



การกำจัดสีและสารอินทรีย์ของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยน้ำหมักชีวภาพ
และเฟนตันรีเอเจนต์

**Color and Organics Removal from Palm Oil Mill Effluent using
Effective Microorganism Culture and Fenton's Reagent**

ธนกฤต พรหมทอง
Thanakrit Promtong

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Science in Environmental Management
Prince of Songkla University**

2552

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์	การกำจัดสีและสารอินทรีย์ของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วย น้ำหมักชีวภาพและเฟนตันรีเอเจนต์
ผู้เขียน	นายชนกฤต พรหมทอง
สาขาวิชา	การจัดการสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	คณะกรรมการสอบ
..... (ดร.ชัยศรี สุขสาโรจน์)ประธานกรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ลือพงศ์ แก้วศรีจันทร์)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมกรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.วีระศักดิ์ ทองลิ้มปี)
..... (ดร.ธันวาคม เตชะภักทวารกุล สุขสาโรจน์)กรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนาลี ชิวกิดาการ)
กรรมการ (ดร.ชัยศรี สุขสาโรจน์)
กรรมการ (ดร.ธันวาคม เตชะภักทวารกุล สุขสาโรจน์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการ
สิ่งแวดล้อม

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การกำจัดสีและสารอินทรีย์ของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยน้ำหมักชีวภาพและเฟนตันรีเอเจนต์
ผู้เขียน	นายชนกฤต พรหมทอง
สาขาวิชา	การจัดการสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2551

บทคัดย่อ

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมการสกัดน้ำมันจากผลปาล์มมีสีน้ำตาลเข้ม มีสารแขวนลอย ไขมันและน้ำมัน และปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในรูปของซีโอคืออยู่สูง แม้ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพแล้ว น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มยังคงมีสีน้ำตาลถึงน้ำตาลเข้ม โดยสีในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเกิดจาก ลิกนิน แทนนิน แคลโรทีน แอนโทไซยานิน ฮิวมิก และฟุลวิก งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการกำจัดสีและสารอินทรีย์ของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการศึกษาการบำบัดสีและสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยน้ำหมักชีวภาพที่ 3 ระดับความเข้มข้น คือ 0.5, 2 และ 5 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตร/ปริมาตร) ผลการศึกษาพบว่า น้ำหมักชีวภาพทำให้ความเข้มข้น สี บีโอดี และซีโอดี เริ่มต้นของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีค่าสูงขึ้นตามระดับความเข้มข้นของน้ำหมักชีวภาพที่ใช้บำบัด และทุกชุดการทดลองมีความเข้มข้น สี บีโอดี และซีโอดีสูงกว่าชุดควบคุมตลอดระยะเวลาการบำบัด

ส่วนที่สองเป็นการศึกษาการกำจัดสีและสารอินทรีย์ของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเฟนตันรีเอเจนต์ ลำดับการศึกษา เริ่มจากหาความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์รัสไอออนที่ความเข้มข้น 0.2-2.5 มิลลิโมลาร์ จากนั้นหาความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 10-150 มิลลิโมลาร์ ผลการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมของเฟอร์รัสไอออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ คือ 1.0 และ 50 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ และมีพีเอชที่เหมาะสมคือ 3.0 ซึ่งสามารถกำจัดสีและสารอินทรีย์ในรูปของซีโอคือได้ 61.11 และ 81 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และมีสลัดจ์เกิดขึ้นจากการบำบัด 315-350 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้การใช้แสงยูวีร่วมกับเฟนตันรีเอเจนต์ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีเพิ่มสูงขึ้นเป็น 81.04 เปอร์เซ็นต์

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาพบว่า การกำจัดสีมีค่าคงที่เฉพาะของอัตราเท่ากับ 6.20×10^2 นาที⁻¹ และการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำมีค่าคงที่เฉพาะของอัตราเท่ากับ 2.19×10^4 (มิลลิกรัมต่อลิตร)⁻¹ นาที⁻¹ นอกจากนี้ที่อัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์

ออกไซด์ต่อเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 50 ระยะเวลาการบำบัด 24 ชั่วโมง สามารถกำจัดแทนนิน-
ลิกนิน สารอินทรีย์ละลายน้ำ สารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี และสารอินทรีย์กลุ่ม **humic acid-like
substances** และ **fulvic acid-like substances** ได้ 43.63, 85, 82 และ 98.61 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และ
ผลการประเมินการยอมรับได้ของสีน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มหลังจากผ่านการบำบัดด้วย
เฟนตันรีเอเจนต์อยู่ในเกณฑ์พึงพอใจมากถึงพึงพอใจมากที่สุด

จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าน้ำหมักชีวภาพไม่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำทิ้ง
โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม เนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มประกอบด้วยสารอินทรีย์ที่ย่อย
สลายได้ยากด้วยกระบวนการทางชีวภาพ แต่อาจจะช่วยลดปัญหาเรื่องกลิ่นของน้ำเสียโรงงานสกัด
น้ำมันปาล์มได้ ขณะเดียวกันผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเฟนตันรีเอเจนต์มีความสามารถในการ
กำจัดสีและสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้เพื่อเป็นการ
ลดต้นทุนการบำบัดควรใช้เฟนตันรีเอเจนต์ร่วมกับวิธีการบำบัดอื่นๆ หรืออาจใช้เป็นระบบบำบัด
แบบผสมผสาน (**hybrid system**) เพื่อให้สามารถนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ได้

Thesis Title Color and Organics Removal from Palm Oil Mill Effluent using Effective Microorganism Culture and Fenton's Reagent
Author Mr. Thanakrit Promtong
Major Program Environmental Management
Academic Year 2008

ABSTRACT

Untreated palm oil mill wastewater (POMW) is dark brown liquid waste and contains high suspended solids, oil and grease and chemical oxygen demand (COD). Although it was treated by conventional biological wastewater treatment unit, but its color still remained. The brown color existed in palm oil mill effluent (POME) originates from organic substances such as lignin, tannin, carotene, anthocyanin, humic and fuvic acid. This research aims to study the color and organics removal from POME and the experiments can be divided into 2 parts. The first part of the experiments was the study of color and organics removal using effective microorganisms (EM) culture. The efficiencies of various EM culture concentrations 0.5, 2 and 5% (v/v) on color and organics removal were determined. The result found that the initial color intensity, biochemical oxygen demand (BOD) and COD of untreated POME were increased with the increasing of EM culture concentration used. The treated effluent had higher color intensity, BOD and COD than that of control in all experiments.

The second part was the study of color and organics removal from POME using Fenton's reagent. The investigation was initiated from the optimization of ferrous ion (Fe^{2+}) concentration (0.2-2.5 mM) and followed by hydrogen peroxide (H_2O_2) concentration optimization (10-150 mM). The result showed the optimal Fe^{2+} and H_2O_2 initial concentrations were 1.0 and 50 mM, respectively. The appropriate pH found was 3.0. With this optimal condition, it could remove color and COD from POME by 61.11 and 81%, respectively. The sludge generated from this process was in range 315-350 mg/L. The use of Fenton's reagent in combination with UV could enhance the color removal efficiency to be 81.04%

In order to describe the color and organics removal mechanisms, the Fenton's reagent reaction kinetic in decolorization and organics degradation were studied. It was found that the

kinetic rate constant of color and dissolved organic carbon (DOC) were 0.0620 min^{-1} and $2.19 \times 10^4 \text{ (mg/L)}^{-1} \text{ min}^{-1}$, respectively. With the appropriate H_2O_2 and Fe^{2+} concentration ratio (50), and 24 hour of reaction time, the tannin-lignin, DOC, COD and humic and fulvic acid-like substances removal efficiencies obtained were 43.63, 85, 82 and 98.61%, respectively. The satisfaction in color of treated POME was evaluated. The assessors expressed their preferences in much and most satisfying degree.

From the results, we may conclude that EM culture may be not appropriate for POME treatment because POME contains difficulty biodegradable substances. However EM culture could reduce POMW odor effectively. Whereas the efficiency of Fenton's reagent in color and organics removal from POME was satisfied but it should be used in combination with other processes to reduce treatment cost or used in hybrid system to treat POME for water reuse.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
Abstract	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(9)
รายการภาพ	(10)
บทที่	
1. บทนำ	1
บทนำต้นเรื่อง	1
การตรวจเอกสาร	4
วัตถุประสงค์	37
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	37
2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย	38
3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	46
4. สรุปผลการทดลอง	79
ข้อเสนอแนะ	82
เอกสารอ้างอิง	84
ภาคผนวก	104
ประวัติผู้เขียน	133

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ลักษณะสมบัติของน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม	8
2	ลักษณะสมบัติของน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มหลังจากผ่านการบำบัดแบบระบบบ่อบำบัด	9
3	โทนสีสำหรับช่วงความยาวคลื่นเด่น	12
4	ค่าศักย์รีดอกซ์ของสารออกซิไดซ์ต่างๆ	21
5	การบำบัดน้ำเสียและน้ำทิ้งด้วยเฟนตันรีเอเจนต์	28
6	การกำจัดเฟอร์รัสไอออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	31
7	การบำบัดน้ำเสียและน้ำทิ้งด้วยจุลินทรีย์อีเอ็ม	35
8	พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์	41
9	ปริมาณน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มและน้ำหมักชีวภาพในแต่ละชุดการทดลอง	42
10	ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ศึกษา	48
11	จำนวนเชื้อจุลินทรีย์แต่ละกลุ่ม	49
12	ค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม และน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ผ่านการบำบัดด้วยเฟนตันรีเอเจนต์	76
13	ผลการประเมินความพึงพอใจต่อสีของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม	78

รายการภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การผลิตน้ำมันปาล์มดิบในกระบวนการผลิตแบบใช้น้ำด้วยเครื่องแบบสกู (decanter)	5
2	การผลิตน้ำมันปาล์มดิบในกระบวนการผลิตแบบใช้น้ำด้วยเครื่องแบบ หมุนเหวี่ยง (separator)	6
3	โครงสร้างทางเคมีของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม	10
4	การสลายพันธะโครงสร้างสารด้วยอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล	23
5	ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและพีอี (pE) กับสถานะของเหล็กในน้ำ	27
6	จุดเก็บตัวอย่างและผังลำดับการบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ศึกษา	39
7	การศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเฟนตันรีเอเจนต์	43
8	ชุดอุปกรณ์การทดลองเฟนตันรีเอเจนต์	44
9	น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ศึกษา	47
10	ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร	47
11	ขนาดของอนุภาคในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ศึกษา	48
12	ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ระยะเวลาบำบัดต่างๆ	50
13	ความเข้มข้นของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่บำบัดด้วยน้ำหมักชีวภาพระดับ ความเข้มข้นต่างๆ	50
14	ปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของซีไอดีในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ ระยะเวลาบำบัดต่างๆ	51
15	ปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของบีไอดีในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ ระยะเวลาบำบัดต่างๆ	52
16	ปริมาณสารแขวนลอย (TSS) ในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ระยะเวลา บำบัดต่างๆ	53
17	ปริมาณของแข็งละลายน้ำ (TDS) ในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ระยะเวลา บำบัดต่างๆ	54
18	ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ระยะเวลาบำบัดต่างๆ	55
19	ค่าพีเอชของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ระยะเวลาบำบัดต่างๆ	56

รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	ผลความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการลดลงของสี ($\text{Fe}^{2+} = 1.0\text{mM}$, $\text{pH } 3.0 \pm 0.2$; ระยะเวลาการบำบัด 5 นาที; optical density 475 นาโนเมตร)	60
21	ผลความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการลดลงของซีโอดี ($\text{Fe}^{2+} = 1.0\text{mM}$, $\text{pH } 3.0 \pm 0.2$; ระยะเวลาการบำบัด 24 ชั่วโมง)	60
22	ผลความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ต่อการลดลงของสี ($\text{H}_2\text{O}_2 = 50\text{mM}$, $\text{pH } 3.0 \pm 0.2$; ระยะเวลาการบำบัด 5 นาที; optical density 475 นาโนเมตร)	62
23	ผลความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ต่อการลดลงของซีโอดี ($\text{H}_2\text{O}_2 = 50\text{mM}$, $\text{pH } 3.0 \pm 0.2$; ระยะเวลาการบำบัด 24 ชั่วโมง)	62
24	ผลของพีเอชเริ่มต้นต่อการลดลงของสีที่ระยะเวลาต่างๆ ($\text{H}_2\text{O}_2 = 50\text{mM}$, $\text{Fe}^{2+} = 1.0\text{mM}$)	64
25	ผลของพีเอชเริ่มต้นต่อการลดลงของสี ($\text{H}_2\text{O}_2 = 50\text{mM}$, $\text{Fe}^{2+} = 1.0\text{mM}$; ระยะเวลาการบำบัด 5 นาที; optical density 475 นาโนเมตร)	64
26	ผลของพีเอชเริ่มต้นต่อการลดลงของซีโอดี ($\text{H}_2\text{O}_2 = 50\text{mM}$, $\text{Fe}^{2+} = 1.0\text{mM}$; ระยะเวลาการบำบัด 24 ชั่วโมง)	65
27	ผลการกำจัดสีด้วยแสงยูวีและกระบวนการออกซิเดชันที่ระยะเวลาต่างๆ ($\text{H}_2\text{O}_2 = 50\text{mM}$, $\text{Fe}^{2+} = 1.0\text{mM}$, $\text{pH } 3.0 \pm 0.2$; หลอดยูวีกำลัง 6 วัตต์)	66
28	ผลการกำจัดสีด้วยแสงยูวีและกระบวนการออกซิเดชัน ($\text{H}_2\text{O}_2 = 50\text{mM}$, $\text{Fe}^{2+} = 1.0\text{mM}$, $\text{pH } 3.0 \pm 0.2$; optical density 475 นาโนเมตร; ระยะเวลาการบำบัด 24 ชั่วโมง; หลอดยูวีกำลัง 6 วัตต์)	66
29	ผลของการกรองตัวอย่างน้ำทิ้งเปรียบเทียบกับผลของพีเอชต่อการลดลงของสี ($\text{H}_2\text{O}_2 = 50\text{mM}$, $\text{Fe}^{2+} = 1.0\text{mM}$; optical density 475 นาโนเมตร; ระยะเวลาการบำบัด 60 นาที)	68
30	ผลของการกรองตัวอย่างน้ำทิ้งเปรียบเทียบกับผลของพีเอชต่อการลดลงของซีโอดี ($\text{H}_2\text{O}_2 = 50\text{mM}$, $\text{Fe}^{2+} = 1.0\text{mM}$; ระยะเวลาการบำบัด 24 ชั่วโมง)	68
31	น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มก่อนบำบัด (A) และหลังจากบำบัดด้วยเฟนตันรีเอเจนต์ (B)	69

รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
32	จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยากำจัดสีน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเฟนตันรีเอเจนต์	70
33	อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ	71
34	FEEM ในรูปแบบสามมิติและเส้นชั้นความสูง	73
35	ผลการกำจัดสี ซีโอดี และสารอินทรีย์กลุ่ม humic acid-like substances และ fulvic acid-like substances (ระยะเวลาการบำบัด 24 ชั่วโมง)	76
36	ความเข้มข้นของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มหลังผ่านการบำบัดด้วยเฟนตันรีเอเจนต์ที่อัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเฟอร์รัสไอออนระดับต่างๆ ($Fe^{2+} = 1.0\text{mM}$, $pH 3.0 \pm 0.2$; ระยะเวลาการบำบัด 24 ชั่วโมง)	77
37	ไดอะแกรมการจัดการน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่เสนอ	83

บทที่ 1

บทนำ

บทนำต้นเรื่อง

ปาล์มน้ำมัน (*Elaeis guineensis*) เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ มีการปลูกมากในทางภาคใต้ของประเทศไทยโดยเฉพาะในจังหวัด กระบี่ สุราษฎร์ธานี ชุมพร ประจวบคีรีขันธ์ นครศรีธรรมราช และตรัง ในปีพุทธศักราช 2551 มีพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันทั้งหมด 3,622,778 ไร่ และให้ผลผลิต 9,263,784 ตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2552) โดยผลผลิตปาล์มน้ำมันที่ได้จะถูกนำส่งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเพื่อเข้าสู่ขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการสกัด ทำให้ได้เป็นน้ำมันปาล์มดิบ และเกิดผลิตภัณฑ์ได้จากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม ได้แก่ ทะลายเปล่า กะลา กากตะกอน ดีแคนเตอร์ และเส้นใยปาล์ม และเกิดของเสียในรูปของน้ำเสียจากกระบวนการสกัด โดยเฉพาะ ทะลายปาล์มสด 1 ตันเมื่อผ่านขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการสกัดเพื่อให้ได้เป็นน้ำมันปาล์ม มีน้ำเสียเกิดขึ้นประมาณ 0.87 ลูกบาศก์เมตร (Prasertsan and Prasertsan, 1996) ทั้งนี้ น้ำเสียที่เกิดขึ้นมาจากน้ำจากการล้างปาล์ม น้ำเสียจากเครื่องแยกเหวี่ยงความเร็วสูง และโดยเฉพาะน้ำเสียจากการแยกน้ำและกากสลัดจ์ออกจากน้ำมันซึ่งมีปริมาณมากที่สุด

โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มส่วนใหญ่ใช้วิธีการบำบัดน้ำเสียแบบระบบชุดบ่อไร้อากาศ ร่วมกับบ่อเติมอากาศและบ่อผึ่งต่อเนื่องกัน (สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2540) ซึ่งสามารถบำบัดปริมาณสารแขวนลอย น้ำมันและไขมัน ปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) และบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand) ให้มีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมได้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2551) แต่น้ำทิ้งสุดท้ายของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มไม่สามารถปล่อยทิ้งออกสู่แม่น้ำลำคลองหรือแหล่งน้ำธรรมชาติได้ เนื่องจากน้ำทิ้งดังกล่าวจะมีสีน้ำตาลซึ่งมีลักษณะเป็นที่พึงรังเกียจ และอาจมีผลกระทบต่อระบบนิเวศของแหล่งน้ำหากมีการปล่อยทิ้ง เนื่องจากสีไปขัดขวางการส่องผ่านของแสง ทำให้ปริมาณแสงที่ส่องผ่านลงสู่แหล่งน้ำลดลง เป็นผลให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ (Park et al., 2007; Wang 2008) และเกิดการเน่าเสียที่ท้องน้ำ

สีน้ำตาลในน้ำเสียและน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มประกอบด้วยสารอินทรีย์ต่างๆ เช่น รงควัตถุพวกแอนโทไซยานิน (anthocyanins) แคโรทีน (carotene) สารประกอบพวก

โพลีฟีนอล (polyphenols) ลิกนิน (lignin) และแทนนิน (tannin) (Barker and Worgan, 1981) ซึ่งถูกสกัดออกมาพร้อมกับน้ำมัน และไอน้ำเนื่องจากเซลล์ผลปาล์มถูกทำลาย (Hartley, 1977) และยังพบสารประกอบพวกเมลานอยดิน (melanoidin) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาที่ไม่ใช้เอนไซม์ระหว่างน้ำตาลและกรดอะมิโนภายใต้สภาวะที่มีอุณหภูมิสูง ซึ่งจะพบมากในส่วนของตะกอน (Hwang *et al.*, 1978) นอกจากนี้ยังพบสารประกอบพวกกัม (gum) ซึ่งเมื่อโดนความร้อนในขั้นตอนการสกัดน้ำมันปาล์มจะทำให้เกิดสีน้ำตาลคล้ำขึ้น และสามารถรวมตัวกับเกลือของโลหะ เช่น แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) และทองแดง (Cu) ทำให้เกิดการคงตัวของสี (Salunkhe and Desai, 1986 อ้างโดย โสภ จันทร์ภาโส, 2542) และสีน้ำตาลในน้ำยังมีสาเหตุมาจากสารอินทรีย์กลุ่มฮิวมิกและฟุลวิก โดยสารอินทรีย์ดังกล่าวเกิดจากการเน่าเปื่อยของพืช

ที่ผ่านมาทางโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มแก้ไขปัญหาด้วยการนำน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสกัดไปใช้รดสวนปาล์ม ส่วนน้ำทิ้งที่เกิดขึ้นปล่อยให้มีภาระเหี้ยตามธรรมชาติแต่อย่างไรก็ตามในช่วงฤดูฝนไม่สามารถระบายน้ำเสียและน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มได้ เนื่องจากปริมาณน้ำฝนเพียงพอต่อความต้องการของพืช อีกทั้งการระบายของน้ำในช่วงหน้าฝนมีอัตราค่อนข้างต่ำ

วิธีการกำจัดสีในน้ำเสียและน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมที่มีอยู่ในปัจจุบัน เช่น การใช้กระบวนการออกซิเดชันขั้นต้น และการกรองด้วยเมมเบรน (Ahmad *et al.*, 2006) มีความยุ่งยากในการดูแลรักษาและมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานค่อนข้างสูง สำหรับวิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมี (Kim *et al.*, 2003) นั้นมีสัลดั้เกิดขึ้นค่อนข้างมาก (Badawy and Ali, 2006) จำเป็นต้องหาวิธีการกำจัดต่อไป ส่วนการกำจัดสีด้วยวิธีการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Santhy and Selvapathy, 2005) เป็นเพียงการเคลื่อนย้ายสารอินทรีย์ออกจากเฟสน้ำ (aqueous phase) ซึ่งต้องนำตัวดูดซับไปกำจัดต่อไปอีกเช่นกัน (พวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกูล, 2548) ต่างจากกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชัน (advance oxidation processes; AOPs) ที่สามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ หรือย่อยสลายได้ยาก (recalcitrant) ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และน้ำ (H₂O)

ทั้งนี้เพื่อให้สามารถระบายน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มออกสู่น้ำลำคลองหรือแหล่งน้ำธรรมชาติได้ ทำให้มีแนวความคิดในการนำเอาเฟนตันรีเอเจนต์และน้ำหมักชีวภาพหรือจุลินทรีย์อีเอ็ม (Effective Microorganisms) มาใช้บำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มสำหรับเฟนตันรีเอเจนต์หรือเฟนตันออกซิเดชันเป็นกระบวนการหนึ่งในกลุ่มของกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชัน ซึ่งเป็นกระบวนการทางเคมีที่อาศัยอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (hydroxyl radicals; OH[•]) ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำเสียให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ

(Bigda, 1995; Malik and Saha, 2003) อนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเกิดจากการทำปฏิกิริยาของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) โดยมีเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) มีค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน (E_0) เท่ากับ 2.80 ซึ่งสูงเป็นอันดับสองรองจากฟลูออรีน (fluorine; $E_0=3.06$) (Zhou and Smith, 2002; Metcalf and Eddy, 2003; Deng and Englehardt, 2006) ผลจากปฏิกิริยาดังกล่าวอาจช่วยให้เกิดสารที่ง่ายต่อการย่อยสลายทางชีวภาพได้ดียิ่งขึ้น (Pignatello *et al.*, 2006) จากรายงานการศึกษาพบว่า เฟนตันรีเอเจนต์สามารถกำจัดสีและซีไอดีในน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ (Azbar *et al.*, 2004) และสามารถกำจัดสีและทีโอซี (Total Organic Carbon) ในน้ำทิ้งโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษได้มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ (Catalkaya and Kargi, 2007) และเพื่อเป็นการลดต้นทุนจากการบำบัดด้วยเฟนตันรีเอเจนต์จึงได้มีการนำน้ำหมักชีวภาพหรือจุลินทรีย์อีเอ็มซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ทางชีวภาพและมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมาใช้บำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มในงานวิจัยครั้งนี้ด้วย ซึ่งจากรายงานการศึกษาพบว่า จุลินทรีย์อีเอ็มสามารถลดสารอินทรีย์และกลิ่นของน้ำเสียในฟาร์มปศุสัตว์ได้เป็นอย่างดี (Chantsavang *et al.*, 1993) และที่ผ่านมามีรายงานการศึกษาพบว่าจุลินทรีย์มีความสามารถในการดูดซับสีได้อีกด้วย (Park *et al.*, 2007)

การวิจัยในครั้งนี้เริ่มต้นจากการศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยน้ำหมักชีวภาพ จากนั้นพิจารณาผลการบำบัดและความเป็นไปได้ในการนำเอาเฟนตันรีเอเจนต์และน้ำหมักชีวภาพมาใช้ร่วมกันในการบำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสีและสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำทิ้ง

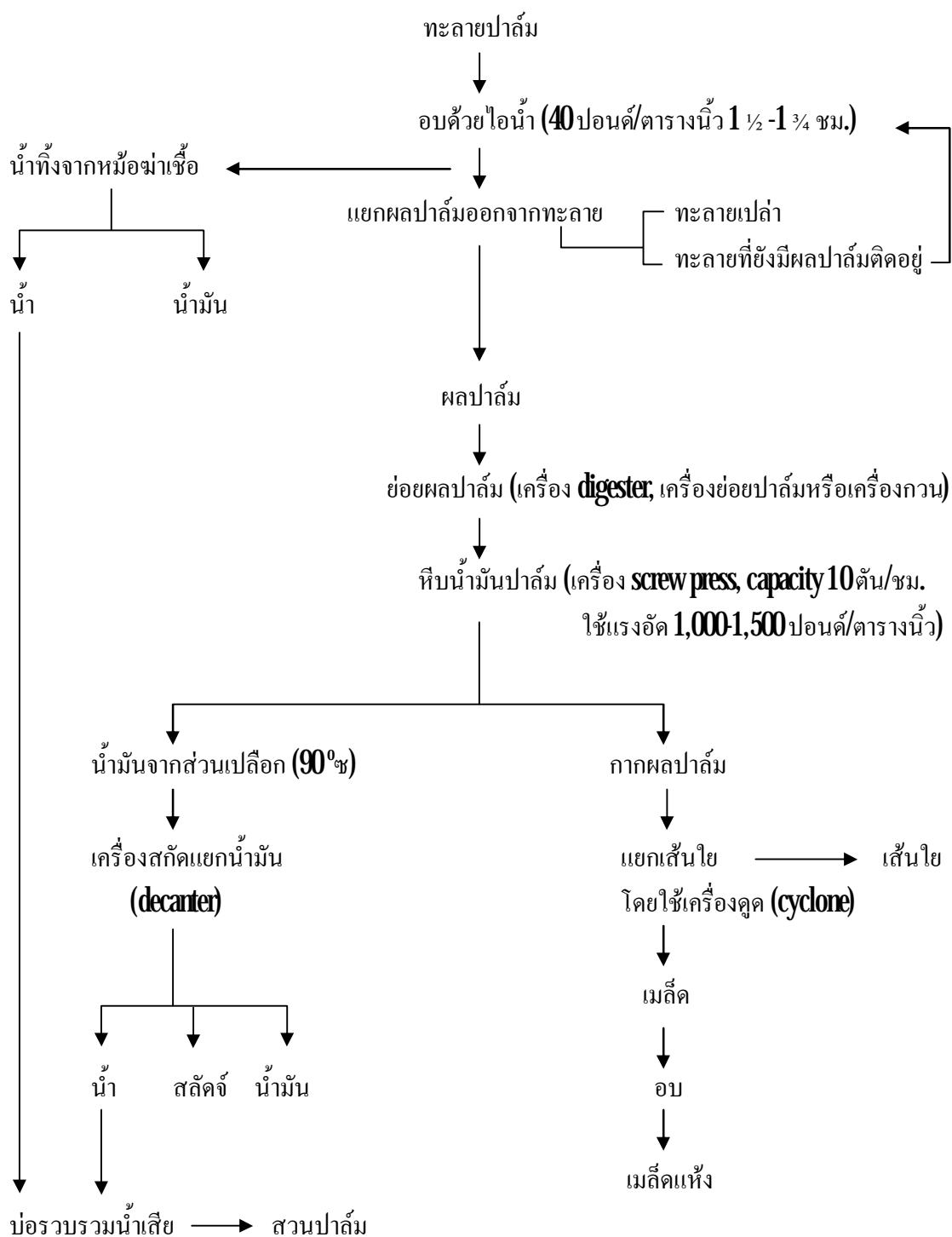
การตรวจเอกสาร

1. แหล่งที่มา ปริมาณ และคุณลักษณะของน้ำเสียจากการสกัดน้ำมันปาล์ม

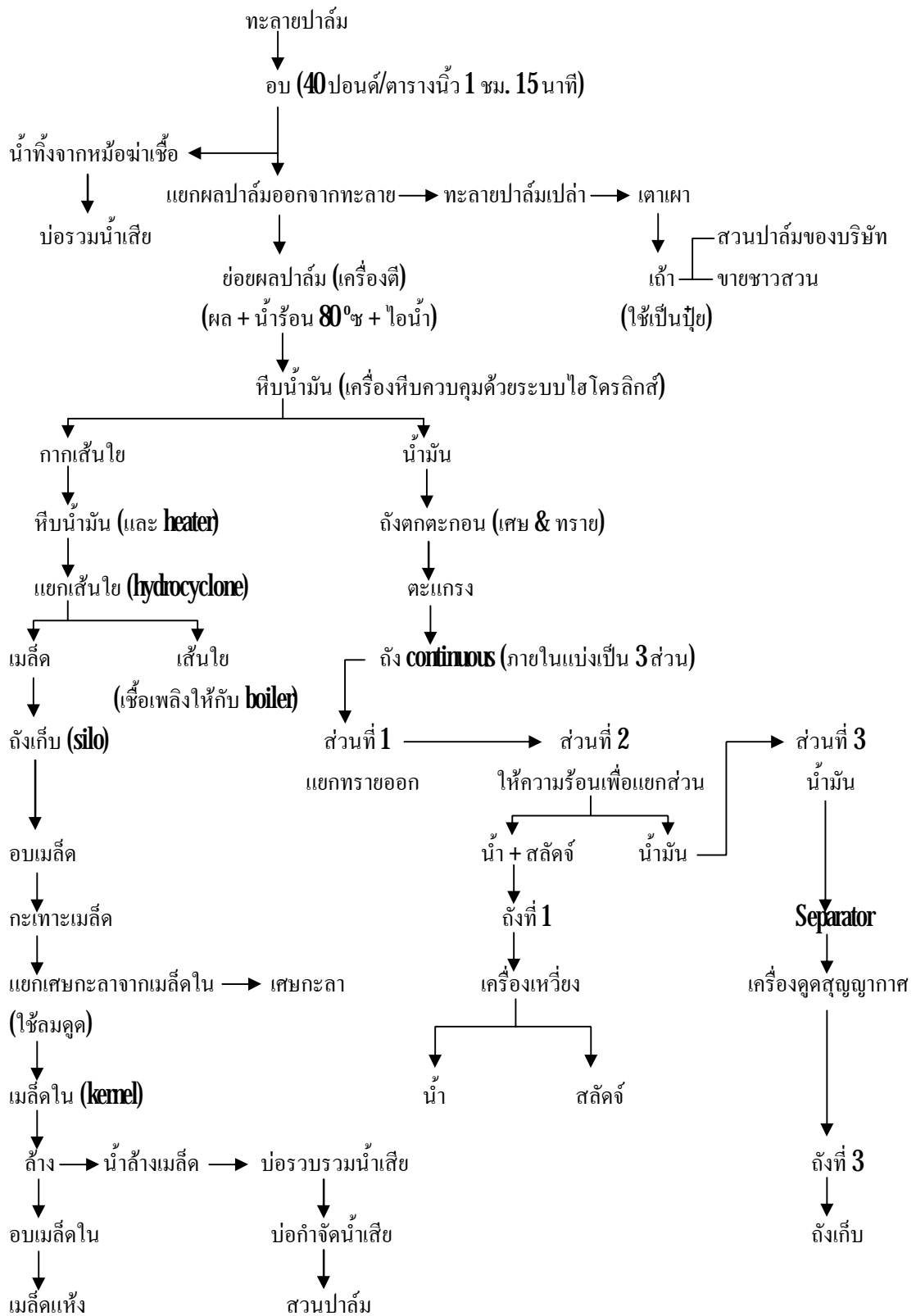
1.1 กระบวนการสกัดน้ำมันจากผลปาล์ม

กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มแบ่งเป็น 3 วิธี (ผาสุก กุลละวณิชย์, 2528) คือ กระบวนการสกัดแบบใช้น้ำหรือที่เรียกว่าแบบมาตรฐาน กระบวนการสกัดแบบย่างผลปาล์มและ กระบวนการสกัดแบบทอดผลปาล์ม แต่วิธีการสกัดที่สามารถรองรับวัตถุดิบได้ในปริมาณมาก และให้ผลผลิตในรูปน้ำมันปาล์มดิบที่มีคุณภาพ คือ กระบวนการสกัดแบบใช้น้ำ

กระบวนการสกัดแบบใช้น้ำ แบ่งย่อยเป็น 2 ลักษณะคือ เครื่องสกัดแยกน้ำมันแบบ สกรู (decanter) (ภาพที่ 1) และเครื่องสกัดแยกน้ำมันแบบหมุนเหวี่ยง (separator) (ภาพที่ 2) ขั้นตอน โดยทั่วไปของการสกัดน้ำมันแบบใช้น้ำเริ่มจากการอบทะลายปาล์มสดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิระหว่าง 120-130 องศาเซลเซียส ที่ความดันประมาณ 40-50 ปอนด์ต่อตารางนิ้วเป็นเวลาประมาณ 40-60 นาที การอบผลปาล์มจะช่วยยับยั้งปฏิกิริยาไลโปไลซิส (lipolysis) ที่จะทำให้เกิดกรดไขมันอิสระใน ผลปาล์มซึ่งส่งผลให้เกิดกลิ่นหืน นอกจากนี้ไอน้ำยังทำให้ผลปาล์มอ่อนนุ่ม ขี้หวูลุดออกจากทะลาย ได้ง่ายสะดวกต่อการย่อยและการหีบ ทะลายปาล์มที่ผ่านการนึ่งแล้วจะมีการนำไปป้อนเข้าเครื่อง แยกผลปาล์มซึ่งเป็นทรงกระบอกกลวงหมุนด้วยความเร็วประมาณ 23 รอบต่อนาที ในส่วนของ ทะลายจะถูกลำเลียงเข้าสู่เตาเผาเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง และในปัจจุบันนำไปเผาเห็ดและทำปุ๋ยหมัก (Chavalpait, 2006) ส่วนผลปาล์มที่แยกได้จะถูกนำไปย่อยด้วยเครื่องย่อยผลปาล์ม โดยส่วนใหญ่มี ลักษณะเป็นรูปถังทรงกระบอกซึ่งภายในมีใบพัด และจะมีการเติมน้ำร้อนลงไปเล็กน้อย สำหรับการ กวนผลปาล์มให้เส้นใยฉีกแยกจากเมล็ดและให้เซลล์น้ำมันเกิดการแตกตัว การกวนจะเกิดขึ้น ประมาณ 15-20 นาที จากนั้นจึงป้อนเข้าเครื่องหีบแบบอัดเกลียว (screw press) และน้ำมันจะถูกแยก ออกจากน้ำ เศษเส้นใย รวมทั้งสิ่งสกปรกอื่นๆ โดยการ ใช้เครื่อง decanter หรือเครื่อง separator อย่างไรก็ตามน้ำมันดิบที่ผ่านเครื่อง separator โดยส่วนใหญ่ยังคงมีสิ่งเจือปนอยู่อีกมาก โดยเฉพาะ อนุภาคของแข็ง จึงต้องมีการนำมาผ่านเข้าเครื่องแยกเหวี่ยงความเร็วสูงเพื่อบำบัดอนุภาคของแข็ง หลังจากนั้นจึงผ่านเข้าสู่เครื่องดูดสุญญากาศเพื่อไล่ความชื้น แล้วจะถูกลำเลียงไปเก็บในถังเก็บ น้ำมันขนาดใหญ่ รอเข้าสู่ขั้นตอนการทำน้ำมันให้บริสุทธิ์หรือเตรียมจำหน่ายโรงงานผลิตน้ำมัน บริสุทธิ์ (พูนสุข ประเสริฐสรรพ และคณะ, 2533)



ภาพที่ 1 การผลิตน้ำมันปาล์มดิบในกระบวนการผลิตแบบใช้น้ำด้วยเครื่องแบบสกรู (decanter)
ที่มา: พูนสุข ประเสริฐสรรพ และคณะ (2533)



ภาพที่ 2 การผลิตน้ำมันปาล์มดิบในกระบวนการผลิตแบบใช้น้ำด้วยเครื่องแบบหมุนเหวี่ยง (separator) ที่มา: พูนสุข ประเสริฐสรรพ และคณะ (2533)

1.2 ปริมาณและลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานน้ำมันปาล์ม

กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มแบบใช้น้ำหรือแบบมาตรฐาน มีน้ำเสียเกิดขึ้นในปริมาณมาก โดยน้ำเสียเกิดขึ้นมาจากน้ำที่ใช้ในระหว่างกระบวนการสกัดน้ำมันซึ่งมาจาก 5 ขั้นตอนหลัก คือ

1.2.1 น้ำจากการนึ่งปาล์ม เป็นน้ำเสียจากการอบทะเลาปาล์มด้วยไอน้ำ น้ำส่วนนี้แม้จะมีน้ำมันอยู่แต่มีสารแขวนลอยต่ำและไม่มีสภาพเป็นอิมัลชัน โดยทั่วไปการอบทะเลาปาล์ม 25 ตันจะมีน้ำนึ่งปาล์มเกิดขึ้นประมาณ 2-3 ลูกบาศก์เมตร

1.2.2 น้ำเสียจากการแยกน้ำและกากสลัดจ์ออกจากน้ำมัน น้ำเสียส่วนนี้เกิดขึ้นมากที่สุด และเป็นน้ำเสียที่มีของแข็งแขวนลอยมาก กรณีที่ใช้ **decanter** ในการแยกน้ำเสียจากการแยกน้ำและกากสลัดจ์ออกจากน้ำมันจะมีน้ำสลัดจ์ที่ถูกแยกออกมาประมาณ 0.35 ลูกบาศก์เมตรต่อ 1 ตันทะเลาปาล์มสด และในกรณีที่ใช้ **separator** จะมีน้ำสลัดจ์ที่ถูกแยกออกมาประมาณ 0.65 ลูกบาศก์เมตรต่อ 1 ตันทะเลาปาล์มสด

1.2.3 น้ำเสียจากการล้างทำความสะอาดเครื่องมือ เครื่องมือที่ต้องทำความสะอาดบ่อยครั้ง ได้แก่

ก. เครื่องแยกกรวดทราย ต้องทำการล้างทุกครั้งชั่วโมง ใช้น้ำในการล้างประมาณ 0.05-0.1 ลูกบาศก์เมตร

ข. เครื่องแยกน้ำและกากสลัดจ์ออกจากน้ำมัน เมื่อใช้งานไประยะหนึ่งต้องมีการล้างทำความสะอาด ซึ่งจะมีน้ำเสียเกิด ครั้งละ 0.2-0.5 ลูกบาศก์เมตร

ค. เครื่องแยกเหวี่ยงความเร็วสูง ต้องทำการล้างทุก 20-30 นาที ในการล้างจะใช้น้ำครั้งละ 0.05-0.06 ลูกบาศก์เมตร นอกจากนี้ยังต้องล้างทำความสะอาดพื้น ถังพัก และภาชนะต่างๆ อีกด้วย

1.2.4 น้ำจากการหล่อเย็นหม้อกำเนิดไอน้ำและเครื่องระเหย เป็นน้ำที่มีของแข็งแขวนลอยต่ำมากและยังสะอาดอยู่ ส่วนใหญ่มีการหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่

1.2.5 น้ำสลัดจ์จากเครื่องแยกเหวี่ยงความเร็วสูง มีน้ำเสียเกิดขึ้นประมาณ 0.03-0.15 ลูกบาศก์เมตรต่อ 1 ตันทะเลาปาล์มสด (อริญ หันพงศ์กิตติกุล และคณะ, 2537)

ปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมดคิดเป็นร้อยละ 60 ของปริมาณทะเลาปาล์ม หรือมีปริมาณน้ำเสีย 250-350 เท่าของปริมาณน้ำมันที่สกัดได้ (Cheah *et al.*, 1988 อ้างโดย ปรีชา มุณีศรี, 2539)

จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นว่าโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ใช้วิธีการสกัดแบบใช้น้ำจะก่อให้เกิดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตประมาณ 25 ลูกบาศก์เมตรต่อตันของน้ำมันที่ผลิตได้ ซึ่งเป็นน้ำเสียจากหม้อนึ่ง เครื่องแยกกรวดทราย เครื่องแยกน้ำ (separator หรือ decanter) และจากการทำความสะอาดเครื่องมือเครื่องจักร ทั้งนี้ น้ำเสียที่เกิดขึ้นมีค่าความสกปรกในรูปของซีไอดี บีไอดี สารแขวนลอยสูง และมีสีน้ำตาลเข้ม ซึ่งเกิดจากในน้ำเสียมีปริมาณของสารอินทรีย์ น้ำมันและไขมัน และแร่ธาตุต่างๆ สูง (ปรีชา มุณีศรี, 2539) สำหรับลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม และน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแบบระบบบ่อบำบัดแล้ว แสดงในตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

พารามิเตอร์	ค่าที่วัดได้	ค่าเฉลี่ย
สี ¹	น้ำตาล-น้ำตาลเข้ม	น้ำตาล-น้ำตาลเข้ม
pH ¹	4.2 - 4.8	4.5
BOD (mg/L) ¹	43,300 - 89,000	58,500
COD (mg/L) ¹	90,000 - 179,000	110,000
ของแข็งทั้งหมด (mg/L) ¹	51,200 - 105,000	71,900
สารแขวนลอย (mg/L) ¹	24,300 - 76,800	43,300
ความเป็นด่าง (mg/L) ¹	240 - 1,240	700
ความเป็นกรด (mg/L) ¹	612 - 3,500	2,740
น้ำมันและไขมัน (mg/L) ¹	5,700 - 57,500	25,600
ไนโตรเจนทั้งหมด (mg/L) ¹	750 - 1,000	900
Al (mg/L) ²	-	3.9
K (mg/L) ²	-	2,270
Mg (mg/L) ²	-	61.5
Ca (mg/L) ²	-	43.9
Fe (mg/L) ²	-	46.5
Mn (mg/L) ²	-	2
Cu (mg/L) ²	-	0.89
Zn (mg/L) ²	-	2.3

ที่มา: ¹Pechsuth *et al.*, (2001^{ab}); ²Ahmad *et al.*, (2006)

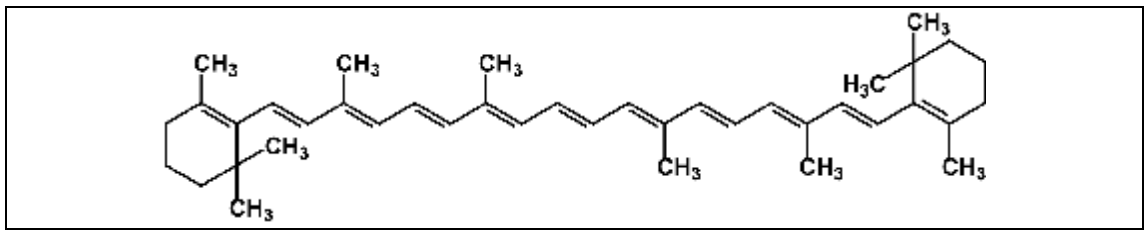
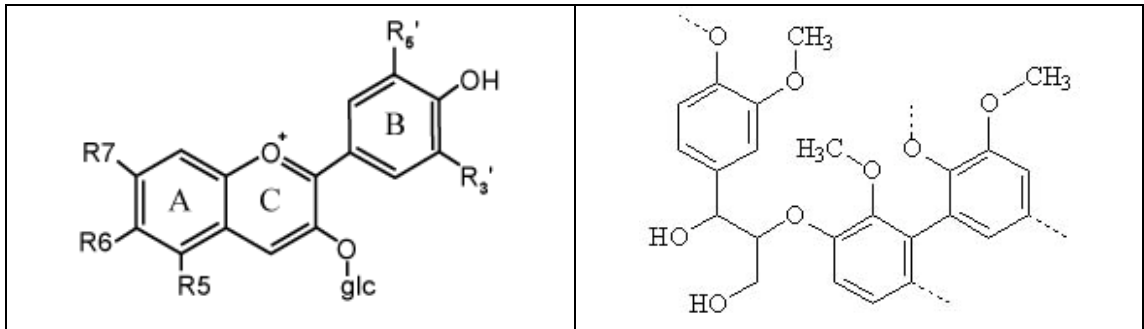
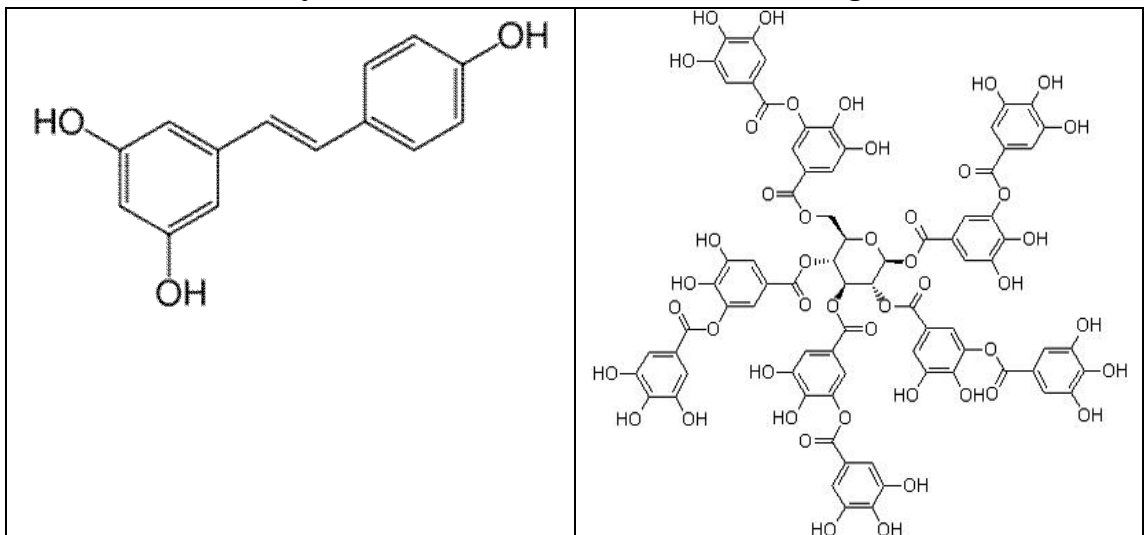
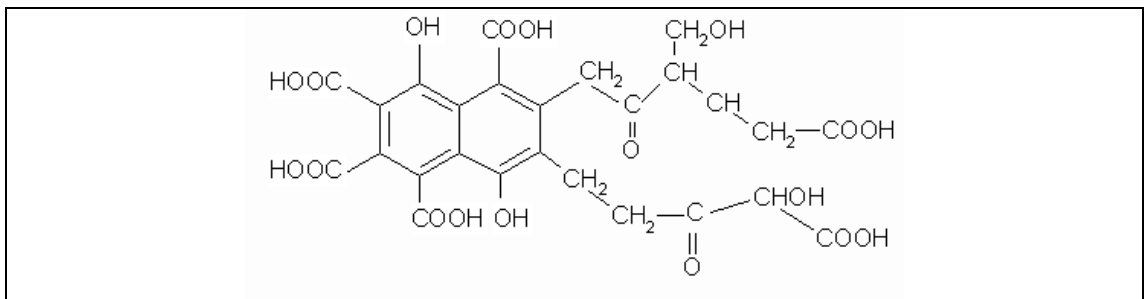
ตารางที่ 2 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มหลังจากผ่านการบำบัดแบบระบบบ่อบำบัด

บ่อบำบัดที่	BOD	ประสิทธิภาพการลด BOD (%)	COD	ประสิทธิภาพการลด COD (%)	BOD/COD
1	30,000	93.00	90,000	81.11	0.33
2	2,100	95.33	17,000	83.44	0.12
3	1,400	97.33	14,900	88.22	0.09
4	800	97.90	10,600	88.33	0.08
5	630	99.03	10,500	93.07	0.06
6	290	99.50	6,240	96.54	0.05
7	150	99.67	3,110	97.79	0.05
น้ำทิ้งสุดท้าย	100	-	2,000	-	0.05

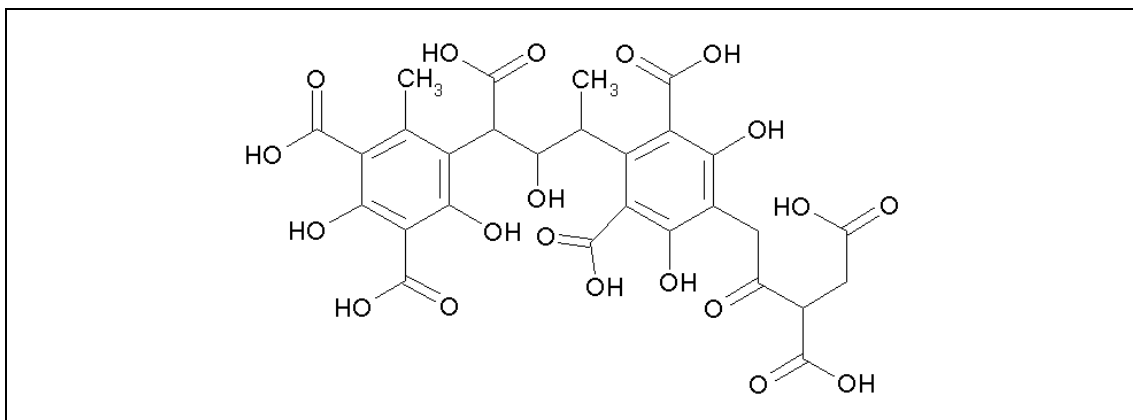
ที่มา: สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน (2540)

2 สีของน้ำ

แหล่งน้ำธรรมชาติมักมีสีเหลืองน้ำตาลหรือสีชา เกิดจากการเน่าเปื่อยของพืชหลากหลายชนิด ซึ่งส่วนประกอบสำคัญอันเป็นที่มาของสีในน้ำตามธรรมชาตินั้นคือ สารลิกนิน เมื่อพืชเน่าเปื่อย ลิกนินในพืชจะถูกย่อยสลายทำให้เกิดสารแทนนิน สารประกอบประเภทฮิวมิก (humic) และฟุลวิก (fulvic) สีในน้ำธรรมชาติซึ่งเกิดจากสารเหล่านี้มีลักษณะสมบัติเป็นอนุภาคคอลลอยด์ที่มีประจุลบ ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากการย่อยสลายของพืชต่างๆ (มันสำปะหลัง, ฝักรวม และมันสำปะหลัง, ฝักรวม, 2545) สารอินทรีย์เหล่านี้เป็นสารที่มีความคงตัวสูงมาก จนไม่สามารถสลายตัวอีกต่อไปได้โดยง่ายตามธรรมชาติ ดังนั้นการกำจัดสีจริงออกจากน้ำจึงไม่อาจกระทำได้ง่าย โดยทั่วไปความเข้มของสีจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชของน้ำเพิ่มขึ้น สำหรับสีในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเกิดจาก แอนโทไซยานิน แคโรทีน เมลานอยดิน โพลีฟีนอล ลิกนิน และแทนนิน (ภาพที่ 3) (Hartley, 1977; Hwang *et al.*, 1978; Barker and Worgan, 1981)

 **β -carotene****Anthocyanin****Lignin****Polyphenol****Tannin****Fulvic acid**

ภาพที่ 3 โครงสร้างทางเคมีของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม



Humic acid

ภาพที่ 3 (ต่อ)

21 หลักการเห็นสี

การมองเห็นจะเกิดขึ้นได้เมื่อมีองค์ประกอบ 4 ประการ คือ แสง วัตถุ สี และ นัยน์ตาของมนุษย์ ซึ่งสมองจะวิเคราะห์และตีความหมายออกมา (ชงชัย พรรณสวัสดิ์, 2527) จะเห็นว่าในการเห็นสีต้องเข้าใจเรื่องแสงก่อน เพราะถ้าปราศจากแสงก็จะมองไม่เห็นสี แสงเป็นส่วนหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีความยาวคลื่นแตกต่างกันออกไป

สำหรับการมองเห็นสีของวัตถุหนึ่งเป็นสีต่างๆ นั้นเป็นเพราะวัตถุนั้นดูดกลืนพลังงานแสงความยาวคลื่นช่วงหนึ่งๆ เอาไว้ และสะท้อนพลังงานแสงความยาวคลื่นอื่นออกมาทำให้เราเห็นสีตามความยาวคลื่นที่ถูกสะท้อนออกมา เช่น ผีเสื้อเชือกเทศจะดูดเอาแถบแสงสีที่มีความยาวคลื่นสั้นๆ (น้ำเงินและเขียว) เอาไว้ และสะท้อนแต่แถบสีที่มีความยาวคลื่นยาว (แดงหรือ แสด) ออกมา ตาเราจึงมองเห็นผีเสื้อเป็นสีแดงอมแดงหรือแดงอมแสด เป็นต้น

การบรรยายลักษณะสีที่ใช้กันอยู่และเป็นที่ยอมรับสำหรับวงการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสามารถอ้างอิงกลับไปได้อย่างถูกต้อง คือการบรรยายด้วยความยาวคลื่นเด่น ซึ่งมนุษย์เราสามารถรับรู้แถบสีในช่วงคลื่นประมาณ 380-770 นาโนเมตร โดยจะเห็นสีออกมาแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับขนาดความยาวคลื่นของแถบสีนั้นๆ (ตารางที่ 3) ดังนั้นถ้าสามารถบอกความยาวคลื่นเด่นที่ปรากฏในตัวอย่างหนึ่งๆ ก็สามารถบรรยายลักษณะสีของตัวอย่างนั้นได้ เช่น ถ้าตัวอย่างมีความยาวคลื่นเป็น 650 นาโนเมตร ก็จะทำให้สีแดง เป็นต้น

ตารางที่ 3 โทนสีสำหรับช่วงความยาวคลื่นเด่น

ช่วงความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	โทนสี
400- 465	ม่วง
465- 482	น้ำเงิน
482- 497	เขียวออกน้ำเงิน
497- 530	เขียว
530- 575	เหลืองออกเขียว
575- 580	เหลือง
580- 587	แสดออกเหลือง
587- 598	แสด
598- 620	แดงออกแสด
620- 700	แดง

ที่มา : APHA, AWWA and WEF (2005)

2.2 สีของน้ำเสีย

โดยปกติ สีของน้ำแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ สีแท้ และสีปรากฏ (มันลิน ตันทุลเวศม์, 2542)

สีแท้หรือสีจริง (**true color**) หมายถึง สีที่ละลายจนกลายเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ ซึ่งเกิดจากสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากประเภทกรดฮิวมิก (**humic acid**) และกรดฟุลวิก (**fulvic acid**) ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากการย่อยสลายพืชต่างๆ กรดอินทรีย์เหล่านี้เป็นสารที่มีความคงตัวสูงมาก จนไม่สลายตัวอีกต่อไปแล้ว ดังนั้นการกำจัดสีแท้ที่ออกจากน้ำจึงไม่อาจกระทำได้ง่าย

สีปรากฏ (**apparent color**) หมายถึง สีของน้ำที่สามารถกำจัดออกได้โดยวิธีกายภาพ เกิดจากการสะท้อนของสิ่งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำหรืออาจเกิดจากการสะท้อนของท้องฟ้า สิ่งที่แขวนลอย ได้แก่ แพลงก์ตอนพืช (**phytoplankton**) และแพลงก์ตอนสัตว์ (**zooplankton**) รวมทั้งสิ่งที่ไม่มีชีวิตบางประเภท เช่น เกล็ดของซากพืชซากสัตว์ ตะกอนของดินและทราย

สีทั้งสองรูปแบบนี้อาจจะแยกจากกันโดยใช้วิธีหมุนเหวี่ยง (**centrifuge**) ซึ่งพวกสีปรากฏจะตกตะกอนส่วนสีแท้จะไม่ตกตะกอน (กรณีการ์ สิริสิงห, 2522) และเมื่อกำจัดสีปรากฏออกไปจะทำให้เห็นสีแท้ของน้ำได้

2.3 ผลเสียของสีในแหล่งน้ำธรรมชาติ

สีในแหล่งน้ำทำให้เกิดทัศนียภาพที่ไม่ดีของแหล่งน้ำ และปริมาณแสงส่องผ่านลงสู่แหล่งน้ำลดลง ส่งผลให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ ทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลง (Park *et al.*, 2007; Wang 2008)

3 การบำบัดน้ำเสีย

3.1 การบำบัดทางกายภาพ และเคมี

3.1.1 การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการทางกายภาพ เป็นการอาศัยแรงทางฟิสิกส์ (**physical force**) เช่น แรงโน้มถ่วง แรงเหวี่ยง แรงหนีศูนย์กลาง เพื่อกำจัดหรือขจัดเอาสิ่งสกปรกออกจากน้ำเสีย โดยเฉพาะสิ่งสกปรกที่ไม่ละลายน้ำ ส่วนการบำบัดทางเคมีเป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการทางเคมี เพื่อทำปฏิกิริยากับสิ่งเจือปนในน้ำเสีย วิธีการนี้จะใช้สำหรับน้ำเสียที่มีส่วนประกอบอย่างใดอย่างหนึ่งดังต่อไปนี้ คือ ค่าพีเอชสูงหรือต่ำเกินไป มีสารพิษ โลหะหนักของแข็งแขวนลอยที่ตกตะกอนยาก ไขมันและน้ำมันที่ละลายน้ำ ไนโตรเจนหรือฟอสฟอรัสที่สูงเกินไป และมีเชื้อโรค

3.1.2 กระบวนการเมมเบรน สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธี คือ ออสโมซิสผันกลับ (**reverse osmosis**) อัลตราฟิวเตรชัน (**ultrafiltration**) และนาโนฟิวเตรชัน (**nanofiltration**) วิธีอัลตราฟิวเตรชันไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากมีขนาดรูเปิดของเยื่อกรองใหญ่ ไม่สามารถกรองอนุภาคของสีออกจากน้ำเสียได้ ส่วนอีก 2 วิธีสามารถแยกสีออกจากน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ เทคโนโลยีนี้สามารถบำบัดน้ำเสียปริมาณมากได้อย่างรวดเร็ว แต่เป็นระบบที่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและบำรุงรักษาอุปกรณ์สูง (กัลยา ศรีสุวรรณ, 2547; ศุภลักษณ์ อรรณพ, 2552)

3.1.3 การดูดซับ เป็นกระบวนการที่ใช้สารดูดซับ (**absorbent**) เช่น ถ่านกัมมันต์ จัปอนุภาคสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เช่น ซีโอดี ซี กลิ่น สารป้องกันกำจัดศัตรูพืช และสัตว์ไวภายใน (Murayama *et al.*, 2003; Aslan and Turkman, 2005; Santhy and Selvapathy, 2005) การดูดซับจะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อใช้บำบัดน้ำเสียปริมาณไม่มากในช่วงเวลาสั้นๆ กรณีที่น้ำเสียมีปริมาณมากวิธีนี้ไม่เหมาะสม เนื่องจากต้องใช้สารดูดซับปริมาณมาก ประกอบกับการคืนสภาพ (**regenerate**) สารดูดซับทำได้ยากและต้องใช้ต้นทุนสูง

3.1.4 การทำให้เป็นกลาง (**neutralization**) เป็นการปรับสภาพความเป็นกรดต่างหรือพีเอชให้อยู่ในสภาพเป็นกลาง เพื่อให้เกิดความเหมาะสมที่จะนำไปบำบัดด้วยกระบวนการบำบัดน้ำเสียในขั้นอื่นต่อไป โดยเฉพาะกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการทาง

ชีวภาพซึ่งต้องการน้ำเสี้ยวที่มีพีเอชอยู่ในช่วง **6.5-8.5** และก่อนที่จะปล่อยน้ำเสี้ยวที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้วลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ต้องปรับสภาพพีเอช อยู่ในช่วง **5-9** การปรับสภาพพีเอชของน้ำเสี้ยวให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับว่าสภาพพีเอชของน้ำเสี้ยวเป็นอย่างไร ถ้ามีพีเอชต่ำจะต้องปรับสภาพโดยใช้ด่าง (**base**) เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (**NaOH**) แคลเซียมออกไซด์ (**CaO**) หรือแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (**NH₄OH**) เป็นต้น และถ้าน้ำเสี้ยวมีพีเอชสูงก็ต้องการปรับให้เป็นกลางโดยใช้กรด เช่น กรดซัลฟิวริก (**H₂SO₄**) กรดไฮโดรคลอริก (**HCl**) หรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (**CO₂**) เป็นต้น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545)

3.1.5 การตกตะกอนโดยใช้สารเคมี (chemical coagulation หรือ precipitation) เป็นการใส่สารเคมี (**coagulant**) ช่วยตกตะกอนเพื่อเปลี่ยนสถานะทางกายภาพของแข็งแขวนลอยที่มีขนาดเล็กให้รวมกันมีขนาดใหญ่ขึ้น เรียกกระบวนการดังกล่าวว่า การรวมตะกอน (**flocculation**) เมื่อของแข็งขนาดเล็กรวมตัวกันขนาดใหญ่พอที่จะตกตะกอนได้ง่ายเรียกว่า ฟล็อก (**floc**) และเรียกกระบวนการดังกล่าวว่าการสร้างตะกอน (**coagulation**) หรืออาจจะเป็นการใส่สารเคมีเพื่อทำให้ของแข็งที่ละลาย (**dissolved solids**) ในน้ำเสี้ยวเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งหรือตะกอน (**precipitate**) ที่มีน้ำหนักมากพอที่จะตกตะกอนได้เรียกว่า การตกตะกอน (**precipitation**) วิธีนี้ต้องใช้สารเคมีในปริมาณสูงและก่อให้เกิดตะกอนปริมาณมาก ซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนต่อไป และใช้ในการบำบัดสีที่ไม่ละลายน้ำได้ดีเท่านั้น (ธนียา เกาศล และ จารุวรรณ จันโสศ, 2551)

3.1.6 กระบวนการไฟฟ้าเคมี (electro-coagulation) การบำบัดน้ำเสี้ยวโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี เป็นกระบวนการที่ไม่มีการใช้สารเคมี แต่อาศัยหลักการบำบัดน้ำเสี้ยวด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน หรือปฏิกิริยารีดอกซ์ ซึ่งเกิดขึ้นทั้งๆ ที่สารซึ่งทำปฏิกิริยากันมิได้สัมผัสกัน เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากสารที่เกิดออกซิเดชันไปยังสารที่เกิดรีดักชัน โดยผ่านตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม (Avsar *et al.*, 2007) โดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี มีกลไกการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ด้วยกระบวนการสร้างตะกอน (**coagulation**) การดูดซึม (**adsorption**) การตกตะกอน (**precipitation**) และการลอยตัว (**flotation**) (ปาริชาติ หมั่นสีทา, 2547; อมรภัค ชูทอง, 2551; Iran *et al.*, 2004; Ugurlu *et al.*, 2008)

3.1.7 กระบวนการออกซิเดชัน ได้แก่ chlorination ozonation UV/hydrogen peroxide Fenton's reagent และ photocatalysis เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูง โดยสีจะทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์ ทำให้พันธะเคมีของโมเลกุลสีแตกออกกลายเป็นโมเลกุลที่ไม่มีสี วิธีนี้สามารถใช้บำบัดน้ำเสี้ยวที่มีปริมาณมากได้และใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาน้อย แต่ใช้ต้นทุนในการติดตั้งอุปกรณ์และสารเคมีสูง (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545)

3.2 การบำบัดทางชีวภาพ

การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการทางชีวภาพ โดยใช้สิ่งมีชีวิตเป็นตัวช่วยในการเปลี่ยนสภาพของเสียในน้ำให้อยู่ในสภาพที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหาภาวะมลพิษต่อแหล่งน้ำตามธรรมชาติ ได้แก่ การเปลี่ยนให้กลายเป็นก๊าซ น้ำ และเซลล์ใหม่ของจุลินทรีย์ สิ่งมีชีวิตที่มีบทบาทในการช่วยเปลี่ยนสภาพสิ่งสกปรกในน้ำเสีย คือ กลุ่มจุลินทรีย์ที่สำคัญ เช่น พวกแบคทีเรีย โปรโตซัว สาหร่าย รา และ โรติเฟอร์ (Yu and Wen, 2005; Daneshvar *et al.*, 2007; Park *et al.*, 2007) โดยจุลินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญที่สุดในการบำบัดน้ำเสียคือแบคทีเรียพวก **chemoheterotrophs** ซึ่งจะเปลี่ยนอินทรีย์คาร์บอนที่ละลายอยู่ในน้ำเสียในรูปคอลลอยด์และสารละลายให้อยู่ในรูปก๊าซ และน้ำ และเซลล์ใหม่ของจุลินทรีย์ ที่สามารถนำกลับไปช่วยในการบำบัดน้ำเสียได้อีก (**returned or recycled sludge**) การย่อยสลายสารอินทรีย์อาจจะกระทำในสภาพที่มีก๊าซออกซิเจนอิสระละลายอยู่ในน้ำ (**aerobic conditions**) หรือไม่มีออกซิเจนอิสระละลายอยู่ในน้ำ (**anaerobic conditions**) (ศิริกัลยา สุวจิตทรานนท์ และคณะ, 2541) แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการทางชีวภาพดังกล่าวก็ไม่สามารถกำจัดสีหรือสารอินทรีย์ที่มีความสลับซับซ้อน ย่อยยากในน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มให้หมดไปได้ ยังคงมีปัญหาเรื่องสีในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

4 การบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

ในอดีตที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบัน โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มใช้วิธีการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบบำบัดทางชีวภาพ โดยระบบที่นิยมมี 2 ลักษณะคือ ระบบชุดบ่อไร้อากาศร่วมกับบ่อเติมอากาศและบ่อฝิ่ง ซึ่งมักเกิดปัญหาในเรื่องกลิ่นรุนแรง ใช้พื้นที่มาก ประสิทธิภาพการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ต่ำ และยังเป็น การเพิ่มปริมาณก๊าซเรือนกระจก ส่งผลทำให้เกิดภาวะโลกร้อน จึงมีการพัฒนาไปใช้ระบบบำบัดแบบ ไร้อากาศรูปแบบอื่น เช่น ระบบถังปฏิกรณ์ไร้ออกซิเจนแบบปิด (**closed anaerobic tank system**) ระบบบ่อหมักไร้อากาศ และระบบชั้นตะกอนลอยตัว เป็นต้น และในปัจจุบันหลายโรงงานใช้น้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่เกิดขึ้นมาใช้ประโยชน์ในลักษณะของการผลิตก๊าซชีวภาพ นอกจากจะเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานภายในโรงงาน และลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกแล้วยังได้ประโยชน์จากนโยบายกลไกการพัฒนาที่สะอาด (**clean development mechanism, CDM**) ซึ่งเป็นกลไกที่กำหนดขึ้นภายใต้พิธีสารเกียวโต (**Ministry of the Environment, 2009**) แต่อย่างไรก็ตาม น้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มหลังการบำบัดด้วยกระบวนการต่างๆ ที่กล่าวมา น้ำทิ้งสุดท้ายยังคงมีสีน้ำตาล ซึ่งเกิดจากแอนโทไซยานิน แคโรทีน เมลานอยดิน โพลีฟีนอล ลิกนิน และแทนนิน (Hartley, 1977; Hwang *et al.*, 1978; Barker and

Worgan, 1981) ทำให้ไม่สามารถปล่อยทิ้งออกสู่อากาศหรือแหล่งน้ำธรรมชาติได้ ที่ผ่านมาทางโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มแก้ไข้ปัญหาด้วยการนำน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสกัดไปใช้รดสวนปาล์ม แต่จากรายงานการศึกษาพบว่าการใช้น้ำเสียในพื้นที่การเกษตร และการใช้ระบบชุดบ่อไร้อากาศร่วมกับบ่อเติมอากาศและบ่อฝิ่ง ส่งผลกระทบเชิงลบต่อสิ่งแวดล้อม 3 ด้าน คือ ผลกระทบทางกายภาพ เคมี ชีวภาพของดิน การยับยั้งการดูดซึมธาตุอาหารบางกลุ่มที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช และเกิดการรั่วซึมของน้ำเสียดังกล่าวลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) ผลกระทบทางกายภาพ เคมี ชีวภาพของดิน

ก. ลักษณะทางเคมีของดิน จากรายงานการศึกษาพบว่าการใช้ระบบบ่อฝิ่งในการบำบัดน้ำเสียเป็นเวลานานทำให้ค่าพีเอช และค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity) ของดินเปลี่ยนแปลงไป และการนำน้ำเสียจากการสกัดน้ำมันมะกอกไปใช้ในพื้นที่ย่อยสลายติดต่อกันเป็นระยะเวลานานทำให้ค่าพีเอชของดินลดลงเหลือ 5.90-6.20 จากพีเอชเดิมคือ 6.40-6.90 (Serio *et al.*, 2008) โดยพีเอชของน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดมีค่าประมาณ 6.80 (Jarboui *et al.*, 2008) นั่นคือค่าความเป็นกรดในน้ำเสียจากการสกัดน้ำมันมะกอกถูกดูดซับไว้ภายในดิน จึงส่งผลให้พีเอชของดินลดลง ขณะที่ค่าการนำไฟฟ้าหรืออัตราการดูดซับโซเดียม โพแทสเซียม (sodium/potassium adsorption ratio, SAR and PAR) ของดินเพิ่มขึ้น จากรายงานการศึกษาพบว่าดินที่ผ่านการบำบัดน้ำเสียจากการสกัดน้ำมันมะกอกมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็นเท่าตัว จากค่าเดิมคือ 0.07 มิลลิซีเมนต่อเซนติเมตร เป็น 0.13-0.19 มิลลิซีเมนต่อเซนติเมตร (Serio *et al.*, 2008) ดังนั้นหากใช้น้ำเสียจากการสกัดน้ำมันมะกอกมากกว่า 360 ลูกบาศก์เมตรต่อ 6.25 ไร่ต่อปี ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืชลดลง (Sierra *et al.*, 2007) เนื่องจากทำให้พืชลดการดูดน้ำ ยับยั้งการดูดใช้โพแทสเซียมและแคลเซียม นอกจากนี้ยังทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์และอัตราการสังเคราะห์แสงลดลง และทำให้โครงสร้างของดินไม่ดี น้ำซึมผ่านได้ช้า การถ่ายเทอากาศลดลง (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2552)

ข. ยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ในดินบางกลุ่ม การลดลงของค่าพีเอชในดินเนื่องจากการใช้น้ำเสียจากการสกัดน้ำมันมะกอก ส่งผลให้เกิดการยับยั้งการทำงานของกลุ่มจุลินทรีย์ในวัฏจักรไนโตรเจนในดิน (nitrogen cycle) ได้แก่ แอมโมนิไฟอิงแบคทีเรีย (ammonifying bacteria) ไนโตรโซโมนาส (nitrosomonas) และไนโตรแบคเตอร์ (nitrobacter) (Serio *et al.*, 2008) และการลดจำนวนของกลุ่มแบคทีเรีย *Bacillus sp.* กลุ่มเชื้อรา *Scopulariopsis brevicaulis* เป็นต้น ซึ่งช่วยในการย่อยสลายดินให้เป็นปุ๋ยแก่พืช (Paredes *et al.*, 1987; Tardioli *et al.*, 1997)

2) ยับยั้งการดูดซับหรือการแลกเปลี่ยนธาตุอาหารในดินที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช เมื่อทำการศึกษาปริมาณธาตุอาหารต่างๆ ในน้ำเสียจากการสกัดน้ำมันปาล์ม (คิดเป็น

เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง) พบว่า มีโพแทสเซียม (K) สูงสุด คือ 3.09-4.15 รองลงมา คือ แมกนีเซียม (Mg) 0.01-2.41 ไนโตรเจน (N) 1.60-2.08 แคลเซียม (Ca) 0.21-0.48 และฟอสฟอรัส (P) 0.28-0.42 (Hwang *et al.*, 1978 อ้างโดย ปรีชา มุณีศรี, 2539) จึงนำไปสู่การศึกษาวิจัยเพื่อนำน้ำเสียจากการสกัดน้ำมันมะกอกหรือน้ำมันปาล์มมาใช้ในพื้นที่เกษตรกรรมพบว่า ธาตุอาหารในน้ำเสียสามารถใช้เป็นปุ๋ยให้กับดินได้ (Senio *et al.*, 2008) หากใช้ในปริมาณที่ควบคุมไว้ไม่เกิน 180 ลูกบาศก์เมตรต่อ 6.25 ไร่ต่อปี นั่นคือโรงงานกรณีศึกษาซึ่งมีการผลิตประมาณ 300 ตันทะเลลายปาล์มสดต่อวัน (กำลังการผลิตของเครื่องจักร 45 ตันทะเลลายปาล์มสดต่อชั่วโมง) จะต้องมีพื้นที่สวนปาล์มซึ่งอยู่ใกล้กับแหล่งเก็บกักน้ำเสียหรือพื้นที่ที่ห่างไกลออกไปแต่ทั้งนี้จะมีค่าใช้จ่ายด้านการขนส่งอย่างน้อย 2,718 ไร่ เพื่อรองรับน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต (คำนวณจาก (300 ตันทะเลลายปาล์มสดต่อวัน x 300 วันต่อปี x 0.87 ลูกบาศก์เมตรต่อตันทะเลลายปาล์มสด)/28.8 ลูกบาศก์เมตรต่อไร่ต่อปี) แต่ถ้าปริมาณการใช้น้ำเสียจากการสกัดน้ำมันมะกอกมากกว่า 360 ลูกบาศก์เมตรต่อ 6.25 ไร่ต่อปี มีผลกระทบต่อพืช (Sierra *et al.*, 2007) เนื่องจากการใช้น้ำเสียมีสภาพความเป็นกรดและมีความเข้มข้นของโพแทสเซียมสูง ซึ่งมีผลยับยั้งการดูดซึมแมกนีเซียมทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์และอัตราการสังเคราะห์แสงลดลง การเจริญเติบโตของพืชหยุดชะงักและผลผลิตของพืชลดลง (ยงยุทธ โอสถสภา, 2546)

3) เกิดการปนเปื้อนของสารโพลีฟีนอลจากน้ำเสียการสกัดน้ำมันมะกอกลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้น ดังนั้นการนำน้ำใต้ดินมาใช้โดยตรงอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพได้ (Spandre and Dellomonaco, 1996; Jarboui *et al.*, 2008)

5. การบำบัดสีในน้ำเสีย

5.1 การรวมตะกอนด้วยสารเคมี (chemical coagulation)

เป็นกระบวนการกำจัดสีที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยมักใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรด ด่าง และสามารถใช้เป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้น ก่อนกระบวนการบำบัดทางชีววิทยา สารรวมตะกอนที่นิยมใช้คือ ปูนขาว (calcium oxide) สารส้ม (alum) และเฟอร์รัสคลอไรด์ (FeCl₃) หรือเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO₄) เป็นต้น การกำจัดสีโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยสารส้มเป็นผลทำให้โมเลกุลของสีถูกดูดซับบนอนุภาคของสารส้ม ทำให้เกิดตะกอนของสีจมตัวลงในน้ำทิ้ง จากนั้นทำให้น้ำทิ้งเป็นกลางก่อนปล่อยลงท่อน้ำทิ้ง เทคนิคนี้สามารถกำจัดสีออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากน้ำทิ้งจะมีลักษณะแตกต่างกันไปตามชนิดของโมเลกุลสีย้อม ถ้าสีย้อมมีโมเลกุลเล็ก เช่น สีประเภทสีย้อมกรด (acid dye) สีย้อมแอคทีฟ (reactive dye) ซึ่งละลายน้ำได้ดี การเกิด

ตะกอนของสีโดยใช้สารส้มจะไม่สามารถทำได้ ดังนั้นต้องปรับปรุงประสิทธิภาพของปฏิบัติการรวมตะกอนให้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ โดยใช้สารช่วยให้เกิดการรวมตัวของตะกอน เช่น โพลีอิเล็กโทรไลต์ (**polyelectrolyte**) ซึ่งต้องใช้ในปริมาณที่เหมาะสม เนื่องจากความเข้มข้นของโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้ง จะส่งผลเสียต่อกระบวนการไนตริฟิเคชัน (**nitrification**)

5.2 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (activated carbon)

การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์เป็นกระบวนการดูดซับที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายสามารถใช้กำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่มีข้อจำกัดที่น้ำหนักโมเลกุลของของเสียที่จะถูกดูดซับต้องมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 400 ซึ่งโดยทั่วไปน้ำหนักโมเลกุลของของเสียในอุตสาหกรรมสีจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 400 และสูงกว่า 1200 ดังนั้นก่อนการกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ จะต้องมีการปรับขนาดโมเลกุลของของเสียให้เหมาะสมก่อน โดยการไฮโดรไลซิส (**hydrolysis**) ด้วยปูนขาว ซึ่งต้องใช้ปูนขาวปริมาณมากในการปรับพีเอชของสารละลายให้อยู่ในช่วง 10-11 ซึ่งส่งผลให้น้ำทิ้งมีค่าพีเอชสูง ดังนั้นต้องมีการปรับพีเอชให้เป็นกลางก่อนปล่อยทิ้ง โดยการกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้โมเลกุลของสีดูดติดบนผิวของถ่านกัมมันต์ ดังนั้นประสิทธิภาพการดูดซับสีจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์ เพราะพื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้นนั่นเอง แต่การทำให้โมเลกุลของสีหลุดออกจากผิวของถ่านนั้นทำได้ยาก ต้นทุนการนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่จึงสูงมาก เพราะต้องผ่านการเผาและการกำจัดกากซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง รวมถึงค่าใช้จ่ายในส่วนที่มีการปรับพีเอช ก่อนปล่อยออกจากโรงงานด้วย ทำให้เทคนิคนี้ไม่เป็นที่นิยมแม้ประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงก็ตาม

5.3 เทคโนโลยีเมมเบรน (membrane technology)

กระบวนการกำจัดสีด้วยเมมเบรน (**membrane**) สามารถใช้ในการกำจัดสี นำเอาสารเคมีที่ใช้ในการย้อมสี และสีย้อมบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ได้ แบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังนี้ (กัลยา ศรีสุวรรณ, 2547)

5.3.1 ไมโครฟิวเตรชัน (microfiltration)

ใช้ในการกำจัดสีย้อมที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ (**colloid**) ที่ถูกปล่อยออกจากหม้อย้อมหลังจากผ่านการล้างโดยใช้กำจัดสีประเภทสปีดเดอร์ส (**disperse dye**) ที่ใช้ย้อมเส้นใยประเภทโพลีเอสเตอร์ (**polyester**) และสีย้อมประเภทสัลเฟอร์ (**sulphur dye**) สีเวต (**vat dye**) และสีอะโซอิก (**azoic dye**) ที่ใช้ย้อมเส้นใยฝ้าย และวิสคอส (**viscose**) สปีดเดอร์สเมื่อผ่านกระบวนการไมโครฟิวเตรชัน แล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

5.3.2 ออสโมซิสผันกลับ (reverse osmosis)

เหมาะสำหรับใช้กำจัดไอออนสีย้อม และโมเลกุลของสีย้อมที่มีขนาดใหญ่ เป็นกระบวนการที่จะต้องผ่านเยื่อแผ่น 2 ชั้นตอน คือเยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำกร่อย (brackish water) และเยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำทะเล (sea water) ซึ่งเยื่อแผ่นแรกจะสามารถกำจัดสีได้ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้นของสีที่เหลือจะถูกส่งผ่านไปยังเยื่อแผ่นที่สอง และสามารถกำจัดสีได้ถึง 94 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามสีย้อมที่ใช้ย้อมเส้นใยประเภทฝ้ายไม่สามารถใช้กระบวนการนี้ได้

5.3.3 ไดนามิกเมมเบรน (dynamic membrane)

ใช้กำจัดสีย้อมที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่โดยใช้ตัวรองรับที่มีรูพรุน เช่น เหล็ก สแตนเลส วัสดุคาร์บอน หรือเซรามิก ซึ่งต่อมาได้พัฒนามาใช้ hydrous zirconium(IV) oxide และกรดโพลีอะคริลิก (Zr/PAA) เพื่อปรับปรุงขนาดของรูพรุน กระบวนการนี้สามารถกำจัดสีได้มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์

5.4 นาโนฟิวเตรชัน (nanofiltration)

ใช้กำจัดสีย้อมประเภทสีรีแอคทีฟที่ใช้ย้อมเส้นใยฝ้าย เนื่องจากการย้อมสีรีแอคทีฟต้องใช้สารอิเล็กโทรไลต์ช่วยในการย้อม เช่น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมซัลเฟต (Na₂SO₄) ซึ่งกระบวนการนี้สามารถแยกสารพวกอิเล็กโทรไลต์เหล่านี้ออกมาและนำกลับมาใช้ได้ด้วย

5.5 กระบวนการออกซิเดชันทางเคมี (chemical oxidation)

โดยทั่วไปโมเลกุลสีย้อมจะมีหมู่โครโมฟอร์ (chromophore) ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์เป็นพวกวงแหวนกับพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยว ดังนั้นการที่จะทำลายโมเลกุลของสีนั้น ต้องทำลายหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยวก่อน ซึ่งการบำบัดทางชีววิทยาไม่สามารถทำได้ กระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีออกซิเดชันทางเคมี เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยการใช้สารเคมี เป็นปัจจัยสำคัญในการออกซิไดซ์สารประกอบต่างๆ ในน้ำเสีย ซึ่งกระบวนการนี้สามารถใช้งานได้หลายจุดประสงค์ เช่น

- การกำจัดสารเคมีเป็นพิษที่มีความเข้มข้นต่ำในน้ำบาดาล
- การบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงแต่ปริมาณน้อย เพื่อลดความเป็นพิษ
- การบำบัดน้ำเสียที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยากให้สามารถถูกย่อยได้ง่ายขึ้น
- ลดความเป็นพิษของน้ำเสียเพื่อให้สามารถบำบัดทางชีวภาพได้
- เพื่อลดเวลาที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

สารเคมีที่ใช้เป็นตัวออกซิเดนต์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ

- โอโซน (O_3) (กุนูรหายน ยามิรุเต็ง, 2551)
- ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)
- คลอรีน (Cl_2)
- โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$)
- สารเคมีเฟนตัน (Fenton's reagent)

ในการเลือกใช้สารเคมีชนิดใดเป็นตัวออกซิเดนต์ สำหรับการบำบัดน้ำเสียนั้น จะต้องคำนึงถึงชนิดและปริมาณของน้ำเสียที่เกิดขึ้น ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้สำหรับการบำบัดน้ำเสียชนิดนั้นๆ ประสิทธิภาพของสารเคมีที่ใช้ เทคโนโลยีเกี่ยวกับการใช้สารเคมีนั้นว่ายุ่งยากเพียงใด สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาของออกซิเดนต์นั้นๆ ความสามารถในการบำบัด ผลผลิตที่ได้จากการออกซิไดซ์ ตลอดจนความปลอดภัยในการใช้สารเคมีนั้น และราคาโดยรวมว่าเหมาะสมหรือไม่เพื่อให้ได้การบำบัดน้ำเสียที่ใช้ต้นทุนต่ำแต่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง (กัณฑ์มาศ สุทธิเรืองวงศ์, 2538)

6 ปฏิกริยาเฟนตัน

ปฏิกริยาเฟนตัน เป็นปฏิกริยาที่ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1894 (Dutta *et al*, 2001) จนกระทั่งถึงปี 1930 ได้มีการศึกษากลไกของปฏิกริยานี้อย่างสมบูรณ์ และได้นำมาใช้ในอุตสาหกรรมบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งมีสารพิษประเภทสารประกอบอินทรีย์ปะปนอยู่ เช่น ฟีนอล ฟอรัลดีไฮด์ สารประกอบอะโรมาติก บี.ที.อี.เอ็กซ์ รวมทั้งสารเคมีต่างๆ ที่ได้มาจากวัสดุที่ย้อม ยาฆ่าแมลง สารกันบูด พลาสติก และยาง รวมทั้งกระบวนการนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับพวกน้ำเสีย ตะกอนหรือดินที่มีสิ่งปนเปื้อน โดยมีผลดังนี้ (US Peroxide, 2006)

- ทำลายสารอินทรีย์ที่เป็นมลพิษ (organic pollutant destruction)
- ช่วยเพิ่มสัดส่วนสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradability improvement)
- ลดปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของบีโอดีหรือซีโอดี (BOD or COD removal)
- ลดกลิ่นและสี (odor and color removal)

ปฏิกริยานี้มีความสามารถในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยาก อาจจนถึงขั้นการกำจัดอย่างสมบูรณ์ (mineralization) คือ เปลี่ยนรูปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ (Deng and Englehardt, 2006) นอกจากนี้กระบวนการเฟนตันยังเกิด

กระบวนการสร้างและรวมตะกอน (**coagulation**) ซึ่งช่วยในการกำจัดสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของคอลลอยด์ (**colloids**) ได้อีกด้วย (Bigda, 1995)

6.1 กลไกของปฏิกิริยาเฟนตัน

ปฏิกิริยาเฟนตัน คือ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วของสารประกอบอินทรีย์ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่มีไอออนบวกของเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยอาศัยอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (**hydroxyl radicals; OH^\bullet**) ที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาเป็นตัวกลางสำคัญ ซึ่งอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลนี้มีค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชันสูงเป็นอันดับสองรองจากฟลูออรีน (**fluorine**) โดยสูงกว่าคลอรีนถึง 200 เปอร์เซ็นต์ และสูงกว่าโอโซน 25 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชันแสดงถึงความสามารถในการรับอิเล็กตรอน ถ้าตัวออกซิไดซ์ที่แรงจะรับอิเล็กตรอนได้ง่ายมาก คือ มีค่าศักย์รีดอกซ์เป็นบวกสูงดังเช่น ฟลูออรีน (**fluorine**) (เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์, 2546) ลำดับค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชันแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าศักย์รีดอกซ์ของสารออกซิไดซ์ต่างๆ

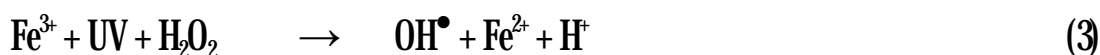
Oxidizing agent	Redox potential (volts)
Fluorine	3.06
Hydroxyl radical	2.80
Ozone	2.08
Hydrogen peroxide	1.78
Hypochlorite	1.49
Chlorine	1.36
Chlorine dioxide	1.27
Oxygen	1.23

ที่มา: Zhou and Smith (2002); Metcalf and Eddy (2003)

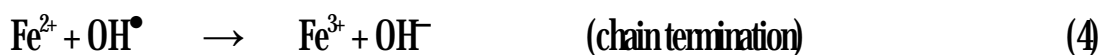
กระบวนการเฟนตันเป็นการทำปฏิกิริยาเพื่อเร่งให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH^\bullet) ในสภาวะกรดดังสมการ (1) (Maletzky and Bauer, 1998; Neyens and Baeyens, 2003) โดยมีขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้



เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) จะเป็นตัวเร่งให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH^\bullet) ซึ่งจะทำปฏิกิริยาแบบต่อเนื่องในสารละลาย โดยอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลจะเกิดเพิ่มมากขึ้นเมื่อให้แสงยูวี (Ghaly *et al.*, 2001) ดังสมการ (2) ซึ่งเรียกการใช้แสงยูวีในกระบวนการเฟนตันว่าโฟโตเฟนตัน (photo-Fenton) ดังสมการ (3)



อย่างไรก็ตามอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลสามารถที่จะถูกยับยั้งโดยเฟอร์รัสไอออนเช่นกัน โดยเฟอร์รัสไอออนจะถูกออกซิไดซ์ไปเป็นเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+})

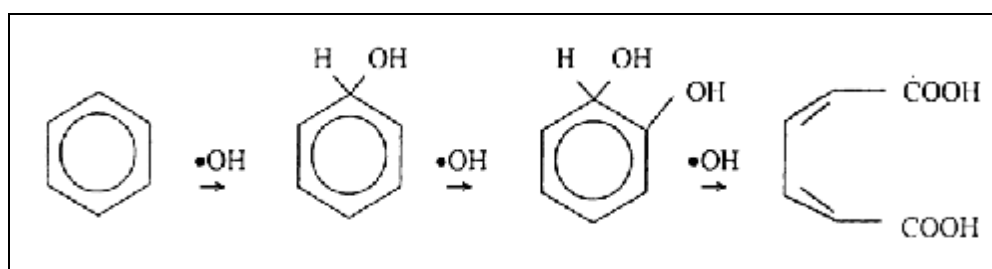


ทั้งอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล และเฟอร์ริกไอออนสามารถเป็นตัวเร่งให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดการสลายตัวเป็นน้ำ และออกซิเจนได้ (Walling 1975) ดังแสดงในสมการ (5)-(9)



จากสมการ (9) จะเห็นว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวยับยั้งอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH^\bullet scavenger) ที่เกิดจากปฏิกิริยาในสมการ (1) แต่จะเกิดอนุมูลอิสระไฮโดรเปอร์ดรอกซิลตัวใหม่ (**hydroperoxyl; HO_2^\bullet**) ซึ่งมีความรุนแรงน้อยกว่า

การออกซิไดซ์สารอินทรีย์โดยอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล เป็นการดึงอิเล็กตรอนของสารอินทรีย์นั้นออกมา ทำให้สารอินทรีย์นั้นเปลี่ยนรูปเป็นอนุมูลอิสระสารอินทรีย์ (R^\bullet) และอนุมูลอิสระสารอินทรีย์นี้ยังสามารถไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบต่อเนื่องได้อีก



ภาพที่ 4 การสลายพันธะโครงสร้างสารด้วยอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล
ที่มา: Neyens and Baeyens (2003)

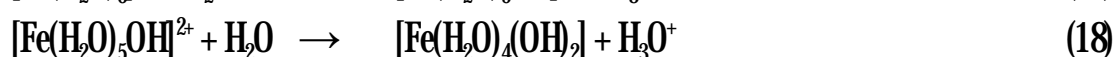
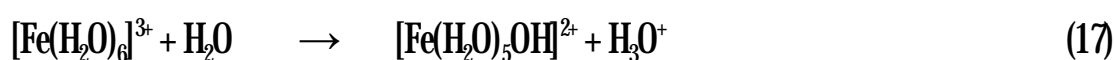
ในภาพที่ 4 อนุมูลอิสระไฮดรอกซิลทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์ **aromatic ring** โดยการสลายพันธะ (**breakdown**) โครงสร้างเป็น **heterocyclic ring** ทั้งนี้อนุมูลอิสระไฮดรอกซิลสามารถสลายพันธะสารประกอบอินทรีย์โครงสร้างวงแหวนให้อยู่ในรูปของพันธะคู่ และพันธะเดี่ยวได้ตามลำดับ (Pignatello *et al.*, 2006)

อนุมูลอิสระสารอินทรีย์จากสมการ (10) อาจถูกออกซิไดซ์โดยเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) จนเฟอร์ริกไอออนเปลี่ยนรูปเป็นเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) หรือสารอินทรีย์ที่มีสองขั้ว (**dimerised**) (Neyens and Baeyens, 2003)

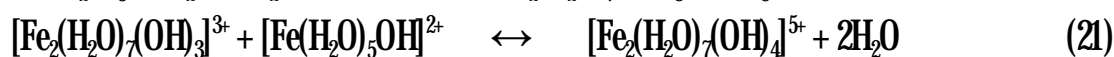


ปฏิกิริยาในสมการ (1), (4), (10) และ (14) แสดงให้เห็นว่าเป็นปฏิกิริยาแบบต่อเนื่องที่เกิดจากกระบวนการเฟนตัน

เฟอร์ริกไอออนที่เกิดขึ้นยังสามารถทำปฏิกิริยากับอนุมูลไฮดรอกไซด์ แล้วเปลี่ยนรูปเป็น **ferric hydroxo complexes** (Neyens and Baeyens, 2003)



ที่สภาวะพีเอช 3 และ 7 คอมเพล็กซ์ที่เกิดข้างบนจะเปลี่ยนรูปเป็น



ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดกระบวนการสร้างและรวมตะกอนขึ้นในกระบวนการเฟนตัน ทำให้ของแข็งแขวนลอยถูกจับและตกตะกอน

นอกจากนี้ จะเกิดการแข่งขันในการทำปฏิกิริยา (**competition reaction**) ระหว่างปฏิกิริยาในสมการ (14) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาสุดท้ายของปฏิกิริยาแบบต่อเนื่อง (เช่นเดียวกับปฏิกิริยาในสมการ (4)) กับปฏิกิริยาในสมการ (10) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการแพร่ (**propagation reaction**) เป็นการแข่งกันระหว่างอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลกับเฟอร์ริกไอออน กลุ่มของสารอินทรีย์ (RH) และเฟอร์ริกไอออน ทำให้เกิดการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ไม่เกิดประโยชน์ และยังเป็นกำกวมการเกิดสารประกอบอินทรีย์ไฮดรอกซิเลต (**hydroxylate (oxidised) organic compounds**)

ผลิตภัณฑ์จากการออกซิเดชันที่ต้องการในการบำบัดน้ำเสีย คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพราะหมายถึง สารประกอบอินทรีย์ได้ถูกเปลี่ยนรูปจนหมดสภาพการเป็นสารพิษ และในการตรวจสอบคุณสมบัติของน้ำเสียก่อนการปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ ด้วยการตรวจสอบ

ค่าซีโอดีหรือทีโอซี (**Total Organic Carbon**) ถ้าผลที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาเป็น คาร์บอนไดออกไซด์ จะทำให้ค่าซีโอดีหรือทีโอซีที่ตรวจสอบหลังปฏิกิริยามีค่าน้อยลง เป็นผลให้น้ำเสียที่ผ่านการทำปฏิกิริยาแล้วสามารถปล่อยออกสู่แหล่งน้ำได้ (ลือพงศ์ แก้วศรีจันทร์ และคณะ, 2548)

6.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเฟนตัน

6.2.1 ผลของความเข้มข้นไอออนเหล็ก (effect of iron ion concentration)

อนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเกิดขึ้นน้อยมาก หากในปฏิกิริยานั้นไม่มีไอออนของเหล็ก เช่น การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในน้ำเสียที่มีฟีนอลอยู่โดยที่ไม่มี การเติมไอออนของเหล็กลงไป แต่หากมีการเติมไอออนของเหล็กลงไปก็จะเร่งให้เกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลมากขึ้น จนถึงที่ความเข้มข้นของเหล็กค่าหนึ่งปฏิกิริยาจะไม่เพิ่มขึ้น

1) ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนที่จุดเริ่มต้น **0.05-0.27** มิลลิโมลาร์ เป็นความเข้มข้นต่ำสุดที่จะกระตุ้นให้ปฏิกิริยาไปข้างหน้าในระยะเวลาที่เหมาะสมโดยไม่คำนึงถึงความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์

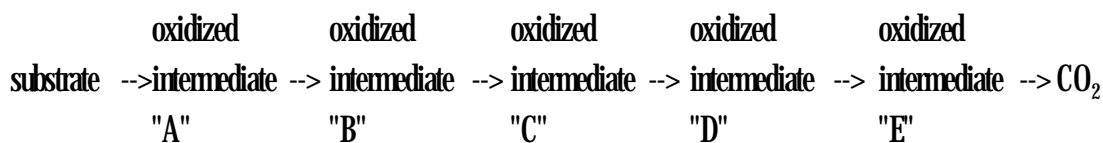
2) สัดส่วนคงที่ของไอออนเหล็กต่อสารที่เข้าทำปฏิกิริยา (**substrate**) เมื่ออยู่สูงกว่าความเข้มข้นต่ำสุดที่กระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา คือ 1 ส่วนของไอออนเหล็กต่อ 10-50 ส่วนของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาซึ่งจะให้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ

3) สารประกอบของเหล็กที่อิมตัวเป็นสมบัติของคีเลต (**chelate**) ซึ่งอยู่ในน้ำเสีย ดังนั้นจึงไม่ควรจะแยกไอออนเหล็กออกไป เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสร้างอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ทั้งนี้สัดส่วนโดยน้ำหนักของไอออนเหล็กต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ควรอยู่ในช่วง **1:5-25**

จากการศึกษาของ **Kusic** และคณะ (2007) พบว่า อัตราส่วนโดยน้ำหนักของไอออนเหล็กต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม และทำให้ปฏิกิริยามีประสิทธิภาพในการกำจัดสี และสารอินทรีย์ได้สูงสุดคือ **0.05** ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ **Neamtu** และคณะ (2003) และ **Meriç** และคณะ (2004)

6.2.2 ผลของความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (effect of H_2O_2 concentration)

การใช้อนุมูลอิสระไฮดรอกซิลในการออกซิไดซ์สารประกอบอินทรีย์เพื่อให้ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีความสำคัญมาก ซึ่งสามารถนำมาเขียนปฏิกิริยาสำหรับการบำบัดน้ำเสียในแต่ละชนิด ได้ดังนี้



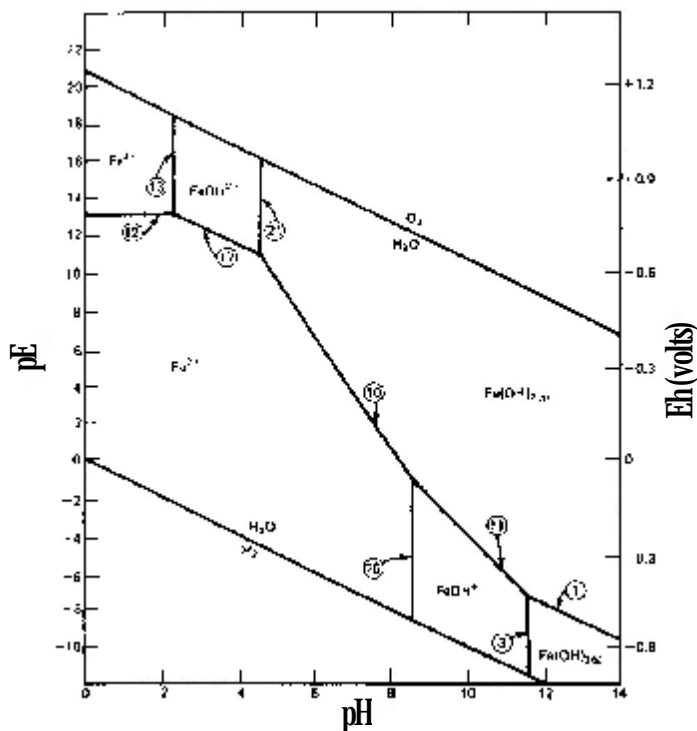
การเปลี่ยนแปลงในแต่ละลำดับที่ต่อเนื่องกันจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวเอง โดยขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์นั้นๆ ตัวอย่างเช่นในกรณีของสารประกอบฟีนอลจะมีสารที่ไม่เสถียร (*intermediate*) นั่นก็คือ ควิโนน (*quinones*) ซึ่งเป็นสารที่ขัดขวางการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นจึงต้องเพิ่มปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าได้มากขึ้นเพื่อให้เลยจุดที่เกิดเป็นสารที่ไม่เสถียร ซึ่งเราจะพบได้ในการบำบัดเบื้องต้นของสารประกอบอินทรีย์ที่มีความซับซ้อนเพื่อช่วยลดความเป็นพิษ ถ้ามีการเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำให้ค่าซีโอดีลดลง ความเป็นพิษอาจจะลดลงได้น้อยหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งถึงจุดที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ค่าหนึ่ง ซึ่งถ้าเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงไปอีกจะทำให้ความเป็นพิษลดลงอย่างรวดเร็ว

6.2.3 ผลของอุณหภูมิ (effect of temperature)

อัตราการเกิดปฏิกิริยาเฟนตันจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนเมื่ออุณหภูมिन้อยกว่า 20 องศาเซลเซียส แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิต่ำที่เพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 40-50 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะค่อยๆ ลดลง เนื่องจากจะมีการเร่งให้เกิดการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปเป็นออกซิเจนและน้ำ ในการประยุกต์ใช้ปฏิกิริยาเฟนตันจึงมักจะใช้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 20-40 องศาเซลเซียส (Guedes *et al.*, 2003; Malik and Saha, 2003; Gulkaya *et al.*, 2006; Alaton and Teksoy, 2007; Xu *et al.*, 2007)

6.2.4 ผลของพีเอช (effect of pH)

ค่าพีเอชเหมาะสมของปฏิกิริยาเฟนตันอยู่ในช่วง 2-4 เนื่องจากเหล็กอยู่ในรูปของสารละลาย (Barb *et al.*, 1951; Lin and Lo, 1997; Gulkaya *et al.*, 2006; Lucas and Peres, 2006; Bautista *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2007; Wongniramaikul *et al.*, 2007; Kallel *et al.*, 2009) ทั้งนี้ที่พีเอชมากกว่า 3.0 เหล็กเกิดการตกตะกอน และทำให้เหล็กอยู่ในรูปเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ (Fe(OH)₃) ซึ่งไม่สามารถใช้เป็นตัวเร่งในการเกิดปฏิกิริยาเฟนตันได้ (Faust and Hoigne, 1990; Neamtu *et al.*, 2003; Papadopoulos *et al.*, 2007) ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและพีอี (pE) กับสถานะของเหล็กในน้ำ
ที่มา: Snoeyink and Jenkins (1980)

6.2.5 ผลของเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (effect of reaction time)

เวลาที่ต้องการทำให้เกิดปฏิกิริยาเฟนตันที่สมบูรณ์นั้นจะขึ้นอยู่กับค่าตัวแปรต่างๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยส่วนใหญ่จะเน้นในเรื่องของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและความเข้มข้นของน้ำเสียก่อนบำบัด สำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟินอลเวลาของปฏิกิริยาควรอยู่ระหว่าง 30-60 นาที ส่วนน้ำเสียที่มีความเข้มข้นมากหรือมีสารที่มีความซับซ้อนมากในการเกิดปฏิกิริยาจึงอาจใช้เวลาหลายชั่วโมง สำหรับในกรณีนี้การเติมไอออนของเหล็กและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ละชั้นๆ จะมีประสิทธิภาพมากกว่าการเติมไอออนของเหล็กและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยปริมาณมากๆ ที่จุดเริ่มต้นของปฏิกิริยาเพียงครั้งเดียว (Lee and Shoda, 2008)

6.3 จลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยา (kinetic reaction)

อัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสาร ที่เปลี่ยนแปลงต่อหน่วยเวลา ซึ่งปฏิกิริยาเคมีทั้งหลายมีอัตราเร็วแตกต่างกัน มีตั้งแต่ปฏิกิริยาที่เกิดช้ามากจนสังเกตไม่ได้ (ประภาณี เกษมศรี ณ อยุธยา และคณะ, 2526) เช่น การเกิดสนิมของเหล็ก (กฤษณา ชูติมา, 2540) จนถึงปฏิกิริยาที่ดำเนินไปอย่างรวดเร็ว เช่น การระเบิด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 4

ประการ คือ ชนิดของตัวทำปฏิกิริยา ความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยา อุณหภูมิ และตัวเร่งปฏิกิริยา (สุรชาติพิศ ศิริไพศาลพิพัฒน์ และคณะ, 2541) นอกจากนี้แต่ละปฏิกิริยาอาจมีอันดับของปฏิกิริยาแตกต่างกันด้วย จากรายงานของ Neamtu และคณะ (2003) Bali และคณะ (2004) และ Dong และคณะ (2007) พบว่าปฏิกิริยาในการกำจัดสีจัดเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (first-order reaction) ส่วนปฏิกิริยาในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของทีโอซีจัดเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 2 (second-order reaction) (Guedes et al., 2003; Burbano et al., 2005)

การศึกษากำจัดสีในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเฟนตันรีเอเจนต์ในระยะเวลาที่ผ่านมา มีผู้ทำการศึกษา น้อยมาก แต่มีการศึกษากำจัดสีในน้ำเสียและน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมและสิ่งทออย่างแพร่หลาย โดยส่วนใหญ่พบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การบำบัดน้ำเสียและน้ำทิ้งด้วยเฟนตันรีเอเจนต์

ตัวอย่างน้ำ	ผลการศึกษา	อ้างอิง
น้ำเสียสีย้อม reactive blue 15	เฟนตันรีเอเจนต์ที่มีอัตราส่วนโดยโมลไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเฟอร์รัสไอออน ประมาณ 20:1 โดยใช้เฟอร์รัสไอออน 0.02 โมลต่อลิตร ที่พีเอช 3.05 อุณหภูมิ 37.3 องศาเซลเซียส สามารถลดสีได้มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์	Flaherty and Huang 1992 อ้างโดย สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2544
น้ำเสียโรงงานยางพารา	ศึกษากำจัดสีน้ำเสียจากโรงงานยางพาราพบว่า ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1815 มิลลิโมลาร์ เฟอร์รัสไอออน 1.25 มิลลิโมลาร์ พีเอช 3 สามารถลด diisobutyl phthalate (DIBP) และซีโอดีได้ 90 และ 48 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ	วรวิทย์ วงศ์นิรามัยกุล , 2549
น้ำเสียสังเคราะห์	ศึกษากำจัดสี และซีโอดีด้วยกระบวนการออกซิเดชันแบบ photo-Fenton และ UV/H ₂ O ₂ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากันคือ 5 มิลลิโมลาร์ และความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 0.25 มิลลิโมลาร์ สำหรับ photo-Fenton พบว่าที่เวลา 15 นาที กระบวนการออกซิเดชันแบบ photo-Fenton สามารถกำจัดซีโอดีและสีได้ 81.34 และ 97.53 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ UV/H ₂ O ₂ สามารถกำจัดซีโอดีและสีได้เพียง 47.77 และ 28.62 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ	Neamtu et al., 2003

ตารางที่ 5 (ต่อ)

ตัวอย่างน้ำ	ผลการศึกษา	อ้างอิง
น้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม	ศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการออกซิเดชัน พบว่าที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 882 มิลลิโมลาร์ และเฟอร์รัสไอออน 3.29 มิลลิโมลาร์ และพีเอช 5 มีความสามารถในการกำจัดสีและซีไอดี ได้ 94 และ 96 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ	<i>Azbar et al., 2004</i>
น้ำเสียสังเคราะห์	จากการศึกษาการบำบัดสี reactive black 5 ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าที่พีเอช 3 อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 11.76 และ 0.66 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ สามารถลดค่าซีไอดีและสี ได้ 71 และ 99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ	<i>Meriç et al., 2004</i>
น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตขนมปังด้วยยีสต์	ศึกษาอัตราส่วนเฟนตันรีเอเจนต์ พีเอช และระยะเวลาการบำบัด พบว่าที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 23.53 มิลลิโมลาร์ และเฟอร์รัสไอออน 21.43 มิลลิโมลาร์ พีเอช 4 ระยะเวลาการบำบัด 20 นาที สามารถกำจัดซีไอดีและสีได้ 88 และ 99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ	<i>Pala and Erden, 2005</i>
น้ำเสียโรงงานฟอกย้อม	จากการศึกษาพบว่าที่พีเอช 3 ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 5.88 และ 1.43 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ และใช้ไฟฟ้ากำลัง 60 วัตต์ สามารถลดซีไอดีและสีได้ 52 และ 90 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ	<i>Sahunin et al., 2006</i>
น้ำเสียชุมชน และน้ำเสียอุตสาหกรรม	จากการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1471 มิลลิโมลาร์ และเฟอร์รัสไอออน 7.14 มิลลิโมลาร์ พีเอช 3.02 สามารถกำจัดซีไอดีและสีได้มากกว่า 90 และ 99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ	<i>Badawy and Ali, 2006</i>
น้ำทิ้งโรงงานผลิตเชื้อและกระดาษ	จากการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 50 มิลลิโมลาร์ และเฟอร์รัสไอออน 2.5 มิลลิโมลาร์ สามารถกำจัดสีและซีไอดีได้ 84.6 และ 88 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ	<i>Catalkaya and Kargi, 2007</i>
น้ำเสียสังเคราะห์	ศึกษาอัตราส่วนของเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าที่อัตราส่วน 1:20 เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 0.5 มิลลิโมลาร์ ที่พีเอช 3 สามารถกำจัด ซีไอดีได้ 72.1 เปอร์เซ็นต์ และกำจัดสีได้มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์	<i>Kusic et al., 2007</i>

ตารางที่ 5 (ต่อ)

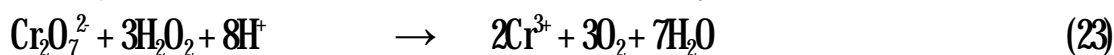
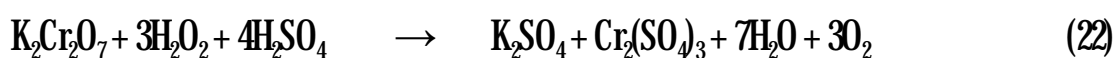
ตัวอย่างน้ำ	ผลการศึกษา	อ้างอิง
น้ำเสียสังเคราะห์	กระบวนการออกซิเดชันแบบ photo-Fenton สามารถกำจัดสีและทีโอซีได้ 98.26 และ 93.24 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเพิ่มขึ้นจากแบบ Fenton ที่สามารถกำจัดสีและสารอินทรีย์ได้ 97.61 และ 91.92 เปอร์เซ็นต์	<i>Liu et al., 2007</i>
น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษ	จากการศึกษาพบว่า ที่อัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 10:1 หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 110.76 มิลลิโมลาร์ เฟอร์รัสไอออน 5.54 มิลลิโมลาร์ พีเอช 3.5 สามารถกำจัดทีโอซีได้ 58 เปอร์เซ็นต์ภายในเวลา 15 นาที และเพิ่มเป็น 82 เปอร์เซ็นต์ที่เวลา 120 นาที	<i>Xu et al., 2007</i>
น้ำเสียสังเคราะห์	กระบวนการ photo-Fenton สามารถกำจัด diethyl phthalate และทีโอซีได้ 75.8 และ 33.2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับซึ่งเพิ่มขึ้นจากแบบ Fenton ที่สามารถกำจัด diethyl phthalate และทีโอซีได้ 42.7 และ 30.0 เปอร์เซ็นต์	<i>Yang et al., 2005</i> <i>Dong et al., 2007</i>
น้ำเสียจากฟาร์มปศุสัตว์	จากการศึกษาพบว่า ที่อัตราส่วนโมลต่อลิตรของ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเฟอร์รัสไอออน เท่ากับ 2 หรือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 170 มิลลิโมลาร์ และเฟอร์รัสไอออน 84.70 มิลลิโมลาร์ พีเอช 4 ระยะเวลาการบำบัด 30 นาที สามารถกำจัด ซีโอดีและสีได้ 88 และ 95 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ	<i>Lee and Shoda, 2008</i>
น้ำเสียจากโรงงานน้ำมันมะกอก	กระบวนการ Fenton สามารถกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีได้ 85 เปอร์เซ็นต์ภายในเวลา 60 นาที ขณะที่กระบวนการ photo-Fenton สามารถกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีได้ 95 เปอร์เซ็นต์ภายในเวลา 30 นาที ที่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 441.18 มิลลิโมลาร์ และเฟอร์รัสไอออน 1218 มิลลิโมลาร์	<i>Rizzo et al., 2008</i>
น้ำเสียฟาร์มสัตว์ปีก	บำบัดซีโอดีและสีในน้ำทิ้งจากระบบ up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) ได้ 95 และ 96 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 35.29 มิลลิโมลาร์ เฟอร์รัสไอออน 1.79 มิลลิโมลาร์ และพีเอช 3 ภายในเวลา 30 นาที	<i>Yetilmezsoy and Sakar, 2008</i>

ตารางที่ 5 (ต่อ)

ตัวอย่างน้ำ	ผลการศึกษา	อ้างอิง
น้ำเสียจากการเนาเปื้อยของฟางข้าวสาลี	ระยะเวลาการบำบัด 90 นาที ที่พีเอช 3 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 4412 มิลลิโมลาร์ และเฟอร์รัสไอออน 3.57 มิลลิโมลาร์ ภายใต้อสงยูวี สามารถกำจัดซีโอดี สารอินทรีย์ (UV ₂₅₄) และลิกนิน (UV ₂₈₀) ได้ 95, 81 และ 90 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ	Torrades <i>et al.</i> , 2008

7. ผลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี

เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในกระบวนการเฟนตันมีผลต่อการวิเคราะห์สารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี โดยทำให้ค่าซีโอดีของตัวอย่างน้ำเสียหลังทำปฏิกิริยาเฟนตันมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการรบกวน (*interference*) ระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับโพแทสเซียมไดโครเมต (K₂Cr₂O₇) (Kang *et al.*, 1999, Heredia *et al.*, 2004) ดังสมการ (22)-(23)



ฉะนั้นในการวิเคราะห์หาค่าซีโอดีของตัวอย่างน้ำเสียหลังทำปฏิกิริยาเฟนตันจำเป็นต้องกำจัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่หลงเหลืออยู่ให้หมดไป ก่อนจะทำการวิเคราะห์ จากการศึกษารายงานการวิจัยพบว่ามีวิธีต่างๆ ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การกำจัดเฟอร์รัสไอออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

วิธีการ	รายละเอียด	อ้างอิง
ปรับพีเอช ¹	ปรับพีเอชให้มากกว่า 10	Malik and Saha, 2003
ปรับพีเอช ¹	ปรับพีเอชเป็น 6-8	Heredia <i>et al.</i> , 2004
ปรับพีเอช ¹	ปรับพีเอชเป็น 7.5	Mexic <i>et al.</i> , 2004
ปรับพีเอช ¹	ปรับพีเอชเป็น 7	Barros <i>et al.</i> , 2006
ปรับพีเอช ¹	ปรับพีเอชเป็น 10	Papadopoulos <i>et al.</i> , 2007
ให้ความร้อน ²	80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที	Heredia <i>et al.</i> , 2004
ปรับพีเอชและให้ความร้อน ^{1,2}	ปรับพีเอชเป็น 7.5 แล้วอบที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที	Pala and Erden, 2005

ตารางที่ 6 (ต่อ)

วิธีการ	รายละเอียด	อ้างอิง
ใช้ reducing agent ²	MnO ₂ powder	Azbar et al., 2004
ใช้ reducing agent ²	KI, Na ₂ SO ₃ และ NaOH	Will et al., 2004
ใช้ reducing agent ²	Na ₂ SO ₃	Yang et al., 2005
หมายเหตุ	1 หมายถึง การกำจัดเฟอร์รัสไอออน	
	2 หมายถึง การกำจัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	

8 จุลินทรีย์อีเอ็ม (Effective Microorganisms)

8.1 องค์ประกอบของอีเอ็ม

อีเอ็มที่ผลิตในประเทศไทยมีสูตรเดียว เรียกว่า อีเอ็มรวม บางคนเรียกว่าซูปเปอร์อีเอ็ม แต่ในปัจจุบันจะเรียกว่า จุลินทรีย์อีเอ็ม (ในประเทศญี่ปุ่นแยกเป็น 3 ชนิด) จุลินทรีย์อีเอ็มมีองค์ประกอบที่ได้คัดสรรมาอย่างดีแล้วจากสภาพแวดล้อมธรรมชาติในประเทศไทย หรือจากธนาคารจุลินทรีย์ทั่วไปมากกว่า 80 ชนิด ที่ไม่เป็นพิษภัยต่อสิ่งมีชีวิตทั้งหลาย แต่เป็นประโยชน์ต่อพืช สัตว์และสิ่งแวดล้อม แยกได้เป็น 5 กลุ่มดังนี้ (รัช รุจิวรรณ, 2544 อ้างโดย สุพรชัย มั่งมีสิทธิ์, 2547)

1) กลุ่มจุลินทรีย์พวงรามิเส้นใย (filamentous fungi) ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งการย่อยสลายอินทรีย์สาร ช่วยย่อยสลายอินทรีย์วัตถุให้มีอนุเล็กลง ทำให้พืชสามารถดูดเอาไปใช้เป็นอาหารได้ง่าย ช่วยทำให้พืชเจริญเติบโต ในด้านอุตสาหกรรมใช้ทำอาหารบางชนิด บทบาทสำคัญ เช่น การทำเนยแข็ง เป็นต้น จุลินทรีย์กลุ่มนี้ทำงานได้ดีในสภาพที่มีออกซิเจน มีคุณสมบัติต้านทานความร้อนได้ดี ปกติใช้เป็นหัวเชื้อในการผลิตเห็ด หรือปุ๋ยหมัก จุลินทรีย์กลุ่มรามิเส้นใยที่สำคัญได้แก่ *Penicillium* spp. *Trichoderma* spp. *Fusarium* spp. *Mucor* spp. และ *Rhizopus* spp. เป็นต้น

2) กลุ่มจุลินทรีย์สังเคราะห์แสง (photosynthetic microorganisms) ทำหน้าที่สังเคราะห์สารอินทรีย์ให้กับดิน เช่น กรดอะมิโน น้ำตาล วิตามิน ฮอร์โมน และอื่นๆ เพิ่มประสิทธิภาพและความสมบูรณ์ให้แก่ดิน และช่วยสร้างความสัมพันธ์แบบพึ่งพาสายกันกับจุลินทรีย์ที่ต้องการอากาศ (azotobacter) ในการสังเคราะห์ธาตุไนโตรเจนในดิน จุลินทรีย์กลุ่มนี้ประกอบด้วย *Chorobium limicola* *Thiosulfatophilu* *Choroflexus auratiacus* *Chromatium vinosum* และอื่นๆ

3) กลุ่มจุลินทรีย์ที่ใช้ในการหมัก (zymogenic or fermentative microorganisms) ทำหน้าที่เป็นตัวกระทำให้ดินเปลี่ยนสภาพจากดินต้านทานโรค (disease resistant) เข้าสู่วงจรย่อยสลายแบบหมักและหมักสังเคราะห์ (fermentation and synthetic orzymogenic) เป็นหัวเชื้อในการผลิตปุ๋ยหมัก ป้องกันโรคและแมลงศัตรูพืชบางชนิดของพืชและสัตว์ ช่วยบำบัดมลพิษในน้ำเสียที่เกิด

จากสิ่งแวดล้อมเป็นพืชต่างๆ จุลินทรีย์กลุ่มหลักได้แก่ พวก **ray fungi (actinomycetes)** ยีสต์ และพวกราหมักต่างๆ เช่น ***Streptomyces spp.*** ***Saccharomyces ceraviseae*** และ ***Trichoderma spp.***

4) กลุ่มจุลินทรีย์ตรึงไนโตรเจน (**nitrogen fixing microorganisms**) ทำหน้าที่ตรึงก๊าซไนโตรเจนจากอากาศสู่ดิน ผลิตสารอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของพืช เช่น โปรตีน กรดอะมิโน กรดอินทรีย์ แป้ง และน้ำตาล กลุ่มจุลินทรีย์กลุ่มนี้มีทั้งสาหร่าย และแบคทีเรีย ได้แก่ ***Azotobactor spp.*** ***Anabaera spp.*** ***Nostoc spp.*** ***Azolla spp.*** ***Rhizobium spp.*** ***Bradyrhizobium spp.*** ***Methylomonas spp.*** ***Thiobacillus thiooxidans spp.*** ***T. ferrooxidant*** ***Erythobactor longus*** ***Baccillus spp.*** ***Polymyxa spp.*** ***Clostridium spp.*** และ ***Pasteurianum spp.***

5) กลุ่มจุลินทรีย์สร้างกรดน้ำนม (**lactic acids**) มีประสิทธิภาพในการต่อต้านเชื้อรา และแบคทีเรียที่ทำให้เกิดผลเสียซึ่งดำรงชีวิตอยู่ได้โดยไม่ต้องใช้อากาศ ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงดินก่อนให้เกิดโรคให้เป็นดินที่ต้านทานโรค โดยช่วยลดจำนวนจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของโรคพืชต่างๆ ให้มีจำนวนน้อยลงหรือหมดไป ทำให้อินทรีย์สารในดินอยู่ในสภาพไร้ออกซิเจนเป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของพืชมาก นอกจากนี้ยังช่วยย่อยสลายเปลือกหุ้มเมล็ดของเมล็ดพันธุ์พืช ทำให้อัตราการงอกของเมล็ดพันธุ์พืชสูงและเร็วกว่าปกติ จุลินทรีย์กลุ่มนี้ประกอบด้วยกลุ่มแลคโตบาซิลลัส เช่น ***Lactobacillus casei*** ***L. brugaricus*** และ ***Streptococcus lactis***

8.2 ประโยชน์ของกลุ่มจุลินทรีย์อีเอ็ม

อนิวรรต เถติมพงษ์ (2537) ได้กล่าวถึงประโยชน์ของกลุ่มจุลินทรีย์อีเอ็มไว้ดังนี้

- 1) ใช้ผสมน้ำรดพืชผักและต้นไม้ ทำให้เจริญเติบโต ให้ผลผลิตมาก มีคุณภาพดี
- 2) ใช้ผสมน้ำและกากน้ำตาลรดดินทำให้ดินอ่อนนุ่ม ร่วนซุย มีความอุดมสมบูรณ์
- 3) ใช้กำจัดกลิ่นเหม็นในคอกปศุสัตว์ได้ผลดี
- 4) ใช้บำบัดน้ำเสีย ดับกลิ่นเหม็นของน้ำในถังคอง และน้ำเสียจากโรงงาน

อุตสาหกรรม

- 5) ใช้บำบัดกลิ่นเหม็นจากกองขยะ ทำให้ขยะกลายเป็นปุ๋ยอย่างดี
- 6) ใช้กำจัดโรคพืช และไล่เดือนฝอยในดิน
- 7) ใช้เป็นสารป้องกันและขับไล่แมลง โดยผสมในรูปสูตร สุโตจู หรือ EM5
- 8) ใช้ดับกลิ่นเหม็นในห้องส้วม
- 9) ใช้บำบัดน้ำเสียในบ่อเลี้ยงปลา กุ้ง และการประมงอื่นๆ
- 10) ใช้ผสมน้ำแช่เมล็ดพันธุ์ ทำให้อัตราการงอกสูงและช่วยป้องกันโรคที่เกิดจากเมล็ด
- 11) ใช้ผสมน้ำรดกล้าไม้ในแปลงเพาะชำ สวนป่า และไม้ผลต่างๆ

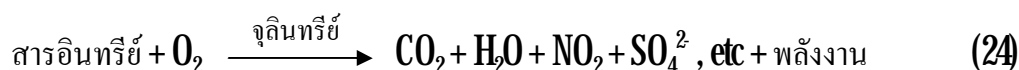
8.3 ปฏิกริยาชีวเคมีในการเผาผลาญสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์

การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ต้องการสารอาหารที่ประกอบด้วยคาร์บอน ออกซิเจน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ที่จุลินทรีย์นำไปประกอบเป็นคาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน และกรดนิวคลีอิก ซึ่งเป็นโมเลกุลที่มาประกอบเป็นส่วนต่างๆ ของเซลล์ต่อไป โดยจุลินทรีย์แต่ละชนิดอาจได้พลังงานในการดำรงชีวิตมาจากแหล่งที่แตกต่างกัน จุลินทรีย์พวกที่สังเคราะห์แสงได้จะ ได้พลังงานมาจากแสง ในขณะที่จุลินทรีย์พวก **chemoorganotroph** จะได้พลังงานจากการออกซิไดซ์ สารเคมีที่เป็นส่วนประกอบของอาหาร (สมใจ ศิริโชค, 2544)

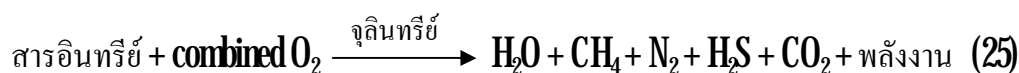
คาร์บอนเป็นธาตุที่มีความสำคัญในการสร้างพลังงานและเซลล์ โดยทั่วไปจุลินทรีย์ ที่เจริญในสภาวะที่ไม่มีอากาศ จะใช้แหล่งคาร์บอนประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ในการสร้างเซลล์ ส่วน จุลินทรีย์ที่เจริญในสภาวะที่มีอากาศ จะใช้แหล่งคาร์บอนประมาณ 50-55 เปอร์เซ็นต์ในการสร้างเซลล์

ปฏิกริยาชีวเคมีในการเผาผลาญสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ในการกำจัดน้ำทิ้งมี ปฏิกริยาที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด (พิมล เรียนวัฒนา และชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์, 2539) คือ

ก. ปฏิกริยาแบบใช้ออกซิเจน (aerobic reaction) เกิดขึ้นเมื่อจุลินทรีย์ใช้ออกซิเจน อีสาระไปเผาผลาญสารอินทรีย์เพื่อให้ได้พลังงานในการดำรงชีวิตของมัน สารประกอบต่างๆ ที่ เกิดขึ้นจากปฏิกริยานี้เป็นสารที่มีเสถียรภาพและไม่มีการก่อกำเนิดแก๊สที่สำคัญได้แก่ ก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ



ข. ปฏิกริยาแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic reaction) เกิดขึ้นเมื่อไม่มีออกซิเจน อีสาระ จุลินทรีย์ประเภทไม่ใช้ออกซิเจนจะเผาผลาญสารอินทรีย์ โดยใช้ออกซิเจนที่มีอยู่ใน สารประกอบ เช่นจาก NO_3^- หรือ SO_4^{2-} ทำให้สารอินทรีย์สลายตัวให้พลังงาน และสารประกอบอื่น ที่มักมีการก่อกำเนิดแก๊ส เช่น H_2S



การศึกษาการใช้ประโยชน์จากจุลินทรีย์อีกเอ็มส่วนใหญ่เน้นทางการเกษตร เช่น การทำปุ๋ยหมัก (สมศักดิ์ วังใน และคณะ, 2539) การป้องกันกำจัดโรคพืชและศัตรูพืช (นิพนธ์ ทวีชัย และคณะ, 2539) กอบเกียรติ์ บันสิทธิ์ และคณะ, 2539) การเพิ่มผลผลิต (วราภรณ์ คำบุญเรือง และคณะ, 2539) และศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทางเคมี (ออมทรัพย์ นพอมรบดี และคณะ, 2547) แต่

ด้านการนำน้ำหมักชีวภาพหรือจุลินทรีย์อีเอ็มมาใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสียและน้ำทิ้งมีน้อยมาก ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การบำบัดน้ำเสียและน้ำทิ้งด้วยจุลินทรีย์อีเอ็ม

ตัวอย่างน้ำ	ผลการศึกษา	อ้างอิง
น้ำเสียจากฟาร์มสุกร	จุลินทรีย์อีเอ็มสามารถลดสารอินทรีย์ในรูปบีโอดีได้ถึง 91 เปอร์เซ็นต์	สมชัย จันทน์สว่าง และคณะ, 2537
น้ำเสียจากฟาร์มสุกร	จุลินทรีย์อีเอ็มสามารถลดค่าบีโอดีได้ 36.0 เปอร์เซ็นต์ และสามารถกำจัดสารแขวนลอยได้ 68.8 เปอร์เซ็นต์	Srituma, 1995 อ้างโดย นวรัตน์ ใจคิด, 2539
น้ำทิ้งจากชุมชน น้ำเสียเทียมจากเทศบาล และ น้ำเสียเทียมแปรง	เชื้อจุลินทรีย์ในอีเอ็มสามารถลดค่าซีโอดี ในโตรเจน และ ฟอสเฟตได้	อรุณวรรณ หวังกอบเกียรติ และคณะ, 2539
น้ำเสียโรงพยาบาล	ลดปริมาณของแข็งละลายน้ำ ปริมาณสารแขวนลอย น้ำมัน และไขมัน และตะกอนหนักได้ 11.77, 11.89, 10.88 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ หลังจากฉีดพ่นจุลินทรีย์อีเอ็ม จำนวน 70 ลิตรในน้ำเสีย 1,280 ลูกบาศก์เมตร นอกจากนี้สามารถลดกลิ่นเหม็นได้ดีแต่ไม่มีผลในการลดความเป็นกรด-ด่าง และค่าบีโอดี	สมศักดิ์ นุกุลอุดมพานิชย์, 2543
น้ำเสียจากโรงครัวในโรงพยาบาล	สามารถบำบัดน้ำมันและไขมันได้ 84.46 และ 82.62 เปอร์เซ็นต์ ที่ปริมาณจุลินทรีย์อีเอ็ม 10 และ 5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และบำบัดบีโอดีได้ 61.66 เปอร์เซ็นต์ ที่จุลินทรีย์อีเอ็ม 5 เปอร์เซ็นต์	วิระพล วงษ์ประพันธ์ และคณะ, 2546
น้ำทิ้งจากคูรองรับน้ำ	น้ำทิ้งในถังทดลองมีค่าบีโอดีลดลง 15.06 ที่อัตราส่วนของน้ำหมักชีวภาพต่อน้ำทิ้ง 1:4600 เปอร์เซ็นต์ขณะที่น้ำทิ้งในถังควบคุมซึ่งไม่มีการเติมน้ำหมักชีวภาพค่าบีโอดี ลดลงเพียง 5.02 เปอร์เซ็นต์หรือน้อยกว่า 3 เท่า ในระยะเวลาหนึ่งสัปดาห์	นัยนา ศรีชัย และคณะ, 2547
น้ำเสียจากระบบบำบัด	จุลินทรีย์อีเอ็มทำให้น้ำเสียมีค่าบีโอดีเพิ่มขึ้นแต่มีผลให้พีเอชลดลง และไม่พบการลดลงของสารแขวนลอย	Szymanski and Patterson, 2003
น้ำมันและไขมันในน้ำทิ้งเศษอาหาร	จุลินทรีย์อีเอ็มหนองบัวอุบล คิวเซ พด.6 และ EX-M สามารถลดน้ำมันและไขมันได้ 99.36, 91.41, 87.80 และ 85.91 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ภายในเวลา 6 วัน	Sinipomadulsil and Labteephano, 2008

9 การใช้เทคนิคฟลูออเรสเซนซ์ในการตรวจวัดปริมาณสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ

Fluorescent spectroscopy เป็นเทคนิคที่นำมาใช้ในการหาลักษณะแหล่งกำเนิดของตัวอย่างสารอินทรีย์ในทะเล สิ่งมีชีวิตในน้ำ และดิน ซึ่งเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์ มีดังนี้

9.1 Conventional fluorescent spectroscopy

เทคนิค **conventional fluorescent spectroscopy** เป็นเทคนิคที่ใช้ความยาวคลื่นกระตุ้น (**excitation wavelength, λ_{ex}**) ที่เจาะจงค่าหนึ่ง ที่สแกนความยาวคลื่นที่คายพลังงาน (**emission wavelength, λ_{em}**) ได้ **emission spectrum** ซึ่งเทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ง่าย มีข้อจำกัดน้อย และสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการตรวจวัดได้โดยตรง (Rodriguez and Sarz, 2000; Patra and Mishra, 2002)

สำหรับเทคนิค **conventional fluorescent spectroscopy** มีการนำไปใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์หาปริมาณ **polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)** เพราะเป็นเทคนิคที่มีคุณสมบัติว่องไวต่อการเกิดแสง และมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างน้อย นอกจากนั้นเทคนิคนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวัด **PAHs** ของตัวอย่างในสิ่งแวดล้อมทางทะเล เช่น การตรวจวัด **PAHs** ของตะกอนดินในทะเล (Vandemeulen *et al.*, 1979)

9.2 Synchronous fluorescent spectroscopy

เทคนิค **synchronous fluorescent spectroscopy** เป็นการสแกนทั้งความยาวคลื่นกระตุ้น (**excitation wavelength**) และความยาวคลื่นการคาย (**emission wavelength**) ในเวลาเดียวกัน โดยให้ความแตกต่างของความยาวคลื่น ($\Delta\lambda$) ระหว่างความยาวคลื่นที่ใช้กระตุ้น และความยาวคลื่นที่คายแสงออกมาคงที่ และจะบันทึกค่าความเข้มข้นของการคายแสง (**intensity emission**) หรือค่าความเข้มข้นของการกระตุ้น (**intensity excitation**)

คุณสมบัติของ **synchronous fluorescent spectroscopy** มีดังนี้

- ส่วนแคบของแถบแสง (**nanowing of spectral band**)
- ความง่ายของแถบแสงที่คายพลังงาน (**simplification of emission spectra**)

การกำหนดความยาวคลื่นที่ใช้กระตุ้นใน **conventional fluorescent spectroscopy** ทำให้ความยาวคลื่นที่คายพลังงานแสงออกมาค่าเดียวจะมีการเพิ่มของ **intensity** ขณะที่เทคนิค **synchronous fluorescent spectroscopy** การเพิ่มของ **intensity** จะขึ้นอยู่กับ การเลือก $\Delta\lambda$ ที่เหมาะสม

- การลดลงของแถบแสง (**contraction of spectral range**)

นอกจากนี้เทคนิค **synchronous fluorescent spectroscopy** มีประสิทธิภาพในการแยกส่วนประกอบของสารอินทรีย์ที่แตกต่างกัน (Cabaniss and Shuman, 1987; Vodacek, 1989)

และระบุคุณสมบัติของสารอินทรีย์ตามธรรมชาติที่มาจากหลายบริเวณ (Miano *et al.*, 1988; Senesi *et al.*, 1991; Miano and Senesi, 1992; Coble, 1996) ที่ผ่านมาได้มีการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อประเมินคุณภาพน้ำเสีย อีกทั้งสามารถนำไปใช้ในการควบคุมระบบบำบัดน้ำเสีย (Galapate *et al.*, 1998)

9.3 Excitation emission matrices (EEM)

เทคนิค **excitation emission matrices** ได้มาจากการสแกน **synchronous** อย่างซ้ำๆ หลายครั้ง แต่จะเร็วกว่าโดยมีกระบวนการการตรวจวัดอย่างชัดเจน และตรงเป้าหมาย ข้อมูลของเทคนิค **excitation emission matrices** จะอยู่ในรูปของ **fluorescent contour plot** นอกจากนี้ **fluorescent excitation emission matrices peak intensity** สามารถตรวจวัดคุณลักษณะของสารละลายอินทรีย์ในน้ำและดิน ติดตามการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำธรรมชาติ (Matthews *et al.*, 1996; Marhaba *et al.*, 2000; Marhaba and Pu, 2000; Sierra *et al.*, 2005) และน้ำเสียได้ (Baker and Cuny, 2004; Musikavong *et al.*, 2006; Janhom *et al.*, 2009; Lu *et al.*, 2009)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีและสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยน้ำหมักชีวภาพ
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา (kinetic reaction) กำจัดสีและสารอินทรีย์ของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเฟนตันรีเอเจนต์

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงประสิทธิภาพของน้ำหมักชีวภาพ และเฟนตันรีเอเจนต์ ตลอดจนความเป็นไปได้ในการใช้น้ำหมักชีวภาพ และเฟนตันรีเอเจนต์ร่วมกันในการกำจัดสีและสารอินทรีย์ของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม
2. สามารถนำผลที่ได้จากการวิจัยไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการบำบัดน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ
3. เป็นข้อมูลพื้นฐานในการกำจัดสีและสารอินทรีย์น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม
4. เป็นข้อมูลช่วยในการตัดสินใจเลือกได้ว่าจะใช้ในส่วนใดของระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

บทที่ 2

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

1. วัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์

1.1 สารเคมี

- ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) 30เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนัก/น้ำหนัก)
- เฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$)
- สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์บีโอดี (ภาคผนวก ก.)
- สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์ซีโอดี (ภาคผนวก ก.)
- สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (ภาคผนวก ก.)
- กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$)
- อาหารเลี้ยงเชื้อ

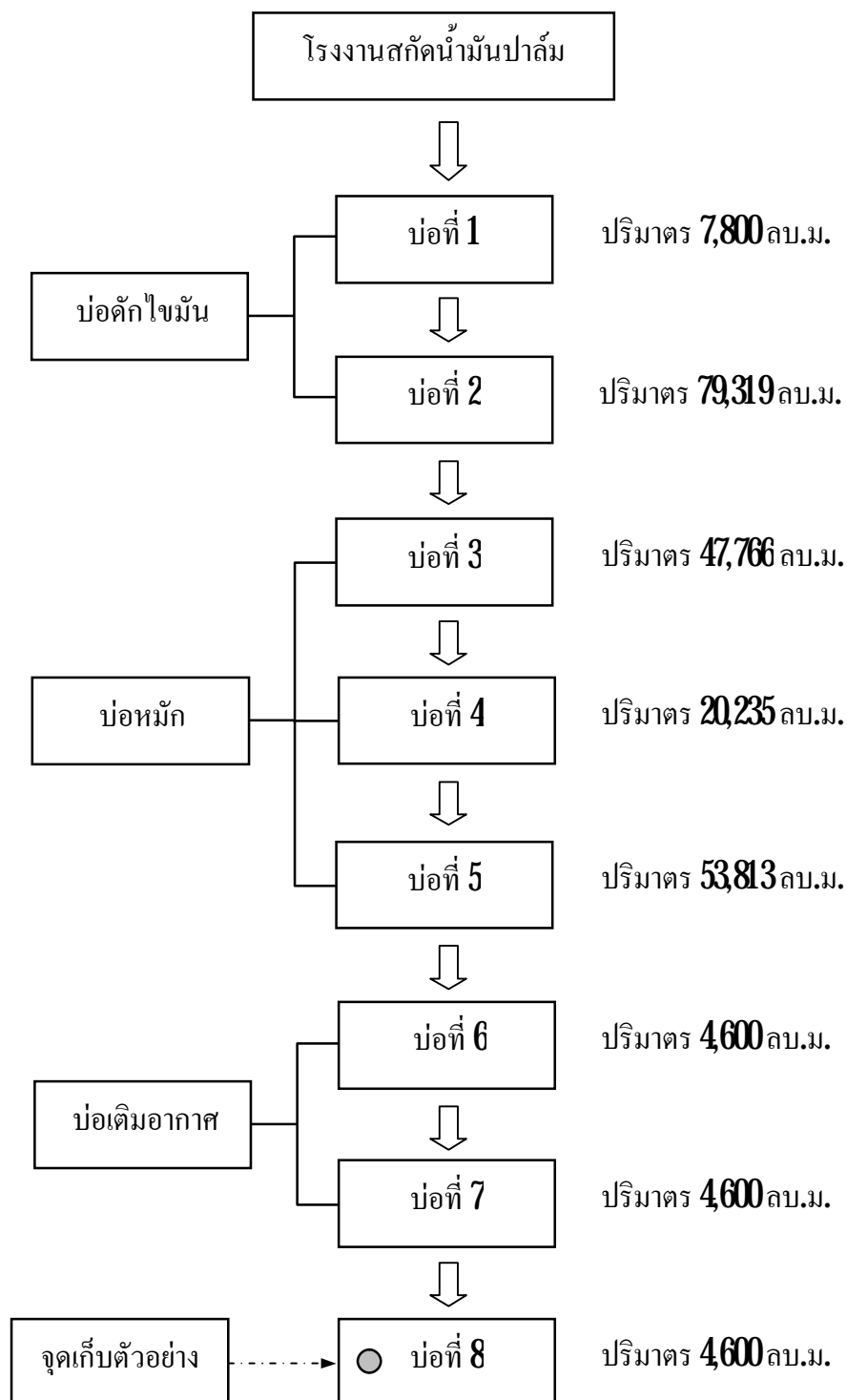
1.2 วัสดุ

- น้ำหมักชีวภาพ

ใช้น้ำหมักชีวภาพซึ่งได้จากการหมักอีเอ็มซูปเปอร์หรือจุลินทรีย์อีเอ็มหัวเชื้อผสมกับกากน้ำตาลและน้ำ ในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 ต่อ 20 ซึ่งเป็นอัตราส่วนตามคำแนะนำของผลิตภัณฑ์จุลินทรีย์อีเอ็มคิวเซ ใส่ในภาชนะที่สะอาด จากนั้นปิดฝาให้สนิทและหมักทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 7 วัน

- กากน้ำตาล
- น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

ตัวอย่างน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเก็บจากระบบบ่อบำบัด (pond system) บ่อสุดท้าย (ภาพที่ 6) โดยได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท ลำสูง (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) เลขที่ 99/9 หมู่ 2 ถนนสิเกา-ควนขัน ตำบลกะลาเส อำเภอสิเกา จังหวัดตรัง ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งแบบจ้วง (grab sampling) ใส่ภาชนะบรรจุขนาด 30 ลิตร เก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 6 จุดเก็บตัวอย่างและผังลำดับการบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ศึกษา

1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์

- เครื่อง UV-visible spectrophotometer ผลิตภัณท์ Shimadzu รุ่น UV 1601
- เครื่องมือวัดความเป็นกรด-ด่างแบบดิจิทัล ผลิตภัณท์ Russell รุ่น RL 150
- เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (laser diffraction particle size analyzer) ผลิตภัณท์

Beckman Coulter รุ่น LS 13 320

- เครื่อง spectrofluorometer ผลิตภัณท์ Jasco รุ่น FP-750
- เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (conductivity meter) ผลิตภัณท์ WTW รุ่น LF 323
- เทอร์โมมิเตอร์ (thermometer)
- เครื่องปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump) ผลิตภัณท์ Gast รุ่น 0823-101Q-SG608X
- แผ่นกรองใยแก้ว GF/C (Whatman®) (pore size 1.2 ไมโครเมตร)
- แผ่นกรองใยแก้ว GF/F (Whatman®) (pore size 0.7 ไมโครเมตร)
- เครื่องชั่งความละเอียด 3 ตำแหน่ง ผลิตภัณท์ Mettler Toledo รุ่น PB 303-S
- เครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง ผลิตภัณท์ Mettler Toledo รุ่น AB 204
- เครื่องกวน (stirrer) ผลิตภัณท์ Framo รุ่น M21/1
- แท่งกวน (magnetic bar)
- ชุดอุปกรณ์ให้แสงยูวี (hand held UV lamp) 6 วัตต์ ผลิตภัณท์ UVP รุ่น UVGL-58
- ตู้ดูดความชื้น (desiccator) ผลิตภัณท์ Electronic hygrostat
- ตู้อบความร้อน (hot air oven) ผลิตภัณท์ Contherm
- ตู้บ่มเชื้อ (incubator) ผลิตภัณท์ Memmert รุ่น BM 700
- อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (water bath) ผลิตภัณท์ Memmert รุ่น W 760
- เตาไมโครเวฟ (microwave) ผลิตภัณท์ Sharp รุ่น R-311
- เครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ (shaking water bath) ผลิตภัณท์ Heto รุ่น SBD 50BIO-1
- หม้อนึ่งความดันไอน้ำ (autoclave) ผลิตภัณท์ Tomy รุ่น SS-325
- เครื่องเขย่าผสมสารละลาย (vortex mixer) ผลิตภัณท์ Fisher scientific รุ่น 231
- เตาหย่อยตัวอย่างสำหรับซีโอดี (heating blocks) ผลิตภัณท์ J.P Selecta รุ่น R.A.T.
- ตู้ดูดควัน (hood) ผลิตภัณท์ Major supper flow fume cupboard
- เตาเผาความร้อนสูง (muffle furnace) ผลิตภัณท์ Thermolyne รุ่น 6000
- ถังน้ำพลาสติกขนาดความจุ 30 ลิตร

2 วิธีการวิจัย

2.1 ศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

ทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ทุกครั้งหลังจากเก็บตัวอย่าง ตามตารางที่ 8

ตารางที่ 8 พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
Color (absorbance at 475 nm)	UV-Visible Spectrophotometry
Temperature (°C)	Thermometer
pH	pH meter
Electrical conductivity (mS/cm)	Conductivity meter
TSS (mg/L)	Dried at 103-105 °C (APHA, AWWA and WEF, 2005)
TDS (mg/L)	Dried at 180 °C (APHA, AWWA and WEF, 2005)
BOD ₅ (mg/L)	Azide modification of Winkler method (APHA, AWWA and WEF, 2005)
COD (mg/L)	Closed reflux titration (APHA, AWWA and WEF, 2005)
DOC (mg/L)	Combustion method (APHA, AWWA and WEF, 2005)
Tannin-lignin (mg/L)	Colorimetric method (APHA, AWWA and WEF, 2005)
FEEM (QSU) ¹	Spectrofluorometer
หมายเหตุ	1 quinine sulfate units

2.2 ศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยน้ำหมักชีวภาพ

การบำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยน้ำหมักชีวภาพประกอบด้วย 4 ชุดการทดลอง ได้แก่

- 1) น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (ชุดควบคุม)
- 2) น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม + น้ำหมักชีวภาพ 0.5 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตร/ปริมาตร)
- 3) น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม + น้ำหมักชีวภาพ 2 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตร/ปริมาตร)
- 4) น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม + น้ำหมักชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตร/ปริมาตร)

2.2.1 ขั้นตอนการทดลอง

เริ่มต้นจากตรวจวัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มให้ได้ปริมาตรตามที่กำหนด จากนั้นเติมน้ำหมักชีวภาพตามระดับความเข้มข้นที่ศึกษา (ตารางที่ 9) ทั้งนี้วัดประสิทธิภาพการ

บำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยน้ำหมักชีวภาพจาก ความเข้มข้น ปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของซีไอดี และบีไอดี ปริมาณสารแขวนลอย ของแข็งละลายน้ำ ค่าการนำไฟฟ้า และพีเอช โดยตรวจวัดติดต่อกันทุกวันเป็นระยะเวลา 5 วัน

ตารางที่ 9 ปริมาณน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มและน้ำหมักชีวภาพในแต่ละชุดการทดลอง

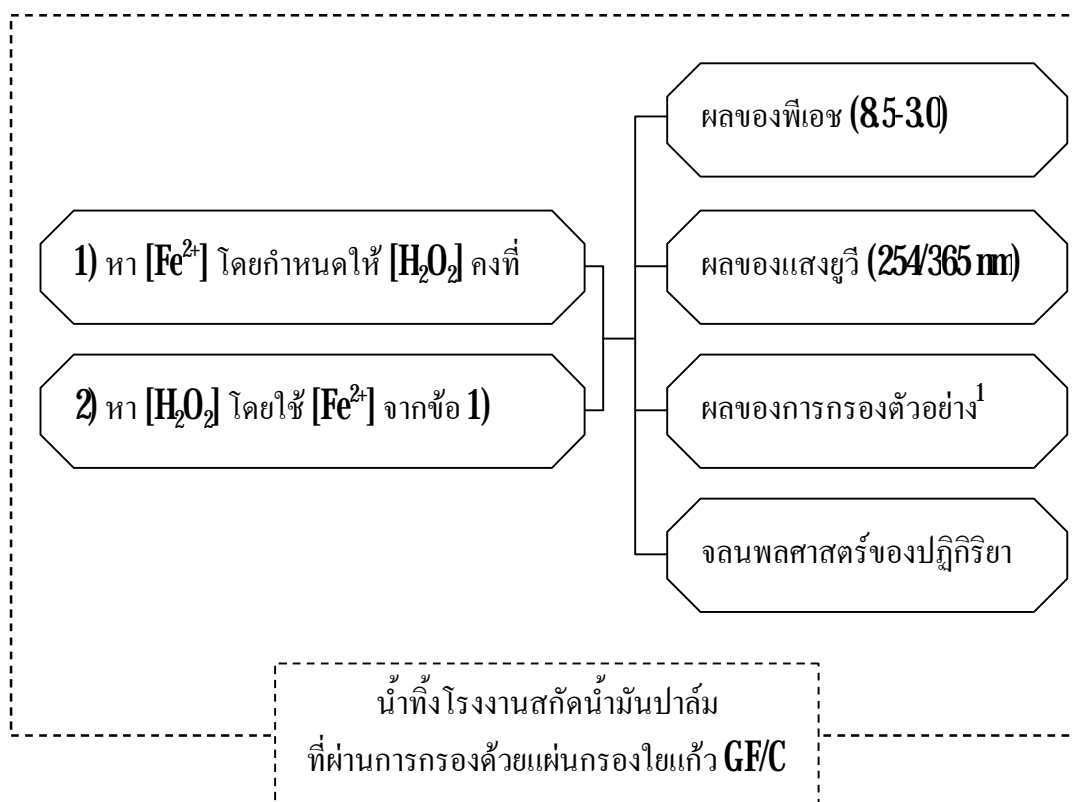
ชุดการทดลอง	น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (ลิตร)	น้ำหมักชีวภาพ (ลิตร)
1	30	-
2	29.85	0.15
3	29.40	0.60
4	28.50	1.50

หมายเหตุ ในแต่ละชุดการทดลองมี 3 ซ้ำ

2.3 ศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเฟนตันรีเอเจนต์

2.3.1 ขั้นตอนการศึกษา

เริ่มต้นศึกษาหาความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน โดยกำหนดให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คงที่ โดยศึกษาที่ความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน 0.2-2.5 มิลลิโมลาร์ จากนั้นศึกษาหาความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยใช้ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนที่ได้จากการทดลองในข้อ 1) โดยศึกษาที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10-150 มิลลิโมลาร์ และกำหนดความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ได้จากการทดลองในข้อ 1) และ 2) เพื่อศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้น ผลของแสงยูวี ผลของการกรองตัวอย่าง และศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา ทั้งนี้พิจารณาความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากประสิทธิภาพการกำจัดสี สำหรับลำดับการศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเฟนตันรีเอเจนต์สรุปได้ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 การศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเฟนตันรีเอเจนต์

หมายเหตุ 1 ใช้น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ไม่ผ่านการกรองในการศึกษาเปรียบเทียบ

2.3.2 วิธีการทดลอง

ทำการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิห้อง โดยใช้ตัวอย่างน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกรองด้วยแผ่นกรองใยแก้ว GF/C และปรับพีเอชเป็น 3.0 ± 0.2 ด้วยกรดซัลฟิวริก (98%) โดยในแต่ละชุดการทดลองใช้ตัวอย่างน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มปริมาตร 250 มิลลิลิตร ขั้นตอนการทดลองเริ่มต้นจากเติมเฟอร์รัสซัลเฟตเฮกซะไฮเดรตซึ่งเตรียมให้อยู่ในรูปสารละลายโดยกวนผสมให้เข้ากันประมาณ 30 วินาที จากนั้นเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อเป็นการเริ่มต้นปฏิกิริยาเฟนตัน (ภาพที่ 8) และทำการเก็บตัวอย่างตามช่วงเวลาเพื่อนำไปวิเคราะห์ค่าสีด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer ทั้งนี้ทำการกรองตัวอย่างด้วยแผ่นกรองใยแก้ว GF/C ก่อนการตรวจวัดด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer เนื่องจากมีตะกอนเกิดขึ้นหลังจากทำปฏิกิริยาสำหรับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการทดลองมีการทดสอบความเข้มข้นด้วยวิธีโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (potassium permanganate standard method) (Mendham *et al.*, 2000)

2.3.3 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยากำจัดสีและสารอินทรีย์ของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

เป็นการติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มสีและสารอินทรีย์กับเวลา และนำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟเพื่อหาอันดับปฏิกิริยา สำหรับจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยากำจัดสีพิจารณาจากพื้นที่ใต้กราฟของค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตร ส่วนปฏิกิริยากำจัดสารอินทรีย์ศึกษาจากการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ (Dissolved Organic Carbon)

2.3.4 การตรวจวัดกลุ่มสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเทคนิค fluorescent excitation-emission matrix (FEEM)

ขั้นตอนการตรวจวัดเริ่มต้นจาก กรองน้ำตัวอย่างด้วยแผ่นกรองใยแก้ว GF/F ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (อัครวินท์ พุ่มไพศาลชัย, 2548; Janhom *et al.*, 2009) จากนั้นตรวจวัดน้ำตัวอย่างที่ผ่านการกรองแล้วด้วยเครื่อง spectrofluorometer ที่ excitation wavelength 220-450 นาโนเมตร และ emission wavelength 220-600 นาโนเมตร และนำข้อมูลที่ได้มาประมวลผลในโปรแกรม model ที่สร้างจากโปรแกรม excel จากนั้นนำผลข้อมูลจาก โปรแกรม model มาสร้างกราฟในรูปแบบเส้นชั้นความสูง (contour) และสามมิติ (3D) ด้วยโปรแกรม sigmaplot และอ่านค่า excitation และ emission จากกราฟแล้วนำมาพิจารณาเปรียบเทียบกับ putative origins (Chen *et al.*, 2003; Musikavong *et al.*, 2006)



ภาพที่ 8 ชุดอุปกรณ์การทดลองเฟนตันรีเอเจนต์

3 การคำนวณประสิทธิภาพการบำบัด

ประสิทธิภาพการกำจัดสี

$$= \left(\frac{\text{ความเข้มสีเริ่มต้น} - \text{ความเข้มสี ณ เวลาใดๆ}}{\text{ความเข้มสีเริ่มต้น}} \right) \times 100$$

ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี

$$= \left(\frac{\text{ซีโอดีเริ่มต้น} - \text{ซีโอดี ณ เวลาใดๆ}}{\text{ซีโอดีเริ่มต้น}} \right) \times 100$$

4 การวิเคราะห์ข้อมูล

อธิบายประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยน้ำหมักชีวภาพ และเฟนตันรีเอเจนต์ โดยใช้สถิติร้อยละ ค่าเฉลี่ย ค่าต่ำสุด สูงสุด และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และทำการทดสอบความพึงพอใจต่อสีของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยการใช้ **hedonic scale scoring test** (ไพโรจน์ วิริยจารี, 2535) โดยใช้ผู้ทดสอบจำนวน 20 คน จากนั้นวิเคราะห์ผลการทดสอบความแปรปรวนแบบทางเดียว (**one-way ANOVA**) ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี **Duncan's Multiple Range Test (DMRT)** โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป **SPSS for Windows versions 11.5**

5 สถานที่ศึกษาวิจัย

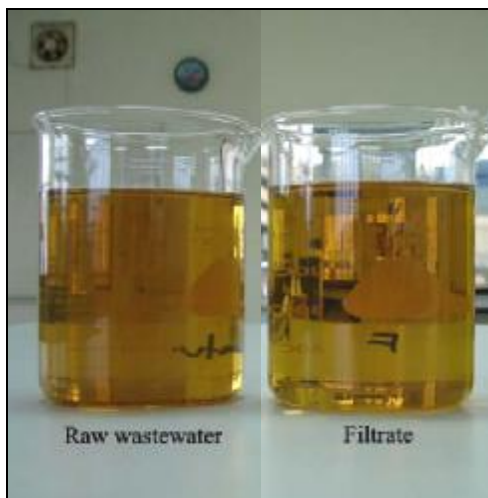
ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการ คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

บทที่ 3

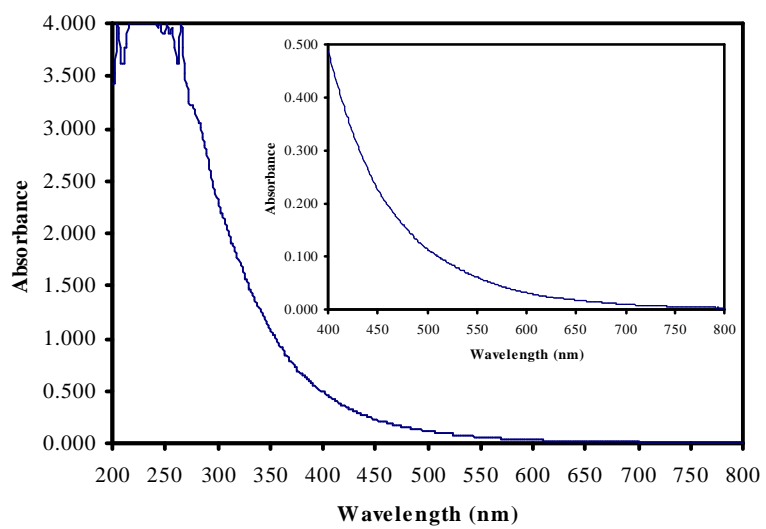
ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

1. ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ศึกษา

ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ศึกษาเป็นแบบระบบชุดบ่อไร้อากาศร่วมกับบ่อเติมอากาศและบ่อฝุ้งต่อเนื่องกันซึ่งเป็นระบบที่ใช้กันโดยทั่วไป (สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2540) โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดความสกปรกของน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มในรูปของบีโอดี ซีโอดี สารแขวนลอย และน้ำมันและไขมัน จนมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม (กรมควบคุมมลพิษ, 2551) แต่น้ำทิ้งยังคงมีสีน้ำตาล โดยน้ำทิ้งที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำทิ้งจากระบบบ่อบำบัด (pond system) บ่อสุดท้าย หลังจากบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (after secondary treatment) ลักษณะโดยทั่วไป น้ำใสแต่มีสีน้ำตาลถึงน้ำตาลเข้ม (ภาพที่ 9) แม้ว่าค่าการดูดกลืนแสงมีค่าต่ำ (ภาพที่ 10) โดยสีน้ำตาลในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มซึ่งสามารถมองเห็นด้วยตาเปล่านั้นเกิดจากสีจริง (true color) แต่เมื่อทดสอบการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร ปรากฏว่าไม่พบความยาวคลื่นเด่นซึ่งเป็นลักษณะเดียวกันกับน้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติที่มีการเน่าเปื่อยของพืช ปกติในช่วงความยาวคลื่น 400-465 นาโนเมตรจะให้โทนสีม่วง 465-482 นาโนเมตรให้โทนสีน้ำเงิน และ 482-497 นาโนเมตรให้โทนสีเขียวออกน้ำเงิน (APHA, AWWA and WEF, 2005) สำหรับพีเอชอยู่ในช่วง 7.5-8.6 อุณหภูมิ 28.5-30.0 องศาเซลเซียส บีโอดี 21-35 มิลลิกรัมต่อลิตร ซีโอดี 485-520 มิลลิกรัมต่อลิตร สารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ (Dissolved Organic Carbon, DOC) 121-140 มิลลิกรัมต่อลิตร มีสารแขวนลอย และของแข็งละลาย 118-135 และ 4,035-4,655 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังตารางที่ 10 และขนาดของอนุภาคในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มอยู่ในช่วง 0.50-27.40 ไมโครเมตร (ภาพที่ 11)



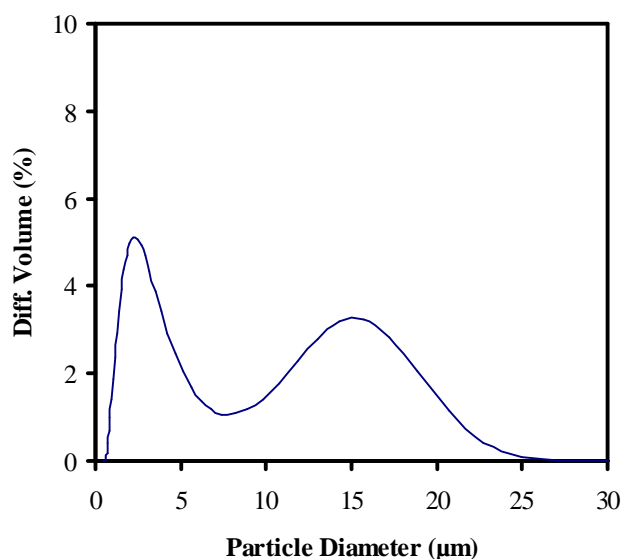
ภาพที่ 9 น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ศึกษา



ภาพที่ 10 ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร

ตารางที่ 10 ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ศึกษา

พารามิเตอร์	ค่าที่วัดได้
สี	น้ำตาล-น้ำตาลเข้ม
pH	7.5-8.6
อุณหภูมิ (°C)	28.5-30.0
EC (mS/cm)	480-483
BOD (mg/L)	21-35
COD (mg/L)	485-520
DOC (mg/L)	121-140
TSS (mg/L)	118-135
TDS (mg/L)	4,035-4,655
แอมโมเนีย-นิกิติน (mg/L)	6.64-6.69
ขนาดอนุภาค (µm)	0.50-27.40
FEEM(QSU)	72



ภาพที่ 11 ขนาดของอนุภาคในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ศึกษา

2 การบำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยน้ำหมักชีวภาพ

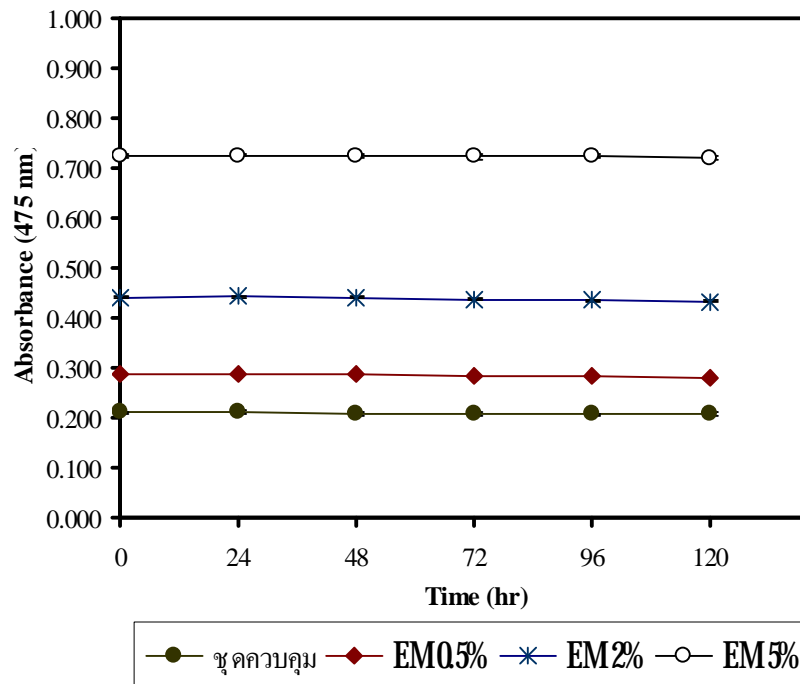
จากการตรวจนับจำนวนเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นในแต่ละกลุ่ม พบว่าน้ำหมักชีวภาพขยายที่เตรียมจาก อีเอ็มซูบเปอร์ : กากน้ำตาล : น้ำสะอาด ในอัตราส่วน **1:1:20** นั้นมีจำนวนเชื้อแต่ละกลุ่มดังตารางที่ **11**

ตารางที่ **11** จำนวนเชื้อจุลินทรีย์แต่ละกลุ่ม

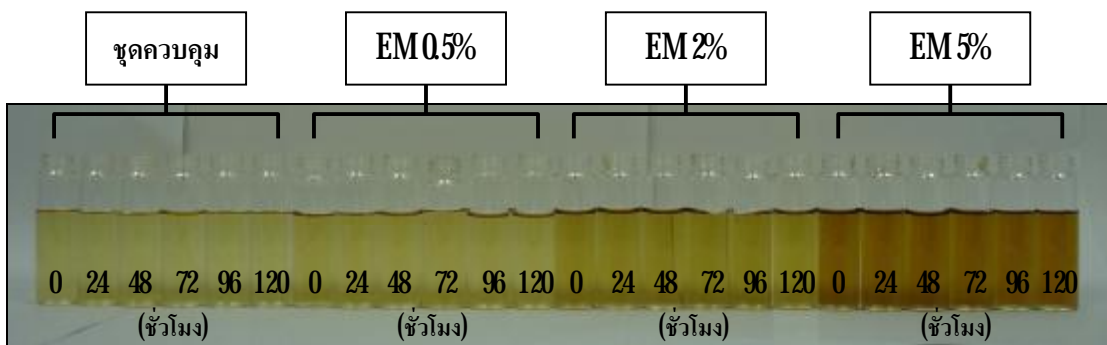
อาหาร	เชื้อ	ค่าเฉลี่ย±S.D. (CFU/mL)
plate count agar (PCA)	แบคทีเรียทั้งหมด	$(3.02 \pm 0.42) \times 10^7$
M.R.S. agar	แลคติกแอซิดแบคทีเรีย	$(2.47 \pm 0.27) \times 10^7$
potato dextrose agar (PDA)	ราและยีสต์	$(2.29 \pm 0.18) \times 10^7$

2.1 สีของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีลักษณะใสแต่มีสีน้ำตาล เมื่อเติมน้ำหมักชีวภาพลงไปเพื่อเริ่มต้นบำบัด พบว่าน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีความเข้มสีเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม โดยชุดการทดลองที่มีการเติมน้ำหมักชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์ มีความเข้มสีสูงสุด รองลงมาเป็นชุดการทดลองที่มีการเติมน้ำหมักชีวภาพ 2 เปอร์เซ็นต์ และชุดการทดลองที่มีการเติมน้ำหมักชีวภาพ 0.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ภาพที่ 12 และ 13) ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของความเข้มสีในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่บำบัดด้วยน้ำหมักชีวภาพเกิดจากสีของน้ำหมักชีวภาพซึ่งมีสีน้ำตาลเข้ม (สมศักดิ์ นุญจอุดมพานิชย์, 2543; โสภิชฐ์ เวทยสุภรณ์ และปรียาภรณ์ อิศรานุวัฒน์, 2548) และชุดการทดลองที่บำบัดด้วยน้ำหมักชีวภาพมีฝ้าเกิดขึ้นที่ผิวน้ำ โดยชุดการทดลองที่มีการเติมน้ำหมักชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์มีฝ้าเกิดขึ้นสูงสุด รองลงมาเป็นชุดการทดลองที่มีการเติมน้ำหมักชีวภาพ 2 เปอร์เซ็นต์ และชุดการทดลองที่มีการเติมน้ำหมักชีวภาพ 0.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



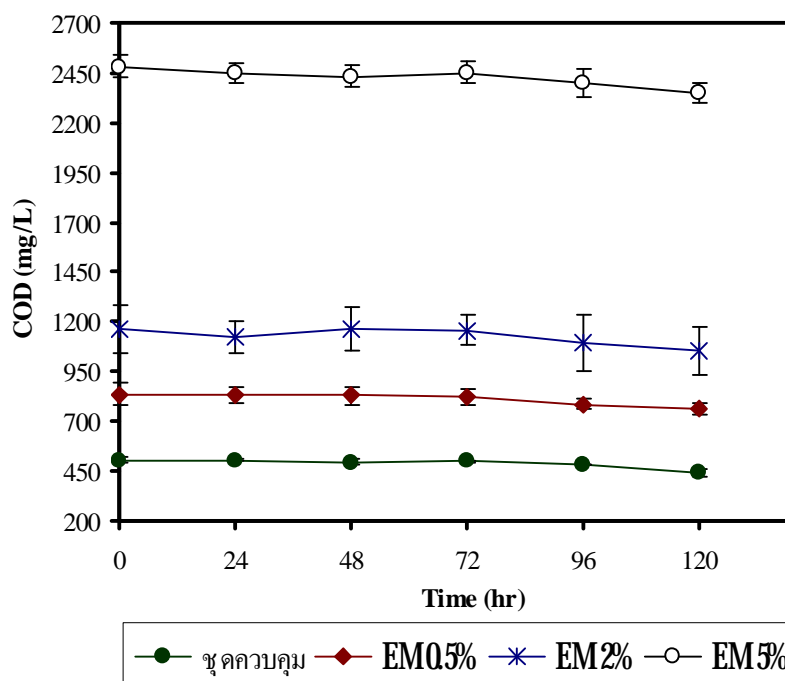
ภาพที่ 12 ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ระยะเวลาบำบัดต่างๆ



ภาพที่ 13 ความเข้มสีของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่บำบัดด้วยน้ำหมักชีวภาพระดับความเข้มข้นต่างๆ

2.2 ปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี

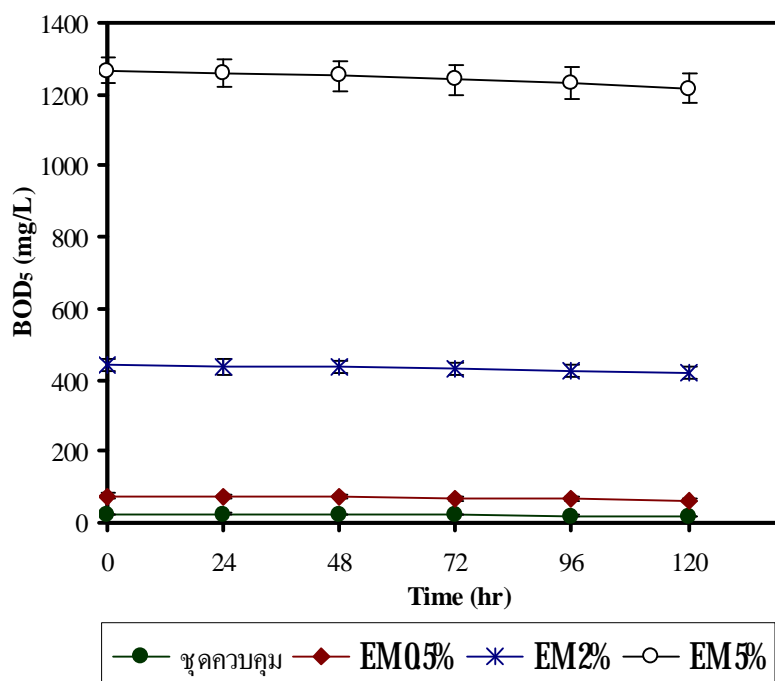
ปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีเริ่มต้นของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มในชุดควบคุม, ชุดที่บำบัดด้วยน้ำหมักชีวภาพ 0.5, 2 และ 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเท่ากับ 503 ± 14 , 834 ± 54 , $1,165 \pm 123$ และ $2,483 \pm 52$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และเมื่อผ่านการบำบัดเป็นระยะเวลา 5 วัน หรือ 120 ชั่วโมง มีค่าซีโอดีเท่ากับ 443 ± 21 , 762 ± 31 , $1,052 \pm 122$ และ $2,348 \pm 52$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จะเห็นว่าปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีมีแนวโน้มลดลง (ภาพที่ 14) แต่อย่างไรก็ตามการเติมน้ำหมักชีวภาพเพื่อเริ่มต้นบำบัด ทำให้น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีค่าซีโอดีเริ่มต้นสูงขึ้นโดยมีค่าสูงขึ้นตามระดับความเข้มข้นของน้ำหมักชีวภาพที่ใช้ในการบำบัด และพบว่าน้ำหมักชีวภาพทั้ง 3 ระดับความเข้มข้น คือ 0.5, 2 และ 5 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตร/ปริมาตร) ไม่สามารถบำบัดสารอินทรีย์ให้มีค่าต่ำกว่าชุดควบคุมได้ และน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มหลังผ่านการบำบัดยังคงมีค่าซีโอดีสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม (กรมควบคุมมลพิษ, 2551) ทั้งนี้อาจเป็นผลจากสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเป็นสารอินทรีย์ที่ยากต่อการย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (Barker and Worgan, 1981; Thambirajah *et al.*, 1995) สำหรับน้ำหมักชีวภาพมีปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี 32,830-33,000 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาพที่ 14 ปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ระยะเวลาบำบัดต่างๆ

2.3 ปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของบีโอดี

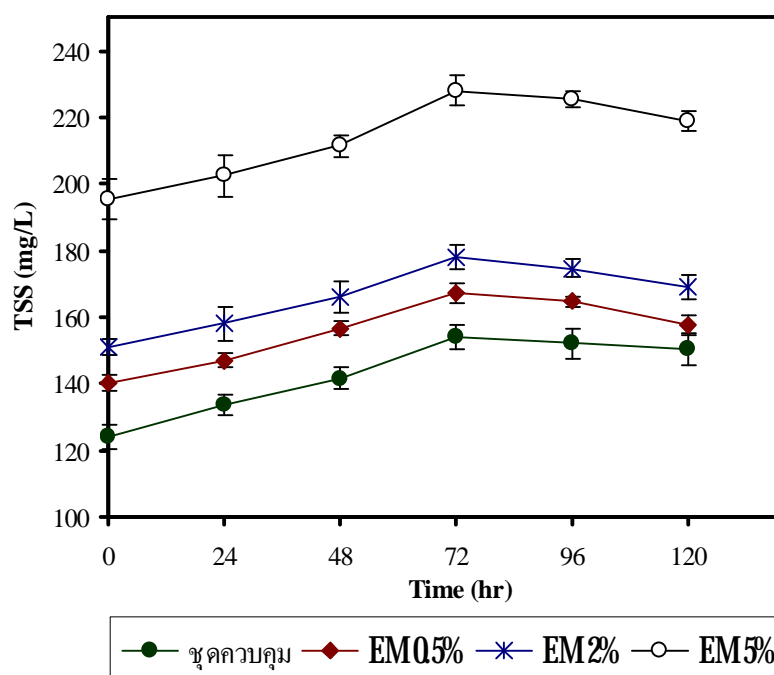
จากการทดลองพบว่าสารอินทรีย์ในรูปของบีโอดีของทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มลดลง (ภาพที่ 15) แต่อย่างไรก็ตามน้ำหมักชีวภาพไม่สามารถบำบัดสารอินทรีย์ซึ่งวัดในรูปของบีโอดีให้มีค่าต่ำกว่าชุดควบคุมได้ (Szymanski and Patterson, 2003) ทั้งนี้ชุดการทดลองที่มีการเติมน้ำหมักชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์มีค่าบีโอดีเริ่มต้นสูงสุดคือ $1,267 \pm 37$ มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนชุดการทดลองที่มีการเติมน้ำหมักชีวภาพ 2 เปอร์เซ็นต์ มีค่าบีโอดีเริ่มต้นเท่ากับ 441 ± 18 มิลลิกรัมต่อลิตร และชุดการทดลองที่มีการเติมน้ำหมักชีวภาพ 0.5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าบีโอดีเริ่มต้นเท่ากับ 75 ± 7 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับชุดควบคุมมีค่าบีโอดีเริ่มต้นเท่ากับ 24 ± 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ระยะเวลาการบำบัดนาน 5 วันหรือ 120 ชั่วโมง ชุดควบคุม ชุดการทดลองที่มีการเติมน้ำหมักชีวภาพ 0.5, 2 และ 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าบีโอดีเท่ากับ 18 ± 1 , 62 ± 4 , 420 ± 16 และ $1,217 \pm 43$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ทั้งนี้ น้ำหมักชีวภาพมีปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของบีโอดี $16,740-17,020$ มิลลิกรัมต่อลิตร จะเห็นว่าในแต่ละชุดการทดลองปริมาณสารอินทรีย์ซึ่งวัดในรูปของบีโอดีมีการลดลงเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องจากสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเป็นสารอินทรีย์ที่ยากต่อการย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (Barker and Worgan, 1981; Thambirajah *et al.*, 1995)



ภาพที่ 15 ปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของบีโอดีในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ระยะเวลาบำบัดต่างๆ

2.4 ปริมาณสารแขวนลอย (TSS)

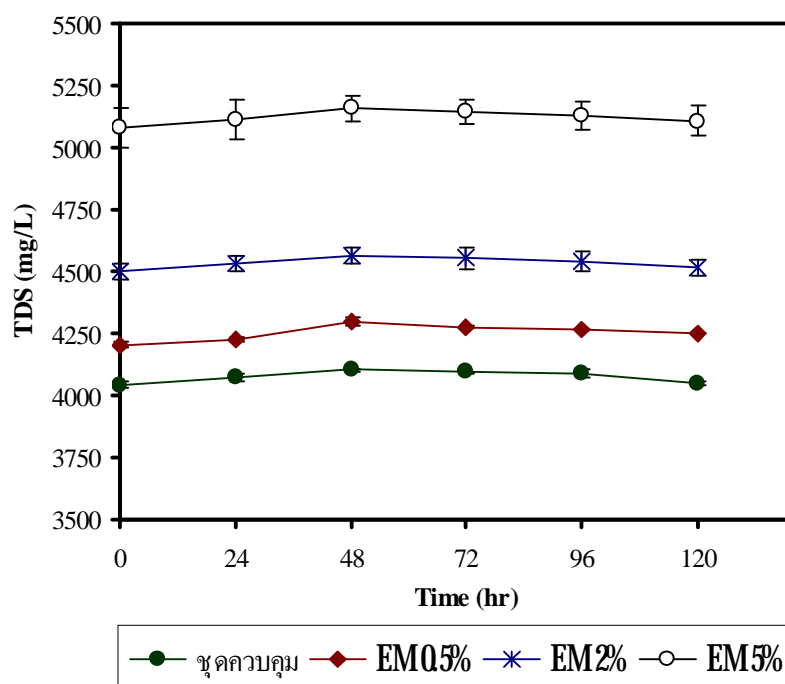
น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (ชุดควบคุม) มีสารแขวนลอยเริ่มต้นเท่ากับ 124 ± 4 มิลลิกรัมต่อลิตร ขณะที่น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่บำบัดด้วยน้ำหมักชีวภาพมีสารแขวนลอยเริ่มต้นเท่ากับ 140 ± 3 , 151 ± 3 และ 195 ± 6 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระดับความเข้มข้นน้ำหมักชีวภาพ 0.5, 2 และ 5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ทั้งนี้ น้ำหมักชีวภาพมีสารแขวนลอย $1,280-1,340$ มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นผลให้สารแขวนลอยในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่บำบัดด้วยน้ำหมักชีวภาพมีค่าเริ่มต้นสูงขึ้นและช่วงระยะเวลา 72 ชั่วโมงแรกของการบำบัด ปริมาณสารแขวนลอยในทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 16) ซึ่งเกิดจากจุลินทรีย์มีการขยายจำนวนเพิ่มขึ้น (Szymanski and Patterson, 2003) และที่ระยะเวลาการบำบัดนาน 5 วันหรือ 120 ชั่วโมง ชุดควบคุม ชุดการทดลองที่มีการเติมน้ำหมักชีวภาพ 0.5, 2 และ 5 เปอร์เซ็นต์ มีสารแขวนลอยเท่ากับ 150 ± 5 , 158 ± 3 , 169 ± 4 และ 219 ± 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ



ภาพที่ 16 ปริมาณสารแขวนลอย (TSS) ในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ระยะเวลาบำบัดต่างๆ

2.5 ปริมาณของแข็งละลายน้ำ (TDS)

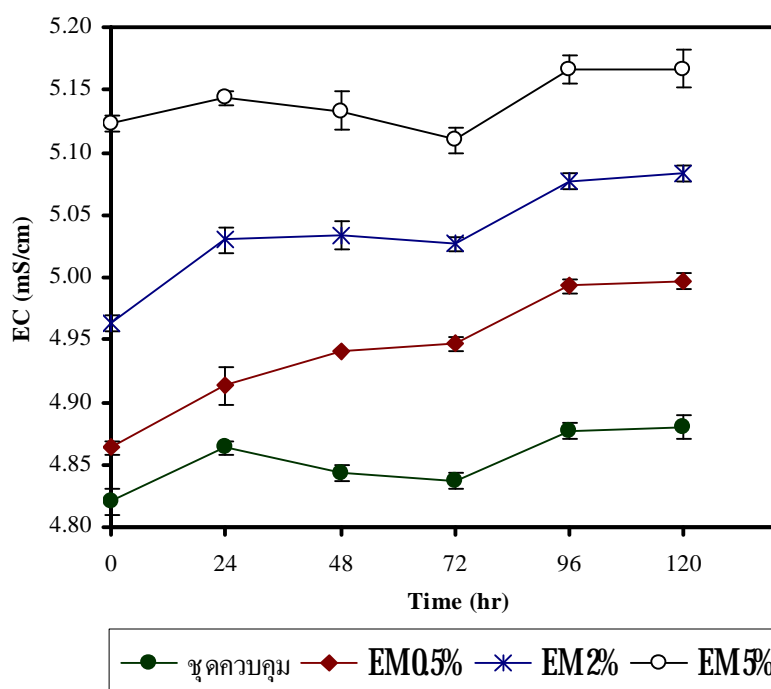
การเติมน้ำหมักชีวภาพเพื่อเริ่มต้นบำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ทำให้ค่าของแข็งละลายน้ำเริ่มต้นของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีค่าสูงขึ้น โดยชุดการทดลองที่มีการเติมน้ำหมักชีวภาพ 0.5, 2 และ 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าของแข็งละลายน้ำเริ่มต้นเท่ากับ $4,203 \pm 12$, $4,500 \pm 35$ และ $5,080 \pm 80$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จะเห็นว่าของแข็งละลายน้ำมีค่าสูงสุดในชุดการทดลองที่เติมน้ำหมักชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากน้ำหมักชีวภาพมีของแข็งละลายน้ำ $21,970-22,210$ มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นผลให้ของแข็งละลายน้ำมีค่าสูงสุดในชุดการทดลองที่เติมน้ำหมักชีวภาพระดับความเข้มข้นสูงสุด และพบว่าช่วงระยะเวลา 72 ชั่วโมงแรกของการบำบัด ปริมาณของแข็งละลายน้ำในทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 17) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Szymanski และ Patterson (2003) และที่ระยะเวลาการบำบัดนาน 5 วันหรือ 120 ชั่วโมง น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ผ่านการบำบัดด้วยน้ำหมักชีวภาพ 0.5, 2 และ 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณของแข็งละลายน้ำเท่ากับ $4,250 \pm 4$, $4,518 \pm 35$ และ $5,109 \pm 61$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ สำหรับชุดควบคุมมีปริมาณของของแข็งละลายน้ำเท่ากับ $4,049 \pm 9$ มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาพที่ 17 ปริมาณของแข็งละลายน้ำ (TDS) ในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ระยะเวลาบำบัดต่างๆ

2.6 ค่าการนำไฟฟ้า (EC)

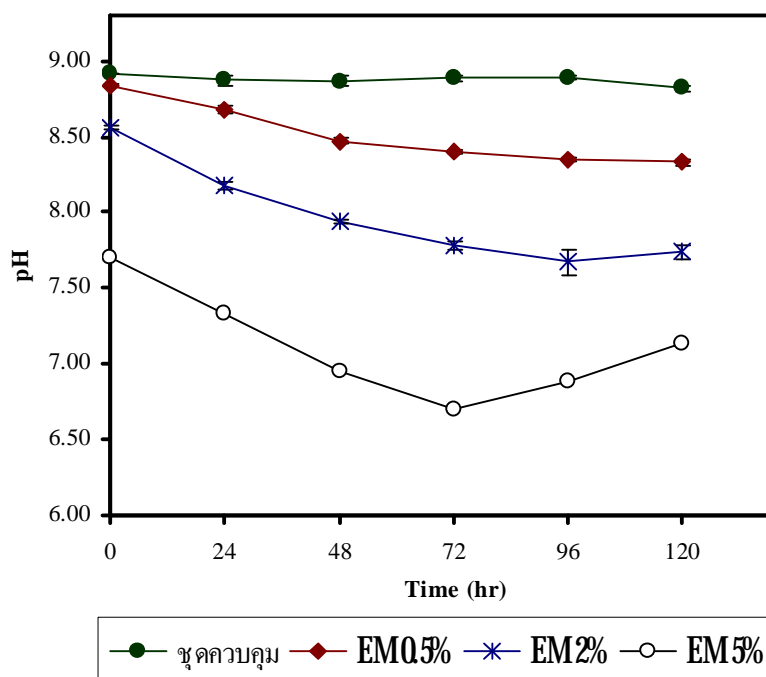
น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีค่าการนำไฟฟ้าเริ่มต้นเฉลี่ย 482 ± 0.01 มิลลิซีเมนต่อเซนติเมตร และค่าการนำไฟฟ้าเริ่มต้นเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้นในชุดการทดลองที่มีการเติมน้ำหมักชีวภาพโดยชุดการทดลองที่มีการเติมน้ำหมักชีวภาพ **0.5** เปอร์เซ็นต์มีค่าการนำไฟฟ้าเริ่มต้นเฉลี่ย 486 ± 0.01 มิลลิซีเมนต่อเซนติเมตร ชุดการทดลองที่มีการเติมน้ำหมักชีวภาพ **2** เปอร์เซ็นต์มีค่าการนำไฟฟ้าเริ่มต้นเฉลี่ย 496 ± 0.01 มิลลิซีเมนต่อเซนติเมตร และชุดการทดลองที่มีการเติมน้ำหมักชีวภาพ **5** เปอร์เซ็นต์มีค่าการนำไฟฟ้าเริ่มต้นเฉลี่ย 5.12 ± 0.01 มิลลิซีเมนต่อเซนติเมตร และค่าการนำไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา **24** ชั่วโมงแรกของการบำบัด (ภาพที่ 18) ทั้งนี้เนื่องจากจุลินทรีย์มีการขยายจำนวนเพิ่มมากขึ้นเป็นผลให้ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น เช่นเดียวกับกับการศึกษาของ **Szymanski** และ **Patterson (2003)** และที่ระยะเวลาการบำบัดนาน **5** วันหรือ **120** ชั่วโมง ชุดควบคุมชุดการทดลองที่มีการเติมน้ำหมักชีวภาพ **0.5**, **2** และ **5** เปอร์เซ็นต์ มีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 4.88 ± 0.01 , 5.00 ± 0.01 , 5.08 ± 0.01 และ 5.17 ± 0.02 มิลลิซีเมนต่อเซนติเมตร ตามลำดับ สำหรับน้ำหมักชีวภาพมีค่าการนำไฟฟ้า $4.35-8.96$ มิลลิซีเมนต่อเซนติเมตร



ภาพที่ 18 ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ระยะเวลาบำบัดต่างๆ

2.7 พีเอช

การเติมน้ำหมักชีวภาพเพื่อเริ่มต้นบำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ทำให้ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีค่าลดลง โดยชุดการทดลองที่มีการเติมน้ำหมักชีวภาพ 0.5, 2 และ 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 8.84 ± 0.01 , 8.56 ± 0.02 และ 7.71 ± 0.02 ตามลำดับ จะเห็นว่าพีเอชมีค่าต่ำสุดในชุดการทดลองที่เติมน้ำหมักชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากน้ำหมักชีวภาพมีความเป็นกรดโดยมีค่าพีเอช 3.30-4.48 เป็นผลให้พีเอชมีค่าต่ำสุดในชุดการทดลองที่เติมน้ำหมักชีวภาพระดับความเข้มข้นสูงสุด จากรายงานการศึกษาของ Szymanski และ Patterson (2003) พบว่าการเพิ่มระดับความเข้มข้นของน้ำหมักชีวภาพทำให้พีเอชมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และจากการทดลองพบว่าช่วงระยะเวลา 72 ชั่วโมงแรกของการบำบัด พีเอชของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่บำบัดด้วยน้ำหมักชีวภาพมีค่าลดลง (ภาพที่ 19) ทั้งนี้การลดลงของค่าพีเอชเกิดจากจุลินทรีย์มีการขยายจำนวนเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะจุลินทรีย์กลุ่มแลคโตบาซิลลัสซึ่งมีความสำคัญในการสร้างกรด (รัช รุจิวรรณ, 2544 อ้างโดย สุพรชัย มั่งมีสิทธิ์, 2547; ออมทรัพย์ นพอมรบดี และคณะ, 2547) และที่ระยะเวลาการบำบัดนาน 5 วันหรือ 120 ชั่วโมง น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ผ่านการบำบัดด้วยน้ำหมักชีวภาพ 0.5, 2 และ 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าพีเอช 8.33 ± 0.02 , 7.74 ± 0.05 และ 7.14 ± 0.01 ตามลำดับ สำหรับชุดควบคุมมีค่าพีเอชเท่ากับ 8.82 ± 0.02



ภาพที่ 19 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ระยะเวลาบำบัดต่างๆ

จากการบำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยน้ำหมักชีวภาพพบว่า น้ำหมักชีวภาพทั้ง 3 ระดับความเข้มข้น คือ 0.5, 2 และ 5 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตร/ปริมาตร) ไม่สามารถทำให้ความเข้มข้น ค่าความสกปรกในรูปของบีโอดีและซีโอดีของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมได้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2551) และการศึกษาการใช้น้ำหมักชีวภาพบำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มร่วมกับเฟนตันรีเอเจนต์ไม่สามารถกระทำได้นี้เนื่องจาก จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเติมน้ำหมักชีวภาพในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ทำให้น้ำทิ้งมีปริมาณสารอินทรีย์ และความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ น้ำหมักชีวภาพอาจมีลักษณะสมบัติเด่นด้านการบำบัดกลิ่นและสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้โดยง่ายด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (สมศักดิ์ นุกุลอุดม, 2543; Chantsavang *et al.*, 1993) สำหรับสีในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเกิดจากแอนโทไซยานิน แคโรทีน เมลานอยดิน โพลีฟีนอล ลิกนิน และแทนนิน (Hartley, 1977; Hwang *et al.*, 1978; Barker and Worgan, 1981) ซึ่งสารอินทรีย์เหล่านี้ย่อยสลายได้ยากด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (Mohan and Karthikeyan, 1997; Kestioglu *et al.*, 2005)

3 การบำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเฟนตันรีเอเจนต์

น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพแล้ว ยังคงมีค่าความสกปรกในรูปของสารอินทรีย์ และความเข้มข้นไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมของประเทศไทย เป็นผลให้ไม่สามารถปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติได้ เฟนตันรีเอเจนต์ หรือเฟนตันออกซิเดชัน เป็นกระบวนการหนึ่งในกลุ่มของกระบวนการออกซิเดชันออกซิเดชัน (**advance oxidation processes, AOPs**) ซึ่งจัดเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งในการนำไปใช้กำจัดสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ตลอดจนการนำไปใช้บำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตด้านการเกษตร อุตสาหกรรมสิ่งทอ และเคมีภัณฑ์ เป็นต้น

ในการทดลองครั้งนี้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี เนื่องจากมีข้อจำกัดด้านเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์สารอินทรีย์รวม (**Total Organic Carbon Analyzer**) แต่เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารรบกวนหรือแทรกซ้อน (**interference**) การวิเคราะห์ซีโอดี โดยการทำปฏิกิริยากับโพแทสเซียมไดโครเมต ฉะนั้นจำเป็นต้องกำจัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหลืออยู่หลังจากบำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเฟนตันรีเอเจนต์ก่อนนำไปวิเคราะห์หาค่าซีโอดี จากการทดลองเบื้องต้นเพื่อกำจัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยวิธีการปรับค่าพีเอชของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ผ่านการบำบัดด้วยเฟนตันรีเอเจนต์ให้อยู่ในช่วง

7-10 ตามรายงานการวิจัยที่ผ่านมา (Meriç *et al.*, 2004; Barros *et al.*, 2006; Papadopoulos *et al.*, 2007) พบว่าหลังจากปรับค่าพีเอชแล้วทำให้หลีกเลี่ยงการตกตะกอน แต่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ยังคงมีอยู่ ส่วนวิธีการให้ความร้อนตามรายงานการวิจัยของ Heredia และคณะ (2004) พบว่าไม่สามารถกำจัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในระยะเวลาอันสั้นได้เช่นกัน แต่จากการทดลองโดยการปล่อยตัวอย่างน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ผ่านการบำบัดด้วยเฟนตันรีเอเจนต์ทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทดสอบการเหลืออยู่ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยวิธีโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Mendham *et al.*, 2000) ผลปรากฏว่าไม่พบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ฉะนั้นในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีในครั้งนี้ใช้วิธีการป้องกันการรบกวนหรือแทรกซ้อนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยวิธีการปล่อยตัวอย่างทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

3.1 ผลความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

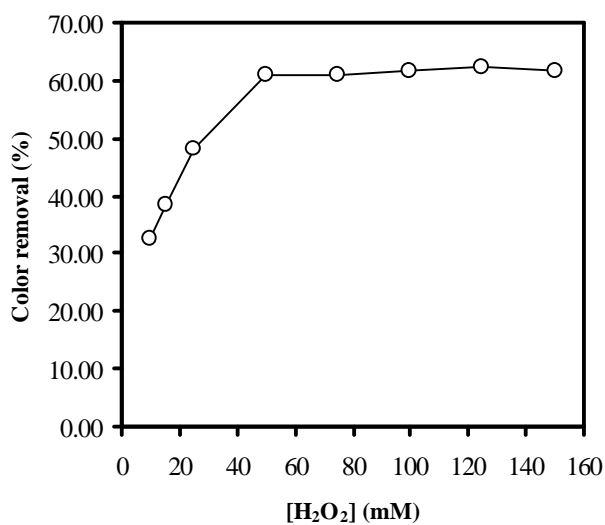
จากการศึกษาหาความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการกำจัดสีในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยกำหนดให้ความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์รัสไอออนคงที่ที่ 1.0 mM พีเอชของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเท่ากับ 3.0 ± 0.2 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ศึกษาเท่ากับ 10, 15, 25, 50, 75, 100, 125, และ 150 มิลลิโมลาร์ ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีประสิทธิภาพการกำจัดสีเท่ากับ 32.58, 38.45, 48.04, 61.11, 60.91, 61.63, 62.45 และ 61.73 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ภาพที่ 20) จากผลการทดลองพบว่า เมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น (จาก 10 เป็น 15 เป็น 25 และ เป็น 50 มิลลิโมลาร์) ประสิทธิภาพการกำจัดสีมีเปอร์เซ็นต์สูงขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นตามสมการ (1)-(2) (Burbano *et al.*, 2005) แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากกว่า 50 มิลลิโมลาร์ กลับไม่มีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลลดลง จากการที่อนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH^\bullet) และอนุมูลอิสระไฮโดรเปอร์ดรอกซิล (HO_2^\bullet) เข้าทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ดังสมการ (3)-(4) และเกิดการจับตัวกันเองของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH^\bullet) และอนุมูลอิสระไฮโดรเปอร์ดรอกซิล (HO_2^\bullet) ดังสมการ (5)-(7) เป็นผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีลดตามไปด้วย (Malik and Saha, 2003; Papadopoulos *et al.*, 2007; Wongniramaikul *et al.*, 2007) และเมื่อพิจารณาค่าคงที่ของปฏิกิริยาพบว่า ค่าคงที่ของปฏิกิริยาในสมการ (3)-(7) มีค่ามากกว่าค่าคงที่ของปฏิกิริยาในสมการ (1)-(2) นั่นคือ ปฏิกิริยาในสมการ (3)-(7) มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่าปฏิกิริยาในสมการ (1)-(2) ดังนั้นจากผลการทดลอง ความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คือ 50 มิลลิโมลาร์ และ

จากการนำส่วนใสที่ได้จากการปล่อยทิ้งไว้ให้ตกตะกอนและกำจัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ไปวัดค่าซีโอดีพบว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 10, 15, 25, 50, 75, 100, 125 และ 150 มิลลิโมลาร์ ให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีเท่ากับ 31, 38, 61, 81, 82, 74, 71 และ 68 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ภาพที่ 21)

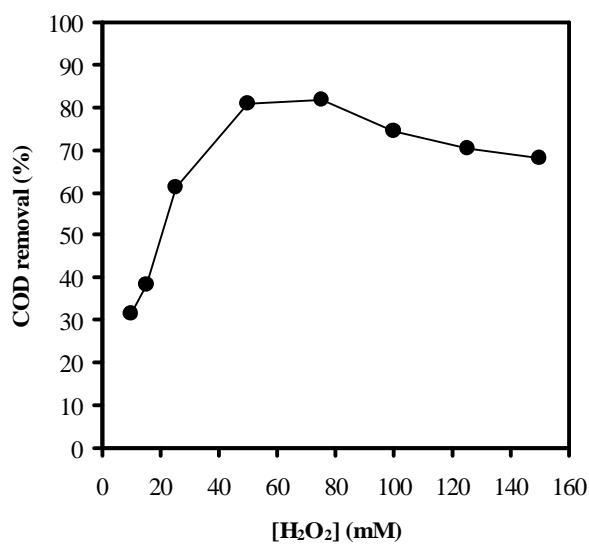
เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี (ภาพที่ 20 และ 21) พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีมีความสัมพันธ์กัน กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและสารอินทรีย์สูงขึ้นไปในทิศทางเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 100, 125 และ 150 มิลลิโมลาร์ ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการลดลงของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลดังแสดงไว้ตามสมการ (3)-(7) เมื่ออนุมูลอิสระไฮดรอกซิลลดลง ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีลดลงตามไปด้วยเช่นกัน (Malik and Saha, 2003; Papadopoulos *et al.*, 2007; Wongniramaikul *et al.*, 2007)

นอกจากนี้การสลายพันธะคู่และพันธะเดี่ยวของโครงสร้างสารอินทรีย์ด้วยอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH^\bullet) สามารถทำให้ความเข้มข้นลดลงได้ แต่สารประกอบคาร์บอนยังคงอยู่ ขณะที่การกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี เป็นการกำจัดอย่างสมบูรณ์ของปฏิกิริยา (mineralization) คือเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ (Tavompanich and Sinopkum, 2001; Zhang *et al.*, 2009) ซึ่งใช้ระยะเวลามากกว่าการลดลงของความเข้มข้น (Alaton and Teksoy, 2007; Lee and Shoda, 2008) จะเห็นได้จากการลดลงของสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี ที่มีประสิทธิภาพเท่ากับ 81 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาการบำบัด 24 ชั่วโมง ขณะที่ระยะเวลาการบำบัด 5 นาที สามารถลดความเข้มข้นได้ 61.11 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เท่ากันคือ 50 มิลลิโมลาร์





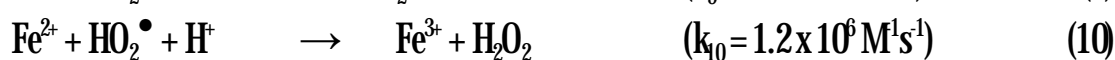
ภาพที่ 20 ผลความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการลดลงของสี ($\text{Fe}^{2+} = 1.0 \text{ mM}$; $\text{pH } 3.0 \pm 0.2$; ระยะเวลาการบำบัด 5 นาที; optical density 475 นาโนเมตร)

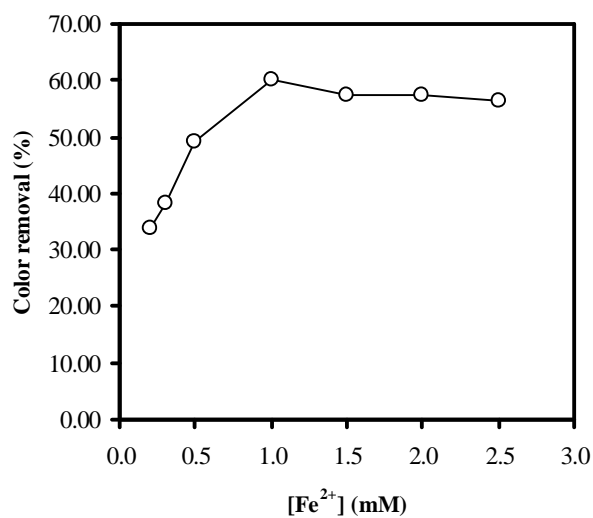


ภาพที่ 21 ผลความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการลดลงของซีโอดี ($\text{Fe}^{2+} = 1.0 \text{ mM}$; $\text{pH } 3.0 \pm 0.2$; ระยะเวลาการบำบัด 24 ชั่วโมง)

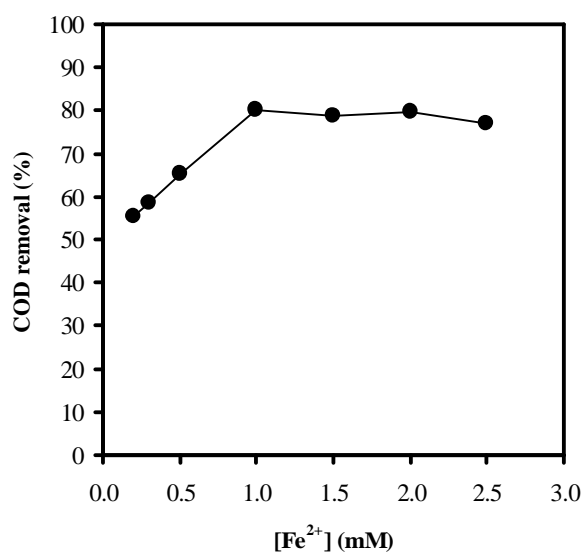
3.2 ผลความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์รัสไอออน

จากการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์รัสไอออนต่อการกำจัดสีในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยกำหนดให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คงที่ที่ 50 มิลลิโมลาร์ พีเอชของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเท่ากับ 3.0 ± 0.2 ความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์รัสไอออนที่ศึกษาเท่ากับ 0.2, 0.3, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 มิลลิโมลาร์ ผลการทดลองพบว่า ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์รัสไอออนต่างๆ ที่ศึกษาให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดสีเท่ากับ 33.82, 38.17, 49.07, 60.08, 57.52, 57.29 และ 56.29 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ภาพที่ 22) จากผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดสีมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากเฟอร์รัสไอออนเป็นตัวเร่งให้เกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล แต่อย่างไรก็ตาม ค่าความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออนที่มากเกินไปมีผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีลดลงได้ จากภาพที่ 22 พบว่าค่าความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออนมากกว่า 1.0 มิลลิโมลาร์ ประสิทธิภาพการกำจัดสีมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH^\bullet) และอนุมูลอิสระไฮโดรเปอร์ออกซิล (HO_2^\bullet) ถูกยับยั้งโดยเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) (Meriç *et al.*, 2004; Wongniramaikul *et al.*, 2007; Xu *et al.*, 2007; Lee and Shoda, 2008) ดังสมการ (8)-(10) จากสมการจะเห็นว่าเมื่อเหล็กเข้าทำปฏิกิริยากับอนุมูลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำให้กลายเป็นอนุมูลไฮดรอกไซด์ และไฮโดรเจนไอออน ซึ่งไม่สามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้ และเมื่อพิจารณาค่าคงที่ของปฏิกิริยาพบว่า ค่าคงที่ของปฏิกิริยาในสมการ (8)-(10) มีค่ามากกว่าค่าคงที่ของปฏิกิริยาในสมการ (1)-(2) นั่นคือ ปฏิกิริยาในสมการ (8)-(10) มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่าปฏิกิริยาในสมการ (1)-(2) ดังนั้นความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์รัสไอออนที่เหมาะสมในการศึกษาครั้งนี้คือ 1.0 มิลลิโมลาร์ สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเปลี่ยนกลับมาอยู่ในรูปเดิม คือเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ได้ดังสมการ (2) และ (9) โดยไม่ได้สูญเสียไปกับปฏิกิริยาแต่อย่างใด และจากการนำส่วนสีที่ได้จากการปล่อยทิ้งไว้ให้ตกตะกอนและกำจัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ไปวัดค่าซีโอดีพบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์รัสไอออนให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีเท่ากับ 56, 58, 65, 80, 79, 80 และ 77 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ภาพที่ 23)





ภาพที่ 22 ผลความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์รัสไอออนต่อการลดลงของสี ($\text{H}_2\text{O}_2 = 50 \text{ mM}$; pH 3.0 ± 0.2 ; ระยะเวลาการบำบัด 5 นาที; optical density 475 นาโนเมตร)

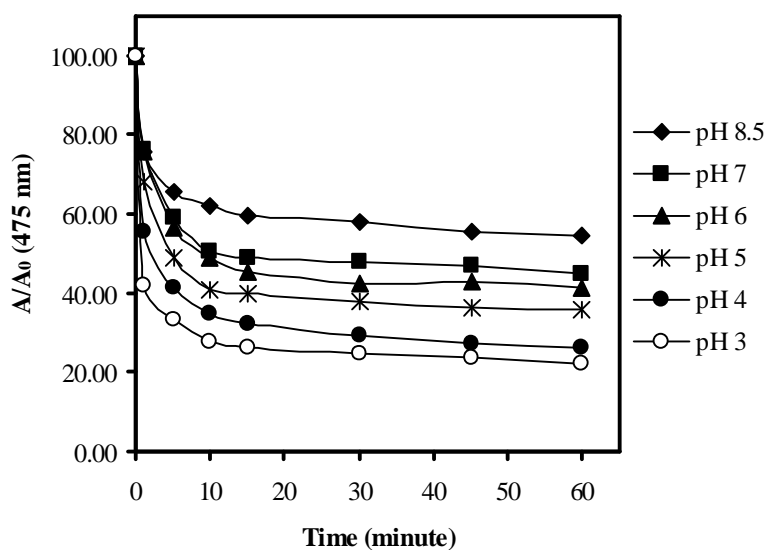


ภาพที่ 23 ผลความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์รัสไอออนต่อการลดลงของซีโอดี ($\text{H}_2\text{O}_2 = 50 \text{ mM}$; pH 3.0 ± 0.2 ; ระยะเวลาการบำบัด 24 ชั่วโมง)

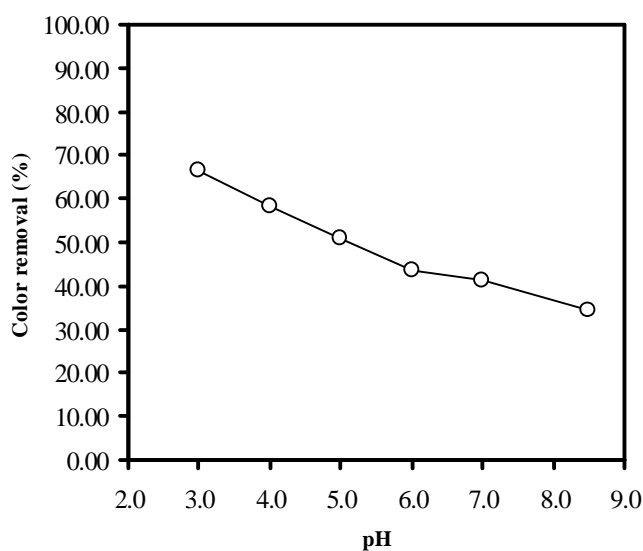
3.3 ผลของพีเอชเริ่มต้น

สำหรับการศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นต่อการกำจัดสีและสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ระดับพีเอชต่างๆ และสามารถนำผลข้อมูลที่ได้มาประกอบการตัดสินใจปรับลดค่าพีเอชน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ได้ทำการศึกษาที่พีเอชปกติของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม คือ 8.5 และปรับพีเอชน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกรดซัลฟิวริกให้มีค่าเท่ากับ 7.0, 6.0, 5.0, 4.0 และ 3.0 ตามลำดับ โดยกำหนดให้ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 50 และ 1.0 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ จากผลการทดลองในข้อ 3.1 และ 3.2 ผลการศึกษาพบว่าที่พีเอช 3.0 เฟนตันรีเอเจนต์มีประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงสุดคือ 66.53 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่พีเอช 8.5, 7.0, 6.0, 5.0 และ 4.0 ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีเท่ากับ 34.18, 41.10, 43.50, 50.90 และ 58.45 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ภาพที่ 24 และ 25) และจากการนำส่วนสีที่ได้จากการปล่อยทิ้งไว้ให้ตกตะกอนและกำจัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ไปวัดค่าซีโอดีพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีสูงสุดที่พีเอช 3.0 คือ 82 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่พีเอช 8.5, 7.0, 6.0, 5.0 และ 4.0 ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์เท่ากับ 20, 27, 33, 57 และ 79 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ภาพที่ 26) ทั้งนี้เนื่องจากที่พีเอช 3.0 มีอัตราของปฏิกิริยาสูงสุดโดยเห็นได้จากความชันของเส้นกราฟในภาพที่ 24 ซึ่งเกิดจากเหล็กอยู่ในรูปของสารละลาย (Bab *et al.*, 1951; Lin and Lo, 1997; Gulkaya *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2007) ส่วนที่พีเอช มากกว่า 3.0 เหล็กเกิดการตกตะกอน และทำให้เหล็กอยู่ในรูปเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) ซึ่งไม่สามารถใช้เป็นตัวเร่งในการเกิดปฏิกิริยาเฟนตันได้ (Faust and Hoigne, 1990; Neantu *et al.*, 2003; Papadopoulos *et al.*, 2007) นอกจากนี้ที่พีเอชมากกว่า 3.0 เกิดการรบกวนจากคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) และไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) โดยคาร์บอเนตและไบคาร์บอเนตในน้ำสามารถทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH^\bullet scavenge) เกิดเป็นอนุมูล $\text{CO}_3^{\bullet-}$ ดังสมการ (11)-(12) ส่งผลให้ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาลดลง (Andreozzi *et al.*, 1999; Czapski *et al.*, 1999; Liao *et al.*, 2001; Bonini *et al.*, 2004; Chiron *et al.*, 2009) สำหรับที่พีเอชน้อยกว่า 3.0 ทำให้ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาลดลงเช่นเดียวกัน เนื่องจากอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH^\bullet) ลดลงจากการทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ดังสมการ (13) และถูกยับยั้งจากกรดซัลฟิวริกดังสมการ (14)-(17) (Laat *et al.*, 2004; Wongniramaikul *et al.*, 2007)

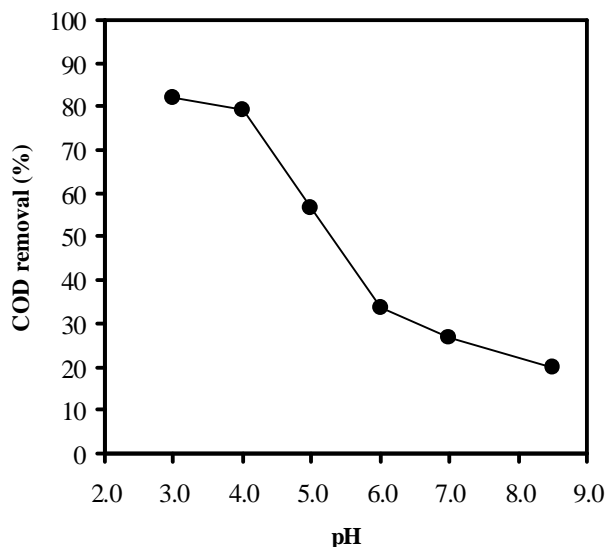




ภาพที่ 24 ผลของพีเอชเริ่มต้นต่อการลดลงของสีที่ระยะเวลาต่างๆ ($\text{H}_2\text{O}_2 = 50 \text{ mM}$; $\text{Fe}^{2+} = 1.0 \text{ mM}$)



ภาพที่ 25 ผลของพีเอชเริ่มต้นต่อการลดลงของสี ($\text{H}_2\text{O}_2 = 50 \text{ mM}$; $\text{Fe}^{2+} = 1.0 \text{ mM}$; ระยะเวลาการบำบัด 5 นาที; optical density 475 นาโนเมตร)

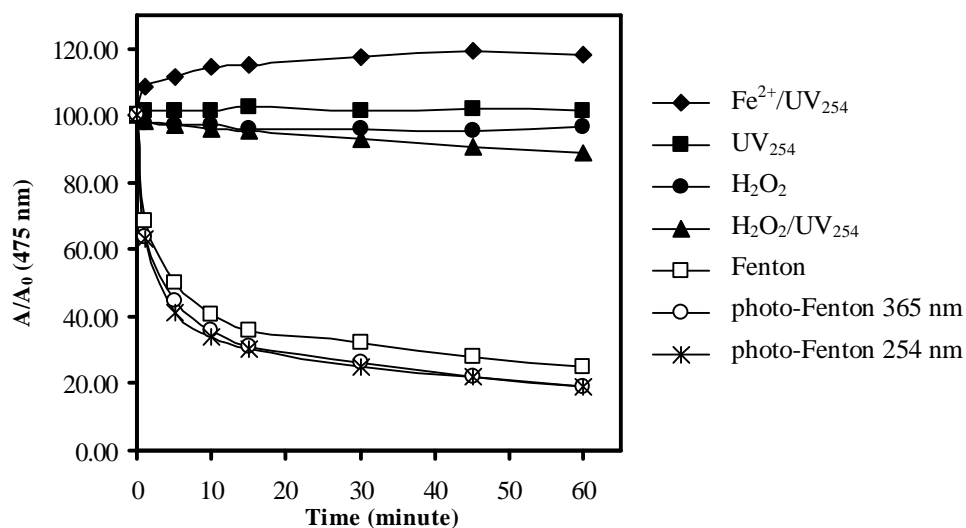


ภาพที่ 26 ผลของพีเอชเริ่มต้นต่อการลดลงของซีโอดี ($\text{H}_2\text{O}_2 = 50 \text{ mM}$; $\text{Fe}^{2+} = 1.0 \text{ mM}$; ระยะเวลาการบำบัด 24 ชั่วโมง)

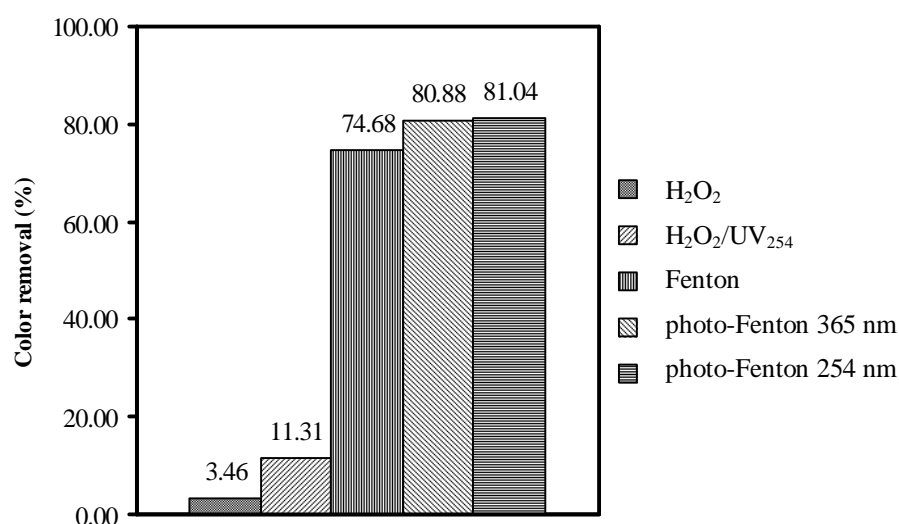
3.4 ผลของแสงยูวี

จากการศึกษาการกำจัดสีในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการออกซิเดชันแบบต่างๆ พบว่าเฟนตันรีเอเจนต์สามารถกำจัดสีในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มได้สูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับบำบัดด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับแสงยูวีที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร (UVC) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว (ภาพที่ 27) โดยสามารถกำจัดสีในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มได้ 7468, 11.31 และ 346 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ภาพที่ 28) สำหรับเฟอร์รัสไอออนร่วมกับแสงยูวี และแสงยูวีเพียงอย่างเดียวไม่สามารถบำบัดได้ เนื่องจากไม่มีแหล่งกำเนิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล แต่เมื่อใช้แสงยูวีร่วมกับเฟนตันรีเอเจนต์หรือที่เรียกว่าโฟโตเฟนตัน (photo-Fenton) พบว่า ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มสูงขึ้นเป็น 81.04 เปอร์เซ็นต์ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร (UVC) ซึ่งเกิดจากแสงยูวีไปกระตุ้นปฏิกิริยาทำให้เกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเพิ่มมากขึ้น (Catalkaya and Kargi, 2007) ดังสมการ (18) แต่ในกรณีการทดลองนี้ผลของแสงยูวีที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร (UVC) และ 365 นาโนเมตร (UVA) ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มต่างกันเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับงานวิจัยการกำจัดสีและสารอินทรีย์ที่ผ่านมา (Feng et al., 2004; Feng et al., 2005; Wei et al., 2006) ทั้งนี้อาจเกิดจากความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีค่าต่ำ ทำให้

ประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยโฟโตเฟนตันที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร (UVC) และ 365 นาโนเมตร (UVA) มีค่าต่างกันเพียงเล็กน้อย



ภาพที่ 27 ผลการกำจัดสีด้วยแสงยูวีและกระบวนการออกซิเดชันที่ระยะเวลาต่างๆ ($\text{H}_2\text{O}_2 = 50 \text{ mM}$; $\text{Fe}^{2+} = 1.0 \text{ mM}$; $\text{pH } 3.0 \pm 0.2$; หลอดยูวีกำลัง 6 วัตต์)

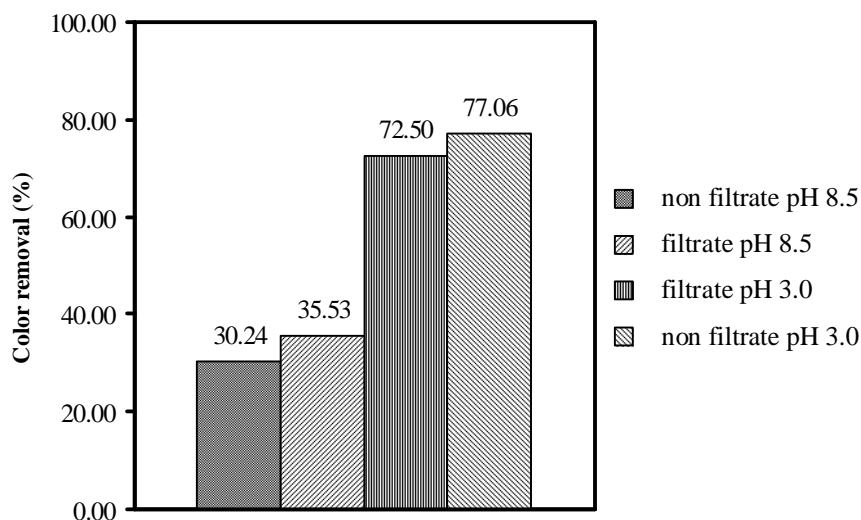


ภาพที่ 28 ผลการกำจัดสีด้วยแสงยูวีและกระบวนการออกซิเดชัน ($\text{H}_2\text{O}_2 = 50 \text{ mM}$; $\text{Fe}^{2+} = 1.0 \text{ mM}$; $\text{pH } 3.0 \pm 0.2$; optical density 475 นาโนเมตร; ระยะเวลาการบำบัด 24 ชั่วโมง; หลอดยูวีกำลัง 6 วัตต์)

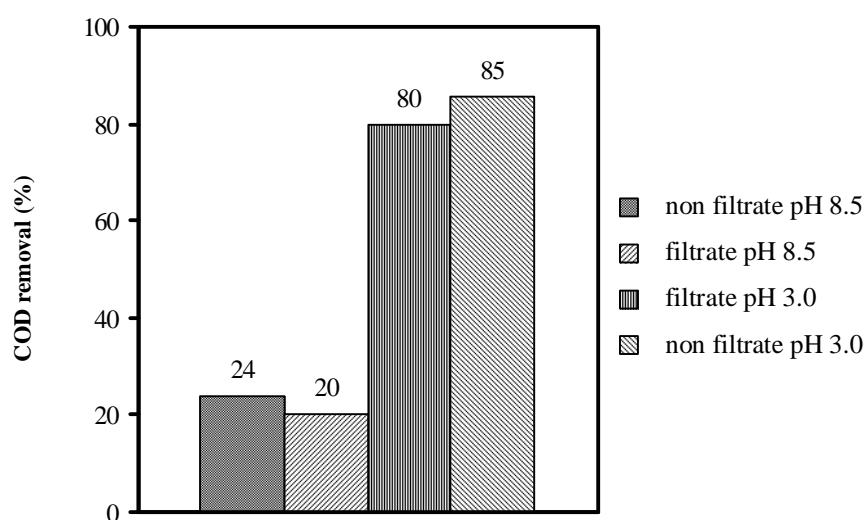
3.5 ผลของการกรองตัวอย่างน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มต่อประสิทธิภาพการบำบัด

เนื่องจากน้ำทิ้งที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มมีปริมาณมาก และลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มแตกต่างกันออกไปไม่ว่าจะเป็นค่าความสกปรก พีเอช สารแขวนลอยหรือความขุ่นเองก็มีผลต่อประสิทธิภาพของปฏิกิริยาเฟนตัน จากการทดลองพบว่า น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกรองด้วยแผ่นกรองใยแก้ว **GF/C** และไม่ผ่านการกรองโดยปรับพีเอชเป็น **3.0** มีประสิทธิภาพการกำจัดสี **72.50** และ **77.06** เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ไม่มีการปรับพีเอชทั้งในแบบที่ผ่านการกรองด้วยแผ่นกรองใยแก้ว **GF/C** และไม่ผ่านการกรอง พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดสีเพียง **35.53** และ **30.24** เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ภาพที่ 29) และจากการนำส่วนใสที่ได้จากการปล่อยให้ตกตะกอนและกำจัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นเวลา **24** ชั่วโมง ไปวัดค่าซีโอดีพบว่าน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกรองและไม่ผ่านการกรองโดยปรับพีเอชเป็น **3.0** ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์เท่ากับ **80** และ **85** เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ไม่มีการปรับพีเอชทั้งในแบบที่ผ่านการกรอง และไม่ผ่านการกรอง พบว่าให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์เพียง **20** และ **24** เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ภาพที่ 30) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าผลของการกรองนั้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสีเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับผลของค่าพีเอชในช่วงที่เหมาะสม

ทั้งนี้ น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกรองโดยปรับพีเอชเป็น **3.0** มีประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีต่ำกว่าน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ไม่ผ่านการกรองโดยปรับพีเอชเป็น **3.0** เนื่องจากสารอินทรีย์แขวนลอยซึ่งรวมถึงสารที่ทำให้เกิดสีบางส่วนถูกกรองออกไป คงเหลือไว้ซึ่งสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำและคอลลอยด์ที่ก่อให้เกิดสีจริงในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ทำให้ค่าเริ่มต้นของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกรองมีค่าลดลง ฉะนั้นเมื่อเทียบสัดส่วนการลดลงจากค่าดังกล่าวทำให้ได้ค่าการลดลงที่น้อยกว่า



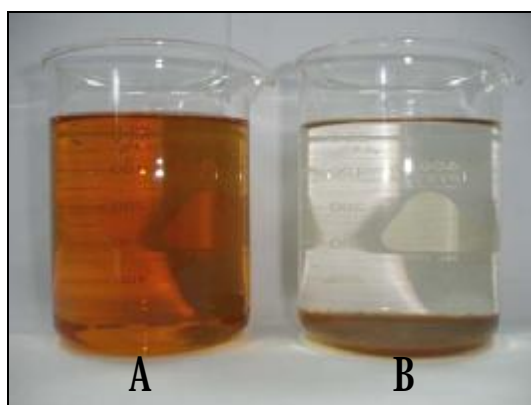
ภาพที่ 29 ผลของการกรองตัวอย่างน้ำทิ้งเปรียบเทียบกับผลของพีเอชต่อการลดลงของสี ($\text{H}_2\text{O}_2 = 50\text{mM}$, $\text{Fe}^{2+} = 1.0\text{mM}$, optical density 475 นาโนเมตร; ระยะเวลาการบำบัด 60 นาที)



ภาพที่ 30 ผลของการกรองตัวอย่างน้ำทิ้งเปรียบเทียบกับผลของพีเอชต่อการลดลงของซีโอดี ($\text{H}_2\text{O}_2 = 50\text{mM}$, $\text{Fe}^{2+} = 1.0\text{mM}$, ระยะเวลาการบำบัด 24 ชั่วโมง)

น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มหลังผ่านการกรองมีสีดังแสดงในภาพที่ 31 (A) ส่วนในภาพที่ 31 (B) คือ น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกรองและบำบัดด้วยเฟนตันรีเอเจนต์ที่สภาวะเหมาะสม คือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 50 มิลลิโมลาร์ เฟอร์รัสไอออน 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอช

30 และปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา **24** ชั่วโมง ซึ่งมีสีอ่อนลงมาก และจางกว่าสีของน้ำในแม่ น้ำ ล้าคลองโดยทั่วไป มีค่าซีไอดี บีไอดี และสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำเท่ากับ **61-70**, **5-9** และ **18-22** มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และมีค่าการนำไฟฟ้า **6.25-8.22** มิลลิซีเมนต่อเซนติเมตร สำหรับสลัดจ์ ที่เกิดขึ้นหลังจากบำบัดด้วยเฟนตันรีเอเจนต์ที่สภาวะเหมาะสมอยู่ในช่วง **315-350** มิลลิกรัมต่อลิตร หรือเฉลี่ย **330** มิลลิกรัมต่อลิตร และสามารถกำจัดแทนนิน-ลิกนินได้ **43.63** เปอร์เซ็นต์ (ภาคผนวก จ.)



ภาพที่ 31 น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มก่อนบำบัด (A) และหลังจากบำบัดด้วยเฟนตันรีเอเจนต์ (B)

3.6 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา (kinetic reaction)

ทำการทดลองโดยบันทึกการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นคือ ความเข้มข้นกับเวลา จากนั้นนำผลที่ได้มาเขียนกราฟ โดยพลอต $\log A$ กับ เวลา พบว่าการกำจัดสีในน้ำทิ้งโรงงานสกัด น้ำมันปาล์มเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (first-order reaction) ซึ่งสามารถหาค่าคงที่เฉพาะของอัตรา (k) ของปฏิกิริยาได้จากสมการ (19)

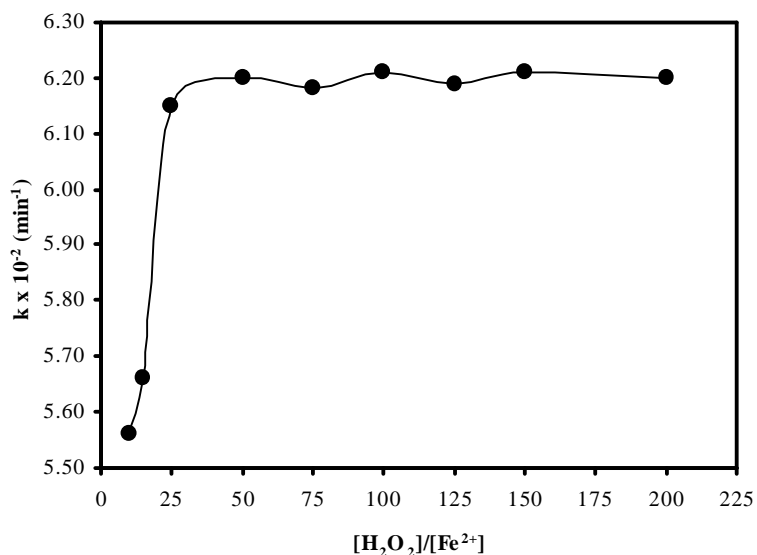
$$\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยา} = \ln\left(\frac{A_t}{A_0}\right) = -kt \quad (19)$$

$$\text{หรือ} = \ln\left(\frac{A_0}{A_t}\right) = kt \quad (20)$$

เมื่อ A_0 = ความเข้มข้นของสีจากพื้นที่ได้กราฟเริ่มต้น
 A_t = ความเข้มข้นของสีจากพื้นที่ได้กราฟ ณ เวลาใดๆ
 k = ค่าคงที่เฉพาะของอัตรา

แต่อย่างไรก็ตามกราฟที่ได้จากการพลอตระหว่าง $\log A$ กับเวลา พบว่ามีค่า R^2 ก่อนข้างต่ำ (0.7587-0.8059) (ภาคผนวก ข.) ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาเริ่มต้นของการบำบัด แต่ไม่สามารถทำการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงระยะเวลาเริ่มต้นของปฏิกิริยาในระยะเวลาอันสั้นและถี่ได้ เนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มหลังจากบำบัดด้วยเฟนตันรีเอเจนต์มีสลัดจ์เกิดขึ้น (230-485 มิลลิกรัมต่อลิตร) จำเป็นต้องทำการกรองตัวอย่างก่อนนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ส่งผลให้การตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงเริ่มต้นของปฏิกิริยาทำได้น้อยครั้ง

ค่าคงที่เฉพาะของอัตราที่อัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเฟอร์รัสไอออน 10, 15, 25, 50, 75, 100, 125 และ 150 เท่ากับ 5.56×10^2 , 5.66×10^2 , 6.15×10^2 , 6.20×10^2 , 6.18×10^2 , 6.21×10^2 , 6.19×10^2 , 6.21×10^2 และ 6.20×10^2 นาที⁻¹ ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 32 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าคงที่เฉพาะของอัตราเริ่มคงที่ที่อัตราส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 50 หรือการเพิ่มขึ้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่สามารถทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วเพิ่มขึ้นได้นั่นเอง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของสี ฉะนั้นอัตราส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเฟอร์รัสไอออนที่เหมาะสมคือ 50



ภาพที่ 32 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยากำจัดสีน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเฟนตันรีเอเจนต์

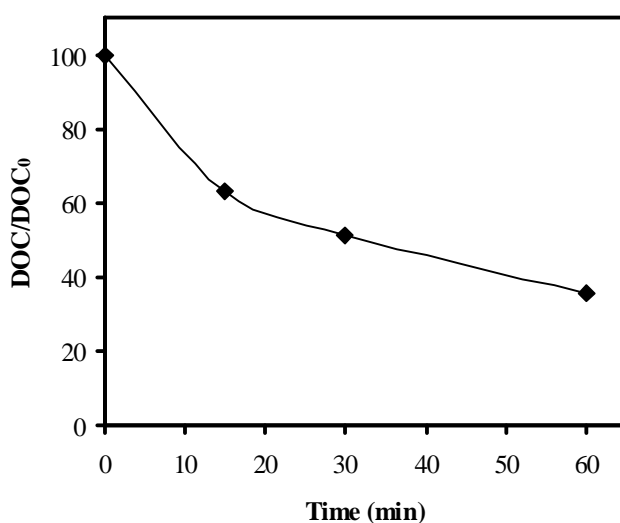
3.7 ผลการกำจัดสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ (Dissolved Organic Carbon) ด้วยเฟนตันรีเอเจนต์

จากการทดสอบสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มหลังจากบำบัดด้วยเฟนตันรีเอเจนต์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 50 มิลลิโมลาร์ และ

เฟอร์รัสไอออน 1.0 มิลลิโมลาร์ ที่เวลาต่างๆ พบว่าปริมาณสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำมีการลดลงตามระยะเวลาการบำบัด (ภาพที่ 33) โดยสามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ 37 และ 64 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาการบำบัด 15 และ 60 นาที และที่ระยะเวลาการบำบัด 24 ชั่วโมงสามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ 85 เปอร์เซ็นต์ และจากการพลอตกราฟการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำกับเวลา (ภาคผนวก ข.) พบว่าการกำจัดสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง (second-order reaction) และจากการหาค่าคงที่เฉพาะของอัตรา (k) ของปฏิกิริยาจากสมการ (21) พบว่ามีค่าเท่ากับ 2.19×10^4 (มิลลิกรัมต่อลิตร)⁻¹นาที่⁻¹

$$\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยา} = \left(\frac{1}{A_t} \right) - \left(\frac{1}{A_0} \right) = kt \quad (21)$$

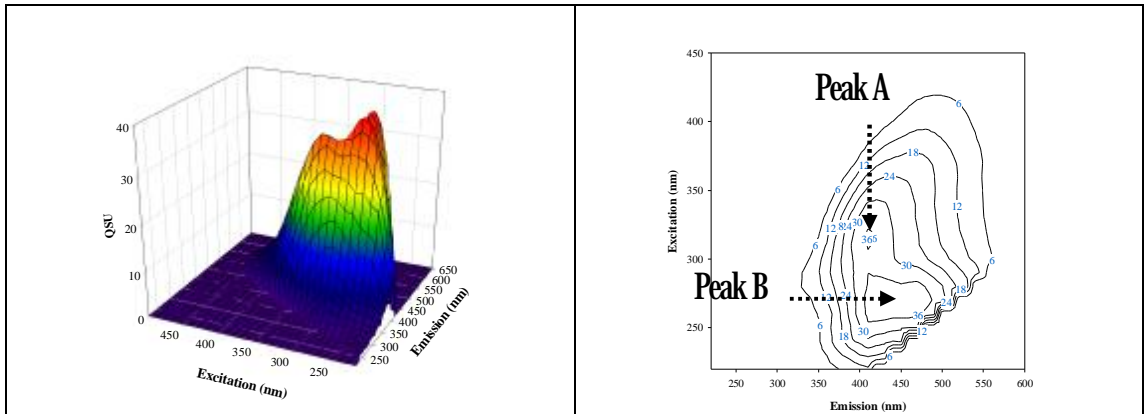
จากการศึกษาของ Lucas และ Peres (2006) พบว่าปฏิกิริยากำจัดสีซีย้อมผ้ามีค่าคงที่เฉพาะของอัตราเท่ากับ 1.225 นาที่⁻¹ เมื่อเปรียบเทียบกับปฏิกิริยากำจัดสีในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มซึ่งมีค่าคงที่เฉพาะของอัตราเท่ากับ 6.20×10^2 นาที่⁻¹ แสดงให้เห็นว่าสีในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มย่อยสลายได้ยากกว่าสีซีย้อมผ้า และเมื่อเปรียบเทียบปฏิกิริยากำจัดสารอินทรีย์พบว่าสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มย่อยสลายได้ยากกว่าสารอินทรีย์ในน้ำเสียต้มเนื้อไม้ โดยปฏิกิริยากำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียต้มเนื้อไม้มีค่าคงที่เฉพาะของอัตราเท่ากับ 2.30×10^4 (มิลลิกรัมต่อลิตร)⁻¹นาที่⁻¹ (Guedes et al., 2003) ขณะที่ค่าคงที่เฉพาะของอัตราของปฏิกิริยากำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีค่าเท่ากับ 2.19×10^4 (มิลลิกรัมต่อลิตร)⁻¹นาที่⁻¹



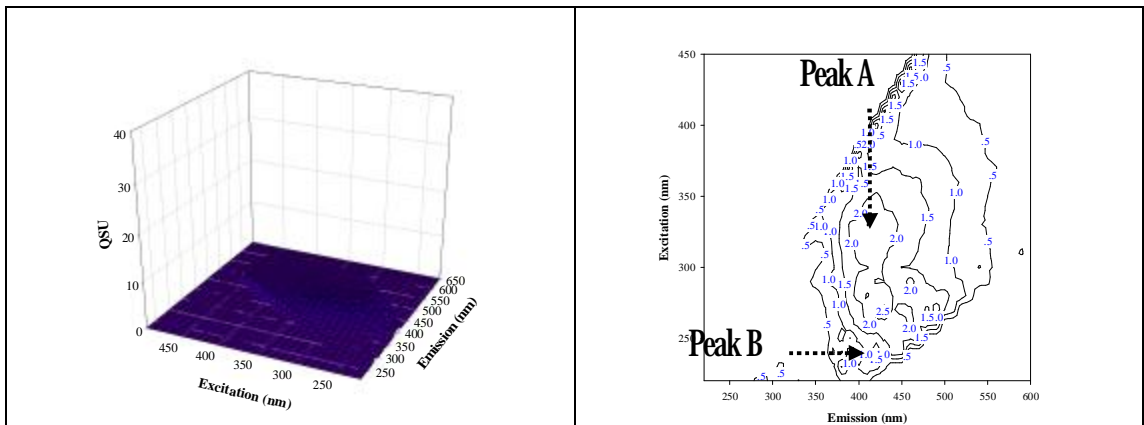
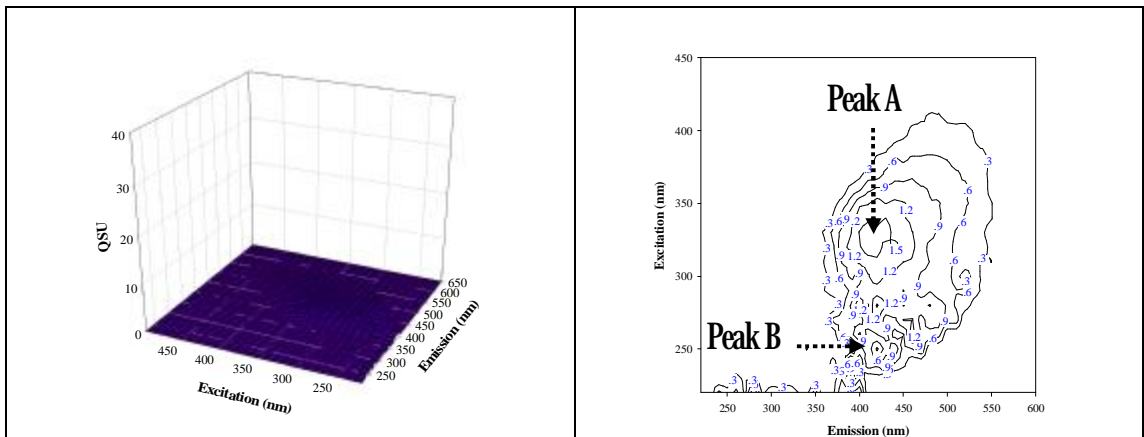
ภาพที่ 33 อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ

3.8 ผลการตรวจวัดกลุ่มสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเทคนิค fluorescent excitation-emission matrix (FEEM)

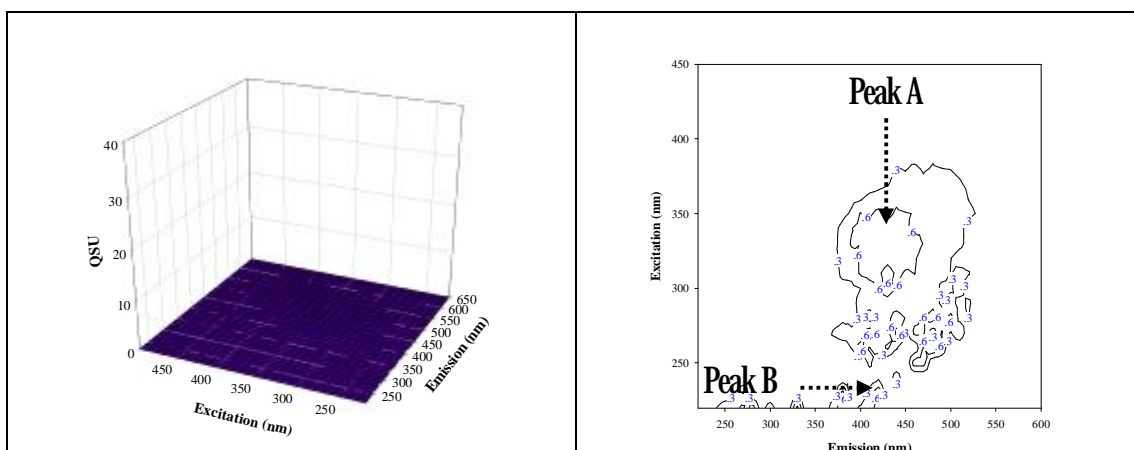
จากการตรวจวัดกลุ่มสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเทคนิค fluorescent excitation-emission matrix (FEEM) ที่ excitation wavelength 220-450 นาโนเมตร และ emission wavelength 220-600 นาโนเมตร พบว่า ตำแหน่งที่มีค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์สูงอย่างชัดเจน (fluorescent peak) ปรากฏอยู่ประกอบด้วย peak A: 315 nm_{Ex}/415 nm_{Em} และ peak B: 260 nm_{Ex}/445 nm_{Em} ในภาพที่ 34 (a) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับขอบเขตของ putative origins ที่พัฒนาโดย Chen และคณะ (2003) และ Musikavong และคณะ (2006) พบว่า fluorescent peak ตำแหน่ง peak A และ B ในภาพที่ 34 (a) ที่ตรวจพบในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเกิดจากสารอินทรีย์กลุ่ม humic acid-like substances และ fulvic acid-like substances ซึ่งเป็นสารอินทรีย์กลุ่มหลักอีกกลุ่มหนึ่งที่ทำให้เกิดสีในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มนอกจากแทนนิน-ลิกนิน (Barker and Worgan, 1981; Fairhurst and Hardtor, 2003) และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ ณ ตำแหน่ง peak A และ B ของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มกับน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ผ่านการบำบัดด้วยเฟนตันรีเอเจนต์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 50 และ 1.0 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ ระยะเวลาการบำบัด 24 ชั่วโมง พบว่าค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่ตำแหน่ง peak A และ B ของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ผ่านการบำบัดด้วยเฟนตันรีเอเจนต์มีค่าลดลง 98.61 เปอร์เซ็นต์ในหน่วยควินินซัลเฟต (quinine sulfate units; QSU) (Janhom *et al.*, 2009) (ตารางที่ 12) ดังนั้นกล่าวได้ว่าเฟนตันรีเอเจนต์สามารถลดสารอินทรีย์กลุ่ม humic acid-like substances และ fulvic acid-like substances ในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มได้อย่างมีประสิทธิภาพ



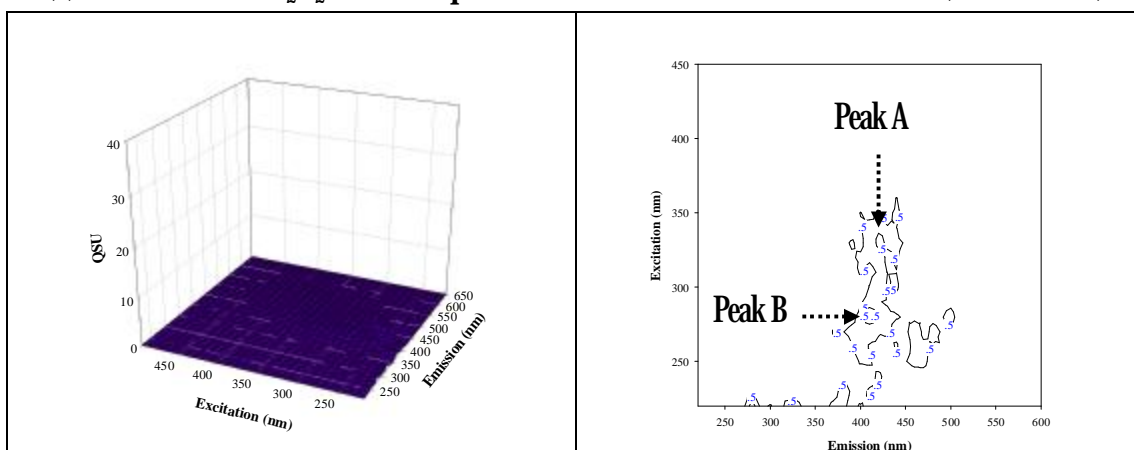
(a) นำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (เจือจาง 25 เท่า)

(b) $\text{Fe}^{2+} = 1.0 \text{ mM}$, $\text{H}_2\text{O}_2 = 5 \text{ mM}$, $\text{pH } 3.0 \pm 0.2$; ระยะเวลาการบำบัด 24 ชั่วโมง (เจือจาง 5 เท่า)(c) $\text{Fe}^{2+} = 1.0 \text{ mM}$, $\text{H}_2\text{O}_2 = 10 \text{ mM}$, $\text{pH } 3.0 \pm 0.2$; ระยะเวลาการบำบัด 24 ชั่วโมง (เจือจาง 5 เท่า)

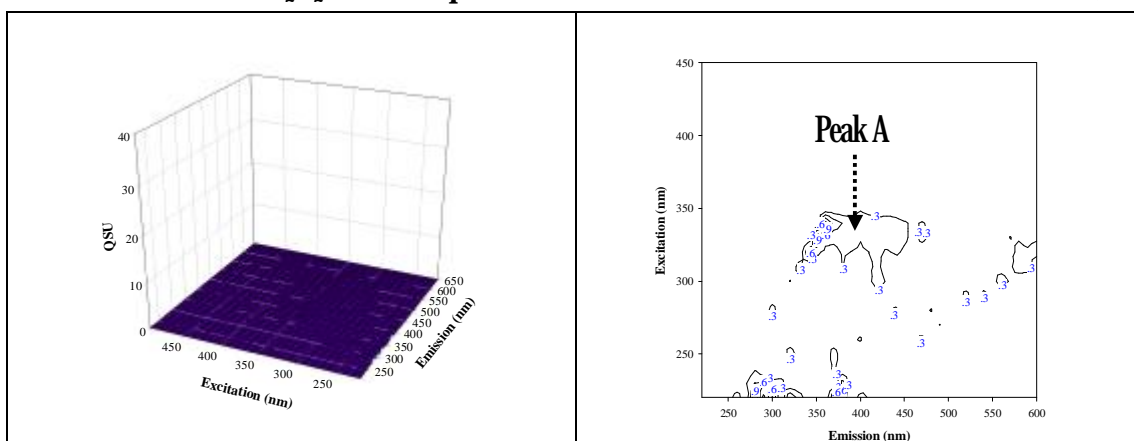
ภาพที่ 34 FEEM ในรูปแบบสามมิติและเส้นชั้นความสูง



(d) $\text{Fe}^{2+} = 1.0 \text{ mM}$, $\text{H}_2\text{O}_2 = 25 \text{ mM}$, $\text{pH } 3.0 \pm 0.2$; ระยะเวลาการบำบัด 24 ชั่วโมง (เงือกจาง 5 เท่า)



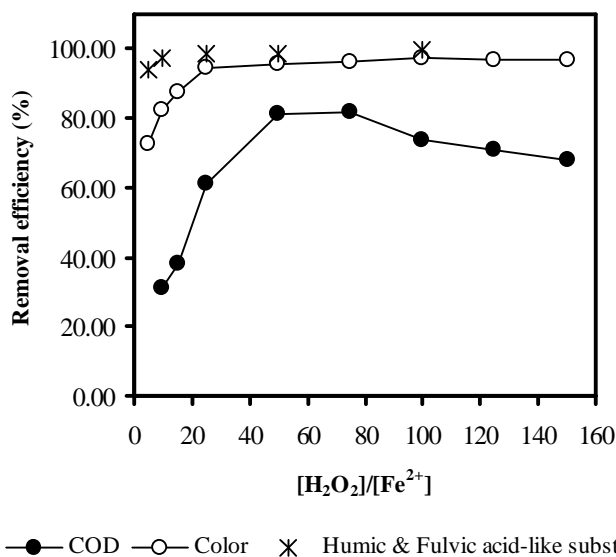
(e) $\text{Fe}^{2+} = 1.0 \text{ mM}$, $\text{H}_2\text{O}_2 = 50 \text{ mM}$, $\text{pH } 3.0 \pm 0.2$; ระยะเวลาการบำบัด 24 ชั่วโมง (เงือกจาง 5 เท่า)



(f) $\text{Fe}^{2+} = 1.0 \text{ mM}$, $\text{H}_2\text{O}_2 = 100 \text{ mM}$, $\text{pH } 3.0 \pm 0.2$; ระยะเวลาการบำบัด 24 ชั่วโมง (เงือกจาง 5 เท่า)
ภาพที่ 34 (ต่อ)

จากการพิจารณาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี และสารอินทรีย์กลุ่ม **humic acid-like substances** และ **fulvic acid-like substances** ที่ระยะเวลาการบำบัด 24 ชั่วโมง (ภาพที่ 35) พบว่าเฟนตันรีเอเจนต์ที่อัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 5 สามารถกำจัดสารอินทรีย์กลุ่ม **humic acid-like substances** และ **fulvic acid-like substances** ได้ 93.75 เปอร์เซ็นต์ในหน่วยควินินซัลเฟต และที่อัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเฟอร์รัสไอออน เท่ากับ 50 สามารถกำจัดสารอินทรีย์กลุ่ม **humic acid-like substances** และ **fulvic acid-like substances** ได้ 98.61 เปอร์เซ็นต์ในหน่วยควินินซัลเฟต จะเห็นว่าสารอินทรีย์ทั้งกลุ่ม **humic acid-like substances** และ **fulvic acid-like substances** สามารถถูกกำจัดได้สูงถึง 93.75 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียง 5 มิลลิโมลาร์ ซึ่งต่างจากซีโอดี นั้นแสดงว่าน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีปริมาณสารอินทรีย์กลุ่ม **humic acid-like substances** และ **fulvic acid-like substances** เพียงเล็กน้อย ทำให้การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นต่ำๆ ก็สามารถกำจัดให้หมดไปได้ ส่วนซีโอดีนั้นเป็นการวัดปริมาณสารอินทรีย์โดยรวมซึ่งรวมถึงสารอินทรีย์กลุ่มอื่นๆ ด้วย ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์โดยรวมในรูปของซีโอดีมีค่าต่ำกว่า และสีของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มก็เช่นเดียวกัน คือเกิดจากสารอินทรีย์หลายกลุ่มซึ่งมีความยากง่ายในการย่อยสลายต่างกัน ฉะนั้นทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของการกำจัดซี และสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีมีค่าต่ำกว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในกลุ่มจำเพาะ คือ **humic acid-like substances** และ **fulvic acid-like substances**

นอกจากนี้ประสิทธิภาพโดยรวมของการกำจัดซีมีค่าสูงกว่าการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี มีสาเหตุมาจาก การที่อนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH^\bullet) เข้าสลายพันธะคู่และพันธะเดี่ยวของโครงสร้างสารอินทรีย์สามารถทำให้ความเข้มข้นลดลงได้ แต่การลดลงของสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีเป็นการหายไปของคาร์บอน ซึ่งเกิดจากการกำจัดอย่างสมบูรณ์ของปฏิกิริยา (**mineralization**) คือเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ฉะนั้นจะเห็นว่าที่อัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเฟอร์รัสไอออนเดียวกัน ประสิทธิภาพการกำจัดซีมีค่าสูงกว่าการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี (Tarvompanich and Srinoppakun, 2001; Zhang *et al.*, 2009)



ภาพที่ 35 ผลการกำจัดสี ซีไอดี และสารอินทรีย์กลุ่ม **humic acid-like substances** และ **fulvic acid-like substances** (ระยะเวลาการบำบัด 24 ชั่วโมง)

ตารางที่ 12 ค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม และน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ผ่านการบำบัดด้วยเฟนตันรีเอเจนต์

ตัวอย่างน้ำ	ความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ (QSU) ¹
น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (เจือจาง 25 เท่า)	7200
น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มหลังผ่าน การบำบัดด้วยเฟนตันรีเอเจนต์ ²	
[H ₂ O ₂]/[Fe ²⁺] = 5 (เจือจาง 5 เท่า)	450 (93.75%) ³
[H ₂ O ₂]/[Fe ²⁺] = 10 (เจือจาง 5 เท่า)	210 (97.08%) ³
[H ₂ O ₂]/[Fe ²⁺] = 25 (เจือจาง 5 เท่า)	1.20 (98.33%) ³
[H ₂ O ₂]/[Fe ²⁺] = 50 (เจือจาง 5 เท่า)	1.00 (98.61%) ³
[H ₂ O ₂]/[Fe ²⁺] = 100 (เจือจาง 5 เท่า)	0.30 (99.58%) ³

หมายเหตุ

1 quinine sulfate units

2 Fe²⁺ = 1.0 mM; pH 3.0±0.2; ระยะเวลาการบำบัด 24 ชั่วโมง

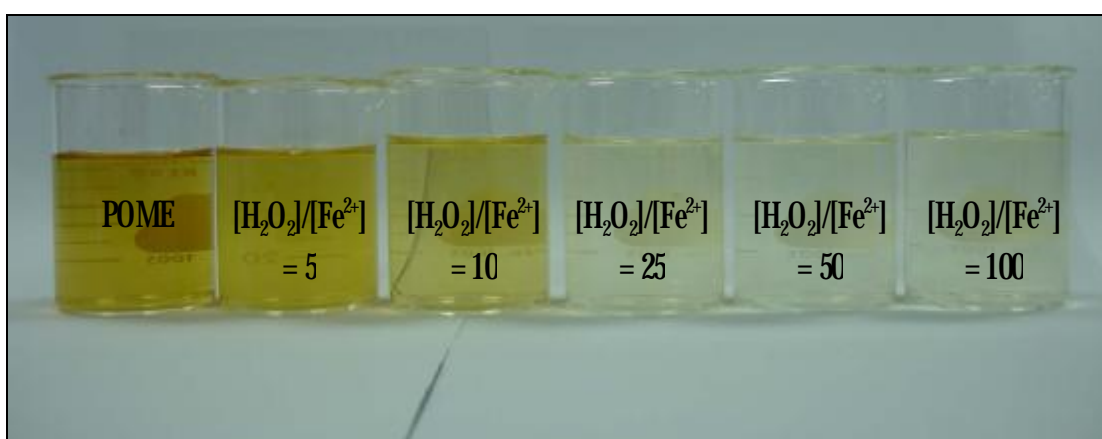
3 เปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์

39 ผลการประเมินความพึงพอใจต่อสีของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

จากการทดสอบความพึงพอใจต่อสีของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (ภาพที่ 36) ด้วยการใช้ **hedonic scale scoring test** (ไพโรจน์ วิริยจารี, 2535) โดยทำการแปลระดับความรู้สึกของผู้ทดสอบเป็นตัวเลข ซึ่งแบ่งออกเป็น 5 ระดับ คือ

5	หมายถึง	เป็นที่พึงพอใจมากที่สุด
4	หมายถึง	เป็นที่พึงพอใจมาก
3	หมายถึง	เป็นที่พึงพอใจปานกลาง
2	หมายถึง	เป็นที่พึงพอใจน้อย
1	หมายถึง	ไม่เป็นที่พึงพอใจ

ผลการศึกษาพบว่าระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีผลต่อความเข้มสีของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยเฟนตันรีเอเจนต์อยู่ในเกณฑ์ไม่เป็นที่พึงพอใจถึงพึงพอใจน้อย ขณะที่น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ผ่านการบำบัดด้วยเฟนตันรีเอเจนต์ที่อัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 5 อยู่ในเกณฑ์เป็นที่พึงพอใจน้อยถึงพึงพอใจปานกลาง ส่วนน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ผ่านการบำบัดด้วยเฟนตันรีเอเจนต์ที่อัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 25, 50 และ 100 อยู่ในเกณฑ์เป็นที่พึงพอใจมากถึงพึงพอใจมากที่สุด (ตารางที่ 13)



ภาพที่ 36 ความเข้มสีของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มหลังผ่านการบำบัดด้วยเฟนตันรีเอเจนต์ที่อัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเฟอร์รัสไอออนระดับต่างๆ ($Fe^{2+} = 1.0\text{mM}$, $pH 3.0 \pm 0.2$; ระยะเวลาการบำบัด 24 ชั่วโมง)

ตารางที่ 13 ผลการประเมินความพึงพอใจต่อสีของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

POME	[H ₂ O ₂]/[Fe ²⁺]					Mean	S.D.	P-value	
	5	10	25	50	100				
สี*	1.45 ^a	2.75 ^b	2.95 ^b	4.85 ^c	4.80 ^c	4.95 ^c	3.63	1.40	0.000

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยในบรรทัดเดียวกันมีอักษรแตกต่างกันแสดงว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เนื่องจากการบำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเฟนตันรีเอเจนต์ที่อัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 25, 50 และ 100 มีผลการประเมินความพึงพอใจต่อสีของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มหลังผ่านการบำบัดอยู่ในเกณฑ์ระดับเดียวกัน ฉะนั้นเพื่อเป็นการลดต้นทุนการบำบัดสามารถใช้เฟนตันรีเอเจนต์ที่อัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 25 บำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มได้ สำหรับน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มหลังจากผ่านการบำบัดด้วยเฟนตันรีเอเจนต์พบว่า มีปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง (น้อยกว่า 120 มิลลิกรัมต่อลิตร) และจากการทดสอบความพึงพอใจต่อสีของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มหลังจากผ่านการบำบัดด้วยเฟนตันรีเอเจนต์อยู่ในเกณฑ์พึงพอใจมากถึงพึงพอใจมากที่สุด กล่าวคือ มีความเข้มข้นลดลงจนไม่เป็นที่พึงรังเกียจ ฉะนั้นนอกจากปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติได้แล้วยังสามารถนำน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วนั้นกลับมาใช้ซ้ำภายในโรงงานได้ เช่น การนำไปใช้ล้างทำความสะอาดเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ภายในโรงงาน เป็นต้น

บทที่ 4

สรุปผลการทดลอง

ผลการศึกษาการกำจัดสีและสารอินทรีย์ของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยน้ำหมักชีวภาพและเฟินต้นริเอเจนต์ มีดังนี้

การบำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยน้ำหมักชีวภาพ

จากการทดลองบำบัดสีและสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยน้ำหมักชีวภาพ ผลการทดลองพบว่าน้ำหมักชีวภาพสามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้เพียงเล็กน้อย เช่นเดียวกับกับการบำบัดด้วยจุลินทรีย์ที่คัดแยกได้จากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (ชนกฤตพรหมทอง และคณะ, 2551) น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มหลังผ่านการบำบัดด้วยน้ำหมักชีวภาพทุกระดับความเข้มข้นยังคงมีค่าความสกปรกในรูปของบีโอดี และซีโอดีสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง และที่สำคัญน้ำหมักชีวภาพทำให้ความเข้มข้นของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีค่าสูงขึ้นตามระดับความเข้มข้นที่ใช้ในการบำบัด ทั้งนี้เป็นผลจากน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มคงเหลือสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากด้วยกระบวนการทางชีวภาพ จึงพบว่าสารอินทรีย์ทั้งในรูปของบีโอดี และซีโอดีในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มหลังผ่านการบำบัดด้วยน้ำหมักชีวภาพลดลงเพียงเล็กน้อย อีกทั้งลักษณะธรรมชาติของน้ำหมักชีวภาพมีสีน้ำตาลเข้มจึงส่งผลให้ความเข้มข้นของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีค่าสูงขึ้นตามระดับความเข้มข้น อาจกล่าวได้ว่าน้ำหมักชีวภาพไม่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม แต่เหมาะสมสำหรับบำบัดน้ำเสียที่มีระดับความเข้มข้นของปริมาณสารอินทรีย์ เช่น บ่อบำบัดน้ำเสียต้นทางที่มีระดับความเข้มข้นของปริมาณสารอินทรีย์อยู่สูงและสารอินทรีย์ส่วนหนึ่งสามารถถูกย่อยสลายได้โดยง่ายด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ฉะนั้นการนำเอาน้ำหมักชีวภาพเข้าไปช่วยในระบบบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นทางน่าจะทำให้การย่อยสลายเกิดได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ช่วยลดปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็นของน้ำเสีย ซึ่งจากรายงานการวิจัยพบว่าน้ำหมักชีวภาพช่วยลดปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็นในน้ำเสียได้ดี (สมศักดิ์ นุฏกุลอุดมพานิชย์, 2543; Chantsavang *et al.*, 1993)

การบำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเฟนตันรีเอเจนต์

เฟนตันรีเอเจนต์สามารถใช้ในการกำจัดสีและสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มได้ โดยประสิทธิภาพการกำจัดสีและสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของเฟนตันรีเอเจนต์ และพีเอช หากในปฏิกิริยามีปริมาณของเฟนตันรีเอเจนต์น้อยเกินไป จะทำให้อนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเกิดขึ้นน้อย เป็นผลให้มีประสิทธิภาพการกำจัดสีและสารอินทรีย์ต่ำ ในทางกลับกันปริมาณเฟนตันรีเอเจนต์ที่มากเกินไป ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีและสารอินทรีย์ลดลงได้เช่นกัน เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเฟอร์รัสไอออนเข้าแข่งทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้น สำหรับในการศึกษาครั้งนี้พบว่า เฟนตันรีเอเจนต์มีประสิทธิภาพกำจัดสีและสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มได้ดีที่พีเอช **3.0** ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ **50** มิลลิโมลาร์ และความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ **1.0** มิลลิโมลาร์ โดยที่สภาวะดังกล่าวสามารถกำจัดสีได้ **61.11** เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาการบำบัด **5** นาที และสามารถกำจัดแทนนิน-ลิกนิน สารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ สารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี และสารอินทรีย์กลุ่ม **humic acid-like substances** และ **fulvic acid-like substances** ได้ **43.63, 85, 82** และ **98.61** เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่ระยะเวลาการบำบัด **24** ชั่วโมง และมีสลัดจ์เกิดขึ้นจากการบำบัด **315-350** มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้การใช้แสงยูวีร่วมกับเฟนตันรีเอเจนต์ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีเพิ่มสูงขึ้นเป็น **81.04** เปอร์เซ็นต์

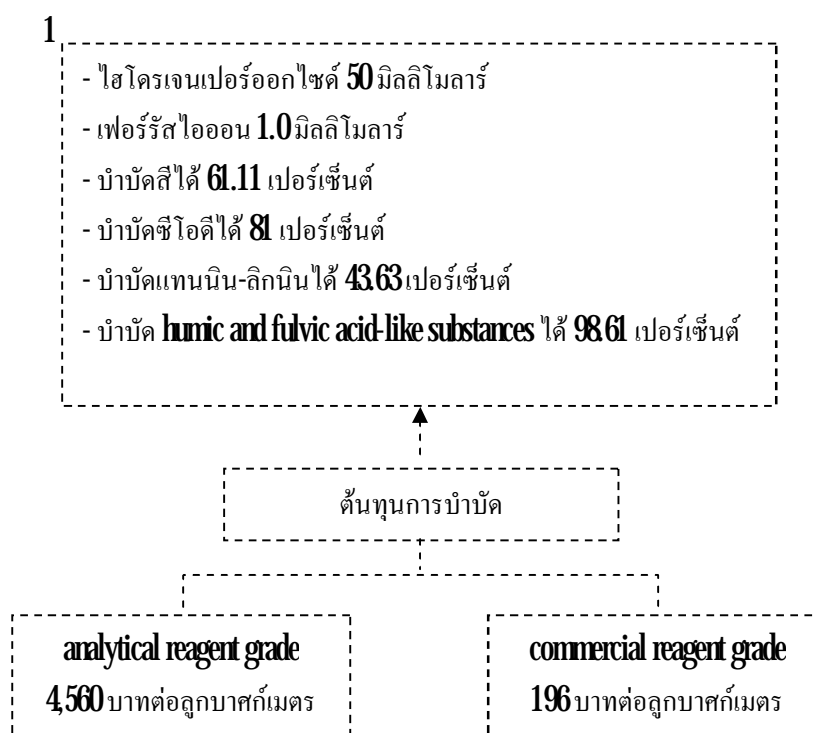
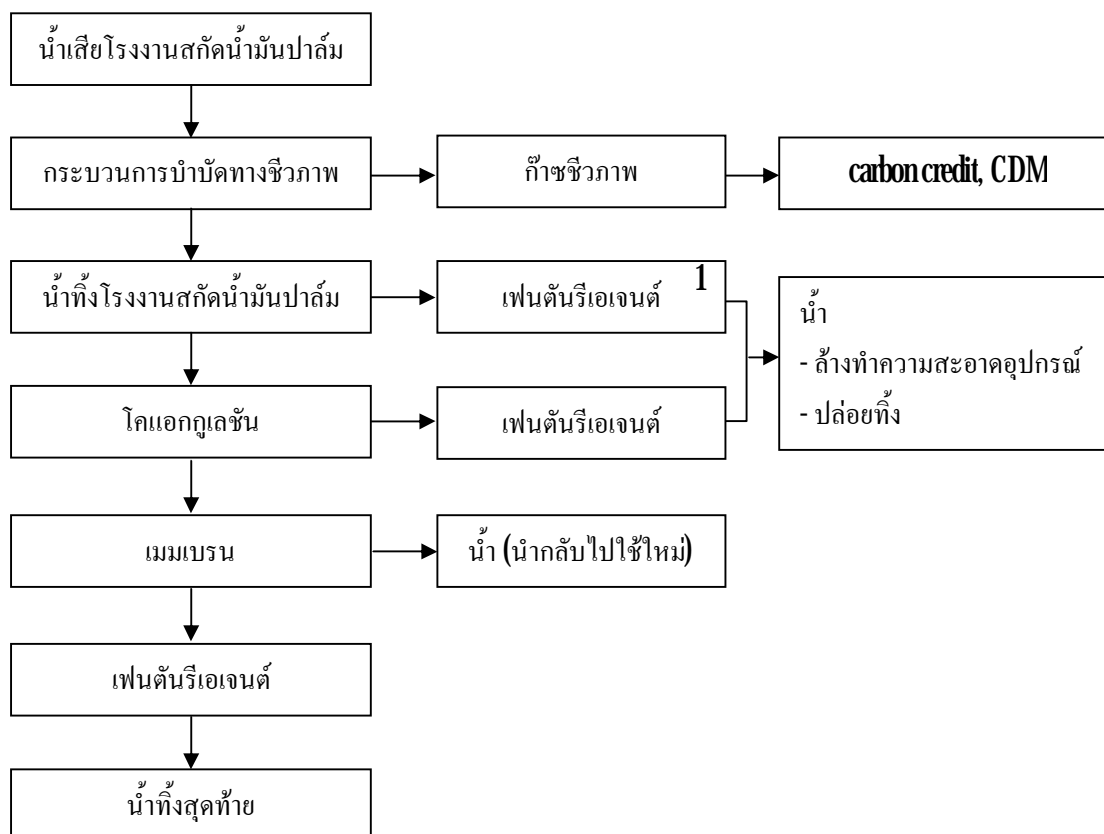
จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาพบว่า การกำจัดสีมีค่าคงที่เฉพาะของอัตราเท่ากับ 620×10^2 นาที⁻¹ และการกำจัดสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำมีค่าคงที่เฉพาะของอัตราเท่ากับ 219×10^4 (มิลลิกรัมต่อลิตร)⁻¹ นาที⁻¹ น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มหลังจากผ่านการบำบัดสามารถปล่อยทิ้งได้ เนื่องจากผลการประเมินการยอมรับได้ของสีน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มหลังจากผ่านการบำบัดด้วยเฟนตันรีเอเจนต์อยู่ในเกณฑ์พึงพอใจมากถึงพึงพอใจมากที่สุด

จากการประเมินทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นพบว่า ค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการทำกระบวนการเฟนตันที่ชุดสภาวะเหมาะสมของเฟนตันรีเอเจนต์ คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ **50** มิลลิโมลาร์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ **1.0** มิลลิโมลาร์ และปรับพีเอชน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มให้มีค่าเท่ากับ **3.0±0.2** มีค่าใช้จ่ายประมาณ **4560** บาทต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อคำนวณต้นทุนจากสารเคมีชนิด **analytical reagent grade** และหรือมีค่าใช้จ่ายประมาณ **196** บาทต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อคำนวณต้นทุนจากสารเคมีชนิด **commercial reagent grade** โดยค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่มาจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ รองลงมาเป็นการชดเชยพีเอช และเฟอร์รัสไอออน ตามลำดับ

เนื่องจากการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันมีต้นทุนการบำบัดต่อหน่วยสูง แต่มีข้อดีคือ สามารถกำจัดความสกปรกให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน และบางวิธีการสามารถปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่อย่างไรก็ตาม กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มก่อให้เกิดน้ำเสียปริมาณมาก เฉลี่ย **0.87** ลูกบาศก์เมตรต่อตันทะลายปาล์มสด (Prasertsan and Prasertsan, 1996) โดยโรงงานกรณศึกษาบน้ำเสียประมาณ **260** ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (คำนวณจาก (300 ตันทะลายปาล์มสดต่อวัน x 0.87 ลูกบาศก์เมตรต่อตันทะลายปาล์มสด)) ถ้าหากบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมดด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันจะทำให้โรงงานอุตสาหกรรมมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียสูงมาก แต่ถ้าสามารถลดปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นลงได้ หรือนำน้ำเสียที่เกิดขึ้นไปผ่านกระบวนการบำบัดขั้นต้นด้วยกระบวนการต่างๆ เช่น การบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพซึ่งสามารถนำก๊าซที่เกิดขึ้นไปใช้ประโยชน์ได้ จากนั้นบำบัดด้วยกระบวนการทางกายภาพ-เคมี เช่น ตกตะกอนด้วยสารเคมีเพื่อเป็นการลดสารแขวนลอยที่ตกตะกอนได้ยาก และสามารถลดความเข้มข้นได้ส่วนหนึ่งซึ่งจากการศึกษาของบัสรี หะยีปะดอหัง และประธาน กรกิติประภา (2552) พบว่า สามารถลดความเข้มข้นในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มได้ **41.45** เปอร์เซ็นต์ หรือใช้วิธีการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยพบว่า น้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ผ่านกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ **8** โวลต์ ระยะเวลาเก็บกัก **90** นาที มีความเข้มข้นลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดมีสีใกล้เคียงกับน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยเฟนตันรีเอเจนต์ที่อัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ **50** (ปาริชาติ หมั่นสีทา, 2547) จากนั้นนำน้ำทิ้งหลังการตกตะกอนด้วยสารเคมี หรือ การรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าไปกรองด้วยเมมเบรนหรือผ่านกระบวนการออสโมซิสผันกลับเพื่อกรองสีที่เหลืออยู่ และนำน้ำที่ได้กลับไปใช้ใหม่ สำหรับการกรองด้วยเมมเบรนนั้นมีหลายแบบด้วยกัน อาทิ เช่น ไมโครฟิวเตรชัน อัลตราฟิวเตรชัน หรือนาโนฟิวเตรชัน ทั้งนี้การเลือกนำไปใช้นั้นขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำน้ำที่ได้หลังผ่านการกรองไปใช้ประโยชน์ ส่วน **retentate** ที่เกิดขึ้นจากนาโนฟิวเตรชันและออสโมซิสผันกลับนั้นอาจนำกลับไปบำบัดด้วยกระบวนการบำบัดขั้นต้น หรือบำบัดด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชัน หรือวิธีการอื่นๆ ที่เหมาะสม เนื่องจาก **retentate** มีความเข้มข้นของความสกปรกในรูปสารอินทรีย์สูง

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารอินทรีย์จากการบำบัดด้วยเฟนตันรีเอเจนต์ในรูปของสารอินทรีย์รวม (**Total Organic Carbon, TOC**) ทุกชุดการทดลอง
2. ศึกษาความเป็นไปได้ในการแยกกรดจากกระบวนการทำก๊าซให้บริสุทธิ์ (**biogas cleanup**) และนำกรดที่ได้มาใช้ประโยชน์ เช่น ใช้ปรับค่าพีเอชน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มสำหรับการบำบัดด้วยเฟนตันรีเอเจนต์ ซึ่งเป็นการศึกษาลำดับต่อไป
3. ควรนำไปใช้แบบระบบผสมผสาน (**hybrid system**) เช่น บำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มขั้นต้นด้วยเฟนตันรีเอเจนต์ จากนั้นนำน้ำทิ้งส่วนใต้อีกไปผ่านการกรองด้วยเมมเบรนหรือ บำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มขั้นต้นด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน แล้วตามด้วยเฟนตันรีเอเจนต์ (ภาพที่ 37) เป็นต้น เพื่อการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ (**water recycle**)
4. ในทางปฏิบัติโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มควรแยกบ่อสำหรับการบำบัดด้วยเฟนตันรีเอเจนต์โดยเฉพาะ และบ่อบำบัดดังกล่าวต้องสามารถควบคุมปริมาณน้ำเข้า-ออกได้



ภาพที่ 37 ๖ โดอะแกรมการจัดการน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่เสนอ

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. 2551. มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (ออนไลน์). (15 พฤศจิกายน 2551). Available from <http://www.pcd.go.th>
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2545. ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ. กรุงเทพฯ: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. 442 น.
- กรณีการ สิริสิงห. 2522. เคมีของน้ำ น้ำโสโครก และการวิเคราะห์. คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. 336 น.
- กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2552. ดินเค็ม (ออนไลน์). (15 มกราคม 2552). Available from http://www.ricethailand.go.th/ikb/data_004/rice_xx2-04_manage_index.html
- กฤษณา ชูติมา. 2540. จดณพลศาสตร์เคมี ใน หลักเคมีทั่วไป เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 14 กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 208-241 น.
- กอบเกียรติ์ บันสิทธิ์, สมศักดิ์ ศิริพลตั้งมั่น, ลัดดาวัลย์ งามวงศ์ธรรม และณัฐวัฒน์ แยมยิ้ม. 2539. การศึกษาประสิทธิภาพของ EM ในการป้องกันกำจัดแมลงศัตรูคะน้ำ. ว. เกษตรศาสตร์. 30(วิทย): 77-82.
- กัณษมาศ สุทธิเรืองวงศ์. 2538. การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีไฟฟ้าเคมีเพื่อกำจัดสารอินทรีย์และสี. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กัลยา ศรีสุวรรณ. 2547. โมเดลการเกิดฟาวลิงของเมมเบรนสำหรับการกำจัดสีในกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม. รายงานการวิจัย. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

กุนทรหายน ยามิรุเต็ง. **2551**. การบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยวิธีโอโซนชั้น.
วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. **2546** กระบวนการทางกายภาพและเคมี ใน ของเสียอันตราย ภาควิชา
วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยรังสิต. **337-464**

ธงชัย พรรณสวัสดิ์. **2527**. การกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงย้อมผ้า. ภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาลและ
สถาบันวิจัยและพัฒนา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ชนกฤต พรหมทอง, ณัฐพล เสนางคนิก, ชัยศรี สุขสาโรจน์, กมลธรรม อ่ำสกุล และฉันทวี
เตชะภัทวรกุล. **2551**. การกำจัดสีของน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยจุลินทรีย์.
ใน การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 6 เล่ม 1, **400-404** สงขลา:
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ชนิยา เกาศล และ จารุวรรณ จันโศด. **2551**. การกำจัดสีจากน้ำเสียโรงงานน้ำมันปาล์มโดยวิธีการ
ตกตะกอนทางเคมี. การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 7 ระหว่างวันที่
12-14 มีนาคม **2251** ณ สถาบันวิจัยจุฬาภรณ์ กรุงเทพฯ: สมาคมวิศวกรรม
สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.

นวรรตน์ ใจศีล. **2539**. การลดปริมาณมูลฝอยชุมชนด้วยการใช้จุลินทรีย์ธรรมชาติ (EM). วิทยานิพนธ์
สาขารณสุขศาสตรมหาบัณฑิต สาขานามัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

นัยนา ศรีชัย, อ้อย ชูหมุน และลำไย ชูทอง. **2547**. ผลของการเติมน้ำหมักชีวภาพต่อการ
เปลี่ยนแปลงคุณลักษณะน้ำทิ้ง. รายงานการเสนอผลงานวิจัย การประชุมวิชาการ
เพื่อนำเสนอผลงานวิจัย วันที่ 2 กรกฎาคม **2547** ณ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
วิทยาเขตปัตตานี.

นิพนธ์ ทวีชัย, ณัฐริมา บุญวัฒน์, ธนวัฒน์ กำแหงฤทธิ์รงค์, อำไพวรรณ ภราดรน์วัฒน์, ปรีชา
สุรินทร์, วิชัย โฆสิตรัตน์, สุนตรา ภาวิจิตร และอดิศักดิ์ บัวนภียาพันธุ์. **2539**.

การทดสอบประสิทธิภาพของสาร EM ในการป้องกันกำจัดโรคพืช. ว.
เกษตรศาสตร์. 30(วิทย): 67-76.

บัสรี หะยีปะดอเห็ง และประธาน กรกิติประภา. 2552. ความเป็นไปได้ในการใช้กระบวนการ
เมมเบรนเพื่อการบำบัดน้ำทิ้งสำหรับนำกลับมาใช้ใหม่ของโรงงานสกัดน้ำมัน
ปาล์ม. โครงการ. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ประภาณี เกษมศรี ณ อุรุยา, อำพัน เพ็ญโรจน์, สอาดศรี กาญจนาลัย, ศุภชัย ใช้เทียมวงศ์, มานิตย์
ปัญจมาลา และสุภาพ บุญยะรัตเวช. 2526. จลนพลศาสตร์เคมี ใน เคมีทั่วไป เล่ม
1. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 406-473 น.

ปรีชา มุณีศรี. 2539. การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้จุลินทรีย์. วิทยานิพนธ์
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ปาริชาติ หมื่นสีทา. 2547. การกำจัดสีและซีโอดีจากน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ผ่านการ
บำบัดบางส่วนโดยใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์วิศวกรรม
ศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ผาสุก กุลละวณิชย์. 2528. ปาล์มน้ำมันและอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม: คู่มือเกษตรกร.
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 113 น.

พวงรัตน์ ขจิตวิชานุกุล. 2548. โครงการการใช้กระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันในการบำบัดน้ำ
เสียขั้นต้นสำหรับน้ำเสียจากโรงพยาบาล. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. ภาควิชา
วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

พิมล เรียนวัฒนา และชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. 2539. เคมีสถานะแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพฯ:
สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์. 215 น.

พูนสุข ประเสริฐสรรพ, เสาวลักษณ์ จิตรบรรเจิดกุล และอรัญ หันพงษ์กิตติกุล. **2533**
กระบวนการผลิต การใช้ประโยชน์วัสดุเหลือทิ้ง และคุณลักษณะน้ำทิ้งจาก
โรงงานน้ำมันปาล์ม. ว.สงขลานครินทร์. **12(2): 169-176**

พูนสุข ประเสริฐสรรพ, อรัญ หันพงษ์กิตติกุล และโสภา จันทภาโส. **2544** เปรียบเทียบการกำจัด
สีของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยวิธีการทางชีวภาพ ทางเคมี และกายภาพ.
ว.สงขลานครินทร์. **23(ฉบับพิเศษ): 807-819**

ไพโรจน์ วิริยาริ. **2535** การวางแผนและการวิเคราะห์ทางด้านประสาทสัมผัส. ภาควิชาวิทยาศาสตร์
และเทคโนโลยีการอาหาร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. **270**น.

มันสิน ตัณฑุลเวศม์ และมันรัช ตัณฑุลเวศม์. **2545** เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. กรุงเทพฯ:
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. **645** น.

มันสิน ตัณฑุลเวศม์. **2542** วิศวกรรมการประปา. พิมพ์ครั้งที่ **3** กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย. **305** น.

ขงยุทธ โอสธสกา. **2546**. ธาตุอาหารพืช. พิมพ์ครั้งที่ **2**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. **424** น.

ลือพงษ์ แก้วศรีจันทร์, จิราวรรณ ศรีโยม และจรัญ บุญกาญจน์. **2548** การบำบัดน้ำเสียที่มี
สารประกอบฟีนอลิกด้วยปฏิกิริยาเฟนตันร่วมกับการตกตะกอนด้วยแคลเซียม
ออกไซด์. ว.สงขลานครินทร์. **27(3): 591-600**

วรวิทย์ วงศ์นิรมัยกุล. **2549** การตรวจหาและการบำบัดสารอินทรีย์อันตรายในน้ำเสียจากโรงงาน
ยางพาราทางภาคใต้ของประเทศไทยด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน. วิทยานิพนธ์วิทยา
ศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วราภรณ์ คำบุญเรือง, วลัยพร แสนวงษ์, สมศักดิ์ ศิริพานิชเจริญ และพิสิฐ พรมนารถ. **2539**
ประสิทธิภาพของ EM ในการเพิ่มผลผลิตข้าว. ว.เกษตรศาสตร์. **30(วิท): 135-142**

วีระพล วงษ์ประพันธ์, วรางคณา สังสิทธิ์สวัสดิ์, อุไรวรรณ อินทร์ม่วง และสุธา ภูสิทธิ์ศักดิ์.

2546 ประสิทธิภาพของ EM ในการบำบัดน้ำมันและไขมันในน้ำเสียจากโรงครัว
โรงพยาบาล. ว.วิจัย มข. (บศ). **3(2): 100-110**

ศิริกัลยา สุวจิตตรานนท์, พัฒนา มูลพฤษดิ์ และธำรงรัตน์ มุ่งเจริญ. **2541**. การป้องกันและควบคุม
มลพิษ. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. **246** น.

ศุภลักษณ์ อรรณพ. **2552** ผลของการเติมอากาศแบบเป็นช่วงต่อระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน
สำหรับบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์
มหาบัณฑิต สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

โสภณัฐ เวทยสุภรณ์ และปริยาภรณ์ อิศรานูวัฒน์. **2548** จุลินทรีย์ EM (Effective Microorganisms)
เพื่อการเกษตรธรรมชาติ. ว. แก่นเกษตร. **33(3): 175-183**

สมใจ ศิริโชค. **2544** จุลชีววิทยาอุตสาหกรรม. ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย
ศรีนครินทรวิโรฒ. **339** น.

สมชัย จันทร์สว่าง, ชลศักดิ์ สันรัชตานนท์, เกียรติไกร อายุวัฒน์ และปราโมทย์ ศิริโรจน์. **2537**.
ผลงานการวิจัยการใช้จุลินทรีย์อีเอ็มบำบัดของเสียจากฟาร์มสุกร. บทความเสนอ
ในการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สาขาสัตว ครั้งที่ **32**
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมศักดิ์ นุกุลอุดมพานิชย์. **2543** การบำบัดน้ำเสียโดยใช้จุลินทรีย์ธรรมชาติ (EM): กรณีศึกษาบ่อ
พักน้ำเสียโรงพยาบาลศิริมาศ จังหวัดสุโขทัย. ว.อนามัยสิ่งแวดล้อม. **4(3): 3-13**

สมศักดิ์ วั่งใน, ภาวนา ลิกขนานนท์ และเย็นใจ วสุวัตติ. **2539** การศึกษาเปรียบเทียบการใช้ EM
และจุลินทรีย์ชนิดอื่นๆ ผลิตปุ๋ยหมัก. ว.เกษตรศาสตร์. **30(วิทย): 110-120**

สมาคมวิศวกรรมาสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. **2544** คู่มือการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานทอผ้าและ
ฟอกย้อม. กรุงเทพฯ. **129** น.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2552. ข้อมูลเศรษฐกิจการเกษตรที่สำคัญ, การผลิตสินค้าการเกษตรที่สำคัญ, ปาล์มน้ำมัน (ออนไลน์). (15 มิถุนายน 2552). Available from <http://www.oae.go.th>

สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน. 2540. คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมการสกัดน้ำมันปาล์ม. กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 80 น.

สุรชาติพิศ ศิริไพศาลพัฒน์, อัจฉนา วงศ์ชัยสุวัฒน์ และสายใจ ชาญเศรษฐิกุล. 2541. จดณพศาสตร์เคมี ใน เคมีทั่วไป 2 ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 1-51 น.

สุพรชัย มั่งมีสิทธิ์. 2547. รายงานประสบการณ์การใช้จุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพในวิธีการผลิตของชุมชนบางไทร : กรณีการทำนาโดยใช้ปุ๋ยหมักโบกาฉิ. สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยศิลปากร. 73 น.

โสภกา จันทภาโส. 2542. ปัจจัยที่มีผลต่อการแยกสารแวนดอลอยและน้ำมันจากน้ำทิ้งโรงงานน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์และการลดความเข้มข้นของสี. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

อนิวรรณ เกลิมพงษ์. 2537. จุลินทรีย์ อี เอ็ม สารมหัศจรรย์สร้างสรรค์ชีวิตและสิ่งแวดล้อมป่าไม้. สำนักวิชาการป่าไม้ กรมป่าไม้. 43 น.

อมรภัค ชูทอง. 2551. การบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

อรัญ หันพงศ์กิตติกุล, พูนสุข ประเสริฐสรรพ และกัลยา ศรีสุวรรณ. 2539. แนวทางการจัดการสิ่งแวดล้อมสำหรับอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 81 น.

อรัญ หันพงศ์กิตติกุล, พูนสุข ประเสริฐสุวรรณ, กัลยา ศรีสุวรรณ, เสาวลักษณ์ จิตบรรเจิดกุล และวีระศักดิ์ ทองลิ้มปี. 2537. เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่องการลดการสูญเสียน้ำมันในอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จัดโดยกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรมและสำนักวิจัยและพัฒนา. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 7 เมษายน 2537 ณ โรงแรมสยามธานีสุราษฎร์ธานี.

อรุณวรรณ หวังกอบเกียรติ, อารี ไชยาภินันท์ และเสาวนีย์ สุนทรพิทักษ์. 2539. การลดปริมาณสารอาหารในน้ำเสียโดยอีเอ็ม. ว.เกษตรศาสตร์. 30(วิทย): 211-218

ออมทรัพย์ นพอมรบดี, สมพร อิศรานุรักษ์, สุนันทา ชมภูนิช, ภาวนา ลิกขนานนท์, นิตยา กันหลง, รังมี เจริญสถาพร และรัตนาภรณ์ พรหมศรีทธา. 2547. ข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ น้ำหมักชีวภาพ (ตอนที่ 1). โครงการวิจัยและพัฒนาน้ำหมักชีวภาพ โครงการเกษตรแบบยั่งยืนเพื่อสิ่งแวดล้อม กรมวิชาการเกษตร. 51 น.

อัศวินท์ พุ่มไพศาลชัย. 2548. การกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติชนิดชอบน้ำและไม่ชอบน้ำในอ่างเก็บน้ำโดยโคแอกกูเลชันที่ใช้สารส้ม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

Ahmad, A.L., Chong MF., Bhatia, S. and Ismail, S. 2006. Drinking water reclamation from palm oil mill effluent (POME) using membrane technology. *Desalination*. 191: 35-44

Alaton, I.A. and Teksoy, S. 2007. Acid dye bath effluent pretreatment using Fenton's reagent: Process optimization, reaction kinetics and effects on acute toxicity. *Dyes Pigments*. 73: 31-39

Andreozzi, R., Caprio, V., Insola, A. and Marotta, R. 1999. Advanced oxidation processes (AOP) for water purification and recovery. *Catal. Today*. 53: 51-59

- APHA, AWWA and WEF. 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st edition, Washington DC : American Public Health Association
- Aslan, S. and Türkman, A. 2005. Combined biological removal of nitrate and pesticides using wheat straw as substrates. *Process Biochem.* 40(2): 935-943
- Avsar, Y., Kurt, U. and Gonullu, T. 2007. Comparison of classical chemical and electrochemical processes for treating rose processing wastewater. *J. Hazard. Mater.* 148: 340-345
- Azbar, N., Yonar, T. and Kestioglu, K. 2004. Comparison of various advanced oxidation processes and chemical treatment methods for COD and color removal from a polyester and acetate fiber dyeing effluent. *Chemosphere.* 55: 35-43
- Badawy, M.I. and Ali, M.E.M. 2006. Fenton's peroxidation and coagulation processes for the treatment of combined industrial and domestic wastewater. *J. Hazard. Mater.* B136: 961-966
- Baker, A. and Cury, M. 2004. Fluorescence of leachates from three contrasting landfills. *Water Res.* 38: 2605-2613
- Baker, T.W. and Worgan, J.T. 1981. The utilization of palm oil processing effluent as substrate of microbial protein by the fungus *Aspergillus oryzae*. *Eur. J. Appl. Microbiol.* 11: 234-240
- Bali, U., Çatalkaya, E. and Sengül, F. (2004) Photodegradation of reactive black 5, direct red 28 and direct yellow 12 using UV, UV/H₂O₂ and UV/H₂O₂/Fe²⁺ : a comparative study. *J. Hazard. Mater.* B114: 159-166

- Barb, W.G., Baxendale, J.H., George, P. and Hargrave, K.R. 1951. Reaction of ferrous and ferric ions with hydrogen peroxide. *Trans. Faraday Soc.* 47: 462-591.
- Barros, A.L., Pizzolato, T.M., Carissimi, E. and Schneider, I.A.H. 2006. Decolorizing dye wastewater from the agate industry with Fenton oxidation process. *Miner. Eng.* 19: 87-90
- Bautista, P., Mohedano, A.F., Gilarranz, M.A., Casas, J.A. and Rodriguez, J.J. 2007. Application of Fenton oxidation to cosmetic wastewaters treatment. *J. Hazard. Mater.* 143: 128-134
- Bigda, R.J. 1995. Consider Fenton's chemistry for wastewater treatment. *Chem. Eng. Process Dec.* 91(12): 62-66
- Borini, M.G., Miyamoto, S., Mascio, P.D. and Augusto, O. 2004. Production of the carbonate radical anion during xanthine oxidase turnover in the presence of bicarbonate. *J. Biol. Chem.* 279(50): 51836-51843
- Burbano, A.A., Dionysiou, D.D., Suidan, M.T. and Richardson, T.L. 2005. Oxidation kinetics and effect of pH on the degradation of MTBE with Fenton reagent. *Water Res.* 39: 107-118
- Cabaniss, S.E. and Shuman, M.S. 1987. Synchronous fluorescence spectra of natural waters: tracing sources of dissolved organic matter. *Mar. Chem.* 21: 37-50
- Catalkaya, E.C. and Kargi, F. 2007. Color, TOC and AOX removals from pulp mill effluent by advanced oxidation process : A comparative study. *J. Hazard. Mater.* B139: 244-253

- Chantsavang S., Sitratchatanun, C., Ayuwat, K. and Sirote, P. 1993. Application of Effective Microorganisms for swine waste treatment. Proceeding of the Third International Conference on Kyusei Nature Farming, October 5-7, 1993. Santa Barbara, California, USA.
- Chavalparit, O. 2006. Clean technology for the crude palm oil industry in Thailand. Wageningen, Netherlands. Ph.D. Thesis. Wageningen University.
- Chen, W., Westerhoff, P., Leenheer, J.A. and Booksh, K. 2003. Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter. *Environ. Sci. Technol.* 37(24): 5701-5710.
- Chiron, S., Barbati, S., Khanra, S., Dutta, B.K., Minella, M., Minero, C., Maurino, V., Pelizzetti, E. and Vione, D. 2009. Bicarbonate-enhanced transformation of phenol upon irradiation of hematite, nitrate and nitrite. *Photochem Photobiol. Sci.* 8: 91-100.
- Coble, P.G. 1996. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy. *Mar. Chem.* 51: 325-346.
- Czapski, G., Lyman, S.V. and Schwarz, H.A. 1999. Acidity of the carbonate radical. *J. Phys. Chem. A.* 103: 3447-3450.
- Daneshvar, N., Ayazloo, M., Khataee, A.R. and Pourhassan, M. 2007. Biological decolorization of dye solution containing malachite green by microalgae *Cosmarium* sp. *Biores. Technol.* 98: 1176-1182.
- Deng, Y. and Englehardt, J.D. 2006. Treatment of landfill leachate by the Fenton process. *Water Res.* 40: 3683-3694.

- Dong X., Ding W., Zhang X. and Liang X. 2007. Mechanism and kinetics model of degradation of synthetic dyes by UV-vis/ H₂O₂/Ferroxalate complexes. *Dyes Pigments*. 74: 470-476.
- Dutta, K., Mukhopadhyay, S., Bhattacharjee, S. and Chaudhuri, B. 2001. Chemical oxidation of methylene blue using a Fenton-like reaction. *J. Hazard. Mater.* B84: 57-71.
- Fairhurst, T.H. and Hardtor, R. 2003. The search for yield in oil palm: basic principles *In Oil Palm: Management for Large and Sustainable Yields*. pp. 59-98.
- Faust, B.C. and Hoigne, J. 1990. Photolysis of Fe (III)-hydroxy complexes as sources of OH radicals in clouds, fog and rain. *Atmos. Environ.* 24: 79-89.
- Feng J., Hu, X. and Yue, P.L. 2004. Discoloration and mineralization of orange II using different heterogeneous catalysts containing Fe: A comparative study. *Environ. Sci. Technol.* 38: 5773-5778.
- Feng J., Hu, X. and Yue, P.L. 2005. Discoloration and mineralization of orange II by using a bentonite clay-based Fe nanocomposite film as a heterogeneous photo-Fenton catalyst. *Water Res.* 39: 89-96.
- Galapate, R.P., Baes, A.U., Ito, K., Mukai, T., Shoto, E. and Okada, M. 1998. Detection of domestic wastes in Kurose river using synchronous fluorescence spectroscopy. *Water Res.* 32(7): 2232-2239.
- Ghaly, M.Y., Hartel, G., Mayer, R. and Haseneder, R. 2001. Photochemical oxidation of p-chlorophenol by UV/ H₂O₂ and photo-Fenton process. A comparative study. *Waste Manag.* 21(1): 41-47.

- Guedes, A.M.F.M, Madeira, L.M.P., Boaventura, R.A.R. and Costa, C.A.V. 2003. Fenton oxidation of cork cooking wastewater-overall kinetic analysis. *Water Res.* 37: 3061-3069.
- Gulkaya, I., Surucu, G.A. and Dilek, F.B. 2006. Importance of H_2O_2/Fe^{2+} ratio in Fenton's treatment of a carpet dyeing wastewater. *J. Hazard. Mater.* B136: 363-769.
- Hartley, C.W.S. 1977. Oil palm selection and breeding *In* The Oil Palm. Longman Inc., New York pp. 195-310.
- Heredia, J.B., Domnguez, J.R. and López, R. 2004. Treatment of cork process wastewater by a successive chemical physical method. *J. Agric. Food Chem.* 52: 4501-4507.
- Hwang T.K., Ong S.M., Scow, C.C. and Tan, H.K. 1978. Chemical composition of palm oil mill effluents. *Planter.* 54: 749-756.
- Inan, H., Dimoglo, A., Simsek, H. and Karpuzcu, M. 2004. Olive oil mill wastewater treatment by means of electro-coagulation. *Sep. Purif. Technol.* 36: 23-31.
- Janhom, T., Wattarachira, S. and Pavasant, P. 2009. Characterization of brewery wastewater with spectrofluorometry analysis. *J. Environ. Manage.* 90: 1184-1190.
- Jarboui, R., Sellami, F., Kharroubi, A., Gharsallah, N. and Ammar, E. 2008. Olive mill wastewater stabilization in open-air ponds: Impact on clay-sandy soil. *Biores. Technol.* 99: 7699-7708.
- Kallel, M., Belaid, C., Boussahel, R., Ksibi, M., Montiel, A. and Elleuch, B. 2009. Olive mill wastewater degradation by Fenton oxidation with zero-valent iron and hydrogen peroxide. *J. Hazard. Mater.* 163: 550-554.

- Kang Y.W., Cho, M.J. and Hwang K.Y. 1999. Correction of hydrogen peroxide interference on standard chemical oxygen demand test. *Water Res.* 33(5): 1247-1251.
- Kestioglu, K., Yonar, T. and Azbar, N. 2005. Feasibility of physico-chemical treatment and advanced oxidation processes (AOPs) as a means of pretreatment of olive mill effluent (OME). *Process Biochem.* 40: 2409-2416.
- Kim S., Park, C., Kim T-H, Lee, J. and Kim S-W. 2003. COD Reduction and decolorization of textile effluent using a combined process. *J. Biosci. Bioeng.* 95: 102-105.
- Kušić, H., Božić, A.L. and Koprivanac, N. 2007. Fenton type processes for minimization of organic content in coloured wastewater : Part I : Processes optimization. *Dyes Pigments.* 74: 380-387.
- Laat, J.D., Le, G.T. and Legube, B. 2004. A comparative study of the effects of chloride, sulfate and nitrate ions on the rates of decomposition of H_2O_2 and organic compounds by $Fe(II)/H_2O_2$ and $Fe(III)/H_2O_2$. *Chemosphere.* 55: 715-723.
- Lee, H. and Shoda, M. 2008. Removal of COD and color from livestock wastewater by the Fenton method. *J. Hazard. Mater.* 153: 1314-1319.
- Liao, C.H., Kang S.F. and Wu, F.A. 2001. Hydroxyl radical scavenging role of chloride and bicarbonate ions in the H_2O_2/UV process. *Chemosphere.* 44: 1193-1200.
- Lin, S.H. and Lo, C.C. 1997. Fenton process for treatment of desizing wastewater. *Water Res.* 31(8): 2050-2056.
- Liu, R., Chiu, H.M., Shiau, C.S., Yeh, R.Y.L. and Hung Y.T. 2007. Degradation and sludge production of textile dyes by Fenton and photo-Fenton process. *Dyes Pigments.* 73: 1-6.

- Lu, F., Chang C.H., Lee, D.J., He, P.J., Shao, L.M and Su, A. 2009. Dissolved organic matter with multi-peak fluorophores in landfill leachate. *Chemosphere*. 74: 575-582.
- Lucas, M.S. and Peres, J.A. 2006. Decolorization of the azo dye reactive black 5 by Fenton and photo-Fenton oxidation. *Dyes Pigments*. 71: 236-244.
- Maletzky, P. and Bauer, R. 1998. The photo-Fenton method-degradation of nitrogen containing organic compounds. *Chemosphere*. 37(5): 899-909.
- Malik, P.K. and Saha, S.K. 2003. Oxidation of direct dyes with hydrogen peroxide using ferrous ion as catalyst. *Sep. Purif. Technol*. 31: 241-250.
- Marhaba, T.F. and Pu, Y. 2000. Rapid delineation of humic and non-humic organic matter fractions in water. *J. Hazard. Mater. A73*: 221-234.
- Marhaba, T.F., Van, D. and Lippincott, R.L. 2000. Rapid identification of dissolved organic matter fractions in water by spectral fluorescent signatures. *Water Res*. 34(14): 3543-3550.
- Matthews, B.J.H., Jones, A.C., Theodorou, N.K. and Tudhope, A.W. 1996. Excitation-emission-matrix fluorescence spectroscopy applied to humic acid bands in coral reefs. *Mar. Chem*. 55: 317-332.
- Mendham J., Denney, R.C., Barnes, J.D. and Thomas, M. 2000. Titrimetric analysis. *In Vogel's Textbook of Quantitative Chemical Analysis*. 6th edition, Pearson Education Ltd, England. pp. 447-449.
- Meriç, S., Kaptan, D. and Ölmez, T. 2004. Color and COD removal from wastewater containing reactive black 5 using Fenton's oxidation process. *Chemosphere*. 54: 435-441.

- Metcalf and Eddy. 2003. Advanced wastewater treatment *In Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. 4th ed. McGraw-Hill. Inc., New York. pp. 1035-1205.
- Miano, T.M and Senesi, N. 1992. Synchronous excitation fluorescence spectroscopy applied to soil humic substances chemistry. *Sci. Total Environ.* 118: 41-51.
- Miano, T.M, Sposito, G. and Martin, J.P. 1988. Fluorescence spectroscopy of humic substances. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 1016-1019.
- Ministry of the Environment. 2009. CDM in Charts, Institute for Global Environmental Strategies, Ministry of the Environment, Japan (online). (January 15, 2009). Available from <http://cdmccchina.gov.cn/WebSite/CDM/UpFile/File1683.pdf>
- Mohan, S.V. and Karthikeyan, J. 1997. Removal of lignin and tannin colour from aqueous solution by adsorption onto activated charcoal. *Environ. Pollut.* 97: 183-187.
- Murayama, H, Moriyama, N., Mitobe, H, Mukai, H, Takase, Y., Shimizu, K. and Kitayama, Y. 2003. Evaluation of activated carbon fiber filter for sampling of organochlorine pesticides in environmental water samples. *Chemosphere.* 52(5): 825-833.
- Musikavong C., Wattanachira, S., Nakajima, F. and Furumai, H. 2006. Three-dimensional fluorescent spectroscopy analysis for evaluation of organic matter removal from industrial estate wastewater by stabilization ponds. *Water Sci. Technol.* 55(11): 201-210.
- Neamtu, M, Yediler, A., Siminiceanu, I. and Ketrup, A. 2003. Oxidation of commercial reactive azo dye aqueous solutions by the photo-Fenton and Fenton-like processes. *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* 161: 87-93.

- Neyens, E. and Baeyens, J. 2003. A review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique. *J. Hazard. Mater.* B98: 33-50.
- Pala, A. and Erden, G. 2005. Decolorization of a baker's yeast industry effluent by Fenton oxidation. *J. Hazard. Mater.* B127: 141-148.
- Papadopoulos, A.E., Fatta, D. and Loizidou, M. 2007. Development and optimization of dark Fenton oxidation for the treatment of textile wastewater with high organic load. *J. Hazard. Mater.* B146: 558-563.
- Paredes, M.J., Moreno, E., Ramos, C.A. and Martinez, J. 1987. Characteristics of soil after pollution with wastewater from olive oil extraction plants. *Chemosphere.* 16: 1557-1564.
- Park, C., Lee, M., Lee, B., Kim, S.W., Chase, H.A., Lee, J. and Kim, S. 2007. Biodegradation and biosorption for decolorization of synthetic dyes by *Furialia trogii*. *Biochem. Eng. J.* 36: 59-65.
- Patra, D. and Mishra, A.K. 2002. Recent developments in multi-component synchronous fluorescence scan analysis. *Trends in Analytical chemistry.* 21(12): 787-798.
- Pechsuth, M., Prasertsan P. and Ukita, M. 2001^a. Biopretreatment of palm oil mill effluent by thermotolerant polymer-producing fungi. *Songklanakarin J. Sci. Technol.* 23(Suppl.): 771-777.
- Pechsuth, M., Prasertsan P. and Ukita, M. 2001^b. High-rate anaerobic treatment of palm oil mill effluent. *Songklanakarin J. Sci. Technol.* 23(Suppl.): 779-787.

- Pignatello, J.J., Oliveros, E. and Mackay, A. 2006. Advanced oxidation processes for organic contaminant destruction based on the Fenton reaction and related chemistry. *Environ. Sci. Technol.* 36: 1-84
- Prasertsan, S. and Prasertsu, P. 1996. Biomass residues from palm oil mills in Thailand: An overview on quantity and potential usage. *Biomass Bioener.* 11: 387-395.
- Rizzo, L., Lofrano, G., Grassi, M. and Belgiomo, V. 2008. Pre-treatment of olive mill wastewater by chitisan coagulation and advanced oxidation processes. *Sep. Purif. Technol.* 63: 648-653.
- Rodriguez, J.J.S. and Sarz, C.P. 2000. Fluorescence techniques for the determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in marine environment: an overview. *Analisis.* 28: 710-717.
- Sahunin, C., Kaewboran, J. and Hunsom, M. 2006. Treatment of textile dyeing wastewater by photo oxidation using UV/H₂O₂/Fe²⁺ reagents. *Science Asia.* 32: 181-186.
- Santhy, K. and Selvapathy, P. 2005. Removal of reactive dyes from wastewater by adsorption on coir pith activated carbon. *Biores. Technol.* 97(11): 1329-1336.
- Senesi, N., Miano, T.M., Provenzano, M.R. and Brunetti, G. 1991. Characterization, differentiation, and classification of humic substances by fluorescence spectroscopy. *Soil Sci.* 152: 259-271.
- Serio, M.G.D., Larza, B., Mucciarella, M.R., Russi, F., Iannucci, E., Marfisi, P. and Madeo, A. 2008. Effects of olive mill wastewater spreading on the physico-chemical and microbiological characteristics of soil. *Inter. Biodeter. Biodegrad.* 62: 403-407.

- Sierra, J., Martí, E., Garau, M.A. and Cruañas, R. 2007. Effects of the agronomic use of olive oil mill wastewater: Field experiment. *Sci Total Environ.* 378: 90-94
- Sierra, MMD., Giovanela, M., Parlante, E. and Sierra, E.J.S. 2005. Fluorescent fingerprint of fulvic and humic acids from varied origins as viewed by single-scan and excitation/emission matrix techniques. *Chemosphere.* 58: 715-733
- Sinipomadulsil, S. and Labtephanao, W. 2008. The efficiency of effective microorganisms (EM) on oil and grease treatment of food debris wastewater. *KKU Sci. J.* 36(Suppl.): 27-35
- Snoeyink, V.L. and Jenkins, D. 1980. Oxidation-reduction reactions *In Water Chemistry.* John Wiley & Sons. Inc., New York pp. 316-430
- Spandre, R. and Dellomonaco, G. 1996. Polyphenols pollution by olive mill wastewater, Tuscany, Italy. *J. Environ. Hydrol.* 4: 1-13
- Szymanski, N. and Patterson, R.A. 2003. Effective Microorganisms (EM) and Wastewater Systems. Future Directions for On-site Systems: Best Management Practice Proceeding of On-site '03 Conference. Held at University of New England, Armidale 30th September to 2nd October 2003.
- Tardioli, S., Barone, T.G. and Santori, F. 1997. Species-specific selection on soil fungal population after olive mill wastewater treatment. *Chemosphere.* 34(11): 2329-2336
- Tarvompanich, T. and Srinoppakun, P. 2001. Ozonization of dyeing water of the paper mulberry pulp and paper industry. *In Final report of the research project for higher utilization of forestry and agricultural plant materials in Thailand (HUFA).* pp. 621-631.

- Thambirajah, J.J., Zulkali, M.D. and Hashim, M.A. 1995. Microbiological and biochemical changes during the composting of oil palm empty-fruit-bunches. Effect of nitrogen supplementation on the substrate. *Biores. Technol.* 52: 133-144.
- Tonades, F., Saiz, S., Hortal, J.A.G. and Montaño, J.G. 2008. Degradation of wheat straw black liquor by Fenton and photo-Fenton processes. *Environ. Eng. Sci.* 25: 92-98.
- Ugurdu, M., Gürses, A., Dogar, Ç. And Yalçın, M. 2008. The removal of lignin and phenol from paper mill effluents by electrocoagulation. *J. Environ. Manage.* 87: 420-428.
- US Peroxide. 2006. Reference library, Peroxide application, Industrial wastewater (online). (December 18, 2006). Available from <http://www.h2o2.com>
- Vandemeulen, J.H., Buckley, D.E., Levy, E.M, Long B.F.N., McLaren, P. and Wells, P.G. 1979. Sediment penetration of *Amoco Cadiz* oil, potential for future release, and toxicity. *Mar. Pollut. Bull.* 10(8): 222-227.
- Vodacek, A. 1989. Synchronous fluorescence spectroscopy of dissolved organic matter in surface waters: application to airborne remote sensing. *Rem. Sens. Env.* 30: 239-247.
- Walling C. 1975. Fenton's reagent revisited. *Acc. Chem. Res.* 8(4): 125-131.
- Wang S. 2008. A comparative study of Fenton and Fenton-like reaction kinetics in decolourisation of wastewater. *Dyes Pigments.* 76: 714-720.
- Wei, C-H, Zhang Y-P., Wu, C-F. and Hu, C-S. 2006. Decoloration and mineralization of yeast wastewater by using Ce-Fe/Al₂O₃ as heterogeneous photo-Fenton catalyst. *J. Cent. South. Univ.* 13(5): 481-485.

- Will, I.B.S., Moraes, J.E.F., Teixeira, A.C.S.C., Guardani, R. and Nascimento, C.A.O. 2004. Photo-Fenton degradation of wastewater containing organic compounds in solar reactors. *Sep. Purif. Technol.* 34: 51-57.
- Wongniramaikul, W., Liao, C-H. and Kanatharana, P. 2007. Diisobutyl phthalate degradation by Fenton treatment. *J. Environ. Sci. Health A.* 42: 567-572.
- Xu, M., Wang Q. and Hao, Y. 2007. Removal of organic carbon from wastepaper pulp effluent by lab-scale solar photo-Fenton process. *J. Hazard. Mater.* 148: 103-109.
- Yang G.P., Zhao, X.K., Sun, X.J. and Lu, X.L. 2005. Oxidative degradation of diethyl phthalate by photochemically-enhanced Fenton reaction. *J. Hazard. Mater.* B126: 112-118
- Yetilmezsoy, K. and Sakar, S. 2008. Improvement of COD and color removal from UASB treated poultry manure wastewater using Fenton's oxidation. *J. Hazard. Mater.* 151: 547-558.
- Yu, Z. and Wen, X. 2005. Screening and identification of yeasts for decolorizing synthetic dyes in industrial wastewater. *Inter. Biodeter. Biodegrad.* 56: 109-114.
- Zhang J., Lee, K.H., Cui, L. and Jeong T.S. 2009. Degradation of methylene blue in aqueous solution by ozone-based processes. *J. Ind. Eng. Chem.* 15: 185-189.
- Zhou, H. and Smith, D.W. 2002. Advanced technologies in water and wastewater treatment. *J. Environ. Eng. Sci.* 1: 247-264.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

การวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสีย

1. การวิเคราะห์ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD) (APHA, AWWA and WEF, 2005)

วิธีการวิเคราะห์

Closed Reflux, Titrimetric Method

หลักการ

สารอินทรีย์ส่วนใหญ่จะถูกออกซิไดซ์ โดยสารละลายผสมของ **chromic acid** และ **sulfuric acid** ที่ต้มเดือด โดยตัวอย่างจะถูก **reflux** ในสารละลายของกรดแก่ซึ่งทราบปริมาณของ **potassium dichromate ($K_2Cr_2O_7$)** ที่มากเกินไป หลังจากที่ได้ย่อยสลายแล้วจะทำการไตเตรท $K_2Cr_2O_7$ ที่เหลือด้วย **ferrous ammonium sulfate (FAS)** เพื่อหาปริมาณของ $K_2Cr_2O_7$ ที่ถูกใช้ไปในการออกซิไดซ์ สารอินทรีย์ ปริมาณของสารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดซ์ จะถูกคำนวณ โดยเปรียบเทียบกับปริมาณของออกซิเจน

วัสดุอุปกรณ์

1. Digestion vessels ชนิด TFE lined screw cap ขนาด 16 x 100 mm หรือ 20 x 150 mm หรือ 25 x 150 mm
2. Block heater สำหรับย่อยตัวอย่าง และใช้งานที่อุณหภูมิ 150 ± 2 องศาเซลเซียส
3. Microburet

สารเคมี

1. Standard potassium dichromate digestion solution, 0.01667 M : เติม 4.903 กรัม $K_2Cr_2O_7$ (ซึ่งผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง) 167 มิลลิลิตร conc. H_2SO_4 และ 33.3 กรัม $HgSO_4$ ลงในน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันแล้วเจือจางให้เป็น 1000 มิลลิลิตร
2. Sulfuric acid reagent : เติม Ag_2SO_4 ลงใน conc. H_2SO_4 ในอัตราส่วน 5.5 กรัม Ag_2SO_4 / 1 กิโลกรัม H_2SO_4 ทิ้งไว้ 1-2 วันก่อนนำมาใช้ เพื่อให้ Ag_2SO_4 ละลาย
3. Ferrous indicator solution : ละลาย 1.485 กรัม 1,10 phenantroline monohydrate และ 695 มิลลิกรัม $FeSO_4 \cdot 6H_2O$ ในน้ำกลั่น แล้วเจือจางให้เป็น 100 มิลลิลิตร เมื่อจะใช้ให้เจือจางสารละลายนี้ 5 เท่า

4 Standard ferrous ammonium sulfate titrant (FAS) ประมาณ 0.10 M: ละลาย **39.2** กรัม $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ในน้ำกลั่น เดิม **20** มิลลิลิตร **conc. H_2SO_4** ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วเจือจางให้เป็น **1000** มิลลิลิตร **Standardize** สารละลายนี้ก่อนใช้ ด้วยการใส่สารละลายมาตรฐาน $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ **5** มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่น **10** มิลลิลิตร ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วไตเตรทด้วย **FAS** โดยใช้ **Ferriion indicator solution 1-2** หยด

$$\text{Molarity of FAS solution} = \frac{\text{Volume 0.01667 M solution titrate (ml)}}{\text{Volume FAS used in titration (ml)}} \times 0.1000$$

วิธีวิเคราะห์

1. ปิเปตตัวอย่างปริมาตร **10** มิลลิลิตร ใส่ใน **digestion vessels**
2. เติมสารละลายมาตรฐาน $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ **0.01667 M** จำนวน **6** มิลลิลิตร
3. เติมสารละลาย H_2SO_4 **reagent 14** มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน
4. ปิดฝา **digestion vessels** ให้แน่นพอดีและผสมตัวอย่างให้เข้ากันโดยใช้ **vortex mixer**
5. ทำการย่อยตัวอย่างเป็นเวลา **2** ชั่วโมงโดยนำ **digestion vessels** วางลงใน **block heater** ที่ **preheat** ไว้ที่อุณหภูมิ **150±2** องศาเซลเซียส ก่อนแล้ว จากนั้นปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
6. นำมาไตเตรทด้วยสารละลาย **FAS 0.10 M** โดยใช้สารละลาย **ferriion 1-2** หยด เป็นอินดิเคเตอร์ จนถึงจุดยุติโดยเปลี่ยนจากสีเขียวฟ้าเป็นสีน้ำตาลแดง
7. สำหรับ **blank** ทำเช่นเดียวกันเพียงแต่ใช้น้ำกลั่นแทน

การคำนวณ

$$\text{COD as mg O}_2/\text{L} = \frac{(\text{A}-\text{B}) \times \text{M} \times 8000}{\text{ml sample}}$$

- โดยที่ **A** = ml FAS ที่ใช้ในการไตเตรท **blank**
B = ml FAS ที่ใช้ในการไตเตรทตัวอย่าง
M = molarity ของ FAS
8000 = milliequivalent weight of oxygen x 1000 ml/L

2. การวิเคราะห์บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand, BOD) (APHA, AWWA and WEF, 2005)

วิธีการวิเคราะห์

Azide Modification of Winkler Method

หลักการ

นำน้ำตัวอย่างที่มีการเติมอากาศจนอิ่มตัวใส่ลงในขวดบีโอดี จนล้น ปิดจุกให้แน่นไม่ให้
อากาศเข้า นำขวดไป **incubate** ที่อุณหภูมิ **20** องศาเซลเซียส เป็นเวลา **5** วัน วัด **DO** ก่อนและ
หลังจาก **incubate** ค่า **BOD** คือ ผลต่างระหว่าง **DO** ก่อนและหลังการ **incubate**

วัสดุอุปกรณ์

1. ขวดบีโอดี ขนาด **300** มิลลิลิตร
2. กระบอกตวง
3. บิวเรต

สารเคมี

1. **Phosphate buffer solution**: ละลาย **8.5** กรัม KH_2PO_4 , **21.75** กรัม K_2HPO_4 , **33.4** กรัม $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ และ **1.7** กรัม NH_4Cl ในน้ำกลั่น ประมาณ **500** มิลลิลิตร แล้วเจือจางเป็น **1** ลิตร
2. **Magnesium sulfate solution**: ละลาย **22.5** กรัม $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ในน้ำกลั่นแล้วเจือจางเป็น **1** ลิตร
3. **Calcium chloride solution**: ละลาย **27.5** กรัม CaCl_2 ในน้ำกลั่นแล้วเจือจางเป็น **1** ลิตร
4. **Ferric chloride solution**: ละลาย **0.25** กรัม $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ในน้ำกลั่นแล้วเจือจางเป็น **1** ลิตร
5. **Dilution water**: เตรียมน้ำกลั่นในปริมาณที่ต้องการใช้เพื่อเจือจางตัวอย่างเดิม สารละลาย **phosphate buffer**, MgSO_4 , CaCl_2 และ FeCl_3 อย่างละ **1** มิลลิลิตรต่อน้ำกลั่น **1** ลิตร เติมอากาศเพื่อให้มีออกซิเจนละลายอิ่มตัวใน **dilution water**
6. **Manganese sulfate**: ละลาย **480** กรัม $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ในน้ำกลั่น ทำการกรอง แล้วเจือจางเป็น **1** ลิตร
7. **Alkaline-iodide-azide reagent**: ละลาย **500** กรัม NaOH (หรือ **700** กรัม KOH) และ **135** กรัม NaI (หรือ **150** กรัม KI) ในน้ำกลั่น แล้วเจือจางเป็น **1** ลิตร เติม **10** กรัม NaN_3 ซึ่งละลายในน้ำกลั่น **40** มิลลิลิตร
8. **Sulfuric acid, conc. H_2SO_4**
9. **Starch**: ละลาย **2** กรัม **soluble starch** และ **0.2** กรัม **salicylic acid** ในน้ำกลั่นร้อน **100** มิลลิลิตร

10. Standard sodium thiosulfate titrant: ละลาย 6.205 กรัม $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ในน้ำกลั่น เติม 1.5 มิลลิลิตร 6N NaOH หรือ 0.4 กรัม NaOH แล้วเจือจางเป็น 1 ลิตร **standardize** สารละลายนี้ด้วย **bi-iodate solution**

11. Standard potassium bi-iodate solution 0.0021 M: ละลาย 81.24 มิลลิกรัม $\text{KH}(\text{IO}_3)_2$ ในน้ำกลั่น แล้วเจือจางเป็น 1 ลิตร

Standardization: ละลาย 2 กรัม KI ด้วยน้ำกลั่น 100-150 มิลลิลิตร เติม 1 มิลลิลิตร 6N H_2SO_4 หรือ 2-3 หยดของ conc. H_2SO_4 และ 20.00 มิลลิลิตร **standard potassium bi-iodate solution** เจือจางให้เป็น 200 มิลลิลิตร แล้วไตเตรทด้วย **thiosulfate titrant**

วิธีวิเคราะห์

1. เตรียมน้ำกลั่นในปริมาณที่ต้องการใช้เพื่อเจือจางตัวอย่างเติมสารละลาย **phosphate buffer**, MgSO_4 , CaCl_2 และ FeCl_3 อย่างละ 1 มิลลิลิตรต่อน้ำกลั่น 1 ลิตร เติมอากาศเพื่อให้มีออกซิเจนละลายอิมตัวใน **dilution water**

2. ตัวอย่างน้ำที่เป็นกรดหรือด่าง ต้องปรับพีเอชให้เป็น 6.5-7.5 ด้วย 1 N H_2SO_4 หรือ NaOH ด้วยปริมาณที่ไม่ทำให้ตัวอย่างเจือจางเกิน 0.5 เปอร์เซ็นต์

3. ตัวอย่างน้ำที่มีสารประกอบคลอรีนตกค้าง ให้ตั้งทิ้งไว้ 1-2 ชั่วโมงในที่ที่มีแสง คลอรีนตกค้างจะสลายตัวไป ในกรณีที่มีคลอรีนตกค้างจำนวนมากในตัวอย่างซึ่งปรับพีเอชเป็นกลางแล้ว ต้องกำจัดโดยใช้โซเดียมซัลไฟต์

4. เลือกเปอร์เซ็นต์ตัวอย่างที่คาดว่าจะให้ค่า BOD_5 อยู่ในช่วงที่กำหนดพร้อมทั้งเปอร์เซ็นต์ที่สูงกว่าและต่ำกว่ามาทำการเจือจาง

5. เติมน้ำตัวอย่างและน้ำเจือจางตัวอย่างลงในขวดบีโอดีของแต่ละเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น อย่างละ 2 ขวด เพื่อหา BOD_0 และ BOD_5 ทั้งนี้ควรเติมด้วยความระมัดระวังเพื่อให้เกิดฟองอากาศน้อยที่สุด ปิดจุกให้สนิท โดยใช้น้ำกลั่นหล่อไว้ จากนั้นนำชุด BOD_5 ไปบ่มในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน

6. สำหรับชุด BOD_0 ให้ทำการหาค่าออกซิเจนละลาย (**dissolved oxygen, DO**) ทันทีซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

6.1 เติม MnSO_4 solution 1 มิลลิลิตร

6.2 เติม **Alkaline-iodide-azide reagent** 1 มิลลิลิตร

6.3 ปิดจุกขวดแล้วเขย่ากลับไปมาอย่างแรง แล้ววางทิ้งไว้ให้ตกตะกอน

6.4 เติม conc. H_2SO_4 1 มิลลิลิตร

6.5 ปิดจุกขวดแล้วเขย่ากลับไปมาอย่างแรงหลายครั้งจนกระทั่งตะกอนละลายหมด

6.6 ตวงสารละลายจากขวดบีโอดี มา 201 มิลลิลิตร

6.7 ทำการไตเตรทด้วย 0.025 M $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ solution จนกระทั่งได้สีฟางข้าว จากนั้นเติมน้ำแป้งลงไป 1-2 หยด แล้วไตเตรทต่อจนกระทั่งสีฟ้าจางหายไป

7. สำหรับ BOD_5 ทำเช่นเดียวกันกับ BOD_0

8. สำหรับ blank ทำเช่นเดียวกันเพียงแต่ใช้น้ำเจือจางแทน

การคำนวณ

$$\text{BOD}_5 \text{ (mg/L)} = \frac{(\text{DO}_0 - \text{DO}_5) \times \text{volume of bottle (ml)}}{\text{volume of sample (ml)}}$$

3 การวิเคราะห์ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids) (APHA, AWWA and WEF, 2005)

วิธีการวิเคราะห์

Gravimetric method

หลักการ

กรองน้ำตัวอย่างผ่านแผ่นกรองใยแก้ว GF/C ที่ทราบน้ำหนัก ตะกอนที่ติดอยู่บนแผ่นกรองจะนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส และทำให้เย็นในโถดูดความชื้นแล้วชั่งน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น คือ น้ำหนักของของแข็งแขวนลอยทั้งหมดต่อปริมาตรตัวอย่างน้ำที่ใช้

วัสดุอุปกรณ์

1. แผ่นกรองใยแก้ว GF/C
2. อลูมิเนียมฟอยล์
3. คีมคีบ
4. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง

วิธีวิเคราะห์

1. นำแผ่นกรองใยแก้ว GF/C วางบนอลูมิเนียมฟอยล์และนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนัก

2. ปริมาตรของตัวอย่างน้ำที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ควรได้ของแข็งอยู่ในช่วง 2.5-200 มิลลิกรัม

- 3 ใช้คีมคีบแผ่นกรองใยแก้ว **GF/C** วางบนกรวยที่ต่อกับเครื่องดูดสุญญากาศ
- 4 ฉีดน้ำกลั่นบนแผ่นกรองใยแก้ว **GF/C** ให้เปียก แล้วเปิดเครื่องดูดสุญญากาศเพื่อให้แผ่นกรองติดกับกรวย
- 5 กรองตัวอย่างที่ผสมเข้ากันดีแล้ว โดยอาศัยแรงดึงจากเครื่องดูดอากาศ
- 6 ปิดเครื่องดูดสุญญากาศ ใช้คีมคีบแผ่นกรอง แล้วนำไปใส่อลูมิเนียมฟอยล์อันเดิม จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ **103-105** องศาเซลเซียส เป็นเวลา **1** ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนัก

การคำนวณ

$$\text{Suspended Solids (mg/L)} = \frac{(A-B) \times 1000}{\text{volume of sample (ml)}}$$

โดยที่ A = น้ำหนักแผ่นกรองใยแก้ว + อลูมิเนียมฟอยล์ + ของแข็ง (mg)

B = น้ำหนักแผ่นกรองใยแก้ว + อลูมิเนียมฟอยล์ (mg)

4 การวิเคราะห์ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total Dissolved Solids) (APHA, AWWA and WEF, 2005)

วิธีการวิเคราะห์

Gravimetric method

หลักการ

ตัวอย่างน้ำที่กรองผ่านแผ่นกรองใยแก้ว **GF/C** ในด้วยระเหยที่ราบน้ำหนัก จะถูกนำไประเหยด้วยไอน้ำจนแห้งแล้วนำไปอบที่ **180** องศาเซลเซียส ทำให้เย็นในโถดูดความชื้นแล้วชั่งน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น คือ น้ำหนักของของแข็งละลายน้ำทั้งหมด

วัสดุอุปกรณ์

- 1 ถ้วยกระเบื้อง
- 2 คีมคีบ
- 3 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
- 4 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (water bath)

วิธีวิเคราะห์

1. นำถ้วยกระเบื้องไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนัก
2. ปริมาตรของตัวอย่างน้ำที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด ควรได้ของแข็งไม่มากกว่า 200 มิลลิกรัม
3. ถ่ายน้ำที่ผ่านการกรองด้วยแผ่นกรองใยแก้ว GF/C แล้วลงในถ้วยกระเบื้องที่ชั่งน้ำหนักเรียบร้อยแล้ว และระเหยบนอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิจนแห้ง
4. นำตัวอย่างที่ระเหยแห้งแล้วไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนัก

การคำนวณ

$$\text{Dissolved Solids (mg/L)} = \frac{(A-B) \times 1000}{\text{volume of sample (ml)}}$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } A &= \text{น้ำหนักถ้วยกระเบื้อง + ของแข็ง (mg)} \\ B &= \text{น้ำหนักถ้วยกระเบื้อง (mg)} \end{aligned}$$

5. การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Mendham *et al.*, 2000)

วิธีการวิเคราะห์

Potassium Permanganate Method

วัสดุอุปกรณ์

1. Beaker 50 ml
2. Erlenmeyer flask 500 ml
3. Class A burette 50 ml

สารเคมี

1. Standard potassium permanganate solution 0.1 N : ละลาย 3.2 กรัม ของ KMnO_4 ด้วยน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร จากนั้นนำไปต้มให้เดือดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง รอให้สารละลายเย็นลง แล้วนำไปกรองด้วย **fritted glass crucible** และปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร ด้วยขวดปรับปริมาตร เก็บสารละลายนี้ในที่มืด

2. **Sulfuric acid (1:3)** : เติม 50 มิลลิลิตร conc. H_2SO_4 ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร ซึ่งมีน้ำกลั่นอยู่ก่อนแล้ว 150 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วเจือจางให้เป็น 250 มิลลิลิตร

3. **Standardization of potassium permanganate (0.1 N)** : เติม 0.3 กรัม $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ (ซึ่งผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง) 50 มิลลิลิตร H_2SO_4 (1:3) ลงใน **Erlenmeyer flask** ซึ่งมีน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปต้มให้เดือดบนเตาให้ความร้อน แล้วไตเตรทสารละลายนี้ด้วย **potassium permanganate solution (50 ml class A burette)** จนถึงจุดยุติ คือให้สีชมพูอ่อนและคงตัวอยู่ประมาณ 30 วินาที (อุณหภูมิของสารละลาย $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ ไม่ควรต่ำกว่า 70 องศาเซลเซียสขณะทำการไตเตรท)

$$\text{Normality of KMnO}_4 = \frac{(\text{Weight Na}_2\text{C}_2\text{O}_4)(2)(1000)}{(\text{mL KMnO}_4)(134)}$$

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่าง H_2O_2 ด้วยบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร พร้อมบันทึกน้ำหนัก ± 5 กรัม สำหรับตัวอย่าง H_2O_2 ความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์ ± 3.5 กรัม สำหรับตัวอย่าง H_2O_2 ความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์ ± 2.5 กรัม สำหรับตัวอย่าง H_2O_2 ความเข้มข้น 70 เปอร์เซ็นต์
2. นำตัวอย่าง H_2O_2 ใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร ซึ่งมี 250 มิลลิลิตรของน้ำกลั่น และ 2 มิลลิลิตรของ H_2SO_4 (1:3) อยู่ก่อนแล้ว จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 500 มิลลิลิตร
3. ปิเปตสารละลาย H_2O_2 20 มิลลิลิตร ใส่ **Erlenmeyer flask** ขนาด 500 มิลลิลิตร ซึ่งมี 60 มิลลิลิตรของน้ำกลั่น และ 15 มิลลิลิตรของ H_2SO_4 (1:3) อยู่ก่อนแล้ว
4. ไตเตรทสารละลายด้วย **standard potassium permanganate solution** จนถึงจุดยุติ

การคำนวณ

$$\% \text{H}_2\text{O}_2 (\text{w/w}) = \frac{(V)(N)(1.701)(25)}{W}$$

- โดยที่ V = ml ของ KMnO_4 ที่ใช้ในการไตเตรท
 N = Normality ของ KMnO_4
 W = น้ำหนักของตัวอย่าง H_2O_2 (กรัม)
 1.701 = weight per milliequivalent of $\text{H}_2\text{O}_2 \times 100$
 25 = dilution factor

6 การวิเคราะห์แทนนิน-ลิกนิน (APHA, AWWA and WEF, 2005)

วิธีการวิเคราะห์

Colorimetric Method

วัสดุอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง
2. Erlenmeyer flask
3. Volumetric flask
4. Pipette

สารเคมี

1. Tannic acid
2. Folin phenol reagent (แบบสำเร็จรูป)
3. Sodium Carbonate (Na_2CO_3)
4. Sodium tartrate ($\text{Na}_2\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

วิธีวิเคราะห์

1. เตรียมสารละลายแทนนินความเข้มข้น 1.0000 กรัม/ลิตร : 1.0000 กรัมของ Tannic acid ละลายด้วยน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร

2. เตรียมสารละลาย Carbonate-Tartrate reagent : 200 กรัมของ Na_2CO_3 และ 12 กรัมของ $\text{Na}_2\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ละลายด้วยน้ำกลั่นที่ต้มให้ร้อนจนเกือบเดือด 750 มิลลิลิตร จากนั้นปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส แล้วปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร

3. น้ำตัวอย่าง : กรองน้ำตัวอย่างด้วยแผ่นกรองใยแก้ว หรือ นำไป centrifuge เพื่อแยกตะกอนออก

4. ปิเปตน้ำตัวอย่าง 25 มิลลิลิตร ใส่ Erlenmeyer flask เดิม 0.5 มิลลิลิตร Folin phenol reagent และ 5 มิลลิลิตร Carbonate-Tartrate reagent

5. ผสมให้สารเข้ากันแล้วปล่อยให้ไวให้เกิดปฏิกิริยาหรือเกิดสีจนสมบูรณ์เป็นเวลา 30 นาที ภายใต้การควบคุมอุณหภูมิที่ 20 ± 2 องศาเซลเซียส

6. นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร โดยเทียบกับกราฟมาตรฐาน

7. สร้างกราฟมาตรฐานสารละลายแทนนิน ที่ความเข้มข้น 0, 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตสารละลายแทนนินความเข้มข้น 1.0000 กรัม/ลิตร มา 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 และ 1.2 มิลลิลิตร ใส่ขวดปรับปริมาตร ตามลำดับ แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร

ภาคผนวก ข.

ลักษณะสมบัติของน้ำเสียและน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

ตารางภาคผนวก ข 1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียและน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

Parameter	Influent	Mean \pm S.D.	Effluent	Mean \pm S.D.
Color	Brown-Dark Brown	Brown-Dark Brown	Brown	Brown
pH	4.20-4.80	4.57 \pm 0.16	6.84-9.10	8.47 \pm 0.05
BOD ₅ (mg/L)	21,150.00-70,500.00	38,591.10 \pm 12,024.67	12.38-382.50	53.94 \pm 85.53
COD (mg/L)	37,726.40-166,483.20	79,034.41 \pm 35,123.96	119.14-638.21	232.38 \pm 123.70
Suspended solids (mg/L)	5,166.67-50,050.00	16,563.64 \pm 9,362.34	4.67-278.00	50.29 \pm 56.15
Oil & Grease (mg/L)	1,132.60-16,419.20	5,527.23 \pm 3,732.11	1.50-14.00	4.03 \pm 2.49

ข้อมูล มกราคม พ.ศ. 2550- ตุลาคม พ.ศ. 2551

ภาคผนวก ค.

การบำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยน้ำหมักชีวภาพ

ตารางภาคผนวก ค 1 ปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่
ระยะเวลาบำบัดต่างๆ

ชุดการทดลอง	ซ้ำที่	เวลา (ชั่วโมง)					
		0	24	48	72	96	120
ชุดควบคุม	1	518	500	492	505	485	467
ชุดควบคุม	2	490	510	480	497	476	428
ชุดควบคุม	3	500	498	513	495	482	435
ชุดควบคุม	$\bar{X} \pm S.D.$	503±14	503±6	495±17	499±5	481±5	443±21
น้ำหมักชีวภาพ 0.5%	1	818	823	795	802	780	764
น้ำหมักชีวภาพ 0.5%	2	895	876	881	874	815	791
น้ำหมักชีวภาพ 0.5%	3	790	802	809	797	764	730
น้ำหมักชีวภาพ 0.5%	$\bar{X} \pm S.D.$	834±54	834±38	828±46	824±43	786±26	762±31
น้ำหมักชีวภาพ 2%	1	1131	1125	1100	1158	1030	982
น้ำหมักชีวภาพ 2%	2	1302	1207	1290	1080	1256	1193
น้ำหมักชีวภาพ 2%	3	1063	1041	1105	1235	992	980
น้ำหมักชีวภาพ 2%	$\bar{X} \pm S.D.$	1165±123	1124±83	1165±108	1158±78	1093±143	1052±122
น้ำหมักชีวภาพ 5%	1	2426	2400	2389	2410	2364	2354
น้ำหมักชีวภาพ 5%	2	2494	2453	2410	2435	2350	2294
น้ำหมักชีวภาพ 5%	3	2528	2501	2498	2513	2476	2397
น้ำหมักชีวภาพ 5%	$\bar{X} \pm S.D.$	2483±52	2451±51	2432±58	2453±54	2397±69	2348±52

หมายเหตุ หน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางภาคผนวก ค 2 ปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของบีโอดีในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่
ระยะเวลาบำบัดต่างๆ

ชุดการทดลอง	ซ้ำที่	เวลา (ชั่วโมง)					
		0	24	48	72	96	120
ชุดควบคุม	1	24	25	23	20	18	16
ชุดควบคุม	2	25	24	24	22	21	18
ชุดควบคุม	3	22	21	23	22	19	18
ชุดควบคุม	$\bar{X} \pm S.D.$	24±2	23±2	23±1	21±1	19±2	18±1
น้ำหมักชีวภาพ 0.5%	1	82	80	78	75	71	66
น้ำหมักชีวภาพ 0.5%	2	69	70	68	67	62	62
น้ำหมักชีวภาพ 0.5%	3	73	71	70	65	64	59
น้ำหมักชีวภาพ 0.5%	$\bar{X} \pm S.D.$	75±7	74±6	72±5	69±5	66±5	62±4
น้ำหมักชีวภาพ 2%	1	427	420	422	415	414	407
น้ำหมักชีวภาพ 2%	2	462	460	458	452	446	438
น้ำหมักชีวภาพ 2%	3	435	429	432	426	421	416
น้ำหมักชีวภาพ 2%	$\bar{X} \pm S.D.$	441±18	436±21	437±19	431±19	427±17	420±16
น้ำหมักชีวภาพ 5%	1	1303	1295	1291	1282	1270	1256
น้ำหมักชีวภาพ 5%	2	1229	1219	1210	1197	1182	1171
น้ำหมักชีวภาพ 5%	3	1270	1265	1257	1245	1237	1225
น้ำหมักชีวภาพ 5%	$\bar{X} \pm S.D.$	1267±37	1260±38	1253±41	1241±43	1230±44	1217±43

หมายเหตุ หน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางภาคผนวก ค 3 ปริมาณสารแขวนลอย (TSS) ในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ระยะเวลา
บำบัดต่างๆ

ชุดการทดลอง	ซ้ำที่	เวลา (ชั่วโมง)					
		0	24	48	72	96	120
ชุดควบคุม	1	120	131	139	150	147	145
ชุดควบคุม	2	125	133	141	155	156	153
ชุดควบคุม	3	127	137	145	157	153	153
ชุดควบคุม	$\bar{X} \pm S.D.$	124±4	134±3	142±3	154±4	152±5	150±5
น้ำหมักชีวภาพ 0.5%	1	138	145	158	170	165	157
น้ำหมักชีวภาพ 0.5%	2	140	147	154	164	163	155
น้ำหมักชีวภาพ 0.5%	3	143	149	158	168	166	161
น้ำหมักชีวภาพ 0.5%	$\bar{X} \pm S.D.$	140±3	147±2	157±2	167±3	165±2	158±3
น้ำหมักชีวภาพ 2%	1	149	152	161	174	172	165
น้ำหมักชีวภาพ 2%	2	154	162	170	179	177	172
น้ำหมักชีวภาพ 2%	3	150	160	167	181	175	170
น้ำหมักชีวภาพ 2%	$\bar{X} \pm S.D.$	151±3	158±5	166±5	178±4	175±3	169±4
น้ำหมักชีวภาพ 5%	1	196	205	211	227	223	219
น้ำหมักชีวภาพ 5%	2	189	195	208	224	228	222
น้ำหมักชีวภาพ 5%	3	201	207	215	233	225	216
น้ำหมักชีวภาพ 5%	$\bar{X} \pm S.D.$	195±6	202±6	211±4	228±5	225±3	219±3

หมายเหตุ หน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางภาคผนวก ค 4 ปริมาณของแข็งละลายน้ำ (TDS) ในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่
ระยะเวลาบำบัดต่างๆ

ชุดการทดลอง	ซ้ำที่	เวลา (ชั่วโมง)					
		0	24	48	72	96	120
ชุดควบคุม	1	4055	4081	4106	4096	4072	4049
ชุดควบคุม	2	4030	4057	4101	4090	4085	4040
ชุดควบคุม	3	4040	4078	4097	4100	4108	4057
ชุดควบคุม	$\bar{X} \pm S.D.$	4042±13	4072±13	4101±5	4095±5	4088±18	4049±9
น้ำหมักชีวภาพ 0.5%	1	4210	4228	4300	4280	4267	4246
น้ำหมักชีวภาพ 0.5%	2	4210	4230	4310	4276	4270	4250
น้ำหมักชีวภาพ 0.5%	3	4190	4215	4280	4270	4268	4254
น้ำหมักชีวภาพ 0.5%	$\bar{X} \pm S.D.$	4203±12	4224±8	4297±15	4275±5	4268±2	4250±4
น้ำหมักชีวภาพ 2%	1	4480	4509	4550	4545	4532	4504
น้ำหมักชีวภาพ 2%	2	4480	4515	4542	4515	4504	4492
น้ำหมักชีวภาพ 2%	3	4540	4568	4603	4598	4587	4557
น้ำหมักชีวภาพ 2%	$\bar{X} \pm S.D.$	4500±35	4531±32	4565±33	4553±42	4541±42	4518±35
น้ำหมักชีวภาพ 5%	1	5080	5100	5170	5167	5165	5143
น้ำหมักชีวภาพ 5%	2	5000	5040	5102	5087	5064	5038
น้ำหมักชีวภาพ 5%	3	5160	5195	5207	5182	5160	5145
น้ำหมักชีวภาพ 5%	$\bar{X} \pm S.D.$	5080±80	5112±78	5160±53	5145±51	5130±57	5109±61

หมายเหตุ หน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางภาคผนวก ค 5 ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ระยะเวลาบำบัดต่างๆ

ชุดการทดลอง	ซ้ำที่	เวลา (ชั่วโมง)					
		0	24	48	72	96	120
ชุดควบคุม	1	483	486	484	484	488	488
ชุดควบคุม	2	482	486	484	483	487	487
ชุดควบคุม	3	481	487	485	484	488	489
ชุดควบคุม	$\bar{X} \pm S.D.$	482±0.01	486±0.01	484±0.01	484±0.01	488±0.01	488±0.01
น้ำหมักชีวภาพ 0.5%	1	486	490	494	494	499	499
น้ำหมักชีวภาพ 0.5%	2	486	491	494	495	499	5.00
น้ำหมักชีวภาพ 0.5%	3	487	493	494	495	5.00	5.00
น้ำหมักชีวภาพ 0.5%	$\bar{X} \pm S.D.$	486±0.01	491±0.02	494±0.00	495±0.01	499±0.01	5.00±0.01
น้ำหมักชีวภาพ 2%	1	496	5.02	5.02	5.03	5.08	5.08
น้ำหมักชีวภาพ 2%	2	496	5.03	5.04	5.03	5.07	5.08
น้ำหมักชีวภาพ 2%	3	497	5.04	5.04	5.02	5.08	5.09
น้ำหมักชีวภาพ 2%	$\bar{X} \pm S.D.$	496±0.01	5.03±0.01	5.03±0.01	5.03±0.01	5.08±0.01	5.08±0.01
น้ำหมักชีวภาพ 5%	1	512	5.14	5.12	5.10	5.16	5.17
น้ำหมักชีวภาพ 5%	2	512	5.14	5.13	5.11	5.16	5.17
น้ำหมักชีวภาพ 5%	3	513	5.15	5.15	5.12	5.18	5.18
น้ำหมักชีวภาพ 5%	$\bar{X} \pm S.D.$	512±0.01	5.14±0.01	5.13±0.02	5.11±0.01	5.17±0.01	5.17±0.02

หมายเหตุ หน่วย มิลลิซีเมนต่อเซนติเมตร

ตารางภาคผนวก ก 6 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ระยะเวลาบำบัดต่างๆ

ชุดการทดลอง	ซ้ำที่	เวลา (ชั่วโมง)					
		0	24	48	72	96	120
ชุดควบคุม	1	8.91	8.84	8.84	8.88	8.89	8.80
ชุดควบคุม	2	8.92	8.89	8.90	8.91	8.90	8.84
ชุดควบคุม	3	8.92	8.90	8.87	8.87	8.88	8.82
ชุดควบคุม	$\bar{X} \pm S.D.$	8.92±0.01	8.88±0.03	8.87±0.03	8.89±0.02	8.89±0.01	8.82±0.02
น้ำหมักชีวภาพ 0.5%	1	8.84	8.65	8.45	8.39	8.34	8.32
น้ำหมักชีวภาพ 0.5%	2	8.85	8.70	8.49	8.40	8.36	8.32
น้ำหมักชีวภาพ 0.5%	3	8.84	8.68	8.48	8.41	8.34	8.35
น้ำหมักชีวภาพ 0.5%	$\bar{X} \pm S.D.$	8.84±0.01	8.68±0.03	8.47±0.02	8.40±0.01	8.35±0.01	8.33±0.02
น้ำหมักชีวภาพ 2%	1	8.57	8.15	7.93	7.75	7.58	7.70
น้ำหมักชีวภาพ 2%	2	8.54	8.19	7.96	7.78	7.75	7.79
น้ำหมักชีวภาพ 2%	3	8.56	8.19	7.94	7.80	7.69	7.73
น้ำหมักชีวภาพ 2%	$\bar{X} \pm S.D.$	8.56±0.02	8.18±0.02	7.94±0.02	7.78±0.03	7.67±0.09	7.74±0.05
น้ำหมักชีวภาพ 5%	1	7.69	7.32	6.91	6.69	6.86	7.14
น้ำหมักชีวภาพ 5%	2	7.72	7.34	6.94	6.68	6.89	7.14
น้ำหมักชีวภาพ 5%	3	7.71	7.35	6.99	6.72	6.91	7.13
น้ำหมักชีวภาพ 5%	$\bar{X} \pm S.D.$	7.71±0.02	7.34±0.02	6.95±0.04	6.70±0.02	6.89±0.03	7.14±0.01

ภาคผนวก ง.

การบำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเฟนตันรีเอเจนต์

ตารางภาคผนวก ง 1 ผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมของเฟอร์รัสไอออน

[H ₂ O ₂] (mM)	[Fe ²⁺] (mM)	ซ้ำที่	ค่าการดูดกลืนแสง เริ่มต้น (Abs.)	ค่าการดูดกลืนแสง สุดท้าย (Abs.)	ประสิทธิภาพ การกำจัดสี (%)
50	0.2	1	0.160	0.106	33.75
		2	0.161	0.107	33.54
		3	0.161	0.106	34.16
		ค่าเฉลี่ย±S.D.	0.161±0.001	0.106±0.001	33.82±0.32
50	0.3	1	0.160	0.100	37.50
		2	0.161	0.100	37.89
		3	0.161	0.098	39.13
		ค่าเฉลี่ย±S.D.	0.161±0.001	0.099±0.001	38.17±0.85
50	0.5	1	0.161	0.082	49.07
		2	0.162	0.082	49.38
		3	0.160	0.082	48.75
		ค่าเฉลี่ย±S.D.	0.161±0.001	0.082±0.000	49.07±0.32
50	1.0	1	0.160	0.065	59.38
		2	0.160	0.064	60.00
		3	0.161	0.063	60.87
		ค่าเฉลี่ย±S.D.	0.160±0.001	0.064±0.001	60.08±0.75
50	1.5	1	0.162	0.069	57.41
		2	0.161	0.069	57.14
		3	0.162	0.068	58.02
		ค่าเฉลี่ย±S.D.	0.162±0.001	0.069±0.001	57.52±0.45
50	2.0	1	0.160	0.068	57.50
		2	0.160	0.069	56.88
		3	0.160	0.068	57.50
		ค่าเฉลี่ย±S.D.	0.160±0.000	0.068±0.001	57.29±0.36

ตารางภาคผนวก ง 1 (ต่อ)

[H ₂ O ₂] (mM)	[Fe ²⁺] (mM)	ซ้ำที่	ค่าการดูดกลืนแสง เริ่มต้น (Abs.)	ค่าการดูดกลืนแสง สุดท้าย (Abs.)	ประสิทธิภาพ การกำจัดสี (%)
50	25	1	0.161	0.070	56.52
		2	0.162	0.070	56.79
		3	0.162	0.072	55.56
		ค่าเฉลี่ย±S.D.	0.162±0.001	0.071±0.001	56.29±0.65

ตารางภาคผนวก ง 2 ผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

[H ₂ O ₂] (mM)	[Fe ²⁺] (mM)	ซ้ำที่	ค่าการดูดกลืนแสง เริ่มต้น (Abs.)	ค่าการดูดกลืนแสง สุดท้าย (Abs.)	ประสิทธิภาพ การกำจัดสี (%)
10	1.0	1	0.162	0.110	32.10
		2	0.163	0.110	32.52
		3	0.163	0.109	33.13
		ค่าเฉลี่ย±S.D.	0.163±0.001	0.110±0.001	32.58±0.52
15	1.0	1	0.163	0.101	38.04
		2	0.163	0.100	38.65
		3	0.163	0.100	38.65
		ค่าเฉลี่ย±S.D.	0.163±0.000	0.100±0.001	38.45±0.35
25	1.0	1	0.162	0.084	48.15
		2	0.162	0.085	47.53
		3	0.161	0.083	48.45
		ค่าเฉลี่ย±S.D.	0.162±0.001	0.084±0.001	48.04±0.47
50	1.0	1	0.162	0.064	60.49
		2	0.162	0.063	61.11
		3	0.162	0.062	61.73
		ค่าเฉลี่ย±S.D.	0.162±0.000	0.063±0.001	61.11±0.62
75	1.0	1	0.162	0.063	61.11
		2	0.162	0.063	61.11
		3	0.162	0.064	60.49
		ค่าเฉลี่ย±S.D.	0.162±0.000	0.063±0.001	60.91±0.36

ตารางภาคผนวก 2 (ต่อ)

[H ₂ O ₂] (mM)	[Fe ²⁺] (mM)	ซ้ำที่	ค่าการดูดกลืนแสง เริ่มต้น (Abs.)	ค่าการดูดกลืนแสง สุดท้าย (Abs.)	ประสิทธิภาพ การกำจัดสี (%)
100	1.0	1	0.163	0.063	61.35
		2	0.164	0.063	61.59
		3	0.163	0.062	61.96
		ค่าเฉลี่ย±S.D.	0.163±0.001	0.063±0.001	61.63±0.31
125	1.0	1	0.163	0.062	61.96
		2	0.163	0.061	62.58
		3	0.164	0.061	62.80
		ค่าเฉลี่ย±S.D.	0.163±0.001	0.061±0.001	62.45±0.44
150	1.0	1	0.162	0.063	61.11
		2	0.162	0.061	62.35
		3	0.162	0.062	61.73
		ค่าเฉลี่ย±S.D.	0.162±0.000	0.062±0.001	61.73±0.62

ตารางภาคผนวก 3 ผลความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี

ความเข้มข้นของ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (mM)	ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี (%)			
	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	เฉลี่ย±S.D.
10	32	35	26	31±5
15	38	36	41	38±2
25	62	63	59	61±2
50	81	80	82	81±1
75	83	81	81	82±2
100	77	75	72	74±3
125	70	72	69	71±1
150	67	71	66	68±3

ตารางภาคผนวก ง 4 ผลความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์รัสไอออนต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี

ความเข้มข้นของ เฟอร์รัสไอออน (mM)	ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี (%)			
	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	เฉลี่ย±S.D.
0.2	57	53	57	56±2
0.3	60	60	55	58±3
0.5	65	67	63	65±2
1.0	80	78	82	80±2
1.5	80	78	79	79±1
2.0	82	80	77	80±3
2.5	78	79	75	77±2

ตารางภาคผนวก ง 5 ผลของพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี

พีเอช	ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี (%)			
	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	เฉลี่ย±S.D.
3	83	81	82	82±1
4	79	80	78	79±1
5	56	61	53	57±4
6	36	30	34	33±3
7	28	30	23	27±3
8.5	18	20	21	20±1

ตารางภาคผนวก ง 6 ผลของการกรองตัวอย่างต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี

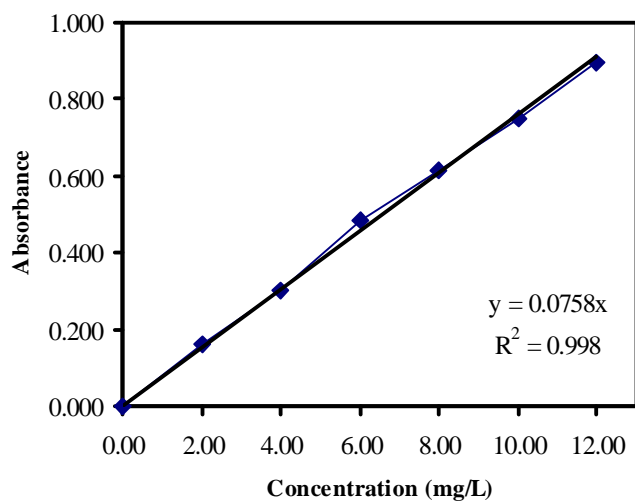
ตัวอย่าง	ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี (%)			
	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	เฉลี่ย±S.D.
กรองปรับพีเอชเป็น 3	80	78	82	80±2
ไม่กรองปรับพีเอชเป็น 3	84	87	86	85±1
กรองพีเอช 8.5	19	23	17	20±3
ไม่กรองพีเอช 8.5	23	25	24	24±1

ภาคผนวก จ.

การตรวจวิเคราะห์แทนนิน-ลิกนิน

ตารางภาคผนวก จ 1 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายแทนนิน-ลิกนินที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง
0.00	0.010
2.00	0.172
4.00	0.311
6.00	0.492
8.00	0.626
10.00	0.762
12.00	0.904



ภาพภาคผนวก จ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแทนนิน-ลิกนินกับค่าการดูดกลืนแสง

ตารางภาคผนวก จ 2 ปริมาณแทนนิน-ลิกนินในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

ตัวอย่าง	ค่าที่ได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	เฉลี่ย
น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มก่อนบำบัด	664	668	668	667
น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มหลังบำบัด ¹	367	388	373	376

หมายเหตุ 1 $H_2O_2 = 50\text{mM}$; $Fe^{2+} = 1.0\text{mM}$; $pH 3.0 \pm 0.2$; ระยะเวลาการบำบัด 24 ชั่วโมง

ภาคผนวก ฉ.

การทดสอบความพึงพอใจต่อสีของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

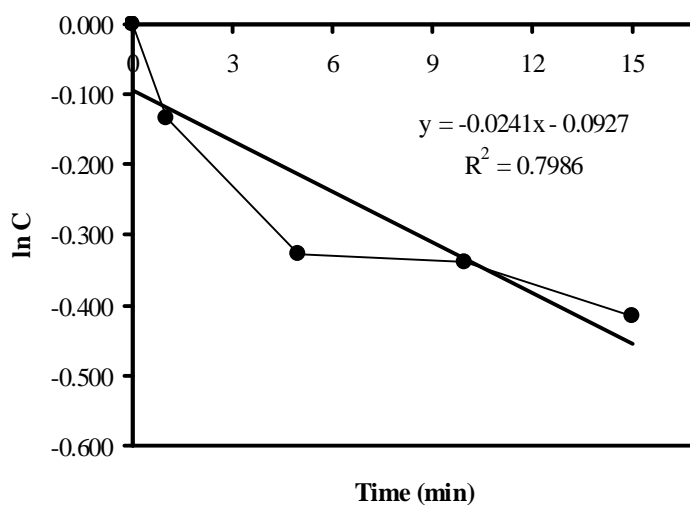
ตารางภาคผนวก ฉ 1 ผลระดับคะแนนความพึงพอใจต่อสีของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

ลำดับที่	POME	[H ₂ O ₂]/[Fe ²⁺]					Total of mean
		5	10	25	50	100	
1	2	3	3	5	5	5	
2	2	3	3	5	4	5	
3	2	3	3	5	5	5	
4	2	3	3	5	5	4	
5	1	2	2	5	5	5	
6	2	3	3	5	5	5	
7	1	3	3	5	5	5	
8	1	3	3	5	5	5	
9	1	2	2	5	5	5	
10	1	2	3	5	4	5	
11	2	4	4	4	4	5	
12	1	2	3	4	5	5	
13	1	3	3	5	5	5	
14	1	2	3	5	4	5	
15	2	3	3	4	5	5	
16	1	3	3	4	5	5	
17	1	3	3	5	5	5	
18	1	3	3	5	5	5	
19	2	3	3	5	5	5	
20	2	2	3	5	5	5	3.63±1.40
Mean of H ₂ O ₂ concentration	1.45±0.51	2.75±0.55	2.95±0.39	4.85±0.37	4.80±0.41	4.95±0.22	-

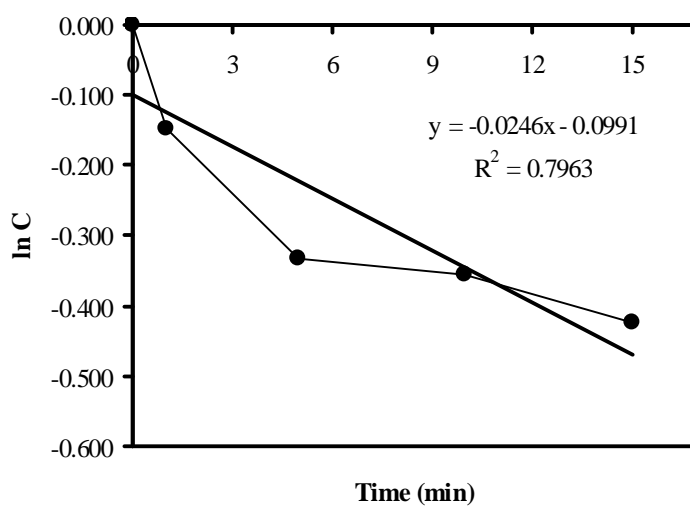
ภาคผนวก ข.

จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา

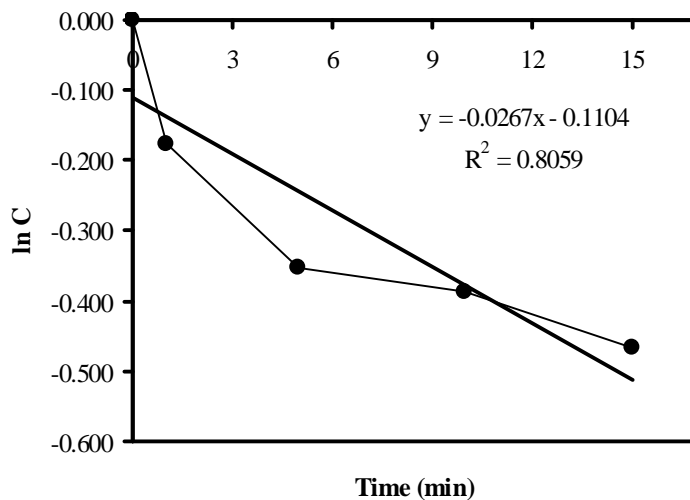
1. จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยากำจัดสีน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเฟนตันรีเอเจนต์



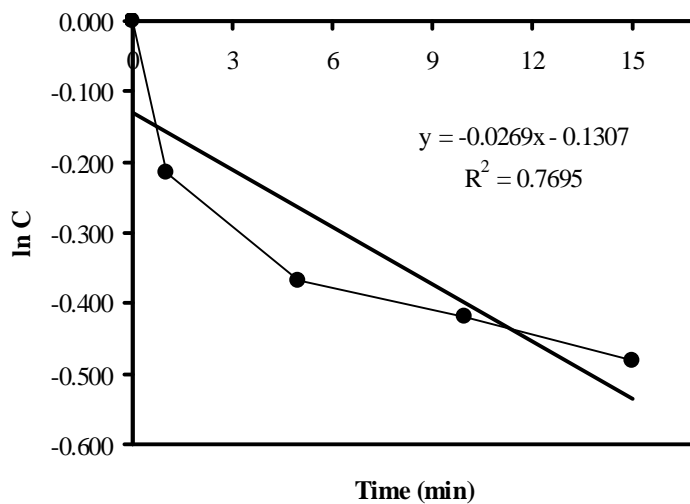
ภาพภาคผนวก ข 1 อัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 10



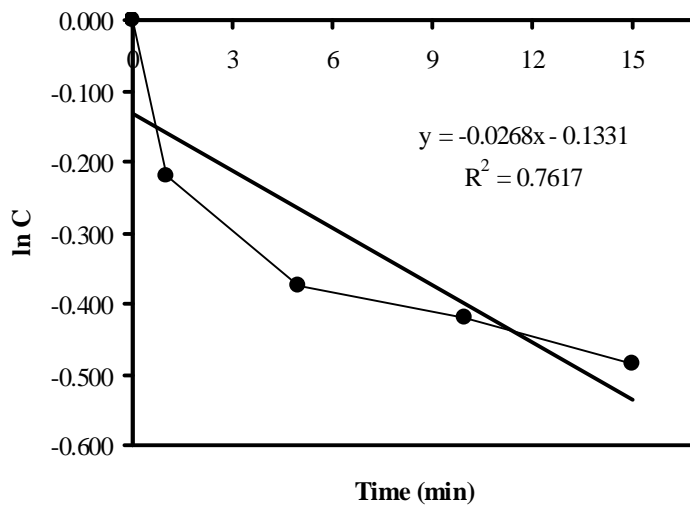
ภาพภาคผนวก ข 2 อัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 15



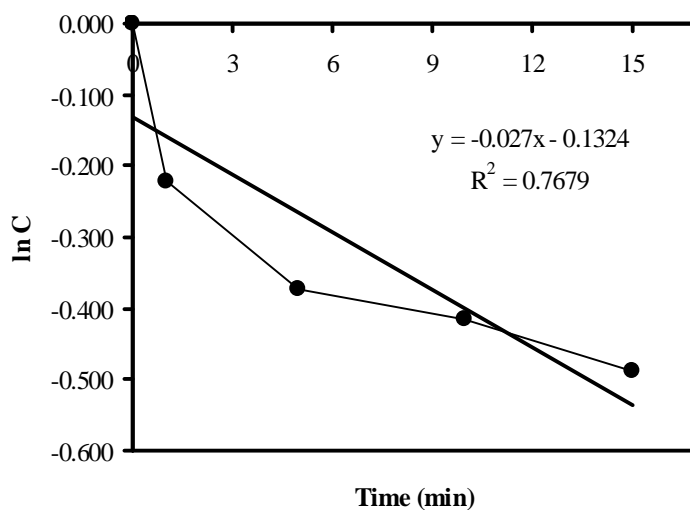
ภาพภาคผนวก ข 3 อัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 25



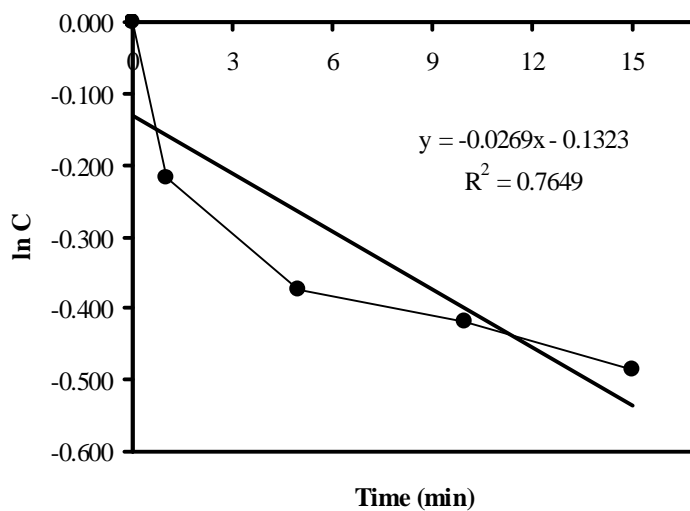
ภาพภาคผนวก ข 4 อัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 50



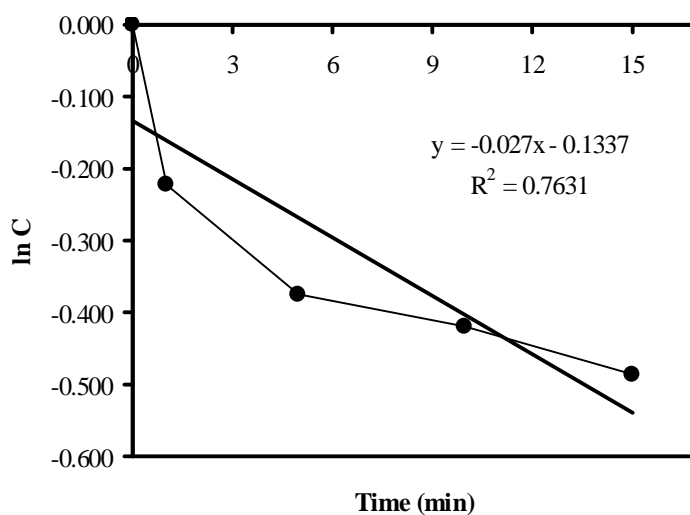
ภาพภาคผนวก ข 5 อัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 75



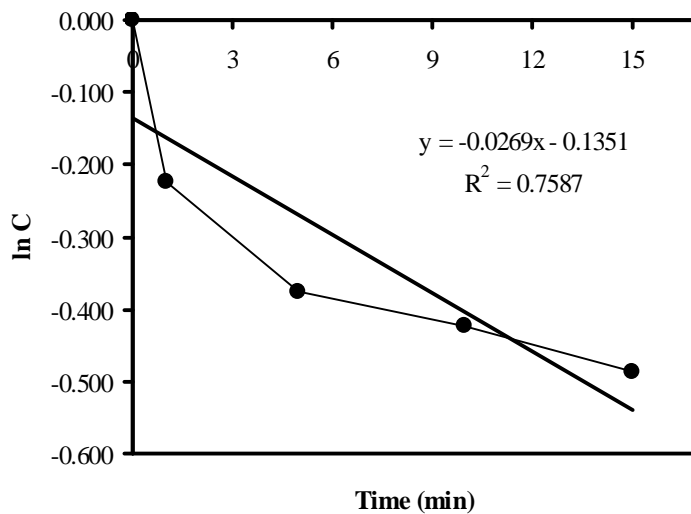
ภาพภาคผนวก ข 6 อัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 100



ภาพภาคผนวก ข 7 อัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 125

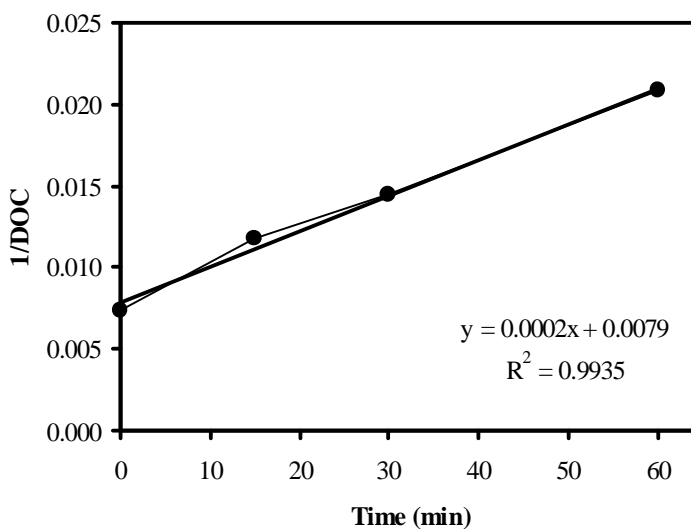


ภาพภาคผนวก ข 8 อัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 150



ภาพภาคผนวก ข 9 อัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 200

2. จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยากำจัดสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำด้วยฟentonรีเอเจนต์



ภาพภาคผนวก ข 10 อัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 50

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายชนกฤต พรหมทอง
 รหัสประจำตัวนักศึกษา 4910920012
 วุฒิกการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เกษตรศาสตร์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2549
เกษตรศาสตรบัณฑิต (การจัดการการผลิตสัตว์)	มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาราช	2551

การตีพิมพ์และเผยแพร่ผลงาน

ชนกฤต พรหมทอง, ณัฐพล เสนางคนิกร, ชัยศรี สุขสาโรจน์, กมลธรรม อ่ำสกุล และชันวดี
 เตชะภัททวรกุล. 2551. “การกำจัดสีของน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วย
 จุลินทรีย์”, ใน การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 6. เล่ม 1, 400-404.
 สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ชนกฤต พรหมทอง, ชัยศรี สุขสาโรจน์ และชันวดี เตชะภัททวรกุล สุขสาโรจน์. 2552.
 “ประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการ
 เฟนตันและโฟโตเฟนตัน”, ใน การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา
 แห่งชาติ ครั้งที่ 12. เล่ม 1, 306-313. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.