การลดสีของน้ำเสียจากโรงงานเยื่อกระดาษ ด้วยวิธีการตรึงเซลล์ *Phanerochaete chrysosporium* ในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิไดซ์เบด

นางสาวจุลวรรณ์ จึงสุวัฒนานนท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-333-620-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DECOLORIZATION OF PULP MILL WASTEWATER BY CELL IMMOBILIZATION OF *Phanerochaete chrysosporium* IN A FLUIDIZED BED BIOREACTOR

Miss Jullawan Juengsuwatananon

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Chemical Technology
Department of Chemical Technology
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 1999

ISBN 974-333-620-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การลดสีของน้ำเสียจากโรงงานเยื่อกระดาษด้วยวิธีการตรึงเซลล์ *Phanerochaete chrysosporium* ในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิไดซ์เบด
โดย	นางสาวจุลวรรณ์ จึงสุวัฒนานนท์
ภาควิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. หรรษา ปุณณะพยัคฆ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย โพธิ์พิจิตร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. หรรษา ปุณณะพยัคฆ์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เลอสรวง เมฆสุต)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์)

จุลวรรณ์ จึงสุวัฒนานนท์ : การลดสีของน้ำเสียจากโรงงานเยื่อกระดาษด้วยวิธีการตรึงเซลล์ *Phanerochaete chrysosporium* ในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิไดซ์เบด (DECOLORIZATION OF PULP MILL WASTEWATER BY CELL IMMOBILIZATION OF *Phanerochaete chrysosporium* IN A FLUIDIZED BED BIOREACTOR) อ. ที่ปรึกษา : ศ.ดร.สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, อ. ที่ปรึกษาร่วม : ผศ.ดร. หรรษา ปุณณะพยัคฆ์, 123 หน้า. ISBN 974-333-620-6.

การลดสีของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษด้วยวิธีทางชีวภาพ โดยใช้เซลล์ตรึงเชื้อรา *Phanerochaete chrysosporium* ตรึงในเม็ดวุ้นแคลเซียมอัลจิเนต ที่บรรจุในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิไดเซชัน 3 สถานะ หอปฏิกรณ์สร้างด้วยพลาสติกใสรูปทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร และสูง 2 เมตร อากาศจากเครื่องอัดอากาศถูกป้อนเข้าทางด้านล่างของหอปฏิกรณ์ผ่านตัวกระจายอากาศด้วยอัตรา 0.033 – 0.0086 ลบ.ม./ชั่วโมง บรรจุเม็ดเซลล์ตรึงที่มีอัตราส่วนเซลล์เชื้อรา 60 กรัมต่อสารละลายโซเดียมอัลจิเนต 1,000 มิลลิลิตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ปริมาตร 1 ลิตร ลงในหอปฏิกรณ์ โดยที่เม็ดเซลล์ตรึงจะถูกฟลูอิไดซ์ด้วยน้ำเสียและอากาศ น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองมีค่าหน่วยสีตั้งแต่ 979 ถึง 1,795 หน่วยสี ในหน่วยแพลทินัม-โคบอลต์ โดยจะถูกสูบเข้าหอปฏิกรณ์ ด้วยอัตรา 0.012 – 0.036 ลบ.ม./ชั่วโมง สารที่มีสีที่อยู่ในน้ำเสียจะถูกทำให้ลดลงโดยเชื้อราที่อยู่ในเม็ดเซลล์ตรึงตลอดความสูงของหอปฏิกรณ์ ภาวะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับเครื่องปฏิกรณ์นี้ ได้แก่ อัตราการไหลของน้ำเสีย 0.036 ลบ.ม./ชั่วโมง อัตราการเติมอากาศ 0.075 ลบ.ม./ชั่วโมง และอุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพการลดสี เท่ากับ 60.3 เปอร์เซ็นต์

ภาควิชา	เคมีเทคนิค	ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา	2542	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

3972795823 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: DECOLORIZATION / THREE PHASE FLUIDIZED BED BIOREACTOR / PULP MILL WASTEWATER / *Phanerochaete chrysosporium* / IMMOBILIZATION

JULLAWAN JUENGSUWATANANON: DECOLORIZATION OF PULP MILL WASTEWATER BY CELL IMMOBILIZATION OF *Phanerochaete chrysosporium* IN A FLUIDIZED BED BIOREACTOR. (THESIS TITLE) THESIS ADVISOR : PROF.DR. SOMSAK DAMRONGLERD, THESIS COADVISOR : ASSIST PROF.DR. HUNSA PUNNAPAYAK, 123 pp. ISBN 974-333-620-6.

Decolorization of pulp mill wastewater was investigated by immobilization of *Phanerochaete chrysosporium* in calcium - alginate beads in three - phase fluidized bed bioreactor. The reactor column was fabricated by using a transparency plastic cylinder with diameter 100 mm and height 2 meters. Air from an air-compressor was fed at the bottom of the column under the distributor with flow rate from 0.033 m^3/hr to 0.086 m^3/hr. The immobilized gel bead had diameter of 3 mm and consisted of the fungus mycelia at 60 grams per 1,000 ml of sodium alginate solution. One litre of the beads was poured into the reactor and they were fluidized by wastewater and air. Wastewater containing color substances from 979 units to 1,795 units (Pt.Co unit) was pumped into the reactor above the air - distributor with flow rate from 0.012 m^3/hr to 0.036 m^3/hr. The color substances were reduced by the fungus immobilized in the gel beads along the height of the column. The optimum condition for this reactor were wastewater flow rate 0.036 m^3/hr, air flow rate 0.075 m^3/hr, temperature 38 ^{0}C for the reduction of color substance 60.3 %

ภาควิชา	เคมีเทคนิค	ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา	2542	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณา และความช่วยเหลือจากบุคคลหลายๆฝ่าย ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. หรรษา ปุณณะพยัคฆ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งท่านได้กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆของการวิจัย ตลอดจนได้กรุณาปรับปรุงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่ได้รับการสนับสนุนทางด้านการเงินจากกองทุนการศึกษาเซลล์ 100 ปี ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนสนับสนุนในระยะแรกของงานวิจัย

ขอขอบคุณ อาจารย์ และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาเคมีเทคนิค และภาควิชาพฤกษศาสตร์ ทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและอุปกรณ์ในการทำงานวิจัย และช่วยซ่อมแซมอุปกรณ์ในการทำงานวิจัย จนสามารถดำเนินงานวิจัยได้ดีมาตลอด และขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ภาควิชาเคมีเทคนิค และภาควิชาพฤกษศาสตร์ ที่ได้กรุณาเอื้อเฟื้อและให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ขอขอบคุณ บริษัทสยามเซลลูโลส จำกัด ที่ให้การอนุเคราะห์น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่แผนกงานควบคุมสิ่งแวดล้อม บริษัทอุตสาหกรรมกระดาษคราฟท์ไทย จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือในการเก็บน้ำเสียที่ใช้ในการวิจัย และให้ความสะดวกในการใช้สถานที่ ห้องปฏิบัติการ และอุปกรณ์ในการทำงานวิจัย ตลอดจนช่วยซ่อมแซมอุปกรณ์ในการทำการวิจัย

ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่เป็นกำลังใจ และสนับสนุนในด้านการเงิน แก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ
กิตติกรรมประกาศ.....ฉ
สารบัญตาราง.....ฌ
สารบัญรูป.....ฎ
บทที่
1. บทนำ.....1
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....3
   2.1 อุตสาหกรรมการผลิตเยื่อและกระดาษ.....3
   2.2 ลิกนิน.....7
   2.3 แหล่งของน้ำเสียที่มีลิกนินเจือปนอยู่.....9
   2.4 เชื้อรา *Phanerochaete chrysosporium*.....11
   2.5 การตรึงเซลล์.....11
   2.6 การประยุกต์ใช้เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิไดซ์เบดในการบำบัดน้ำเสีย.....17
   2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....21
3. วิธีการดำเนินงานวิจัย.....25
   3.1 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง.....25
   3.2 เชื้อจุลินทรีย์และการเก็บรักษา.....25
   3.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....27
   3.4 อุปกรณ์และครุภัณฑ์.....27
   3.5 อุปกรณ์การทดลอง.....28
   3.6 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....30
4. ผลการทดลองและวิจารณ์.....35
   4.1 ผลการศึกษาการเจริญของเชื้อรา *P.chrysosporium* เปรียบเทียบการเจริญในอาหารเลี้ยงเชื้อ Potato dextrose broth และ Synthetic growth medium....35
   4.2 การวิเคราะห์สมบัติของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ.....37
   4.3 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการลดสีของน้ำเสียโดยการใช้เซลล์ตรึง *P.chrysosporium* ในระดับขวดเขย่า.....37

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการลดสีของน้ำเสียโดยการใช้เซลล์ตรึง *P.chrysosporium* ในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิไดซ์เบด.....43
4.5 การศึกษาลักษณะของเชื้อรา *P.chrysosporium* ที่ถูกตรึงในเม็ดเจลแคลเซียมอัลจิเนต โดยดูจากภาพถ่าย SEM.....70
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....74
5.1 สรุปผลการทดลอง.....74
5.2 ข้อเสนอแนะ.....76
รายการอ้างอิง.....77
ภาคผนวก.....81
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....123

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
ตาราง 2.1	ขั้นตอนการฟอกเยื่อและสารเคมีที่ใช้	7
ตาราง 2.2	สารอนุพันธ์ของลิกนินที่เกิดจากกระบวนการผลิตเยื่อและการฟอกเยื่อ	9
ตาราง 2.3	วิธีการกักขังเซลล์ด้วยการทำให้เกิดเจลโดยพอลิเมอร์ของสารอินทรีย์	15
ตาราง 2.4	ตัวอย่างการใช้เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิไดซ์เบดในงานด้านการบำบัดน้ำเสีย	20
ตาราง 3.1	วิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียจากกระบวนผลิตเยื่อกระดาษก่อนทำการทดลอง	32
ตาราง 4.1	ผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ ก่อนทำการทดลอง	37
ตาราง ค-1	การเลือกขนาดตัวอย่างและอัตราเจือจางสำหรับช่วงบีโอดีต่างๆ	92
ตาราง ค-2	การเจือจางและชนิดตัวอย่างน้ำสำหรับวิเคราะห์ค่าบีโอดี	94
ตาราง ง-1	ปริมาณตัวอย่างและรีเอเจนต์ที่ใช้สำหรับขนาดต่างๆของภาชนะที่ใช้ในการย่อยสลาย	100
ตาราง จ-1	ข้อมูลการเทียบมาตรฐานของมาตรอัตราการไหลแบบลูกลอยสำหรับวัดอัตราการไหลของน้ำเสีย	103
ตาราง จ-2	ข้อมูลการเทียบมาตรฐานของมาตรอัตราการไหลแบบลูกลอยสำหรับวัดอัตราการเติมอากาศ	105
ตาราง จ-3	ข้อมูลการเทียบมาตรฐานของเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณค่าหน่วยสีในหน่วย Pt.Co	107
ตาราง ฉ-1	ข้อมูลการศึกษาการเจริญของเชื้อรา *P.chrysosporium* เปรียบเทียบการเจริญในอาหารเลี้ยงเชื้อ PDB และ Synthetic growth medium	109
ตาราง ฉ-2	ข้อมูลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำเสียจากกระบนการผลิตเยื่อกระดาษ โดยใช้เซลล์ตรึงเชื้อรา *P.chrysosporium* เปรียบเทียบกับการไม่ใช้เซลล์ตรึงและไม่เติมสารใดๆ ในระดับขวดเขย่า	110
ตาราง ฉ-3	ข้อมูลการหาอัตราส่วนเซลล์เชื้อราต่อแคลเซียมอัลจิเนตที่เหมาะสมในการตรึงเซลล์เพื่อใช้ในการกำจัดสีของน้ำเสีย ในระดับขวดเขย่า	112

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
ตาราง ฉ-4	ข้อมูลการหาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดสีของน้ำเสีย โดยการใช้เซลล์ตรึงเชื้อรา *P.chrysosporium* 6 % (กรัมต่อลิตร สารละลายโซเดียมอัลจิเนต) ในระดับขวดเขย่า	115
ตาราง ฉ-5	ข้อมูลการหาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีของน้ำเสีย โดยการใช้เซลล์ตรึงเชื้อรา *P.chrysosporium* 6 % (กรัมต่อลิตร สารละลายโซเดียมอัลจิเนต) ในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิไดซเบด	117

สารบัญรูป

รูป		หน้า
รูป 2.1	กระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษ	4
รูป 2.2	โครงสร้างของ Phenylpropane unit	7
รูป 2.3	โครงสร้างโมเลกุลของลิกนิน	8
รูป 2.4	กระบวนการตรึงเซลล์	13
รูป 2.5	โครงสร้างทางเคมีของอัลจิเนต	16
รูป 2.6	การรวมตัวของสายโซ่โดยการเกิด complex formation กับแคลเซียมไอออน	17
รูป 2.7	ลักษณะของฟลูอิไดเซชัน 3 สถานะ	19
รูป 3.1	จุดเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษของบริษัท สยามเซลลูโลสจำกัด	26
รูป 3.2	ชุดอุปกรณ์เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิไดซ์เบด	29
รูป 3.3	แผนผังอุปกรณ์การทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิไดซ์เบด	30
รูป 4.1	กราฟการเจริญเติบโตของเชื้อรา *P.chrysosporium* เปรียบเทียบการเจริญในอาหารเลี้ยงเชื้อ PDB และ Synthetic growth medium	36
รูป 4.2	ประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำเสียโดยการใช้เซลล์ตรึงเชื้อรา *P.chrysosporium* เปรียบเทียบกับการไม่ใช้เซลล์ตรึงและไม่เติมสารใดๆ (ค่าความเข้มสีของน้ำเสียก่อนทดลองเท่ากับ 1,381 ในหน่วย Pt.Co) ในระดับขวดเขย่า	39
รูป 4.3	การเปรียบเทียบสีของเม็ดเจลแคลเซียมอัลจิเนตที่ไม่ได้ตรึงเซลล์ก่อนและหลังการทดลองการกำจัดสีของน้ำเสีย (ค่าความเข้มสีของน้ำเสียก่อนทดลองเท่ากับ 1,381 ในหน่วย Pt.Co) ในระดับขวดเขย่า	39
รูป 4.4	ประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำเสียโดยการใช้เซลล์ตรึงเชื้อรา *P.chrysosporium* อัตราส่วนเซลล์ 3, 6 และ 12 % (กรัมต่อมิลลิลิตรสารละลายโซเดียมอัลจิเนต) (ค่าความเข้มสีของน้ำเสียก่อนทดลองเท่ากับ 1,069 ในหน่วย Pt.Co) ในระดับขวดเขย่า	41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป		หน้า
รูป 4.5	ประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำเสียโดยการใช้เซลล์ตรึงเชื้อรา *P.chrysosporium* อัตราส่วนเซลล์ 6 % (กรัมต่อมิลลิลิตรสารละลายโซเดียมอัลจิเนต) ที่เวลาทดลองต่างๆ (ก) เก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์ค่าความเข้มสีทุก 1 ชั่วโมง (ค่าความเข้มสีของน้ำเสียก่อนทดลองเท่ากับ 754 ในหน่วย Pt.Co) (ข) เก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์ค่าความเข้มสีทุก 15 นาที (ค่าความเข้มสีของน้ำเสียก่อนทดลองเท่ากับ 840 ในหน่วย Pt.Co) ในระดับขวดเขย่า	42
รูป 4.6	ค่าหน่วยสีในหน่วย Pt.Co ของน้ำเสีย ที่ความสูงต่างๆของหอปฏิกรณ์เมื่อใช้เซลล์ตรึงเชื้อรา *P.chrysosporium* อัตราส่วนเซลล์ 6 % (กรัมต่อมิลลิลิตรสารละลายโซเดียมอัลจิเนต) ปริมาตรเม็ดเซลล์ตรึง 1 ลิตร ในการกำจัดสีของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิไดซ์เบด ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าเครื่องปฏิกรณ์ 0.012 ลบ.ม./ชั่วโมง	44
รูป 4.7	ค่าบีโอดีและค่าซีโอดี (มก./ลิตร) ของน้ำเสีย ที่จุด Inlet และจุด Outlet ของหอปฏิกรณ์ เมื่อใช้เซลล์ตรึงเชื้อรา *P.chrysosporium* อัตราส่วนเซลล์ 6 % (กรัมต่อมิลลิลิตรสารละลายโซเดียมอัลจิเนต) ปริมาตรเม็ดเซลล์ตรึง 1 ลิตร ในการกำจัดสีของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิไดซ์เบด ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าเครื่องปฏิกรณ์ 0.012 ลบ.ม./ชั่วโมง	45
รูป 4.8	ประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำเสีย ที่ความสูงต่างๆของหอปฏิกรณ์เมื่อใช้เซลล์ตรึงเชื้อรา *P.chrysosporium* อัตราส่วนเซลล์ 6 % (กรัมต่อมิลลิลิตรสารละลายโซเดียมอัลจิเนต) ปริมาตรเม็ดเซลล์ตรึง 1 ลิตร ในการกำจัดสีของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิไดซ์เบด ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าเครื่องปฏิกรณ์ 0.012 ลบ.ม./ชั่วโมง	47

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป		หน้า
รูป 4.9	ประสิทธิภาพการลดค่าบีโอดีและค่าซีโอดีของน้ำเสีย เมื่อใช้เซลล์ตรึงเชื้อรา *P.chrysosporium* อัตราส่วนเซลล์ 6 % (กรัมต่อมิลลิลิตรสารละลายโซเดียมอัลจิเนต) ปริมาตรเม็ดเซลล์ตรึง 1 ลิตร ในการกำจัดสีของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิไดซ์เบด ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าเครื่องปฏิกรณ์ 0.012 ลบ.ม./ชั่วโมง	48
รูป 4.10	ค่าหน่วยสีในหน่วย Pt.Co ของน้ำเสีย ที่ความสูงต่างๆของหอปฏิกรณ์ เมื่อใช้เซลล์ตรึงเชื้อรา *P.chrysosporium* อัตราส่วนเซลล์ 6 % (กรัมต่อมิลลิลิตรสารละลายโซเดียมอัลจิเนต) ปริมาตรเม็ดเซลล์ตรึง 1 ลิตร ในการกำจัดสีของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิไดซ์เบด ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าเครื่องปฏิกรณ์ 0.020 ลบ.ม./ชั่วโมง	50
รูป 4.11	ค่าบีโอดีและค่าซีโอดี (มก./ลิตร) ของน้ำเสีย ที่จุด Inlet และจุด Outlet ของหอปฏิกรณ์ เมื่อใช้เซลล์ตรึงเชื้อรา *P.chrysosporium* อัตราส่วนเซลล์ 6 % (กรัมต่อมิลลิลิตรสารละลายโซเดียมอัลจิเนต) ปริมาตรเม็ดเซลล์ตรึง 1 ลิตร ในการกำจัดสีของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิไดซ์เบด ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าเครื่องปฏิกรณ์ 0.020 ลบ.ม./ชั่วโมง	51
รูป 4.12	ประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำเสีย ที่ความสูงต่างๆของหอปฏิกรณ์ เมื่อใช้เซลล์ตรึงเชื้อรา *P.chrysosporium* อัตราส่วนเซลล์ 6 % (กรัมต่อมิลลิลิตรสารละลายโซเดียมอัลจิเนต) ปริมาตรเม็ดเซลล์ตรึง 1 ลิตร ในการกำจัดสีของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิไดซ์เบด ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าเครื่องปฏิกรณ์ 0.020 ลบ.ม./ชั่วโมง	53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป		หน้า
รูป 4.13	ประสิทธิภาพการลดค่าบีโอดีและค่าซีโอดีของน้ำเสีย เมื่อใช้เซลล์ตรึงเชื้อรา *P.chrysosporium* อัตราส่วนเซลล์ 6 % (กรัมต่อมิลลิลิตรสารละลายโซเดียมอัลจิเนต) ปริมาตรเม็ดเซลล์ตรึง 1 ลิตร ในการกำจัดสีของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิไดซ์เบด ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าเครื่องปฏิกรณ์ 0.020 ลบ.ม./ชั่วโมง	54
รูป 4.14	ค่าหน่วยสีในหน่วย Pt.Co ของน้ำเสีย ที่ความสูงต่างๆของหอปฏิกรณ์ เมื่อใช้เซลล์ตรึงเชื้อรา *P.chrysosporium* อัตราส่วนเซลล์ 6 % (กรัมต่อมิลลิลิตรสารละลายโซเดียมอัลจิเนต) ปริมาตรเม็ดเซลล์ตรึง 1 ลิตร ในการกำจัดสีของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิไดซ์เบด ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าเครื่องปฏิกรณ์ 0.024 ลบ.ม./ชั่วโมง	56
รูป 4.15	ค่าซีโอดี (มก./ลิตร) ของน้ำเสีย ที่จุด Inlet และจุด Outlet ของหอปฏิกรณ์ เมื่อใช้เซลล์ตรึงเชื้อรา *P.chrysosporium* อัตราส่วนเซลล์ 6 % (กรัมต่อมิลลิลิตรสารละลายโซเดียมอัลจิเนต) ปริมาตรเม็ดเซลล์ตรึง 1 ลิตร ในการกำจัดสีของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิไดซ์เบด ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าเครื่องปฏิกรณ์ 0.024 ลบ.ม./ชั่วโมง	57
รูป 4.16	ประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำเสีย ที่ความสูงต่างๆของหอปฏิกรณ์ เมื่อใช้เซลล์ตรึงเชื้อรา *P.chrysosporium* อัตราส่วนเซลล์ 6 % (กรัมต่อมิลลิลิตรสารละลายโซเดียมอัลจิเนต) ปริมาตรเม็ดเซลล์ตรึง 1 ลิตร ในการกำจัดสีของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิไดซ์เบด ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าเครื่องปฏิกรณ์ 0.024 ลบ.ม./ชั่วโมง	58
รูป 4.17	ประสิทธิภาพการลดค่าซีโอดีของน้ำเสีย เมื่อใช้เซลล์ตรึงเชื้อรา *P.chrysosporium* อัตราส่วนเซลล์ 6 % (กรัมต่อมิลลิลิตรสารละลายโซเดียมอัลจิเนต) ปริมาตรเม็ดเซลล์ตรึง 1 ลิตรในการกำจัดสีของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิไดซ์เบด ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าเครื่องปฏิกรณ์ 0.024 ลบ.ม./ชั่วโมง	59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป		หน้า
รูป 4.18	ค่าหน่วยสีในหน่วย Pt.Co ของน้ำเสีย ที่ความสูงต่างๆของหอปฏิกรณ์ เมื่อใช้เซลล์ตรึงเชื้อรา *P.chrysosporium* อัตราส่วนเซลล์ 6 % (กรัมต่อมิลลิลิตรสารละลายโซเดียมอัลจิเนต) ปริมาตรเม็ดเซลล์ตรึง 1 ลิตร ในการกำจัดสีของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิไดซ์เบด ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าเครื่องปฏิกรณ์ 0.030 ลบ.ม./ชั่วโมง	61
รูป 4.19	ค่าบีโอดีและค่าซีโอดี (มก./ลิตร) ของน้ำเสีย ที่จุด Inlet และจุด Outlet ของหอปฏิกรณ์ เมื่อใช้เซลล์ตรึงเชื้อรา *P.chrysosporium* อัตราส่วนเซลล์ 6 % (กรัมต่อมิลลิลิตรสารละลายโซเดียมอัลจิเนต) ปริมาตรเม็ดเซลล์ตรึง 1 ลิตร ในการกำจัดสีของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิไดซ์เบด ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าเครื่องปฏิกรณ์ 0.030 ลบ.ม./ชั่วโมง	62
รูป 4.20	ประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำเสีย ที่ความสูงต่างๆของหอปฏิกรณ์ เมื่อใช้เซลล์ตรึงเชื้อรา *P.chrysosporium* อัตราส่วนเซลล์ 6 % (กรัมต่อมิลลิลิตรสารละลายโซเดียมอัลจิเนต) ปริมาตรเม็ดเซลล์ตรึง 1 ลิตร ในการกำจัดสีของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิไดซ์เบด ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าเครื่องปฏิกรณ์ 0.030 ลบ.ม./ชั่วโมง	63
รูป 4.21	ประสิทธิภาพการลดค่าบีโอดีและค่าซีโอดีของน้ำเสีย เมื่อใช้เซลล์ตรึงเชื้อรา *P.chrysosporium* อัตราส่วนเซลล์ 6 % (กรัมต่อมิลลิลิตรสารละลายโซเดียมอัลจิเนต) ปริมาตรเม็ดเซลล์ตรึง 1 ลิตร ในการกำจัดสีของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิไดซ์เบด ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าเครื่องปฏิกรณ์ 0.030 ลบ.ม./ชั่วโมง	64

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป		หน้า
รูป 4.22	ค่าหน่วยสีในหน่วย Pt.Co ของน้ำเสีย ที่ความสูงต่างๆของหอปฏิกรณ์ เมื่อใช้เซลล์ตรึงเชื้อรา *P.chrysosporium* อัตราส่วนเซลล์ 6 % (กรัมต่อมิลลิลิตรสารละลายโซเดียมอัลจิเนต) ปริมาตรเม็ดเซลล์ตรึง 1 ลิตร ในการกำจัดสีของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิไดซ์เบด ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าเครื่องปฏิกรณ์ 0.036 ลบ.ม./ชั่วโมง	66
รูป 4.23	ค่าบีโอดีและค่าซีโอดี (มก./ลิตร) ของน้ำเสีย ที่จุด Inlet และจุด Outlet ของหอปฏิกรณ์ เมื่อใช้เซลล์ตรึงเชื้อรา *P.chrysosporium* อัตราส่วนเซลล์ 6 % (กรัมต่อมิลลิลิตรสารละลายโซเดียมอัลจิเนต) ปริมาตรเม็ดเซลล์ตรึง 1 ลิตร ในการกำจัดสีของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิไดซ์เบด ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าเครื่องปฏิกรณ์ 0.036 ลบ.ม./ชั่วโมง	67
รูป 4.24	ประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำเสีย ที่ความสูงต่างๆของหอปฏิกรณ์ เมื่อใช้เซลล์ตรึงเชื้อรา *P.chrysosporium* อัตราส่วนเซลล์ 6 % (กรัมต่อมิลลิลิตรสารละลายโซเดียมอัลจิเนต) ปริมาตรเม็ดเซลล์ตรึง 1 ลิตร ในการกำจัดสีของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิไดซ์เบด ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าเครื่องปฏิกรณ์ 0.036 ลบ.ม./ชั่วโมง	68
รูป 4.25	ประสิทธิภาพการลดค่าบีโอดีและค่าซีโอดีของน้ำเสีย เมื่อใช้เซลล์ตรึงเชื้อรา *P.chrysosporium* อัตราส่วนเซลล์ 6 % (กรัมต่อมิลลิลิตรสารละลายโซเดียมอัลจิเนต) ปริมาตรเม็ดเซลล์ตรึง 1 ลิตร ในการกำจัดสีของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิไดซ์เบด ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าเครื่องปฏิกรณ์ 0.036 ลบ.ม./ชั่วโมง	69
รูป 4.26	ภาพถ่าย Scanning electron micrograph (SEM) พื้นผิวภาคตัดขวางของเม็ดเจลแคลเซียมอัลจิเนตที่ไม่ได้ตรึงเซลล์เชื้อรา ที่กำลังขยาย (ก) x750 (ข) x1,500 (ค) x10,000	71

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป		หน้า
รูป 4.27	ภาพถ่าย Scanning electron micrograph (SEM) พื้นผิวภาคตัดขวางของเม็ดเซลล์ตรึงเชื้อรา *P.chrysosporium* อัตราส่วนเซลล์ 6 % (กรัมต่อมิลลิลิตรสารละลายโซเดียมอัลจิเนต) หลังจากทำการตรึงเซลล์แล้วเก็บไว้ 1 วัน ก่อนทำการทดลอง ที่กำลังขยาย (ก) x500 (ข) x3,500 (ค) x3,500	72
รูป 4.28	ภาพถ่าย Scanning electron micrograph (SEM) พื้นผิวภาคตัดขวางของเม็ดเซลล์ตรึงเชื้อรา *P.chrysosporium* อัตราส่วนเซลล์ 6 % (กรัมต่อมิลลิลิตรสารละลายโซเดียมอัลจิเนต) ในวันที่ 3 ของการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิไดซ์เบด ที่กำลังขยาย (ก) x750 (ข) x1,500 (ค) x10,000	73
รูป จ-1	กราฟมาตรฐานของการเทียบมาตรฐานมาตรอัตราการไหลแบบลูกลอยสำหรับวัดอัตราการไหลของน้ำเสีย	104
รูป จ-2	กราฟมาตรฐานของการเทียบมาตรฐานมาตรอัตราการไหลแบบลูกลอยสำหรับวัดอัตราการเติมอากาศ	106
รูป จ-3	กราฟมาตรฐานของการเทียบมาตรฐานมาตรเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณค่าหน่วยสีในหน่วย Pt.Co	108