

การบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยโฟโตเฟนตันออกซิเดชันในเครื่องปฏิกรณ์ดั่งกวนแบบต่อเนื่อง



นายศักดิ์ ก่อตั้งสกุล

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-53-2716-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TREATMENT OF TEXTILE WASTEWATER BY PHOTO-FENTON OXIDATION IN CONTINUOUS
STIRRED TANK REACTOR



Mr. Sakda Kortangsakul

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-53-2716-6

นายศักดิ์ดา ก่อตั้งสกุล : การบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยกระบวนการโฟโตเฟนตัน
ออกซิเดชันในเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง TREATMENT OF TEXTILE
WASTEWATER BY PHOTO-FENTON OXIDATION PROCESS IN CONTINUOUS
STIRRED TANK REACTOR

อาจารย์ที่ปรึกษา: ผศ.ดร. มะลิ หุ่นสม จำนวนหน้า 91 หน้า. ISBN 974-53-2716-6

งานวิจัยนี้ศึกษาการลดสี ค่าซีไอดีและค่าบีไอดี ในน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันออกซิเดชันในเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ตอน คือ ตอนที่ 1 เป็นการออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟกทอเรียล เพื่อศึกษาผลของตัวแปรที่มีผลต่อการลดลงของสารมลพิษ คือ อัตราการป้อนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (5-25 มิลลิลิตรต่อนาที่) อัตราการป้อนของเฟอร์รัสไอออน (0-5 มิลลิลิตรต่อนาที่) และกำลังไฟฟ้าของหลอดยูวี ที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร (0-60 วัตต์) ต่อการลดลงของสี ค่าซีไอดี และค่าบีไอดี โดยน้ำเสียที่ใช้จะมีค่าความเป็นกรด-เบสประมาณ 7-8 และอัตราการไหลของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 1 ลิตรต่อนาที่ จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าอัตราการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเฟอร์รัสไอออนมีผลต่อการลดลงของสีและค่าบีไอดีอย่างมีนัยสำคัญ โดยสามารถลดสีได้ประมาณร้อยละ 40-50 และลดค่าบีไอดีได้ประมาณร้อยละ 40-80 ส่วนค่าซีไอดีนั้นไม่มีตัวแปรใดที่มีผลต่อการลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ในการบำบัดน้ำเสียในระบบต่อเนื่อง โดยพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันในระบบต่อเนื่องคือ กำลังไฟฟ้าของหลอดยูวี 90 วัตต์ ค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 5 อัตราการป้อนเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 5 มิลลิลิตรต่อนาที่ และอัตราการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 25 มิลลิลิตรต่อนาที่ โดยที่ภาวะดังกล่าวสามารถลดสี ค่าบีไอดี และค่าซีไอดีได้ร้อยละ 69.2 99.4 และ 45.5 ตามลำดับ

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อนิสิต.....^{ศักดิ์ดา ก่อตั้งสกุล}
สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2548.....

4672423323: MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: PHOTO - FENTON/ ADVANCE OXIDATION PROCESS/

TEXTILE WASTEWATERTREATMENT

SAKDA KORTANGSAKUL : TREATMENT OF TEXTILE WASTEWATER BY PHOTO-FENTON OXIDATION PROCESS IN CONTINUOUS STIRRED TANK REACTOR.

THESIS ADVISOR : ASST.PROF. MALI HUNSOM, Ph. D., 91 pp.

ISBN 974-53-2716-6.

This work was carried out to decrease color, COD and BOD in wastewater from textile industry by using the photo-Fenton oxidation process in continuous stirred tank reactor. The experiment was separated into two parts. The first part was to study the effect of parameters including feed rate of H_2O_2 (5-25 ml/min), feed rate of Fe^{2+} (0-5 ml/min) and UV power (365 nm, 0-60 w) on the reduction of color, COD and BOD by 2^k factorial design experiment. The initial pH of wastewater and its feed rate were maintained constant at 7-8 and 1 l/min, respectively. The preliminary results indicated that feed rate of both H_2O_2 and Fe^{2+} had significant effect on the reduction of color and BOD which led to decrease approximately 40-50% and 40-80% of color and BOD, respectively. For COD, no parameters in the investigated range had effect on its reduction percentages. The second part was carried out to investigate the effects of parameters for treating textile wastewater in continuous process. The optimum condition was found at UV power of 90 W, initial pH of wastewater of 5, feed rate of Fe^{2+} of 5 ml/min and feed rate of H_2O_2 of 25 ml/min. By employing such condition, approximately 69.2%, 99.4% and 45.5% of color, BOD and COD were reduced, respectively.

Department.....Chemical Technology..... Student's signature..... *sakda kortangsakul*
 Field of study... Chemical Technology..... Advisor's signature..... *Mali Hunsom*
 Academic year.....2005.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หนู่นสม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ด้วยดีตลอดมา รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำในงานวิจัยนี้

งานวิจัยเรื่อง “การบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยโฟโตเฟนตันออกซิเดชันในเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง” สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากบัณฑิตศึกษา ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรธม ประศาสน์สารกิจ ประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พฤกษาทรร และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อลิสวา วังไน กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ทุกท่านของภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการสร้าง ซ่อมแซมเครื่องมือและอำนวยความสะดวกในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณนวนนิตี เวสยาสถิต ผู้จัดการฝ่ายควบคุมและพัฒนาคุณภาพผลิตภัณฑ์ บริษัทเอเชียไฟเบอร์ จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่โรงงาน

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่ให้ความช่วยเหลือ เป็นกำลังใจอย่างดีและให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ชาวเคมีเทคนิคทุกคน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัยการวิจัย	1
1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย	1
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	2
2 วารสารปริทัศน์.....	3
2.1 กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมสิ่งทอ	3
2.1.1 กระบวนการเตรียมผ้า.....	4
2.1.2 กระบวนการย้อมผ้า.....	8
2.1.3 กระบวนการตกแต่งสำเร็จ.....	16
2.2 ความเป็นพิษของน้ำเสีย	16
2.2.1 โลหะหนัก.....	17
2.2.2 ฟอรัมาลดีไฮด์.....	17
2.2.3 สีย้อม.....	17
2.2.4 แก๊สคลอรีน.....	18
2.2.5 ความเป็นกรด-เบส	18
2.2.6 สารอื่นๆ	19

บทที่	หน้า
2.3 แหล่งที่มาของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม	19
2.3.1 การกำจัดแป้งและการขจัดสิ่งสกปรก	19
2.3.2 การฟอกขาว	19
2.3.3 การย้อมผ้าและการชุบมัน	20
2.4 หลักการและการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ.....	21
2.4.1 การบำบัดน้ำเสียทางกายภาพ	22
2.4.2 การบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ	22
2.4.3 การบำบัดน้ำเสียทางเคมี	28
2.4.4 กระบวนการออกซิเดชันด้วยสารเคมี	30
2.5 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ^k	36
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	37
3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	40
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	40
3.1.1 สารเคมีที่ใช้บำบัดน้ำเสีย	40
3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์สี	40
3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์บีไอดี	40
3.1.4 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ซีไอดี.....	40
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง	41
3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	41
3.2.2 ชุดเครื่องมือประกอบการทดลอง.....	41
3.3 วิธีการทดลอง.....	44
ตอนที่ 1 การวิเคราะห์สมบัติน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ.....	44
ตอนที่ 2 ผลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อการทดลอง	44
ตอนที่ 3 ผลของกำลังไฟของแสงยูวีเอ	45
ตอนที่ 4 ผลของค่าความเป็นกรด-เบส.....	46
ตอนที่ 5 ผลของอัตราการป้อนเฟอร์รัสซัลเฟต	46
ตอนที่ 6 ผลของอัตราการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	47

บทที่	หน้า
4 ผลการทดลองและการวิจารณ์ผลการทดลอง	48
4.1 การวิเคราะห์สมบัติของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ	48
4.2 การออกแบบการทดลองแบบ 2 ^k แฟกทอเรียล	49
4.2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการลดลงของค่าสี.....	53
4.2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการลดลงของค่าบีโอดี.....	59
4.2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการลดลงของค่าซีโอดี	64
4.3 การปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการบำบัดน้ำเสีย.....	66
4.3.1 ผลของกำลังไฟฟ้าของหลอดยูวี.....	67
4.3.2 ผลของความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นของน้ำเสีย	68
4.3.3 ผลของอัตราการป้อนเพอร์ริสไอออน	70
4.3.4 ผลของอัตราการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	71
4.4 เปรียบเทียบงานวิจัยอื่น	73
5 สรุปผลการทดลอง.....	75
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	75
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	75
รายการอ้างอิง.....	76
ภาคผนวก.....	79
ภาคผนวก ก.....	80
ภาคผนวก ข.....	85
ภาคผนวก ค	89
ประวัติผู้เขียน.....	91

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 สมบัติของน้ำเสียเมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน	20
2.2 ศักย์ไฟฟ้าของสารเคมีที่ใช้ในการออกซิเดชันน้ำเสีย	31
2.3 สารประกอบที่สามารถถูกออกซิไดซ์ด้วยไฮดรอกซิลแรดิคัล	32
2.4 ประเภทของ AOPs	33
3.1 ภาวะการทดลองตามการออกแบบการทดลองแบบ 2^k factorial	45
4.1 สมบัติของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมก่อนการบำบัด	48
4.2 แสดงร้อยละการลดลงของสีที่ภาวะต่างๆ	54
4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละการลดลงของสี	55
4.4 แสดงร้อยละการลดลงของค่าบีโอดีที่ภาวะต่างๆ	60
4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละการลดลงของบีโอดี	60
4.6 แสดงร้อยละการลดลงของค่าซีโอดีที่ภาวะต่างๆ	65
4.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละการลดลงของซีโอดี	65
4.8 สมบัติของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมและสิ่งทอที่ผ่านการบำบัด ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันออกซิเดชัน	73
4.9 เปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ	74

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 กระบวนการผลิตผ้าในอุตสาหกรรมสิ่งทอ	3
2.2 เครื่องย้อมผ้าแบบแพกเกจ	14
2.3 เครื่องย้อมผ้าแบบปิม	14
2.4 เครื่องย้อมผ้าแบบเจท.....	15
2.5 เครื่องย้อมผ้าแบบจิกเกอร์.....	16
2.6 กระบวนการเอเอสแบบธรรมดา	24
2.7 กระบวนการเติมอากาศแบบเรียวลง.....	24
2.8 กระบวนการเติมอากาศแบบเป็นชั้น	25
2.9 กระบวนการผสมแบบสมบูรณ์.....	26
2.10 กระบวนการเติมอากาศยัดเวลาหรือแบบคลองเวียน	27
2.11 กระบวนการปรับเสถียรสี.....	27
2.12 กระบวนการแอนอกซิก-แอนแอโรบิกและแอโรบิก	28
3.1 แผนผังของชุดเครื่องมือการทดลองที่ใช้ในงานวิจัย	43
4.1 ร้อยละการลดลงของสีที่ภาวะต่างๆ.....	49
4.2 ร้อยละการลดลงของบีโอดีที่ภาวะต่างๆ.....	50
4.3 ร้อยละการลดลงของซีโอดีที่ภาวะต่างๆ.....	51
4.4 การแจกแจงความน่าจะเป็นปกติแบบครึ่งกับปัจจัยที่มีผล	55
4.5 ก) ร้อยละการลดลงของสีที่อัตราไหลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ค่าสูงสุดและต่ำสุด	56
4.5 ข) ร้อยละการลดลงของสีที่อัตราไหลของเฟอร์รัสไอออน ที่ค่าสูงสุดและต่ำสุด	56
4.6 ร้อยละการลดลงของสีที่อัตราการไหลของเฟอร์รัสไอออนสูงสุด (—) และต่ำสุด (—)	57
4.7 ก) ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแจกแจงแบบปกติและค่าเศษตกค้างของสี.....	58
4.7 ข) ความสัมพันธ์ระหว่างเศษตกค้างและร้อยละการลดของสีที่ได้จากการทำนาย.....	58
4.8 ร้อยละการลดลงของสีที่ได้จากการทำนายด้วยสมการที่ (4.10).....	59
4.9 การแจกแจงความน่าจะเป็นปกติแบบครึ่งกับปัจจัยที่มีผล	61
4.10 ก) ร้อยละการลดลงของบีโอดีที่อัตราไหลของ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ค่าสูงสุดและต่ำสุด	62

รูปที่	หน้า
4.10 ข) ร้อยละการลดลงของปีโอดีต่อที่อัตราไหลของเฟอร์รัสไอออนที่ค่าสูงสุดและต่ำสุด.....	62
4.11 ก) ความสัมพันธ์พันธ์ระหว่างร้อยละการแจกแจงแบบปกติ และค่าเศษตกค้างของค่าปีโอดี.....	63
4.11 ข) ความสัมพันธ์ระหว่างเศษตกค้างและร้อยละการลดลงของ ค่าปีโอดีที่ได้จากการทำนาย.....	63
4.12 ร้อยละการลดลงของค่าปีโอดีที่ได้จากการทำนาย.....	64
4.13 ร้อยละการแจกแจงปกติแบบครึ่งกับผลกระทบ.....	66
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสารมลพิษและกำลังไฟฟ้าของหลอดยูวี ที่เวลา 20 นาที.....	68
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสารมลพิษและค่าความเป็นกรด-เบส ที่เวลา 20 นาที.....	69
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสารมลพิษและอัตราการป้อนเฟอร์รัสไอออน ที่เวลา 20 นาที.....	71
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสารมลพิษและ อัตราการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เวลา 20 นาที.....	72

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบันประเทศไทยจัดว่าเป็นประเทศที่ผลิตสินค้าเพื่อการส่งออกที่สำคัญประเทศหนึ่ง ไม่ว่าจะเป็นสินค้าทางด้านเกษตรหรืออุตสาหกรรม ตัวอย่างสินค้าส่งออกที่ทำรายได้เข้าสู่ประเทศเป็นจำนวนมากอย่างหนึ่งคือสินค้าประเภทสิ่งทอ ซึ่งการผลิตสินค้าชนิดนี้ต้องผ่านกระบวนการหลายขั้นตอน เช่น กระบวนการปั่นหรือทอ กระบวนการฟอกย้อม ซึ่งกระบวนการฟอกย้อมมีความสำคัญที่จะทำให้ผ้าหรือเส้นด้ายมีสีสันทึบสวยงาม แต่ผลเสียที่เกิดจากกระบวนการนี้คือการใช้น้ำและสารเคมีในปริมาณสูง โดยมีการใช้น้ำตั้งแต่ 20-2000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ในขณะที่โรงงานอุตสาหกรรมทั่วไปใช้น้ำเพียง 10-150 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ดังนั้นน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมจึงก่อปัญหาต่อสภาวะแวดล้อมอย่างมาก เนื่องจากการปนเปื้อนของสีย้อมทำให้น้ำเสียที่ออกจากอุตสาหกรรมสิ่งทอมีสีเข้มมาก จึงต้องเข้าสู่ระบบบำบัดเพื่อลดสี และความเป็นพิษของน้ำเสียก่อนที่จะถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อทำการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยวิธีโฟโตเพนตันออกซิเดชัน (photo-Fenton oxidation) ในระบบต่อเนื่อง

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ออกแบบและสร้างเครื่องบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยวิธีโฟโตเพนตันออกซิเดชันในระบบต่อเนื่อง
2. หาภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีโฟโตเพนตันออกซิเดชันในระบบต่อเนื่อง

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเครื่องบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยวิธีโฟโตเพนตันออกซิเดชันในระบบต่อเนื่อง
2. ออกแบบและสร้างเครื่องบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมโดยวิธีโฟโตเพนตันออกซิเดชันในระบบต่อเนื่อง

3. วิเคราะห์องค์ประกอบน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ ได้แก่ ค่าซีโอดี ค่าบีโอดี ค่าของแข็งละลายได้ทั้งหมด สี และความเป็นกรด-เบส
4. หากภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ ตัวแปรที่ศึกษาคือ อัตราการไหลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) อัตราการไหลของเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และกำลังไฟของแสงยูวี (UV power)
5. อภิปรายและวิเคราะห์ผลการทดลอง
6. สรุปผลการทดลองและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้เครื่องบำบัดน้ำเสียสำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้วิธีโฟโตเฟนตันออกซิเดชันในระบบต่อเนื่องที่สามารถลดสีและสารมลพิษในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

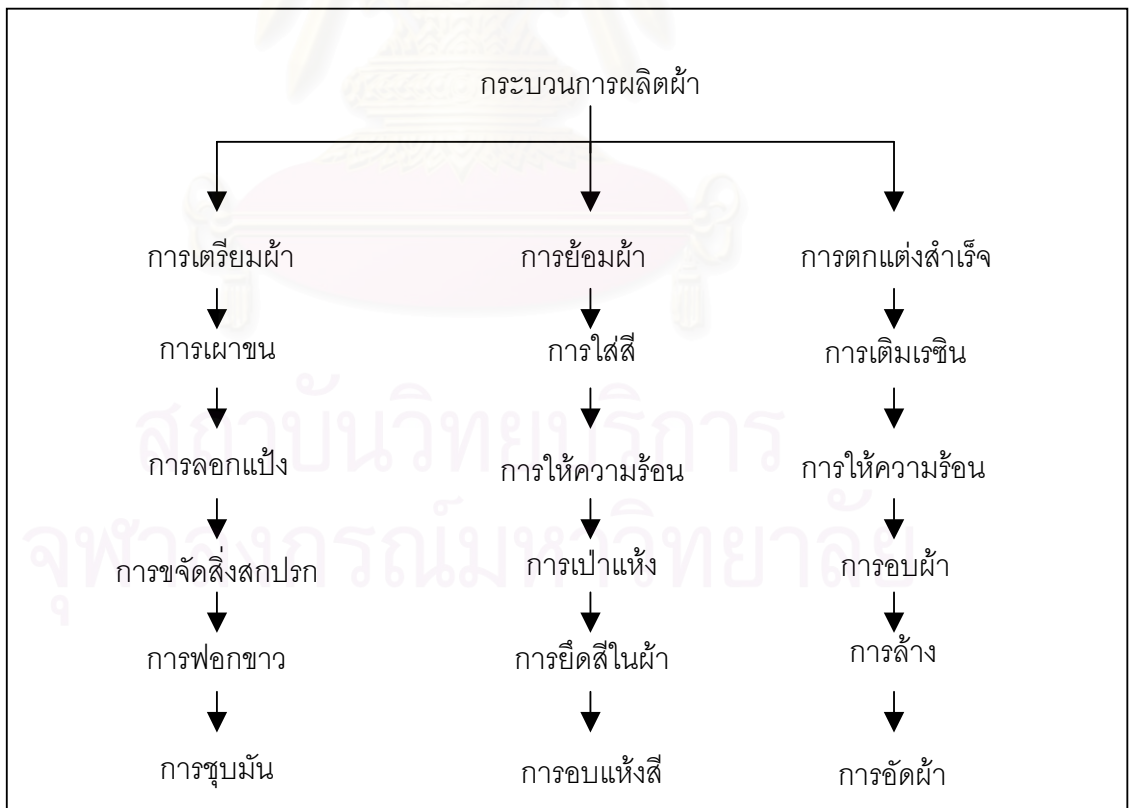
บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

ประเทศไทยจัดว่าเป็นประเทศที่ผลิตสินค้าเพื่อการส่งออกที่สำคัญประเทศหนึ่ง ไม่ว่าจะเป็นสินค้าทางด้านเกษตรหรืออุตสาหกรรม ตัวอย่างสินค้าส่งออกที่ทำรายได้เข้าสู่ประเทศเป็นจำนวนมากอย่างหนึ่งคือสินค้าประเภทสิ่งทอ อย่างไรก็ตามการผลิตสินค้าประเภทนี้ต้องผ่านกระบวนการหลายขั้นตอน เช่น กระบวนการปั่นหรือทอ กระบวนการฟอกย้อม ซึ่งกระบวนการฟอกย้อมมีความสำคัญที่จะทำให้ผ้าหรือเส้นด้ายมีสีสันทที่สวยงาม แต่ผลเสียที่เกิดจากกระบวนการนี้คือ จะมีสีส่วนหนึ่งที่ปนออกไปกับน้ำทิ้ง และต้องเข้าสู่ระบบบำบัดก่อนที่จะถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ

2.1 กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมสิ่งทอ

กระบวนการผลิตผ้าประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก คือ การเตรียมผ้า การย้อมผ้า และการตกแต่งสำเร็จ โดยมีรายละเอียดพอสังเขปดังนี้



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตผ้าในอุตสาหกรรมสิ่งทอ

2.1.1 กระบวนการเตรียมผ้า (Preparation process) (สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย 2004, มณฑา 1998, อัจฉราพร และคณะ 1977, วีระศักดิ์ 2001)

กระบวนการเตรียมสิ่งทอเพื่อการพิมพ์ย้อมนับว่าเป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่จะผลิตได้ เพราะเป็นการนำด้ายหรือผ้าดิบที่ออกจากโรงงาน โรงทอหรือโรงถัก มาผ่านกระบวนการต่าง ๆ เพื่อเตรียมด้ายหรือผ้านั้นให้อยู่ในสภาพที่สามารถนำไปให้สีหรือตกแต่งสำเร็จได้ทันทีจุดมุ่งหมายที่สำคัญของขั้นตอนการเตรียมสิ่งทอมีดังนี้

- เพื่อขจัดสิ่งสกปรกที่เจือปนในเส้นใย โดยปกติเส้นด้ายหรือผ้าดิบที่ออกมาจากโรงงานหรือโรงทอไม่ว่าจะเป็นเส้นด้ายหรือผ้าที่ทำจากเส้นใยธรรมชาติ ใยประดิษฐ์ หรือใยสังเคราะห์ ล้วนมีสิ่งสกปรกชนิดต่างๆ เจือปนติดมาด้วยเสมอในปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใยและกระบวนการที่ใช้ในการผลิต ตัวอย่างของสารเจือปนในเส้นใย ได้แก่ สารหล่อลื่นที่เติมลงไปในช่วงขั้นตอนการปั่นใยสังเคราะห์ แป้งที่ใช้ลงเส้นด้ายยีนขณะทอผ้า ตลอดจนสิ่งสกปรกต่างๆ ที่อาจติดมาในระหว่างขั้นตอนต่างๆ ก่อนถึงการเตรียม เป็นต้น สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้ ถ้าไม่ขจัดให้หมดไปก็อาจส่งผลกระทบต่อให้เกิดปัญหาขึ้นได้ในขั้นตอนการย้อมพิมพ์หรือตกแต่งสำเร็จ
- เพื่อให้เส้นใยมีการดูดซึมน้ำได้ดี
- เพื่อช่วยให้การย้อม การพิมพ์และการตกแต่งสำเร็จ ในขั้นตอนต่อไปบังเกิดผลตามที่ต้องการอย่างเต็มที่ เช่น ในการทำผ้าขาวซึ่งจะต้องมีการตกแต่งขาว นั้นเพื่อให้ได้ผ้าที่มีความขาวสูงสุด ในขั้นตอนการเตรียมผ้าควรจะได้รับฟอกขาวมาอย่างดี หรืออย่างในกรณีที่ผ้าที่ต้องการให้มีความเงามันเป็นพิเศษ ในขั้นตอนการเตรียมผ้าควรต้องมีการเผาขนผ้า และผ่านการตกแต่งสำเร็จเพื่อให้ผ้าเกิดความเงามัน อาจใช้วิธีอัดรีดด้วยลูกกลิ้งจะได้ผ้าที่มีความเงามันสูงสุด
- เพื่อให้เส้นใยมีการดูดติดสี และสารเคมีได้มากขึ้น เช่น วิธีการชุบมันนในกรณีของผ้าฝ้าย
- เพื่อให้เส้นใยมีความคงรูป ไม่เสียรูปไปในระหว่างขั้นตอนการตกแต่งอื่นๆ ในภายหลัง กรณีนี้มักจะเกิดกับพวกใยสังเคราะห์ ซึ่งถ้าไม่ทำการเซทด้วยความร้อนก่อน มักจะเกิดการหดหรือเสียรูปไปในระหว่างการย้อม

สำหรับกระบวนการที่ใช้ในการเตรียมผ้า มีอยู่หลายประการที่สำคัญดังนี้คือ

2.1.1.1 การเผาขน (Singeing) ในเส้นด้ายที่ปั่นจากใยสั้นหรือที่เรียกว่าเส้นด้ายสปันนั้น มักจะมีปลายเส้นใยโผล่ขึ้นมาเหนือพื้นผิวของเส้นด้ายเป็นจำนวนมาก เมื่อเส้นด้ายนั้นถูกนำไปทอให้เป็นผืนผ้าปลายเส้นใยที่โผล่ขึ้นมาเหนือผิวเส้นด้ายก็จะมากขึ้น เนื่องจากการเสียดสีที่เกิดขึ้นระหว่างการทอ มีผลทำให้พื้นผ้าดูไม่เรียบ เป็นการทำลายความเงามันของผ้า จึงได้มีการกำจัดปลายเส้นใยดังกล่าวด้วยการใช้ความร้อนโดยการผ่านผ้าไปในเปลวแก๊สหรือไปบนแผ่นโลหะที่ถูกเผาจนร้อนในอัตราความเร็วที่สูงพอที่ผ้าจะไม่ติดไฟ แต่ในขณะเดียวกันก็ฆ่าพอกที่ปลายเส้นใยที่โผล่ขึ้นมาเหนือผิวเส้นด้ายจะถูกเผาทำลายไป การเผาขนมีจุดมุ่งหมายที่สำคัญดังนี้

- เพื่อให้ผ้ามีพื้นผิวที่ดูเรียบและเมื่อนำผ้าไปชุบมัน อัดรีด หรืออัดมัน จะทำให้ได้ผ้าที่มีความเงามันสูงสุด
- เพื่อให้ได้ลายที่คมชัดขึ้นในกรณีที่เป็นผ้าพิมพ์
- ลดปัญหาการเกิดขุยบนผ้าเมื่อใช้ไปนานๆ ของผ้าเส้นใยสังเคราะห์ เช่น พอลิเอสเตอร์

ในปัจจุบันวิธีการเผาขนโดยใช้เปลวแก๊สเป็นวิธีที่ใช้กันมากที่สุดเนื่องจากให้ผลดีกว่าวิธีอื่น

2.1.1.2 การลอกแป้ง (Desizing) การลอกแป้งเป็นขั้นตอนที่มีความจำเป็นสำหรับผ้าทอ เนื่องจากในการทอผ้าจะต้องมีการลงแป้งเส้นด้ายยีนก่อน เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการทอ แต่เมื่อนำผ้าที่ทอเสร็จแล้วไปทำการพอกย้อม แป้งที่เคลือบอยู่บนเส้นด้ายจะมีผลกระทบต่อสมบัติในการดูดซึมน้ำและสารเคมีของเส้นใย ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทำการขจัดออกไป ขั้นตอนการลอกแป้งมีความสำคัญดังนี้

- ทำให้ผ้ามีสมบัติในการเปียกน้ำได้ดีและสม่ำเสมอจะช่วยทำให้การตกแต่งผ้าในขั้นตอนต่อไปเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น
- ทำให้ผ้ามีสมบัติการดูดติดสีและสารเคมีอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งผืน
- ทำให้ผ้ามีความนุ่มต่อการสัมผัส ไม่หยาบและแข็งกระด้าง

2.1.1.3 การขจัดสิ่งสกปรก (Scouring) หมายถึงการกำจัดไขมันและสารปนเปื้อนต่างๆ เช่น สารประกอบพวกเกลือทั้งเกลืออินทรีย์และเกลืออนินทรีย์ ขั้นตอนการขจัดสิ่งสกปรกเป็นขั้นตอนที่จำเป็นสำหรับวัสดุสิ่งทอทุกประเภท เนื่องจากเส้นใยทุกชนิดมักจะต้องมีสิ่งสกปรกเจือปนติดมาด้วยเสมอ ไม่ว่าจะเป็นสิ่งที่ติดมาตามธรรมชาติหรือสิ่งติดมาในขั้นตอนการทอ สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้

จำเป็นต้องกำจัดออกไปเพื่อให้เส้นใยมีการดูดซึมน้ำได้ดี สามารถดูดติดสีและสารเคมีอย่างสม่ำเสมอ กรรมวิธีจัดสิ่งสกปรกของเส้นใยแต่ละชนิดจะไม่เหมือนกัน ขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของสิ่งสกปรก ในเส้นใยแต่ละชนิด โดยปกติเส้นใยธรรมชาติจะมีสิ่งสกปรกอยู่มากกว่าใยสังเคราะห์ เพราะฉะนั้นจึงต้องการกรรมวิธีการกำจัดที่รุนแรงกว่า เช่น ในกรณีของใยฝ้ายโดยเฉลี่ยจะมีสิ่งสกปรกเกือบปนติดมาจากธรรมชาติถึงร้อยละ 10 ของน้ำหนักเส้นใยทั้งหมด สิ่งสกปรกเกือบที่สำคัญประกอบด้วยสารขี้ผึ้ง พวกสารเปกติน โปรตีน พวกเศษใบไม้ กิ่งไม้ และเศษเมล็ดฝ้าย เป็นต้น การกำจัดสิ่งสกปรกเกือบในใยฝ้ายต้องใช้วิธีการต้มในสารละลายโซดาไฟ สิ่งสกปรกเกือบจึงจะถูกทำลายและละลายน้ำหลุดออกมา การตรวจสอบประสิทธิภาพในการกำจัดสิ่งสกปรกของฝ้ายนี้สามารถกระทำได้ด้วยการตรวจสอบสมบัติด้านการดูดซึมน้ำของผ้า การตรวจดูความขาว การวิเคราะห์ปริมาณสารขี้ผึ้งที่เหลือ และวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำหนักที่ลดลงไป เป็นต้น สำหรับการกำจัดสิ่งสกปรกเกือบจากพวกเส้นใยสังเคราะห์นั้นสามารถทำได้ง่ายกว่าฝ้าย เนื่องจากใยเหล่านี้อยู่ในสภาพที่ค่อนข้างสะอาดอยู่แล้ว สิ่งสกปรกเกือบที่มีส่วนมากเป็นเพียงพวกสารหล่อลื่นที่ถูกเติมเข้าในช่วงการปั่นเส้นด้ายเท่านั้น สารหล่อลื่นสามารถขจัดออกได้ด้วยการต้มน้ำที่มีสารซักฟอกและตามด้วยการซักล้างในน้ำจืดสะอาด สารเคมีที่ใช้ในการกำจัดสิ่งสกปรกมีดังนี้

- โซดาไฟ (Sodium hydroxide: NaOH) ทำปฏิกิริยากับไขมันโดยเปลี่ยนไขมันให้เป็นสบู่ที่ละลายน้ำได้ นอกจากนี้ยังทำให้เส้นใยขยายตัว สิ่งสกปรกต่างๆ ถูกกำจัดออกได้ง่าย ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้ได้แก่ ความร้อน นอกจากนี้สารเคมีประเภทที่มีฤทธิ์เป็นเบสยังช่วยกำจัดสารอื่นๆ อีก เช่น โปรตีน เพกติน สารลงแป้งที่ตกค้าง เกลือแร่ต่างๆ
- น้ำสบู่ (Detergents) ทำหน้าที่กำจัดไขมันในลักษณะที่ทำให้เกิดอิมัลชัน และกำจัดสิ่งสกปรกอื่นๆ ออกจากวัสดุ รวมทั้งป้องกันมิให้ย้อมกลับไปติดบนวัสดุอีก น้ำสบู่แบ่งออกเป็น 4 ชนิด ได้แก่ พวกไม่มีประจุไฟฟ้า (Nonionic detergents) พวกที่มีประจุลบ (Anionic detergents) พวกที่มีประจุบวก (Cationic detergents) และพวกที่มีทั้งประจุบวกและลบ (Amphoteric detergents) แต่ละกลุ่มจะมีสมบัติแตกต่างกันออกไป เช่น ความสามารถในการแทรกซึม (Penetration property) ความสามารถในการซักล้าง (Detergency property) ความสามารถในการเกิดอิมัลชัน (Emulsifying property) เป็นต้น

- สารจับโลหะ (Complexing agents) เป็นพวกลิแกนด์ (Ligands) หรือคีเลต (Chelates) สารนี้สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนของโลหะเช่น Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} , Mn^{2+} เป็นสารที่ละลายน้ำได้ดีในภาวะเบส

2.1.1.4 การฟอกขาว (Bleaching) หมายถึง การกำจัดสีธรรมชาติที่ติดมากับวัสดุสิ่งทอ โดยใช้ปฏิกิริยาเคมีทำให้เส้นใยมีความขาวขึ้น ขั้นตอนการฟอกขาวนี้เป็นขั้นตอนที่จำเป็นโดยเฉพาะกับผ้าที่จะนำไปย้อมสีเข้ม สารที่ใช้ในการฟอกขาวมีหลายชนิด ซึ่งมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป หลักเกณฑ์การเลือกใช้สารฟอกขาวกับสิ่งทอ คือสิ่งทอที่ผ่านกระบวนการฟอกขาวแล้วจะต้องได้รับความขาวบริสุทธิ์และคงทนถาวร วัสดุที่ได้ต้องไม่เปื่อยซึ่งอาจเนื่องมาจากถูกทำลายด้วยสารเคมี หรือมีการแตกหักภายในโมเลกุลของเส้นใย ซึ่งจะส่งผลให้ความแข็งแรงของเส้นใยลดลง สารเคมีที่ใช้ในการฟอกขาวแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

- สารออกซิไดส์ ได้แก่ สารประกอบเปอร์ออกไซด์ เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สารประกอบไฮโปคลอไรต์ เช่น โซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaClO) และแคลเซียมไฮโปคลอไรต์ (Ca(OCl)_2) สารประกอบคลอไรต์ เช่น โซเดียมคลอไรต์ (NaClO_2) เป็นต้น
- สารรีดิวซ์ ได้แก่ โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$) โซเดียมฟอร์มาลดีไฮด์ซัลฟอกซิเลต ($\text{HCHOHSO}_2\text{Na}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) โซเดียมเมทาไบซัลไฟต์ ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) การฟอกขาวด้วยสารกลุ่มนี้ จะได้รับความขาวที่ไม่ถาวร (Temporary white)

อย่างไรก็ดีสารฟอกขาวที่มีความสำคัญและใช้กันมากในวงการสิ่งทอ ได้แก่ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สารประกอบไฮโปคลอไรต์ และสารประกอบคลอไรต์

2.1.1.5 การชุบมัน (Mercerizing) ผู้ค้นพบกระบวนการชุบมัน คือ Mercer ในปี ค.ศ.1850 โดยนำฝ้ายไปผ่านสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง พบว่าผ้าฝ้ายนั้นมีสมบัติต่างไปจากเดิมคือ มีความสามารถในการดูดซับน้ำและสีย้อมดีขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าผ้าหดตัว ต่อมา Lowe พบว่าการหดตัวของผ้าที่เกิดขึ้นในกระบวนการข้างต้นนี้สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการชิงผ้าให้ตึงในขณะที่ผ่านผ้าลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผ้าที่ได้นอกจากสามารถดูดซับน้ำและสีย้อมได้ดีขึ้น ยังมีความเงามันและแข็งแรงมากขึ้นด้วย

การชุบมันนอกจากจะกระทำกับผ้าฝ้ายแล้วยังสามารถกระทำกับผ้าจากเส้นใยผสม เช่น เส้นใยฝ้ายผสมเส้นใยพอลิเอสเตอร์ เนื่องจากผ้าชนิดนี้จะไม่ผ่านกระบวนการทำความสะอาด ส่วนของ

ซีฟิ่งและไขมันที่อยู่ในฝ้ายจึงไม่ถูกกำจัดออก เส้นใยฝ้ายในผ้าจึงดูดซับน้ำไม่ค่อยดีนัก การชุบมันจะช่วยให้ซีฟิ่งและไขมันในฝ้ายออกและทำให้เส้นใยฝ้ายพองตัว มีความสามารถดูดซับน้ำได้ดีขึ้น ณ ที่อุณหภูมิสูงและเวลานาน แต่ปฏิกิริยาของการชุบมันเกิดขึ้นในเวลาสั้นๆ ที่อุณหภูมิห้องหรือต่ำกว่า พอลิเอสเทอร์ในผ้าเส้นใยผสมจึงไม่ถูกทำลายในกระบวนการชุบมัน จุดมุ่งหมายในกระบวนการชุบมันมีดังนี้

- เพื่อเพิ่มและปรับปรุงความสามารถในการดูดซับน้ำและการดูดซับน้ำ
- เพื่อเพิ่มความสดใสและเงามัน
- เพื่อให้วัสดุมีผิวสัมผัสที่อ่อนนุ่มขึ้น
- เพื่อเพิ่มความคงทนและแข็งแรง
- เพื่อขจัดปัญหาเส้นใยที่ติดอยู่ตามตะเข็บ
- เพื่อเพิ่มและปรับปรุงความคงตัว
- เพื่อช่วยในการจัดแบ่งที่ตกค้างในเนื้อผ้า หลังจากผ่านกระบวนการลอกแบ่ง

2.1.2 กระบวนการย้อมผ้า (Dyeing process)

กระบวนการย้อมผ้าประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆดังนี้

- การใส่สี (Pad) โดยนำเม็ดสีมาละลายน้ำให้กลายเป็นน้ำย้อม
- การให้ความร้อนขั้นต้น (Pre-heat) เพื่อให้สีมีการจับตัวกับผ้าได้ดี (Coagulation) โดยใช้ Infra-heater และให้สีมีความสม่ำเสมอ
- การเป่าแห้ง (Hot-flue dry) ป้องกันไม่ให้สีตก ต้องใช้อุณหภูมิ ความเร็วลม และความชื้นที่เหมาะสม
- การย้อมสีในเนื้อผ้า (Thermo-sol) ใช้ย้อมผ้าที่ใช้สีประเภทพอลิเอสเทอร์ ดีสเพิร์ส และสีแวตที่อุณหภูมิ 180-210 องศาเซลเซียส สำหรับผ้าที่ใช้สีประเภทรีแอคทีฟควรอบผ้าที่อุณหภูมิ 150-160 องศาเซลเซียส
- การอบแห้งสี (Chemical pad steaming) ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนด้วยกัน ทำงานโดยเครื่องจักรที่เรียกว่า เครื่องอบแห้งสี (Chemical pad steamer)
 1. การใช้สารเคมี (Chemical pad) โดยสารเคมีที่ใช้คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือ โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ ประเภทสีแวตแอลคาไลน์ที่ละลายน้ำ
 2. การอบไอน้ำ (Steaming) ต้องไม่มีออกซิเจนในไอน้ำและไม่ละลายไปกับน้ำ

3. การเติมอากาศ (Aeration) จะใช้สารเคมีประเภทไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และสีแควตที่ไม่ละลายน้ำ
4. การล้าง (Washing) เป็นการล้างครั้งสุดท้ายด้วยน้ำ ทำให้ผ้าที่ใช้สารเคมีประเภทแควตและดีสเพิร์สมีความสมบูรณ์ ส่วนการย้อมด้วยสารเคมีประเภททรีแอคทีฟ การล้างครั้งสุดท้ายทำให้ผ้าคงตัว

สีย้อม โมเลกุลของสีย้อมประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

- กลุ่มอะตอมโครโมฟอร์ในโมเลกุลสีย้อมที่ก่อให้เกิดสี (Dye chromophore) เป็นกลุ่มอะตอมพันธะคู่และเป็นส่วนที่ก่อให้เกิดสีของสีย้อม เมื่อโมเลกุลถูกแสงโครงสร้างของกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์จะสั่นและดูดกลืนแสง ทำให้ปรากฏเป็นสีที่ตาเปล่ามองเห็น กลุ่มอะตอมโครโมฟอร์ ได้แก่ เอโซ (Azo) อินดิโก (Indigo) และกลุ่มซัลเฟอร์ (Sulfur group) เป็นต้น
- กลุ่มที่ทำปฏิกิริยายึดเกาะเส้นใยกับสีย้อม (Dye function group) การที่จะนำสีย้อมชนิดใดมาใช้ในการย้อมให้เกิดผลดีนั้นขึ้นอยู่กับการรวมกันได้ดีของสีกับเส้นใย จะต้องมีความมากกว่าการรวมกันของสีกับน้ำ นั่นคือโมเลกุลของสีย้อมต้องมีหมู่อะตอมที่ถูกจัดให้เรียงตัวกันในลักษณะที่ทำให้เกิดการดูดติด (Substantivity) กับเส้นใยแล้วเกิดพันธะยึดกันแน่น พันธะที่ทำให้มีการดูดติดของสีและเส้นใยมี 4 ชนิด คือพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) แรงแวนเดอวาลส์ (Van der Waals' forces) แรงไอออน (Ionic forces) และพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond)

นอกจากนี้แล้วการยึดติดของสีบนผ้ายังสามารถเกิดจากอิทธิพลด้านรูปร่างและขนาดของโมเลกุลของสี คือถ้าโมเลกุลของสีย้อมยิ่งเล็กและยาวก็จะทำให้สามารถผ่านช่องว่างของเส้นใยได้มากขึ้น ทำให้การติดสีดีขึ้น เป็นต้น

การจำแนกสีย้อม สีย้อมสามารถจำแนกได้ตามลักษณะการนำไปใช้งานได้ดังนี้คือ

- สีเบสิก (Basic dye) เป็นสารอินทรีย์ที่มีประจุบวกของเกลือแอมโมเนีย เกลือซัลโฟเนียม หรือ เกลือออกซิเนียม ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ ใช้ย้อมขนสัตว์
- สีแอซิด (Acid dye) เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน ส่วนที่ให้สีคือส่วนที่มีประจุลบ ซึ่งทำให้สีแอซิดสามารถยึดเกาะกับเส้นใยโปรตีนหรือพอลิเอไมด์ได้

- สีมอร์แดนท์ (Mordant) ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน เป็นสีที่พัฒนามาจากสีแอซิดที่ทำปฏิกิริยาเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะบางชนิด เช่น โครเมียม เพื่อทำให้มีความคงทนต่อกระบวนการใช้น้ำ โดยสารประกอบเชิงซ้อนที่ก่อรูปขึ้นมาใหม่จะละลายน้ำ
- สีไดเรกต์ (Direct dye) เป็นสารประกอบเฮโซ น้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่ซัลโฟนิคทำให้สามารถละลายน้ำได้ดีแม้ว่าสีจะอยู่ในเส้นใยก็ตาม สามารถย้อมผ้าหรือเส้นใยเซลลูโลสได้โดยไม่ต้องมีสารช่วยติด แต่จะไม่คงทนต่อกระบวนการใช้น้ำมากนักคือจะทำให้สีจางลงเมื่อผ่านกระบวนการซัก
- สีดีสเพอร์ส (Disperse dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ แต่จะเป็นคอลลอยด์อยู่ในน้ำเมื่อมีสารกระจายตัวที่เหมาะสม ใช้ย้อมในน้ำย้อมธรรมดาไม่ต้องใช้สารเคมีอย่างอื่นช่วย นอกจากสารพาให้ตัวสีเข้าไปใกล้กับเส้นใยเท่านั้น
- สีเอโซอิก (Azotic dye) เป็นสีย้อมที่เป็นสารประกอบเฮโซ แต่ตัวสีไม่ละลายน้ำ จึงต้องย้อมเส้นใยในสารประเภทฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อน แล้วจึงย้อมทับด้วยเกลือไดอะโซเนียมโดยเกลือนี้จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบฟีนอลเกิดเป็นสารประกอบเฮโซที่มีสี
- สีแวต (Vat dye) เป็นสีที่มีองค์ประกอบทางเคมี 2 กลุ่ม คือ พวกอินดิโก และพวกแอนทราควิโนน โดยปกติจะไม่ละลายน้ำ ดังนั้นเมื่อนำไปย้อมต้องทำให้ละลายน้ำก่อน และจึงทำให้อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ โดยทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนเส้นด้าย นิยมใช้ย้อมผ้าฝ้าย
- สีกำมะถัน (Sulpher dye) เป็นสีที่มีกลุ่มธาตุกำมะถันเป็นองค์ประกอบ โดยปกติตัวสีย้อมจะไม่ละลายน้ำ แต่เมื่อนำไปรีดิวซ์แล้วจะทำให้สามารถละลายน้ำได้ นิยมใช้ย้อมเซลลูโลสโดยเฉพาะผ้าฝ้าย แต่สีที่ได้ไม่สด
- สีออกซิไดส์ (Oxidation colorants) เป็นสีที่เกิดจากการออกซิไดส์โดยเกลืออะนิลีน คือเมื่อสารอะนิลีนถูกออกซิไดส์ด้วยสารเคมีที่เหมาะสมจะเกิดเป็นสี โครงสร้างที่ให้สีหรือวิธีการย้อมติดยังไม่เป็นที่รู้จักนัก
- สีโอลีเยม (Olium dye) เป็นพิกเมนต์ที่ละลายน้ำได้ วิธีการย้อมจะให้สีดูเข้มเข้าไปในเส้นใยและเปลี่ยนกลับมาเป็นสีที่ไม่ละลายน้ำอีกครั้ง โดยปกติจะใช้ในการพิมพ์มากกว่า
- สีโลหะ (Mineral colorants) เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อย้อมแล้วต้องให้สารตกตะกอนอยู่ที่ผ้า
- สีรีแอกทีฟ (Reactive dye) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด

- สีพิกเมนต์ (Pigment dye) ที่ใช้กับเรซิน เป็นการอัดผ้าด้วยพิกเมนต์ผสมเรซินจะมีลักษณะเหมือนการพิมพ์หรือการเขียนสีมากกว่าการย้อมใช้ได้กับเส้นใยทุกชนิด งานที่ได้จะมีความคงทนต่อการขัดสีมาก แต่ผิวผ้าจะแข็งกระด้าง

สารเคมีช่วยย้อม (Additive) ทำหน้าที่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย้อม ให้มีการดูดติดสีและมีความสม่ำเสมอ และทำให้สีที่ยึดติดเส้นใยมีความคงทนยิ่งขึ้น สารช่วยย้อมประกอบไปด้วยสารเคมีพื้นฐานที่สำคัญคือ

- สารช่วยย้อมในกระบวนการย้อมสี เช่น เกลือ โซดาแอช และโซดาไฟซึ่งเป็นตัวช่วยให้สียึดติดกับเส้นใยหรือที่เรียกว่า ฟิกซิงเอเจนท์ (Fixing agent)

- กรดใช้สำหรับปรับสภาพน้ำสีให้เหมาะสมในขั้นตอนการย้อม ทำให้สีมีความเข้มข้นมากขึ้น (Thickener) ใช้เป็นตัวหน่วงเพื่อให้ผ้ามีเวลาซึมซับน้ำย้อมได้ดีขึ้น

- สารช่วยทำให้เปียก (Wetting agent) ใช้สำหรับทำให้น้ำสีซึมเข้าไปในเส้นใยได้ดีขึ้น

- สารช่วยทำให้จับโลหะหนัก (Sequestering agent) ใช้เป็นตัวทำน้ำที่ช่วยจับโลหะหนักต่างๆ ในน้ำ

- สารช่วยทำให้กระจายตัว (Dispersing agent) ใช้เป็นตัวช่วยให้สีกระจายตัวได้ดีในน้ำ

- สารช่วยทำให้ผ้าดูดติดสี (Leveling agent) ใช้เป็นตัวช่วยให้ผ้าดูดติดสีอย่างสม่ำเสมอ

นอกจากนี้ยังมีการใช้สารเคมีบางชนิดในขั้นตอนการตกแต่งสำเร็จ เช่น สารป้องกันการซีมน้ำ สารป้องกันเชื้อรา สารป้องกันไฟ สารทำให้ผ้านุ่มและอื่นๆ

กรรมวิธีการย้อม การย้อมวัสดุสิ่งทอสามารถทำได้หลายวิธี ทั้งที่เป็นแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ผู้ย้อมสามารถเลือกใช้วิธีการย้อมที่เหมาะสมกับสภาพโรงงานและความต้องการเฉพาะกรณีได้ ในการเลือกวิธีการย้อมนั้นควรคำนึงถึง ลักษณะของวัสดุที่จะย้อม ประเภทของเครื่องจักร ต้นทุนในการย้อม เป็นต้น กรรมวิธีการย้อมผ้าและเส้นด้ายสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธีดังนี้

1. การย้อมแบบดูดซึม (Exhaustion method)

การย้อมวิธีนี้ผ้าหรือวัสดุที่ย้อมจะถูกแช่หรือหมუნอยู่ในอ่างย้อม จนกระทั่งการย้อมเสร็จสมบูรณ์ เครื่องย้อมที่ใช้กันมาก เช่น เครื่องจิกเกอร์ (Jigger machine) เครื่องวินช์ (Winch machine) เครื่องเจท (Jet machine) และ เครื่องย้อมเส้นด้ายสำเร็จรูป

(Package machine) โดยเครื่องย้อมแต่ละชนิดจะมีอัตราส่วนน้ำหนักผ้าต่อสารละลายน้ำย้อม (Liquor Ratio, LR) แตกต่างกันไป เช่น เครื่องย้อมจิกเกอร์มี LR เท่ากับ 1:2-1:5 เครื่องย้อมเจทมี LR เท่ากับ 1:8-1:12 เครื่องย้อมวินช์มี LR เท่ากับ 1:5-1:30 และเครื่องย้อมด้ายสำเร็จรูปมี LR เท่ากับ 1:10-1:30

2. การย้อมแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous method)

การย้อมแบบกึ่งต่อเนื่องหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Pad-batch dyeing เครื่องย้อมที่ใช้ประกอบด้วยอ่างน้ำย้อมสำหรับจุ่มผ้า ลูกกลิ้งสำหรับอัดรีด เอน้ำย้อมส่วนเกินออกจากผ้า ลูกกลิ้งสำหรับม้วนผ้า ตู้อบในกรณีที่เป็นและอ่างซัก รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังนี้

- การอัดน้ำสีและเบส ในขั้นตอนนี้สีย้อมและเบสจะถูกผสมลงไปพร้อมกันในอ่างย้อม ผ้าจะถูกผ่านไปในน้ำย้อม และต่อไปยังลูกกลิ้ง เพื่อเตรียมนำไปเก็บในขั้นตอนต่อไป ในขั้นตอนนี้สิ่งสำคัญที่ต้องควบคุมคือ ความเข้มข้นของน้ำสีในอ่างย้อม และแรงอัดของลูกกลิ้งเพื่อให้ย้อมได้ระดับความเข้มข้นตามต้องการ นอกจากนี้การควบคุมความเข้มข้นของน้ำสีในอ่างย้อมให้คงที่ตลอดที่ผ่านของผ้าก็เป็นเรื่องสำคัญ เพื่อไม่ให้ผ้าส่วนต้นและส่วนปลายมีระดับความเข้มที่แตกต่างกันการลดปัญหาเรื่องนี้ อาจกระทำได้ 3 ทาง คือ เลือกใช้สีที่มีแรงดูดกับเส้นใยต่ำ พยายามให้ผ้ามีเวลาที่จุ่มอยู่ในน้ำสีให้น้อยที่สุดและทดแทนน้ำสีส่วนที่ถูกดูดซึมไปด้วยการเติมน้ำสีใหม่ในปริมาณที่เหมาะสมลงในอ่างย้อม
- การม้วนเก็บ ภายหลังจากที่ผ้าได้รับน้ำสีและเบสในปริมาณที่เหมาะสมแล้ว จะถูกนำไปเก็บในลักษณะที่ยังม้วนพันอยู่บนลูกกลิ้ง เพื่อให้สีย้อมได้มีเวลาแทรกซึมเข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใย ก่อนที่จะนำไปม้วนเก็บม้วนผ้า จะถูกห่อหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกใส เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำในช่วงของการเก็บ ในช่วงเวลานี้ม้วนผ้าจะถูกหมุนไปเรื่อยๆ ตามแกนของลูกกลิ้งเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการซึมของน้ำสีในทิศทางใดเป็นพิเศษ สำหรับระยะเวลาที่ใช้ในการเก็บขึ้นอยู่กับความว่องไวต่อปฏิกิริยาของสี ความแรงของเบสที่ใช้ และอุณหภูมิของการเก็บ โดยปกติระยะเวลาสำหรับการเก็บจะแตกต่างกันตั้งแต่ประมาณ 2 ชั่วโมง

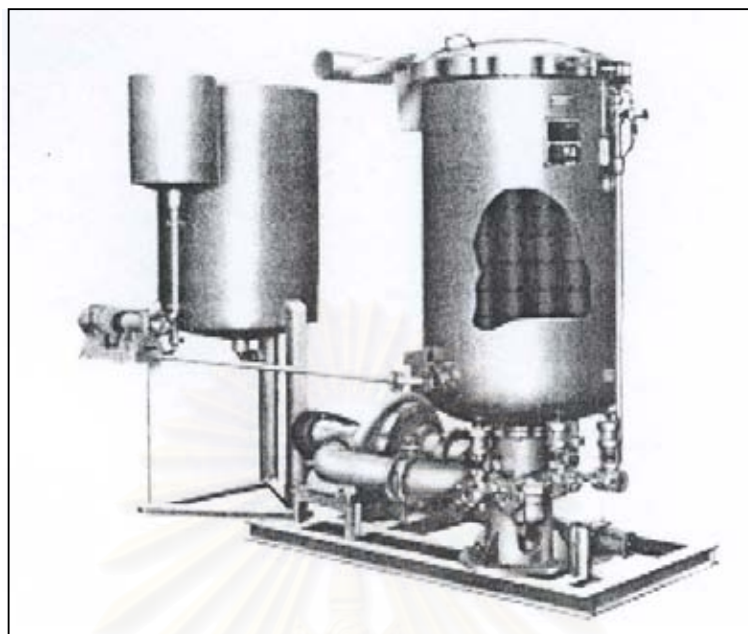
ข้อแตกต่างประเภทหนึ่งของการย้อมด้วยวิธีการย้อมแบบกึ่งต่อเนื่องและวิธีการย้อมแบบดูดซึมคือ อัตราส่วนของน้ำหนักผ้าต่อน้ำหนักน้ำย้อมสีที่ใช้ ในขั้นตอนการแทรกซึมของสี ย้อมเข้าไปในเส้นใยในวิธีนี้อยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำกว่าคือ 1:1 เท่านั้น เพราะฉะนั้นโดยทั่วไปร้อยละของการติดสีในวิธีการย้อมแบบกึ่งต่อเนื่องจะสูงกว่าวิธีการย้อมแบบดูดซึมทำให้ประหยัดสีได้มากกว่า

3. การย้อมด้วยวิธีต่อเนื่อง (Continuous method)

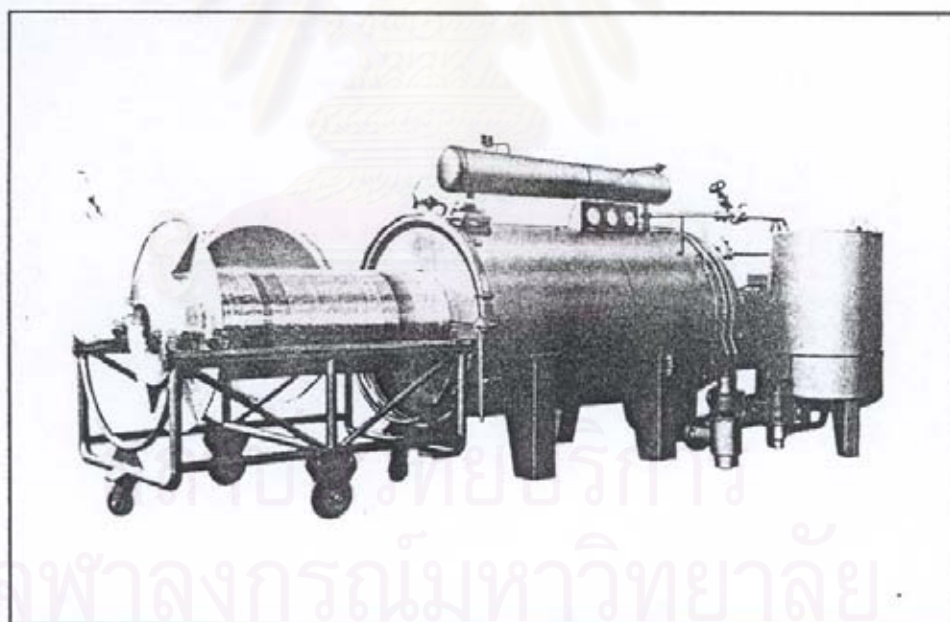
วิธีนี้ผ้าจะเคลื่อนที่ไปตามขั้นตอนการย้อมต่างๆ อย่างต่อเนื่อง โดยไม่มีการหยุดแช่อยู่ที่จุดใด ตั้งแต่เป็นผ้าขาวจนกระทั่งออกมาเป็นผ้าย้อมสำเร็จ วิธีนี้จึงเป็นวิธีการย้อมที่เร็วที่สุด และเหมาะกับการย้อมที่ละมากๆ ข้อเสียของวิธีนี้คือ ถ้าเกิดมีการผิดพลาดขึ้นในระหว่างการย้อม กว่าข้อผิดพลาดนั้นจะถูกค้นพบและได้รับการแก้ไข ผ้าอาจจะถูกย้อมไปเป็นจำนวนมาก เพราะฉะนั้นก่อนที่จะดำเนินการย้อมด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องมีการเตรียมอย่างระมัดระวัง

เครื่องจักรที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยเฉพาะในส่วนของอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีเครื่องย้อมมากมายหลายชนิด ซึ่งผู้ผลิตเครื่องย้อมได้พยายามออกแบบให้เหมาะสมกับลักษณะของวัสดุสิ่งทอที่นำมาย้อม เช่น ย้อมเส้นใย ย้อมเส้นด้าย ย้อมผ้าผืนที่เป็นผ้าถักหรือผ้าทอ เป็นต้น ซึ่งการจำแนกชนิดของเครื่องย้อมนั้นจำแนกได้ 3 ประเภทตามกลไกของการย้อม ดังนี้

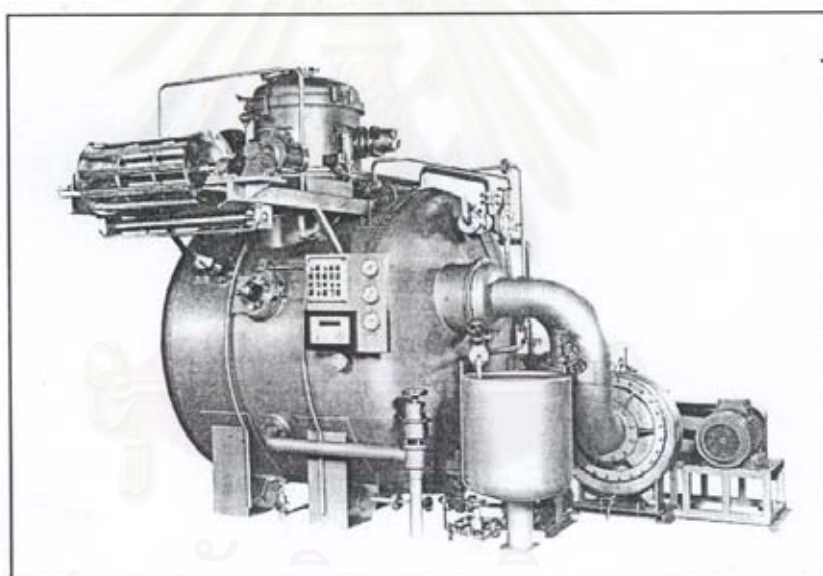
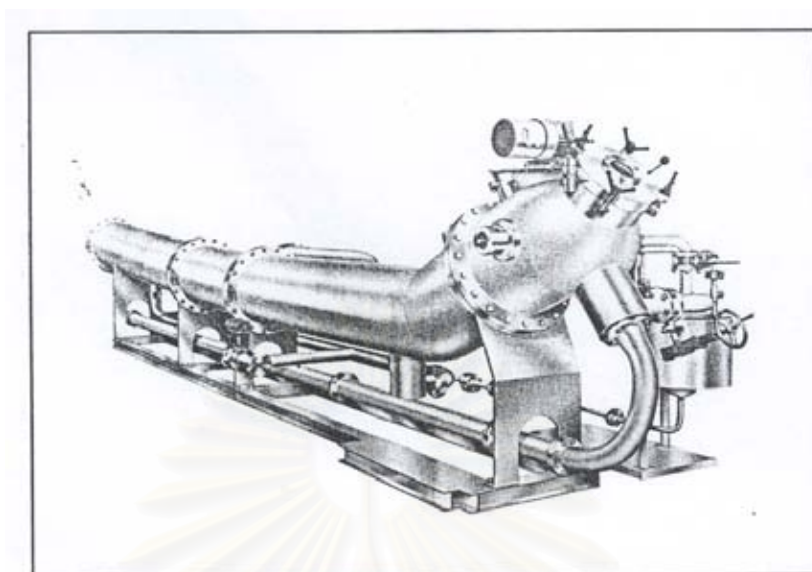
- เครื่องย้อมผ้าที่เคลื่อนที่เฉพาะน้ำย้อม เครื่องย้อมลักษณะนี้ วัสดุที่ถูกย้อมจะถูกตรึงอยู่กับที่ ส่วนที่เป็นน้ำย้อมจะเคลื่อนที่ผ่านวัสดุที่ถูกย้อม เครื่องย้อมชนิดนี้คือพวกเครื่องแพกเกจและเครื่องบีบ ดังรูปที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ
- เครื่องย้อมผ้าที่เคลื่อนที่ทั้งน้ำย้อมและวัสดุที่ย้อมพร้อมกัน เครื่องลักษณะนี้วัสดุที่ย้อมและน้ำย้อมจะเคลื่อนที่ไปพร้อมกัน เช่น เครื่องย้อมประเภทเครื่องเจท ดังรูปที่ 2.4
- เครื่องย้อมผ้าที่เคลื่อนที่เฉพาะวัสดุย้อม เครื่องย้อมลักษณะนี้วัสดุที่ย้อมจะเคลื่อนที่ผ่านน้ำย้อม โดยที่น้ำย้อมจะไม่ได้เคลื่อนที่ตามไปด้วย เช่น เครื่องจิกเกอร์และเครื่องวินช์ เป็นต้น ดังรูปที่ 2.5



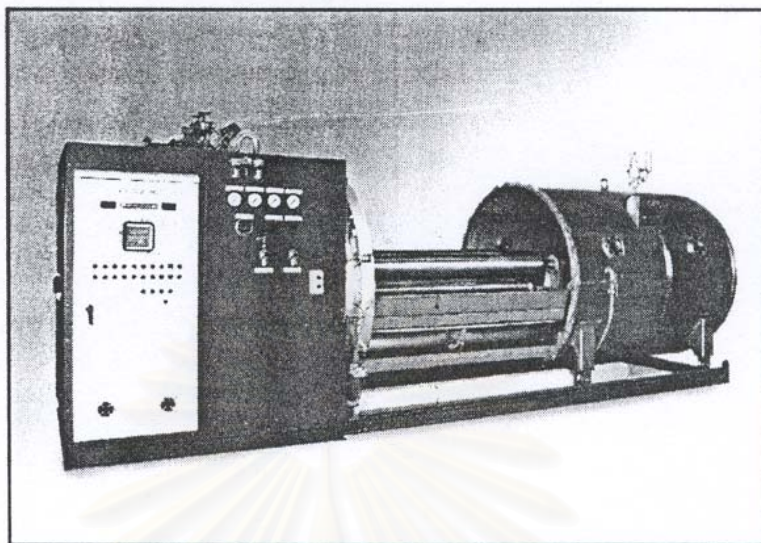
รูปที่ 2.2 เครื่องย้อมผ้าแบบแพกเกจ



รูปที่ 2.3 เครื่องย้อมผ้าแบบบีม



รูปที่ 2.4 เครื่องยนต์ไอน้ำแบบเจท



รูปที่ 2.5 เครื่องย้อมผ้าแบบจิกเกอร์

2.1.3 กระบวนการตกแต่งสำเร็จ (Finishing process)

ประกอบด้วยกระบวนการหลักคือใส่สารเรซิน (Resin finishing) เพื่อให้สวมใส่สบายและซักล้างได้ดี และผ้ามีสภาพคงตัวไม่ยืดและไม่หด ขั้นตอนของกระบวนการตกแต่งสำเร็จประกอบด้วย

- การเติมเรซิน ใช้เรซินประเภทเส้นใยและไดไฮดรอกซี ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)
- การให้ความร้อนเพื่อตั้งผ้าให้ตึง
- การอบผ้าเพื่อให้เซลลูโลสกับเรซินเข้ากันได้ดี มักดำเนินการที่อุณหภูมิ 150-160 องศาเซลเซียส
- การล้าง เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกออกจากเนื้อผ้า
- การอัดผ้า (Compressive shrink) เพื่อทดสอบการล้างพร้อมกับอัดด้ายยีน (Warp) ให้แข็งแรงมากขึ้นเปลี่ยนจากแบบยืดเป็นแบบกระชับ และทดสอบการยืด-หด

2.2 ความเป็นพิษของน้ำเสีย (มกราคม 1999)

ของเสียที่ระบายออกมามีความเป็นพิษ (Toxicity) จากวัตถุเคมีที่ใช้ เช่น โลหะหนัก ฟอรัมาลดีไฮด์ สีย้อม แก๊สคลอรีนและสารอื่นๆ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.2.1 โลหะหนัก

การใส่โลหะหนักในสีย้อมมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มความสดใสของสีสิ่งทอ สีย้อมผ้าบางชนิดมีสารโลหะหนักเป็นส่วนผสมในปริมาณที่ค่อนข้างต่ำ โลหะหนักเหล่านี้ ได้แก่ ทองแดง อาร์เซนิก แคดเมียม โครเมียม โคบอลต์ ตะกั่ว ปรอท สังกะสี และสelenium จะติดอยู่กับเนื้อผ้า แต่ยังมีสีบางตัว เช่นสีโลหะ ซึ่งโลหะหนักในสีจะค่อนข้างติดกับผ้ามากกว่า อาจหลงเหลือออกมาได้ร้อยละ 5 - 15 เหตุผลสำคัญที่ต้องระวังในการใช้สีที่มีโลหะหนักเหล่านี้ คือหากมีอยู่ในน้ำทิ้งมากจะเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำหรือพืชน้ำ และในที่สุดจะเข้ามาอยู่ในห่วงโซ่อาหารซึ่งมีผลกระทบต่อมนุษย์โดยตรง การย้อมบางลักษณะต้องให้สารออกซิเดชันหรือรีดักชัน โดยเฉพาะกับสีแวตและสีซัลเฟอร์ต้องออกซิไดส์ด้วยไดโครเมต แต่ปัจจุบันอาจใช้สารอื่นแทน เช่น เปอร์ออกไซด์ การย้อมที่ต้องใช้ซิงค์ซัลไฟไฮเลต หรือฟอร์มัลดีไฮด์ อาจทำให้อนุภาคสังกะสีปนออกมากับน้ำเสีย

2.2.2 ฟอร์มัลดีไฮด์

สารประกอบฟอร์มัลดีไฮด์ (Dihydroxymethyl-4,5-dihydroxyethylene urea) ใช้เป็นสารตกแต่ง เพื่อป้องกันผ้ายับที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในปัจจุบัน แต่ฟอร์มัลดีไฮด์เป็นสารเคมีที่มีความเป็นอันตรายหากสูดดมเข้าไปมากเกินไป ฟอร์มัลดีไฮด์ที่ตรวจพบในสิ่งทอพิมพ์ส่วนใหญ่แล้วมาจากแบ่งทอพิมพ์ มีเพียงส่วนน้อยมากที่มาจากกระบวนการทางเคมี แหล่งที่มาของฟอร์มัลดีไฮด์ในแบ่งพิมพ์คือตัวประสาน (Binder) และสารช่วยผนึกซึ่งเป็นสารเคมีประเภท Melamine-formaldehyde ตัวประสานเป็นสารพอลิเมอร์ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวาง (Crosslink) แล้วเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย เพื่อกักสีฟิสิกเมนที่ใหติดอยู่ภายใน ซึ่งสารบางชนิดจำเป็นต้องเติมสารช่วยเสริมให้เกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายที่สมบูรณ์ ซึ่งระบบนี้จะมีปัญหาสารฟอร์มัลดีไฮด์ตกค้างค่อนข้างสูง ในปัจจุบันได้มีผู้พัฒนาสารที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่จำเป็นต้องเติมสารช่วยผนึกเข้าไป และในต่างประเทศพยายามจะหาสารอื่นมาทดแทน แต่ส่วนมากยังมีประสิทธิภาพด้อยกว่าและราคาแพงกว่า จึงยังไม่นิยมใช้เท่าที่ควร

2.2.3 สีย้อม

สีย้อมที่ใช้ในโรงงานเป็นสารประกอบชนิดต่างๆ ที่มีโครงสร้างเคมีต่างๆ มากมายและเนื่องจากสีย้อมจำเป็นต้องมีความทนทานต่อแสงแดด การซักผ้า การเสียดสี และความสกปรกที่เกิดจากเหงื่อและน้ำมันจากร่างกายมนุษย์ ดังนั้นตามเหตุผลดังกล่าวแล้วสีย้อมที่ใช้ในปัจจุบันจึงมีลักษณะที่ไม่ถูกย่อยสลายได้ง่าย จึงทำให้เกิดการตกค้าง เกิดสีขึ้นในแหล่งน้ำและเกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมต่างๆ

สีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมปัจจุบันแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ สีย้อมประเภทละลายน้ำได้ และสีย้อมประเภทที่ไม่ละลายน้ำแต่กระจายตัวในน้ำ สีย้อมประเภทละลายน้ำได้ ได้แก่ สีไดเรค สีรีแอคทีฟ สีเมทิลคอมเพลกซ์ และสีเบสิค ส่วนสีดีสเพิร์ส สีซัลเฟอร์ สีแอซิด เป็นสีที่ละลายในน้ำได้ในขั้นตอนการย้อมสีแต่เมื่อถูกปรับสภาพด้วยเกลือของโครเมียมแล้ว จะเปลี่ยนเป็นแบบไม่ละลายน้ำ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าความสามารถในการละลายน้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดความยากง่ายของการขจัดสีในน้ำทิ้ง

ในอุตสาหกรรมสิ่งทอพบว่า การพิมพ์ย้อมด้วยสีรีแอคทีฟและสีฟิกเมนต์จำเป็นต้องใช้สารเคมีช่วยพิมพ์ การพิมพ์ทั้งสองแบบก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมที่ต่างกัน กล่าวคือการพิมพ์ด้วยสีรีแอคทีฟก่อให้เกิดปัญหามลภาวะทางน้ำ ส่วนการพิมพ์ฟิกเมนต์ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศเป็นส่วนใหญ่ ทั้งนี้เพราะการพิมพ์ด้วยสีรีแอคทีฟจำเป็นต้องทำการซักล้างเพื่อกำจัดสีส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยารวมทั้งต้องกำจัดน้ำพิมพ์และสารช่วยพิมพ์อื่นๆ ออกให้หมด ภายหลังจากพิมพ์จึงก่อให้เกิดน้ำเสียจากการซักล้าง แต่ในการพิมพ์ด้วยสีฟิกเมนต์จะแตกต่างจากการพิมพ์ด้วยสีรีแอคทีฟ คือ การพิมพ์แบบนี้ไม่ต้องการการซักล้างหลังจากการผนึกสีพิมพ์ลงบนผ้าเสร็จแล้ว ทั้งนี้เพราะการพิมพ์สีฟิกเมนต์สามารถทำให้สีติดอยู่บนเส้นใยได้ 100% แต่แบ่งพิมพ์ฟิกเมนต์ที่มีส่วนประกอบที่เป็นน้ำมันอยู่เกินกว่าครึ่งหนึ่ง ซึ่งจะระเหยออกไปในขณะที่ทำการผนึกสีพิมพ์ ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะทางอากาศ

สีย้อมอาจเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง คือ โดยทางจมูกด้วยการสูดดมเอาสีที่ฟุ้งกระจายอยู่ในอากาศ โดยการสัมผัสทางผิวหนัง และโดยการกินอาหารที่มีการปะปนของสี โดยทั่วไปสีย้อมเป็นสารที่ได้ชื่อว่าเป็นพิษต่ำ จากการเก็บรวบรวมข้อมูลในต่างประเทศไม่พบว่า มีพนักงานในโรงงานฟอกย้อมมีอัตราการตายหรือเจ็บป่วยสูงกว่าบุคคลอาชีพอื่นแต่อย่างใด

2.2.4 แก๊สคลอรีน

ปัจจุบันยังมีการใช้แก๊สคลอรีนเป็นสารฟอกย้อมสีอยู่บ้างแต่ไม่มากนัก คลอรีนเป็นแก๊สที่มีฤทธิ์เป็นกรด มีกลิ่นฉุนแสบจมูก สีเหลืองอมเขียวหรือสีเขียวอ่อน มีสมบัติละลายน้ำได้ดีปานกลางแต่สามารถจะละลายได้ดีในเบส ถ้าหายใจเข้าไปโดยตรงจะมีผลต่อเยื่อปอดและเยื่อเมือกต่างๆ

2.2.5 ความเป็นกรด-เบส

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอนั้นมักจะมีค่าสูงหรือเป็นเบส เนื่องจากกระบวนการผลิตในการฟอกผ้ามีการใช้เบสนั่นเอง สำหรับการแก้ปัญหาเรื่องความเป็นกรด-เบส เกินมาตรฐานนั้นสามารถทำได้โดยใช้ระบบปรับความเป็นกรด-เบส และพบว่าระบบบำบัดโดยส่วนใหญ่ล้วนมีค่าความ

เป็นกรด-เบส ที่ต้องคำนึงถึงเสมอ เช่น ในระบบบำบัดชีวภาพจะต้องทำการปรับความเป็นกรด-เบสในน้ำเสีย เพื่อให้ น้ำเสียมีภาวะเหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลชีพ การที่ความเป็นกรด-เบสไม่เหมาะสมจะทำให้ประสิทธิภาพในการเดินระบบต่ำ

2.2.6 สารอื่นๆ

ในกระบวนการฟอกย้อมจะมีการเติมสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) สารซักฟอก (Emulsifiers) และสารช่วยในการกระจายตัว แต่สารเคมีเหล่านี้มีความเป็นพิษต่อแหล่งน้ำ โดยต้องทำตามข้อบ่งใช้ในเอกสารกำกับ

2.3 แหล่งที่มาของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

แหล่งน้ำที่ใช้สำหรับกระบวนการฟอกย้อมได้มาจากน้ำบาดาลและน้ำประปา เนื่องจากปริมาณการใช้น้ำในกระบวนการฟอกย้อมมีค่ามาก ดังนั้นน้ำเสียที่ปล่อยจากกระบวนการจึงมีค่ามากด้วยเช่นกัน จากรายงานของ U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency) พบว่ามีการปล่อยน้ำทิ้งออกมาจากโรงงานฟอกย้อม 1-2 ล้านแกลลอนต่อวัน ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงมาก โดยน้ำเสียจะถูกปล่อยออกจากกระบวนการต่างๆ เช่น การกำจัดแป้ง การขจัดสิ่งสกปรก การฟอกขาวและการย้อมสี

2.3.1 การกำจัดแป้งและการขจัดสิ่งสกปรก

น้ำเสียส่วนใหญ่เกิดจากการเอาแป้งออกมาจากเนื้อผ้าซึ่งหากเป็นแป้งธรรมชาติจะมีค่าบีโอดีประมาณ 500,000 ส่วนในล้านส่วน เมื่อเทียบกับแป้งสังเคราะห์ (PVA, CMC, PVOH) ซึ่งมีค่าบีโอดีเพียง 10,000 ส่วนในล้านส่วน ดังนั้นหากเปลี่ยนการใช้แป้งสังเคราะห์จะลดความสกปรกในรูปของบีโอดีได้กว่าร้อยละ 90 ส่วนการฟอกย้อมผ้าทอ (Woven fabrics) ความสกปรกจากการลอกแป้งจะเป็นสัดส่วนประมาณร้อยละ 50 ของความสกปรกทั้งหมดในกระบวนการผลิต

2.3.2 การฟอกขาว

บีโอดีที่เกิดจากการฟอกขาวมีน้อยกว่าร้อยละ 5 ของค่าบีโอดีทั้งหมดในกระบวนการผลิต น้ำจากการกำจัดไขมันออกจะประกอบด้วยน้ำมันและไฮดรอกไซด์ ซึ่งทำให้น้ำมีค่าบีโอดีสูงมาก สารเคมีสำหรับกำจัดไขมัน เช่น กรดไขมัน (Fatty acids) และเกลือบางตัวที่มีค่าบีโอดีประมาณ

1,000,000 ส่วนในล้านส่วน สารซักฟอกบางตัวมีค่าบีโอดีไม่สูงมากแต่ไม่ควรนำมาใช้เพราะย่อยสลายได้ยากและมีความเป็นพิษต่อแหล่งน้ำมากกว่า

2.3.3 การข่มฝ้ายและการชุบมัน

น้ำเสียจากกระบวนการข่มฝ้ายหรือด้ายและกระบวนการชุบมันจะมีค่าบีโอดีน้อย กระบวนการข่มฝ้ายมีหลายวิธีและแตกต่างกันมาก น้ำเสียส่วนใหญ่เป็นน้ำล้างหลังจากข่มแล้ว ปริมาณสารเคมีที่หลุดติดออกมาจึงมีน้อยเมื่อเทียบกับการลอกแป้งหรือการกำจัดไขมันของน้ำ ดังนั้นการลดค่าบีโอดีในแหล่งน้ำนี้จึงไม่ค่อยมีผลนักเมื่อเทียบกับการปรับปรุงขั้นตอนการข่มแบบเป็นกะ การข่มแบบเป็นกะมีปัญหาเกี่ยวกับการจัดการสิ่งแวดล้อมมากเพราะเมื่อข่มเสร็จในแต่ละคราวน้ำเสียจะปล่อยทิ้งไปครั้งเดียวหมดในท่อระบายน้ำทิ้งรวม ทำให้ยากต่อการแยกน้ำเสียรวมถึงเวลาปล่อยทิ้งที่ไม่แน่นอนและสารเคมีที่ใช้ก็มีความหลากหลายมาก

จากการวิเคราะห์สมบัติของน้ำเสียจากโรงงานฟอกข่มต่าง ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานแสดงได้ดังตารางที่ 2.1 พบว่าค่าต่างๆ มีค่าสูงกว่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ จึงไม่สามารถปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อมโดยตรงได้

ตารางที่ 2.1 สมบัติของน้ำเสียเมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน

ตัวแปร	ค่าที่วัดได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่ามาตรฐานที่ยอมรับ (NEQS) (มิลลิกรัมต่อลิตร)
บีโอดี	120-440	80
ซีโอดี	300-1100	150
ของแข็งละลายได้ทั้งหมด	200-5000	3500
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด	50-120	150
ความเป็นกรด-เบส	7-11	6-10
ไขมันและน้ำมัน	11-45	10
โครเมียม	0.5-2.5	1.0

หมายเหตุ NEQS คือ National Environmental Quality Standards

2.4 หลักการและการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ (สมพร 2001)

ขั้นตอนของกระบวนการผลิตสิ่งทอมีการปล่อยน้ำทิ้งโดยเฉพาะจากขั้นตอนการลอกแป้ง จะมีความสกปรกในรูปของสารอินทรีย์ที่วัดเป็นบีโอดีค่อนข้างสูง ซึ่งทำให้กระบวนการทางชีวภาพยังจำเป็นต้องมีในระบบบำบัดน้ำเสียฟอกย้อม แม้ว่าจะมีการใช้กระบวนการกำจัดอื่นๆในการกำจัดสีก็ตาม

อย่างไรก็ดีการใช้กระบวนการทางชีวภาพจำเป็นต้องศึกษาลักษณะน้ำเสีย ตลอดจนข้อมูลองค์ประกอบของสี ทั้งนี้เพราะกระบวนการชีวภาพจะไวต่อสารมลพิษที่อาจมีในน้ำเสีย และสามารถที่จะย่อยสลายสารประกอบสีเพียงบางประเภท ตัวอย่างเช่น สีเอโซ ตำแหน่งของพันธะเอโซจะถูกละลายโดยจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้อากาศและได้สารที่มีโมเลกุลเล็กลง คือสารแอรอแมติกเอมีน ที่เป็นสารประกอบพื้นฐานของสีย้อมนั้นๆ และการย่อยสลายในขั้นตอนนี้ก็ยังไม่สามารถลดค่าซีโอดีในน้ำเสีย เนื่องจากเป็นขั้นตอนที่จะต้องใช้กระบวนการเติมอากาศต่อเนื่องจากกระบวนการที่ไม่ใช้อากาศเพื่อให้จุลินทรีย์ที่ใช้อากาศย่อยสลายสารแอรอแมติกเอมีนให้หมดไป และลดค่าซีโอดีในน้ำเสีย ดังนั้นการใช้จุลินทรีย์ทั้งสองประเภทร่วมกันดังกล่าวมีผลทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงขึ้น เพราะโดยปกติโมเลกุลสารที่สลับซับซ้อน ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ทั้งหมดในขั้นตอนเดียว นอกจากการใช้วิธีดังกล่าวแล้วอาจเปลี่ยนมาใช้กระบวนการออกซิเดชันทางเคมีเพื่อการแตกพันธะโมเลกุลของสีให้เป็นโมเลกุลที่เล็กลงก่อน แล้วจึงผ่านกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพโดยใช้อากาศเพื่อกำจัดต่อไป

โดยทั่วไปกระบวนการบำบัดทางชีวภาพยังเป็นกระบวนการที่จำเป็นต้องมีในระบบบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อม เพื่อลดค่าสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำส่วนใหญ่ลง บางครั้งการใช้เฉพาะกระบวนการทางชีวภาพสามารถลดค่าบีโอดีและซีโอดีได้ตามมาตรฐานการระบายน้ำทิ้ง แต่น้ำทิ้งจะยังคงมีสี การนำกระบวนการออกซิเดชันทางเคมีมาช่วยในการลดสีและซีโอดีนั้น อาจมีการบำบัดก่อนหรือการบำบัดหลัง ใช้กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ การจัดเรียงกระบวนการออกซิเดชันก่อนใช้กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ จะใช้ในกรณีที่น้ำเสียมีองค์ประกอบของสารเคมีที่เป็นพิษ การออกซิเดชันทางเคมีก่อนจะช่วยลดปริมาณสารพิษหรือช่วยแตกพันธะของสารซับซ้อนให้เป็นโมเลกุลเล็กลง ทำให้การทำงานในกระบวนการชีวภาพดีขึ้น วิธีนี้จำเป็นต้องมีการควบคุมปริมาณการเติมสารออกซิเดชันที่เหมาะสม เพราะไม่ได้มีวัตถุประสงค์ในการลดค่าซีโอดีในน้ำเสีย แต่ต้องการเพียงการปรับปรุงให้อัตราส่วนระหว่างบีโอดีและซีโอดีมีค่าสูงขึ้น ส่วนการนำการออกซิเดชันทางเคมีมาใช้ต่อจากกระบวนการทางชีวภาพก็เพื่อต้องการให้คุณภาพของน้ำทิ้งสูงขึ้น การออกซิเดชันเพื่อลดค่าซีโอดีนั่นเอง

2.4.1 การบำบัดน้ำเสียทางกายภาพ (Physical Treatment)

การบำบัดน้ำเสียทางกายภาพเป็นวิธีที่จำเป็นต้องใช้ในระบบบำบัดน้ำเสีย เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนออกจากน้ำเสีย ซึ่งสิ่งเจือปนนี้จะเป็นของแข็งที่อยู่ในน้ำเสีย ได้แก่ ของแข็งแขวนลอย เศษผ้า กระดาษ อาหาร กรวด ทราาย ไขมัน น้ำมัน เป็นต้น น้ำเสียจากโรงงานทอผ้าและฟอกย้อมมีค่าของแข็งแขวนลอยอยู่ค่อนข้างสูง มีเศษผ้ามากและมีเศษแข็ง จึงจำเป็นต้องมีระบบบำบัดน้ำเสียทางกายภาพ โดยมีวิธีต่างๆดังนี้

1. ตะแกรง ทำหน้าที่ดักเศษขยะต่างๆ ที่ไหลมากับน้ำเสียซึ่งอาจเป็นเศษผ้า เศษเส้นด้าย และเศษแข็ง เป็นระบบที่มีความจำเป็นมากสำหรับระบบบำบัดน้ำเสีย เพื่อป้องกันไม่ให้เศษขยะดังกล่าวไปอุดตันเครื่องสูบน้ำ หรือเครื่องเติมอากาศ
2. ถังดักกรวดทราย ทำหน้าที่แยกตะกอนหนักต่างๆ ออกจากน้ำเสีย เช่น กรวด หิน ทราาย เศษแข็งแข็ง เป็นต้น
3. ถังกำจัดน้ำมันและไขมัน ทำหน้าที่ดักหรือกวาดพวงน้ำมันและไขมันออกจากน้ำเสีย ถังกำจัดน้ำมันและไขมันออกจากน้ำเสียฟอกย้อมก่อนปล่อยน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัดขั้นต่อไป
4. ถังตกตะกอน ทำหน้าที่ตกตะกอนของแข็งแขวนลอยต่างๆ ออกจากน้ำเสีย
5. ดาฟ (Daf) หน้าที่หลักคือทำการแยกตะกอนออกจากน้ำเสียด้วยวิธีทำให้ตะกอนลอย เป็นวิธีที่ใช้ฟองอากาศขนาดเล็กดันของแข็ง ทำให้ลอยขึ้นมาบนผิวน้ำ แล้วจึงทำการกวาดผ้าไซออกจากน้ำเสียโดยอาจทำหน้าที่แทนถังกำจัดน้ำมันและไขมัน และถังตกตะกอนขั้นต้นได้
6. ถังกรอง หน้าที่หลักคือ ทำการกรองน้ำเสียให้ได้น้ำใสมีค่าของแข็งแขวนลอยน้อยลงก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ถังกรองจะประกอบด้วยชั้นทราย ชั้นหิน เพื่อดักของแข็งแขวนลอยขนาดต่างๆออกจากน้ำ

2.4.2 การบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพ (Biological Treatment)

มีหน้าที่หลักคือ กำจัดสารปนเปื้อนที่ละลายอยู่ในน้ำเสียโดยเฉพาะสารอินทรีย์เป็นส่วนใหญ่ โดยอาศัยจุลินทรีย์หลายชนิดทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย วิธีการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพมีวิธีการต่างๆ ให้พิจารณาดังนี้

1. ระบบโปรยกรอง (Trickling Filters) ประกอบด้วยตัวกลางบรรจุอยู่ในถัง เพื่อให้จุลชีพเกาะอยู่ตามผิวตัวกลางโดยให้ออกซิเจนแก่จุลชีพ เมื่อน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ไหลไปพบกับจุลชีพพร้อมๆ กับมีออกซิเจนอยู่ด้วย ทำให้เกิดปฏิกิริยาชีวเคมีจะได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ความหนาของชั้นจุลชีพจะมีผลต่อปฏิกิริยาชีวเคมี โดยภายในชั้นจุลชีพจะเกิดสภาพไร้อากาศหรือแอนแอโรบิก (Anaerobic) จะ

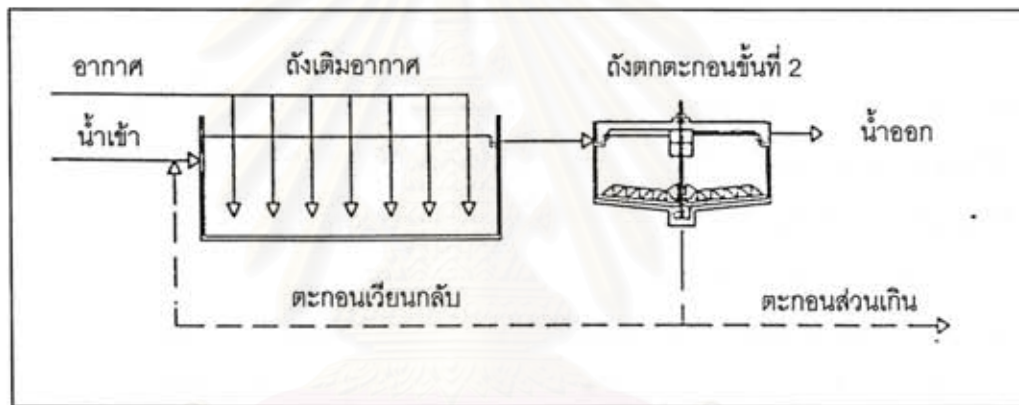
ได้แก่ออกซิเจน และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ส่วนผิวบนของชั้นจุลชีพจะเกิดสภาพมีอากาศหรือแอโรบิก (Aerobic) จะได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

2. ระบบชุดสัมผัสผิวนวนเวียนชีวภาพหรืออาร์บีซี (Rotating Biological Contractors, RBC) ระบบชุดสัมผัสผิวนวนเวียนชีวภาพมีชื่อย่อว่า อาร์บีซี เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ตัวกลางเช่นเดียวกับระบบโปรยกรอง แต่แตกต่างกันตรงที่ระบบอาร์บีซีใช้แผ่นตัวกลางหมุนอยู่ในน้ำเสียในถังประมาณครึ่งวงกลม ส่วนแผ่นตัวกลางส่วนบนจะได้ออกซิเจนจากอากาศ ทำให้จุลชีพที่เกาะอยู่บนผิวตัวกลางได้รับออกซิเจนและนำออกซิเจนลงไปสู่น้ำเสียในถังด้วย โดยปกติแผ่นตัวกลางกลมหมุนด้วยความเร็วประมาณ 0.5 รอบต่อนาที และมีอัตราการเคลื่อนที่ของด้านขอบของแผ่นกลมเท่ากับ 0.3 เมตรต่อวินาที ระบบบำบัดน้ำเสียแบบอาร์บีซีจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดีค่อนข้างสูง แต่ระบบนี้จะมีเครื่องจักรกลมากกว่าระบบโปรยกรอง จึงทำให้การควบคุมทำได้ยาก และไม่นิยมใช้ระบบนี้เนื่องจากมีปัญหาเรื่องแกนเพลลาจันหมุนหักบ่อย

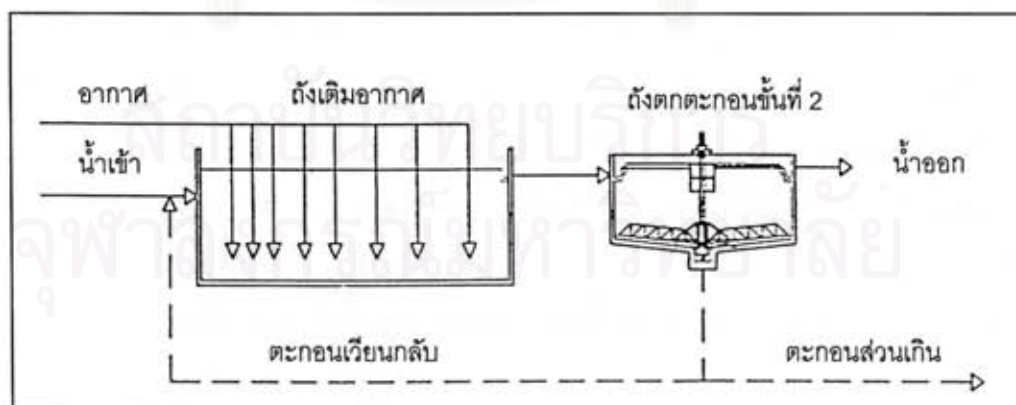
3. ระบบเอเอส (Activated Sludge) ระบบนี้มีจุลชีพแขวนลอยที่มีความเข้มข้นสูงสำหรับการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย จุลชีพเหล่านี้จะลอยอยู่ในน้ำอากาศตะกอนของถังเดิมอากาศ ซึ่งจุลชีพจะขยายพันธุ์เพิ่มปริมาณขึ้นในลักษณะที่เรียกว่า การเจริญเติบโตแขวนลอย (Suspended growth) โดยทั่วไปภายในถังเดิมอากาศจะมีระบบกวนซึ่งมักจะทำให้เครื่องจักรกลทำหน้าที่ให้จุลชีพแขวนลอยภายในอยู่ภายในถังเดิมอากาศตลอดเวลา เพื่อที่สามารถควบคุมจำนวนจุลชีพภายในระบบเอเอสได้เป็นที่ต้องการ จำเป็นต้องมีระบบแยกน้ำใสออกจากกากตะกอน ซึ่งนิยมใช้ถังตกตะกอนทำหน้าที่แยกน้ำทิ้งออกจากกากตะกอน เพื่อให้น้ำทิ้งที่ใสไหลล้นออกจากถังตกตะกอนและมีการเวียนกากตะกอนบางส่วนกลับเข้าสู่ถังเดิมอากาศ และทั้งกากตะกอนส่วนเกินบางส่วนออกนอกระบบ ระบบเอเอสมีหลายรูปแบบที่มีกลไกการบำบัดน้ำเสียที่แตกต่างกันดังนี้

- กระบวนการเอเอสแบบธรรมดา (Conventional Activated Sludge Process) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียในถังเดิมอากาศที่มีการไหลตามกัน (Activated sludge) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ทำให้บริเวณตัวถังมีค่าออกซิเจนละลายต่ำ ซึ่งมีข้อดีตรงที่ปฏิกิริยาชีวเคมีที่สูงกว่า และอายุของจุลชีพตกตะกอนดีกว่าแบบผสมสมบูรณ์
- กระบวนการเติมอากาศแบบเรียววง (Tapered Aeration Process) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไหลตามกันเช่นเดียวกับระบบเอเอสแบบธรรมดา แต่แตกต่างกันตรงที่มีการติดตั้งเครื่องเติมอากาศบริเวณต้นทางมากกว่าปลายทางถัง เพื่อให้ปริมาณออกซิเจนที่เติมลงไปใกล้เคียงกับปริมาณออกซิเจนที่ต้องการใช้ ดังรูปที่ 2.7

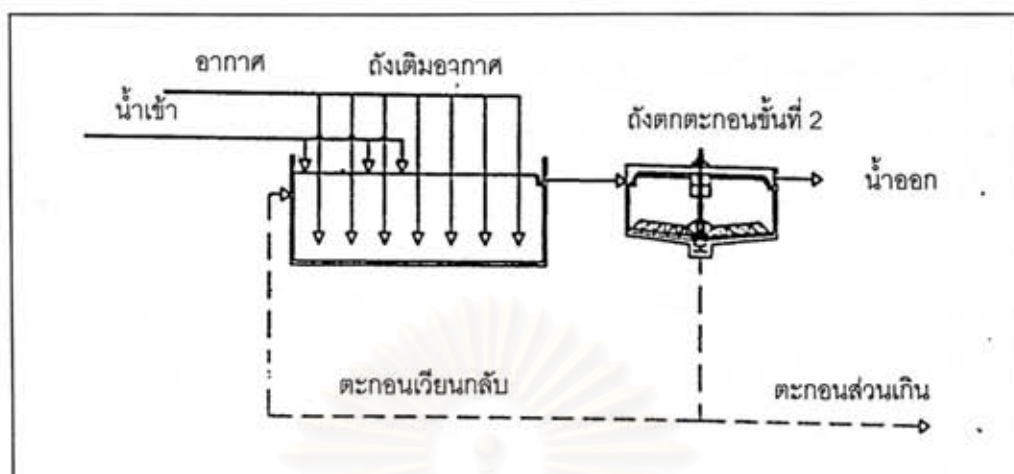
- กระบวนการเติมอากาศแบบเป็นขั้น (Step-feed Aeration Process) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียเป็นแบบไหลตามกันเช่นเดียวกับระบบเอเอสแบบธรรมดา แต่แตกต่างกันตรงที่มีการป้อนน้ำเสียหรือกระจายน้ำเสียเข้าหลายจุดตามความยาวของถังเติมอากาศ เพื่อให้ค่าบีโอดีมีค่าใกล้เคียงกันตลอดถัง และมีความสอดคล้องกับระบบเติมอากาศที่กระจายทั่วถัง ดังรูปที่ 2.8
- กระบวนการผสมสมบูรณ์ (Completely Mix Process) กระบวนการบำบัดน้ำเสียเป็นแบบผสมสมบูรณ์ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ความเข้มข้นของบีโอดีหรือออกซิเจนละลาย ณ จุดใดๆ ในถังแบบนี้มีค่าเท่ากันเสมอ ถังผสมสมบูรณ์มีข้อดีตรงที่สามารถรับปริมาณช็อก (Shock loads) และสารพิษที่มีเข้ามากระทบหนักได้ดีกว่าแบบธรรมดา



รูปที่ 2.6 กระบวนการเอเอสแบบธรรมดา



รูปที่ 2.7 กระบวนการเติมอากาศแบบเรียวลง

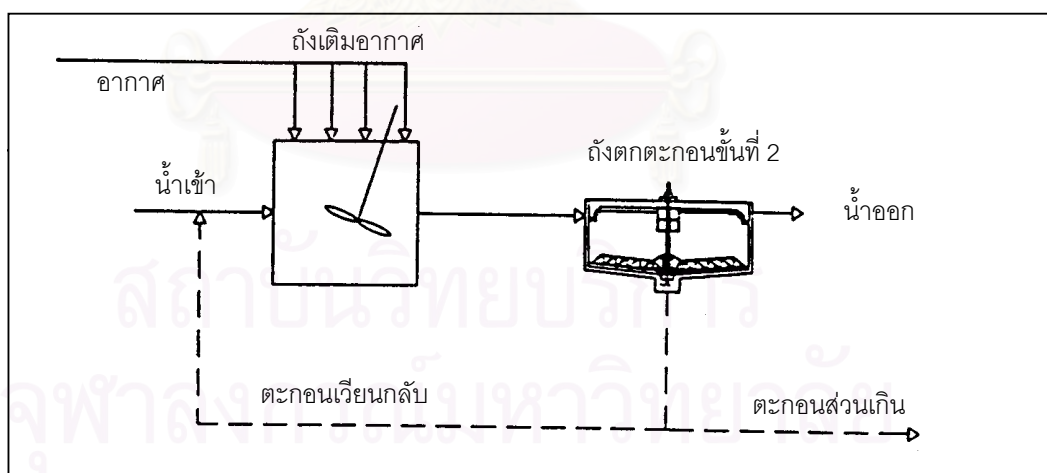


รูปที่ 2.8 กระบวนการเติมอากาศแบบเป็นขั้น

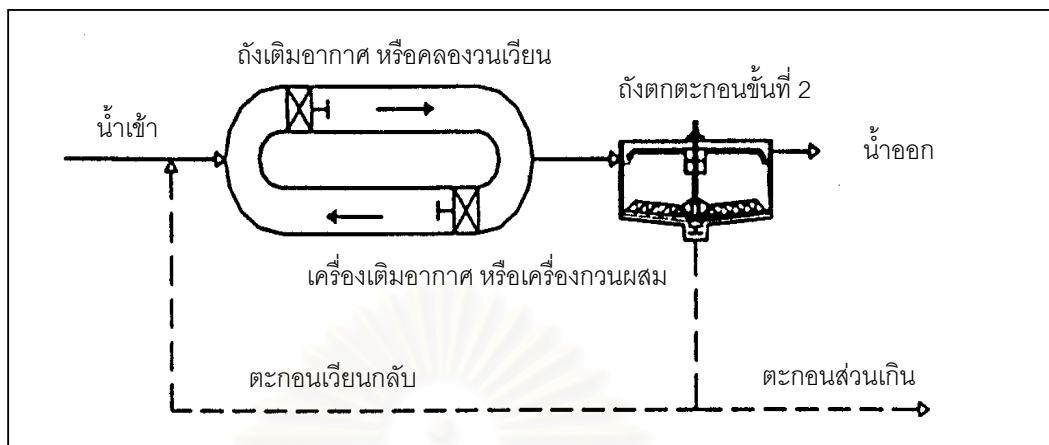
- กระบวนการเติมอากาศยืดเวลา (Extended Aeration Process) กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบเอเอสที่มีระยะเวลาเก็บกักในบ่อพักและอายุการตกตะกอนยาวนานกว่าระบบเอเอสอื่นๆ ระบบนี้อาจไม่จำเป็นต้องถ่ายกากตะกอนส่วนเกินออกจากระบบ หรือถ่ายกากตะกอนออกจากระบบน้อย เพราะระบบนี้จะเกิดการย่อยสลายตัวเองด้วย ทำให้มีกากตะกอนส่วนเกินน้อย ระบบบำบัดแบบการเติมอากาศยืดเวลาอาจเป็นถังเติมอากาศรูปสี่เหลี่ยม หรืออาจเป็นรูปวงรีซึ่งเรียกว่าระบบคลองวนเวียน (Oxidation Ditch Process) ดังรูปที่ 2.10
- กระบวนการปรับเสถียรสัมผัส (Contact Stabilization Process) กระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีการนำกากตะกอนไหลเวียนกลับจากกันถังไปยังถังเติมอากาศเพื่อปรับความเสถียรของกากตะกอนด้วยออกซิเจนที่เรียกว่า ถังปรับเสถียร ก่อนที่จะนำไปบำบัดน้ำเสียอีกถังที่เรียกว่า ถังสัมผัส ซึ่งถังสัมผัสนี้ต้องการเวลากักเก็บเพียง 30-60 นาที ก็สามารถบำบัดน้ำเสียได้ ระบบนี้มีขนาดเล็ก ใช้พื้นที่น้อยกว่าแบบอื่น ระบบบำบัดนี้จะอาศัยหลักการที่ทำให้จุลชีพในถังปรับเสถียร เมื่อพบน้ำเสียในถังสัมผัสจะสามารถบำบัดน้ำเสียได้รวดเร็ว รูปแบบของกระบวนการบำบัดนี้ได้แสดงดังรูปที่ 2.11
- กระบวนการแอนอกซิก-แอนแอโรบิกและแอโรบิก (Anoxic-Anaerobic/Aerobic Process) กระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีถังหรือภาวะแอนแอโรบิก/แอนอกซิกและ

ถังเติมอากาศ ระยะเวลาเก็บกักของถังแวนอโรบิก-แวนอกซิกควรมากกว่า 10 ชั่วโมง และ ถังเติมอากาศเท่ากับ 5-6 ชั่วโมง ระบบบำบัดนี้ใช้พื้นที่น้อย ระบบบำบัดนี้สามารถกำจัดบีโอดีได้อย่างรวดเร็วและได้มากกว่าเอเอสทั่วไป สามารถออกแบบให้กำจัดไนโตรเจนได้หรืออาจกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ

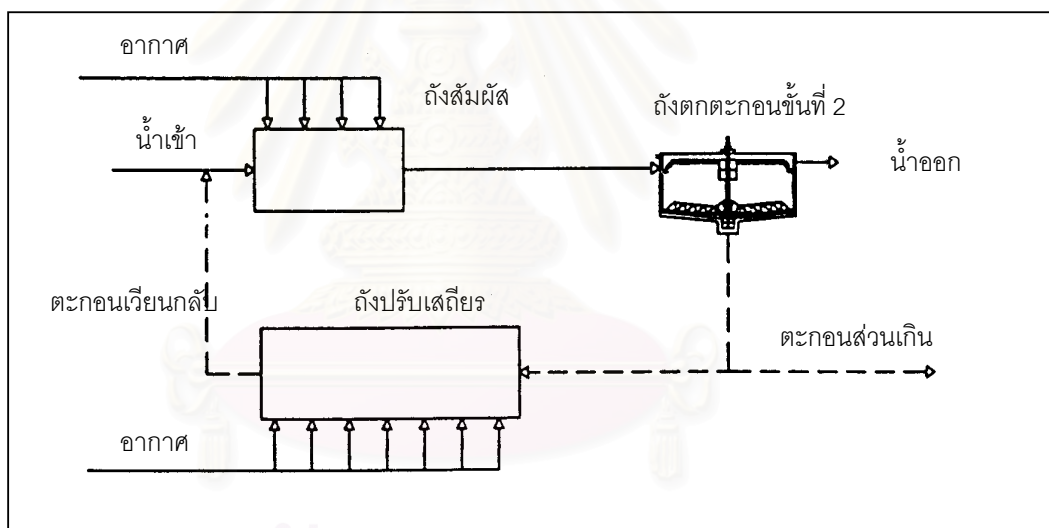
- กระบวนการถังปฏิกรณ์สลับเป็นกะหรือเอสบีอาร์ (Sequencing Batch Reactor, SBR) กระบวนการถังปฏิกรณ์เอสบีอาร์เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ใช้ถังเติมอากาศเพียงถังเดียวทำหน้าที่เป็นทั้งตัวรับน้ำเสีย ถังแวนอโรบิก/แวนอกซิก และ ถังตกตะกอนในถังเดียวกัน ระบบบำบัดน้ำเสียแบบนี้สามารถกำจัดบีโอดี ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสได้เหมือนระบบบำบัดแบบแวนอกซิก+แวนอโรบิก/แวนอโรบิก และยังสามารถกำจัดสีจากโรงงานฟอกย้อมได้อีกด้วย
- สระเติมอากาศ (Aerated Lagoon) สระเติมอากาศจะเป็นบ่อดินหรือบ่อคอนกรีต หรือบ่อขี้ผึ้งบ่อด้วยหิน อาจมีระบบไหลเวียนกากตะกอนหรือไม่มีกากตะกอนไหลเวียนก็ได้ สระเติมอากาศต้องการพื้นที่บำบัดน้ำเสียมากกว่าระบบเอเอส และมีจำนวนจุลชีพในสระเติมอากาศน้อยกว่าระบบเอเอส



รูปที่ 2.9 กระบวนการผสมแบบสมบูรณ

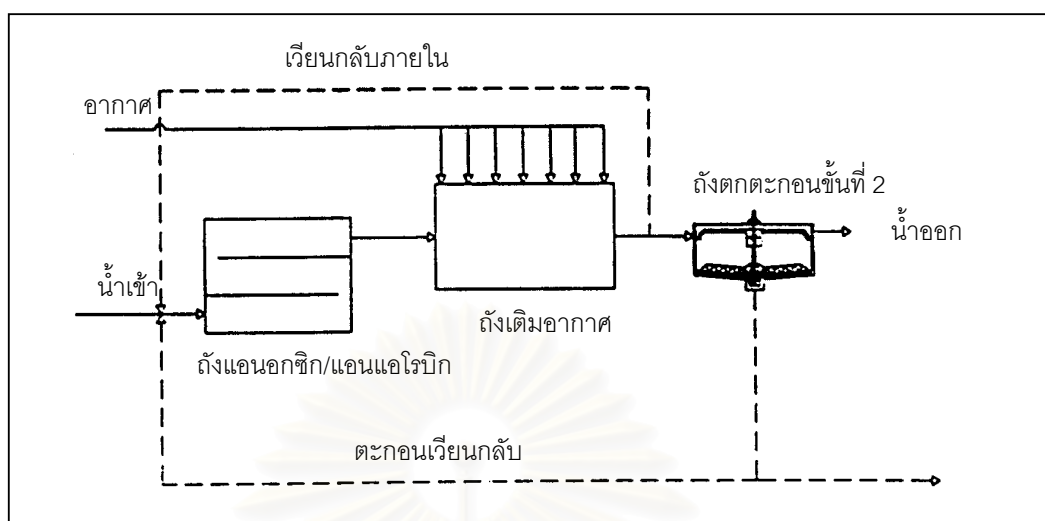


รูปที่ 2.10 กระบวนการเติมอากาศยัดเวลาหรือแบบคลองเวียน



รูปที่ 2.11 กระบวนการปรับเสถียรส้มฝัด

4. การบำบัดแบบไร้อากาศหรือแอนแอโรบิก (Anaerobic Treatment) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่เกิดการหมัก กากตะกอนมีสีดำ จะเกิดแก๊สมีเทนและแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้นจะมี 2 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การเกิดกรดอินทรีย์ แล้วตามด้วยการเกิดแก๊สมีเทน



รูปที่ 2.12 กระบวนการแอนออกซิก-แอนแอโรบิกและแอโรบิก

2.4.3 การบำบัดน้ำเสียทางเคมี (Chemical Treatment)

น้ำเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีพารามิเตอร์หลายอย่างที่ไม่ผ่านมาตรฐาน เช่น ค่าความเป็นกรด-เบส บีโอดี ซีโอดี สารแขวนลอย และสี โดยปกติการเลือกใช้กระบวนการทางเคมีจะทำเมื่อพบว่าวิธีอื่นไม่สามารถทำได้ทั้งนี้เนื่องจากการบำบัดทางเคมีจะเสียค่าใช้จ่ายในการเดินระบบสูงกว่ากระบวนการบำบัดน้ำเสียวิธีอื่น

สีเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดอยู่ในมาตรฐานน้ำทิ้งด้วย แต่เกณฑ์การวัดจะทำได้ยากโดยกำหนดไว้ว่า “ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ” ทำให้ไม่สามารถสื่อถึงปัญหาได้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามมีความพยายามในการที่จะหาวิธีวัดสีเพื่อกำหนดให้เป็นวิธีมาตรฐานต่อไป เช่น วิธีเอตีเอ็ม ซีเอสยู เป็นต้น ปัญหาเรื่องสีในปัจจุบันมักเกิดการร้องเรียนจากชุมชนรอบข้าง เนื่องจากความรู้สึกว่าน้ำที่มีสีจะมีความสกปรก ทั้งๆที่ในความเป็นจริงอาจไม่ได้เป็นเช่นนั้น การบำบัดสีที่ไม่ละลายในน้ำเสียมักใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารเคมีประเภทต่างๆ สำหรับสีที่ละลายน้ำได้ดีนั้นอาจใช้การออกซิไดส์ให้โครงสร้างสีเปลี่ยนไป หรือทำปฏิกิริยากับสีที่ละลายน้ำแล้วสูญเสียความสามารถในการละลายน้ำซึ่งทำให้สามารถตกตะกอนแยกออกได้ และทำให้สีในน้ำหายไป

การแก้ปัญหาเรื่องสีในน้ำเสียด้วยวิธีเคมีมีได้หลายวิธี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของสีที่อยู่ในน้ำ โดยสามารถแบ่งลักษณะของสีที่อยู่ในน้ำเสียอย่างง่ายได้ 2 ประเภท คือสีที่ละลายน้ำกับสีที่ไม่ละลายน้ำ ดังนั้นโรงงานที่จะเลือกใช้กระบวนการทางเคมีในการบำบัดน้ำเสียควรทราบก่อนว่าน้ำเสียที่เกิดขึ้นมีสีประเภทไหนปนอยู่เพื่อทำการคัดเลือกวิธีที่เหมาะสมต่อไป

2.4.3.1 สีสี่ไม่ละลายน้ำ หมายถึงสารสีที่เมื่อปนอยู่ในน้ำเสียจะอยู่ในรูปสารแขวนลอยหรือคอลลอยด์ เช่น สีย้อมแวต ซัลเฟอร์ เอโซติก เมทาลิค เป็นต้น ซึ่งสามารถแยกออกจากน้ำเสียได้โดยการตั้งทิ้งไว้ แต่โดยปกติต้องใช้ระยะเวลาเวลานานมากซึ่งเป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติ ดังนั้นการกำจัดสีประเภทนี้จึงใช้หลักการกำจัดสารแขวนลอยหรือคอลลอยด์โดยทั่วไปได้ ซึ่งปกติมักใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันในการแก้ปัญหาดังกล่าว เพื่อให้การจัดการเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว

- หลักการโคแอกกูเลชัน

สาเหตุที่คอลลอยด์อนุภาคสีย้อมในน้ำเสียไม่สามารถตกตะกอนในเวลาอันรวดเร็วเนื่องจากคอลลอยด์เหล่านั้นมีเสถียรภาพ คือ แรงผลักระหว่างอนุภาคเนื่องจากประจุไฟฟ้าบนอนุภาคมีมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างอนุภาค ทำให้อนุภาคยังมีขนาดเล็กมาก น้ำหนักเบา ทำให้ต้องใช้ระยะเวลาเวลานานในการตกตะกอน ดังนั้นในการทำให้อนุภาคสีย้อมสามารถตกตะกอนได้เร็ว ทำได้โดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้สารแขวนลอยหรือคอลลอยด์อนุภาคสีถูกทำลายเสถียรภาพ และสามารถรวมกันเป็นอนุภาคใหญ่ทำให้ตกตะกอนได้เร็วขึ้น

- สารโคแอกกูแลนต์

โรงงานฟอกย้อมโดยส่วนใหญ่มีน้ำเสียประเภทมีสีไม่ละลายน้ำปนอยู่ ดังนั้นโรงงานฟอกย้อมมักจะมีกระบวนการโคแอกกูเลชันเพื่อใช้ในการกำจัดสีในน้ำเสียอยู่แล้ว อย่างไรก็ตามการหาสารโคแอกกูแลนต์ใหม่ที่เหมาะสมสำหรับน้ำเสียของแต่ละโรงงานยังคงเป็นสิ่งที่ทำได้ โดยอาจพบว่าการเปลี่ยนสารโคแอกกูแลนต์ใหม่ทำให้ค่าใช้จ่ายในการบำบัดลดลง การควบคุมระบบง่ายขึ้นและมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีในน้ำเสียดีขึ้น โดยมีการปรับปรุงระบบเพื่อมาใช้สารโคแอกกูแลนต์ใหม่เสียค่าใช้จ่ายไม่มากนัก

2.4.3.2 สีละลายน้ำ น้ำเสียที่มีสีย้อมละลายน้ำปนอยู่ จะพบว่าการบำบัดด้วยวิธีโคแอกกูเลชันไม่สามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากกลไกโคแอกกูเลชันไม่สามารถใช้ในการกำจัดสารที่ละลายอยู่ในน้ำนั่นเอง ดังนั้นจึงต้องใช้กลไกอื่นในการทำปฏิกิริยากับสีที่ละลายอยู่ในน้ำโดยตรง

2.4.4 กระบวนการออกซิเดชันด้วยสารเคมี (Chemical oxidation)

กระบวนการออกซิเดชันด้วยสารเคมีนี้เป็นวิธีที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนอิเล็กตรอนของสารที่มีศักย์ไฟฟ้าต่างกัน แสดงดังตารางที่ 2.2 โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเกิดทั้งออกซิเดชัน-รีดักชันพร้อมกัน ซึ่งสามารถกำจัดสารประกอบพวกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ (Non-biodegradable substances) โดยจะใช้ปริมาณของตัวออกซิไดส์น้อย

กระบวนการออกซิเดชันด้วยสารเคมีนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ การใช้สารเคมีแบบดั้งเดิม (Classical chemical treatment) และการออกซิเดชันด้วยสารเคมีแบบประยุกต์ (Advanced oxidation process, AOPs) โดยในที่นี้จะกล่าวถึงวิธีการใช้สารเคมีแบบประยุกต์เท่านั้น

การออกซิเดชันด้วยสารเคมีแบบประยุกต์

คำว่า Advance oxidation process หรือ AOPs ได้ถูกนิยามขึ้นโดยนาย Glaze ในปี 1987 วิธี AOPs นี้จะเกี่ยวข้องกับกระบวนการสร้างเรดิคัลที่มีความว่องไวสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งไฮดรอกซิลเรดิคัล ซึ่งไฮดรอกซิลเรดิคัลที่เกิดขึ้นนี้จะไปทำลายโมเลกุลของสารประกอบที่เป็นพิษทำให้น้ำเสียมีความเป็นพิษน้อยลง (Oppenlander และคณะ 2003)

โดยทั่วไปปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่งโดย ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นกับความเข้มข้นของไฮดรอกซิลและความเข้มข้นของสารที่ถูกออกซิไดส์ ซึ่งค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาปกติแล้วจะอยู่ในช่วง 10^8 - 10^{11} โมลต่อลิตร และความเข้มข้นของไฮดรอกซิลเรดิคัลจะอยู่ระหว่าง 10^{-10} - 10^{-12} โมลต่อลิตร ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่งคือ 10^{-10} ถึง 1 โมลต่อนาที่ สารประกอบที่มีผลต่อไฮดรอกซิลเรดิคัลแสดงดังตารางที่ 2.3

การจำแนกประเภทของ AOPs สามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภท คือ แบบเนื้อเดียวกัน และแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการ) โดยกระบวนการต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 ศักย์ไฟฟ้าของสารเคมีที่ใช้ในการออกซิเดชันน้ำเสีย

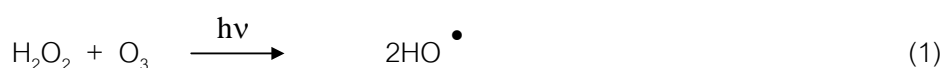
สาร	ศักย์ไฟฟ้า (V)
ฟลูออรีน	3.03
ไฮดรอกซิลแรดิคอลล	2.80
ออกซิเจน	2.42
โอโซน	2.07
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	1.77
เปอร์แมงกานेट	1.67
กรดไฮโปโบรมัส	1.59
คลอไรต์ไดออกไซด์	1.50
กรดไฮโปคลอรัส	1.49
กรดไฮโปไอโอดัส	1.45
คลอรีน	1.36
โบรมีน	1.09
ไอโอดีน	0.54

ในกระบวนการ AOPs วิธีที่จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นไฮดรอกซิลแรดิคอลลอยู่หลายทาง ซึ่งกระบวนการหลักๆ ที่จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮดรอกซิลแรดิคอลลนั้นจะแสดงดังนี้

1. การใช้แสงยูวี เป็นกระบวนการเกิดปฏิกิริยาที่มีจลนพลศาสตร์ที่ช้าแบ่งออกเป็น

- UV/O₃/H₂O₂ process

กระบวนการนี้จะมีแสงยูวีและโอโซนเข้ามาเกี่ยวข้อง เกิดปฏิกิริยาโฟโตไลซิสของโอโซน ซึ่งโอโซนจะเป็นแหล่งที่ทำให้เกิดเป็นไฮดรอกซิลแรดิคอลลได้ 2 ทางดังสมการที่ (1) และ (2)



พบว่าในระบบนี้มีตัวที่จะทำให้เกิดเป็นไฮดรอกซิลแรดิคอลลอยู่ 3 ชนิด คือ แสงยูวี โอโซน และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ตารางที่ 2.3 สารประกอบที่สามารถถูกออกซิไดส์ด้วยไฮดรอกซิลแรดิคอลล (Faust และคณะ 1990)

สารประกอบ	หมู่ฟังก์ชัน
กรด	Formic, Gluconic, Lactic, Malic, Propionic, Tartaric
แอลกอฮอล์	Benzyl, <i>Tert</i> -butyl, Ethanol, Ethylene Glycol, Glycerol, Isopropanol, Methanol, Propandiol
อัลดีไฮด์	Acetaldehyde, Benzaldehyde, Trichloroacetaldehyde
เอโรแมติก	Benzene, Chlorobenzene, Chlorophenol, Creosote, Dichlorophenol, Hydroquinone, P-nitrophenol, Phenol, Toluene, Trichlorophenol, Xylene, Trinitrotoluene
เอมีน	Aniline, Cyclic amines, Diethylamine, Dimethylformamide, EDTA, Propanediamine, N-propylamine
คีโตน	Anthraquinone, Diazo, Monoazo
อีเทอร์	Tetrahydrofuran
คีโตน	Dihydroxyacetone, Methyl ethyl ketone

ตารางที่ 2.4 ประเภทของ AOPs

ประเภท			กระบวนการ
ปฏิกิริยา	ปัจจัยภายนอก	กระบวนการทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคอลล	
แบบเนื้อเดียวกัน	แสง	กระบวนการเคมีแบบใช้แสง	UV/O ₃
		กระบวนการเคมี	UV/H ₂ O ₂
			UV/H ₂ O ₂ /O ₃
			UV/Fe ²⁺ (Fe ³⁺)/H ₂ O ₂
	แสง/Ultrasonnd	กระบวนการเคมีแบบใช้แสง/ กระบวนการเคมีแบบใช้เสียง	UV/Ultrasonnd
	Ultrasonnd	กระบวนการเคมีแบบใช้เสียง	Ultrasonnd/H ₂ O ₂ Ultrasonnd/O ₃
	High-energy	กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน	Electron Beam
	-	กระบวนการเคมี	H ₂ O ₂ /O ₃
	กระบวนการเคมี	O ₃ /H ₂ O ₂ ที่ความเป็นกรด-เบสสูง	
-	กระบวนการเคมี	Fe ²⁺ /H ₂ O ₂ (Fenton)	
-	กระบวนการเคมีแบบใช้ไฟฟ้า	Electro-Fenton	
แบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน	แสง	กระบวนการเคมีแบบใช้แสง	UV/TiO ₂ /O ₂ UV/TiO ₂ /H ₂ O ₂
	-	กระบวนการเคมี	Iron Oxide/H ₂ O ₂

- Fe³⁺/UV-vis process

กระบวนการนี้จะไม่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แต่จะอาศัย Fe[(OH)(H₂O)₅]²⁺ เป็นแหล่งที่จะทำให้เกิดไฮดรอกซิลแรดิคอลล โดยพบว่าร้อยละของผลที่เกิดขึ้นคือ 0.075 โดยใช้แสงที่มีความยาวคลื่น 360 นาโนเมตร ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงได้ดังนี้



โดยที่ Fe(OH)²⁺ มาจากการแตกตัวของ Fe[(OH)₂(H₂O)₅]

- UV/TiO₂

วิธีการนี้เป็นวิธีที่มีการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ในกระบวนการซึ่งจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีออกซิเจนโดยไฮดรอกซิลแรดิคอลลจะเกิดขึ้นด้วยกระบวนการแตกตัวด้วยแสงแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งจะประกอบไปด้วย 2 เฟส คือ เฟสของแข็งกับของเหลว วิธีนี้มีข้อดีคือเป็นวิธีที่ให้ผลดีและราคาถูก แต่มีข้อเสียคือจะต้องมีการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัด

2. H₂O₂ - based process

ส่วนใหญ่การบำบัดโดยใช้กระบวนการออกซิเดชันแบบประยุกต์ จะใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาเป็นไฮดรอกซิลแรดิคอลลดังนี้คือ H₂O₂/O₃ และ H₂O₂/UV กระบวนการที่มีการใช้แสงจะเกิดปฏิกิริยาโฟโตไลซิส กลไกส่วนใหญ่ของปฏิกิริยาโฟโตไลซิส ที่ทำให้เกิดเป็นโมเลกุลของไฮดรอกซิลแรดิคอลลที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 400 นาโนเมตรคือ

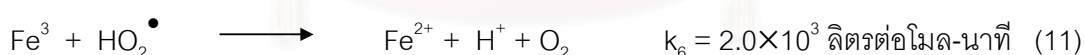
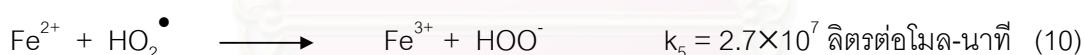
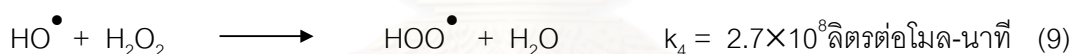
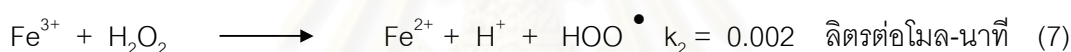
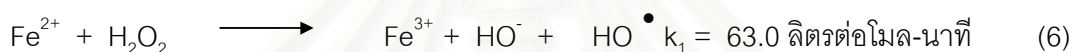


ในกระบวนการนี้เมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานที่มีไอโซนพบว่าเป็นวิธีที่ถูกลงกว่าและมีการเกิดแรดิคอลลอย่างแน่นอน ซึ่งแบ่งออกเป็นหลายประเภทดังนี้คือ

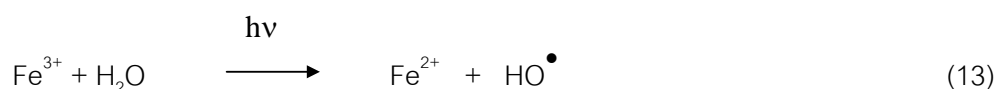
● ปฏิกิริยาเฟนตัน (Fenton) และปฏิกิริยาเฟนตันแบบใช้แสง (Photo-Fenton) ปฏิกิริยาเฟนตันนั้นได้ถูกค้นพบโดย Fenton H.J. ในปี 1894 สี่สิบปีต่อมา Haber-Weiss ได้เสนอกลไกที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของปฏิกิริยาเฟนตันที่ทำให้เกิดไฮดรอกซิลแรดิคัล ต่อมาก็มีการศึกษาอีกมากมายที่ได้อธิบายกลไกของเฟนตันซึ่งพบว่าปฏิกิริยาของเฟนตันเป็นดังนี้คือ



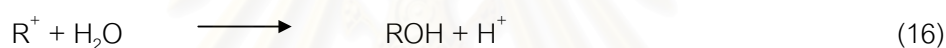
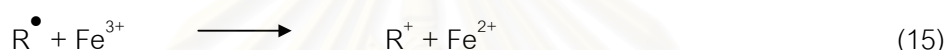
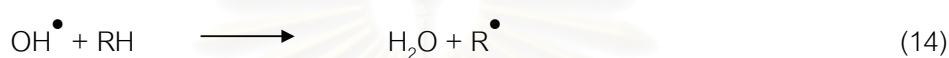
เมื่อ M คือ โลหะจำพวกเหล็กหรือทองแดง และปฏิกิริยานี้จะเกิดได้ดีในภาวะที่เป็นกรด การเกิดไฮดรอกซิลแรดิคัลเพื่อไปทำลายสารประกอบอินทรีย์ในน้ำเสียนั้น จะมีการทำให้เกิดสารประกอบพวกโลหะได้หลายทาง สำหรับเฟอร์ริสไฮออนมีปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ดังนี้



สำหรับอัตราการเกิดปฏิกิริยาของเฟนตันนั้นจะขึ้นกับการเพิ่มรังสีของแสงยูวี ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาหลังจากมีการเปลี่ยนของ Fe^{2+} นั้น Fe^{3+} จะถูกสะสมในระบบและปฏิกิริยาที่เกิดเป็นเฟอร์ริสไฮออนโดยโฟโตรีดักชันของเฟอร์ริกไฮออน แสดงได้ดังสมการ



ในปฏิกิริยาเฟนตันและโฟโตเฟนตันนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และปริมาณเฟอร์รัสหรือเฟอร์ริกไอออนที่เติมเข้าไปเพียงอย่างเดียวแต่ยังขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-เบส ที่ใช้ในกระบวนการด้วย ข้อดีของกระบวนการโฟโตเฟนตันคือ ไม่ก่อให้เกิดตะกอนภายหลังจากการบำบัดด้วยวิธีนี้ ปฏิกิริยาเฟนตันในการแตกตัวไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นไฮดรอกซิลแรดิคอลลนั้น จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนไฮดรอกซิลแรดิคอลลที่เกิดขึ้นสามารถทำให้ความเป็นพิษของน้ำเสียลดลงได้คือ อนุภาคดังกล่าวจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ในน้ำเสีย กลายเป็นสารประกอบประเภทออร์แกโนไฮดรอกซี ซึ่งมีความเป็นพิษลดลง ดังนี้



2.5 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k (ปารเมศ 2002)

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลใช้มากในการทดลองที่เกี่ยวกับปัจจัยหลายปัจจัยที่ต้องการศึกษาถึงผลรวมที่มีต่อผลตอบซึ่งเกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้น การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลชนิดพิเศษอีกหลายแบบที่มีความสำคัญ ซึ่งได้ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในงานวิจัยและใช้เป็นรากฐานการออกแบบชนิดอื่นๆ ที่มีความสำคัญมากในทางปฏิบัติ

กรณีพิเศษของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่มีความสำคัญมากที่สุดคือ กรณีที่มีปัจจัย k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือเวลา เป็นต้น หรืออาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพก็ได้ เช่น เครื่องจักร หรือ คนงาน เป็นต้น และใน 2 ระดับที่กล่าวถึงนี้จะแทนระดับ “สูง” หรือ “ต่ำ” ของปัจจัยหนึ่งๆ หรือการ “มี” หรือ “ไม่มี” ของปัจจัยนั้นๆ ก็ได้ ใน 1 เพลทเคตที่ปริบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2 \times 2 \times 2 \dots \times 2 = 2^k$ ข้อมูล และเรียกการออกแบบลักษณะนี้ว่า การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

การออกแบบ 2^k มีประโยชน์มากต่อการทดลองในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่ต้องการที่จะตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถจะทำได้

เพื่อศึกษาผลของปัจจัยทั้ง k ชนิดได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล เพื่อกรองปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้เหลือน้อยลง

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Liao และคณะ (2000) ศึกษาถึงการใช้กระบวนการโฟโตเพนตันเพื่อลดสีในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ ตัวอย่างน้ำเสียที่นำมาบำบัดเป็นน้ำเสียที่สังเคราะห์ขึ้นมาโดยใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และสีย้อม (R94H) พบว่าไฮดรอกซิลแรดิคอลลสามารถลดสีได้เป็นอย่างมากแต่ลดซีไอได้ดีได้ไม่มาก การลดลงของสีขึ้นอยู่กับปริมาณของไฮดรอกซิลแรดิคอลลที่มาทำปฏิกิริยาและความเป็นกรด-เบส ของน้ำเสีย โดยการลดลงของสีอยู่ในช่วง 3-5 ที่เวลา 30 นาทีของการศึกษา กระบวนการลดสีได้ร้อยละ 96 เนื่องจากปฏิกิริยาโฟโตรีดักชันของเพอร์ริคไออนอนไปเป็นเพอร์รัสไออนอน การที่สีเพิ่มกลับขึ้นมาเกิดขึ้นหลังจากเวลา 30 นาที นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มปริมาณเพอร์รัสไออนอนและความเข้มข้นแสงยูวีเป็นผลทำให้การลดลงของสีเพิ่มมากขึ้น

Perez และคณะ (2002) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ตัวแปรที่ศึกษาคือ แหล่งกำเนิดแสงที่ต่างกัน อุณหภูมิ ความเป็นกรด-เบส ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเพอร์รัสไออนอน ความเข้มข้นของเพอร์รัสไออนอนที่ใช้ในการทดลองคือ 0-400 ส่วนในล้านส่วน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0-10,000 ส่วนในล้านส่วน และอุณหภูมิ 25-70 องศาเซลเซียส การใช้ปฏิกิริยาเหมือนเพนตันและโฟโตเพนตันร่วมกันจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอได้เป็นอย่างดีและสามารถนำเทคนิคนี้ไปประยุกต์ใช้งานได้

Kos และ คณะ (2001) ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อการลดปริมาณสีในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมขนสัตว์และผ้าพอลิเอสเตอร์โดยใช้โอโซน หรือบำบัดโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับยูวี ที่ช่วงอุณหภูมิ 25-55 องศาเซลเซียส เมื่อนำมาวิเคราะห์ลักษณะทางเคมี ได้แก่ ความเป็นกรด-เบส ซีไอดี บีไอดี รวมถึงลักษณะเฉพาะของสี พบว่าวิธีการบำบัดทั้งสองวิธีจะมีประสิทธิภาพดีเมื่อนำไปทำการบำบัดที่อุณหภูมิสูง

Philippopoulos และคณะ (2003) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานน้ำมันหล่อลื่น โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และแสงยูวีที่ความยาวคลื่น 253.7 นาโนเมตร ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะชนิดหมุนเวียนที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งทำการศึกษาผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ค่าความเป็นกรด-เบส เริ่มต้น และการเติมเพอร์ริคไออนต่อการลดลงของ ซีไอดี และการย่อยสลายสารประกอบต่างๆ ในน้ำเสีย พบว่าสามารถลดค่าซีไอดีได้ร้อยละ 20-40 และสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เกือบทุกชนิดโดยย่อยสลายได้มากกว่าร้อยละ 50 ยกเว้นเอทิลีนไกลคอลซึ่งสลายได้เพียงร้อยละ 10-30

Barlas และ Akgun (2000) ศึกษาการกำจัดสีจากน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมโดยอาศัยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ซึ่งพบว่าปริมาณการดูดซับสีขึ้นอยู่กับขนาดของถ่านกัมมันต์ โครงสร้างของรูพรุนและลักษณะเฉพาะของรูพรุน นอกจากนี้ยังพบว่าโครงสร้างและคุณสมบัติของสีย้อมเป็นปัจจัยสำคัญในการถูกดูดซับ

Kobyra และคณะ (2003) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้า ตัวแปรที่ศึกษาคือ ผลของค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และเวลาที่ใช้ในการบำบัดต่อการลดลงของค่า ซีไอดี และค่าความขุ่น จากการทดลองพบว่าการเลือกใช้ขั้วไฟฟ้าขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-เบส โดยที่ช่วงภาวะกรดอ่อน (ความเป็นกรด-เบส < 6) ขั้วอะลูมิเนียมจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ดีกว่าขั้วเหล็ก ขณะที่ช่วงภาวะเป็นกลางขั้วเหล็กจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ดีกว่า และที่ระยะเวลาในการบำบัด 10 นาที พบว่าขั้วเหล็กจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ดีในช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 80-100 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ในขณะที่ขั้วอะลูมิเนียมนั้นต้องการความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 150 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

Sheng และ Ming (1997) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมโดยใช้กระบวนการเฟ้นต้นควบคู่กับวิธีแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้า พบว่าการบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการเฟ้นต้น สามารถลดสี ค่าความขุ่นและค่าซีไอดีได้ดีและสามารถลดค่าซีไอดี ปริมาณเพอร์ริสไฮออนที่เกิดจากกระบวนการเฟ้นต้น ค่าการนำไฟฟ้า และปริมาณสารแขวนลอยในน้ำเสียได้เพิ่มขึ้นเมื่อใช้ควบคู่กันทั้งสองกระบวนการด้วย

Ciardelli และคณะ (2001) ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคการตกตะกอนด้วยสารเคมีโดยใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตและเพอร์ริสซัลเฟตกับเทคนิคไอโซเนนชัน เปรียบเทียบประสิทธิภาพโดยศึกษาตัวแปรต่างๆดังนี้ ซีไอดี การดูดกลืนสีที่ความยาวคลื่น 436 525 และ 620 นาโนเมตร พบว่าสามารถลดสี ซีไอดี และความเป็นพิษได้ประมาณร้อยละ 50-60 60 และ 70-80 ตามลำดับเมื่อใช้เพอร์ริสซัลเฟต 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร และอะลูมิเนียมซัลเฟต 1500 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตามปริมาณที่สามารถลดความเป็นพิษได้ไม่เหมาะสมเนื่องจากเกิดตะกอนของเสีย (Chemical sludge) มาก ส่วนกระบวนการไอโซเนนชันนั้นมีประสิทธิภาพในการลดสีได้เป็นอย่างมาก คือ ลดได้ประมาณร้อยละ 98 ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที ขณะที่ลดค่าซีไอดีได้เพียงร้อยละ 37 ความเป็นพิษของน้ำเสียลดลงได้ 85% เมื่อใช้ไอโซเนนในการทำปฏิกิริยา 82.3 มิลลิกรัมต่อลิตร

Sahunuin และคณะ (2006) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้กระบวนการโฟโตเฟ้นต้นออกซิเดชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ตัวแปรที่ศึกษาคือ ค่าความเป็นกรด-

เบส ปริมาณเฟอร์รัสไอออน ปริมาณเฟอร์ริกไอออน กำลังไฟฟ้าของหลอดยูวี ที่มีผลต่อการลดลงของ สี และค่าซีไอดี พบว่าค่าความเป็นกรด-เบส และกำลังไฟฟ้าของหลอดยูวีที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำ เสียเท่ากับ 3 และ 60 วัตต์ ตามลำดับ โดยสามารถลดค่าซีไอดีและสีได้ ร้อยละ 50 และ 90 ตามลำดับ เฟอร์รัสไอออนมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียดีกว่าเฟอร์ริกไอออน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย

(บริษัท, ความบริสุทธิ์)

1. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)

(Univer, 30%)

2. เฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$)

(Univer, AR grade)

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์สี

1. โพแทสเซียมคลอโรแพลตทินेट (K_2PtCl)

(Carlo, AR grade)

2. โคบอลต์คลอไรด์ ($CoCl_2 \cdot 6H_2O$)

(Merck, AR grade)

3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ บีโอดี

1. สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 7 (Univer, AR grade)

2. แมกนีเซียมซัลเฟตไฮเดรต ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$)

(Univer, AR grade)

3. แมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2 \cdot 7H_2O$)

(Univer, AR grade)

4. เฟอริกคลอไรด์ ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$)

(Univer, AR grade)

5. แมงกานีสซัลเฟตโมโนไฮเดรต ($MnSO_4 \cdot H_2O$)

(Univer, AR grade)

6. โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$)

(Univer, AR grade)

7. โซเดียมไอโอดัด (NaI)

(Labchem, AR grade)

8. โซเดียมไนไตรต์ (NaN_2)

(Labchem, AR grade)

9. กรดซัลฟูริกเข้มข้น (conc. H_2SO_4)

(Fisher, 98%)

10. โซเดียมไทโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$)

(Univer, AR grade)

11. น้ำแป้ง

(Univer, AR grade)

3.1.4 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ ซีโอดี

1. กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (conc. HCl)

(Fisher, 37%)

2. โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$)

(Merck, AR grade)

3. ซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$)

(POCh. S.A., AR grade)

4. เฟอโรอินอินดิเคเตอร์

(Labchem, AR grade)

5. ไนออน(II) แอมโมเนียมซัลเฟต $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Unilab, AR grade)
6. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) (Univer, AR grade)

3.2 เครื่องมือ และ อุปกรณ์

3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. เครื่อง UV/Vis spectrophotometer รุ่น V-530 ยี่ห้อ JASCO
2. เครื่องวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-เบส รุ่น 420A ยี่ห้อ ORION
3. เครื่องควบคุมอุณหภูมิสำหรับบ่มบีโอดี รุ่น FOC 225I ยี่ห้อ VELP Scientifica
4. เครื่องให้ความร้อนแบบปิดสำหรับวิเคราะห์บีโอดี รุ่น EC 16 ยี่ห้อ VELP Scientifica

3.2.2 ชุดเครื่องมือประกอบการทดลอง

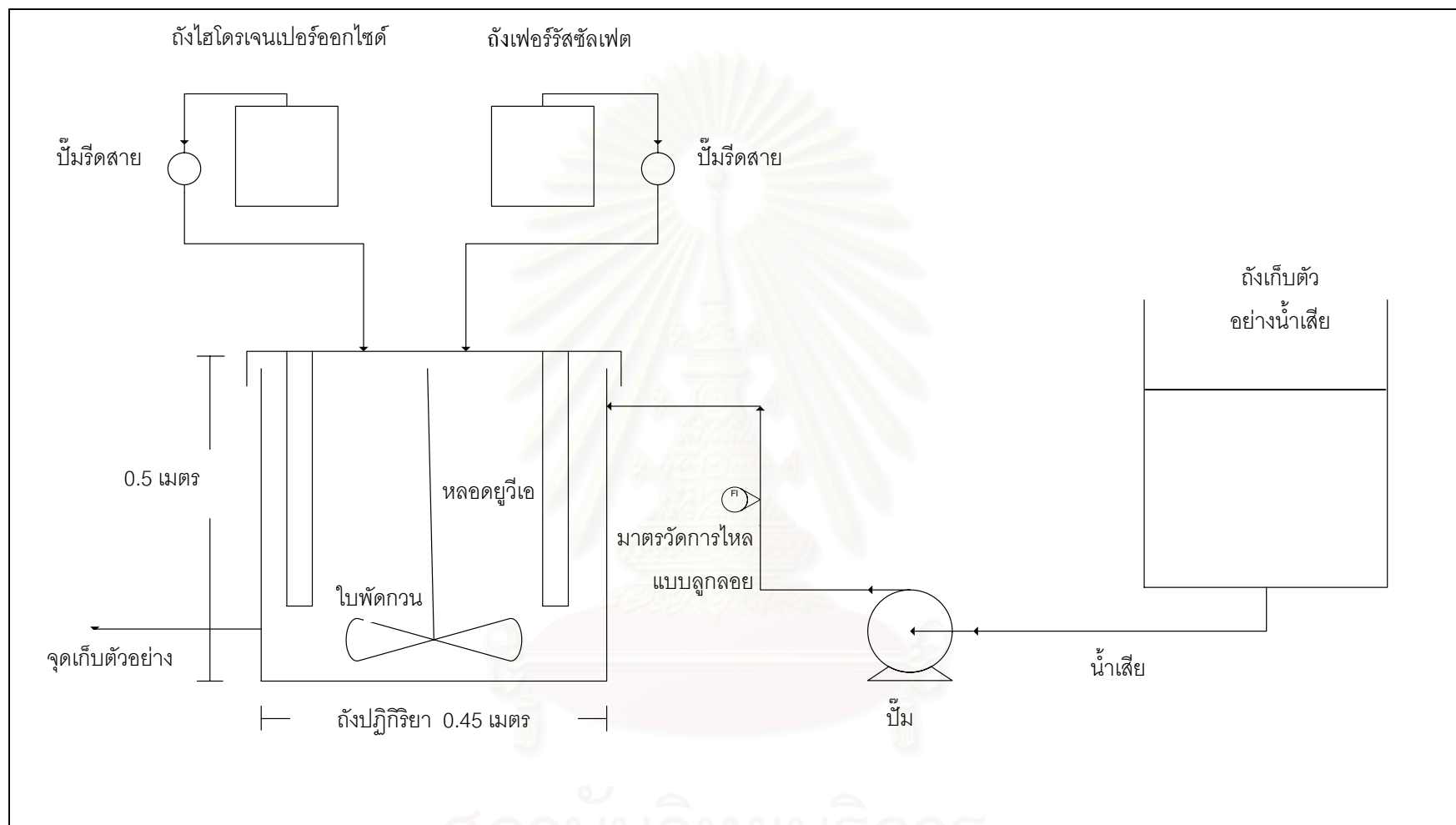
ชุดเครื่องมือที่ใช้ประกอบงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 3.1 ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

1. ถังปฏิกิริยา (Reaction tank) เป็นถังทรงกระบอก ทำจากสแตนเลส มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.40 เมตร สูง 0.50 เมตร มีลักษณะเป็นถังปิด (Close tank) บริเวณฝาถังมีการเจาะรูสำหรับใส่หลอดแก้วที่บรรจุหลอดยูวี
2. ไบกรวน ทำมาจากสแตนเลสสตีล 316 (SS 316)
3. หลอดยูวี (UV Lamp) เป็นหลอดยูวีเอ ยี่ห้อ PHL รุ่น TL15W/09CLEO ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.016 เมตร ยาว 0.29 เมตร กำลังไฟ 15 วัตต์ ความยาวคลื่น 365 nm
4. กระบอกแก้ว ใช้บรรจุหลอดยูวีเอในถังปฏิกิริยา ผลิตจากแก้ว Duran มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.05 เมตร ยาว 0.40 เมตร หนา 2 มิลลิเมตร
5. ถังเก็บน้ำเสีย (Storage tank) เป็นถังที่เก็บน้ำเสียก่อนที่จะถูกปั๊มเข้าสู่ถังเป็นถังพลาสติกขนาด 150 ลิตร
6. มาตรวัดอัตราการไหลแบบลูกกลอย (Rotameter) ใช้ในการควบคุมความเร็วของการปั๊มน้ำเสียเข้าสู่ถังสำหรับทำปฏิกิริยา โดยมาตรวัดอัตราการไหลที่ใช้มี 2 ขนาด คือ มาตรวัดอัตราการไหลขนาด 4-40 ลิตรต่อนาที ยี่ห้อ Dwyer รุ่น VFC-152 และมาตรวัดอัตราการไหลขนาด 0.2-1.2 ลิตรต่อนาที ยี่ห้อ Dwyer รุ่น RMB-83D-SSV
7. โรตารีปั๊ม (Rotary pump) ยี่ห้อ PANWORLD รุ่น NH-50PX ใช้สำหรับสูบน้ำเสียจากถังเก็บน้ำเสียเข้าสู่ถังสำหรับทำปฏิกิริยา สามารถจะสูบน้ำออกทางจ่ายได้สูง 3.5 เมตร

8. ปั๊มรีดสาย (Peristaltic pump) ยี่ห้อ COLE-PARMER รุ่น U-07554-95 ใช้สำหรับ
ปั๊มไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเฟอร์ริสไอออน เพื่อควบคุมอัตราการไหลของสารให้คงที่ตลอด
การทดลอง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 แผนผังของชุดเครื่องมือการทดลองที่ใช้ในงานวิจัย

3.3 วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 การวิเคราะห์สมบัติน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ

เก็บตัวอย่างน้ำเสียจากบ่อกักน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมก่อนเข้าระบบบำบัด โดยนำมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิประมาณ 4 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ก่อนนำมาใช้ในการทดลองต้องนำออกมาตั้งทิ้งไว้ให้มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง และเขย่าให้เป็นเนื้อเดียวกันก่อน และทำการกรองน้ำเสียก่อนทำการวิเคราะห์ด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 จากนั้นทำการวิเคราะห์สมบัติน้ำเสียก่อนทำการทดลอง ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-เบส สี ค่าความขุ่น ค่าซีไอดี ค่าบีไอดี ค่าของแข็งละลายน้ำ ค่าของแข็งแขวนลอย และค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity)

ตอนที่ 2 ผลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อการทดลอง

โดยตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ อัตราการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อัตราการป้อนเพอร์ริสซัลเฟต และความเข้มข้นของแสงยูวี ที่มีผลต่อการลดลงของสารมลพิษ

1. สูบน้ำเสียจากบ่อกักมาเก็บที่ถังเก็บน้ำเสียแล้วกวนเพื่อให้เกิดการผสมเป็นเนื้อเดียวกัน
2. ป้อนน้ำเสียที่ผ่านการกวนแล้วเข้าสู่ถังที่ทำปฏิกิริยาด้วยอัตรา 4 ลิตรต่อนาที โดยปริมาณน้ำเสียที่สะสมอยู่ในถังปฏิกรณ์ประมาณ 35 ลิตร
3. เริ่มทำการทดลองภาวะที่ 1 ตามการออกแบบการทดลองแบบ 2^k factorial ดังตารางที่ 3.1 กวนด้วยอัตราเร็วคงที่ พร้อมทั้งเริ่มจับเวลา และเก็บตัวอย่างเริ่มต้นเพื่อทำการวิเคราะห์
4. ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดปริมาตร 120 มิลลิลิตรในช่วงเวลา 5 10 20 และ 30 นาที
5. ทำการวิเคราะห์ ค่าซีไอดี ค่าบีไอดี สี และค่าของแข็งละลายน้ำ ของตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด
6. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-4 โดยเปลี่ยนค่าการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพอร์ริสซัลเฟต และความเข้มข้นของแสงยูวีเอ ตามภาวะการทดลองตามแบบ 2^k factorial
7. นำเสนอข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ตามแบบ 2^k factorial เพื่อหาค่าของตัวแปรที่มีผลต่อการทดลองและแนวโน้มในการทดลอง
8. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลองเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการทดลอง

ตารางที่ 3.1 ภาวะการทดลองตามการออกแบบการทดลองแบบ 2^k factorial

ภาวะ	ตัวแปร		
	อัตราการไหลของ H_2O_2 8.82 M (มิลลิลิตรต่อนาที)	อัตราการไหลของ $FeSO_4$ 0.1M (มิลลิลิตรต่อนาที)	ความเข้มของ แสงยูวี (วัตต์)
1	25	5	60
2	25	5	0
3	25	0	60
4	25	0	0
5	5	5	60
6	5	5	0
7	5	0	60
8	5	0	0

ตอนที่ 3 ผลของกำลังไฟของแสงยูวีเอ

1. ทำการบ่อน้ำเสียจากบ่อพักมาเก็บที่ถังเก็บน้ำเสียแล้วกวนเพื่อให้เกิดการผสมเป็นเนื้อเดียวกัน
2. บ่อน้ำเสียที่ผ่านการกวนแล้วเข้าสู่ถังที่ทำปฏิกิริยาด้วยอัตรา 1 ลิตรต่อนาที
3. ทำการทดลองตามภาวะที่ดีที่สุดของการทดลองตอนที่ 2 คือ บ่อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยอัตรา 25 มิลลิลิตรต่อนาที บ่อนเฟอร์รัสซัลเฟตด้วยอัตรา 5 มิลลิลิตรต่อนาที และให้แสงจากหลอดยูวีกำลังไฟฟ้า 60 วัตต์ และกวนด้วยอัตราเร็วคงที่ พร้อมทั้งเริ่มจับเวลา และเก็บตัวอย่างเริ่มต้นเพื่อทำการวิเคราะห์
4. ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดปริมาณ 120 มิลลิลิตรในช่วงเวลาเริ่มต้น 5 10 20 30 นาที ตามลำดับ
5. ทำการวิเคราะห์ ค่าซีไอดี ค่าบีไอดี สี และค่าของแข็งละลายน้ำ ของตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด
6. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-4 แต่เปลี่ยนกำลังไฟฟ้าของหลอด UV ให้อยู่ที่ 75 90 105 และ 120 วัตต์ ตามลำดับ
7. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลองเพื่อหากำลังไฟของแสงยูวี ที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา

ตอนที่ 4 ผลของค่าความเป็นกรด-เบส

1. ทำการป้อนน้ำเสียจากบ่อพักมาเก็บที่ถังเก็บน้ำเสียแล้วกวนเพื่อให้เกิดการผสมเป็นเนื้อเดียวกัน
2. ป้อนน้ำเสียที่ผ่านการกวนแล้วเข้าสู่ถังที่ทำปฏิกิริยาด้วยอัตรา 1 ลิตรต่อนาที
3. ทำการทดลองตามภาวะที่ดีที่สุดของการทดลองตอนที่ 2 และ 3 คือ ป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยอัตรา 25 มิลลิลิตรต่อนาที ป้อนเฟอร์รัสซัลเฟตด้วยอัตรา 5 มิลลิลิตรต่อนาที และให้แสงจากหลอดยูวีกำลังไฟฟ้า 90 วัตต์ พร้อมทั้งปรับค่าความเป็นกรด-เบสให้เท่ากับ 5 และกวนด้วยอัตราเร็วคงที่ พร้อมทั้งเริ่มจับเวลา และเก็บตัวอย่างเริ่มต้นเพื่อทำการวิเคราะห์
4. ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดปริมาณ 120 มิลลิลิตรในช่วงเวลาเริ่มต้น 5 10 20 30 นาที ตามลำดับ
5. ทำการวิเคราะห์ค่าซีไอดี ค่าบีไอดี ซี และค่าของแข็งละลายน้ำ ของตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด
6. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-4 แต่เปลี่ยนค่าความเป็นกรด-เบสให้เท่ากับ 7 และ 9 ตามลำดับ
7. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง เพื่อหาค่าความเป็นกรด-เบส ที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา

ตอนที่ 5 ผลของอัตราการป้อนเฟอร์รัสซัลเฟต

1. สูบน้ำเสียจากบ่อพักมาเก็บที่ถังเก็บน้ำเสียแล้วกวนเพื่อให้เกิดการผสมเป็นเนื้อเดียวกัน
2. ป้อนน้ำเสียที่ผ่านการกวนแล้วเข้าสู่ถังที่ทำปฏิกิริยาด้วยอัตรา 1 ลิตรต่อนาที
3. ทำการทดลองตามภาวะที่ดีที่สุดของการทดลองตอนที่ 2 3 และ 4 คือ ป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยอัตรา 25 มิลลิลิตรต่อนาที ป้อนเฟอร์รัสซัลเฟตด้วยอัตรา 3 มิลลิลิตรต่อนาที และให้แสงจากหลอดยูวีกำลังไฟฟ้า 90 วัตต์ พร้อมทั้งปรับค่าความเป็นกรด-เบสให้เท่ากับ 5 และกวนด้วยอัตราเร็วคงที่ พร้อมทั้งเริ่มจับเวลา และเก็บตัวอย่างเริ่มต้นเพื่อทำการวิเคราะห์
4. ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดปริมาณ 120 มิลลิลิตรในช่วงเวลาเริ่มต้น 5 10 20 30 นาที ตามลำดับ
5. ทำการวิเคราะห์ ค่าซีไอดี ค่าบีไอดี ซี และค่าของแข็งละลายน้ำ ของตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด

6. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-4 แต่เปลี่ยนอัตราการป้อนเฟอร์ริสซัลเฟตเป็น 5 7 และ 9 มิลลิลิตรต่อนาที
7. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลองเพื่อหาอัตราการป้อนเฟอร์ริสซัลเฟต ที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา

ตอนที่ 6 ผลของอัตราการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

1. สูบน้ำเสียจากบ่อพักมาเก็บที่ถังเก็บน้ำเสียแล้วกวนเพื่อให้เกิดการผสมเป็นเนื้อเดียวกัน
2. ป้อนน้ำเสียที่ผ่านการกวนแล้วเข้าสู่ถังที่ทำปฏิกิริยาด้วยอัตรา 1 ลิตรต่อนาที
3. ทำการทดลองตามภาวะที่ดีที่สุดของการทดลองตอนที่ 2 3 4 และ 5 คือ ป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 20 มิลลิลิตรต่อนาที ป้อนเฟอร์ริสซัลเฟตด้วยอัตรา 5 มิลลิลิตรต่อนาที และให้แสงจากหลอดยูวีกำลังไฟฟ้า 90 วัตต์ พร้อมทั้งปรับค่าความเป็นกรด-เบสให้เท่ากับ 5 และกวนด้วยอัตราเร็วคงที่ พร้อมทั้งเริ่มจับเวลา และเก็บตัวอย่างเริ่มต้นเพื่อทำการวิเคราะห์
4. ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดปริมาณ 120 มิลลิลิตรในช่วงเวลาเริ่มต้น 5 10 20 30 นาที ตามลำดับ
5. ทำการวิเคราะห์ ค่าซีไอดี ค่าบีไอดี ค่าสี และค่าของแข็งละลายน้ำ ของตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด
6. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-4 แต่เปลี่ยนอัตราการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 25 30 และ 35 มิลลิลิตรต่อนาที
7. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลองเพื่อหาอัตราการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 สมบัติน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ

อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้น้ำในปริมาณมากถึงวันละ 200-2,000 ลูกบาศก์เมตร หรือคิดเป็นประมาณ 21-377 ลูกบาศก์เมตรต่อตันผลิตภัณฑ์ ปริมาณการใช้น้ำมากหรือน้อยของแต่ละแห่งจะขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต เทคโนโลยีและเครื่องจักรที่ใช้ รวมถึงนโยบายการประหยัดน้ำของแต่ละโรงงานด้วย จากการใช้ปริมาณมากในกระบวนการทำให้น้ำทิ้งที่ออกจากกระบวนการมีปริมาณมากด้วยเช่นกัน โดยน้ำเหล่านี้จะมีการปนเปื้อนของสี เกล็ด และสารเคมีต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิตส่งผลให้น้ำทิ้งเหล่านี้มีค่าสมบัติสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานและไม่สามารถปล่อยทิ้งลงสู่สิ่งแวดล้อมได้

ตารางที่ 4.1 สมบัติของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอก่อนการบำบัด

สมบัติ	ค่า	ค่ามาตรฐาน*
ค่าความเป็นกรด-เบส	7.21-8.03	5.5-9.0
ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand, BOD, mg/l)	840-2,250	≤ 60
ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD, mg/l)	7,200-28,800	≤ 400
ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total Dissolved Solid, TDS, mg/l)	2,656-5,160	≤ 3,000
ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity, $\mu\text{s/cm}$)	3,564-4,720	ไม่ได้ระบุ
สี (Color, Pt-Co unit)	1,465-2,452	ไม่เป็นที่น่ารังเกียจ
ความขุ่น (Turbidity, NTU)	105-164	ไม่ได้ระบุ
สารประกอบอื่นๆ (Na_2CO_3 , Cr, Fe, ฟอर्मาลดีไฮด์, NaOH, etc.)		

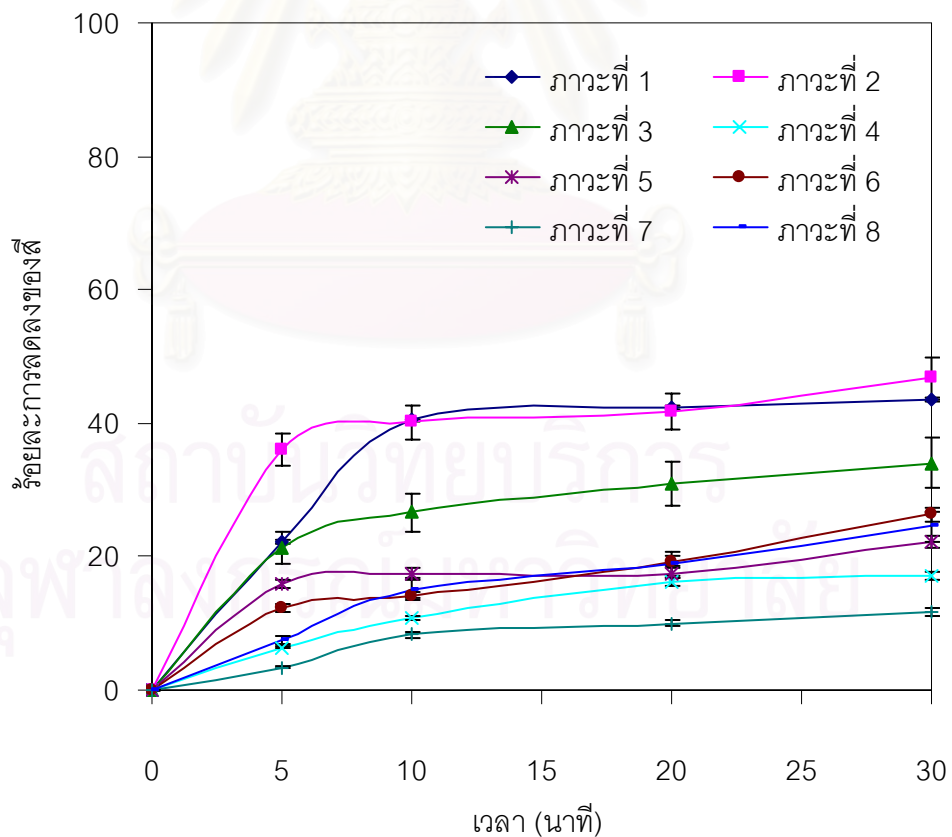
* ที่มา ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ. ศ. 2539) ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13 ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539

ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ พบว่ามีเพียงค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำเสียเท่านั้นที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคือมีค่าอยู่ระหว่าง 5.5-9.0 ส่วนสมบัติอื่นๆ เช่น ค่าบีโอดี ค่าซีโอดี ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดจะมีค่าสูงกว่ามาตรฐานทั้งสิ้น นอกจากนี้ยัง

พบว่าน้ำเสียจากอุตสาหกรรมดังกล่าวมีสีขุ่นเข้มถึงดำเป็นที่น่ารังเกียจ และมีกลิ่นของสารเคมีปะปนอยู่ในน้ำเสีย จากการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงว่าน้ำเสียที่ออกจากอุตสาหกรรมสิ่งทอจะต้องนำเข้าไปผ่านกระบวนการบำบัดก่อนจึงจะปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อมได้

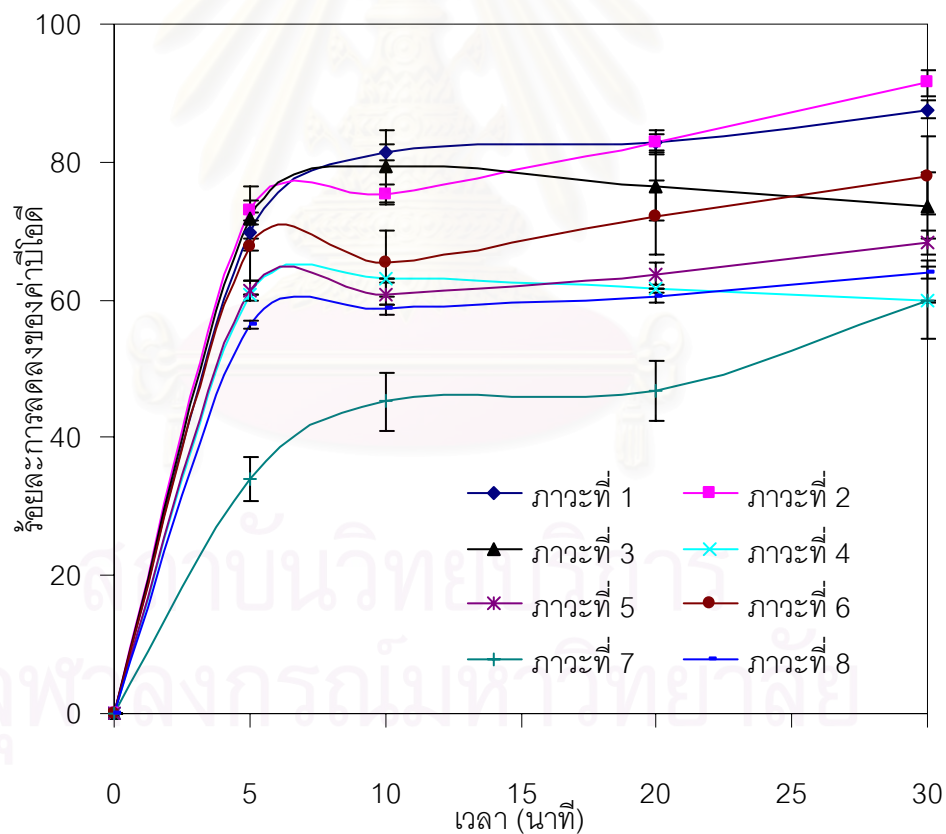
4.2 การออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟกทอเรียล

ประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตเฟนตันออกซิเดชันจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ ความเข้มแสง และความเป็นกรด-เบสของสารละลาย ในงานวิจัยนี้จะศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการดังกล่าวในเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง ที่อุณหภูมิบรรยากาศ (Ambient temperature) โดยจะออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟกทอเรียล ตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 เพื่อศึกษามลของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ อัตราการไหลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (A) ในช่วง 5-25 มิลลิลิตรต่อนาทีหรือคิดเป็น 0.045-0.220 โมลต่อนาที อัตราการไหลของเฟอร์รัสไอออน (B) ในช่วง 0-5 มิลลิลิตรต่อนาทีหรือคิดเป็น 0-0.0005 โมลต่อนาที และกำลังไฟฟ้าของแสงยูวี (C) ในช่วงกำลังไฟฟ้า 0-60 วัตต์ (ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร) ต่อร้อยละการลดลงของสี ค่าบีโอดี และค่าซีโอดี



รูปที่ 4.1 ร้อยละการลดลงของสีที่ภาวะต่างๆ

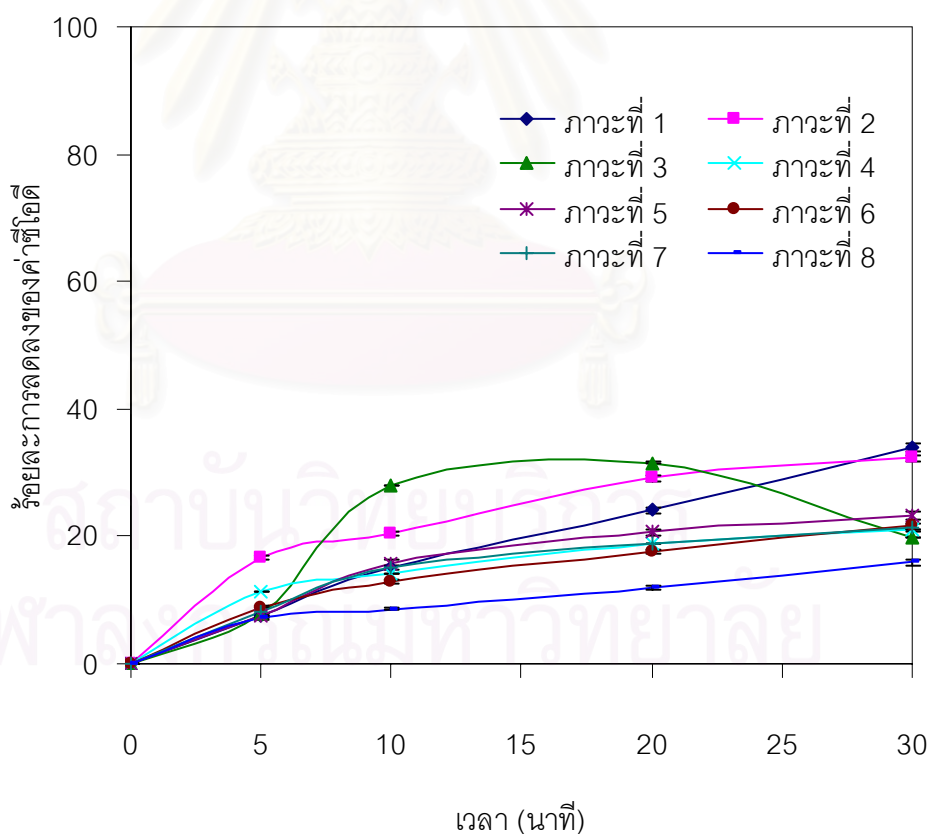
รูปที่ 4.1 แสดงร้อยละการลดลงของสีที่ภาวะการทำงานต่างๆ ตั้งแต่เริ่มทำงาน (Start up) จนถึงเวลา 30 นาที ที่เวลาคงอยู่ของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ (Retention time) คงที่ที่ 8.75 นาที ความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 7.0 พบว่าค่าร้อยละการลดลงของสีจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 5 นาทีเมื่อเริ่มทำงาน และเมื่อเวลาผ่านไปมากกว่า 10 นาที พบว่าร้อยละการลดลงของสีมีแนวโน้มคงที่ โดยที่ภาวะที่ 1 (อัตราการไหลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เท่ากับ 25 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของเฟอร์รัสไอออน เท่ากับ 5 มิลลิลิตรต่อนาที และกำลังไฟฟ้าของหลอดยูวี เท่ากับ 60 วัตต์) และภาวะที่ 2 (อัตราการไหลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เท่ากับ 25 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของเฟอร์รัสไอออน เท่ากับ 5 มิลลิลิตรต่อนาที และกำลังไฟฟ้าของหลอดยูวี เท่ากับ 0 วัตต์) จะเป็นภาวะที่ทำให้ร้อยละการลดลงของสีมีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับภาวะอื่น โดยการลดลงของสีที่ภาวะ 1 จะเกิดขึ้นได้มากกว่าที่ภาวะที่ 2 ในช่วง 5 นาทีแรก จากนั้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นร้อยละการลดลงของสีที่ทั้งสองภาวะจะมีค่าไม่แตกต่างกันคือสามารถลดสีได้ประมาณร้อยละ 40



รูปที่ 4.2 ร้อยละการลดลงของค่าบีโอดีที่ภาวะต่างๆ

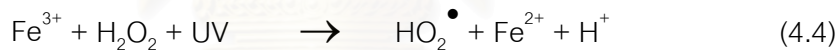
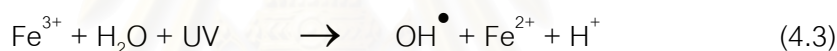
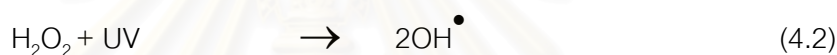
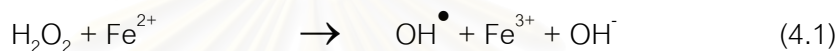
รูปที่ 4.2 แสดงร้อยละการลดลงของค่าบีโอดีที่ภาวะต่างๆ พบว่าการลดลงของค่าบีโอดีจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 5-10 นาทีแรก ซึ่งร้อยละการลดลงจะมีค่าระหว่าง 57-81 โดยภาวะที่ 1, 2 และ 3 จะให้ค่าร้อยละการลดลงของค่าบีโอดีใกล้เคียงกันและสูงกว่าที่ภาวะอื่น เมื่อเวลาการทำงานเพิ่มมากขึ้น ร้อยละการลดลงของค่าบีโอดีมีแนวโน้มคงที่เช่นเดียวกับสี่คือมีค่าคงที่ที่เวลามากกว่า 10 นาที ส่วนรูปที่ 4.3 แสดงร้อยละการลดลงของค่าซีโอดีที่ภาวะเดียวกับรูปที่ผ่านมา พบว่าร้อยละการลดลงของค่าซีโอดีจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ในช่วง 10 นาทีแรกหลังการเริ่มการทำงาน คือมีการลดลงประมาณร้อยละ 10-21 จากนั้นร้อยละการลดลงจะมีแนวโน้มคงที่เมื่อเวลาในการทำงานเพิ่มขึ้น

จากการทดลองพบว่าเมื่อทำการทดลองที่ภาวะต่างกันจะให้ร้อยละการลดลงของค่าบีโอดี และค่าซีโอดีที่แตกต่างกัน ทั้งนี้อัตราการลดลงของค่าต่างๆ จะขึ้นอยู่กับปริมาณ OH^\bullet (Hydroxyl radical) ที่ถูกผลิตขึ้นในระบบ ถ้าในระบบมีเพียงไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเฟอร์รัสไอออน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงได้ดังปฏิกิริยาที่ (4.1) ปฏิกิริยานี้เรียกว่าปฏิกิริยาเฟนตัน (Fenton reaction) สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในภาวะที่มีและไม่มีแสง

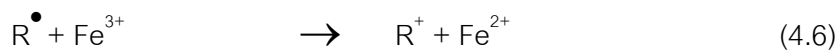
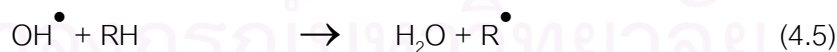


รูปที่ 4.3 ร้อยละการลดลงของค่าซีโอดีที่ภาวะต่างๆ

อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเฟอร์รัสไอออน ถ้าในระบบมีแสงยูวีจะมีการผลิต OH^\bullet ตามปฏิกิริยา (4.2)-(4.4) โดยปฏิกิริยาที่ (4.2) เรียกว่าปฏิกิริยาการแยกสลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยแสง (Photolysis of hydrogen peroxide) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่จะเกิดได้ดีที่สภาพกรด ปฏิกิริยาที่ (4.3) เรียกว่าปฏิกิริยารีดักชันของเฟอร์ริกไอออนด้วยแสง (Photoreduction of ferric ion) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ในทุกสภาพความเป็นกรด-เบส ส่วนปฏิกิริยาที่ (4.4) เป็นปฏิกิริยาที่มีการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมี Fe^{3+} เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และเมื่อในระบบมีแสงยูวีหรือความร้อนจะทำให้เกิดเฟอร์รัสไอออน และ HO_2^\bullet (Perhydroxyl radical) โดยปฏิกิริยาที่ (4.1) จะมีค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยามากกว่าปฏิกิริยาที่ (4.4) ประมาณ 2,650 เท่า (Kim และคณะ 1999)



อนุภาค OH^\bullet ที่ผลิตขึ้นจะมีคุณสมบัติเป็นสารออกซิไดส์ที่รุนแรง (Strong oxidizing agent) สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ (RH) ที่มีอยู่ในน้ำเสียได้ดังแสดงในปฏิกิริยาที่ (4.5)-(4.7) โดยสารอินทรีย์ที่เหลือในกระบวนการจะมีความเป็นพิษน้อยกว่าสารอินทรีย์เริ่มต้นในกระบวนการ



นอกจากนี้เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการยังสามารถทำปฏิกิริยากับ OH^- ที่มีในระบบ ได้ผลผลิตหลักที่เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของเฟอริกไฮดรอกไซด์ (Ferric hydroxo complex) ตามปฏิกิริยาที่ (4.8)-(4.9) และที่ความเป็นกรด-เบสประมาณ 3-7 สารประกอบเชิงซ้อนดังกล่าวจะเปลี่ยนรูปไปเป็น $[\text{Fe}_2(\text{H}_2\text{O})_7(\text{OH})_4]^{5+}$ ซึ่งมีสมบัติเป็นสารก่อการจับตะกอน (Coagulant) สารก่อการจับตะกอนเหล่านี้จะไปจับตัวกับโมเลกุลของสี และสารอินทรีย์ทำให้เกิดการตกตะกอนแยกตัวจากน้ำเสียได้ (Sheng และคณะ 1997) แสดงว่าการลดลงของสารอินทรีย์ในน้ำเสียจะเกิดขึ้นเนื่องจากสองกระบวนการร่วมกันคือการออกซิเดชันด้วย OH^\bullet และการตกตะกอน ทำให้ความเข้มของสี ค่าบีโอดีและค่าซีโอดีในน้ำเสียลดต่ำลง



จากผลการทดลองที่ผ่านมาพบว่าร้อยละการลดของสี ค่าบีโอดี และค่าซีโอดีด้วยกระบวนการโฟโตเพนตันออกซิเดชันเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วมาก และมีแนวโน้มเข้าสู่ภาวะคงตัว (Steady state) ที่เวลามากกว่า 10 นาที ดังนั้นการศึกษาผลของอัตราการไหลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อัตราการไหลของเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ และกำลังไฟฟ้าของแสงยูวี ต่อร้อยละการลดลงของสี ค่าบีโอดี และค่าซีโอดีจะทำการศึกษาที่เวลา 20 นาที

4.2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการลดลงของสี

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) ของตัวแปรต่างๆ มักจะพิจารณาจากค่า F_0 เป็นหลัก ถ้าค่า F_0 ของตัวแปรใดมีค่ามากกว่าค่าวิกฤติ F_{α, v_1, v_2} (เมื่อ α คือระดับความเชื่อมั่นที่พิจารณา v_1 คือระดับขั้นความเสรี (Degree of freedom) ของตัวแปร และ v_2 คือระดับขั้นความเสรีของความคลาดเคลื่อน) แสดงว่าตัวแปรนั้นทำให้ผลตอบสนองเบี่ยงเบนจากสมมติฐานที่กำหนดไว้ในการศึกษาทดลอง จึงกล่าวได้ว่าตัวแปรนั้นมีผลกระทบต่อผลการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ หรืออีกนัยหนึ่งอาจพิจารณาตัวแปรที่มีผลต่อผลตอบสนองในการทดลองได้จากค่า P-value กล่าวคือถ้าค่า P-value ของตัวแปรใดมีค่าต่ำกว่าค่า α แสดงว่าตัวแปรนั้นมีผลต่อผลตอบสนองในการทดลอง ในการทดลองนี้จะวิเคราะห์ความแปรปรวนของการลดลงของสีจะพิจารณาที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95% หรือระดับความสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 ซึ่งมีค่าวิกฤติ $F_{0.05, 1, 8}$ เท่ากับ 5.59 (Montgomery, 1997) ตารางที่ 4.2 แสดงร้อยละการลดลงของสีที่ภาวะต่างๆ เมื่อเวลาผ่านไป 20 นาที

ตารางที่ 4.2 แสดงร้อยละการลดลงของสีที่ภาวะต่างๆ ที่เวลา 20 นาที

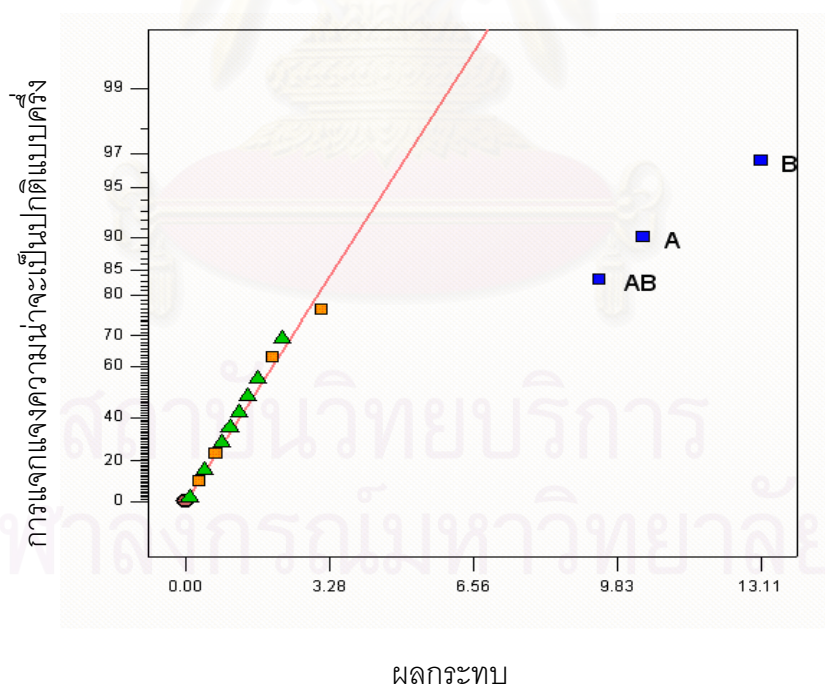
ภาวะที่	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (ml/min)	เฟอร์ริสไอออน (ml/min)	กำลังไฟฟ้าแสงยูวี (watt)	ร้อยละการลดลงของสี	
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1	25	5	60	42.5	43.4
2	25	5	0	37.5	46.7
3	25	0	60	18.7	34.0
4	25	0	0	22.3	17.2
5	5	5	60	15.9	22.2
6	5	5	0	32.1	26.3
7	5	0	60	18.5	11.7
8	5	0	0	11.5	24.5
9	15	2.5	30	26.1	25.8

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการลดลงของสีโดยทำการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล พบว่าค่า P-value ของตัวแปร A B และ AB ซึ่งได้แก่อัตราการไหลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อัตราการไหลของเฟอร์ริสไอออน และอันตรกิริยาของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับเฟอร์ริสไอออนจะมีผลต่อร้อยละการลดลงสีอย่างมีนัยสำคัญ คือค่า P-value ของตัวแปรดังกล่าวมีค่าน้อยกว่า 0.05 และค่า P-value ของ Pure quadratic มีค่ามากกว่าค่า 0.05 แสดงว่าค่าตรงกลางไม่มีผลต่อร้อยละการลดลงของสีอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการแจกแจงความน่าจะเป็นปกติแบบครึ่ง (Half normal probability plot) และผลกระทบบ ดังรูปที่ 4.4 พบว่าให้ผลสอดคล้องกับตารางที่ 4.3 คือตัวแปรที่มีต่อการลดลงของสีอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เฟอร์ริสไอออน และอันตรกิริยาของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับเฟอร์ริสไอออน

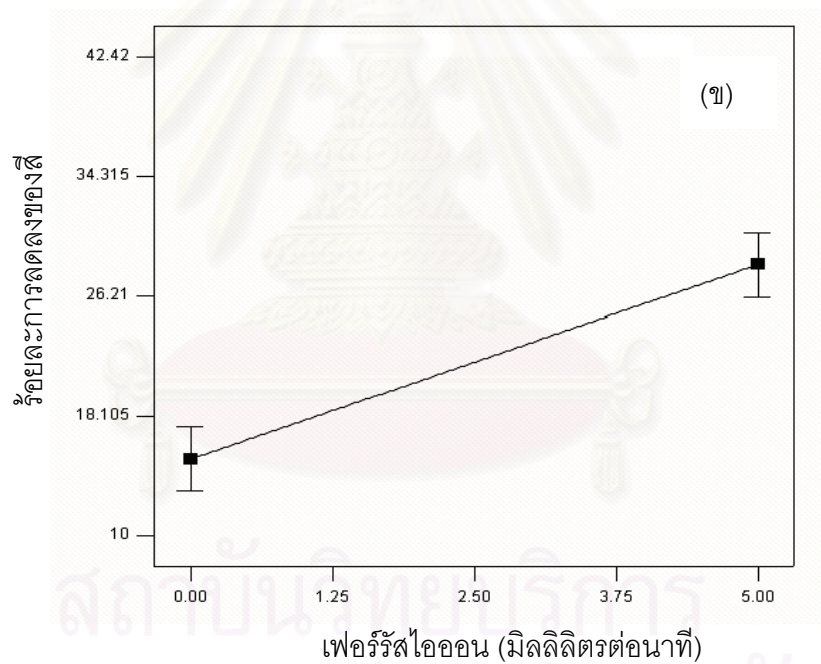
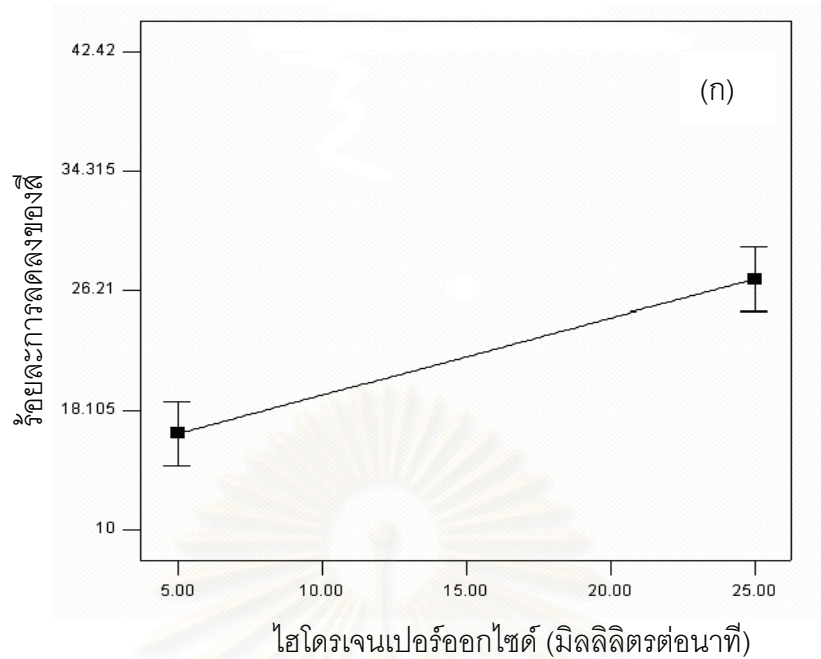
รูปที่ 4.5 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (ก) และเฟอร์ริสไอออน (ข) ต่อร้อยละการลดลงของสี พบว่าการเพิ่มอัตราการไหลของทั้งไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเฟอร์ริสไอออนจะทำให้ร้อยละการลดลงของสีมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันคือ ร้อยละการลดลงของสีจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของสารเคมีทั้งสองเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากว่าเมื่ออัตราการไหลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเฟอร์ริสไอออนเข้าสู่ระบบมากขึ้น จะทำให้อัตราการผลิต OH^\bullet ในระบบตามปฏิกิริยาที่ (4.1) สูงขึ้นส่งผลให้เกิดการลดลงของสีมากขึ้นเช่นกัน

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละการลดลงของสี

Source of Variance	Degree of freedom	ร้อยละการลดสี			
		Sum square	Mean square	F ₀	P-value
A	1	434.9832	434.9832	40.6221	0.000377
B	1	687.4229	687.4229	64.1969	0.000090
AB	1	355.4017	355.4017	33.1902	0.000691
C	1	1.9120	1.9120	0.1786	0.685293
AC	1	38.4847	38.4847	3.5940	0.099823
BC	1	0.3861	0.3861	0.0361	0.854780
ABC	1	15.8384	15.8384	1.4791	0.263328
Pure quadratic	1	46.4950	46.4950	4.3421	0.095664
Error	8	96.372	10.70803		
Total	16	1677.2962			

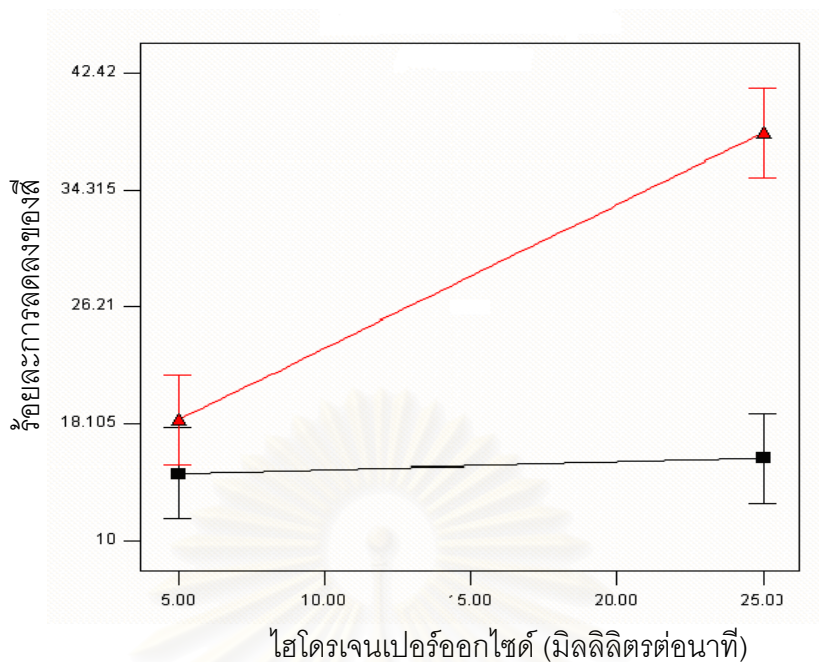


รูปที่ 4.4 การแจกแจงความน่าจะเป็นปกติแบบครึ่งกับปัจจัยที่มีผล



รูปที่ 4.5 ร้อยละการลดลงของสีที่อัตราการไหลสูงสุดและต่ำสุดของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (ก) และเฟอร์ริสไอออน (ข)

รูปที่ 4.6 แสดงผลของอันตรกิริยาของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับเฟอร์ริสไอออนสูงสุดและต่ำสุด พบว่าที่ค่าสูงสุดของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับเฟอร์ริสไอออนจะให้ร้อยละการลดลงของสีมากกว่าที่ค่าต่ำ



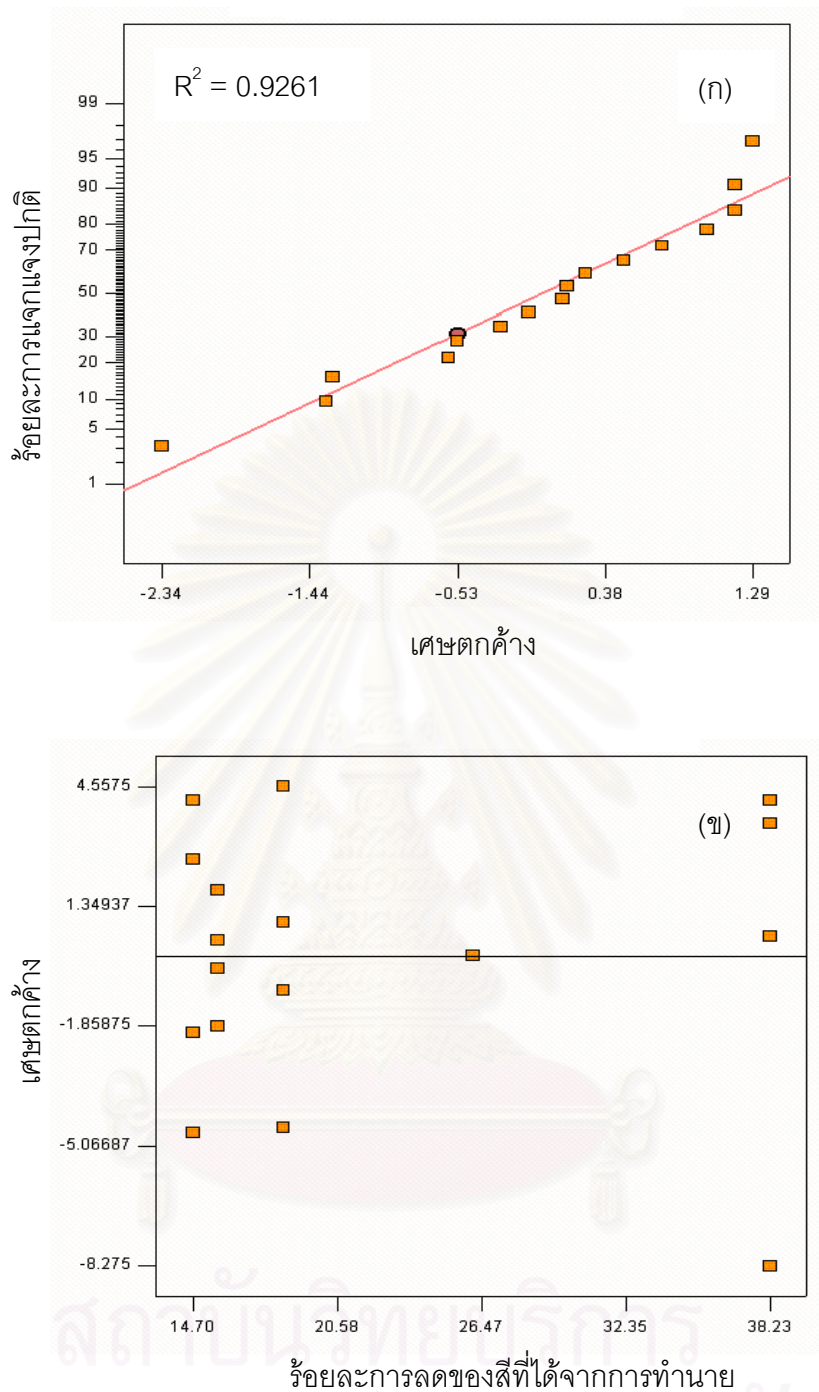
รูปที่ 4.6 ร้อยละการลดลงของสีที่อัตราการไหลของเฟอร์ริสไอออนสูงสุด (Δ) และต่ำสุด (□)

รูปที่ 4.7(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแจกแจงปกติและค่าเศษตกค้างของสี พบว่าค่า R^2 ของความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแจกแจงแบบปกติและค่าเศษตกค้างมีค่าประมาณ 0.9261 แสดงว่าค่าของเศษตกค้างจากสมการมีการกระจายตัวแบบปกติ ซึ่งตามสมมติฐานของการแจกแจงแบบปกติแล้วพฤติกรรมดังกล่าวจะแสดงค่าเฉลี่ยของเศษตกค้างมีค่าเท่ากับศูนย์ รูปที่ 4.7(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเศษตกค้างและร้อยละการลดของสีที่ได้จากการทำนายโดยสมการ (4.10) พบว่าการกระจายตัวของเศษตกค้างมีค่าคงที่และไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ในสมการที่ (4.10) สามารถใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลได้อย่างเหมาะสม

เมื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Regression model) เพื่อทำนายร้อยละการลดลงของสี จะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.10) พบว่าการเพิ่มอัตราการไหลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเฟอร์ริสไอออนจะส่งผลให้ร้อยละการลดลงของสีเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.5 โดยการเพิ่มอัตราการไหลของเฟอร์ริสไอออนจะส่งผลต่อร้อยละการลดลงของสีมากกว่าการเพิ่มอัตราการไหลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ประมาณ 1.26 เท่า

$$\text{ร้อยละการลดลงของสี} = 21.75 + 5.21X_A + 6.55X_B + 4.71X_A X_B \quad (4.10)$$

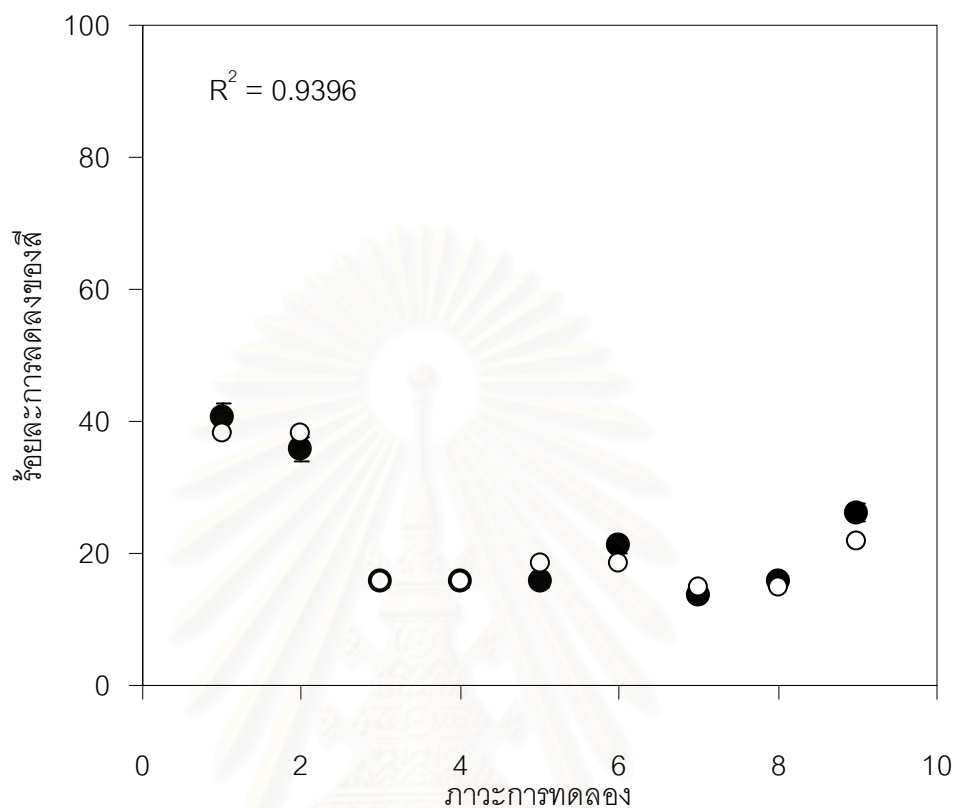
เมื่อ X_A , X_B , $X_A X_B$ คือ ค่าของตัวแปร A B และ AB ที่เข้ารหัส



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแจกแจงปกติและค่าเศษตกค้างของสี (ก) และความสัมพันธ์ระหว่างเศษตกค้างและร้อยละการลดของสีที่ได้จากการทำนายนาย (ข)

รูปที่ 4.8 แสดงร้อยละการลดลงของสีที่ได้จากการทำนายนายด้วยสมการที่ (4.10) ที่ภาวะต่างๆ จำนวน 9 ภาวะการทดลอง โดยภาวะที่ 9 เป็นผลการทดลองที่ทำที่ภาวะกลางคือใช้อัตราการไหลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหลของเฟอรัสไอออน 2.5

มิลลิกรัมต่อลิตร และกำลังไฟฟ้าของหลอดยวี่ 30 วัตต์ พบว่าค่า R^2 ของร้อยละการลดลงของสีที่ได้จากการทดลองและการทำนายมีค่าเท่ากับ 0.9396 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้



รูปที่ 4.8 ร้อยละการลดลงของสีที่ได้จากการทำนายด้วยสมการที่ (4.10) (O) และการทดลอง (●)

4.2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการลดลงของค่าบีโอดี

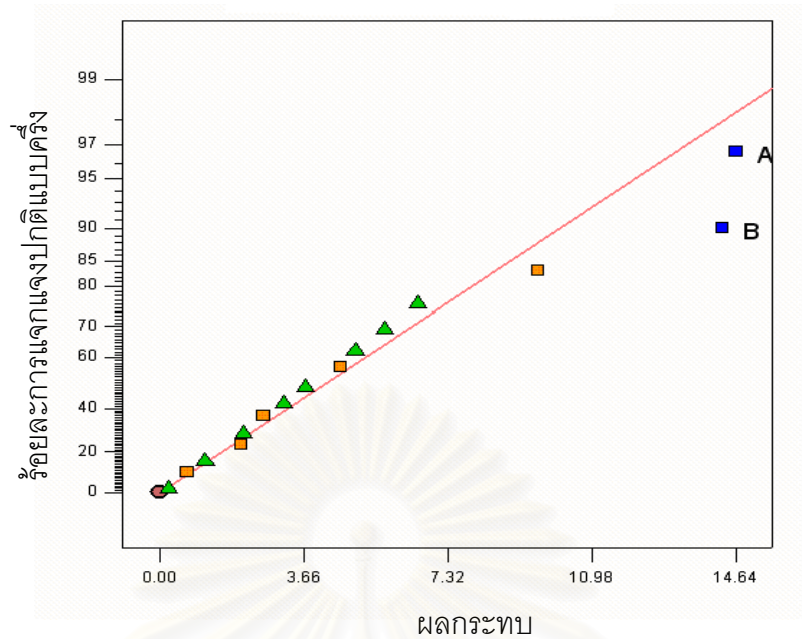
การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการลดลงของค่าบีโอดีในน้ำเสียจะพิจารณาที่ร้อยละความเชื่อมั่นเท่ากับ 95% หรือระดับความสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 เช่นเดียวกับสี โดยตารางที่ 4.4 แสดงร้อยละการลดลงของค่าบีโอดีที่ภาวะต่างๆ เมื่อเวลาผ่านไป 20 นาที จากตารางที่ 4.5 พบว่าตัวแปรที่มีผลต่อการลดลงของค่าบีโอดีอย่างมีนัยสำคัญคือ อัตราการไหลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และอัตราการไหลของเฟอร์รัสไอออน โดยพบว่าค่า P-value ของตัวแปรมีค่าต่ำกว่า 0.05 และค่า P-value ของ Pure quadratic มีค่ามากกว่าค่า 0.05 แสดงว่าค่าตรงกลางไม่มีผลต่อร้อยละการลดลงของค่าบีโอดี และเมื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการแจกแจงความน่าจะเป็นปกติแบบครึ่งและผลกระทบดังรูปที่ 4.9 พบว่าให้ผลสอดคล้องกับตารางที่ 4.5 คือตัวแปรที่มีต่อการลดลงของค่าบีโอดีอย่างมีนัยสำคัญ คืออัตราการไหลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเฟอร์รัสไอออน

ตารางที่ 4.4 แสดงร้อยละการลดลงของค่าบีโอดีที่ภาวะต่างๆ

ภาวะที่	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (ml/min)	เฟอร์ริสไอออน (ml/min)	กำลังไฟฟ้าแสงยูวี (watt)	ร้อยละการลดลงของ ค่าบีโอดี	
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1	25	5	60	86.5	88.6
2	25	5	0	92.9	90.0
3	25	0	60	78.6	85.3
4	25	0	0	59.7	59.8
5	5	5	60	70.0	66.4
6	5	5	0	71.6	65.7
7	5	0	60	53.3	66.7
8	5	0	0	64.8	63.1
9	15	2.5	30	59.8	58.7

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละการลดลงของค่าบีโอดี

Source of Varian	Degree of freedom	ร้อยละการลดลงของค่าบีโอดี			
		Sum square	Mean square	F ₀	P-value
A	1	856.73	856.73	7.08	0.0288
B	1	817.96	817.96	6.76	0.0316
AB	1	1.92	1.92	0.016	0.9029
C	1	17.18	17.18	0.14	0.7162
AC	1	369.41	369.41	3.05	0.1188
BC	1	27.88	27.88	0.23	0.6441
ABC	1	84.36	84.36	0.70	0.4280
Pure quadratic	1	69.55	69.55	0.57	0.4702
Error	8	968.42	121.05		
Total	16	3213.41			



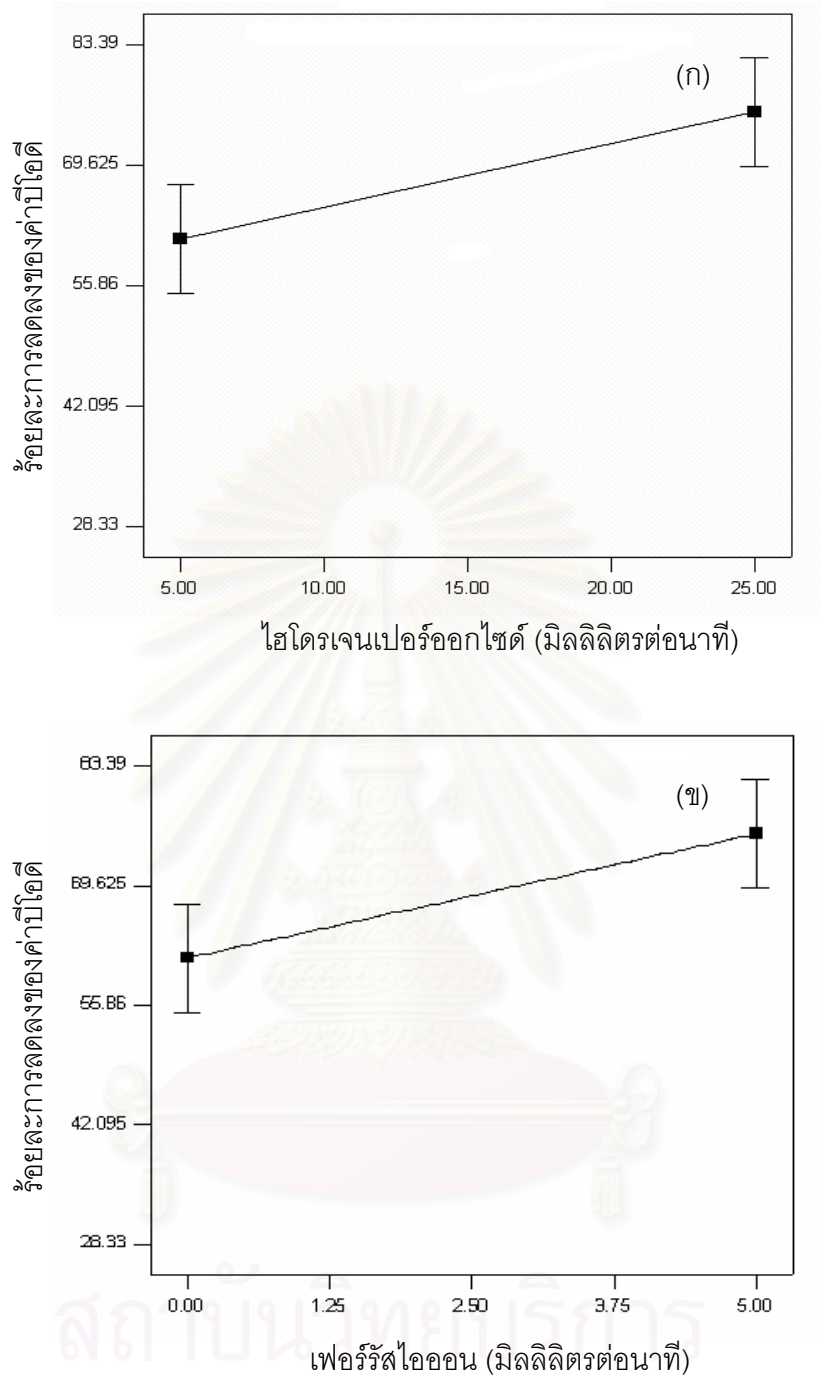
รูปที่ 4.9 การแตกแจงความน่าจะเป็นปกติแบบครึ่งกับปัจจัยที่มีผล

รูปที่ 4.10 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิตของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อร้อยละการลดลงของค่าบีไอดี พบว่าการเพิ่มอัตราการผลิตของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเฟอร์รัสไอออนจะให้แนวโน้มการลดลงของค่าบีไอดีเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากว่าเมื่ออัตราการผลิตของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเฟอร์รัสไอออนเข้าสู่ระบบมากขึ้นจะทำให้อัตราการผลิต OH^\bullet ในระบบตามปฏิกิริยา (4.1) สูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการลดลงของค่าบีไอดีมากขึ้นเช่นกัน

เมื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Regression model) เพื่อทำนายร้อยละการลดลงของค่าบีไอดี จะแสดงได้ดังสมการที่ (4.11) พบว่าการเพิ่มอัตราการผลิตของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเฟอร์รัสไอออนจะส่งผลให้ร้อยละการลดลงของค่าบีไอดีเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.10 อย่างไรก็ดีเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการทำนายร้อยละการลดลงของค่าบีไอดี จึงมีการเพิ่มเทอมที่เกี่ยวข้องกับอันตรกิริยาของอัตราการผลิตของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และกำลังไฟฟ้าของแสงยูวี

$$\text{ร้อยละการลดลงของค่าบีไอดี} = 68.44 + 7.32X_A + 7.15X_B + 4.81X_A X_C - 2.30X_A X_B X_C \quad (4.11)$$

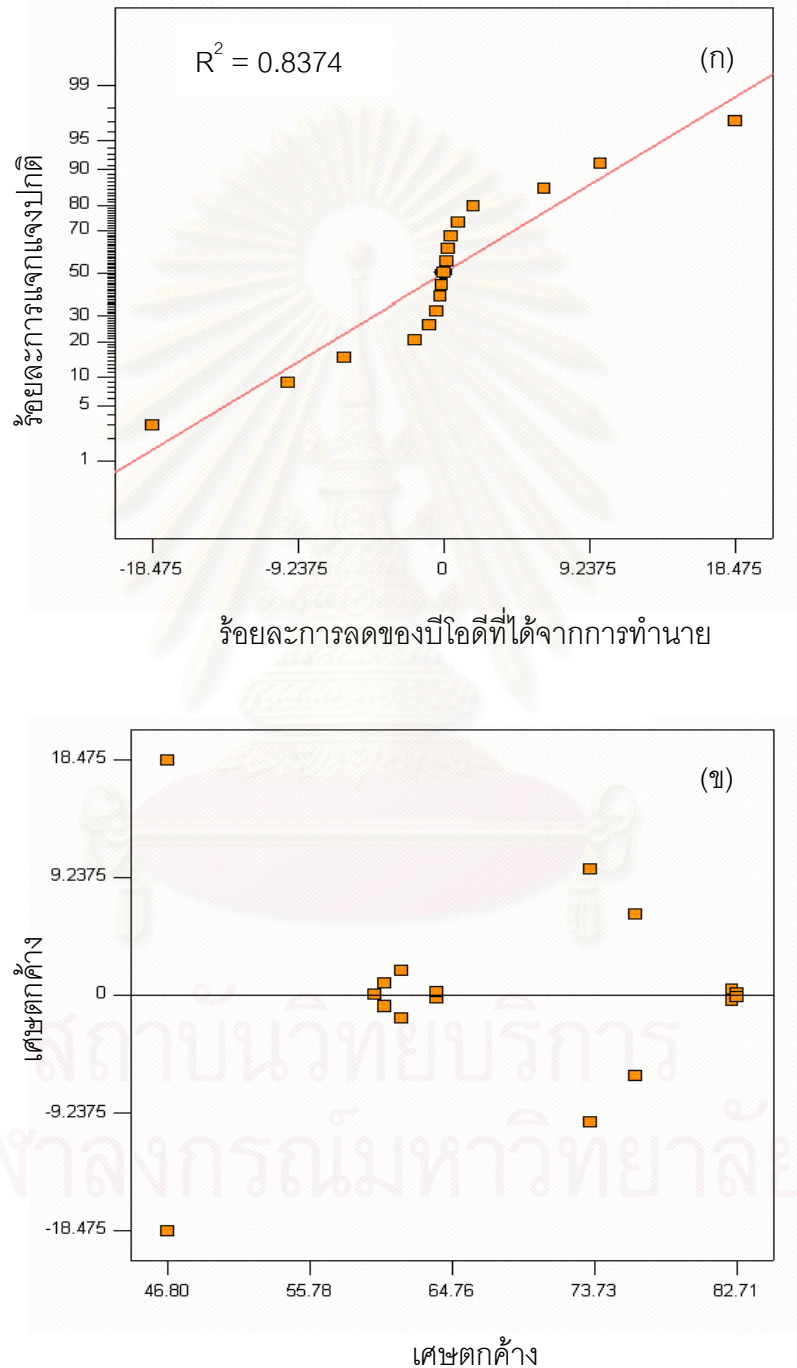
เมื่อ X_A , X_B , $X_A X_B$ คือ ค่าของตัวแปร A B และ AB ที่เข้ารหัส



รูปที่ 4.10 ร้อยละการลดลงของสีที่อัตราการไหลสูงสุดและต่ำสุดของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (ก) และเฟอร์รัสไอออน (ข)

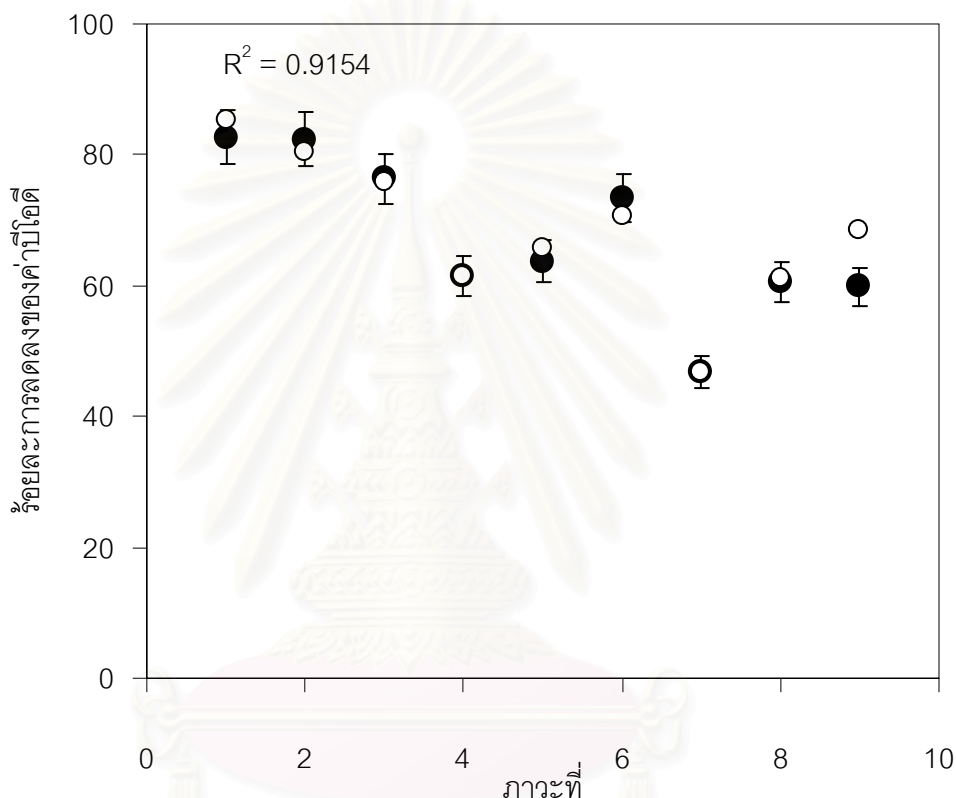
รูปที่ 4.11(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแจกแจงแบบปกติและค่าเศษตกค้างของค่าบีโอดี พบว่าค่า R^2 ของความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแจกแจงแบบปกติและค่าเศษตกค้างมีค่าประมาณ 0.8374 แสดงว่าเศษตกค้างจากสมการมีการกระจายตัวแบบปกติ ซึ่งตามสมมติฐานของการแจกแจงแบบปกติแล้วพฤติกรรมดังกล่าวจะแสดงค่าเฉลี่ยของเศษตกค้างมีค่า

เท่ากับศูนย์ และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าเศษตกค้างและค่าร้อยละการลดลงของค่าปีโอดีที่ได้จากการทำนายโดยสมการ (4.11) ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.11 (ข) พบว่ามีการกระจายตัวของเศษตกค้างอย่างไม่มีรูปแบบจึงกล่าวได้ว่าสมการดังกล่าวเหมาะสมที่จะนำไปทำนายร้อยละการลดลงของค่าปีโอดี



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแจกแจงแบบปกติและค่าเศษตกค้างของค่าปีโอดี (ก) และความสัมพันธ์ระหว่างเศษตกค้างและร้อยละการลดลงของค่าปีโอดีที่ได้จากการทำนาย (ข)

รูปที่ 4.12 แสดงร้อยละการลดลงของค่าบีไอดีที่ได้จากการทำนายด้วยสมการที่ (4.11) ที่ภาวะการทดลองต่างๆ จำนวน 9 ภาวะการทดลอง โดยภาวะที่ 9 เป็นผลการทดลองที่ทำที่ภาวะกลาง พบว่าค่า R^2 ของร้อยละการลดลงของค่าบีไอดีที่ได้จากการทดลองและการทำนายมีค่าเท่ากับ 0.8225 แสดงว่าสมการที่ได้จากแบบจำลองมีความแม่นยำในการทำนายค่าบีไอดีประมาณร้อยละ 92



รูปที่ 4.12 ร้อยละการลดลงของค่าบีไอดีที่ได้จากการทำนาย (○) และการทดลอง (●)

4.2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการลดลงของค่าซีไอดี

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการลดลงของค่าซีไอดีในน้ำเสียจะพิจารณาที่ร้อยละความเชื่อมั่นเท่ากับ 95% หรือระดับความสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 เช่นเดียวกับสีและค่าบีไอดี ซึ่งผลของการลดลงของค่าซีไอดีที่ภาวะต่างๆแสดงในตารางที่ 4.6 และจากตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.13 พบว่าไม่มีตัวแปรใดมีผลต่อร้อยละการลดลงของค่าซีไอดีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากว่าค่า P-value ของทุกตัวแปรมีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าค่าของตัวแปรต่างๆ ซึ่งได้แก่ อัตราการไหลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในช่วง 5-25 มิลลิลิตรต่ออนาที อัตราการไหลของเฟอร์รัส

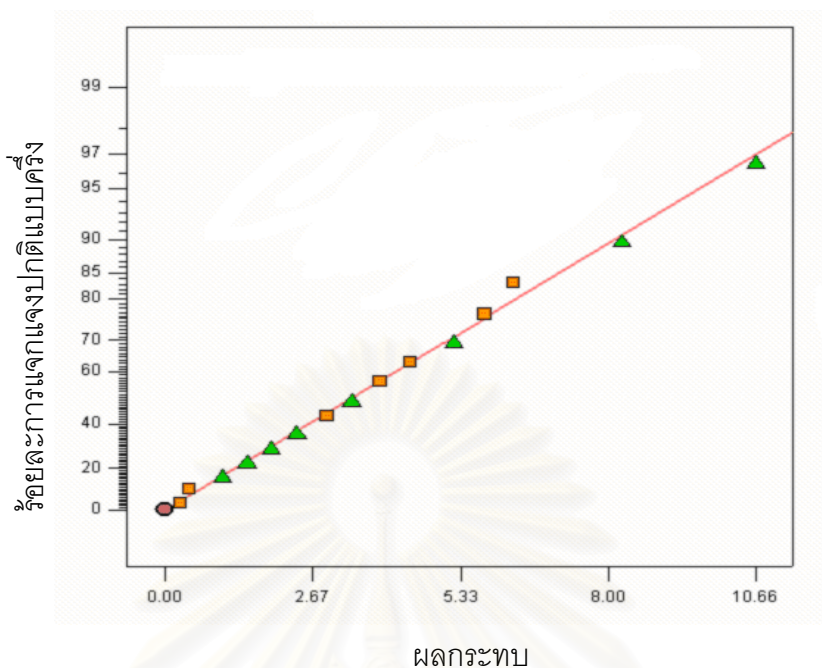
ไอออนในช่วง 0-5 มิลลิเมตรต่อนาที และกำลังไฟฟ้าของแสงยูวีในช่วงกำลังไฟฟ้า 0-60 วัตต์ ไม่มีผลต่อการลดลงของค่าซีไอดี

ตารางที่ 4.6 แสดงร้อยละการลดลงของค่าซีไอดีที่ภาวะต่างๆ

ภาวะที่	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (ml/min)	เพอร์ร็อกไซด์ไอออน (ml/min)	กำลังไฟฟ้าแสงยูวี (watt)	ร้อยละการลดลงของ ค่าซีไอดี	
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1	25	5	60	35.4	32.5
2	25	5	0	33.3	31.3
3	25	0	60	20.0	19.5
4	25	0	0	20.6	21.3
5	5	5	60	25.0	21.7
6	5	5	0	22.9	20.3
7	5	0	60	20.8	22.1
8	5	0	0	14.4	17.5
9	15	2.5	30	9.7	10.2

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี

Source of Varian	Degree of freedom	ร้อยละการลดของค่าซีไอดี			
		Sum square	Mean square	F ₀	P-value
A	1	157.63	157.63	1.57	0.2455
B	1	0.77	0.77	0.07	0.9322
AB	1	34.52	34.52	0.34	0.5738
C	1	78.94	78.94	0.79	0.4010
AC	1	0.31	0.31	0.03	0.9568
BC	1	132.37	132.37	1.32	0.2846
ABC	1	60.68	60.68	0.60	0.4592
Pure quadratic	1	41.53	41.53	0.41	0.5381
Error	8	802.93	100.37		
Total	16	1309.68			



รูปที่ 4.13 ร้อยละการแจกแจงปกติแบบครึ่งกับผลกระทบ

4.3 การปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

จากผลการทดลองในช่วงที่ 1 พบว่าค่าตัวแปรที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการลดลงของสี คืออัตราการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อัตราการป้อนเฟอร์รัสไอออน และอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับอัตราการไหลของเฟอร์รัสไอออน ส่วนตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละการลดลงของค่าบีโอดีอย่างมีนัยสำคัญ คือ อัตราการไหลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และอัตราการไหลของเฟอร์รัสไอออน และไม่มีตัวแปรใดเลยที่มีผลต่อการลดลงของค่าซีโอดีอย่างมีนัยสำคัญ แต่จากงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ พบว่าความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนในระบบจะมีผลต่อการลดลงของค่าซีโอดี ส่วนความเข้มข้นของแสงยูวีจะมีผลต่อการลดลงของสี (Kang และคณะ 1999 และ Kang และคณะ 2002) ซึ่งผลการทดลองที่ได้ในการทดลองนี้ไม่สอดคล้องกับงานวิจัยดังกล่าว ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าความเข้มข้นของสารเคมีและความเข้มของแสงยูวีที่ใช้ไม่เพียงพอต่อการลดปริมาณสารมลพิษที่อยู่ในน้ำเสีย ดังนั้นในการทดลองช่วงที่ 2 นี้จะเป็นการทดลองเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน ออกซิเดชันในเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง โดยการเพิ่มความเข้มข้นของสารเคมีและความเข้มของแสงยูวี โดยอัตราการไหลของน้ำเสียที่เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์คงที่ที่ประมาณ 1 ลิตร/นาที หรือคิดเป็นเวลาคงอยู่ของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ (Retention time) ประมาณ 63.6 นาที

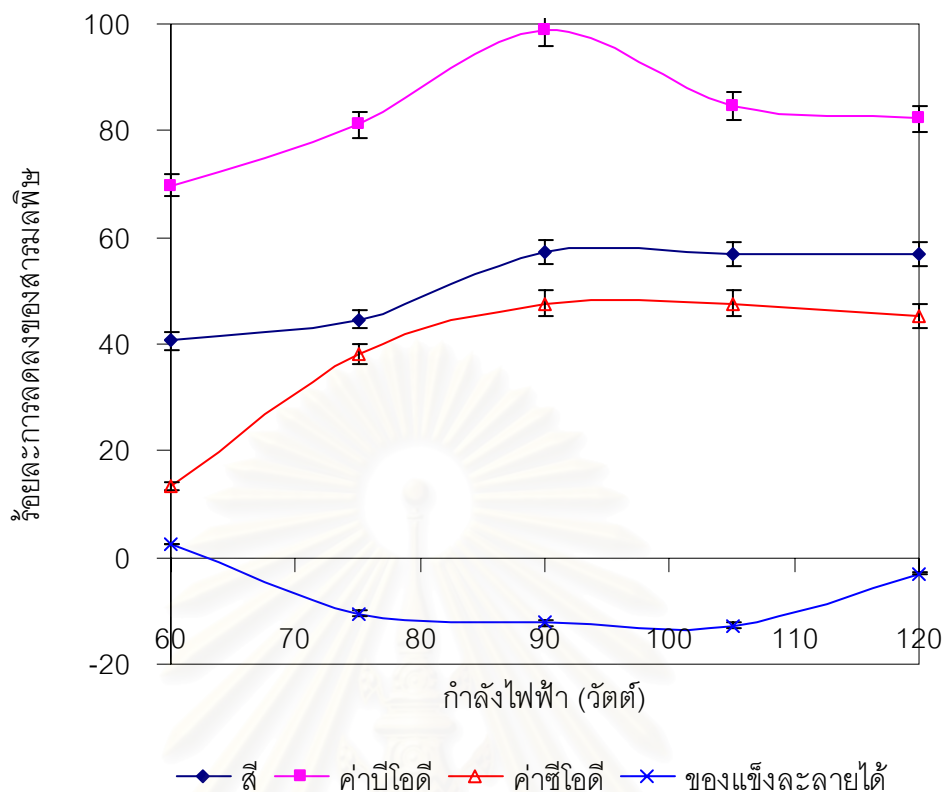
4.3.1 ผลของกำลังไฟฟ้าของหลอดยูวี

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ากำลังไฟฟ้าของหลอดยูวีมีผลต่อการลดลงของสารมลพิษในน้ำเสีย (Sahunin และคณะ 2006) ดังนั้นเพื่อพิสูจน์สมมติฐานนี้จึงได้ออกแบบและปรับปรุงเครื่องปฏิกรณ์ให้สามารถเพิ่มกำลังไฟฟ้าของหลอดยูวีได้มากขึ้น โดยเพิ่มกำลังไฟฟ้าของหลอดยูวีจาก 60 วัตต์ เป็น 75 90 105 และ 120 วัตต์ ภาวะที่ใช้ในการทดลองคือ อัตราการป้อนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 25 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการป้อนของเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 5 มิลลิลิตรต่อนาที และค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 7 โดยทำการทดลองในระบบต่อเนื่องและเก็บตัวอย่างที่ภาวะสมดุลคือเวลามากกว่า 20 นาที

รูปที่ 4.14 แสดงร้อยละการลดลงของสารมลพิษเมื่อทำการเพิ่มกำลังไฟฟ้าของหลอดยูวีพบว่าเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าของหลอดยูวีเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ร้อยละการลดลงของสี และค่าซีไอดีเพิ่มขึ้น กล่าวคือเมื่อเพิ่มกำลังแสงยูวีจาก 60 วัตต์ ไปที่ 90 วัตต์ จะทำให้การลดลงของสีจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 40.6 ไปที่ประมาณร้อยละ 57.2 และทำให้การลดลงของค่าซีไอดีเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 13.3 ไปที่ร้อยละ 47.6 การเพิ่มกำลังไฟฟ้าของหลอดยูวีมากกว่า 90 วัตต์จะไม่ช่วยให้เกิดการลดลงของสีและค่าซีไอดีมากขึ้น ส่วนการลดลงของค่าบีไอดีจะเพิ่มขึ้นมากที่สุดคือมากกว่าร้อยละ 99 ที่กำลังไฟฟ้าของหลอดยูวีเท่ากับ 90 วัตต์ และลดลงเมื่อกำลังไฟฟ้าของหลอดยูวีสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อกำลังไฟฟ้าของแสงยูวีมากเกินไป แสงยูวีจะไปการกระตุ้นการรีดักชันของเฟอร์ริกไอออนกลายเป็นเฟอร์รัสไอออน ดังปฏิกิริยาที่ (4.3) เมื่อมีปริมาณเฟอร์รัสไอออนในระบบมากขึ้นจึงมีโอกาที่เฟอร์รัสไอออนจะเข้าทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่ละลายในน้ำเสีย (Dissolved oxygen) ดังปฏิกิริยา (4.12) ทำให้มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำได้ลดลง ส่งผลให้ค่าบีไอดีในระบบลดลง (Kongkao, 2005) นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณของแข็งละลายได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากในระบบที่มีการป้อนแสงยูวีจะมีผลิตภัณฑ์พลอยได้ (By-product) เกิดขึ้นจากกระบวนการโฟโตไลซิสของสี (Photolysis of dye) ที่มีอยู่ในน้ำเสีย ทำให้มีอนุภาคของแข็งละลายน้ำได้เพิ่มขึ้น (Ince และคณะ 1999).



จากการทดลองนี้จึงกล่าวได้ว่ากำลังไฟฟ้าของหลอดยูวีที่เหมาะสมคือ 90 วัตต์ โดยที่ภาวะดังกล่าวสามารถลดสี ค่าบีไอดี และค่าซีไอดี ได้ร้อยละ 57.2 99.3 และ 47.6 ตามลำดับ

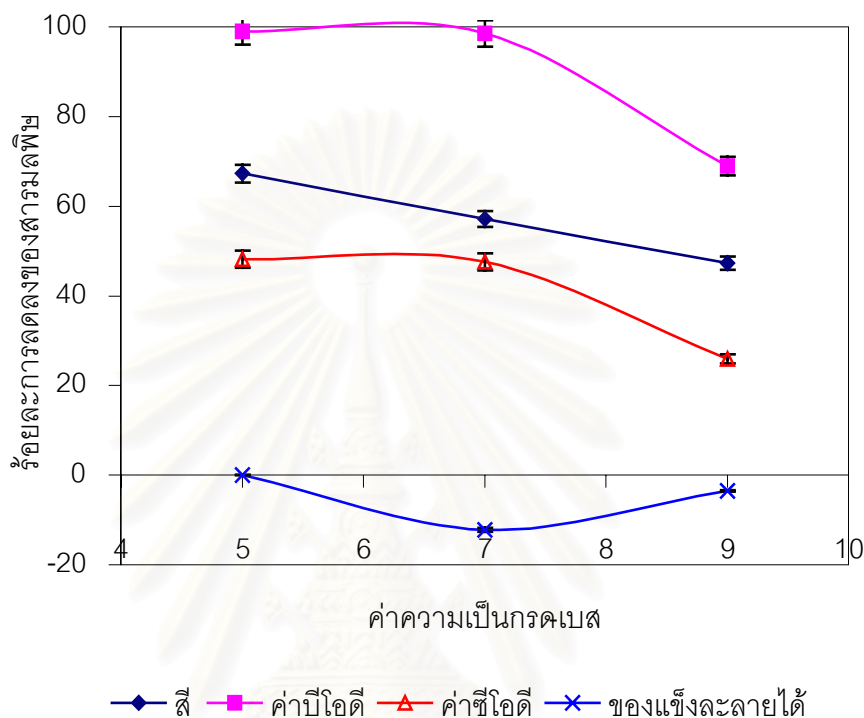


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสารมลพิษและกำลังไฟฟ้าของหลอดยูวีที่เวลา 20 นาที เมื่อน้ำเสียมีสีเริ่มต้น 3230 หน่วยสี ค่าบีไอดี 424 ค่าซีไอดี 3360 และค่าของแข็งละลายได้ 1542 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.3.2 ผลของความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นของน้ำเสีย

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าค่าความเป็นกรด-เบสจะมีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตเพนตันออกซิเดชัน โดยพบว่าค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมในการทำงานคือ 3 (Pignatello และคณะ 1999; Kim และคณะ 1999; Katsumata และคณะ 2005) แต่ในการทำงานจริงของอุตสาหกรรม ผู้ประกอบการไม่สามารถที่จะปรับค่าความเป็นกรด-เบสให้อยู่ในช่วงดังกล่าวได้ เนื่องจากต้องใช้กรดในการทำงานในปริมาณมาก นอกจากนี้ น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจะยังมีค่าความเป็นกรด-เบสต่ำ ทำให้ต้องใช้สารเคมีเพื่อการปรับค่าความเป็นกรด-เบส เพื่อให้ น้ำเสียมีความเป็นกลางก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม ส่งผลให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโฟโตเพนตันในช่วงค่าความเป็นกรด-เบสประมาณ 5-9 เพื่อลดต้นทุนของสารเคมีที่จะใช้ในการปรับค่าความเป็นกรด-เบส เนื่องจากน้ำเสียของอุตสาหกรรมสิ่งทอมีค่าความเป็นกรด-เบสประมาณ 7.2-8.0 นอกจากนี้ น้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดจะมีค่าความเป็นกรด-เบสประมาณ 5-6 ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ของมาตรฐานน้ำทิ้ง

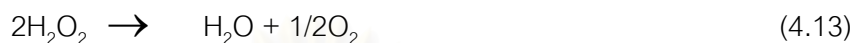
ของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ภาวะที่ใช้ในการทดลองคืออัตราการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 25 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการป้อนเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 5 มิลลิลิตรต่อนาที และกำลังไฟฟ้าของหลอดยูวีเท่ากับ 90 วัตต์ โดยทำการทดลองในระบบต่อเนื่องและเก็บตัวอย่างที่ภาวะสมดุลคือเวลามากกว่า 20 นาที



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสารมลพิษและความเป็นกรด-เบสที่เวลา 20 นาที เมื่อน้ำเสียมีค่าเริ่มต้น 2815 หน่วยค่าพีไอดี 290 ค่าซีไอดี 4320 และค่าของแข็งละลายได้ 1560 มิลลิกรัมต่อลิตร

รูปที่ 4.15 แสดงร้อยละการลดลงของสารมลพิษเมื่อทำการปรับค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำเสียเริ่มต้นโดยใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้น พบว่าเมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรด-เบส ในช่วง 5-7 จะทำให้ร้อยละการลดลงของค่าพีไอดี และซีไอดีมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก กล่าวคือในช่วงความเป็นกรด-เบสดังกล่าวจะสามารถลดค่าพีไอดีได้ประมาณร้อยละ 99.3 และลดค่าซีไอดีได้ประมาณร้อยละ 47.6-48.2 แต่เมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรด-เบสไปที่ประมาณ 9 พบว่าจะเกิดการลดลงของร้อยละการลดค่าพีไอดี และค่าซีไอดี อย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องจากว่าเมื่อค่าความเป็นกรด-เบสเพิ่มขึ้นจะทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แตกตัวกลายเป็นน้ำมากกว่าที่จะแตกตัวเป็นไฮดรอกซิลแรดิคอล (Shimoda และคณะ 1997) ดังปฏิกิริยา (4.13) และเมื่อมีไฮดรอกซิลแรดิคอลในระบบน้อยลงจึงทำให้การออกซิเดชันสารมลพิษในน้ำเสียลดลง ส่งผลให้ค่า S ค่าพีไอดี และค่าซีไอดีในระบบเพิ่มขึ้น

ส่วนร้อยละการลดลงของของแข็งละลายได้มีค่าลดลงและเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรด-เบสเพิ่มสูงขึ้น อาจเนื่องมาจากค่าความเป็นกรด-เบสในช่วง 7-9 โครงสร้างของเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในระบบจะกลายเป็นไฮดรอกไซด์ของมอนอเมอร์ ได้แก่ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ และ Polyhydroxyl iron (III) complex ได้แก่ $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5\text{OH}^{2+}$ และ $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_4(\text{OH})_2^+$ ซึ่งไฮดรอกไซด์เหล่านี้จะเกิดการรวมตัวกันของสารมลพิษในน้ำเกิดเป็นตะกอนขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ค่าของแข็งละลายได้มีค่าเพิ่มขึ้น

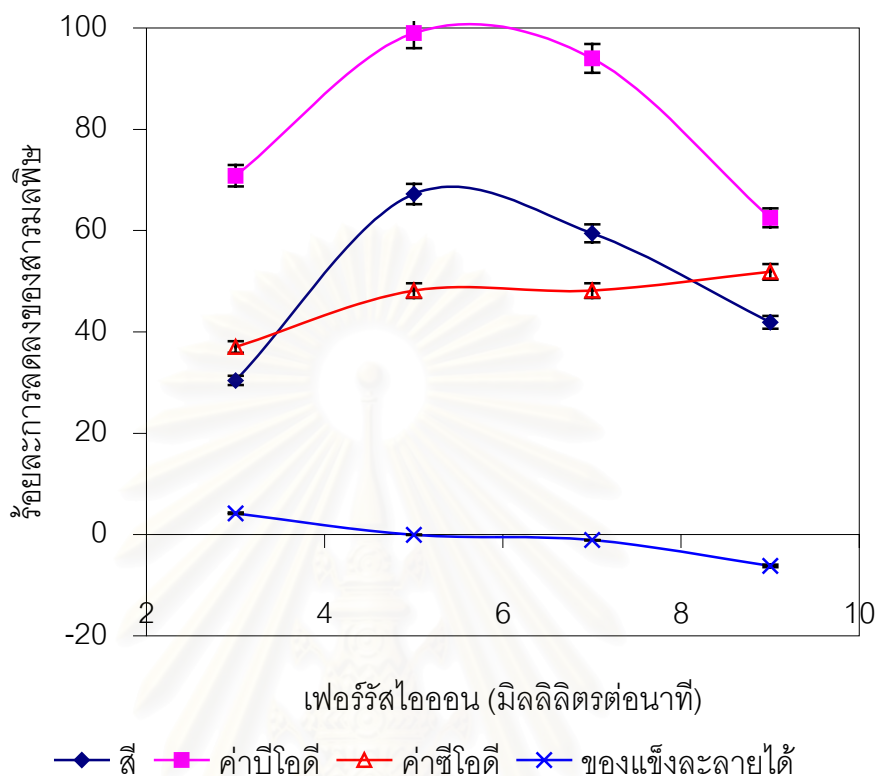


จากการทดลองนี้ จึงกล่าวได้ว่าค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมสำหรับการลดลงของสารมลพิษคือ ค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 5 โดยสามารถลดสี ค่าบีโอดี และค่าซีโอดี ได้ร้อยละ 67.2 99.3 และ 48.1 ตามลำดับ

4.3.3 ผลของอัตราการป้อนเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์

การทดลองในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาผลของอัตราการป้อนเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ต่อการลดลงของสารมลพิษในน้ำเสีย โดยทำการศึกษาอัตราการป้อนเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ที่ 3 5 7 และ 9 มิลลิลิตรต่อนาที หรือคิดเป็น 0.0003 0.0005 0.0007 และ 0.0009 โมลต่อนาที ภาวะที่ใช้ในการทดลองคือ อัตราการป้อนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 25 มิลลิลิตรต่อนาที ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 5 และกำลังไฟฟ้าของหลอดยูวีเท่ากับ 90 วัตต์ โดยทำการทดลองในระบบต่อเนื่องและเก็บตัวอย่างที่ภาวะสมดุลคือเวลามากกว่า 20 นาที จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์จาก 3 มิลลิลิตรต่อนาที ไปที่ 5 มิลลิลิตรต่อนาที จะทำให้อัตราการลดลงของค่าสีและบีโอดีเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 4.16 กล่าวคือจะเพิ่มการลดลงของสีได้จากร้อยละ 30.4 ไปที่ร้อยละ 67.3 หรือคิดเป็นการเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า และสามารถเพิ่มการลดลงของค่าบีโอดีได้จากร้อยละ 70.8 ไปที่ร้อยละ 99.3 หรือคิดเป็นประมาณ 1.4 เท่า ส่วนร้อยละการลดลงของค่าซีโอดีจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากร้อยละ 37.0 ไปที่ 48.2 ในช่วงอัตราการไหลดังกล่าว แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์มากกว่า 5 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าร้อยละการลดลงของสีและบีโอดีลดลงอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือจะเกิดการลดลงของสีจากร้อยละ 67.3 ไปที่ร้อยละ 41.9 และเกิดการลดลงของบีโอดีจากร้อยละ 99.3 ไปที่ร้อยละ 62.5 แต่ไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการลดลงของค่าซีโอดีนัก ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อปริมาณเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ในระบบมากเกินไป เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์จะถูกรีดิวซ์กลายเป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ซึ่งเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์นี้เป็นผลทำให้เกิดการที่สีเพิ่มกลับคืนมา (Color Resurgence) (Kang และคณะ 1999) อีกทั้งเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในน้ำเสียกลายเป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) ดังปฏิกิริยา (4.13)

ทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำเสียน้อยลง ส่งผลให้ค่าบีโอดีในน้ำเสียเพิ่มขึ้น อีกทั้งตะกอนที่เกิดขึ้นนี้ยังส่งผลให้ค่าของแข็งละลายได้มีค่าเพิ่มขึ้น



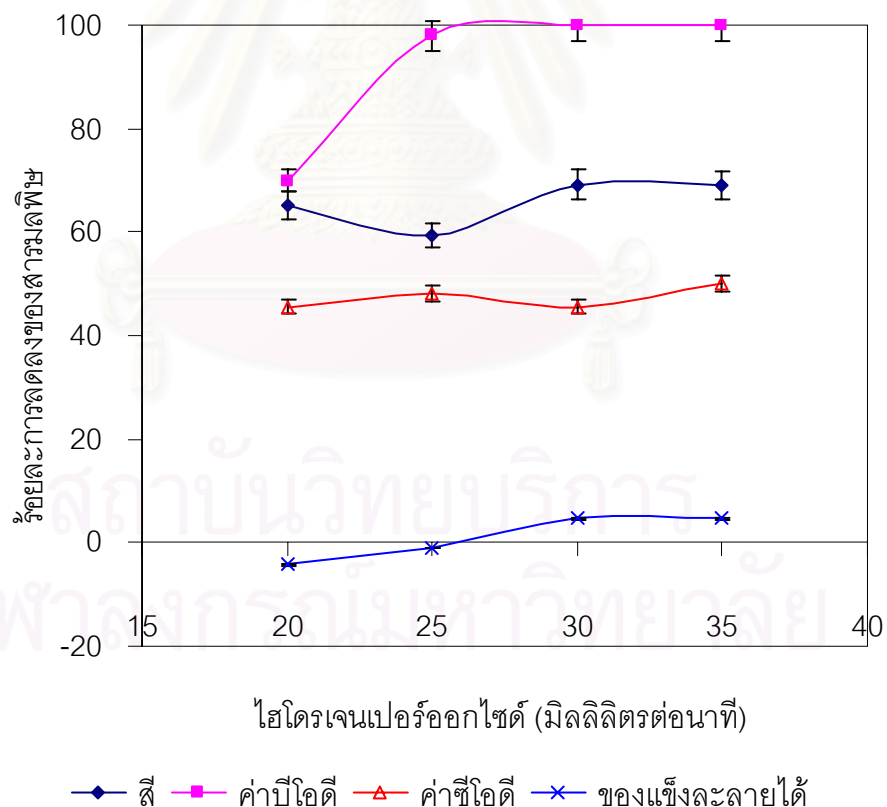
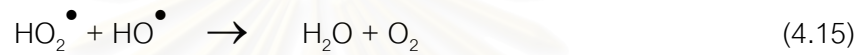
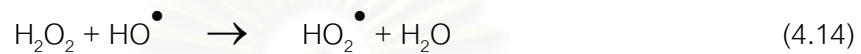
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสารมลพิษและอัตราการป้อนเฟอร์รัสไอออนที่เวลา 20 นาที เมื่อน้ำเสียมีสีเริ่มต้น 1001 หน่วยสี ค่าบีโอดี 240 ค่าซีโอดี 4320 และค่าของแข็งละลายได้ 2292 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากการทดลองนี้อาจกล่าวได้ว่าอัตราการไหลของเฟอร์รัสไอออนที่เหมาะสมสำหรับการลดลงของสารมลพิษคือ อัตราการป้อนเฟอร์รัสไอออน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสามารถลดค่าบีโอดี และค่าซีโอดี ได้ร้อยละ 67.3 99.3 และ 48.2 ตามลำดับ

4.3.4 ผลของอัตราการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

การทดลองนี้เป็นการศึกษาผลของอัตราการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการลดลงของสารมลพิษในน้ำเสีย โดยทำการศึกษาอัตราการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ 20 25 30 และ 35 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็น 0.176 0.220 0.265 และ 0.309 โมลต่อลิตร ภาวะที่ใช้ในการทดลองคือ อัตราการป้อนของเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 5 และกำลังไฟฟ้าของหลอดยูวีเท่ากับ 90 วัตต์ โดยทำการทดลองในระบบต่อเนื่องและเก็บตัวอย่างที่ภาวะสมดุลคือเวลามากกว่า 20 นาที จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอัตรา

การป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากขึ้นจะส่งผลต่อร้อยละการลดลงของบีโอดีอย่างชัดเจน (รูปที่ 4.17) โดยที่อัตราการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ประมาณ 25 มิลลิลิตรต่อนาฬิกาจะทำให้เกิดลดลงของบีโอดีเกือบร้อยละ 100 แต่การเพิ่มอัตราการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะไม่ส่งผลต่อร้อยละการลดลงของซีไอและซีโอดีมากนัก เนื่องจากการเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากเกินไปในระบบจะส่งผลให้เกิดการรวมตัวระหว่างไฮดรอกซิลแบริดคอลลกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กลายเป็นน้ำกับออกซิเจน (Welling 1975) ดังปฏิกิริยา (4.14)-(4.16) ส่งผลให้ปริมาณไฮดรอกซิลแบริดคอลลในระบบน้อยลง ทำให้ร้อยละการลดลงของสารมลพิษไม่เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสารมลพิษและอัตราการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เวลา 20 นาที เมื่อน้ำเสียมีซีไอเริ่มต้น 1732 หน่วยซีไอ ค่าบีโอดี 150 ค่าซีไอ 3520 ค่าของแข็งละลายได้ 1809 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากการทดลองนี้พบว่าอัตราการปนเปื้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมเพื่อลดสี ค่าบีโอดีและค่าซีโอดีร่วมกันคือ 25 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ ซึ่งสามารถลดสี ค่าบีโอดี และค่าซีโอดี ได้ ร้อยละ 69.2 99.4 และ 45.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.8 แสดงสมบัติของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด พบว่าค่าความเป็นกรด-เบส ค่าบีโอดี ค่าของแข็งละลายได้ทั้งหมด และสี ที่ผ่านการบำบัดแล้วจะมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม ส่วนค่าซีโอดีหลังจากผ่านการบำบัดแล้วมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยและ ยังมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม

ตารางที่ 4.8 สมบัติของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันออกซิเดชัน

สมบัติ	งานวิจัย	มาตรฐาน
ค่าความเป็นกรด-เบส	6.6-8.7	✓
ค่าบีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	< 30.0	✓
ค่าซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	1,600-1,760	×
ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	1,572-1,600	✓
สี (Pt-Co unit)	533-822	✓
ปริมาณเหล็ก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	< 13.3	

4.4 เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น

ตารางที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ พบว่ากระบวนการโฟโตเฟนตันออกซิเดชันมีประสิทธิภาพในการลดสีและค่าบีโอดีของน้ำเสียได้เป็นอย่างดีคือประมาณร้อยละ 70.0 และ 99.0 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่น ส่วนประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดีของกระบวนการโฟโตเฟนตันออกซิเดชัน ดังที่กล่าวไว้แล้วว่าไม่สามารถลดค่าซีโอดีได้มากนักซึ่งไม่แตกต่างจากงานวิจัยอื่นคือสามารถลดค่าซีโอดีได้ประมาณร้อยละ 45.0-50.0

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ

ผู้วิจัย (ปี)	กระบวนการบำบัด	น้ำเสียที่ใช้ในงาน วิจัย	ระบบของเครื่องปฏิกรณ์ที่ ใช้ในการบำบัด	สี		ค่าซีไอดี		ค่าบีไอดี	
				ก*	ข*	ก	ข	ก	ข
Kadirvelu (2000)	ดูดซับถ่านกัมมันต์	น้ำเสียจริงจาก โรงงาน	แบบกะ	-	100.0	419.0	56.0	60.43	35.0
Selcuk (2005)	ตกตะกอนด้วย สารเคมี	น้ำเสียจริงจาก โรงงาน	แบบกะ	1240 (m^{-1})	60.0	1150	56.0	-	-
Marco (2005)	โฟโตเฟนตันออกซิเดชัน	น้ำเสียสังเคราะห์	แบบกะ	1.5×10^{-4} (โมลต่อลิตร)	98.1	-	-	-	-
Sahunin (2006)	โฟโตเฟนตันออกซิเดชัน	น้ำเสียจริงจาก โรงงาน	แบบกะ	1,584-2,310 (Pt-Co unit)	90.0	2,500-27,000	52.0	-	-
งานวิจัยนี้	โฟโตเฟนตันออกซิเดชัน	น้ำเสียจริงจาก โรงงาน	แบบต่อเนื่อง	1,465-2,542 (Pt-Co unit)	69.2	7,200-28,800	45.5	840-2250	99.4

หมายเหตุ *ก คือ ความเข้มข้นของสารมลพิษในน้ำเสียก่อนการบำบัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)

*ข คือ ร้อยละการลดของสารมลพิษหลังการบำบัด

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันออกซิเดชันในเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบไหลต่อเนื่อง โดยศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการทดลอง ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นของน้ำเสีย กำลังไฟฟ้าของหลอดยูวี อัตราการป้อนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเฟอร์รัสไอออน ที่มีผลต่อการลดลงของ สี ค่าบีโอดี ค่าซีโอดี และค่าของแข็งละลายได้ทั้งหมด จากการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากการออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟกทอเรียล ในช่วงอัตราการป้อนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเฟอร์รัสไอออน 5-25 และ 0-5 มิลลิลิตรต่อนาที กำลังไฟฟ้าของหลอดยูวี 0-60 วัตต์พบว่า

- อัตราการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อัตราการป้อนเฟอร์รัสไอออน และอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเฟอร์รัสไอออน มีผลต่อการลดลงของสีอย่างมีนัยสำคัญ
- อัตราการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และอัตราการป้อนเฟอร์รัสไอออน มีผลต่อการลดลงของบีโอดีอย่างมีนัยสำคัญ
- ไม่มีตัวแปรใดที่มีผลต่อการลดลงของค่าซีโอดีอย่างมีนัยสำคัญ

2. ภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันออกซิเดชัน คือ กำลังไฟฟ้าของแสงยูวี 90 วัตต์ ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 5 อัตราการป้อนของเฟอร์รัสไอออน 5 มิลลิลิตรต่อนาทีและอัตราการป้อนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 25 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งสามารถลด สี ค่าบีโอดี และค่าซีโอดีได้ร้อยละ 69.2 99.4 และ 45.5 ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทำการบำบัดเบื้องต้นก่อนทำการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันเพื่อทำการลดค่าซีโอดีของน้ำเสีย
2. ทำการติดตั้งปั๊มเพื่อวนน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วมาผ่านกระบวนการบำบัดอีกครั้งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการบำบัด

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- ปารเมศ ชูติมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. บริษัทด้านสุทธนาการพิมพ์ จำกัด, 2545
- มณฑา จันทร์เกิดเยี่ยม. 2541. วิทยาศาสตร์สิ่งทอเบื้องต้น. สมาคมคหเศรษฐศาสตร์. มั่นสิน ตัณ ทูลเวศม์. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. เล่มที่ 1. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. บริษัทแซน.อี.68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียรส์ จำกัด, 2542.
- วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา. อุตสาหกรรมสิ่งทอไทย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย .www.tei.or.th/bep/envperfeval/textile/
- สมพร เกาะปิ่นะ. 2544. คู่มือการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานทอผ้าและฟอกย้อม. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- อัจฉราพร ไชยะสูต และ ชิงรุ วาตานาเบ. 2520. วิศวกรรมสิ่งทอ. สมาคมส่งเสริมเทคนิคระหว่างประเทศ.

ภาษาอังกฤษ

- Barlas, H., and Akgun, T. Colour removal from the textile wastewaters by adsorption Techniques. Fresenius Environmental Bulletin 9 (2000): 597-602.
- Ciardelli, G., Capannelli, G., and Bottino, A. Ozone treatment of textile wastewaters for reuse. Water Science and Technology 44 (2001): 61-67.
- Faust, B.C., and Hoigne, J. Photolysis of Fe complexes as sources of OH radicals in clouds, fog and rain. Atmos. Environ A24 (1990): 79-89.
- Ince, NH and Tezcanlı, G. Treatability of textile dye-bath effluents by advanced oxidation: preparation for reuse. Water Science and technology 40 (1999): 1-391.
- Kadirvelu, K., Palanival, M., Kalpana, R. and Rajeswari, S. Activated carbon from an agricultural by-product, for the treatment of dyeing industry wastewater. Bioresource Technology 74 (2000): 263-265.

- Kang, S.F., Liao, C.H., and Hung, P.H. Peroxidation treatment of dye manufacturing wastewater in presence of ultraviolet light and ferrous ions. Journal of Hazardous Materials B65 (1999): 317-333.
- Kang, SF., Liao, CH. and Chen, MC. Pre-oxidation and coagulation of textile wastewater by the Fenton process. Chemosphere 46 (2002): 797-944.
- Katsumata, H., Kaneco, S. and Suzaki, L. Degradation of linuron in aqueous solution by the photo-Fenton reaction., Chemical Engineering Journal 108 (2005): 269-276.
- Kim, S.M., Geissen. S., and Vogelpohl, A. Landfill leachate treatment by a photoassisted fenton reaction. Water Science Technology 35 (1999): 239-248.
- Koby, M., Taner, O.C., and Bayramoglu, M. Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. Journal of Hazardous Materials B100 (2003): 163-178.
- Kongjao S. 2005. Treatment of tannery wastewater in electrochemical reactors. Chemical Technology. Chulalongkorn University.
- Kos, L., Perkowski, J., and Ledakowicz, S. The effect of temperature on advanced oxidation of dyeing wastewater. Fibres and Textiles in Eastern Europe 9 (2001): 66–69.
- Liao, C.H., Lu, M.C., Yang, YH., and Lu, I.C. UV-catalyzed hydrogen peroxide treatment of textile wastewater. Environmental Engineering Science 17 (2000): 9-18.
- Lenore, S.C., Arnold, E.G. and Andrew, D.E 2001. Standard methods for the examination of water and wastewater.
- Marco, S.L. and Jose, A.P. Decolorization of the azo dye Reactive Black 5 by Fenton and photo-Fenton oxidation. Dyes and Pigments 71 (2005): 235-243.
- Montgomery, D.C. 1997. Design and analysis of experiments. John Wiley & Sons.
- Oppenlander, T 2003. Photochemical purification of water and air: advanced oxidation processes (AOPS), Weinheim : Wiley-VCH.
- Perez, M., Francisc, T., Xavier, D., and Jose, P. Fenton and photo-Fenton oxidation of textile effluents. Water Research 36 (2002): 2703-2710.
- Philippopoulos, C.J., and Pouloupoulos, S.G. Photo-assisted oxidation of an oily wastewater using hydeogenperoxide. Journal of Hazardous Materials 98 (2003): 201-210.

- Pignatello, J.J., Liu, D. and Huston, P. Evidence for an additional oxidant in the photoassisted Fenton reaction, Environ. Sci. Technol 33 (1999): 1832–1839.
- Sahunin, C., Kaewboran, J., Hunsom, M. 2006. "Treatment of Textile Dyeing Wastewater by Photo Oxidation using UV/H₂O₂/Fe²⁺ Reagents", *Science Asia*, *Accepted*.
- Selcuk, H. Decolorization and detoxification of textile wastewater by ozonation and coagulation process. Dyes and Pigments 64 (2005): 217-222.
- Sheng, H.L., and Cho, C. L. Fenton process for treatment of desizing wastewater. Water Research 31, 8 (1997): 1825-2125.
- Sheng, H.L., and Ming, L.C. Purification of textile wastewater effluents by combined Fenton processs and ion exchange. Desalination 109 (1997): 121-130.
- Shimoda, S., Prengle, H.M. and Symons, J.M. H₂O₂/VisUV photo-oxidation process for treatment of waterborne hazardous substances – reaction mechanism, rate model and data for tubular flow and flow stirred tank reactors. Waste Management 17 (1997): 507-515.
- Shyh, F.K., Liao, C.H., and Shei, T.P. Decolorization of textile wastewater by photo-fenton oxidation technology. Chemosphere 41 (2000): 1287-1294.
- Tang, W.H., and An, H. Photocatalytic oxidation of commercial dye in aqueous solution. Chemosphere 23 (2000): 40-48.
- Venceslau, P.C., Tom, S., and Simon, J.J. Characterization of textile wastewater. Environmental Technology 15 (1994): 917-929.
- Vendevivere, P.C., Bianchi, R., and Verstraete. Treatment and reuse of wastewater from the textile wet-processing industry. Journal of Chemical Technology 72 (1998): 289-302.
- Welling, CH. Fenton's reagent revisited. *Accounts of Chemical Research* 8 (1975): 125-131.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์สมบัติของน้ำ (Standard methods 2001)

1. วิธีวิเคราะห์สี

1.1 หลักการ

สีของน้ำมี 2 ประเภทคือ

1. สีที่แท้จริง (True colour) เกิดจากการละลายของสารประกอบที่มีสีในน้ำ
2. สีที่ปรากฏ (Apparent color) เกิดจากการสะท้อนของสิ่งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ หรือไม่ก็อาจเกิดจากการสะท้อนของท้องฟ้า การทราบสีที่แท้จริงของน้ำอาจทำได้โดยการเก็บตัวอย่างน้ำขึ้นมาทำการกรองสิ่งที่แขวนลอยออกไปใช้ Millipore filter หรือทำการเหวี่ยงแยก แล้วนำส่วนที่เป็นน้ำที่แท้จริงมาทำการเปรียบเทียบกับสีมาตรฐาน สีมาตรฐานจะได้จากการเจือจางในหลาย ๆ ชั้น ตอ น ของ สาร ละ ลาย Potassium chloroplatinate (K_2PtCl) และ Cobaltous chloride ($CoCl_2 \cdot 6H_2O$) หน่วยที่ใช้วัดคือ Platinum cobalt unit (1 unit = 1 mg Pt/liter) เช่น 1 unit คือ สี ใส มาก, 300 units คือ สี เข้ม มาก

1.2 การเก็บและรักษาน้ำตัวอย่าง

ถ้ายังไม่ได้ทำการวิเคราะห์สีในทันทีควรเก็บไว้ในตู้เย็นอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส แต่มีช่วงเวลาที่ยอมให้เก็บได้นานที่สุดคือ 2 วัน

1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์
2. กระจกกรองเบอร์ 1

1.4 วิธีวิเคราะห์

การวัดสีจะวัดในรูปความเข้มของสี ซึ่งจะวัดเป็นค่าการดูดกลืนแสง

1. ทำการกรองน้ำเสียที่ได้หลังทำการบำบัดด้วยกระจกกรองเบอร์ 1
2. นำส่วนที่เป็นน้ำใสไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 465 นาโนเมตร

1.5 การวัดสีโดยเปรียบเทียบกับแพลทินัมโคบอลต์มาตรฐาน (Platinum Cobalts standard)

อุปกรณ์และสารเคมี

1. หลอดเนสเลอร์ (Nessler tubes)
2. สารละลายมาตรฐานคลอโรแพลทีเนท (Standard chloroplatinate solution)

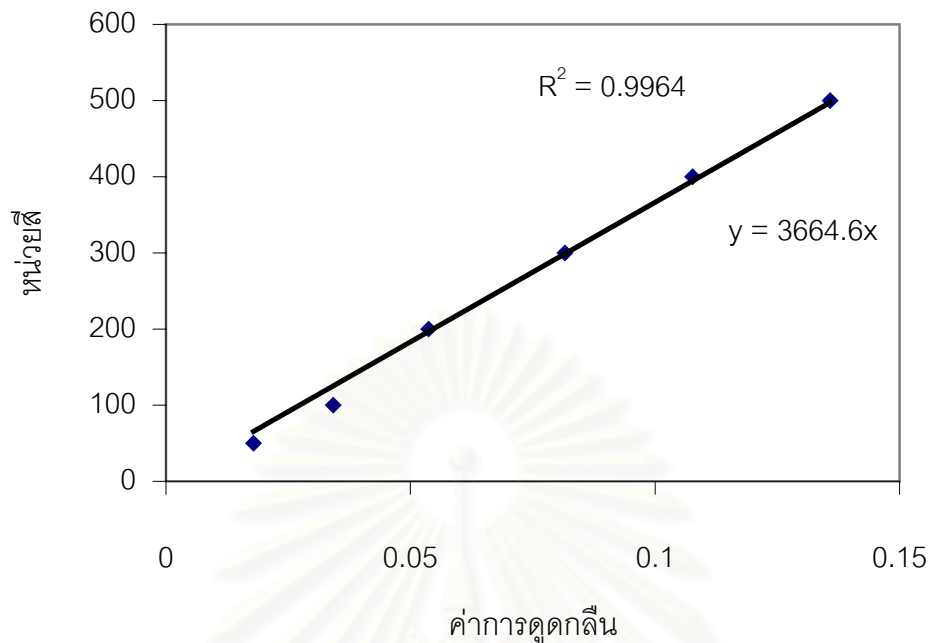
สารละลายโพแทสเซียมคลอโรแพลทีเนท (K_2PtCl_6) 1.246 กรัม และสารโคบอลต์สคลอไรด์ ($CoCl_2 \cdot 6H_2O$) 1.0 กรัม ในน้ำกลั่นที่มีกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นอยู่ (conc.HCl) 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 1 ลิตร จะได้สารละลายมาตรฐานที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 500 หน่วยสี จากสารละลายนี้นำมาเตรียมสารละลายที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 100-500 หน่วยสี โดยการเจือจาง

วิธีการเทียบมาตรฐานของเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

1. นำสารละลายมาตรฐานคลอโรแพลทีเนทที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 100 – 500 หน่วยสี ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ด้วยความยาวคลื่น 465 นาโนเมตร
2. นำข้อมูลที่ได้ไปเขียนกราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับค่าหน่วยสี ซึ่งจะทำการพลาตมาตรฐานทุกครั้งก่อนทำการวัดสี

ตารางที่ ก -1 ตัวอย่างข้อมูลการเทียบมาตรฐานของเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณค่าหน่วยสี (Color unit, Pt-Co unit)

ค่าหน่วยสี (Colour unit, Pt.Co unit)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 465 นาโนเมตร
500	0.1358
400	0.1077
300	0.0816
200	0.0537
100	0.0342



รูปที่ ก-1 ตัวอย่างกราฟมาตรฐานของการเทียบมาตรฐานเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ใช้คำนวณค่าหน่วยดี

จากกราฟมาตรฐานจะสามารถคำนวณค่าหน่วยดีได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ค่าหน่วยดี} &= \text{ค่าความชัน} \times \text{ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้} \\ &= 3664.6 \times \text{ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้} \end{aligned}$$

2. วิธีวิเคราะห์ปริมาณบีโอดี

2.1 หลักการ

การวิเคราะห์หาค่าบีโอดีเป็นการวิเคราะห์เพื่อที่จะทราบถึงปริมาณความสกปรกของน้ำเพื่อประโยชน์ในการออกแบบระบบบำบัดควบคุมคุณภาพน้ำทิ้งและประสิทธิภาพของระบบนั้น ๆ โดยคิดเปรียบเทียบในรูปของปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ต้องการใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ภายใต้ภาวะที่เหมือนกับเกิดในธรรมชาติมากที่สุด เพื่อให้การวิเคราะห์เป็นแบบปริมาณวิเคราะห์

การวิเคราะห์ค่าบีโอดีโดยทั่วไปเป็นการวัดปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ชนิดที่ย่อยสลายได้ภายใต้ภาวะที่มีออกซิเจนที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ เนื่องจากออกซิเจนในอากาศสามารถละลายในน้ำได้ในจำนวน

จำกัด คือ ประมาณ 9 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ดังนั้นในน้ำเสียที่มีความสกปรกมากจำเป็นต้องทำให้ปริมาณความสกปรกเจือจางลงอยู่ในระดับที่สมมูลพอดีกับปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่

การเตรียมน้ำสำหรับทำเจือจาง

1. ตวงน้ำกลั่นในปริมาตรที่ต้องการใส่ในบีกเกอร์ที่สะอาด
2. ปรับอุณหภูมิของน้ำให้มีค่าประมาณ 20 องศาเซลเซียส
3. เป่าอากาศที่สะอาดเพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนให้กับน้ำ อย่างน้อย 2 ชั่วโมง
4. เติมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ และสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ ตามลำดับ ใช้สารละลายแต่ละชนิด 1 มิลลิตรต่อน้ำเจือจาง 1 ลิตร

การทำเจือจางน้ำ

1. ปิเปิดน้ำตัวอย่าง 2 มิลลิลิตร ลงในขวด BOD 300 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำสำหรับเจือจางจนเต็มขวด โดยค่อยๆรินใส่ขวดอย่าให้มีฟองอากาศ
3. นำน้ำตัวอย่างไปวัดค่า DO_0 ที่วันเริ่มต้นไปวัดค่า

การเพาะเลี้ยง

เพาะเลี้ยงโดยเก็บตัวอย่างที่เจือจางในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน แล้วจึงนำมาวัดค่า DO_5

การวัดค่า

โดยการเติมแมงกานีสซัลเฟต และโซเดียมไฮโอไซด์ อย่างละ 1 มิลลิลิตร แล้วเขย่าให้เข้ากัน จากนั้นเติมกรดซัลฟิวริก 98 % 1 มิลลิลิตร เขย่าให้ตะกอนละลาย แล้วนำสารละลายปริมาตร 201.3 มิลลิลิตร ไปไตเตรตกับโซเดียมไทโอซัลเฟต วัดปริมาตรแล้วนำค่าไปคำนวณหาค่า BOD

การคำนวณค่า BOD

$$BOD \text{ (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = (DO_0 - DO_5) \times \text{จำนวนเท่าที่ทำการเจือจาง}$$

เมื่อ DO_0 คือ ค่าของการไตเตรตกับโซเดียมไทโอซัลเฟตในวันที่เริ่มต้น (มิลลิลิตร)

DO_5 คือ ค่าของการไตเตรตกับโซเดียมไทโอซัลเฟตในวันที่ 5 (มิลลิลิตร)

3. วิธีวิเคราะห์ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD)

หลักการ

การวิเคราะห์หาค่าซีโอดีเป็นการวัดความสกปรกของน้ำเสียโดยคิดเปรียบเทียบในรูปของปริมาณออกซิเจนที่ต้องการใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ โดยใช้สารเคมีซึ่งมีความสามารถในการออกซิไดซ์สูงในสารละลายที่เป็นกรด

วิธีการการวิเคราะห์

1. นำตัวอย่างน้ำเสียมากรองผ่านเครื่องกรอง
2. นำน้ำเสียที่ผ่านการกรองแล้ว 2 มิลลิลิตร ใส่ในหลอด COD ที่บรรจุ COD reagent ปริมาตร 3.8 มิลลิลิตร แล้วนำไปใส่ลงใน COD chamber เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส
3. เทสารจากหลอด COD ลงในขวดรูปชมพู่ แล้วล้างด้วยน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร เทลงในขวดรูปชมพู่เดิม
4. หยดเฟอร์โรซีนอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด ในขวดรูปชมพู่ แล้วไทเทรตกับแอมโมเนียมเพอร์รัสซัลเฟต บันทึกปริมาณแอมโมเนียมเพอร์รัสซัลเฟตที่ใช้
5. ทำการทดลองเช่นเดียวกันนี้กับน้ำกลั่น

การคำนวณ

$$\text{ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(A-B) \times M \times 8000}{V}$$

A = ปริมาตรของไอโอรอน (II) แอมโมเนียมซัลเฟตซึ่งใช้ไทเทรตสำหรับแบลนด์ (ลบ.ชม.)

B = ปริมาตรของไอโอรอน (II) แอมโมเนียมซัลเฟตซึ่งใช้ไทเทรตสำหรับตัวอย่างน้ำเสีย (ลบ.ชม.)

M = ความเข้มข้นของไอโอรอน (II) แอมโมเนียมซัลเฟต (โมลต่อลิตร)

V = ปริมาตรของตัวอย่าง (ลบ.ชม.)

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณ

1. การคำนวณการเจือจางน้ำเสีย

เนื่องจากน้ำเสียที่นำมาจากโรงงานฟอกย้อมมีค่า COD สูงจึงต้องทำการเจือจางก่อนการทดลอง โดยทำการเจือจาง 100 เท่า

$$\text{จาก} \quad \text{จำนวนเท่า} = \frac{V_{\text{Sample}} + V_{\text{น้ำกลั่น}}}{V_{\text{Sample}}}$$

V_{Sample} = ปริมาตรของน้ำเสีย (มิลลิลิตร)

$V_{\text{น้ำกลั่น}}$ = ปริมาตรของน้ำกลั่น (มิลลิลิตร)

เช่น ต้องการเตรียมตัวอย่างน้ำเสียที่เจือจาง 100 เท่า สามารถทำได้โดยการบีบน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม 1 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตรรวม 100 มิลลิลิตร

2. การคำนวณค่า COD

$$\text{COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(A-B) \times M \times 8000}{V}$$

A = ปริมาตรของไอร์ออน (II) แอมโมเนียมซัลเฟตซึ่งใช้ไทเทรตสำหรับแบลนด์ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

B = ปริมาตรของไอร์ออน (II) แอมโมเนียมซัลเฟตซึ่งใช้ไทเทรตสำหรับตัวอย่างน้ำเสีย (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

M = ความเข้มข้นของไอร์ออน (II) แอมโมเนียมซัลเฟต (โมลต่อลิตร)

V = ปริมาตรของตัวอย่าง (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

เช่น $A = 3.5$ ลูกบาศก์เซนติเมตร

$B = 3.0$ ลูกบาศก์เซนติเมตร

$$M = 0.025 \text{ โมลต่อลิตร}$$

$$V = 2.0 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

$$\begin{aligned} \text{จะได้ COD (เจือจาง 100 เท่า)} &= \frac{(3.5 - 3.0) \times 8000 \times 0.025}{2} \\ &= 50 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร} \end{aligned}$$

เนื่องจากเราทำการเจือจางตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม 100 เท่า ก่อนนำมาหาค่า COD ดังนั้น COD ของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมก่อนการบำบัด = $50 \times 100 = 5000$ มิลลิกรัมต่อลิตร

3. การคำนวณร้อยละการลดลงของ COD

$$\text{ร้อยละการลดลงของ COD} = \left[\frac{\text{COD เริ่มต้น} - \text{COD หลังบำบัด}}{\text{COD เริ่มต้น}} \right] \times 100$$

เช่น COD เริ่มต้น = 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร COD หลังบำบัด = 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\text{ร้อยละการลดลงของ COD} = \left[\frac{5000 - 3000}{5000} \right] \times 100 = 40$$

4. การคำนวณสี

จากการทำกราฟมาตรฐานจะสามารถคำนวณค่าหน่วยสีได้ดังนี้

$$\text{ค่าหน่วยสี} = \text{Slope} \times \text{ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้}$$

การคำนวณสีก่อนการบำบัด

ในการทดลองได้ทำการเจือจางน้ำเสียก่อนการบำบัด 5 เท่า เพื่อการวิเคราะห์สี
ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเสียก่อนการบำบัด = 0.1261

$$\text{จะได้ ค่าหน่วยสี} = 3664.6 \times 0.1261 \times 5 = 2310 \text{ หน่วยสี}$$

การคำนวณสีหลังการบำบัด

ในการทดลองได้ทำการเจือจางน้ำเสียหลังการบำบัด 3 เท่า เพื่อการวิเคราะห์สี
ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเสียหลังการบำบัด = 0.0357

จะได้ ค่าหน่วยสี = $3664.6 \times 0.0357 \times 3 = 392.42$ หน่วยสี

5. การคำนวณร้อยละการลดลงของสี

$$\text{ร้อยละการลดลงของสี} = \left[\frac{\text{หน่วยสีเริ่มต้น} - \text{หน่วยสีหลังการบำบัด}}{\text{หน่วยสีเริ่มต้น}} \right] \times 100$$

เช่น หน่วยสีเริ่มต้น = 2310 หน่วยสี หน่วยสีหลังการบำบัด 392 หน่วยสี

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละการลดลงของสี} &= \left[\frac{2310 - 392}{2310} \right] \times 100 \\ &= 83.03 \end{aligned}$$

6. การคำนวณค่า BOD

$$\text{BOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = (DO_0 - DO_5) \times \text{อัตราส่วนเจือจาง}$$

เมื่อ DO_0 คือ ค่าของการไตเตรตกับโซเดียมไทโอซัลเฟตในวันที่เริ่มต้น (มิลลิลิตร)

DO_5 คือ ค่าของการไตเตรตกับโซเดียมไทโอซัลเฟตในวันที่ 5 (มิลลิลิตร)

$$\text{อัตราส่วนเจือจาง} = \frac{\text{ปริมาตรน้ำเต็มขวดบีโอดี (300 มิลลิลิตร)}}{\text{ปริมาณตัวอย่างที่ใช้}}$$

เช่น $DO_0 = 15.2$ มิลลิลิตร

$DO_5 = 9.2$ มิลลิลิตร

อัตราส่วนเจือจาง = 300

จะได้ BOD = $(15.2 - 9.2) \times 300$
= 1800 มิลลิกรัมต่อลิตร

7. การคำนวณร้อยละการลดลงของ BOD

$$\text{ร้อยละการลดลงของ BOD} = \text{BOD เริ่มต้น} \left[\frac{\text{BOD หลังบำบัด} \times 100}{\text{BOD เริ่มต้น}} \right]$$

เช่น BOD เริ่มต้น = 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร BOD หลังบำบัด = 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\text{ร้อยละการลดลงของ BOD} = \left[\frac{5000 - 3000}{5000} \right] \times 100 = 40$$



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

ข้อมูลการทดลอง

1. ผลของกำลังไฟฟ้าต่อการลดลงของสารมลพิษ

ตารางที่ ค-1 แสดงข้อมูลของสารมลพิษที่เวลาต่างๆเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าหลอดยูวี

กำลังไฟฟ้าหลอดยูวี	เวลา (นาที)	สี	ค่าบีโอดี	ค่าซีโอดี	ของแข็งละลายได้
75 วัตต์	20	1789.1	80	2080	1644
90 วัตต์	20	1384.4	0	1760	1764
105 วัตต์	20	1395.9	65	1760	1700
120 วัตต์	20	1397.8	75	1840	1648

2. ผลของค่าความเป็นกรด-เบส

ตารางที่ ค-2 แสดงข้อมูลของสารมลพิษที่เวลาต่างๆเมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรด-เบส

ค่าความเป็นกรด-เบส	เวลา (นาที)	สี	ค่าบีโอดี	ค่าซีโอดี	ของแข็งละลายได้
5	20	922.12	0	1920	1664
7	20	1318.03	0	2720	2332
9	20	1484.49	90	2720	1764

3. ผลของอัตราการไหลของเฟอร์รัสไอออน

ตารางที่ ค-3 แสดงข้อมูลของสารมลพิษที่เวลาต่างๆเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของเฟอร์รัสไอออน

เฟอร์รัสไอออน	เวลา (นาที)	สี	ค่าบีโอดี	ค่าซีโอดี	ของแข็งละลายได้
3 มิลลิลิตรต่อนาที	20	696.74	70	2720	2280
5 มิลลิลิตรต่อนาที	20	379.898	80	2400	2228
7 มิลลิลิตรต่อนาที	20	581.914	0	2240	2280
9 มิลลิลิตรต่อนาที	20	405.977	90	2080	2404

4. ผลของอัตราการไหลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ตารางที่ ค-4 แสดงข้อมูลของสารมลพิษที่เวลาต่างๆเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	เวลา (นาที)	สี	ค่าบีโอดี	ค่าซีโอดี	ของแข็งละลายได้
20 มิลลิลิตรต่อนาที	20	604.879	45	1920	1676
25 มิลลิลิตรต่อนาที	20	822.12	0	1760	2280
30 มิลลิลิตรต่อนาที	20	533.259	0	2080	1612
35 มิลลิลิตรต่อนาที	20	591.645	0	1600	1600

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ศักดา ก่อตั้งสกุล เกิดวันที่ 13 กันยายน พ.ศ. 2523 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2545 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2546



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย