การลดสีรีแอกทีฟในน้ำเสียภายใต้สภาวะไร้อากาศ ด้วยระบบยูเอเอสบี

นางสาวโสภา ชินเวชกิจวานิชย์

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2540

ISBN 974-638-266-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 17906064

DECOLOURISATION OF REACTIVE-DYE WASTEWATER UNDER ANAEROBIC CONDITION BY A UASB SYSTEM

Miss Sopa Chinwetkitvanich

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Environmental Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

Acedemic Year 1997

ISBN 974-638-266-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การลดสีรีแอกทีฟในน้ำเสียภายใต้สภาวะไร้อากาศด้วยระบบยูเอเอสบี
โดย	โสภา ชินเวชกิจวานิชย์
ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ธงชัย พรรณสวัสดิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธีระ เกรอต)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

โสภา ชินเวชกิจวานิชย์ : การลดสีรีแอกทีฟในน้ำเสียภายใต้สภาวะไร้อากาศด้วยระบบยูเอเอสบี
(Decolourisation of Reactive-Dye Wastewater Under Anaerobic Condition by A UASB System)
อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร. มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 279 หน้า. ISBN 974-638-266-7

การลดสีในน้ำเสียจากโรงฟอกย้อมด้วยจุลชีพแบบไม่ใช้ออกซิเจน มีการศึกษาเพิ่มขึ้นมากในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมานี้ และส่วนใหญ่มักจะมุ่งเน้นไปที่สีย้อมชนิดอะโซ โดยเชื่อว่า สีย้อมอะโซจะทำหน้าที่เป็นสารรับอิเล็กตรอนในกระบวนการย่อยอาหารของแบคทีเรีย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ของการบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมรีแอกทีฟ ด้วยกระบวนการไร้อากาศที่ประกอบด้วยระบบยูเอเอสบี 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการสร้างกรดและขั้นตอนการสร้างมีเทน มีเวลากักน้ำขั้นตอนละ 12 ชั่วโมง การศึกษาแบ่งออกเป็น 5 การทดลอง โดย 3 การทดลองแรกใช้น้ำเสียกึ่งสังเคราะห์ซึ่งเป็นน้ำเสียสีเข้มจากการย้อมครั้งที่ 1 มาเจือจางและควบคุมให้มีความเข้มสีประมาณ 150 เอสยู น้ำเสียที่นำมาใช้ในการทดลองมี 3 โทนสี คือ สีดำ แดง และน้ำเงิน ทำการศึกษากับความเข้มข้นแป้งมันที่เติมให้แตกต่างกัน 3 ค่า ในการทดลองที่ 4 จะคล้ายกับ 3 การทดลองแรกแต่ใช้น้ำย้อมสีน้ำเงินสังเคราะห์ทั้งหมด ส่วนการทดลองที่ 5 ใช้น้ำย้อมสีน้ำเงินสังเคราะห์เช่นกัน แต่เปลี่ยนแปลงความเข้มสีในน้ำเสียที่เตรียมให้เป็น 0 50 และ 100 เอสยู (โดยใช้ความเข้มข้นแป้งมัน 500 มก./ล.)

การทดลองที่ 1 ใช้น้ำย้อมสีดำและความเข้มข้นแป้งมัน 500 1,000 และ 1,500 มก./ล. พบว่า ประสิทธิภาพการลดสีเท่ากับ 67% 71% และ 69% ตามลำดับ แสดงว่าการเติมแป้งมันให้ในช่วง 500 ถึง 1,500 มก./ล. ไม่ได้ทำให้ประสิทธิภาพการลดสีเพิ่มขึ้นแต่อย่างใด ดังนั้น ในการทดลองที่ 2 ถึง 4 จึงเปลี่ยนความเข้มข้นแป้งมันที่ใช้เป็น 0 200 และ 500 มก./ล. ประสิทธิภาพการลดสีของน้ำย้อมสีแดงเท่ากับ 36% 57% และ 56% ตามลำดับ ส่วนน้ำย้อมสีน้ำเงินมีประสิทธิภาพการลดสี 48% 52% และ 56% ตามลำดับ และน้ำย้อมสีน้ำเงินสังเคราะห์ก็มีประสิทธิภาพการลดสี 36% 54% และ 57% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า การเติมแป้งมันทำให้ประสิทธิภาพการลดสีเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการไม่เติม ถึงแม้ว่าในการทดลองที่ 3 กับน้ำย้อมสีน้ำเงินจะเห็นไม่ชัดเจนเท่าไรนัก แต่ก็มีแนวโน้มที่ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อเติมแป้งมัน นอกจากนี้ จากทั้ง 4 การทดลอง พบว่า น้ำย้อมสีดำมีการลดสีได้มากที่สุด ทั้งนี้คาดว่าเป็นเพราะสีดำมีความสามารถในการสลายตัวตามธรรมชาติได้ดีกว่าสีอื่น ส่วนการทดลองที่ 5 กับน้ำย้อมสีน้ำเงินสังเคราะห์ที่ความเข้มสีในน้ำเสียที่เตรียมให้ 100 และ 50 เอสยู ประสิทธิภาพการลดสีเป็น 56% และ 63%

สรุปได้ว่า ระบบไร้อากาศยูเอเอสบีสามารถลดสีในน้ำเสียได้ กลไกการลดสีคาดว่าสีย้อมอะโซทำหน้าที่เป็นสารรับอิเล็กตรอน เพราะระบบสามารถลดสีได้มากขึ้นเมื่อมีแหล่งคาร์บอนอื่นที่ไม่ใช่สี ความเข้มข้นของแหล่งคาร์บอนที่ต้องการประมาณ 200 ถึง 500 มก./ล. ก็สามารถบำบัดน้ำเสียให้มีประสิทธิภาพการลดสีได้อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ ยังพบว่าแบคทีเรียสร้างมีเทนและแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตที่พบในการศึกษานี้ มีบทบาทในการลดสีในน้ำเสียไม่เท่ากับแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างกรด

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต โสภา ชินเวชกิจวานิชย์
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ปีการศึกษา 2540 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

##C818017 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING
KEY WORD: ANAEROBIC DECOLOURISATION /REACTIVE DYES / AZO DYES / UASB

SOPA CHINWETKITVANICH : DECOLOURISATION OF REACTIVE-DYE WASTEWATER UNDER ANAEROBIC CONDITION BY A UASB SYSTEM. THESIS ADVISOR : ASSO. PROF. MUNSIN TUNTOOLAVEST. Ph.D. 279 pp. ISBN 974-638-266-7

Anaerobic decolourisation of textile wastewater had recently become an interesting topic, as indicated by the multitude of related research reports. Much of the research focused on microbial anaerobic reduction of azo dye. The mechanism of microbial azo reduction had been proposed that azo dyes acted as an electron acceptor in microbial anaerobic respiration.

The purpose of this study was to investigate the anaerobic treatability of reactive- dye wastewater. The two-phase UASB system was chosen and consisted of the UASB reactor and an acidification tank with 12-hr. retention time each. There were five sets of experiment in this study. Three of them were undertaken to treat the semi-synthetic dye wastewater, prepared to have constant initial colouration of approximately 150 space unit (SU). Dye wastewater under investigation had 3 different colours, namely, black, red and blue, and 3 different concentrations of tapioca used as a supplemental carbon source. The fourth set was the experiment of full-synthetic blue wastewater and the fifth was to study the variation of initial colouration of 0, 50 and 100 SU with using tapioca concentration of 500 mg./l.

In the black-dye experiment, using the tapioca concentration of 500, 1000 and 1500 mg./l., the decolourisation efficiencies were 67%, 71% and 69%, respectively. It was shown that the tapioca concentration ranged from 500 to 1500 mg./l. did not produce better colour removal efficiency. For the tapioca concentration of 0, 200 and 500 mg./l., the decolourisation efficiencies of the red-dye experiment were 36%, 57% and 56%, respectively, the blue-dye experiment were 48%, 52% and 56%, respectively and the synthetic blue-dye experiment were 36%, 54% and 57%, respectively. It seemed that the supplement of tapioca tended to give better colour removal efficiency. It was found that the black-dye experiment had the highest decolourisation efficiency than other experiments. In the last experiment with the synthetic blue-dye wastewater, efficiencies of decolourisation of 56% and 63% were found at the initial colouration of 100 and 50 SU, respectively.

In conclusion, the two-phase UASB system was able to achieve adequate colour removal. It was tentatively postulated that azo dyes played the role of electron acceptor because the system could remove much more colour when there was external carbon source other than the dye in wastewater. The system was found to require tapioca, as carbon source, having concentration ranged from 200 to 500 mg./l., in order to remove colour significantly. Moreover, experimental results disclosed that methanogens and sulfate reducing bacteria did not tend to play as important role in colour removal as acidogens did.

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต โสภา ชินเวชกิจวานิช

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2540 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.มั่นสิน ตัณฑุลเวคม เป็นอย่างสูง ในฐานะที่ท่านเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และเป็นผู้ให้จุดเริ่มต้นของวิทยานิพนธ์นี้กับผู้เขียน และยังคอยให้คำแนะนำต่างๆ รวมทั้งให้ความอดทนอย่างไม่มีที่สิ้นสุดกับผู้เขียน ในการอบรมสั่งสอนให้ผู้เขียนมีความเป็นผู้ใหญ่ รู้จักการวางแผนการทำงาน การแก้ไขปัญหา การค้นคว้าหาข้อมูล และการเขียนวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ถึงแม้ในที่สุดแล้ว ผู้เขียนจะไม่สามารถพัฒนาตัวเองให้ได้สมกับความเหนื่อยที่ท่านอุตสาห์สละให้ก็ตาม

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ธงชัย พรรณสวัสดิ์ ประธานการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาเป็นที่ปรึกษาให้คำแนะนำต่างๆ และช่วยชักนำให้วิทยานิพนธ์นี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่กรุณาให้คำแนะนำต่างๆ และช่วยแก้ไขให้วิทยานิพนธ์นี้มีข้อบกพร่องน้อยลง รวมทั้งคณาจารย์ภาควิชาสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดความรู้ต่างๆ ให้แก่ผู้เขียน

ขอขอบพระคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่ให้ทุนอุดหนุนตลอดงานวิจัยนี้ และบัณฑิตวิทยาลัย ที่ให้ทุนอุดหนุนส่วนหนึ่งเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้เช่นกัน

ขอขอบพระคุณ บริษัท แชนอี 68 คอนซัลแตนท์ จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือในการเก็บน้ำเสีย รวมทั้งถังยูเอเอสบีและเครื่องวัดปริมาณก๊าซที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และบริษัท แชนอี 68 แลป จำกัด ที่ให้คำแนะนำในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำต่างๆ รวมทั้งสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ บริษัท อุตสาหกรรมรามาเท็กซ์ไทล์(1988) จำกัด ที่อนุญาตให้นำน้ำเสีย และสีย้อมบางส่วนเพื่อมาใช้ในงานวิจัย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ในบริษัททุกท่านที่ช่วยประสานงานและเจ้าหน้าที่ในฝ่ายผลิตที่ให้ความช่วยเหลือในการเก็บน้ำเสียเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ นิสิตปริญญาโททุกท่าน ที่คอยให้กำลังใจและช่วยเหลือซึ่งกันและกัน ทำให้แต่ละวันของการทำวิทยานิพนธ์นี้ผ่านไปอย่างไม่ยากลำบากจนเกินไปนัก

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัวของผู้เขียน ที่เป็นกำลังใจและให้ความรักความช่วยเหลืออย่างสม่ำเสมอตลอดมา จนทำให้ผู้เขียนสามารถก้าวไปได้อีกก้าวหนึ่งในวันนี้

สารบัญ

เรื่อง หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ญ
สารบัญรูป ..... ฌ

บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมา 1
1.2 วัตถุประสงค์ 2
1.3 ขอบเขตการวิจัย 2

บทที่ 2 ทบทวนเอกสาร 4
2.1 กระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ 4
2.1.1 ลักษณะทั่วไป 4
2.1.2 กลไกการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบไร้อากาศ 6
2.1.3 แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ 11
2.1.4 ความสัมพันธ์ของแบคทีเรียกลุ่มต่างๆ ในระบบไร้อากาศ 20
2.2 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน 25
2.2.1 พาหะขนส่งอิเลกตรอน 26
2.2.2 ระบบขนส่งอิเลกตรอน 28
2.2.3 แนวโน้มของปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน 30
2.2.4 ค่าโออาร์พี 34
2.3 ระบบยูเอเอสบี 37
2.3.1 ความเป็นมาของระบบยูเอเอสบี 37
2.3.2 ลักษณะการทำงานของระบบยูเอเอสบี 38
2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบยูเอเอสบี 39
2.3.4 ระบบยูเอเอสบีแบบมีถังสร้างกรด 44

เรื่อง หน้า

2.4 สีย้อม (dyes) 49
2.4.1 การมองเห็นสี 49
2.4.2 การจำแนกสีย้อม 50
2.4.3 ปัจจัยในการทำให้สีย้อมติดกับเส้นใย 52
2.4.4 สีรีแอคทีฟ 53
2.4.5 กระบวนการย้อมสี 64
2.5 การบำบัดน้ำเสียมีสีย้อมด้วยกระบวนการทางชีวภาพ 69
2.5.1 การบำบัดน้ำเสียมีสีย้อมด้วยระบบบำบัดแบบเติมอากาศ 70
2.5.2 การบำบัดน้ำเสียมีสีย้อมด้วยระบบบำบัดแบบไร้อากาศ 71
2.5.3 การศึกษาที่ผ่านมา 76

บทที่ 3 การวางแผนการวิจัย 88
3.1 แผนการทดลอง 88
3.2 การเตรียมน้ำเสีย 89
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 91
3.4 การเดินระบบและการควบคุมระบบ 94
3.5 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ 98

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์ 100
4.1 ผลการดำเนินการวิจัย 100
4.1.1 การทดลองที่ 1 น้ำย้อมสีดำ 104
4.1.2 การทดลองที่ 2 น้ำย้อมสีแดง 117
4.1.3 การทดลองที่ 3 น้ำย้อมสีน้ำเงิน 135
4.1.4 การทดลองที่ 4 น้ำย้อมสีน้ำเงินสังเคราะห์ 151
4.1.5 การทดลองที่ 5 เปลี่ยนแปลงความเข้มสี 166
4.2 ประสิทธิภาพการลดสี 179
4.2.1 ผลของความเข้มข้นแป้งมันกับการลดสี 179
4.2.2 ผลของคาร์บอนอื่นที่ไม่ใช่แป้งมันในน้ำย้อมกับการลดสี 180
4.2.3 ผลของโทนสีกับการลดสี 182
4.2.4 ผลของความเข้มสีกับการลดสี 183

เรื่อง หน้า

4.3 การรบกวนการวิเคราะห์ค่าซีโอดี....184
4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี....188
4.4.1 ผลของความเข้มข้นแป้งมันกับการกำจัดซีโอดี....189
4.4.2 ผลของไทนสีกับการกำจัดซีโอดี....191
4.4.3 ผลของความเข้มสีกับการกำจัดซีโอดี....192
4.4.4 ความสามารถของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตในการกำจัดซีโอดี....193
4.5 การเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนทั้งหมดในถังสร้างมีเทน....196
4.5.1 ดุลคาร์บอนในถังสร้างมีเทน....196
4.5.2 การละลายน้ำของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น....200
4.5.3 การเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอนอนินทรีย์....209
4.6 กลไกการลดสีด้วยระบบไร้อากาศ....216

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ....219
5.1 สรุปผลการทดลอง....219
5.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม....220

บทที่ 6 ความสำคัญของงานวิจัยในทางวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม....221

รายการอ้างอิง....222

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ผลการทดลองที่ 1 น้ำย้อมสีดำ....228
ภาคผนวก ข ผลการทดลองที่ 2 น้ำย้อมสีแดง....244
ภาคผนวก ค ผลการทดลองที่ 3 น้ำย้อมสีน้ำเงิน....254
ภาคผนวก ง ผลการทดลองที่ 4 น้ำย้อมสีน้ำเงินสังเคราะห์....261
ภาคผนวก จ ผลการทดลองที่ 5 เปลี่ยนแปลงความเข้มสี....265
ภาคผนวก ฉ บันทึกการทดลองที่ 1....269
ภาคผนวก ช ตัวอย่างการคำนวณ....275

ประวัติผู้วิจัย....279

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ลักษณะสมบัติของแบคทีเรียบางกลุ่มในจีนัส *Clostridium* 12
2.2 สารอาหารสำหรับแบคทีเรียสร้างมีเทน 14
2.3 ตัวอย่างแบคทีเรียที่สร้างมีเทนและสารอาหารที่ใช้ 15
2.4 สารประกอบซัลเฟอร์และสารให้อิเลกตรอนสำหรับแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต 17
2.5 ตัวอย่างแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและสารอาหารที่ใช้ 18
2.6 ตัวอย่างของปฏิกิริยาการยอยสลายสารอาหารของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต 19
2.7 ค่าพลังงานทางเทอร์โมไดนามิกของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (SRB) และแบคทีเรียสร้างมีเทน (MPB) 23
2.8 ผลของแอมโมเนียไนโตรเจนต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ 42
2.9 ค่าจลศาสตร์ต่างๆ ของแบคทีเรีย Mesophilic 44
2.10 ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ออกแบบถังสร้างกรดสำหรับน้ำเสียประเภทต่างๆ ในระบบบำบัดไร้ออกซิเจน 48
2.11 เปอร์เซนต์การกระจายของลักษณะโครงสร้างของกลุ่มโครโมฟอร์ในสีรีแอกทีฟแบ่งตามโทนสีต่างๆ 56
2.12 กลุ่มรีแอกทีฟที่สำคัญ 59
2.13 แบคทีเรียในลำไส้ที่พบเอนไซม์ azoreductase 72
2.14 รายชื่อแบคทีเรียในงานวิจัยที่สามารถลดสีได้ 75
2.15 ผลการกำจัดสีรีแอกทีฟด้วยระบบไร้อากาศ 77
3.1 แผนการทดลอง 89
3.2 สารอาหารที่ใช้ในการเตรียมน้ำเสียให้แก่แบคทีเรีย 90
3.3 แผนการเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ 99
4.1 สรุปลำดับการทดลอง 102
4.2 ตารางเวลาการทดลองในงานวิจัยนี้ 103
4.3 สรุปค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่างๆ จากการทดลองที่ 1 (น้ำย้อมสีดำ) 105
4.4 สรุปค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่างๆ จากการทดลองที่ 2 (น้ำย้อมสีแดง) 119
4.5 สรุปค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่างๆ จากการทดลองที่ 3 (น้ำย้อมสีน้ำเงิน) 137
4.6 สรุปค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่างๆ จากการทดลองที่ 4 (น้ำย้อมสีน้ำเงินสังเคราะห์) 152
4.7 สรุปค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่างๆ จากการทดลองที่ 5 167

ตารางที่ หน้า

4.8 เปรียบเทียบค่าซีโอดีและปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในน้ำออกจากระบบบำบัดของทุกการทดลองในงานวิจัยนี้ 184
4.9 เปรียบเทียบค่าซีโอดีที่ปรับใหม่และปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในน้ำออกจากระบบบำบัด ของการทดลองที่ 3 4 และ 5 185
4.10 ปริมาณซัลไฟด์และค่าซีโอดีที่ปรับใหม่ในถังสร้างกรดของการทดลองที่ 3 4 และ 5 186
4.11 ค่าซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดที่ทำการปรับใหม่ 188
4.12 ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในการทดลองกับน้ำย้อมสีน้ำเงินและน้ำย้อมสีน้ำเงินสังเคราะห์ 194
4.13 ดุลคาร์บอนในถังสร้างมีเทนของการทดลองที่ 2 (น้ำย้อมสีแดง) 197
4.14 ดุลคาร์บอนในถังสร้างมีเทนของการทดลองที่ 3 (น้ำย้อมสีน้ำเงิน) 198
4.15 ดุลคาร์บอนในถังสร้างมีเทนของการทดลองที่ 4 (น้ำย้อมสีน้ำเงินสังเคราะห์) 198
4.16 ดุลคาร์บอนในถังสร้างมีเทนของการทดลองที่ 5 (เปลี่ยนแปลงความเข้มสี) 199
4.17 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซมีเทนละลายน้ำที่คำนวณได้กับปริมาณคาร์บอนที่วัดไม่ได้ 205
4.18 ปริมาณคาร์บอนรวม (TC) ปริมาณคาร์บอนอนินทรีย์ (IC) และปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ (TOC) ของการทดลองที่ 2 น้ำย้อมสีแดง 209
4.19 ปริมาณคาร์บอนรวม (TC) ปริมาณคาร์บอนอนินทรีย์ (IC) และปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ (TOC) ของการทดลองที่ 3 น้ำย้อมสีน้ำเงิน 209
4.20 ปริมาณคาร์บอนรวม (TC) ปริมาณคาร์บอนอนินทรีย์ (IC) และปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ (TOC) ของการทดลองที่ 4 น้ำย้อมสีน้ำเงินสังเคราะห์ 210
4.21 ปริมาณคาร์บอนรวม (TC) ปริมาณคาร์บอนอนินทรีย์ (IC) และปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ (TOC) ของการทดลองที่ 5 เปลี่ยนแปลงความเข้มสี 210
4.22 ประสิทธิภาพการลดสีในยูเอเอสบีซุดที่ 2 และ 3 ของการทดลองที่ 3 และ 4 218

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 วิถีของอิเลกตรอนและคาร์บอนในกระบวนการหายใจ 5
2.2 วิถีของอิเลกตรอนและคาร์บอนในกระบวนการหมัก 5
2.3 ขั้นตอนของปฏิกิริยาไร้อากาศ 10
2.4 ตัวอย่างความสัมพันธ์แบบ Syntrophy 21
2.5 ขั้นตอนการย่อยสารอินทรีย์ในระบบไร้อากาศเมื่อน้ำเสียมีซัลเฟต 22
2.6 การขนส่งอิเลกตรอนผ่านโคเอนไซม์ NAD 27
2.7 ตัวอย่างค่าศักย์รีดักชันของสารพาหะในระบบขนส่งอิเลกตรอน 29
2.8 ตัวอย่างระบบขนส่งอิเลกตรอนในกระบวนการหายใจ 30
2.9 ตัวอย่างปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน 31
2.10 ค่าศักย์รีดักชันของครึ่งปฏิกิริยาต่าง ๆ 33
2.11 ไดอะแกรมของค่า pε ของบางปฏิกิริยา 35
2.12 ตัวอย่างระบบยูเอเอสบี 39
2.13 ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มโครโมฟอร์แบบ Unmetallised Azo 54
2.14 ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มโครโมฟอร์แบบ Metal-Complex Azo 55
2.15 ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มโครโมฟอร์แบบ Anthraquinone 55
2.16 ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มโครโมฟอร์แบบ Phthalocyanine 55
2.17 ตัวอย่างสีรีแอกทีฟแบบ Bifunctional ที่มีกลุ่มโครโมฟอร์เป็นแบบ Azo 56
2.18 ตัวอย่างปฏิกิริยาแบบ Nucleophilic Substitution 57
2.19 ตัวอย่างปฏิกิริยาแบบ Nucleophilic Addition 58
2.20 ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มรีแอกทีฟแบบ Monofunctional 60
2.21 ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มรีแอกทีฟแบบ Bifunctional ในลักษณะสมมาตร 61
2.22 ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มรีแอกทีฟแบบ Bifunctional ในลักษณะกลุ่มรีแอกทีฟแตกต่างกัน 62
2.23 การเตรียมเส้นใยสำหรับการย้อม 67
2.24 กระบวนการย้อมสีและตกแต่งผ้า 68
2.25 ปฏิกิริยาการย่อยสลายสีในสภาวะไร้อากาศของสี C.I. Direct Yellow 12 73
2.26 ปฏิกิริยาการย่อยสลายสีในสภาวะไร้อากาศของสี C.I. Acid Yellow 36 74
2.27 กลไกการรับอิเลกตรอนของสีย้อมอะโซภายใต้สภาวะไร้อากาศ 74

รูปที่ หน้า

3.1 รายละเอียดถังยูเอเอสบีที่ใช้ในการทดลอง 92
3.2 รายละเอียดถังสร้างกรดที่ใช้ในการทดลอง 93
3.3 เครื่องวัดปริมาณก๊าซ 95
3.4 การติดตั้งระบบยูเอเอสบีที่ใช้ในการทดลอง 96
4.1 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองกับน้ำย้อมสีดำ 101
4.2 ค่าความเข้มสีตลอดการทดลองที่ 1 107
4.3 ประสิทธิภาพการลดสีตลอดการทดลองที่ 1 107
4.4 ค่าซีโอดีตลอดการทดลองที่ 1 109
4.5 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีตลอดการทดลองที่ 1 109
4.6 สภาพด่างทั้งหมดตลอดการทดลองที่ 1 111
4.7 ปริมาณกรดไขมันระเหยตลอดการทดลองที่ 1 111
4.8 ค่าพีเอชตลอดการทดลองที่ 1 113
4.9 ค่าโออาร์พีตลอดการทดลองที่ 1 113
4.10 ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวม (TOC) ตลอดการทดลองที่ 1 116
4.11 ปริมาณก๊าซชีวภาพตลอดการทดลองที่ 1 116
4.12 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองกับน้ำย้อมสีแดง 118
4.13 ค่าความเข้มสีตลอดการทดลองที่ 2 121
4.14 ประสิทธิภาพการลดสีตลอดการทดลองที่ 2 121
4.15 ค่าซีโอดีตลอดการทดลองที่ 2 123
4.16 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีตลอดการทดลองที่ 2 123
4.17 สภาพด่างทั้งหมดตลอดการทดลองที่ 2 126
4.18 ปริมาณกรดไขมันระเหยตลอดการทดลองที่ 2 126
4.19 ค่าพีเอชตลอดการทดลองที่ 2 128
4.20 ค่าโออาร์พีตลอดการทดลองที่ 2 128
4.21 ปริมาณคาร์บอนรวม (TC) ตลอดการทดลองที่ 2 131
4.22 ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ (IC) ตลอดการทดลองที่ 2 131
4.23 ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวม (TOC) ตลอดการทดลองที่ 2 133
4.24 ปริมาณก๊าซชีวภาพตลอดการทดลองที่ 2 134
4.25 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองกับน้ำย้อมสีน้ำเงิน 136
4.26 ค่าความเข้มสีตลอดการทดลองที่ 3 139
4.27 ประสิทธิภาพการลดสีตลอดการทดลองที่ 3 139

รูปที่ หน้า

4.28 ค่าซีโอดีตลอดการทดลองที่ 3 141
4.29 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีตลอดการทดลองที่ 3 141
4.30 สภาพด่างทั้งหมดตลอดการทดลองที่ 3 143
4.31 ปริมาณกรดไขมันระเหยตลอดการทดลองที่ 3 143
4.32 ค่าพีเอชตลอดการทดลองที่ 3 145
4.33 ค่าโออาร์พีตลอดการทดลองที่ 3 145
4.34 ปริมาณคาร์บอนรวม (TC) ตลอดการทดลองที่ 3 147
4.35 ปริมาณคาร์บอนอนินทรีย์ (IC) ตลอดการทดลองที่ 3 147
4.36 ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวม (TOC) ตลอดการทดลองที่ 3 149
4.37 ปริมาณก๊าซชีวภาพตลอดการทดลองที่ 3 150
4.38 ค่าความเข้มสีตลอดการทดลองที่ 4 154
4.39 ประสิทธิภาพการลดสีตลอดการทดลองที่ 4 154
4.40 ค่าซีโอดีตลอดการทดลองที่ 4 156
4.41 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีตลอดการทดลองที่ 4 156
4.42 สภาพด่างทั้งหมดตลอดการทดลองที่ 4 158
4.43 ปริมาณกรดไขมันระเหยตลอดการทดลองที่ 4 158
4.44 ค่าพีเอชตลอดการทดลองที่ 4 160
4.45 ค่าโออาร์พีตลอดการทดลองที่ 4 160
4.46 ปริมาณคาร์บอนรวม (TC) ตลอดการทดลองที่ 4 162
4.47 ปริมาณคาร์บอนอนินทรีย์ (IC) ตลอดการทดลองที่ 4 162
4.48 ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวม (TOC) ตลอดการทดลองที่ 4 164
4.49 ปริมาณก๊าซชีวภาพตลอดการทดลองที่ 4 165
4.50 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองเปลี่ยนแปลงความเข้มสี 166
4.51 ค่าความเข้มสีตลอดการทดลองที่ 5 168
4.52 ประสิทธิภาพการลดสีตลอดการทดลองที่ 5 168
4.53 ค่าซีโอดีตลอดการทดลองที่ 5 170
4.54 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีตลอดการทดลองที่ 5 170
4.55 สภาพด่างทั้งหมดตลอดการทดลองที่ 5 172
4.56 ปริมาณกรดไขมันระเหยตลอดการทดลองที่ 5 172
4.57 ค่าพีเอชตลอดการทดลองที่ 5 174
4.58 ค่าโออาร์พีตลอดการทดลองที่ 5 174

รูปที่ หน้า

4.59 ปริมาณคาร์บอนรวม (TC) ตลอดการทดลองที่ 5 176
4.60 ปริมาณคาร์บอนอนินทรีย์ (IC) ตลอดการทดลองที่ 5 176
4.61 ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวม (TOC) ตลอดการทดลองที่ 5 178
4.62 ปริมาณกาซชีวภาพตลอดการทดลองที่ 5 178
4.63 ประสิทธิภาพการลดสีกับความเข้มข้นแป้งมันที่เติมให้ 179
4.64 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดสีระหว่างน้ำย้อมจริงและน้ำย้อมสังเคราะห์ 181
4.65 ประสิทธิภาพการลดสีในแต่ละโทนสีที่ความเข้มข้นแป้งมัน 500 มก./ล 182
4.66 ประสิทธิภาพการลดสีที่ความเข้มสีในน้ำเสียที่เตรียมต่างๆ กัน 183
4.67 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่ความเข้มข้นแป้งมันต่างๆ 190
4.68 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในแต่ละโทนสีที่ความเข้มข้นแป้งมัน 500 มก./ล 191
4.69 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่ความเข้มสีในน้ำเสียที่เตรียมต่างๆ กัน 192
4.70 เปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในน้ำออกของการทดลองกับน้ำย้อมจริง และน้ำย้อมสังเคราะห์ 193
4.71 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการลดสีกับการกำจัดซีโอดี 195
4.72 เปอร์เซนต์คาร์บอนที่วัดไม่ได้กับความเข้มข้นแป้งมันที่เติมให้ 208
4.73 เปอร์เซนต์คาร์บอนที่วัดไม่ได้กับความเข้มสีในน้ำเสียที่เตรียม 208
4.74 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนรูปคาร์บอนอินทรีย์ที่ถูกกำจัดกับความเข้มข้นแป้งมัน ที่เติมให้ 212
4.75 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนรูปคาร์บอนอินทรีย์ที่ถูกกำจัดกับความเข้มสีในน้ำเสียที่ เตรียม 213
4.76 ความสัมพันธ์ระหว่างคาร์บอนอนินทรีย์กับการลดสี 214
4.77 ประสิทธิภาพการลดสีในการทดลองกับน้ำย้อมสีดำ 216