่วงที่เกี่ยวกับการสร้างแก๊สชีวภาพคือ เมโซฟิลิกโดยที่อุณหภูมิอยู่ในช่วง 25-40 องศาเซลเซียสและเทอร์โมฟิลิกอยู่ในช่วง 50-65 องศาเซลเซียสโดยที่อัตราของการเกิดมีเทนจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ แต่จะลดลงถ้าอุณหภูมิสูงถึง 45 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิไม่เหมาะสมกับแบคทีเรียพวกเมโซฟิลิกและเทอร์โมฟิลิกโดย Polprasert (1989) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดแก๊สมีเทนกับอุณหภูมิดังภาพที่ 2.3 ซึ่งจากความสัมพันธ์พบว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 10

องศาเซลเซียสจะมีการสร้างแก๊สน้อย ดังนั้นไม่ควรดำเนินการในช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้เพราะแก๊สจะมีปริมาณน้อย ส่วนการดำเนินงานที่อุณหภูมิสูงกว่า 30-35 องศาเซลเซียส ถึงแม้ว่าจะทำให้เกิดแก๊สมากก็ตามแต่จะต้องมีการใช้พลังงานเพื่อให้ความร้อนแก่ถังหมัก ซึ่งไม่เหมาะสมในทางเศรษฐศาสตร์ ดังนั้นการดำเนินการในช่วงอุณหภูมิของเมโซฟิลิกคือช่วงอุณหภูมิระหว่าง 25-40 องศาเซลเซียสจะเป็นการดำเนินการที่เหมาะสม แม้ว่าการทำลายเชื้อโรคจะไม่มากพอเมื่อเทียบกับช่วงของเทอร์โมฟิลิกก็ตาม



ภาพที่ 2.3 ผลของอุณหภูมิต่อการเกิดแก๊ส (Polprasert,1989)

2.3.2) pH และค่าความเป็นด่าง (Alkalinity)

ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาควรอยู่ในช่วง 6.6-7.6 และมี ช่วงที่เหมาะสมคือ 7-7.2 แม้ว่าแบคทีเรียที่สร้างกรดจะสามารถทน pH ต่ำได้ถึง 5.5 แต่ แบคทีเรียก่อมีเทนจะถูกยับยั้งที่ pH ต่ำ pH ของถังหมักอาจลดลงต่ำกว่า 6.6 ถ้ามีการสะสมของกรดไขมันระเหย เช่น เมื่อภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงมาก หรือมีสารพิษอยู่ในถังหมัก

การที่ pH ต่ำไม่ว่าจะเนื่องจากการสะสมของกรดไขมันระเหย หรือการเพิ่มความดันจะทำให้อัตราการสร้างมีเทนลดลง ควรหยุดการเติมน้ำเสียชั่วคราวเพื่อให้แบคทีเรีย ก่อมีเทนใช้กรดไขมันระเหยและ H_2 ที่สะสมให้หมดก่อน เมื่ออัตราการสร้างแก๊สเข้าที่แล้วจึงเริ่มให้ภาระบรรทุกปกติต่อไป pH ที่ต่ำกว่า 6.2 จะเป็นพิษต่อแบคทีเรียก่อมีเทน

pH ของถังหมักควรปรับให้เป็นกลางโดยการเติมปูนขาวหรือสารด่างอื่นๆ ถ้ามีการรักษา ระดับความเป็นด่างของน้ำตะกอนให้อยู่ในช่วง 2500-5000 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งจะเกิดความสามารรถ ในการต่อต้านการเปลี่ยนแปลงที่ดีในถังหมักนั้น

2.3.3) ภาวะบรรทุก

ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์มีหน่วยเป็น กิโลกรัมCOD หรือ VS / ลูกบาศก์เมตร-วัน และภาวะ บรรทุกทางน้ำหรือระยะเวลาเก็บกัก (HRT) เป็นปัจจัยสำคัญ ถ้าภาวะบรรทุกที่สูงเกินไปจะทำให้ กรดไขมันระเหยเกิดมากเกิน ไป ทำให้ pH ของถังหมักมีค่าต่ำ แต่ถ้าภาวะบรรทุกที่ต่ำเกินไปจะ ทำให้เกิดแก๊สชีวภาพจำนวนน้อยไม่พอใช้

ระยะเวลาเก็บกักที่สั้นเกินไปจะทำให้แบคทีเรียโดยเฉพาะแบคทีเรียที่สร้างมีเซนมีเวลาไม่ พอในการย่อยสลายของเสีย นั้น ระยะเวลาเก็บกักที่นานเกินไปจะทำให้เกิดการสะสมของสารที่ถูก ย่อยในถังหมัก และทำให้ต้องมีขนาดถังหมักที่ใหญ่ ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์และระยะเวลาเก็บกัก ที่เหมาะสมก็ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบรวมทั้งสภาพแวดล้อมในถังหมัก ด้วย สำหรับถังหมักแบบเกาะบนผิวดักกลางมีระยะเวลาเก็บกักที่เหมาะสมคือ 1-10 วันและยังพบว่า พวกเกาะบนผิวดักกลางสามารถทำงานได้ดีที่ภาวะบรรทุกสูง หรือมีระยะเวลาเก็บกักสั้นกว่าพวกที่ ถูกหมักอยู่ในถังหมัก ข้อดีของพวกที่เกาะบนผิวดักกลางคือ อยู่ในถังหมักด้วยความเข้มข้นที่สูงกว่า และไม่ถูกขับออกไปกับน้ำตะกอนที่ถูกย่อยแล้วและจะมีสภาพคุ้นเคยกับของเสียที่เข้ามาในถังหมัก

2.3.4) สารที่เป็นพิษ

ของเสียสารอินทรีย์เช่น อุจจาระคน มูลสัตว์ ของเสียจากการเกษตร อาจมีการสะสมกรด ไขมันระเหย H_2 และ พวกแอมโมเนีย ถ้ามีมากก็จะทำให้การดำเนินของระบบล้มเหลวได้ การมี ออกซิเจนอยู่ในถังก็จะยับยั้งปฏิกิริยาของแบคทีเรียที่สร้างมีเซนได้พวกนี้ออนบางชนิดที่มาก เกินไปก็ยับยั้งปฏิกิริยาได้ ตารางที่ 2.1 แสดงอออนที่มีปฏิกิริยาดังกล่าว

ในระบบการหมักแบบแอนแอโรบิคแบคทีเรียพวกก่อมีเซนเป็นแบคทีเรียที่สำคัญซึ่งระบบ ต้องอยู่ในสภาวะ และมีปริมาณสารต่างๆที่จำเป็นอย่างเหมาะสมจึงจะเจริญเติบโตและทำงานได้ดี สารบางชนิดสามารถยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียนี้ได้ทันทีแม้มีปริมาณน้อย ส่วนสารบางชนิด แม้มีปริมาณน้อยๆแต่ก็จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ในขณะที่เดียวกันถ้าเพิ่มจำนวนมาก ขึ้นจะไปลดการทำงานของแบคทีเรีย และอาจจะไปยับยั้งขบวนการทำงานของแบคทีเรีย เช่น โซเดียม โปแตสเซียม

และยังมีตารางที่แสดงถึงค่าความเข้มข้นของสารพิษที่จะก่อให้เกิดการยับยั้งปฏิกิริยาของ เสียอินทรีย์ที่มีอออนดังตารางที่ 2.2 ควรได้รับการบำบัดหรือเจือจางเพื่อให้อยู่ในระดับที่ไม่ยับยั้ง การทำงานของระบบ

ตารางที่ 2.1 อีออนประจุบวกที่เป็นชินเนอจิสติกหรือแอนทาโกนิสติก

สารพิษ	ประจุบวกที่เป็นชินเนอจิสติก	ประจุบวกเป็นแอนทาโกนิสติก
แอมโมเนีย (ของ N)	แคลเซียม, แมกนีเซียม , โพแทสเซียม	โซเดียม
แคลเซียม (Ca^{++})	แอมโมเนีย (ของ N), แมกนีเซียม	โพแทสเซียม, โซเดียม
แมกนีเซียม (Mg^{++})	แอมโมเนีย (ของ N), แคลเซียม	โพแทสเซียม, โซเดียม
โพแทสเซียม (K^{+})	-	โพแทสเซียม, โซเดียม
โซเดียม (Na^{+})	แอมโมเนีย (ของ N), แคลเซียม แมกนีเซียม	โพแทสเซียม

ที่มา : Polprasert (1989)

เมื่อแบคทีเรียได้รับสารพิษจะมีการปรับตัวต่อต้านสารนั้น ทำให้ทนต่อความเป็นพิษของสารนั้นมากขึ้น ซึ่งจะใช้เวลาช่วงหนึ่งแล้วจะสามารถดำเนินกิจกรรมต่อไปได้ ซึ่งระยะเวลาในการปรับตัวขึ้นอยู่กับความรุนแรงของสารพิษและชนิดของสารนั้น แต่แบคทีเรียก็สามารถทนได้สูงสุดที่ขีดจำกัดอันหนึ่ง ถ้าเพิ่มปริมาณของสารพิษให้เกินจุดนี้แล้วแบคทีเรียจะไม่สามารถปรับตัวดำเนินกิจกรรมตามปกติต่อไปได้ ทำให้ระบบล้มเหลว สารพิษที่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรียกลุ่มที่ก้อมีเชนมียหลายชนิดดังนี้

1. ซัลเฟต (Sulfate) และซัลไฟด์ (Sulfide)

ซัลเฟตเราจะพบได้ในน้ำเสียทั่วไป การย่อยสลายซัลเฟตจะได้ซัลไฟด์ ซึ่งซัลไฟด์จะไปยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มที่ก้อมีเชนโดยปกติ แบคทีเรียกลุ่มนี้จะสามารถทำงานได้ที่ซัลเฟต 5 กรัมต่อลิตร แต่ในขณะที่เดียวกันถ้าระบบมีซัลไฟด์ 500 มิลลิกรัมต่อลิตรจะลดการทำงานของแบคทีเรียลงครึ่งหนึ่ง และในแก๊สที่เกิดขึ้นจะพบไฮโดรเจน ซัลไฟด์ประมาณ 5 % ความสามารถในการยับยั้งจะเรียงลำดับดังนี้ ไทโอซัลเฟต < ซัลไฟด์ < ไฮโดรซัลไฟด์

2. แอมโมเนีย

แอมโมเนียเกิดจากการย่อยสลายโปรตีนในระบบ และ แอมโมเนียยังเป็นสารอาหารที่จำเป็นต่อแบคทีเรียในช่วงความเข้มข้น 50-200 มิลลิกรัมแอมโมเนีย-ไนโตรเจน ต่อลิตร จะเป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย แต่ถ้าความเข้มข้นสูง >150 มิลลิกรัมไนโตรเจน/ลิตร และ 3000 มิลลิกรัมไนโตรเจน/ลิตร ตามลำดับจะก่อให้เกิดการยับยั้งได้

3. กรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acids : VFA)

กรดอินทรีย์ และสารอินทรีย์อื่นๆ ในการย่อยสลายสารอินทรีย์จะเกิดกรดอินทรีย์ต่างๆขึ้น

ตารางที่ 2.2 สารยับยั้งในกระบวนการสร้างมีเซนและความเข้มข้นที่ทำให้เกิดการยับยั้ง

พารามิเตอร์	ปริมาณความเข้มข้นที่มีผลกระทบต่อระบบ บำบัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)
กรดอินทรีย์	> 2000 (เช่น กรดอะซิติก) ^a
แอมโมเนีย (ของ N)	1500-3000 (at pH > 7.6)
ซัลไฟด์ (สารละลาย) ^b	>200; >3000 เป็นพิษ
แคลเซียม (Ca ⁺⁺)	2500-4500; 8000 ความเข้มข้นที่มีผลยับยั้งอย่างรุนแรง
แมกนีเซียม (Mg ⁺⁺)	1000-1500; 3000 ความเข้มข้นที่มีผลยับยั้งอย่างรุนแรง
โปแตสเซียม (K ⁺)	2500-4500; 12000 ความเข้มข้นที่มีผลยับยั้งอย่างรุนแรง
โซเดียม (Na ⁺)	3500-5500; 8000 ความเข้มข้นที่มีผลยับยั้งอย่างรุนแรง
คอปเปอร์	0.5 (สารละลายโลหะ)
แคดเมียม	150 ^c
เหล็ก	1710 ^c
โครเมียม ⁺⁶	3
โครเมียม ⁺³	500
นิกเกิล ^d	2

ที่มา : Polprasert (1989)

^a ที่ pH ประมาณ 6.6-7.4 จะมีความสามารถในการต้านทานกรดอินทรีย์ที่ความเข้มข้น 6000-8000 มิลลิกรัมต่อลิตร

^b แก๊สที่มีความเข้มข้น 6 เปอร์เซ็นต์จะเป็นพิษ

^c มิลลิโมลของโลหะ ต่อ กิโลกรัมของของแข็งแห้ง

^d นิกเกิลจะช่วยก่อให้เกิดแก๊สมีเทนที่ความเข้มข้นต่ำ

หลายชนิด เช่น กรดอะซิติก กรดโพฟิไอเนท กรดบิวไทเรท กรดที่ถูกสร้างขึ้นนี้หากมีปริมาณมากเกินไปก็จะไปยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียพวกก่อกำเนิดได้

4. โลหะหนัก

โลหะหนักส่วนใหญ่เป็นสารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในปริมาณน้อย ถ้ามีมากก็จะยับยั้งการเจริญเติบโตและการทำงานของแบคทีเรียด้วย ความเป็นพิษของโลหะหนักนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของสารประกอบ และชนิดของธาตุเช่น นิกเกิล แบคทีเรียทนได้สูงสุดที่ไม่เกิน 250 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ก็มี เงิน สังกะสี ตะกั่ว พรอท โดยทั่วไปน้ำเสียจะมีโลหะหนักไม่สูงมากจนกระทั่งไปยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียได้ ดังนั้นโลหะหนักนี้จึงไม่เป็นปัญหาที่สำคัญในการดำเนินระบบหมักแบบแอนแอโรบิก

2.4 คลอรีเนเต็ดไฮโดรคาร์บอน

สารเคมีกำจัดศัตรูพืช (Pesticides) ประเภทสารป้องกันและกำจัดแมลง (Insecticides) แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆคือ

1. กลุ่มออร์กาโนคลอรีน (Organochlorine Insecticides) ได้แก่ สารอัลดริน (Aldrin) สารดีลดริน (Dieldrin) สารเอนดริน (Endrin) ดีดีที (DDT) เป็นต้น
2. กลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต (Organophosphate Insecticides) ได้แก่ สารเมทิลพาราไทออน (Methyl Parathion) เป็นต้น
3. กลุ่มคาร์บาเมต (Carbamate Insecticides) ได้แก่ สารคาร์โบฟูราน (Carbofuran) สารคาร์บาริล (Carbaryl) เป็นต้น

แม้ว่าจะไม่ค่อยพบสารนี้ปริมาณมากในน้ำเสียชุมชน แต่ก็อาจจะพบได้ในตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรม แหล่งสำคัญของสารนี้คือในกิจการซักแห้ง ดังตารางที่ 2.3 ซึ่งสรุปปริมาณความเข้มข้นของสารเหล่านี้ในสลัดจ์น้ำเสียชุมชน การบำบัดจากน้ำเสียนี้อาจจะใช้วิธีการไล่อากาศ (Air-Stripping) หรือวิธีแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) ก่อนปล่อยลงสู่ระบายน้ำ

การวิเคราะห์สารตกค้างของยาฆ่าแมลงโดยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟีอาศัยหลักการของการสกัดแยกยาฆ่าแมลงออกจากตัวอย่างน้ำโดยใช้ตัวทำละลายผสม Diethylether หรือ Hexane นำส่วนที่สกัดได้มาระเหยแห้ง และกำจัดสารแทรกสอด (Interference) โดยใช้เทคนิค Column Chromatograph แล้วจึงนำไปวิเคราะห์หาปริมาณตกค้างด้วยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟีที่มีเครื่องตรวจวัดชนิด Electron-Capture (ECD) โดยทั่วไปวิธีวิเคราะห์นี้สามารถตรวจได้ในระดับหนึ่งส่วนใน

พื้นล้านส่วน (ppb) ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างด้วยกันเช่น ความไวของเครื่องตรวจวัด (Detector Sensitivity) ประสิทธิภาพของการสกัดและการบำบัดสารแทรกสอด (Extraction and Clean-up Efficiency) ความเข้มข้นในตัวอย่างเป็นต้น

ตารางที่ 2.3 ความเข้มข้นของคลอรีเนเต็ดไฮโดรคาร์บอนที่ทำให้เกิดการยับยั้ง 20%

สารเคมี	ความเข้มข้น(มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของของแข็งแห้ง)
Chloroform	15
Trichlorethane	20
1,1,2-Trichlorotrifluoroethane	200
Carbon tetrachloride	200
Trichloroethylene	1800
Tetrachloroethylene	1800

ที่มา : Institution of Water Pollution Control (1979)

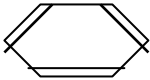
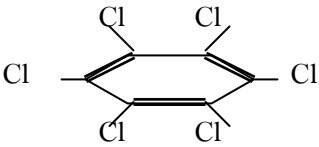
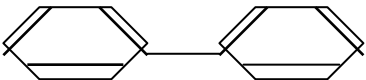
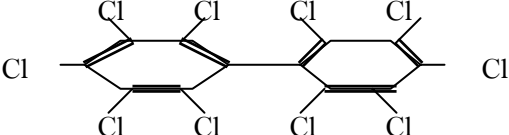
ส่วนวิธีในการเก็บรักษาตัวอย่างให้เก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จนกว่าจะทำการสกัด ซึ่งไม่ควรเกิน 7 วัน และเมื่อสกัดตัวอย่างแล้วให้เก็บส่วนที่สกัดที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จนกว่าจะนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีแก๊สโครมาโท กราฟี ซึ่งไม่ควรเกิน 40 วัน

2.4.1) การย่อยสลายสารประกอบฮาโลเจน (Dehalogenation)

หน่วยงานทางด้านกรป้องกันสิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา กล่าวว่าสารประกอบอินทรีย์พวกฮาโลเจนเป็นของเสียที่มีปริมาณมากที่สุดและมีความสำคัญเป็นอันดับต้นๆ ที่จะต้องได้รับการดูแลเป็นพิเศษ โดยส่วนใหญ่มักจะพบในรูปของ ฟลูออรีน คลอรีน โบรมีน และไอโอดีน ซึ่งสารประกอบพวกฮาโลเจนนี้จะเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และย่อยสลายได้ยากมาก อันเนื่องมาจากกลุ่มอะตอมของฮาโลเจนตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.4 โดยกระบวนการทางเมตาบอลิซึมของโมเลกุลคลอรีนนี้สามารถที่จะช่วยลดความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมได้ ซึ่งไฮโดรคาร์บอนนี้เราทราบกันดีว่ามันสามารถที่จะถูกย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ แต่อย่างไรก็ตามโมเลกุลของฮาโลเจนโดยส่วนใหญ่ก็จะย่อยสลายได้ช้ามากในธรรมชาติ และยังสามารถพบได้อีกว่า ในแต่ละองค์ประกอบของคลอรีนเช่น คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon Tetrachloride) จะเปลี่ยนรูปร่างอย่างรวดเร็วซึ่งเตตระคลอโรเอธิลีน(Tetrachloroethylene)และเฮกซะคลอโรเบนซีน

(Hexachlorobenzene) เป็นสารที่ใช้ฆ่าเชื้อราและใช้ในการทำลายทางการเกษตรกรรม และอุตสาหกรรม ที่ย่ำที่สุดสารประกอบพวงฮาโลเจนดังกล่าวก็จะถูกปลดปล่อยออกมาปนเปื้อนกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งสารประกอบเหล่านี้จะเปลี่ยนรูป และย่อยสลายช้ามาก และก็จะสามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการแอนแอโรบิกเพียงอย่างเดียวเท่านั้น (Vogel et al, 1987)

ตารางที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการย่อยสลายไฮโดรคาร์บอนและโครงสร้างโมเลกุลของคลอรีน

สามารถย่อยสลายได้เร็ว	ย่อยสลายได้ช้า
CH_4 $\text{CH}_2 = \text{CH}_2$	CCl_4 $\text{Cl}_2\text{C} = \text{CCl}_2$
	
	

ที่มา : Wackett (1991)

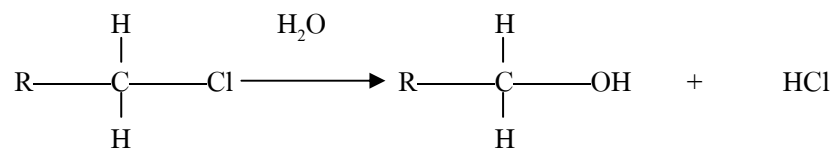
2.4.2) ลำดับขั้นของปฏิกิริยาการย่อยสลายทางชีววิทยาของสารประกอบพวงฮาโลเจน

โดยทั่วไปแล้วแบคทีเรียจะกระตุ้นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของพันธะระหว่าง คาร์บอนและฮาโลเจน โดยเราสามารถอธิบายได้เป็น 4 ขั้นตอนตามที่แสดงในภาพที่ 2.4 โดยที่ในแต่ละขั้นตอนจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

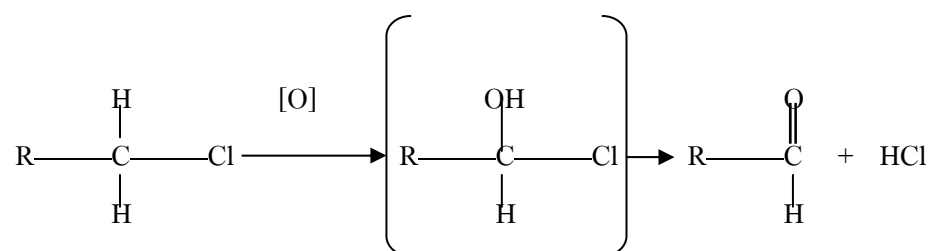
ขั้นตอนที่ 1. เป็นขั้นตอนของไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ซึ่งจะเกิดโดยการแทนที่อะตอมของฮาโลเจนด้วยกลุ่มไฮดรอกไซด์ที่แปรสภาพมาจากน้ำ ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่ากลไกในขั้นตอนที่ย่อยสลายฮาโลเจนนี้เกิดโดยแบคทีเรีย

ขั้นตอนที่ 2. เป็นการย่อยสลายสารฮาโลเจนด้วยเอนไซม์ของออกซิเจน ซึ่งสามารถเรียก
กลไกนี้ว่าการออกซิเดทีฟ (Oxidative) ซึ่งก็คือ การสังเคราะห์ทางชีววิทยาของแบคทีเรีย แต่มันก็
ไม่ได้

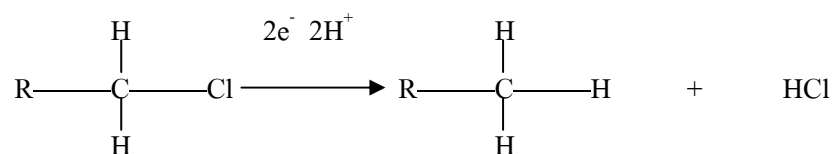
(1) Hydrolytic:



(2) Oxidative:

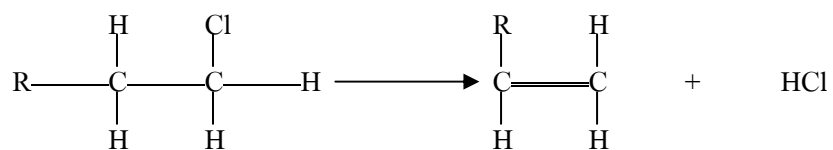


(3) Reductive:

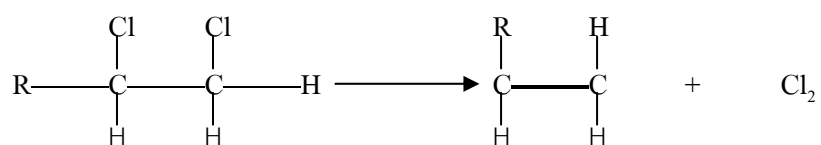


(4) Elimination:

Dehydrohalogenation



Dehalogenation



รูปที่ 2.4 สี่ขั้นตอนของการย่อยสลายทางชีววิทยาของสารประกอบฮาโลเจน

เป็นการลดจำนวนของสารประกอบฮาโลเจนลงแต่อย่างใด โดยมันเป็นแค่การผลิตออกซิเจนของแบคทีเรียซึ่งเมตาบอลิซึมนี้บางครั้งจะถูกเรียกว่าโคออกซิเดชัน (Co-Oxidation) หรือโคเมตาบอลิซึม (Co-Metabolism) ซึ่งมันมีความสำคัญในการย่อยสลายทางชีววิทยาของสารประกอบอินทรีย์จำพวกฮาโลเจน (Wackett et al, 1989)

ส่วนในขั้นตอนที่ 3. คือการรีดักทีฟ ดีฮาโลจิเนชัน (Reductive Dehalogenation) ของคาร์บอนที่อยู่ตรงกลาง โดยอะตอมของคลอรีนจะเกิดขึ้นจากการใส่ 2 อิเล็กตรอนและ 2 โปรตอน ซึ่งจะทำให้เกิดพันธะระหว่างคาร์บอนและไฮโดรเจนและยังเกิดกรดไฮโดรคลอริกอีกด้วย โดยกลไกดังกล่าวจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางชีววิทยา (Sufliata et al, 1982) ความสำคัญของการดึงอะตอมคลอรีนนี้คือ การทำลายพิษเพื่อป้องกันปัญหาที่จะเกิดขึ้นกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งสารประกอบคลอรีนสามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยวิธีการทางชีววิทยา

และขั้นตอนสุดท้ายคือการย่อยสลายสารประกอบฮาโลเจนด้วยด้วยปฏิกิริยาของการทำลายหรือขจัดทิ้ง (Elimination) ซึ่งจะประกอบด้วยปฏิกิริยา 2 ชนิดตามที่แสดงไว้ในภาพที่ 2.4 โดยในชนิดแรกคือการดีไฮโดรฮาโลจิเนชัน โดยเกิดด้วยการบำบัดโปรตอนและอะตอมของสารประกอบฮาโลเจนจากอะตอมของคาร์บอนที่อยู่ใกล้ชิดกันให้กลายเป็นสารประกอบไฮโดรเจนและอัลคีนของฮาโลเจน ส่วนในชนิดที่สองคือการดีฮาโลจิเนชันที่เราสามารถแยกแยะได้โดยดูที่การสูญเสียของสารประกอบฮาโลเจนที่ใกล้ชิดกันซึ่งเราจะเห็นได้ทั่วไปจากยาฆ่าแมลงต่างๆ เช่น ดีดีที

2.5 จลนศาสตร์ของการยับยั้ง (Kinetics of Inhibition)

การยับยั้ง (Inhibition) คือ ความกีดกันแบบย้อนกลับได้ ที่มีต่อการเติบโตของจุลินทรีย์ โดยมีรูปแบบการยับยั้งอยู่ 5 ชนิด (Grady et al, 1980)

2.5.1) Competitive Inhibition

สารพิษจะทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ ซึ่งจะมีผลกระทบต่อ K_m (ค่าคงที่ของ Michaelis-Menten) ดังสมการ

$$r_p = \frac{V_m C_s}{(K_m(1 + \frac{C_i}{K_i}) + C_s)}$$

โดยที่ C_i = ความเข้มข้นของสารยับยั้ง

K_i = ค่าคงที่ของสารยับยั้ง

C_s = ความเข้มข้นของสารอาหาร

r_p = อัตราการเกิดปฏิกิริยา

V_m = ความเร็วสูงสุดของการเกิดปฏิกิริยา

2.5.2) Uncompetitive Inhibition

การยับยั้งแบบนี้จะมีผลกระทบต่อค่าของ V_m และ K_m ดังสมการ

$$r_p = \frac{V_m C_s}{(K_m + C_s(1 + \frac{C_I}{K_I}))}$$

2.5.3) Noncompetitive Inhibition

การยับยั้งแบบนี้จะมีผลกระทบต่อค่าของ V_m เพียงอย่างเดียวดังสมการ

$$r_p = \frac{V_m C_s}{(K_m + C_s)(1 + \frac{C_I}{K_I})}$$

2.5.4) Substrate Inhibition

โดยมีสมการในการยับยั้งดังนี้

$$r_p = \frac{k_2 C_{E0} C_s}{(K_s + C_s + \frac{C_s^2}{K_s'})}$$

2.5.5) Product Inhibition

การยับยั้งรูปแบบนี้จะมีพฤติกรรมคล้ายกับ Uncompetitive Inhibition ดังนี้

$$r_p = \frac{V_m C_s}{(K_m + C_s(1 + \frac{C_p}{K_p}))}$$

โดยที่ C_p = ความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

K_p = ค่าคงที่ของการยับยั้งที่เกิดจากสารผลิตภัณฑ์

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

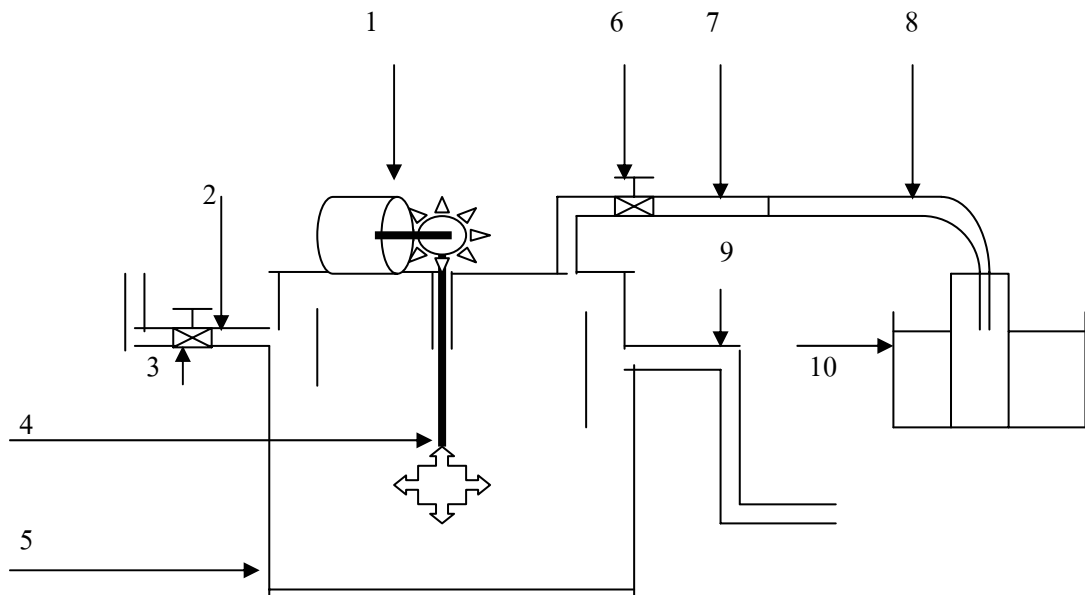
ถังปฏิกรณ์ระบบแอนแอโรบิกสี่ถังถูกสร้างขึ้น เพื่อใช้ในการดำเนินการทดลองนี้ โดยถังปฏิกรณ์ทั้งสี่ติดตั้งอยู่ที่บริเวณห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยที่ถังปฏิกรณ์แต่ละตัวมีปริมาตรรวมเท่ากับ 0.125 ลูกบาศก์เมตร ขนาดของถังปฏิกรณ์แต่ละตัวสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.1 และรายละเอียดของการติดตั้งถังปฏิกรณ์ ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ลักษณะถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการบำบัดแอนแอโรบิก

วัสดุที่ใช้ในการสร้าง	เหล็ก
รูปร่าง	ถังทรงสี่เหลี่ยม
กว้าง x ยาว x สูง	0.50 x 0.50 x 0.50 ลูกบาศก์เมตร
ความหนาของเหล็กที่ใช้สร้างถัง	3 มิลลิเมตร
ความลึกของน้ำเสีย	35 เซนติเมตร
ปริมาตรของน้ำเสีย	0.0875 ลูกบาศก์เมตร
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของใบกวน	15 เซนติเมตร
ความเร็วรอบในการหมุน	40 รอบ/นาที

3.2 ขั้นตอนในการเริ่มต้นระบบโดยการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์

ตะกอนน้ำเสียชุมชนจากระบบบำบัดแอนแอโรบิก ได้ถูกเลี้ยงให้จุลินทรีย์มีความแข็งแรงและปริมาณเพียงพออยู่ในถังปฏิกรณ์ที่สร้างขึ้น จุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ได้รับการปรับตัวประมาณ 3-4 เดือนด้วยน้ำเสียสังเคราะห์โดยน้ำตาลกลูโคสจนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady-State Conditions) โดยเราสามารถสังเกตได้จากค่า COD ของน้ำเสียที่ออกมามีค่าค่อนข้างคงที่ โดยดูได้จากร้อยละความคลาดเคลื่อนซึ่งเท่ากับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ COD หากด้วยค่าเฉลี่ยของ COD โดยใช้จำนวนตัวอย่างหลังสุด 8-12 ตัวอย่าง ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนที่ได้ต้องมีค่าไม่เกิน 5%



รายละเอียด

- | | |
|---------|--|
| 1 | มอเตอร์ |
| 2, 7, 9 | ท่อพีวีซีสำหรับทางน้ำเข้า, ออกและแก๊สออก มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1/2 นิ้ว |
| 3, 6 | วาล์วที่ใช้ในการควบคุมน้ำเข้าถังปฏิกรณ์และควบคุมแก๊สที่เกิดขึ้น |
| 4 | ใบพัดแบบมีแกนหมุน |
| 5 | ถังปฏิกรณ์ |
| 8 | สายยาง |
| 10 | ถังที่ใช้ในการเก็บแก๊สแบบแทนที่น้ำ |

ภาพที่ 3.1 ถังปฏิกรณ์แอนแอโรบิกที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

หลังจากนั้นก็เริ่มทำการวิจัยได้โดยการเริ่มป้อนสารแปลกปลอมในแต่ละชนิดที่ต้องการจะศึกษาลงไปทีละน้อยในถังปฏิกรณ์แต่ละตัว

3.3 วิธีในการดำเนินการวิจัย

3.3.1) น้ำเสียหรือสารแปลกปลอมที่ป้อนเข้าสู่ระบบ

น้ำเสียหรือสารแปลกปลอมที่ป้อนเข้าสู่ระบบในการดำเนินการวิจัยนี้เป็นน้ำเสียที่ได้รับ การสังเคราะห์ขึ้นมาโดยใน

-ถังปฏิกรณ์ใบแรกเป็นน้ำตาลกลูโคสซึ่งเป็นตั้งที่ใช้ในการควบคุม

-ถังปฏิกรณ์ใบที่สอง นอกจากมีน้ำตาลกลูโคสแล้วยังมีสาร CB, MC และซัลเฟต (SO_4^{2-}) เป็นสารแปลกปลอมที่เราป้อนลงไปเพื่อต้องการศึกษา

-ถังปฏิกรณ์ใบที่สาม นอกจากมีน้ำตาลกลูโคสแล้วยังมีสาร CB และ MC เป็นสารแปลกปลอมที่เราป้อนลงไปเพื่อต้องการศึกษาโดยไม่มีซัลเฟต

-ถังปฏิกรณ์ใบสุดท้าย มีเพียงน้ำตาลกลูโคสและซัลเฟต

ลักษณะของน้ำเสียที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นมานี้ถูกทำให้มีความเข้มข้นเหมือนกับน้ำเสียจริง ที่ได้ข้อมูลจาก Environmental Protection Agency (1987) โดยมีรายละเอียดอยู่ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์ในแต่ละถังปฏิกรณ์

ถังปฏิกรณ์	ตัวแปรต่างๆ	ความเข้มข้น
ถังปฏิกรณ์ใบที่ 1 (ควบคุม)	น้ำตาลกลูโคส	8500 mg/L
	Yeast Extract	30 mg/L
ถังปฏิกรณ์ใบที่ 2	น้ำตาลกลูโคส	8500 mg/L
	Yeast Extract	30 mg/L
	Chlorobenzene	50 และ 150 ppm
	Methylene Chloride	30 และ 90 ppm
	ซัลเฟต	1000 mg/L
ถังปฏิกรณ์ใบที่ 3	น้ำตาลกลูโคส	8500 mg/L
	Yeast Extract	30 mg/L
	Chlorobenzene	50 และ 150 ppm
	Methylene Chloride	30 และ 90 ppm
ถังปฏิกรณ์ใบที่ 4	น้ำตาลกลูโคส	8500 mg/L
	Yeast Extract	30 mg/L
	ซัลเฟต	1000 mg/L

3.3.2) ระยะเวลาในการเก็บกัก (Hydraulic Retention Time); HRT

การดำเนินการวิจัยนี้แยกออกเป็น 4 ช่วง โดยในช่วงแรกใช้ระยะเวลาเก็บกักประมาณ 10

วัน ในทุกๆถึงปฏิกรณ์ของการดำเนินงาน จนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ หลังจากนั้นก็จะทำการเปลี่ยนแปลงในช่วงต่อไป เป็น 7 วัน 5 วัน และ 2 วัน ของระยะเวลาเก็บกัก

3.3.3) การควบคุม pH และ อุณหภูมิ

pH ที่ใช้ในการทดลองนี้ ถูกควบคุมให้อยู่ในช่วง 6.6-7.6 ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแบคทีเรียพวกก่อมีเซน

อุณหภูมิที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นอุณหภูมิปกติโดยไม่ได้มีการควบคุมเพื่อให้ระบบมีอุณหภูมิเหมือนกับสภาพความเป็นจริง

3.4 การวิเคราะห์การทดลอง

เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ในแต่ละช่วงของระยะเวลาเก็บกัก ได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจำนวน 4 ตัวอย่างที่ทางเข้าของถังปฏิกรณ์ ทางออกของถังปฏิกรณ์และ แก๊สที่เกิดขึ้นในแต่ละถังปฏิกรณ์ เพื่อนำไปวิเคราะห์อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งการวิเคราะห์น้ำเสียที่เก็บมานี้จะดำเนินการวิเคราะห์ตาม “Standard Methods” (Greenberg et al, 1992) โดยมีรายละเอียดในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรและวิธีการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสีย

ตัวแปร	วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์
Chlorobenzene	Gas Chromatographic Method
Methylene Chloride	Gas Chromatographic Method
Methane	Gas Chromatographic Method
Hydrogen Sulfide	Iodometric Method
Sulfate	Gravimetric Method with Ignition of Residue
COD	Dichromate Reflux Method

บทที่ 4
ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผล

การทดลองนี้มีวิธีในการดำเนินการวิจัยตามรายละเอียดในบทที่ 3 โดยทำการสังเคราะห์น้ำเสียและป้อนเข้าสู่ระบบทุกวัน การทดลองนี้ใช้เวลาทั้งสิ้นประมาณ 15 เดือน โดยมีรายละเอียดดังนี้

ถังปฏิกรณ์ ที่ใช้	เดือนที่															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
กลูโคส	← ปรับสภาพถังปฏิกรณ์ →						Hrt 10 วัน		Hrt 7 วัน		Hrt 5 วัน	Hrt 2 วัน				
กลูโคส +CB+MC +ซัลเฟต	← ปรับสภาพถังปฏิกรณ์ →									Hrt 10 วัน		Hrt 7 วัน		Hrt 5 วัน	Hrt 2 วัน	
กลูโคส +CB+MC	← ปรับสภาพถังปฏิกรณ์ →								Hrt 10 วัน		Hrt 7 วัน		Hrt 5 วัน	Hrt 2 วัน		
กลูโคส +ซัลเฟต	← ปรับสภาพถังปฏิกรณ์ →						Hrt 10 วัน	Hrt 7 วัน			Hrt 5 วัน	Hrt 2 วัน				

ซึ่งในแต่ละระยะเวลาเก็บกัก (HRT) จะป้อนน้ำเสียสังเคราะห์เข้าสู่ระบบด้วยอัตราคงที่ โดยมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 26-29 องศาเซลเซียส และมี pH อยู่ในช่วง 9-12 ซึ่งค่าตัวแปรทั้งสองอยู่ในช่วงที่ไม่กว้างมาก โดยอุณหภูมิที่ได้จะเป็นอุณหภูมิทั่วไปที่อยู่ในประเทศเขตร้อน ส่วนค่าของตัวแปรอื่นๆที่ได้จากการทดลองจะได้นำเสนอต่อไปตามลำดับ

4.1 การตรวจสอบว่าระบบเป็น CSTR

การตรวจสอบว่าระบบที่ทำการวิจัยนี้เป็นระบบ CSTR หรือไม่ สามารถตรวจสอบได้จากค่าของ Reynolds Number: N_{Re} โดยจะต้องมีค่ามากกว่า 10000 ซึ่งแสดงว่าเกิดการปั่นป่วน (Turbulent Flow) ขึ้นภายในถังปฏิกรณ์จึงสามารถยืนยันได้ว่าระบบที่ทำการทดลองศึกษานี้เป็นระบบ CSTR ดังนี้

$$N_{Re} = \frac{D_i^2 n \rho}{\mu} \quad (4.1)$$

โดยที่ N_{Re} = Reynolds Number

D_i = เส้นผ่าศูนย์กลางของใบกวน, เมตร

n = ความเร็วรอบในการหมุน, รอบต่อวินาที

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ, $\rho = \frac{\gamma}{g_c}$

γ = น้ำหนักจำเพาะของน้ำ, N/m^3

$g_c = 9.806 \text{ m/S}^2$

μ = ความหนืดของน้ำ, $N-S/m^2$

จากสมการที่ 4.1 ความเร็วในการหมุน = 0.667 รอบ/วินาที และเส้นผ่าศูนย์กลางของใบกวน = 0.15 เมตรทำให้สามารถคำนวณหาค่าของ N_{Re} จากการทดลองได้เท่ากับ 11450.382 > 10000 ดังนั้นแสดงว่าเกิดการปั่นป่วนขึ้นภายในถังปฏิกรณ์ แสดงว่าระบบที่ใช้ทดลองนี้เป็นระบบ CSTR (Reynolds et al, 1995)

4.2 ลักษณะของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบ

น้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีคุณลักษณะดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยแสดงถึงลักษณะของน้ำเสียในแต่ละถังปฏิกรณ์ที่ HRT ต่างๆ ซึ่งจากตารางที่ 4.1 จะพบว่า ลักษณะของน้ำเสียในแต่ละถังปฏิกรณ์ไม่แตกต่างกันมากเช่น ค่า COD มีค่าอยู่ในช่วง 7595-7970 มิลลิกรัมต่อลิตร ชัลไฟด์ มีค่าอยู่ในช่วง 2.5-2.8 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากเก็บตัวอย่างน้ำมาทำการวิเคราะห์ทันทีหลังจากที่สังเคราะห์น้ำเสร็จจึงทำให้มีค่าน้อย ค่าของซัลเฟตในถังที่ใส่ลงไปมีค่าอยู่ที่ 435 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนในถังที่ไม่ได้ใส่ลงไปมีค่าของซัลเฟตเฉลี่ยอยู่ที่ 24 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นเริ่มต้นของสาร CB และ MC อยู่ที่ 50 ppm และ 30 ppm ตามลำดับแต่เมื่อทำการตรวจวัดหาค่าของ CB และ MC จากน้ำเสียออกของระบบ พบว่าค่าที่วัดได้มีค่าส่วนใหญ่เป็นศูนย์ซึ่งทำให้สามารถบอกได้เพียงอย่างเดียวว่าประสิทธิภาพในการบำบัด CB และ MC เป็น 100% แต่ไม่สามารถ

ตารางที่ 4.1 ค่าตัวแปรต่างๆของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบในแต่ละถังปฏิกรณ์ที่สภาพต่างๆ

ตัวแปร	ค่าเฉลี่ยในแต่ละระยะเวลาเก็บกักที่วัดได้จากการทดลอง (mg/L)			
	ถังควบคุม	ถังที่ใส่ CB+MC	ถังที่ใส่ CB+MC+ซัลเฟต	ถังควบคุม+ซัลเฟต
pH	11.88	11.36	12.10	11.25
อุณหภูมิ	28.25	27.80	27.90	27.85
COD	7595	7955	7839	7970
BOD	4432	4698	4731	5595
ซัลไฟด์	----	----	2.5	2.8
ซัลเฟต	----	----	421	449
TKN	27	29	27	27
ฟอสฟอรัส	12.7	13.9	12.1	12.6
TS	4072	5104	5360	5235
SS	396	316	426	325
TDS	3677	4789	4935	4910
TVS	3080	2612	2514	2982
VSS	210	237	180	289
VDS	2870	2375	2334	2693
CB	--	50, 150	50, 150	--
MC	--	30, 90	30, 90	--
Acetic acid	912	440	430	1129
Propionic acid	542	318	349	1041
Butyric acid	298	202	556	367

บอกถึงความสัมพันธ์หรือแนวโน้มของการบำบัดของแต่ละถังปฏิกรณ์ที่ HRT ต่างๆได้ ดังนั้นจึงเพิ่มความเข้มข้นของ CB และ MC อีก 3 เท่าเป็น 150 ppm และ 90 ppm ตามลำดับที่ HRT 7 วันและ 5 วันทั้งในสภาพที่มีซัลเฟตและไม่มีซัลเฟต เพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์และแนวโน้มระหว่างถังปฏิกรณ์ต่างๆ ส่วนความเข้มข้นของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่เติมลงไปเพื่อเป็นสารอาหารมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 28 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 13 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

4.3 การประเมินผลประสิทธิภาพของระบบสัมผัสแอนแอโรบิก

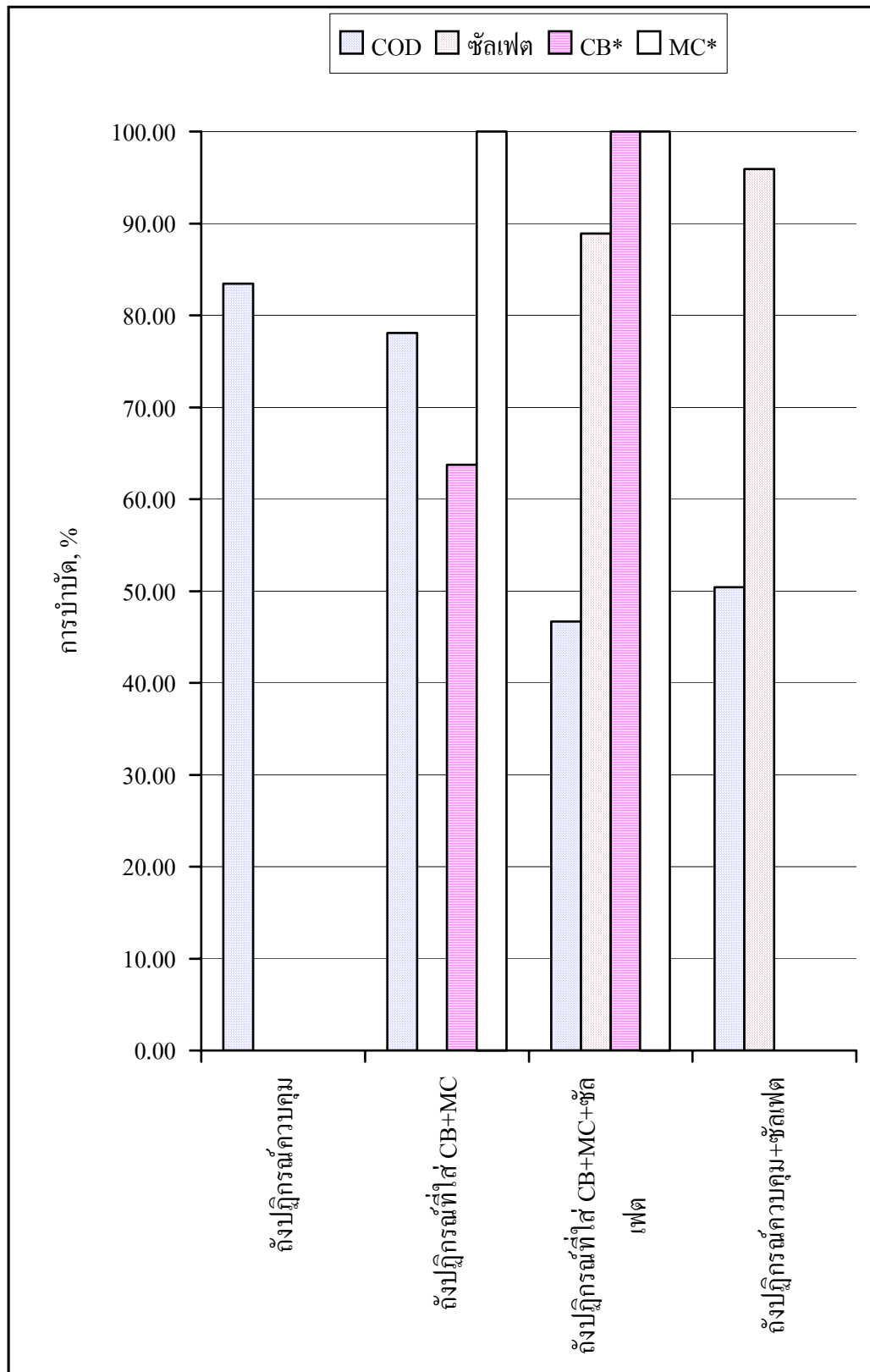
ในการศึกษาเรื่องการดึงอะตอมคลอรีนจากน้ำเสียโพลีเมอร์โดยระบบสัมผัสแอนแอโรบิก นี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ใส่ลงไปจนถึงปฏิกรณ์ทั้งสี่ถึงในสภาพต่างๆกันคือ

- ถึงปฏิกรณ์ใบแรก เป็นน้ำตาลกลูโคสซึ่งเป็นถึงที่ใช้ในการควบคุม
- ส่วนถึงปฏิกรณ์ใบที่ 2 และ 3 นอกจากจะมีน้ำตาลกลูโคสแล้วยังมีสาร CB และ MC โดยถึงปฏิกรณ์ใบที่ 2 และ 3 จะแตกต่างกันตรงที่มีซัลเฟตและไม่มีซัลเฟตซึ่งเป็นสารแปลกปลอมที่เราป้อนลงไปเพื่อทำการศึกษา

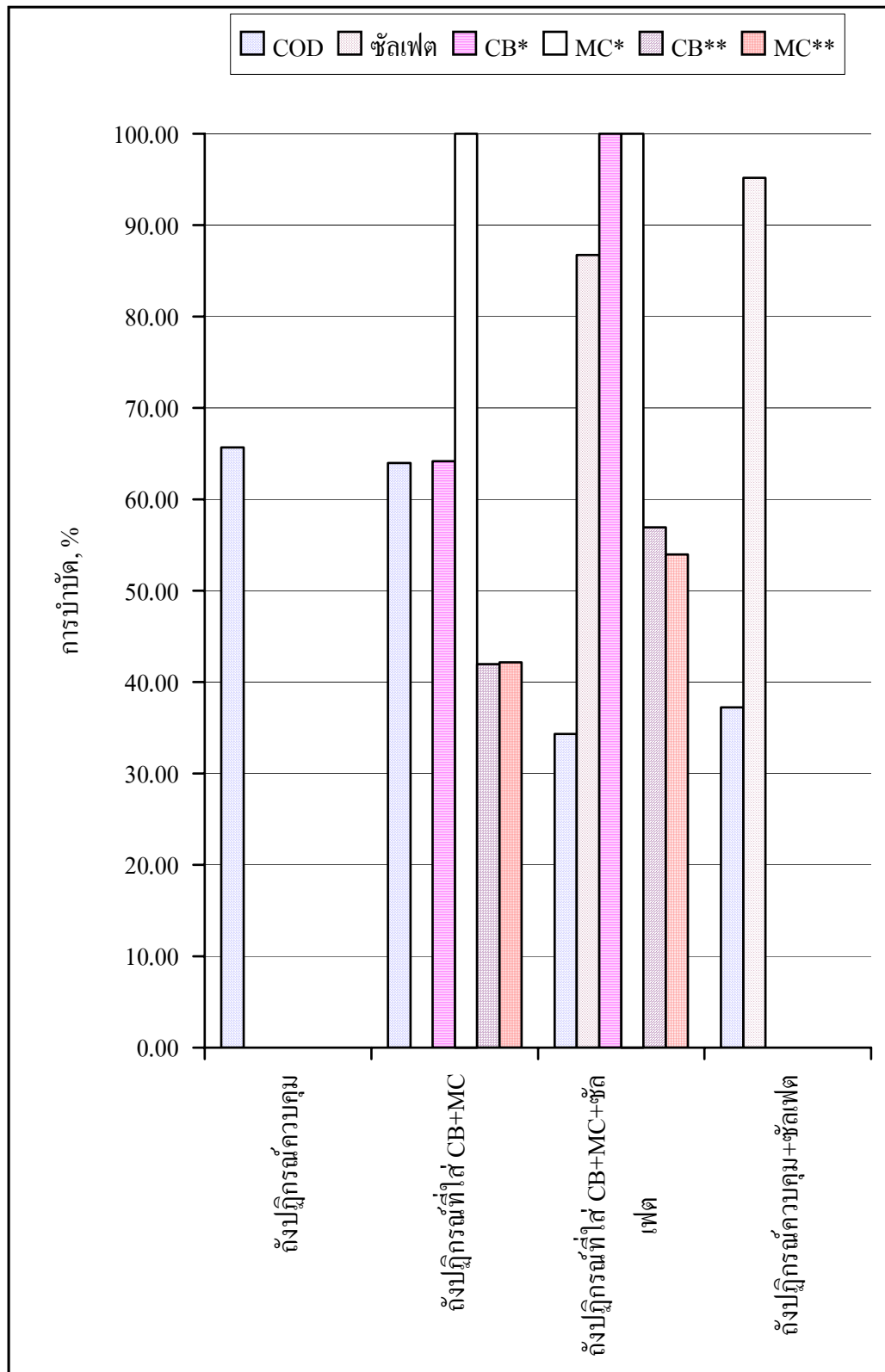
- ถึงปฏิกรณ์ใบสุดท้าย เป็นน้ำตาลกลูโคสและซัลเฟต

ถึงปฏิกรณ์ทุกใบถูกป้อนสารแปลกปลอมเข้าสู่ระบบด้วยระยะเวลาเก็บกัก (HRT) ต่างๆคือ 10 วัน 7 วัน 5 วันและ 2 วัน โดยมีอัตราการไหลตามลำดับคือ 0.01 0.014 0.019 และ 0.048 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยในแต่ละอัตราการไหลของถึงปฏิกรณ์แต่ละใบ ได้ทำการวิเคราะห์หาค่าของ COD ทุกวันจนกว่าระบบจะเข้าสู่สภาวะคงที่โดยสามารถดูได้จากร้อยละความคลาดเคลื่อนซึ่งเท่ากับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ COD หาค่าเฉลี่ยของ COD โดยใช้จำนวนตัวอย่างหลังสุด 8-12 ตัวอย่าง ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนที่ได้ต้องมีค่าไม่เกิน 5% ซึ่งผลการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงอยู่ในภาคผนวก ข และเราก็ทำการวิเคราะห์หาค่าของ COD ซัลไฟด์ ซัลเฟต แก๊สมีเทน CB และ MC ตามวิธี “Standard Method” (Greenberg et al,1992) ในทุกๆ HRT และในแต่ละถึงปฏิกรณ์ภายหลังจากที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่แล้ว ซึ่งจากข้อมูลที่วิเคราะห์ได้ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของถึงปฏิกรณ์แต่ละใบใน HRT ต่างๆดังที่แสดงอยู่ในตารางภาคผนวก ค และ ง

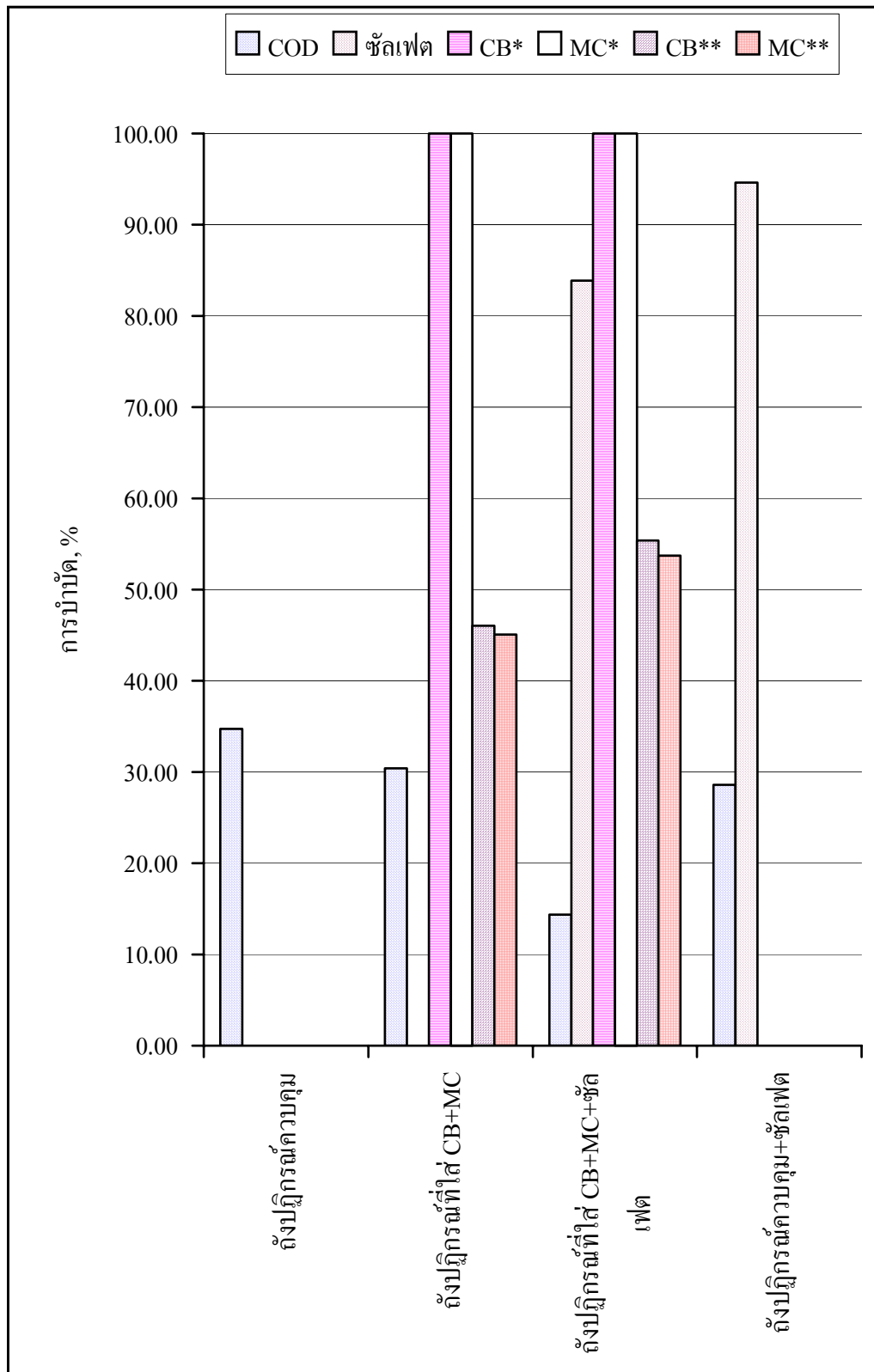
เราสามารถเปรียบเทียบคุณภาพน้ำก่อนและหลังบำบัดของแต่ละถึงปฏิกรณ์ที่ HRT ต่างๆได้จากภาคผนวก ง และจากที่กล่าวมาทำให้เราทราบถึงความสามารถของถึงปฏิกรณ์แต่ละใบแล้ว และต่อไปเรายังสามารถเปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพของถึงปฏิกรณ์ที่แต่ละ HRT ต่างๆได้ดังภาพที่ 4.1-4.4 และตารางในภาคผนวก จ ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพของการบำบัด COD เหมือนกันในทุกๆ ระยะเวลาเก็บกัก โดยถึงปฏิกรณ์ควบคุมเป็นถึงที่ดีที่สุด ประสิทธิภาพการบำบัด COD อันดับที่สองคือถึงที่ใส่สารแปลกปลอมแต่ไม่มีซัลเฟต ประสิทธิภาพการบำบัด COD อันดับที่สามคือถึงที่เหมือนกับถึงควบคุมแต่ใส่ซัลเฟตเพิ่มลงไปและถึงที่มีประสิทธิภาพการบำบัด COD ต่ำที่สุดได้แก่ถึงที่ใส่สารแปลกปลอมและมีซัลเฟต โดยประสิทธิภาพการบำบัด COD นี้ที่ระยะเวลาเก็บกัก 10 วันจะดีที่สุด แต่เมื่อมาพิจารณาเพียงแค่สาร 2 ชนิดคือ CB และ MC จะพบว่าถึงปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารทั้งสองชนิดดังกล่าวได้ดีกว่าถึงที่ไม่ได้ใส่ซัลเฟตลงไปแสดงว่าซัลเฟตมีส่วนช่วยในกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพของสารทั้งสองดังกล่าว



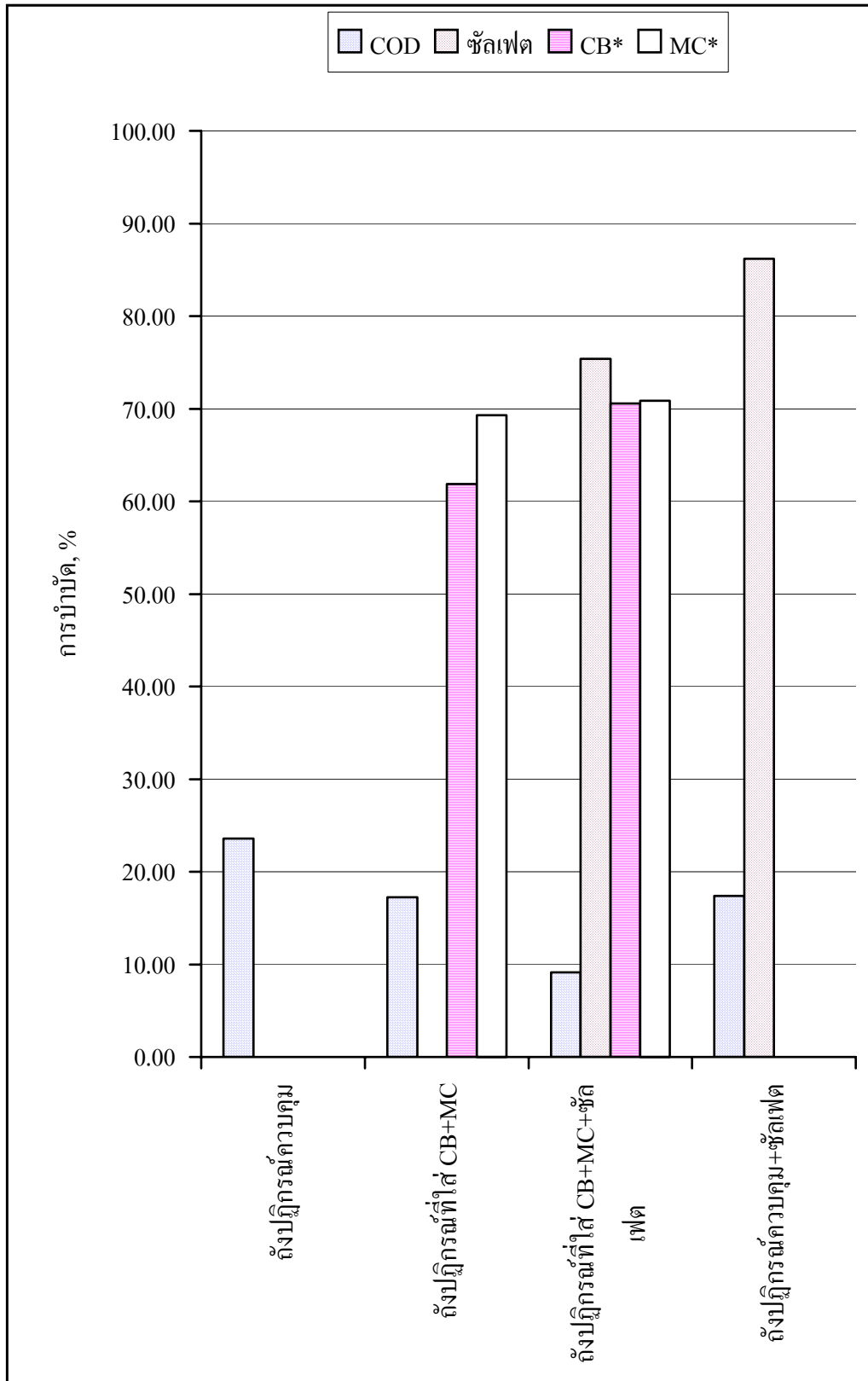
ภาพที่ 4.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของถังปฏิกรณ์ทั้งสองที่ HRT 10 วัน



ภาพที่ 4.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของถังปฏิกรณ์ทั้งสี่ที่ HRT 7 วัน



ภาพที่ 4.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของถังปฏิกรณ์ทั้งสี่ถังที่ HRT 5 วัน



ภาพที่ 4.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของถังปฏิกรณ์ทั้งสี่ถังที่ HRT 2 วัน

ต่อไปจะได้อธิบายถึงรายละเอียดของแต่ละตัวแปรได้ทำการศึกษาวิจัยดังนี้

4.3.1) อุณหภูมิและpH

ค่า pH ของน้ำที่อยู่ภายในถังปฏิกรณ์ทั้งสี่ถังถูกควบคุมให้มีค่าเป็นกลางมากที่สุดเพื่อให้เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยจากการเก็บตัวอย่างพบว่าค่า pH ของน้ำที่ออก จากถังปฏิกรณ์ทั้งสามถังมีค่าอยู่ในช่วง 5.1-7.8 และมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 27-30 องศาเซลเซียส

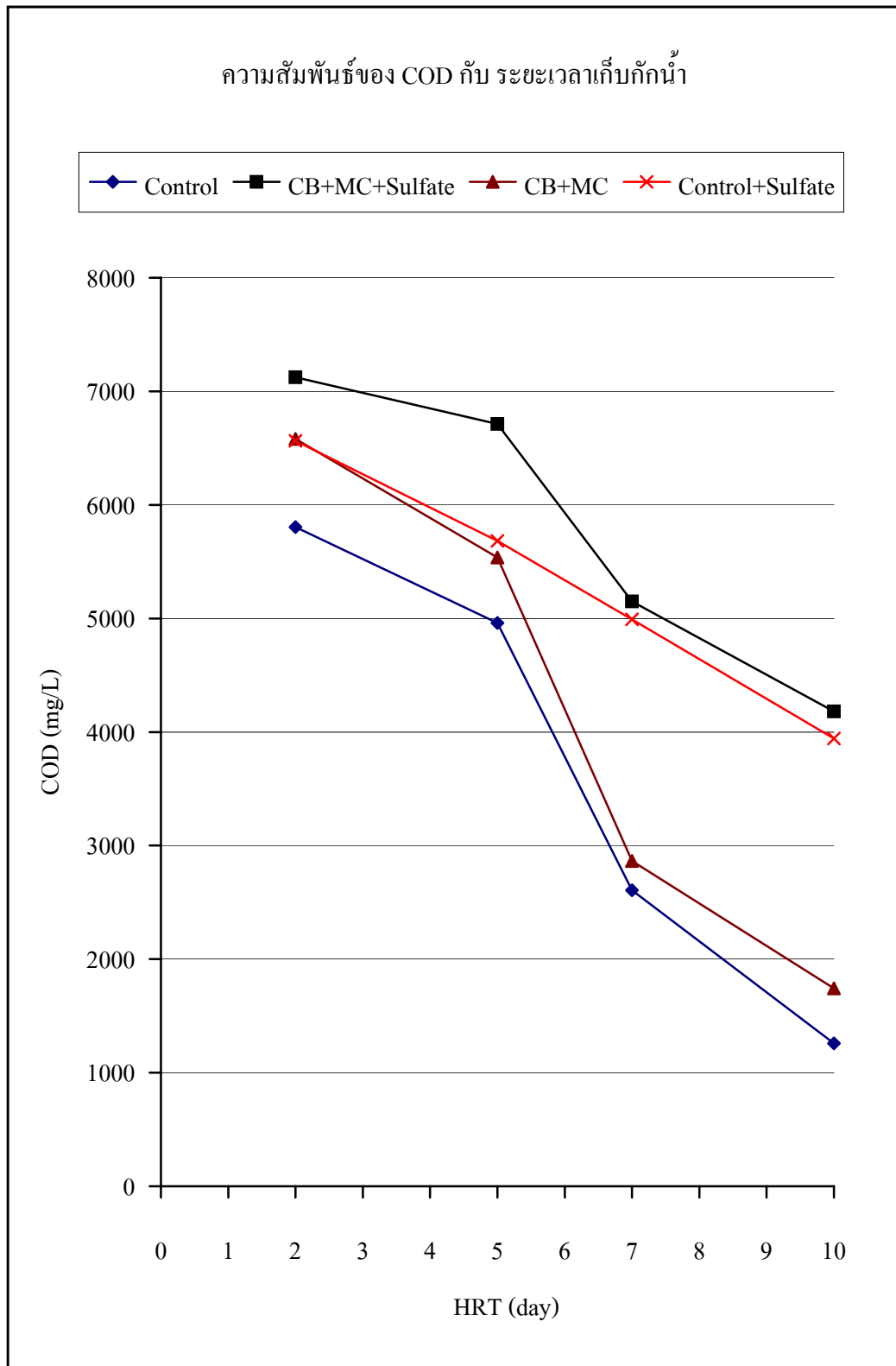
4.3.2) ประสิทธิภาพการบำบัด COD

ประสิทธิภาพการบำบัด COD ของระบบสัมผัสแอนแอโรบิกที่ HRT 10 วัน 7 วัน 5 วัน และ 2 วัน ที่สภาวะต่างๆของถังปฏิกรณ์แต่ละใบแสดงไว้ในตารางภาคผนวก 1ค 2ค 3ค 4ค และ 1จ 2จ 3จ 4จ ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพการบำบัด COD จะเพิ่มขึ้นตาม HRT ที่เพิ่มขึ้นหรือตรงข้ามกับ อัตราการไหลที่ลดลง และที่อัตราการไหลต่ำที่สุดหรือที่ HRT 10 วันนี้มีประสิทธิภาพในการบำบัด COD ได้สูงสุดเพราะว่ามีระยะเวลาเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยารย่อยสลายทางชีวภาพ ซึ่งในภาพ ที่ 4.5-4.6 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของ COD น้ำออกกับถังปฏิกรณ์ที่ HRT ต่างๆและ ประสิทธิภาพการบำบัด COD ของถังปฏิกรณ์ต่างๆ ตามลำดับและถ้าเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพ ในการบำบัด COD ของถังปฏิกรณ์ในแต่ละชนิดของสารแปลกปลอมที่ใส่ลงไปโดยสนใจใน แต่ละ HRT นั้นๆจะพบว่าที่ HRT 10 วัน (HRT นี้ถังปฏิกรณ์ทั้งสี่ถังมีประสิทธิภาพการบำบัด COD สูงสุดเมื่อเทียบกับที่ HRT อื่นๆ) ถังปฏิกรณ์ควบคุม ถังปฏิกรณ์ที่ใส่ CB+MC ถังปฏิกรณ์ที่ใส่ CB+MC+ซัลเฟต และถังปฏิกรณ์ควบคุม+ซัลเฟตมีประสิทธิภาพการบำบัด COD เท่ากับ 83.42 % 78.09% 46.68% และ50.44% ตามลำดับแสดงว่าถังปฏิกรณ์ที่มีสารแปลกปลอมและซัลเฟตรวมอยู่ ด้วยเป็นถังที่มีประสิทธิภาพการบำบัด COD ต่ำที่สุดและต่ำกว่าถังปฏิกรณ์ที่มีสารแปลกปลอม ด้วยกันแต่ไม่มีซัลเฟต และจากภาพที่ 4.6 สามารถสังเกตเห็นได้อีกอย่างว่า ร้อยละของการบำบัด COD ที่ HRT 10 วันมีค่าประมาณ 80 % และเหลือประมาณ 20% ที่ HRT 2 วัน แสดงให้เห็นว่าถัง ปฏิกรณ์ได้เปลี่ยนสภาพจากถังปฏิกรณ์ที่ก่อมีเทน (Methanogenic Reactor) ไปเป็นถังปฏิกรณ์ที่ก่อ กรด (Acidogenic Reactor)

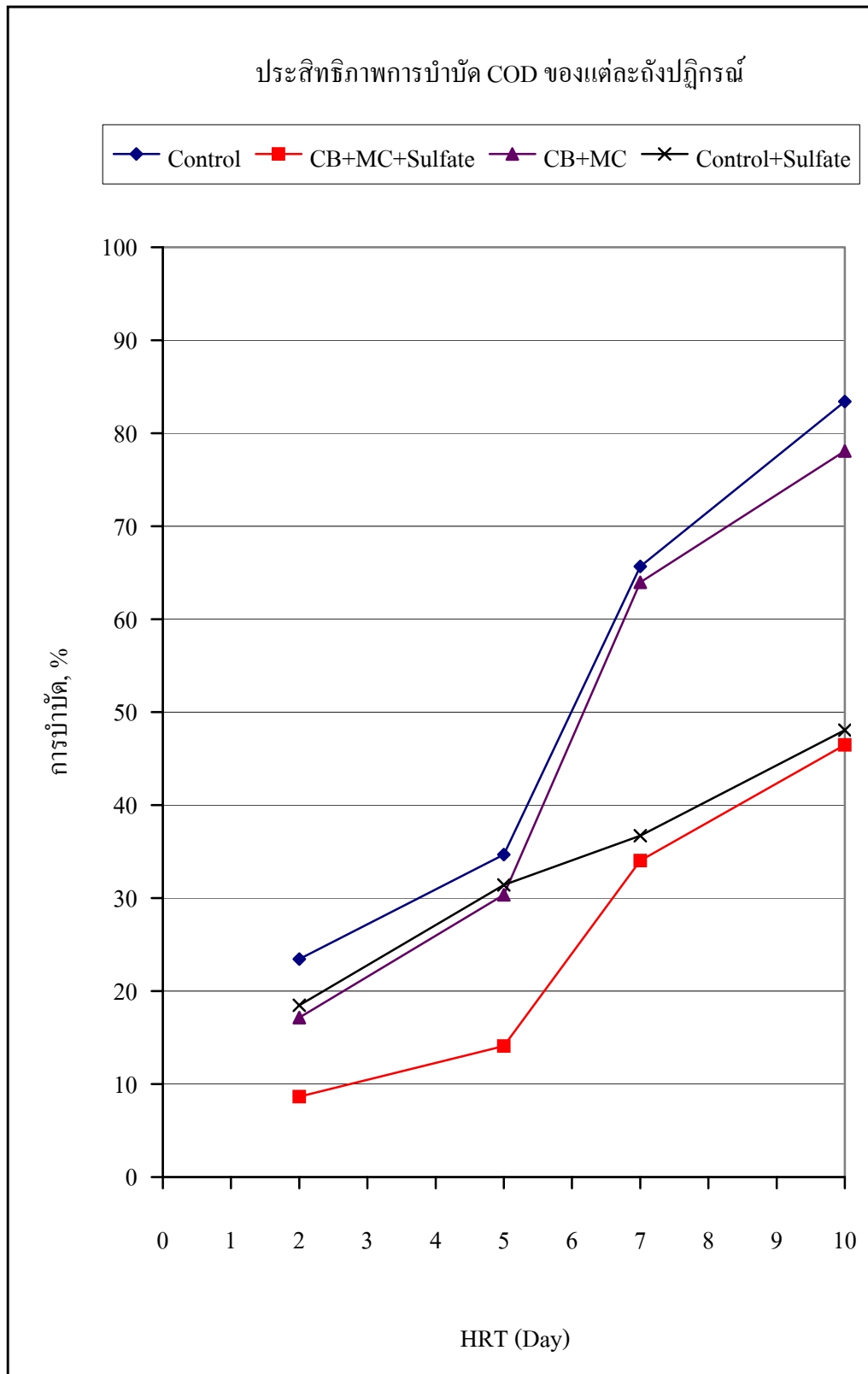
จากการวิจัยนี้ทำให้เราทราบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการบำบัด COD มีอยู่ 2 ปัจจัยคือ ระยะเวลาเก็บกักน้ำและชนิดของสารแปลกปลอมที่ใส่ลงไปถังปฏิกรณ์เช่นในสภาพที่มีซัลเฟตหรือไม่มีซัลเฟต

4.3.3) ประสิทธิภาพการลดซัลเฟต

เป็นที่ทราบกันดีว่า การประยุกต์ใช้ระบบแอนแอโรบิกในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมมี ข้อจำกัด เพราะวาระบบแอนแอโรบิกมีความอ่อนไหวมากต่อสารพิษหรือสารยับยั้งต่างๆที่มีอยู่ใน น้ำเสียของอุตสาหกรรม (Parkin et al., 1983) ซึ่งสารยับยั้งที่เราจำคิดนี้คือ ซัลเฟต ซึ่งพบในน้ำเสีย



ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของ COD น้ำออกกับถังปฏิกรณ์ที่ HRT ต่างๆ



ภาพที่ 4.6 ประสิทธิภาพในการบำบัด COD ของแต่ละถังปฏิกรณ์

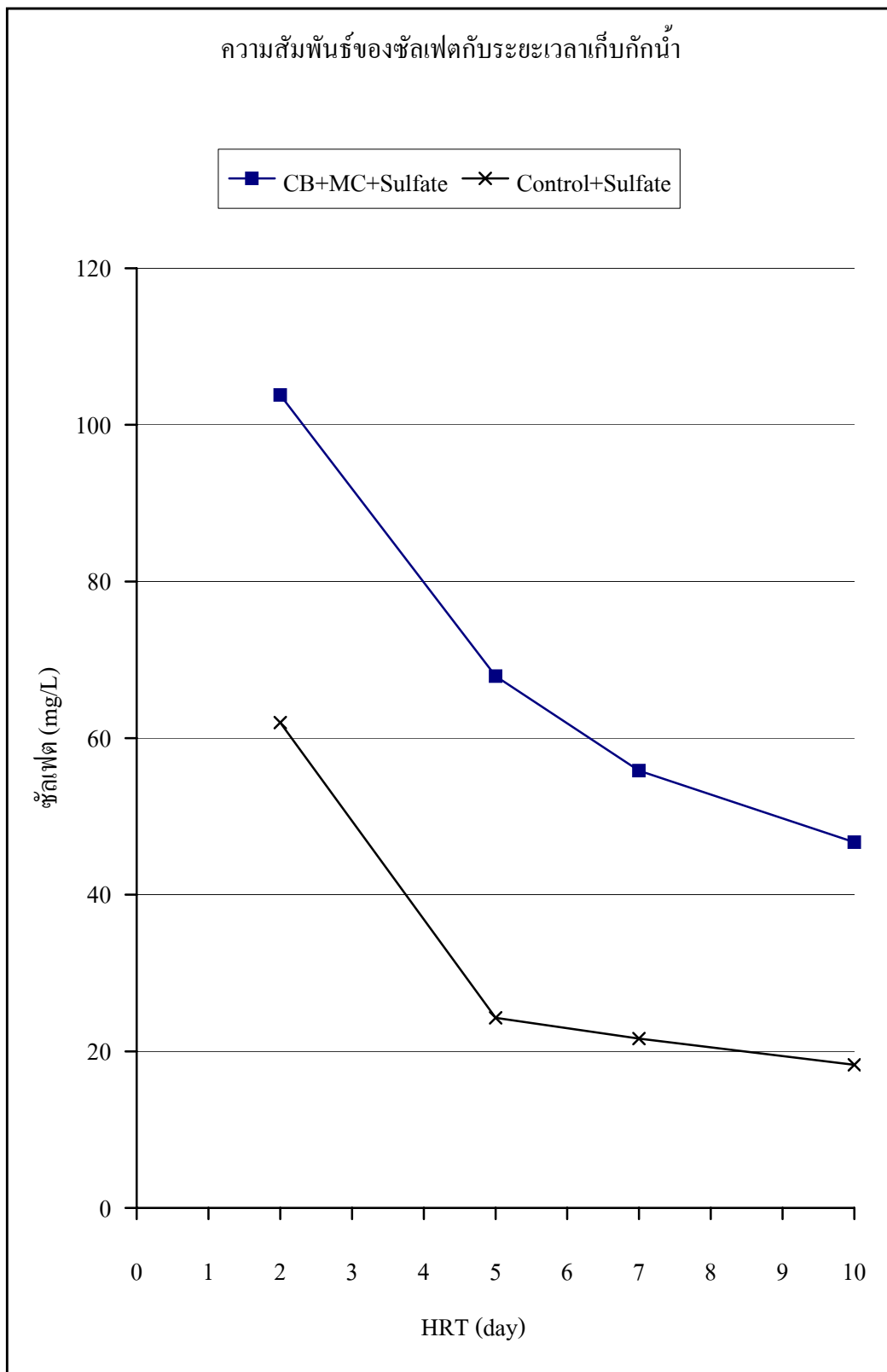
จากอุตสาหกรรมประเภท น้ำตาล กระดาษ และเคมี เป็นต้นโดยประสิทธิภาพการลดซัลเฟตของระบบสัมผัสแอนแอโรบิกที่ทำการวิจัยในแต่ละ HRT พบว่าที่ HRT 10 วันมีประสิทธิภาพการลดซัลเฟตสูงสุด รองลงมาคือที่ HRT 7 วัน 5 วัน และ 2 วัน ตามลำดับในทุกๆสภาวะต่างๆของถังปฏิกรณ์ดังที่แสดงไว้ในตารางภาคผนวก 1ค 2ค 3ค 4ค และ 1จ 2จ 3จ 4จ โดยเห็นได้ว่า HRT ที่เพิ่มขึ้นหรืออัตราการไหลที่ลดลง ทำให้ประสิทธิภาพในการลดซัลเฟตเพิ่มขึ้น ซึ่งในภาพที่ 4.7 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของซัลเฟตกับถังปฏิกรณ์ที่ HRT ต่างๆ และในภาพที่ 4.8 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการลดซัลเฟตของแต่ละถังปฏิกรณ์ ซึ่งพบว่าถังปฏิกรณ์ที่ใส่ซัลเฟตลงไปเป็นส่วนประกอบของอินทรีย์สารในน้ำเสียที่สังเคราะห์ขึ้น มีประสิทธิภาพในการลดซัลเฟตได้เท่ากับ 88.91% 86.75% 83.88%และ 75.36% ที่ HRT 10 วัน 7 วัน 5 วันและ 2 วัน ตามลำดับ ดังนั้นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการลดซัลเฟตก็คือ ระยะเวลาเก็บกักน้ำ นอกจากนี้ ซัลเฟตที่มีความเข้มข้นสูง จะมีผลกระทบรุนแรงต่อการย่อยสลายทางชีวภาพอันเนื่องมาจากแบคทีเรียลดซัลเฟต (Sulfate-reducing bacteria; SRB) และแบคทีเรียก่อมีเทนจะได้รับผลกระทบที่รุนแรงกว่าแบคทีเรียก่อกรดเมื่อซัลเฟตและซัลไฟด์มีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น โดยที่ซัลเฟตจะปลดปล่อยกระบวนการเกิดมีเทนเพราะว่ามันจะเปลี่ยนอะซิเตทไปเป็น CO₂ มากกว่าเปลี่ยนไปเป็นมีเทน (Bryant et al, 1977; Lovley and Klug, 1983) การเปลี่ยนของอะซิเตทดังกล่าวโดยกระบวนการลดซัลเฟตจะเป็นแบบเทอร์โมไดนามิก ซึ่งจะทำให้ปริมาณของอินทรีย์สารที่เปลี่ยนไปเป็นแก๊สมีเทนลดลงโดยที่เราสามารถทราบได้จากการวิเคราะห์สมมูลมวล COD ตามที่ได้กล่าวไว้ในภาคผนวก จ ซึ่งการลดลงของ COD ในทุกๆส่วนของถังปฏิกรณ์แอนแอโรบิกจะเกิดจากกลไก 2 อย่างคือ การลดซัลเฟต (Sulfate Reduction) และการก่อมีเทน (Methanogenesis)

4.3.4) ความสัมพันธ์ระหว่างซัลไฟด์และซัลเฟต

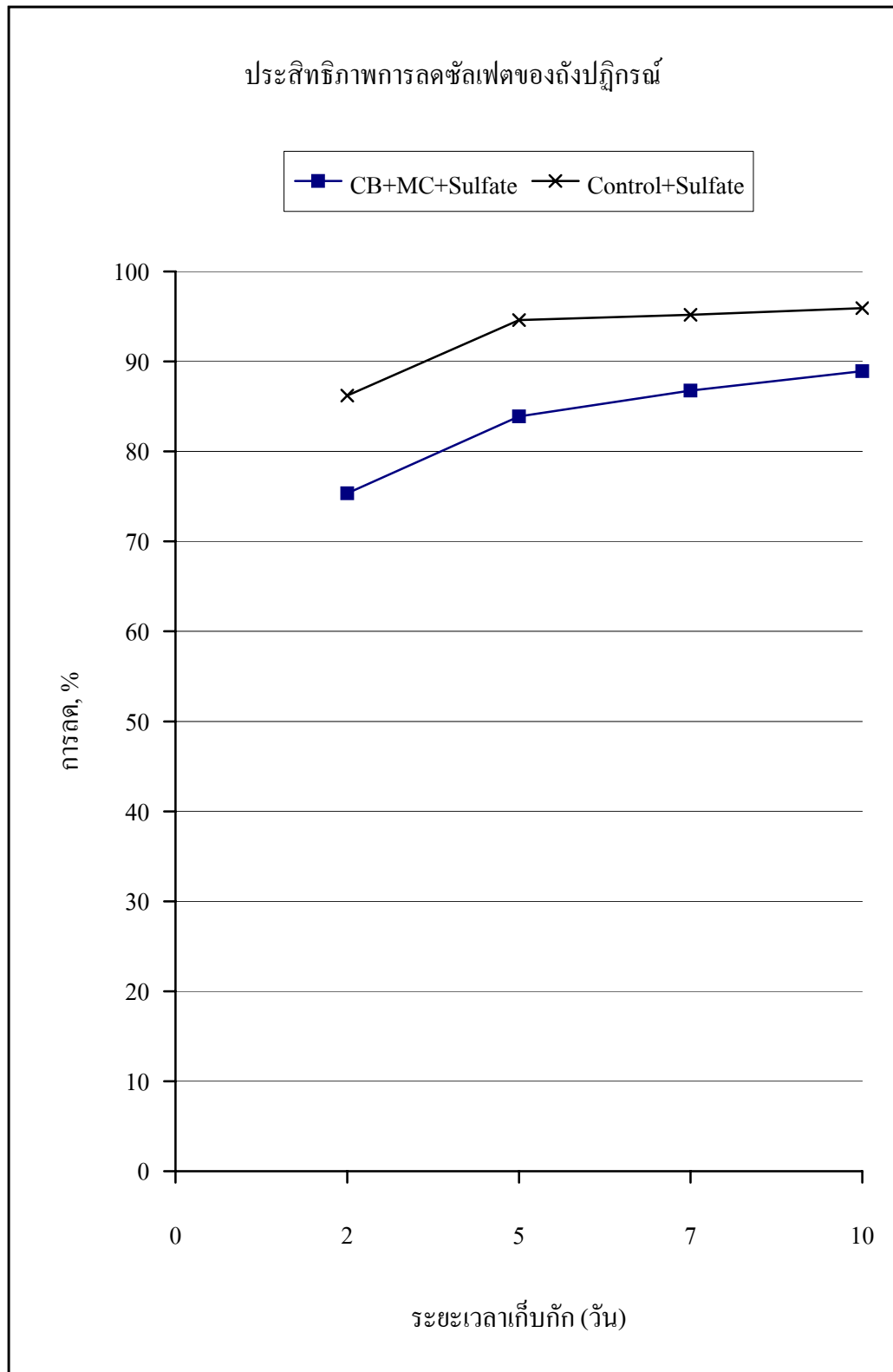
แบคทีเรียลดซัลเฟต (SRB) มีอิทธิพลต่อกระบวนการการเปลี่ยนแปลงของซัลเฟตไปเป็นซัลไฟด์ (Sulfate reduction) ซึ่งค่าความเข้มข้นของซัลเฟตที่ลดลง นอกจากจะเกี่ยวข้องกับกลไกในการย่อยสลายทางชีวภาพแล้วยังเกี่ยวข้องกับ ปฏิกริยาการเกิดซัลไฟด์ด้วย โดยเห็นได้จากค่าความเข้มข้นของซัลไฟด์ที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางภาคผนวก 2ง 4ง และในสมการสมมูลมวลในภาคผนวก จ โดยซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นนี้มีผลต่อการยับยั้งกระบวนการเกิดมีเทน (Production of methane)

ค่าของซัลไฟด์ที่ตรวจวัดได้ดังที่แสดงอยู่ในตารางภาคผนวก 2ง และ 4ง อาจมีค่าน้อยกว่าค่าของซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นจริงจากปฏิกริยาการลดซัลเฟต เนื่องจากมีซัลไฟด์บางส่วนได้หนีออกไปจากระบบโดยการ Stripping ไปพร้อมกับแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้น ซึ่งในภาพที่ 4.9 แสดงให้เห็นถึง

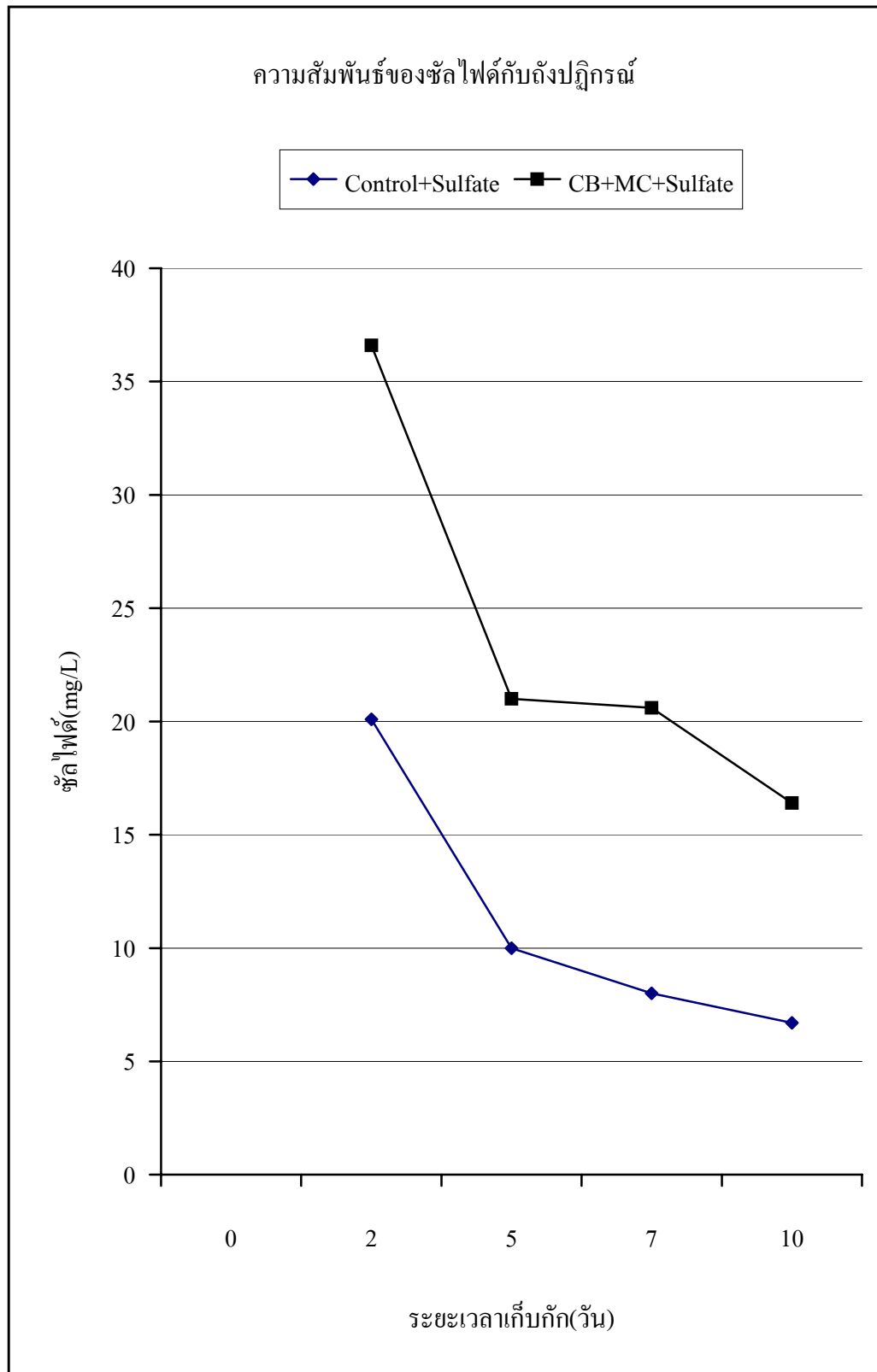
ความสัมพันธ์ของซัลไฟด์กับสภาพของถังปฏิกรณ์ที่ HRT ต่างๆ และพบว่าค่าของซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นสัมพันธ์กับ HRT โดยซัลไฟด์มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น หรือ HRT ที่ลดลง



ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของซัลเฟตกับถังปฏิกรณ์ที่ HRT ต่างๆ



ภาพที่ 4.8 ประสิทธิภาพในการลดซัลเฟตของแต่ละถังปฏิกรณ์



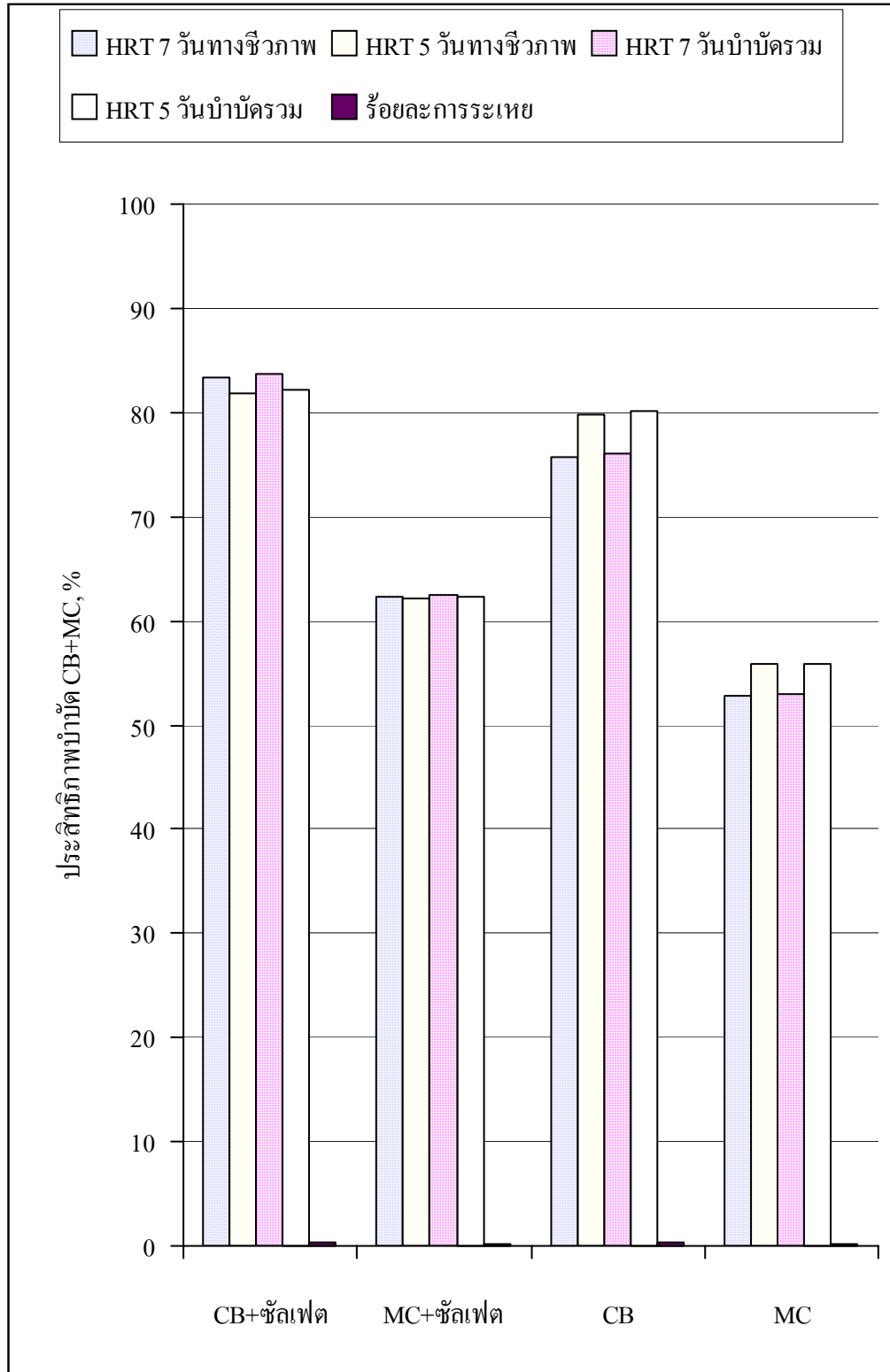
ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของซัลไฟด์กับถังปฏิกรณ์ที่ HRT ต่างๆ

ส่วนถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตเป็นถึงที่สามารถวัดค่าของซัลไฟด์ได้มากที่สุดและมากกว่าถังที่ไม่ได้ใส่ซัลเฟต และจากตารางในภาคผนวก 1ง 2ง 3ง และ 4ง จะเห็นว่าค่าของซัลไฟด์จากน้ำเสียที่เข้าระบบในทุกสภาพของถังปฏิกรณ์มีค่าน้อยเพราะว่า เราเก็บน้ำเสียที่เพิ่งจะสังเคราะห์เสร็จใหม่ๆมาทำการวิเคราะห์ โดยที่ปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันจะยังไม่เกิดขึ้น

4.3.5) ประสิทธิภาพการบำบัด CB และ MC

ระบบบำบัดที่เราู้จักกันอยู่มี 2 แบบ คือแบบใช้อากาศและไม่ใช้อากาศ แต่ระบบบำบัดแบบใช้อากาศไม่สามารถบำบัดสารอินทรีย์ที่ระเหยง่าย (Volatile organic compounds; VOC_s) เนื่องจาก VOC_s โดยเฉพาะพวกที่มีองค์ประกอบของคลอรีน (ในการวิจัยนี้ได้แก่ CB และ MC) จะไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ภายใต้สภาวะแอโรบิก และไม่สามารถถูกบำบัดได้ด้วยกระบวนการแอโรบิก (Dobbs, 1990; Melcer et al., 1989) ดังนั้นจึงได้ทำการวิจัยโดยใช้ระบบสัมผัสแอนแอโรบิกเพื่อบำบัด VOC_s โดยกลไกในการบำบัด CB และ MC ของระบบสัมผัสแอนแอโรบิกนี้ จะมีอยู่ 2 กลไกคือ การเปลี่ยนสถานะจากสารละลายกลายเป็นแก๊สแล้วระเหยไปในอากาศ (Stripping into the gas phase) โดย CB และ MC จะระเหยออกจากน้ำเสียที่ออกจากระบบโดยการออกไปพร้อมกับแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นในระบบ และกลไกการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biological degradation) โดยมีสมมติฐานที่สำคัญคือ ปริมาณของ CB และ MC ที่ป้อนเข้าสู่ระบบและไม่ได้ออกไปจากระบบพร้อมกับน้ำเสีย เราจะสมมติว่ามันถูกบำบัดได้ทั้งหมดด้วยกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพแต่จะไม่รวมส่วนที่มันระเหยไปในอากาศ (Stripping) พร้อมกับแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นจากระบบจากการวิจัยนี้จะพบว่า ประสิทธิภาพของการย่อยสลายทางชีวภาพในการบำบัด CB และ MC ทั้งในสภาพที่มีซัลเฟตและไม่มีซัลเฟตที่ HRT 10 วัน 7 วัน 5 วัน และ 2 วัน สามารถหาได้โดยการสมมูลมวล และในภาพที่ 4.10 ก็ทำให้เราสามารถเปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพของการบำบัดทางชีวภาพได้ง่ายขึ้น และถ้าเราลองพิจารณาวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพการบำบัดรวม (การย่อยสลายทางชีวภาพ+การ Stripping) ที่ HRT 7 วันและ 5 วัน โดยที่ความเข้มข้นของ CB และ MC ที่ใส่ลงไปในถังปฏิกรณ์เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 150 ppm และ 90 ppm ตามลำดับ พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดรวมในสภาพที่มีซัลเฟตจะมากกว่าในสภาพไม่มีซัลเฟต โดยในสภาพที่มีซัลเฟตที่ HRT 7 วัน และ 5 วัน มีประสิทธิภาพในการบำบัดรวมของ CB เท่ากับ 83.67 % และ 82.13 % ตามลำดับ และส่วนของ MC จะเท่ากับ 62.51% และ 62.25% ตามลำดับ ส่วนในสภาพที่ไม่มีซัลเฟตที่ HRT 7 วันและ 5 วันจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดรวมของ CB เท่ากับ 76.10% และ 80.18% ตามลำดับ และส่วนของ MC จะเท่ากับ 53.01% และ 55.93% ตามลำดับ โดยตารางในภาคผนวก 5จ จะแสดงให้เห็นถึงที่มาของประสิทธิภาพในการบำบัดรวมของ CB และ MC ทั้งในสภาพที่มีซัลเฟตและไม่มี

ซัลเฟต และต่อไปเราจะทำการวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพการบำบัด CB และ MC โดยการย่อยสลายทาง



ภาพที่ 4.10 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดโดยการย่อยสลายทางชีวภาพ

ชีวภาพและร้อยละการระเหย (Stripping) ของ CB และ MC ดังในตารางการวิเคราะห์ที่ 4.2 โดยจะเห็นว่าร้อยละการระเหยของสาร MC มีค่าน้อยกว่าร้อยละการระเหยของสาร CB ถึง 3.14 เท่า ทั้งในสภาพที่มีซัลเฟตและไม่มีซัลเฟต โดยที่เราสามารถเปรียบเทียบร้อยละของการระเหยกับร้อยละของการย่อยสลายทางชีวภาพ และประสิทธิภาพการบำบัดรวม ได้ดังภาพที่ 4.10 ซึ่งจากภาพดังกล่าวทำให้เราทราบว่า กลไกในการย่อยสลายทางชีวภาพจะเป็นกลไกที่มีความสำคัญมากที่สุดในการบำบัด VOC_s โดยเฉพาะกับ MC ซึ่งประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพน้อยกว่าของ CB โดยประมาณเท่ากับ 1.38 เท่าทั้งในสภาพที่มีซัลเฟตและไม่มีซัลเฟตทำให้สามารถสรุปได้อีกว่า MC ย่อยสลายได้ยากกว่า CB ทั้งในสภาพที่มีซัลเฟตและไม่มีซัลเฟต

ตารางที่ 4.2 ศึกษาร้อยละการระเหยเพื่อวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการบำบัด VOC_s โดยการย่อยสลายทางชีวภาพ

ตัวแปร	ก่อนเป่าอากาศ (ppm)	หลังเป่าอากาศ (ppm)	ร้อยละการระเหย	ประสิทธิภาพบำบัดรวม, %		ร้อยละย่อยสลายทางชีวภาพ		
				HRT 7 วัน	HRT 5 วัน	HRT 7 วัน	HRT 5 วัน	
ถึงที่ใส่ซัลเฟต	CB	32.34	32.24	0.31	83.67	82.13	83.37	81.82
	MC	15.27	15.25	0.10	62.51	62.25	62.38	62.11
ถึงที่ไม่ได้ใส่ซัลเฟต	CB	32.34	32.21	0.39	76.10	80.18	75.71	79.79
	MC	15.27	15.25	0.12	53.01	55.93	52.86	55.80

แต่เมื่อมองภาพรวมของประสิทธิภาพการบำบัด VOC_s ทั้ง 2 ชนิดในสภาพที่มีซัลเฟตและไม่มีซัลเฟตจะพบว่า ซัลเฟตมีส่วนช่วยในการย่อยสลายทางชีวภาพของ VOC_s เพราะในสภาพที่มีซัลเฟตประสิทธิภาพในการบำบัด CB และ MC โดยการย่อยสลายทางชีวภาพจะมากกว่าในสภาพที่ไม่มีซัลเฟตประมาณ 1.1 เท่าหรือประมาณ 10% นั่นคือซัลเฟตมีส่วนช่วยในการบำบัด CB และ MC ได้ดีกว่าในสภาพที่ไม่มีซัลเฟตประมาณ 10% เท่านั้น

จากที่กล่าวมาทั้งหมดทำให้สามารถทราบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพบำบัด VOC_s มีอยู่ 4 ปัจจัย คือ ระยะเวลาเก็บกักน้ำ ซัลเฟต ร้อยละการระเหย และชนิดของ VOC_s เอง โดยกลไกการย่อยสลายทางชีวภาพเป็นกลไกสำคัญและมีประสิทธิภาพในการบำบัด CB และ MC มากที่สุด

4.3.6) การเกิดแก๊สชีวภาพ

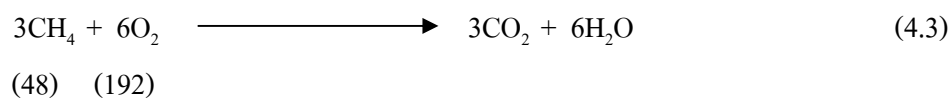
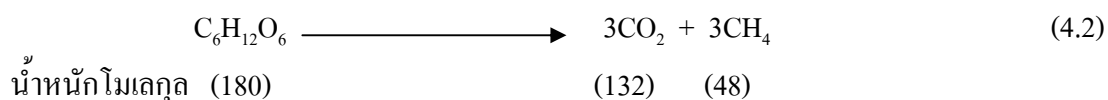
แก๊สที่ผลิตได้จากระบบบำบัดแอนแอโรบิก มีอยู่ด้วยกันหลายชนิดได้แก่ แก๊สมีเทน (CH₄)

ประมาณ 70% แก๊ส CO₂ ประมาณ 30% และแก๊สอื่นๆอีกเล็กน้อยคือ แก๊ส N₂, H₂, H₂S ฯลฯ ซึ่งในการวิจัยนี้สมมติให้มีค่าน้อยมากจนเป็น 0% โดยปริมาณแก๊ส และองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นที่ HRT ต่างๆ ในแต่ละสภาพของถังปฏิกรณ์แสดงอยู่ในตารางภาคผนวก ข และภาพที่ 4.11-4.14 ซึ่งจากภาพทำให้มั่นใจได้ว่าในทุกๆระยะเวลาเก็บกักและทุกๆสภาพของถังปฏิกรณ์ แก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นมีองค์ประกอบของมีเทนและ CO₂ เป็นส่วนใหญ่โดยมีปริมาณมีเทนมากกว่า CO₂

นอกจากนี้เรายังสามารถวิเคราะห์ได้อีกอย่างโดยการมองถึง ปริมาณแก๊สชีวภาพและองค์ประกอบของแก๊สที่เกิดขึ้นที่ถังปฏิกรณ์สภาพต่างๆในแต่ละระยะเวลาเก็บกัก ดังตารางที่แสดงอยู่ในภาคผนวก ข และภาพที่ 4.15-4.18 ซึ่งทำให้เราทราบว่าสาร CB, MC และซัลเฟต มีผลต่อการเกิดแก๊สชีวภาพหรือกระบวนการผลิตมีเทน โดยสารแปลกปลอมที่เป็น CB และ MC มีผลต่อกระบวนการผลิตมีเทนน้อยกว่าสารแปลกปลอมที่เป็นซัลเฟต ซึ่งจากการทดลองนี้เมื่อเปรียบเทียบระหว่างถังปฏิกรณ์ที่มีสารแปลกปลอมเหมือนกันแต่อยู่ในสภาพมีซัลเฟต และไม่มีซัลเฟตจะพบว่าซัลเฟตมีอิทธิพลต่อกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพโดยทำให้ปริมาณแก๊สและองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพลดลงถึง 50% ซึ่งความเข้มข้นของซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นนี้จะสวนทางกับการผลิตแก๊สที่ลดลงในกระบวนการผลิตแก๊สมีเทนโดยมีอิทธิพลมาจากแบคทีเรียลดซัลเฟต

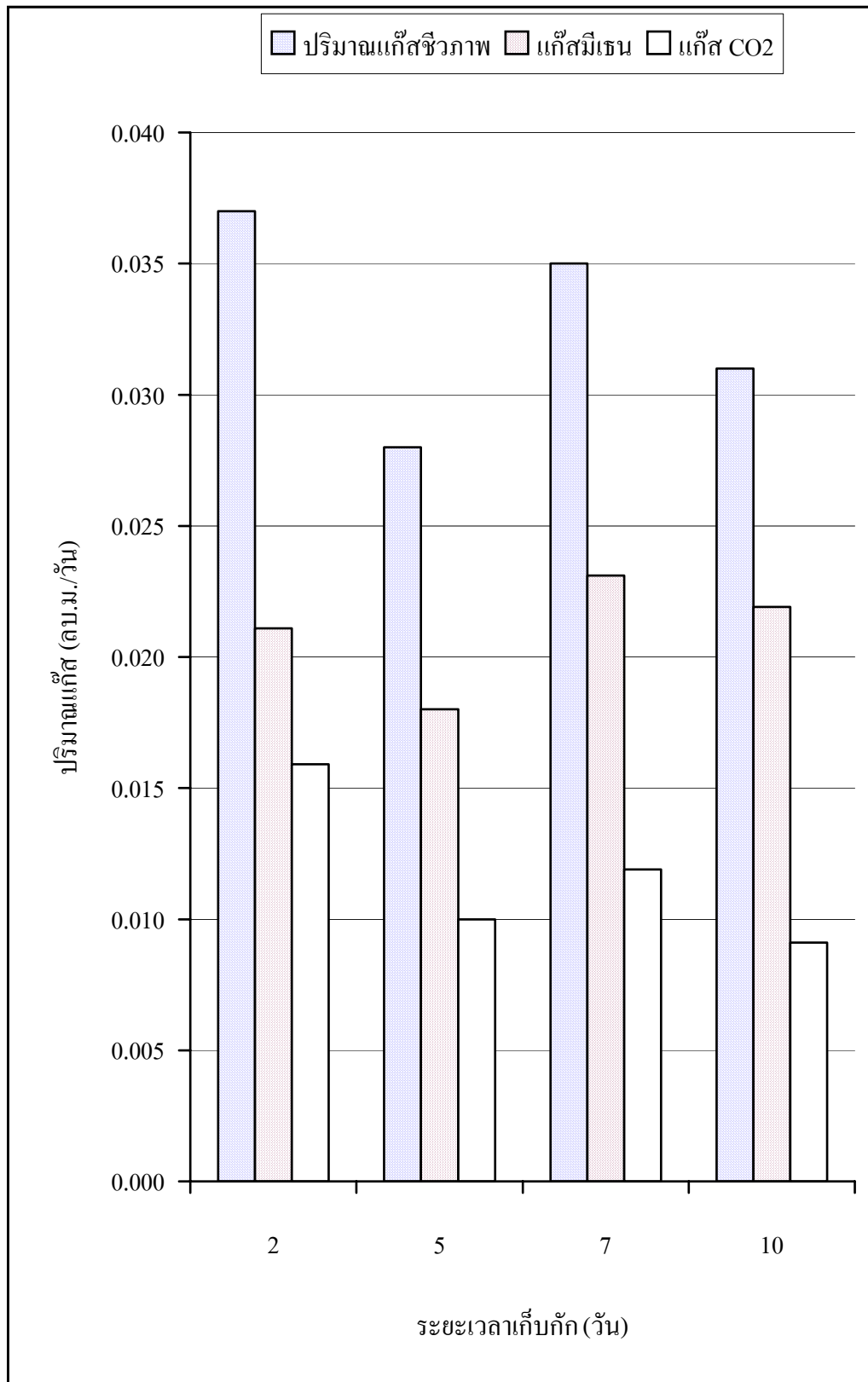
นอกจากนี้สามารถทราบถึงปริมาณและองค์ประกอบแก๊สชีวภาพที่สัมพันธ์กับอัตราการไหล COD_{in} และประสิทธิภาพในการบำบัด ได้อีกทางหนึ่งจากการทำสมดุลมวลดังนี้

การวิจัยนี้เราใช้กลูโคสเป็นหลักในการตั้งเคราะห์น้ำเสีย ดังนั้นเราจึงสามารถเขียนสมการเคมีของการเปลี่ยนกลูโคสไปเป็น CO₂ และ CH₄ ได้ดังสมการ 4.2 และสมการของการออกซิไดซ์แก๊สมีเทนไปเป็น CO₂ และ H₂O ดังสมการ 4.3

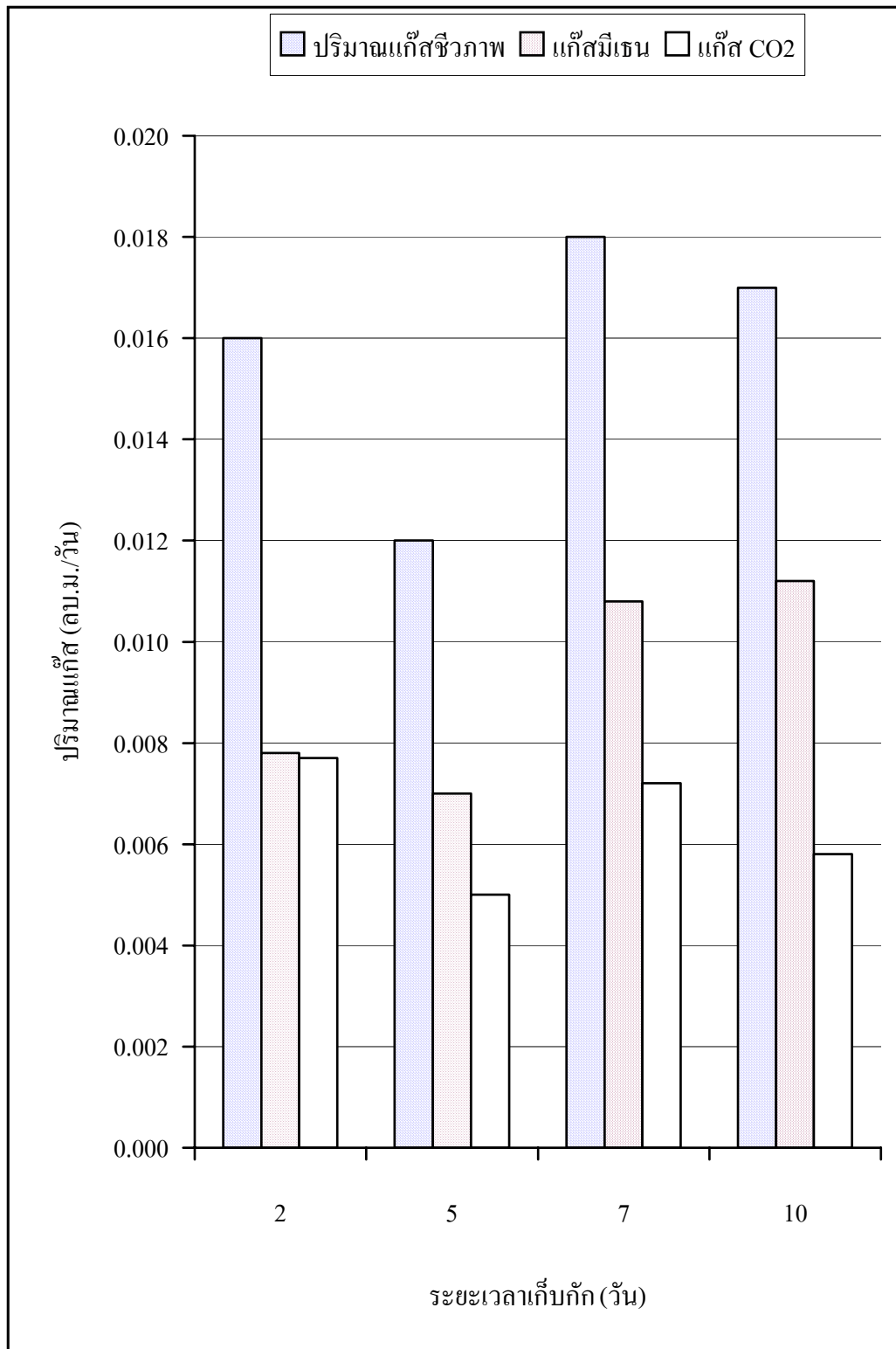


และจะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง CH₄ และ COD ดังนี้

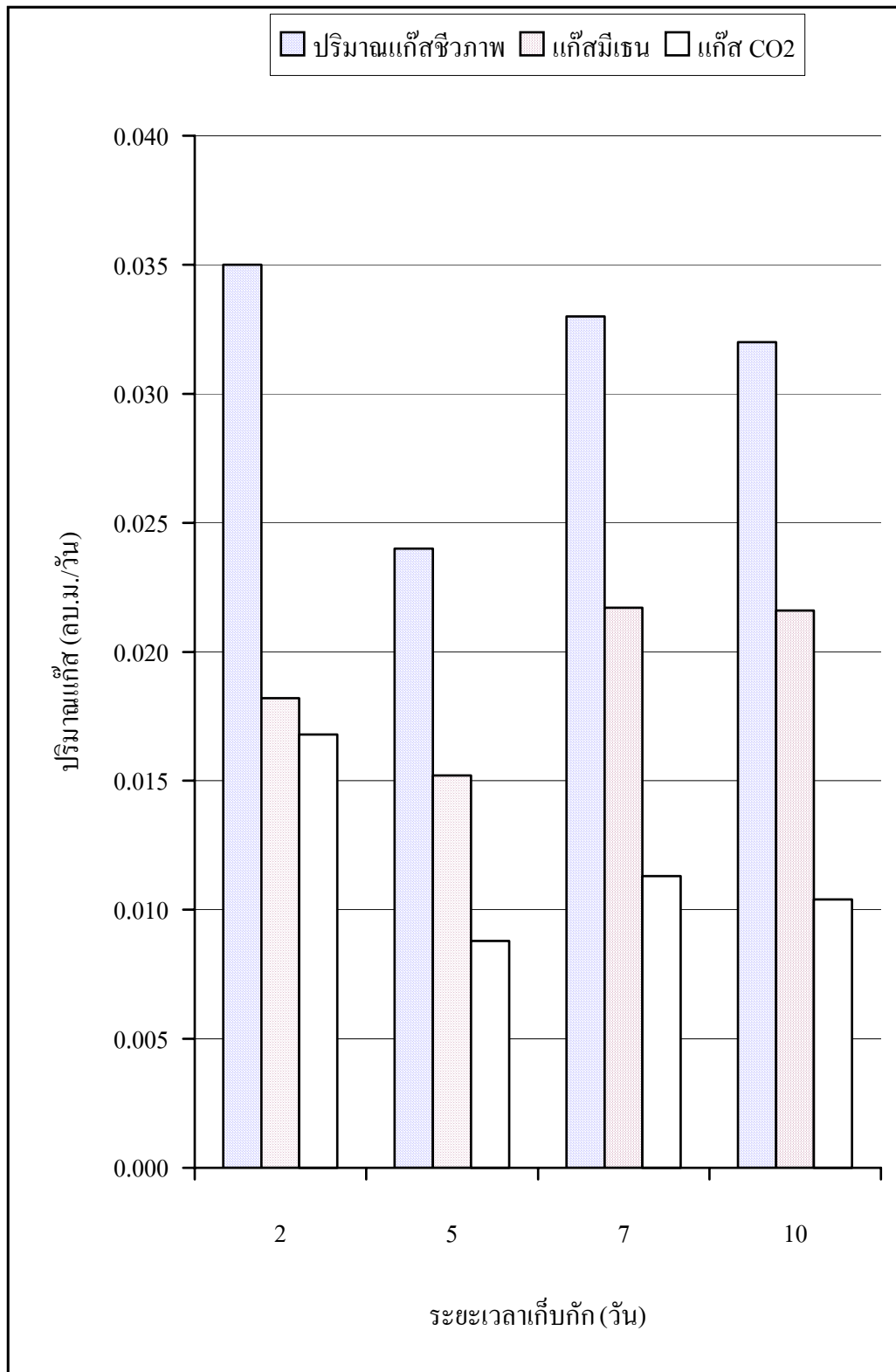
$$\frac{\text{CH}_4}{\text{COD}} \quad \text{เท่ากับ} \quad \frac{48}{192} \quad \text{เท่ากับ} \quad 0.25 \quad \frac{\text{กก. CH}_4}{\text{กก. COD.}}$$



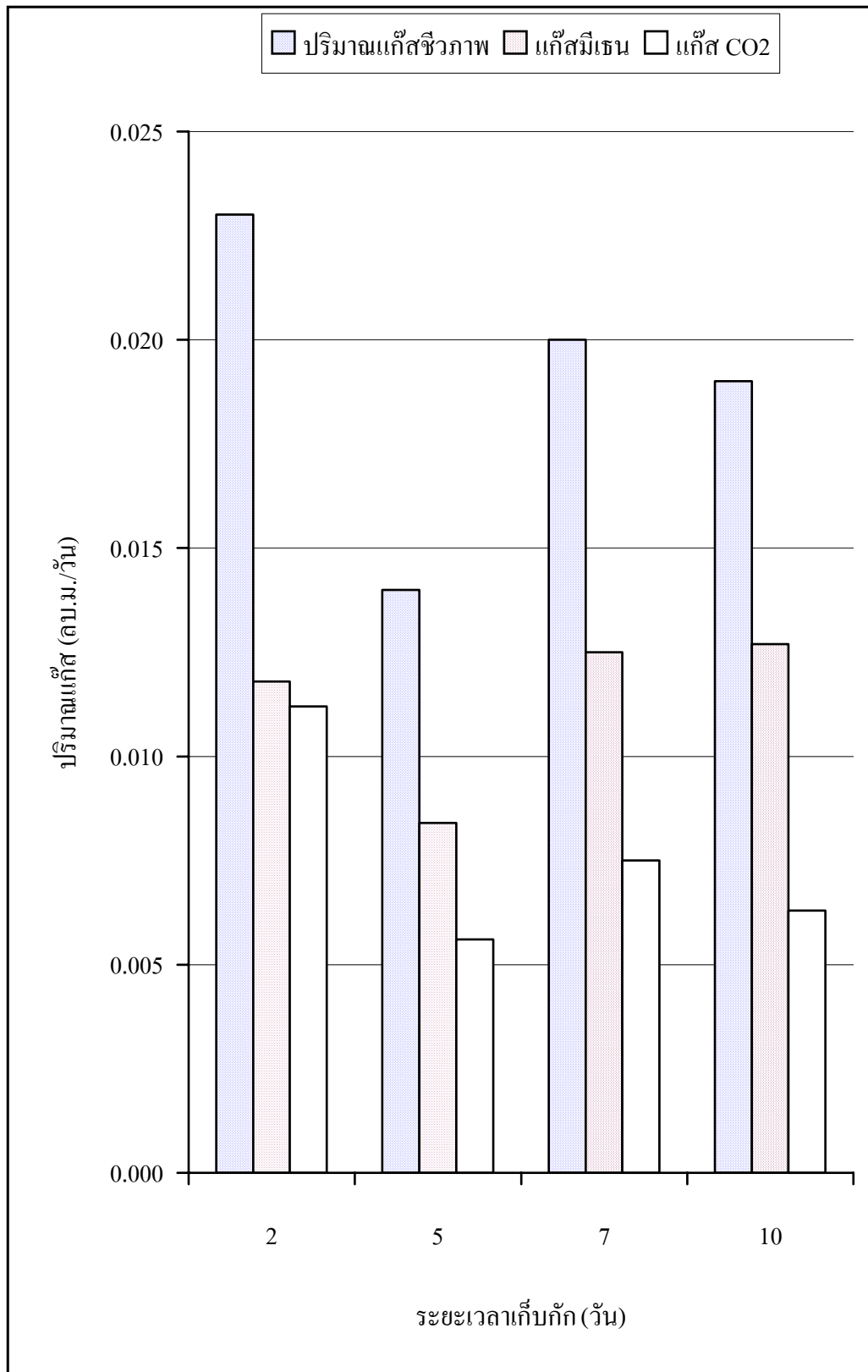
ภาพที่ 4.11 ปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นและองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพของถังปฏิกรณ์ควบคุม



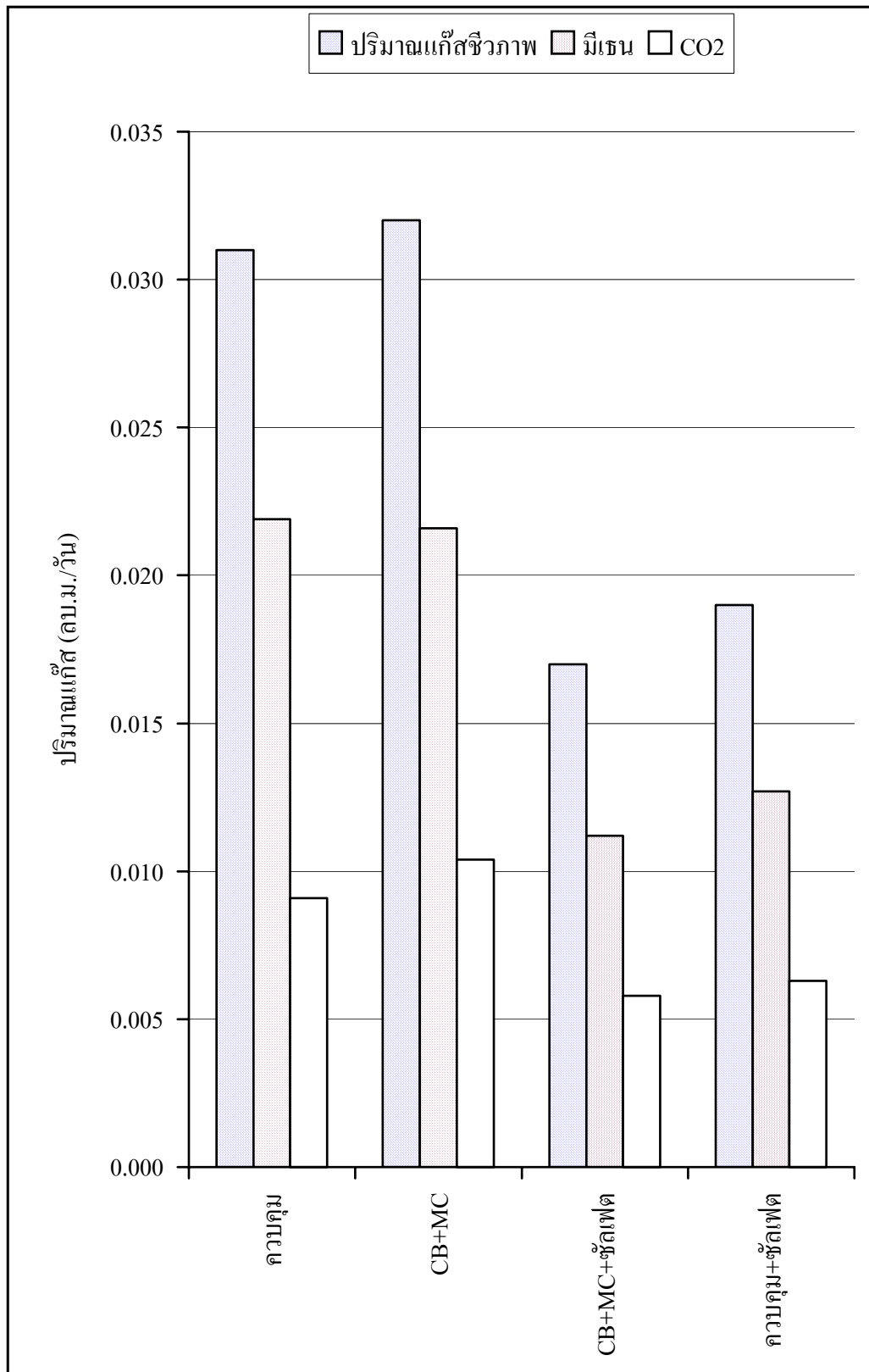
ภาพที่ 4.12 ปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นและองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพของ
ถังปฏิกรณ์ที่ใส่ CB + MC + ซัลเฟต



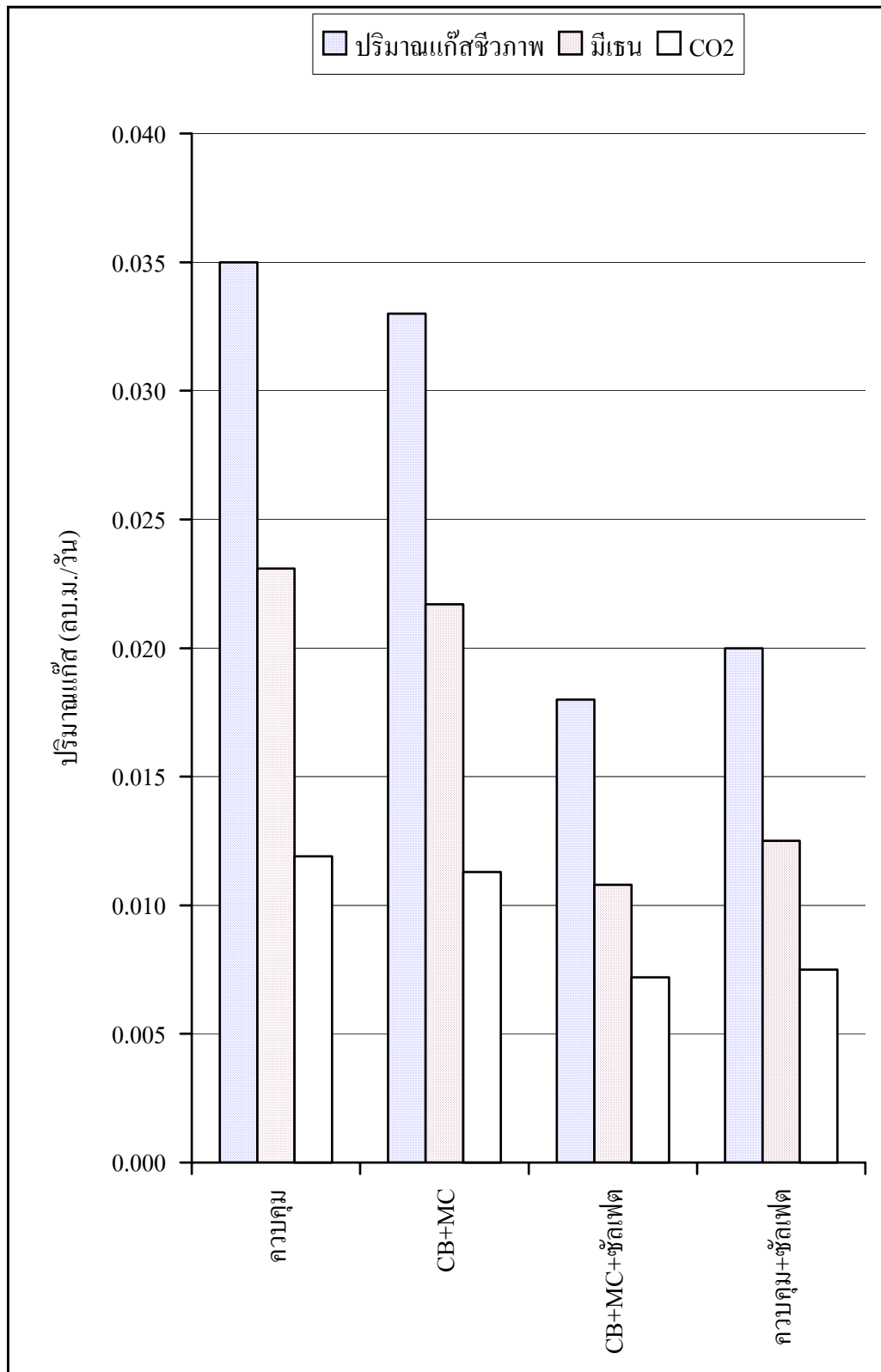
ภาพที่ 4.13 ปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นและองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพของ
ถังปฏิกรณ์ที่ใส่ CB+MC



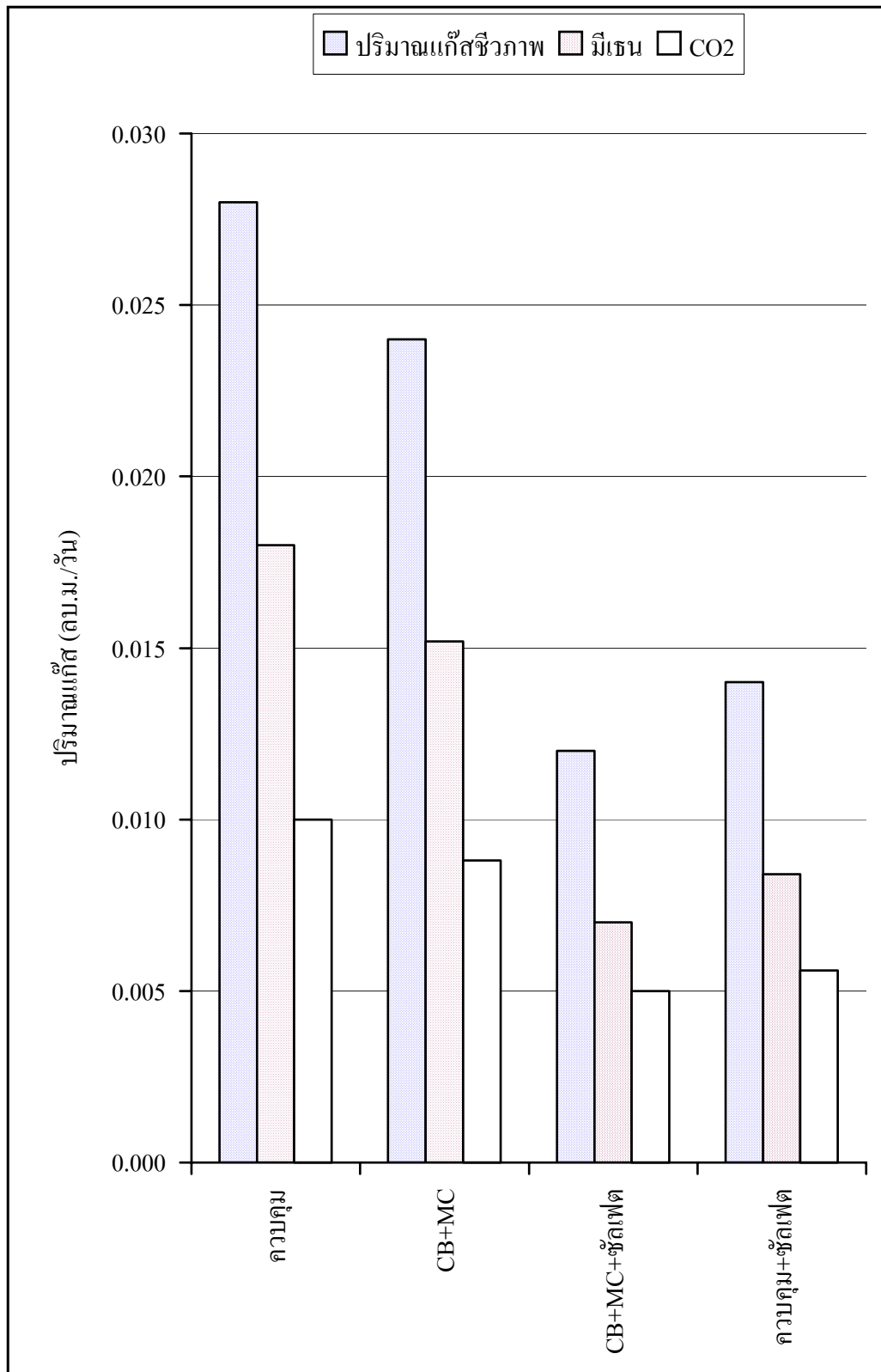
ภาพที่ 4.14 ปริมาณแก๊สและองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพของถังปฏิกรณ์ควบคุม+ซัลเฟต



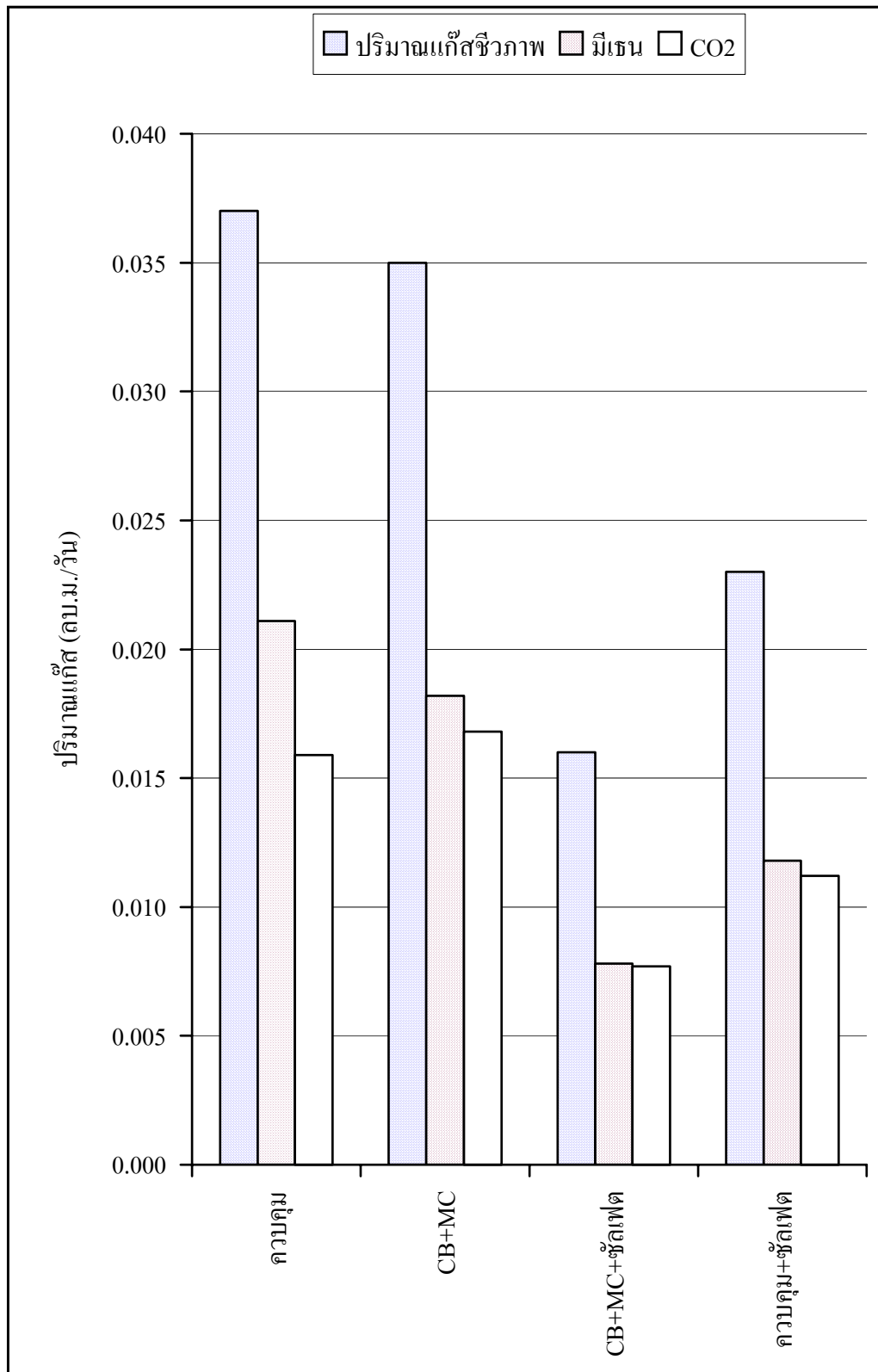
ภาพที่ 4.15 ปริมาณแก๊สชีวภาพและองค์ประกอบแก๊สที่เกิดขึ้นที่ระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน



ภาพที่ 4.16 ปริมาณแก๊สชีวภาพและองค์ประกอบแก๊สที่เกิดขึ้นที่ระยะเวลาเก็บกัก 7 วัน



ภาพที่ 4.17 ปริมาณแก๊สชีวภาพและองค์ประกอบแก๊สที่เกิดขึ้นที่ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน



ภาพที่ 4.18 ปริมาณแก๊สชีวภาพและองค์ประกอบแก๊สที่เกิดขึ้นที่ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน

ดังนั้นปริมาณของแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นจะเป็น

$$V_{\text{CH}_4} = \frac{0.25 \text{ กก. CH}_4 \times 1 \text{ โมล} \times 1000 \text{ กรัม} \times 22.4 \text{ ลิตร}}{\text{กก. COD} \times 16 \text{ กรัม} \times 1 \text{ กก.} \times 1 \text{ โมล}}$$

$$V_{\text{CH}_4} = 0.35 \text{ ลบ.ม. CH}_4 / \text{กก. COD ที่ถูกบำบัด} \quad (4.4)$$

ซึ่งสมการ 4.4 จะหมายถึง 1 กิโลกรัมของ COD สามารถผลิตแก๊สได้ประมาณ 0.35 ลบ.ม. ทำให้เราสามารถคำนวณหาปริมาณของแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นได้ดังสมการ 4.5 และปริมาณของแก๊สชีวภาพและแก๊ส CO₂ จาก %องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพที่ทราบอยู่แล้วดังตารางในภาคผนวก ฅ

$$Q_{\text{มีเทน}} = 0.35 Q E S_0 / 1000 \quad (4.5)$$

โดยที่

$$Q_{\text{มีเทน}} = \text{ปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้น, ลบ.ม.ต่อวัน}$$

$$0.35 = \text{ปริมาณของแก๊สมีเทนที่ผลิตได้จากการบำบัด COD 1.0 กิโลกรัม}$$

$$\text{ลบ.ม. CH}_4 / \text{กก. COD}$$

$$E = \text{ประสิทธิภาพของการย่อยสลายน้ำเสีย}$$

$$S_0 = \text{ค่า COD ของน้ำเสียที่เข้าระบบ, mg/L}$$

$$Q = \text{ปริมาณน้ำเสียไหลเข้าระบบ, ลบ.ม.ต่อวัน}$$

และจากการทดลองยังสามารถคำนวณเพื่อหาค่าของปริมาณของแก๊สมีเทนที่ผลิตได้จากการบำบัด COD 1.0 กิโลกรัม (m³.CH₄/Kg. COD) ของแต่ละระยะเวลาเก็บกักที่ถังปฏิกรณ์สภาพต่างๆ ดังที่แสดงไว้ในภาคผนวก ฅ โดยสรุปเป็นสมการของแต่ละถังปฏิกรณ์ได้ดังสมการ 4.6-4.9

$$\text{ถังปฏิกรณ์ควบคุม} \quad Q_{\text{มีเทน}} = 0.35 Q E S_0 / 1000 \quad (4.6)$$

$$\text{ถังปฏิกรณ์ที่ใส่ CB+MC+ซัลเฟต} \quad Q_{\text{มีเทน}} = 0.30 Q E S_0 / 1000 \quad (4.7)$$

$$\text{ถังปฏิกรณ์ที่ใส่ CB+MC} \quad Q_{\text{มีเทน}} = 0.33 Q E S_0 / 1000 \quad (4.8)$$

$$\text{ถังปฏิกรณ์ควบคุม+ซัลเฟต} \quad Q_{\text{มีเทน}} = 0.31 Q E S_0 / 1000 \quad (4.9)$$

โดยที่ ค่าคงที่ต่างๆ = ปริมาณของแก๊สมีเทนที่ผลิตได้จากการบำบัด COD 1.0 กิโลกรัม, ลบ.ม. CH₄ / กก. COD

เมื่อเราทราบถึงปริมาณของแก๊สชีวภาพและองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพทั้งที่ได้จากการทดลองและที่ได้จากการทำสมดุลมวล ซึ่งทำให้เราสามารถเปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นได้ดังตารางในภาคผนวก ญ และจากภาคผนวกดังกล่าว ทำให้เราพบว่าค่าของปริมาณและองค์ประกอบของแก๊สที่ได้จากวิธีทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุดที่ถึงปฏิกิริยาควบคุม รองลงมาเป็นถึงที่มีสารแปลกปลอมแต่ไม่มีซัลเฟต ส่วนถึงควบคุมและมีซัลเฟตเป็นถึงที่มีความแตกต่างกันมากที่สุด และสังเกตได้อีกอย่างคือในทุกถึงปฏิกิริยาควบคุม CO_2 ที่วัดได้จริงน้อยกว่าที่ได้จากการสมดุลมวล เนื่องจาก CO_2 ที่เกิดขึ้นบางส่วนได้ละลายน้ำไปแล้ว

ดังนั้นจากการเปรียบเทียบที่กล่าวมาทั้งหมด ก็เป็นการยืนยันได้ว่า ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตมีเทนคือปัจจัยของ CB, MC และซัลเฟต โดยเฉพาะซัลเฟตเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากที่สุดของการทดลองนี้ ที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการผลิตแก๊สมีเทน โดยการทำให้ปริมาณและองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพลดลงในขณะที่ความเข้มข้นของปัจจัยดังกล่าวมีค่าเพิ่มมากขึ้น

4.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์

4.4.1) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบบำบัดแบบแอนแอโรบิกนี้เราสามารถหาได้จากการนำสมการของ “Monod” มาวิเคราะห์ในรูปแบบของสมการสมดุลอาหาร และสมดุลของมวลจุลินทรีย์ในถึงปฏิกิริยาดังสมการ 4.10 และ 4.11

$$\frac{dS}{dt}V = QS_0 - QS + V\left(\frac{-kXS}{K_s + S}\right) \quad (4.10)$$

$$\frac{dX}{dt}V = QX_0 - QX + V\left(\frac{YkXS}{K_s + S} - kaX\right) \quad (4.11)$$

โดยที่	V	=	ปริมาตรของถึงปฏิกิริยาควบคุม, ลบ.ม.
	$\frac{dS}{dt}$	=	อัตราการบำบัดน้ำเสีย, มก./ (ล.วัน)
	$\frac{dX}{dt}$	=	อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์, มก./ (ล.วัน)
	Q	=	อัตราน้ำเสียไหลเข้าระบบ, ลบ.ม.ต่อวัน
	S ₀	=	ความเข้มข้นของน้ำเสียก่อนเข้าระบบ, มก./ลิตร

S	=	ความเข้มข้นของน้ำเสียในถังปฏิกรณ์, มก./ลิตร
X	=	ความเข้มข้นของจุลินทรีย์, มก./ลิตร
k	=	อัตราการใช้อาหารมากที่สุดต่อหนึ่งหน่วยมวลจุลินทรีย์, มก./ (มก.วัน)
K_s	=	ความเข้มข้นของน้ำเสีย ณ จุดที่มีค่าครึ่งหนึ่งของอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด, มก./ลิตร
k_d	=	อัตราการสลายตัวของจุลินทรีย์, ต่อวัน
Y	=	ค่าคงที่เจริญเติบโตของจุลินทรีย์, มก./มก.

เมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงที่จะได้ $\frac{dS}{dt} = 0$ และ $\frac{dX}{dt} = 0$ ดังนั้นจะได้สมการของ X และ S ดัง

สมการ 4.12 และ 4.13

$$X = \frac{Y(S_0 - S)}{(1 + k_d\theta)} \quad (4.12)$$

$$S = \frac{K_s(1 + \theta k_d)}{\theta(Yk - k_d) - 1} \quad (4.13)$$

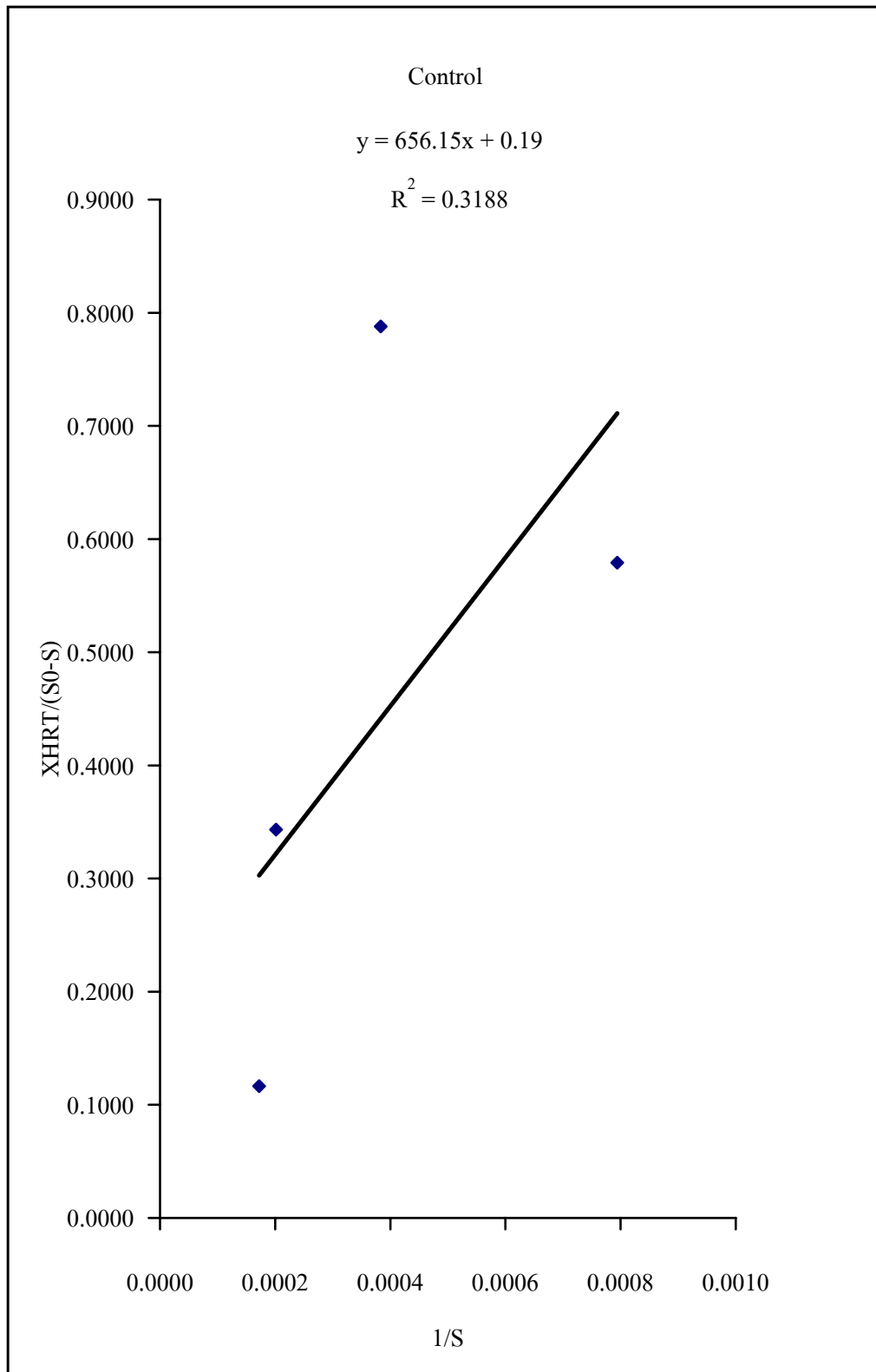
โดยที่ θ = ระยะเวลาเก็บกักของน้ำเสียในถังปฏิกรณ์, วัน

4.4.2) ค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์

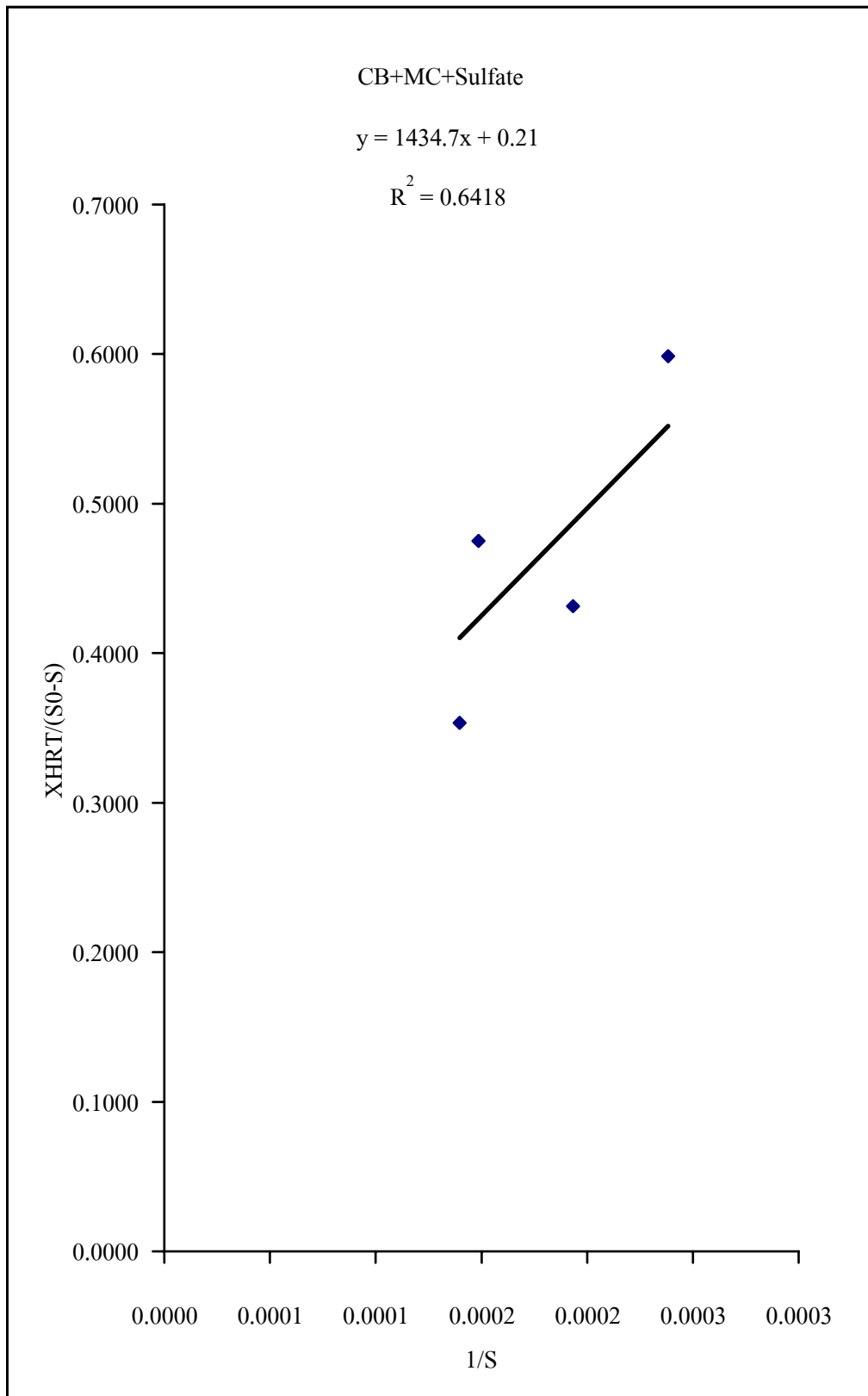
สัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ของระบบแอนแอโรบิกที่สนใจในการวิจัยนี้คือค่าของ k และ K_s ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวข้องกับการเกิด Inhibition โดยสามารถหาค่าของปริมาณอาหาร; K_s (mg/L) จากกราฟระหว่างส่วนกลับของ COD ออก (เป็นแกน x) และผลคูณของระยะเวลาเก็บกักกับ MLVSS หาดด้วยผลต่างระหว่าง COD ทั้งเข้าและออก (เป็นแกน y) โดยความชันของกราฟคือค่า K_s/k และจุดตัดแกน y คือส่วนกลับของอัตราการใช้อาหารมากที่สุดต่อหน่วย MLVSS; k (วัน⁻¹) ดังที่แสดงในภาพที่ 4.19-4.22 โดยค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ที่ได้แสดงอยู่ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ของถังปฏิกรณ์ต่างๆ

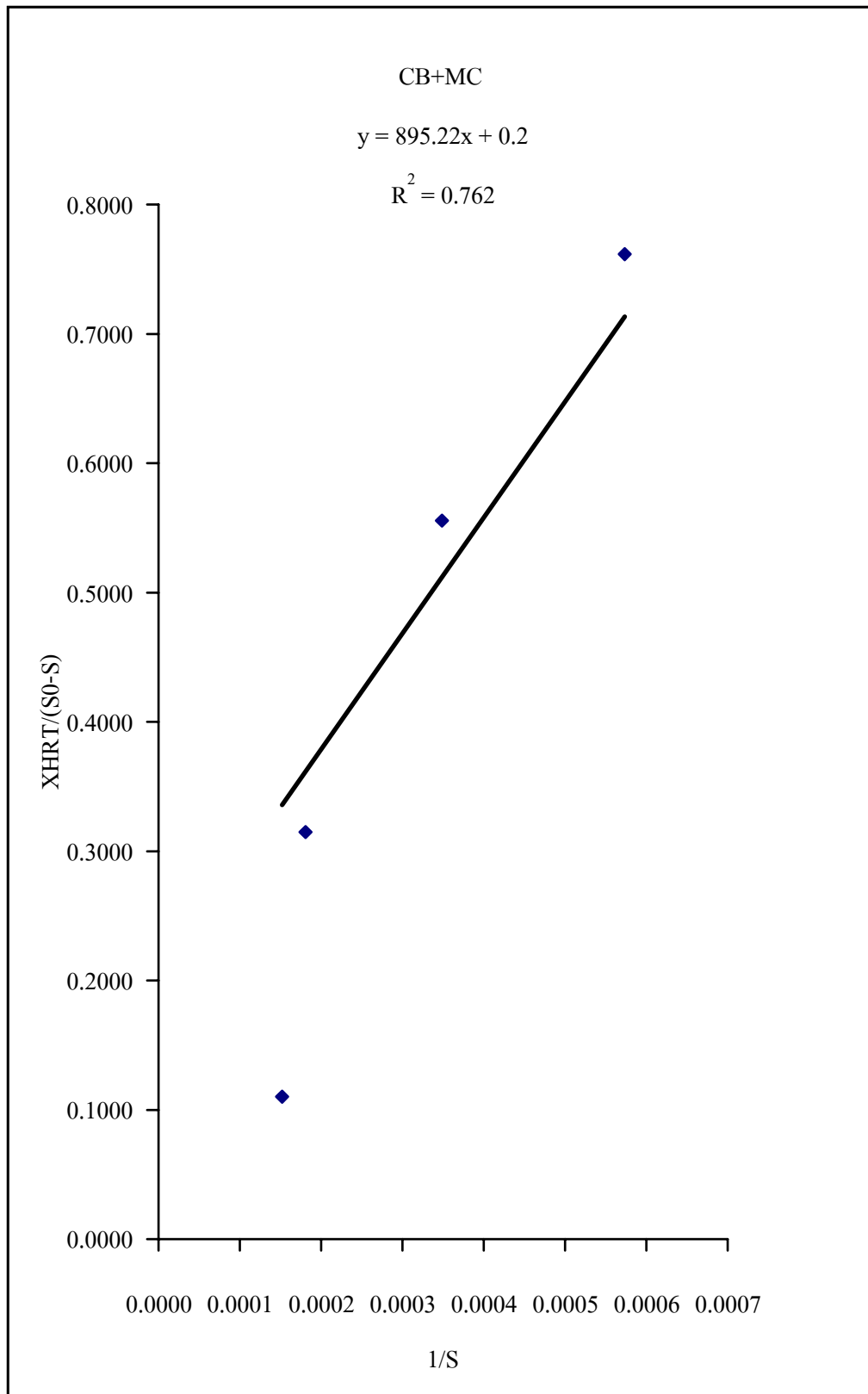
ถังปฏิกรณ์ที่ใช้	K(วัน ⁻¹)	K_s (mg/L)
กลูโคส	5.26	3453.42
กลูโคส+CB+MC	5.00	4476.10
กลูโคส+ซัลเฟต	5.00	6296.50
กลูโคส+ CB+MC+ซัลเฟต	4.76	6833.33



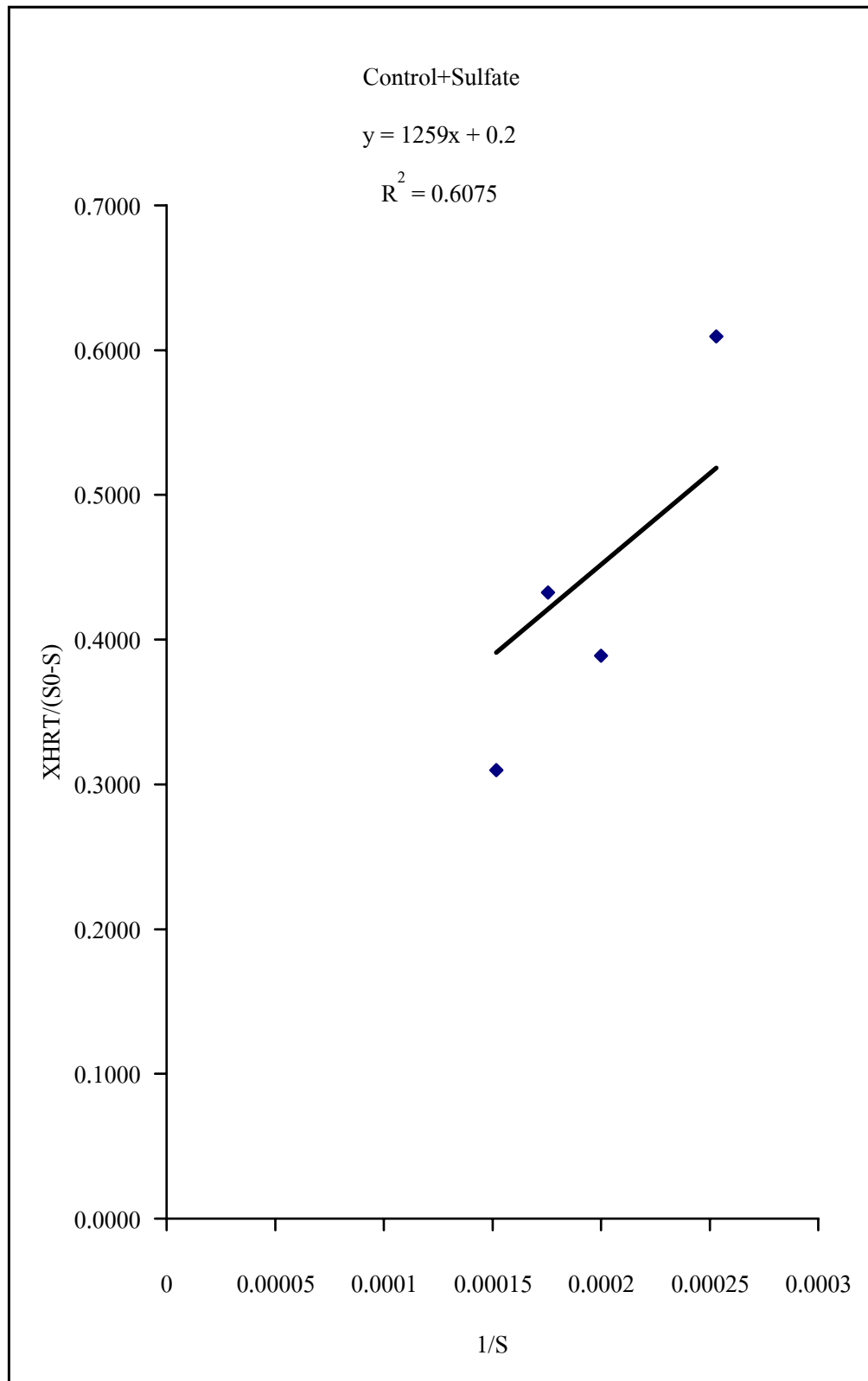
ภาพที่ 4.19 การหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ K_s และ k ของถังปฏิกรณ์ควบคุม



ภาพที่ 4.20 การหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ K_s และ k ของถังปฏิกรณ์ที่ใส่ CB+MC+ซัลเฟต



ภาพที่ 4.21 การหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ K_s และ k ของถังปฏิกรณ์ที่ใส่ CB+MC



ภาพที่ 4.22 การหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ K_s และ k ของถังปฏิกรณ์ควบคุม+ซัลเฟต

โดยจากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า ถังปฏิกรณ์ทั้ง 3 ถังที่มีสารแปลกปลอม ไม่ว่าจะเป็น CB, MC หรือ ซัลเฟตก็ตาม ทำให้เกิดกระบวนการยับยั้ง (Inhibition) ในรูปแบบของ Competitive Inhibition เมื่อเทียบกับถังปฏิกรณ์ควบคุมที่ใส่กลูโคสอย่างเดียว โดยจะสังเกตได้จากค่าของ K_s มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าค่าของ k ที่ลดลง ซึ่งมีสมการทางจลนศาสตร์ของการยับยั้งดังสมการ 4.14

$$r_{su} = \frac{-kXS}{(K_s(1 + \frac{I}{K_I}) + S)} \quad (4.14)$$

โดยที่ I = ความเข้มข้นของสารยับยั้ง, mg/L
 K_I = ค่าคงที่ของสารยับยั้ง

ซึ่งจากสมการของการยับยั้งนี้จะเห็นว่าการยับยั้งมีผลกระทบต่อค่าของ K_s นั่นคือค่าคงที่ของความเข้มข้นสารอาหารเพิ่มขึ้น โดยไม่มีผลกระทบของการยับยั้งต่อค่าของ k ดังสมการ 4.15

$$K'_s = K_s(1 + \frac{I}{K_I}) \quad (4.15)$$

หลังจากที่ทราบรูปแบบของการยับยั้งแล้วก็จะทำให้สามารถประมาณหาค่าของ K_I ได้จากค่าของ K'_s จากข้อมูลในตารางที่ 4.3 ของถังปฏิกรณ์ที่เกิดการยับยั้งทั้ง 3 ถังคือ ถังที่ใส่ กลูโคส+CB+MC ถังที่ใส่กลูโคส+ซัลเฟต และถังที่ใส่ กลูโคส+CB+MC+ซัลเฟต และค่าของ K_s ของถังปฏิกรณ์ควบคุม โดยสามารถสรุปค่าของ K_I และ I ได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ความเข้มข้นของสารยับยั้ง (I) และค่าคงที่สารยับยั้ง (K_I) ของการยับยั้งแบบ

Competitive Inhibition

การเปรียบเทียบระหว่างถังที่ใส่	K_s (mg/L)	K'_s (mg/L)	K_I (mg/L)	I (mg/L)
กลูโคส กับถังที่ใส่ กลูโคส+CB+MC	3453.42	4476.10	46.73	14.02
กลูโคส กับถังที่ใส่ กลูโคส+ซัลเฟต	3453.42	6296.50	13.66	11.20

ตารางที่ 4.4 ความเข้มข้นของสารยับยั้ง (I) และค่าคงที่สารยับยั้ง (K_i) ของการยับยั้งแบบ

Competitive Inhibition (ต่อ)

การเปรียบเทียบ ระหว่างถังที่ใส่	K_s (mg/L)	K'_s (mg/L)	K_i (mg/L)	I (mg/L)
กลูโคส กับถังที่ใส่ กลูโคส+ CB+MC+ซัลเฟต	3453.42	6833.33	24.13	23.65
กลูโคส+CB+MC กับถังที่ใส่กลูโคส +ซัลเฟต	4476.10	6296.50	27.32	11.2
กลูโคส+CB+MC กับถังที่ใส่กลูโคส + CB+MC+ซัลเฟต	4476.10	6833.33	44.62	23.65
กลูโคส+ซัลเฟต กับถังที่ใส่กลูโคส + CB+MC+ซัลเฟต	6296.50	6833.33	132.65	11.275

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

- 5.1.1) ประสิทธิภาพการบำบัด COD ในสภาพที่ไม่มีซัลเฟตจะประมาณ 80 % แต่ในสภาพที่มีซัลเฟต ซัลเฟตมีผลทำให้ประสิทธิภาพการบำบัด COD ลดลงประมาณ 65% โดยถึงปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟต อยู่ด้วยจะมีประสิทธิภาพในการบำบัด COD ได้เพียงแค่ประมาณ 50% เท่านั้น
- 5.1.2) ซัลเฟตมีส่วนช่วยในการบำบัด CB+MC โดยในสภาพที่มีซัลเฟตจะสามารถบำบัด CB+MC ได้ดีกว่าในสภาพไม่มีซัลเฟตประมาณ 10% เมื่อพิจารณาแยกแต่ละชนิดของสาร VOC_s จะพบว่าทั้งในสภาพที่มีซัลเฟตและไม่มีซัลเฟต MC ถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้น้อยกว่า CB ประมาณ 1.38 เท่า
- 5.1.3) ปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อ การเกิดแก๊สชีวภาพคือ ซัลเฟต โดยซัลเฟตจะทำให้การเกิดแก๊สชีวภาพลดลงถึง 50%
- 5.1.4) CB และ MC มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตมีเทนน้อยกว่าซัลเฟต โดย CB และ MC ทำให้ปริมาตรของแก๊สมีเทนที่ผลิตได้จากการบำบัด COD 1.0 กิโลกรัม เท่ากับ 0.33 ลบ.ม. CH_4 /กิโลกรัม. COD แสดงว่า CB และ MC ทำให้ปริมาตรของแก๊สมีเทนลดลง 6%
- 5.1.5) ชนิดของการยับยั้งที่เกิดขึ้นนี้เป็นแบบ Competitive Inhibition ซึ่งมีผลกระทบต่อค่าของ K_s นั่นคือ ค่าคงที่ของความเข้มข้นสารอาหารเพิ่มขึ้น โดยจะไม่มีผลของการยับยั้งต่อค่าของ k

5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะที่ควรพิจารณาเพิ่มเติมมีดังนี้

- 5.2.1) ควรทำการวิจัยกับระบบที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเช่น Pilot-scale โดยใช้น้ำเสียจริง

- 5.2.2) ควรทำการศึกษาเจาะลึกถึงผลกระทบของสารแปลกปลอมที่เกิดการยับยั้งอย่างไร รวมถึงจลนศาสตร์ของการยับยั้งให้ชัดเจนและละเอียดมากขึ้น
- 5.2.3) ควรทำการศึกษาเพื่อหากลไกในการย่อยสลายสารประกอบฮาโลเจนที่แท้จริง

เอกสารอ้างอิง

- Bryant, M.P., Campbell, L. L., Reddy, C. A., and Crabill, M. R. (1977) **Growth of Desulfovibrio in Lactate of Ethanol Media Low Sulfate in Association with H₂ Utilizing Methanogenic Bacteria.** Applied and Environmental Microbiology, 33, 1162.
- Dobbs, R. A. (1990) **Factors Affecting Emissions of Volatiles From Wastewater Treatment Plants.**, Cincinnati, Ohio.
- Environmental Protection Agency (1987). **Pretreatment to meet the EPA's Organic Chemicals, Plastics and Synthetic Fibers Effluent Guidelines.**, Pennsylvania.
- Fogelman, K.D., Walker, D.M, Margerum, D.W. (1989) **Non-Metal Redox Kinetics: Hypochlorite and Hypochlorous Acid Reactions with Sulfite.** Inorganic Chemistry 28:986-993.
- Grady, C.P. Leslie, Jr. and Lim, Henry C. (1980). **Biological Wastewater Treatment.** Marcel Dekker, Inc., New York.
- Gray, N.F. (1989). **Biological of Wastewater Treatment.** Oxford University Press, Oxford.
- Greenberg, A.E., Clesceri. L.S. and Eaton, A.D. (1992). **Standard Methods for the Examination of water and wastewater. 18th ed.** APHA. Washington, DC.
- Institution of Water Pollution Control (1979). **Sewage sludge. I. Production, Preliminary treatment and digestion.** Institution of Water Pollution Control, London.
- Kobayashi, H. and Rittmann, B. E. (1982). **Microbial removal of hazardous organic compounds.** Environmental Science and Technology 3(16): 170A-183A.
- Lovley, D. R., and Klug, M. J. (1983) **Sulfate Reducers can Outcompete Methanogens at Freshwater Sulfate Concentrations.** Applied and Environmental Microbiology, 45,187.
- Melcer, H., Thompson, D., Bell, J., Monteith, H. (1989) **Stripping of Volatile Organic Compounds at Municipal Wastewater Treatment Plants.** AWM/EPA International Symposium on Hazardous Waste Treatment: Biosystems for Pollution Control, Cincinnati, Ohio.

- Nagel, W.H. (1994) **Controlled Dechlorination Achievable With New Systems.**
Water/Engineering & Management. February 24-25.
- Parkin, G.F., Speece, R. E., Yang, C. H. and Kocher, W. M. (1983) Response of Methane Fermentation System to Industrial Toxicants. **Journal of The Water Pollution Control Federation.** 55, 44.
- Polprasert, Chongrak. (1996). **Organic waste recycling.** (2nd ed) Wiley, Chichester.
- Reynolds, Tom D and Richards, Paul A. (1995). **Unit Operations and Processes in Environmental Engineering.** PWS Publishing Company, Boston.
- Suflita, J. M., Horowitz, A., Shelton, D. R. and Tiedje, J. M. (1982). **Dehalogenation: a novel pathway for the anaerobic biodegradation of haloaromatic compounds.** Science (218): 1115-1117.
- Vogel, T. M., Criddle, C. S. and McCarty, P. L. (1987). **Transformations of halogenated aliphatic compounds.** Environmental Science and Technology 8 (21):722-736
- Wackett, L. P. and Householder, S. R. (1989). **Toxicity of trichloroethylene to pseudomonas putida F1 is mediated by toluene dioxygenase.** Applied and Environmental Microbiology 10(55): 2723-2725.
- Wackett, L. P. (1991). **Dehalogenation reactions catalyzed by bacteria.** Biological degradation of waste, (ed. A.M. Martin), pp 187-205. Great Britain, Galliard.
- White, G.C. (1992) **The Handbook of Chlorination, 3rd ed.** Van Nostrand Reinhold Co., New York, 889-934.
- Yiin, B.S., Walker, D.M. and Margerum, D.W. (1987) **Non-Metal Redox Kinetics: General Acid Assisted Reactions of Chloramine with Sulfite and Hydrogen Sulfite.** Inorganic Chemistry 26: 3435-3441.
- Yiin, B.S. and Margerum, D.W. (1990) **Non-Metal Redox Kinetics: Reactions of Sulfite with Dichloramine and Trichloramine.** Inorganic Chemistry 29: 1942-1948.

ภาคผนวก ก
ข้อมูลกรณีไขมันระเหย

ตารางที่ 1ก ค่าของกรดไขมันระเหยง่ายจากแต่ละถังปฏิกรณ์ที่ระยะเวลาเก็บกักต่างๆ

HRT 10 วัน	กลูโคส	CB+MC+ซัลเฟต	CB+MC	กลูโคส+ซัลเฟต
Acetic acid	350	581	445	574
Propionic acid	984	311	229	884
Butyric acid	488	824	159	341
HRT 7 วัน	กลูโคส	CB+MC+ซัลเฟต	CB+MC	กลูโคส+ซัลเฟต
Acetic acid	431	624	254	618
Propionic acid	765	356	184	872
Butyric acid	625	340	147	352
HRT 5 วัน	กลูโคส	CB+MC+ซัลเฟต	CB+MC	กลูโคส+ซัลเฟต
Acetic acid	530	577	0	696
Propionic acid	670	353	178	845
Butyric acid	637	247	286	321
HRT 2 วัน	กลูโคส	CB+MC+ซัลเฟต	CB+MC	กลูโคส+ซัลเฟต
Acetic acid	651	899	0	758
Propionic acid	554	344	0	373
Butyric acid	644	217	209	747

ภาคผนวก ข
ค่า COD ที่สถานะคงที่

ตารางที่ 1x ค่า COD น้ำเสียออกจากถังปฏิกรณ์ควบคุมที่ HRT ต่างๆ

COD (mg/L)	ระยะเวลาเก็บกัก (วัน)			
	10	7	5	2
ลำดับ				
1	1231.06	2500.00	4847.25	5933.20
2	1186.77	2531.95	4908.35	5917.49
3	1274.51	2558.27	4901.52	5432.30
4	1272.02	2640.65	4873.10	5472.42
5	1223.09	2622.50	5010.16	5984.25
6	1274.51	2636.36	5010.16	5984.25
7	1225.49	2654.55	5172.41	5708.66
8	1245.10	2622.06	5192.70	5834.97
9	1294.12	2658.23	5080.61	5952.85
10	1367.19	2658.23	5080.61	5913.56
11	1254.83	****	4718.31	****
12	****	****	4738.43	****
จำนวนตัวอย่าง	11.00	10.00	12.00	10.00
ค่าเฉลี่ย	1258.97	2608.28	4961.13	5813.40
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	47.13	57.17	155.87	207.09
ร้อยละความคลาดเคลื่อน	3.74	2.19	3.14	3.56
ค่า COD ที่ได้	1259	2608	4961	5813

COD=(Blank-inlet)*normality of FAS*8000/ปริมาตรของสารตัวอย่าง

ตารางที่ 2x COD น้ำเสียออกจากถังปฏิกรณ์ที่มีสาร CB+MC และซัลเฟต ในระยะเวลาเก็บกัก
ต่างๆ

COD (mg/L)	ระยะเวลาเก็บกัก (วัน)			
	10	7	5	2
ลำดับ				
1	3955.38	5498.60	6616.96	7187.80
2	4056.80	5237.65	6616.96	7149.67
3	4052.80	4976.70	6616.96	7176.47
4	4072.95	5033.33	6588.89	7161.29
5	4215.29	5073.17	6478.05	7209.97
6	4235.41	5112.20	6556.10	7267.06
7	4344.42	5095.79	7203.07	7095.52
8	4344.42	5249.04	6896.55	7033.14
9	4324.85	5236.71	7014.49	****
10	4363.99	5186.60	6755.98	****
จำนวนตัวอย่าง	10.00	10.00	10.00	8.00
ค่าเฉลี่ย	4196.63	5169.98	6734.40	7160.12
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	150.45	148.25	232.12	71.08
ร้อยละความคลาดเคลื่อน	3.59	2.87	3.45	0.99
ค่า COD ที่ได้	4197	5170	6734	7160

$COD = (Blank - inlet) * normality \ of \ FAS * 8000 / ปริมาตร \ ของ \ สาร \ ตัวอย่าง$

ตารางที่ 3x COD น้ำเสียออกจากถังปฏิกรณ์ที่มีสาร CB+MC ในระยะเวลาเก็บกักต่างๆ

COD (mg/L)	ระยะเวลาเก็บกัก (วัน)			
	10	7	5	2
ลำดับ				
1	1744.42	2907.53	5823.75	6430.58
2	1825.56	2888.47	5747.13	6390.34
3	1724.10	3022.77	5855.07	6579.74
4	1724.10	2916.51	5627.38	6579.74
5	1695.17	2761.27	5156.22	6573.71
6	1715.29	2853.80	5387.99	6573.71
7	1643.84	2787.52	5357.48	6865.08
8	1756.35	2807.02	5643.26	6944.44
9	1783.54	****	5453.51	6547.62
10	1824.19	****	5341.13	6428.57
จำนวนตัวอย่าง	10.00	8.00	10.00	10.00
ค่าเฉลี่ย	1743.66	2868.11	5539.29	6591.35
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	56.60	84.58	233.74	181.09
ร้อยละความคลาดเคลื่อน	3.25	2.95	4.22	2.75
ค่า COD ที่ได้	1744	2868	5540	6591

$COD = (\text{Blank-inlet}) * \text{normality of FAS} * 8000 / \text{ปริมาตรของสารตัวอย่าง}$

ตารางที่ 4x ค่า COD น้ำเสียออกจากถังปฏิกรณ์ควบคุม+ซัลเฟตที่ HRT

COD (mg/L)	ระยะเวลาเก็บกัก (วัน)			
	10	7	5	2
ลำดับ				
1	5444.23	5195.37	5784.11	6954.81
2	5500.00	4901.59	5784.11	6954.81
3	5303.57	4962.12	5685.28	6716.15
4	5492.23	4848.48	5693.40	6700.10
5	5516.41	4796.07	5670.73	7007.87
6	5509.50	4947.13	5589.43	6535.43
7	5509.50	4962.41	6004.06	6220.47
8	5681.00	5191.73	6085.19	6220.47
9	5663.08	5003.76	5445.38	6259.84
10	5698.92	5195.49	5445.38	6259.84
11	5627.24	****	5549.30	****
12	****	****	5573.44	****
จำนวนตัวอย่าง	11.00	10.00	12.00	10.00
ค่าเฉลี่ย	5540.52	5000.42	5692.49	6582.98
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	118.01	146.45	199.09	327.011
ร้อยละความคลาดเคลื่อน	2.13	2.93	3.50	4.97
ค่า COD ที่ได้	5541	5000	5692	6583

$COD = (\text{Blank-inlet}) * \text{normality of FAS} * 8000 / \text{ปริมาตรของสารตัวอย่าง}$

ภาคผนวก ค
ประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์

ตารางที่ 1ค ร้อยละประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ควบคุมในแต่ละระยะเวลาเก็บกัก (HRT)

ตัวแปร	HRT 10 วัน	HRT 7 วัน	HRT 5 วัน	HRT 2 วัน
COD	83	66	35	23

ตารางที่ 2ค ร้อยละประสิทธิภาพถังปฏิกรณ์ใส่ CB+MC+ซัลเฟตในแต่ละระยะเวลาเก็บกัก

ตัวแปร	HRT 10 วัน	HRT 7 วัน	HRT 5 วัน	HRT 2 วัน
COD	46	34	14	9
ซัลเฟต	89	87	84	75
CB	100*	100*, 57**	100*, 55**	71*
MC	100*	100*, 54**	100*, 54**	71*

ตารางที่ 3ค ร้อยละประสิทธิภาพถังปฏิกรณ์ใส่ CB+MC ในแต่ละระยะเวลาเก็บกัก(HRT)

ตัวแปร	HRT 10 วัน	HRT 7 วัน	HRT 5 วัน	HRT 2 วัน
COD	78	64	30	17
CB	64*	64*, 42**	100*, 46**	62*
MC	100*	100*, 42**	100*, 45**	69*

ตารางที่ 4ค ร้อยละประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ควบคุมที่ใส่ซัลเฟตในแต่ละ HRT

ตัวแปร	HRT 10 วัน	HRT 7 วัน	HRT 5 วัน	HRT 2 วัน
COD	50	37	29	17
ซัลเฟต	96	95	95	86

CB* ใส่สารตั้งต้นมีความเข้มข้นเท่ากับ 50 ppm

MC* ใส่สารตั้งต้นมีความเข้มข้นเท่ากับ 30 ppm

CB** ใส่สารตั้งต้นมีความเข้มข้นเท่ากับ 150 ppm

MC** ใส่สารตั้งต้นมีความเข้มข้นเท่ากับ 90 ppm

ภาคผนวก ง
ตัวแปรน้ำเข้า-ออกของถังปฏิกรณ์

ตารางที่ 1ง เปรียบเทียบค่าของแต่ละตัวแปรต่างๆทั้งน้ำเข้า-ออกของถังปฏิกรณ์ควบคุมที่ระยะเวลาเก็บกักต่างๆ

ตัวแปร	หน่วย	น้ำเข้าถัง	น้ำออกจากถังที่ระยะเวลาเก็บกักต่างๆ			
			10 วัน	7 วัน	5 วัน	2 วัน
pH	ไม่มีหน่วย	11.88	5.90	6.44	6.13	5.58
อุณหภูมิ	เซลเซียส	28.25	30.10	29.70	27.40	29.80
COD	mg/L	7595	1259	2608	4961	5813
BOD	mg/L	4432	790	1570	3100	3275
TKN	mg/L	27	0	2	3	5
ฟอสฟอรัส	mg/L	13	1	1	2	2
TS	mg/L	4072	1415	2496	696	546
SS	mg/L	396	500	728	209	126
TDS	mg/L	3677	915	1768	487	420
TVS	mg/L	3080	824	1278	432	313
VSS	mg/L	210	373	573	188	110
VDS	mg/L	2870	451	705	245	203
อัตราการเกิดแก๊ส	m ³ /day	ยังไม่เกิด	0.031	0.035	0.028	0.05
Methane gas	เปอร์เซ็นต์	ยังไม่เกิด	71	69	67	65
CO ₂ gas	เปอร์เซ็นต์	ยังไม่เกิด	29	32	33	35
Acetic acid	mg/L	912	350	431	530	651
Propionic acid	mg/L	542	984	765	670	554
Butyric acid	mg/L	298	488	625	637	644

ตารางที่ 2ง ตัวแปรต่างๆทั้งน้ำเข้า-ออกของถังปฏิกรณ์ใต้น้ำ CB+MC+ซัลเฟต

ตัวแปร	หน่วย	น้ำเข้าถัง	น้ำออกที่ระยะเวลาเก็บกักต่างๆ			
			10 วัน	7 วัน	5 วัน	2 วัน
pH	ไม่มีหน่วย	12.10	7.76	6.60	6.00	5.11
อุณหภูมิ	เซลเซียส	27.90	29.20	28.10	29.50	27.70
COD	mg/L	7839	4197	5170	6734	7160
BOD	mg/L	4731	2688	3037	4112	4275
ซัลไฟด์	mg/L	3	16	21	21	37
ซัลเฟต	mg/L	421	47	56	68	104
TKN	mg/L	27	7	9	10	13
ฟอสฟอรัส	mg/L	12	5	6	6	7
TS	mg/L	5360	2210	2551	574	359
SS	mg/L	426	444	166	93	40
TDS	mg/L	4934	1766	2385	481	319
TVS	mg/L	2513	1164	1344	279	181
VSS	mg/L	180	318	148	74	32
VDS	mg/L	2334	846	1196	205	149
CB*	ppm	10.78	0.00	0.00	0.00	0.29
MC*	ppm	5.09	0.00	0.00	0.00	1.05
CB**	ppm	32.34	ไม่ได้ทำ	5.28	5.78	ไม่ได้ทำ
MC**	ppm	15.27	ไม่ได้ทำ	5.73	5.77	ไม่ได้ทำ
อัตราการเกิดแก๊ส	m ³ /day	ยังไม่เกิด	0.017	0.018	0.012	0.0155
Methane gas	เปอร์เซ็นต์	ยังไม่เกิด	66	60	61	57
CO ₂ gas	เปอร์เซ็นต์	ยังไม่เกิด	34	40	39	43
Acetic acid	mg/L	430	581	624	577	899
Propionic acid	mg/L	349	311	356	353	344
Butyric acid	mg/L	556	824	340	247	217

CB*, CB** ไส้สารตั้งต้นมีความเข้มข้นเท่ากับ 50 ppm และ 150 ppm ตามลำดับ

MC*, MC** ไส้สารตั้งต้นมีความเข้มข้นเท่ากับ 30 ppm และ 90 ppm ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ตัวแปรต่างๆทั้งน้ำเข้า-ออกของถังปฏิกรณ์ใต้น้ำ CB+MC ที่ระยะเวลาเก็บกัก

ตัวแปร	หน่วย	น้ำเข้าถัง	น้ำออกจากถังที่ระยะเวลาเก็บกักต่างๆ			
			10 วัน	7 วัน	5 วัน	2 วัน
pH	ไม่มีหน่วย	11.36	6.96	7.08	7.12	5.62
อุณหภูมิ	เซลเซียส	27.8	30.20	26.70	28.80	28.80
COD	mg/L	7955	1744	2868	5539	6591
BOD	mg/L	4698	1025	1700	3375	3850
TKN	mg/L	29	6	8	9	13
ฟอสฟอรัส	mg/L	14	1	2	3	3
TS	mg/L	5104	2436	2986	1465	477
SS	mg/L	316	668	516	187	94
TDS	mg/L	4789	1768	2470	1278	383
TVS	mg/L	2612	1226	993	589	226
VSS	mg/L	237	473	404	152	75
VDS	mg/L	2375	753	589	437	151
CB*	ppm	10.78	0.23	0.18	0.00	0.43
MC*	ppm	5.09	0.00	0.00	0.00	1.01
CB**	ppm	32.34	ไม่ได้ทำ	7.73	6.41	ไม่ได้ทำ
MC**	ppm	15.27	ไม่ได้ทำ	7.175	6.73	ไม่ได้ทำ
อัตราการเกิดแก๊ส	m ³ /day	ยังไม่เกิด	0.030	0.033	0.024	0.036
Methane gas	เปอร์เซ็นต์	ยังไม่เกิด	68	66	66	59
CO ₂ gas	เปอร์เซ็นต์	ยังไม่เกิด	32	34	34	41
Acetic acid	mg/L	440	445	254	0	0
Propionic acid	mg/L	318	229	184	178	0
Butyric acid	mg/L	202	159	147	286	209

CB*, CB** ไส้สารตั้งต้นมีความเข้มข้นเท่ากับ 50 ppm และ 150 ppm ตามลำดับ (เป็นสารระเหย)

MC*, MC** ไส้สารตั้งต้นมีความเข้มข้นเท่ากับ 30 ppm และ 90 ppm ตามลำดับ (เป็นสารระเหย)

ตารางที่ 4ง เปรียบเทียบตัวแปรต่างๆทั้งน้ำเข้า-ออกของถังปฏิกรณ์ควบคุมที่ใส่ซัลเฟตใน HRT

ตัวแปร	หน่วย	น้ำเข้าถัง	น้ำออกจากถังที่ HRT ต่างๆ			
			10 วัน	7 วัน	5 วัน	2 วัน
pH	ไม่มีหน่วย	11.25	5.57	6.22	6.51	5.97
Temperature	เซลเซียส	27.85	28.10	28.10	26.70	28.70
COD	mg/L	7970	3950	5000	5692	6583
BOD	mg/L	5595	2350	2975	3512	4100
ซัลไฟด์	mg/L	3	7	8	10	20
ซัลเฟต	mg/L	449	18	22	24	62
TKN	mg/L	27	4	5	6	6
ฟอสฟอรัส	mg/L	13	2	3	3	4
TS	mg/L	5235	1404	622	1738	595
SS	mg/L	325	405	165	274	98
TDS	mg/L	4910	999	457	1465	497
TVS	mg/L	2982	763	299	778	287
VSS	mg/L	289	303	145	210	70
VDS	mg/L	2693	461	154	568	217
อัตราการเกิดแก๊ส	m ³ /day	ยังไม่เกิด	0.007	0.010	0.019	0.023
Methane gas	เปอร์เซ็นต์	ยังไม่เกิด	69	63	62	63
CO ₂ gas	เปอร์เซ็นต์	ยังไม่เกิด	31	37	38	37
Acetic acid	mg/L	1129	574	618	696	758
Propionic acid	mg/L	1041	884	872	845	373
Butyric acid	mg/L	367	341	352	321	747

ภาคผนวก จ

ประสิทธิภาพดังปฏิกรณ์ที่ระยะเวลาเก็บกักต่างๆ

ตารางที่ 1จ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ทั้งสี่ถังที่ HRT 10 วัน

	ถังปฏิกรณ์ควบคุม	ถังปฏิกรณ์ที่ใส่ CB+MC	ถังปฏิกรณ์ที่ใส่ CB+MC+ซัลเฟต	ถังปฏิกรณ์ควบคุม+ซัลเฟต
COD	83	78	47	50
ซัลเฟต	----	----	89	96
CB*	----	64	100	----
MC*	----	100	100	----

ตารางที่ 2จ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ทั้งสี่ถังที่ HRT 7 วัน

	ถังปฏิกรณ์ควบคุม	ถังปฏิกรณ์ที่ใส่ CB+MC	ถังปฏิกรณ์ที่ใส่ CB+MC+ซัลเฟต	ถังปฏิกรณ์ควบคุม+ซัลเฟต
COD	66	64	34	37
ซัลเฟต	----	----	87	95
CB*	----	64	100	----
MC*	----	100	100	----
CB**	----	42	57	----
MC**	----	42	54	----

CB*ใส่สารตั้งต้นมีความเข้มข้นเท่ากับ 50 ppm (เป็นสารระเหย)

MC*ใส่สารตั้งต้นมีความเข้มข้นเท่ากับ 30 ppm (เป็นสารระเหย)

CB**ใส่สารตั้งต้นมีความเข้มข้นเท่ากับ 150 ppm (เป็นสารระเหย)

MC**ใส่สารตั้งต้นมีความเข้มข้นเท่ากับ 90 ppm (เป็นสารระเหย)

ตารางที่ 3๖ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ทั้งสี่ถังที่ HRT 5 วัน

	ถังปฏิกรณ์ควบคุม	ถังปฏิกรณ์ที่ใส่ CB+MC	ถังปฏิกรณ์ที่ใส่ CB +MC+ซัลเฟต	ถังปฏิกรณ์ควบคุม+ซัลเฟต
COD	35	30	14	29
ซัลเฟต	----	----	84	95
CB*	-----	100	100	-----
MC*	-----	100	100	-----
CB**	-----	46	55	-----
MC**	-----	45	54	-----

ตารางที่ 4๖ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ทั้งสี่ถังที่ HRT 2 วัน

	ถังปฏิกรณ์ควบคุม	ถังปฏิกรณ์ที่ใส่ CB+MC	ถังปฏิกรณ์ที่ใส่ CB +MC+ซัลเฟต	ถังปฏิกรณ์ควบคุม+ซัลเฟต
COD	24	17	9	17
ซัลเฟต	----	----	75	86
CB*	----	62	71	-----
MC*	-----	69	71	----

CB*ใส่สารตั้งต้นมีความเข้มข้นเท่ากับ 50 ppm (เป็นสารระเหย)

MC*ใส่สารตั้งต้นมีความเข้มข้นเท่ากับ 30 ppm (เป็นสารระเหย)

CB**ใส่สารตั้งต้นมีความเข้มข้นเท่ากับ 150 ppm (เป็นสารระเหย)

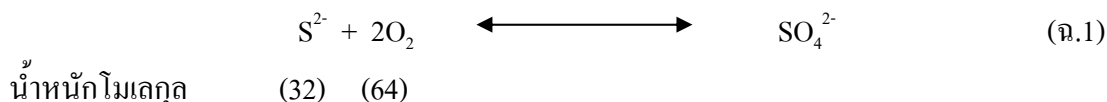
MC**ใส่สารตั้งต้นมีความเข้มข้นเท่ากับ 90 ppm (เป็นสารระเหย)

ภาคผนวก จ

COD-Equivalent และประสิทธิภาพการบำบัด CB และ MC

การวิเคราะห์สมดุลมวล COD

ผลลัพธ์ของค่า COD ที่ถูกบำบัดโดยการลดซัลเฟตนี้พบว่า ซัลไฟด์ (S^{2-}) 1 mg/L จะทำให้ COD มีค่าเพิ่มขึ้น 2 mg/L ของ COD ดังสมการ จ.1 ของการสมดุลมวลต่อไปนี้



ดังนั้น เราสามารถคำนวณหาค่าของการบำบัด COD ที่แท้จริงของถังปฏิกรณ์ที่ใช้ซัลเฟต ทั้ง 2 ถังได้โดยการทำให้ COD-Equivalent ตามสมการที่ จ.2 และสามารถเปรียบเทียบหาค่าการบำบัด COD ของอินทรีย์สารที่แท้จริงได้ดังตารางที่ 1จ-2จ รวมทั้งประสิทธิภาพในการบำบัด COD ของอินทรีย์สารที่แท้จริงได้ดังตารางที่ 3จ-4จ ซึ่งจะทำให้พบว่าสารอนินทรีย์จากซัลไฟด์ที่มีอยู่ในน้ำเสียมีผลต่อค่า COD ในน้ำเสียโดยเฉลี่ยเพียงแค่ 0.81 % ซึ่งมีค่าน้อยมาก ดังนั้นสารอนินทรีย์จากซัลไฟด์ดังกล่าวจึงไม่มีนัยสำคัญต่อร้อยละการบำบัด COD ของน้ำเสีย

$$COD_{\text{น้ำทิ้งที่แท้จริง}} = COD_{\text{จากการไคเตรท}} - COD_{\text{ของซัลไฟด์เทียบเท่าจากการคำนวณ}} \quad (จ.2)$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } COD_{\text{น้ำทิ้งที่แท้จริง}} &= COD \text{ ที่เกิดจากแบคทีเรียพวกก่อกัมมิเซน} \\ COD_{\text{จากการไคเตรท}} &= COD \text{ ที่วัดได้จากน้ำออก} \\ COD_{\text{ของซัลไฟด์เทียบเท่าจากการคำนวณ}} &= COD \text{ ที่เกิดจากกระบวนการลดซัลเฟต} \end{aligned}$$

ตารางที่ 1จ การวิเคราะห์สมดุลมวล เพื่อหาค่า $COD_{\text{น้ำทิ้งที่แท้จริง}}$ จาก COD Equivalent ของถังปฏิกรณ์ที่ใช้สารแปลกปลอม+ซัลเฟตใน HRT ต่างๆ

HRT (วัน)	$COD_{\text{จากการไคเตรท}}$ (mg/L)	S^{2-} จากการไคเตรท (mg/L)	$COD_{\text{ของซัลไฟด์เทียบเท่าจากการคำนวณ}}$ (mg/L)	$COD_{\text{น้ำทิ้งที่แท้จริง}}$ (mg/L)
10	4197	16	33	4164
7	5170	21	41	5129
5	6734	21	42	6692
2	7160	37	73	7087

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์สมดุลมวล เพื่อหาค่า COD_{น้ำทิ้งที่แท้จริง} จาก COD Equivalent ของถัง
ปฏิกรณ์ควบคุมที่ใส่ซัลเฟตใน HRT ต่างๆ

HRT (วัน)	COD _{จากการไคเตรท} (mg/L)	S ²⁻ จากการไคเตรท (mg/L)	COD _{ของซัลไฟด์เทียบเท่าจากการคำนวณ} (mg/L)	COD _{น้ำทิ้งที่แท้จริง} (mg/L)
10	3950	7	13	3937
7	5000	8	16	4984
5	5693	10	20	5673
2	6583	20	40	6543

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบร้อยละการบำบัด COD_{น้ำทิ้งที่แท้จริง} กับร้อยละการบำบัด COD ที่ได้จากน้ำ
ออกของถังปฏิกรณ์ที่ใส่สารแปลกลอม+ซัลเฟตใน HRT ต่างๆ

HRT (วัน)	COD _{เฉลี่ย} (mg/L)	COD _{จาก} การไคเตรท (mg/L)	COD _{น้ำทิ้งที่แท้จริง} (mg/L)	%บำบัด COD _{น้ำทิ้งที่แท้จริง} (mg/L)	%บำบัด COD _{จากการไคเตรท} (mg/L)
10	7839	4197	4164	47	47
7	7839	5170	5129	35	34
5	7839	6734	6692	15	14
2	7839	7160	7087	10	9

ตารางที่ 4ล เปรียบเทียบร้อยละการบำบัด COD_{น้ำทิ้งที่แท้จริง} กับร้อยละการบำบัด COD_{ที่ได้จากน้ำออกของถังปฏิกรณ์ควบคุมที่ใส่ซัลเฟตใน HRT ต่างๆ}

HRT (วัน)	COD _{อินทรีย์} (mg/L)	COD _{จากการ ไคเตรท} (mg/L)	COD _{น้ำทิ้งที่แท้จริง} (mg/L)	%บำบัด COD _{น้ำทิ้งที่แท้จริง} (mg/L)	%บำบัด COD _{จากการไคเตรท} (mg/L)
10	7970	3950	3937	51	50
7	7970	5000	4984	37	37
5	7970	5692	5672	29	29
2	7970	6583	6543	18	17

ตารางที่ 5ฉ ประสิทธิภาพการบำบัดของ CB และ MC ในสภาพต่างๆที่ระยะเวลาเก็บกัก 7 วัน และ 5 วัน

ตัวแปร		ถึงปฏิกรณ์ที่ ใส่ซัลเฟต		ถึงปฏิกรณ์ที่ ไม่ได้ใส่ซัลเฟต	
		CB	MC	CB	MC
ความเข้มข้นที่เข้าระบบ(ppm)		32.34	15.27	32.34	15.27
ความเข้มข้นที่ออกระบบที่ ระยะเวลาเก็บกัก	7 วัน	5.28	5.73	7.73	7.18
	5 วัน	5.78	5.77	6.41	6.73
ประสิทธิภาพการบำบัด รวมที่ระยะเวลาเก็บกัก, %	7 วัน	84	63	76	53
	5 วัน	82	62	80	56
ความเข้มข้นที่หายไปจากการระเหย(ppm)		0.099	0.015	0.126	0.019
ความเข้มข้นที่เหลืออยู่จากการ ย่อยสลายทางชีวภาพเท่านั้น	7 วัน	5.38	5.75	7.86	7.20
	5 วัน	5.88	5.79	6.54	6.75
ประสิทธิภาพการบำบัดทาง ชีวภาพที่ระยะเวลาเก็บกัก, %	7 วัน	83	62	76	53
	5 วัน	82	62	80	56

ภาคผนวก ข

ปริมาณและองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพที่เกิด

ตารางที่ 1x ปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นและองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพของถังปฏิกรณ์ควบคุม

HRT	ปริมาณแก๊สชีวภาพ	ร้อยละองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพ		ปริมาณแก๊สต่างๆ(m ³ /วัน)	
(วัน)	(m ³ /วัน)	แก๊สมีเทน	แก๊ส CO ₂	แก๊สมีเทน	แก๊ส CO ₂
10	0.031	71	29	0.022	0.009
7	0.035	66	34	0.023	0.012
5	0.028	64	36	0.018	0.010
2	0.037	57	43	0.021	0.016

ตารางที่ 2x ปริมาณและองค์ประกอบแก๊สชีวภาพของถังปฏิกรณ์ที่ใส่ CB+MC+ซัลเฟต

HRT	ปริมาณแก๊สชีวภาพ	ร้อยละองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพ		ปริมาณแก๊สต่างๆ(m ³ /วัน)	
(วัน)	(m ³ /วัน)	แก๊สมีเทน	แก๊ส CO ₂	แก๊สมีเทน	แก๊ส CO ₂
10	0.017	66	34	0.011	0.006
7	0.018	60	40	0.011	0.007
5	0.012	59	41	0.007	0.005
2	0.016	50	50	0.008	0.008

ตารางที่ 3x ปริมาณแก๊สและองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพของถังปฏิกรณ์ที่ใส่ CB+MC

HRT	ปริมาณแก๊สชีวภาพ	ร้อยละองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพ		ปริมาณแก๊สต่างๆ(m ³ /วัน)	
(วัน)	(m ³ /วัน)	แก๊สมีเทน	แก๊ส CO ₂	แก๊สมีเทน	แก๊ส CO ₂
10	0.032	68	32	0.022	0.010
7	0.033	66	34	0.022	0.011
5	0.024	63	37	0.015	0.009
2	0.035	52	48	0.018	0.017

ตารางที่ 4x ปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นและองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพของถังปฏิกรณ์ควบคุม
ที่ใส่ซัลเฟต

HRT (วัน)	ปริมาณแก๊สชีวภาพ (m ³ /วัน)	ร้อยละองค์ประกอบแก๊สชีวภาพ		ปริมาณแก๊สต่างๆ (m ³ /วัน)	
		แก๊สมีเทน	แก๊ส CO ₂	แก๊สมีเทน	แก๊ส CO ₂
10	0.019	67	33	0.013	0.006
7	0.020	63	37	0.013	0.008
5	0.014	60	40	0.008	0.006
2	0.023	51	49	0.012	0.011

ภาคผนวก ข

ปริมาณและองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพที่ระยะเวลาเก็บกักต่างๆ

ตารางที่ 1x แก๊สและองค์ประกอบของแก๊สที่เกิดขึ้นจากถังปฏิกรณ์ต่างๆที่ HRT 10 วัน

ถังปฏิกรณ์	แก๊สชีวภาพ (ลบ.ม./วัน)	ร้อยละองค์ประกอบแก๊สชีวภาพ		แก๊สต่างๆที่เกิดขึ้น (ลบ.ม./วัน)	
		มีเทน	CO ₂	มีเทน	CO ₂
ควบคุม	0.031	71	29	0.022	0.009
CB+MC	0.032	68	32	0.022	0.010
CB+MC+ซัลเฟต	0.017	66	34	0.011	0.006
ควบคุม+ซัลเฟต	0.019	67	33	0.013	0.006

ตารางที่ 2x แก๊สและองค์ประกอบของแก๊สที่เกิดขึ้นจากถังปฏิกรณ์ต่างๆที่ HRT 7 วัน

ถังปฏิกรณ์	แก๊สชีวภาพ (ลบ.ม./วัน)	ร้อยละองค์ประกอบแก๊สชีวภาพ		แก๊สต่างๆที่เกิดขึ้น (ลบ.ม./วัน)	
		มีเทน	CO ₂	มีเทน	CO ₂
ควบคุม	0.035	66	34	0.023	0.012
CB+MC	0.033	66	34	0.022	0.011
CB+MC+ซัลเฟต	0.018	60	40	0.011	0.007
ควบคุม+ซัลเฟต	0.020	63	37	0.013	0.008

ตารางที่ 3x แก๊สและองค์ประกอบของแก๊สที่เกิดขึ้นจากถังปฏิกรณ์ต่างๆที่ HRT 5 วัน

ถังปฏิกรณ์	แก๊สชีวภาพ (ลบ.ม./วัน)	ร้อยละองค์ประกอบแก๊สชีวภาพ		แก๊สต่างๆที่เกิดขึ้น (ลบ.ม./วัน)	
		มีเทน	CO ₂	มีเทน	CO ₂
ควบคุม	0.028	64	36	0.018	0.010
CB+MC	0.024	63	37	0.015	0.009
CB+MC+ซัลเฟต	0.012	59	41	0.007	0.005
ควบคุม+ซัลเฟต	0.014	60	40	0.008	0.006

ตารางที่ 4x แก๊สและองค์ประกอบของแก๊สที่เกิดขึ้นจากถังปฏิกรณ์ต่างๆที่ HRT 2 วัน

ถังปฏิกรณ์	แก๊สชีวภาพ (ลบ.ม./วัน)	ร้อยละองค์ประกอบแก๊สชีวภาพ		แก๊สต่างๆที่เกิดขึ้น (ลบ.ม./วัน)	
		มีเทน	CO ₂	มีเทน	CO ₂
ควบคุม	0.037	57	43	0.021	0.016
CB+MC	0.035	52	48	0.018	0.017
CB+MC+ซัลเฟต	0.016	50	50	0.008	0.008
ควบคุม+ซัลเฟต	0.023	51	49	0.012	0.011

ภาคผนวก ฅ

ปริมาณและองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพจากสมุดมวล

ตารางที่ 1 ณ ปริมาณและองค์ประกอบแก๊สชีวภาพของถังปฏิกรณ์ควบคุมจากสมุดมวล

HRT	ปริมาณแก๊สชีวภาพ	ร้อยละองค์ประกอบ แก๊สชีวภาพ		ปริมาณแก๊สต่างๆ (m ³ /วัน)	
(วัน)	(m ³ /วัน)	แก๊สมีเทน	แก๊ส CO ₂	แก๊สมีเทน	แก๊ส CO ₂
10	0.031	71	29	0.022	0.009
7	0.036	66	34	0.024	0.012
5	0.028	64	36	0.018	0.009
2	0.046	57	43	0.030	0.016

ตารางที่ 2 ณ ปริมาณและองค์ประกอบแก๊สชีวภาพของถังปฏิกรณ์ที่ใส่ CB+MC+ซัลเฟตจากสมุดมวล

HRT	ปริมาณแก๊สชีวภาพ	ร้อยละองค์ประกอบ แก๊สชีวภาพ		ปริมาณแก๊สต่างๆ (m ³ /วัน)	
(วัน)	(m ³ /วัน)	แก๊สมีเทน	แก๊ส CO ₂	แก๊สมีเทน	แก๊ส CO ₂
10	0.020	66	34	0.013	0.007
7	0.022	60	40	0.013	0.009
5	0.012	59	41	0.007	0.005
2	0.020	50	50	0.011	0.009

ตารางที่ 3 ณ ปริมาณและองค์ประกอบแก๊สชีวภาพของถังปฏิกรณ์ที่ใส่ CB+MC จากสมุดมวล

HRT	ปริมาณแก๊สชีวภาพ	ร้อยละองค์ประกอบ แก๊สชีวภาพ		ปริมาณแก๊สต่างๆ (m ³ /วัน)	
(วัน)	(m ³ /วัน)	แก๊สมีเทน	แก๊ส CO ₂	แก๊สมีเทน	แก๊ส CO ₂
10	0.033	68	32	0.022	0.011
7	0.038	66	34	0.025	0.013
5	0.024	63	37	0.016	0.008
2	0.039	52	48	0.023	0.016

ตารางที่ 4ฃ ปริมาณแก๊สและองค์ประกอบแก๊สชีวภาพของถังปฏิกรณ์ควบคุม+ซัลเฟตจากสมดุลมวล

HRT (วัน)	ปริมาณแก๊สชีวภาพ (m ³ /วัน)	ร้อยละองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพ		ปริมาณแก๊สต่างๆ (m ³ /วัน)	
		แก๊สมีเทน	แก๊ส CO ₂	แก๊สมีเทน	แก๊ส CO ₂
10	0.021	67	33	0.014	0.007
7	0.023	63	37	0.015	0.009
5	0.024	60	40	0.015	0.009
2	0.037	51	49	0.023	0.014

หมายเหตุ : ปริมาณแก๊สมีเทน หาได้จากสมการที่ 4.5 ภาคผนวก ค และ ง
 ปริมาณแก๊สชีวภาพ = ปริมาณแก๊สมีเทน/ร้อยละของแก๊สมีเทน
 ปริมาณแก๊ส CO₂ = ปริมาณแก๊สชีวภาพ x ร้อยละของแก๊ส CO₂

ภาคผนวก ญ

เปรียบเทียบปริมาณและองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพที่เกิดจริงและจากสมดุลมวล

ตารางที่ 1 ญ เปรียบเทียบปริมาณและองค์ประกอบแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นระหว่างจากการ

ทดลองและจากการทำสมดุลมวลของถังปฏิกรณ์ควบคุม (ลบ.ม.ต่อวัน)

HRT (วัน)	m ³ .CH ₄ / 1 Kg.COD	ปริมาณแก๊สชีวภาพ		ปริมาณแก๊สมีเทน		ปริมาณแก๊ส CO ₂	
		เกิดจริง	สมดุลมวล	เกิดจริง	สมดุลมวล	เกิดจริง	สมดุลมวล
10	0.35	0.031	0.031	0.022	0.022	0.009	0.009
7	0.34	0.035	0.036	0.023	0.024	0.012	0.012
5	0.35	0.028	0.028	0.018	0.018	0.010	0.010
2	0.25	0.037	0.046	0.021	0.030	0.016	0.016

ตารางที่ 2 ญ เปรียบเทียบปริมาณและองค์ประกอบแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นระหว่างทดลองและจาก

การทำสมดุลมวลของถังปฏิกรณ์ที่ใส่ CB+MC+ซัลเฟต (ลบ.ม.ต่อวัน)

HRT (วัน)	m ³ .CH ₄ / 1 Kg.COD	ปริมาณแก๊สชีวภาพ		ปริมาณแก๊สมีเทน		ปริมาณแก๊ส CO ₂	
		เกิดจริง	สมดุลมวล	เกิดจริง	สมดุลมวล	เกิดจริง	สมดุลมวล
10	0.30	0.017	0.020	0.011	0.013	0.006	0.007
7	0.29	0.018	0.022	0.011	0.013	0.007	0.009
5	0.35	0.012	0.012	0.007	0.007	0.005	0.005
2	0.24	0.016	0.020	0.008	0.011	0.008	0.009

ตารางที่ 3 ญ เปรียบเทียบปริมาณและองค์ประกอบแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นระหว่างทดลอง

และจากการทำสมดุลมวลของถังปฏิกรณ์ที่ใส่ CB+MC (ลบ.ม.ต่อวัน)

HRT (วัน)	m ³ .CH ₄ / 1 Kg.COD	ปริมาณแก๊สชีวภาพ		ปริมาณแก๊สมีเทน		ปริมาณแก๊ส CO ₂	
		เกิดจริง	สมดุลมวล	เกิดจริง	สมดุลมวล	เกิดจริง	สมดุลมวล
10	0.34	0.032	0.033	0.022	0.022	0.010	0.011
7	0.30	0.033	0.038	0.022	0.025	0.011	0.013
5	0.33	0.024	0.024	0.015	0.016	0.008	0.008
2	0.28	0.035	0.039	0.018	0.023	0.016	0.016

ตารางที่ 4ญ เปรียบเทียบปริมาณและองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการทดลองและจากการทำสมดุลมวลของถังปฏิกรณ์ควบคุม+ซัลเฟต (ลบ.ม.ต่อวัน)

HRT (วัน)	m ³ .CH ₄ / 1 Kg.COD	ปริมาณแก๊สชีวภาพ		ปริมาณแก๊สมีเทน		ปริมาณแก๊ส CO ₂	
		เกิดจริง	สมดุลมวล	เกิดจริง	สมดุลมวล	เกิดจริง	สมดุลมวล
10	0.32	0.019	0.021	0.013	0.014	0.006	0.007
7	0.30	0.020	0.023	0.013	0.015	0.008	0.009
5	0.19	0.014	0.024	0.008	0.015	0.006	0.009
2	0.18	0.023	0.037	0.012	0.023	0.011	0.014

ประวัติผู้เขียน

นายประยงค์ กิระดิฐไธสง เกิดเมื่อวันที่ 10 มิถุนายน พ.ศ. 2515 มีภูมิลำเนาอยู่ในจังหวัด นครราชสีมา เริ่มเข้าศึกษาระดับปริญญาตรีในปีพ.ศ. 2533 ที่มหาวิทยาลัยขอนแก่น คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา สำเร็จการศึกษาเมื่อปีพ.ศ. 2537 ภายหลังจากที่สำเร็จ การศึกษาในระดับปริญญาตรีเป็นเวลา 3 ปีก็ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ที่ มหาวิทยาลัยขอนแก่น คณะวิชาบริหารธุรกิจ สาขาการจัดการทั่วไปในปีพ.ศ. 2540 และภายหลัง สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาโทจากมหาวิทยาลัยขอนแก่นก็ได้เข้าศึกษาต่อในปีเดียวกันใน ระดับปริญญาโท สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารีจนถึงปัจจุบัน