

การกำจัดลิกนินในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือน

นางสาวพรรณิ หล่อดำรงเกียรติ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Removal of Lignin in pulping wastewater by Fenton-like reaction

Miss Phanee Lawdamrongkeat



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

พรรณิ หล่อดำรงเกียรติ : การกำจัดลิกนินในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษด้วยกระบวนการเพนตันเสมือน (Removal of Lignin in pulping wastewater by Fenton-like reaction) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ, 194 หน้า.

การแยกลิกนินในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษทำให้เกิดน้ำเสียที่มีสีน้ำตาลถึงดำ ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจึงจำเป็นต้องมีการกำจัดลิกนินออกจากน้ำเสียก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากำจัดลิกนินในน้ำเสียอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษด้วยกระบวนการเพนตันโดยใช้เฟอร์รัสซัลเฟตและเพนตันเสมือนโดยใช้แมกนีไทต์ เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์ เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์และไอรอนโมลิบเดต เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นเริ่มต้นลิกนิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับกระบวนการเพนตัน ที่พีเอชเริ่มต้น 3 ความเข้มข้นเริ่มต้นเฟอร์รัสไอออน 80 มิลลิกรัมต่อลิตร และอัตราส่วนเหล็กเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:2.5 สามารถกำจัดลิกนิน สี และซีไอดีได้ 81.13% 96.65% และ 94.80% ตามลำดับ ส่วนในกระบวนการเพนตันเสมือนพบว่าเมื่อใช้เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นได้ประสิทธิภาพรวมดีที่สุด โดยภายใน 30 นาทีสามารถกำจัดลิกนิน สี และซีไอดีได้ 90.32% 91.66% และ 71.56% ตามลำดับ เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์รัสไอออน 5 กรัมต่อลิตร และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และรองมาคือเกอร์ไทต์ แมกนีไทต์ ฮีมาไทต์และไอรอนโมลิบเดต โดยพบว่า กระบวนการดูดซับที่พื้นผิวของตัวกลางเกิดขึ้นได้ดีกว่าการเกิดออกซิเดชัน นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อพีเอชเริ่มต้นสูงกว่า 3 ประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีไอดีจะลดลง แต่ยังสามารถกำจัดลิกนิน สีและซีไอดีได้ ยกเว้นเมื่อใช้ไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และจากนั้นทำการศึกษการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าเดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์สามารถใช้ซ้ำได้มากที่สุด 12 รอบ และเมื่อนำสถานะที่เหมาะสมประยุกต์ใช้กับน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษพบว่า ประสิทธิภาพที่ได้ในการบำบัดลิกนิน สี และซีไอดีใกล้เคียงกันกับประสิทธิภาพที่ได้เมื่อทดสอบกับน้ำเสียสังเคราะห์

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5670293021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: LIGNIN / FENTON REACTION / FENTON-LIKE REACTION / HETEROGENEOUS / HOMOGENEOUS

PHANNEE LAWDAMRONGKEAT: Removal of Lignin in pulping wastewater by Fenton-like reaction. ADVISOR: ASST. PROF. ON-ANONG LARPPARISUDTHI, Ph.D., 194 pp.

Removal of lignin from pulping processes cause brownish colored wastewater which adversely affects human and aquatic life. Hence, it has to be treated before discharge to environment. This research aims to study the removal of lignin in pulping wastewater by fenton reaction using ferrous sulfate and by fenton-like reaction using magnetite, goethite, hematite, delta-ferricoxyhydroxide, and iron molybdate as catalysts. The initial lignin concentration was 200 mg/l. For fenton reaction, at 80 mg/l of ferrous ion, initial pH 3 and the optimal ratio of ferrous ion to hydrogen peroxide at 1:2.5, lignin, color and COD was removed by 81.13%, 96.55%, and 94.80% respectively. For fenton-like reaction, using 5 g-Fe/l delta-ferricoxyhydroxide and 100 mg/l hydrogenperoxide within 30 min gave the most efficiency. Which were 90.32%, 91.66%, and 71.56% for lignin, color and COD removal respectively. The efficiency of the catalysts was ferrous ion > delta-ferricoxyhydroxide > goethite > magnetite > hematite > iron molybdate. The efficiency decreased when initial pH was higher than 3, but the removal efficiency was still high except using iron molybdate. Furthermore, delta-ferricoxyhydroxide was found to be reused for 12 times. When the optimal conditions of the reactions were applied on real pulping wastewater, it was found that the efficiency of lignin, color and COD removal was similar to that of synthesic wastewater.

Department: Environmental
Engineering

Student's Signature

Advisor's Signature

Field of Study: Environmental
Engineering

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจากบุคคลหลายท่าน ผู้ทำวิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางที่เป็นประโยชน์และการแก้ไขข้อบกพร่องในการดำเนินงานวิจัย และรวมถึงสนับสนุนทุนในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.สุชา ขาวเอียร ที่ให้ความกรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์และตลอดจนคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ชนาธิป ผาริโน อาจารย์ ดร. ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เจนจิต เอี่ยมจตุรภัทร ที่ได้ให้เกียรติและสละเวลาเพื่อสอบวิทยานิพนธ์นี้ รวมถึงให้คำชี้แนะและแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จไปได้ด้วยดี

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ได้รับอบรมสั่งสอน และให้ความรู้

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือของห้องปฏิบัติการวิจัยและบัณฑิต

ขอขอบพระคุณบริษัท เอสซีจี เปเปอร์ จำกัด ที่ได้สนับสนุนน้ำเสีย เพื่อใช้ในการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณพี่ ๆ น้อง และเพื่อน ๆ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือตลอดการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกทุกคนในครอบครัวที่ช่วยสนับสนุนและเป็นกำลังใจตลอดการดำเนินการวิจัยจนบรรลุผลสำเร็จไปได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ.....	4
2.1.1 วัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษ.....	4
2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย.....	5
2.1.3 กระบวนการผลิตกระดาษ.....	6
2.2 ลิกนิน	12
2.2.1 โครงสร้างโมเลกุลของลิกนิน.....	13
2.2.2 ลักษณะของสีและลิกนินในน้ำเสีย.....	15
2.2.3 ผลกระทบของสีและลิกนิน	15
2.3 เทคโนโลยีในการบำบัดสีในน้ำเสีย.....	16
2.3.1 เทคโนโลยีทางกายภาพ.....	16

2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
2.3.3 เทคโนโลยีทางเคมี	17
2.3.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18
2.3.5 เทคโนโลยีทางชีวภาพ.....	19
2.3.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
2.4 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง.....	20
2.5 ปฏิกริยาเฟนตัน	22
2.5.1 กลไกการเกิดปฏิกริยาเฟนตัน	23
2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกริยาเฟนตัน	24
2.5.3 ข้อดีข้อเสียของปฏิกริยาเฟนตัน	25
2.5.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
2.6 ปฏิกริยาเฟนตันเสมือน	27
2.6.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
2.7 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	38
3.1 ภาพรวมของงานวิจัย	38
3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	39
3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	39
3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	40
3.3 วิธีการเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์	41
3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	42
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	58
4.1 ศึกษาสมบัติทั่วไปของน้ำเสีย.....	58

4.2 การศึกษาคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	59
4.2.1 ผลการวิเคราะห์รูปร่างลักษณะด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	60
4.2.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค Energy Dispersive Spectroscopy (EDS).....	62
4.2.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ ด้วยเครื่องวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD).....	63
4.3 การศึกษาชุดการทดลองควบคุมในการกำจัดลิแกนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเพนต์และเพนต์เสมือน	70
4.3.1 การศึกษาชุดการทดลองควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยา	70
4.3.1.1 กระบวนการเพนต์โดยใช้เฟอร์รัสซัลเฟต	70
4.3.1.2 กระบวนการเพนต์เสมือนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ.....	71
4.3.2 การศึกษาชุดการทดลองควบคุมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	73
4.4 การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดลิแกนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์.....	75
4.4.1 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดลิแกนด์ในน้ำเสียด้วยกระบวนการเพนต์.....	75
4.4.2 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดลิแกนด์ในน้ำเสียด้วยกระบวนการเพนต์เสมือน.....	79
4.5 การศึกษาการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเพนต์เสมือน.....	99
4.6 การศึกษาชุดการทดลองควบคุมในการกำจัดลิแกนด์ในน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการเพนต์และเพนต์เสมือน.....	102
4.6.1 การศึกษาชุดการทดลองควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยา	102
4.6.1.1 กระบวนการเพนต์โดยใช้เฟอร์รัสซัลเฟต	102
4.6.1.2 กระบวนการเพนต์เสมือนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ.....	103
4.6.2 การศึกษาชุดการทดลองควบคุมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	104

4.7 การศึกษาการกำจัดลิแกนด์ในน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือน	104
4.7.1 กระบวนการเฟนตันโดยใช้เพอร์ร็อกซัลเฟต	104
4.7.2 กระบวนการเฟนตันเสมือนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ	106
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	110
5.1 สรุปผลการทดลอง	110
5.2 ข้อเสนอแนะ	112
รายการอ้างอิง	113
ภาคผนวก.....	120
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์	121
ภาคผนวก ข บันทึกผลการทดลองชุดควบคุมการทดลอง	138
ภาคผนวก ค บันทึกผลการทดลองกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือน	144
ภาคผนวก ง บันทึกผลการทดลองกระบวนการใช้ซ้ำในกระบวนการเฟนตันเสมือน	158
ภาคผนวก จ บันทึกผลการทดลองกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือนโดยใช้น้ำเสียจริง	167
ภาคผนวก ฉ กราฟผลการทดลองกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือน	169
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	194

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2-1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อน.....	6
ตารางที่ 2-2 การฟอกซึ่งมีชื่อเรียกตามสารเคมีที่ใช้ฟอกและเรียงลำดับตามลำดับอักษร	9
ตารางที่ 2-3 สัดส่วนของพันธะต่าง ๆ ในลิกนินในไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง	14
ตารางที่ 2-4 ประเภทของกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง.....	21
ตารางที่ 2-5 ความสามารถในการปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารเคมีชนิดต่าง ๆ	22
ตารางที่ 2-6 ศึกษากระบวนการบำบัดสีในน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือน.....	32
ตารางที่ 3-1 สรุปตัวแปรที่ทำการศึกษาและวิธีทดลอง.....	41
ตารางที่ 4-1 ลักษณะของน้ำเสีย	58
ตารางที่ 4-2 แสดงถึงรูปร่างลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	60
ตารางที่ 4-3 องค์ประกอบของประกอบธาตุประเภทเหล็กออกไซด์.....	63
ตารางที่ 4-4 องค์ประกอบของประกอบธาตุของไอรอนโมลิบเดต.....	63
ตารางที่ 4-5 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอติในชุดการทดลองควบคุมตัวเร่ง ปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันที่ความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน 40 – 100 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	71
ตารางที่ 4-6 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอติของชุดการควบคุมตัวเร่ง ปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันเสมือน.....	72
ตารางที่ 4-7 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอติในกระบวนการเฟนตันที่ อัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:2.5 – 1:25	76
ตารางที่ 4-8 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอติ เมื่อเติมความเข้มข้นเริ่มต้นเฟอร์ รัสไอออน 40 – 100 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	77
ตารางที่ 4-9 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอติ เมื่อเติมแมกนีไทด์ที่ความเข้มข้น เริ่มต้นของเฟอร์ริกไอออน 5 - 15 กรัมต่อลิตร.....	80
ตารางที่ 4-10 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอติ เมื่อเติมเกอร์ไทด์ที่ความ เข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์ริกไอออน 2 - 15 กรัมต่อลิตร	81

ตารางที่ 4-11 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดี เมื่อเติมฮีมาไทต์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเพอร์ริกไอออน 5 - 15 กรัมต่อลิตร.....	82
ตารางที่ 4-12 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดี เมื่อเติมเคลตาเพอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเพอร์ริกไอออน 2 - 15 กรัมต่อลิตร.....	83
ตารางที่ 4-13 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดี เมื่อเติมไอรอนโมลิบเดตที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเพอร์ริกไอออน 2 - 15 กรัมต่อลิตร.....	84
ตารางที่ 4-14 ความเข้มข้นเริ่มต้นเพอร์ริกไอออนที่เหมาะสมของตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ ในกระบวนการเพนต์นสี.....	85
ตารางที่ 4-15 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีในกระบวนการเพนต์นสีเมื่อเติมความเข้มข้นเริ่มต้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0 - 200 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	86
ตารางที่ 4-16 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพลิกนิน สี และซีโอดีในกระบวนการเพนต์นสีที่พีเอช 3 และ 7.....	89
ตารางที่ 4-17 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีในกระบวนการเพนต์นสีเวลา 30 นาที.....	92
ตารางที่ 4-18 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีจากการคำนวณหักล้างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	96
ตารางที่ 4-19 สภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการเพนต์นและเพนต์นสี.....	98
ตารางที่ 4-20 ลักษณะของน้ำเสียที่ผ่านการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีด้วยกระบวนการเพนต์นและเพนต์นสี.....	99
ตารางที่ 4-21 ประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีในกระบวนการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเพนต์นสี.....	100
ตารางที่ 4-22 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีในกระบวนการเพนต์นสีในน้ำเสียจริง.....	106
ตารางที่ 4-23 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันของกระบวนการเพนต์นสีในน้ำเสียจริง.....	108
ตารางที่ 5-1 สรุปผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	110

สารบัญรูป

รูปที่ 2-1 แผนภาพกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ.....	11
รูปที่ 2-2 แสดงถึงโครงสร้างของลิกนินในไม้เนื้ออ่อน	12
รูปที่ 2-3 โครงสร้างของหมู่ฟีนอลโพรพานอยด์ของลิกนิน	13
รูปที่ 2-4 พันธะต่าง ๆ ในโครงสร้างของลิกนิน.....	14
รูปที่ 3-1 แผนภาพการทดลองการสังเคราะห์เตลตาเพอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์.....	43
รูปที่ 3-2 แผนภาพการทดลองการสังเคราะห์ไฮรอนโมลิบเดต	45
รูปที่ 3-3 แผนภาพศึกษาสัดส่วนเหล็กต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม	48
รูปที่ 3-4 แผนภาพศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดลิกนินในน้ำเสีย สังเคราะห์ ด้วยกระบวนการเฟนตัน	48
รูปที่ 3-5 แผนภาพศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดลิกนิน	49
รูปที่ 3-6 แผนภาพศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม.....	50
รูปที่ 3-7 แผนภาพศึกษาพีเอชเริ่มต้นและเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดลิกนินในน้ำเสียสังเคราะห์ ..	51
รูปที่ 3-8 แผนภาพศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดลิกนินในน้ำเสียสังเคราะห์	52
รูปที่ 3-9 แผนภาพศึกษาการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดลิกนินในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือน.....	54
รูปที่ 3-10 แผนภาพศึกษาการกำจัดลิกนินในน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการเฟนตัน	56
รูปที่ 3-11 แผนภาพศึกษาการกำจัดลิกนินในน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือน	57
รูปที่ 4-1 ลักษณะของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ.....	59
รูปที่ 4-2 เส้นสเปกตรัม EDS ของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	62
รูปที่ 4-3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแมกนีไทต์ด้วย XRD.....	64
รูปที่ 4-4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเกอร์ไทต์ด้วย XRD.....	65
รูปที่ 4-5 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฮีมาไทต์ด้วย XRD.....	66

รูปที่ 4-6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ด้วย XRD	67
รูปที่ 4-7 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของไอรอนโมลิบเดตด้วย XRD.....	68
รูปที่ 4-8 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดี เมื่อเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว	74
รูปที่ 4-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และปริมาณซีโอดี .	75
รูปที่ 4-10 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สีและซีโอดีด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน.....	78
รูปที่ 4-11 ปริมาณตะกอนรวมที่เกิดขึ้นในกระบวนการเฟนตัน	79
รูปที่ 4-12 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดี เมื่อเติมแมกนีไทต์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์ริกไอออน 5 - 15 กรัมต่อลิตร.....	80
รูปที่ 4-13 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดี เมื่อเติมเกอร์ไทต์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์ริกไอออน 2 - 15 กรัมต่อลิตร.....	81
รูปที่ 4-14 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดี เมื่อเติมฮีมาไทต์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์ริกไอออน 5 - 15 กรัมต่อลิตร.....	82
รูปที่ 4-15 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดี เมื่อเติมเดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์ริกไอออน 2 - 15 กรัมต่อลิตร.....	83
รูปที่ 4-16 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดี เมื่อเติมไอรอนโมลิบเดตที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเฟอร์ริกไอออน 2 - 15 กรัมต่อลิตร.....	84
รูปที่ 4-17 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี เมื่อเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	87
รูปที่ 4-18 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี ซีโอดี เมื่อเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ โดยมีไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	88
รูปที่ 4-19 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และลิกนินของการศึกษาพีเอชเริ่มต้นที่พีเอช 3 และ 7	90
รูปที่ 4-20 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนินที่เวลาต่าง ๆ ในกระบวนการเฟนตันเสมือน.....	91
รูปที่ 4-21 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดสีที่เวลาต่าง ๆ ในกระบวนการเฟนตันเสมือน	91

รูปที่ 4-22 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่เวลาต่าง ๆ ในกระบวนการเฟนตันเสมือน.....	92
รูปที่ 4-23 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันของกระบวนการเฟนตันเสมือนในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอช 3	94
รูปที่ 4-24 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันของกระบวนการเฟนตันเสมือนในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอช 7	94
รูปที่ 4-25 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คงเหลือในกระบวนการเฟนตันเสมือน	95
รูปที่ 4-26 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีจากการคำนวณหักล้างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	96
รูปที่ 4-27 ปริมาณเหล็กในน้ำตัวอย่างในกระบวนการเฟนตันเสมือน	97
รูปที่ 4-28 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในกระบวนการเฟนตันเสมือนเมื่อใช้ซ้ำ 6 รอบ	101
รูปที่ 4-29 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีของชุดการทดลองควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันโดยใช้เฟอร์รัสซัลเฟตในน้ำเสียจริง	102
รูปที่ 4-30 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีของชุดการทดลองควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยาในน้ำเสียจริง	103
รูปที่ 4-31 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีของกระบวนการเฟนตันโดยใช้เฟอร์รัสซัลเฟตในน้ำเสียจริง	105
รูปที่ 4-32 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันของกระบวนการเฟนตันในน้ำเสียจริง.....	105
รูปที่ 4-33 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือนในน้ำเสียจริง	106

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอุตสาหกรรมกระดาษเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย เนื่องจากมีปริมาณการผลิตและการส่งออกมากขึ้นในทุก ๆ ปี ทำให้มีรายได้เข้าประเทศเป็นจำนวนมาก อุตสาหกรรมกระดาษเป็นอุตสาหกรรมต่อเนื่องมาจากภาคเกษตรกรรม เนื่องจากมีต้นไม้เป็นวัตถุดิบหลัก นอกจากนี้อุตสาหกรรมกระดาษยังเกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมสิ่งพิมพ์ประเภทต่าง ๆ ได้แก่ หนังสือพิมพ์ นิตยสาร เป็นต้น จากปัจจัยดังกล่าวข้างต้นนั้นแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของอุตสาหกรรมกระดาษที่มีแนวโน้มการขยายตัวอย่างต่อเนื่องและเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ และจากปริมาณความต้องการกระดาษและผลิตภัณฑ์จากกระดาษที่เพิ่มขึ้นในแต่ละปี อาจสร้างผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษซึ่งนับว่าเป็นกระบวนการผลิตขั้นต้นของอุตสาหกรรมกระดาษ (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2557) เนื่องจากมีการใช้ทรัพยากรต่าง ๆ เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเยื่อกระดาษ เช่น ต้นไม้ น้ำ และพลังงานต่าง ๆ เป็นต้น ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษจะประกอบด้วย การต้มเยื่อ การล้างเยื่อ และการฟอกเยื่อ เมื่อต้นไม้ถูกแปรรูปให้อยู่ในรูปไม้สับแล้วจะส่งเข้ากระบวนการดังกล่าวโดยมีการเติมสารเคมีและความร้อนร่วมด้วย จึงเกิดการแยกตัวของส่วนประกอบในเนื้อไม้ เช่น ลิกนินและอนุพันธ์ของลิกนิน ทำให้น้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษมีสีน้ำตาลจนถึงดำ และในอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษมีการใช้น้ำในปริมาณมากจึงก่อให้เกิดน้ำเสียในปริมาณมากด้วย หากมีการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมอาจส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศในแหล่งน้ำนั้น ๆ เนื่องจากสีของน้ำเสียจะขัดขวางการส่องผ่านของแสง ทำให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้จึงมีผลกระทบต่อสัตว์น้ำที่อาศัยอยู่ รวมถึงอนุพันธ์ของลิกนินอาจเปลี่ยนรูปกลายเป็นรูปที่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำ รวมถึงทำให้แหล่งน้ำไม่เป็นที่น่ามอง เป็นต้น

ลิกนินเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างเนื้อไม้ ทำให้โครงสร้างของพืชมีความแข็งแรง มักพบลิกนินประมาณร้อยละ 20 - 30 ของน้ำหนักไม้แห้ง ลิกนินเป็นสารพอลิเมอร์อะโรมาติก ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ไม่มีรูปผลึกและไม่ละลายน้ำ เป็นสารประกอบที่มีความซับซ้อนคงตัวและย่อยสลายยาก โดยประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนรวมตัวกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิด (Ragauskas, 2013) ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษมักพบลิกนินในน้ำเสียซึ่งทำให้น้ำเสียมีสี และการกำจัดลิกนินด้วยกระบวนการทางชีวภาพนั้นเป็นไปได้ยาก และใช้ระยะเวลาในการย่อยสลาย

(Wu et al., 2005) ในปัจจุบันมีการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการและเทคโนโลยีในการกำจัดสีในน้ำเสียด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น กระบวนการตกตะกอน โคแอกกูเลชัน การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ การกรองด้วยเยื่อเมมเบรน เป็นต้น (วนิดา ชูอักษร, 2555) แต่ก็สามารถบำบัดสีได้เพียงระดับหนึ่งเท่านั้นและยังก่อให้เกิดตะกอนเคมีในปริมาณมาก

กระบวนการเฟนตันเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) กับเหล็ก (Fe^{2+}) ทำให้เกิดไฮดรอกซิลแรดิคัล ($OH\cdot$) ที่มีค่าศักย์ออกซิเดชันสูง สามารถสลายสารที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยากจนได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายคือ น้ำและคาร์บอนไดออกไซด์หมายถึงสารประกอบอินทรีย์ต่าง ๆ ได้ถูกเปลี่ยนสภาพให้หมดความเป็นพิษแล้ว ในการดำเนินปฏิกิริยาของกระบวนการเฟนตันจะเกิดขึ้นได้ดีในสภาวะเป็นกรด (2 - 4) (Kuznetsova et al., 2004) และก่อให้เกิดตะกอนเคมีซึ่งมีเหล็กปนเปื้อน (Shukla et al., 2010) จึงจำเป็นต้องมีการกำจัดตะกอนเคมีอย่างถูกวิธี โดยส่วนใหญ่ในกระบวนการเฟนตันมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณมาก จึงเกิดตะกอนเคมีจำนวนมากอีกด้วย ซึ่งทำให้ในการบำบัดน้ำเสียมีค่าใช้จ่ายสูง (Ma et al., 2015) ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการกำจัดลิกนินในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือนซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) กับเหล็ก (Fe^{3+}) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันเสมือนสามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงพีเอชที่กว้าง และตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษานำตะกอนเหล็ก (Fe^{3+}) กลับมาใช้ซ้ำ เพื่อลดการกระจายของสารเคมีเป็นพิษสู่สิ่งแวดล้อมและเป็นการลดต้นทุนในการบำบัดน้ำเสียและตะกอนเคมี รวมถึงสามารถลดปัญหาในเรื่องการกำจัดตะกอนเคมี โดยในงานวิจัยนี้มีการใช้น้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงในการทดลองเพื่อเป็นแนวทางในการนำกระบวนการเฟนตันเสมือนมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดลิกนินในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษในอนาคตต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนินด้วยกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือนโดยการเดินระบบแบบทีละเท

1.2.2 เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสม (Optimum conditions) ได้แก่ พีเอช ความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็ก สัดส่วนของเหล็กต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเวลาในการกำจัดลิกนินด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือน

1.2.3 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันเสมือนกลับมาใช้ซ้ำ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ดำเนินการภายใต้อุณหภูมิต้อง ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีขอบเขตงานวิจัยดังนี้

1.3.1 ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ โดยผสมน้ำประปากับอัลคาไลน์ลิทมิให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการและน้ำเสียจริงจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ

1.3.2 ทำการสังเคราะห์เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์ (δ -FeOOH) และไอรอนโมลิบเดต ($\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$) และสังเคราะห์แมกนีไทต์ (Fe_3O_4) เกอร์ไทต์ (α -FeOOH) และฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) เพื่อใช้เป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาเฟนตันเสมือน และทำการศึกษาคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา

1.3.3 ศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการเฟนตันแบบเนื้อเดียว (Homogeneous) โดยใช้สารเฟอร์รัสซัลเฟต โดยเดินระบบแบบทีละเท

1.3.4 ศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการเฟนตันเสมือนแบบเนื้อผสม (Heterogeneous) โดยใช้แมกนีไทต์ เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์ เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์ และไอรอนโมลิบเดต โดยเดินระบบแบบทีละเท

1.3.5 ศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันเสมือนกลับมาใช้ซ้ำ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดลิทมิในน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.4.2 สามารถลดต้นทุนในการกำจัดลิทมิในน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือนจากการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำ

1.4.3 เพื่อเป็นแนวทางที่เหมาะสมในการกำจัดลิทมิในน้ำเสียสำหรับใช้งานจริงด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือนในอนาคตต่อไป

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ

2.1.1 วัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษ

วัตถุดิบหลักสำคัญในการผลิตเยื่อกระดาษคือพืช โดยพืชประกอบด้วยเส้นใยซึ่งมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลัก พืชที่สามารถนำมาเป็นวัตถุดิบได้ จำเป็นต้องมีเส้นใยที่แข็งแรง และเป็นพืชที่หาง่าย ราคาไม่แพง การเก็บเกี่ยวและการขนส่งมีความสะดวกไม่ยุ่งยาก เป็นต้น (วิชา พืชพรรณรงค์, 2545) พืชที่สามารถนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่

- ไม้ยืนต้น (Wood) หมายถึง พืชที่เป็นต้นไม้มีลำต้นแข็งแรง อายุยืน แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ
 - ไม้เนื้ออ่อน (Softwood)

โดยส่วนมากเป็นไม้ที่ชอบขึ้นในที่สูง และมีอากาศเย็น โตช้า ลักษณะใบไม้นั้นแคบ เรียวยาว เส้นใยในไม้เนื้ออ่อนนั้นเรียกว่า เยื่อใยยาว (Needle bleached kraft pulp) มีความยาวประมาณ 3.5 - 5 มิลลิเมตร มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 30 - 50 ไมโครเมตร เยื่อใยยาวนั้นมีลักษณะหยาบและสามารถจับตัวกันได้สูงจึงทำให้กระดาษมีความแข็งแรง ทนต่อการฉีกขาดและแรงดึง แต่ถ้าหากในการผลิตมีการใช้เยื่อชนิดนี้มากเกินไป อาจทำให้กระดาษไม่มีความเรียบ เยื่อใยยาวมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการนำไปผลิตกระดาษที่ต้องรับแรงขณะใช้งาน เช่น กระดาษบรรจุภัณฑ์ ถุง กระดาษห่อต่าง ๆ กล่อง ลูกฟูก เป็นต้น

- ไม้เนื้อแข็ง (Hardwood)

โดยส่วนมากเป็นไม้ที่ชอบขึ้นในบริเวณเขตร้อนลักษณะใบไม้กว้าง เรียวยาว เส้นใยในไม้เนื้อแข็งนั้นเรียกว่า เยื่อใยสั้น (Leaf bleached kraft pulp) มีความยาวประมาณ 1 - 1.5 มิลลิเมตร มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 20 - 30 ไมโครเมตร เยื่อใยสั้นนั้นมีลักษณะเล็กและละเอียด และสามารถแทรกตัวไปตามช่องว่างได้ดี ทำให้เนื้อกระดาษที่ได้นั้นเนื้อแน่นสม่ำเสมอ มีความเรียบและทึบแสง แต่มีข้อเสียคือ กระดาษจะไม่มี ความแข็งแรง ฉีกขาดได้ง่าย เยื่อใยสั้นมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการนำไปผลิตกระดาษที่ต้องการความละเอียดสูง เช่น กระดาษที่ใช้สำหรับพิมพ์หรือเขียน แต่ในปัจจุบันการผลิตกระดาษนิยมใช้เยื่อเส้นใยสั้นผสมกับเยื่อเส้นใยยาวในอัตราส่วนที่แตกต่างกันตามลักษณะความต้องการที่จะนำไปใช้

- ไม้ล้มลุก (Nonwood) หมายถึง พืชอื่น ๆ นอกเหนือจากไม้ยืนต้นที่มีคุณสมบัติของเส้นใยที่เหมาะสม เพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษ ได้แก่ ปอ ใผ่ ฝ้าย หรือส่วนที่เหลือจากเกษตรและอุตสาหกรรม เช่น ฟางข้าว ชานอ้อย เป็นต้น คุณสมบัติของเส้นใยชนิดนี้ไม่แน่นอน อาจมีความยาวน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร หรือมากกว่า 1 เซนติเมตรขึ้นไป ไม้ล้มลุกนั้นไม่เป็นที่นิยมนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษมากเท่ากับไม้ยืนต้น เพราะมีปัญหาค่อนข้างมาก เนื่องจากมีความหนาแน่นต่ำจึงต้องการพื้นที่ให้การเก็บมาก พืชบางชนิดนั้นมีเป็นฤดูกาลเท่านั้น

2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย

องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนั้นประกอบด้วยสารเคมีต่าง ๆ หลายชนิด ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสังเคราะห์แสง (ณัฐกร วงษา, 2551) ได้แก่

- เซลลูโลส (Cellulose) นับว่าเป็นสารที่มีปริมาณมากที่สุด และมีความแข็งแรงมากที่สุด เมื่อเทียบกับสารอื่น ๆ เซลลูโลสนั้นเป็นสาเหตุให้ต้นไม้มีความแข็งแรง เซลลูโลสบริสุทธิ์มีสีขาว เช่น เส้นใยของฝ้ายมีสีขาวเนื่องจากมีปริมาณเซลลูโลสมากถึงร้อยละ 90 โครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลสจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงยาว มีองค์ประกอบย่อยคือ กลูโคส (Glucose) ซึ่งเป็นลักษณะเช่นเดียวกับแป้ง แต่ต่างกันที่สูตรโครงสร้าง ทำให้เซลลูโลสไม่อมน้ำและพองตัวเมื่อโดนน้ำเหมือนแป้ง สำหรับในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษนั้นมีความจำเป็นที่จะต้องรักษาเซลลูโลสให้ถูกทำลายน้อยที่สุด
- เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เป็นสารที่มีองค์ประกอบคือ น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เช่นเดียวกับเซลลูโลส แต่โครงสร้างของโมเลกุลมีลักษณะเป็นแบบมีกิ่ง ไม่ได้เป็นเส้นตรงยาวเหมือนเซลลูโลส ทำให้เฮมิเซลลูโลสมีความแข็งแรงน้อยกว่าเซลลูโลสและมีคุณสมบัติอมน้ำและพองตัวคล้ายแป้ง
- ลิกนิน (Lignin) และแทนนิน (Tannin) มีโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์เชิงซ้อน (Complex polymer) เป็นสารประกอบอะโรมาติก พบในปริมาณร้อยละ 20 - 30 ทำหน้าที่เสมือนกาวยึดเส้นใยในเนื้อไม้ และในกระบวนการย่อยสลายมักจะละลายออกมาจากเส้นใย

- สารประกอบอื่น ๆ (Extraneous component) ได้แก่ กรดอ่อน เทอร์ฟิน เรซิน เป็นต้น พบในปริมาณร้อยละ 2 - 10 โดยเป็นสารประกอบที่สามารถละลายได้ในตัวทำละลาย เช่น แอลกอฮอล์ อะซิโตน คลอโรฟอร์ม เป็นต้น

ตารางที่ 2-1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อน (คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา, 2556)

องค์ประกอบทางเคมี	ไม้เนื้ออ่อน	ไม้เนื้อแข็ง
เซลลูโลส	45	43
เฮมิเซลลูโลส	5 - 20	15 - 30
ลิกนิน	24 - 32	17 - 25
สารประกอบอื่น ๆ	3 - 4	2

2.1.3 กระบวนการผลิตกระดาษ

ในกระบวนการผลิตกระดาษเชิงอุตสาหกรรมสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้ (แสดงในรูปที่ 2-1)

- การเตรียมวัตถุดิบ

นำไม้ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักมาทำการตัดแยกสิ่งที่ไม่ต้องการออกแล้วนำไปแปรรูปหรือลดขนาดวัตถุดิบให้เป็นชิ้นไม้ตามขนาดที่ต้องการ หรือเรียกว่า การสับชิ้นไม้ (Wood handing) ซึ่งในขั้นตอนนี้จะมีการใช้เครื่องจักรเพียงอย่างเดียว ชิ้นไม้เล็ก ๆ จะถูกคัดเลือกโดยผ่านตะแกรงร่อนเพื่อทำการคัดขนาดให้ใกล้เคียงกัน

- การผลิตเยื่อ

การผลิตเยื่อเป็นขั้นตอนที่ชิ้นไม้จะถูกนำมาทำเป็นเยื่อกระดาษ โดยวิธีในการผลิตเยื่อสามารถแบ่งได้เป็น 3 วิธี ดังนี้

- กระบวนการผลิตเยื่อเชิงกล (Mechanical pulping)

กระบวนการผลิตเยื่อประเภทนี้เป็นกระบวนการผลิตที่ใช้พลังงานกลในการแยกเส้นใยออกจากกัน โดยจะนำเนื้อไม้มาผ่านกระบวนการบด (Grinding) ซึ่งเนื้อไม้จะถูกบดด้วยลูกกลิ้ง (Grinder) จะได้เนื้อไม้ละเอียด จากนั้นนำมาแยกเยื่อออกจากเศษเนื้อไม้ ปริมาณเยื่อกระดาษบดที่ได้จากกระบวนการนี้มีปริมาณสูงถึงร้อยละ 85 ขึ้นไปและลักษณะเยื่อกระดาษ

บดที่ได้นั้นส่วนใหญ่เป็นเยื่อไม้แท้ ไม่ใช่เยื่อเซลลูโลสบริสุทธิ์ เนื่องจากลิกนินถูกจำกัดออกไป ในปริมาณน้อยมากจึงมีคุณสมบัติที่ไม่ดี มีความแข็งแรงต่ำ มีความทึบแสงสูง และมีราคาสูงกว่าเยื่อกระดาษชนิดอื่น ๆ จึงมักนิยมนำไปใช้ผลิตเป็นกระดาษหนังสือพิมพ์ กระดาษอนามัย บางชนิด กระดาษฝาผนัง กระดาษเช็ดมือ กระดาษห่อคุณภาพต่ำ และกระดาษกั้นสำหรับบรรจุสิ่งของกันแตกภายในกล่อง เป็นต้น

— กระบวนการผลิตเยื่อกึ่งเคมี (Semi-chemical Pulping)

กระบวนการผลิตเยื่อประเภทนี้เป็นกระบวนการผลิตที่ใช้กระบวนการบดร่วมกับกระบวนการทางเคมีในการแยกเส้นใยออกจากกัน โดยเนื้อไม้จะถูกสับเป็นชิ้นไม้สับ จากนั้นจะถูกต้มด้วยสารเคมีให้มีสภาพกึ่งสุกกึ่งดิบ เพื่อให้สารที่ยึดเส้นใยอ่อนตัวลงทำให้สามารถสกัดออกมาง่ายขึ้นแล้วนำไปบดด้วยเครื่องบดเยื่อ เพื่อสกัดเยื่อออกมา ซึ่งจะมีการใช้สารเคมีมากกว่ากระบวนการผลิตเยื่อเชิงกล โดยสารเคมีต่าง ๆ ในกระบวนการนี้ไม่ก่อให้เกิดการสูญเสียเยื่อไม้มากนัก และมีการใช้พลังงานในกระบวนการบดน้อยลง ในปัจจุบันกระบวนการนี้ถูกใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถใช้ได้กับเนื้อไม้หลายชนิด เช่น ไม้เนื้ออ่อน ไม้เนื้อแข็ง เป็นต้น ลักษณะเยื่อกระดาษที่ได้นั้นจะมีลิกนินและแทนนินปนน้อยและมีความแข็งแรงมากกว่าเยื่อที่ได้จากกระบวนการผลิตเยื่อเชิงกล ได้ปริมาณเยื่อกระดาษค่อนข้างมาก ค่าใช้จ่ายไม่แพง มักนิยมนำไปใช้ผลิตกระดาษได้หลายชนิดตั้งแต่กระดาษหนังสือพิมพ์ไปจนถึงกระดาษปอนด์อย่างดี ซึ่งในกระบวนการผลิตเยื่อวิธีนี้จะถูกจัดประเภทตามประเภทของสารเคมีที่ใช้ ได้แก่ กระบวนการกราวด์วูดเคมี (Chemi-groundwood process) กระบวนการโซดาไฟ (Cold caustic soda) กระบวนการโซเดียมซัลไฟท์ (Neutral sulphite semichemical process) และกระบวนการซัลเฟต (Sulphate semichemical process หรือ Kraft semichemical process) เป็นต้น

● กระบวนการผลิตเยื่อเคมี (Chemical pulping)

กระบวนการผลิตเยื่อประเภทนี้เป็นกระบวนการผลิตที่ใช้กระบวนการทางเคมี เพื่อแยกเยื่อออกมาให้ได้มากที่สุดหรืออีกนัยหนึ่งคือ เพื่อสกัดลิกนินออกไปให้มากที่สุด โดยนำเนื้อไม้เข้าสู่กระบวนการต้มย่อยเนื้อไม้และเส้นใยต่าง ๆ ด้วยสารเคมี ภายใต้ความดัน เพื่อให้ง่ายต่อการล้างเยื่อและการแยกเยื่อออกจากสิ่งอื่น ๆ ปริมาณเยื่อกระดาษที่ได้มีปริมาณร้อยละ 45 - 60 ซึ่งเมื่อเทียบกับกระบวนการผลิตเยื่อประเภทอื่น ๆ แล้วนับว่าได้ปริมาณเยื่อกระดาษน้อย ลักษณะของเยื่อกระดาษนั้นมีคุณภาพดี มีความเหนียว แข็งแรงสูง แต่ค่าใช้จ่ายในการผลิตสูง มักนิยมนำไปใช้ผลิตกระดาษคุณภาพดี ซึ่งในกระบวนการผลิตเยื่อวิธีนี้จะถูกจัดประเภทตามประเภทของสารเคมี

ที่ใช้ในซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ 1) กระบวนการแบบอัลคาไลน์ (Alkaline process) สามารถจำแนกย่อยออกเป็น 2 ประเภท ประเภทแรกคือ กระบวนการโซดา (Soda process) จะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH) เหมาะกับวัตถุดิบ เช่น ฟางข้าว และไม้เนื้อแข็งบางชนิด ลักษณะเยื่อกระดาษที่ได้ หลังจากจากนำไปฟอกขาวแล้ว มักนิยมนำไปผลิตกระดาษพิมพ์เขียน กระดาษซองจดหมาย และกระดาษที่ต้องการความนุ่ม และประเภทที่สองคือ กระบวนการคราฟท์ (Kraft process) หรือเรียกว่ากระบวนการซัลเฟต (Sulphate process) จะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ลักษณะเยื่อกระดาษที่ได้มีความแข็งแรงกว่ากระบวนการแบบโซดา เยื่อกระดาษที่ไม่ฟอกสี มักนิยมนำไปผลิตถุงกระดาษ กระดาษห่อของ และกระดาษฝักกล่อง เยื่อกระดาษที่ฟอกสีแล้ว มักนิยมนำไปผลิตกระดาษพิมพ์เขียน กระดาษหนังสือคุณภาพดี และกระดาษอนามัย เป็นต้น 2) กระบวนการซัลไฟต์ (Sulphite process) จะใช้สารพวกไบซัลไฟต์ (Bisulphite) และกรดซัลไฟรัส (Sulphurous acid) เหมาะกับวัตถุดิบ เช่น ไม้เนื้อแข็ง และพันธุ์ไม้จำพวกหญ้า เยื่อที่ได้เรียกว่าเยื่อซัลไฟต์ ลักษณะเยื่อกระดาษที่ได้มีความแข็งแรงต่ำ กระบวนการนี้ไม่เหมาะกับไม้ที่มีเรซินหรือยางเป็นส่วนประกอบ จึงใช้ได้กับไม้บางชนิดเท่านั้น แต่มีข้อดีคือน้ำยาต้มเยื่อมีราคาถูก

- การล้างเยื่อ (Washing) และการร่อนเอาเยื่อกระดาษหยาบออก (Screening)

หลังจากที่ได้เยื่อกระดาษแล้ว ต้องทำการล้างน้ำยาเคมีจากกระบวนการผลิตเยื่อ รวมทั้งสิ่งสกปรกต่าง ๆ ออกให้หมด และจากนั้นนำเข้าสู่เครื่องร่อน เพื่อทำการแยกสิ่งเจือปน เช่น เปลือกไม้ ตาไม้ เส้นใยไม้ และกรวดทราย เป็นต้น และแยกเยื่อกระดาษแบบหยาบหรือแม้กระทั่งวัตถุดิบที่ต้มยังไม่สุกออกไปผ่านกระบวนการผลิตใหม่อีกครั้ง ส่วนน้ำยาล้างเยื่อนั้นจะนำไปปรับปรุงให้เป็นน้ำยาต้มเยื่อสะอาดใหม่อีกครั้ง เยื่อที่ทำความสะอาดแล้ว จะส่งต่อไปยังหน่วยสกัดลิกนิน

- การสกัดลิกนิน (Delignification)

เป็นการฟอกเยื่อขั้นต้นและแยกลิกนินออกจากเยื่อ โดยนิยมสกัดลิกนินด้วยออกซิเจน (O_2 Delignification) เยื่อจะถูกรวมตัวเข้ากับออกซิเจน โซเดียมไฮดรอกไซด์ และน้ำ ควบคุมอุณหภูมิที่ 90 - 130 องศาเซลเซียส เมื่อเยื่อผ่านการสกัดลิกนินแล้วจะถูกนำไปล้างแล้วส่งไปยังหน่วยฟอกเยื่อต่อไป

- การฟอกเยื่อ (Bleaching)

การฟอกเยื่อนั้นเป็นขั้นตอนเพิ่มความขาวสว่างของเยื่อกระดาษ ในขั้นตอนนี้จะขึ้นอยู่กับความต้องการลักษณะความขาวสว่างของเยื่อ และต้องควบคุมความเป็นกรด ต่าง ปริมาณสารเคมี และปริมาณเยื่อกระดาษที่เข้าสู่ขั้นตอนนี้ สำหรับการฟอกเยื่อมี 2 วิธี คือ

- 1) วิธีฟอกเยื่อเพื่อกำจัดลิกนินออกไป (Removing lignin)
- 2) วิธีฟอกเยื่อเพื่อเปลี่ยนสีของลิกนินให้อยู่ในรูปที่ไม่มีสี (Bleaching lignin)

เยื่อเคมีจะฟอกโดยวิธีกำจัดลิกนินออกไปโดยใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับลิกนินแล้วกำจัดออกไป การฟอกเยื่อในแบบนี้มีชื่อเรียกตามสารเคมีที่ถูกใช้และเรียงตามลำดับตัวอักษรแรกของแต่ละขั้นตอน โดยสารเคมี สัญลักษณ์และชื่อขั้นตอนถูกแสดงในตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 การฟอกซึ่งมีชื่อเรียกตามสารเคมีที่ใช้ฟอกและเรียงลำดับตามลำดับอักษร (รุ่งอรุณ วัฒนวงศ์, 2542)

สารเคมี	สัญลักษณ์	ขั้นตอนการฟอก
คลอรีน	c	ขั้นคลอรีเนชัน
โซเดียมไฮดรอกไซด์	e	ขั้นแอกแทรกชัน
แคลเซียมไฮโปคลอไรท์	h	ขั้นไฮโปคลอไรท์
คลอรีนไดออกไซด์	d	ขั้นคลอรีนไดออกไซด์
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	p	ขั้นเปอร์ออกไซด์
ออกซิเจน	o	ขั้นออกซิเจน
โอโซน	z	ขั้นโอโซน
กรด	a	ขั้นกรด

- การเตรียมน้ำเยื่อ (Stock preparation)

เป็นขั้นตอนที่มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะปรับปรุงคุณสมบัติของเส้นใยให้เหมาะแก่การเดินแผ่น และให้ได้กระดาษที่มีคุณภาพตามความต้องการของท้องตลาด ซึ่งจะมีการบดเยื่อและการเติมสารปรับแต่งต่าง ๆ โดยเริ่มจากการตีเยื่อให้กระจายในน้ำเพื่อให้เส้นแยกออกจากกันอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นทำการบดเยื่อเพื่อเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใย และทำการเติมสารเติมแต่ง เช่น สารกันซึม สารเติมแต่ง เป็นต้น จนได้เยื่อที่มีคุณภาพตามที่ต้องการ จากนั้นทำความสะอาดเยื่อ เพื่อให้มีคุณสมบัติคงที่ และส่งเยื่อไปยังหน่วยเดินแผ่นต่อไป

- การเดินแผ่น (Sheeting) การอบแห้ง (Dryer)

หลังจากที่เยื่อผ่านขั้นตอนการทำความสะอาดเยื่อแล้ว จะทำให้เยื่อมีความเข้มข้น 3% ซึ่งจะถูกส่งไปทำการเจือจางเยื่อ เพื่อให้สามารถป้อนเข้าสู่ตะแกรงลวดเดินแผ่น น้ำจะซึมผ่านตะแกรง

ลงด้านล่างและนำกลับไปใช้อีก เยื่อที่ผ่านตะแกรงลวดจะถูกบีบน้ำออกและอบโดยมีไอน้ำเป็นตัวให้พลังงานความร้อน โดยที่แผ่นเยื่อที่เดินผ่านเครื่องเดินแผ่นจะมีความชื้น 10% จากนั้นจะถูกส่งไปเก็บเพื่อผลิตเป็นกระดาษหรือผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ต่อไป

- กระบวนการนำสารเคมีกลับคืน (Chemical recovery process)

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่นำสารเคมีกลับคืนไปใช้ใหม่ในการผลิตเยื่อกระดาษครั้งต่อไป ซึ่งประกอบด้วย 3 กระบวนการ

- กระบวนการระเหย (Evaporation)

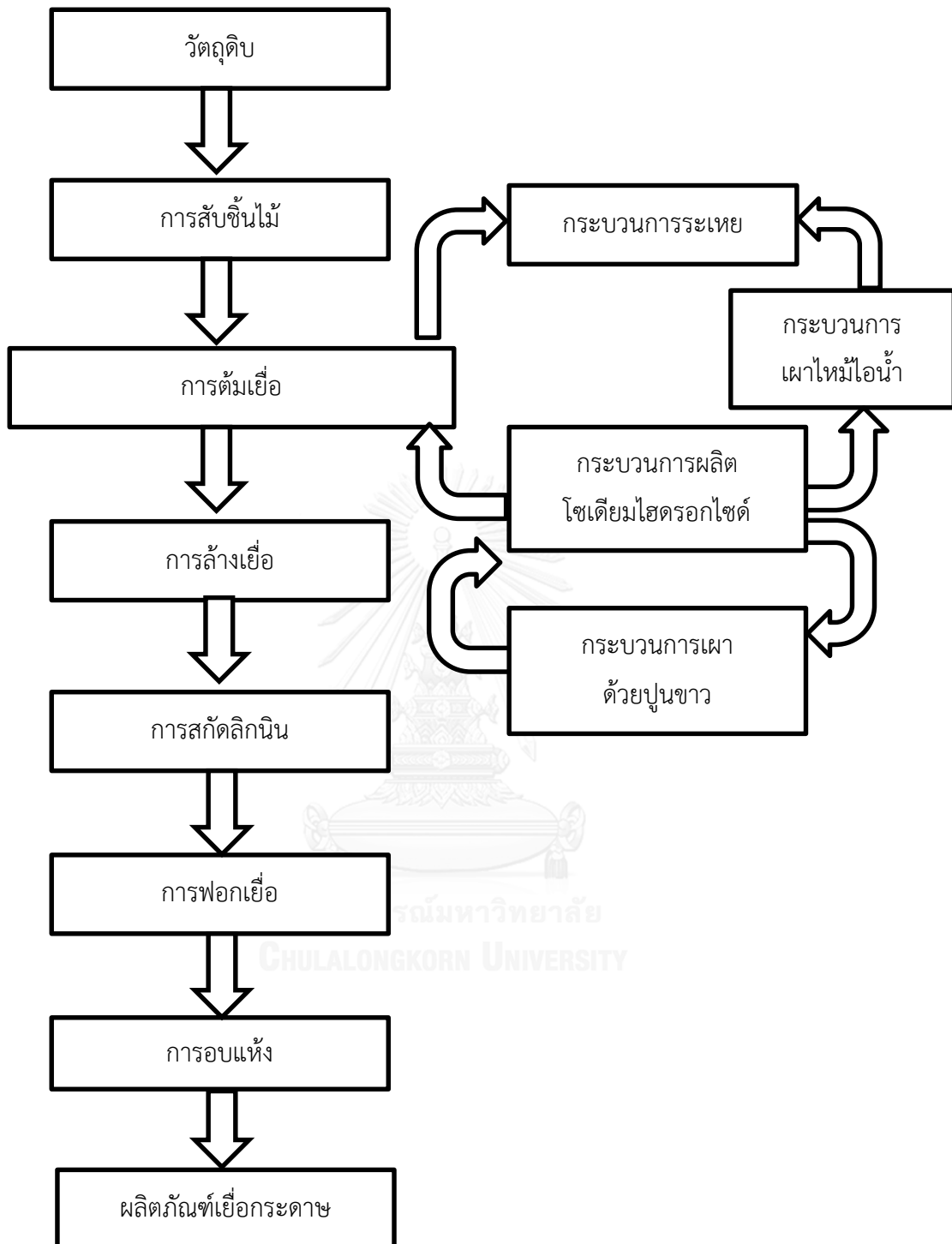
ในกระบวนการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำดำเจือจางที่ได้จากการล้างในกระบวนการผลิตเยื่อซึ่งประกอบด้วยสารที่มีสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์เป็นองค์ประกอบ โดยจะทำให้ น้ำระเหยออกแล้วนำกลับไปใช้ใหม่อีกครั้งในกระบวนการคอสติกไซซิ่ง (Causticizing)

- กระบวนการเผาไหม้ไอน้ำ (Recovery boiler)

ในกระบวนการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเผา น้ำดำเข้มข้น (Black liquor) ซึ่งจะได้ความร้อนเพื่อนำไปผลิตกระแสไฟฟ้า และไอน้ำเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตต่อไป นอกจากนี้ยังได้ผลพลอยได้คือ ส่วนของน้ำเขียว (Green liquor) ซึ่งสามารถนำมาผลิตเป็นน้ำขาว (White liquor) ในกระบวนการคอสติกไซซิ่ง สำหรับในกระบวนการนี้จำเป็นต้องมีการควบคุมความเข้มข้นของกำมะถันในน้ำขาว ดังนั้นจึงมีการผลิตโซเดียมซัลเฟตและเถ้าจากเครื่องบำบัดมลพิษทางอากาศด้วย

- กระบวนการคอสติกไซซิ่ง (Causticizing)

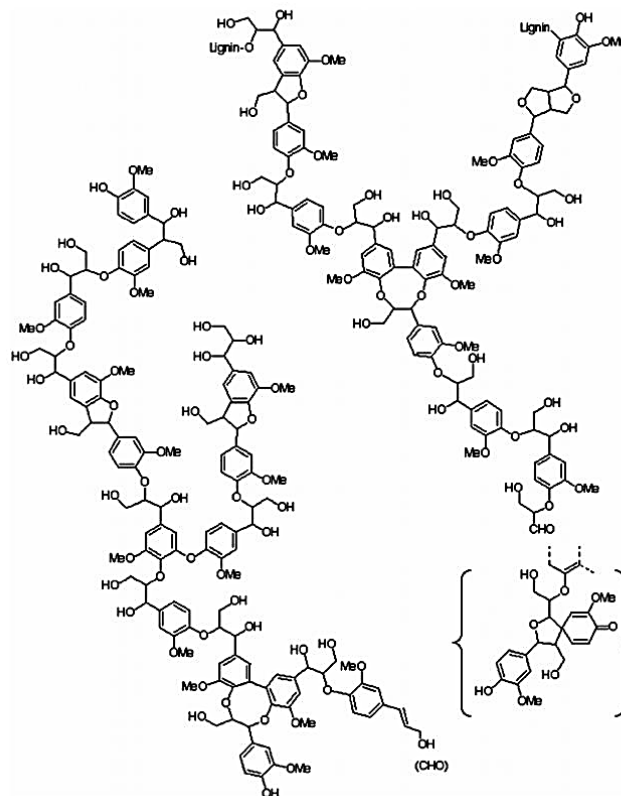
ในกระบวนการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปลี่ยนน้ำเขียว (Green liquor) เป็นน้ำขาว (White liquor) หรือน้ำยาต้มเยื่อ โดยการผลิตโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยการใช้ปูนขาว ซึ่งน้ำขาวมีโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก ทำให้มีคุณสมบัติในการย่อยเยื่อได้เหมือนสารตั้งต้นเพื่อใช้ในกระบวนการต้มเยื่อ ส่วนปูนขาวที่ถูกใช้ในกระบวนการนี้จะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยการเผาปูนขาวด้วยเตาเผาปูนขาว (Lime kiln)



รูปที่ 2-1 แผนภาพกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ (ณัฐกร วงษา, 2551)

2.2 ลิกนิน

ลิกนิน คือส่วนประกอบของโครงสร้างของเนื้อไม้ โดยปกติในเนื้อไม้จะพบลิกนินประมาณร้อยละ 20 - 30 ของน้ำหนักไม้แห้งขึ้นอยู่กับชนิดของไม้ มักพบลิกนินอยู่ร่วมกับเซลลูโลสในเนื้อไม้ ทำให้โครงสร้างของพืชมีความแข็งแรง ลิกนินเป็นสารพอลิเมอร์อะโรมาติก น้ำหนักโมเลกุลสูง ไม่มีรูปผลึก ไม่ละลายน้ำ เป็นสารประกอบที่มีความซับซ้อนคงตัวย่อยสลายยาก โดยประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนรวมตัวกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิดดังแสดงในรูปที่ 2-2 พืชที่มีลิกนินเป็นส่วนประกอบจำนวนมาก จะมีความแข็งแรงทนทาน เนื่องจากลิกนินมีคุณสมบัติที่ไม่ยืดหยุ่น เมื่อเซลล์พืชตายลิกนินจะถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์ลิกเนส (Lignase) หรือ ลิกนินเนส (Ligninase) จากจุลินทรีย์สำคัญที่พบได้ในรา ไม้จะประกอบด้วยอัตราส่วนของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับชนิดและอายุของไม้ ไม้ที่มีอายุมากจะมีปริมาณลิกนินมากและมีความสูงมากตามไปด้วย

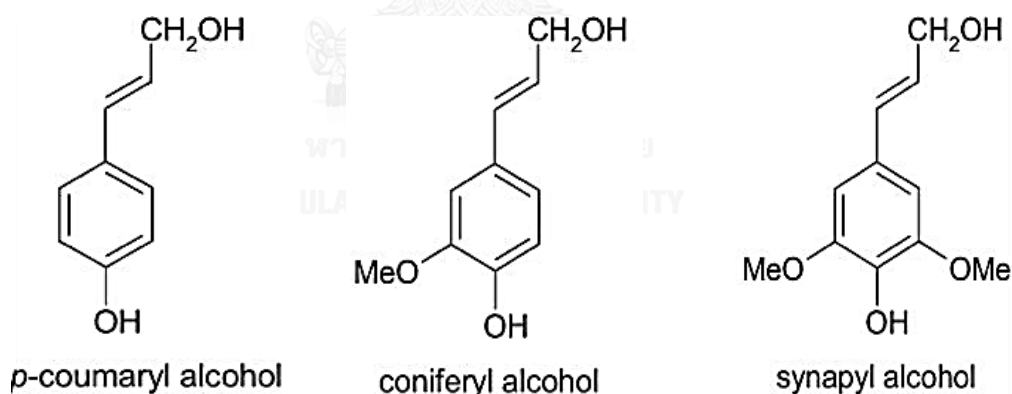


รูปที่ 2-2 แสดงถึงโครงสร้างของลิกนินในไม้เนื้ออ่อน (Ragauskas, 2013)

ในภาษาละตินนั้นลิกนินมาจากคำว่า Lignum ซึ่งหมายถึง ไม้ โดยมีคุณสมบัติช่วยในการยึดประสานเนื้อไม้เข้าด้วยกัน และป้องกันไม่ให้น้ำไหลออกจากผนังเซลล์ ซึ่งทำให้เกิดการขนถ่ายสารอาหารและน้ำในเซลล์ ลิกนินยังสามารถแยกคาร์บอนในชั้นบรรยากาศที่จะเข้าไปในเนื้อเยื่อพืช ยืนต้นหรือไม้ยืนต้น ลิกนินเป็นองค์ประกอบที่ย่อยสลายช้าที่สุดเมื่อพืชตาย ซึ่งเมื่อสลายตัวจะกลายเป็นเป็นฮิวมัส

2.2.1 โครงสร้างโมเลกุลของลิกนิน

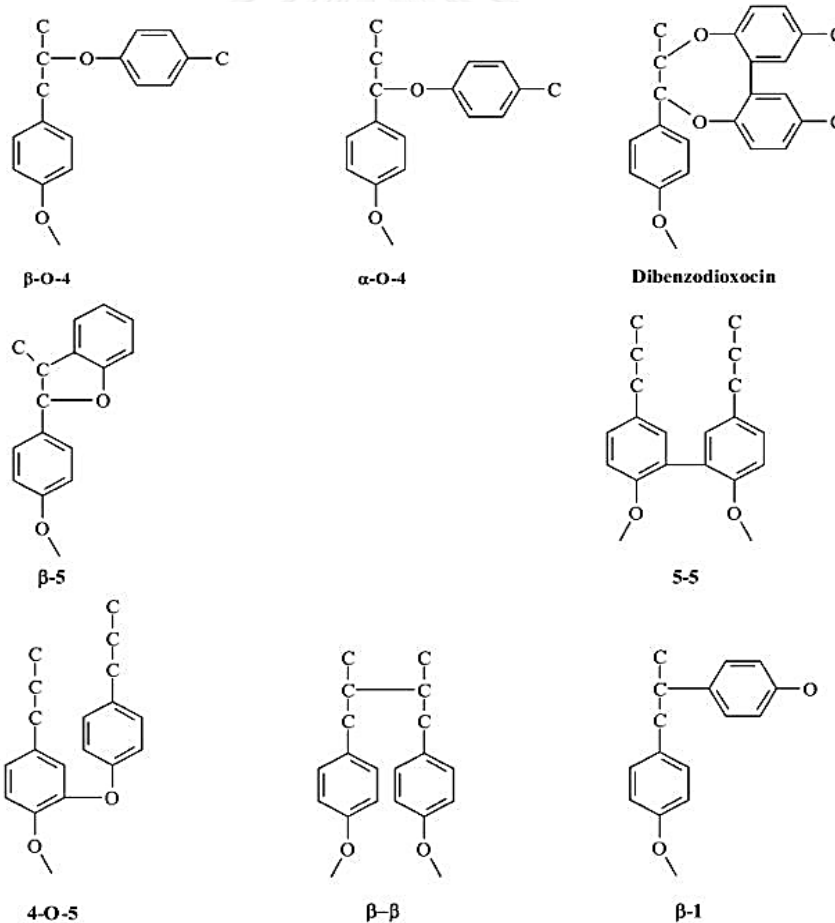
ลิกนินประกอบด้วยโมเลกุลที่เป็นวงแหวนที่ต่อกันแบบสุ่มเป็นโครงสร้าง 3 มิติ โดยภายในโครงสร้างจะเชื่อมกันด้วยพันธะอีเธอร์หรือคาร์บอนระหว่าง 2 โมเลกุล ทำให้ลิกนินทนทานต่อการย่อยสลายด้วยสารเคมีและเอนไซม์มากกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ ภายในโมเลกุลขนาดใหญ่ของลิกนินประกอบด้วยหน่วยย่อยซ้ำ ๆ กันเรียกว่า ฟีนิลโพรพานอยด์ (Phenyl propanoid) ที่มีหมู่เมธิลอยู่บนโมเลกุลดังในรูปที่ 2-3 ลิกนินจากไม้เนื้ออ่อน ไม้เนื้อแข็ง และหญ้า จะมีองค์ประกอบของหมู่แทนที่พวกเมธอกซี (Methoxy) และการเกิดพันธะระหว่างหมู่ฟีนิลที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2-3 และดังรูปที่ 2-4



รูปที่ 2-3 โครงสร้างของหมู่ฟีนิลโพรพานอยด์ของลิกนิน (Ragauskas, 2013)

ตารางที่ 2-3 สัดส่วนของพันธะต่าง ๆ ในลิกนินในไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง (Stephen, 2010)

ชื่อ	ชนิดพันธะ	ร้อยละของพันธะ	
		ไม้เนื้ออ่อน	ไม้เนื้อแข็ง
β -O-4	Phenylpropane β -aryl ether	50	60
α -O-4	Phenylpropane β -aryl ether	2 - 8	7
β -5	Phenylcoumaran	9 - 12	6
5-5	Biphenyl	10 - 11	5
4-O-5	Diaryl ether	4	7
β - β	β - β -linked structure	2	3



รูปที่ 2-4 พันธะต่าง ๆ ในโครงสร้างของลิกนิน (Ragauskas, 2013)

2.2.2 ลักษณะของสีและลิกนินในน้ำเสีย

ลักษณะของสีในน้ำเสียที่มาจากลิกนินและอนุพันธ์ของลิกนินรวมถึงพอลิเมอร์ของแทนนิน มักพบได้จากน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ ซึ่งเกือบทั้งหมดมาจากกระบวนการต้มเยื่อ ล้างเยื่อ ฟอกเยื่อ และส่วนการนำสารเคมีกลับคืน โดยในกระบวนการคราฟท์ ลิกนินจะถูกเปลี่ยนเป็นไทโอ (thio-) และอัลคาไลน์ลิกนิน (alkali – lignin) และในกระบวนการซัลไฟต์ ลิกนินจะถูกเปลี่ยนเป็น ลิกโนซัลเฟต (Lignosulphates) นอกจากนี้หากมีการใช้คลอรีน (Chlorine) ในกระบวนการ ฟอกเยื่อจะทำให้เกิดสารคลอโรลิกนิน (Chlorolignin) องค์ประกอบของลิกนินรวมทั้งอนุพันธ์ของ ลิกนินเหล่านี้ทำให้การย่อยสลายทางชีววิทยาเกิดขึ้นได้ยาก ทำให้ค่าซีโอดี บีโอดี หลังจากผ่าน กระบวนการบำบัดทางชีววิทยา มีค่าสูงเกินกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า กระบวนการบำบัดทางชีววิทยาเพียงกระบวนการเดียวนั้นไม่เหมาะสมกับน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อ กระดาษ เนื่องจากมีการใช้สารเคมีในกระบวนการผลิตปริมาณมาก และสารประกอบลิกนินต่าง ๆ เป็นองค์ประกอบหลักที่พบในน้ำเสียซึ่งเป็นสารโมเลกุลใหญ่ ย่อยสลายได้ยากและยังก่อให้เกิดสีในน้ำ เสียอีกด้วย (วุฒิพงษ์ โนนศรีชัย, 2546)

2.2.3 ผลกระทบของสีและลิกนิน

- หากมีการปล่อยน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษลงสู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติในปริมาณ มาก อาจทำให้เกิดการอุดตันทางเดินของแสงอาทิตย์ในน้ำ ทำให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสง ได้และทำให้ขาดออกซิเจน
- สารประกอบของลิกนินบางชนิดอาจถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำได้ เช่น พบว่าปลาชนิดที่ได้รับน้ำจากกระบวนการฟอกสีเยื่อกระดาษมีโครงสร้างกระดูกที่ผิดปกติ เกิด ผลในอวัยวะภายในและทางเดินอาหารและอาจตายได้ (วุฒิพงษ์ โนนศรีชัย, 2546)

2.3 เทคโนโลยีในการบำบัดสีในน้ำเสีย

2.3.1 เทคโนโลยีทางกายภาพ

- การดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

เป็นเทคโนโลยีที่นิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากถ่านกัมมันต์นั้นเป็นวัสดุที่มีรูพรุนสูงและมีคุณสมบัติในการดูดซับสารประกอบต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในของเหลวหรือก๊าซได้ในปริมาณสูงจึงทำให้สามารถกำจัดสีแท้และสีปรากฏได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับการดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์นั้น โมเลกุลของสีจะถูกดูดซับติดที่ผิวของถ่านกัมมันต์ ดังนั้นประสิทธิภาพของการกำจัดสีจะขึ้นอยู่กับปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์ยิ่งมีปริมาณรูพรุนมากพื้นที่ผิวจำเพาะจะมากขึ้นตามไปด้วย แต่การนำถ่านกลับมาใช้ซ้ำเป็นไปได้ยาก เนื่องจากการแยกสีออกจากถ่านทำได้ยาก มีต้นทุนสูง ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วจำเป็นต้องนำไปกำจัดอีกด้วย (วนิดา ชูอักษร, 2555)

- การกรองด้วยเยื่อเมมเบรน (Membrane)

การกรองด้วยเยื่อเมมเบรนเป็นเทคโนโลยีที่สามารถกำจัดสีรวมทั้งสารเคมีที่ใช้ในการย้อมสีและสีย้อมบางชนิดให้นำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกครั้ง การกรองด้วยเยื่อเมมเบรนถูกแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ดังนี้

- ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration) มักนิยมใช้ในการกำจัดสีย้อมที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์
- รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse osmosis) มักนิยมใช้ในการกำจัดสีย้อมที่มีลักษณะโมเลกุลของสีย้อมที่มีขนาดใหญ่
- ไดนามิคเมมเบรน (Dynamic membrane) มักนิยมใช้ในการกำจัดสีย้อมที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่แขวนลอย โดยจะมีการใช้ตัวรองรับที่มีรูพรุน เช่น เหล็ก คาร์บอน เซรามิก เป็นต้น
- นาโนฟิลเตรชัน (Nano filtration) มักนิยมใช้ในการกำจัดสีย้อมประเภทสีรีแอกทีฟที่ใช้ย้อมเส้นใยฝ้ายและมีการใช้สารอิเล็กโทรไลต์ในการย้อม เช่น โซเดียมคลอไรด์ โซเดียมซัลเฟต เป็นต้น ซึ่งสามารถแยกและนำกลับมาใช้ซ้ำได้

2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วนิดา ชูอักษร (2555) ได้ศึกษาเกี่ยวกับเทคโนโลยีการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม พบว่าเทคโนโลยีในการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรมถูกแบ่งได้ออกเป็นวิธีทางกายภาพ วิธีทางเคมี และวิธีทางชีวภาพ ซึ่งในแต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อจำกัดที่แตกต่างกัน สำหรับวิธีทางกายภาพ ได้แก่ การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ซึ่งมีความสามารถในการบำบัดได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง แต่การนำกลับมาใช้ใหม่นั้นมีราคาแพง ส่วนการกรองด้วยเยื่อเมมเบรนนั้นต้องควบคุมปัจจัยต่าง ๆ เช่น ระดับความดันน้ำ อัตราการไหลของน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ สำหรับวิธีทางเคมี ได้แก่ การสร้างตะกอนและการรวมตะกอนซึ่งจะมีการใช้สารเคมี เช่น สารส้ม ปูนขาว เพื่อทำให้เกิดตะกอนจึงทำให้เกิดกากตะกอนจำนวนมากและเกิดความยุ่งยากในการนำไปกำจัดต่อไป หรือกระบวนการเฟนตันต้องควบคุมปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความเข้มข้นของเหล็ก ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อุณหภูมิ พีเอช และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ส่วนการใช้โอโซนต้องมีการควบคุมทั้งอุณหภูมิ ความดัน พีเอช และระยะเวลา นอกจากนี้โอโซนยังอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำนั้น ๆ ด้วย สำหรับวิธีทางชีวภาพ ได้แก่ การดูดซับด้วยสาหร่าย หรือการย่อยสลายสีด้วยเชื้อราจำเป็นต้องควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับและมีความยุ่งยากในเรื่องการเก็บรักษา ขนส่ง ดังนั้นในการเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสมในการกำจัดสีจำเป็นต้องมีการทดสอบถึงลักษณะของน้ำเสียเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสมรวมถึงควรคำนึงถึงปริมาณของน้ำเสีย ประสิทธิภาพและค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ของกระบวนการนั้น ๆ ด้วย

2.3.3 เทคโนโลยีทางเคมี

● การสร้างรวมตะกอน (Coagulation-flocculation)

เป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้นและเป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลาย ก่อนเข้าสู่กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ ส่วนใหญ่แล้วนิยมใช้ร่วมกับการปรับพีเอช ซึ่งในการรวมตะกอนจะมีการใช้สารเคมีสร้างตะกอน เช่น ปูนขาว สารส้ม เพอร์ร็อคโลไรด์ เป็นต้น สำหรับในการสร้างรวมตะกอนนั้นจะทำให้โมเลกุลของสีถูกดูดซับบนอนุภาคของสารเคมีสร้างตะกอน ทำให้ตะกอนสีจมตัวลงในน้ำที่เทคโนโลยีนี้สามารถกำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการเติมสารช่วยให้เกิดการรวมตะกอน เช่น โพลีอิเล็กโทรไลต์ เนื่องจากสีและคุณสมบัติของน้ำเสียต่าง ๆ มีคุณลักษณะที่ต่างกัน เช่น โมเลกุลของสีมีขนาดเล็ก ละลายน้ำได้ดี การเกิดตะกอนของสีอาจทำได้ยาก จึงต้องหาเทคนิคในการรวมตะกอน (ธนภุต พรหมทอง, 2552)

- การออกซิเดชันทางเคมี (Chemical oxidation)

เทคโนโลยีนี้เป็นกระบวนการทางเคมีที่ใช้สารเคมีในการออกซิไดซ์สารประกอบต่าง ๆ ซึ่งสารเคมีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น โอโซน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ คลอรีน สารเคมีเฟนตัน เป็นต้น การออกซิเดชันทางเคมี ได้แก่

- กระบวนการเฟนตัน คือการออกซิเดชันขั้นสูงที่ใช้สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำปฏิกิริยากับเพอร์ร็อกซิไดออกไซด์ ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์สารอินทรีย์

- กระบวนการโอโซนเนชัน คือการกำจัดสีด้วยโอโซนซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงจึงทำให้พันธะของโมเลกุลที่ทำให้เกิดสีแตกออกกลายเป็นโมเลกุลเล็กและสีหายไป โดยสามารถแยกสลายโมเลกุลของสีที่มีความยาวมากให้มีขนาดสั้นลง ทำให้สีของน้ำเสียลดลง

นอกจากนี้ยังมีกระบวนการอื่นๆ เช่นการกำจัดสีแบบไฟฟ้าเคมีกระบวนการคลอรีนเนชัน เป็นต้น โดยที่การออกซิเดชันทางเคมีเป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสามารถบำบัดน้ำได้ในปริมาณมากได้และใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาน้อย แต่มีต้นทุนในการติดตั้งและสารเคมีสูง

2.3.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Irfan et al. (2013) ได้ทำการศึกษากำจัดสีโอดี ปริมาณของแข็งละลายน้ำและสีของน้ำยางดำ ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลอคคูเลชันโดยมีสถานะของพีเอช อัตราการตกตะกอนและอัตราการเติมสารเคมีที่เหมาะสม เนื่องจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษมีค่าสีโอดี ปริมาณของแข็งละลาย และสีในปริมาณสูง ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาถึงประสิทธิภาพของสารโคแอกกูแลนต์และฟลอคคูแลนต์ต่าง ๆ เช่น สารส้ม เพอร์ริกคลอไรด์ อะลูมิเนียมคลอไรด์ เพอร์ร็อกซิไดซ์โพแทสเซียมคลอไรด์ (PAC) และพอลิเมอร์โพลิอะคริลาไมด์ประจุบวกและประจุลบ รวมถึงศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการลดสีโอดี ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และสีของน้ำเสีย เช่น อัตราการเติมสารเคมี เวลาในการตกตะกอน และพีเอช ในงานวิจัยพบว่าการใช้สารโคแอกกูแลนต์ต่าง ๆ รวมกันมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีโอดี ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และสีมากกว่าใช้เพียงชนิดเดียว ในกระบวนการโคแอกกูเลชันพบว่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียมีผลกระทบอย่างมากในการกำจัดสีโอดี ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และสี และพบว่าที่พีเอชน้อยกว่า 3 พอลิเมอร์โพลิอะคริลาไมด์ประจุบวกและประจุลบรวมกับเพอร์ริกคลอไรด์และอะลูมิเนียมคลอไรด์ มีประสิทธิภาพมากที่สุดสามารถลดสีโอดีได้ถึง 76% ลดปริมาณของแข็งละลายน้ำได้ถึง 95% และสามารถลดสีได้ถึง 95%

Stephenson and Duff (1996) ได้ศึกษาการกำจัดคาร์บอน สี และความชุ่ม ของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน โดยศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของโลหะโคแอกกูแลนต์ การเจือจางน้ำทิ้ง และพีเอชต่อการกำจัดคาร์บอน สี และความชุ่มของน้ำเสียที่ผสมกันระหว่างน้ำเสียกระบวนการฟอก Chemithermomechanical และ Thermomechanical พบว่าทั้งเกลือคลอไรด์และเกลือซัลเฟต ของโลหะและอะลูมิเนียมมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเท พีเอชมีผลต่อการตกตะกอนซึ่งในการกำจัดคาร์บอน สี และความชุ่มด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์นั้นควรมีพีเอชอยู่ระหว่าง 4 – 6.5 เฟอร์รัสซัลเฟต มากกว่า 7.4 สำหรับอะลูมิเนียมคลอไรด์ 5 – 6 และสำหรับอะลูมิเนียมซัลเฟต 5.8 – 6.8 จะทำให้สามารถกำจัดคาร์บอนทั้งหมดได้ถึง 88% สี 90% และความชุ่ม 98% การตกตะกอนนั้นทำให้น้ำใสและไม่มีสี

2.3.5 เทคโนโลยีทางชีวภาพ

กระบวนการทางชีวภาพนั้นจะใช้สิ่งมีชีวิตเป็นตัวช่วยในการเปลี่ยนแปลงน้ำเสียให้อยู่ในสถานะที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมโดยการเปลี่ยนสารพิษหรือสารปนเปื้อนให้อยู่ในรูปของน้ำ ก๊าซ หรือเซลล์ใหม่ของจุลินทรีย์ ซึ่งกลุ่มสิ่งมีชีวิตที่มีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการทางชีวภาพ ได้แก่ แบคทีเรีย โปรโตซัว สาหร่าย รา โรติเฟอร์ เป็นต้น ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ทั้งในสถานะที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจน แต่เทคโนโลยีนี้ไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์และสีที่มีโครงสร้างซับซ้อนได้ (ธนภุต พรหมทอง, 2552) เทคโนโลยีชีวภาพ ได้แก่

- การดูดซับด้วยสาหร่าย (Algae absorption) พบว่าสาหร่ายสามารถกำจัดสีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมได้โดยการดูดซับสีในสถานะที่มีแสงโดยเปลี่ยนโมเลกุลที่มีสีเป็นโมเลกุลที่ไม่มีสี (Dilek et al., 1999)
- การย่อยสลายด้วยเชื้อรา (Fungi decomposition) พบว่าเชื้อราสามารถกำจัดสีได้ด้วย การผลิตเอนไซม์ เพื่อย่อยสลายสีได้เช่น ในการกำจัดสีจากน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษได้ (พิมพ์ชนก เต็งเจริญ, 2546)
- การย่อยสลายด้วยแบคทีเรีย (Bacteria decomposition) พบว่าแบคทีเรีนั้นมีความสามารถในการย่อยสลายสีได้หลายประเภท (Walker and Weatherley, 2000)

2.3.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วารสาร อภิวัดนาภิวัด (2550) ได้ศึกษาการลดสีน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษโดยโอโซนโดยศึกษาถึงปัจจัยและสถานะที่เหมาะสมต่อการบำบัดสี ได้แก่ พีเอช ปริมาณโอโซน และระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนของน้ำทิ้งก่อนผ่านระบบบำบัดของโรงงาน พบว่าสามารถลดสีได้ 66.98% ซีโอดี 8.16% และพีเอชมีผลต่อกระบวนการโอโซนออกซิเดชันในการกำจัดสีและสารอินทรีย์ พีเอชที่เหมาะสมคือ 12 ± 0.1 เมื่ออัตราการไหลของ โอโซนมากขึ้นจะทำให้สีลดลงมากขึ้น และที่อัตราการไหลของโอโซน 4 ลิตรต่อนาทีคิดเป็นปริมาณโอโซน 158.2 มิลลิกรัมโอโซนต่อนาทีสามารถกำจัดสีในน้ำทิ้งได้ดีที่สุดและระยะเวลาสัมผัสโอโซนที่ดีที่สุดคือ 40 นาที

Singh and Thakur (2006) ได้ทำการศึกษาการบำบัดสีของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษด้วยกระบวนการแอนแอโรบิกโดยถึงปฏิกรณ์แบบสองขั้นตอน ซึ่งกระบวนการแอนแอโรบิกสามารถกำจัดสีได้ 70% ลิกนิน 25% ซีโอดี 42% สารประกอบ AOX 15% และฟีนอล 39% ภายในระยะเวลา 15 วัน ในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการแอนแอโรบิกถูกแยกออกเป็นสองส่วนในถังปฏิกรณ์ซึ่งประกอบด้วยสายพันธุ์เชื้อรา *Paecilomyces sp.* และสายพันธุ์แบคทีเรีย *Microbrevis luteum* ข้อมูลจากการศึกษาพบว่าภายในระยะเวลา 3 วัน *Paecilomyces sp.* สามารถลดสีได้ถึง 95% สารประกอบ AOX 67% ลิกนิน 86% ซีโอดี 88% และ ฟีนอล 63% ในขณะที่ *Microbrevis luteum* สามารถลดสีได้ 76% สารประกอบ AOX 82% ลิกนิน 69% ซีโอดี 75% และ ฟีนอล 93% และเมื่อผ่านไป 7 วันการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการแอนแอโรบิกพบว่าการเปลี่ยนแปลงพีเอชและการเพิ่มขึ้นของมวลชีวภาพของจุลินทรีย์ซึ่งสามารถยืนยันผลต่าง ๆ ของการศึกษาซึ่งเป็นไปในทางเดียวกันกับวิธีการบำบัด

2.4 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง

กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced oxidation processes: AOPs) คือ กระบวนการทางเคมีที่อาศัยตัวออกซิแดนท์ เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) โอโซน (O_3) หรือ ออกซิเจน (O_2) เพื่อก่อให้เกิดอนุมูลอิสระ (Free radical) เช่น ไฮดรอกซิลแรดิคัล ซึ่งมีความว่องไวสูง สามารถทำลายหรือเปลี่ยนรูปโมเลกุลของสารประกอบที่เป็นมลพิษได้ (ชนัญญา เพิ่มชาติ, 2556) ทำให้มลพิษนั้น มีความเป็นพิษน้อยลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและขนาดที่เล็กลง (Jiyun et al., 2003) กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงเกิดขึ้นที่อุณหภูมิและความดันปกติซึ่งในกระบวนการจะมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาหรือไม่ใช้ก็ได้ เกิดได้ทั้งปฏิกิริยาเคมีที่ใช้แสงหรือไม่ใช้แสงก็ได้หรือมีการทำปฏิกิริยาร่วมกับแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) ในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายปฏิกิริยา เช่น O_3 , O_3/H_2O_2 , UV/ozone, UV/ H_2O_2 , UV/ H_2O_2/O_3 , Fe^{2+}/H_2O_2 เป็นต้น (Glaze et al., 1987)

ปัจจุบันการบำบัดน้ำเสียนิยมนำกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงมาใช้ในงานต่าง ๆ เช่น การกำจัดสารอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษในน้ำใต้ดิน การบำบัดน้ำขั้นต้น (Pre-treatment) ก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ การบำบัดน้ำเสียที่มีสารพิษเช่น ไซยาไนต์ และสารประกอบโลหะหนักซึ่งขัดขวางการทำงานของจุลินทรีย์ การบำบัดน้ำขั้นสุดท้ายต่อจากการบำบัดทางชีวภาพ หรือใช้ร่วมกับระบบอื่น ๆ เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง (เจษฎา ถาวรศักดิ์, 2547) โดยในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงอาจจำแนกออกเป็น 2 ประเภทดังนี้ 1) ปฏิกริยาแบบสารเนื้อเดียว (Homogeneous) และ 2) ปฏิกริยาแบบสารเนื้อผสม (Heterogeneous) ดังแสดงในตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-4 ประเภทของกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (นุสรุา โรจน์วิลาวัลย์, 2554)

ประเภท			กระบวนการ
ปฏิกริยา	ปัจจัยภายนอก	กระบวนการทำให้เกิดไฮดรอกซิลแรดิคัล	
Homogenous	แสง	Photochemical Process/Chemical Process	UV/O ₃ UV/H ₂ O ₂ UV/H ₂ O ₂ / O ₃ UV/Fe ²⁺ (Fe ³⁺)/ H ₂ O ₂
	แสง/ ultrasound	Photochemical/Sonochemical	UV/US
	Ultrasound	Sonochemical Process	US/O ₃ US/H ₂ O ₂
	High-energy	Ionising	Electron Beam
	-	Chemical	H ₂ O ₂ / O ₃
	-	Chemical	O ₃ /H ₂ O ₂ /high pH
	-	Chemical	Fe ²⁺ / H ₂ O ₂ (Fenton)
-	Electrochemical	Electro-Fenton	
Heterogeneous	แสง	Photochemical Process	UV/Ti ₂ O ₂ /O ₂ UV/Ti ₂ O ₂ /H ₂ O ₂
	-	Chemical	Iron Oxide/ H ₂ O ₂

2.5 ปฏิกิริยาเฟนตัน

H.J.H Fenton ได้ค้นพบปฏิกิริยาเฟนตัน (Fenton reaction) ในปี ค.ศ. 1894 โดยกล่าวถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ต่อมาในปี ค.ศ. 1934 Harber และ Weiss ได้เสนอกลไกเกี่ยวกับประสิทธิภาพของปฏิกิริยาเฟนตันซึ่งแสดงถึงกระบวนการทางเคมีของปฏิกิริยาเฟนตันที่ทำให้เกิดอนุมูลอิสระคือ ไฮดรอกซิลแรดิคัล เป็นตัวออกซิแดนท์และเป็นส่วนหนึ่งในการเกิดกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (นุสรา โรจน์วิลาวัลย์, 2554)

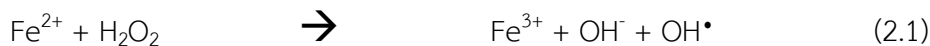
ปฏิกิริยาเฟนตันคือปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) โดยมีเฟอร์รัสไอออนทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์คือไฮดรอกซิลแรดิคัล ซึ่งมีค่าศักย์ออกซิเดชัน (Oxidation potential) สูงรองจากฟลูออรีนเท่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 2-5 โดยปฏิกิริยาเฟนตันเกิดได้ดีในสภาวะที่พีเอชเป็นกรด

ตารางที่ 2-5 ความสามารถในการปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารเคมีชนิดต่าง ๆ (Rodríguez, 2003)

สารเคมีในปฏิกิริยาออกซิเดชัน	ความสามารถในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน (โวลต์)
Fluorine	3.03
Hydroxyl radical	2.80
Atomic oxygen	2.42
Ozone	2.07
Hydrogen peroxide	1.77
Permanganate	1.67
Hypobromous acid	1.59
Chloride dioxide	1.5
Hypochlorous acid	1.49
Hypoiodous acid	1.45
Chlorine	1.36
Bromide	1.09

2.5.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเฟนตัน

กลไกของปฏิกิริยาเฟนตันสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1)



นอกจากสมการที่ (2.1) ในสารละลายยังเกิดปฏิกิริยาอื่นๆ ขึ้นด้วย ดังในสมการ (2.2) ถึง (2.6) แต่จะไม่เกิดขึ้นทุกปฏิกิริยา โดยจะขึ้นอยู่กับปริมาณของเฟอร์รัสไอออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เมื่อมีปริมาณเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) มากเกินไป จะทำให้เกิดปฏิกิริยาดังสมการ (2.2) และ (2.3) หากมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) มากเกินไป ในสภาวะที่เป็นกรด (Flaherty and Huang, 1992) จะทำให้ไม่เกิดปฏิกิริยาดังสมการ (2.5) และ (2.6) แต่จะเกิดเฉพาะปฏิกิริยาตามสมการ (2.1), (2.3), และ (2.4)



สำหรับปฏิกิริยาเฟนตันกับสารประกอบอินทรีย์นั้น สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งด้วยกลไกแบบลูกโซ่ (Chain) หรือไม่ใช่ลูกโซ่ (Non-chain) ดังในสมการ (2.7) ถึง (2.12) และในกรณีที่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นด้วยกลไกแบบลูกโซ่ จะทำให้เกิดการสลายตัวของสารประกอบอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ได้อย่างสมบูรณ์มากขึ้น ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงเป็นน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังสมการที่ (2.13) (Flaherty and Huang, 1992)



อนุพลอิสระไฮดรอกซิลแรติเคิลสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์เกือบทั้งหมดและได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้ายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งหมายถึงสารประกอบอินทรีย์ต่าง ๆ ได้ถูกเปลี่ยนสภาพให้หมดความเป็นพิษหรือในการนำกระบวนการเฟนตันมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจะพบว่าคุณสมบัติของน้ำทิ้งมีค่าซีโอดีหรือทีโอดีน้อยลง เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นคือคาร์บอนไดออกไซด์

2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาเฟนตัน

- พีเอช

ช่วงพีเอชที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาเฟนตันควรอยู่ในช่วงพีเอช 3 เนื่องจากความสามารถในการออกซิเดชันจะลดลงเมื่อพีเอชมีค่าเพิ่มขึ้น (Wang et al., 2013)

- อุณหภูมิ

เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 10 องศาเซลเซียสเป็น 30 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีสูงขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นมากถึง 40 - 50 องศาเซลเซียส จะทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีประสิทธิภาพลดลง เนื่องจากจะแตกตัวเป็นน้ำและออกซิเจน ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมกับปฏิกิริยาเฟนตันคือ 20 - 40 องศาเซลเซียส (ชนัญญา เพิ่มชาติ, 2556)

- สัดส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเหล็กที่เหมาะสม

โดยทั่วไปเมื่อสัดส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเหล็กเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น แต่จะทำให้มีต้นทุนสูงจึงต้องมีการควบคุมสัดส่วนที่เหมาะสม เพื่อให้ปฏิกิริยาเฟนตันนั้นสามารถผลิตไฮดรอกซิลแรติเคิลได้เพียงพอต่อการออกซิเดชันสารประกอบอินทรีย์ต่าง ๆ ในน้ำ (ปิ่นรัตน์ สิริพันธ์วงศ์, 2552)

- ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

หากความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากเกินไป จะทำให้เกิดตะกอนลอยจากออกซิเจน ทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ตกค้าง ซึ่งจะไปยังยังกระบวนการทางชีวภาพในน้ำและยังส่งผลกระทบต่อการใช้ค่าซีโอดีในน้ำทำให้การวิเคราะห์ซีโอดีมีค่ามากเกินไปจริง (ปฐมภาพร นันทากุล, 2549)

- ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน

พบว่าหากความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าของแข็งที่ละลายทั้งหมด ค่าการนำไฟฟ้า และมีตะกอนเพิ่มขึ้นด้วย (ปฐมภาพร นันทากุล, 2549)

2.5.3 ข้อดีข้อเสียของปฏิกิริยาเฟนตัน

ข้อดี	<ol style="list-style-type: none"> 1) สารเคมีที่ใช้ในปฏิกิริยาเฟนตันมีราคาถูก 2) การดำเนินระบบปฏิกิริยาเฟนตันง่าย 3) ไม่ต้องใช้พลังงานในการเดินระบบ
ข้อเสีย	<ol style="list-style-type: none"> 1) เหล็กเพอร์ริกถูกใช้อย่างรวดเร็วมากกว่ากระบวนการฟื้นฟูใหม่ ทำให้อัตราการออกซิเดชันลดลง 2) ตะกอนเพอร์ริกออกไซด์ต้องกำจัดด้วยวิธีการฝังกลบซึ่งมีค่าดำเนินการแพง (กมลฤทัย ทัดเทียม, 2555)

2.5.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ธนกฤต พรหมทอง (2552) ได้ศึกษาการกำจัดสีและสารอินทรีย์ ในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยน้ำหมักชีวภาพและเฟนตันรีเอเจนต์ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกศึกษาการบำบัดสีและสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยน้ำหมักชีวภาพที่ 3 ระดับความเข้มข้นคือ 0.5, 2, และ 5 เปอร์เซ็นต์ พบว่าน้ำหมักชีวภาพทำให้สี บีโอดีและซีโอดีมีค่าสูงขึ้นตามความเข้มข้นของน้ำหมักชีวภาพที่ใช้ ส่วนที่ 2 ศึกษาการบำบัดสีและสารอินทรีย์ด้วยเฟนตันรีเอเจนต์ พบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมของเพอร์รัสไอออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คือ 1.0 และ 50 มิลลิโมลาร์ พีเอชที่เหมาะสมคือ 3 ซึ่งสามารถกำจัดสีได้ 61.11% และสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีได้ 81% มีตะกอนเคมีเกิดขึ้น 315 - 350 มิลลิกรัมต่อลิตร และถ้าใช้ยวี่ร่วมกับเฟนตันรีเอเจนต์ทำให้สามารถกำจัดสีได้เพิ่มขึ้นเป็น 81.04% แสดงให้เห็นว่าน้ำหมักชีวภาพไม่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม เนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มประกอบด้วยสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากด้วยกระบวนการทางชีวภาพและในขณะเดียวกันจากการศึกษาแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของเฟนตันรีเอเจนต์ในการกำจัดสีและสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วุฒิ วิพันธ์พงษ์ (2540) ศึกษาการใช้สารเคมีเฟนตันในการกำจัดสีและสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 0, 200, 500, 800, และ 1,200 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราส่วนโดยโมลระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับเหล็กที่ 5:1, 10:1, และ 20:1 โดยทำปฏิกิริยาที่ 60, 120, และ 180 นาที สีของน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองคือ โทนสีดำ โทนสีม่วง โทนสีแดง และโทนสีน้ำตาลอ่อน ซึ่งมีค่าซีโอดีประมาณ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่ากันทุกโทนสี จากผลการทดลองพบว่า ในการบำบัดน้ำเสียโทนสีดำ โทนสีแดง และโทนสี

น้ำตาลอ่อน เมื่อใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราส่วน 5:1 และเมื่อใช้อัตราส่วน 10:1 ในการบำบัดน้ำเสียโทนสีม่วง สามารถกำจัดซีไอดีได้มากกว่า 80% ภายในระยะเวลา 1 ชั่วโมง

Pérez et al. (2002) ได้ศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ปนเปื้อนในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษด้วยกระบวนการเฟนตันและโฟโตเฟนตัน ซึ่งได้ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาเกิดปฏิกิริยาเฟนตันและโฟโตเฟนตันได้แก่ ความเข้มข้น อุณหภูมิ พีเอช ความเข้มข้นเริ่มต้นของเพอร์ร็อกไซด์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในงานวิจัยเลือกทำปฏิกิริยาที่พีเอชเท่ากับ 3 โดยความเข้มข้นเหล็กไอออนอยู่ในช่วง 0 ถึง 800 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อยู่ในช่วง 0 ถึง 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และอุณหภูมิที่สูงกว่า 25 องศาเซลเซียสขึ้นไปจนถึง 70 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิมีผลกระทบต่ออัตราการสลายปริมาณคาร์บอนทั้งหมด จากการทดลองพบว่าที่พีเอชเท่ากับ 3 โดยใช้ความเข้มข้นเหล็กไอออน 450 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7500 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดสารอินทรีย์ปนเปื้อนในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมได้ถึง 60%

Bentivenga et al. (2003) ได้ศึกษาการสลายลิกนินจากการระเบิดด้วยไอน้ำจากต้นบีช (beech) ด้วยสารเคมีเฟนตัน ในการบำบัดลิกนินด้วยความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเพอร์ร็อกซัลเฟตที่ 1.5, 5.8, 11.65, และ 31.32 มิลลิโมล โดยตรวจวัดปฏิกิริยาเฟนตันด้วยเครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 207, 230, และ 276 นาโนเมตร พบว่าสารเคมีเฟนตันสามารถสลายลิกนินธรรมชาติได้ เนื่องจากไม่พบการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 207, 230, และ 276 นาโนเมตร นอกจากนี้ได้ทำการวิเคราะห์ของแข็งด้วยเทคนิค GPC พบว่ามีการสลายตัวของลิกนิน โดยที่การบำบัดด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเพอร์ร็อกซัลเฟตที่ความเข้มข้น 5.8 มิลลิโมล พบผลิตภัณฑ์จากการสลายลิกนินขนาดเล็กต่าง ๆ เกิดขึ้น

Torrades et al. (2011) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้ central composite experimental design เพื่อออกแบบสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายน้ำยางดำ (black liquor) จากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษและกระดาษด้วยกระบวนการเฟนตัน โดยทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการและศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการออกซิเดชันได้แก่ อุณหภูมิ ความเข้มข้นของเพอร์ร็อกไซด์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยน้ำยางดำมีค่าซีไอดีเท่ากับ 628 มิลลิกรัมต่อลิตรที่พีเอชเท่ากับ 3 จากการทำปฏิกิริยาในสภาวะที่เหมาะสมที่พีเอช 3 อุณหภูมิ 298 เคลวิน ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 44.1 มิลลิโมลาร์และความเข้มข้นของเพอร์ร็อกไซด์ไอออนเท่ากับ 4.655 มิลลิโมลาร์และอัตราส่วนต่อโมลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเพอร์ร็อกไซด์ไอออนคือ 9.5 โดยใช้เวลา 90 นาที สามารถ

ลดซีไอดีได้ถึง 94.8% และองค์ประกอบอะโรมาติกได้ถึง 80.9% และองค์ประกอบของลิกนินได้ถึง 85.6%

2.6 ปฏิกริยาเฟนตันเสมือน

ในปฏิกริยาเฟนตันเสมือน (Fenton-like reaction) นั้นจะก่อให้เกิดไฮดรอกซิลแรดิคัล ได้จากปฏิกริยาระหว่างเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) เช่น เหล็กออกไซด์ต่าง ๆ ได้แก่ แมกนีไทต์, เกอร์ไทต์, ฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) เป็นต้น หรือโลหะทรานซิชันอื่น ๆ เช่น Ti(II) , Cr(II) , และ Cu(II) เป็นต้น กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งแตกต่างจากปฏิกริยาเฟนตันที่ใช้เฟอร์รัสไอออนเป็นตัวเร่งปฏิกริยา (Hasan et al., 2012)

โดยลำดับของปฏิกริยาการเกิดไฮดรอกซิลแรดิคัล แสดงดังสมการดังนี้



ในลำดับแรกจะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างเฟอร์ริกไอออนกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังสมการที่ (2.14) และในสมการที่ (2.15) จะเป็นการสลายของสารประกอบเชิงซ้อน เพื่อก่อให้เกิดเฟอร์รัสไอออนและไฮโดรเปอร์ออกไซด์หรือซูเปอร์ออกไซด์ ($\text{HO}_2 \cdot$) จากนั้นเฟอร์รัสไอออน จะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกริยากระตุ้นให้เกิดการสลายของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังในสมการที่ (2.16) ให้เกิดเป็นไฮดรอกซิลแรดิคัล เพื่อทำปฏิกริยากับสารประกอบอินทรีย์ต่าง ๆ ต่อไปดังในสมการที่ (2.17)

ข้อดีของปฏิกริยาเฟนตันเสมือน (ชนัญญา เพิ่มชาติ, 2556)

- 1) เฟอร์ริกไอออนมีราคาถูกกว่าเฟอร์รัสไอออน
- 2) เกิดตะกอนคอลลอยด์น้อย

2.6.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชญัญญา เพิ่มชาติ (2556) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเพนตันและเพนตันเสมือน โดยกระบวนการเพนตันใช้เฟอร์รัสซัลเฟต กระบวนการเพนตันเสมือนแบบสารเนื้อเดียวใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ และเพนตันเสมือนแบบเนื้อผสมใช้ไอรอนโมลิบเดต ในการทดลองใช้น้ำมันตัดที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ากระบวนการเพนตันสามารถบำบัดซีไอดีได้ถึง 81% เมื่อใช้เฟอร์รัสไอออนที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเท่ากับ 3 มีอัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:2.5 จากนั้นทำการศึกษาการแบ่งเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกระบวนการเพนตันโดยแบ่งเติมเป็น 2 ครั้ง พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ครั้งเดียว ส่วนกระบวนการเพนตันเสมือนแบบสารเนื้อเดียวสามารถบำบัดซีไอดีได้ถึง 79% เมื่อใช้เฟอร์รัสไอออนที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเท่ากับ 3 มีอัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:2.5 กระบวนการเพนตันและกระบวนการเพนตันเสมือนแบบเนื้อเดียวมีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้กระบวนการเพนตันเสมือนแบบเนื้อผสมโดยใช้ไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าสามารถบำบัดซีไอดีได้ 58% เมื่อใช้ความเข้มข้นเฟอร์ริกไอออน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเท่ากับ 4 มีอัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 1:10 จากการศึกษาสามารถทราบได้ว่ากระบวนการเพนตันและเพนตันเสมือนแบบเนื้อเดียวมีประสิทธิภาพในการบำบัดไม่แตกต่างกันและมีประสิทธิภาพสูงกว่ากระบวนการเพนตันแบบเนื้อผสม

Ramirez et al. (2007) ศึกษาการย่อยสลายของสีย้อมอะโซอเรนจ์ 2 (Azo Orange II) ด้วยกระบวนการเพนตันเสมือนแบบเนื้อผสมใช้ carbon-Fe เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเมื่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำปฏิกิริยากับ carbon-Fe 2 ชนิดที่แตกต่างกันซึ่งถูกชุบด้วยเหล็ก 7% โดยน้ำหนัก ตัวคาร์บอนที่ใช้มีความแตกต่างกันเล็กน้อยโดยถ่านกัมมันต์ชนิดแรกได้เป็นผลพลอยได้จากการเกษตรและถ่านกัมมันต์อีกชนิดได้จากพอลิเมอร์สารอินทรีย์รีซอสซิงโกลฟอร์มันดีไฮด์ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้มีการทดสอบคุณสมบัติโดยใช้เทคนิคต่าง ๆ เช่น การดูดซับไนโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ -196 และ 0 องศาเซลเซียสตามลำดับ เทคนิค MIP กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิด SEM กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิด HRTEM และเทคนิค XRD แล้วได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการย่อยสลายของสีย้อมอะโซอเรนจ์ 2 และวิเคราะห์ผลกระทบจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น พีเอช ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาและอุณหภูมิ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม จากผลการศึกษาพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีเหล็กกระจายตัวได้ดีบนพื้นผิวของคาร์บอนและสามารถทำปฏิกิริยาได้ดี โดยที่พีเอช 3 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 6 มิลลิโมล ความ

เข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.2 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส สามารถสลายสีย้อมได้ถึง 90% และจำเป็นต้องมีการพิจารณาการหลุดของแร่เหล็กต่อไปด้วย

Jingheng et al. (2008) ได้ศึกษาปฏิกิริยาเฟนตันเสมือนโดยใช้ไอรอนวานาเดต (FeVO_4) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาก่อให้เกิดไฮดรอกซิลแรดิคัล เพื่อสลายสีย้อมออเรนจ์ 2 (Orange II) เปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาทั่วไปได้แก่ $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, Fe_3O_4 และ $\gamma\text{-FeOOH}$ จากการทดลองพบว่าไอรอนวานาเดต 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตรสามารถเร่งปฏิกิริยาของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 15 มิลลิโมลต่อลิตร ทำปฏิกิริยาที่พีเอช 6.1 ภายในเวลา 60 นาที สามารถสลายสีย้อมออเรนจ์ 2 ได้ถึง 92.9% ประสิทธิภาพที่สูง อาจเกิดจากกลไกของกระบวนการเฟนตันเสมือนที่เกิด 2 ทาง คือการเกิดปฏิกิริยาของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับเฟอร์รัสและกับวานาเดียมในไอรอนวานาเดต และนอกจากนั้นไอรอนวานาเดตสามารถทำปฏิกิริยาได้ในช่วงพีเอชตั้งแต่ 3 ถึง 8 อีกด้วย

Ahmad et al. (2010) ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมเอสิดเรด 1 (Acid Red 1;AR1) ด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือนโดยใช้ Fe-Montmorillonite K10 (Fe-MK10) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเทและศึกษาถึงผลกระทบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ต่อประสิทธิภาพของการกำจัดสี เช่น ปริมาณเหล็กที่ติดอยู่บน Montmorillonite K10 (MK10) ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา พีเอชของสารละลาย ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และสีย้อมเอสิดเรด 1 และอุณหภูมิ จากการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-MK10 0.14% ปริมาณ 5 กรัมต่อลิตรของ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 16 มิลลิโมลาร์ ที่พีเอชเท่ากับ 2.5 สามารถกำจัดสีย้อมเอสิดเรด 1 ปริมาณ 50 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ถึง 99% ภายในเวลา 150 นาที นอกจากนี้การทดสอบการชะละลายของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-MK10 พบว่ามีการละลายของเหล็กน้อยกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

Daud and Hameed (2010) ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 (Reactive Black 5) ด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือนโดยใช้ Fe-Montmorillonite K10 (Fe-MK10) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำการศึกษาถึงผลกระทบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาณเหล็กที่ติดอยู่บน Montmorillonite K10 (MK10) ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา พีเอชของสารละลาย ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และสีย้อม และอุณหภูมิ จากการทดลองพบว่าการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 12 มิลลิโมลาร์ และ Fe-Montmorillonite K10 3.5 กรัมต่อลิตรของ Fe-MK10 0.11% ที่พีเอชเท่ากับ 2.5 สามารถกำจัดสีย้อมได้ถึง 99% ภายในเวลา 150 นาที โดยทำปฏิกิริยาในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเท

Liu et al. (2011) ได้ศึกษาการสลายของสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 (Reactive Black 5) ด้วยกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือน ซึ่งได้ทำการศึกษาถึงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการสลายสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 เช่น ความเข้มข้นเริ่มต้นของเพอร์ร็อกซิไดออกไซด์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม จากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพของการย่อยสลายสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 ในช่วงแรกของกระบวนการเฟนตันปฏิกิริยาการสลายเกิดขึ้นเร็วกว่ากระบวนการเฟนตันเสมือนและมีประสิทธิภาพเท่ากับ 97% เมื่อทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 45 นาทีพบว่า ประสิทธิภาพของทั้ง 2 กระบวนการได้ผลใกล้เคียงกัน สำหรับประสิทธิภาพกระบวนการออกซิเดชันทั้ง 2 ระบบนั้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม ความเข้มข้นของเพอร์ร็อกซิไดออกไซด์ เพอร์ริกไดออกไซด์ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และค่าพีเอชของสารละลายสีย้อม

Tian et al. (2011) ได้ศึกษาการสลายของสีย้อมเอซิดออเรนจ์ 2 (Acid Orange II) ที่พีเอชเป็นกลางด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือนโดยใช้ไอรอนโมลิบเดต (Iron molybdate) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากการทดลองพบว่าไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูงในการสลายสีย้อมเอซิดออเรนจ์ 2 ที่พีเอชเป็นกลางโดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้น 6.7 ประสิทธิภาพการสลายเอซิดออเรนจ์ 2 สูงถึง 94.1% ภายในเวลา 60 นาที นอกจากนี้สามารถทำปฏิกิริยาได้ในสารละลายที่มีพีเอชตั้งแต่ 3.0 ถึง 9.0 ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าการใช้ไอรอนโมลิบเดตเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการเฟนตันเสมือนโดยสามารถทำปฏิกิริยาที่พีเอชเป็นกลางหรือเป็นเบส และการชะละลายของไอรอนโมลิบเดตมีค่าต่ำ มีโครงสร้างที่แข็งแรงดี มีความเสถียร และสามารถใช้งานได้ถึง 5 ครั้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Pinto et al. (2012) ได้ศึกษาการออกซิเดชันสีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene blue) และสีย้อมอินดิโกคาร์มีน (Indigo carmine) ในน้ำโดยใช้เคลต้าเพอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์ (δ -FeOOH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพื้นที่ผิวและขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน พบว่า ความสามารถในการทำปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้เมื่อทำการตรวจวัดการสลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยวิธี (Electron Spin Resonance; ESR) ซึ่งพบเมทานอลเกิดขึ้นแสดงว่ากลไกของการสลายเป็นไปตามกลไกของ Haber และ Weiss และการตรวจวัดผลการทดลองด้วยวิธี (Electrospray ionization-mass spectrometry; ESI MS) พบว่าเคลต้าเพอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์สามารถกระตุ้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อก่อให้เกิด reactive radicals ดังเช่น ไฮดรอกซิลแรดิคัล และมีผลต่อการออกซิเดชันของสีย้อม โดยอัตราการสลายของสีย้อมขึ้นอยู่กับปริมาณของเพอร์ร็อกซิไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นบน

พื้นผิวของเตลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์ นอกจากนี้พื้นผิวของเตลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์มีบทบาทสำคัญในการดูดซับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และสีย้อมที่มีประจุบวกต่าง ๆ ได้ดี

Lee et al. (2006) ได้ศึกษาการสลายพินอลด้วยกระบวนการเฟนตันโดยใช้เหล็กออกไซด์สังเคราะห์ (synthesized iron oxide) เปรียบเทียบกับใช้เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์ และแมกนีไทต์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของเหล็กออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน การวัดพื้นที่ผิวและขนาดอนุภาครูพรุนโดยวิธี BET เทคนิค XRD และเทคนิค EPR ความสามารถในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาแบ่งประเภทจากอัตราการสลายของพินอล ซึ่งประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถจัดลำดับจากสูงไปต่ำ คือ เฟอร์รัสไอออน เหล็กออกไซด์สังเคราะห์ แมกนีไทต์ ฮีมาไทต์ และเกอร์ไทต์ จากผลการทดลองพบว่า เหล็กออกไซด์สังเคราะห์มีประสิทธิภาพสูงสุดและมีโครงสร้างคล้ายกับฮีมาไทต์ในธรรมชาติ เมื่อเวลาผ่านไป 60 นาทีพบว่าสามารถสลายพินอลได้สมบูรณ์ที่พีเอช 3 โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 400 มิลลิกรัมต่อลิตรและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1% โดยน้ำหนัก เมื่อทำการตรวจวัดหาปริมาณเฟอร์ริกละลายและเฟอร์รัสไอออนด้วยเครื่อง AAS พบว่าในน้ำตัวอย่างจากปฏิกิริยาเฟนตันไม่พบเฟอร์ริกละลาย

Sun et al. (2007) ได้ศึกษาการสลาย 2,4,6-ไตรไนโตรโทลูอิน (2,4,6-trinitrotoluene) ด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือนโดยการใช้แร่เหล็กชนิดต่าง ๆ ได้แก่ เฟอร์ไฮไดรต์ (ferrihydrite) ฮีมาไทต์ เกอร์ไทต์ เลพิโดโครไซต์ (lepidocrocite) แมกนีไทต์และไพไรต์ (pyrite) พบว่ามีเพียงไพไรต์และแมกนีไทต์สามารถสลาย 2,4,6-ไตรไนโตรโทลูอินได้ถึง 85% ที่พีเอชเท่ากับ 3 ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 80 มิลลิโมลาร์ ปริมาณแร่เหล็ก 1.76 กรัมต่อลิตร ภายในเวลา 30 นาทีและ 6 ชั่วโมงตามลำดับ

Wang et al. (2015) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ (Methyl orange) ด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือน โดยใช้เกอร์ไทต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำการวัดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาจากประสิทธิภาพในการกำจัดสีและทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของเกอร์ไทต์ก่อนและหลังทำปฏิกิริยาด้วยเทคนิค XRD กล้องอิเล็กตรอนชนิด SEM และเทคนิค FTIR ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ เช่น พีเอช ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม พบว่าเมื่อพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3.88 มิลลิโมลาร์ และปริมาณเกอร์ไทต์ 0.4 กรัมต่อลิตร สามารถสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ได้ 96.4% ภายในเวลา 20 นาที และอัตราการสลายสีย้อมเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และตัวเร่งปฏิกิริยา แต่เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลออเรนจ์เพิ่มขึ้น อัตราการสลายสีย้อมจะลดลง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องในขั้นต้นสามารถนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือนได้ดังแสดงในตารางที่ 2-6

ตารางที่ 2-6 ศึกษากระบวนการบำบัดสีในน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือน

กระบวนการ	ประเภทน้ำเสีย	ตัวแปรที่ศึกษา	ผลการศึกษา	แหล่งที่มา
เฟนตัน	น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม	<ul style="list-style-type: none"> - ความเข้มข้นเริ่มต้นของเพอร์ร็อกไซด์ไฮดรอกไซด์ - ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ - พีเอช - เวลาในการทำปฏิกิริยา - ประสิทธิภาพการบำบัด 	<ul style="list-style-type: none"> - ความเข้มข้นเริ่มต้นของเพอร์ร็อกไซด์ไฮดรอกไซด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ - ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 50 มิลลิโมลาร์ - พีเอชที่เหมาะสมคือ 3.0 - เวลา 5 นาที - สามารถกำจัดสี 61.11% และซีไอดี 81% 	(ชนกฤต พรหมทอง, 2552)
เฟนตัน	น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม	<ul style="list-style-type: none"> - ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ - อัตราส่วนโดยโมลระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับเหล็ก - เวลาในการทำปฏิกิริยา - ประสิทธิภาพการบำบัด 	<ul style="list-style-type: none"> - ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร - อัตราส่วนโดยโมลระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับเหล็ก น้ำเสียโทนสีดำ โทนสีแดง และโทนสีน้ำตาลอ่อน คือ 5:1 และน้ำเสียโทนสีม่วง คือ 10:1 - เวลา 1 ชั่วโมง - สามารถลดซีไอดีได้มากกว่า 80% 	(วุฒิ วิพันธ์พงษ์, 2540)

กระบวนการ	ประเภท น้ำเสีย	ตัวแปรที่ศึกษา	ผลการศึกษา	แหล่งที่มา
เฟนตัน	น้ำเสียจาก อุตสาหกรรม เยื่อกระดาษ	<ul style="list-style-type: none"> - อุณหภูมิ - พีเอช - ความเข้มข้นเริ่มต้นเพอร์ รัสไอออน - ความเข้มข้นเริ่มต้นของ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 	<ul style="list-style-type: none"> - อุณหภูมิ 25 องศา เซลเซียส - พีเอชเท่ากับ 3 - ความเข้มข้นเหล็กไอออน 450 มิลลิกรัมต่อลิตร - ความเข้มข้นไฮโดรเจน เปอร์ออกไซด์ 7500 มิลลิกรัมต่อลิตร 	(Pérez et al., 2002)
เฟนตัน	ลิกนินจาก การระเบิด ด้วยไอน้ำ จากต้นบีช (beech)	<ul style="list-style-type: none"> - ความเข้มข้นของ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ - ความเข้มข้นของเพอร์รัส - ซัลเฟต - ประสิทธิภาพการบำบัด 	<ul style="list-style-type: none"> - ความเข้มข้นของ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5.8 มิลลิโมล - ความเข้มข้นของเพอร์ รัสซัลเฟต 5.8 มิลลิโมล - สามารถลดลิกนินได้ 90% 	(Bentivenga et al., 2003)
เฟนตัน	น้ำยางดำ (black liquor)	<ul style="list-style-type: none"> - อุณหภูมิ - พีเอช - ความเข้มข้นของ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ - ความเข้มข้นของเพอร์รัส - อัตราส่วนต่อโมลของ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ต่อเพอร์รัสไอออน - เวลาในการทำปฏิกิริยา - ประสิทธิภาพการบำบัด 	<ul style="list-style-type: none"> - อุณหภูมิ 298 เคลวิน - พีเอช 3 - ความเข้มข้นไฮโดรเจน เปอร์ออกไซด์ 44.1 มิลลิโมล - ความเข้มข้นของเพอร์รัส ไอออน 4.655 มิลลิโมล - อัตราส่วนต่อโมลของ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ต่อเพอร์รัสไอออนคือ 9.5 - เวลา 90 นาที สามารถลด ซีไอดี 94.8% อะโรมาติก 80.9% ลิกนิน 85.6% 	(Torrades et al., 2011)

กระบวนการ	ประเภท น้ำเสีย	ตัวแปรที่ศึกษา	ผลการศึกษา	แหล่งที่มา
เฟนตัน เสมือน	น้ำมันตัด	<ul style="list-style-type: none"> - ความเข้มข้นเริ่มต้นของเพอร์ร็อกไซด์ - ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ - อัตราส่วนต่อโมลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเพอร์ร็อกไซด์ - พีเอช - ประสิทธิภาพการบำบัด 	<ul style="list-style-type: none"> - ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2 กรัมต่อลิตร - ความเข้มข้นของเพอร์ร็อกไซด์ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร - อัตราส่วนต่อโมลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเพอร์ร็อกไซด์ 10:1 - พีเอช 4 - สามารถลดซีไอดี 58% 	(ชัญญา เพิ่มชาติ, 2556)
เฟนตัน เสมือน	สีย้อม อะโซ ออเรนจ์ 2	<ul style="list-style-type: none"> - พีเอช - ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ - ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา - อุณหภูมิ - ประสิทธิภาพการบำบัด 	<ul style="list-style-type: none"> - พีเอช 3 - ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 6 มิลลิโมลาร์ - ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.20 กรัมต่อลิตร - อุณหภูมิ 30 เซลเซียส - สามารถลดสีได้ 90% 	(Ramirez et al., 2007)
เฟนตัน เสมือน	สีย้อม ออเรนจ์ 2	<ul style="list-style-type: none"> - ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา - ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ - พีเอช - เวลาในการทำปฏิกิริยา - ประสิทธิภาพการบำบัด 	<ul style="list-style-type: none"> - ไอรอนวานาเดต 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร - ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 15 มิลลิโมลต่อลิตร - พีเอช 6.1 - เวลา 60 นาที - สามารถลดสีได้ 92.9% 	Jingheng D. et al., 2008)

กระบวนการ	ประเภท น้ำเสีย	ตัวแปรที่ศึกษา	ผลการศึกษา	แหล่งที่มา
เฟนตัน เสมือน	สีย้อม เอสเตรด 1	<ul style="list-style-type: none"> - ปริมาณเหล็กที่ติดอยู่บน Montmorillonite K10 - พีเอช - ความเข้มข้นเริ่มต้นของ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ - เวลาในการทำปฏิกิริยา - ประสิทธิภาพในการบำบัด 	<ul style="list-style-type: none"> - Fe-Montmorillonite K10 5 กรัมต่อลิตรของ Fe-MK10 0.14% - พีเอช 2.5 - ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 16 มิลลิโมลาร์ - เวลา 150 นาที - สามารถลดสีได้ 99% 	(Ahmad et al., 2010)
เฟนตัน เสมือน	สีย้อม รีแอคทีฟ แบล็ค 5	<ul style="list-style-type: none"> - ปริมาณเหล็กที่ติดอยู่บน Montmorillonite K10 - พีเอช - ความเข้มข้นเริ่มต้นของ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ - เวลาในการทำปฏิกิริยา - ประสิทธิภาพในการบำบัด 	<ul style="list-style-type: none"> - Fe-Montmorillonite K10 3.5 กรัมต่อลิตรของ Fe-MK10 0.11% - พีเอช 2.5 - ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 12 มิลลิโมลาร์ - เวลา 150 นาที - สามารถลดสีได้ 99% 	(Daud and Hameed, 2010)
เฟนตัน เสมือน	สีย้อม รีแอคทีฟ แบล็ค 5	<ul style="list-style-type: none"> - ความเข้มข้นเริ่มต้นของ เพอร์ริกไอออน - ความเข้มข้นเริ่มต้นของ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ - พีเอช - เวลาในการทำปฏิกิริยา - ประสิทธิภาพในการบำบัด 	<ul style="list-style-type: none"> - ความเข้มข้นเริ่มต้นของ เพอร์ริกไอออน 0.05 มิลลิโมลาร์ - ความเข้มข้นเริ่มต้นของ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2 มิลลิโมลต่อลิตร - พีเอช 3.5 - เวลา 20 นาที - สามารถลดสีได้ 97% 	(Liu et al., 2011)

กระบวนการ	ประเภท น้ำเสีย	ตัวแปรที่ศึกษา	ผลการศึกษา	แหล่งที่มา
เฟนตัน เสมือน	สีย้อม เมทิลีน บลูและสี ย้อมอินดิ โกคาร์มีน	- พีเอช - ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ - ปริมาณเตลต้าเฟอร์ริก ออกซีไฮดรอกไซด์	- พีเอช 6 - ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ 12 โมลาร์ - ปริมาณเตลต้าเฟอร์ริกออก ซีไฮดรอกไซด์ 30 มิลลิกรัม	(Pinto et al., 2012)
เฟนตัน เสมือน	ฟีนอล	- พีเอช - ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ - ปริมาณเหล็กออกไซด์ สังเคราะห์ - เวลาในการทำปฏิกิริยา - ประสิทธิภาพในการบำบัด	- พีเอช 3 - ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ 400 มิลลิกรัมต่อ ลิตร - ปริมาณเหล็กออกไซด์ สังเคราะห์ 0.1% โดย น้ำหนัก - เวลา 60 นาที - สามารถลดได้ 100%	(Lee et al., 2006)
เฟนตัน เสมือน	2,4,6-ไตร ไนโตโทลู อิน	- พีเอช - ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ - ปริมาณแร่เหล็ก - เวลาในการทำปฏิกิริยา - ประสิทธิภาพในการบำบัด -	- พีเอช 3 - ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ 80 มิลลิโมลาร์ - ปริมาณแร่เหล็ก 1.76 กรัม ต่อลิตร - เวลา 30 นาที - สามารถลดไตรไนโตโทลูอิน ได้ 85%	(Sun et al., 2007)
เฟนตัน เสมือน	สีย้อม เมทิล ออเรนจ์	- พีเอช - ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ - ปริมาณเกอร์ไทด์ - เวลาในการทำปฏิกิริยา - ประสิทธิภาพในการบำบัด	- พีเอช 3 - ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ 3.88 มิลลิโมลาร์ - ปริมาณเกอร์ไทด์ 0.4 กรัม ต่อลิตร - เวลา 20 นาที - สามารถลดสีได้ 96.4%	(Wang et al., 2015)

2.7 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ในอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษนั้นมึน้ำเสียเกิดขึ้นปริมาณมาก และมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลจนถึงดำ ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ เช่น การต้มเยื่อ การล้างเยื่อ และการฟอกเยื่อ เนื่องจากเกิดการแยกตัวของส่วนประกอบภายในเนื้อไม้ เช่น ลิกนินและอนุพันธ์ของลิกนินออกมา ซึ่งหากมีการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมอาจเกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศในแหล่งน้ำนั้นได้ จึงจำเป็นต้องมีการกำจัดสีก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ากระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือนเป็นเทคโนโลยีที่สามารถกำจัดสีในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การกำจัดสีย้อมต่าง ๆ แต่พบงานวิจัยที่ทำการศึกษากำจัดสีในน้ำเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษไม่มากนัก กระบวนการเฟนตันเป็นวิธีการกำจัดสีในน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพสูงในแต่มีข้อเสีย คือ ต้องดำเนินปฏิกิริยาที่พีเอชต่ำ และเมื่อทำการปรับพีเอชให้สูงขึ้น ทำให้เกิดตะกอนเคมีปริมาณมาก ซึ่งจำเป็นต้องบำบัดต่อแต่ในกระบวนการเฟนตันเสมือนแบบสารเนื้อผสมสามารถทำปฏิกิริยาได้ในช่วงพีเอชกว้าง ราคาไม่แพง แยกออกจากน้ำเสียได้ง่ายและสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาและเปรียบเทียบการกำจัดสีในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือนโดยใช้แมกนีไทต์ เกรย์ไทต์ ฮีมาไทต์ เดลตา เพอร์ริออกซีไฮดรอกไซด์ และไอรอนโมลิบเดต

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ภาพรวมของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการ ณ ห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยศึกษาการกำจัดลิกนินในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ โดยสามารถแบ่งได้เป็น 6 ส่วน

ส่วนที่ 1 การเตรียมการทดลอง

- ศึกษาลักษณะของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ
- เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์
- สังเคราะห์เตลตาเพอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์ และไอรอนโมลิบเดต
- ศึกษาคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาได้แก่ แมกนีไทต์ เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์
- เตลตาเพอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์ และไอรอนโมลิบเดต

ส่วนที่ 2 ศึกษาชุดการทดลองควบคุมในการกำจัดลิกนินในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือน เติมนระบบแบบที่ละเทซึ่งประกอบด้วย

- การทดลองควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ สารละลายเพอร์ร็อกไซด์เฟต แมกนีไทต์ เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์ เตลตาเพอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์ และไอรอนโมลิบเดต
- การทดลองควบคุมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ส่วนที่ 3 ศึกษาการกำจัดลิกนินในน้ำเสียสังเคราะห์โดยทำการหาสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ สัดส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเหล็ก ความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็ก และเวลาในการทำปฏิกิริยา เติมนระบบแบบที่ละเทด้วย 2 กระบวนการคือ

- กระบวนการเฟนตัน โดยใช้สารละลายเพอร์ร็อกไซด์เฟต
- กระบวนการเฟนตันเสมือน โดยใช้แมกนีไทต์ เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์ เตลตาเพอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์ และไอรอนโมลิบเดต

ส่วนที่ 4 ศึกษาประสิทธิภาพเมื่อมีการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันเสมือน โดยใช้แมกนีไทต์ เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์ เตลตาเพอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์ และไอรอนโมลิบเดต โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ เติมนระบบแบบที่ละเท

ส่วนที่ 5 ศึกษาชุดการทดลองควบคุมในการกำจัดลิกนินในน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษด้วยกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือน เติมนระบบแบบที่ละเทซึ่งประกอบด้วย

- การทดลองควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ สารละลายเพอร์ร็อกซิซัลเฟต แมกนีไทต์ เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์ เดลตาเพอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์ และไอรอนโมลิบเดต
- การทดลองควบคุมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ส่วนที่ 6 ศึกษาการกำจัดลิกนินในน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษที่สภาวะที่เหมาะสม เติมนระบบแบบที่ละเทด้วย 2 กระบวนการนี้

- กระบวนการเฟนตัน โดยใช้สารละลายเพอร์ร็อกซิซัลเฟต
- กระบวนการเฟนตันเสมือน โดยใช้แมกนีไทต์ เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์ เดลตาเพอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์ และไอรอนโมลิบเดต

3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- เครื่องวัดค่าพีเอช (Seven Easy, METTLER TOLEDO)
- เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) (Genesys 10 UVScanning, single cell holder, Thermo Fisher Scientific, USA)
- เครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
- นาฬิกาจับเวลา
- เครื่องชั่งละเอียด ยี่ห้อ OHAUS
- ปีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 50, 100, 250, 1000 มิลลิลิตร
- ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 50, 100, 250, และ 1000 มิลลิลิตร
- อุปกรณ์วัดค่าซีไอดี
- หลอดทดสอบวัดค่าซีไอดี ขนาด 25 × 150 มิลลิเมตร พร้อมฝาจุกเกลียวทำด้วยเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Tetrafluoroethylene, TFE)
- ตู้อบ (Hot air oven)
- ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 100 และ 1,000 มิลลิลิตร
- กระบอกตวง (Cylinder) ขนาด 200, 500 และ 1,000 มิลลิลิตร
- ไมโครปิเปต (Micro pipet) ขนาด 1, 5 และ 10 มิลลิลิตร

- เครื่องวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray Diffractometer, XRD)
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด Scanning Electron Microscope with EDS (SEM-EDS) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6400 และ Link ISIS Series 300
- เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge)
- กระดาษกรองใยแก้ว ขนาดรูพรุน 0.45 ไมครอน ขนาด 25 มิลลิเมตร

3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- อัลคาไลน์ลิกนิน (Alkali lignin) ยี่ห้อ Aldrich
- สารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) ยี่ห้อ Ajax
- สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ยี่ห้อ Ajax
- สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ยี่ห้อ Ajax
- สารละลายแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) ยี่ห้อ Ajax
- กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ยี่ห้อ Ajax
- ซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4) ยี่ห้อ Qrec
- เมอร์คิวรีซัลเฟต (HgSO_4) ยี่ห้อ Qrec
- สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต ($\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ยี่ห้อ Ajax
- สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) ยี่ห้อ Ajax
- สารละลายเพอร์อินอินดิเคเตอร์
- กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ยี่ห้อ Qrec
- สารละลายฟีนานโทรีน ($\text{C}_{10}\text{H}_8\text{N}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ยี่ห้อ Ajax
- สารละลายไฮโดรโซลามีน ($\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$) ยี่ห้อ Ajax
- สารละลายแอมโมเนียมอะซิเตท ($\text{NH}_4\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$) ยี่ห้อ Carlo
- กรดกลูตาซีอะซิดิก (CH_3COOH) ยี่ห้อ Qrec
- โพแทสเซียมคลอโรแพลทินัท (K_2PtCl_6) ยี่ห้อ Qrec
- โคบอลต์สคลอไรด์ ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ยี่ห้อ Ajax
- สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต ($(\text{NH}_4)_6\text{MoO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ยี่ห้อ Ajax
- สารละลายไอรอนไนเตรต (FeNO_3) ยี่ห้อ Ajax
- สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) ยี่ห้อ Panreac

- แมกนีไทต์ (Fe_3O_4) ยี่ห้อ Aldrich
- เกอร์ไทต์ ($\alpha\text{-FeOOH}$) ยี่ห้อ Aldrich
- ฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) ยี่ห้อ Aldrich

3.3 วิธีการเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์

ในกระบวนการเพนตันหลังการเก็บตัวอย่างจากการทดลองแล้วทำการหยุดปฏิกิริยาทันทีโดยการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ 0.5 มิลลิลิตรทันที และในกระบวนการเพนตันเสมือนหยุดปฏิกิริยาด้วยการแยกตัวเร่งปฏิกิริยา โดยกรองตัวอย่างด้วยกระดาษกรองขนาดรูพรุน 0.45 ไมครอน จากนั้นนำไปวิเคราะห์ตามที่ระบุในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 สรุปตัวแปรที่ทำการศึกษาและวิธีทดลอง

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	เครื่องมือ / วิธีวิเคราะห์
ปริมาณลิกนิน	เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
ค่าซีไอดี	วิธีรีฟลักซ์แบบปิด (Closed Reflux)
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	เครื่องชั่ง
ปริมาณเหล็กทั้งหมด เพอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และ เพอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) **	วิธีฟีแนนโทรลีน (Phenanthroline)
ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คงเหลือ	วิธีไอโอดิเมตริก (Iodometric)
ค่าพีเอช	เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
ปริมาณสี	วิธีแพลทินัม – โคบอลต์ (Platinum-Cobalt)
โครงสร้างผลึก	เครื่องมือเอ็กซ์เรย์ดีฟแฟรคชัน
ขนาดของอนุภาคและลักษณะพื้นผิวและปริมาณธาตุ	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด
ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาออกซิเดชัน	จากการคำนวณ***

*วิธีการวิเคราะห์แสดงดังภาคผนวก ก

**ปริมาณเพอร์ริกไอออนสามารถหาได้จากการคำนวณ

***การคำนวณดังภาคผนวก ก

3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

การทดลองที่ 3.4.1 วิเคราะห์ลักษณะของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ

เตรียมตัวอย่างน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ จากนั้นนำตัวอย่างมาวิเคราะห์พีเอช ซีโอดี ความเข้มข้นของลิกนินและปริมาณสีด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 280 และ 475 นาโนเมตร ตามลำดับ โดยใช้กราฟมาตรฐานดังแสดงในภาคผนวก ก เพื่อใช้ในการหาความเข้มข้นของลิกนินและปริมาณสีจากค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และวิเคราะห์หาปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำตัวอย่าง ตามวิธีที่แสดงในภาคผนวก ก

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นลิกนิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อให้สะดวกต่อการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการเฟ้นต้นและเฟ้นต้นเสมือน และมีความใกล้เคียงกับความเข้มข้นลิกนินในน้ำเสียจริง ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ในการกำจัดลิกนินในน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษต่อไป นอกจากนี้ทำศึกษาปริมาณสีในมาตรฐานน้ำทิ้งพบว่า ควรมีสีไม่เกิน 300 หน่วยสี ADMI แต่ในงานวิจัยทำการวิเคราะห์ปริมาณสีด้วยวิธีแพลทตินัม – โคบอลต์ ฉะนั้นเพื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานน้ำทิ้งตามที่กฎหมายกำหนดได้ จำเป็นต้องเปลี่ยนปริมาณสีให้หน่วยสีมีหน่วย ADMI ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้ (อภิญา ศุภรพิพัฒน์, 2557, วิภาดา วิศวศิริรักษ์, 2558)

$$\text{หน่วยสี (ADMI)} = \text{หน่วยสี (แพลทตินัม - โคบอลต์)} / 0.96$$

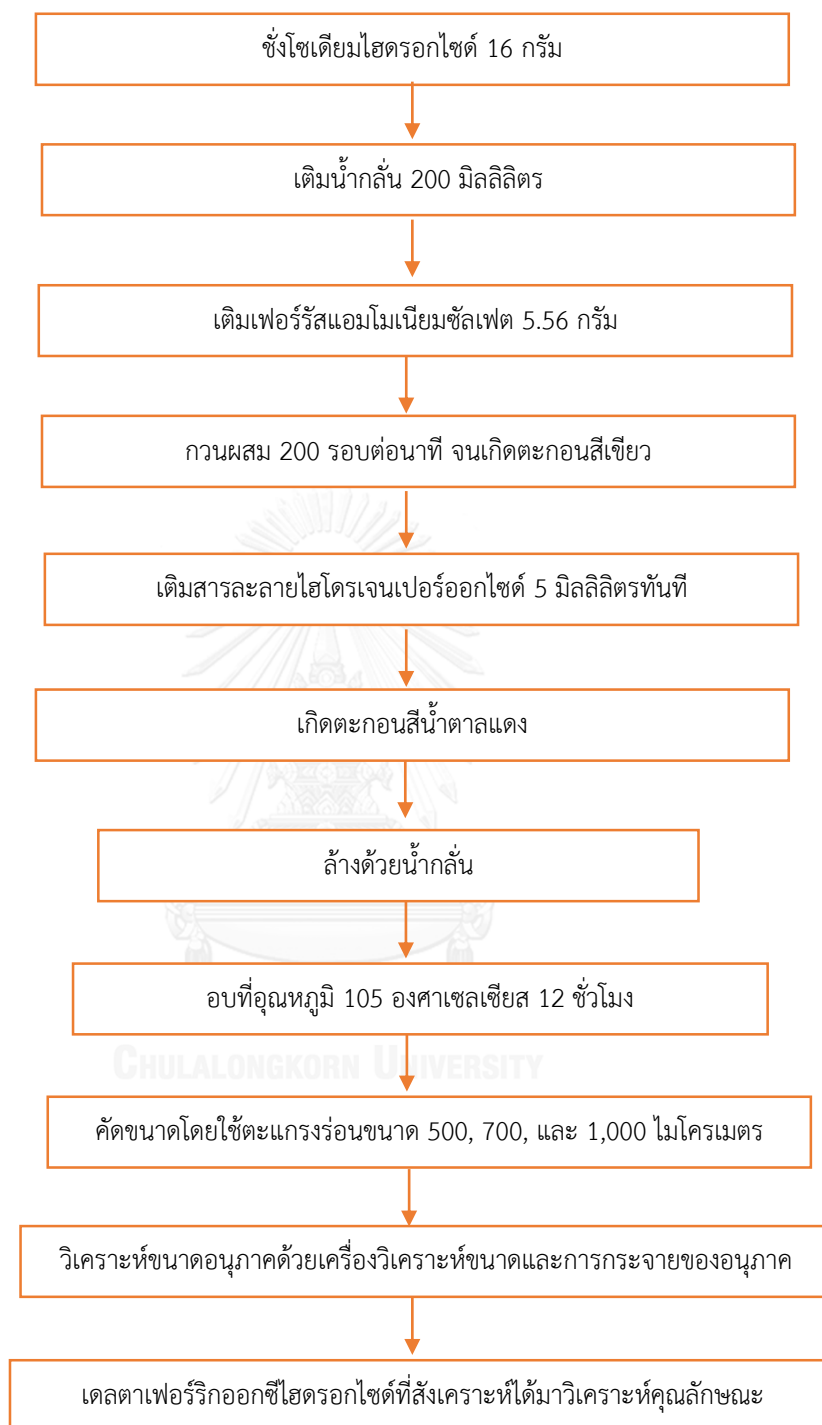
การทดลองที่ 3.4.2 เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นลิกนิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยนำน้ำประปา 1 ลิตรมาผสมกับอัลคาไลน์ลิกนิน 200 มิลลิกรัม จากนั้นทำการผสมให้เข้ากันที่อุณหภูมิห้อง

การทดลองที่ 3.4.3 สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

การทดลองที่ 3.4.3.1 การสังเคราะห์เตลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์

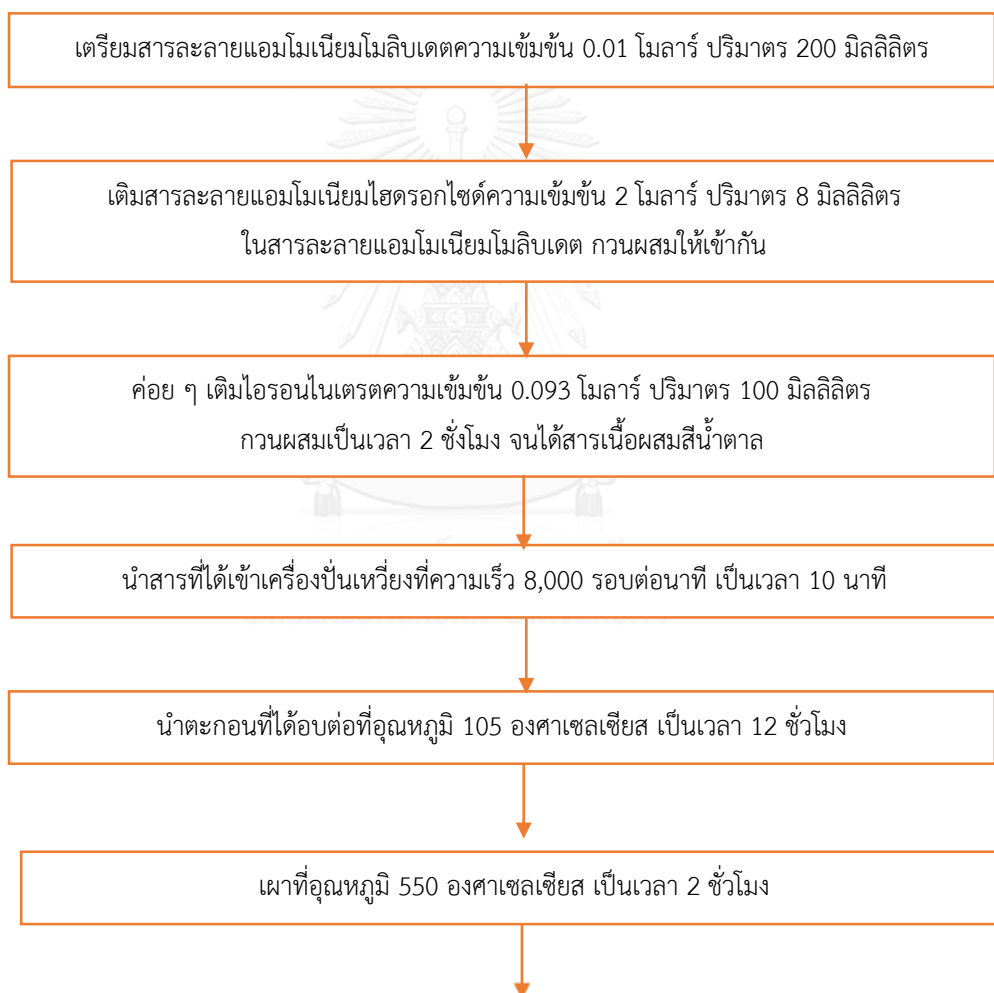
การสังเคราะห์เตลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์อ้างอิงจากวิธีของ Pinto et al. (2012) โดยเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นเติมสารเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต กวนผสมจนเกิดตะกอนสีเขียวแล้วจึงเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทันที กวนผสมจนเกิดตะกอนสีน้ำตาลแดง แสดงว่าเตลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นแล้ว สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3-1 และทำการคัดขนาดเตลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์โดยใช้ตะแกรงร่อนขนาด 500, 700, และ 1,000 ไมโครเมตร จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดและการกระจายของอนุภาค

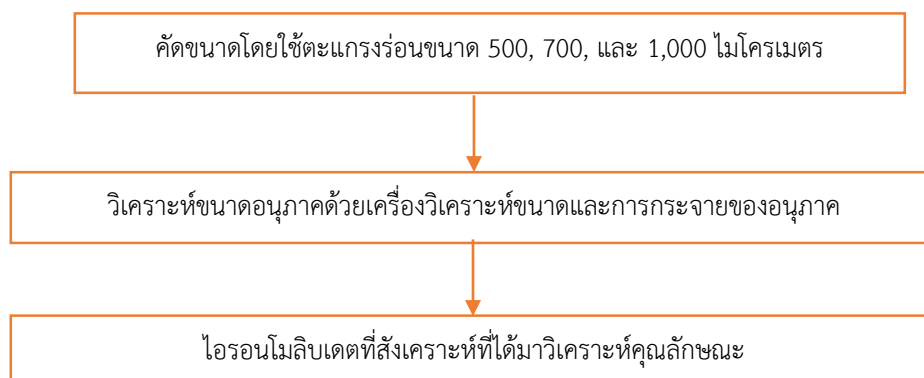


รูปที่ 3-1 แผนภาพการทดลองการสังเคราะห์เดลตาเพอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์

การทดลองที่ 3.4.3.2 การสังเคราะห์ไอออนโพลิเบต

การสังเคราะห์ไอออนโพลิเบตอ้างอิงจากวิธีของ Tian et al. (2011) โดยเตรียมสารละลายแอมโมเนียมโพลิเบตและเติมสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ กวนผสมให้เข้ากัน จากนั้นค่อย ๆ เติมไอออนไนเตรต กวนผสมจนได้สารเนื้อผสมสีน้ำตาล นำสารที่ได้เข้าเครื่องปั่นเหวี่ยง นำส่วนตะกอนที่ได้เข้าอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสและเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาสามารถสรุปได้ตั้งรูปที่ 3-2 และทำการตัดขนาดไอออนโพลิเบตโดยใช้ตะแกรงร่อนขนาด 500, 700, และ 1,000 ไมโครเมตร จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดและการกระจายของอนุภาค





รูปที่ 3-2 แผนภาพการทดลองการสังเคราะห์ไอรอนโมลิบเดต (ชนัญญา เพิ่มชาติ, 2556)

การทดลองที่ 3.4.4 ศึกษาคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาได้แก่ แมกนีไทต์ เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์ เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์ และไอรอนโมลิบเดต

การทดลองที่ 3.4.4.1 วิเคราะห์รูปร่างลักษณะด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron microscope; SEM) ทำการส่งวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลองที่ 3.4.4.2 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและปริมาณธาตุด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองแสงรังสีเอ็กซ์แบบ EDS (Energy Dispersive Spectroscopy; EDS) ทำการส่งวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลองที่ 4.4.4.3 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องมือเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray Diffractometer; XRD) ทำการส่งวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลองที่ 3.4.5 ศึกษาชุดการทดลองควบคุมในการกำจัดลิแกนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเฟนตัน โดยมีสารเฟอร์รัสซัลเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การทดลองที่ 3.4.5.1 การทดลองควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยา

นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นลิแกนด์ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร เกล่งในถังปฏิกิริยาแบบที่ละเท จากนั้นปรับพีเอชเริ่มต้นให้เท่ากับ 3 ด้วยกรดซัลฟิวริกหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ เติมเหล็กที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 40, 80, และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และเก็บตัวอย่างที่เวลา 1, 5, 10, 15, 30, และ 60 นาที เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

การทดลองที่ 3.4.5.2 การทดลองควบคุมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นลิกนิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร เทลงในถังปฏิกิริยาแบบที่ละเท จากนั้นปรับพีเอชเริ่มต้นให้เท่ากับ 3 ด้วยกรดซัลฟิวริกหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 100, 200, 250, 400, 800, และ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตรและเก็บตัวอย่างที่เวลา 1, 5, 10, 15, 30, และ 60 นาที เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

เนื่องจากปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่คงเหลือในน้ำตัวอย่างจะส่งผลกระทบต่อการวิเคราะห์ซีโอดี ทำให้ค่าซีโอดีเพิ่มขึ้นจากความเป็นจริง จึงได้สร้างกราฟมาตรฐานระหว่างปริมาณซีโอดีกับปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ ดังแสดงในภาคผนวก ก และสามารถคำนวณหาค่าซีโอดีที่เกิดขึ้นจริงได้ดังนี้

$$\text{ค่าซีโอดีที่เกิดขึ้นจริง (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = A - B$$

A คือ ค่าซีโอดีที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง (มิลลิกรัมต่อลิตร)

B คือ ค่าซีโอดีที่เกิดจากปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คงเหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\text{ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คงเหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)} \times 0.4377$$

การทดลองที่ 3.4.6 ศึกษาชุดการทดลองควบคุมในการกำจัดลิกนินในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือน โดยมีแมกนีไทต์ เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์ เดลตาเพอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์ และไอรอนโมลิบเดต เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การทดลองที่ 3.4.6.1 การทดลองควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยา

นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นลิกนิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร เทลงในถังปฏิกิริยาแบบที่ละเท จากนั้นปรับพีเอชเริ่มต้นให้เท่ากับ 3 หรือ 7 ด้วยกรดซัลฟิวริกหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ เติมเหล็กที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 5, 10, และ 15 กรัมต่อลิตร และเก็บตัวอย่างที่เวลา 30, 60, 90, และ 120 นาที เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

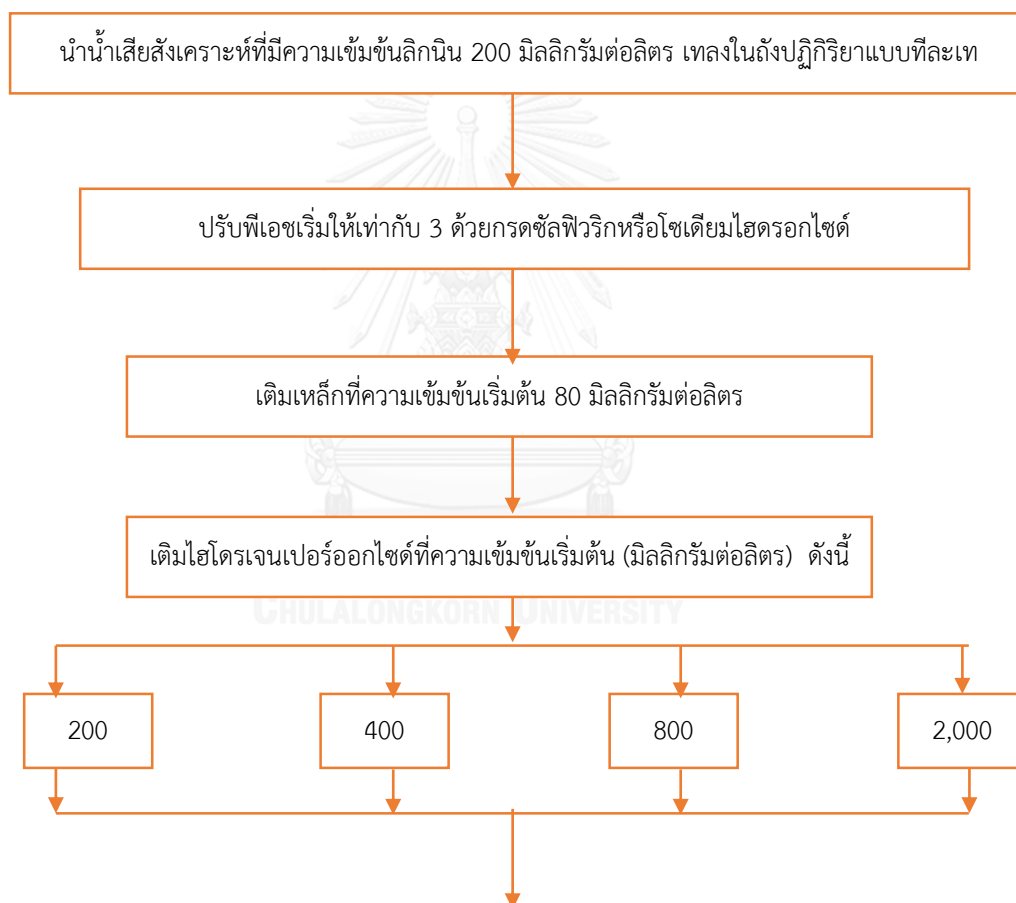
การทดลองที่ 3.4.6.2 การทดลองควบคุมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

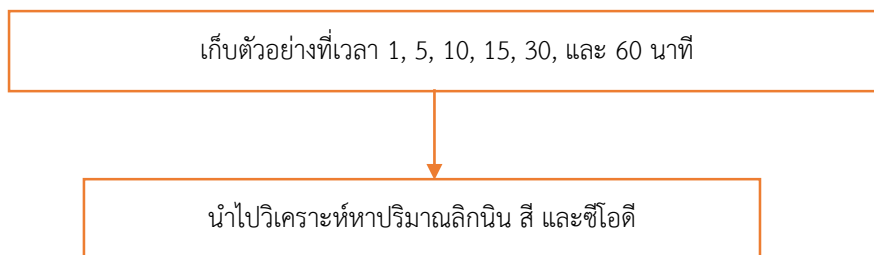
นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นลิกนิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร เทลงในถังปฏิกิริยาแบบที่ละเท จากนั้นปรับพีเอชเริ่มต้นให้เท่ากับ 3 หรือ 7 ด้วยกรดซัลฟิวริกหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 0, 100,

และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และเก็บตัวอย่างที่เวลา 30, 60, 90 และ 120 นาที เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไปและคำนวณหาค่าซีโอดีที่เกิดขึ้นจริง ดังแสดงในการทดลองที่ 3.4.5.2

การทดลองที่ 3.4.7 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดลิกนินในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการฟenton โดยมีสารเฟอร์รัสซัลเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

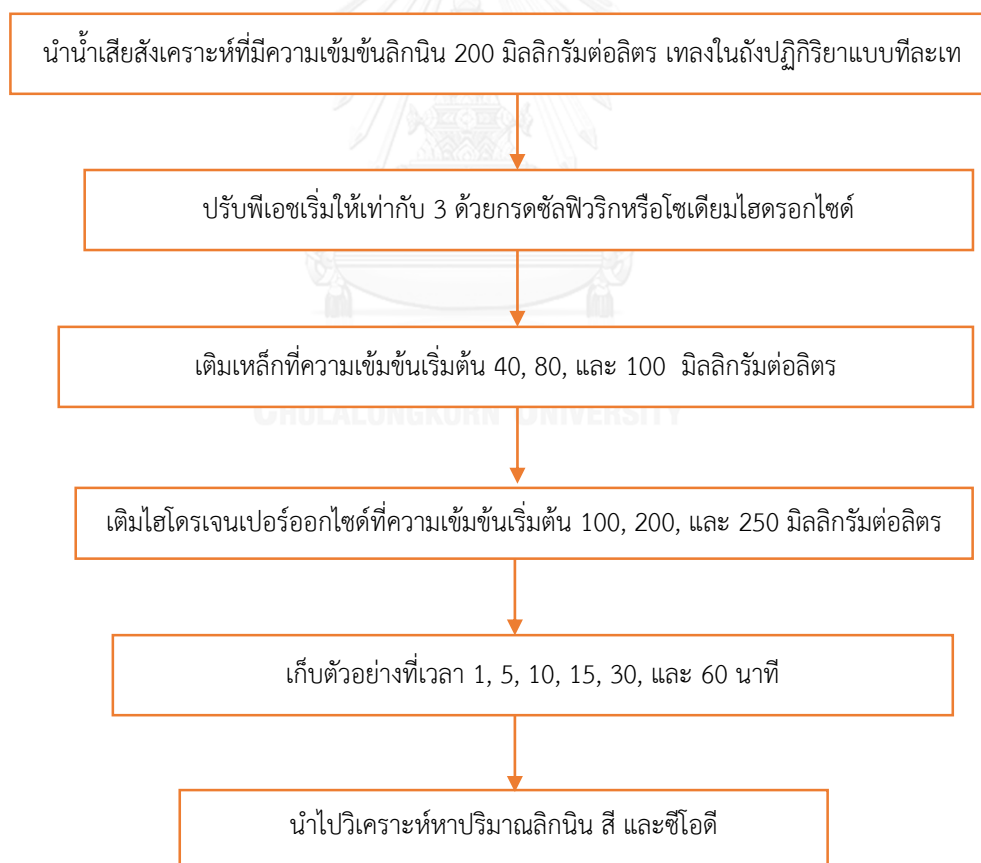
การทดลองที่ 3.4.7.1 ศึกษาสัดส่วนเหล็กต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 3-3





รูปที่ 3-3 แผนภาพศึกษาสัดส่วนเหล็กต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมในการกำจัดลิกนินในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเฟนตัน

การทดลองที่ 3.4.7.2 ทำการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็กที่เหมาะสม โดยเติมเหล็กที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 40, 80, และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นตามสัดส่วนเหล็กต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ คือ 1:2.5 ดังแสดงในรูปที่ 3-4

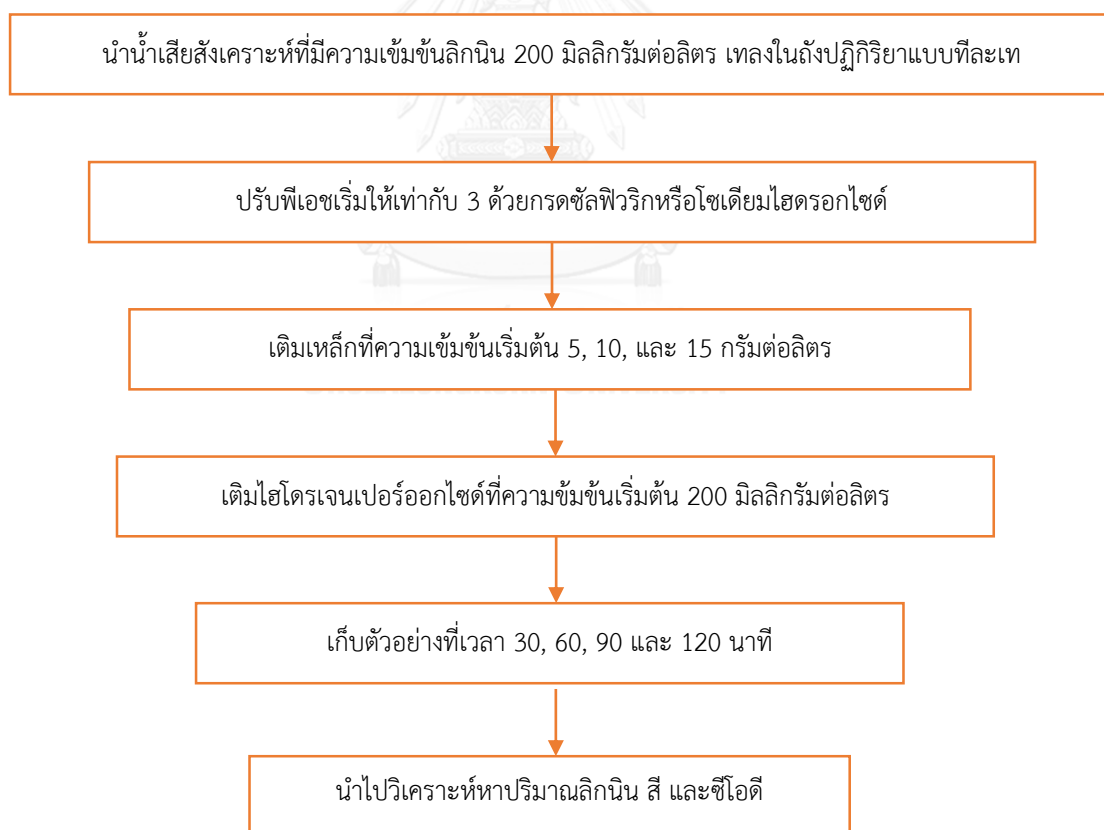


รูปที่ 3-4 แผนภาพศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดลิกนินในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเฟนตัน

การทดลองที่ 3.4.7.3 ศึกษาปริมาณสารเคมีที่คงเหลือในน้ำตัวอย่าง โดยดำเนินปฏิกิริยาเพนตันในสภาวะที่เหมาะสม ทำการวิเคราะห์ปริมาณเหล็กคงเหลือด้วยวิธีพีแวนโทรลีนและวิเคราะห์ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คงเหลือด้วยวิธีไอโอดิเมทริกดังแสดงในภาคผนวก ก ซึ่งทำการวิเคราะห์ทันทีเมื่อเก็บน้ำตัวอย่างหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา

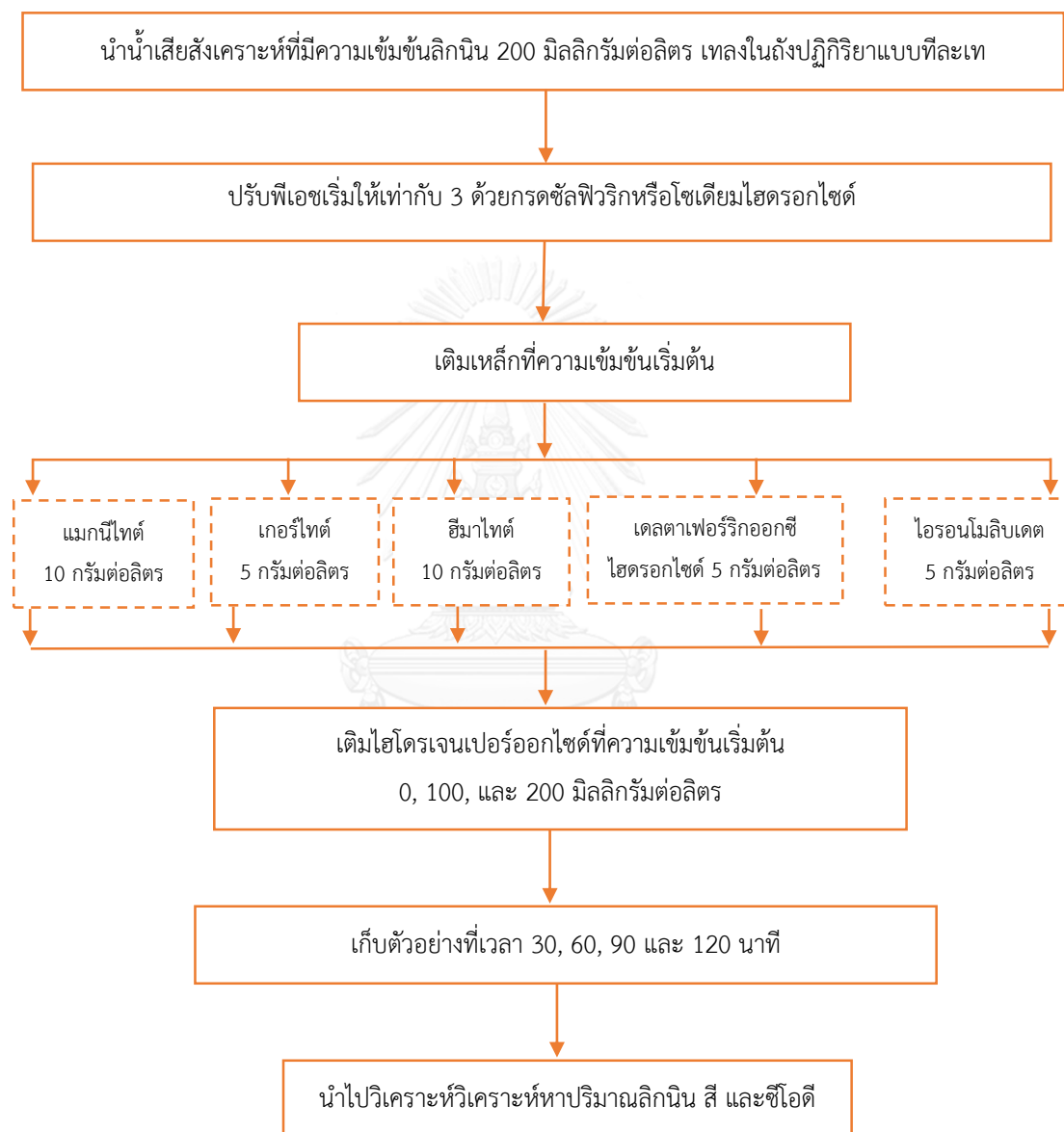
การทดลองที่ 3.4.8 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดลิกันนินในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเพนตันเสมือน โดยมีแมกนีไทด์ เกอร์ไทด์ ฮีมาไทด์ เดลตาเพอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์ และไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การทดลองที่ 3.4.8.1 ศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็กที่เหมาะสมในการดำเนินปฏิกิริยาเพนตันเสมือน โดยเติมเหล็กที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5, 10, และ 15 กรัมต่อลิตร และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 3-5



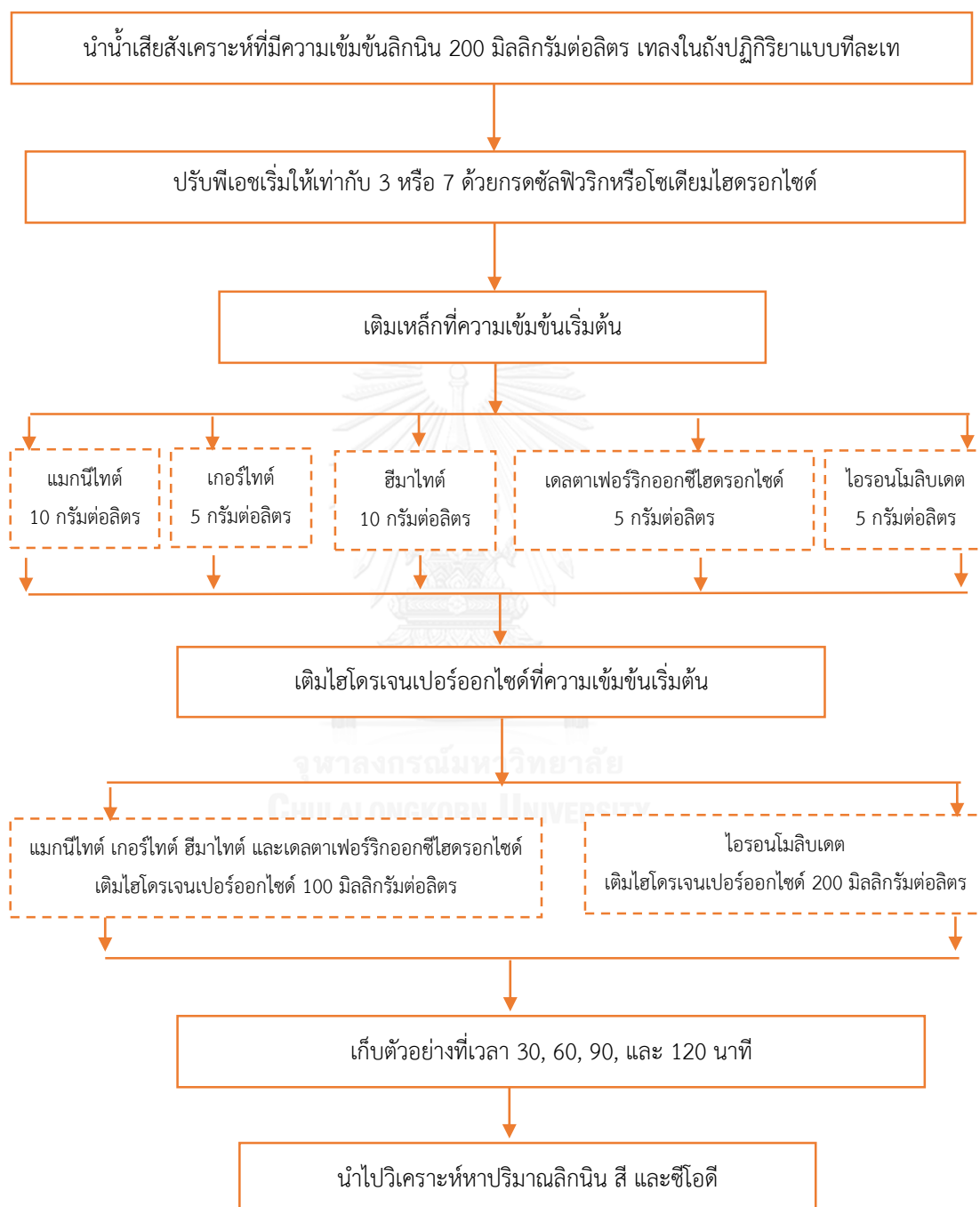
รูปที่ 3-5 แผนภาพศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดลิกันนินในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยกระบวนการเพนตันเสมือน

การทดลองที่ 3.4.8.2 ศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม โดยเติมเหล็กที่ความเข้มข้นที่ได้จากการทดลองที่ 3.4.8.1 และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 0, 100, และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 3-6



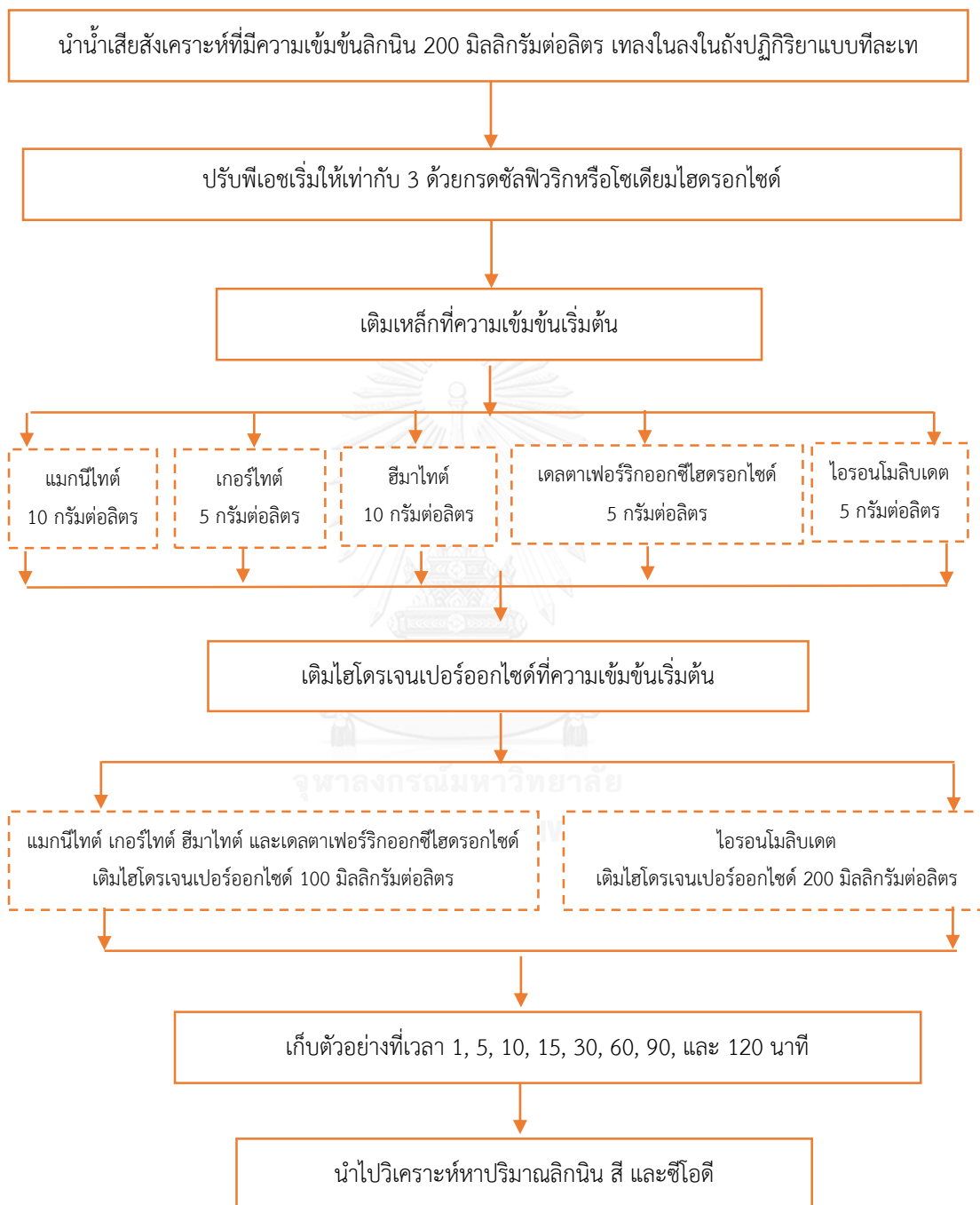
รูปที่ 3-6 แผนภาพศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม ในการกำจัดลิกนินในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยกระบวนการเพนตันเสมือน

การทดลองที่ 3.4.8.3 ทำการศึกษาพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม โดยปรับพีเอชเริ่มต้นที่ 3 หรือ 7 จากนั้นเติมเหล็กที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองที่ 3.4.8.1 และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองที่ 3.4.8.2 ดังแสดงในรูปที่ 3-7



รูปที่ 3-7 แผนภาพศึกษาพีเอชเริ่มต้นและเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดลิกนินในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยกระบวนการเฟ้นต้นเสมือน

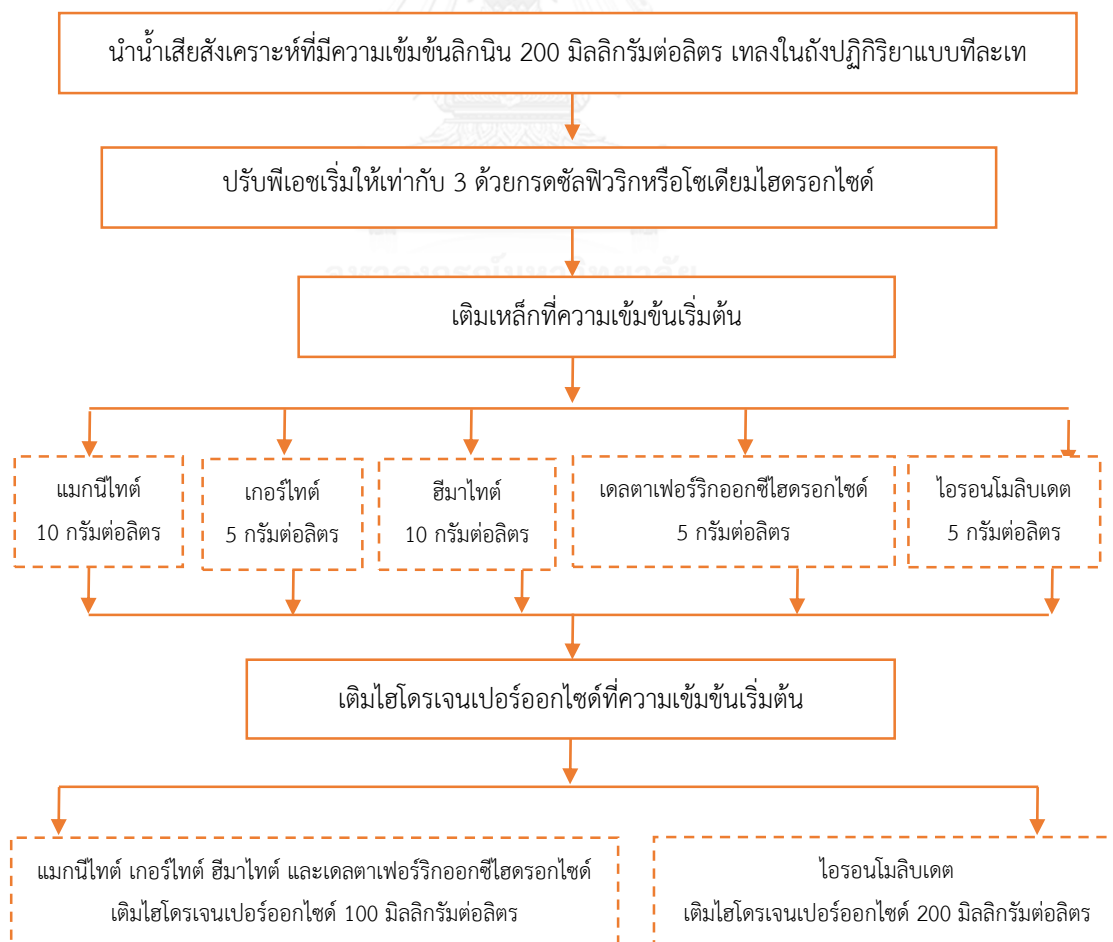
การทดลองที่ 3.4.8.4 ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการดำเนินปฏิกิริยา โดยปรับพีเอชเริ่มต้นที่ 3 จากนั้นเติมเหล็กที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองที่ 3.4.8.1 และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองที่ 3.4.8.2 ดังแสดงในรูปที่ 3-8

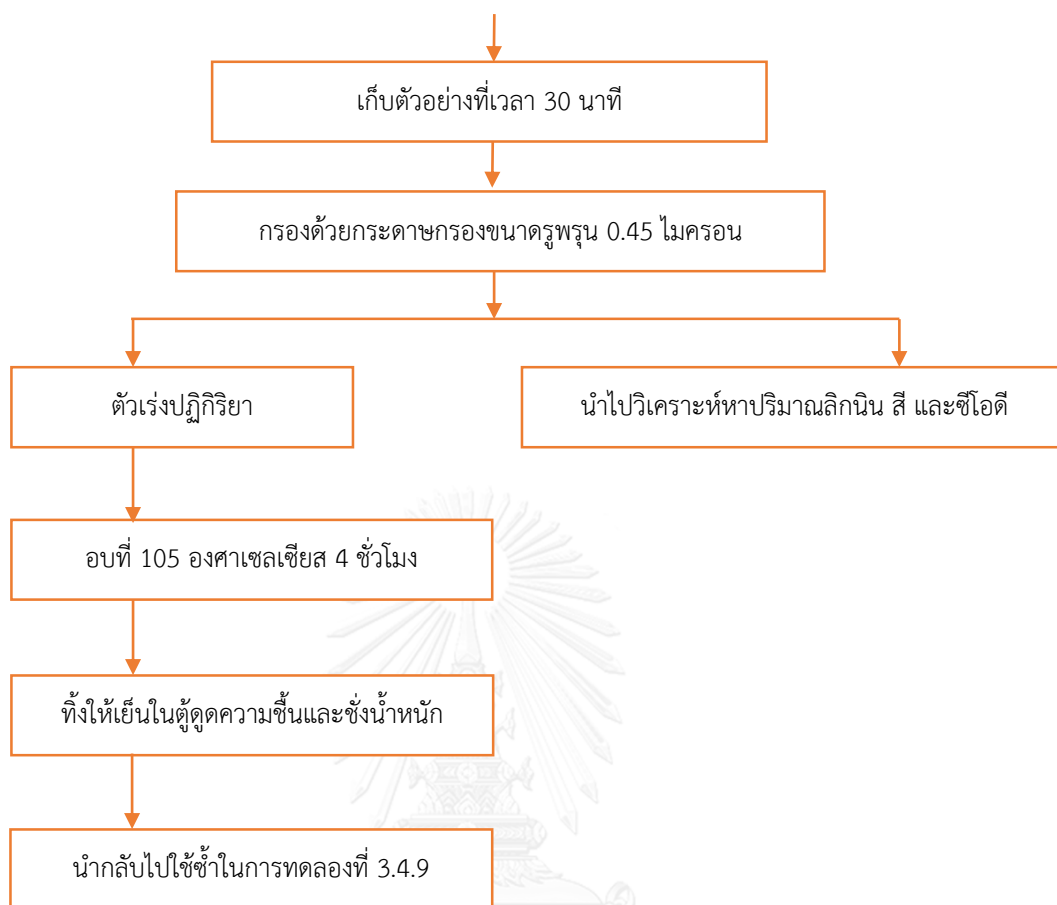


รูปที่ 3-8 แผนภาพศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดลิกนินในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยกระบวนการเฟ้นต้นเสมือน

การทดลองที่ 3.4.8.3 ศึกษาปริมาณสารเคมีที่คงเหลือในน้ำตัวอย่าง โดยดำเนินปฏิกิริยาเพนตันเสมือนในสภาวะที่เหมาะสม ทำการวิเคราะห์ปริมาณเหล็กคงเหลือด้วยวิธีพีแวนโนทรินและวิเคราะห์ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คงเหลือด้วยวิธีไอโอดิเมทริกดังแสดงในภาคผนวก ก ซึ่งทำการวิเคราะห์ทันทีเมื่อเก็บน้ำตัวอย่างหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา

การทดลองที่ 3.4.9.1 ศึกษาการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดลิกนินในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยกระบวนการเพนตันเสมือนที่สภาวะที่เหมาะสม โดยมีแมกนีไทด์ เกอร์ไทด์ ฮีมาไทด์ เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์ และไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการเก็บตัวอย่างที่เวลา 30 นาที โดยกรองแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากน้ำตัวอย่าง จากนั้นทำการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างต่อไป และนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่แยกออกมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในตู้ดูดความชื้นและชั่งน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นนำกลับมาใช้ซ้ำต่อไปจนไม่สามารถกำจัดลิกนิน สี และซีไอดีได้อีก และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำทิ้งจะต้องมีประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และ ซีไอดีอย่างน้อย 50% ดังแสดงในรูปที่ 3-9





รูปที่ 3-9 แผนภาพศึกษาการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดลิกนินในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือน

การทดลองที่ 3.4.9.2 คำนวณค่าใช้จ่ายในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีในกระบวนการเฟนตันแลเฟนตันเสมือน โดยทำการคำนวณค่าใช้จ่ายในส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาและสารเคมีที่ใช้ในการดำเนินปฏิกิริยา โดยอ้างอิงราคาจาก <https://www.alibaba.com>

การทดลองที่ 3.4.10 ศึกษาชุดการทดลองควบคุมในการกำจัดลิกนินในน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการเฟนตันที่สภาวะที่เหมาะสม โดยมีสารเฟอร์รัสซัลเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การทดลองที่ 3.4.10.1 การทดลองควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยา

นำน้ำเสียจริงเทลงในถังปฏิกิริยาแบบที่ละเท จากนั้นปรับพีเอชเริ่มต้นให้เท่ากับ 3 ด้วยกรดซัลฟิวริกหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ เติมเหล็กที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1.5 เท่าของ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร คือ 120 มิลลิกรัมต่อลิตร และเก็บตัวอย่างที่เวลา 30 นาที เพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณลิกนิน สี และซีโอดี

การทดลองที่ 3.4.10.2 การทดลองควบคุมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

นำน้ำเสียจริงเทลงในถังปฏิกิริยาแบบที่ละเท จากนั้นปรับพีเอชเริ่มต้นให้เท่ากับ 3 ด้วยกรดซัลฟิวริกหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1.5 เท่าของสัดส่วนหลักต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 1:2.5 โดยมีความเข้มข้นหลักเริ่มต้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร คือ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร และเก็บตัวอย่างที่เวลา 30 นาที เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไปปริมาณลิกนิน สี และซีไอดี

การทดลองที่ 3.4.11 ศึกษาชุดการทดลองควบคุมในการกำจัดลิกนินในน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการเฟ้นต้นเสมือนที่สภาวะที่เหมาะสม โดยมีแมกนีไทต์ เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์ เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์ และไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

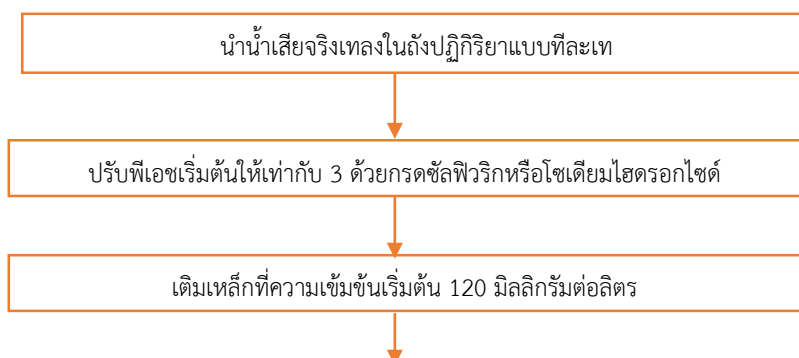
การทดลองที่ 3.4.11.1 การทดลองควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยา

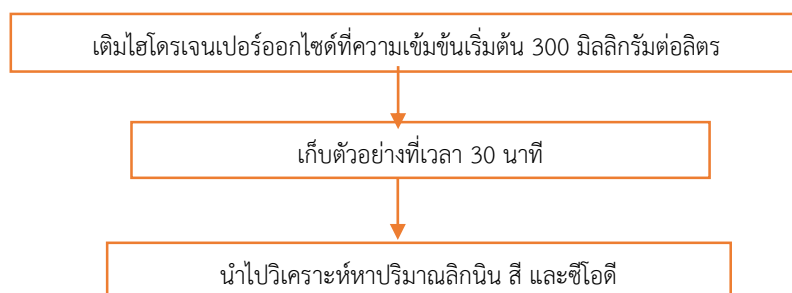
นำน้ำเสียจริงเทลงในถังปฏิกิริยาแบบที่ละเท จากนั้นปรับพีเอชเริ่มต้นให้เท่ากับ 3 ด้วยกรดซัลฟิวริกหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ เติมหลักที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1.5 เท่าของแมกนีไทต์และฮีมาไทต์ 10 กรัมต่อลิตร และเกอร์ไทต์ เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์ และไอรอนโมลิบเดต 5 กรัมต่อลิตร และเก็บตัวอย่างที่เวลา 30 นาที เพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณลิกนิน สี และซีไอดี

การทดลองที่ 3.4.11.2 การทดลองควบคุมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

นำน้ำเสียจริงเทลงในถังปฏิกิริยาแบบที่ละเท จากนั้นปรับพีเอชเริ่มต้นให้เท่ากับ 3 ด้วยกรดซัลฟิวริกหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 0, 150, และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตรและเก็บตัวอย่างที่เวลาตามเวลาที่เวลา 30 เพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณลิกนิน สี และซีไอดี

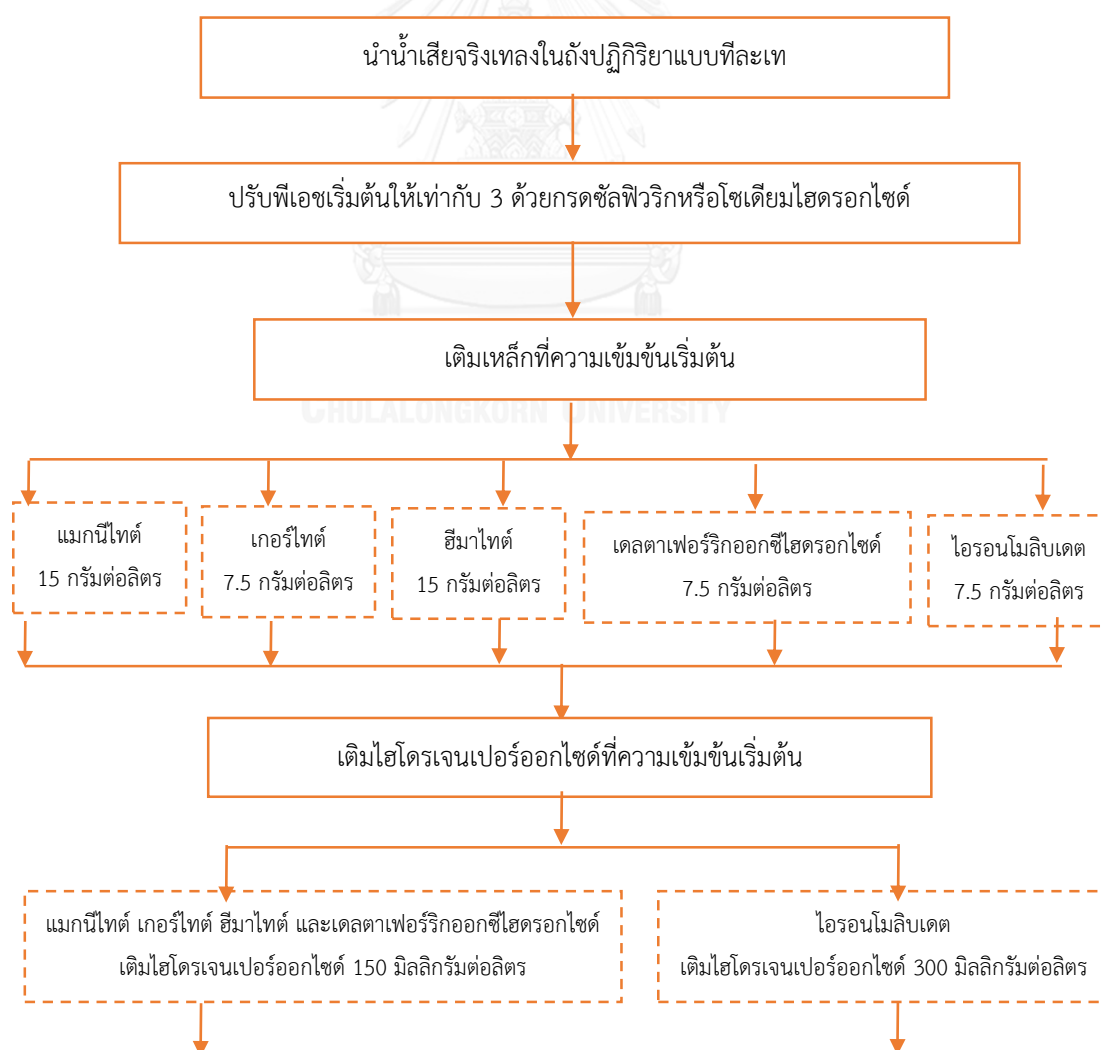
การทดลองที่ 3.4.12 ศึกษาการกำจัดลิกนินในน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการเฟ้นต้นที่สภาวะที่เหมาะสม โดยมีสารเฟอร์รัสซัลเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 3-10

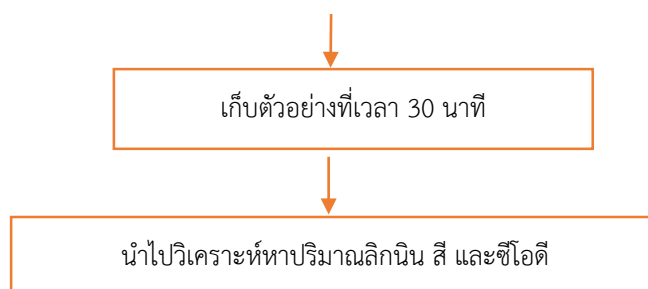




รูปที่ 3-10 แผนภาพศึกษาการกำจัดลิกนินในน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการเฟนตัน

การทดลองที่ 3.4.12 ศึกษาการกำจัดลิกนินในน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือนที่สภาวะที่เหมาะสม โดยมีแมกนีไทต์ เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์ เดลตาเพอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์ และไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 3-11





รูปที่ 3-11 แผนภาพศึกษาการกำจัดลิกนินในน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือน



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการกำจัดลิกนินในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษด้วยกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือนโดยเดินระบบแบบทีละเท ซึ่งทำการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนินโดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ พีเอช ความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็ก ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สัดส่วนของเหล็กต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเวลาในการดำเนินปฏิกิริยา โดยในกระบวนการเฟนตันได้มีการเลือกใช้เฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และในกระบวนการเฟนตันเสมือนได้มีการเลือกใช้แมกนีไทต์ (Fe_3O_4) เกอร์ไทต์ ($\alpha\text{-FeOOH}$) ฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์ ($\delta\text{-FeOOH}$) และไอรอนโมลิบเดต ($\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ได้ศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันเสมือนกลับมาใช้ซ้ำอีกด้วย

4.1 ศึกษาสมบัติทั่วไปของน้ำเสีย

ในงานวิจัยนี้ได้รับน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษในจังหวัดราชบุรี เดือนเมษายน 2559 ซึ่งในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษมีส่วนประกอบอื่น ๆ เช่น เศษเนื้อไม้และสารเคมีต่าง ๆ นอกจากลิกนินและอนุพันธ์ของลิกนิน จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาสมบัติทั่วไปของตัวอย่างน้ำเสียจริงซึ่งได้ผล ดังแสดงในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ลักษณะของน้ำเสีย

สมบัติ	น้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง
พีเอช	7.5 ± 0.5	$5.5 - 9.0^*$
ซีโอดี (มก./ล.)	358 ± 50	$\leq 120^*$
ลิกนิน (มก./ล.)	277 ± 50	-
สี (หน่วยสี)	$3,050 \pm 200$ (หน่วยแพลทินัม – โคบอลต์) $3,177 \pm 208$ (หน่วย ADMI)	$\leq 300^*$ (ADMINI)
ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	200 ± 20	≤ 50

* ที่มา ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม ลงวันที่ 6 มิถุนายน 2559

ตัวอย่างน้ำเสียมาจากขั้นตอนการผลิตเยื่อในอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ ซึ่งมีการสลายตัวขององค์ประกอบในเนื้อไม้ด้วยกระบวนการทางเคมีภายใต้แรงดันและความร้อน โดยส่วนประกอบในน้ำเสียส่วนใหญ่คือลิกนินและอนุพันธ์ของลิกนิน ซึ่งสามารถนำกลับเข้าสู่กระบวนการนำสารเคมีกลับคืนเพื่อนำสารเคมีซึ่งเป็นตัวทำละลายกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตเยื่ออีกครั้ง และสามารถเปลี่ยนรูปลิกนินและอนุพันธ์ของลิกนินมาเป็นพลังงานเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตเยื่อต่อไป แต่พบว่าลิกนินคงเหลือในน้ำเสียบางส่วนซึ่งมีความเข้มข้นต่ำไม่เหมาะสมต่อการแปรรูปเป็นพลังงาน และก่อให้เกิดน้ำเสียที่มีสี หากปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศนั้น ๆ ได้ และเพื่อให้น้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งตามที่กฎหมายกำหนดจึงจำเป็นต้องกำจัดลิกนินในน้ำเสียต่อไป จากการวิเคราะห์ลักษณะของตัวอย่างน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษพบว่าตัวอย่างน้ำเสียมีลักษณะเกินกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่กฎหมายกำหนดดังนี้ โดยมีลิกนินประมาณ 277 ± 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งทำให้น้ำเสียมีสีประมาณ $3,177 \pm 208$ หน่วย ADMI ซีไอดี 358 ± 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และของแข็งแขวนลอย 200 ± 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4-1 โดยน้ำเสียถูกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อลดกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีก่อนนำมาวิเคราะห์และทำการทดลองต่อไป



รูปที่ 4-1 ลักษณะของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ

4.2 การศึกษาคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา


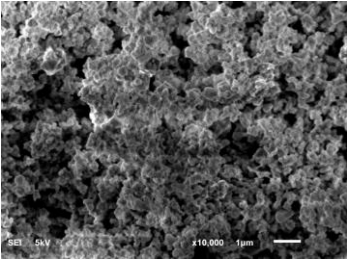

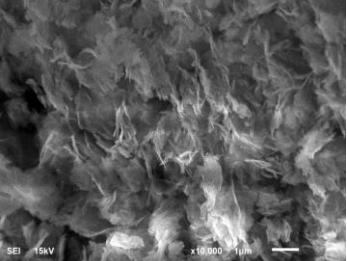

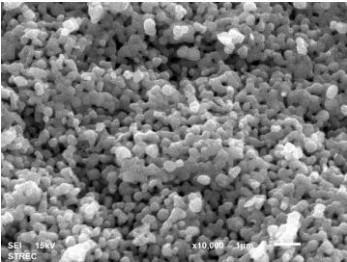
ในงานวิจัยนี้ได้นำตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งใช้ในการกำจัดลิกนินด้วยกระบวนการเพนตันเสมือน ทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพต่าง ๆ โดยส่งวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.1 ผลการวิเคราะห์รูปร่างลักษณะด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ ในกระบวนการเฟ้นต้นเสมือนที่กำลังขยาย 10,000 เท่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope with EDS; SEM-EDS) ยี่ห้อ JCOL รุ่น JSM-600 และ Link ISIS Series 300 ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 แสดงถึงรูปร่างลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา

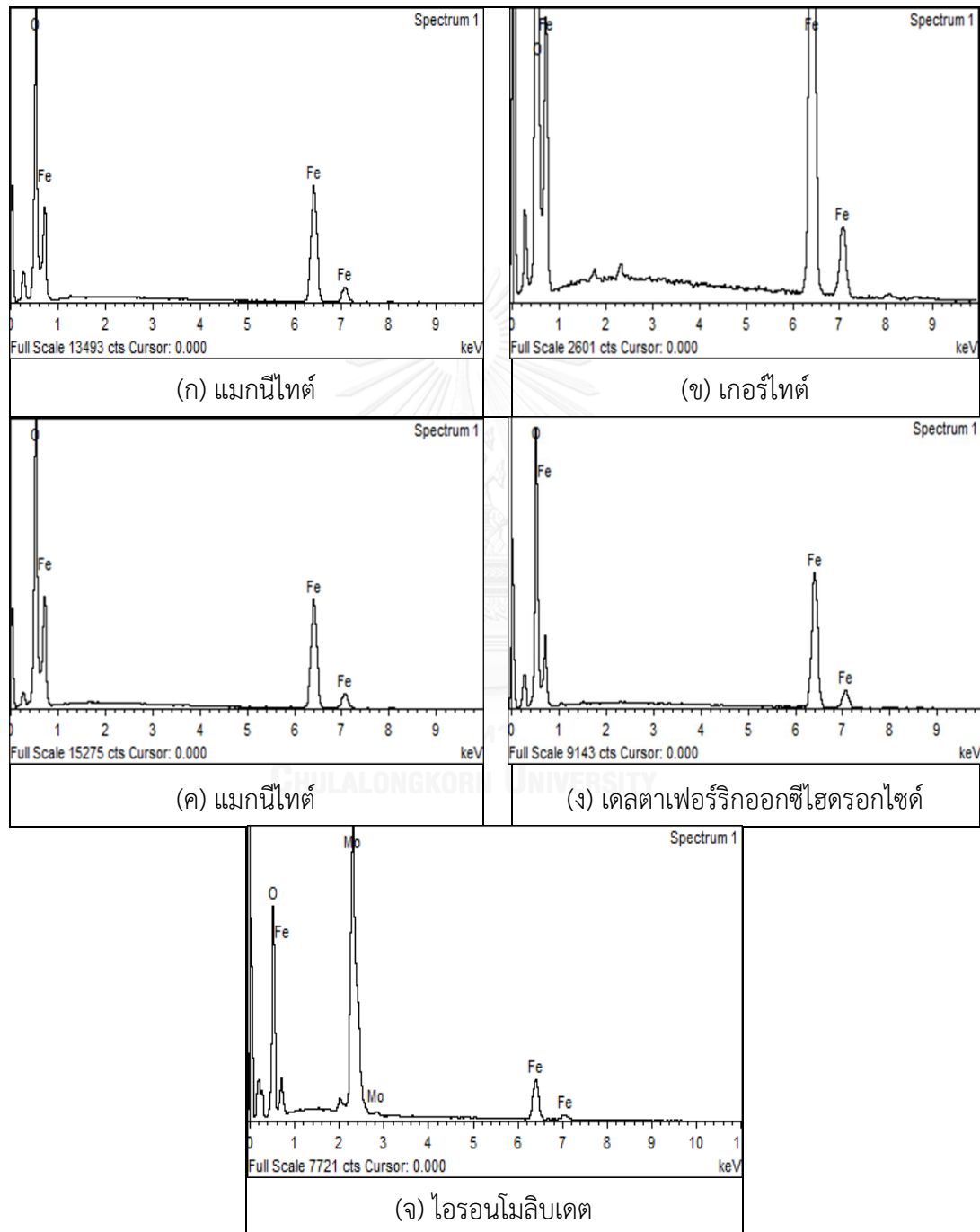
ตัวเร่งปฏิกิริยา	ภาพถ่ายจากกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า	ผลการทดลอง
1. แมกนีไทต์ (Fe_3O_4) 		<ul style="list-style-type: none"> – มีลักษณะเป็นสารสีดำ – มีลักษณะเป็นเม็ดกลม และมีการจัดเรียงตัวซ้อนทับกัน – ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 5 ไมโครเมตร (Sigma Aldrich) – มีลักษณะสอดคล้องกับ Suppiah and Abd Hamid (2016)
2. เกอร์ไทต์ (α - FeOOH) 		<ul style="list-style-type: none"> – มีลักษณะเป็นสารสีเหลือง – มีลักษณะเป็นแท่งเกล็ด ๆ เหมือนเข็มและการจัดเรียงตัวซ้อนทับกัน – ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 5 ไมโครเมตร (Sigma Aldrich) – มีลักษณะสอดคล้องกับ Gilbert et al. (2008)

<p>3. ฮีมาไทต์ (Fe_2O_3)</p> 		<ul style="list-style-type: none"> – ลักษณะเป็นสารสีแดงเลือดหมู – มีลักษณะเป็นเม็ดกลม ๆ และมีการจัดเรียงตัวทับซ้อนกันอย่างหนาแน่น – ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 5 ไมโครเมตร (Sigma Aldrich) – มีลักษณะสอดคล้องกับ Wang et al. (2016)
<p>4. เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์ ($\delta\text{-FeOOH}$)</p> 		<ul style="list-style-type: none"> – ลักษณะเป็นสารสีแดงเลือดหมู – มีลักษณะเป็นแผ่นเกล็ด ๆ และมีการจัดเรียงตัวทับซ้อนกัน – ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 396 ไมโครเมตร (d_{50}) – มีลักษณะสอดคล้องกับ Carlson. L. and U. (1980)
<p>5. ไอรอนโมลิบเดต ($\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$)</p> 		<ul style="list-style-type: none"> – มีลักษณะเป็นสารสีเหลืองอมเขียว – มีลักษณะเป็นเม็ดกลม ๆ และมีการจัดเรียงตัวทับซ้อนกัน โดยมีลักษณะพื้นผิวขรุขระ – ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 416 ไมโครเมตร (d_{50}) – มีลักษณะสอดคล้องกับ (กิตติพงษ์ ไพรศรี (2554), ชนัญญา เพิ่มชาติ (2556))

4.2.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค Energy

Dispersive Spectroscopy (EDS)

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ ในกระบวนการเฟ้นต้นเสมือนด้วยเทคนิค Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) ดังแสดงในรูปที่ 4-2 และตารางที่ 4-3 – 4-4



รูปที่ 4-2 เส้นสเปกตรัม EDS ของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ 4-3 องค์ประกอบของประกอบธาตุประเภทเหล็กออกไซด์

ตัวเร่งปฏิกิริยา	องค์ประกอบของธาตุ (%)		สัดส่วนขององค์ประกอบของธาตุ (Fe:O)	
	Fe	O	จากผลวิเคราะห์	ตามมวลโมเลกุล
แมกนีไทต์	67.30	32.70	2.1:1	2.6:1
เกอร์ไทต์	67.33	32.67	2.0:1	1.75:1
ฮีมาไทต์	68.45	31.55	2.3:1	2.33:1
เทลตาเฟอร์ริกออกไซด์	69.47	30.53	2.3:1	2.33:1

ตารางที่ 4-4 องค์ประกอบของประกอบธาตุของไอรอนโมลิบเดต

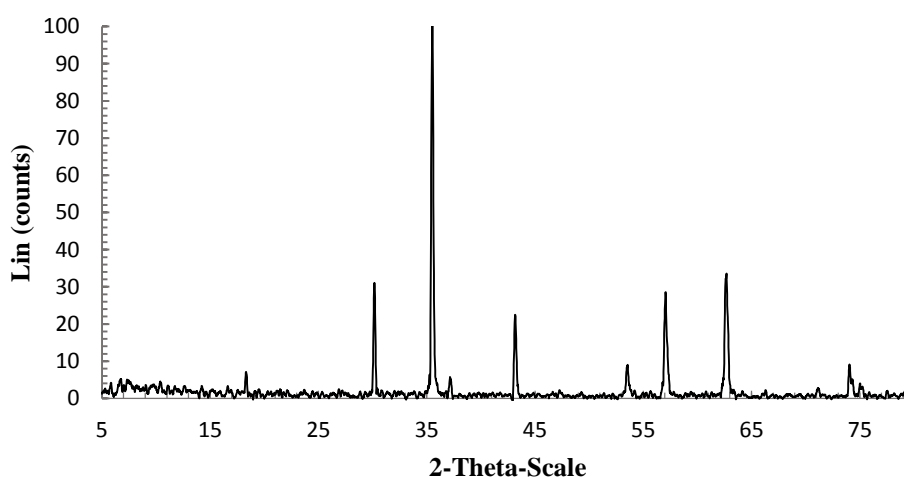
ตัวเร่งปฏิกิริยา	องค์ประกอบของธาตุ (%)			สัดส่วนขององค์ประกอบของธาตุ (Fe:O:Mo)	
	Fe	O	Mo	จากผลวิเคราะห์	ตามมวลโมเลกุล
ไอรอนโมลิบเดต	32.97	18.63	48.34	1:0.6:1.5	1:0.6:1.45

4.2.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ ด้วยเครื่องวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD)

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ ในกระบวนการเฟ้นต้นเสมือนด้วยเครื่องวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD) รุ่น Model D8 advance ของบริษัท Bruker AXS โดยใช้หลอดรังสี $\text{CuK}\alpha$ ความยาวคลื่น 1.5406 ความต่างศักย์ไฟฟ้า 40 กิโลวัตต์ และกระแสไฟฟ้า 30 มิลลิแอมแปร์ และนำผลการทดลองเปรียบเทียบ patterns อ้างอิงโดยจาก JCPDS พบว่ามีลักษณะต่าง ๆ ดังนี้

- แมกนีไทต์ (Fe_3O_4)

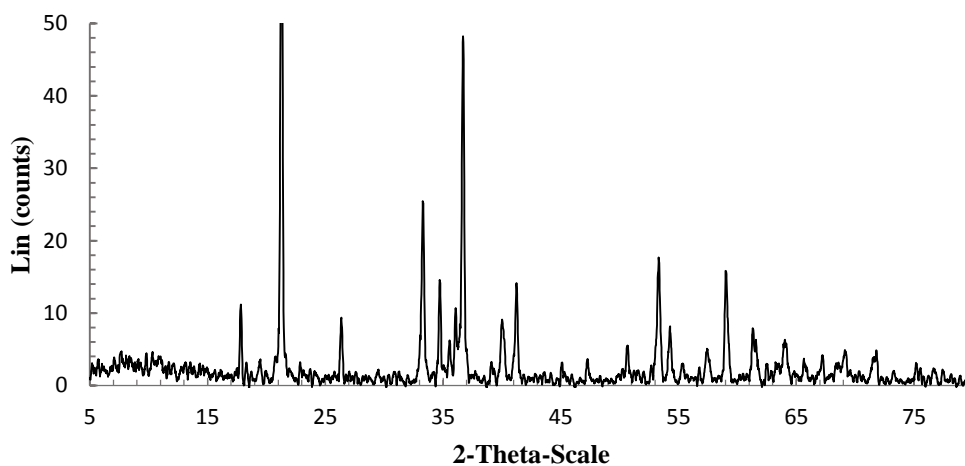
ผลการวิเคราะห์แมกนีไทต์ด้วยเครื่อง XRD ดังแสดงในรูปที่ 4-3 พบว่าผลวิเคราะห์ตรงกับ JCPDS No.019-0629 แมกนีไทต์ (Magnetite, Fe_3O_4) ซึ่งสอดคล้องกับ Rusianto. T. et al. (2015) โดยแมกนีไทต์มีโครงสร้างผลึกแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Face-centered cubic) โดยที่ 2θ ที่ 18.270° 30.095° 35.423° 37.053° 43.053° 53.392° 56.944° 62.516° 65.745° 70.926° 73.950° 74.962° 78.931° 86.704° 89.620° 94.428° 102.228° 105.228° 105.222° 106.209° 110.273° 118.741° 122.124° 128.038° 138.659° 143.244° และ 144.857° ในระนาบ (1 1 1) (2 2 1) (3 1 1) (2 2 2) (4 0 0) (4 2 2) (5 1 1) (4 4 0) (5 3 1) (6 2 0) (5 3 3) (6 2 2) (4 4 4) (6 4 2) (7 3 1) (8 0 0) (6 6 0) (7 5 1) (6 6 2) (8 4 0) (6 6 4) (9 3 1) (8 4 4) (10 2 0) (9 5 1) และ (10 2 2)



รูปที่ 4-3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแมกนีไทต์ด้วย XRD

- เกอร์ไทต์ (α -FeOOH)

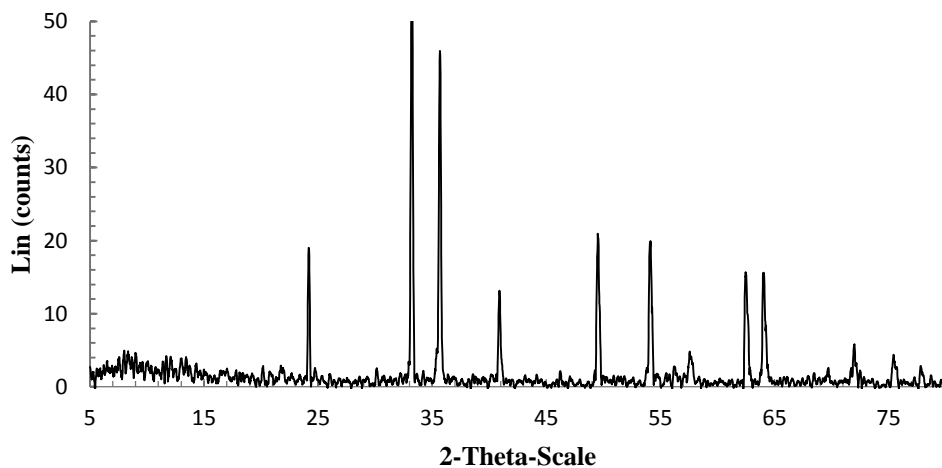
ผลการวิเคราะห์เกอร์ไทต์ด้วยเครื่อง XRD ดังแสดงในรูปที่ 4-4 พบว่าผลการวิเคราะห์ตรงกับ JCPDS No.029-0713 เกอร์ไทต์ (Goethite, α -FeOOH) ซึ่งสอดคล้องกับ YooJin et al. (2013) โดยเกอร์ไทต์มีโครงสร้างผลึกแบบออร์ทอโรมบิก (Orthorhombic) โดยที่ 2θ ที่ 17.796° 21.223° 26.323° 33.242° 34.701° 35.496° 36.056° 36.650° 39.081° 39.985° 41.187° 43.276° 45.045° 47.306° 50.614° 51.508° 53.238° 54.212° 55.321° 57.413° 59.025° 59.121° 61.386° 63.324° 63.976° 65.667° 67.111° 68.459° 69.057° 69.826° 71.572° 73.191° 74.997° 76.539° 79.918° 84.053° 84.605° และ 86.302° ในระนาบ (0 2 1) (1 1 0) (1 2 0) (1 3 0) (0 2 1) (1 0 1) (0 4 0) (1 1 1) (2 0 0) (1 2 1) (1 4 0) (2 2 0) (1 3 1) (0 4 1) (2 1 1) (1 4 1) (2 2 1) (2 4 0) (0 6 0) (2 3 1) (1 5 1) (1 6 0) (0 0 2) (3 2 0) (0 6 1) (1 1 2) (3 3 0) (3 0 0) (1 7 0) (2 6 0) (1 3 2) (0 4 2) (3 3 1) (1 4 2) (3 4 1) (0 8 1) (4 1 0) และ (2 4 2)



รูปที่ 4-4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเกอร์ไทต์ด้วย XRD

- ฮีมาไทต์ (Fe₂O₃)

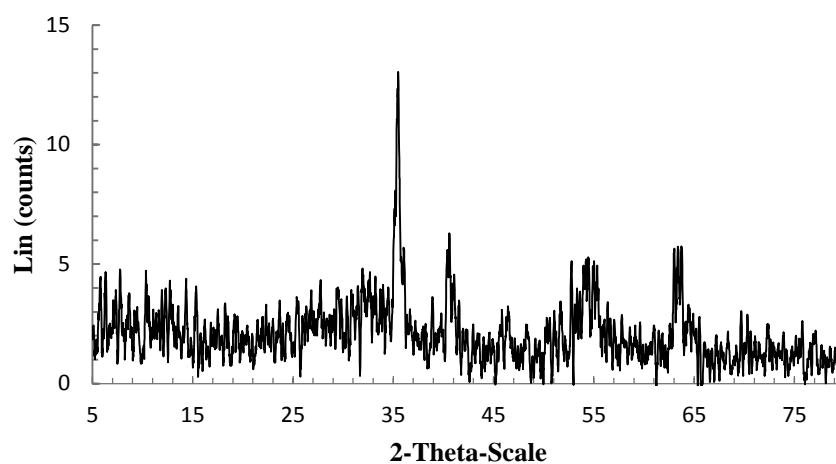
ผลการวิเคราะห์ฮีมาไทต์ด้วยเครื่อง XRD ดังแสดงในรูปที่ 4-5 พบว่าผลการวิเคราะห์ตรงกับ JCPDS No. 033-0664 ฮีมาไทต์ (Hematite, Fe₂O₃) ซึ่งสอดคล้องกับ Fu et al. (2014) โดยฮีมาไทต์มีโครงสร้างผลึกแบบรอมโบอีดรัล (Rhombohedral) โดยที่ 2θ ที่ 3.684° 2.700° 2.519° 2.292° 2.207° 2.077° 1.840° 1.694° 1.636° 1.603° 1.599° 1.485° 1.453° 1.413° 1.349° 1.311° 1.306° 1.259° 1.227° 1.214° 1.189° 1.163° 1.141° 1.103° 1.076° 1.055° 1.042° 1.039° 0.989° 0.971° 0.960° 0.958° 0.951° 0.931° 0.920° 0.908° 0.899° 0.895° 0.878° 0.864° 0.854° 0.843° 0.839° 0.808° และ 0.801° ในระนาบ (0 1 2) (1 0 4) (1 1 0) (0 0 6) (1 1 3) (2 0 2) (0 2 4) (1 1 6) (2 1 1) (1 2 2) (0 1 8) (2 1 4) (3 0 0) (1 2 5) (2 0 8) (1 0 10) (1 1 9) (2 2 0) (3 0 6) (2 2 3) (1 2 8) (0 2 10) (1 1 12) (4 0 4) (3 1 8) (2 2 9) (3 2 4) (0 1 14) (4 1 0) (4 1 3) (0 4 8) (1 3 10) (3 0 12) (2 0 14) (4 1 6) (2 3 8) (4 1 10) (1 2 14) (3 3 0) (4 1 10) และ (2 4 4)



รูปที่ 4-5 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฮีมาไทต์ด้วย XRD

- เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์ (δ -FeOOH)

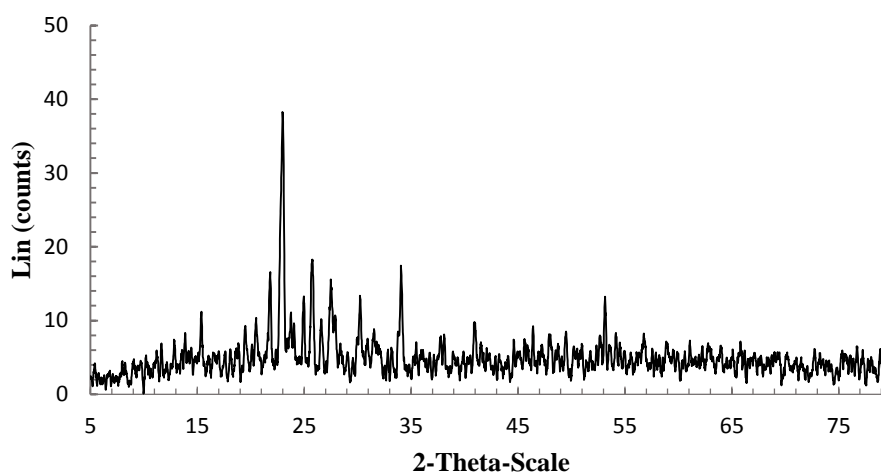
ผลการวิเคราะห์เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์ด้วยเครื่อง XRD ดังแสดงในรูปที่ 4-6 พบว่าผลการวิเคราะห์ตรงกับ JCPDS No. 013-0518 เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์ (Delta-FeOOH, δ -FeOOH) ซึ่งสอดคล้องกับ Pinto et al. (2012) โดยเดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) โดยที่ 2θ ที่ 35.236° 40.491° 54.407° 63.156° 74.610° และ 78.077° ในระนาบ (1 0 0) (1 0 1) (1 0 2) (1 1 0) (2 0 0) และ (2 0 1)



รูปที่ 4-6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์ด้วย XRD

- ไอรอนโมลิบเดต ($\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$)

ผลการวิเคราะห์ไอรอนโมลิบเดตด้วยเครื่อง XRD ดังแสดงในรูปที่ 4-7 พบว่าผลวิเคราะห์ตรง กับ JCPDS No. 035-0183 ไอรอนโมลิบเดต (Iron Molybdate, $\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$) ซึ่งสอดคล้องกับ (Tian et al. (2011), ชาญญา เพิ่มชาติ (2556)) มีโครงสร้างผลึกแบบมอโนคลินิก (Monoclinic) โดยที่ 2θ ที่ 13.804° 15.291° 19.425° 20.414° 21.755° 22.831° 23.714° 24.442° 24.900° 25.689° 26.587° 27.490° 27.831° 28.420° 30.128° 30.867° 31.437° 33.789° 34.065° 35.235° 35.914° 36.364° 36.415° 37.546° 38.215° 38.526° 40.192° 40.916° 41.291° 41.476° 42.267° 43.217° 44.667° 44.917° 45.118° 46.920° 47.918° 48.128° 48.569° 49.320° 50.871° 51.851° และ 52.883° ในระนาบ (2 0 0) (0 1 2) (1 1 2) (1 2 0) (-2 1 4) (0 2 2) (-1 -1 4) (2 2 0) (-1 1 4) (2 2 0) (-1 2 3) (2 1 2) (1 2 2) (-1 0 5) (-4 1 1) (-2 2 4) (4 0 0) (-5 0 3) (2 2 2) (0 2 4) (0 3 2) (1 3 2) (-1 1 6) (-2 3 4) (-5 2 5) (-6 0 2) (4 0 2) (-6 0 2) (-1 2 6) (3 3 1) (5 1 1) (1 0 6) (-6 2 6) (4 0 3) (0 3 5) (-6 1 8) (4 0 3) (0 3 5) (-6 1 8) (5 1 2) (2 2 5) (-3 2 8) (-1 0 8) (-5 3 7) (-2 3 7) (-7 2 2) (4 1 4) (-7 0 9) (4 4 0) (-7 1 9) (-7 3 6) (-1 5 3) และ (-3 5 3)



รูปที่ 4-7 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของไอรอนโมลิบเดตด้วย XRD

จากการศึกษาคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ นั้นอาจจะสรุปได้ดังต่อไปนี้

- แมกนีไทต์

จากการศึกษาคุณลักษณะของแมกนีไทต์ โดยวิเคราะห์รูปร่างลักษณะสัณฐานนั้นมีลักษณะเป็นเม็ดกลม เรียงซ้อนทับกัน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 5 ไมโครเมตร (Sigma Aldrich) และเมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีพบว่าสัดส่วนของปริมาณเหล็กต่อออกซิเจนเท่ากับ 2.1:1 ซึ่งสอดคล้องกับสัดส่วนมวลโมเลกุลของแมกนีไทต์ และผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกพบว่าตรงกับ JCPDS No.019-0629 ซึ่งสอดคล้องกับ Rusianto. T. et al. (2015) และมีโครงสร้างผลึกแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Face-centered cubic) (Suppiah and Abd Hamid, 2016)

- เกอร์ไทต์

จากการศึกษาคุณลักษณะของเกอร์ไทต์ โดยวิเคราะห์รูปร่างลักษณะสัณฐานนั้นมีลักษณะเป็นแท่งเกล็ด ๆ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 5 ไมโครเมตร (Sigma Aldrich) และเมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีพบว่าสัดส่วนของปริมาณเหล็กต่อออกซิเจนเท่ากับ 2:1 ซึ่งสอดคล้องกับสัดส่วนมวลโมเลกุลของเกอร์ไทต์ และผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกพบว่าตรงกับ JCPDS No.029-0713 ซึ่งสอดคล้องกับ YooJin et al. (2013) โดยเกอร์ไทต์มีโครงสร้างผลึกแบบออร์ทอโรรมบิก (Orthorhombic)

- ฮีมาไทต์

จากการศึกษาคุณลักษณะของฮีมาไทต์ โดยวิเคราะห์รูปร่างลักษณะสัณฐานนั้นมีลักษณะเป็นเม็ดกลม ๆ เรียงซ้อนทับกัน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 5 ไมโครเมตร (Sigma Aldrich) และเมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีพบว่าสัดส่วนของปริมาณเหล็กต่อออกซิเจนเท่ากับ 2.3:1 ซึ่งสอดคล้องกับสัดส่วนมวลโมเลกุลของฮีมาไทต์ และผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกพบว่าตรงกับ JCPDS No. 033-0664 ซึ่งสอดคล้องกับ Fu et al. (2014) โดยฮีมาไทต์มีโครงสร้างผลึกแบบรอมโบฮีดรัล (Rhombohedral)

- เดลตาเฟอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์

จากการศึกษาคุณลักษณะของเดลตาเฟอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์ โดยวิเคราะห์รูปร่างลักษณะสัณฐานนั้นมีลักษณะเป็นแผ่นเกล็ด ๆ เรียงซ้อนทับกัน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 396 ไมโครเมตร (d_{50}) และเมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีพบว่าสัดส่วนของปริมาณเหล็กต่อออกซิเจนเท่ากับ 2.3:1 ซึ่งสอดคล้องกับสัดส่วนมวลโมเลกุลของเดลตาเฟอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์ และผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกพบว่าตรง JCPDS No. 013-0518 ซึ่งสอดคล้องกับ Pinto et al. (2012) โดยเดลตาเฟอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonol)

- ไอรอนโมลิบเดต

จากการศึกษาคุณลักษณะของไอรอนโมลิบเดต โดยวิเคราะห์รูปร่างลักษณะพื้นฐานนั้นมีลักษณะเป็นเม็ดกลม ๆ เรียงซ้อนทับกัน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 416 ไมโครเมตร (d_{50}) และเมื่อทำการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีพบว่าสัดส่วนของปริมาณเหล็กต่อโมลิบดินัมต่อออกซิเจนเท่ากับ 1:1.5:0.6 ซึ่งสอดคล้องกับสัดส่วนมวลโมเลกุลของไอรอนโมลิบเดต และผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกพบว่าตรง JCPDS No. 035-0183 ซึ่งสอดคล้องกับ (Tian et al. (2011), ชนัญญา เพิ่มชาติ (2556)) มีโครงสร้างผลึกแบบมอโนคลินิก (Monoclinic)

4.3 การศึกษาชุดการทดลองควบคุมในการกำจัดลิทินในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือน

จากการทดลองชุดการทดลองควบคุม เพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่อาจเกิดจากตัวเร่งปฏิกิริยาและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ในการดำเนินการวิจัย โดยทำการศึกษาคูควบคุมการทดลองออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

4.3.1 การศึกษาชุดการทดลองควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยา

4.3.1.1 กระบวนการเฟนตันโดยใช้เฟอร์รัสซัลเฟต

เนื่องจากในกระบวนการเฟนตัน มีการใช้เฟอร์รัสซัลเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสารเนื้อเดียว เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาจำเป็นต้องปรับพีเอชของน้ำตัวอย่างให้มีสถานะสูงขึ้น (พีเอช 5) เพื่อหยุดปฏิกิริยาและแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากน้ำตัวอย่าง จึงก่อให้เกิดตะกอนเคมี จากการตกตะกอนของเฟอร์รัสไอออนที่เปลี่ยนรูปเป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_3$) (Talget and Li, 2013) หรืออาจจะเรียกได้ว่า เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชัน ซึ่งสามารถกำจัดสารอินทรีย์ออกจากน้ำเสียได้ จึงทำการศึกษาคูควบคุมการทดลองนี้ เพื่อศึกษาผลที่เกิดจากกระบวนการโคแอกกูเลชันต่อประสิทธิภาพรวมในการกำจัดลิทิน สี และซีโอดี โดยศึกษาการเติมเฟอร์รัสไอออนความเข้มข้น 40, 80, และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4-5 และภาคผนวก ข อาจจะสรุปได้ว่าเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้นจะเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดลิทิน สี และซีโอดีเพิ่มขึ้นจาก 62.47% - 74.67%, 35.16% - 77.56%, และ 61.80% - 85.00% ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ ชนัญญา เพิ่มชาติ (2556)

ตารางที่ 4-5 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีในชุดการทดลองควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเพนตันที่ความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน 40 – 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน (มก./ล.)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)		
	ลิกนิน	สี	ซีโอดี
40	62.47	35.16	61.80
80	70.93	63.33	74.46
100	74.67	77.56	85.00

4.3.1.2 กระบวนการเพนตันเสมือนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ

กระบวนการเพนตันเสมือนที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสารเนื้อผสม คือ แมกนีไทด์ เกอร์ไทด์ ฮีมาไทด์ เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์ และไอรอนโมลิบเดต เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวเร่งการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แต่นอกจากกระบวนการออกซิเดชันแล้ว ในการทำปฏิกิริยาสามารถเกิดกระบวนการดูดซับที่พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Baohua et al., 1994) ทำให้สารอินทรีย์ต่าง ๆ ถูกดูดซับที่พื้นผิวและถูกแยกออกมาพร้อมตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้นตอนการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากรูน้ำตัวอย่าง เพื่อหยุดปฏิกิริยาเพนตันเสมือน จึงทำการศึกษาชุดควบคุมการทดลองโดยมีแมกนีไทด์ เกอร์ไทด์ ฮีมาไทด์ เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์ และไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เหล็กที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 - 15 กรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 3 หรือ 7 ทำการเก็บตัวอย่างในช่วงเวลาต่าง ๆ เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณลิกนิน สี และซีโอดี ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4-6 และภาคผนวก ข

ตารางที่ 4-6 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอติของชุดการควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยา
ในกระบวนการเฟนตันเสมือน

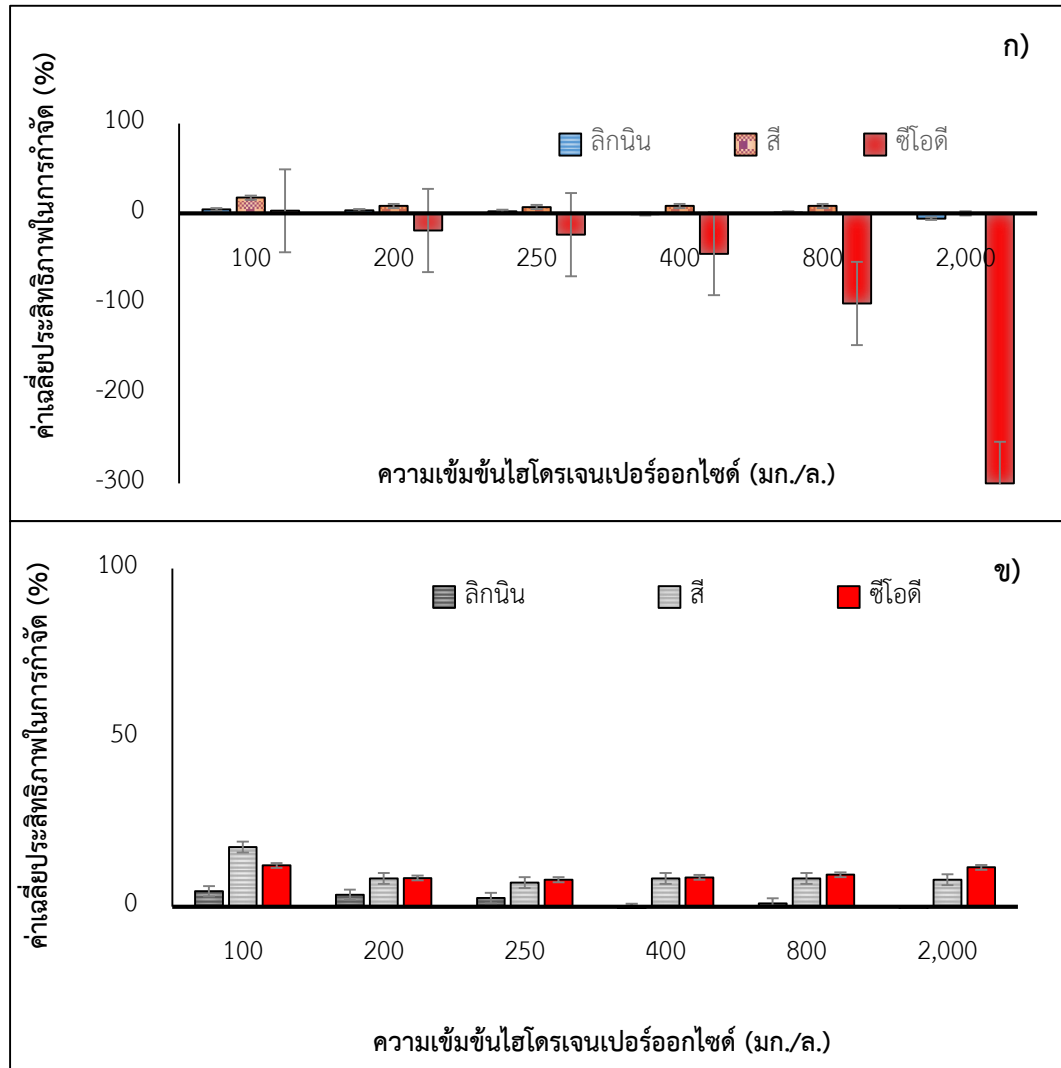
ตัวเร่งปฏิกิริยา		ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)			
		ลิกนิน	สี	ซีโอติ	
pH เริ่มต้น	ความเข้มข้นเฟอร์ริกไอออน (ก./ล.)				
1. แมกนีไทต์	pH 3	5	70.41	79.17	75.00
		10	93.44	99.09	78.33
		15	92.46	99.09	87.50
	pH 7	10	74.98	82.31	82.14
2. เกอร์ไทต์	pH 3	5	84.35	94.55	77.12
		10	87.92	96.36	78.57
		15	89.38	98.18	80.36
	pH 7	5	77.02	84.17	79.35
3. ฮีมาไทต์	pH 3	5	61.79	58.33	62.50
		10	91.27	98.18	85.59
		15	90.47	95.45	96.43
	pH 7	10	71.59	70.71	78.57
4. เดลตาเฟอร์ริก ออกไซด์	pH 3	5	89.17	90.00	78.13
		10	78.03	60.91	82.14
		15	65.63	45.45	62.50
	pH 7	5	66.33	50.00	78.57
5. ไอรอนโมลิบเดต	pH 3	5	4.00	0.91	15.18
		10	11.72	20.00	67.86
		15	16.01	29.09	65.63
	pH 7	5	10.14	25.83	37.50

จากการศึกษาชุดการทดลองควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันเสมือน โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสารเนื้อผสม คือ แมกนีไทต์ เกรย์ไทต์ ฮีมาไทต์ และเทลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์ พบว่า เมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้นจะเกิดกระบวนการดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีพื้นที่ผิวมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Araujo et al. (2011) ในขณะที่ใช้ไฮดรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นพบว่า สามารถกำจัดลิกนินและซีโอดีได้เพียงเล็กน้อย และมีปริมาณสีเกิดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการละลายของตัวเร่งปฏิกิริยาไฮดรอนโมลิบเดต (วุฒิ วิพันธ์พงษ์, 2540) นอกจากนี้เมื่อพีเอชสูงขึ้นน้ำเสียสังเคราะห์จะมีสีที่เข้มขึ้นเนื่องจากลิกนินสามารถละลายได้ดี ทำให้ส่งผลต่อการวิเคราะห์สีเพราะลิกนินสามารถดูดกลืนแสงได้มากขึ้น

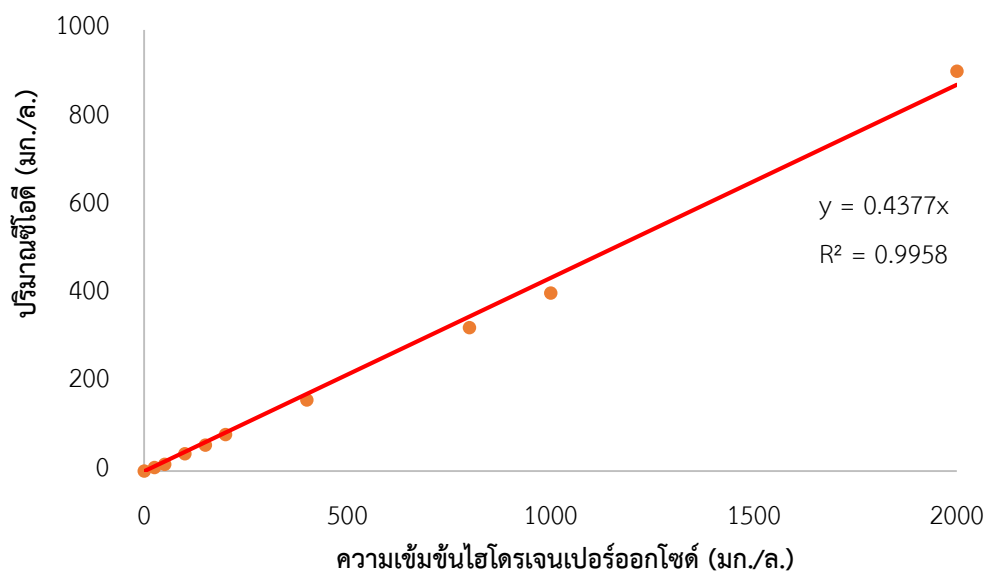
4.3.2 การศึกษาชุดการทดลองควบคุมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

เนื่องจากในกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือน เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันขั้นสูงที่มีไฮดรอกซิลแรดิคัลเป็นตัวออกซิแดนท์ ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) โดยมีการกระตุ้นด้วยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (Araujo et al., 2011) แต่การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว อาจจะทำให้การปฏิกิริยากับลิกนินได้ จึงทำการทดลองชุดควบคุมการทดลองนี้ขึ้นมา ได้ผลดังนี้

จากผลการศึกษาชุดการทดลองโดยเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดี ในกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือน ทำการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นตั้งแต่ 100 – 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ผลการทดลองดังภาคผนวก ข และรูปที่ 4-8 ก) พบว่า ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีมีค่าติดลบ เนื่องจากมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คงเหลือในน้ำตัวอย่าง เมื่อปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าซีโอดีเพิ่มขึ้น และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่คงเหลือในน้ำตัวอย่างสามารถทำปฏิกิริยากับโพแทสเซียมไดโครเมตซึ่งเป็นสารออกซิไดซ์สารอินทรีย์ต่าง ๆ ในการวิเคราะห์ซีโอดีทำให้ค่าซีโอดีที่วิเคราะห์ได้สูงกว่าความเป็นจริง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีลดลง (Talinli and Anderson, 1992) จึงได้ทำการปรับแก้โดยใช้ผลจากการทดลองในรูปที่ 4-9 สามารถปรับแก้การรบกวนการวิเคราะห์ซีโอดี ได้ผลการปรับแก้ดังแสดงในรูปที่ 4-8 ข) พบว่า สามารถกำจัดลิกนิน สี และซีโอดี ได้ไม่เกิน 4.56%, 8.33%, และ 11.62% สามารถสรุปได้ว่าการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว สามารถกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีได้เพียงเล็กน้อย เนื่องจากทำให้โครงสร้างของลิกนินแตกตัวเท่านั้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Araujo et al. (2011)



รูปที่ 4-8 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดี เมื่อเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียง
 อย่างเดียว ก) ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพซีโอดีมากจากการวิเคราะห์ ข) ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพซีโอดีมาก
 จากการคำนวณหักล้างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์



รูปที่ 4-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และปริมาณซีไอดี

4.4 การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดลิแกนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์

ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดลิแกนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเฟนตัน และเฟนตันเสมือน ได้แก่ สัดส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเหล็ก ความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็ก ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พีเอชเริ่มต้น และเวลาในการทำปฏิกิริยา ซึ่งได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

4.4.1 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดลิแกนด์ในน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟนตัน

กระบวนการเฟนตันคือปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดอนุมูลอิสระคือ ไฮดรอกซิลแรดิคัล (OH^\bullet) เป็นสารออกซิแดนท์ที่ทำให้เกิดกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (นุสรา โรจน์วิลาวัลย์, 2554) สามารถสลายสารประกอบอินทรีย์หรืออนินทรีย์ที่สลายยากได้ โดยปฏิกิริยาเฟนตันจะเกิดขึ้นในสถานะที่พีเอชเป็นกรดเท่านั้น (Talinli and Anderson, 1992) และเมื่อทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์สามารถเกิดขึ้นดังสมการที่ (2.1)



เมื่อสารประกอบอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์เกิดการสลายตัวได้อย่างสมบูรณ์ จะได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายคือน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Flaherty and Huang, 1992) นั้นแสดงว่าสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ได้หมดความเป็นพิษแล้ว จึงทำให้ค่าซีไอลดลง

ในการศึกษาอัตราส่วนเหล็กต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม โดยทำการศึกษาอัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมวลที่ 1:2.5, 1:5, 1:10, และ 1:25 ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4-7 และภาคผนวก ค

ตารางที่ 4-7 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีไอตีในกระบวนการเพนตันที่อัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:2.5 – 1:25

อัตราส่วน เฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)		
	ลิกนิน	สี	ซีไอตี
1:2.5	81.13	96.65	94.80
1:5	80.10	96.46	93.41
1:10	79.10	94.86	91.79
1:25	63.03	93.67	90.97

พบว่าการใช้อัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมวลที่ 1:2.5 ให้ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดดีที่สุด โดยสามารถกำจัดลิกนิน 81.13% กำจัดสี 96.65% และกำจัดซีไอตี 94.80% นอกจากนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดที่อัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมวลที่ 1:5, 1:10, และ 1:25 พบว่ามีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลดลงตามอัตราส่วนที่เพิ่มมากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (อภิญา สุภรพิพัฒน์ (2557), วิภาดา วิศาลศิริรักษ์ (2558)) เนื่องจากการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มากเกินไปจะส่งผลเสียและขัดขวางการเกิดออกซิเดชันของสารอินทรีย์ (Pinto et al., 2012) ดังแสดงในสมการที่ (2.2) โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหลืออยู่ในระบบจะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลแรดิคัล ทำให้เกิดอนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิลแรดิคัล ($\text{HO}_2\cdot$) ซึ่งเป็นออกซิแดนซ์ที่มีประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์ต่ำกว่าไฮดรอกซิลแรดิคัล (ชนัญญา เพิ่มชาติ, 2556) จึงทำให้กำจัดลิกนิน สี และซีไอตีได้ลดลงและมีค่าใช้จ่ายในการกำจัดเพิ่มขึ้น



นอกจากนี้ได้ศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็กที่เหมาะสม โดยทำการศึกษาการเติมเฟอร์รัสไอออนที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 40 - 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ตามอัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมวลที่ 1:2.5 ได้ผลการทดลองแสดงดังในตารางที่ 4-8 และภาคผนวก ค

ตารางที่ 4-8 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดี เมื่อเติมความเข้มข้นเริ่มต้นเฟอร์รัสไอออน 40 - 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

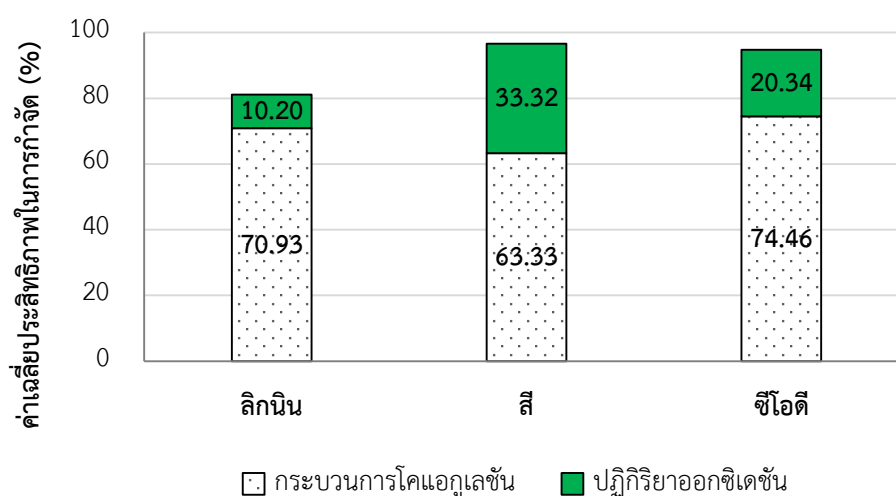
ความเข้มข้นเริ่มต้นเฟอร์รัสไอออน (มก./ล.)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)		
	ลิกนิน	สี	ซีโอดี
40	63.50	48.46	85.05
80	81.13	96.65	94.80
100	79.23	94.30	94.12

พบว่า ความเข้มข้นเหล็กเริ่มต้นที่เหมาะสมคือ การเติมเฟอร์รัสไอออนที่ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งให้ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดที่ดีที่สุดสามารถกำจัดลิกนิน 81.13% กำจัดสี 96.65% และกำจัดซีโอดี 94.80% และเมื่อเติมเฟอร์รัสไอออน 40 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีลดลง แต่เมื่อเติมเฟอร์รัสไอออน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีใกล้เคียงกับเมื่อเติมเฟอร์รัสไอออน 80 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากการเติมเฟอร์รัสไอออนที่มากหรือน้อยเกินไปจะส่งผลยับยั้งต่อการเกิดไฮดรอกซิลแรดิคัล (Khataee et al., 2016) ดังแสดงในสมการที่ (2.3)



ในสมการที่ (2.3) พบว่า เมื่อเติมเฟอร์รัสไอออนในปริมาณที่มากเกินไป เฟอร์รัสไอออนสามารถทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลแรดิคัลกลายเป็นเฟอร์ริกไอออนและไฮดรอกไซด์ จะส่งผลทำให้ไฮดรอกซิลแรดิคัลมีปริมาณลดลง อีกทั้งเฟอร์ริกไอออนสามารถทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อผลิตไฮดรอกซิลแรดิคัลได้ช้ากว่าเฟอร์รัสไอออน (นุสรรา โรจนวิลาวัลย์, 2554)

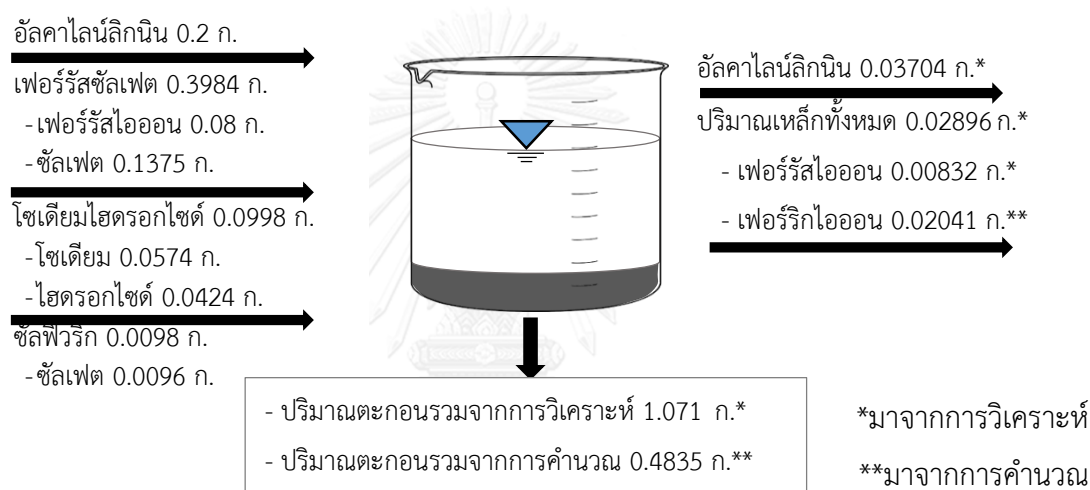
เพื่อศึกษาปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นจึงทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพรวมในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีด้วยกระบวนการเฟนตันกับค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในชุดการทดลองควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยาดังแสดงในรูปที่ 4-10 พบว่า มีปฏิกิริยาออกซิเดชันในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีเกิดขึ้นอย่างน้อย 10.2%, 33.32%, และ 20.04% ตามลำดับ ซึ่งวิธีคำนวณแสดงในภาคผนวก ก



รูปที่ 4-10 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันของกระบวนการเฟนตัน

จากนั้นได้ศึกษาถึงปริมาณสารเคมีที่คงเหลือในน้ำตัวอย่าง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อการวิเคราะห์ลิกนิน สี (วุฒิ วิพันธ์พงษ์, 2540) และซีโอดี (Talinli and Anderson, 1992) และหากปนเปื้อนลงสู่สิ่งแวดล้อมอาจจะส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำนั้น ๆ ได้ จึงทำการวิเคราะห์ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหลือในน้ำตัวอย่างได้ผล ดังแสดงในภาคผนวก ค โดยพบว่า ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ถูกใช้หมดอย่างรวดเร็ว ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีในกระบวนการเฟนตัน และทำการวิเคราะห์ปริมาณเหล็กที่เหลือในน้ำตัวอย่างก่อนที่ถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม เนื่องจากในการหยุดปฏิกิริยาเฟนตันจะทำการปรับพีเอชให้อยู่ในสภาวะเบสมากขึ้น (พีเอช 5) ทำให้เหล็กในรูปของเฟอร์รัสไอออนเปลี่ยนรูปเป็นเฟอร์ริกไอออนและทำให้เกิดการตกตะกอนของตะกอนเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) แต่เนื่องจากพีเอชในน้ำตัวอย่างอาจมีสภาวะเป็นเบสไม่พอต่อการตกตะกอนของปริมาณเหล็กทั้งหมดได้จึงอาจพบปริมาณเหล็กคงเหลือในน้ำตัวอย่างได้ จึงทำการวิเคราะห์ปริมาณเหล็กที่เหลือในน้ำตัวอย่างดังแสดงในภาคผนวก ค พบว่า

มีปริมาณเหล็กคงเหลือในน้ำตัวอย่าง 28.96 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งประกอบไปด้วย เพอร์รัสไอออน 8.32 มิลลิกรัมต่อลิตรและเพอร์ริกไอออน 20.41 มิลลิกรัมต่อลิตร และวิเคราะห์ ปริมาณตะกอนเคมีที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเฟนตันได้ดังรูปที่ 4-11 ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีปริมาณตะกอน รวมเกิดขึ้นประมาณ 1,072 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อคำนวณปริมาณตะกอนรวมจากการดำเนินปฏิกิริยา ซึ่งประกอบด้วยตะกอนเพอร์ริกไฮดรอกไซด์ อัลคาไลน์ลิกันิน ซัลเฟตจากเพอร์รัสซัลเฟตและกรด ซัลฟิวริก และโซเดียมจากโซเดียมไฮดรอกไซด์เกิดขึ้น 483.5 มิลลิกรัมต่อลิตร วิธีคำนวณดังแสดงใน ภาคผนวก ก พบว่า ปริมาณตะกอนรวมที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์และการคำนวณไม่สอดคล้องกัน เนื่องจากปริมาณตะกอนรวมจากการคำนวณน้อยกว่าปริมาณตะกอนรวมจากการวิเคราะห์ 588.2 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงสันนิษฐานว่าน่าจะเป็นตะกอนที่เกิดขึ้นจากของแข็งทั้งหมดที่พบในน้ำประปา



รูปที่ 4-11 ปริมาณตะกอนรวมที่เกิดขึ้นในกระบวนการเฟนตัน

4.4.2 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดลิกันินในน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟนตัน

เสมือน

กระบวนการเฟนตันเสมือนคือปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ (H_2O_2) กับเพอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) หรือโลหะทรานซิชันอื่น ๆ ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ซึ่งแตกต่างจากปฏิกิริยาเฟนตันที่ใช้เพอร์รัสไอออนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Hasan et al., 2012) ดังแสดงในสมการดังนี้



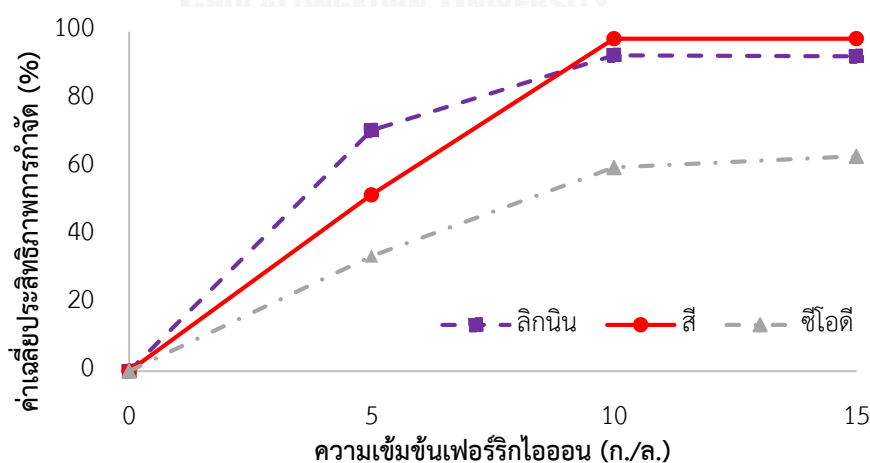
ในขั้นตอนแรกทำการศึกษาความเข้มข้นเหล็กเริ่มต้นที่เหมาะสมของการกำจัดลิกนินด้วยกระบวนการเพนตันเสมือน โดยมีแมกนีไทด์ เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์ เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์ และไอรอนโมลิบเดจเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

- แมกนีไทด์

จากผลการทดลองโดยมีแมกนีไทด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงดังในตารางที่ 4-9 รูปที่ 4-12 และภาคผนวก ค พบว่า การเติมเฟอร์ริกไอออน 10 กรัมต่อลิตร มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดดีที่สุดในสามการกำจัดลิกนิน 91.87% สี 97.00% และซีโอดี 51.67% ในขณะที่การเติมเฟอร์ริกไอออนที่ 15 กรัมต่อลิตร พบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีที่ใกล้เคียงกับการเติมเฟอร์ริกไอออนที่ 10 กรัมต่อลิตร แต่การเติมเฟอร์ริกไอออนที่ 5 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีลดลง

ตารางที่ 4-9 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดี เมื่อเติมแมกนีไทด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์ริกไอออน 5 - 15 กรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นเริ่มต้นเฟอร์ริกไอออน (ก./ล.)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)		
	ลิกนิน	สี	ซีโอดี
5	71.35	53.00	33.93
10	91.87	97.00	51.67
15	92.72	98.00	63.33



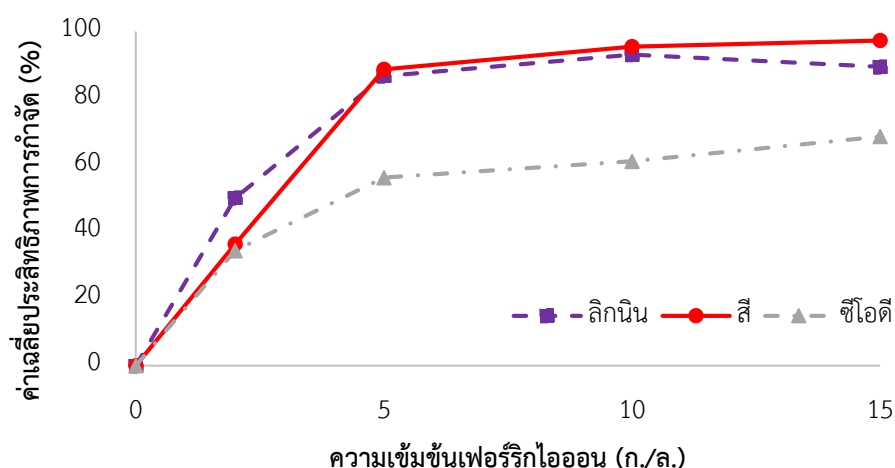
รูปที่ 4-12 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดี เมื่อเติมแมกนีไทด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์ริกไอออน 5 - 15 กรัมต่อลิตร

- เกอร์ไทต์

จากผลการทดลองโดยมีเกอร์ไทต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงดังในตารางที่ 4-10 รูปที่ 4-13 และภาคผนวก ค พบว่า การเติมเฟอร์ริกไอออน 5 กรัมต่อลิตร มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดดีที่่ที่สุดสามารถกำจัดลิกนิน 84.76% สี 88.60% และซีโอดี 56.25% และในขณะที่การเติมเฟอร์ริกไอออนที่ 10 และ 15 กรัมต่อลิตร พบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีที่ใกล้เคียง กับการเติมเฟอร์ริกไอออนที่ 5 กรัมต่อลิตร แต่การใช้เฟอร์ริกไอออนที่ 2 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีลดลง

ตารางที่ 4-10 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดี เมื่อเติมเกอร์ไทต์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์ริกไอออน 2 - 15 กรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นเริ่มต้นเฟอร์ริกไอออน (ก./ล.)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)		
	ลิกนิน	สี	ซีโอดี
2	48.18	27.27	34.48
5	84.76	88.60	56.25
10	91.87	97.27	61.11
15	89.41	98.18	68.52



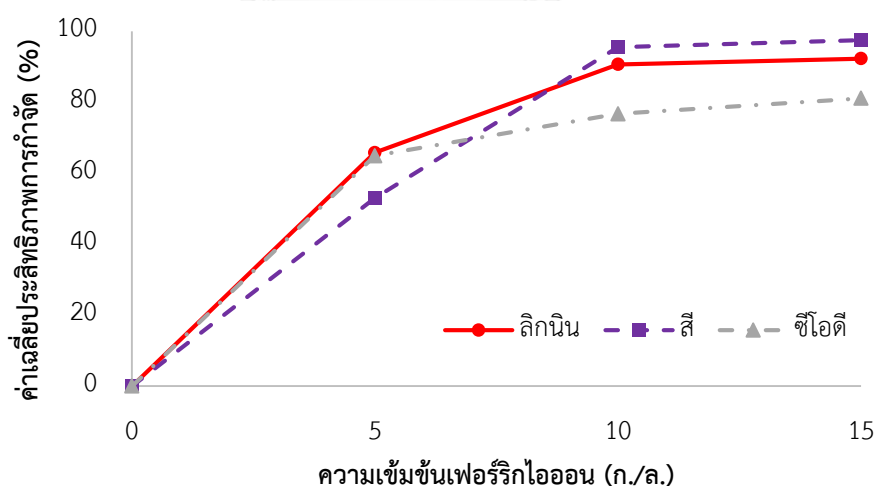
รูปที่ 4-13 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดี เมื่อเติมเกอร์ไทต์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์ริกไอออน 2 - 15 กรัมต่อลิตร

- ฮีมาไทต์

จากผลการทดลองโดยมีฮีมาไทต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงดังในตารางที่ 4-11 รูปที่ 4-14 และภาคผนวก ค การเติมเฟอร์ริกไอออน 10 กรัมต่อลิตร มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดดีที่สูงสุดสามารถกำจัดลิกนิน 89.87% สี 95.00% และซีโอดี 76.70% ในขณะที่การเติมเฟอร์ริกไอออนที่ 15 กรัมต่อลิตร พบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีที่ใกล้เคียงกับการเติมเฟอร์ริกไอออนที่ 5 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีลดลง

ตารางที่ 4-11 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดี เมื่อเติมฮีมาไทต์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์ริกไอออน 5 - 15 กรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นเริ่มต้นเฟอร์ริกไอออน (ก./ล.)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)		
	ลิกนิน	สี	ซีโอดี
5	66.33	58.00	64.86
10	89.87	95.00	76.70
15	91.28	93.00	81.08



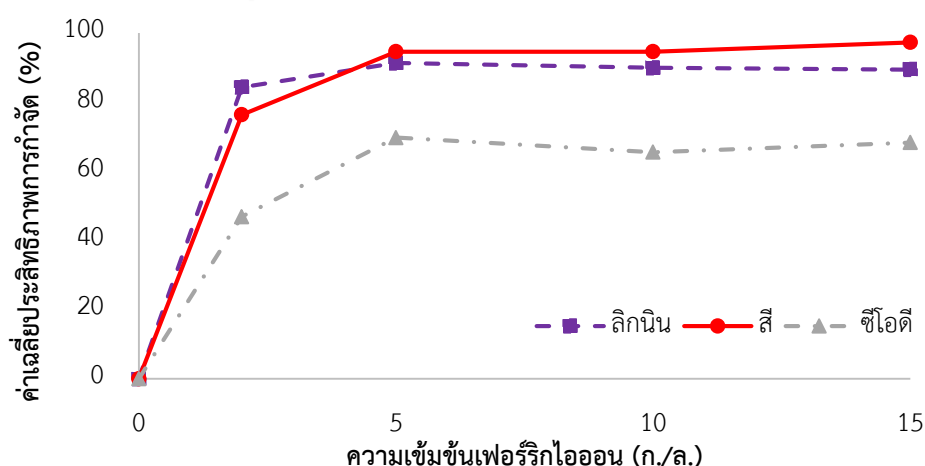
รูปที่ 4-14 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดี เมื่อเติมฮีมาไทต์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์ริกไอออน 5 - 15 กรัมต่อลิตร

- เดลตาเฟอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์

จากผลการทดลองที่ใช้เดลตาเฟอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงดังในตารางที่ 4-12 รูปที่ 4-15 และภาคผนวก ค พบว่า การเติมเฟอร์ริกไอออน 5 กรัมต่อลิตร มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดที่ดีที่สุดสามารถกำจัดลิกนิน 90.94% สี 95.45 และซีโอดี 57.64% และการเติมเฟอร์ริกไอออนที่ 10 และ 15 กรัมต่อลิตร พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีที่ใกล้เคียงกับการเติมเฟอร์ริกไอออนที่ 5 กรัมต่อลิตร แต่การเติมเฟอร์ริกไอออนที่ 2 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีลดลง

ตารางที่ 4-12 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดี เมื่อเติมเดลตาเฟอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์ริกไอออน 2 - 15 กรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นเริ่มต้นเฟอร์ริกไอออน (ก./ล.)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)		
	ลิกนิน	สี	ซีโอดี
2	79.90	72.73	46.88
5	90.94	95.45	57.64
10	88.87	91.82	59.57
15	89.41	98.18	68.75



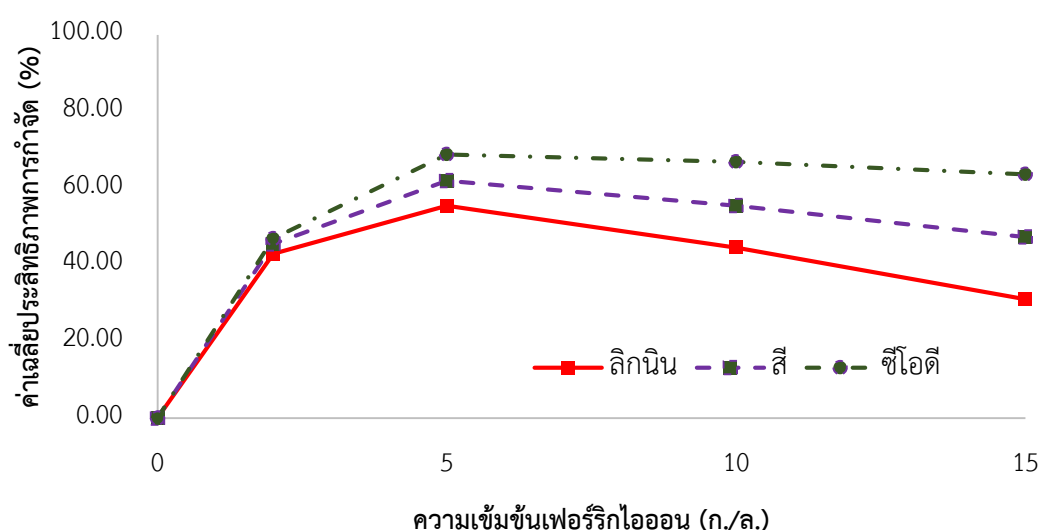
รูปที่ 4-15 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดี เมื่อเติมเดลตาเฟอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์ริกไอออน 2 - 15 กรัมต่อลิตร

- ไอรอนโมลิบดีต

จากผลการทดลองโดยมีไอรอนโมลิบดีตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงดังในตารางที่ 4-13 รูปที่ 4-16 และภาคผนวก ค พบว่า การเติมเฟอร์ริกไอออน 5 กรัมต่อลิตร มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดที่ดีที่สุดสามารถกำจัดลิกนิน 55.38% สี 61.94% และซีโอดี 68.78% ในขณะที่การเติมเฟอร์ริกไอออนที่ 2, 10, และ 15 กรัมต่อลิตร พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีลดลง

ตารางที่ 4-13 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดี เมื่อเติมไอรอนโมลิบดีตที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเฟอร์ริกไอออน 2 - 15 กรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นเริ่มต้นเฟอร์ริกไอออน (ก./ล.)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)		
	ลิกนิน	สี	ซีโอดี
2	42.91	45.45	46.88
5	55.38	61.94	68.78
10	44.48	55.45	66.90
15	31.00	47.27	63.64



รูปที่ 4-16 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดี เมื่อเติมไอรอนโมลิบดีตที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเฟอร์ริกไอออน 2 - 15 กรัมต่อลิตร

จากการศึกษาถึงความเข้มข้นเริ่มต้นเพอร์ริกไอออนที่เหมาะสมในกระบวนการเพนต์นเสมือนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังนี้ได้ผล ดังแสดงในตารางที่ 4-14

ตารางที่ 4-14 ความเข้มข้นเริ่มต้นเพอร์ริกไอออนที่เหมาะสมของตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ ในกระบวนการเพนต์นเสมือน

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ความเข้มข้นเริ่มต้นเพอร์ริกไอออน (ก./ล.)
แมกนีไทด์	10
เกอร์ไทด์	5
ฮีมาไทด์	10
เดลตาเพอร์ริกออกไซด์	5
ไอรอนโมลิบเดต	5

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นเพอร์ริกไอออนในกระบวนการเพนต์นเสมือนโดยมีแมกนีไทด์ เกอร์ไทด์ ฮีมาไทด์ และเดลตาเพอร์ริกออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอตีเพิ่มขึ้น แต่หากเติมเพอร์ริกไอออนมากกว่าสภาวะที่เหมาะสมพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอตีไม่เพิ่มขึ้นหรือลดลง เพราะปริมาณเหล็กเพอร์ริกไอออนที่เหลือในระบบจะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลแรดิคัล จึงส่งผลทำให้ปริมาณไฮดรอกซิลแรดิคัลลดลง (นุสรารุโรจน์วิลาวัลย์, 2554) และหากเติมความเข้มข้นเพอร์ริกไอออนในปริมาณที่น้อยกว่าสภาวะที่เหมาะสมก็จะไม่เพียงพอต่อการกำจัดลิกนิน สี และซีโอตี ในขณะที่เมื่อใช้ไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นเพอร์ริกไอออนมากกว่าสภาวะที่เหมาะสม ประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน และสีกลับลดลงจาก 55.38% และ 61.94% เป็น 31.00% - 44.48% และ 47.27% - 55.45% เนื่องจากเหล็กละลายออกมาจากไอรอนโมลิบเดตซึ่งทำให้สีเพิ่มขึ้นส่งผลต่อการวิเคราะห์ลิกนินและสี

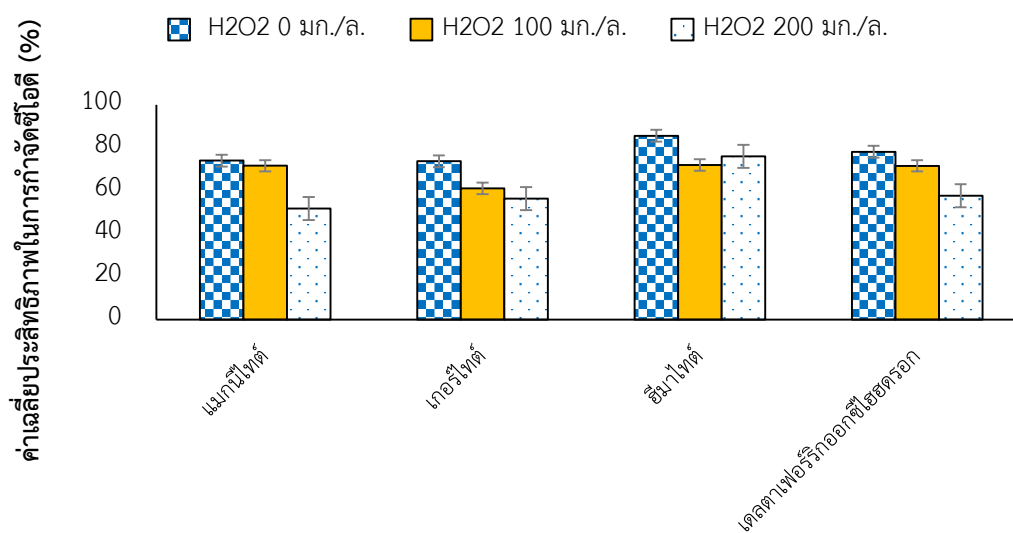
จากนั้นทำการศึกษาความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เริ่มต้นที่เหมาะสม เพื่อลดปริมาณการใช้สารเคมีซึ่งเป็นการลดต้นทุนในการดำเนินปฏิกิริยา อีกทั้งการเติมความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปริมาณที่เหมาะสมจะสามารถผลิตไฮดรอกซิลแรดิคัลที่ดีที่สุดและทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอตีดีที่สุด ดังนั้นหากมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปริมาณที่มากเกินไป จะทำให้ขัดขวางการผลิตไฮดรอกซิลแรดิคัลและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์บางส่วนสามารถทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลแรดิคัล ทำให้เกิดอนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิลแรดิคัล ($\text{HO}_2\cdot$) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์ต่ำกว่าไฮดรอกซิลแรดิคัล ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอตีลดลง

ได้ (ชัญญา เพิ่มชาติ, 2556) นอกจากนี้ข้อมูลเปอร์ไฮดรอกซิลแรติเคิลสามารถทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซึ่งจะสลายตัวกลายเป็นออกซิเจนได้อีกด้วย แต่หากเพิ่มความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปริมาณที่น้อยเกินไปจะทำให้ไม่เพียงพอต่อการผลิตไฮดรอกซิลแรติเคิล จึงทำการศึกษาการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0, 100, และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีแมกนีไทด์ เกรอ์ไทด์ ฮีมาไทด์ เดลตาเพอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์ และไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งได้ผล ดังแสดงในภาคผนวก ค และตารางที่ 4-15 พบว่า เมื่อใช้แมกนีไทด์ เกรอ์ไทด์ ฮีมาไทด์ และเดลตาเพอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนินและสีไม่เพิ่มขึ้นจากการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอติกลับลดลง เนื่องจากปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คงเหลือในน้ำตัวอย่างสามารถทำปฏิกิริยากับโพแทสเซียมไดโครเมตเป็นเหตุให้ค่าซีโอติจากการวิเคราะห์มีค่าสูงกว่าค่าซีโอติจริงจึงมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอติลดลง (Talinli and Anderson, 1992) ดังแสดงในรูปที่ 4-17 ดังนั้นความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เริ่มต้นที่เหมาะสมคือ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่เมื่อใช้ไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 4-18 พบว่า ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เริ่มต้นที่เหมาะสมคือ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อทำการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0, 100, และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอติลดลง เนื่องจากการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปริมาณมากเกินไปจะยับยั้งและขัดขวางการผลิตไฮดรอกซิลแรติเคิลได้ จึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และ ซีโอติลดลงหรือไม่เพิ่มขึ้น (Araujo et al., 2011)

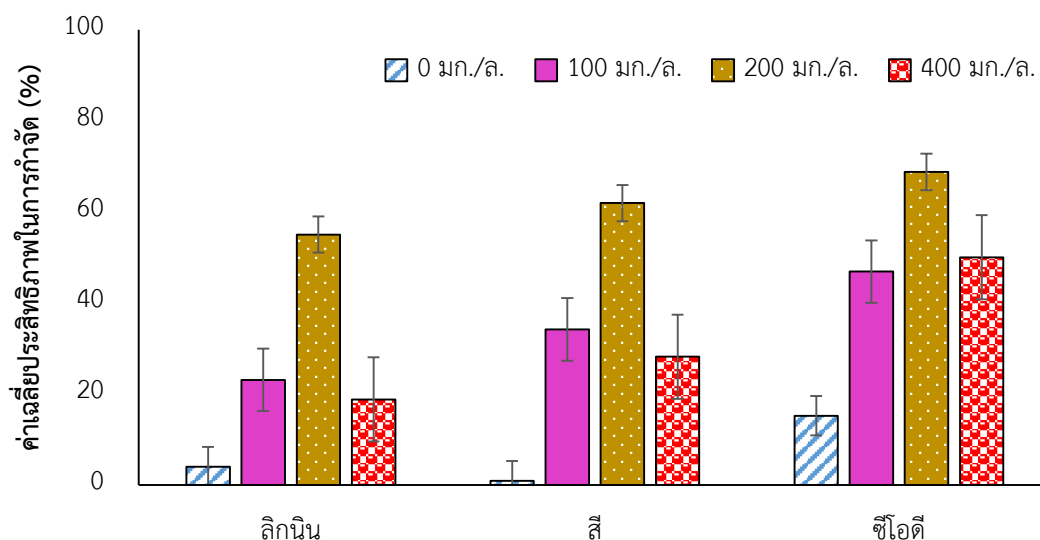
ตารางที่ 4-15 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอติในกระบวนการเฟนตันเสมือนเมื่อเติมความเข้มข้นเริ่มต้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0 - 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นเริ่มต้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (มก./ล.)		ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)		
		ลิกนิน	สี	ซีโอติ
แมกนีไทด์	0	93.44	99.00	91.87
	100	91.21	97.00	71.61
	200	91.87	97.00	51.67
เกรอ์ไทด์	0	84.35	94.55	73.73
	100	84.90	93.00	61.11
	200	84.76	88.60	56.25

ความเข้มข้นเริ่มต้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (มก./ล.)		ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพ ในการกำจัด (%)		
		ลิกนิน	สี	ซีโอดี
อีมาไทด์	0	91.27	98.18	85.59
	100	90.00	92.27	71.67
	200	89.87	95.00	76.70
เดลตาเฟอรัริกออกไซด์ ไฮดรอกไซด์	0	89.17	90.00	78.13
	100	90.32	91.66	71.56
	200	90.94	95.45	57.64
ไอรอนโมลิบเดต	0	4.00	0.91	15.18
	100	23.08	34.17	46.88
	200	55.38	61.94	68.78
	400	18.77	28.18	50.00



รูปที่ 4-17 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี เมื่อเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ



รูปที่ 4-18 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี ซีโอดี

เมื่อเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ โดยมีไฮดรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

นอกจากนี้พบว่า ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในชุดการทดลองควบคุมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดลิกนิน 4.00% และสี 0.96% แต่สามารถกำจัดซีโอดี 15.18% เนื่องจากเมื่อทำปฏิกิริยาในสถานะที่เป็นกรดพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาไฮดรอนโมลิบเดตมีการละลายของเหล็กทำให้สีของเหล็กในตัวเร่งปฏิกิริยาไฮดรอนโมลิบเดตรบกวนการวิเคราะห์สี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ วุฒิ วิพันธ์พงษ์ (2540)

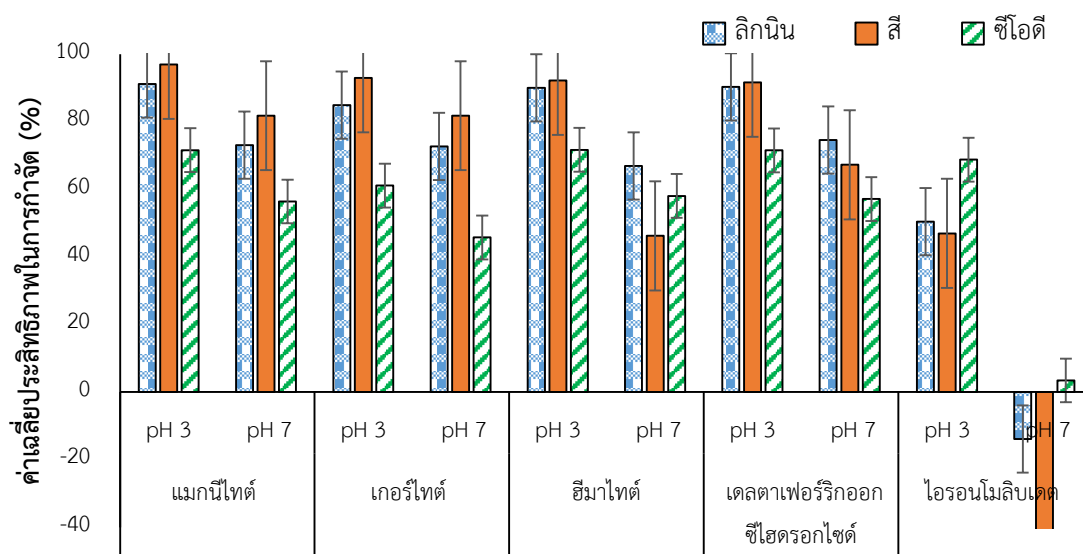
จากผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์ริกไอออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา คือ แมกนีไทต์ เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์ เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์โรดออกไซด์ และไฮดรอนโมลิบเดต จะได้อัตราส่วนระหว่างเฟอร์ริกไอออน (กรัมต่อลิตร) ต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ดังนี้ 1:10, 1:20, 1:10, 1:20, และ 1:40 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Araujo et al. (2011) ซึ่งสามารถกำจัดสีย้อมได้มากกว่า 99% เมื่อใช้ฮีมาไทต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยมีสัดส่วนเหล็กต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อยู่ในช่วง 1:10 – 1:40

เนื่องจากกระบวนการเฟ้นต้นเสมือนสามารถดำเนินปฏิกิริยาได้ที่พีเอชเริ่มต้นกว้างกว่ากระบวนการเฟ้นต้นซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาได้เฉพาะที่พีเอชเป็นกรดเท่านั้น ทำให้สามารถลดต้นทุนในการปรับพีเอชก่อนการดำเนินปฏิกิริยาเฟ้นต้นเสมือนได้ จึงทำการศึกษาพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมของปฏิกิริยาเฟ้นต้นเสมือน โดยปรับพีเอชเริ่มต้นที่ 3 และ 7 ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4-16 และภาคผนวก ค

ตารางที่ 4-16 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพลิกนิน สี และซีโอติในกระบวนการเฟนตันเสมือนที่พีเอช 3 และ 7

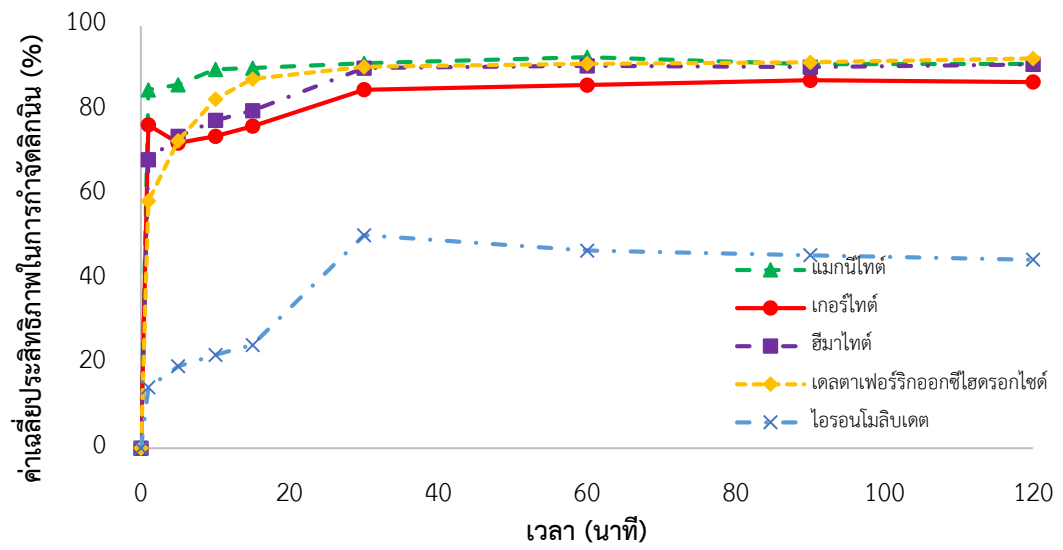
ตัวเร่งปฏิกิริยา	พีเอช	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)		
		ลิกนิน	สี	ซีโอติ
แมกนีไทต์	3	91.21	97.00	71.61
	7	73.05	81.82	56.41
เกอร์ไทต์	3	84.90	93.00	61.11
	7	72.67	81.82	45.76
ฮีมาไทต์	3	90.00	92.27	71.67
	7	66.95	46.25	58.06
เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์	3	90.32	91.66	71.56
	7	74.63	67.27	57.14
ไอรอนโมลิบเดต	3	55.38	61.94	68.78
	7	-13.87	-72.73	3.45

ในกระบวนการเฟนตันเสมือน โดยมีแมกนีไทต์ เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์ และเดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า เมื่อพีเอชเริ่มต้น 7 มีประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอติมีประสิทธิภาพที่ค่อนข้างสูง สามารถกำจัดลิกนินอยู่ในช่วง 66.95% - 74.63% สีอยู่ในช่วง 46.25% - 81.82% และซีโอติ 45.76% - 58.06% แต่เมื่อเปรียบเทียบกับพีเอชเริ่มต้นที่ 3 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอติที่ต่ำกว่าประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอติที่พีเอชเริ่มต้น 3 ซึ่งสามารถกำจัดลิกนินอยู่ในช่วง 84.90% - 91.21% สีอยู่ในช่วง 91.66% - 97.00% และซีโอติ 61.11% - 71.76% ดังแสดงในรูปที่ 4-19 ในขณะที่เมื่อใช้ไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่พีเอชเริ่มต้น 7 พบว่า ไม่สามารถกำจัดลิกนิน และสีได้ แต่กำจัดซีโอติได้เพียงเล็กน้อยและมีประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอติน้อยกว่าประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอติที่พีเอชเริ่มต้นที่ 3 ซึ่งสามารถกำจัดลิกนิน 55.38% สี 61.94% และซีโอติ 68.78% นอกจากนี้เมื่อพีเอชสูงกว่า 3 พบว่ามีการเกิดขึ้นของสารประกอบเชิงซ้อนเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ซึ่งจะทำให้การผลิตไฮดรอกซิลแรดิคัลได้ลดลง (Lee et al., 2006) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะมีความเสถียรน้อยลงสามารถสลายตัวเป็นออกซิเจนได้ง่าย จึงทำให้ไฮดรอกซิลแรดิคัลมีปริมาณลดลง (Wang, 2008) และเมื่อพีเอชสูงขึ้นทำให้ลิกนินสามารถละลายได้ดี มีสีเข้มขึ้นและดูดกลืนแสงได้ดีขึ้นจึงมีค่าดูดกลืนแสงมากขึ้น ทำให้กระบวนการวิเคราะห์ลิกนินและสี (วุฒิ วิพันธ์พงษ์, 2540)

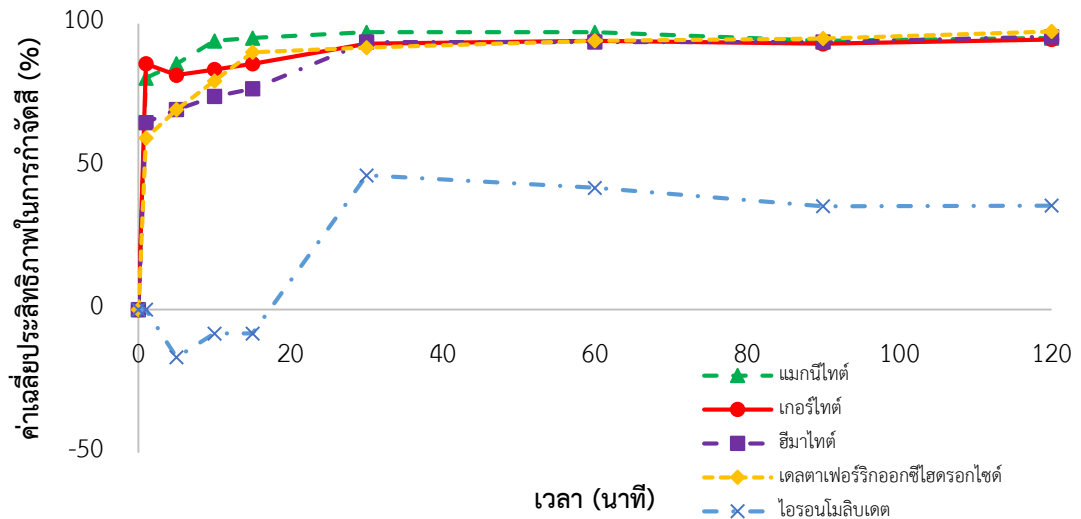


รูปที่ 4-19 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และลิกนินของการศึกษาพีเอชเริ่มต้นที่พีเอช 3 และ 7

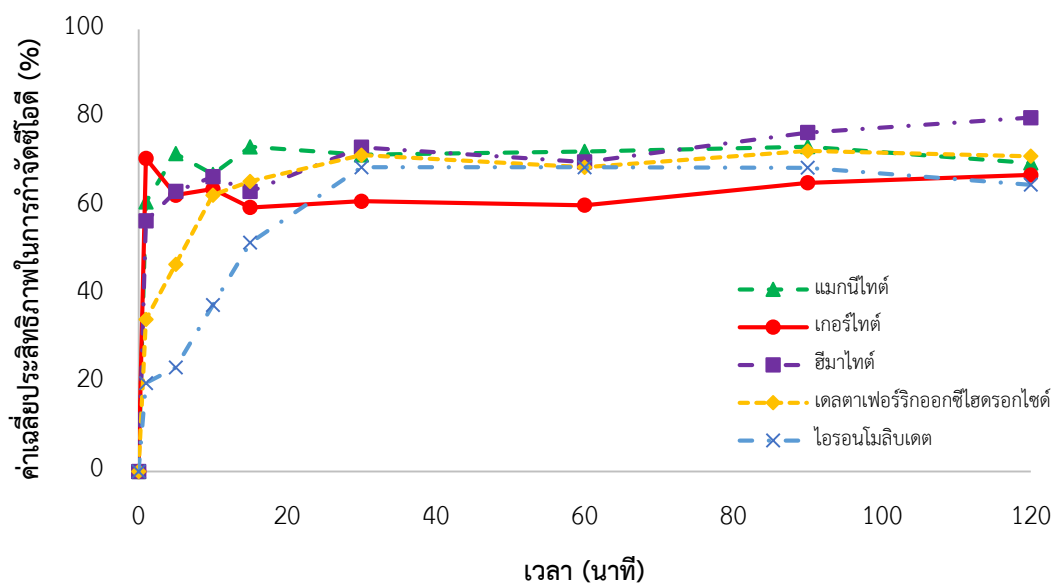
จากนั้นทำการศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาเฟนตันเสมือน โดยมีแมกนีไทต์ เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์ เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ และไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไปจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีอย่างไร จึงได้ทำการดำเนินปฏิกิริยาเฟนตันเสมือนในช่วงระยะเวลาต่าง ๆ ตั้งแต่ 0 จนถึง 120 นาที ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4-20 - 4-22 ตารางที่ 4-17 และภาคผนวก ค



รูปที่ 4-20 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดการกีดกันที่เวลาต่าง ๆ ในกระบวนการเฟนตันเสมือน



รูปที่ 4-21 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดสีที่เวลาต่าง ๆ ในกระบวนการเฟนตันเสมือน



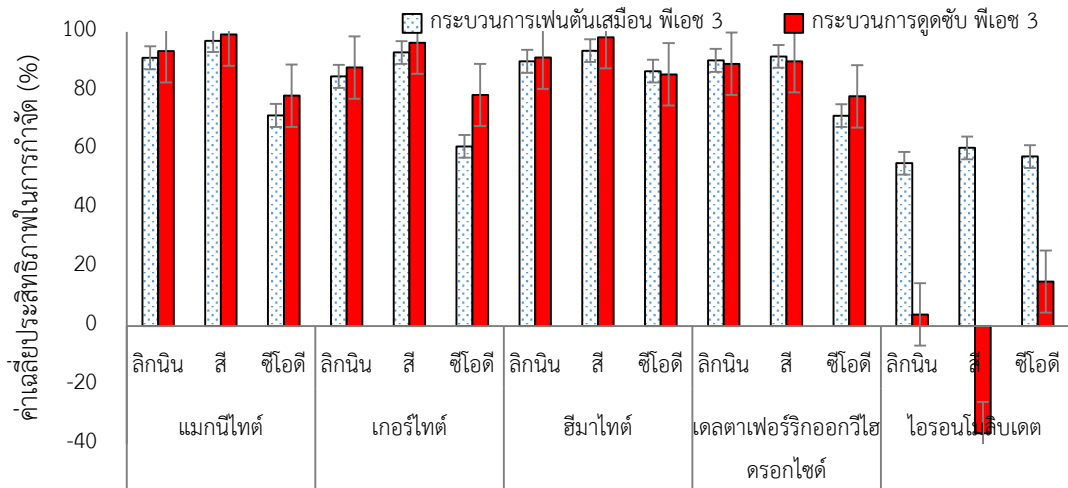
รูปที่ 4-22 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่เวลาต่าง ๆ ในกระบวนการเฟนตันเสมือน

ตารางที่ 4-17 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีในกระบวนการการเฟนตันที่เวลา 30 นาที

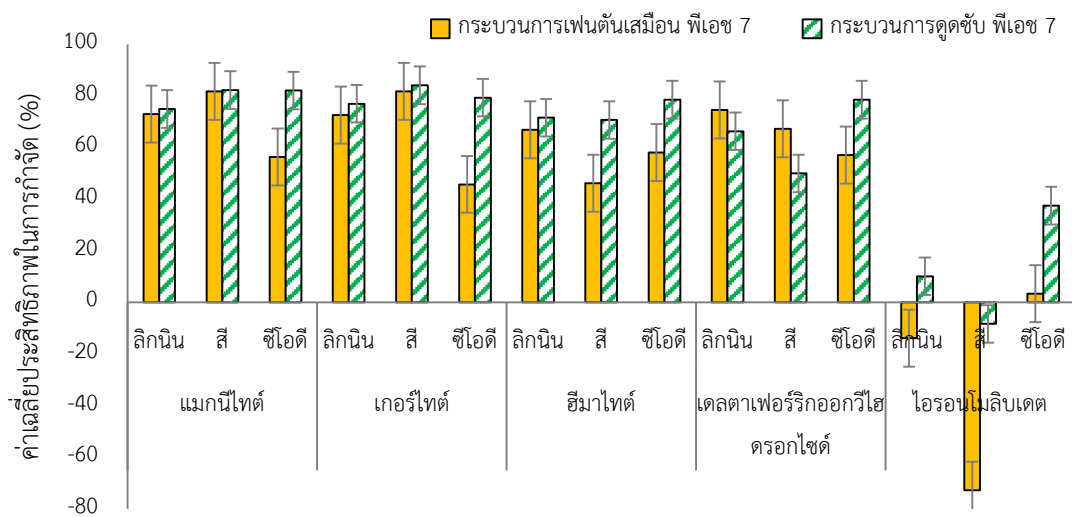
ตัวเร่งปฏิกิริยา	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)		
	ลิกนิน	สี	ซีโอดี
แมกนีไทต์	91.21	97.00	71.61
เกอร์ไทต์	84.90	93.00	61.11
ฮีมาไทต์	90.00	93.64	71.67
เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์	90.32	91.66	71.56
ไอรอนโมลิบเดต	55.38	61.94	68.78

ในกระบวนการเฟนตันเสมือน โดยมีแมกนีไทต์ เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์ เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ และไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพรวมในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีที่เวลา 30 นาทีเป็นเวลาที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากเป็นระยะเวลาที่น้อยที่สุดที่ทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนินอยู่ในช่วง 55.38% - 91.21% สีอยู่ในช่วง 61.94% - 97.00% และซีโอดี 68.78% - 71.76% เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สีและซีโอดีไม่เพิ่มขึ้นหรือลดลง

เพื่อศึกษาปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นจึงทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพรวมในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอติด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือนกับค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอติ โดยมีแมกนีไทต์ เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์ เดลตาเฟอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์ และไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า เมื่อพีเอชเริ่มต้นที่พีเอช 3 จะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4-23 แสดงให้เห็นว่าโดยส่วนใหญ่ประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอติของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาก็คือแมกนีไทต์ เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์ และเดลตาเฟอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์เป็นผลมาจากกระบวนการดูดซับเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดเล็ก จึงมีพื้นที่ผิวมาก ทำให้มีกระบวนการดูดซับที่พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว (Baohua et al., 1994) อีกทั้งในกระบวนการเฟนตันเสมือนใช้เวลาในการผลิตไฮดรอกซิลแรดิคัลที่นานกว่ากระบวนการดูดซับ เนื่องจากต้องเปลี่ยนรูปเฟอร์ริกไอออนให้อยู่ในรูปเฟอร์รัสไอออนก่อน (Hasan et al., 2012) ดังสมการที่ (2.14) – (2.15) จึงสามารถผลิตไฮดรอกซิลแรดิคัลได้ นอกจากนี้การเกิดกระบวนการดูดซับที่พื้นที่ผิวทำให้พื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลดลง จึงเป็นอุปสรรคในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันอีกด้วย ในขณะที่เมื่อใช้ไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า โดยส่วนใหญ่ประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอติเป็นผลมาจากกระบวนการออกซิเดชัน สามารถกำจัดลิกนิน 51.38% สี 61.03 % และซีโอติ 53.60% ซึ่งนอกจากเฟอร์ริกไอออนในโครงสร้างของไอรอนโมลิบเดตจะสามารถกระตุ้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้ผลิตไฮดรอกซิลแรดิคัลได้แล้ว ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับโมลิบเดต (MoO_4^{2-}) ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนโมลิบดินัมเปอร์ออกไซด์ ($\text{MoO}_2(\text{O}_2)_2^{2-}$) และสามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้ (ชนัญญา เพิ่มชาติ, 2556) โดยเฟอร์ริกไอออนและโมลิบเดตสามารถทำปฏิกิริยากระตุ้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ควบคู่กัน (Tian et al., 2011) และเมื่อพีเอชเริ่มต้นที่พีเอช 7 จะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4-24 แสดงให้เห็นว่าโดยส่วนใหญ่ประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอติในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาก็คือแมกนีไทต์ เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์ และเดลตาเฟอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์เป็นผลมาจากกระบวนการดูดซับ ในขณะที่เมื่อใช้ไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า ไม่สามารถกำจัดลิกนิน และสีได้ แต่สามารถกำจัดซีโอติได้เพียงเล็กน้อย เนื่องจากเมื่อพีเอชสูงขึ้นทำให้ลิกนินละลายได้ดีขึ้นจึงสามารถดูดกลืนแสงได้มากขึ้น สีจึงเข้มขึ้น และมีสีของเหล็กบางส่วนที่ละลายออกมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งส่งผลกระทบต่อการวิเคราะห์ลิกนิน และสี ทำให้สีในน้ำตัวอย่างเพิ่มขึ้น อีกทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดลดลง เนื่องจากพีเอชเริ่มต้นที่สูงกว่าพีเอช 3 ทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีความเสถียรลดลงและสลายกลายเป็นออกซิเจนได้ง่าย จึงทำให้ความสามารถในการผลิตไฮดรอกซิลแรดิคัลเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่าง ๆ ได้น้อยลง

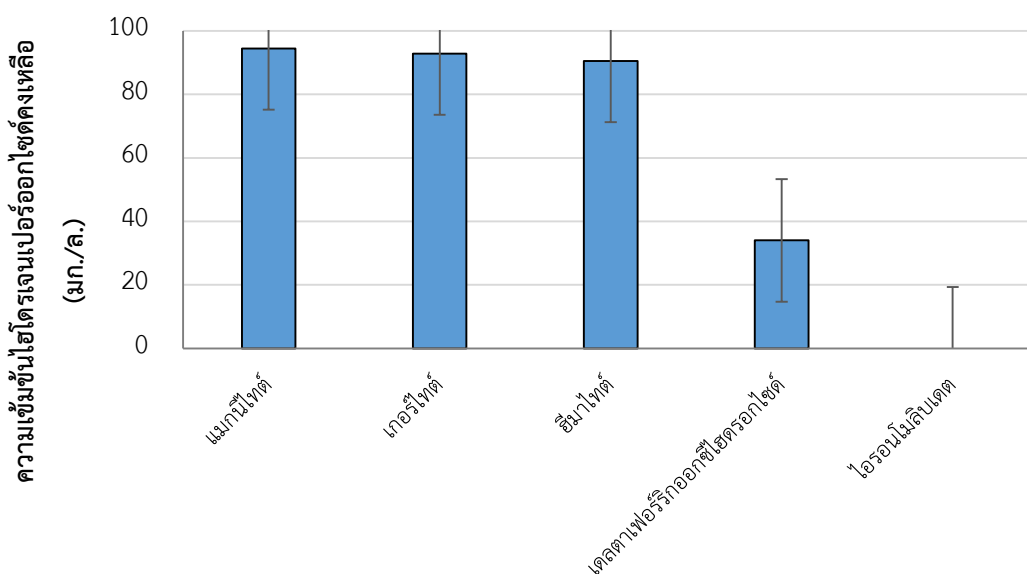


รูปที่ 4-23 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สีและซีโอติด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันของกระบวนการฟেনตันเสมือนในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอช 3



รูปที่ 4-24 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สีและซีโอติด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันของกระบวนการฟেনตันเสมือนในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอช 7

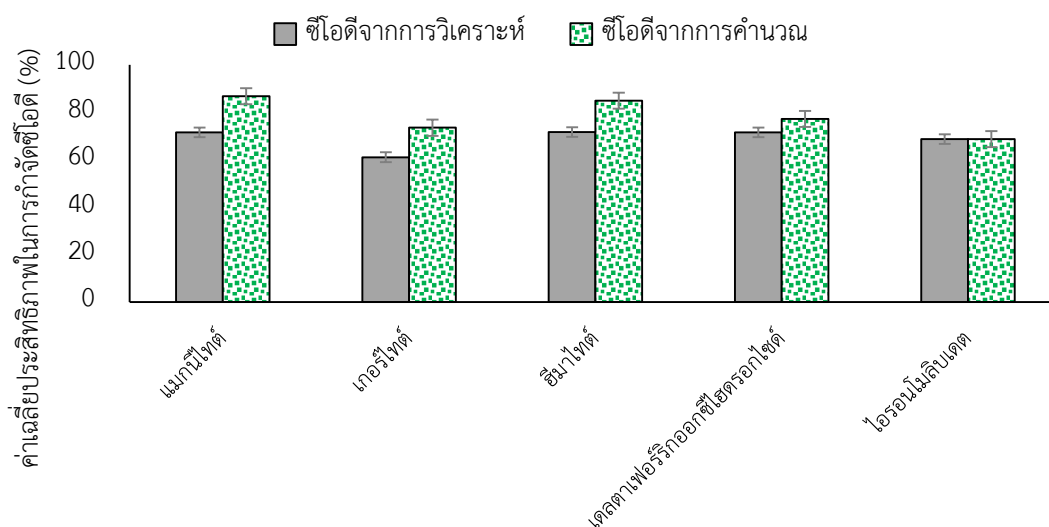
และศึกษาถึงปริมาณสารเคมีที่เหลือในน้ำตัวอย่าง เช่น ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และ ปริมาณเหล็กต่าง ๆ ซึ่งอาจจะส่งกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ หากมีการปนเปื้อนสู่แหล่ง น้ำ ๆ นั้น และ อาจจะส่งผลต่อการวิเคราะห์ลิกนิน สี และซีโอดีได้ จึงได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เหลืออยู่ในน้ำตัวอย่าง ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4-25 และภาคผนวก ค



รูปที่ 4-25 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คงเหลือในกระบวนการเพนต์นเสมือน

เมื่อใช้แมกนีไทต์ เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์ เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ และไอรอนโมลิบดีตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า มีความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คงเหลือ 94.44, 92.86, 90.51, 34.00, และ 0.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งแสดงว่าโดยส่วนใหญ่ประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีของการใช้แมกนีไทต์ เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดขึ้นจากกระบวนการดูดซับเป็นหลัก และเมื่อใช้เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า มีกระบวนการดูดซับเกิดขึ้นเป็นหลักและมีกระบวนการออกซิเดชันเกิดขึ้นร่วมด้วยเพียงเล็กน้อย จากปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่คงเหลือจะผลกระทบต่อวิเคราะห์ซีโอดี เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับโพแทสเซียมไดโครเมต ทำให้ค่าซีโอดีที่วิเคราะห์ได้สูงกว่าความเป็นจริง การสังเกตจุดยุติในการวิเคราะห์ซีโอดีเป็นไปได้ยาก (วุฒิ วิพันธ์พงษ์, 2540) แต่ในขณะที่เมื่อใช้ไอรอนโมลิบดีตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ไม่พบปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เหลืออยู่ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในชุดควบคุมการทดลองตัวเร่งปฏิกิริยาและการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของตัวเร่ง

ปฏิกิริยาไฮรอนโมลิบเดต ซึ่งมีกระบวนการออกซิเดชันเกิดขึ้น และเนื่องจากในการทำปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันเสมือนโดยมีแมกนีไทด์ เกอร์ไทด์ ฮีมาไทด์ เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์ และไฮรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสามารถคำนวณประสิทธิภาพในการกำจัด ซีโอดีได้ใหม่จากปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่คงเหลืออยู่ในน้ำตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 4-26 และในตารางที่ 4-18 พบว่าค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีจากการคำนวณเพิ่มขึ้น คือ 86.81% - 68.78% และค่าซีโอดีจากการวิเคราะห์คือ 71.68% - 68.78%



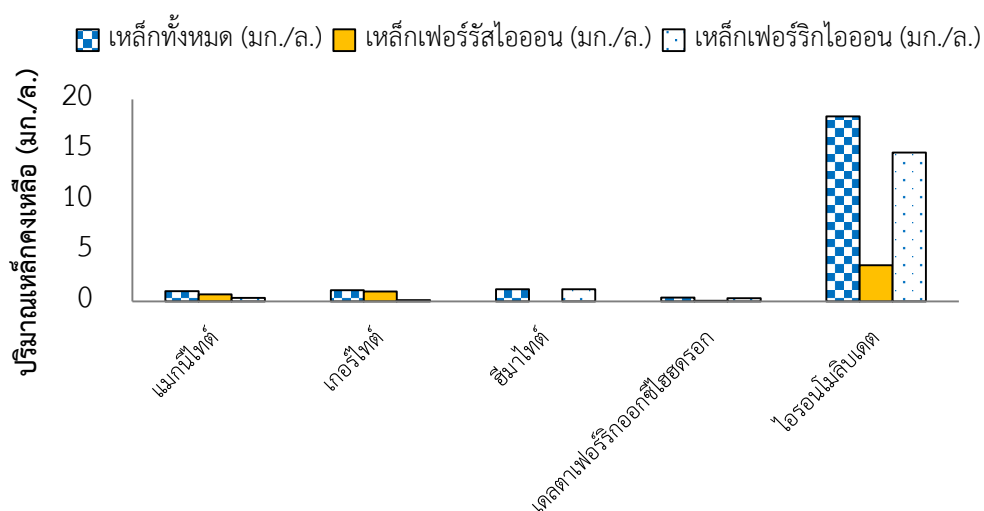
รูปที่ 4-26 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีจากการคำนวณห้ก้างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4-18 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีจากการคำนวณห้ก้างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)	
	ซีโอดีจากการวิเคราะห์	ซีโอดีจากการคำนวณ ห้ก้างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
แมกนีไทด์	71.61	86.81
เกอร์ไทด์	61.11	73.54
ฮีมาไทด์	71.67	84.94
เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์	71.56	77.26
ไฮรอนโมลิบเดต	68.78	68.78

และวิเคราะห์ปริมาณเหล็กที่เหลือในน้ำตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 4-27 และ ภาคผนวก ค พบว่า แมกนีไทต์ เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์ และเดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์มีปริมาณเหล็กในน้ำตัวอย่าง 0.36 – 1.20 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ในขณะที่ไอรอนโมลิบเดตมีปริมาณเหล็กในน้ำตัวอย่าง 18.36 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งประกอบไปด้วยเฟอร์ริกไอออน 14.72 มิลลิกรัมต่อลิตร และเฟอร์รัสไอออน 3.58 มิลลิกรัมต่อลิตร จากปริมาณเหล็กในน้ำตัวอย่างทำให้มีสีของเหล็กมารบกวนการวิเคราะห์ลิกนินและสีได้ (วุฒิ วิพันธ์พงษ์, 2540)



รูปที่ 4-27 ปริมาณเหล็กในน้ำตัวอย่างในกระบวนการเฟนตันเสมือน

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการเฟนตันโดยมีเฟอร์รัสซัลเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการเฟนตันเสมือนโดยมีแมกนีไทต์ เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์ เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์ และไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถกำจัดลิกนิน สี และซีไอได้ดีที่สุดเมื่อดำเนินปฏิกิริยาที่สภาวะที่เหมาะสมซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4-19 พบว่า กระบวนการเฟนตันโดยมีเฟอร์รัสซัลเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นให้ประสิทธิภาพรวมในการกำจัดลิกนิน สี และซีไอดีมากที่สุตรองลงมาคือ เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์ เกอร์ไทต์ แมกนีไทต์ ฮีมาไทต์และไอรอนโมลิบเดต ตามลำดับ ซึ่งเมื่อใช้แมกนีไทต์ เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์ และเดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า มีกลไกหลักคือ กระบวนการดูดซับ ในขณะที่เมื่อใช้ไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีกลไกหลักคือ กระบวนการออกซิเดชัน

และเนื่องจากในการทำปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันเสมือนโดยมีแมกนีไทต์ เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์ เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์ และไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่ามีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ตารางที่ 4-19 สภาวะที่เหมาะสมในการพบต้นและพบต้นเสมือน

ตัวเร่งปฏิกิริยา	พีเอชเริ่มต้น	ความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็ก (ก./ล.)	ความเข้มข้นเริ่มต้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (ก./ล.)	อัตราส่วนเหล็กต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)		
						ลิกนิน	สี	ซีไอดี
เพอร์ซัลเฟต	3	0.08	0.2	1:2.5	30	81.13	96.65	94.80
แมกนีไทด์	3	10	0.1	10:0.1	30	91.21	97.00	71.61
เกอร์ไทด์	3	5	0.1	5:0.1	30	84.90	93.00	61.11
ฮีมาไทด์	3	10	0.1	5:0.1	30	90.00	93.64	71.67
เดลตาเพอร์ริออกซีไฮดรอกไซด์	3	5	0.1	5:0.1	30	90.32	91.66	71.56
ไอรอนนิเมลิบเดต	3	5	0.2	5:0.2	30	55.38	61.94	68.78

เมื่อนำน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการกำจัดลิกนิน สี และซีโอติด้วยกระบวนการเฟนตันโดยมีเพอร์ซัลเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและเฟนตันเสมือนโดยมีแมกนีไทต์ เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์ เดลตาเพอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์ และไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และเนื่องจากในงานวิจัยนี้วิเคราะห์สีในหน่วยแพลทินัม – โคบอลต์ จึงได้ทำการเปลี่ยนหน่วยเป็น ADMI ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.20 พบว่า น้ำเสียตัวอย่างอยู่ในเกณฑ์ต่ำกว่าที่กฎหมายกำหนด แต่มีเพียงการกำจัดสีเมื่อใช้ไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเกินกว่ามาตรฐานที่กฎหมายกำหนดเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 4-20 ลักษณะของน้ำเสียที่ผ่านการกำจัดลิกนิน สี และซีโอติด้วยกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือน

ชนิดน้ำเสีย	สมบัติ		
	ซีโอติ (มก./ล.)	ลิกนิน (มก./ล.)	สี (ADMI)
มาตรฐานน้ำทิ้ง	≤120*	-	≤300
น้ำเสียสังเคราะห์	300 ± 20	190 ± 10	572.91 ± 52
เพอร์ซัลเฟต	15.60	35.85	19.19
แมกนีไทต์	85.17	16.70	17.19
เกอร์ไทต์	116.67	28.69	40.10
ฮีมาไทต์	84.99	19.00	36.44
เดลตาเพอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์	85.32	18.39	47.78
ไอรอนโมลิบเดต	93.66	94.18	303.82

4.5 การศึกษาการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันเสมือน

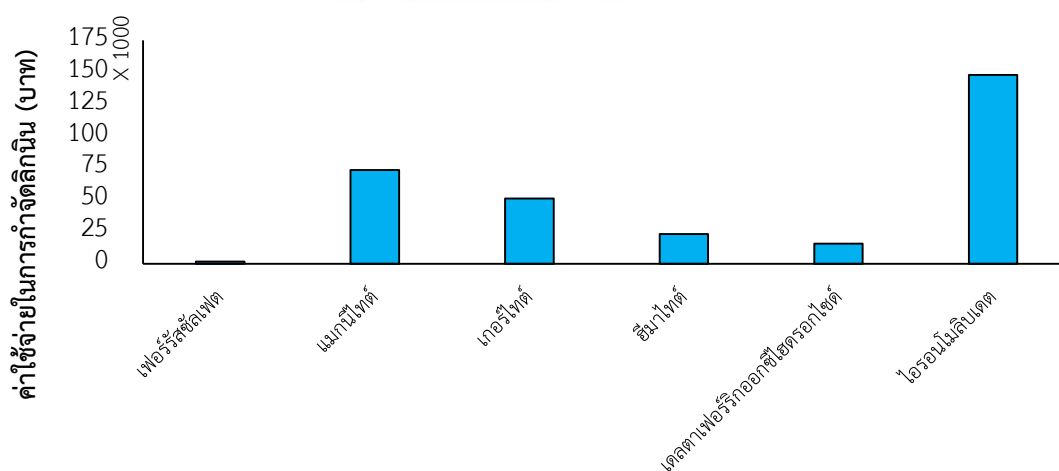
จากการศึกษาถึงการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันเสมือน เพื่อเป็นการลดต้นทุนของตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอติในน้ำเสีย โดยมีแมกนีไทต์ เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์ เดลตาเพอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์ และไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4-21 และภาคผนวก ง

ตารางที่ 4-21 ประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีในกระบวนการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันเสมือน

ตัวเร่งปฏิกิริยา	รอบการใช้ซ้ำ (ครั้ง)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)		
		ลิกนิน	สี	ซีโอดี
แมกนีไทต์	1	91.21	97.00	71.61
เกอร์ไทต์	2	53.98	40.17	33.91
ฮีมาไทต์	2	41.13	9.14	31.57
เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ ซีไฮดรอกไซด์	12	44.88	19.12	29.87
ไอรอนโมลิบเดต	1	55.38	61.94	68.78

พบว่า เมื่อใช้เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถใช้ซ้ำในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีได้มากที่สุด 12 ครั้ง และรองมาคือ เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์ สามารถใช้ซ้ำได้ 2 ครั้ง ในขณะที่เมื่อใช้แมกนีไทต์และไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถใช้ได้เพียงครั้งเดียว แต่ในงานวิจัยของอภิญญา ศุภรพิพัฒน์ (2557) ทำการศึกษาการใช้ซ้ำของไอรอนโมลิบเดต สามารถใช้ซ้ำได้ 4 ครั้ง เนื่องจากศึกษาที่อัตราส่วนเหล็กต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน และประกอบกับตัวเร่งปฏิกิริยาไอรอนโมลิบเดตที่สังเคราะห์ได้แตกและมีเหล็กละลายออกมาจากผิวที่ใช้ทำปฏิกิริยา ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยาต่อไปตามระยะเวลาที่นานขึ้นจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีจะลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xu (2012) ทำให้มีปริมาณเหล็กละลายออกมาในน้ำตัวอย่าง สีจากปริมาณเหล็กที่ละลายออกมาจะรบกวนการวิเคราะห์ลิกนินและสี จึงมีปริมาณเหล็กในการเร่งปฏิกิริยาเพื่อผลิตไฮดรอกซิลเรดิเคิลลดลงและจากการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่า กลไกหลักเมื่อใช้เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์ เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์ และแมกนีไทต์ คือกระบวนการดูดซับ ซึ่งงานวิจัยของ Bolobajev et al. (2014) ได้กล่าวว่า ในกระบวนการออกซิเดชันจะเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยสามารถผลิตไฮดรอกซิลเรดิเคิลเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับเฟอร์รัสไอออนหรือเฟอร์ริกไอออน ซึ่งเมื่อมีตะกอนเฟอร์ริกไอออนเกิดขึ้นจะดูดซับสารอินทรีย์จนเต็มความสามารถ โดยการดูดซับสารอินทรีย์ของตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้ความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ลดลง ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันเสมือน

จากนั้นเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอติที่ได้จากการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันเสมือนกับมาตรฐานน้ำทิ้งตามที่กฎหมายกำหนดจะต้องมีประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอติอย่างน้อย 50% ดังแสดงในภาคผนวก ง พบว่า เดลตาเพอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์ใช้ซ้ำได้ถึง 6 ครั้ง สามารถกำจัดลิกนิน 66.39% สี 57.96% และซีโอติ 50.44% รองลงมาคือ แมงनीไทต์ ฮีมาไทต์ เกอร์ไทต์ และไอรอนโมลิบเดตสามารถใช้ได้เพียงครั้งเดียว และพบว่า เมื่อเปรียบต้นทุนในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอติ โดยกำจัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นลิกนิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใช้ซ้ำ 6 รอบ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4-28 สามารถเรียงลำดับต้นทุนในการบำบัดจากน้อยไปมากได้ดังนี้ เพอร์ริสซัลเฟต 1,622 บาท เดลตาเพอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์ 15,822 บาท ฮีมาไทต์ 23,324 บาท เกอร์ไทต์ 51,022 บาท แมงनीไทต์ 73,519 บาท และไอรอนโมลิบเดต 147,864 บาท ซึ่งพบว่า กระบวนการเฟนตันโดยมีเพอร์ริสซัลเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา มีค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียน้อยที่สุด แต่ในกระบวนการเฟนตันมักก่อให้เกิดตะกอนเคมีจำนวนมาก จึงต้องมีค่าใช้จ่ายในกระบวนการกำจัดต่อไป แต่จากการใช้ซ้ำของเดลตาเพอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์สามารถลดต้นทุนในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอติจากการใช้ซ้ำ 6 รอบได้ 79,110 บาท ทำให้มีความเป็นไปได้ในการนำตัวเร่งปฏิกิริยาเดลตาเพอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์กลับมาใช้ซ้ำในการดำเนินปฏิกิริยาเฟนตันเสมือนเพื่อกำจัดลิกนิน สี และซีโอติในอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ อีกทั้งการใช้ซ้ำสามารถลดปริมาณของเสีย เช่น ตะกอนเคมีที่จะเกิดขึ้นหลังสิ้นสุดปฏิกิริยาได้อีกด้วย



รูปที่ 4-28 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในกระบวนการเฟนตันเสมือนเมื่อใช้ซ้ำ 6 รอบ

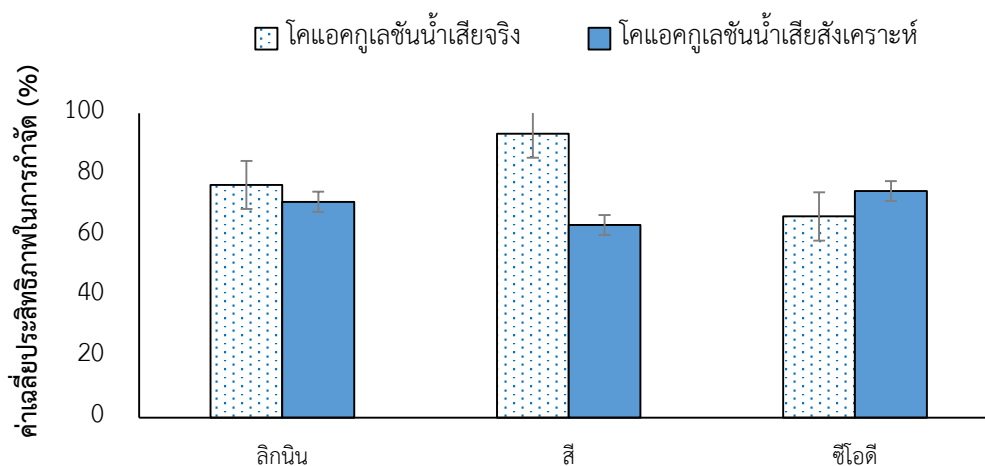
4.6 การศึกษาชุดการทดลองควบคุมในการกำจัดลิกนินในน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือน

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาศักยภาพชุดการทดลองควบคุมในน้ำเสียจริง เพื่อศึกษาถึงผลกระทบจากตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการกำจัดลิกนินในน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือน เนื่องจากในน้ำเสียจริงนั้นมีส่วยประกอบอื่น ๆ มากกว่าน้ำเสียสังเคราะห์ เช่น สารเคมีต่าง ๆ ในการผลิตเยื่อ เซลลูโลส เป็นต้น อาจจะทำให้ผลการทดลองที่ได้แตกต่างจากการใช้น้ำเสียสังเคราะห์จึงได้ทำการทดลองชุดควบคุมการทดลองดังนี้

4.6.1 การศึกษาชุดการทดลองควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยา

4.6.1.1 กระบวนการเฟนตันโดยใช้เฟอร์รัสซัลเฟต

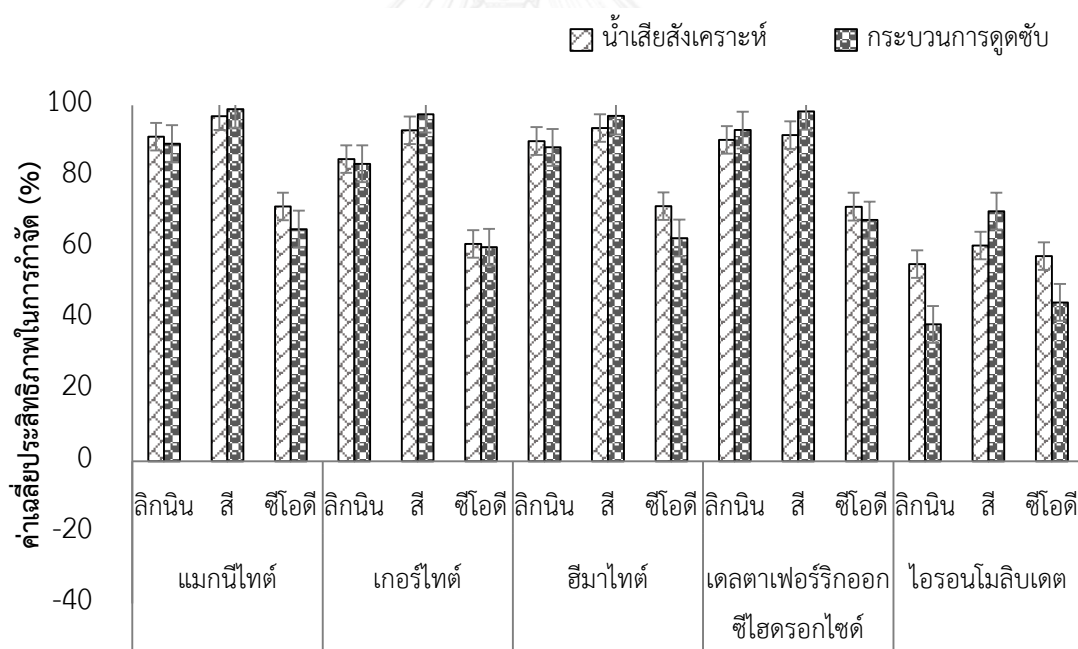
จากการศึกษาชุดควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันโดยมีเฟอร์รัสซัลเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4-29 และภาคผนวก จ พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน 76.44% สี 93.28% และซีไอดี 66.13% อาจกล่าวได้ว่ามีกระบวนการโคแอกกูเลชันเกิดขึ้นในน้ำเสียจริง และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีไอดีกับชุดควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยาในน้ำเสียสังเคราะห์พบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนินและซีไอดีใกล้เคียงกัน แต่ประสิทธิภาพในการกำจัดสีในน้ำเสียจริงสูงกว่าน้ำเสียสังเคราะห์ เนื่องจากการเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันในน้ำเสียจริงสามารถกำจัดลิกนิน สี และองค์ประกอบอื่น ๆ ด้วย เช่น ของแข็งแขวนลอย ซึ่งตกตะกอนลงมาพร้อมกับเฟอร์รัสไอออนซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันโดยตกตะกอนลงมาในรูปของเฟอร์ริกไอออน ซึ่งอาจทำให้สามารถกำจัดสีได้มากกว่า



รูปที่ 4-29 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีไอดีของชุดการทดลองควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันโดยใช้เฟอร์รัสซัลเฟตในน้ำเสียจริง

4.6.1.2 กระบวนการเฟนตันเสมือนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ

จากการศึกษาชุดควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันเสมือน โดยมี แมกนีไทต์ เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์ เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ และไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4-30 และภาคผนวก จ พบว่า แมกนีไทต์ เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์ เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ มีกระบวนการดูดซับเกิดขึ้นและมีประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนินและซีไคไลต์เทียบกับประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน ซี และซีไคไลต์ในน้ำเสียสังเคราะห์ แต่ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไคไลต์ในน้ำเสียจริงสูงกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์ เนื่องจากเกิดการกำจัดสารอินทรีย์หรือองค์ประกอบอื่น ๆ ในน้ำจริงนอกจากการกำจัดลิกนินในน้ำเสียสังเคราะห์เพียงอย่างเดียว แต่ในขณะที่เมื่อใช้ไอรอนโมลิบเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า สามารถกำจัดลิกนิน ซี และซีไคไลต์ในน้ำเสียจริงมากกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์ เนื่องจากไอรอนโมลิบเดตอาจสามารถดูดซับสารอินทรีย์หรือองค์ประกอบอื่น ๆ ในน้ำเสียจริงได้ จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4-30 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน ซี และซีไคไลต์ของชุดการทดลองควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยาในน้ำเสียจริง

4.6.2 การศึกษาชุดการทดลองควบคุมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

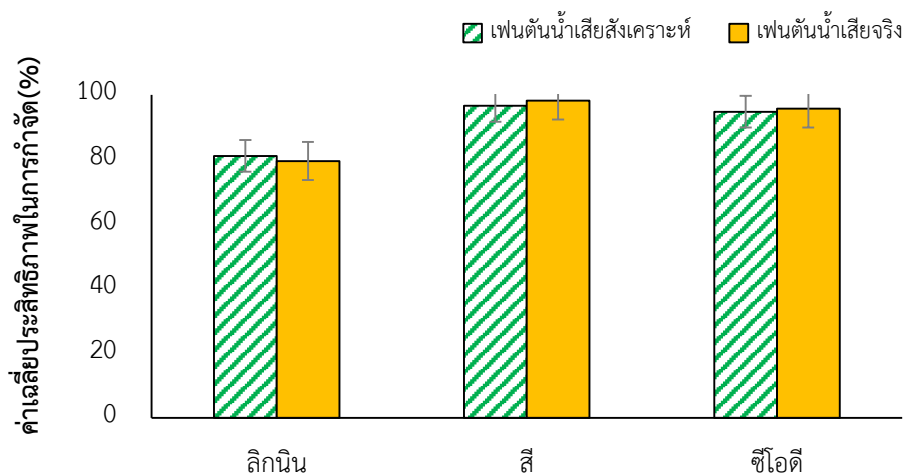
จากการศึกษาชุดการทดลองควบคุมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดี เมื่อเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว โดยเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ผลการทดลองดังภาคผนวก จ พบว่า การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีไม่เกิน 4.56% สี 17.56% และซีโอดี 12.19% และเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองควบคุมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในน้ำเสียสังเคราะห์พบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีใกล้เคียงกัน ซึ่งการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว ทำให้เกิดการแตกตัวของลิกนินเพียงเท่านั้น ซึ่งอาจทำให้ปริมาณสีลดลง แต่ไม่สามารถกำจัดลิกนิน และซีโอดีได้ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Araujo et al. (2011) นอกจากนี้พบว่า ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คงเหลือในน้ำตัวอย่างอาจรบกวนการวิเคราะห์ซีโอดี (Talinli and Anderson, 1992) ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง

4.7 การศึกษาการกำจัดลิกนินในน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือน

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีในน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือน เนื่องจากในน้ำเสียจริงมีองค์ประกอบที่มีความซับซ้อนมากกว่าน้ำเสียสังเคราะห์ อาจจะทำให้ผลการทดลองแตกต่างจากการใช้น้ำเสียสังเคราะห์ ประกอบกับน้ำเสียจริงมีองค์ประกอบและความเข้มข้นของสารอินทรีย์ไม่คงที่ จึงจำเป็นต้องศึกษาลักษณะของน้ำเสียจริงก่อนทำการทดลอง เพื่อเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้เหมาะสม โดยในการทดลองได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

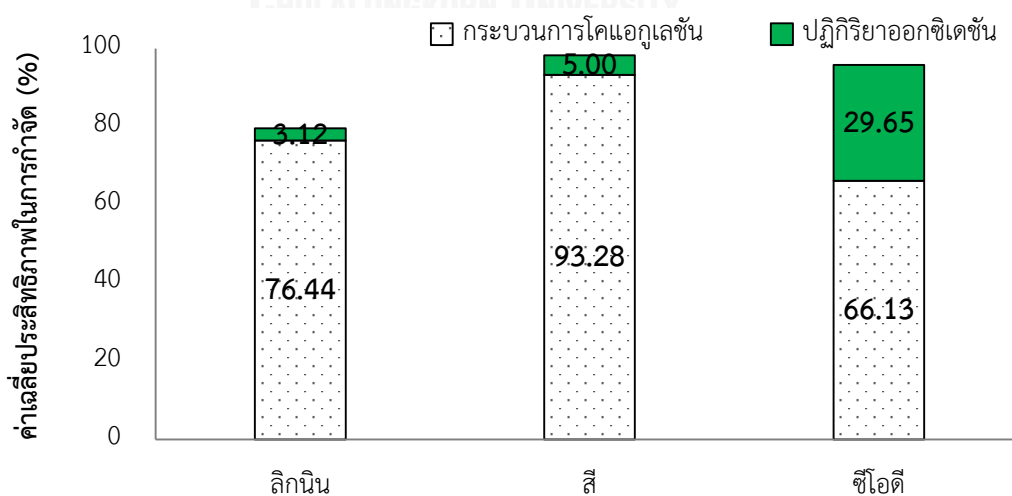
4.7.1 กระบวนการเฟนตันโดยใช้เฟอร์รัสซัลเฟต

จากการศึกษาการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีด้วยกระบวนการเฟนตันโดยมีเฟอร์รัสซัลเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4-31 และภาคผนวก จ พบว่า มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน 79.57% กำจัดสี 98.28% และกำจัดซีโอดี 95.78% และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีของกระบวนการเฟนตันในน้ำเสียจริงกับกระบวนการเฟนตันในน้ำเสียสังเคราะห์พบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4-31 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีไอดีของกระบวนการเฟนตัน
โดยใช้เฟอร์รัสซัลเฟตในน้ำเสียจริง

จากนั้นทำการศึกษาปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพรวมในการกำจัดลิกนิน สี และซีไอดีด้วยกระบวนการเฟนตันกับค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในชุดการทดลองควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยาดังแสดงในรูปที่ 4-32 พบว่า มีปฏิกิริยาออกซิเดชันในการกำจัดลิกนิน สี และซีไอดีเกิดขึ้นอย่างน้อย 3.12%, 5.00%, และ 29.65% ตามลำดับ ซึ่งวิธีคำนวณแสดงในภาคผนวก ก ในน้ำเสียจริงเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันน้อยกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์ อาจเกิดจากองค์ประกอบต่าง ๆ ในน้ำเสียจริงที่มีองค์ประกอบที่ซับซ้อนมากกว่าทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพื่อสลายลิกนินและองค์ประกอบอื่น ๆ ในน้ำเสียได้ยากขึ้น



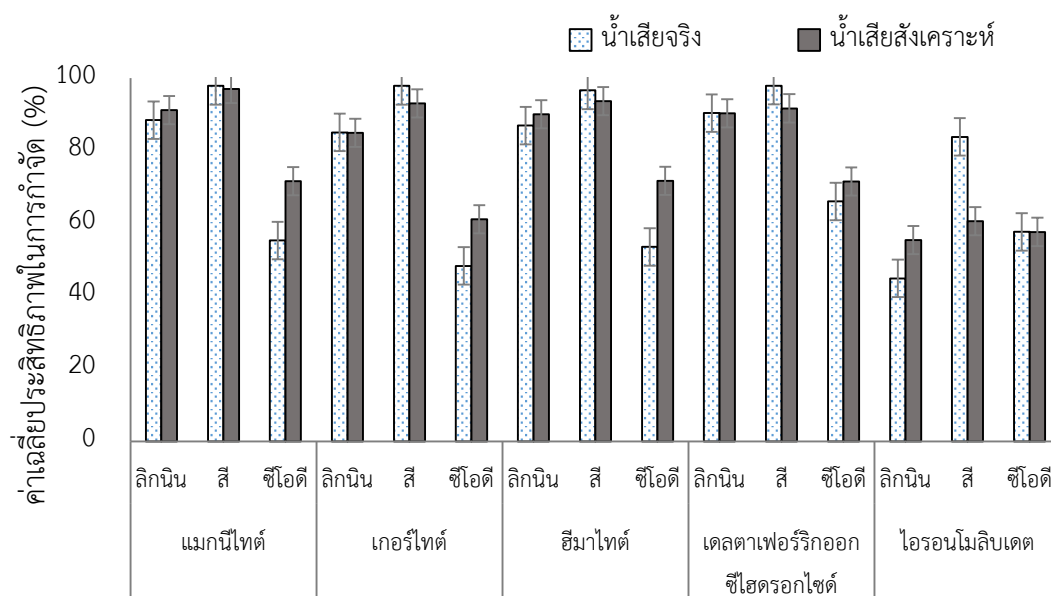
รูปที่ 4-32 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีไอดีด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน
ของกระบวนการเฟนตันในน้ำเสียจริง

4.7.2 กระบวนการเฟนตันเสมือนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ

ทำการศึกษาระบวนการเฟนตันเสมือนในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอทีในน้ำเสียจริง โดยมีแมกนีไทต์ เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์ เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ และไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4-22 รูปที่ 4-33 และภาคผนวก จ ตามลำดับดังนี้

ตารางที่ 4-22 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอทีในกระบวนการเฟนตันเสมือนในน้ำเสียจริง

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)		
	ลิกนิน	สี	ซีโอที
แมกนีไทต์	88.42	97.83	55.28
เกอร์ไทต์	85.03	97.84	48.26
ฮีมาไทต์	86.93	96.62	53.54
เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์	90.37	97.87	66.04
ไอรอนโมลิบเดต	44.85	83.78	57.68



รูปที่ 4-33 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอที
ด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือนในน้ำเสียจริง

จากผลการทดลองการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีในน้ำเสียจริงและน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าจากการใช้แมกนีไทต์ เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์ และเดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนินและสีใกล้เคียงกัน แต่ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียจริงต่ำกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งสามารถกำจัดซีโอดีในน้ำเสียจริงได้ 48.26% - 57.68% แต่ในน้ำเสียสังเคราะห์สามารถกำจัดซีโอดีได้ 57.68% - 71.61% ในขณะที่ไอรอนโมลิบเดตพบว่า มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนินในน้ำเสียจริงลดลงจากในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งสามารถกำจัดลิกนินในน้ำเสียสังเคราะห์ 55.38% แต่ในน้ำเสียจริงสามารถกำจัดลิกนิน 44.85% และพบว่าค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดสีในน้ำเสียจริงสูงกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งสามารถกำจัดสีได้ 83.73% แต่ในน้ำเสียสังเคราะห์สามารถกำจัดสี 61.94% เนื่องจากในน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษมีองค์ประกอบอื่น ๆ ที่มีความซับซ้อนขึ้น และเมื่อในน้ำเสียจริงมีองค์ประกอบอื่น ๆ ร่วมด้วยอาจจะลดโอกาสในการทำปฏิกิริยาระหว่างลิกนินกับ ไฮดรอกซิลแรดิคัลในกระบวนการเฟนตันเสมือนกับลิกนินและองค์ประกอบเหล่านั้นมีผลต่อการเกิดสีในน้ำเสียจริงได้ ซึ่งไฮดรอกซิลแรดิคัลในปฏิกิริยาสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ได้อย่างกว้างขวาง ประกอบกับลิกนินซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่สลายยาก ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในการกำจัดลิกนินได้ลดลงแต่อาจทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีเพิ่มขึ้น

และศึกษาปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพรวมในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือนกับค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในชุดการทดลองควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยาดังแสดงในตารางที่ 4-23 พบว่า เมื่อใช้แมกนีไทต์ เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์ และเดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์ มีกลไกหลักที่เกิดขึ้นคือกระบวนการดูดซับ (Baohua et al., 1994) ในขณะที่ไอรอนโมลิบ มีกลไกการดูดซับร่วมกับปฏิกิริยาออกซิเดชัน แต่เมื่อใช้ไอรอนโมลิบเดตเป็น พบว่า มีปฏิกิริยาออกซิเดชันในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีเกิดขึ้นอย่างน้อย 6.38%, 13.51%, และ 13.04% ตามลำดับ ซึ่งวิธีคำนวณแสดงในภาคผนวก ก จากองค์ประกอบต่าง ๆ ในน้ำเสียจริงที่มีองค์ประกอบที่ซับซ้อนมากกว่าในน้ำเสียจริงจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันน้อยกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์ เนื่องจากไฮดรอกซิลแรดิคัลในปฏิกิริยาออกซิเดชันสามารถสลายองค์ประกอบอื่น ๆ ในน้ำเสียจริงนอกจากลิกนิน จึงทำให้โอกาสที่ลิกนินสามารถทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลแรดิคัลลดลง ประสิทธิภาพได้จากการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีจึงลดลงตามไปด้วย

ตารางที่ 4-23 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีด้วยปฏิกริยาออกซิเดชันของกระบวนการเพนตันเสมือนในน้ำเสียจริง

ตัวเร่งปฏิกริยา	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)								
	กระบวนการเพนตันเสมือน			ชุดควบคุมตัวเร่งปฏิกริยา			ปฏิกริยาออกซิเดชัน		
	ลิกนิน	สี	ซีโอดี	ลิกนิน	สี	ซีโอดี	ลิกนิน	สี	ซีโอดี
แมกนีไทด์	88.42	97.83	55.28	89.27	98.92	65.25	-	-	-
เกอร์ไทด์	85.03	97.84	48.26	83.58	97.56	60.17	1.45	0.28	-
ฮีมาไทด์	86.93	96.62	53.54	88.24	97.03	62.71	-	-	-
เดลตาเฟอร์ริก ออกซีไฮดรอกไซด์	90.37	97.87	66.04	93.08	98.37	67.80	-	-	-
ไอรอนโมลิบเดต	44.85	83.78	57.68	38.47	70.27	44.64	6.38	13.51	13.04

จากการศึกษาการกำจัดลิกนินด้วยกระบวนการเพนตันและเพนตันเสมือน โดยการศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมในการใช้ตัวเร่งปฏิกริยาต่าง ๆ คือ เพอร์ซัลเฟต แมกนีไทด์ เกอร์ไทด์ ฮีมาไทด์ เดลตาเฟอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์ และไอรอนโมลิบเดต พบว่า ในกระบวนการเพนตัน โดยมีเพอร์ซัลเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกริยาสามารถกำจัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นลิกนินประมาณ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้อัตราส่วนเหล็กต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:2.5 และจากการศึกษางานวิจัยของ วิภาดา วิศาลศิริรักษ์ (2558) สามารถบำบัดลิกนินที่มีความเข้มข้นประมาณ 900 - 1,100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้อัตราส่วนเดียวกัน ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า จากสภาวะที่เหมาะสมจากการศึกษาในงานวิจัยนี้เหมาะสมสำหรับการกำจัดลิกนินในน้ำเสียในช่วง 200 - 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้อัตราส่วนเหล็กต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 1:2.5 แต่มีการใช้ความเข้มข้นเหล็กเริ่มต้นที่ต่างกัน ในขณะที่กระบวนการเพนตันเสมือน โดยมีแมกนีไทด์ เกอร์ไทด์ ฮีมาไทด์ เดลตาเฟอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์ และไอรอนโมลิบเดต เป็นตัวเร่งปฏิกริยา พบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองอาจเหมาะสมต่อการกำจัดลิกนินที่มีความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตรเท่านั้น โดยใช้อัตราส่วนที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 5:0.1 - 10:0.1 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ อภิญญา ศุภรพิพัฒน์ (2557) พบว่า ในการกำจัดลิกนินที่มีความเข้มข้น 910 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการเพนตันเสมือน โดยมีไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกริยานั้นมีสภาวะที่เหมาะสมที่แตกต่างกัน ซึ่งใช้อัตราส่วนเหล็กต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 1:10 ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าอัตราส่วนในการกำจัดลิกนินด้วยกระบวนการเพนตันเสมือนนั้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของลิกนินในน้ำเสียและชนิดของตัวเร่งปฏิกริยาในกระบวนการเพนตันเสมือนด้วย และการกำจัดลิกนินด้วยกระบวนการเพนตันและเพนตันเสมือนไม่

เหมาะต่อการกำจัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นลิกนินหรือสารอินทรีย์จำนวนมาก ซึ่งน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือนจะมีสารเคมีหรือองค์ประกอบของสารอินทรีย์คงเหลือในน้ำทิ้งซึ่งจะต้องมีกระบวนการบำบัดต่อไป



บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาการกำจัดลิกนินในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือนสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ผลการศึกษาลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งถูกใช้ในกระบวนการเฟนตันเสมือน เพื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะและสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีผลการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 5-1

ตารางที่ 5-1 สรุปผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (ไมโครเมตร)	สัดส่วนองค์ประกอบของธาตุ			โครงสร้างผลึก
		เหล็ก	ออกซิเจน	โมลิบดีนัม	
แมกนีไทต์	≤5	2.1	1	-	แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส
เกอร์ไทต์	≤5	2	1	-	แบบออร์โทโรห์มบิก
ฮีมาไทต์	≤5	2.3	1	-	แบบโอบอฮีดรัล
เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์	396	2.3	1	-	แบบเฮกซะโกนอล
ไอรอนโมลิบดีต	416	1	0.6	1.5	แบบมอโนคลินิก

2. สภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือน โดยมีพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 และเวลาที่เหมาะสม 30 นาที ดังแสดงในตารางที่ 5-2

ตารางที่ 5-2 สรุปสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือน

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็ก (ก./ล.)	ความเข้มข้นเริ่มต้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (ก./ล.)	สัดส่วนเหล็กต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
เฟอร์รัสซัลเฟต	0.08	0.2	1:2.5
แมกนีไทต์	10	0.1	10:0.1

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ความเข้มข้น เริ่มต้นหลัก (ก./ล.)	ความเข้มข้นเริ่มต้น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (ก./ล.)	สัดส่วนหลักต่อ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
เกอร์ไทด์	5	0.1	5:0.1
อีมาไทด์	10	0.1	5:0.1
เดลตาเพอร์ริกออก ซีไฮดรอกไซด์	5	0.1	5:0.1
ไอรอนโมลิบเดต	5	0.2	5:0.2

- จากการศึกษากระบวนการเพนตันและเพนตันเสมือนในการกำจัดลิทินในน้ำเสียสังเคราะห์ของอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษพบว่า กระบวนการเพนตันโดยใช้เพอร์ริสซัลเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้ประสิทธิภาพรวมสูงที่สุด และรองลงมาคือกระบวนการเพนตันเสมือนโดยมีเดลตาเพอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์ เกอร์ไทด์ แมกนีไทด์ อีมาไทด์และไอรอนโมลิบเดต และจากชุดการทดลองในชุดควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าในกระบวนการเพนตันโดยใช้เพอร์ริสซัลเฟตมีกลไกหลักในการกำจัด คือกระบวนการโคแอกกูเลชัน ในกระบวนการเพนตันเสมือน โดยมีเดลตาเพอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์ เกอร์ไทด์ แมกนีไทด์ อีมาไทด์ มีกลไกหลักในการกำจัด คือ กระบวนการดูดซับ ในขณะที่ใช้ไอรอนโมลิบเดตพบว่า เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นกลไกหลักในการกำจัด
- จากการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อกระบวนการเพนตันและเพนตันเสมือนพบว่า เมื่อพีเอชเริ่มต้น ความเข้มข้นหลักเริ่มต้น ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงหรือต่ำกว่าสภาวะที่เหมาะสม จะขัดขวางการเกิดไฮดรอกซิลแรดิคัล ทำให้การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้น้อยหรือช้าลง และในกระบวนการเพนตันเสมือนโดยมีแมกนีไทด์ เกอร์ไทด์ อีมาไทด์ เดลตาเพอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นสามารถดำเนินปฏิกิริยาในสภาวะที่พีเอชเริ่มต้นเป็นกลาง (พีเอชเท่ากับ 7) แม้ประสิทธิภาพที่ได้จะน้อยกว่าที่พีเอชในสภาวะเป็นกรด แต่ยังคงให้ประสิทธิภาพที่สูง
- จากการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเพนตันเสมือนพบว่าเดลตาเพอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์นั้นสามารถใช้ซ้ำได้มากที่สุดถึง 12 ครั้งและรองมาคือ เกอร์ไทด์

ฮีมาไทต์ ซึ่งสามารถใช้ซ้ำได้ถึง 2 ครั้งและไอรอนโมลิบดีนัมและแมกนีไทต์สามารถใช้ได้เพียงครั้งเดียว

6. ในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอทีในน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการเฟนตันที่สภาวะที่เหมาะสม พบว่ามีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอทีใกล้เคียงกัน แต่ในกระบวนการเฟนตันเสมือนโดยมี แมกนีไทต์ เกอร์ไทต์ ฮีมาไทต์ เดลตาเฟอร์ริก ออกซีไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน และสีใกล้เคียงกันแต่ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอทีลดลง ในขณะที่เมื่อใช้ไอรอนโมลิบดีนัมพบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีเพิ่มขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การหยุดปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันมักจะกระทำโดยการปรับพีเอชให้อยู่ในสภาวะที่เป็นต่าง แต่พบว่าส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ปริมาณลิกนินและสี ทำให้การปรับพีเอชมีข้อจำกัดและพบว่ามีปริมาณเหล็กละลายคงเหลือในระบบ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการบำบัดเหล็กในน้ำเสียอีกครั้งหากนำไปประยุกต์ใช้ในระบบน้ำเสียจริง
2. ในกระบวนการเฟนตันเสมือนพบว่ามีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คงเหลือในระบบซึ่งรบกวนประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ซีโอที ดังนั้นอาจจะใช้วิธีการแบ่งเติมสารเคมี (step feeds) ในการเติมสารเคมี เพื่อลดปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่คงเหลือในระบบ
3. ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันเสมือนเป็นแบบสารเนื้อผสมซึ่งมีลักษณะเป็นผงและจำเป็นต้องแยกตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกระดาษกรองเสมอ ทำให้เกิดความยุ่งยากหากนำมาใช้ในระบบน้ำเสียจริง ดังนั้นอาจจะต้องประยุกต์ใช้ตัวกลางรองรับหรือยึดตัวเร่งปฏิกิริยาไว้
4. การนำกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือนมาประยุกต์ใช้ในระบบน้ำเสียจริงในอุตสาหกรรมนั้นจะต้องทำการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการดำเนินปฏิกิริยาแบบต่อเนื่อง
5. ศึกษาถึงกลไกกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันเสมือนกับลิกนินในอนาคต

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

เจษฎา ถาวรศักดิ์. การใช้กระบวนการยูวีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์บำบัดน้ำชะซึมจากหลุมฝังกลบมันคงที่ผ่านกระบวนการบำบัดขั้นต้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2547.

ไพฑูรย์ หมายมั่นสมสุข. "การวิเคราะห์น้ำเสียเบื้องต้น" [ออนไลน์]. 2554. เข้าถึงได้จาก: <http://www2.diw.go.th/Research/%E0%B9%80%E0%B8%AD%E0%B8%81%E0%B8%AA%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%80%E0%B8%9C%E0%B8%A2%E0%B9%81%E0%B8%9E%E0%B8%A3%E0%B9%88/6-ColorOdorTaste-w.pdf> [22 มกราคม 2558]

กมลฤทัย ทัดเทียม. การบำบัดคูมินไฮโดรเปอร์ออกไซด์ด้วยกระบวนการเฟ้นต้นและอิเล็กโตรเฟ้นต้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.

กิตติพงษ์ ไพรศรี. การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาไอรอน-โมลิบดีนัมในอุตสาหกรรมการผลิตฟอร์มัลดีไฮด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา. "การศึกษาผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิต" [ออนไลน์]. 2556. เข้าถึงได้จาก: http://sci.bsru.ac.th/dept/product/research/1364273813/1364273813_Chapter3.pdf [22 มกราคม 2558]

ชนัญญา เพิ่มชาติ. การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟ้นต้นและเฟ้นต้นเสมือน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556.

ณัฐกร วงษา. คอสติกไซเซชันโดยตรงของน้ำยางดำโดยตัวเร่งปฏิกิริยาไททานเนียมและแมงกานีสในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

ธนภุต พรหมทอง. การกำจัดสีและสารอินทรีย์ของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยน้ำหมักชีวภาพและเฟ้นต้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2552.

- นุสรุา โรจนวิลาวัลย์. การบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าและโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- ปฐมภาพร นันทกากุล. การใช้ปฏิกิริยาเฟนตันในการบำบัดค่า COD และสีของน้ำทิ้งจากกระบวนการรักษาเนื้อไม้ของพาราของโรงงานผลิตเฟอร์นิเจอร์และน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตกล่องกระดาษ. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2549.
- ปิ่นรัตน์ สิริพันธ์พงศ์. การใช้น้ำหมักชีวภาพและปฏิกิริยาเฟนตันบำบัดน้ำชะมูลฝอย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2552.
- พิมพ์ชนก เต็งเจริญ. การกำจัดสีของน้ำทิ้งในการผลิตลิกนินโดยราไวต์รอต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- รุ่งอรุณ วัฒนวงศ์. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับกระดาษ. ใน เอกสารการอบรมเรื่อง เทคโนโลยีการผลิตเยื่อและกระดาษ รุ่นที่ 2, กรุงเทพมหานคร 2542.
- วนิดา ชูอักษร. เทคโนโลยีการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2555.
- วรภรณ์ อภิวัฒนาภิวัด. การลดสีน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษโดยโอโซนออกซิเดชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2550.
- วิชา พิชัยณรงค์. การแยกลิกนินออกจากน้ำดำในกระบวนการทำเยื่อกระดาษจากยูคาลิปตัส. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- วิภาดา วิศาลศิริรักษ์. การกำจัดลิกนินในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษด้วยกระบวนการเฟนตันและเฟนตันแบบประยุกต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- วุฒิพงศ์ วิพันธ์พงษ์. การใช้สารเคมีเฟนตันกำจัดสีและสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- วุฒิพงศ์ โนนศรีชัย. การกำจัดลิกนิน สี และซีไอดี ในน้ำเสียโรงงานผลิตเยื่อกระดาษด้วยกากปูนขาว. ขอนแก่น มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2546.
- สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. "เอกสารเผยแพร่อุตสาหกรรมน้ำรู้ ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ กระดาษ และสิ่งพิมพ์" [ออนไลน์]. 2557. เข้าถึงได้จาก http://www.oie.go.th/sites/default/files/attachments/IndustBasicKnowledge/Master_7.pdf [22 มกราคม 2558]

อภิญญา ศุภรพีพัฒน์. การกำจัดลิควินในน้ำเสียโรงงานเยื่อกระดาษโดยกระบวนการเฟนตันเสมือนแบบเนื้อผสมโดยใช้ไอรอนโมลิบเดต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

ภาษาอังกฤษ

Ahmad, M. A., Daud N. K. and Hameed B. H. (2010). "Decolorization of Acid Red 1 dye solution by Fenton-like process using Fe–Montmorillonite K10 catalyst." Chemical Engineering Journal 165(1): 116.

APHA., AWWA. and WPCF. (1985). Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater.

Araujo, F., Yokoyama L. and Telxeira L. (2011). "Heterogeneous fenton process using the mineral hematite for the discolouration of a reactive dye solution." Braz. J. Chem. Eng. 28(4): 605-616.

Baohua, G., Schmitt J. and Chen Z. (1994). "Adsorption and desorption of natural organic matter on iron oxide mechanisms and models." Environmental Science Technology 28(1): 38-46.

Bentivenga, G., Bonini C., D'Auria M. and De Bona A. (2003). "Degradation of steam-exploded lignin from beech by using Fenton's reagent." Biomass and Bioenergy 24(3): 238.

Bolobajev, J., K E., V M. and G A. (2014). "Reuse of ferric sludge as an iron source for the Fenton-based process in wastewater treatment." Chemical Engineering Journal 255: 8-13.

Carlson. L. and U. S. (1980). "NATURAL OCCURRENCE OF FERROXYHITE (8'-FeOOH)." Clays and Clay Minerals 28(4): 272-280.

Daud, N. K. and Hameed B. H. (2010). "Fenton-like oxidation of reactive black 5 solution using iron–Montmorillonite K10 catalyst." Journal of Hazardous Materials 176(1–3): 1121.

Dilek, F. B., Taplamacioglu H. M. and Tarlan E. (1999). "Colour and AOX removal from pulping effluents by algae." Applied Microbiology and Biotechnology 52(4): 585-591.

- Flaherty, K. A. and Huang C. P. (1992). "Continuous flow application of Fenton's reaction for the treatment of refractory wastewaters." Chemical Oxidation: Technology for the nineties 2: 58-77.
- Fu, L., Yu H., Zhang C., Shao Z. and Yi B. (2014). "Cobalt Phosphate Group Modified Hematite Nanorod Array as Photoanode for Efficient Solar Water Splitting." Electrochimica Acta 136: 363-369.
- Gilbert, F., Refait P., Lévêque F., Remazeilles C. and Conforto E. (2008). "Synthesis of goethite from Fe(OH)₂ precipitates: Influence of Fe(II) concentration and stirring speed." Journal of Physics and Chemistry of Solids 69(8): 2124-2130.
- Glaze, W. H., Kang J. W. and Douglas H. C. (1987). "The Chemistry of Water Treatment Processes Involving Ozone, Hydrogen Peroxide and Ultraviolet Radiation." Ozone: Science & Engineering 9(4): 335-352.
- Hasan, D., Abdul-Aziz A. R. and Daud W. (2012). "Oxidative mineralisation of petroleum refinery effluent using Fenton-like process." Chemical Engineering Research and Design 90(2): 298-307.
- Irfan, M., Butt T., Imtiaz N., Abbas N., Khan R. A. and Shafique A. (2013). "Optimisation of ozone treatment for colour and COD removal of acid dye effluent using central composite design experiment." Dyes and Pigments 63(2): 127-134.
- Jingheng, D., Jingyuan J., Yuanyuan Z., Xiaoping L., Changming D. and Ya X. (2008). "FeVO₄ as a highly active heterogeneous Fenton-like catalyst towards the degradation of Orange II." Applied Catalysis B: Environmental 84(3-4): 473.
- Jiyun, F., Xijun H., Po-Lock Y., Huai-Yong Z. and Gao-Qing L. (2003). "Discoloration and mineralization of Reactive Red HE-3B by heterogeneous photo-Fenton reaction." Water Research 37(15): 3776-3784.
- Khataee, A., Gholami P. and Sheydaei M. (2016). "Heterogeneous Fenton process by natural pyrite for removal of a textile dye from water: Effect of parameters and intermediate identification." Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 58: 366-373.
- Kuznetsova, E. V., Savinov E. N., Vostrikova L. A. and Parmon V. N. (2004). "Heterogeneous catalysis in the Fenton-type system FeZSM-5/H₂O₂." Applied Catalysis B: Environmental 51(3): 170.

- Lee, S., Oh J. and Park J. (2006). "Degradation of Phenol with Fenton-like Treatment by Using Heterogeneous Catalyst (Modified Iron Oxide) and Hydrogen Peroxide." Bulletin of the Korean Chemical Society 27(4): 489-494.
- Liu, X., Qiu Q. and Huang C. (2011). "Degradation of the Reactive Black 5 by Fenton and Fenton-like system." Procedia Engineering 15: 4840.
- Ma, J., Yang M., Yu F. and Chen J. (2015). "Easy solid-phase synthesis of pH-insensitive heterogeneous CNTs/FeS Fenton-like catalyst for the removal of antibiotics from aqueous solution." Journal of Colloid and Interface Science - 444(- 0): - 32.
- Pérez, M., Torrades F., García-Hortal J. A., Domènech X. and Peral J. (2002). "Removal of organic contaminants in paper pulp treatment effluents under Fenton and photo-Fenton conditions." Applied Catalysis B: Environmental 36(1): 63-74.
- Pinto, S. X., Pacheco H. V., Coelho J. V. and Lorenc, on E. (2012). "Nanostructured Delta-FeOOH: An efficient Fenton-like catalyst for the oxidation of organics in water." Applied Catalysis B: Environmental 119: 175– 182.
- Ragauskas, A. "Lignin Overview" [Online]. 2013. Available from: http://www.ipst.gatech.edu/faculty/ragauskas_art/technical_reviews/lignin%20overview.pdf [2015, January 20]
- Ramirez, J. H., Maldonado-Hódar F. J., Pérez-Cadenas A. F., Moreno-Castilla C., Costa C. A. and Madeira L. M. (2007). "Azo-dye Orange II degradation by heterogeneous Fenton-like reaction using carbon-Fe catalysts." Applied Catalysis B: Environmental 75(3–4): 323.
- Rodríguez, M. (2003). "Fenton and UV-vis based advanced oxidation processes in wastewater treatment: Degradation, mineralization and biodegradability enhancement." Universitat de Barcelona.
- Rusianto. T., Wildan. M. W. and K. A. (2015). "Various sizes of the synthesized Fe₃O₄ nanoparticles assisted by mechanical vibrations." Indian Journal of Engineering and Materials Sciences 22(2): 175-180.
- Shukla, P., Wang S., Sun H., Ang H. M. and Moses T. (2010). "Adsorption and heterogeneous advanced oxidation of phenolic contaminants using Fe loaded mesoporous SBA-15 and H₂O₂." Chemical Engineering Journal 164(1): 260.

- Singh, P. and Thakur I. S. (2006). "Colour removal of anaerobically treated pulp and paper mill effluent by microorganisms in two steps bioreactor." Bioresource Technology 97(2): 223.
- Stephen, C. F. (2010). "Chemical and thermal characterization of three industrial lignins and their corresponding lignin esters " Bioresources 5(2): 990-1009.
- Stephenson, R. J. and Duff J. B. (1996). "Coagulation and precipitation of a mechanical pulping effluent—I. Removal of carbon, colour and turbidity." Water Research 30(4): 792.
- Sun, S. P., Hanna K. and Chiron S. (2007). "Fenton-like oxidation of 2,4,6-trinitrotoluene using different iron minerals." Science of the Total Environment 349(1-2): 71-79.
- Suppiah, D. D. and Abd Hamid S. B. (2016). "One step facile synthesis of ferromagnetic magnetite nanoparticles." Journal of Magnetism and Magnetic Materials 414: 204-208.
- Talget, M. and Li M. (2013). "Wastewater treatment process of organic impurities by Fenton reaction." Applied Technologies and innovations 9(3): 105-108.
- Talinli, I. and Anderson G. K. (1992). "Interference of hydrogen peroxide on the standard cod test." Water Research 26(1): 107-110.
- Tian, S. H., Tu Y. T., Chen D. S., Chen X. and Xiong Y. (2011). "Degradation of Acid Orange II at neutral pH using $\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$ as a heterogeneous Fenton-like catalyst." Chemical Engineering Journal 169(1-3): 37.
- Torrades, F., Saiz S. and García-Hortal J. A. (2011). "Using central composite experimental design to optimize the degradation of black liquor by Fenton reagent." Desalination 268(1-3): 97-102.
- US Peroxide. (2553).
- Walker, G. M. and Weatherley L. R. (2000). "Biodegradation and biosorption of acid anthraquinone dye." Environmental Pollution 108(2): 219-223.
- Wang, S. (2008). "A Comparative study of Fenton and Fenton-like reaction kinetics in decolourisation of wastewater." Dyes and Pigments 76(3): 714-720.
- Wang, W. M., Song J. and Han X. (2013). "Schwertmannite as a new Fenton-like catalyst in the oxidation of phenol by H_2O_2 ." Journal of Hazardous Materials 262: 412-419.

- Wang, Y., Gao Y., Chen L. and Zhang H. (2015). "Goethite as an efficient heterogeneous Fenton catalyst for the degradation of methyl orange." Catalysis Today.
- Wu, J., Xiao Y.-Z. and Yu H.-Q. (2005). "Degradation of lignin in pulp mill wastewaters by white-rot fungi on biofilm." Bioresource Technology - 96(- 12): - 1363.
- Xu, L. (2012). "Magnetic nanoscaled Fe₃O₄/CeO₂ composite as an efficient Fenton-like heterogeneous catalyst for degradation of 4-chlorophenol." Environ Sci Technol 46(18): 10145-10153.
- YooJin, K., Ri Y., Kyoon C. and Jae-Hwan P. (2013). "Color Evolution and Phase Transformation of α -FeOOH@SiO₂ and β -FeOOH@SiO₂ pigments." Journal of Korean Powder Metallurgy Institute 20(3): 210-214.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์

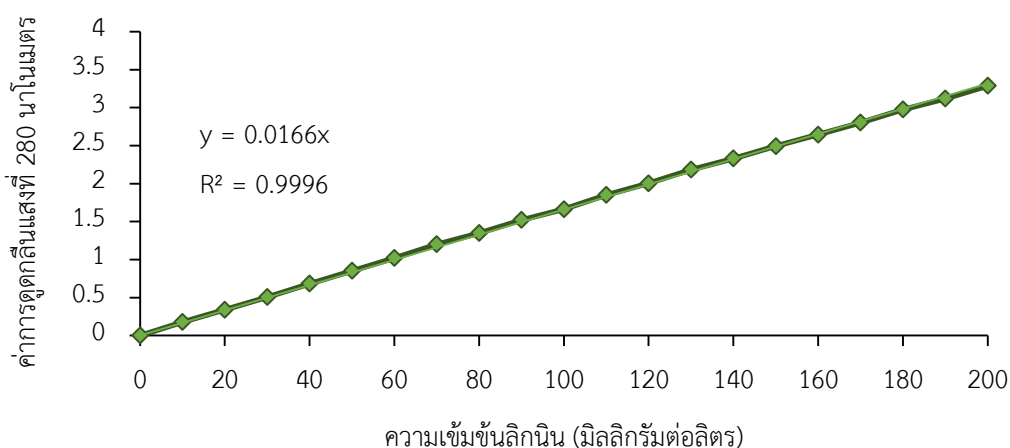
ภาคผนวก ก-1 การวิเคราะห์ลิกลิน

ทำการวัดวิเคราะห์ลิกลินด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยทำการวัดน้ำตัวอย่างที่ความยาวคลื่นที่ 280 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่สามารถตรวจวัดโครงสร้างของลิกลินจึงได้ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) จากนั้นนำไปเทียบกับกราฟมาตรฐานของลิกลิน เพื่อเปรียบเทียบหาค่าความเข้มข้นลิกลิน

● การสร้างกราฟมาตรฐานลิกลิน

วิธีทำ

- เตรียมสารละลายลิกลิน 1 กรัมต่อลิตร โดยชั่งอัลคาไลน์ลิกลิน 1 กรัม ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร เก็บไว้เป็นสารละลายเข้มข้น (stock solution)
- เตรียมอนุกรมของสารละลายอัลคาไลน์ลิกลิน โดยเจือจางสารละลายอัลคาไลน์ลิกลินให้อยู่ในช่วง 0 – 200 มิลลิกรัมต่อลิตร
- จากนั้นนำไปทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร
- นำค่าที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอัลคาไลน์ลิกลินกับค่าการดูดกลืนแสงที่ 280 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ ก-1



รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานลิกลินที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร

ภาคผนวก ก-2 การวิเคราะห์ปริมาณซีโอดี

ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand; COD) คือการวัดปริมาณออกซิเจนเทียบเท่าที่ใช้ในการออกซิไดส์สารประกอบอินทรีย์ในน้ำตัวอย่างอย่างสมบูรณ์ด้วยตัวออกซิไดส์อย่างแรงจนได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายคือ น้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งการวิเคราะห์ซีโอดีในงานวิจัยนี้เลือกวิธีรีฟลักซ์แบบปิด (Closed reflux) เนื่องจากสารระเหยง่ายจะสามารถถูกออกซิไดส์ได้มากกว่าในระบบปิด เพราะมีเวลาสัมผัสกับสารออกซิไดซ์นานกว่า (ไพฑูริย์ หมายมั่นสมสุข, 2554)

วิธีทำ

โดยนำน้ำตัวอย่างใส่หลอดย่อยสลาย 5 มิลลิลิตร จากนั้นเปิดสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล 3 มิลลิลิตร และกรดซัลฟิวริก 7 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดย่อยสลายและนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นตัวลง จากนั้นหยดเฟอร์โรอินดิเคเตอร์ 2 - 3 หยดและทำการไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล จนน้ำตัวอย่างเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแดง จากนั้นนำค่าที่ได้จากการไทเทรตไปคำนวณหาค่าซีโอดี

● การคำนวณหาซีโอดี

$$\text{ซีโอดี (COD)} = (A - B) \times (8000 \times M) / C$$

เมื่อ	ซีโอดี (COD)	คือ ค่าซีโอดี หน่วยเป็นมิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร
A		คือ ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไตเตรทแบลงค์ หน่วยเป็นมิลลิลิตร
B		คือ ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไตเตรทตัวอย่าง หน่วยเป็นมิลลิลิตร
M		คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต หน่วยเป็นโมลาร์
C		คือ ปริมาตรตัวอย่างที่ใช้ หน่วยเป็นมิลลิลิตร

● **วิธีหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต**

โดยนำน้ำกลั่นปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในหลอดย่อยสลายและเติมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล 5 มิลลิลิตร และกรดซัลฟิวริก 15 มิลลิลิตร จากนั้นหยดเฟอร์โรอินดิเคเตอร์ 2 - 3 หยดและทำการไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต

— การคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต

$$\text{ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต} = A \times 0.1 / B$$

เมื่อ A คือ ปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล 3 มิลลิลิตร

B คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต ที่ใช้ไตเตรท หน่วยเป็นมิลลิลิตร

ภาคผนวก ก-3 การวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กทั้งหมด ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนและเฟอร์ริกไอออน

ทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนและปริมาณเหล็กทั้งหมดด้วยวิธีฟิแนนโทลีน

● **สำหรับการหาปริมาณเหล็กทั้งหมด**

นำตัวอย่างปริมาตร 50 มิลลิลิตร เติมกรดเกลือเข้มข้น 2 มิลลิลิตรและสารไฮดรอกซีลามีน 1 มิลลิลิตร ใส่ลูกแก้ว 3 - 4 เม็ด นำไปต้มจนเดือดเพื่อให้มั่นใจว่าเหล็กละลายหมดแล้วจนปริมาตรลดลงเหลือประมาณ 15 - 20 มิลลิลิตร จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง เทใส่หลอดเนสเลอร์ เติมสารละลายอะเซเตตบัฟเฟอร์ 10 มิลลิลิตร สารละลายฟิแนนโทลีน 4 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจนครบ 50 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันตั้งทิ้งอย่างน้อย 10 - 15 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร แล้วนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานเพื่ออ่านค่าปริมาณเหล็กทั้งหมด

— การสร้างกราฟมาตรฐานสารละลายเหล็ก

เตรียมสารละลายเหล็กที่ความเข้มข้น 10, 20, 30, 40, 50, และ 60 ไมโครกรัม โดยเปิดสารละลายเหล็กที่มีความเข้มข้นปริมาตร 1 มิลลิลิตรเท่ากับ 10 ไมโครกรัม มา 1, 2, 3, 4, 5, และ 6 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดเนสเลอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นให้ครบปริมาตรแล้วทำตามวิธีการหาปริมาณเหล็กทั้งหมดที่ได้กล่าวมาข้างต้น

สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเหล็ก หน่วยไมโครกรัมกับค่าดูดกลืนแสงที่ 510 นาโนเมตร

— การคำนวณหาปริมาณเหล็กทั้งหมด

เหล็ก (มิลลิกรัมต่อลิตร) = ไมโครกรัมเหล็กที่อ่านได้จากกราฟ / ปริมาตรตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

● สำหรับการหาปริมาณเหล็กเฟอร์รัส

นำตัวอย่างปริมาตร 50 มิลลิลิตร เติมกรดเกลือเข้มข้น 2 มิลลิลิตร เทใส่หลอดเนสเลอร์ เติมสารละลายอะเซเตตบัฟเฟอร์ 10 มิลลิลิตร สารละลายฟิแนนโทรลีน 20 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจนครบ 100 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ไม่ให้ถูกแสง นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตรแล้วนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน เพื่ออ่านค่าปริมาณเหล็กเฟอร์รัส

— การคำนวณหาปริมาณเหล็กเฟอร์รัส

เหล็กเฟอร์รัส (มิลลิกรัมต่อลิตร) = ไมโครกรัมเหล็กที่อ่านได้จากกราฟ / ปริมาตรตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

— สำหรับการหาปริมาณเหล็กเฟอร์ริก จะหาได้จากการคำนวณโดยนำปริมาณเหล็กทั้งหมดลบด้วยปริมาณเหล็กเฟอร์รัส

— สำหรับการหาปริมาณตะกอนเหล็กที่เกิดขึ้น จะหาได้จากการคำนวณโดยนำปริมาณเหล็กเริ่มต้นลบด้วยปริมาณเหล็กทั้งหมด

ภาคผนวก ก-4 การวิเคราะห์สี

ทำการวัดวิเคราะห์สีด้วยวิธีแพลทตินัม - โคบอลต์ อ้างอิงจาก APHA. et al. (1985) โดยนำน้ำตัวอย่างมาทำการกรองด้วยเมมเบรนฟิวเตอร์ขนาด 0.45 ไมโครเมตรจากนั้นนำน้ำตัวอย่างใส่หลอดเนสเลอร์ แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 475 นาโนเมตรแล้วนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของสารละลายสีมาตรฐาน เพื่อหาค่าความเข้มข้นที่ได้เติมไว้ หากมีความเข้มข้นมากกว่าค่าสีมาตรฐานให้นำน้ำตัวอย่างไปเจือจางด้วยน้ำกลั่น

● การสร้างกราฟมาตรฐาน

วิธีทำ

- เตรียมสารละลายคลอโรแพลทตินัม โดยนำโพแทสเซียมคลอโรแพลทตินัม 1.246 กรัม และโคบอลต์สกลอไรด์ 1 กรัม ในน้ำกลั่นที่มีการเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 100 มิลลิลิตร คนให้ละลายจนหมด จากนั้นเทใส่ขวดปริมาตรขนาด 1 ลิตร เจือจางจนครบปริมาตร 1 ลิตร ซึ่งมีความเข้มข้นสีเท่ากับ 500 หน่วยสี (color unit)
- นำสารละลายคลอโรแพลทตินัมที่ได้มาทำการเตรียมสารละลายความเข้มข้นที่หน่วยสีต่าง ๆ โดยทำการเจือจางให้ได้ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ดังแสดงในตารางที่ ก-1

ตารางที่ ก-1 ค่าสีของสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

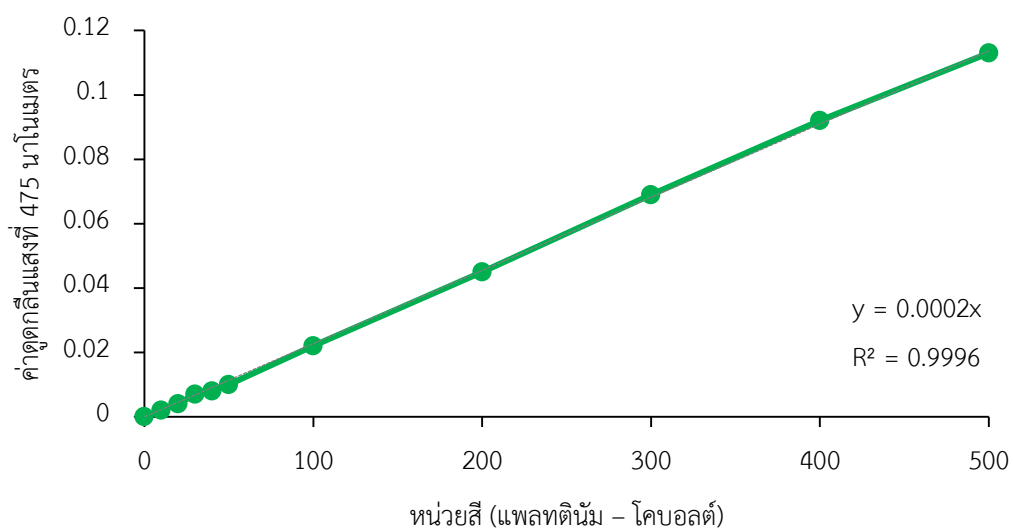
ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน (มิลลิลิตร)	ค่าของสีในหน่วยของแพลทตินัม - โคบอลต์
0.0	0
0.5	5
1	10
1.5	15
2	20
2.5	25
3.0	30
3.5	35
4.0	40
4.5	45

5.0	50
5.5	55
6.0	60
6.5	65

– การคำนวณหาหน่วยสี

$$\text{หน่วยสี} = (A \times 50) / V$$

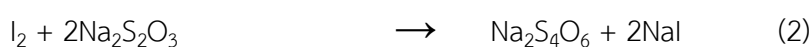
เมื่อ A คือ ค่าดูดกลืนแสงที่อ่านได้
B คือ ปริมาตรน้ำตัวอย่างที่นำมาเจือจาง



รูปที่ ก-2 กราฟมาตรฐานสีที่ความยาวคลื่น 475 นาโนเมตร

ภาคผนวก ก-5 การวิเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ตกค้าง

ทำการวิเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ตกค้างด้วยวิธีการไอโอดิเมตริก (Iodometric) อ้างอิงจาก US Peroxide. (2553) ซึ่งเมื่อสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ออกซิไดซ์ไอโอดีนในสภาวะที่เป็นกรด ทำให้ไอโอดีนเปลี่ยนรูปได้ตั้งสมการที่ (1) และ (2) จากการไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต โดยมีน้ำแฉ่งเป็นอินดิเคเตอร์ ซึ่งวิธีการนี้จะเหมาะกับการหาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร



วิธีทำ

นำน้ำตัวอย่างใส่ในขวดปรับปริมาตรจากนั้นปรับปริมาตรจนได้ 50 มิลลิตรและเติมกรดซัลฟูริก 1:4 10 มิลลิตร สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ 15 มิลลิตร และสารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต 2 หยด จากนั้นทำการไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ความเข้มข้น 0.025 นอร์มัล จนเกิดสีฟางข้าว จากนั้นทำการเติมน้ำแฉ่ง 2 มิลลิตรและไทเทรตจนสีหายไปเป็นสีใส

● การคำนวณหาไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

$$\text{ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = ((A - B) \times C \times 17 \times 1000) \times F_0 / D$$

เมื่อ	A	คือ ปริมาตรสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ไทเทรต ในน้ำตัวอย่าง หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร
	B	คือ ปริมาตรสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ไทเทรต ในแบลงค์ หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร
	C	คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต
	D	คือ ปริมาตรของน้ำตัวอย่าง
	F ₀	คือ แฟคเตอร์

- การเตรียมสารมาตรฐาน

วิธีทำ

เตรียมสารละลายโพแตสเซียมไอโอไดด์ 2 กรัมในขวดรูปชมพู่ จากนั้นปรับปริมาตรจนได้ 100 มิลลิลิตร เติมโพแตสเซียมไดโคเมต ความเข้มข้น 0.025 นอร์มัล 10 มิลลิลิตร และเติมกรดซัลฟูริก 1:9 10 มิลลิลิตร เก็บไว้ในที่มืด 5 นาที จากนั้นปรับปริมาตรจนได้ 200 มิลลิลิตร จากนั้นทำการไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ความเข้มข้น 0.025 นอร์มัล จนเกิดสีฟางข้าว จากนั้นทำการเติมน้ำแฉ่ง 2 มิลลิลิตรและไทเทรตจนสีหายไป

— การคำนวณหาแฟคเตอร์

$$F_0 = 10 / ((A + B) / 2)$$

เมื่อ	A	คือ ปริมาตรสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ไทเทรตครั้งที่ 1
	B	คือ ปริมาตรสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ไทเทรตครั้งที่ 2

ภาคผนวก ก-6 การคำนวณประสิทธิภาพจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน

● กระบวนการเฟนตัน

$$\text{ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาออกซิเดชัน} = (A - B)$$

เมื่อ	A	คือ ประสิทธิภาพจากชุดการทดลองควบคุมในกระบวนการเฟนตัน (กระบวนการโคแอกกูเลชัน)
	B	คือ ประสิทธิภาพรวมจากการทดลองในกระบวนการเฟนตัน

● กระบวนการเฟนตันเสมือน

$$\text{ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาออกซิเดชัน} = (A - B)$$

เมื่อ	A	คือ ประสิทธิภาพจากชุดการทดลองควบคุมในกระบวนการเฟนตันเสมือน (กระบวนการดูดซับ)
	B	คือ ประสิทธิภาพรวมจากการทดลองในกระบวนการเฟนตันเสมือน

ภาคผนวก ก-7 การวิเคราะห์ของแข็งแขวนลอย

นำกระดาษกรอง GF/C วางบนภาชนะที่ใส่และอบในตู้อบความชื้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที จากนั้นทำการชั่งน้ำหนัก (A) จากนั้นทำการเปิดตัวอย่างน้ำ 50 - 100 มิลลิลิตร ซึ่งปริมาตรของน้ำเสียขึ้นกับปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำ ลงบนกระดาษกรอง GF/C และเปิดป้อนดูดอากาศและค่อยๆ ทยิบกระดาษกรองออกนำไปวางบนภาชนะที่ใส่เดิมจากนั้นอบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที และทิ้งให้เย็น แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก (B) ซึ่งสามารถคำนวณหาปริมาณของแข็งแขวนลอยได้ดังนี้

$$\text{ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = (A - B) / \text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)}$$

ภาคผนวก ก-8 ลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยา

- แมกนีไทต์

SIGMA-ALDRICH[®]

sigma-aldrich.com

3050 Spruce Street, Saint Louis, MO 63103, USA

Website: www.sigmaaldrich.com

Email USA: techserv@sial.com

Outside USA: eurtechserv@sial.com

Product Specification

Product Name:
Iron(II,III) oxide - powder, <5 µm, 95%

Product Number: 310069
CAS Number: 1317-61-9
MDL: MFCD00011010
Formula: Fe₃O₄
Formula Weight: 231.53 g/mol



TEST	Specification
Appearance (Color)	Black
Appearance (Form)	Powder
X-Ray Diffraction	Conforms to Structure
Titration with Na ₂ S ₂ O ₃	68.0 - 76.7 %
% Fe	
Size (Average Particle Size)	≤ 5 micron

Specification: PRD.0.ZQ5.10000058878

Sigma-Aldrich warrants, that at the time of the quality release or subsequent retest date this product conformed to the information contained in this publication. The current Specification sheet may be available at Sigma-Aldrich.com. For further inquiries, please contact Technical Service. Purchaser must determine the suitability of the product for its particular use. See reverse side of invoice or packing slip for additional terms and conditions of sale.

- เกอร์ไทต์

SIGMA-ALDRICH[®]

sigma-aldrich.com

3050 Spruce Street, Saint Louis, MO 63103, USA

Website: www.sigmaaldrich.comEmail USA: techserv@sial.comOutside USA: eurtechserv@sial.com

Product Specification

Product Name:
Iron(III) oxide - hydrated, catalyst grade, 30-50 mesh

Product Number: 371254
CAS Number: 20344-49-4
MDL: MFCD00064782
Formula: HFeO₂
Formula Weight: 88.85 g/mol



TEST	Specification
Appearance (Color)	Conforms to Requirements
Red-Brown to Dark Brown or Black	
Appearance (Form)	Conforms to Requirements
Powder, Crystals, Granules, Crystalline Powder or Crystalline Granules	
ICP Major Analysis	Confirmed
Confirms Iron Component	
Titration by Na ₂ S ₂ O ₃	
Typically 60% - 70% Fe	
Loss on Drying	
Typically 0.5%-10% @ 400 Deg, 2 hours	
Size	Conforms
30-50 Mesh	
Specification: PRD.0.ZQ5.10000020433	

Sigma-Aldrich warrants, that at the time of the quality release or subsequent retest date this product conformed to the information contained in this publication. The current Specification sheet may be available at Sigma-Aldrich.com. For further inquiries, please contact Technical Service. Purchaser must determine the suitability of the product for its particular use. See reverse side of invoice or packing slip for additional terms and conditions of sale.

- สีมาไทดัด

SIGMA-ALDRICH

sigma-aldrich.com

3050 Spruce Street, Saint Louis, MO 63103, USA

Website: www.sigmaldrich.comEmail USA: techserv@sial.comOutside USA: eurtechserv@sial.com

Product Specification

Product Name:
Iron(III) oxide - powder, <5 µm, ≥99%

Product Number: 310050
 CAS Number: 1309-37-1
 MDL: MFCD00011008
 Formula: Fe₂O₃
 Formula Weight: 159.69 g/mol



TEST	Specification
Appearance (Color)	Red to Very Dark Red and Red-Brown and Brown-Red
Appearance (Form)	Powder
ICP Major Analysis Confirms Iron Component	Confirmed
Titration with Na ₂ S ₂ O ₃ % Iron	69.2 - 71.3 %
Size Particle Size Measurements	< 5 micron

Specification: PRD.1.ZQ5.10000017396

Sigma-Aldrich warrants, that at the time of the quality release or subsequent retest date this product conformed to the information contained in this publication. The current Specification sheet may be available at Sigma-Aldrich.com. For further inquiries, please contact Technical Service. Purchaser must determine the suitability of the product for its particular use. See reverse side of invoice or packing slip for additional terms and conditions of sale.

ภาคผนวก ก-9 รายงานผลวิเคราะห์ขนาดอนุภาค

- เดลตาเฟอริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์



MASTERSIZER 2000

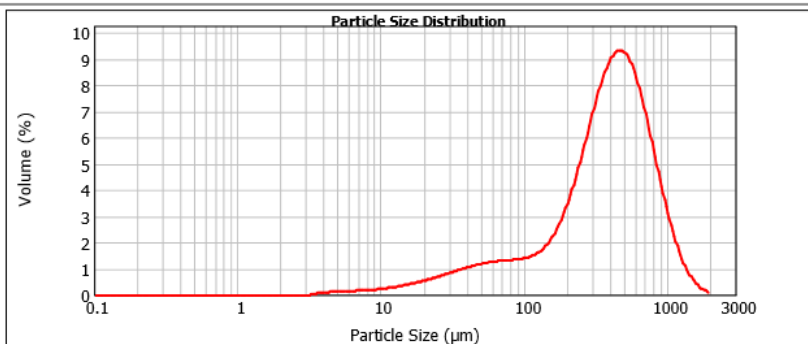
Result Analysis Report

Sample Name: Iron Oxide
SOP Name:
Measured: Friday, July 8, 2016 10:30:01 AM
Sample Source & type: Supplier
Measured by: default
Analysed: Friday, July 8, 2016 10:30:02 AM
Sample bulk lot ref:
Result Source: Measurement

Particle Name: Iron
Accessory Name: Scirocco 2000 (A)
Analysis model: General purpose
Sensitivity: Enhanced
Particle RI: 2.860
Absorption: 1
Size range: 0.020 to 2000.000 μm
Obscuration: 0.77 %
Dispersant Name: Dry dispersion
Dispersant RI: 1.000
Weighted Residual: 0.464 %
Result Emulation: Off

Concentration: 0.0033 %Vol
Span : 1.950
Uniformity: 0.589
Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.0449 m^2/g
Surface Weighted Mean D[3,2]: 133.759 μm
Vol. Weighted Mean D[4,3]: 435.427 μm

d(0.1): 66.493 μm **d(0.5):** 392.427 μm **d(0.9):** 831.570 μm



Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.00	11.482	0.26	120.226	1.46	1258.925	0.94
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.00	13.183	0.31	138.038	1.78	1445.440	0.47
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.00	15.136	0.37	158.489	2.25	1659.587	0.17
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.00	17.378	0.44	181.970	2.93	1906.461	0.04
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.00	19.963	0.52	208.930	3.82	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.00	22.909	0.61	239.883	4.90	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.00	26.303	0.70	275.423	6.04	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.00	30.200	0.79	316.228	7.12	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	0.00	34.674	0.88	363.078	8.38	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.04	39.811	0.97	416.869	9.71	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.08	45.709	1.04	478.630	11.11	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.00	5.012	0.10	52.481	1.11	549.541	12.66	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.00	5.754	0.12	60.256	1.15	630.957	14.36	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.00	6.607	0.13	69.183	1.18	724.436	16.21	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.00	7.586	0.14	79.433	1.21	831.764	18.21	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.00	8.710	0.16	91.201	1.24	954.953	20.36	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.00	10.000	0.18	104.713	1.32	1096.478			
0.105	0.00	1.096	0.00	11.482	0.22	120.226		1258.925			

Operator notes:

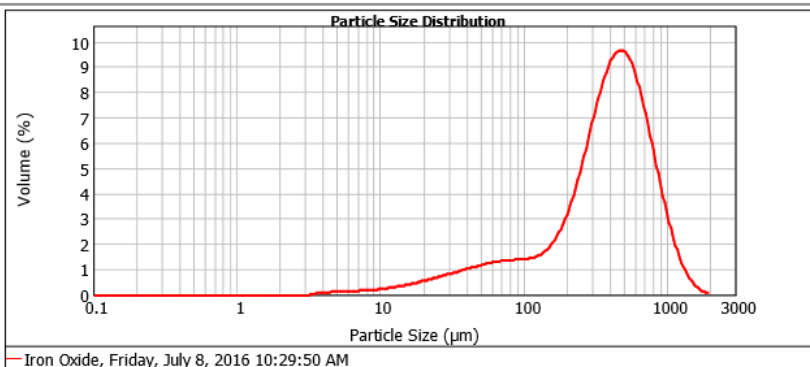


Result Analysis Report

Sample Name: Iron Oxide
SOP Name:
Measured: Friday, July 8, 2016 10:29:50 AM
Sample Source & type: Supplier
Measured by: default
Analysed: Friday, July 8, 2016 10:29:51 AM
Sample bulk lot ref:
Result Source: Measurement

Particle Name: Iron	Accessory Name: Sirocco 2000 (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Enhanced
Particle RI: 2.860	Absorption: 1	Size range: 0.020 to 2000.000 μm	Obscuration: 1.08 %
Dispersant Name: Dry dispersion	Dispersant RI: 1.000	Weighted Residual: 0.637 %	Result Emulation: Off
Concentration: 0.0047 %Vol	Span : 1.895	Uniformity: 0.569	Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.0447 m^2/g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 134.277 μm	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 437.098 μm	

d(0.1): 66.755 μm **d(0.5):** 400.267 μm **d(0.9):** 825.306 μm



Iron Oxide, Friday, July 8, 2016 10:29:50 AM

Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.066	0.00	11.482	0.26	120.226	1.41	1258.925	0.84
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.00	13.183	0.32	138.038	1.63	1445.440	0.38
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.00	15.136	0.38	158.489	2.04	1659.587	0.12
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.00	17.378	0.45	181.970	2.68	1905.461	0.03
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.00	19.953	0.53	208.930	3.56	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.00	22.909	0.61	239.883	4.68	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.612	0.00	26.303	0.69	275.423	5.51	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.00	30.200	0.77	316.228	7.12	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	0.04	34.674	0.86	363.078	8.59	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.08	39.811	0.95	416.869	9.64	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.10	45.709	1.03	478.630	8.63	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.00	5.012	0.12	52.481	1.11	549.541	8.04	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.00	5.754	0.13	60.256	1.17	630.957	6.95	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.00	6.607	0.14	69.183	1.22	724.436	5.55	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.00	7.586	0.16	79.433	1.24	831.764	4.05	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.00	8.710	0.18	91.201	1.25	954.993	2.70	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.00	10.000	0.22	104.713	1.25	1096.478	1.51		
0.105	0.00	1.096	0.00	11.482	0.22	120.226	1.31	1258.925			

Operator notes:

- ไอรอนโมลิบเดต



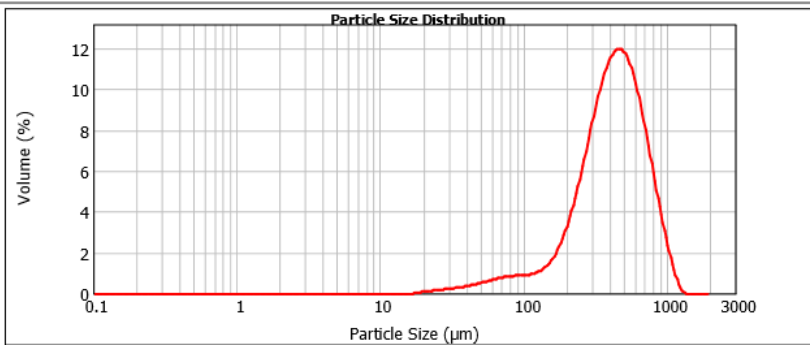
Result Analysis Report

Sample Name: Iron molybdate
SOP Name:
Measured: Friday, July 8, 2016 10:53:55 AM
Sample Source & type: Supplier
Measured by: default
Analysed: Friday, July 8, 2016 10:53:57 AM
Sample bulk lot ref:
Result Source: Measurement

Particle Name: Iron
Accessory Name: Scirocco 2000 (A)
Analysis model: General purpose
Sensitivity: Enhanced
Particle RI: 2.860
Absorption: 1
Size range: 0.020 to 2000.000 μm
Obscuration: 1.37 %
Dispersant Name: Dry dispersion
Dispersant RI: 1.000
Weighted Residual: 0.997 %
Result Emulation: Off

Concentration: 0.0131 %Vol
Span : 1.369
Uniformity: 0.423
Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.0209 m^2/g
Surface Weighted Mean D[3,2]: 287.175 μm
Vol. Weighted Mean D[4,3]: 451.261 μm

d(0.1): 180.879 μm **d(0.5):** 424.485 μm **d(0.9):** 761.810 μm



Iron molybdate (N' Pui), Friday, July 8, 2016 10:53:55 AM

Size (μm)	Volume in %	Size (μm)	Volume in %	Size (μm)	Volume in %	Size (μm)	Volume in %	Size (μm)	Volume in %	Size (μm)	Volume in %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.056	0.00	11.482	0.00	120.226	0.96	1258.925	0.01
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.00	13.183	0.00	138.038	1.25	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.00	15.136	0.00	158.489	1.81	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.00	17.378	0.00	181.970	2.71	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.00	19.953	0.03	208.930	3.96	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.00	22.909	0.10	239.883	5.54	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.00	26.303	0.13	275.423	7.25	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.00	30.200	0.16	316.228	9.90	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	0.00	34.674	0.23	363.078	13.61	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.00	39.811	0.28	416.869	18.48	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.00	45.709	0.35	478.630	24.62	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.00	5.012	0.00	52.481	0.44	549.541	32.16	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.00	5.754	0.00	60.256	0.54	630.957	41.51	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.00	6.607	0.00	69.183	0.64	724.436	52.80	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.00	7.586	0.00	79.433	0.72	831.764	66.19	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.00	8.710	0.00	91.201	0.77	954.993	81.84	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.00	10.000	0.00	104.713	0.80	1096.478	99.84		
0.105	0.00	1.096	0.00	11.482	0.00	120.226	0.84	1258.925	119.90		

Operator notes:

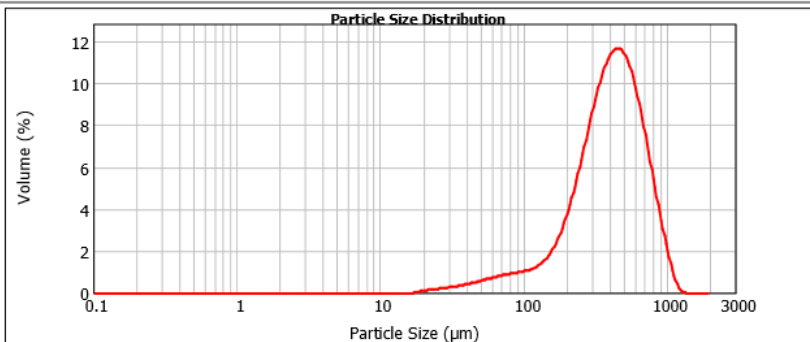


Result Analysis Report

Sample Name: Iron molybdate
SOP Name:
Measured: Friday, July 8, 2016 10:57:00 AM
Sample Source & type: Supplier
Measured by: default
Analysed: Friday, July 8, 2016 10:57:01 AM
Sample bulk lot ref:
Result Source: Measurement

Particle Name: Iron	Accessory Name: Sirocco 2000 (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Enhanced
Particle RI: 2.860	Absorption: 1	Size range: 0.020 to 2000.000 μm	Obscuration: 1.86 %
Dispersant Name: Dry dispersion	Dispersant RI: 1.000	Weighted Residual: 0.927 %	Result Emulation: Off
Concentration: 0.0169 %Vol	Span : 1.412	Uniformity: 0.43	Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.0221 m^2/g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 271.008 μm	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 434.001 μm	

d(0.1): 163.895 μm **d(0.5): 408.126 μm** **d(0.9): 740.150 μm**

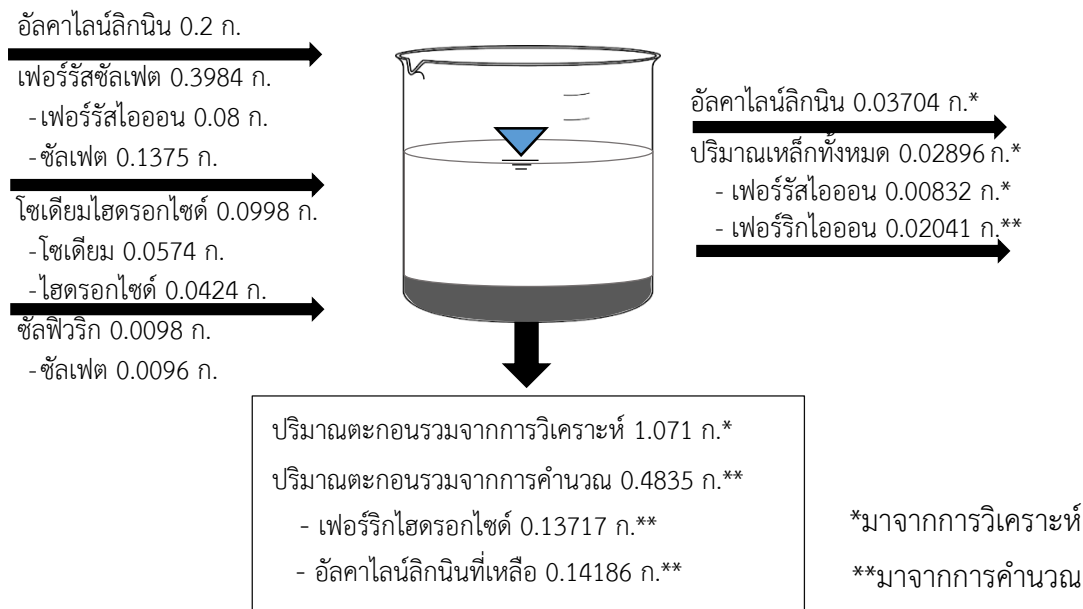


Iron molybdate (N' Pui), Friday, July 8, 2016 10:57:00 AM

Size (μm)	Volume in %	Size (μm)	Volume in %	Size (μm)	Volume in %	Size (μm)	Volume in %	Size (μm)	Volume in %	Size (μm)	Volume in %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.00	11.482	0.00	120.226	1.19	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.00	13.183	0.00	138.038	1.55	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.00	15.136	0.00	158.489	2.16	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.00	17.378	0.05	181.970	3.10	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.00	19.953	0.11	208.930	4.38	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.00	22.909	0.16	239.883	6.88	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.612	0.00	26.303	0.21	275.423	7.48	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.00	30.200	0.28	316.228	8.89	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	0.00	34.674	0.32	363.078	10.07	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.00	39.811	0.40	416.869	10.54	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.00	45.709	0.48	478.630	10.23	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.00	5.012	0.00	52.481	0.59	549.541	9.16	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.00	5.754	0.00	60.256	0.69	630.957	7.48	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.00	6.607	0.00	69.183	0.77	724.436	5.48	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.00	7.586	0.00	79.433	0.84	831.764	3.46	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.00	8.710	0.00	91.201	0.91	954.993	1.68	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.00	10.000	0.00	104.713	0.91	1096.478	1.00		
0.105	0.00	1.096	0.00	11.482	0.00	120.226	1.00	1258.925	0.36		

Operator notes:

ภาคผนวก ก-10 ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นในกระบวนการเฟนตัน



● ปริมาณตะกอนจากการวิเคราะห์

นำน้ำตัวอย่างและตะกอนรวมทั้งหมดที่เกิดขึ้นใส่ถ้วยภาชนะซึ่งทำการชั่งน้ำหนักเรียบร้อยแล้วและทำการระเหยน้ำออกโดยนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักตะกอนที่เกิดขึ้นซึ่งคำนวณดังนี้

$$\text{ปริมาณตะกอนจากการวิเคราะห์} = A - B$$

โดยที่ A คือ น้ำหนักของภาชนะก่อนอบ

B คือ น้ำหนักของภาชนะหลังอบ

● ปริมาณตะกอนจากการคำนวณ = อลคาไลน์ลิทมิเนนที่เหลือ + เฟอร์ริกไฮดรอกไซด์

$$\begin{aligned} &+ \text{ซัลเฟต}_{\text{จากเฟอร์รัสซัลเฟต}} + \text{ซัลเฟต}_{\text{จากกรดซิลิฟิวริก}} \\ &+ \text{โซเดียม}_{\text{จากโซเดียมไฮดรอกไซด์}} \\ &= 0.4835 \text{ กรัมต่อลิตร} \end{aligned}$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณตะกอนจากการวิเคราะห์และการคำนวณพบว่า ปริมาณตะกอนจากการคำนวณน้อยกว่าปริมาณตะกอนจากการวิเคราะห์ 0.5882 กรัมต่อลิตร

ภาคผนวก ข
บันทึกผลการทดลองชุดควบคุมการทดลอง

ภาคผนวก ข-1 ผลการทดลองชุดควบคุมการทดลองตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ ข-1 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีของชุดควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยา
กระบวนการเพนตัน

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)								
	ลิกนิน			สี			ซีโอดี		
	40 มก./ล.	80 มก./ล.	100 มก./ล.	40 มก./ล.	80 มก./ล.	100 มก./ล.	40 มก./ล.	80 มก./ล.	100 มก./ล.
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	69.53	71.78	75.36	50.12	62.50	79.22	68.54	75.00	86.67
5	68.57	70.63	75.29	41.81	64.17	75.00	65.17	77.72	81.67
10	67.93	71.42	73.92	41.81	70.00	78.39	68.00	72.83	85.00
15	64.72	70.86	73.50	37.66	67.50	77.56	68.54	75.00	88.00
30	62.47	70.93	74.67	35.16	63.33	77.56	61.80	74.46	85.00
60	64.08	73.44	73.20	41.81	71.67	77.50	67.00	72.00	81.67

ตารางที่ ข-2 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีของชุดควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยาใน
กระบวนการเพนตันเสมือน โดยใช้แมกนีไทต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)											
	ลิกนิน				สี				ซีโอดี			
	5 น./ล. pH 3	10 น./ ล. pH 3	15 น./ ล. pH 3	10 น./ ล. pH 7	5 น./ล. pH 3	10 น./ล. pH 3	15 น./ ล. pH 3	10 น./ ล. pH 7	5 น./ล. pH 3	10 น./ ล. pH 3	15 น./ ล. pH 3	10 น./ ล. pH 7
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	70.41	93.44	92.46	74.98	79.17	99.09	99.09	82.31	75.00	78.33	87.50	82.14
60	68.00	90.58	92.42	74.85	74.17	99.09	99.09	81.54	75.00	76.67	84.38	82.14
90	70.72	90.51	92.56	75.35	78.33	99.09	99.09	82.31	77.00	74.00	81.25	85.71
120	67.42	92.89	90.84	74.88	75.83	100.00	98.18	80.00	75.00	73.00	87.50	78.57

ตารางที่ ข-3 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอटीของชุดควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเพนตันเสมือน โดยใช้เกอร์ไทต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)											
	ลิกนิน				สี				ซีโอटी			
	5 น./ล. pH 3	10 น./ล. pH 3	15 น./ล. pH 3	10 น./ล. pH 7	5 น./ล. pH 3	10 น./ล. pH 3	15 น./ล. pH 3	10 น./ล. pH 7	5 น./ล. pH 3	10 น./ล. pH 3	15 น./ล. pH 3	10 น./ล. pH 7
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	84.35	87.92	89.38	77.02	94.55	96.36	98.18	84.17	77.12	78.57	80.36	79.35
60	83.97	83.87	86.85	77.89	92.73	95.45	96.36	85.00	73.73	85.71	85.71	76.09
90	84.52	88.27	89.86	77.66	93.64	97.27	98.18	83.33	77.12	85.71	88.00	76.09
120	85.96	85.28	86.82	76.96	93.64	94.55	97.27	81.67	77.12	82.14	85.71	79.35

ตารางที่ ข-4 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอटीของชุดควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเพนตันเสมือน โดยใช้ฮีมาไทต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)											
	ลิกนิน				สี				ซีโอटी			
	5 น./ล. pH 3	10 น./ล. pH 3	15 น./ล. pH 3	10 น./ล. pH 7	5 น./ล. pH 3	10 น./ล. pH 3	15 น./ล. pH 3	10 น./ล. pH 7	5 น./ล. pH 3	10 น./ล. pH 3	15 น./ล. pH 3	10 น./ล. pH 7
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	61.79	91.27	90.47	71.59	58.33	98.18	95.45	70.71	62.50	85.59	96.43	78.57
60	63.46	91.11	89.56	68.67	58.33	96.36	93.64	63.57	58.93	83.05	96.43	75.00
90	60.80	91.37	90.51	70.78	58.33	97.27	94.55	67.14	58.93	88.14	98.21	78.57
120	63.46	91.82	90.24	68.54	58.33	98.18	92.73	63.57	57.14	85.59	96.43	78.57

ตารางที่ ข-5 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีของชุดควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันเสมือน โดยใช้เตลตาเฟอร์ริกออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)											
	ลิกนิน				สี				ซีโอดี			
	5 น./ล. pH 3	10 น./ล. pH 3	15 น./ล. pH 3	10 น./ล. pH 7	5 น./ล. pH 3	10 น./ล. pH 3	15 น./ล. pH 3	10 น./ล. pH 7	5 น./ล. pH 3	10 น./ล. pH 3	15 น./ล. pH 3	10 น./ล. pH 7
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	89.17	78.03	65.63	66.33	90.00	60.91	45.45	50.00	78.13	82.14	62.50	78.57
60	89.93	84.80	74.93	76.09	95.00	87.27	72.73	75.00	76.56	85.71	70.83	75.00
90	90.00	85.45	72.88	77.44	96.25	88.18	73.64	66.67	80.21	78.57	70.83	78.57
120	90.17	86.02	79.48	81.48	98.75	90.00	76.36	75.00	81.25	89.29	75.00	78.57

ตารางที่ ข-6 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีของชุดควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันเสมือน โดยใช้ไฮรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)											
	ลิกนิน				สี				ซีโอดี			
	5 น./ล. pH 3	10 น./ล. pH 3	15 น./ล. pH 3	10 น./ล. pH 7	5 น./ล. pH 3	10 น./ล. pH 3	15 น./ล. pH 3	10 น./ล. pH 7	5 น./ล. pH 3	10 น./ล. pH 3	15 น./ล. pH 3	10 น./ล. pH 7
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	4.00	11.72	0.36	10.14	0.91	20.00	29.09	25.83	15.18	67.86	65.63	37.50
60	3.67	4.48	6.05	3.85	0.91	10.91	20.00	17.50	13.39	64.29	75.00	28.12
90	4.67	8.00	14.95	2.10	10.00	20.00	29.09	17.50	13.39	71.43	68.75	31.25
120	5.00	8.97	4.27	2.10	0.91	29.09	20.00	17.50	13.39	71.43	68.75	25.00

ภาคผนวก ข-2 ผลการทดลองชุดควบคุมการทดลองไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ตารางที่ ข-7 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนินของชุดควบคุมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกระบวนการเพนตัน

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน (%)					
	เหล็ก 40 มก./ล.	เหล็ก 80 มก./ล.				เหล็ก 100 มก./ล.
	1:2.5	1:2.5	1:5	1:10	1:25	1:2.5
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	5.79	2.57	-0.65	0.32	-5.18	2.22
5	4.56	3.22	0.00	0.32	-6.15	1.27
10	3.64	2.89	-0.65	0.65	-6.47	1.90
15	4.87	3.54	0.65	0.65	-4.21	1.27
30	4.56	3.54	-0.65	0.97	-5.83	2.53
60	3.33	3.86	-0.33	0.32	-5.50	0.63

ตารางที่ ข-8 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดสีของชุดควบคุมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกระบวนการเพนตัน

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดสี (%)					
	เหล็ก 40 มก./ล.	เหล็ก 80 มก./ล.				เหล็ก 100 มก./ล.
	1:2.5	1:2.5	1:5	1:10	1:25	1:2.5
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	7.37	8.33	8.33	8.33	0.00	7.14
5	0.25	8.33	8.33	8.33	0.00	7.14
10	0.25	8.33	8.33	8.33	0.00	7.14
15	3.81	8.33	8.33	8.33	0.00	7.14
30	0.96	8.33	8.33	8.33	0.00	7.14
60	0.25	8.33	8.33	8.33	0.00	7.14

ตารางที่ ข-9 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีจากผลการทดลองชุดควบคุมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกระบวนการเฟนตัน

ก) จากการวิเคราะห์

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดี (%)					
	เหล็ก 40 มก./ล.	เหล็ก 80 มก./ล.				เหล็ก 100 มก./ล.
	1:2.5	1:2.5	1:5	1:10	1:25	1:2.5
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	-16.00	-35.71	-46.32	-137.50	-300.00	-17.92
5	-10.00	-26.53	-41.58	-118.75	-286.21	-23.58
10	-7.00	-28.06	-46.32	-106.25	-286.21	-17.92
15	-7.00	-14.29	-46.32	-106.25	-300.00	-15.09
30	-7.00	-18.88	-44.74	-100.00	-300.00	-23.58
60	-4.00	-15.82	-40.00	-100.00	-300.00	-23.58

ข) หักล้างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดี (%)					
	เหล็ก 40 มก./ล.	เหล็ก 80 มก./ล.				เหล็ก 100 มก./ล.
	1:2.5	1:2.5	1:5	1:10	1:25	1:2.5
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	12.20	7.10	41.38	-3.05	11.62	7.97
5	15.06	11.84	46.11	9.49	24.20	7.97
10	9.34	7.10	41.38	9.49	24.20	7.97
15	9.34	7.10	41.38	3.22	11.62	7.97
30	12.20	8.68	42.96	9.49	10.68	7.97
60	15.06	13.42	47.69	9.49	10.68	7.97

ตารางที่ ข-10 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอติของชุดควบคุมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกระบวนการเพนตันเสมือน

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)											
	ลิกนิน				สี				ซีโอติ			
	100 มก./ก. pH 3	100 มก./ก. pH 7	200 มก./ก. pH 3	200 มก./ก. pH 7	100 มก./ก. pH 3	100 มก./ก. pH 7	200 มก./ก. pH 3	200 มก./ก. pH 7	100 มก./ก. pH 3	100 มก./ก. pH 7	200 มก./ก. pH 3	200 มก./ก. pH 7
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	1.54	0.00	6.73	-0.32	17.65	8.33	18.75	7.69	2.86	0.00	-33.33	-14.29
60	2.16	0.00	6.73	-0.32	23.53	8.33	31.25	15.38	2.86	0.00	-33.33	-14.29
90	2.78	-0.64	5.81	-1.28	17.65	8.33	31.25	7.69	2.86	0.00	-30.00	-14.29
120	2.47	-1.93	5.50	-0.64	23.53	8.33	31.25	15.38	2.86	-6.25	-28.33	-21.43

ตารางที่ ข-11 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอติของชุดควบคุมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกระบวนการเพนตันเสมือน เมื่อห้ก้างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (มก./ล.)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)		
	ลิกนิน	สี	ซีโอติ
100	4.56	17.65	12.19
200	3.54	8.33	8.46
250	2.53	7.14	7.97
400	-0.65	8.33	8.68
800	0.97	8.33	9.48
2,000	-5.83	8.00	11.62

ภาคผนวก ค

บันทึกผลการทดลองกระบวนการฟenton และฟentonเสมือน

ภาคผนวก ค-1 ผลการทดลองกระบวนการฟenton

ตารางที่ ค-1 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนินที่อัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมวลต่าง ๆ ในการกำจัดลิกนินในน้ำเสียด้วยกระบวนการฟenton

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน (%)					
	เหล็ก 40 มก./ล.	เหล็ก 80 มก./ล.				เหล็ก 100 มก./ล.
	1:2.5	1:2.5	1:5	1:10	1:25	1:2.5
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	43.87	85.69	84.48	80.85	49.53	82.36
5	51.89	84.38	83.47	80.90	53.69	81.32
10	64.72	82.66	80.72	80.61	57.71	79.89
15	66.58	82.41	79.92	80.16	59.07	79.45
30	63.50	81.13	80.10	79.10	63.03	79.23
60	55.10	80.24	80.18	78.15	64.81	81.25

ตารางที่ ค-2 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดสีที่อัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมวลต่าง ๆ ในน้ำเสียด้วยกระบวนการฟenton

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดสี (%)					
	เหล็ก 40 มก./ล.	เหล็ก 80 มก./ล.				เหล็ก 100 มก./ล.
	1:2.5	1:2.5	1:5	1:10	1:25	1:2.5
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	16.87	95.57	97.02	96.98	94.74	94.30
5	33.50	97.68	95.74	94.56	93.90	94.30
10	45.97	96.98	94.61	94.86	95.01	94.30
15	51.79	97.35	94.33	93.95	93.94	93.59
30	48.46	96.65	96.46	94.86	93.67	94.30
60	45.97	95.53	96.74	95.47	93.63	94.30

ตารางที่ ค-3 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่อัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมวลต่าง ๆ ในน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟนตัน

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี (%)					
	เหล็ก 40 มก./ล.	เหล็ก 80 มก./ล.				เหล็ก 100 มก./ล.
	1:2.5	1:2.5	1:5	1:10	1:25	1:2.5
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	79.44	94.20	92.51	90.45	82.01	97.06
5	85.05	95.80	96.81	89.04	83.47	91.18
10	79.44	94.80	95.70	91.27	87.73	94.12
15	82.24	94.00	95.67	93.27	90.36	94.12
30	85.05	94.80	93.41	91.79	90.97	94.12
60	76.64	90.00	91.83	89.04	92.88	92.65

ภาคผนวก ค-2 ผลการทดลองศึกษาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหลือในระบบของกระบวนการเฟนตัน

ตารางที่ ค-5 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหลือในระบบของกระบวนการเฟนตัน

เวลา (นาที)	ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (มก./ล.)
0	200.00
1	0.00
5	0.00
10	0.00
15	0.00
30	0.00
60	0.00

ภาคผนวก ค-3 ผลการทดลองศึกษาปริมาณเหล็กต่าง ๆ ที่คงเหลือในน้ำตัวอย่างของกระบวนการเฟนตัน

ตารางที่ ค-5 ปริมาณเหล็กต่าง ๆ ที่คงเหลือในน้ำตัวอย่างของกระบวนการเฟนตัน

เวลา (นาท)	เหล็กทั้งหมด (มก./ล.)	ตะกอนเหล็ก (มก./ล.)	เหล็กเฟอร์รัสไอออน (มก./ล.)	เหล็กเฟอร์ริกไอออน (มก./ล.)
0	80.00	0.00	0.00	0.00
1	19.11	60.89	4.62	14.49
5	23.81	56.19	4.57	19.24
10	23.08	56.92	5.60	17.48
15	24.55	55.45	5.95	18.59
30	28.96	51.04	8.47	20.49
60	32.59	47.41	10.88	21.71

ภาคผนวก ค-4 ผลการทดลองกระบวนการเฟนตันเสมือน

ตารางที่ ค-4 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีไอดีที่ความเข้มข้นเฟอร์ริกไอออนต่าง ๆ โดยใช้แมกนีไทต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลา (นาท)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)								
	ลิกนิน			สี			ซีไอดี		
	5 ก./ล.	10 ก./ล.	15 ก./ล.	5 ก./ล.	10 ก./ล.	15 ก./ล.	5 ก./ล.	10 ก./ล.	15 ก./ล.
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	71.35	91.87	92.72	53.00	97.00	98.00	33.93	51.67	63.33
60	70.95	93.08	92.79	52.00	98.00	98.00	35.71	58.33	65.00
90	73.68	92.98	93.22	55.00	97.00	98.00	39.29	61.67	68.33
120	75.00	93.32	92.35	56.00	98.00	97.00	38.00	56.67	67.00

ตารางที่ ค-5 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีที่ความเข้มข้นเฟอร์ริกไอออนต่าง ๆ โดยใช้เกอร์ไทต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)											
	ลิกนิน				สี				ซีโอดี			
	2 ก./ล.	5 ก./ล.	10 ก./ล.	15 ก./ล.	2 ก./ล.	5 ก./ล.	10 ก./ล.	15 ก./ล.	2 ก./ล.	5 ก./ล.	10 ก./ล.	15 ก./ล.
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	48.16	84.76	91.87	89.41	27.27	88.60	97.27	98.18	34.38	56.25	61.11	74.07
60	50.17	86.65	93.08	89.38	36.36	88.64	95.45	97.27	40.63	57.81	63.89	75.93
90	49.83	83.48	92.98	90.07	40.00	88.73	96.36	97.27	40.63	59.38	61.11	75.93
120	44.15	84.82	93.32	87.63	36.36	88.77	96.36	96.36	40.00	53.13	62.50	68.52

ตารางที่ ค-6 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีที่ความเข้มข้นเฟอร์ริกไอออนต่าง ๆ โดยใช้ฮีมาไทต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)								
	ลิกนิน			สี			ซีโอดี		
	5 ก./ล.	10 ก./ล.	15 ก./ล.	5 ก./ล.	10 ก./ล.	15 ก./ล.	5 ก./ล.	10 ก./ล.	15 ก./ล.
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	66.33	89.87	91.28	58.00	95.00	93.00	64.86	76.70	81.08
60	65.80	90.63	92.26	53.00	95.45	97.50	67.30	80.30	86.49
90	72.69	90.81	92.56	58.00	95.91	97.50	67.57	74.34	81.08
120	76.33	91.25	92.46	60.00	96.36	98.50	62.16	70.11	91.89

ตารางที่ ค-7 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีไอดีที่ความเข้มข้นเฟอร์ริกไอออนต่าง ๆ โดยใช้เตลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)											
	ลิกนิน				สี				ซีไอดี			
	2 ก./ล.	5 ก./ล.	10 ก./ล.	15 ก./ล.	2 ก./ล.	5 ก./ล.	10 ก./ล.	15 ก./ล.	2 ก./ล.	5 ก./ล.	10 ก./ล.	15 ก./ล.
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	79.90	90.94	88.87	89.41	72.73	95.45	91.82	98.18	46.88	57.64	59.57	68.75
60	84.32	91.28	89.90	89.38	76.36	94.55	94.55	97.27	50.00	66.24	69.15	69.43
90	87.72	91.95	91.07	90.07	83.64	96.36	97.27	97.27	53.13	63.37	65.96	67.05
120	89.83	92.59	91.17	87.63	91.82	98.18	97.27	96.36	53.13	61.09	69.15	70.45

ตารางที่ ค-8 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีไอดีที่ความเข้มข้นเฟอร์ริกไอออนต่าง ๆ โดยใช้ไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)											
	ลิกนิน				สี				ซีไอดี			
	2 ก./ล.	5 ก./ล.	10 ก./ล.	15 ก./ล.	2 ก./ล.	5 ก./ล.	10 ก./ล.	15 ก./ล.	2 ก./ล.	5 ก./ล.	10 ก./ล.	15 ก./ล.
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	42.91	55.38	44.48	31.00	45.45	60.61	36.36	18.18	53.13	69.82	66.90	63.64
60	40.54	52.44	41.81	30.00	42.00	51.89	36.36	18.18	50.00	69.94	65.49	63.64
90	41.89	50.98	38.46	25.00	43.00	47.35	36.36	18.18	50.00	73.27	68.31	65.34
120	40.00	49.51	38.13	21.33	45.45	47.73	36.36	18.18	46.88	69.94	66.90	56.82

ตารางที่ ค-9 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่าง ๆ โดยใช้แมกนีไทต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)								
	ลิกนิน			สี			ซีโอดี		
	0 มก./ล.	100 มก./ล.	200 มก./ล.	0 มก./ล.	100 มก./ล.	200 มก./ล.	0 มก./ล.	100 มก./ล.	200 มก./ล.
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	93.44	91.21	91.87	99.09	97.00	97.00	74.00	71.61	51.67
60	90.58	89.93	93.08	99.09	95.00	98.00	73.33	72.40	58.33
90	90.51	89.72	92.98	99.09	94.00	97.00	73.00	73.47	61.67
120	92.89	89.90	93.32	100.00	94.00	98.00	75.00	69.76	56.67

ตารางที่ ค-10 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่าง ๆ โดยใช้เกอร์ไทต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)								
	ลิกนิน			สี			ซีโอดี		
	0 มก./ล.	100 มก./ล.	200 มก./ล.	0 มก./ล.	100 มก./ล.	200 มก./ล.	0 มก./ล.	100 มก./ล.	200 มก./ล.
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	84.35	84.90	84.76	93.00	93.00	88.60	73.73	61.11	56.25
60	83.97	86.00	86.65	92.73	94.00	88.64	73.73	60.22	57.81
90	84.52	87.14	83.48	93.64	93.00	88.73	77.12	65.28	59.38
120	85.96	86.70	84.82	93.64	94.50	88.77	75.00	67.05	53.13

ตารางที่ ค-11 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่าง ๆ โดยใช้ฮีมาไทต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)								
	ลิกนิน			สี			ซีโอดี		
	0 มก./ล.	100 มก./ล.	200 มก./ล.	0 มก./ล.	100 มก./ล.	200 มก./ล.	0 มก./ล.	100 มก./ล.	200 มก./ล.
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	91.27	90.00	89.87	98.18	92.27	95.00	85.59	71.67	76.70
60	91.11	91.02	90.63	96.36	94.09	95.45	83.05	76.67	80.30
90	91.37	91.86	90.81	97.27	95.45	95.91	88.14	78.33	74.34
120	91.82	91.72	91.25	98.18	96.82	96.36	85.59	83.33	70.11

ตารางที่ ค-12 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่าง ๆ โดยใช้เตลตาเฟอร์ริกออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)								
	ลิกนิน			สี			ซีโอดี		
	0 มก./ล.	100 มก./ล.	200 มก./ล.	0 มก./ล.	100 มก./ล.	200 มก./ล.	0 มก./ล.	100 มก./ล.	200 มก./ล.
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	89.17	90.32	90.94	90.00	91.66	95.45	78.13	71.56	57.64
60	89.93	91.03	91.28	95.00	94.07	94.55	76.56	68.80	66.24
90	90.00	91.36	91.95	96.25	94.82	96.36	80.21	72.47	63.37
120	90.17	92.28	92.59	98.75	97.30	98.18	81.25	71.30	61.09

ตารางที่ ค-13 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่าง ๆ โดยใช้ไฮรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)											
	ลิกนิน				สี				ซีโอดี			
	0 มก./ ล.	100 มก./ล.	200 มก./ล.	400 มก./ล.	0 มก./ล.	100 มก./ ล.	200 มก./ล.	400 มก./ล.	0 มก./ล.	100 มก./ล.	200 มก./ล.	400 มก./ล.
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	4.00	23.08	50.43	18.77	0.91	34.17	46.97	27.27	15.18	46.88	68.78	50.00
60	3.67	24.08	46.78	19.11	0.91	34.17	42.61	27.27	13.39	48.44	68.79	63.64
90	4.67	22.74	45.70	18.09	10.00	34.17	36.17	18.18	13.39	48.44	68.70	59.09
120	5.00	22.07	44.65	22.18	0.91	34.17	36.36	18.18	13.39	50.00	64.85	63.64

ตารางที่ ค-14 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีที่พีเอชต่าง ๆ ใช้แมกนีไทต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลา	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)					
	pH 3			pH 7		
	ลิกนิน	สี	ซีโอดี	ลิกนิน	สี	ซีโอดี
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	50.43	46.97	68.78	73.05	81.82	56.41
60	46.78	42.61	68.79	71.43	81.82	55.13
90	45.70	36.17	68.70	70.13	81.82	51.28
120	44.65	36.36	64.85	71.10	81.82	52.56

ตารางที่ ค-15 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีที่พีเอชต่าง ๆ ใช้เกอร์ไทด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลา	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)					
	pH 3			pH 7		
	ลิกนิน	สี	ซีโอดี	ลิกนิน	สี	ซีโอดี
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	84.90	93.00	61.11	72.67	81.82	45.76
60	86.00	94.00	60.22	76.00	81.82	38.98
90	87.14	93.00	65.28	75.67	81.82	42.37
120	86.70	94.50	67.05	76.00	81.82	35.59

ตารางที่ ค-16 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีที่พีเอชต่าง ๆ โดยใช้ฮีมาไทด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลา	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)					
	pH 3			pH 7		
	ลิกนิน	สี	ซีโอดี	ลิกนิน	สี	ซีโอดี
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	90.00	92.27	71.67	66.95	46.25	58.06
60	91.02	94.09	76.67	66.82	38.75	51.61
90	91.86	95.45	78.33	67.95	40.00	51.61
120	91.72	96.82	83.33	67.71	37.50	50.00

ตารางที่ ค-17 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีที่พีเอชต่าง ๆ โดยใช้เตลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลา	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)					
	pH 3			pH 7		
	ลิกนิน	สี	ซีโอดี	ลิกนิน	สี	ซีโอดี
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	90.32	93.00	71.56	74.63	67.27	57.14
60	91.03	94.00	68.80	80.90	80.00	60.44
90	91.36	93.00	72.47	83.83	86.36	62.00
120	92.28	94.50	71.30	85.03	90.00	65.00

ตารางที่ ค-18 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีที่พีเอชต่าง ๆ โดยใช้ไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลา	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)					
	pH 3			pH 7		
	ลิกนิน	สี	ซีโอดี	ลิกนิน	สี	ซีโอดี
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	50.43	46.97	68.78	-13.87	-72.73	3.45
60	46.78	42.61	68.79	-5.16	-54.55	3.45
90	45.70	36.17	68.70	3.23	-36.36	6.90
120	44.65	36.36	64.85	3.23	-36.36	13.79

ตารางที่ ค-19 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีที่พีเอชต่าง ๆ ด้วยปฏิกิริยาเฟนตันเสมือนในการกำจัดลิกนิน

เวลา (นาท)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน (%)				
	แมกนีไทต์	เกอร์ไทต์	ฮีมาไทต์	เทลตาเฟอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์	ไอรอนโมลิเบต
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	84.83	76.56	68.29	58.50	14.38
5	86.06	72.24	73.81	72.79	19.40
10	89.70	73.84	77.63	82.65	22.07
15	90.00	76.26	79.93	87.41	24.41
30	91.16	84.90	89.93	90.32	50.43
60	92.58	86.00	90.54	91.03	46.78

ตารางที่ ค-19 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีที่เวลาต่าง ๆ ด้วยปฏิกิริยาเฟนตันเสมือนในการกำจัดสี

เวลา (นาท)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดสี (%)				
	แมกนีไทต์	เกอร์ไทต์	ฮีมาไทต์	เทลตาเฟอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์	ไอรอนโมลิเบต
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	81.00	86.00	65.45	60.00	0.00
5	86.00	82.00	70.00	70.00	-16.67
10	94.00	84.00	74.55	80.00	-8.33
15	95.00	86.00	77.27	90.00	-8.33
30	97.00	93.00	93.64	91.66	46.97
60	97.00	94.00	93.64	94.07	42.61

ตารางที่ ค-20 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีที่เวลาต่าง ๆ ด้วยปฏิกิริยาเพนตันเสมือนในการกำจัดซีโอดี

เวลา (นาท)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี (%)				
	แมกนีไทต์	เกอร์ไทต์	ฮีมาไทต์	เทลตาเฟอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์	ไอรอนโมลิบเดต
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	60.94	70.83	56.67	34.37	20.00
5	71.88	62.50	63.33	46.87	23.53
10	67.19	63.89	66.67	62.50	37.65
15	73.44	59.72	63.33	65.62	51.76
30	71.61	61.11	73.33	71.56	68.78
60	72.40	60.22	70.00	68.80	68.79

ภาคผนวก ค-5 ผลการทดลองศึกษาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหลือในระบบของกระบวนการเพนตันเสมือน

ตารางที่ ค-21 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหลือในระบบของกระบวนการเพนตันเสมือน

เวลา (นาท)	ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (มก./ล.)				
	แมกนีไทต์	เกอร์ไทต์	ฮีมาไทต์	เทลตาเฟอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์	ไอรอนโมลิบเดต
0	100.00	100.00	100.00	100.00	200.00
1	100.00	100.00	94.44	72.25	8.50
5	94.44	98.00	94.44	68.00	8.50
10	94.44	100.00	94.44	51.00	8.50
15	94.44	100.00	94.44	51.00	8.50
30	94.44	92.86	90.51	34.00	0.00
60	78.70	92.86	78.70	34.00	0.00

ภาคผนวก ค-6 ผลการทดลองศึกษาปริมาณเหล็กต่าง ๆ ที่คงเหลือในน้ำตัวอย่างของกระบวนการ
เพนตันเสมือน

ตารางที่ ค-22 ปริมาณเหล็กทั้งหมดที่คงเหลือในน้ำตัวอย่างของกระบวนการเพนตันเสมือน

เวลา (นาท)	ปริมาณเหล็กทั้งหมดที่คงเหลือ (มก./ล.)				
	แมกนีไทต์	เกอร์ไทต์	ฮีมาไทต์	เทลตาเฟอร์ริกออกไซด์ ซีไฮดรอกไซด์	ไอรอนโมลิเบต
0	1.10	1.33	1.69	2.84	9.22
1	0.97	1.26	1.54	0.79	10.37
5	0.95	1.33	1.33	0.77	11.34
10	1.00	1.16	1.18	0.59	13.34
15	1.15	0.95	1.28	0.36	13.58
30	1.00	1.10	1.20	0.36	18.31
60	1.05	1.16	1.26	0.44	22.44

ตารางที่ ค-23 ปริมาณเหล็กเฟอร์รัสที่คงเหลือในน้ำตัวอย่างของกระบวนการเพนตันเสมือน

เวลา (นาท)	ปริมาณเหล็กเฟอร์รัสที่คงเหลือ (มก./ล.)				
	แมกนีไทต์	เกอร์ไทต์	ฮีมาไทต์	เทลตาเฟอร์ริกออกไซด์ ซีไฮดรอกไซด์	ไอรอนโมลิเบต
0	0.79	1.22	0.12	0.24	0.79
1	0.85	1.22	0.12	0.00	3.15
5	0.67	0.98	0.06	0.06	3.52
10	0.79	1.10	0.06	0.18	3.52
15	0.85	1.10	0.00	0.06	3.27
30	0.67	0.98	0.00	0.12	3.58
60	0.61	0.80	0.06	0.12	5.34

ตารางที่ ค-24 ปริมาณเหล็กเฟอร์ริกที่คงเหลือในน้ำตัวอย่างของกระบวนการเฟนตันเสมือน

เวลา (นาที)	ปริมาณเหล็กเฟอร์ริกที่คงเหลือ (มก./ล.)				
	แมกนีไทต์	เกอร์ไทต์	ฮีมาไทต์	เทลตาเฟอร์ริกออกไซด์ ซีไฮดรอกไซด์	ไอรอนโมลิบเดต
0	0.31	0.11	1.57	2.60	8.43
1	0.12	0.03	1.42	0.79	7.22
5	0.28	0.35	1.27	0.71	7.82
10	0.21	0.05	1.12	0.41	9.82
15	0.30	-0.15	1.28	0.30	10.31
30	0.33	0.12	1.20	0.24	14.74
60	0.44	0.35	1.19	0.31	17.10



ภาคผนวก ง

บันทึกผลการทดลองกระบวนการใช้ซ้ำในกระบวนการเฟนตันเสมือน

ภาคผนวก ง-1 ผลการทดลองกระบวนการใช้ซ้ำในกระบวนการเฟนตันเสมือน

ตารางที่ ง-1 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนินในกระบวนการใช้ซ้ำในกระบวนการเฟนตันเสมือนในการกำจัดลิกนิน

รอบ (ครั้ง)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน (%)				
	แมกนีไทต์	เกอร์ไทต์	ฮีมาไทต์	เทลตาเฟอร์ริกออกไซด์	ไอรอนโมลิบเดต
1	91.21	88.17	90.53	90.74	67.08
2	47.20	53.98	41.13	88.53	15.59
3	32.30	22.60	48.66	89.78	1.54
4	-	-	-	82.55	-
5	-	-	-	75.35	-
6	-	-	-	66.39	-
7	-	-	-	63.00	-
8	-	-	-	60.53	-
9	-	-	-	53.85	-
10	-	-	-	48.26	-
11	-	-	-	47.21	-
12	-	-	-	44.88	-
13	-	-	-	40.40	-

ตารางที่ ง-2 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดสีในกระบวนการใช้ซ้ำในกระบวนการเพนตันเสมือนในการกำจัดลิแกนด์

รอบ (ครั้ง)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดสี (%)				
	แมกนีไทต์	เกอร์ไทต์	ฮีมาไทต์	เทลตาเฟอริกออกไซด์ ซีไฮดรอกไซด์	ไอรอนโมลิบเดต
1	95.00	93.91	93.53	93.83	66.70
2	-9.09	40.17	9.14	87.47	-25.34
3	-11.37	-23.90	-37.45	90.79	-4.31
4	-	-	-	85.45	-
5	-	-	-	73.99	-
6	-	-	-	57.96	-
7	-	-	-	48.43	-
8	-	-	-	35.22	-
9	-	-	-	32.08	-
10	-	-	-	29.80	-
11	-	-	-	30.14	-
12	-	-	-	19.12	-
13	-	-	-	-8.92	-

ตารางที่ ง-3 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีในกระบวนการใช้ซ้ำในกระบวนการเพนต์น
เสมือน

รอบ (ครั้ง)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี (%)				
	แมกนีไทต์	เกอร์ไทต์	ฮีมาไทต์	เทลตาเฟอร์ริกออก ซีไฮดรอกไซด์	ไอรอนโมลิบเดต
1	66.32	65.52	71.47	70.93	69.27
2	31.12	33.91	31.57	71.97	38.04
3	23.33	12.15	64.52	74.40	7.18
4	-	-	-	67.33	-
5	-	-	-	55.31	-
6	-	-	-	50.44	-
7	-	-	-	42.11	-
8	-	-	-	43.17	-
9	-	-	-	40.43	-
10	-	-	-	38.05	-
11	-	-	-	30.59	-
12	-	-	-	29.87	-
13	-	-	-	30.30	-

ภาคผนวก ง-4 การคำนวณค่าใช้จ่ายในการกำจัดลิกนินในน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟนตัน โดยมีเพอร์ร็อกซัลเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เมื่อใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นลิกนิน 0.2 กรัมต่อลิตร ทำการปรับพีเอชเริ่มต้นให้เท่ากับ 3 ด้วยกรดซัลฟิวริก จากนั้นทำการเติมเพอร์ร็อกซัลเฟตเข้มข้น 0.3984 กรัมต่อปริมาตร 1 ลิตร และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.200 กรัมต่อลิตร

1.ราคาค่าสารเคมี

สารเพอร์ร็อกซัลเฟต	=	0.3984 กรัม × 0.002019 บาทต่อกรัม
	=	0.000804 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร
	=	0.80437 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร
	=	40.218 บาทต่อน้ำเสีย 50 ลูกบาศก์เมตร
สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	=	0.2 กรัม × 0.010532 บาทต่อกรัม
	=	0.002106 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร
	=	2.10633 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร
	=	105.3165 บาทต่อน้ำเสีย 50 ลูกบาศก์เมตร
สารกรดซัลฟิวริก	=	0.2 กรัม × 0.00721 บาทต่อมิลลิลิตร
	=	0.001442 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร
	=	1.442 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร
	=	72.1 บาทต่อน้ำเสีย 50 ลูกบาศก์เมตร
สารโซเดียมไฮดรอกไซด์	=	0.1 มิลลิลิตร × 0.0105 บาทต่อมิลลิลิตร
	=	0.00105 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร
	=	1.0531 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร
	=	52.65825 บาทต่อน้ำเสีย 50 ลูกบาศก์เมตร

2.ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด

ค่าใช้จ่ายในการกำจัด	=	40.218 + 105.3165 + 72.1 + 52.65825
	=	270.29 บาทต่อน้ำเสีย 50 ลูกบาศก์เมตร

ภาคผนวก ง-5 การคำนวณค่าใช้จ่ายในการกำจัดลิกนินในน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือน โดยมีแมกนีไทต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เมื่อใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นลิกนิน 0.2 กรัมต่อลิตร ทำการปรับพีเอชเริ่มต้นให้เท่ากับ 3 ด้วยกรดซัลฟิวริก จากนั้นทำการเติมแมกนีไทต์เข้มข้น 13.82 กรัมต่อปริมาตร 1 ลิตร และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.100 กรัมต่อลิตร

1.ราคาค่าสารเคมี

สารแมกนีไทต์	=	13.82 กรัม × 0.017552 บาทต่อกรัม
	=	0.242569 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร
	=	242.5686 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร
	=	12,128.432 บาทต่อน้ำเสีย 50 ลูกบาศก์เมตร
สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	=	0.1 กรัม × 0.010532 บาทต่อกรัม
	=	0.002106 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร
	=	2.10633 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร
	=	105.3165 บาทต่อน้ำเสีย 50 ลูกบาศก์เมตร
สารกรดซัลฟิวริก	=	0.2 กรัม × 0.00721 บาทต่อมิลลิกรัม
	=	0.001442 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร
	=	1.442 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร
	=	72.1 บาทต่อน้ำเสีย 50 ลูกบาศก์เมตร

2.ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด

ค่าใช้จ่ายในการกำจัด	=	12,128.432 + 52.65825 + 72.1
	=	12,253.19 บาทต่อน้ำเสีย 50 ลูกบาศก์เมตร

ภาคผนวก ง-6 การคำนวณค่าใช้จ่ายในการกำจัดลิกนินในน้ำเสียด้วยกระบวนการเพนตันเสมือน โดยใช้เกอร์ไทต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เมื่อใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นลิกนิน 0.2 กรัมต่อลิตร ทำการปรับพีเอชเริ่มต้นให้เท่ากับ 3 ด้วยกรดซัลฟิวริก จากนั้นทำการเติมเกอร์ไทต์เข้มข้น 7.956 กรัมต่อปริมาตร 1 ลิตร และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.100 กรัมต่อลิตร

1.ราคาค่าสารเคมี

สารเกอร์ไทต์	=	7.956 กรัม × 0.021063 บาทต่อกรัม
	=	0.167577 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร
	=	167.5772 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร
	=	8,378.86 บาทต่อน้ำเสีย 50 ลูกบาศก์เมตร
สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	=	0.1 กรัม × 0.010532 บาทต่อกรัม
	=	0.001053 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร
	=	1.053165 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร
	=	52.65825 บาทต่อน้ำเสีย 50 ลูกบาศก์เมตร
สารกรดซัลฟิวริก	=	0.2 กรัม × 0.00721 บาทต่อมิลลิกรัม
	=	0.001442 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร
	=	1.442 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร
	=	72.1 บาทต่อน้ำเสีย 50 ลูกบาศก์เมตร

2.ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด

ค่าใช้จ่ายในการกำจัด	=	8,378.86 + 52.65825 + 72.1
	=	8,503.62 บาทต่อน้ำเสีย 50 ลูกบาศก์เมตร

ภาคผนวก ง-7 การคำนวณค่าใช้จ่ายในการกำจัดลิกนินในน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือน โดยใช้ฮีมาไทต์ไทต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เมื่อใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นลิกนิน 0.2 กรัมต่อลิตร ทำการปรับพีเอชเริ่มต้นให้เท่ากับ 3 ด้วยกรดซัลฟิวริก จากนั้นทำการเติมฮีมาไทต์เข้มข้น 14.29 กรัมต่อปริมาตร 1 ลิตร และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.100 กรัมต่อลิตร

1.ราคาค่าสารเคมี

สารฮีมาไทต์	=	14.29 กรัม × 0.00526582 บาทต่อกรัม
	=	0.075249 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร
	=	75.24857 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร
	=	3,762.4284 บาทต่อน้ำเสีย 50 ลูกบาศก์เมตร
สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	=	0.1 กรัม × 0.010532 บาทต่อกรัม
	=	0.001053 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร
	=	1.053165 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร
	=	52.65825 บาทต่อน้ำเสีย 50 ลูกบาศก์เมตร
สารกรดซัลฟิวริก	=	0.2 กรัม × 0.00721 บาทต่อมิลลิกรัม
	=	0.001442 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร
	=	1.442 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร
	=	72.1 บาทต่อน้ำเสีย 50 ลูกบาศก์เมตร

2.ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด

ค่าใช้จ่ายในการกำจัด	=	3,762.4284 + 52.65825 + 72.1
	=	3,887 บาทต่อน้ำเสีย 50 ลูกบาศก์เมตร

ภาคผนวก ง-8 การคำนวณค่าใช้จ่ายในการกำจัดลิกนินในน้ำเสียด้วยกระบวนการเพนตันเสมือน โดยใช้เตลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เมื่อใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นลิกนิน 0.2 กรัมต่อลิตร ทำการปรับพีเอชเริ่มต้นให้เท่ากับ 3 ด้วยกรดซัลฟิวริก จากนั้นทำการเติมเตลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์เข้มข้น 7.956 กรัมต่อปริมาตร 1 ลิตร และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.100 กรัมต่อลิตร

1.ราคาค่าสารเคมี

สารเตลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์	=	7.956 กรัม × 0.313927 บาทต่อกรัม
	=	0.313973 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร
	=	313.9273 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร
	=	15,696.37 บาทต่อน้ำเสีย 50 ลูกบาศก์เมตร
สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	=	0.1 กรัม × 0.010532 บาทต่อกรัม
	=	0.001053 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร
	=	1.053165 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร
	=	52.65825 บาทต่อน้ำเสีย 50 ลูกบาศก์เมตร
สารกรดซัลฟิวริก	=	0.2 กรัม × 0.00721 บาทต่อมิลลิกรัม
	=	0.001442 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร
	=	1.442 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร
	=	72.1 บาทต่อน้ำเสีย 50 ลูกบาศก์เมตร

2.ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด

ค่าใช้จ่ายในการกำจัด	=	15,696.37 + 52.65825 + 72.1
	=	15,821.12 บาทต่อน้ำเสีย 50 ลูกบาศก์เมตร

ภาคผนวก ง-9 การคำนวณค่าใช้จ่ายในการกำจัดลิกนินในน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือน โดยมีไฮดรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เมื่อใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นลิกนิน 0.2 กรัมต่อลิตร ทำการปรับพีเอชเริ่มต้นให้เท่ากับ 3 ด้วยกรดซัลฟิวริก จากนั้นทำการเติมไฮดรอนโมลิบเดตเข้มข้น 26.48 กรัมต่อปริมาตร 1 ลิตร และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.200 กรัมต่อลิตร

1.ราคาค่าสารเคมี

สารไฮดรอนโมลิบเดต	=	26.48 กรัม × 0.039458 บาทต่อกรัม
	=	1.0448 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร
	=	1,044.846 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร
	=	52,242.3 บาทต่อน้ำเสีย 50 ลูกบาศก์เมตร
สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	=	0.2 กรัม × 0.010532 บาทต่อกรัม
	=	0.002106 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร
	=	2.10633 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร
	=	105.3165 บาทต่อน้ำเสีย 50 ลูกบาศก์เมตร
สารกรดซัลฟิวริก	=	0.2 กรัม × 0.00721 บาทต่อมิลลิกรัม
	=	0.001442 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร
	=	1.442 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร
	=	72.1 บาทต่อน้ำเสีย 50 ลูกบาศก์เมตร

2.ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด

ค่าใช้จ่ายในการกำจัด	=	52,242.3 + 105.3165 + 72.1
	=	52,419.72 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร

ภาคผนวก จ

บันทึกผลการทดลองกระบวนการฟenton และฟentonเสมือนโดยใช้น้ำเสียจริง

ภาคผนวก จ-1 ผลการทดลองชุดควบคุมการทดลอง

ตารางที่ จ-1 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอटीของชุดควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยาในน้ำเสียจริง

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)		
	ลิกนิน	สี	ซีโอटी
เพอร์รัสซัลเฟต	76.44	93.28	66.13
แมกนีไทต์	89.27	98.92	65.25
เกอร์ไทต์	83.58	97.56	60.17
ฮีมาไทต์	88.24	97.03	62.71
เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์รอกไซด์	93.08	98.37	67.80
ไฮดรอนโมลิบเดต	38.47	70.27	44.64

ตารางที่ จ-2 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอटीของชุดควบคุมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในน้ำเสียจริง

ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (มก./ล.)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)		
	ลิกนิน	สี	ซีโอटी
100	4.91	10.34	-40.00
200	3.97	6.90	-55.00

ภาคผนวก จ-2 ผลการทดลองกระบวนการฟentonและฟentonเสมือนโดยใช้น้ำเสียจริง

ตารางที่ จ-3 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีไอดีในกระบวนการฟentonและฟentonเสมือนโดยใช้น้ำเสียจริง

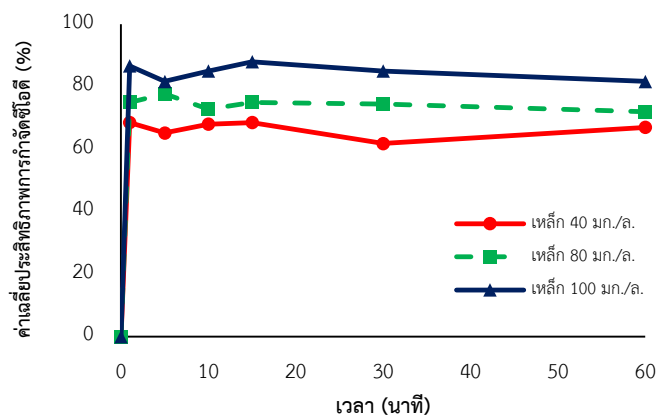
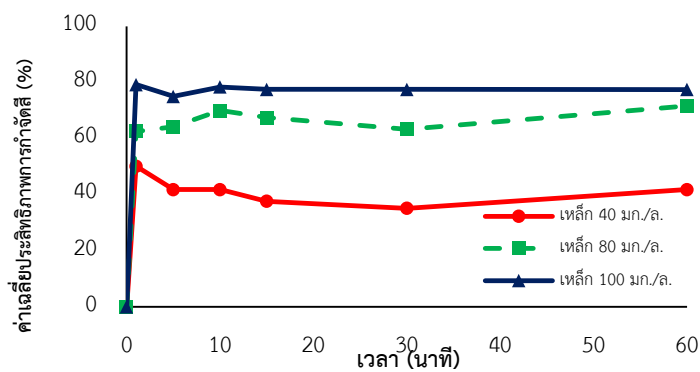
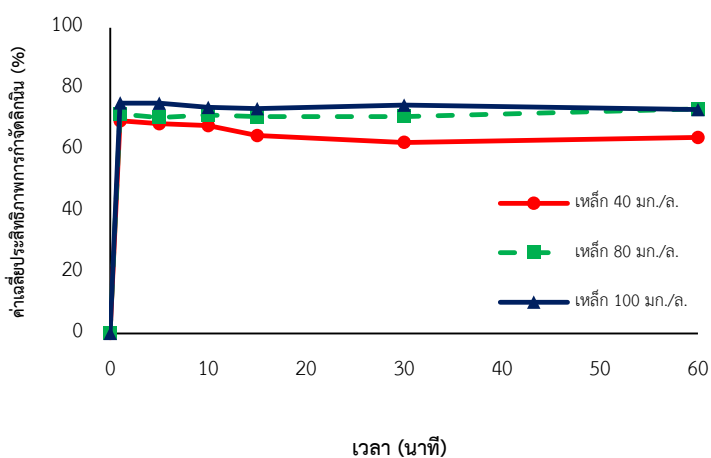
ตัวเร่งปฏิกิริยา	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด (%)		
	ลิกนิน	สี	ซีไอดี
เฟอร์รัสซัลเฟต	79.57	98.28	95.78
แมกนีไทด์	88.42	97.83	55.28
เกอร์ไทด์	85.03	97.84	48.26
ฮีมาไทด์	86.93	96.62	53.54
เดลตาเฟอร์ริกออกไซด์รอกไซด์	90.37	97.87	66.04
ไฮรอนโมลิบเดต	44.85	83.78	57.68

ภาคผนวก ฉ

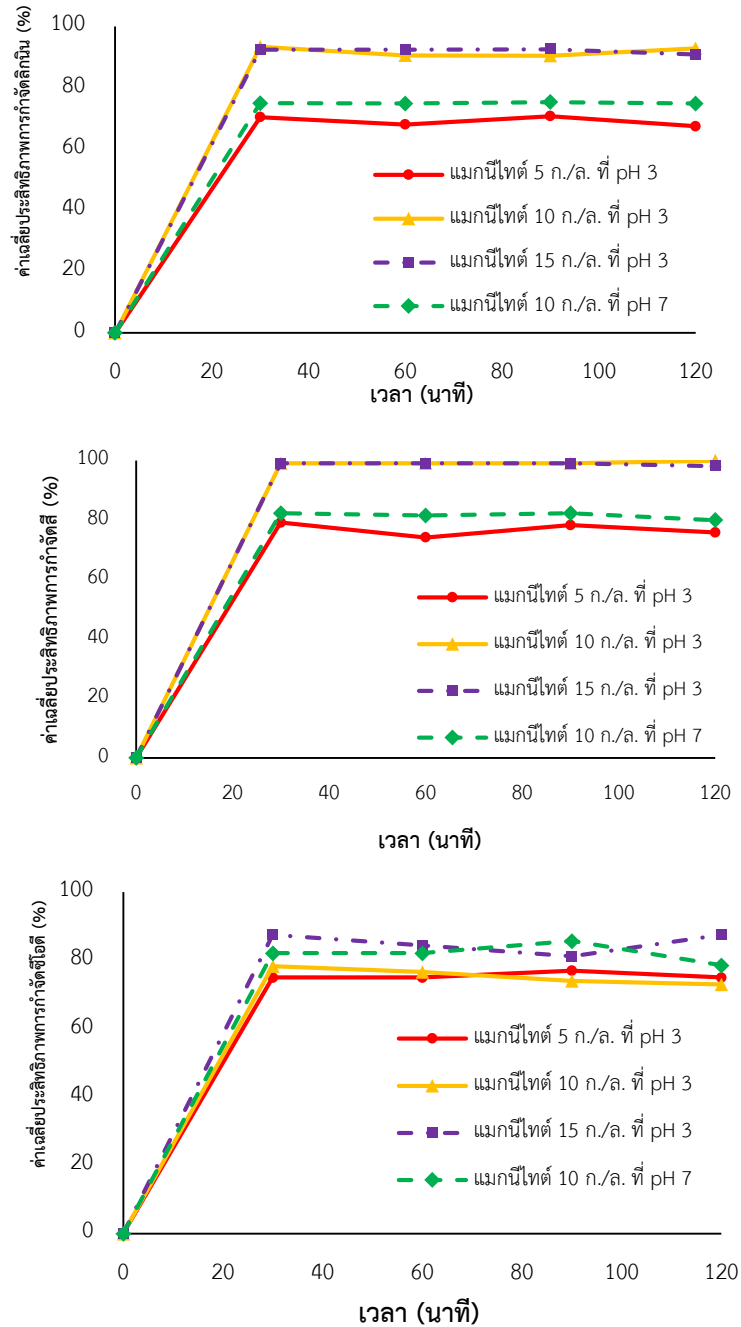
กราฟผลการทดลองกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือน

ภาคผนวกที่ ฉ-1 ผลการทดลองชุดควบคุมการทดลองตัวเร่งปฏิกิริยา

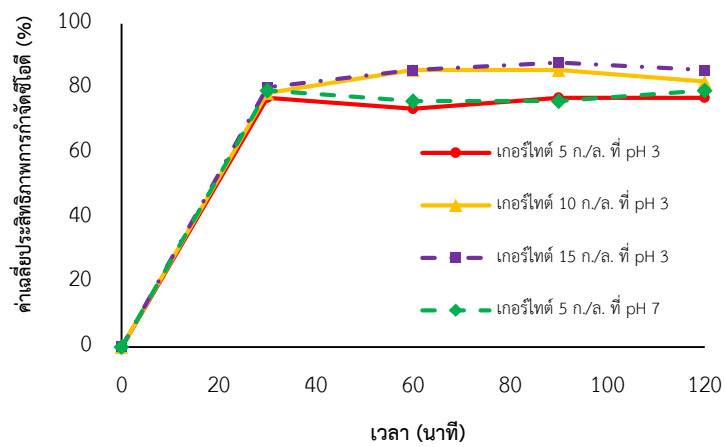
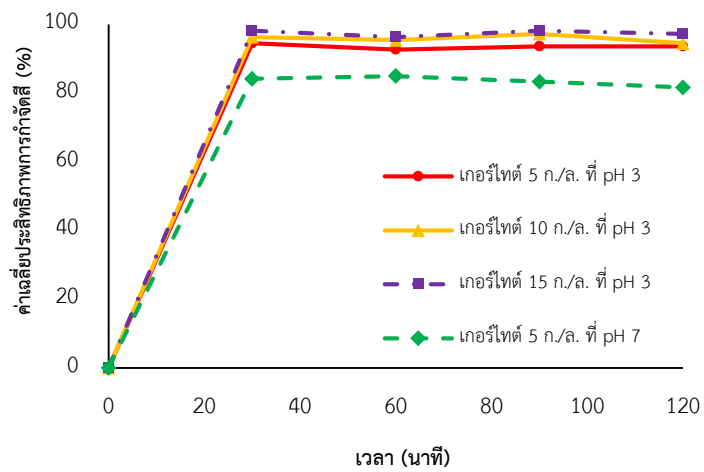
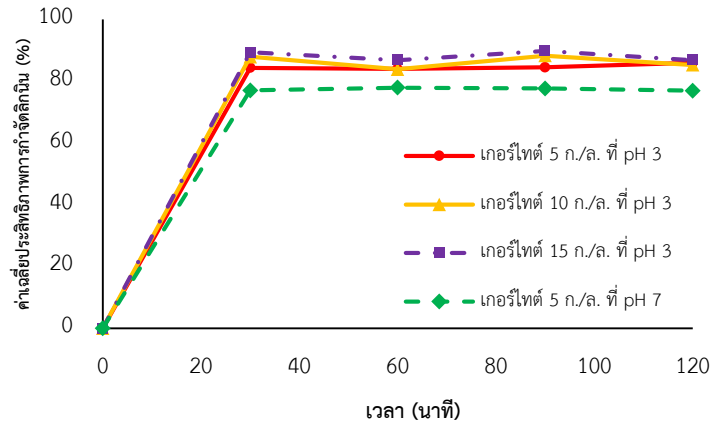
รูปที่ ฉ-1 กราฟค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีไอดีชุดควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตัน



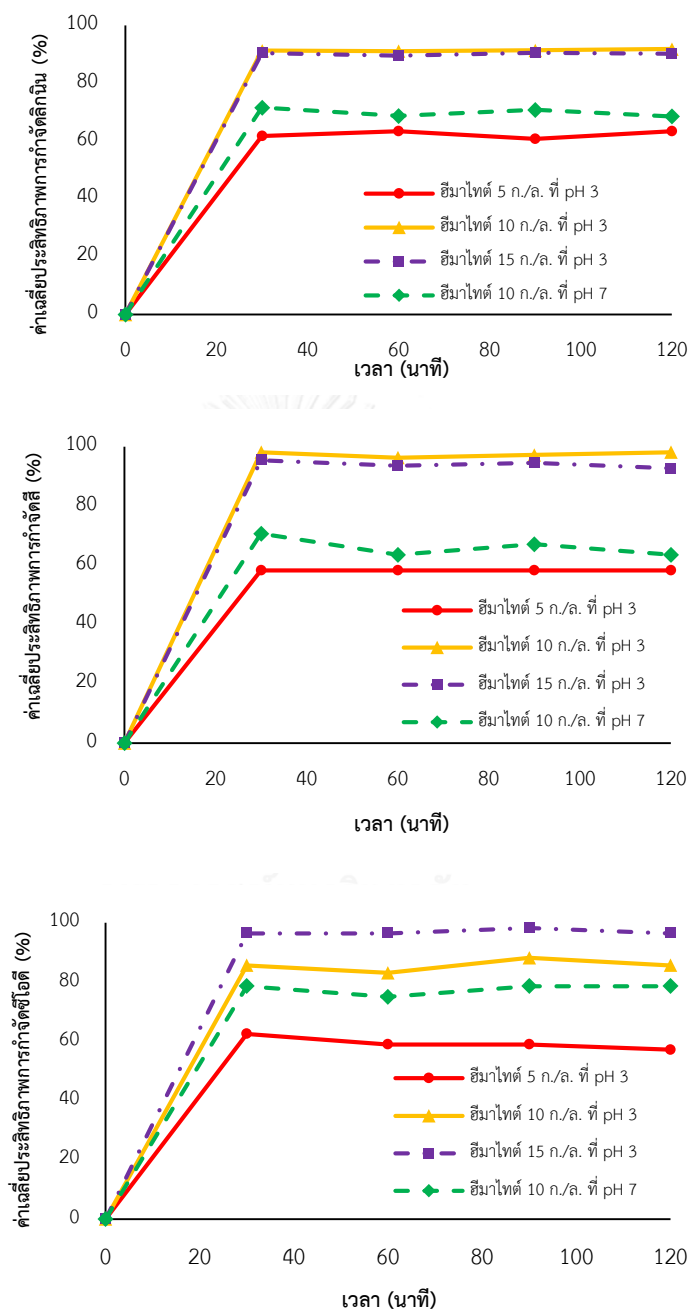
รูปที่ ๑-2 กราฟค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีชุดควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการฟentonเสมือน โดยใช้แมกนีไทด์



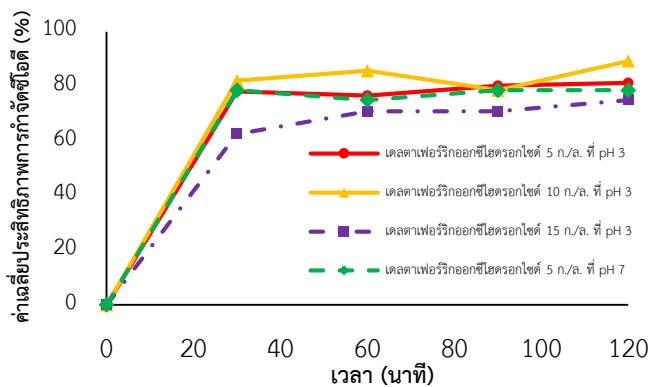
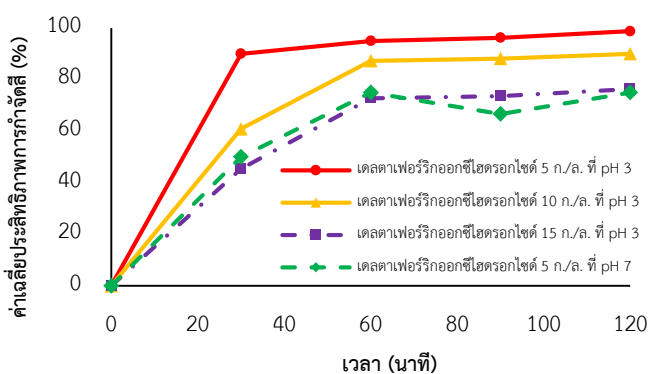
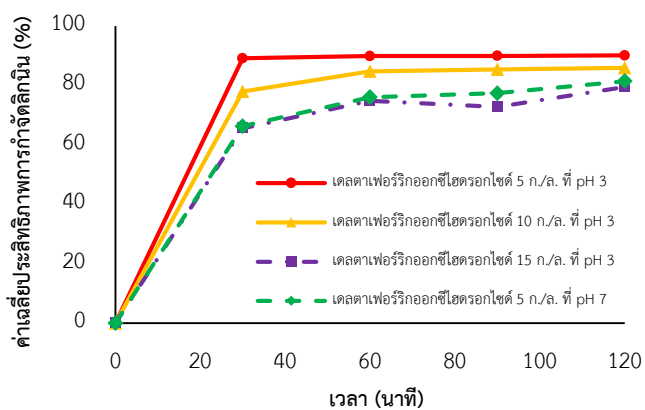
รูปที่ ๓-3 กราฟค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีชุดควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการฟentonเสมือน โดยใช้เกอร์ไทด์



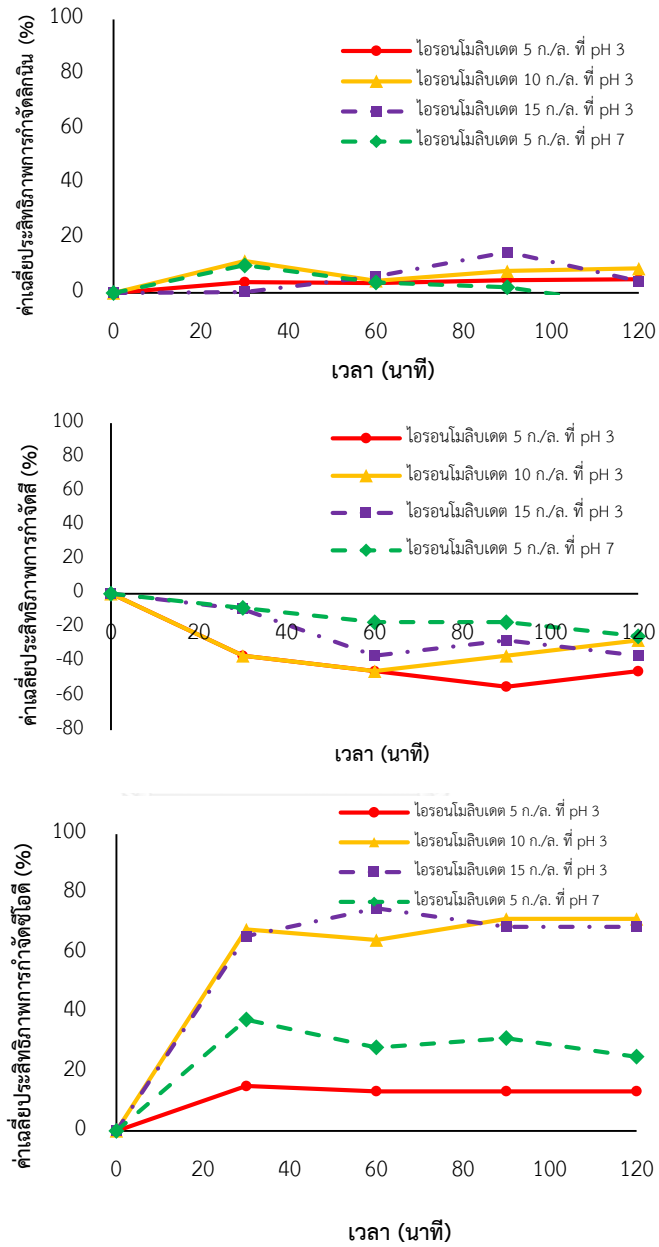
รูปที่ ๕-5 กราฟค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีชุดควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันเสมือน โดยใช้ฮีมาไทต์



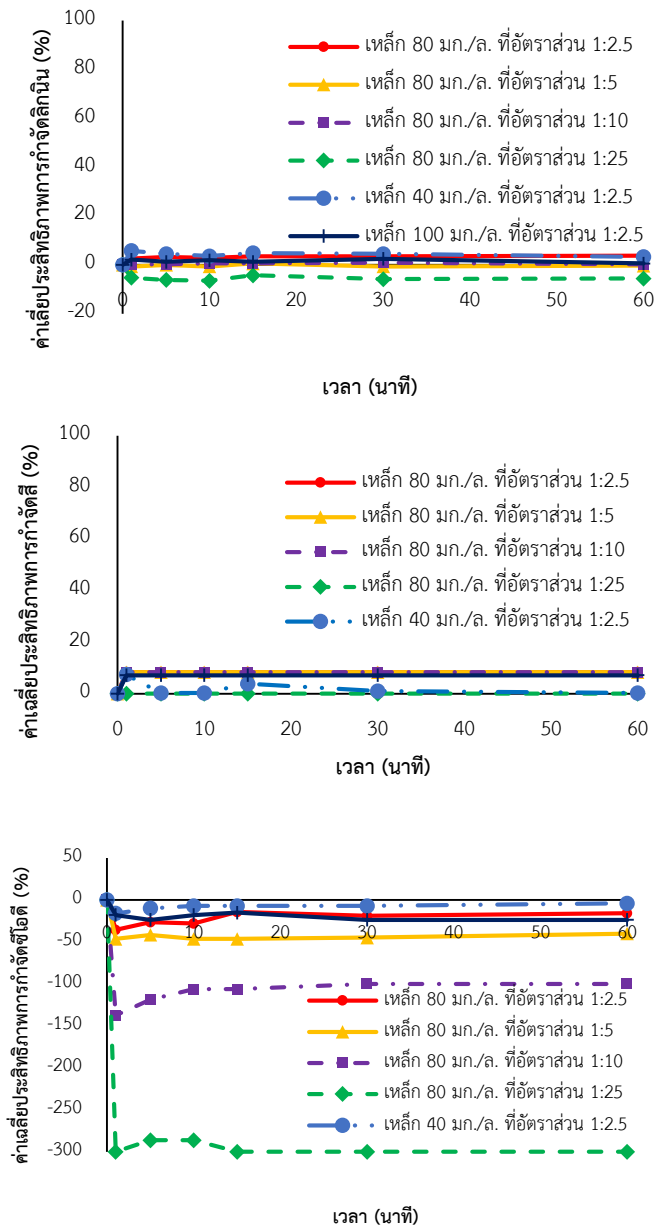
รูปที่ ๖-6 กราฟค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีชุดควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการฟentonเสมือน โดยใช้เคลตาเฟอร์ริกออกไซด์รอกไซด์



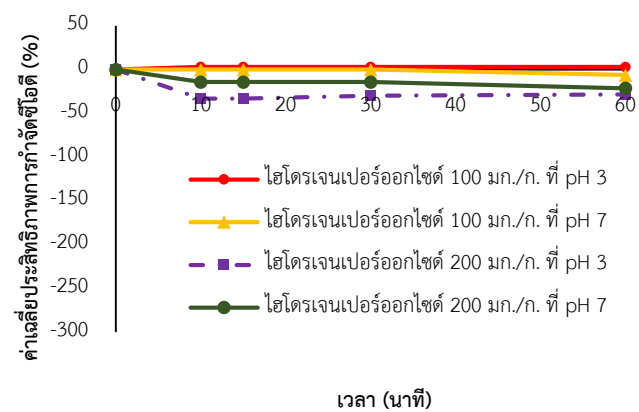
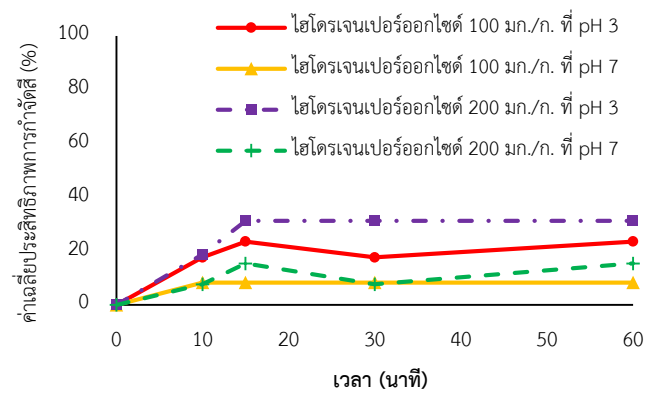
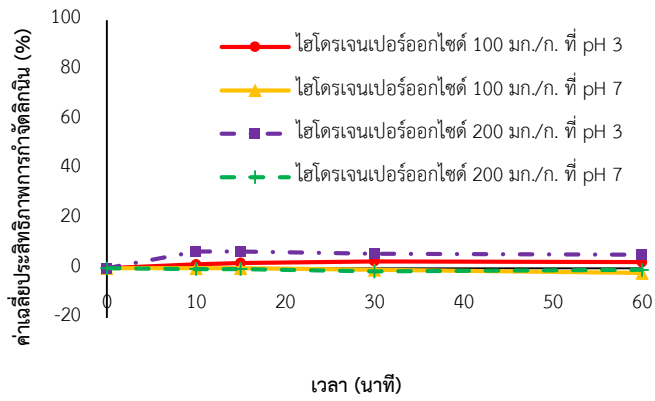
รูปที่ ๗-7 กราฟค่าเฉลี่ยประสิทธิผลการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีชุดควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการฟentonเสมือน โดยใช้ไฮดรอกซิลเปอร์ออกไซด์



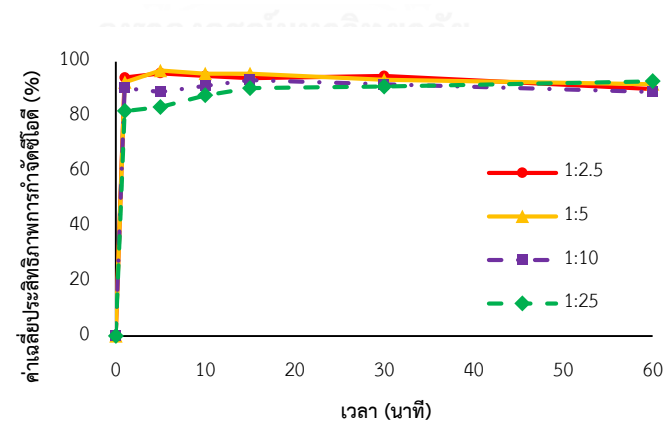
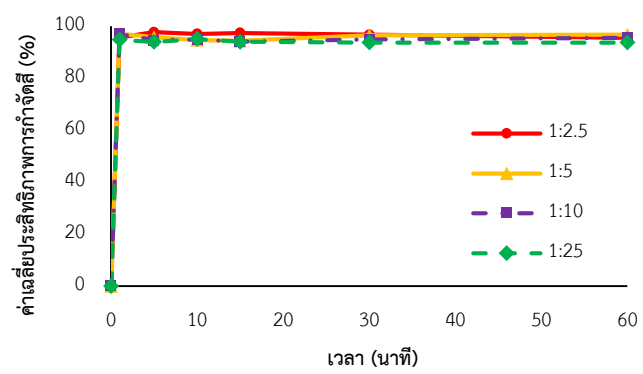
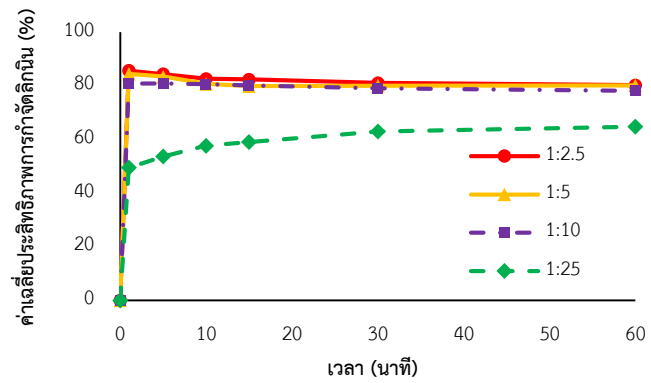
รูปที่ ๘-8 กราฟค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิแกนด์ สี และซีไอดีชุดการทดลองควบคุมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกระบวนการเฟ้นต้น



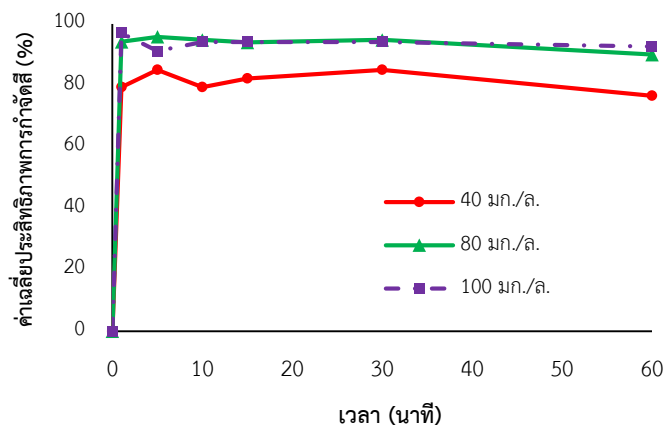
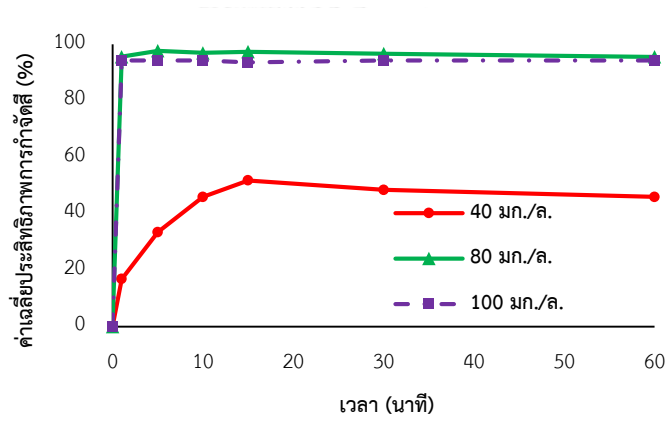
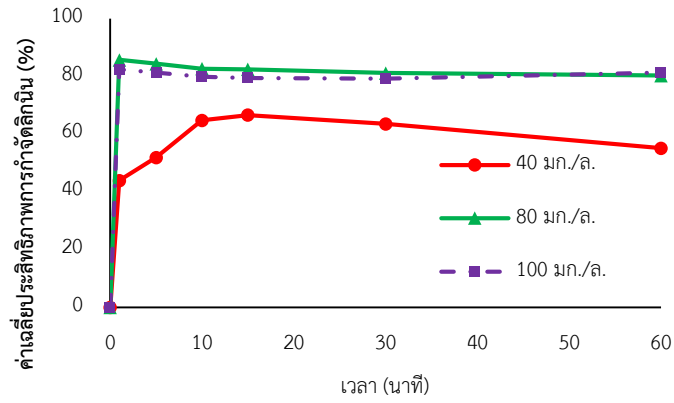
รูปที่ ๙-9 กราฟค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกลินีน สี และซีไอดีชุดการทดลองควบคุมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกระบวนการฟentonเสมือน



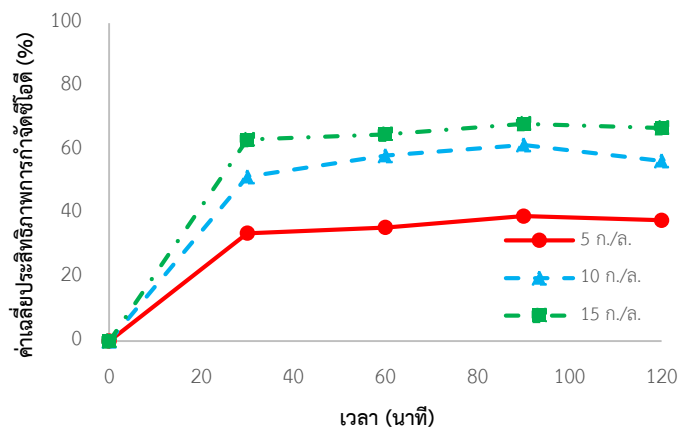
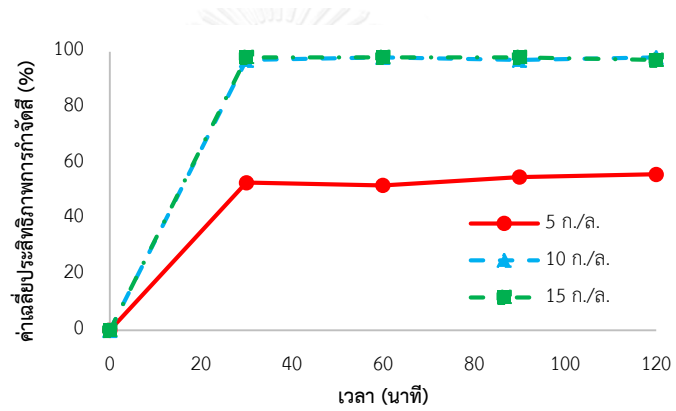
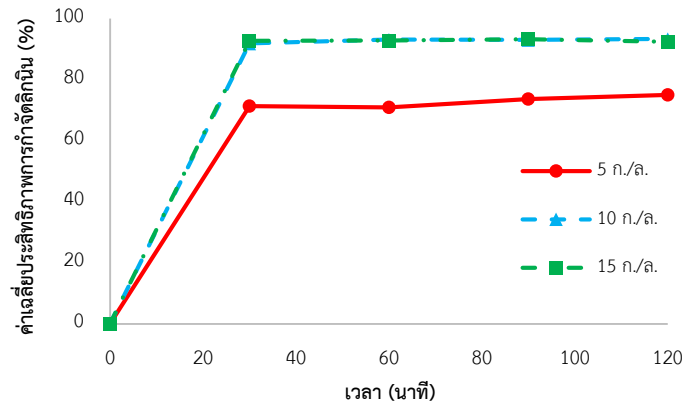
รูปที่ ๑-10 กราฟค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีในกระบวนการเพนตันที่อัตราส่วนเหล็กต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่าง ๆ



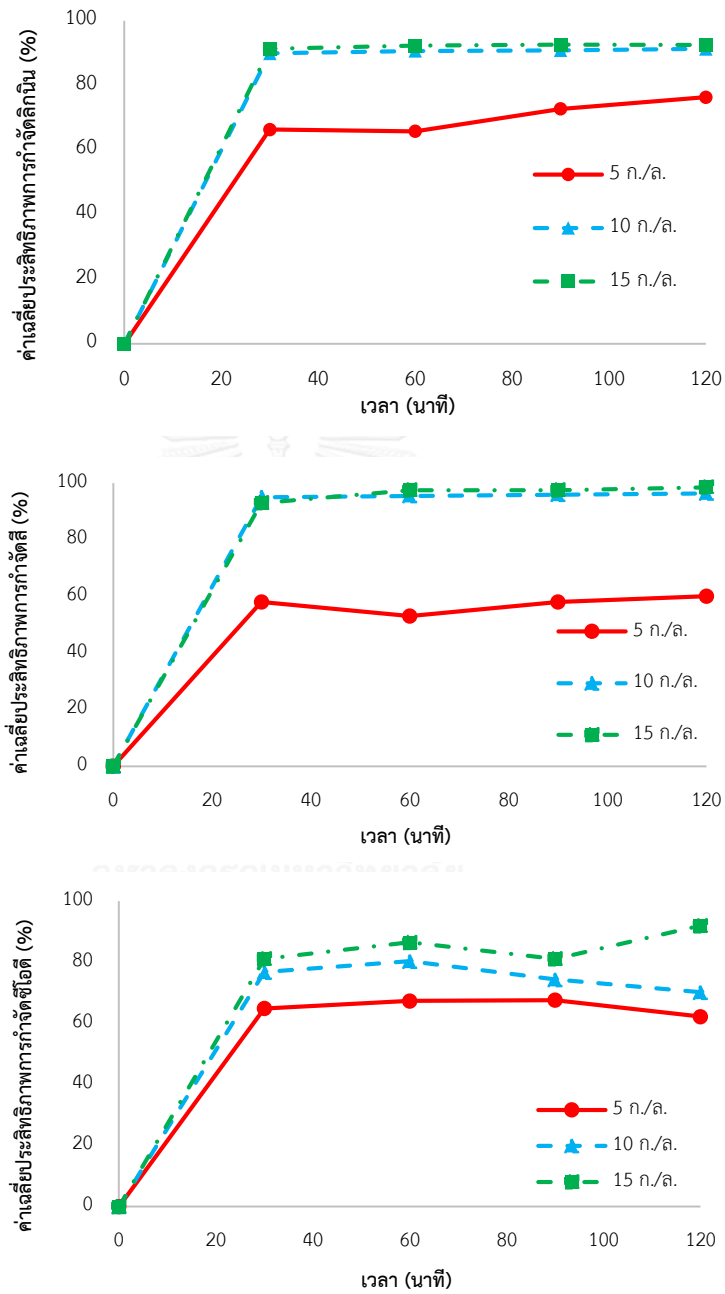
รูปที่ ๑-11 กราฟค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีในกระบวนการเพนตันที่ความเข้มข้น ต่าง ๆ อัตราส่วนเหล็กต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 1:2.5



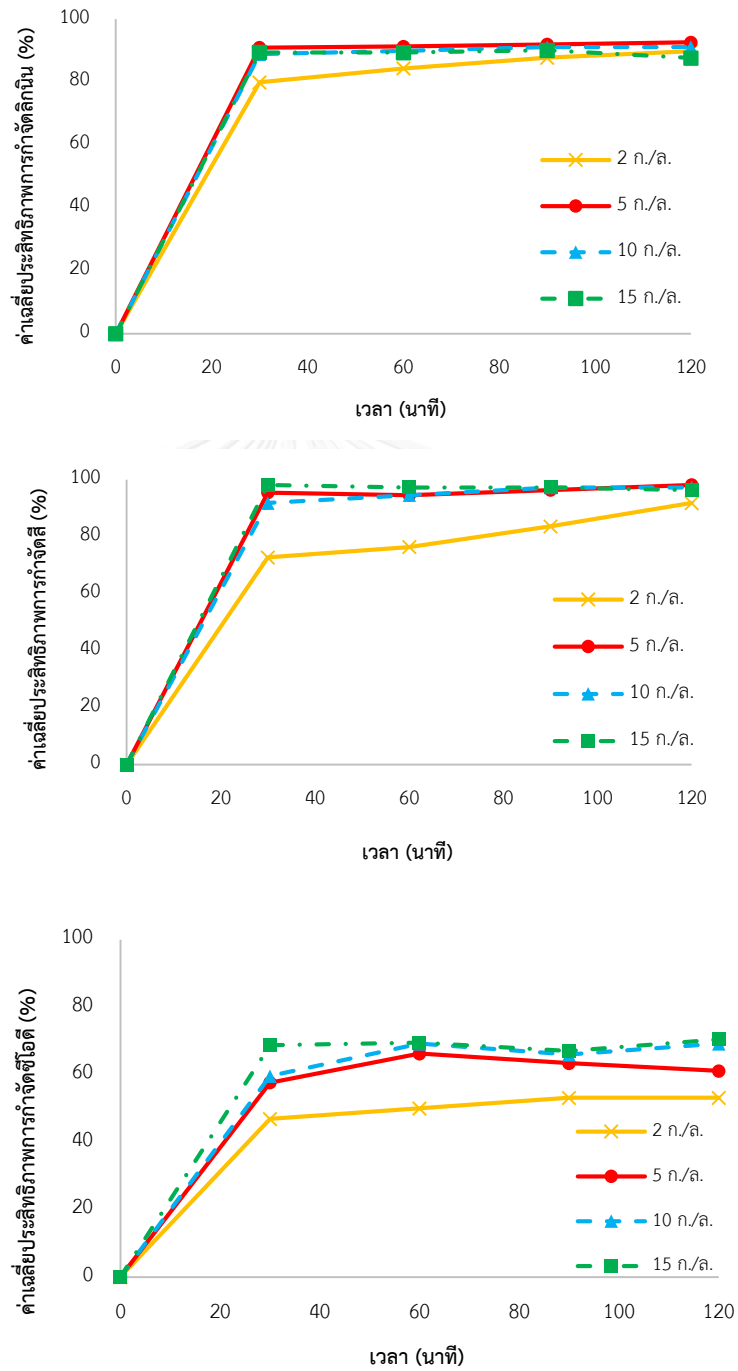
รูปที่ ๑-12 กราฟค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีไอดีในกระบวนการเพนตันเสมือนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็กต่าง ๆ ของแมกนีไทด์



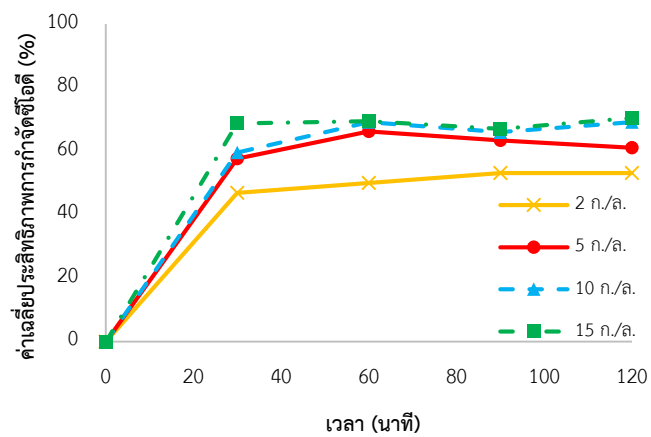
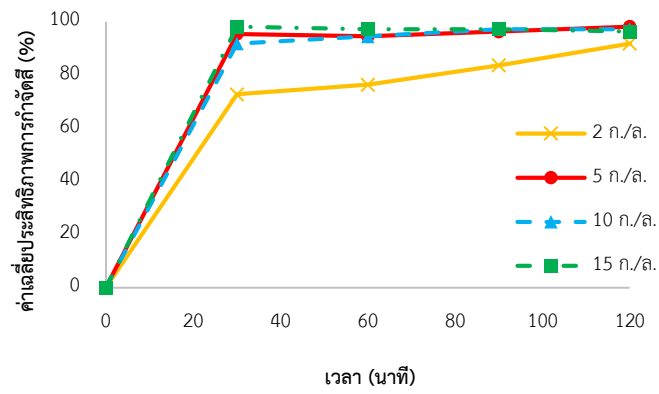
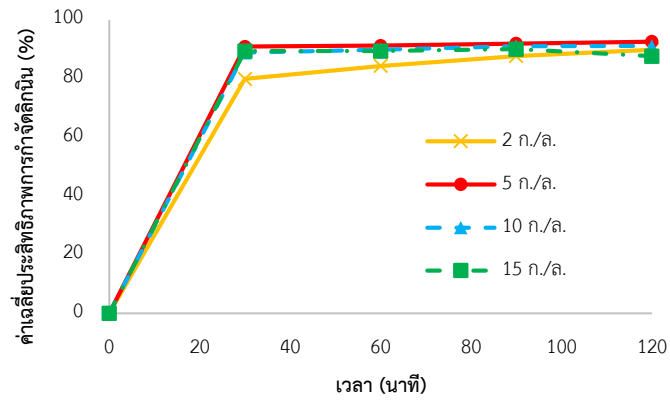
รูปที่ ๑-14 กราฟค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอทีในกระบวนการเพนตันเสมือนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็กต่าง ๆ ของฮีมาไทต์



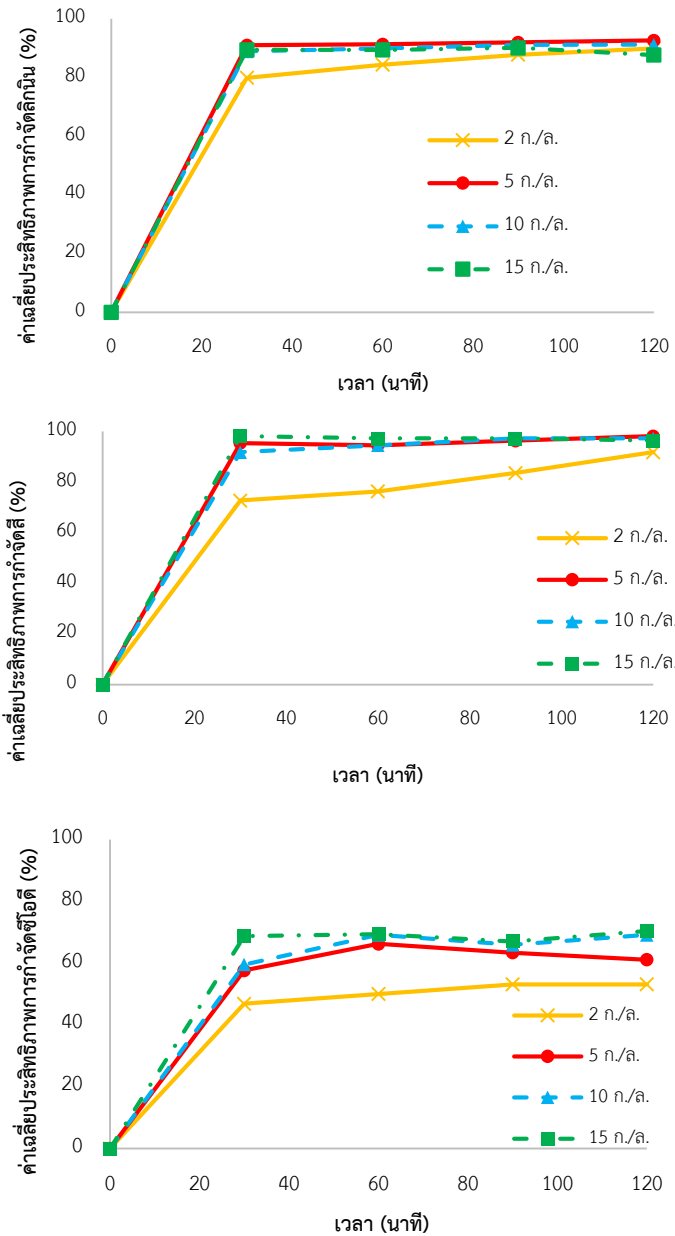
รูปที่ ๑-15 กราฟค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีไอดีในกระบวนการเพนตันเสมือนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็กต่าง ๆ ของเดลตาเฟอร์ริกออกไซด์รอกไซด์



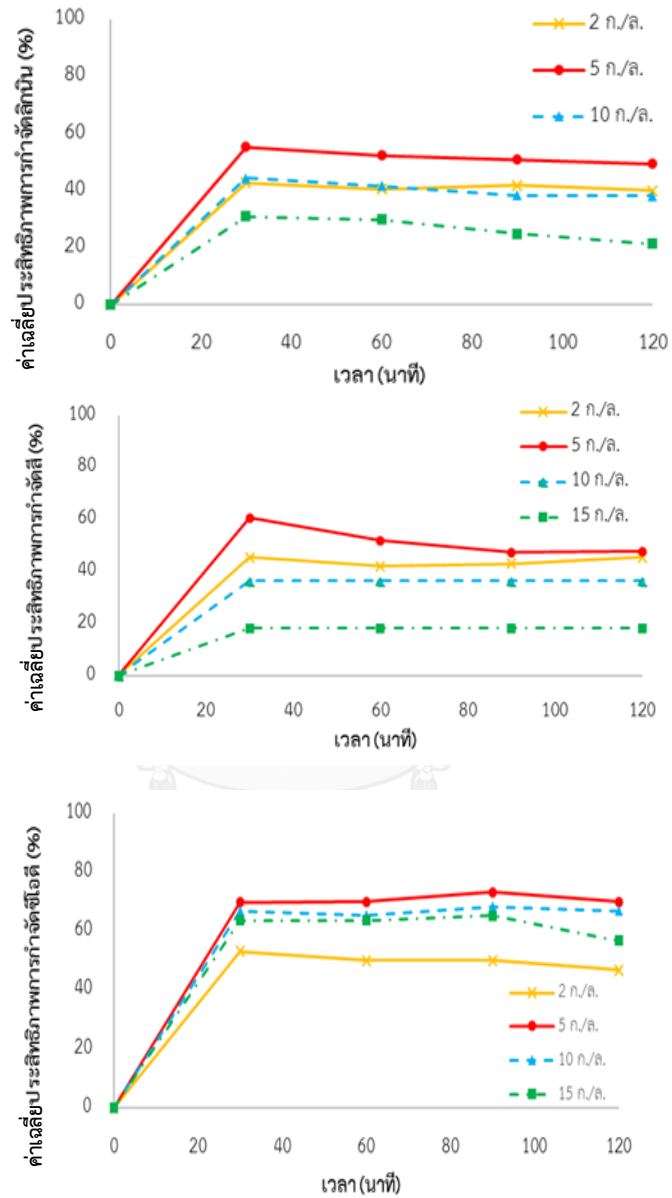
รูปที่ ๑-15 กราฟค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอทีในกระบวนการเพนตันเสมือนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็กต่าง ๆ ของเดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์



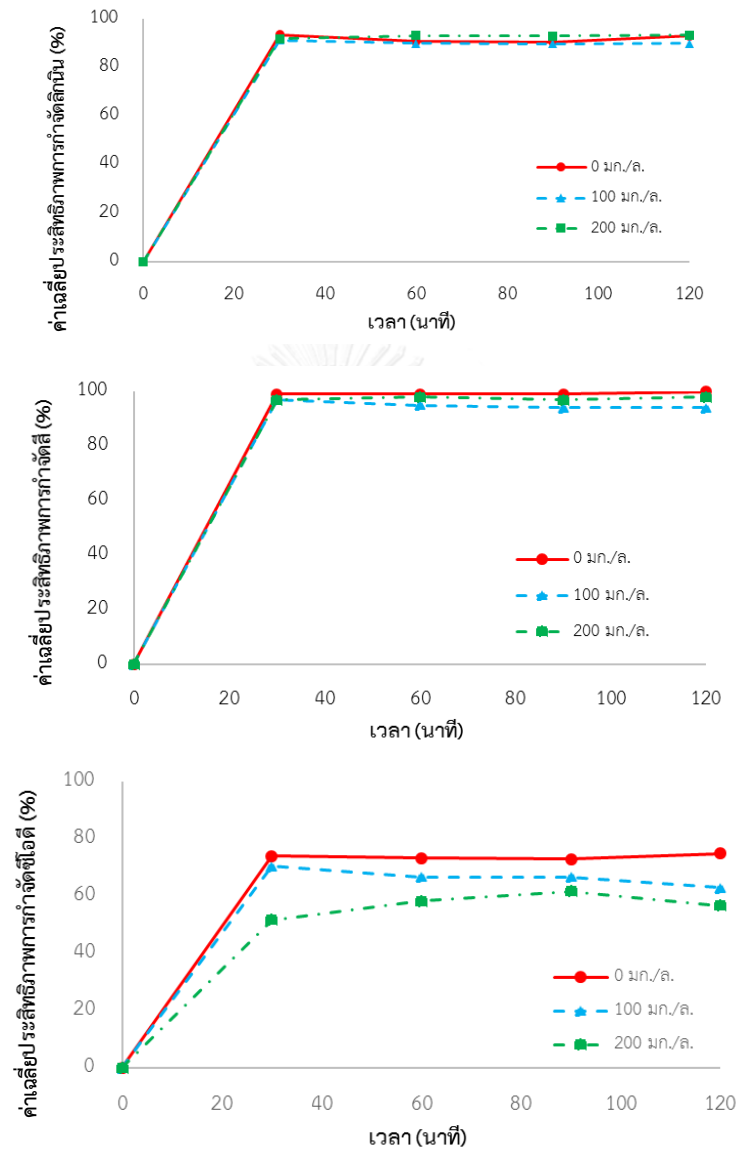
รูปที่ ๑-15 กราฟค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอทีในกระบวนการเพนตันเสมือนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็กต่าง ๆ ของเดลตาเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์



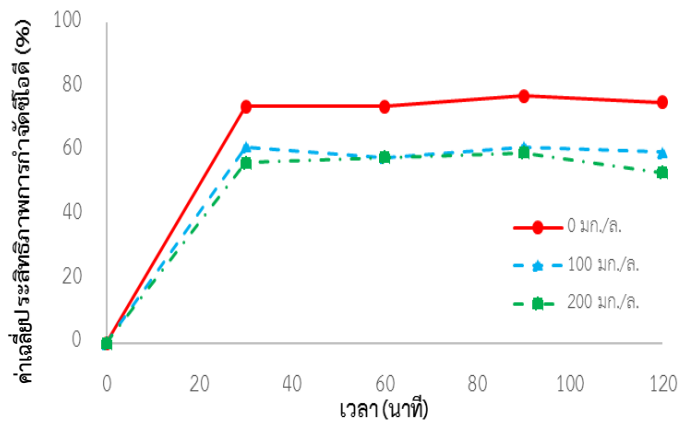
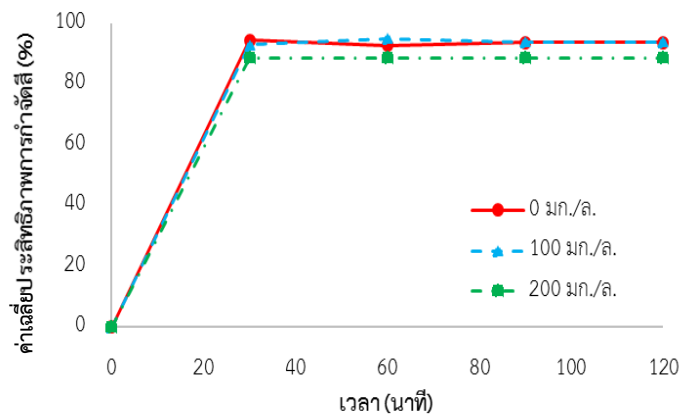
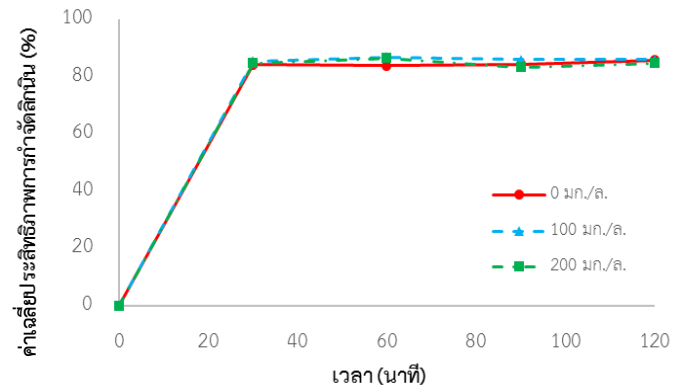
รูปที่ ๑-16 กราฟค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิทินิน สี และซีไอดีในกระบวนการเพนตันเสมือนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็กต่าง ๆ ของไฮรอนโมลิบเดต



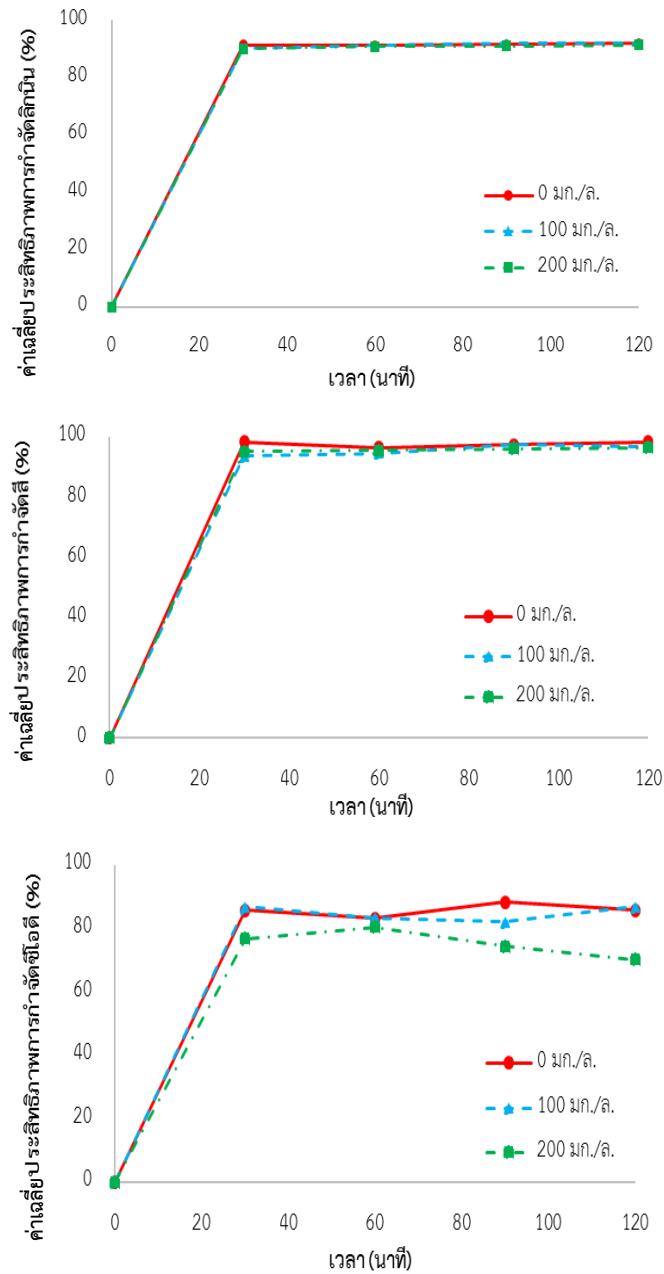
รูปที่ ๑-17 กราฟค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิแกนด์ สี และซีไอทีในกระบวนการเฟนตันเสมือนที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่าง ๆ ของแมกนีไทต์



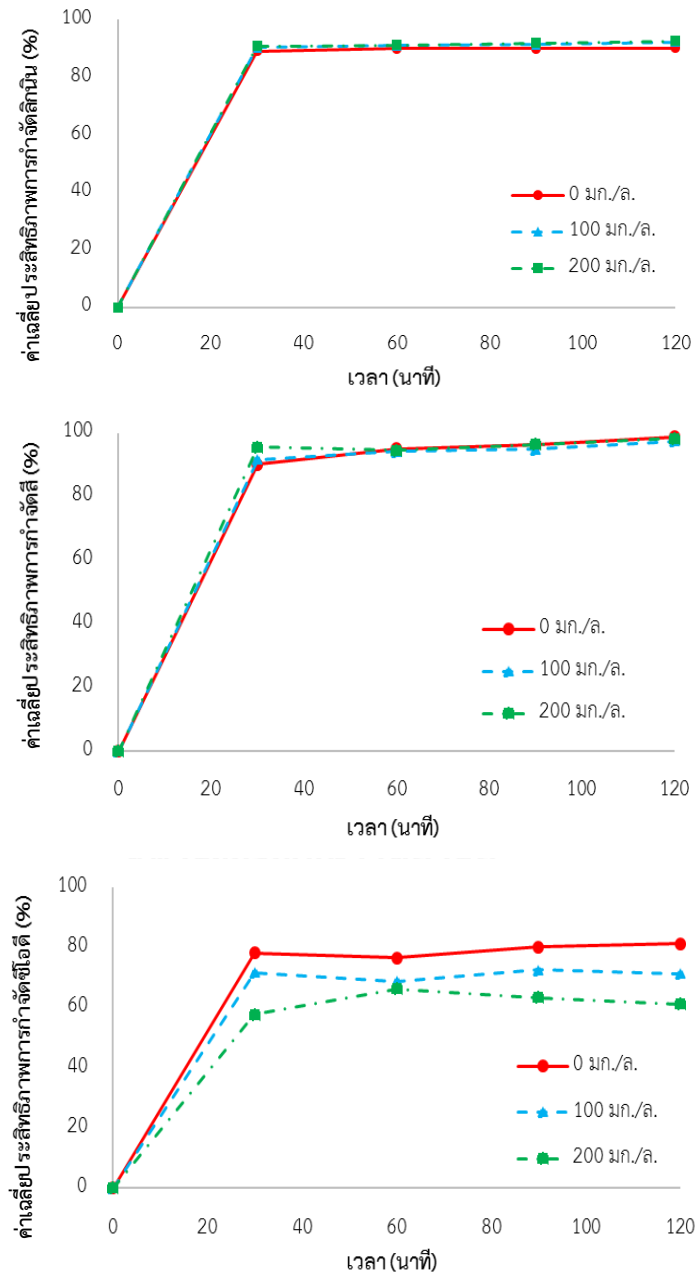
รูปที่ ๑-18 กราฟค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอทีในกระบวนการเพนตันเสมือนที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่าง ๆ ของเกอร์ไทต์



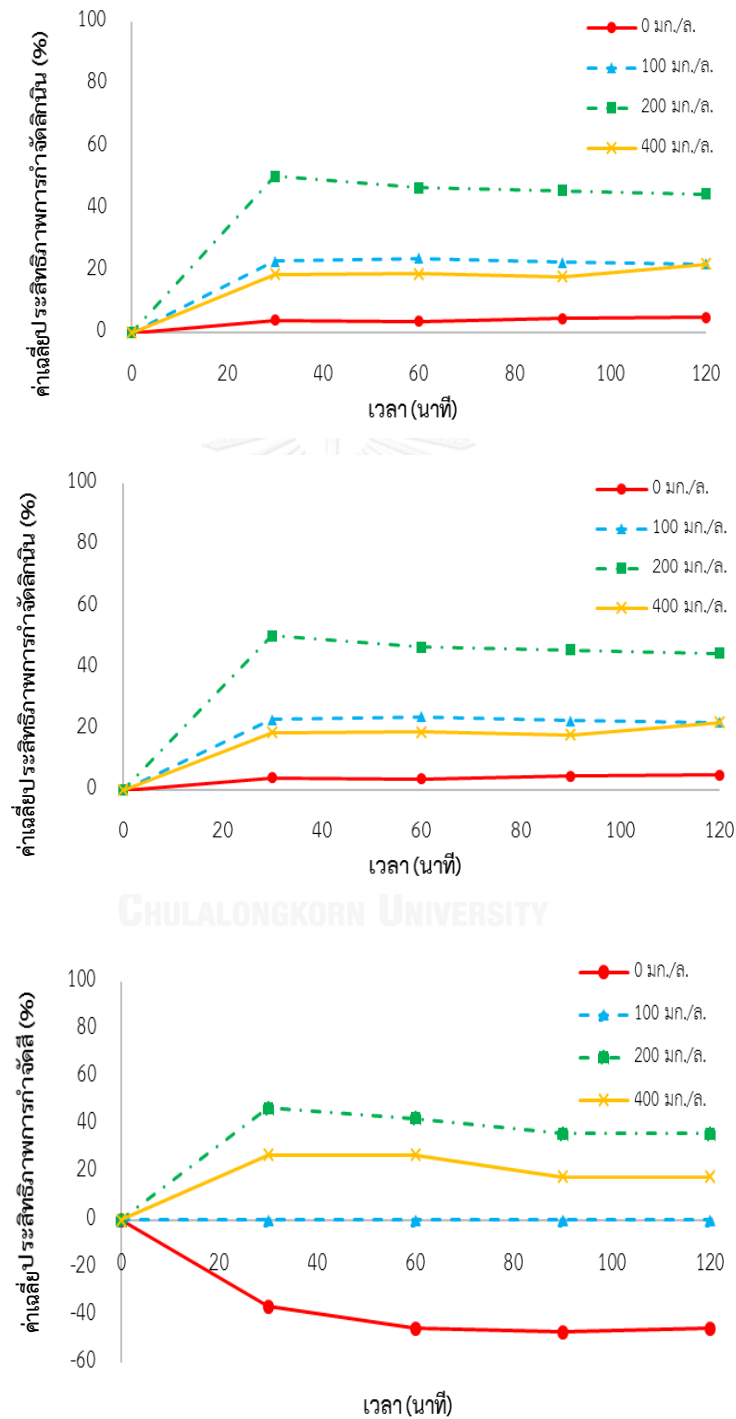
รูปที่ ๑-19 กราฟค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอทีในกระบวนการเพนตันเสมือนที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่าง ๆ ของฮีมาไทต์



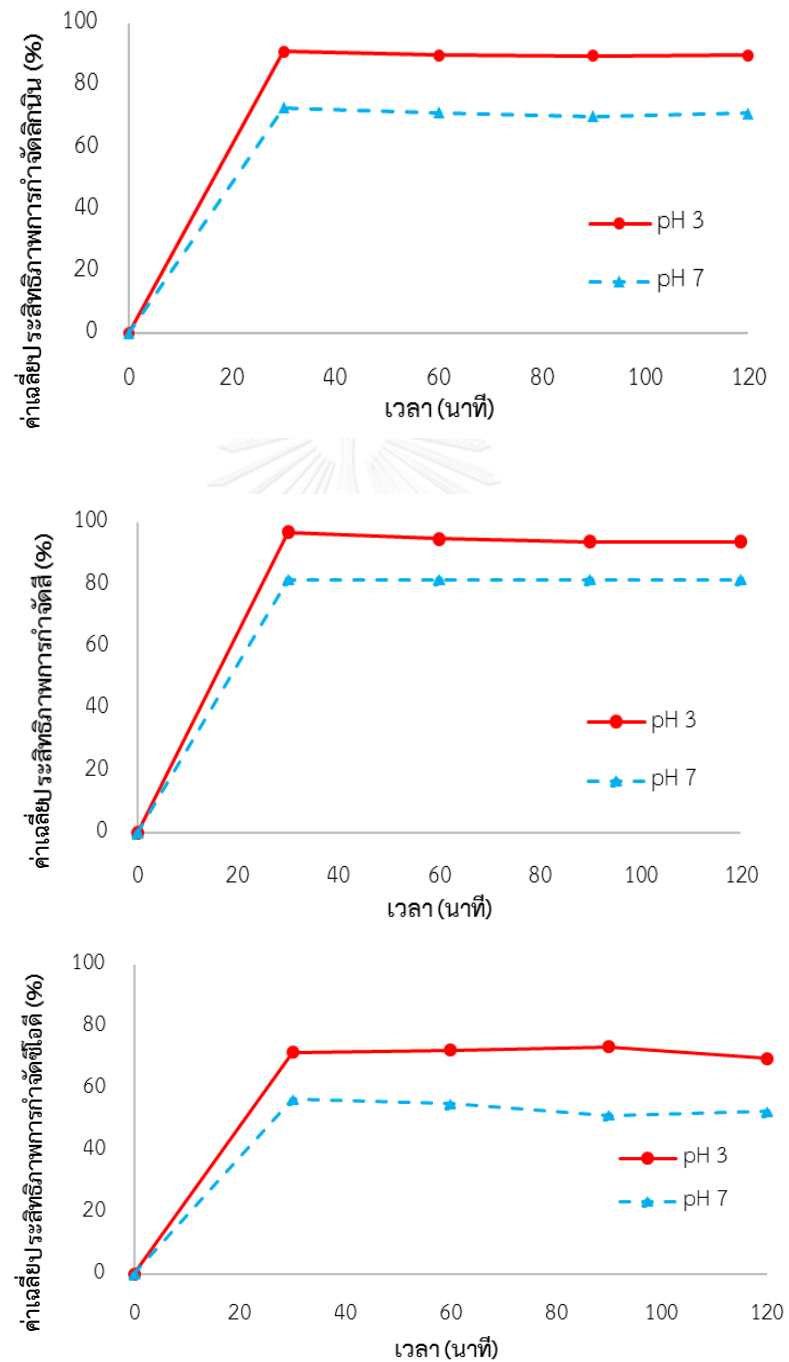
รูปที่ ๑-20 กราฟค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอทีในกระบวนการเพนตันเสมือนที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่าง ๆ ของเซลล์ตาเฟอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์



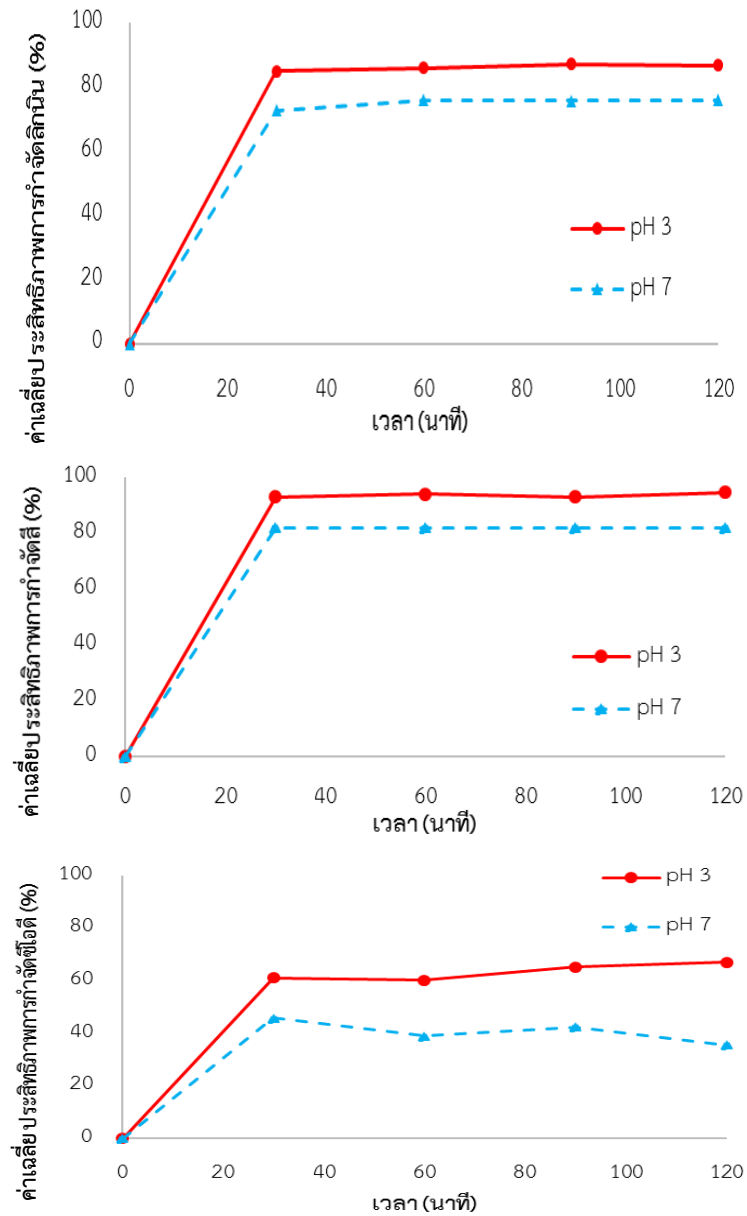
รูปที่ ๑-21 กราฟค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีไอดีในกระบวนการเพนตันเสมือนที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่าง ๆ ของไอรอนโมลิบเดต



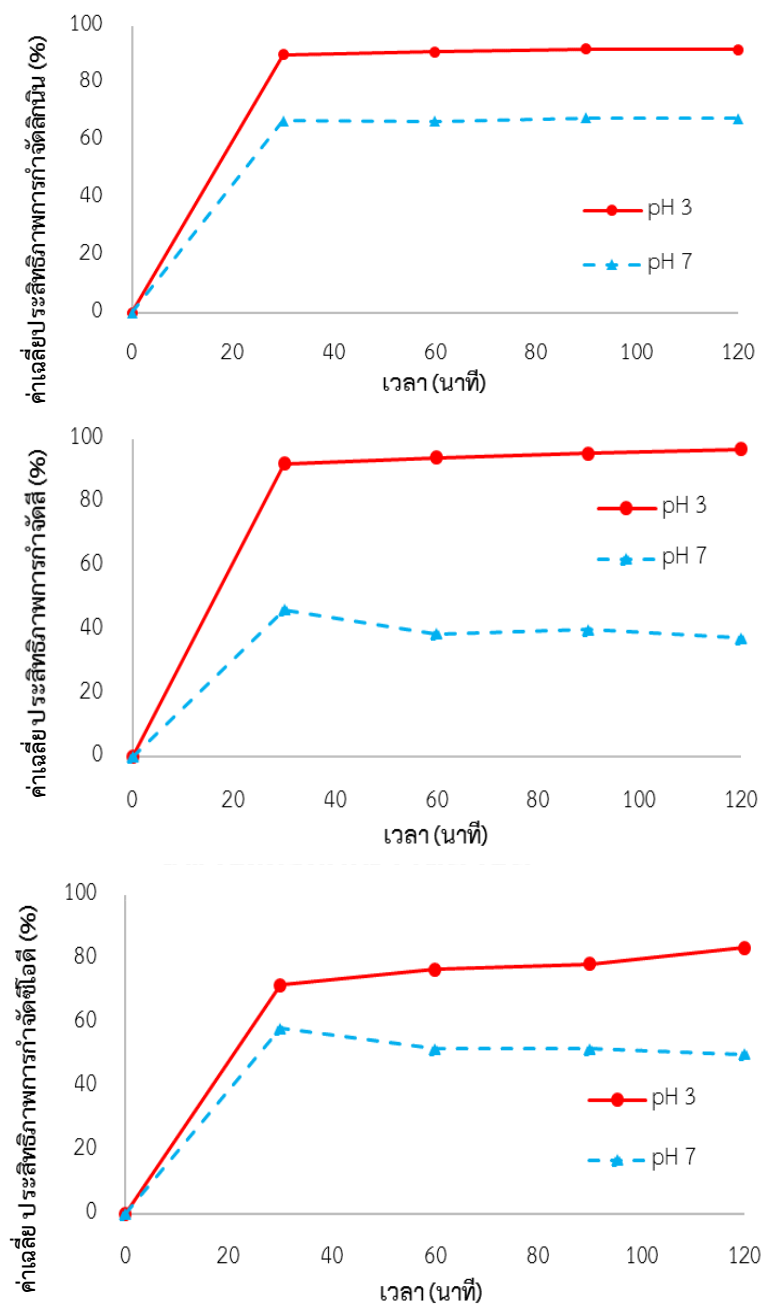
รูปที่ ๑-22 กราฟค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอทีในกระบวนการเพนตันเสมือนที่ความพีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ ของแมกนีไทต์



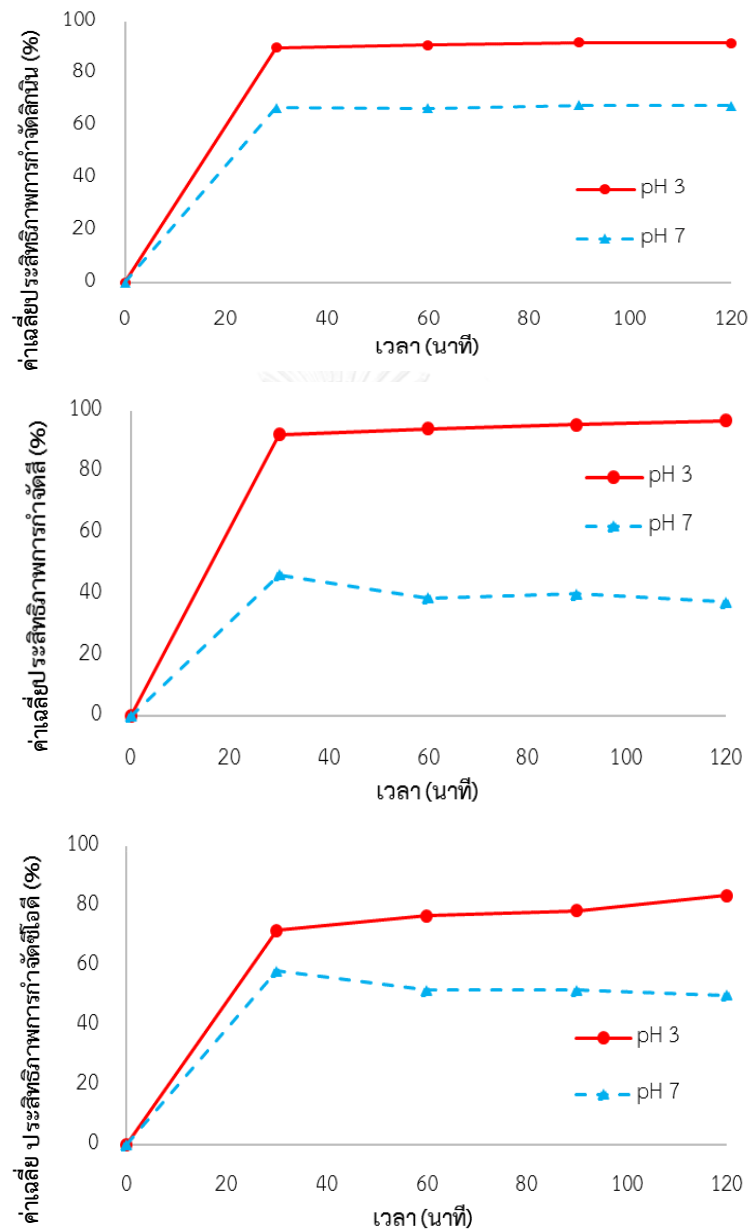
รูปที่ ๑-23 กราฟค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีไอดีในกระบวนการเพนตันเสมือนที่ความพีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ ของเกอร์ไทด์



รูปที่ ๑-24 กราฟค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอทีในกระบวนการเพนตันเสมือนที่ความพีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ ของฮีมาไทต์



รูปที่ ๑-24 กราฟค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน สี และซีโอทีในกระบวนการเพนตันเสมือนที่ความพีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ ของฮีมาไทต์



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพรรณณี หล่อดำรงเกียรติ เกิดเมื่อวันที่ 15 มกราคม พ.ศ. 2534 ที่จังหวัดนครปฐม สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล เมื่อปีการศึกษา 2555 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555

ผลงานวิจัยส่วนหนึ่งจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการเผยแพร่ในประชุมวิชาการ สิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 15 จัดที่โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ รongเมือง กรุงเทพฯ ระหว่างวันที่ 11 – 13 พฤษภาคม 2559

