การบำบัดน้ำเสียจากการหมักกรดมะนาวโดยระบบยูเอเอสบี

นายสัมพันธ์ เขียวเหมือน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีทางชีวภาพ
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2540

ISBN 974-638-908-4

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TREATMENT OF WASTEWATER FROM CITRIC ACID FERMENTATION BY UASB PROCESS

Mr. Sampan Keawmuan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Biotechnology
Programme of Biotechnology
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 1997

ISBN 974-638-908-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การบำบัดน้ำเสียจากการหมักกรดมะนาวโดยระบบยูเอเอสบี
โดย	นายสัมพันธ์ เขียวเหมือน
สาขาวิชา	เทคโนโลยีทางชีวภาพ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงศ์ นวังคสัตถุศาสน์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. นลิน นิลอุบล
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. ไพเราะ ปิ่นพานิชการ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริรัตน์ เร่งพิพัฒน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงศ์ นวังคสัตถุศาสน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. นลิน นิลอุบล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. ไพเราะ ปิ่นพานิชการ)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. สุเมธ ชวเดช)

สัมพันธ์ เขียวเหมือน การบำบัดน้ำเสียจากการหมักกรดมะนาวโดยระบบยูเอเอสบี
(TREATMENT OF WASTEWATER FROM CITRIC ACID FERMENTATION BY UASB PROCESS)
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สุรพงศ์ นวังคสัตถุศาสน์, อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : รศ.ดร. นลิน นิลอุบล
และ รศ.ดร ไพเราะ ปิ่นพานิชการ, 230 หน้า. ISBN 974-638-908-4

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อทำการศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากการหมักกรดมะนาว เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด รวมทั้งพิจารณาถึงเสถียรภาพของระบบด้วย น้ำเสียนี้จะมีค่าซีโอดีสูงมาก คืออยู่ในช่วง 35,000 - 80,000 มิลลิกรัม/ลิตร และมีปริมาณกรดไขมันระเหยสูง คือประมาณ 3,000 - 8,000 มิลลิกรัม/ลิตร ระบบหมักยูเอเอสบีแบบขั้นตอนเดียวสามารถที่จะบำบัดน้ำเสียนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทำการทดลองในถังหมักแบบยูเอเอสบีขนาด 14.3 ลิตร และควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 37 องศาเซลเซียส จากการศึกษาพบว่าระบบสามารถรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ได้สูงถึง 21.27 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่เหมาะสมสำหรับระบบหมักนี้คือ 1.99 -17.06 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน โดยมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์มากกว่า 91 % และมีประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณกรดไขมันระเหยมากกว่า 95 % และอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัดน้ำเสียชนิดนี้คือ 12.55 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ซึ่งมีอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบ 2.88 ลิตร/วัน ระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสียในระบบ 4.97 วัน อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ 87,078 มิลลิลิตร/วัน ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์ 96.72 % ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ 0.4876 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัมซีโอดีที่ป้อนเข้าสู่ระบบ หรือ 0.5075 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด สัดส่วนของมีเทนในก๊าซชีวภาพเท่ากับ 67.84 % สัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพเท่ากับ 22.28 % และเกิดตะกอนแบคทีเรียลักษณะเม็ดขนาด 1 - 3 มิลลิเมตร ในระบบปริมาณมาก

ภาควิชา ..... ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา เทคโนโลยีทางชีวภาพ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ปีการศึกษา 2540 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

C727002 : MAJOR BIOTECHNOLOGY
KEY WORD: UASB / WASTEWATER / CITRIC ACID

SAMPAN KEAWMUAN TREATMENT OF WASTEWATER FROM CITRIC ACID FERMENTATION BY UASB PROCESS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SURAPONG NAVANKASATTUSAS, Ph.D. THESIS CO-ADVISOR : ASSO. PROF. NALIN NILUBOL, Ph.D. AND ASSO. PROF. PAIROH PINPHANICHAKARN, Ph.D. 230 pp. ISBN 974-638-908-4

The purpose of this experimental study was to find the optimal condition to treat the wastewater from citric acid fermentation for the maximum organic reduction and biogas production and also to determine the process stability of the UASB system. This wastewater contained high COD of 35,000 - 80,000 mg/l and high VFA of 3,000 - 8,000 mg/l. Single - phase UASB could treat this wastewater efficiently. The UASB reactor had 14.3 l holding volume. This bioreactor operated at constant temperature of 37 ^{O}C. From the experimental results, it was found that the system could take an organic loading up to 21.27 kgCOD/m^{3}.d. The optimal organic loading range was 1.99 - 17.06 kgCOD/m^{3}.d which had COD reduction more than 91 % and VFA reduction more than 95 %. The best optimal organic loading for this study was 12.55 kgCOD/m^{3}.d. The flow rate of waste water was 2.88 l/d. Hydraulic retention time was 4.97 d. This organic loading had biogas production of 87,078 ml/d, COD reduction of 96.72 %, biogas yield of 0.4876 m^{3}/kgCOD fed or 0.5075 m^{3}/kgCOD removed. Methane content in the produced biogas was 67.84 % and carbondioxide content in the produced biogas was 22.28 %. There were substantial 1 - 3 mm microbial granules in this system.

ภาควิชา เทคโนโลยีทางชีวภาพ ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา 2540 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงศ์ นวังคสัตถุศาสน์ ที่กรุณารับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. นลิน นิลอุบล และ รองศาสตราจารย์ ดร. ไพเราะ ปิ่นพานิชการ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ และให้ความดูแลช่วยเหลืออย่างดียิ่งตลอดการทำวิจัย รวมทั้งช่วยตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ซึ่งกระผมขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงสุดไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริรัตน์ เร่งพิพัฒน์ ที่ได้กรุณาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำอันมีคุณค่ายิ่ง รวมทั้งช่วยตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. สุเมธ ชวเดช กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำในการออกแบบระบบหมักยูเอเอสบี และให้คำปรึกษาอันมีคุณค่ายิ่ง รวมทั้งช่วยตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือด้านเงินทุนอุดหนุนเพื่อทำการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณเสริมศักดิ์ พารุ่ง เจ้าหน้าที่ฝ่ายควบคุมดูแลระบบบำบัดน้ำเสีย บริษัท ไทยอมฤตบริเวอรี่ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์จัดหาตะกอนแบคทีเรียเริ่มต้นสำหรับทำการวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณณรงค์ หอมจันทร์ และคุณปรีดา ไชยฤทธิ์ เจ้าหน้าที่ฝ่ายช่างเทคนิคที่ให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่งตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ฝ่ายธุรการของสถาบันฯ ทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือตลอดจนอำนวยความสะดวกในระหว่างการทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณ พี่อาภรณ์ ธีรมงคลรัศมี ที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านคอมพิวเตอร์

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจด้วยดีมาตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และขอขอบคุณ น้องสาว และเพื่อนสนิททุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือสนับสนุนอย่างดียิ่งทั้งกำลังกาย กำลังใจ กำลังทรัพย์ สำหรับการทำวิจัยนี้ตลอดเวลา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ
กิตติกรรมประกาศ..... ฉ
สารบัญ..... ช
สารบัญตาราง..... ญ
สารบัญรูป..... ฐ
คำย่อและนิยาม..... ณ

บทที่

1 บทนำ
1.1 หลักการพื้นฐาน..... 3
1.1.1 ปฏิกิริยาชีวเคมีและจุลชีววิทยาของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน..... 3
1.1.2 ลักษณะการเจริญของแบคทีเรีย..... 15
1.1.3 ชีวเคมีของกระบวนการสร้างมีเทน..... 17
1.1.4 ภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน..... 19
1.1.5 สัญญาณที่เตือนถึงปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน..... 25
1.1.6 สาเหตุของการล้มเหลวของระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน..... 27
1.1.7 ข้อดีและข้อเสียของระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน..... 27
1.2 รูปแบบระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน..... 28
1.2.1 ระบบบำบัดแบบดั้งเดิม..... 29
1.2.2 ระบบบำบัดแบบประสิทธิภาพสูง..... 29
1.3 การพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบบำบัดแบบประสิทธิภาพสูง.... 33
1.3.1 การแยกการเกิดปฏิกิริยาออกเป็นสองส่วน..... 33

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
1.3.2	ข้อดีและข้อเสียของระบบบำบัดแบบสองขั้นตอน	34
1.3.3	เทคนิคในการแยกออกเป็นสองขั้นตอน	34
1.3.4	ลักษณะการทำงานของระบบ	35
1.4	กระบวนการเกิดตะกอนแบคทีเรียลักษณะเม็ด	37
1.4.1	ปัจจัยที่ส่งเสริมกระบวนการเกิดตะกอนแบคทีเรียลักษณะเม็ด	39
1.4.2	แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องในกระบวนการเกิดตะกอนแบคทีเรียลักษณะเม็ด	43
1.5	การเริ่มต้นเดินระบบ	46
1.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหลักการบำบัดน้ำเสียในกระบวนการผลิตกรดมะนาว	47
1.7	มูลเหตุจูงใจในการทำงานวิจัย	51
1.8	วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	51
1.9	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	51
2	วิธีการทดลอง	
2.1	น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง	52
2.2	ตะกอนแบคทีเรียที่ใช้เริ่มต้น	52
2.3	อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	52
2.4	การทำงานของระบบ	59
2.5	เงื่อนไขและภาวะที่ใช้ในการทดลอง	62
2.6	การเก็บตัวอย่าง	63
2.7	การวิเคราะห์	63
2.8	การประเมินประสิทธิภาพและเสถียรภาพของระบบ	64
2.9	การเริ่มต้นการทำงานของระบบ	65
3	ผลการทดลอง	
3.1	องค์ประกอบและลักษณะจำเพาะต่างๆ ของน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการหมักกรดมะนาว	66

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
3.2	การบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการหมักกรดมะนาวในระดับห้องทดลอง	66
3.2.1	ระบบบำบัดยูเอเอสบีแบบสองขั้นตอน	66
3.2.2	ระบบบำบัดยูเอเอสบีแบบขั้นตอนเดียว	69
3.2.2.1	อัตราการป้อนสารอินทรีย์และระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสีย	69
3.2.2.2	ระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่ภาวะคงตัว	73
3.2.2.3	ค่าความเป็นกรด-ด่างในระบบ	74
3.2.2.4	ปริมาณกรดไขมันระเหยในระบบ	76
3.2.2.5	ค่าสภาพความเป็นด่างของระบบ	78
3.2.2.6	อัตราส่วนระหว่างปริมาณกรดไขมันระเหยต่อค่าสภาพความเป็นด่าง	79
3.2.2.7	ปริมาณของแข็งแขวนลอยในระบบทั้งหมด	81
3.2.2.8	ปริมาณตะกอนแบคทีเรียภายในถังหมัก	83
3.2.2.9	ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์	90
3.2.2.10	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ	92
3.2.2.11	องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้	94
3.2.2.12	ประสิทธิ์ภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ	96
3.2.2.13	ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทน	100
3.2.2.14	เสถียรภาพของระบบ	104
3.2.2.15	ภาวะที่เหมาะสมของระบบ	105
4	สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	107
	รายการอ้างอิง	111
	ภาคผนวก	
ก	วิธีการวิเคราะห์ค่าดรรชนีต่างๆ ของน้ำเสียในงานวิจัย	117
ข	การคำนวณ	128
ค	ข้อมูลการทดลอง	131
ง	ค่าความเบี่ยงเบนของข้อมูล	228
	ประวัติผู้เขียน	230

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	แบคทีเรียชนิดต่างๆ ที่สามารถย่อยสลายสารโพลีเมอร์ชีวภาพ.....	5
1.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรเจน (ความดันย่อย) และผลิตภัณฑ์สุดท้ายของปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน.....	6
1.3	ความจำเพาะของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนต่อสารตั้งต้นและไซโตโคม.....	10
1.4	ลักษณะสำคัญของแบคทีเรียในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนภายใต้ภาวะอุณหภูมิปานกลาง.....	11
1.5	เปรียบเทียบค่าดรรชนีในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในภาวะปกติและภาวะที่ทำให้เกิดการยับยั้งการทำงาน.....	11
1.6	สมการปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้นในการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนและค่าพลังงานอิสระ (ΔG°) ที่ภาวะมาตรฐาน (25 องศาเซลเซียส และค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7).....	13
1.7	ปริมาณธาตุอาหารรองที่มีความจำเป็นต่อการเจริญของแบคทีเรีย.....	23
1.8	ระดับความเข้มข้นของสารต่างๆ ที่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรียในระบบหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน.....	24
1.9	สัดส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์ของธาตุต่างๆ ในพื้นที่ 4 บริเวณของเม็ดตะกอนแบคทีเรียสีดำ เทาและขาว ในระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนโดย EDAX Analysis.....	45
2.1	ภาวะของระบบหมักที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	62
2.2	ดรรชนีต่างๆ และจำนวนครั้งในการตรวจวิเคราะห์.....	64
3.1	องค์ประกอบและสมบัติจำเพาะต่างๆ ของน้ำเสีย.....	67
3.2	ค่าเฉลี่ยดรรชนีต่างๆ ของระบบหมักที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ ภายใต้ภาวะคงตัว.....	70
3.3	ประสิทธิภาพของระบบหมักที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ ภายใต้ภาวะคงตัว.....	71

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
3.4	ปริมาณตะกอนแบคทีเรียที่ระดับความสูงต่างๆ ของถังหมักที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ(แสดงข้อมูลที่ภาวะคงตัวของแต่ละอัตราการป้อนสารอินทรีย์)	84
ค. 1	ข้อมูลการทดลองแสดงค่าดรรชนีต่างๆ และประสิทธิภาพของระบบในแต่ละวันที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 0.53 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน	132
ค. 2	ข้อมูลการทดลองแสดงค่าดรรชนีต่างๆ และประสิทธิภาพของระบบในแต่ละวันที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 0.62 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน	140
ค. 3	ข้อมูลการทดลองแสดงค่าดรรชนีต่างๆ และประสิทธิภาพของระบบในแต่ละวันที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 1.99 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน	151
ค. 4	ข้อมูลการทดลองแสดงค่าดรรชนีต่างๆ และประสิทธิภาพของระบบในแต่ละวันที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 4.26 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน	162
ค. 5	ข้อมูลการทดลองแสดงค่าดรรชนีต่างๆ และประสิทธิภาพของระบบในแต่ละวันที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 6.61 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน	173
ค. 6	ข้อมูลการทดลองแสดงค่าดรรชนีต่างๆ และประสิทธิภาพของระบบในแต่ละวันที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 8.93 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน	184
ค. 7	ข้อมูลการทดลองแสดงค่าดรรชนีต่างๆ และประสิทธิภาพของระบบในแต่ละวันที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 12.55 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน	195
ค. 8	ข้อมูลการทดลองแสดงค่าดรรชนีต่างๆ และประสิทธิภาพของระบบในแต่ละวันที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 17.06 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน	206

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ค. 9	ข้อมูลการทดลองแสดงค่าดรรชนีต่างๆ และประสิทธิภาพของระบบในแต่ละวันที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 21.27 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน.....	217
ง. 1	ค่าความเบี่ยงเบนของข้อมูล (standard diviation) ของประสิทธิภาพของระบบหมักที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ ภายใต้ภาวะคงตัว.....	228
ง. 2	ค่าความเบี่ยงเบนของข้อมูล (standard diviation) ของดรรชนีต่างๆ ของระบบหมักที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ ภายใต้ภาวะคงตัว.....	229

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	การย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนในระดับโมเลกุล.....	8
1.2	การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารอินทรีย์และจำนวนแบคทีเรียในถังหมักแบบครั้งคราว (batch reactor) เมื่อเวลาผ่านไป.....	16
1.3	อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิช่วงต่างๆ.....	20
1.4	ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตกรดมะนาว.....	49
2.1	ขนาดและสัดส่วนของถังหมักกรดแบบยูเอเอสบี.....	54
2.2	รายละเอียดของถังหมักกรดแบบยูเอเอสบี.....	55
2.3	ขนาดและสัดส่วนของถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบี.....	56
2.4	รายละเอียดของถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบี.....	57
2.5	กรวยแยกตะกอน (Gas - Solid Separator)	58
2.6	ท่อใช้สำหรับเก็บตัวอย่างก๊าซ.....	60
2.7	แผนผังแสดงเครื่องมืออุปกรณ์และการทำงานของระบบหมักที่ใช้ในงานวิจัย.....	61
3.1	อัตราการไหลของน้ำเสียที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ.....	72
3.2	ระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสียในระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ.....	73
3.3	ระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่ภาวะคงตัวที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ.....	74
3.4	ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ.....	75
3.5	ปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ.....	77
3.6	ค่าสภาพความเป็นด่างของน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ.....	79
3.7	อัตราส่วนระหว่างปริมาณกรดไขมันระเหยต่อค่าสภาพความเป็นด่างของน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ.....	81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.8	ปริมาณของแข็งแขวนลอยของน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ	82
3.9	ปริมาณตะกอนแบคทีเรียทั้งหมดในถังหมักที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ	85
3.10	ความเข้มข้นตะกอนแบคทีเรียโดยเฉลี่ยในถังหมักที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ	85
3.11	ความเข้มข้นตะกอนแบคทีเรียที่ระดับความสูงต่างๆ ในถังหมักที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ (แสดงข้อมูลที่ภาวะคงตัวของแต่ละอัตราการป้อนสารอินทรีย์)	87
3.12	ค่า COD ของน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ	91
3.13	ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์ในรูป COD ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ	91
3.14	ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ.	93
3.15	องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพซึ่งผลิตได้จากระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ	95
3.16	ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยพิจารณาเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ	97
3.17	ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยพิจารณาเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ	99
3.18	ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยพิจารณาเทียบกับปริมาตรของถังหมักที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ	100
3.19	ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนโดยพิจารณาเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ	102
3.20	ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนโดยพิจารณาเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ	102

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.21	ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนโดยพิจารณาเทียบกับปริมาตรของถังหมักที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ	103
ค.1 - ค.6	ค่าดรรชนีต่างๆ และประสิทธิภาพของระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 0.53 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน	136
ค.7 - ค.21	ค่าดรรชนีต่างๆ และประสิทธิภาพของระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 0.62 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน	143
ค.22 - ค.36	ค่าดรรชนีต่างๆ และประสิทธิภาพของระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 1.99 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน	154
ค.37 - ค.51	ค่าดรรชนีต่างๆ และประสิทธิภาพของระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 4.26 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน	165
ค.52 - ค.66	ค่าดรรชนีต่างๆ และประสิทธิภาพของระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 6.61 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน	176
ค.67 - ค.81	ค่าดรรชนีต่างๆ และประสิทธิภาพของระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 8.93 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน	187
ค.82 - ค.96	ค่าดรรชนีต่างๆ และประสิทธิภาพของระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 12.55 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน	198
ค.97 - ค.111	ค่าดรรชนีต่างๆ และประสิทธิภาพของระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 17.06 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน	209
ค.112 - ค.126	ค่าดรรชนีต่างๆ และประสิทธิภาพของระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 21.27 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน	220

คำย่อและนิยาม

1. ALK — Alkalinity

ค่าสภาพความเป็นด่าง หมายถึง ความสามารถของสารละลายในการรับโปรตอน ซึ่งเกิดจากองค์ประกอบของสารละลายไบคาร์บอเนต คาร์บอเนต และไฮดรอกไซด์ ค่าสภาพความเป็นด่างของระบบเปรียบเสมือนตัวรักษาสมดุลความเป็นกรด-ด่าง ในระบบ

2. AR — Acid Reactor

ถังหมักกรด

3. BOD — Biochemical Oxygen Demand

เป็นดรรชนีในการวัดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ โดยคิดเปรียบเทียบในรูปของปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ต้องการใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสีย

4. COD — Chemical Oxygen Demand

เป็นดรรชนีในการวัดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ โดยคิดเปรียบเทียบในรูปของปริมาณออกซิเจนที่ต้องการใช้ออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำเสีย โดยใช้สารเคมีที่มีอำนาจในการออกซิไดซ์สูงในสารละลายที่เป็นกรด

5. Eff. — Effluent

ในที่นี้หมายถึง น้ำเสียที่ออกจากถังหมัก

6. Feed — ในที่นี้หมายถึง น้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบ

7. HRT — Hydraulic Retention Time

หมายถึง ระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสียในระบบ

8. Inf. Influent

ในที่นี้หมายถึง น้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ถังหมัก

9. MLSS Mixed Liquor Suspended Solids

เป็นดรรชนีบ่งชี้ถึงความเข้มข้นของจุลินทรีย์ในระบบ โดยวัดในรูปของน้ำหนักแห้งของสารแขวนลอยทั้งหมดของน้ำตะกอน (Mixed Liquor) ซึ่งมีหน่วยเป็นมิลลิกรัม/ลิตร

10. MLFSS Mixed Liquor Fixed Suspended Solids

หมายถึง สารคงตัวในตะกอนจุลินทรีย์ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอนินทรีย์ ซึ่งมีหน่วยเป็น มิลลิกรัม/ลิตร

11. MLVSS Mixed Liquor Volatile Suspended Solids

หมายถึง สารระเหยง่ายในตะกอนจุลินทรีย์ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ ซึ่งมีหน่วยเป็น มิลลิกรัม/ลิตร

12. MR Methane Reactor

ถังหมักมีเทน

13. pH เป็นค่าที่แสดงปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคโปรตอน $[H^+]$ ในน้ำ ซึ่งในทางปฏิบัติ ค่าพีเอชแสดงถึงความเป็นกรดหรือด่างของน้ำเสีย

14. SS Suspended Solids

หมายถึง ปริมาณของแข็งแขวนลอย